

令和 3 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 4 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 本事業報告書の概要	2
■ 2章 陸域動態モデルの整備に向けて	4
2.1 本章の概要	4
2.2 陸域動態モデルの利用と関連情報の現状調査報告	4
2.3 集中定数型流出モデルの整備方針	5
2.4 分布定数型流出モデルの整備方針	6
2.5 まとめ	6
■ 3章 集中定数型モデルの整備と試解析	8
3.1 本章の概要	8
3.2 集中定数型流出モデルの整備	8
3.3 集中定数型流出モデルの試解析（阿武隈川、請戸川、前田川、熊川）	24
3.4 まとめ	44
■ 4章 分布定数型モデルの整備と試解析	46
4.1 本章の概要	46
4.2 分布定数型流出モデルの整備	46
4.3 分布定数型流出モデルの試解析（前田川、熊川、請戸川（高瀬川含む））	48
4.4 まとめ	67
■ 5章 河口域モデル（陸域と河口域の接続）の整備	69
5.1 本章の概要	69
5.2 接続対象の河口域モデル	70
5.3 集中定数型モデルと河口域モデルの接続に係る整備	71
5.4 集中定数型モデルと河口域モデルの接続に係る試解析（阿武隈川）	79
5.5 分布定数型モデルと河口域モデルの接続に係る整備	90
5.6 分布定数型モデルと河口域モデルの接続に係る試解析（阿武隈川）	92
5.7 まとめ	96
■ 6章 海域モデル（河口域と海域の接続）の整備	98
6.1 本章の概要	98
6.2 河口域解析モデルと海域モデルの接続に係る整備	98
6.3 河口域解析モデルと海域モデルの接続に係る試解析（福島沿岸・沖合）	107
6.4 まとめ	115
■ 7章 陸域・河口域・海域統合モデル（3域接続）に係る整備	116
7.1 本章の概要	116
7.2 陸域・河口域・海域の3域モデルの統合接続に係る整備	116
7.3 陸域・河口域・海域統合モデルの試解析（福島陸域・沿岸・沖合）	117
7.4 まとめ	122

■ 8章 考察とまとめ	123
8.1 本章の概要	123
8.2 陸域動態モデルの整備と試解析についての考察	123
8.3 陸域と沿岸域の動態モデル接続に係る整備と試解析についての考察	124
8.4 沿岸域と海域の動態モデル接続に係る整備と試解析についての考察	125
8.5 陸域・沿岸域・海域の動態モデル統合に係る整備と試解析についての考察	126
8.6 まとめと結論	126
■ 付録1 放射性物質陸域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	127
1.1 日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門	127
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	127
1.3 国立環境研究所・福島地域協働研究拠点	128
1.4 電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部	128
1.5 まとめ	129
■ 付録2 分布型定数モデルの整備と試解析（4章付録）	130
2.1 地理空間情報の取得方法	130
2.2 RADFLOW(version1.2.5)の改修	154
2.3 テーブルデータの作成方法	155
2.4 ベイズ最適化の適用	191
2.5 実装とキャリブレーション機能の実装方法	191
2.6 課題	201
2.7 GIS に関する基礎概念	202
2.8 地理空間情報の加工方法（QGIS or ParaView）	207
2.9 4河川（前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）の情報	211

■ 1章 本事業の目的及び概要

1.1 本事業の目的

東京電力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事故時における環境への放射性物質の放出量の推定のためには、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重要である。本事業では、陸域に拡散した放射性物質の河川による動態と海洋への流出量を評価するシミュレーションモデルの整備を実施する。

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の移行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、流出水だけでなく、同時に運搬される土砂も重要となり、一般には土砂と流出水の間で固液平衡条件を課すモデルを採用する。

本事業では、陸域に降着し河川から海洋へと流出する放射性核種に対し、陸域シミュレーションモデル、河口域（沿岸域）シミュレーションモデル、海域シミュレーションモデルの3つを統合することで、陸域から発した放射性物質の移行が最終的に海へと到達する様子をシミュレーションする統合シミュレーションモデルを試作し、その統合上で生じる課題を抽出し整理することを目的とする。

1.2 本事業の概要

本事業では、陸域に拡散した放射性物質が地表水によって移動する際、河川を通じて海洋へ流出するに至るまでの動態を、降水分布等に基づいて定量的に評価するシミュレーションモデルを整備するため、具体的に、以下の1.2.1~1.2.2について実施する。1.2.1は陸域動態モデルにおける事業概要、1.2.2は河口域モデルにおける事業概要であり、陸域及び海域との接続に係る事業を含む。

1.2.1 陸域動態モデル

①モデルの整備

降水分布から河川流量、浮遊土壌粒子発生量及び放射性セシウムの河川による流出量を推定する陸域動態モデルを整備する。また、その目的のため、既往モデルの研究開発機関へのインタビューを3回程度実施し、陸域での放射性物質動態に関する参考情報を収集する。

②整備モデルの試解析

整備した陸域動態モデルを用いて、以下の4河川について、流量及び土壌発生量について観測値との比較を行い、その結果について検証する。

- ・阿武隈川、請戸川、前田川、熊川

上記検証の下、上記 4 河川による 1F 事故後 10 年間の放射性セシウム流出量の評価も行う。また、他の河川、他の地域に適用する際に必要となるデータと課題についても整理する。

1.2.2 河口域モデル

①モデルの整備

満潮時に流入する海水が浮遊土壌粒子の動態に与える影響を評価するため、河口域モデルを整備する。河口域モデルは以下の仕様を満たすものとする。

- ・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整備モデルの試解析

特定の河口域を対象に、満潮時、干潮時それぞれ 2 時間程度のシミュレーションを行い河口への土壌粒子の流出という観点からも、その違いについて整理する。

③海洋モデルとの結合

上記①②の河口域モデルを海洋シミュレーションモデル ROMS(Regional Ocean Modeling system; <http://www.myroms.org>) の入力データとするためのインターフェイスを整備する。

1.3 本事業報告書の概要

本事業報告書の概要を記す。2 章以下では、1.1 に記した本事業の目的に従い、1.2 に記した本事業の概要に沿った事業内容の詳細を記す。

2 章では、本事業の主要目的である、令和 3 年度に実施した陸域動態モデルの整備方針についてまとめる。尚、その際、福島県における放射性セシウムに関する陸域動態研究を実施している機関をインタビューし、最新の動向を調査し取得情報を整理する（詳細は付録 1 にて記載）。

3 章及び 4 章では、令和 3 年度に実施した陸域動態モデルの整備内容と発生した課題を整理し報告する。尚、整備する陸域動態モデルとしては、集中定数型流出モデルと分布定数型流出モデルの二つがあるが、3 章では、集中定数型流出モデルについて報告し、4 章は、分布定数型流出モデルとする。令和 2 年度の該当事業において、複数の集中定数型流出モデルを調査したが、令和 3 年度は、放射性物質の動態も含めた解析モデルとして実績のある日本原子力研究開発機構が開発した MERCURY を選択し、陸域・沿岸域・海域を統合する際、陸域モデルとしての役割を果たすべく、集中的に整備を実施した。一方、分布定数型流出モデルにおいては、計算コストの観点とパラメータ設定が比較的容易であるとの利点を有する他、放射性物質の動態解析部分が含まれていることから、同じく日本原子力研究開発機構が開発した RADFLOW コードを選択し、MERCURY と同様に整備を行った。これらのコードを選択した理由として、ソースコードが入手可能であり、河口域モデルとの接続の際、それらの改変が容易であるという利点もあることを付記する。

5章では、上記の2つの陸域モデルと河口域3次元モデルとの接続について整備した結果と発生した課題を整理し報告する。集中定数型流出モデルの場合、河口域にて見られる潮汐を考慮するため、簡易河道モデルを接続部分に配置する一方、分布定数型流出モデルは、水位の連続的接続が可能のため、直接接続するための整備を行った結果と発生した課題を報告する。尚、河口域3次元モデルとしては、塩淡混合等の河川水と海水の混合をシミュレーション可能とするため、3次元非静水圧モデルを有し、放射性物質の動態解析モデルが組み込まれている、日本原子力研究開発機構が開発した3D-Sea-SPECを利用する。本コードについてもソースコードが入手可能であり、改変が可能なコードであることを付記する。

6章では、上記の河口域3次元モデルと海域との接続について整備した結果を報告する。河口域モデルには、上記3D-Sea-SPECを用いる一方、海域モデルについては、世界的に利用されているコードROMSを用いる。本章では、接続に当り課題となる項目を整理し報告する。

7章では、上記の陸域・河口域・海域の3つの動態モデルを統合するため、整備した結果を報告する。また、実際に本統合モデルを用いて実施した試解析結果を報告し、発生した課題を整理し報告する。

8章は、本事業全体のまとめと考察である。

■ 2章 陸域動態モデルの整備にむけて

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は流水により運ばれ、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に関係条件を課すモデルが用いられてきた。

本事業では、陸域に降着し河川から海洋へと流出する放射性核種の動態モデルとして、二つの陸域モデル（集中定数型流出モデルと分布定数型流出モデル）に対し、令和2年度の調査報告より日本原子力研究開発機構が開発した MERCURY と RADFLOW を採用し、その整備を行う。その際、両コードが有するパラメータのキャリブレーション機能を整備し、過去の降雨量及び流出量のデータを基に、コード（モデル）が有する、流域環境や流出条件を規定するパラメータを自動的に最適化する機能を実装することを目標とする（3章及び4章にて詳述）。また、陸域から海洋への流出を主たる対象とするため、陸域モデルの接続先となる河口域モデルとの接続に関する整備も併せて行う（5章にて詳述）。

2.2 陸域動態モデルの利用と関連情報の現状調査報告

前節 2.1 にて記したように、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。一方、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。これらの放射性物質に対する基本的概念が、事故後10年以上が経過した現在においても、十分に成立するかについては調査する必要があると考えられ、福島陸域及び河川からの放射性セシウムの流出について研究を実施している研究機関の現状調査の結果を報告し課題を整理する。

上記の目的に対し、現在、精力的に福島県の放射性セシウムの陸域及び水域を含め動態研究を実施している研究機関としては、以下の4つが挙げられる。尚、他にも多数の研究機関が存在するが、本事業の目的に沿い、特にモデリング（特にシミュレーションモデル）構築という観点にて、研究開発を進めている下記4機関を主たる機関として選択した。

- (1) 日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門、
- (2) 日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター
- (3) 国立環境研究所・福島地域協働研究拠点、
- (4) 電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部、

本節では、上記の4機関にインタビューした結果を付録1に記し、現状と課題を整理する一方、以下にて、その結果の概要を記す。

陸域動態については、現状、懸濁態と溶存態の相互作用についての理解が、地域毎に異なる等の課題が重要となっている他、溶存態のソースとなっている状況の理解に対し課題があることが分かった。また、依然として、河口及び沿岸域での複雑な挙動には、課題があることが分かったが、それらの課題解決のための取り組みが各機関にて実施されていることも分かった。

陸域モデルについては、日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門が開発している2つのコード(集中定数型流出モデル:MERCURYと分布定数型流出モデル:RADFLOW)の最新の進捗が把握できた。本コードは福島事故以後に、福島県において観測結果を中心に得られた放射性セシウムの動態を再現することを目的に開発されており、コード自身が簡潔に構成されていることから追加整備が容易であり、本事業の目的の一つである、他の域のモデルとの接続という点で極めて便利であることが分かる。

一方、沿岸域モデルの開発に関連しては、河川からの流出をモデル化することが難しく、今後も調査研究が必要であると、上記主要機関の多くが認識していることが分かった。今後も、これらの機関の調査研究報告に注視する必要があることが分かった。以上、上記の詳細については、付録1参照。

2.3 集中定数型流出モデルの整備方針

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及び文献によると、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。

令和3年度事業では、集中定数型流出モデルとしてMERCURYを選定し必要な整備を行う。これは、ソースコードが入手可能であり改変が容易に可能という理由がある他、放射性物質流出解析の実績があるためである。整備項目としては、下記のような2項目とした(尚、沿岸域モデルとの接続に係る整備は5章にて詳述)。

- (1) 流出量と強い相関を有する地理空間情報を基にパラメータを設定可能とする機能を実装する
- (2) 降雨量と流出量のデータを基に自動的にパラメータをキャリブレーションする機能を実装する

いずれの項目も、流出量を推定する上で、重要となる環境や条件に依存するモデルパラメータ設定機能の実装であり、(1)はパラメータ設定に際し、その河川の流域における地理空間情報を基に日本全国の河川に対し、統一的に設定可能とするパラメータ設定機能を付加するためである。その一方、(2)は河川単位での更なるパラメータのチューニング機能となる。パラメータのチューニングに当たっては、MERCURYのようなタンクモデルの他、簡素化した貯留関数モデルに対して、様々なチューニング方法、即ち、最適化ツール(PSO法、USE法)が開発適用されており、本事業でもそれらを可能な限り実装し、比較検討を試みる。尚、既に報告のある最適化ツールの実装だけでなく、最新のツール(ベイズ最適化)の適用についても実施した。

2.4 分布定数型流出モデルの整備方針

陸域での水の動態を記述する水文流出モデルとして、モデルの定数（パラメータ）を局所的に異なるセットとして分布させる分布定数型流出モデルがあり、集中定数型流出モデルと異なり、流域の各地点の局所的環境の違いを直接反映させることが可能である。特に、日本の河川のように、一つの流域において、様々な地形変化が存在する他、土地利用も一般に複雑であり、流域内の非一様性が、極めてバラエティーに富んでいる場合、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有利となる。本方法は、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、利活用が進んでいる。本節では、陸域動態モデル RADFLOW に対する整備方針を記す。RADFLOW を選択した理由としては、ソースコードの入手が可能な上、パラメータ設定に係るプログラム等を付加し整備できる他、沿岸域コードとの接続に際し、修正を施す必要があるためである。また、福島事故後に開発が進められたことから、放射性物質解析についても整備されており、そのモデルの利用及び適切な改変等が可能という利点がある。

以下、整備事項として、まず、降雨後の表層流出水を精度良く定量評価する際に重要となる地下水を計算する際、必要となるパラメータの一つである透水係数の設定方法を記す。この設定に当り、公開されている地理空間情報をもとにテーブルデータを作成し、RADFLOW に実装することで、局所的環境の違いが反映可能となる。尚、利用する地理空間情報は以下とする。

- ・土地利用（ALOS18.03）
- ・土壌図（50 万分の 1 土地分類基本調査、20 万分の 1 土地分類基本調査）
- ・表層地質図（50 万分の 1 土地分類基本調査、20 万分の 1 土地分類基本調査）

テーブルデータの作成においては、上記の地理空間情報をもとに、例えば地下 1-2 層は土地利用、3-5 層は土壌図、6-9 層は表層地質図等を参考に透水係数を適切に設定可能とする他、地理空間情報の区分毎の透水係数については、文献等を参考に設定し、テーブルデータを作成する。尚、実装とキャリブレーション機能の開発では、作成したテーブルデータを読み込めるように RADFLOW へ実装する。その一方、複数の流域を対象にデータをキャリブレーションする機能も開発する。その際、多目的ベイズ最適化等の最適化ツールを実装し試解析を通して課題を整理する。

2.5 まとめ

以上、本 2 章では、本事業で中核となる 2 種の陸域動態モデルについての整備方針について記載した。インタビューにより、陸域動態については、現状、懸濁態と溶存態の相互作用についての理解が重要となっている他、溶存態のソース源等にも課題があることが分かった。また、依然として、河口及び沿岸域での複雑な挙動には課題があることが分かったが、それらの課題解決のための取り組みが実施されていることも分かった。これらの現状調査結果を踏まえ、陸域動態モデルの整備を行うが、集中定数流出モデルにおいては、キャリブレーション機能の充実とモデルの各河川への適応力の評価が重要である他、放射性物質の流出源情報や知見を蓄積し、モデルへの取り込みについて更なる検討を重ねる必要があることが分かった。これは、分布定数型流出モデルにおいても重要な課題であることが分かる。これらの

観点から、本事業では、各陸域モデルの機能を整備する他、沿岸域との接続についても整備を実施し、3域統合モデル開発に向けた整備を行い、課題を整理する。

■ 3章 集中定数型流出モデルの整備と試解析

3.1 本章の概要

本3章では、集中定数型流出モデル MERCURY コード[3-1]の整備と福島県の4河川に適用した試解析結果について報告する。尚、当該 MERCURY コードは、令和2年度当該事業により、本年度において整備すべき集中定数型流出モデルとした選定したコードである。MERCURY は、日本原子力研究開発機構において、福島事故以後、福島県を中心とする河川からの放射性物質（特に Cs-137）の流出量を推定するために開発されたモデルであり、河川水量の推定と共に、溶存態としての流出量だけでなく、懸濁態としての流出量も併せて推定可能とする。従って、本事業の目的達成に当たり最適なコードと考えられる（溶存態及び懸濁態流出量推定に実績あり[3-2]）他、本コードのプログラムが入手可能であり、容易に改変できることから、本事業での整備対象コードとした。整備事項は、前章にて記したように、以下の二つである。

- 1) 地理空間情報を基に GIS を活用したパラメータ設定方法の実装
- 2) 自動キャリブレーション機能（最適化機能）の実装

以下では、上記の整備項目に従い、実装すべき機能の詳細を記した後、福島県の4河川に対し試解析を行った結果を報告し、発生した課題を整理する。

3.2 集中定数型流出モデルの整備

本節では、集中定数型流出モデルである MERCURY の整備事項として、上記1) 2)の事項の実装方法の詳細を記す。

3.2.1 地理空間情報を基に GIS を活用したパラメータ設定方法の実装

① 概要

上記整備項目1)に対し、令和2年度の当該事業では、GISシステムを用い、貯留関数モデルのパラメータ設定(未知の河川に適用)を、文献[3-3]に従い実装した。その後、福島県の広瀬川に適用することで、観測流量との良い一致が得られることを確認した。本事業では、この報告を基に GISシステムを用いて得られたパラメータ設定法を、タンクモデル・MERCURYにも適用する。タンクモデルのパラメータ空間での自由度の高さから、より最適なパラメータ設定が可能となり、流量とのより良い一致が得られる可能性がある。

MERCURY パラメータ設定の考え方として、上段のタンクに係るパラメータ設定に対しては、土地利用や標高及び傾斜等のデータとの関係を考慮する一方、下段タンクについては、地質との相関を考慮しパラメータを設定する機能を開発する[3-4]。これは、一般に地表面での流出が土地利用や標高・傾斜に依存する一方、中間流出及び基底流出と関係する貯留量は、土壌や地質に強く依存するからである。尚、パラメータ設定に当り、貯留関数モデルにおいては、表層地質図のみ用いたが、タンクモデルでは、下記の複数の GIS データ等も取り扱うことで、更なる精度の高い調整機能が期待できると考える。しかし、

設定すべきパラメータが多くなると、局所的な最適点の数も増える等、チューニングが一層難しくなる場合がある。また、考慮すべき GIS データの選択に十分な合理性が無い場合、高い調整機能が働かない場合があることも注意する。

- ・土地利用 (ALOS18.03)
- ・標高データ (国土数値情報)
- ・傾斜度 (国土数値情報)
- ・土壌図 (50 万分の 1 土地分類基本調査、20 万分の 1 土地分類基本調査)
- ・表層地質図 (50 万分の 1 土地分類基本調査、20 万分の 1 土地分類基本調査)

以下では、簡単に MERCURY コードの特徴を説明する。MERCURY コードは、3 段タンクモデルを使用する。その際、各タンクに対し、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。以下は、そのモデルを表現する式である。

$$\frac{dS_1}{dt} = P - E - q_1 - i_1 \quad (3-1)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = i_1 - q_2 - i_2 \quad (3-2)$$

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

$$q_1 = a_1 S_1, \quad q_2 = a_2 S_2, \quad q_3 = a_3 S_3. \quad (3-4)$$

$$i_1 = b_1 S_1, \quad i_2 = b_2 S_2. \quad (3-5)$$

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

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 (m³/h) である。 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無い場合、 S_2 タンクから蒸発させる。この際、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。本節では、これらのパラメータを、GISシステムを活用し、地理空間情報を基に推定する方法について整備し、試解析を行って課題を調査し整理する。

② 面積比率の算定方法

上記各GISデータに対し、河川毎の全流域面積に占める属性毎の面積比率を、QGIS (世界的に利用されている地理空間情報を取り扱うオープンソフトウェア) を使用して算出する。本節では、面積比率算定のために作成したQGISデータの一覧を、前田川を例に取って示す。また、MERCURYのパラメータとの相関関係を分析するための重回帰分析に備えて、属性値が連続的な標

高値や傾斜度等のGISデータについては、データの離散化を行う。例えば、図 3-1で示した標高データについては、100.0m間隔でクラス分けを行い、図 3-2のように標高値の離散的なデータフィールドを作成した。

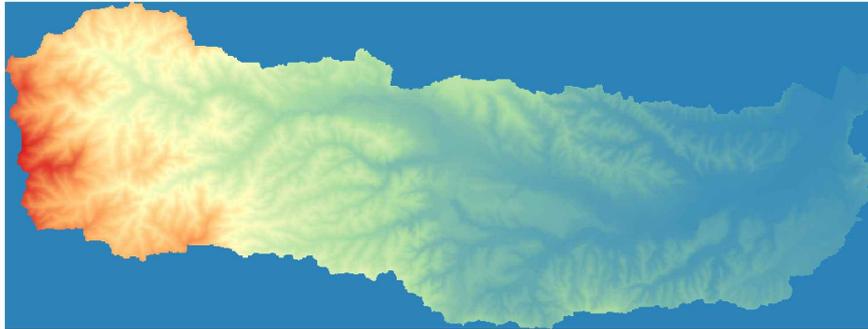


図 3-1 連続値属性のフィールド

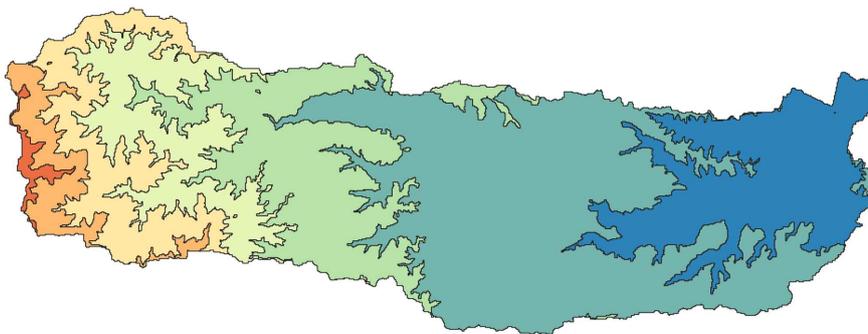


図 3-2 離散化したフィールド

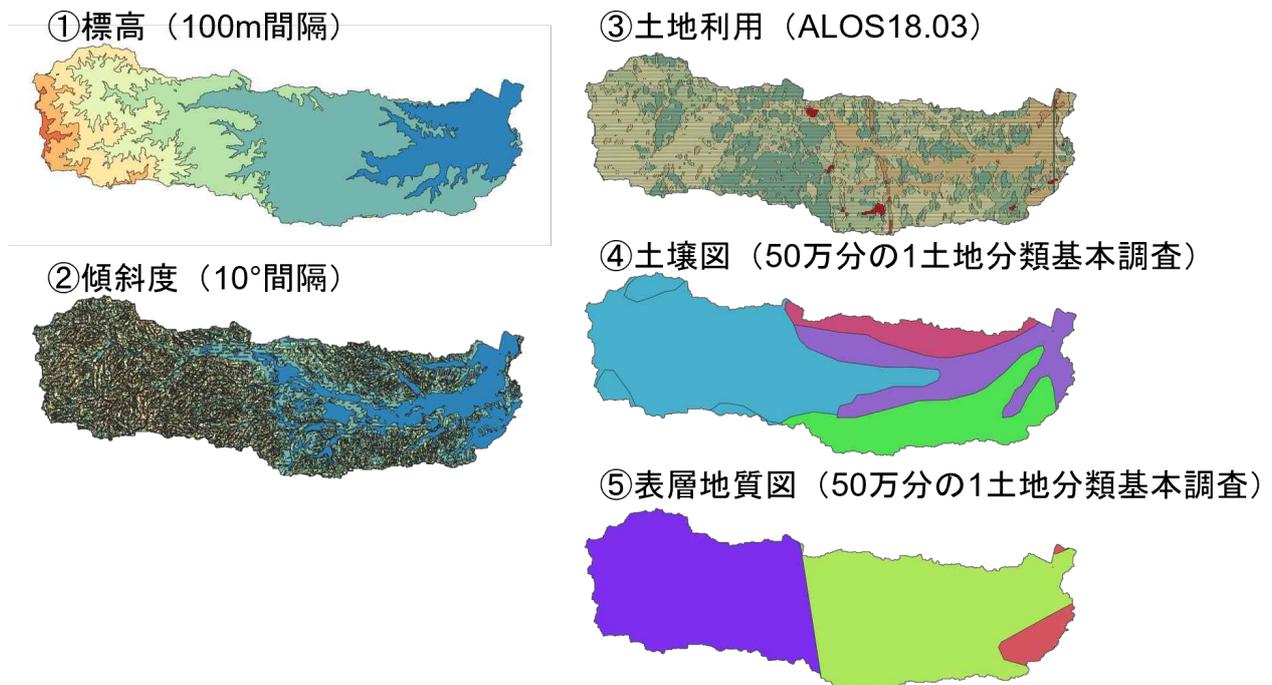


図 3-3 GIS データの面積比率 (前田川の場合)

③ 地質パラメータの属性値一覧

MERCURY のモデル定数との相関を考える地質パラメータとして、表 3-1～表 3-5 にリストアップした約 70 個程度の属性値を採用した。

表 3-1 標高データ (100.0m 間隔にクラス分け)

Data	ID	Range		
Elevation	0	0	～	100
	1	100	～	200
	2	200	～	300
	3	300	～	400
	4	400	～	500
	5	500	～	600
	6	600	～	700
	7	700	～	800
	8	800	～	900
	9	900	～	1000
	10	1000	～	1100
	11	1100	～	1200
	12	1200	～	1300
	13	1300	～	1400
	14	1400	～	1500
	15	1500	～	1600
	16	1600	～	1700
	17	1700	～	1800
	18	1800	～	1900
	19	1900	～	2000
	20	2000	～	2100

表 3-2 傾斜度データ (10.0°間隔にクラス分け)

Data	ID	Range		
Slope	0	0	～	10
	1	10	～	20
	2	20	～	30
	3	30	～	40
	4	40	～	50
	5	50	～	60
	6	60	～	70

表 3-3 土地利用データ

Data	ID	Label
LandUse	0	未分類 (Unclassified)
	1	水域 (Water)
	2	都市 (Urban and built-up)
	3	水田 (Rice paddy)
	4	畑地 (Crops)
	5	草地 (Grassland)
	6	落葉広葉樹 (DBF)
	7	落葉針葉樹 (DNF)
	8	常緑広葉樹 (EBF)
	9	常緑針葉樹 (ENF)
	10	裸地 (Bare land)
	11	--
	12	--

表 3-4 土壌データ

Data	ID	Label
Soil	0	グライ土
	1	ポドゾル
	2	灰色低地土
	3	褐色森林土
	4	褐色低地土
	5	岩屑土
	6	黒ボク土
	7	水面
	8	赤黄色土
	9	泥炭土
	10	埋立地
	11	未熟土
	12	未定義
	13	その他

表 3-5 表層地質データ

Data	ID	Label
Geology	0	安山岩類
	1	火山灰・ローム
	2	花崗岩類
	3	結晶片岩類
	4	玄武岩類
	5	洪積砂礫(段丘堆積物を含む)
	6	砂岩・泥岩・礫岩など
	7	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
	8	砂岩・頁岩・礫岩など
	9	砂丘砂
	10	砂礫・粘土
	11	蛇紋岩・橄欖岩
	12	水域
	13	石灰岩
	14	粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン (輝緑凝灰岩)
	15	斑れい岩・輝緑岩
	16	片麻岩類
	17	埋立地
	18	溶結凝灰岩
	19	流紋岩類
20	その他	

④ 重回帰式の構成

降雨量や流出量などの観測データが既知の河川については、対象流域の最適パラメータを別途計算する。その際、パラメータは本章の後半で示す最適化機能により定め、それらの値と GIS データとの相関関係を求める。その際、MERCURY の最適パラメータ $a_i (i = 1, 2, 3)$, $b_i (i = 1, 2)$ を目的変数とし、抽出した GIS データの面積比率 $r_j (j = 1, \dots, n)$ を説明変数として次の重回帰式を作成する。

$$a_i = g_i^a + \sum_{j=1}^n k_{i,j}^a \cdot r_j, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3-6)$$

$$b_i = g_i^b + \sum_{j=1}^n k_{i,j}^b \cdot r_j, \quad (i = 1, 2) \quad (3-7)$$

上記重回帰式(3-6),(3-7)を用いて、各々の回帰係数 $k_{i,j}^a, k_{i,j}^b$ と g_i^a, g_i^b を求める方法については、以降の⑤重回帰分析の理論にまとめた。上記の回帰係数 $k_{i,j}, g_i$ が求まると、観測データが未知でMERCURYの最適パラメータが得られていない河川についても、対象河川のGISデータの面積比率 $r_j(j=1, \dots, n)$ を求めた後、重回帰式(3-6),(3-7)を用いることで、その河川の妥当なパラメータを推定可能となることが期待される。説明変数は、表 3-1～表 3-5 に列挙したパラメータ属性に相当する(約 70 個)。

⑤ 重回帰分析の理論

以降では、重回帰分析の概要について説明する。内容については文献[3-5]を参考に実装した。特に、本事業では、複数ある重回帰分析の中で、説明変数間に強い相関があった場合でも、安定に回帰係数を計算できるリッジ回帰を採用する。

一般に重回帰分析では、 N 個の観測データとして d 次元ベクトルの入力 $x_i \in R^d$ と出力 $y_i \in R$ のペア $\{(x_n, y_n)\}_{n=1}^N$ から、 $y = f(x) + \epsilon$ となる関数 f を推定する。入力 x_i が説明変数であり、出力 y_i が目的変数である。ここで、関数 f は式(3-8)のように入力 $x \in R^d$ に関する一次式として仮定する。また、 ϵ は観測ノイズである。

$$f(x) = w^T \tilde{x} \quad (3-8)$$

ここで、 $\tilde{x} = (1, x_1, \dots, x_d)^T, w = (w_0, w_1, \dots, w_d)^T$ とする。 N 個の観測データが与えられたとき、式(3-8)は次のようにまとめられる。

$$\tilde{y}(w) = \begin{pmatrix} w^T \tilde{x}_1 \\ w^T \tilde{x}_2 \\ \vdots \\ w^T \tilde{x}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_0 + w_1 x_{11} + \dots + w_d x_{1d} \\ w_0 + w_1 x_{21} + \dots + w_d x_{2d} \\ \vdots \\ w_0 + w_1 x_{N1} + \dots + w_d x_{Nd} \end{pmatrix} = \tilde{X}w \quad (3-9)$$

$$\tilde{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1d} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{N1} & \dots & x_{Nd} \end{pmatrix} \quad (3-10)$$

こうして回帰係数 $w = (w_0, w_1, \dots, w_d)^T$ は、式(3-8)による計算データと観測データの L^2 誤差を最小とするものとして特徴付けることができる。

$$\begin{aligned} E(w) &= \|y - \tilde{X}w\|^2 \\ &= y^T y - w \tilde{X}^T y - y^T \tilde{X} w + w^T \tilde{X}^T \tilde{X} w \end{aligned} \quad (3-11)$$

つまり、誤差関数 $E(w)$ が極値を取る w が回帰係数となる。このような w は式(3-11)を微分して整理することで、次のように求めることができる。

$$\frac{\partial E(w)}{\partial w} = -2\tilde{X}^T y + 2\tilde{X}^T \tilde{X} w = 0 \quad (3-12)$$

$$\tilde{X}^T \tilde{X} w = \tilde{X}^T y \quad (3-13)$$

$$w = (\tilde{X}^T \tilde{X})^{-1} \tilde{X}^T y \quad (3-14)$$

リッジ回帰は、重回帰モデルに多重共線性がある(説明変数間に強く相関がある)場合に、回帰係数の最小二乗推定量が不正確になることを解決するために開発された手法である。リッジ回帰では、式(3-11)

に正則化項 $\lambda\|w\|^2$ を追加した式(3-15)の誤差関数を最小化するような回帰係数 w を求める。ただし、 λ はハイパーパラメータである（別途決定する必要がある）。

$$E(w) = \|y - \tilde{X}w\|^2 + \lambda\|w\|^2 \quad (3-15)$$

これにより、回帰係数 w は式(3-18)として計算することができる。

$$\frac{\partial E(w)}{\partial w} = -2\tilde{X}^T y + 2\tilde{X}^T \tilde{X}w + 2\lambda w = 0 \quad (3-16)$$

$$(\tilde{X}^T \tilde{X} + \lambda I)w = \tilde{X}^T y \quad (3-17)$$

$$w = (\tilde{X}^T \tilde{X} + \lambda I)^{-1} \tilde{X}^T y \quad (3-18)$$

3.2.2 自動キャリブレーション機能（最適化機能）の実装

MERCURY コードに対し、3.2.1 では、地理空間情報を基にパラメータを設定する手法について説明したが、本項 3.2.2 では、降雨量及び流量情報がある場合、パラメータの自動最適化機能を設計開発し、実装する方法について記す。尚、実装を予定する最適化機能は以下の4つとする。

- 1) キャリブレーション機能（ニュートン法等）
- 2) PSO 法（粒子群最適化法） 文献[3-6]参照
- 3) SCE-UA 法 文献[3-7]参照
- 4) ベイズ最適化法

2)～4) については、流域の最適パラメータ設定に当たり、パラメータ空間での局所的最適値だけでなく、大局的な最適値探索も行い、より良い最適値を取得するために用いられる手法である。4) のベイズ最適化法については、陸域流出モデルへの適用例は見当たらないが、流量の観測量と推定量との差を評価関数として、タンクモデルの各パラメータの最適値を探索することが可能な手法であり、適用は妥当と考えられる。また、ベイズ最適化については、複数のフリーソフトが公開されており、それらを活用することが可能である。以下、①から④の順に手法と実装法について記す。

① ニュートン法

ニュートン法によるモデル定数最適化手法を以下に列挙する。文献[3-8]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、文献[3-8]の方法を踏襲する。

MERCURY モデルは、3 段モデルタンクである。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、 $P(mm/h)$ は降水量であり、 $E(mm/h)$ は蒸発散量である。

$$\frac{dS_1}{dt} = P - E - q_1 - i_1, \quad (3-19)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = i_1 - q_2 - i_2, \quad (3-20)$$

$$\frac{dS_3}{dt} = i_2 - q_3. \quad (3-21)$$

ここで、 $S_n(mm)$ は各タンクの貯水高さ、 $q_n(mm/h)$ 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。

$$q_1 = a_1 S_1, \quad (3-22)$$

$$q_2 = a_2 S_2, \quad (3-23)$$

$$q_3 = a_3 S_3. \quad (3-24)$$

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

$$i_1 = b_1 S_1, \quad (3-25)$$

$$i_2 = b_2 S_2. \quad (3-26)$$

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。

$$Q = Coef \sum_k^3 q_k, \quad Coef = Area \times 10^{-3}. \quad (3-27)$$

次に感度方程式を導出する。式(3-19)～(3-21)を貯水高さ S_n によって整理すると下式となる：

$$\frac{dS_1}{dt} = P - E - (a_1 + b_1)S_1 \quad (3-28)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = b_1 S_1 - (a_2 + b_2)S_2, \quad (3-29)$$

$$\frac{dS_3}{dt} = b_2 S_2 - a_3 S_3. \quad (3-30)$$

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。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_1} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_1} - S_1, \quad (3-31)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_2} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_2}, \quad (3-32)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_3} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_3}, \quad (3-33)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial b_1} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial b_1} - S_1, \quad (3-34)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_1}{\partial b_2} \right) = -(a_1 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial b_2}. \quad (3-35)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial a_1} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_1} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial a_1}, \quad (3-36)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial a_2} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_2} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial a_2} - S_2, \quad (3-37)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial a_3} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_3} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial a_3}, \quad (3-38)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial b_1} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial b_1} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial b_1} + S_1, \quad (3-39)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_2}{\partial b_2} \right) = b_1 \frac{\partial S_1}{\partial b_2} - (a_2 + b_2) \frac{\partial S_2}{\partial b_2} - S_2. \quad (3-40)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial a_1} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_1} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_1}, \quad (3-41)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial a_2} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_2} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_2}, \quad (3-42)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial a_3} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_3} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_3} - S_3, \quad (3-43)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial b_1} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial b_1} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial b_1}, \quad (3-44)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial S_3}{\partial b_2} \right) = b_2 \frac{\partial S_2}{\partial b_2} - a_3 \frac{\partial S_3}{\partial b_2} + S_2. \quad (3-45)$$

尚、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。

$$\frac{\partial q_1}{\partial a_1} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_1} + S_1 \quad \frac{\partial q_2}{\partial a_1} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_1} \quad \frac{\partial q_3}{\partial a_1} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_1} \quad (3-46)$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial a_2} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_2} \quad \frac{\partial q_2}{\partial a_2} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_2} + S_2 \quad \frac{\partial q_3}{\partial a_2} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_2} \quad (3-47)$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial a_3} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_3} \quad \frac{\partial q_2}{\partial a_3} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_3} \quad \frac{\partial q_3}{\partial a_3} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial a_3} + S_3 \quad (3-48)$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial b_1} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial b_1} \quad \frac{\partial q_2}{\partial b_1} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial b_1} \quad \frac{\partial q_3}{\partial b_1} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial b_1} \quad (3-49)$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial b_2} = a_1 \frac{\partial S_1}{\partial b_2} \quad \frac{\partial q_2}{\partial b_2} = a_2 \frac{\partial S_2}{\partial b_2} \quad \frac{\partial q_3}{\partial b_2} = a_3 \frac{\partial S_3}{\partial b_2} \quad (3-50)$$

以上より、モデル定数の最適化は、観測流量 $Q_i^*(m^3/s)$ と計算流量

$$Q_i = Q_i(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2)(m^3/s) \quad (3-51)$$

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。従って、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。

$$J(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2) = \sum_{i=1}^N e_i^2(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2) / \sum_{i=1}^N (Q_i^*)^2, \quad (3-52)$$

$$e_i(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2) = Q_i^* - Q_i(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2). \quad (3-53)$$

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：

$$K = [a_1, a_2, a_3, b_1, b_2]^T. \quad (3-54)$$

ニュートン法による最適化では、式(3-52)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：

$$K^{m+1} = K^m + \Delta K, \quad (3-55)$$

$$\Delta K = [\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3, \Delta b_1, \Delta b_2]^T. \quad (3-56)$$

$(m+1)$ 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：

$$e_i(K^{m+1}) = e_i(K^m) + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_j} \Delta a_j + \sum_{j=1}^2 \frac{\partial e_i(K^m)}{\partial b_j} \Delta b_j, \quad (3-57)$$

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

ただし、下式に注意すること。

$$\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_j} = -Coef \sum_{k=1}^3 \frac{\partial q_k}{\partial a_j}(K^m), (j = 1, 2, 3), \quad (3-58)$$

$$\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial b_j} = -Coef \sum_{k=1}^2 \frac{\partial q_k}{\partial b_j}(K^m), (j = 1, 2). \quad (3-59)$$

ここで、誤差ベクトル E と行列 W を次のように定義する：

$$E^m = [e_1(K^m) \quad e_2(K^m) \quad \dots \quad e_N(K^m)]^T. \quad (3-60)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{11}^m & w_{12}^m & w_{13}^m & w_{14}^m & w_{15}^m \\ w_{21}^m & w_{22}^m & w_{23}^m & w_{24}^m & w_{25}^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{N1}^m & w_{N2}^m & w_{N3}^m & w_{N4}^m & w_{N5}^m \end{bmatrix}. \quad (3-61)$$

ただし、各 $i = 1, \dots, N$ に対して、

$$w_{i1}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_1}, \quad (3-62)$$

$$w_{i2}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_2}, \quad (3-63)$$

$$w_{i3}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial a_3}, \quad (3-64)$$

$$w_{i4}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial b_1}, \quad (3-65)$$

$$w_{i5}^m = -\frac{\partial e_i(K^m)}{\partial b_2}. \quad (3-66)$$

従って、式(3-57)は下記のように整理される：

$$E^{m+1} = E^m - W\Delta K. \quad (3-67)$$

また、評価関数 $J(K^{m+1})$ は下記のように整理される：

$$\begin{aligned} J(K^{m+1}) &= (E^{m+1})^T E^{m+1} \\ &= (E^m - W\Delta K)^T (E^m - W\Delta K) \\ &= (E^m)^T E^m - 2(\Delta K)^T W^T E^m + (\Delta K)^T (W^T W) \Delta K \\ &= J(E^m) + (\Delta K)^T \{-2W^T E^m + (W^T W) \Delta K\}. \end{aligned} \quad (3-68)$$

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：

$$\frac{\partial J(K)}{\partial (\Delta K)} = -2W^T E^m + (W^T W) \Delta K = 0. \quad (3-69)$$

従って、式(3-69)から補正ベクトル ΔK は次式で計算される：

$$\Delta K = 2(W^T W)^{-1} W^T E^m. \quad (3-70)$$

② PSO 法 (particle swarm optimization)

PSO 法 (particle swarm optimization) によるモデル定数を最適化する手法については、文献[3-6]を参照し実装する。以下に、上記文献で説明されている PSO 法のアルゴリズムを記す。

Kennedy と Bberhart (1995) により提案された PSO 法は、鳥の群れや魚の群泳等、群れをなして移動する生物の行動パターンから着想を得た集団探索に基づく確率的最適化手法であり、生物個体を真似た粒子の群れが、情報を共有しながら解空間を探索するという手法である。 n 個の決定変数を持つ目的関数 f を最大化する場合、 n 次元の変数空間中の位置ベクトル x を考え、目的関数 f は位置ベクトル x の関数として表されるものとする。ここで、独立した位置変数 x_i を有する m 個の粒子 ($i = 1 \sim m$) を与える。全ての粒子は群全体が過去において経験した最良の位置 x_{Gbest} を共有しており、また個々の粒子は自身の経験した最良の位置 $x_{pbest,i}$ を有している。その上で、個々の粒子は、群全体の最良位置に近づこうとするベクトル、自身の最良位置に戻ろうとするベクトル、および自身が有している慣性ベクトルの重み付き相加平均によって次回の位置を決定する。則ち、 k 回目の探索において、粒子 i の位置 x_i^k と速度 v_i^k を用いて、 $k+1$ 回目の位置 x_i^{k+1} と速度 v_i^{k+1} が、次式で更新される。

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3-71)$$

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 r_1 (x_{pbest,i}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (x_{Gbest}^k - x_i^k) \quad (3-72)$$

ここで、 $x_{pbest,i}^k$ は粒子 i の k 回目の探索までの最良位置、 x_{Gbest}^k は群全体の k 回目の探索までの最良位置、 w は粒子の慣性パラメータ、 c_1 は自身の既往最良位置に戻ろうとする強度パラメータ、 c_2 は群の最良位置

に近づこうとする強度パラメータ、 r_1, r_2 は区間[0,1]の一様乱数である。計算手順を図 3-4 に示す他、以下箇条書きし説明する。

- (1) 決定変数の個数 n 、粒子数 m 、パラメータ w, c_1, c_2 を決定する。
- (2) 初期世代として、各粒子の位置 x_i および速度 v_i をランダムに設定する。
- (3) 全ての粒子の適合度（目的関数）を計算する。
- (4) 個々の粒子について、群全体におけるこれまでの最良位置での適合度との比較を行い、適合度が大きい場合は、その粒子の位置で x_{Gbest} を更新する。
- (5) 個々の粒子について、その粒子のこれまでの最良位置での適合度と比較し、適合度が大きい場合は、その粒子の現在の位置を $x_{Pbest,i}$ に保存する。
- (6) 各粒子の $k+1$ ステップでの速度および位置を式(3-71)と(3-72)により求める。このとき、解空間の範囲外に出た粒子は反射処理を行う。
- (7) x_{Gbest} が収束していない、または繰り返し回数が規定の回数に達していない場合は、手順(3)に戻る。

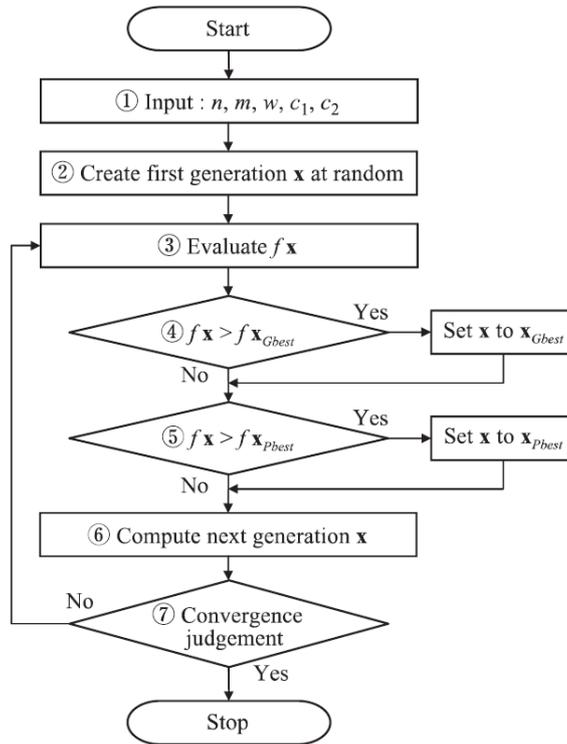


図 3-4 PSO アルゴリズムの手順

尚、文献[3-6]では、図 3-4 の計算手順に加えて、収束性を改善するための追加機能をいくつか提案している。本事業でもこれらの機能を実装した。それらの詳細については、文献[3-6]参照。

- 移動速度制約の追加
- 局所ランダム探索機能の追加
- 優良粒子群の重心による群最良位置の更新機能の追加
- 初期値の利用による収束の改善

③ SCE-UA 法 (shuffled complex evolution method developed at The University of Arizona)

SCE-UA 法 (shuffled complex evolution method developed at The University of Arizona) を用いて、モデル定数を最適化する手法については、文献[3-7]を参照し実装する。以降は、当該文献で説明されている SCE-UA 法のアルゴリズムについてその内容を記す。SCE-UA 法とは、Duan らによって提案されたシンプレックス法にランダム探索 : GA に類似した競争進化、新たに開発された集団混合の概念を組み合わせた大域的探索手法である。 n 個の決定属性を持つ関数を最小化する場合のアルゴリズムを以下に示す。また、そのフローを図 3-5 に示す。

- (1) 集団の個数 p , 各集団における点の個数 m を $p \geq 1$ および $m \geq n + 1$ を満たすように選択する。
- (2) 探索空間 $\Omega \subset R^n$ から s 個($s = p \times m$)の点 $x_i, i = 1, 2, \dots, s$ をランダムに抽出し、各点 x_i における関数値 f_i を計算する。
- (3) s 個の点を関数値が最小の値を 1 位として、小さいものから順に並べる。
- (4) これらの点を p 個の集団 A^1, A^2, \dots, A^p に分割する。各集団 $A^\kappa, \kappa = 1, 2, \dots, p$ は、 m 個の点 $x_{\kappa+p(j-1)j} = 1, 2, \dots, m$ を含むものとする。
- (5) 各集団を後述する Competitive Complex Evolution (以下、CCE) アルゴリズムによって進化させる。
- (6) すべての集団に含まれる点を混ぜ合わせ、 s 個の点を関数値が最小の値を 1 位として、小さいものから順に並べる。
- (7) 収束判定をする。収束判定条件を満たされれば終了し、そうでなければステップ(4)に戻る。

SCE-UA 法の計算手順のステップ(5)において、各集団を進化させる CCE アルゴリズム (集団 $A^\kappa, \kappa = 1, 2, \dots, p$ に含まれる m 個の点をそれらの関数値が小さくなるように修正する) の内容を以下に示す。また、そのフローを図 3-6 に示す。

