

令和2年度原子力規制庁委託成果報告書

放射性物質の河川による動態評価手法の整備

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

令和3年3月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

■ 1章 本事業の目的及び概要	1
1.1 本事業の目的	1
1.2 本事業の概要	1
1.3 事業報告書の概要	2
■ 2章 陸域での水文流出及び放射性物質動態モデルの現状調査	3
2.1 本章の概要	3
2.2 水文流出モデルの分類とその特徴及び現状	3
2.3 集中定数型流出モデルとその特徴及び現状	4
2.4 分布定数型流出モデルとその特徴及び現状	11
2.5 土砂動態モデルの特徴及び現状	16
2.6 放射性物質（セシウム）動態モデルの特徴及び現状	19
■ 3章 陸域水文流出及び放射性物質動態モデルの試開発(試解析及び試計算)と相互比較	28
3.1 本章の概要	28
3.2 集中定数型モデルの適用と試開発（試解析及び試計算）の結果	31
3.3 分布定数型モデルの適用と試計算及び試解析の結果	88
3.4 モデル間相互比較及びまとめ	157
■ 4章 河口域放射性物質動態モデルの現状調査	167
4.1 本章の概要	167
4.2 河口域での塩淡混合に伴う現象の特徴	167
4.3 河口域での懸濁物質の挙動の特徴とモデリングの現状	170
4.4 沿岸域での放射性物質動態モデリングの特徴と現状	171
■ 5章 河口域放射性物質動態モデルによる試計算	176
5.1 本章の概要	176
5.2 河口域及び可動域モデルの作成	177
5.3 河口域でのシミュレーション（試解析）と結果検証	184
5.4 河口域での試計算のまとめ	239
■ 6章 考察とまとめ	240
6.1 本章の概要	240
6.2 陸域動態モデルの試解析についての考察	240
6.3 河口域動態モデルの試解析についての考察	241
6.4 まとめと結論	242
■ 付録1 放射性物質（セシウム）動態モデルの研究開発機関へのインタビュー結果とまとめ	243
1.1 日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門	243
1.2 日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター	244
1.3 (株)地圏環境テクノロジー	245
■ 付録2 分布定数型モデルの解析手順	247
2.1 ArcSWAT コード	247
2.2 GeoWEPP コード	269

2.3 RADFLOW コード	286
■ 付録3 支配方程式 (3D-Sea-SPEC)	314
3.1 多重 σ 座標	314
3.2 流れの支配方程式	315
3.3 移流拡散方程式	317
3.4 風応力と海表(水表)面熱収支モデル	324
3.5 海底土(河床土砂)モデル	328
■ 付録4 沿岸試算データ(試算:満潮時 \pm 1時間)	341
■ 別添1 貯留関数モデル(GISを用いた汎用的な流出計算手法)	372
1.1 手法概要	372
1.2 広瀬川への適用	377

■ 1章 本事業の目的及び概要

1.1 本事業の目的

東京電力ホールディングス・福島第一原子力発電所事故（以下「1F 事故」という）では、1号機から3号機までが炉心損傷し、大量の放射性物質が環境に放出され、大気中及び海洋に拡散した。1F 事故における環境への放射性物質の放出量の推定とその動態を予測するためには、地形影響等を考慮した大気拡散モデル、海洋拡散モデル及び陸域動態モデルを統合した環境拡散評価手法の整備が求められる。従来、これらのモデルは個別に開発され、各々、計算機の進歩と共にモデルの高度化が進められてきたが、統合した環境拡散評価手法の整備は十分に行われていない。特に、陸域へ降下した放射性物質の陸域動態モデルと、河川を通して河口域に達し、其の後、沿岸を拡散する動態モデルを連携する試みは少なく、陸域から沿岸域への統合モデルの整備が求められる。

以上、シビアアクシデントの発生により、環境中に拡散した放射性物質を統一的に追跡することを可能にするため、本事業では、陸域に拡散した放射性物質の動態と河川を通して海洋への流出量を評価可能とするシミュレーションモデルを整備することを目的とし、現状調査と試開発（試解析及び試計算）を行い、モデルの現状と課題を整理する。

1.2 本事業の概要

陸域に拡散した放射性物質は、降雨により発生する地表水の流れにより陸域を移動した後、河川に流入し、河川流を通じて海洋へ流出する。この海洋に至るまでの放射性物質の動態は、降雨による降水分布に基づき、地表水及び河川水の流量を定量的に評価可能なシミュレーションモデルにより記述される。更に、土砂等の河川水中の固相成分へ吸着する放射性物質を取り扱うには、河川流に含まれる懸濁態成分の流量を定量的に評価するシミュレーションモデルが必要となる。以上より、本事業では、河川による流出シミュレーションモデルの調査を行い、その上で候補となるシミュレーションモデルを選定し試開発（試解析）を行い、現状と課題を整理する。以下、調査する項目と試開発（試解析及び試計算）する項目を記す。

（1） 調査

上記の目的に沿うシミュレーションモデルについて、モデルの概要、実績、適用範囲、必要パラメータとその決定手法の他、トレーサ物質（溶存態及び懸濁態）の動態評価に係る実装手法等について文献調査を行う。また、主要な研究開発／民間企業、あわせて3箇所程度（各2回程度）へのインタビューを行い、対象機関が開発しているシミュレーションモデルの適用と得られた結果の現状とシミュレーションモデルの開発状況と課題等についての情報及び資料を収集し報告する（付録1参照）。

尚、河口域を取り扱うシミュレーションモデルについては、研究開発の現状を調査する他、実際のシミュレーションコードを利用し、満潮時等の海水の流入を考慮するため、以下の仕様を満たすモデルとする（5章参照）。

- ・ 河口域を適切な空間解像度で表現できること。
- ・ 水底地形を表現できる座標系を用い、観測潮位を境界条件として利用できること。
- ・ 河川水（淡水）に塩分濃度の異なる海水が流入する際の水流動を表現できること。

- ・ 水面における風応力と放射による強制場を考慮できること。
- ・ トレーサについては移流・拡散挙動を表現できること。

(2) 試開発（試解析及び試計算）

(1) の調査結果に基づき候補となるシミュレーションモデルを選定して試開発（試解析及び試計算）を行う。尚、河口域モデルについては上記条件を満たす1モデルを選定し、単純化した河口地形において、満潮時2時間程度の流動及びトレーサの挙動についての試計算を行う（5章及び付録3参照）。陸域モデルについては、5モデル程度を選定し、阿武隈川水系（本事業では一つの支流である広瀬川を対象とするが、1つのモデルに対しては阿武隈川本流の試解析を実施する）を対象とした試解析及び試計算を実施し、主に以下の評価項目について性能及び特性の相互比較を行う（3章参照）。

- ・ 実用化に必要な開発期間及び費用
- ・ 適用可能領域と評価対象事象の時間スケール
- ・ 計算結果の精度
- ・ 時空間解像度と計算時間

以上の比較結果を基に将来的には、海洋拡散シミュレーションモデルと結合することを前提として、主に以下の評価項目について現状と課題を整理する（3章参照）。

- ・ 陸域におけるトレーサの初期分布の決定方法
- ・ 必要なパラメータとその決定手法
- ・ 必要なデータと入手方法
- ・ インターフェイスのデザイン
- ・ 計算結果の検証方法
- ・ 新規開発の必要性

1.3 事業報告書の概要

本事業の報告書では、2章において、先ず陸域を対象とし、降水により生じる流水と発生した土砂の移行を追跡するシミュレーションモデルについて調査した結果を報告した後、放射性物質（特に福島県を中心とする地域）の動態に活用した例を取り上げ、放射性物質の動態を追跡する上での課題等を検討する。3章では、実際に用いられている陸域モデルについて、7モデル（内訳は、集中定数型モデル4個、分布定数型モデル3個：詳細は3章参照）を選択し、阿武隈川水系の広瀬川流域に適用した結果を比較評価する（一部は公開コードを利用し、他は試開発したコードを用いて左記流域に適用し、比較検討を実施）。比較では、各々のモデルの特徴（入出力のセット、各種パラメータの設定法）を記した後、開発・計算に関するコスト及び精度比較等を行い、課題等を整理する。4章では、河口域での河川水と土砂及び放射性物質の特徴的挙動を記述するシミュレーションモデルについて調査した結果を報告する。5章では、河口域での挙動をモデル化し、日本原子力研究開発機構が開発中の沿岸域シミュレーションコード(3D-Sea-SPEC)を用いて試解析を実施した結果を記し、6章にて考察とまとめを記す。

■ 2章 陸域での水文流出及び放射性物質動態モデルの現状調査

2.1 本章の概要

陸域に降下した放射性物質の動態を予測するには、放射性物質が降下した地域において、降水に伴い発生する流水をモデリングすることが重要となる。これは、地表の放射性物質の一部が流水により運ばれ、河川を通して流出すると考えられるからである。従って、降水後の水の流れを解析することがモデリングの主たる要素となる一方、放射性セシウムのように、土壌の粘土鉱物等に強く吸着する放射性物質の場合は、河川による流出水だけでなく、同時に運搬される土砂量も重要となり、一般に土砂と流出水の間で固液平衡条件を課すモデリングが用いられてきた。

本章では、上記の考え方に基づき、一つの流域に対し、流出水量を予測する代表的モデリングを概説した後、放射性物質流出に関する動態を取り扱った文献に対し、調査結果を報告する。特に、福島事故後、多くの研究が日本を中心に行われたことから、それらの文献に対し相互比較を試みる。以下、本章の構成を記す。2.2において、陸域に降下した雨水の動態モデルとして、水文流出モデルをモデルの特徴より2つ（集中定数型と分布定数型）に分類し、各々の概念及び特徴について記した（2.3及び2.4）後、2.5において土砂移動のモデルについて記す。本章の最終節2.6では、水文流出モデルを放射性物質（放射性セシウム）流出の動態に適用した文献を整理し、現状を調査した結果を報告する。尚、本2章をまとめるに当たり、福島県の放射性セシウム動態研究を実施している2つの研究機関（日本原子力研究開発機構の福島研究開発部門と同システム計算科学センター）と高精度な水文流出モデルを開発し陸水解析を主たる業務としている（株）地圏テクノロジーに対し、インタビューした結果を付録1に記す。尚、本章の一部を執筆するに当たり、以下の文献を主たる参考文献とし、正確を記すため、一部の記述を抜粋し本事業内容にあわせて適宜修正したことを付記する。

- 1) 風間聡、「水文学」、コロナ社 (2011)
- 2) 横尾善之、丹羽諭、内田太郎、平岡真合乃、勝山正則、五味高志、水垣滋、浅野友子、「山地流の水・土砂流出における空間スケールの影響 (3) : 数値解析モデル上の取り扱い事例」、水文・水資源学会誌、Vol. 31, pp. 245 – 261 (2018)
- 3) 高瀬信忠「河川工学入門」、森北出版 (2003)
- 4) 佐久間一幸、「福島における放射性セシウム輸送解析と空間線量評価シミュレーション」、東京農工大学大学院工学府応用化学専攻博士論文 (2019)
- 5) 恩田裕一、加藤弘亮「陸域における放射性有無の環境動態と長期移行予測」、RADIOISOTOPES, 69, 67-77 (2020)

2.2 水文流出モデルの分類とその特徴及び現状

陸域に降着した放射性物質の一部は、降水により発生する地表水の流れにより陸域を移動した後、河川に流入し、その後、河川流を通じて海洋へと流出する。この海洋に至るまでの放射性物質の動態は、降雨による降水分布に基づき、地表水と河川水の流量を定量的に評価可能なシミュレーションモデルにより記述可能となる。更に、放射性セシウムのように、土砂等の河川水中の固相成分へ強く吸着する放射性物質の動態を記述するには、河川流に含まれる懸濁態成分の流量を定量的に評価可能なシミュレーションモデルが必要となる。以上より、本節では、河川での水文流出モデルの現状調査を行う。その上で候補となる代表的シミュレーションモデルを選定して試開発（試解析及び試算）を行い、現状と課

題を具体的に整理する（試開発（試解析及び試計算）し整理した結果は次章 3 章にて詳述）。

陸域での水の動態を記述する水文流出モデルは、多くの成書やレビュー文献によると、大きく二つの型に分類することができる。一つ目は、モデルの定数（パラメータ）を流域内で均一とする集中定数型モデル（*lumped model*）（概念モデルとも呼ばれる）であり、二つ目は、地形や土地利用そして土壌等が非一様に流域内にて分布していることを反映させ、モデルのパラメータの空間分布を考慮する分布型モデル（*distributed model*）（物理モデルとも呼ばれる）である。しかし、一般的には、水文流出モデルを、このように単純に区別できないこともある。例えば、複数の水文過程を考慮するモデルの場合、地下水流については、集中型（概念）モデルを用いる一方、表面流については分布型物理モデルで表現するハイブリット型のこともある。しかし、モデル中の各構成部分に対し、この二つの分類は凡そ明白となる。以下では、この二つのモデルの特徴について概説する。

2.3 集中定数型流出モデルとその特徴及び現状

本節では、流域を一つの単位とし、数学的には水文流出過程を一つの関数（概念）として表現し、関数中のパラメータを流域単位で定める集中定数型モデルについて概説する。一つの流域は、地形変化を含む他、土地利用や土壌も一様ではないが、一つの流域を一つの関数として代表させることで計算は極めて容易になる。但し、複雑な流出過程を表現するため、関数は様々なパラメータを有し、それらは流域毎に定める必要がある（流域毎に流出過程には違いがあることに起因する）。以下、水文学関連の成書 [2-1~2-4] を参考に、各モデルの特徴を記す（簡潔なモデルより説明する）。

2.3.1 合理式

流域単位での降雨流出において、その流域での洪水対策は極めて重要な要件となるが、その目的に対し、流出過程（降雨と共に流出量が増え降雨終止後、流出量が減少する過程）のピーク流量（尖頭流量とも呼ぶ）を知ることが最も重要となる。そのピーク流量を知るために最も簡単な式は、

$$Q_{peak} = CrA \quad (2-1)$$

と書ける。ここで、 Q_{peak} はピーク流量 [m³/s]、 r は降雨量 [m/s]、 A は流域面積 [m²]、 C は流出係数（*runoff coefficient*）である。式（2-1）は、雨が降り続けた場合、すべての降雨量 rA が係数 C の割合でピーク流量になることを表している(図 2-1)。この現象論的式を合理式(*rational method*)、または物部式や洪水尖頭流量公式という。尚、単位を考慮すると、式（2-1）は、

$$Q_{peak} = \frac{1}{3.6} CrA \quad (2-2)$$

と表記される。ここで、 Q_{peak} 、 r 、 A の単位は、各々、m³/s、mm/hr、km² である。物部によれば、流出係数 C は表 2-1 のように与えられる[2-5]。尚、現在、使われる合理式を初めてマルバニーが提案したのは 1852 年であり、古い歴史がある[2-6]ことを付記する。一般に、合理式は、流量の時間変化を知ることができないため、ハイドログラフ（流出量の経時変化）を出力できないが、ピーク流量を簡易に知ることができるため、住宅地や造成地の排水設計などに利用される。

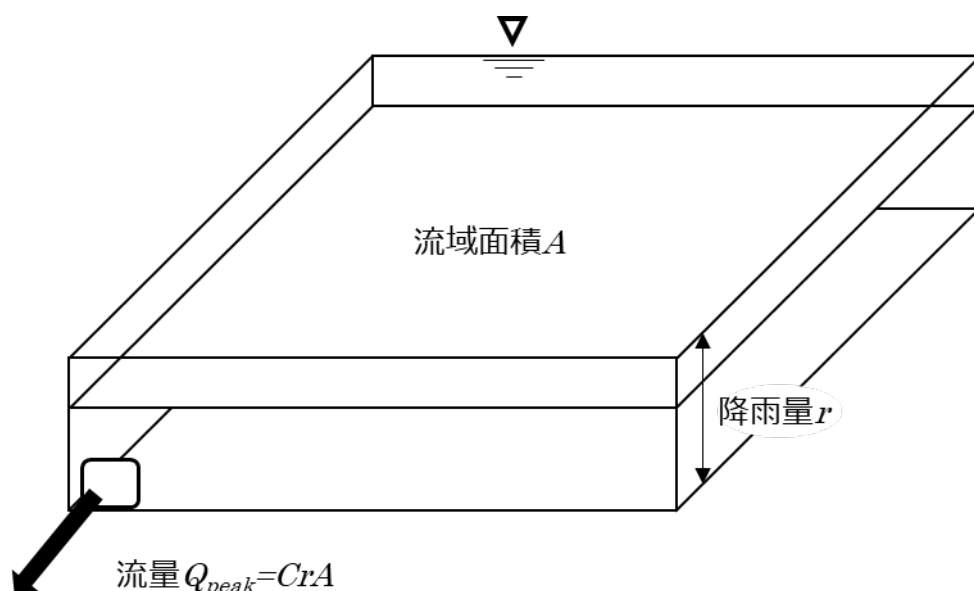


図 2-1 合理式の概念図

表 2-1 日本の合理式における流出係数

流域の状況	流出係数
急峻な山地	0.75 ~ 0.90
三紀層山地	0.70 ~ 0.80
起伏がある土地および樹林	0.50 ~ 0.75
平坦な耕地	0.45 ~ 0.60
灌漑中の水田	0.70 ~ 0.80
山地河川	0.75 ~ 0.85
平地河川	0.45 ~ 0.75
流域の半ば以上が平地である大河川	0.50 ~ 0.75

尚、上記の河川流量がピーク流量値を示すまでの時間を到達時間とし（図 2-2 参照）、到達時間（流出係数も）を流域内の様でない状況とも関係づけ（図 2-3 参照）、変動する降雨を分解し、降雨単位毎に河川流量の経時変化（ハイドログラフ）を得る合成合理式という手法も提案されている[2-7]。極めて簡単な計算式である他、流域の非一様な状況をも反映できることから、ハイドログラフを凡そ推定できる有用な方法の一つである。早急に流出量（その経時変化）を推定する必要がある場合等には、有効な手法と考えられる（3 章にて試開発した結果について報告）。

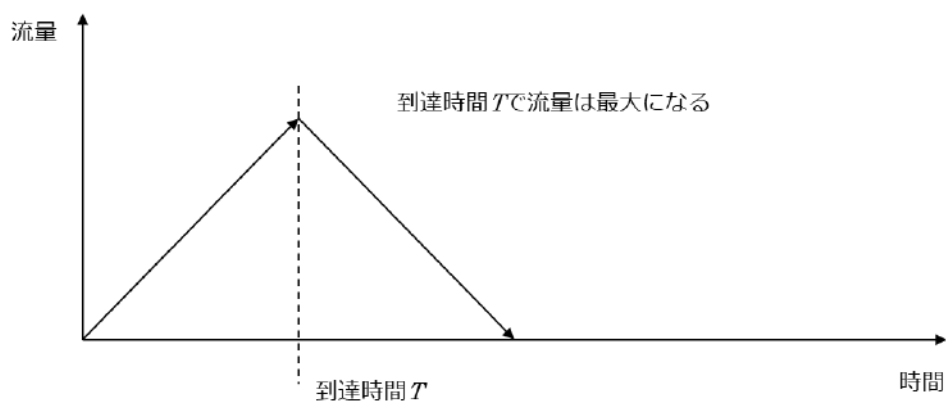


図 2-2 流量と時間の関係（合成合理式）

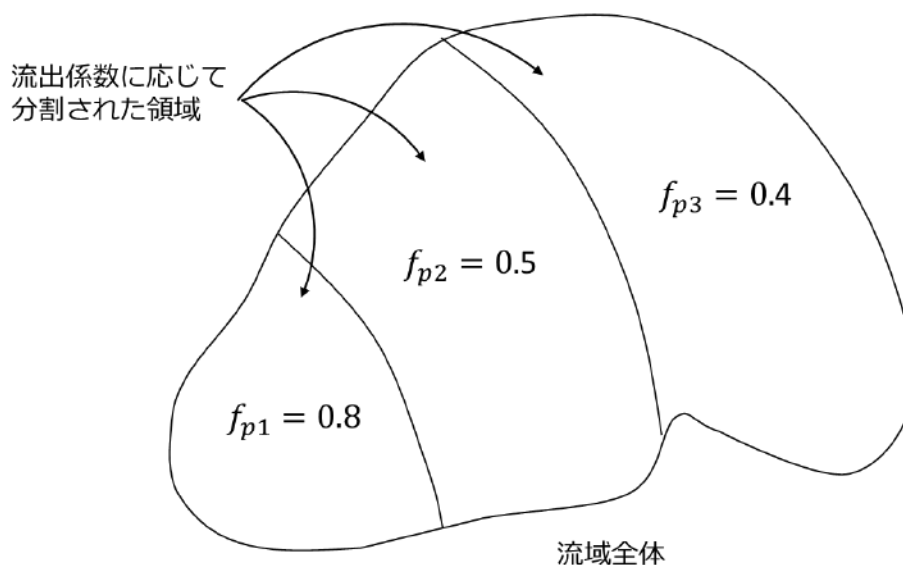


図 2-3 流域を複数の異なる流出域で分割（合成合理式）

2.3.2 単位図法

流域単位で、河川のハイドログラフ（流量の経時変化）を推定するには、流量の時系列データが必要である。計算機が十分に発達していない過去のある時期、単位降雨（例：1 時間同じ強度で継続する降雨等）に対して、各単位ハイドログラフを作成し、この図形を降雨の継続時間や強度に応じて引き延ばす他、重ね合わせをすることで流量を予測する方法が考えられてきた。この単位降雨に対するハイドログラフを単位図(unit hydrograph)という。単位図の理論は、1932 年にシャーマンによって提唱された[2-8]。以下、この単位図を用いてハイドログラフを得る単位図法(unit hydrograph method)を説明する。まず、単位図法において、用いる仮定を以下に記す。

- ① 単位降雨の α 倍の強度の降雨によるハイドログラフは、単位図を α 倍した形状になる（比例の仮定）。
- ② 単位降雨により発生するハイドログラフの経過時間（基底長）は、降雨強度にかかわらず一定である（基底長一定の仮定）。

- ③ 任意のハイトグラフ（降雨の経時変化）に対する合成ハイドログラフは、①と②の仮定によって作成された各降雨のハイドログラフを算術的に加算したものに等しい（合成の仮定）。

これらの仮定は、図 2-4 のように模式的に示される。以下のように、単位図を事前に取得すれば、観測された降雨に基づき、逐次作成される各々のハイドログラフを合成することで、流出量が予測可能となる。本手法は、アメリカで発展し、一般に 2000 平方マイル(1 平方マイル=2.59 キロ平方 m)以下の流域で適合性がよいとされている[2-9]。日本では降雨パターンや地形が複雑なため、更に小さい流域に適用するのがよいと考えられている。本手法も簡潔であり、早急に流出量を推定するには有用な手法であると考えられる（3 章にて試開発した結果について報告）。

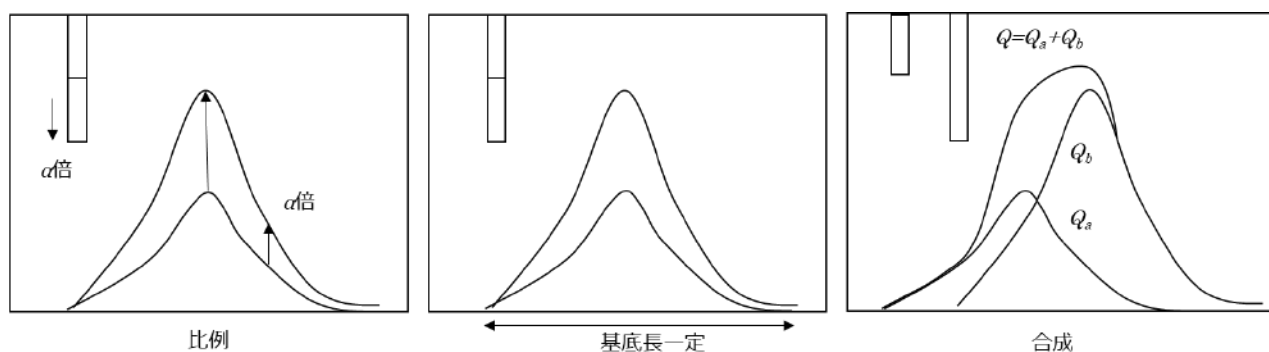


図 2-4 単位図法の仮定（左から仮定①、②、③に該当、上方にハイトグラフを示す）

2.3.3 応答関数

計算機が発展すると、単位図を関数で描画することが可能になった。単位図を関数で表現すると、次のように表される。

$$q(t) = h(t) \quad (2-3)$$

q は単位降雨イベントに対する流量、 h は単位図であり、時間 t によって変化する流量を表現している。比例の仮定から降雨量を乗じると、その降雨量に対するハイドログラフが作成される。1 降雨イベントのハイドログラフは、

$$q(t) = r(t)h(t) \quad (2-4)$$

と表現できる。ここで、 r は降雨量であり、時間 t で変化する。(2-4) 式は、あらゆる単位降雨に対し、流出期間が同じ、すなわち基底長（図 2-4 の中図参照）も同じことを意味する。ここで、ある時刻 t_1 の降雨 r_1 に対する時刻 t の流量は、

$$q(t) = r_1 h(\tau_1) = r(t_1) h(t - t_1) = r(t - \tau_1) h(\tau_1) \quad (2-5)$$

で書ける。時間 τ_1 は r_1 が発生した時刻 t_1 から流量 q の観測時刻 t までに経過した時間である。これが 1 降雨イベントに対するハイドログラフであり、実際のハイドログラフは、現在時刻 t から無限大時刻ま

で過去をさかのぼったさまざまな降雨イベントによって構成される。こうして、合成の法則は下式のように書ける。

$$\begin{aligned} Q(t) &= r(t_1)h(t - \tau_1) + r(t_2)h(t - \tau_2) + \dots \\ &= r(t - \tau_1)h(\tau_1) + r(t - \tau_2)h(\tau_2) + \dots \end{aligned} \quad (2-6)$$

この離散的表現を、積分表記によって連続関数で表記すると、

$$Q(t) = \int_0^{\infty} r(t - \tau) h(\tau) d\tau \quad (2-7)$$

となる。ここで、

$$h(\tau) = \int_0^{\infty} h(\tau) d\tau = 1 \quad (2-8)$$

であり、これは、1降雨イベントに対するハイドログラフ（単位図）である。単位図 $h(\tau)$ は分布関数で与えることが多く、対称性が強いときは正規分布関数を用いるが、流出にはガンマ分布関数が用いられることが多い。

2.3.4 貯留関数法

観測されるハイドログラフを詳細に見ると、指数関数的に流量が増加・減少することがわかる。この流出パターンをタンクからの流出と考えて表現したのが木村の貯留関数法(storage function method)と菅原のタンクモデル(2.3.5 参照)である。一般に、ベルヌイの式（流体のエネルギー保存則）より、タンクからの流出量は、タンク内の水深（貯留量）に対し、以下のべき乗則で表わされる関係がある。

$$S = kQ^p \quad (2-9)$$

ここで、 S は流域の貯留量、 Q は流出量、 k と p は係数である（開水路の場合、水路の断面形状等に依存して決まる）。これを木村の貯留関数と呼び、流域の貯留量の時間変化は、その連続の式から

$$\frac{dS}{dt} = r - Q \quad (2-10)$$

で与えられる。ここで、 r は降雨量である。式(2-9)に貯留関数式(2-10)を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} = r - Q, \quad kpQ^{p-1} \frac{dQ}{dt} = r - Q \\ \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{kp} (r - Q) Q^{1-p} \end{aligned} \quad (2-11)$$

を得る。上式 (2-11) は数値的に解くことが可能である。差分表記をすると、

$$\frac{Q_2 - Q_1}{\Delta t} = \frac{1}{kp} (r_1 - Q_1) Q_1^{1-p} \quad (2-12)$$

すなわち

$$Q_2 = \frac{\Delta t}{kp} (r_1 - Q_1) Q_1^{1-p} + Q_1 \quad (2-13)$$

となる。ここで、下付きの 1 と 2 は、時刻差 Δt を挟んだ前後の時刻を指し、前の時刻の流量 Q_1 と降雨 r_1 が分かれば、後の時刻の流量 Q_2 が算定されることが分かる。木村は、日本各地で貯留関数を調べ、次の関係式

$$S = 40.3 Q^{0.5} \quad (2-14)$$

を得た[2-10]。ここで S と Q の単位は、各々、mm, mm/hr である。降雨初期においては、有効雨量を用いることが推奨されている。貯留関数法は、その簡便さと流量予測の適合性から多くの河川の治水計画や利水計画に利用されており、日本で最も汎用的に用いられている流出モデルである。また、流域の特徴を更に記述するための派生モデルも提案され、様々な検証が行われ知見が蓄積している。現在の計算機を用いれば、計算コストは低く、降雨量の経時変化を与えれば、容易にハイドログラフを得ることができる。尚、パラメータを流域毎に決定する必要がある、その不確実さを含め、決定法の研究も行われてきた[2-11]。その一方、パラメータを土地利用等の GIS データから決定論的に導出する研究[2-12]もあり、計算の容易さとモデル自身が持つ物理的背景（理解し易さ）より発展性があり、今後も、様々な場面での活用が考えられる。このようなモデルは、現在の計算科学の流儀によれば、複雑な流出という問題に対して、自由度を大きく低減した縮約モデル或いは低次元化モデルとも考えられ、パラメータの決定等において新たな展開の可能性も考えられる[2-13]。また、本モデルについては、公開されているコードが複数存在しており、その一つを利用した試解析結果と同時に、実際に試開発した結果を 3 章にて報告する。

2.3.5 タンクモデル

流出量が流域の貯留量に関係すると考えた菅原[2-14]は、タンクモデル(tank model)と呼ばれるモデルを提案した（概念がタンクからの流出に似ているため、そのように呼ばれる）。最終的には、図 2-5 に示す 4 段タンクモデルを提案している。各タンクからの流出量 q_i はタンクの貯留高 S_i と排水口の高さ h_i の差に比例する。各流出口からの流出量を、それぞれ上から順に、速い洪水流、遅い洪水流、速い中間流、遅い中間流、基底流の 5 成分に区分することもある。一つの流出成分は、貯留高と排水口高の差の線形関数で表現されているが、四つのタンクの流出量和によって全体的には非線形な流出モデルとなる。尚、各々の流出成分は、実際の流域が持つ雨水の貯留機構と関係すると考えられ、物理（概念）的理解との一致が明白となっている。また、日本の環境に適合させるため、蒸発散や雪の過程を設けるため、更に

1 段のタンクを付けることもある。こうした適合度の良さから、本来の菅原のタンクモデルから派生した様々なタンク型モデルも提案されている。

以上、タンクモデルは、流出の直感的理解と良く適合し、様々な用途で派生モデルが提案されてきたが、定量的な側面からも、長期流出、短期流出共により精度を発揮することが示されている。1974 年に実施された世界気象機関(World Meteorological Organization, WMO)主催の流出モデルの相互比較では、最良と評価された[2-15]。しかし、最も高い性能とされる 4 段タンクモデルは、12 個のパラメータと 4 個の初期値を定める必要があり、これらを同定することは簡単ではない。様々な理論的なパラメータ同定法が提案された[2-16]が、どれも簡便な方法ではないこともあり、実務への普及はその性能に比して十分ではない。但し、上記の評価は、現在の計算科学の発展の前では修正が必要になると考えられる。パラメータは多いが、物理（概念）的に現実の流域の状況を模擬しており、十分な水文データがあれば、精確にパラメータをセットできる可能性がある他、多数のパラメータを最適化する技術も、最新の機械学習技術を用いることで発展可能と考えられる。また、集中定数型モデルの中では、複雑ではあるが、分布型定数モデルより遥かに計算コストは低く、早急に流出量を推定する必要がある場合等には有用であることを記す。本手法を、福島県内の陸域の放射性物質の動態に活用した例が、日本原子力研究開発機構と福島大学の連名で発表されており[2-17]、計算コストは低い一方、予測精度は高く、長期（数年単位）に渡る予測に適すると考えられる。本モデルの適用については、インタビュー対象とし、2.7.1 に、その結果を記す他、3 章にて、試解析した結果を報告する。今後、パラメータの決定に最新の最適化法（機械学習法を含む）を導入する他、GIS データを活用する等の改良を施すことで、日本各地の精度の高い長期の流出予測に活用可能と考えられる。

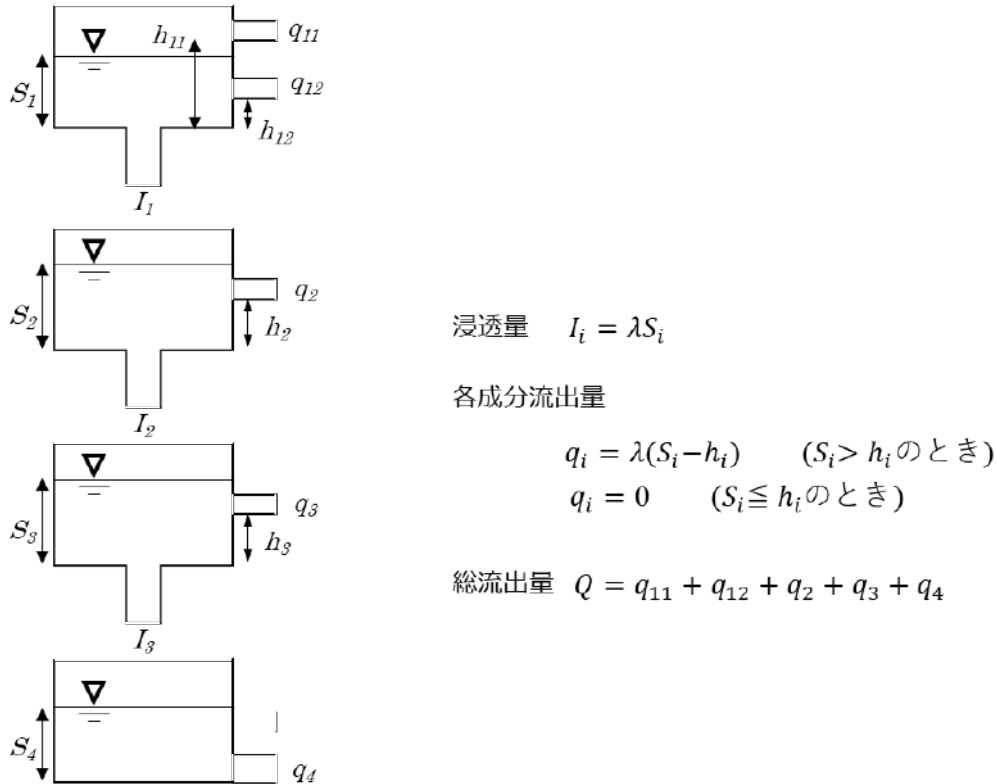


図 2-5 4 段タンクモデルの構成

2.4 分布定数型流出モデルとその特徴及び現状

前節までに記したように、一つの流域には、様々な地形変化がある他、土地利用も一般に非一様であり、特に日本の河川における流域内の非一様性は、極めてバラエティーに富んでいる。従って、その非一様性を表現した上、水の動きにも反映させることで流出量を計算する方法がある。このような方法は、分布定数型流出モデルと呼ばれる他、物理モデル（水の動きを、その物理モデルを基に、流域内の地理空間分布情報に従って忠実に再現することを目指すことから）とも呼ばれ、一般に計算コストは高いが、昨今の計算機の発達もあり利用が進んでいる。本報告では、この分布型流出モデルについて、下記に示す観点から、モデルの特徴とその研究開発の現状について報告する。

2.4.1 キネマティックウェーブモデル

図 2-6 のように流域を空間的に格子状に分割し、その一つ一つの小流域（格子中）の水の動きをその物理モデルを用いて計算した後、下流へ水を伝播させれば、流域の非一様性を表現する分布型流出モデルを構成することができる。つまり、格子毎に、主に地下での降雨浸透及び地下水流と地表での蒸発散と表面流出等の水文過程を解析的に記述し、表面流または地中流として水を下流に輸送し、その下流の格子で再度、同様の水文過程を計算し、より下流に伝えることを全格子で行う。こうして、集中型流出モデルに比べ、その計算コストは大きくなり、高速の計算機（並列計算機或いは演算を加速する装置等）が必要となるが、そのコストは空間分割の方法に依存することが分かる（空間分解能に依存する）。こうして、過去には、あまり普及しなかったが、最近の計算機の発達により、デスクトップの PC（ハイスペックな PC が望ましい）でも、解像度を適切に設定すれば、十分に利用可能となっており、様々な活用報告がある。

尚、上記の表面流を下流へ伝える方法の一つとして、キネマティックウェーブモデル(kinematic wave model)があり、分布定数型モデルでは一般的に利用されている。以下では、このキネマティックウェーブモデルについて概説する。キネマティックウェーブとは 1 方向に進む波を指し、キネティックウェーブモデルとは、下流へのみ水が伝播するモデルである。

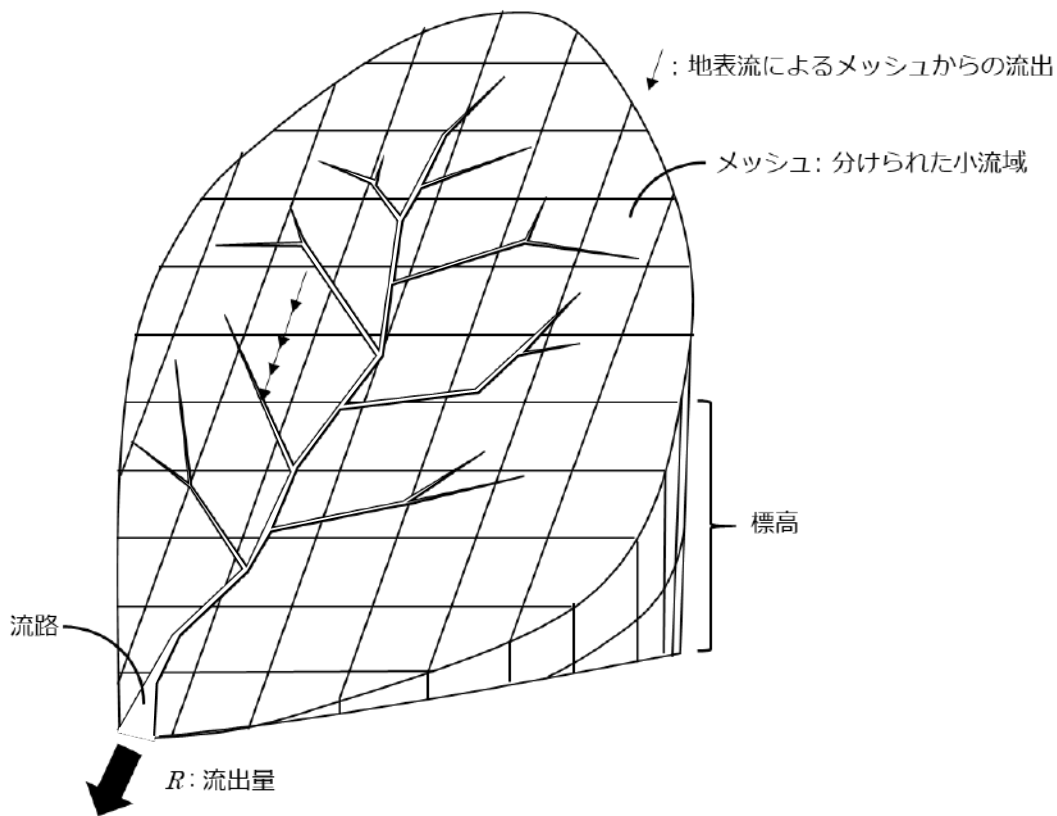


図 2-6 流域の格子状分割の模式図

一般に、下流への水の伝わり方は、連続の式（質量保存式）で表現することができる。表面流の連続の式は、

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_b \quad (2-15)$$

と記述される。ここで Q は流量、 A は流水断面積、 q_b は単位幅横流入量であり、 x 方向に流下する状況を記述している。今、格子の幅を単位長さとし、横流入量がないとすれば、単位幅流量 q と水深 h により、以下の式となる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2-16)$$

上式を離散的に記述すると、

$$\frac{h_1^2 - h_1^1}{\Delta t} + \frac{q_2^1 - q_1^1}{\Delta x} = 0 \quad (2-17)$$

となり、上付き数字は時間、下付き数字は、各々、場所を表している。式(2-17)の第1項は、水深の時間変化率、第2項は格子内の上下流間の流量変化率を表現している。つまり、上流から入った量と下流から出た量の差が、単位時間当りにその地点に貯留された水の高さとなることを意味している。これは、

格子内の水収支を表している。

次に、表面流の平均流速を表現する必要があり、一般に以下のマンニングの式(Manning's formula)がよく用いられる。

$$v = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2-18)$$

ここで、 v は流速、 n はマンニングの粗度係数、 I は水路床勾配である。これより、単位幅流量は、

$$q = vh = \frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2-19)$$

となる。これを式(2-16)に代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \right) &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{5}{3} \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{5}{3} v \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (2-20)$$

となる。この式は、一般形として、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + C \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

で表記される1階の波動方程式であり、 C は波速である。上式より、地表水の流れは、波の性質を持つことが分かる。つまり、キネマティックウェーブでは、洪水波が速度 $5v/3$ で下流に伝わることを意味している（洪水とは通常、水が流れていない土地表面を水が流れるという観点から洪水波とした）。こうして、一般の分布型モデルでは、各格子において、勾配 I と粗度 n から求められる波速 C で下流へと h の変化が伝播されると考える。このような伝播特性を表す法則をクライツ・セドン則ともいう。上記キネマティックウェーブモデルは、地形勾配の大きい流域で用いられる一方、勾配が緩やかな地域では、洪水波は上下流に伝わるのが可能となり、2階偏微分方程式の波動方程式であるダイナミックウェーブモデルや拡散モデルが用いられる[2-1]こともある。木下によると、その目安として、 $I > 1/1000$ の場合にキネマティックウェーブモデルの適用が適しているとの報告がある[2-18]。以上、分布型モデルで重要となる地表の表面流の一般的モデリングについて記載した。このような地表水流れのモデル化に対し、放射性セシウムを2つの形態（溶存態と懸濁態）に分け、各々の挙動をアサインし、それらの動態を解析することが可能であることが分かる。

2.4.2 分布型モデルの最小スケール

これ以降、分布型モデルに対し、計算コストと精度に係る重要な視点について議論する。分布型モデ

ルでは、一般に、対象流域を空間的に区分するため、最小の空間スケール（格子とも定義される。図 2-6 参照）が存在する。この最小空間スケールは、凡そ（1）モデル開発者の解析方針と（2）利用する空間分布情報等から決まる。

先ず、（1）モデル開発者の解析方針を議論すると、流域内の水の動態を表現・把握するためのモデル化において、モデル開発者が現象に応じ、例えば、1次元・2次元・3次元で現象を解析するかによって決まる場合がある。例えば、土層内の飽和・不飽和浸透流を表現する Richards の式[2-19]を数値的に解く際、仮想流域を対象とする最近の研究において、その次元の違いが議論された[2-20]。また、地表面近くの2次元の流れが中心となる洪水流を対象とした研究では、洪水流をキネマティックウェーブで近似する方法[2-21]が用いられ、近年では、[2-22]による斜面内多層流れを考慮した流出計算手法の開発を主眼とした研究により、詳細な現象を取り込む必要性が認識されている。以上、上記（1）モデル開発者の解析方針に従い、最小スケールが決定される場合とは、開発されるモデルとその支配方程式で表現される現象が生起するスケールにより決まると言える。今後、新たな流出過程が解明されモデル化されるが、空間解像度は、より詳細化する方向で進むと考えられる。

次に、「（2）利用する空間分布情報から決まる」だが、これは、分布型モデルが広く認知され、その実用段階に入ることによって主流となってきた。尚、「利用する空間分布情報」とは、一般に対象とする流域の空間スケールによって異なる。例えば、流域面積が 10km^2 程度以下の山地流域を対象とするような場合（試験的流域を対象とする場合も含む）、流域の詳細な地形・土層・植生等の水平2次元における「取得可能な情報の空間解像度」により、最小空間スケールが決まる[2-20]。尚、実流域を対象とした研究例の中で、空間スケールが小さいものとしては、Qu and Duffy [2-23]の 1m という例がある。日本では、流域面積が 10km^2 以上の山地流域で、約 1km^2 のメッシュ情報として、国土地理院の数値地図情報[2-24]を活用したモデルの場合、実質的な最小スケールは、 1km^2 になる場合が多い [2-25, 2-26]。また、全国的に整備されている標高データのみでモデルを構築する場合は、そのデータの解像度に合わせて最小スケールが 50m の場合もある[2-27]。最近では、 50cm 単位での様々な GIS データが整備されているが、それらの活用例は未だないと見る。しかし、最近の計算機の発達により、かなり詳細な計算も可能となっていることを付記する。また、全球の水循環やユーラシア大陸などの空間スケールの水循環を構成する「陸面モデル」では、地球規模で整備された地形・土層・植生等のデータベースを活用し、モデルが構築されており[2-28]、最小単位は 1km になる[2-29]。このように、データの空間解像度に合わせて最小スケールが決定される場合と、計算機の能力と計算時間の考慮等とデータの大きさという観点から最適な空間スケールをとる場合[2-30, 2-31]もある。

一般に、高解像度な空間スケールを単位とした場合、当然のように計算量は増大する。一般の流体計算（3次元）の場合、解像度を2倍にすれば、2の3乗でメモリーサイズは増える。水文流出モデルの場合、メモリーサイズの増大は、上記より抑制される（モデルの簡略化により）が、不必要な高解像度化は避けるべきである。また、解像度を向上させれば、準備する初期条件及び境界条件の解像度も増えるため、内外挿が必要となり、十分な精度が保証されないという課題もある。これらは、計算科学共通の課題であり、今後、様々な解決手法が提案されると想定される。

2.4.3. 利用する空間分布情報

上記のように、取得可能な空間分布データにより、空間解像度が決まる場合の課題について整理したが、ここでは、利用する情報そのものについて議論する。

一般に、山地流域を対象とした集中型の降雨流出モデルの構造・パラメータの選定などは、河川流量

のデータを再現するように決定される場合が多い。この場合、モデルの構造やパラメータを流域の地理条件から決定する、いわゆる、モデルパラメータの「地域化」と呼ばれる研究例がある。例えば[2-32, 2-33]は、流域の岩盤の種類や年代・土層の種類・地形・土地利用などから、モデルの構造とパラメータの決定法を提案している。しかし、この方法で構築したモデルを他流域に適用するには限界があり、開発途上と言える（機械学習法を活用する研究が進展しつつある[2-34]）。その一方、本節の主たる対象である分布型モデルに入力する空間分布情報では、モデルの構造だけでなくデータの有無にも支配される。数値実験やライシメーター内の水の動態の再現を対象とする場合は、鉛直 2 次元構造の分布型モデルも存在する[2-35]が、研究例は少ない。多くの研究では、実際の流域を対象とし、少なくとも水平方向に 2 次元に分布する構造を採用する。洪水波を再現するモデルのように、地表面付近の流れが支配的であると考えられる場合、鉛直方向に分布した構造はとらず、実質的に水平 2 次元の構造となる。それ以外の場合は、鉛直方向にも分布を考慮した構造を採用し、3 次元の分布型モデルとなる[2-36]。水平 2 次元の分布型モデルの場合、各モデル共通で入力する 2 次元空間情報の一つは降水量となる。これに、蒸発散過程を組み込んだモデルの場合、Budyko カーブ[2-37]を利用する簡単なものから[2-38]、陸面過程モデルのように熱収支の計算に必要な様々な気象データを入力する場合[2-39, 2-40]もある。他の入力パラメータとして、地表面に関する粗度係数・土層の透水係数・層厚・空隙率等、地表付近の場所に関連した空間分布するパラメータ等は、土地利用ごとに値が同定される場合が多い[2-41]。これらのパラメータの中には、斜面区画などで直接的あるいは間接的に測定可能なもの[2-42]もあるが、スケール依存性があり、モデルに直接使用しても流出量や流出波形の再現性は良くない場合も多い[2-43]。従って、土層や土地利用の種類間の相対的大小関係や同等のスケール・現象を対象とした数値実験事例を報告している既往文献を参考にしながら最終的に「試行錯誤」によって決定されることとなる。尚、3 次元の分布型モデルの場合、2 次元に加え、深さ方向にも分布するパラメータを入力する必要がある。一般には、透水係数・土層厚・空隙率などの土層に関するパラメータを鉛直方向に分布させる場合が多い[2-42]。土層に加え岩盤の情報も入力する場合は、岩盤の種類や透水性などの文献値[2-44]を考慮し、岩盤に関するパラメータが入力される。岩盤の水理学的特性を決定する物理的なパラメータは複数あり、それらは、いずれも深さ方向に分布することが考えられるが、地質や形成年代を考慮した岩盤の水理学的特性を評価した研究は、殆どなく経験的にパラメータを決定する場合が多い[2-20, 2-44]。

2.4.4. 支配方程式の空間スケール依存性

分布型モデルで、山地斜面から河道に流出した後の雨水の流下過程を再現する場合、運動波近似モデル[2-20]や拡散波近似モデル[2-45]等、開水路の水の移動過程を模したモデルが殆どであり、支配方程式そのものが空間スケールに依存することはないという前提でモデルが構築・利用されている（もちろん、そのような近似を用いない選択も可能だが、時間ステップを短くする必要等もあり、計算コストが増大することに注意する必要がある）。

一般に、山地流域の斜面過程を考慮した分布型モデルは、支配モデル（方程式）の空間スケール依存性の問題に直面する。空間スケールが異なれば、対象とする降雨流出過程の空間スケールも異なり、各々に従い、考慮すべき主要な水文プロセスも変化する[2-46]。しかし、「支配方程式の空間スケール依存性」を明示的に表現する分布型モデルは殆どない。例えば、水平 2 次元の分布情報を基にしたモデル[2-41]は、運動波（Kinematic wave）近似に基づく支配方程式がスケールに依存しないことを暗に前提としているし、3 次元的に分布した構造を有するモデル[2-42]でも、主要な支配方程式である Richards 式が空間スケールに依存しないことを仮定している。また、全球を対象とした MATSIRO[2-40]等の陸面過程モデ

ルでも、一連の支配方程式は空間スケールに依存しないことを前提としている。網羅的にモデルを比較した場合、パラメータの空間スケール依存性をモデルに組み込んだ研究例はあるが[2-47]、主要な降雨流出過程が空間スケールに応じて変化する点を包括的に議論した研究例は殆どない。しかし、トレーサー物質の流出を考える際、本課題は重要になると考えられる。特に、放射性物質（放射性セシウム）の山地域での詳細な動態を議論する際、流出機構がスケール不変とは考えられない。しかし、その観点でのモデル化の考察例は未だ十分でないことを指摘する。

2.5 土砂動態モデルの特徴及び現状

本節では、陸域において、降水により生じる地表面での流水とそれに伴い運搬される土砂の移行を追跡するモデルについて調査した結果を報告する。1F 事故で放出された主要な放射性物質である放射性セシウムは、土壤中に普遍的に含まれる微細土砂粒子（特にシルト以下粘土画分の鉱物粒子）に強く吸着することから、微細土砂粒子の動態が重要となる。以下では、土砂粒子の動態について、一般的議論を概説した後、モデリングの現状と課題について報告する。

2.5.1 土砂の流送

河川の流域において、上流山地の崩壊や浸食が多いと、河川への補給土砂は増大する一方、その一部は、河道に堆積し河床は上昇する。逆に、補給土砂が少ないと、河床は低下する。こうして、河川全体から見ると、上流からの補給土砂量と下流の土砂の運搬能力とのバランスに従い、河道全体の変化が決まる。これは、河川の各部分に着目しても同様で、河川のある小区間に着目すると、その区間の上流端から運びこまれる土砂量が、その区間の下流端の流水の土砂運搬能力以下の場合、流水は不足分をその区間内の河床材料から取り上げるように働くため、その区間の河床は洗掘されることとなる。その逆の場合は、河床に堆積することとなる。この考え方に従うと、各地点の洗掘・堆積に対する流送土砂の運搬条件を調べることで、河川的全延長に渡り、河床環境の変化を予測することが可能となる。しかし、河道内にダム(dam) が築造され、また、流域内の防砂工事も進み、大規模な河川改修工事が行われ、大幅に境界条件が変化する場合は、過去の記録および定性的な類推のみでは、河床変動を予測することが困難となることに注意する必要がある。以上、河道の計画立案では、将来の河床状況の変化を推定することが必要となるが、河床変動の予測には、流送土砂量に対する定量的把握が重要となることが分かる。このような観点での分析は、微細な土壌粒子へ強く吸着する放射性セシウムの河川を通じた動態を考える際にも重要な視点となる。微細土砂が堆積する河川（大きな河川の場合は河川域も対象となる）か、洗掘される河川（河川域）かの違いを知ることで、凡その議論が可能となるからである。

2.5.2 土砂の流送形式

流水によって流送される土砂の運搬形式は、掃流砂・浮遊砂および洗流砂(wash load) の3つに大別される。比較的重い砂礫は河底に沿い、または河床に近い所を運動することから、掃流砂と呼び、これを動かす流水の力を掃流力という。尚、掃流砂の運動には、様々な形式があり、流速によりその様相が変化するが、静止河床砂は、流速がしだいに増加すると運動をはじめ、砂は河床上を転がるか、または跳躍(saltation) して移動することとなる。次に、土砂の運搬が起こっている河床表面を観察すると、近似的に三角形に近い形の小規模な砂漣(sand ripple)が発生し、その砂漣は下流方向に進行する様子が見られるが、砂礫の大きさと流速の関係によっては、砂漣よりも規模の大きい堆積砂丘(砂堆, dune) が発生し、この砂丘が全体として下流へ進行するような運動が現れる。更に流速が大きくなると、河床は平滑河床

となるが、再び不安定となり、次に正弦波に近い対称的な波の砂丘が上流方向に進む現象（反砂堆, antidune）が現れる。

比較的小さい砂は、河床から流水中にもち上げられると、流れの乱れ成分により水中に拡散され、浮遊しながら運搬される。これを浮遊砂とするが、流水中に浮遊する土砂の中でも、河床を構成する土砂よりも細かい粒子よりなる流砂を洗流砂と呼び浮遊砂と区別する。こうして、掃流砂と浮遊砂とは、河床構成材料と交換しながら移動する物質とし、両者を合わせて河床物質(bed material load)と呼び、洗流砂は、河床構成材料とは無関係に上流より浮遊流下するものと定義する。放射性セシウムの場合、微細な土砂への吸着が強く、河床構成材料の分布調査によって様々な情報が得られると考えられる。一般に、放射性セシウムの多くは、洗流砂に強く付着していると考えられ、中小河川では、河床に堆積せず河口域に達するものと考えられるが、洪水の際は河川幅が大きく変化する他、河床構成材料は、河道横断面内で広く分布することも考えられる。以上、河川内での放射性セシウムの詳細な動態の知見を得るには、河川の詳しいモデリングが必要となるが、一部の文献[2-48,2-49]を除いて十分な研究は行われていないことを付記する。

2.5.3 限界掃流力

水が流れる際、水底面には必ずせん断力が働くが、このせん断力が、ある限界値以上になると、土砂の運動がはじまる。この限界のせん断力を限界掃流力と定義し、せん断力（掃流力）がこの限界値を超えて大きくなると、大規模に砂礫が移動することとなる。流れの中で、図 2-7 のような断面積 A 、長さ dx の部分を考えると、河床に働くせん断力の強さ τ は、次のつり合いの関係式から求められる。

$$wAdxI = \tau Sdx \quad (2-21)$$

ただし、 I : 水面勾配

S : 断面の潤辺

w : 水の単位体積重量

そして、径深 $R=A/S$ であるから上式に代入すると、

$$\tau = wRI \quad (2-22)$$

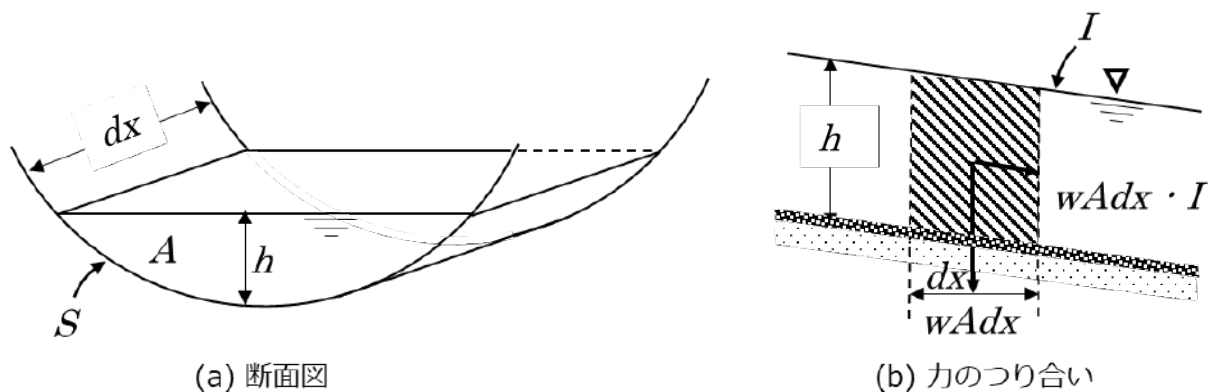


図 2-7 河川の断面及び限界掃流力

ここで、 $S > 30R$ であれば、 R の代わりに平均水深 h を用いて、

$$\tau = whl \quad (2-23)$$

と記述され、普通の河川断面の掃流力は、凡そ式(2-23)となり、一般にこれをデュブア(Du Buat)[2-50]の式という。尚、限界掃流力は、河床砂礫の大きさと重さ等により決まるが、これを与えるため、古来より多くの公式が発表されている。限界掃流力の概略値としては、

$$\tau_c \cong 0.05(w_s - w)d \quad (2-24)$$

として推定されることもある。尚、 τ_c の単位は gr/cm^2 、 w_s と w の単位は gr/cm^3 、 d (平均粒径)は cm で表す。

2.5.4 流砂量(流送土砂量)の測定と流量との関係

一般に、流砂量 Q_s と流量 Q との間には、

$$Q_s = \alpha Q^n \quad (2-25)$$

の関係があり、 α は河川の状態により決まる定数で、 n については浮流砂の場合は、約 2.0、掃流砂の場合は、約 1.0 程度の値となることが知られている。すなわち、1 地点で測った浮流砂量は、流量のほぼ 2 乗、掃流砂量は、ほぼ流量に比例するものと見ることができる。尚、福島原発事故で大気中に放出され、陸域に降下した主要な放射性物質の放射性セシウムは、微細土砂粒子に強く吸着されることから、多くが浮流砂として運搬されると考えられる。上記の経験則から、放射性物質の土砂による運搬量が凡そ推定可能となることが分かる。

以上、諸公式(経験則)により、流砂量の概略値が得られるが、各々の河川で実測による量を定めて利用することが望ましい。しかし、流砂量の実測は一般に容易ではなく、その困難さは、断片的な採水による測定から河川横断面の総流砂量を推定することにある。尚、河床材料の採取を適宜、実施し、ふるい分け試験を行い、情報を蓄積することも必要となることを指摘する(推定量の精度を向上させるには、多面的視点から情報を蓄積する必要がある)。

2.5.5 河床変動の特性

河床変動は、移動床河床において、水流が限界掃流力を超える際に生起し、特に河床砂波(sand waves)は、ほとんど常に河床面上に形成される。この現象は、「ある河川で与えられた流量の下、どれだけの河床砂が流送されるか」という問いと密接に関連し、流砂における基本的な問題である。以下では、河床変動の特性として、河道にダムなどの河川構造物を設けた場合の局所の変動に関連し、貯水池内の堆砂とダム下流部における河床変動の各々の特性について記す。

(1) 河道にダムなどの横断する河川構造物を設けた場合の局所の変動

河床変動の重要な問題の 1 つとして、流域内にダム等があり、河道に貯水池が設けられている場合、貯水池内への堆砂が挙げられる。これは、貯水池の寿命にも関係する重要な問題となるが、同

時にダム下流に対し、上流に堆砂が集中することで、下流への補給土砂が著しく減少または皆無となる等、ダム下流部では河床の低下が予想される。福島事故で陸域に降下した放射性セシウムの多くは、微細土砂粒子に強く吸着するため、貯水池内に堆積することが考えられる一方、貯水池からの流出量の予測や計測から、下流域等での環境影響評価が可能になる。その際、懸濁態成分と共に溶存態としての成分の量が、生態系に対する寄与が大きいことが分かっており、流出量以外に、その化学形態も重要である。

(2) 貯水池内の堆砂

矢野・芦田らは、貯水池の土砂堆積には、掃流砂と浮流砂によるものがあるとし、前者に対して、理論及び実験を基に考察した。その結果、掃流砂による貯水池の堆砂は、主に流入口付近で、砂堆(delta)形で行われることを報告し、その砂堆の挙動に着目し、複数の様相を明らかにした[2-51]。一方、放射性セシウムの多くは、微細土砂粒子に強く吸着する性質を持つため、貯水池内で発達する砂堆より、浮流砂により多く含まれるため、長期間貯水池内に停滞した後、一部は堆積する一方、下流へも移流される等の複雑な挙動を示すことが想定され、様々な研究が行われている[2-49, 2-52]。

(3) ダム下流の河床変動

古くから、ダム築造後、下流の河床低下が生じ、それが波状となり、下流へと伝播するといわれていたが、安芸[2-53]は、庄川の小牧および祖山ダム完成後の下流の河床変動についてダム完成後の昭和7年から2年ごとに観測した横断面より、平均河床高を調べた結果、河床の洗掘、堆積が順次下流に波状をなして移動することを見出した。また、吉川は2~3の例を観測し[2-54]、「細かい粒子が先に流され、河床表面の材料の粒度が次第に粗くなることで、河床を洗掘から保護するようになる」という状況を報告しており、下流での洗掘が発達する領域では、堆積した場合でも、放射性物質の多くは、時間と共に、河口へと運ばれると推定される。以上より、福島事故で放射性セシウムが降着した福島県浜通り地方では、河川の上流域にダム(貯水池)を持つ河川が多く、下流域での堆砂現象の理解が、将来予測とも密接に関連することが分かる。

2.6 放射性物質(セシウム)動態モデルの特徴及び現状

前節までに、降水により生じる流水と発生した土砂の移行を追跡するためのモデルについて調査した結果を報告した。本節では、それらのモデルを放射性物質の動態に活用した例(特に福島県を中心とする地域での活用)を取り上げ、課題等を整理し考察する。

まず、放射性セシウム(以降、放射性Cs)の重要な特徴として、土壌中の粘土鉱物に強く取り込まれる特徴[2-55~2-57]が極めて重要であることを指摘する。事故初期、溶存態Csとして流出する割合が、8-55%と多かったが[2-58~2-60]、徐々に、その割合は低下し(1-30%)、懸濁態由来の流出が大半を占めるようになった[2-58~2-63]。また、懸濁態Csの流出は、台風等の出水時等が、年間流出の殆どを占めることが判明し[2-58~60, 2-64~66]、洪水時の流量とその際の懸濁態の流量が極めて重要となることが指摘される。一方、平水時に限ると、平水時は懸濁態Csの割合は少なく、溶存態Csの割合が16-91%と比較的多いことも複数報告[2-67~2-69]され、少なくとも、洪水時と平水時の流量と放射性物質の流量を精度良く推定するモデルの開発が急務であることが分かる。尚、流域内での再分布としては、懸濁態Csが流域内に留まるか、太平洋へと流出するかのどちらか[2-70]に限られ(溶存態は、ほぼ河口に直接流出する)、河川を通しての懸濁態の挙動のモデル化が重要となる。尚、溶存態Csは、流域内の放射性Csの

再分布に殆ど寄与しないが、生物利用性の高さから、非常に重要な存在形態である[2-61, 2-71]と指摘されている。つまり、河川生態系への影響評価に際し、溶存態 Cs は極めて重要な研究課題に位置付けられる。

一般に、河川水中の懸濁態 Cs 濃度 (Bq/kg) と溶存態 Cs 濃度 (Bq/L) は、初期の流域沈着量 (Bq/m²) と正の相関を示すことが多数報告されている[2-68~2-69, 2-72~2-73]。特に、Yoshimura ら[2-73]は、懸濁態 Cs 濃度と溶存態 Cs 濃度にも正の相関があることを報告する一方、Ochiai ら[2-67]は、その相関は弱いことを報告している。また、溶存態 Cs の特徴として、Yoshikawa ら、Tsuji ら、Shinomiya ら[2-61, 2-69, 2-74]は、平水時に比べ出水時の濃度が上昇する傾向があることを報告している。更に Tsuji ら[2-69]は、平水時の溶存態 Cs 濃度は、季節変動し、夏季に高く、冬季に低い事象を報告している。また、上流域のダムが存在により、下流域への土砂供給を大幅に抑制する効果、すなわち放射性 Cs の下流への汚染の拡大を抑制する効果が、Kurikami ら及び Yamada ら[2-49, 2-52, 2-75]により報告され、その効果には、降水強度やダム湖の大きさ等、様々なファクターが関与する一方、約 90%程度の放射性 Cs の貯留効果があると報告されている。その一方、水田からの流出に関しては、Yoshimura ら[2-76]によると、他の土地利用よりも懸濁態 Cs 濃度の減少速度が速く河川への影響の大きさを示唆している。

以上の観測事実を基に、Cs 動態に係る事象に対して、陸域モデルの研究開発が福島県内を対象に、流域スケールの土壌の流出と放射性 Cs の流出モデルの開発とその成果が多数報告されている[2-77~82]。中でも、Yamaguchi ら及び Kitamura ら[2-77~2-78]は、経験的な土砂流亡式(USLE)を用いた SACT (Soil And Cesium Transport)モデルを開発し、福島県の 14 の流域 (5432km²) を対象に、流域からの年単位の土砂・放射性 Cs 流出量を算出し、将来予測を行ったが、その後は、放射性 Cs の流出量が年を経るにつれ減少する効果を取り入れた改良等が、Liu ら[2-83]により報告されている。一方、Kinouchi ら[2-79]は、阿武隈川水系の口太川 (140km²) を対象に、物理ベースの流域モデル WEPP (Water and Energy transfer Processes) を改良し、水、土砂、放射性 Cs の流出量解析を実施している。WEPP は、年単位の平均ではなく、降水イベント単位で土砂の流亡解析が可能であることから、放射性セシウムの移行挙動を詳細に分析可能である。一方、Mori ら[2-81]は、統合型流域物理モデル GETFLOWS (GEneral purpose Terrestrial fluid FLOW Simulator) を用いて、堀川ダム流域(15km²)を対象とし、水、土砂、放射性 Cs の流出や再分布の解析を実施している。GETFLOWS は、陸域を連続した種々の物理モデルにより記述し、水や土砂の輸送を追跡することが可能であるが、計算コストが高く、入念な準備が必要となる一方、ブラックボックス的部分は殆どなく (複数の物理モデルから構成)、今後の詳細な放射性核種動態の追跡が期待される場面においては、その機能は有用と考えられる。

次に、福島事故により放出された放射性 Cs の多くが森林 (森林の面積は、福島県の 7 割程度に及ぶ) に降着したことを受け、森林内における放射性 Cs の挙動について概観する。理由は、放射性 Cs 動態の起点の多くが森林から生起するからである。都市域に降着した放射性 Cs が素早く減少したため、この傾向は現在、より支配的となっている。

事故初期、放射性 Cs の大部分が、針葉樹の樹冠に沈着[2-84]したが、その後、雨や落葉等によって林床へ移動する現象[2-85~2-87]が報告されている。その後、林床において、落葉層から土壌層へと時間と共に徐々に移動し、深さ方向の放射性 Cs 量の分布が変化していること[2-88]が報告された。その一方、広葉樹においては、事故初期の 3 月に落葉していたため、樹冠には沈着せず、その多くが落葉層や土壌層へ直接沈着したことが分かっている[2-88]。一旦、土壌層に移動した放射性 Cs の一部は、根を介して再び樹木内部へと移動する可能性が指摘され[2-89]、今後の挙動に注目が集まっている。尚、河川への流量予測に重要な、森林内から森林外への流出量は、いくつかの観測事例から、一般に非常に少ないこと

が報告されて[2-90~2-91]おり、この経時変化傾向は、今後の挙動を左右するため、注目が集まっている。

陸域（特に森林域）に沈着した放射性セシウムは、降水を通じて流水となり、下流域へ運搬され、最終的には海洋へと流出する。各流域の水系を通じて移行する放射性 Cs は、河川水中の溶存態と懸濁態及び粗大有機物等に保持された形態で運搬される。先ず、森林からなる源頭部流域でのモニタリング結果によれば、事故から 1 年後の年間の Cs-137 の流出フラックスは 170~1600 Bq/m² と推定され、これは流域への大気沈着量の 0.02~0.3% にあたることが知られている[2-92]。また、水系を通じて流出する Cs-137 の 96~99% は土砂等の懸濁態であり、粗大有機物にともなう流出フラックスはいずれの流域でも 0.1% 以下と報告されている。その一方、溶存態として流出する割合は、0.73~3.7% と推定され、水系を通じた放射性セシウムの主要な移行経路は懸濁態だが、特に森林の被覆面積が大きい流域では溶存態が 2~4% 程度含まれており、生態系への放射性セシウムのインプット経路としては軽視できない量と考えられている（平水時と洪水時の違いについては、本節前半参照）。実際、森林域からの放射性セシウムの流出が、河川水中の溶存態放射性セシウム濃度の形成に及ぼす影響について、福島県伊達郡川俣町及び二本松市の複数の小流域を対象とした広域調査が実施されている[2-93]。その調査結果によれば、小流域から流出する河川水に含まれる溶存態 Cs-137 濃度は、集水域内の森林面積率と正の相関が認められ、草地面積率とは負の相関を示した。これは、森林の被覆面積が大きい流域では河川水中の溶存態 Cs-137 濃度が高くなることを示唆している。また、森林源頭部流域において、渓流水中の溶存態放射性セシウム濃度が高くなる傾向については、土壌水の寄与が指摘されている[2-94]。土壌水に含まれる溶存態放射性セシウム濃度は、地下水よりも凡そ 100 倍程度高い値を示し、土壌水と地下水が流出・混合することによって渓流水の溶存態放射性セシウム濃度が形成されていると考えられる。また、リターが厚く堆積した林床においては、堆積有機物からの溶出が渓流水中の放射性セシウム濃度の形成に寄与する可能性が指摘されている[2-95~2-96]。以上、渓流水中の溶存態放射性セシウム濃度の形成機構として土壌水と堆積有機物からの溶出の影響が考えられるが、平水時及び出水時のそれらの寄与割合については今後詳細な解析が必要であり、これらをモデル化することで、精度の高い流出推定シミュレーションが可能になると考えられる。

現在、福島第一原発事故から凡そ 10 年が経過し、事故初期に避難区域に指定された地域へ住民が帰還しつつあるが、陸域に沈着した放射性セシウムは依然として環境中を移行し続けており、長期的な移行予測が今後も必要である。特に、陸域に沈着した放射性セシウムの凡そ 70% は森林域に沈着し、今なお環境に保持されており、上流域に位置する森林は、水系を通じて下流域へと拡散する放射性セシウムの供給源となるだけでなく、上記のように、河川水中の溶存態放射性セシウム濃度（水域生態系への影響が大きい）の形成機構への寄与が指摘されている。しかし、日本をはじめとする温暖湿潤な森林生態系での放射性セシウムの循環過程や水系への移行メカニズムについては、依然として不明で未解明な点が多く、長期動態予測の精度向上のためには、森林を起点とした陸域-水系での放射性セシウムの移行メカニズムの解明を通して移行パラメータの精緻化も行うことが必要となる。今後は、これらの知見を獲得し、どのようにモデルに反映させるかという点について議論を重ねることが重要である。即ち、森林に対し、水や土砂移行の物理モデルと放射性物質を含む化学形態の変化を記述する化学モデルの双方向を進展させ、日本の気候や地形及び土壌や植生を反映させた科学的モデルを構築する必要がある。

参考文献

- [2-1] 風間聡、「水文学」、コロナ社 (2011)
- [2-2] 高瀬信忠「河川工学入門」、森北出版 (2003)

- [2-3] 椎葉充晴、市川温、立川康人、「水文学・水工計画学」、京都大学学術出版会 (2013)
- [2-4] 水村和正、「水文学の数理」、東京電機大学出版局 (2008)
- [2-5] 本間仁、安芸皎一、「物部水理学」、岩波書店、585-586 (1962)
- [2-6] アシット・K.ビスワス (高橋裕、早川正子訳)、「水の文化史」、文一総合出版 (1979)
- [2-7] 渡邊暁人、笹田拓也、渡辺直樹、山田正、「合成合理式の理論的導出」、土木学会論文集 B1 (水工学)、68 巻、4 号 pp.I_499-I_504 (2012)
- [2-8] V.T. Chow, D.R. Maidment and L.W. Mays, “Applied Hydrology”, McGraw-Hill (1988)
- [2-9] R.K. Linsley, M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus, “Hydrology for Engineers”, 3rd edition, McGraw-Hill, New York (1982)
- [2-10] 木村俊晃、「流出地域を想定して解析した総合貯留関数の提案」、土木技術資料、2 (11) (1960)
- [2-11] 藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、村上雅博、「洪水流出を対象とした貯留関数パラメータの不確実性低減に向けた解析的研究」、土木学会論文集 G (環境)、72 巻 5 号 p.I_35-I_43 (2016)
- [2-12] 奥泉宗一郎、中津川誠、臼谷友秀、「GIS を用いた汎用的な流出計算手法の提案」、水文・水資源学会誌、29 巻 1 号 p. 32-43 (2016)
- [2-13] 大林茂、三坂孝志、加藤博司、菊地亮太、「データ同化流体科学: 流動現象のデジタルツイン」、共立出版 (2021)
- [2-14] M. Sugawara, “On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers, Japanese journal of geophysics”, 2, pp.1-76 (1961)
- [2-15] 菅原正巳、「タンクモデルと共に」、水文・水資源学会誌、6、pp.268-257 (1993)
- [2-16] 多田毅、「PSO アルゴリズムによる流出モデルパラメータの最適化」、水文・水資源学会誌、20 巻 5 号 p. 450-461 (2007)
- [2-17] Sakuma S., Nakanishi T., Yoshimura K., Kurikami H., Nanba K., Zheleznyak M., “A modeling approach to estimate the ¹³⁷Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017”, 208–209, 106041 (2019)
- [2-18] 水工学委員会 水理公式集編集小委員会、「数理公式集」土木学会 (1999)
- [2-19] LA. Richards, “Capillary conduction of liquids through porous mediums”, Journal of Applied Physics 1, pp.318-333 (1931)
- [2-20] Y. Yokoo, S. Kazama, “Numerical investigations on the relationships between watershed characteristics and water balance model parameters: searching for universal relationships among regional relationships”, Hydrological Processes, 26, pp.843-854 (2012)
- [2-21] MJ. Lighthill, GB. Whitham, “On kinematic waves. I. Flood movement in long rivers”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A 229, pp.281-316. (1955)
- [2-22] 吉見和紘、山田 正、「鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の長短期流出解析への適用」、土木学会論文集 B1 (水工学) 70(4) : I_367-I_372 (2014)
- [2-23] Y. Qu, CJ. Duffy, “A semidiscrete finite volume formulation for multiprocess watershed simulation. Water Resources”, Research 43: W08419. (2007)
- [2-24] 国土交通省国土政策局国土情報課、「土地分類調査・水調査」,
<https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html> (参照 : 2021/3/3)
- [2-25] 敖天其、石平 博、竹内邦良、「ブロック型 TOPMODEL 及び M-C 追跡法による分布型流出解析モデルの検討」、水工学論文集 43、pp.7-12 (1999) DOI: 10.2208/prohe.43.7.

- [2-26] 滝野晶平、立川康人、椎葉充晴、山口千裕、萬和明、「地球温暖化に伴う日本の河川流況変化の推計」、水工学論文集 54、pp.475-480 (2010)
- [2-27] 市川温、村上将道、立川康人、椎葉充晴、「流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発」、土木学会論文集 691、pp.43-52 (2001)
- [2-28] F. Chen, KW. Manning, MA. LeMone, SB. Trier, JG. Alfieri, R. Roberts, M. Tewari, D. Niyogi, TW. Horst, SP. Oncley, JB. Basara, PD. Blanken, “Description and evaluation of the characteristics of the NCAR high-resolution land data assimilation system”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46, pp.694-713 (2007) DOI: 10.1175/JAM2463.1.
- [2-29] Wood EF, Roundy JK, Troy TJ, van Beek LPH, Bierkens MFP, Blyth E, de Roo A, Döll P, Ek M, Famiglietti J, Gochis D, van de Gielsen N, Houser P, Jaffé PR, Kollet S, Lehner B, Lettenmaier DP, Peters-Lidard C, Sivapalan M, Sheffield J, Wade A, Whitehead P, “Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water”, *Water Resources Research* 47, W05301 (2011) DOI:10.1029/2010WR010090.
- [2-30] Zhu D, Ren Q, Xuan Y, Chen Y, Cluckie ID., “An effective depression filling algorithm for DEM-based 2-D surface flow modelling”, *Hydrology and Earth System Sciences* 17, pp.495-505 (2013) DOI: 10.5194/hess-17-495-2013.
- [2-31] Kotsuki S, Takenaka H, Tanaka K, Higuchi A, Miyoshi T., “1-km-resolution land surface analysis over Japan: Impact of satellite-derived solar radiation”, *Hydrological Research Letters* 9, pp.14-19 (2015) DOI: 10.3178/hrl.9.14.
- [2-32] 小葉竹重樹、石原安雄、「タンクモデルおよび集中面積図を利用した洪水流出モデルの総合化」土木学会論文報告集 337、pp.129-135 (1983) DOI: 10.2208/jscej1969.1983.337_129.
- [2-33] Yokoo Y, Kazama S, Sawamoto M, Nishimura H, “Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression”, *Journal of Hydrology* 246, pp.209-222 (2001) DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00372-9.
- [2-34] 一言正之、「ニューラルネットワークと物理型モデルを用いた実時間洪水予測の精度向上に関する研究」東京大学工学系研究科博士論文 (2016)
- [2-35] 白木克繁、「斜面ライシメーターを対象とした流出量および土壌水分分布の長期再現計算」、水文・水資源学会誌 12、pp.97-108 (1999)
- [2-36] An H, Ichikawa Y, Tachikawa Y, Shiiba M., “Comparison between iteration schemes for three-dimensional coordinate-transformed saturated-unsaturated flow model”, *Journal of Hydrology* 470-471, pp.212-226 (2012) DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.08.056.
- [2-37] Budyko MI, “Climate and Life”, Academic Press: New York; 508 (1974)
- [2-38] Manabe S, Bryan K., “Climate calculation with a combined ocean-atmosphere model”, *Journal of the Atmospheric Sciences* 26, pp.786-789 (1969) DOI: 10.1175/1520-0469(1969)026<0786:CCWACO>2.0.CO;2.
- [2-39] Sellers PJ, Mintz Y, Sud YC, Dalcher A., “A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models”, *Journal of the Atmospheric Sciences* 43, pp.505-531 (1986) DOI: 10.1175/1520-0469(1986)043<0505:ASBMFU>2.0.CO;2.
- [2-40] Takata K, Emori S, Watanabe T., “Development of minimal advanced treatments of surface interaction and runoff”, *Global and Planetary Change* 38, pp.209-222 (2003)

DOI:10.1016/S0921-8181(03)00030-4.

- [2-41] 立川康人、永谷言、寶馨、「飽和不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発」、水工学論文集 48、pp.7-12 (2004)
- [2-42] 白木克繁、「簡略化された 3 次元飽和不飽和浸透数値計算による森林山地流域土中水挙動の再現計算」、日本林学会誌 82、pp.364-372 (2000)
- [2-43] 森友宏、千葉崇、渦岡良介、風間基樹、「谷埋め盛土地盤における降雨に伴う水分変化と地震応答特性」、日本地震工学論文集 10(4)、pp.4_1-4_13 (2010) DOI: 10.5610/jaee.10.4_1.
- [2-44] 小杉賢一郎、「森林の水源涵養機能に土層透水性基岩が果たす役割の評価」、水文・水資源学会誌 20、pp.201-213 (2007)
- [2-45] 佐山敬洋、建部祐哉、藤岡奨、牛山朋來、萬矢敦啓、田中茂信、「2011 年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測」、土木学会論文集 B1 (水工学) 69(1)、pp.14-29 (2013)
- [2-46] Sidle RC, Tsuboyama Y, Noguchi S, Hosoda I, Fujieda M, Shimizu T., “Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm”, “Hydrological Processes 14, pp.369-385 (2000) DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(20000228)14:3<369::AID-HYP943>3.0.CO;2-P.
- [2-47] Langhans C, Govers G, Diels J, Stone JJ, Nearing MA., “Modeling scale-dependent runoff generation in a small semi-arid watershed accounting for rainfall intensity and water depth”, *Advances in Water Resources* 69, pp.65-78 (2014). DOI:10.1016/j.advwatres.2014.03.005.
- [2-48] Iwasaki T., Nabi M., Shimizu Y., Kimura I., “Computational modeling of ¹³⁷Cs contaminant transfer associated with sediment transport in Abukuma River”, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 139, pp. 416-426 (2015)
- [2-49] Yamada, S., Kitamura, A., Kurikami, H., Yamaguchi, M., Malins, A., Machida, M., 2015. Sediment and ¹³⁷Cs transport and accumulation in the Ogaki dam of eastern Fukushima. *Environ. Res. Lett.* 10, 014013.
- [2-50] L.G. Du Buat, “Principle d’Hydraulique”, Nabu Press (1816)
- [2-51] 矢野勝正、芦田和男、定道成美、「ダムの背砂に関する研究(I) —貯水池における砂堆の運動機構について—」、京都大学防災研究所年報、6 号 (1963)
- [2-52] Kurikami, H., Funaki, H., Malins, A., Kitamura, A., Onishi, Y., 2016. Numerical study of sediment and ¹³⁷Cs discharge out of reservoirs during various scale rainfall events. *J. Environ. Radioact.* 164, 73-83. doi:10.1016/j.jenvrad.2016.07.004.
- [2-53] 安芸皎一、「河相論」、岩波書店 (1951)
- [2-54] 吉川秀夫、「河床変動論」、水工学シリーズ、60-03、土木学会 (1964)
- [2-55] Akai, J., Nomura, N., Matsushita, S., Kudo, H., Fukuhara, H., Matsuoka, S., Matsumoto, 2013. “Mineralogical and geomicrobial examination of soil contamination by radioactive Cs due to 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident”, *Phys. Chem. Earth* 58-60, 57-67. doi: 10.1016/j.pce.2013.04.010.
- [2-56] Kozai, N., Ohnuki, T., Arisaka, M., Watanabe, M., Sakamoto, F., Yamasaki, S., Jiang, M., 2012. “Chemical states of fallout radioactive Cs in the soils deposited at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident”, *J. Nucl. Sci. Technol.* 49, 473-478. doi:10.1080/00223131.2012.677131
- [2-57] Tanaka, K., Sakaguchi, A., Kanai, Y., Tsuruta, H., Shinohara, A., Takahashi, Y., 2013. “Heterogeneous distribution of radiocesium in aerosols, soil and particulate matters emitted by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: Retention of micro scale heterogeneity during the migration of radiocesium from the

- air into ground and river”, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 295, 1927-1937. doi:10.1007/s10967 012 2160 9.
- [2-58] Nagao, S., Kanamori, M., Ochiai, S., Tomihara, S., Fukushi, K., Yamamoto, M., 2013. “Export of ^{134}Cs and ^{137}Cs in the Fukushima river systems at heavy rains by typhoon Roke in September 2011”, *Biogeosciences* 10, 6215-6223. doi: 10.5194/bg 10 6215 2013.
- [2-59] Ueda, S., Hasegawa, H., Kakiuchi, H., Akata, N., Ohtsuka, Y., Hisamatsu, S., 2013. “Fluvial discharges of radiocaesium from watersheds contaminated by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan”, *J. Environ. Radioact.* 118, 96-104. doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.11.009.
- [2-60] Yamashiki, Y., Onda, Y., Smith, H.G., Blake, W.H., Wakahara, T., Igarashi, Y., Matsuura, Y., Yoshimura, K., 2014. “Initial flux of sediment-associated radiocaesium to the ocean from the largest river impacted by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, *Sci. Rep.* 4, 3714. doi:10.1038/srep03714.
- [2-61] Yoshikawa, N., Obara, H., Ogasa, M., Miyazu, S., Harada, N., Nonaka, M., 2014. “ ^{137}Cs in irrigation water and its effect on paddy fields in Japan after the Fukushima nuclear accident”, *Sci. Total Environ.* 481, 252-259. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.01.129.
- [2-62] Sakaguchi, A., Tanaka, K., Iwatani, H., Chiga, H., Fan, Q., Onda, Y., Takahashi, Y., 2015. “Size distribution studies of ^{137}Cs in river water in the Abukuma Riverine system following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident”, *J. Environ. Radioact.* 139, 379-389. doi:10.1016/j.jenvrad.2014.05.011
- [2-63] Iwagami, S., Onda, Y., Tsujimura, M., Abe, Y., 2016. “Contribution of radioactive ^{137}Cs discharge by suspended sediment, coarse organic matter, and dissolved fraction from a headwater catchment in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident”, *J. Environ. Radioact.* 166, 466-474. doi:10.1016/j.jenvrad.2016.07.025.
- [2-64] Chartin, C., Evrard, O., Onda, Y., Patin, J., Lefevre, I., Otle, C., Ayrault, S., Lepage, H., P., 2013. “Tracking the early dispersion of contaminated sediment along rivers draining the Fukushima radioactive pollution plume”, *Anthropocene* 1, 23-34doi: 10.1016/j.ancene.2013.07.001.
- [2-65] Evrard, O., Laceby, J.P., Lepage, H., Onda, Y., Cerdan, O., Ayrault, S., 2015. Radiocaesium transfer from hillslopes to the Pacific Ocean after the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A review”, *J. Environ. Radioact.* 148, 92-110, doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.06.018.
- [2-66] Yamasaki, S., Imoto, J., Furuki, G., Ochiai, A., Ohnuki, T., Sueki, K., Nanba, K., Ewing, R.C., Utsunomiya, S., 2016. “Radioactive Cs in the estuary sediments near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, *Sci. Total Environ.* 551-552, 155-162. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.01.155.
- [2-67] Ochiai, S., Ueda, S., Hasegawa, H., Kakiuchi, H., Akata, N., Ohtsuka, Y., Hisamatsu, S., 2015. “Effects of radiocaesium inventory on ^{137}Cs concentrations in river waters of Fukushima, Japan, under base flow conditions”, *J. Environ. Radioact.* 144, 86-95. doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.03.005.
- [2-68] Eyrolle Boyer, F., Boyer, P., Garcia Sanchez, L., Métivier, J.M., Onda, Y., De Vismes, A., Cagnat, X. X., Boulet, B., Cossonnet, C., 2016. “Behaviour of radiocaesium in coastal rivers of the Fukushima Prefecture (Japan) during conditions of low flow and low turbidity Insight on the possible role of small particles and detrital organic compounds”, *J. Environ. Radioact.* 151, 328-340. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.10.028.
- [2-69] Tsuji, H., Nishikiori, T., Yasutaka, T., Watanabe, M., Ito, S., Hayashi, S., 2016. “Behavior of dissolved radiocaesium in river water in a forested watershed in Fukushima Prefecture”, *J. Geophys. Res.: Biogeosciences* 121, 2588-2599. doi:10.1002/2016JG003428.
- [2-70] Tanaka, K., Iwatani, H., Sakaguchi, A., Fan, Q., Takahashi, Y., 2015. Size dependent distribution of

- radiocesium in riverbed sediments and its relevance to the migration of radiocesium in river systems after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.* 139, 390–397. doi:10.1016/j.jenvrad.2014.05.002.
- [2-71] Uematsu, S., Vandenhove, H., Sweeck, L., Hees, M.V., Wannijn, J., Smolders, E., 2017. Foliar uptake of radiocaesium from irrigation water by paddy rice (*Oryza sativa*): an overlooked pathway in contaminated environments. *New Phytol.* 214, 820–829. doi: 10.1111/nph.14416
- [2-72] Tsuji, H., Yasutaka, T., Kawabe, Y., Onishi, T., Komai, T., 2014a. Distribution of dissolved and particulate radiocesium concentrations along rivers and the relations between radiocesium concentration and deposition after the nuclear power plant accident in Fukushima. *Water Res.* 60, 15–27. doi:10.1016/j.watres.2014.04
- [2-73] Yoshimura K., Onda Y., Sakaguchi A., Yamamoto M., Matsuura Y. 2015. An extensive study of the concentrations of particulate/dissolved radiocaesium derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident in various river systems and their relationship with catchment inventory. *J. Environ. Radioact.* 139, 370–378, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.08.021.
- [2-74] Shinomiya, Y., Tamai, K., Kobayashi, M., Ohnuki, Y., Shimizu, T., Iida, S., Nobuhiro, T., Sawano, S., Tsuboyama, Y., Hiruta, T., 2014. Radioactive cesium discharge in stream water from a small watershed in forested headwaters during a typhoon flood event. *Soil Sci. Plant Nutr.* 60, 765–771. doi:10.1080/00380768.2014.949852.
- [2-75] Kurikami, H., Kitamura, A., Yokuda, S.T., Onishi, Y., 2014. Sediment and ¹³⁷Cs behaviors in the Ogaki Dam Reservoir during a heavy rainfall event. *J. Environ. Radioact.* 137, 10–17. doi:10.1016/j.jenvrad.2014.06.013.
- [2-76] Yoshimura K., Onda Y., Wakahara T. 2016. Time dependence of the ¹³⁷Cs concentration in particles discharged from rice paddies to freshwater bodies after the Fukushima Daiichi NPP accident. *Environ. Sci. Technol.* 50, 4186–4193, doi:10.1021/acs.est.5b05513.
- [2-77] Yamaguchi, M., Kitamura, A., Oda, Y., Onishi, Y., 2014. Predicting the long term ¹³⁷Cs distribution in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: a parameter sensitivity analysis. *J. Environ. Radioact.* 135, 135–146. doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.04.011.
- [2-78] Kitamura, A., Yamaguchi, H., Kurikami, Y., Yui, M., Onishi, Y., 2014. Predicting sediment and caesium-137 discharge from catchments in eastern Fukushima. *Anthropocene* 5, 22–31, doi: 10.1016/j.ancene.2014.07.001.
- [2-79] Kinouchi T., Yoshimura K., Omata T. 2015. Modeling radiocesium transport from a river catchment based on a physically based distributed hydrological and sediment erosion model. *J. Environ. Radioact.* 139, 407–415, doi:10.1016/j.jenvrad.2014.07.022.
- [2-80] Mori, K., Tada, K., Tawara, Y., Ohno, K., Asami, M., Kosaka, K., Tosaka, H., 2014. An integrated watershed modeling to assess the long term fate of Fukushima derived radionuclides. *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 7th International Congress on Environmental Modelling and Software*, San Diego, CA.
- [2-81] Mori, K., Tada, K., Tawara, Y., Ohno, K., Asami, M., Kosaka, K., Tosaka, H., 2015. Integrated watershed modeling for simulation of spatiotemporal redistribution of post fallout radionuclides: Application in radiocesium fate and transport processes derived from the Fukushima accidents. *Environ. Model. Softw.* 72, 126–146, doi:10.1016/j.envsoft.2015.06.012.
- [2-82] Wei, L., Kinouchi, T., Yoshimura, K., Velleux, M.L., 2017. Modeling watershed scale ¹³⁷Cs transport in a forested catchment affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*

171, 21–33. doi:10.1016/j.jenvrad.2017.01.017.

- [2-83] Liu X., Machida M., Kurikami H., Kitamura A., “Long-term simulations of radiocesium discharge in watershed with improved radioesium wash-off model: Applying the model to Abukuma River basin of Fukushima”, *Journal of Environmental Radioactivity*, 203, pp.135-146 (2019)
- [2-84] Kato, H., Onda, Y., Gomi, T., 2012. Interception of the Fukushima reactor accident derived ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{131}I by coniferous forest canopies. *Geophys. Res. Lett.* 39, L20403 . doi:10.1029/
- [2-85] Kato, H., Onda, Y., Hisadome, K., Loffredo, N., Kawamori, A., 2017. Temporal changes in radiocesium deposition in various forest stands following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.* 166, 449–457. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.04.016.
- [2-86] Teramaga, M.T., Onda, Y., Patin, J., Kato, H., Gomi, T., Nam, S., 2014. Vertical distribution of radiocesium in coniferous forest soil after the Fukushima Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.* 137, 37–45, doi:10.1016/j.jenvrad.2014.06.017.
- [2-87] Endo, I., Ohte, N., Iseda, K., Tanoi, K., Hirose, A., Kobayashi, N.I., Murakami, M., Tokuchi, N., Ohashi, M., 2015. Estimation of radioactive ^{137}Cs transportation by litterfall, stemflow and throughfall in the forests of Fukushima. *J. Environ. Radioact.* 149, 176–185. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.07.027
- [2-88] Imamura, N., Komatsu, M., Ohashi, S., Hashimoto, S., 2017. Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Sci. Rep.* 11. doi:10.1038/s41598-017-08261-x.
- [2-89] Yoschenko, V., Takase, T., Konoplev, A., Nanba, K., Onda, Y., Kivva, S., Zheleznyak, M., Sato, N., Keitoku, K., 2017. Radiocesium distribution and fluxes in the typical *Cryptomeria japonica* forest at the late stage after the accident at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *J. Environ. Radioact.* 166, 45–55. doi:10.1016/j.jenvrad.2016.02.017
- [2-90] Yoshimura K., Onda Y., Kato H. 2015. Evaluation of radiocaesium wash-off by soil erosion from various land uses using USLE plots. *J. Environ. Radioact.* 139, 362–369, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.07.019.
- [2-91] Niizato, T., Abe, H., Mitachi, K., Sasaki, Y., Ishii, Y., Watanabe, T., 2016 . Input and output budgets of radiocesium concerning the forest floor in the mountain forest of Fukushima released from the TEPCO’s Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *J. Environ. Radioact.* 161, 11–21, doi:10.1016/j.jenvrad.2016.04.017
- [2-92] Iwagami, S., Onda, Y., Tsujimura, M. and Abe, Y., Contribution of radioactive ^{137}Cs discharge by suspended sediment, coarse organic matter, and dissolved fraction from a headwater catchment in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *J. Environ. Radioact.*, 166, 466–474 (2017)
- [2-93] 原子力規制委員会. 森林・土壌に蓄積した放射性セシウムの移行メカニズム解明とモデル化に関する研究, pp. 94 (2019)
- [2-94] Iwagami, S., Tsujimura, M., Onda, Y., Konuma, R., et al., Dissolved ^{137}Cs concentrations in stream water and subsurface water in a forested headwater catchment after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *J. Hydrol. (Amst.)*, 573, 688–696 (2019)
- [2-95] Sakai, M., Gomi, T., Naito, S. R., Negishi, N. J., et al., Radiocesium leaching from contaminated litter in forest streams, *J. Environ. Radioact.*, 144, 15–20 (2015)
- [2-96] Sakai, M., Gomi, T. and Negishi, N. J., Fallout volume and litter type affect ^{137}Cs concentration difference in litter between forest and stream environments, *J. Environ. Radioact.*, 164, 169–173 (2016)

■ 3 章 陸域水文流出及び放射性物質動態モデルの試開発(試解析及び試計算)と相互比較

3.1 本章の概要

陸域に降下した放射性物質は、主に地表水の流れにより陸域を移動した後、河川に流入し、その後、河川流を通じて海洋へ流出すると考えられる。この海洋に至るまでの放射性物質の動態は、降雨による降水分布に基づき、地表の流水と河川水の流量を定量的に評価可能とするシミュレーションモデルにより記述される。また、土砂等の河川水の固相成分へ吸着する放射性物質を取り扱うには、河川流に含まれる懸濁態成分の流量を定量的に評価するシミュレーションモデルが必要となる。本章では、前2章にて概説した陸域での流出モデルについて、実際に福島県の阿武隈川水系の一河川である広瀬川に着目し、最も基本となる河川による水の流出に関し比較検討した結果について報告する。尚、本比較は、各モデルを計算機上に実装し最低限のセッティングにより実施したものであり、各モデルのチューニングを十分に行い比較したものではないことを付記する(各モデルは特徴を有し、上記の対象である広瀬川へ適用後、流出量を観測結果と高い精度で適合させるため、モデルパラメータを十分にチューニングする他、モデル自体の改良等も必要になるが、それらについては本事業の目的が試解析という点から実施していない)。本章で試開発(試解析及び試計算)したモデルは下記の通りである。**集中定数型(3.2参照)**:貯留関数法、タンクモデル、合成合理式、単位図法、**分布定数型(3.3参照)**:Arc-SWAT、GeoWEPP、RADFLOW。また、分布定数型モデルについては、各々のモデルの使用手順(セットアップに係る煩雑な部分)は付録2にまとめた。

3.1.1 広瀬川について

本章を通して解析対象とする阿武隈川水系の支流の一つである広瀬川について、その位置をマップ上に示す。図 3-1～図 3-3 に示したマップは『国土交通省 川の防災情報』(<https://www.river.go.jp/portal/#80>)の『川の水位情報』の地図から取得したものである。

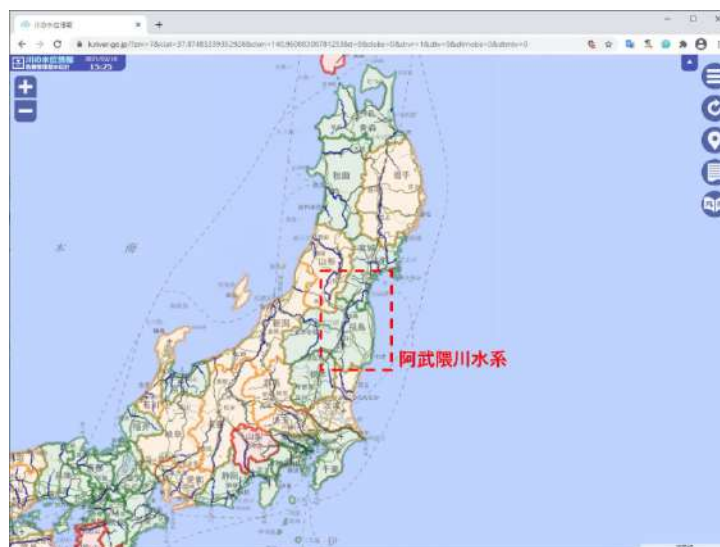


図 3-1 阿武隈川水系

尚、阿武隈川は福島・宮城県を流れる一級河川である。延長は 239.0km で流域面積は 5,390km²である。

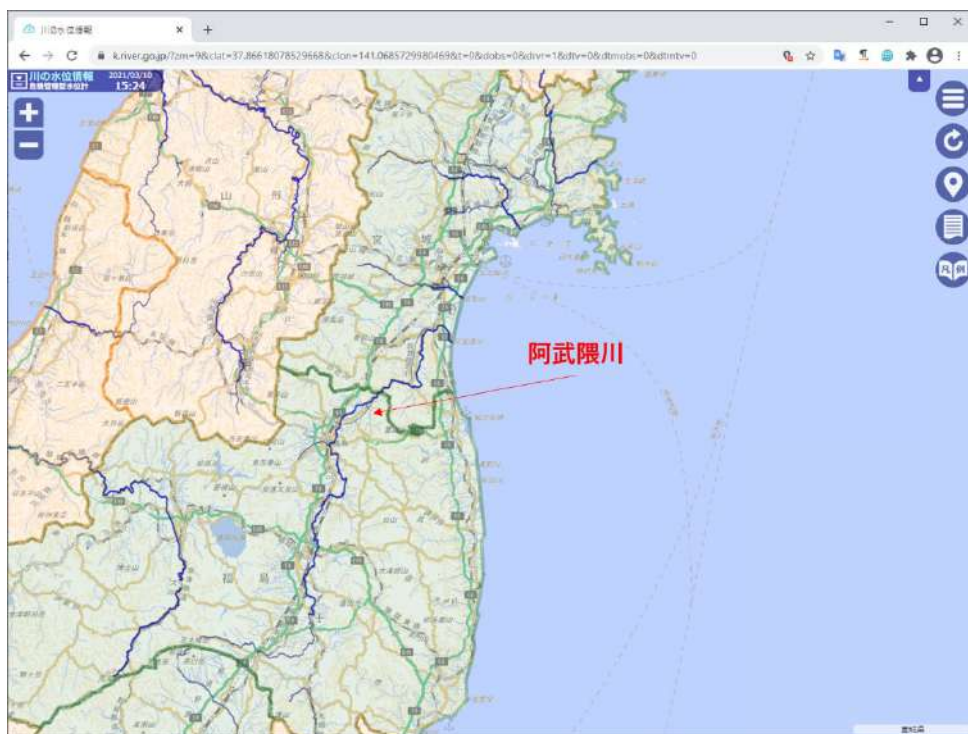


図 3-2 阿武隈川

広瀬川の流域は、図 3-3 の赤枠内（点線）で囲まれた範囲である。広瀬川の延長は 39.0km であり、流域面積は 268.8km²である



図 3-3 阿武隈川水系：広瀬川

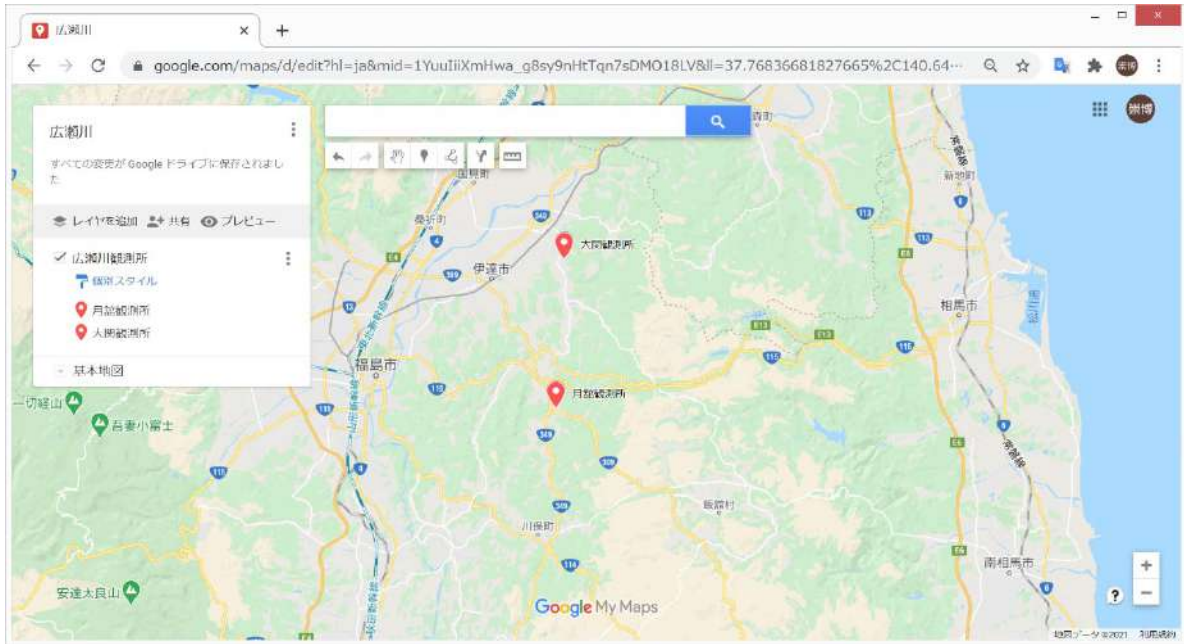


図 3-4 広瀬川の観測所位置①

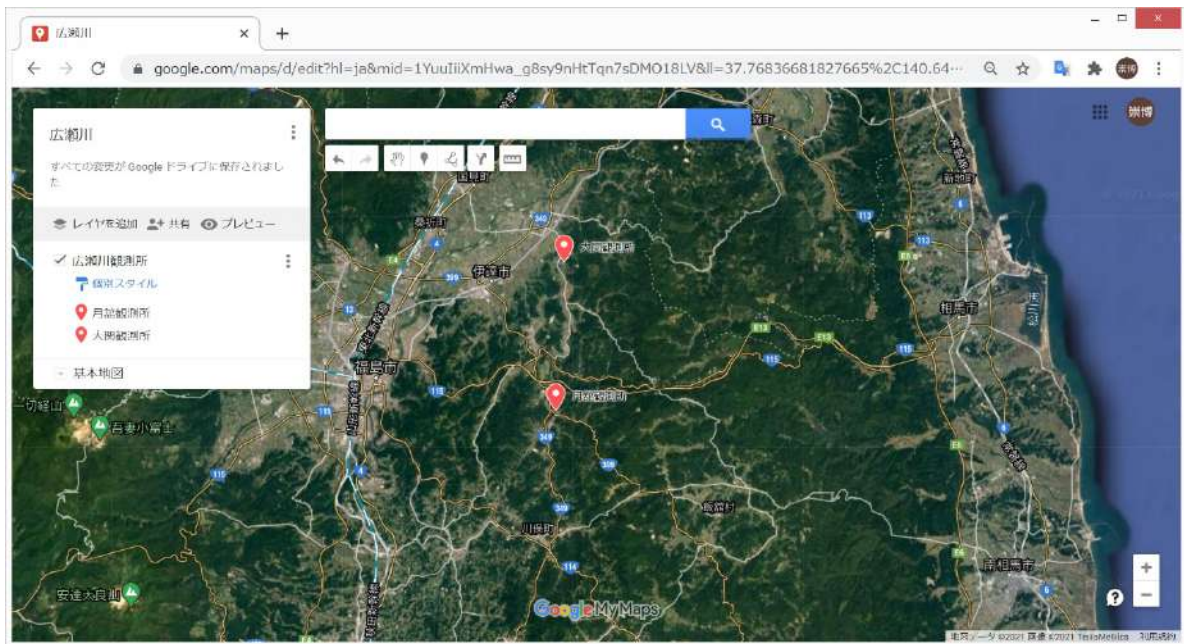


図 3-5 広瀬川の観測所位置②

表 3-1 観測所一覧（広瀬川）

観測データ	観測所	所在地	緯度経度
雨量	月館	福島県伊達市月館町大字布川字中平 11 番地	北緯 37 度 44 分 23 秒 東経 140 度 36 分 46 秒
流量	大関	福島県伊達市梁川町大字大関字中ノ内	北緯 37 度 49 分 57 秒 東経 140 度 37 分 02 秒

3.2 集中定数型モデルの適用と試開発（試解析及び試計算）の結果

本節では、複数の一般に利用されている集中定数型モデルを用いて試計算した結果を示し、モデル間比較結果も報告する。貯留関数モデル（iRIC-SRM 及び試開発コード）、タンクモデル（MERCURY）、合成合理式（試開発）単位関法（試開発）に対し、試解析及び試計算結果を報告する。

3.2.1 観測データの取得方法

以下、阿武隈川水系河川（広瀬川）に対し、試解析及び試計算を行うための必要なデータの取得について記す。試解析及び試計算には以下の2つの入力データが必要となる：

- ・ 降雨量データ
- ・ 流出量データ

① 水門水質データベース

試解析及び試計算に使用する広瀬川（福島県）の降雨量データ及び流出量データは、国土交通省の水門水質データベースから取得する（<http://www1.river.go.jp/>）。広瀬川流域に対する観測データとして、降雨量は月館観測所（北緯 37 度 44 分 23 秒、東経 140 度 36 分 46 秒）から取得し、河川流出量は大関観測所（北緯 37 度 49 分 57 秒、東経 140 度 37 分 02 秒）から取得する。観測所の諸元を表 3-1 に示した。また、それぞれの観測所位置を図 3-3～図 3-5 で表示している。観測データには「欠損」及び「未登録」等の抜けが含まれる場合があり、そのような抜けがない期間として 2015 年 9 月期間の観測データを試解析及び試計算に使用する。

①-1 降雨量（月館観測所）の取得手順

水門水質データベース（<http://www1.river.go.jp/>）を開く。「観測所諸元からの検索」を選択する。



図 3-6 水門水質データベースの WEB サイト

河川名「広瀬川」として、観測所を検索する。雨量として月館観測所を選択する。



図 3-7 「広瀬川」の検索結果（水門水質データベース）

月館観測所の情報は下記の通りである。



図 3-8 月館観測所（降雨量データ）の諸元情報

月館観測所の地図上の位置は下記の通りである。

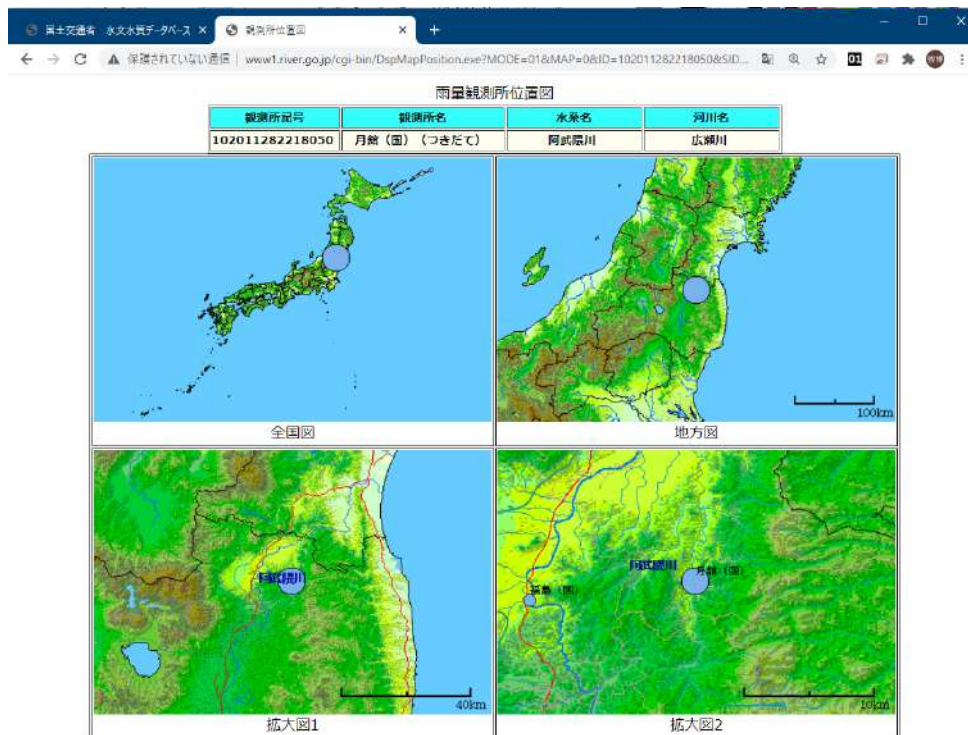


図 3-9 月館観測所（降雨量データ）の位置図

月館観測所の詳細な諸元情報は下記の通りである。

観測所詳細諸元情報		
観測所名	月館(国)(つきだて)	
観測項目	雨量	
観測所記号	102011282218050	
水系名	阿武隈川	
河川名	広瀬川	
観測所管理者名	国土交通省福島河川国道事務所	
観測所種別	第1種	
観測開始時期	1946年09月01日	
位置	所在地	福島県伊達市月館町大字布川字中平11番地
	緯度 世界測地系	北緯 37度44分23秒 東経 140度36分46秒
	経度 日本測地系	北緯 37度44分12秒 東経 140度36分57秒
	標高	130.00m
記録方法	テレメータ	○
	自記紙	○
	電子ロガー	—

図 3-10 月館観測所（降雨量データ）の詳細諸元情報

図 3-8 において「雨量月表検索」を選択して、取得する観測データの期間を指定する。

時間雨量月表検索

観測所記号	観測所名	水系名	河川名
102011282218050	月籠 (国) (つきたて)	阿武隈川	広瀬川

●年月入力
 2015 年
 9 月

参照したい時間雨量月表の西暦年と月を入力し、検索開始ボタンを押してください。なお、時間雨量データ登録状況に●が付与された年にデータが登録されています。

時間雨量データ登録状況 ● データ登録有り

		年(年代の*部)									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
年代	195*										●
	196*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	197*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	198*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	199*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	200*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	201*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	202*	●	●								

図 3-11 月籠観測所の時間雨量月表

観測期間として「2015年9月」を指定したときの結果は下記の通りである。ここで、WEB画面上のフローピーアイコンを押下すると、降雨量のテキストデータが取得できる。

2015年9月 時間雨量月表

	単位: mm/h																							
	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	24時
2015/09/01	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
2015/09/04	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	5.0	4.0	2.0	6.0
2015/09/07	3.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.0	6.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	2.0
2015/09/08	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0
2015/09/09	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	1.0	2.0	1.0	4.0	8.0	6.0	2.0	1.0	1.0	0.0	2.0	0.0	2.0	1.0	2.0	1.0	0.0
2015/09/10	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	3.0	3.0	23.0	6.0	5.0	13.0	7.0	12.0	7.0	29.0	35.0	7.0	1.0	5.0
2015/09/11	1.0	0.0	2.0	3.0	4.0	6.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	2.0	4.0	8.0	9.0	4.0	1.0	2.0	0.0	0.0	2.0
2015/09/18	0.0	1.0	7.0	1.0	0.0	1.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/19	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図 3-12 月籠観測所の時間雨量月表 (2015年9月)

取得した月鑑観測所の2015年9月期間の降雨量データは、下記の通りである。

時間雨量月鑑検索結果
 水系名:阿武隈川
 河川名:広瀬川
 観測所番号(国):
 観測所記号:102011282218020
 日付:1時データ,1時フラグ,,,,,24時データ,24時フラグ
 フラグの意味:※雷定値,†安曇,†赤松

日付	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	24時
2015/09/01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015/09/25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図 3-13 月鑑観測所の時間雨量月表 (2015年9月) のテキストデータ

①-2 流出量 (大関観測所) の取得手順

図 3-7 において、流出量として大関観測所を選択する。

水文水質観測所情報

観測所名	大関 (おおげき)	
観測所項目	水位流量	
観測所記号	302011282218020	
水系名	阿武隈川	
河川名	広瀬川	
所在地	福島県伊達市梁川町大字大関字中ノ内	
緯度経度	北緯 37度49分57秒 東経 140度37分02秒	
最新の零点高	T.P. 53.564m	
零点高履歴	T.P. 53.564m	2005/01/01 1:00~
	T.P. 53.750m	1962/02/01 1:00~2004/12/31 24:00

位置図 観測所詳細図元

水位月表検索 水位年表検索 水位表検索 任意期間水位検索 川の防災情報 雨量水位リンク

流量月表検索 流量年表検索 流量表検索 任意期間流量検索

図 3-14 大関観測所 (流出量データ) の諸元情報

大関観測所の地図上の位置は下記の通りである。

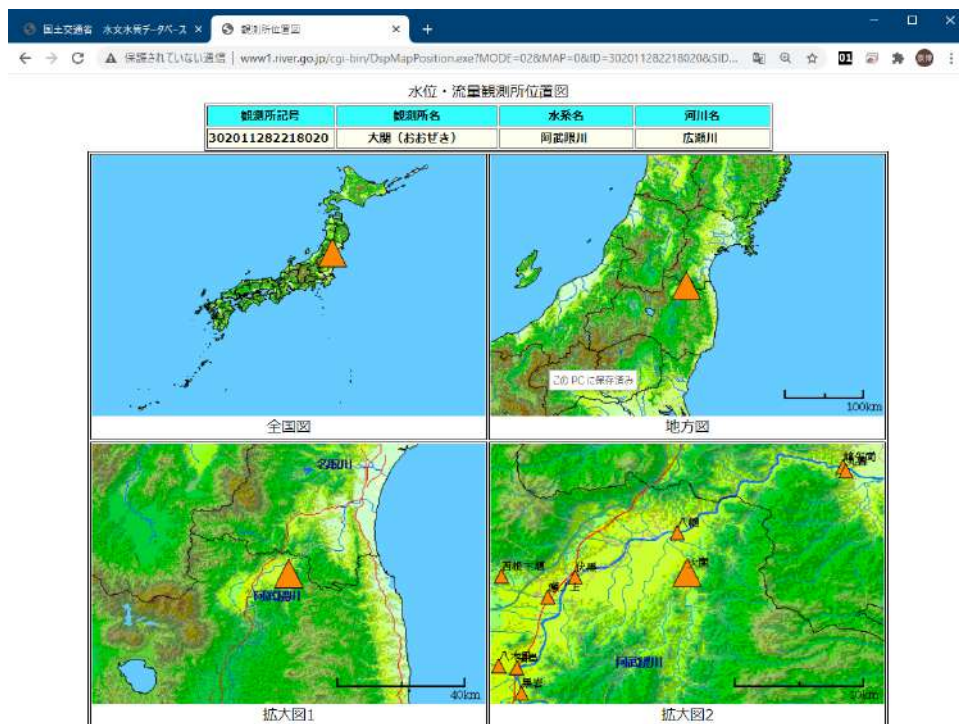


図 3-15 大関観測所（流出量データ）の位置図

大関観測所の詳細な諸元情報は下記の通りである。

観測所詳細諸元情報		
観測所名	大関（おおせき）	
観測項目	水位流量	
観測所記号	302011282218020	
水系名	阿武隈川	
河川名	広瀬川	
観測所管理者名	国土交通省福島河川国道事務所	
観測所種別	第3種	
観測開始時期	1962年02月01日	
位置	左右岸の別	
	河口または合流点からの距離	6.00km
	所在地	福島県伊達市梁川町大字大関字中ノ内
経度	緯度 世界測地系	北緯 37度49分57秒 東経 140度37分02秒
	経度 日本測地系	北緯 37度49分46秒 東経 140度14分04秒
記録方法	テレメータ	<input type="radio"/>
	自記紙	<input type="radio"/>
	電子ロガー	-
観測所諸元	流域面積	247.00km ²
	零点高	53.564m
	水防団待機水位	:m
	はん濫注意水位	:m
	遊離判断水位	:m
	はん濫危険水位	:m
	計画高水位	:m
計画高水流量	:m ³ /s	

図 3-16 大関観測所（流出量データ）の詳細諸元情報

図 3-14 において「流量月表検索」を選択して、取得する観測データの期間を指定する。

時刻流量月表検索

観測所記号	観測所名	水系名	河川名
302011282218020	大関 (おおせき)	阿武隈川	広瀬川

●年月入力
 2015年
 9月

参照したい時刻流量月表の西暦年と月を入力し、検索開始ボタンを押してください。なお、時刻流量データ登録状況に●が付与された年にデータが登録されています。

時刻流量データ登録状況 ●データ登録有り

		年(年代の*部)																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
年代	198*																			
	199*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	200*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	201*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

図 3-17 大関観測所の時刻流量月表

観測期間として「2015年9月」を指定したときの結果は下記の通りである。ここで、WEB画面上のフローピーアイコンを押下すると、流出量のテキストデータが取得できる。

時刻流量月表検索結果

観測所記号	観測所名	水系名	河川名
302011282218020	大関 (おおせき)	阿武隈川	広瀬川

2015年9月 時刻流量月表

	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時
2015/09/01	6.85	6.85	6.85	7.24	7.24	6.48	6.48	6.11	5.76	6.85	5.76	6.48	6.85	6.48	6.48	6.85	6.48	6.85	6.48
2015/09/02	5.76	5.76	5.76	5.08	5.41	5.08	4.45	4.15	4.45	4.15	3.85	3.85	2.12	4.15	3.85	3.85	4.15	3.85	3.85
2015/09/03	3.31	3.31	3.31	3.05	3.05	3.57	3.05	2.80	3.05	2.80	3.31	3.05	2.80	3.05	2.80	3.05	3.05	2.80	2.56
2015/09/04	2.80	2.80	2.80	2.80	3.05	3.31	3.85	4.15	4.45	4.45	4.76	4.76	4.45	4.45	3.85	3.57	3.57	3.05	3.05
2015/09/05	2.80	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.33	2.33	2.33	2.33	2.56	2.33	2.33	2.33	2.33	2.56	2.33	2.33
2015/09/06	2.12	2.33	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	1.91	1.19
2015/09/07	27.41	52.67	54.42	46.80	35.39	34.69	28.03	27.41	23.80	22.09	17.34	20.44	16.85	20.44	26.79	25.57	28.67	28.03	28.03
2015/09/08	20.44	22.09	25.57	28.03	31.94	27.41	29.31	29.95	26.79	26.17	24.38	23.22	20.98	19.38	20.44	18.35	17.84	20.98	18.35
2015/09/09	15.89	18.86	18.35	20.44	19.91	23.80	25.57	29.31	28.03	45.99	56.19	68.38	80.69	95.18	108.38	108.38	125.08	78.57	74.41
2015/09/10	53.54	57.08	50.12	46.80	54.42	45.19	43.60	40.52	41.28	39.76	34.69	39.76	41.28	97.52	172.85	210.70	239.24	252.29	279.44
2015/09/11	446.00	312.17	279.44	244.79	210.70	242.93	210.70	190.48	200.46	133.19	119.82	94.03	89.47	86.13	85.02	87.23	90.60	60.73	61.66
2015/09/12	40.52	46.80	39.76	40.52	37.55	36.10	36.82	35.39	35.39	31.94	31.27	38.28	30.61	30.61	29.31	24.97	23.80	28.03	23.80
2015/09/13	20.44	23.80	18.86	21.53	16.85	18.35	19.38	18.86	17.34	20.44	18.35	16.36	16.36	16.36	15.89	15.89	16.36	16.85	14.95
2015/09/14	12.18	13.17	15.42	13.17	11.68	11.19	10.71	12.70	12.70	13.17	13.60	12.18	11.68	11.19	10.71	12.70	11.19	10.71	11.19
2015/09/15	10.71	9.78	10.71	9.33	8.89	9.78	8.89	9.78	8.46	9.78	8.89	9.33	9.33	9.33	9.33	9.33	8.89	9.33	8.04
2015/09/16	7.64	8.46	8.04	8.04	6.48	7.64	7.64	8.46	7.64	7.24	7.64	7.24	7.64	7.24	7.24	8.04	7.64	7.64	7.24
2015/09/17	7.64	5.76	7.64	6.48	6.48	6.11	6.48	6.48	6.11	6.85	6.48	6.48	7.64	8.46	10.24	10.24	11.68	18.86	18.86
2015/09/18	28.03	24.38	26.17	27.41	37.55	40.52	30.61	34.69	30.61	29.31	25.57	24.38	25.57	21.53	22.65	18.86	18.86	18.86	15.42
2015/09/19	15.42	17.84	16.36	15.89	15.89	14.05	10.24	11.68	11.68	12.18	13.17	12.70	13.17	11.68	11.68	11.68	10.24	12.70	9.33
2015/09/20	9.78	8.89	8.04	9.33	8.46	9.33	8.46	9.33	8.46	8.04	8.04	7.64	7.64	8.89	8.04	7.24	7.24	7.64	6.85
2015/09/21	7.64	7.24	6.85	7.64	7.24	6.85	6.85	6.48	6.11	7.24	6.11	6.48	6.85	6.85	5.76	6.11	6.85	6.48	6.48
2015/09/22	5.76	6.11	5.41	5.76	5.76	5.41	5.76	5.76	5.41	4.76	5.41	5.76	6.11	6.48	6.11	5.76	5.76	5.41	5.41

図 3-18 大関観測所の時刻流量月表 (2015年9月)

取得した大関観測所の 2015 年 9 月期間の流出データは、下記の通りである。

The screenshot shows a web browser window with a URL ending in '.dat'. The page content is a text-based table of precipitation data. The header includes:

- 時刻雨量月表検索結果
- 水系名 阿武隈川
- 河川名 広瀬川
- 観測所名 月館 (国)
- 観測所記号 102011282218050
- # 日付, 1時データ, 1時フラグ, ..., 24時データ, 24時フラグ
- # フラグの意味: * 暫定値, \$ 欠測, - 未登録

 The data rows follow a pattern: Day (e.g., 2015/09/01), Hourly precipitation values (e.g., 0.00, 0.40, 0.05, ...), and Hourly flags (e.g., 0.00, 0.00, 0.00, ...). The data ends on 2015/09/25.

図 3-19 大関観測所の時間雨量月表 (2015 年 9 月) のテキストデータ

② 観測データのフォーマット変換

国土交通省の水門水質データベースから得られる降水量や流出量の観測データは、下記のようなデータフォーマットで与えられる。

The screenshot shows a text editor window with the following content:

- 1 時間雨量月表検索結果
- 2 水系名 阿武隈川
- 3 河川名 広瀬川
- 4 観測所名 月館 (国)
- 5 観測所記号 102011282218050
- 6 #
- 7 # 日付, 1時データ, 1時フラグ, ..., 24時データ, 24時フラグ
- 8 # フラグの意味: * 暫定値, \$ 欠測, - 未登録
- 9 #
- 10 # 1時, 2時, 3時, 4時, 5時, 6時, 7時, 8時, 9時, 10時, 11時, 12時, 13時, 1
- 11 2015/09/01, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 1.00, 0.00,
- 12 2015/09/02, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 13 2015/09/03, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 14 2015/09/04, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 5.00,
- 15 2015/09/05, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 16 2015/09/06, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 17 2015/09/07, 3.00, 0.00, 0.00, 1.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 1.00, 0.00,
- 18 2015/09/08, 2.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 19 2015/09/09, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 2.00, 0.00,
- 20 2015/09/10, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 1.00, 0.00, 0.00,
- 21 2015/09/11, 1.00, 0.00, 2.00, 3.00, 4.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 22 2015/09/12, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 23 2015/09/13, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 24 2015/09/14, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 25 2015/09/15, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 26 2015/09/16, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,
- 27 2015/09/17, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00,

図 3-20 水門水質データベースから得られるデータフォーマット

本業務では Python スクリプトを作成し、図 3-21 と図 3-22 のようなデータ形式に整形した。

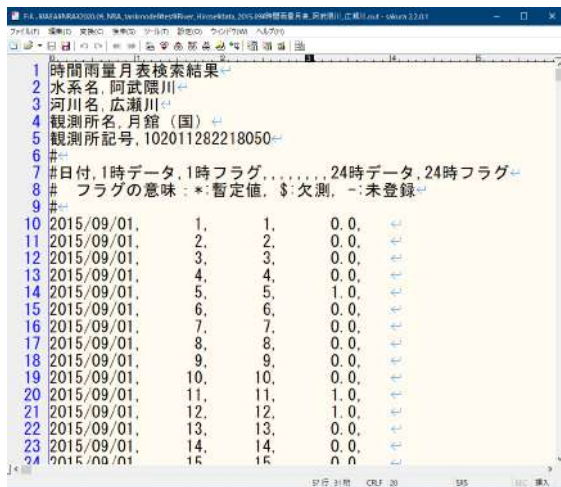


図 3-21 フォーマット整形①

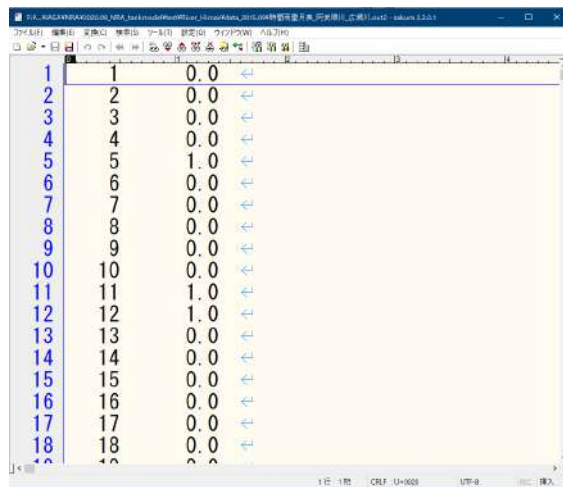


図 3-22 フォーマット整形②

③ 観測データ

③-1 1週間分 (2015/09/17~2015/09/23)

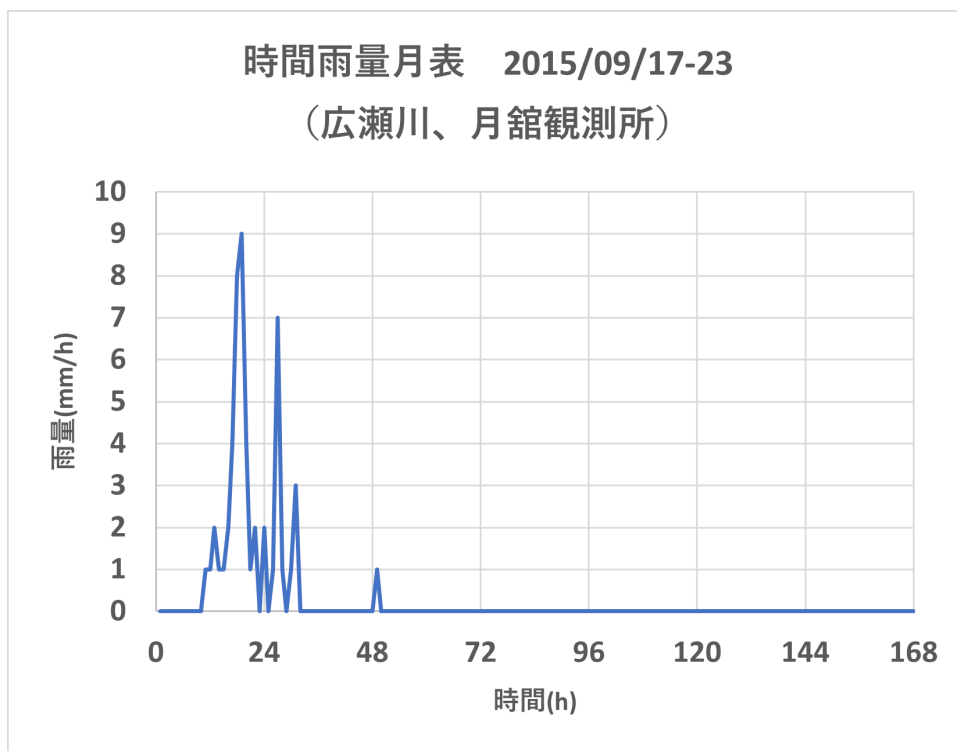


図 3-23 広瀬川、降雨量、2015/09/17~2015/09/23

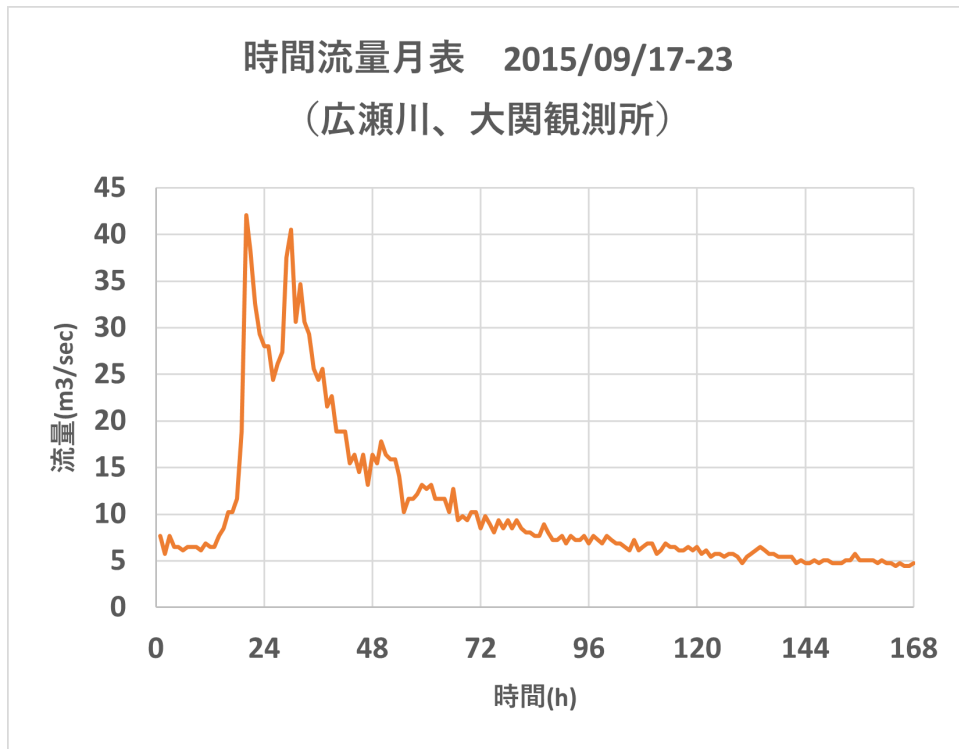


図 3-24 広瀬川、流出量、2015/09/17～2015/09/23

③-2 1カ月分 (2015/09)

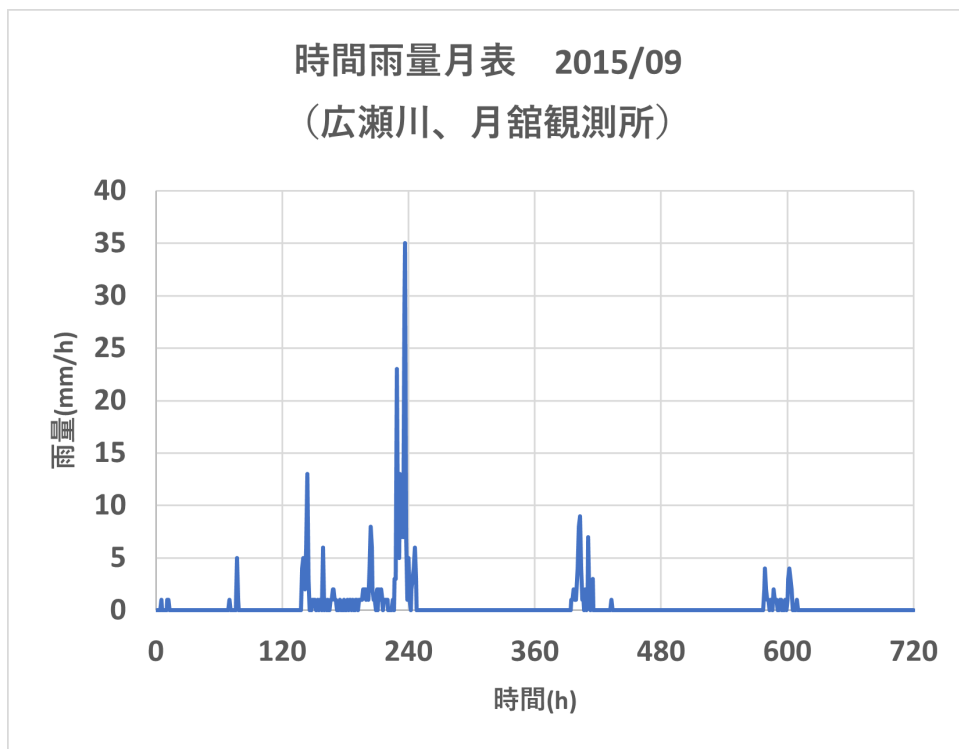


図 3-25 広瀬川、降雨量、2015/09/01～2015/09/30

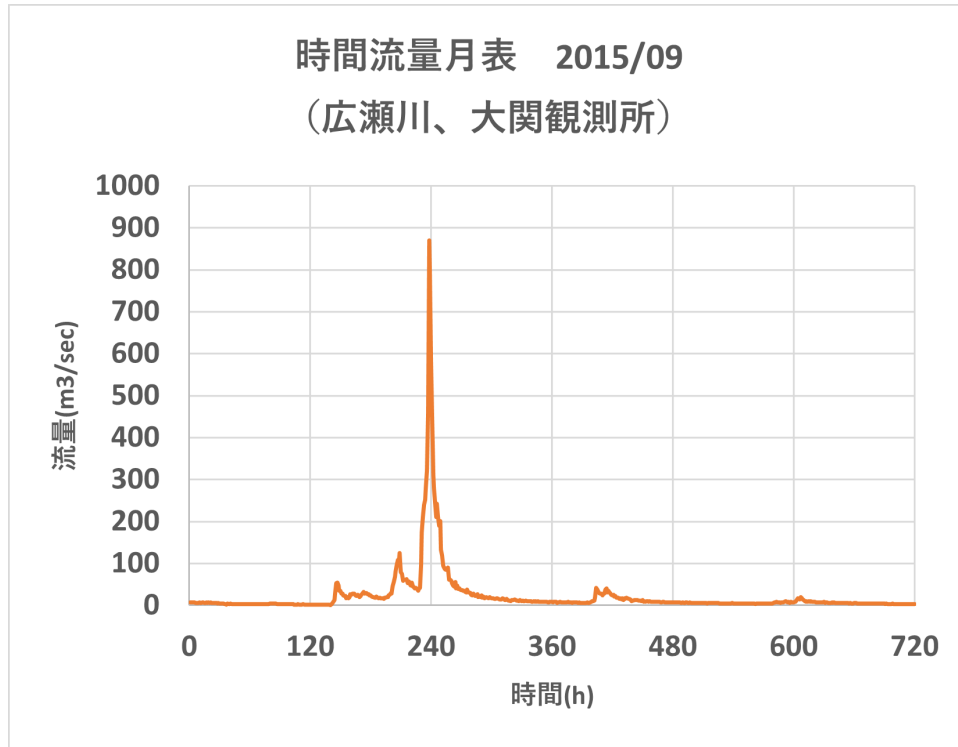


図 3-26 広瀬川、流出量、2015/09/17～2015/09/30

3.2.2 誤差評価の方法

試算の際、下記の2つの誤差評価関数を使用して、流出量の計算値と観測値の誤差を測る。

① NSE(Nash-Sutcliffe efficiency)

NSE(Nash-Sutcliffe efficiency)は、水門モデルの予測性能を評価する際に使われる。式(3-1)によって定義される。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (3-1)$$

ここで、 Q_m^t と Q_o^t は、それぞれ時刻 t の計算値と観測値である。また、 \bar{Q}_o は観測値の時間平均として定義する。NSEはその値が1.0に違いほどモデル再現性が高く、0.7以上で良好な再現性があるとされている。NSEの使用例については文献[3-1]で確認できる。

② RSE(Relative Squared Error)

相対二乗誤差 RSE(Relative Squared Error)は式(3-2)で定義される。

$$RSE = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (3-2)$$

NSE と RSE の間には、 $NSE = 1 - RSE$ の関係が成立する。

3.2.3 貯留関数モデル (iRIC-SRM, 自主試開発 SRM)

貯留関数モデル[3-2~3-5] (2章参照) として、公開コードの iRIC-SRM を用いる他、本事業で試開発したコード SRM を用いて試解析及び試計算を行う。

① モデル概要

1 段タンク型貯留関数モデルの基礎式は次式で与えられる (詳細は 2 章参照)。

$$\frac{ds}{dt} = r - q - b + q_0 \quad (3-3)$$

$$s = k_{11}q^{p_1} + k_{12}\frac{d}{dt}(q^{p_2}) \quad (3-4)$$

$$b = k_{13}q \quad (3-5)$$

$$q_0 = q_B \exp(-\lambda t) \quad (3-6)$$

但し、

$$k_{11} = c_1 A^{0.24}, \quad k_{12} = c_2 k_{11}^2 (\bar{r})^{-0.2648}, \quad k_{13} = c_3 - 1 \quad (3-7)$$

ここで、 $s(mm)$ は貯留高、 $r(mm/h)$ は観測雨量、 $q(mm/h)$ は観測流出高、 $b(mm/h)$ は損失高、 $q_0(mm/h)$ は規定流出高、 $q_B(mm/h)$ は初期流出高、 k_{11}, k_{12} は貯留係数、 k_{13} は損失係数、 p_1, p_2 は貯留指数、 λ は減衰係数、 $A(km^2)$ は流域面積、 $\bar{r}(mm/h)$ は平均雨量強度、 c_1, c_2, c_3 はモデル定数。また、貯留係数 p_1, p_2 は、表面流が卓越する比較的大きな洪水を解析対象とする場合、 Manning 則を想定すると $p_1 = 0.6, p_2 = 0.4648$ に近似できる。また、減衰係数 λ は、北海道内で発生した 650 例の洪水を解析した結果 $\lambda = 0.019$ が得られている。

② モデル定数の最適化

貯留関数モデル (Storage Routing Model, iRIC-SRM) のパラメータを最適化する手法は、文献[3-3]を参照。尚、当該文献では、非線形方程式の数値解析手法で多用されているニュートン法 (Newton-Raphson Method) により、モデル定数を最適化する。ニュートン法では評価関数の一次微分係数を算定し、モデル定数の補正量を決定する。最適化の流れについては、文献から抜粋し修正を加えた。

②-1 1 段タンク型貯留関数モデルの解法 (線形化による非線形方程式の数値解法)

1 段タンク型貯留関数型モデルは下記のように定義される。

$$s = k_{11}q^{p_1} + k_{12}\frac{d}{dt}(q^{p_2}) \quad (3-8)$$

$$\frac{ds}{dt} = r - q - b + q_0 \quad (3-9)$$

$$b = k_{13}q \quad (3-10)$$

$$q_0 = q_B \exp(-\lambda t) \quad (3-11)$$

ここに、 s : 貯留高 (mm)、 r : 観測雨量(mm/h)、 q : 観測流出高(mm/h)、 b : 損失高(mm/h)、 q_0 : 基底流出高(mm/h)、 q_B : 初期流出高(mm/h)、 k_{11}, k_{12} : 貯留係数、 k_{13} : 損失係数、 p_1, p_2 : 貯留指数、 λ : 減衰係数。モデル定数の p_1, p_2 に関しては、表面流が卓越する比較的大きな出水を解析対象とする場合、マニング則に従うと仮定し、以下の値に固定した。

$$p_1 = 0.6 \quad (3-12)$$

$$p_2 = 0.4648 \quad (3-13)$$

モデル定数の k_1, k_2 については、既往研究成果から次の関数形を仮定する。

$$k_{11} = c_{11} A^{0.24} \quad (3-14)$$

$$k_{12} = c_{12} k_{11} (\bar{r})^{-0.2648} \quad (3-15)$$

ここに、 A は流域面積(km²)、 \bar{r} は平均雨量強度(mm/h)、 c_{11}, c_{12} は未知係数である。

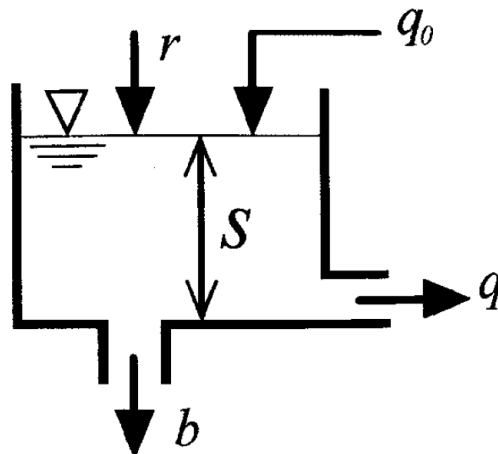


図 3-27 1 段タンク型貯留関数モデル

式(3-8)～(3-11)の貯留関数モデルの解法にあたって、次の変数変換を行う。

$$y_1 = q^{p_2} \quad (3-16)$$

$$y_2 = \frac{d}{dt} (q^{p_2}) \quad (3-17)$$

式(3-16)と(3-17)により、非線形連立常微分方程式(3-18)と(3-19)を得る。

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2 \quad (3-18)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = -\frac{k_{11} p_1}{k_{12} p_2} y_1^{p_1/p_2-1} y_2 - \frac{c_{13}}{k_{12}} y_1^{1/p_2} + \frac{1}{k_{12}} (r + q_0) \quad (3-19)$$

ここに、

$$c_3 = 1 + k_{13} \quad (3-20)$$

式(3-18)と(3-19)さらに式(3-21)のようにベクトル表示できる。

$$\frac{dY}{dt} = F(Y) \quad (3-21)$$

ここに、

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad F(Y) = \begin{bmatrix} f_1(y_1, y_2) \\ f_2(y_1, y_2) \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

$$f_1(y_1, y_2) = y_2 \quad (3-23)$$

$$f_2(y_1, y_2) = -\frac{k_{11} p_1}{k_{12} p_2} y_1^{p_1/p_2-1} y_2 - \frac{c_{13}}{k_{12}} y_1^{1/p_2} + \frac{1}{k_{12}} (r + q_0) \quad (3-24)$$

2階非線形方程式(3-21)を近似線形化する。1ステップ前におけるYの値をY*とし、F(Y)を1次の項までTaylor級数展開すると、式(3-21)は式(3-30)に変換される。

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2 \quad (3-25)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_0 + \frac{1}{k_2} (r + q_0) \quad (3-26)$$

$$a_1 = \frac{\partial f_2}{\partial y_1} = -\frac{k_{11} p_1}{k_{12} p_2} \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) (y_1^*)^{p_1/p_2-2} (y_2^*) - \frac{c_{13}}{k_{12} p_2} (y_1^*)^{1/p_2-1} \quad (3-27)$$

$$a_2 = \frac{\partial f_2}{\partial y_2} = -\frac{k_{11} p_1}{k_{12} p_2} (y_1^*)^{p_1/p_2-1} \quad (3-28)$$

$$a_0 = \frac{k_{11} p_1}{k_{12} p_2} \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) (y_1^*)^{p_1/p_2-1} (y_2^*) + \frac{c_{13}}{k_{12}} \left(\frac{1}{p_2} - 1 \right) (y_1^*)^{1/p_2} \quad (3-29)$$

$$\frac{dY}{dt} = A_1 Y + B \quad (3-30)$$

ここに、

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

$$b_2 = a_0 + \frac{1}{k_2} (r + q_b) \quad (3-32)$$

式(3-30)を数値計算の便宜上、離散方程式に変換する。A₁(Y*)とB(Y*)が定係数行列の時、kを任意のタイム・ステップとして、式(3-30)は差分方程式(3-33)に変換できる。

$$Y_{k+1} = \Phi Y_k + \Gamma B_k \quad (3-33)$$

ここに、

$$Y_k = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}_k, B_k = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix}_k, \quad (3-34)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

尚、 Φ および Γ は次の級数和で求められる。

$$\begin{aligned} \Phi &= \exp(AT) \\ &= I + AT + \frac{1}{2}(AT)^2 + \frac{1}{6}(AT)^3 + \dots + \frac{1}{m!}(AT)^m \end{aligned} \quad (3-36)$$

$$\begin{aligned} \Gamma &= \{\exp(AT) - I\}A^{-1} \\ &= T \left\{ I + \frac{1}{2}AT + \frac{1}{6}(AT)^2 + \frac{1}{24}(AT)^3 + \dots + \frac{1}{m!}(AT)^{m-1} \right\} \end{aligned} \quad (3-37)$$

ここで、 I は単位行列、 T は計算時間間隔。通常、級数は第5項まで展開すれば十分なので、 $m=4$ としたときの Φ および Γ の要素を求めると、次の通りである。

$$\phi_{11} = 1 + \frac{1}{2}a_1T^2 + \frac{1}{6}a_1a_2T^3 + \frac{1}{24}a_1a_3T^4 \quad (3-38)$$

$$\phi_{12} = T \left(1 + \frac{1}{2}a_2T + \frac{1}{6}a_3T^2 + \frac{1}{24}a_2a_4T^3 \right) \quad (3-39)$$

$$\phi_{21} = a_1\phi_{12} \quad (3-40)$$

$$\phi_{22} = 1 + a_2T + \frac{1}{2}a_3T^2 + \frac{1}{6}a_2a_4T^3 + \frac{1}{24}(a_1a_3 + a_2^2a_4)T^4 \quad (3-41)$$

$$\gamma_{11} = T \left(1 + \frac{1}{6}a_1T^2 + \frac{1}{24}a_1a_2T^3 \right) \quad (3-42)$$

$$\gamma_{12} = T^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{6}a_2T + \frac{1}{24}a_3T^2 \right) \quad (3-43)$$

$$\gamma_{21} = a_1\gamma_{12} \quad (3-44)$$

$$\gamma_{22} = \phi_{12} \quad (3-45)$$

ここに、

$$a_3 = a_1 + a_2^2, \quad a_4 = a_1 + a_3 \quad (3-46)$$

所要流出高 q は、漸化式(3-33)により任意のタイムステップ k における y_1 と y_2 の値が逐次計算されるので、式(3-16)と(3-17)を用いて次のように求められる。

$$q = y_1^{1/p_2} \quad (3-47)$$

②-2 感度係数の算定

今、モデル定数が時間的に変化しないと仮定し、式(3-18)と(3-19)における変数 y_1 と y_2 に関する微分方程式をモデル定数 k_{11}, k_{12}, c_{13} で微分すると式(3-48)が得られる。

$$\frac{dU}{dt} = A_1 U + D \quad (3-48)$$

ここに、

$$U = \left[\frac{\partial y_1}{\partial k_{11}} \quad \frac{\partial y_1}{\partial k_{12}} \quad \frac{\partial y_1}{\partial c_{13}} \quad \frac{\partial y_2}{\partial k_{11}} \quad \frac{\partial y_2}{\partial k_{12}} \quad \frac{\partial y_2}{\partial c_{13}} \right]^T \quad (3-49)$$

$$A_1 = \frac{\partial F}{\partial Y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_1 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & a_2 \end{bmatrix} \quad (3-50)$$

$$D = [0 \quad 0 \quad 0 \quad d_1 \quad d_2 \quad d_3]^T \quad (3-51)$$

$$d_1 = \frac{\partial f_2}{\partial k_{11}} = -\frac{1}{k_{12}} \frac{p_1}{p_2} (y_1^*)^{p_1/p_2 - 1} (y_2^*) \quad (3-52)$$

$$d_2 = \frac{\partial f_2}{\partial k_{12}} = \frac{1}{k_{12}^2} \left\{ k_{11} \frac{p_1}{p_2} (y_1^*)^{p_1/p_2 - 1} (y_2^*) + c_{13} (y_1^*)^{1/p_2} - (r + q_0) \right\} \quad (3-53)$$

$$d_3 = \frac{\partial f_2}{\partial c_{13}} = -\frac{1}{k_{12}} (y_1^*)^{1/p_2} \quad (3-54)$$

式(3-49)のベクトル U はモデル定数(k_{11}, k_{12}, c_{13})の変化の変数(y_1, y_2)の変化に及ぼす影響と解釈されるので、しばしば「感度係数」といわれ、感度係数に関する方程式(3-48)は「感度方程式」といわれる。感度方程式の重要な性質として、式(3-30)のシステム方程式と同一形式になる。システム方程式と同様に、式(3-48)は式(3-55)の差分方程式に変換される。

$$U_{k+1} = \Phi_1 U_k + \Gamma_1 D_k \quad (3-55)$$

ここに、

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \phi_{11} & 0 & 0 & \phi_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \phi_{11} & 0 & 0 & \phi_{12} & 0 \\ 0 & 0 & \phi_{11} & 0 & 0 & \phi_{12} \\ \phi_{21} & 0 & 0 & \phi_{22} & 0 & 0 \\ 0 & \phi_{21} & 0 & 0 & \phi_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \phi_{21} & 0 & 0 & \phi_{22} \end{bmatrix} \quad (3-56)$$

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & 0 & 0 & \gamma_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{11} & 0 & 0 & \gamma_{12} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{11} & 0 & 0 & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & 0 & 0 & \gamma_{22} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{21} & 0 & 0 & \gamma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{21} & 0 & 0 & \gamma_{22} \end{bmatrix} \quad (3-57)$$

係数行列 Φ_1 および Γ_1 は(6×6)の正方行列であり、式(3-33)と同じ要素で構成されることがわかる。 Φ_1 と Γ_1 の小行列が対角行列になるのは、式(3-50)の行列 A_1 の小行列が対角行列になっていることによる。また、 $\phi_{11} \sim \phi_{12}$ および $\gamma_{11} \sim \gamma_{12}$ の要素は、式(3-38)～(3-41)と(3-42)～(3-45)に示されている係数と同一である。従って、感度係数方程式(3-55)の解法は非常に容易となる。

②-3 流出高 q に関する感度係数

流出高 q に関する感度係数は、式(3-47)を用いて次のように計算される。

$$\frac{\partial q}{\partial k_{11}} = \frac{1}{p_2} y_1^{1/p_2-1} \frac{\partial y_1}{\partial k_{11}} \quad (3-58)$$

$$\frac{\partial q}{\partial k_{12}} = \frac{1}{p_2} y_1^{1/p_2-1} \frac{\partial y_1}{\partial k_{12}} \quad (3-59)$$

$$\frac{\partial q}{\partial c_{13}} = \frac{1}{p_2} y_1^{1/p_2-1} \frac{\partial y_1}{\partial c_{13}} \quad (3-60)$$

式(3-60)の右辺に示される感度係数は、式(3-49)のベクトル U の3要素から求められる。さらに c_{11} と c_{12} の最適値を求めるためには、 c_{11} と c_{12} に関する感度係数が必要となるが、これらは式(3-14)と(3-15)と(3-58)～(3-60)を用いて、次式で計算される。

$$\frac{\partial q}{\partial c_{11}} = \frac{\partial q}{\partial k_{11}} \frac{\partial k_{11}}{\partial c_{11}} = (A^{0.24}) \frac{\partial q}{\partial k_{11}} \quad (3-61)$$

$$\frac{\partial q}{\partial c_{12}} = \frac{\partial q}{\partial k_{12}} \frac{\partial k_{12}}{\partial c_{12}} = (k_{11}^2 \bar{r}^{-0.2648}) \frac{\partial q}{\partial k_{12}} \quad (3-62)$$

②-4 Newton 法による最適化手法の適用

モデル定数の最適化は、観測流量 q_i^* と計算流量 $q_i(c_{11}, c_{12}, c_{13})$ の誤差 $e_i(c_{11}, c_{12}, c_{13})$ ができるだけ小さくなるように定数を同定することを目的としている。よって、本報告では、誤差2乗和を最小とする目的関数(評価関数) $J(c_{11}, c_{12}, c_{13})$ を、カイ2乗基準を用いて次式のように表す。

$$\text{Min}_{c_{11}, c_{12}, c_{13}} J(c_{11}, c_{12}, c_{13}) = \sum_{i=1}^N e_i^2(c_{11}, c_{12}, c_{13}) \quad (3-63)$$

ここに、 $J(c_{11}, c_{12}, c_{13})$ は目的関数、 N は標本数、 $e_i(c_{11}, c_{12}, c_{13})$ は誤差項。また、誤差項は次式で与えられる。

$$e_i(c_{11}, c_{12}, c_{13}) = \frac{q_i^* - q_i(c_{11}, c_{12}, c_{13})}{\sqrt{q_i^*}} \quad (3-64)$$

ここに、 q_i^* は観測流量、 $q_i(c_{11}, c_{12}, c_{13})$ は計算流量。今、新たにモデル定数ベクトル K を定義する。

$$K = [c_{11} \quad c_{12} \quad c_{13}]^T \quad (3-65)$$

ニュートン法による最適化では、式(3-63)を満足するように最適ベクトル値 K を繰り返し法によって探索する。すなわち、 $(m+1)$ ステップにおける K の値を K^{m+1} 、 m ステップにおける K の値を K^m としたとき、次式が成立するとして補正ベクトル ΔK をいかに客観的かつ迅速に算出するかが主要課題となる。

$$K^{m+1} = K^m + \Delta K \quad (3-66)$$

$$\Delta K = [\Delta c_{11} \quad \Delta c_{12} \quad \Delta c_{13}]^T \quad (3-67)$$

②-5 目的関数の評価基準の最小化条件

$(m+1)$ ステップでの誤差項 $e_i(K^{m+1})$ を、 K^m のまわりで1次の項までTaylor級数展開すると次のようになる。

$$\begin{aligned} e_i(K^{m+1}) = e_i(K^m) &+ \frac{\partial e_i(K^m)}{\partial c_{11}} (c_{11}^{m+1} - c_{11}^m) \\ &+ \frac{\partial e_i(K^m)}{\partial c_{12}} (c_{12}^{m+1} - c_{12}^m) \\ &+ \frac{\partial e_i(K^m)}{\partial c_{13}} (c_{13}^{m+1} - c_{13}^m) \end{aligned} \quad (3-68)$$

式(3-68)の誤差項に関する感度係数は、式(3-58)～(3-60)と(3-61)～(3-62)および式(3-64)を用いて、次式で計算される。

$$\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial c_{11}} = -\frac{1}{\sqrt{q_i^*}} \frac{\partial q_i(K^m)}{\partial c_{11}} = -w_{i1} \quad (3-69)$$

$$\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial c_{12}} = -\frac{1}{\sqrt{q_i^*}} \frac{\partial q_i(K^m)}{\partial c_{12}} = -w_{i2} \quad (3-70)$$

$$\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial c_{13}} = -\frac{1}{\sqrt{q_i^*}} \frac{\partial q_i(K^m)}{\partial c_{13}} = -w_{i3} \quad (3-71)$$

式(3-69)～(3-71)の関係式を用いると、式(3-68)は以下のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} e_i(K^{m+1}) &= e_i(K^m) - w_{i1}\Delta c_{11} - w_{i2}\Delta c_{12} - w_{i3}\Delta c_{13} \\ &= E - W\Delta K, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (3-72)$$

ここで、下記の式が成立する。

$$E = [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_i \ \cdots \ e_N]^T \quad (3-73)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{i1} & w_{i2} & w_{i3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{N1} & w_{N2} & w_{N3} \end{bmatrix} \quad (3-74)$$

$$\Delta K = \begin{bmatrix} \Delta c_{11} \\ \Delta c_{12} \\ \Delta c_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^{m+1} - c_{11}^m \\ c_{12}^{m+1} - c_{12}^m \\ c_{13}^{m+1} - c_{13}^m \end{bmatrix} \quad (3-75)$$

すなわち、 E は観測流量と計算流量の差からなる($N \times 1$)行列、 W は感度係数からなる($N \times 3$)行列、 ΔK はモデル定数の補正項からなる(3×1)行列である。式(3-63)の目的関数のもとに K^{m+1} の値を算出することになるが、 K^m は既知であるので、目的関数の評価基準は次のように変換される。

$$\begin{aligned} \text{Min}_{\Delta K} J(K) &= \sum \{e_i(K^m) - w_{i1}\Delta c_{11} - w_{i2}\Delta c_{12} - w_{i3}\Delta c_{13}\}^2 \\ &= (E - W\Delta K)^T (E - W\Delta K) \\ &= [E^T E] - 2(\Delta K)^T [W^T E] + (\Delta K)^T [W^T W] (\Delta K) \end{aligned} \quad (3-76)$$

式(3-76)の最小化条件は次式で与えられる。

$$\frac{\partial J(K)}{\partial (\Delta K)} = -2[W^T E] + 2[W^T W]\Delta K = 0 \quad (3-77)$$

式(3-77)から補正ベクトル ΔK は次式で計算される。

$$\Delta K = [W^T W]^{-1} [W^T E] \quad (3-78)$$

式(3-78)を解くにあたり、最適値すなわち $|\Delta K|$ の値が十分に小さい値に収束するか、 $|\Delta K/K^m|$ が許容限界値（通常は0.001~0.01程度）に収束するまで繰り返される。従って、効率よく ΔK を計算する必要がある。

③ iRIC-SRM について

iRIC (International River Interface Cooperative) ソフトウェアは、河川をはじめ水や土砂など水工学に係る数値シミュレーションのプラットフォームである。多数のコードが準備されており、iRIC-SRM (Storage Routing Model) は、iRIC ソフトウェア上で動作する貯留関数モデルを用いた流出計算用ソルバーである。iRIC-SRM についての詳細は、下記のサイト (<https://i-ric.org/about/>) 参照。



図 3-28 iRIC の公式サイト



図 3-29 iRIC-SRM のページ

④ 試解析及び試計算

④-1 期間：1週間、観点：iRIC-SRM との比較

ソフトウェア「iRIC-SRM」では、計算できる時間数が168時間（7日間）までと上限が設けられている（WEB サイト[3-4]の解析事例集を参照すること）。従って、①で説明したモデルに従い SRM (Storage Routing Model)プログラムを自主試開発し、流出量の計算結果を iRIC-SRM と比較した。検証方法として、広瀬川流域で観測された1週間（2015/09/17～2015/09/23）の降雨量データを入力した際に、iRIC-SRM と別途自主試開発した SRM プログラムで推定した流出量の結果を比較した。以降では、試開発した SRM プログラムを SRM(made)と記載する。試開発プログラムの妥当性を検証するため、計算パラメータ毎の比較計算を実施した結果を、④-1-A～④-1-C に示す。どのケースについても、iRIC-SRM と SRM(made)のそれぞれで推定した流出量は完全に一致していることがわかる。従って、以降の検証では、SRM(made)を使用する。

④-1-A ケース1（基本ケース）

このケースの条件を基本とする。

表 3-2 計算条件

モデル定数	$c1$	12.501
モデル定数	$c2$	0.134
モデル定数	$c3$	1.752
減衰定数	λ	0.019
流域面積	$Area(km^2)$	268.8
初期流出量	$Q_0(m^2/sec)$	1.0

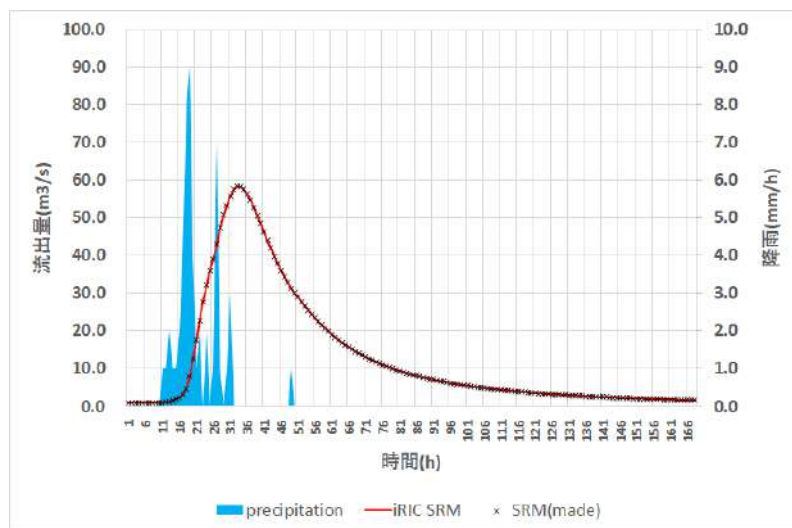


図 3-30 ケース1（基本ケース）

④-1-B ケース2（初期流出量を変更）

ケース1に対して、初期流出量（変更は赤字で記載）を変更した。

表 3-3 計算条件

モデル定数	$c1$	12.501
モデル定数	$c2$	0.134
モデル定数	$c3$	1.752
減衰定数	λ	0.019
流域面積	$Area(km^2)$	268.8
初期流出量	$Q_0(m^2/sec)$	10.0

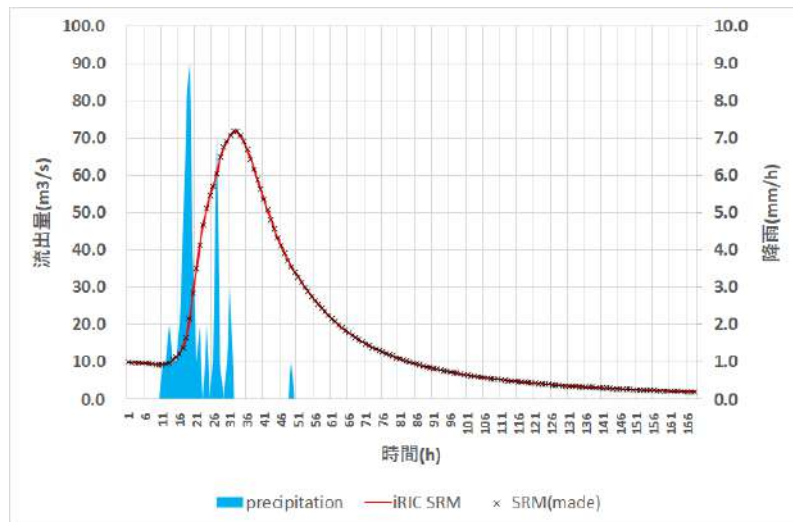


図 3-31 ケース 2 (初期流出量を変更)

④-1-C ケース 3 (モデル定数を変更)

ケース 1 に対して、モデル定数 (変更は赤字で記載) を変更した。

表 3-4 計算条件

モデル定数	$c1$	20.316
モデル定数	$c2$	0.082
モデル定数	$c3$	3.184
減衰定数	λ	0.019
流域面積	$Area(km^2)$	268.8
初期流出量	$Q_0(m^2/sec)$	1.0

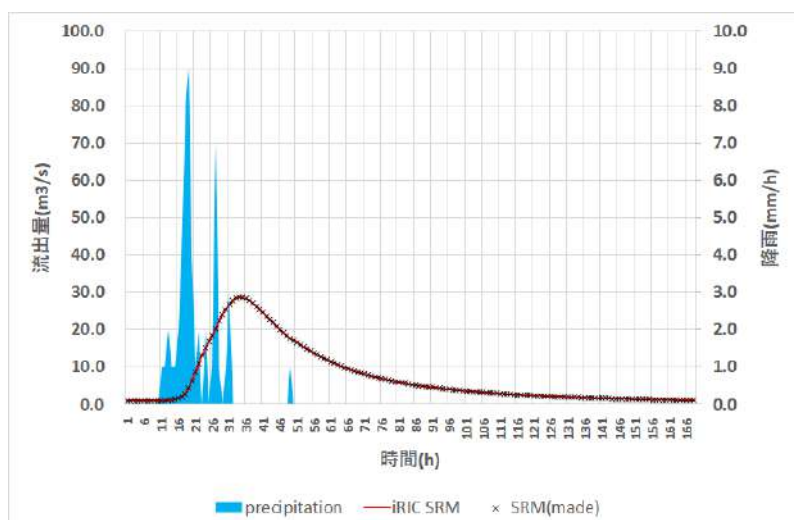


図 3-32 ケース 3 (モデル定数を変更)

④-2 期間：1週間、観点：観測値との比較と最適化の効果

ここでは、①で導入したモデル定数の最適化アルゴリズムを、SRM プログラムに適用した場合について、流出量推定の性能評価を行う。評価自体は、SRM プログラムの計算値と実際の観測値との誤差を取ることで行う。誤差は①と②で導入した NSE および RSE を使用する。また、降雨量の入力 は 広瀬川流域で観測された 1 週間分 (2015/09/17~2015/09/23) の観測データとする。この観測データについては、①-1 参照。

④-2-A 最適化の効果

まず、最適化を行った際のモデル定数の変化と誤差評価の結果について、表 3-5 と表 3-6 に示す。最適化により SRM プログラムの計算値が観測値に近似していることが確認できる。

表 3-5 モデル定数の最適化

モデル定数	初期状態	最適化後
c1	11.092	27.984
c2	0.142	0.004
c3	1.690	2.786

表 3-6 誤差評価

誤差	初期状態	最適化後
RSE	2.2467	0.0997
NSE	-1.2467	0.9003

このケースの、ハイドログラフの比較結果を図 3-33 に示す。

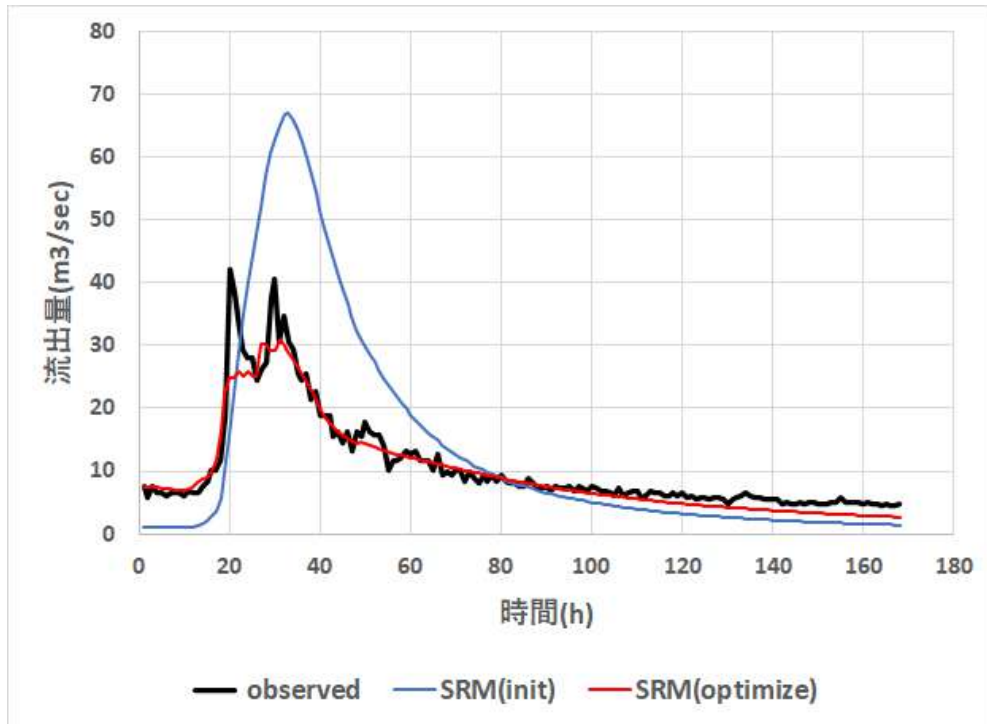


図 3-33 ハイドログラフの結果比較（最適化の効果）

observed : 観測結果, SRM(init) : 初期状態、SRM(optimize) : 最適化後

④-2-B iRIC-SRM との比較

モデル定数を最適化したときの、iRIC-SRM と SRM(made)の流出量推定値の性能について比較した結果を表 3-7 に示す。結果として、今回の試解析においては SRM(made)の方がより観測に即した最適化がなされていることがわかる。SRM(made)のモデル定数の最適化方法は文献[3-3]と同じだが、流出量の推定精度に差が生じた（原因は不明だが、試開発コードの性能は極めて良い）。

表 3-7 誤差評価

誤差	iRIC-SRM(optimize)	SRM(made)(optimize)
RSE	0.1984	0.0997
NSE	0.8016	0.9003

各々のモデルのハイドログラフの推定結果と観測結果との比較を図 3-34 に示す。試開発コードの方が、流出ピーク後の流出過程を再現できていることが分かる。しかし、両モデルとも、更に後期の流出過程を再現できていないことが分かる（両モデルとも減衰が早い）。また、両モデルとも、ピーク流量が十分に再現できていないことも付記する。しかしながら、全体的な再現精度は高く、流出モデルとして十分に活用可能であると判断できる。