- (1) 点数 q 、反復回数 α, β を選択する。ここで、 $2 \leq q \leq m, \alpha \geq 1, \beta \geq 1$ である。
- (2) A^κ に含まれる各点に、次の台形分布で与えられる選択確率を割り当てる。

$$p_j = \frac{2(m+1-j)}{m(m+1)}, j = 1, 2, \dots, m \quad (3-73)$$

- (3) A^κ から異なる q 個の点 u_1, u_2, \dots, u_q を先に定めた選択確率に従ってランダムに選び、これらを配列 $B = \{u_j, v_j, j = 1, 2, \dots, p\}$ に記憶させる。ここで、 v_j は点 u_j の関数値である。
- (4) 配列 B に含まれる点を親として、次の手順に従って子孫を生成する。

a) q 個の点を関数値が最小のものを 1 位として、小さいものから順に並べ、次式でその中心を求める。

$$g = \frac{1}{q-1} \sum_{j=1}^{q-1} u_j \quad (3-74)$$

b) 新しい点 $r = 2g - u_q$ を求める (鏡像ステップ)。

c) r が探索範囲 Ω に含まれているならば、関数値 f_r を計算して、ステップ d)へ行く。そうでなければ、 A^k のすべての点を含む最小の多面体 $H \subset R^n$ を計算して、ランダムに H 内に点 z を生成する。そして、関数値 f_z を計算し、 $r = z, f_r = f_z$ とする (突然変異ステップ)。

d) もし、 $f_r < f_q$ であれば、 u_q を r で置き換え、ステップ f)へ行く。そうでなければ、 $c = (g + u_q)/2$ および f_c を計算する (収縮ステップ)。

e) もし、 $f_c < f_q$ であれば、 u_q を c で置き換え、ステップ f)へ行く。そうでなければ、ランダムに H 内に点 z を生成し、 f_z を計算する (突然変異ステップ)。そして、 u_q を z で置き換える。

f) ステップ a)~e)を β 回繰り返す。

(5) A^k 内の B を構成する点 (親) を修正後の点 (子孫) で置き換える。次いで、 A に含まれる m 個の点を関数値の小さいものから順に並べる。

(6) ステップ(2)~(5)を β 回繰り返す。

Duan らは、数値実験の結果に基づき、本アルゴリズムのパラメータとして、 $m = 2n + 1, q = n + 1, \alpha = 1, \beta = 2n + 1$ を推奨しており、本事業でもこれらの値を採用する。また、集団の個数 p は、田中丸の研究において ([3-9]参照)、 $p = 20$ とすることで安定した解析を行うことが可能であると報告されていることから、本事業でもこの値を採用する。

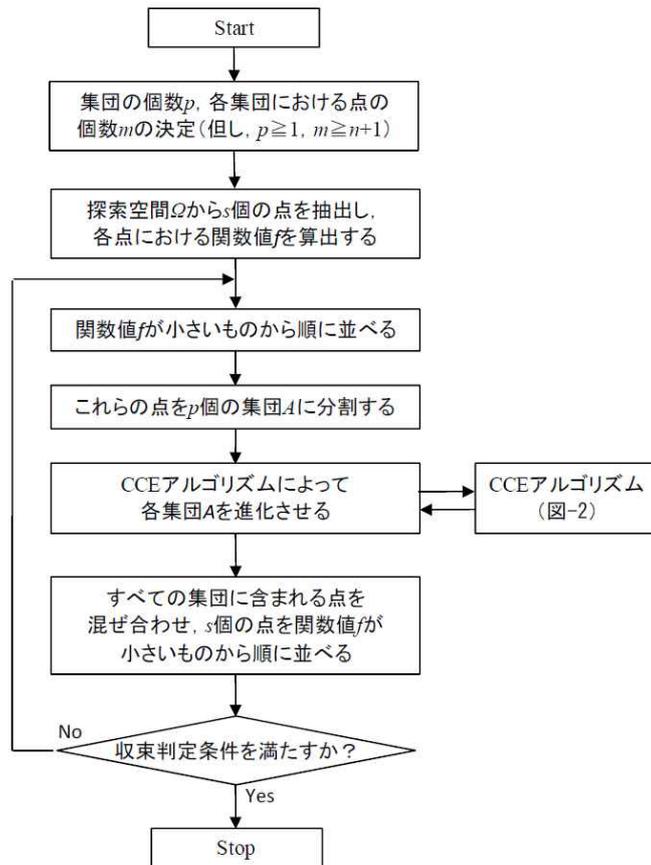


図 3-5 SCE-UA 法のアルゴリズム

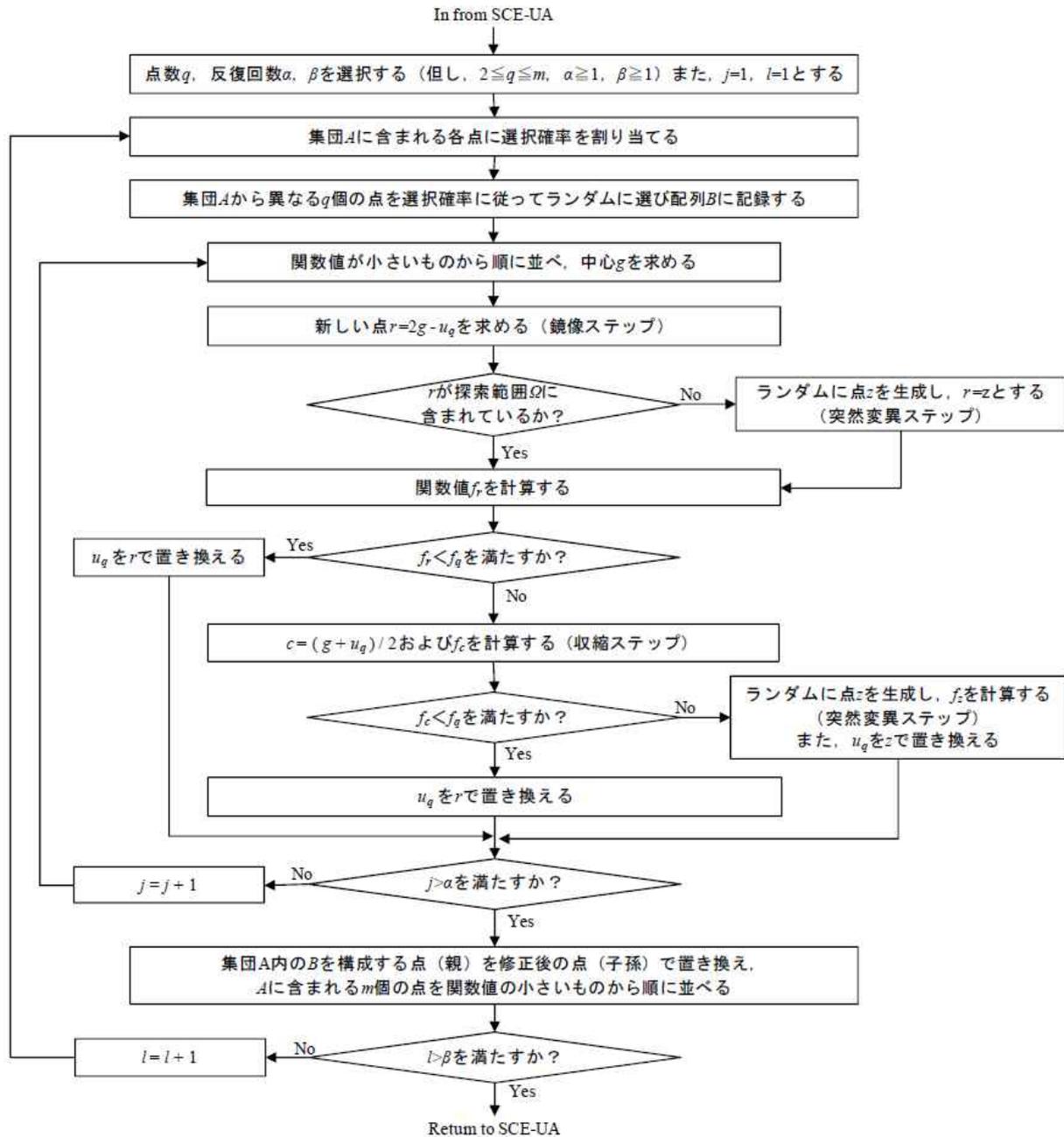


図 3-6 CCE アルゴリズム

④ ベイズ最適化

MERCURY に対してベイズ最適化を適用するため、Python の多目的ベイズ最適化ライブラリ「PHYSBO」を利用する。ベイズ最適化ライブラリとしての「PHYSBO」の特徴は、公開サイト情報[3-10]を基に以下の通りである。また、PHYSBO の理論と使用方法についての詳細は文献[3-11]から参照できる。

- PHYSBO は高速でスケーラブルなベイズ最適化のための Python ライブラリである。
- ベイズ最適化は、複雑なシミュレーションや実験タスクなど、目的関数値（特性値など）の評価

に大きなコストがかかるような場合に利用できる手法である。

- ベイズ最適化では、探索するパラメータの候補をあらかじめリストアップし、候補の中から目的関数値が最大と考えられる候補を機械学習（ガウス過程回帰を利用）による予測をうまく利用することで選定する。
- 一般的にベイズ最適化は計算コストが高く、scikit-learn 等のスタンダードな実装では、多くのデータを扱うことが困難である。PHYSBO では以下の特徴により、高いスケーラビリティを実現する。

- Thompson Sampling
- random feature map
- one-rank Cholesky update
- automatic hyperparameter tuning

3.3 集中定数型流出モデルの試解析（阿武隈川、請戸川、前田川、熊川）

3.2 で開発実装した二つの MERCURY パラメータ設定機能の検証を行う。以下、3.3.1 では、GIS を活用するパラメータ設定方法を検証する他、3.3.2 では、自動的にパラメータを最適化する手法を検証する。

3.3.1 GIS を活用したパラメータ設定方法の検証試験

3.2 で実装した GIS システム活用 MERCURY パラメータ設定機能の検証を行う。最適パラメータが既知の河川を前田川、熊川、請戸川、阿武隈川の4河川とし、それらの最適パラメータを基に各地理空間情報の面積比率との関係を重回帰分析によって推定する。その後、高瀬川を対象としてパラメータの検証を行う。尚、リッジ回帰分析に用いたハイパーパラメータ λ に対するパラメータスタディも行い、 λ の効果を考察する。尚、上記、前田川、熊川、請戸川、阿武隈川の4河川については PSO 法により最適パラメータを事前準備する。

① 高瀬川に対するパラメータ推定

リッジ回帰のハイパーパラメータ λ を $\lambda = 0.01 \sim 100.0$ の範囲で動かしたとき、高瀬川において推定される MERCURY パラメータと観測データとの誤差（RSE）を表 3-6 にまとめる。また、その表のケース番号③～⑤について、推定パラメータで計算したときの流出量時刻歴の結果と観測データとの比較図を図 3-7 と図 3-8、図 3-9 に示す。結果として、 $\lambda = 1.0 \sim 10.0$ のときの誤差は小さく、重回帰分析によるパラメータ推定法の有効性が確認できる。その一方、 λ が大きい場合（ $\lambda = 100.0$ ）や、 λ が小さい場合（ $\lambda < 0.1$ ）には、誤差が大きく回帰分析が機能しない結果となった。尚、誤差関数 RSE（具体的式）については章末に記した。

表 3-6 重回帰分析によって推定された最適パラメータと誤差（高瀬川）

ケース	①	②	③	④	⑤
λ	100.0	10.0	1.0	0.1	0.01
a_1	1.780E-03	9.920E-03	1.770E-02	2.309E-02	3.568E-02
a_2	1.168E-02	6.945E-02	1.783E-01	2.869E-01	2.703E-01
a_3	1.000E-04	5.600E-04	1.170E-03	2.200E-03	3.800E-03
b_1	1.186E-02	6.442E-02	8.731E-02	1.290E-02	-2.539E-02
b_2	3.921E-02	2.304E-01	5.605E-01	9.489E-01	1.115E+00
RSE	0.92744	0.43975	0.46321	0.80358	15.40576

高瀬川の解析結果

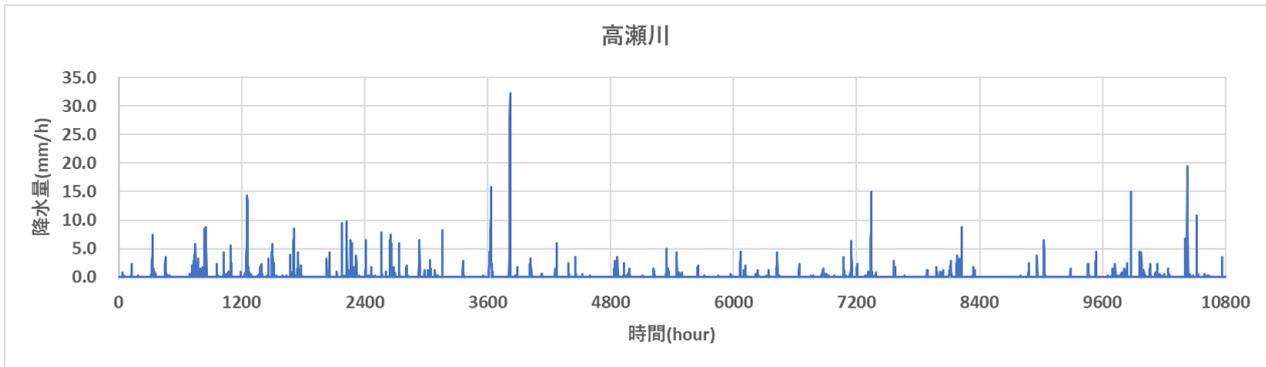


図 3-7 降水量時刻歴（全期間）

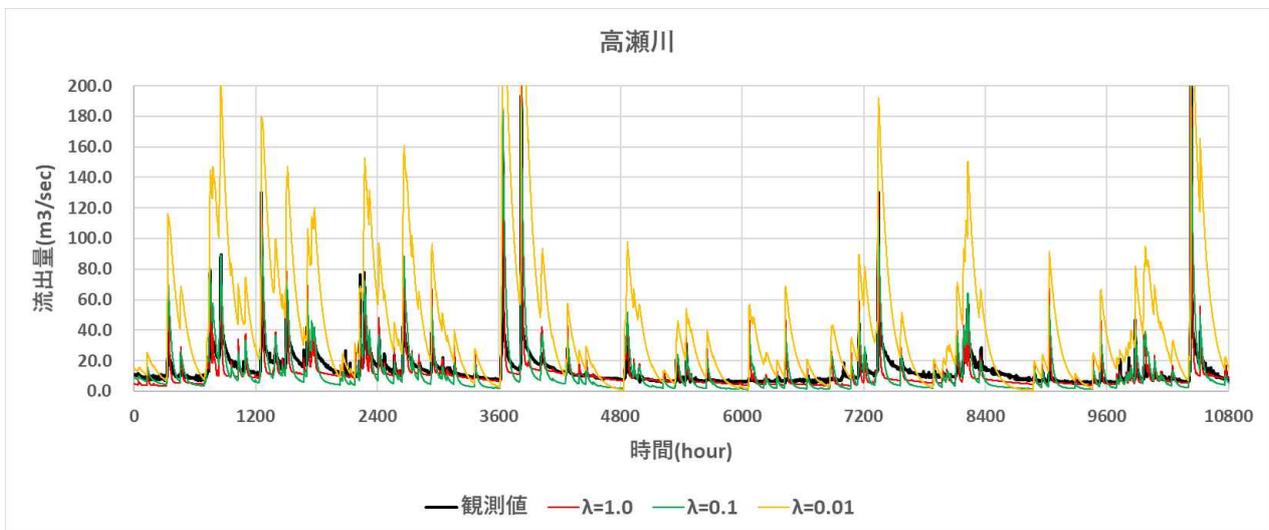


図 3-8 流出量時刻歴の比較（高瀬川、 λ 依存性含む）（全期間）

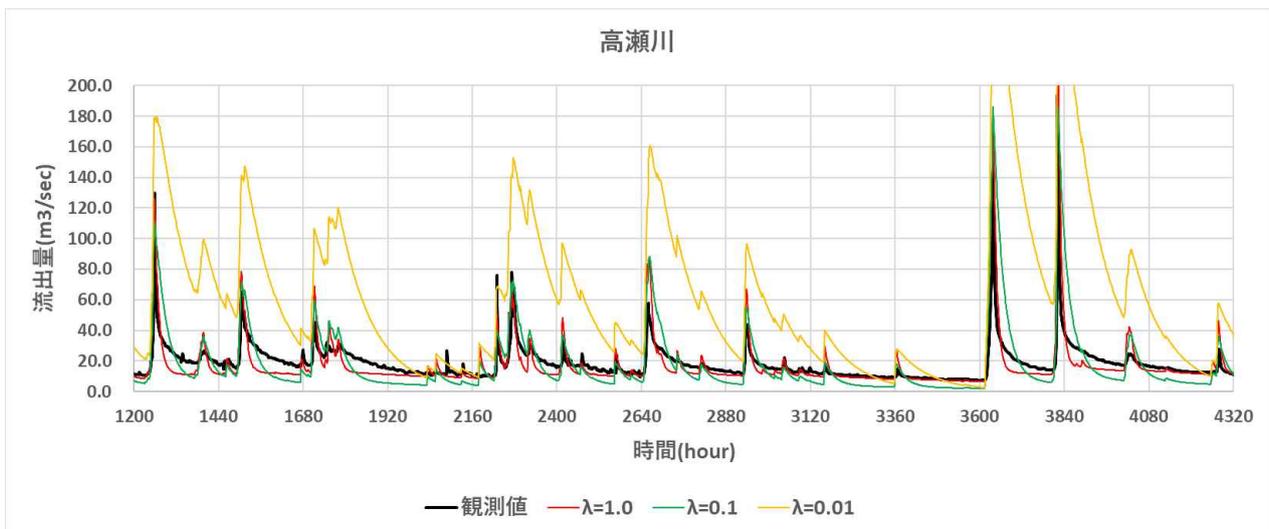


図 3-9 流出量時刻歴の比較（高瀬川、 λ 依存性含む）（一部期間）

② 課題

まず、各河川の GIS データの面積比率を、QGIS 上にて手作業で作成するため、時間を要するという課題がある。尚、本事業では、重回帰分析の学習データとして用意できたサンプル数は、4 河川分と少なく、得られた回帰係数の精度が十分ではないと考えられる。今後、全国の河川に展開しサンプル数を増やすことで十分な精度が得られる可能性が高い。また、用いる地理空間情報の選択にも未だ検討の余地がある（例として標高データの利用等）。

3.3.2 自動キャリブレーション機能の検証

① 概要

本章 3.2.2 で設計・実装した各最適化機能を福島の阿武隈川、請戸川、高瀬川、前田川、熊川の 5 河川に適用することで、MERCURY の自動キャリブレーション機能の検証試験を行う。期間は約半年間とし、モニタリング流出量との一致度を表わす量を用いて評価する。また、2011 年 1F 事故以降の凡そ 10 年間の長期期間の下での計算も実施する。

② 最適パラメータの推定

5 河川について流域面積のリストを表 3-7 に示す。

表 3-7 対象流域

河川	流域面積 [km ²]	計算期間（最適化）	平均降雨(mm/h)	平均蒸発散量(mm/h)
前田川	21.000	2014/05/19～2015/08/19	0.165	0.05
熊川	63.900	2014/05/13～2015/11/13	0.164	0.045
請戸川	148.700	2014/05/08～2015/08/26	0.162	0.05
高瀬川	238.600	2014/05/08～2015/08/26	0.162	0.05
阿武隈川	5323.127	2014/05/01～2014/12/31	0.138	0.05

まず、各流域対して、平均降雨と平均蒸発散量を一定に与え続けるという定常計算を実施する。この計算により定常状態に達した際の貯水高さ(mm)を求め、以降の解析では、ここで得られた値を初期の貯水高さとする。求められた初期貯水高さを表 3-8 に示す。

表 3-8 初期の貯水高さ

貯水高さ (mm)	前田川	熊川	請戸川	高瀬川	阿武隈川
S ₁ タンク	0.2191	0.2267	0.2133	0.2133	0.1676
S ₂ タンク	5.4762	5.6667	5.3333	5.3333	4.1905
S ₃ タンク	13.6905	14.1667	13.3333	13.3333	10.4762

各手法（Newton 法、Bayes 最適化、PSO 法、SCE-UA 法）で推定した最適パラメータにおける流出量の精度を以下に記す。尚、手法ごとの誤差評価の結果を表 3-9 にまとめる。また、各最適化手法で提案された最適パラメータのリストを表 3-10～表 3-14 に示す。更に、流出量時刻歴の計算結果と観測結果の比較図を河川毎に記す。前田川は図 3-10～図 3-12 に、熊川は図 3-13～図 3-15、請戸川は図 3-16～図 3-18、高瀬川は図 3-19～図 3-21、阿武隈川は図 3-22～図 3-24 に示す。結果として、表 3-9 によると、熊川を除いた 4 河川（前田川、請戸川、高瀬川、阿武隈川）について、Nash-Sutcliffe 係数が 0.7 以上の値に達することから、最適化の精度は良好と判断する。ただし、手法ごとに得られる最適パラメータの値にはバラツキがある。これはパラメータの探索空間の次元が大きく、手法毎に異なる最適解に到達することを意味している。この結果から、ベイズ最適化が、一般的に（いずれの河川でも）、優れた最適化性能を示すことが分かる。また、ベイズ最適化は他の手法より計算コストも小さいことを付記する。

表 3-9 用いた最適化手法とその誤差（赤字は手法間で最も RSE 値が低い場合を示す）

河川	RSE			
	Newton	Bayes	PSO	SCE-UA
前田川	1.545	0.296	0.355	0.182
熊川	0.405	0.377	0.399	0.394
請戸川	1.194	0.421	0.556	0.277
高瀬川	0.291	0.295	0.278	0.273
阿武隈川	0.313	0.288	0.415	0.309

表 3-10 最適パラメータ（前田川）

	Newton	Bayes	PSO	SCE-UA
a_1	1.756E-02	3.334E-02	3.784E-02	2.177E-02
a_2	8.146E-03	6.670E-03	5.749E-03	2.403E-03
a_3	5.093E-03	3.400E-05	4.170E-05	2.508E-05
b_1	2.470E-01	5.719E-01	5.003E-01	2.321E-01
b_2	2.211E-02	2.864E-02	6.536E-03	3.459E-03
RSE	1.545	0.296	0.355	0.182

表 3-11 最適パラメータ（熊川）

	Newton	Bayes	PSO	SCE-UA
a_1	3.651E-02	4.445E-02	5.238E-02	4.944E-02
a_2	3.681E-03	4.450E-03	1.478E-02	1.121E-02
a_3	9.053E-03	3.400E-05	4.857E-03	3.776E-03
b_1	9.231E-02	1.437E-01	2.578E-01	2.126E-01
b_2	1.000E-10	1.000E-04	9.633E-02	6.913E-02
RSE	0.405	0.377	3.99E-01	3.94E-01

表 3-12 最適パラメータ (請戸川)

	Newton	Bayes	PSO	SCE-UA
a_1	7.363E-03	1.000E-05	2.528E-02	4.012E-03
a_2	7.324E-03	4.450E-03	4.237E-03	1.000E-10
a_3	5.389E-03	4.500E-05	1.745E-04	1.741E-05
b_1	3.567E-01	1.000E+00	5.475E-01	3.154E-03
b_2	2.035E-02	1.437E-02	2.211E-03	1.586E-02
RSE	1.194	0.421	0.556	0.277

表 3-13 最適パラメータ (高瀬川)

	Newton	Bayes	PSO	SCE-UA
a_1	2.066E-02	3.334E-02	4.567E-03	1.000E-10
a_2	3.506E-03	3.340E-03	1.255E-01	3.115E-02
a_3	2.200E-03	3.400E-05	3.240E-03	3.349E-03
b_1	6.719E-02	1.437E-01	1.506E-01	9.853E-01
b_2	6.918E-03	1.000E-04	6.611E-01	1.284E-01
RSE	0.291	0.295	0.278	0.273

表 3-14 最適パラメータ (阿武隈川)

	Newton	Bayes	PSO	SCE-UA
a_1	1.859E-04	1.000E-05	2.511E-03	1.000E-10
a_2	1.603E-02	1.000E-02	1.359E-01	1.986E-02
a_3	4.754E-04	1.000E-04	4.423E-04	4.196E-04
b_1	1.135E-01	1.437E-01	3.981E-02	9.163E-02
b_2	2.994E-02	2.864E-02	4.457E-01	3.982E-02
RSE	0.313	0.288	0.415	0.309

前田川

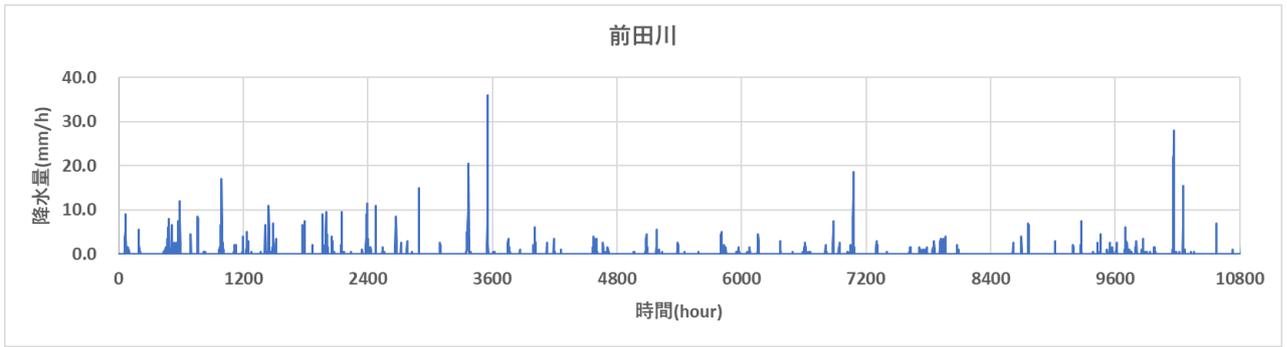


図 3-10 降水量時刻歴（全期間）

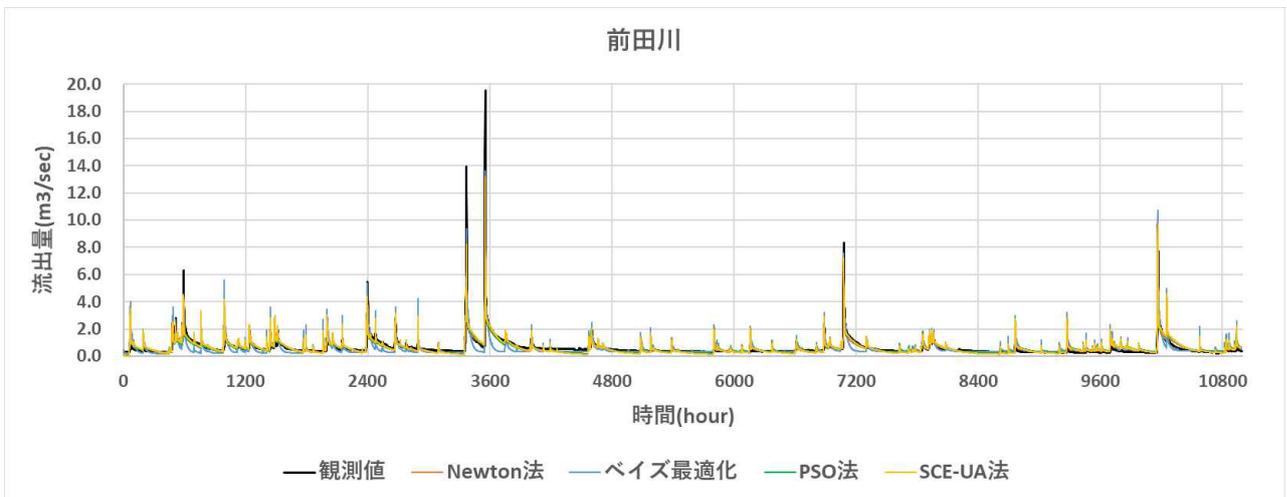


図 3-11 流出量時刻歴（全期間）

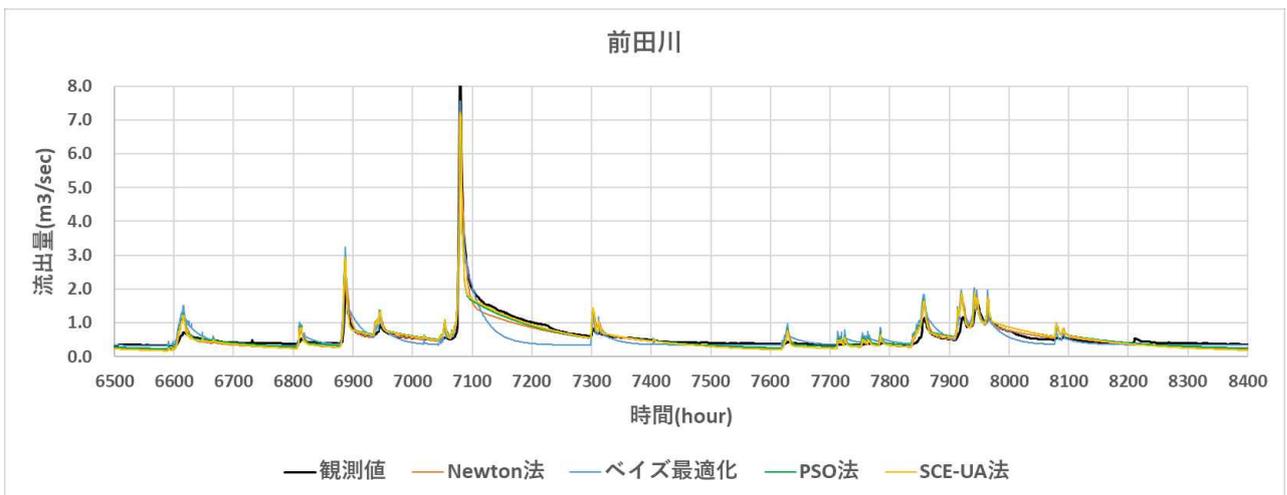


図 3-12 流出量時刻歴（一部期間）

熊川

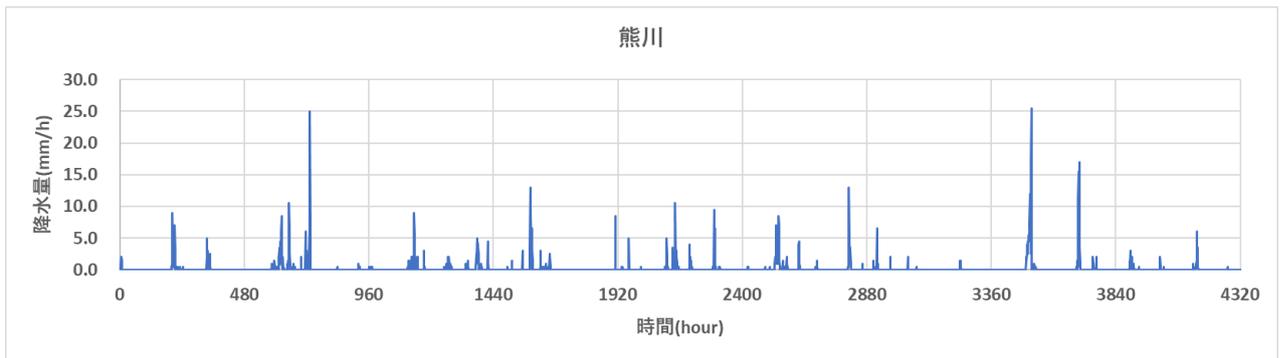


図 3-13 降水量時刻歴（全期間）

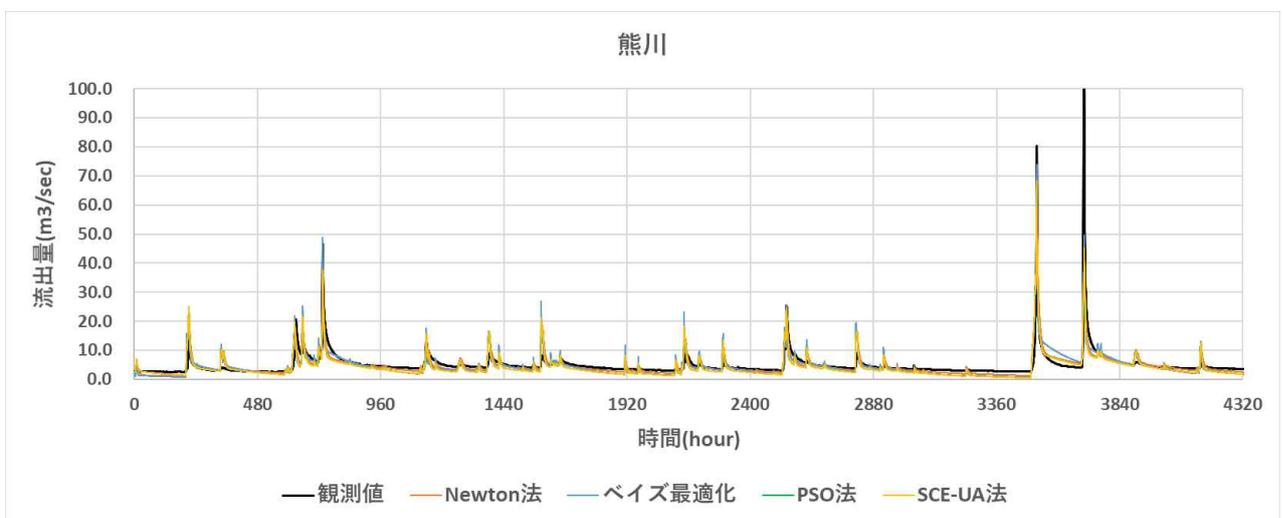


図 3-14 流出量時刻歴（全期間）

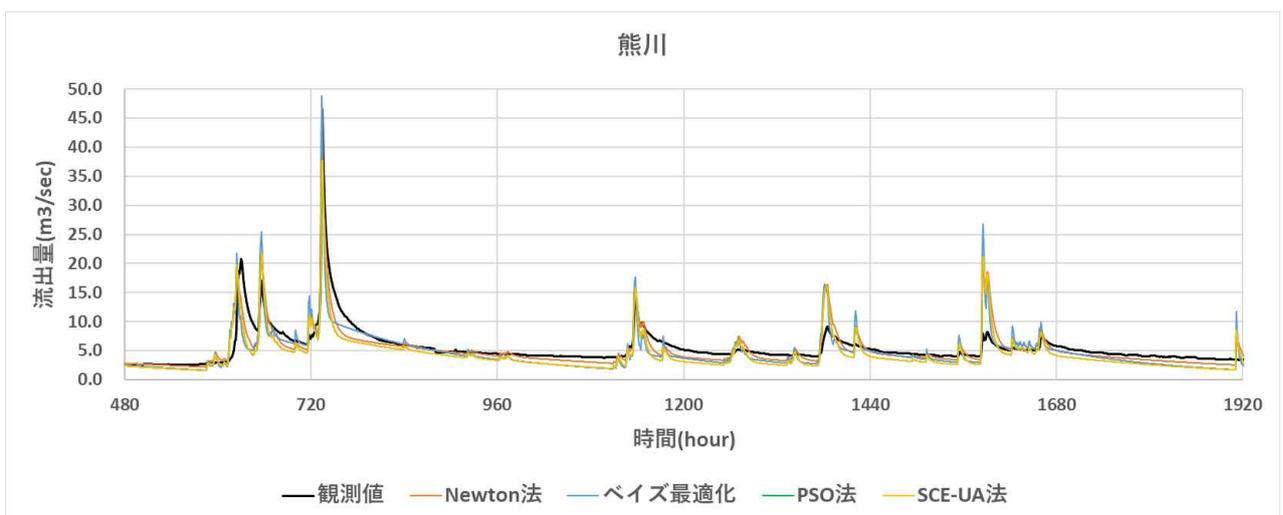


図 3-15 流出量時刻歴（一部期間）

請戸川

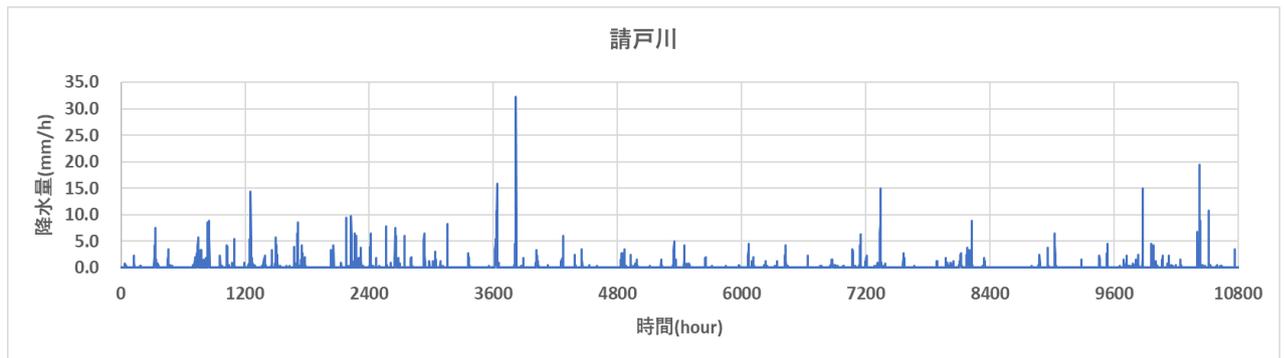


図 3-16 降水量時刻歴（全期間）

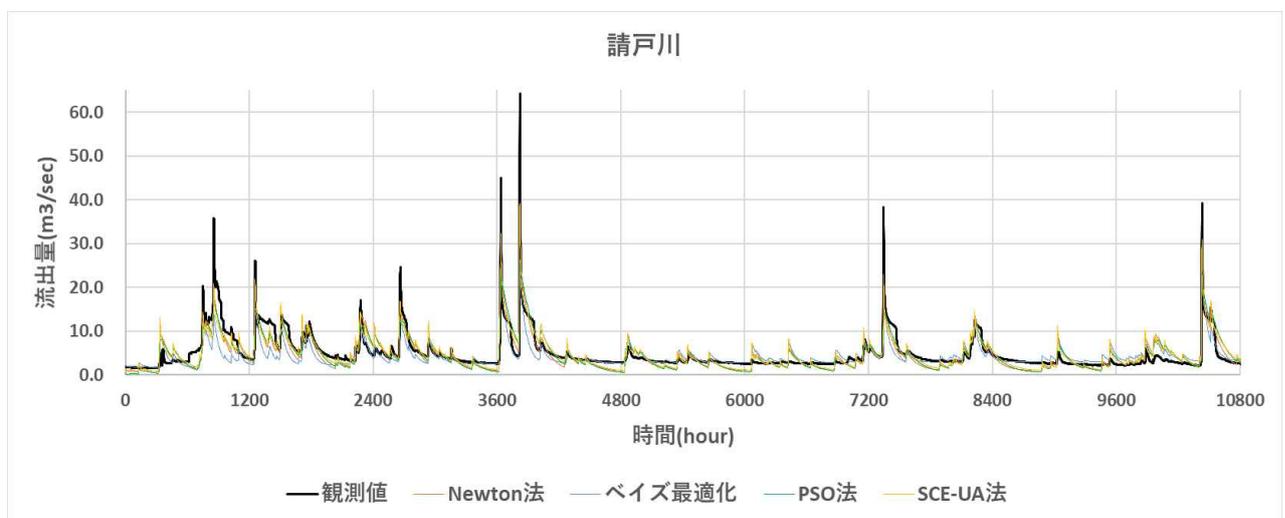


図 3-17 流出量時刻歴（全期間）

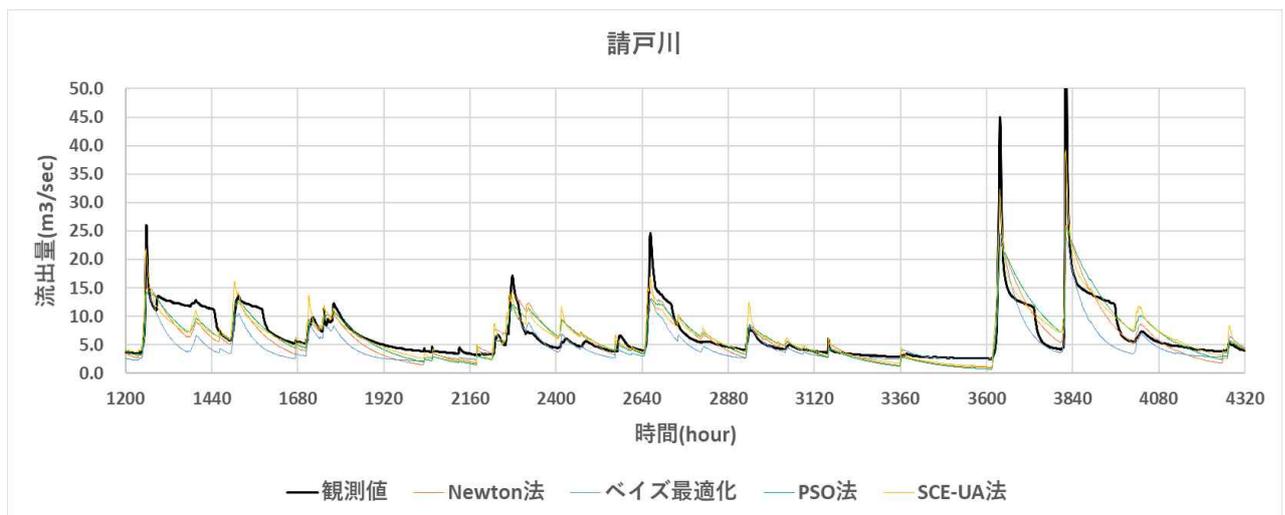


図 3-18 流出量時刻歴（一部期間）

高瀬川

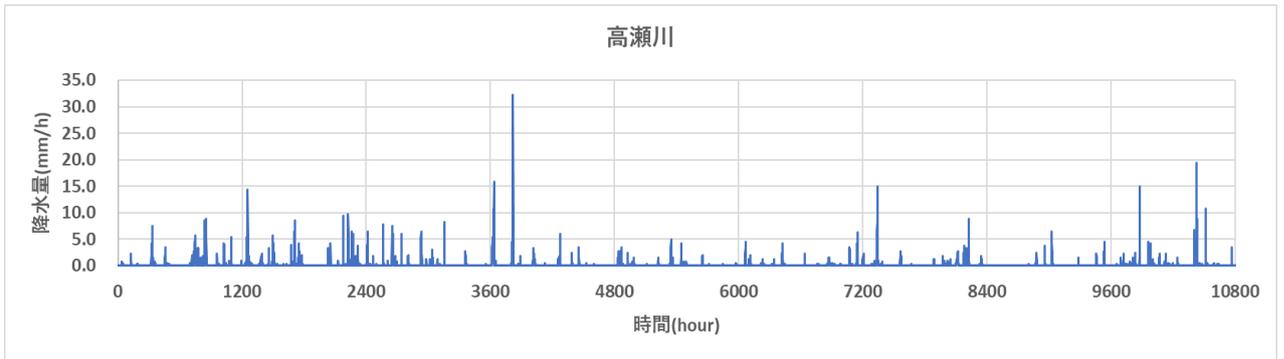


図 3-19 降水量時刻歴（全期間）

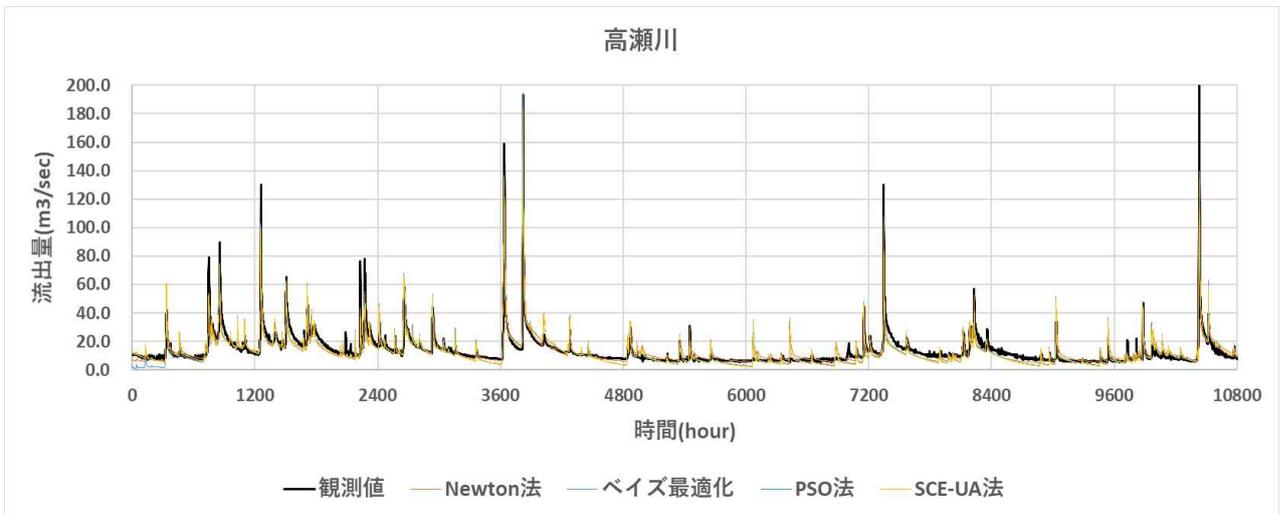


図 3-20 流出量時刻歴（全期間）

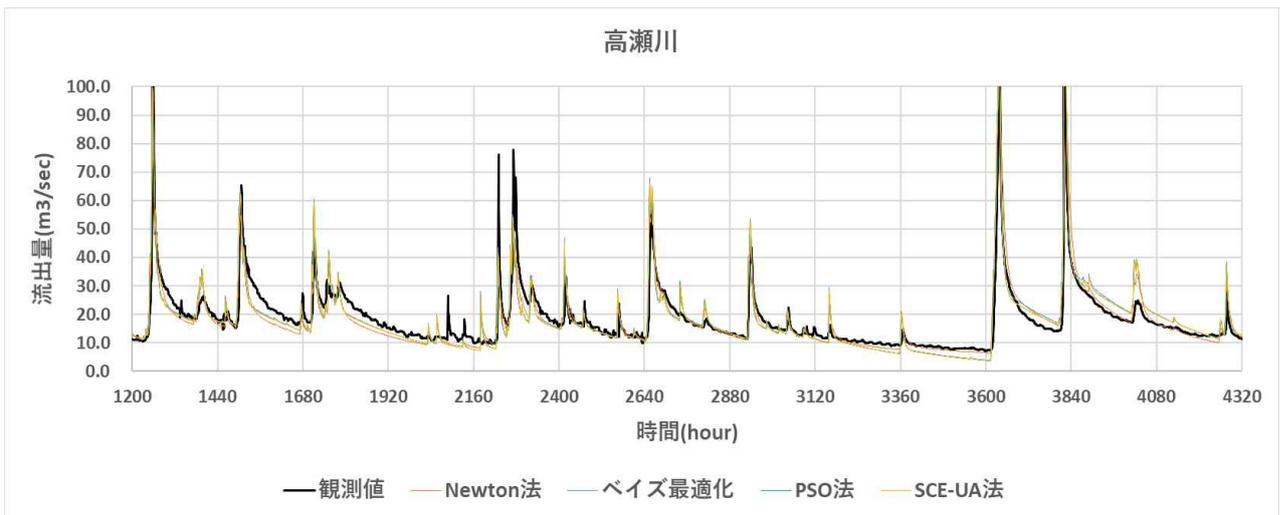


図 3-21 流出量時刻歴（一部期間）

阿武隈川

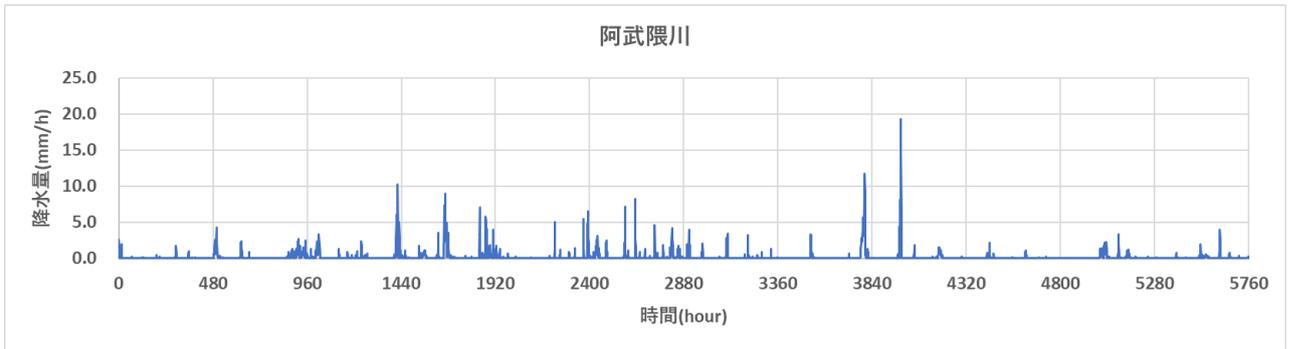


図 3-22 降水量時刻歴（全期間）

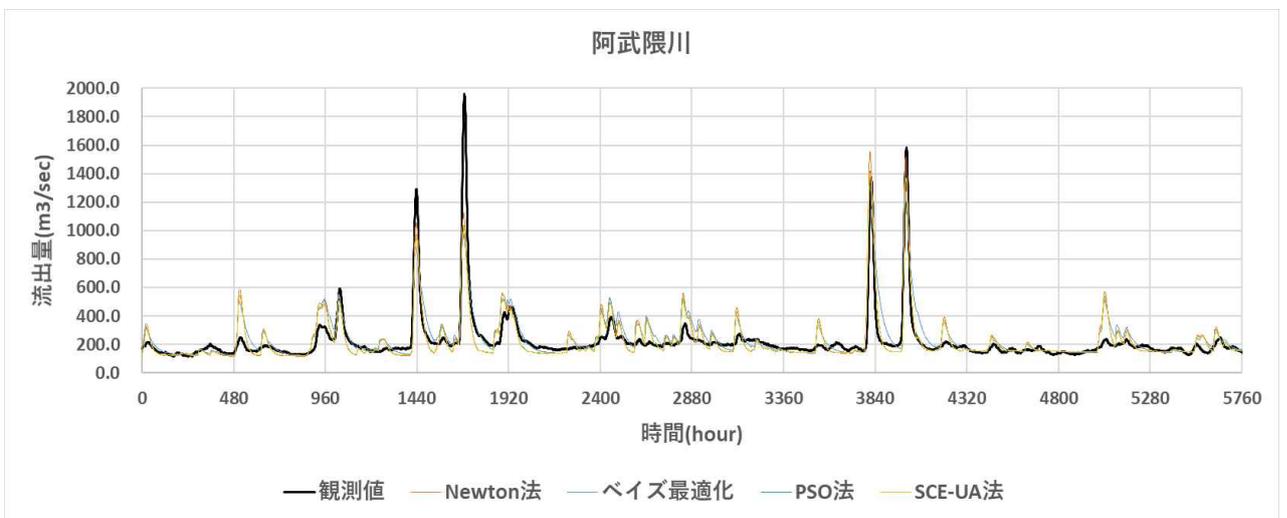


図 3-23 流出量時刻歴（全期間）

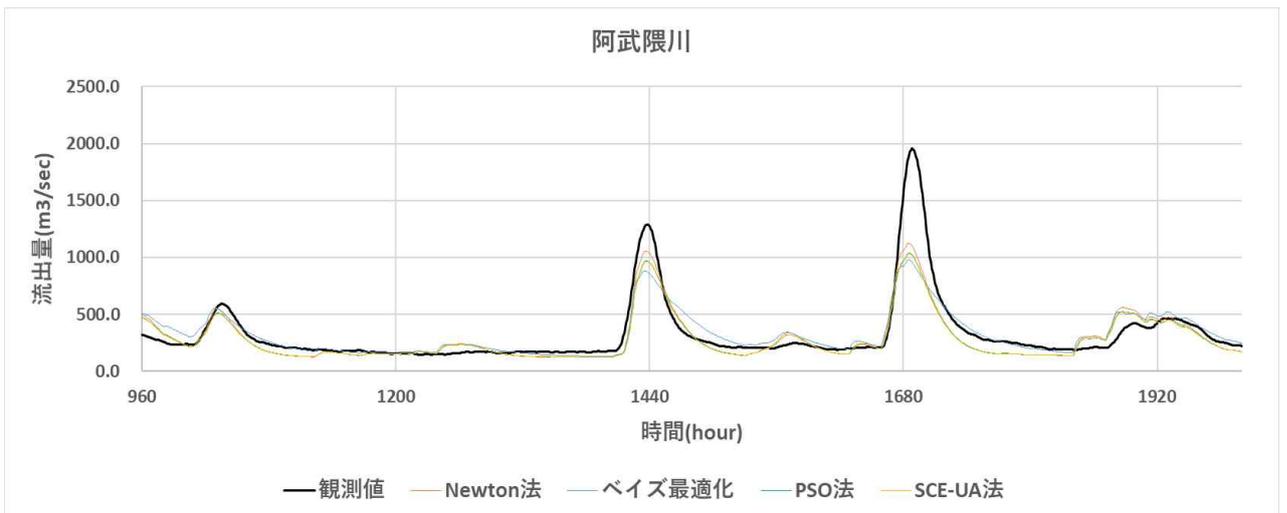


図 3-24 流出量時刻歴（一部期間）

③ 長期期間（10年間）の流出量計算

5河川（前田川、熊川、請戸川、高瀬川、阿武隈川）に対し、2011年3月11日から2021年3月31日の凡そ10年間の長期期間、MERCURYによる計算を行い、10年分の流出量を算出する。その際、MERCURYの3段タンクの初期の貯水高さは表3-3を利用した。また、MERCURYのパラメータは前項で推定した河川毎の最適パラメータを与えた。尚、5河川について流域面積のリストを表3-15に示す。

表 3-15 対象流域

河川	流域面積 [km ²]	平均蒸発散量(mm/h)
前田川	21.000	0.05
熊川	63.900	0.045
請戸川	148.700	0.05
高瀬川	238.600	0.05
阿武隈川	5323.127	0.05

MERCURYでの計算結果（流量、土砂流出量、¹³⁷Cs懸濁態流出量、¹³⁷Cs溶存態流出量）を、河川毎に以下の図番号に示す。尚、¹³⁷Csに係る流出量は、L-Q式を用いて推定している（詳細は文献[3-2]参照）

- ・前田川 : 図 3-25～図 3-29
- ・熊川 : 図 3-30～図 3-34
- ・請戸川 : 図 3-35～図 3-39
- ・高瀬川 : 図 3-40～図 3-44
- ・阿武隈川 : 図 3-45～図 3-49

前田川

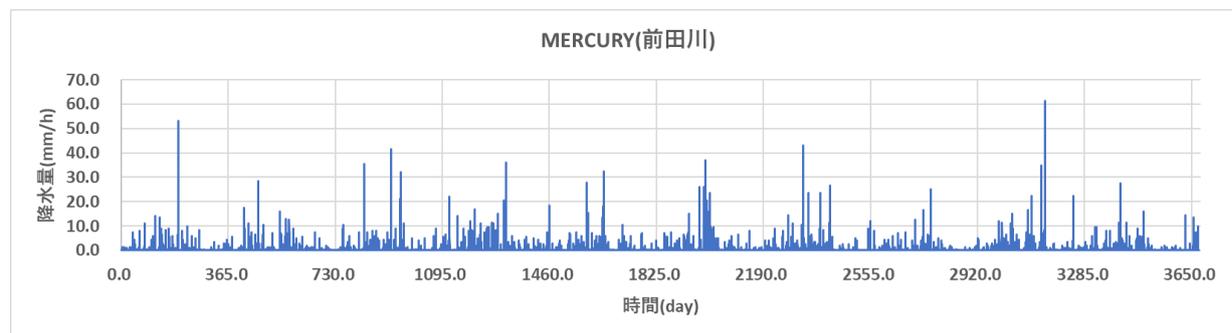


図 3-25 降水量(mm/h) 時刻歴（前田川）

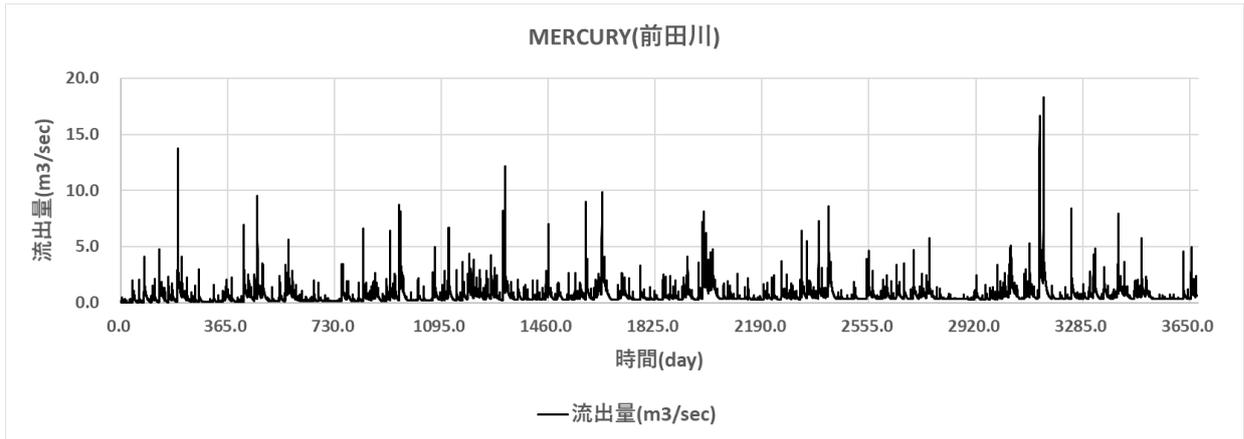


図 3-26 流量(m³/sec) 時刻歴 (前田川)

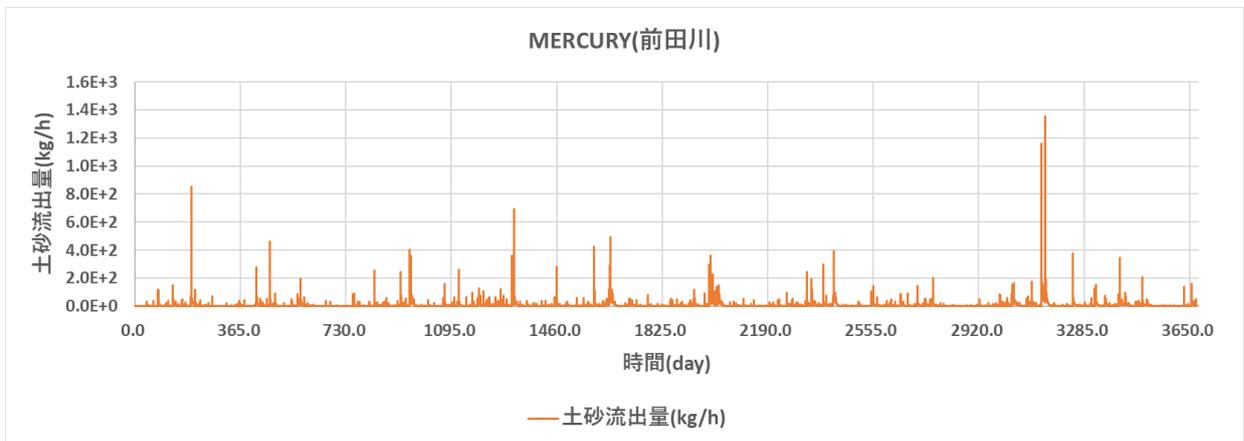


図 3-27 土砂流出量(kg/h) 時刻歴 (前田川)

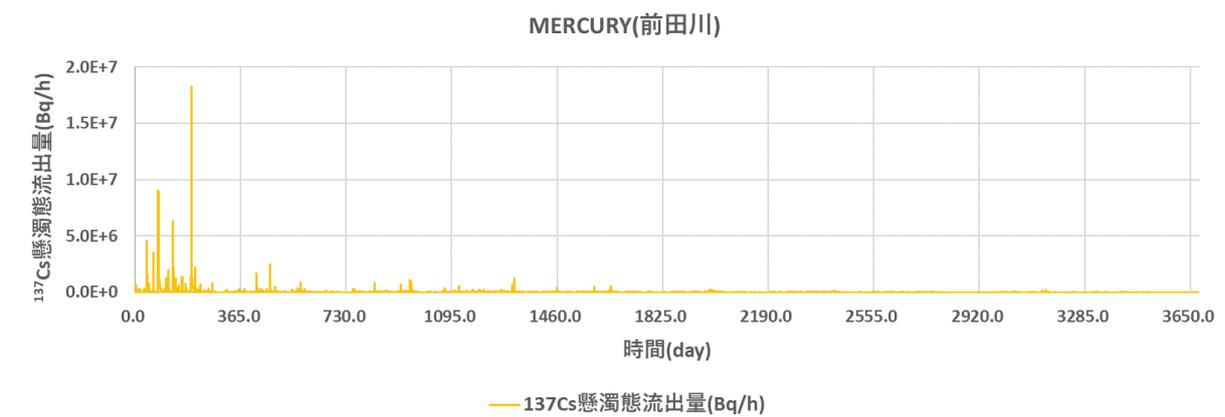


図 3-28 ¹³⁷Cs 懸濁態流出量(Bq/h) 時刻歴 (前田川)

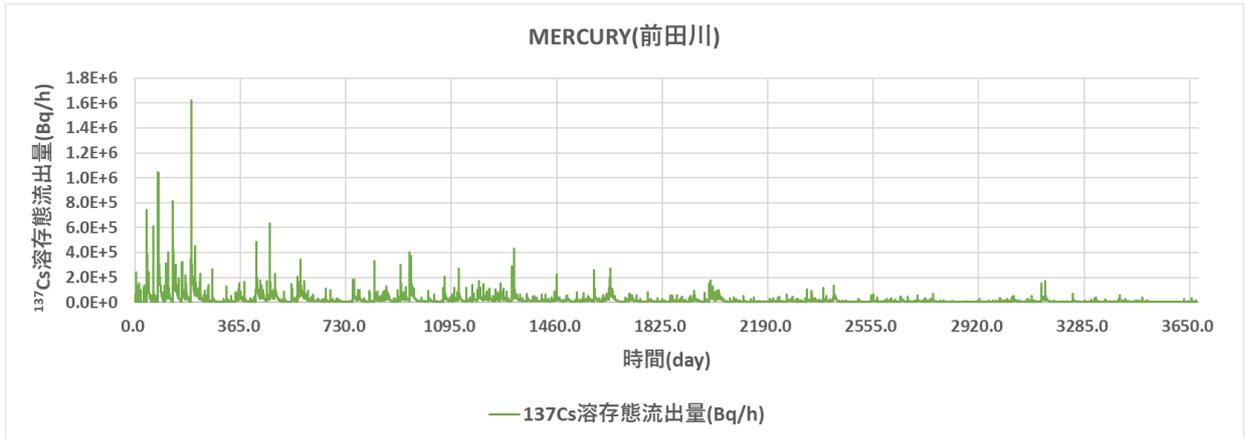


図 3-29 ^{137}Cs 溶存態流出量(Bq/h) 時刻歴 (前田川)

熊川

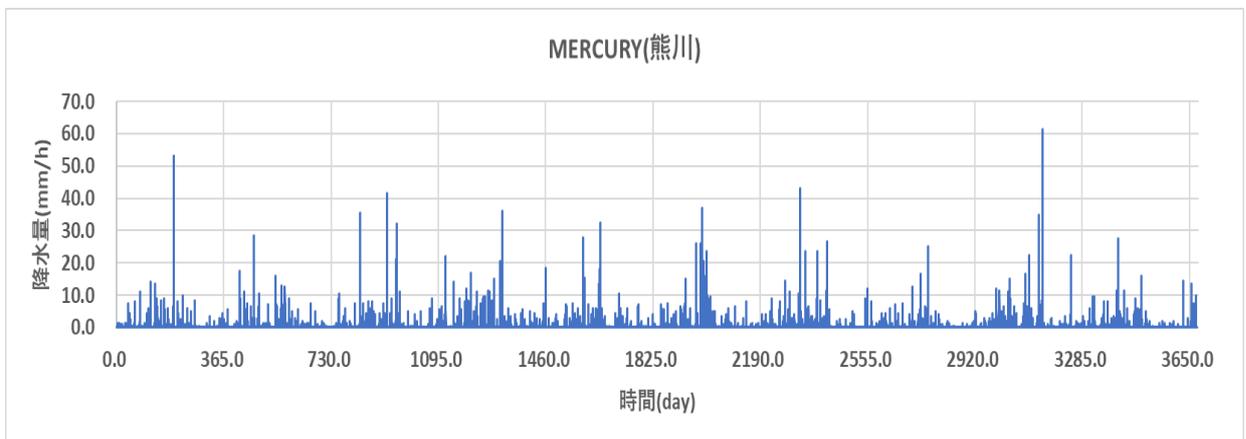


図 3-30 降水量(mm/h) 時刻歴 (熊川)

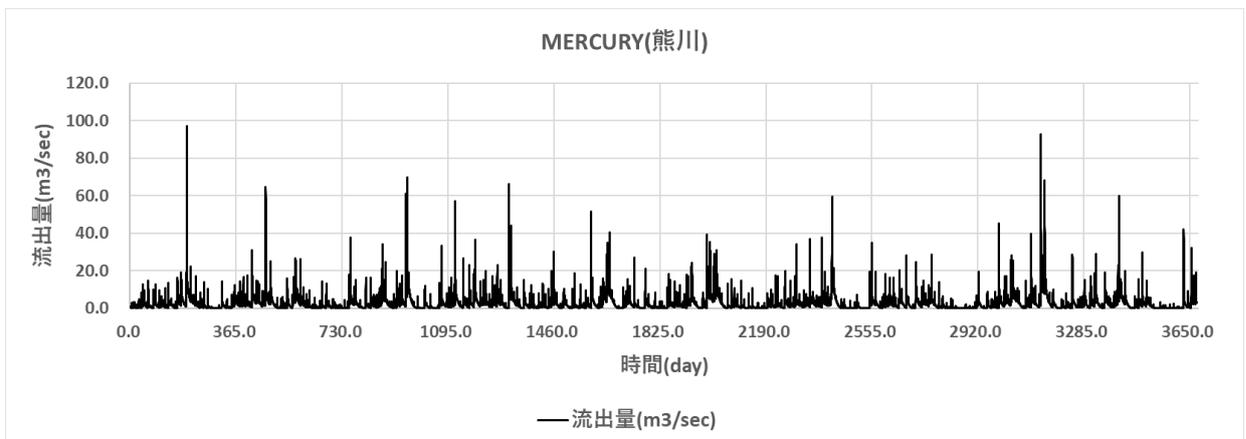


図 3-31 流量(m³/sec) 時刻歴 (熊川)

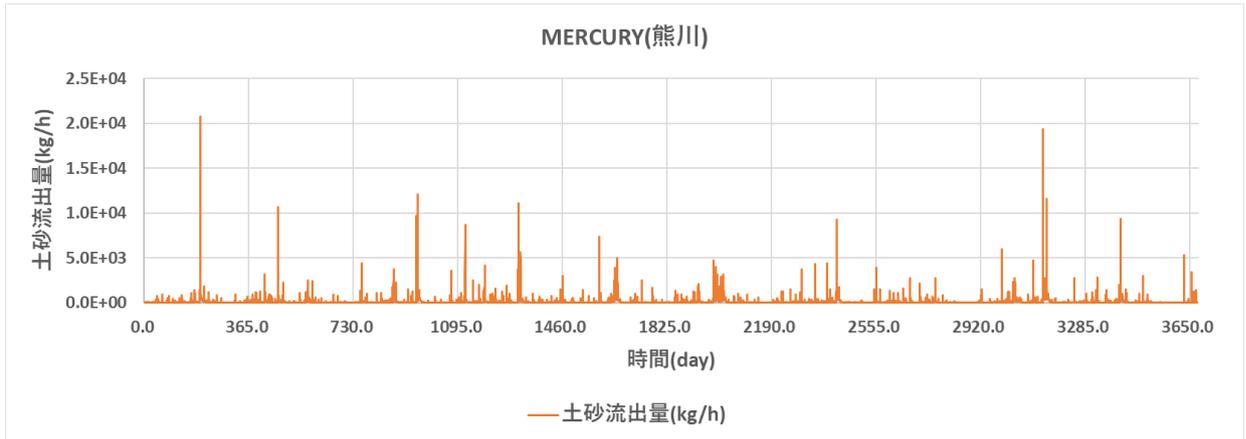


図 3-32 土砂流出量(kg/h) 時刻歴 (熊川)

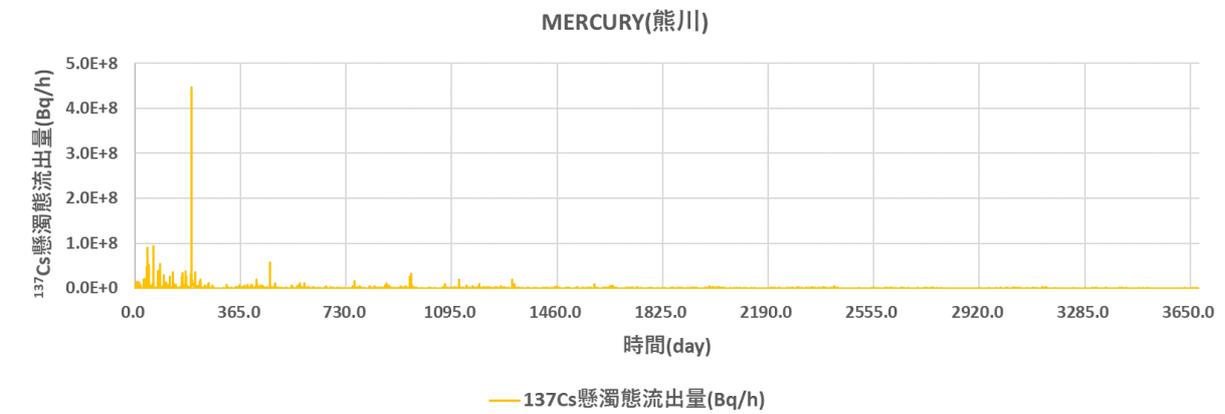


図 3-33 ¹³⁷Cs 懸濁態流出量(Bq/h) 時刻歴 (熊川)

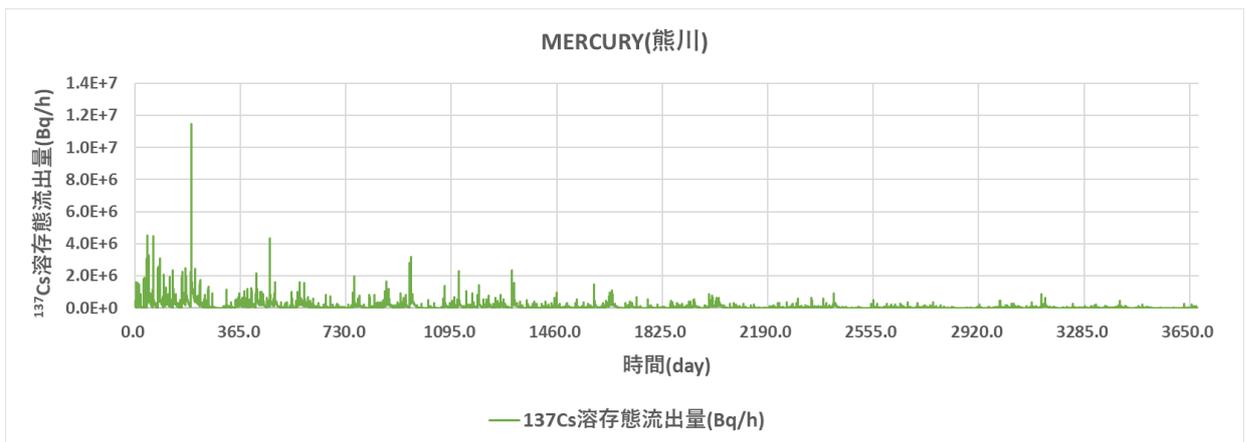


図 3-34 ¹³⁷Cs 溶存態流出量(Bq/h) 時刻歴 (熊川)

請戸川

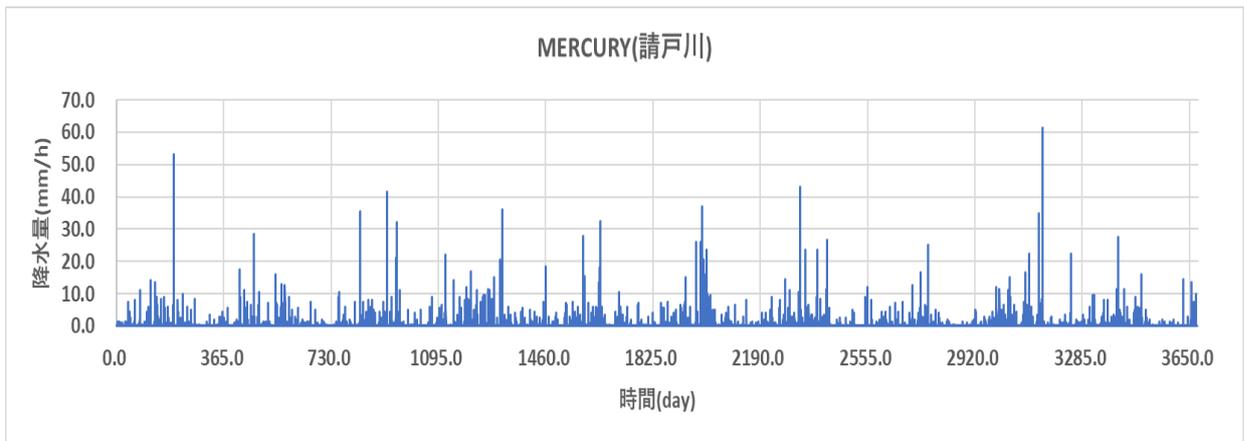


図 3-35 降水量(mm/h) 時刻歴 (請戸川)

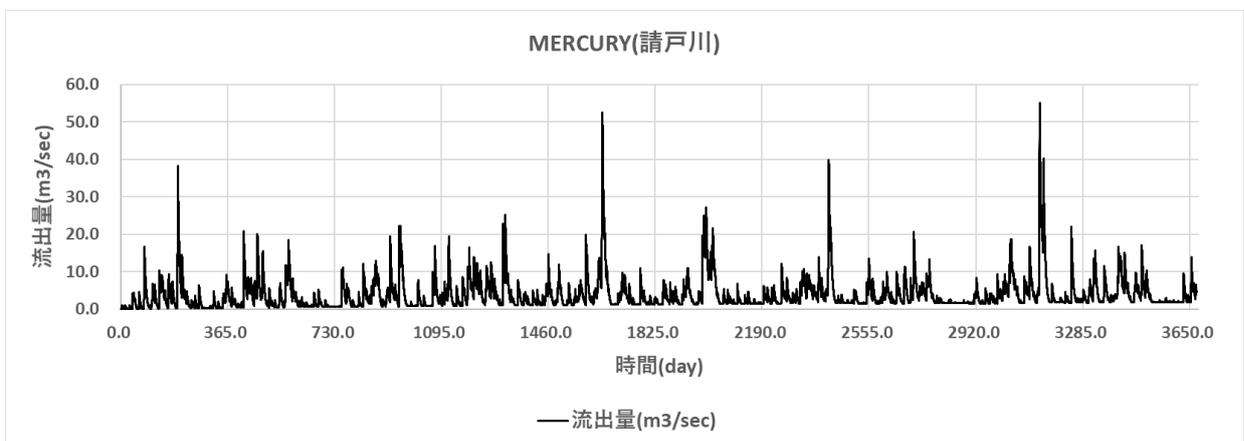


図 3-36 流量(m³/sec) 時刻歴 (請戸川)

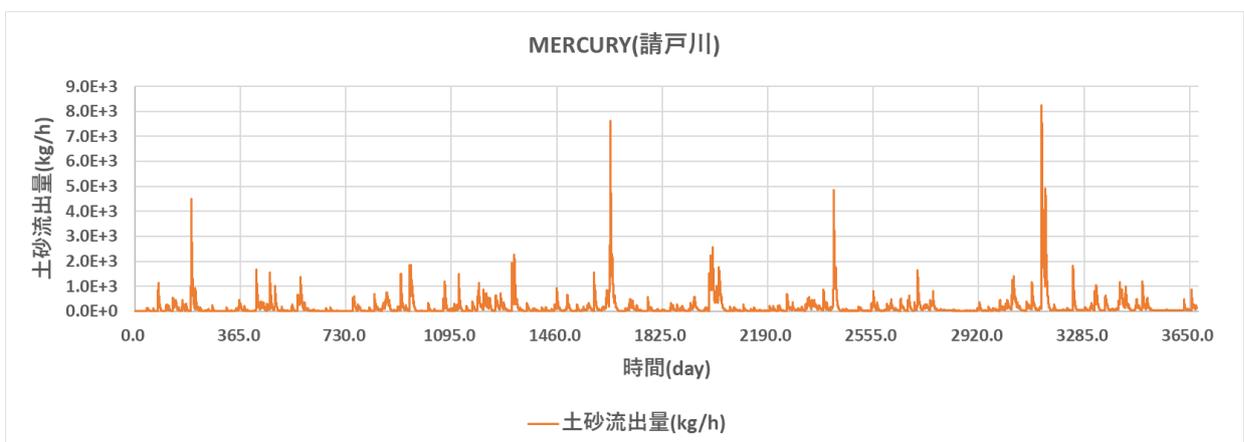


図 3-37 土砂流出量(kg/h) 時刻歴 (請戸川)

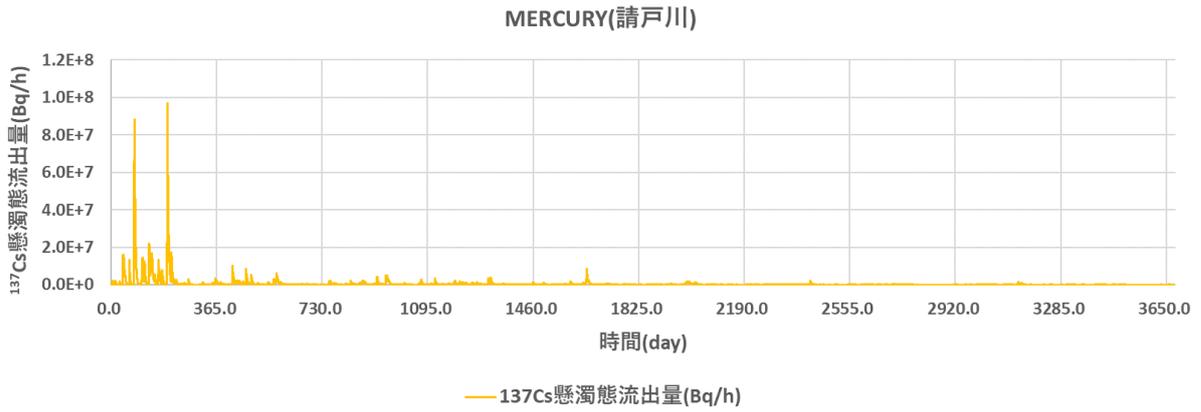


図 3-38 ^{137}Cs 懸濁態流出量(Bq/h) 時刻歴 (請戸川)

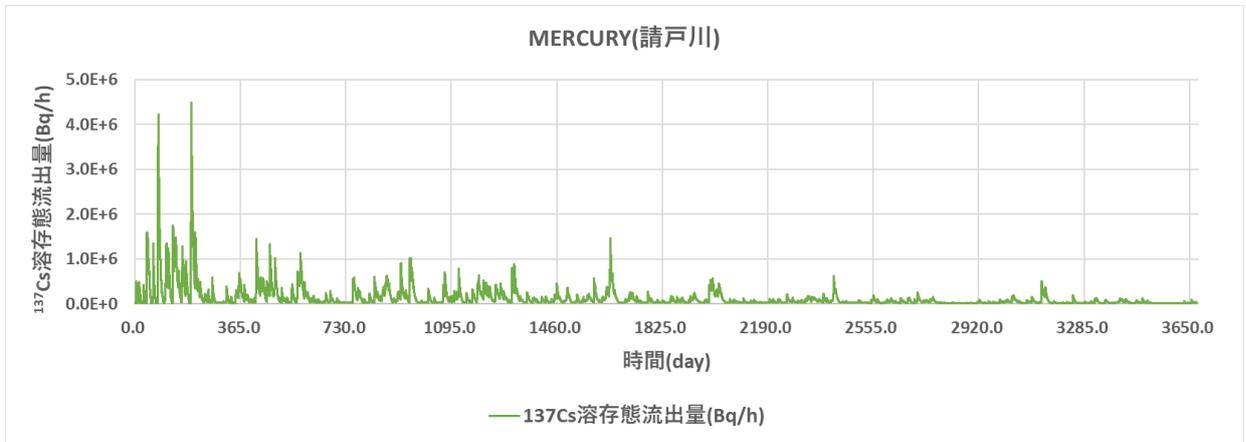


図 3-39 ^{137}Cs 溶存態流出量(Bq/h) 時刻歴 (請戸川)

高瀬川

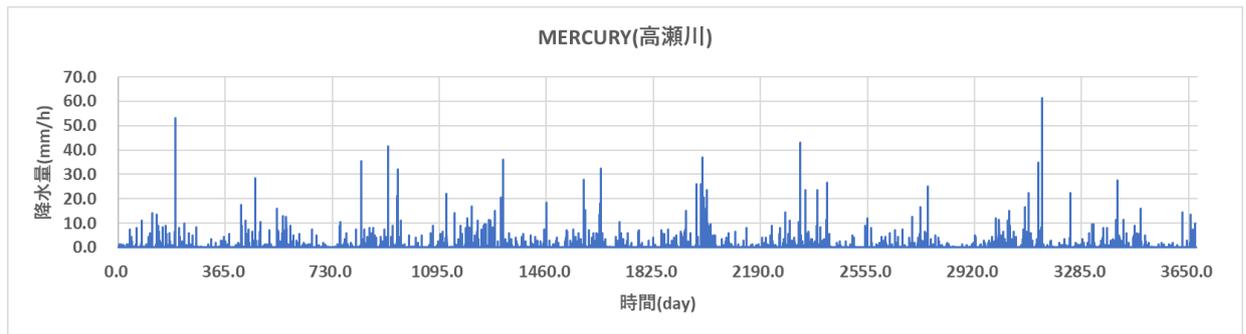


図 3-40 降水量(mm/h) 時刻歴 (高瀬川)

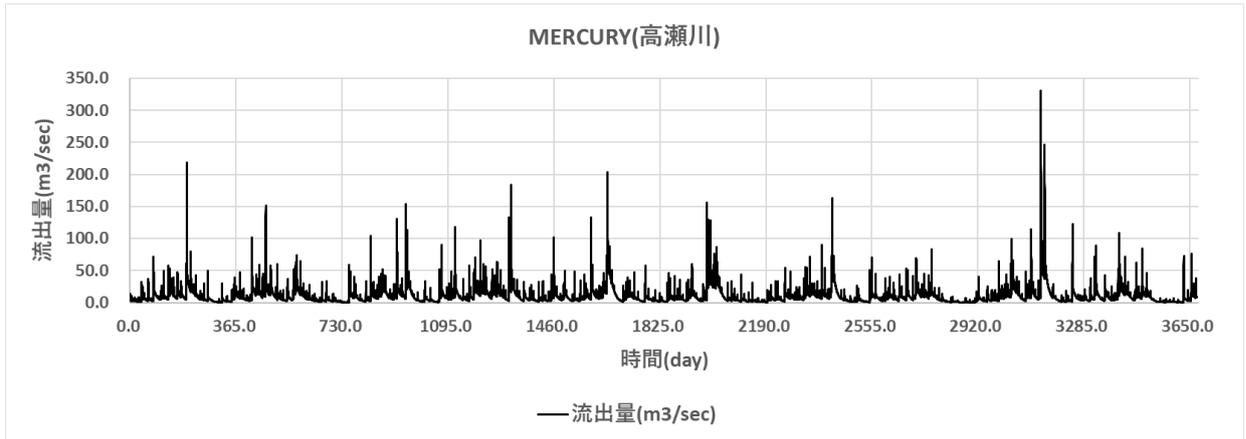


図 3-41 流量(m³/sec) 時刻歴 (高瀬川)

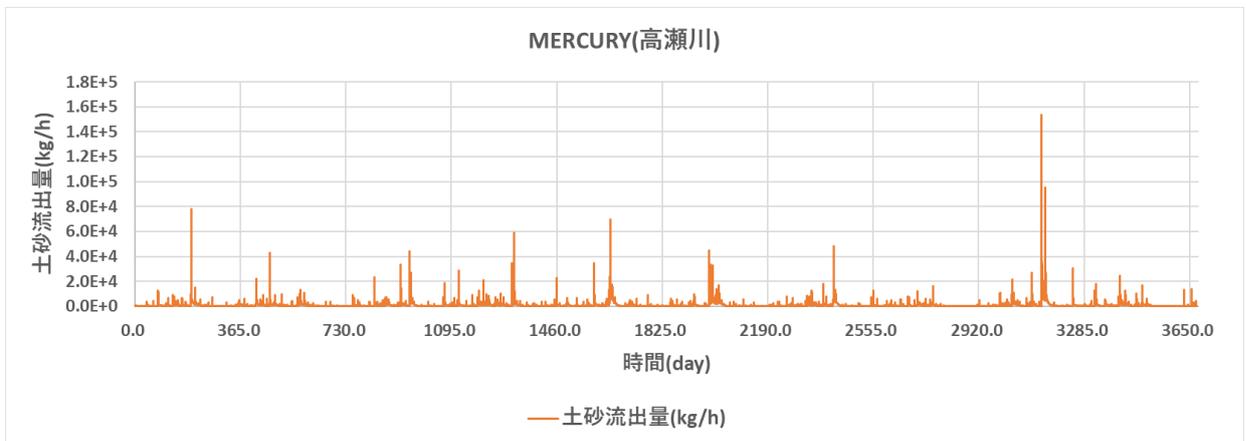


図 3-42 土砂流出量(kg/h) 時刻歴 (高瀬川)

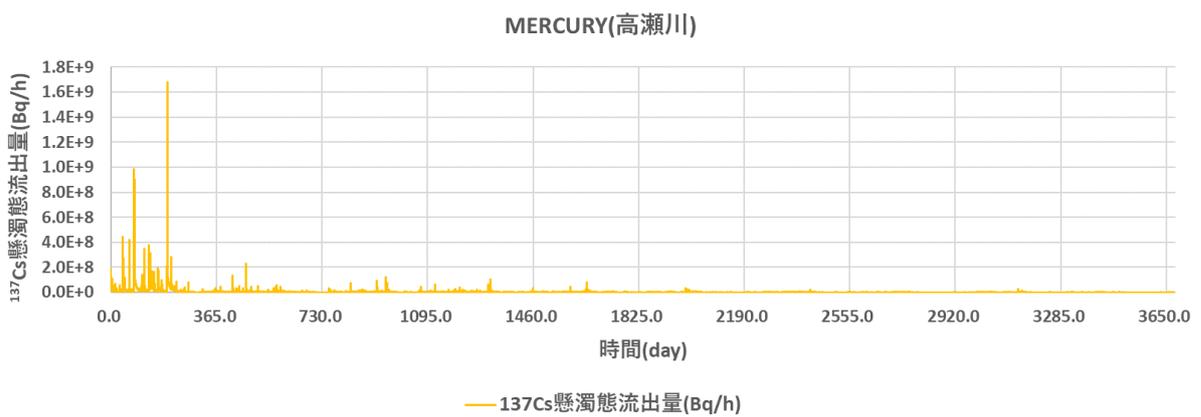


図 3-43 ¹³⁷Cs 懸濁態流出量(Bq/h) 時刻歴 (高瀬川)

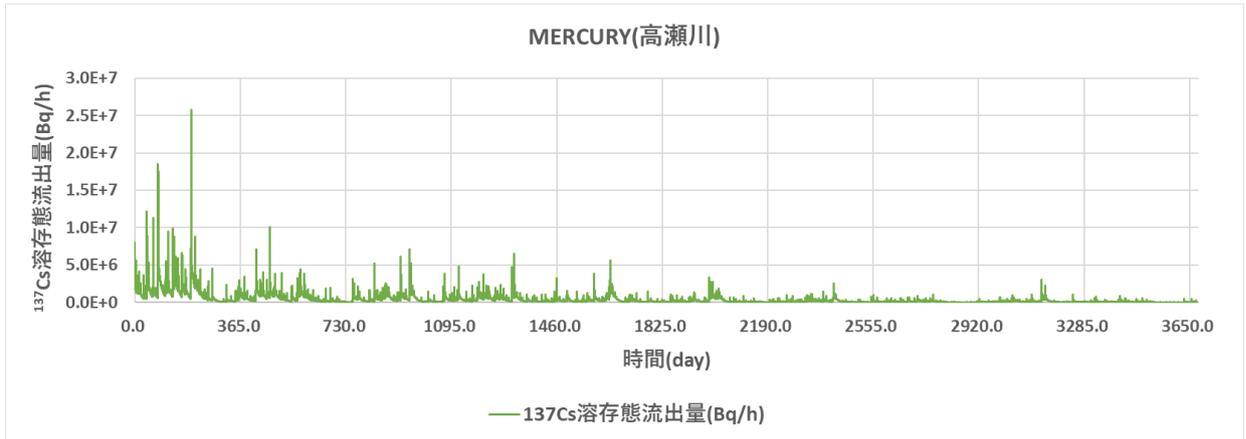


図 3-44 ^{137}Cs 溶存態流出量(Bq/h) 時刻歴 (高瀬川)

阿武隈川

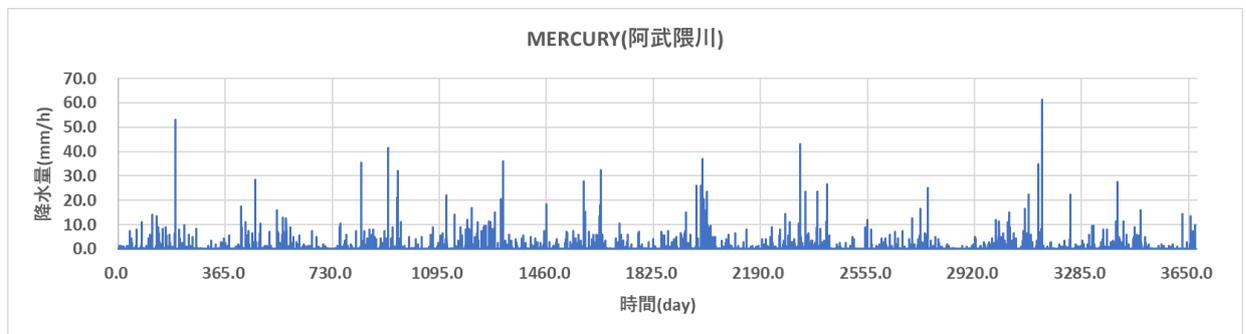


図 3-45 降水量(mm/h) 時刻歴 (阿武隈川)

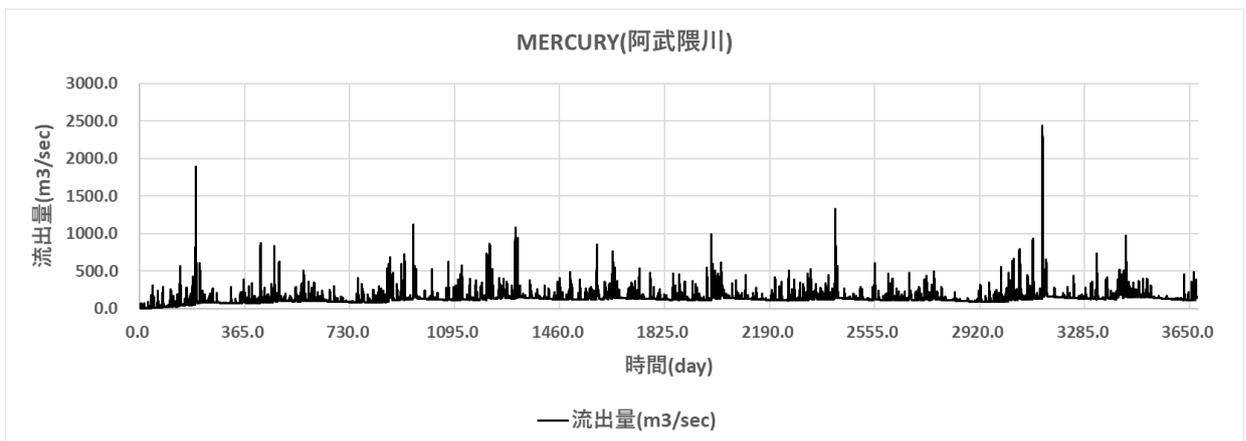


図 3-46 流量(m³/sec) 時刻歴 (阿武隈川)

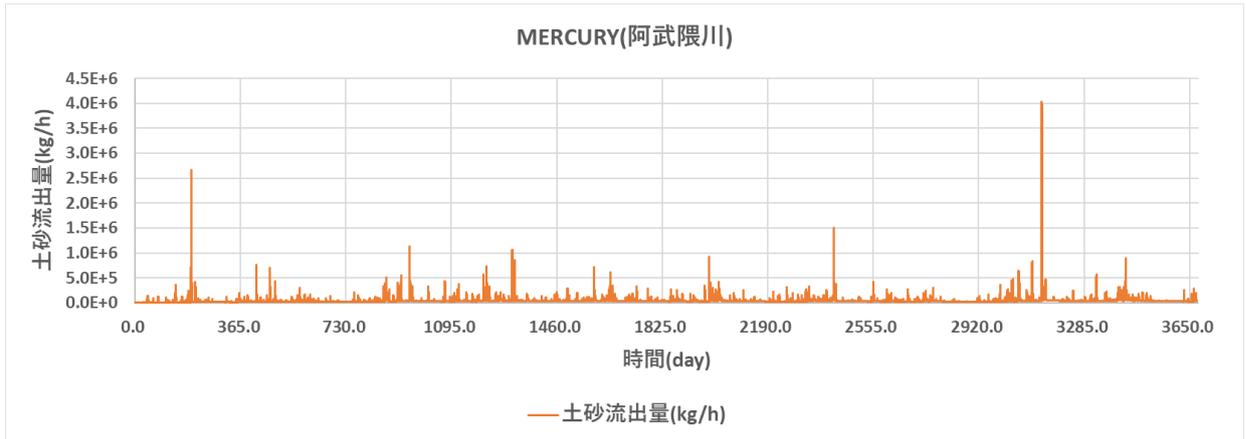


图 3-47 土砂流出量(kg/h) 時刻歴 (阿武隈川)

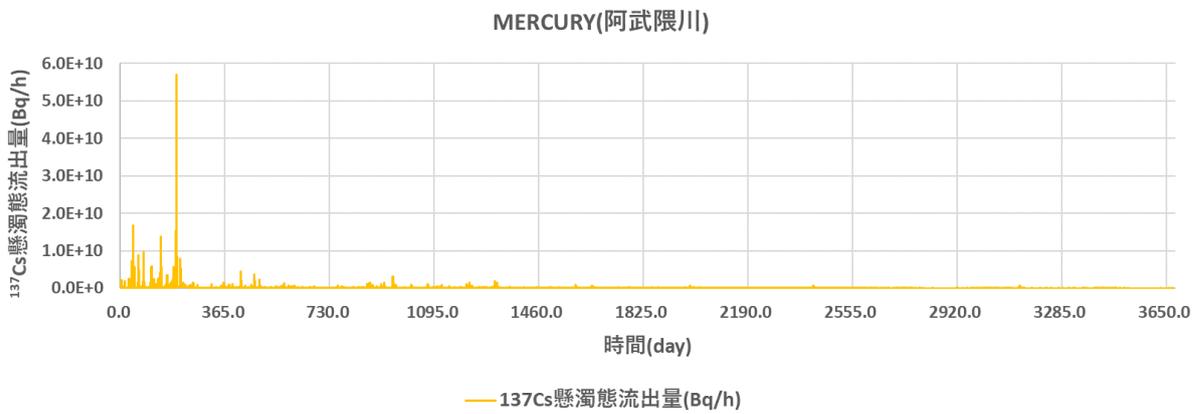


图 3-48 ¹³⁷Cs 懸濁態流出量(Bq/h) 時刻歴 (阿武隈川)

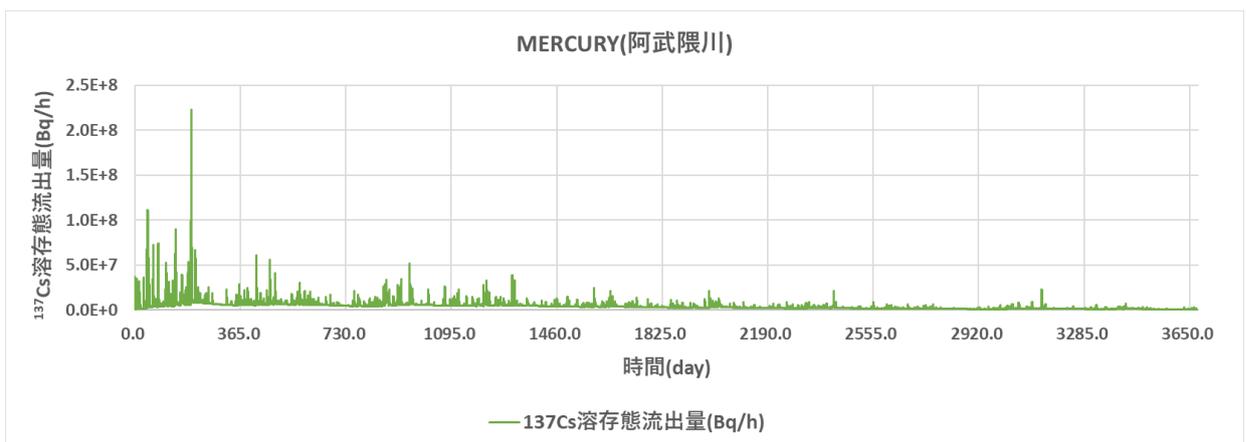


图 3-49 ¹³⁷Cs 溶存態流出量(Bq/h) 時刻歴 (阿武隈川)

3.4 まとめ

本章では、集中定数型モデル MERCURY に対し、地理空間情報を基に GIS を活用するパラメータ設定方法の実装と、各種の自動キャリブレーション機能（最適化機能）の実装を行った。また、それらの機能の検証を福島県内の 5 河川（前田川、熊川、請戸川、高瀬川、阿武隈川）を対象に実施した。

GIS を活用するパラメータ設定法の検証では、重回帰分析の学習データとして用意できたサンプル数が少なく、得られた回帰係数の精度が不十分と考えられる。その一方、学習データの準備に当たっては、各河川の GIS データの面積比率表の作成が必要だが、現状は QGIS 上で手作業にて作成しており、時間がかかるという課題がある。また、重回帰分析として使用したリッジ回帰にはハイパーパラメータ λ があり、この値の設定法が残された課題である。

自動キャリブレーション機能（最適化機能）については、3.2 で報告した通り、4 種の手法（Newton 法、ベイズ最適化、PSO 法、SCE-UA 法）を実装し、いずれの手法においても、パラメータの最適化に成功し、自動キャリブレーション機能の有効性を確認した。尚、3 手法（Newton 法、PSO 法、SCE-UA 法）については、観測データとの誤差を評価し、パラメータを連続的に変化させて、次の最良パラメータの候補を推定することができる。その一方、ベイズ最適化では、キャリブレーション機能を実行する前に探索空間と呼ばれるパラメータの変化する範囲を定義する必要がある。尚、この探索空間は離散的に定義され、ステップごとに離散的な探索空間の一つが次なる最適パラメータの候補となる。従って、最適パラメータを連続的に掃引できないため、他の 3 手法と比較し、推定精度が向上しないと考えられる。最適パラメータを連続空間内で選択する拡張が望まれる。

章末補足事項

誤差関数

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(3-75)によって定義される。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (3-75)$$

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。参考として、NSEは文献[3-12]等で使用されている。

② RSE(Relative Squared Error)

相対二乗誤差 RSE(Relative Squared Error)は式(3-76)で定義される。

$$RSE = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (3-76)$$

NSE と RSE の間には、 $NSE = 1 - RSE$ の関係が成立する。参考として、RSE は下記の WEB サイトでもその定義を確認できる (https://www.saedsayad.com/model_evaluation_r.htm)。

参考文献

MERCURY について

- [3-1] 佐久間一幸、「MERCURY バージョン 1.1 理論/ユーザーマニュアル」.
- [3-2] Kazuyuki Sakuma, Takahiro Nakanishi, Kazuya Yoshimura, Hiroshi Kurikami, Kenji Namba, Mark Zheleznyak, “A modeling approach to estimate the 137Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017”, Journal of Environmental Radioactivity, Volume 216, May 2020, Pages 106201. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X19303406>.