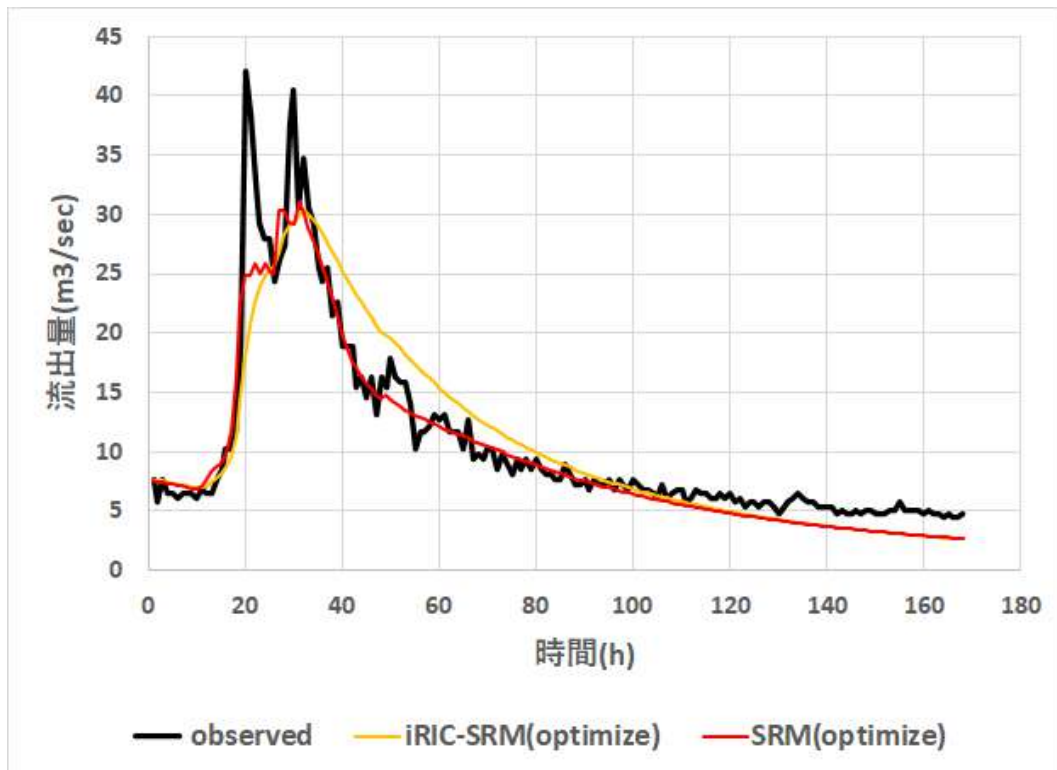


図 3-34 ハイドログラフの比較結果 (iRIC-SRM との比較)

尚、図 3-33 において、各々、observed : 観測結果、iRIC-SRM(optimize) : iRIC ソフトウェアの結果 (最適化あり)、SRM(optimize) : 別途作成した SRM プログラムの結果 (最適化あり) を示している。

④-3 期間 : 1 か月間、観点 : 観測値との比較と最適化の効果

ここでは、降雨量の入力を広瀬川流域で観測された 1 か月 (2015/09/01~2015/09/30) の観測データとした際の、SRM プログラムの流出量推定の性能評価を行う。尚、流出量の推定の際にはモデル定数の最適化処理を行う。モデル定数の初期値を変更し Case01~Case05 について流出量推定を行った。各々のケースについて、最適化を行った際のモデル定数の変化と誤差評価の結果について、表 3-9 と表 3-10 に示す。なお、Case01~Case04 のモデル定数の初期設定は、[3-4]流出計算ソルバー iRIC SRM マニュアルで明記されている、北海道 4 地域 (I 地区~IV 地区) で定められた値に基づく (図 3-35 および表 3-8 参照)。また、Case05 は広瀬川を対象として、1 週間降雨(2015/09/17~2015/09/23) を入力データとして与えた試解析において最適化した値を初期値として設定した (表 3-5 参照)。



図 3-35 北海道における4地域のカテゴリ

[3-4]流出計算ソルバーiRIC SRM マニュアル (図 2-1) から抜粋

表 3-8 北海道の地域毎のモデル定数 (1 段タンク型貯留関数モデル)

[3-4]流出計算ソルバーiRIC SRM マニュアル (表 2-1) から抜粋

地域区	c1	c2	c3
I 地区	11.092	0.142	1.690
II 地区	11.822	0.153	1.461
III 地区	20.316	0.082	3.184
IV 地区	12.152	0.125	1.568
北海道全域	12.501	0.134	1.752

結果として、Case01 が最も実際の観測値に近い推定値を与えることが分かる。また、Case05 で与えたモデル定数の初期設定は、1 週間降雨 (2015/09/17~2015/09/23) を入力データとして与えた試解析において最適化した値を採用したが (表 3-5 参照)、今回の 1 か月降雨の試解析では Case05 は近似精度が最も悪いケースとなった。従って、対象流域が同じだとしても、ある期間で最適化したモデル定数の値は、別期間の流出量推定に、そのまま使用しても、良好な結果が得られるとは限らないことが結論される。原因としては、流域内での降雨分布が降雨毎に異なるためと考えられる。

表 3-9 モデル定数の最適化

	モデル定数	Case 01	Case 02	Case 03	Case 04	Case 05
初期設定	c1	11.092	11.822	20.316	12.152	27.984
	c2	0.142	0.153	0.082	0.125	0.005
	c3	1.690	1.461	3.184	1.568	2.786
最適化後	c1	15.243	15.859	19.172	15.771	28.762
	c2	0.012	0.011	0.009	0.011	0.005
	c3	2.116	2.028	2.524	2.108	2.846

表 3-10 誤差評価

誤差	Case 01	Case 02	Case 03	Case 04	Case 05
RSE	0.247	0.255	0.364	0.258	0.895
NSE	0.753	0.745	0.636	0.742	0.105

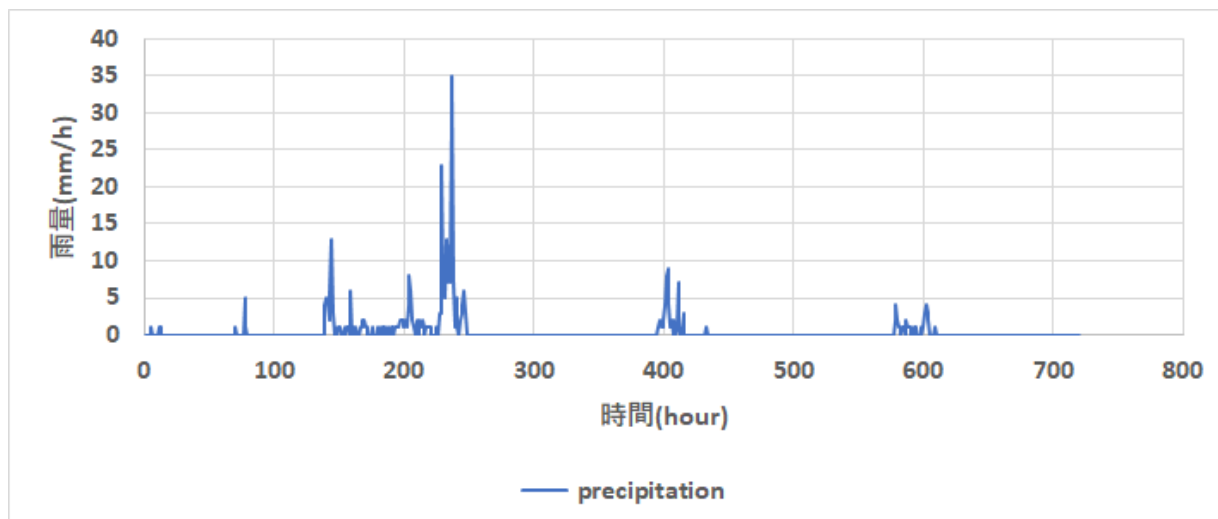


図 3-36 降雨量データ（広瀬川、2015/09/01～2015/09/30）

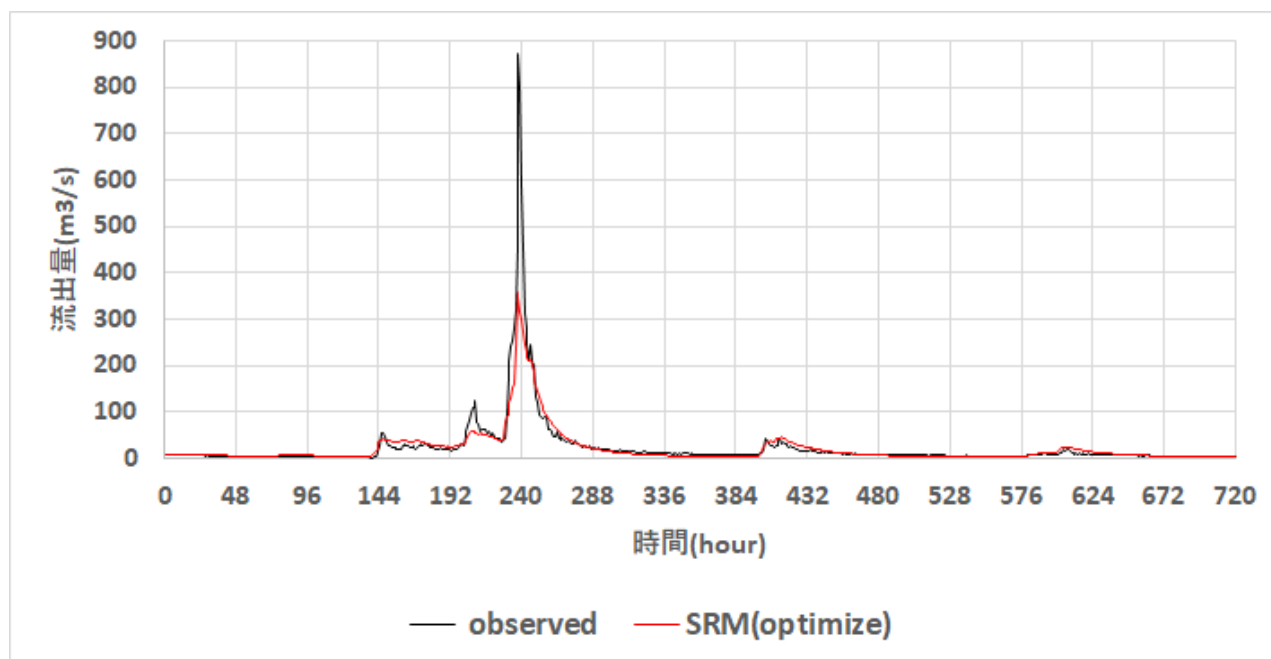


図 3-37 Case01（1 か月間の降雨データを入力）
NSE=0.753（試解析ケースの中で最良の近似精度）

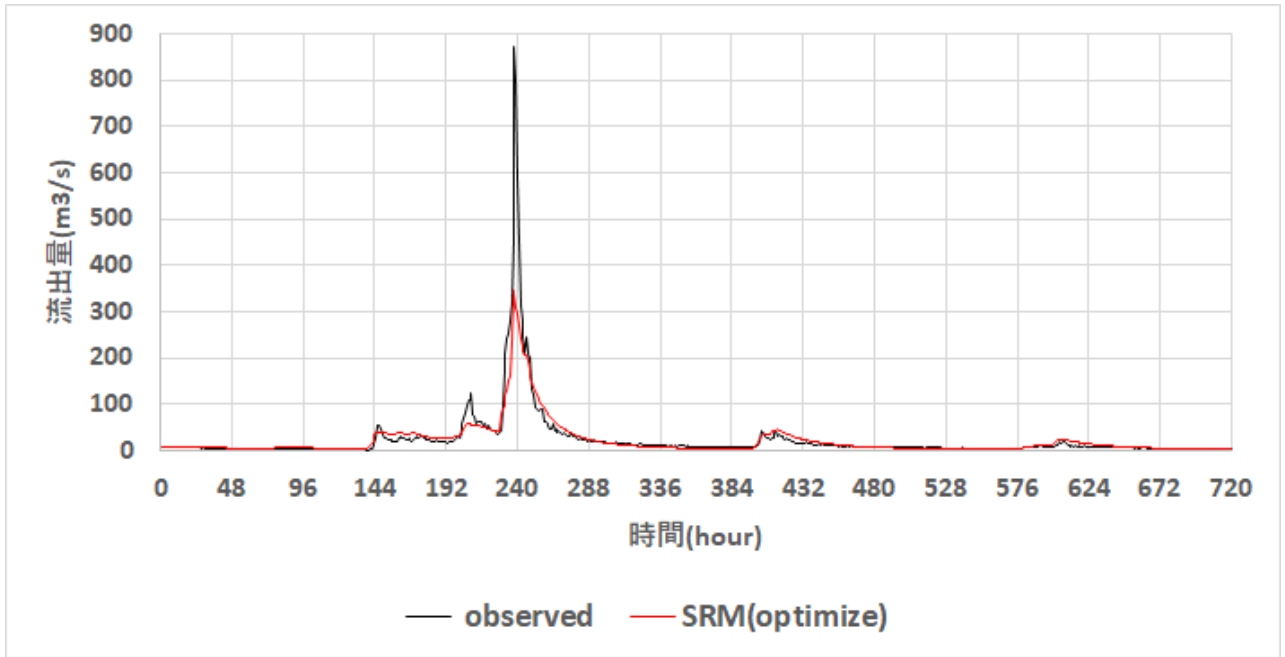


図 3-38 Case02 (1 か月間の降雨データを入力)
NSE=0.745

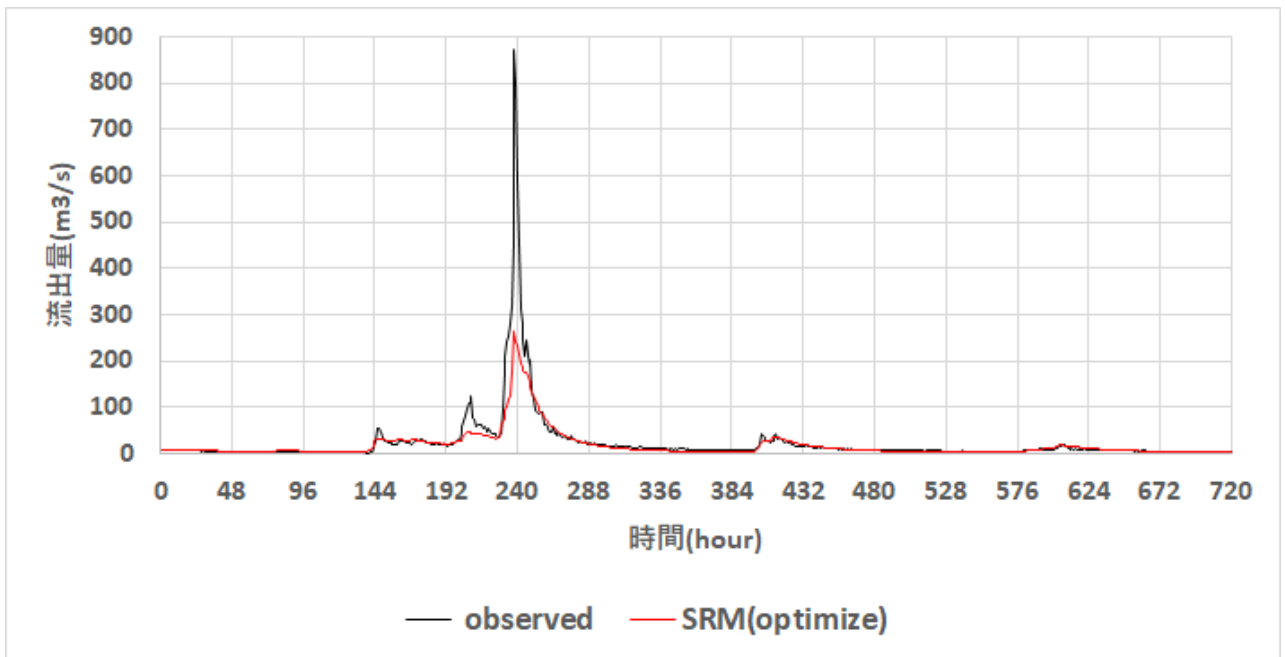


図 3-39 Case03 (1 か月間の降雨データを入力)
NSE=0.636

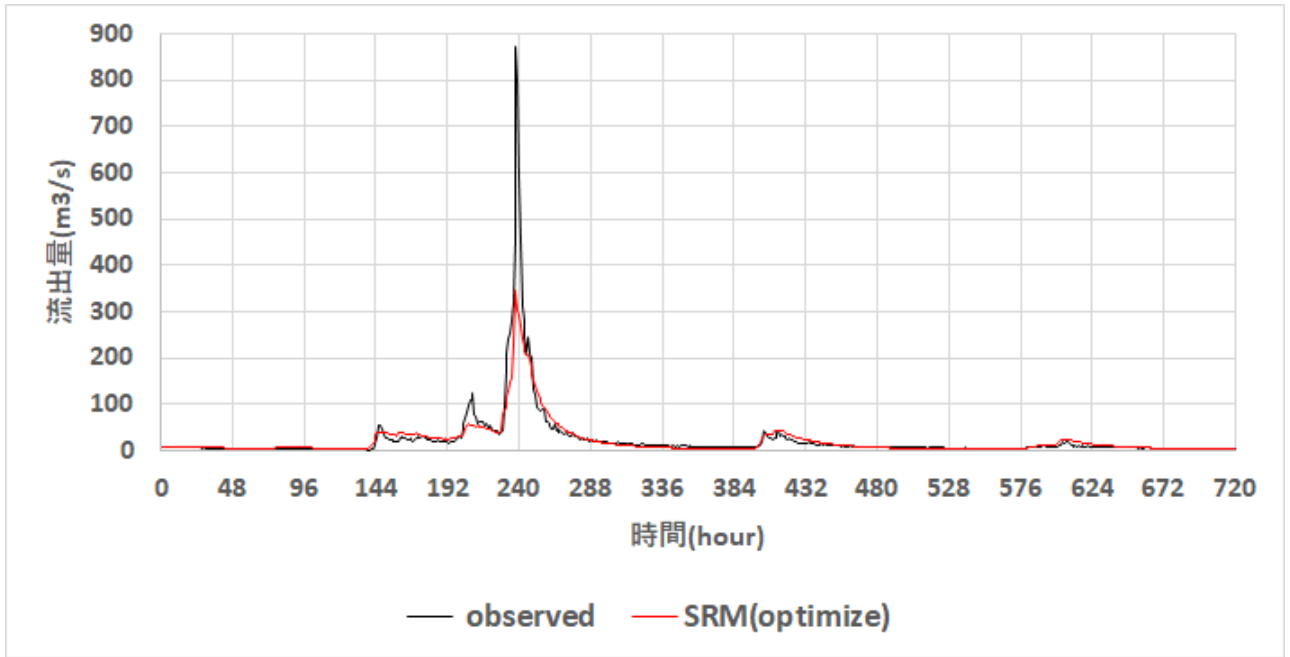


図 3-40 Case04 (1 か月間の降雨データを入力)
NSE=0.742

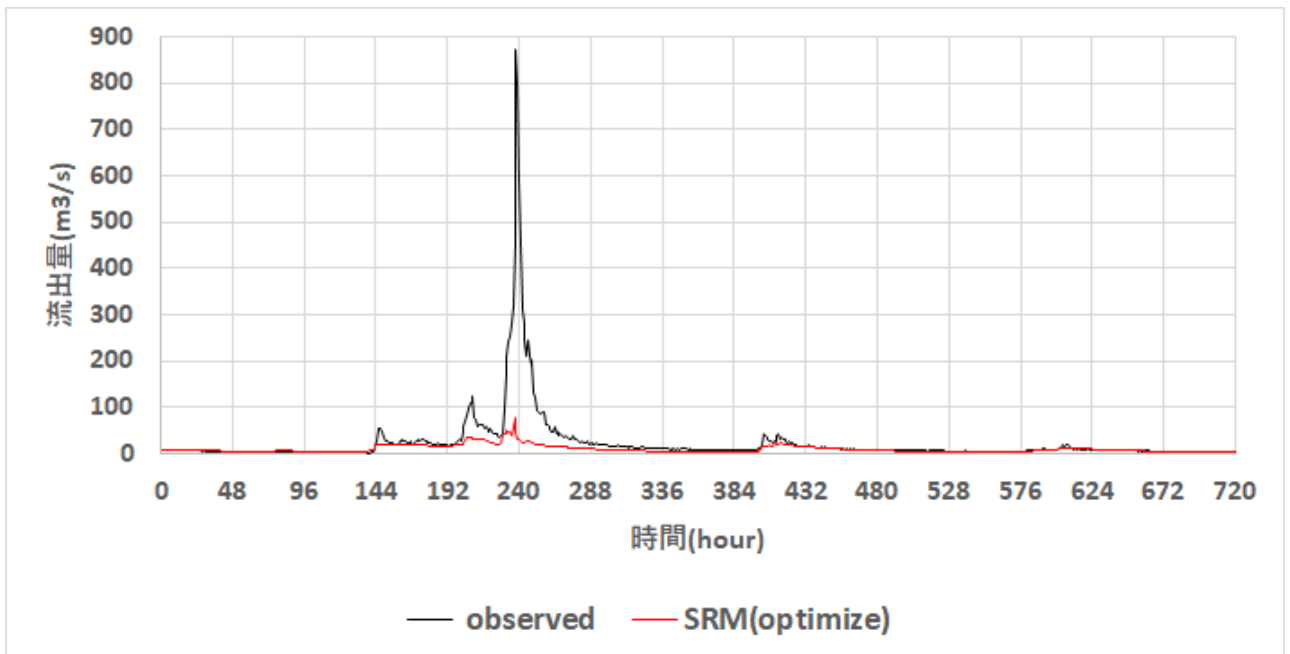


図 3-41 Case05 (1 か月間の降雨データを入力)
NSE=0.105

以上の試解析より、貯留関数法 (SRM) を用いる場合、推定ハイドログラフ (最適化パラメータを用いて得た) に対して、入力パラメータの初期値依存性があり、初期値により、パラメータの最適化結果が異なる推定結果を与えることが分かる。これは、パラメータ空間内に複数の極小解 (最小値ではない極小値) があるためであり、真の最適解 (最小値) を得るためには、パラメータ空間内を広く大局的に最適解探索を行う必要があることが分かる。本事業内では、試解析に留め、上記課題を解決するための

先端的な最適化方法の実装は実施しないが、複数の関係する文献報告があることを付記する（総説は[3-5]）。一方、パラメータを流域内の地質の分布と関連させ、GISソフトを用いて、地質毎にパラメータセットを定義する方法が提案されている[3-6]。この方法は、広いパラメータ空間から、流域での水の物理的挙動との関連性から、適切なパラメータ空間の絞りこみに繋がるため、有用である他、雨量と流出量の観測データセットが整備されていない場合（日本全国の河川）にも適用可能であり、極めて有望な方法と考えられる。本事業では、当該文献[3-6]に従い、広瀬川で試解析を行った（結果は付録2.1に記載）。結果は良好であり、当該文献の方法が実際に有用であることが分かる。

3.2.4 MERCURY コード（タンクモデル）

タンクモデル[3-7~3-8]（2章参照）として、日本原子力研究開発機構が中心となり開発した MERCURY コードを用いて試解析及び試計算を行う。

① モデル概要

①-1 3段タンクモデル

MERCURY モデルは、3段タンクモデルを使用している。各タンクから河川へ流出する量、地下へ浸透する量、降水量と蒸発散量のマスバランスを計算することで、河川流域からの流出量を算出する。

$\frac{dS_1}{dt} = P - E - q_1 - i_1$	(3-79)
---------------------------------------	--------

$\frac{dS_2}{dt} = i_1 - q_2 - i_2$	(3-80)
-------------------------------------	--------

$\frac{dS_3}{dt} = i_2 - q_3$	(3-81)
-------------------------------	--------

$q_1 = a_1 S_1, \quad q_2 = a_2 S_2, \quad q_3 = a_3 S_3.$	(3-82)
$i_1 = b_1 S_1, \quad i_2 = b_2 S_2.$	

$Q = \sum_i^3 q_i \times \text{流域面積}(m^2) \times 10^{-3}.$	(3-83)
--	--------

ここで、 S_n :各タンクの貯水高さ（mm）（ $n=1-3$ ）、 q_n :各タンクからの流出比（mm/h）（ $n=1-3$ ）、 i_n :浸透量（mm/h）（ $n=1-2$ ）、 P :降水量（mm/h）、 E :蒸発散量（mm/h）、 a_n :流出比に関する経験パラメータ（ $n=1-3$ ）、 b_n :浸透量に関する経験パラメータ（ $n=1-2$ ）、 Q :流域から流出する流量（ m^3/h ）。 S_1 は地表流、 S_2 は中間流、 S_3 は地下水流に相当する。蒸発散量 E については、 S_1 タンク内の貯水高さがない場合、 S_2 タンクから蒸発させる。このとき、各タンクの貯水高さ(mm) S_n の初期値、および流出比に関する経験パラメータ a_n 、浸透量に関する経験パラメータ b_n を入力ファイルで設定する。

①-2 L-Q 式

一般的に、河川水流量と懸濁物質流出量の関係（L-Q 式）は、以下のように流量のべき乗によって表される。

$$Q_s = aQ^b \quad (3-84)$$

ただし、 Q_s :懸濁物質流出量（kg/h）、 Q :河川水流量（m³/h）、 a, b :経験パラメータ。このとき、経験パラメータ a, b を入力ファイルで設定する。

①-3 懸濁態及び溶存態放射性セシウムの規格化 2 成分指数減衰モデル

河川流域ごとの特徴量（流域面積及び¹³⁷Cs沈着量）と河川水中の放射性セシウム濃度の経時変化を用いることで、河川流域ごとの放射性セシウムの流出量を算出できる。

懸濁態 ^{137}Cs 流出量 (Bq/h)	(3-85)
$= I \times C_{par}(t) \times Qs$	
$= I \times \{c \times \exp(-k_1 t) + d \times \exp(-k_2 t)\} \times aQ^b$	

溶存態 ^{137}Cs 流出量 (Bq/h)	(3-86)
$= I \times C_{dis}(t) \times Qs$	
$= I \times \{e \times \exp(-k_3 t) + f \times \exp(-k_4 t)\} \times Q$	

但し、 I : 計算対象流域内の平均 ^{137}Cs 沈着量 (Bq/m²)、 C_{par} : 規格化懸濁態 ^{137}Cs 濃度 (Bq/kg m²/Bq)、 C_{dis} : 規格化溶存態 ^{137}Cs 濃度 (Bq/m³m²/Bq)、 $k_1, k_2, k_3, k_4, c, d, e, f$: 経験パラメータ。このとき、経験パラメータ $k_1, k_2, k_3, k_4, c, d, e, f$ を入力ファイルで設定する。

② モデル定数の最適化

モデル定数を最適化する手法については、文献[3-3]を参照し実装した。当該文献では、非線形方程式の数値解析手法で多用されているニュートン法 (Newton-Raphson Method) によりモデル定数を最適化する。ニュートン法では評価関数の一次微分係数を算出し、モデル定数の補正量を決定する。最適化の流れについては、当該文献の方法を踏襲する。

②-1 3 段タンクモデル

MERCURY モデルにおいて、3 段モデルタンクを使用している。各タンクから河川へ流出する量、地下へ浸透する量、降水量と蒸発散量のマスバランスを計算することで、河川流域から流出比を算出する。基礎方程式は下記の通りである。ただし、 $P(\text{mm}/h)$ は降水量であり、 $E(\text{mm}/h)$ は蒸発散量である。

$\frac{dS_1}{dt} = P - E - q_1 - i_1,$	(3-87)
--	--------

$\frac{dS_2}{dt} = i_1 - q_2 - i_2,$	(3-88)
--------------------------------------	--------

$\frac{dS_3}{dt} = i_2 - q_3.$	(3-89)
--------------------------------	--------

ここで、 $S_n(\text{mm})$ は各タンクの貯水高さ、 $q_n(\text{mm}/h)$ は各タンクからの流出比、 a_n は流出比に関する経験パラメータである。

$q_1 = a_1 S_1,$	(3-90)
------------------	--------

$q_2 = a_2 S_2,$	(3-91)
------------------	--------

$q_3 = a_3 S_3.$	(3-92)
------------------	--------

また、 $i_n(\text{mm}/h)$ は浸透量、 b_n は浸透量に関する経験パラメータである。

$i_1 = b_1 S_1,$	(3-93)
------------------	--------

$$i_2 = b_2 S_2. \quad (3-94)$$

最後に、流域から流出量 $Q(m^3/h)$ は下記の式で計算する。ただし、 $Area(m^2)$ は流域面積である。

$$Q = Coef \sum_k^3 q_k, \quad Coef = Area \times 10^{-3}. \quad (3-95)$$

②-2 感度係数方程式

式(3-87)～(3-89)を貯水高さ S_n によって整理すると下式となる：

$$\frac{dS_1}{dt} = P - E - (a_1 + b_1)S_1 \quad (3-96)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = b_1 S_1 - (a_2 + b_2)S_2, \quad (3-97)$$

$$\frac{dS_3}{dt} = b_2 S_2 - a_3 S_3. \quad (3-98)$$

これを経験パラメータ a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 で微分すると、感度係数方程式が得られる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_1} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_1} - S_1, \quad (3-99)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_2} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_2}, \quad (3-100)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_3} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_3}, \quad (3-101)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial b_1} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial b_1} - S_1, \quad (3-102)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial b_2} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial b_2}. \quad (3-103)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial a_1} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_1} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial a_1}, \quad (3-104)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial a_2} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_2} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial a_2} - S_2, \quad (3-105)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial a_3} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_3} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial a_3}, \quad (3-106)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial b_1} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial b_1} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial b_1} + S_1, \quad (3-107)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial b_2} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial b_2} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial b_2} - S_2. \quad (3-108)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial a_1} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_1} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_1}, \quad (3-109)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial a_2} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_2} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_2}, \quad (3-110)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial a_3} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_3} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_3} - S_3, \quad (3-111)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial b_1} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial b_1} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial b_1}, \quad (3-112)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial b_2} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial b_2} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial b_2} + S_2. \quad (3-113)$$

なお、貯水高さ $S_n(mm)$ と流出比 $q_n(mm/h)$ について、それぞれの感度係数の関係式は次のようになる。

$\frac{\partial q_1}{\partial a_1} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_1} + S_1$	$\frac{\partial q_2}{\partial a_1} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_1}$	$\frac{\partial q_3}{\partial a_1} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_1}$	(3-114)
---	---	---	---------

$\frac{\partial q_1}{\partial a_2} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_2}$	$\frac{\partial q_2}{\partial a_2} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_2} + S_2$	$\frac{\partial q_3}{\partial a_2} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_2}$	(3-115)
---	---	---	---------

$\frac{\partial q_1}{\partial a_3} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_3}$	$\frac{\partial q_2}{\partial a_3} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_3}$	$\frac{\partial q_3}{\partial a_3} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_3} + S_3$	(3-116)
---	---	---	---------

$\frac{\partial q_1}{\partial b_1} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial b_1}$	$\frac{\partial q_2}{\partial b_1} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial b_1}$	$\frac{\partial q_3}{\partial b_1} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial b_1}$	(3-117)
---	---	---	---------

$\frac{\partial q_1}{\partial b_2} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial b_2}$	$\frac{\partial q_2}{\partial b_2} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial b_2}$	$\frac{\partial q_3}{\partial b_2} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial b_2}$	(3-118)
---	---	---	---------

②-3 モデル定数の最適化問題

モデル定数の最適化は、観測流量 $Q_i^*(m^3/s)$ と計算流量

$Q_i = Q_i(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2) (m^3/s)$	(3-119)
--	---------

の誤差 $e_i(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2)$ ができるだけ小さくなるように定数を同定することを目的としている。誤差の二乗和を最小とする目的関数(評価関数) $J(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2)$ を χ 二乗基準を用いて次式のように表す:

$J(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2) = \sum_{i=1}^N e_i^2(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2) / \sum_{i=1}^N (Q_i^*)^2,$	(3-120)
--	---------

$e_i(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2) = Q_i^* - Q_i(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2).$	(3-121)
--	---------

今、新たにモデル定数ベクトル K を下記のように定義する:

$K = [a_1, a_2, a_3, b_1, b_2]^T.$	(3-122)
------------------------------------	---------

ニュートン法による最適化では、式(3-120)を最小化するようにベクトル値 K を繰り返し法によって探索する。 $(m+1)$ ステップの K の値を K^{m+1} 、 m ステップにおける K の値を K^m 、補正ベクトル ΔK とすると、下記の関係が成立する:

$K^{m+1} = K^m + \Delta K,$	(3-123)
-----------------------------	---------

$$\Delta K = [\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3, \Delta b_1, \Delta b_2]^T. \quad (3-124)$$

($m+1$)ステップにおける誤差項 $e_i(K^{m+1})$ を、 K^m のまわりで1次の項まで Taylor 級数展開すると次のようになる：

$$e_i(K^{m+1}) = e_i(K^m) + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_j} \Delta a_j + \sum_{j=1}^2 \frac{\partial e_i(K^m)}{\partial b_j} \Delta b_j, \quad (3-125)$$

$$(i = 1, \dots, N).$$

ただし、下式に注意すること。

$$\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_j} = -Coef \sum_{k=1}^3 \frac{\partial q_k}{\partial a_j}(K^m), \quad (j = 1, 2, 3), \quad (3-126)$$

$$\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial b_j} = -Coef \sum_{k=1}^2 \frac{\partial q_k}{\partial b_j}(K^m), \quad (j = 1, 2). \quad (3-127)$$

ここで、誤差ベクトル E と行列 W を次のように定義する：

$$E^m = [e_1(K^m) \quad e_2(K^m) \quad \dots \quad e_N(K^m)]^T. \quad (3-128)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{11}^m & w_{12}^m & w_{13}^m & w_{14}^m & w_{15}^m \\ w_{21}^m & w_{22}^m & w_{23}^m & w_{24}^m & w_{25}^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{N1}^m & w_{N2}^m & w_{N3}^m & w_{N4}^m & w_{N5}^m \end{bmatrix}. \quad (3-129)$$

ただし、各 $i = 1, \dots, N$ に対して、

$$w_{i1}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_1}, \quad (3-130)$$

$$w_{i2}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_2}, \quad (3-131)$$

$$w_{i3}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_3}, \quad (3-132)$$

$$w_{i4}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial b_1}, \quad (3-133)$$

$$w_{i5}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial b_2}. \quad (3-134)$$

このとき、式(3-125)は下記のように整理される：

$$E^{m+1} = E^m - W\Delta K. \quad (3-135)$$

また、評価関数 $J(K^{m+1})$ は下記のように整理される：

$$\begin{aligned} J(K^{m+1}) &= (E^{m+1})^T E^{m+1} \\ &= (E^m - W\Delta K)^T (E^m - W\Delta K) \\ &= (E^m)^T E^m - 2(\Delta K)^T W^T E^m + (\Delta K)^T (W^T W) \Delta K \\ &= J(E^m) + (\Delta K)^T \{-2W^T E^m + (W^T W) \Delta K\}. \end{aligned} \quad (3-136)$$

以上により、評価関数 $J(K)$ の最小化条件は次式のように与えられる：

$$\frac{\partial J(K)}{\partial(\Delta K)} = -2W^T E^m + (W^T W)\Delta K = 0. \quad (3-137)$$

従って、式(3-137)から補正ベクトル ΔK は次式で計算される：

$$\Delta K = 2(W^T W)^{-1}W^T E^m. \quad (3-138)$$

③ 試解析（対象流域：広瀬川）

③-1 期間：1週間、観点：観測値との比較と最適化の効果

ここでは、②で導入したモデル定数の最適化アルゴリズムを MERCURY コードに適用した場合について、流出量推定の性能評価を行う。評価自体は、計算値と実際の観測値との誤差を取ることで行う（誤差は①と②で導入した NSE および RSE を使用）。また、降雨量の入力は広瀬川流域で観測された1週間分（2015/09/17～2015/09/23）の観測データとする。この観測データについては、①-1 参照。最適化を行った際のモデル定数の変化と誤差評価の結果について、表 3-11 と表 3-12 に示す。最適化により MERCURY コードの計算値が観測値を精度良く推定できていることが確認できる。

表 3-11 モデル定数の最適化

モデル定数	初期状態	最適化後
a1	0.020	0.013
a2	0.004	0.002
a3	9.00.E-05	6.16E-05
b1	0.500	0.059
b2	0.010	0.014

表 3-12 誤差評価

誤差	初期状態	最適化後
RSE	0.3234	0.0586
NSE	0.6766	0.9414

最適化後に得られたハイドログラフと観測結果との比較結果を図 3-43 に示す。最大のピーク流出量の再現は十分ではないが、その後の流出過程の推定精度は極めて高く、複雑な過程の再現力を確認できる。特に、ピーク流量を経た後期の減衰過程の再現は、貯留関数モデルと比較し優れていることが分かる。また、実装した単純な最適化による推定精度の向上より、タンクモデルの優れた可塑性が確認できる。

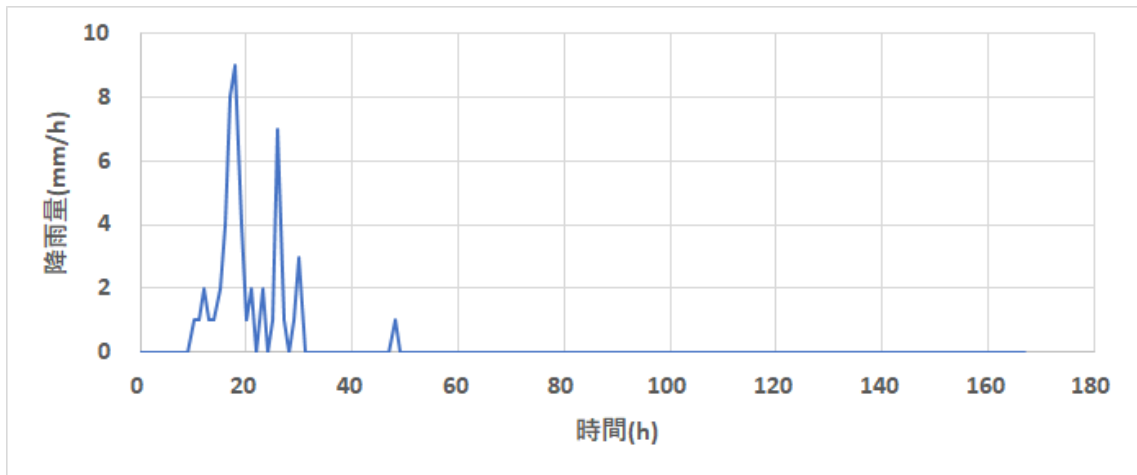


図 3-42 一週間の降雨量データ

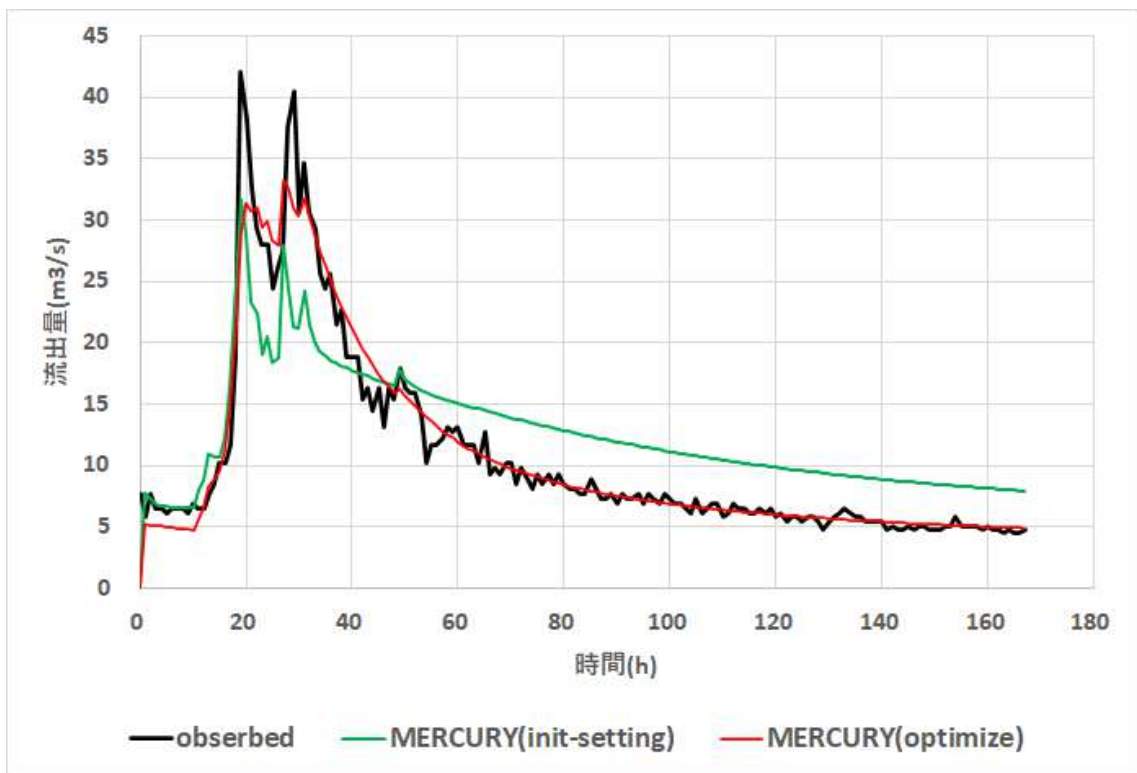


図 3-43 ハイドログラフの比較結果（最適化の効果）

observed : 観測結果、MERCURY(init-setting) : 初期状態、MERCURY(optimize) : 最適化後

③-2 期間：1カ月、観点：観測値との比較と最適化の効果

ここでは、降雨量の入力を広瀬川流域で観測された1カ月（2015/09/01～2015/09/30）の観測データとしたときの、MERCURYコードの流出量推定の性能評価を行う。尚、流出量の推定の際にはモデル定数の最適化処理を行う。最適化を行った際のモデル定数の変化と誤差評価の結果について、表 3-13 と表 3-14 に示す。RSE およびNSE による誤差評価という観点からは、最適化により MERCURY コードの計算値が観測値を精度良く再現できることが確認できる。

表 3-13 モデル定数の最適化

モデル定数	初期状態	最適化後
a1	0.020	0.075
a2	0.004	0.006
a3	9.00.E-05	1.00E-10
b1	0.500	0.072
b2	0.010	0.007

表 3-14 誤差評価

誤差	初期状態	最適化後
RSE	0.7113	0.1577
NSE	0.2886	0.8422

最適化後のハイドログラフの推定結果と観測量の比較結果を図 3-45 に示す。最適化により一番大きい流出量ピークが大きくなり観測値により近い結果となった。その一方で、最適化により小さいピークの計算値が大きい値となり、この部分において観測値との誤差が大きくなった。この結果から、貯留関数法と同じく、一つの降雨イベント毎に最適なパラメータがあり、複数の降雨イベントに適合しようとするはずれが大きくなることが分かった。この原因としては、降雨毎に降雨分布が異なることが考えられる。

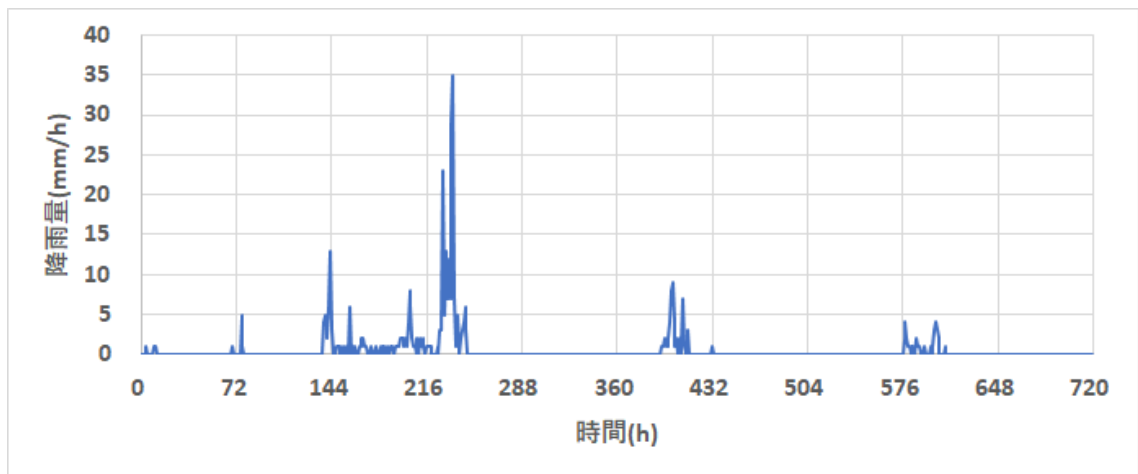


図 3-44 一カ月の降雨量データ

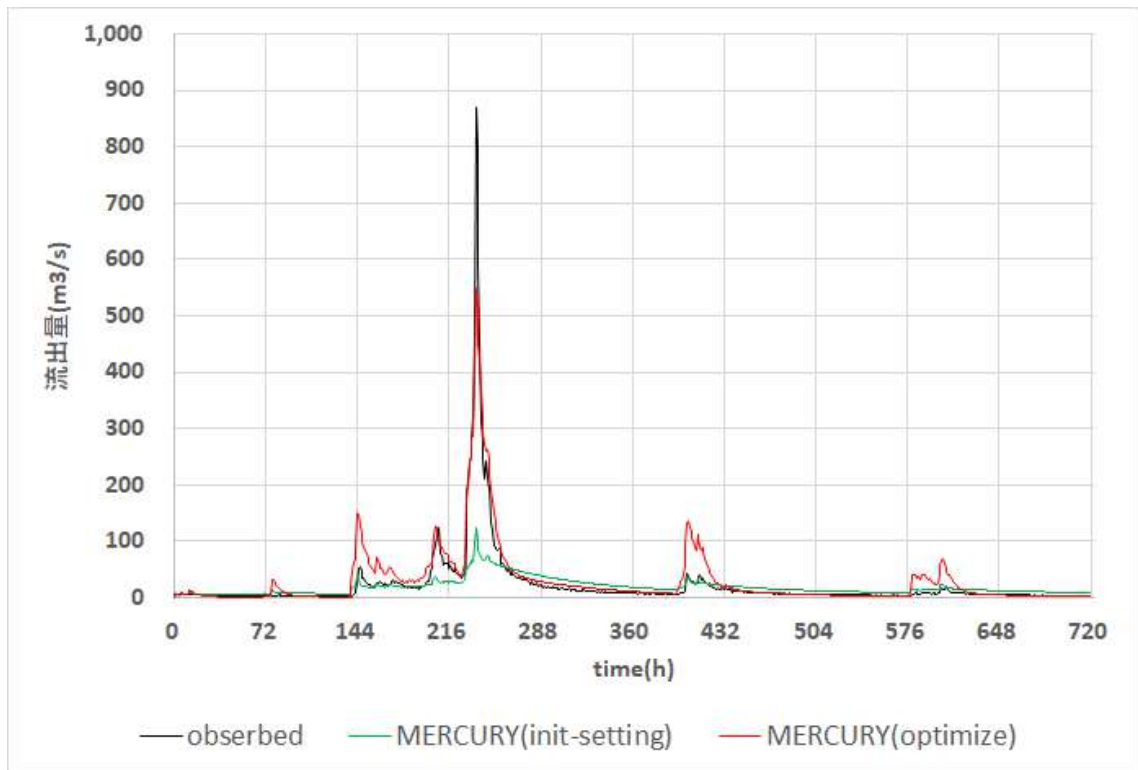


図 3-45 ハイドログラフの比較結果（最適化の効果）

observed：観測結果、MERCURY(init-setting)：初期状態、MERCURY(optimize)：最適化後

④ 試解析（対象流域：阿武隈川）

タンクモデルの精度の高さより、試解析を阿武隈川全体に拡大し、その性能を調査した。

④-1 阿武隈川について

④-1-A 河川位置

試解析対象の阿武隈川の位置をマップ上に示す。図 3-46、図 3-47 に示したマップは『国土交通省川の防災情報』（<https://www.river.go.jp/portal/#80>）の『川の水位情報』の地図から取得した。

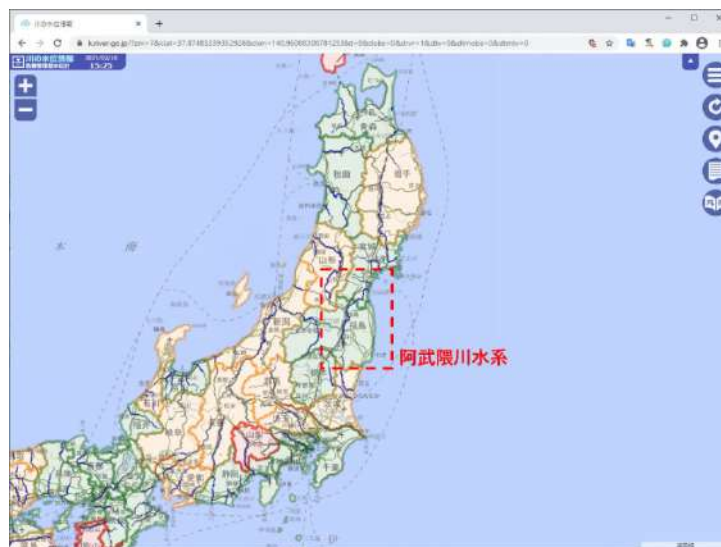


図 3-46 阿武隈川水系

阿武隈川は福島県および宮城県を流れる一級河川である。延長は 239.0km で、流域面積は 5,390km²である。

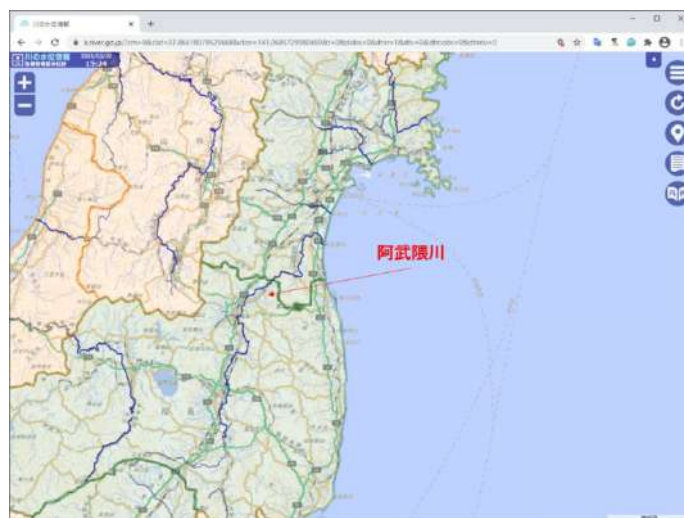


図 3-47 阿武隈川①

④-1-B 観測所一覧（阿武隈川）

阿武隈川沿いの雨量観測所と流量観測所の諸元一覧を、表 3-15 と表 3-16 に示す。また、それぞれの観測所の位置について、雨量観測所は図 3-49 に示し、流量観測所は図 3-50（図 3-51）に示した。表中の番号と地図上に付記した番号は対応している。ただし、流量観測所について、今回に対象とする期間（2015 年 09 月）の観測データに欠損を含むものがあった。欠損なく完全な観測データを得られたかどうかについての情報を、表 3-16 に記載した。

表 3-15 雨量観測所の一覧（阿武隈川）

NO	項目	水系名	河川名	観測所名	所在地	緯度経度
1	雨量	阿武隈川	阿武隈川	岩沼	宮城県岩沼市館下1丁目2-9	北緯 38度06分36秒 東経 140度51分51秒
2	雨量	阿武隈川	阿武隈川	角田	宮城県角田市梶賀字高畑北322-3	北緯 37度59分05秒 東経 140度47分53秒
3	雨量	阿武隈川	阿武隈川	余目	宮城県柴田郡柴田町大字入間田字館山崎5	北緯 38度05分39秒 東経 140度47分59秒
4	雨量	阿武隈川	阿武隈川	志賀	宮城県岩沼市志賀字大日	北緯 38度08分01秒 東経 140度48分48秒
5	雨量	阿武隈川	阿武隈川	八幡	福島県伊達市梁川町大字八幡	北緯 37度52分03秒 東経 140度36分33秒
6	雨量	阿武隈川	阿武隈川	福島（国）	福島県福島市黒岩字榎平36	北緯 37度43分25秒 東経 140度28分10秒
7	雨量	阿武隈川	阿武隈川	二本松（国）	福島県二本松市安達ヶ原4丁目135	北緯 37度35分40秒 東経 140度27分54秒
8	雨量	阿武隈川	阿武隈川	郡山（福島）	福島県郡山市富久山町久保田字中台12	北緯 37度24分29秒 東経 140度24分26秒
9	雨量	阿武隈川	阿武隈川	須賀川（国）	福島県須賀川市江持字中丸238-1	北緯 37度18分04秒 東経 140度23分07秒
10	雨量	阿武隈川	阿武隈川	真船	福島県西白河郡西郷村大字真船字小萱9	北緯 37度10分01秒 東経 140度04分44秒

表 3-16 流量観測所の一覧（阿武隈川）

NO	項目	観測所名	データ	所在地	緯度経度
1	水位流量	阿武隈川河口	欠損	宮城県岩沼市新浜	北緯 38度02分51秒 東経 140度55分28秒
2	水位流量	荒浜	欠損	宮城県亶理郡亶理町荒浜字隈潟	北緯 38度02分58秒 東経 140度54分41秒
3	水位流量	岩沼	欠損	宮城県岩沼市阿武隈	北緯 38度05分45秒 東経 140度52分18秒
4	水位流量	小山	欠損	宮城県亶理郡亶理町逢隈小山	北緯 38度04分37秒 東経 140度49分29秒
5	水位流量	江尻	取得成功	宮城県角田市江尻字巻前	北緯 38度01分07秒 東経 140度48分08秒
6	水位流量	笠松	欠損	宮城県角田市枝野寄井	北緯 37度57分34秒 東経 140度47分30秒
7	水位流量	丸森	取得成功	宮城県伊具郡丸森町船場	北緯 37度55分18秒 東経 140度45分42秒
8	水位流量	館矢間	取得成功	宮城県伊具郡丸森町館矢間山田	北緯 37度55分34秒 東経 140度45分04秒
9	水位流量	新浜	欠損	宮城県岩沼市寺島字川向1	北緯 38度03分12秒 東経 140度55分10秒
10	水位流量	志引橋	欠損	宮城県岩沼市押分	北緯 38度06分14秒 東経 140度52分32秒
11	水位流量	八幡	欠損	福島県伊達市梁川町大字八幡	北緯 37度52分06秒 東経 140度36分38秒
12	水位流量	伏黒	取得成功	福島県伊達市伏黒字下大川57	北緯 37度49分48秒 東経 140度31分08秒
13	水位流量	福島	取得成功	福島県福島市杉妻町2番35号	北緯 37度44分59秒 東経 140度28分08秒
14	水位流量	黒岩	取得成功	福島県福島市渡利小倉寺字中ノ内	北緯 37度43分38秒 東経 140度28分23秒
15	水位流量	二本松	取得成功	福島県二本松市安達ヶ原4丁目135番地	北緯 37度35分41秒 東経 140度27分42秒
16	水位流量	本宮	取得成功	福島県本宮市大字下町	北緯 37度30分57秒 東経 140度24分17秒
17	水位流量	阿久津	取得成功	福島県郡山市大字阿久津館63番地	北緯 37度24分28秒 東経 140度24分34秒
18	水位流量	御代田	取得成功	福島県郡山市田村町御代田字古町	北緯 37度20分46秒 東経 140度22分25秒
19	水位流量	須賀川	取得成功	福島県須賀川市大字江持字中丸238-1	北緯 37度18分02秒 東経 140度23分21秒
20	水位流量	小作田	取得成功	福島県須賀川市小作田字西館	北緯 37度16分21秒 東経 140度24分25秒
21	水位流量	白河	取得成功	福島県白河市金勝寺205-18	北緯 37度08分05秒 東経 140度12分34秒

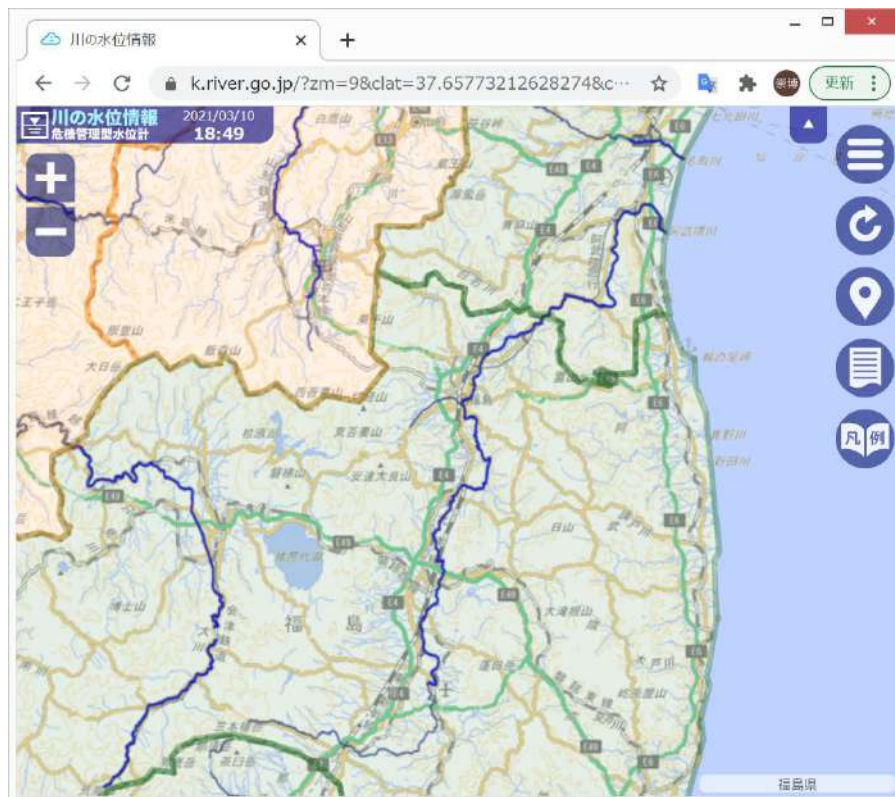


図 3-48 阿武隈川②

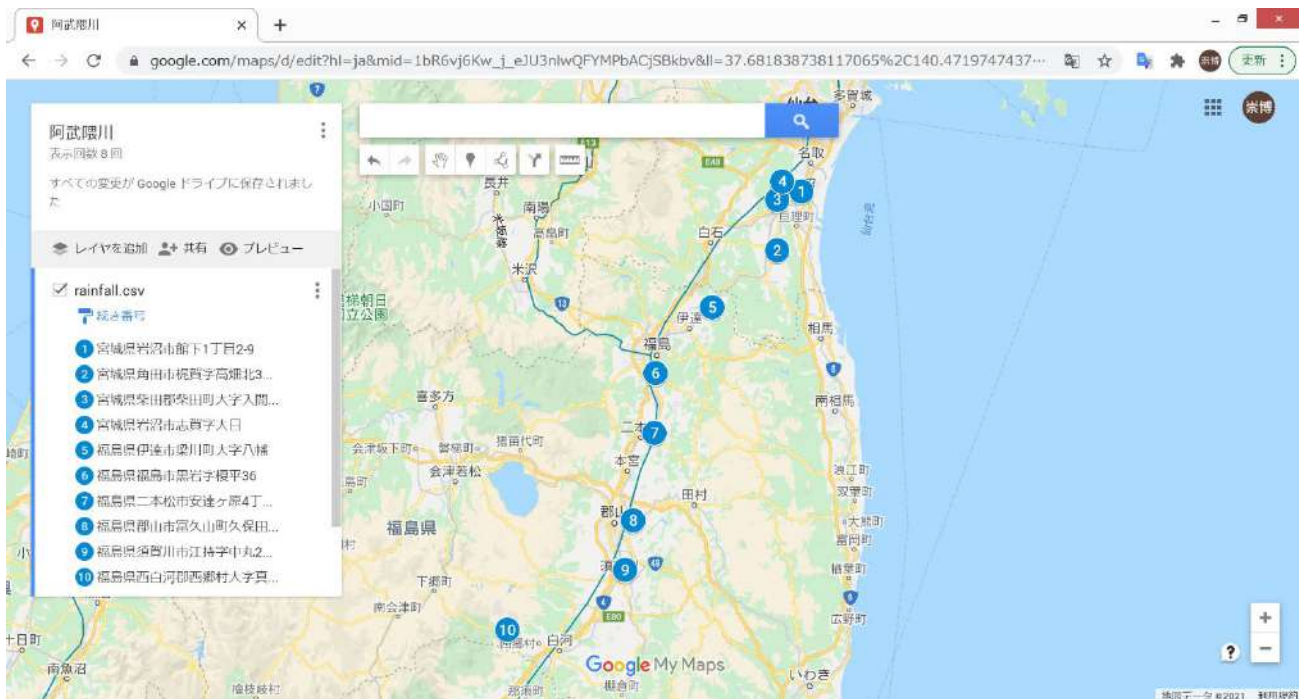


図 3-49 雨量観測所の位置（阿武隈川、水門水質データベース）

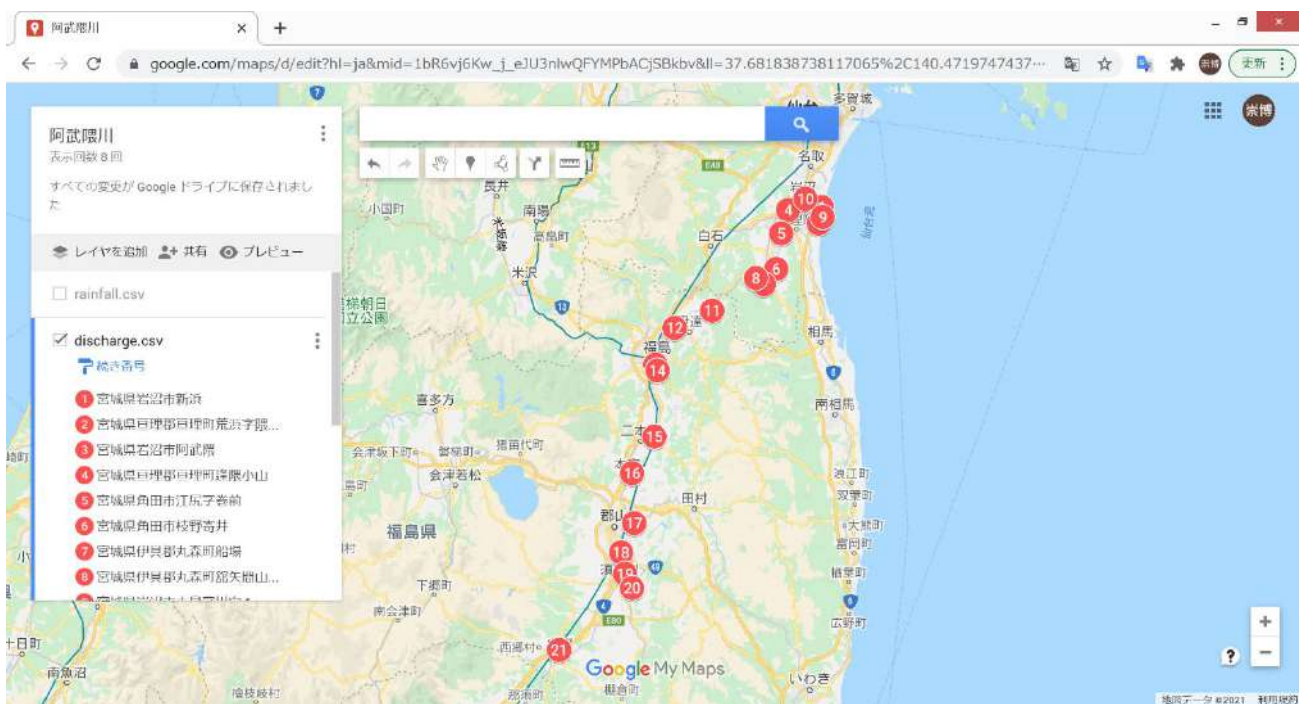


図 3-50 流量観測所の位置①（阿武隈川、水門水質データベース）

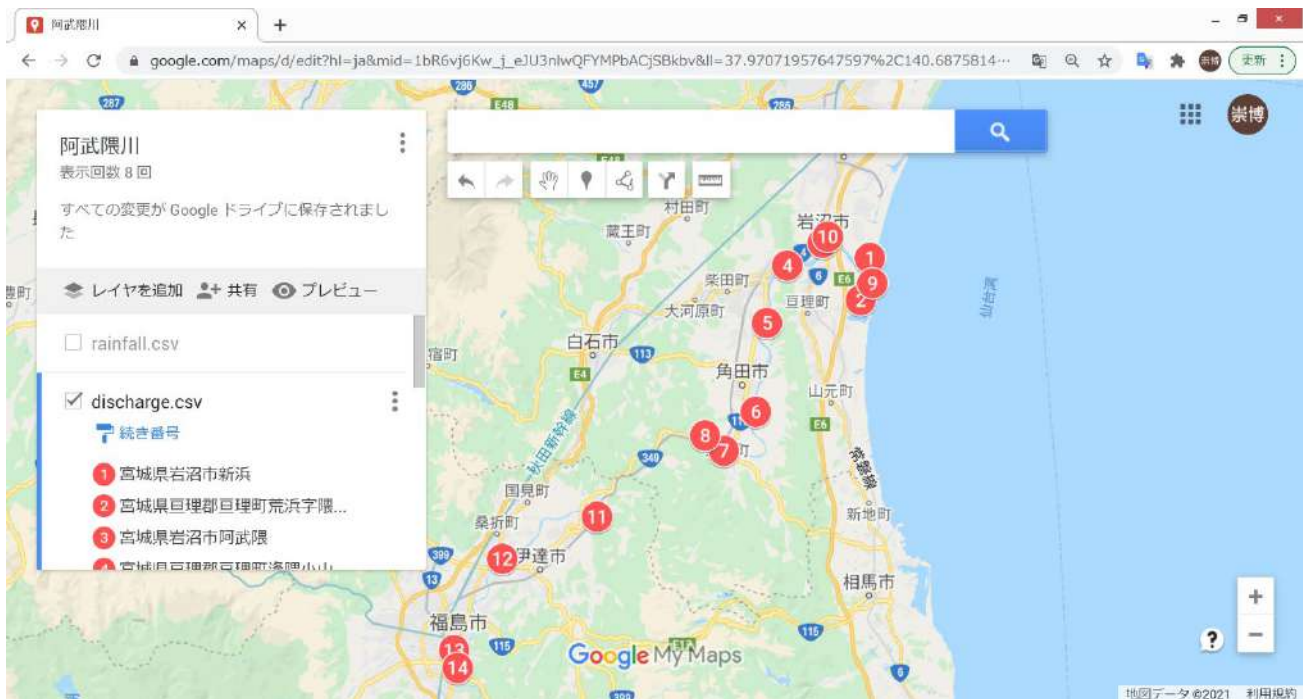


図 3-51 流量観測所の位置②（阿武隈川、水門水質データベース）

④-1-C 観測データ（1カ月期間）

検証に使用する1カ月期間の気象データ（雨量、流量）を図 3-52 と図 3-53 に示す。雨量は表 3-15 の6番の「福島観測所」から取得し（図 3-49 の6番）、流量は表 3-16 の5番の「江尻観測所」から取得した（図 3-50 の5番）。図 3-49 と図 3-50 で確認できる通り、阿武隈川の中流域に位置する観測所を選択した。ここで、観測所の表内の番号と地図上の番号対応は一致していること注意。

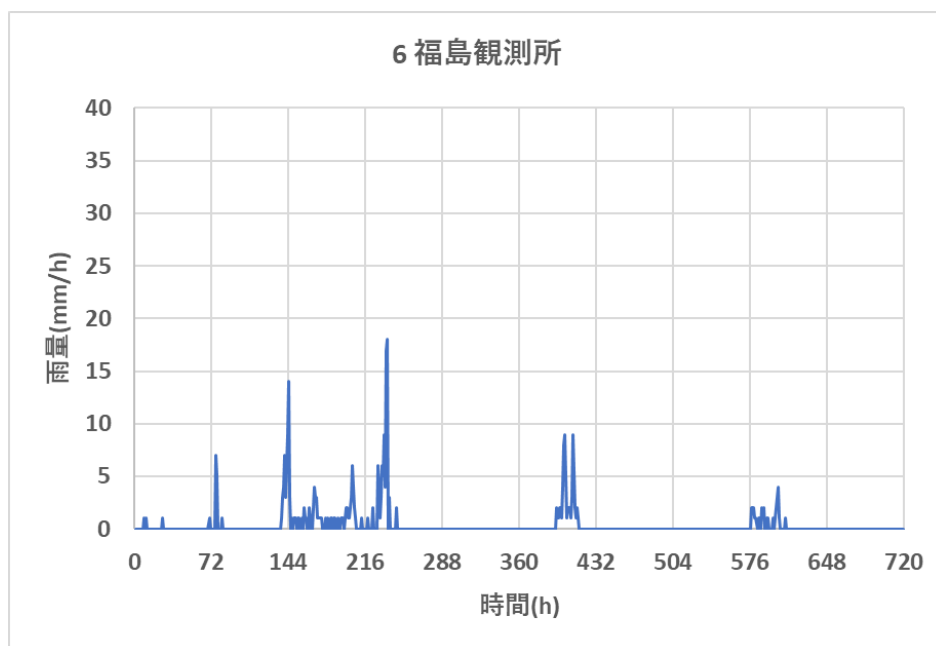


図 3-52 福島観測所⑥番（雨量観測所、2015年9月、阿武隈川）

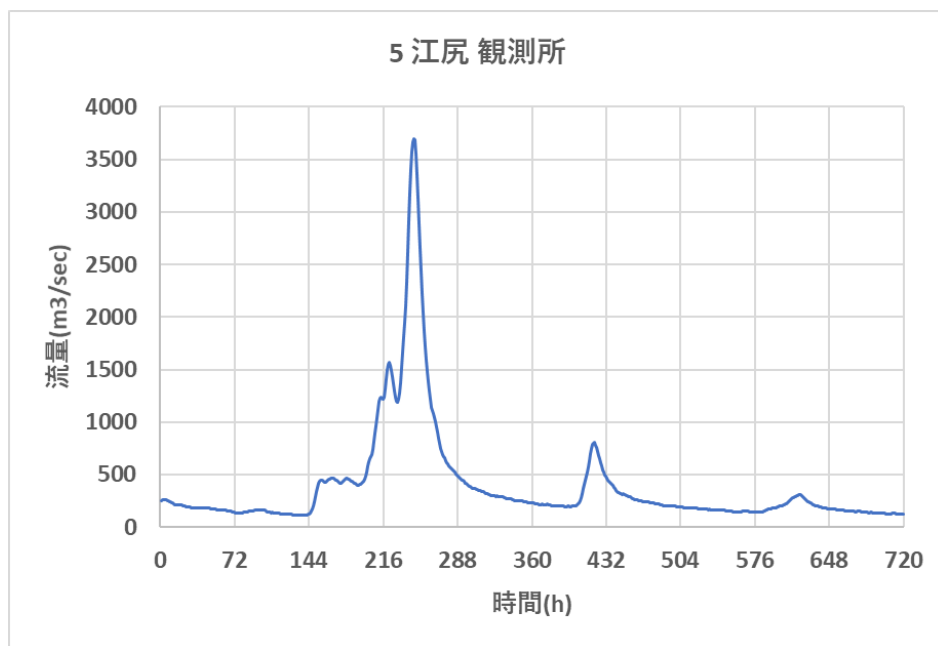


図 3-53 江尻観測所⑤番（流量観測所、2015 年 9 月、阿武隈川）

④-1-D 観測データ（1 年間期間）

検証に使用する 1 年間期間の気象データ（雨量、流量）を図 3-54 と図 3-55 に示す。雨量は、気象庁アメダスのデータベースにおいて、「福島観測所」から取得した。また、流量は表 3-16 の 1 番の「岩沼観測所」から取得した。

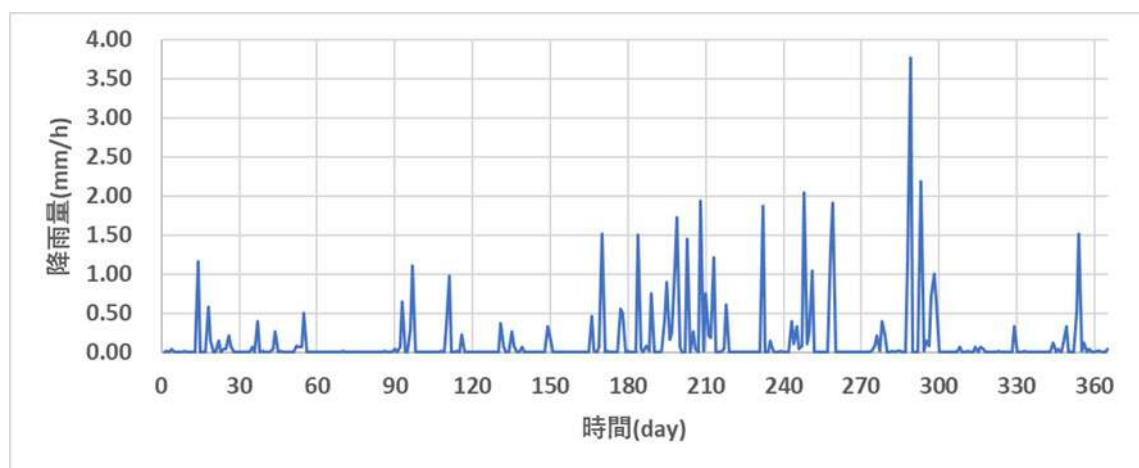


図 3-54 福島観測所（雨量観測所、2013 年、阿武隈川）

※気象庁アメダスのデータベースより取得

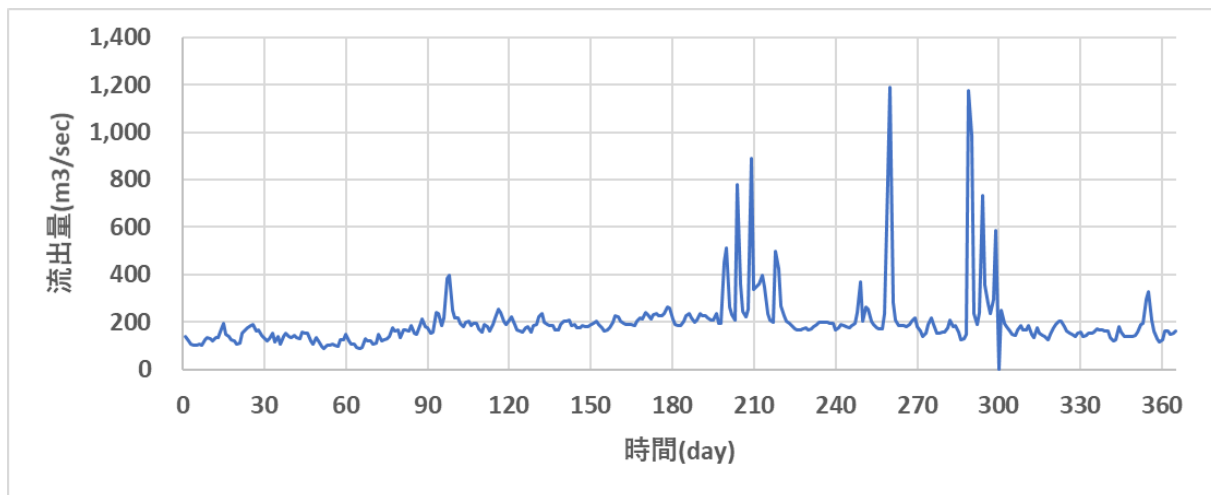


図 3-55 岩沼観測所①番（流量観測所、2013、阿武隈川）

④-2 試解析結果 期間：1カ月、観点：観測値との比較と最適化の効果

ここでは、降雨量の入力を阿武隈流域で観測された1カ月期間（2015年09月01日～09月30日）の観測データとしたときの、MERCURYコードの流出量推定の性能評価を行う。なお、流出量の推定の際にはモデル定数の最適化処理を行う。最適化を行った際のモデル定数の変化と誤差評価の結果について、表3-17と表3-18に示す。

表 3-17 モデル定数の最適化

モデル定数	初期状態	最適化後
a1	0.020	0.0005
a2	0.004	0.015
a3	9.00.E-05	1.0.E-10
b1	0.500	0.303
b2	0.010	0.008

表 3-18 誤差評価

誤差	初期状態	最適化後
RSE	0.622	0.315
NSE	0.378	0.685

このときの、降雨データを図3-56に示し、ハイドログラフの比較結果を図3-57に示す。

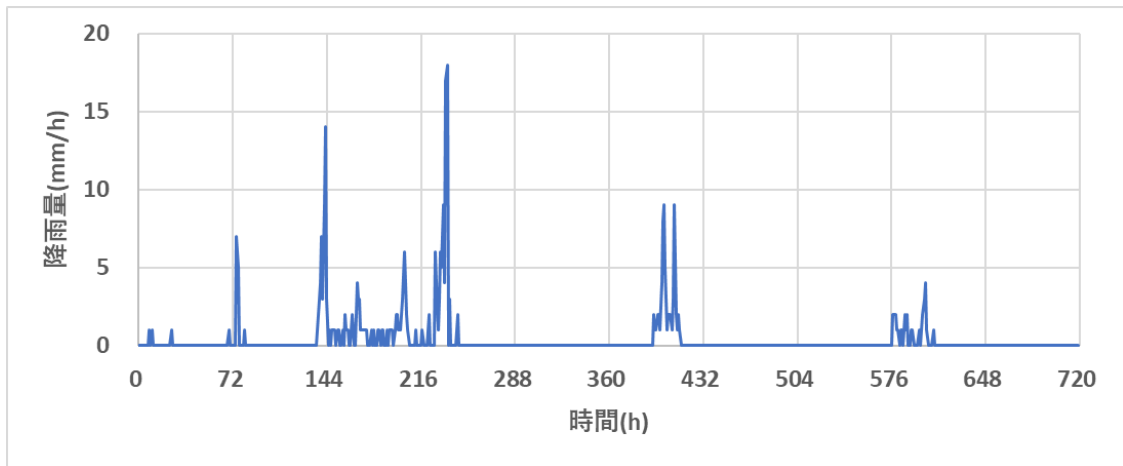


図 3-56 一カ月の降雨量データ（阿武隈川、2015 年 09 月）

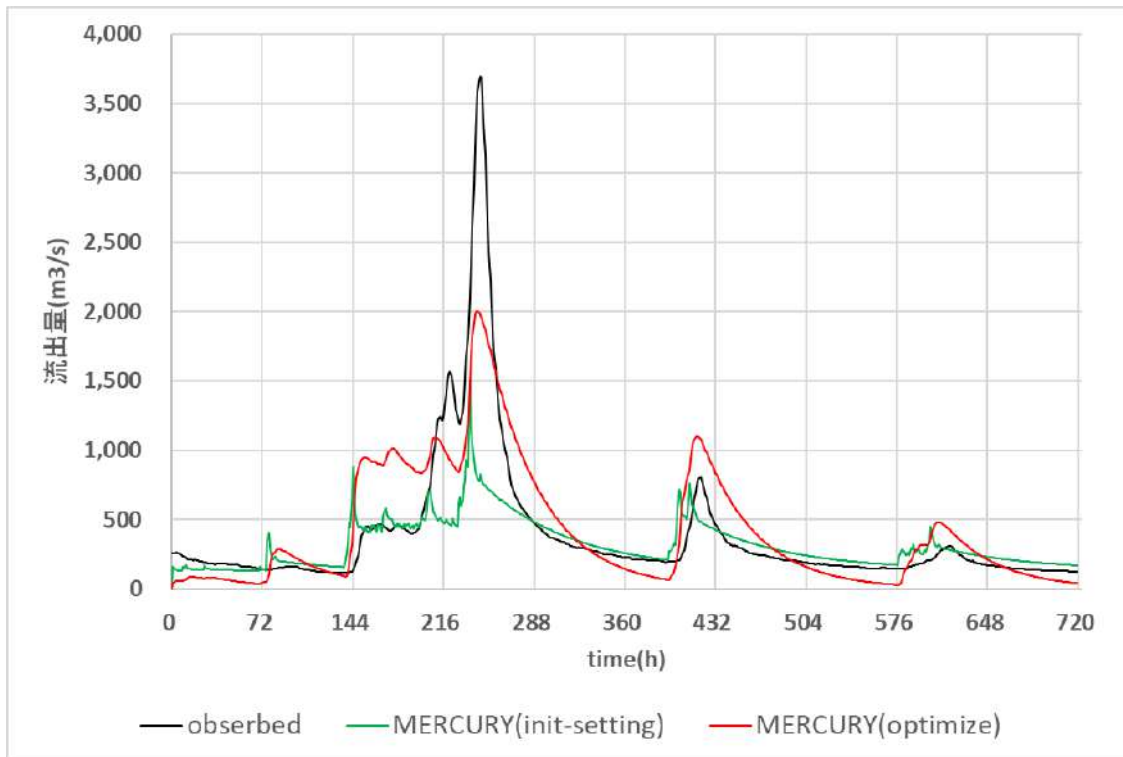


図 3-57 ハイドログラフの比較結果（最適化の効果）

observed : 観測結果、MERCURY(init-setting) : 初期状態、MERCURY(optimize) : 最適化後

④-3 試解析結果 期間：1年間、観点：観測値との比較と最適化の効果

ここでは、降雨量の入力を阿武隈川流域で観測された1年間期間（2013年）の観測データとしたときの、MERCURYコードの流出量推定の性能評価を行う。なお、流出量の推定の際にはモデル定数の最適化処理を行う。最適化を行った際のモデル定数の変化と誤差評価の結果について、表3-19と表3-20に示す。

表 3-19 モデル定数の最適化

モデル定数	初期状態	最適化後
a1	0.020	0.0109
a2	0.004	0.0066
a3	9.00.E-05	1.2.E-04
b1	0.500	1.0557
b2	0.010	0.0159

表 3-20 誤差評価

誤差	初期状態	最適化後
RSE	0.482	0.411
NSE	0.518	0.589

このときの、降雨データを図3-58に示し、ハイドログラフの比較結果を図3-59に示す。

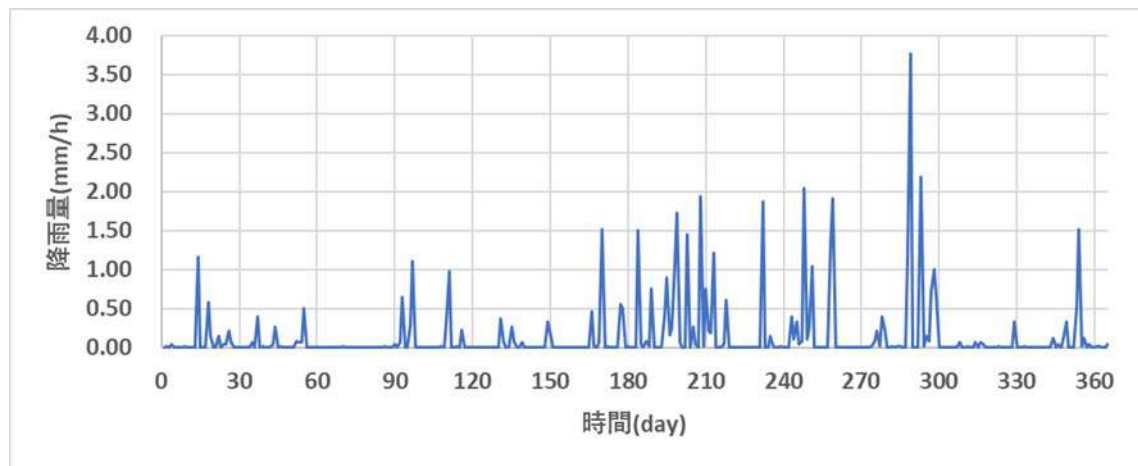


図 3-58 一年間の降雨量データ（阿武隈川、2013年）

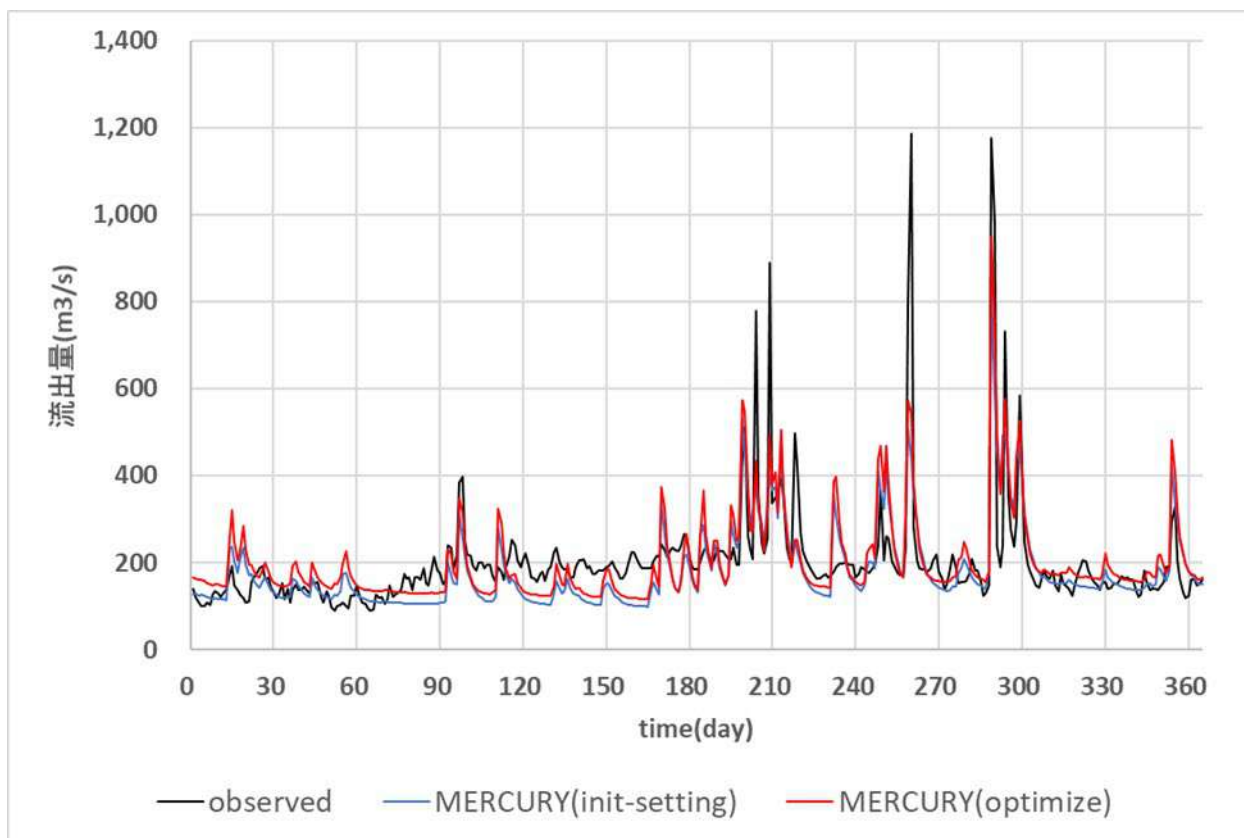


図 3-59 ハイドログラフの比較結果（最適化の効果）

observed : 観測結果、MERCURY(init-setting) : 初期状態、MERCURY(optimize) : 最適化後

⑤ まとめ

以上の結果から、貯留関数法（SRM）より推定精度は幾分、向上していることが分かった（3.2.3 参照）。しかし、最大降雨による流出とその他の小さい流出とを同時に満たすモデルパラメータを決定することは難しいことが分かる。パラメータを決定するに当たり、貯留関数法の際に記した課題と同様の課題があり、これについては今後の研究対象となる。尚、推定精度の高さは、河川流出量の推定には十分であり、環境モデルとしては優れた性能を有することが分かる。

3.2.5 単位図法コード

① モデル概要

単位図法[3-9~3-11](2章参照)はユニットグラフ法ともいわれ、経験的事実に基づいて1932年にアメリカのシャーマンによって提案された方法である。線形現象における重ね合わせの原理を応用したものが、今日では洪水流量を求める有力な方法として、日本でも大いに活用されている。単位図とは単位流量、すなわち流域全体に一定の単位継続時間と一様強度の有効雨量があった場合、流域の出口下流端で得られるハイドログラフを指し、当初は、ある流域に1日間1インチの有効雨量が単独で降った場合、下流端で新しく生じたハイドログラフと定義された。単位図法で用いる3つの仮定については2章参照。尚、図3-60に単位図の解析図を示した。

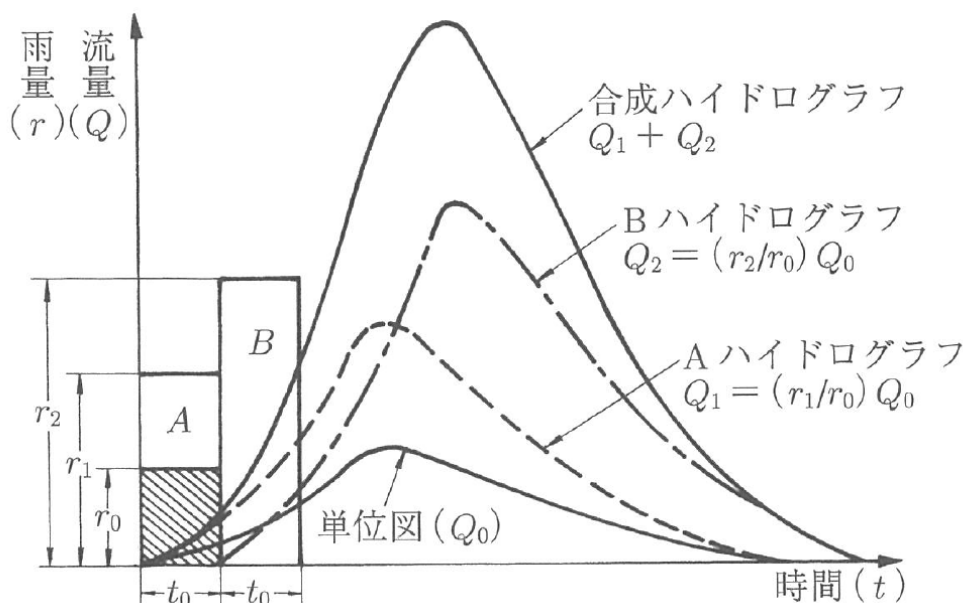


図 3-60 単位図法の解析図

② 計算アルゴリズム

単位図法の計算アルゴリズムを説明する。

$$Q(t) = Area \times Coef \times \sum_{j=0}^n (U_j \times R_{t-j}) \quad (3-139)$$

ここで、 $Q(t)(m^3/s)$ は流出量、 $R_t(mm/hr)$ は雨量、 $U_j(-)$ は配分率、 $Area(m^2)$ は流域面積、 $Coef$ は単位合わせの係数とし $Coef = \frac{1}{1000} \times \frac{1}{3600} = 0.277 \times 10^{-6}$ で与える。¹なお、配分率 U_j については、文献[3-9]を参考に次のような関数形を仮定する。ここで、 k, m, α は定数である。

$$U(t) = kt^m \exp(-at) \quad (3-140)$$

③ 試解析

③-1 期間：1週間、観点：観測値との比較とキャリブレーション

ここでは、単位図法による流出量推定に対して性能評価を行う。評価自体は、計算値と実際の観測値との誤差を計算することで行う。誤差は①と②で導入したNSEおよびRSEを使用する。また、降雨量の入力は広瀬川流域で観測された1週間分(2015/09/17~2015/09/23)の観測データとする。この観測データについては、①-1参照。キャリブレーションを行った際の単位図のパラメータの変化と誤差評価の結果について、表3-21と表3-22に示す。

¹ $\left(\frac{mm}{hr}\right) \sim \left(\frac{mm}{m}\right) \left(\frac{sec}{hr}\right) \left(\frac{m}{sec}\right) \sim \frac{1}{1000} \times \frac{1}{3600} \times \left(\frac{m}{sec}\right)$

表 3-21 モデル定数のキャリブレーション

単位 パラメータ	初期状態	キャリブレーション
k	0.0001	0.0022
m	2.0	1.0
α	0.1	0.1

表 3-22 誤差評価

誤差	初期状態	キャリブレーション
RSE	0.59427	0.19709
NSE	0.40573	0.80291

キャリブレーション後のハイドログラフと観測結果との比較結果を図 3-62 に示す。ピーク流量の再現精度は十分ではないが、その後の流出過程の再現性は確認できる。

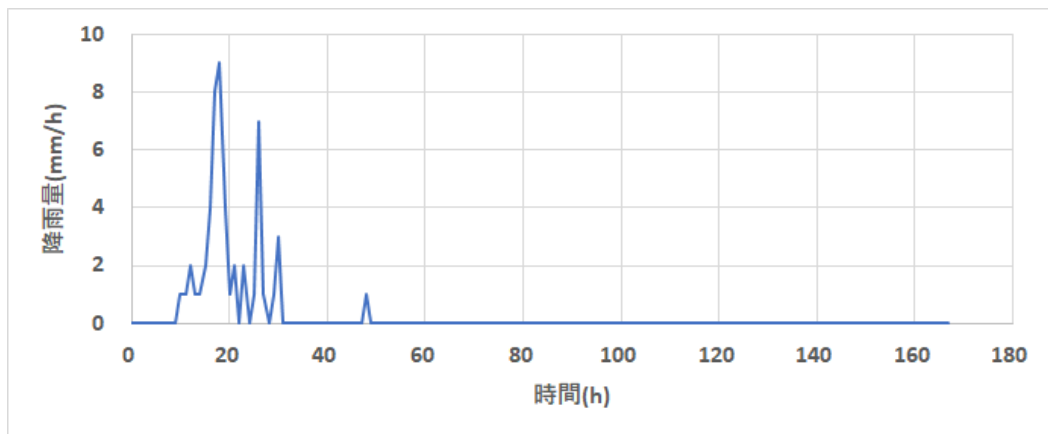


図 3-61 一週間の降雨量データ

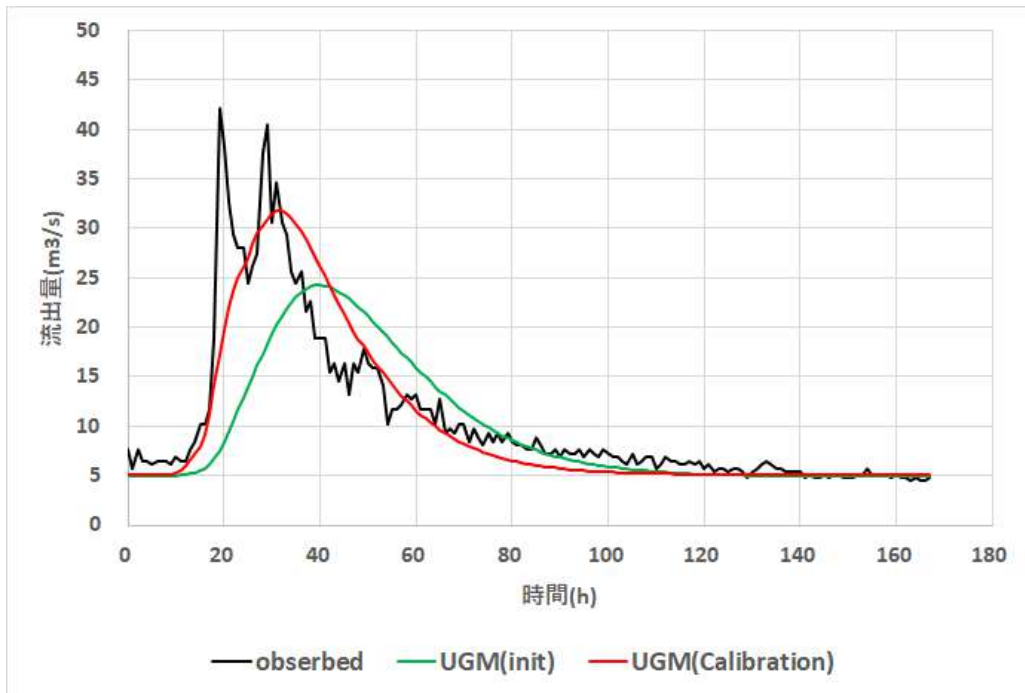


図 3-62 ハイドログラフの比較結果（最適化の効果）

observed：観測結果、UGM(init)：初期状態、UGM(Calibration)：キャリブレーション後

※UGM：Unit Graph Method

③-2 期間：1カ月、観点：観測値との比較とキャリブレーション

ここでは、降雨量の入力を広瀬川流域で観測された1カ月（2015/09/01～2015/09/30）の観測データとしたときの、単位関法による流出量推定に対する性能評価を行う。キャリブレーションを行った際の単位関のパラメータの変化と誤差評価の結果について、表 3-16 と表 3-17 に示す。

表 3-23 モデル定数のキャリブレーション

単位関 パラメータ	初期状態	キャリブレーション
k	0.0001	0.006
m	2.0	1.0
α	0.1	0.12

表 3-24 誤差評価

誤差	初期状態	キャリブレーション
RSE	0.85208	0.47409
NSE	0.14792	0.52591

キャリブレーション後のハイドログラフの比較結果を図 3-64 に示す。

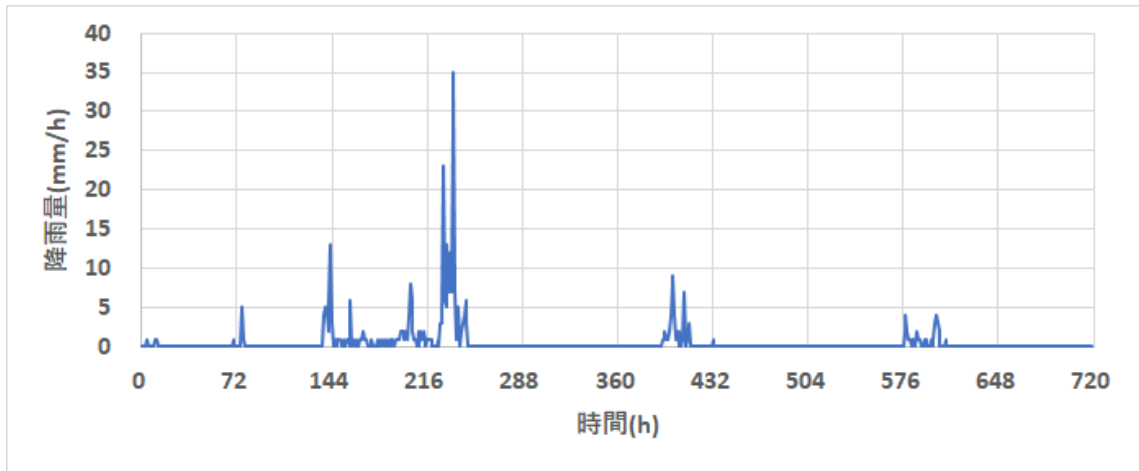


図 3-63 1ヶ月間の降雨量データ

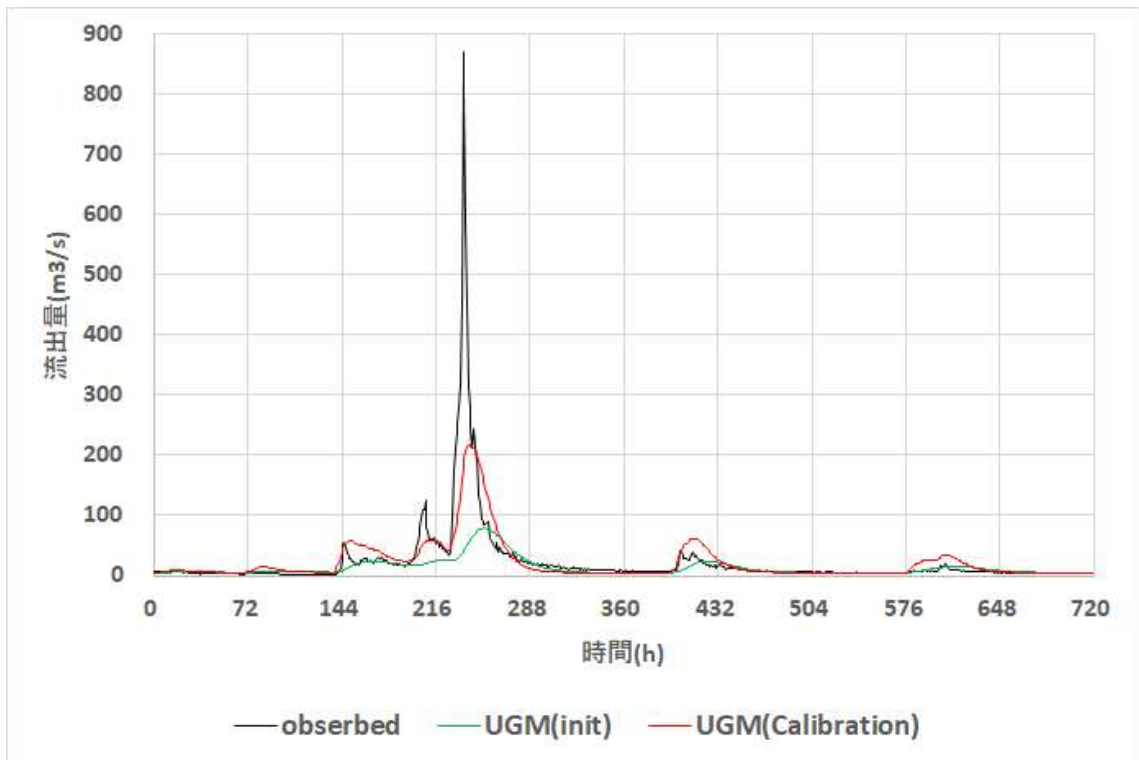


図 3-64 ハイドログラフの比較結果（最適化の効果）

observed : 観測結果、UGM(init) : 初期状態、UGM(Calibration) : キャリブレーション後

※UGM : Unit Graph Method

以上の結果より、簡単なモデルであるため、流出量の推定精度は貯留関数法（SRM）やタンクモデル（MERCURY）と比べて劣ることが分かった。しかし、極めて簡単なモデルであり、最適化の必要もなく、プログラム開発も短時間で可能であることから、流出モデルの適用例がない河川において、緊急時等の簡易推定に利用すべきモデルであることが分かる。

3.2.6 合理式法コード

① モデル概要

合理式[3-9~3-11]は、物部式あるいは Rational 式ともよばれ、流域を図 3-65(a)に示すように、模型的に細長い長方形流域を考え、流域の上流端 M から末端 N (流量測定点) までの距離を l とし、この流域全体に一様に継続時間 τ_r の一様強度の雨が降ったものと仮定し、流域の先端 (流出末端 N より最も遠い地点) に降った雨水が地表及び河道を流れ、N までに達するに要する時間を t_l とする。 $\tau_r > t_l$ として、地点 N での流量図を考える際、雨の降りはじめ $t = 0$ から $t = t_l$ までは、流量をほぼ直線的に増加させる。その後、 $t = t_l$ に、地点 N に全流域からの流出水が到達し、流量の最大値、即ちピーク流量 Q_{max} が得られるとする。その量は以下の式で与えられる。

$$Q_{max} = f \frac{r}{3600 \times 1000} \times A \times 1000^2 = \frac{frA}{3.6} \quad (3-141)$$

$$= 0.2778 \times frA (\text{m}^3/\text{sec})$$

ここで、 r は雨量強度 (mm/hr)、 A は流域面積 (km^2)、 f は流出係数であり、表 3-25 を参考に指定する。尚、(3-141) の数値 0.2778 は流量に m^3/sec の単位を用い、1 時間当たりの降雨の mm を m に、hr を sec に、流域面積を km^2 を m^2 に換算した場合の値である。

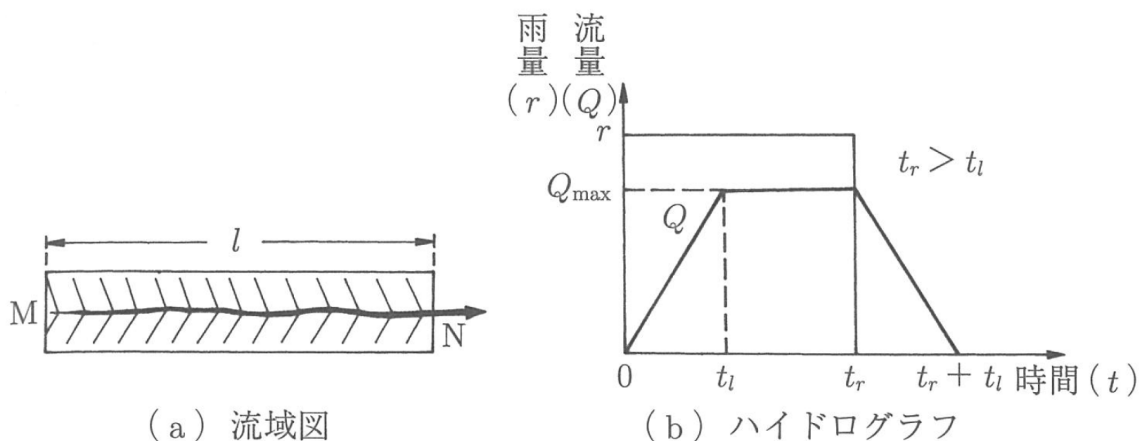


図 3-65 長方形流域と仮定するハイドログラフ形状

表 3-25 流出係数 (出典：文献[3-9]の表 2.11)

急峻な山地	0.75~0.90	かんがい中の水田	0.70~0.80
三紀層山丘	0.70~0.80	山地河川	0.75~0.85
起伏のある土地および樹林	0.50~0.75	平地小河川	0.45~0.75
平らな耕地	0.45~0.60	流域の半分以上が平地の大河川	0.50~0.75

流水が流域の最遠点からある地点まで到達する時間 T_p については、文献[3-11]を参考に、次の公式から求める。尚、 T_p は上述の t_l に相当する。

自然流域の場合の到達時間： T_p

$$T_p = 1.67 \times 10^{-3} \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.7} \quad (3-142)$$

都市流域の場合の到達時間： T_p

$$T_p = 2.40 \times 10^{-3} \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.7} \quad (3-143)$$

ここで、 L は流域最遠点から流量計算地点までの距離(m)であり、 S は平均流路勾配である。

② 計算アルゴリズム

合理式の計算アルゴリズムを説明する。各時刻の変動降雨を考慮した流出量の算定は、単位図法②を踏襲する。この際、仮定する単位図形状は、①で説明した合理式で規定されるハイドログラフとする。今回は変動降雨を扱うため、一様強度の雨の継続時間は0.0secである。従って、単位図は(3-144)のような形状を仮定する。

$$Q(t) = Area \times Coef \times \sum_{j=0}^n (f \times U_j \times R_{t-j}) \quad (3-144)$$

ここで、 $Q(t)(m^3/s)$ は流出量、 $R_t(mm/hr)$ は雨量、 $f(-)$ は流出係数、 $U_j(-)$ は配分率、 $Area(m^2)$ は流域面積、 $Coef$ は単位合わせの係数とし $Coef = \frac{1}{1000} \times \frac{1}{3600} = 0.277 \times 10^{-6}$ で与える。²

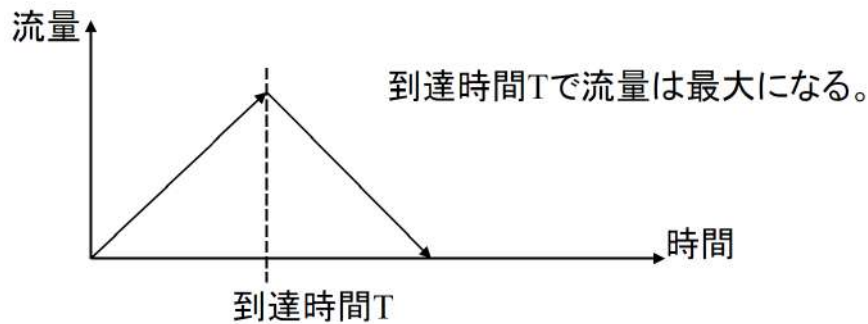


図 3-66 合理式法で仮定する単位図形状

合理式法において、配分率 U_j は次のように定義する。

$$U(t) = \begin{cases} \frac{1.0}{T_p} \left(\frac{1.0}{T_p} t \right) & (t \leq T_p), \\ \frac{1.0}{T_p} \left(2.0 - \frac{1.0}{T_p} t \right) & (t > T_p). \end{cases} \quad (3-145)$$

ここで、到達時間 T_p は次のように計算する。

$$T_p = ATC \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.7} \quad (3-146)$$

² $\left(\frac{mm}{hr} \right) \sim \left(\frac{mm}{m} \right) \left(\frac{sec}{hr} \right) \left(\frac{m}{sec} \right) \sim \frac{1}{1000} \times \frac{1}{3600} \times \left(\frac{m}{sec} \right)$

L は流域最遠点から流量計算地点までの距離(m)であり、 S は平均流路勾配である。また、 ATC (ARRIVAL TIME COEFFICIENT)は到達時間を規定する係数である。合理式法において、計算アルゴリズムを(3-144)~のように定義すると、一様強度の雨を仮定した場合の推定流出量のハイドログラフは、ちょうど図 3-65(b)で示した台形形状と一致する。また、式(3-147)のように配分率 U_j を定義すると、次のような性質が成り立つ。

$$\int_0^{2T_p} U(t) dx = 1.0 \quad (3-147)$$

③ 試解析

③-1 期間：1週間、観点：観測値との比較とキャリブレーション

合理式法による流出量推定に対して性能評価を行う。評価は、計算値と実際の観測値との誤差を取ることで行い、①②で利用したNSEおよびRSEを使用する。また、降雨量の入力は広瀬川流域で観測された1週間分(2015/09/17~2015/09/23)の観測データとする。この観測データについては、③-1を確認すること。尚、広瀬川の流路延長は37.251(km)とし、水源の標高を843.0(m)とする。この値から式(3-146)の距離や平均流路勾配を計算する。キャリブレーションを行った際の単位図のパラメータの変化と誤差評価の結果については、表 3-26 と表 3-27 に示す。

表 3-26 モデル定数のキャリブレーション

単位図 パラメータ	初期状態	キャリブレーション
f	0.75	0.12
ATC	0.00167	0.00100

※ f は流出係数、 ATC は到着時間係数とする。

表 3-27 誤差評価

誤差	初期状態	キャリブレーション
RSE	21.1074	0.49697
NSE	-20.1074	0.50303

キャリブレーション後のハイドログラフと実測結果との比較結果を図 3-68 に示す。モデルの単純さから、ピーク流量後の流出過程の再現が十分ではないが、流出過程の概略は凡そ推定できていることが分かる。本モデルも容易に開発可能であり、モデルの背景にある仮定も明白であることから、流出モデルの適用がない河川に対し、緊急時に適用可能なモデルと位置づけられる。

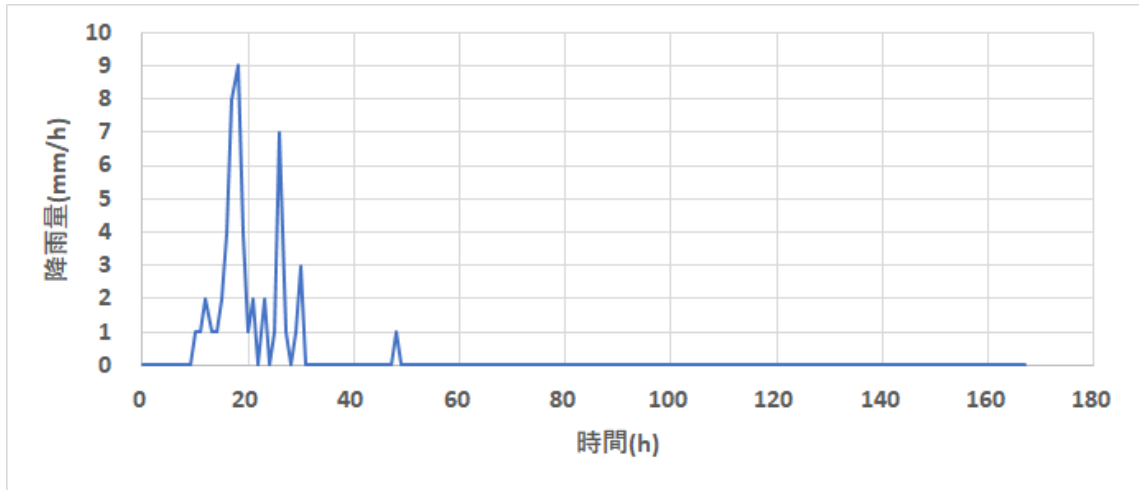


図 3-67 一週間の降雨量データ

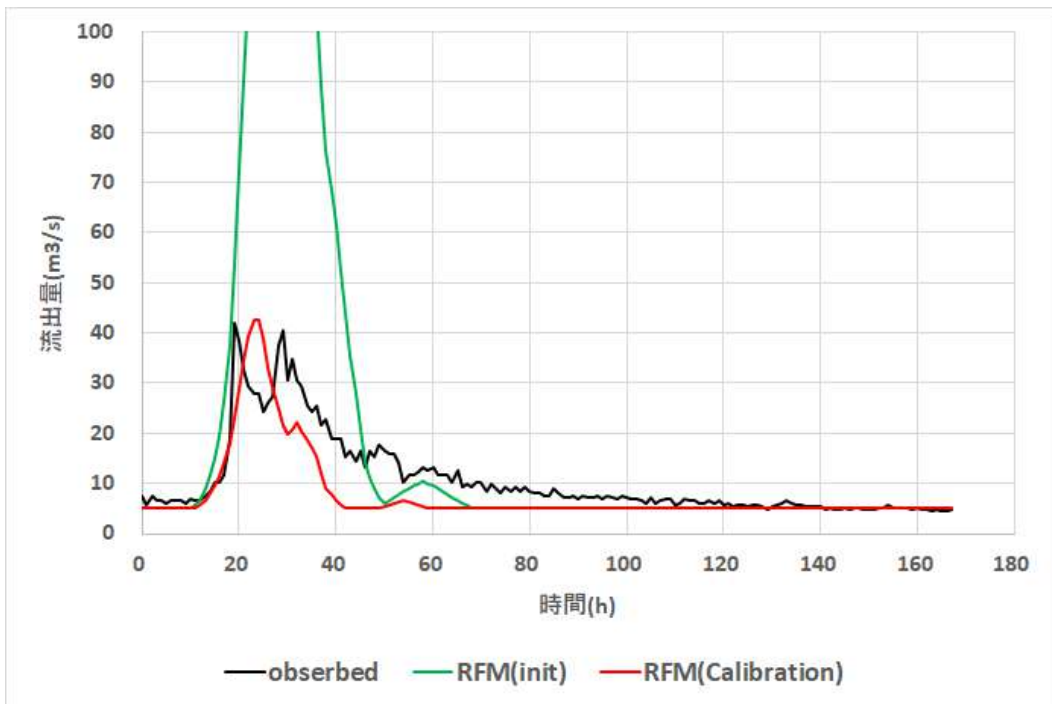


図 3-68 ハイドログラフの比較結果（最適化の効果）

observed：観測結果、RFM(init)：初期状態、RFM (Calibration)：キャリブレーション後

※RFM：Rational Formula Method

③-2 期間：1 カ月、観点：観測値との比較とキャリブレーション

次に、降雨量の入力を広瀬川流域で観測された1 カ月（2015/09/01～2015/09/30）間を対象とした際の合理式法による流出量推定に対する性能評価を行う。尚、広瀬川の流路延長は37.251(km)とし、水源の標高を843.0(m)とする。この値から式(3-146)の距離や平均流路勾配を計算する。キャリブレーションを行った際の単位図のパラメータの変化と誤差評価の結果については表 3-28 と表 3-29 に示す。

表 3-28 モデル定数のキャリブレーション

単位 パラメータ	初期状態	キャリブレーション
f	0.75	0.35
ATC	0.00167	0.00125

※ f は流出係数、 ATC は到着時間係数とする。

表 3-29 誤差評価

誤差	初期状態	キャリブレーション
RSE	0.83096	0.35304
NSE	0.16904	0.64696

キャリブレーション後のハイドログラフの比較結果を図 3-70 に示す。

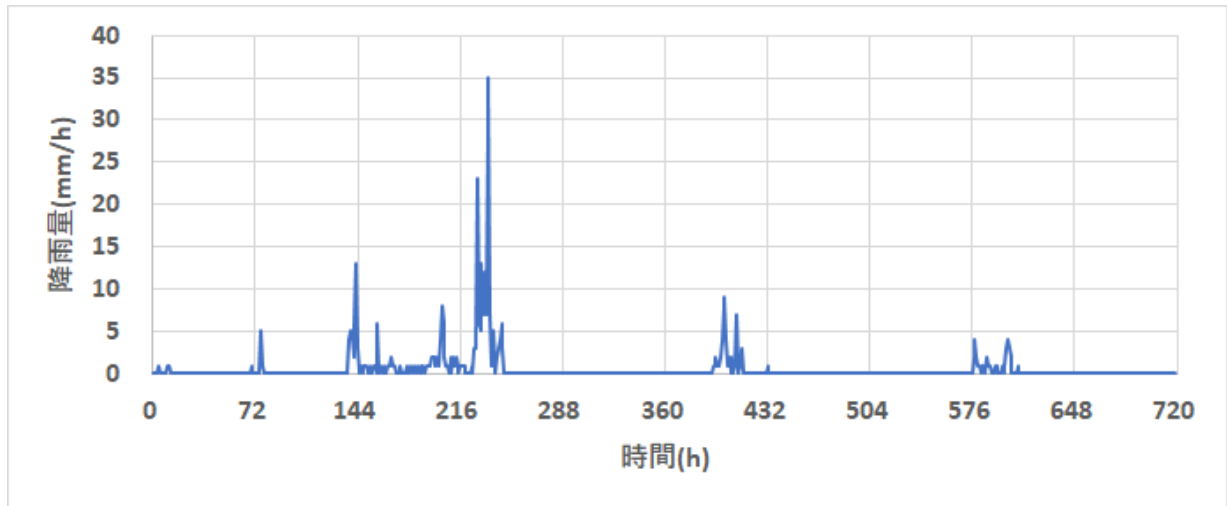


図 3-69 一月間の降雨量データ

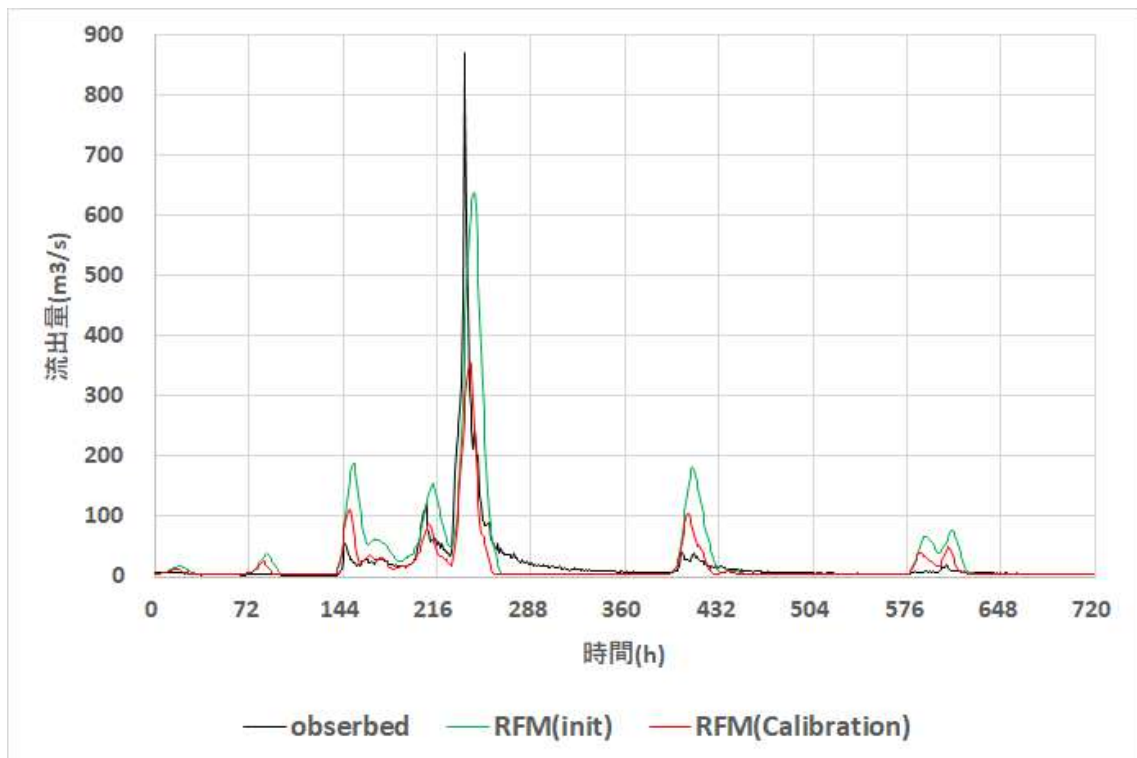


図 3-70 ハイドログラフの比較結果（最適化の効果）

observed：観測結果、RFM(init)：初期状態、RFM (Calibration)：キャリブレーション後

※RFM：Rational Formula Method

以上の結果より、精度は貯留関数モデルやタンクモデルと比べて低いが、単位関法と同様に簡単に開発できる他、最適化等も必要なく、容易に推定解析が可能となる。従って、単位関法と同様、緊急時等の利用が有効と考えられる。

3.3 分布定数型モデルの適用と試計算及び試解析の結果

本節では、複数の一般的な分布定数型モデルを用いて、試計算及び試解析した結果を示し、モデル間の比較検討した結果を報告する。用いたモデルは Arc-SWAT[3-12~3-19], GeoWEPP[3-20~3-29], RADFLOW（JAEA 開発中）[3-30~3-31]である。

3.3.1 誤差評価の方法

解析の際は、集中定数型の場合と同様、2つの誤差評価関数を使用して、計算値と観測値の誤差を測る。評価関数の詳細は3.2.2①および②を参照すること。

3.3.2 GIS(Geographic Information System)の利用

GIS(Geographic Information System、地理情報システム)とは、地理情報及びその付加情報をコンピュータ上で作成・保存・利用・管理・表示・検索するシステムを言う。人工衛星、現地踏査などより得られたデータを空間、時間の面から分析・編集することが可能で、科学的調査、土地、施設や道路などの地理情報の管理、都市計画などに利用される。GIS で使われるデータは多岐に渡っているが、大

大きく分類すると、地図や空中写真、衛星画像などの図形情報、地物に関連する属性情報、使用している測地系や投影法、縮尺、精度などのメタ情報などに大別される。

一般的に、描画方式上のデータ形式として、ラスターデータとベクターデータに大別されるが、オブジェクト指向 GIS では、このような区別はなく、従来のラスターデータは関数によって表現される被覆 (ISO 19123) として扱われ (ラスターデータは、空間を一定間隔の格子点に分割して各格子点に値を与えることによって表現するラスター形式のデータ)、主に、空中写真や衛星画像などのリモートセンシング技術による写真やセンサーで受信しデジタル化された画像であることが多い。また、それらを基に作られた土地被覆分類図や植生分布図、メッシュ気象データなどもラスターデータである。一方、ベクターデータとは、点座標とそれらから構成されるポリゴンやポイント、ライン等によって表現する、ベクタ形式のデータである。測量や地図のトレース、CAD データなどからの変換によって得られる。現在、複数の GIS ソフトウェアが存在するが、代表的ソフトウェアを下に記す (実際に本事業にて利用する)。

① ArcGIS の利用

ArcGIS とは、ESRI 社により提供されている GIS ソフトウェアである。ArcGIS は、ArcMap、ArcCatalog、ArcToolbox から構成されている。ArcMap はデータの表示および編集などを実行する、ArcCatalog はデータの管理を実行し、ArcToolbox はデータ管理や解析での使用ツールを格納するアプリケーションである。ArcSWAT 及び GeoWEPP を利用する際の基本ソフトウェアである。

② QGIS の利用

QGIS (キュージーアイエス、旧称:Quantum GIS) は、地理情報システムの閲覧、編集、分析機能を有するクロスプラットフォームのオープンソースソフトウェア・GIS ソフトである。無料でありながら、有料・高額な GIS ソフト (ArcGIS など) に近い機能・操作性を備えており、機能の追加も無料のプラグインで行うことができる。RADFLOW を用いる際に利用する。

3.3.3 入力データおよび観測データの取得方法

① 地形データ

①-1 DEM とは

DEM(Digital Elevation Model)は、建物や樹木などを取り除いた地表面の高さを表示するデータモデルである。日本では、国土地理院が提供する「基盤地図情報 (数値標高モデル)」という DEM データが広く利用されており、これは航空レーザー測量や写真測量によって得た標高データをメッシュ (5m、10m 単位などの方眼) で区切り、その中心点の標高値を抽出したデータである。DEM については以下のサイトに簡単な説明がある。

<https://www.esri.com/gis-guide/other-dataformat/elevation-data/>

また、無償で使える GIS データ/マップについては、以下のサイトで紹介されている。

<https://www.esri.com/gis-guide/other-dataformat/free-gis-data/>

①-2 取得方法

解析に使用する地形データ（DEM）は国土地理院の基盤地図情報の数値標高モデルから取得する。

<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>



図 3-71 国土地理院の基盤地図情報：ダウンロードサービス

今回の解析対象である広瀬川を包含する DEM データの ID は、564034、564035、564044、564045、564054、564055、564064、564065 である。

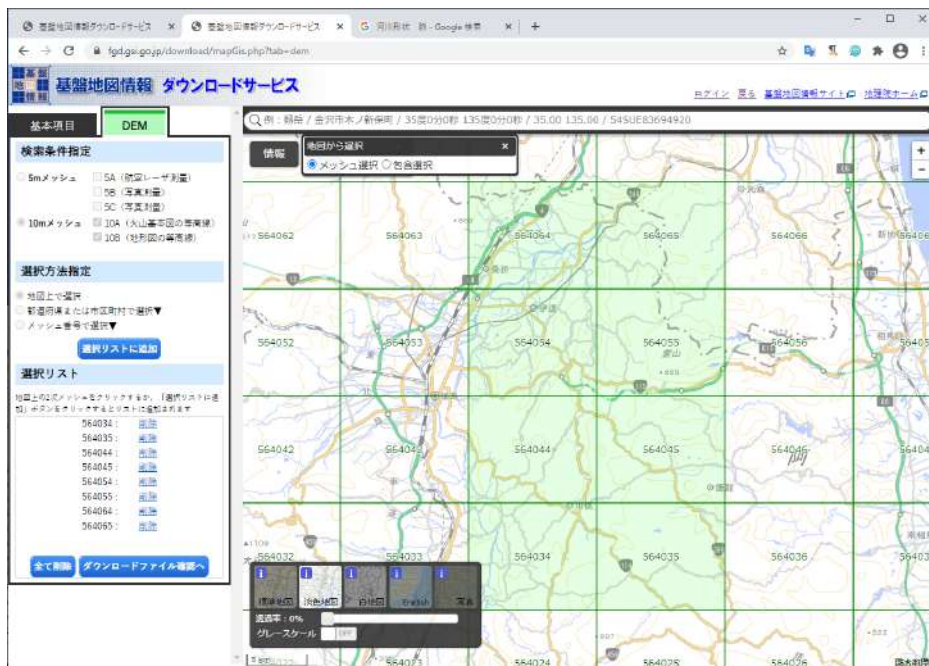


図 3-72 広瀬川を包含する DEM データ ID（基盤地図情報）

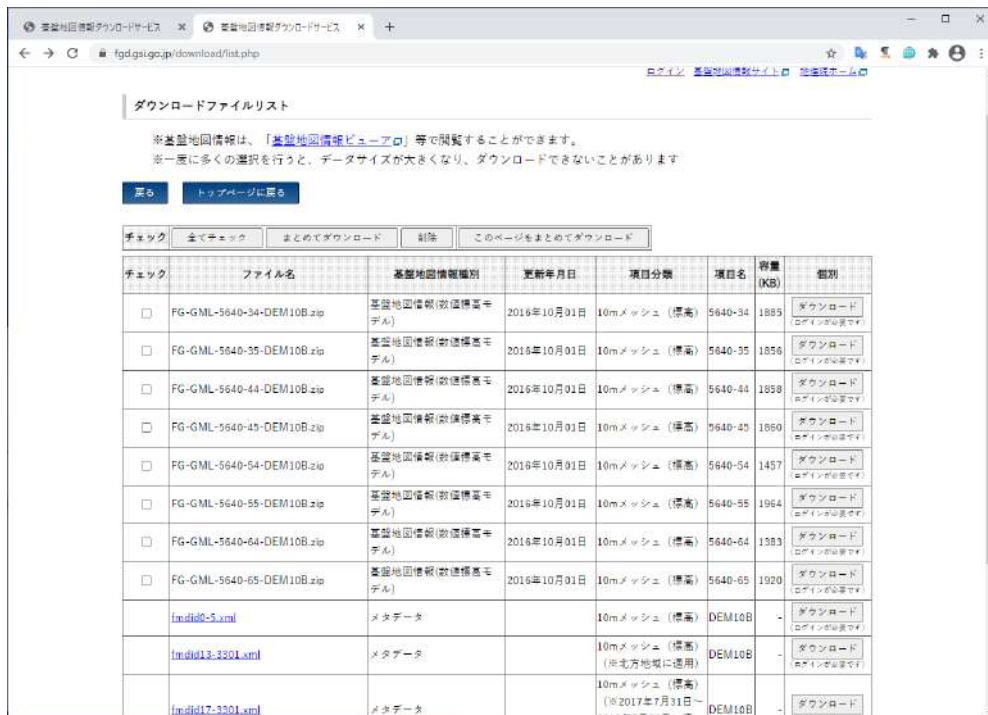


図 3-73 ダウンロードファイルリスト (基盤地図情報)

ダウンロードしたファイル「PackDLMap.zip」は解凍する。その中に含まれる、ZIP 群「FG-GML-5640-34-DEM10B.zip」などは、そのまま未解凍でよい。

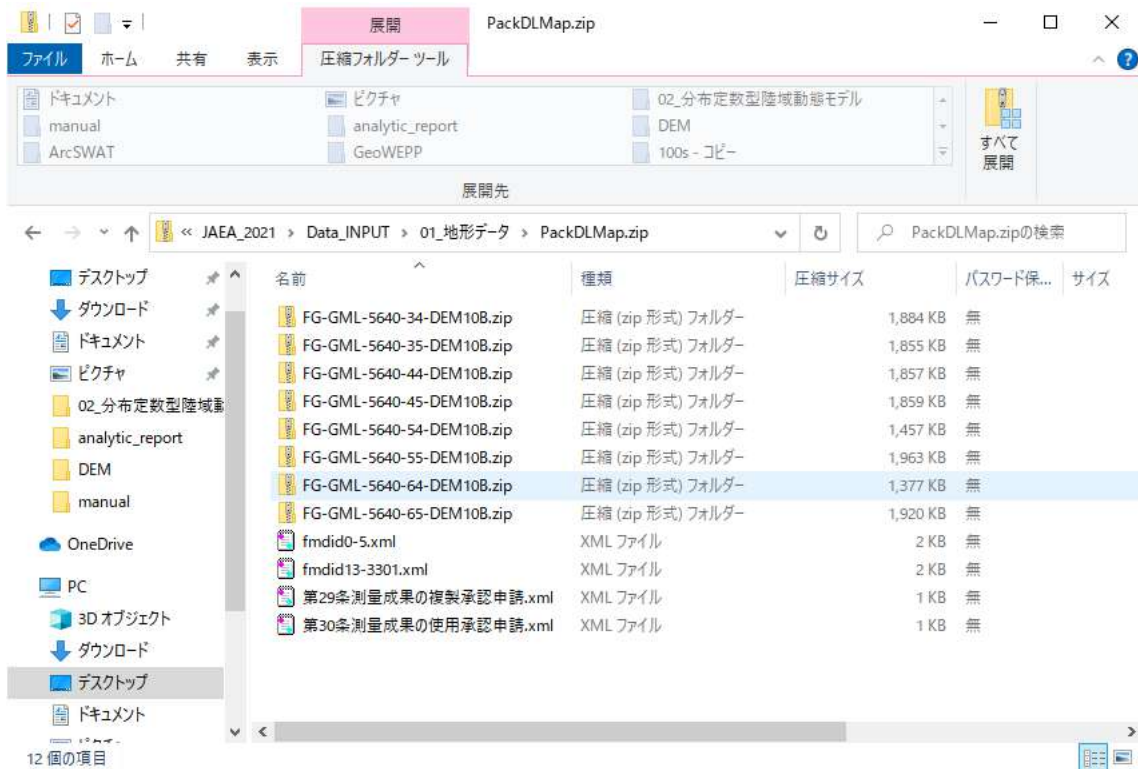


図 3-74 ダウンロードファイル「PackDLMap.zip」

①-3 ArcGIS による操作

①-3-A インポート方法

基盤地図情報データを ArcGIS へインポートするためには、あらかじめ、ESRI ジャパンで提供されている拡張アドイン「変換ツール (国内データ)」(もしくは「国内対応パック」という)を導入する必要がある。その導入手順については、ESRI 公式サイト (<https://www.esri.com/products/arcgis/>)を参照すること。また、以降で説明するデータのインポート方法については ESRI 関連サイト (<https://blog.esri.com/2016/01/15/5-a80f/>, <https://blog.esri.com/2014/10/09/jpgis2014gml-39ff/>)を参考にした。

はじめに、ArcMap(ArcGIS)を起動する。初期状態では、ArcToolBox に「変換ツール (国内データ)」が表示されていないため、新しく追加する必要がある。

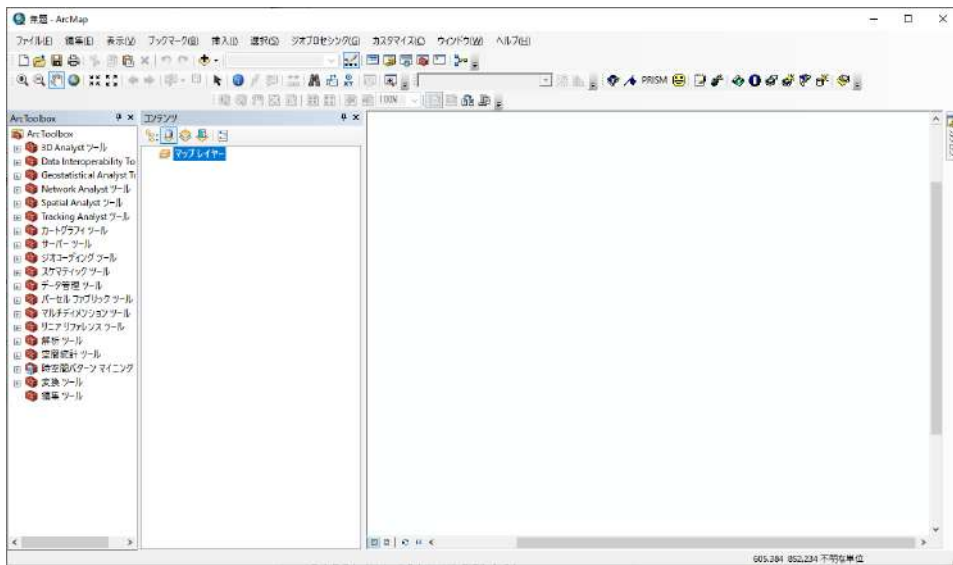


図 3-75 ArcMap(ArcGIS)

ArcToolBox を右クリックして、「ツールボックスの追加」を選択する。

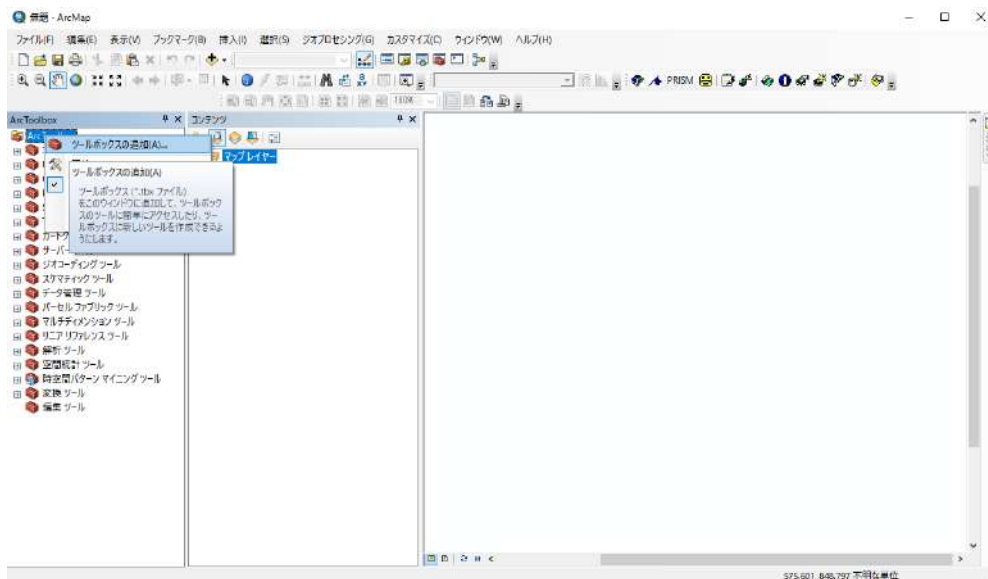


図 3-76 ツールボックスの追加 (ArcToolBox)

PC の下記の位置にインストールされている、「変換ツール（国内データ）」アドインを選択する。
アドインは下記の赤字で示した絶対パスの位置に存在する。

C:\Program Files\ (x86)\ArcGIS\Desktop\10.4\ArcToolbox\Toolboxes\Esi Japan Tools.tbx

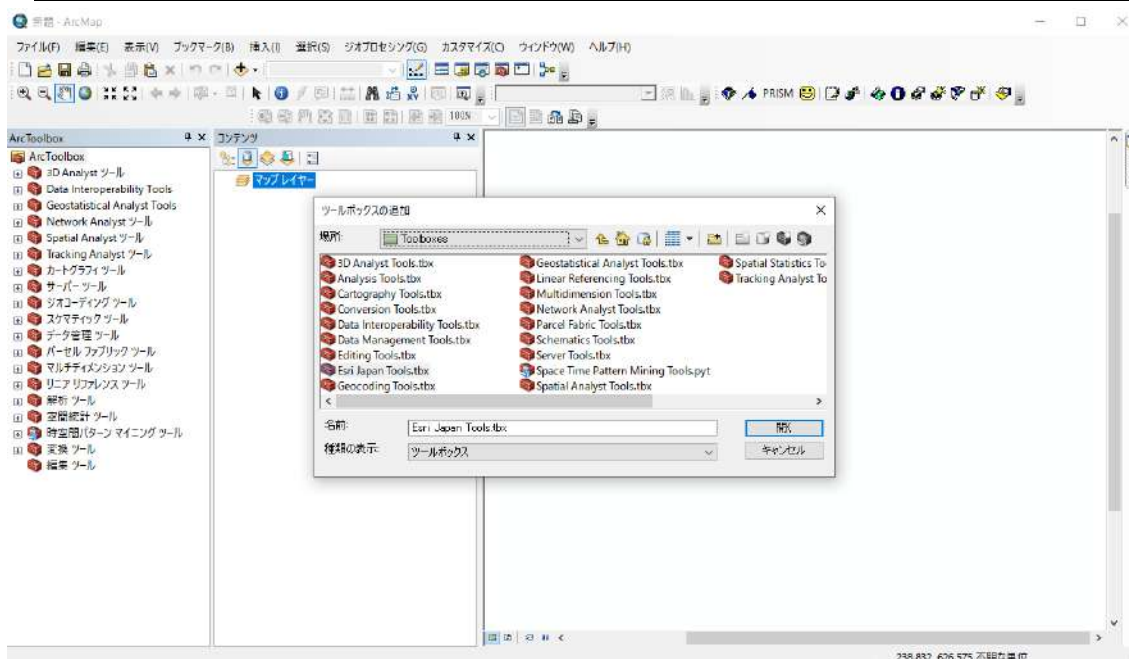


図 3-77 「変換ツール（国内データ）」アドインの適用①

ArcToolbox にアドイン「変換ツール（国内データ）」が追加される。

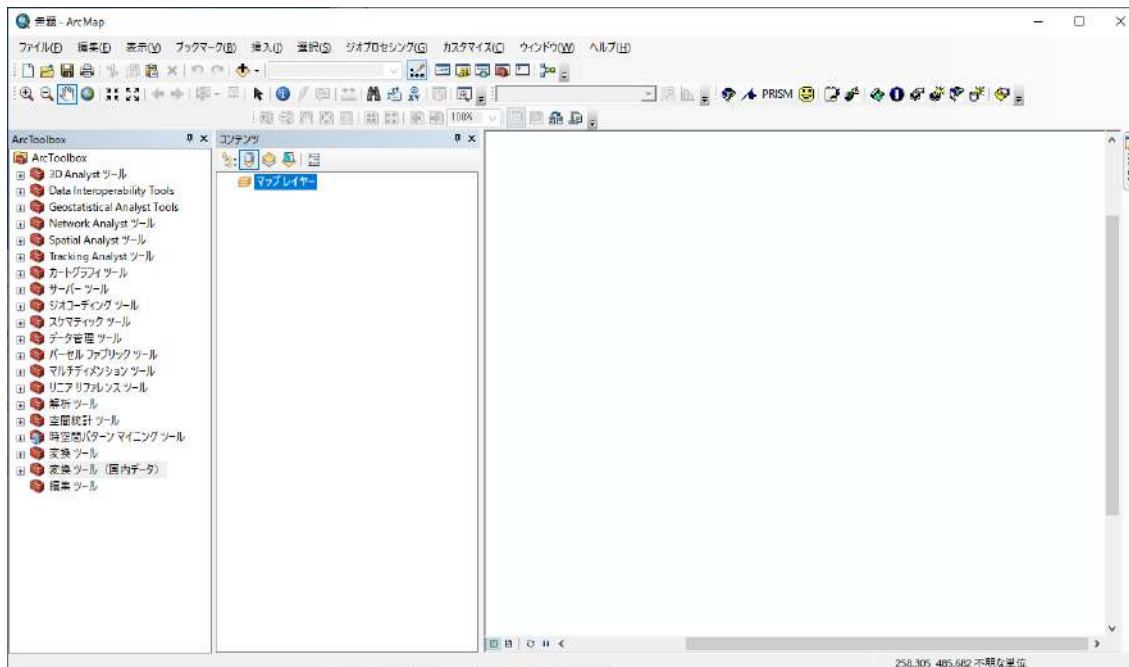


図 3-78 「変換ツール（国内データ）」アドインの適用②

以降では、基盤地図情報データをインポートする方法を説明する。

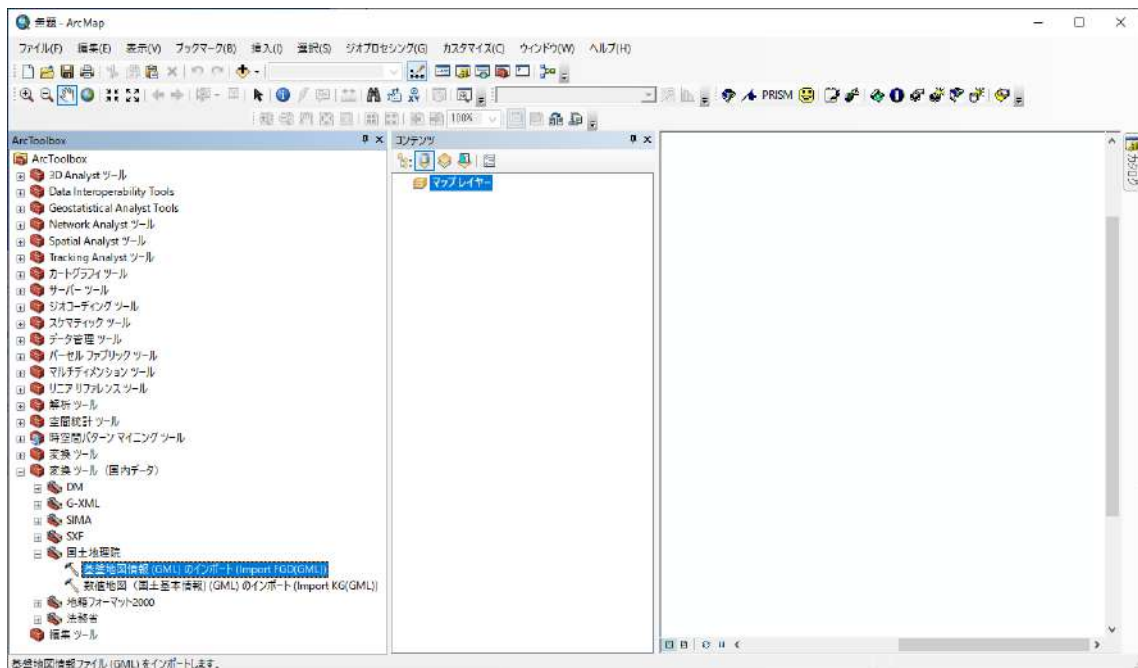


図 3-79 基盤地図情報 (GML) のインポート①

入力ファイルとして、基盤地図情報 zip データ群を選択する。また、測地系は「JGD2000」に変更する。

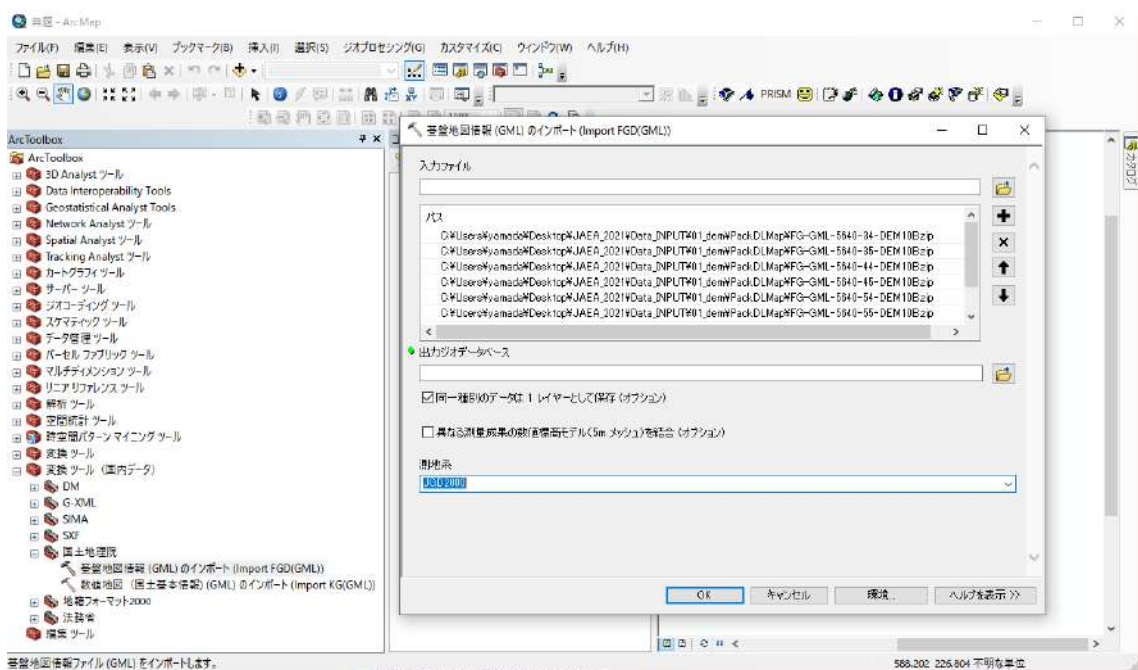


図 3-80 基盤地図情報 (GML) のインポート②

「出力ジオデータベース」を開き、ダイアログの右上にあるボタン「新規ファイル ジオデータベース」を押下して、新規ジオデータベースを作業フォルダに追加する。

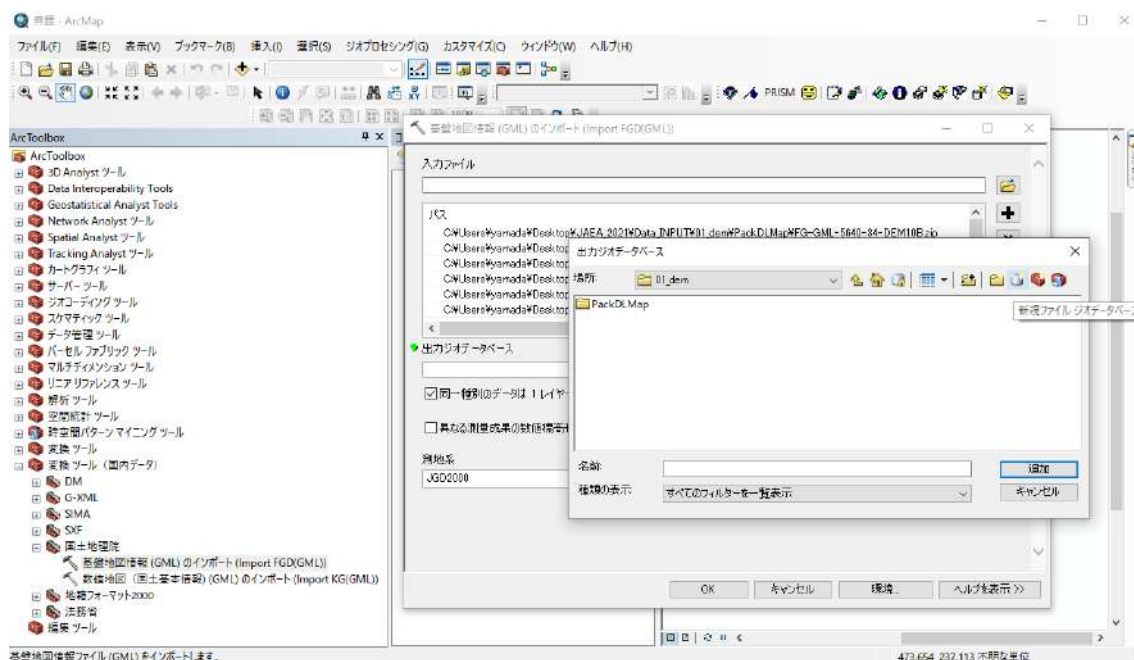


図 3-81 基盤地図情報 (GML) のインポート③

今回は、新規作成したジオデータベースに「Geodatabase.gdb」という名前を付けて、これを出力先に設定する。

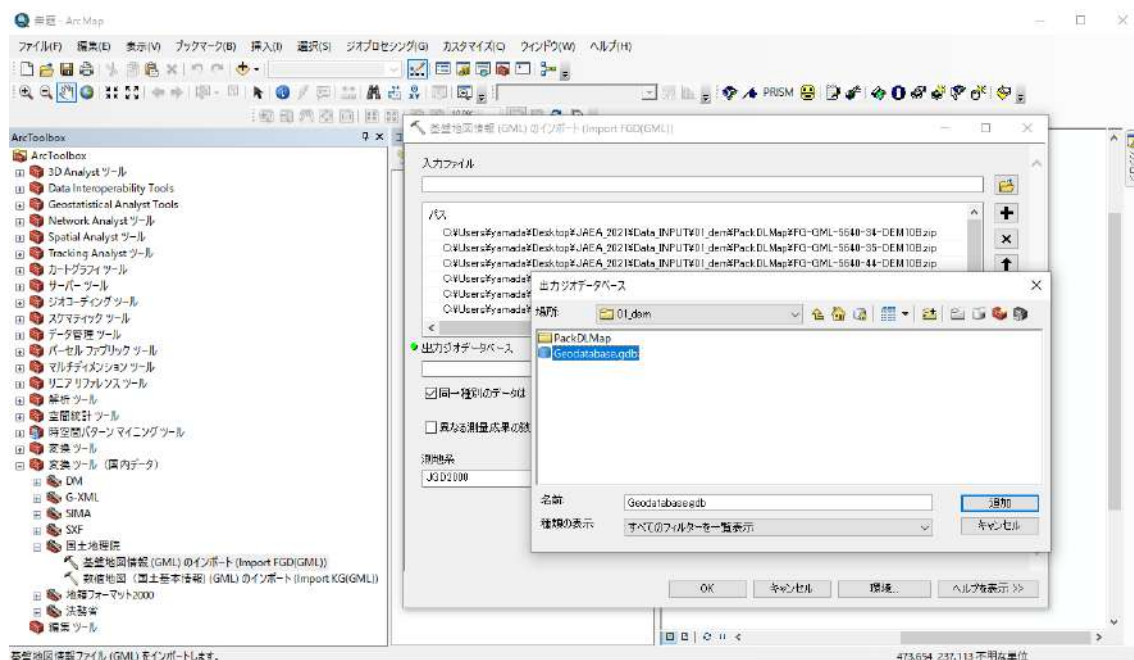


図 3-82 基盤地図情報 (GML) のインポート④

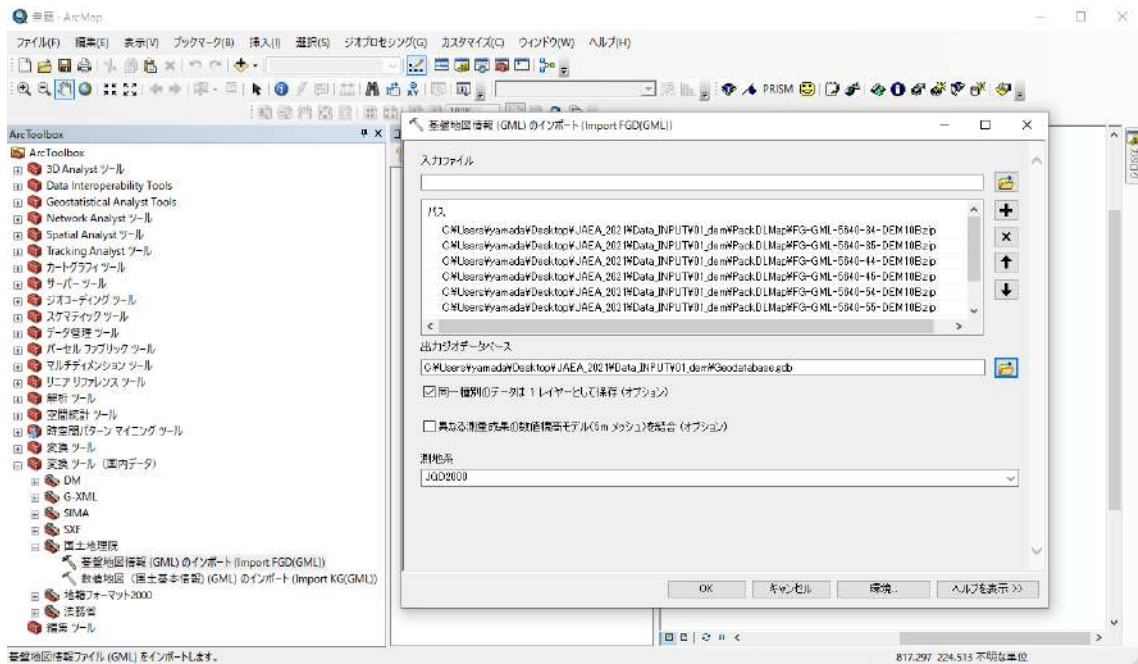


図 3-83 基盤地図情報 (GML) のインポート⑤

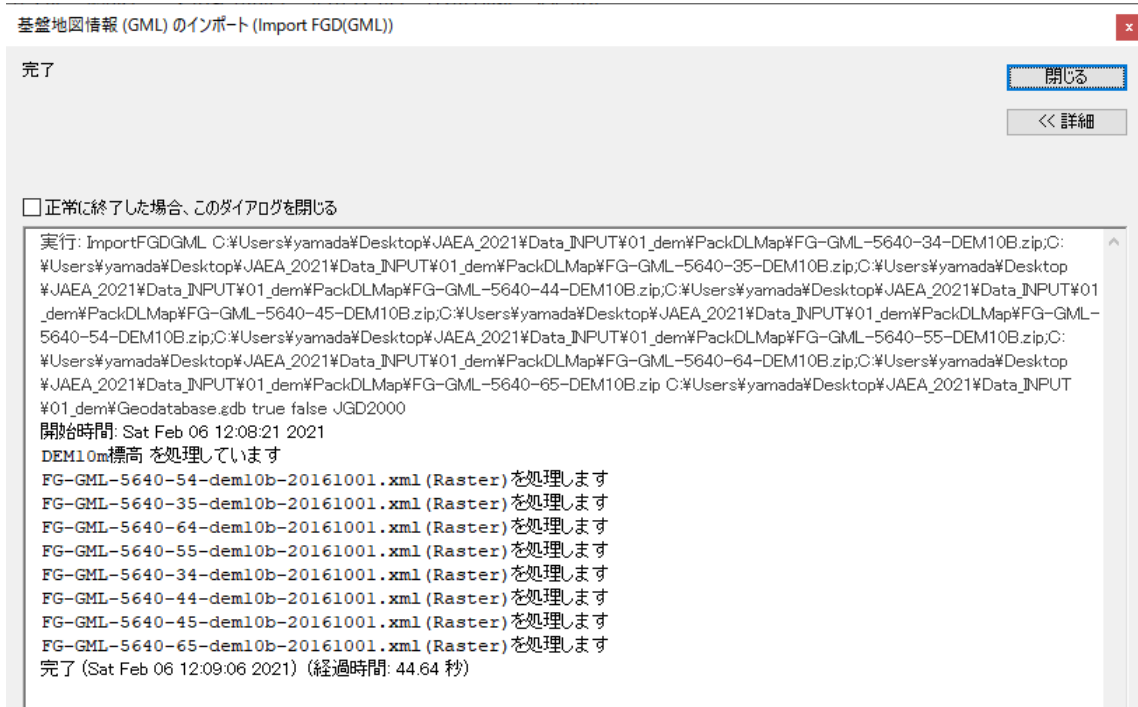


図 3-84 基盤地図情報 (GML) のインポート⑥

基盤地図情報データをインポートして、作成した Geodatabase.gdb を ArcMap の読み込む。

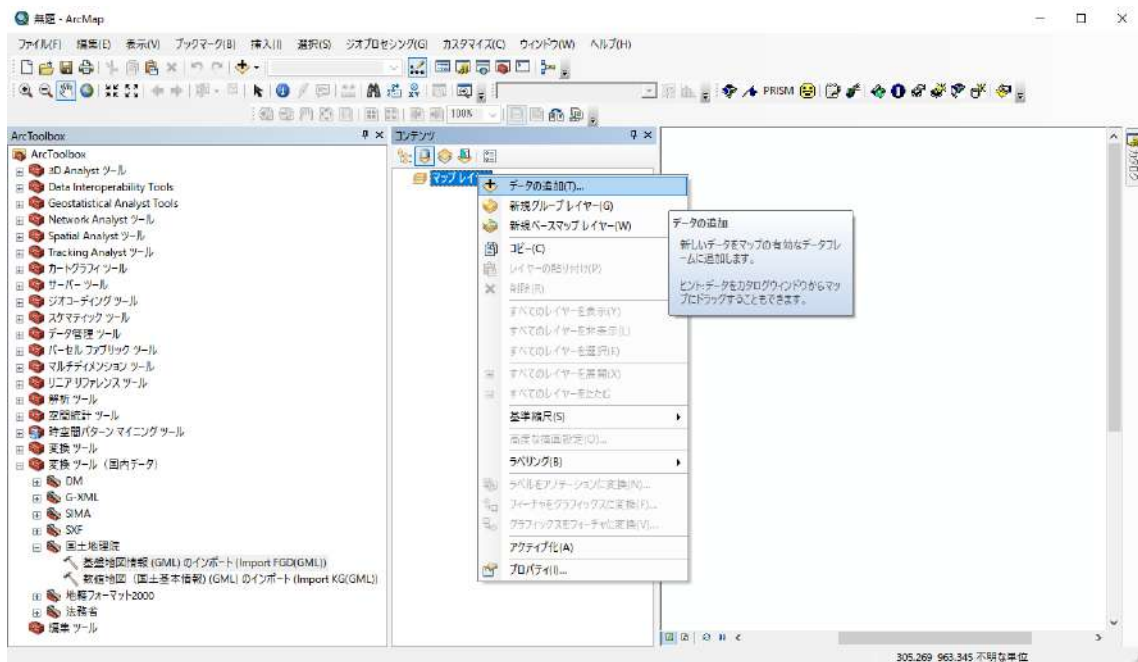


図 3-85 基盤地図情報のジオデータベースの読み込み

コンテンツからデータを選択して、右クリックで表示されるプロパティからコンター色などを調整できる。

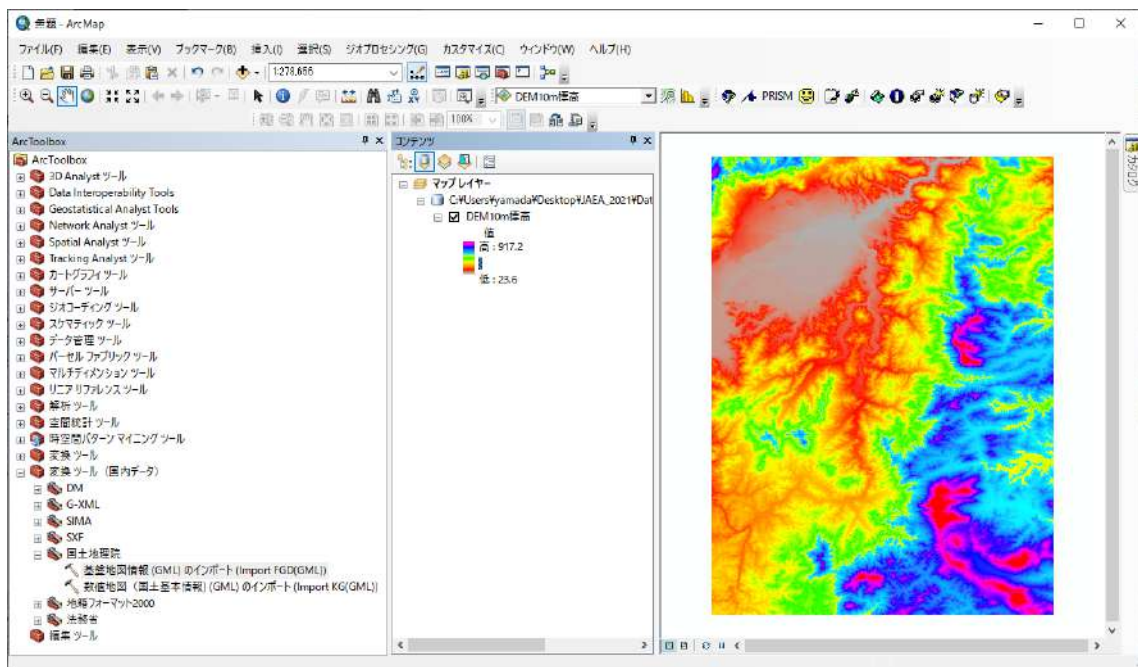


図 3-86 コンター色の調整 (ArcMap)

①-3-B 測地系（緯度経度）から UTM 座標系への変換方法

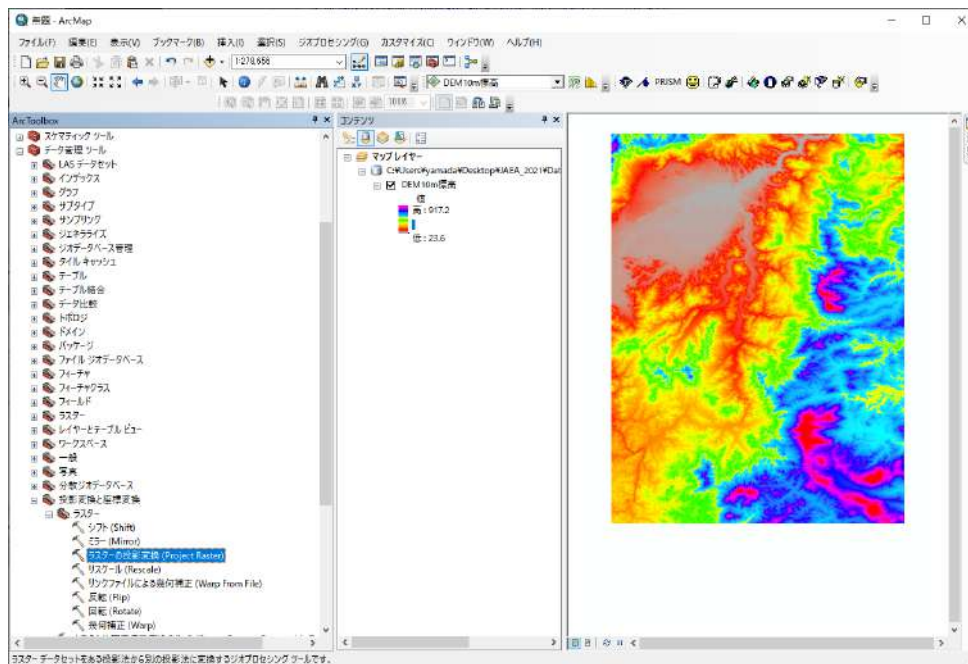


図 3-87 座標系の変換①

出力ラスターデータセットの場所は、図 3-88 の位置においてデフォルトで「Default.gdb」と決まっている。ここで、出力ファイルに全角（日本語など）が含まれていると ArcSWAT で上手く読み込めないのので、出力ファイルには全角を含めないように注意する。また、このとき、変換先の座標系「JGD_2000_UTM_Zone_54N」を指定する。

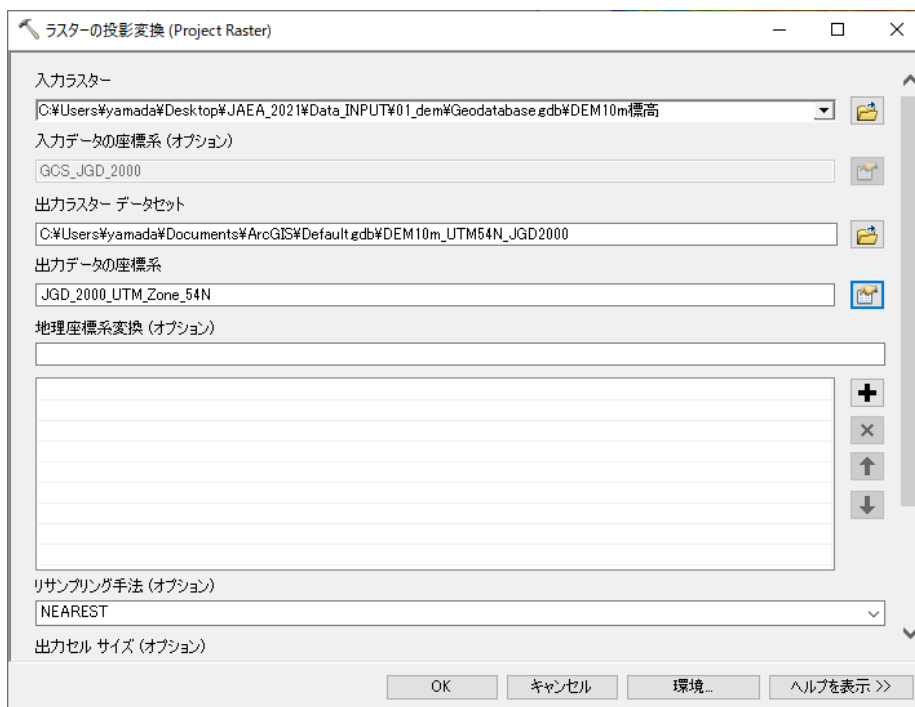


図 3-88 座標系の変換②



図 3-89 座標系の変換③

データのプロパティを確認すると、座標参照（座標系）が適切に変更されていることがわかる。

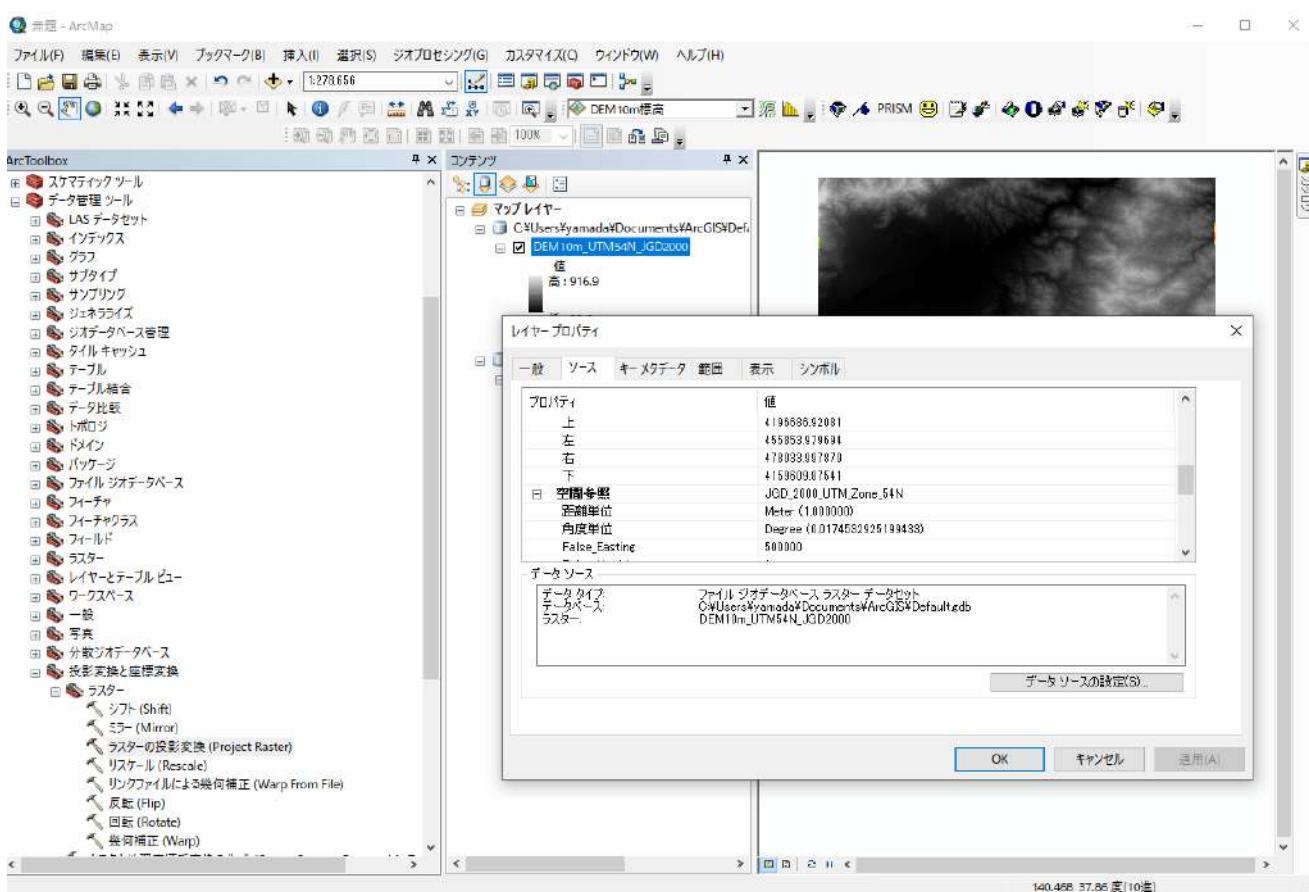


図 3-90 座標系の変換④

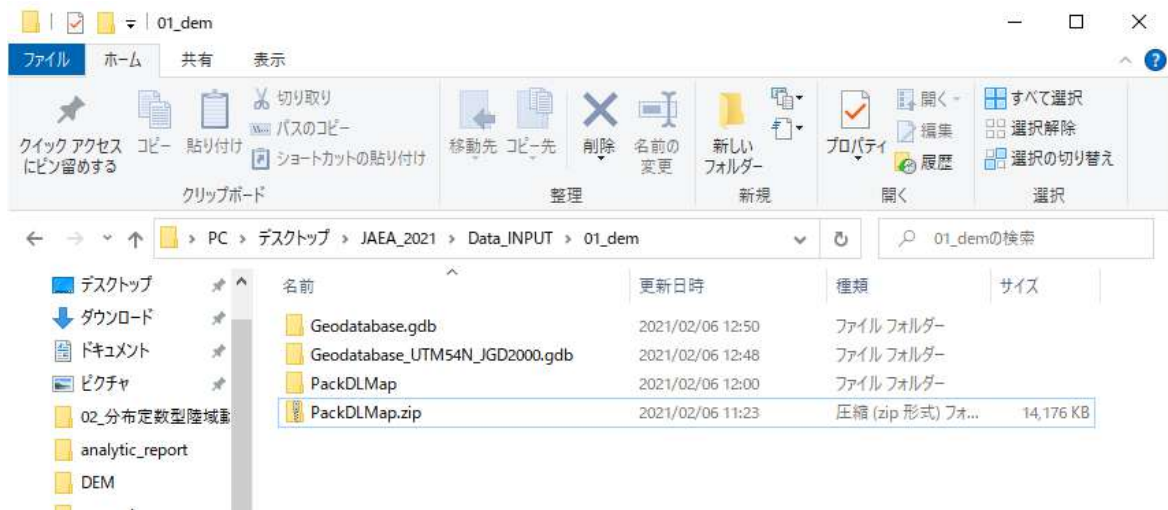


図 3-91 座標系の変換⑤

①-3-C Raster-Grid 形式から Raster-ASCII 形式への変換方法 (For GeoWEPP)