GIS 活用パラメータ設定

- [3-3] 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、Vol.29, No.1, p.32-43, 2016. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/29/1/29_32/article-char/ja/.
- [3-4] 横尾善之、風間聡、「GIS データによるタンクモデル定数の推定」、水工学論文集、Vol.42, p.100-114, 1998. https://www.jstage.jst.go.jp/article/prohe1990/42/0/42_0_109/pdf-char/en.
- [3-5] 持橋大地、大羽成征、「ガウス過程と機械学習」、講談社 MLP 機械学習プロフェッショナルシリーズ、2019. <https://www.kspub.co.jp/book/detail/1529267.html>.

パラメータ最適化機能

- [3-6] 杉原成満、福田慎哉、倉本和正、荒木義則、朝位孝二、古川浩平「SCE-UA 法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生危険基準線の設定」、土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.67, No.1, p.1-13, 2011. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejsp/67/1/67_1_1/article-char/ja/.
- [3-7] 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、No.589, p.7-18, 2002. <https://river.ceri.go.jp/contents/archive/uploads/067-078.pdf>.
- [3-8] 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、Vol.20, No.5, Sep. 2007. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/20/5/20_5_450/article-char/ja/
- [3-9] 田中丸治哉、「タンクモデル定数の大域的探索」、農業土木学会論文集、Vol.1995, p.503-512, 1995. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsidre1965/1995/178/1995_178_503/article-char/ja/.
- [3-10] “PHYSBO--optimization tools for PHYSics based on Bayesian Optimization”. <https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/physbo/about/>.
- [3-11] Yuichi Motoyama, Ryo Tamura, Kazuyoshi Yoshimi, Kei Terayama, Tsuyoshi Ueno, Koji Tsuda, “Bayesian optimization package: PHYSBO”, arXiv:2110.07900. Available from <https://arxiv.org/abs/2110.07900>.

章末補足参考文献

- [3-12] 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), Vol.72, No.5, I_35-I_43(2016). https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejer/72/5/72_I_35/_pdf

■ 4章 分布型定数モデルの整備と試解析

4.1 本章の概要

本事業では、陸域に降着し河川から海洋へと流出する放射性核種の動態解析を行うため、河口域シミュレーションモデル（本作業では、機構が開発した海洋・沿岸シミュレーションコード：3D-Sea-SPECを対象とする）に陸域からのインプット情報を与えることを可能にする陸域動態モデルの改良整備を行い、福島県内河川水系での検証作業を実施することを目的としている。

本章にて報告の対象とするモデルは、分布定数型流出モデルであり、日本原子力研究開発機構が開発した陸域動態モデル RADFLOW とする。RADFLOW は、分布定数型流出モデルであるが、放射性物質の動態解析を行うために開発されたコードであり、水・懸濁粒子と放射性物質の動態解析に実績を有する他、改良整備が容易であるという利点がある（詳細は文献[4-1][4-2]参照）。本事業では、RADFLOW の改良整備に当たり、先ず、地理空間情報から透水係数を推定する方法を開発し実装する。これは、RADFLOW の他の流域への適用性と共に汎用性を向上させるための整備に当たる。また、降雨量と流出量が観測されている流域に対し、自動的にパラメータを最適化するための機能についても実装する。次に、これらの整備作業の結果を検証するため、試解析対象流域を福島県の請戸川（高瀬川含む）、前田川、熊川の流域とし、検証試験を行う。本章の構成は下記の通りである。本章 2 節（4.2）で、現状版の RADFLOW を対象に地理空間情報を基に透水係数の設定に係る作業内容と自動的にパラメータを最適化するための作業内容を記す。本章 3 節（4.3）では、設定した透水係数と自動最適化機能を用いて福島県内の流域（上記河川）に適用し、性能評価試験の内容と結果について記す。

4.2 分布定数型流出モデルの整備

4.2.1 地理空間情報による透水係数の設定

陸域動態モデル RADFLOW を用いて地下水流動を計算する際、必要なパラメータである透水係数（および間隙率、粗度係数）等のモデル定数に対し、公開されている地理空間情報を基にテーブルデータを作成し、それを読み込むモジュールを RADFLOW プログラムに実装する。対象とする地理空間情報は以下の 3 種（土地利用図と土壤図、表層地質図）である。地理空間情報の取得方法やそれらの加工方法の詳細については付録 2.1～2.3 および付録 2.8, 2.9 を参照すること。また、付録 2.7 に GIS に関する基礎概念を簡単にまとめた。

- ・土地利用図（ALOS18.03）
- ・土壤図（50 万分の 1 土地分類基本調査、20 万分の 1 土地分類基本調査）
- ・表層地質図（50 万分の 1 土地分類基本調査、20 万分の 1 土地分類基本調査）

RADFLOW では複数の地下層の各地点において、モデル定数（パラメータ）を設定する必要があり、本事業では、表層および地下 1-2 層は土地利用図、3-5 層は土壤図、6-9 層（それ以降の下層）は表層地質図を参考に透水係数を適切に設定可能とする。テーブルデータの区分や値については文献等を参考に設定する（詳細は[4-3]～[4-8]参照）。具体的なテーブルデータは表 4-1～表 4-3 に示す。

表 4-1 テーブルデータ (土地利用データ)

属性ID	Label	ラベル	透水係数(m/s)	粗度係数	間隙率(-)
0	River	河川	1.00E-04	0.030	0.50
1	Water	水域	1.00E-04	0.030	0.50
2	Urban	都市	1.00E-06	0.300	0.25
3	Rice paddy	水田	1.00E-07	0.100	0.20
4	Crop	畑地	1.00E-03	0.300	0.50
5	Grassland	草地	1.00E-03	0.300	0.50
6	Deciduous broad-leaved forest	落葉広葉樹(DBF)	1.00E-03	0.500	0.50
7	Deciduous needle-leaved forest	落葉針葉樹(DNF)	1.00E-03	0.500	0.50
8	Evergreen broad-leaved forest	常緑広葉樹(EBF)	1.00E-03	0.500	0.50
9	Evergreen needle-leaved forest	常緑針葉樹(ENF)	1.00E-03	0.500	0.50
10	Bare land	裸地	1.00E-03	0.300	0.50
11	Snow and ice	雪氷	1.00E-03	0.300	0.50
253	Other	その他	1.00E-04	0.030	0.50
255	No data	データなし	1.00E-04	0.030	0.50

表 4-2 テーブルデータ (土壌図データ)

Label	透水係数(m/s)	間隙率(-)
グライ土	1.00E-07	0.20
ポドゾル	1.00E-04	0.30
灰色低地土	1.00E-07	0.20
褐色森林土	1.00E-03	0.50
褐色低地土	1.00E-03	0.50
岩屑土	1.00E-03	0.50
黒ボク土	1.00E-03	0.50
水面	1.00E-05	0.30
赤黄色土	1.00E-07	0.20
泥炭土	1.00E-05	0.70
埋立地	1.00E-05	0.70
未熟土	1.00E-03	0.50
未定義	1.00E-04	0.30
その他	1.00E-04	0.30

表 4-3 テーブルデータ (表層地質図)

Label	透水係数(m/s)	間隙率(-)
安山岩類	1.00E-06	0.10
火山灰・ローム	1.00E-07	0.60
花崗岩類	1.00E-09	0.25
結晶片岩類	1.00E-09	0.25
玄武岩類	1.00E-07	0.10
洪積砂礫(段丘堆積物を含む)	1.00E-06	0.30
砂岩・泥岩・礫岩など	1.00E-06	0.30
砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリーンタフを含む)(緑色凝灰岩)	1.00E-06	0.30
砂岩・頁岩・礫岩など	1.00E-06	0.10
砂丘砂	1.00E-06	0.30
砂礫・粘土	1.00E-05	0.30
蛇紋岩・橄欖岩	1.00E-08	0.30
水域	1.00E-06	0.30
石灰岩	1.00E-09	0.20
粘板岩・砂岩・チャート・シャルスタイン(輝緑凝灰岩)	1.00E-07	0.30
斑れい岩・輝緑岩	1.00E-08	0.15
片麻岩類	1.00E-09	0.30
埋立地	1.00E-07	0.30
溶結凝灰岩	1.00E-10	0.30
流紋岩類	1.00E-08	0.30
その他	1.00E-08	0.30

4.2.2 ベイズ最適化による透水係数の修正

上記で作成するテーブルデータの値に対し、複数の流域を対象にデータをキャリブレーションする機能を開発する。キャリブレーションには、Python の多目的ベイズ最適化ライブラリ「PHYSBO」を利用した。「PHYSBO」の詳細については文献[4-9],[4-10]を参照すること。

また、キャリブレーション機能の開発に際して、PHYSBO を活用した RADFLOW のパラメータ最適化システムを実装した。システムの詳細については付録 2.4, 2.5 を参照すること。

4.3 分布定数型流出モデルの試解析（前田川、熊川、請戸川（高瀬川含む））

上記・本章 2 節（4.2）において実装したモデルを用いて福島県における河川（前田川、熊川、請戸川（高瀬川含む））に対し、試解析を実施する。

4.3.1 地理空間情報による透水係数の設定

① 概要

本章 2 節（4.2）において実装した地理空間情報による透水係数の設定機能を用いて前田川、熊川、請戸川流域に対する流出試解析を実施する。モデルにおける透水係数の設定方法としては、次の 2 種類とし、両者の解析結果の違いを比較する。

- ・ 一様設定
- ・ GIS 設定

上記「一様設定」とは、既存 RADFLOW に実装されている、各々の地下層に対し、一様にモデル定数（透水係数、粗度係数、間隙率）を設定する手法を指す。一方、「GIS 設定」では、本章 2 節（4.2）にて記した、地理空間情報（GIS 情報）により分布定数としてモデル定数を設定する。計算期間は、降雨イベントを含む 2014 年 5 月～10 月の凡そ半年間とする。尚、流出解析を実行する直前、各流域の平均降雨量を一定に与え続けるスピニアップ計算（10 年～15 年の期間）を実施する。スピニアップ計算とは、地下水を満水状態にしてから有効降水量を与え続け、平衡状態時の地下水位と河川形成を実施する計算を指す。尚、計算ケース毎の ID や図中での凡例名について表 4-4 から表 4-6 に記す。ここで、「表層流の水位上限(m)」は、RADFLOW で計算される表層流の水位について、その上限値として設定する値を意味する。

表 4-4 計算ケース（前田川）

ケース ID	図凡例のケース名	透水係数の設定方法	表層流の水位上限(m)
M1	Uniformly_rh1	一様設定	1.0
M2	Distributedly_rh1	GIS 設定	

表 4-5 計算ケース（熊川）

ケース ID	図凡例のケース名	透水係数の設定方法	表層流の水位上限(m)
M1	Uniformly_rh1	一様設定	2.0
M2	Distributedly_rh1	GIS 設定	

表 4-6 計算ケース（請戸川）

ケース ID	図凡例のケース名	透水係数の設定方法	表層流の水位上限(m)
U1	Uniformly_rh2	一様設定	2.0
U2	Distributedly_rh2	GIS 設定	

② 計算結果

上述の計算ケースについて解析結果を示す。各ケースについて、流出量の計算値と観測値の誤差を表 4-7～表 4-9 に示す。その際、誤差関数として RSE(Relative Square Error)を採用する（3 章末参照）。また、流出量の時刻歴結果の比較図を図 4-1～図 4-11 流出量の結果比較（地理空間情報反映の効果）（一部期間）（高瀬川）に示す。

表 4-7 観測値との誤差（前田川）

ケース ID	図凡例のケース名	RSE
M1	Uniformly_rh1	2.196
M2	Distributedly_rh1	1.177

表 4-8 観測値との誤差（熊川）

ケース ID	図凡例のケース名	RSE
K2	Uniformly_rh2	2.905
K4	Distributedly_rh2	0.812

表 4-9 観測値との誤差（請戸川）

ケース ID	図凡例のケース名	河川	RSE	RSE 合計
U1	Uniformly_rh2	請戸川	8.906	15.903
		高瀬川	6.997	
U2	Distributedly_rh2	請戸川	2.104	4.008
		高瀬川	1.904	

※請戸川の解析では、請戸川と高瀬川の各々の河川で RSE(Relative Square Error)を計算した。

以上の試解析結果をまとめると、平水時の基底流出量と降雨イベント時の流出量のピーク値の観点から、前田川と熊川、請戸川（高瀬川含む）の 3 河川について、「GIS 設定」によって透水係数を設定したケースの方が再現性が向上することが分かる。（前田川：図 4-3 参照、熊川：図 4-6 参照、請戸川：図 4-9 参照、高瀬川：図 4-11 参照）。実際、誤差 RSE(3 章末補足参照)を見ると、「GIS 設定」によって透水係数を設定したケースの方が「一様設定」よりも小さい値を示す。尚、「基底流出」という用語を月単位から年単位の長時間かけて流出する遅い中間流と地下水流を合わせた水流出の意味で使用。

上記の試解析結果から、「GIS 設定」により、観測量の再現性が明らかに向上していることが分かる。しかし、元来の基底流出量に相当する流出量の再現性は十分ではなく（計算は過小評価となっている等）、パラメータの設定に課題があると考えられる。パラメータの環境条件に対するチューニング等が更に必要と考えられる。

前田川

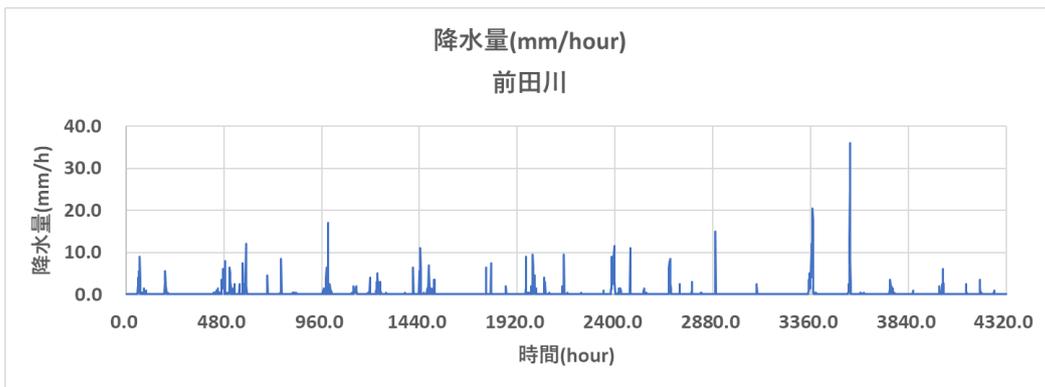


図 4-1 降雨量（前田川） 平均降雨量：0.191(mm/h)

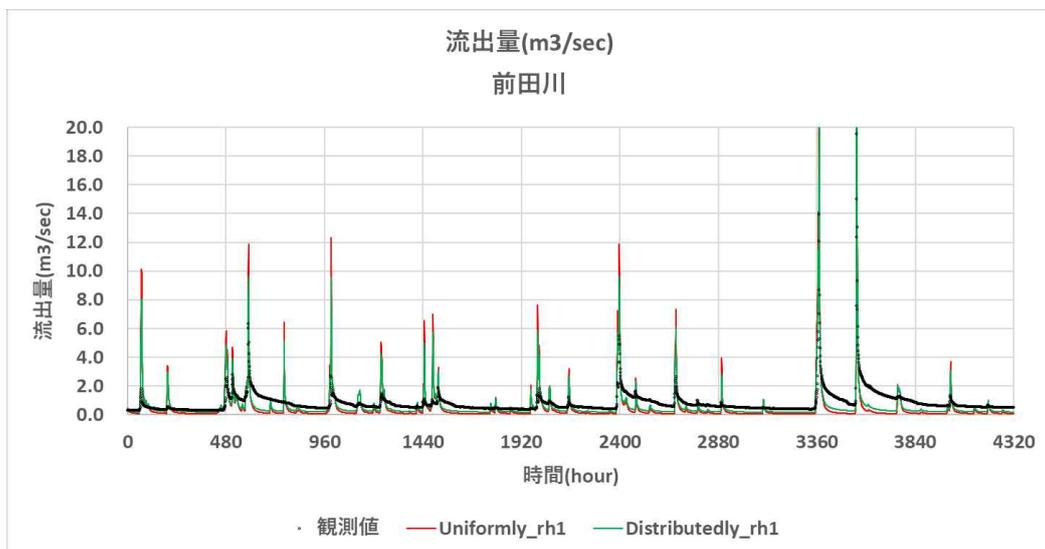


図 4-2 流出量の結果比較（地理空間情報反映の効果）（全期間）（前田川）

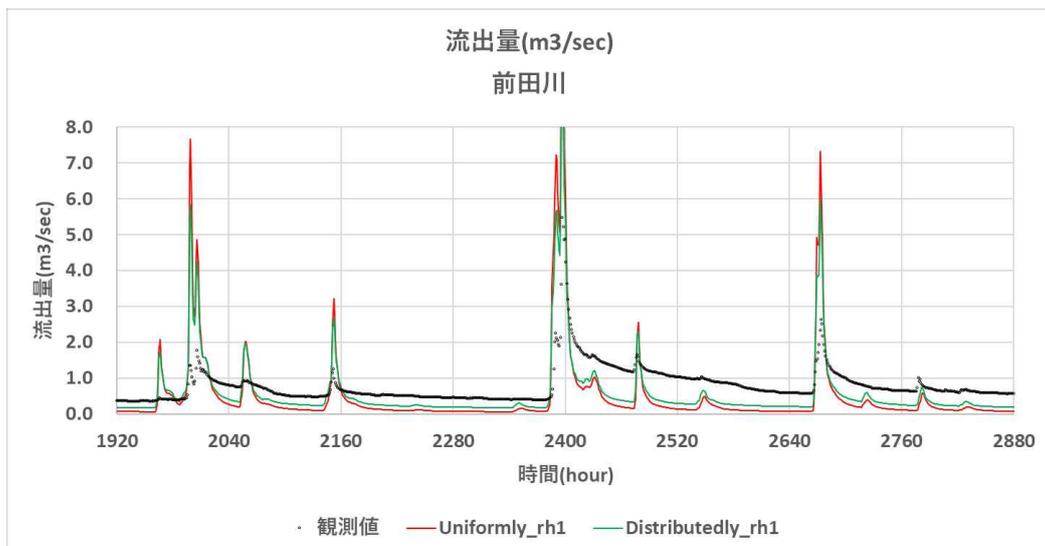


図 4-3 流出量の結果比較（地理空間情報反映の効果）（一部期間）（前田川）

熊川

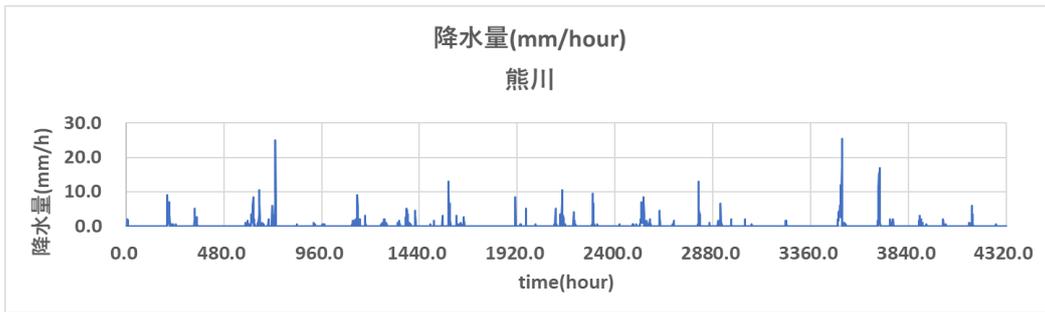


図 4-4 降雨量（熊川） 平均降雨量：0.228(mm/h)

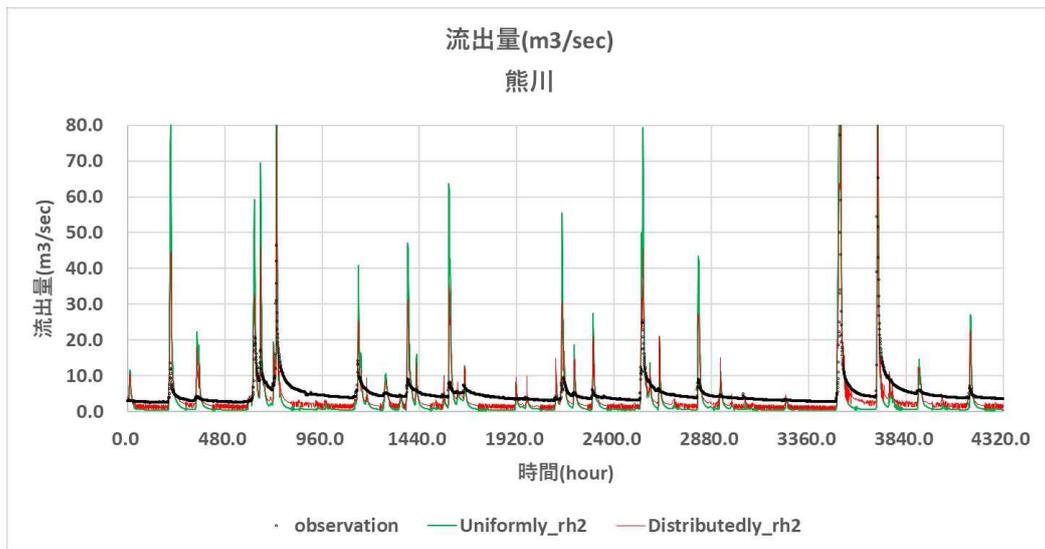


図 4-5 流出量の結果比較（地理空間情報反映の効果）（全期間）（熊川）

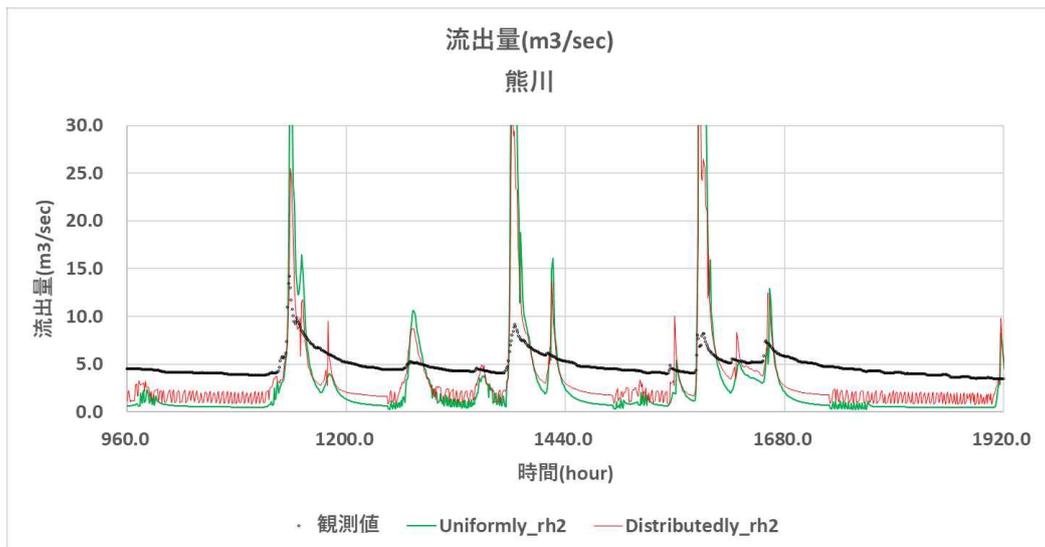


図 4-6 流出量の結果比較（地理空間情報反映の効果）（一部期間）（熊川）

請戸川

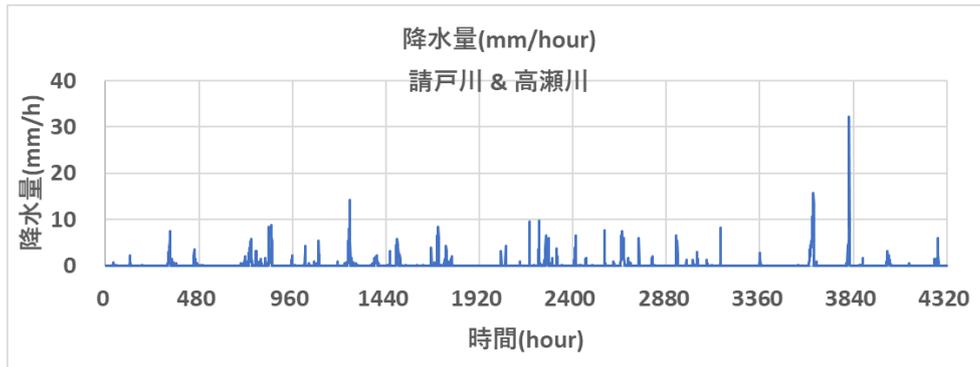


図 4-7 降雨量（請戸川） 平均降雨量：0.182(mm/h)

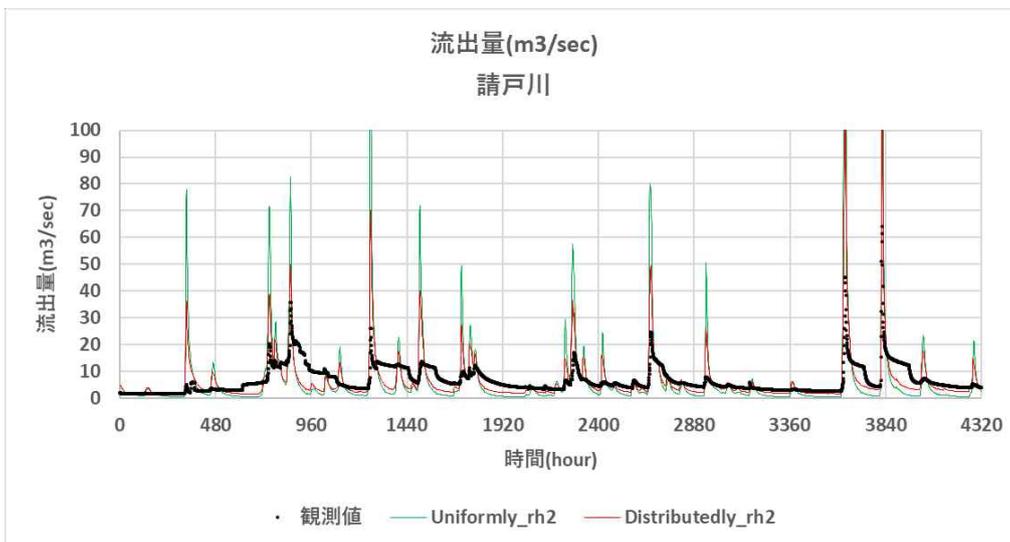


図 4-8 流出量の結果比較（地理空間情報反映の効果）（全期間）（請戸川）

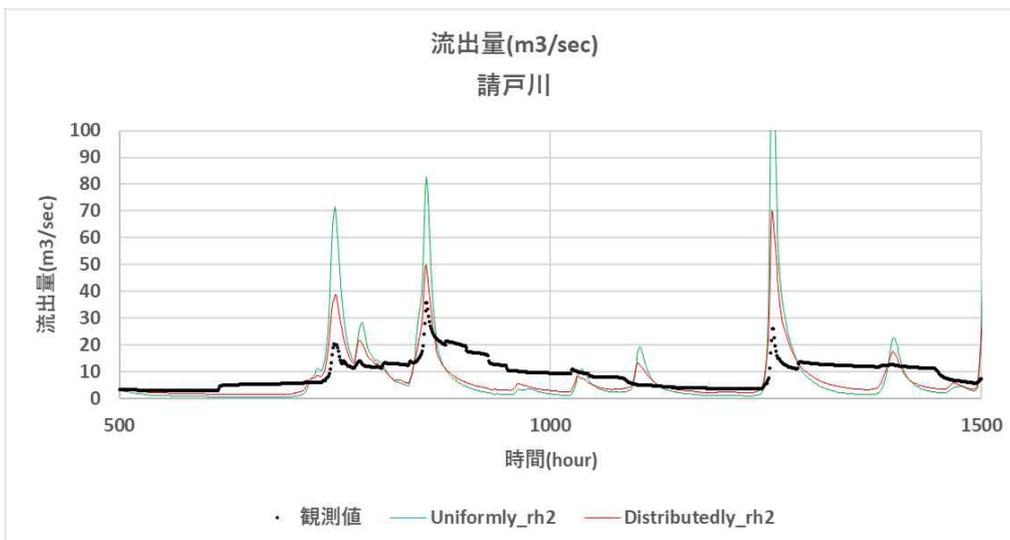


図 4-9 流出量の結果比較（地理空間情報反映の効果）（一部期間）（請戸川）

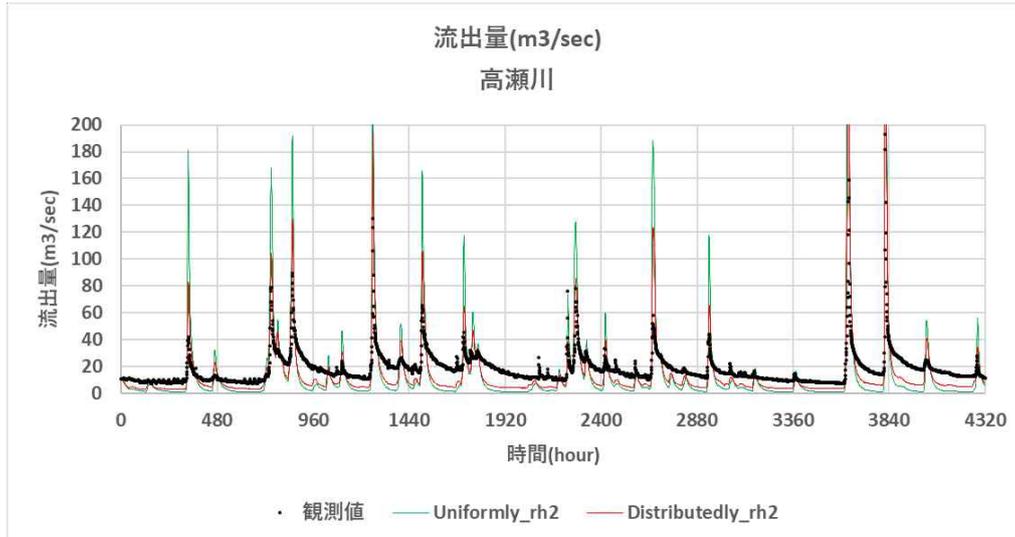


図 4-10 流出量の結果比較（地理空間情報反映の効果）（全期間）（高瀬川）

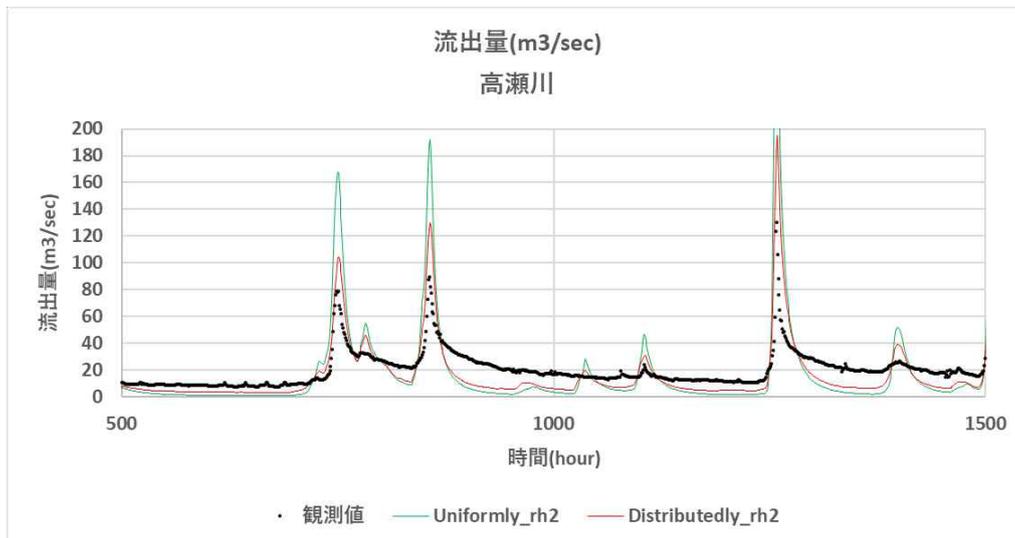


図 4-11 流出量の結果比較（地理空間情報反映の効果）（一部期間）（高瀬川）

4.3.2 ベイズ最適化による透水係数の修正

① 概要

本章 2 節 (4.2) において記した、ベイズ最適化による透水係数のキャリブレーション機能を用いて、前田川、熊川、請戸川（高瀬川含む）流域に対する流出試解析を実施する。

② 探索空間とメモリ使用量

ベイズ最適化では、探索空間のサイズに比例し、メモリの使用量もスケールする。実際に、表 4-10～表 4-12 において、最適化対象とするモデル定数の個数と、それぞれのモデル定数の候補パターン数に対して、消費された物理メモリをモニタリングした結果をまとめる。

表 4-10 メモリ使用量 (最適化対象を変更)

NUM_RAND_BASIS	Target (D)	Pattern (N)	Candidate Space Size (N^D)	Memory [GB]
5000	5	3	243	0.691
5000	6	3	729	0.702
5000	7	3	2187	0.724
5000	8	3	6561	1.062
5000	9	3	19683	2.603
5000	10	3	59049	7.269
5000	11	3	177147	21.273

表 4-11 メモリ使用量 (候補パターン数を変化)

NUM_RAND_BASIS	Target (D)	Pattern (N)	Candidate Space Size (N^D)	Memory [GB]
5000	5	3	243	0.691
5000	5	4	1024	0.617
5000	5	5	3125	0.800
5000	5	6	7776	1.199
5000	5	7	16807	2.258
5000	5	8	32768	4.148
5000	5	9	59049	7.259
5000	5	10	100000	12.106

表 4-12 メモリ使用量 (ランダム特徴写像の次元を変更)

NUM_RAND_BASIS	Target (D)	Pattern (N)	Candidate Space Size (N^D)	Memory [GB]
50	10	3	59049	0.075
100	10	3	59049	0.178
250	10	3	59049	0.348
500	10	3	59049	0.846
1000	10	3	59049	1.555
2500	10	3	59049	3.664
5000	10	3	59049	7.269
10000	10	3	59049	14.776
20000	10	3	59049	28.094

ここで、「Target」とは最適化対象のモデル定数の個数、「Pattern」とは候補パターン数、「Candidate Space Size」とは候補空間のサイズ、「Memory」とは消費された物理メモリのサイズ[GB]を指す。

また、PHYSBO ではガウス過程において使用するカーネル関数を、より低次元の正定値対称行列で近似することで、高いスケラビリティを実現する。この低次元の行列のことをランダム特徴写像という。

「NUM_RAND_BASIS」はこのランダム特徴写像の次元を意味する。

以上より、NUM_RAND_BASIS=500~5000 且つ候補パターン数が3通りと考えた場合、最適化可能な対象モデル定数の個数の上限は10~12個程度であることが分かる。一方、RADFLOWのモデル定数の個数は下記の通り数多く、最適化システムでこれら全てのモデル定数を一度に最適化することは困難であることが分かる。

- ・土地利用：属性 14 種類×モデル定数 3 種類（透水係数、粗度係数、間隙率） → 42 種類
- ・土壌：属性 14 種類×モデル定数 2 種類（透水係数、間隙率） → 28 種類
- ・表層地質：属性 21 種類×モデル定数 2 種類（透水係数、間隙率） → 42 種類

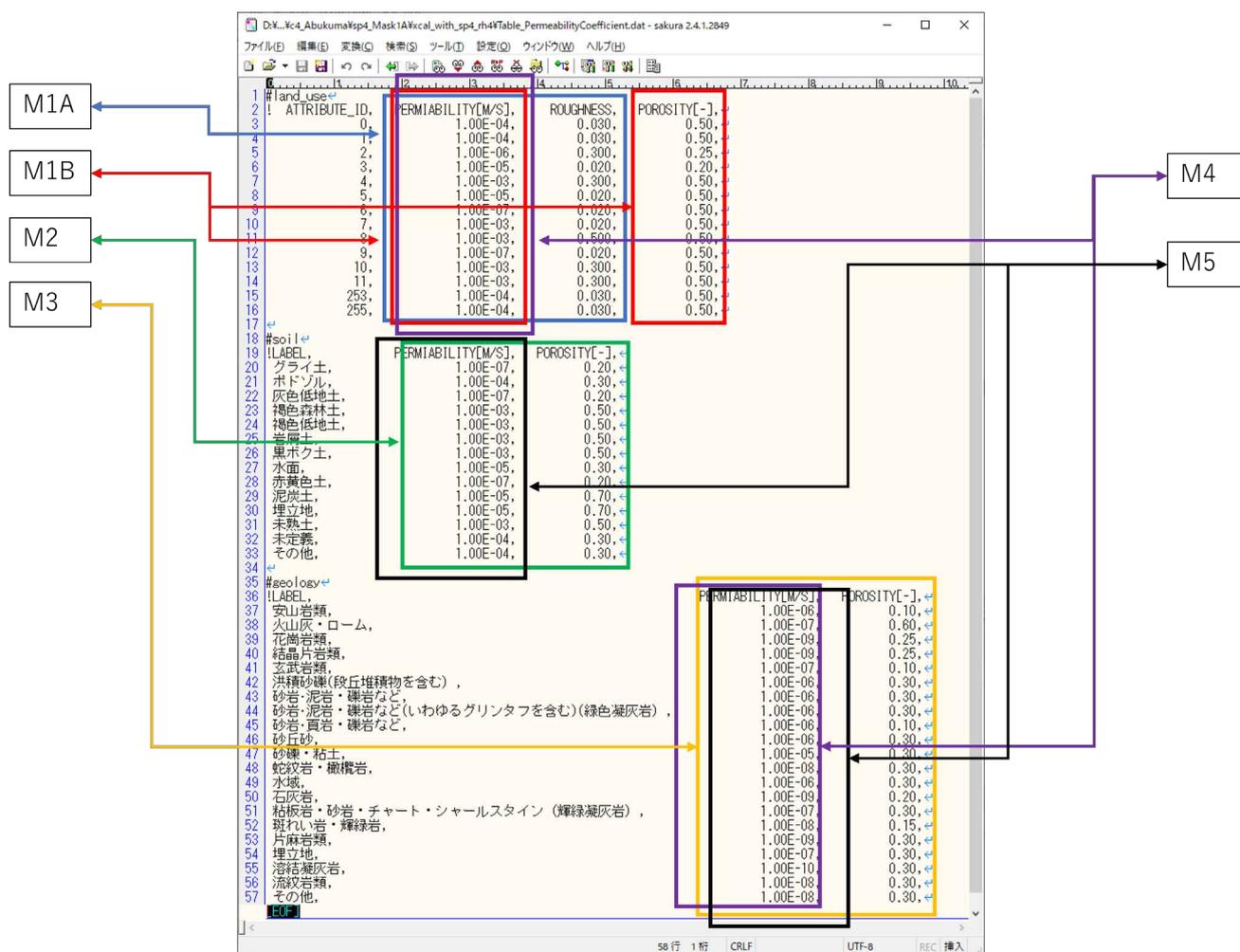


図 4-12 マスクテーブルのパターン

③ 探索空間とメモリ使用量

上記の検討から、パラメータ全体の最適化は断念し、最適化対象とするモデル定数の範囲を限定することを考える。本節の試解析ではモデル定数の中で最適化の対象とする範囲（マスク値を 1 に設定する範囲）を表 4-13 のようにケースごとに限定することを考える（図 4-12 も参照）。

表 4-13 マスク値（最適化対象値）のパターン

ケース	マスク値（最適化対象値）のパターン
Mask1A (M1A)	・土地利用の透水係数と粗度係数
Mask1B (M1B)	・土地利用の透水係数と間隙率
Mask2 (M2)	・土壌の透水係数と間隙率
Mask3 (M3)	・表層地質の透水係数と間隙率
Mask4 (M4)	・土地利用の透水係数 ・表層地質の透水係数
Mask5 (M5)	・土壌の透水係数 ・表層地質の透水係数

※本章 2 節にある通り、「土地利用」は表層および地下 1-2 層、土壌図は 3-5 層、表層地質図は 6 層以降のモデル定数（透水係数、粗度係数、間隙率）に影響する。

④ 地理空間情報の面積比率

流域毎に地理空間情報（土地利用、土壌、表層地質）の面積比率を計算した。前田川を表 4-14、熊川を表 4-15、請戸川を表 4-16 に示す。比率の大きい属性ほど、その属性に付与されるモデル定数（透水係数、粗度係数、間隙率）による計算への影響は大きいと考えられる。従って、表 4-13 で最適化対象の範囲を限定した上で、さらにその範囲の中で面積比率が上位 5 位のモデル定数についてだけマスク値に「1」を設定して、一度に最適化の対象とするモデル定数の個数を 10 個程度（10 個＋数個の程度）に抑えることとした。

表 4-14 地理空間情報の面積比率（前田川）

① 土地利用			② 土壌図			③ 表層地質図		
ID	ATTRIBUTE_ID	AREA RATIO[%]	ID	AREA RATIO[%]	LABEL	ID	AREA RATIO[%]	LABEL
1	0	6.9	1	3.3	グライ土	1	0.0	安山岩類
2	1	0.4	2	0.0	ポドゾル	2	0.0	火山灰・ローム
3	2	1.4	3	14.3	灰色低地土	3	40.5	花崗岩類
4	3	0.0	4	42.3	褐色森林土	4	0.0	結晶片岩類
5	4	1.3	5	2.8	褐色低地土	5	0.0	玄武岩類
6	5	13.9	6	0.0	岩屑土	6	0.0	洪積砂礫(段丘堆積物を含む)
7	6	25.2	7	10.3	黒ガク土	7	0.0	砂岩・泥岩・礫岩など
8	7	21.4	8	0.0	水面	8	51.0	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
9	8	11.4	9	27.0	赤黄色土	9	0.0	砂岩・頁岩・礫岩など
10	9	17.9	10	0.0	泥炭土	10	0.0	砂丘砂
11	10	0.2	11	0.0	埋立地	11	8.5	砂礫・粘土
12	11	0.0	12	0.0	未熟土	12	0.0	蛇紋岩・橄欖岩
13	253	0.0	13	0.0	未定義	13	0.0	水域
14	255	0.0	14	0.0	その他	14	0.0	石灰岩
						15	0.0	粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩)
						16	0.0	斑れい岩・輝緑岩
						17	0.0	片麻岩類
						18	0.0	埋立地
						19	0.0	溶結凝灰岩
						20	0.0	流紋岩類
						21	0.0	その他

表 4-15 地理空間情報の面積比率 (熊川)

① 土地利用			② 土壌図			③ 表層地質図		
ID	ATTRIBUTE_ID	AREA RATIO[%]	ID	AREA RATIO[%]	LABEL	ID	AREA RATIO[%]	LABEL
1	0	10.2	1	0.0	グライ土	1	0.0	安山岩類
2	1	0.3	2	0.0	ポドゾル	2	0.0	火山灰・ローム
3	2	1.3	3	10.5	灰色低地土	3	67.9	花崗岩類
4	3	0.5	4	50.2	褐色森林土	4	0.0	結晶片岩類
5	4	2.3	5	2.0	褐色低地土	5	0.0	玄武岩類
6	5	11.0	6	0.0	岩屑土	6	0.0	洪積砂礫(段丘堆積物を含む)
7	6	26.2	7	26.9	黒ゴク土	7	0.0	砂岩・泥岩・礫岩など
8	7	20.9	8	0.0	水面	8	22.3	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
9	8	7.0	9	10.6	赤黄色土	9	0.0	砂岩・頁岩・礫岩など
10	9	20.1	10	0.0	泥炭土	10	0.0	砂丘砂
11	10	0.3	11	0.0	埋立地	11	8.8	砂礫・粘土
12	11	0.0	12	0.0	未熟土	12	1.0	蛇紋岩・橄欖岩
13	253	0.0	13	0.0	未定義	13	0.0	水域
14	255	0.0	14	0.0	その他	14	0.0	石灰岩
						15	0.0	粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩)
						16	0.0	斑れい岩・輝緑岩
						17	0.0	片麻岩類
						18	0.0	埋立地
						19	0.0	溶結凝灰岩
						20	0.0	流紋岩類
						21	0.0	その他

表 4-16 地理空間情報の面積比率 (請戸川)

① 土地利用			② 土壌図			③ 表層地質図		
ID	ATTRIBUTE_ID	AREA RATIO[%]	ID	AREA RATIO[%]	LABEL	ID	AREA RATIO[%]	LABEL
1	0	7.9	1	2.0	グライ土	1	0.0	安山岩類
2	1	0.0	2	0.0	ポドゾル	2	0.0	火山灰・ローム
3	2	0.2	3	5.2	灰色低地土	3	85.8	花崗岩類
4	3	0.8	4	54.3	褐色森林土	4	0.0	結晶片岩類
5	4	1.6	5	1.0	褐色低地土	5	0.0	玄武岩類
6	5	8.8	6	0.0	岩屑土	6	0.0	洪積砂礫(段丘堆積物を含む)
7	6	30.2	7	33.2	黒ゴク土	7	0.0	砂岩・泥岩・礫岩など
8	7	28.2	8	0.0	水面	8	7.3	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
9	8	1.4	9	3.5	赤黄色土	9	0.0	砂岩・頁岩・礫岩など
10	9	20.4	10	0.7	泥炭土	10	0.0	砂丘砂
11	10	0.5	11	0.0	埋立地	11	4.3	砂礫・粘土
12	11	0.0	12	0.1	未熟土	12	0.0	蛇紋岩・橄欖岩
13	253	0.0	13	0.0	未定義	13	0.0	水域
14	255	0.0	14	0.0	その他	14	0.0	石灰岩
						15	0.0	粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩)
						16	2.6	斑れい岩・輝緑岩
						17	0.0	片麻岩類
						18	0.0	埋立地
						19	0.0	溶結凝灰岩
						20	0.0	流紋岩類
						21	0.0	その他