GeoWEPP では、地形データを ASCII フォーマットで指定する必要がある。ここでは、①-3-B で作成したジオデータベースから、Raster-ASCII フォーマットのデータを作成する手順を示す。

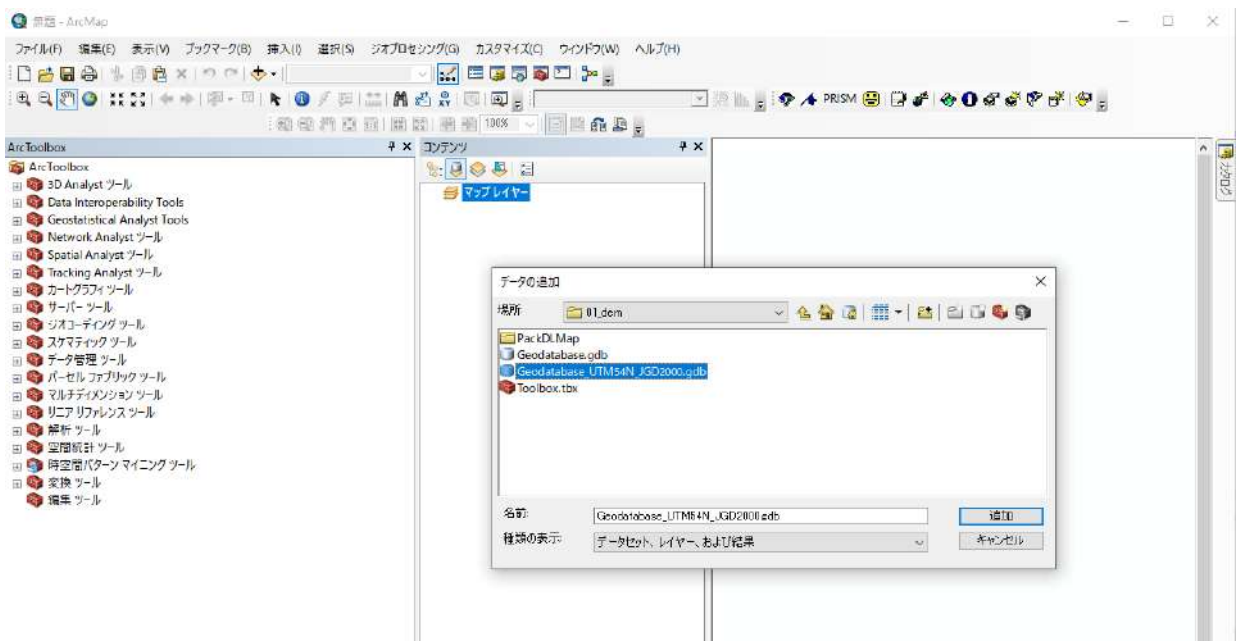


図 3-92 Raster-ASCII 形式への変換①

あらかじめ、出力先のフォルダを作成しておく。

ここでは、「Geodatabase_UTM54N_JGD2000_ASCII」というフォルダを前もって作成した。

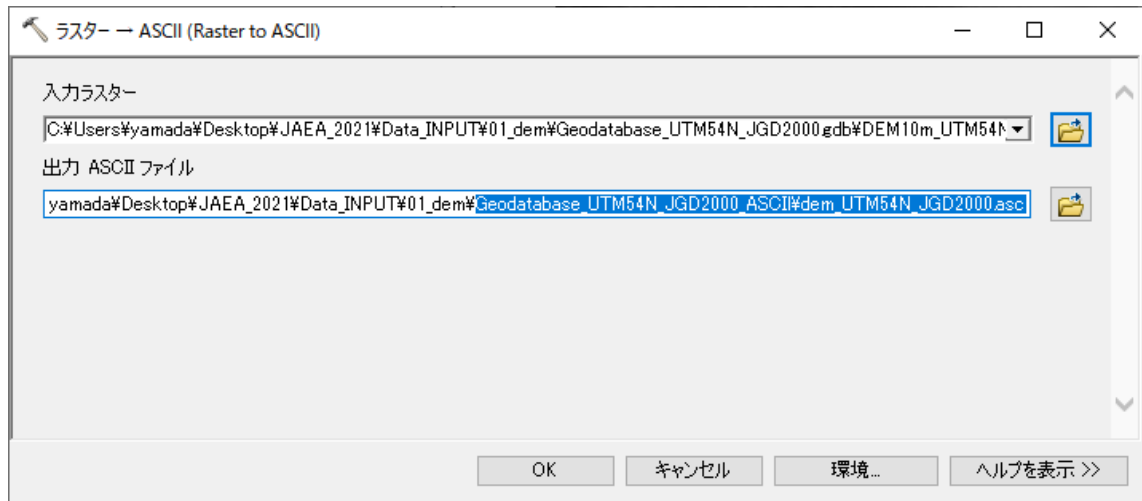


図 3-93 Raster-ASCII 形式への変換②

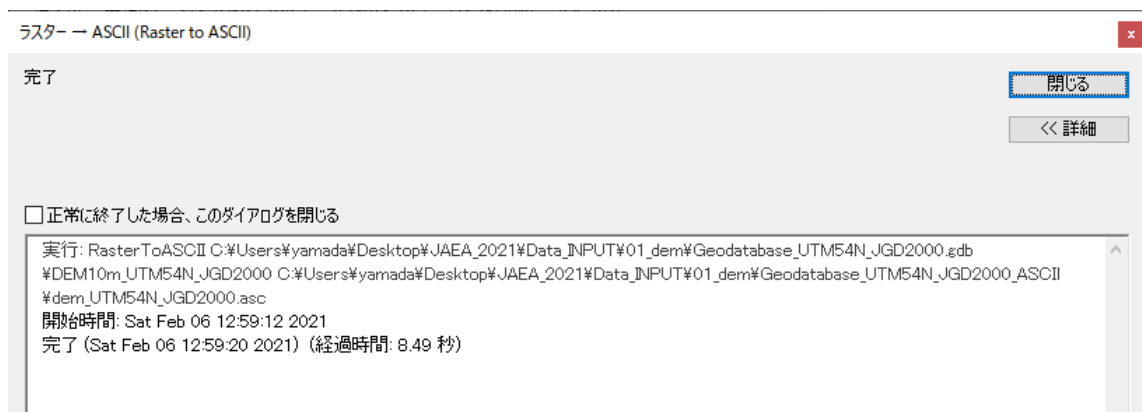


図 3-94 Raster-ASCII 形式への変換③

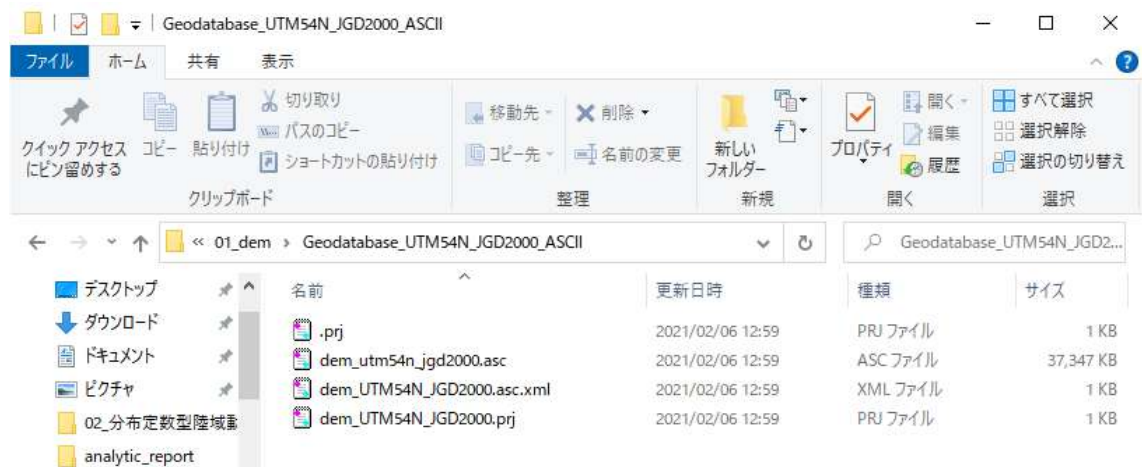


図 3-95 Raster-ASCII 形式への変換④

①-3-D TIFF 形式データのエクスポート(For QGIS)

RADFLOW の入力ファイル作成に使用する QGIS では、地形データを TIFF フォーマットで指定する必要がある。ここでは、①-3-B で作成したジオデータベースから、TIFF フォーマットのデータを作成する手順を示す。

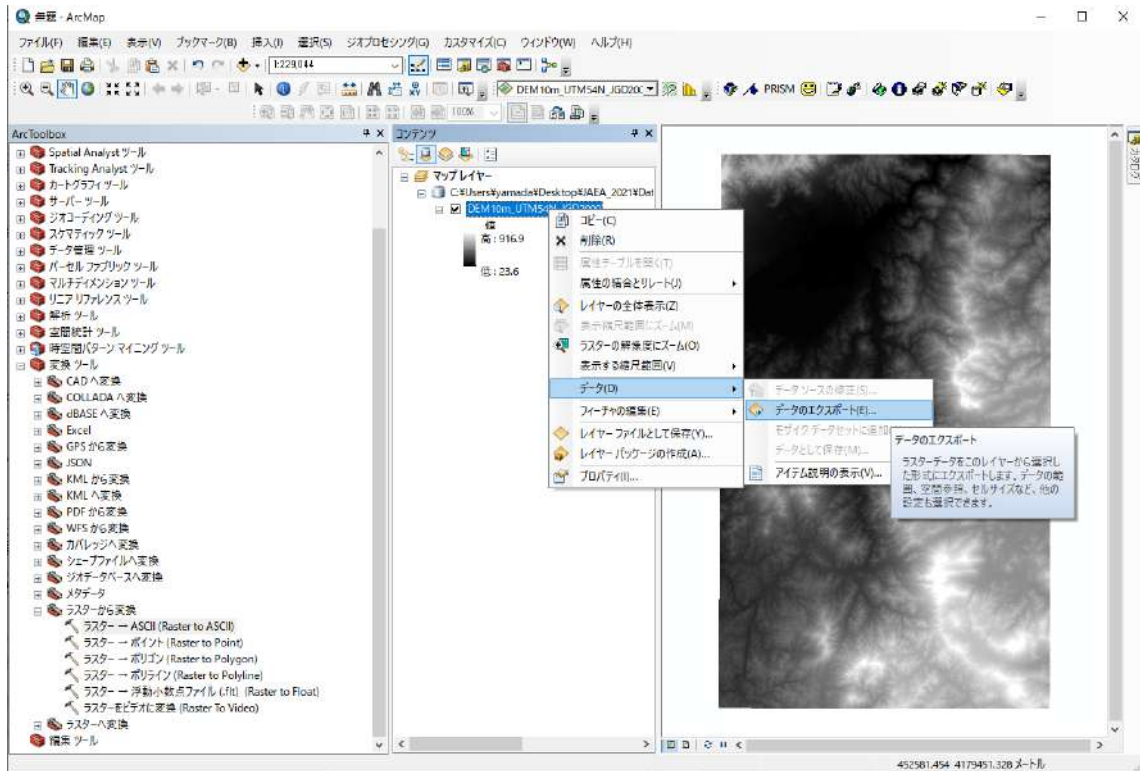


図 3-96 TIFF 形式への変換①

あらかじめ出力先のフォルダ「Geodatabase_UTM54N_JGD2000_TIFF」を作成しておく。

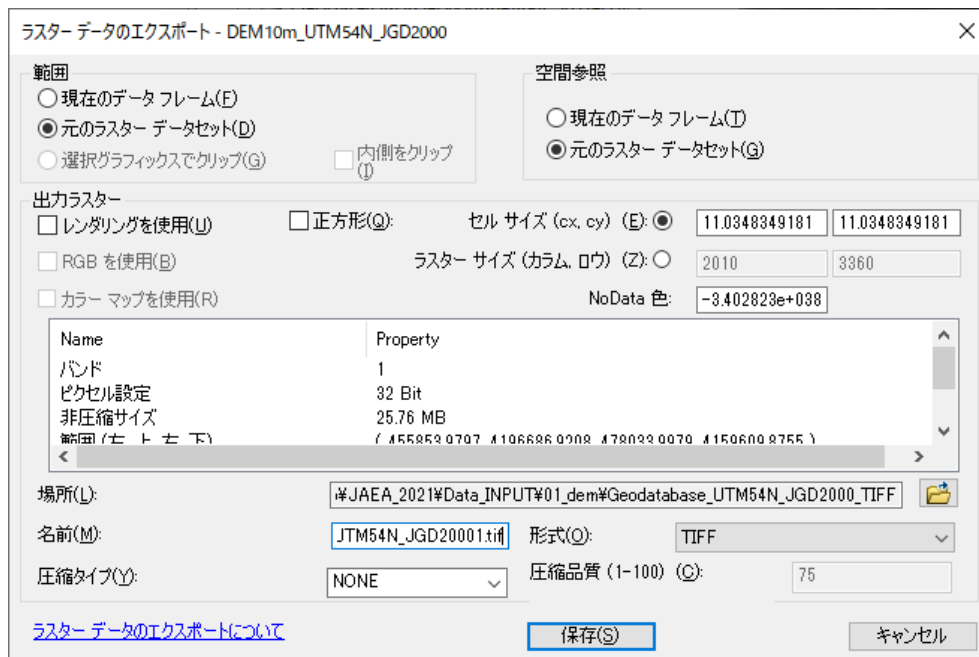


図 3-97 TIFF 形式への変換②

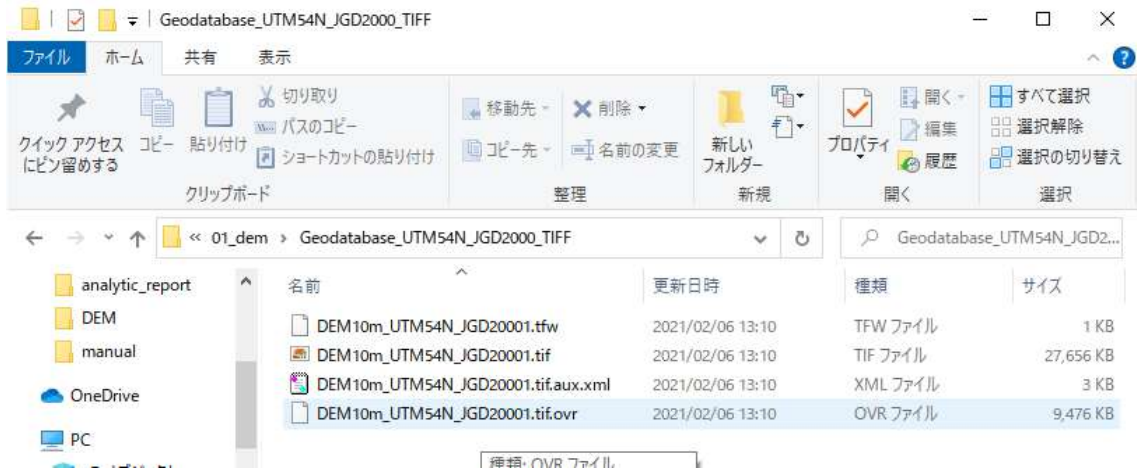


図 3-98 TIFF 形式への変換③

② 土地利用データ

②-1 概要

土地利用データとは、全国の土地利用の状況について、3次メッシュ 1/10 細分区画（100m メッシュ）毎に、各利用区分（田、その他の農用地、森林、荒地、建物用地、幹線交通用地、湖沼、河川等）を整備したものである。利用区分は整備年度により異なる。

②-2 取得方法

土地利用データは、国土交通省の国土数値情報ダウンロードサイト (<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>)から、「土地利用細分メッシュ」として取得できる。

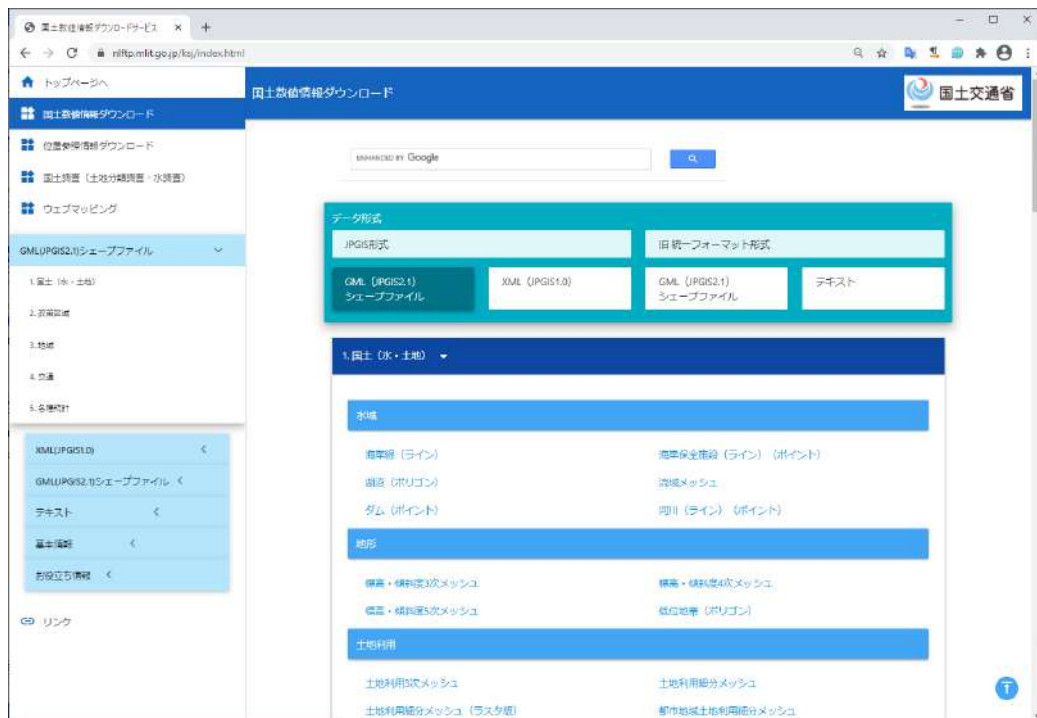


図 3-99 国土交通省の国土数値情報ダウンロードサイト①

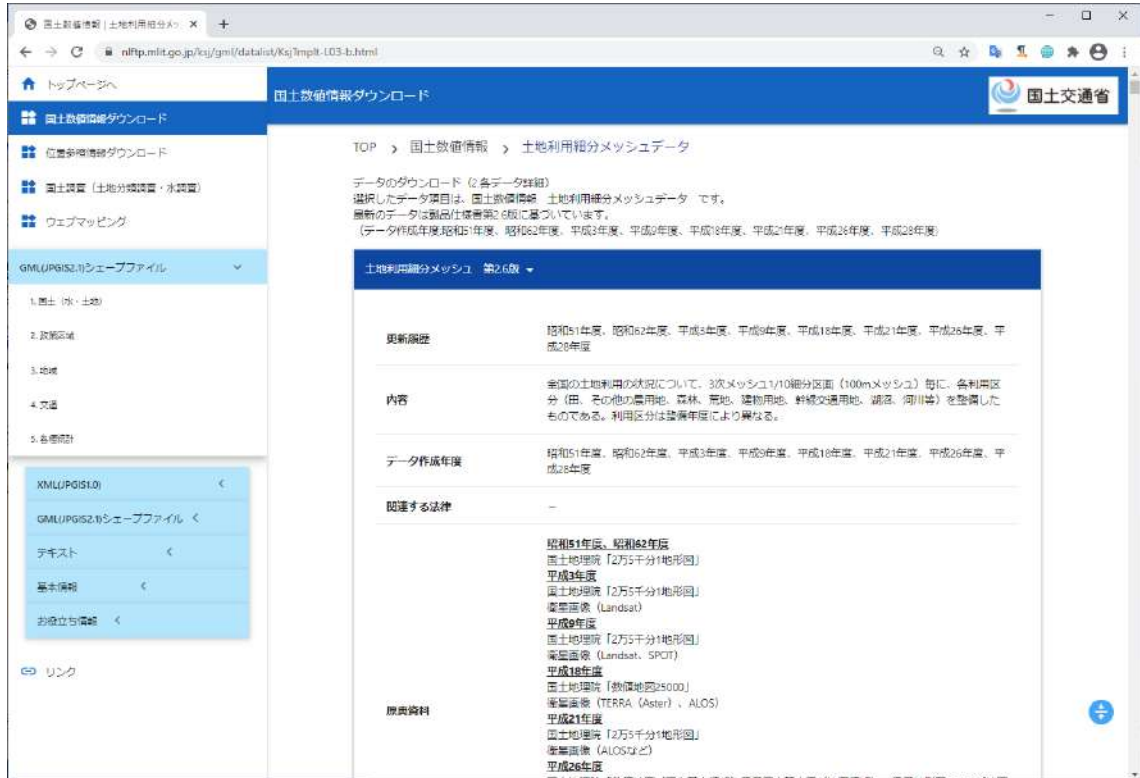


図 3-100 国土交通省の国土数値情報ダウンロードサイト②

土地利用細分メッシュにおいて、広瀬川を包含する福島県のサイトコードは「5640」である。このコードに対応するデータファイルをダウンロードする。

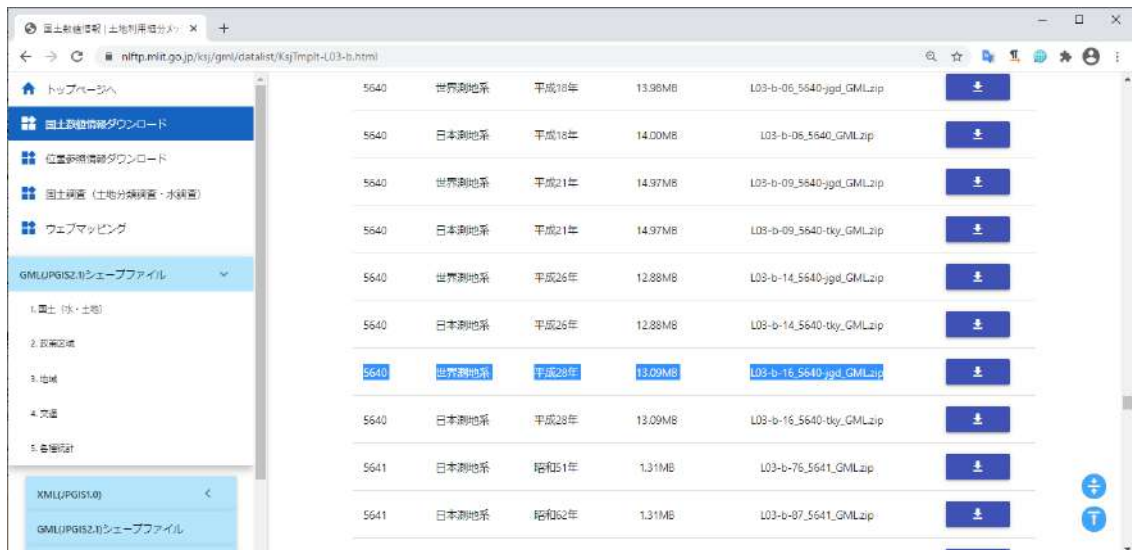


図 3-101 国土交通省の国土数値情報ダウンロードサイト③

ダウンロードした zip ファイル「L03-b-16_5640-jgd_GML.zip」は、解凍する。

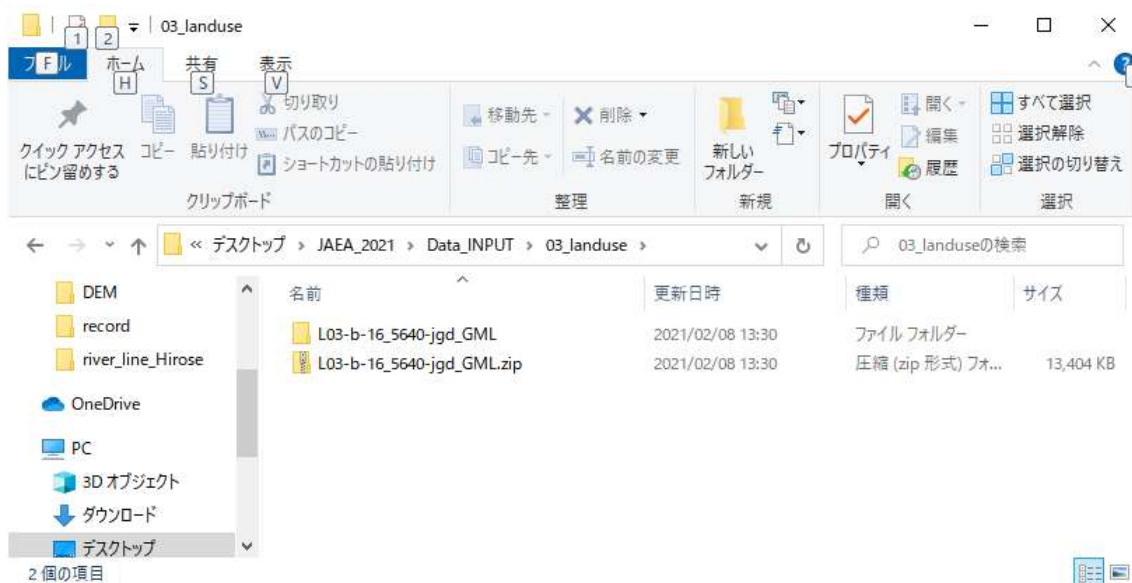


図 3-102 国土交通省の国土数値情報ダウンロードサイ④

ダウンロードしたファイルには、図 3-103 に列挙した shp ファイル群が含まれている。

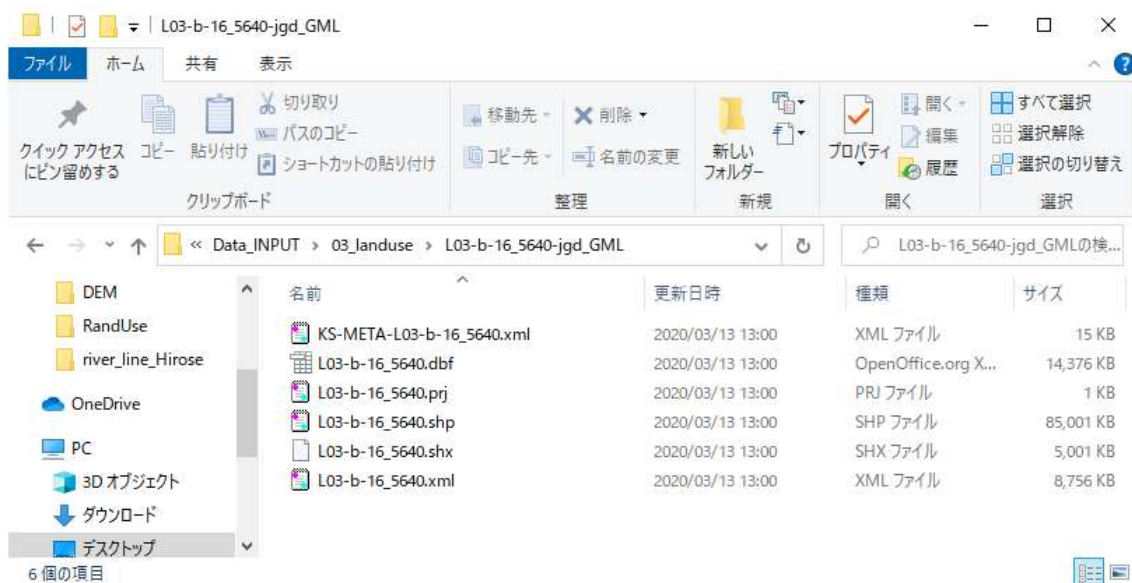


図 3-103 国土交通省の国土数値情報ダウンロードサイ⑤

②-3 ArcGIS による操作 (for ArcSWAT)

②-3-A カラーマップの変更

ArcGIS を起動して、「コンテンツ>マップレイヤー(右クリック)>データの追加」によって、②-2 で取得した土地利用データファイルを可視化することができる。デフォルトの状態だと図 3-104 のようにデータは単色で表示される。カラーマップを変更するために、土地利用データを右クリックして、「プロパティ」を選択する。

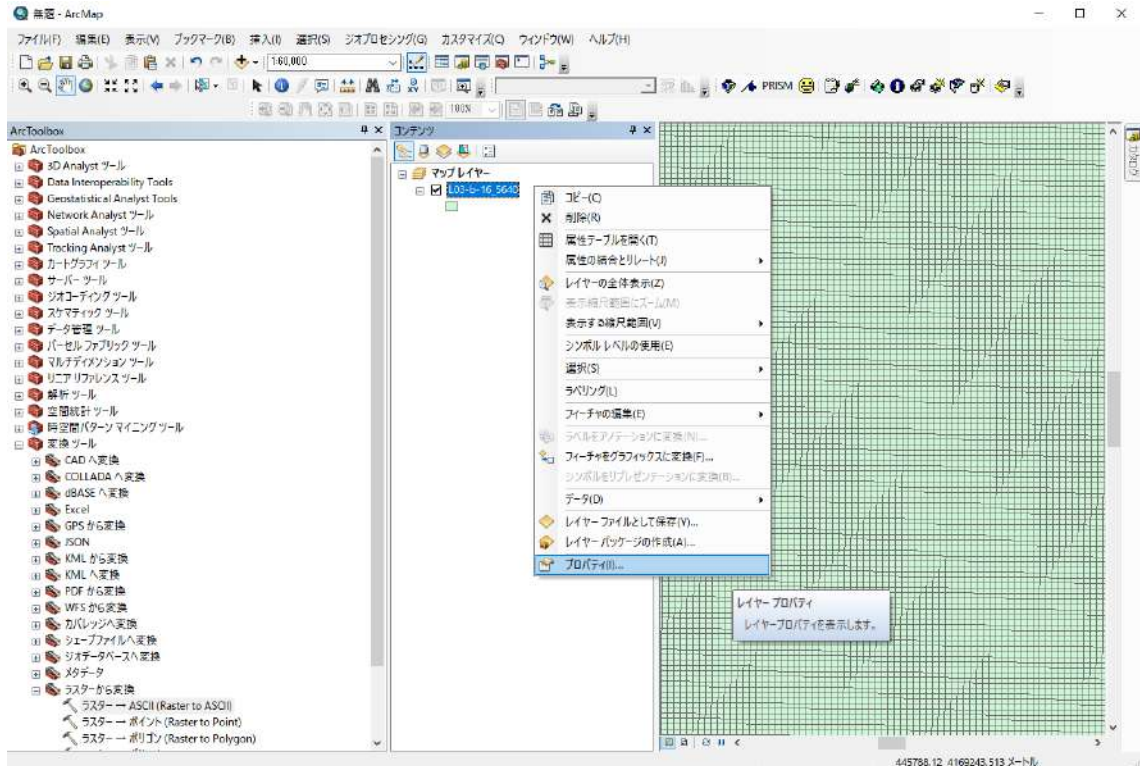


図 3-104 カラーマップ変更①（土地利用データ）

自動的に立ち上がる「レイヤープロパティ」ダイアログの「シンボル」タブについて、表示を「カテゴリ/個別値」に設定し、フィールドを「土地利用種」に設定し、ボタン「すべての値を追加」を選択する。



図 3-105 カラーマップ変更②（土地利用データ）

ボタン「適用」を押下すると、カラーマップが変更される。

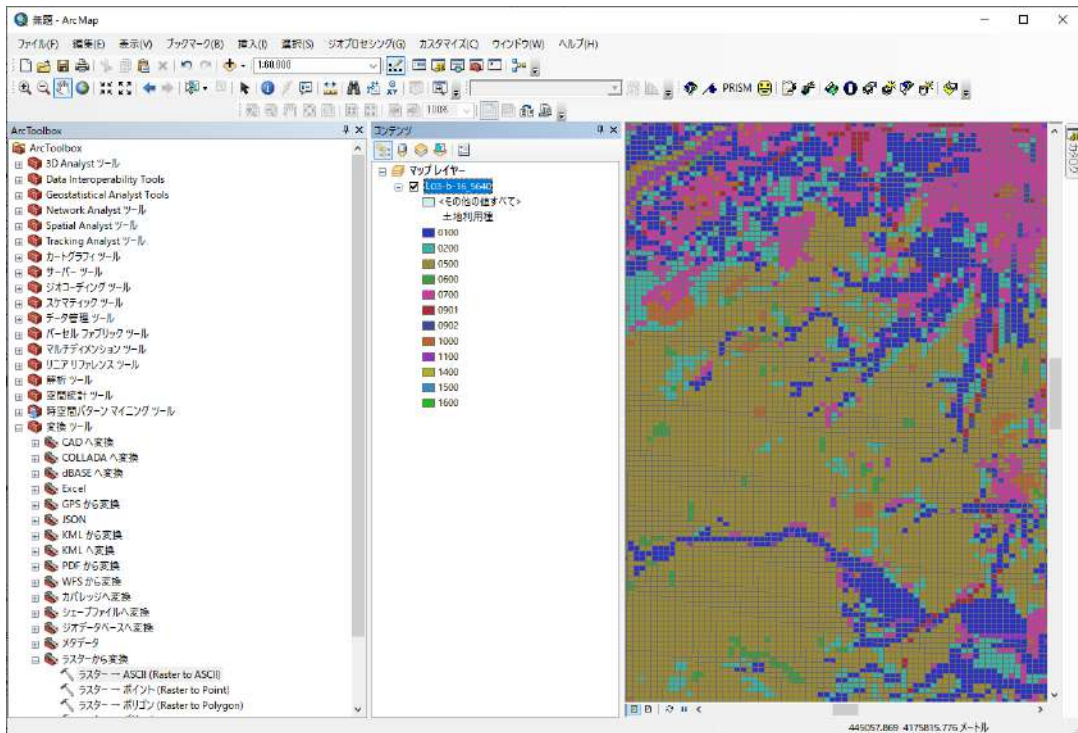


図 3-106 カラーマップ変更③（土地利用データ）

なお、土砂利用データについて、各セルには土地利用コード(0100～1600)が設定されている。それぞれのコードが意味する土地利用情報の対応については、ダウンロードサイト (<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/codelist/LandUseCd-09.html>)に説明が掲載されている。



図 3-107 土地利用情報①（土地利用データ）

国土利用種別 (平成21、26、28年度) (ファイル名称: LandUseCd-09.html)

コード	種別	定義
0100	田	灌漑田・乾田・沼田・灌漑及び田とする。
0200	その他の農用地	菜・除煩・野菜・草畑・芝地・りんご・梨・桃・ブドウ・茶・桐・はぎ・ごうそ・しゅうろ等を栽培する土地とする。
0300	-	-
0400	-	-
0500	森林	多年生植物の密生している地域とする。
0600	荒地	しの地・荒地・がけ・岩・万年草・湿地・採鉱地等で旧土地利用データが荒地であるところとする。
0700	建物用地	住宅地・市街地等で建物が密集しているところとする。
0800	-	-
0901	道路	道路などで、面的に捉えられるものとする。
0902	鉄道	鉄道・換装場などで、面的にとらえられるものとする。
1000	その他の用地	運動競技場・空港・競馬場・野球場・学校港灣地区・人工造成地の空地等とする。
1100	河川地及び湖沼	人工湖・自然湖・池・養魚場等で平水時に常に水を湛えているところ及び河川・河川区域の河川敷とする。
1200	-	-
1300	-	-
1400	海浜	海岸に接する砂・れき、岩の区域とする。
1500	海水域	隠岩岩、干潟、シーパースも海に含める。
1600	ゴルフ場	ゴルフ場のゴルフコースの集まっている部分のフェアウェイ及びラフの外側と森林の境目を境界とする。

図 3-108 土地利用情報② (土地利用データ)

②-3-B テーブルの編集

土地利用データについて、土地利用種は文字列で定義されているため、これを数値に変換した属性を用意する必要がある。テーブルの編集方法についてはいくつかの WEB サイト (<https://support.esri.com/en/technical-article/000009835>, <https://qastack.jp/gis/74470/changing-data-type-in-arcgis-attribute-table>)を参照した。まず、図 3-109 のように属性テーブルを開く。

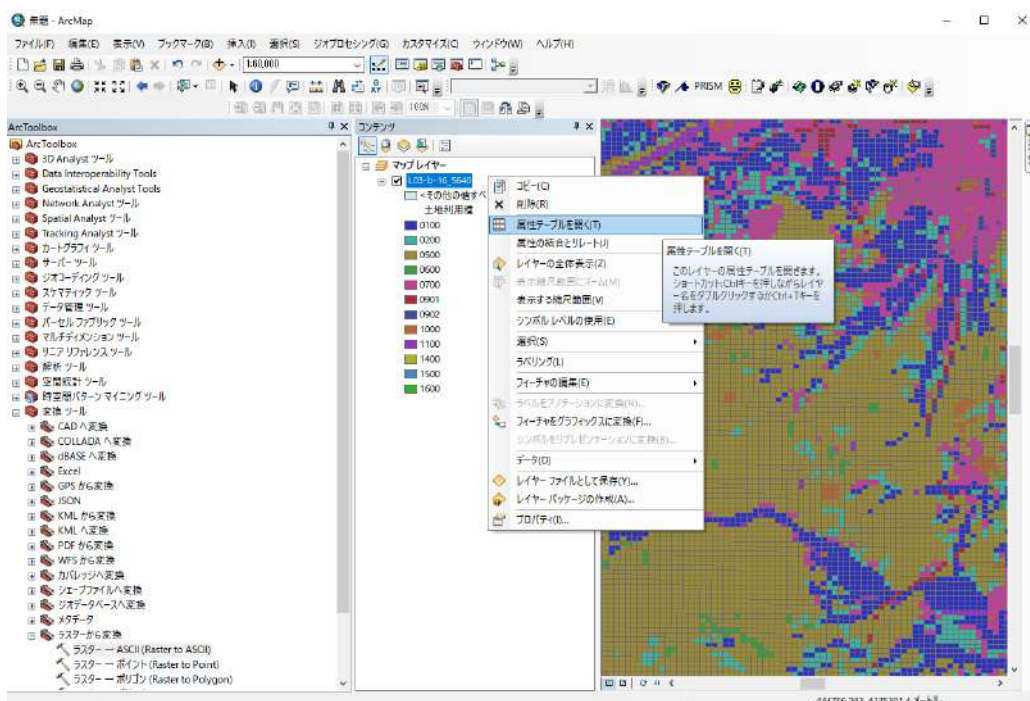


図 3-109 テーブル編集① (土地利用データ)

図 3-110 で表示される属性テーブルにおいて、「土地利用種」は文字列で定義されている。

FID	Shape *	メッシュ	土地利用	撮影年月
0	Polygon	554000000	0500	20160425
1	Polygon	554000001	0500	20160425
2	Polygon	554000002	0500	20160425
3	Polygon	554000003	0500	20160425
4	Polygon	554000004	0500	20160425
5	Polygon	554000005	0500	20160425
6	Polygon	554000006	0500	20160425
7	Polygon	554000007	0500	20160425
8	Polygon	554000008	0500	20160425
9	Polygon	554000009	0500	20160425
10	Polygon	554000010	0500	20160425
11	Polygon	554000011	0500	20160425
12	Polygon	554000012	0500	20160425
13	Polygon	554000013	0500	20160425
14	Polygon	554000014	0500	20160425
15	Polygon	554000015	0500	20160425
16	Polygon	554000016	0500	20160425
17	Polygon	554000017	0500	20160425
18	Polygon	554000018	0500	20160425
19	Polygon	554000019	0500	20160425
20	Polygon	554000020	0500	20160425
21	Polygon	554000021	0500	20160425
22	Polygon	554000022	0500	20160425
23	Polygon	554000023	0500	20160425
24	Polygon	554000024	0500	20160425
25	Polygon	554000025	0500	20160425
26	Polygon	554000026	0500	20160425
27	Polygon	554000027	0500	20160425
28	Polygon	554000028	0500	20160425
29	Polygon	554000029	0500	20160425
30	Polygon	554000030	0500	20160425
31	Polygon	554000031	0500	20160425
32	Polygon	554000032	0500	20160425
33	Polygon	554000033	0500	20160425
34	Polygon	554000034	0500	20160425
35	Polygon	554000035	0500	20160425
36	Polygon	554000036	0500	20160425
37	Polygon	554000037	0500	20160425
38	Polygon	554000038	0500	20160425
39	Polygon	554000039	0500	20160425
40	Polygon	554000040	0500	20160425
41	Polygon	554000041	0500	20160425

図 3-110 テーブル編集②（土地利用データ）

属性テーブルについて、「テーブルオプション」から「フィールド追加」を選択して、属性フィールドを新規作成する。

FID	Shape *	メッシュ	土地利用	撮影年月
37	Polygon	554000037	0500	20160425
38	Polygon	554000038	0500	20160425
39	Polygon	554000039	0500	20160425
40	Polygon	554000040	0500	20160425
41	Polygon	554000041	0500	20160425

図 3-111 テーブル編集③（土地利用データ）

自動的に立ち上がる、「フィールドの追加」ダイアログで、属性の名前と属性タイプを定義する。ここでは、属性の名前に「LandUseInt」を設定し、そのタイプを「Short Integer」として設定する。

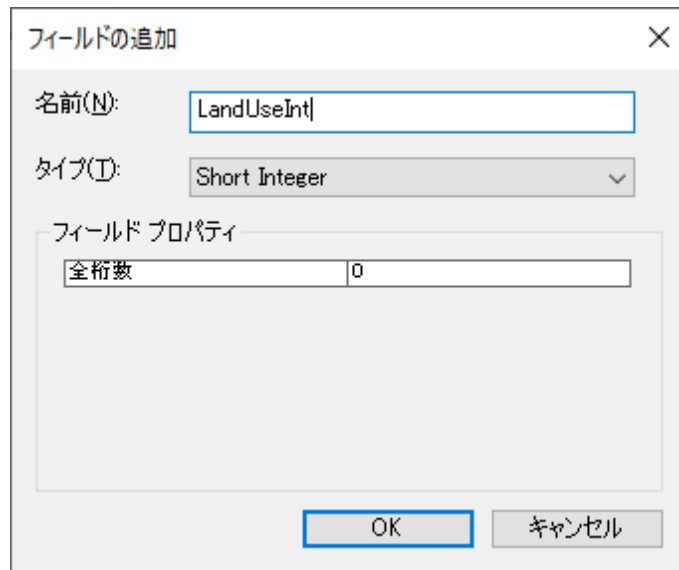


図 3-112 テーブル編集④（土地利用データ）

属性テーブルに、新たな属性「LandUseInt」が追加される。

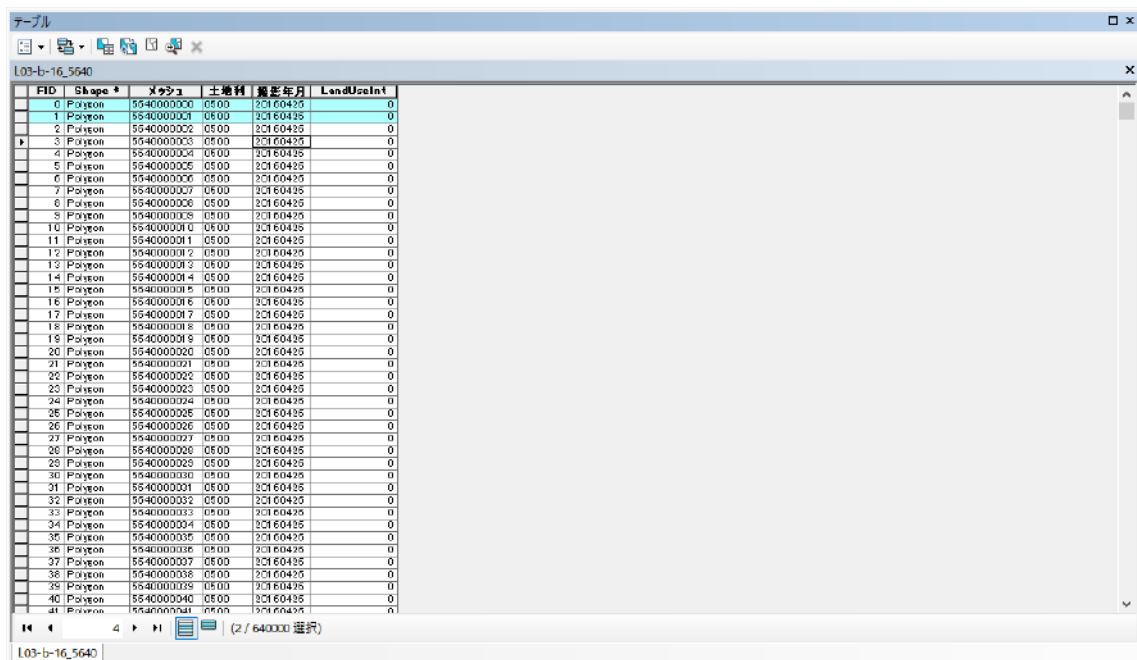


図 3-113 テーブル編集⑤（土地利用データ）

属性「土地利用種」の文字列型のコードを、新規の属性「LandUseInt」に INT 型として書き込む。そのために、テーブルを全選択した後で「LandUseInt」属性の列を右クリックして、ダイアログから「フィールド演算」を選択する。

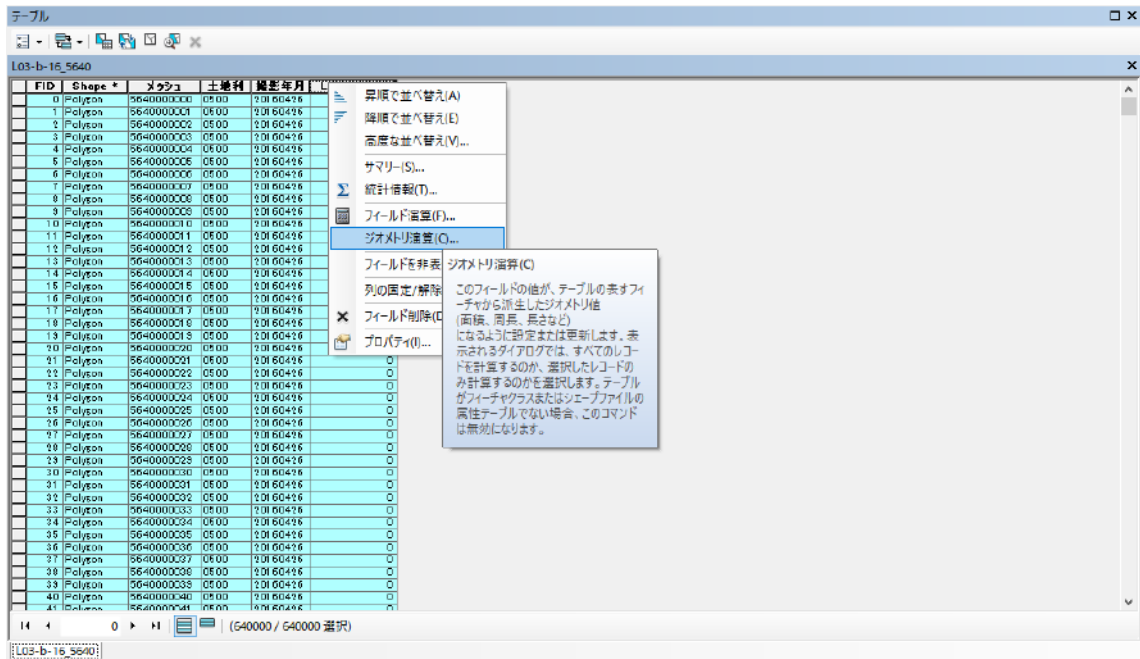


図 3-114 テーブル編集⑥（土地利用データ）

フィールド演算では、参照元としてフィールド「土地利用種」を選択する。

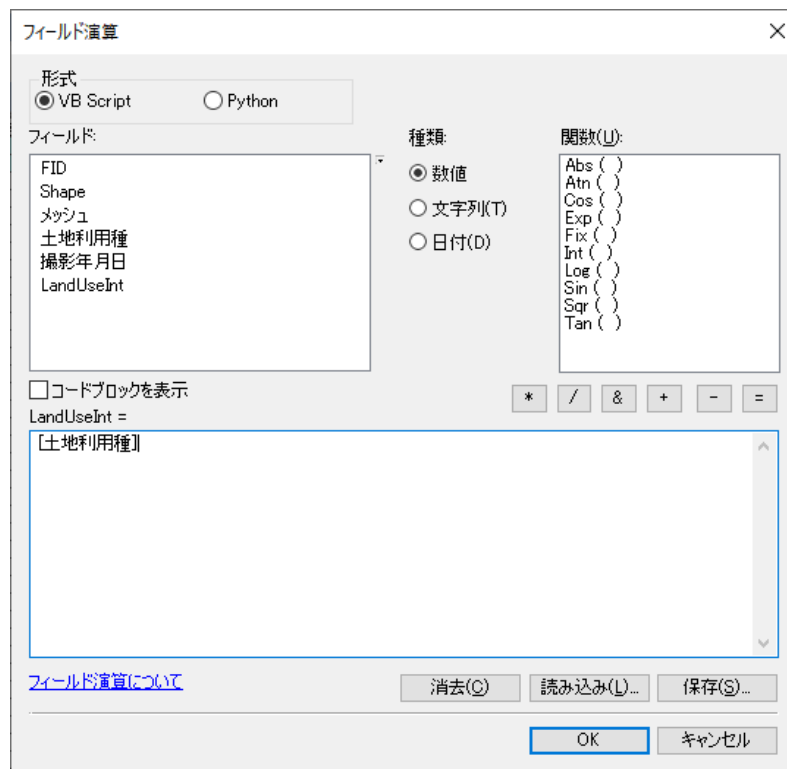


図 3-115 テーブル編集⑦（土地利用データ）

フィールド演算の実行状況は、図 3-116 のように表示される。

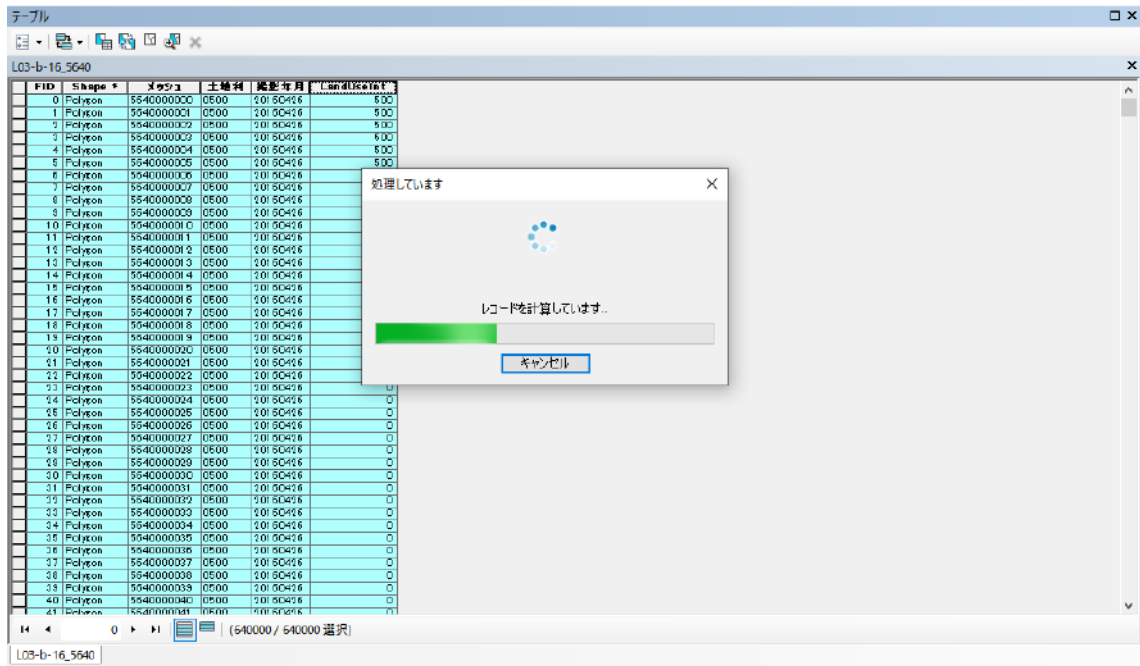


図 3-116 テーブル編集⑧（土地利用データ）

フィールド演算が実行された後の、属性テーブルの様子を図 3-117 に示す。以上の手順について、操作が正常に完了した場合は、土地利用データを上書き保存する。

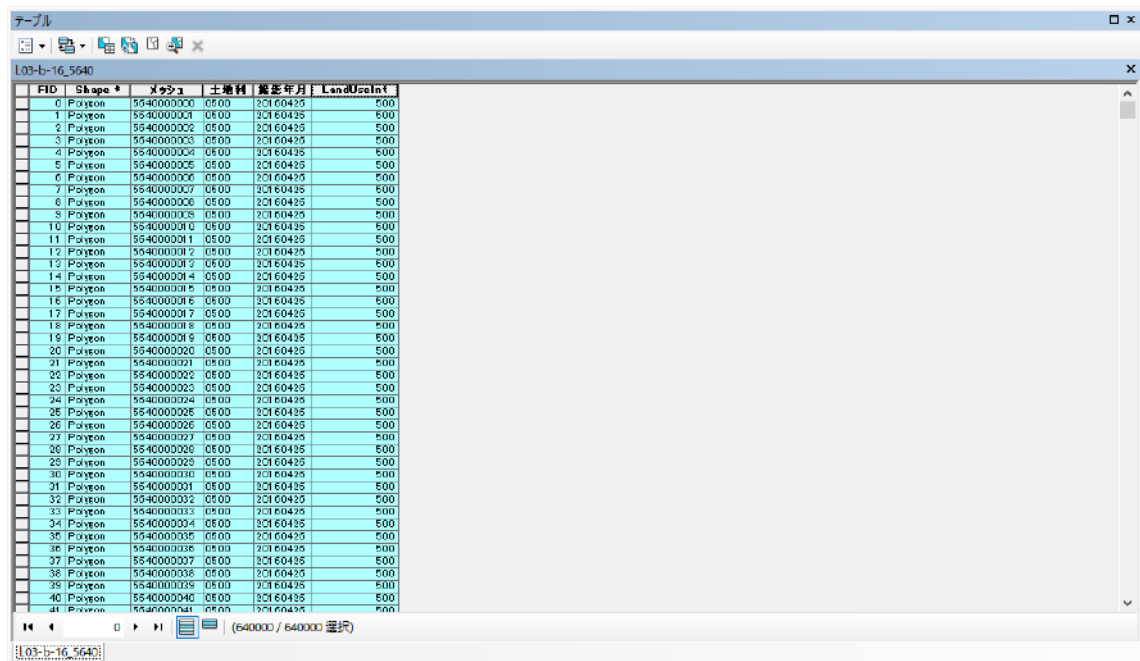


図 3-117 テーブル編集⑨（土地利用データ）

②-3-C 測地系（緯度経度）から UTM 座標系への変換方法

データを緯度経度座標系から、UTM 座標系に変換する必要がある。「ArcToolBox>データ管理ツール>投影変換と座標変換>投影変換(Project)」を選択する。

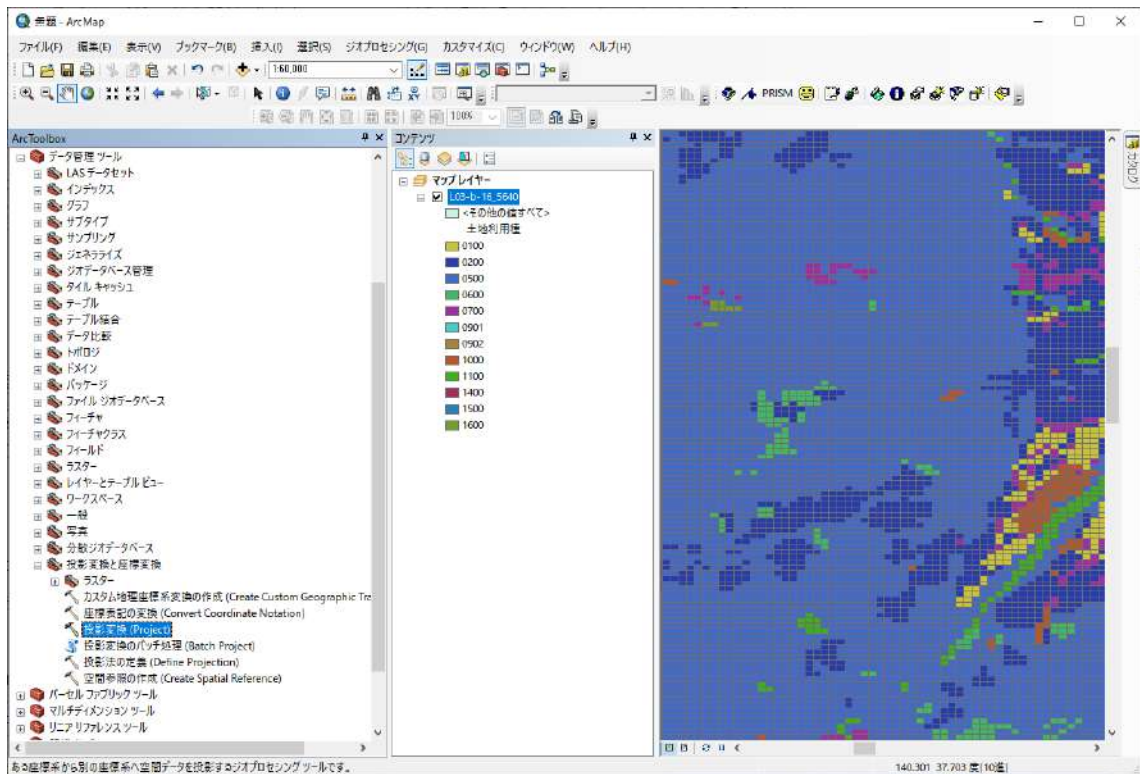


図 3-118 座標系の変換①（土地利用データ）

出力ラスタデータセットの場所は、図 3-88 の位置においてデフォルトで「Default.gdb」と決まっている。ここで、出力ファイルに全角（日本語など）が含まれていると ArcSWAT で上手く読み込めないのので、出力ファイルには全角を含めないように注意する。また、このとき、変換先の座標系「JGD_2000_UTM_Zone_54N」を指定する。

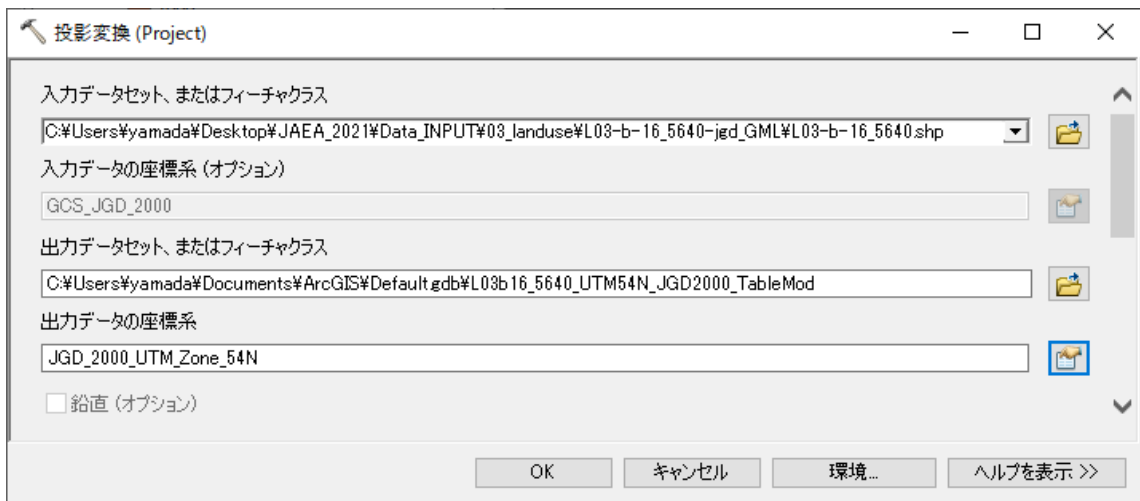


図 3-119 座標系の変換②（土地利用データ）

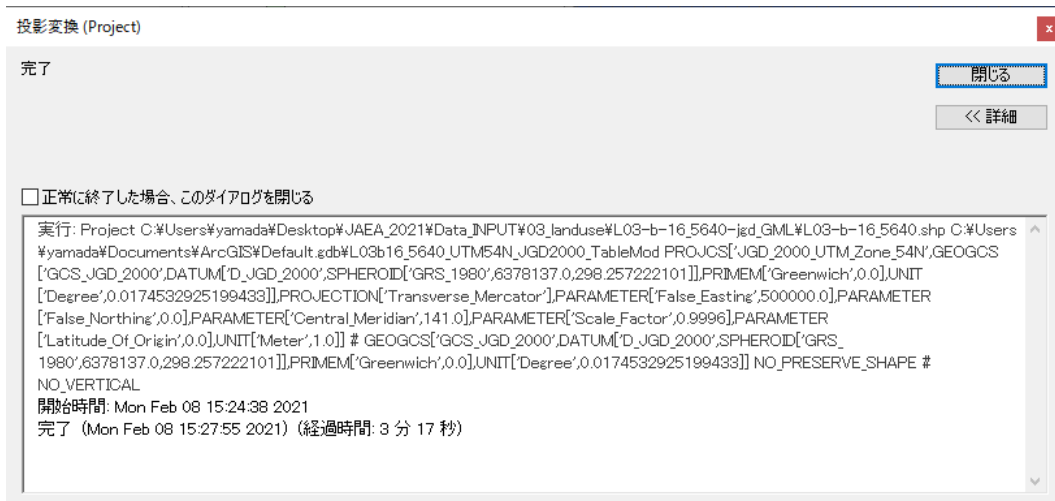


図 3-120 座標系の変換③ (土地利用データ)

出力ラスタデータセットは「Default.gdb」として出力されるので、これをコピーして、「L03-b-16_5640-jgd_GML_UTM54N_JGD2000_TableMod.gdb」として、土地利用データを保管するディレクトリに保存する。



図 3-121 座標系の変換④ (土地利用データ)

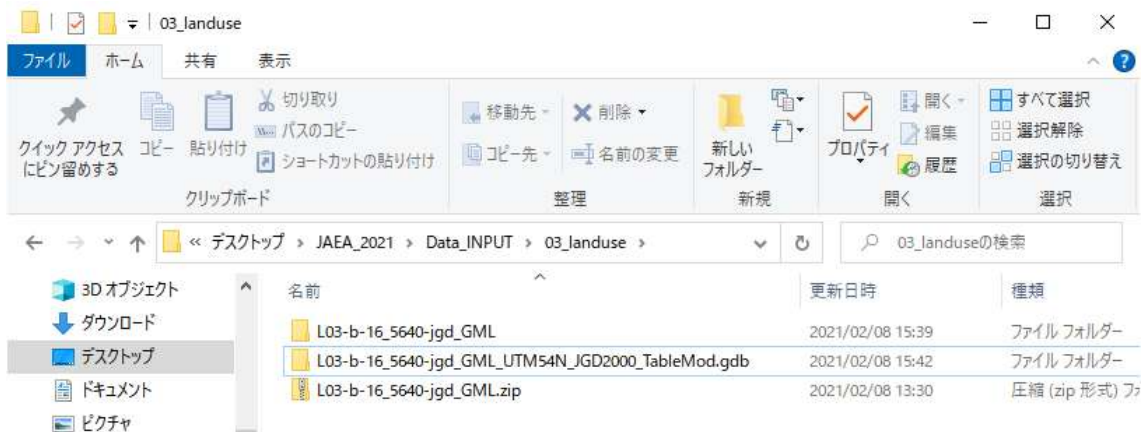


図 3-122 座標系の変換⑤ (土地利用データ)

保存した「L03-b-16_5640-jgd_gml_UTM54N_JGD2000_TableMod.gdb」を ArcGIS で開いた様子を図 3-123 に示す。以上の手順によって、属性テーブルを編集し、座標系を UTM54N に変換した土地利用データを用意することができる。

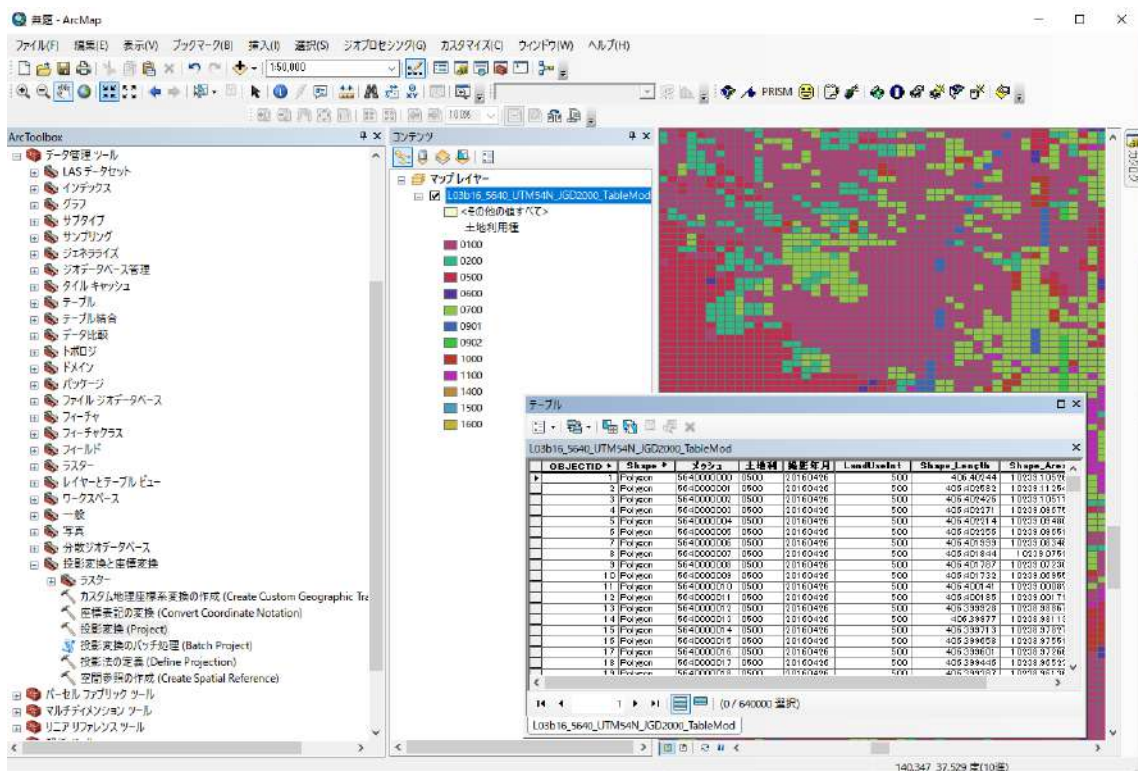


図 3-123 座標系の変換⑥（土地利用データ）

③ 土壌データ

③-1 概要

土壌分布データは、土地のエリアごとに土壌物性値を指定する。ここでは、国土交通省土地水資源局 WEB サイトより、20 万分の一土地分類基本調査の土壌分布データを入手する。このデータは緯度経度で記述されたデータであり、UTM54 系に再投影する。また、土壌属性は漢字で定義されているため、これを数値コードに変換する必要がある。

③-2 取得方法

国土交通省土地・水資源局国土交通課 WEB サイトを開く。

<https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html>

項目「20 万分の一土地分類基本調査」を選択する。

https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/l_national_map_20-1.html

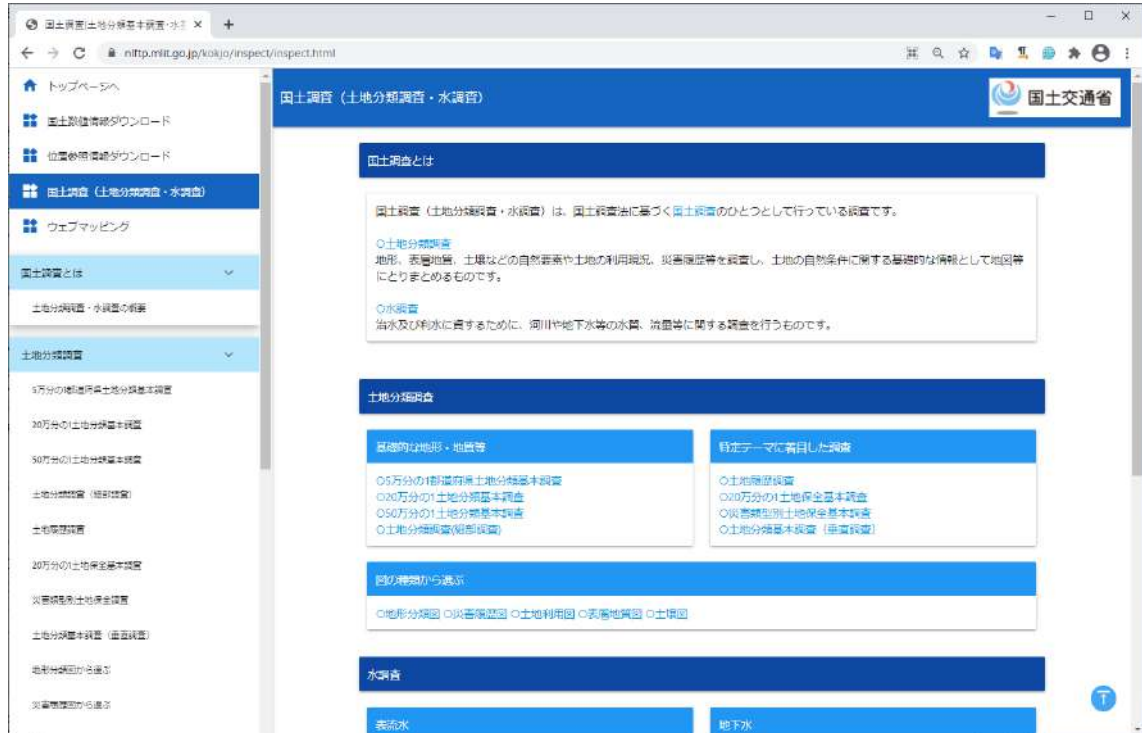


図 3-124 国土交通省：「20 万分の一土地分類基本調査」①

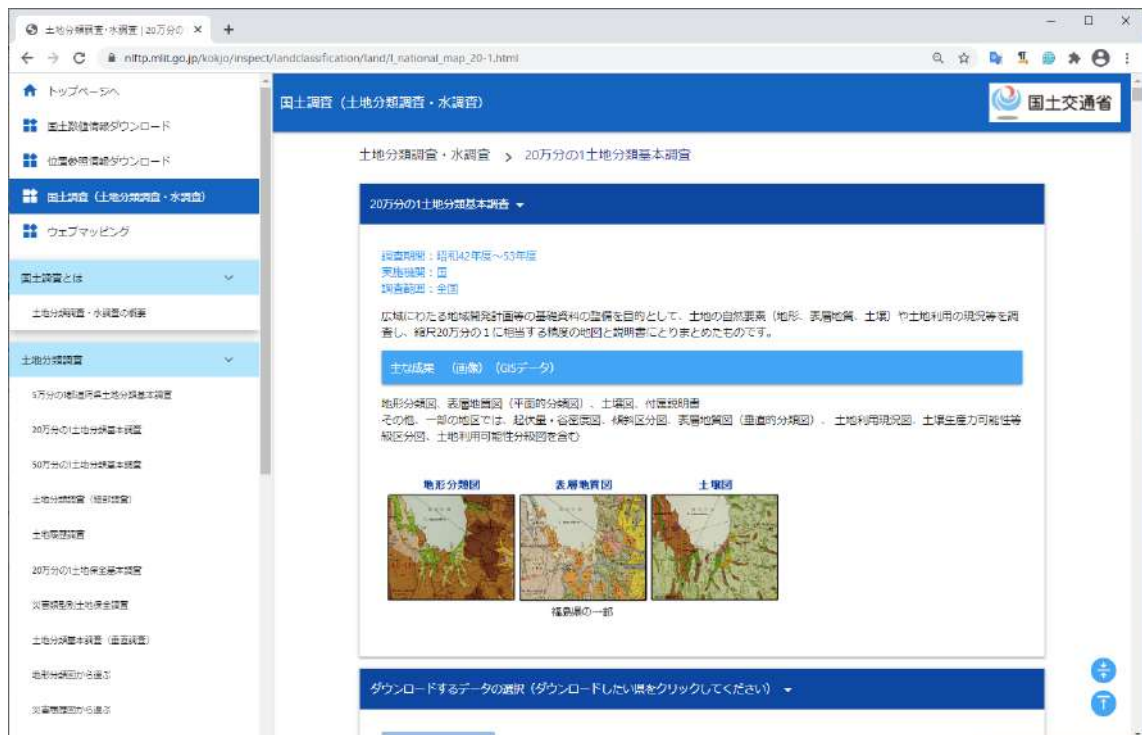


図 3-125 国土交通省：「20 万分の一土地分類基本調査」②

広瀬川を含む福島県の GIS データファイルを、ダウンロードする。

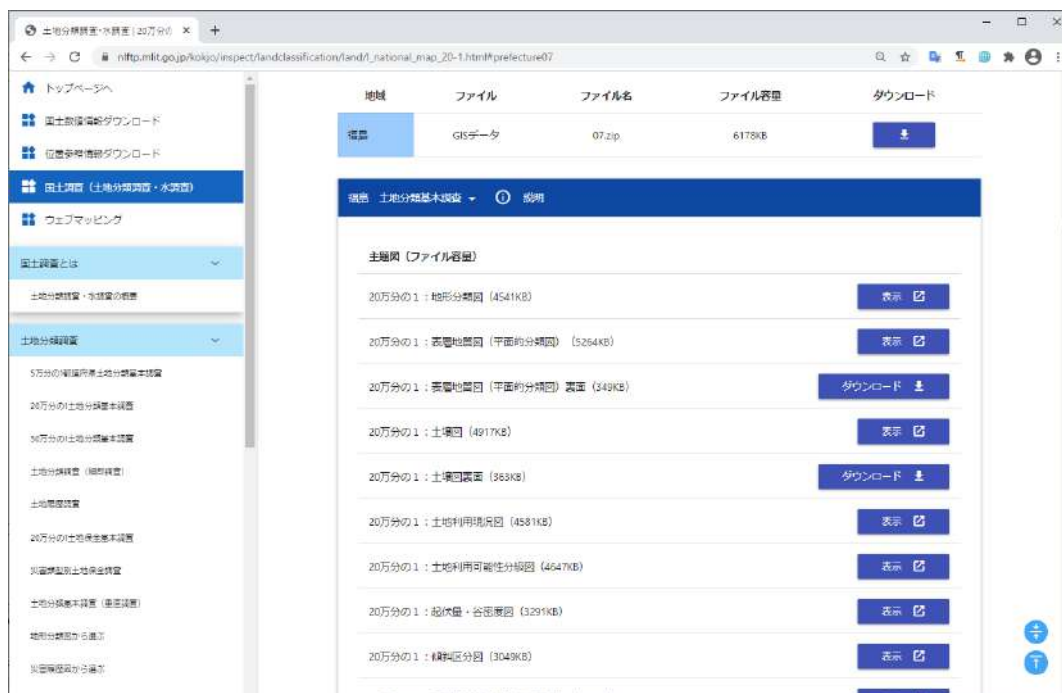


図 3-126 国土交通省：「20 万分の一土地分類基本調査」③

ダウンロードした、GIS データの一覧を図 3-127 に示す。「20 万分の一土地分類基本調査」の土地分類データの中には、地形区分、地形区分_地形区域、土壌分類、表層地質の 4 種類のタイプのデータが含まれている。この中から、解析では土壌分類のデータを使用する。

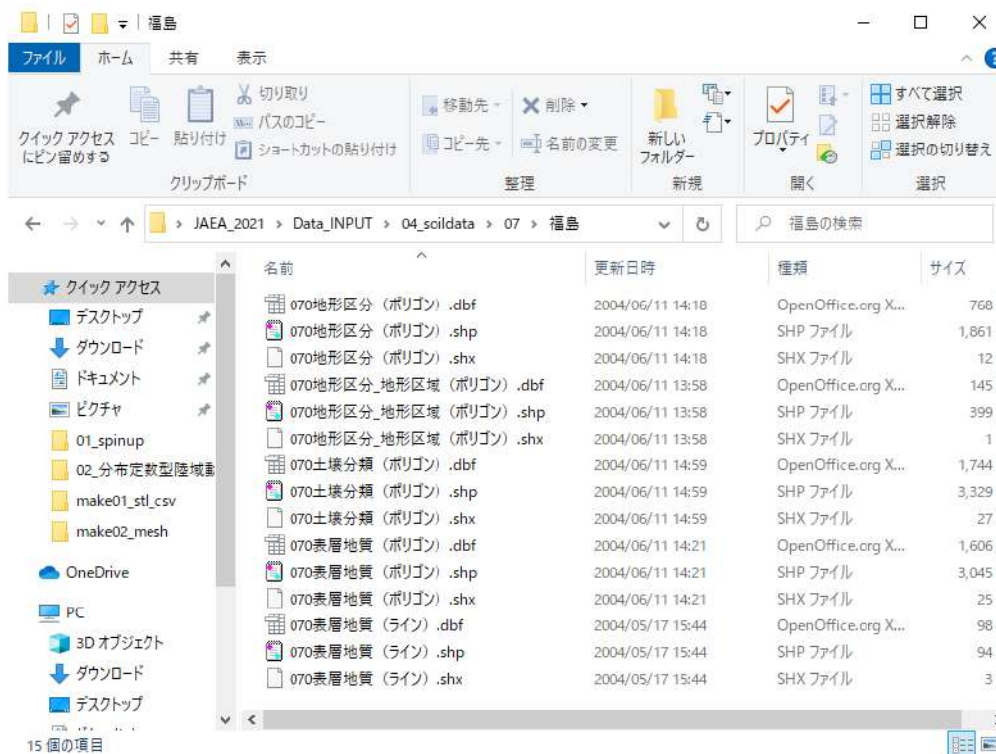


図 3-127 国土交通省：「20 万分の一土地分類基本調査」④

③-3 ArcGIS による操作 (for ArcSWAT)

ArcGIS を開き、ダウンロードしたデータの中から「土壌分類」 shp ファイルを読み込む。

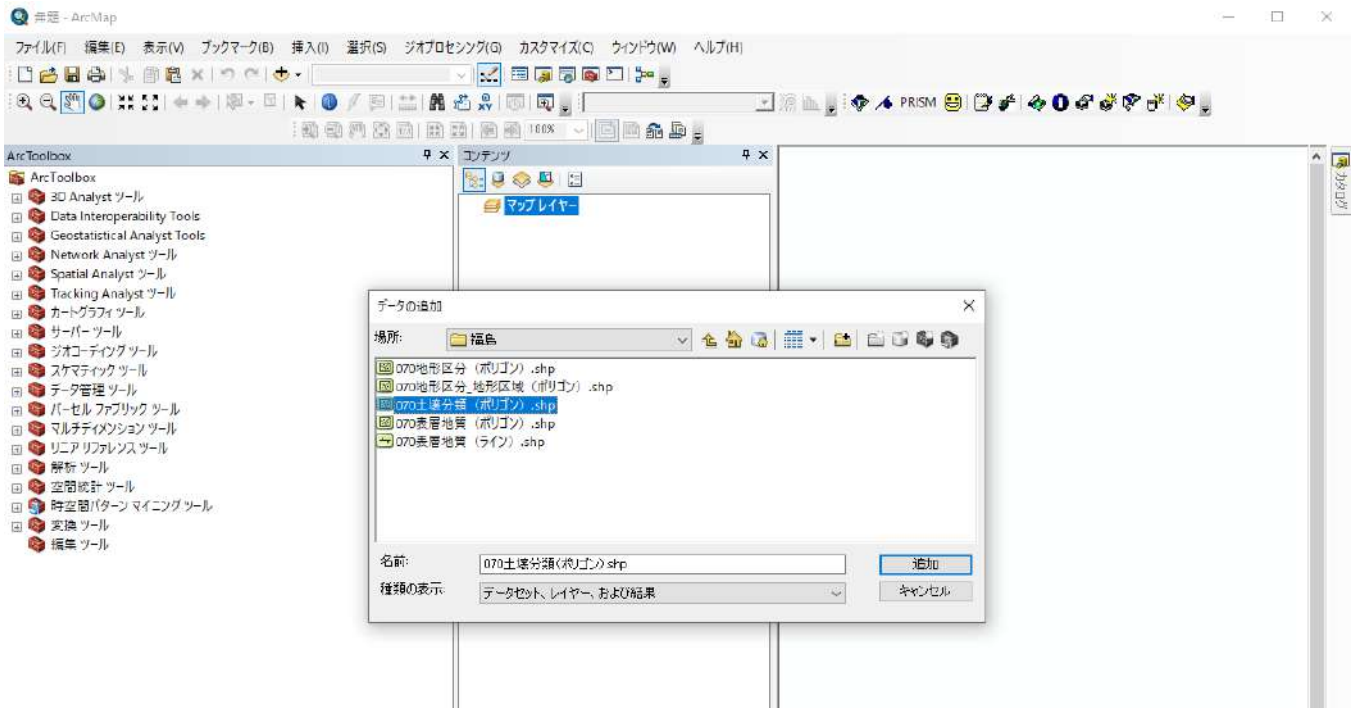


図 3-128 座標系の定義① (土壌データ)

shp ファイルを読み込むと以下のエラーメッセージが表示される。これは、shp ファイルのデータに座標系情報が未定義であることに由来する。

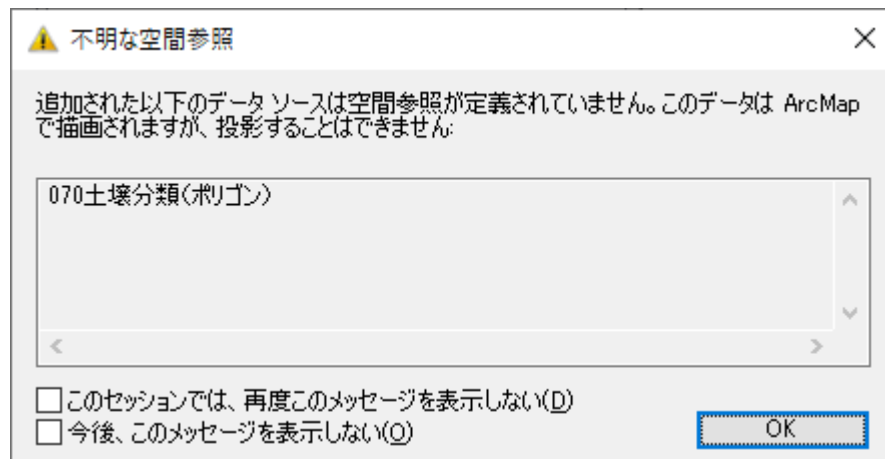


図 3-129 座標系の定義② (土壌データ)

実際、shp のプロパティを確認すると、座標系が未定義と表示される。

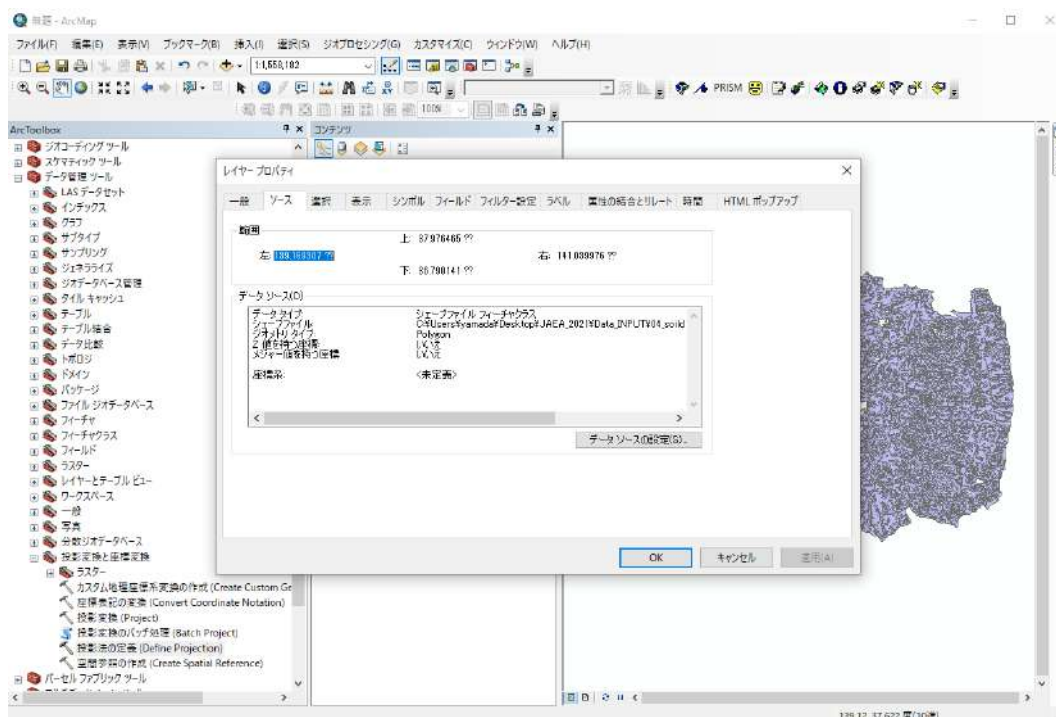


図 3-130 座標系の定義③（土壌データ）

shp ファイルに新たに座標系を設定する。ArcToolBox>データ管理ツール>投影変換と座標変換>ラスター>投影法の定義を選択し、入力データと座標系を設定する。緯度経度の測地系としては、「GCS_WGS_1984」が標準的である。地理座標系>世界>WGS1984 で設定可能である。

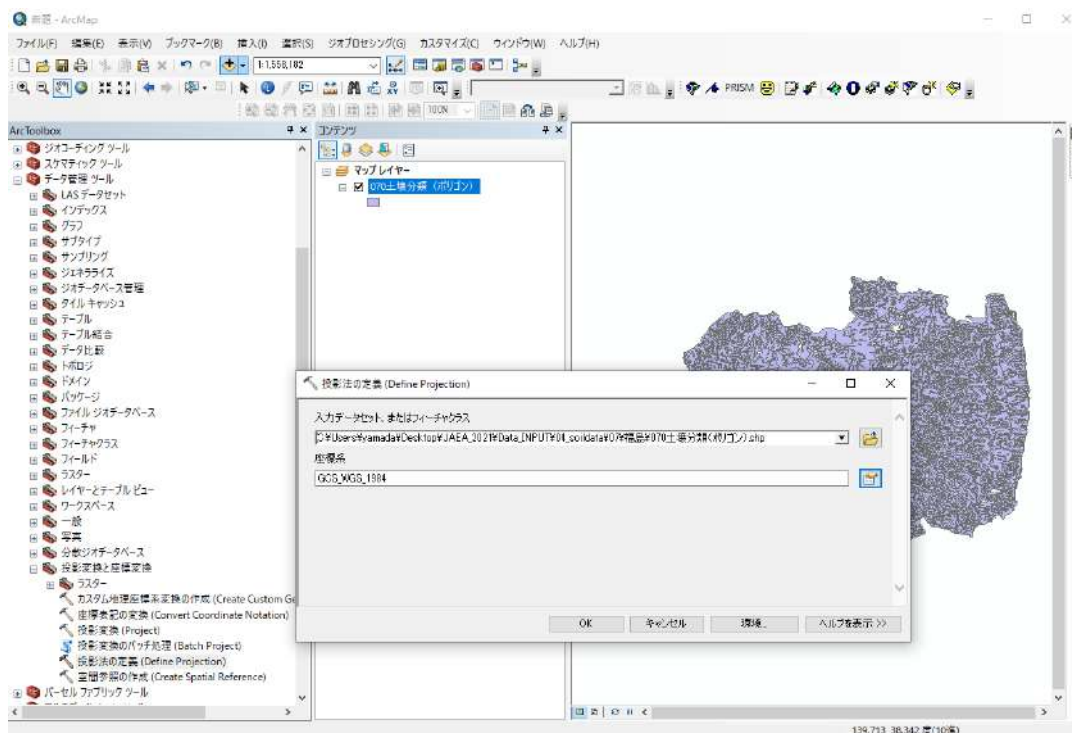


図 3-131 座標系の定義④（土壌データ）

投影法の定義を行い、座標系の設定が完了した際は下記のようなダイアログが表示される。



図 3-132 座標系の定義⑤（土壌データ）

再度、shp ファイルのプロパティを確認すると、座標系が「GCS_WGS_1984」で設定されていることが確認できる。

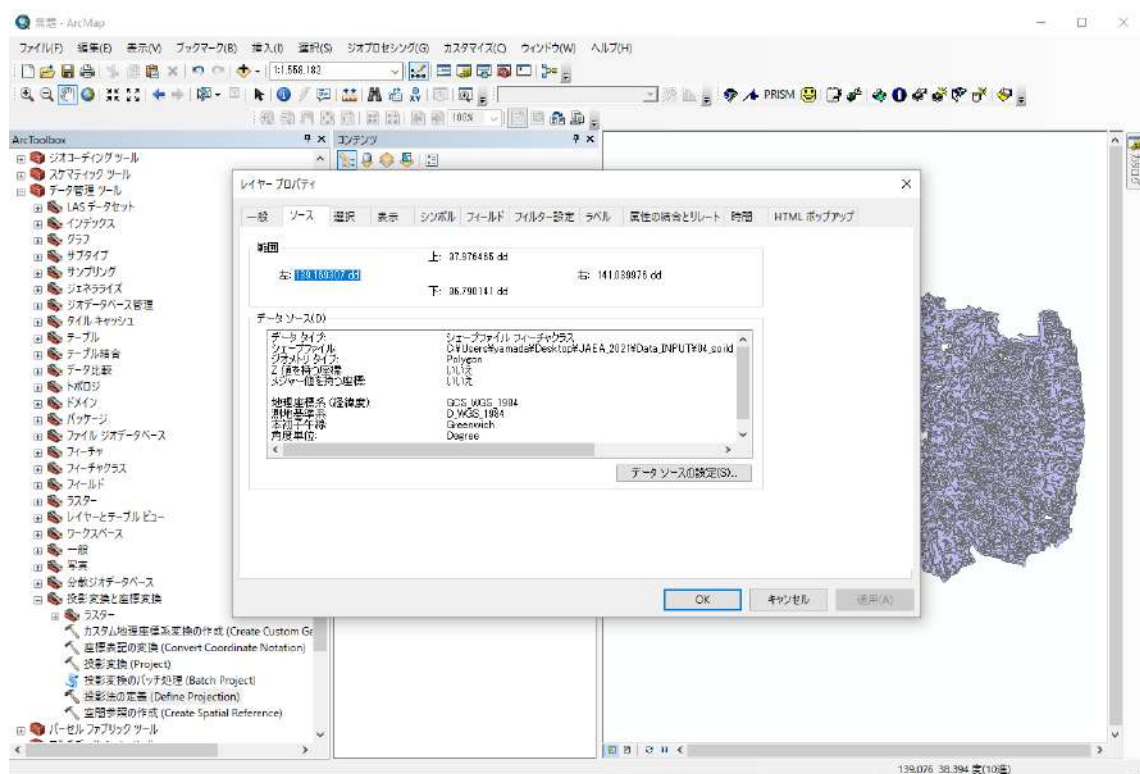


図 3-133 座標系の定義⑥（土壌データ）

③-3-A カラーマップの変更

土壌データ (shp ファイル) の属性テーブルを確認すると、各ポリゴンごとに定義されている土壌分類データが確認できる。属性テーブルは、レイヤーの右クリック>属性テーブルを開く、を選択することで表示できる。

FID	Shape	OBJECTID	属性1	属性2
0	Polygon	1	灰色	灰色低地土壌
1	Polygon	2	褐色	乾性褐色森林土壌
2	Polygon	3	黒ボク	黒ボク土壌
3	Polygon	4	褐色	湿性褐色森林土壌
4	Polygon	5	褐色	乾性褐色森林土壌
5	Polygon	6	灰色	灰色低地土壌
6	Polygon	7	褐色	褐色低地土壌
7	Polygon	8	灰色	灰色低地土壌
8	Polygon	9	褐色	乾性褐色森林土壌
9	Polygon	10	褐色	乾性褐色森林土壌
10	Polygon	11	褐色	乾性褐色森林土壌
11	Polygon	12	褐色	乾性褐色森林土壌
12	Polygon	13	グライ	グライ土壌
13	Polygon	14	褐色	湿性褐色森林土壌
14	Polygon	15	褐色	乾性褐色森林土壌
15	Polygon	16	褐色	乾性褐色森林土壌
16	Polygon	17	褐色	乾性褐色森林土壌
17	Polygon	18	褐色	乾性褐色森林土壌
18	Polygon	19	灰色	細粒灰色低地土壌
19	Polygon	20	褐色	乾性褐色森林土壌

図 3-134 カラーマップ変更① (土壌データ)

ビューワーに表示されている土壌データのカラーマップを変更する。レイヤーの右クリック>プロパティ>シンボルタブを開く。ここで、カテゴリを個別値、フィールドを属性1とし、「すべての値を追加」ボタンを押す。その後、適用を押すとカラーマップに変更が反映される。

シンボ...	値	ラベル	デー...
<input checked="" type="checkbox"/>	<その他の値すべて>	<その他の値すべて>	0
	<見出し>	属性1	3381
	グライ土	グライ土	299
	ポドソル	ポドソル	116
	岩屑土	岩屑土	259
	岩石地	岩石地	45
	未熟土	未熟土	49
	泥炭土	泥炭土	139
	灰色低地土	灰色低地土	470
	褐色低地土	褐色低地土	191

図 3-135 カラーマップ変更② (土壌データ)

カラーマップを変更した後の、土壌データの様子を図 3-136 に示す。

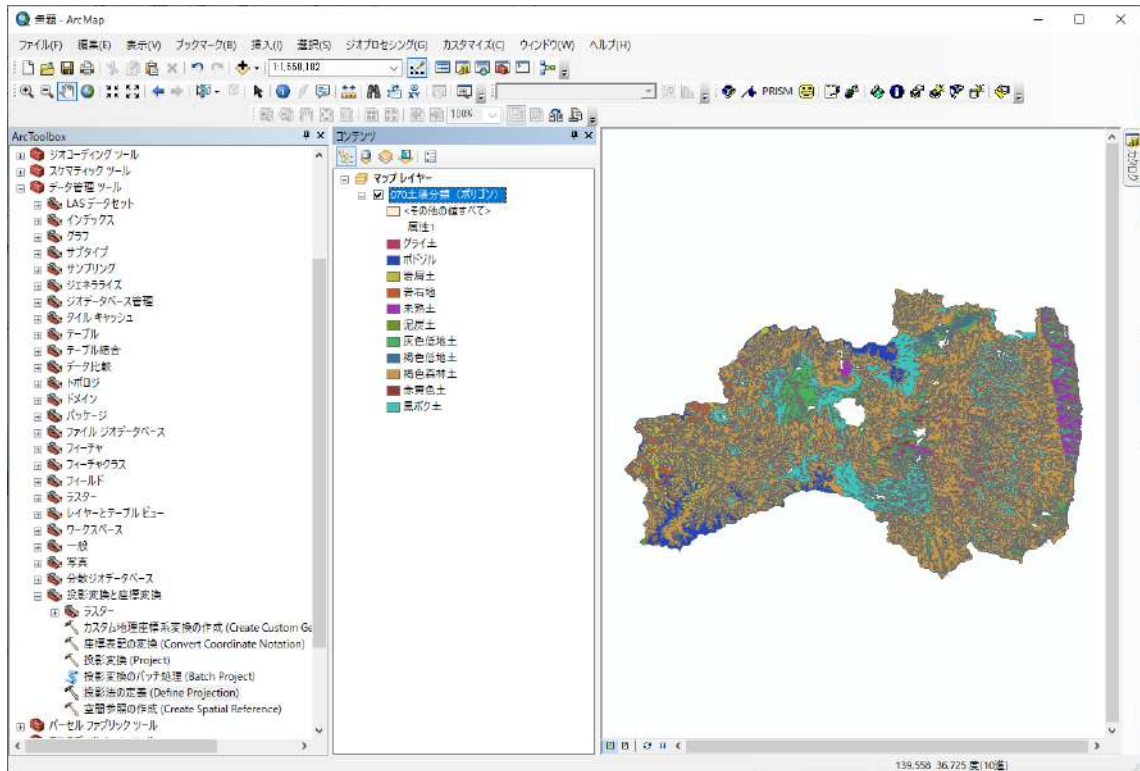


図 3-136 カラーマップ変更③（土壌データ）

③-3-B テーブルの編集

属性テーブルについて、土壌属性は漢字で定義されているため、これを数値コードに変換する必要がある。まず、右クリック>属性テーブルを開く、を選択する。

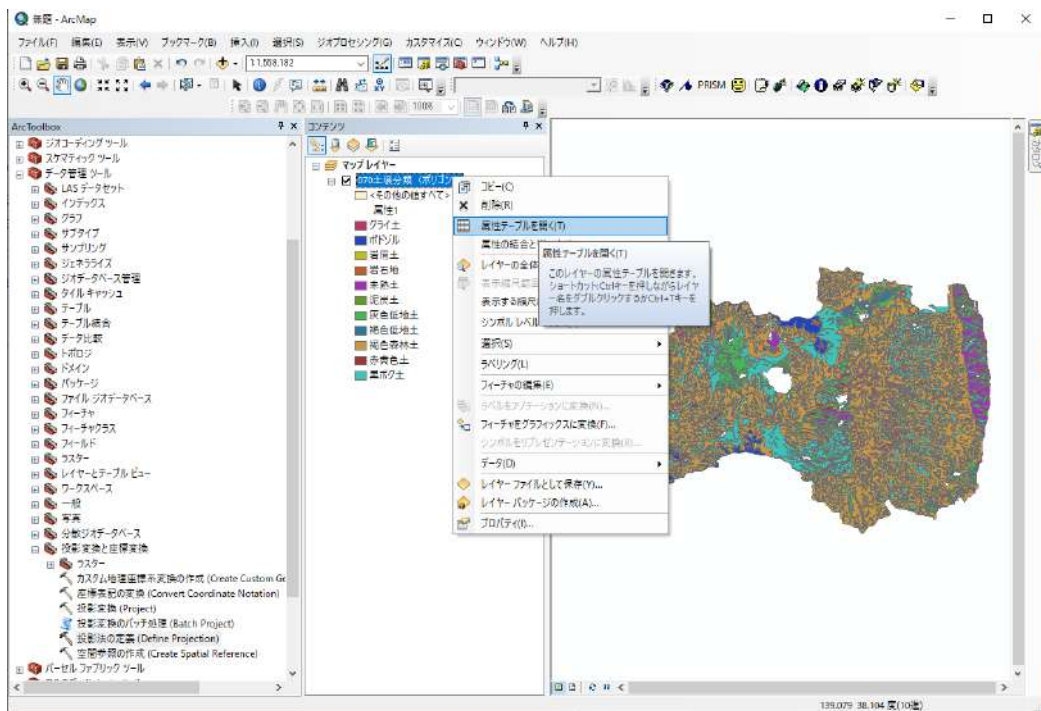


図 3-137 テーブル編集①（土壌データ）

新たに属性を追加する。テーブルオプション>フィールドの追加を押す。

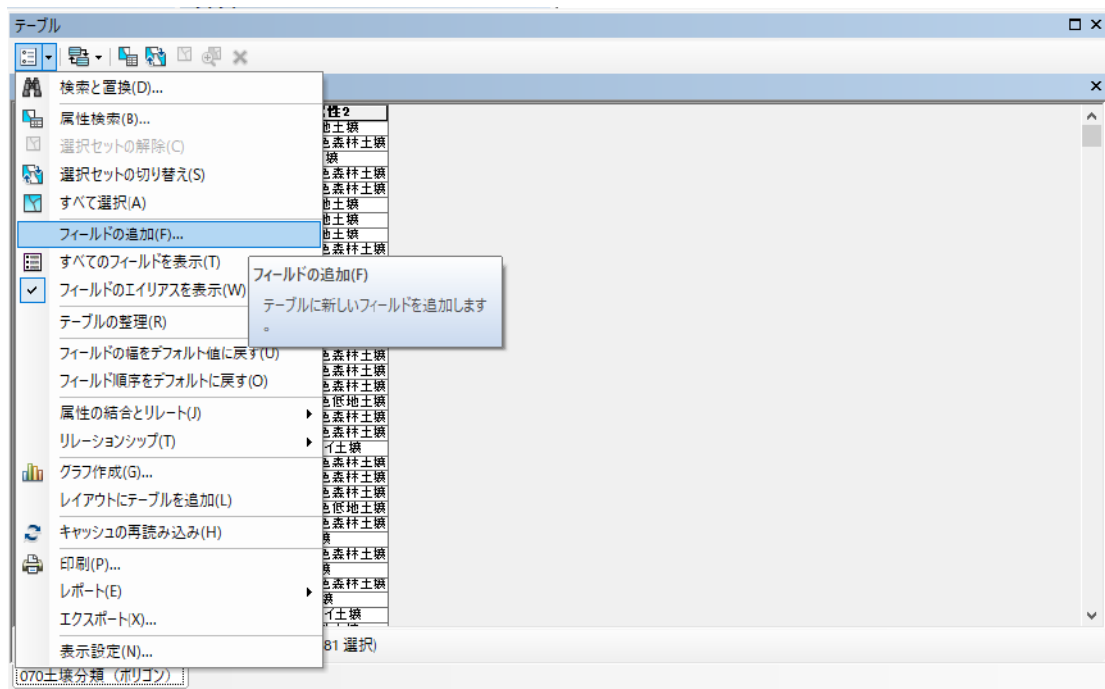


図 3-138 テーブル編集② (土壌データ)

新たなフィールドの名前とデータタイプを指定する。ここでは、フィールド名を「SoilType」とし、データタイプを「Short Integer」と設定する。

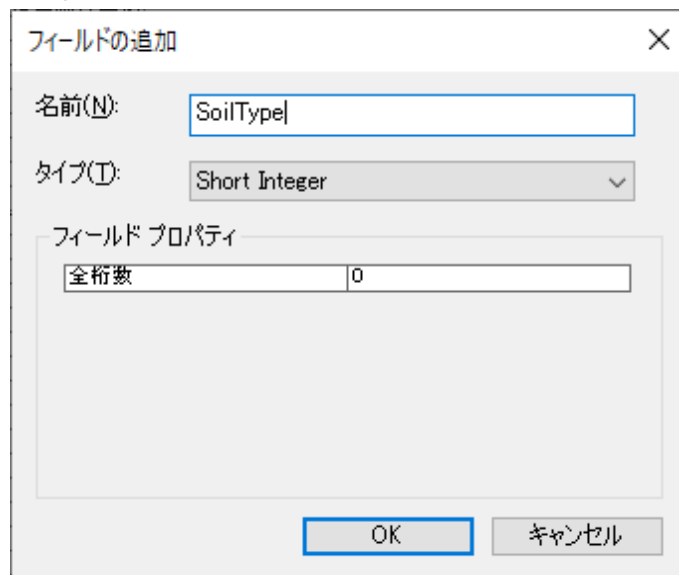


図 3-139 テーブル編集③ (土壌データ)

新規作成されたフィールドに対して、右クリック>フィールド演算を選択する。フィールド演算によって、属性1の漢字で指定された土壤情報を数値コードに変換し、それを新規フィールドに設定する。

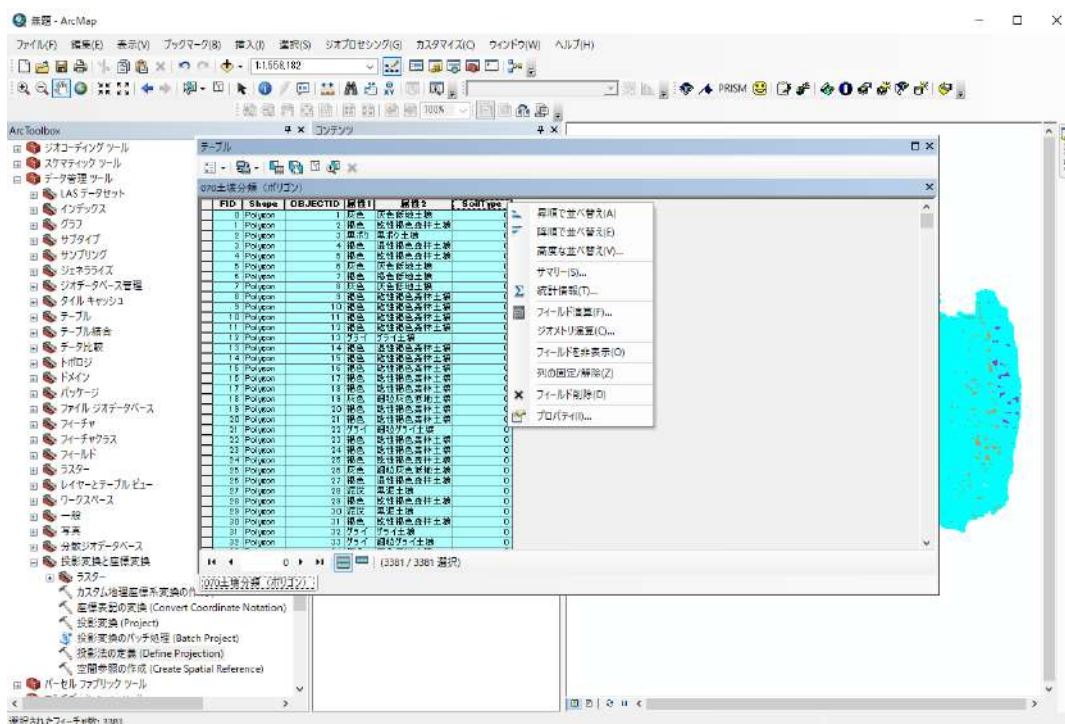


図 3-140 テーブル編集④（土壤データ）

フィールド演算について、形式を「Python」とし、「コードブロックを表示」にチェックを付ける。関数「Reclass」を Python スクリプトで定義して、属性1の情報を数値コードに変換する。

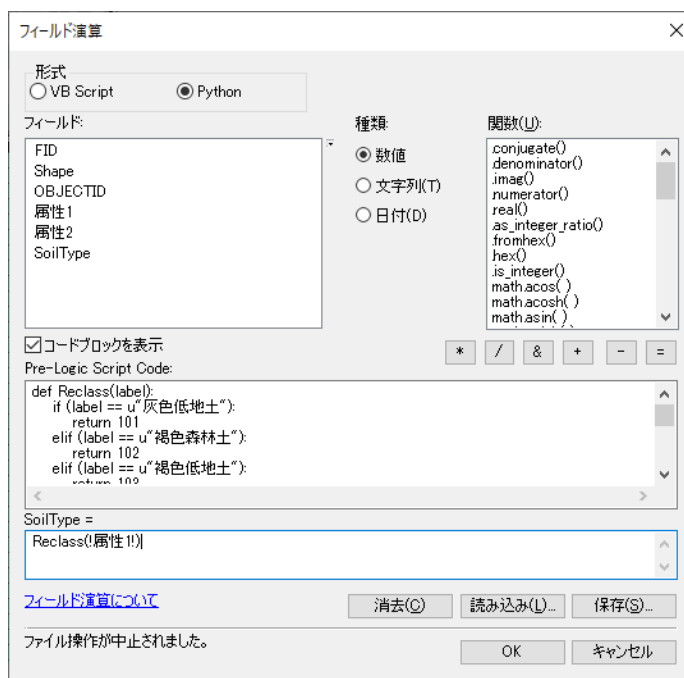


図 3-141 テーブル編集⑤（土壤データ）

スクリプトの詳細を図 3-142 に示す。

```

変換コード
SoilType = Reclass(!属性 1!)
スクリプト
def Reclass(label):
    if (label == u"灰色低地土"):
        return 101
    elif (label == u"褐色森林土"):
        return 102
    elif (label == u"褐色低地土"):
        return 103
    elif (label == u"黒ボク土"):
        return 104
    elif (label == u"グライ土"):
        return 105
    elif (label == u"泥炭土"):
        return 106
    elif (label == u"未熟土"):
        return 107
    elif (label == u"岩屑土"):
        return 108
    elif (label == u"岩石地"):
        return 109
    elif (label == u"赤黄色土"):
        return 110
    elif (label == u"ポドゾル"):
        return 111
    
```

図 3-142 テーブル編集⑥ (土壌データ)

フィールド演算を実行した後は、「属性 1」フィールドのタイプの対応した数値コードが、「SoilType」フィールドに設定される。

FID	Shape	OBJECTID	属性1	属性2	SoilType
0	Polygon	1	灰色	灰色低地土壌	101
1	Polygon	2	褐色	乾性褐色森林土壌	102
2	Polygon	3	黒ボク	黒ボク土壌	104
3	Polygon	4	褐色	湿性褐色森林土壌	102
4	Polygon	5	褐色	乾性褐色森林土壌	102
5	Polygon	6	灰色	灰色低地土壌	101
6	Polygon	7	褐色	褐色低地土壌	103
7	Polygon	8	灰色	灰色低地土壌	101
8	Polygon	9	褐色	乾性褐色森林土壌	102
9	Polygon	10	褐色	乾性褐色森林土壌	102
10	Polygon	11	褐色	乾性褐色森林土壌	102
11	Polygon	12	褐色	乾性褐色森林土壌	102
12	Polygon	13	グライ	グライ土壌	105
13	Polygon	14	褐色	湿性褐色森林土壌	102
14	Polygon	15	褐色	乾性褐色森林土壌	102
15	Polygon	16	褐色	乾性褐色森林土壌	102
16	Polygon	17	褐色	乾性褐色森林土壌	102
17	Polygon	18	褐色	乾性褐色森林土壌	102
18	Polygon	19	灰色	細粒灰色低地土壌	101
19	Polygon	20	褐色	乾性褐色森林土壌	102
20	Polygon	21	褐色	乾性褐色森林土壌	102
21	Polygon	22	グライ	細粒グライ土壌	105
22	Polygon	23	褐色	乾性褐色森林土壌	102
23	Polygon	24	褐色	乾性褐色森林土壌	102
24	Polygon	25	褐色	乾性褐色森林土壌	102
25	Polygon	26	灰色	細粒灰色低地土壌	101
26	Polygon	27	褐色	湿性褐色森林土壌	102
27	Polygon	28	泥炭	黒泥土壌	106
28	Polygon	29	褐色	乾性褐色森林土壌	102
29	Polygon	30	泥炭	黒泥土壌	106
30	Polygon	31	褐色	乾性褐色森林土壌	102
31	Polygon	32	グライ	グライ土壌	105
32	Polygon	33	グライ	細粒グライ土壌	105

図 3-143 テーブル編集⑦ (土壌データ)

③-3-C 測地系（緯度経度）から UTM 座標系への変換方法

データを緯度経度座標系から、UTM 座標系に変換する必要がある。「ArcToolBox>データ管理ツール>投影変換と座標変換>投影変換(Project)」を選択する。

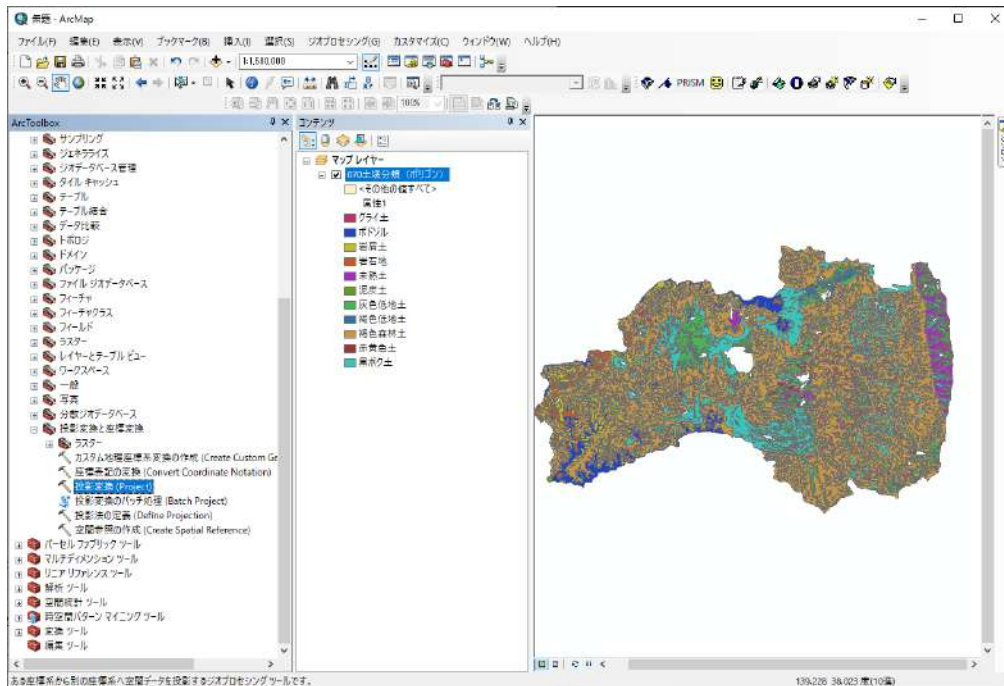


図 3-144 座標系の変換①（土壌データ）

出力位置はデフォルトで「Default.gdb」と決まっている。ここで、出力ファイルに全角（日本語など）が含まれていると ArcSWAT で上手く読み込めないなので、出力ファイルには全角を含めないように注意する。また、このとき、変換先の座標系「JGD_2000_UTM_Zone_54N」を指定する。

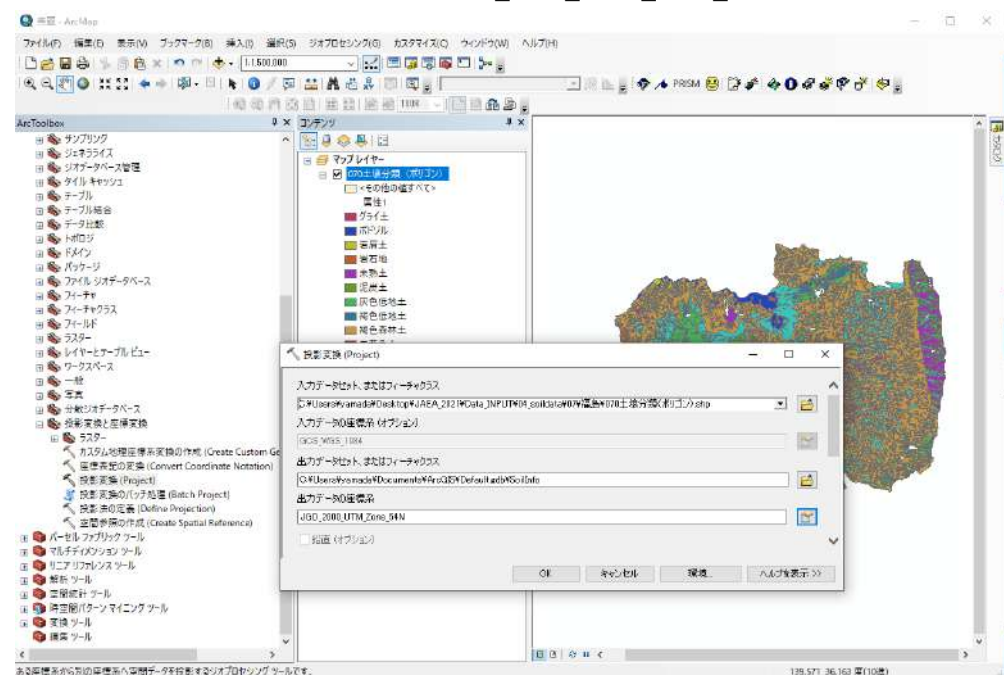


図 3-145 座標系の変換②（土壌データ）

座標系の変換が完了した場合は、下記のダイアログが表示される。



図 3-146 座標系の変換③ (土壌データ)

座標系を変換したジオデータベースファイル「Default.gdb」を、「SoilInfo_UTM54N_JGD2000_TableMod.gdb」という名前で保存する。

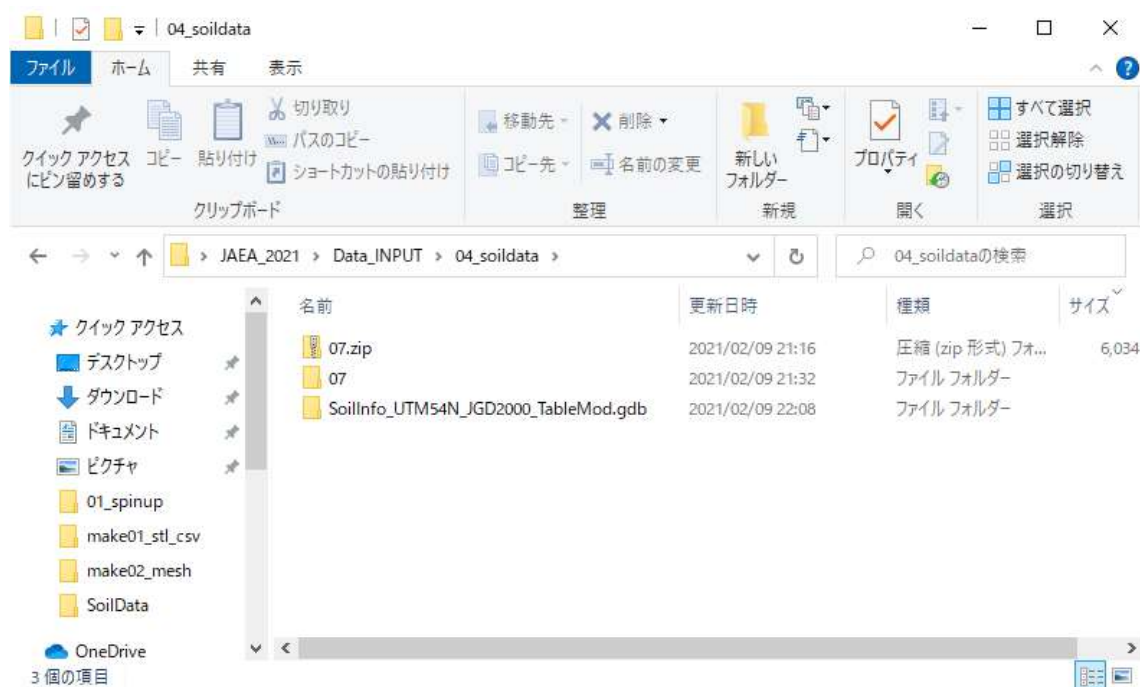


図 3-147 座標系の変換④ (土壌データ)

④ 観測データ (降雨量および流出量)

④-1 取得方法

試解析に使用する広瀬川 (福島県) の降雨量データおよび流出量データは、国土交通省の水門水質データベースから取得する (<http://www1.river.go.jp/>)。広瀬川流域に対する観測データとして、降雨量

は月館観測所（北緯 37 度 44 分 23 秒、東経 140 度 36 分 46 秒）から取得して、河川流出量は大関観測所（北緯 37 度 49 分 57 秒、東経 140 度 37 分 02 秒）から取得する。観測データには「欠損」および「未登録」などの抜けが含まれる場合があり、そのようなデータ抜けが少ない期間として 2003 年～2007 年の観測データを試解析に使用する。

④-1-A 降雨量データ（月館観測所）

水門水質データベース（<http://www1.river.go.jp/>）を開く。「観測所諸元からの検索」を選択する。



図 3-148 水門水質データベースの WEB サイト

河川名「広瀬川」として、観測所を検索する。雨量として月館観測所を選択する。



図 3-149 「広瀬川」の検索結果（水門水質データベース）

月館観測所の情報は下記の通りである。ここでは、「雨量年表検索」を選択する。

水文水質観測所情報

観測所名	月館（国）（つきだて）
観測項目	雨量
観測所記号	102011282218050
水系名	阿武隈川
河川名	広瀬川
所在地	福島県伊達市月館町大字布川字中平11番地
緯度経度	北緯 37度44分23秒 東経 140度36分46秒

[位置図](#) [観測所詳細諸元](#)

[雨量月表検索](#) [雨量年表検索](#) [経年雨量状況検索](#) [任意期間雨量検索](#) [リアルタイム雨量](#) [川の防災情報](#) [雨量・水位ランキング](#)

図 3-150 月館観測所（降雨量データ）の諸元情報

取得する観測データの期間を指定する。

日雨量年表検索

観測所記号	観測所名	水系名	河川名
102011282218050	月館（国）（つきだて）	阿武隈川	広瀬川

●年入力
 年

参照したい日雨量年表の西暦年を入力し、検索開始ボタンを押してください。なお、日雨量データ登録状況に●が付与された年にデータが登録されています。

日雨量データ登録状況 ●データ登録有り

		年(年代の*部)													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
年代	194*														●
	195*	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	196*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	197*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	198*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	199*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	200*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	201*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

図 3-151 月館観測所の日雨量年表

月館観測所の地図上の位置は下記の通りである。

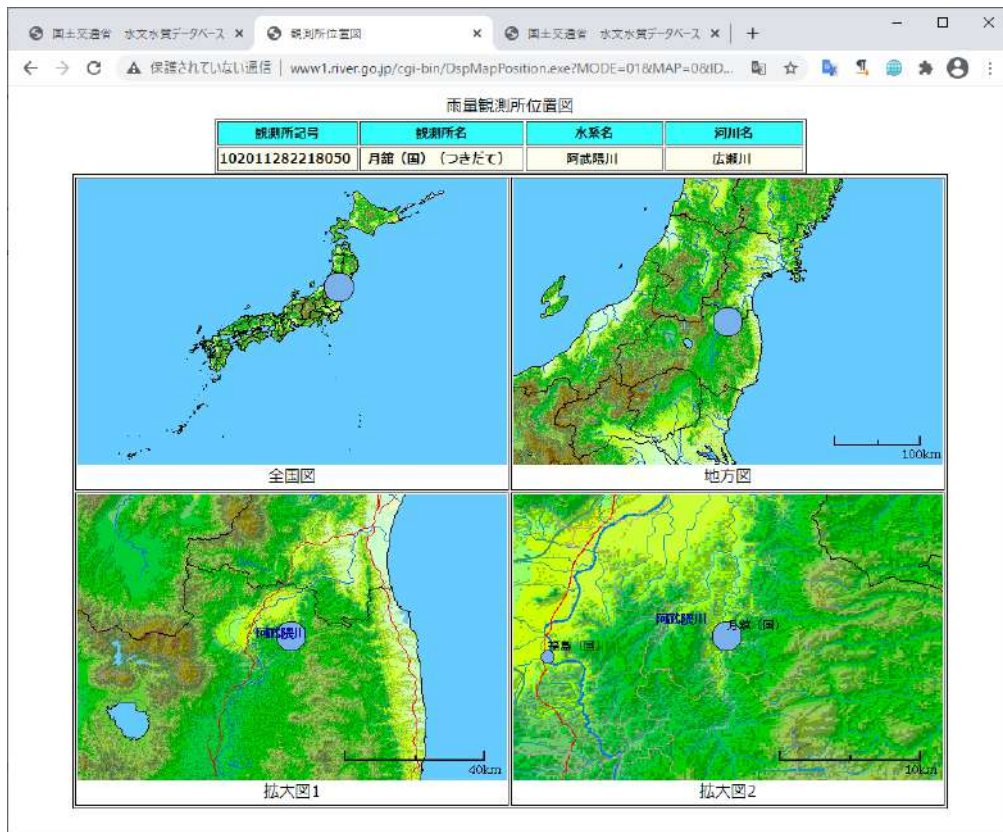


図 3-152 月館観測所（降雨量データ）の位置図

観測期間として「2003年」を指定したときの結果は下記の通りである。ここで、WEB画面上のフローピーアイコンを押下すると、降雨量のテキストデータが取得できる。



図 3-153 月館観測所の雨量年表（2003年）

取得した月館観測所の 2003 年の降雨量データは、下記の通りである。

雨量年表検索結果
 水系名,阿武隈川
 河川名,広瀬川
 観測所名,月館(国)
 観測所記号,102011282218050

 #月,1日データ,1日フラグ,,,,,31日データ,31日フラグ,月平均データ,月平均フラグ
 #フラグの意味: \$:欠測, -:未登録

. 1日,,2日,,3日,,4日,,5日,,6日,,7日,,8日,,9日,,10日,,11日,,12日,,13日,,14日,,15日,,16日,,17日,,18日,,19日,,20日,,21日,,22日,,23日,,24日,,25日,,26日,,27日,,28日,,29日,,30日,,31日,
 2003年

1月	0.0,	0.0,	7.0,	12.0,	2.0,	1.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,
2月	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	8.0,	0.0,	1.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,
3月	27.0,	12.0,	0.0,	1.0,	0.0,	0.0,	44.0,	6.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,
4月	0.0,	1.0,	0.0,	0.0,	23.0,	1.0,	0.0,	11.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	11.0,
5月	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,
6月	8.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,
7月	0.0,	0.0,	2.0,	0.0,	0.0,	0.0,	32.0,	5.0,	1.0,	7.0,	6.0,	1.0,	9.0,	1.0,	4.0,	32.0,	2.0,	12.0,	0.0,
8月	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	1.0,	1.0,	0.0,	0.0,	6.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	18.0,
9月	15.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	4.0,	39.0,	18.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	42.0,
10月	0.0,	1.0,	0.0,	1.0,	0.0,	1.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	4.0,
11月	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	2.0,	0.0,	1.0,	6.0,	8.0,	17.0,	0.0,	0.0,	0.0,	17.0,	0.0,	0.0,	0.0,
12月	1.0,	1.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	0.0,	5.0,	10.0,	0.0,

図 3-154 月館観測所の雨量年表 (2003 年) のテキストデータ

④-1-B 流出量 (大関観測所)

図 3-149 として、「大関観測所」を選択する。

水文水質観測所情報

観測所名	大関 (おおぜき)	
観測項目	水位流量	
観測所記号	302011282218020	
水系名	阿武隈川	
河川名	広瀬川	
所在地	福島県伊達市梁川町大字大関字中ノ内	
緯度経度	北緯 37度49分57秒 東経 140度37分02秒	
最新の零点高	T.P. 53.564m	
零点高履歴	T.P. 53.564m	2005/01/01 1:00~
	T.P. 53.750m	1962/02/01 1:00~2004/12/31 24:00

位置図	観測所詳細諸元				
水位月表検索	水位年表検索	位況表検索	任意期間水位検索	川の防災情報	雨量・水位ランキング
流量月表検索	流量年表検索	流況表検索	任意期間流量検索		

図 3-155 大関観測所 (流出量データ) の諸元情報

大関観測所の地図上の位置は下記の通りである。

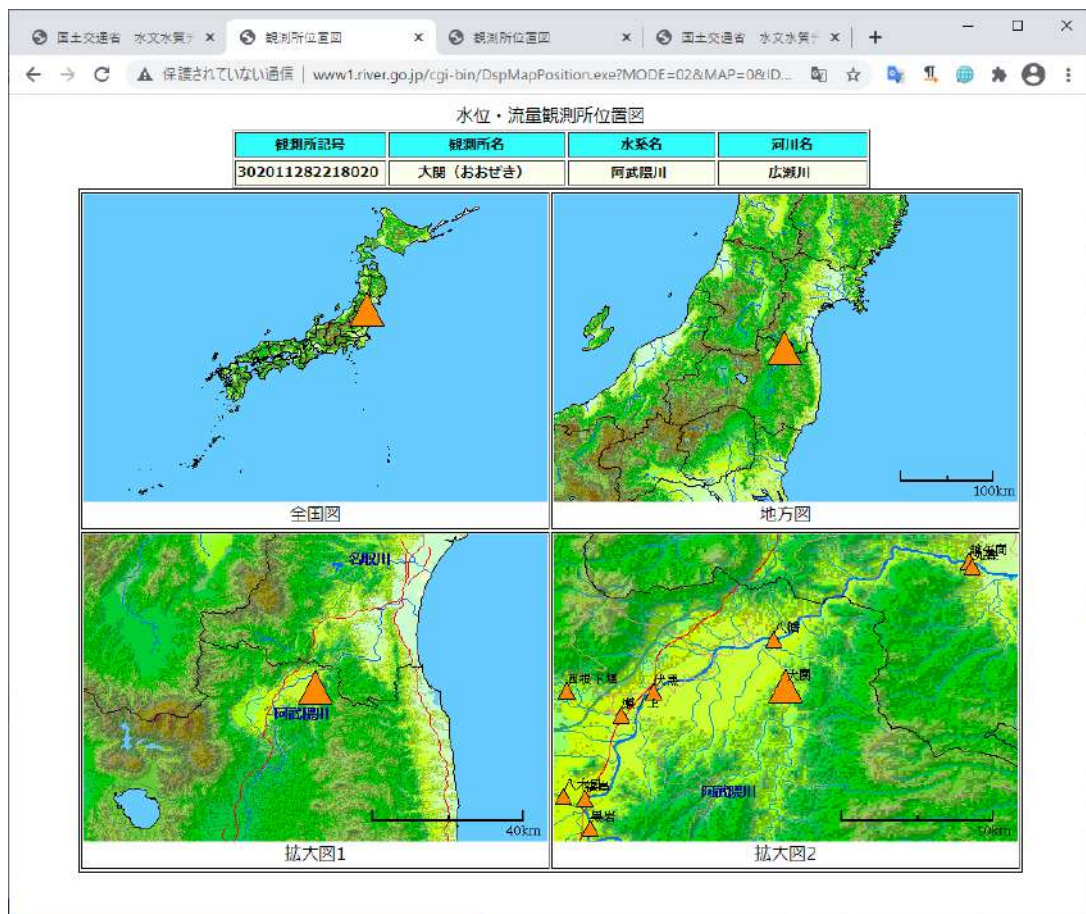


図 3-156 大関観測所（流出量データ）の位置図

取得する観測データの期間を指定する。



図 3-157 大関観測所の日流量年表

④-2 フォーマットの変換

水門水質データベースから取得した観測データは図 3-160 のようなフォーマット形式をとる。

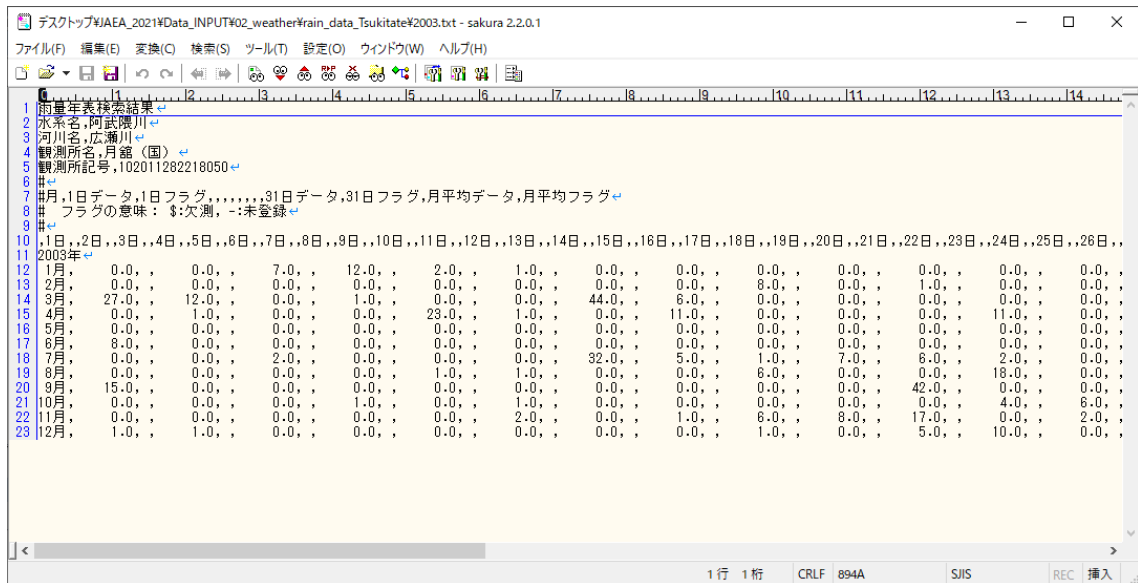


図 3-160 水門水質データベースから得られるデータフォーマット

このままでは、各解析ソフトの入力として扱いにくいいため、Python スクリプトを作成して、図 3-161 や図 3-162 のような形式に変換した。

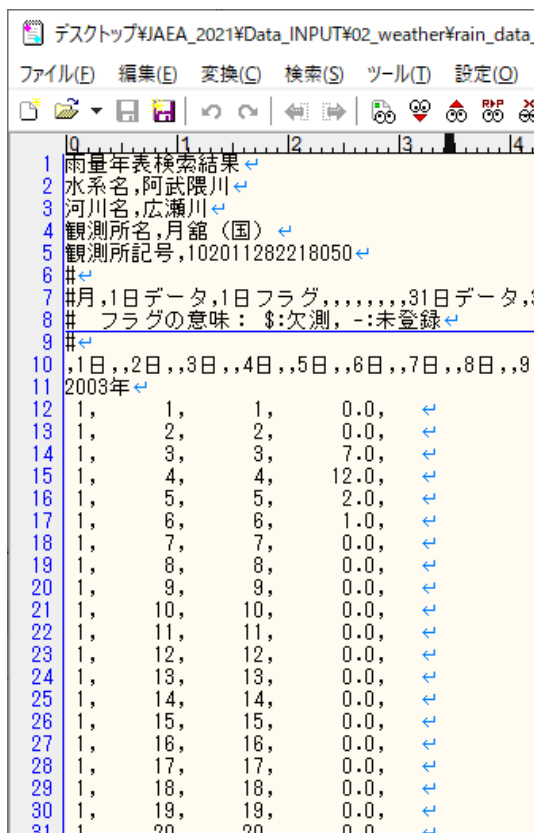


図 3-161 フォーマット整形①

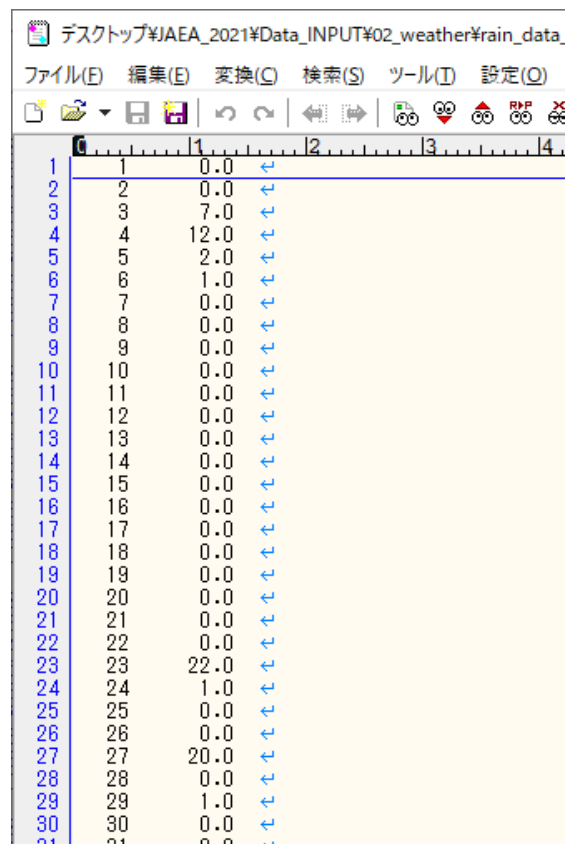


図 3-162 フォーマット整形②

④-3 広瀬川のデータ

広瀬川流域沿いで観測された、降雨量および河川流出量のデータ（2003年から2007年）を以下に示す。降雨量は月館観測所のデータであり、流出量は大関観測所のデータである。

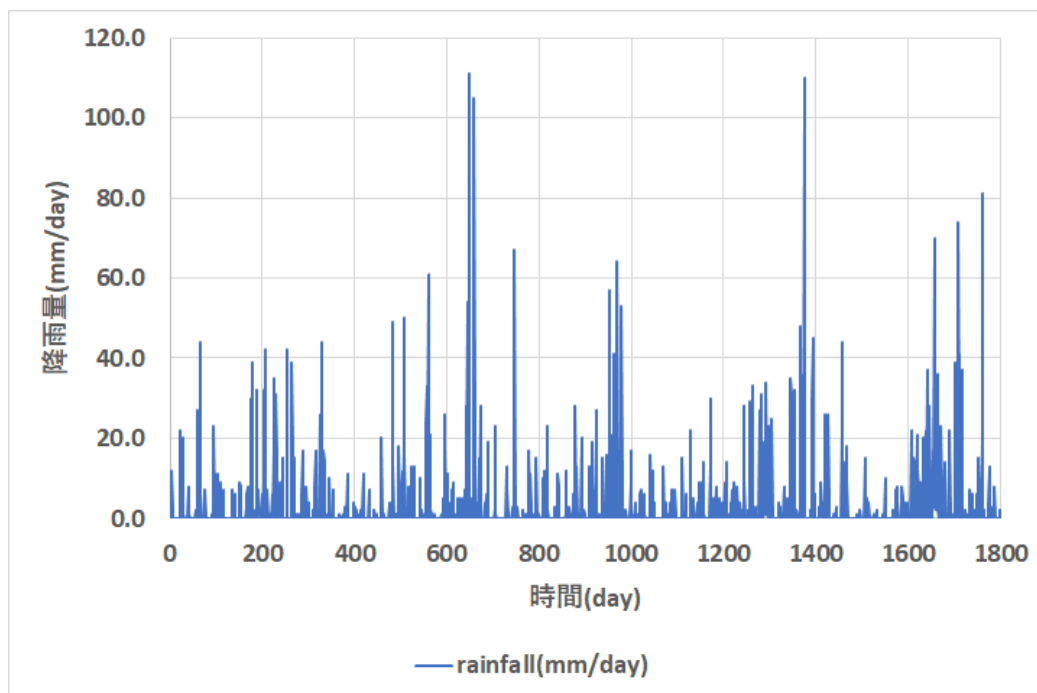


図 3-163 広瀬川、降雨量、2003～2007

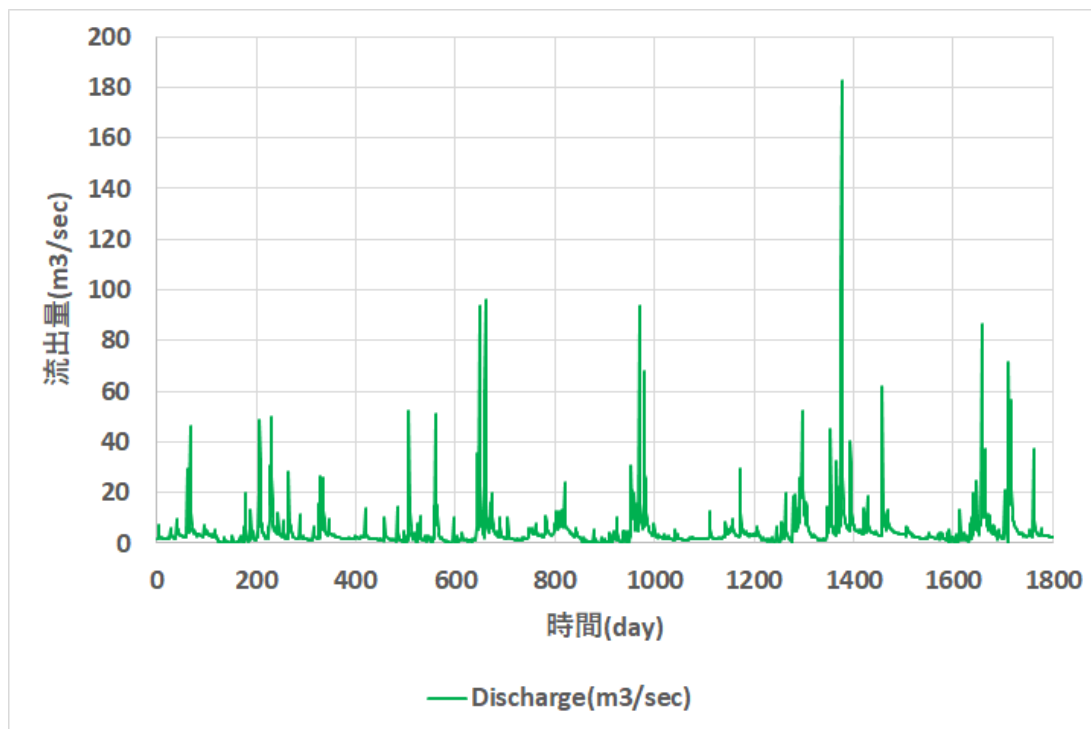


図 3-164 広瀬川、流出量、2003～2007

⑤ 観測データ（気象関連）

ArcSWAT への入力が必要な気象データの種類は5つある。日雨量（mm/day）、日気温の最大・最小（℃）、全天日射量（MJ 換算）、日平均風速（m/s）、相対湿度（%）である。日雨量以外の気象データは、気象庁のアメダス気象データから取得する。気象庁のアメダス気象データは、下記の気象庁 WEB サイトの「過去の気象データ・ダウンロード」

(<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>) から取得する。



図 3-165 気象庁 アメダス気象データ①

気象データは福島地方気象台から取得する。福島気象台は標高 70.0m に設置されている。



図 3-166 気象庁 アメダス気象データ②

以下に、福島地方気象台で観測された最低・最高気温および、全天日射量、平均風速、平均湿度の 2003 年から 2005 年までのデータを示す。

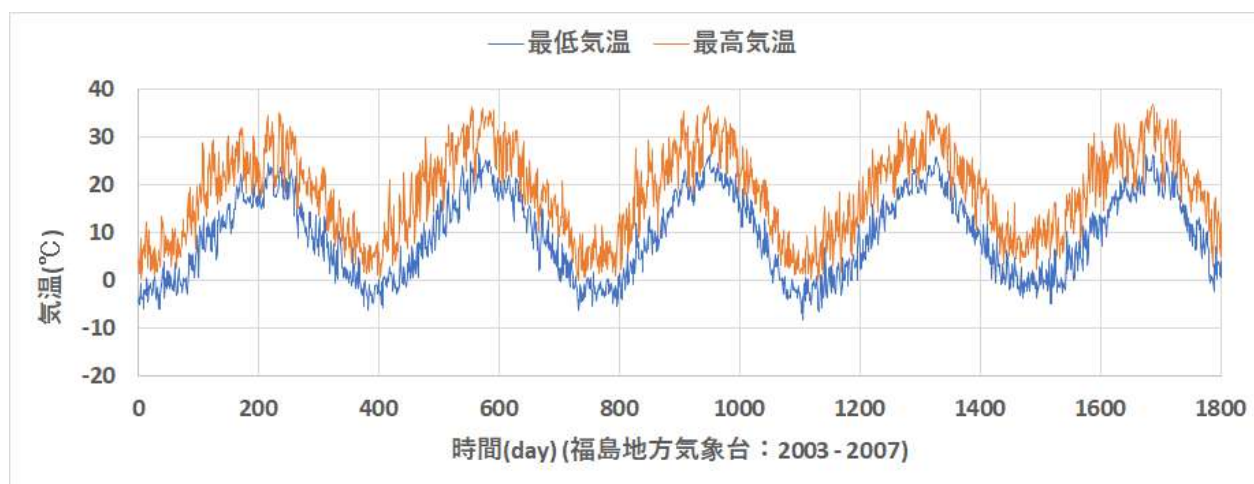


図 3-167 アメダス気象データ① 最低・最高気温

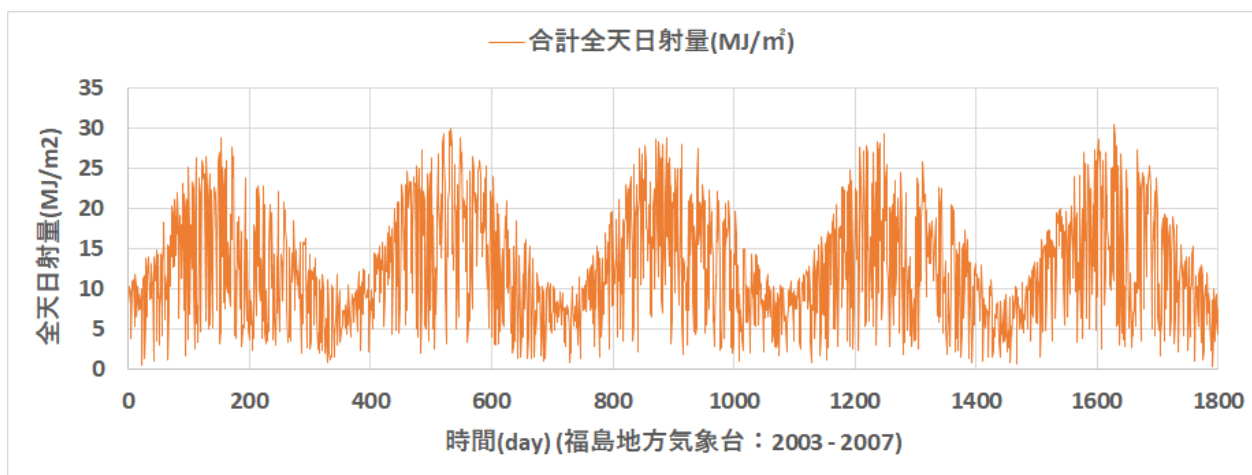


図 3-168 アメダス気象データ② 全天日射量

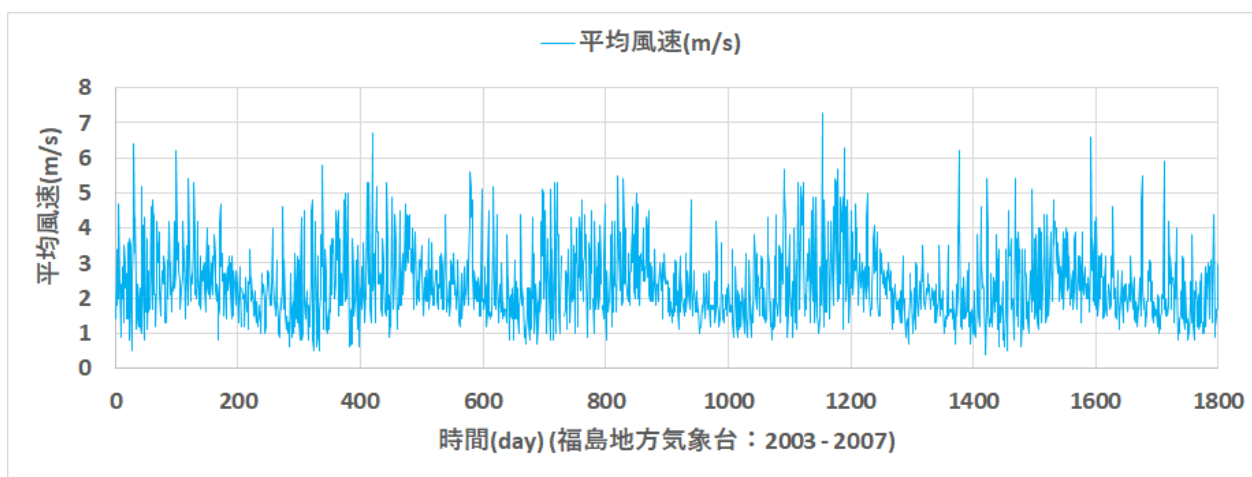


図 3-169 アメダス気象データ③ 平均風速

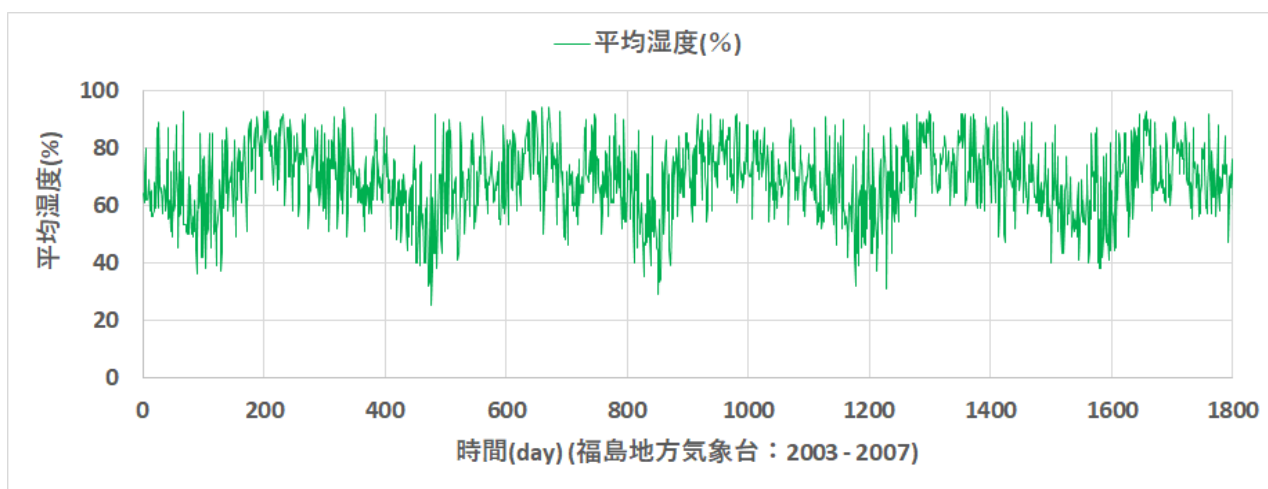


図 3-170 アメダス気象データ④ 平均湿度

3.3.4 ArcSWAT (試計算)

① ArcSWAT コードの入手及びコードの概要

①-1 入手方法

ArcGIS を別途導入した PC 環境に対して、ArcSWAT をインストールする。ArcSWAT の入手は、公式サイト (WEB サイト[3-12]) から可能である。今回は、「ArcSWAT2012」を使用した。

①-2 概要

ArcSWAT および SWAT コードの機能について、その概要を記す。概要は、参考文献から内容を一部抜粋する他、一部は要約した。

【文献[3-13]から抜粋】

水門-流出現象は降雨・融雪、蒸発散、河川流、地下水流など、多くのプロセスが関与しており、それらが複雑に関連していると考えられる。計算が容易な貯留関数法に代表される集中定数型モデルでは水門特性を評価できる一方で、物質流出特性の評価は苦手とする。分布定数型モデルの代表例である SWAT モデルには、流域の土地利用状況や土壌特性、地被状態などが複雑に関与する物質流出特性を評価するための一連のプロセスが組み込まれている。

SWAT とは、テキサス A&M 大学と Black land 研究所が開発した流域統合評価モデルである。水、気象、地被という視点を通して、個々の事象にのみ注目するのではなく、流域全体の健全度を評価するものである。降水量・日照量・土壌データ等を、本モデルに入力することにより、対象流域の現状の再現や土地利用の変化、気象変化等が流域に与える影響を推定することができる。図 3-171 に示した水文サイクルの各プロセスの他、ダム/貯水池、河道流下、河道灌漑水作物の生育を考慮可能で、施肥環境もモデル化可能である (図 3-172 参照)。

【文献[3-14]から抜粋】

日本では、これまでに様々な GIS 情報が整備・公開されている。例えば国土地理院の WEB サイトでは地形データや土地利用の GIS データが公開され、国土交通省土地・水資源局国土調査課の WEB サイトでは土壌分布データが公開されている。ArcSWAT モデルは ESRI 社製の GIS である ArcMAP で稼働する SWAT モデルであり、既存の GIS 情報や土壌、気象情報を用いて流域の水・物質循環を評価できる。評価ステップは日単位である。基本的に ArcSWAT は緯経度ではなく平面直角座標系で稼働するため、対象流域付近を、世界測地系 JGD2000 の UTM54 系(ユニバーサル横メカルトル)か、平面直角座標系 JGD2000 の 12 系のデータとして取り扱う必要がある。

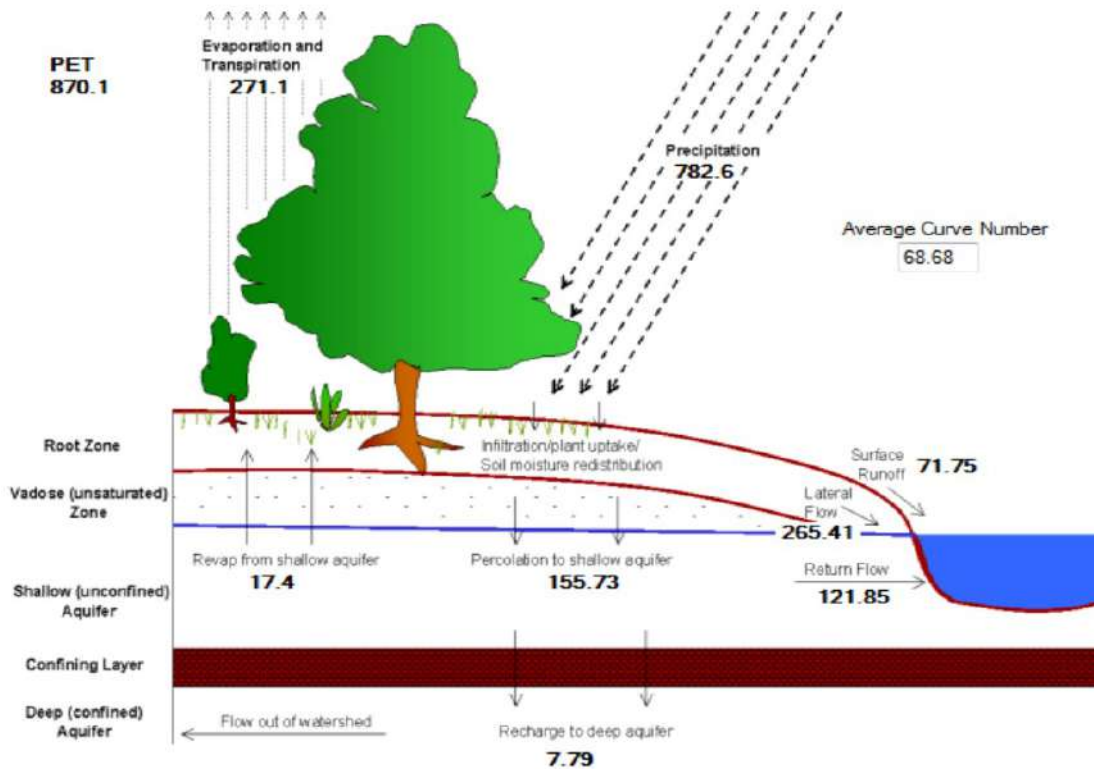


図 3-171 SWAT モデルの水門サイクル概念図 (抜粋：文献[3-13])

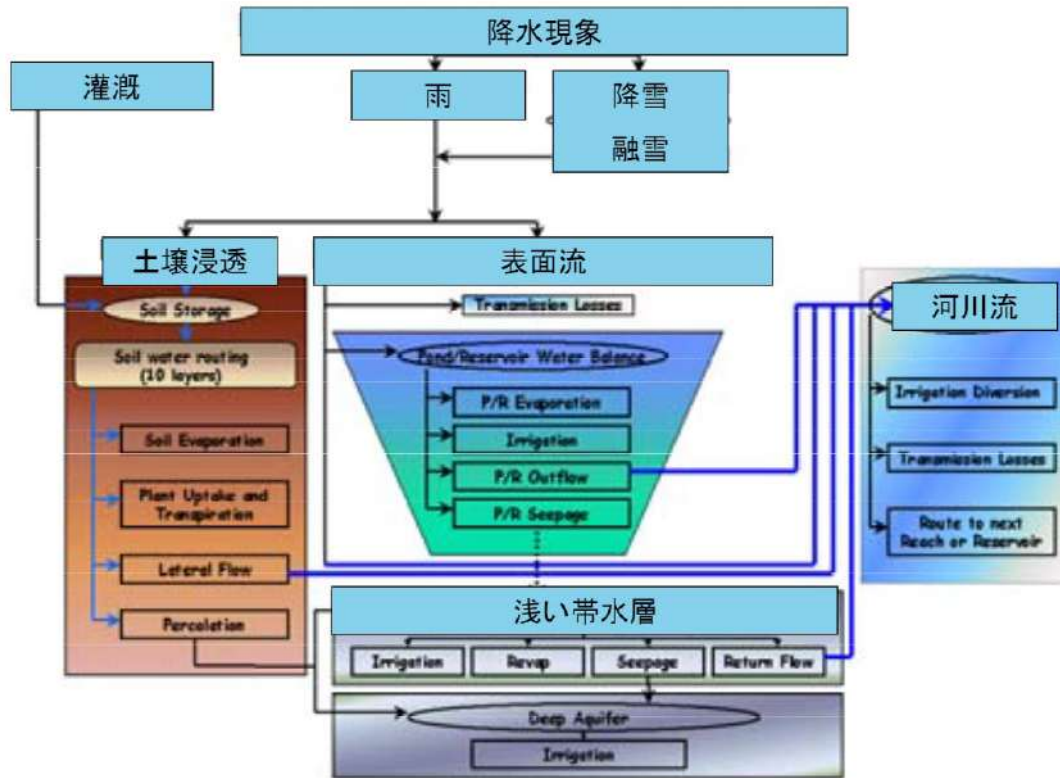


図 3-172 SWAT モデルの模式図 (抜粋：文献[3-13])

② SWAT の試計算結果とその評価

広瀬川流域に対して、2003 年～2007 年期間の降雨量を設定した際、ArcSWAT で流出量の試計算結果を以下に示す。なお、降雨は下記のようなデータとなる。この期間の平均降雨量は4.947(m³/sec)と計算される。

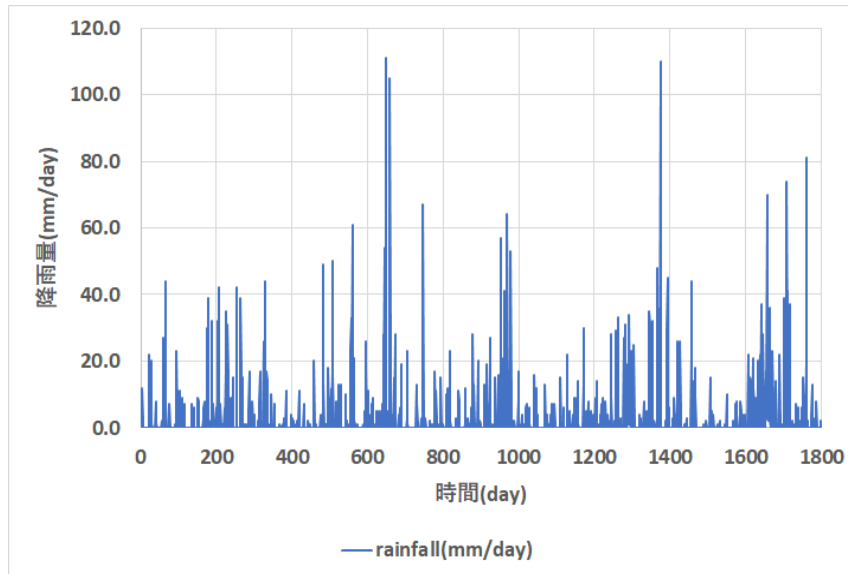


図 3-173 広瀬川、降雨量、2003～2007

図 3-174 から図 3-176 に、ArcSWAT による流出量に関する試計算結果と観測値の比較を示す。なお、Observed : 観測値、Sim : 計算結果、Sim_Optim : 計算結果 (モデル定数最適化) である。ここではモデル定数のキャリブレーションとして、降雨の土壌内滞留時間(LAT_TIME(days))を 0days から 10days に変更し、側方流長さ(SLSOIL(m))を 0.0m から 100.0m に変更することで、表面流と側方流の比率を調整した。これにより、3.3.1 で導入した評価関数 NSE、RSE の値は、各々、表 3-30 で示した結果となった。

表 3-30 誤差評価の結果

	Sim	Sim_Optimized
NSE	-1.079	0.452
RSE	2.079	0.548

モデル定数が初期設定のままだと雨水は土壌内に滞留することなく、その大半が表面流として流出するのに対して、土壌内滞留時間を調整した計算(Sim_Optimized)では雨水が土壌内に滞留し、降雨から遅れて側方流あるいは地下水流として流出することとなり、より観測結果に近い計算結果となった。

以上、分布定数型モデルの場合、様々なパラメータを調整する必要がある上、それらの分布にも配慮する必要がある。本事業では試計算に留めたため、十分なチューニングを実施していないが、それらを適切に定めるには、現地の情報や経験が必要となることが分かる。

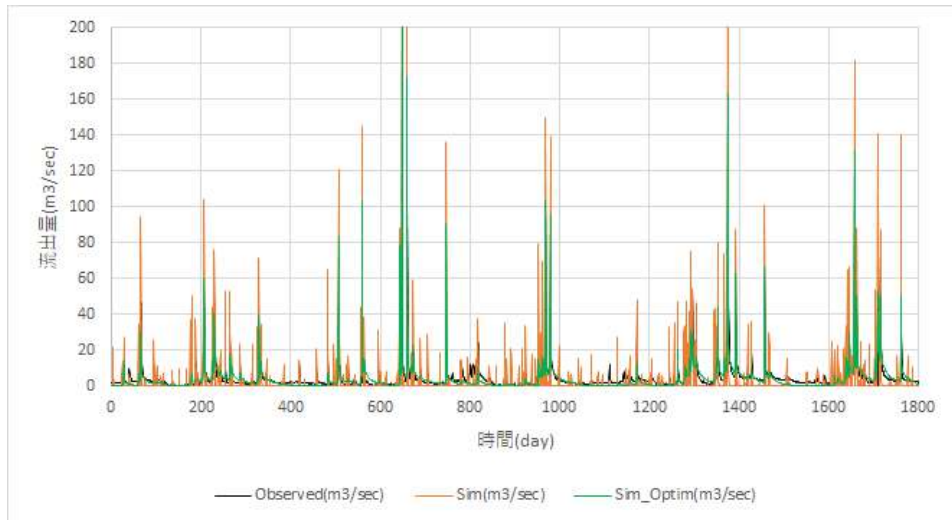


図 3-174 ArcSWAT の試計算結果（全体表示：5年間分）

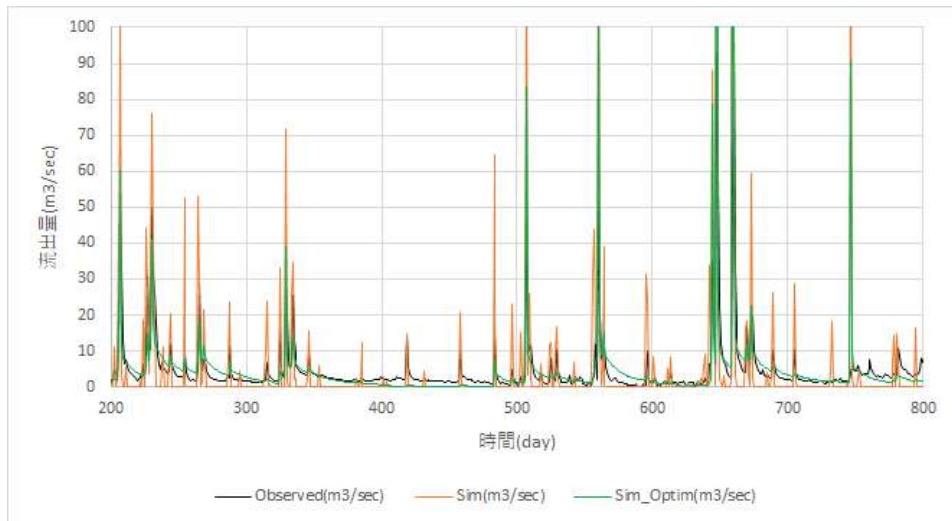


図 3-175 ArcSWAT の試計算結果（拡大表示：200日から800日）

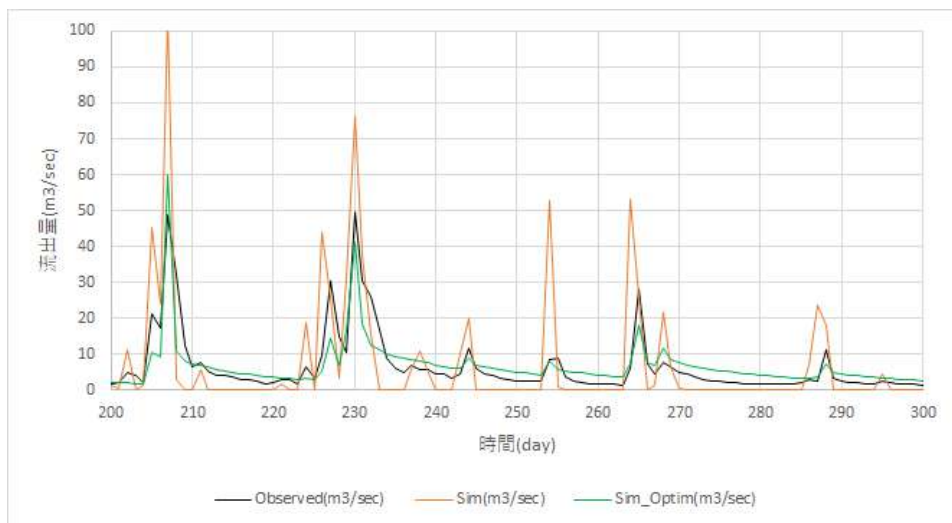


図 3-176 ArcSWAT の試計算結果（拡大表示：200日から300日）

3.3.5 GeoWEPP コード

① WEPP コードの入手及びコードの概要

①-1 入手方法

ArcGIS を別途導入した PC 環境に対して、GeoWEPP ツールをインストールする。GeoWEPP ツールの入手は、公式サイト（WEB サイト[3-20]）から可能である。今回は、「GeoWEPP for ArcGIS 10.4.」を使用した。

①-2 概要

GeoWEPP 及び WEPP コードの機能について、その概要を記す。概要は、参考文献から内容を一部抜粋し、適宜修正した他、要約した。

【文献[3-26]から抜粋し修正】

WEPP は 1985 年に開発が始まり、農地などの斜面モデルが 1989 年に発表された。その後、水路や貯水池を含む流域モデルとして 1995 年に公開された。現在に至るまでモデルは随時更新されており、インターネットを介して無償で配布されている。WEPP は斜面における土壌侵食過程、水路または河川における侵食、堆積、輸送過程、そして貯水池における堆積、輸送過程の 3 つの過程で構成されている。中でも土壌侵食に関して大きな影響因子である作物の生長、土壌状態の変化、各種営農管理作業を実際の現象に即した形で表現していることが特徴である（図 3-177）。また、WEPP は流域スケールでの土砂動態を表現できる特徴を持つ。一方で、ソースコードが公開されていないために、利用者はモデルの構造や計算式の改変ができないという不便さもある。

WEPP の適用性をさらに高めた展開として、2001 年より GIS と連携した形で解析を実行することができる GeoWEPP の開発が進んでいる。GIS における地形情報をもとに河道網や集水域が自動的に決定され、土壌図や土地利用図が WEPP の土壌や管理入力データとして直接利用できるようになったので、広域評価を行う際の労力が大幅に軽減される。

【文献[3-26]から抜粋し修正】

WEPP モデル(Water Erosion Prediction Project)は、農地などの斜面における土壌侵食に加え、流域における土砂流下過程も表現することが可能であり、現状の再現、広域評価、土木的対策や営農的対策による効果の算定などのために用いる有力なモデルである。WEPP モデルの入力データには、気象、土壌、地形、栽培管理方法等がある。気象データに関しては項目数が多く、形式が特殊であるという問題点を有しているのに加え、WEPP モデルに付属している気象データベースは米国のみであるため、日本を含む他の地域では独自に気象データを収集・整備しなければならない。

【文献[3-29]から抜粋し修正】

WEPP モデルは、有効雨量の算定に土壌浸透に係る Green-Ampt モデル、表面流解析に Kinematic Wave モデル、土壌層の中間流解析に Kinematic storage-discharge モデルを用いている。次に、流出量が得られた後、土壌侵食モデルによって斜面域での侵食量・堆積量の時・空間分布を算定することができる。WEPP モデルは 1 年間を通じた水収支、土砂流出量の算定を基本としているが、日単位の時

系列データを入力して、計算結果は日単位で出力される。WEPP モデルはまた、冬季間の降雪、積雪、融雪過程と土壌層の凍結・融解過程の物理モデルも組み込まれており、積雪地域の年間水収支も算定可能である。

【WEB サイト[3-20]から要約】

GeoWEPP は、WEPP のための地理空間インターフェースである。数値標高モデル (DEM) を読み込んだ ArcGIS と連携させ WEPP を動作させることができる。

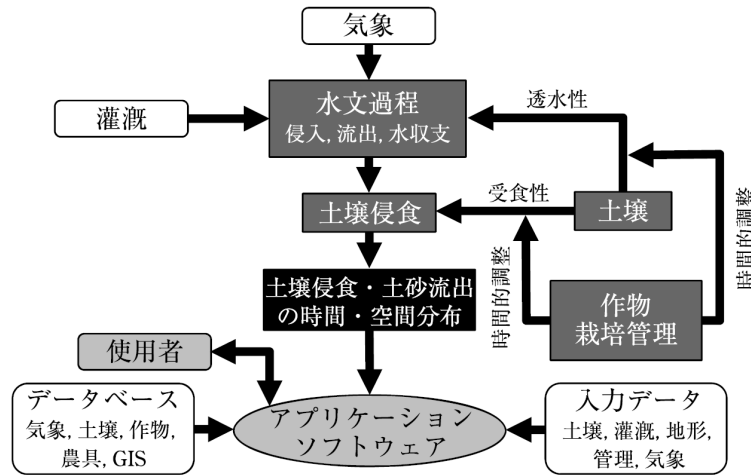


図 3-177 WEPP の概要

表 3-31 WEPP の入力データ

要素	項目	入力データ
共通	気象	降水量, 気温, 風向, 風力 (風速), 日射量, 露点温度
斜面	土壌	土性 (粘土・シルト・砂の割合), 有機物含有率, CEC, アルベド, 初期含水率
	地形	斜面長, 流下方向における勾配
	管理	管理スケジュール 作物の生長に関するパラメータ群, 耕起, 播種, 灌漑, 収穫などの営農作業に関するパラメータ群
水路	土壌 地形 管理	斜面と同じ
	特性	形状, 粗度, 侵食に関するパラメータ群
貯水池	種類	貯水形態や流出形態を選択
	特性	形状, 初期貯水量などのパラメータ群

② GeoWEPP の試計算結果とその評価

②-1 試計算結果

広瀬川流域に対して、2003年～2007年期間の降雨量を設定した際の、GeoWEPPで流出量を試計算した結果を以下に示す。なお、降雨は下記のようなデータとなり、平均降雨量は $4.947(\text{m}^3/\text{sec})$ と計算される。

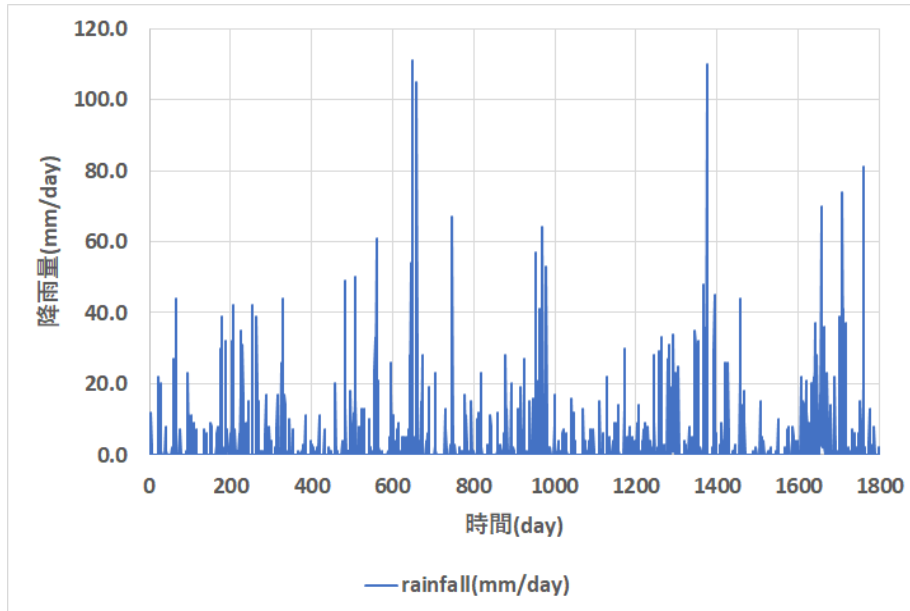


図 3-178 広瀬川、降雨量、2003～2007

図 3-179 と図 3-180 に、流出量についての GeoWEPP による試計算結果と観測値の比較を示す。ここで、Observed：観測値、GeoWEPP：計算結果である。3.3.1 で導入した評価関数 NSE、RSE の値は、各々、次のような結果となった。本試計算の範囲（パラメータは、デフォルト値やサンプル問題と同様のセットを用いる一方、自動キャリブレーションがあれば、その機能のみ用いる。マニュアルでのチューニングは最低限とする）では、誤差が大きく、パラメータを変更し、広瀬川流域にあわせてチューニングをする必要があることが分かる。尚、この結果から分かるように、表層流れが大きいことから、地下への貯留を促すパラメータチューニングを実施すべきである。

表 3-32 誤差評価結果

	GeoWEPP
NSE	61.288
RSE	-60.288

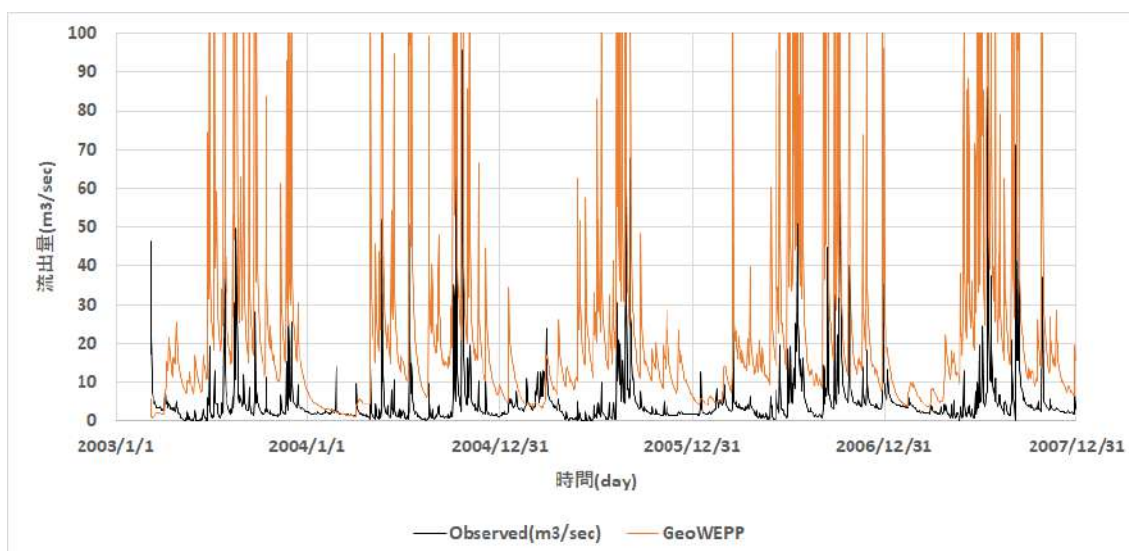


図 3-179 GeoWEPP の試計算結果（全体表示：5年間分）

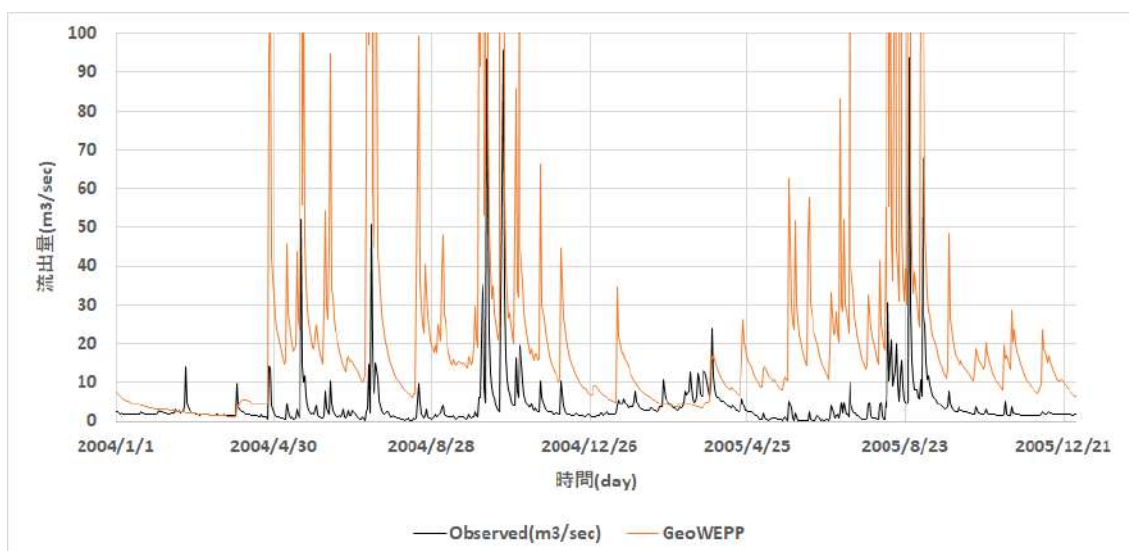


図 3-180 GeoWEPP の試計算結果（拡大表示：2004～2005年期間）

3.3.6 RADFLOW コード

① RADFLOW コードの概要

RADFLOW は、日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門が開発中の分布定数型の放射性物質の動態解析を主眼としたモデルを採用したコードである。水文流出過程としては、流域内の地表水及び地下水流動を対象とし、水深（水頭）、地表水中の土砂粒子濃度（粘土、シルト、砂）、地表水及び地下水中の溶存態 Cs-137 濃度、地表水中の懸濁態 Cs-137 濃度（粘土、シルト、砂）の動態を計算対象とする。尚、水深（水頭）及び土砂粒子濃度、Cs-137 濃度の動態に関する支配方程式の詳細は、①-2 と①-3 に記した他、各々の支配方程式の離散化手法として、時間発展は陽解法、空間方向は有限体積法を採用する。

①-1 プログラム仕様

【文献[3-30]から抜粋】

- ・地上の平面格子を作成し、地下層は指定した層厚、層数に従って作成する。
- ・層毎に水平方向2次元的に計算を実施、鉛直方向はソース項としてやり取りを行う。
- ・河川ノード間、河川ノードとその他のノード間の移流計算は1次元で取り扱う。

①-2 水の流動

【文献[3-31]から抜粋】

以下、水流動、土砂輸送に関する基礎方程式、離散方程式、ポイント (node) とエッジ(edge)、セル (face) ポリゴン(polygon)の定義を、図 3-181～図 3-183 に示す。

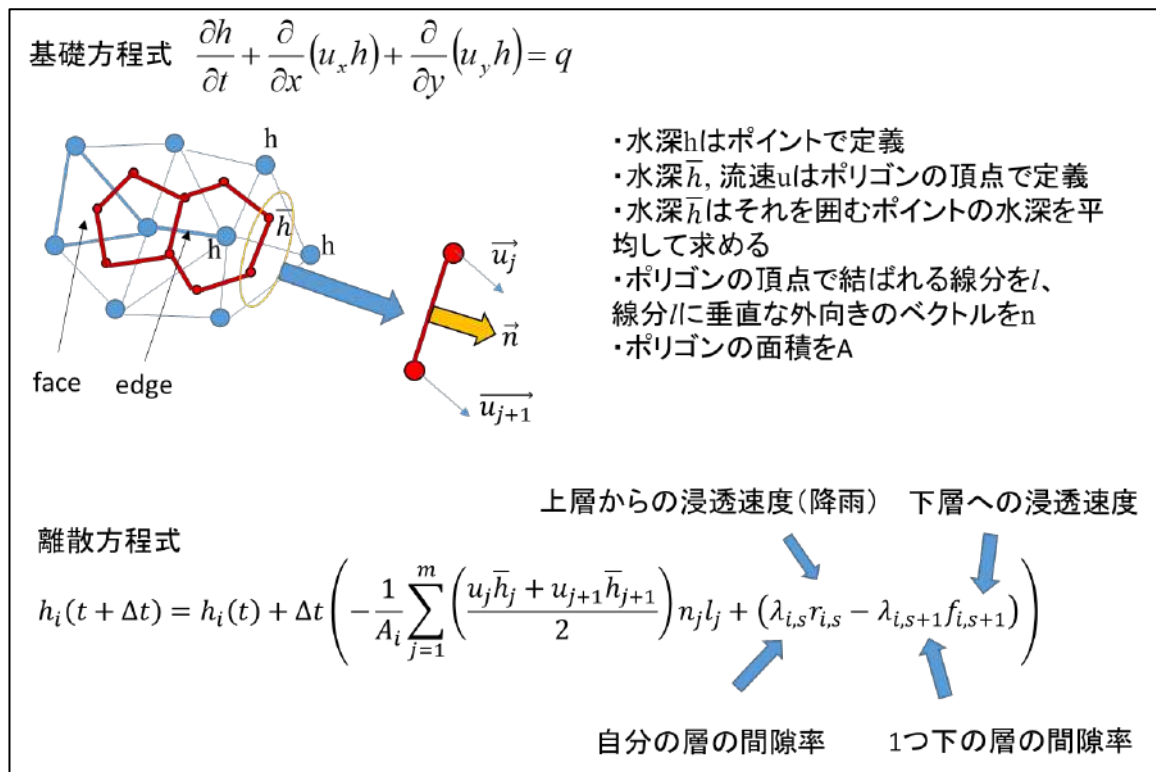


図 3-181 水の輸送モデル (水平方向)

【文献[3-30]から抜粋】

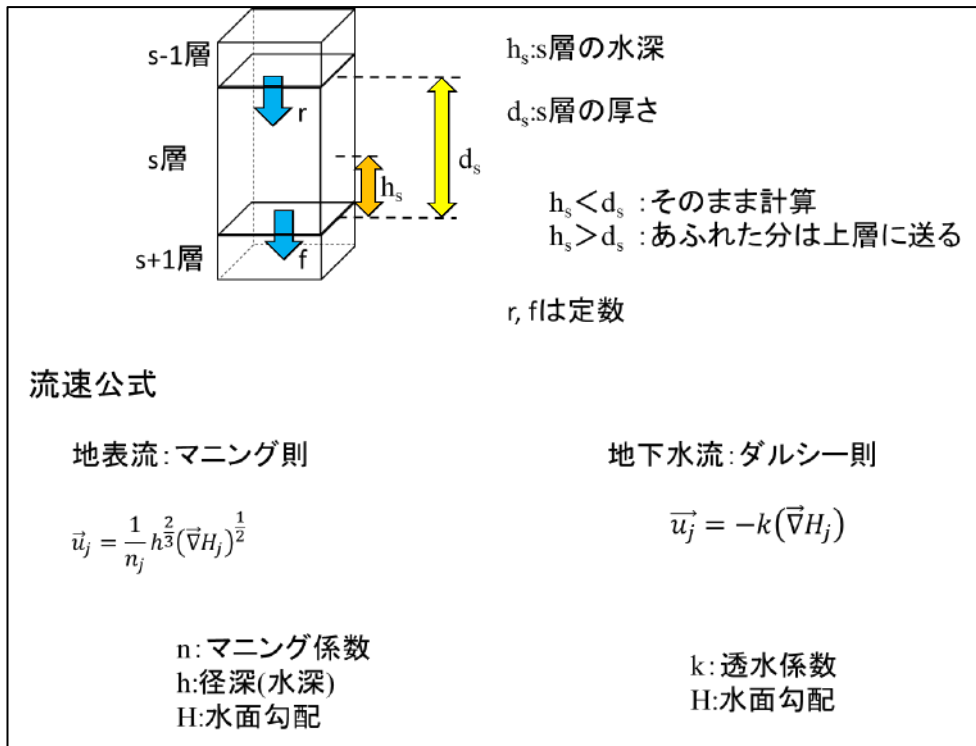


図 3-182 水の輸送モデル (鉛直方向) と流速公式

①-3 土砂輸送

【文献[3-30]から抜粋】

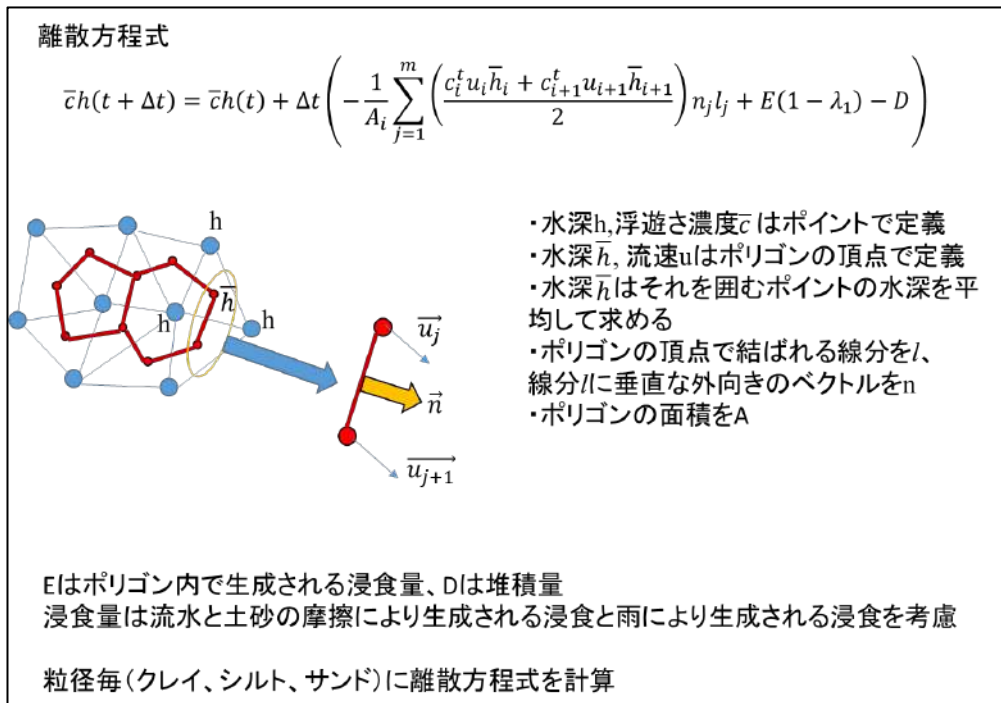


図 3-183 浮遊砂の輸送モデル (水平方向)

※放射性セシウムについても同様な考え方で離散化している

①-4 入力・出力ファイル

【文献[3-30]から抜粋】

計算に必要な入力ファイルは以下の通り。

- ・ stl ファイル (メッシュファイル)
- ・ rain.dat ファイル
- ・ dem_point.river ファイル (河川 node を指定するファイル)
- ・ input.dat (job ファイル)

出力ファイルは以下の通り。

- ・ res_layer_z.tvk

(層毎、出力したいタイムステップごとに vtk ファイルが出力される)

出力される変数は水深、粒径毎の浸食量、堆積量、浮遊砂濃度、浸食堆積高さ、溶存態 Cs-137 濃度、粒径毎の懸濁態 Cs-137 濃度等 vtk ファイルで出力されるので Paraview で描画可能

- ・ discharge.dat

(時間、流量、土砂流出量、粒径毎の土砂流出量、溶存態 Cs-137 流出量、粒径毎の懸濁態 137 流出量)

※流出量を出力する edge 番号を input.dat で指定する。

- ・ edge_number.dat (edge を共有する node 番号)

このファイルから流出量を出力したい edge 番号を取得する。

② RADFLOW の試解析：結果

②-1 計算メッシュ

広瀬川流域を対象として、河川ノードとしてランダムノード 1000 点を配置 (QGIS : 点間距離の最小値を 400.0m と設定した)、領域ノードとしてランダムノード 1000 点を配置した (QGIS : 点間距離の最小値を 600.0m と設定した)。

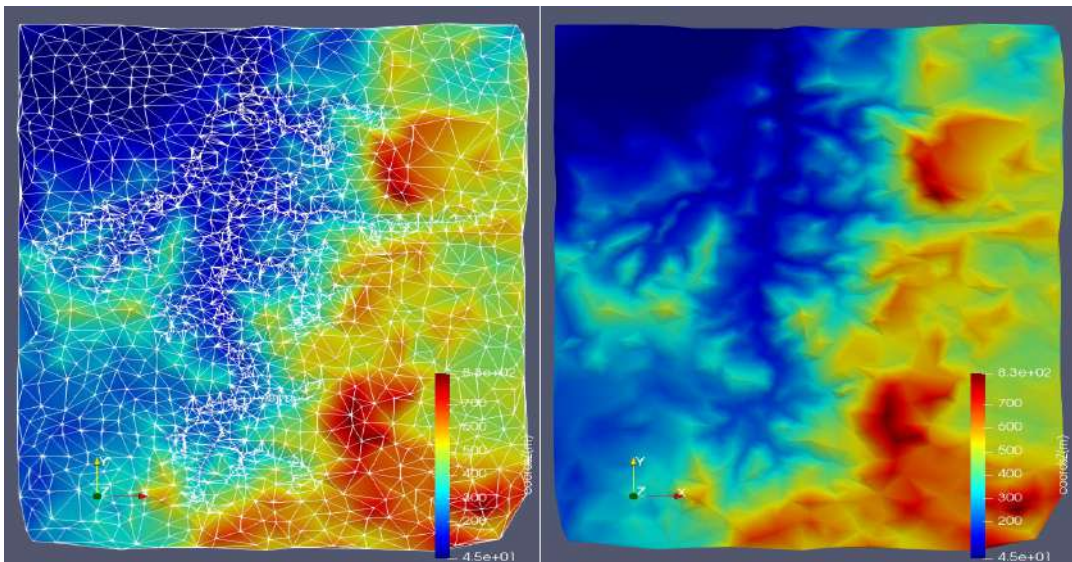


図 3-184 カラーマップは標高値(m)で設定

流出量は、河川ノード 128, 662 を繋ぐエッジ (図 3-185 参照) でモニタリングした。

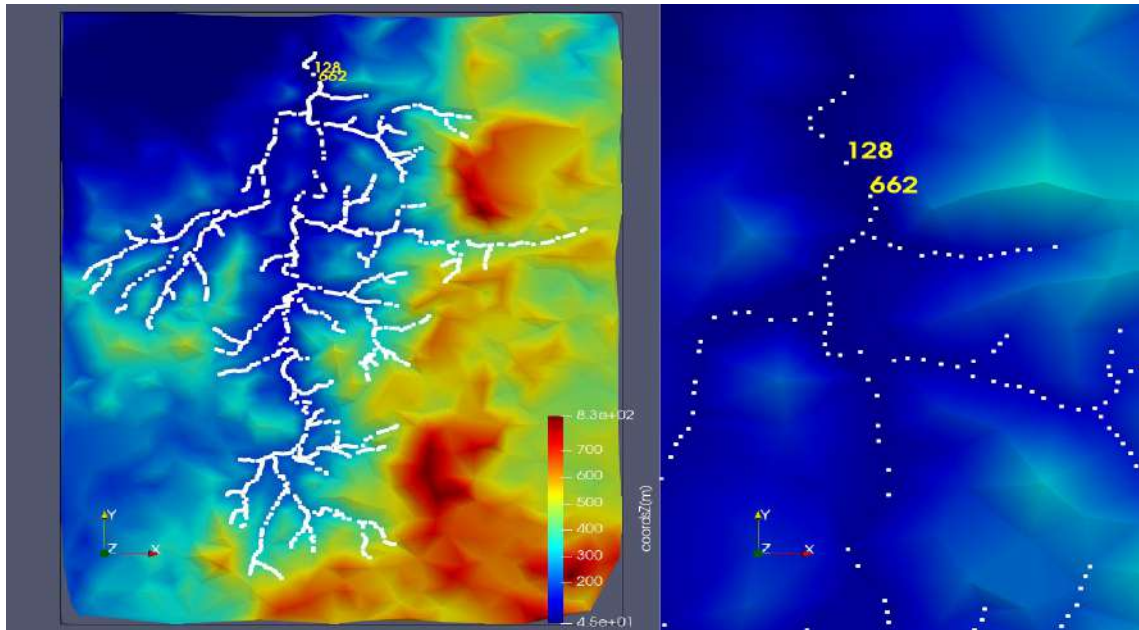


図 3-185 カラーマップは標高値(m)で設定

②-2 計算ケース

基本ケースの計算条件は表 3-33 で与えた。時間刻みは $\Delta t = 30.0\text{sec}$ とし、計算期間は5年間(157680000.0sec)である。なお、出力間隔は1週間(604800.0sec)とした。土壌の層数は9とする。このとき、基本ケースを基準として、パラメータを変更した表 3-33 のケースについても計算を実施した。

表 3-33 計算ケース

ケース	変更点	基本ケースからの変更点
CASE01	基本ケース ($\Delta t = 30.0\text{sec}$)	—
CASE02	limit height=0.5m.	水深の上限値を変更する。
CASE03	change the permeability to type①.	土壌の透水性を高く設定する。 透水係数をタイプ①に変更する。
CASE04	change the permeability to type②.	土壌の透水性をより高く設定する。 透水係数をタイプ②に変更する。

Permeability(透水係数)

基準 (基本ケース)

permiability=1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-8, 1d-8, 1d-10

type① (浸透性を高く設定)

permiability=1d-4, 1d-4, 1d-4, 1d-4, 1d-4, 1d-4, 1d-7, 1d-7, 1d-9

type② (浸透性をより高く設定)

permiability=1d-3, 1d-3, 1d-3, 1d-3, 1d-3, 1d-3, 1d-6, 1d-6, 1d-8

```

&geometry
  input_file = 'hirose.stl'
  vertical_axis='z'
  geom_scale = 1.d0
  number_of_layer = 9
  calculation_height = 15.d0
  layer_height=0.1,0.2,0.5,1,2,5,10,20
  permiability=1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-8, 1d-8, 1d-10
  porosity      =0.3d0,0.3d0,0.3d0,0.3d0,0.3d0,0.3d0,0.2d0,0.2d0,0.1d0
  permiability_river=1d-6
/

&control
  calculation_time = 157680000 !259200 !10000000d0 !63072000
  delta_t = 60d0 !0.01d0
  output_interval = 604800
  output_file = 'res'
  calc_debris = 'no'
  calc_radioactive = 'no'
  id_edge_discharge = 678
  restart_file='res_213120.dat'
/

&hydraulic
  soil_density=2650
  water_density=1000
  factor_of_roughness=0.5d0, 0.03d0
  K_aquiclude=0.d0
  D_aquiclude=1.d10
  limit_height=1d0
  limit_velocity=20.d0
  number_of_diameter=3
  diameter_list= 4.2d-6, 3.6d-5, 2.8d-4
  probability_list=0.1, 0.4, 0.5
/

```

図 3-186 input.dat (計算条件)

②-3 降雨量

降雨量データは、水門水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) において、広瀬川流域沿いの月館観測所で観測された 2003 年～2007 年の日降雨量 (5 年間分) を与える。

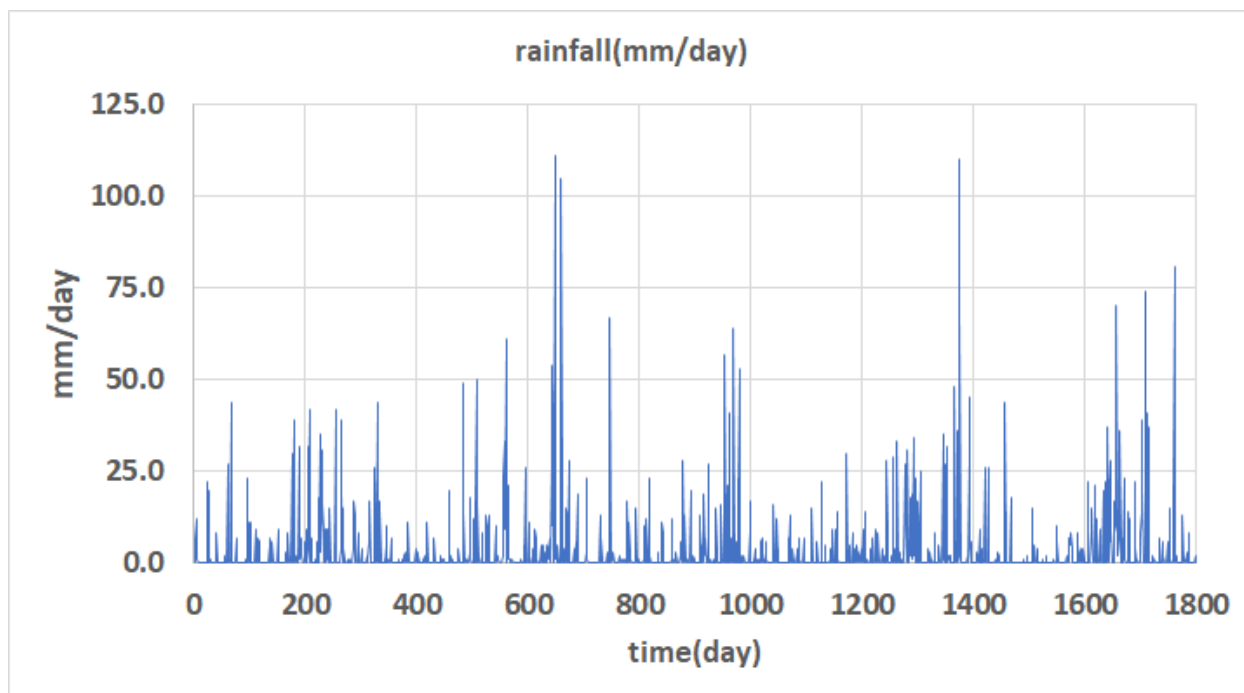


図 3-187 広瀬川、降雨量、2003 年～2007 年

②-4 計算結果

RADFLOW で計算された広瀬川下流での流出量と、水門水質データベースにおいて、広瀬川流域沿いの大関観測所 (<http://www1.river.go.jp/>) で観測された日平均流出量データを比較した。比較評価の方法は、RADFLOW の計算値と観測値の誤差を取る。誤差は(3-1)と(3-2)で導入した NSE 及び RSE を使用した。ケース毎の誤差の結果を表 3-34 に示す。また、ハイドログラフの比較結果を②-4-A～②-4-D に示す。

表 3-34 誤差評価結果

ケース	RSE	NSE
CASE01	0.4023	0.5977
CASE02	0.3903	0.6097
CASE03	0.4202	0.5798
CASE04	0.2577	0.7423

結果として、CASE01（基本ケース）では雨水は土壌内に滞留することなく、その大半が表面流として流出するのに対して、土壌の透水性を高めた CASE04（表 3-33 参照）では雨水が土壌内に滞留することで、降雨時刻から遅れて流出する結果となり、観測結果により整合することが分かった。

以上、パラメータについては、キャリブレーションする余地があり、今後のチューニングにより、更に観測値に近づけることが可能と考えられる。一方、簡単な試計算により、十分な結果が得られたこととモデル自体が簡潔であることを踏まえると、RADFLOW の有用性は高いと考えられる。

②-4-A Case01

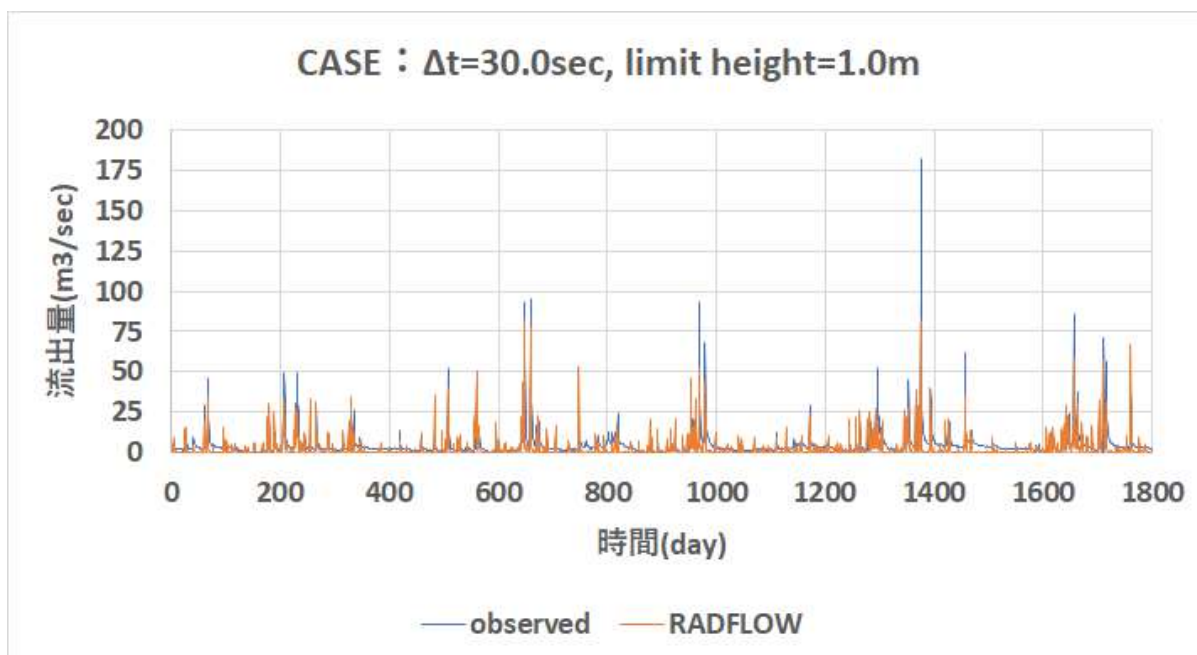


図 3-188 RADFLOW 計算結果 : Case01 (全期間)

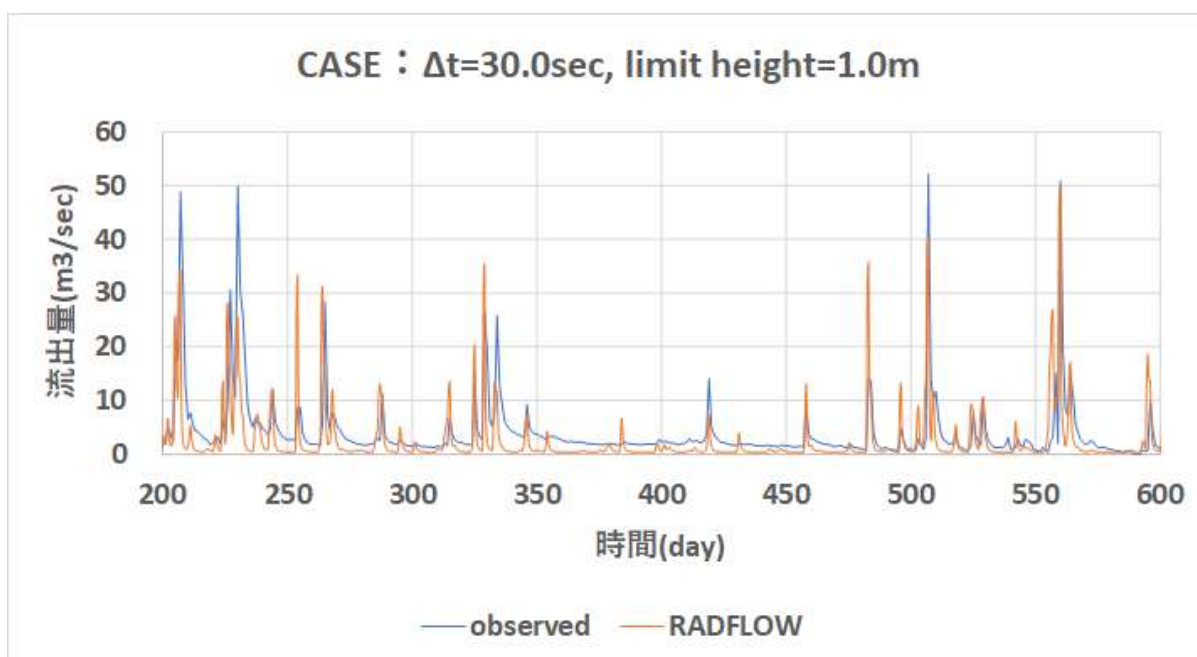


図 3-189 RADFLOW 計算結果 : Case01 (200 日~600 日)

②-4-B Case02

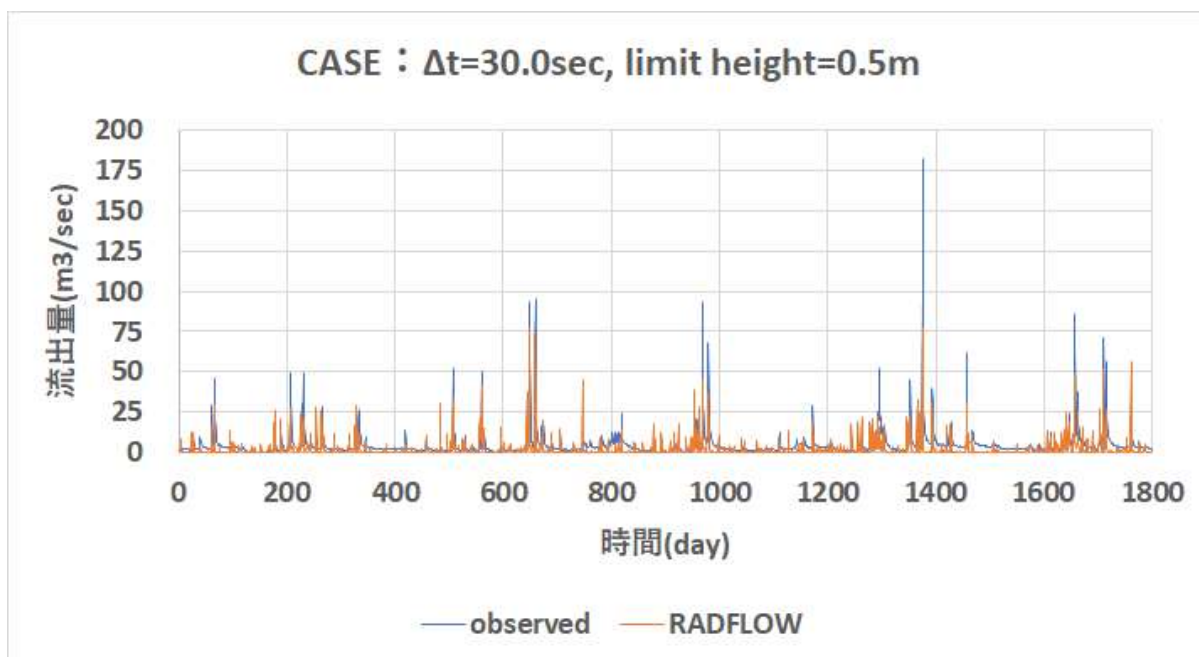


図 3-190 RADFLOW 計算結果 : Case02 (全期間)

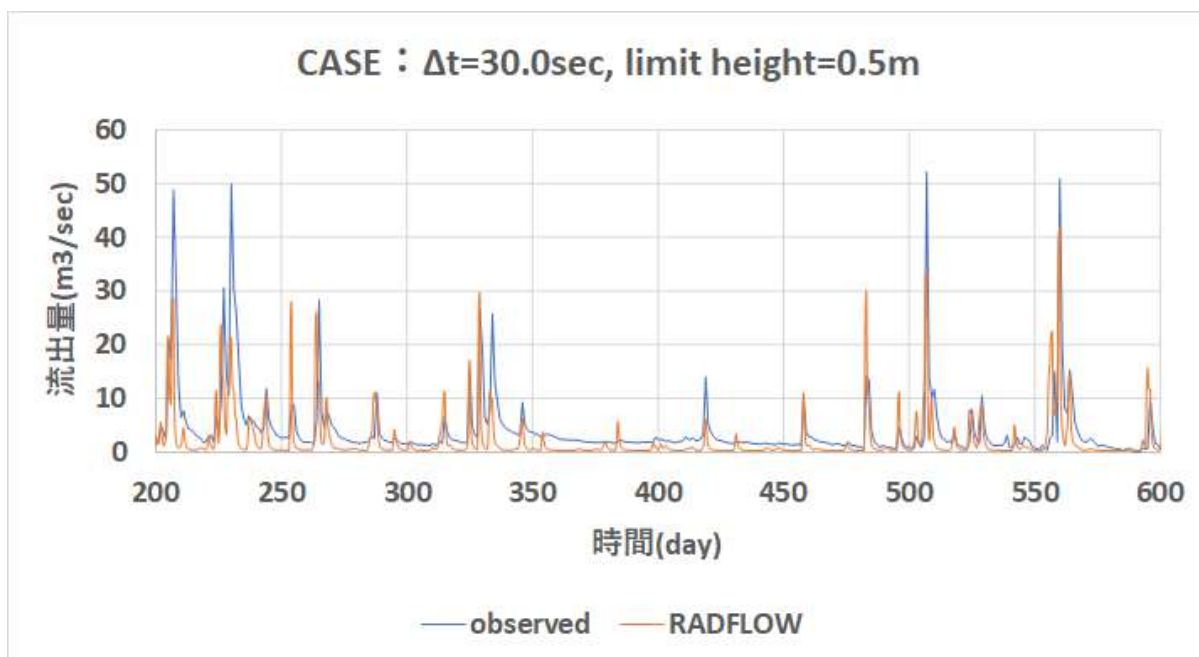


図 3-191 RADFLOW 計算結果 : Case02 (200 日~600 日)

②-4-C Case03

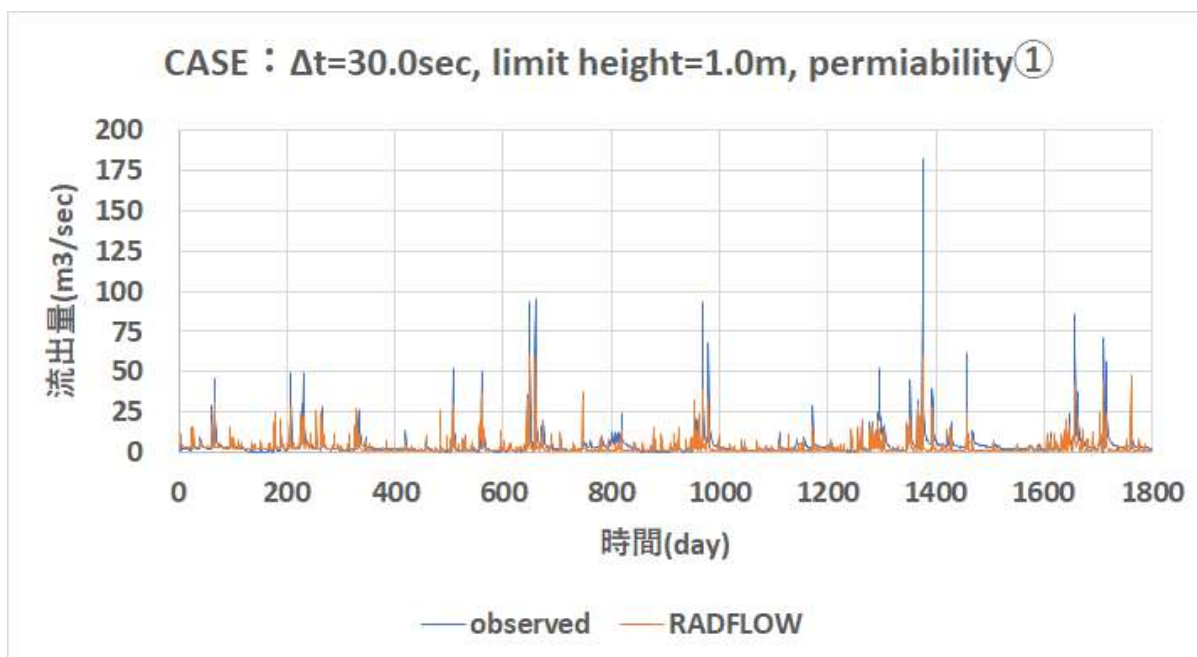


図 3-192 RADFLOW 計算結果 : Case03 (全期間)

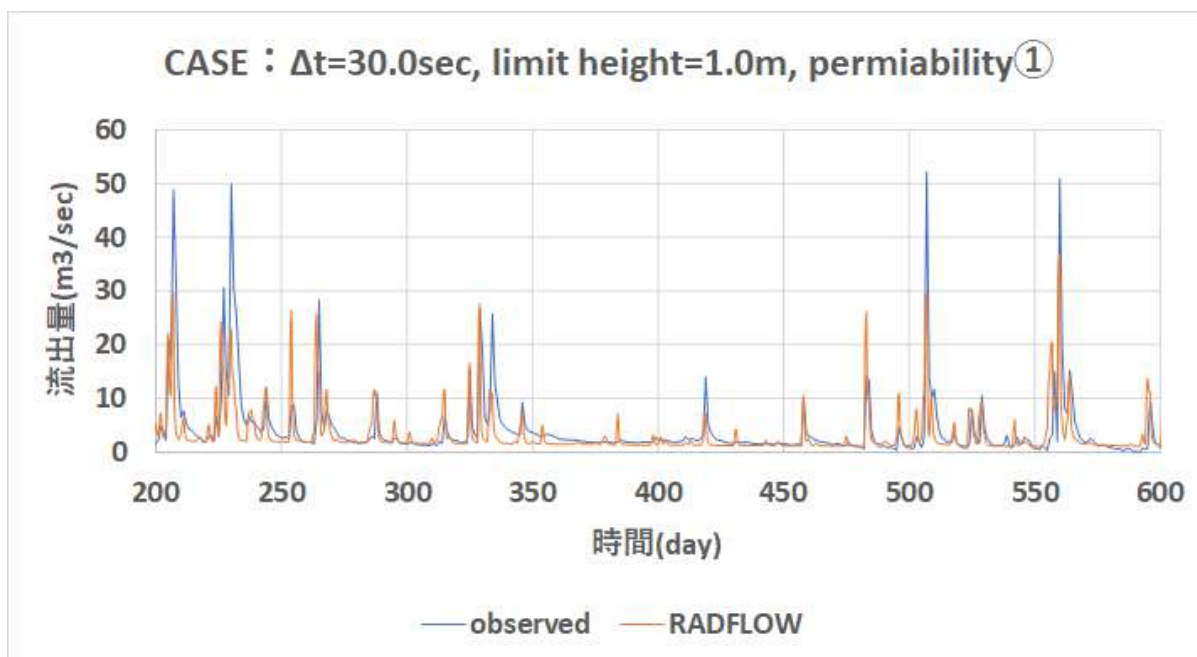


図 3-193 RADFLOW 計算結果 : Case03 (200 日~600 日)

②-4-D Case04

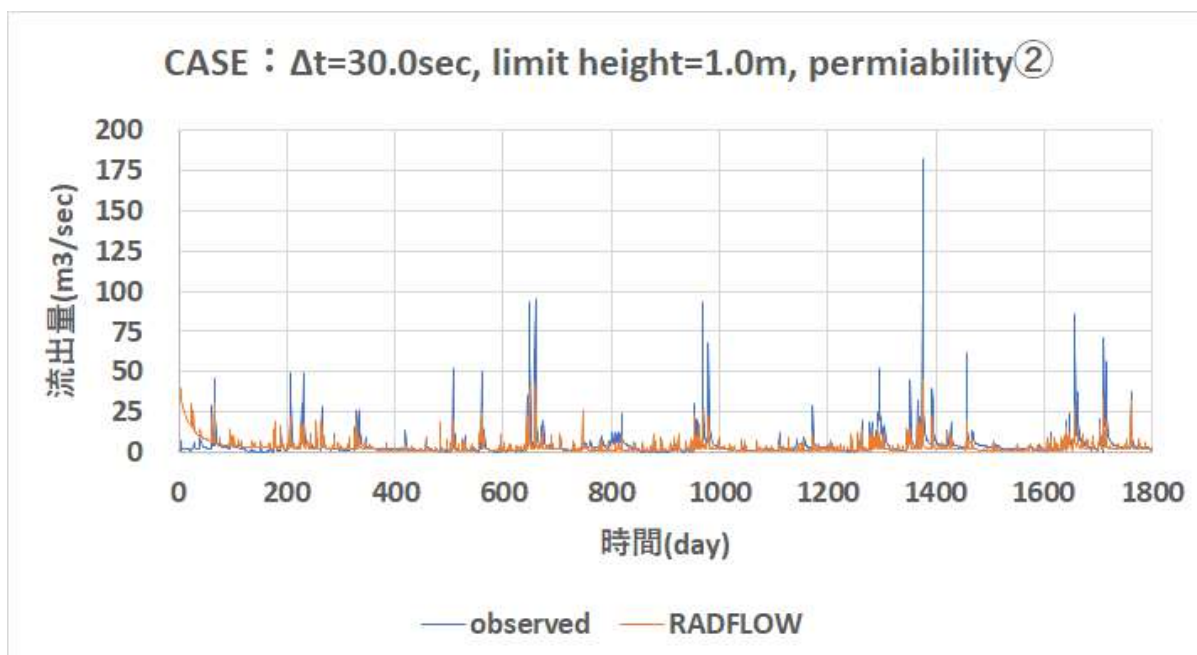


図 3-194 RADFLOW 計算結果 : Case04 (全期間)

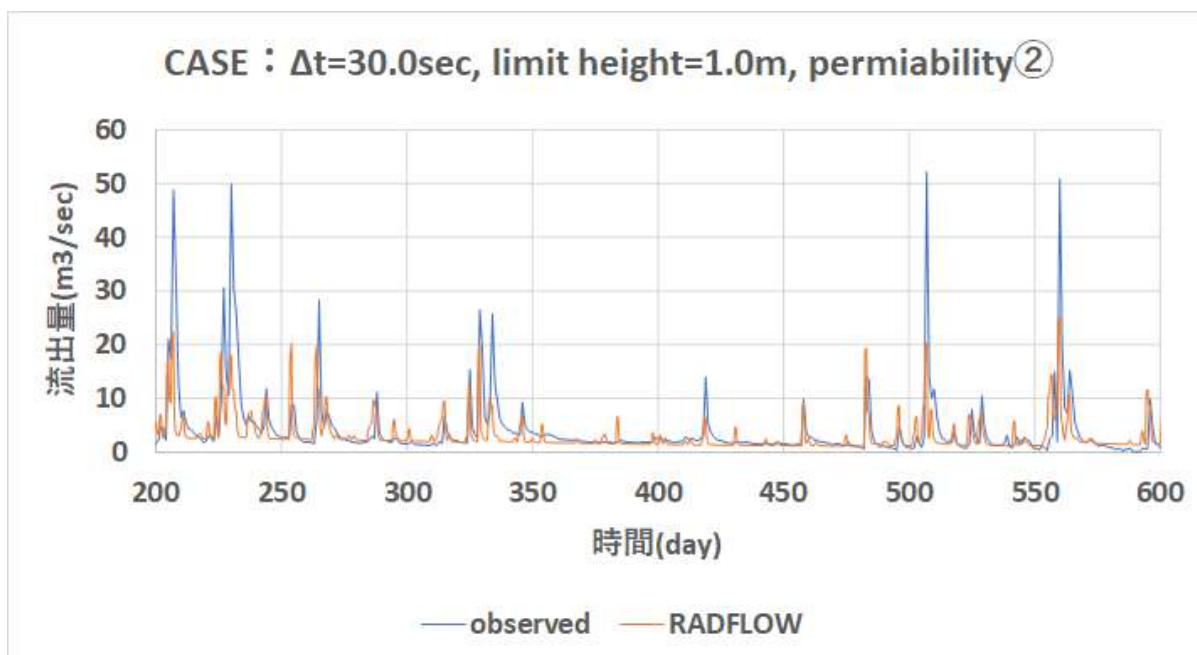


図 3-195 RADFLOW 計算結果 : Case04 (200 日~600 日)

3.4 モデル間相互比較及びまとめ

本節では、前節までに実施した試計算（試解析）の結果を基に、主に以下の評価項目について性能及び特性の相互比較を行った結果を比較評価する。

- ・ 実用化に必要な開発期間及び費用
- ・ 適用可能領域と評価対象事象の時間スケール
- ・ 計算結果の精度
- ・ 時空間解像度と計算時間

また、以上の比較結果を基に、将来的に海洋拡散シミュレーションモデルと結合し、陸域からの放射性物質の流出解析に供することを前提として、主に以下の評価項目について現状と課題を整理する。

- ・ 陸域におけるトレーサの初期分布の決定方法
- ・ 必要なパラメータとその決定手法
- ・ 必要なデータと入手方法
- ・ インターフェイスのデザイン
- ・ 計算結果の検証方法
- ・ 新規開発の必要性

評価内容について、各モデルと表番号との対応は下記の通りである。

3.4.1：集中定数型モデル

- ・ 貯留関数モデル(Storage Routing Model)
 - 表 3-35
- ・ MERCURY
 - 表 3-36
- ・ 単位関法
 - 表 3-37
- ・ 合理式法
 - 表 3-38

3.4.2：分布定数型モデル

- ・ ArcSWAT
 - 表 3-39
- ・ GeoWEPP
 - 表 3-40
- ・ RADFLOW
 - 表 3-41

3.4.1 集中定数型モデル

表 3-35 貯留関数モデル(Storage Routing Model)

1	陸域動態モデル
	貯留関数モデル(Storage Routing Model)
2	モデルタイプ
	集中定数型
3	実用化（適用と活用）に必要な開発期間及び費用
	適用：プログラム開発（流出量推定、モデル定数最適化）と試解析（計1週間程度） 活用：トレーサの動態追跡処理を追加し解析を一部改良（計1週間程度）
4	適用可能領域と評価対象事象の時間スケール
	適用可能流域：ある一つの河川流域（検証対象は阿武隈川水系広瀬川） 評価時間スケール：特に制限なし（本事業では1週間及び1カ月間を試解析）
5	計算結果の精度（1カ月間の降雨計算について）
	RSE : 0.247 NSE : 0.753
6	時空間解像度と計算時間
	時間解像度： $\Delta t = 1.0\text{hour}$ 1か月分のハイドログラフの計算に要する時間：T = 瞬時（1.0sec 未満※） ※モデル定数最適化処理後の計算, PC(CPU: Xeon 2.01GHz 8 core, Memory:32Mb)利用
7	陸域におけるトレーサの初期分布の決定方法
	観測事実に基づき流出量を決定するため特に必要ない
8	必要なパラメータとその決定手法
	モデル定数 c_1, c_2, c_3 。 最小二乗法による自動最適化により、キャリブレーション可能。
9	必要なデータと入手方法
	時平均降雨量および時平均河川流出量（両者とも国土交通長の水門水質データベースから取得が可能）
10	インターフェイスのデザイン
	コマンドライン（iRIC-SRMの場合はGUI）
11	計算結果の検証方法
	主に観測事実との誤差評価（*NSE及び¥RSE）
12	新規開発の必要性
	トレーサの動態追跡処理の追加

*RSE : Residual Standard Error (3.2.2 参照)

¥NSE : Nash Sutcliffe Efficiency (3.2.2 参照)

表 3-36 MERCURY

1	陸域動態モデル
	MERCURY
2	モデルタイプ
	集中定数型
3	実用化（適用と活用）に必要な開発期間及び費用
	適用：プログラム開発（モデル定数最適化）と試解析。（1週間） 活用：活用に当たり、モデル定数の設定法の導入が必要（数ヶ月以上）
4	適用可能領域と評価対象事象の時間スケール
	適用可能流域：ある一つの河川流域（検証対象は阿武隈川水系広瀬川） 評価時間スケール：1週間もしくは1カ月間
5	計算結果の精度（1カ月間の降雨計算について）
	RSE：0.158 NSE：0.842
6	時空間解像度と計算時間
	時間解像度： $\Delta t = 1.0\text{hour}$ 1か月分の hidrograph の計算に要する時間：T=瞬時（1.0sec 未満） ※モデル定数最適化処理後の計算、PC(CPU: Xeon 2.01GHz 8 core, Memory:32Mb)利用
7	陸域におけるトレーサの初期分布の決定方法
	観測事実に基づき流出量を決定するため特に必要ない
8	必要なパラメータとその決定手法
	モデル定数 a1, a2, a3, b1, b2 最小二乗法による自動最適化により、キャリブレーション可能。
9	必要なデータと入手方法
	時平均降雨量および時平均河川流出量（両者とも国土交通長の水門水質データベースから取得が可能）
10	インターフェースのデザイン
	コマンドライン
11	計算結果の検証方法
	主に観測事実との誤差評価（NSE 及び RSE）
12	新規開発の必要性
	GUI やモデル定数の設定法の導入が必要

*RSE：Residual Standard Error（3.2.2 参照）

¥NSE：Nash Sutcliffe Efficiency（3.2.2 参照）

表 3-37 単位図法

1	陸域動態モデル
	単位図法
2	モデルタイプ
	集中定数型
3	実用化（適用と活用）に必要な開発期間及び費用
	適用：プログラム試開発（流出量推定）と試解析（3日間） 活用：モデル定数の自動最適化機能追加（1週間） トレーサの動態追跡処理の追加。（3日間）
4	適用可能領域と評価対象事象の時間スケール
	適用可能流域：ある一つの河川流域（検証対象は阿武隈川水系広瀬川） 評価時間スケール：1週間もしくは1カ月間
5	計算結果の精度（1カ月間の降雨計算について）
	RSE：0.474 NSE：0.526
6	時空間解像度と計算時間
	時間解像度： $\Delta t = 1.0\text{hour}$ 1か月分のハイドログラフの計算に要する時間：T = 瞬時（1.0sec 未満※） ※PC(CPU: Xeon 2.01GHz 8 core, Memory:32Mb)利用
7	陸域におけるトレーサの初期分布の決定方法
	観測事実に基づき流出量を決定するため特に必要ない
8	必要なパラメータとその決定手法
	単位図の関数形状を規定するためのパラメータ (k, m, α) 自動キャリブレーション機能はなく、手動によるパラメータスタディが必要。
9	必要なデータと入手方法
	時平均降雨量および時平均河川流出量（両者とも国土交通長の水門水質データベースから取得が可能）
10	インターフェイスのデザイン
	コマンドライン
11	計算結果の検証方法
	主に観測事実との誤差評価（NSE 及び RSE）
12	新規開発の必要性
	・モデル定数の自動最適化機能 ・トレーサの動態追跡処理の追加 ・GUI 等の処理画面（便利機能）

*RSE：Residual Standard Error（3.2.2 参照）

¥NSE：Nash Sutcliffe Efficiency（3.2.2 参照）

表 3-38 合理式法

1	陸域動態モデル
	合理式法
2	モデルタイプ
	集中定数型
3	実用化（適用と活用）に必要な開発期間及び費用
	適用：プログラム開発（流出量推定）と試解析（3日間）。 活用：モデル定数の自動最適化機能追加（1週間） トレーサの動態追跡処理の追加。（3日間）
4	適用可能領域と評価対象事象の時間スケール
	適用可能流域：ある一つの河川流域（検証対象は阿武隈川水系広瀬川） 評価時間スケール：1週間もしくは1カ月間
5	計算結果の精度（1カ月間の降雨計算について）
	RSE：0.353 NSE：0.647
6	時空間解像度と計算時間
	時間解像度： $\Delta t = 1.0\text{hour}$ 1か月分のハイドログラフの計算に要する時間：T = 瞬時（1.0sec 未満※） ※PC(CPU: Xeon 2.01GHz 8 core, Memory:32Mb)利用
7	陸域におけるトレーサの初期分布の決定方法
	観測事実に基づき流出量を決定するため特に必要ない
8	必要なパラメータとその決定手法
	流出係数 f と到着時間係数 ATC （表 3-26 参照） 自動キャリブレーション機能はなく、手動によるパラメータスタディが必要。
9	必要なデータと入手方法
	時平均降雨量および時平均河川流出量（両者とも国土交通長の水門水質データベースから取得が可能）
10	インターフェイスのデザイン
	コマンドライン
11	計算結果の検証方法
	主に観測事実との誤差評価（NSE 及び RSE）
12	新規開発の必要性
	・モデル定数の自動最適化機能 ・トレーサの動態追跡処理の追加 ・GUI 等の処理画面（便利機能）

*RSE：Residual Standard Error（3.2.2 参照）

¥NSE：Nash Sutcliffe Efficiency（3.2.2 参照）

3.4.2 分布定数型モデル

表 3-39 ArcSWAT

1	陸域動態モデル
	ArcSWAT
2	モデルタイプ
	分布定数型
3	実用化（適用と活用）に必要な開発期間及び費用
	適用：入力データ入手・整形作業および試計算（10日間） 活用：土壌データのキャリブレーション（1週間）
4	適用可能領域と評価対象事象の時間スケール
	適用可能流域：ある一つの河川流域（検証対象は阿武隈川水系広瀬川） 評価時間スケール：5年間
5	計算結果の精度（5年間の降雨計算について）
	RSE：0.548 NSE：0.452
6	時空間解像度と計算時間
	時間解像度： $\Delta t = 1.0\text{day}$ 5年分のハイドログラフの計算に要する時間： $T = 60.0\text{sec}$ 程度（※） ※PC(CPU: Xeon 2.01GHz 8 core, Memory:32Mb)利用
7	陸域におけるトレーサの初期分布の決定方法
	解像スケールでの $Bq/area$ の分布と流出率（溶存成分及び懸濁成分）が必要
8	必要なパラメータとその決定手法
	入力データに関するパラメーター式が必要。有償の SWAT-CUP による自動キャリブレーション機能か、もしくは手動によるキャリブレーションが必要となる。
9	必要なデータと入手方法
	気象データとして、降雨量、その他気象データ（平均気温、湿度、平均風速など）。 地形データ（DEM）、土地利用データ、土壌データ。
10	インターフェイスのデザイン
	GUI
11	計算結果の検証方法
	主に観測事実との誤差評価（NSE 及び RSE）
12	新規開発の必要性
	放射性物質の動態モデルの追加

*RSE：Residual Standard Error（3.2.2 参照）

¥NSE：Nash Sutcliffe Efficiency（3.2.2 参照）

表 3-40 GeoWEPP

1	陸域動態モデル
	GeoWEPP
2	モデルタイプ
	分布定数型
3	実用化（適用と活用）に必要な開発期間及び費用
	適用：入力データ入手・整形作業および試解析。（1週間） 活用：土壌データのキャリブレーション（1週間）により活用が可能
4	適用可能領域と評価対象事象の時間スケール
	適用可能流域：ある一つの河川流域（検証対象は阿武隈川水系広瀬川） 評価時間スケール：5年間
5	計算結果の精度（5年間の降雨計算について）
	RSE：-60.288（※） NSE：61.288（※） ※試調整（キャリブレーション）レベルでは精度が向上しない（不具合か未確認）。 ※詳細チューニングが必要
6	時空間解像度と計算時間
	時間解像度： $\Delta t = 1.0\text{day}$ 5年分のヒドログラフの計算に要する時間： $T = 30.0\text{min}$ 程度（※） ※PC(CPU: Xeon 2.01GHz 8 core, Memory:32Mb)利用
7	陸域におけるトレーサの初期分布の決定方法
	解像スケールでの $Bq/area$ の分布と流出率（溶存成分及び懸濁成分）が必要
8	必要なパラメータとその決定手法
	入力データに関するパラメーター式が必要。
9	必要なデータと入手方法
	気象データとして、降雨量、その他気象データ（平均気温、湿度、平均風速など）。 地形データ（DEM）、土地利用データ、土壌データ。
10	インターフェイスのデザイン
	GUI
11	計算結果の検証方法
	主に観測事実との誤差評価（NSE 及び RSE）
12	新規開発の必要性
	放射性物質の動態モデルの追加 パラメータ調整等のチューニング技術の習得

*RSE：Residual Standard Error（3.2.2 参照）

¥NSE：Nash Sutcliffe Efficiency（3.2.2 参照）

表 3-41 RADFLOW

1	陸域動態モデル
	RADFLOW
2	モデルタイプ
	分布定数型
3	実用化（適用と活用）に必要な開発期間及び費用
	適用：入力データ入手・整形作業および試解析（4日間） 活用：主に地下土壌情報によるキャリブレーションにより活用が可能
4	適用可能領域と評価対象事象の時間スケール
	適用可能流域：ある一つの河川流域（検証対象は阿武隈川水系広瀬川） 評価時間スケール：5年間
5	計算結果の精度（5年間の降雨計算について）
	RSE：0.2577 NSE：0.7423
6	時空間解像度と計算時間
	時間解像度： $\Delta t = 30.0\text{sec}$ 5年分のハイドログラフの計算に要する時間： $T = 6.0\text{hour}$ 程度（※） ※PC(CPU: Xeon 2.01GHz 8 core, Memory:32Mb)利用
7	陸域におけるトレーサの初期分布の決定方法
	観測事実に基づき流出量を決定するため特に必要ない
8	必要なパラメータとその決定手法
	入力データに関するパラメーター式が必要。 手動によるキャリブレーションが必要となる。
9	必要なデータと入手方法
	降雨量および地形データ（DEM）
10	インターフェイスのデザイン
	コマンドライン
11	計算結果の検証方法
	主に観測事実との誤差評価（NSE及びRSE）
12	新規開発の必要性
	・自動パラメータキャリブレーション機能 ・GISを用いた入出力機能（便利機能）

*RSE：Residual Standard Error（3.2.2 参照）

¥NSE：Nash Sutcliffe Efficiency（3.2.2 参照）

参考文献

誤差評価の方法

- [3-1]藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、村上雅博、「洪水流出を対象とした貯留関数パラメータの不確実性低減に向けた解析的研究」、土木学会論文集(2016)

貯留関数モデル (iRIC-SRM)

- [3-2]国土交通省・北海道開発局建設部河川計画課、「単一流域を対象とした貯留関数法の精度比較」、財)北海道河川防災研究センター・研究所 (2002)
- [3-3]園山裕士、星清、「2 段タンク型貯留関数モデルの同定手法の改良」、北海道開発土木研究所月報第 589 号 (2002)
- [3-4]iRIC-SRM, <https://i-ric.org/solvers/srm/>, iRIC Software
- [3-5]金塚匠、「進化的計算手法を用いた都市貯留関数モデルのパラメータ同定」、首都大学東京 大学院 都市環境科学研究所 (平成 29 年 3 月)
- [3-6]奥泉宗一郎、中津川誠、臼谷友秀、「GIS を用いた汎用的な流出計算手法の提案」、水文・水資源学会誌、29 巻、1 号、p.32-43 (2016)

タンクモデル (MERCURY)

- [3-7]Kazuyuki Sakuma, Takahiro Nakanishi, Kazuya Yoshimura, Hiroshi Kurikami, Kenji Nanba, Mark Zheleznyak, A modeling approach to estimate the 137Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017, Journal of Environmental Radioactivity(2019)
- [3-8]JAEA, 「MERCURY バージョン 1.1 理論/ユーザーマニュアル」

単位図法および合理式法

- [3-9]高瀬信忠、「河川工学入門」、森北出版 (2003)
- [3-10] 角谷睦、「流出解析手法 (その 3) 単位図法による洪水流出解析」、農業土木学会誌 (1979)
- [3-11] 河川工学 (第 3 回) 流出解析法 1 (流出成分の分離と有効降雨・合理式・単位図法)、
http://www.cce.ehime-u.ac.jp/~hydro/lecture/rivereng/river_eng_3.pdf

ArcSWAT

- [3-12] SWAT (Soil & Water Assessment Tool) , <https://swat.tamu.edu/>
- [3-13] 村上泰啓、水垣滋、鳥谷部寿人、「SWAT モデルを用いた河川流域の、物質流出特性評価について」、寒地土木研究所平成 21 年度技術研究発表会 (2010)
- [3-14] 村上泰啓、水垣滋、三島啓雄、「SWAT モデルを用いた河川流域の、物質流出特性評価について (第 2 報)」、寒地土木研究所平成 22 年度技術研究発表会 (2011)
- [3-15] 村上泰啓、水垣滋、久保まゆみ、「SWAT モデルを用いた沙流川流域の物質循環推定について」、砂防学会研究発表会概要集 (2012)

- [3-16] 穂刈健太郎、「サトウキビ畑が支配的なネグロス島河川における土砂・栄養塩の流出解析」、首都大学東京大学院（平成 28 年）
- [3-17] 坂口敦、「水田地帯における水管理支援のための流域モデル SWAT の改良」、東京農工大学大学院（2014）
- [3-18] 清水裕太、小野寺真一、齋藤光代、「郊外農業流域におけるリン流出量推定への SWAT モデルの適用可能性」、水文・水資源学会誌（2013）
- [3-19] W.Me, J.M.Abell, D.P.Hamilton, Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand, Hydrology and Earth System Sciences(2015)

GeoWEPP

- [3-20] GeoWEPP (The Geo-spatial interface for the Water Erosion Prediction Project), <https://geowepp.geog.buffalo.edu/>
- [3-21] Zeleke Gete, Thomas Winter, and Dennis Flanagan, BPCDG: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP Using Observed Standard Weather Data Sets, <https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/50201000/WEPP/bpcdg.pdf>
- [3-22] A.D.Nicks, L.J.Lane and G.A. Gander, Chapter 2. WEATHER GENERATOR, <https://forest.moscowfsl.wsu.edu/fswepp/docs/cligench2.pdf>
- [3-23] Jan Boll, Erin Brooks, Zach Easton, Tammo Steenhuis, COMPARISON OF WEPP AND SWAT FOR WATERSHED, American Society of Agricultural and Biological Engineers(2011)
- [3-24] Kharistya AMARU, Norifumi HOTTA, Application of GeoWEPP for Evaluating Sediment Yield in a Mountain Area: Agatsuma Watershed, Japan, International Journal of Erosion Control Engineering(2018)
- [3-25] 大澤和敏、酒井一人、池田駿介、「WEPP モデルによる土壌侵食・土地流出解析」、農業農村工学会誌 小特集「私のお薦めのシミュレーションモデル」（2013）
- [3-26] 大澤和敏、中島 祥子、松井 宏之、「日本で WEPP モデルを適用するための気象入力データ自動作成プログラムの構築と活用」、農業農村工学会大会講演会講演要旨集（平成 28 年）
- [3-27] 高須賀俊之、鶴木啓二、中村和正、「WEPP による畑地流域からの土砂流出量の推定」、土木学会北海道支部論文報告集（平成 20 年）
- [3-28] 高須賀俊之、鶴木啓二、中村和正、「土砂流出解析における“WEPP”モデルの適用」、寒地土木研究所月報 第 735 号（2014）
- [3-29] 早川博、張新慶、「WEPP モデルによる小流域における土砂流出量の推定」、土木学会北海道支部論文報告集（平成 20 年）

RADFLOW

- [3-30] JAEA, RADFLOW 簡易マニュアル（2021）
- [3-31] QGIS, <https://qgis.org/ja/site/>

■ 4章 河口域放射性物質動態モデルの現状調査

4.1 本章の概要

本章では、2、3章にて記した陸域での水文流出（放射性物質動態）モデルから得られる河川流出量（懸濁態も含む）を基に、沿岸域の放射性物質動態モデルへの接続に係る課題を整理し、モデル開発に関する現状を報告する。以下、本章の構成を記す。4.2節では、河口域で、河川により輸送された河川水が海水と混合する際に生起する現象について概説し、4.3節では、河川水の混合を取り扱うモデル開発の現状と懸濁態挙動のモデル開発の現状、そして、4.4節にて河口及び沿岸域での放射性物質動態の研究についての現状を記す。尚、本章の一部を執筆するに当たり、以下の文献を主たる参考文献とし、正確を記すため、一部の記述を抜粋し、本事業内容にあわせて適宜修正したことを付記する。

- 1) 本間仁、「河川工学」コロナ社 (1988)
- 2) 中山昭彦、Jeremy D. Bricker、本田翔平、「沿岸に放流される処理水拡散の観測と LES シミュレーション」、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 66, No.1, 351-355 (2010)
- 3) 大竹剛史、AYURZANA Badarch、細山田得三、「河口から放出される土砂と海水の混合による沈降促進を考慮した浮遊土砂の数値計算」、土木学会論文集 B2(海岸工学)、72 巻 2 号 p.I_1309-I_1314 (2016)
- 4) 内山雄介、「マルチクラス懸濁質輸送モデルを用いた福島沿岸域における河川由来懸濁質および懸濁態放射性核種の海洋分散について」、沿岸海洋研究第 54 巻、第 2 号、159-172 (2017)

4.2 河口域での塩淡水混合に伴う現象の特徴

勾配の小さい河川が潮汐の大きい海に注ぐ際、潮汐の影響は上流まで影響し、河川の水位や流速及び水中の塩分量は、周期的（時空間にて）に変化する。このような河川は一般に感潮河川と呼ばれ、水位に影響のある範囲は、感潮部と呼ばれる。感潮部では、潮汐の周期を持つ波長の長い波が上流に伝わる事が観察されるが、河口付近では、海水は河川水と混合せず、その下部に入り込み、上流へと向かってくさび状に進入する。しかし、水流の乱れにより、その形は崩れ、上流では混合することとなる。本節では、このような河口域での塩水及び淡水が混合する際の現象について概説する。尚、以下では、河川の流量により上記のような現象を分類し、その現象の特徴を記す。

(1) 低水（平常）時

河口における潮汐の影響は、洪水時以外の低水時に顕著に現れ、一般に河口付近では、上げ潮時に、逆流現象を生起する。逆流現象は、洪水流のように準定常流の仮定は成立せず、不定流の基礎方程式をその境界条件の下で解き理解される現象となる。従って、その現象を記す簡潔な方程式を以下に記す。河口部での密度変化を無視し、x 軸を下流に向かって正とし、z 軸を河床から上方に対し、正にとると、上記不定流の運動方程式は以下のように与えられる。

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{av}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = i - I_f \quad (4-1)$$

尚、河川に対し、一様幅の水路を仮定すると、その連続式は以下の通りとなる。

$$Bv \frac{\partial H}{\partial x} + BH \frac{\partial v}{\partial x} + B \frac{\partial H}{\partial t} = q' \quad (4-2)$$

河口で生起する現象はこれらの方程式により記述される。上式にて、定義は以下の通りである。

H : 水深

v : x 方向の流れの平均流速

α : 平均流速に対する補正係数で $\alpha \approx 1.1$

i : 河床勾配

I_f : 流水の受ける抵抗による勾配(近似的には水面勾配に等しい)

g : 重力加速度

t : 時間

q' : 感潮部に存在する支派川からの流入量で流入時は正、流出時は負、流出入量のない時は $q' = 0$

B : 水面幅

尚、式(4-1)、(4-2)を解析的に解くことは、一般に困難であり、境界条件を単純化し、基本方程式を差分方程式の形にして解く直接数値積分法や特性曲線による図解法[4-1]及び物部が提案した方法[4-2]の他、本間が修正した方法[4-3]等が用いられ、現象理解に利用されてきた。現在は、計算機が発達し、仮定を殆ど設定せず、3次元で河床(及び海底)の地形を取り込み、非定常の運動方程式と連続の方程式を連立させ、塩分濃度による密度分布も考慮することで、塩淡混合過程の時間発展を数値的に解くことが可能となっている。本報告書では、そのような計算を可能にするコード(3D-Sea-SPEC: 2章7.2参照)を用いて、河川上流端と沿岸域端で、各々、定常淡水流入及び潮汐を与える境界条件の下、シミュレーションを実施した結果について報告する(5章参照)。

(2) 高水(洪水)時

洪水(高水)時、即ち、河川自身の流量が大きく、河川の流れに対する潮汐の影響が小さくなる際、感潮部は短くなり、流れの運動方程式は、準定常流の仮定を用いても誤差は比較的小さく、妥当な近似となる。しかし、河口の水位と流量との関係は、一般の河道部のような対応はなく、計算に与えられる条件は水位変化だけとなるため、洪水追跡の方法をそのまま応用することができない。そこで、本間は洪水時の感潮部が短いことを考慮し、次のような方法[4-3]を示した。まず、潮汐波が、感潮部を通過するのに要する時間を0とし、水面での貯留が、常に図4-1(a)のようにくさび形になるものと仮定すると、貯留量 S は、河口水位 H_0 の関数で表わされる。以上、感潮部の上流端 A から河口までの区間に対して、連続方程式が以下のように与えられる。

$$(Q_A - Q_0)\Delta t = \Delta S \quad (4-3)$$

但し、 Q_0 : 河口の流量である。ここで、 Δt を1~2時間にとり、図から ΔH_0 を求め、これに対応する ΔS を計算すれば、与えられた洪水流量 $Q_A(t)$ に対する河口流量 $Q_0(t)$ が式(4-3)より求められる。この場合、感潮部における水面曲線が問題となるが、概算値としては両端の水位を直線で結ぶか、平均した流量の

背水曲線で結べばよいことが分かる。尚、洪水時、河口域（沿岸域）の2次元水平面での自由度を考えると、強い河川流の影響により、表層での淡水プルームが観測される。このようなプルームの挙動については、理論的考察も可能だが、上記のように、最近の計算機の発達によって、沿岸域の海底地形や潮汐及び波浪等の効果も取り込んだ3次元計算が可能であることを付記する[4-4, 4-5]。

(3) 密度流

河川・海洋・湖等の水域内で、何等かの原因により、密度の違った水塊の接触が起こると、その接触面が水平でない限り、相對運動の原因となる圧力勾配が生ずるが、これにより生起する運動を密度流と呼ぶ。尚、河口における淡水と海水との密度流混合の度合は、通常、図4-1のように3つの型に大別される。尚、一般にこれらの形状の違いは、鉛直方向の塩淡濃度差によっても、凡そ分類できるとの報告[4-7, 4-8]があり、日本の河川の河口域での振る舞いが凡そ分類可能となる。日本の多くの河川は、凡そ(b)及び(c)型に分類される。以下、それらの特徴について記す。

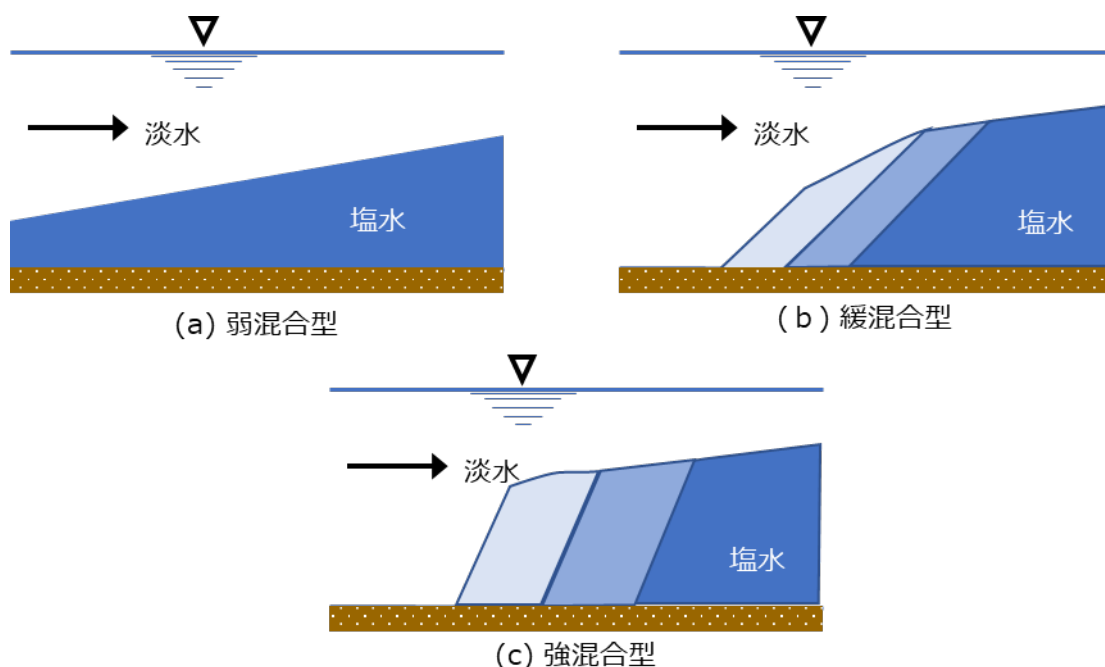


図4-1 河口域での淡水・塩水の混合型の分類

①弱混合型

図4-1(a)の場合に相当し、淡水と海水の混合の少ない状態だが、海水がくさび状になり、河道内に入り込むため、塩水くさびと呼ばれる他、2層流とも呼ばれる。一般に潮位差の小さな海に対し、水深の大きな河川が流入する場合に生ずる。潮位変動量が少なく、河川流量の大きい日本海側の河川にて見られる型である。

②緩混合型

図4-1(b)の場合に相当し、塩淡混合が①弱混合型と比べ進んだ状態であり、乱れがあり、淡水と海水の間に混合が生ずることで、塩水の等濃度曲線が傾斜するが、全体としては、塩水がくさび状となって河道内に浸入する。東日本の太平洋側にて良く見られる型である。

③強混合型

図 4-1(c)の場合に相当し、乱れが著しくなると、塩分の濃度分布による密度差の影響が消滅してしまう。図のように、塩分の等濃度曲線は、鉛直または鉛直に近くなる。主に、潮位差の大きい海に緩流河川が流入する場合に現れる。太平洋側の内海に流入する河川において見られる型である。

尚、海水と淡水との混合機構は、潮位・潮位差・河川流量・河口状況・河道内の形状等、各種の要素が関係するため、1つの河川でも常に一定の混合型を示すものではなく、その混合型においても、緩混合型が一般的となるが、上げ潮の時には強混合型に近くなる傾向がある等、固定されるものではない。一般的に、図 4-1 (a), (b)を塩水くさびとよんでいるが、實際上、日本では、同図(b)の緩混合型に属する河川が多い。

河口域での塩淡混合挙動をシミュレーションするには、海域での潮流、河口域の地形、そして混合する海水の成層特性等を反映する必要があり、POM[4-8]、ODEM[4-9]等の海底地形を考慮し、潮流や塩分と共に、その濃度の計算が可能であるモデルが必要となるが、静水圧近似をした多層モデルでは、鉛直の乱流変動を計算しないため、塩淡混合の3次元挙動を追跡できないことが知られている。また、渦粘性や渦拡散の他、境界条件も複雑で、主に経験則に頼るため、河口域の3次元挙動の普遍的予測には限界があることが分かる。従って、本報告では、乱流のシミュレーション法として様々な分野で適用され、沿岸での拡散のシミュレーションにも適用され、その有用性が示されている Large Eddy Simulation (LES) 法[4-10]を、上述のような河口域での塩淡混合に伴う乱流拡散の予測・解析に応用する。具体的には、原子力機構が開発・検証してきたコード (σ 座標系を採用し、複雑な河床・海底を表現し、LES法を用い非静水圧計算が実施可能)を用い、温度、塩分(密度差)による浮力変動も考慮した乱流運動をシミュレーションすることで塩淡混合場の予測を試みる。LES法は、開水路乱流で、既に幾つかのベンチマークで検証され、実河川にも応用されているが、非定常で開境界のある沿岸流での検証例は少なく、Nakayamaら[4-11]の放流水のシミュレーション等の例がある程度である。一方、温排水等のシミュレーションでは、非静水圧条件で計算が行われてきた例があるが、計算機資源が十分でない時代に行われていることを付記する[4-12] (計算格子サイズに注意)。

4.3 河口域での懸濁物質の挙動の特徴とモデリングの現状

日本の河川の河口部では、上流から輸送されてきた土砂が、河口周辺の海岸地形の形成に長期間に渡って大きな影響を与えることが知られている。河口から放出された土砂は、粒径や材質、河口特有の力学過程に依存し、微細土砂粒子は、一般に浮遊状態で沖へと輸送され、最終的には未固結土砂として沖合に沈降し泥質の堆積層を形成する。尚、このような土砂の輸送過程に関するシミュレーションでは、砂浜海岸を形成する砂質土砂に着目したものが多く、粒径が細かい 100 μm 以下のような浮遊する微細土砂が沖に運ばれ、どこにどのように輸送され、堆積するかは十分に解明されていない他、浮遊状態の土砂は、沖合まで輸送され、海岸波動による振動流の影響を受けなくなると想定されることから、従来用いられている漂砂と地形変化の解析による理解の範疇を超え、十分に正確なシミュレーションモデルが開発されていないのが現状である。

浮遊土砂の運動は、一般的に連続体として移流拡散方程式によって計算されるものと考えられるが、移流拡散方程式を使う前提は、拡散する物質が乱れに短時間で十分追従することであり、拡散物質と流体の密度差も小さいと仮定されている。しかし、実際には土砂と流体の間には明らかな密度差があり、重力の影響を受けるため、代表粒径を仮定した沈降速度を導入することで、シミュレーションを行って

いるのが現状である。しかし、実際の土砂は幅広い粒径分布を持ち、粒子個別に沈降速度が決定される他、河川から輸送されてきた土砂は、塩水と接触することにより、電荷およびそれに起因する反発力を失い、分子間力によって凝集し、フロックを形成して沈降する速度が速まることが知られており、そのようなフロック形成による沈降促進のモデル化は、簡単ではないことが分かる[4-13]。尚、宋ら[4-14, 4-15]は、河口域における密度流形態と最大懸濁帯に関する数値計算を行い、室内実験に基づく予測式から凝集沈殿を考慮した微細土粒子の移流拡散計算を実施している。しかし、このような海水と接触してフロック化され沈降が促進される現象は、粒子個別に起こる現象であり、移流拡散方程式を用いる方法は、粒子個別に起こる現象の実体を平均的に捉える事により、その詳細な理解を妨げている可能性がある。この観点から、土砂粒子の運動である浮遊土砂の現象は、ラグランジュ的な手法とより親和性が高いと考えられる。実際、大竹ら[4-16]は、大規模河川である大河津分水路の河口において、ラグランジュ的手法である粒子追跡による浮遊土砂の輸送過程についての2次元計算を実施し、粒子追跡手法の妥当性と密度流とフロック形成による沈降促進を考慮した土粒子の堆積過程についての考察を行っている。以上、水平的な広がりを考慮し、鉛直方向の塩淡混合そして、河口から放出される土砂の輸送過程を取り込み、微細土砂の輸送過程をシミュレーションするに当たっては、塩淡混合のダイナミクスを取り込むLES手法、そして海水と混合することによる懸濁態のフロック化を考慮したモデルを導入した計算（可能であれば、土砂粒子に対しラグランジュ的方法を取り込む）を行う必要があることが分かる。

4.4 沿岸域での放射性物質動態モデリングの特徴と現状

本節では、河口で陸域から輸送された放射性物質が、その後、沿岸域でどのような挙動を示すか、その挙動を記述するためのモデリングについて現状を記し、課題を整理する。

海洋環境中の放射性セシウムのインベントリとしては、直接漏洩や大気沈着過程を通じて流入する溶存態の寄与だけでなく、海水中の懸濁粒子へ吸脱着することにより、溶存相と懸濁相間を移行する成分が重要な寄与を与える。更に、懸濁態として海洋中に輸送され海底に沈降した後も、再懸濁して再輸送される成分が存在し、それらも含めて総合的に評価することが必要となる。一方、大気中へ放出された後、陸上に降下し、鉱物粒子や有機物粒子に吸着した成分は、降雨等に伴い、溶存体及び懸濁態核種として河川から海洋へ流入する。従って、陸域での水文過程の評価が重要となるが、未だ、十分な知見が得られていないことに注意すべきである。懸濁態放射性セシウムの挙動は、陸域沈着、土壌表層への移行、表面流出を経て河川から海域へと輸送されるという複数のプロセスを経るが、化学形態に依存した様々な変化を経た上、一旦海洋へ流入した後も、再懸濁・沈降等を繰り返すため、長期間に渡り沿岸域に滞留することも懸念されており、そのインベントリを正確に把握し、海洋生態系への影響を考察するには、土壌・河川・河口・沿岸での懸濁態粒子の動態評価は、極めて重要な課題と位置付けられる。以下、海洋側から見た沿岸域での放射性セシウム動態モデルの研究開発における現状について調査した結果を報告する。

一旦、海洋環境へ移行した放射性セシウムの海水中での挙動は、流動に対して完全に受動的となる溶存態と、粒径や粒子密度に応じ、沈降過程の影響を強く受ける懸濁態とに分類できるが、それらは大きく異なることが知られている。懸濁態は、海底に沈降して堆積層に取り込まれても、その後の外的擾乱に応じ、底面せん断応力が一定の閾値を超えると海水中へ再懸濁し、輸送・沈降を繰り返しながら広域へ分散する。この再懸濁過程を支配する底面せん断応力は、堆積層直上の海水の物理過程と密接に関連しており、海洋内部領域の流動の影響を受けて発達する海底 Ekman 境界層の影響に加えて、特に波浪の影響を強く受ける浅海域（概ね表面波の半波長程度の水深以下）では、波動境界層の影響が重畳するた

め、波一流れ共存場としてせん断応力を評価することが重要となる[4-17~4-19]。

以上より、懸濁態セシウムの分散解析を行うためには、溶存態セシウムとは異なるモデル化を行う必要がある。しかし、福島原発事故を対象とした懸濁態セシウムに関するモデル解析例は、溶存態セシウムのモデルと比べて少ない。その中で、Misumi ら[4-20]は、海底堆積物と海水中の溶存態の放射性セシウムの静的な吸脱着過程に関するモデル化を行い、事故直後に海洋底層付近を通過した高濃度溶存態セシウムが静的に底質に吸着することによる堆積層表層における放射性セシウムの濃度変化を定量的に評価した。その際、吸脱着が粒径に強く依存するため、堆積層放射性セシウムの解析結果も、底質粒径の空間分布に依存し、これを適切に設定することによって浅海域での堆積層中の放射性セシウム濃度を精度良く再現することに成功している。その一方、水深 200m 以深の沖合海域では堆積層放射性セシウム濃度を過小評価する傾向があり、その原因として、堆積層からの再懸濁に伴う懸濁態放射性セシウムの発生と海水中での再輸送過程が考慮されていないことが指摘され、懸濁粒子の輸送の重要性が示唆された。その後、Choi らは、Periáñez、Periáñez and Elliott、Kobayashi ら[4-21~4-24]と同様の Lagrange 粒子追跡モデルを用いて LPM (large particulate matter ; 粒子粒径 15 μm のシルトに着目) 及びそれに吸脱着する放射性セシウム濃度の移流分散、底質との物理的交換(沈降と再懸濁)及び化学的な吸脱着過程の解析を行った。その結果、懸濁態放射性セシウムの分布は、溶存態のそれとは大幅に異なり、事故後約 1 ヶ月間に生じた沿岸域底質への吸着によって堆積層中の放射性セシウムの分布が決定されることを示した。一方、Higashi ら[4-25]は、Periáñez[4-26]をベースとした Euler 型移流拡散モデルにより、Choi ら[4-21]と同様の解析を行った。但し、堆積層を多層モデルで表現し、堆積層内における生物攪乱などの効果を鉛直拡散モデルで近似することで、海水と堆積層間の物理的・化学的交換及び履歴効果を同時に評価した。その結果、いわき沖に形成される底質中の高濃度放射性セシウム分布を再現することに成功すると共に、海上風と潮流によって形成される底面せん断応力分布と堆積層放射性セシウム分布とがよく対応することを明らかにした。尚、Higashi ら[4-25]のモデルでは懸濁態は単一粒径粒子で代表し、LPM の再懸濁に対する限界せん断力や比例係数には、粒径 15 μm 程度のシルトに対する値を用いる一方、沈降速度はチューニングの結果 0.05 mm s^{-1} を採用している。粒径 4 μm の泥分の沈降速度は、0.1 mm s^{-1} 程度であることから、LPM の沈降は大幅に抑制されて広域的に分散するように調整されていることに注意すべきである。また、堆積層からの再懸濁に際し、シルトのモデルを採用したということは、粘土質粒子と比べ、底面せん断力が大きくなる浅海域では、再懸濁が生じ、再懸濁フラックス値も大きくなるように調整されているものと解釈される。尚、懸濁質輸送を考慮した Choi ら、Higashi ら[4-21, 4-25]のモデルでは、共に浅海域での再懸濁を支配する波浪、河川から流入する懸濁質、粒径別の分散挙動などの影響が考慮されておらず、今後、河川-河口-沿岸での放射性セシウムの動態を議論する際、モデリング精度向上の必要性が十分にあることを指摘する。

以上、沿岸での放射性セシウムの動態についての研究(特に懸濁態の挙動)に注視したが、沿岸域では、海水流動を記述するため、JCOPE2-ROMS 多段ネスティング 3 次元海洋流動モデルを用い、事故直後より、海洋中での懸濁態の移流分散過程の高解像度の再解析が実施されてきた。しかし、既往研究にて十分に評価されてこなかった懸濁態の粒度組成、波浪、河川の影響は、上記のように、今尚、着目する必要がある。その観点から従来研究をサーベイすると、Blaas ら[4-27]による Euler 型マルチクラス懸濁質輸送モデルおよび多層堆積層モデルにより、細砂・シルト・粘土(泥)の三画分の粒子を同時に考慮し、粒径クラス毎の分散・再懸濁過程を解析した例がある他、気象庁広域波浪推算モデル再解析値である GPVCWM にネスティングさせたスペクトル波浪推算モデル SWAN[4-28, 4-29]を用い、浅海域の底面せん断応力評価を基に波浪の効果を考慮した例がある。更に、従来の海洋モデル解析で、十分に考慮

されてこなかった河川の影響を可能な限り精緻に扱うため、1Fを中心とした宮城・福島・茨城県沿岸に流入する全ての1級および2級河川からの淡水流入として表面流出モデルHYDREEMS[4-30]による日平均推算値を付与し、それに伴う粒径別の懸濁質の海洋への流入を同時に考慮した研究が行われている。また、佐久間ら[4-31]のタンクモデルを用いた福島沿岸へ注ぐ河川の溶存態セシウム及び懸濁態セシウムの事故後の推定流出量を基に、ROMSの3次元海洋流動計算を行う動きが見られる等、河川からの影響評価を高精度化する研究が今後も実施されると考えられる。

以上、本報告では、懸濁態の海洋中での挙動と分散機構を物理的な側面から、現状を整理することを主たる目的としたが、懸濁態放射性セシウムについては、粒子比表面積と懸濁態セシウム濃度に関する経験的な関係式を組み込むことにより簡易的に評価せざるを得ないのが現状である。従って、溶存相、懸濁相、そして堆積相間での吸脱着などについて、全ての過程を精確に考慮することは難しく、今後の課題として残されていることを記す。即ち、放射性セシウムの陸域から河口そして沿岸での挙動を一貫して精度良くモデリングし追跡することは、残された課題であり、且つ困難な課題と位置づけられることを結論づける。特に、本節で記したように、沿岸での放射性セシウム動態解析の多くは、海洋からのアプローチであり、河川水が河口域（感潮域）に到達し、その後の化学的・物理的变化を伴い、沿岸へと流出する動態については、殆ど解析が行われていないことを付記する。前節に記したように、感潮域では懸濁態が凝集する一方、セシウムの懸濁態からの溶脱が起こる等、ダイナミカルで且つドラスティックな物理化学的变化が起こる。こうした挙動をモデル化するには、実際の河口域での詳細な観測か、適切に管理された実験等による知見の蓄積が必要であり、今後に残された課題であると指摘したい。尚、次5章では、これらの現象が起こる物理化学的パラメータを、変化させたときに生起する現象の感度解析（試解析）を行うことで、現象の複雑さと共に、出現する現象を凡そ模擬できることのみを報告する。

参考文献

- [4-1] 岸力、「特性曲線法による非定常流の解き方(I)」、建設省土木研究所報告、85号(1953)
- [4-2] 物部長穂、「水理学」、岩波書店(1979)
- [4-3] 本間仁、「河川工学」コロナ社(1988)
- [4-4] 笠井亮秀、「河川水と海水の接合点」、沿岸海洋研究、40巻、2号、pp.101-108(2003)
- [4-5] 万田敦昌、「河口域周辺の流れと密度場」、沿岸海洋研究、40巻、2号、pp.109-119(2003)
- [4-6] 土木学会水理委員会河口部の水理現象小委員会、「河口部の水理現象と関連する諸問題」、土木学会論文集、1985巻、363号、pp.47-60(1985)
- [4-7] 須賀堯三、「感潮河川における塩水楔の水理に関する基礎的研究」、土木研究所資料、第1537号、1979.
- [4-8] Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987) : A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Ed., N. S. Heaps, Vol. 4, Coastal and Estuarine Sciences, Amer. Geophys. Union, 1-16.
- [4-9] 中辻啓二・山見晴三・末吉寿明・藤原建紀(1992) : 大阪湾の恒流系に関する数値実験的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 906-910.
- [4-10] Tang, H.S., J. Paik, F. Sotiropoulos and T. Khangaonkar (2008) : Three-dimensional numerical modeling of initial mixing of thermal discharges at real-life configurations, J. Hydraul. Eng., Vol.134(9), pp.1210-1224.
- [4-11] Nakayama, A. and N. Hisasue (2010) : Large eddy simulation of vortex flow in intake channel of hydropower facility, J. Hydraul. Res., Vol. 48(4), pp.415-427.

- [4-12] 和田明、「海洋環境水理学」、丸善 (2007)
- [4-13] 柳哲雄、「沿岸海洋学-海の中でものはどう動くか-」、恒星社厚生閣, p.130 (1989)
- [4-14] 宋元平, 小田一紀, 重松孝昌, 汪思明、「河口域における密度流形態と最大混濁帯の2次元数値シミュレーション」、海岸工学論文集, 第46巻, pp.471-475 (1999)
- [4-15] 宋元平, 小田一紀, 重松孝昌, 汪思明、「準3次元河口モデル地形を対象とした密度流と最大混濁帯の形成過程に関する数値シミュレーション」、海岸工学論文集, 第47巻, pp.471-475, (2000).
- [4-16] 大竹剛史, AYURZANA Badarch, 細山田得三、「河口から放出される土砂と海水の混合による沈降促進を考慮した浮遊土砂の数値計算」、土木学会論文集 B2(海岸工学), 72 巻 2 号 p.I_1309-I_1314 (2016)
- [4-17] Warner, J. C., C. Sherwood, R. P. Signell, C. K. Harris and H. G. Arango (2008) : Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*, 34, 1284–1306.
- [4-18] Warner, J. C., B. Armstrong, R. Heb and J. B. Zambon (2010) :Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) Modeling System. *Ocean Modelling*, 35, 230–244, doi :10.1016/j.ocemod.2010.07.01014)
- [4-19] Harris, C. K., C. R. Sherwood, R. P. Signell, A. Bever and J. C. Warner (2008) : Sediment dispersal in the northwestern Adriatic Sea. *Journal of Geophysical Research*, 113, C11S03, doi :10. 1029/2006JC003868.
- [4-20] Misumi, K., D. Tsumune, T. Tsubono, Y. Tateda, M. Aoyama, T. Kobayashi and K. Hirose (2014) : Factors controlling the spatiotemporal variation of ^{137}Cs in seabed sediment off the Fukushima coast : implications from numerical simulations.*Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 218 – 228, doi :10.1016/j.jenvrad.2014.06.004.
- [4-21] Choi, Y., S. Kida and K. Takahashi (2013) : The impact of oceanic circulation and phase transfer on the dispersion of radionuclides released from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Biogeosciences*, 10, 4911–4925, doi :10.5194/bg–10–4911–2013.
- [4-22] Periañez, R. (2000) : Modelling the tidal dispersion of ^{137}Cs and $^{239, 240}\text{Pu}$ in the English Channel. *Journal of Environmental Radioactivity*, 49, 259–277.
- [4-23] Periañez, R. and A. J. Elliott (2002) : A particle-tracking method for simulating the dispersion of non-conservative radionuclides in coastal waters. *Journal of Environmental Radioactivity*, 58, 13–33.
- [4-24] Kobayashi, T., S. Otsuka, O. Togawa and K. Hayashi (2007) :Development of a Non-conservative Radionuclides Dispersion Model in the Ocean and its Application to Surface Cesium-137 Dispersion in the Irish Sea. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 44, 238–247.
- [4-25] Higashi, H., Y. Morino, N. Furuichi and T. Ohara (2015) : Ocean dynamic processes causing spatially heterogeneous distribution of sedimentary caesium-137 massively released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Biogeosciences*, 12, 7107–7128, doi :10.5194/bg–12–7107–2015.
- [4-26] Periañez, R. (2008) : A modelling study on ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ behaviour in the Alborán Sea, western Mediterranean. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 694–715.
- [4-27] Blaas, M., C. Dong, P. Marchesiello, J. C. McWilliams and K. D. Stolzenbach (2007) : Sediment-transport modeling on Southern Californian shelves : a ROMS case study. *Continental Shelf Research*, 27, 832–853.
- [4-28] Booij, N., R. C. Ris and L. H. Holthuisen (1999) : A thirdgeneration wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, C4, 104, 7649–7666.

- [4-29] Ris, R. C., N. Booij and L. H. Holthuijsen (1999) : A thirdgeneration wave model for coastal regions, Part II, Verification. *Journal of Geophysical Research*, C4, 104, 7667–7681.
- [4-30] 豊田康嗣, 平口博丸, 杉本聡一郎, 橋本篤、「気象予測モデルと連携した出水予測手法の開発」.
<http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/N08058.html> (2009)
- [4-31] Sakuma S., Nakanishi T., Yoshimura K., Kurikami H., Nanba K., Zheleznyak M., “A modeling approach to estimate the ^{137}Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017”, 208–209, 106041 (2019)

■ 5章 河口域放射性物質動態モデルによる試算

5.1 本章の概要

本章では、河川から海洋へと流出する放射性核種の河口域モデルを沿岸域のシミュレーションコード 3D-Sea-SPEC に実装し、河口域での放射性核種の動態について、試算を実施した結果を報告する。尚、河口域として、典型的な河口域地形（阿武隈川河口を模擬）を作成し、海水が潮位変動に伴い河口域に侵入し、塩水遡上や塩淡混合を示す様子を再現可能することを解析の条件とした。更に、塩淡混合と共に放射性セシウムの溶存・懸濁態の動態をモデル化し、試算を行った結果を評価し、その定性的な妥当性について論じる。

5.1.1 河口域シミュレーションモデル

① 河口域シミュレーションモデルの条件

河口域シミュレーションモデルの実装に当たっては、以下の条件を満足することを条件とした。

- ・ 河口域を適切な空間解像度で表現すること。
- ・ 水底地形を表現できる座標系を用い観測潮位を境界条件として利用すること。
- ・ 河川水（淡水）に塩分濃度の異なる海水が流入する際の水の流動を表現すること。
- ・ 水面における風応力と放射による強制場を考慮可能とすること。
- ・ トレーサ（放射性物質については移流・拡散挙動を表現すること。

② 非静水圧近似領域の策定と実装

5.2 にて記す検証用河口域モデルにて、海水遡上や塩淡混合が起こり得る領域については、非静水圧計算領域を定め、密度差のある流体の鉛直挙動をシミュレーション可能とする一方、鉛直挙動が無視できる領域（十分遠方の海域及び淡水のみ流入の河川域）については、静水圧近似領域とし、領域間接続を可能とすることで、計算コストを下げる必要がある。尚、用いるコード（3D-Sea-SPEC）は、上記実装が可能だが、本事業では、非静水圧計算領域の結果のみに着目するため、本報告書で示すケースでは、全領域を非静水圧計算領域としたことを付記する（河口の塩淡混合域付近にのみ着目する）。

③ 境界条件の策定と実装

海洋側での境界条件として、潮位変動及び流速成分の他、塩分、温度等を境界条件として設定した。また、海面や河口域水面では、風による応力の印加と放射によるエネルギー交換についても考慮可能だが、本報告書で示すケースでは、温度を一定とした他、風による応力の効果を取り込まない設定とした。理由は上記の効果を取り込むことで、塩淡混合プロセスが加速されると考えられ、塩分濃度の違いによる懸濁態成分の挙動評価が困難になることを避けるためである。尚、流速成分については、最外境界を JCOPE2 とし、3D-Sea-SPEC のダウンスケーリング機能を用いて河口域へと接続した。河川側の境界条件としては、遡上域の上流側で一定量の淡水流入条件とした。

④ 放射性物質（溶存体・懸濁態）挙動モデルの実装

溶存体については、移流拡散方程式に従い、その濃度を追跡可能とした。一方、懸濁態については、放射性物質の懸濁態への吸着に関する塩分濃度依存性を考慮可能（固液平衡分配係数とその時定数を付与）とした一方、塩分濃度に依存し、凝集・沈降するモデリングを実装した。また、沈降・巻き上げのモデリングも実装した（付録 3.5 参照）。

5.1.2 対象河口域とモデル検証について

① モデル形状の作成

実装する上記シミュレーションモデルを検証するため、典型的な河口域及び河道域のモデル形状を定め、試計算を行う。河口域については、塩水遡上（潮位変化による）と塩淡混合が起こることを条件として、モデル形状を作成する。河口域のモデル作成に当たっては、阿武隈川の河口及び下流域を参考にモデルを作成する。

② 実装モデリングの妥当性検証

実装したシミュレーションモデルを、上記で作成した河口域モデルに適用して試計算（モデルパラメータ等の感度解析）を行い、計算結果の妥当性を定性的に評価する。

5.2 河口域及び可動域モデルの作成

本節では、河口域におけるシミュレーションを実施するための解析メッシュ作成について説明する。

5.2.1 解析メッシュ作成手順概要

解析メッシュ作成手順概要について、以下に示す。

- 1) GoogleMap より、対象となる阿武隈川河口の水域を定義する（5.2.2 で詳細説明）。
- 2) 国土地理院が提供している基盤地図情報の数値標高データ（<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>）より、1) の範囲を包含するデータをダウンロードする（5.2.3 で詳細説明）。
- 3) 阿武隈川河口域を含む 8km 四方の領域について、メッシュ幅 100m の解析メッシュを設定し、2) のデータから解析メッシュの標高値を設定する。ただし、1) の水域に含まれる解析メッシュについては、河床の標高値として、（標高値-1）m を設定する（5.2.4 で詳細説明）。
- 4) 3) で設定された標高値を 3D-Sea-SPEC の地形ファイルフォーマットに従って出力する。

以降では、各項目の詳細について説明する。

5.2.2 阿武隈川水域の定義

GoogleMap より阿武隈川水域の定義を行った。以降では、その手順について示す。

① Google マイマップの利用

<https://www.google.co.jp/intl/ja/maps/about/mymaps/>

- ・ 「利用を開始」 ボタンを押下
- ・ 「+新しい地図を作成」 ボタンを押下



図 5-1 Google マイマップ開始画面

② ポリラインの描画

- ・ 無題のレイヤにチェックを付けて選択状態にする（レイヤ名は変更可）。
- ・ 基本地図で『水域白表示』を選択する。
- ・ 「ラインを描画」 ボタンを押して、リストから「ラインやシェイプを追加」を選択する。
- ・ カーソルが十字モードになるので、水域境界に沿って頂点を追加していく。
- ・ 選択中も地図の拡大と縮小、移動が可能である。「Enter」を押すと、頂点選択モードが解除されてポリラインが確定する。
- ・ ポリラインの細かい編集は後で行うことが可能である。
- ・ ポリラインの色と太さの変更も可能である。
- ・ 阿武隈川河口から上流 10km ほどに『阿武隈大関』があるため、ここまでを阿武隈川河口域の水域として定義した。図 5-2 に水域として定義したポリラインを示す。

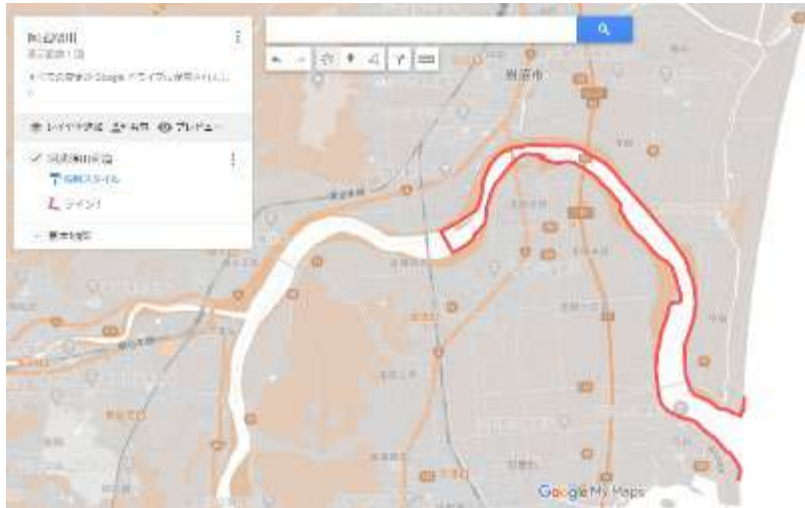


図 5-2 阿武隈川河口域の水域定義

③ ポリラインの編集

- ・ ポリラインの頂点を移動すると、移動させた頂点の両端に新しく頂点が生成される。これを繰り返すことによって、境界線の取得精度を徐々に高めることができる。

④ データのエクスポート

- ・ 設定ボタンを押して、リストから「KML/KMZ にエクスポート」を選択する。
- ・ データをエクスポートするレイヤを適切に選択して、「ダウンロード」ボタンを押す。
- ・ エクスポートされた KML ファイルが、ダウンロードフォルダに生成される。

5.2.3 基盤地図情報：数値標高データの整理

阿武隈川河口域の標高値を取得するため、国土地理院が提供している基盤地図情報の数値標高データ (<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>) を利用した。基盤地図情報はユーザ登録(無料)するだけで利用可能である。阿武隈川河口域を包含する範囲として、上記サイトより2次メッシュコード『574006』、『574007』、『574016』、『574017』のデータをダウンロードした。図 5-3 に上記サイトのダウンロード画面を、図 5-4 にダウンロードしたデータの可視化結果を示す。



図 5-3 基盤地図情報：数値標高データダウンロード画面（緑網掛がダウンロードした範囲）

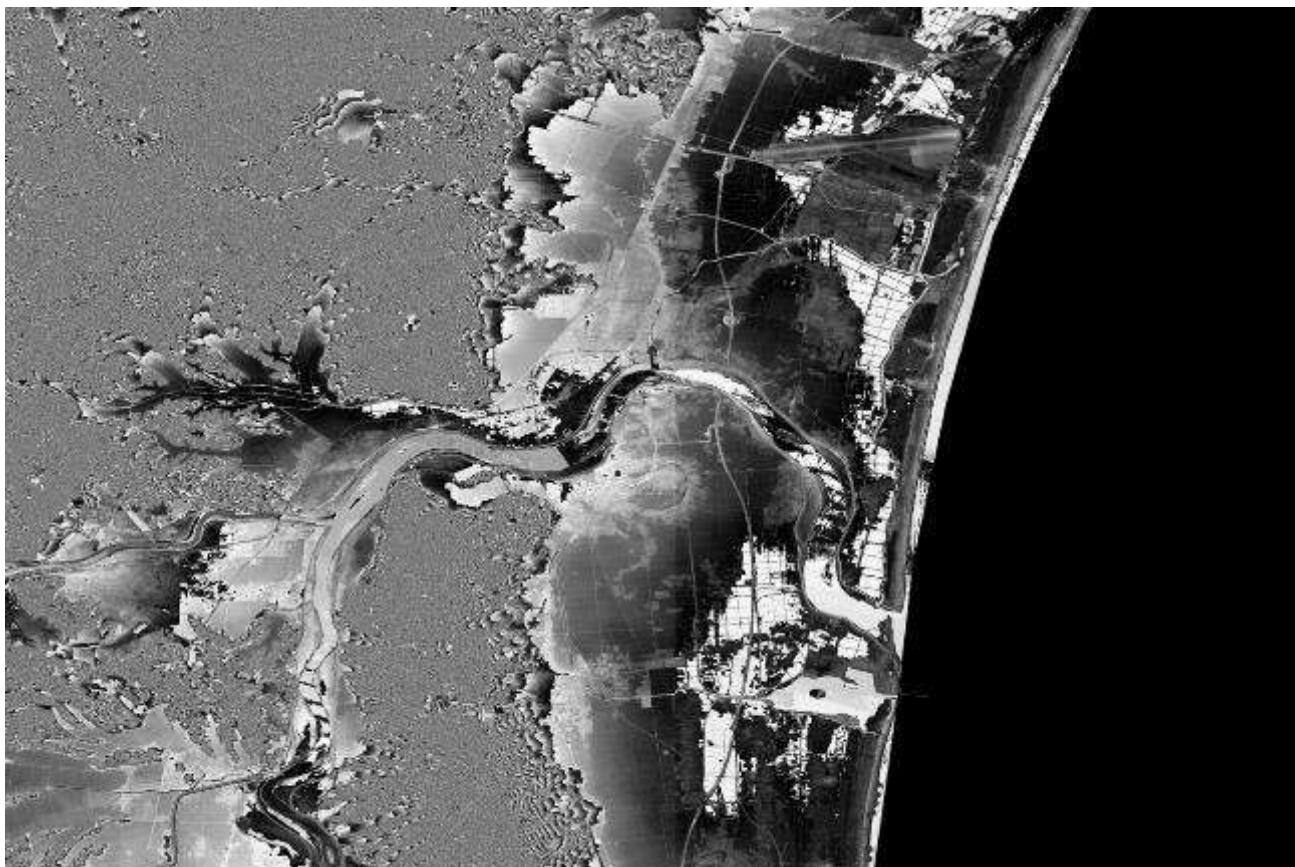


図 5-4 基盤地図情報：数値標高データ可視化結果
(二次メッシュコード：574006, 574007、574016, 574017)

5.2.4 解析メッシュの標高値設定

5.2.2 と 5.2.3 の処理結果を用いて、解析メッシュ点における標高値を設定する。
解析メッシュは、阿武隈川河口域を含む 8km 四方の領域で設定した。

計算メッシュ幅 100m

計算範囲 X 方向 53000m ～ 61000m 80 点

Y 方向 -663000m ～ -655000m 80 点

※19 座標系の X, Y と逆であることに注意

図 5-5 に、阿武隈川河口域として設定した解析領域を示す。

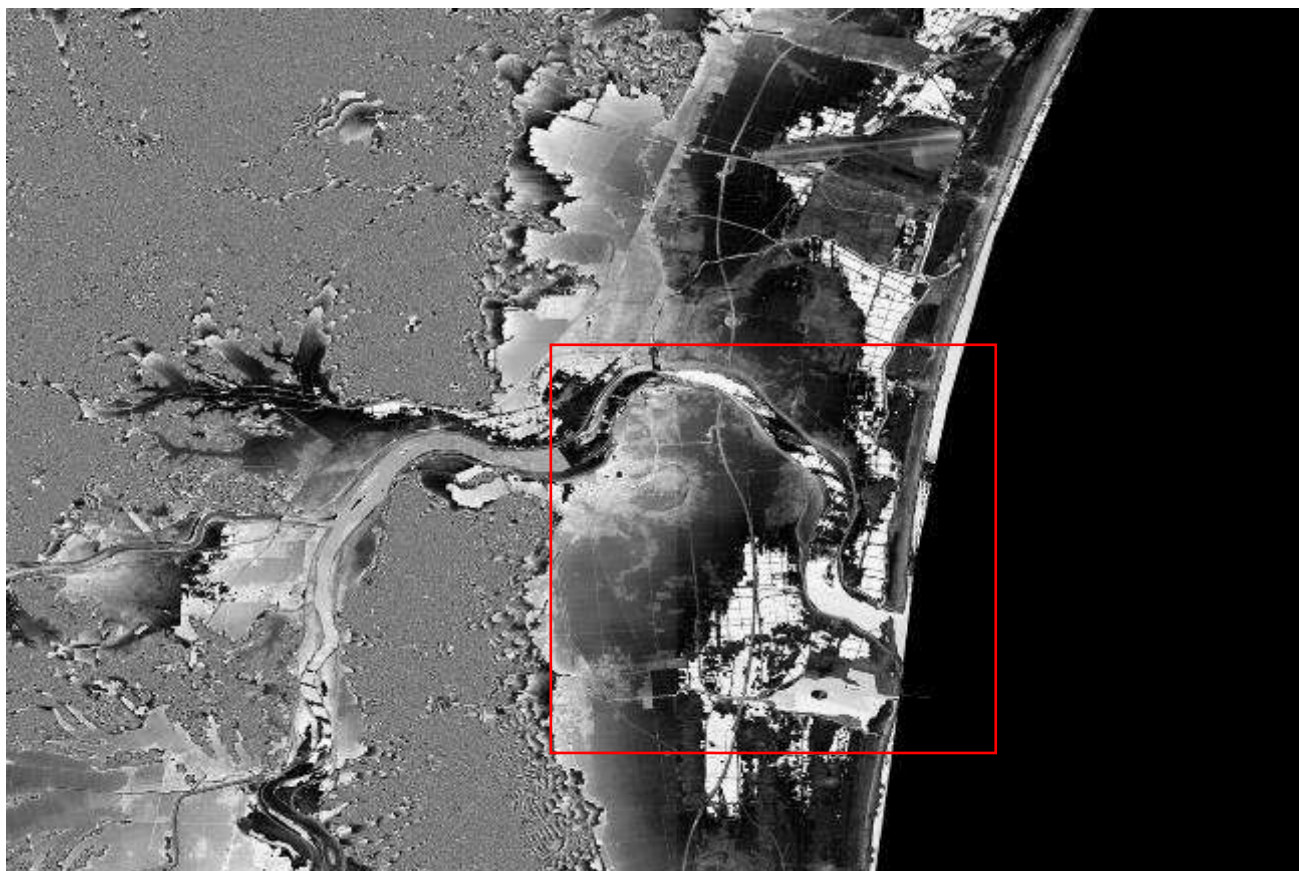


図 5-5 試解析領域（阿武隈川河口域）

図 5-6 では、解析メッシュに設定した標高値を示す。基盤地図情報の標高データは、水域については、水面位置が標高として設定されており、正確な河床標高を得ることはできない。そこで、便宜的ではあるが、河床および海底の標高値は下記の通りに定義した。

- ・ 河床標高値

基盤地図情報で得られた標高値（水面位置）に対して、簡単のため、水深が 1.0m となるように河床標高を設定した。

- ・ 海底標高値

河口から沖合方向（X 軸方向）については、海底水深が 2 段階で深くなるように設定した。本事業では、1 段目は水深 5.0m、2 段目は水深 8.0m として海底標高を定義した。

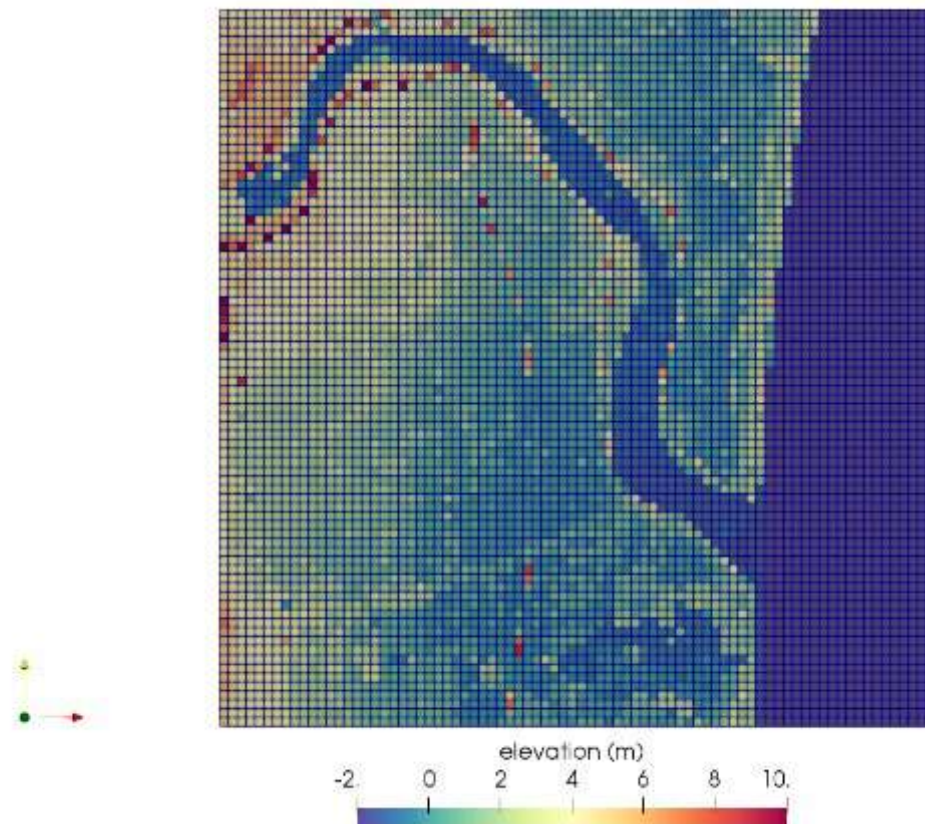


図 5-6 解析メッシュに設定した標高値

5.3 河口域でのシミュレーション（試解析）と結果検証

5.5.2 で作成した解析メッシュを用いて、河口域シミュレーション（試解析）を実施し、塩水楔の再現及び各物理量の塩分濃度依存性の検証を実施した。

5.3.1 計算条件

5.1.1 のシミュレーションモデルの条件より、河口域シミュレーションにて満足すべき条件を※に記し、各々の条件を如何に反映したかを記号「→」に記す。

※河口域を適切な空間解像度で表現すること。

→ 河口域における塩水楔の再現性を検討し 100m とした。

※水底地形を表現できる座標系を用い観測潮位を境界条件として利用すること。

→ 3D-Sea-SPEC はマルチ σ 座標系を採用していることから、水底地形を適切に表現可能。

→ 観測潮位は M_2 潮を仮定し、河口域における塩水楔の再現できるような潮位振幅および河川流入量を試行により決定した。

※河川水（淡水）に塩分濃度の異なる海水が流入する際の水の流動を表現すること。

→ 上流境界を河川水（淡水）、外洋境界を M_2 潮を仮定した塩分固定境界とした。3D-Sea-SPEC では、塩分の移流拡散方程式、および運動方程式に浮力項を考慮することにより、上記条件を考慮可能となっている。

※水面における風応力と放射による強制場を考慮可能とすること。

→ 3D-Sea-SPEC では、日射および風による大気と水表面の熱交換、および風応力による吹送流の考慮が可能。しかし、塩水楔と塩分依存性による懸濁態・放射性物質の動態を検討するため、水温変動による密度変化を駆動力とする流れへの影響を取り除くため、水温は 25°C 一定で解析を実施した。従って、日射および風による大気と水表面の熱交換、および風応力による吹送流の影響は取り込まないこととした。尚、上記の影響は、塩水楔の挙動において、混合をより加速させるものと考えられる。

※トレーサ（放射性物質）については移流・拡散挙動を表現すること。

→ 3D-Sea-SPEC では、懸濁態、および放射性物質の移流拡散方程式を計算しており、懸濁態の凝集・分解・沈降・巻き上げ、および放射性物質の懸濁態への吸着・脱着についても考慮可能である。

→ 放射性物質の懸濁態への吸着に関する塩分濃度依存性を考慮可能とする一方、塩分濃度に依存し、凝集・沈降するモデリングに関しては 5.3.2 で後述する。

→ 沈降・巻き上げのモデリングは既に 3D-Sea-SPEC に実装済みである。

尚、計算（設定）条件の詳細を表 5-1 と表 5-2 に示す。

表 5-1 流動計算条件

解析パラメータ			
解析メッシュ幅	100 m 一定		
時間刻み	1.0 sec		
初期水位	0.0 m		
水温	25 °C		解析領域全体で一定値
河川流入量、塩分	30 m ³ /s、0.0 (-)		
海側境界	水位境界 M ₂ 潮を仮定 (周期 12 時間、振幅 0.2 m) 塩分 34.0 (-)		
水表面の熱交換	非考慮		
風応力	非考慮		
渦動粘性係数	水平 : 1.0m ² /s	鉛直 : 0.001m ² /s	
渦動拡散係数	水平 : 1.42857m ² /s	鉛直 : 0.0001m ² /s	

表 5-2 懸濁態計算条件

土砂粒子モデル				
水密度	1027.0kg/m ³ ※懸濁態の沈降速度計算で使用			
水動粘性係数	1.31×10 ⁻⁶ m ² /s※懸濁態の沈降速度計算で使用			
アーマリング係数	0.0			非考慮
項目	粘土	凝集懸濁態 大粒子	凝集懸濁態 小粒子	備考
密度(kg/m ³)	2650	2650	2650	
粒径(m)	4.2×10 ⁻⁶	6.0×10 ⁻⁵	3.6×10 ⁻⁵	
水中初期濃度(kg/m ³)	0.0	0.0	0.0	
臨界せん断応力 (沈降) (Pa)	1.0	1.0	1.0	
臨界せん断応力 (再浮遊) (Pa)	0.2	0.2	0.2	
海底土砂体積分率(%)	0.0	0.0	0.0	

5.3.2 塩分依存性検討

① 懸濁態凝集の塩分依存性

感潮域において、淡水中を輸送されてきた懸濁態が凝集することが知られている。そのメカニズムは以下のとおりである。一般に懸濁態は、淡水時、帯電（マイナス）しているが、海水に出会うと、海水はイオン強度が高い（ Na^+ , K^+ , Ca^{2+} が豊富に存在する）ため、電荷が中和され、中性条件では、ファンデルワールス力（引力）が有効に働くため凝集する。尚、ある時間経過すると凝集は飽和するが、飽和する時間や凝集懸濁態の飽和粒子径は、河口毎に異なることが知られている。その効果をモデル化した粘土及び凝集懸濁態：小粒子及び大粒子の基礎式を以下に示す。

→ 粘土成分 C_c

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_c D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C_c D) + \frac{\partial}{\partial y}(v C_c D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(w C_c) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(D K_x \frac{\partial C_c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D K_y \frac{\partial C_c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_c}{\partial \sigma}\right) \\ & - S_v \frac{\partial C_c}{\partial \sigma} + D R_{cs} + D(C_s k_{-l} - C_c k + \gamma(C_l + C_s)) \end{aligned} \quad (5-1)$$

→ 凝集懸濁態：小粒子 C_s

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_s D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C_s D) + \frac{\partial}{\partial y}(v C_s D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(w C_s) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(D K_x \frac{\partial C_s}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D K_y \frac{\partial C_s}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_s}{\partial \sigma}\right) \\ & - S_v \frac{\partial C_s}{\partial \sigma} + D(C_l r_{-l} + C_c k - C_s(\gamma + r + k_{-l})) \end{aligned} \quad (5-2)$$

→ 凝集懸濁態：大粒子 C_l

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_l D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C_l D) + \frac{\partial}{\partial y}(v C_l D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(w C_l) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(D K_x \frac{\partial C_l}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D K_y \frac{\partial C_l}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_l}{\partial \sigma}\right) \\ & - S_v \frac{\partial C_l}{\partial \sigma} + D(C_s r - C_l(\gamma + r_{-l})) \end{aligned} \quad (5-3)$$

※ k_{-l} ：脱着率（1/s）（凝集懸濁態：小粒子 ⇒ 粘土成分）

※ k ：吸着率（1/s）（粘土成分 ⇒ 凝集懸濁態：小粒子）

※ γ ：分解率（1/s）（凝集懸濁態：大粒子、凝集懸濁態：小粒子 ⇒ 粘土成分）

※ r ：凝集率（1/s）（凝集懸濁態：小粒子 ⇒ 凝集懸濁態：大粒子）

※ r_{-l} ：崩壊率（1/s）（凝集懸濁態：大粒子 ⇒ 凝集懸濁態：小粒子）

上式において、パラメータ k および r が大きくなると凝集が加速される。そこで、凝集に関連するパラメータ k および r については、3D-Sea-SPEC の既存値を淡水時とみなし、塩分 $S_{env}(-)$ で C_p 倍になると仮定し、各計算セルの塩分値 $S_p(-)$ に応じて以下のように線形補間によってモデル化したパラメータ k_{mod} および r_{mod} に置き換えて解析を実施した。

$$k_{mod} = k * \left\{ 1 + (C_p - 1) * \frac{\min(S_{env}, S_p)}{S_{env}} \right\} \quad (5-4)$$

$$r_{mod} = r * \left\{ 1 + (C_p - 1) * \frac{\min(S_{env}, S_p)}{S_{env}} \right\} \quad (5-5)$$

② 放射性セシウムの懸濁態への吸脱着に関する塩分依存性

感潮域においては、放射性セシウムが懸濁態より脱離することが知られている。この現象を模擬するため、放射性セシウムが吸着した粘土と、放射性セシウムが水に溶存している状態である放射性溶存態の基礎式を以下に示す。

→ 放射性懸濁態 C_c

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_i D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u C_i D) + \frac{\partial}{\partial y} (v C_i D) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w C_i) \\ & = D (R_i (K_d(i) \cdot S_i \cdot W - C_i) + C_{i in}) \\ & - S_v \frac{\partial C_i}{\partial \sigma} \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_i}{\partial \sigma} \right) \\ & + (\text{Suspended solids Diffusion } x, y) \\ & + (\text{Cohesive failure}) \end{aligned} \quad (5-6)$$

→ 粘土成分に吸着する放射性物質濃度 C_{cc}

$$(\text{Cohesive failure}) = D (C_{cs} k_{-l} - C_{cc} k + \gamma (C_{cl} + C_{cs})) \quad (5-7)$$

→ 小粒子の凝集懸濁体に吸着する放射性物質濃度 C_{cs}

$$(\text{Cohesive failure}) = D (C_{cl} r_{-l} + C_{cc} k - C_{cs} (\gamma + r + k_{-l})) \quad (5-8)$$

→ 大粒子の凝集懸濁体に吸着する放射性物質濃度 C_{cl}

$$(\text{Cohesive failure}) = D (C_{cs} r - C_{cl} (\gamma + r_{-l})) \quad (5-9)$$

式(5-6)の付加項(*Suspended solids Diffusion x, y*)は、懸濁体自体の水平拡散により、その懸濁体に吸着していた放射性物質が空間的に移動(拡散)する現象を表す項である。この項は次のように定義する。

$$\begin{aligned} & (\text{Suspended solids Diffusion } x, y) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial S_i C_i}{\partial x S_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial S_i C_i}{\partial y S_i} \right) \end{aligned} \quad (5-10)$$

式(5-10)は、以下に示す方針で吸着態放射性物質の拡散を記述するものである。

- 1) 懸濁体濃度によって拡散フラックスを算出。
- 2) 懸濁体の拡散フラックスを懸濁体濃度で除算して、単位物理量の拡散フラックスを計算。
- 3) 放射性物質濃度を掛算して、放射性物質の拡散フラックスを導出。

→ 放射性溶存態 W_B

$$\begin{aligned} & \frac{\partial WD}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uWD) + \frac{\partial}{\partial y}(vWD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wW) \\ &= D \left(\sum_i R_i (C_i - K_d(i) \cdot S_i \cdot W) + W_{in} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial W}{\partial \sigma} \right) \\ &+ (\text{Sedimentation Cohesive failure}) \end{aligned} \quad (5-11)$$

(Sedimentation Cohesive failure)

海底面付近の溶存態と堆積している放射性懸濁態との放射性物質の交換項。詳細については、付録3「支配方程式 (3D-Sea-SPEC)」の3.5「海底土 (河床土砂) モデル」の式(3-88)を参照。

※ $K_d(i)$: タイプ i の粒子態に対する分配係数(m^3/kg)

※ R_i : タイプ i の粒子態の対する吸脱着の時定数 (1/秒)

放射性セシウムは、淡水と比べ塩分濃度が上昇すると、懸濁態への分配量が減少する。これは、塩分濃度が高い海水ではイオン濃度が高く、セシウムと他のイオンとの交換確率が増大し、結果として脱離する確率が増大するからである。この現象をモデル化する際、上式において、パラメータ $K_d(i)$ が小さい方が、水中に溶存しているセシウムが懸濁態に吸着しにくくなる一方、パラメータ R_i が大きい方が、懸濁態に吸着した放射性セシウムが脱離して溶存態に移行しやすくなる。そこで、セシウムの吸脱着に関連するパラメータ $K_d(i)$ 、および R_i については、3D-Sea-SPEC の設定 (既存) 値を淡水時とみなし、塩分 $S_{Kd_env}(-)$ 、および塩分 $S_{Ri_env}(-)$ でそれぞれ、 $1/C_{Kd}$ 倍、 C_{Ri} 倍になると仮定して、各計算セルの塩分値 $S_p(-)$ に応じて以下のように線形補間によってモデル化したパラメータ $K_d(i)_{mod}$ 、および $R_{i_{mod}}$ に置き換え、試計算を実施する。

$$K_d(i)_{mod} = K_d(i) / \left\{ 1 + (C_{Kd} - 1) * \frac{\min(S_{Kd_env}, S_p)}{S_{Kd_env}} \right\} \quad (5-12)$$

$$R_{i_{mod}} = R_i * \left\{ 1 + (C_{Kd} - 1) * \frac{\min(S_{Ri_env}, S_p)}{S_{Ri_env}} \right\} \quad (5-13)$$

5.3.3 試計算ケース

表 5-1 と表 5-2 に加えて、表 5-3 のようにパラメータを変化させ試計算を実施した。以下、試計算を実施したケースを Case N / Case N-M (表 5-3 参照) と記す。

- Case 0 は、塩分濃度の分布のみに着目する。懸濁態は無視する。
→ 結果は 5.3.4①にて報告
- Case 1-M (M=1,2) は、分配係数を 0 とし、懸濁態の凝集に関する塩分依存性を検討するケースのみ実施。M=1 は塩分依存性なし、M=2 にて塩分依存性を考慮。
→ 結果は 5.3.4②にて報告
- Case 2-M(M=1,2)は、初期状態で溶存態の放射性セシウムは存在せず、河川から懸濁態に吸着した放射性セシウムが流入するとき、懸濁態に吸着した放射性セシウムの脱離に関する塩分依存性を検討するケースを実施。M=1 は塩分依存性なし、M=2 にて塩分依存性を考慮。
→ 結果は 5.3.4③にて報告
- Case 3-M(M=1,2)は、初期状態で溶存態の放射性セシウムは存在せず、河川から懸濁態に吸着した放射性セシウムが流入するとき、懸濁態の凝集、および懸濁態に吸着した放射性セシウムの脱離に関する塩分依存性を検討するケースを実施。M=1 は塩分依存性なし、M=2 にて塩分依存性を考慮。
→ 結果は 5.3.4④にて報告

表 5-3 解析ケース

ケース	河川流入濃度					懸濁態凝集・分解時定数					粒子径	放射性吸脱着定数	
	懸濁態		放射性懸濁態		溶存態	小→粘	大→粘	大→小	粘→小	小→大		大粒子径 (m)	分配係数 Kd (m ³ /kg)
	シルト (kg/m ³)	粘土 (kg/m ³)	シルト (Bq/m ³)	粘土 (Bq/m ³)		(Bq/m ³)	k _l (1/s)	γ (1/s)	r _l (1/s)	k (1/s)	r (1/s)		
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)	(1/s)	(1/s)	(1/s)	(1/s)	(1/s)	(m)	(m ³ /kg)	(1/s)
凝集懸濁態の塩分依存性													
Case1-1	0.0	0.002	0.0	0.0	500.0	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	6.0E-05	0.0	5.0E-08	0.0	5.0E-08
Case1-2													
放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性													
Case2-1	0.0	0.5	0.0	500.0	0.0	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	6.0E-05	500.0	5.0E-08	III	IV
Case2-2													
凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性													
Case3-1	0.0	0.5	0.0	500.0	0.0	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	6.0E-05	500.0	2.5E-06	III	2.5E-06
Case3-2													

- I : (5-4), (5-5)において、塩分 $S_{env}=10(-)$ で $C_p=100$ 倍
- II : (5-4), (5-5)において、塩分 $S_{env}=34(-)$ で $C_p=100$ 倍
- III : (5-12)において、塩分 $S_{Kd_{env}}=20(-)$ で $1/C_{Kd}=1/50$ 倍
- IV : (5-13)において、塩分 $S_{Ri_{env}}=20(-)$ で $C_{Ri}=50$ 倍
- ※ k_{-l} : 脱着率 (1/s) (凝集懸濁態 : 小粒子 ⇒ 粘土成分)
- ※ k : 吸着率 (1/s) (粘土成分 ⇒ 凝集懸濁態 : 小粒子)
- ※ γ : 分解率 (1/s) (凝集懸濁態 : 大粒子、凝集懸濁態 : 小粒子 ⇒ 粘土成分)
- ※ r : 凝集率 (1/s) (凝集懸濁態 : 小粒子 ⇒ 凝集懸濁態 : 大粒子)
- ※ r_{-l} : 崩壊率 (1/s) (凝集懸濁態 : 大粒子 ⇒ 凝集懸濁態 : 小粒子)
- ※ $K_d(i)$: タイプ i の粒子態に対する分配係数 (m³/kg)
- ※ R_i : タイプ i の粒子態に対する吸脱着の時定数 (1/秒)

5.3.4 シミュレーション結果検証

① Case0 塩水楔の再現

本節の結果では、20周期目の4潮時（満潮時、下げ潮時、干潮時、上げ潮時）における表層の流速・塩分及び河口域における流速・塩分の鉛直断面図を示す。塩水楔(4章参照)が形成され、満潮時から下げ潮時に塩水が河川に浸出している様子が分かる（下げ潮時が最も海水が浸出：海側の潮位変動に際し河川側の水位に遅延効果が生じるためである[5-1]）。尚、満潮時±1時間の図は付録4参照。

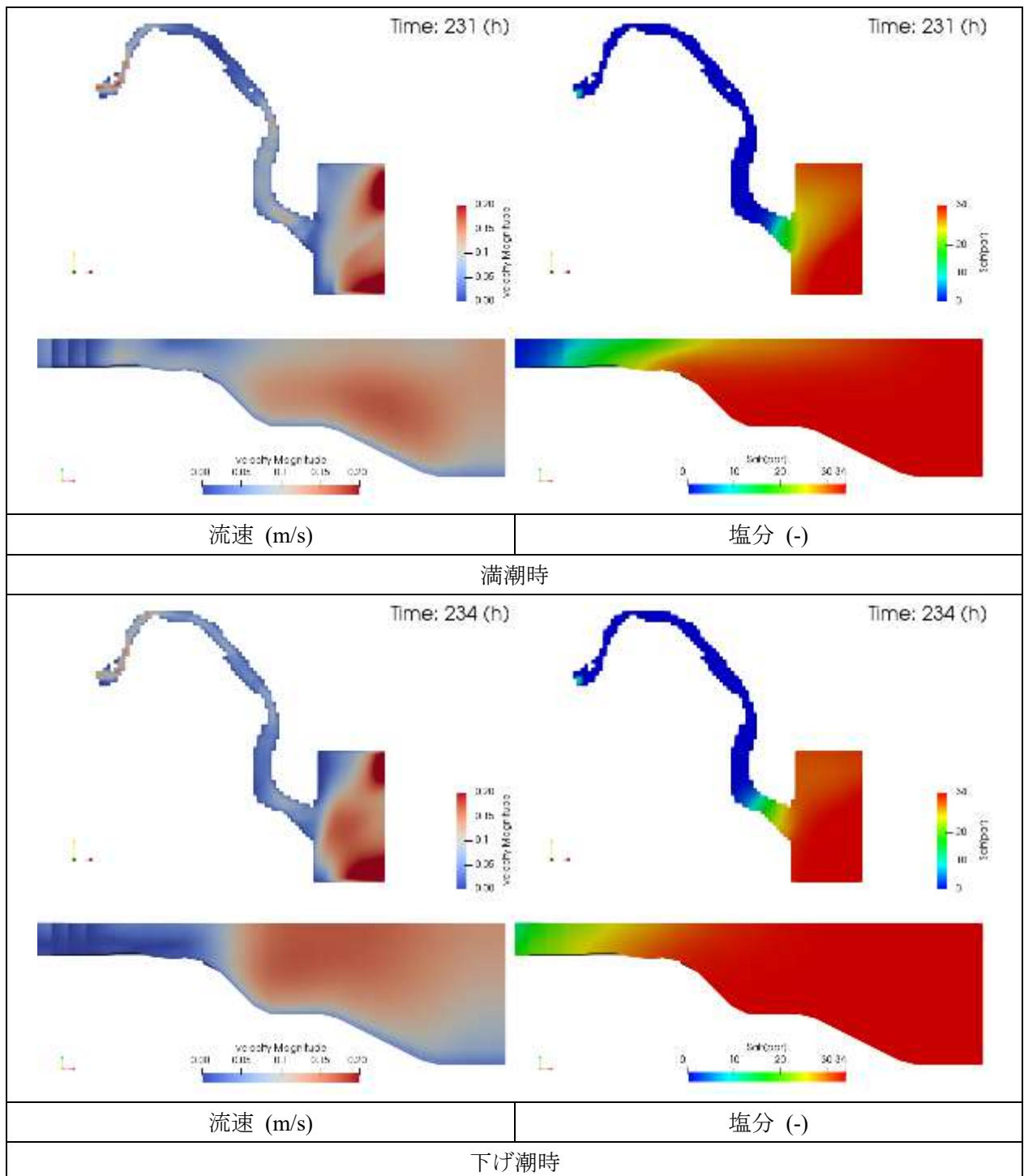


図 5-7 検証結果 Case0 塩水楔の再現（満潮時、下げ潮時）

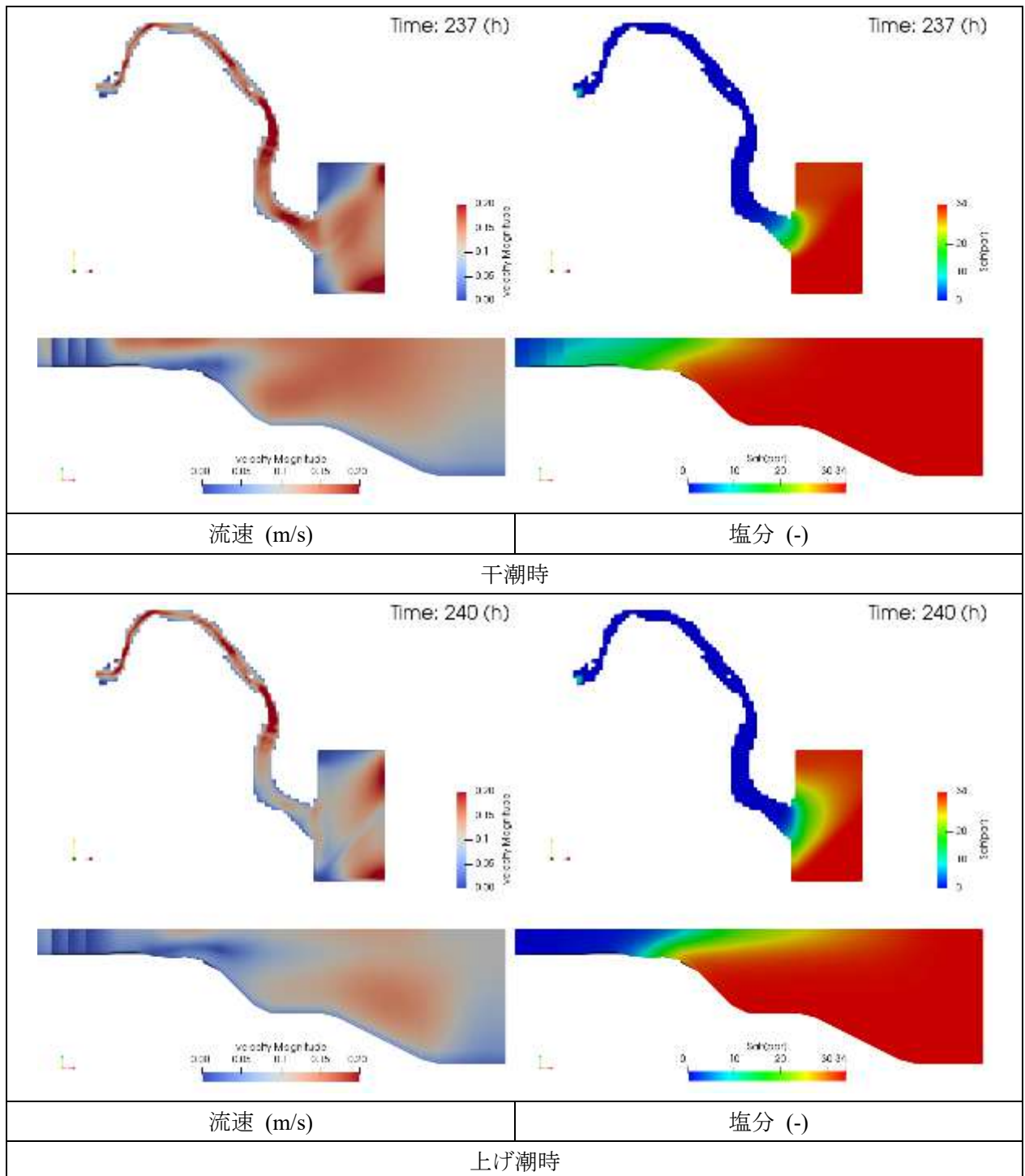


図 5-8 検証結果 Case0 塩水楔の再現 (干潮時、上げ潮時)

② Case1 凝集懸濁態の塩分依存性

次に、Case1-1、Case1-2 に対し、20 周期目の 4 潮時（満潮時、下げ潮時、干潮時、上げ潮時）の河口域の流下方向で切断した断面における以下の量の試算結果を示す（尚、満潮時±1 時間の結果は、付録 5.6 参照）。

【粘土分布（水中）】

【凝集懸濁態：小粒子分布（水中）】

【凝集懸濁態：大粒子分布（水中）】

また、最終時刻の河口域における以下の土砂堆積厚さ水平分布を示す。

【粘土堆積厚さ】

【凝集懸濁態：小粒子堆積厚さ】

【凝集懸濁態：大粒子堆積厚さ】

尚、本試算では、放射性セシウムは考慮せず、懸濁態の凝集に関する塩分依存性のみを検討の対象とした。以下、各々の項目の試算結果の概略を記す。

【粘土分布（水中）】

河口域において、Case1-1 のほうが Case1-2 よりも粘土粒子濃度が高い。(5-4),(5-5)より、塩分濃度が高いほど粘土粒子は凝集しやすくなるため、Case1-2 のほうが粘土粒子濃度は下がることが分かる。従って、凝集懸濁態の塩分依存性を定性的に再現できていることが分かる。

→ 図 5-9～図 5-12 参照

【凝集懸濁態：小粒子分布（水中）】

Case1-2 のほうが Case1-1 よりも凝集懸濁態小粒子の濃度が高くなっており、Case1-2 のほうが凝集しやすくなっていることがわかる。従って、懸濁態の凝集の塩分依存性を定性的に再現できていることが分かる。

→ 図 5-13～図 5-16 参照

【凝集懸濁態：大粒子分布（水中）】

凝集懸濁態大粒子分布も凝集懸濁態小粒子分布と同様の傾向となっており、懸濁態の凝集の塩分依存性を定性的に再現できていることが分かる。

→ 図 5-17～図 5-20 参照

【粘土堆積厚さ】

河口域における粘土堆積厚さは、Case1-1 > Case1-2 となっており、凝集しやすい Case1-2 のほうが、河口域における粘土堆積厚さは薄くなっていることが分かる。

→ 図 5-21 参照

【凝集懸濁態：小粒子堆積厚さ】

塩分により凝集しやすくなるケース Case1-2 のほうが、Case1-1 より上流から堆積している様子が分かる。

→ 図 5-22 参照

【凝集懸濁態：大粒子堆積厚さ】

塩分により凝集しやすくなるケース Case1-2 のほうが、Case1-1 より河口域でより堆積している様子がわかる。

→ 図 5-23 参照

以上の試計算結果より、上記に設定したモデリングを用いることで、懸濁態の凝集に係る塩分依存性を定性的に再現できることが分かった。

②-1 粘土分布（水中）

満潮時

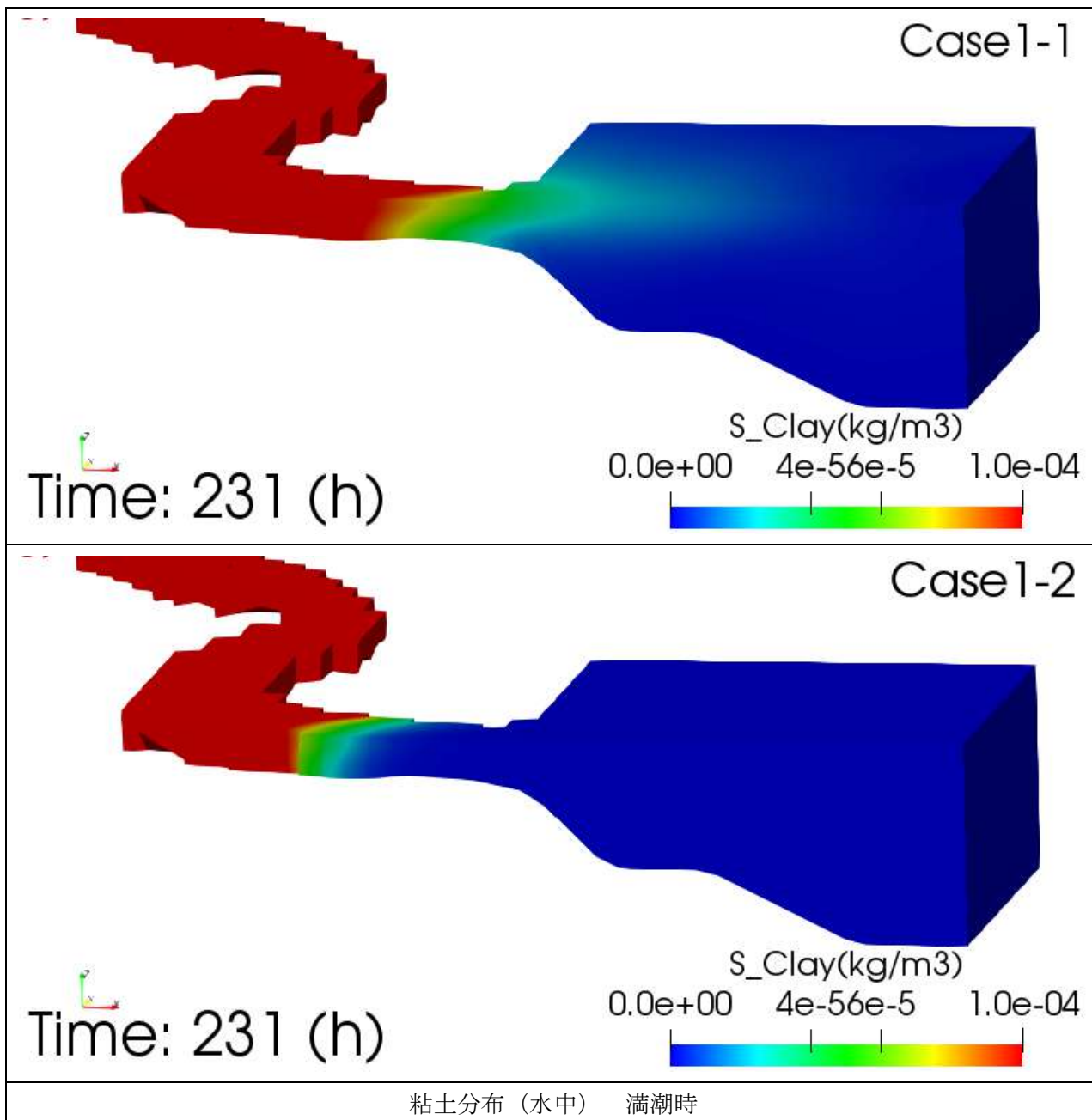
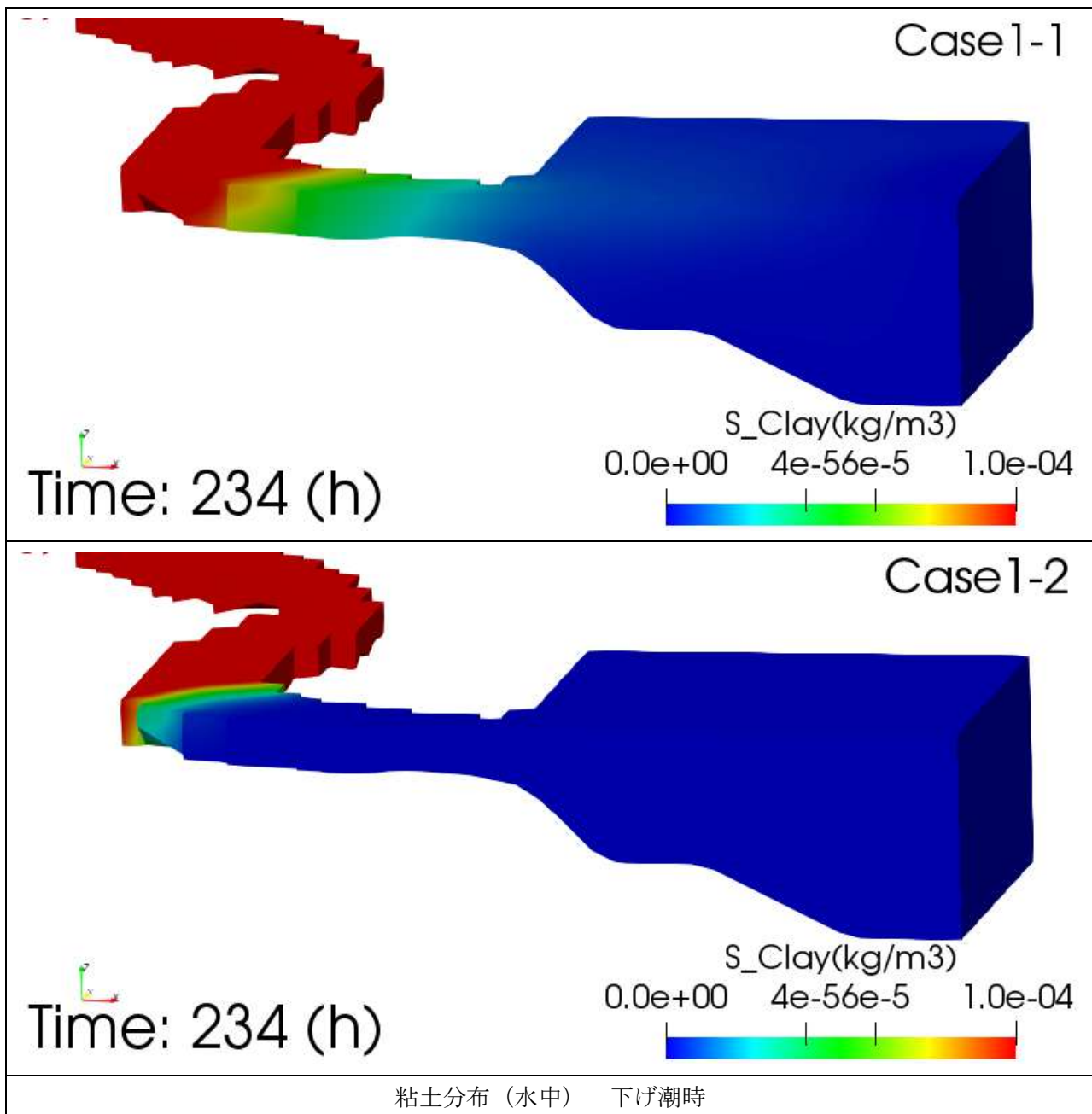


図 5-9 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：満潮時
(粘土：水中分布)

下げ潮時



粘土分布 (水中) 下げ潮時

図 5-10 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：下げ潮時
(粘土：水中分布)

干潮時

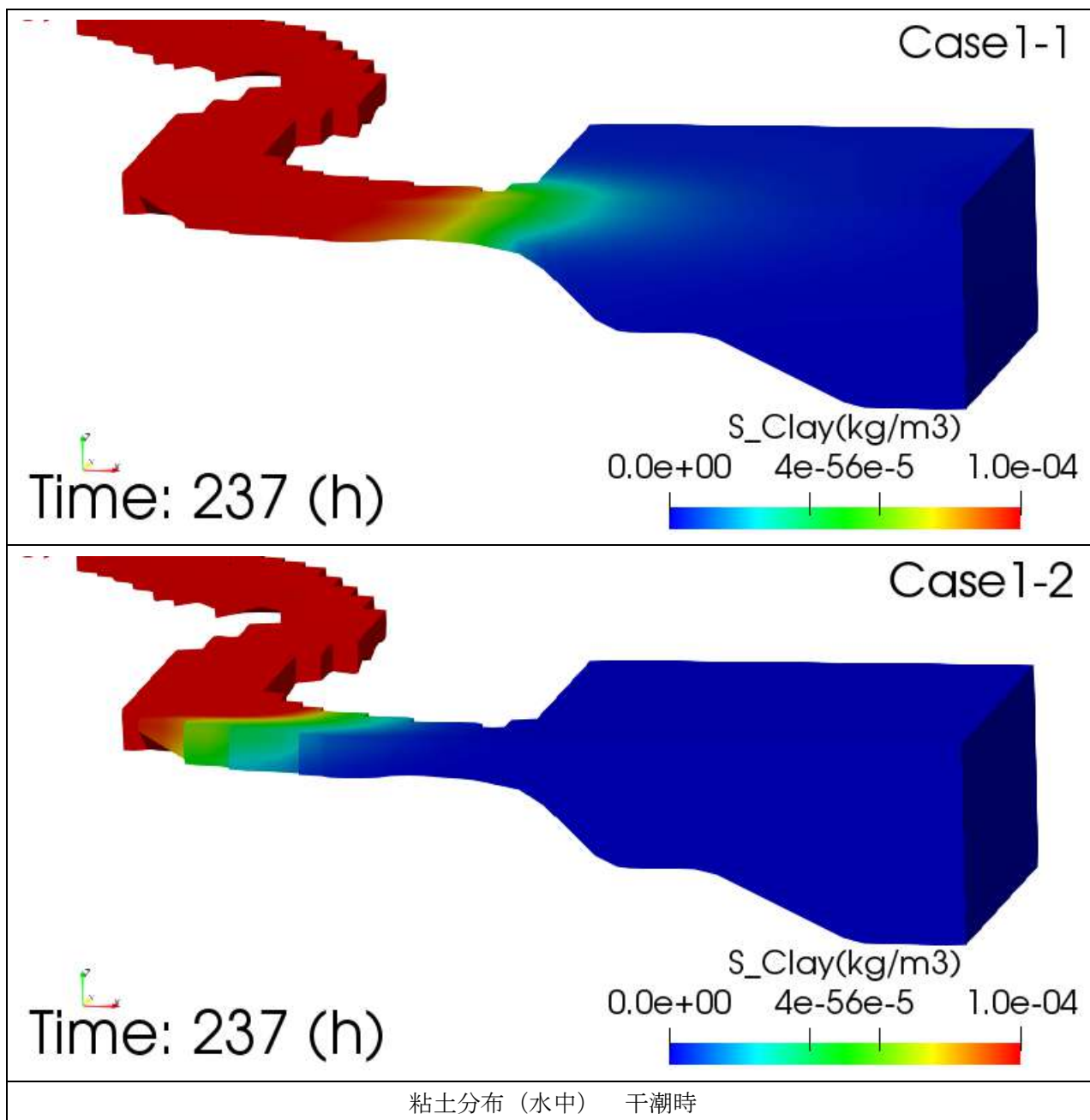


図 5-11 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：干潮時
(粘土：水中分布)

上げ潮時

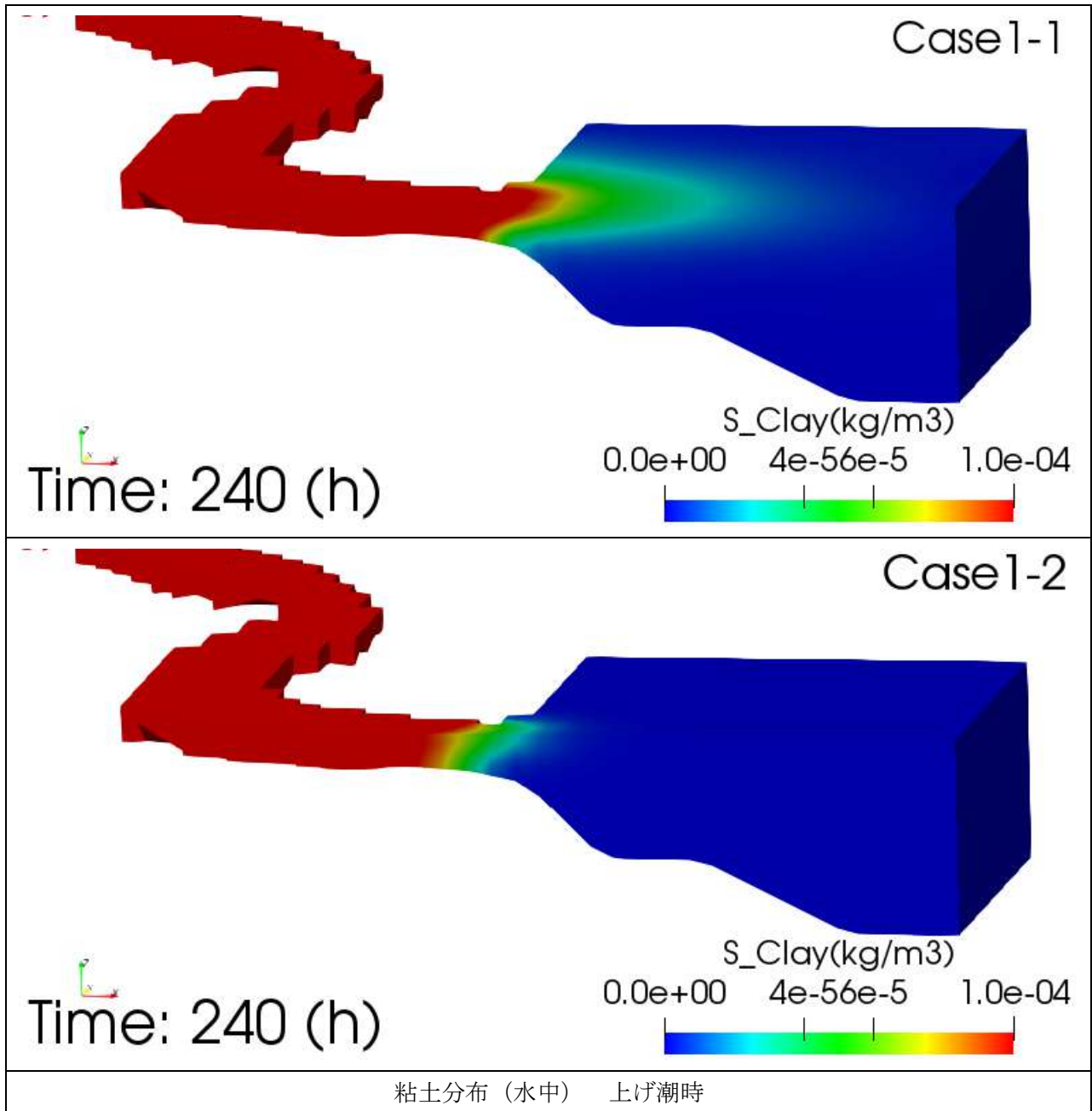


図 5-12 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：上げ潮時
(粘土：水中分布)

②-2 凝集懸濁態：小粒子 分布（水中）

満潮時

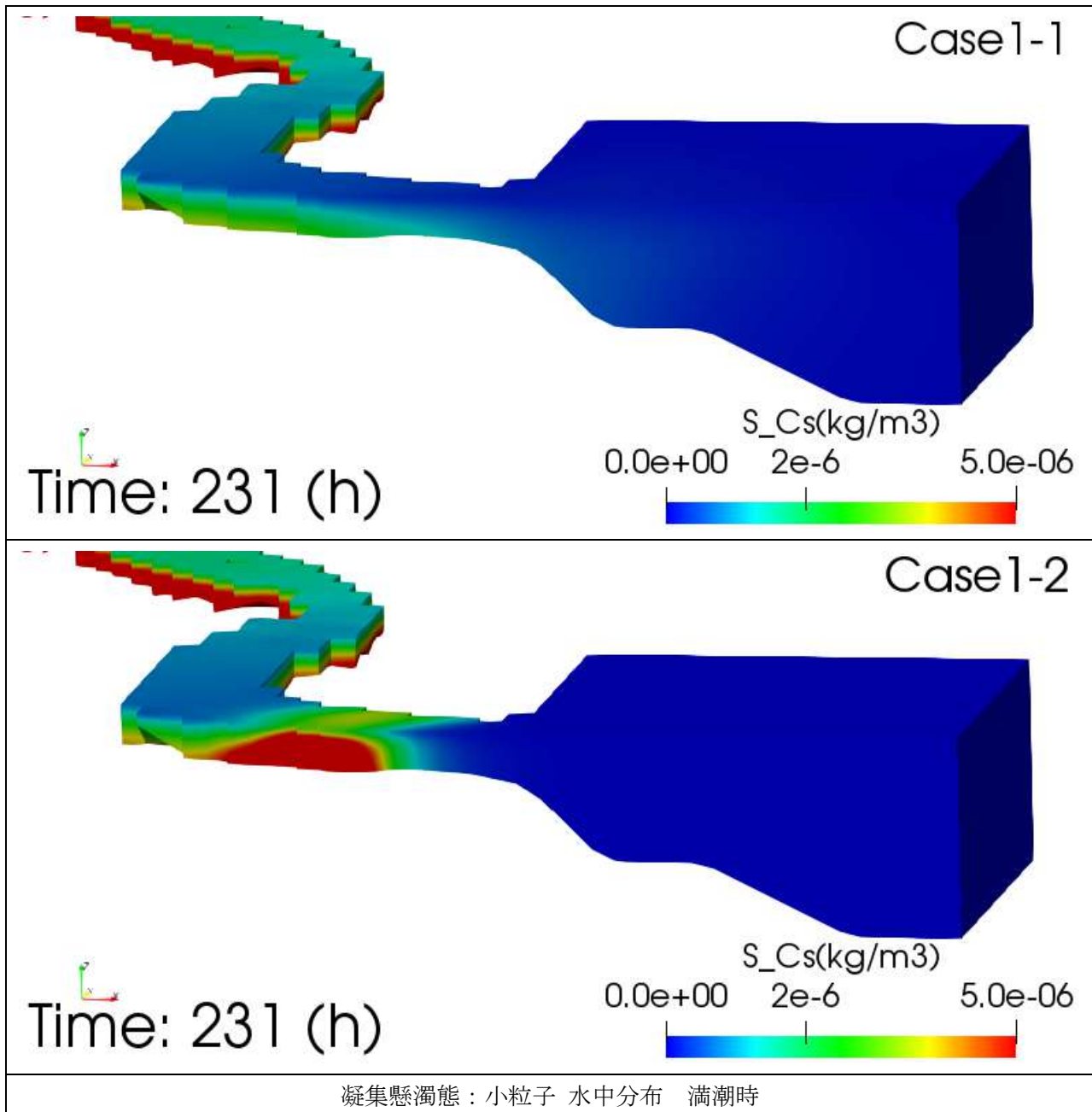


図 5-13 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：満潮時
(凝集懸濁態：小粒子・水中分布)

下げ潮時

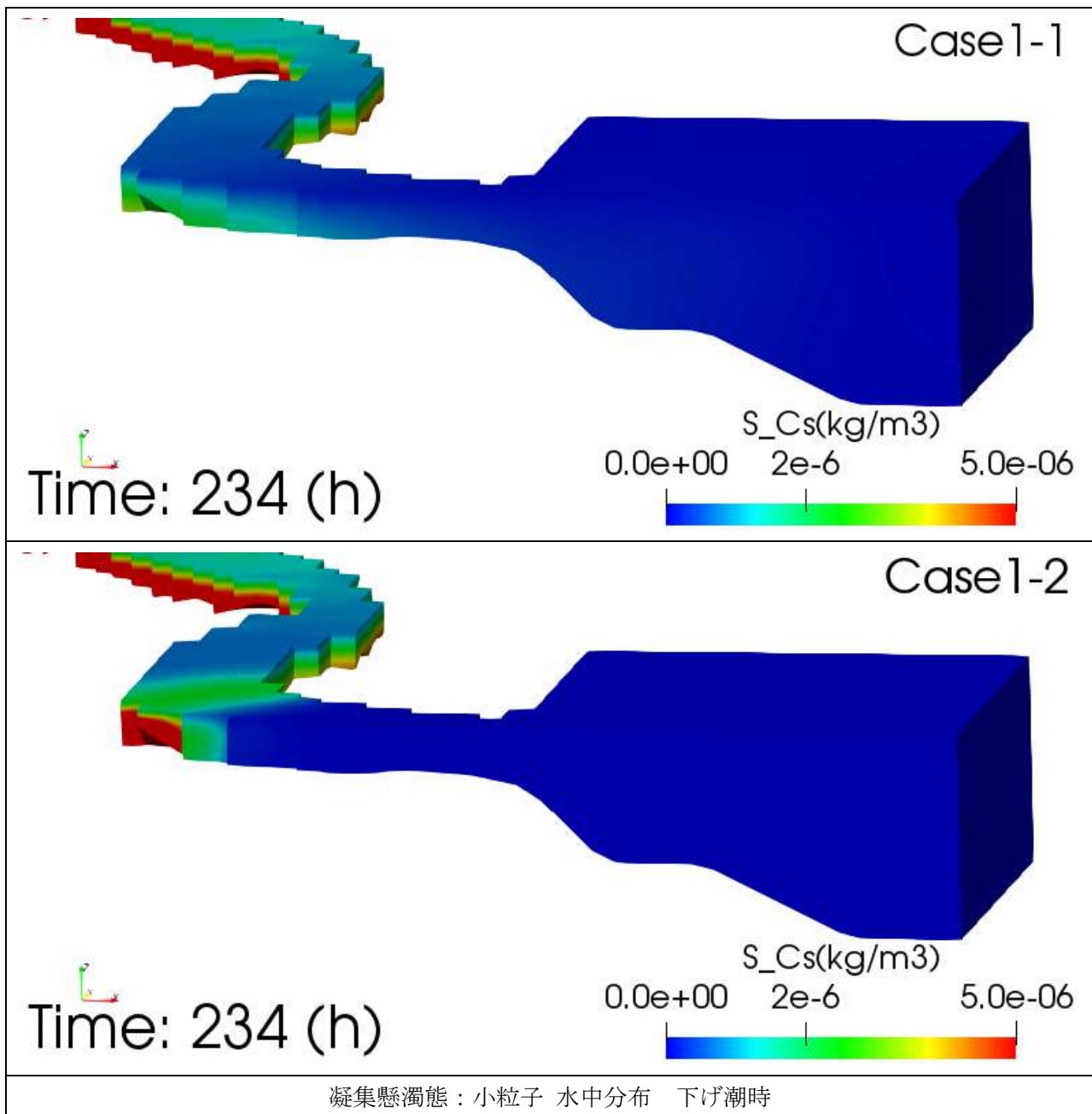


図 5-14 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：下げ潮時
(凝集懸濁態：小粒子・水中分布)