⑤ 地理空間情報の面積比率

キャリブレーションは、前述の試解析 4.3.1「地理空間情報による透水係数の設定」の検証で使用した計算データを基準として、テーブルデータ内で定義されるモデル定数の最適化を実施する。また、ベイズ最適化の主要な制御情報を表 4-17 にまとめる。

表 4-17 ベイズ最適化の制御情報

パラメータ	値	役割
NUM_RANDOM_SEARCH	3	ランダム探索の回数
NUM_BAYESIAN_SEARCH	30	ベイズ探索の回数
FLAG_SCORE	“EI”	獲得関数のタイプ
NUM_RAND_BASIS	5000	ランダム特徴写像の次元

※制御情報については 5.2 も確認すること。

各々の河川について、計算ケースの諸元を表 4-18 に示す。また、ベイズ最適化における評価値の計算には誤差関数 RSE(Relative Square Error : 3 章末参照)を使用する。

表 4-18 計算ケース

河川	マスク値の パターン
前田川	Mask1A
	Mask1B
	Mask2
	Mask3
	Mask4
	Mask5
熊川	Mask1B
	Mask2
	Mask3
	Mask4
	Mask5
請戸川	Mask1A
	Mask1B
	Mask2
	Mask3
	Mask4
	Mask5

ただし、請戸川の解析モデルは請戸川自体とその支流である高瀬川の 2 河川で構成される。請戸川上流には大柿ダムがあるため請戸川と高瀬川の流出挙動は異なり、観測データも河川毎に用意される。従って、誤差 RSE は請戸川と高瀬川で個別に算定し、両者の合計値をベイズ最適化のための評価値とした。

⑥ 計算結果

計算結果として、探索試行ごとの評価値 (RSE) の履歴を下記の図番号に表示した。どのケースについても、探索試行を進めるに従い、評価値を低減させる方向に作用していることがわかる。以上より、ベイズ最適化によるモデル定数の最適化に一定の有効性が認められた。

- ・前田川： 図 4-13 参照
- ・熊川： 図 4-17 参照
- ・請戸川： 図 4-21 参照

また、各河川の検証において、基準とした計算ケースの評価値 RSE と、モデル定数をキャリブレーションしたケースの評価値 RSE の比較結果を表 4-19 に示す。これらの結果からも、ベイズ最適化によるモデル定数の最適化に一定の有効性が認められた。

表 4-19 RSE の比較

河川	RSE	
	基準とした計算ケース	RSE を最適化したケース
前田川	1.177 (ケース : M2)	0.511 (ケース : Mask2) 0.765 (ケース : Mask5)
熊川	0.812 (ケース : K4)	0.541 (ケース : Mask2) 0.513 (ケース : Mask5)
請戸川	4.008 (ケース : U2)	3.059 (ケース : Mask2) 3.523 (ケース : Mask5)

更に、各河川に対するキャリブレーションにおいて、比較的、評価値が減少したケースについて、その流出量時刻歴データを観測データと比較した結果を下記の図番号に表示した。

- ・前田川： 図 4-14、図 4-15、図 4-16 参照
- ・熊川： 図 4-18、図 4-19、図 4-20 参照
- ・請戸川： 請戸川については図 4-23 と図 4-24 参照、
高瀬川については図 4-25 と図 4-26 図 4-参照

前田川については、Mask2 と Mask5 のパターンにおいて最適化ケースの流出量ピーク値が基準ケースより低減したことで、観測データの再現性が向上している。また、平水時の基底流出量が増加しており、これも再現性の向上に貢献している。熊川についても、図 4-20 より、同様の傾向が見られた。その一方、請戸川については、表 4-19 から、最適化により誤差 RSE は下がってはいるものの、流出量時刻歴の再現性については十分な向上が見られていない。

前田川

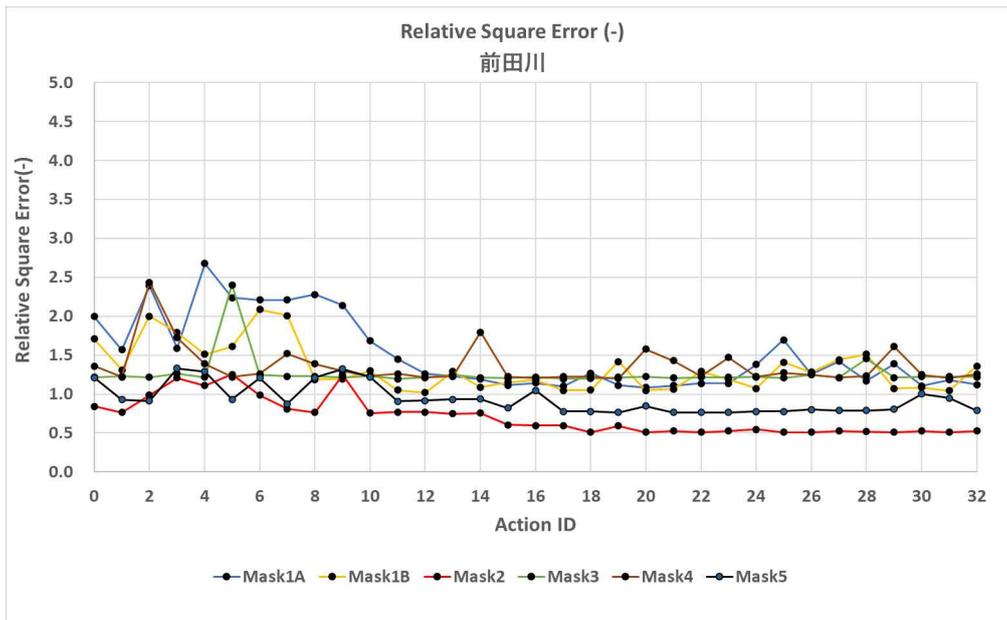


図 4-13 RSE の履歴 (前田川)

※Mask2 と Mask5 のキャリブレーション結果が、評価値が比較的小さい。

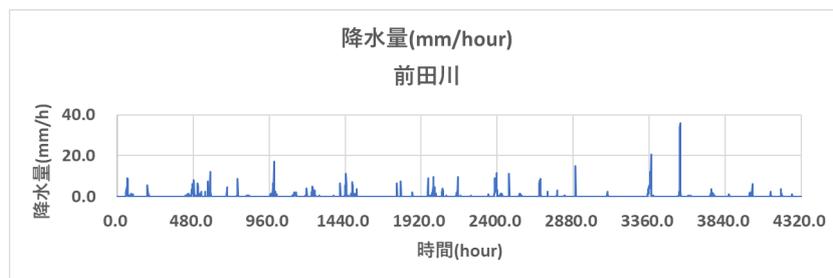


図 4-14 降雨量 (前田川) 平均降雨量 : 0.191(mm/h)

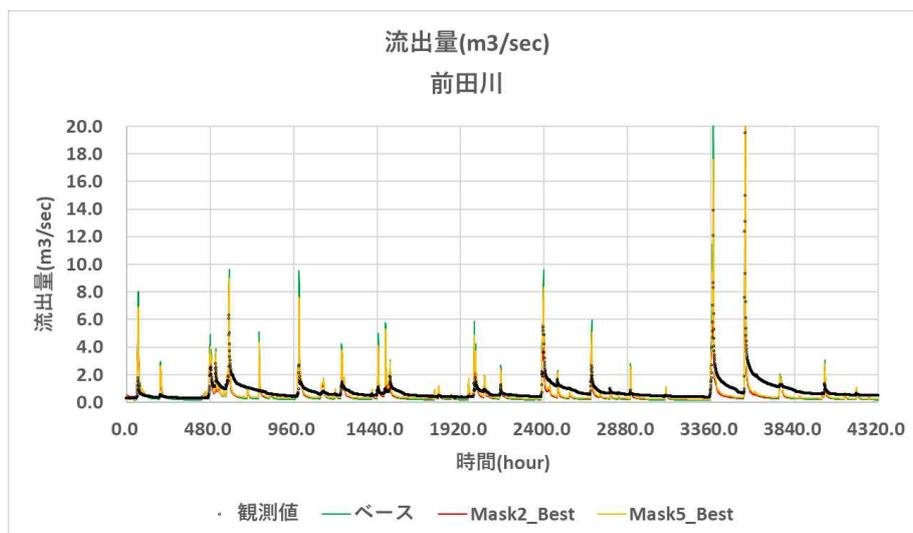


図 4-15 流出量時刻歴の比較 (全期間) (前田川)

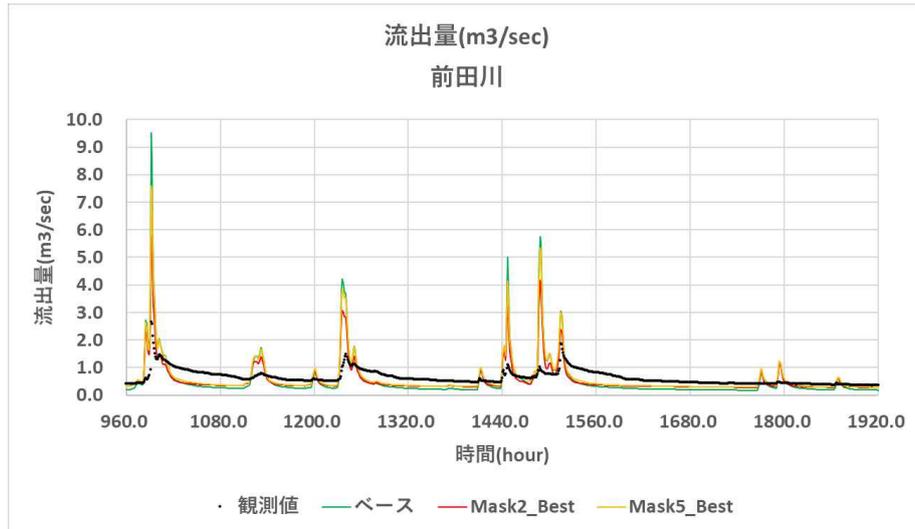


図 4-16 流出量時刻歴の比較（一部期間）（前田川）

熊川

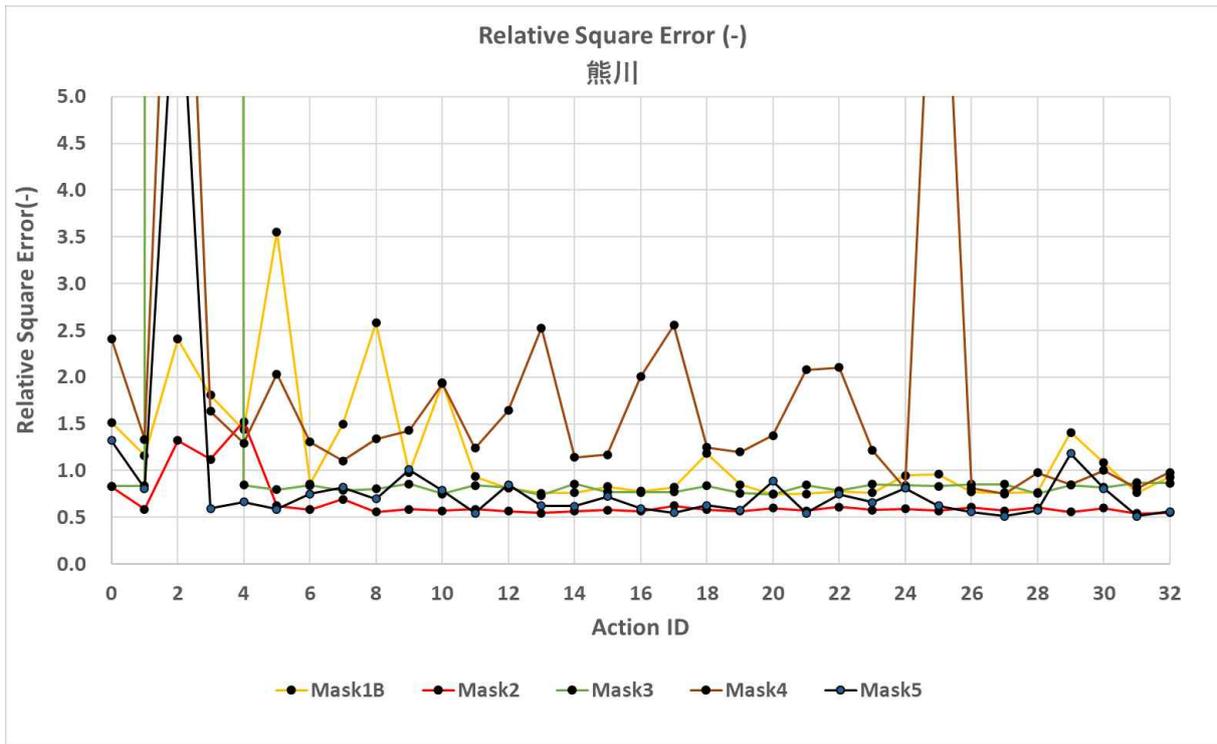


図 4-17 RSE の履歴 (熊川)

※Mask2 と Mask5 のキャリブレーション結果が、評価値が比較的小さい。

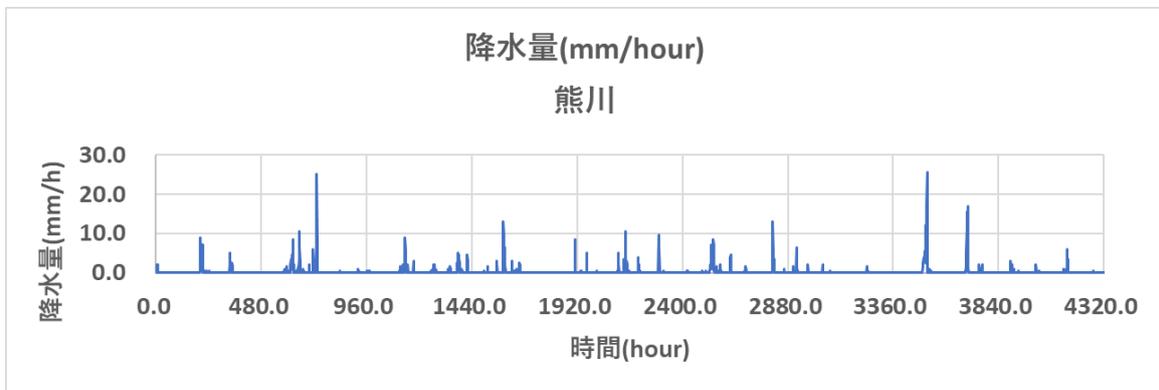


図 4-18 降雨量 (熊川) 平均降雨量 : 0.228(mm/h)

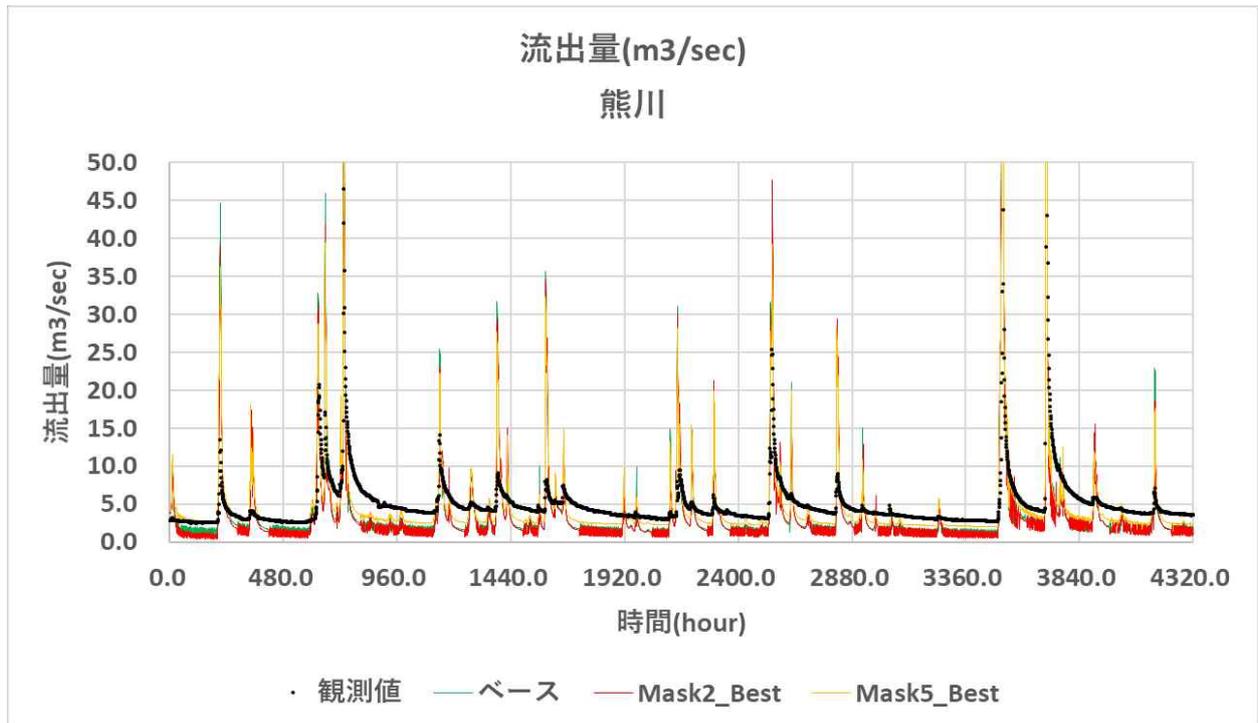


図 4-19 流出量時刻歴の比較（全期間）（熊川）

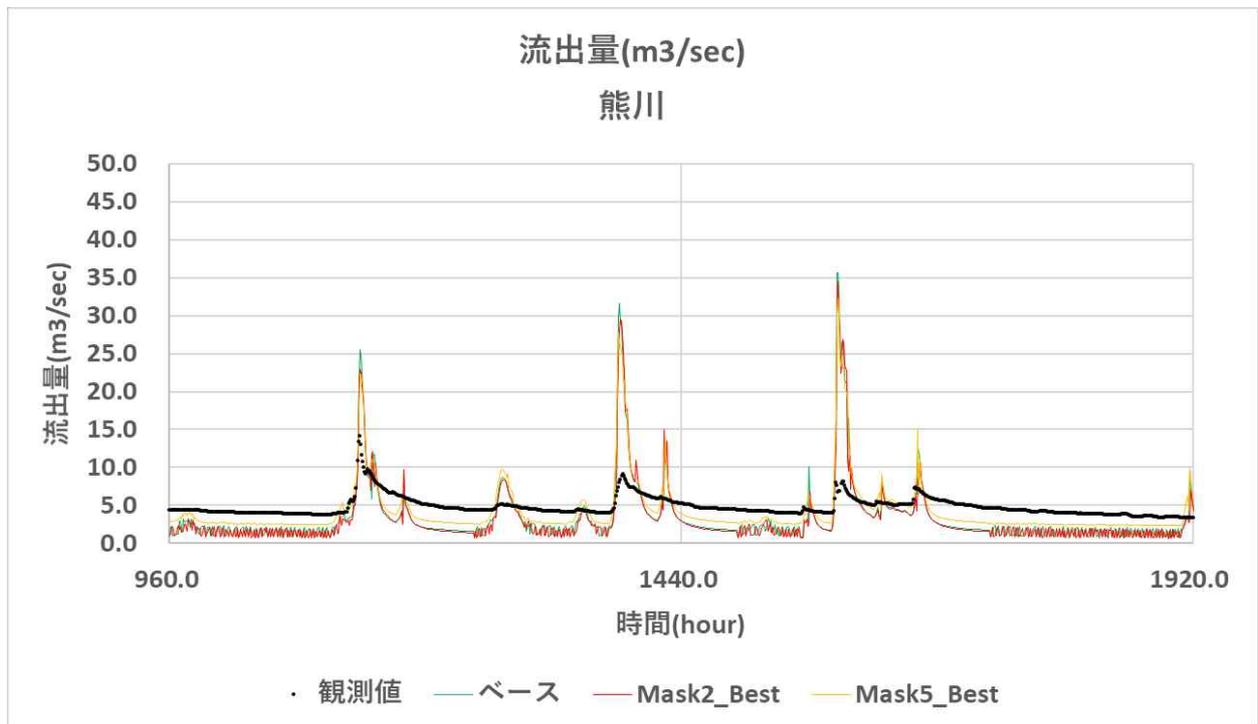


図 4-20 流出量時刻歴の比較（一部期間）（熊川）

請戸川（および高瀬川）

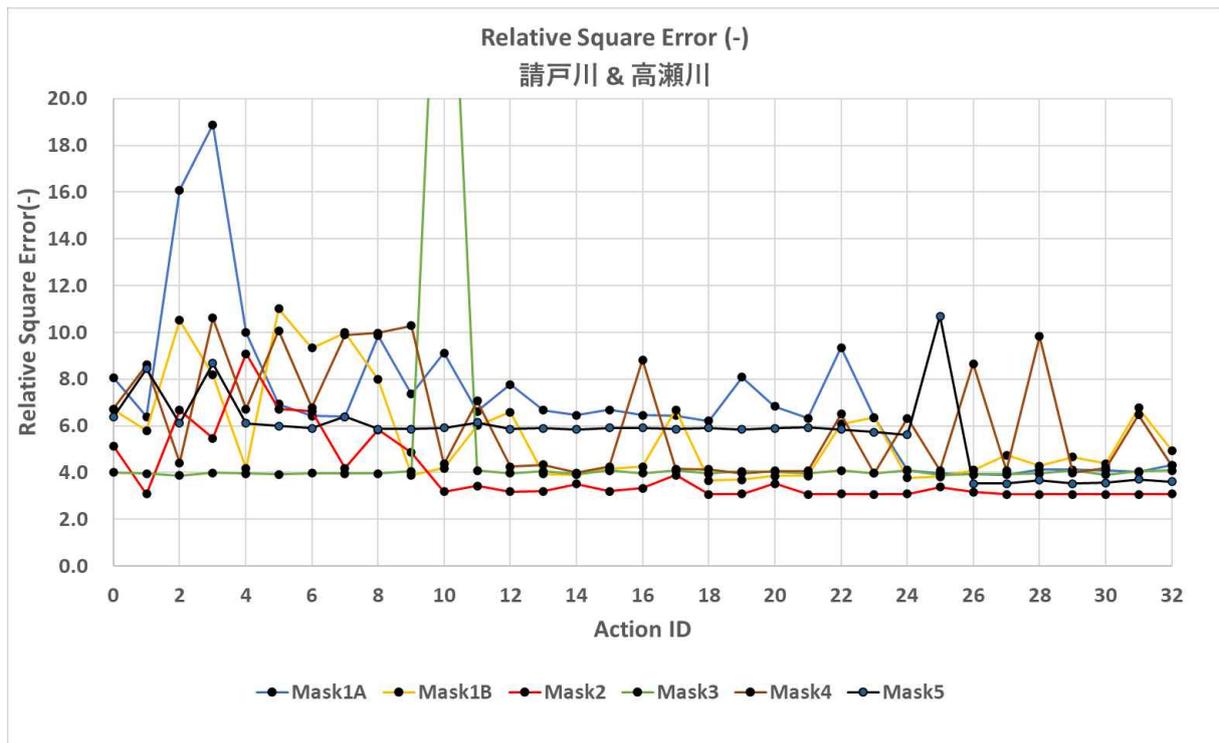


図 4-21 RSE の履歴 (請戸川+高瀬川)

※Mask2 のキャリブレーション結果が、評価値が比較的小さい。

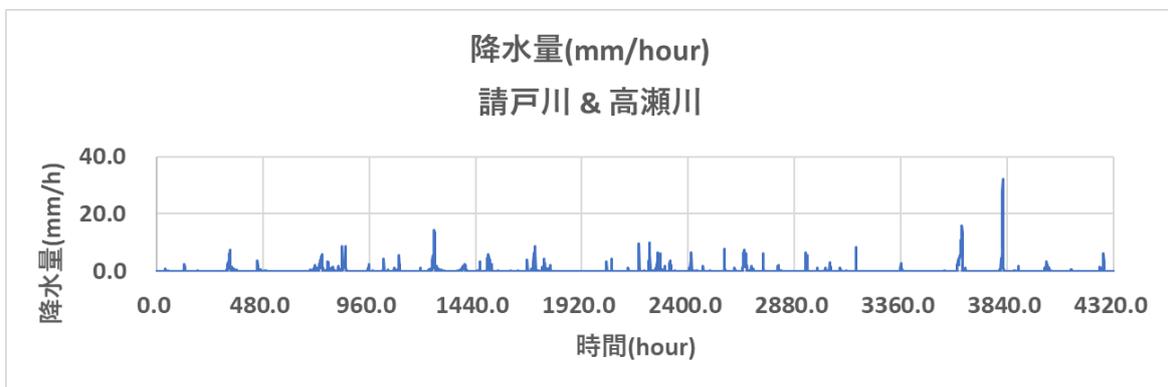


図 4-22 降雨量 (請戸川+高瀬川) 平均降雨量 : 0.182(mm/h)

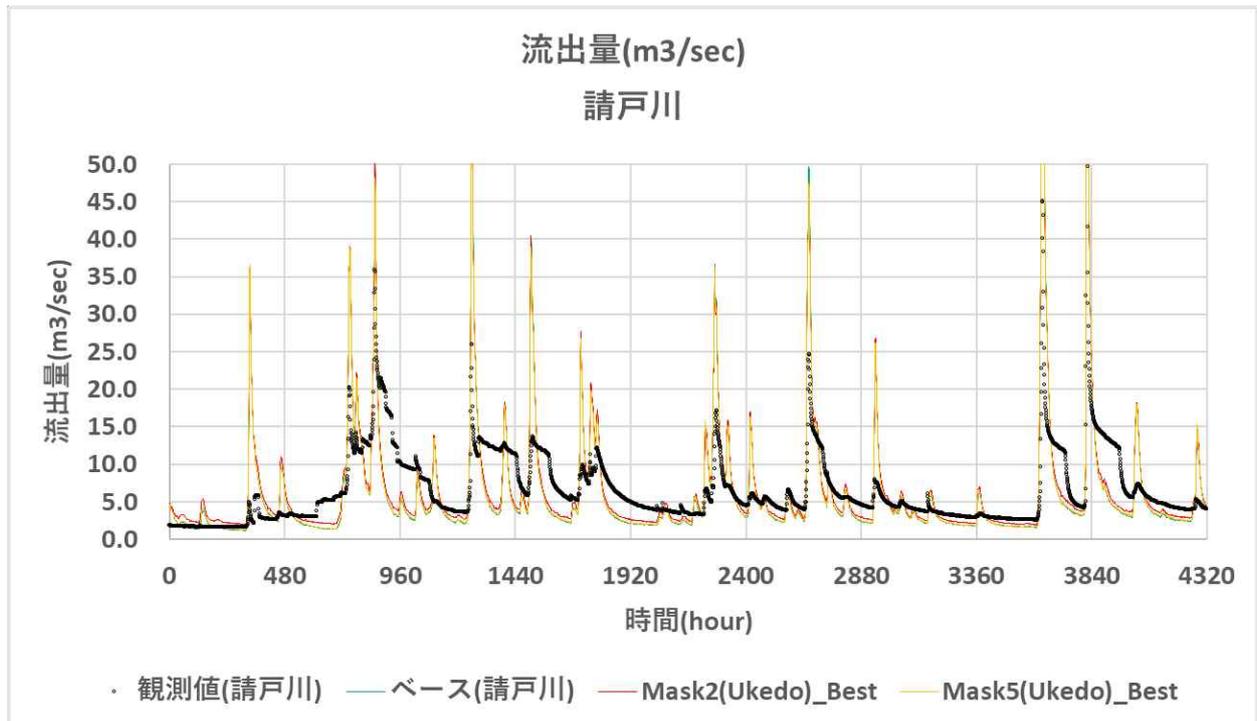


図 4-23 流出量時刻歴の比較（全期間）（請戸川）

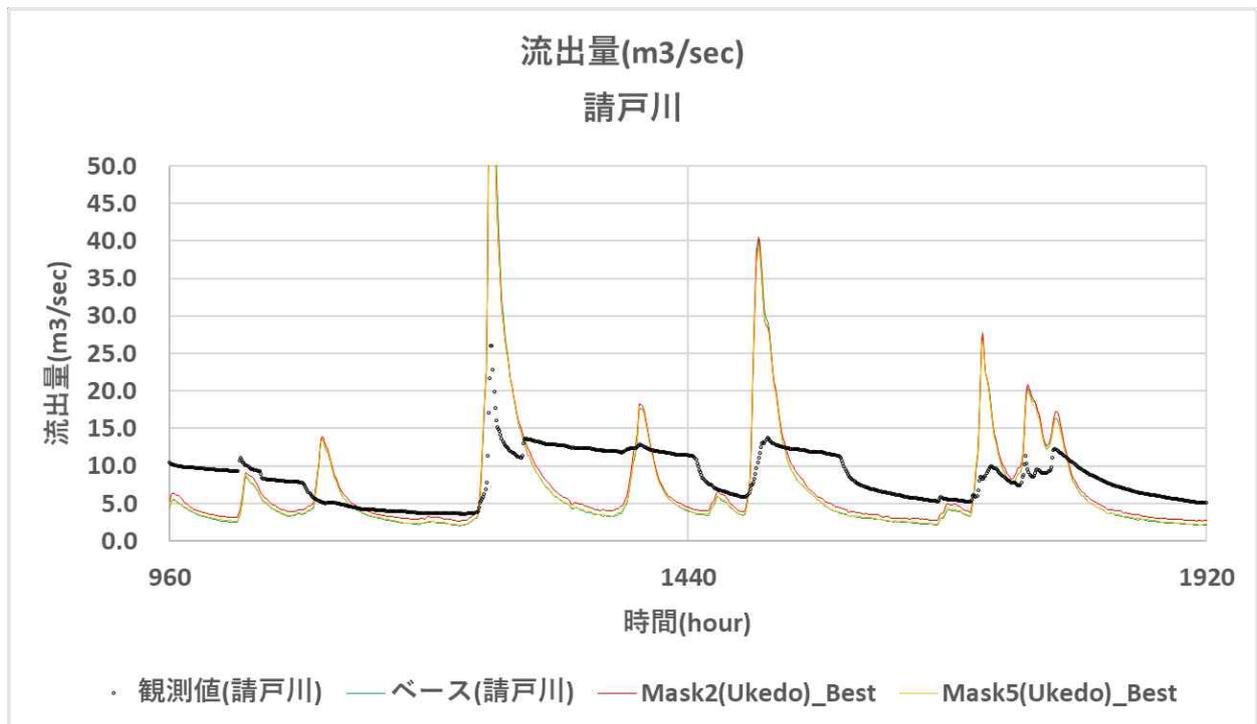


図 4-24 流出量時刻歴の比較（一部期間）（請戸川）

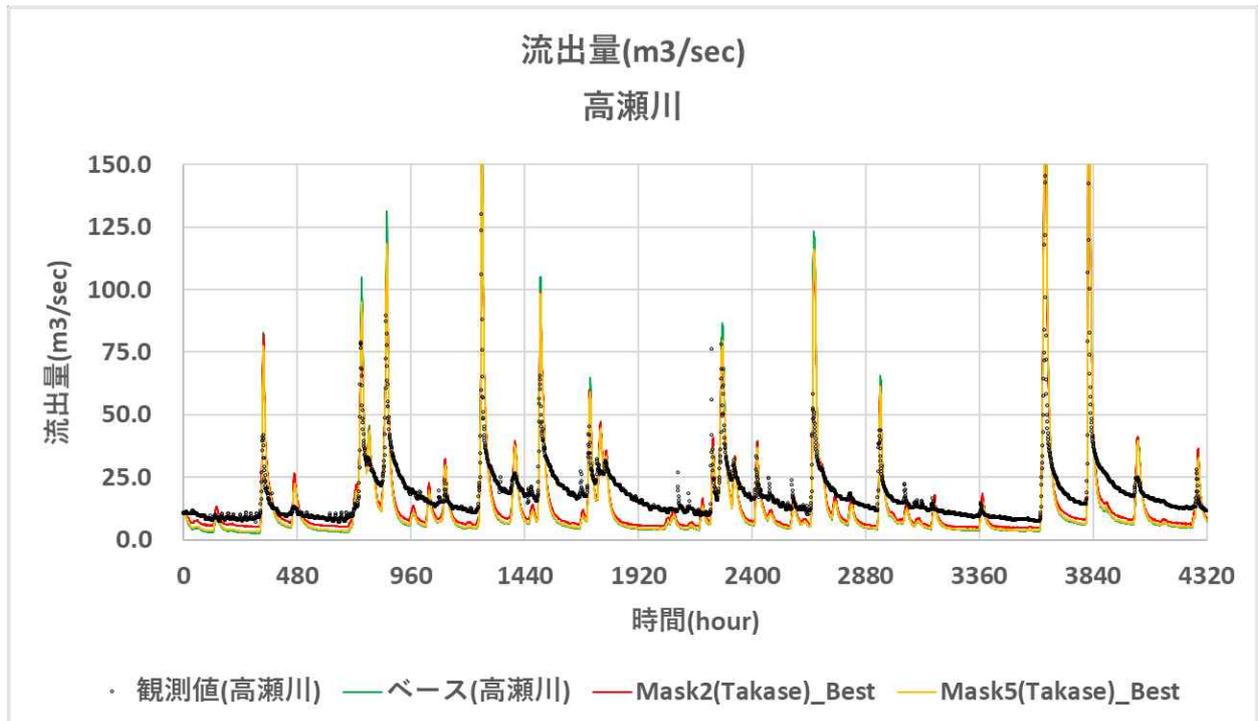


図 4-25 流出量時刻歴の比較（全期間）（高瀬川）

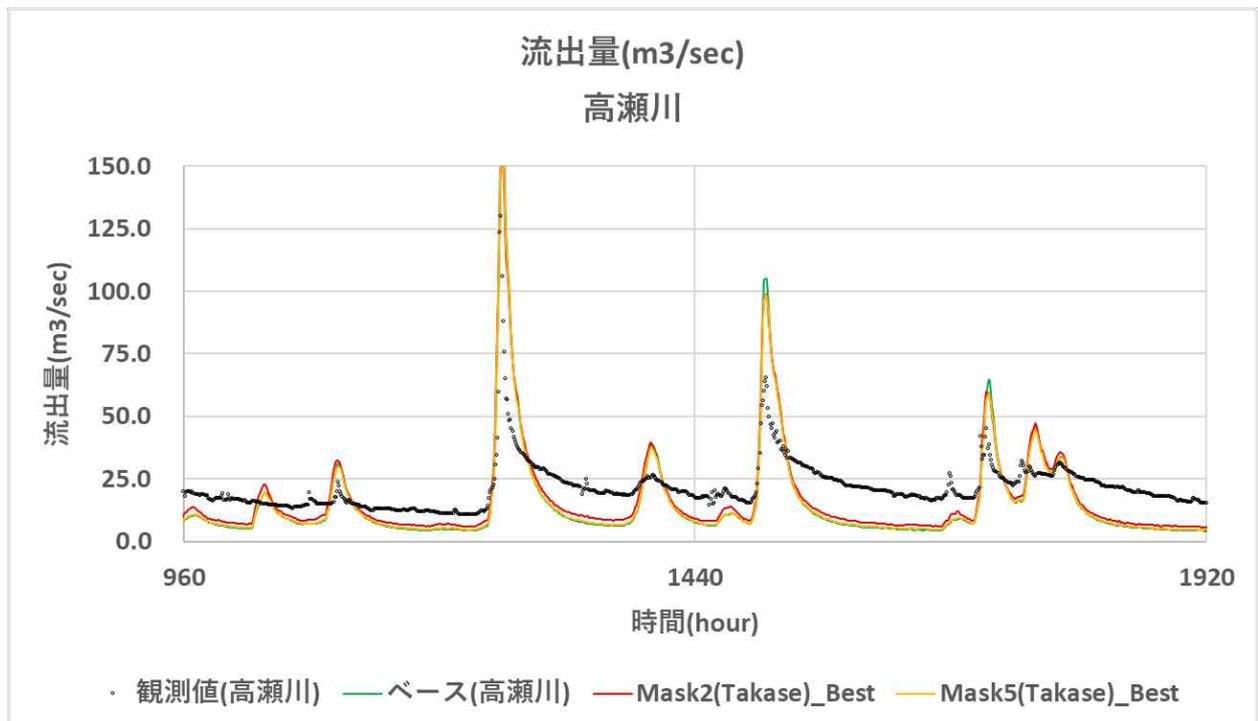


図 4-26 流出量時刻歴の比較（一部期間）（高瀬川）

4.4 まとめ

分布定数型流出モデルの整備要件として、本事業では陸域動態モデル（RADFLOW）に対して次の機能を実装した。

- ① 地理空間情報を基にモデル定数のテーブルデータを作成し、それらを読み込み、モデル定数（透水係数、間隙率、粗度係数）として設定する機能
- ② ベイズ最適化により、自動的にモデル定数をキャリブレーションする機能

上記の整備実装した機能に対し、福島県内の3河川流域：請戸川（高瀬川含む）、熊川、前田川に対して試解析を実施した。その結果、地理空間情報をもとにモデル定数を設定する機能では、実際にその機能を用いると観測量の再現性向上が見られた。一方、ベイズ最適化によるモデル定数のキャリブレーション機能については、候補の探索施行を繰り返すことで評価値を改善し、誤差 RSE を低減させる効果が見られた。

尚、これらの機能実装に当たり、分布定数型流出モデルにおいてはパラメータ数が多く、更に十分な分析を行い、パラメータ範囲を限定する必要があることが分かった。以上、本章にて記したように、精度を向上させる取り組みは未だ十分ではないが、最適化の方向性は妥当であり、今後の検討により性能向上が見込まれることを報告する。

参考文献

RADFLOW について

- [4-1] 佐久間一幸、「RADFLOW 簡易マニュアル」.
- [4-2] 宮本邦明、井戸俊介、「任意 3 角形平面要素を用いた土砂流出解析法」、砂防学会誌、Vol.55, No.6, p.33-39, 2003. https://www.jstage.jst.go.jp/article/sabo1973/55/6/55_6_33/article-char/ja/.

物性値について

- [4-3] 「H25 GETFLOWS 報告書」、表 5.8、「透水係数と有効間隙率と表 5.9 地質と水理条件(1).」
- [4-4] 「H25 GETFLOWS 報告書」、表 5.3、「いろいろな岩の透水係数.」
- [4-5] 「H25 GETFLOWS 報告書」、表 3.11、「地下地質構造区分に与える水理物性値.」
- [4-6] 「岩石・岩盤の透水係数（その2）-コラム(Feel&Think) | 地層科学研究所 (geolab.jp)」、表 3-1、「岩石の透水係数と岩盤の透水係数の比較」、<https://www.geolab.jp/column/2005/01/experiment-017.php>.
- [4-7] 「S2 GETFLOWS 報告書」、表 3-3、「表層土壌（層厚 1m）の基本条件」.
- [4-8] 「社団法人 日本道路協会 道路土工－排水工指針 p.22」、「マニングの粗度係数」、<https://isabou.net/soft/petit/common/waterway/flowcalc/ReferRoughCoef.asp>.

ベイズ最適化について

- [4-9] “PHYSBO--optimization tools for PHYsics based on Bayesian Optimization”.

<https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/physbo/about/>.

[4-10] Yuichi Motoyama, Ryo Tamura, Kazuyoshi Yoshimi, Kei Terayama, Tsuyoshi Ueno, Koji Tsuda, “Bayesian optimization package: PHYSBO”, arXiv:2110.07900. Available from <https://arxiv.org/abs/2110.07900>.

■ 5章 河口域モデル（陸域と河口域の接続）の整備

5.1 本章の概要

本事業では、放射性物質の動態を解析可能とする陸域コードとして、二つのコード(MERCURY RADFLOW)の整備を実施した（整備した結果と課題については、3、4章参照）。本章では、この二つのコードを河口域（沿岸域）のコードである3D-Sea-SPEC（非静水圧3次元モデル）に接続する。以下、陸域コード毎に、接続に当り実施する事項の概要を記す。

①MERCURY（集中定数型モデル）

MERCURYは、集中定数型流出モデルであり、河道流（特に下流域での）の水位及び流速のダイナミクスを解く部分を有していない。従って、河口域（沿岸域）へ接続するに当たり、予測流量のみが河口域モデルへのアウトプットとなる。しかし、実際には、河口域で潮汐により水位変化が生じるため、沿岸域へ供給される河川流量は、上記の予測流量に、潮汐変化に伴い変化する水位が影響を与えるため、時間と共に周期的に変化することが知られている。この潮汐による流量の変化は、放射性物質の輸送量にも影響することから、本事業では、この効果を取り込むため、参考文献[5-1]（河道モデルI参照）に従い、河口近くに簡易な河道モデルを実装し、沿岸解析コード3D-Sea-SPECに接続し、試解析を行うことで発生する課題を整理する。

②RADFLOW（分布定数型モデル）

RADFLOWは、陸域にて表面流（河道も同様）を解く際、キネマティックウエーブモデルを用いて水位変化を直接解いていることから、沿岸で発生する潮位変動を直接取り込み、RADFLOWの計算にフィードバックすることが可能である。従って、河口域にて、沿岸解析コード3D-Sea-SPECに直接接続し、陸域から沿岸域まで、連続的に水位変化を求めるための実装を行い、試解析を行うことで課題を整理する。

以上、本事業では、開発した接続モデルを用いて、阿武隈川河口を対象として、1F事故後の一定期間に渡り、放射性物質（Cs-137）の動態を試計算し、その妥当性を評価する他、発生する課題を整理し報告する。

本章の構成を記す。5.2では、接続モデルの対象とする河口域モデル（阿武隈川河口のモデル）について記し、5.3では、集中定数型流出モデル：MERCURYと3D-Sea-SPECとの接続モデルについて整備事項をまとめる。5.4にて、その接続モデルを用いて阿武隈川河口モデルでの試解析結果を記し、その評価を行う。次に、5.5では、分布定数型流出モデル：RADFLOWと3D-Sea-SPECとの接続モデルについて整備事項を記し、5.6にて、その接続モデルの阿武隈川河口モデルでの試解析結果を記し、その評価を行う。5.7は、まとめとし、上記の試解析結果を基に、課題を整理した結果をまとめる。

5.2 接続対象の河口域モデル

5.2.1 河口域で接続する 3D-Sea-SPEC 計算モデル

各陸域モデルと接続する 3D-Sea-SPEC の妥当性検証のため、令和 2 年度の当該事業にて作成した、阿武隈川河口の計算モデルを活用する。

図 5-1 に、対象とする阿武隈川河口域を設定した解析領域を示す他、図 5-2 に解析メッシュ内の標高値の分布を示す。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（格子点）
Y 方向 -663000m ～ -655000m 80 点（格子点）

※19 座標系の X, Y と逆であることに注意

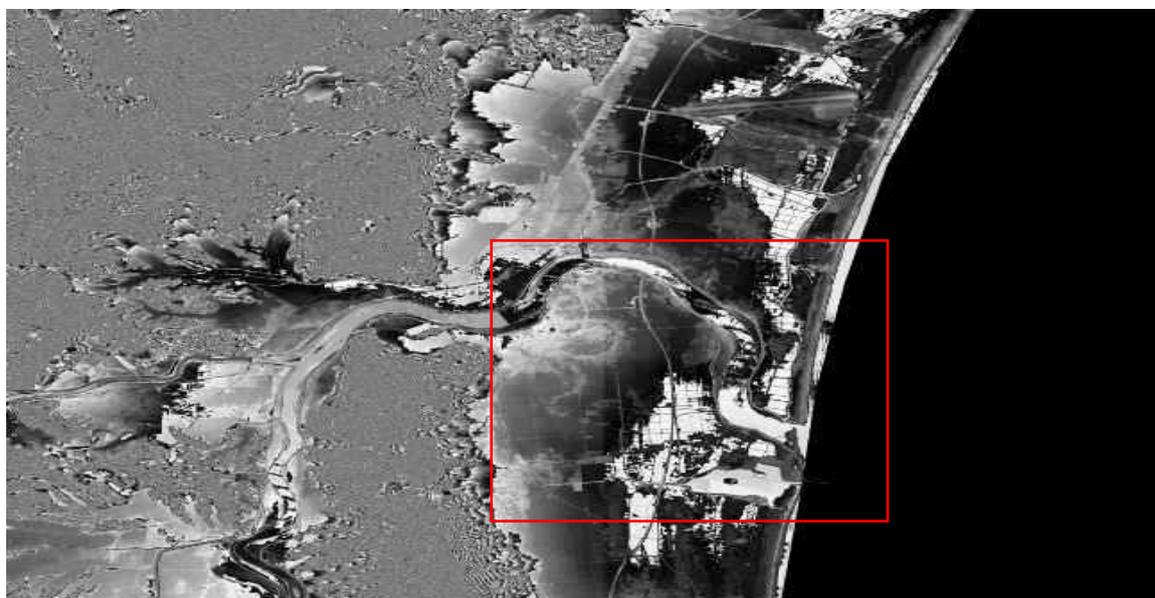


図 5-1 解析領域（赤枠が計算領域となる）

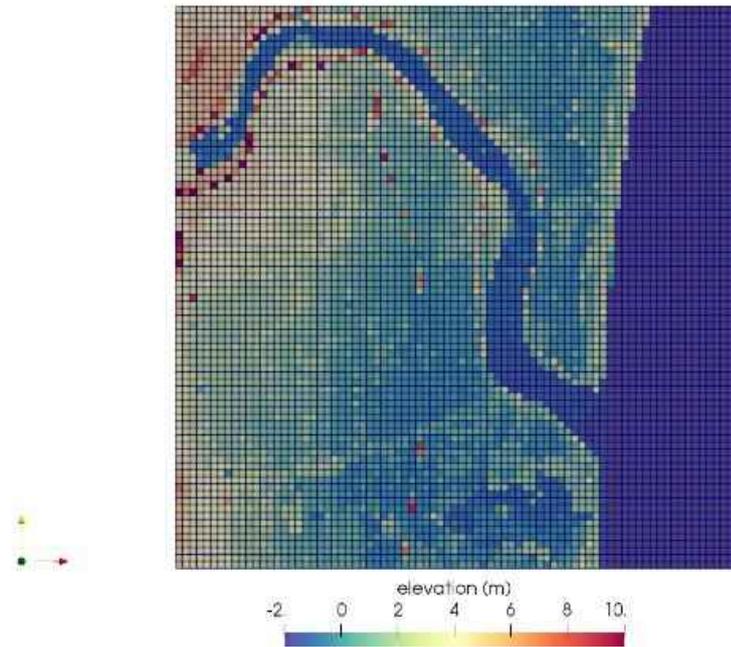


図 5-2 解析メッシュ上に設定した標高値の分布

5.3 集中定数型モデルと河口域モデルの接続に係る整備

本事業で整備した MERCURY は、予測流量の経時変化のみを、接続先となる河口域モデルへのアウトプットとする。以上、河道流（特に下流域）の水位と流速のダイナミクスを解く部分は有していないため、河口域（沿岸域）モデルに接続する際は、十分な注意が必要である。

河川の河口での流量は、一般に潮位変動により影響を受け、周期的に変動するが、その変動を表現するには、河口への河川流と潮汐による水位変化により発生する流れを重畳させ、流量が決まるようなモデルを作成し、陸域モデルと河口域モデルとの接続に用いる必要がある。本節では、上記課題を解決するため、潮位変化を取り込み、河川流量の変化を沿岸域モデルに接続可能とする簡易河道モデルを実装し、3D-Sea-SPEC に接続する。

5.3.1 簡易河道モデル

簡易河道モデルを以下に示す。まず、MERCURY の下流端と、感潮域を除いた河道の下流端が一致すると定義する。そして、その下流端にて、潮汐の影響を考慮する物質の移流拡散モデルを結合する。結合する先のモデルは、通常物質の移流拡散モデルである。当該モデル（下記式）にて、流速は、MERCURY より与えられる流速に、潮汐による流れを加えたものから得られるものとする。