干潮時

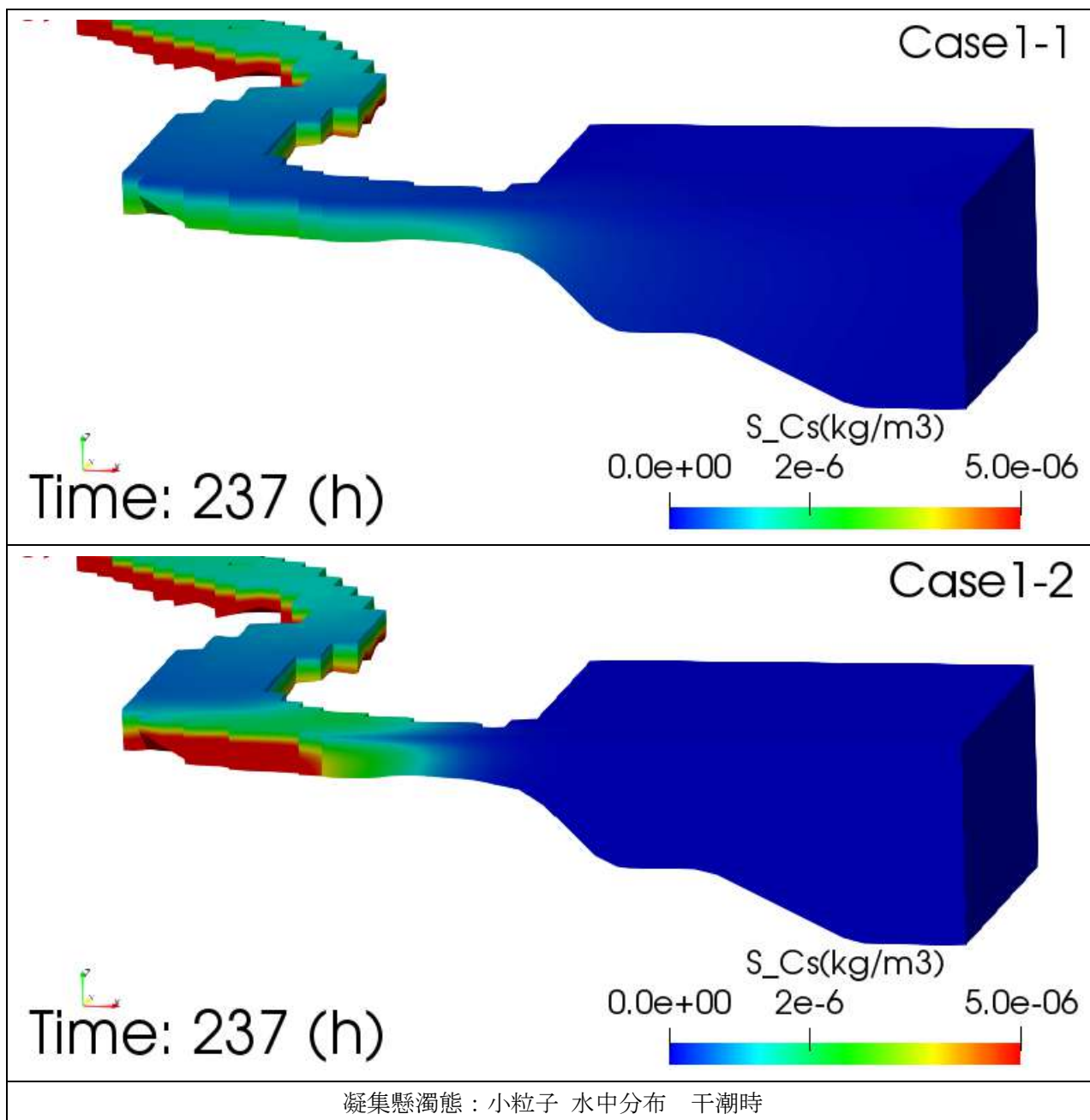


図 5-15 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：干潮時
(凝集懸濁態：小粒子・水中分布)

上げ潮時

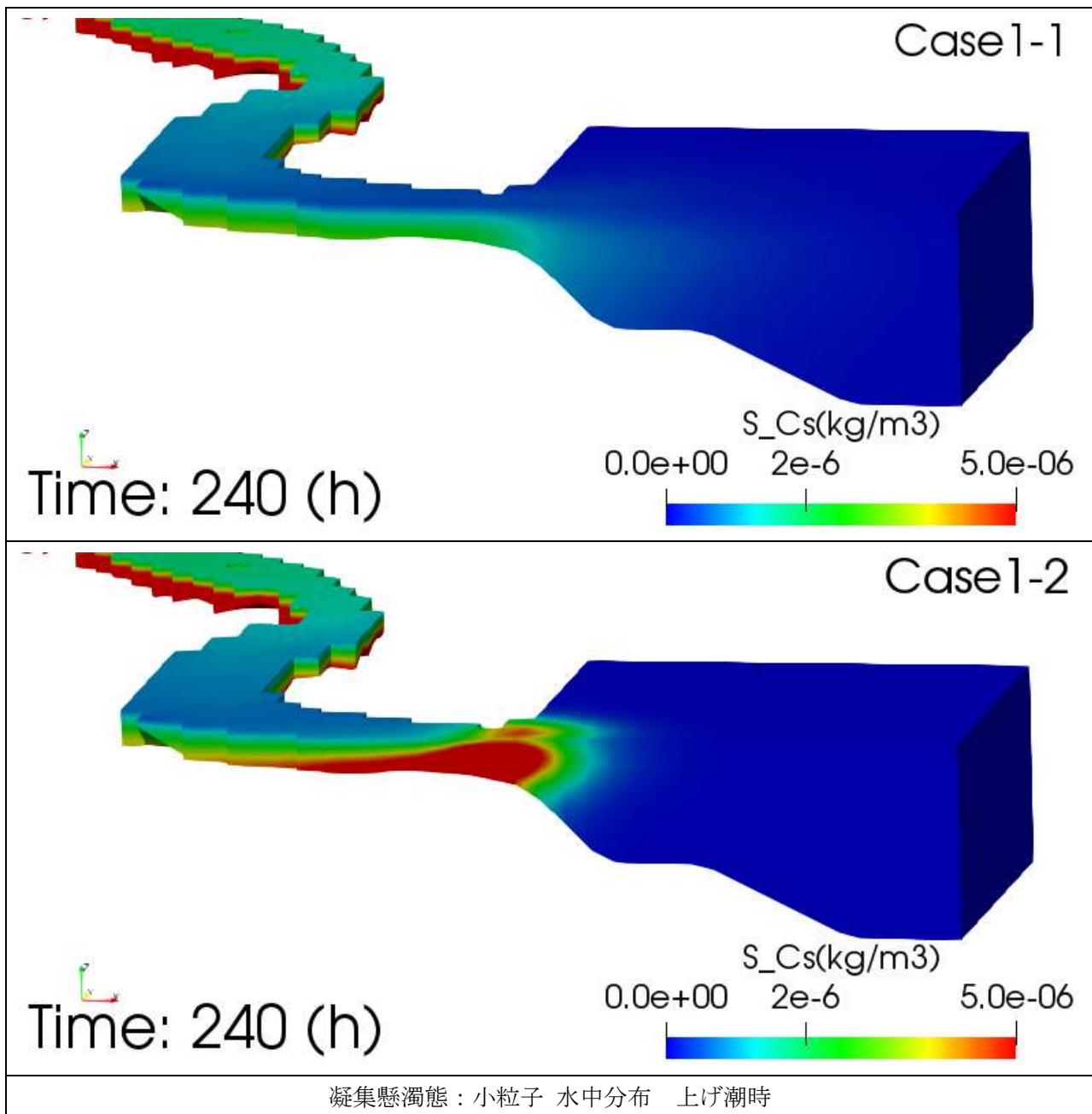


図 5-16 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：上げ潮時
(凝集懸濁態：小粒子・水中分布)

②-3 凝集懸濁態：大粒子 分布（水中）

満潮時

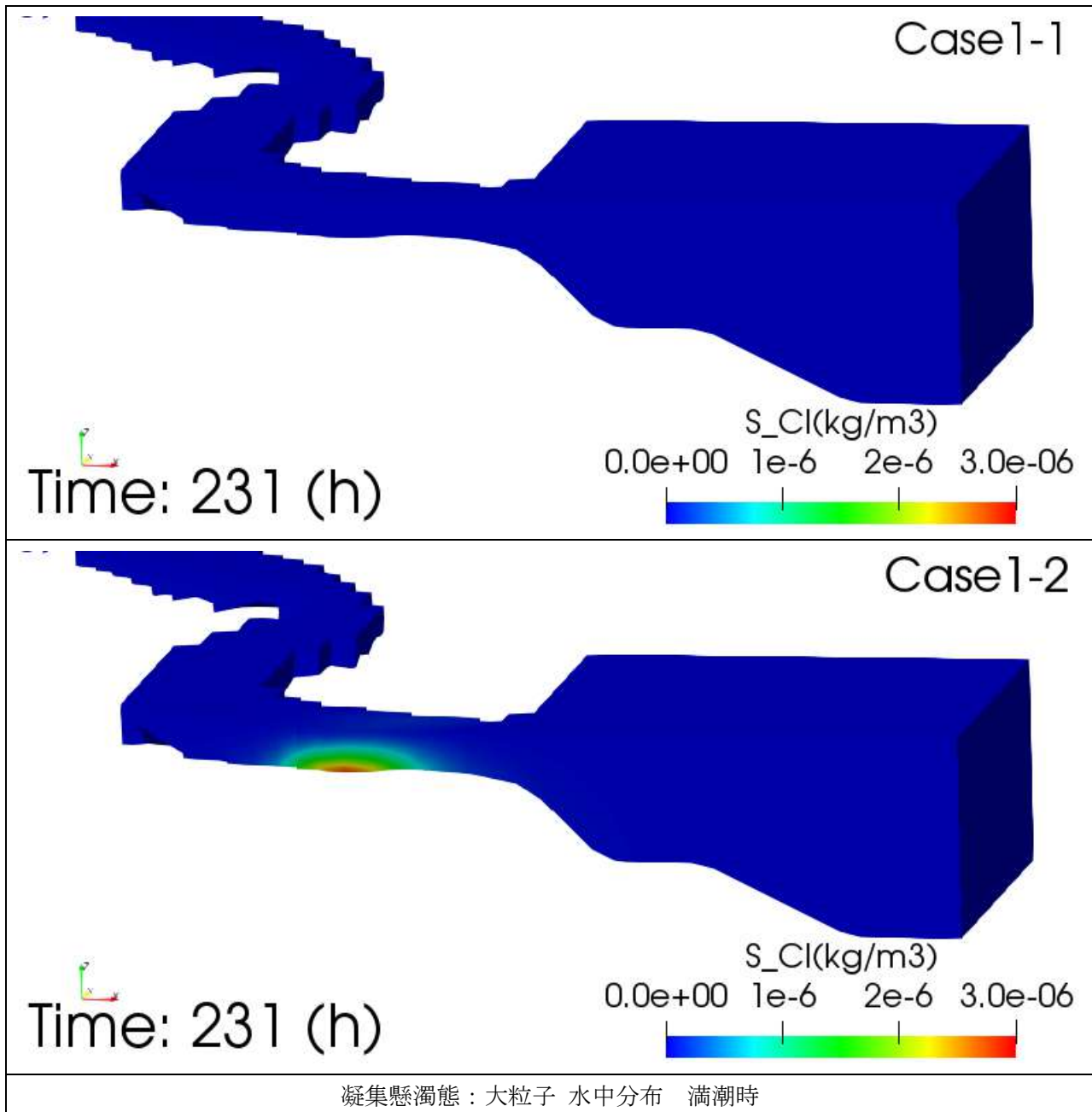
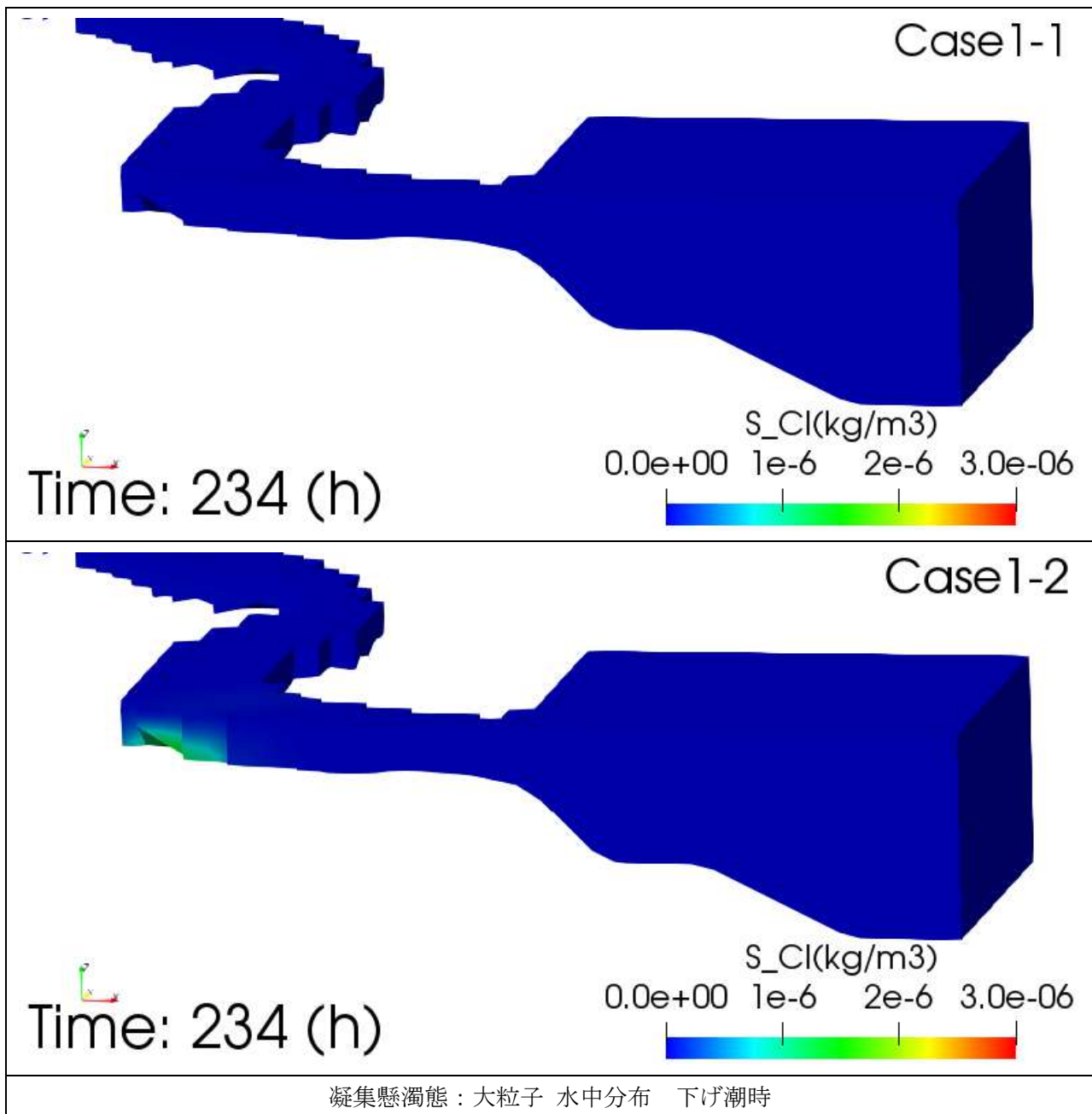


図 5-17 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：満潮時
(凝集懸濁態：大粒子・水中分布)

下げ潮時



凝集懸濁態：大粒子 水中分布 下げ潮時

図 5-18 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：下げ潮時

(凝集懸濁態：大粒子・水中分布)

干潮時

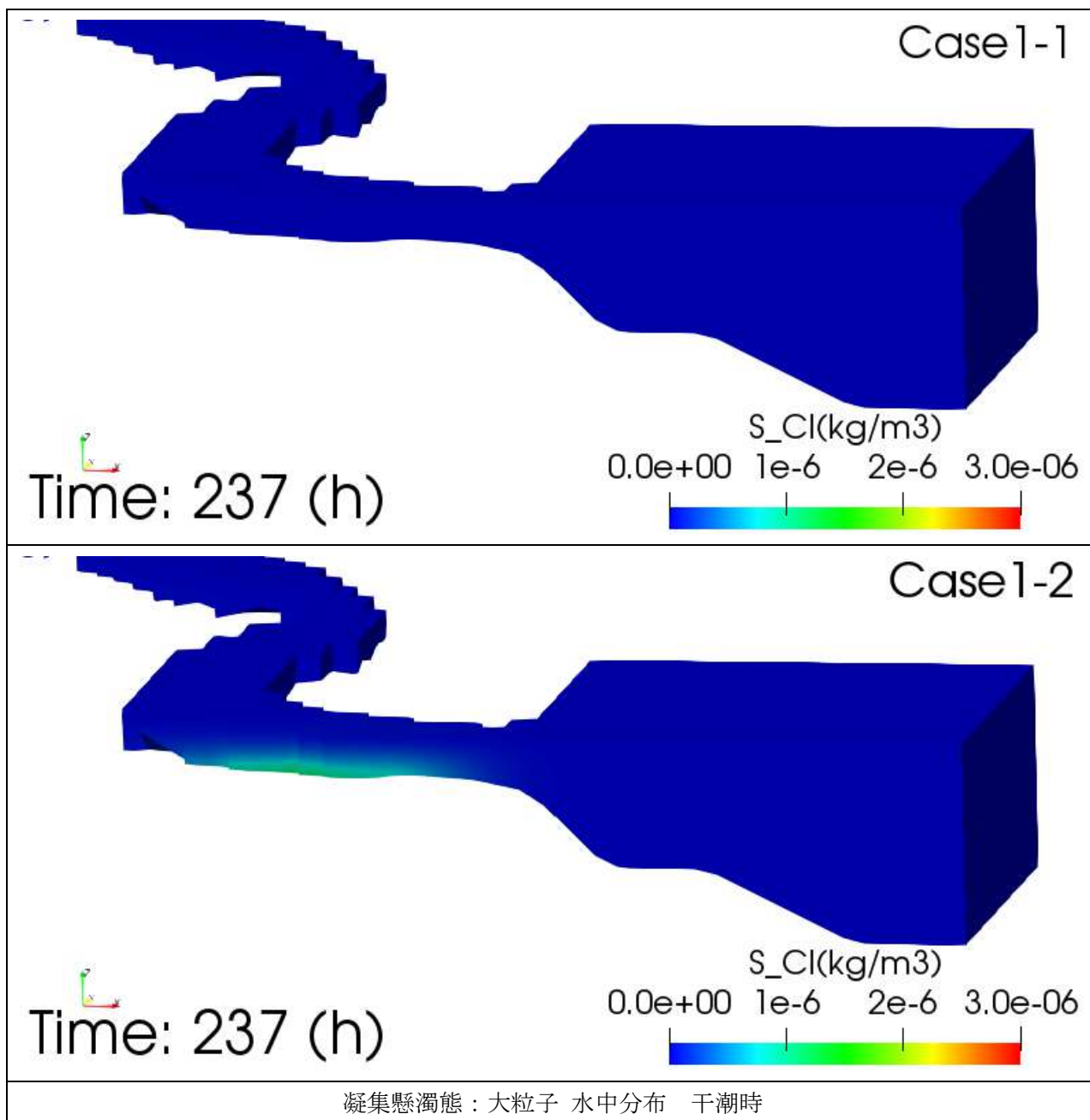
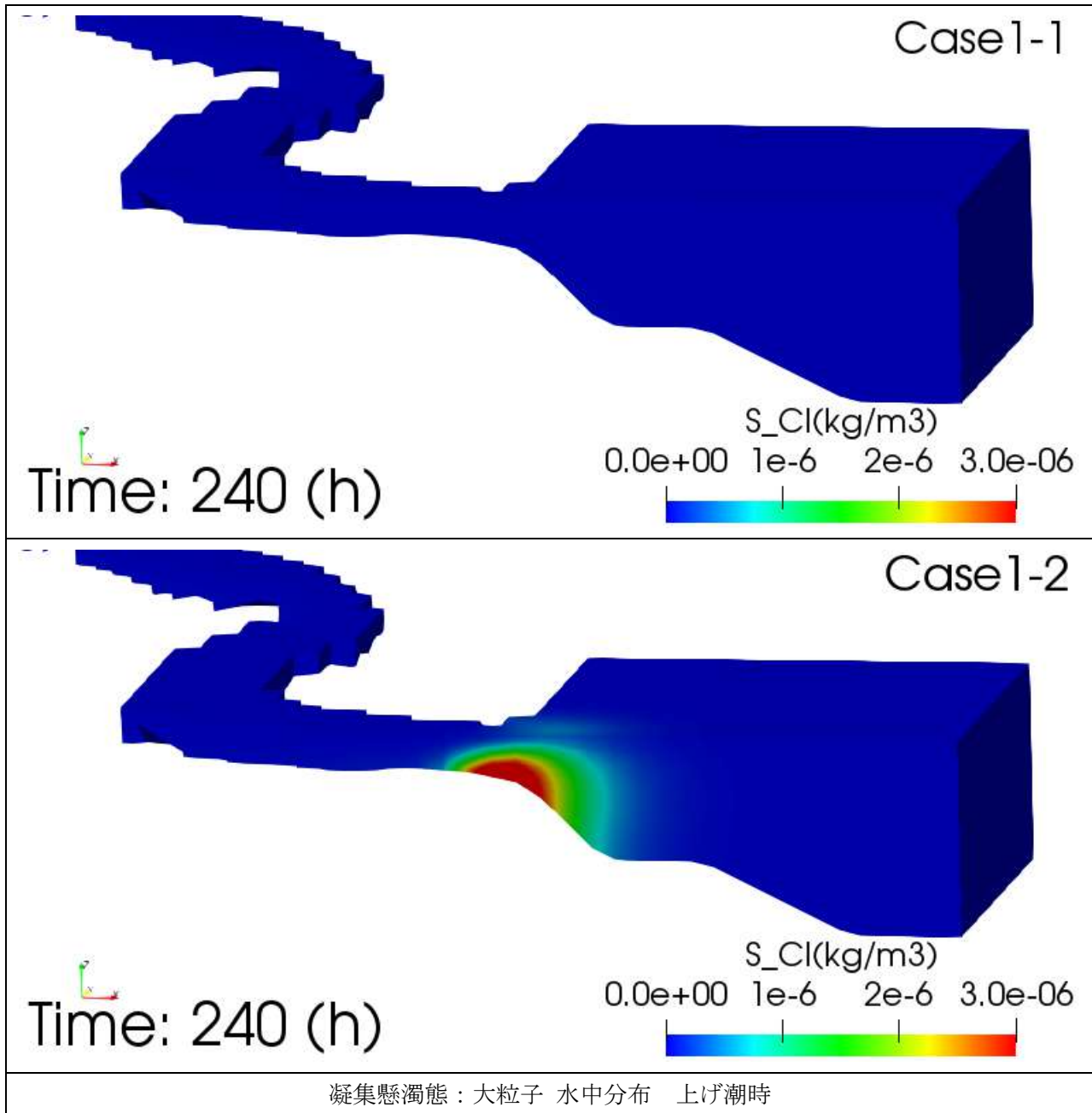


図 5-19 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：干潮時
(凝集懸濁態：大粒子・水中分布)

上げ潮時



凝集懸濁態：大粒子 水中分布 上げ潮時

図 5-20 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性：上げ潮時

(凝集懸濁態：大粒子・水中分布)

②-4 粘土堆積厚さ分布

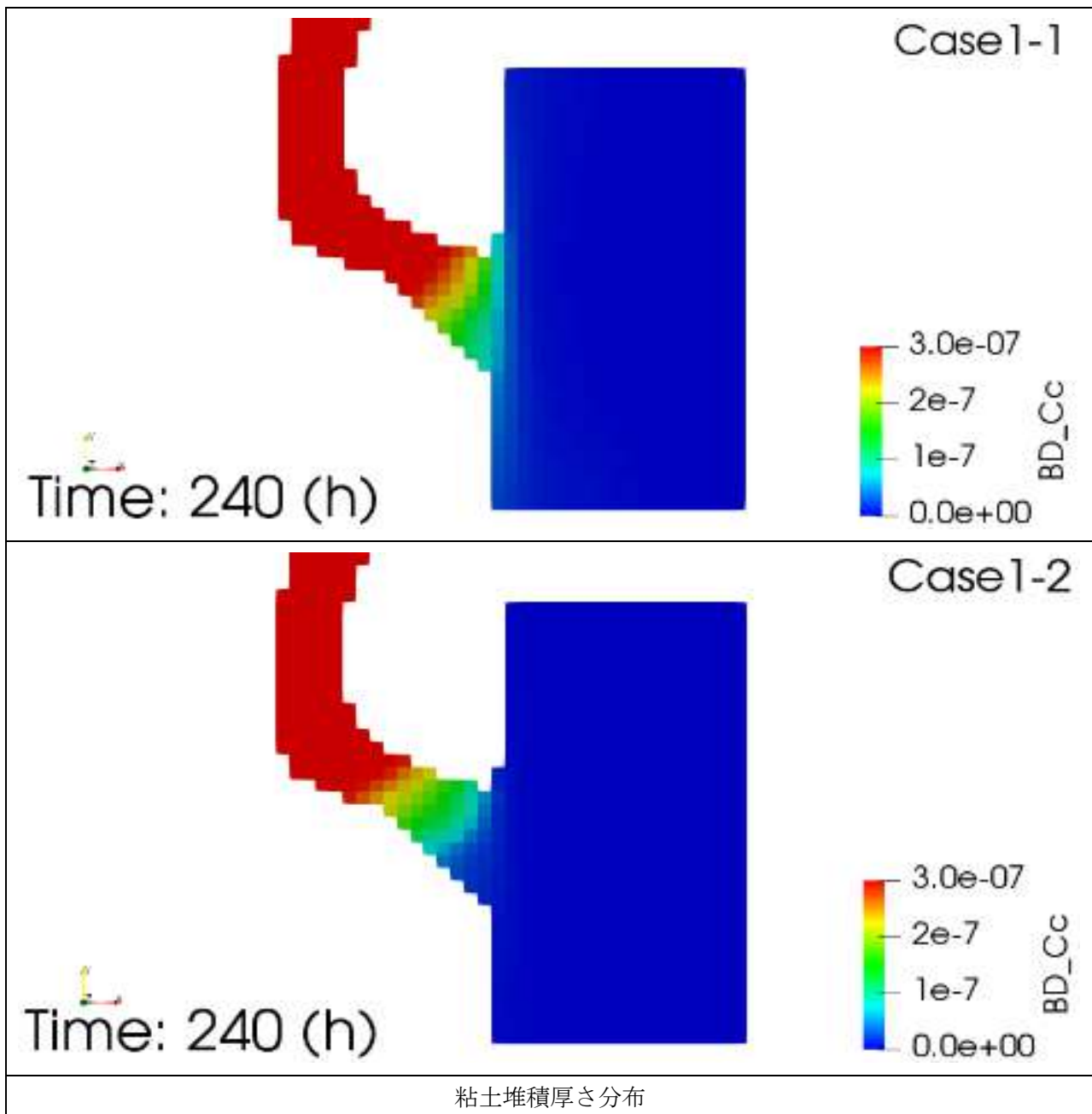


図 5-21 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (粘土堆積厚さ分布)

②-5 凝集懸濁態：小粒子 堆積厚さ分布

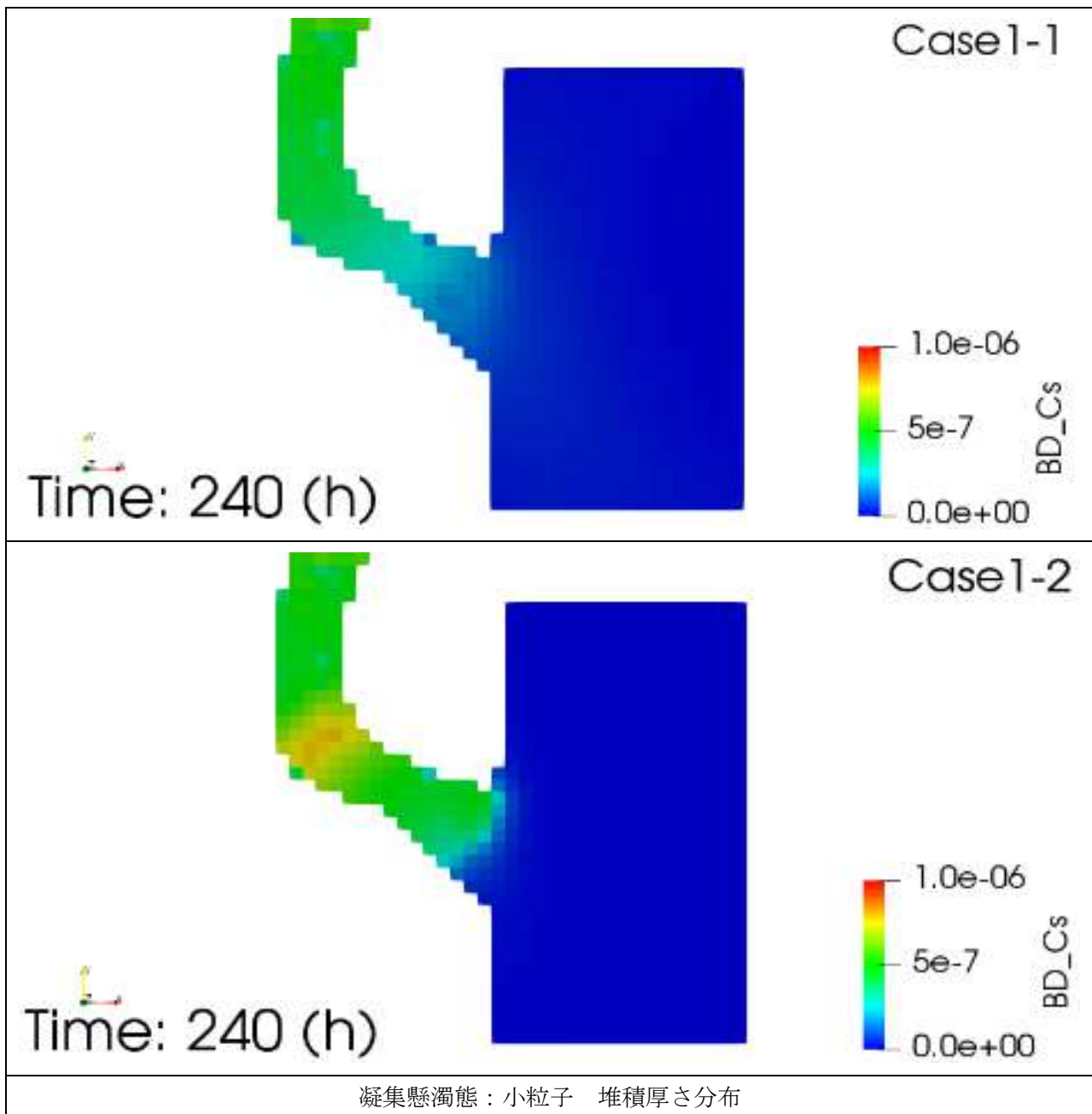


図 5-22 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (凝集懸濁態：小粒子 堆積厚さ分布)

②-6 凝集懸濁態：大粒子 堆積厚さ分布

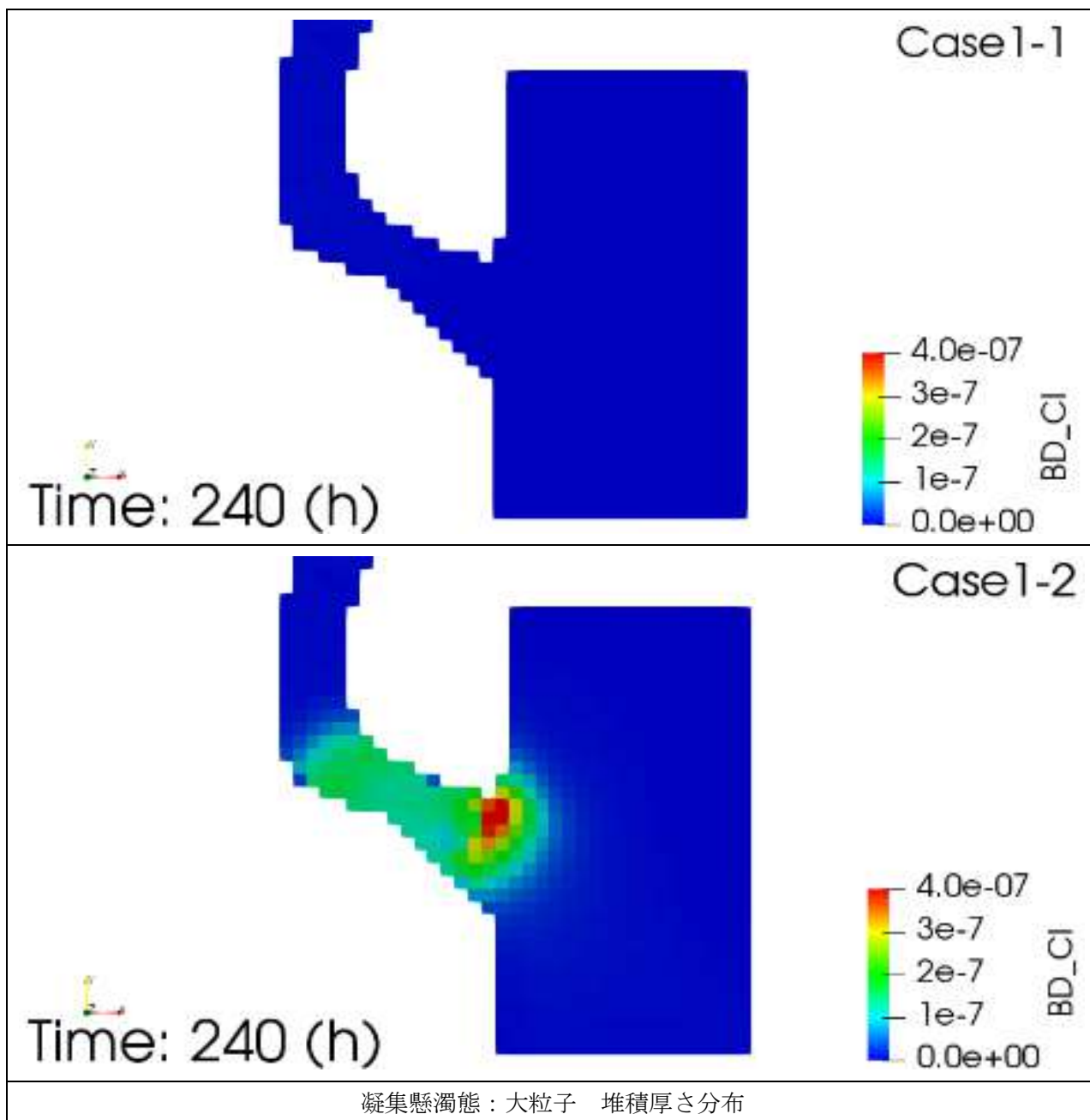


図 5-23 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (凝集懸濁態：大粒子 堆積厚さ分布)

③ Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性

本ケースでは、初期状態で溶存態の放射性セシウムは存在せず、河川から懸濁態に吸着した放射性セシウムのみ流入するとし、懸濁態に吸着した放射性セシウムの脱離に関する塩分依存性を検討するケースを実施する。

Case2-1 では、分配係数および吸脱着に関する時定数について塩分依存性を考慮せず、Case2-2 では、分配係数および吸脱着に関する時定数について塩分依存性を考慮し、河口域において懸濁態に吸着した放射性セシウムが脱離し、河口の水に溶存する様子を検証した。以降、Case2-1、Case2-2 について、20 周期目の 4 潮時（満潮時、下げ潮時、干潮時、上げ潮時）の河口域における流下方向で切断した断面における以下の量の試算結果を示す（尚、満潮時±1 時間の結果は、付録 5.6 参照）。

【粘土に吸着した放射性セシウムの水中濃度分布】

【溶存態放射性セシウムの水中濃度分布】

以下、各々の試算結果の概略を記す。

【粘土に吸着した放射性セシウム濃度の鉛直分布】

Case2-1 と Case2-2 を比較すると、河口域における濃度分布は、Case2-2 のほうが Case2-1 よりもやや上流で留まっている。（例えば、231h：満潮時の $0\sim 20\text{Bq/m}^3$ の青から緑色の範囲）。分配係数及び吸脱着に関する時定数について塩分依存性を考慮したことで、懸濁態に吸着している放射性セシウムが海水へ溶存しやすくなったことが分かる。

→ 図 5-24～図 5-27 参照

【溶存態放射性セシウム濃度の鉛直分布】

Case2-1 と Case2-2 を比較すると、いずれの時刻でも Case2-2 のほうが、溶存態放射性セシウムの分布範囲が広い。分配係数及び吸脱着に関する時定数について塩分依存性を考慮したことで、海水へ溶存しやすくなったことが分かる。

→ 図 5-28～図 5-31 参照

以上より、上記に設定したモデリングにより、放射性物質の懸濁態からの溶脱に係る塩分依存性を定性的に再現できることが分かった。

③-1 粘土に吸着した放射性セシウム濃度分布 (水中)

満潮時

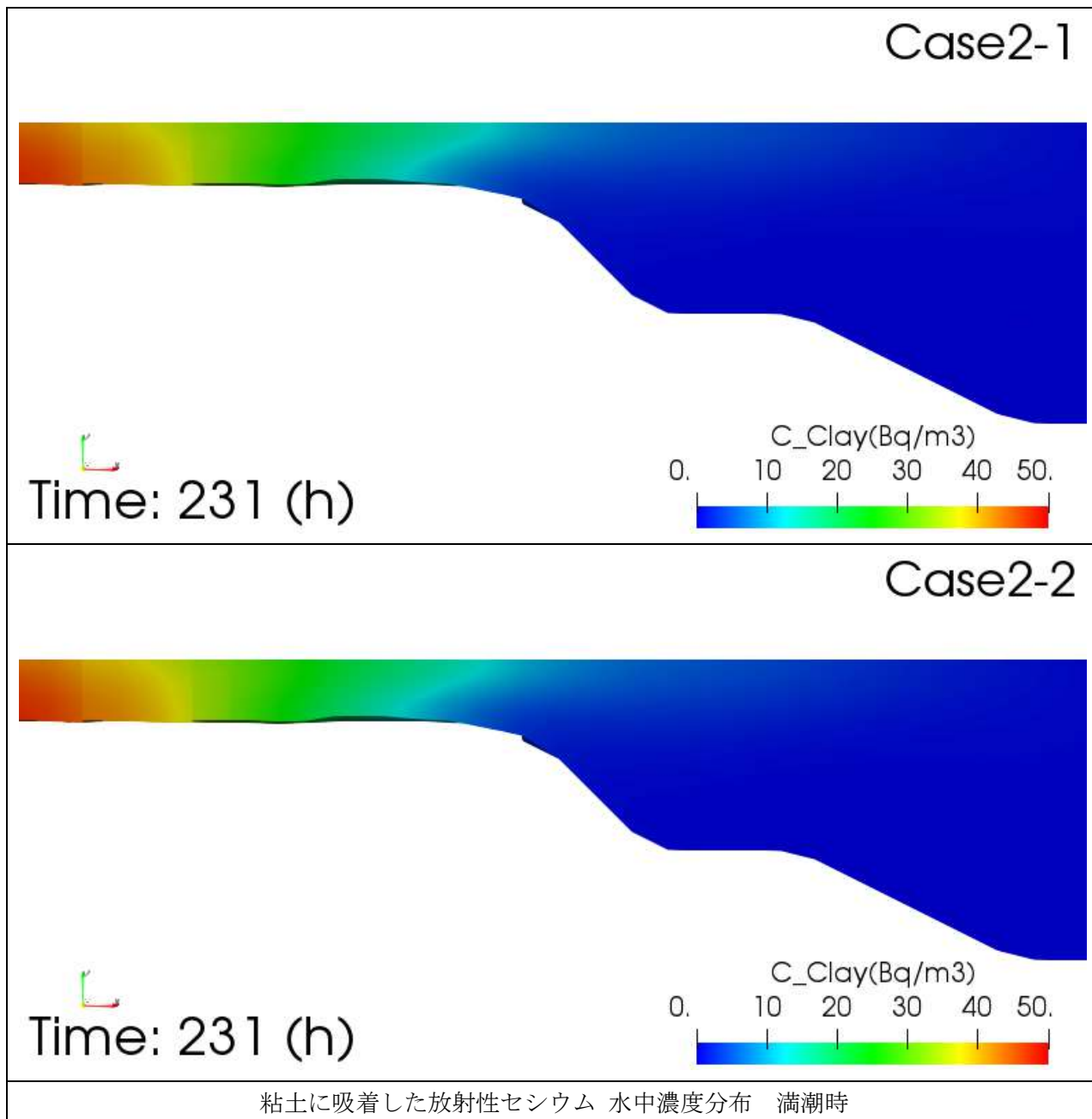


図 5-24 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (満潮時)
(粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

下げ潮時

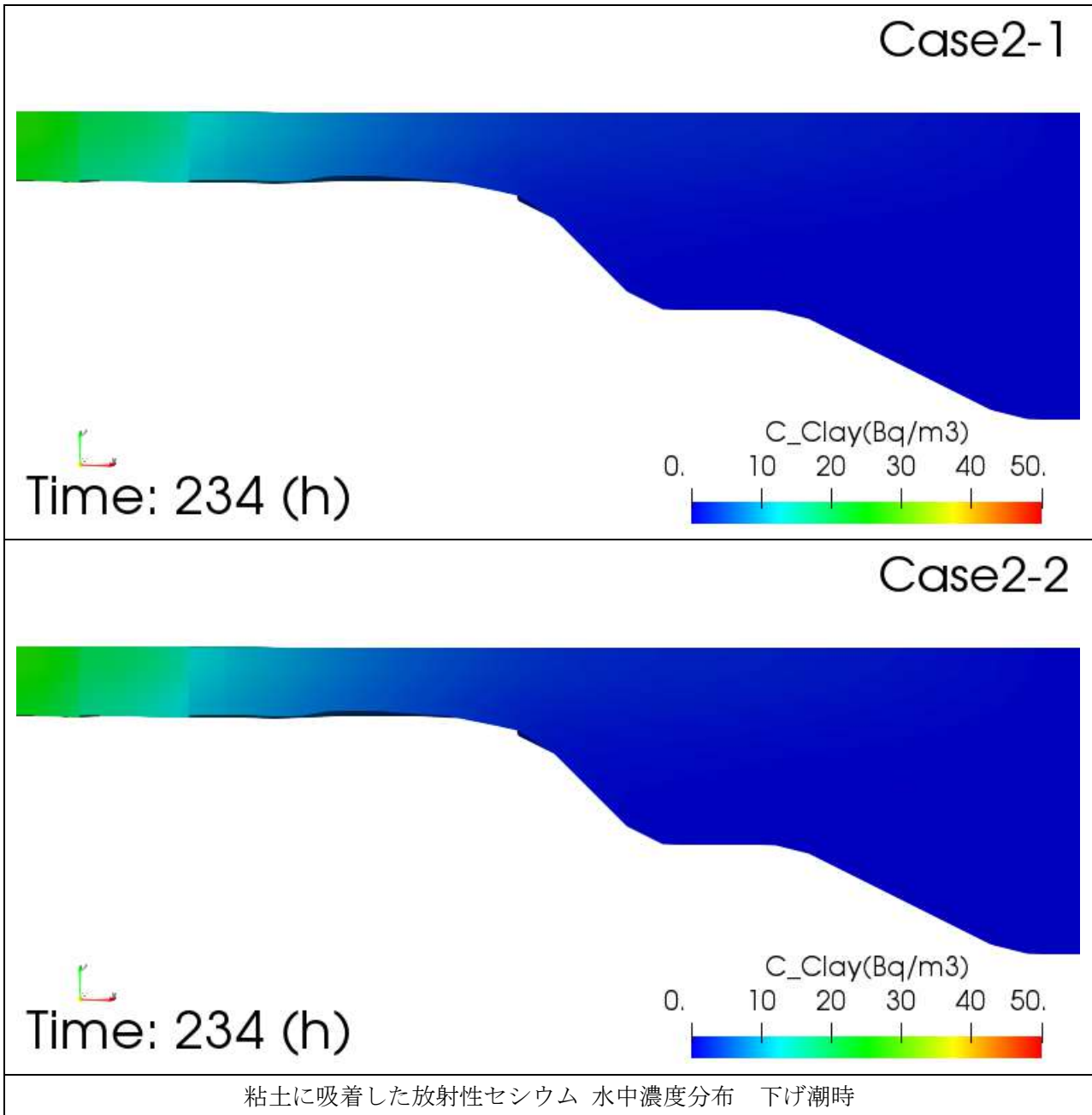


図 5-25 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（下げ潮時）
（粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

干潮時

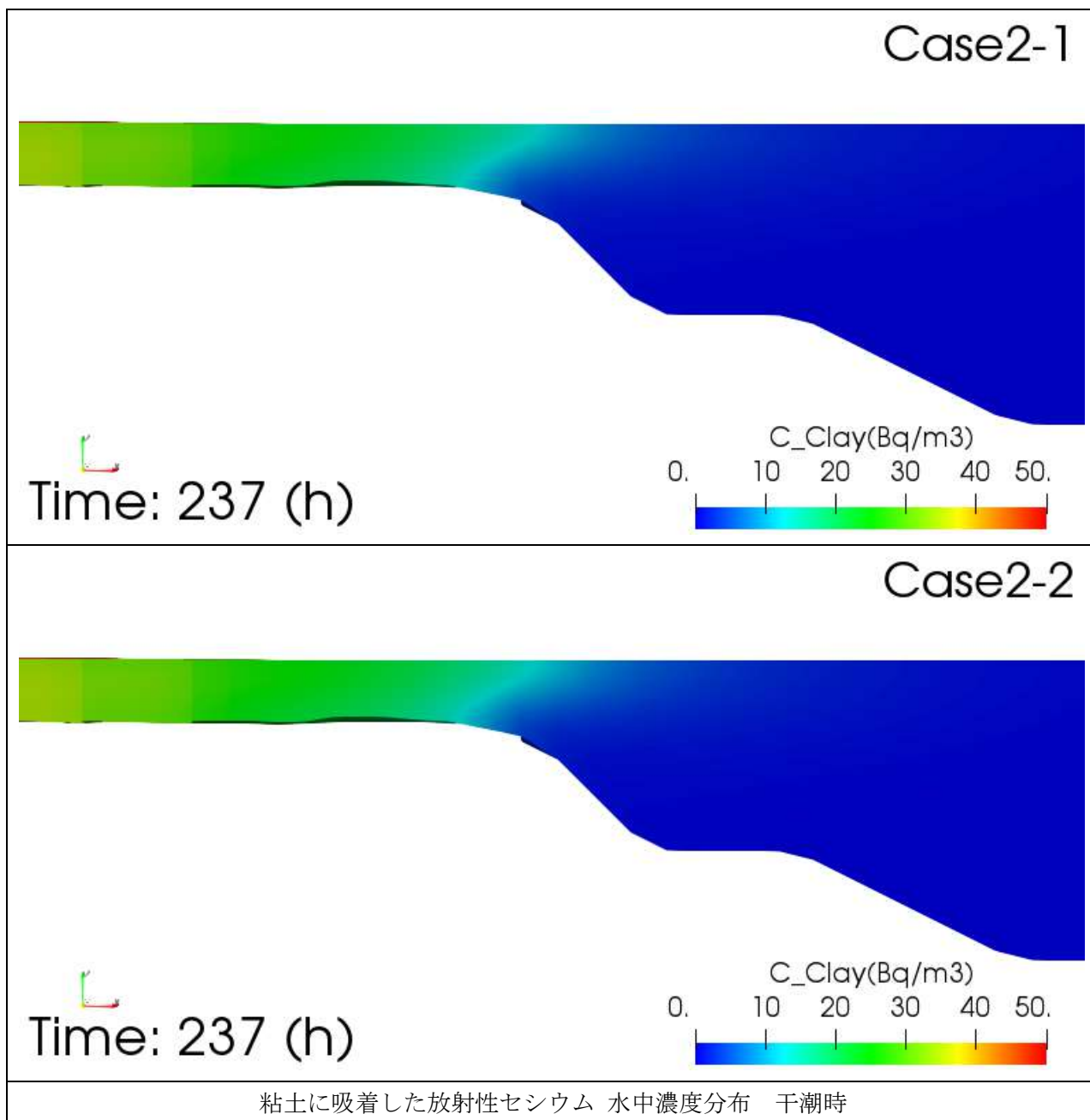


図 5-26 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (干潮時)
(粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

上げ潮時

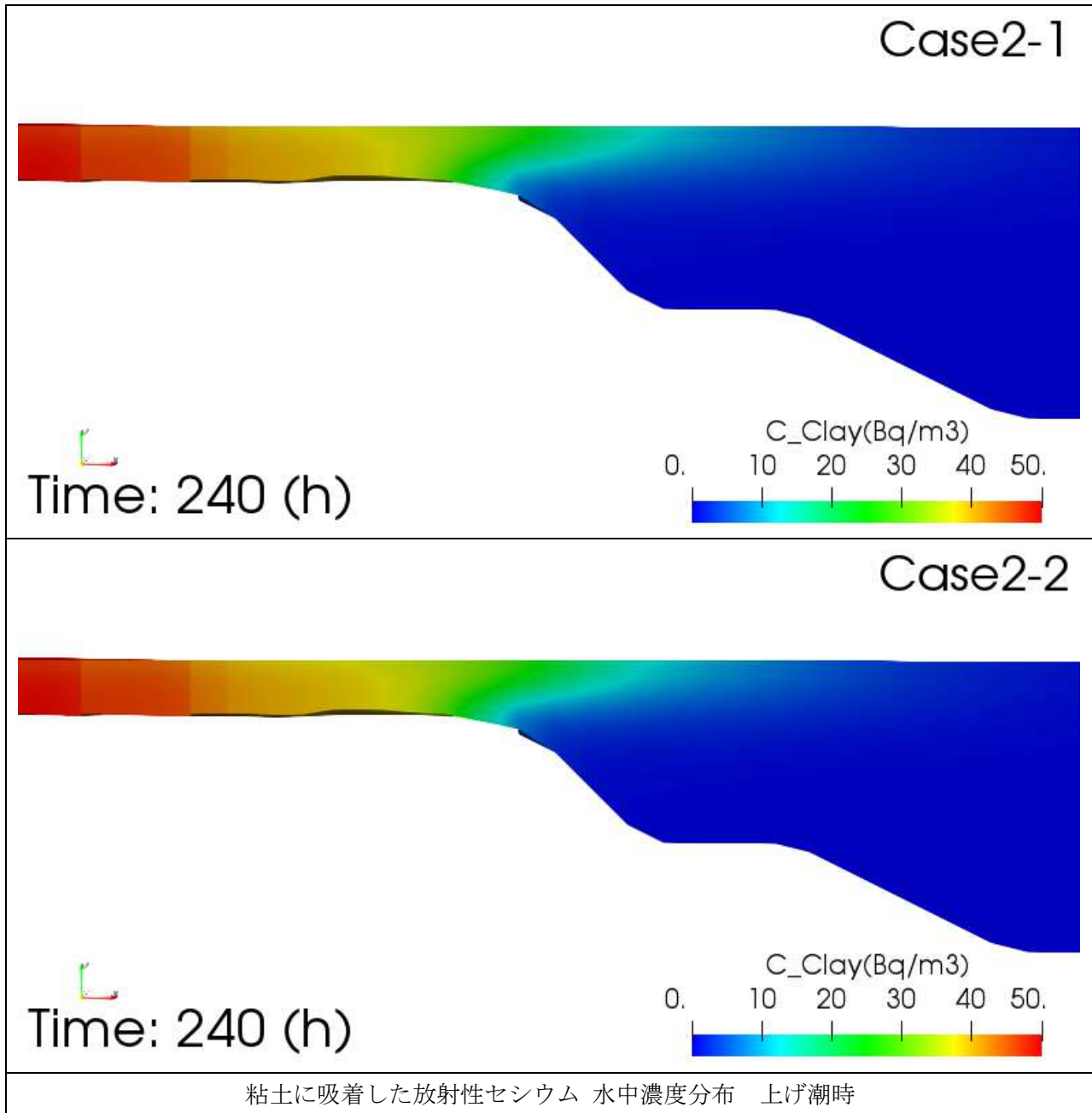


図 5-27 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (上げ潮時)
(粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

③-2 溶存態放射性セシウム濃度分布（水中）

満潮時

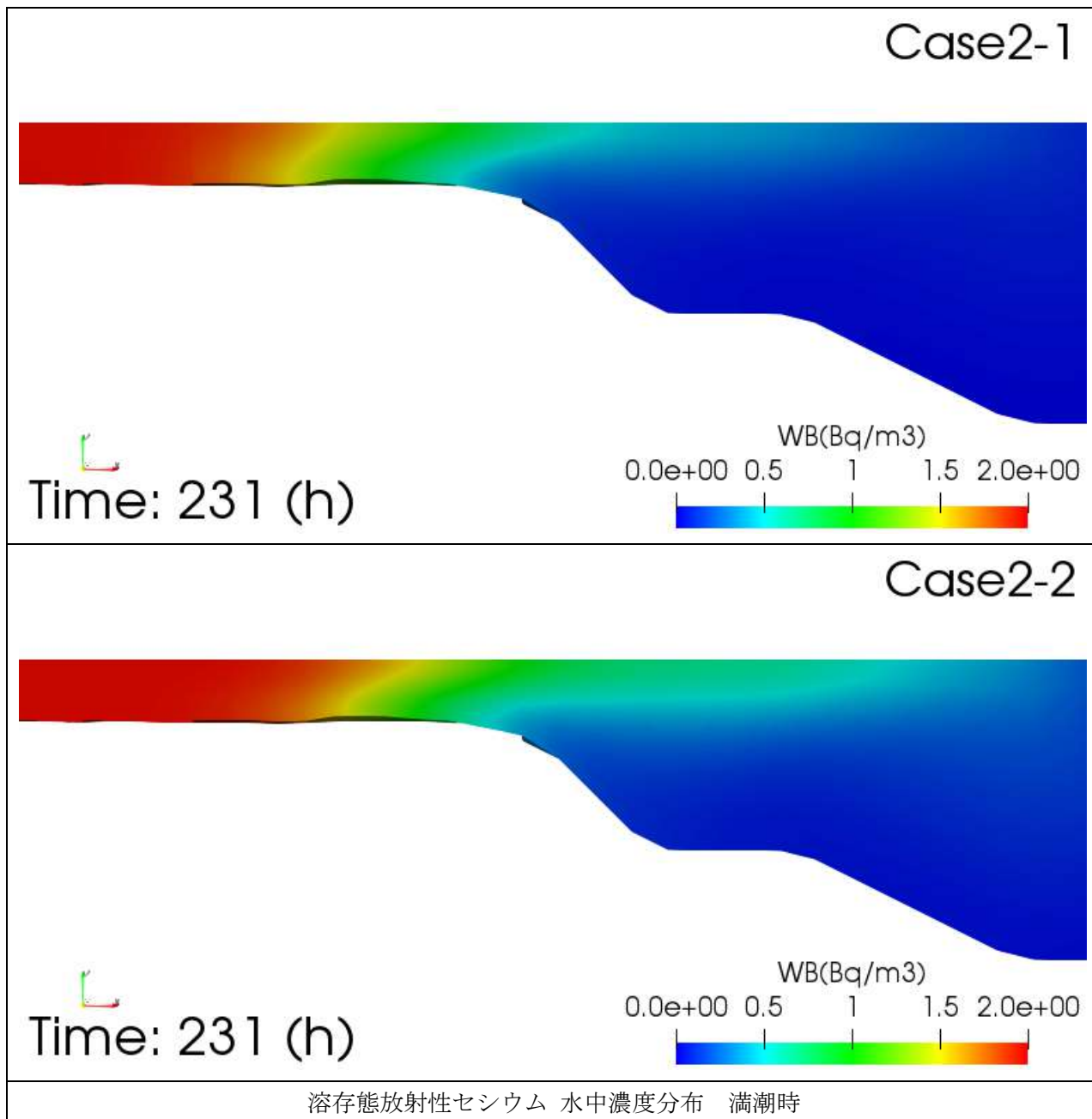


図 5-28 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時）
（溶存態放射性セシウム・水中濃度分布）

下げ潮時

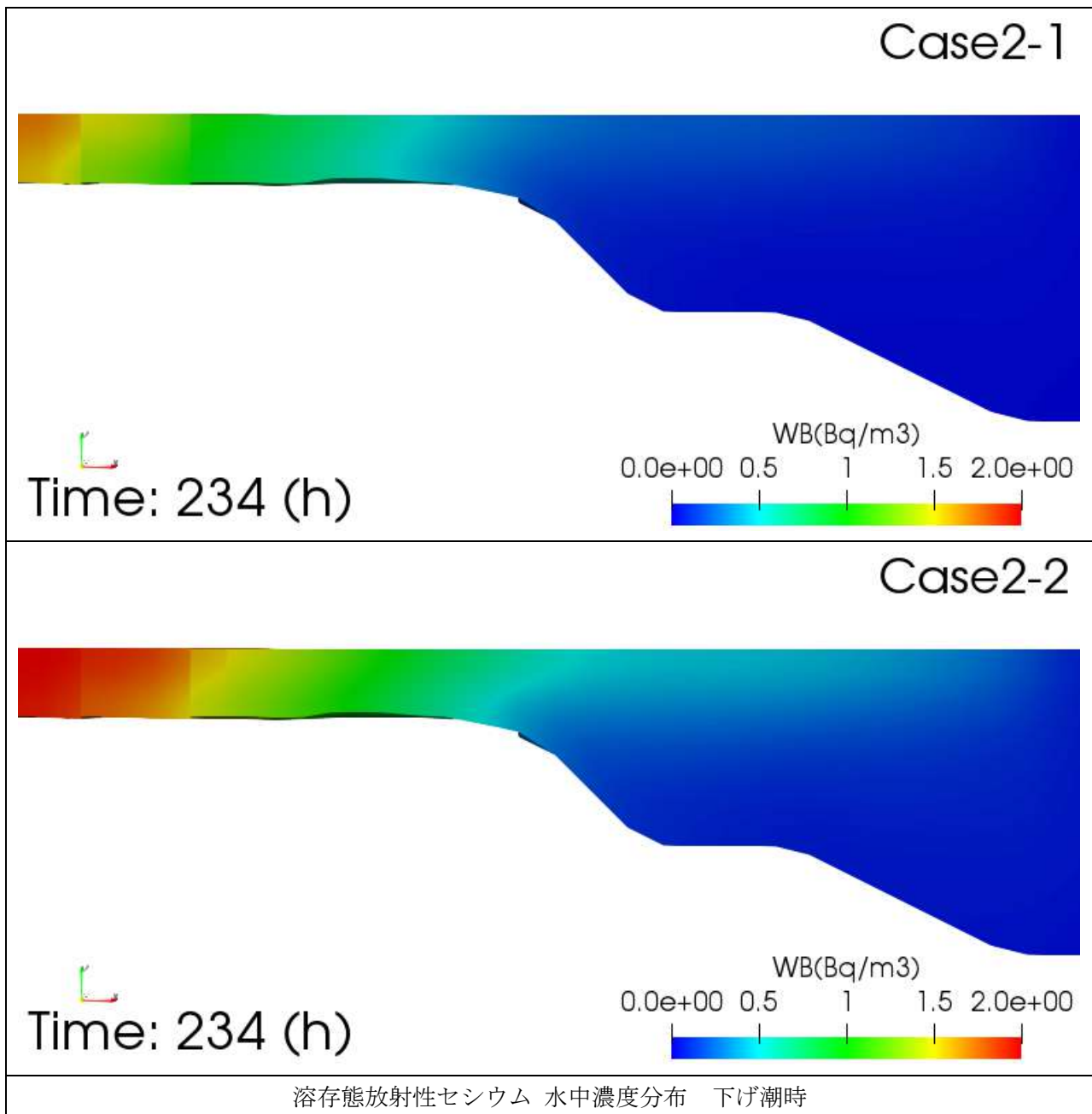


図 5-29 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（下げ潮時）
（溶存態放射性セシウム・水中濃度分布）

干潮時

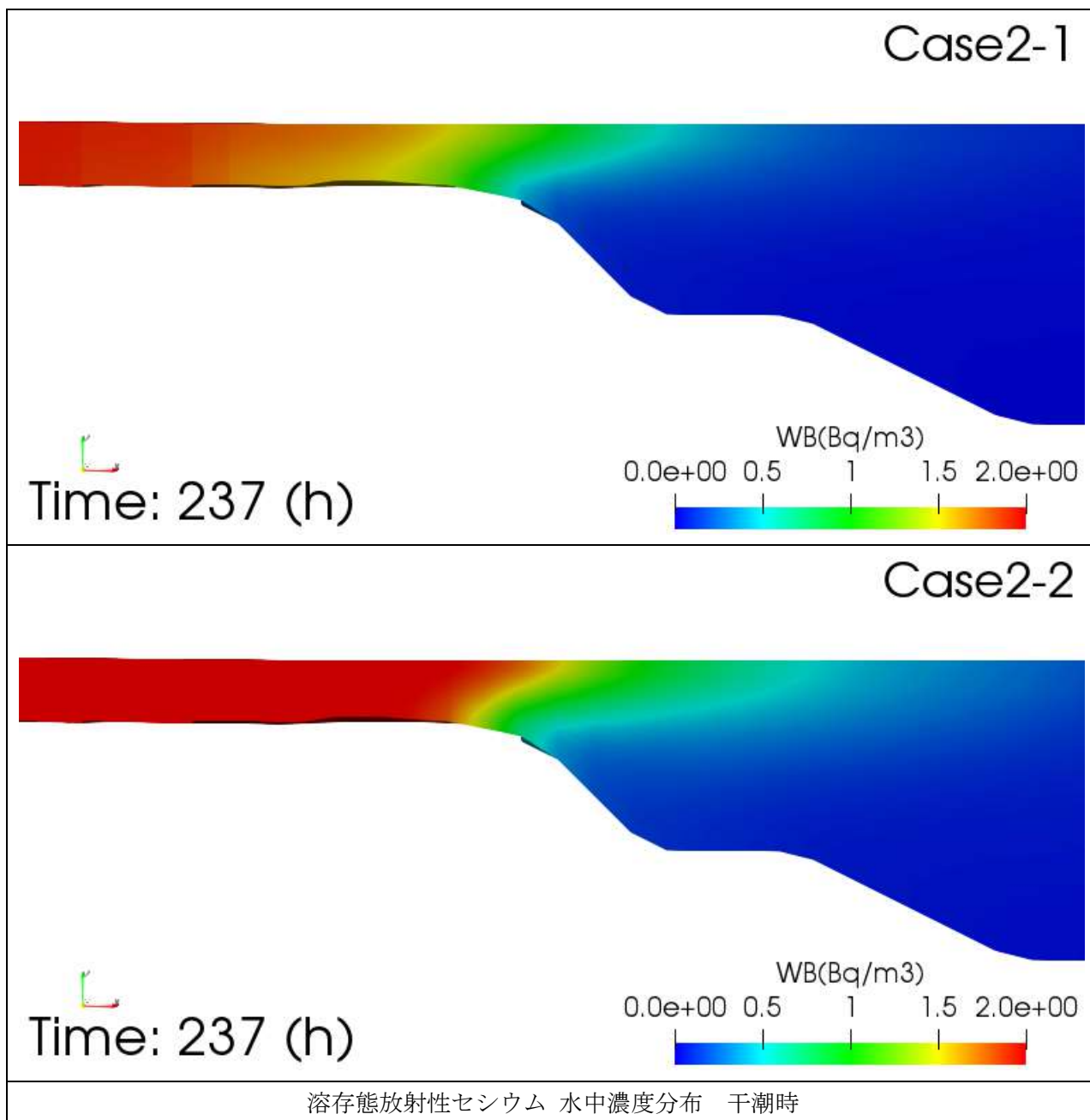


図 5-30 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (干潮時)
(溶存態放射性セシウム・水中濃度分布)

上げ潮時

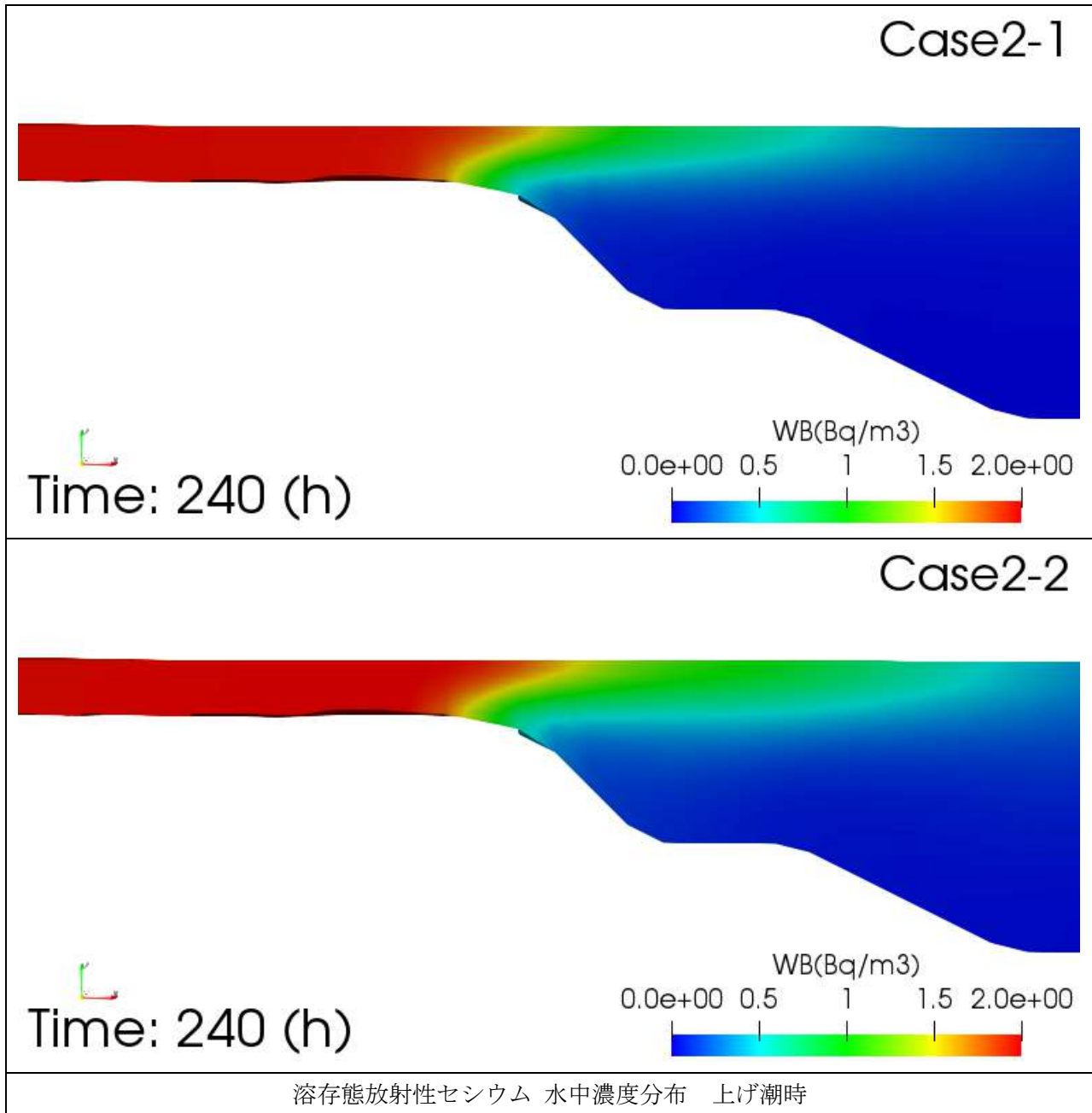


図 5-31 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（上げ潮時）
（溶存態放射性セシウム・水中濃度分布）

④ Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性

初期状態で溶存態の放射性セシウムは存在せず、河川から懸濁態に吸着した放射性セシウムのみが流入するとき、懸濁態の凝集、懸濁態に吸着した放射性セシウムの脱離に関する塩分依存性を検討するケースを実施した。

Case3-1 は、凝集に関する時定数及び分配係数の塩分依存性を無視し、Case3-2 では、凝集に関する時定数、および分配係数について塩分依存性を考慮し、河口域において懸濁態に吸着した放射性セシウムが脱離し、溶存態に移行すると共に、凝集した懸濁態として放射性物質が堆積する様子について検証した。以降に、Case3-1、Case3-2 について、20 周期目の 4 潮時（満潮時、下げ潮時、干潮時、上げ潮時）の河口域において、流下方向で切断した断面における以下の量の試算結果を示す（尚、満潮時±1 時間の結果は、付録 5.6 参照）。

【粘土に吸着した放射性セシウムの水中濃度分布】

【凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウムの水中濃度分布】

【凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウムの水中濃度分布】

【溶存態放射性セシウムの水中濃度分布】

また、最終時刻の河口域における以下の土砂堆積厚さ水平分布を示す。

【粘土堆積厚さ】

【凝集懸濁態：小粒子堆積厚さ】

【凝集懸濁態：大粒子堆積厚さ】

【粘土に吸着した放射性セシウム濃度の鉛直分布】

Case3-1 と Case3-2 を比較すると、河口域における濃度分布は、Case3-2 のほうが Case3-1 よりもやや上流までに留まっている。（例えば、231h：満潮時の 0～20Bq/m³ の青から緑色の範囲）。凝集に関する時定数について塩分依存性を考慮したことにより、小粒子への凝集が促進されていることが分かる。

→ 図 5-32～図 5-35 参照

【凝集懸濁態：小粒子吸着した放射性セシウム濃度の鉛直分布】

Case3-1 と Case3-2 を比較すると、いずれの時刻でも Case3-2 のほうが、高濃度の範囲はわずかに狭いが、海域の中程度の水深から海底にかけて、Case3-1 よりも広く分布していることが分かる。凝集に関する時定数について塩分依存性を考慮したことにより、小粒子への凝集が促進され、沈降する傾向を反映したことが分かる。

→ 図 5-36～図 5-39 参照

【凝集懸濁態：大粒子吸着した放射性セシウム濃度の鉛直分布】

凝集懸濁態：大粒子分布も、凝集懸濁態：小粒子分布と同傾向の結果であるが、凝集懸濁態：大粒子分布の方が、凝集懸濁態：小粒子分布よりも、より顕著に傾向が表れている。河口から離れた海底近傍にて凝集懸濁態：大粒子が分布している様子が見られる。

→ 図 5-40～図 5-43 参照

【溶存態放射性セシウム濃度の鉛直分布】

Case3-1 と Case3-2 を比較すると、いずれの時刻でも Case3-2 のほうが、海底近傍の濃度が高くなっており、また全体的に分布範囲も広い。分配係数について塩分依存性を考慮したことで、海水へ溶存しやすくなり、凝集によって沈降している懸濁態に吸着した放射セシウムが脱離して海中に溶存したためと思われる。

→ 図 5-44～図 5-47 参照

【粘土堆積厚さ】

Case3-1 と Case3-2 を比較すると、Case3-1 のほうが、河川のより下流まで堆積している。これは、凝集に関する塩分依存性を考慮したことにより、小粒子への凝集が促進され、Case3-2 では粘土の沈降量が減少したためである。

→ 図 5-48 参照

【集懸濁態：小粒子 堆積厚さ】

Case3-1 と Case3-2 を比較すると、Case3-2 のほうが厚く堆積しており、塩水楔が最も遡上する付近で、最も堆積している。これは、凝集に関する塩分依存性を考慮したことで、Case3-2 のほうが凝集しやすいため、より上流から堆積している。

→ 図 5-49 参照

【凝集懸濁態：大粒子 堆積厚さ】

Case3-1 と Case3-2 を比較すると、Case3-2 のほうが明らかに多く堆積している。これは、凝集に関する塩分依存性を考慮したことで、Case3-2 のほうが凝集しやすくなったため、堆積量も多いことが分かる。

→ 図 5-50 参照

以上より、上記に設定したモデリングによって、放射性物質の懸濁態からの溶脱と懸濁態の凝集の塩分依存性により生じる放射性物質の動態について、定性的に観測されている事実を再現できることが分かった。

④-1 粘土に吸着した放射性セシウム濃度分布 (水中)

満潮時

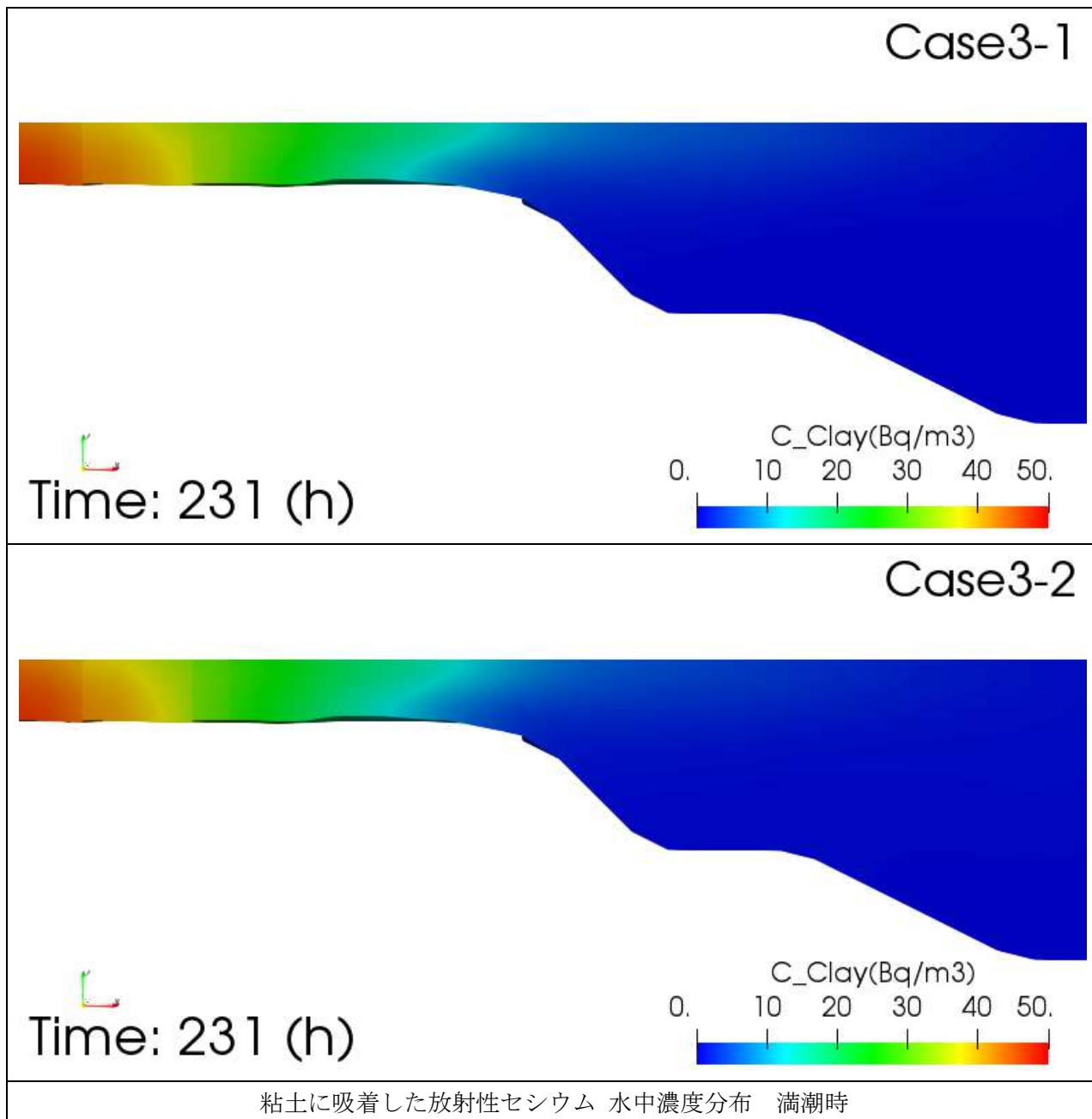


図 5-32 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (満潮時) (粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

下げ潮時

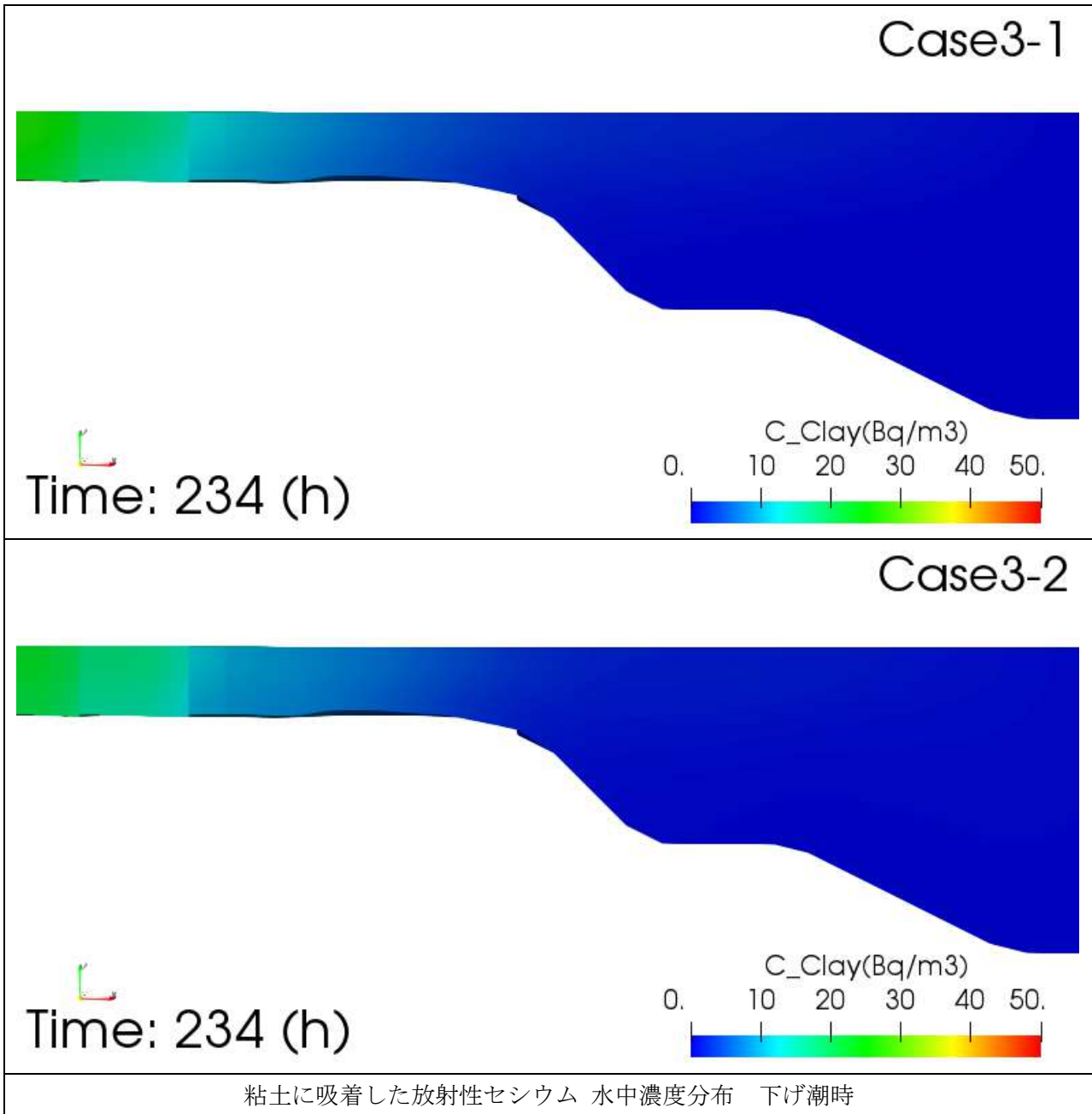


図 5-33 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（下げ潮時）（粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

干潮時

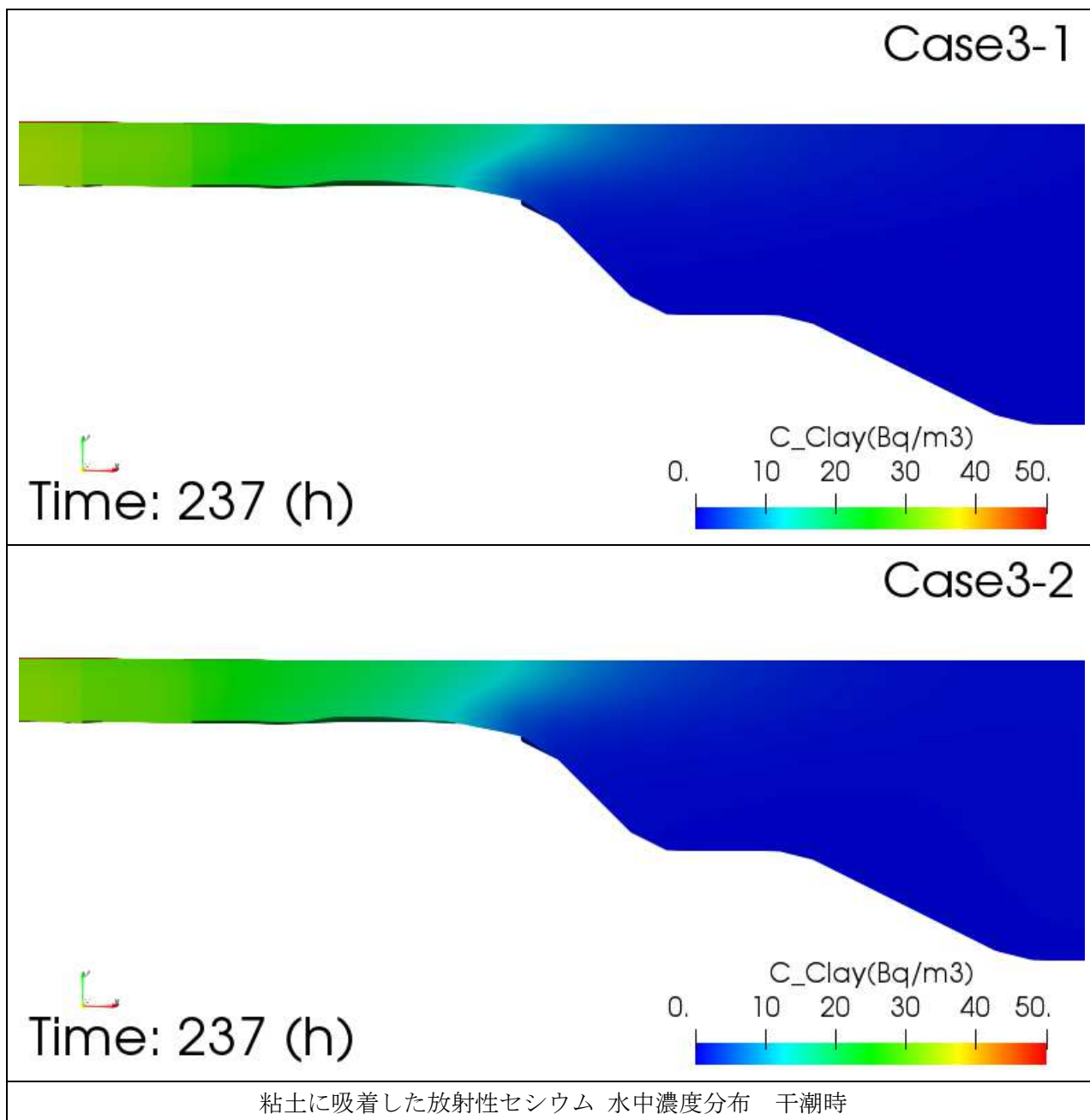


図 5-34 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (干潮時) (粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

上げ潮時

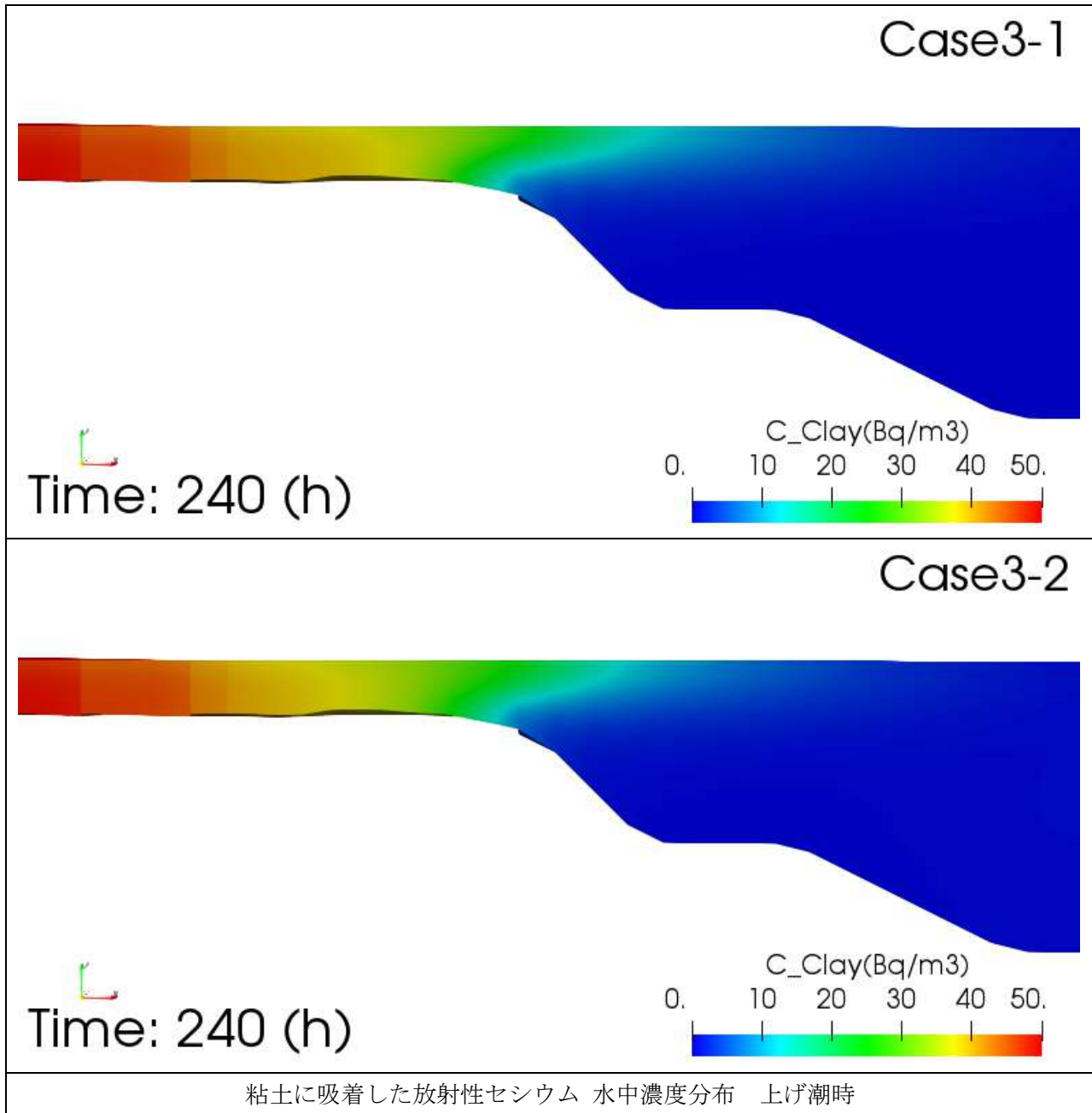


図 5-35 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（上げ潮時）（粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

④-2 凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウム濃度分布（水中）

満潮時

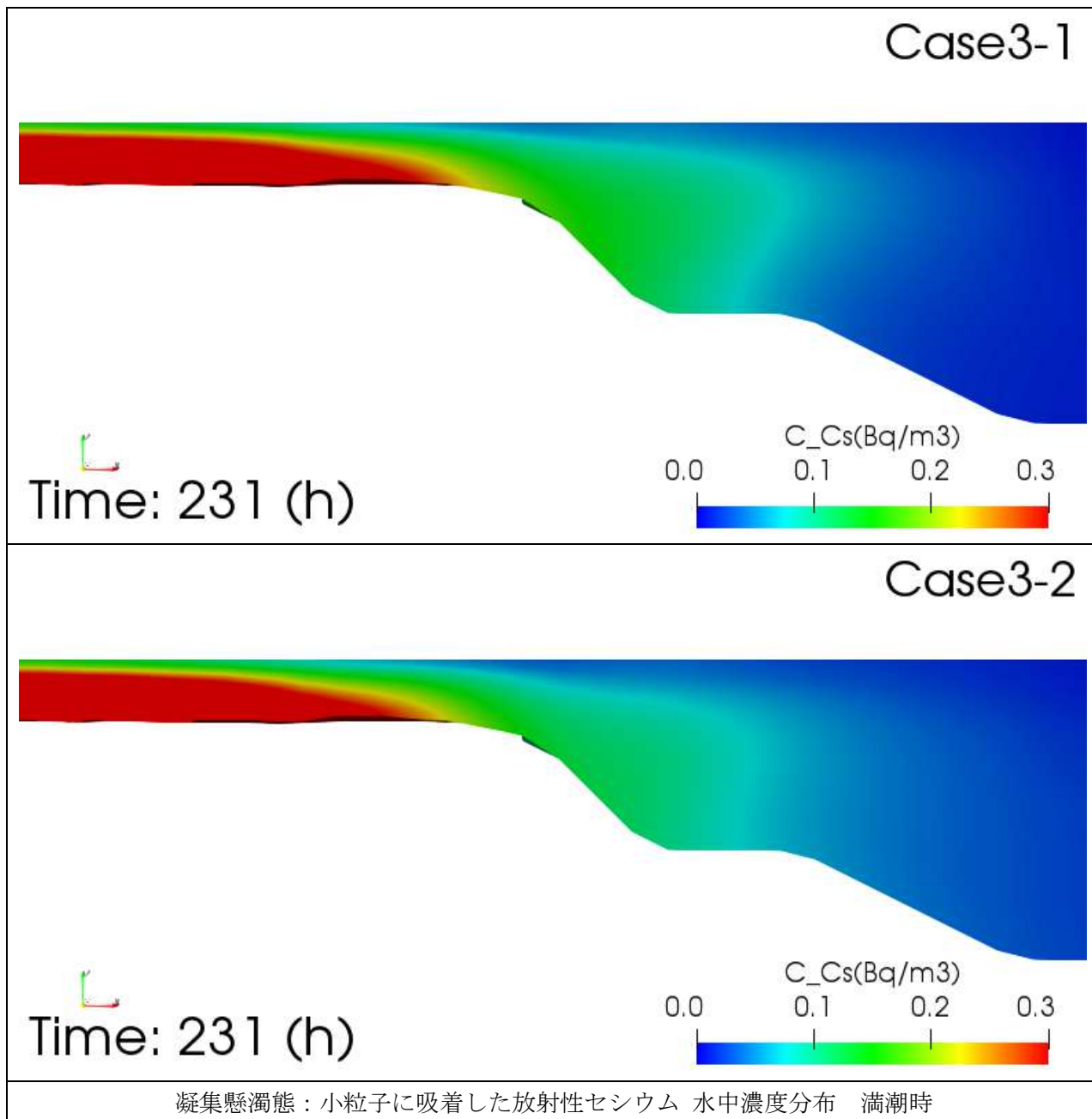


図 5-36 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時）（凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

下げ潮時

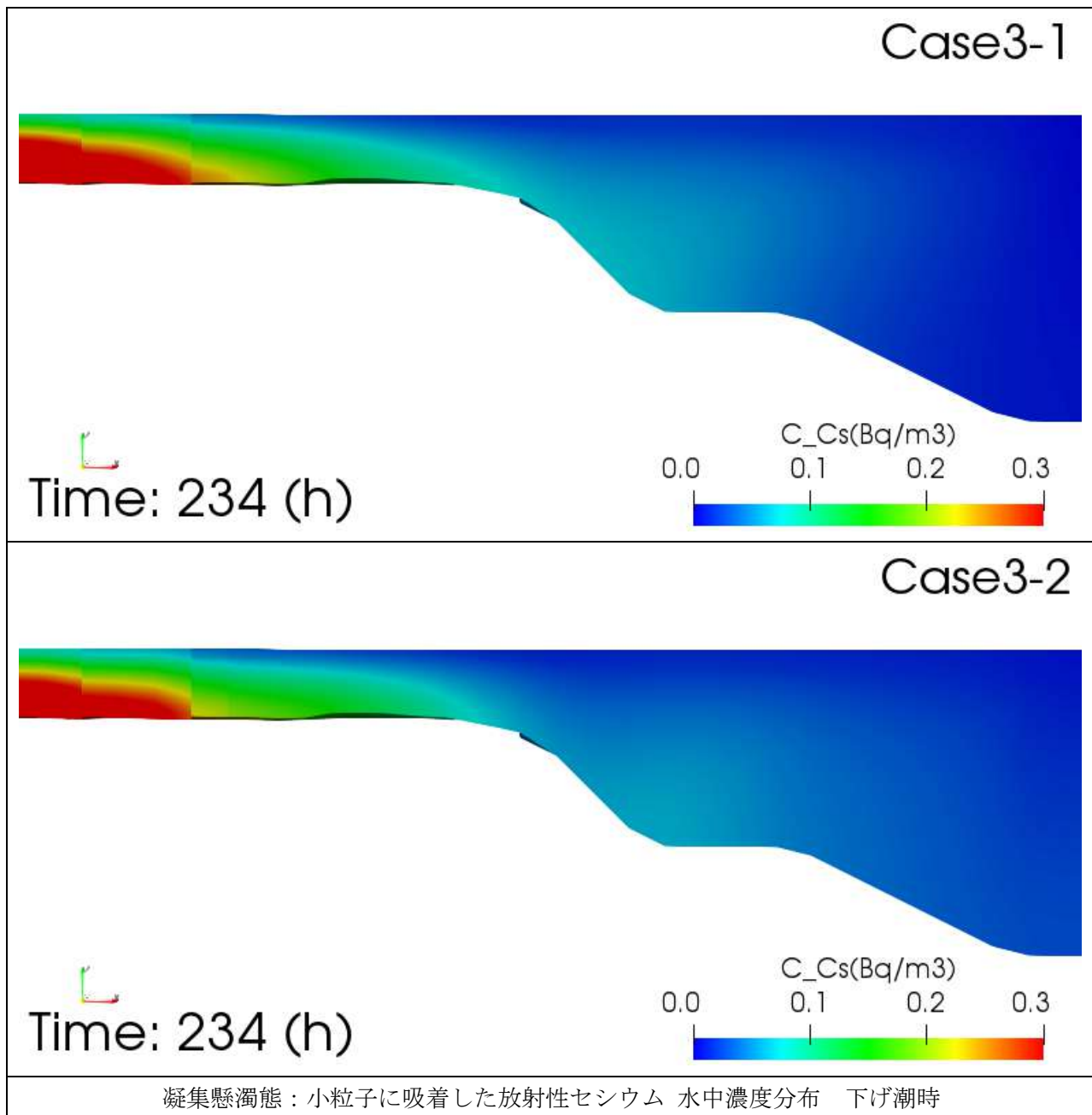


図 5-37 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（下げ潮時）（凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

干潮時

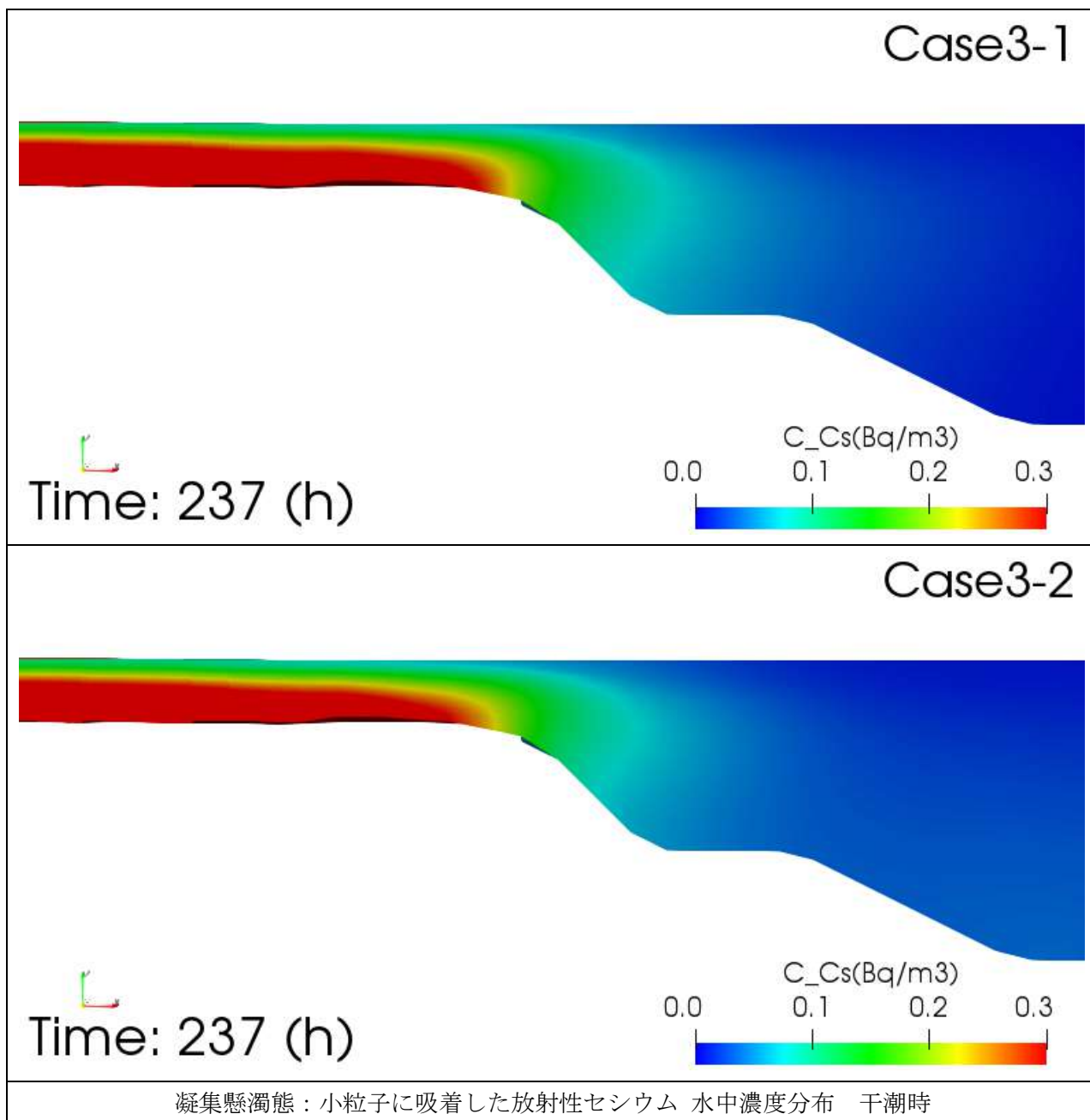


図 5-38 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (干潮時) (凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

上げ潮時

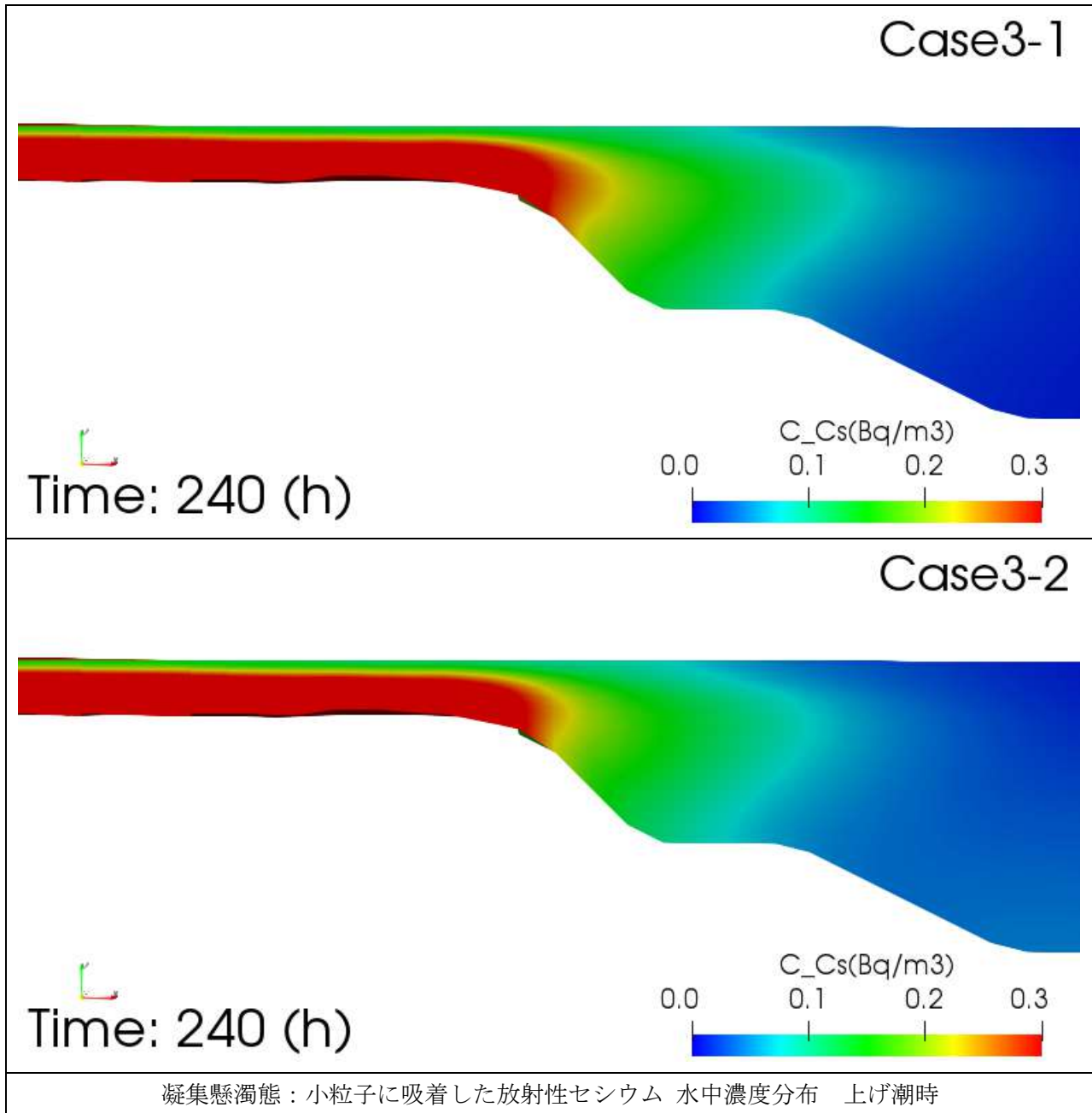


図 5-39 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（上げ潮時）（凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

④-3 凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウム濃度分布（水中）

満潮時

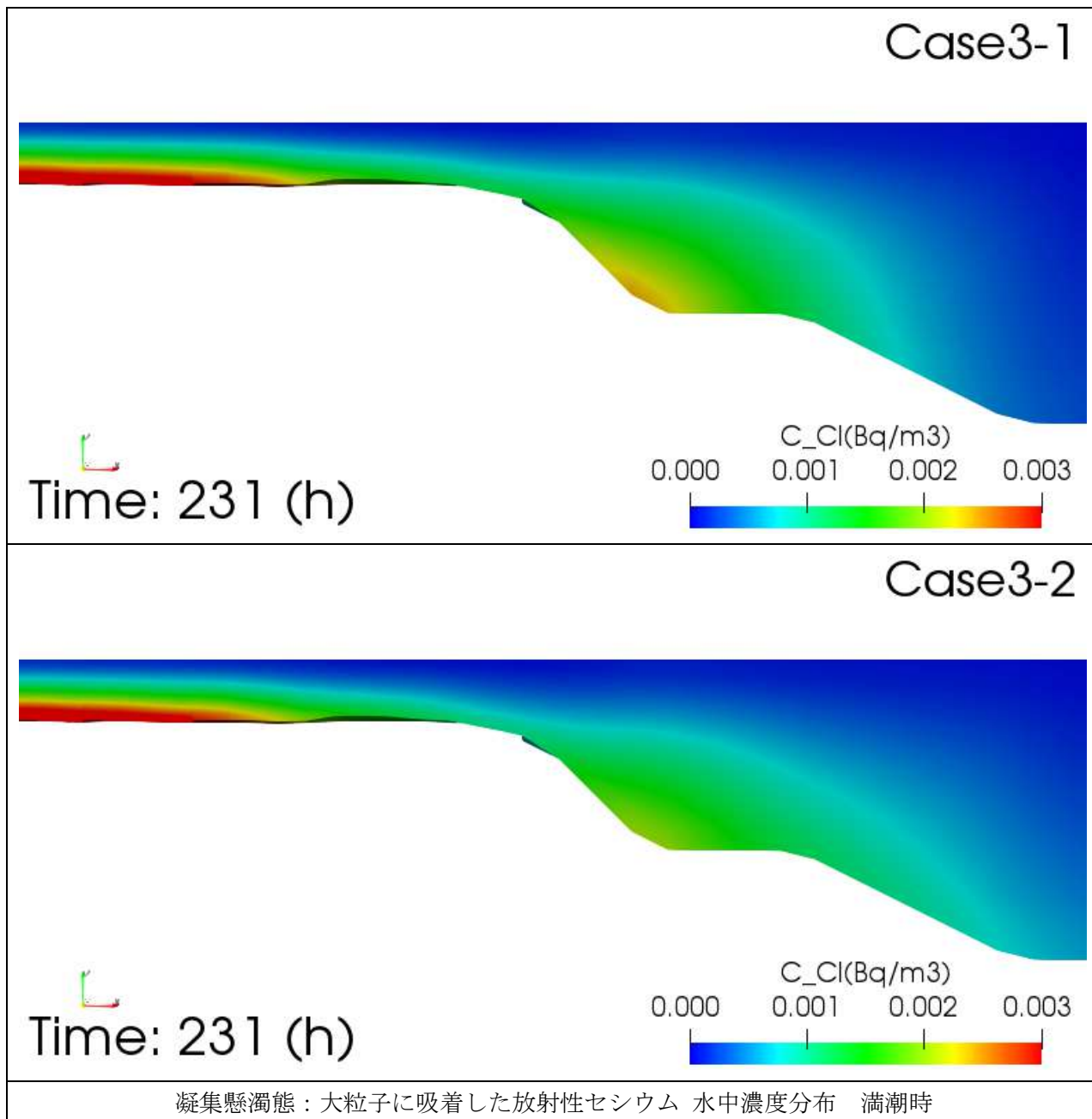


図 5-40 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時）（凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

下げ潮時

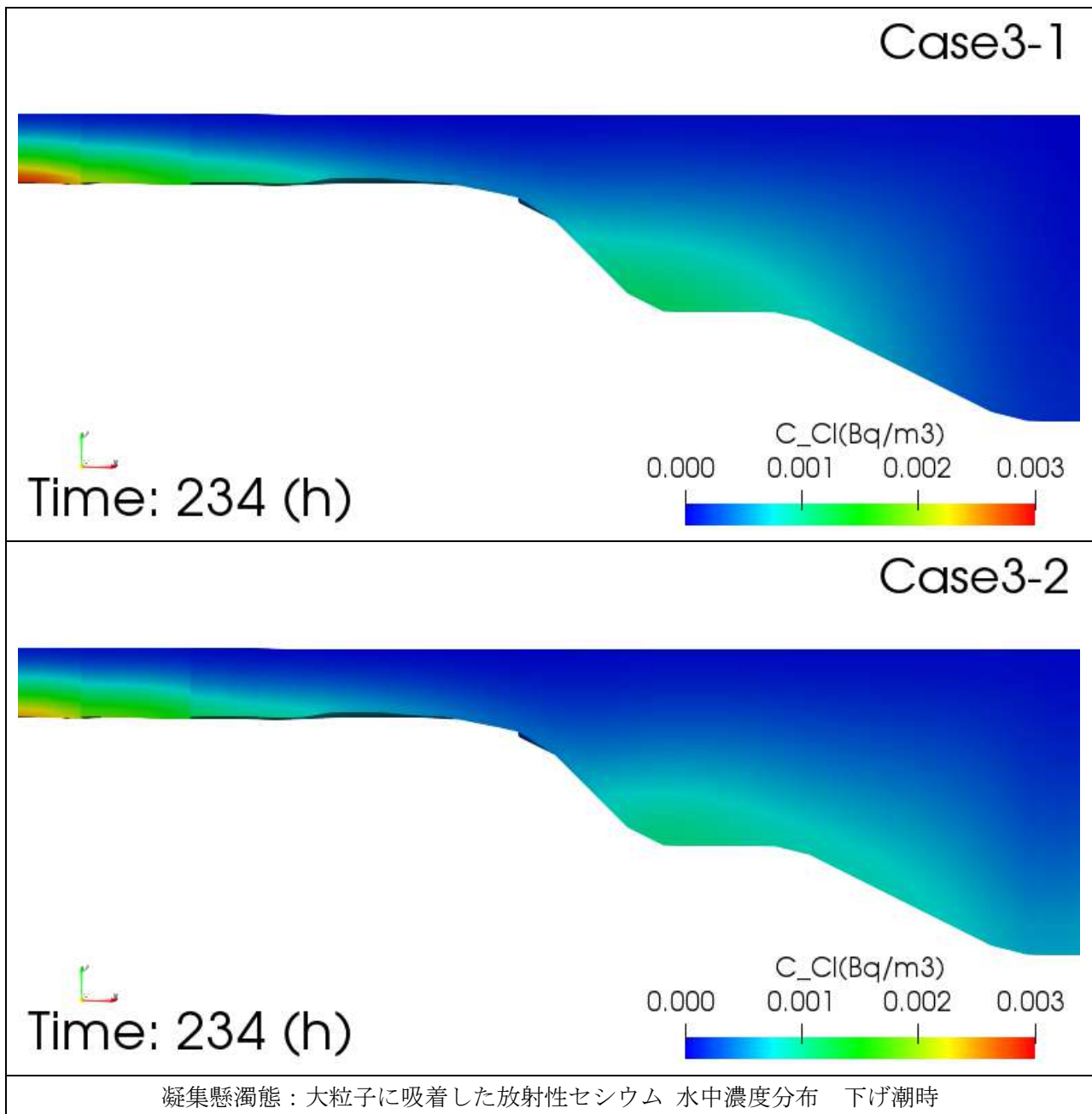


図 5-41 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（下げ潮時）（凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

干潮時

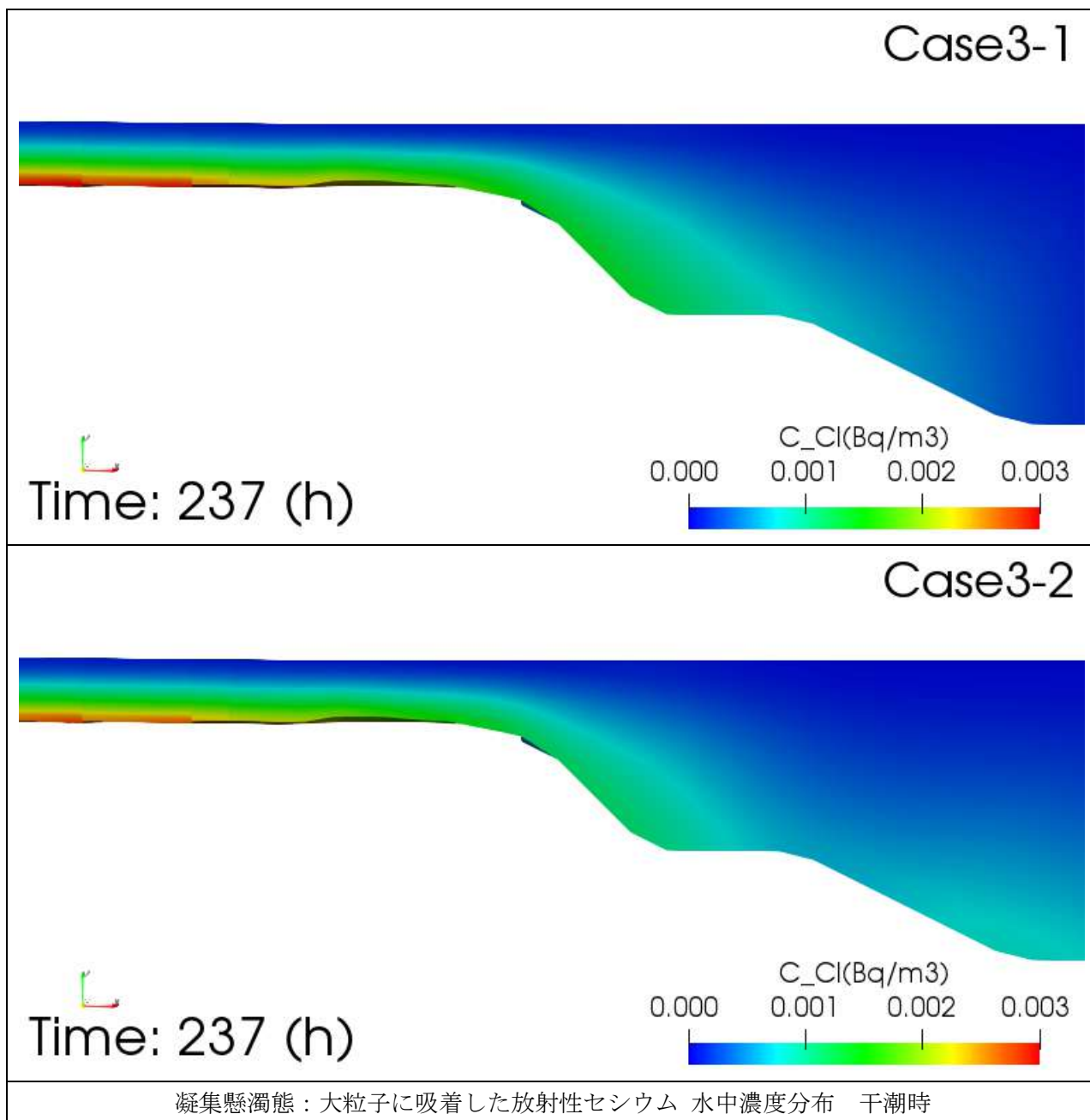


図 5-42 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (干潮時) (凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

上げ潮時

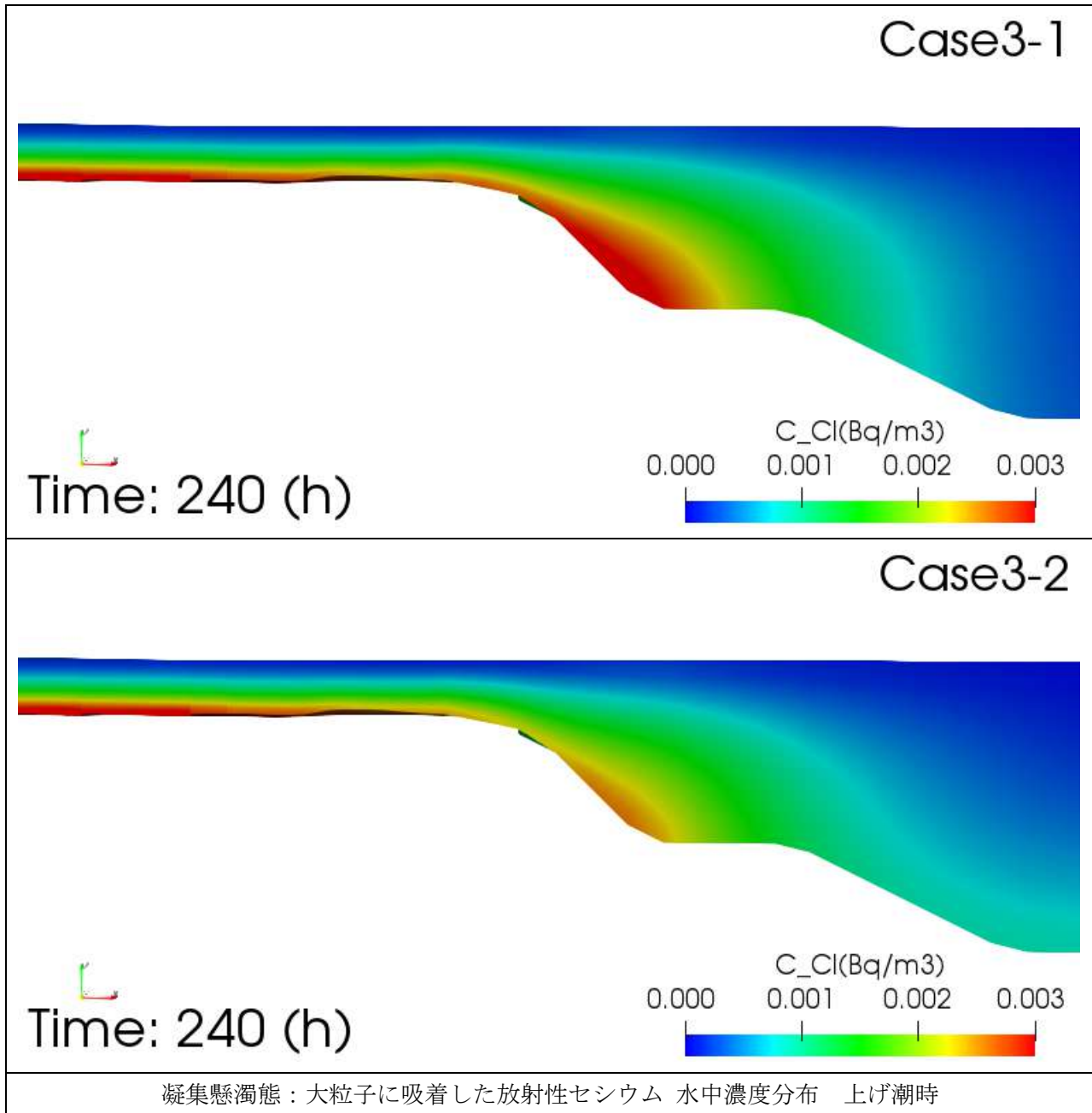


図 5-43 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（上げ潮時）（凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

④-4 溶存態放射性セシウム濃度分布（水中）

満潮時

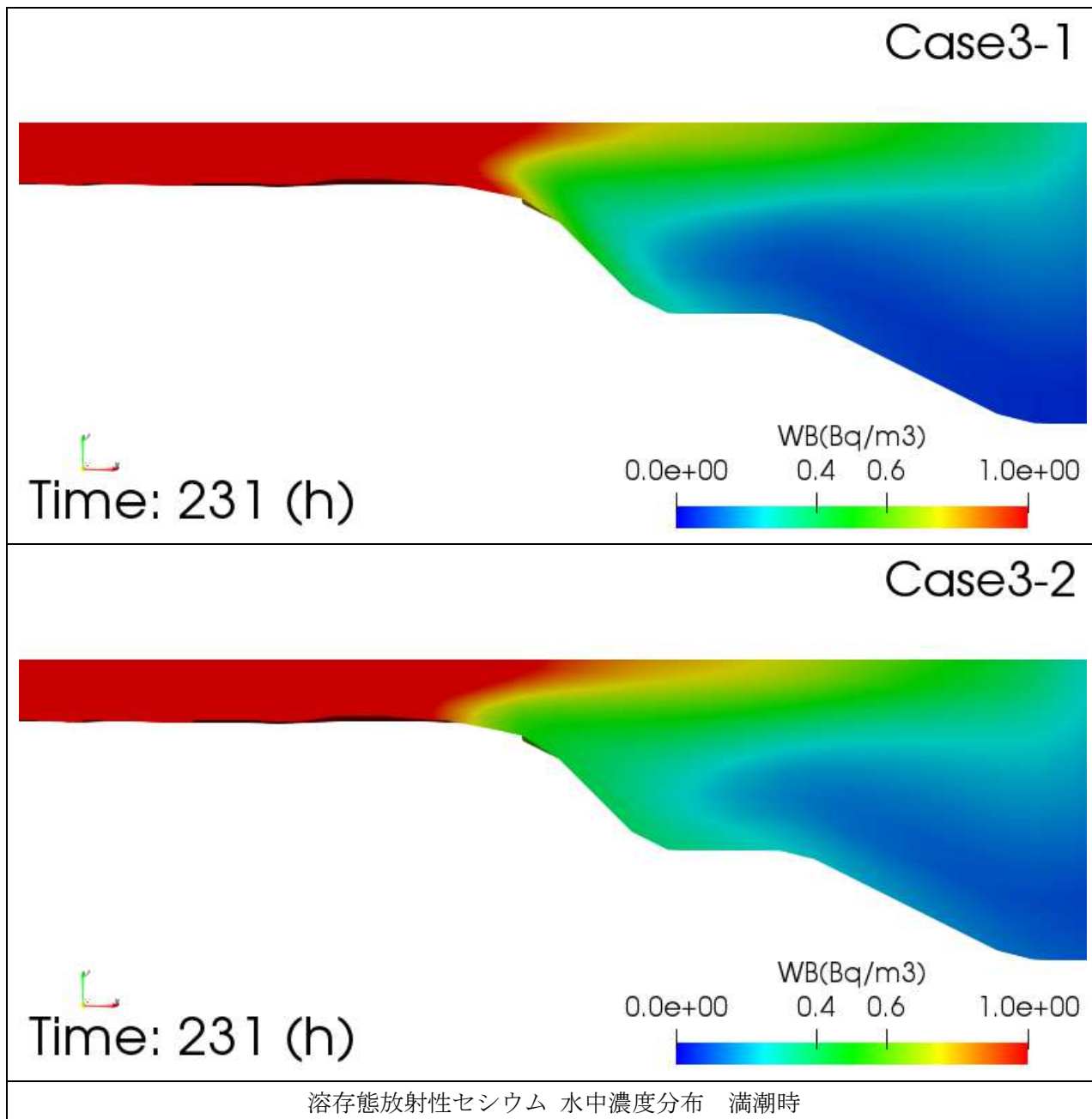


図 5-44 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時）（溶存態放射性セシウム・水中濃度分布）

下げ潮時

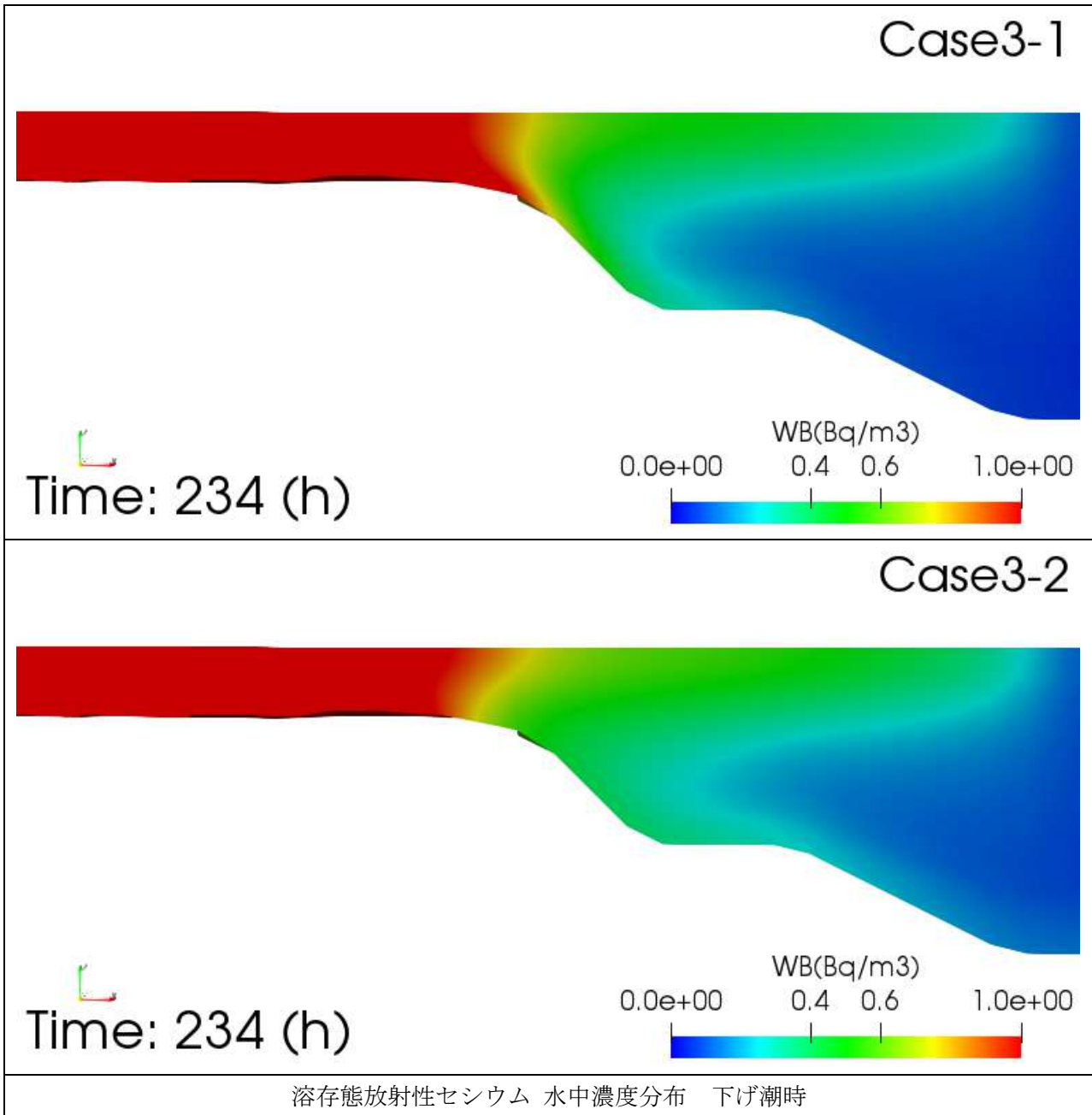


図 5-45 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (下げ潮時) (溶存態放射性セシウム・水中濃度分布)

干潮時

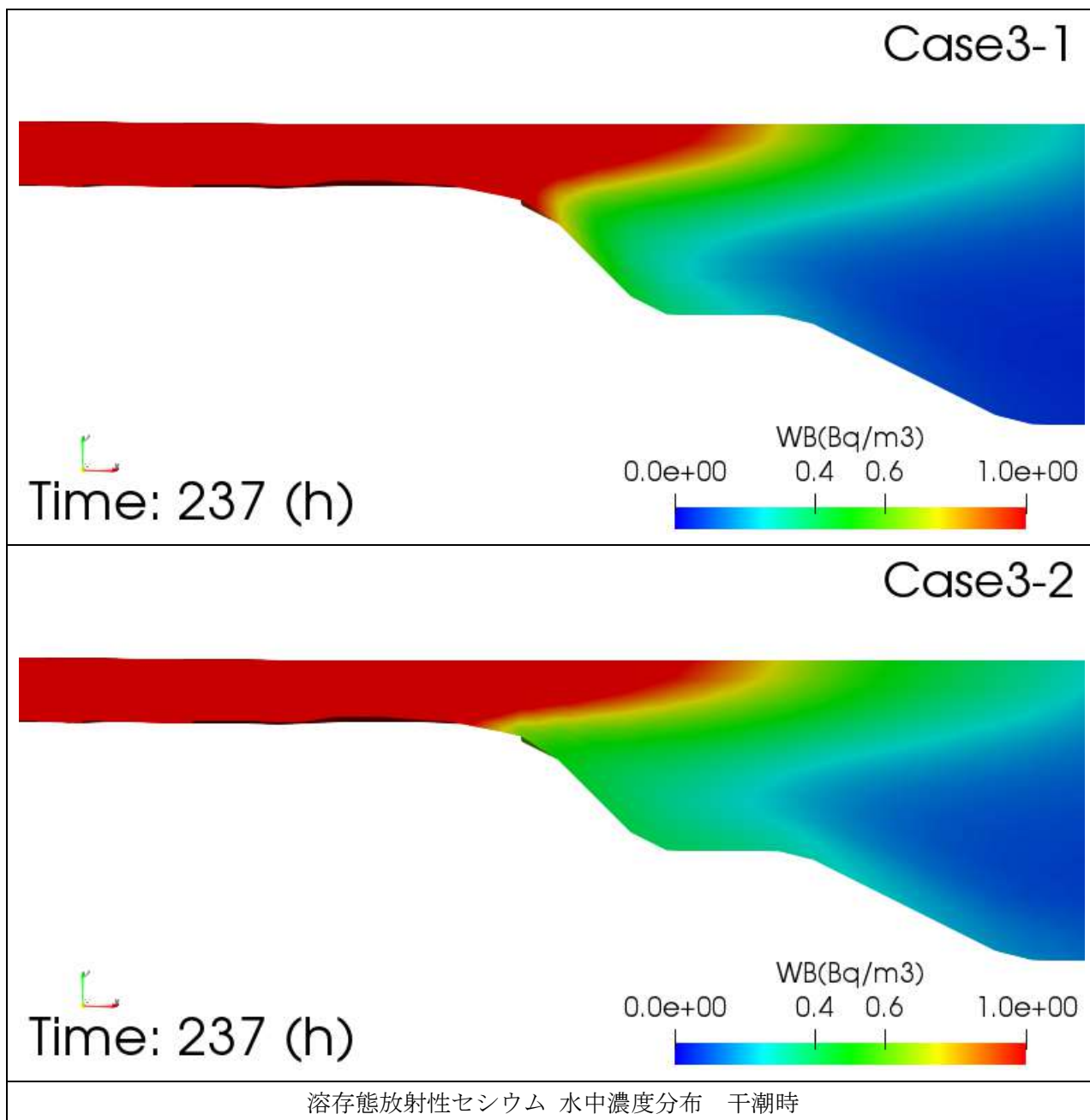
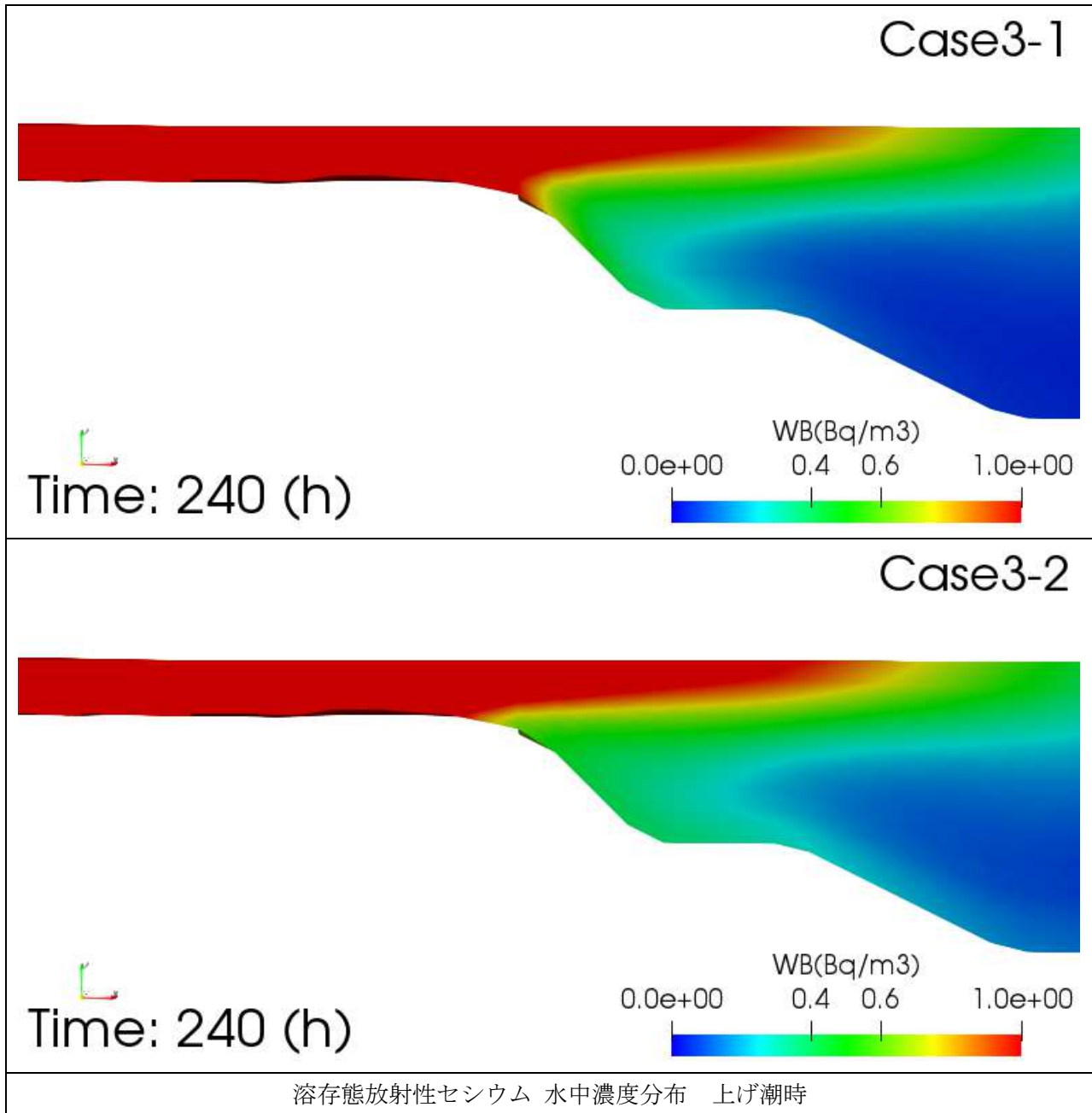


図 5-46 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (干潮時) (溶存態放射性セシウム・水中濃度分布)

上げ潮時



溶存態放射性セシウム 水中濃度分布 上げ潮時

図 5-47 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (上げ潮時) (溶存態放射性セシウム・水中濃度分布)

④-5 粘土堆積厚さ分布

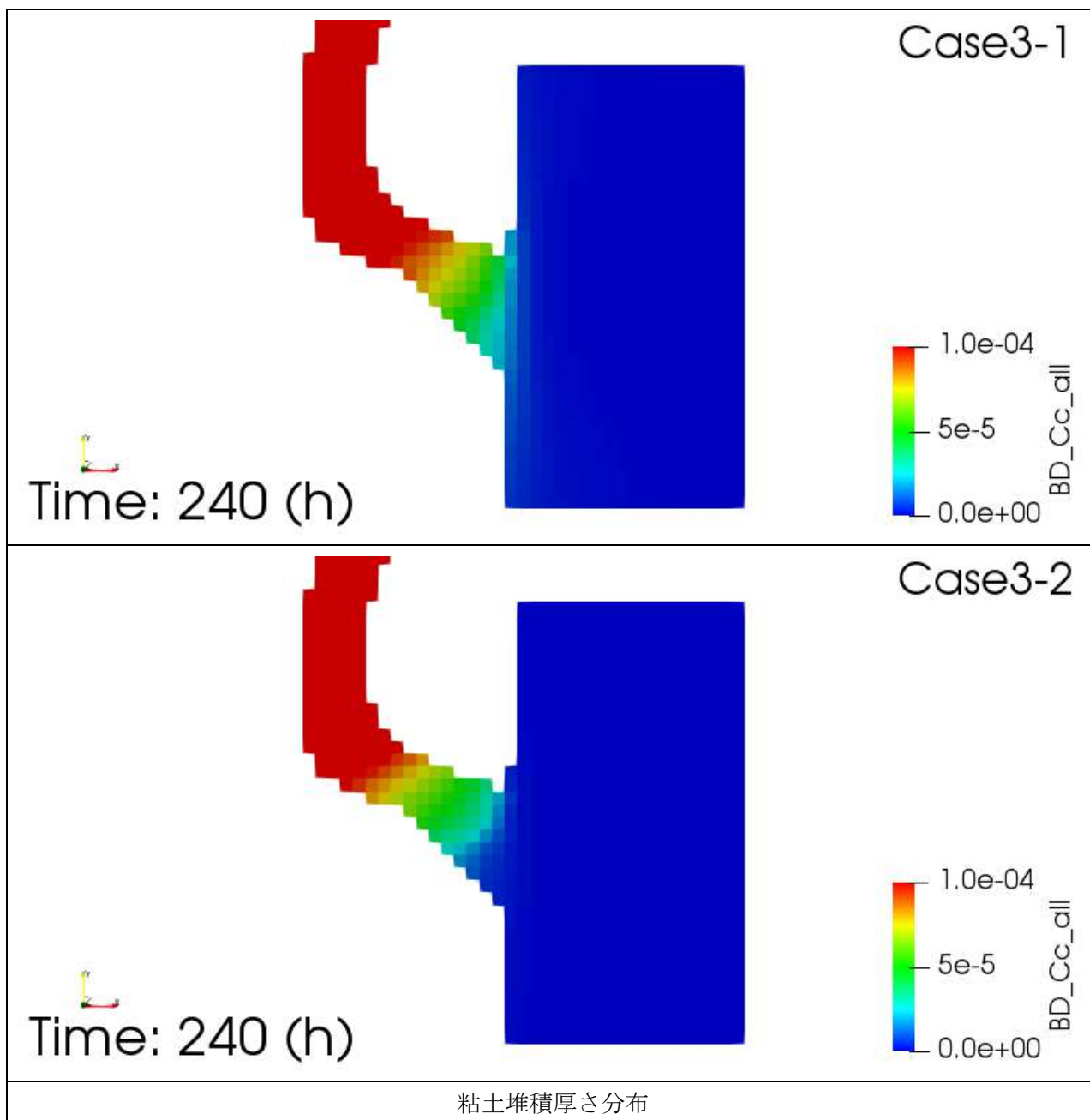


図 5-48 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (粘土堆積厚さ分布)

④-6 凝集懸濁態：小粒子 堆積厚さ分布

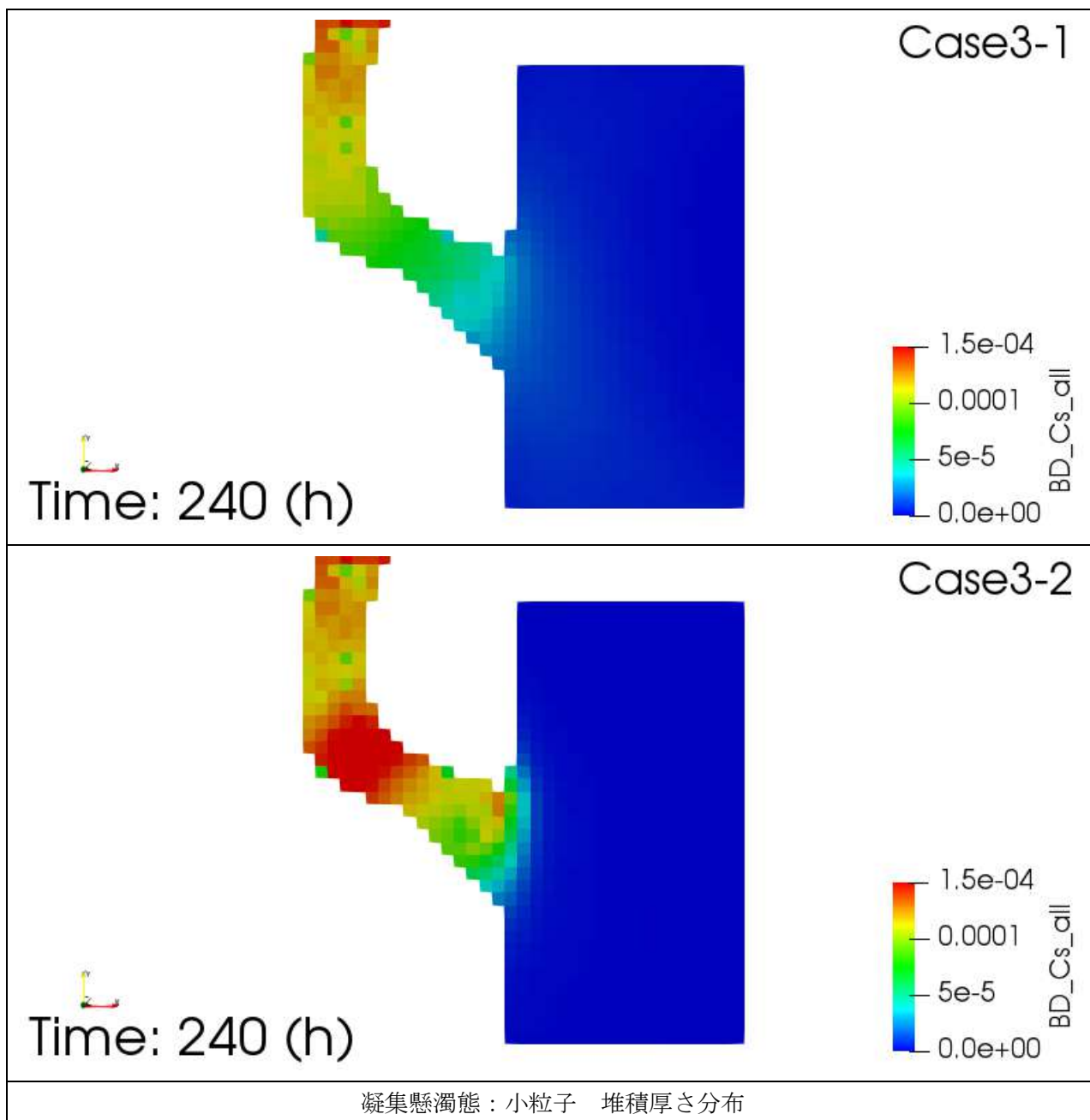
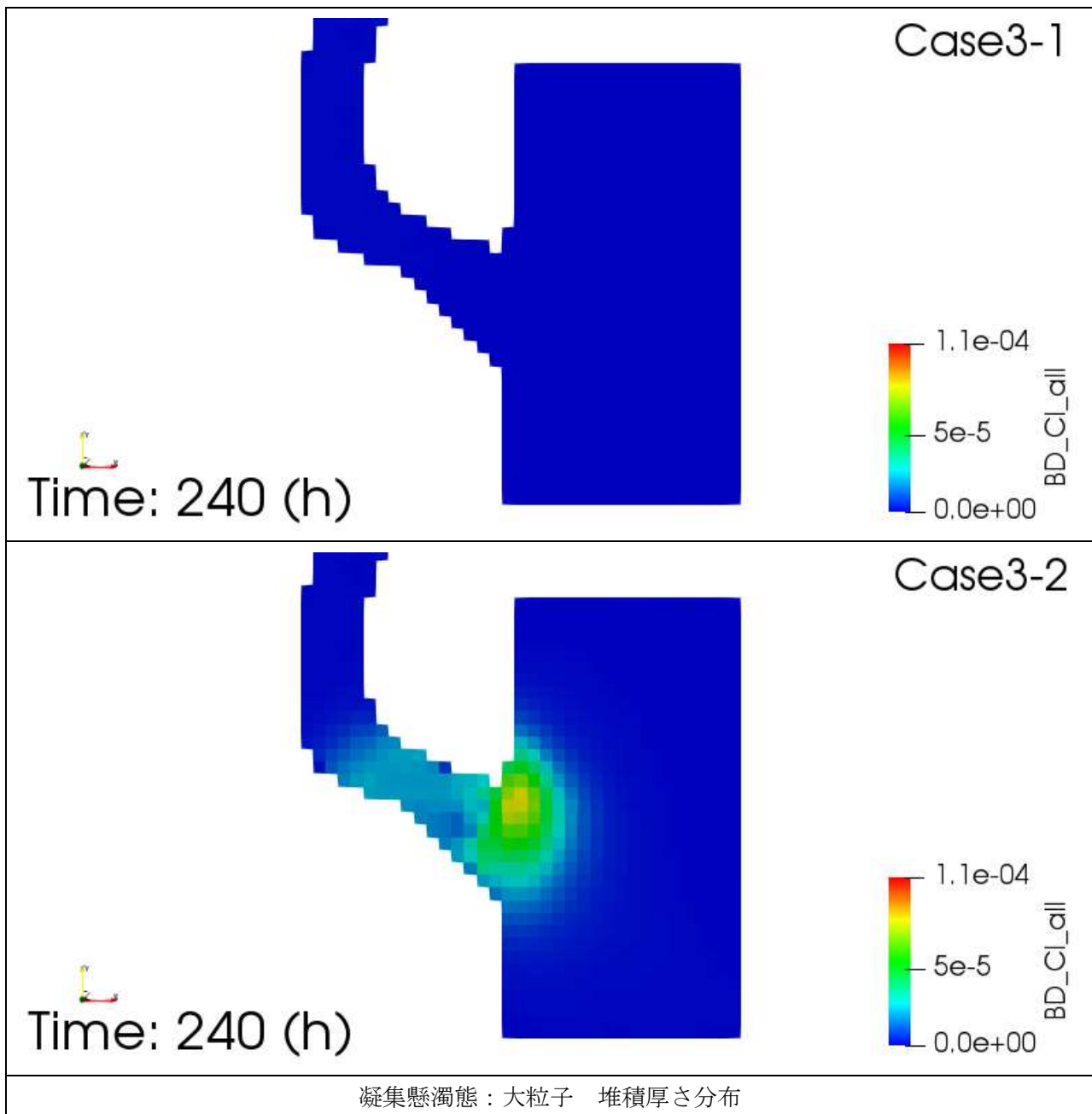


図 5-49 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (凝集懸濁態：小粒子 堆積厚さ分布)

④-7 凝集懸濁態：大粒子 堆積厚さ分布



凝集懸濁態：大粒子 堆積厚さ分布

図 5-50 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (凝集懸濁態：大粒子 堆積厚さ分布)

5.4 河口域での試計算のまとめ

本 5 章では、河川から海洋へと流出する放射性核種に対する河口域シミュレーションモデルを、沿岸解析用シミュレーションコード 3D-Sea-SPEC に実装し、河口域での放射性核種の動態について試計算を実施し、その妥当性について評価した。河口域モデルについては、典型的な河口域地形（阿武隈川河口を模擬）を作成し、海水が潮位変動に伴い河川流域へと侵入し、塩水遡上や塩淡混合を示す様子を再現可能とすることを条件とした他、塩淡混合と共に溶存・懸濁態の動態をモデル化し、試計算した。また、上記現象に伴い、放射性物質の動態がどう変化するかを調べた。その結果、凡そ定性的に示されている観測事実の殆どを矛盾なく再現できることが分かった。従って、今後は、これらのパラメータをシミュレーションする対象の河口域に合わせて設定すれば良いことが分かる。パラメータの設定に当たっては、現地での観測が必要となる一方、物理化学的知見のみを基に、それらを決定することが可能か、調査を継続する必要がある。

参考文献

[5-1]松村健史、「感潮河道の地形特性が塩水遡上に及ぼす影響に関する三次元シミュレーション解析」、首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 市基盤環境学域 環境水理学研究室 修士論文 (2016)

■ 6章 考察とまとめ

6.1 本章の概要

本章では、陸域から河川そして沿岸へと流出する放射性核種の動態をシミュレーションする陸域モデルと河口域モデルの試開発（試解析及び試計算）結果に対して考察を加え、今後の課題を整理した後、まとめを記す。6.2 は、陸域動態モデルの試開発（試解析及び試計算）結果に対する考察と課題を報告し、6.3 は、河口域モデルの試計算結果に対する考察と課題の報告とする。それらの課題を基に、6.4 にて、陸域から海洋へ流出する放射性核種の動態をシミュレーションする統合モデルの研究開発に対し、結論を記す。

6.2 陸域動態モデルの試解析についての考察

陸域に降下した放射性物質は、降水による流水や、土砂に吸着した形で流水と共に運ばれ、河川水として河口域に運搬されると考えられる。従って、本事業では、先ず、陸域での流水の挙動と土砂の運搬に係るモデルを概観し、課題を整理した。流水のモデルにおいては、大きく分けて2つのモデル（集中定数型と分布定数型）が存在し、集中定数型は、開発及び実装が容易で且つ計算コストが低く、手軽に解析が可能であることが分かった他、計算機が発達した現在でも、実際の現業（河川水位予測等の洪水解析）において利用されている。しかし、モデルが簡単である一方、パラメータは流域単位で観測データを基に決定する必要があり、十分な水文データが必要である。こうした課題については、最近では機械学習法を利用し、パラメータの決定を高度化する研究が行われている他、GIS データを用いて、パラメータの決定を流域毎に一定のルールにて定めていくといった研究が行われている。このような進展は、データ駆動型のモデル開発に位置づけられ、今後の機械学習技術の発展の影響を受け更に高度化される可能性が高い。今後は、こうした試みの発展を注視し取り込むことで、放射性物質の陸域動態モデルの高度化が可能である。例えば、本事業で試解析を実施したタンクモデル（MERCURY）は、PC の利用のみで、極めて低コストで且つ高速に過去数年分の河川流量を降水データから計算することが可能であり、パラメータを十分にチューニングすれば、流量予測だけでなく、放射性物質の流出量の精度の高い予測が可能と考えられる（そのためには、機械学習技術のような最新のパラメータの決定方法を導入する必要がある）。

一方、計算機の発達を背景として、分布型定数モデルが発展している。分布型定数モデルでは、先ず、空間を解像するスケールをユーザーが決定するが、一般には、地形や土地利用等の GIS データの解像度に依存することが多く、最近の GIS データの普及によって高解像度（例：m オーダー）での分布型モデルを構築することが可能となっている。本事業で対象とする日本の河川の流域は、世界的に見て、極めて複雑であり、非一様な環境となっているが、m オーダーの解像度で分布型モデルを構築できれば十分にその非一様性を反映できると考えられる。従って、解像度を上げ、非一様性を十分に捉えることができた場合、いわゆる物理モデルの違いが敏感に結果に反映することが想定される。一般に、物理モデルの違いの多くは、地下水モデルに顕れることが多く、そのモデルの違いは、水の流出の経時変化であるハイドログラフへと反映され、観測データとの一致やずれの原因究明が可能となる。また、表面流についても、土地利用などが小さいスケールで非一様な日本の流域では、高解像度化が重要となる可能性がある。更に、都市部では、土地利用だけでなく、下水なども含めて、極めて水の流れは非一様であり、それらも物理モデルに反映させる必要がある。しかし、分布型モデルの場合、データが未整備な流域に適用するのは困難

であり、データの準備と多数のパラメータの決定に多くの時間を要する他、モデルが精緻で物理モデルに忠実であればあるほど、計算コストがかかる。従って、一旦、信頼できるパラメータが定まり、流域内の様々なデータの入手が可能であれば、流水の挙動とそれに伴って発生する土砂の動きも詳細に判明するものと考えられる。従って、様々な予測が可能となる他、異常な汚染が観測された際の原因究明等にも活用できる。このように、分布型モデルの場合、デメリットとメリットが大きく競合する一方、ユーザーによるコードの可塑性が無い場合、新たな場面に対する活用が制限されるという点もあることを強調したい。つまり、モデルが単純で簡単な実装が容易で且つ、改良も容易な集中定数型と比べ、複雑な物理モデルを採用する分布定数型の場合、モデルの改良や高度化は、常に避けられず、コードのオープン化やプラットフォーム化がつとに求められることを指摘したい。

次に、放射性セシウムの陸域動態を調査した結果についても考察を加える。現在、1F事故後、凡そ10年余りが経過したが、放射性セシウムは、依然として陸域環境中を移行し続けており、長期的な移行予測に係る知見の蓄積が今後も必要であることが分かった。特に、陸域に沈着した放射性セシウムの凡そ70%は、森林域に沈着し、今なお環境中に保持されており、上流域に位置する森林は、水系を通じて下流域へと拡散する放射性セシウムの供給源となるだけでなく、河川水中の溶存態放射性セシウム（水域生態系への影響が大きい）の形成機構への寄与（主要な寄与）が指摘されている。しかし、日本をはじめとする温暖湿潤な森林生態系での放射性セシウムの水系への移行メカニズムについては、依然として不明で未解明な点が多く、長期動態予測の精度向上のためには、森林を起点とした陸域-水系での放射性セシウムの移行メカニズムの解明を通して移行パラメータの精緻化を行うことが必要である。今後は、これらの知見を獲得し、それらを、どのようにモデルに反映させるかという点が重要であることが分かる。即ち、水や土砂移行の物理モデルと放射性物質の化学形態の変化を記述する化学モデルの双方向を進展させ、日本の気候や地形及び土壌や植生を反映させた科学的モデルを構築する必要がある。一方、日本の河川で重要な要件として、河川の多くが、流域面積が比較的狭く急流に位置づけられ、降水後の応答が早く、強い降水イベントによる土砂運搬が放射性セシウムの移動に大きな寄与を占めているという事実があることを考慮する必要がある。従って、放射性セシウムの陸域動態モデルの精緻化に当たっては、森林上流域での流水と放射性物質の動態挙動と土砂生産過程のモデル化とその河川による運搬等も課題であることが分かった。このような課題の解決に当たっては、ユーザーによる改良が容易に可能で高速な計算が可能な分布定数型モデルの開発が急務であると言えよう。一方、放射性セシウムの動態研究で判明した、複雑な動態挙動をモデル化することは容易ではないが、沿岸域への影響を評価するだけの場合については、集中定数型の改良で十分に対応できる可能性があると言いたい。しかし、その際はパラメータ決定等をより科学的立場から検討を加えていく必要がある。

6.3 河口域動態モデルの試解析についての考察

降水により発生した流水や土砂は、河川水に運ばれ河口域に達する。しかし、河口域では、淡水と塩水が会う感潮域で複雑な物理化学現象が現れ、放射性セシウムの動態に影響を及ぼしていることが知られている。本事業では、感潮域で現れる塩淡混合過程と懸濁態の特徴的挙動を調査し、更に、それらの挙動と放射性セシウム動態との繋がりについて調査を行った。その結果、塩淡混合については、沿岸や外洋を中心に開発された一般的コードが採用している静水圧近似の下では、正確な挙動把握は困難となり、非静水圧計算条件の下、流体としての混合過程を追跡する必要があることが分かった。

流体としての塩淡混合過程と共に、懸濁態の挙動は複雑化し、塩分が増大すると、淡水中の懸濁態の化学的性質が変化することで、凝集と沈殿が進行するが、そのモデル化は、十分に進展していないことが分かった。実際、凝集と沈殿を制御するモデルとそのパラメータは、河口域単位での観測が必要な段階であり、今後の微視的なレベルの研究も含めて原理的探索が必須であることが分かる。

上記の調査結果を基に、本事業では、沿岸海域を高精度に取り扱う 3D-Sea-SPEC を活用し、非静水圧計算条件で、塩淡混合とそれに伴う懸濁態の凝集沈殿と放射性物質の動態挙動の感度解析を、複数のパラメータを変化させることで、上記の現象を再現できるかを試算した。その結果、河口域で現れる特徴的な凝集沈殿の再現に成功した他、放射性物質の特徴的動態についても、定性的レベルで観測された現象を十分に再現できることが確認できた。従って、今後の課題は、これらのパラメータの決定であり、観測を強化し、パラメータ取得を試行するか、物理化学的見地から、これらのパラメータを決定する必要がある。今後の展開としては、パラメータの現実的範囲を定め、海洋コードへのインプットとすることで、感度解析を行うことが現実的であると考えられる。

6.4 まとめと結論

本事業では、放射性物質が降着した陸域にて、降水に伴い発生する流水及び土砂により放射性物質が河川により運搬され、河口域で沿岸そして外洋へと流出する過程のモデル開発の現状調査を実施した。その結果、陸域でのモデル開発は進捗しているが、詳細な挙動については未解明な部分が残されており、モデル化の精度を上げる取り組みが、精力的に行われていることが分かった。また、放射性物質の陸域動態のモデルは、いずれも、従来の水文流出モデルを基に開発されており、それらのモデルを熟知し、その放射性物質への適用版として開発整備され利用されていることも分かった。従って、放射性物質の陸域動態モデルの現状は、水文流出モデルのパラメータ設定や入出力データ等における課題が継承されており、今後、水文流出モデルに対する更なる進展とリンクして発展すると考えられる。

一方、河口域での複雑な物理化学的過程と共に放射性物質がどのような挙動を示すかについては、日本の河口域が狭い領域に限定されていることもあり、十分な研究が実施されておらず、知見が十分に蓄積していないことが分かった。このような状況下、本報告では、従来の海洋モデルで開発された懸濁態モデルのパラメータを塩分濃度に依存するとして設定し、それらのパラメータを適切に選択すれば、河口域で見られる現象を十分に再現できる可能性があることを見出した。

これらの試開発（試解析及び試算）の結果より、今後実施すべき研究開発は、陸域での集中定数型モデルの整備（特にパラメータ決定法の整備）と分布型定数モデルの整備（公開 GIS ソフトへの実装による計算環境の改良とパラメータ決定法の整備）を併用する他、河口域でのモデルパラメータの決定プロセスの研究開発にあると言えよう。また、河口域モデルと海洋（沿岸）シミュレーションコードとのインターフェースを整備し、放射性物質の河川からの流出インベントリー（溶存態と懸濁態）を海洋コードへ接続を図ることも重要であることが分かる。

付録1 放射性物質（セシウム）動態モデルの研究開発機関へのインタビュー結果とまとめ

本節では、放射性物質の陸域動態モデルに関連し、研究開発を実施している3つの機関に、研究開発状況についてインタビューした結果を報告する。インタビューを実施した機関は、福島県の放射性セシウム動態研究を福島事故より精力的に実施している2つの研究機関（日本原子力研究開発機構の福島研究開発部門と同システム計算科学センター）と高精度な水文モデルを開発し陸水解析を主たる業務としている（株）地圏環境テクノロジーである。

1.1 日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門

日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門は、2011年3月に発生した1F事故以来、福島県の環境回復から1Fの廃止措置に至る幅広い事業に関連し、基礎基盤的研究開発の成果を左記事業へと展開することを主たる目標としている。そこで、今般、本事業「放射性物質の河川による動態評価手法の整備」に関連した研究開発を主に行っている廃炉環境国際共同研究センター・環境影響研究ディビジョン・環境動態研究グループをインタビューの対象とした。

本インタビューでは、本事業に関連する陸域動態モデルとして、令和2年1月15日に国立大学法人・福島大学と共同プレス発表を行った案件「川から海へ、セシウムはどれだけ流出したか—観測結果とモデルを組み合わせたセシウム流出量の推定方法を開発—」の成果を中心に、そのモデルの研究開発状況についてインタビューした。上記の研究開発では、当該機関により開発済みのタンクモデルMERCURYコードを利用しており、当該コード（モデル）について、下記の項目よりインタビューした結果をまとめる。

(1)モデルの概要(MERCURYコード)

MERCURYとは、降水量から河川水流量を計算できるタンクモデルを指し、実測値をベースとした河川水流量と懸濁物質流出量の関係（L-Q式）及び河川水中の放射性セシウム濃度の経験式を組み合わせることで、河川から海洋に流出する放射性セシウムを河川単位で、且つ、降雨に対応するような時間単位で、かつ数年という長期間に対しても迅速に算出できる計算モデルである。

(2)実績

福島県の阿武隈川および浜通り2級河川を対象に、事故初期から2017年までのセシウム137流出量を推定し、事故初期の河川を経由した海洋への流出量は、1Fからの直接放出および大気を経由したフォールアウトに比べ、2桁程度小さいことを明らかにした。本成果は「Journal of Environmental Radioactivity」にて発表した[1-1]。

(3)適用範囲

河川流量及び流量と懸濁態物質濃度の実測値がある河川であれば、上流から下流に至るいずれの場所においても適用可能である。

(4)必要パラメータとその決定手法

土砂及びセシウム流出に関するパラメータは、実測値から最小二乗法により決定する。タンクモデルに関しては、流量の観測値を用いて、水文モデルの評価に良く用いられる Nash 係数を参考に、タンクモデルの流出率を決定する。

(5)放射性セシウムの溶存態及び懸濁態の動態評価に係る実装手法

溶存態及び懸濁態放射性セシウムに対し、福島県内で測定された実測値を、2成分指数関数モデルにフィッティングした経験式を MERCURY に実装している。

1.2 日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター

日本原子力研究開発機構・システム計算科学センターとは、日本原子力研究開発機構の共通事業組織の一つであり、原子力研究開発全般に対し、計算科学による研究開発を支援する一方、自ら計算科学基礎基盤の研究開発を行っている。尚、2011年3月に発生した1F事故以降は、福島県の環境回復から1Fの廃止措置に至る幅広い事業に関連し、基礎基盤的研究開発を行う福島研究開発部門と連携し、特に、福島放射性物質の環境動態シミュレーション技術の高度化を進めるべく研究開発を実施している。今般、本事業に関連し、陸域及び沿岸域の環境動態シミュレーション技術の研究開発を行っているシステム計算科学センター・シミュレーション技術開発室をインタビューの対象とした。

本インタビューでは、降雨後の地表流が河川流として河口域に到達する際に重要となる、河川及びダム等での放射性物質の環境動態モデルと河口域での放射性物質の環境動態モデルを研究開発し、一つの統合コード(3D-Sea-SPEC)として開発を進めている状況をインタビューした。尚、本インタビューでは、河川及びダム域での研究開発状況について、下記の観点からインタビューを行った結果をまとめる。

(1)モデルの概要(3D-Sea-SPECコード:河川及びダムを主たる対象)

開発中の3D-Sea-SPECコードとは、3次元流動場の連続の式と運動方程式を計算する3次元流動場シミュレーションコードである。水平方向は直交格子で分割しているが、鉛直方向は多重シグマ座標系により分割することで川底や湖底の形状を正確に表現可能である。また、準3次元計算(静水圧近似計算)及び3次元計算(非静水圧計算)が選択可能である他、ネスト構造により、一部を非静水圧で計算し、他を静水圧近似として計算する等の切り分けも可能である。例えば、河口域に応用した場合、塩淡混合が起こる箇所を非静水圧で計算し、他を、静水圧近似を用いて計算することで塩淡混合過程を精度良く且つ効率的にシミュレーションすることが可能となる。

(2)実績

福島県浜通り地区を流れる請戸川の上流にある大柿ダム内の貯留水に対し、夏季に確認される水温躍層を再現することに成功した(躍層の数値的安定性を保つため、クリーブ補正等の機能を実装)。その結果、躍層形成期のダム湖内の浮遊砂の振る舞いを評価可能となった他、非静水圧計算を行うことで、鉛直混合による躍層解消の様子も再現可能とした。本研究の成果は国際会議「SNA+MC2020」(会議自体は中止)の査読付き予稿として「Proc. of SNA+MC2020」にて発表[1-2]。

(3)適用範囲

水域であれば、河川、ダム、河口、沿岸等、様々な場面に適用可能で、準3次元計算及び3次元計算を選択して実施することが可能である。尚、本コードには、塩分濃度とそれに伴い生じる密度差を考慮する機能も付いており、適切な塩分濃度を付与することで沿岸の他、海洋にも適用可能である。河口域に適用すれば、塩淡混合過程と懸濁物質の凝集沈殿等も原理的にシミュレーション可能となっている。

(4)必要パラメータとその決定手法

水平方向の渦動粘性係数は、LES手法で用いられるスマゴリンスキーモデルを採用し、鉛直方向は実験や経験的定数を付与する。懸濁態粒子と放射性セシウムの吸脱着に関するパラメータは実測値があればそれを用いることが可能である。浮遊砂の沈降速度はストークスの式を用いて計算する。また、懸濁態の凝集・分解等もシミュレーション可能である。

(5)放射性セシウムの溶存態及び懸濁態の動態評価に係る実装手法

溶存態及び懸濁態セシウム（粒径に依存し）は、計算で得られた流れ場に合わせて移流拡散させる方法を取る。また、設定した分配係数と時定数を基に、溶存態及び懸濁態セシウムの移動量が計算可能な他、両相間の移行も計算可能である。様々な状況を再現可能とするため、懸濁態の複数の挙動モデルを実装している。

1.3 (株) 地圏環境テクノロジー

(株) 地圏環境テクノロジーは、地圏（陸域を中心とした生活圏）における水問題を中心に、情報・ノウハウ・解析技術を組み合わせて、幅広い分野で科学的ソリューション&コンサルティング、解析ツールライセンス販売、コンテンツ販売、講習会等を展開しており、特に、統合型水循環シミュレーションシステム「GETFLOWS」を核とし、陸域の自然環境における水循環現象の解析を主たる業務としている。本節では、そのGETFLOWSに対し、下記の観点からインタビューした結果を記す。

(1)モデルの概要(GETFLOWS)

GETFLOWSは統合型陸域水循環モデルであり、その最大の特徴は、表流水と地下水の完全水理的連成により地表水、地下水の相互交換挙動を考慮していることである。また、流体・熱・化学物質・土砂の同時輸送現象を包含したきわめて統合されたモデルとなっている。独自の高速ソルバー（前処理付き共役残差法）や逐次陽化処理により、数値的安定性や高速化を実現し、流域規模での解析も可能である。

(2)実績

地表水・地下水連成解析による流域全体の評価が可能なることから、一般的な地下水解析だけでなく、流域規模での水資源評価・管理などへの適用が行われている[1-3~1-4]。尚、放射性物質の陸域動態に関しては、例えば福島第一原子力発電所敷地内における汚染水問題にかかる核種移行解析及び対策効

果の予察解析[1-5]、同事故に伴って降下した放射性核種の流域規模での水・土砂・核種連成解析[1-6~1-7]などへの適用が挙げられる。

(3)適用範囲

数値シミュレーション上、時間的・空間的スケールの制約はなく、数 mm スケールの室内試験系から数 1,000km 超スケールの大循環系、時間的には秒単位から数億年というような未来まで伸ばすことも可能である。中でも流域スケールの解析では、既往のシミュレータの多くが、河川や斜面等の流域コンポーネントを分離し、経験的パラメータを用いて再結合（統合化）するのが基本となっているが、GETFLOWS では物理法則と数学モデルに基づいた地上・地下連成系における統合化によって、特定のコンポーネントや関係性を定義することなく解析できるのが強みである。

(4)必要パラメータとその決定手法

必要パラメータとしては、流体物性や化学物質特性（密度、粘性、分子拡散係数、半減期等）、降水量や蒸発散等の気象条件、地形標高、水理物性値（粗度係数、絶対浸透率、有効間隙率等）、その他水利用や人工構造物（地下水揚水、ダムなど）が挙げられる。基本的に GETFLOWS はシミュレータ特有の経験的パラメータを含まないため、主要なデータソースから収集したデータや、文献値等を基に各パラメータを設定することが基本である。

(5)放射性セシウムの溶存態及び懸濁態の動態評価に係る実装手法

GETFLOWS では、放射性セシウムを水相中の溶存態及び土砂（浮遊砂または岩石）への吸着態として取り扱う。尚、溶存態及び土砂吸着体については、移流分散・拡散、吸着、脱離、壊変、崩壊連鎖などのプロセスを考慮している。解析手順としては、はじめに地表水・地下水連成系の流動解析を行い、地表水及び地下水の流速場を得る。次いで、地表水中の土砂（懸濁態物質）の移流拡散解析を行う。最後に放射性核種に対し、地表水・地下水や懸濁態物質の移動量を用い、移流拡散解析を行う。

付録2 分布定数型モデルの解析手順

2.1 ArcSWAT コード

2.1.1 プロジェクトの作成

ArcGIS を起動する。前準備としてカスタマイズ>エクステンションにおいて、「Spatial Analyst, SWAT HRU Delineator, SWAT Project Manager, SWAT Watershed Delineator」を選択する。また、カスタマイズ>ツールバーにおいて、「Spatial Analyst, ArcSWAT」をアクティブにする。

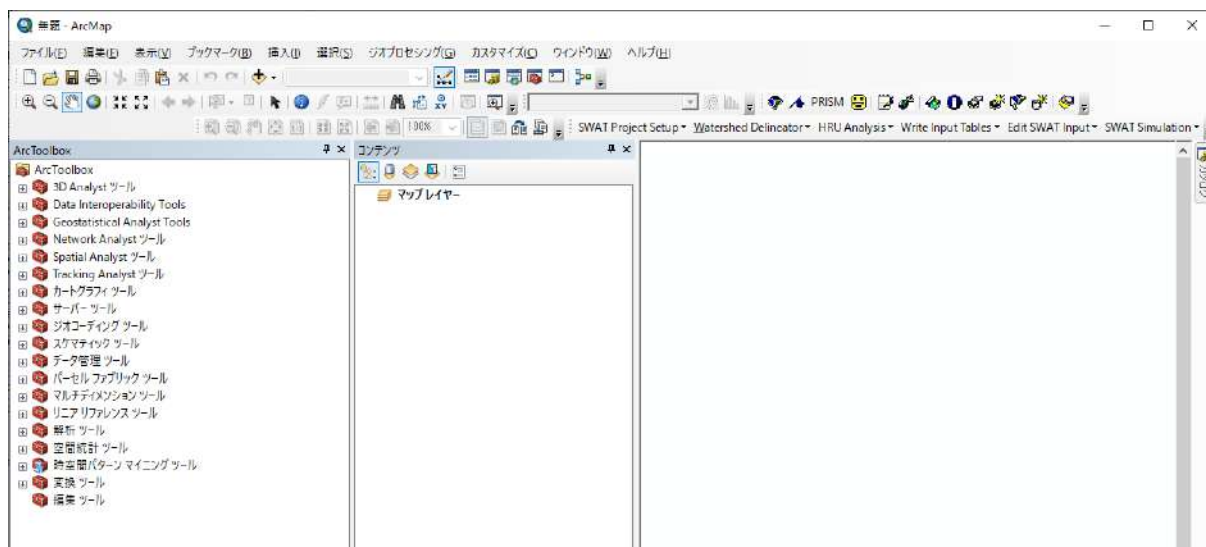


図 2-1 プロジェクト作成①(ArcSWAT)

ArcSWAT ツールバーから、「SWAT Project Setup>New SWAT Project」を選び作業フォルダを指定する。

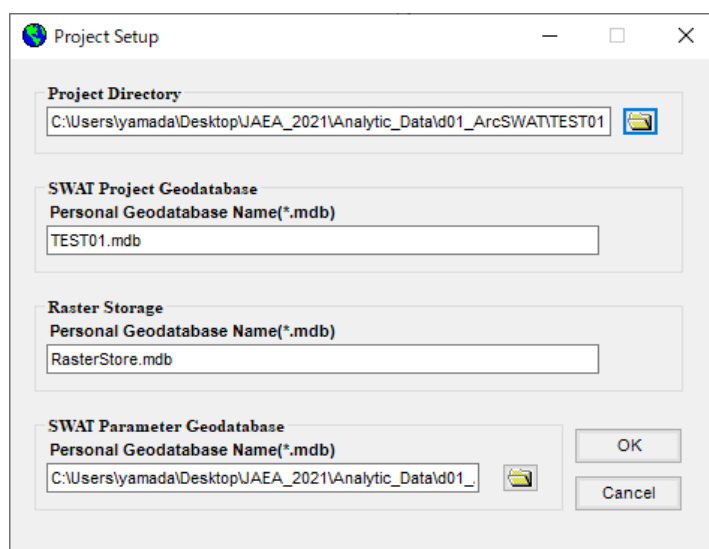


図 2-2 プロジェクト作成②(ArcSWAT)

プロジェクトを作成すると、作業フォルダには下記のようなファイルが作成される。

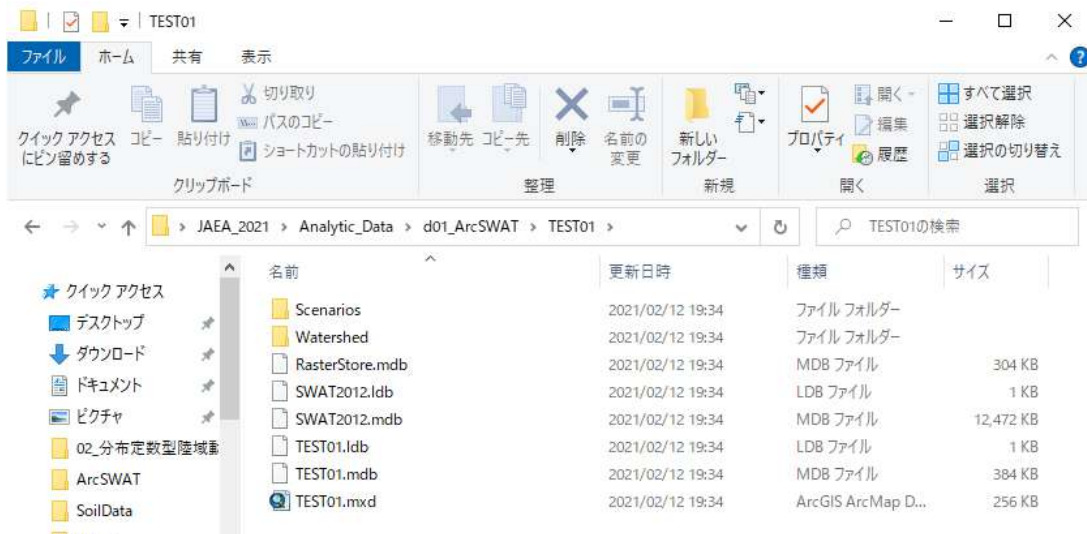


図 2-3 プロジェクト作成③(ArcSWAT)

2.1.2 流域データの設定

ArcSWAT[2-1]には Spatial Analyst(空間解析)の機能を利用し、標高データを利用して計算で用いる流域分割を自動的に処理する機能が付帯している。まず、ArcSWAT ツールバーから「Watershed Delineator > Automatic Watershed Delineation」を選択する。図 2-4 の①を押下して、「Open DEM Raster>Load from Disk」を選択して、流域をカバーする地形データ（ラスター形式）のDEMデータファイルを指定する。

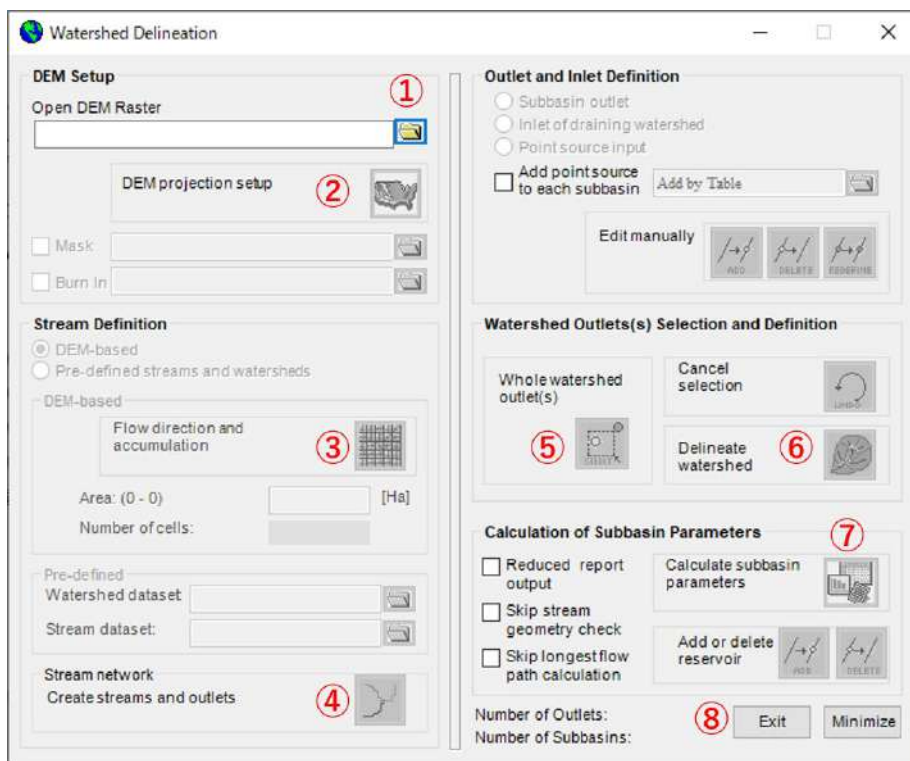


図 2-4 流域データ設定①(ArcSWAT)

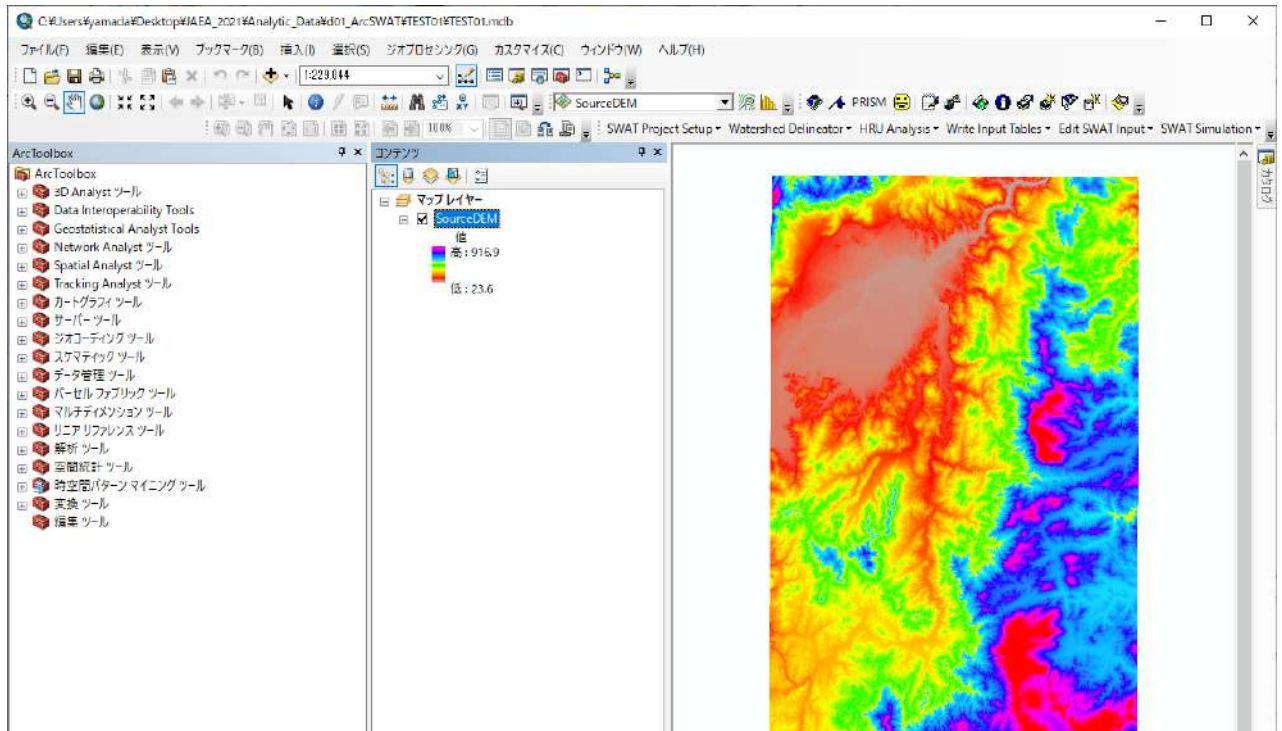


図 2-5 流域データ設定②(ArcSWAT)

図 2-4 の②の DEM Projection Setup(投影設定)のマークをクリックして、標高の単位を指定する Z unit においてメートルを指定する。

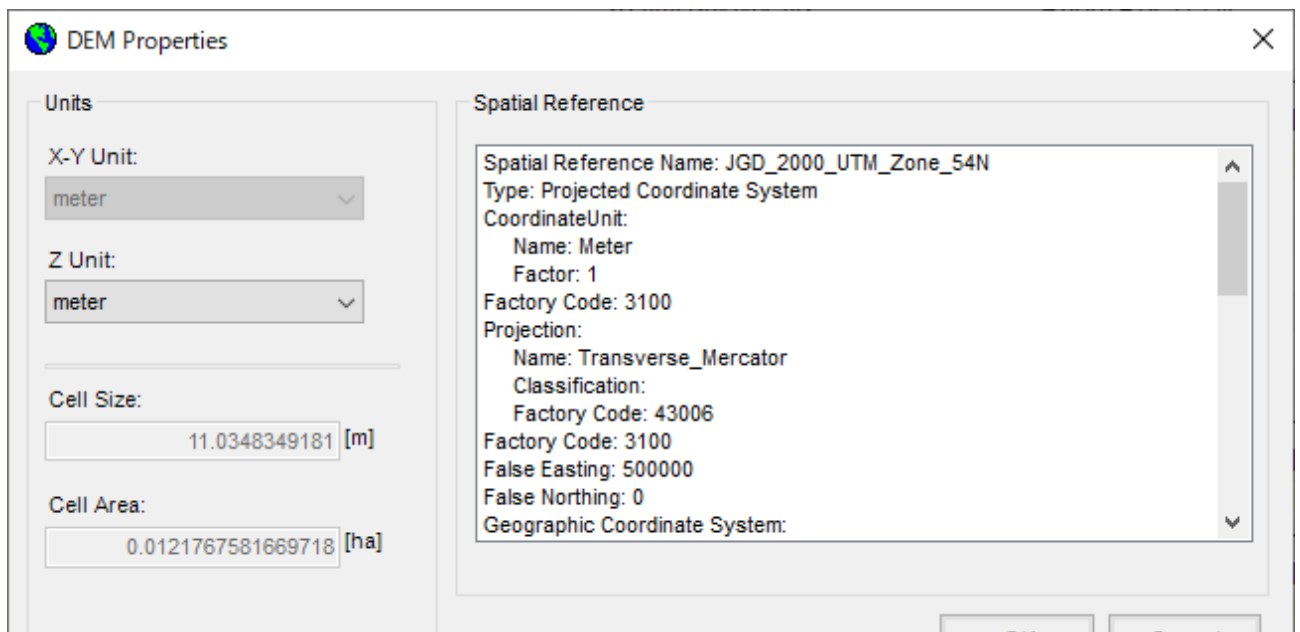


図 2-6 流域データ設定③(ArcSWAT)

図 2-4 の③の Stream Definition(流路定義)において、DEM-based を選択し、格子マークをクリックする。また、図 2-4 の④の Stream network(流路ネットワーク)においてマークをクリックすると、自動的に河道網が発生し、画面上に表示される。

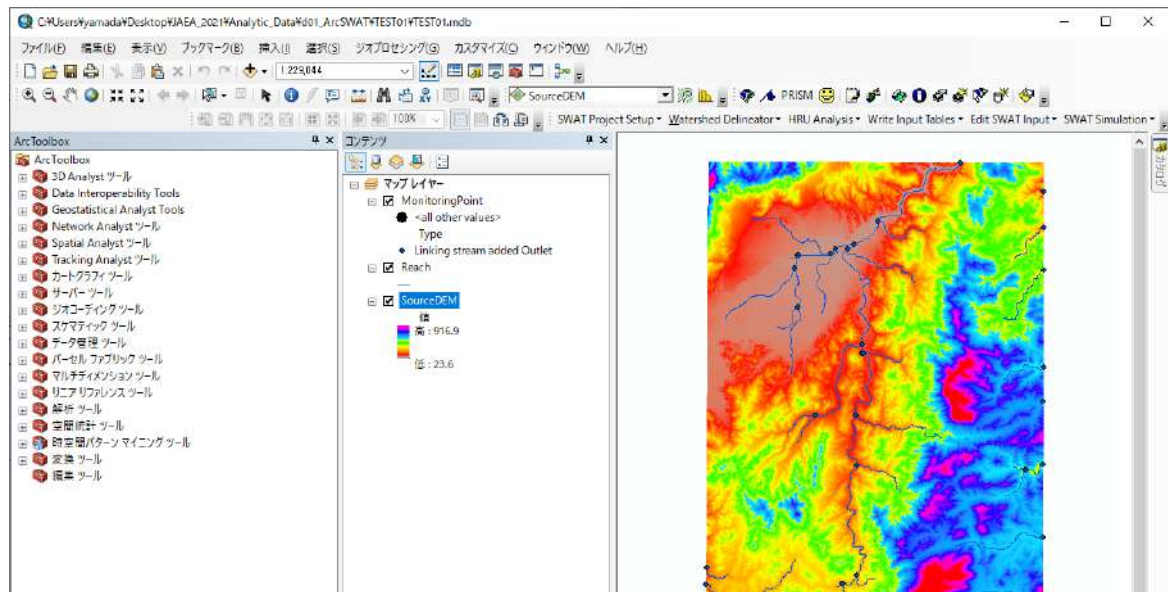


図 2-7 流域データ設定④(ArcSWAT)

図 2-4 の⑤の Whole watershed outlet をクリックし、流域末端のポイントを画面上のマウスで指定する。

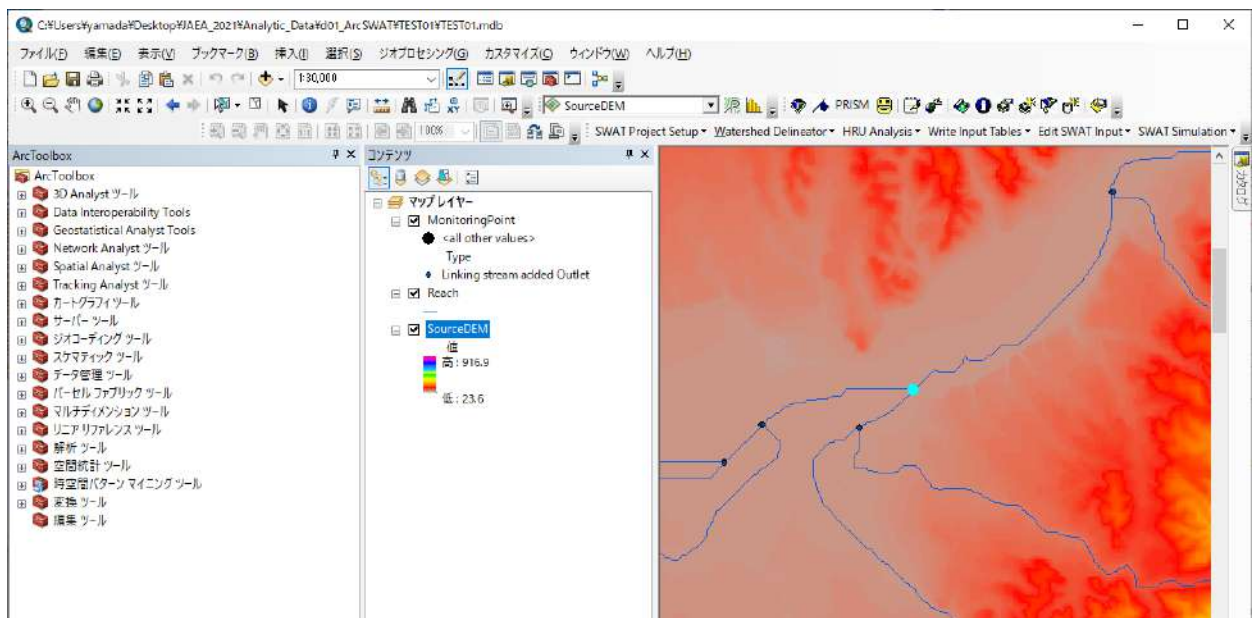


図 2-8 流域データ設定⑤(ArcSWAT)

図 2-4 の⑥の Delineate Watershed(流域描画)のマークをクリックすると、流域が小流域に分割され、画面に表示される。

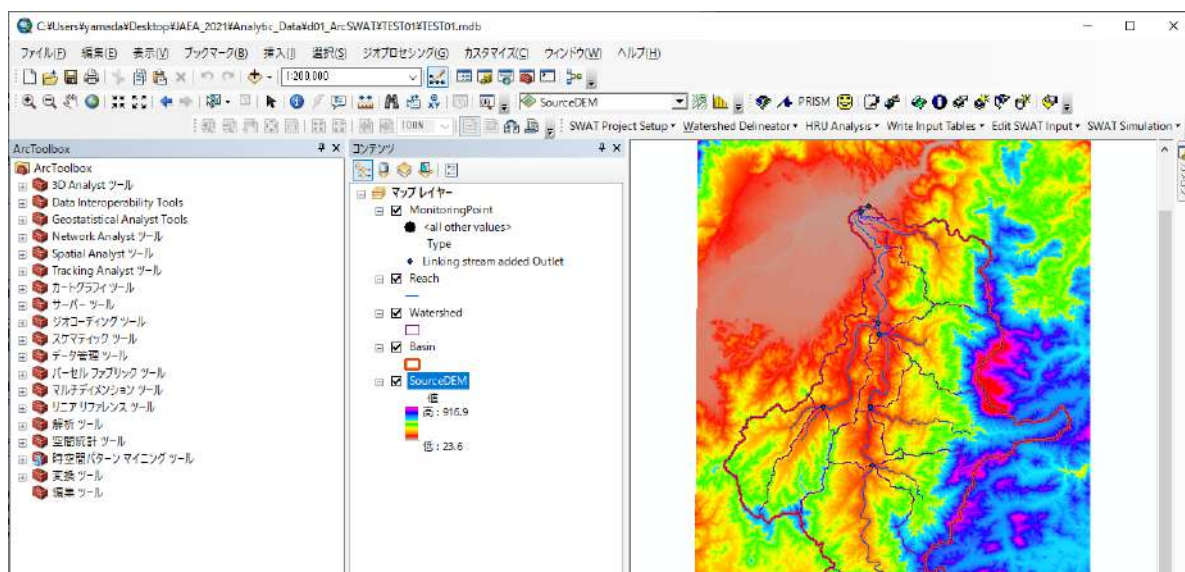


図 2-9 流域データ設定⑥(ArcSWAT)

図 2-4 の⑦の Calculate Subbasin parameter のマークをクリックすると、流域が小流域に分割され、画面に表示される。最後に EXIT キーをクリックして流域設定を終了する。

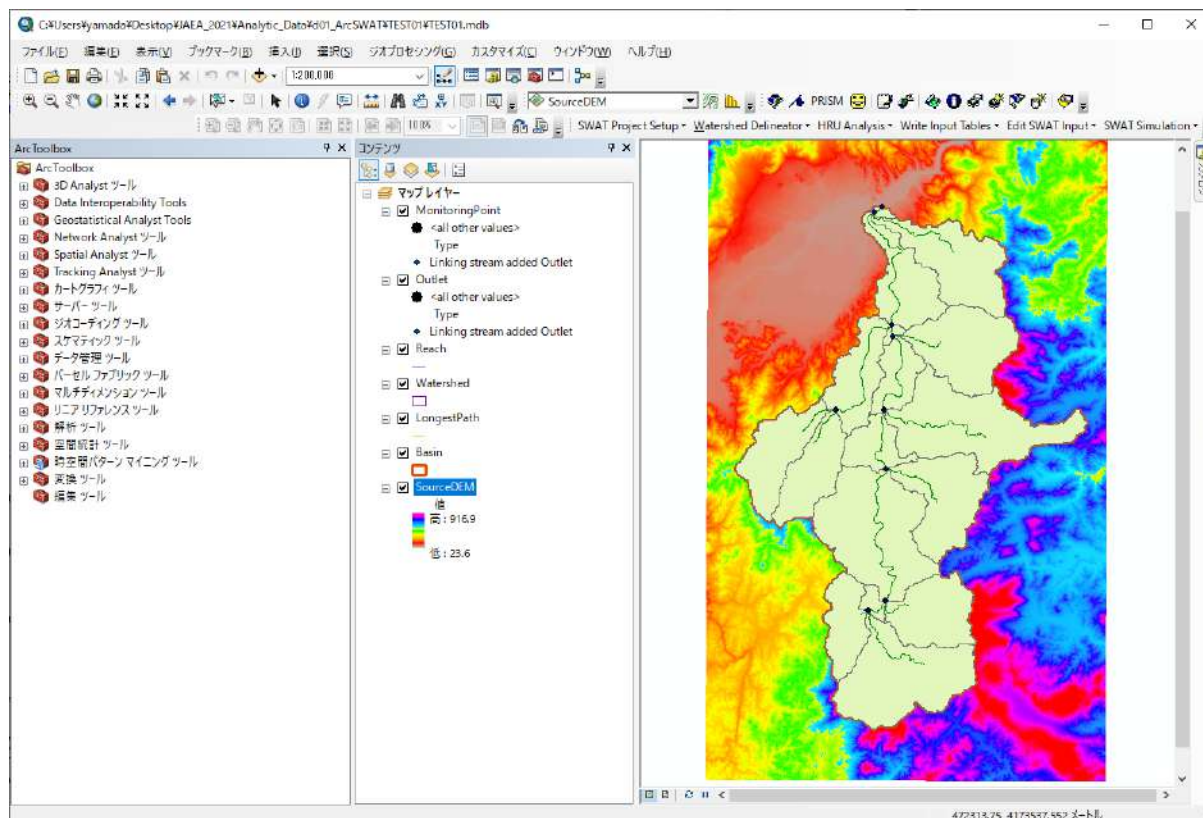


図 2-10 流域データ設定⑦(ArcSWAT)

2.1.3 HRU Analysis(水門流出単位解析)

① 前処理

あらかじめ、ArcGIS で作成した土地利用データを読み込む（マップレイヤー右クリック>データの追加）。

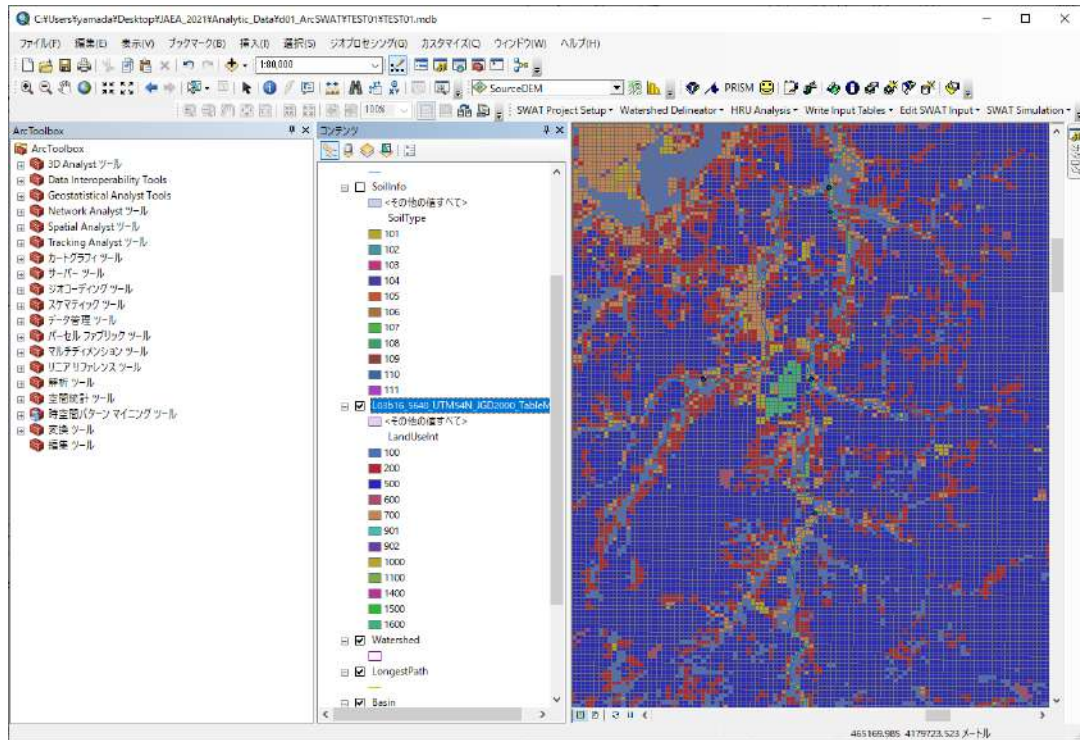


図 2-11 HRU 設定：前処理①(ArcSWAT)

あらかじめ、ArcGIS で作成した土壤データを読み込む（マップレイヤー右クリック>データの追加）。

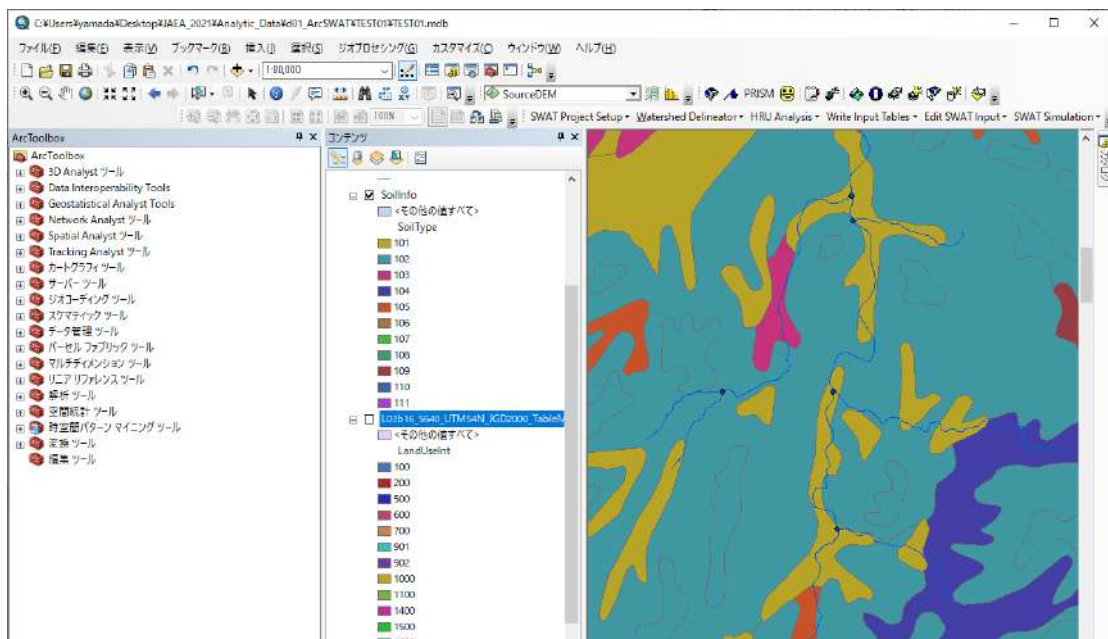


図 2-12 HRU 設定：前処理②(ArcSWAT)

あらかじめ、計算で使用する土壌物理諸元を定義する。ArcSWAT エクステンションからタブ「Edit_SWAT_Databases」を選択して、新規にユーザー土壌名を登録する。

「Edit_SWAT_Databases>Select Database to Edit>User Soils Edit>New Add」によって新規土壌を登録できる。

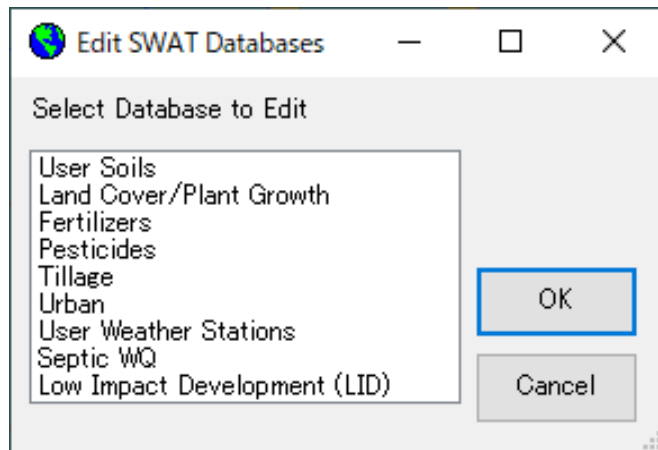


図 2-13 HRU 設定：前処理③(ArcSWAT)

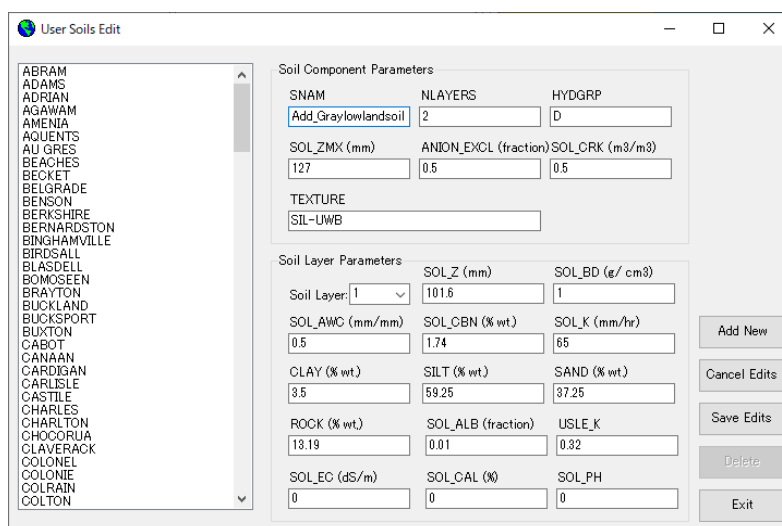


図 2-14 HRU 設定：前処理④(ArcSWAT)

今回の解析では、それぞれの数値コードに対して、土壌タイプを割り当てる。

101	-->	灰色低地土	-->	Add_Graylowlandsoil
102	-->	褐色森林土	-->	Add_Brownforestsoil
103	-->	褐色低地土	-->	Add_Brownlowlandsoil
104	-->	黒ボク土	-->	Add_Andosols
105	-->	グライ土	-->	Add_Gleysoil
106	-->	泥炭土	-->	Add_Peatsoil
107	-->	未熟土	-->	Add_Immaturesoil
108	-->	岩屑土	-->	Add_Debrissoil
109	-->	岩石地	-->	Add_Rockygroundsoil
110	-->	赤黄色土	-->	Add_Redyellowsoil
111	-->	ポドゾル	-->	Add_Podzols

② 土地利用データ

「Land Use Grid > Select Land Use > Select Land Use layer(s) from the map」を選択して、「Shapefile or Feature Class」から ArcGIS に読み込んだ土地利用データを選択する。

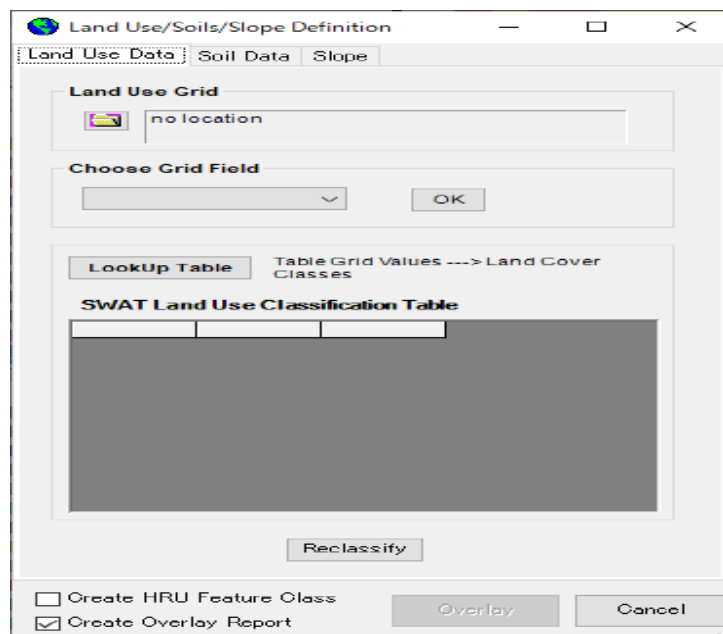


図 2-15 HRU 設定：土地利用データ①(ArcSWAT)

このとき、「Pick field grid code values」では土地利用コード（数値）が定義された属性フィールドを選択する。

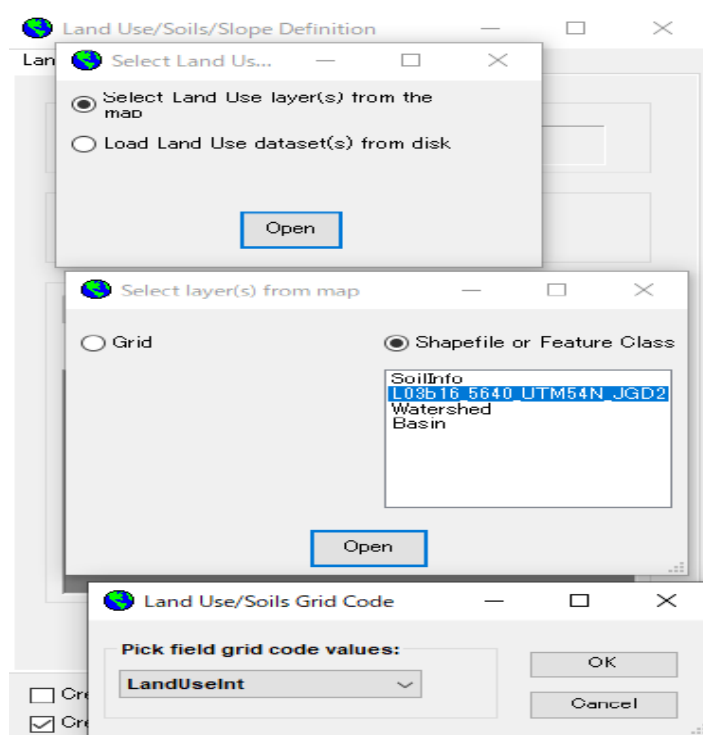


図 2-16 HRU 設定：土地利用データ②(ArcSWAT)

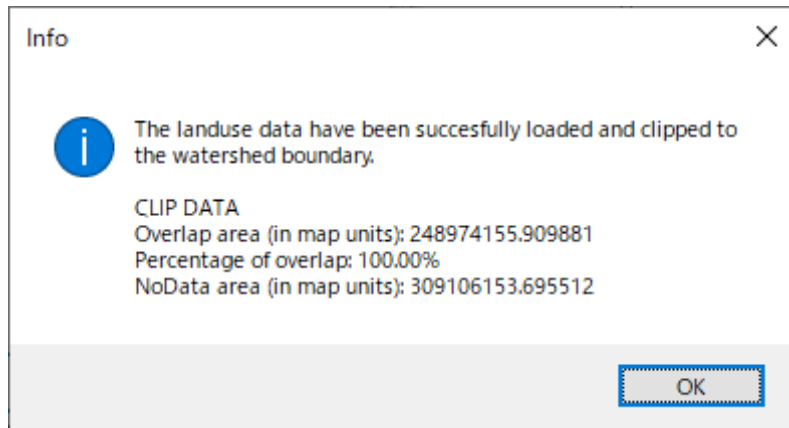


図 2-17 HRU 設定：土地利用データ③(ArcSWAT)

「Choose Grid Field」から VALUE を選択する。また、それぞれの属性値に対して「Land Cover Database」のタイプを適切に割り当てる。

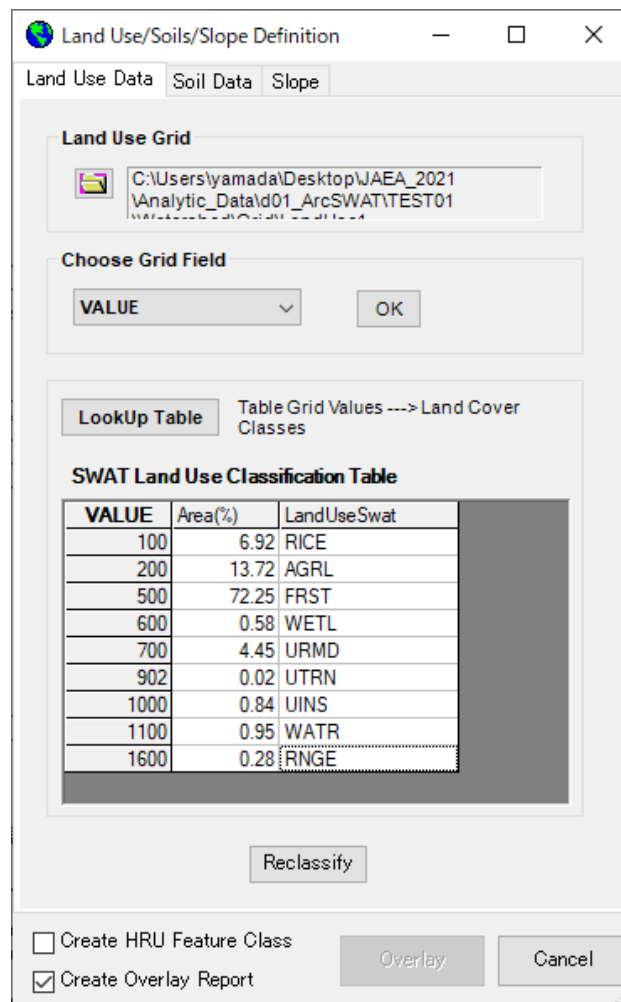


図 2-18 HRU 設定：土地利用データ④(ArcSWAT)

最後に「Reclassify」ボタンを適用する。

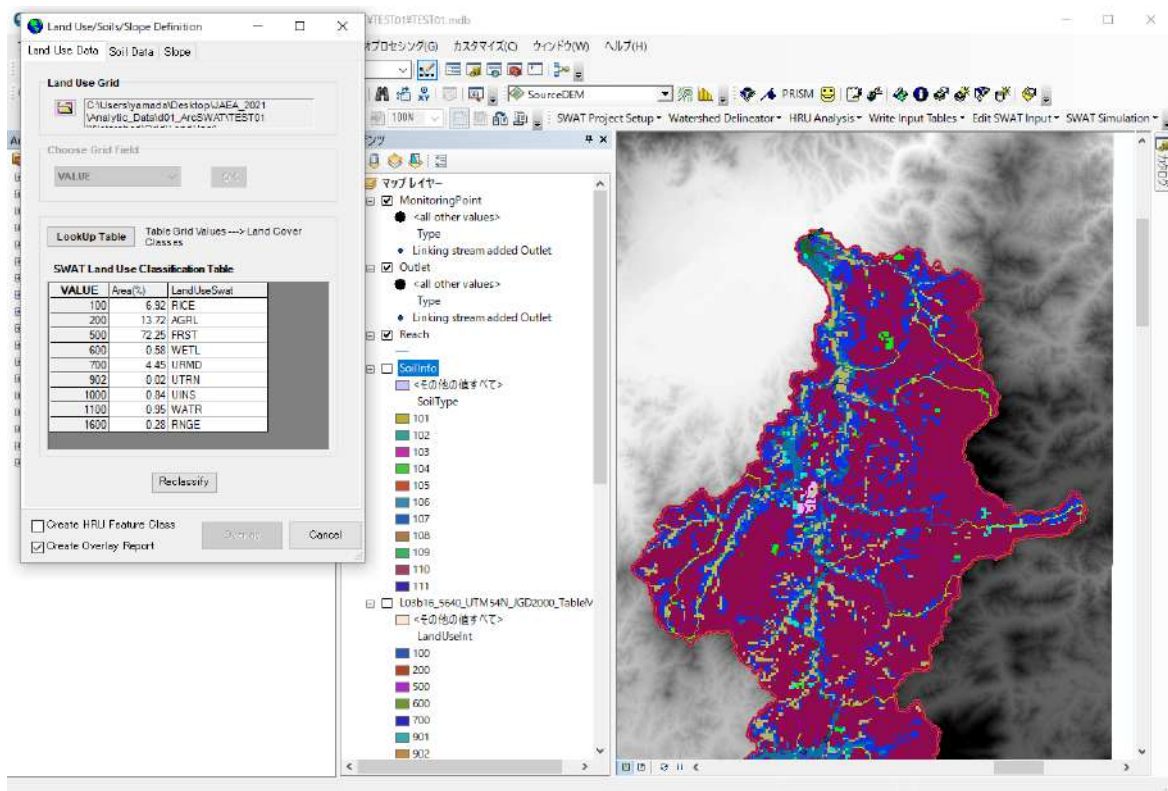


図 2-19 HRU 設定：土地利用データ⑤(ArcSWAT)

ArcSWAT の Land Cover/Plant には、主要なものとしては下記のタイプがある。

[Crops]

- RICE 田
- PAST 牧草地 (Pasture)
- OAK 常緑樹
- RNGE 草地 (Range-Grasses)
- RNGB 雑木林 (Range-Brush)
- WATR 水 (Water)
- FRST 森-混在 (Forest-mixed)
- FRSD 森-落葉樹 (Forest-Deciduous)
- FESC 森-常緑樹 (Forest-Evergreen)
- AGRL 汎用の農業用地 (Agriculture Land Generic)
- AGRR コーンなどの列に並べて耕作する作物の農業用地 (Agriculture Land Row Crops)
- WETR 湿地-森 (Wetlands-Forested)
- WETL 湿地-混在 (Wetlands-Mixed)
- WETN 湿地-森でない何か (Wetlands-Non-Forested)

[Urban]

- UCOM 商業用地 (Commercial)
- UIDU 工業用地 (Industrial)
- UINS 組織用地 (Institutional)
- URBN 住宅 (Residential)
- URHD 住宅高密度 (Residential-High Density)
- URLD 住宅中密度 (Residential-Medium Density)
- URLD 住宅低密度 (Residential-Low Density)
- UTRN 交通 (Transportation)

今回の解析では、それぞれの属性値に対して次の土地利用タイプを割り当てる。

- 100 RICE
- 200 AGRL
- 500 FRST
- 600 WETL
- 700 URMD
- 902 UTRN
- 1000 UINS
- 1100 WATR
- 1600 RNGE

③ 土壌データ

「Soil Data > Soils Grid > Select Soils Data > Select Soils layer(s) from the map」を選択して、「Shapefile or Feature Class」から ArcGIS にあらかじめ読み込んだ土壌データを選択する。

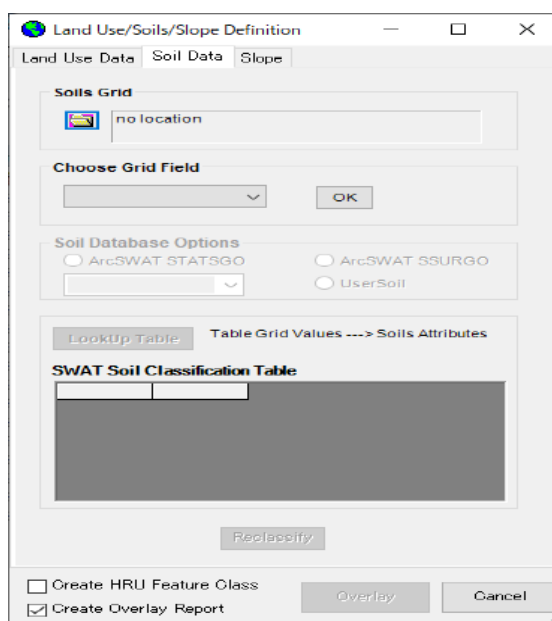


図 2-20 HRU 設定 : 土壌データ①(ArcSWAT)

このとき、「Pick field grid code values」では土壌コード（数値）が定義された属性フィールドを選択する。

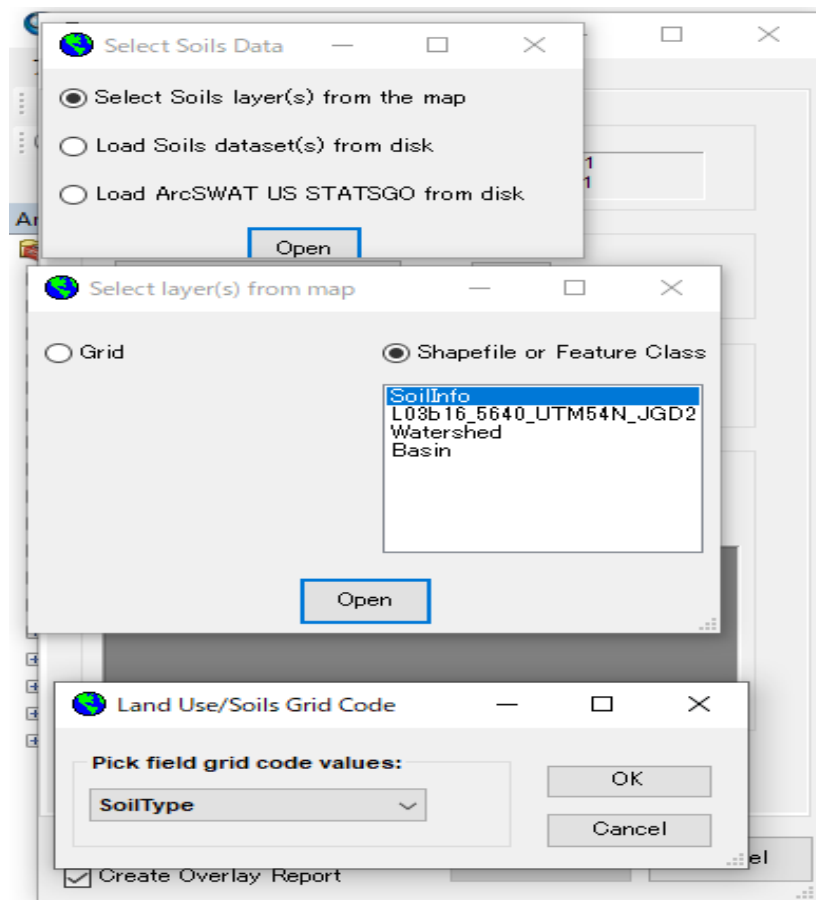


図 2-21 HRU 設定：土壌データ②(ArcSWAT)

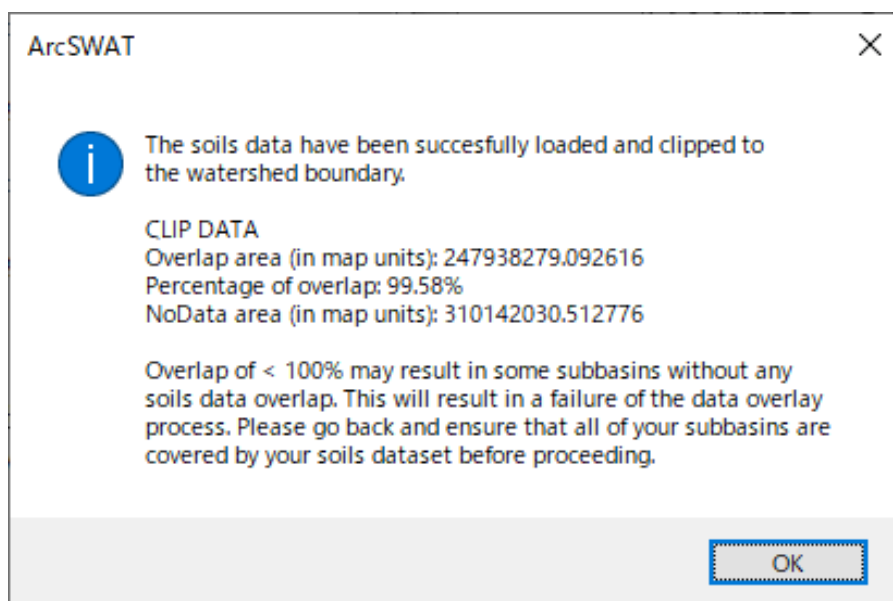


図 2-22 HRU 設定：土壌データ③(ArcSWAT)

「Choose Grid Field」から VALUE を選択する。「Soils Database Options」では UserSoil を選択する。そして、「SWAT Soil Classification Table」それぞれの数値コードに対して適切に土壌タイプを割り当てる。ここで、割り当てる土壌タイプは①で、あらかじめ作成したタイプを指定する。

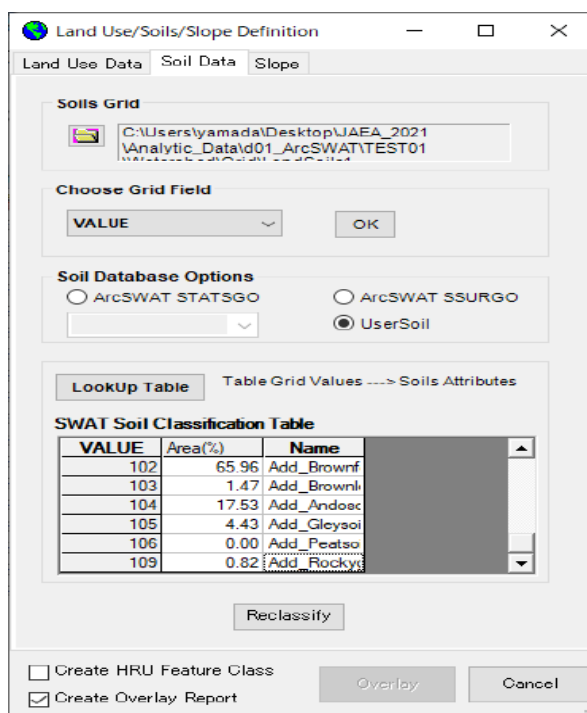


図 2-23 HRU 設定：土壌データ④(ArcSWAT)

最後に「Reclassify」ボタンを適用する。

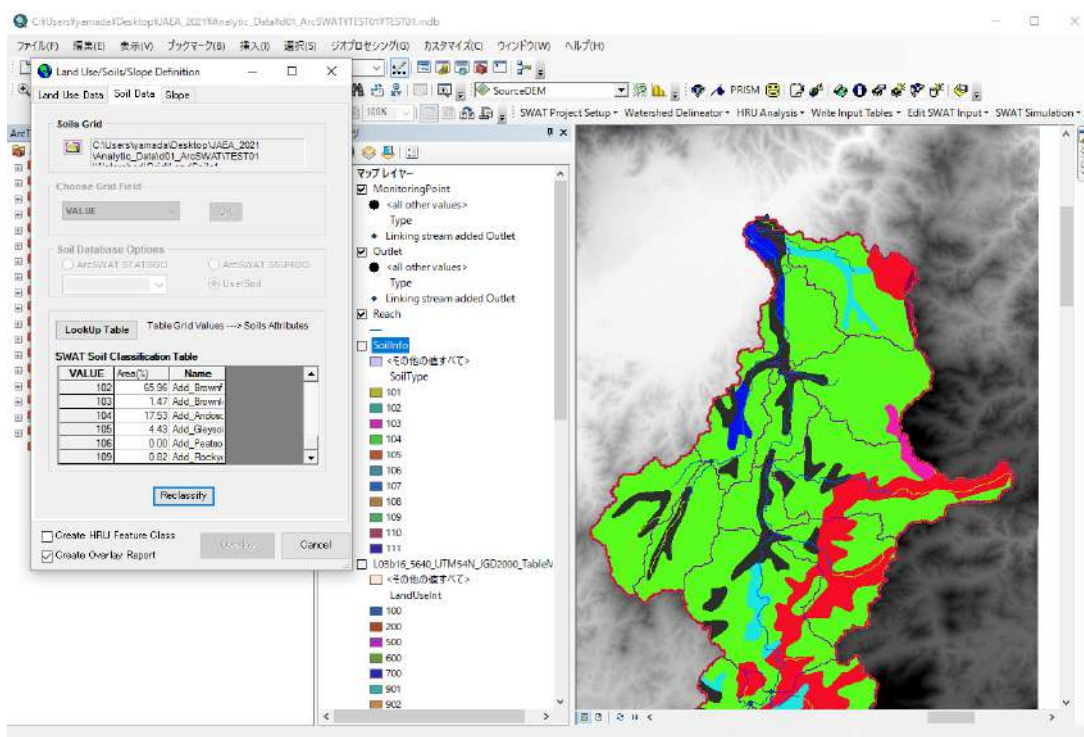


図 2-24 HRU 設定：土壌データ⑤(ArcSWAT)

④ 斜面データ

Slope タブの Slope Discretization 枠において、複数斜面の Multiple slope を選択する。Slope Classes 枠において、例えば斜面勾配を3つに分類する場合、slope classes の値をプルダウンより3を選択。Current Slope class において、例えば1番目の斜面の勾配を0~5%以下と仮定した場合、slopeclass を1、Class Upper limit を5 と入力し、Add キーをクリック。同様に2番目の斜面の値を10 と入力すると、SWAT Slope Classification Table にクラス分けされた斜面の諸元が表示される。

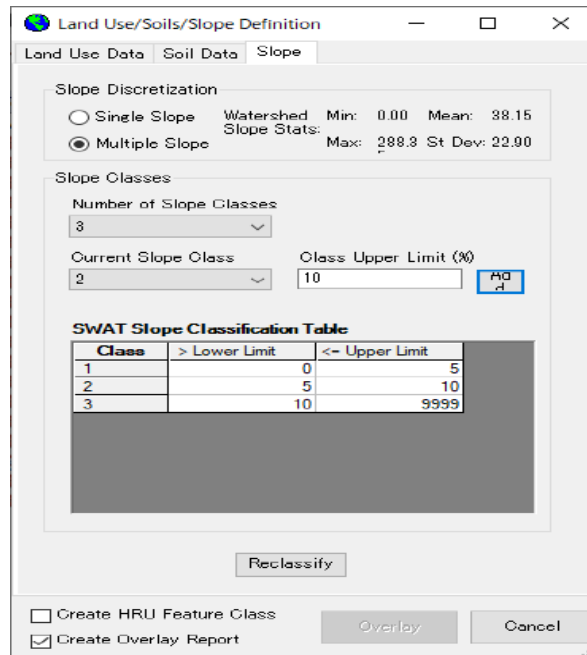


図 2-25 HRU 設定：斜面データ①(ArcSWAT)

最後に Reclassify(再分類)をクリック。

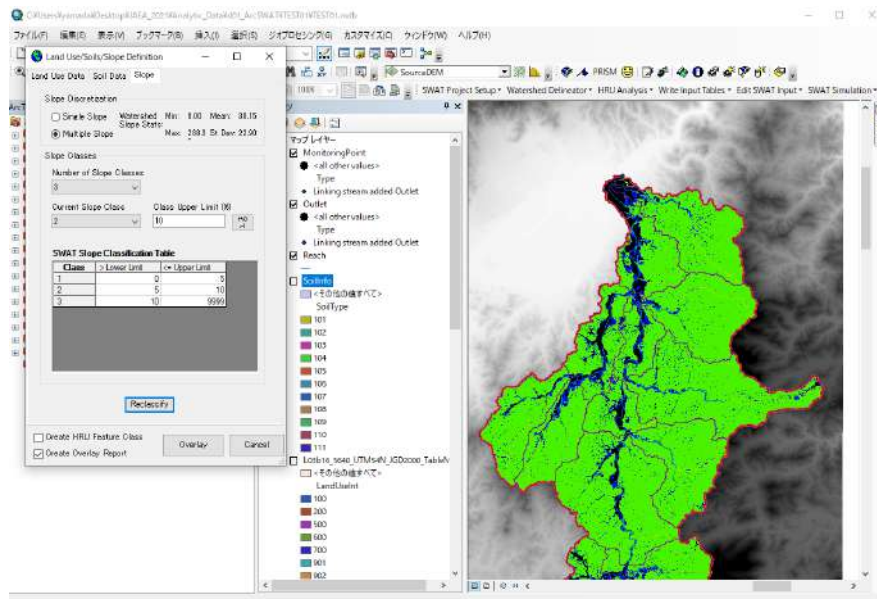


図 2-26 HRU 設定：斜面データ②(ArcSWAT)

土地利用、土壌、斜面の設定が終了すると、Overlay キーがアクティブになるので、クリックする。

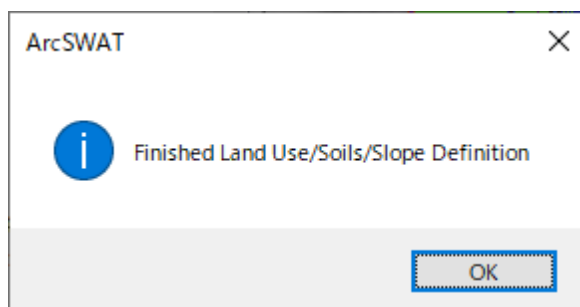


図 2-27 HRU 設定 : 斜面データ③(ArcSWAT)

「HRU Definition > HRU Thresholds > HRU Definition > Dominant Land Use, Soils, Slope > Create HRUs」を選択する。以上で HRU の設定が終了する。

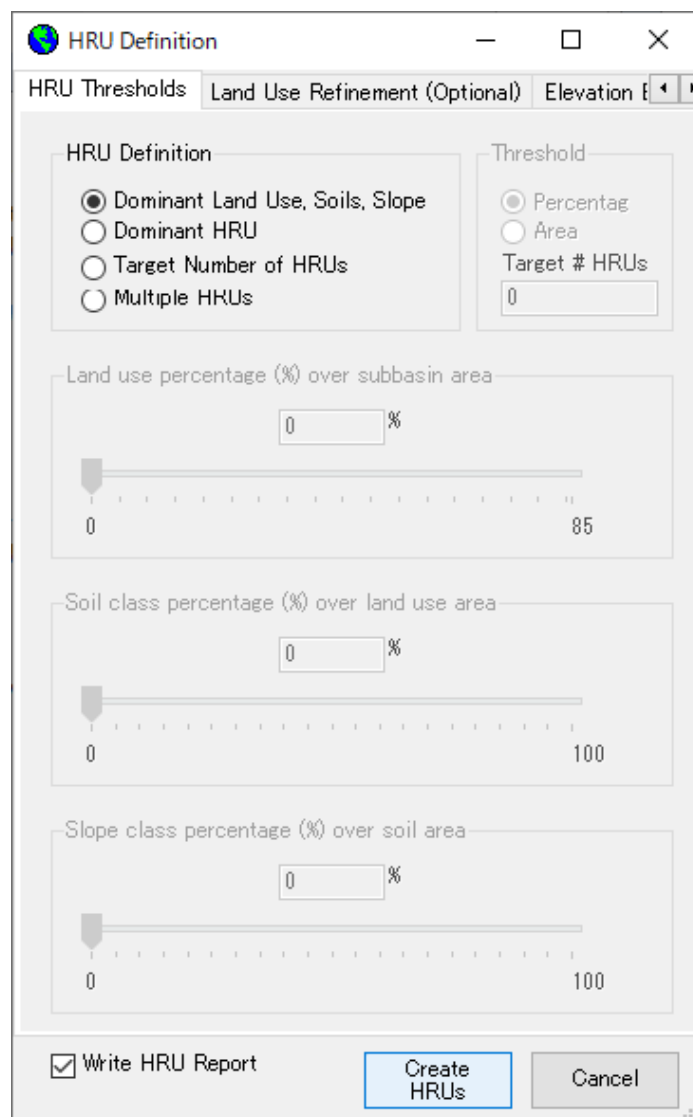


図 2-28 HRU 設定 : 斜面データ④(ArcSWAT)

2.1.4 気象データの入力

ArcSWAT に気象データを設定する。はじめに、ArcSWAT ツールバーから、「Write Input Tables>Weather Stations>Weather Data Definition>Weather Generator Data>Select Monthly Weather Database」から、「Locations Table」から WGEN_user を選択する。

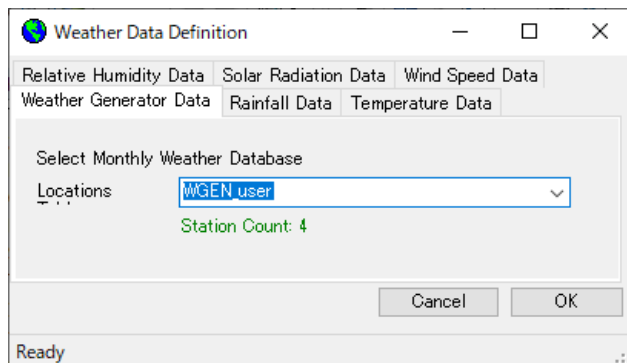


図 2-29 気象データ設定①(ArcSWAT)

降雨量データを設定する。「Weather Data Definition>Rainfall Data」を選択する。「Precip Timestep」を Daily とし、「Raingages」を選択しファイルパスを指定する。

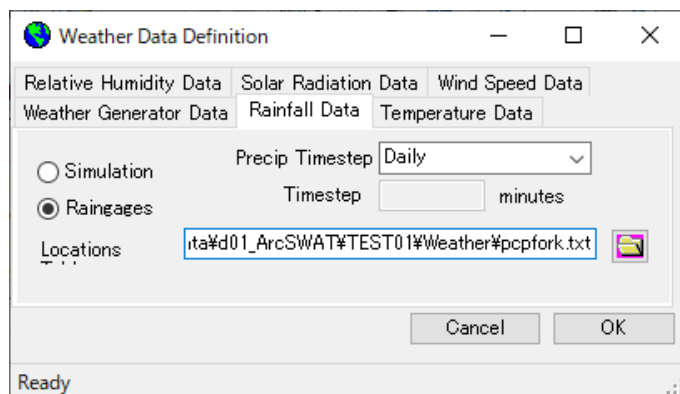


図 2-30 気象データ設定②(ArcSWAT)

今回はプロジェクトフォルダの直下に「Weather」フォルダを作成し、降雨量データを指定するファイル「pcpfork.txt」と「hop0pcp.txt」を用意した。

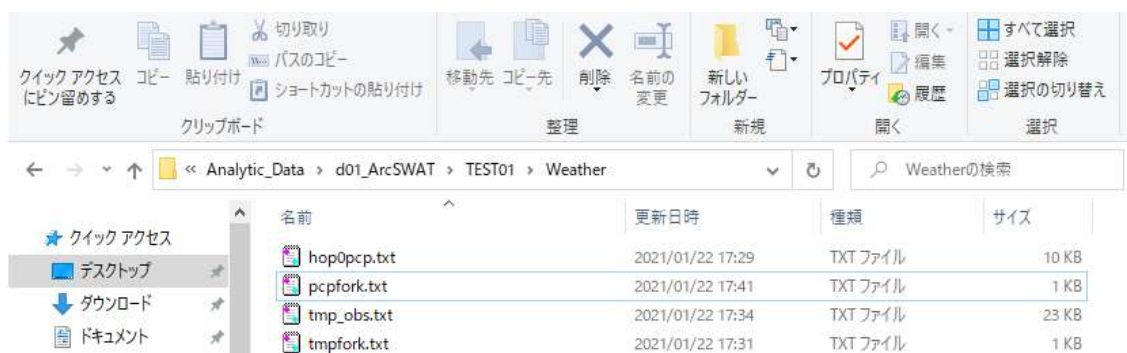


図 2-31 気象データ設定③(ArcSWAT)

ファイル「pcpfork.txt」には、降雨量データの観測所情報（観測所 ID、観測所名、緯度経度、標高）を設定する。

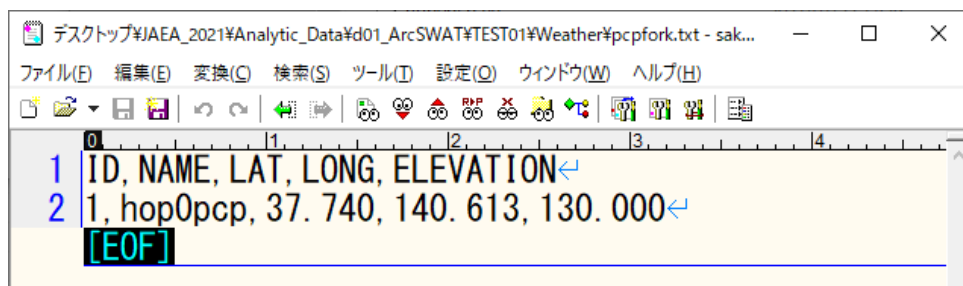


図 2-32 気象データ設定④(ArcSWAT)

ファイル「hop0pcp.txt」には、観測所「hop0pcp」での降雨量の日平均データを設定する。1行目は観測データの開始年月日を指定し、2行目以降は降雨量データを設定する。

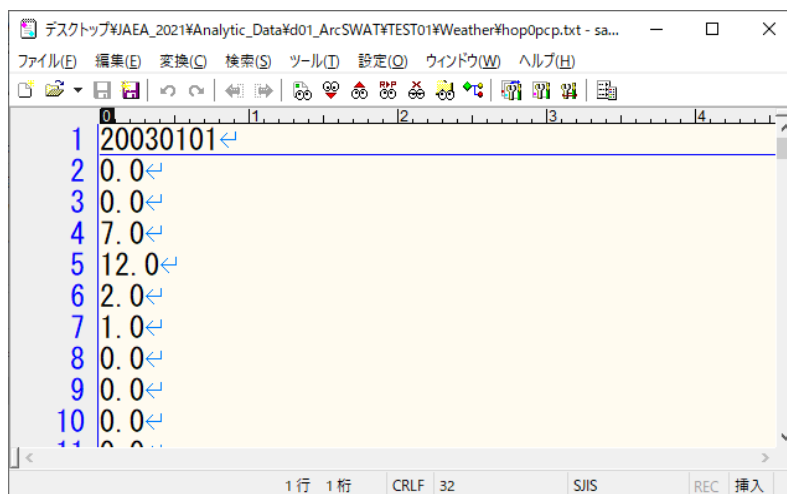


図 2-33 気象データ設定⑤(ArcSWAT)

気象データとして各日の最高気温・最低気温を設定する。「Weather Data Definition>Temperature Data」を選択する。「Climate Stations」を選択しファイルパスを指定する。

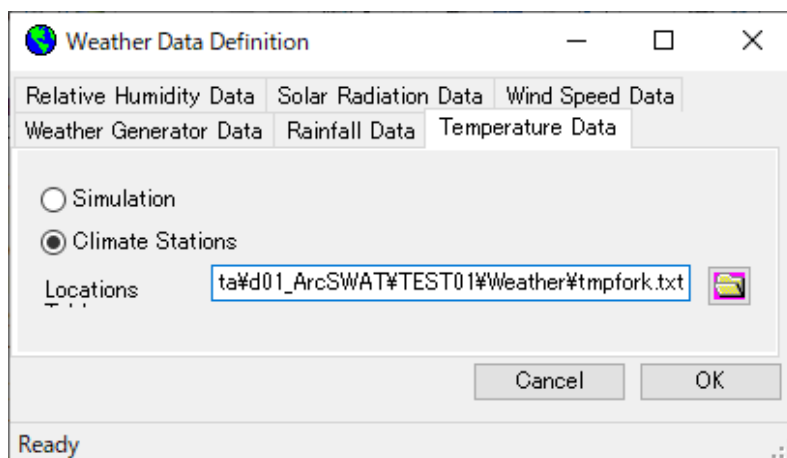


図 2-34 気象データ設定⑥(ArcSWAT)

今回は、降雨量データと同様に、プロジェクトフォルダの直下の「Weather」フォルダの下に、最高気温・最低気温のデータを指定するファイル「tmpfork.txt」と「tmp_obs.txt」を用意した。

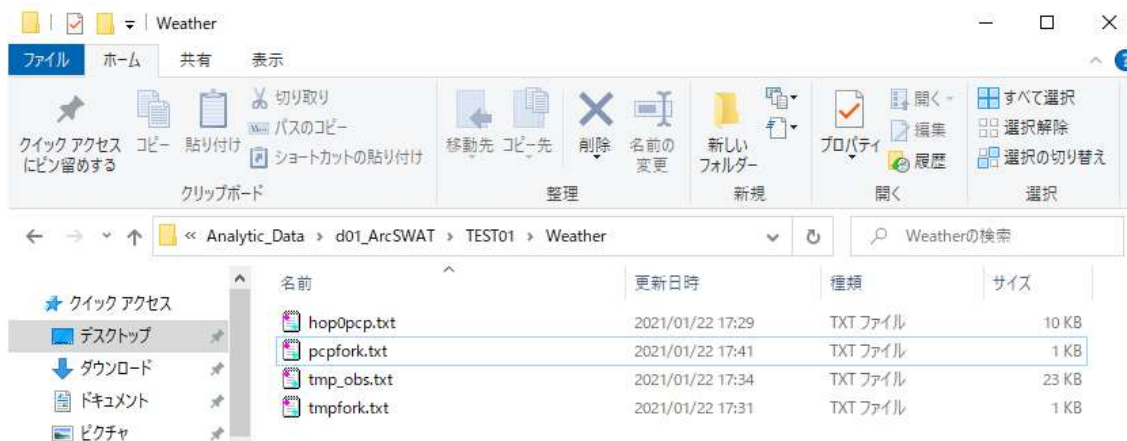


図 2-35 気象データ設定⑦(ArcSWAT)

ファイル「tmpfork.txt」には、最高気温・最低気温データの観測所情報（観測所 ID、観測所名、緯度経度、標高）を設定する。

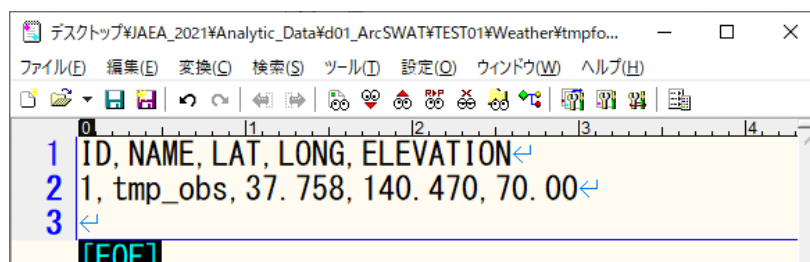


図 2-36 気象データ設定⑧(ArcSWAT)

ファイル「tmp_obs.txt」には、観測所「tmp_obs」での最高気温・最低気温データを設定する。1行目は観測データの開始年月日を指定し、2行目以降は気温データを設定する。

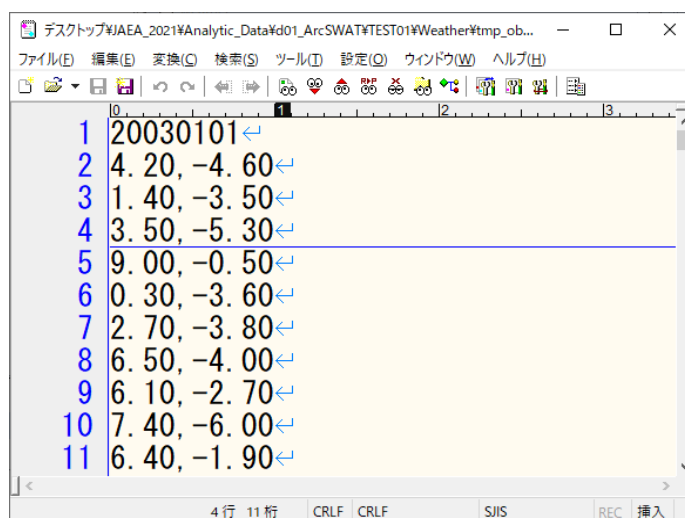


図 2-37 気象データ設定⑨(ArcSWAT)

降雨量および最高気温・最低気温を設定した後は「OK」ボタンを押下して、気象データの設定を完了する。そして、ArcSWAT ツールバーから「Write Input Tables>Write SWAT Input Tables」を選択して、データベースを作成する。「Select All>Create Tables」を選択して、気象データベースを作成する。

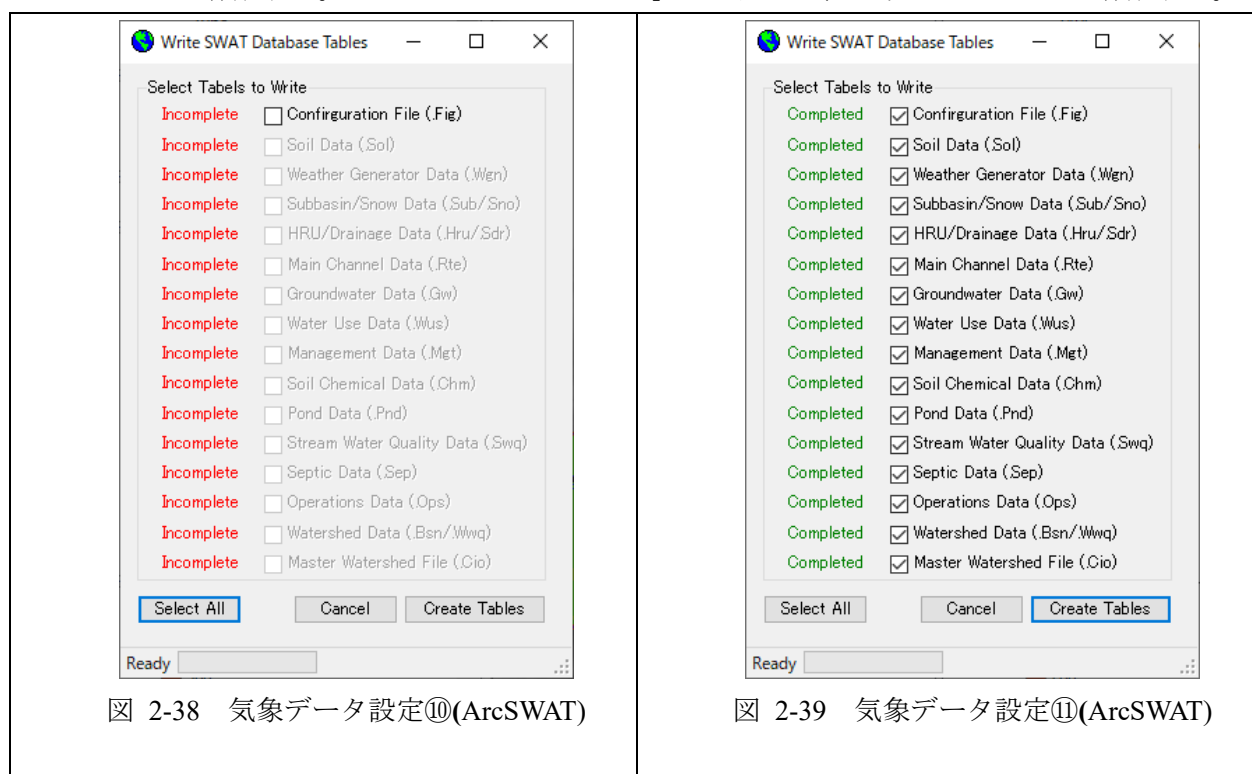


図 2-38 気象データ設定⑩(ArcSWAT)

図 2-39 気象データ設定⑪(ArcSWAT)

2.1.5 SWAT の実行と結果確認

ArcSWAT ツールバーから、「SWAT Simulation>Run SWAT」を選択して「Setup and Run SWAT Model Simulation」を起動する。Period of Simulation に入力した気象データの期間を自動設定される。また、Printout Settings として「Daily」を選択する。その他の設定を行った後、「Setup SWAT Run」を押下して計算条件を確定させる。

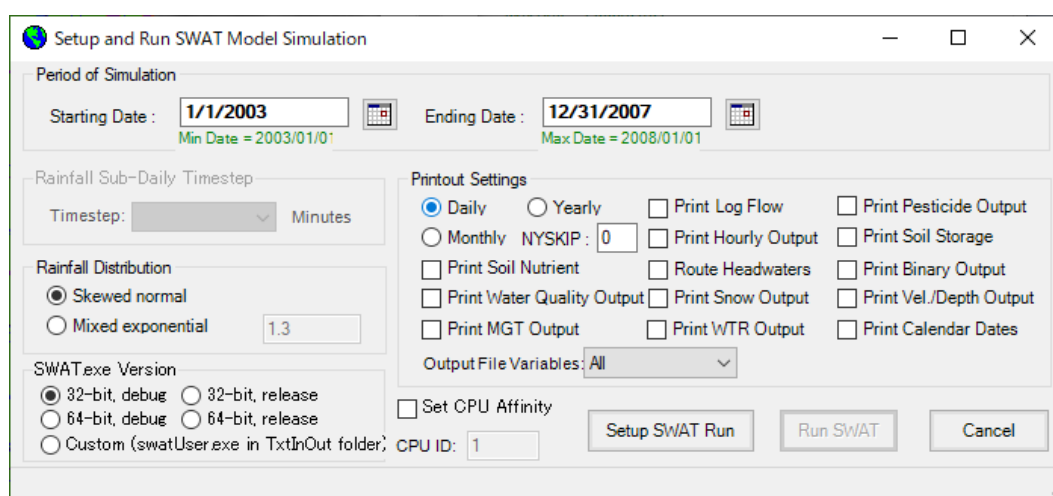


図 2-40 解析実行①(ArcSWAT)

「Run SWAT」を押すと計算が開始する。

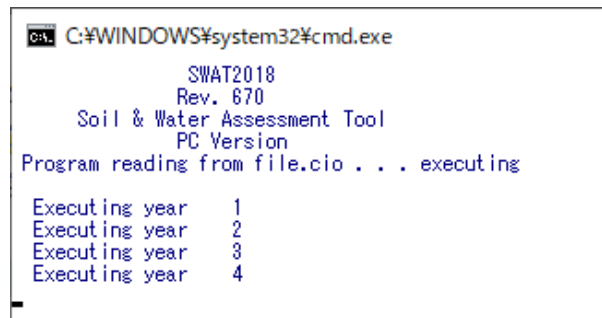


図 2-41 解析実行②(ArcSWAT)

ArcSWAT ツールバーから、「SWAT Simulation > Read SWAT Output」を選択して「SWAT Output」ダイアログを起動する。「Save SWAT Simulation」において、下記のようにシミュレーション名「Sim1」を設定して保存すると、計算結果が保存できる。

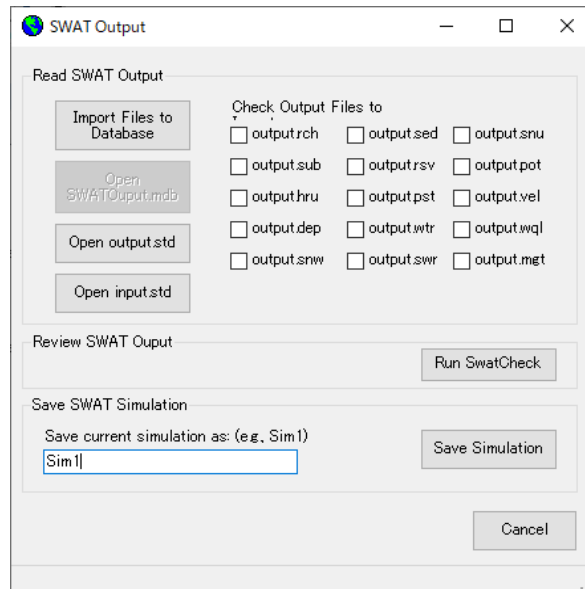


図 2-42 結果確認①(ArcSWAT)

上記のよって、プロジェクトフォルダ/Scenarios に計算結果「Sim1」が保存される。



図 2-43 結果確認②(ArcSWAT)

「Sim1」直下には下記のフォルダ群が生成される。流出量のハイドログラフなどの結果は、「TxtInOut」フォルダの下に生成される（watout.dat）。

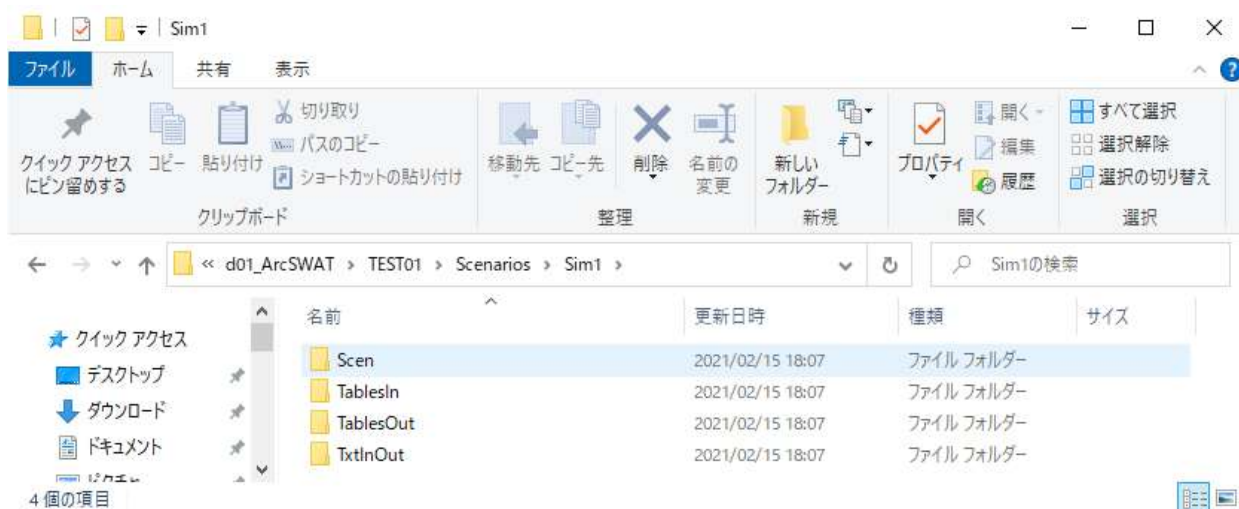


図 2-44 結果確認③(ArcSWAT)

2.1.6 パラメータ調整の一例

降雨の土壌内滞留時間を調整して、流出量グラフのピークを調整する方法について説明する。ArcSWAT ツールバーから、「Edit SWAT Input>Subbasins Data」を選択して「Edit Subbasin Inputs」を起動し、「Edit HRU parameters」を実行する。

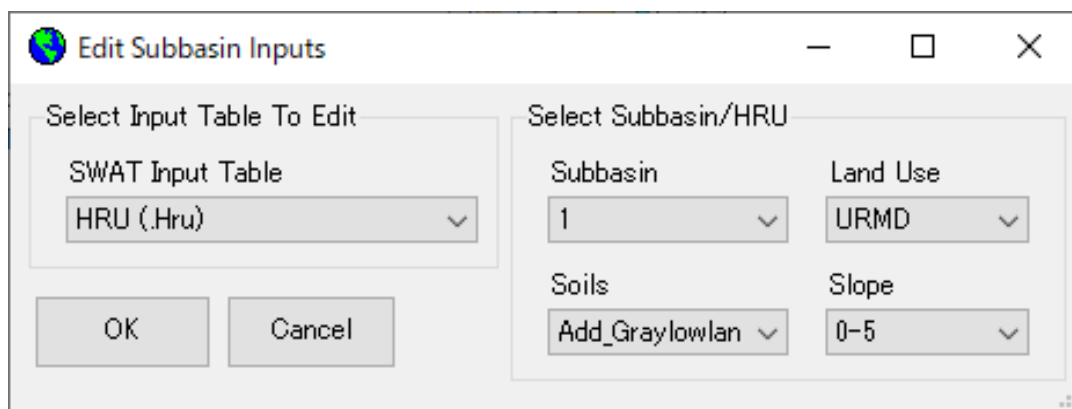


図 2-45 パラメータ調整①(ArcSWAT)

ここでは、LAT_TIME(days)および SLSOIL(m)を調整し、表面流と側方流の比率を調整する。編集した HRU プロパティをすべての流域に適用するために、「Extend Edits to ALL HRUs」にチェックを付けることに注意する。最後に、「Save Edits」を押下して、パラメータ編集を確定する。

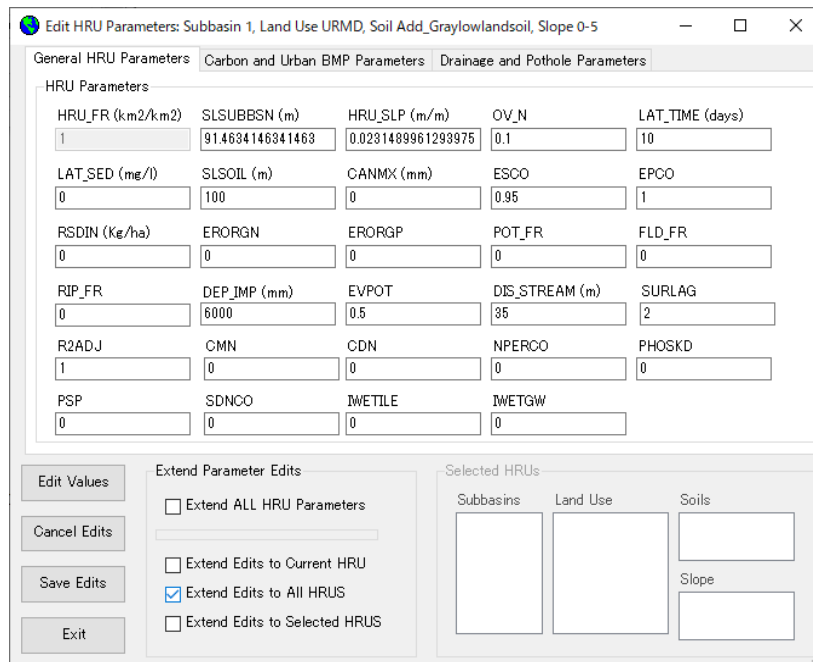


図 2-46 パラメータ調整②(ArcSWAT)

HRU パラメータの編集事項を計算に反映するためには、ツールバーの「Edit SWAT Input > Rewrite SWAT Input Files」を選択する。

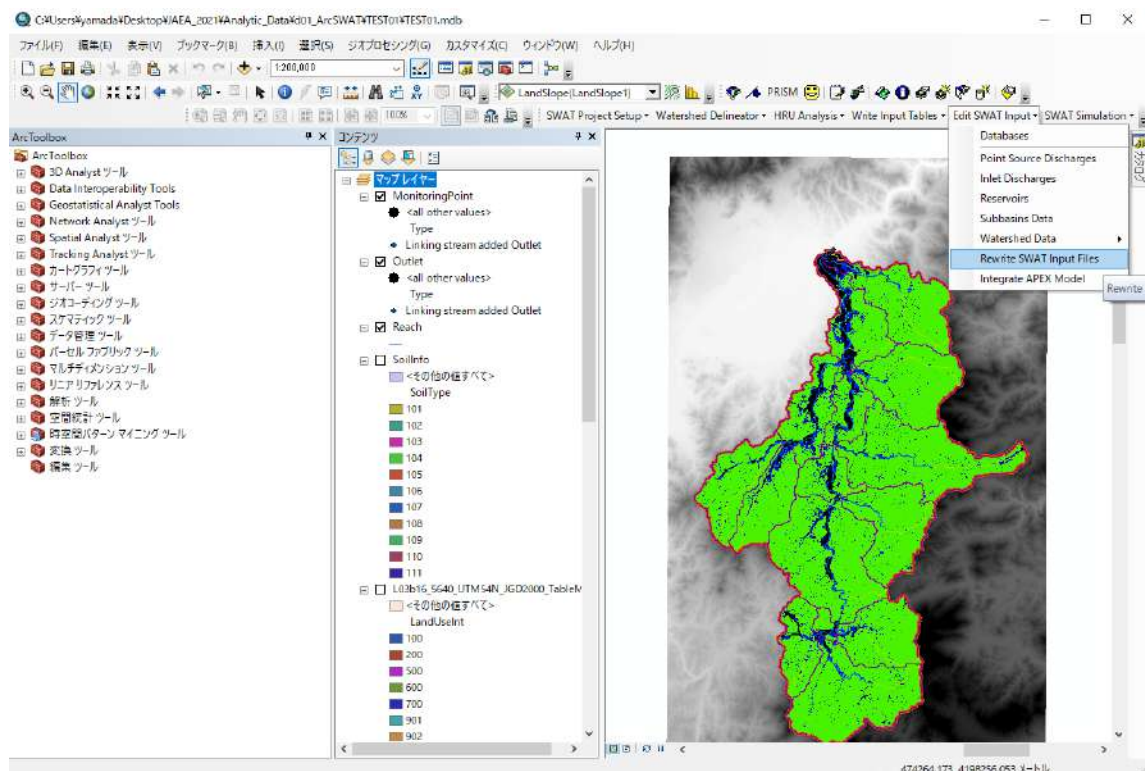


図 2-47 パラメータ調整③(ArcSWAT)

「Select All > Write Edit」を選択して、入力ファイルの更新を行う。

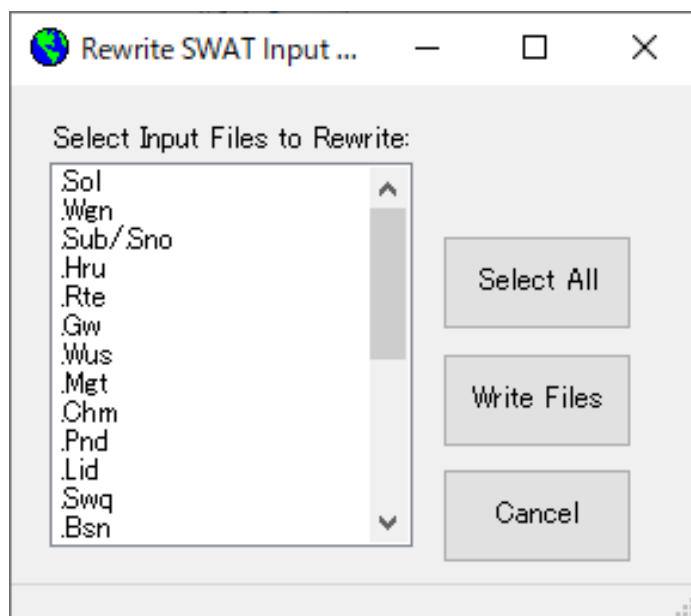


図 2-48 パラメータ調整④(ArcSWAT)

2.2 GeoWEPP コード

2.2.1 入力ファイル

GeoWEPP の計算[2-2-2-4]には、地形、気象、土壌および土地利用データが必要である。地形データ DEM、土壌および土地利用データは、ASCII フォーマット (.asc) で与える必要がある。

2.2.2 DEM データの編集手順

解析対象である流域をカバーする地形データ（ラスタ）を ASCII フォーマットで与える必要がある。ここでは、ArcGIS で作成した DEM データ（ASCII）を指定する。

2.2.3 気象データの準備

気象データは CLIGEN フォーマットで指定する必要がある。CLIGEN フォーマットについて、文献 [2-3]と[2-4]を参考すること。今回はアラバマ州のブラントリー市（Brantley, Alabama）の CLIGEN フォーマットの気象データファイルをベースにして、降雨情報（precipitation, during）と観測所の位置情報（緯度経度、標高）のみを広瀬川流域で観測された値に置き換えたファイルを下記のように作成した。

パス：¥¥GeoWEPP_10_4_public¥WEPP¥Data¥climates¥cligen¥TEMP¥

ファイル：Mod_HIROSE_RIVER_AL.cli

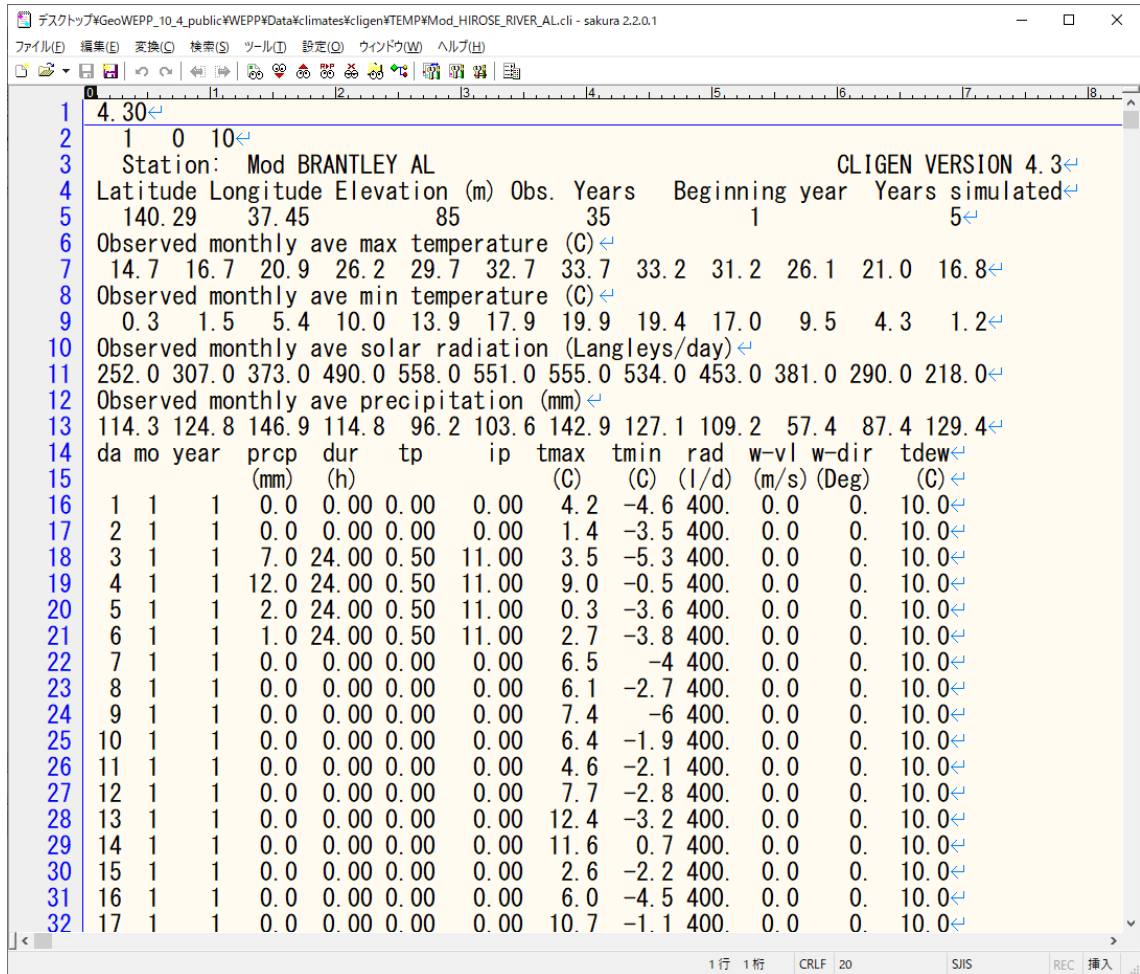


図 2-49 気象データの準備 (GeoWEPP)

2.2.4 GeoWEPP ツールバー

図 2-50 に、ArcGIS に表示される GeoWEPP ツールバーを示す。



図 2-50 ツールバー説明① (GeoWEPP)

各ボタンの役割について、GeoWEPP マニュアル (WEB サイト[2-2]) から内容を抜粋する。

<TOPAZ part>	
①	- Defines CSA (Critical Source Area) and MSCL (Minimum Source Channel Length) to delineate streams
②	- Specifies the outlet point of watershed
<PRISM part>	
③	- Opens PRISM to select/edit existing climate data
<WEPP part>	

- ④ - Obtains the erosion pattern in the watershed
- ⑤ - Displays reports
- ⑥ - Saves GeoWEPP project
- ⑦ - Changes tolerable value of erosion
- ⑧ - Shows the information of hillslope in the watershed area (click on hillslope)
- ⑨ - Changes the associated landuse and soil type
- ⑩ - Returns WEPP after changing hillslope parameter
- ⑪ - Loads a single hillslope on WEPP
- ⑫ - Goes to WEPP
- ⑬ - Saves project and exit

もし、ツールバーが表示されない場合は、図 2-51 に示す手順（「カスタマイズ」→「ツールバー」→「GeoWEPP」）で表示チェックを ON に切り替える。

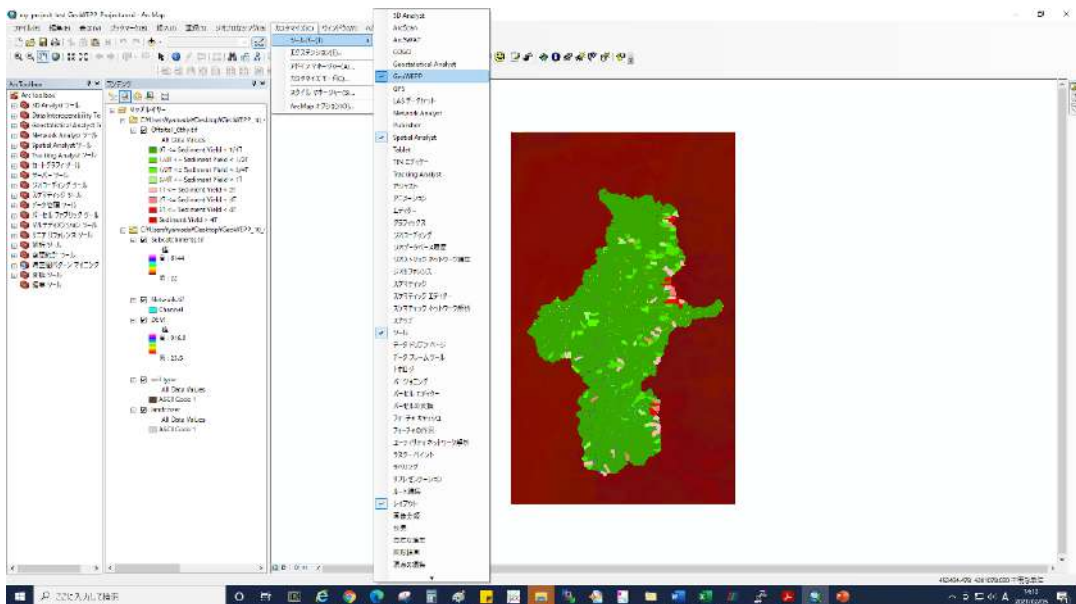


図 2-51 ツールバー説明② (GeoWEPP)

2.2.5 手順

以降では GeoWEPP を使用した解析の一連の流れについて、その手順を細かく記載する。基本的には図番号の順番に、図 2-52 から図 2-86 までに示す手順で処理を実行すればよいが、補足が必要な手順についてはその内容を記載した。GeoWEPP ランチャーの起動の前に、アドイン「GeoWEPP.esriAddIn」を実行する。これは ArcGIS と WEPP を連携させるためのソフトである。その後ランチャー「LaunchGeoWEPP」を押下して、GeoWEPP を起動する。なお、以降では、「¥GeoWEPP_10_4_public」をカレントディレクトリとする。

① プロジェクト作成

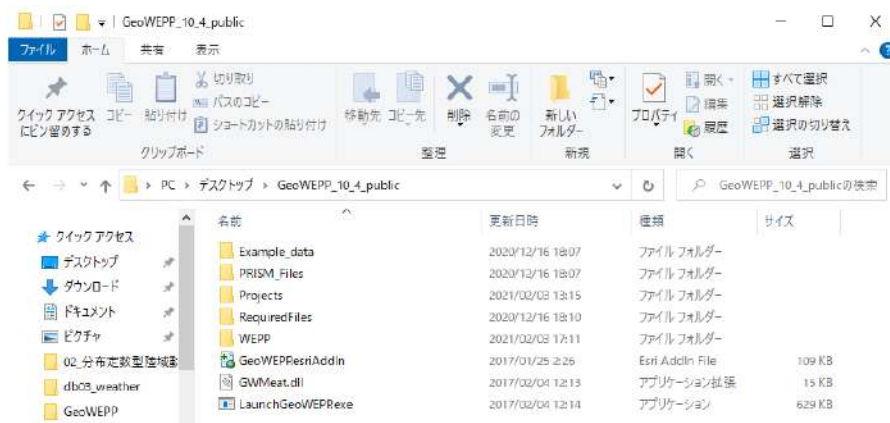


図 2-52 プロジェクト作成① (GeoWEPP)

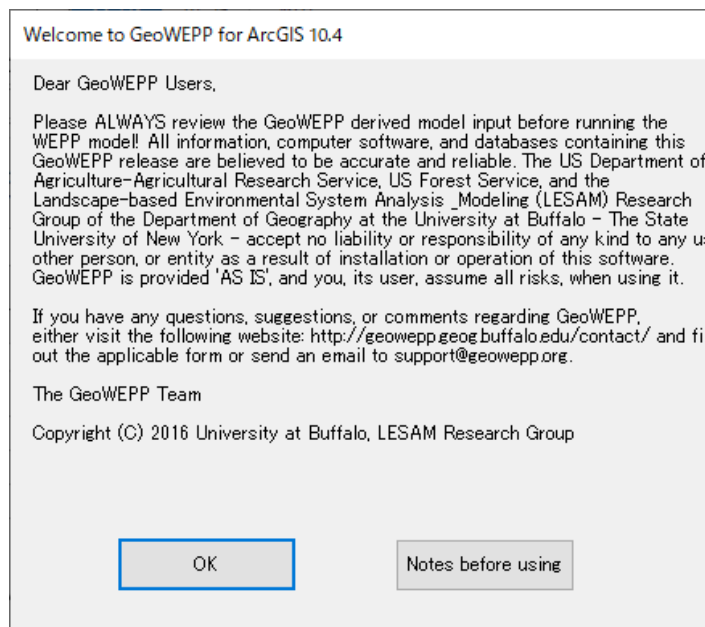


図 2-53 プロジェクト作成② (GeoWEPP)

今回は福島県の広瀬川を対象とした解析を行うため、「Use your own GIS ASCII Data」を選択する。

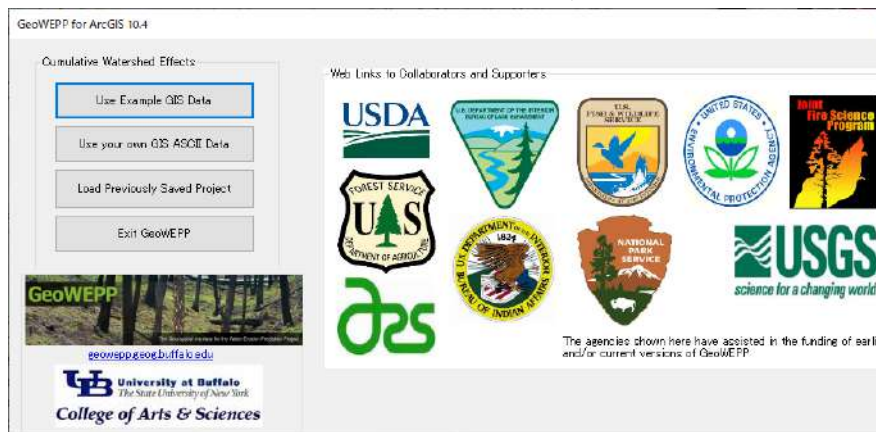


図 2-54 プロジェクト作成③ (GeoWEPP)

自動的に立ち上がるダイアログのメッセージの通り、入力ファイルは全て ASCII フォーマット (*.asc) で与えなくてはならない。

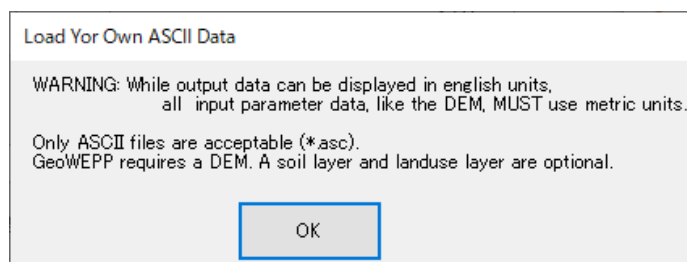


図 2-55 プロジェクト作成④ (GeoWEPP)

新規に作成するプロジェクトデータの名前を設定する。ここでは「my_project_test」という名前を設定する。「Add a DEM file in ASCII format」に対して、広瀬川の DEM ファイルを追加する。「Start Processing」を押下すると、「¥GeoWEPP_10_4_public¥Projects¥my_project_test」というプロジェクトデータが作成される。

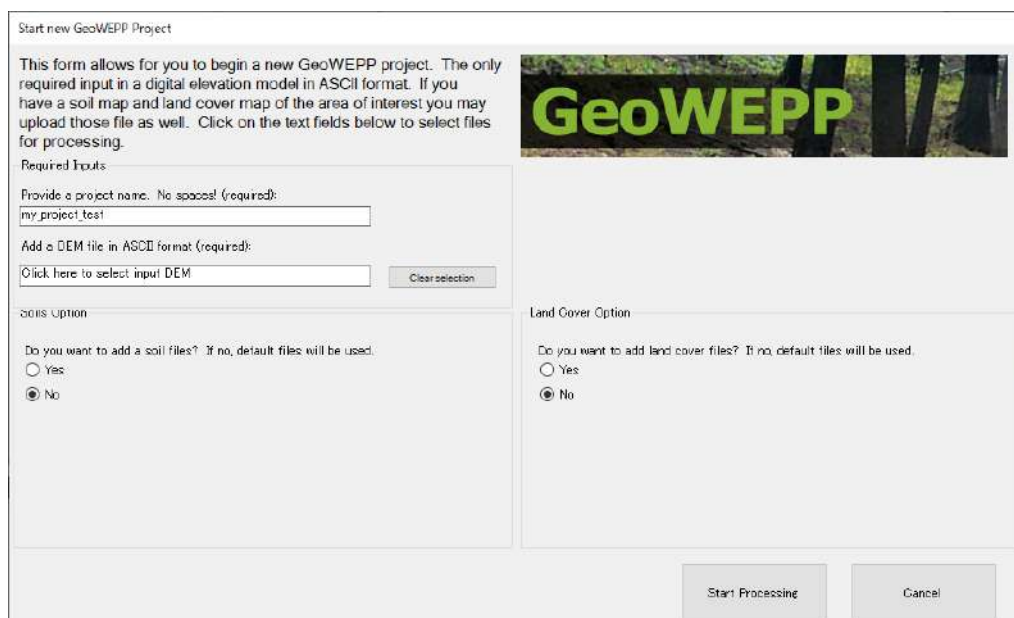


図 2-56 プロジェクト作成⑤ (GeoWEPP)

自動的にメッセージダイアログが立ち上がるが、「OK」を押下して先に進む。

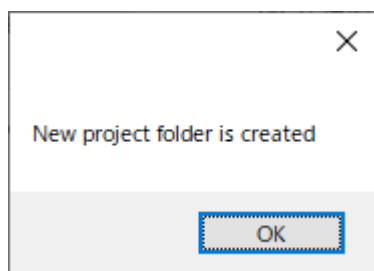


図 2-57 プロジェクト作成⑥ (GeoWEPP)

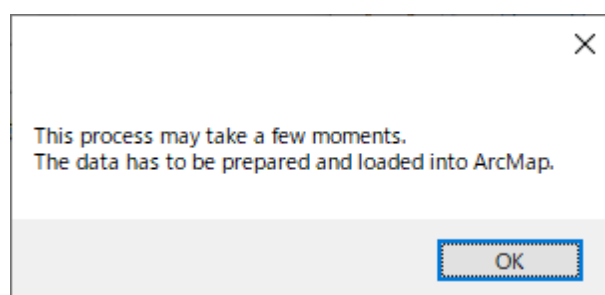


図 2-58 プロジェクト作成⑦ (GeoWEPP)

GeoWEPP のプロジェクトデータの作成には、しばらく時間（数分）がかかる。

Please wait for data to process and ArcMap to load

Please wait for the program to load.
This could take several minutes depending on your computer speed and the location of the GeoWEPP folder. Speed is reduced when operating GeoWEPP from a USB drive or network drive.

図 2-59 プロジェクト作成⑧ (GeoWEPP)

自動的に立ち上がったコマンドプロンプトで、「DO YOU WISH TO CONTINUE?」と聞かれるので、「1」をインプットして処理を続行させる。

```
C:\Users\yamada\Desktop\GeoWEPP_10_4_public\Projects\my_project_test\dednm.exe

***** BEGINNING PROGRAM DEDNM.
***** BEGINNING INITIALIZATION AND INPUT OF CONTROL DATA FROM FILE DNMCONT.INP.

TOPAZ SOFTWARE : TOPAZ PARAMETERIZATION SOFTWARE SYSTEM
                  VERSION 3.12, AUGUST 1989
PROGRAM DEDNM  : DIGITAL ELEVATION DRAINAGE NETWORK MODEL PROGRAM
                  VERSION 3.10, APRIL 1989

J. GARBRECHT, USDA-ARS, EL RENO, OKLAHOMA, USA.
L. MARTZ, UNIVERSITY OF SASKATCHEWAN, SASKATOON, CANADA.

DISCLAIMER

THIS PROGRAM AND ITS SUBROUTINES ARE ACCEPTED AND USED BY THE RECIPIENT UPON
THE EXPRESS UNDERSTANDING THAT THE DEVELOPERS MAKE NO WARRANTIES, EXPRESSED
OR IMPLIED, CONCERNING THE ACCURACY, COMPLETENESS, RELIABILITY OR
SUITABILITY FOR ANY ONE PURPOSE, AND THAT THE DEVELOPERS SHALL BE UNDER NO
LIABILITY TO ANY PERSON BY REASON OF ANY USE MADE THEREOF.

THE NUMBER OF ROWS OR COLUMNS IN THE AGGREGATED/RESAMPLED DEM, 8380 , IS LARGE.
DO YOU WISH TO CONTINUE? ENTER 1 TO CONTINUE,
                           OR 0 TO STOP PROGRAM EXECUTION.
```

図 2-60 プロジェクト作成⑨ (GeoWEPP)

プロジェクトが作成されると、連携した ArcWEPP が自動的に起動する。ただし、これは **GeoWEPP の不具合動作だと考えられるが**、読み込んだデータがビューウィンドウに表示されない。なお、この問題については公式サイト (WEB サイト[2-2]) の FAQ でも議論されている。

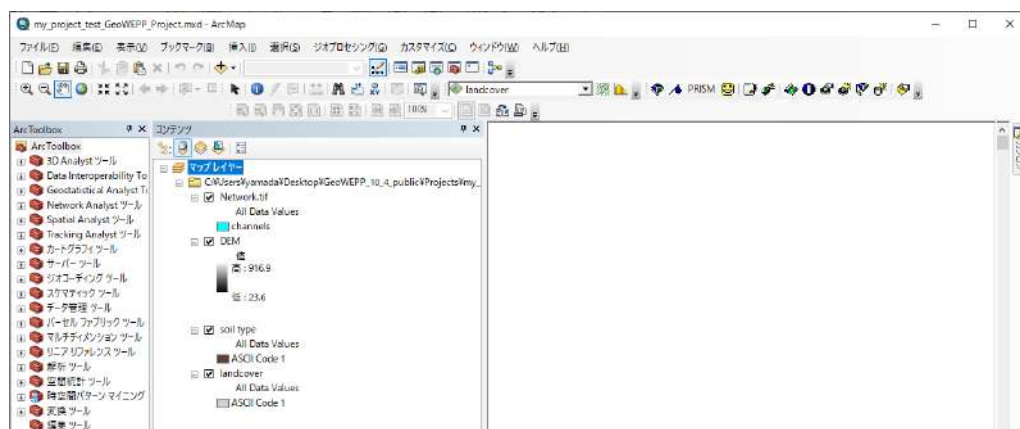


図 2-61 プロジェクト作成⑩ (GeoWEPP)

上記の問題への対応として、このプロジェクトデータを ArcGIS において Save して、起動している ArcGIS を一旦閉じる。その後に、再度ランチャー「LaunchGeoWEPP」を立ち上げ、図 2-54 の「Load Previously Saved Project」から、Save したプロジェクトデータを再度読み込む。

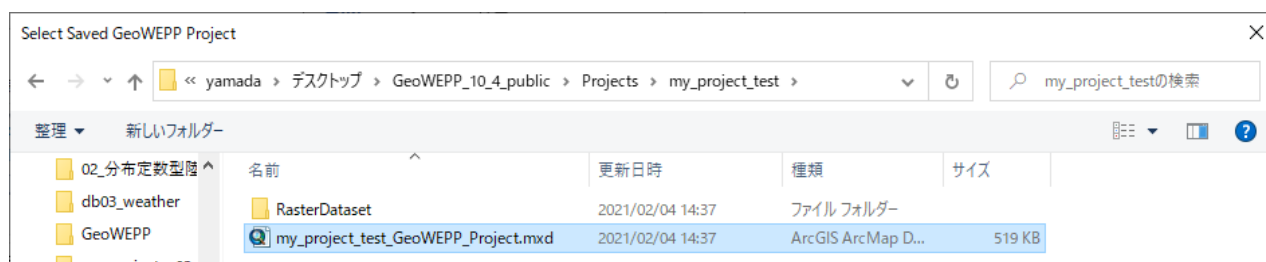


図 2-62 プロジェクト作成⑩ (GeoWEPP)

プロジェクトデータ「my_project_test_GeoWEPP_Project.mxd」を再度読み込むと、図 2-63 で示した通り、今度はビューウィンドウにデータが正常に表示される。カラーマップは適宜変更する。

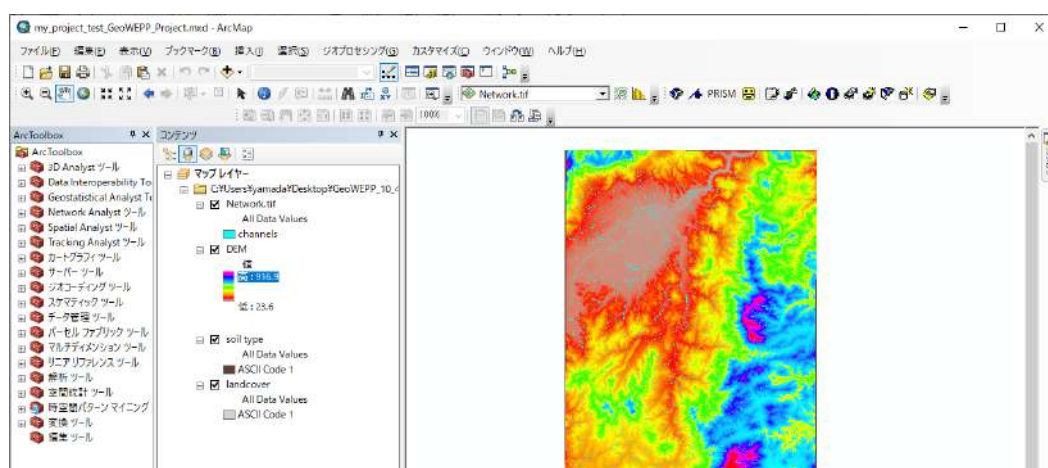


図 2-63 プロジェクト作成⑪ (GeoWEPP)

② 流域定義

ツールバー(2.2.4)のボタン①を押下して、CSA(Critical Source Area)と MSCL(Minimum Source Channel Length)を設定する。2つのパラメータによって小流域の河道生成を制御する。この値を大きく設定すると河道網は粗く生成される。ここでは、「Critical Source Area(CSA)」を 20 Hectares とし、「Minimum Source Channel Length(MSCL)」を 100 Meters と設定した。

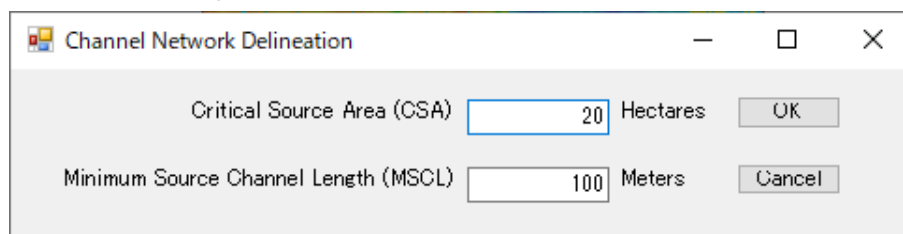


図 2-64 流域定義① (GeoWEPP)

河道生成の際、下記のようなログが表示される。河道生成の処理には数分程度の時間を要する。

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
demanly -

**** BEGINNING PROGRAM DEDNM.
**** BEGINNING INITIALIZATION AND INPUT OF CONTROL DATA FROM FILE DNMINT.INP.

TOPAZ SOFTWARE : TOPAZ PARAMETERIZATION SOFTWARE SYSTEM
                  VERSION 3.12, AUGUST 1999
PROGRAM DEDNM : DIGITAL ELEVATION DRAINAGE NETWORK MODEL PROGRAM
                  VERSION 3.10, APRIL 1999

J. GARBRECHT, USDA-ARS, EL RENO, OKLAHOMA, USA.
L. MARTZ, UNIVERSITY OF SASKATCHEWAN, SASKATOON, CANADA.

DISCLAIMER

THIS PROGRAM AND ITS SUBROUTINES ARE ACCEPTED AND USED BY THE RECIPIENT UPON
THE EXPRESS UNDERSTANDING THAT THE DEVELOPERS MAKE NO WARRANTIES, EXPRESSED
OR IMPLIED, CONCERNING THE ACCURACY, COMPLETENESS, RELIABILITY OR
SUITABILITY FOR ANY ONE PURPOSE, AND THAT THE DEVELOPERS SHALL BE UNDER NO
LIABILITY TO ANY PERSON BY REASON OF ANY USE MADE THEREOF.

THE NUMBER OF ROWS OR COLUMNS IN THE AGGREGATED/RESAMPLED DEM, 3380 , IS LARGE.
DO YOU WISH TO CONTINUE? ENTER 1 TO CONTINUE,
OR 0 TO STOP PROGRAM EXECUTION.
TITLE OF THE CURRENT TOPAZ APPLICATION:

DATE: 23 AUGUST 1999   WEPP INTERFACE   DEDNM VERSION 3.1
APPLICATION FOR TESTING AND VERIFICATION; INPUT FILE
TESTING AND CALIBRATION.