潮汐を考慮した流速

$$u_r = u_R + \frac{2\pi a_T x_r}{T_T h} \sin\left(\frac{2\pi}{T_T} t\right) \quad (5-1)$$

$$= u_R + \eta_R \sin\left(\frac{2\pi}{T_T} t\right) \quad (5-2)$$

$$= u_R + C \frac{d\eta}{dt} \quad (5-3)$$

物質の移流拡散モデル

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_r} (\phi u_r) = \frac{\partial}{\partial x_r} \left(K_r \frac{\partial \phi}{\partial x_r} \right) \quad (5-4)$$

ここで、 u_r ：流下方向流速 (m/s)、 u_R ：MERCURYにより与えられる河道内での流速 (m/s)、 a_T ：潮汐振幅 (m)、 T_T ：潮汐周期 (s)、 h ：水深 (m)、 x_r ：感潮河川域の上流端をゼロとし下流に向けて増加する距離 (m)、 t ：時間 (s)、 K_r ：渦拡散係数 (m²/s)、 η_R ：潮汐による流速振幅 (m/s)、 η ：水位計算結果 (m)、 C ：水位時間微分に掛かる係数である。

潮汐の影響を考慮しない場合、陸域モデルが推定する流量が河川から流出するだけであるが、潮汐の影響を考慮すると、河口域から河川内への流入が潮汐の周期で発生することも再現する必要がある。この潮汐による効果を考慮する簡易河道モデルの物理量の定義点を図 5-3 に示した点とすると、物質の移流拡散モデル(5-4)式は、移流項を1次風上、拡散項を中心差分で離散化することで以下の通りとなる。

$$\phi_r^{n+1} = \phi_r^n + \Delta t \left[-\frac{u_r \phi_r - u_R \phi_R}{x_r} + \frac{K_r}{x_r} \left(\frac{\phi_s - \phi_r}{x_r} - \frac{\phi_r - \phi_R}{x_r} \right) \right] \quad (5-5)$$

ここで、黄網掛の変数は MERCURY によって算出される一方、青網掛の変数は 3D-Sea-SPEC によって算出される。

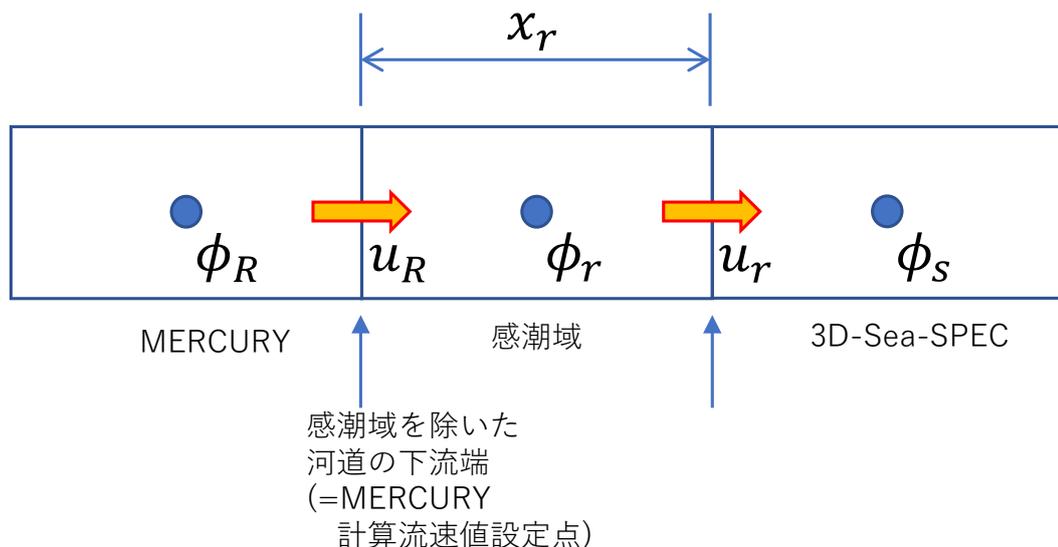


図 5-3 簡易河道モデルにおける物理量定義点

5.3.2 感潮域の推定

簡易河道モデルを適用するには、上記モデルの説明にて記したように、感潮河川域の上流端をゼロとし、下流に向けて増加する距離 x_r (m)を推定する必要がある。この推定に当たっては、観測値を利用することが考えられるが、観測結果がない場合、昨年度（令和2年度）当該事業で作成した阿武隈川河口域モデルに対し、3D-Sea-SPECを用いて、表5-1の解析条件による非定常計算を行うことで感潮域の推定を行う。

表 5-1 解析条件（感潮域推定）

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		20 周期
初期水位	0.0 m		
水温	25 °C		解析領域全体で一定値
河川	流量	30 m ³ /s 一定	
	塩分	0.0 (-)	
	溶存態	500 Bq/m ³	
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 (-)		干潮時から計算開始
水表面の熱交換	非考慮（気温等データがないため）		
風応力	非考慮（風速等データがないため）		
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	

計算では、図5-4に示す阿武隈川下流域の赤●に示す6点をモニタリングポイントとして設定し、上流から①～⑥と番号付けする。これらの位置における流速および溶存態の時刻歴を確認することで、感潮域を推定する。

尚、阿武隈川の流況が周期的定常状態となるように、最初の10周期分を助走計算とし、残りの10周期分の定常計算結果より感潮域を推定する。図5-5～図5-10に、各モニタリングポイントにおける定常計算結果の時刻歴を示す。これらより、図5-10のモニタリングポイント⑥において、溶存態の周期的変動がわずかに見られることから、物質の動態を考える上で、潮汐を考慮する必要性が発生することから、感潮域内と推定し、この点を通る横断面に対して、(5-1)式の流下方向流速 u_r (m/s)を推定する。尚、図5-5～図5-10より、最上流のモニタリングポイント①においても流速の周期的変動が見られることから、(5-1)式の感潮河川域の上流端をゼロとし、下流に向けて増加する距離 x_r (m)を推定することは困難であることが分かる（感潮域の上流端は、阿武隈河口モデルの範囲を超え更に上流側にあると推測される）。そこで、(5-2)式の潮汐による流速振幅 η_r (m/s)を推定することで対処することを考える。

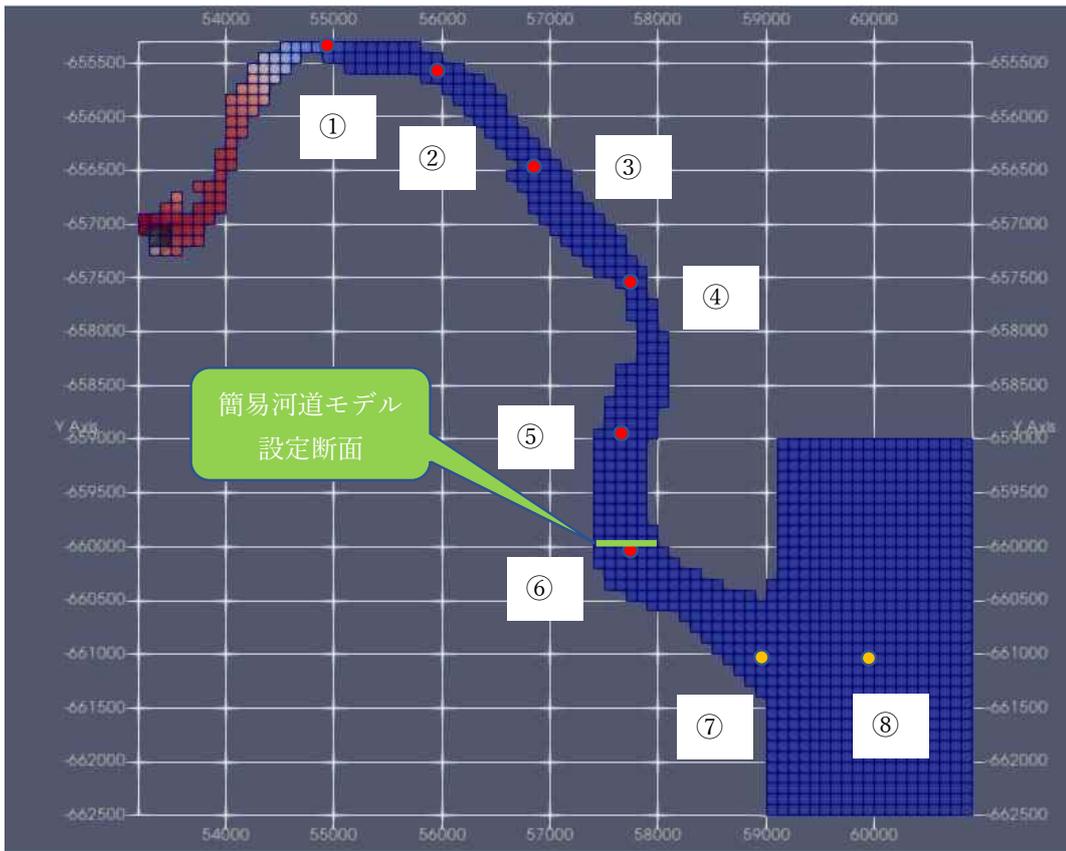


図 5-4 感潮域推定用モニタリングポイント

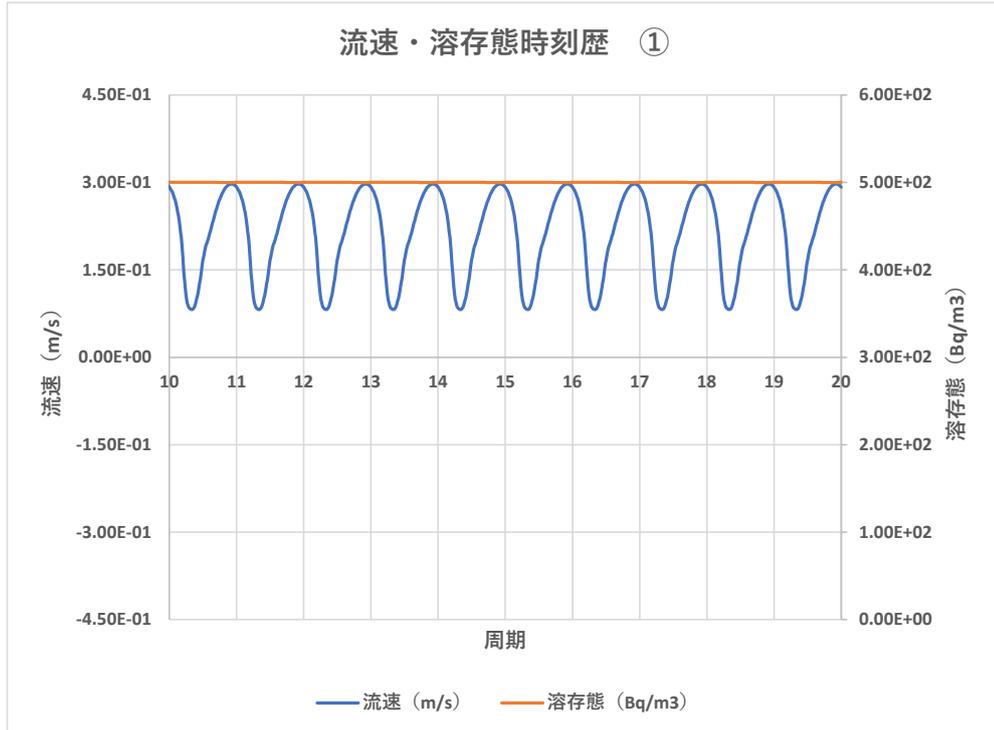


図 5-5 流速・溶存態時刻歴 (モニタリングポイント①)

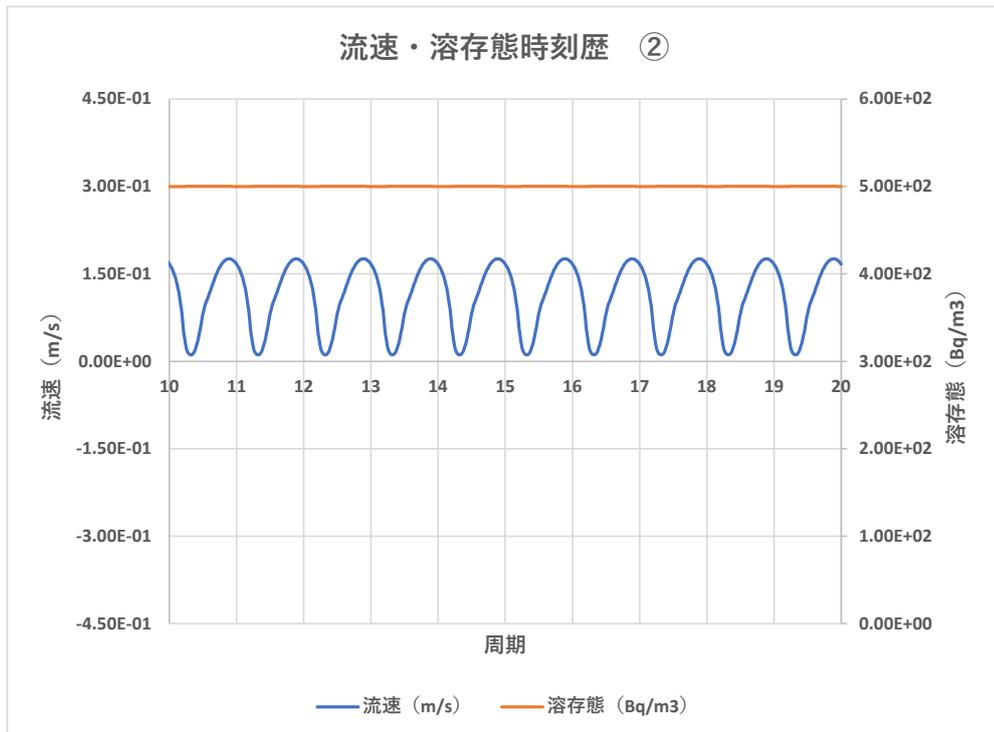


図 5-6 流速・溶存態時刻歴 (モニタリングポイント②)

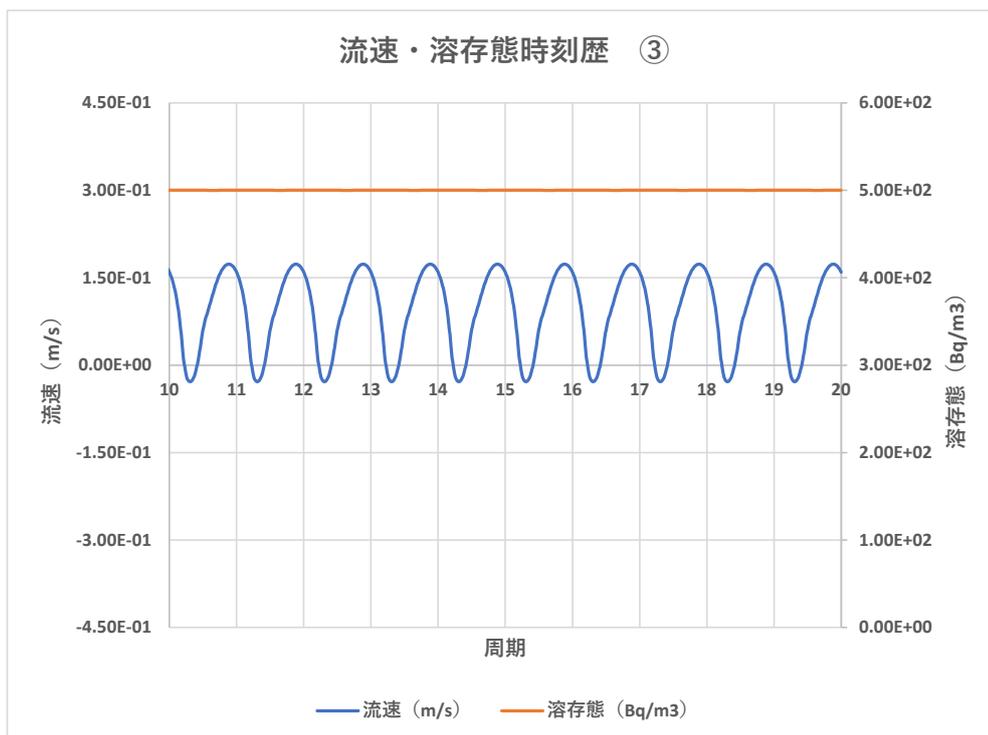


図 5-7 流速・溶存態時刻歴 (モニタリングポイント③)

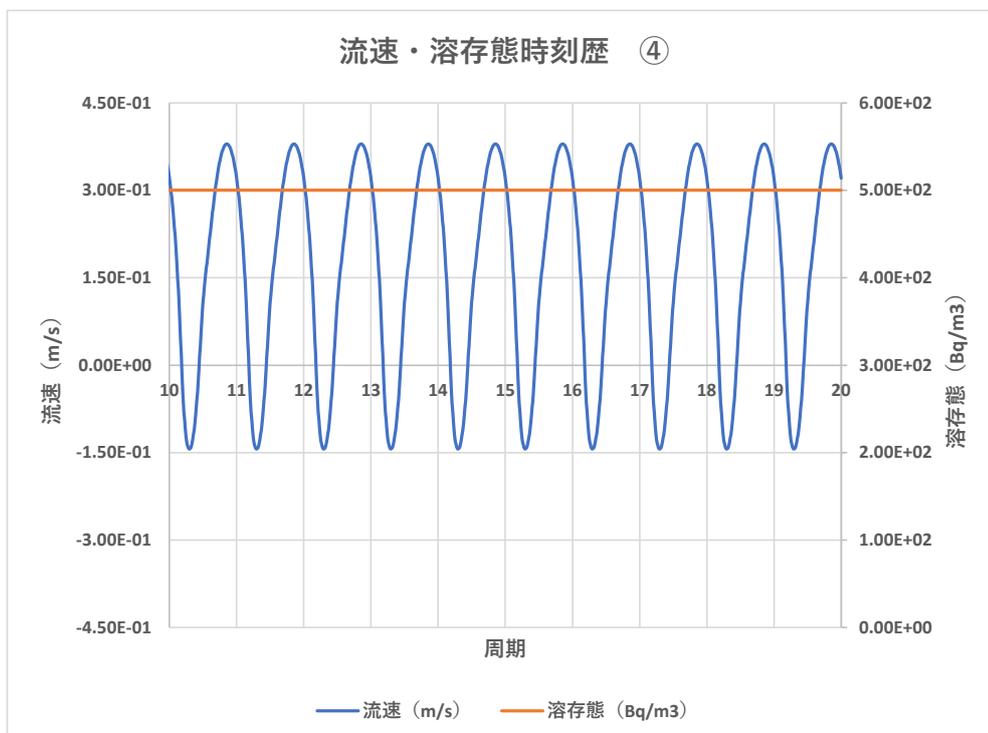


図 5-8 流速・溶存態時刻歴 (モニタリングポイント④)

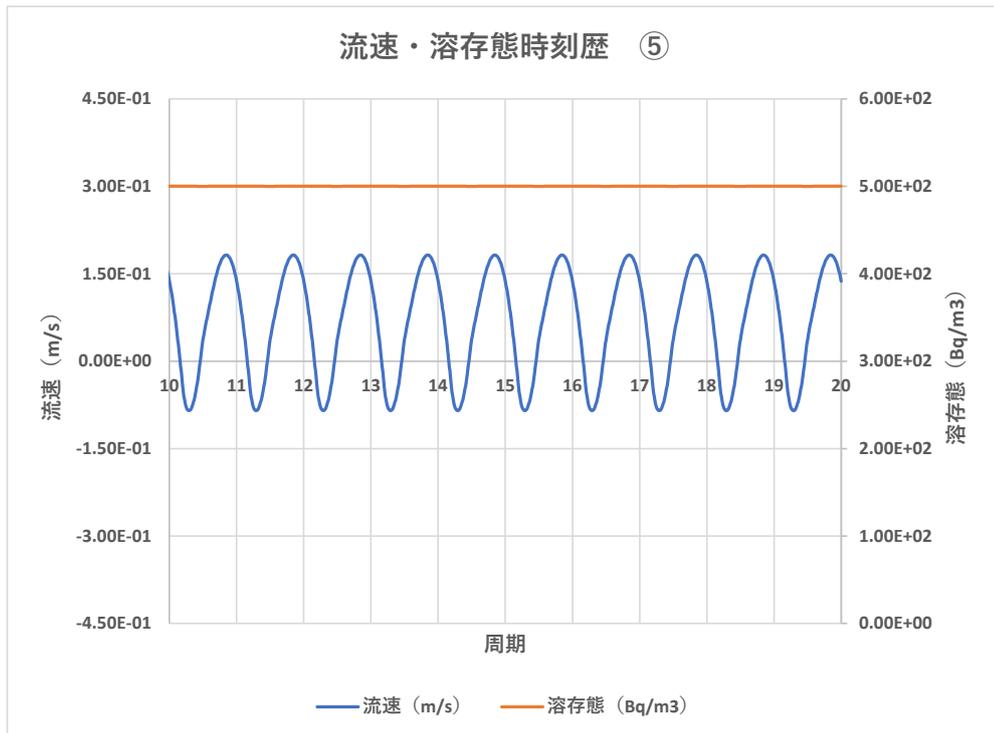


図 5-9 流速・溶存態時刻歴 (モニタリングポイント⑤)

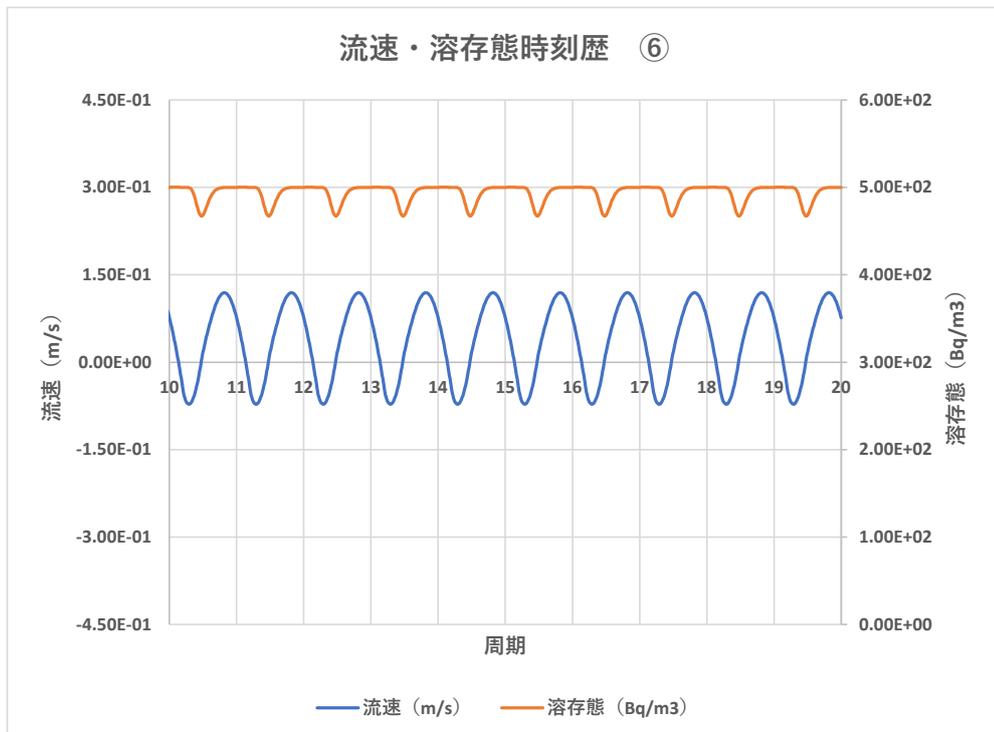


図 5-10 流速・溶存態時刻歴 (モニタリングポイント⑥)

次に、図 5-11 に 16～20 周期におけるモニタリングポイント⑥での水位・流速・溶存態計算結果と流速計算値のグラフを示す。河川流量一定+潮汐流とする定常計算では、河川流速 u_R は流速計算結果の平均値に一致し、潮汐による流速変動値は、流速平均値からの増減に一致すると考えられる。この関係を使うと、沿岸域モデルに付与する流速推定値を、(5-2)式に対し、以下のパラメータ（3D-Sea-SPEC 計算結果を基に決定）を付与することで算出できることが分かる。

MERCURY により与えられる河道内での流速： $u_R = 0.025$ (m/s) ※平均流速
 潮汐周期： $T_T = 43200$ (s) ※M2 潮 (12 時間)
 潮汐による流速振幅： $\eta_r = 0.097$ (m/s) ※平均流速からの最大変動

上記の考え方に従い、流速値の変化と 3D-Sea-SPEC を用いた計算値を比較すると、わずかな位相のずれが見られるが、3D-Sea-SPEC による定常計算結果流速値（青線）と、(5-2) 式と上記パラメータから求めた推定流速値（赤線）は、ほぼ一致していることが分かる。また、3D-Sea-SPEC で計算される水位の時間微分によって流速変動値を算出する(5-3)式についても検討した。図 5-11 に、 $C = -0.08$ の場合の(5-3)式の算出結果（緑線）も合わせて示した。これも、(5-2)式より算出した流速推定値（赤線）とほぼ重なっていることがわかる。

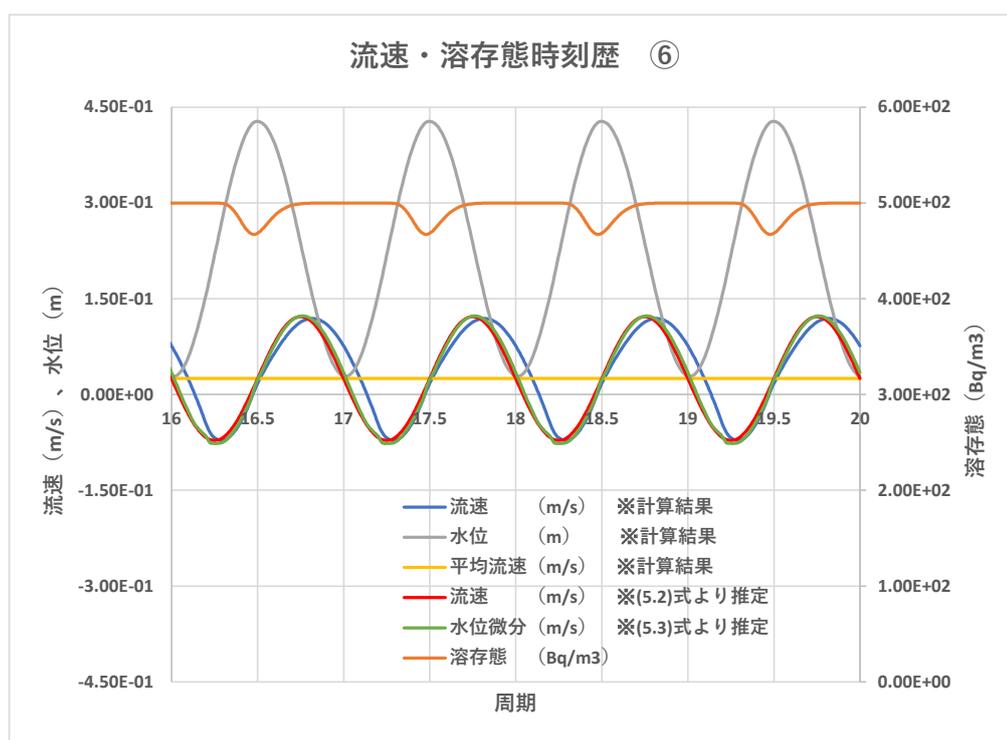


図 5-11 流速・溶存態時刻歴と流速 u_r 推定結果（モニタリングポイント⑥）

以上、本来の簡易河道モデル[5-1]では、(5.1) 式を適用するが、パラメータの観測等が困難な場合、(5.2) 式や (5.3) 式を用いて、接続先のモデルから、必要なパラメータを導出することが可能と分かった。

5.4 集中定数型モデルと河口域モデルの接続に係る試解析（阿武隈川）

5.4.1 簡易河道モデルを用いた 3D-Sea-SPEC による試計算

前節にて示したように、簡易河道モデルを用いた MERCURY と 3D-Sea-SPEC の接続計算を実施する際、河川流速を一定とし、3D-Sea-SPEC のみの計算により、感潮域での流速の時間変化を計算した（この計算は簡易河道モデルのパラメータを求めるための観測に相当すると考えられる）。これにより、簡易河道モデル上の一点にて、潮汐変化による流速成分の振幅が判明し、(5-2)式が下記(5-6)式のように、パラメータが決定された式として、潮汐を考慮した流速を、3D-Sea-SPEC に付与することが可能となった。この方法を採用すると、上流域を含めた 3D-Sea-SPEC の計算を実施する必要がなくなり、計算コストは大幅に減少する。令和 2 年度の当該事業では、塩水遡上が起こる領域全体を 3D-Sea-SPEC にてカバーすることを考えていたが、提案された簡易河道モデル[5-1]の(5-1)式と同等の式(5.2)を 3D-Sea-SPEC による計算結果を比較することで、簡易河道モデルのパラメータが決定可能となり、3D-Sea-SPEC の計算領域を x_r 分だけ実質減らすことが可能であると分かる。実際、本簡易河道モデルを用いて MERCURY の結果を接続する場合、基本的には、(5-1)式の u_R を MERCURY の計算結果から得られる流速値に置き換えるだけで良いと考えられ、接続モデルの評価を行う際は、以下の式（パラメータを決定した簡易河道モデル）を基に試計算を実施する。以上、本簡易河道モデルは以下の通りとなる。

潮汐を考慮した流速(5-2)式より

$$u_r = 0.025 + 0.097 \sin\left(\frac{2\pi}{43200}t\right) \quad (5-6)$$

潮汐を考慮した流速(5-3)式より

$$u_r = 0.025 - 0.08 \frac{d\eta}{dt} \quad (5-7)$$

物質の移流拡散モデル

$$\phi_r^{n+1} = \phi_r^n + \Delta t \left[-\frac{u_r \phi_r - u_R \phi_R}{x_r} + \frac{K_r}{x_r} \left(\frac{\phi_s - \phi_r}{x_r} - \frac{\phi_r - \phi_R}{x_r} \right) \right] \quad (5-8)$$

※ 感潮域推定時の計算条件より、 $\phi_R = 500$ (Bq/m³) とする。

※ K_r は海域の典型的オーダーである $K_r = 1.0$ (m²/s) とする。

尚、試計算としては、以下の 5 ケースを実施した。

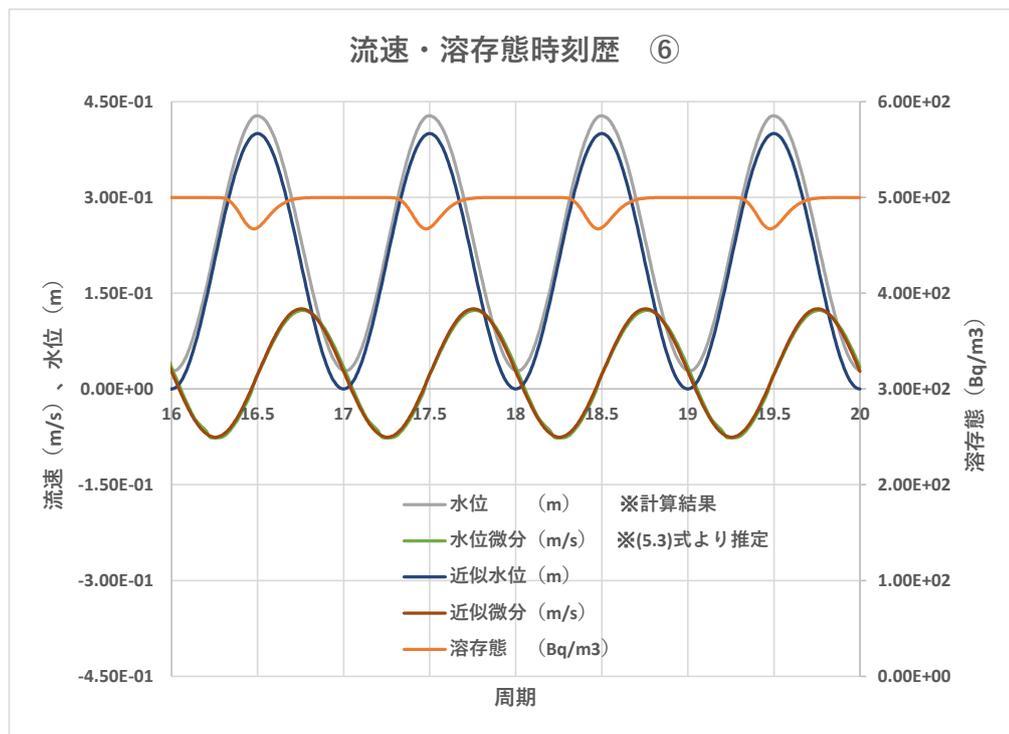
表 5-2 試計算ケース一覧

No.	(5-1)式の u_R	u_r 計算式	(5-4)式の u_R	ϕ_R	x_r (暫定)	ϕ_s
TestM0		感潮域推定計算 (5.3.2 参照)				
TestM1	0.025 m/s	(5-2)式	0.025 m/s	500 Bq/m ³	1000m	図 5-4⑥位置
TestM2	0.025 m/s	(5-6)式	0.025 m/s	500 Bq/m ³	500m	図 5-4⑥位置
TestM3	0.025 m/s	(5-6)式	0.050 m/s	500 Bq/m ³	1000m	図 5-4⑥位置
TestM4	0.025 m/s	(5-6)式	0.050 m/s	500 Bq/m ³	1000m	図 5-4⑦位置
TestM3 η	0.025 m/s	(5-7)式	0.050 m/s	500 Bq/m ³	1000m	図 5-4⑥位置

(5-4)式の u_R に対し、TestM1, TestM2 においては、簡易河道モデル設定位置における横断面積と、感潮域を除いた河道下流端における横断面積は、一致（河道幅・水深に変化がないと仮定）するとして、推定される平均流速を与える。TestM3, TestM4 に関しては、TestM0 の溶存態濃度分布よりも、TestM1, TestM2 の溶存態濃度分布のほうが低い傾向となったため、簡易河道モデルの上流側溶存態フラックスを増やす目的で TestM1, TestM2 の 2 倍の流速値とした。 ϕ_R に関しては、TestM0 の溶存態河川放出設定と同じ $500(\text{Bq}/\text{m}^3)$ とした。 x_r 、 ϕ_s に関しては、事前に 3D-Sea-SPEC のような沿岸モデルで解析を試行するか、流速の経時変化を測定した上で、数値（位置）を決定すべき量である。もし、事前に決定するとした場合、どのような根拠で設定するかは、本来の式 (5-1) 式に立ち戻り求める必要がある。次に TestM3 η の設定を示す。まず、3D-Sea-SPEC で得られた水位を用いて、 $C = -0.08$ として(5-3)式による計算を実施したところ、発散することが分かった。そこで、3D-Sea-SPEC の海側境界を M2 潮周期（43200(s)）で 0.2m 振幅であることから、簡易河道モデル設定位置における水位を以下のように cos 関数で近似することで対処した（図 5-12：紺線）。

$$\eta = 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{43200} t\right)$$

この近似水位の時間微分をとると、図 5-12：茶線で示す近似微分となり、3D-Sea-SPEC で得られた水位（図 5-12：グレー線）の時間微分の結果（図 5-12：緑線）とほぼ一致することが分かる。従って、この近似水位を(5-3)式に当てはめ、計算を実施したところ、最終 20 周期まで計算できたことから、これを TestM3 η の計算結果とする。cos 関数の近似水位による計算が問題なく安定に実施できたことから、3D-Sea-SPEC で得られた水位の時間微分による計算が発散したのは、計算結果の水位に細かい振動があり、微分計算により不自然な変動が助長され不安定になるためと考えられる。



5-12 水位とその時間微分結果（モニタリングポイント⑥）

20 周期目の上げ潮時・下げ潮時について、各ケースの表層における流速分布を図 5-13～図 5-14、溶存態分布を図 5-15～図 5-16 に示す。流速分布については、TestM1～TestM4 で結果が完全一致するため、TestM0 と TestM1 の比較、および TestM1 と TestM3 η の比較のみ示す。

【流速 U 分布】

3D-Sea-SPEC のみで計算した TestM0 と、簡易河道モデル+3D-Sea-SPEC で計算した TestM1、TestM3 η を比較すると、概ね一致した分布となっており、簡易河道モデルの適用性の高さが示唆される。しかし、TestM1 における簡易河道モデルの流速 u_r は、3D-Sea-SPEC の定常計算結果による流速を基にあらかじめ推定した式で与えたものであり、また、TestM3 η における簡易河道モデルの流速 u_r は、近似水位の時間微分から与えたものであることから、凡そ一致することは想定される。尚、感潮河川域の上流端をゼロとし下流に向けて増加する距離 x_r (m) の推定方法や、3D-Sea-SPEC による水位計算結果を基に簡易河道モデルの流速 u_r を推定する方法が、今後の課題となる。

【溶存態分布】

以下、各ケースとケース間の比較を行い、ケース毎の評価を行う。

<TestM0 vs TestM1>

TestM1 のほうが TestM0 よりも溶存態濃度が低い傾向にある。簡易河道モデル上流側に与える溶存態フラックスが少ないためと考えられる。

<TestM0 vs TestM2>

TestM0 vs TestM1 と同様

<TestM1 vs TestM2>

感潮河川域の上流端をゼロとし下流に向けて増加する距離 x_r を小さくすることは、簡易河道モデル内のボリュームを小さくすることに対応するが、流入出するフラックス量は変わらないため、結果として、 x_r を小さくした TestM2 のほうが TestM1 よりも溶存態濃度がやや高めとなる傾向にある。

<TestM0 vs TestM3>

簡易河道モデル上流側に与える溶存態フラックスを増加させたことによって、TestM0 と TestM3 で概ね一致する溶存態分布が得られた。

<TestM0 vs TestM4>

TestM0 vs TestM3 と同様

<TestM3 vs TestM4>

海側の物理量参照点が河口から遠い TestM4 のほうが、TestM3 よりも溶存態濃度がやや低めとなる傾向にある。海側の物理量参照点位置をどのように決定するかが、今後の課題である。

<TestM3 vs TestM3 η >

目視ではわからないほど結果が一致している。簡易河道モデルに与える流速 u_r を、(5-3)式の水
位微分によって与える方法が可能であることが示唆されるが、実際に 3D-Sea-SPEC の水位計算
結果を微分して算出された流速を与えると計算が発散するため、3D-Sea-SPEC の水位計算結果を
簡易河道モデルの流速 u_r へどのように反映させるかは、今後の課題ではあるが、数値微分の計算
方法を変える等の手段で解決可能と考えられる。

① 流速 U 分布

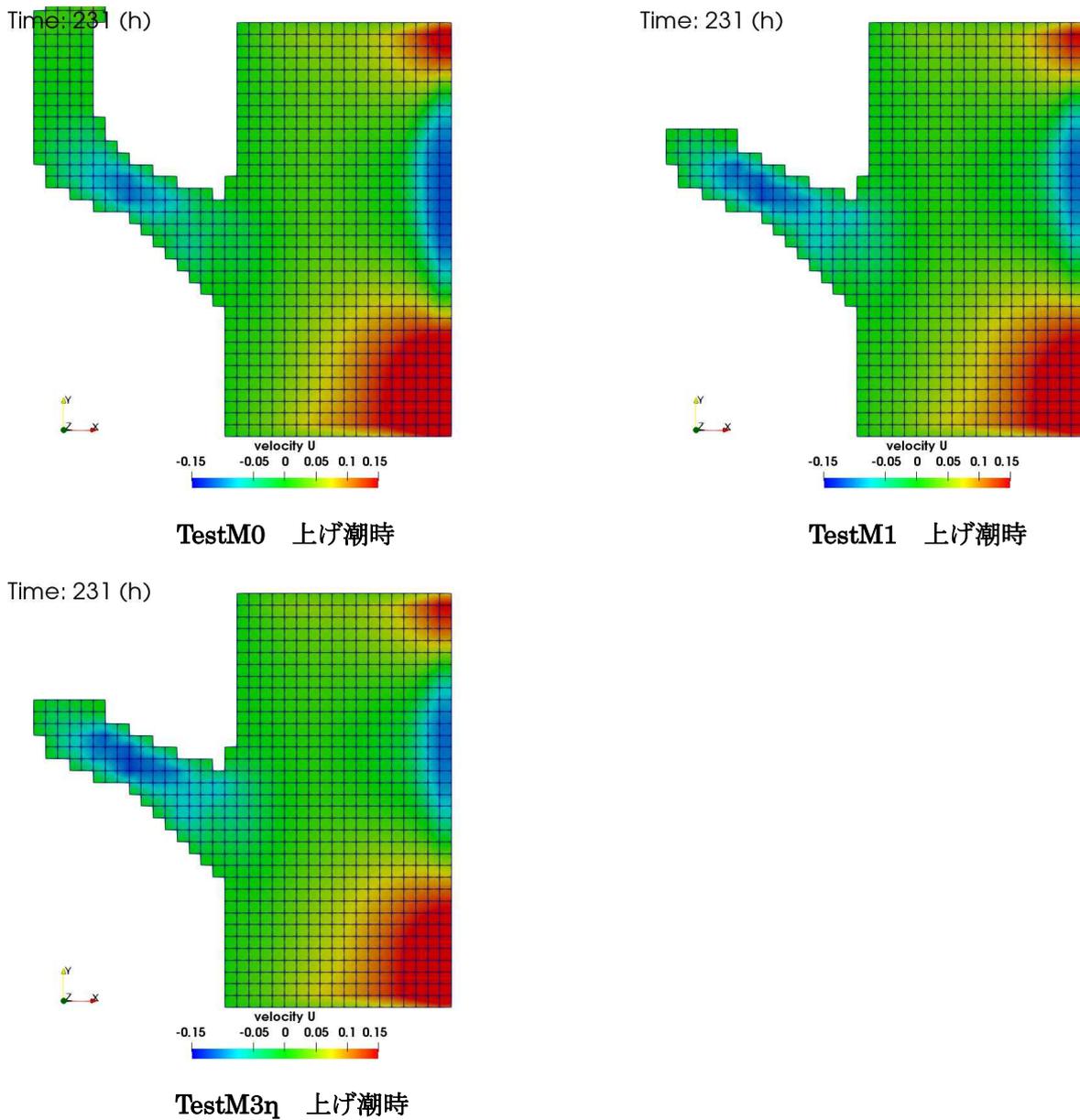
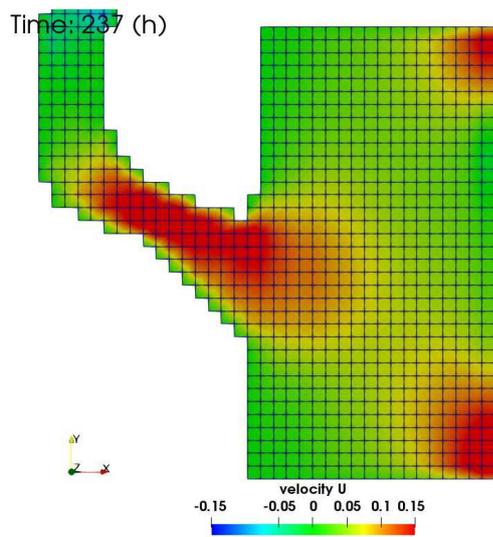
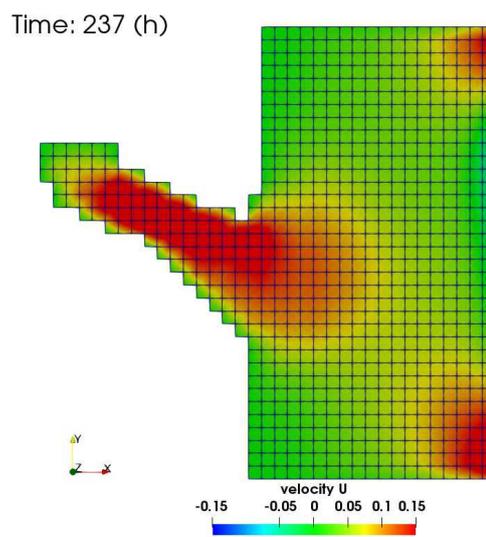


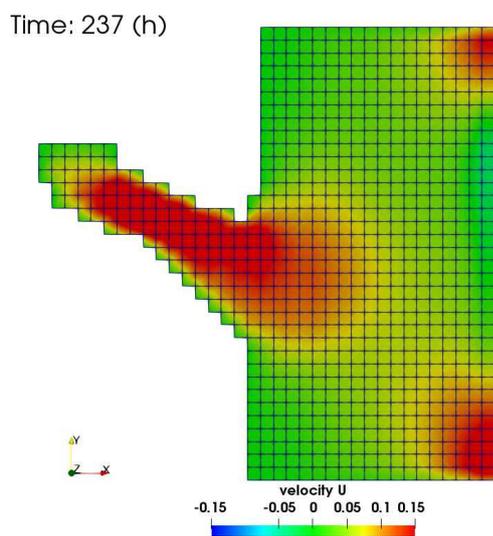
図 5-13 流速 U 分布 (TestM0 vs TestM1)



TestM0 下げ潮時



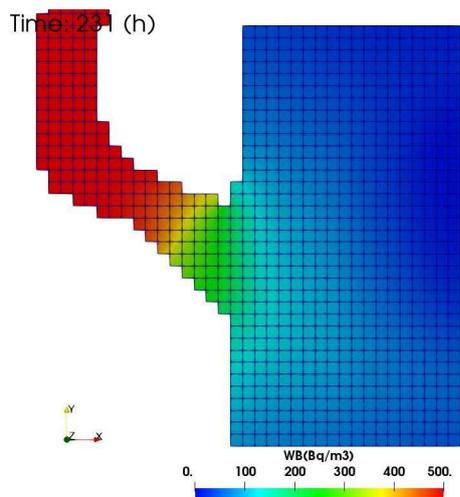
TestM1 下げ潮時



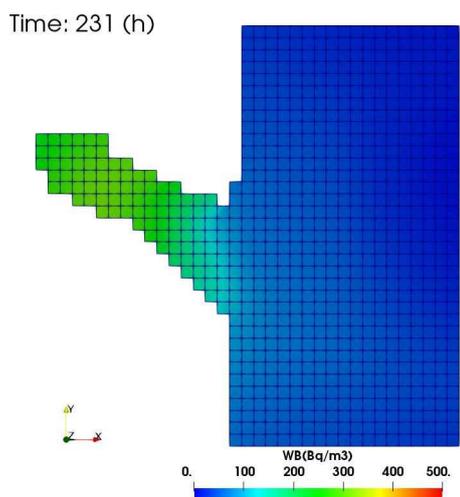
TestM3 η 下げ潮時

図 5-14 流速 U 分布 (TestM0 vs TestM1)