**** BEGINNING DEM INPUT AND DEM PRE-PROCESSING.
**** BEGINNING DEPRESSION AND FLAT AREA TREATMENT.
**** BEGINNING FLOW VECTOR, FLOW PATH AND DRAINAGE AREA COMPUTATIONS.

```

図 2-65 流域定義② (GeoWEPP)

河道生成が完了すると、ArcGIS のビューに河道網が描画される。

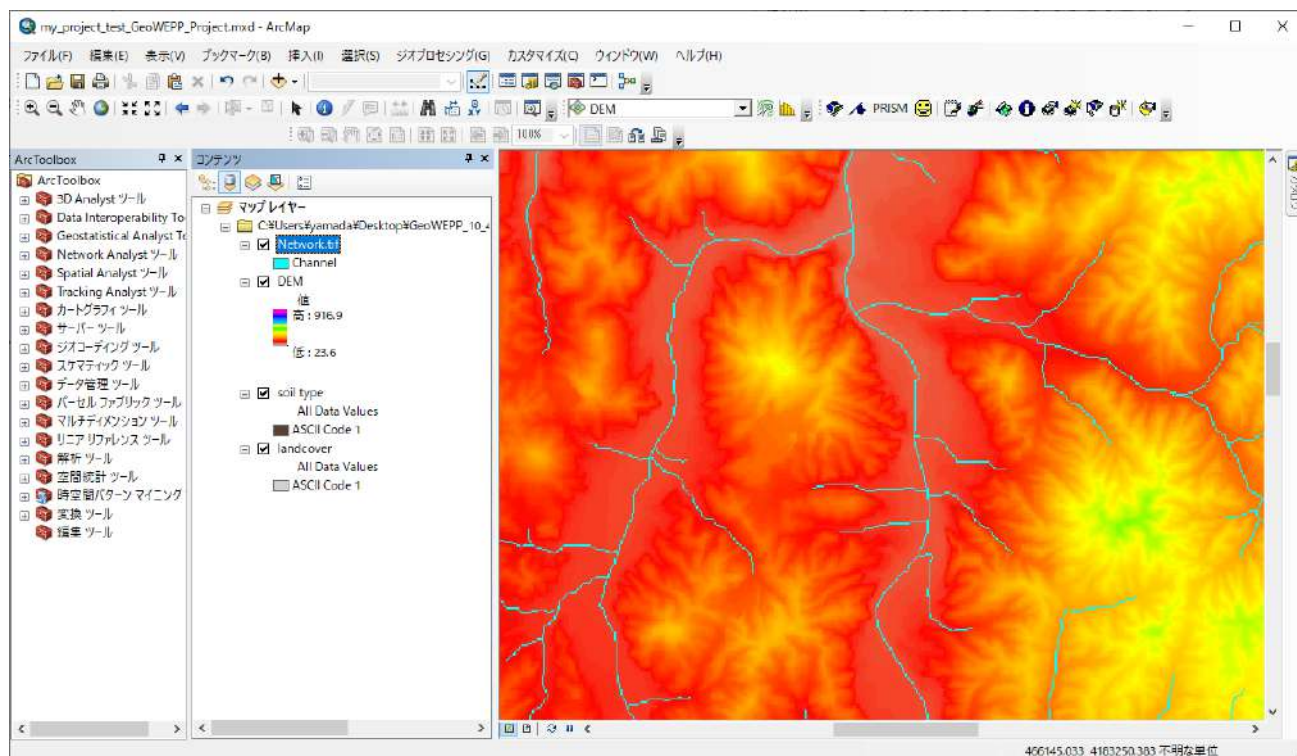


図 2-66 流域定義③ (GeoWEPP)

ツールバー(2.2.4)のボタン②を押下すると、カーソルによって流出点を指摘できるようになる。前の手順によって生成した河道網に対して、流出点として一つのセルを選択する。

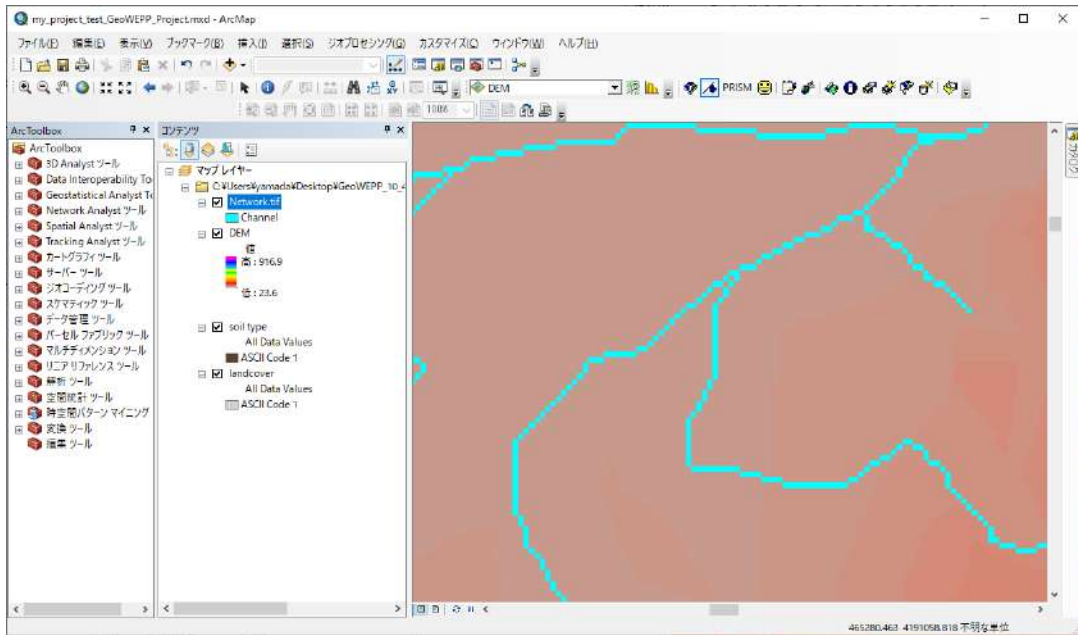


図 2-67 流域定義④ (GeoWEPP)

流出点を指定すると、解析対象となる領域の UTM-ID の入力を求められる。ここでは、福島県の広瀬川を対象とするため、54 番を指定する。

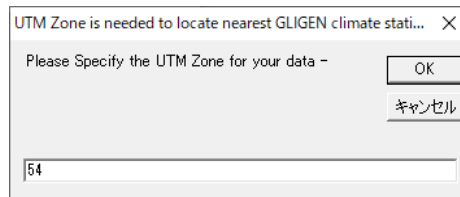


図 2-68 流域定義⑤ (GeoWEPP)

生成された河道網に対して流出点を指定すると、その流出点を持つ小流域が抽出される。抽出処理の際、下図のようなログが表示される。

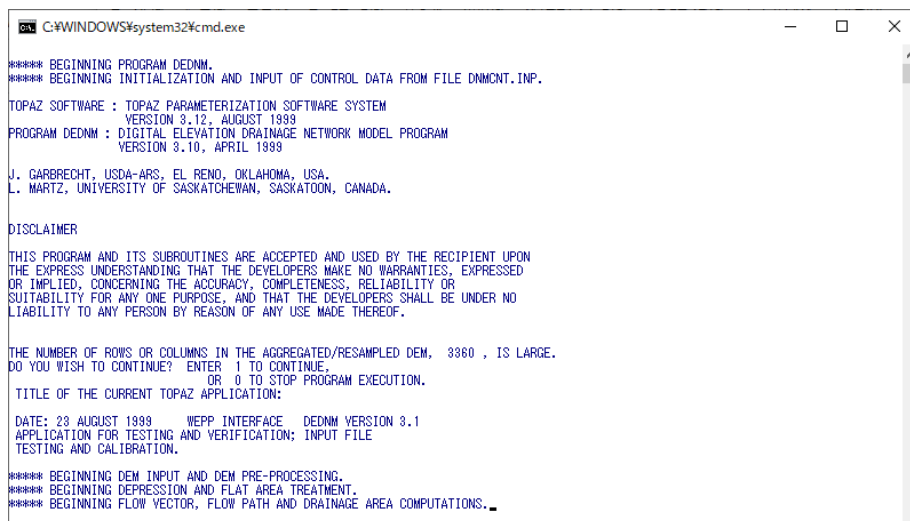


図 2-69 流域定義⑥ (GeoWEPP)

指定した流出点を持つ小流域の抽出が完了すると、その結果が ArcGIS のビューに表示される。カラーマップは適宜変更する。

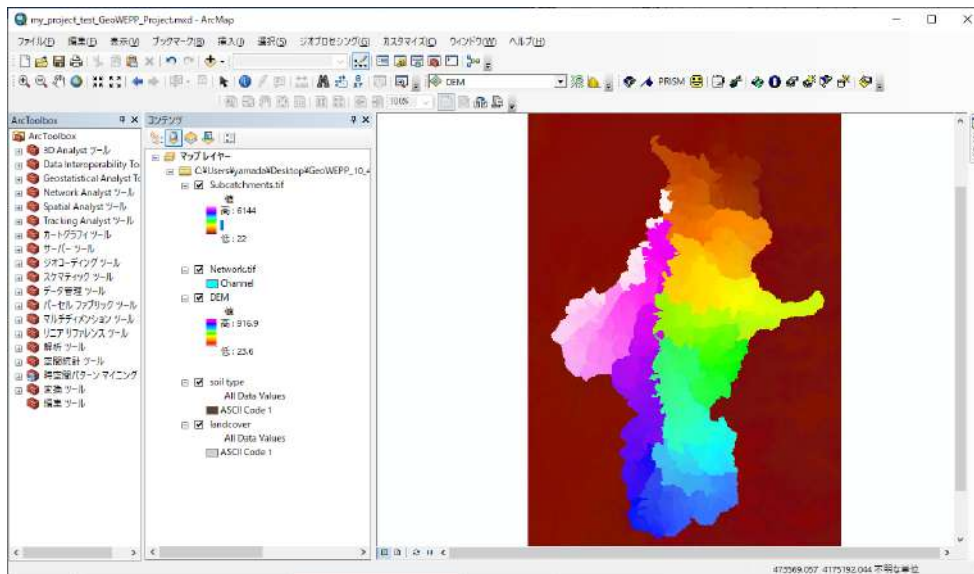


図 2-70 流域定義⑦ (GeoWEPP)

③ 気象データ設定

あらかじめ、下記のパスに解析に使用する気象データ（降雨量など）を CLIGEN フォーマットで作成する。

パス：.¥GeoWEPP_10_4_public¥WEPP¥Data¥climates¥cligen¥TEMP¥

ファイル：Mod_HIROSE_RIVER_AL.cli

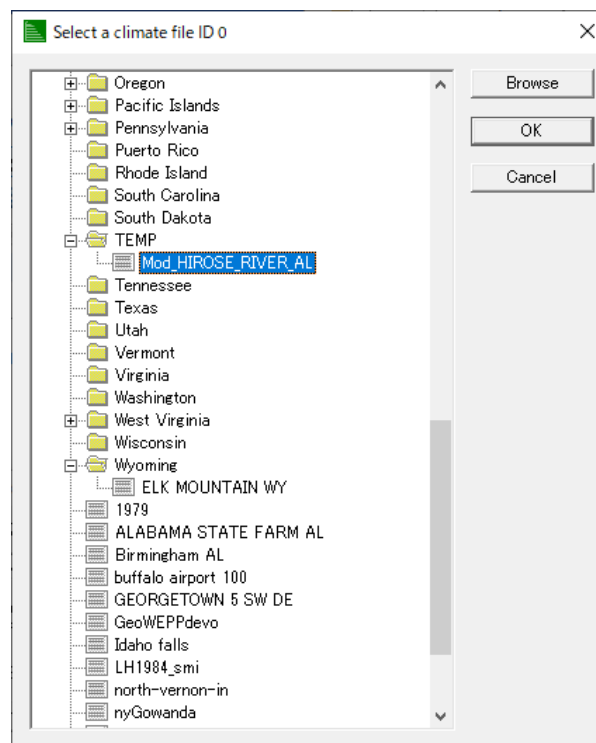


図 2-71 気象データ設定① (GeoWEPP)

ツールバー(2.2.4)のボタン④を押下すると、解析領域に近い気象台で観測された気象データを入力することを要求される。ここで、気象データは CLIGEN データフォーマットで与える必要がある。ここでは「Use Existing Climate File」を選択して、個別に作成した気象データを選択する。

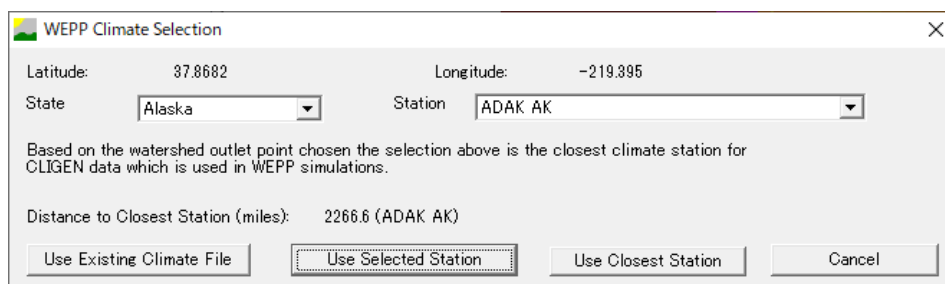


図 2-72 気象データ設定② (GeoWEPP)

気象データを設定すると、図 2-73 で示したダイアログが表示される。「Yes」を選択して次に進む。

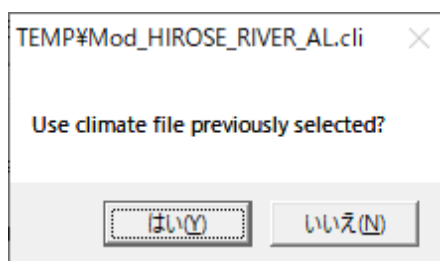


図 2-73 気象データ設定③ (GeoWEPP)

CLIGEN フォーマットで作成した気象データ「Mod_HIROSE_RIVER_AL.cli」を図 2-74 で示す。このファイルについては、2.2.3 でも説明している。

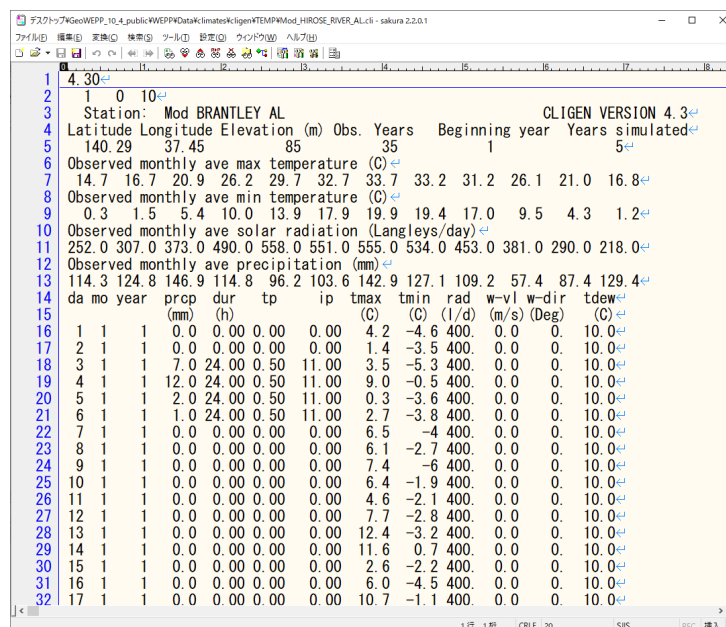


図 2-74 気象データ設定④ (GeoWEPP)

気象データを指定すると、「Loading Topaz Data」の処理が起動する。

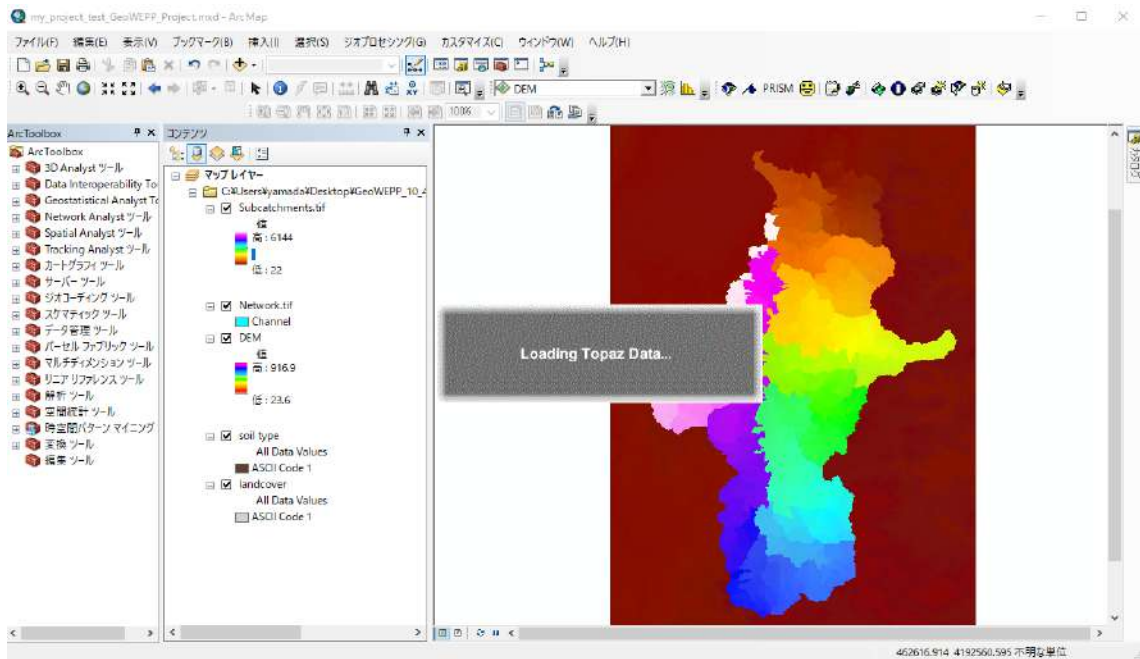


図 2-75 気象データ設定⑤ (GeoWEPP)

④ 土地利用データ、土壌データ、河道設定

WEPPによる解析が始まる前に、下記のダイアログが起動する。ここで、Landuse, Soils, Channels の設定内容を編集することができる。

【LandUse】タブ

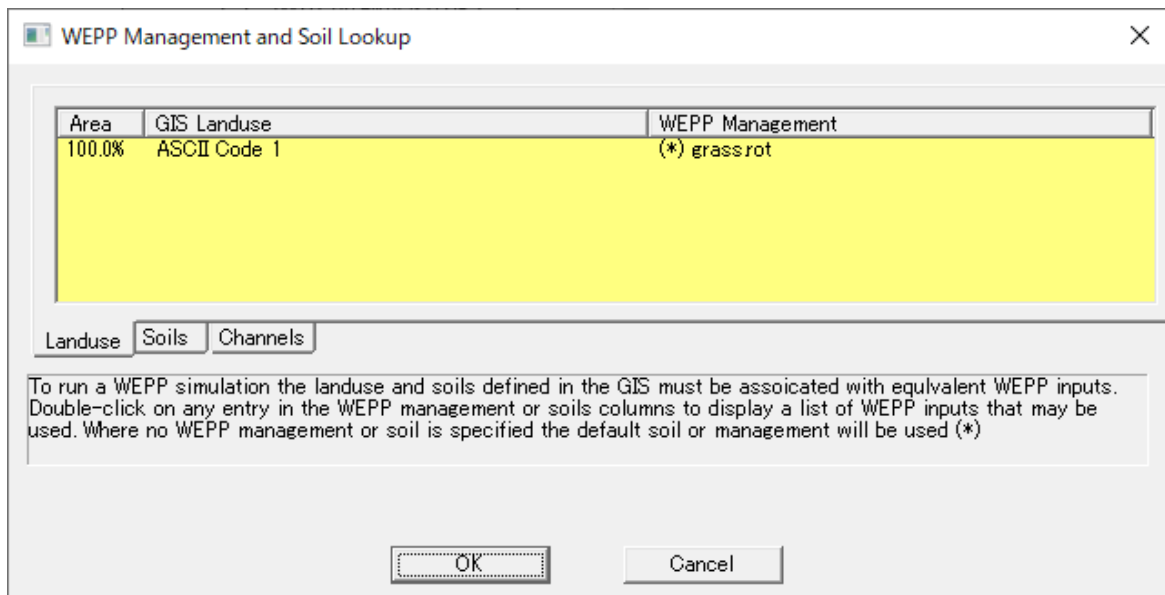


図 2-76 土地利用データの編集 (GeoWEPP)

【Soils】タブ

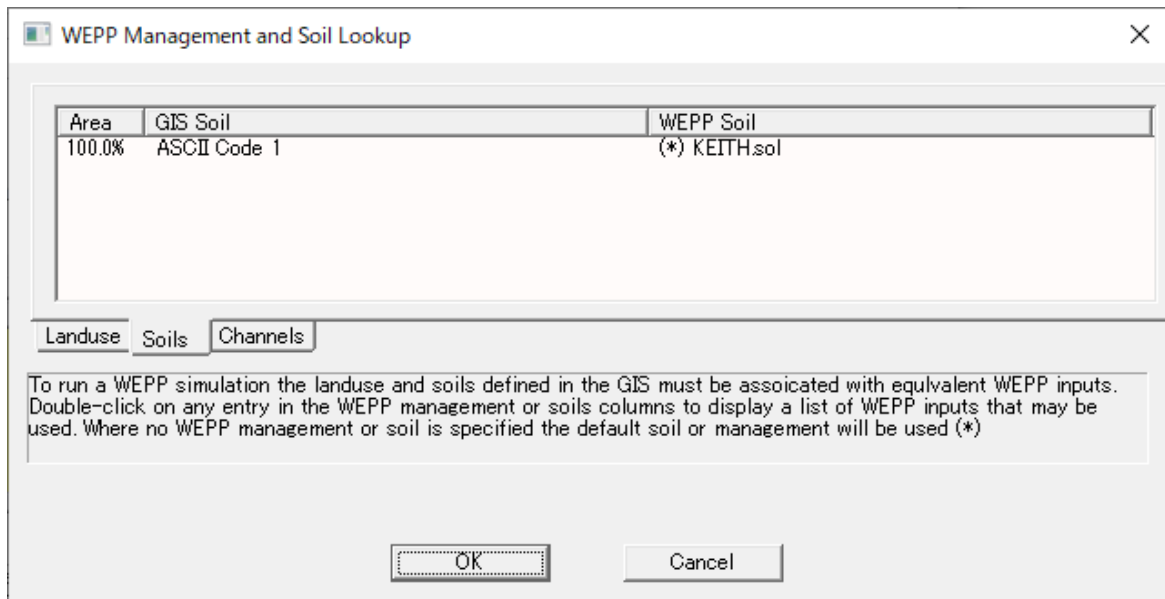


図 2-77 土壌データの編集 (GeoWEPP)

【Channels】タブ

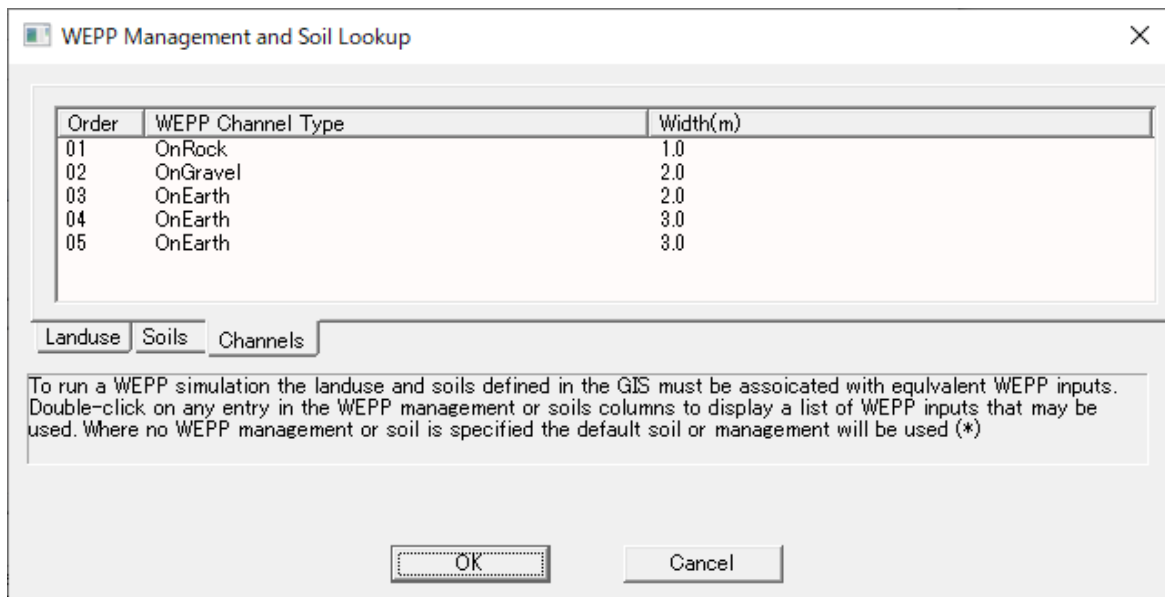


図 2-78 河道データの編集 (GeoWEPP)

ここでは、図 2-77 の【Soils】タブにおいて、土壌データを「KEITH.sol」から「Young forest loam」に変更した（図 2-79、図 2-80 参照）。

[Soils] → [Forest] → [Disturbed WEPP Soils] → [Young forest loam]

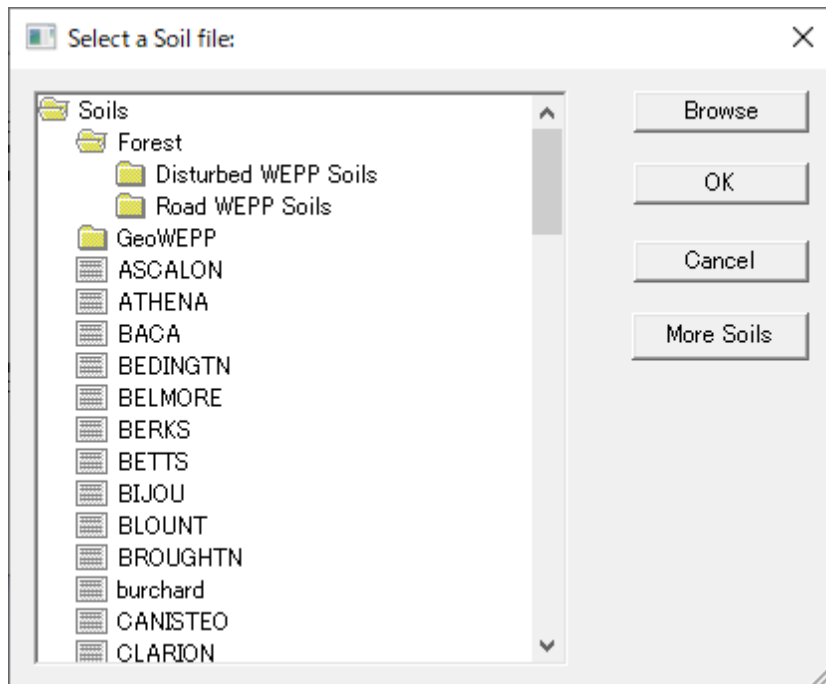


図 2-79 土壌データの編集例① (GeoWEPP)

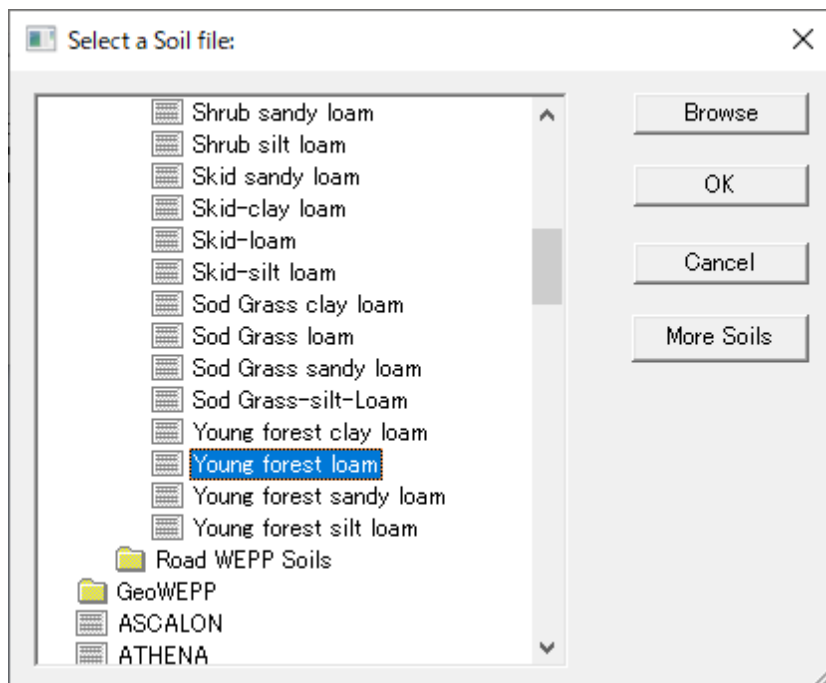


図 2-80 土壌データの編集例② (GeoWEPP)

⑤ 解析実行

図 2-81 のように起動した「WEPP Watershed Settings」ダイアログについて、計算条件の編集が可能である。特に、「Number of Years」および「Simulation Method」によって、計算期間と解析手法を選択する。「Simulation Method」では、2つの解析手法「Flowpath Method」と「Watershed Method」が用意されている。それぞれの手法については GeoWEPP マニュアル (WEB サイト[2-2]) を参照すること。ここでは、計算時間が短い簡便な「Watershed Method」を選択する。

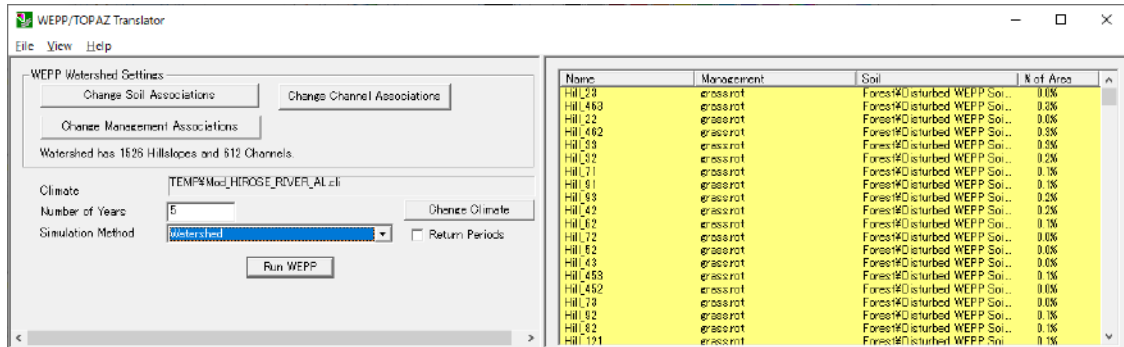


図 2-81 解析実行① (GeoWEPP)

図 2-81 において、「Run WEPP」ボタンを押下すると解析が開始する。解析の進捗状況は図 2-82 と図 2-83 のように表示される。解析には、作業 PC で 30 分程度の時間を要した。



図 2-82 解析実行② (GeoWEPP)

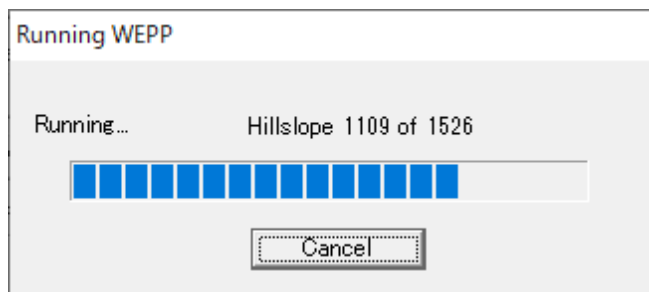


図 2-83 解析実行③ (GeoWEPP)

⑥ 結果確認

解析が完了すると、図 2-84 が表示される。また、図 2-85 のように解析ケース名の入力を要求される。

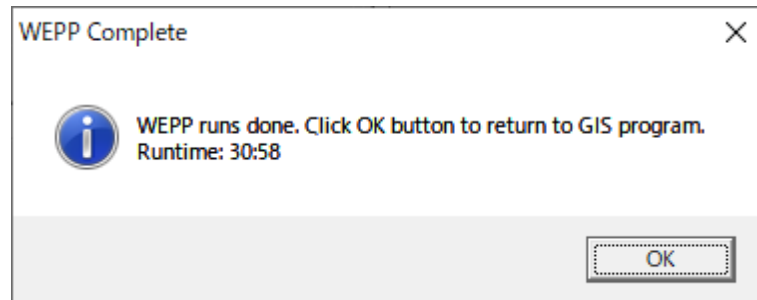


図 2-84 結果確認① (GeoWEPP)

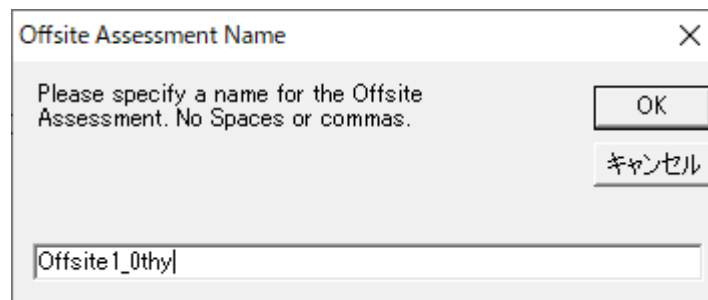


図 2-85 結果確認② (GeoWEPP)

ツールバー(2.2.4)のボタン⑤を押下して、表示する解析結果を選択できる。

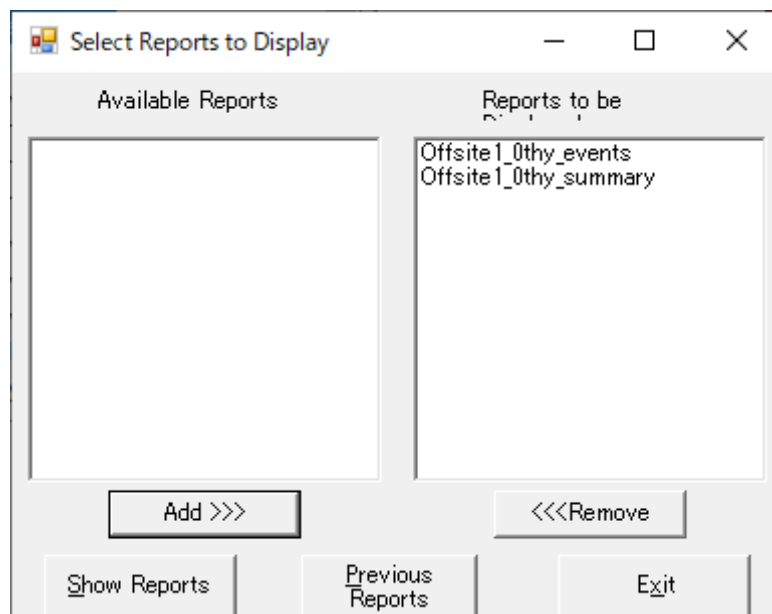


図 2-86 結果確認③ (GeoWEPP)

図 2-87 と図 2-88 に、解析後の得られる主要な出力内容を示す。

Day	Month	Year	Precip. Depth (mm)	Runoff Volume (m ³)	Peak Runoff (m ³ /s)	Sediment Yield (kg)
7	3	1	44.0	133159.84	5.90139	144249.8
8	3	1	6.0	50359.86	2.25598	270398.2
9	3	1	0.0	22975.20	1.03820	893.5
10	3	1	0.0	18461.70	0.83626	91761.3
11	3	1	0.0	21968.99	0.99322	110509.9
12	3	1	0.0	24523.30	1.10735	967.9
13	3	1	0.0	25913.98	1.16944	1035.1
14	3	1	0.0	26489.45	1.19511	1062.9
15	3	1	0.0	26547.50	1.19770	1065.7
16	3	1	0.0	26313.22	1.18725	1054.3
17	3	1	7.0	37879.46	1.70225	195949.3
18	3	1	0.0	38403.05	1.72551	1649.6
19	3	1	0.0	43613.94	1.95689	1911.4
20	3	1	0.0	46821.93	2.09918	2073.6
21	3	1	0.0	48397.69	2.16904	2152.7
22	3	1	0.0	48803.62	2.18703	2173.1

図 2-87 結果確認④ (GeoWEPP)

Hillslopes	Runoff Volume (m ³)	Subrunoff Volume (m ³)	Soil Loss (kg)	Sediment Deposition (kg)	Sediment Yield (kg)
Hill 1	9378.38	414.65	0.00	0.00	0.00
Hill 2	1190.71	666.81	0.00	0.00	0.00
Hill 3	572325.38	137298.65	0.00	0.00	0.00
Hill 4	174794.38	279671.07	0.00	0.00	0.00
Hill 5	244946.19	165854.30	0.00	0.00	0.00
Hill 6	29626.42	69173.07	0.00	0.00	0.00
Hill 7	16762.79	99506.66	0.00	0.00	0.00
Hill 8	16180.18	120459.50	29.98	0.00	29.98
Hill 9	52796.84	143537.77	0.00	0.00	0.00
Hill 10	14802.57	80269.32	0.00	0.00	0.00
Hill 11	137859.02	104685.04	0.00	0.00	0.00
Hill 12	923.59	32782.14	0.00	0.00	0.00
Hill 13	891.93	33455.46	0.00	0.00	0.00
Hill 14	61104.97	260232.30	3528.75	0.00	3528.76
Hill 15	189929.42	290532.50	869.54	0.00	869.53

図 2-88 結果確認⑤ (GeoWEPP)

2.3 RADFLOW コード

2.3.1 QGIS の導入

公式サイトから（WEB サイト[2-6]）、下記の QGIS 用のインストーラをダウンロードした。

『QGIS スタンドアロンインストーラバージョン 3.16 (64 ビット)』

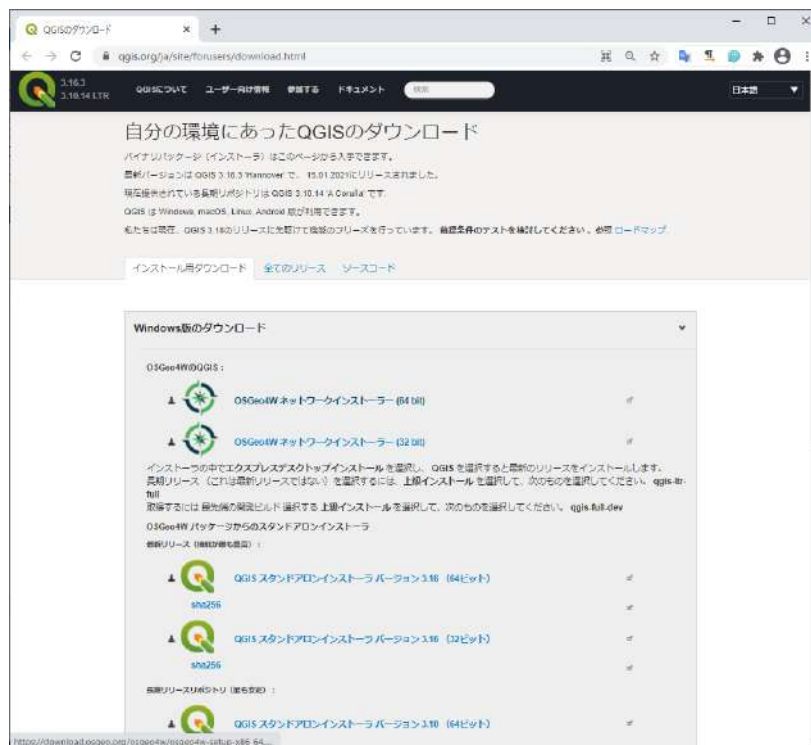


図 2-89 QGIS の導入① (RADFLOW)

2.3.2 入力ファイル（メッシュ）の作成手順

ここでは、RADFLOW[2-5,6]に入力するメッシュデータの作成手順について説明する。

① 河道ラインの部分抽出

まず、ランチャー「QGIS Desktop 3.16.3 with GRASS7.8.5」を起動する。

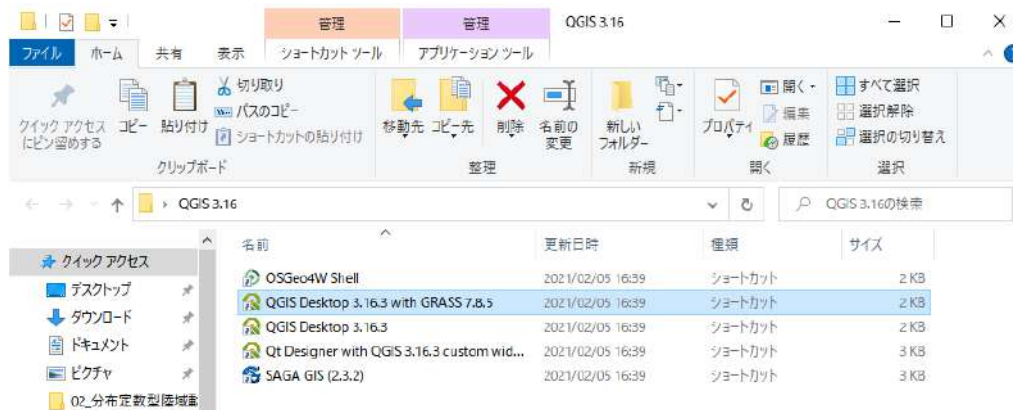


図 2-90 河道ラインの部分抽出① (RADFLOW)

アイコン「データソースマネージャを開く」を選択して、河道ラインデータを読み込む。

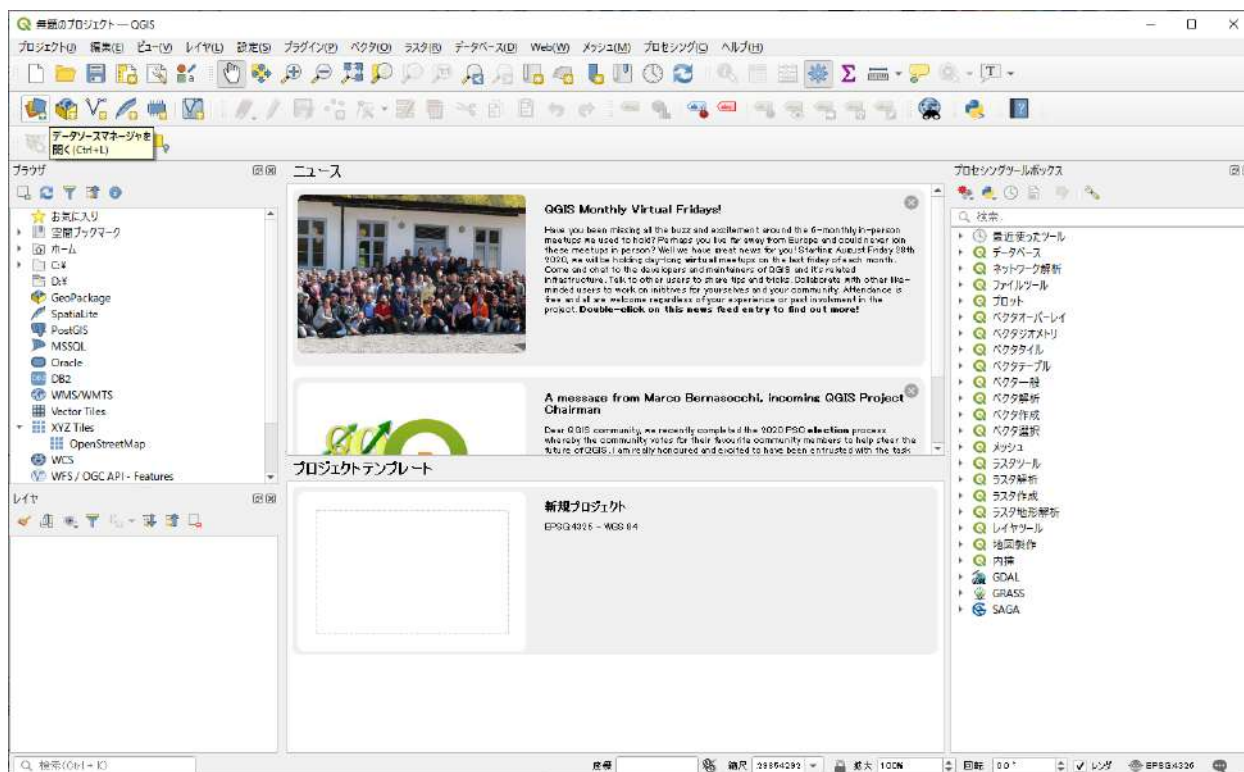


図 2-91 河道ラインの部分抽出② (RADFLOW)

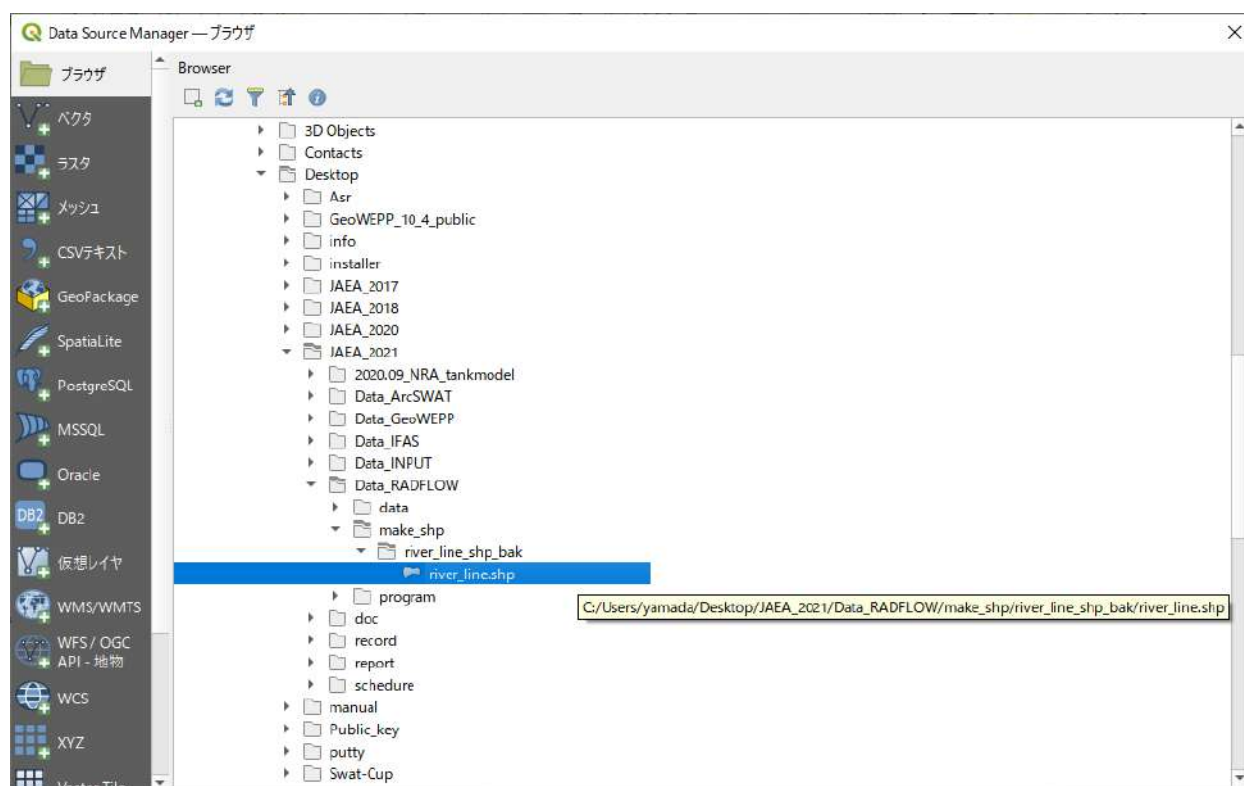


図 2-92 河道ラインの部分抽出③ (RADFLOW)

レイヤに河道ラインデータである「river_line」が登録される。また、ビューワーに河道ラインが表示される。

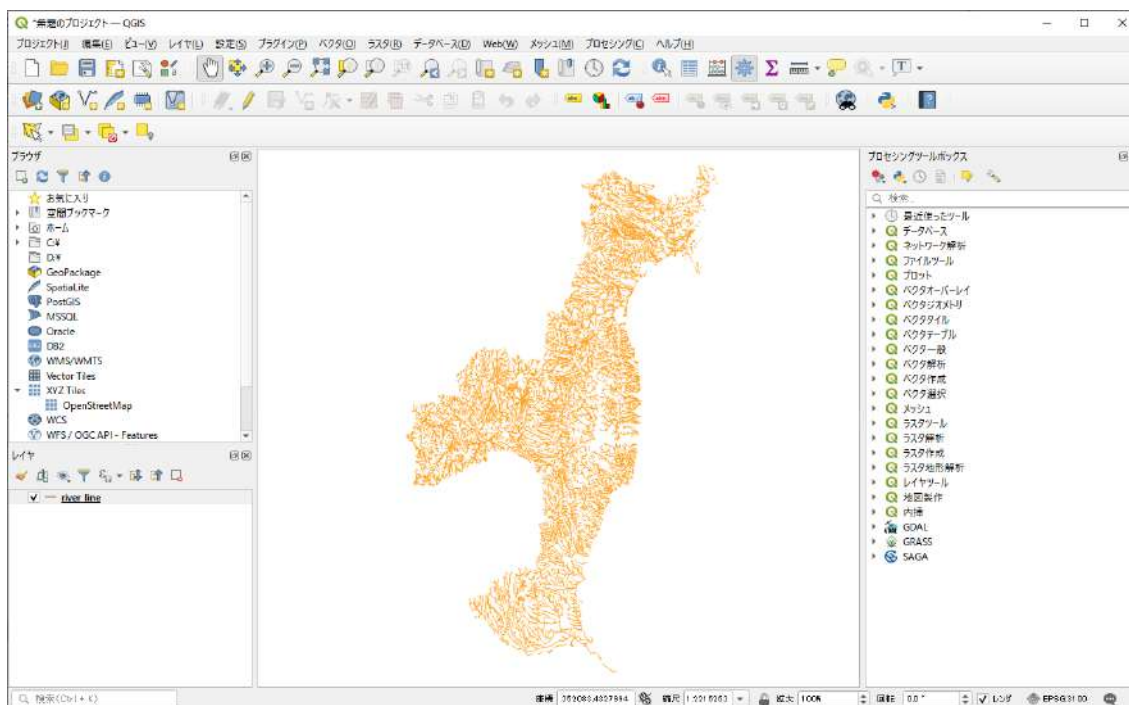


図 2-93 河道ラインの部分抽出④ (RADFLOW)

同様の手順によって、広瀬川周辺の DEM ラスターデータを読み込む。ここでは、ArcGIS で作成した TIFF フォーマットデータを読み込む。

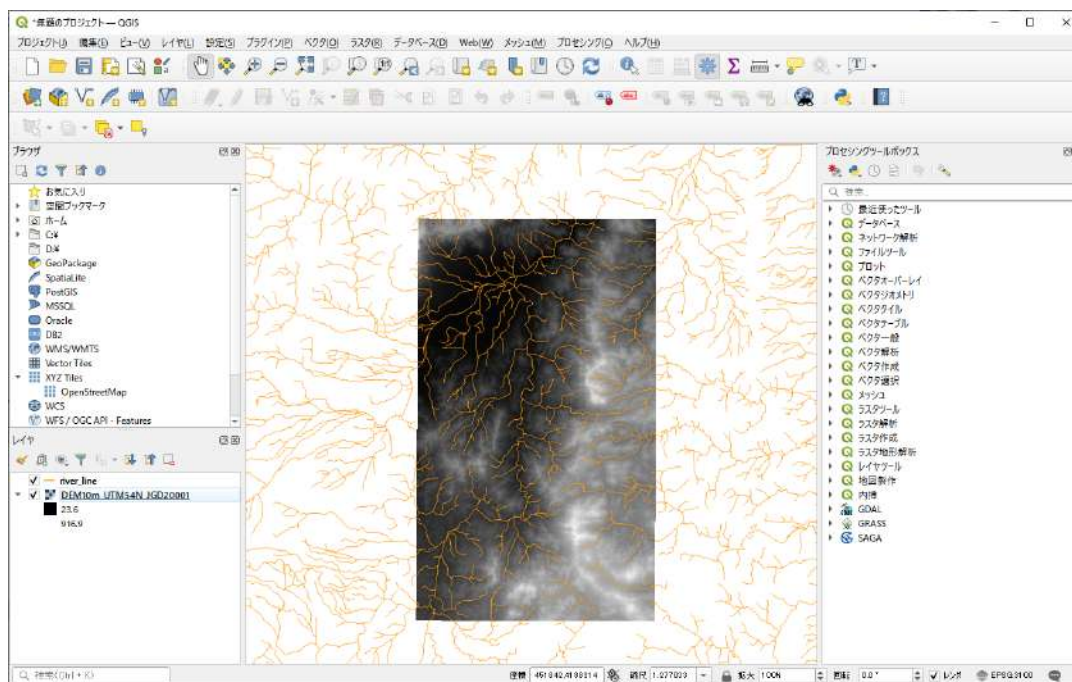


図 2-94 河道ラインの部分抽出⑤ (RADFLOW)

DEM ラスターデータのカラーマップは、レイヤ窓においてデータを右クリックして立ち上げたレイヤプロパティから調整が可能である。なお、レンダリングタイプを「カテゴリ値タイプ」とし、「分類」ボタンを押すと見やすいカラーマップで表示される。

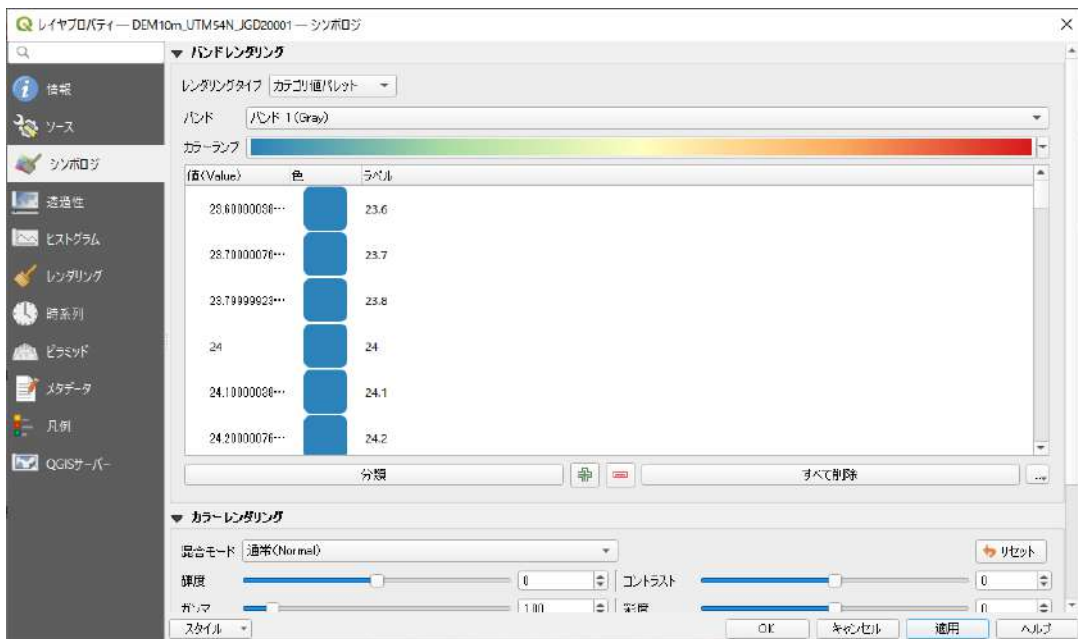


図 2-95 河道ラインの部分抽出⑥ (RADFLOW)

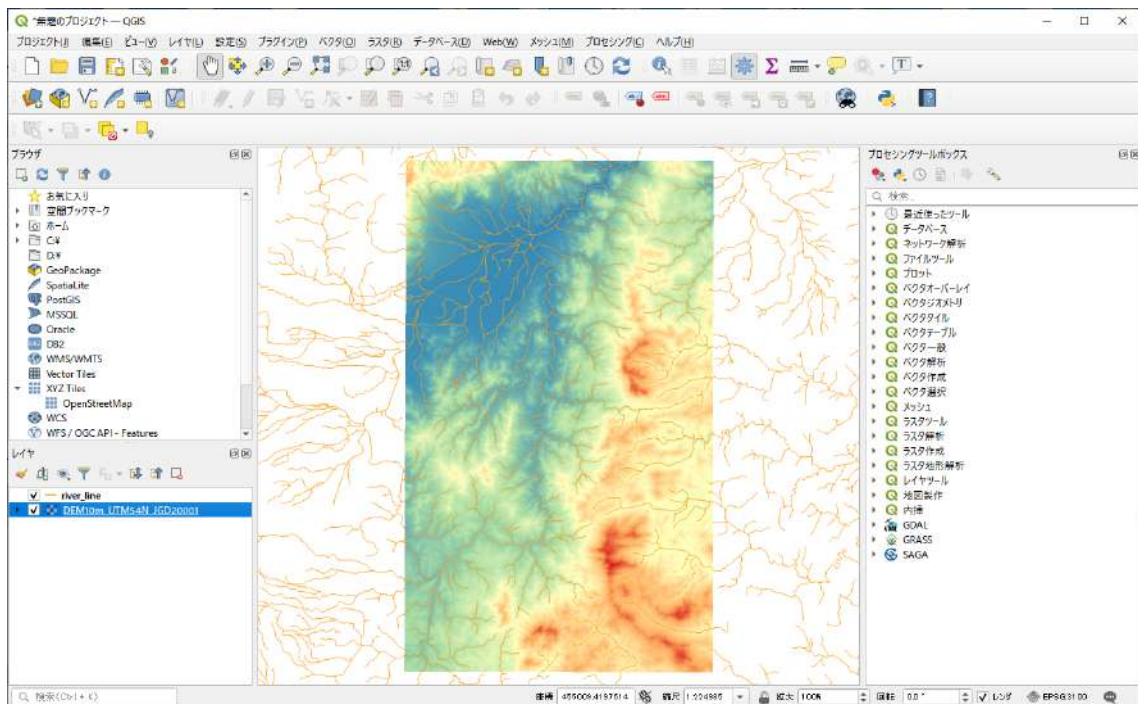


図 2-96 河道ラインの部分抽出⑦ (RADFLOW)

河道ラインデータから、広瀬川のラインデータ(shp)を作成する。選択アイコンから、「フリーハンドによる地物選択」を選ぶ。

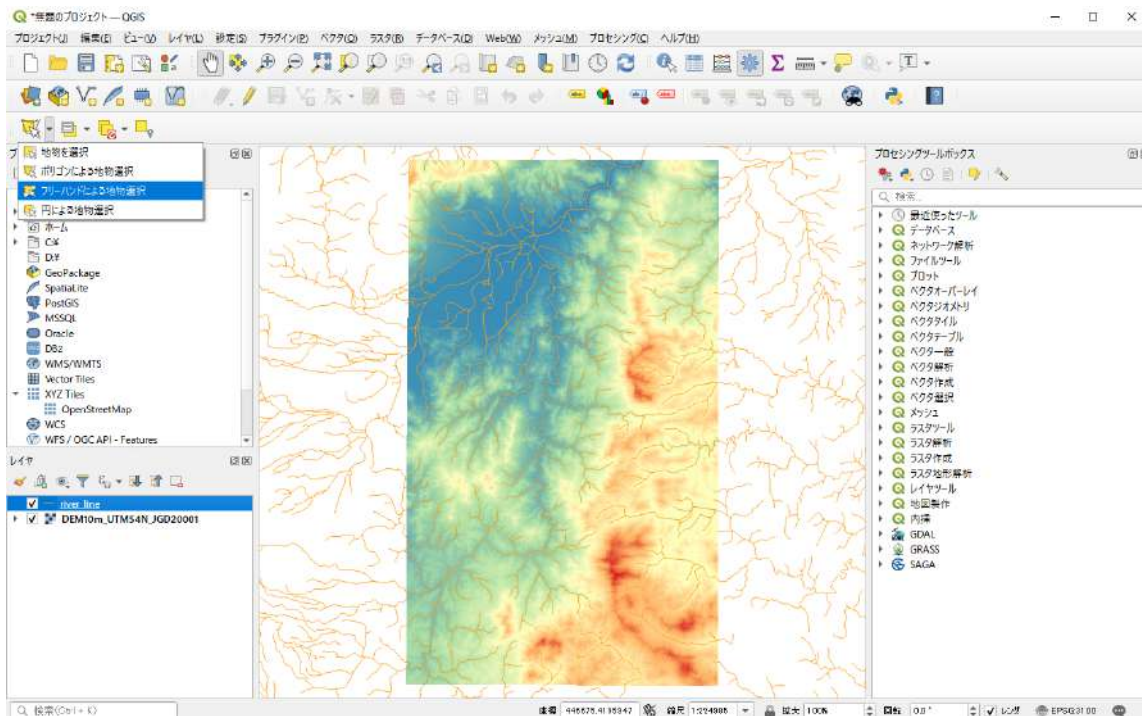


図 2-97 河道ラインの部分抽出⑧ (RADFLOW)

図 2-98 のように、広瀬川のラインデータを包含する範囲を選択する。

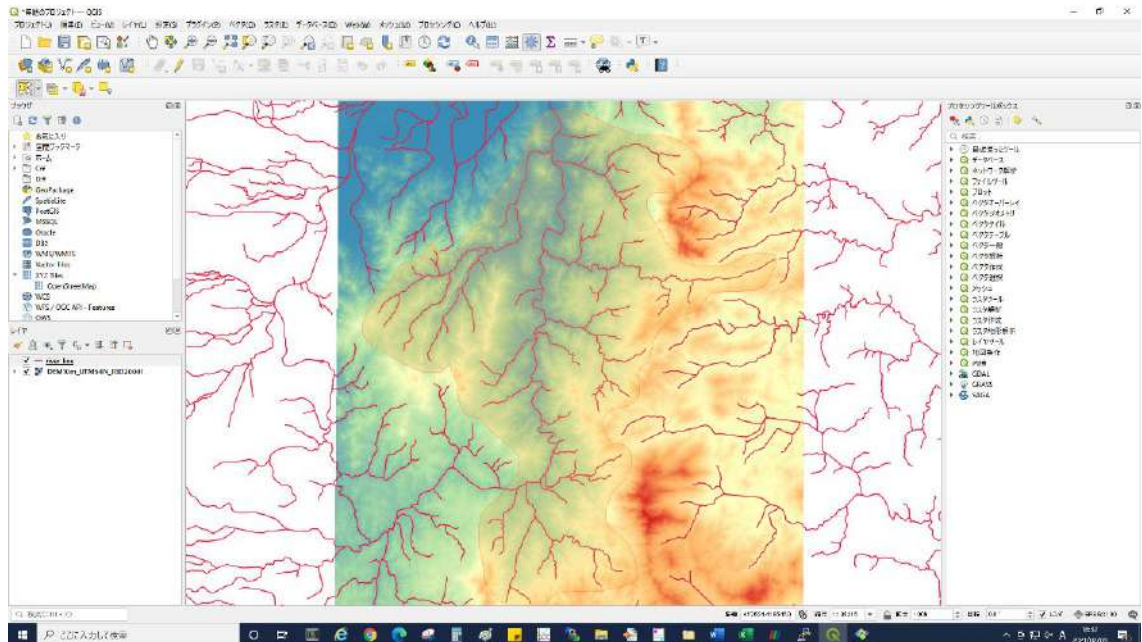


図 2-98 河道ラインの部分抽出⑨ (RADFLOW)

選択を確定すると、選択した河道ラインの色が変わる。

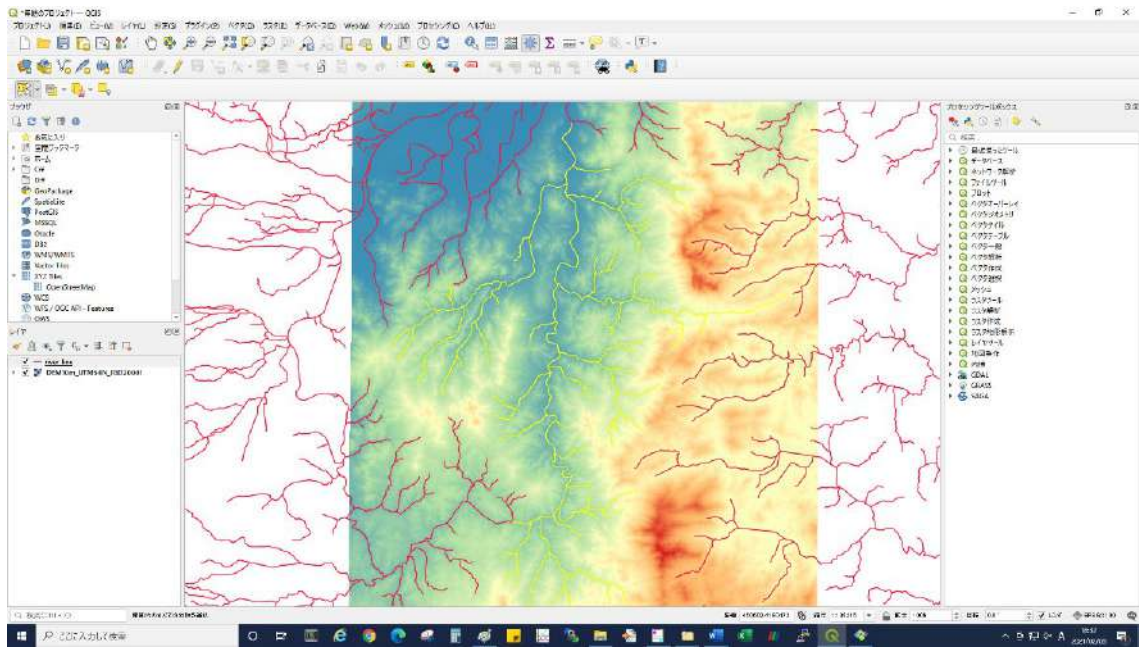


図 2-99 河道ラインの部分抽出⑩ (RADFLOW)

図 2-99 で選択した広瀬川の河道ラインを、shp ファイルデータとして保存する。元の河道ラインデータ「river_line」を選択し、右クリック>エクスポート>選択地物の保存を選ぶ。

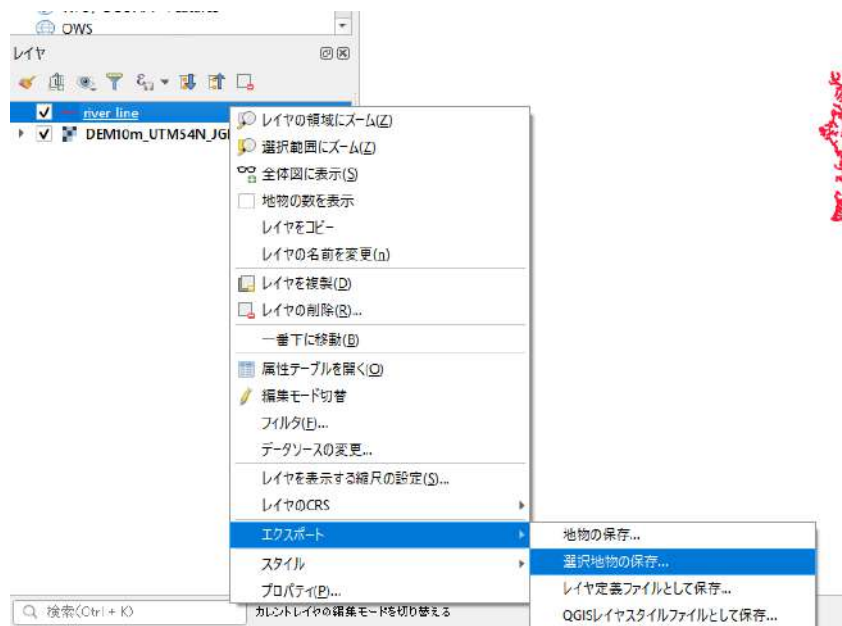


図 2-100 河道ラインの部分抽出⑪ (RADFLOW)

形式を「Shapefile」とし、座標参照系を「UTM zone 54N/JGD2000」とすることに注意して、shp ファイルデータを保存する。

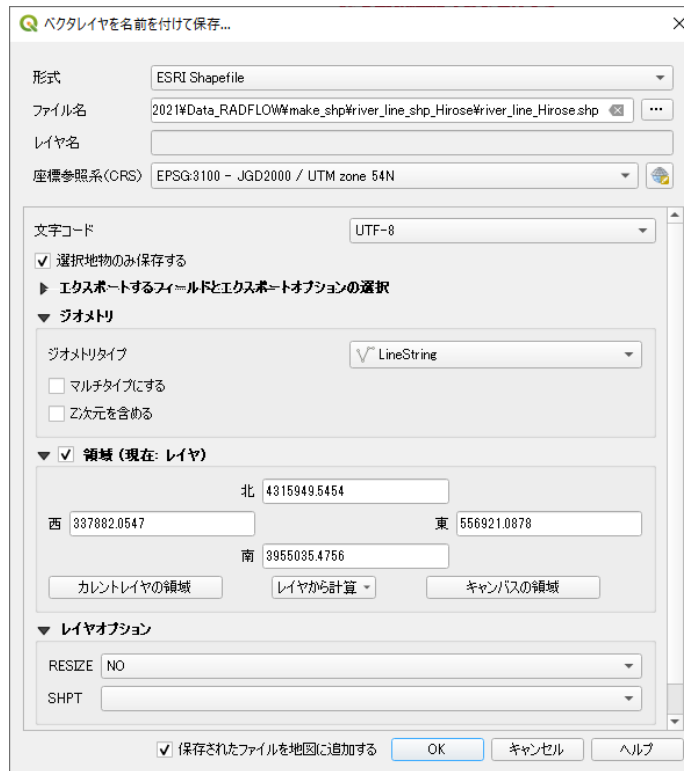


図 2-101 河道ラインの部分抽出⑫ (RADFLOW)

保存した広瀬川の shp ファイルは図 2-102 のようになる。

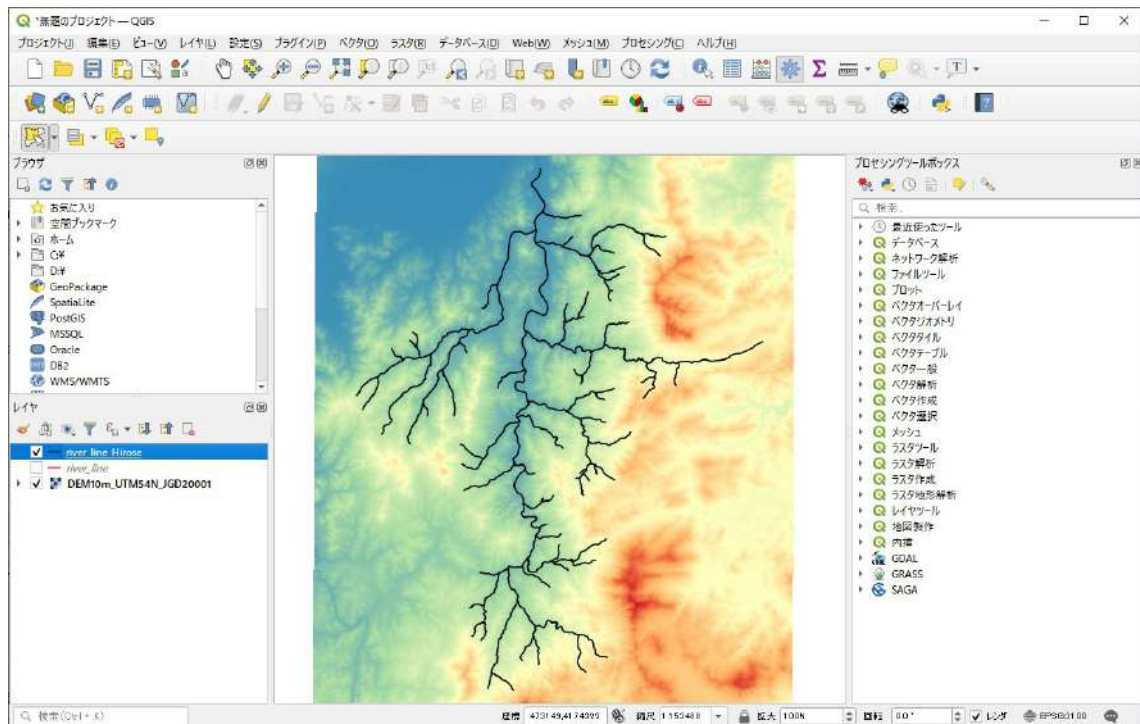


図 2-102 河道ラインの部分抽出⑬ (RADFLOW)

② 河道ライン上にポイントを配置

ツールボックス>ベクタ作成>線に沿ったランダム点群を選択し、河道ライン上にノードを発生させる。

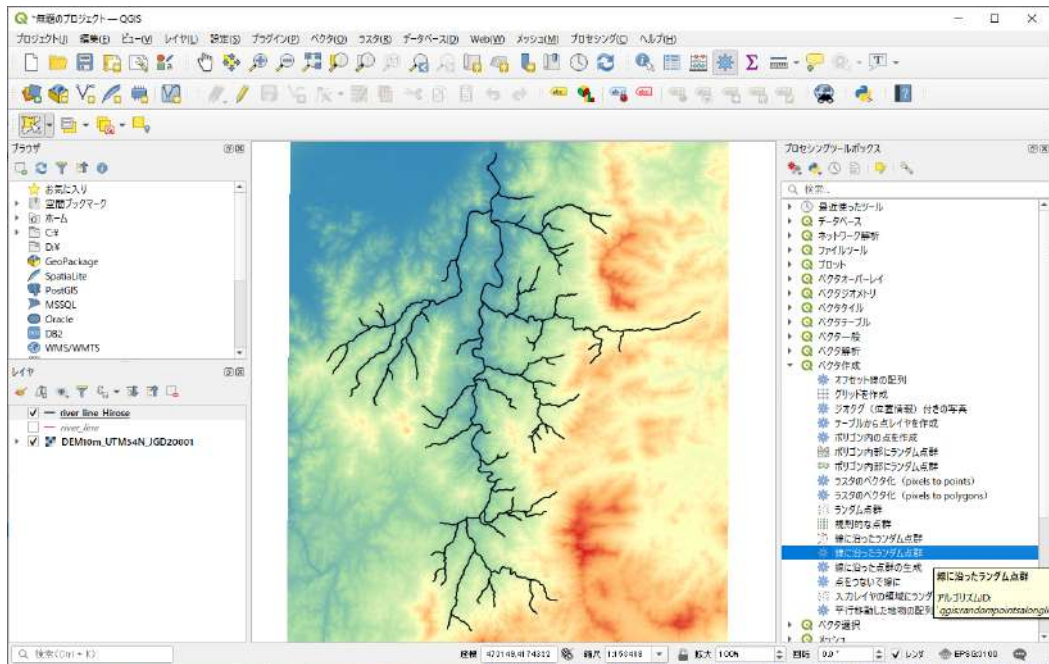


図 2-103 河道ライン上でノード生成① (RADFLOW)

点の数と点間距離の最小値を選択する。ここで、出力先は一時レイヤでよい。

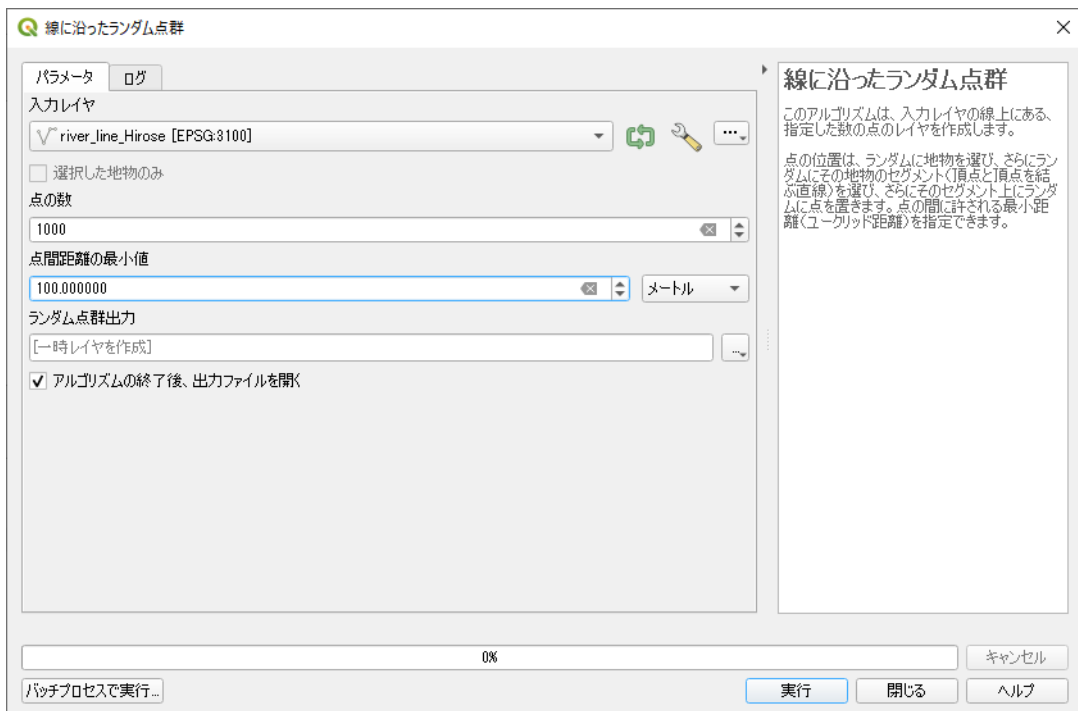


図 2-104 河道ライン上でノード生成② (RADFLOW)

一時レイヤとして「ランダム点群出力」が、レイヤ窓に登録される。このレイヤに対して、ツールボックス>ベクタテーブル>X/Y フィールドの追加を選択する。このとき、座標参照系「UTM zone 54N/JGD2000」の座標値をポイントに付与する。

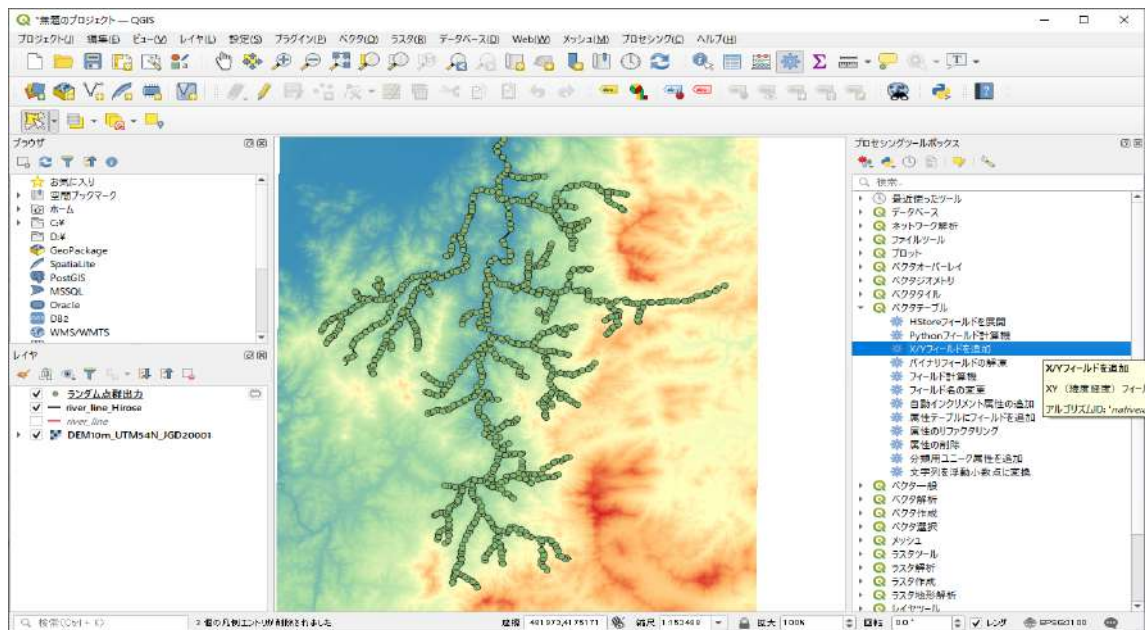


図 2-105 河道ライン上でノード生成③ (RADFLOW)

ここでは、あらかじめ入力した DEM の窪地を埋めたデータを作成する。ツールボックス>GRASS>ラスタ>r.fill.dir を利用する。

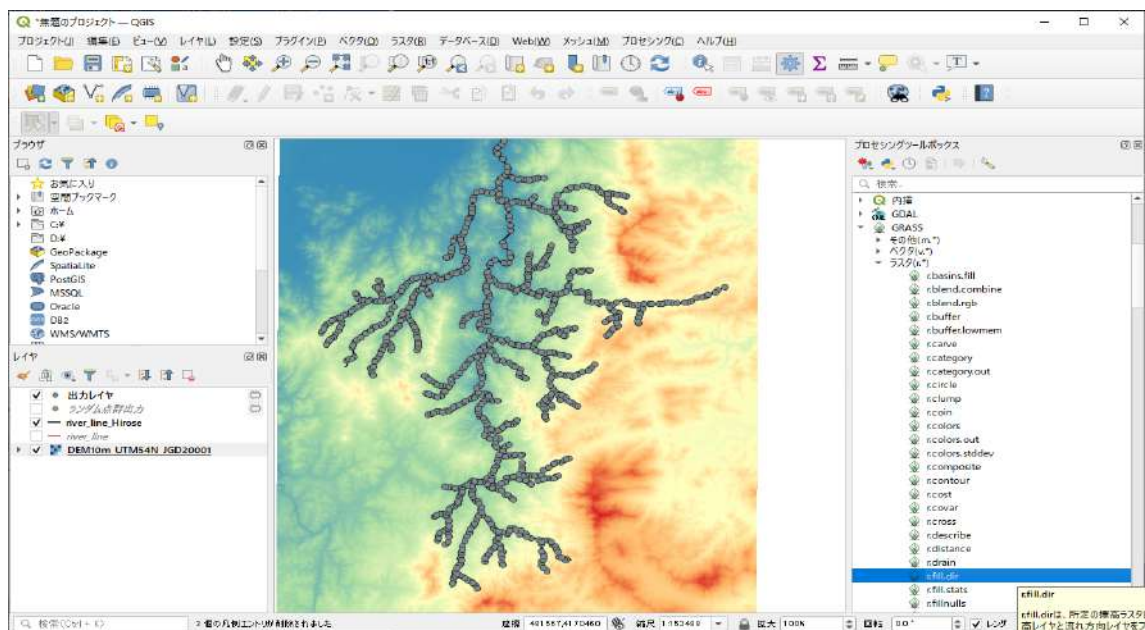


図 2-106 河道ライン上でノード生成④ (RADFLOW)

元の DEM 「DEM10m_UTM54N_JGD20001」に対して、窪地を埋めた DEM を「DEM10m_UTM54N_JGD20001_fill」として保存する。

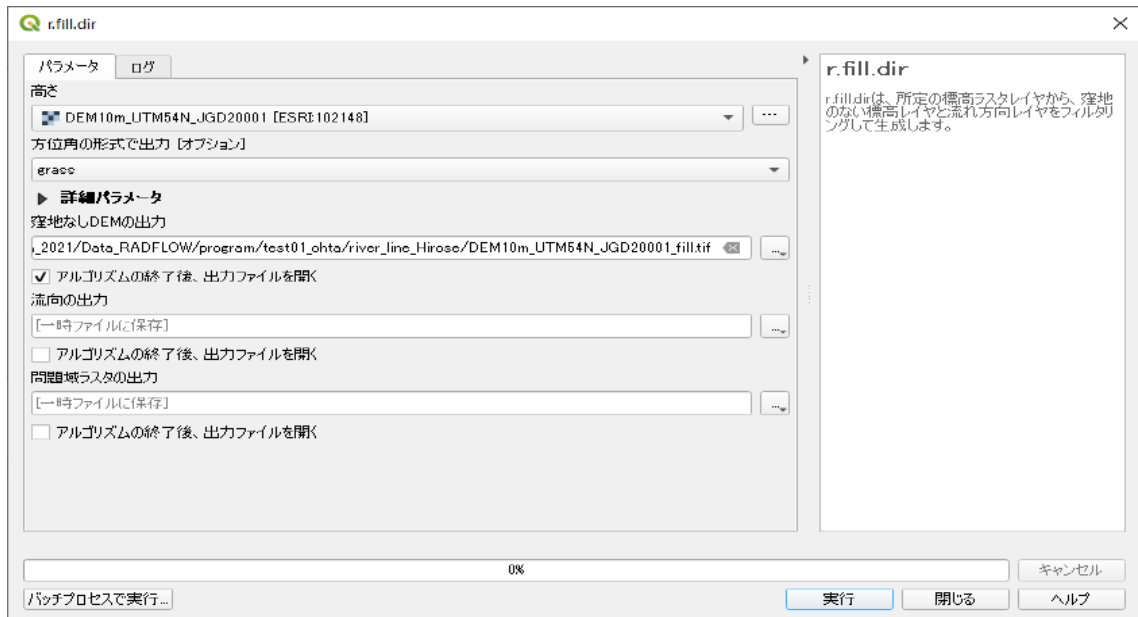


図 2-107 河道ライン上でノード生成⑤ (RADFLOW)

窪地を埋めた DEM を「DEM10m_UTM54N_JGD20001_fill」がレイヤ窓に登録される。

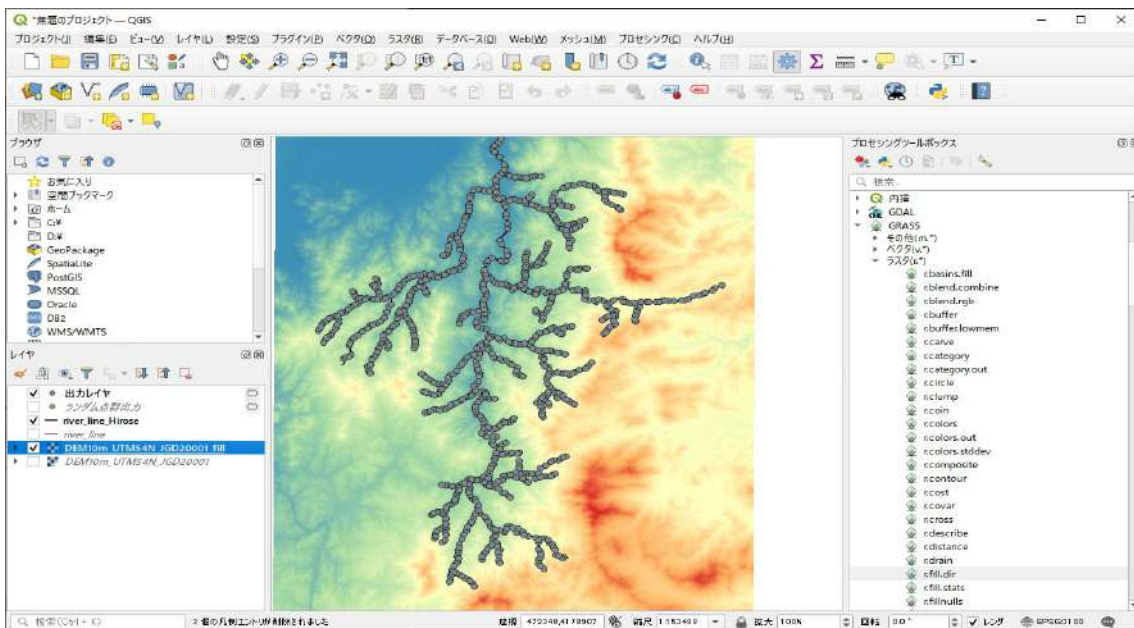


図 2-108 河道ライン上でノード生成⑥ (RADFLOW)

ツールボックス>ラスタ解析>ベクタレイヤにラスタ値を付加を選択して、窪地を埋めた DEM を用いて、河道ラインに配置したランダム点に標高値を付与する。

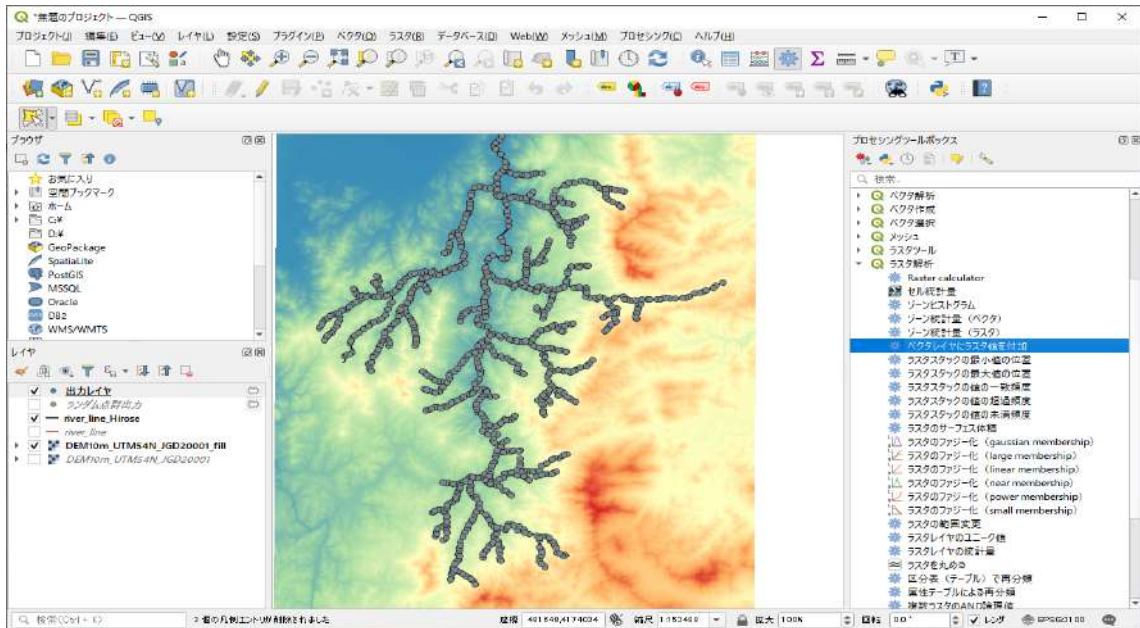


図 2-109 河道ライン上でノード生成⑦ (RADFLOW)

入力レイヤとライヤレイヤ (窪地を埋めた DEM) を指定して、出力を Shapefile 「river_points.shp」として保存する。

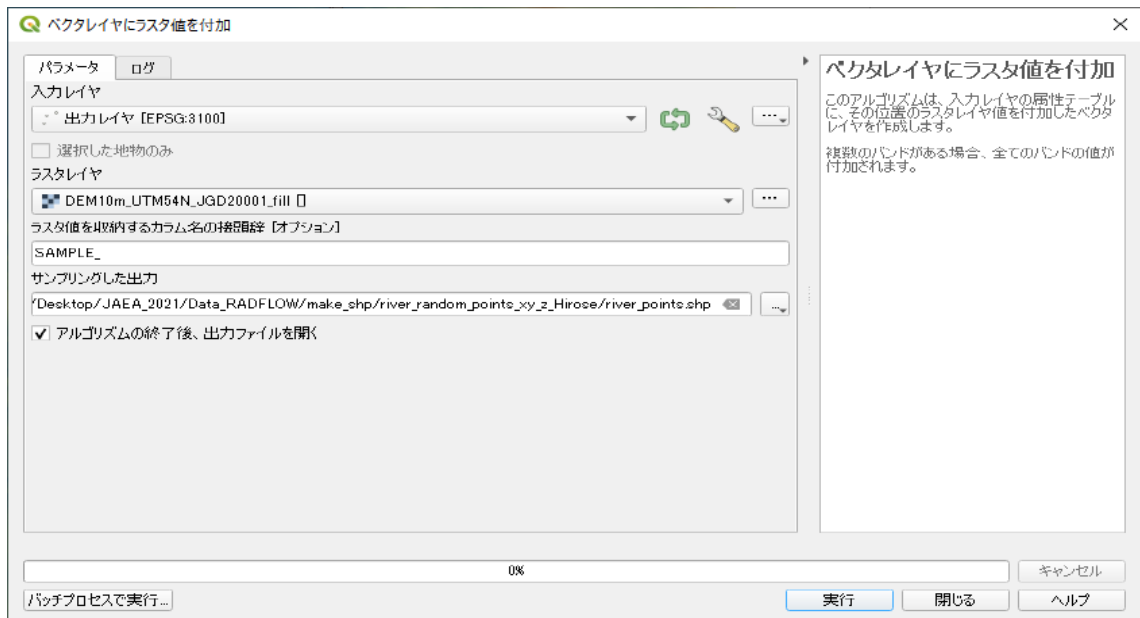


図 2-110 河道ライン上でノード生成⑧ (RADFLOW)

さらに、保存した Shapefile 「river_points.shp」を CSV ファイルとして出力する。レイヤ窓にて、「river_points.shp」を右クリック>エクスポート>地物の保存を選択する。

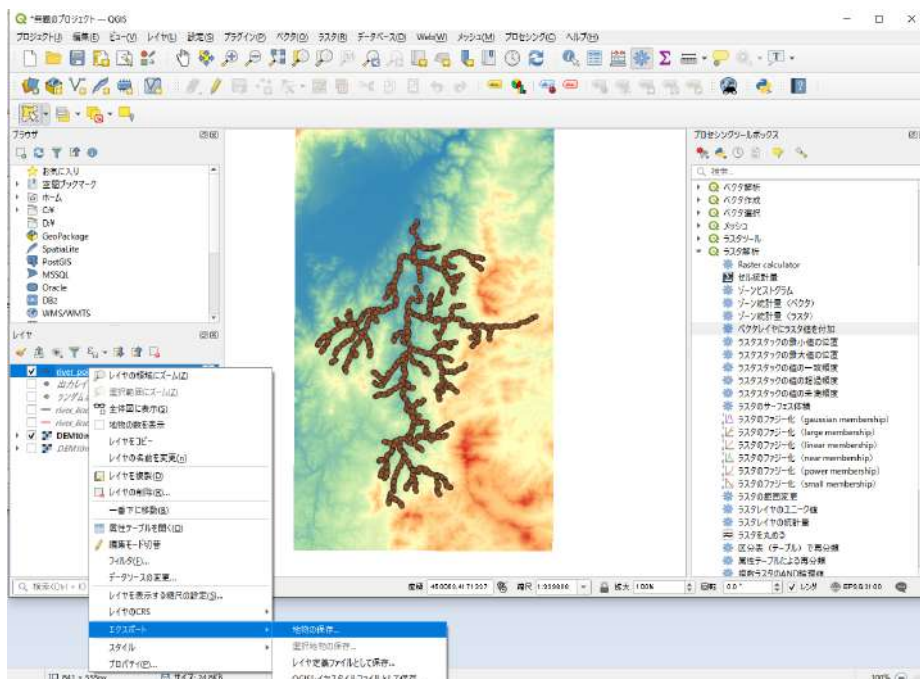


図 2-111 河道ライン上でノード生成⑨ (RADFLOW)

形式を「カンマで区切られた値」とし、領域にチェックを入れることに注意して、CSV ファイルとして「river_points_Hirose.csv」を保存する。



図 2-112 (RADFLOW) 河道ライン上でノード生成⑩

③ 流域にポイントを配置

ツールボックス>ベクタ作成>ランダム点群を選択する。

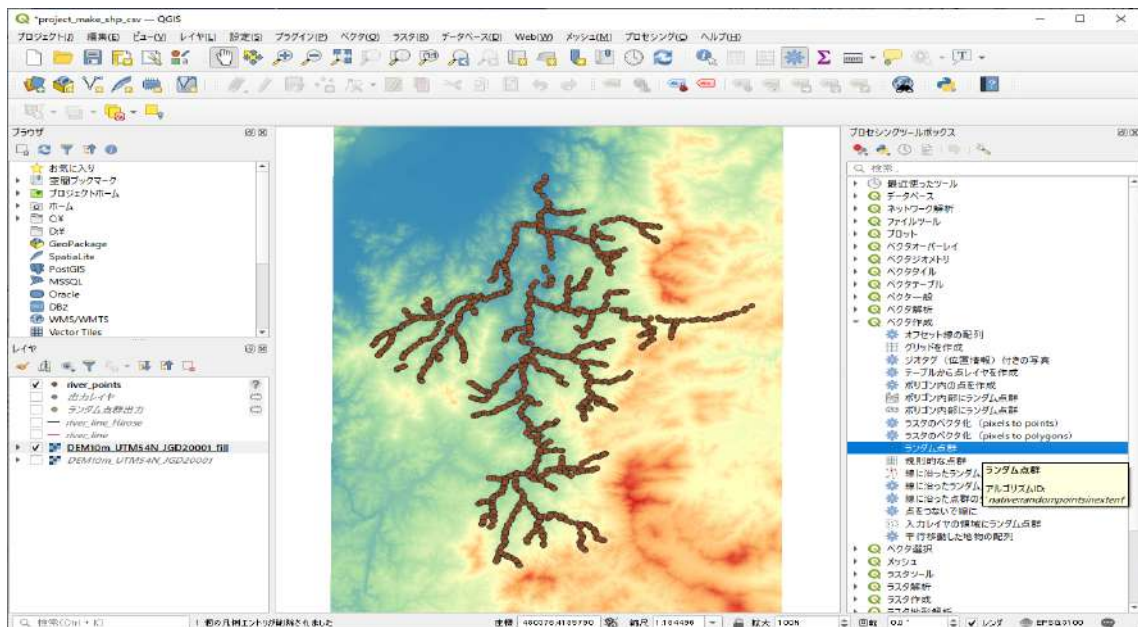


図 2-113 流域内でノード生成① (RADFLOW)

作成範囲をマウスで指定する。また、点の数と点間距離の最小値をオプションで変更する。また、座標参照系を「UTM zone 54N/JGD2000」とする。出力は一時レイヤでよい。

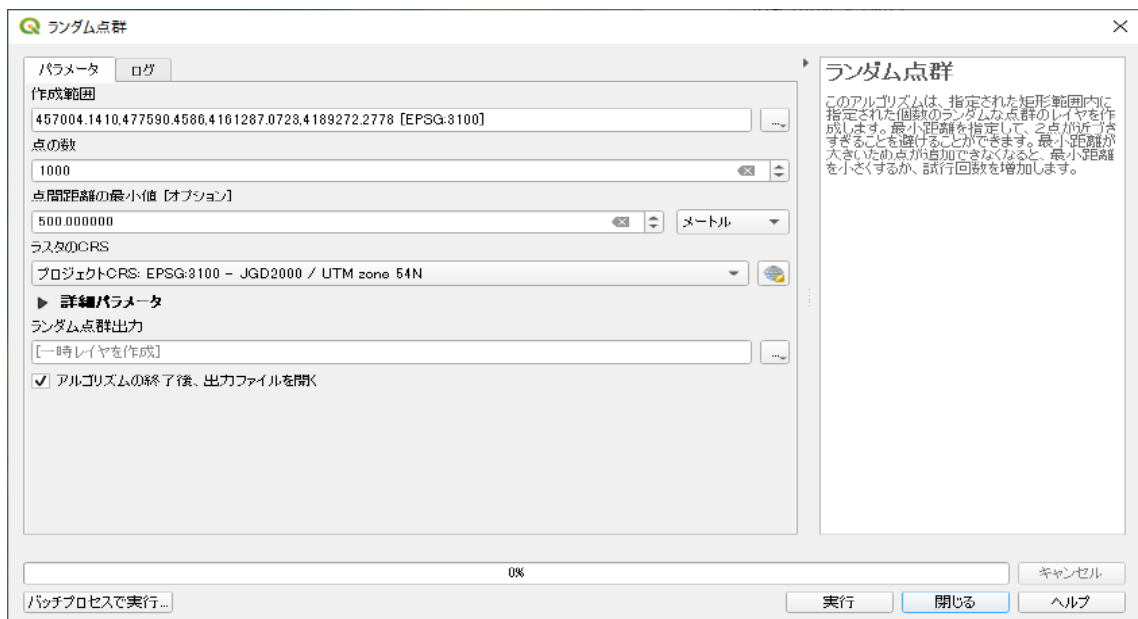


図 2-114 流域内でノード生成② (RADFLOW)

出力された一時レイヤ「ランダム点群出力_region」に対して、河川ポイント近くに発生したポイントを河川沿いに移動する必要がある。

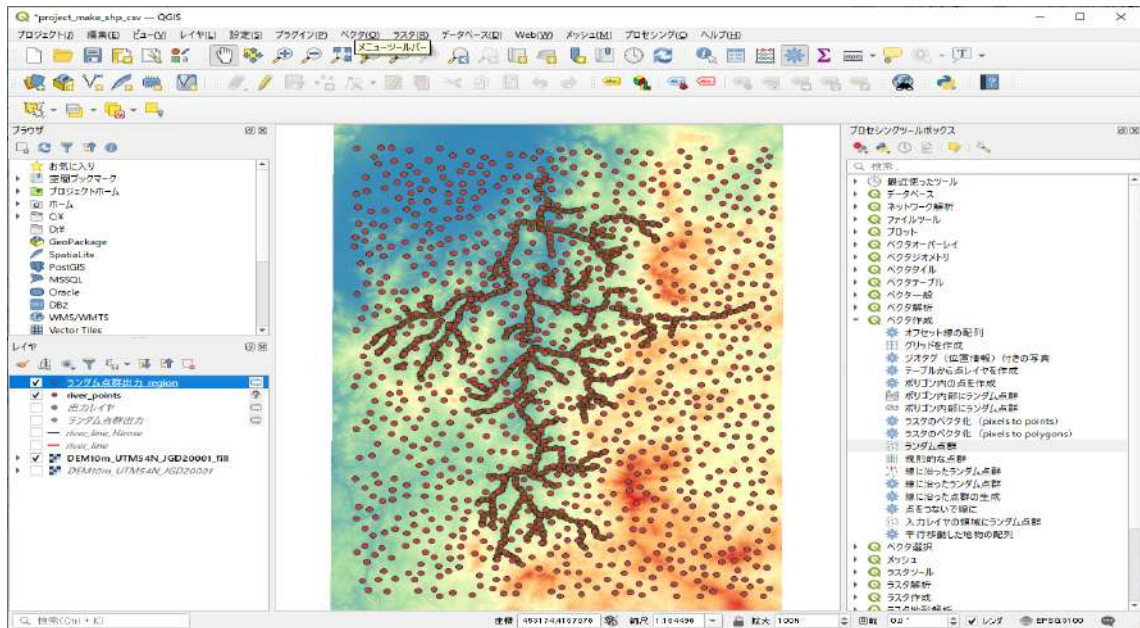


図 2-115 流域内でノード生成③ (RADFLOW)

一時レイヤ「ランダム点群出力_region」に対して、右クリック>編集モード切替を選択する。

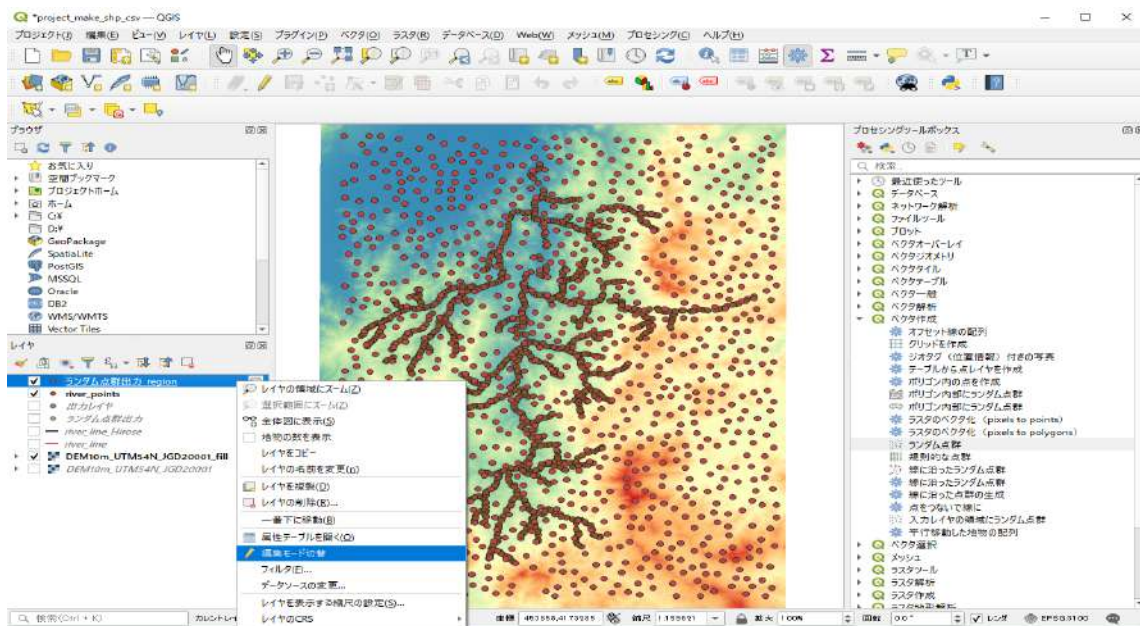


図 2-116 流域内でノード生成④ (RADFLOW)

アクティブになったツールバーから、「頂点ツール（現在のレイヤ）」を選択して、河川ポイント沿いに位置するポイントの位置を編集する。

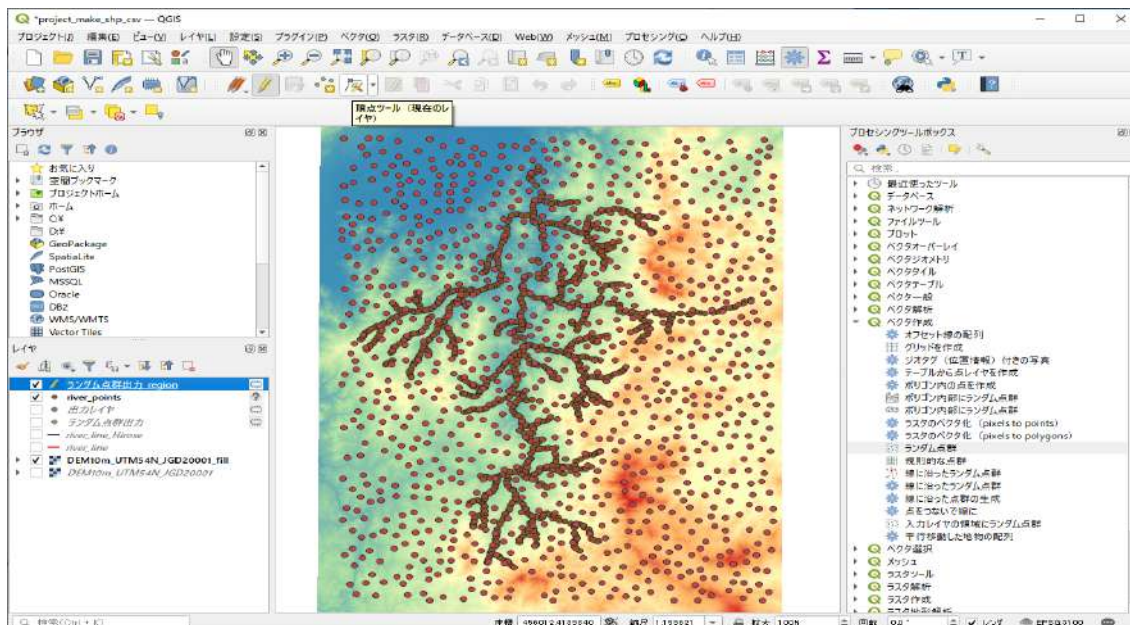


図 2-117 流域内でノード生成⑤ (RADFLOW)

ポイント位置の編集（前）

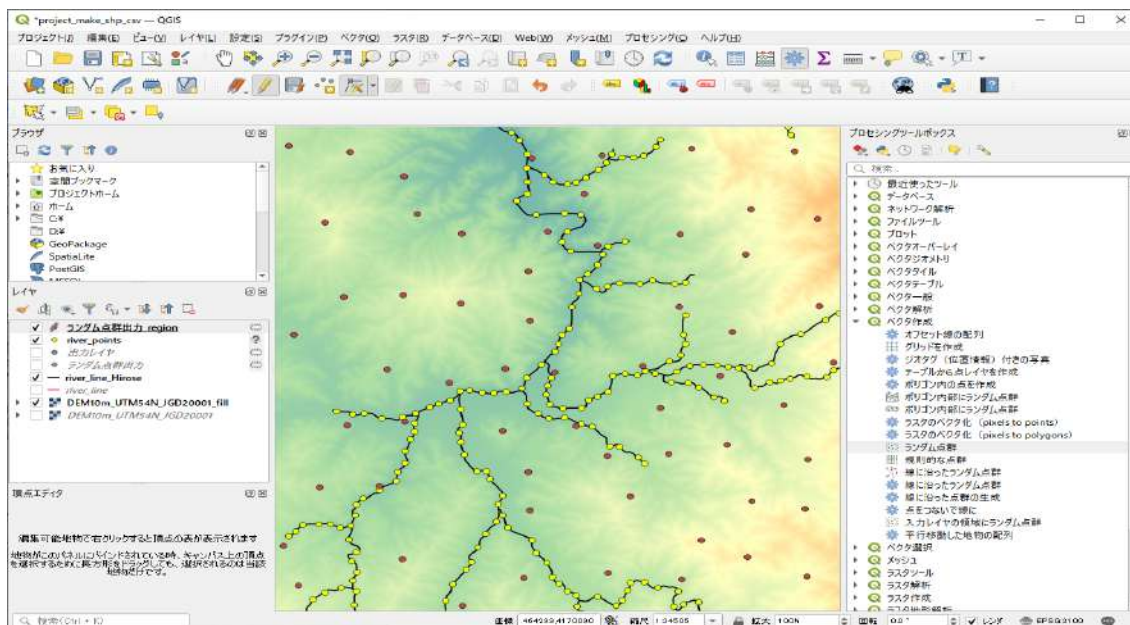


図 2-118 流域内でノード生成⑥ (RADFLOW)

ポイント位置の編集（後）

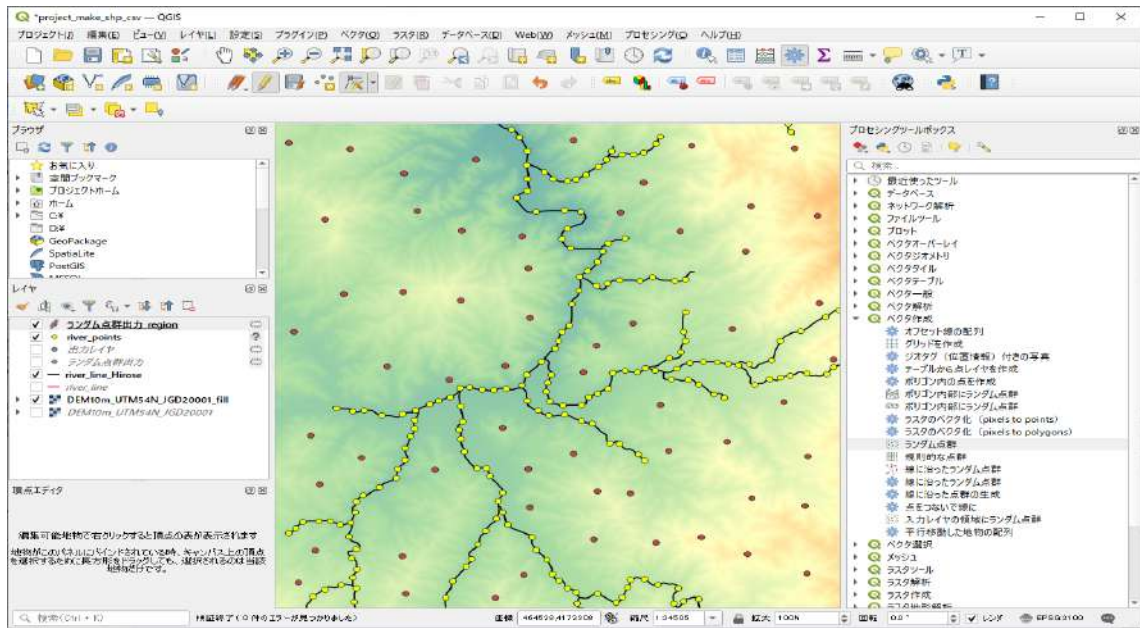


図 2-119 流域内でノード生成⑦ (RADFLOW)

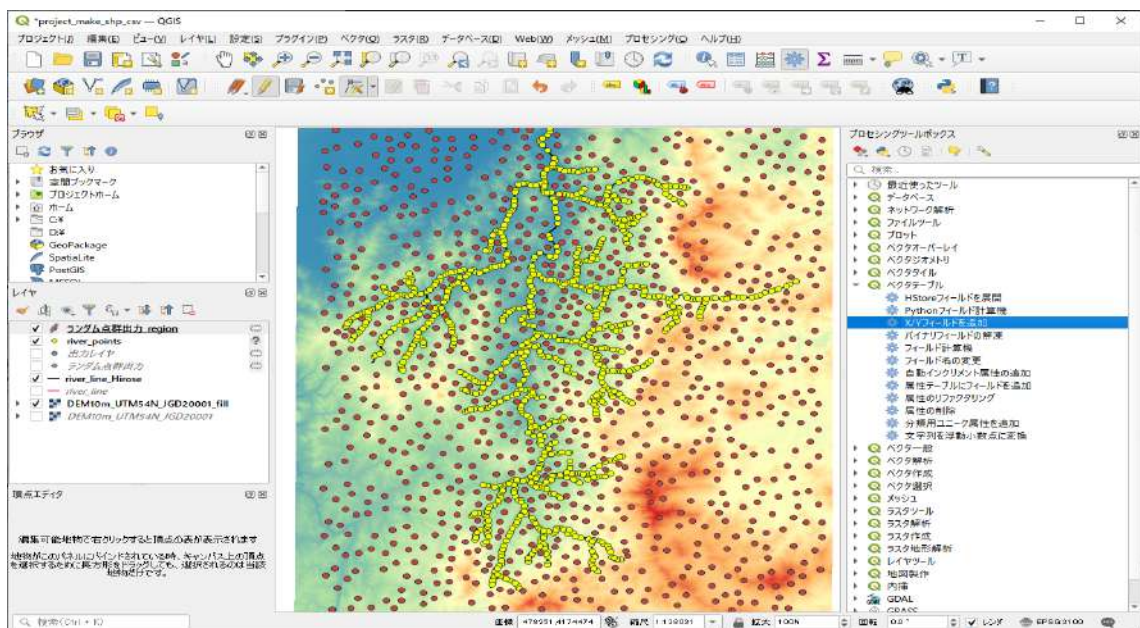


図 2-120 流域内でノード生成⑧ (RADFLOW)

ポイント位置を編集した「ランダム点群出力_region」に対して、ツールボックス>ベクタテーブル>X/Yフィールドの追加を選択する。このとき、座標参照系「UTM zone 54N/JGD2000」の座標値をポイントに付与する。

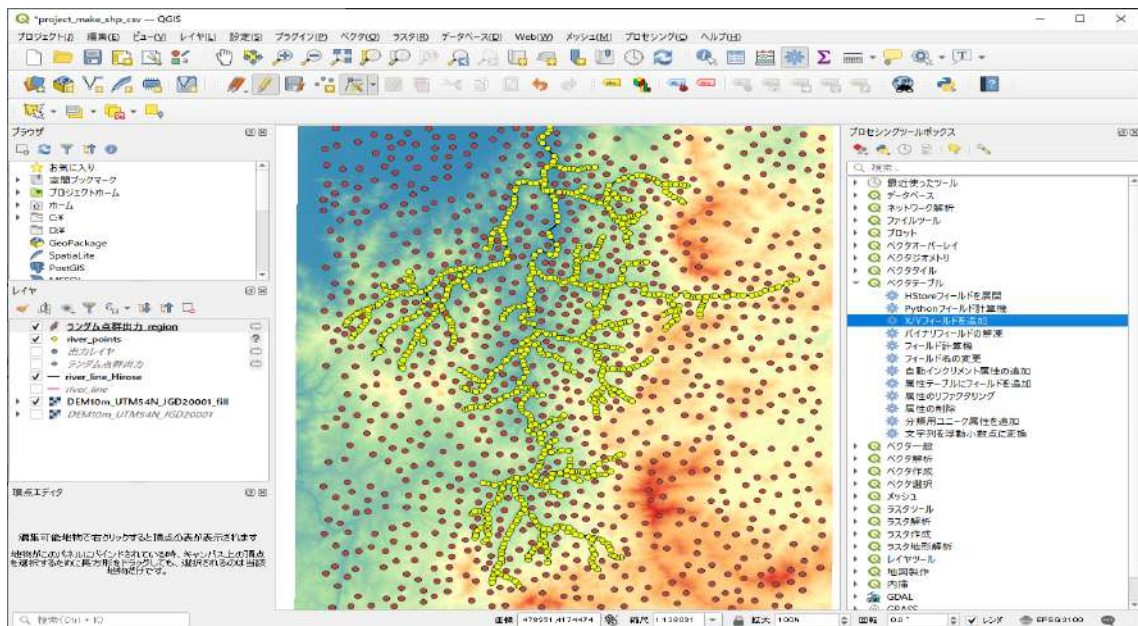


図 2-121 流域内でノード生成⑨ (RADFLOW)

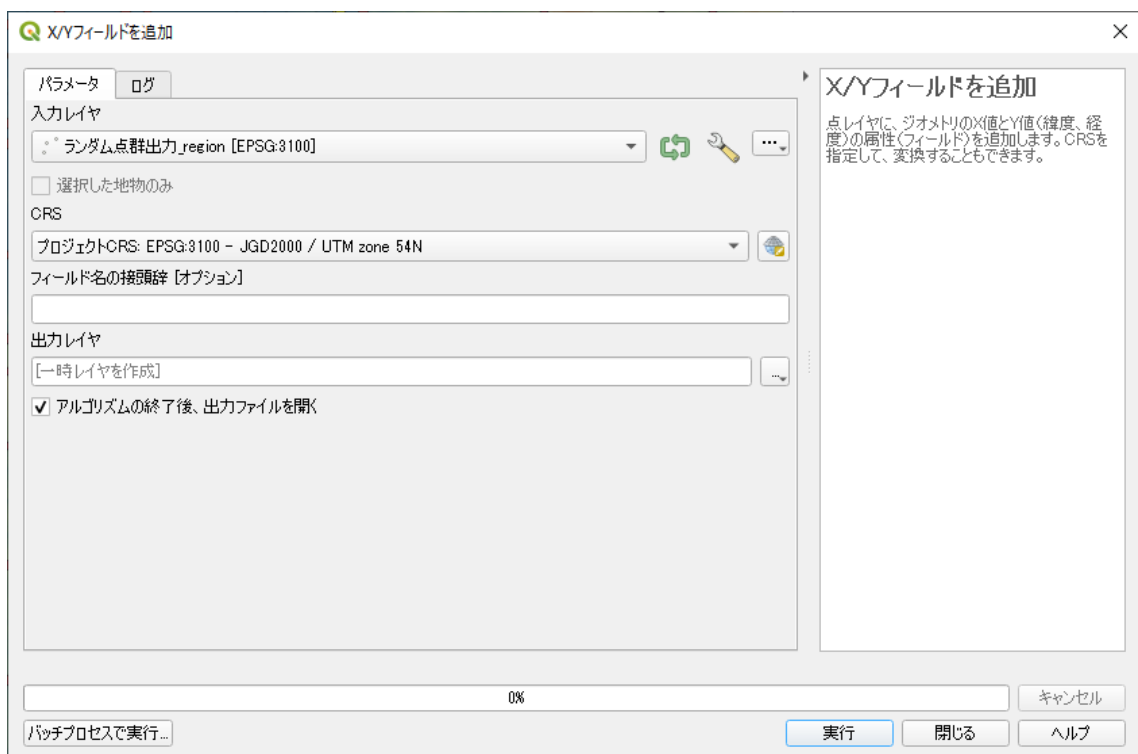


図 2-122 流域内でノード生成⑩ (RADFLOW)

ツールボックス>ラスタ解析>ベクタレイヤにラスタ値を付加を選択して、窪地を埋めた DEM を用いて、領域に配置したランダム点に標高値を付与する。

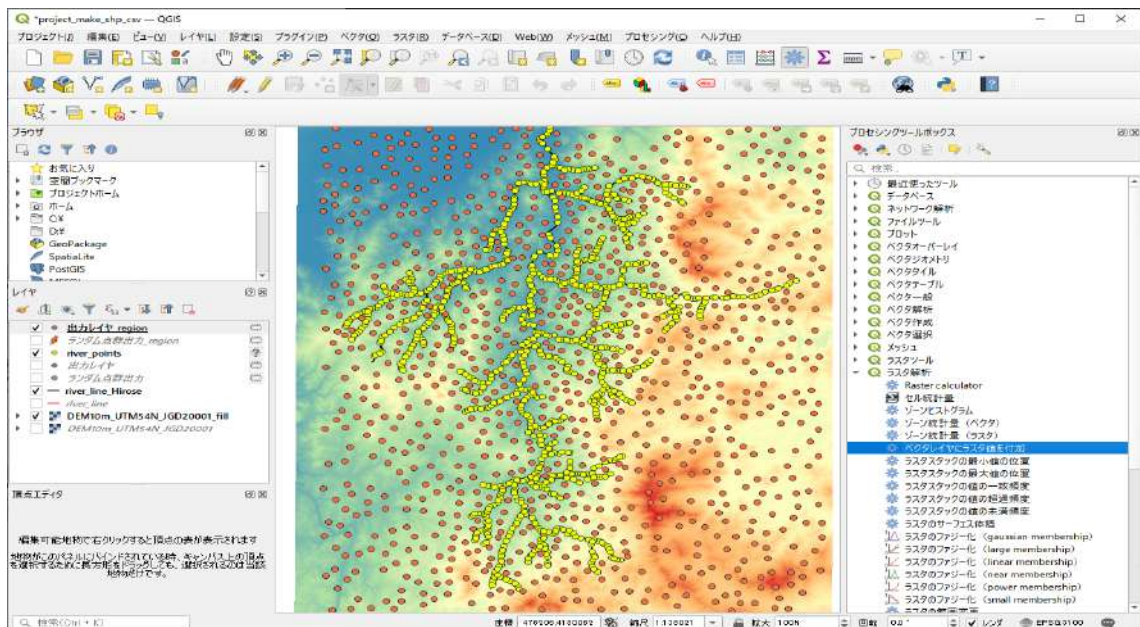


図 2-123 流域内でノード生成⑩ (RADFLOW)

入力レイヤとライヤレイヤ (窪地を埋めた DEM) を指定して、出力を Shapefile 「region_points.shp」として保存する。

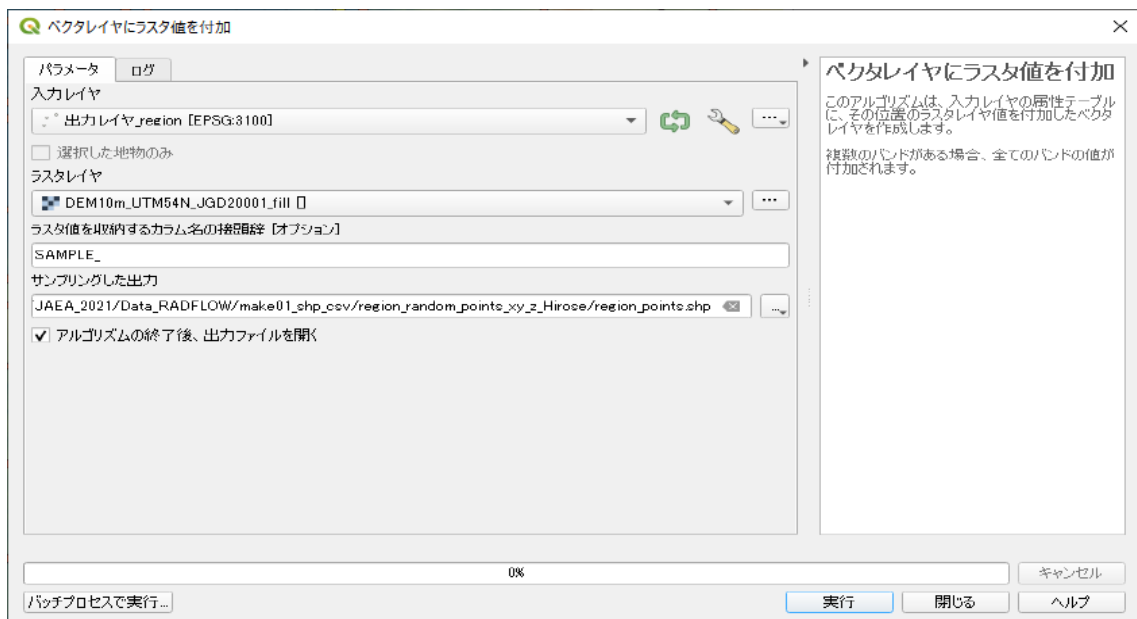


図 2-124 流域内でノード生成⑪ (RADFLOW)

さらに、保存した Shapefile 「region_points.shp」を CSV ファイルとして出力する。レイヤ窓にて、「region_points.shp」を右クリック>エクスポート>地物の保存を選択する。

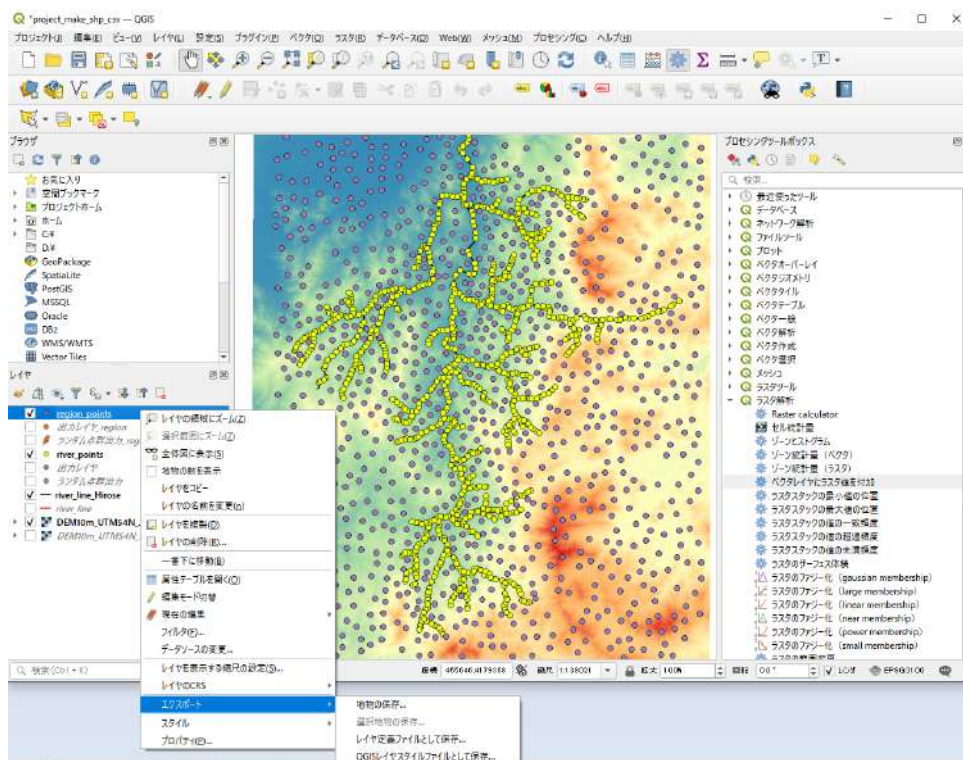


図 2-125 流域内でノード生成⑬ (RADFLOW)

形式を「カンマで区切られた値」とし、領域にチェックを入れることに注意して、CSV ファイルとして「region_points_Hirose.csv」を保存する。



図 2-126 流域内でノード生成⑭ (RADFLOW)

以上の手続きを完了すると、レイヤ窓の様子は図 2-127 のようになる。

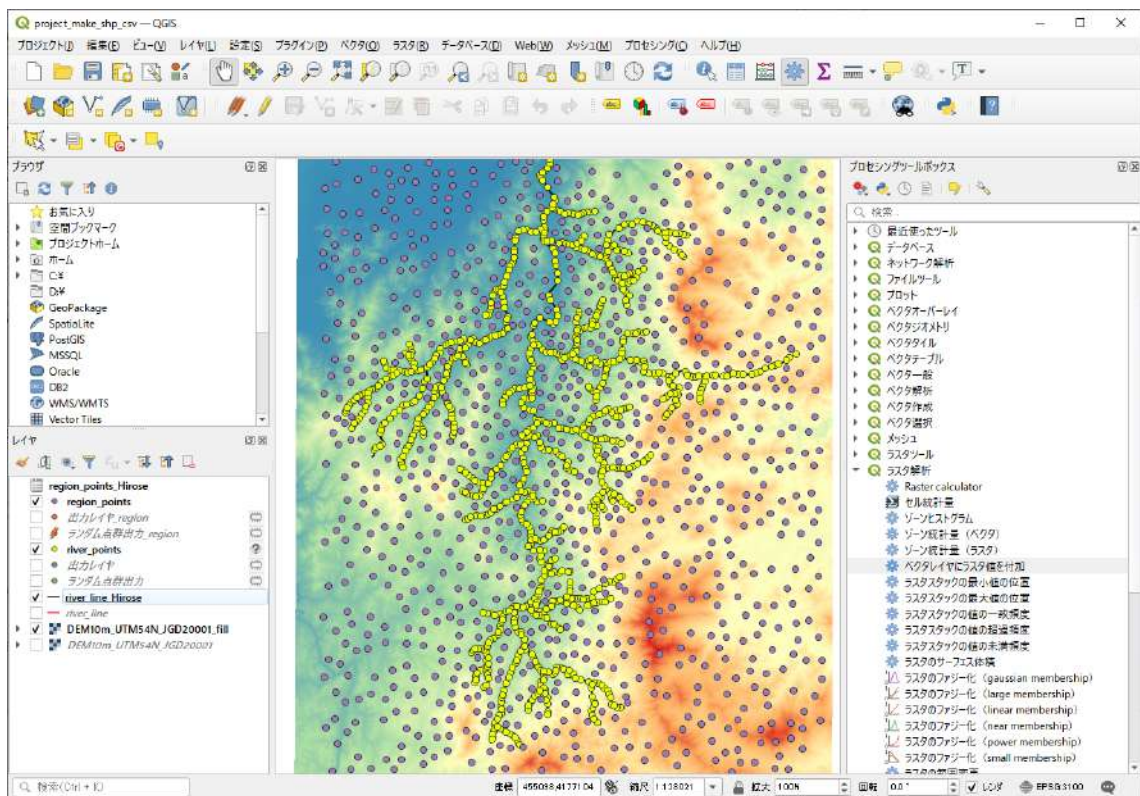


図 2-127 流域内でノード生成⑮ (RADFLOW)

出力した2つのCSVファイルをマージし、X,Y,Z,1 or 2 となるように編集する。ここで、河川ノードは2、それ以外は1を入力する。拡張子は「.particles」とする。

ID	X	Y	Z	Value	Value	Value	Value
1	468524	4624160384	4175178	3240538798	277	299987792968750	2
2	468815	0066329946	4173890	6527827503	336	100006103515625	2
3	468260	1060807110	4173394	1726846271	353	799987792968750	2
4	469037	0068572822	4182660	9559769081	172	000000000000000	2
5	467993	6171400846	4183766	9710896113	114	000000000000000	2
6	461157	8881269394	4176199	8844648479	201	000000000000000	2
7	471259	1842615632	4183998	9978359286	358	399993896484375	2
8	458594	6060752584	4177057	8741880143	247	000000000000000	2
9	469449	2176589866	4182429	3262417554	199	000000000000000	2
10	463709	7195733416	4172921	3503707568	213	699996948242188	2
11	463021	2730492378	4180021	4802375752	114	900001525878906	2
12	466127	6939930036	4184900	7548583946	69	199996948242188	2
13	466124	4907398014	4171452	6913162409	162	100006103515625	2
14	463723	2255209274	4174164	0750852232	180	300003051757813	2
15	465578	3464884230	4177940	2627373417	109	400001525878906	2
16	463567	1673395902	4173903	2266251026	197	500000000000000	2
17	465766	5066114044	4176841	9548247610	116	300003051757813	2
18	465521	7916289442	4169181	5836635246	189	899993896484375	2
19	465803	6806762966	4168967	5986929401	197	300003051757813	2
20	466159	4723578886	4185317	6637995946	67	199996948242188	2
21	468686	7661047998	4173947	0530360327	324	600006103515625	2
22	467497	2226202460	4169060	6937404689	279	100006103515625	2
23	463831	8168012234	4180163	2297108113	108	400001525878906	2
24	465575	7940197240	4165180	8087254111	328	000000000000000	2
25	461226	5036417482	4177182	1737723206	166	100006103515625	2
26	460264	1719190990	4174963	2819906478	256	100006103515625	2
27	464891	3774299400	4183875	2202507663	86	099998474121094	2
28	467781	3892234000	4180604	6376585863	162	699996948242188	2
29	466595	8007088022	4175521	1824451634	186	100006103515625	2
30	466560	1396366842	4185872	0695044599	64	699996948242188	2
31	461158	6078231724	4178933	7285404527	139	899993896484375	2
32	469978	5398405182	4185010	3849716126	218	500000000000000	2

図 2-128 (RADFLOW) 流域内でノード生成⑯

④ 三角形格子を生成 (ParaView 使用)

ParaView を起動し、dem_point.particles を開く。Propaties>Apply を押す。

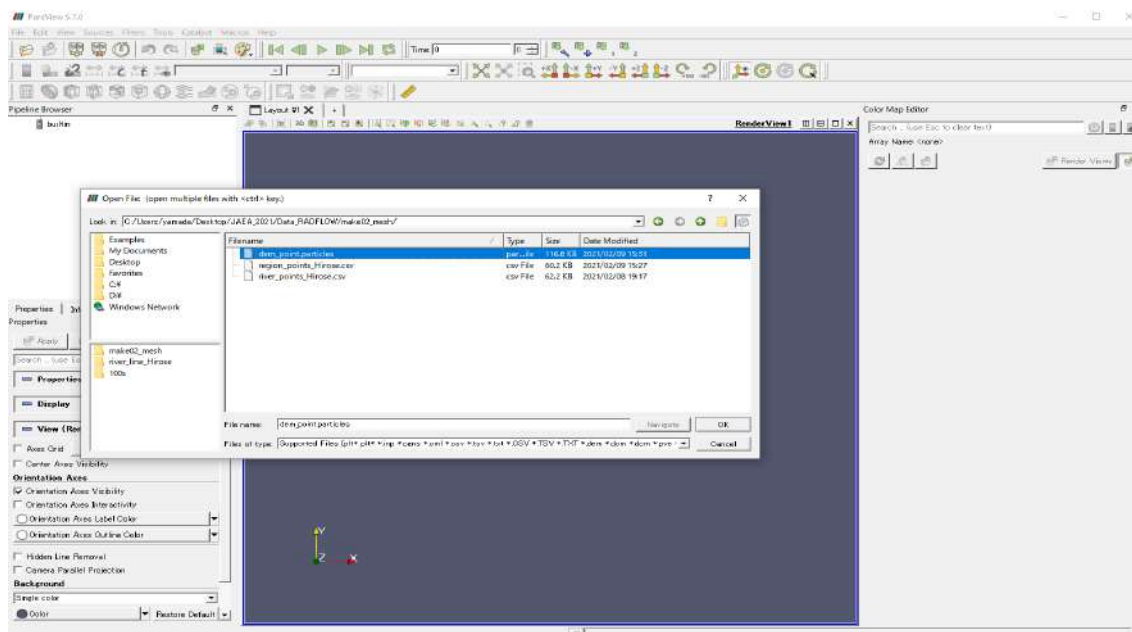


図 2-129 三角形格子の生成① (RADFLOW)

PipelineBrowse に「dem_point.particles」が登録される。

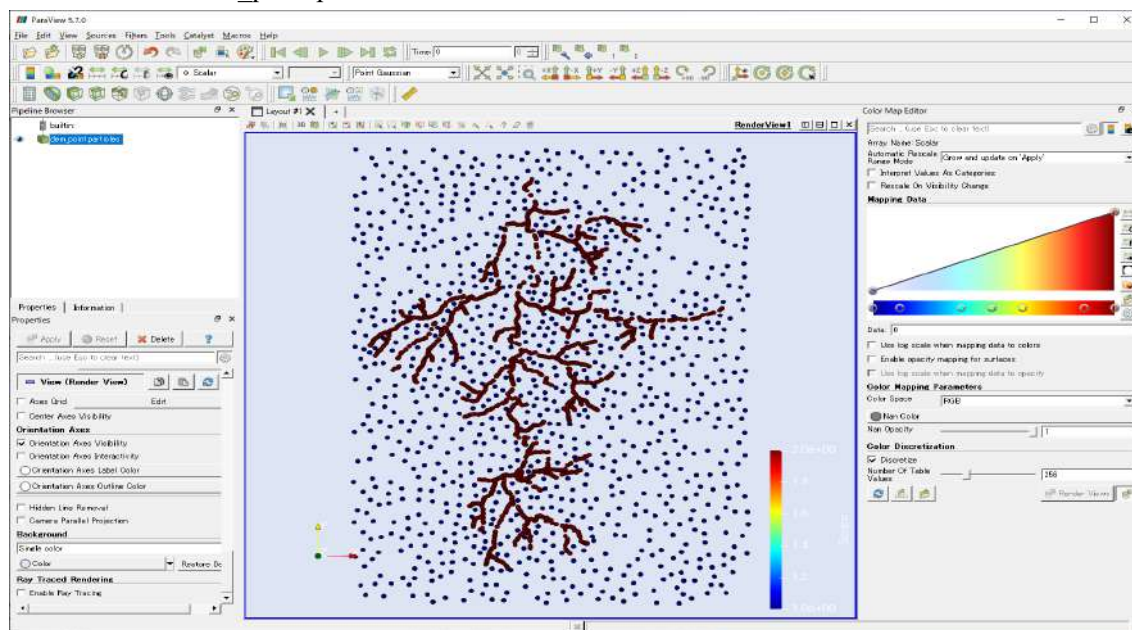


図 2-130 三角形格子の生成② (RADFLOW)

読み込んだ「dem_point.particles」に対して、ツールバーの「Calculator」を選択し、Calculator機能で高さ方向データ (coordsZ) を新たな変数 P で定義する。

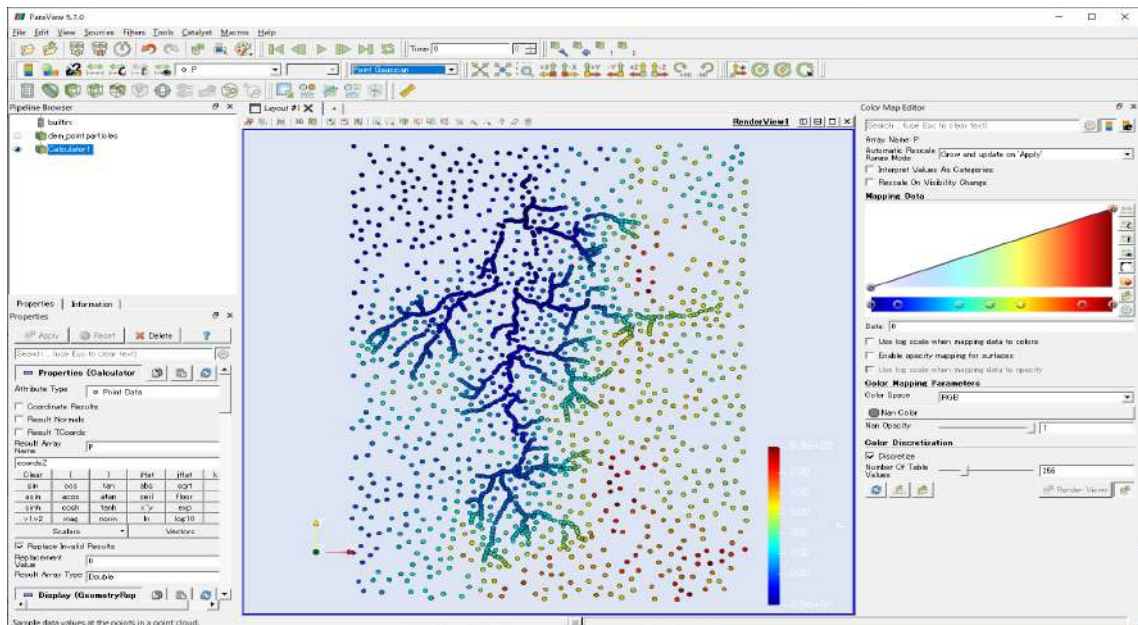


図 2-131 三角形格子の生成③ (RADFLOW)

PipelineBrowse の「Calculator1」データに対して、ツールバーの「Calculator」を選択し、Calculator機能で高さ方向の負のデータ (-coordsZ) を新たな変数 M で定義する。

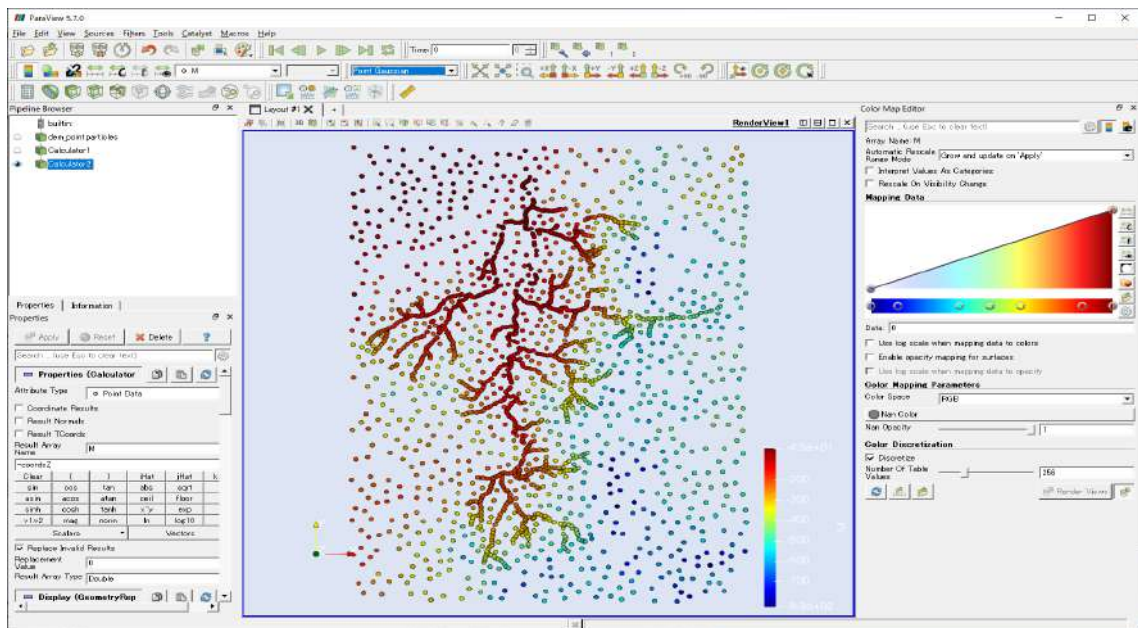


図 2-132 三角形格子の生成④ (RADFLOW)

PipelineBrowse の「Calculator1」データに対して、Filter>Alphabetical>WarpByScalar を適用する。このとき、Scalars に M を選択し x-y 面にポイント位置を投影する。この処理は、点群を 2 次的に配置することで Delaunay2D フィルターを適用するために必要である。

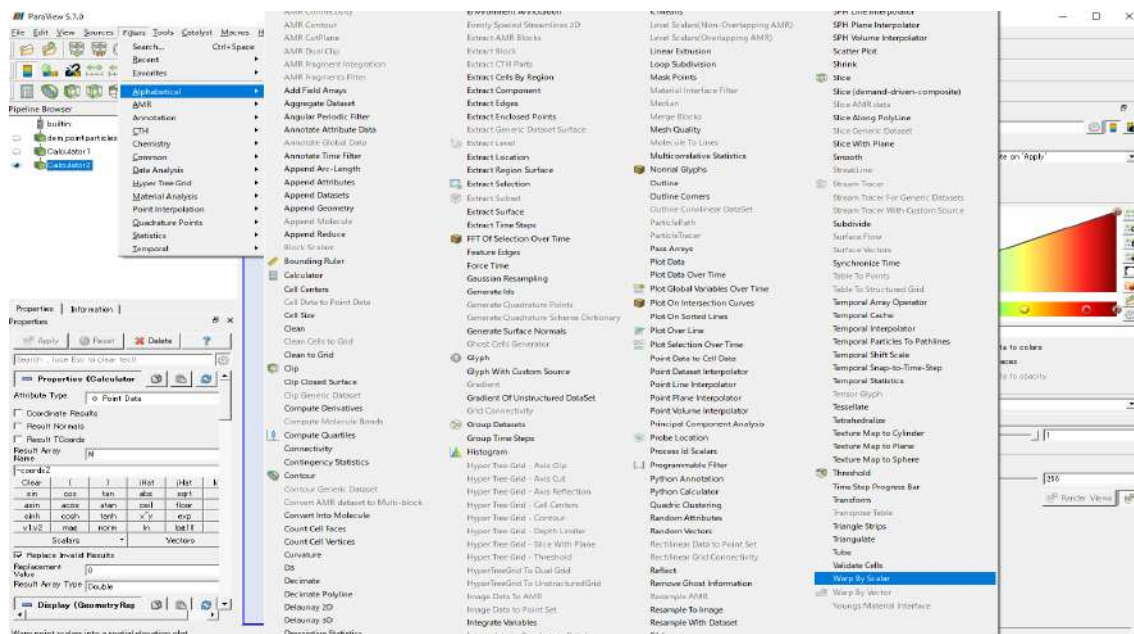


図 2-133 三角形格子の生成⑤ (RADFLOW)

WarpByScalar の適用 (前)

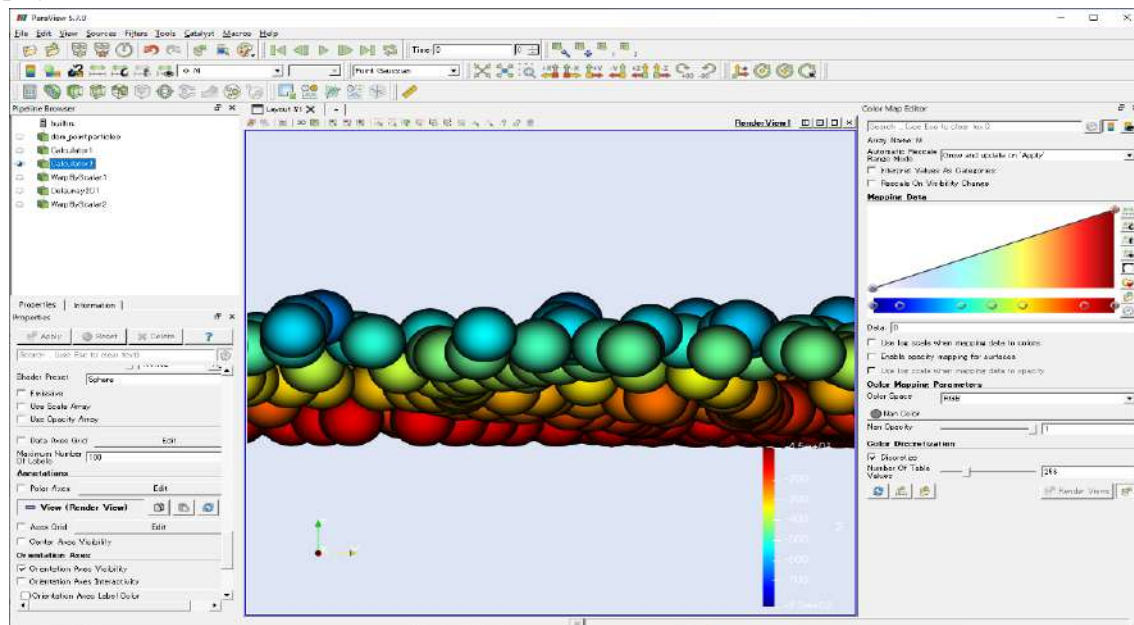


図 2-134 三角形格子の生成⑥ (RADFLOW)

※X-Y 平面を横から見た図

WarpByScalar の適用 (後)

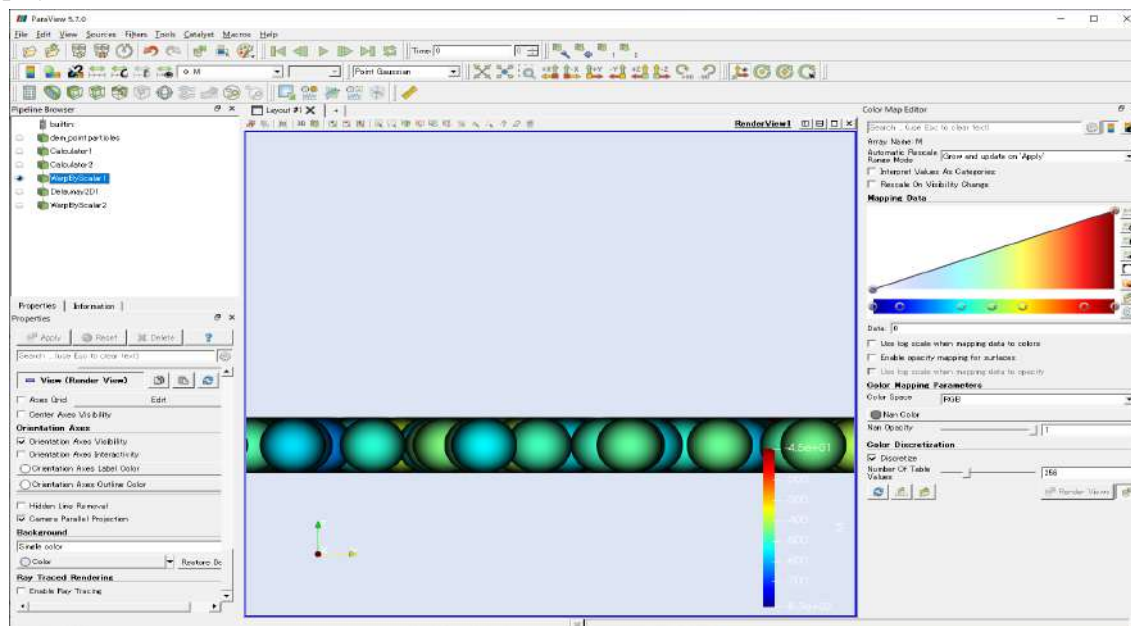


図 2-135 三角形格子の生成⑦ (RADFLOW)

※X-Y 平面を横から見た図

2次元平面(x-y 面)に投影したデータ「WarpByScalar1」に対して、
Filters>Alphabetical>Delaunay2D を適用して、x-y 面に三角形格子データを作成する。

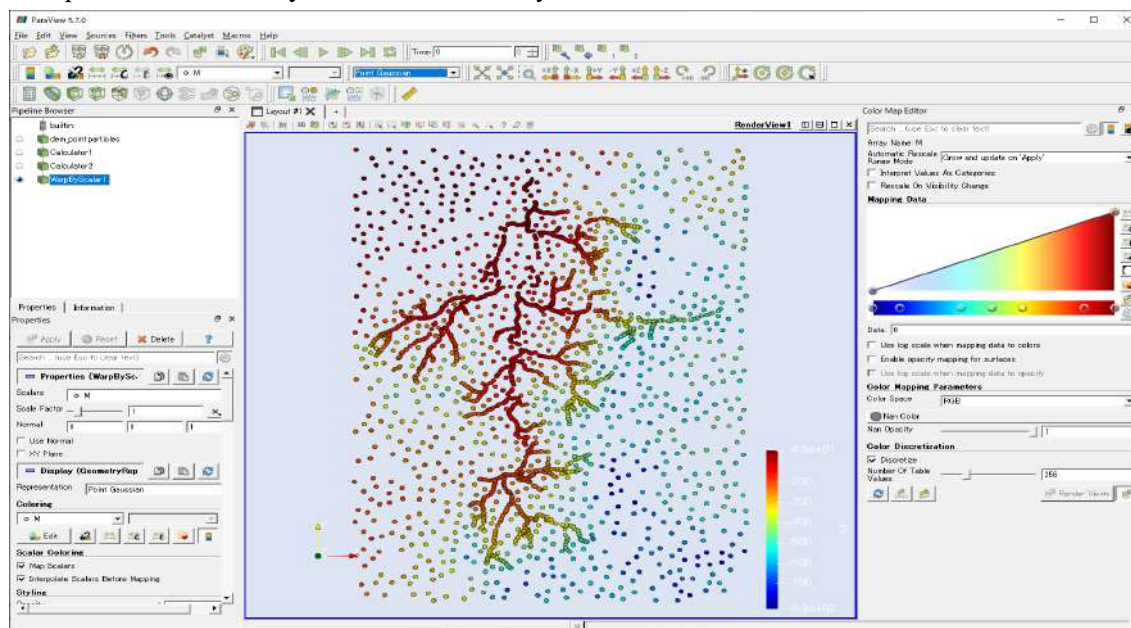


図 2-136 三角形格子の生成⑧ (RADFLOW)

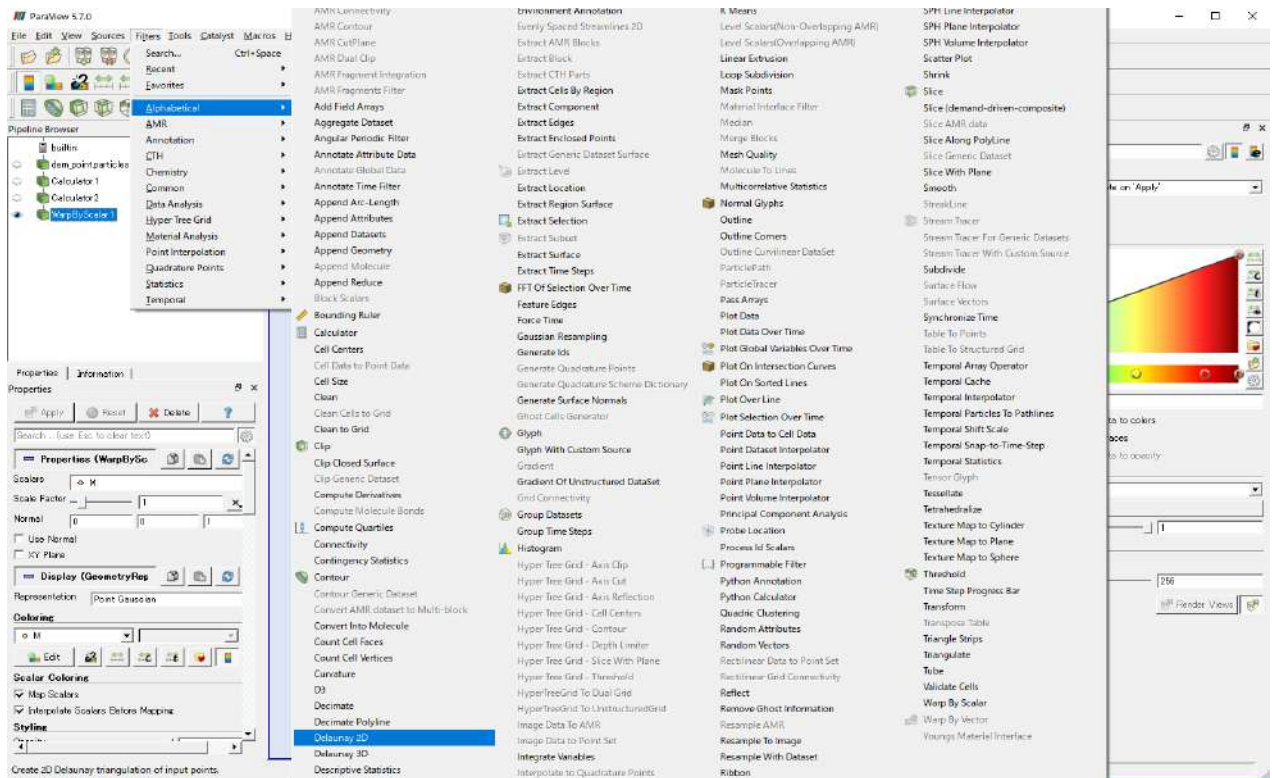


図 2-137 三角形格子の生成⑨ (RADFLOW)

作成された三角形格子データ。

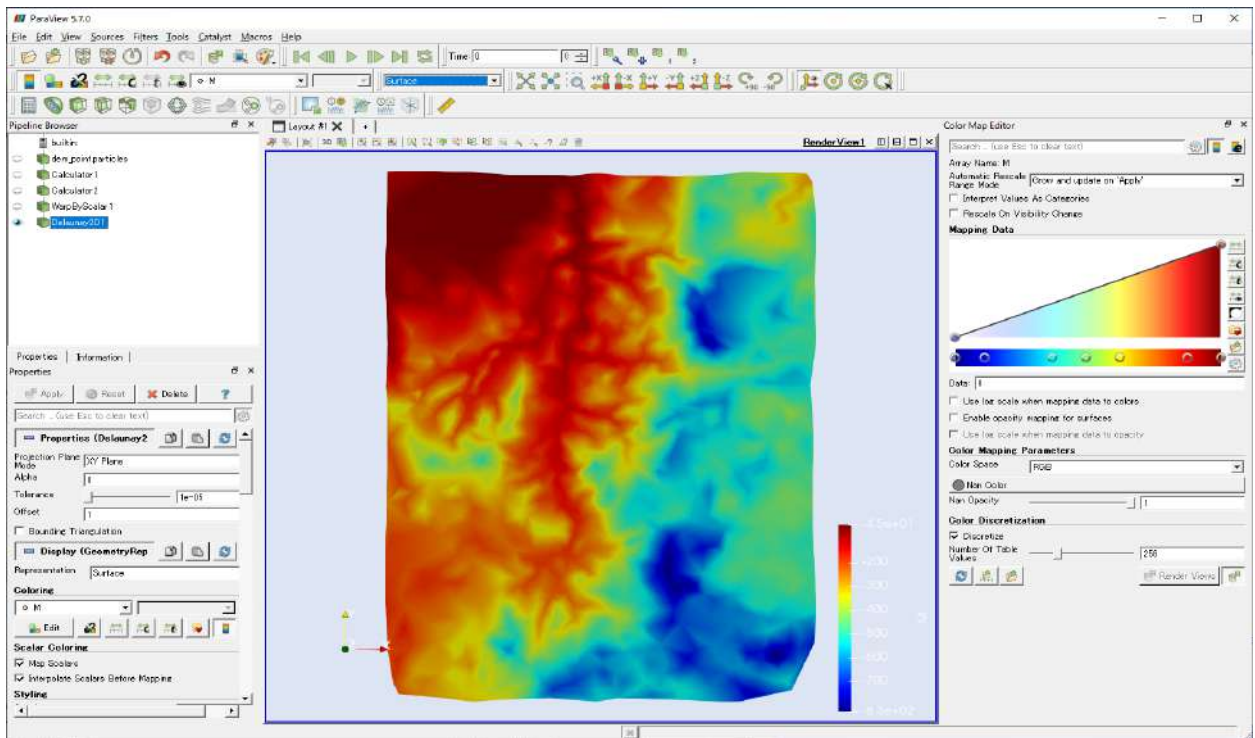


図 2-138 三角形格子の生成⑩ (RADFLOW)

2次元データである三角形格子データに標高データを再度セットする。そのために、PipelineBrowsの「Delaunay2D1」に対して、Filters>Alphabetical>WarpByScalarを適用する。ここで、ScalarsにPを選択することに注意する。

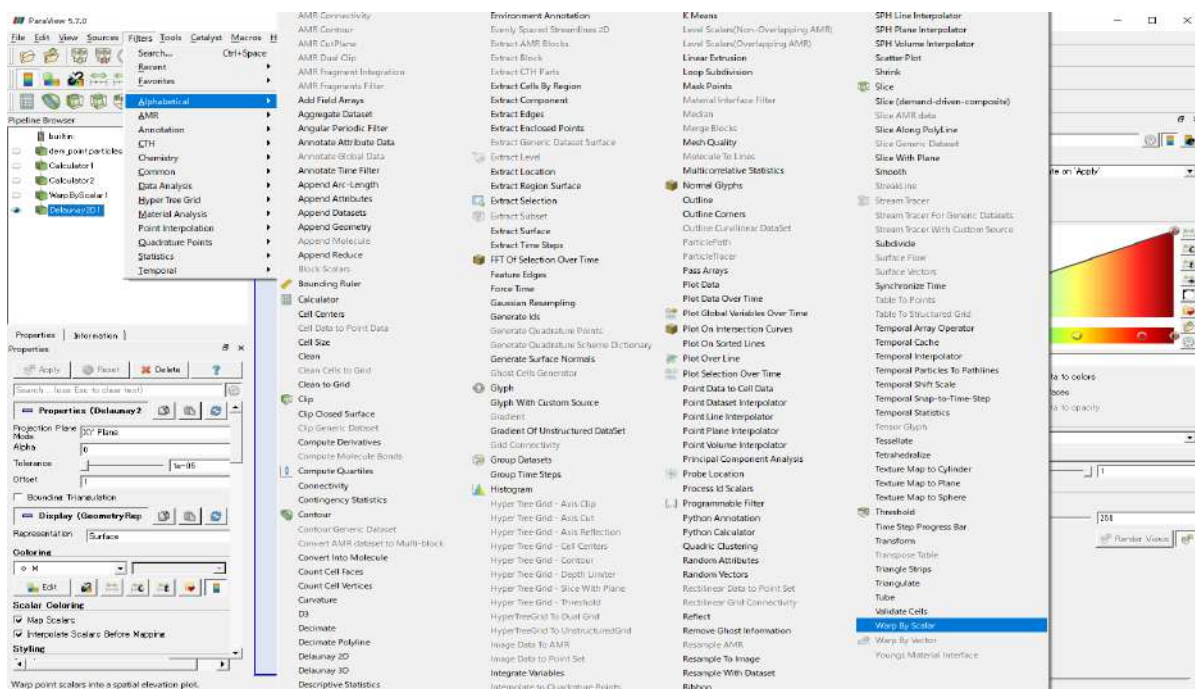


図 2-139 三角形格子の生成⑩ (RADFLOW)

以上の手続きによって、元の座標での三角形格子データを作成できる。

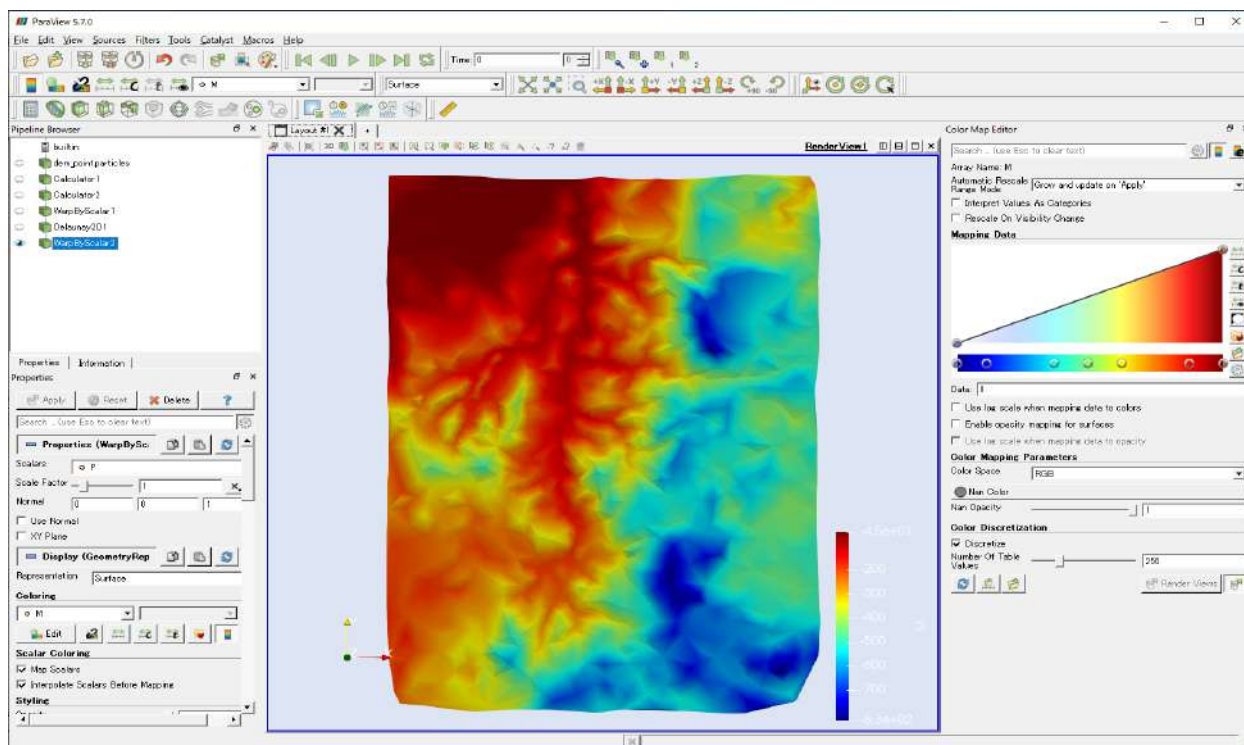


図 2-140 三角形格子の生成⑪ (RADFLOW)

作成された三角形格子と点群の様子。

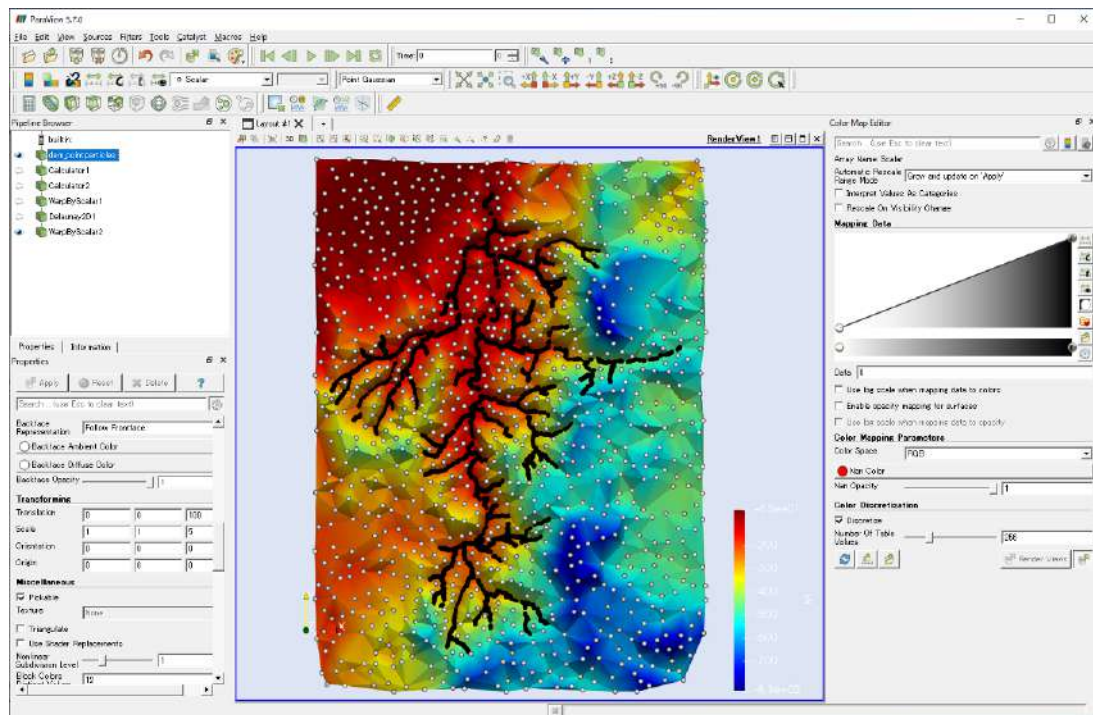


図 2-141 三角形格子の生成⑬ (RADFLOW)

作成したデータは、file>Save Data>stl 形式 (Ascii) で保存する。

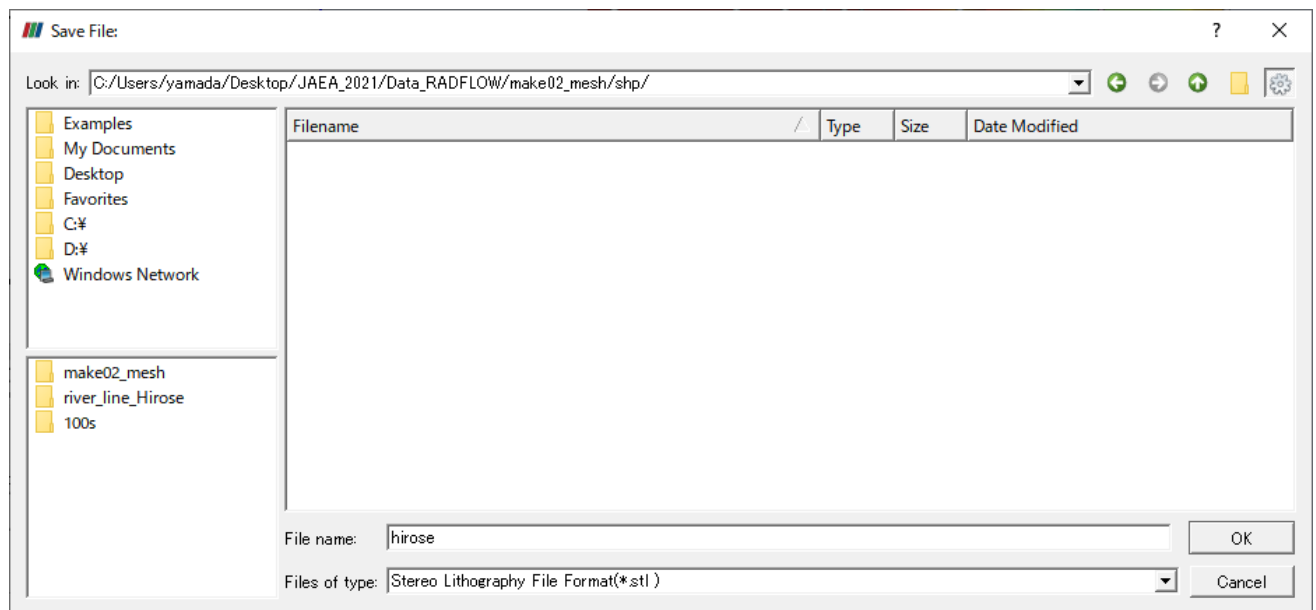


図 2-142 三角形格子の生成⑭ (RADFLOW)

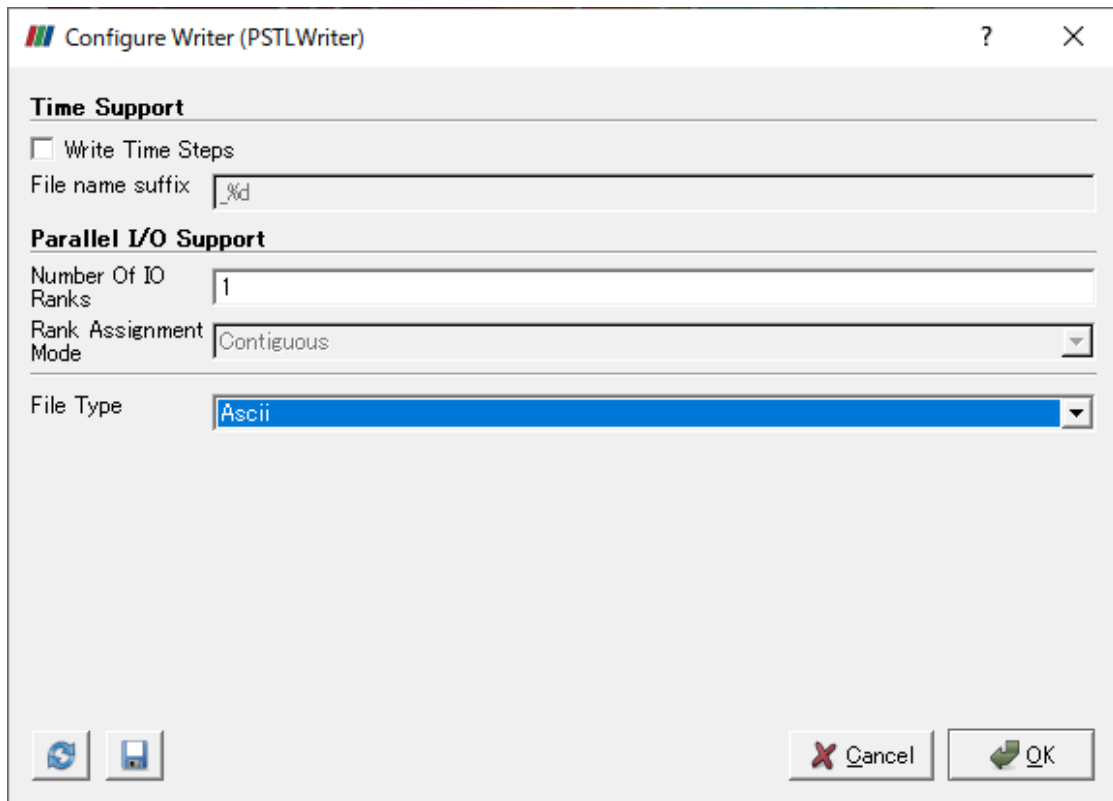


図 2-143 三角形格子の生成⑮ (RADFLOW)

付録3 支配方程式 (3D-Sea-SPEC)

3.1 多重 σ 座標

「沿岸放射性核種解析コード 3D-Sea-SPEC」[3-1,3-2] (以下、本コード) は、鉛直方向に多重 σ 座標系を採用している。多重 σ 座標系については、文献[3-1]を参照した。座標系は以下に示すような多重 σ 座標系を採用する。

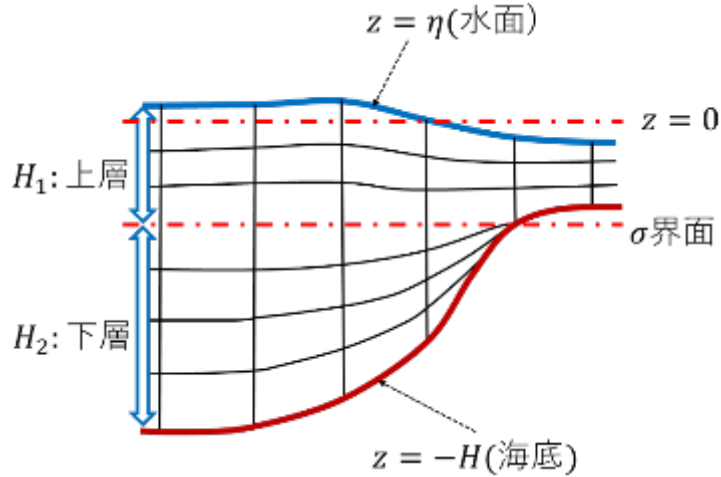


図 3-1 多重 σ 座標

多重 σ 座標系では上層の σ_1 と、下層の σ_2 の定義式は次のように与えられる。

$$\sigma_1 = \frac{z - \eta}{D_1} \quad -H_1 < z < \eta \quad (3-1)$$

$$\sigma_2 = \frac{z + H_1}{D_2} \quad -(H_1 + H_2) < z < -H_1 \quad (3-2)$$

ここで、 H_1 は上層における $z=0$ から σ 界面までの距離、 H_2 は下層における σ 界面から海底までの距離とする。 η は水位とする。また、 D_1 と D_2 は上層および下層の厚さとする。つまり、次のように与える。

$$D_1 = H_1 + \eta \quad (3-3)$$

$$D_2 = H_2 \quad (3-4)$$

各層の定式化は通常の σ 座標系モデルと同様に行える。ただし、 σ 界面での鉛直方向の流速には次の条件を与える。

$$w_1^*|_{\sigma_1=-1} = w_2^*|_{\sigma_2=0} \quad (3-5)$$

ここで、上層の鉛直流速 w_1^* と下層の鉛直流速 w_2^* は、

$$w_1^* = w + D_1 \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma_1}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma_1}{\partial y} \right) \quad (3-6)$$

$$w_2^* = w + D_2 \left(\frac{\partial \sigma_2}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma_2}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma_2}{\partial y} \right) \quad (3-7)$$

で与えられることに注意する。u および v は、それぞれ x 方向と y 方向の流速とする。尚、貯水池での解析も想定し、水面位置は $z=0$ に限定しない。つまり、水面標高の変数 z_{surf} を用いて水面位置を指定する。また、河床標高と多重 σ の分割標高を保持する変数として、 z_{bottom} と z_{sepa} を導入する。以上、本コードは港湾および貯水池での解析を目的としており、用語の使い方として、水面と海表面、海底と河床などの異なる記載を併用するが、同じ上端、下端の境界を意味することを注意する。

3.2 流れの支配方程式

3.2.1 はじめに

多重 σ は 2 層（上層と下層）のみとする。各変数の下付添え字は、多重 σ の上層(下付添え字：1)、下層(下付添え字：2)を示すことに注意すること。また、上層は自由表面モデルとして、水表面では風の影響や熱収支を考慮する。下層の底面と接するセルでは、流動摩擦、懸濁体の巻き上げ、沈降の作用を考慮する。

3.2.2 連続式

$$\frac{\partial D_1}{\partial t} + \frac{\partial(D_1 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(D_1 v_1)}{\partial y} + \frac{\partial w_1^*}{\partial \sigma_1} = 0 \quad (\text{上層}) \quad (3-8)$$

$$\frac{\partial(D_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(D_2 v_2)}{\partial y} + \frac{\partial w_2^*}{\partial \sigma_2} = 0 \quad (\text{下層}) \quad (3-9)$$

ここで、下層の D_2 は時間変化しないものとする。また、全水深 D を $D = D_1 + D_2$ と定める。

3.2.3 運動方程式（上層・下層）

使用する変数を次のように定義する。u, v, w* は x, y, σ 方向流速(m/s)、p は圧力(N/m²)、H は水深(m)、 ρ は密度(kg/m³)、 A_x, A_y, A_z は x, y, z 方向渦動粘性係数(m²/s)、g は重力加速度(m/s²)、f はコリオリパラメータとする。このとき、上層と下層それぞれの運動方程式は次のようになる。

① 上層

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(D_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial(D_1 u_1^2)}{\partial x} + \frac{\partial(D_1 v_1 u_1)}{\partial y} + \frac{\partial(w_1^* u_1)}{\partial \sigma_1} - f v_1 D_1 \\ & = -D_1 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial x} + g \left((1 + \sigma_1) \frac{\partial D_1}{\partial x} - \frac{\partial H_1}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y D_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma_1} \left(\frac{A_z}{D_1} \frac{\partial u_1}{\partial \sigma_1} \right) \end{aligned} \quad (3-10)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(D_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial(D_1 u_1 v_1)}{\partial x} + \frac{\partial(D_1 v_1^2)}{\partial y} + \frac{\partial(w_1^* v_1)}{\partial \sigma_1} + f u_1 D_1 \\
& = -D_1 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial y} + g \left((1 + \sigma_1) \frac{\partial D_1}{\partial y} - \frac{\partial H_1}{\partial y} \right) \right\} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y D_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial \sigma_1} \left(\frac{A_z \partial v_1}{D_1 \partial \sigma_1} \right)
\end{aligned} \tag{3-11}$$

② 下層

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(D_2 u_2)}{\partial t} + \frac{\partial(D_2 u_2^2)}{\partial x} + \frac{\partial(D_2 v_2 u_2)}{\partial y} + \frac{\partial(w_2^* u_2)}{\partial \sigma_2} - f v_2 D_2 \\
& = -D_2 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_2}{\partial x} + g \left((1 + \sigma_1) \frac{\partial D_2}{\partial x} - \frac{\partial H_2}{\partial x} \right) \right\} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y D_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma_2} \left(\frac{A_z \partial u_2}{D_2 \partial \sigma_2} \right)
\end{aligned} \tag{3-12}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(D_2 v_2)}{\partial t} + \frac{\partial(D_2 u_2 v_2)}{\partial x} + \frac{\partial(D_2 v_2^2)}{\partial y} + \frac{\partial(w_2^* v_2)}{\partial \sigma_2} + f u_2 D_2 \\
& = -D_2 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_2}{\partial y} + g \left((1 + \sigma_2) \frac{\partial D_2}{\partial y} - \frac{\partial H_2}{\partial y} \right) \right\} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y D_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial \sigma_2} \left(\frac{A_z \partial v_2}{D_2 \partial \sigma_2} \right)
\end{aligned} \tag{3-13}$$

③ 海底摩擦項

海底摩擦の影響は次の式によって与える。

$$\left. \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{A_z \partial u}{D \partial \sigma} \right) \right|_{\sigma_2=-1} = \frac{1}{\Delta \sigma} \left(\frac{A_z \Delta u}{D \Delta \sigma} - f b_x \right), \quad f b_x = C_b u \sqrt{u^2 + v^2} \tag{3-14}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{A_z \partial v}{D \partial \sigma} \right) \right|_{\sigma_2=-1} = \frac{1}{\Delta \sigma} \left(\frac{A_z \Delta v}{D \Delta \sigma} - f b_y \right), \quad f b_y = C_b v \sqrt{u^2 + v^2} \tag{3-15}$$

ここで C_b は海底摩擦係数である。

④ 海底摩擦係数

海底摩擦係数 C_b は底面摩擦速度 u_* ($\tau/\rho = u_*^2$)を用いて計算する。カルマン定数 κ と粗度長 z_0 について、壁面近傍の流速 \bar{u} は次のように近似される。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa z} \tag{-16}$$

このとき、底面隣接セルまでの距離を z_1 とし、位置 z_1 での流速を u_{z_1} とすると次の式が得られる。

$$u_{z_1} - u_{z_0} = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z_1}{z_0} \tag{-17}$$

また、 $u_{z_0} = 0$ に注意と、摩擦係数 C_{low} に対応する値は次のようになる。

$$C_{low} = (\kappa / \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0})^2 \quad (3-18)$$

計算では、通常の海底の場合も踏まえて $C_b = \max(C_{low}, 0.0026)$ として、海底摩擦係数を与える。

3.2.4 静水圧式、状態方程式

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \sigma} = gD \quad (3-19)$$

ただし、密度 ρ は UNESCO 式を用いて計算する。

$$\rho = f(T, S, P) \quad (3-20)$$

3.3 移流拡散方程式

3.3.1 概要

以降では多重 σ 座標系における、水温、塩分濃度、懸濁体、放射性物質の基礎方程式を示す。

ただし、自由表面での風の影響や熱収支、底面での流動摩擦や懸濁体の巻き上げや沈降などの境界面での付随的な作用を除いて、上層と下層の方程式は同じであるため、以下では層の位置は区別しない。なお、 σ 座標系で用いられる添字*は省略する。

以降において、 K_x, K_y, K_z は x, y, z 方向の渦動拡散係数(m^2/s)を意味する。

3.3.2 水温 (T) の方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uTD) + \frac{\partial}{\partial y}(vTD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wT) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (3-21)$$

3.3.3 塩分濃度 (S) の方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uSD) + \frac{\partial}{\partial y}(vSD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wS) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (3-22)$$

3.3.4 沈降速度

懸濁態と放射性物質の移流拡散現象では、沈降作用を考慮する必要がある。沈降速度 S_v は、以下の Stokes の法則で設定する。¹

¹ 厳密には Stokes の法則に対して座標変換を考慮した式を導入する必要があるが、ここでは省略する。

$$S_v = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{gd^2}{\nu} \quad (3-23)$$

ただし、 g は重力加速度(m/s^2)とし、 ρ_s は粒子密度(kg/m^3)、 ρ_w は海水密度(kg/m^3)、 ν は海水の動粘性係数(m^2/s)、 d は粒子の平均直径(m)である。また、鉛直方向の計算座標軸 z は上向きに正方向としている。従って、重力加速度 $g = -9.8(m/s^2)$ に注意すると、水よりも密度の大きい懸濁体粒子に働く沈降速度 S_v は負値をとる。

3.3.5 無機懸濁態（シルト・砂成分の粒径が異なる粒子）

無機懸濁体の種数は任意の個数を指定できる。また、以降で現れる記号 R_{ms} , R_{ml} , R_{msd} はシルト 2 種と砂の単位時間あたりの流入量とする。

① シルト成分（2種： R_s , R_l ）

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_s D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u R_s D) + \frac{\partial}{\partial y} (v R_s D) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w R_s) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial R_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial R_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial R_s}{\partial \sigma} \right) - S_v \frac{\partial R_s}{\partial \sigma} + DR_{ms} \end{aligned} \quad (3-24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_l D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u R_l D) + \frac{\partial}{\partial y} (v R_l D) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w R_l) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial R_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial R_l}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial R_l}{\partial \sigma} \right) - S_v \frac{\partial R_l}{\partial \sigma} + DR_{ml} \end{aligned} \quad (3-25)$$

② 砂成分 (R_{sd})

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_{sd} D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u R_{sd} D) + \frac{\partial}{\partial y} (v R_{sd} D) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w R_{sd}) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial R_{sd}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial R_{sd}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial R_{sd}}{\partial \sigma} \right) - S_v \frac{\partial R_{sd}}{\partial \sigma} + DR_{msd} \end{aligned} \quad (3-26)$$

3.3.6 粘土成分 (C_c) と粒径が異なる 2 種の凝集懸濁体 (C_s, C_l)

① 粘土成分 (C_c)

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_c D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u C_c D) + \frac{\partial}{\partial y} (v C_c D) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w C_c) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial C_c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial C_c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_c}{\partial \sigma} \right) \\ - S_v \frac{\partial C_c}{\partial \sigma} + DR_{cs} + D(C_s k_{-l} - C_c k + \gamma(C_l + C_s)) \end{aligned} \quad (3-27)$$

ここで、 R_{cs} は粘土の単位時間あたりの流入量とする。また、 $C_s k_{-l} - C_c k + \gamma(C_l + C_s)$ の 3 項は粘土の凝集・分解作用を示す。それぞれの項は次の作用を意味する。

表 3-1 粘土の凝集・分解作用

項	作用
$C_s k_{-l}$	小粒子態から粘土成分への脱着
$-C_c k$	粘土成分から小粒子態への吸着
$\gamma(C_l + C_s)$	大粒子態および小粒子態から、粘土成分への分解

※ k_{-l} : 脱着率 (小粒子態 ⇒ 粘土成分)

※ k : 吸着率 (粘土成分 ⇒ 小粒子態)

※ γ : 分解率 (大粒子態、小粒子態 ⇒ 粘土成分)

② 凝集懸濁体 : 小粒子 C_s

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial C_s D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C_s D) + \frac{\partial}{\partial y}(v C_s D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(w C_s) \\
& = \frac{\partial}{\partial x} \left(D K_x \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D K_y \frac{\partial C_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_s}{\partial \sigma} \right) \\
& - S_v \frac{\partial C_s}{\partial \sigma} + D(C_l r_{-l} + C_c k - C_s(\gamma + r + k_{-l}))
\end{aligned} \tag{3-28}$$

$C_l r_{-l} + C_c k - C_s(\gamma + r + k_{-l})$ の3項は小粒子 C_s の凝集・分解作用を示す。それぞれの項は次の作用を意味する。

表 3-2 小粒子 C_s の凝集・分解作用

項	作用
$C_l r_{-l}$	大粒子態から小粒子態への崩壊
$C_c k$	粘土成分から小粒子態への吸着
$-C_s(\gamma + r + k_{-l})$	小粒子態から大粒子態への凝集および 小粒子態から粘土成分への分解、 小粒子態から粘土成分への脱着

※ k_{-l} : 脱着率 (小粒子態 ⇒ 粘土成分)

※ k : 吸着率 (粘土成分 ⇒ 小粒子態)

※ γ : 分解率 (大粒子態、小粒子態 ⇒ 粘土成分)

※ r : 凝集率 (小粒子態 ⇒ 大粒子態)

※ r_{-l} : 崩壊率 (大粒子態 ⇒ 小粒子態)

③ 凝集懸濁体：大粒子 C_l

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_l D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C_l D) + \frac{\partial}{\partial y}(v C_l D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(w C_l) \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(D K_x \frac{\partial C_l}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D K_y \frac{\partial C_l}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_l}{\partial \sigma}\right) \\ - S_v \frac{\partial C_l}{\partial \sigma} + D(C_s r - C_l(\gamma + r_{-l})) \end{aligned} \quad (3-29)$$

$C_s r - C_l(\gamma + r_{-l})$ の2項は大粒子 C_l の凝集・分解作用を示す。それぞれの項は次の作用を意味する。

表 3-3 大粒子 C_l の凝集・分解作用

項	作用
$C_s r$	小粒子態から大粒子態への凝集
$-C_l(\gamma + r_{-l})$	大粒子態から粘土成分への分解および 大粒子態から小粒子態への崩壊

※ γ ：分解率（大粒子態、小粒子態 ⇒ 粘土成分）

※ r ：凝集率（小粒子態 ⇒ 大粒子態）

※ r_{-l} ：崩壊率（大粒子態 ⇒ 小粒子態）

3.3.7 懸濁体の吸脱着、凝集・崩壊、分解について

懸濁体の吸脱着、凝集・崩壊、分解現象についてまとめると、制御パラメータは表 3-4 の通りである。

その役割を図示すると図 3-2 のようになる。

表 3-4 吸脱着・凝集崩壊パラメータの記号と変数

記号	プログラム変数	内容
k_{-l}	c_kml	凝集懸濁体小粒子から粘土への脱着速度(1/s)
k	c_k	粘土から凝集懸濁体小粒子への吸着速度(1/s)
$c\gamma$	c_gamma	凝集懸濁態大粒子の分解率(1/s)
cr	c_rml	凝集懸濁態大粒子から小粒子への崩壊速度(1/s)
cr_{-l}	c_r	凝集懸濁態小粒子から大粒子への凝集速度(1/s)
$p\gamma$	p_gamma	有機懸濁態の分解率(1/s)
pr_{-l}	p_rml	有機懸濁態大粒子から小粒子への崩壊速度(1/s)
pr	p_r	有機懸濁態小粒子から大粒子への凝集速度(1/s)
Pr	---	有機小粒子態生物生成項 $Pr = \alpha \cdot T(t - tl)$ ただし、 α は係数（生物生成率）であり変数 pr_con で与える。また、 $T(t - tl)$ は時刻 $t - tl$ 時点での水

		温とする。 tl は遅れ時間といい、変数 lagtime で与える。
--	--	--------------------------------------

※記号は図 3-2 と対応する。

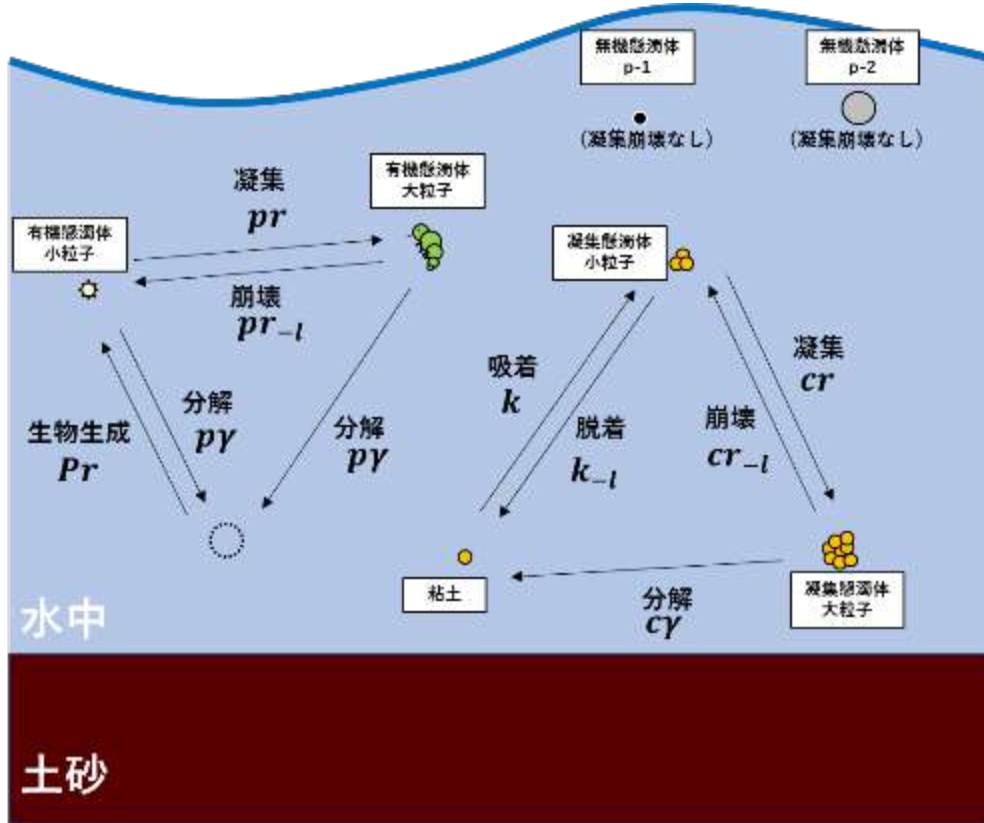


図 3-2 吸脱着・凝集崩壊パラメータの役割

3.3.8 放射性物質の基礎方程式

放射性物質の吸脱着モデルを以下に示す。

粒子に吸着した放射性物質濃度 C_i (i は粒子態の種類) の時間発展方程式は下式で与える。

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial C_i D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u C_i D) + \frac{\partial}{\partial y} (v C_i D) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w C_i) \\
 & = D(R_i(K_a(i) \cdot S_i \cdot W - C_i) + C_{i,in}) \\
 & - S_v \frac{\partial C_i}{\partial \sigma} \\
 & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_i}{\partial \sigma} \right) \\
 & + (\text{Suspended solids Diffusion } x, y) \\
 & + (\text{Cohesive failure})
 \end{aligned} \tag{3-30}$$

ただし、式(3-30)には注意すべき付加項として次の2項がある。

➤ (Suspended solids Diffusion x, y)

懸濁体自体の水平拡散によって、その懸濁体に吸着していた放射性物質が空間的に移動(拡散)する現象を表す項である。詳細は式(3-32)を参照。

➤ (Cohesive failure)

懸濁態自体の吸脱着、凝集・崩壊、分解に付随した、放射性物質の状態変化を表す項である。従って、凝集崩壊しない無機懸濁体（シルト・砂）についてはこの項は考慮しない。詳細は3.3「移流拡散方程式」の②「懸濁体の吸脱着、凝集・崩壊、分解に付随した変質」で説明。

また、溶存濃度 W の時間発展方程式は下式で与える。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial WD}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uWD) + \frac{\partial}{\partial y}(vWD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wW) \\ &= D \left(\sum_i R_i (C_i - K_d(i) \cdot S_i \cdot W) + W_{in} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial W}{\partial \sigma} \right) \\ &+ (\text{Sedimentation Cohesive failure}) \end{aligned} \quad (3-31)$$

ここで、懸濁体に吸着する放射性物質の移動には沈降作用を考慮するが、溶存成分については、沈降作用は考慮しないことに注意すること。また、(3-31)には注意すべき付加項として次の1項がある。

➤ **(Sedimentation Cohesive failure)**

溶存態放射性物質（溶存成分）と堆積土砂中の懸濁体について、放射性物質を直接交換する項を表す。ただし、式中(3-30)と(3-31)に現れる吸脱着パラメータはそれぞれ次の効果を持つ。

表 3-5 放射性物質の吸脱着モデル

パラメータ	内容
R_i	タイプ i の粒子態に対する吸脱着の時定数 (1/秒)
$K_d(i)$	タイプ i の粒子態に対する分配係数 (10~1000 のオーダー：この値が大きいと粒子への吸着が促進)
S_i	タイプ i の粒子態の土砂および各種懸濁態濃度
C_{i_in}	タイプ i の粒子に吸着した放射性物質の単位時間あたりの放出量
W_{in}	溶存態放射性物質の単位時間あたりの放出量

① **懸濁体の拡散に付随した吸着態放射性物質の移動（拡散）**

懸濁体濃度と懸濁体に吸着した放射性物質濃度を各々、次の記号で書く。

表 3-6 懸濁態濃度とそれに吸着した放射性物質濃度

記号	内容
S_i	懸濁体濃度
C_i	懸濁体 S_i に吸着した放射性物質濃度

従って、時間発展方程式(3-30)の付加項(**Suspended solids Diffusion x, y**)は、懸濁体自体の水平拡散により、その懸濁体に吸着していた放射性物質が空間的に移動（拡散）する現象を表す項である。この項は次のように定式化する。

$$\begin{aligned} & \text{(Suspended solids Diffusion } x, y) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial S_i C_i}{\partial x S_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial S_i C_i}{\partial y S_i} \right) \end{aligned} \quad (3-32)$$

式(3-32)は、以下に示す方針で吸着態放射性物質の拡散を記述するものである。

- 1) 懸濁体濃度によって拡散フラックスを算出。
- 2) 懸濁体の拡散フラックスを懸濁体濃度で除算して、単位物理量の拡散フラックスを計算。
- 3) 放射性物質濃度を掛算して、放射性物質の拡散フラックスを導出。

② 懸濁体の吸脱着、凝集・崩壊、分解に付随した変質

➤ 粘土成分と凝集懸濁体に吸着した放射性物質について

粘土成分と凝集懸濁体に吸着した放射性物質濃度を、それぞれ次の記号で書く。

表 3-7 粘土成分と凝集懸濁体に吸着した放射性物質濃度

記号	内容
C_{cc}	粘土成分 C_c に吸着した放射性物質濃度
C_{cs}	小粒子の凝集懸濁体 C_s に吸着した放射性物質濃度
C_{cl}	大粒子の凝集懸濁体 C_l に吸着した放射性物質濃度

このとき、時間発展方程式(3-30)について付加項(*Cohesive failure*)は懸濁態自体の吸脱着、凝集・崩壊、分解に付随した、放射性物質の状態変化を表す項である。この項は以降のように定式化する。例えば、凝集懸濁体の小粒子が脱着して粘土成分に変化した場合、それに合わせて領域中の凝集懸濁体（小粒子）に吸着した放射性物質濃度 C_{cs} は減少し、粘土成分に吸着した放射性物質濃度 C_{cc} は増加する。

➤ 粘土成分に吸着する放射性物質濃度 C_{cc}

$$\text{(Cohesive failure)} = D(C_{cs}k_{-l} - C_{cc}k + \gamma(C_{cl} + C_{cs})) \quad (3-33)$$

※ k_{-l} ：脱着率（小粒子態 ⇒ 粘土成分）

※ k ：吸着率（粘土成分 ⇒ 小粒子態）

※ γ ：分解率（大粒子態、小粒子態 ⇒ 粘土成分）

➤ 小粒子の凝集懸濁体に吸着する放射性物質濃度 C_{cs}

$$\text{(Cohesive failure)} = D(C_{cl}r_{-l} + C_{cc}k - C_{cs}(\gamma + r + k_{-l})) \quad (3-34)$$

※ k_{-l} ：脱着率（小粒子態 ⇒ 粘土成分）

- ※ k : 吸着率 (粘土成分 \Rightarrow 小粒子態)
- ※ γ : 分解率 (大粒子態、小粒子態 \Rightarrow 粘土成分)
- ※ r : 凝集率 (小粒子態 \Rightarrow 大粒子態)
- ※ r_{-l} : 崩壊率 (大粒子態 \Rightarrow 小粒子態)

➤ 大粒子の凝集懸濁体に吸着する放射性物質濃度 C_{cl}

$$(Cohesive\ failure) = D(C_{cs}r - C_{cl}(\gamma + r_{-l})) \quad (3-35)$$

- ※ γ : 分解率 (大粒子態、小粒子態 \Rightarrow 粘土成分)
- ※ r : 凝集率 (小粒子態 \Rightarrow 大粒子態)
- ※ r_{-l} : 崩壊率 (大粒子態 \Rightarrow 小粒子態)

3.4 風応力と海表（水表）面熱収支モデル

本コードでは、風応力と海表面熱収支モデルの機能が利用できる。それぞれのモデルについては、文献[3-2]を参考にしている。

3.4.1 風による効果

海面の流れについて風による効果を考慮する場合には、海表面付近における速度勾配の離散化式に、風による剪断応力を組み込む。

$$\left. \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{A_z}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \right|_{\sigma_1=0} = \frac{1}{\Delta \sigma} \left(\frac{\tau_s^x}{\rho} - \frac{A_z \Delta u}{D \Delta \sigma} \right), \quad \tau_s^x = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3-36)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{A_z}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \right|_{\sigma_1=0} = \frac{1}{\Delta \sigma} \left(\frac{\tau_s^y}{\rho} - \frac{A_z \Delta v}{D \Delta \sigma} \right), \quad \tau_s^y = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3-37)$$

ここで、 ρ_a は大気密度 (1.2kg/m³) とし、 C_D はバルク定数、 W_x, W_y は海面上 10m の x, y 方向の風速とする。また、バルク定数 C_D は Kondo モデルによって算定する。Kondo モデルでは風速 W (m/s)について、次の式によりバルク定数 C_D を設定する。

$$\begin{aligned} C_D &= (1.08W^{-0.15}) \times 10^{-3} & (0.3 < W \leq 2.2) \\ C_D &= (0.771 + 0.0858W) \times 10^{-3} & (2.2 < W \leq 5.0) \\ C_D &= (0.867 + 0.0667W) \times 10^{-3} & (5.0 < W \leq 8.0) \\ C_D &= (1.2 + 0.025W) \times 10^{-3} & (8.0 < W \leq 25.0) \\ C_D &= (0.073W) \times 10^{-3} & (25.0 < W \leq 50.0) \end{aligned} \quad (3-38)$$

3.4.2 海表面の熱収支モデル

ここでは、海表面の熱収支モデルについて説明する。海水中への日射の透過は考慮せず、表面層のみでの熱収支過程を以下のように組み込むものとする。

$$\left. \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right|_{\sigma_1=0} = \frac{1}{\Delta \sigma} \left(\frac{Q}{\rho C_p} - \frac{K_z \Delta T}{D \Delta \sigma} \right) \quad (3-39)$$

ここで、水面と大気との単位時間当たりの熱交換熱量を Q (W/m^2) とする。また、定圧比熱は $C_p = 1.03 \text{J/g/}^\circ\text{C}$ と定める。

① 熱交換量 Q の算定式

熱交換熱量 Q は図 3-3 に示す水表面での放射収支（短波・長波放射と顕熱量、潜熱量のバランス）で決まる。その収支は下式のように水表面熱収支式として与えられる。

$$Q = Q_s - (Q_{eb} + Q_h + Q_e) \quad (3-40)$$

ただし、式(3-40)の諸量の定義は下表のようになる。

表 3-8 シルトフェンスの制御パラメータ

変数	定義	内容
Q_s	短波放射量	日射（短波放射による海表面温度が上がる）
Q_{eb}	有効逆波放射量	下向きと上向き長波放射の差（長波放射により海表面から逃げる熱）
Q_h	顕熱量	風による乱流熱輸送（伝導拡散による熱移動）
Q_e	蒸発に伴う潜熱量	水の蒸発による熱輸送

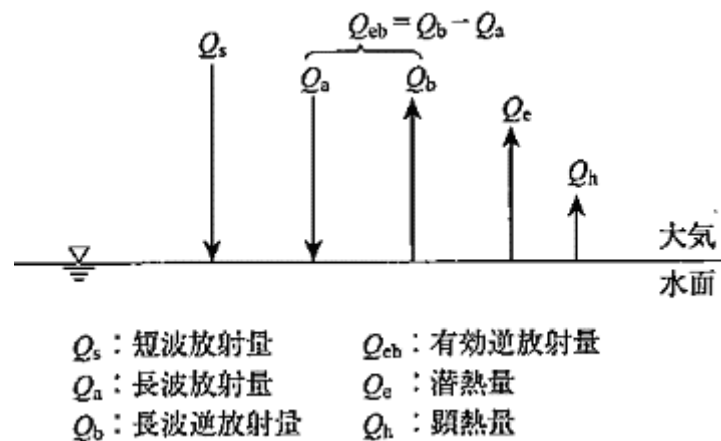


図 3-3 水面における熱収支
(文献[3-2]の図II 9-1 の転載)

② 熱収支式の諸量の設定方法

ここでは、水表面熱収支式(3-40)に現れる諸量について、本コードにおける設定方法に説明する。
計算方法については、個別に説明する。

- 短波放射量： Q_s

短波放射量は入力データとする。観測日射をベースに反射など考慮した正味の入射短波放射を与える。

- 有効逆波放射量： Q_{eb}

有効逆波放射量は下向きと上向き長波放射の差で以下の式で算出する。

$$Q_{eb} = \varepsilon' \sigma T_{a,K}^4 (0.39 - 0.05\sqrt{e})(1 - 0.6823c^2) + 4\varepsilon' \sigma T_{a,K}^3 (T_{s,K} - T_{a,K}) \quad (3-41)$$

ここで、ステファン・ボルツマン定数を $\sigma = 5.670373 \times 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$ として、放射率を $\varepsilon' = 0.98$ とする。また、 $T_{a,K}$ 、 $T_{s,K}$ は、単位：K で表される海面の水温と大気の種類、 e は水蒸気圧、 c は雲量とする。水蒸気圧 (e) は飽和水蒸気圧 (e_{sat}) に相対湿度 (RH) を乗じて求める。

$$e = e_{sat} \cdot RH \quad (3-42)$$

ただし、飽和水蒸気圧 (e_{sat}) は下式により決まる。

$$\log_{10} e_{sat} = \frac{0.7859 + 0.3477T_a}{1 + 0.00412T_a} \quad (3-43)$$

ここで、 T_a の単位：°C で表される大気の種類である。

- 顕熱量： Q_h

$$Q_h = \rho_a C_p C_H |W| (T_s - T_a) \quad (3-44)$$

- 蒸発に伴う潜熱フラックス： Q_e
潜熱フラックスは次式で算出する。

$$Q_e = \rho_a L C_E |W| (q_{sat} - q_a) \quad (3-45)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 T_a は水面の温度（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）とする。また、定圧比熱は $C_p = 1.03 \times 10^3 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ とする。Lは蒸発潜熱で $L = 2.51 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 、Wは風速とする（文献[3-2]では u_{10} としている）。尚、 q は大気中の比湿とする。 q_{sat} は海面上での比湿であり、飽和比湿とする。比湿 q は以下の式で算出する。

$$q = \frac{0.622 \left(\frac{e}{p}\right)}{1 - 0.378 \left(\frac{e}{p}\right)} \approx 0.622 \frac{e}{p} \quad (3-46)$$

$$\rightarrow q = q_{sat} \cdot RH$$

また、 C_H は顕熱輸送係数、 C_E は潜熱輸送係数でバルク定数と呼ばれ、風速 $W(\text{m/s})$ により変化する値である。以下にバルク定数（ C_H ：顕熱輸送係数、 C_E ：潜熱輸送係数）の設定を示す。

顕熱輸送係数 (C_H)

$$\begin{aligned} C_H &= (1.185W^{-0.16}) \times 10^{-3} && W \leq 2.2 \\ C_H &= (0.927 + 0.0546W) \times 10^{-3} && 2.2 < W \leq 5.0 \\ C_H &= (1.15 + 0.01W) \times 10^{-3} && 5.0 < W \leq 8.0 \\ C_H &= (1.170 + 0.0075W \\ &\quad - 0.0004(W - 8)^2) \times 10^{-3} && 8.0 < W \end{aligned} \quad (3-47)$$

潜熱輸送係数 (C_E)

$$\begin{aligned} C_E &= (1.23W^{-0.16}) \times 10^{-3} && W \leq 2.2 \\ C_E &= (0.969 + 0.0521W) \times 10^{-3} && 2.2 < W \leq 5.0 \\ C_E &= (1.18 + 0.01W) \times 10^{-3} && 5.0 < W \leq 8.0 \\ C_E &= (1.196 + 0.0075W \\ &\quad - 0.0004(W - 8)^2) \times 10^{-3} && 8.0 < W \end{aligned} \quad (3-48)$$

尚、海表面の熱収支モデルの気象データは、以下の5つのデータをファイルにて入力する。また、気象データは矩形の計算領域の4点における時刻歴として与える。

- ・ 風速、日射量、気温、湿度、雲量

3.5 海底土（河床土砂）モデル

海底での土砂と放射性物質の移動モデルの詳細を以下に示すが、いくつかの注意を説明する。海底土については、沈降堆積と巻き上げによる堆積量（堆積土砂の厚さ）の変化は記録するが、地形変化は考慮しない。つまり、堆積土砂の厚みの変化は流れの計算に影響を与えない。放射性物質が吸着した土砂が海底に堆積すると、海底土中の放射性物質濃度 B_i が増加する。また、堆積した土砂が海底から巻き上げられると、海中の土砂に吸着した放射性物質濃度 C_i が増加する。しかし、放射性物質の内、溶存成分は海中だけに存在し、海底土中には移動しない。

3.5.1 土砂の沈降・巻き上げ移動量

土砂の沈降・巻き上げのモデルは「通常モード」と「TODAMモデル」の2種類があり、それぞれ個別に説明する。

① 通常モデル

まず、土砂の沈降・巻き上げに係わる変数として、主要なものは次の通りである。

表 3-9 主要変数

変数	定義	備考
S_i	タイプ i の懸濁体の水中濃度(kg/m ³)	
M_i	単位時間あたりの沈降量・巻き上げ量(kg/m ²)	単位時間= Δt (sec)
τ	海底面の流速における剪断応力(N/m ²)	
τ_{drop}	沈降限界剪断応力 $\tau \leq \tau_{drop}$ のとき、懸濁体は沈降堆積する。	
τ_{raise}	巻き上げ限界剪断応力 $\tau \geq \tau_{raise}$ のとき、懸濁体は巻き上がる。	

※ $\tau_{drop} < \tau_{raise}$ であることに注意する。

土砂が沈降堆積するか、巻き上げられるかは海底面上の剪断応力 τ (N/m²)の大きさにより次のように決まる。

$$\begin{aligned} \tau &\Rightarrow M_i = |Sv| \cdot S_i \times \Delta t \\ \leq \tau_{drop} &\Rightarrow M_i = 0.0 \\ \tau_{drop} < \tau &\Rightarrow M_i = Rate \cdot (\tau / \tau_{raise} - 1) \\ < \tau_{raise} &\quad \cdot \Delta t \\ \tau_{raise} \leq \tau & \end{aligned}$$

※ Sv は沈降速度であり、その大きさは Stokes の法則で決まる。

※Rate は Surface erosion rate というパラメータで、セルごとの入力値(kg/m²/s)として設定する。

各海底面位置でのせん断応力 τ (N/m²)は底面に隣接するセルの流速成分 u, v を用いて、次のように計算する。

$$\tau = \rho \cdot C_b \cdot (u^2 + v^2) \quad (3-49)$$

ここで、摩擦係数 C_b は次の算定式で与える。

$$C_b = \left(\kappa / \ln \left(\frac{z_1 + z_0}{z_0} \right) \right)^2 \quad (3-50)$$

ただし、 z_1 は底面までの距離とし、 κ はカルマン定数(0.4)とする。また、 z_0 は底面の粗度係数(m)とし、本コードでは粗度係数 $z_0(m)$ を計算制御ファイルにて指定する。また、限界剪断応力の値は粒径に応じて異なると考えられるが、本コードでは、ROMS を参考に $\tau_{raise} = 0.1(N/m^2)$ 、 $\tau_{drop} = 0.02(N/m^2)$ と設定した。

② 「SWAN」を利用した底面せん断応力

通常モデルでは底面でのせん断応力 $\tau(N/m^2)$ を(3-49)で計算する。また、本コードはそれとは別に、波からの寄与も考慮した底面せん断応力 τ_b を算定する機能を持つ。つまり、流れからの寄与 τ_c を次のように与え