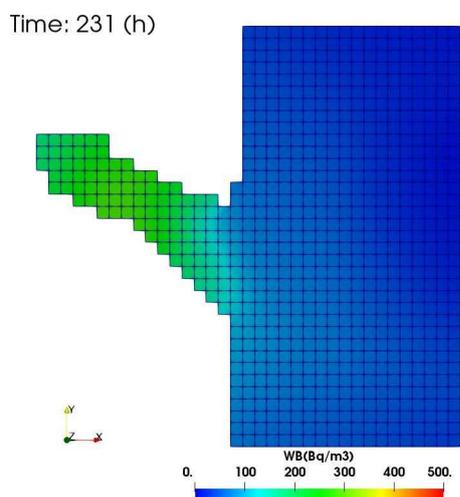
② 溶存態分布



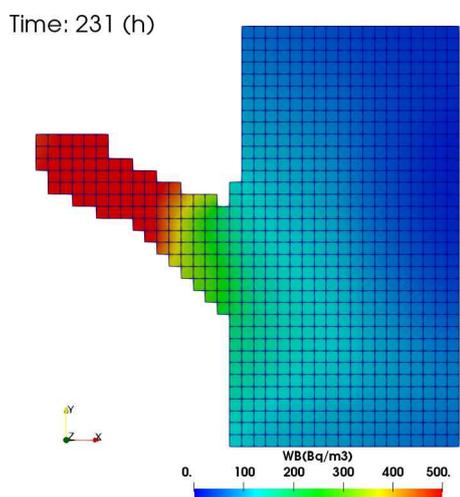
TestM0



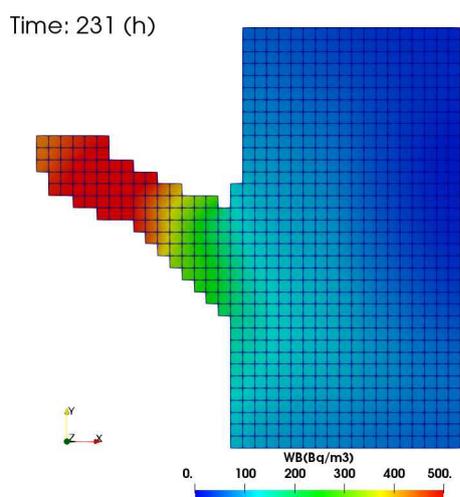
TestM1



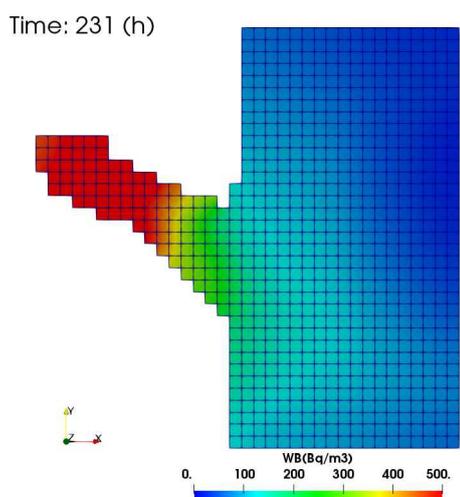
TestM2



TestM3

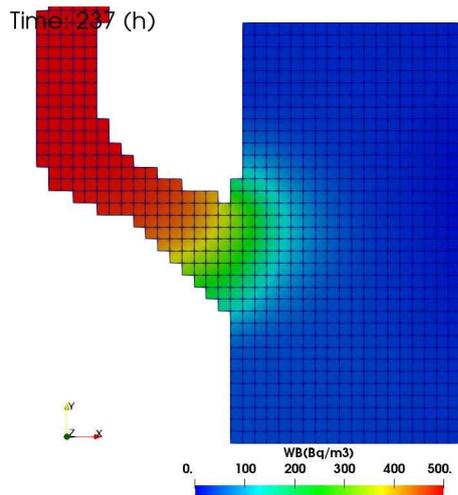


TestM4

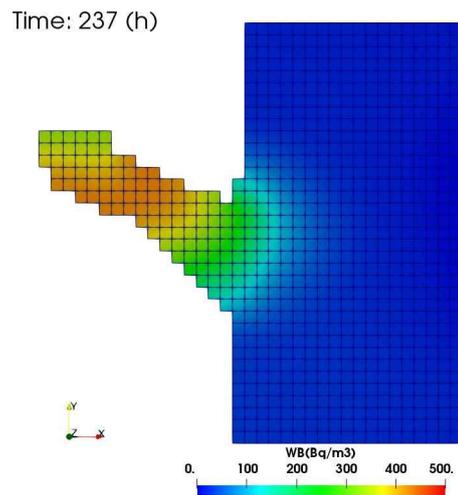


TestM3 η

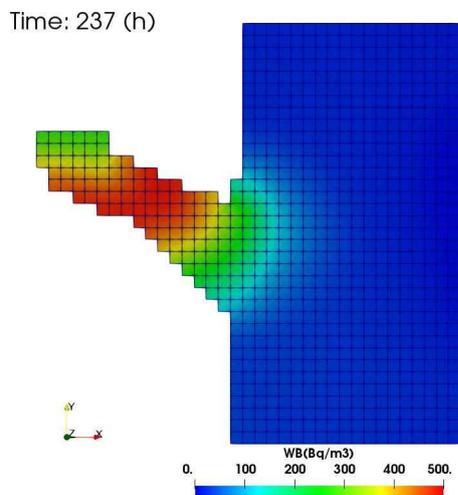
図 5-15 溶存態分布 (上げ潮時)



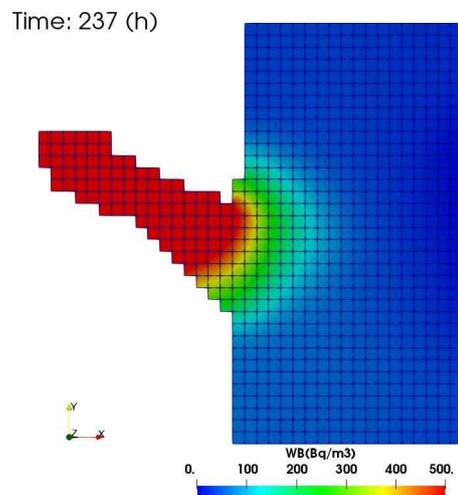
TestM0



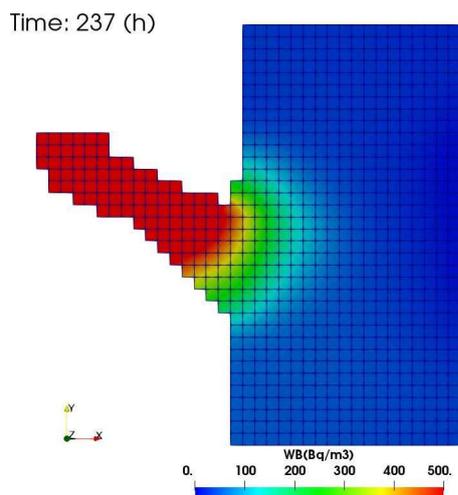
TestM1



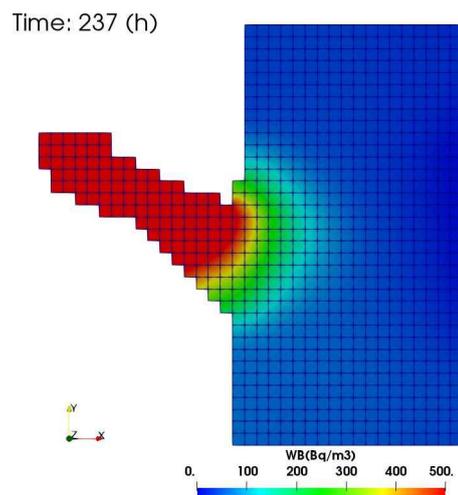
TestM2



TestM3



TestM4



TestM3 η

図 5-16 溶存態分布 (下げ潮時)

5.4.2 MERCURY による阿武隈川の流出解析

簡易河道モデルを用いた MERCURY と 3D-Sea-SPEC の接続計算を実施するために必要となる、MERCURY による阿武隈川の流出解析を実施する。図 5-17 に MERCURY に入力した降雨量 (mm/h) と MERCURY 計算結果である流量 (m³/s) の時刻歴グラフを示す。また、図 5-18 と図 5-19 には、MERCURY 計算結果である流量 (m³/s) と ¹³⁷Cs 懸濁態流出量 (Bq/h) および ¹³⁷Cs 溶存態流出量 (Bq/h)、の時刻歴グラフを示す。降雨量は、気象庁アメダスデータベースより取得した 2013 年に福島観測所における観測値を MERCURY に入力した。MERCURY のモデル定数は、表 5-3 に示すように与える。

表 5-3 モデル定数

適用先	モデル定数	設定値
タンクモデル	a1	0.020
	a2	0.004
	a3	9.00.E-05
	b1	0.500
	b2	0.010
L-Q 式	A	1.8e-5
	B	1.634664
	C	1.953
	D	0.0858
	E	0.001269
	F	0.000242
	k1	4.994
	k2	0.463
	k3	4.782
k4	0.267	
流量算出	流域面積 (m ²)	5.432e9
放射性物質算出	Cs137 沈着量 (Bq/m ²)	1.06e5

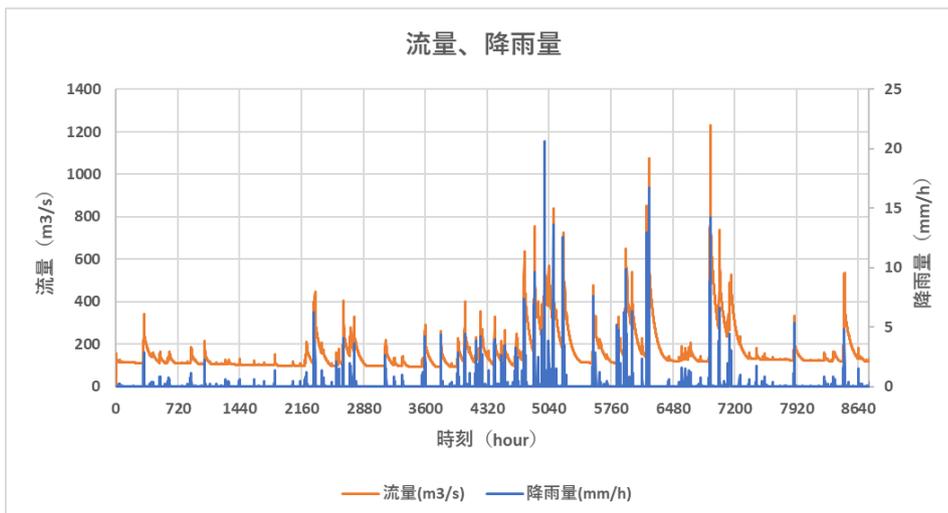


図 5-17 流量 (MERCURY 計算結果) と降雨量 (福島観測所 2013 年)

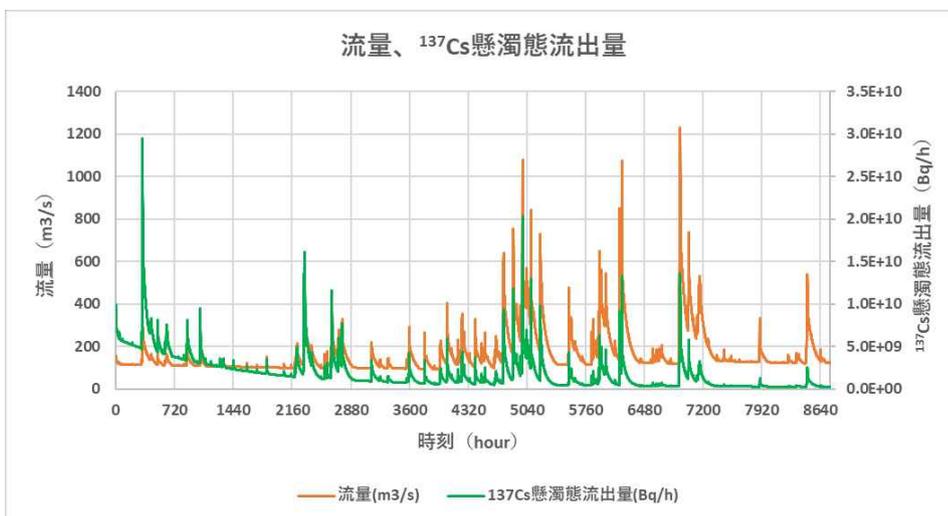


図 5-18 流量と溶存態 (MERCURY 計算結果)

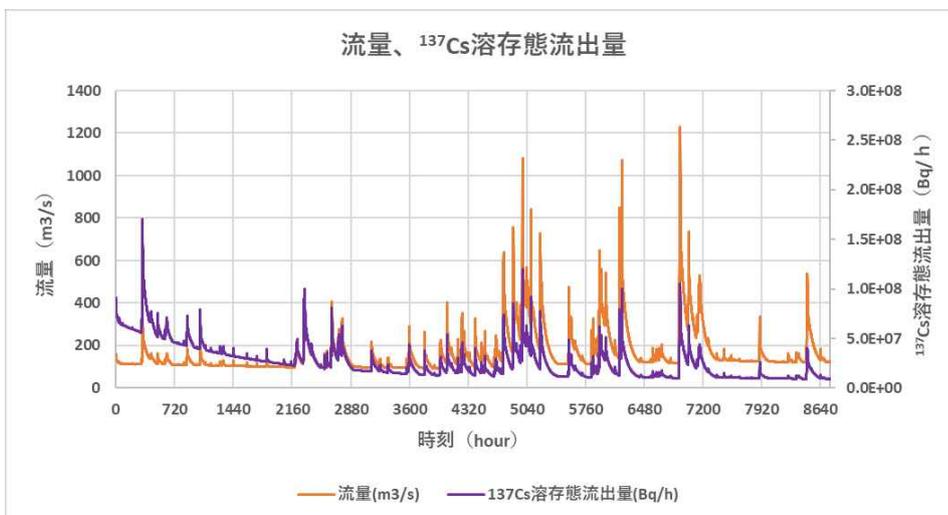


図 5-19 流量と溶存態 (MERCURY 計算結果)

5.4.3 簡易河道モデルを用いた MERCURY と 3D-Sea-SPEC の接続計算

本節では、実際に簡易河道モデルを用いた MERCURY と 3D-Sea-SPEC の接続計算を実施する。計算期間は図 5-17、図 5-18 の 3900～4140h までの 240h とした。5.4.1 における定常計算試験では、河川流量を $30\text{m}^3/\text{s}$ として一定としていたことから、計算期間における MERCURY 計算結果の流量も概ね同じオーダーとなるように $1/5$ 倍し流量を与えることとした。図 5-20 に、MERCURY 計算結果として与える 3900～4140h までの 240h の流量と溶存態の時刻歴を示す。

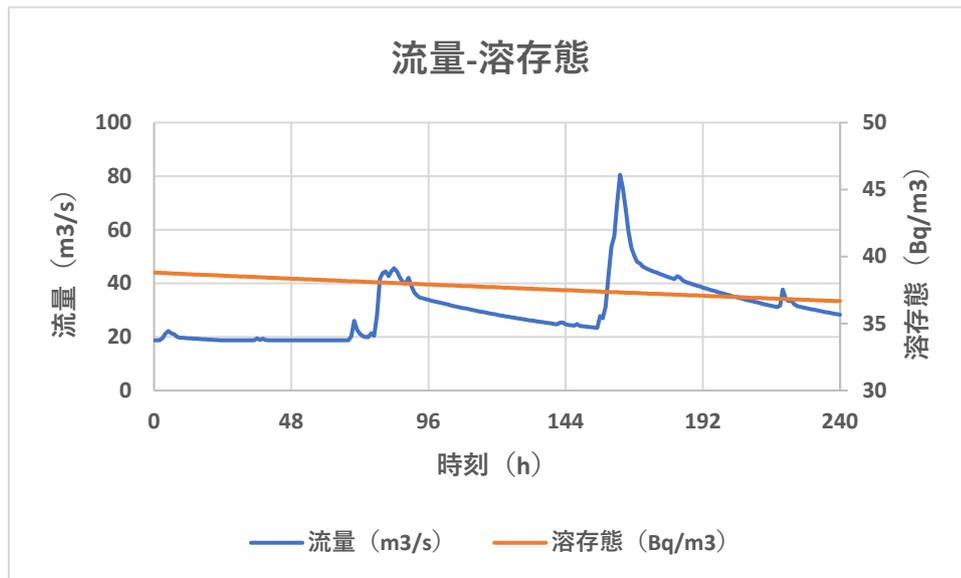


図 5-20 河川条件

計算は、以下の 2 ケースを実施した。

表 5-4 MERCURY と 3D-Sea-SPEC の接続計算ケース一覧

No.	(5-1)式の u_R	(5-4)式の u_R	ϕ_R	x_r	ϕ_s
M0	3D-Sea-SPEC に対し河道最上流にて MERCURY 計算結果を付与				
M1	MERCURY 計算結果を簡易河道モデルで接続			1000m	図 5-4⑥位置

5.4.1 で検討したように、MERCURY を接続するため、(5-1)式の u_R を、MERCURY の計算結果から得られた流速値に置き換える。則ち、MERCURY は対象河川の流出流量を計算結果として出力することから、簡易河道モデル設定位置における河道幅と水深値から算出した流速値の時刻歴を(5-1)式の u_R に与える。また、(5-4)の ϕ_R には、MERCURY から出力された溶存態濃度の時刻歴をそのまま与える。 x_r 、 ϕ_s に関しては 5.4.1 の検討より、 $x_r = 1000\text{m}$ 、 ϕ_s は図 5-4⑥位置とした。

20 周期目の上げ潮時・下げ潮時について、各ケースの表層における流速分布を図 5-21、溶存態分布を図 5-22 に示す。

【流速分布】

3D-Sea-SPEC のみで計算した M0 と、簡易河道モデル+3D-Sea-SPEC で計算した M1 を比較すると、概ね一致した分布となっており、MERCURY と 3D-Sea-SPEC の接続は適切と考えられる。

【溶存態分布】

3D-Sea-SPEC のみで計算した M0 と、簡易河道モデル+3D-Sea-SPEC で計算した M1 を比較すると、河道の分布でやや異なるものの、海域への負荷に関しては概ね一致した分布となっており、MERCURY と 3D-Sea-SPEC の接続は適切と考えられる。

① 流速 U 分布

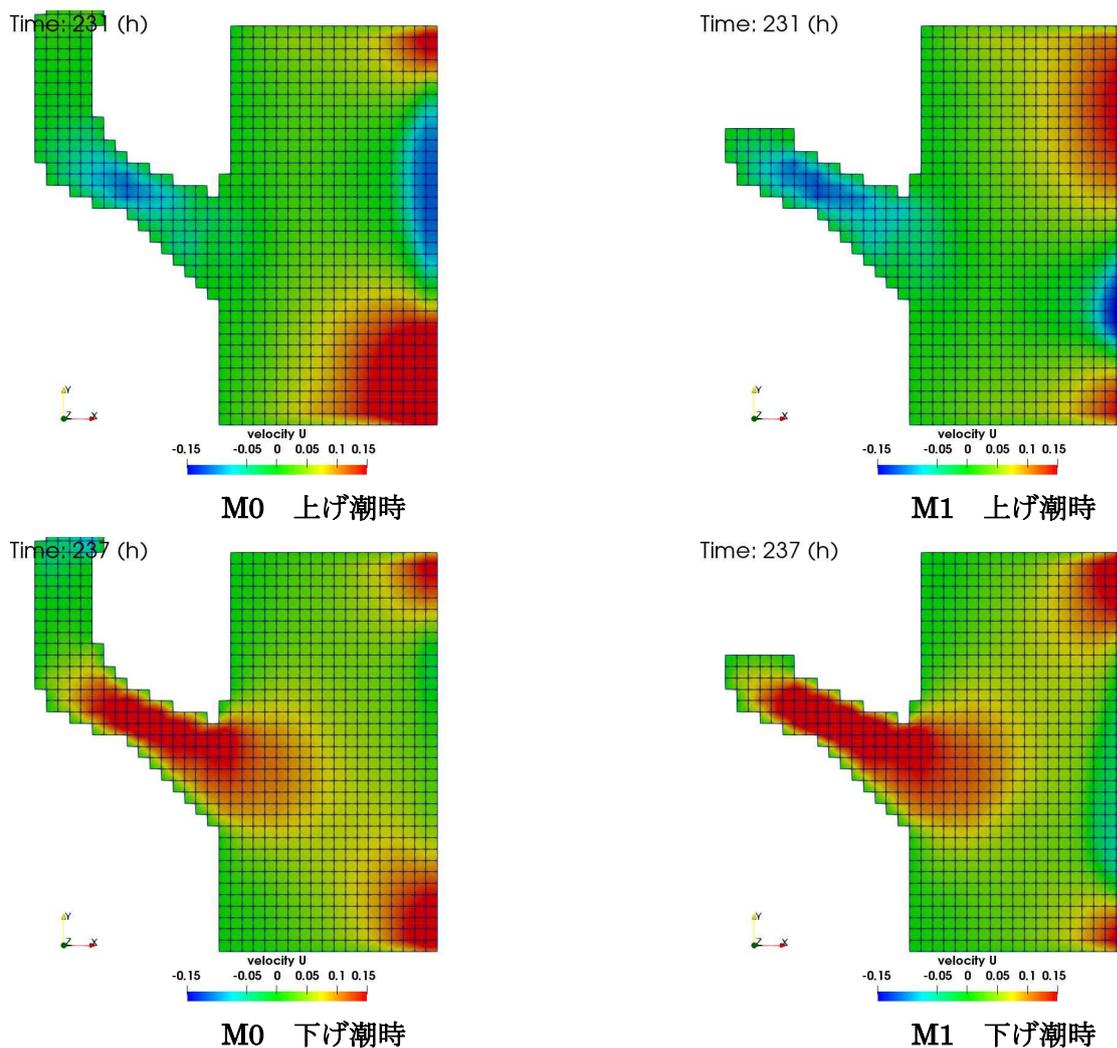


図 5-21 流速 U 分布

② 溶存態分布

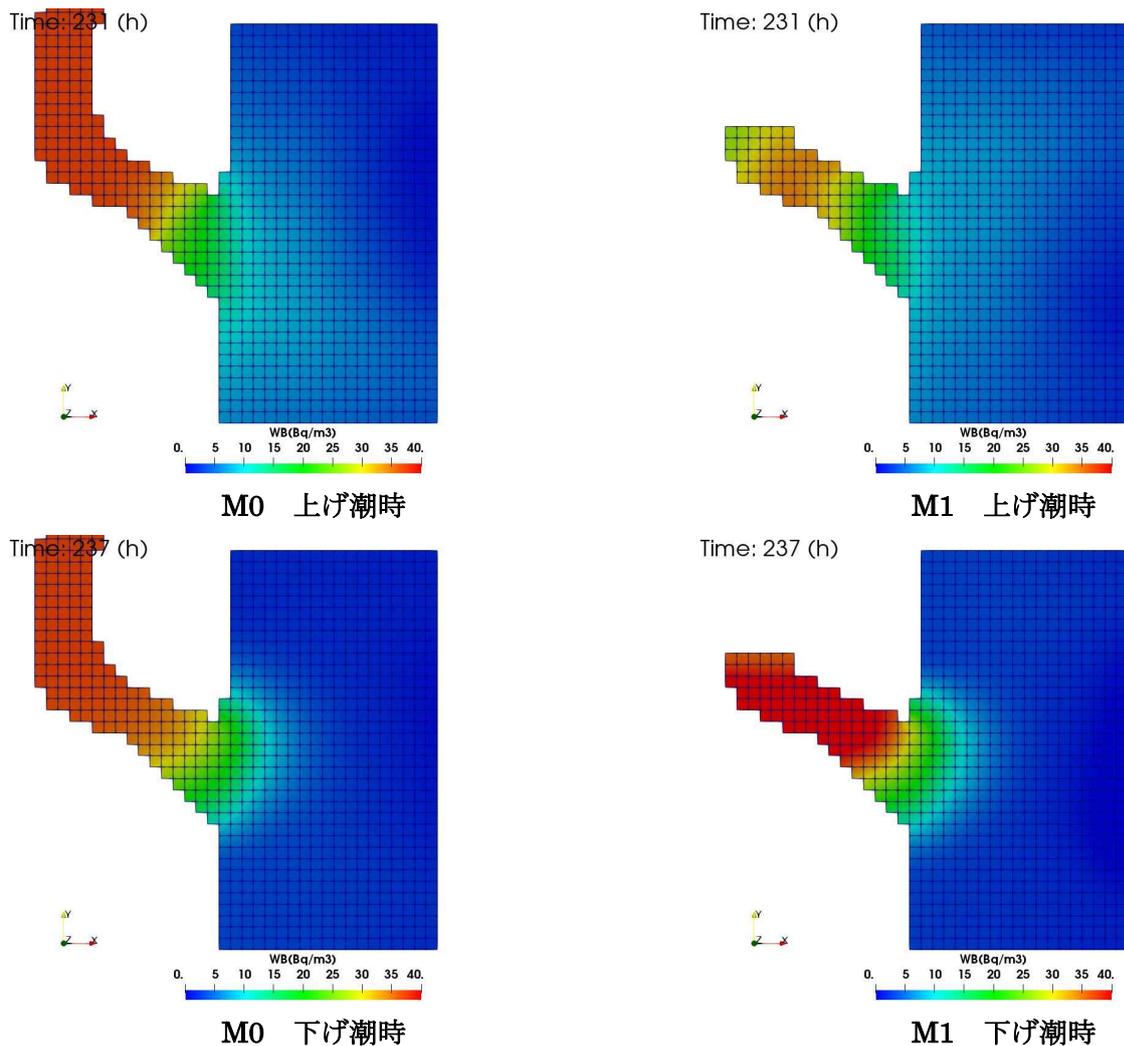


図 5-22 溶存態分布

5.5 分布定数型モデルと河口域モデルの接続に係る整備

RADFLOW は、陸域の表面流（河道も同様）を解く際、キネマティックウエーブモデルを用いており、水位の分布とその時間発展を計算していることから、沿岸での潮位変動による水位変化を直接取り込むことで、潮位変化の影響を反映する流出量の変化を計算することが可能となる。従って、河口域にて直接、3D-Sea-SPEC への接続を試みる。

5.5.1 RADFLOW による阿武隈川の解析

先ず、準備のため、RADFLOW による阿武隈川の流出量解析を行う。RADFLOW に入力した降雨量 (mm/h) は MERCURY による阿武隈川の流出解析で使用した図 5-17 と同じとする。その他の解析条件は、4 章で実施した阿武隈川での解析と同じである。図 5-23、図 5-24 に、RADFLOW 計算結果である流量 (m^3/s) と水深 (m)、溶存態濃度 (Bq/m^3) の経時変化を示す。尚、観測点が感潮域内であるため、流量観測結果には周期的変動が見られるが、RADFLOW 計算結果にはそれが見られない。流量観測結果を移動平均すると、RADFLOW 計算結果と概ね一致すると思われる。

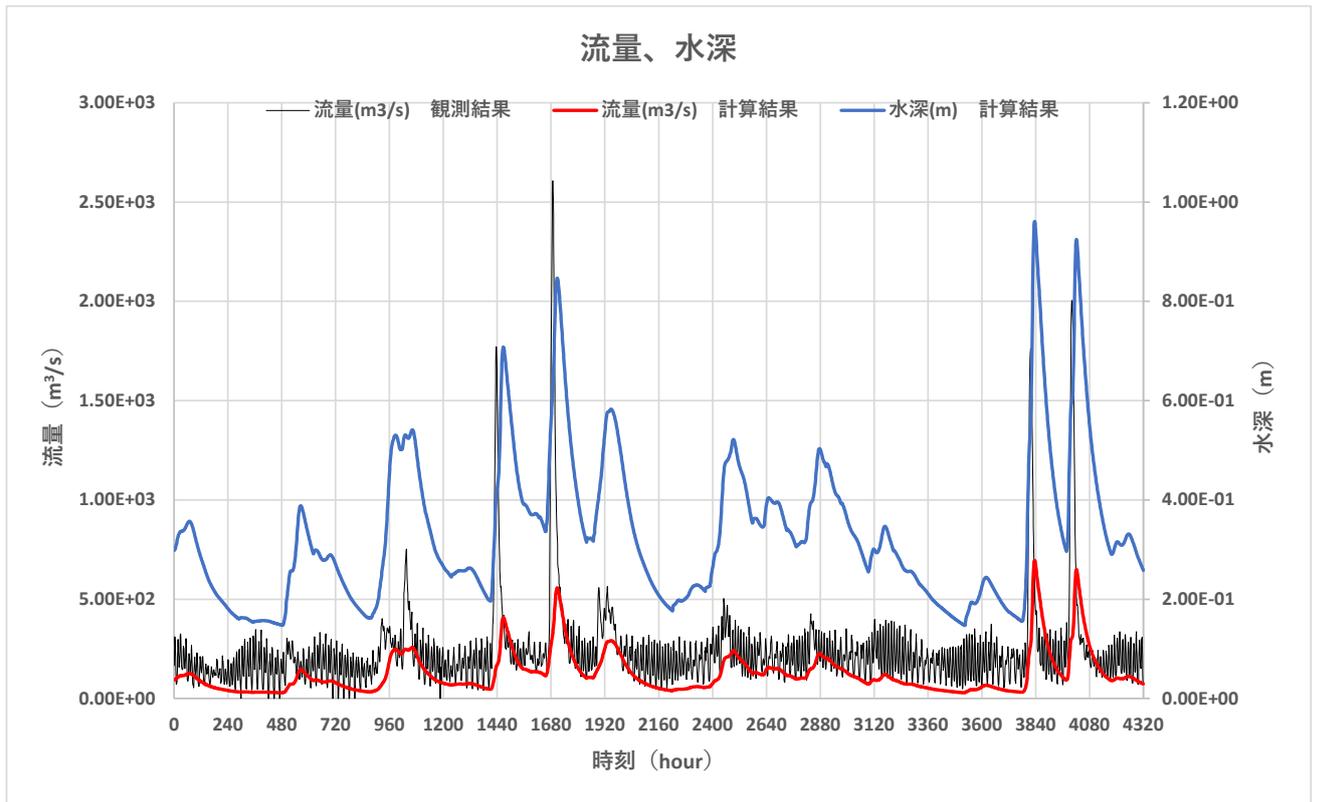


図 5-23 流量と水深 (RADFLOW 計算結果)

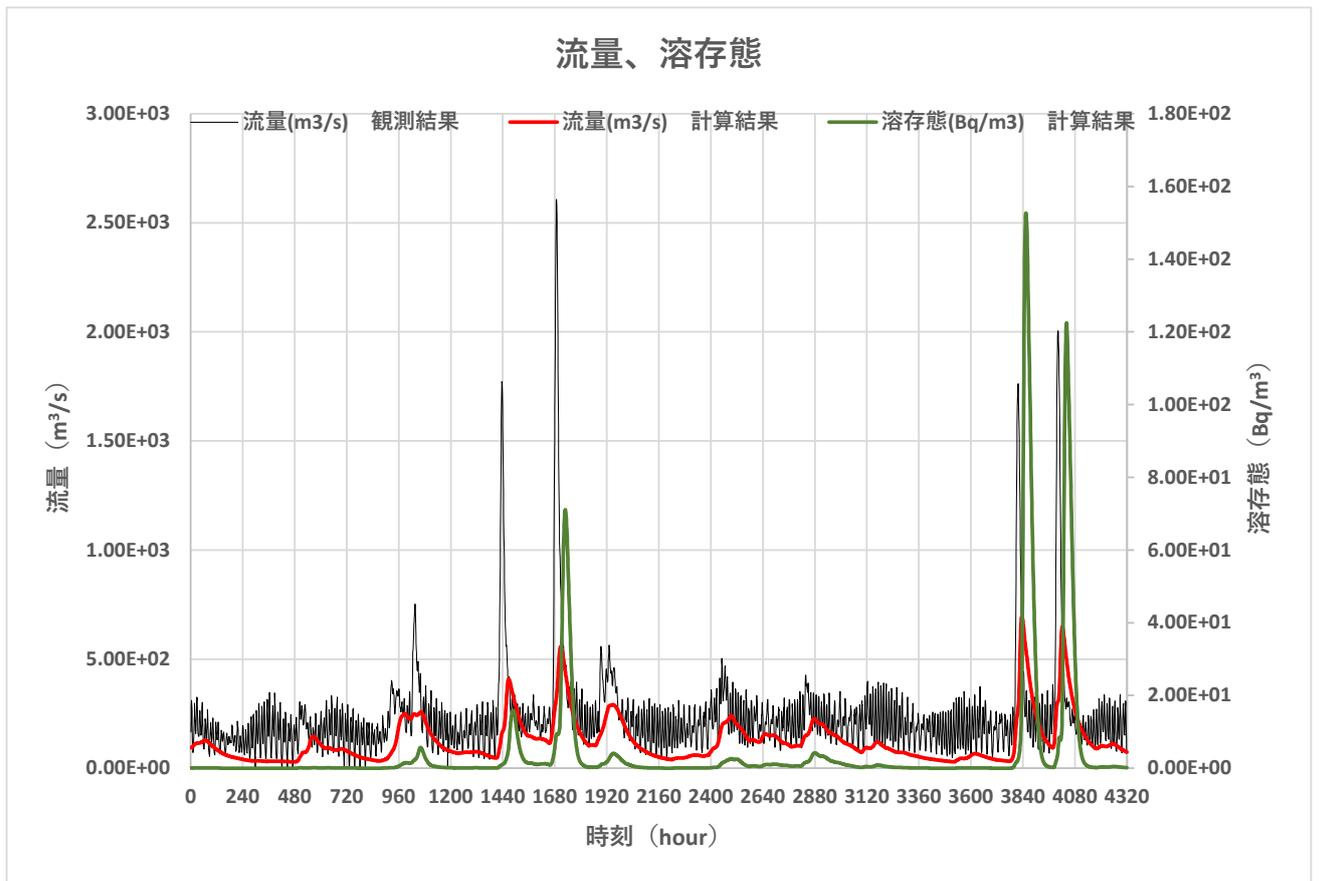


図 5-24 流量と溶存態 (RADFLOW 計算結果)

5.5.2 RADFLOW と 3D-Sea-SPEC の接続

RADFLOW と 3D-Sea-SPEC の接続方法について説明する。RADFLOW の河川ノード流速 u (m/s) は、水深 h (m)、水面勾配 ∇H を用いて以下のように計算される。

$$u = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} (\nabla H)^{\frac{1}{2}} \quad (5-9)$$

3D-Sea-SPEC で計算された水位を、(5-9)式の下流河川ノードに与えることで、(5-9)式の水面勾配が変化し、(5-9)式の上流河川ノードの流速が変動することで、3D-Sea-SPEC の計算結果が RADFLOW に反映される。逆に、RADFLOW から 3D-Sea-SPEC へは、(5-9)式で計算された流速から算出される流量を 3D-Sea-SPEC の河川条件として与えることで、3D-Sea-SPEC へと反映される。RADFLOW で計算された懸濁態濃度や放射性物質濃度も同様に河川から流出条件として 3D-Sea-SPEC に与えられる。図 5-25 に接続イメージを示す。

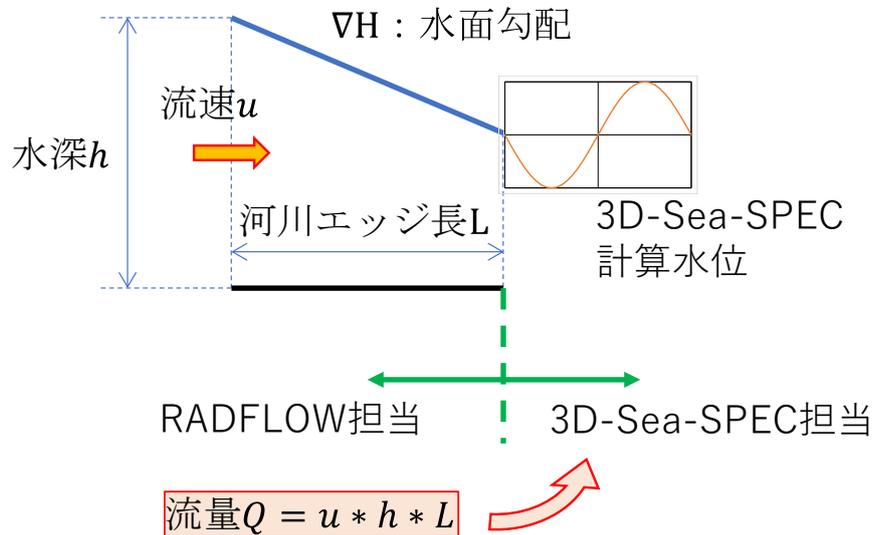


図 5-25 RADFLOW・3D-Sea-SPEC 接続イメージ

5.6 分布定数型モデルと河口域モデルの接続に係る試解析 (阿武隈川)

5.6.1 RADFLOW と 3D-Sea-SPEC の接続試計算

RADFLOW と 3D-Sea-SPEC を直接接続したモデルを用いて試計算を実施する。計算期間は図 5-23、図 5-24 の 1608~1848h までの 240h とした。これまでの検討では、河川流量を $30\text{m}^3/\text{s}$ (一定) として実施していたが、阿武隈川は大流量河川であることから、計算期間における RADFLOW 計算結果の流量を概ね同じオーダーとなるように、降雨量を 1/5 倍して与えることとした。また、阿武隈川の流況が周期的定常状態となるように、1608h の RADFLOW 計算結果を、72h の間、与え続ける助走計算を行ってから接続計算を開始した。計算は、以下の 2 ケースを実施した。3D-Sea-SPEC の計算条件は表 5-1 と同じとした。

ただし、RADFLOW では塩分濃度の分布とその時間発展の計算ができないため、塩分は 34(‰) の一様とした。

表 5-5 RADFLOW と 3D-Sea-SPEC の接続計算ケース一覧

No.	条件
R0	河道最上流に RADFLOW 計算結果を 河川境界条件として静的に設定
R1	RADFLOW ・ 3D-Sea-SPEC 接続計算

図 5-26 と図 5-27 に、RADFLOW と 3D-Sea-SPEC を接続した RADFLOW 河川エッジ上流ノードにおける、RADFLOW 単体及び RADFLOW+3D-Sea-SPEC 接続計算結果の流量・水深・溶存態時刻歴グラフを示す。RADFLOW と 3D-Sea-SPEC を接続している 1608~1848h の時刻で計算結果が変化している様子が見られており、3D-Sea-SPEC による水位変動計算結果が RADFLOW に反映されていることがわかる。溶存態に関しては、水位変動による流量変動が少ないため、溶存態もわずかな変動にとどまっていると考えられる。

また、1681~1692h までの各潮時について、各ケースの表層における流速 U 分布を図 5-28、溶存態分布を図 5-29 に示す。3D-Sea-SPEC のみで計算した R0 と、RADFLOW+3D-Sea-SPEC で計算した R1 で、見た目では違いがわからないほど結果が一致しており、RADFLOW と 3D-Sea-SPEC の接続は問題なく機能していると考えられる。

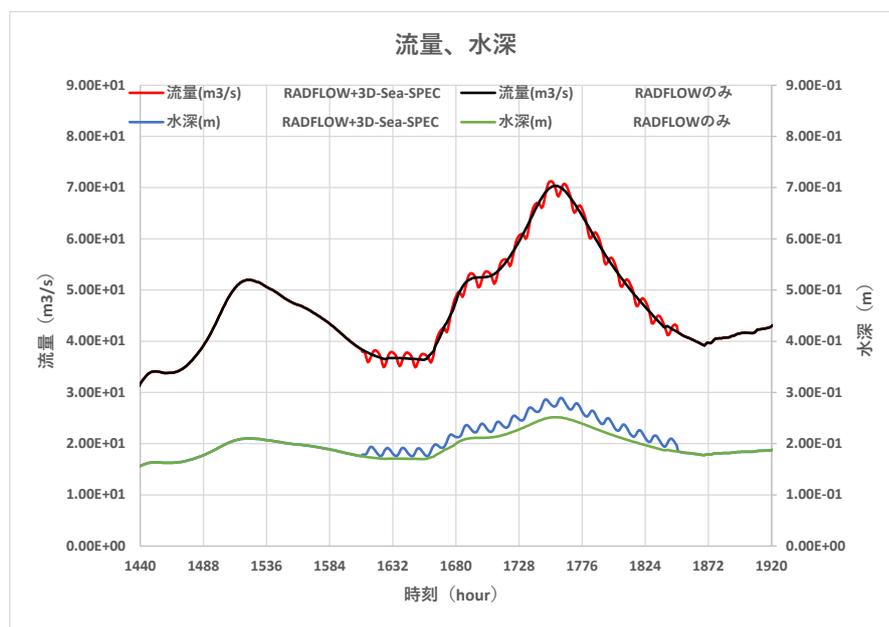


図 5-26 流量と水深 (RADFLOW 単体および 3D-Sea-SPEC 接続計算結果)

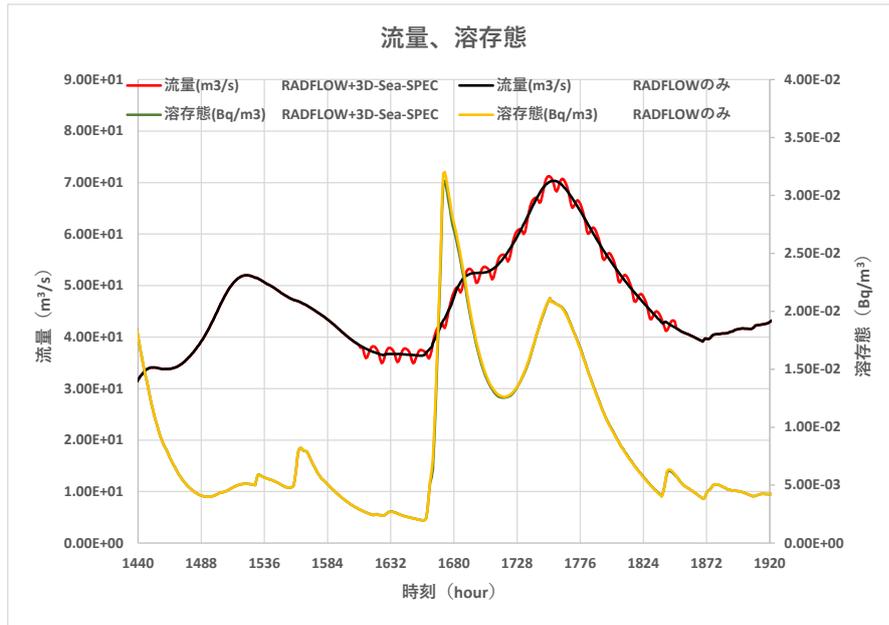
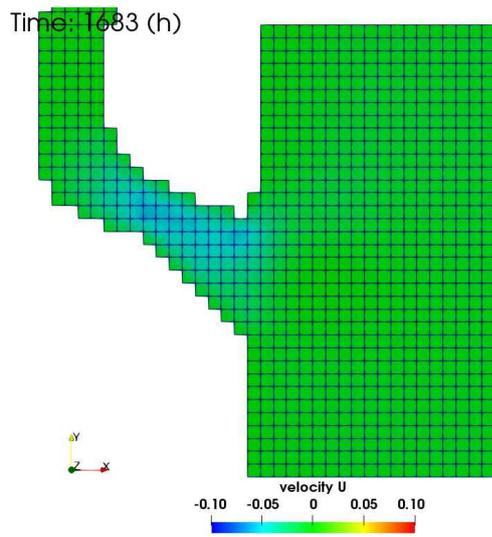
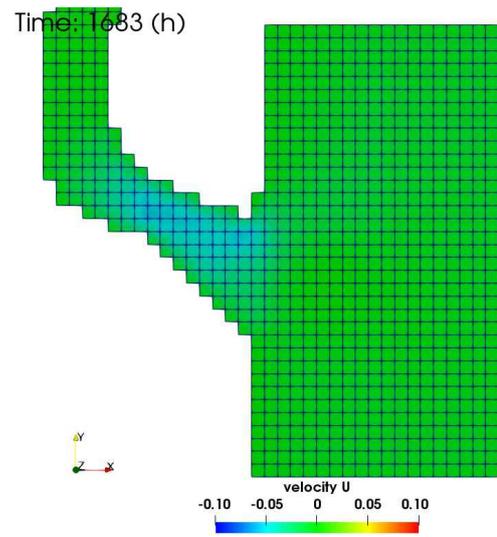


図 5-27 流量と溶存態 (RADFLOW 単体、および 3D-Sea-SPEC 接続計算結果)

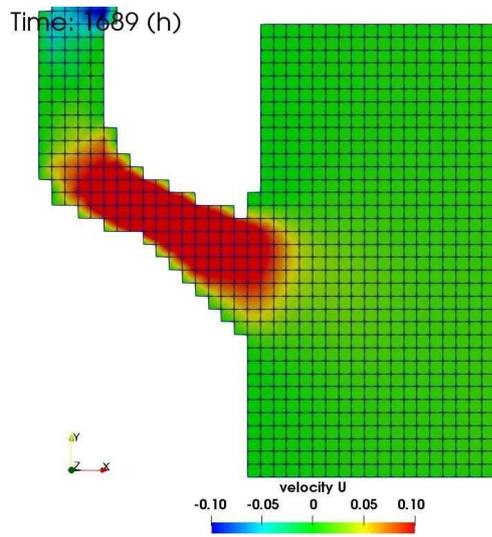
① 流速 U 分布



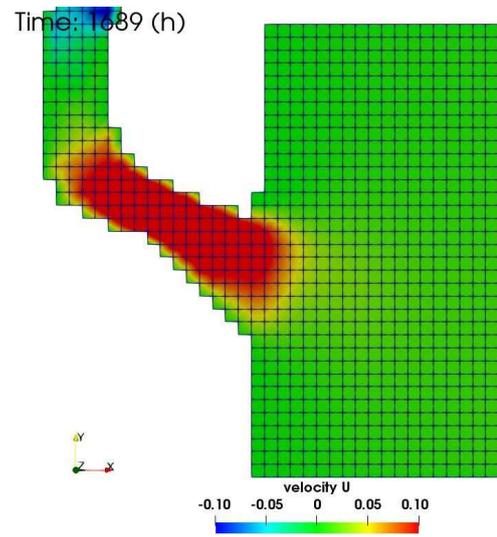
R0 上げ潮時



R1 上げ潮時



R0 下げ潮時



R1 下げ潮時

図 5-28 流速 U 分布

② 溶存態分布

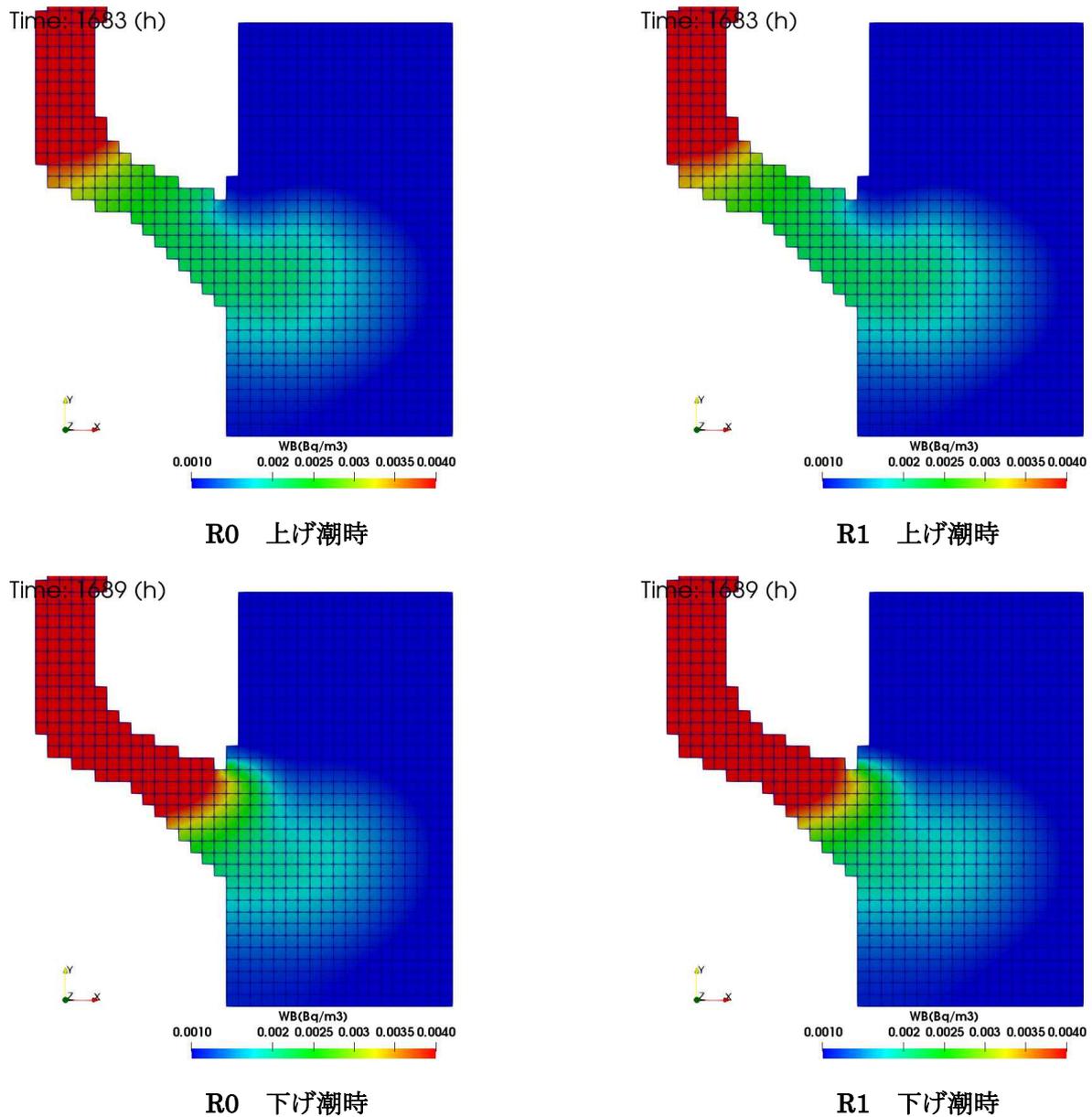


図 5-29 溶存態分布

5.7 まとめ

本5章では、陸域モデル（集中定数型流出及び分布定数型流出モデル）と沿岸域のモデルとの接続を行い、阿武隈川を対象に試解析を実施した。

集中定数型流出モデルの MERCURY と 3D-Sea-SPEC の接続に簡易モデルを設置して接続を図り、試計算を行った。試計算結果については、以下にまとめる。