$$\tau_c = \rho \cdot \left(\kappa / \ln \left(\frac{z_1 + z_0}{z_0} \right) \right)^2 \cdot (u^2 + v^2) \quad (3-51)$$

波からの寄与を

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w u_b^2 \quad (3-52)$$

としたときに、底面でのせん断応力 τ_b を次のように計算する。

$$\tau_b = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (3-53)$$

ここで、 z_0 は Nikuradse 粗度高さであり、 z_1 は底面までの距離である。 κ はカルマン定数(0.4)とする
なお、(3-52)の u_b は軌道流速といい、 f_w は次のように表される。

$$f_w = 1.39(\sigma z_0 / |u_b|)^{0.52} \quad (3-54)$$

変数 σ は波の周期である。本コードでは軌道流速と波の周期を波浪モデル「SWAN」で算出した結果をデータファイル入力として読み込み、波によるせん断応力を計算に反映させる。

③ 「TODAM」を利用した沈降・巻き上げ

TODAM モデルでは、1次元河川シミュレーションコード「TODAM」で利用している1次元沈降・巻き上げモデルを3次元に拡張して適用する。まず、TODAM では主流方向(x方向)の浮遊砂濃度の輸送方程式は、1次元モデルとして次のように定義される（側面からの流入出は考慮しない）。

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + UA \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x A \frac{\partial C}{\partial x} \right) + B(S_R - S_D) \quad (3-55)$$

ただし、(3-55)の各変数は次の物理量に対応する。

C	: 浮遊砂濃度 (kg/m ³)	S_R	: 河床からの移行率 (侵食
U	: 流速 (m/s)	S_D	(kg/m ² /s))
K_x	: 拡散係数 (m ² /s)		: 河床への移行率 (堆積 (kg/m ² /s))
A	: 河川断面 (m ²)		
B	: 河床幅 (m)		

従って、 $A\partial C/\partial t$ と BS_R のそれぞれの項は、河床面の単位面積(m²)と単位時間(s)あたりの浮遊砂移動量(kg)に相当する。

$$\begin{aligned} A\partial C/\partial t \text{の単位} &: (\text{m}^2) \times (\text{kg}/\text{m}^3) / \text{s} && \rightarrow (\text{kg}/\text{m}/\text{s}) \\ BS_R \text{の単位} &: (\text{m}) \times (\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}) && \rightarrow (\text{kg}/\text{m}/\text{s}) \end{aligned}$$

このとき、砂、シルト、粘土などタイプ i の懸濁体について、単位時間あたりの沈降・巻き上げ量 $M_i(\text{kg}/\text{m}^2)$ は次の式で計算する。

$$M_i = -(S_{Ri} - S_{Di}) \cdot \Delta t \quad (3-56)$$

以降では、土砂の河床からの移行率 S_R 、および河床への移行率 S_D の計算方法について説明するが、移行率は粒子タイプ(砂とシルト・粘土)で異なるため、それぞれ個別に扱う。

● 砂

砂について、河床での侵食・堆積の移行率は次式で与える。

$$S_R = \begin{cases} K_a \left(\frac{Q_T - Q_{Ta}}{\Delta x} \right) & \text{for } Q_T > Q_{Ta} \\ 0.0 & \text{for } Q_T \leq Q_{Ta} \end{cases} \quad (3-57)$$

$$S_D = \begin{cases} \left(\frac{Q_{Ta} - Q_T}{\Delta x} \right) & \text{for } Q_{Ta} > Q_T \\ 0.0 & \text{for } Q_{Ta} \leq Q_T \end{cases} \quad (3-58)$$

ただし、(3-57)と(3-58)の各変数は次の物理量に対応する。

K_a	: アーミング係数 (0~1.0)	Q_T	: 浮遊砂量の限界輸送 (kg/m/s)
Δx	: シミュレーションのために 分割した区間の長さ	Q_{Ta}	: 実際の浮遊砂量輸送 (kg/m/s)

Q_T の計算方法として、TODAM では DuBoys[1,2]、Toffaletti[2,3]、Colby[2,4]の3つの方法を採用しているため、本業務で開発したコードでもこの3種類の方法を採用している。また、それぞれの方法はTODAMで使用している1次元モデル用のサブルーチンコード Duboys.f、Toffal.f、Colby.fをそのまま利用している。それぞれのサブルーチンについて入出力仕様を以下に記載する。

Dubois.f

REAL FUNCTION DUBOYS(D50, STRESS)

D50 中央粒径(m) 対象粒子の粒径とする。
STRESS せん断応力(/kgf/m²) 河床面のせん断応力(N/ m²)を単位変換する

※kgf=9.807N

Toffal.f

REAL FUNCTION TOFFAL(HRAD, VELOC, D50, FV, SLOPE, TEMPC)

HRAD 径深(m) Δx (メッシュ幅) +2D (水深) と仮定する。
VELOC 流速 (m/day) V (平均流速) と仮定し単位変換する
D50 中央粒径(m) 対象粒子の粒径とする。
FV 粒子の沈降速度 (m/day) 対象粒径ごとに算出した値とし単位変換とする
SLOPE 河床勾配 (m/m) 水平隣接メッシュの河床勾配の最大と仮定する。
TEMPC 水温 (°C) 初期温度(°C)と仮定する

C HRAD - HYDRAULIC RADIUS, METERS
C VELOC - FLOW VELOCITY, METERS/DAY
C D50 - MEDIRN PARTICLE DIAMETER, METERS
C FV - PATICLE FALL VELOCITY, MTERS/DAY
C SLOPE - CHANNBEL OR ENERGY SLOPE
C TEMPC - WATER TEMPERATURE, DEGREES ENTIGRADE
C TOFFAL — (NONCOHESIVE) SAND TRANSPORT CAPACITY, KG/M/DAY

Colby.f

REAL FUNCTION COLBY(D50, HRAD, TMP, AREA, FLOW, FSL, IERROR)

D50 中央粒径(m) 対象粒子の粒径とする
HRAD 径深(m) Δx (メッシュ幅) +2D (水深) と仮定する
TMP 水温 (°C) 初期温度(°C)と仮定する
AREA 断面積 (m²) Δx (メッシュ幅) ×D (水深) と仮定する
FLOW 流量(m³/s) Δx (メッシュ幅) ×D (水深) ×V (平均流速) と仮定する
FSL 土砂濃度 (mg/l, ppm) 対象粒子の河床の濃度 (kg/m³) を単位変換する

C SAND USING THE COLBY METHOD. THE COMUTED CAPACITY IS
C RETURNED IN KG/DAY/M
C THE COLBY METHOD HAS FOLLOWING UNITS AND APPLICABLE RANGES OF
C VARIABLES.
C AVERAGE VELOCITY :V.....FP5.....1-10 FPS
C HYDRAULIC RADIUS.....FHRAD...FT.....1-100 FT
C WATER SURFACE WIDTH.....W.....FT.....
C MEDIAN AND MATERIAL SIZE....DB50...MM.....0.1-0.8 MM
C TEMPERATURE.....TMPR....DEG F.....32-100 DEG.
C FINE SEDIMENT CONCENTTATION FSL.....MG/LITER....0-200000 PPM
C TOTAL SEDIMENT LOAD.....GSI.....TON.....
DB50 = D50 * 1000.0
FHRAD = HRAD * 3.200833
TMPR = TMP * 1.8 + 32.0
V = FLOW/AREA * 3.7975E-5

上記関数の戻り値の単位は[kg/day/m]であるから、[kg/m/s]に変換し、 Δx （セル幅）で割れば、侵食（kg/m²/s）と堆積（kg/m²/s）の単位と一致する。

● シルト・粘土

シルト・粘土について、河床での侵食・堆積の移行率は次式で与える。

$$S_R = \begin{cases} K_a M_C \left(\frac{\tau_b}{\tau_{RC}} - 1 \right) & \text{for } \tau_b > \tau_{RC} \\ 0.0 & \text{for } \tau_b \leq \tau_{RC} \end{cases} \quad (3-59)$$

$$S_R = \begin{cases} C_{Ws} W_s \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{DC}} \right) & \text{for } \tau_b \leq \tau_{DC} \\ 0.0 & \text{for } \tau_b > \tau_{DC} \end{cases} \quad (3-60)$$

ただし、(3-59)と(3-60)の各変数は次の物理量に対応する。

K_a : アーミング係数 (0~1.0)	τ_b : 河床部のせん断応力 τ_{DC} : 臨界せん断応力 (沈降) τ_{RC} : 臨界せん断応力 (再浮遊)
M_C : 侵食係数	
W_s : 浮遊砂の沈降速度	
C_{Ws} : 沈降速度に係る係数	

④ 沈降・巻き上げの注意

有機懸濁態は海水中に浮遊し、海底への沈降堆積・巻き上げはないものと仮定する。また、海底土の土砂がなくなった場合は、巻き上げは起こらない ($M_i = 0.0$ とする)。

3.5.2 土砂モデルの処理フロー

土砂の沈降・巻き上げによって、水中と海底の堆積土砂との間で懸濁体と放射性物質が移動する。懸濁体の移動量 M_i の算定方法は①で説明した。懸濁体の移動量 M_i を所与として、海底の堆積土砂もしくは水中の懸濁体量と放射性物質質量の変化の計算は以下のように行う。

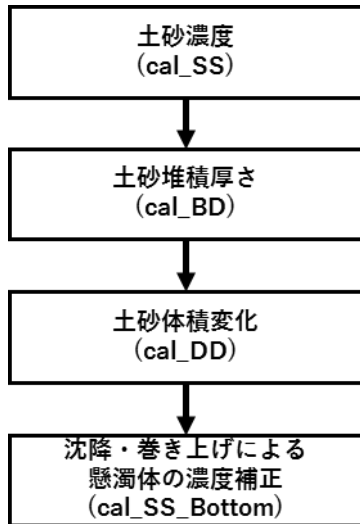


図 3-4 懸濁体のみ計算

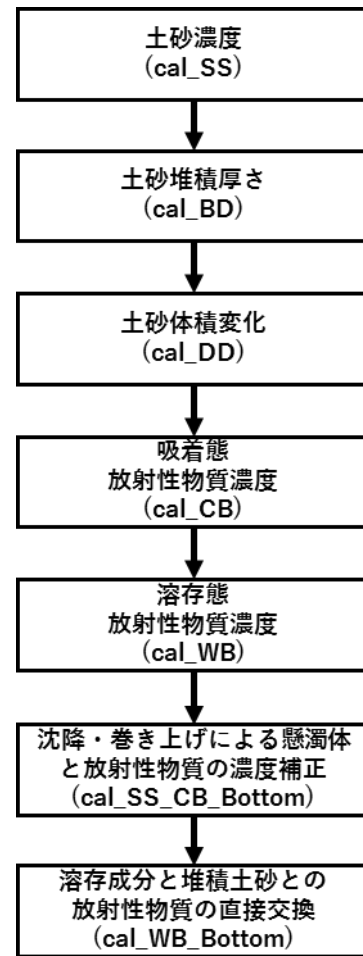


図 3-5 懸濁体と放射性物質を計算

ここで、懸濁体のみ計算を行う場合の処理フローは図 3-4 に従い、懸濁体と放射性物質を共に計算する場合の処理フローは図 3-5 に従う。

① cal_SS

土砂種別 i の巻き上げ量または沈降量 M_i (単位はともに kg/m^2) は、一般的に次のように計算する。

[subroutine cal_SS]

$$\tau = \rho_i C_b (u_b^2 + v_b^2) \quad \text{底面せん断応力} (\text{N}/\text{m}^2)$$

$$M_i = \begin{cases} -Sv_i \cdot S_i^{n'} \cdot \Delta t & \tau < \tau_{drop} \quad \text{沈降量} (\text{kg}/\text{m}^2) \\ -Rate \cdot (\tau/\tau_{raise} - 1) \cdot \Delta t & \tau \geq \tau_{raise} \quad \text{巻き上げ量} (\text{kg}/\text{m}^2) \\ 0 & \text{else} \quad \because \tau_{drop} \leq \tau < \tau_{raise} \end{cases}$$

(3-61)

ρ_i : 種別 i の密度 (kg/m^3) Sv_i : 種別 i の沈降速度 (m/s)
 $S_i^{n'}$: 種別 i の濃度 (kg/m^3) Δt : 時間刻み幅 (s)
 C_b : 底面摩擦係数 u_b, v_b : 底面に隣接するセルの流速
 τ_{drop} : 沈降限界せん断応力 τ_{raise} : 巻き上げ限界せん断応力
 $Rate$: Surface erosion rate (= $10^4 \text{ kg}/\text{m}^2 / \text{s}$)

種別 i の濃度 $S_i^{n'}$ は、凝集・分解を考慮した移流拡散式計算後の懸濁態濃度とし、この濃度で時間刻み幅 Δt 秒の間、沈降するものとする。ただし、 $(S_i^{n'} - M_i/\Delta z) < 0$ の場合は、海中の最下層セルに分布している懸濁体総量より大きな移動量（沈降量）が発生することを意味する。このときは、懸濁体の移動量を下式のように制限する。

[subroutine cal_SS]

$$\begin{aligned} & \text{if} \left(S_i^{n'} - \frac{M_i}{\Delta z} < 0 \right) \text{ then} \\ & M_i = S_i^{n'} \cdot \Delta z \end{aligned} \quad (3-62)$$

② cal_BD

沈降速度 Sv_i は鉛直下向きであり符号は負であることから、沈降量 $M > 0$ 、巻き上げ量 $M < 0$ としていることに注意すること。これより土砂種別 i の堆積厚さ BD_i は以下のように計算する。

[subroutine cal_BD]

$$BD_i^{n+1} = BD_i^n + M_i/\rho_i \quad (\text{m}) \quad (3-63)$$

ここで $BD_i^{n+1} < 0$ の場合は、1つ前の時間ステップまでに堆積していた土砂の全てが巻き上がったことを意味するため、巻き上げ量 M_i 、堆積厚さ BD_i^{n+1} を以下のように修正する。

[subroutine cal_BD]

$$\begin{aligned} & \text{if} (BD_i^{n+1} < 0) \text{ then} \\ & M_i = -BD_i^n \cdot \rho_i \\ & BD_i^{n+1} = 0 \end{aligned} \quad (3-64)$$

以上より、全ての土砂堆積厚さの合計は以下ようになる。

[subroutine cal_BD]

$$BD_{all}^{n+1} = BD_{all}^n + \sum_i M_i/\rho_i \quad (3-65)$$

③ cal_DD

土砂種別 i が堆積している体積 DD_i は土砂種別 i の堆積厚さ BD_i によって以下のように計算できる。

ここで、 dx, dy は x, y 方向メッシュ幅 (m) である。

[subroutine cal_DD]

$$DD_i^{n+1} = dx \cdot dy \cdot BD_i^n \quad (\text{m}^3) \quad (3-66)$$

④ cal_SS_Bottom

沈降・巻き上げにより、海中の最下層セルの懸濁態濃度の変化は以下のように計算できる。

[subroutine cal_SS_Bottom]

$$S_i^{n+1} = \max[(S_i^{n'} - M_i/\Delta z), 0] \quad (3-67)$$

⑤ cal_SS_CB_Bottom_Nest

● 沈降

沈降に伴って減少する懸濁態 S_i 、吸着放射性懸濁態 C_i 、および増加する、海底に堆積する吸着放射性懸濁態 BB_i は次のように計算される。なお、懸濁態 $S_i^{n'}$ 、および吸着放射性懸濁態 $C_i^{n'}$ は、それぞれ凝集・分解、吸着・脱着を考慮した移流拡散式計算後の物質濃度とし、この濃度で時間刻み幅 Δt 秒の間、沈降するものとする。

沈降に関しては、懸濁態 S_i 、海底に堆積する土砂厚さ d_i などによって以下の5つの条件を考慮する。なお、全水深 $< dcr$ は、全水深が非常に浅いことを表す。また複数の条件が含まれるものに関しては、全て AND 条件とする。

表 3-10 沈降考慮の条件

条件 (優先 順位)	懸 濁 態 $S_i^{n'}$	土 砂 厚 d_i	層 番 号	全水 深	備考
1		>0	2	$< dcr$	条件：水深が非常に浅い and 土砂が十分堆積してる 処理：懸濁体と放射性物質を全て土砂に堆積させる
2	>0	>0			条件：懸濁体がある and 土砂が堆積してる 処理：移動量の通りに懸濁体と放射性物質を沈降させる
3		>0			条件：懸濁体がない and 土砂が堆積してる 処理：水中の放射性物質濃度を 0.0 とする
4	>0				条件：懸濁体が大きい and 土砂が堆積していない 処理：土砂厚み d_i を微量セットする
5	else				条件：懸濁体がない and. 土砂が堆積していない 処理：懸濁体と放射性物質の濃度を 0.0 とする。

※ここで、懸濁体 $S_i^{n'}$ とは海中の最下層セルの懸濁体濃度を意味する。

まず、各変数について次のように定義する。

[subroutine cal_SS_CB_Bottom]

$$\begin{aligned} area &= dx \cdot dy, \\ dz &= D \cdot d\sigma, \\ d_i^{n+1} &= BD_i^{n+1}, \quad d_i^n = BD_i^n \end{aligned} \quad (3-68)$$

ここで、 D は水深とする。また、変数 $area$ は底面のセル面積とし、変数 dz は海中の最下層セルの水深とする。

- 条件 1

[subroutine cal_SS_CB_Bottom]

懸濁態 S_i

$$S_i^{n+1} = 0 \quad (3-69)$$

吸着放射性懸濁態 C_i

$$C_i^{n+1} = 0 \quad (3-70)$$

海底に堆積する吸着放射性懸濁態 BB_i

$$\begin{aligned} area \cdot d_i^{n+1} \cdot BB_i^{n+1} &= area \cdot d_i^n \cdot BB_i^n + area \cdot \Delta z \cdot C_i^{n'} \\ \therefore BB_i^{n+1} &= (d_i^n BB_i^n + \Delta z \cdot C_i^{n'}) / d_i^{n+1} \end{aligned} \quad (3-71)$$

- 条件 2

[subroutine cal_SS_CB_Bottom]

懸濁態 S_i

$$\begin{aligned} area \cdot \Delta z \cdot S_i^{n+1} &= area \cdot \Delta z \cdot S_i^{n'} + area \cdot Sv_i \cdot \Delta t \cdot S_i^{n'} \\ \therefore S_i^{n+1} &= \max[(S_i^{n'} - M_i / \Delta z), 0] \end{aligned} \quad (3-72)$$

吸着放射性懸濁態 C_i

$$\begin{aligned} area \cdot \Delta z \cdot C_i^{n+1} &= area \cdot \Delta z \cdot C_i^{n'} + area \cdot Sv_i \cdot \Delta t \cdot C_i^{n'} \\ \therefore C_i^{n+1} &= C_i^{n'} \cdot \max[(S_i^{n'} - M_i / \Delta z), 0] / S_i^{n'} \\ &= C_i^{n'} \cdot S_i^{n+1} / S_i^{n'} \end{aligned} \quad (3-73)$$

海底に堆積する吸着放射性懸濁態 BB_i

$$\begin{aligned} area \cdot d_i^{n+1} \cdot BB_i^{n+1} &= area \cdot d_i^n \cdot BB_i^n - area \cdot Sv_i \cdot \Delta t \cdot C_i^{n'} \\ \therefore BB_i^{n+1} &= (d_i^n BB_i^n + M_i \cdot C_i^{n'} / S_i^{n'}) / d_i^{n+1} \end{aligned} \quad (3-74)$$

- 条件 3

[subroutine cal_SS_CB_Bottom]

懸濁態 S_i

$$S_i^{n+1} = 0 \quad (3-75)$$

吸着放射性懸濁態 C_i

$$C_i^{n+1} = 0 \quad (3-76)$$

海底に堆積する吸着放射性懸濁態 BB_i

(3-74)のように $BB_i^{n+1} = (d_i^n BB_i^n + M_i \cdot C_i^{n'} / S_i^{n'}) / d_i^{n+1}$ とするべきであるが、 $C_i^{n'} \sim 0.0$ かつ $S_i^{n'} \sim 0.0$ であるため、次式で計算する。

$$(3-77)$$

$$BB_i^{n+1} = BB_i^n \cdot d_i^n / d_i^{n+1}$$

- 条件 4

[subroutine cal_SS_CB_Bottom]

懸濁態 S_i

$$\begin{aligned} area \cdot \Delta z \cdot S_i^{n+1} &= area \cdot \Delta z \cdot S_i^{n'} + area \cdot Sv_i \cdot \Delta t \cdot S_i^{n'} \\ \therefore S_i^{n+1} &= \max[(S_i^{n'} - M_i/\Delta z), 0] \end{aligned} \quad (3-78)$$

吸着放射性懸濁態 C_i

$$\begin{aligned} area \cdot \Delta z \cdot C_i^{n+1} &= area \cdot \Delta z \cdot C_i^{n'} + area \cdot Sv_i \cdot \Delta t \cdot C_i^{n'} \\ \therefore C_i^{n+1} &= C_i^{n'} \cdot \max[(S_i^{n'} - M_i/\Delta z), 0] / S_i^{n'} \\ &= C_i^{n'} \cdot S_i^{n+1} / S_i^{n'} \end{aligned} \quad (3-79)$$

海底に堆積する吸着放射性懸濁態 BB_i

(3-74)のように $BB_i^{n+1} = (d_i^n BB_i^n + M_i \cdot C_i^{n'} / S_i^{n'}) / d_i^{n+1}$ とするべきであるが、 $d_i^{n+1} \sim 0.0$ であるため、次式で計算する。

$$BB_i^{n+1} = (d_i^n BB_i^n + M_i \cdot C_i^{n'} / S_i^{n'}) / \max(d_i^{n+1}, \epsilon) \quad (3-80)$$

ただし、 ϵ は微量であり、 $\epsilon = 1.0E - 20$ を与える。

- 条件 5

[subroutine cal_SS_CB_Bottom]

懸濁態 S_i

$$\begin{aligned} area \cdot \Delta z \cdot S_i^{n+1} &= area \cdot \Delta z \cdot S_i^{n'} + area \cdot Sv_i \cdot \Delta t \cdot S_i^{n'} \\ \therefore S_i^{n+1} &= \max[(S_i^{n'} - M_i/\Delta z), 0] \end{aligned} \quad (3-81)$$

吸着放射性懸濁態 C_i

$$C_i^{n+1} = 0 \quad (3-82)$$

海底に堆積する吸着放射性懸濁態 BB_i

$$BB_i^{n+1} = 0 \quad (3-83)$$

● 巻き上げ

巻き上げに伴って増加する懸濁態 S_i 、吸着放射性懸濁態 C_i 、および減少する、海底に堆積する吸着放射性懸濁態 BB_i は次のように計算される。なお、懸濁態 $S_i^{n'}$ 、および吸着放射性懸濁態 $C_i^{n'}$ は、それぞれ凝集・分解、吸着・脱着を考慮した移流拡散式計算後の物質濃度とし、この濃度で時間刻み幅 Δt 秒の間、巻き上がるものとする。

[subroutine cal_SS_CB_Bottom]

懸濁態 S_i

$$\begin{aligned} area \cdot \Delta z \cdot S_i^{n+1} &= area \cdot \Delta z \cdot S_i^{n'} - area \cdot (d_i^{n+1} - d_i^n) \cdot \rho_i \\ \therefore S_i^{n+1} &= S_i^{n'} - M_i / \Delta z \end{aligned} \quad (3-84)$$

吸着放射性懸濁態 C_i

$$\begin{aligned} area \cdot \Delta z \cdot C_i^{n+1} &= area \cdot \Delta z \cdot C_i^{n'} - area \cdot (d_i^{n+1} - d_i^n) \cdot BB_i^n \\ \therefore C_i^{n+1} &= C_i^{n'} - (d_i^{n+1} - d_i^n) \cdot BB_i^n / \Delta z \end{aligned} \quad (3-85)$$

海底に堆積する吸着放射性懸濁態 BB_i

$$\begin{aligned} area \cdot d_i^{n+1} \cdot BB_i^{n+1} \\ &= area \cdot d_i^n \cdot BB_i^n + area \cdot (d_i^{n+1} - d_i^n) \cdot BB_i^n \\ \therefore BB_i^{n+1} &= BB_i^n \end{aligned} \quad (3-86)$$

⑥ cal_WB_Bottom

土砂堆積厚さ $BD_i > 0$ のとき、海底面付近の放射性溶存態と堆積する吸着放射性懸濁態との間で放射性物質の直接交換を考慮する。まず、溶存態放射性物質 W [Bq/m³]の時間発展方程式を(5-99)に示す。ただし、 S_i は種別 i の懸濁体濃度とし、 C_i は懸濁体 S_i に吸着した放射性物質濃度とする。

$$\begin{aligned} \frac{\partial WD}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uWD) + \frac{\partial}{\partial y}(vWD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wW) \\ &= D \left(\sum_i R_i (C_i - K_d(i) \cdot S_i \cdot W) + W_{in} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial W}{\partial \sigma} \right) \\ &+ (\text{Sedimentation Cohesive failure}) \end{aligned} \quad (3-87)$$

ここで、懸濁体に吸着する放射性物質の移動には沈降作用を考慮するが、溶存成分について、沈降作用は考慮しないことに注意する。また、式(3-87)に現れるパラメータはそれぞれ次の効果を持つ。

表 3-11 パラメータ

パラメータ	内容
R_i	タイプ i の粒子態に対する吸脱着の時定数 (1/秒)
$K_d(i)$	タイプ i の粒子態に対する分配係数 (10~1000 のオーダー：この値が大きいと粒子への吸着が促進)
S_i	タイプ i の粒子態の土砂および各種懸濁態濃度

C_{i_in}	タイプ i の粒子に吸着した放射性物質の単位時間あたりの放出量
W_{in}	溶存態放射性物質の単位時間あたりの放出量

また、(3-87)には付加項として海底面付近の水中セルにだけ作用する放射性物質の吸脱着項である。以降ではこの項のことを海底面吸脱着項といい、詳細を説明する。

➤ (Sedimentation Cohesive failure)

海底面付近の溶存態放射性物質（溶存成分）と堆積土砂中の懸濁体について、放射性物質を直接交換する項を表す（図 3-6 参照）。

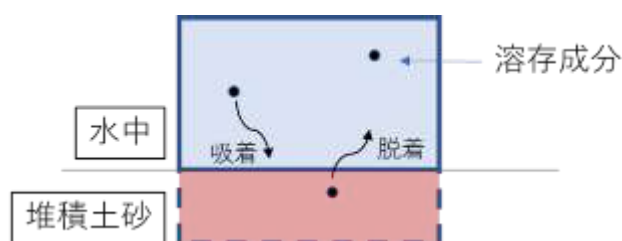


図 3-6 土砂中の懸濁体に対する放射性物質の吸脱着

● 海底面吸脱着項の定義

式(3-87)の海底面吸脱着項を次のように定義する。この項は海中の最下層セルのみに作用する。

$$\begin{aligned}
 & \text{(Sedimentation Cohesive failure)} \\
 & = \sum_i R_i (BB_i - K_d(i) \cdot \rho_i \cdot W) \cdot \min(d_i, 0.01) \quad [Bq/m^2/s] \quad (3-88)
 \end{aligned}$$

ただし、 BB_i は海底の種別 i の堆積土砂に吸着する放射性物質濃度とし、 ρ_i は種別 i の懸濁体密度とする。また、 d_i は種別 i の堆積土砂厚さである。パラメータ R_i と $K_d(i)$ については表 3-11 を参照すること。また、定義式(3-88)について種別 i の堆積土砂厚さ d_i の効果を $\min(d_i, 0.01)$ として、上限を与えている。これは、定義式(3-87)の次元を合わせるためには d_i のような長さの次元を掛ける必要があるが、海中の溶存成分と堆積土砂の吸脱着に関して堆積土砂厚さは影響しないと考えられることから、便宜的に上限値を与えた。

まず、各変数について次のように定義する。

[subroutine cal_WB_Bottom]

$area = dx \cdot dy$: 底面のセル面積	
$dz = D \cdot d\sigma$: 海中の最下層セルの水深	(3-89)
$d_i = BD_i^{n+1}$: 種別 <i>i</i> の堆積土砂の厚さ	
W^{n+1}	: 海中の最下層セルの溶存成分濃度	(3-90)
BB_i^{n+1}	: 海底の種別 <i>i</i> の堆積土砂に吸着する放射性物質	
MB_i	: 海底の種別 <i>i</i> の堆積土砂から溶存成分への放射性物質の移動量[Bq/m ² /s]	(3-91)

● 移動量 MB_i の算定

各種別 *i* の堆積土砂と溶存成分との間の放射性物質の移動量 MB_i [Bq/m²/s]を以下のように計算する。

[subroutine cal_SS_CB_Bottom]

放射性物質の移動量 MB_i , *i* : 懸濁体の種別

$$MB_i = R_i(BB_i^{n+1} - K_d(i) \cdot \rho_i \cdot W^{n+1}) \cdot \min(d_i, 0.01) \quad (3-92)$$

ただし、移動量 MB_i の符号によって放射性物質の吸脱着の様子は次のように変わる。

$$\begin{cases} MB_i > 0.0 & : \text{種別 } i \text{ の堆積土砂から放射性物質が脱着する} \\ MB_i < 0.0 & : \text{種別 } i \text{ の堆積土砂に放射性物質が吸着する} \end{cases} \quad (3-93)$$

● 吸脱着による放射性物質の変化

移動量 MB_i によって、溶存成分 W と種別*i*の堆積土砂の放射性物質濃度 BB_i はそれぞれ次のように変化する。

[subroutine cal_SS_CB_Bottom]

種別*i*の堆積土砂の放射性物質濃度 BB_i

$$\begin{aligned} area \cdot d_i \cdot BB_i^{n+1} &= area \cdot d_i \cdot BB_i^{n+1} - area \cdot MB_i \cdot dt \\ \therefore BB_i^{n+1} &= BB_i^{n+1} - MB_i \cdot \frac{dt}{d_i} \end{aligned} \quad (3-94)$$

溶存成分 W

$$\begin{aligned} area \cdot dz \cdot W^{n+1} &= area \cdot dz \cdot W^{n+1} + \sum_i (area \cdot MB_i \cdot dt) \\ \therefore W^{n+1} &= W^{n+1} + \sum_i (area \cdot MB_i \cdot dt) / dz \end{aligned} \quad (3-95)$$

ただし、式(3-94)と(3-95)について、海底面吸脱着によって溶存成分 W と種別*i*の堆積土砂の放射性物質濃度 BB_i のそれぞれの値が負値を取る場合には、移動量 MB_i を補正する処理を与える。

付録4 沿岸試計算データ（試計算：満潮時±1時間）

本節では、5.3 節で記した解析結果に対し、満潮時を境に±1 時間のシミュレーションデータを各々、付録として示す。

4.1.1 Case0 塩水楔の再現

▼満潮時-1時間

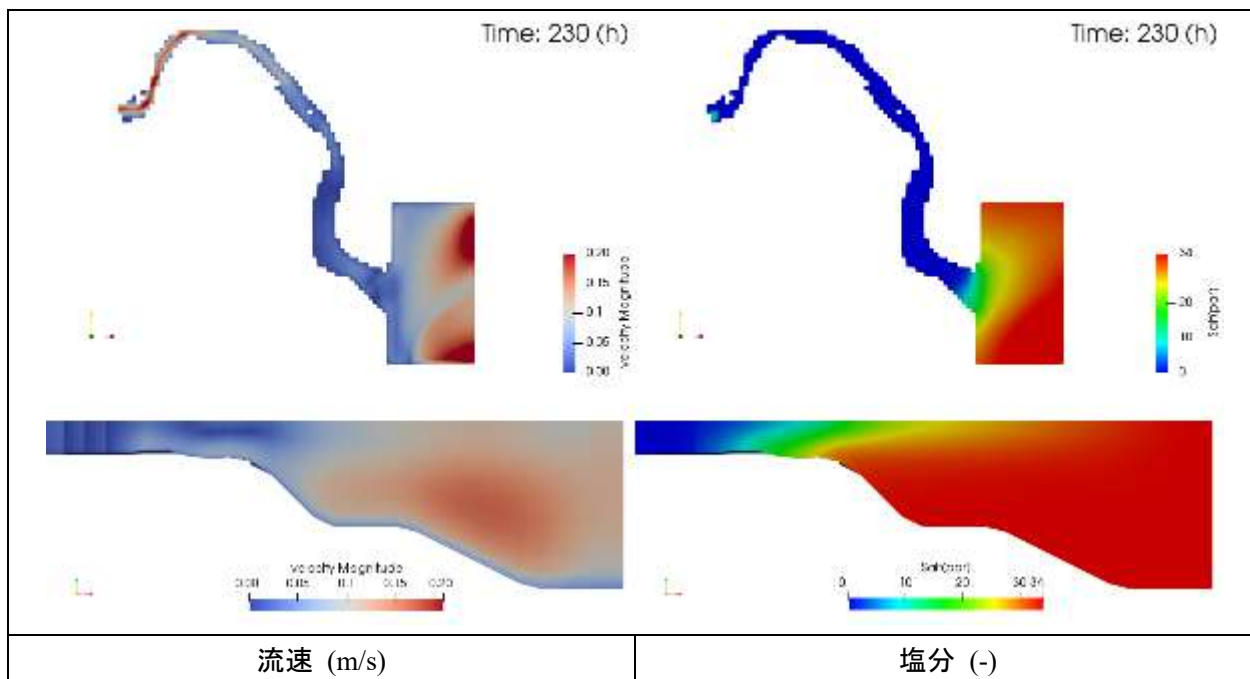


図 4-1 検証結果 Case0 塩水楔の再現（満潮時-1時間）

▼満潮時

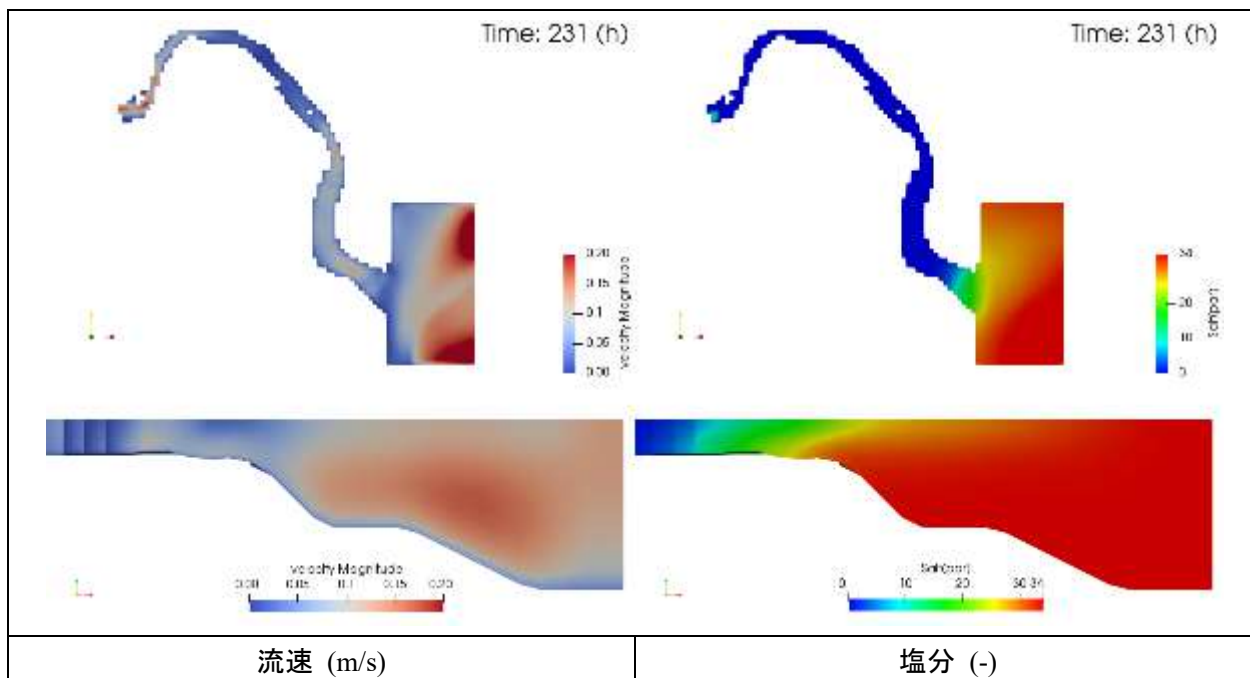


図 4-2 検証結果 Case0 塩水楔の再現（満潮時）

▼満潮時+1時間

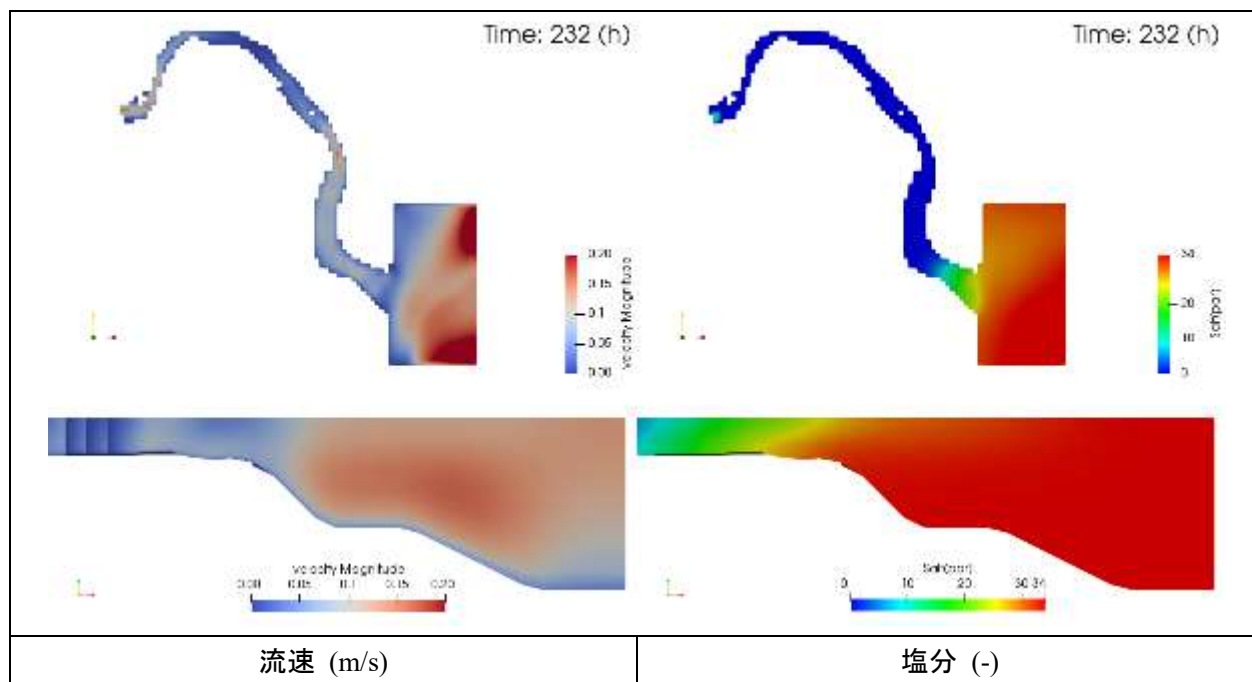


図 4-3 検証結果 Case0 塩水楔の再現 (満潮時+1時間)

4.1.2 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性

① 粘土分布 (水中)

▼満潮時-1時間

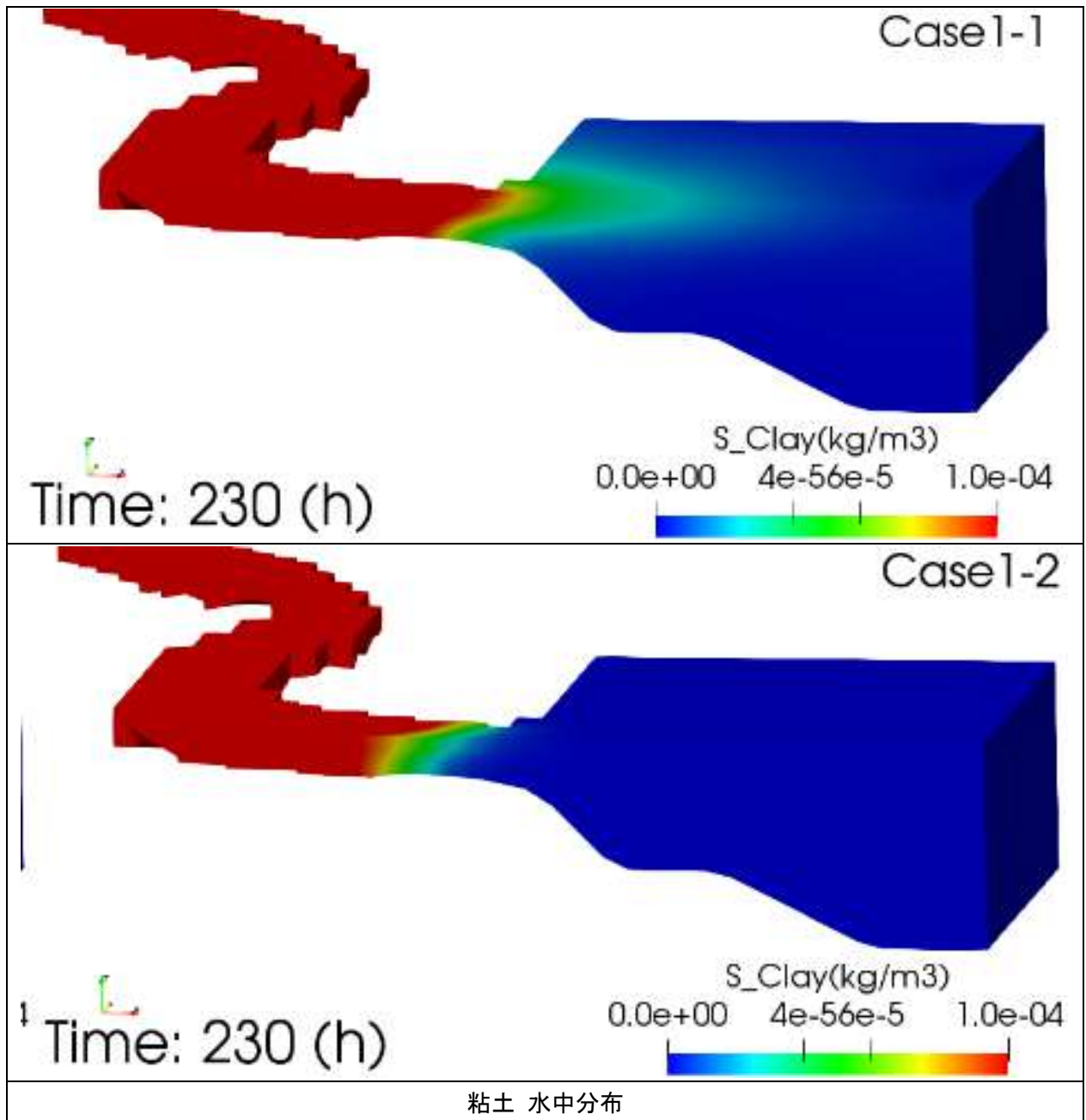


図 4-4 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (満潮時-1時間)

(粘土 : 水中分布)

▼満潮時

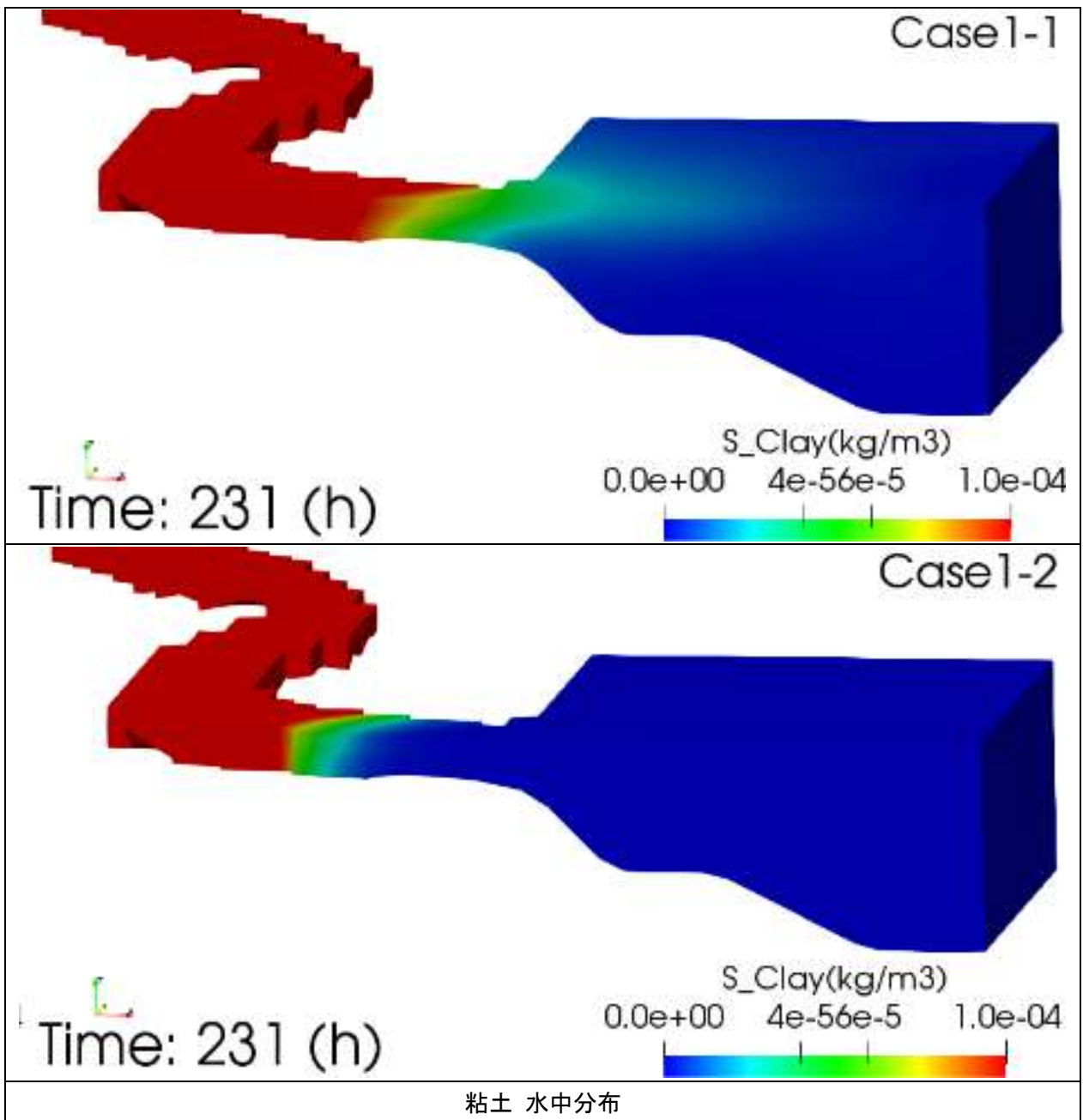


図 4-5 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (満潮時)
(粘土 : 水中分布)

▼満潮時+1時間

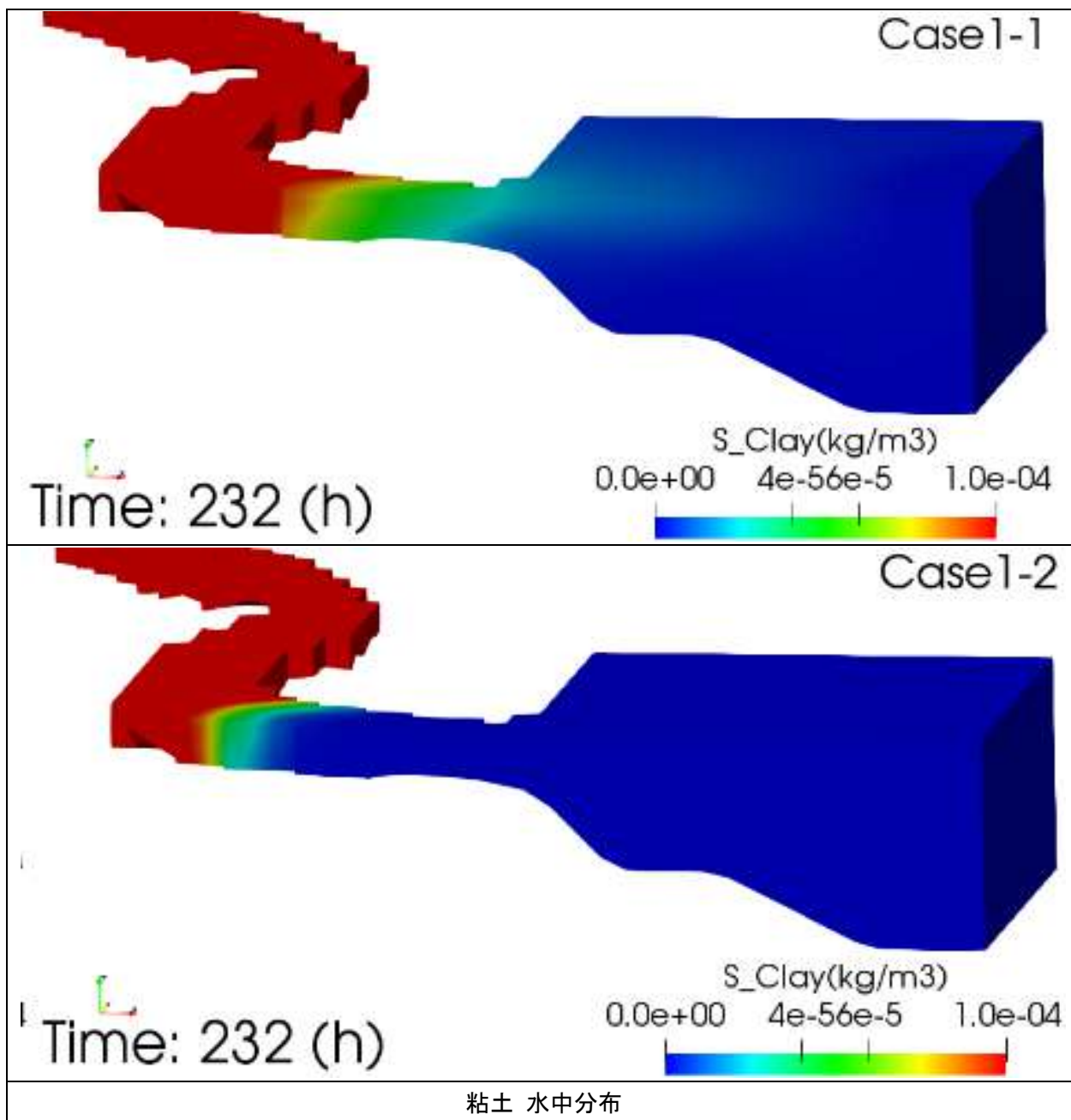


図 4-6 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (満潮時+1時間)
(粘土 : 水中分布)

② 凝集懸濁態：小粒子 分布（水中）

▼満潮時-1時間

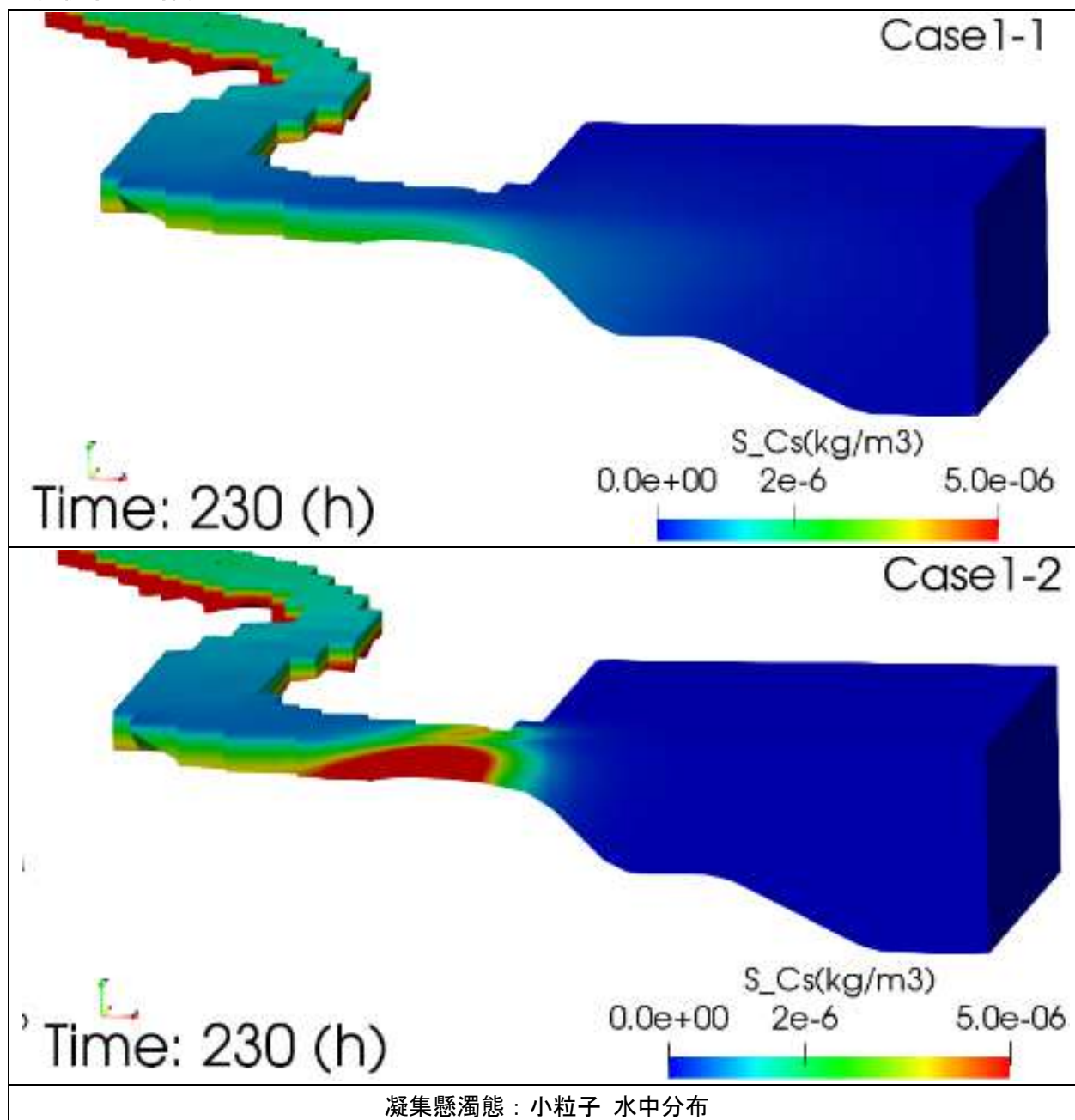


図 4-7 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性（満潮時-1時間）
（凝集懸濁態：小粒子・水中分布）

▼満潮時

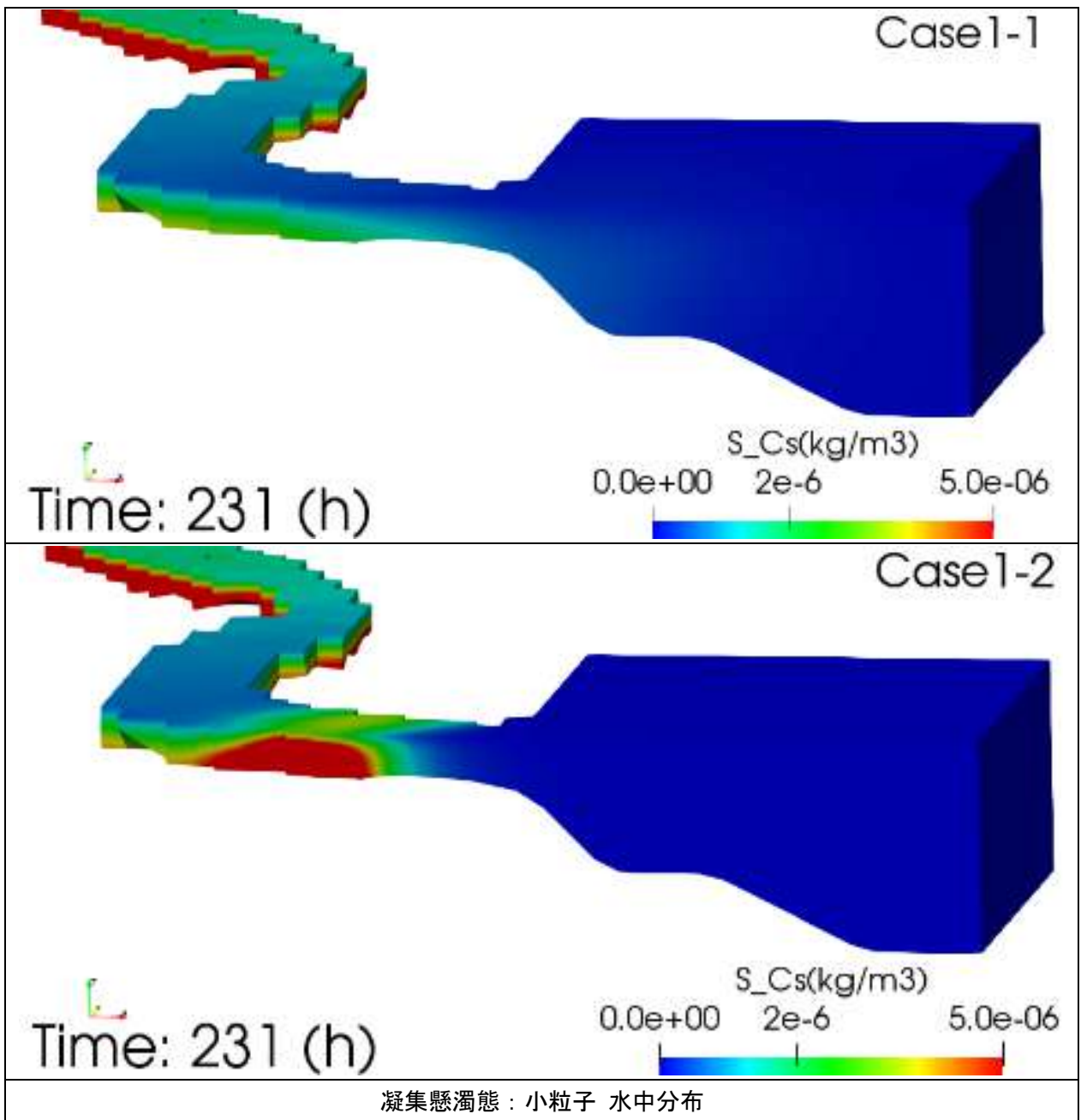


図 4-8 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (満潮時)

(凝集懸濁態：小粒子・水中分布)

▼満潮時+1時間

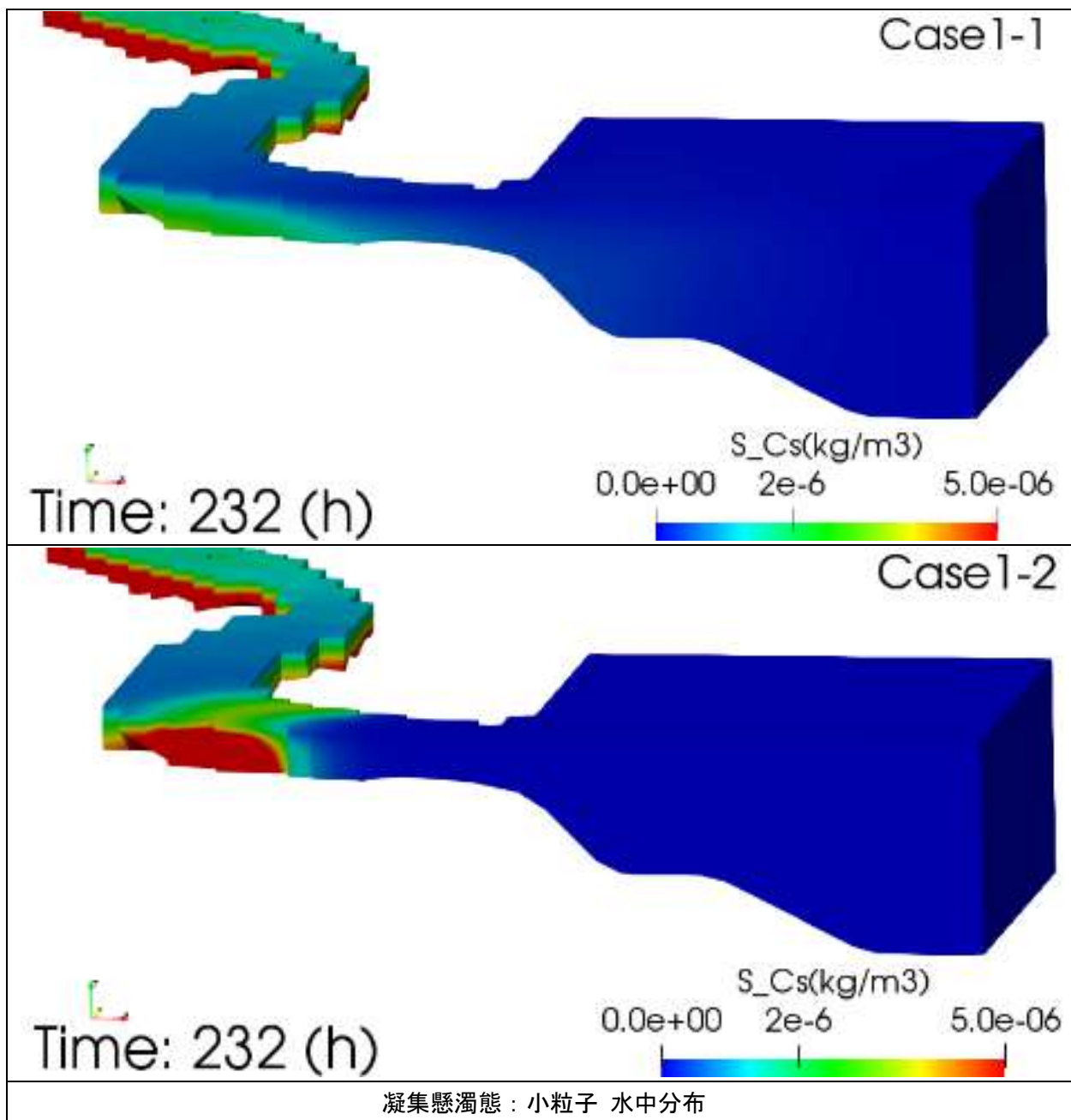
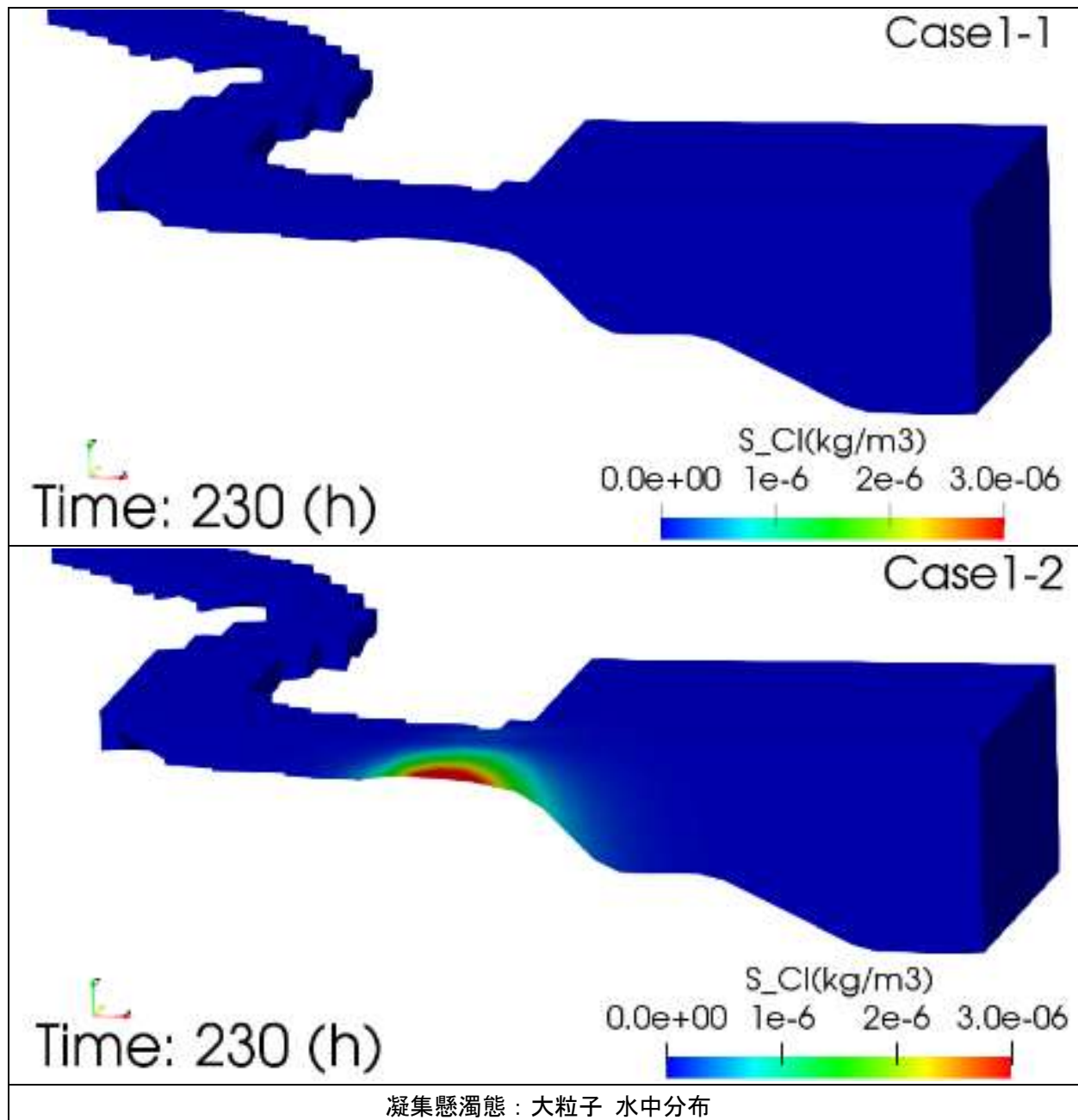


図 4-9 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (満潮時+1時間)

(凝集懸濁態：小粒子・水中分布)

③ 凝集懸濁態：大粒子 分布（水中）

▼満潮時-1時間



凝集懸濁態：大粒子 水中分布

図 4-10 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性（満潮時-1時間）

（凝集懸濁態：大粒子・水中分布）

▼満潮時

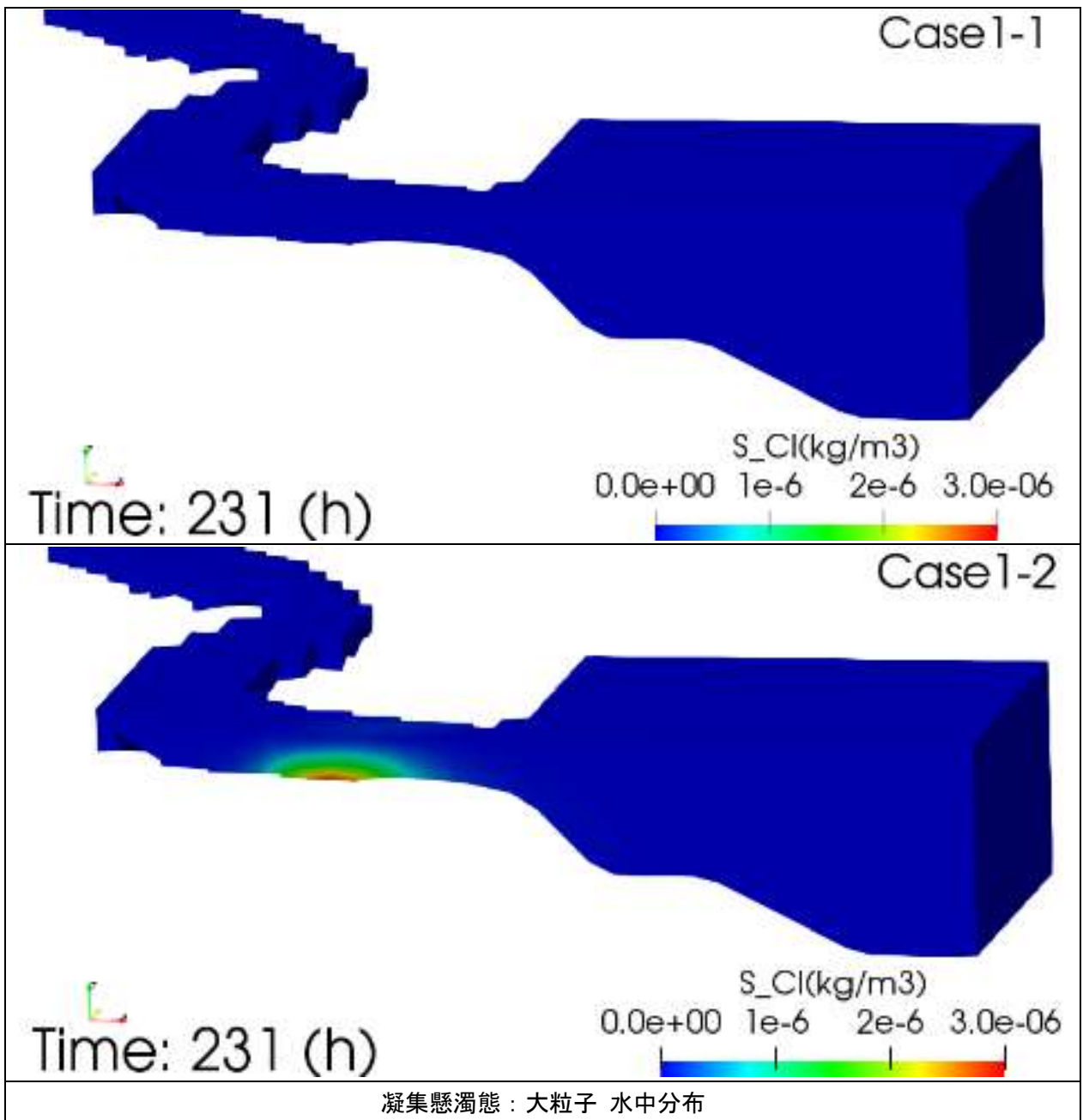


図 4-11 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (満潮時)
(凝集懸濁態：大粒子・水中分布)

▼満潮時+1時間

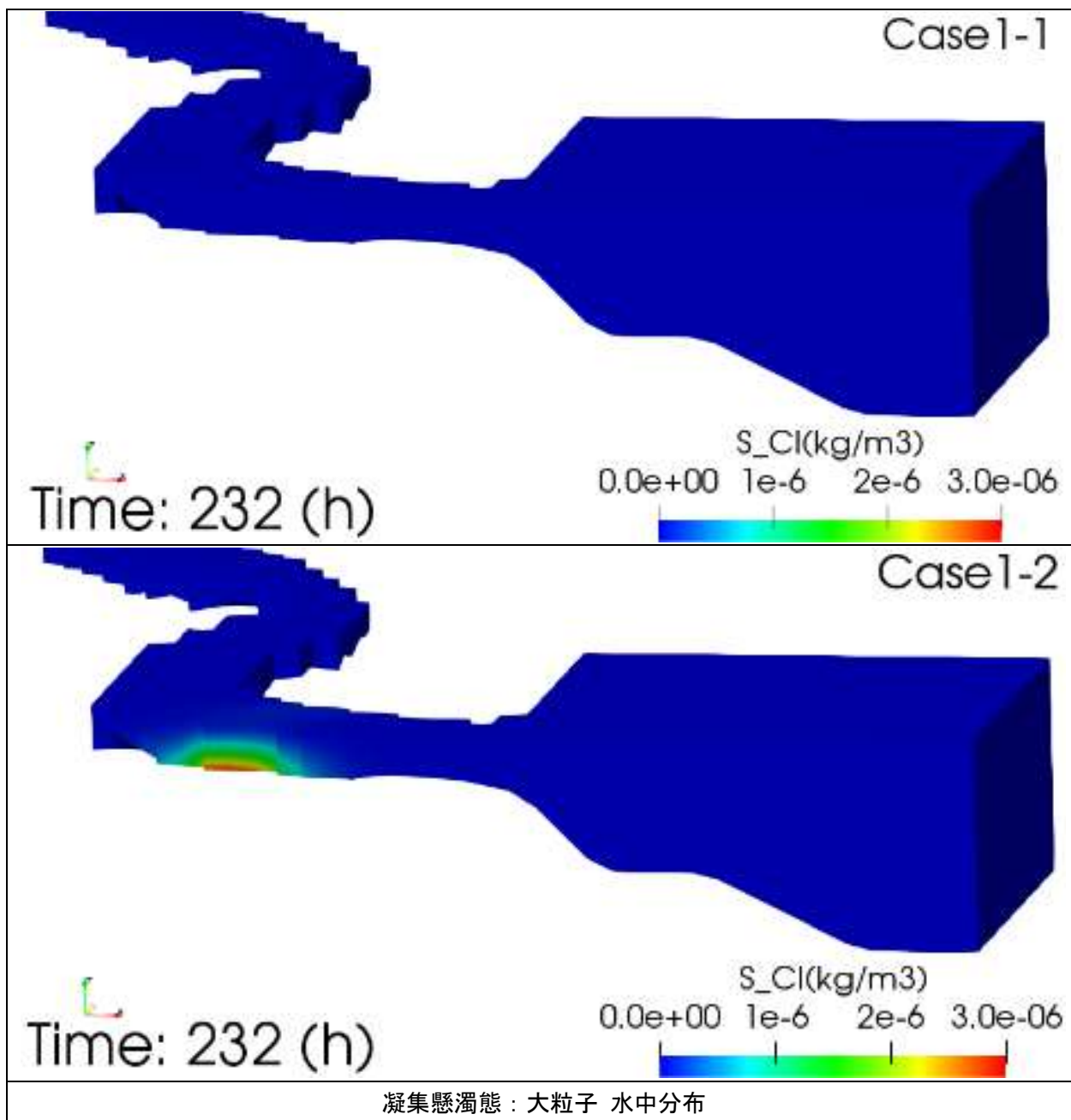


図 4-12 検証結果 Case1 凝集懸濁態の塩分依存性 (満潮時+1時間)

(凝集懸濁態：大粒子・水中分布)

4.1.3 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性

① 粘土に吸着した放射性セシウム濃度分布（水中）

▼満潮時-1時間

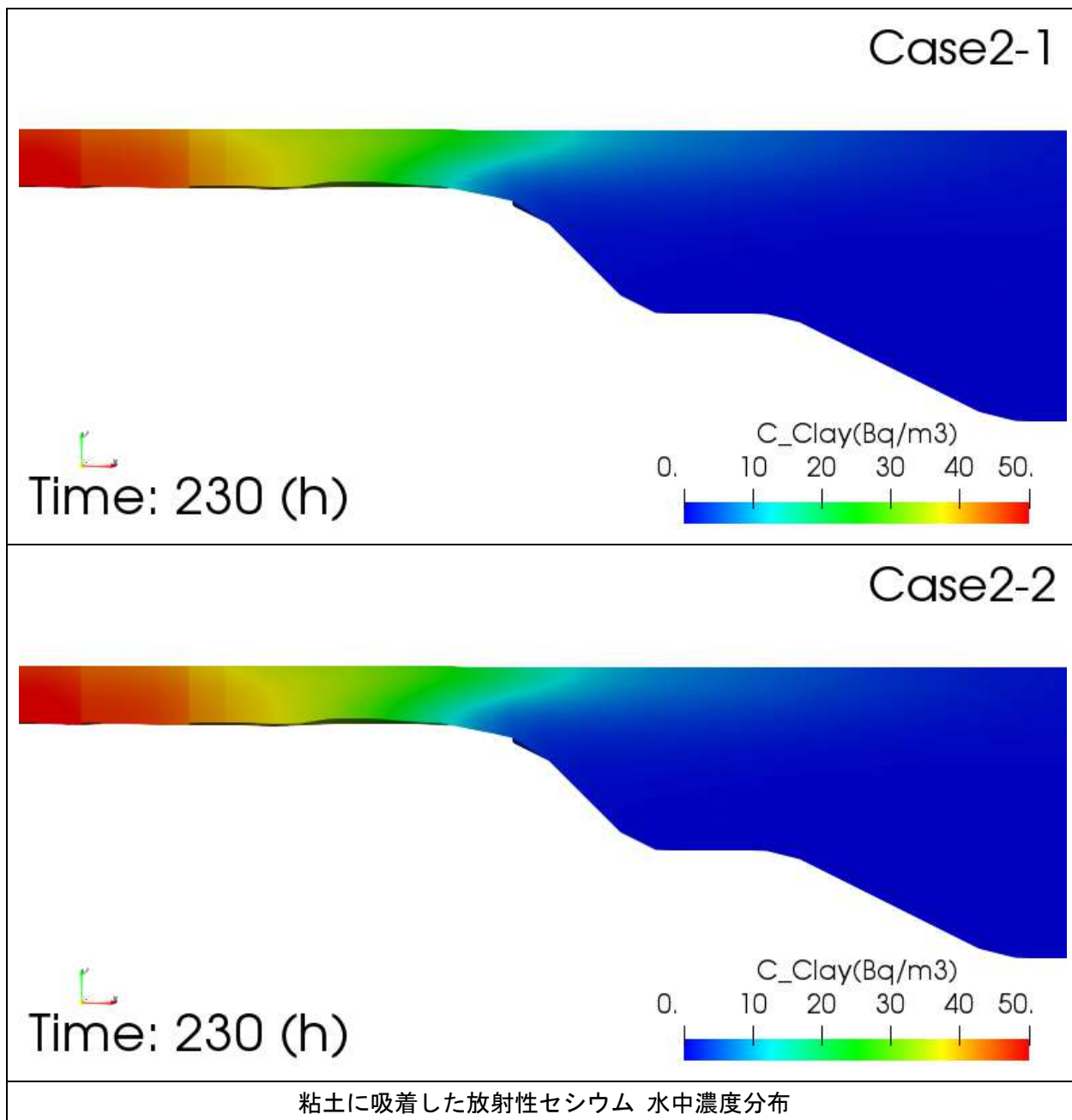


図 4-13 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時-1時間）（粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時

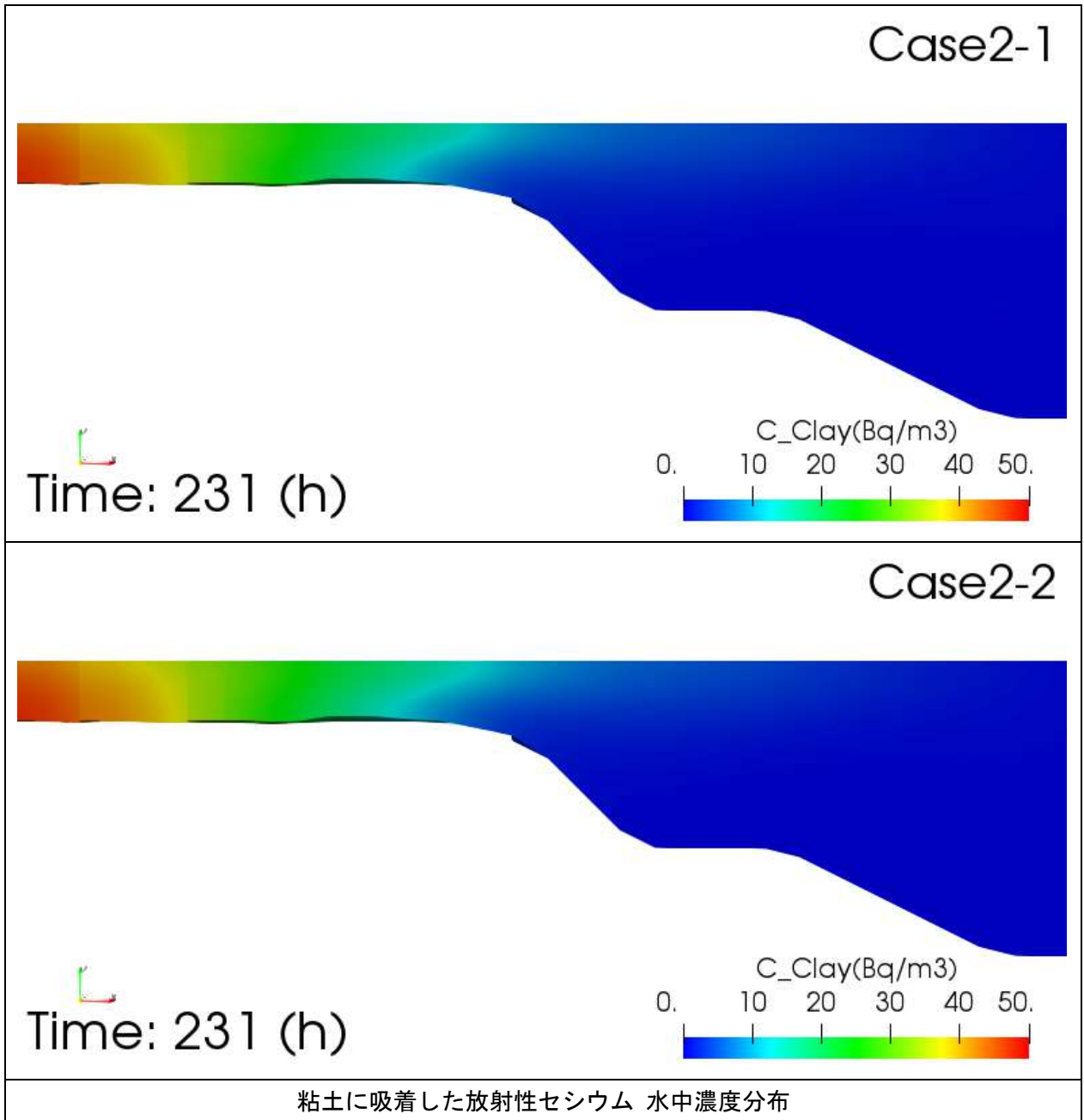


図 4-14 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (満潮時)
(粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

▼満潮時+1時間

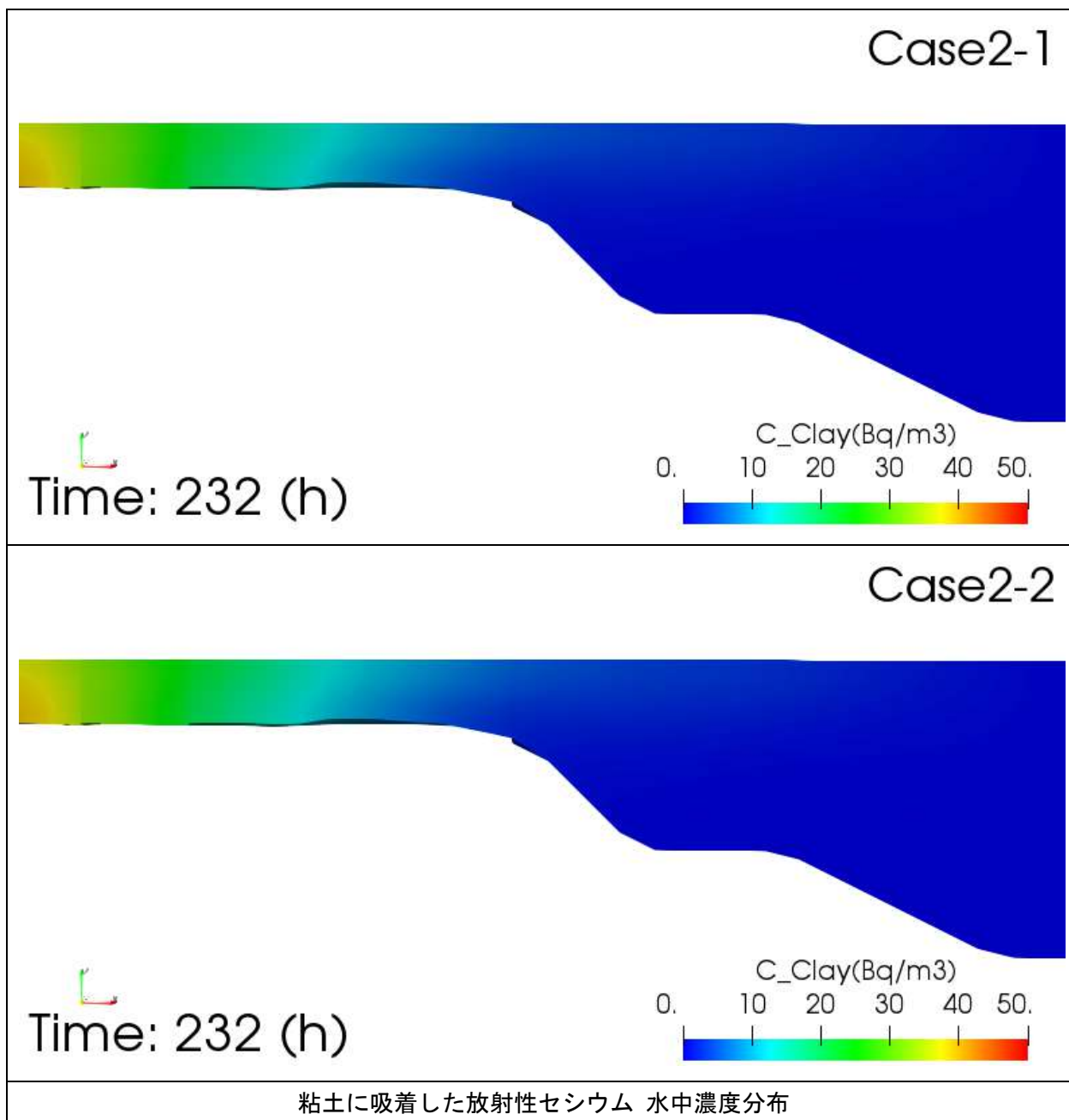


図 4-15 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時+1時間）（粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

② 溶存態放射性セシウム濃度分布（水中）

▼満潮時-1時間

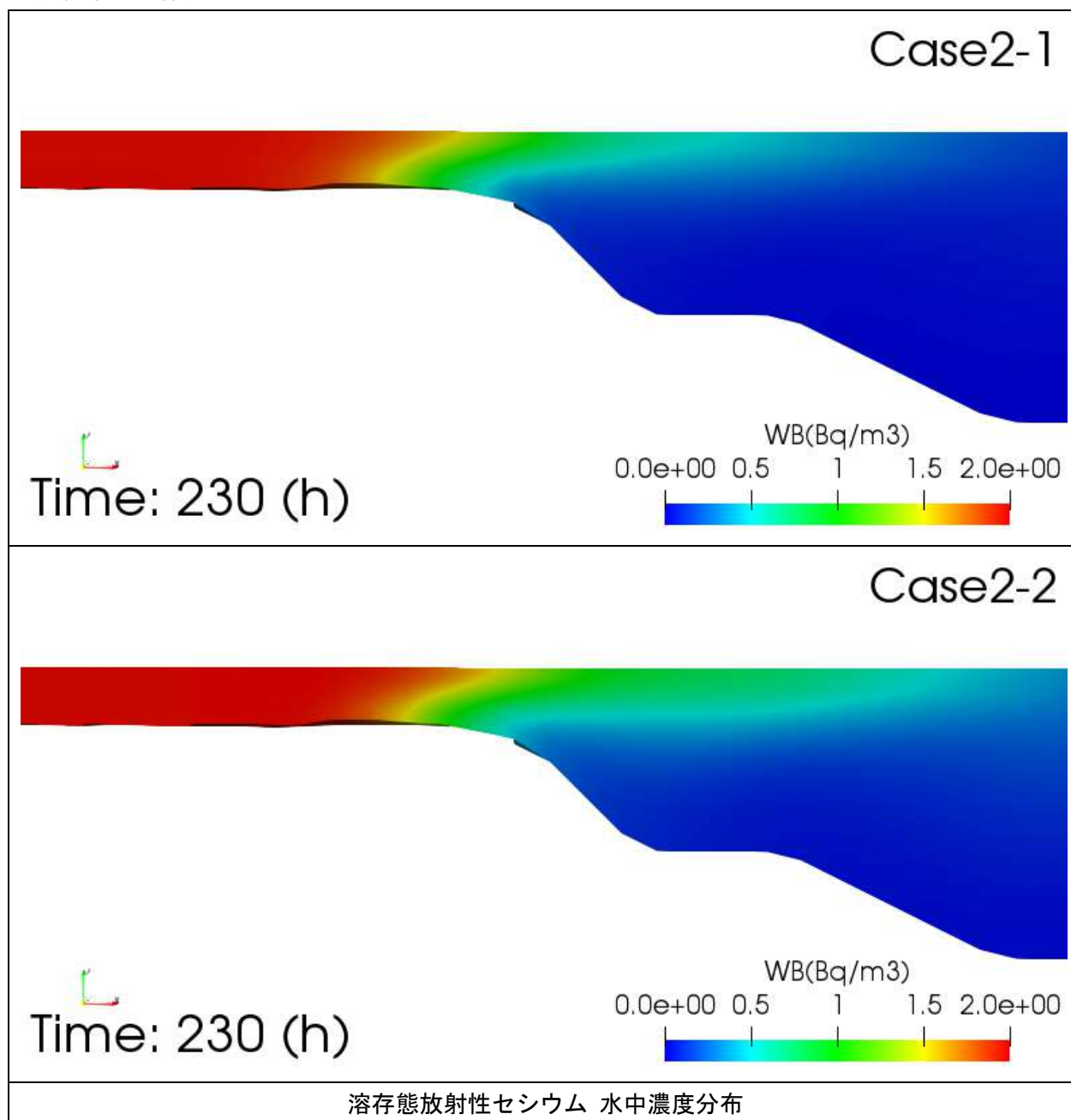


図 4-16 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時-1時間）（溶存態放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時

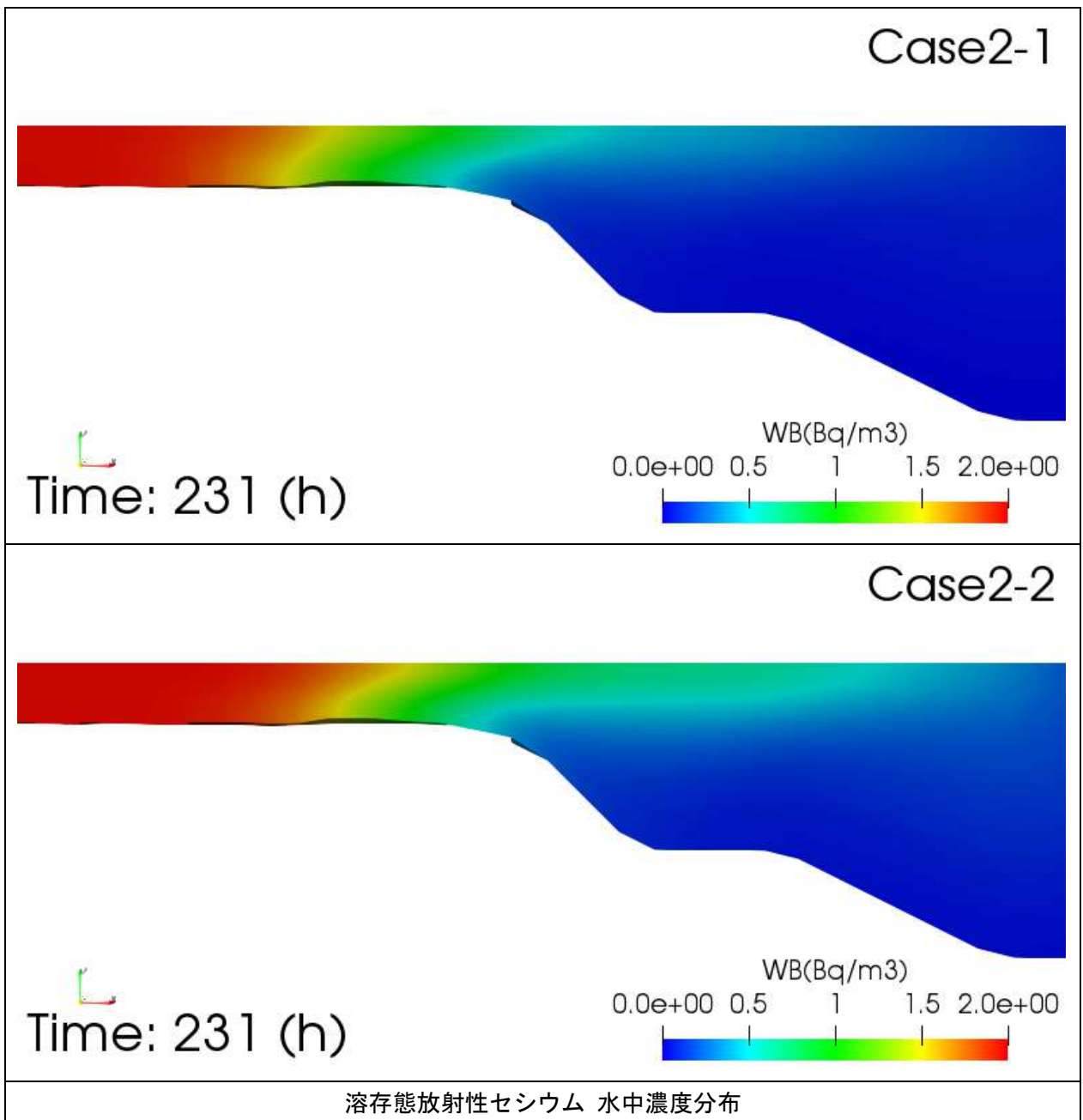


図 4-17 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (満潮時)
(溶存態放射性セシウム・水中濃度分布)

▼満潮時+1時間

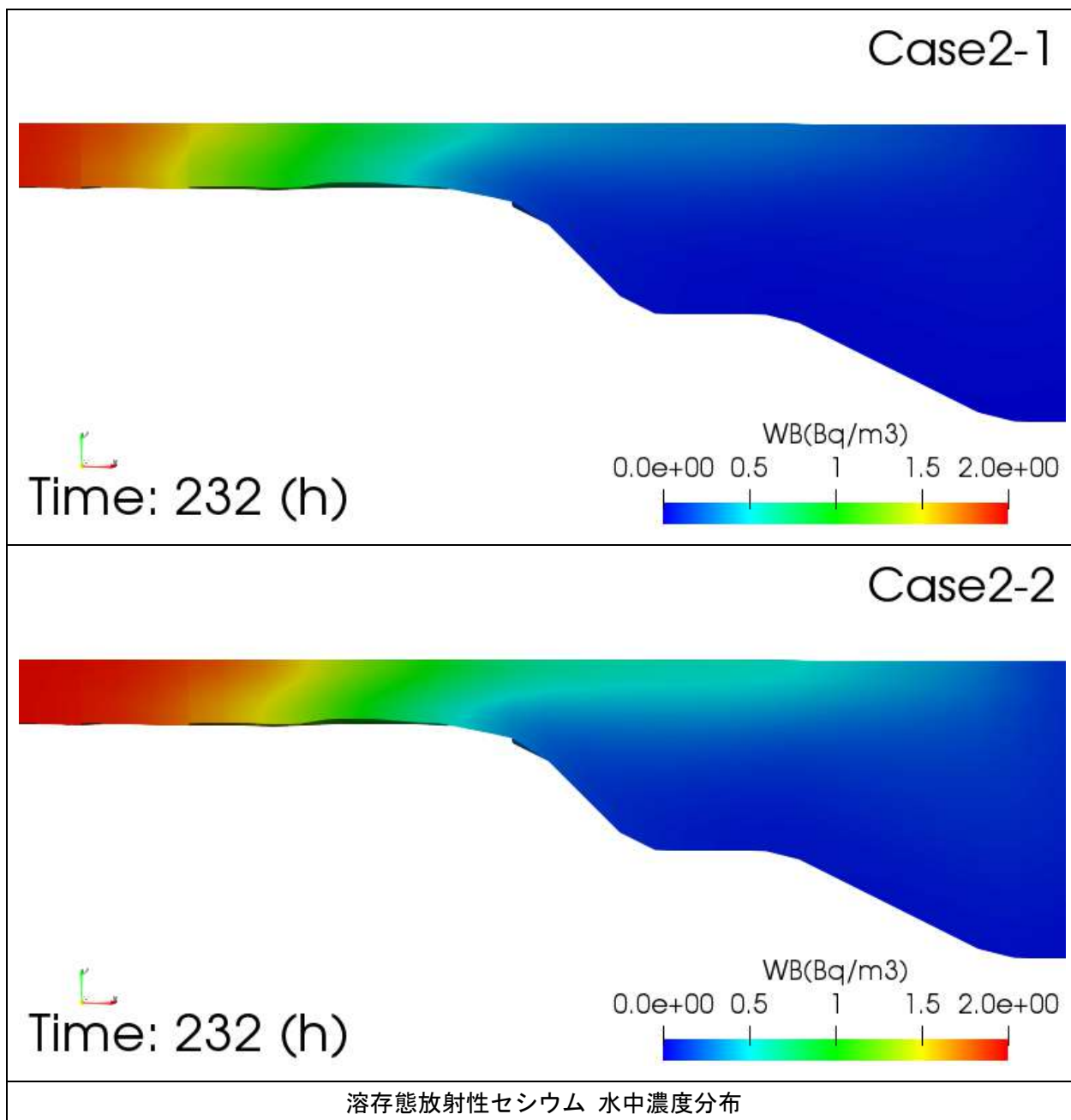


図 4-18 検証結果 Case2 放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時+1時間）（溶存態放射性セシウム・水中濃度分布）

4.1.4 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性

① 粘土に吸着した放射性セシウム濃度分布（水中）

▼満潮時-1時間

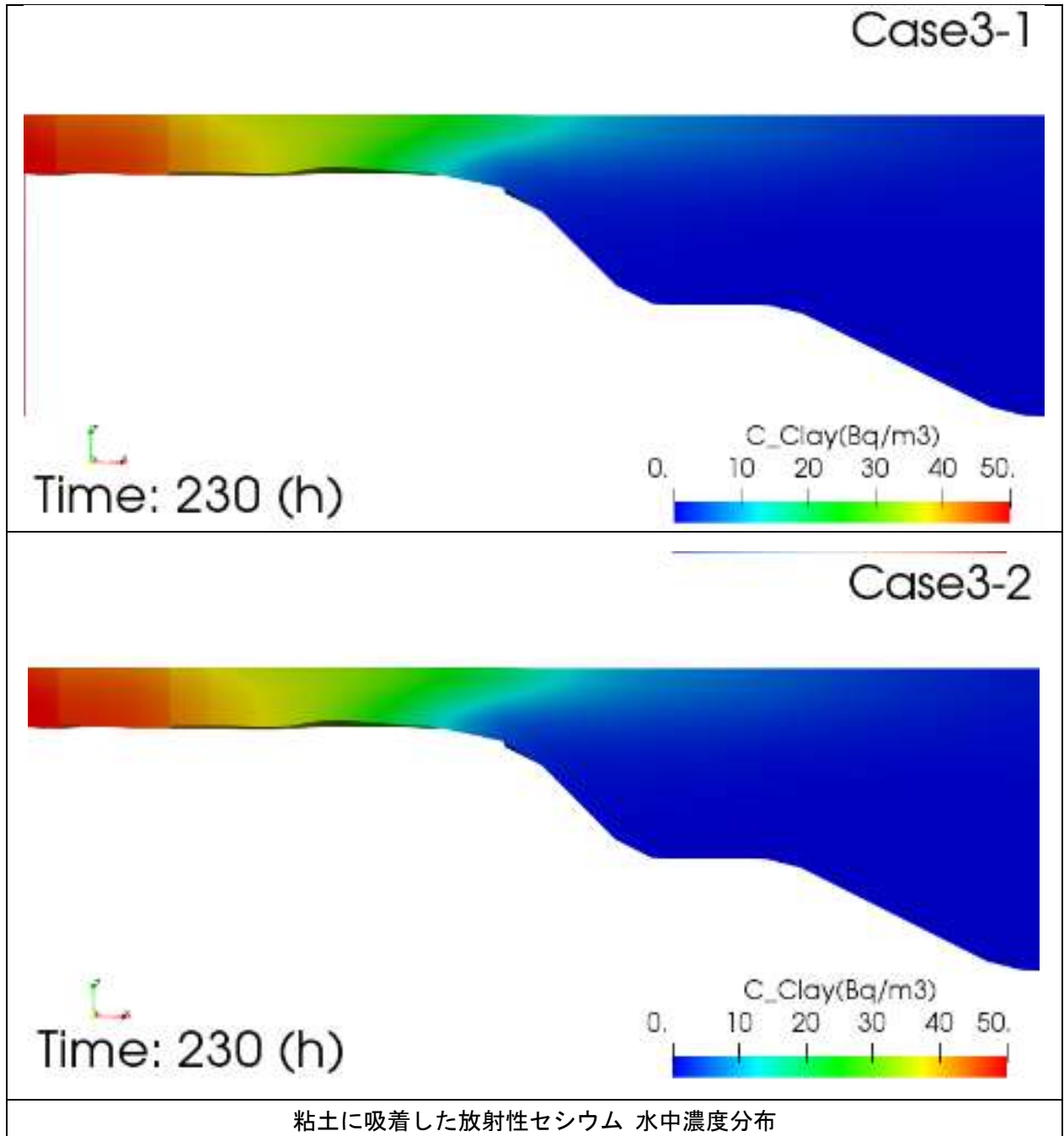


図 4-19 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時-1時間）（粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時

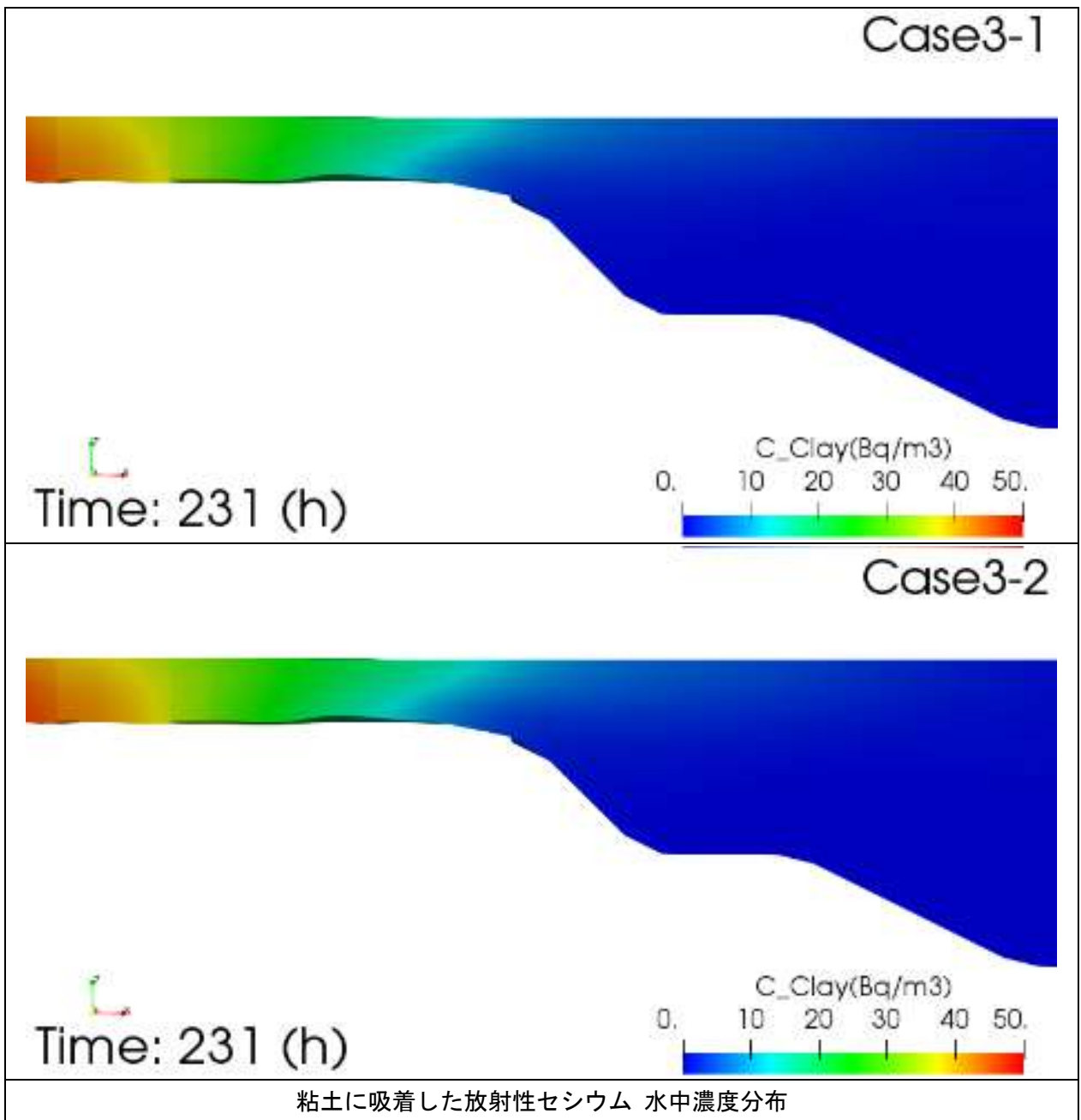
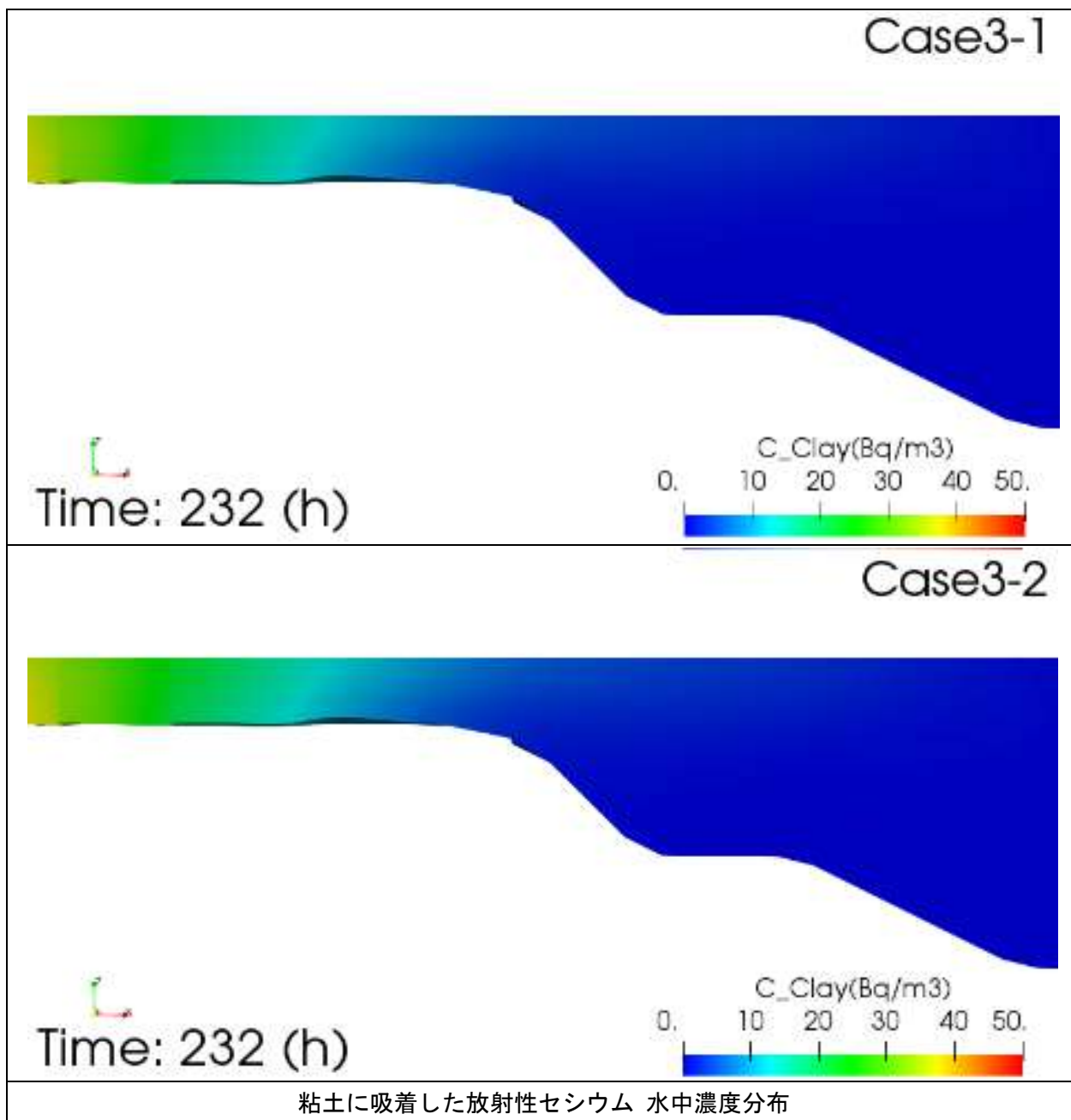


図 4-20 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時）（粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時+1時間



粘土に吸着した放射性セシウム 水中濃度分布

図 4-21 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (満潮時+1時間) (粘土に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

② 凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウム濃度分布（水中）

▼満潮時-1時間

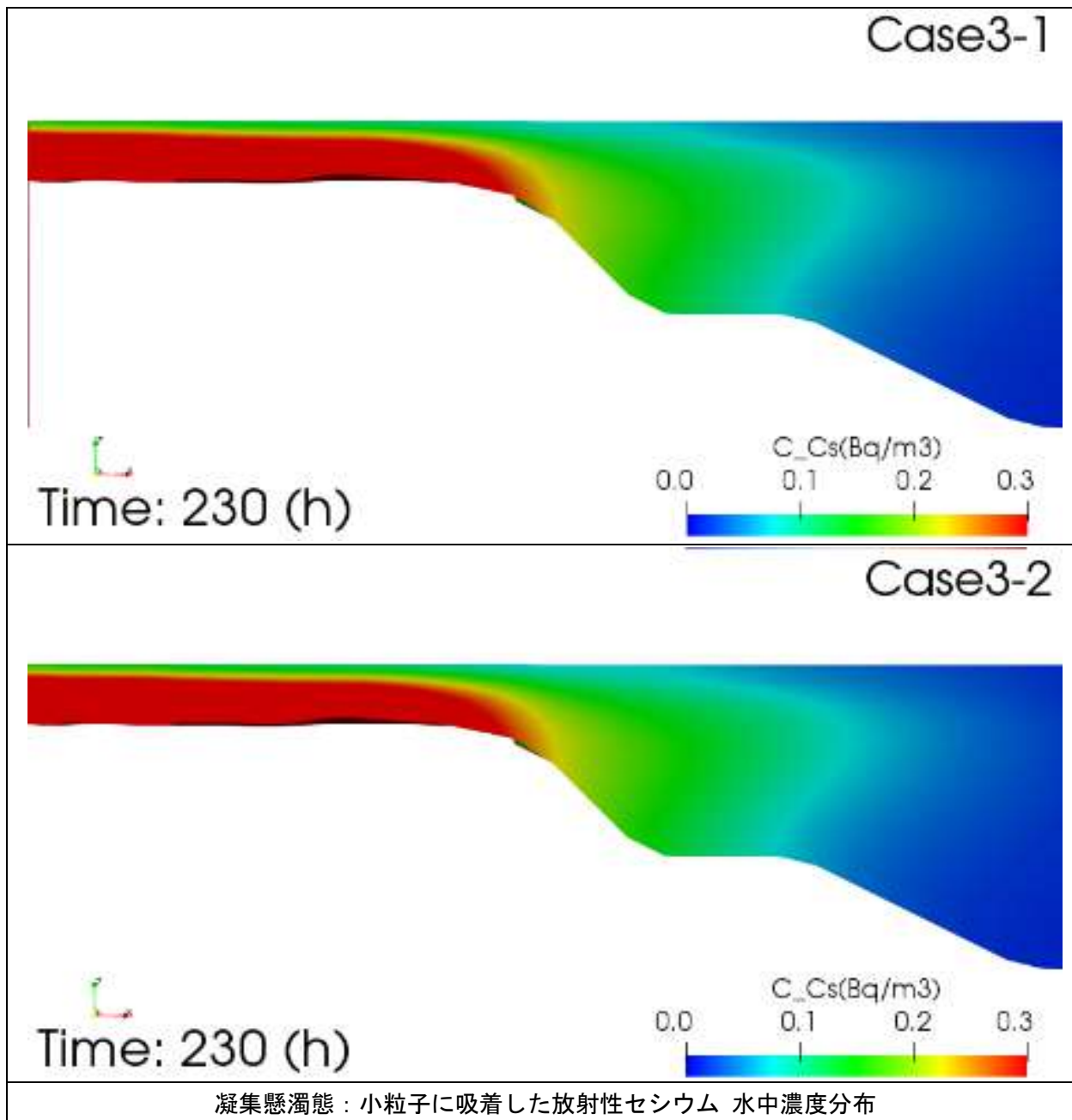


図 4-22 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時-1時間）（凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時

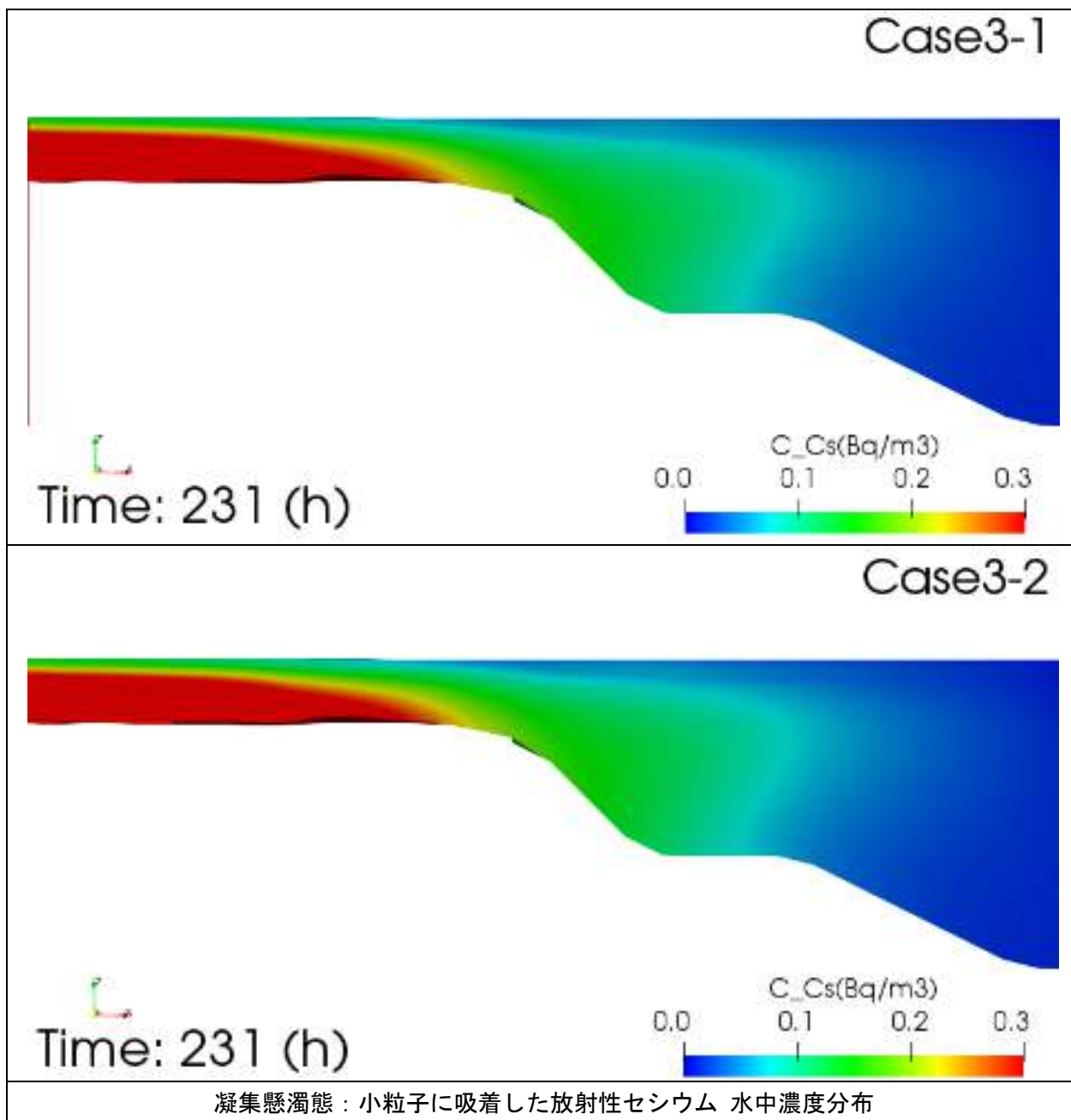


図 4-23 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時）（凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時+1時間

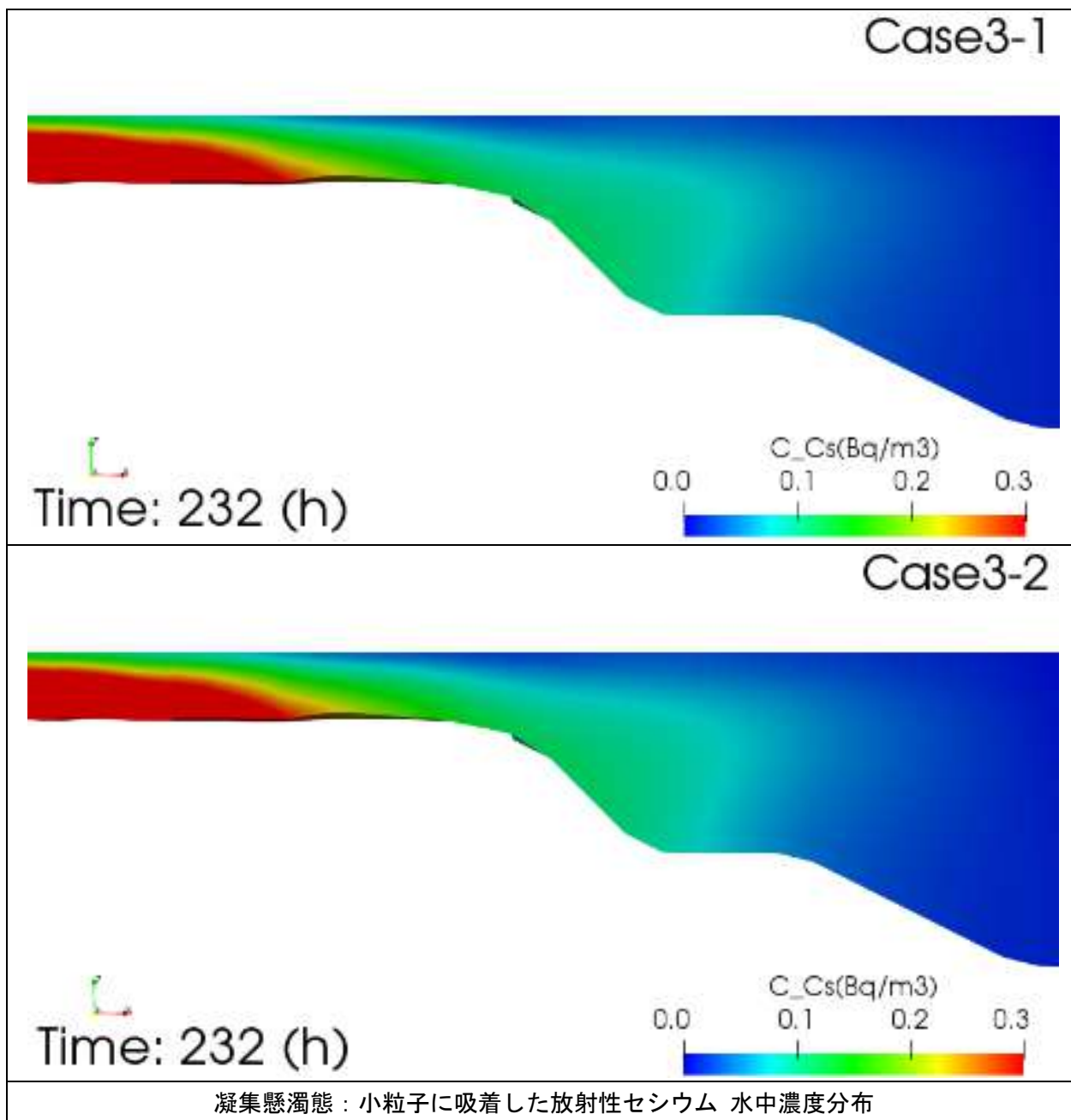


図 4-24 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (満潮時+1時間) (凝集懸濁態：小粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

③ 凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウム濃度分布（水中）

▼満潮時-1時間

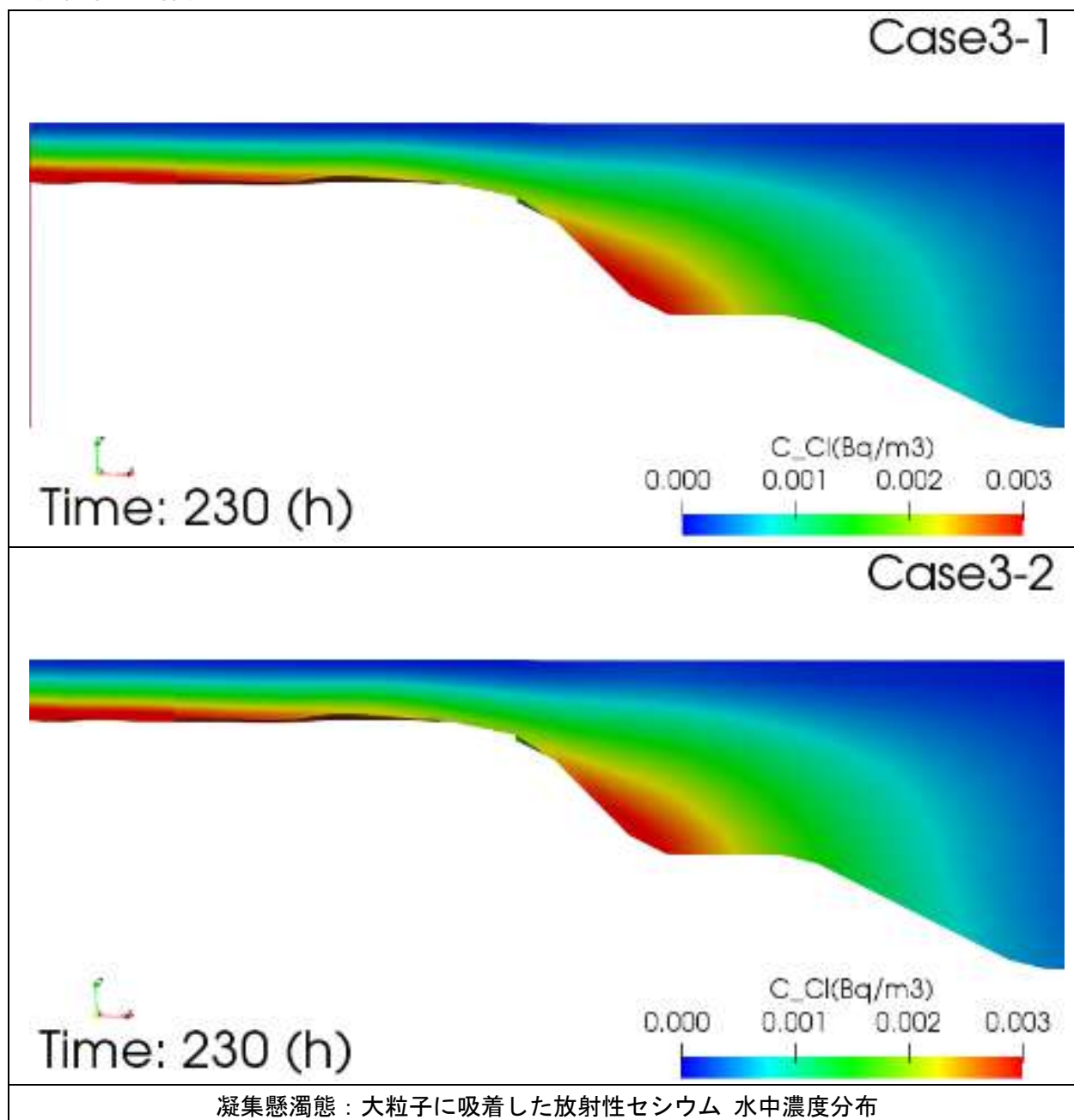


図 4-25 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時-1時間）（凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時

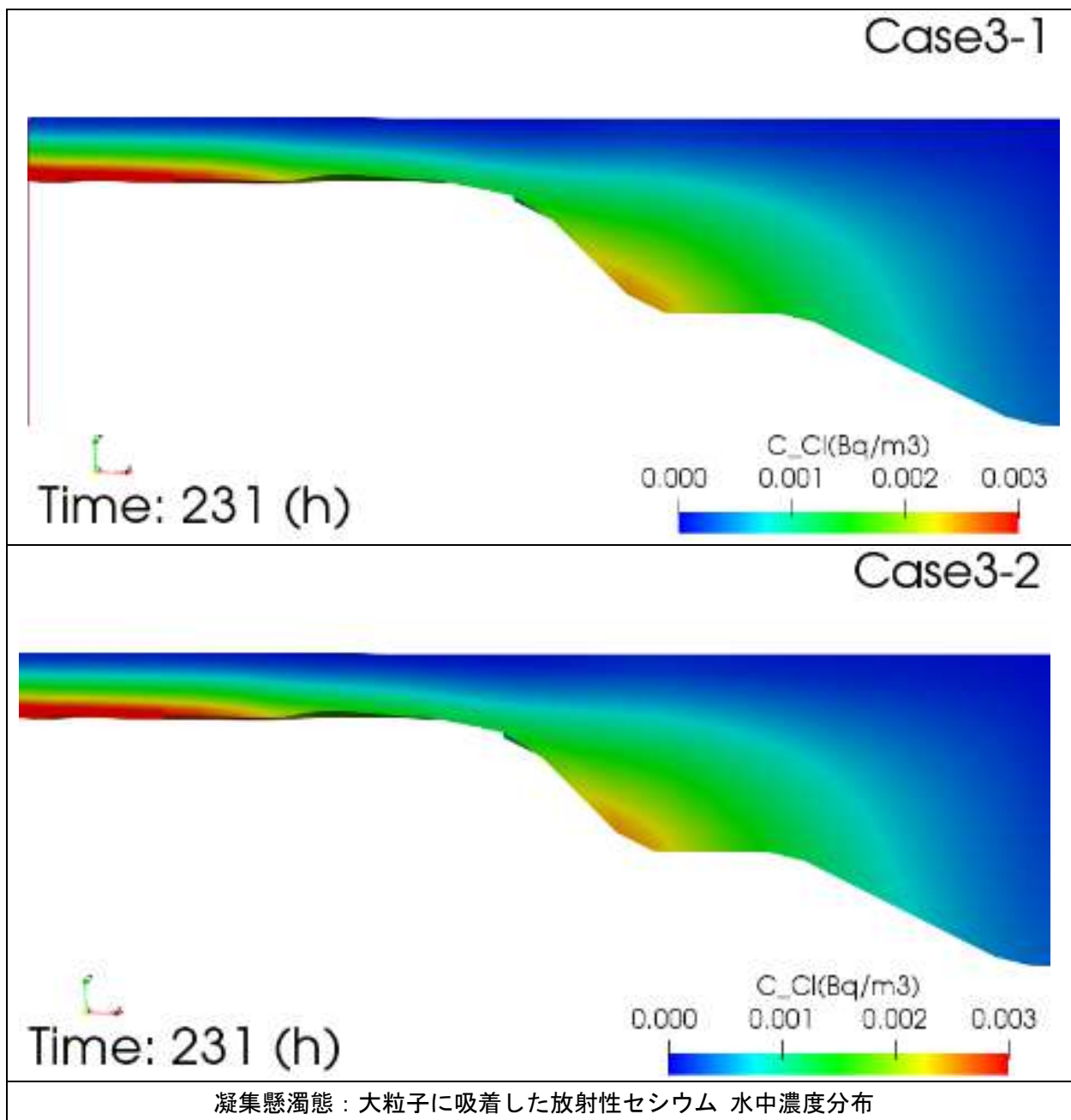


図 4-26 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時）（凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時+1時間

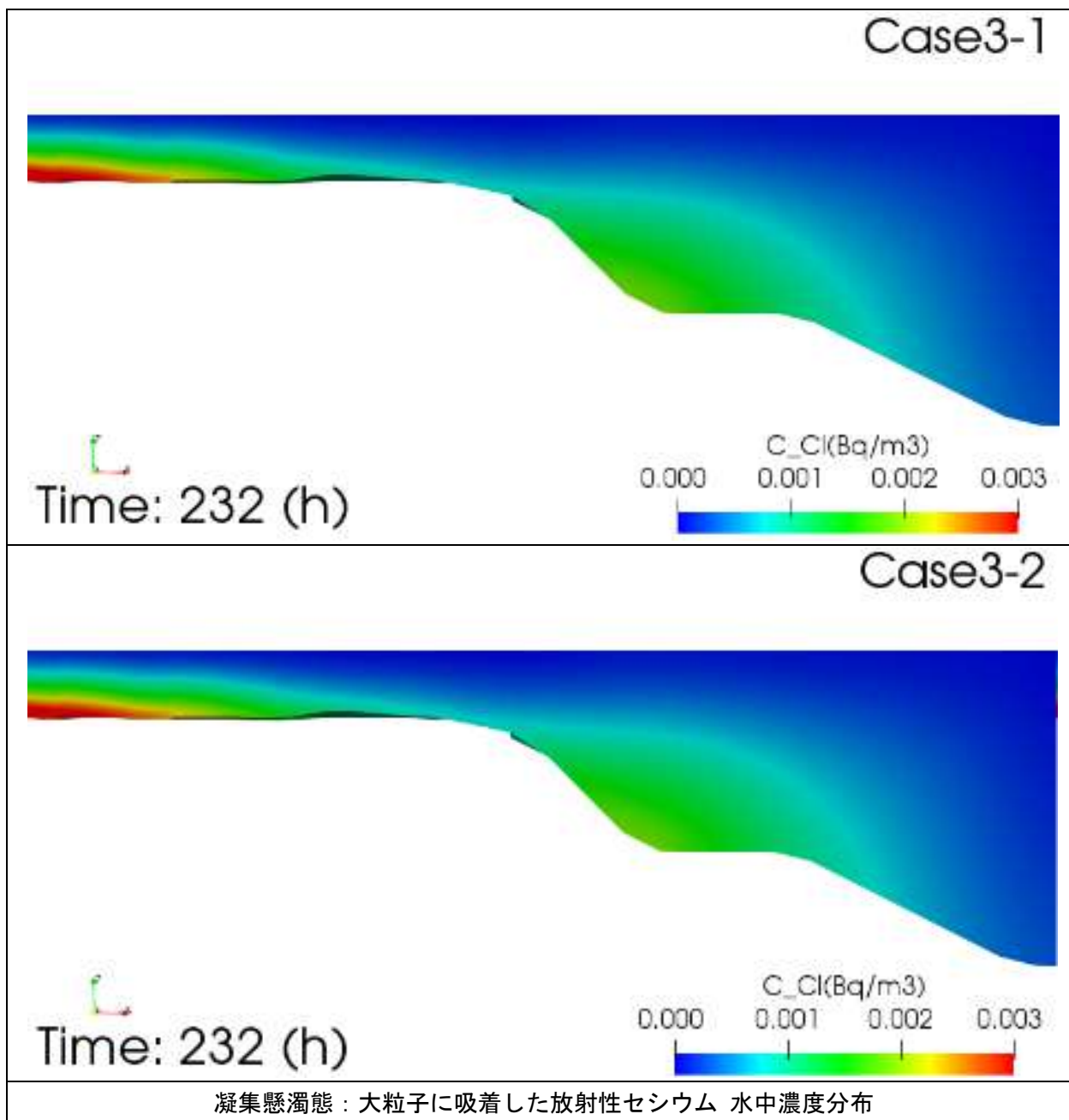


図 4-27 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性 (満潮時+1時間) (凝集懸濁態：大粒子に吸着した放射性セシウム・水中濃度分布)

④ 溶存態放射性セシウム濃度分布（水中）

▼満潮時-1時間

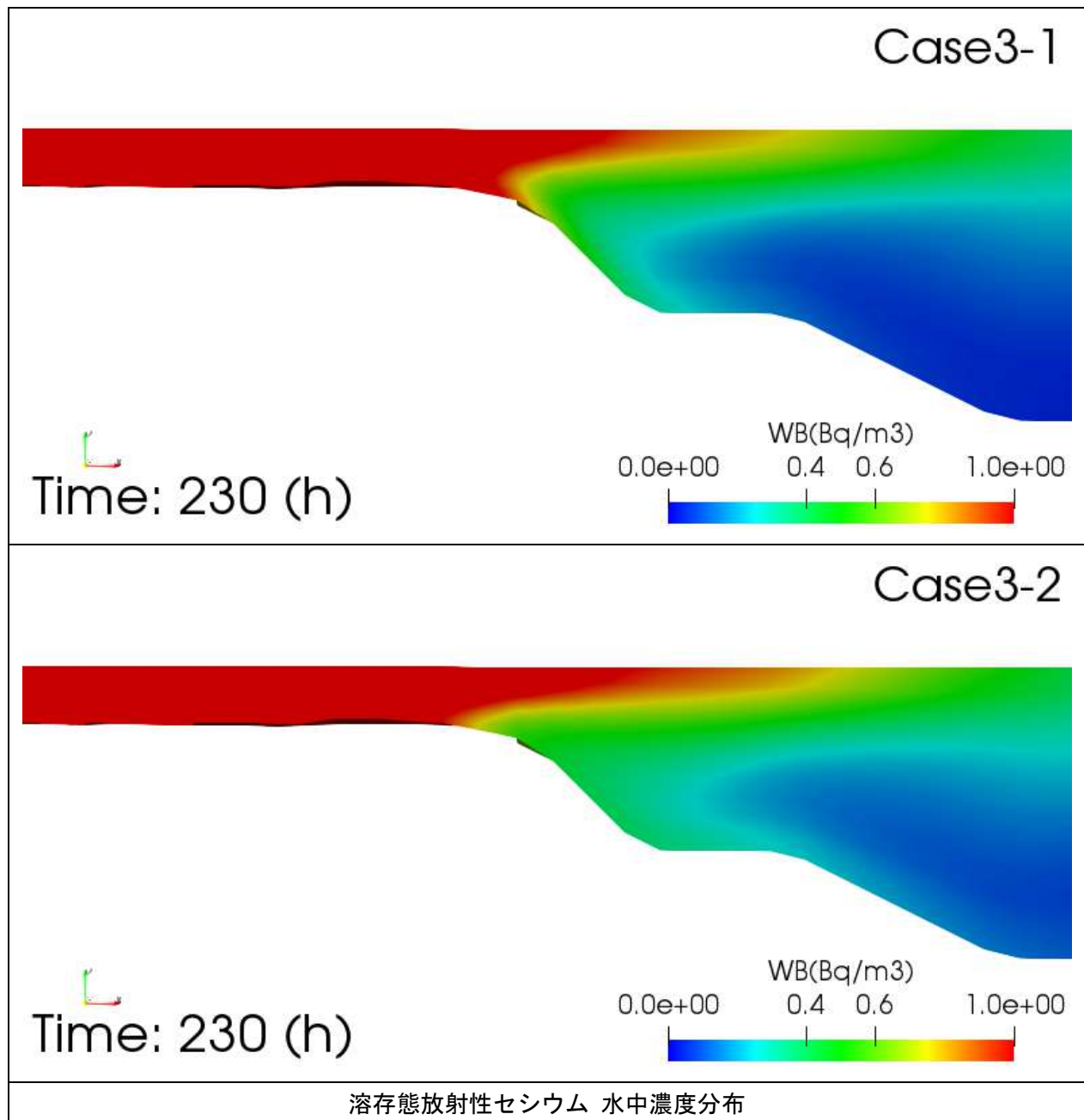


図 4-28 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時-1時間）（溶存態放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時

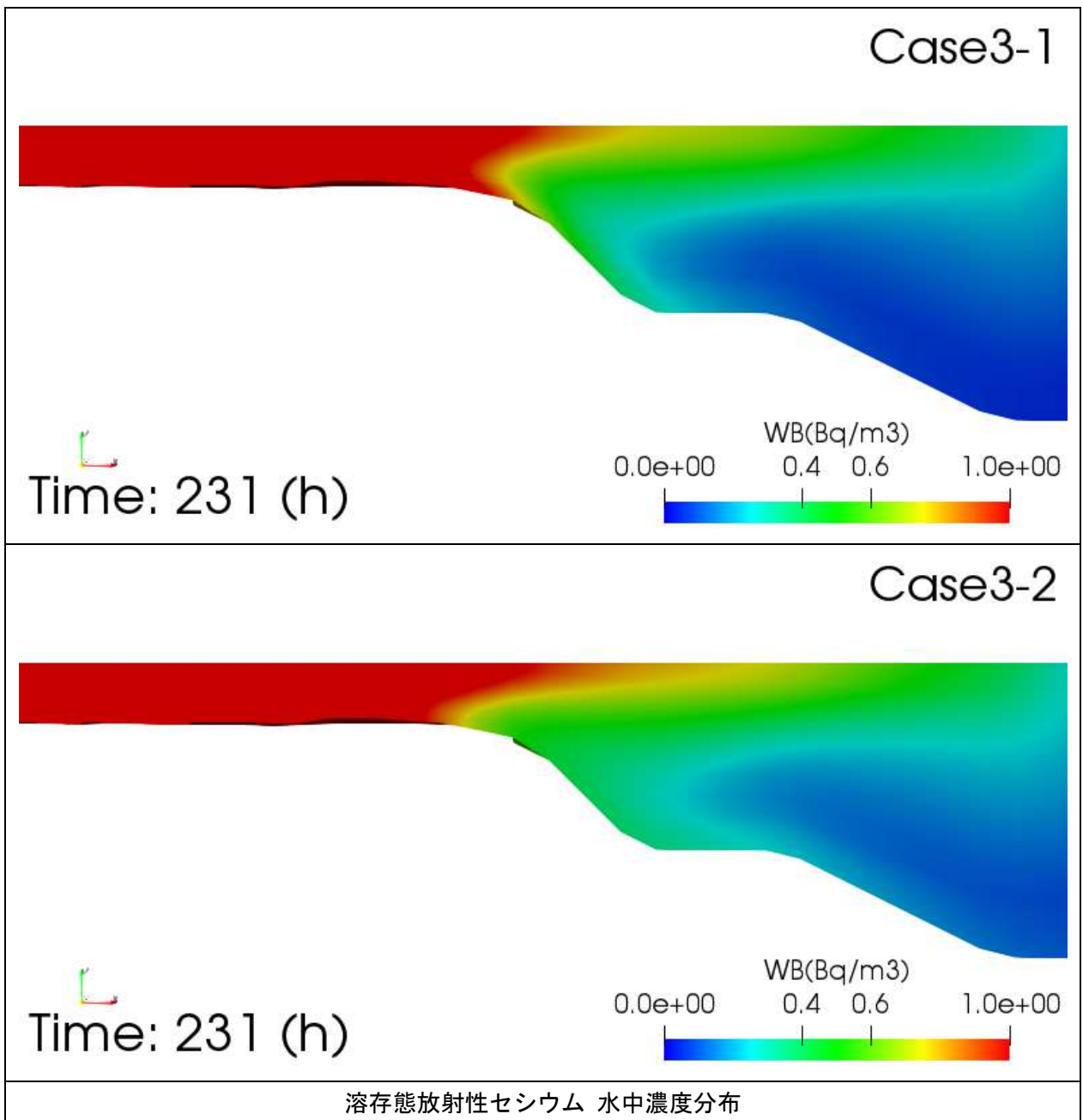


図 4-29 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時）（溶存態放射性セシウム・水中濃度分布）

▼満潮時+1時間

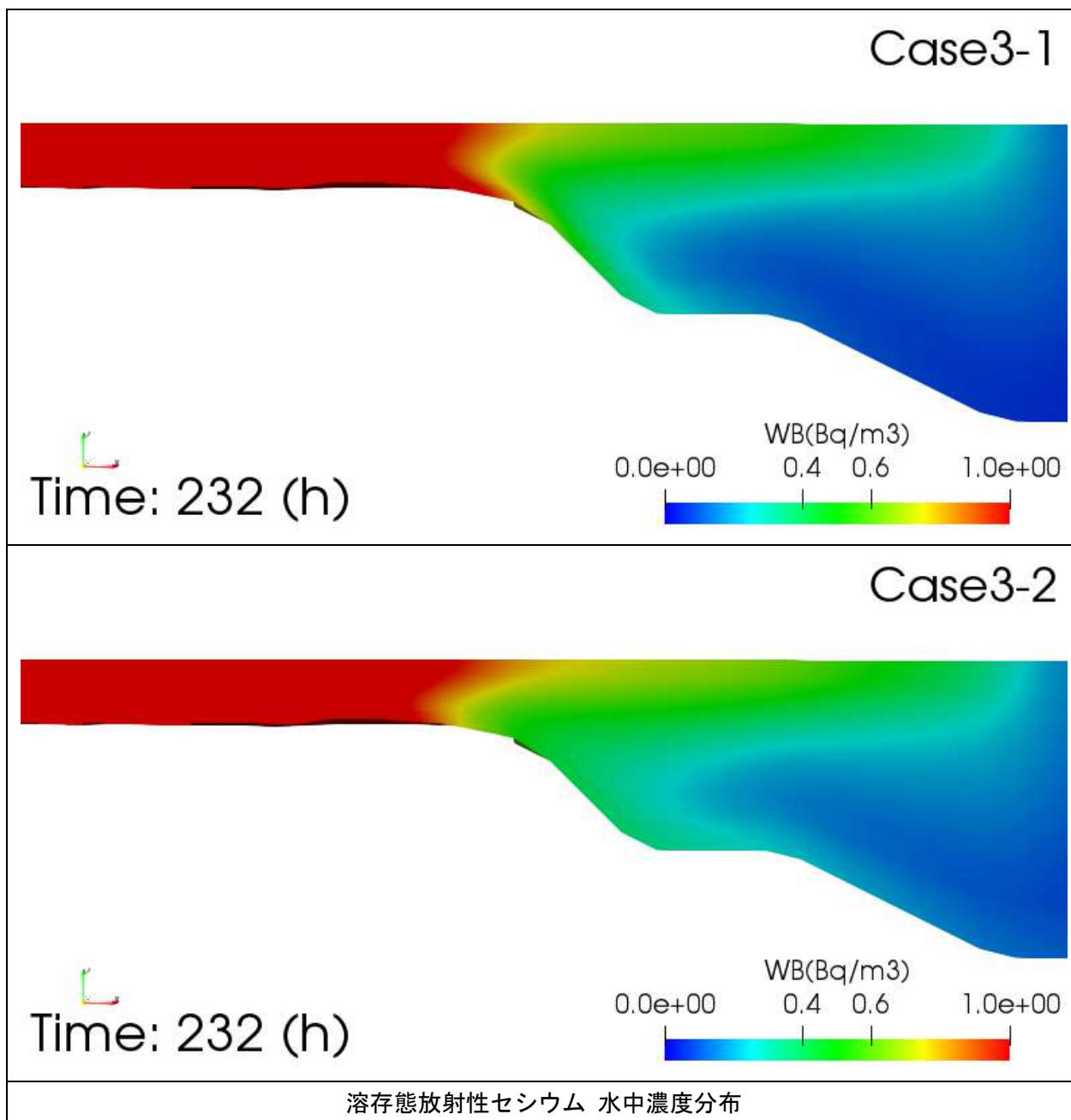


図 4-30 検証結果 Case3 凝集懸濁態および放射性セシウムの懸濁態からの脱離に関する塩分依存性（満潮時+1時間）（溶存態放射性セシウム・水中濃度分布）

参考文献

- [1-1] Sakuma S., Nakanishi T., Yoshimura K., Kurikami H., Nanba K., Zheleznyak M., “A modeling approach to estimate the ¹³⁷Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017”, 208–209, 106041 (2019)
- [1-2] Yamada S., Machida M., and Kurikami H., “Applications of Radiocesium Migration Models to Fukushima Environmental Issues: Numerical analysis of radiocesium transport in temperature-stratified reservoirs by 3D-Sea-SPEC”, Proceedings of SNA:MC2020, No.3299508 (2020)
秦野市、2012、秦野市地下水総合保全管理計画
- [1-3]SUNTORY、「地下水を見る試みーゲットフローズー」、
<https://www.suntory.co.jp/eco/forest/protect/getflows.html>、（参照 2021-03-02）
- [1-4]地圏環境テクノロジー、2015、平成26年度東京電力福島第一原子力発電所敷地内における核種移行解析の妥当性確認のための海水影響等を考慮した試解析 業務報告書
- [1-5]Mori, K., Tada, K., Tawara, Y., Ohno, K., Asami, M., Kosaka, K., & Tosaka, H. (2015). Integrated watershed modeling for simulation of spatiotemporal redistribution of post-fallout radionuclides: application in radiocesium fate and transport processes derived from the Fukushima accidents. *Environmental Modelling & Software*, 72, 126-146.
- [1-6]Sakuma, K., Malins, A., Funaki, H., Kurikami, H., Niizato, T., Nakanishi, T.,& Hosomi, M. (2018). Evaluation of sediment and ¹³⁷Cs redistribution in the Oginosawa River catchment near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using integrated watershed modeling. *Journal of environmental radioactivity*, 182, 44-51.

ArcSWAT

- [2-1]SWAT (Soil & Water Assessment Tool) , <https://swat.tamu.edu/>

GeoWEPP

- [2-2]GeoWEPP (The Geo-spatial interface for the Water Erosion Prediction Project),
<https://geowepp.geog.buffalo.edu/>
- [2-3]Zeleeke Gete, Thomas Winter, and Dennis Flanagan, BPCDGD: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP Using Observed Standard Weather Data Sets,
<https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/50201000/WEPP/bpcdgd.pdf>
- [2-4]A.D.Nicks, L.J.Lane and G.A. Gander, Chapter 2. WEATHER GENERATOR,
<https://forest.moscowfsl.wsu.edu/fosepp/docs/cligench2.pdf>

RADFLOW

- [2-5]JAEA, RADFLOW 簡易マニュアル (2021)
- [2-6]QGIS, <https://qgis.org/ja/site/>

3D-Sea-SPEC

[3-1] 灘岡和夫、吉野忠和、二瓶泰雄、沿岸海水流動数値計算法の高度化のための Dual- σ 座標系の提案、
土木学会論文集 No.656/II-52,183-192,2000.8

[3-2] 和田明、海洋環境水理学、丸善株式会社、2007、

第I部：物質拡散問題 7章：湾内における潮汐密度流モデル

第II部：温排水の環境影響評価 9章：海面と大気間の熱収支過程

別添1 貯留関数モデル（GIS を用いた汎用的な流出計算手法）

貯留関数モデル（SRM）は、雨量と流量を入力し、モデルパラメータを最適化する。従って、流域単位で最適化が必要となるため、雨量と流量のない流域への適用が困難という課題がある。しかし、最近、文献[1-1]により、ArcGIS を用いて、流域内の表層地質の抽出を行い、貯留関数モデルのパラメータを定める方法が提案されている。本手法を用いると、上記データ（雨量及び流量）のない河川流域に対しても、流量予測が可能になる等、優れた発展性が見込まれる。本事業では、この手法を広瀬川流域に適用し、その妥当性を調査した。

1.1 手法概要

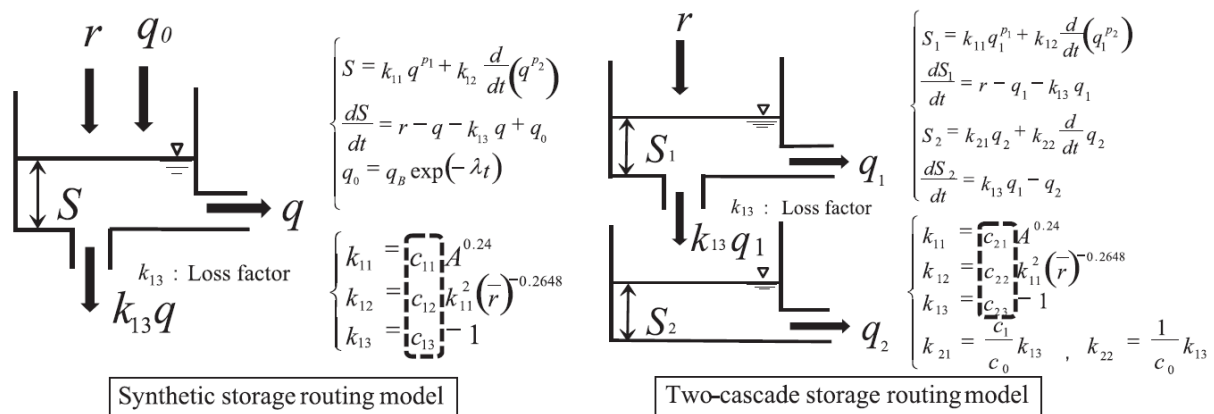
GIS を用いた汎用的な流出計算手法について、その手法概要を記す。概要は参考文献[1-1]から内容を一部抜粋する他、一部は要約した。

1.1.1 貯留関数モデル（SRM）による流出計算

文献[1-2]で紹介されている、貯留関数法モデル（SRM）として、1 段タンク型貯留関数法（以下、1 段法）、2 段タンク型貯留関数法（以下、2 段法）がある。1 段法と 2 段法の概略図を図 1-1 に示す。

貯留関数法はモデル構造が単純であるにも関わらず、流量の再現性が高く現在まで多くの適応例がある。特に 1 段・2 段二種類の貯留関数法は損失機構を考慮することで、事前に有効雨量の算出を必要としない客観性に優れたモデルとして現業の洪水予測システムなどの実務にも取り入れられている（文献[1-3]参照）。

SRM には①雨量から流量を計算する機能、また、②モデルパラメータを最適化する機能を持つ。後者の機能を用いて対象河川のモデルパラメータの最適化を行う。図 1-1 の c_{11}, c_{12}, c_{13} が 1 段法のパラメータ、 c_{21}, c_{22}, c_{23} が 2 段法のパラメータである。ここで、SRM における流出解析機能を用いて対象河川のモデルパラメータを最適化して得られたものを「最適パラメータ」と称する。



Where, s is storage (mm); r is observed rainfall (mm/h); q is observed runoff (mm/h); b is loss (mm/h); q_0 is base flow (mm/h); q_B is initial runoff (mm/h); k_{11} and k_{12} are storage parameters; k_{13} is a loss parameter; p_1 and p_2 are storage indices; λ is a damping factor; A is the catchment area (km²); \bar{r} is the mean rainfall intensity (mm/h); $c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{21}, c_{22}, c_{23}$ are the model parameters. T_c and λ are base flow separation parameters.

図 1-1 1 段タンク型貯留関数法・2 段タンク型貯留関数法の模式図（文献[1-1]から抜粋）

1.1.2 表層地質の面積率に基づくモデルパラメータ

文献[1-4]において虫明らは、全国的に出現頻度が高く流出特性に大きく寄与するとした地質6区分（第三紀火山岩類、第四紀火山岩類、花崗岩類、第三紀層、中生層、古生層）を調査した。モデルパラメータを設定するために、全流域面積に占める面積の比率を算出する。そのために、ArcGIS-SpatialAnalyst ツールを用いて基盤地図情報数値標高モデル（10m 間隔）より図 1-2 に示すように観測所の流域界を作成し、内部の表層地質情報を切り出した。地質情報（G05-54M）は地形分類、表層地質、地質の時代、岩石の硬さ、土壌が 1 km メッシュ毎にコード番号によって整備されている。表層地質と地質の時代コードより、表 1-1 に示すように表層地質を区分し面積率を算出した。1.1.3 の①で示す対象流域のモデルパラメータを最適化したものを目的変数、抽出した表層地質の面積率を説明変数として(1-1)～(1-3)で示した重回帰式を作成する。

$C_{ij} = \sum_{k=1}^6 a_k g_k + b_{ij} \quad (1-1)$	(1-1)
$T_c = \sum_{k=1}^6 a_k g_k + b_{ij} \quad (1-2)$	(1-2)
$\lambda = \sum_{k=1}^6 a_k g_k + b_{ij} \quad (1-3)$	(1-3)

ここで、 C_{ij} ：各モデルパラメータ、 $a_1 \sim a_6$ ：各係数、 $g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6$ ：各々第三紀火山岩類、第四紀火山岩類、花崗岩類、第三紀層、中生層、古生層の面積率（0～1）、 b_{ij} ：切片となる。式の $g_1 \sim g_6$ に任意の地点の流域界内の各表層地質の面積率を入力することで、モデルパラメータを求めることができる。これを、「地質設定パラメータ」という。

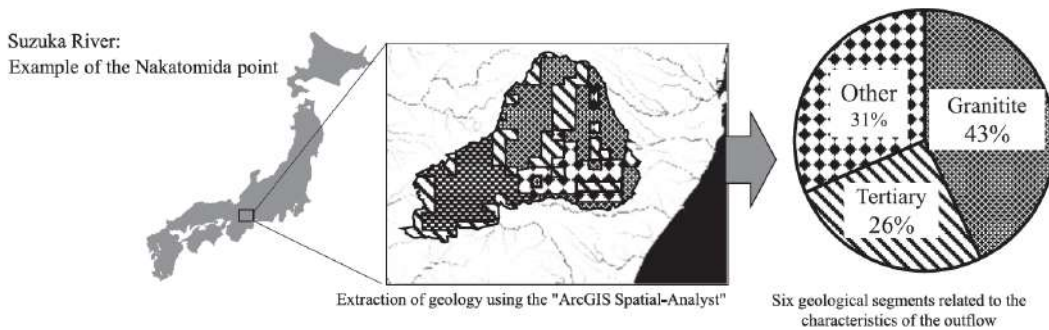


図 1-2 地質の抽出のイメージ図（文献[1-1]から抜粋）

表 1-1 表層地質の分類（文献[1-1]から抜粋）

Six geological segments related to the characteristics of the outflow	Age	Character String
Tertiary volcanic rock	3, 4, 9	41 - 55
Quaternary volcanic rock	5, 6	41 - 55
Granite	None	62
Tertiary rock	3, 4, 9	10 - 40
Mesozoic strata	2, 7, 8	10 - 40
Paleozoic strata	1	10 - 40

1.1.3 貯留関数モデル (SRM) に対する重回帰式の作成

① 対象流域と解析データ

今回対象とした河川は、図 1-3 に示す日本全国の 25 河川である。対象とする洪水時の雨量および流量は、水文水質データベース（国土交通省、2014、<http://www1.river.go.jp/>）から流域界内のデータを抽出した（表 1-2 参照）。ただし、山間部は観測地点が少ないことから、ダム管理所で取得されている気象データも用いた（国土交通省、2014、<https://www.river.go.jp/portal/#80>）。収集期間は 1999 年から 2010 年の 11 年間のうち、融雪の影響が少ない 7 月から 9 月までの 3 ヶ月間とし、時間単位あたりのデータを対象にした。



図 1-3 対象流域（文献[1-1]から抜粋）

表 1-2 使用洪水事例（文献[1-1]から抜粋）

Region	Rivers	Rain-gauge		Flood event	Month/day	Basin (km ²)	Total flow (m ³)	Basin area ratio flow quantity (m ³ /km ²)
		station						
Hokkaido	Ishikari	Nishiikku		2001	9/10~9/14	149	3783	25.4
	Shokotsu	Takinoue		2000	9/2~9/6	233	10295	44.2
Tohoku	Takase	Uwano		2006	9/27~9/30	344	5664	16.5
	Natori	Yumoto		2000	7/8~7/10	130	1677	12.9
	Omono	Kawai		2011	8/17~8/20	145	1882	13
	Kitakami	Arao		1999	9/15~9/18	405	6655	16.4
Hokuriku	Ara	Oguni		2004	8/17~8/19	287	3224	11.2
	Takehasi	Haneda		2011	7/4~7/7	167	1282	7.7
Chubu	Toyo	Ishida		2010	9/27~9/30	545	7675	14.1
	Shounai	Toki		2010	9/27~9/30	285	3473	12.2
	Suzuka	Nakatomida		2009	9/7~9/10	208	4351	20.9
	Kano	Tokura		2011	6/12~6/15	568	9448	16.6
Kinki	Kita	Takatsuka		2005	7/3~7/7	202	3483	17.2
Chugoku	Tenjin	Koda		2002	9/7~9/10	464	4867	10.5
	Saba	Manao		2004	9/7~9/11	403.9	8405	20.8
Shikoku	Doki	farugamebasl		2006	7/20~7/23	126.5	2943	23.3
	Monobe	Fukabuchi		2002	8/9~8/14	468	24800	53
	Shigenobu	Yuwatari		2011	9/2~9/5	105.4	6423	60.9
	Kimotsuki	Matase		2005	9/4~9/9	450	58715	130.5
Kyushu	Kimotsuki	Houei		2004	8/29~9/1	120	5076	42.3
	Omaru	Omaruohashi		2005	9/3~9/7	433	139537	322.3
	Banjo	Banjobashi		2002	7/25~7/29	278	19811	71.3
	Onga	Soeda		2009	7/29~7/22	76	6178	81.3
	Yabe	Funagoya		2009	7/24~7/29	460	42858	93.2
	Oyodo	Arashida		2008	9/18~9/21	381	10897	28.6

② 重回帰式

収集した洪水事例について（1.1.3の①参照）、求めた最適パラメータを表 1-4 に示す。一方で、表 1-3 のように表層地質の面積率を算定した。最適パラメータを目的変数、表層地質の面積率を説明変数として地質設定パラメータを求める重回帰式を作成した。結果は(1-4)~(1-11)のようになる。

$c_{11} = 15.287 + 0.0432 * g_1 + 2.061 * g_2 - 9.217 * g_3 - 2.286 * g_4 - 4.698 * g_5 - 0.162 * g_6$	(1-4)
$c_{12} = 0.083 - 0.016 * g_1 - 0.006 * g_2 - 0.008 * g_3 - 0.059 * g_4 + 0.063 * g_5 - 0.055 * g_6$	(1-5)
$c_{13} = 1.733 + 0.614 * g_1 - 0.116 * g_2 + 1.363 * g_3 - 0.094 * g_4 - 0.547 * g_5 - 0.222 * g_6$	(1-6)
$c_{21} = 8.759 + 1.395 * g_1 + 3.39 * g_2 - 1.361 * g_3 - 0.108 * g_4 + 0.248 * g_5 - 0.790 * g_6$	(1-7)
$c_{22} = 0.287 - 0.089 * g_1 + 0.06 * g_2 - 0.121 * g_3 + 0.054 * g_4 - 0.049 * g_5 + 0.245 * g_6$	(1-8)
$c_{23} = 2.636 + 1.009 * g_1 + 0.301 * g_2 + 0.468 * g_3 - 0.02 * g_4 - 1.563 * g_5 + 0.515 * g_6$	(1-9)
$\lambda = 0.008 + 0.013 * g_1 + 0.008 * g_2 + 0.008 * g_3 + 0.021 * g_4 + 0.002 * g_5 + 0.021 * g_6$	(1-10)
$T_c = 77.533 - 31.948 * g_1 - 5.817 * g_2 - 12.178 * g_3 - 37.517 * g_4 - 12.939 * g_5 - 34.021 * g_6$	(1-11)

ここで、 g_1 、 g_2 、 g_3 、 g_4 、 g_5 、 g_6 ：各々第三紀火山岩類、第四紀火山岩類、花崗岩類、第三紀層、中生層、古生層の面積率（0~1）である。これらの式を用いて、それぞれの流域ごとにモデルパラメータを算定した結果を表 1-5 に示す。ここに示すように最適パラメータと地質設定パラメータの間には、ある程度の相関が見られる。

表 1-3 各流域における地質の面積率（文献[1-1]から抜粋）

Rivers	Tertiary volcanic rock	Quaternary volcanic rock	Granite	Tertiary rock	Mesozoic strata	Paleozoic strata	Other
Ishikari	0.00	0.07	0.01	0.02	0.01	0.00	0.90
Shokotsu	0.02	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
Takase	0.29	0.48	0.00	0.10	0.00	0.00	0.13
Natori	0.40	0.31	0.00	0.23	0.00	0.00	0.06
Omono	0.65	0.08	0.23	0.00	0.00	0.00	0.03
Kitakami	0.58	0.02	0.07	0.08	0.00	0.00	0.25
Ara	0.39	0.00	0.07	0.52	0.00	0.00	0.02
Takehasi	0.90	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.09
Toyo	0.00	0.00	0.20	0.09	0.00	0.00	0.71
Shounai	0.00	0.00	0.30	0.14	0.00	0.00	0.56
Suzuka	0.00	0.00	0.42	0.25	0.00	0.00	0.33
Kano	0.14	0.19	0.00	0.03	0.00	0.00	0.63
Kita	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.88	0.12
Tenjin	0.01	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.58
Saba	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.05	0.76
Doki	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.92
Monobe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.41	0.12
Shigenobu	0.31	0.00	0.00	0.16	0.47	0.00	0.07
Kimotsuki-Matase	0.05	0.54	0.14	0.06	0.08	0.00	0.12
Kimotsuki-Houei	0.00	0.60	0.05	0.00	0.29	0.00	0.05
Omaru	0.00	0.00	0.00	0.53	0.30	0.00	0.16
Banjo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.32	0.05
Onga	0.43	0.00	0.30	0.03	0.01	0.00	0.23
Yabe	0.40	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.59
Oyodo	0.00	0.00	0.00	0.82	0.03	0.00	0.15
Average	0.18	0.12	0.10	0.12	0.09	0.07	0.31

表 1-4 各流域の最適パラメータ（文献[1-1]から抜粋）

River	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{21}	c_{22}	c_{23}	T_c	λ
Ishikari	20.659	0.041	2.056	10.761	0.345	3.723	95.4	0.007
Shokotsu	13.146	0.055	1.063	9.467	0.234	1.795	65.9	0.013
Takase	14.542	0.139	2.035	8.513	0.593	3.830	68.836	0.019
Natori	14.351	0.071	2.251	10.596	0.232	3.47	60.768	0.034
Omono	12.635	0.057	2.768	7.471	0.374	4.108	57.549	0.022
Kitakami	20.569	0.044	1.722	12.687	0.207	3.365	49.6	0.016
Ara	13.088	0.062	2.810	9.043	0.244	4.067	59.378	0.044
Takehasi	17.631	0.034	2.247	13.72	0.071	3.589	57.572	0.009
Toyo	8.12	0.145	2.558	5.875	0.371	3.863	60.268	0.015
Shounai	8.872	0.038	1.633	6.631	0.101	2.248	57.29	0.012
Suzuka	12.721	0.062	2.261	9.182	0.27	3.44	59.91	0.022
Kano	10.167	0.066	1.978	7.28	0.147	2.587	61.2	0.012
Kita	13.307	0.042	1.626	6.89	0.659	3.114	38.4	0.024
Tenjin	12.99	0.112	3.07	8.803	0.304	2.499	105.60	0.007
Saba	15.753	0.044	1.672	11.718	0.104	2.96	69.60	0.017
Doki	16.918	0.083	1.761	10.251	0.494	2.824	65.80	0.011
Monobe	17.981	0.049	1.306	10.83	0.117	2.139	74.70	0.023
Shigenobu	8.444	0.129	1.938	6.044	0.483	2.506	25.37	0.019
Kimotsuki-Matase	14.673	0.118	1.482	9.421	0.358	2.1	68.80	0.011
Kimotsuki-Houei	21.873	0.039	2.203	16.429	0.168	3.446	68.17	0.010
Omaru	7.949	0.057	0.855	5.29	0.64	1.16	68.50	0.018
Banjo	10.365	0.141	1.262	8.374	0.249	1.693	62.10	0.014
Onga	10.469	0.042	1.413	8.271	0.089	1.711	35.9	0.004
Yabe	12.501	0.134	1.752	5.712	0.167	1.356	70.02	0.012
Oyodo	17.97	0.017	1.539	11.93	0.079	2.226	36.0	0.009

Note: c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{21} , c_{22} and c_{23} are the model parameters.

T_c is a base flow separation parameter; λ is a damping factor.

表 1-5 各流域の地質設定パラメータ（文献[1-1]から抜粋）

River	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{21}	c_{22}	c_{23}	T_c	λ
Ishikari	15.250	0.081	1.731	8.968	0.290	2.646	76.147	0.009
Shokotsu	16.808	0.078	1.663	11.294	0.329	2.883	72.452	0.014
Takase	16.067	0.069	1.848	10.790	0.295	3.075	61.684	0.017
Natori	15.422	0.061	1.921	10.342	0.282	3.127	54.442	0.020
Omono	13.332	0.070	2.443	9.623	0.205	3.428	53.359	0.019
Kitakami	14.512	0.068	2.175	9.519	0.232	3.256	55.161	0.018
Ara	13.452	0.045	2.024	9.150	0.271	3.055	44.743	0.024
Kakehasi	15.298	0.067	2.283	10.009	0.207	3.542	48.405	0.020
Toyo	13.233	0.076	1.998	8.476	0.267	2.728	71.730	0.011
Shounai	12.203	0.072	2.127	8.336	0.258	2.773	68.515	0.013
Suzuka	10.868	0.064	2.279	8.163	0.250	2.827	63.104	0.016
Kano	15.614	0.077	1.796	9.604	0.287	2.838	70.636	0.012
Kita	15.068	0.035	1.550	8.056	0.500	3.091	47.664	0.026
Tenjin	11.545	0.079	2.295	8.225	0.236	2.840	72.164	0.011
Saba	13.603	0.078	1.967	8.472	0.278	2.745	73.507	0.010
Doki	14.519	0.082	1.847	8.645	0.277	2.675	76.519	0.008
Monobe	13.005	0.089	1.384	8.550	0.365	2.112	57.396	0.017
Shigenobu	12.752	0.097	1.654	9.292	0.244	2.218	55.720	0.016
Kimotsuki-Matase	14.550	0.079	1.848	10.481	0.297	2.789	67.707	0.015
Kimotsuki-Houei	14.672	0.097	1.576	10.802	0.302	2.387	69.612	0.014
Omaru	12.631	0.070	1.525	8.777	0.300	2.160	53.692	0.020
Banjo	12.297	0.104	1.319	8.658	0.335	1.826	58.426	0.016
Onga	12.418	0.072	2.392	8.944	0.214	3.187	58.864	0.016
Yabe	15.294	0.076	1.975	9.323	0.252	3.036	64.585	0.013
Oyodo	13.282	0.036	1.640	8.691	0.329	2.576	46.336	0.025

Note: c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{21} , c_{22} and c_{23} are the model parameters.

T_c is a base flow separation parameter; λ is a damping factor.

1.2 広瀬川への適用

1.2.1 地質設定パラメータの算定

ここでは、対象流域を広瀬川とした場合について、文献[1-1]の GIS を用いた汎用的な流出計算手法にもとづき、貯留関数法モデルの地質設定パラメータを算定する。まず、ArcGIS ツールを使用して図 1-4 と図 1-5 に示したように、広瀬川の流域界を抽出する。



図 1-4 広瀬川の流域

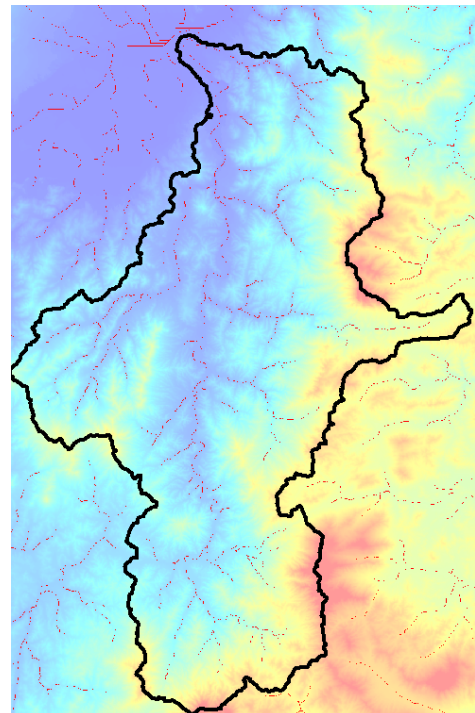


図 1-5 広瀬川の流域界(ArcGIS)

次に、図 1-6 と図 1-7 に示したように、ArcGIS を用いて、広瀬川流域界と地質情報マップのオーバーレイデータを作成して、表 1-1 の分類テーブルに従い広瀬川流域界の表層地質の面積率を算定した。面積率の結果を表 1-6 に示す。

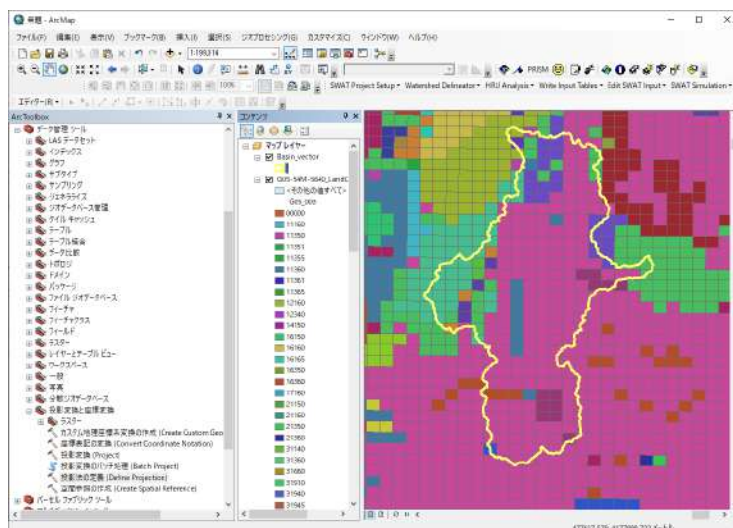


図 1-6 地質情報 G05-54M(ArcGIS)

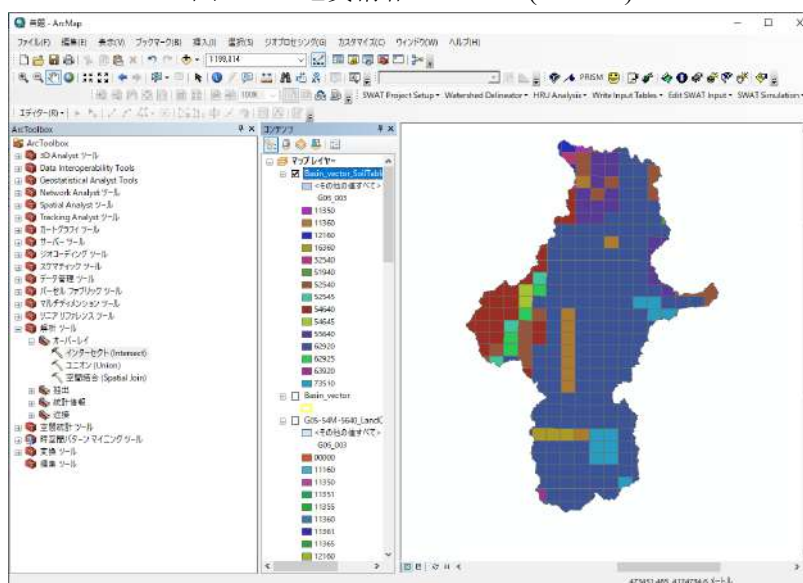


図 1-7 広瀬川流域界と地質情報のオーバーレイ(ArcGIS)

表 1-6 広瀬川の表層地質の面積率

表層地質	変数	Area	Ratio
Tertiary volcanic rock	g_1	5.509E+07	0.222
Quaternary volcanic rock	g_2	0.000E+00	0.000
Granite	g_3	1.662E+08	0.669
Tertiary rock	g_4	8.322E+05	0.003
Mesozoic strata	g_5	0.000E+00	0.000

Paleozoic strata	g_6	0.000E+00	0.000
Others		2.639E+07	0.106
SUM		2485E+08	1.000

このとき、1.1.3 の②で導入した重回帰式により、広瀬川に対する地質設定パラメータが計算できる。その結果を表 1-7 に示す。

表 1-7 広瀬川の地質設定パラメータ

c_{11}	9.12356
c_{12}	0.07392
c_{13}	2.78087
c_{21}	8.15786
c_{22}	0.18645
c_{23}	3.17303
λ	62.18091
T_c	0.01630

1.2.2 試解析

① 期間：1週間

広瀬川流域に期間 1 週間（2015/09/17～09/23）の降雨イベントを与えたときの（図 1-8 参照）、1 段タンク型貯留関数モデルで推定したハイドログラフの精度を観測結果と比べて評価する。ただし、計算に使用するモデルパラメータのパターンは次の 2 ケースとする。

ケース：SRM(optimize)

第 3 章の 3.2.3 「貯留関数モデル」で導入した最小二乗法を使用したモデル最適化機能により、観測データからモデルパラメータを最適化する。ここでは、最適化後のモデル定数として、 $c_{11} = 27.984$, $c_{12} = 0.004$, $c_{13} = 2.786$ を設定した。

ケース：SRM(GIS)

本付録で説明した、GIS を用いた汎用的な流出計算手法により推定した地質設定パラメータを設定した。ここでは、表 1-7 の値を設定した。

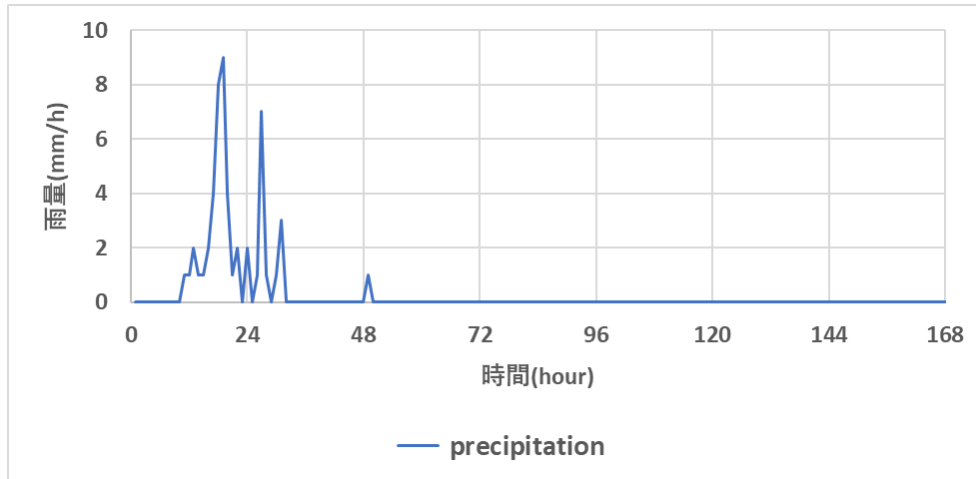


図 1-8 降雨量データ（広瀬川、2015/09/01～2015/09/30）

計算結果として、観測値との誤差評価関数の値を表 1-8 に示した。誤差評価関数の RSE および NSE の定義については、第 3 章の 3.2.2 「誤差評価の方法」を参照すること。また、ハイドログラフの比較結果を図 1-9 に示した。GIS を用いて地質設定パラメータを設定したケース SRM(GIS)の推定値は、観測値と大きく異なる結果となった。

表 1-8 誤差評価（降雨イベント：1 週間）

誤差	SRM(optimize)	SRM(GIS)
RSE	0.0997	1.395
NSE	0.9003	-0.395

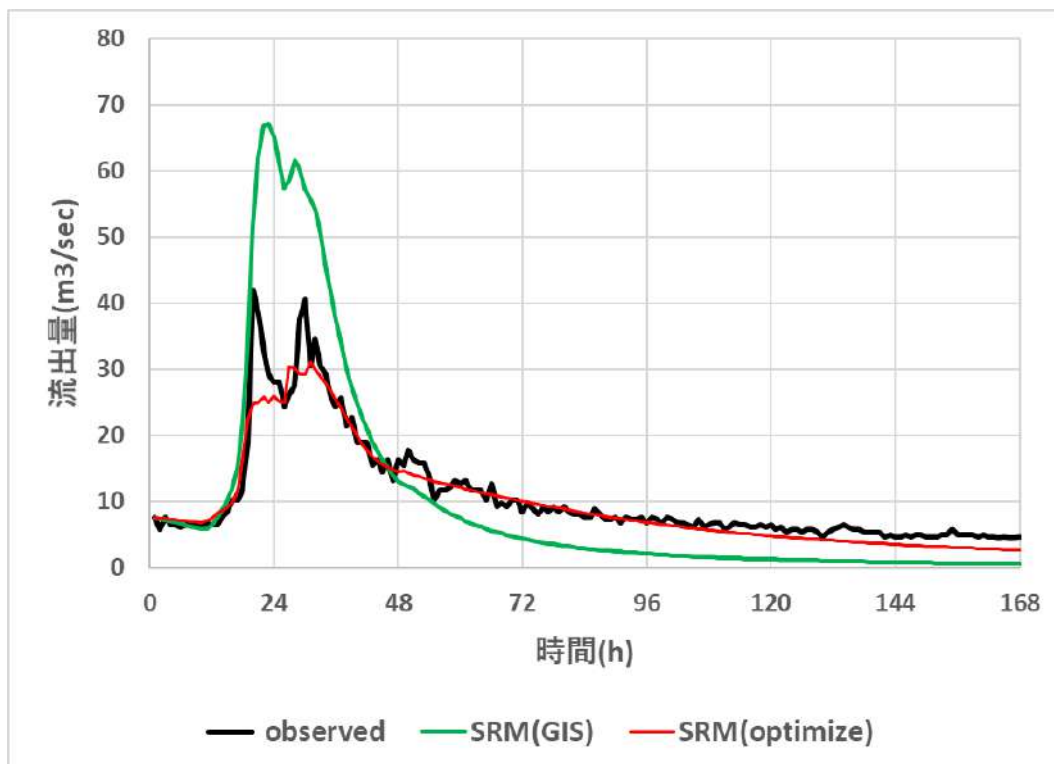


図 1-9 ハイドログラフの比較結果（広瀬川、降雨イベント：1 週間）

② 期間：1か月間

広瀬川流域に期間1か月間（2015/09/01～09/30）の降雨イベントを与えたときの（図 1-10 参照）、1 段タンク型貯留関数モデルで推定したハイドログラフの精度を観測結果と比べて評価する。ただし、計算に使用するモデルパラメータのパターンは次の2 ケースとする。

ケース：SRM(optimize)

第3章の3.2.3「貯留関数モデル」で導入した最小二乗法を使用したモデル最適化機能により、観測データからモデルパラメータを最適化する。ここでは、最適化後のモデル定数として、 $c_{11} = 15.243$, $c_{12} = 0.142$, $c_{13} = 1.690$ を設定した。

ケース：SRM(GIS)

本付録で説明した、GIS を用いた汎用的な流出計算手法により推定した地質設定パラメータを設定した。ここでは、表 1-7 の値を設定した。

計算結果として、観測値との誤差評価関数の値を表 1-9 に示した（誤差評価関数の RSE および NSE の定義については、第3章の3.2.2「誤差評価の方法」を参照）。また、ハイドログラフの比較結果を図 1-11 に示した。GIS を用いて地質設定パラメータを設定したケース SRM(GIS)の推定値は、ケース SRM(optimize)と同程度の精度で観測データと近い値となることが分かった。本結果より、本手法の妥当性が検証された。今後は、この手法の考え方をタンクモデル（MERCURY）にも適用することで、より精度が向上すると想定され、日本全国の河川（データのない）への適用性を更に調査すべきと考える。

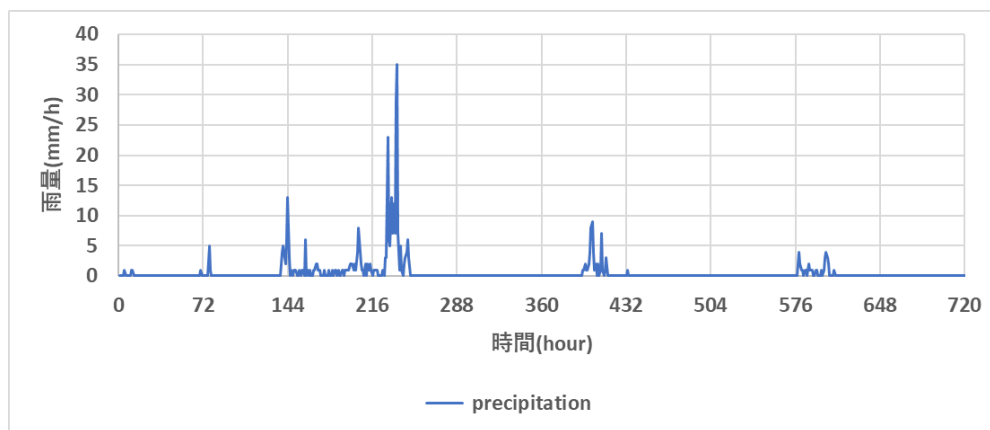


図 1-10 降雨量データ（広瀬川、2015/09/01～2015/09/30）

表 1-9 誤差評価（降雨イベント：1か月）

誤差	SRM(optimize)	SRM(GIS)
RSE	0.247	0.212
NSE	0.753	0.788

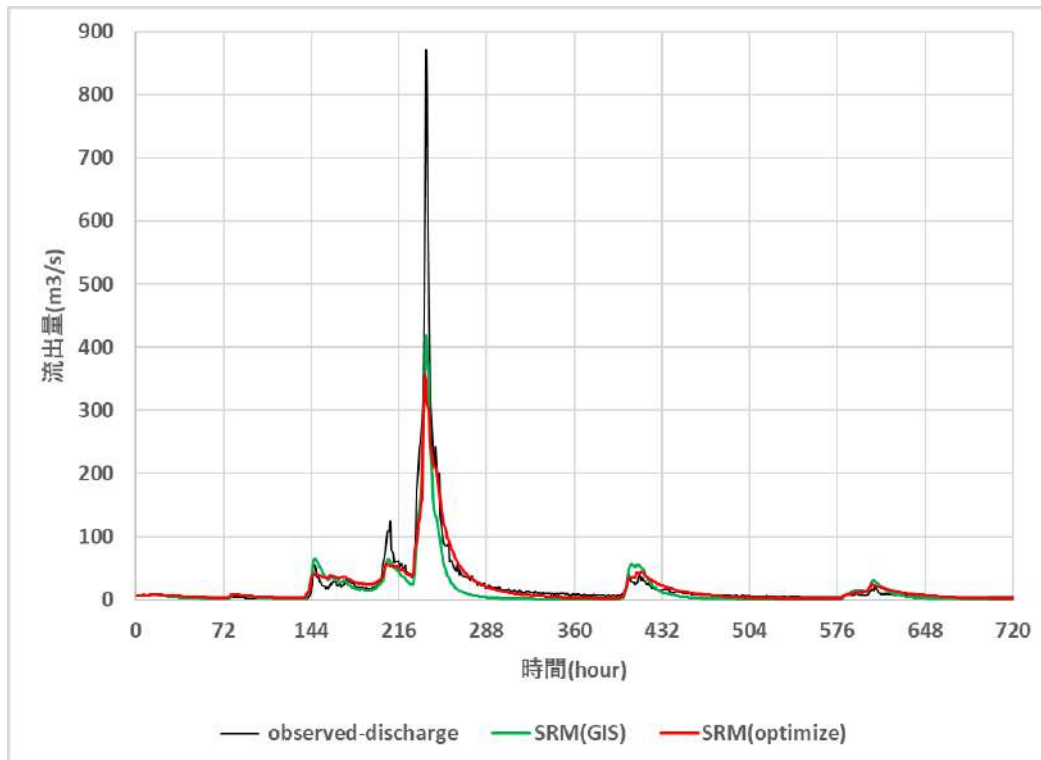


図 1-11 ハイドログラフの比較結果（広瀬川、降雨イベント：1か月）

参考文献

貯留関数モデル（GIS を用いた汎用的な流出解析手法）

- [1-1]奥泉宗一郎、中津川誠、臼谷友秀、「GIS を用いた汎用的な流出計算手法の提案」、水門・水資源学会誌、2016
- [1-2]園山裕士、星清、「2 段タンク型貯留関数モデルの同定手法の改良」、北海道開発土木研究所月報 第 589 号 (2002)
- [1-3]財団法人北海道河川防災研究センター・研究所、「実践流出解析ゼミ」、株式会社アイワード (2006)
- [1-4]虫明功臣、高橋裕、安藤義久、「日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果」、土木学会論文報告集 (1981)