- 3D-Sea-SPEC 単独による計算結果と簡易河道モデル+3D-Sea-SPEC による計算結果は概ね一致しており、MERCURY と 3D-Sea-SPEC の簡易河道モデルを用いた接続は概ね妥当と考えられる。

- 12 時間周期の M2 潮を仮定して検討を実施したが、実際の海域では複数潮の複合となる。この点も踏まえると、簡易河道モデルに設定するパラメータに関して、以下の点が今後の課題である。
 - 3D-Sea-SPEC の計算結果から簡易河道モデルで設定する流速 u_r をどのように付与するか？
 - 感潮河川域の上流端をゼロとし下流に向けて増加する距離 x_r をどのように設定するか？
 - 海側の物理量参照点位置をどのように決定するか？

以上、3つの課題が整理されたが、流速の付与については、3D-Sea-SPEC による単独計算から求めることが可能である他、感潮域の距離についても、モデル式の定義を用いれば推定可能であり、課題解決の糸口はあると言える。

次に、分布定数型流出モデルの RADFLOW と 3D-Sea-SPEC の接続を実施し、試計算を行った。試計算結果を以下にまとめる。

- 3D-Sea-SPEC 単独による計算結果と RADFLOW+3D-Sea-SPEC による計算結果の違いは、殆ど観察されなかった。RADFLOW と 3D-Sea-SPEC を接続は妥当と考えられる。
- 3D-Sea-SPEC の計算結果である水位時刻歴を直接 RADFLOW に与え、その水位によって RADFLOW で計算された流量を 3D-Sea-SPEC に直接与えていることから、実際の海域における複数潮の複合でも問題なく接続可能と考えられる。

一方、以下の課題があることが分かった。

- RADFLOW では水温や塩分を計算することができない。従って、感潮域において RADFLOW と 3D-Sea-SPEC を接続する場合、これらの取り扱いについて今後検討し改良する必要がある。

尚、水温・塩分等の河川内分布を解く陸域モデルについては、今後の調査が待たれる一方、原理的には、陸域モデル内で考慮することは可能と考えられる。

参考文献

[5-1] 中山恵介、Dutta DUSHMANTA、田中岳、岡田知也「河道モデルと沿岸流動モデルの統合とその必要性に関する検討」,水文・水資源学会誌、Vol.18, No.4, pp390-400(2005)

■ 6章 海域モデル（河口域と海域の接続）の整備

6.1 本章の概要

福島第一原子力発電所（1F）事故以後、放射性物質の環境動態を陸域・河口域・海域を通して統合したモデルを用い、陸域から海域までを評価する研究手段の開発が求められている。しかし、現状では統合モデルの開発は十分に実施されておらず、各域でのモデルが複数、独立に提案されているのみである。そこで、本事業では、特に河口域と海域を 1 つの統合コードで実現すべく、河口域には非静水圧条件での計算が可能な原子力開発機構開発のコード 3D-Sea-SPEC を用い、海域には、世界的に利用されている既存のオープンソース ROMS を採用し、両者の接続を試みる。以上、本事業では、河口域を 3D-Sea-SPEC、河口域を囲む海域は ROMS[6-1]とする統合コード（システム）を開発することを目的とする。

本事業で海域コードとして用いるコード ROMS（Regional Ocean Modeling System）はカリフォルニア大学ロサンゼルス校とラトガース大学が中心となって開発している静水圧近似シグマ座標系 3 次元海洋シミュレーションコードである。本コードは沿岸域のシミュレーションにおいて、解像度を小さくした領域を入れ子状に配置し、一つの領域内のシミュレーションで得られた結果を他の領域の境界条件として付与することができる[6-1]。従って、上記ネスティングを行う際の境界にて、交換するデータを調査することにより、3D-Sea-SPEC とのインターフェース構築が可能になると考えられる。尚、ROMS は並列計算可能であることから、その並列化手法[6-2]についても調査し、ベンチマーク試験を実施することで、その接続結果の妥当性（並列化についても）を評価する。

以下、本章の構成について記す。次節 6.2 において、各コード（3D-Sea-SPEC と ROMS）の概要について記した後、各々のコードの接続条件を示し、接続方法について記す。次に 6.3 にて、実際に接続した際の接続試解析（福島沿岸・沖合）結果について報告する。

6.2 河口域解析モデルと海域モデルの接続に係る整備

本節では、上記の河口域モデル 3D-Sea-SPEC と海域モデル ROMS の接続に際し重要となる部分の概要と相互の接続方法について記す。

3D-Sea-SPEC:

先ず、3D-Sea-SPEC に対し、接続に係るコードの概要を説明する。3D-Sea-SPEC は 2-way のネスティングでダウンスケーリングすることが可能で、各領域に対し、静水圧近似モデルおよび非静水圧モデルのどちらかを選択し計算することができるコードである。非静水圧モデルを利用できることから、鉛直方向のダイナミクスをより正確に計算する必要がある沿岸域の解析に適したコードと位置付けられる。ネスティングを行う際は、小さい領域に接する大きい領域のメッシュサイズは、小さい領域のメッシュサイズの整数倍となる。これらの領域間でやり取りする物理データは以下の通りである。

- ・ 流速
- ・ 塩分濃度

- ・ 水温
- ・ 浮遊砂濃度
- ・ 放射性物質濃度（浮遊砂に付着および溶存態で存在しているもの）

これらのデータを受け渡す際、相手先のコードが用いる格子点の位置と整合しない場合が考えられるが、付近の格子点のデータを補間して得られた値を利用することで対応が可能である。次に、並列化については、3D-Sea-SPEC は、ネスティングにより入れ子状になっている複数の領域に対し、

- ・ 1つの領域に対し並列計算を行い、この並列計算を領域の数だけ逐次的に行う。
- ・ 全ての領域を適切に分割して、すべてをまとめて並列計算する。

の2つの並列計算方法が実装されている。そこで、ROMS の並列化の知見を利用し、上記2つの並列化方法で3D-Sea-SPEC と接続したROMS コードをMPIにより並列化することを試験する。

ROMS:

領域海洋モデリングシステム：ROMS（Regional Ocean Modeling System）について記す。ROMSはカリフォルニア大学ロサンゼルス校とラトガース大学が中心となって開発している静水圧近似シグマ座標系3次元海洋シミュレーションコードである[6-1]。当該コードではシミュレーションでの解像度を小さくした領域を入れ子状に配置し、各々の領域のシミュレーションで得られた結果を他の領域の境界条件として用いる。本事業では、3D-Sea-SPEC との接続を行うため、ROMSによるネスティングを行う際の境界で交換するデータを調査する。また、ROMSは並列計算が可能[6-2]であることから、その並列化手法についても調査し、接続コードの並列計算手法についても調査する。以下では、接続対象であるROMSの調査結果を記す。

① ネスティング時の境界で交換するデータに関する調査

①-1 使用するROMSのバージョン

今般、使用するROMSのバージョンは、原子力規制委員会（NRA）から提供のあったROMSソースと同様、リビジョン858とする。同梱のバージョンファイルの内容を以下に記載する。

[ROMS/Version]

```
svn: $HeadURL: https://www.myroms.org/svn/src/trunk/ROMS/Version $
svn: $LastChangedBy: arango $
svn: $LastChangedRevision: 858 $
svn: $LastChangedDate: 2017-08-01 08:02:30 +0900 (2017年08月01日 (火)) $
```

①-2 使用する ROMS の計算データについて

今回の調査にあたり、NRA から提供があったデータ（以下、『NRA データ』とする）を使用する。NRA データの一覧を表 6-1 に示す。以降、ネスティングを行っている各々の領域について、図 6-1 のように【外領域】【内領域】と表記する。

表 6-1 NRA データ一覧

ファイル名	内容
roms_test.nc	グリッドデータ【外領域】
roms_test_fine.nc	グリッドデータ【内領域】
roms_test_contact.nc	ネスティンググリッド接続データ
roms_test_ic_HYCOM_GLBu0.08.nc	初期条件データ【外領域】
roms_test_fine_ic_HYCOM_GLBu0.08.nc	初期条件データ【内領域】
roms_test_bdry_HYCOM_GLBu0.08.nc	境界条件データ【外領域】
roms_test_fine_bdry_HYCOM_GLBu0.08.nc	境界条件データ【内領域】
roms_test_clim_HYCOM_GLBu0.08.nc	気象データ（ナudging用）【外領域】
roms_test_fine_clim_HYCOM_GLBu0.08.nc	気象データ（ナudging用）【内領域】
roms_test_nud.nc	ナudging係数データ
roms_test_Fallout.nc	大気中放射性物質の海面降下量【外領域】
roms_test_fine_Fallout.nc	大気中放射性物質の海面降下量【内領域】
roms_test_JRA55.nc	気象庁長期再解析気象データ【外領域】
roms_test_fine_JRA55.nc	気象庁長期再解析気象データ【内領域】
roms_test_river.nc	放射性物質流出条件データ【外領域】
roms_test_fine_river.nc	放射性物質流出条件データ【内領域】

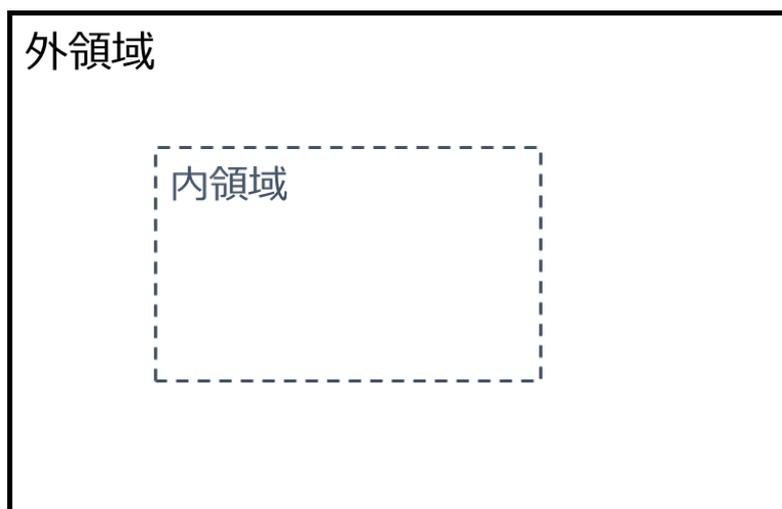


図 6-1 ネスティング構造（NRA 提供 ROMS）

①-3 NRA データの計算結果について

NRA データにおける主な計算条件を表 6-2 に示す。各方向の正の向きは各々、X 方向：方角東向き、Y 方向：方角北向き、Z 方向：鉛直方向上向きである。NRA データでは、フォールアウトおよびナッジング処理が考慮されているが、3D-Sea-SPEC ではこれらの機能が使用できないため、両者の機能をオフにした。また、NRA データの放射性物質の流出条件データは時刻ごとに区切られて管理されている（“dye01~dye21”）が、本計算では全時刻の流出条件データをまとめて“dye01”とした。本データによる ROMS の計算結果として、図 6-2 には水温分布の計算結果、図 6-3 には放射性物質分布の計算結果を示す（白枠は内領域を表す）。図 6-3 より、放出された放射性物質が海流によって拡散される様子が確認できる。尚、本計算は 1 並列および 4 並列で実施した。それぞれの計算時間を表 6-3 に示す。

表 6-2 ROMS 計算条件

項目	値
計算期間	11/03/07~11/04/01 (25 日間)
計算範囲【外領域】	経度：136.8°~149.6° 緯度：29.8°~42.2°
計算範囲【内領域】	経度：140.4°~142.8° 緯度：35.9°~38.6°
メッシュ点数【外領域】	X 方向：67 Y 方向：88 Z 方向：30
メッシュ点数【内領域】	X 方向：39 Y 方向：57 Z 方向：30
計算ステップ数【外領域】	72,000
計算ステップ数【内領域】	216,000
時間刻み【外領域】	30 秒
時間刻み【内領域】	10 秒
放射性物質の放出期間	11/03/07~11/04/01 (25 日間)
フォールアウト処理	無
ナッジング処理	無

表 6-3 ROMS 計算時間

並列プロセス数	計算時間 (秒)
1	21,308
4	10,220

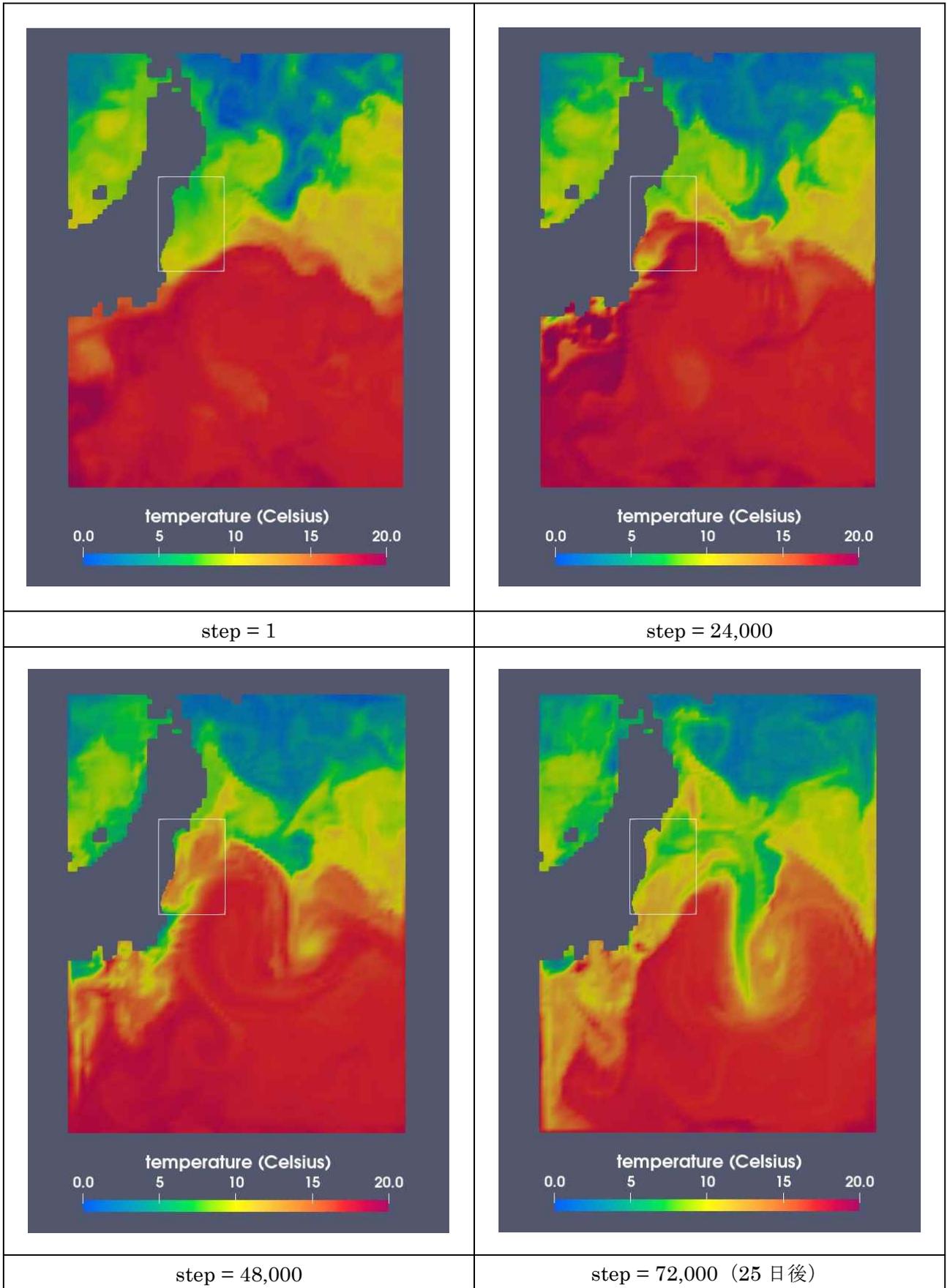


図 6-2 ROMS 計算結果 (temperature(Celsius) : 水温 (°C))

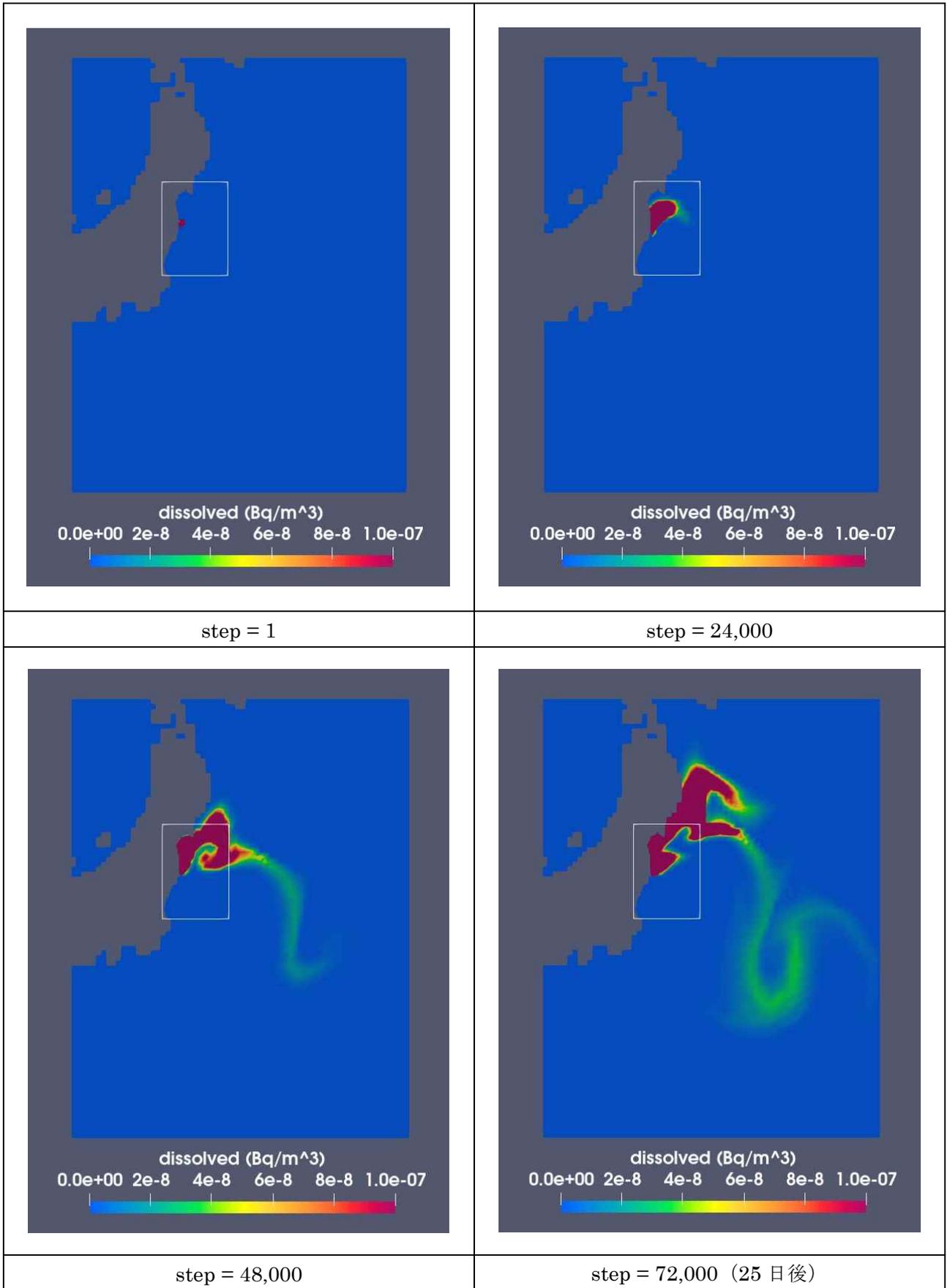


図 6-3 ROMS 計算結果 (dissolved (Bq/m³) : 溶存態放射性物質濃度 (Bq/m³))

①-4 ネスティングするデータについて

次に、ネスティングを行う際、境界でやり取りするデータを表 6-4 に示す。「鉛直方向平均流速」は式 (1) で定義される。ここで、 D は全水深、 H_z は σ 座標系における鉛直方向メッシュ厚さ、 u は流速を表す。

$$\bar{u} = \frac{1}{D} \int_{-1}^0 H_z u d\sigma \quad (1)$$

表 6-4 ネスティング境界でやり取りを行うデータ

ネスティング方向	データ
外領域 → 内領域	流速、水温、塩分濃度、放射性物質濃度、水位
内領域 → 外領域	流速、水温、塩分濃度、放射性物質濃度、水位、鉛直方向平均流速

② ROMS 並列化手法の調査

次に、ROMS 内の並列化手法について調査結果を記載する。ROMS では、1 つの領域を、並列計算するため分割し並列計算する他、異なる領域に対しては、その並列計算を逐次的に行う（図 6-4 参照：外領域と内領域で各々、並列計算が行われる）[6-2]。ユーザーは「並列プロセス数」および「X 方向の分割数(=Itile)」と「Y 方向の分割数(=Jtile)」を指定することで、並列計算が実行できる。

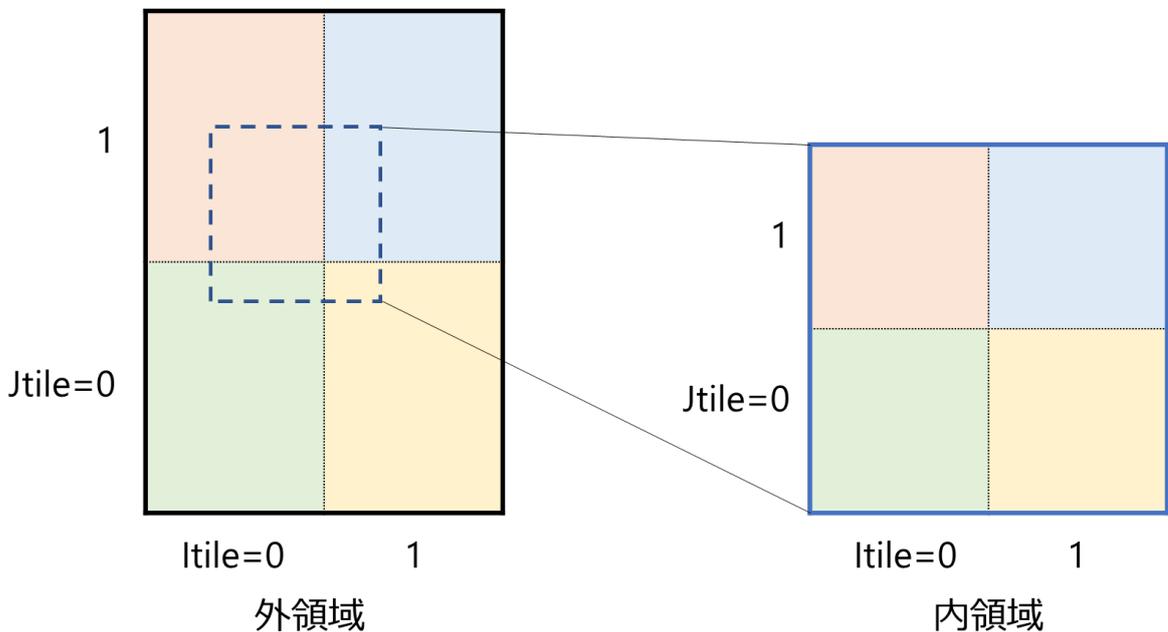


図 6-4 並列化におけるグリッドのタイル分割の例（プロセス数=4, Itile=2, Jtile=2）

6.2.1 ROMS と 3D-Sea-SPEC の接続

上記のように、調査した両コードのネスティングでの領域間交換データ情報を利用し、ROMS と 3D-Sea-SPEC を接続する。以下、接続方法について具体的に記す。

① ROMS と 3D-Sea-SPEC の接続方法

①-1 ファイル入出力による接続

以下の手順で、ROMS（外領域）と 3D-Sea-SPEC（内領域）の接続を行う（図 6-4 参照）。

- ① ROMS は外領域の計算を担当し内領域へとネスティングする
- ② ROMS は内領域への境界データをファイル出力する
- ③ ROMS から出力された上記出力ファイルを 3D-Sea-SPEC が読み込む
- ④ 3D-Sea-SPEC が読み込んだデータを内領域への境界データとする
- ⑤ 3D-Sea-SPEC が内領域の計算を行う
- ⑥ 3D-Sea-SPEC が計算した境界データをファイル出力する
- ⑦ 3D-Sea-SPEC から出力されたファイルを ROMS が読み込む
- ⑧ ROMS が読み込んだデータを内領域の境界データとして適用する

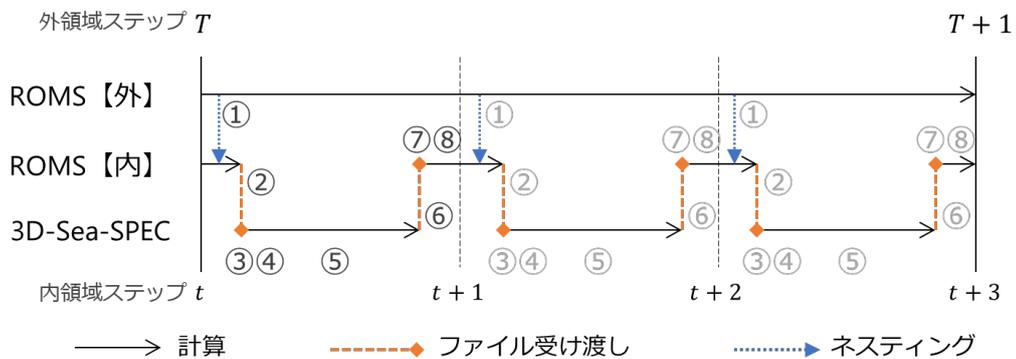


図 6-5 ROMS と 3D-Sea-SPEC の接続処理の概略図

①-2 鉛直方向メッシュの補間

ROMS は、鉛直方向の定義点を不等間隔に設定することが可能であり、NRA データでは鉛直方向の定義が不等間隔となっている [6-3]。しかし、3D-Sea-SPEC では鉛直方向の定義点は、等間隔で設定する（図 6-6 にイメージを示す）。この設定の不一致から、3D-Sea-SPEC 内にて、鉛直座標を基に各物理量を線形補間する処理を新たに追加し、ROMS からデータを読み込んだ直後（第①-1 節 ③~④ 間）および ROMS にデータを送る直前（第①-1 節 ⑤~⑥ 間）に補間処理を入れる必要がある。

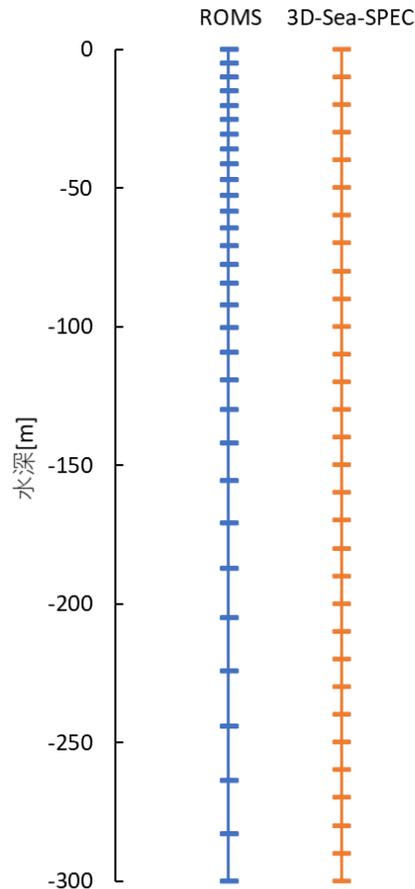


図 6-6 ROMS と 3D-Sea-SPEC における鉛直方向定義点の例

6.2.2 接続コードの並列化

3D-Sea-SPEC には、ネスティングにより入れ子状になっている複数の領域に対し、

- A) 1つの領域内にて並列計算し、この並列計算を異なる領域の数だけ逐次的に行う。
- B) 全ての領域を適切に分割して、すべてをまとめて並列計算する。

の2つの並列計算方法が実装されている。そこで、上記で得られたROMSの並列化の知見を利用し、上記2つの並列化方法で3D-Sea-SPECと接続したROMSコードをMPIにより並列化する。

① ROMS 並列化に関する検討

ROMS は既に並列化されている状態であり（以下②参照）、これを基に接続コードの並列化手法を検討する。ROMS の並列化手法は 3D-Sea-SPEC の上記手法 A) と同じであるため、本計算における並列化も手法 A) の方針で統一し対応する。本事業の検討では外領域 (ROMS) ・内領域 (3D-Sea-SPEC) に対し、各々、1 領域分のみの計算としているが、複数領域で計算する場合は、手法 B) の方がリソースを効率的に利用でき、計算時間的にも有利になると想定される。しかし、ROMS は全体的に手法 A) で設計・

コーディングされており、手法B)に移行することが困難のため、本検討では手法B)の検討は行わない。この課題により、接続システムの並列化効率を十分に向上させることは難しいことが分かる。

6.3 河口域解析モデルと海域モデルの接続に係る試解析（福島沿岸・沖合）

福島沿岸・沖合を対象とし、2段ネスティングの領域を作成し、全ての領域に対しROMSで計算した場合と、3D-Sea-SPECで計算した場合を比較し、両者の計算結果の妥当性を比較評価した。次に、内側の領域を3D-Sea-SPEC、外側をROMSで計算した結果と比較し、接続の妥当性を評価する。尚、その際、3D-Sea-SPECは静水圧近似モデル、非静水圧モデルの2通りで計算し、その違いを比較評価する（本報告では非静水圧モデルケースのみ報告）。以上、上記の比較テストに当たり、ダウンスケール計算の境界条件として適切な時期のJCOPE2のデータを利用する。また、並列化の効果についても基準になる並列数から4倍の並列数で計算し、並列性能を上記のケース毎に確認した。

6.3.1 性能評価対象

全ての領域に対して、ROMSで計算した結果と、3D-Sea-SPEC（以下、本節では『3DSS』と称する）で計算した結果と、内側の領域を3DSS、外側をROMSで計算した結果（以下、『ROMS+3DSS』とする）を比較する。3DSS計算で使用するデータは、NRAデータからコンバートしたものをを用いた。性能評価を行う対象の計算条件を表6-5に記す（第①-3節と同様の条件）。

表 6-5 性能評価対象の計算条件

項目	値
計算期間	11/03/07～11/04/01（25日間）
計算範囲【外領域】	経度：136.8°～149.6° 緯度：29.8°～42.2°
計算範囲【内領域】	経度：140.4°～142.8° 緯度：35.9°～38.6°
メッシュ点数【外領域】	X方向：67 Y方向：88 Z方向：30
メッシュ点数【内領域】	X方向：39 Y方向：57 Z方向：30
計算ステップ数【外領域】	72,000
計算ステップ数【内領域】	216,000
時間刻み【外領域】	30秒
時間刻み【内領域】	10秒
放射性物質の放出期間	11/03/07～11/04/01（25日間）
フォールアウト処理	無
ナッジング処理	有（ROMSのみ）、無（ROMS, 3DSS）
並列化プロセス数	1, 4

6.3.2 比較対象ケース

それぞれのケースで計算にかかった時間を表 6-6 に示す。計算時間は両者とも概ね同じであった。ROMS と 3DSS それぞれの計算結果について、水温比較を図 6-7 に、塩分濃度比較を図 6-8 に、放射性物質濃度比較を図 6-9 に示す。ナッジング無しの ROMS は、東京湾近傍で低塩分+高温の放出があるように見えるが原因は不明である。尚、使用している ROMS データには、福島第一原発付近の放出条件（表 6-1：roms_test_river.nc, roms_test_fine_river.nc）以外の放出条件設定がないことを確認済みである。ナッジング有りの ROMS ではナッジングによる補正が入るため、東京湾近傍で低塩分+高温の放出があるような分布はほとんど見られない。水温および塩分濃度の分布が時間変化すると、ROMS と 3DSS との差異は大きくなると考えられる。尚、3DSS にはナッジング機能が無いため、3DSS にナッジング機能を導入した上で、ROMS と比較したほうが良いと考える。ただ、36,000step 程度までは、低塩分+高温の放出の影響が少ない宮城県沖から北側の海域においては、ナッジング無しの ROMS と 3DSS は、概ね一致した結果が得られていることを記す。

次に、ROMS+3DSS の接続ケースについて、外領域で 36,000 ステップまで計算した結果を記載する。水温の時間変化を図 6-10 に、塩分濃度の時間変化を図 6-11 に、放射性物質濃度の時間変化を図 6-12 に示す。結果を見る限り、境界にて不自然な挙動は見られず概ね接続処理ができてしていると判断できる。

表 6-6 各ケースの計算時間比較（秒）

計算手法 \ 並列プロセス数	1	4
ROMS(※)	21,308	10,220
3DSS	21,242	11,436
ROMS(※) + 3DSS	—	734,400 ※2

※1 ナッジング無し

※2 外領域 36,000 ステップまでの時間

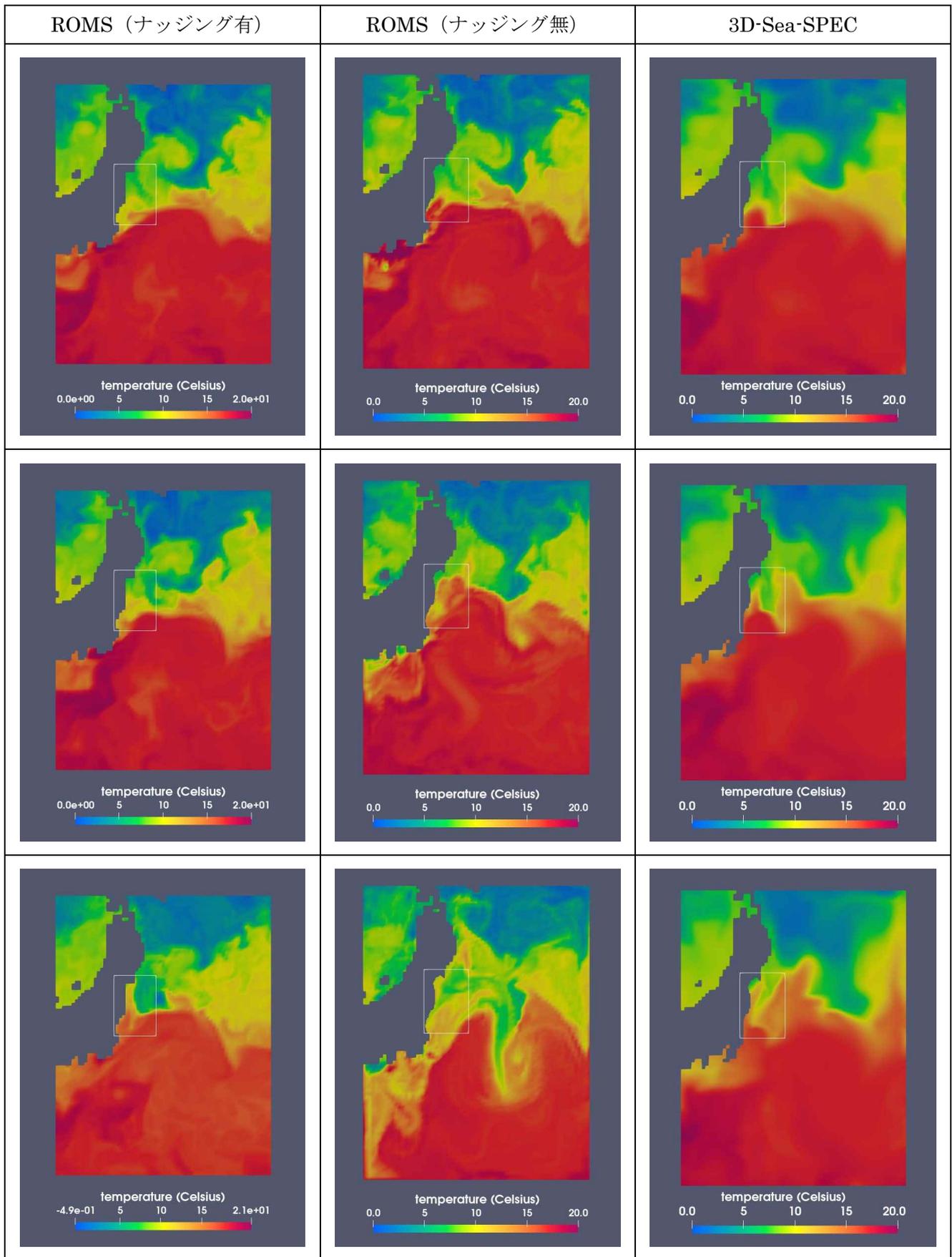


図 6-7 temperature(Celsius) : 水温 (°C) 比較
(上段 : 12,000step, 中段 : 36,000step, 下段 : 72,000step)

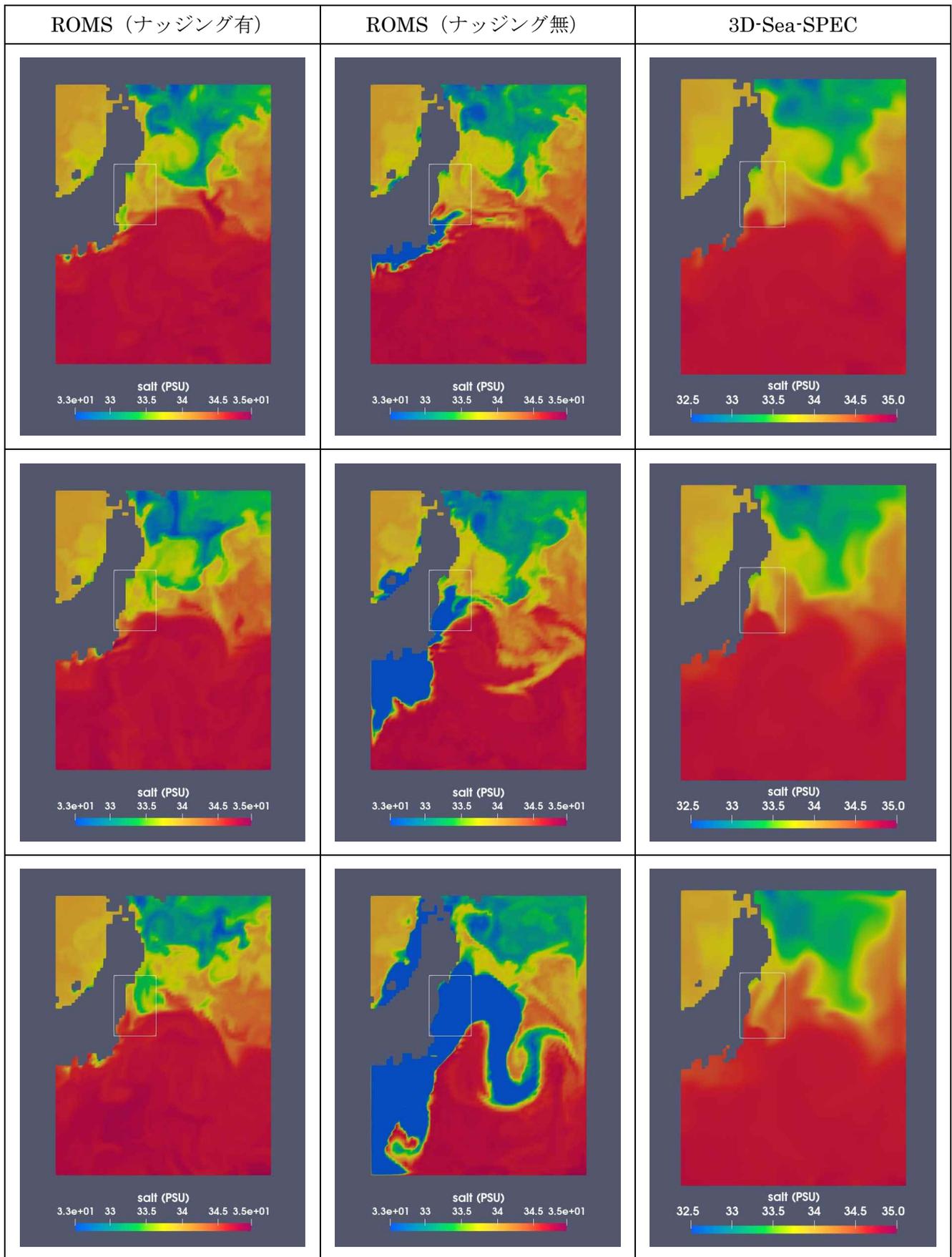


図 6-8 salt(PSU) : 塩分濃度 (%) 比較
(上段 : 12,000step, 中段 : 36,000step, 下段 : 72,000step)

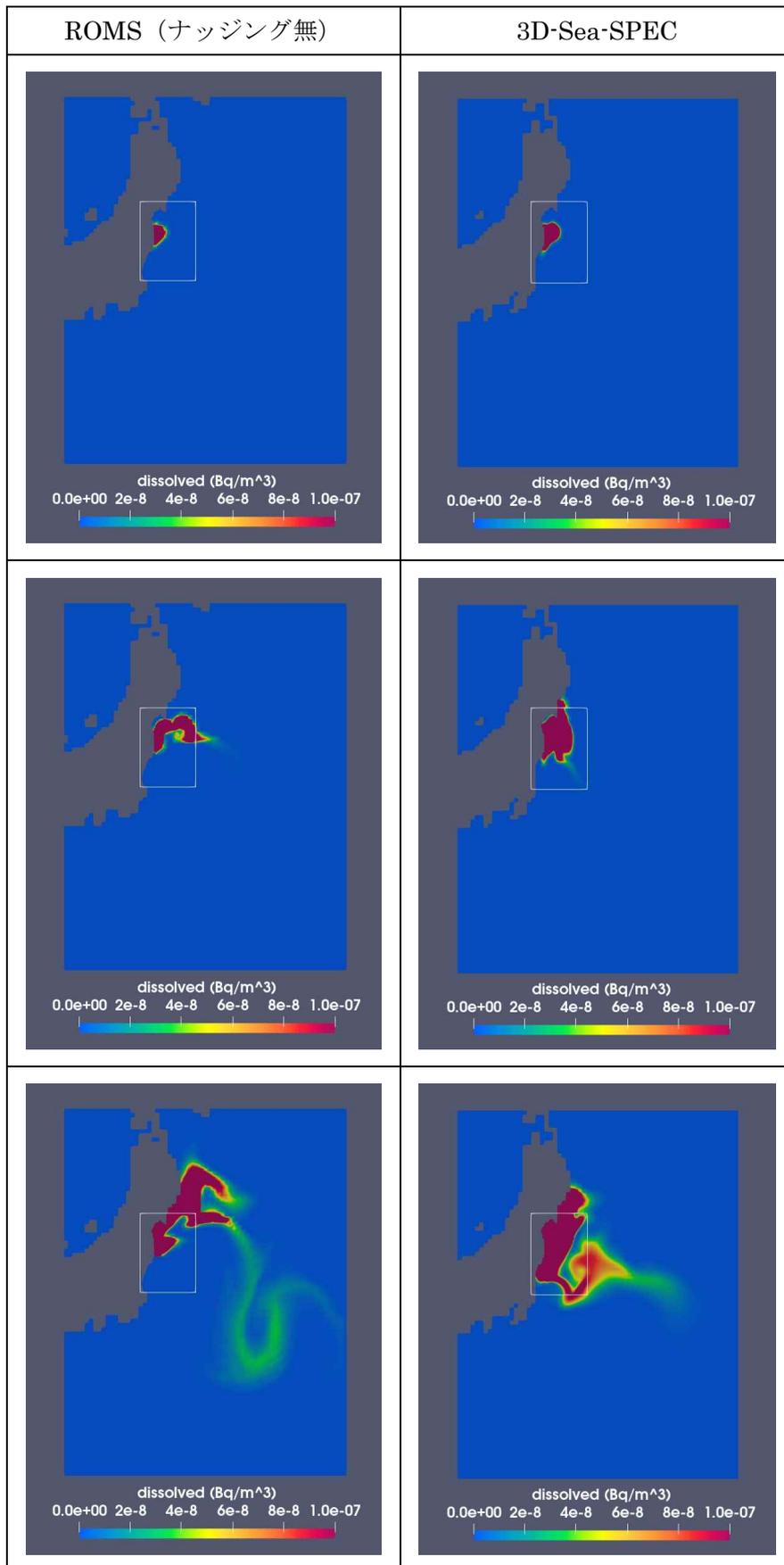


図 6-9 dissolved (Bq/m³) : 溶存態放射性物質濃度 (Bq/m³) 比較
(上段 : 12,000step, 中段 : 36,000step, 下段 : 72,000step)

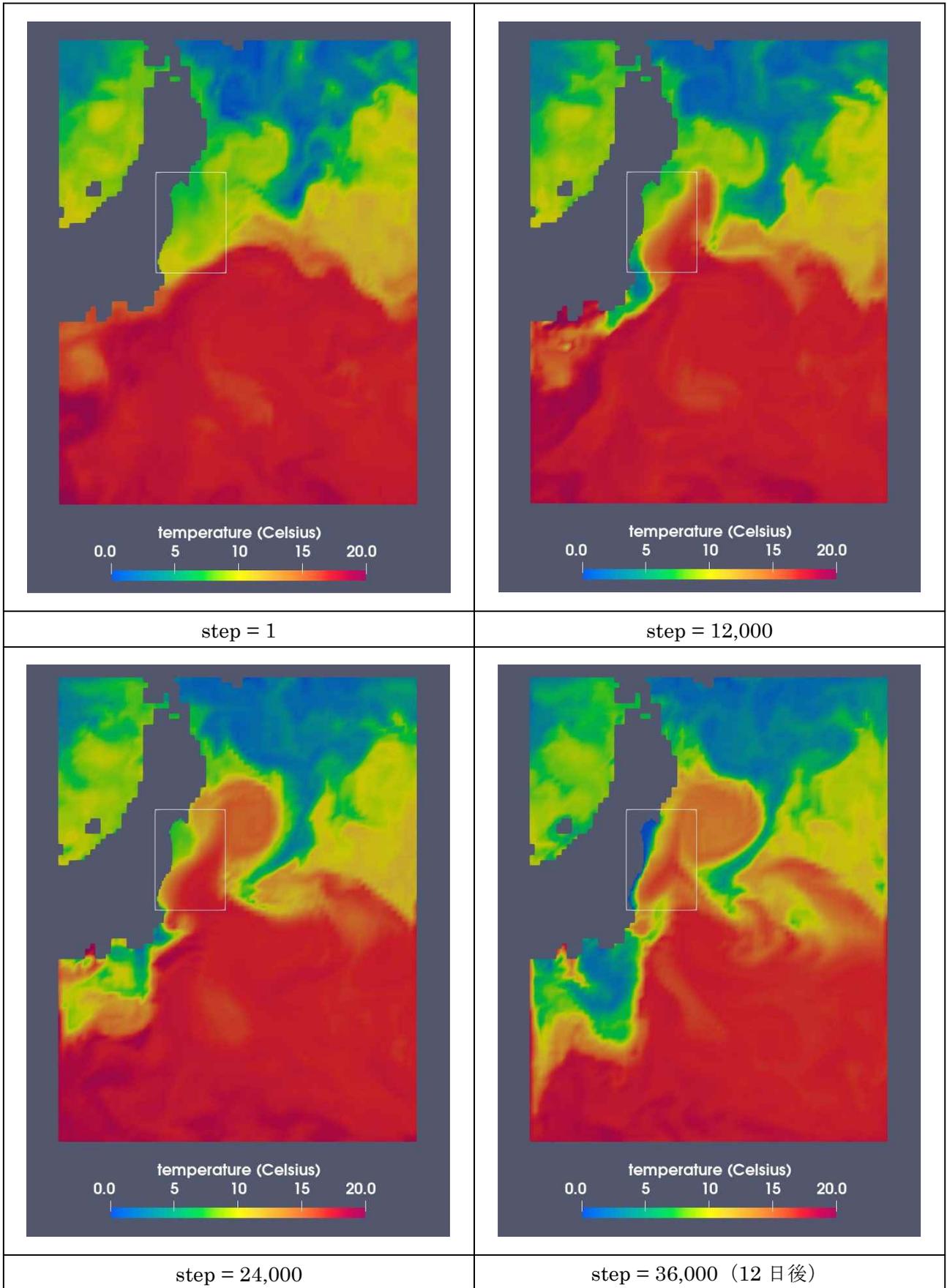


図 6-10 ROMS+3D-Sea-SPEC 計算結果 (temperature(Celsius) : 水温 (°C))

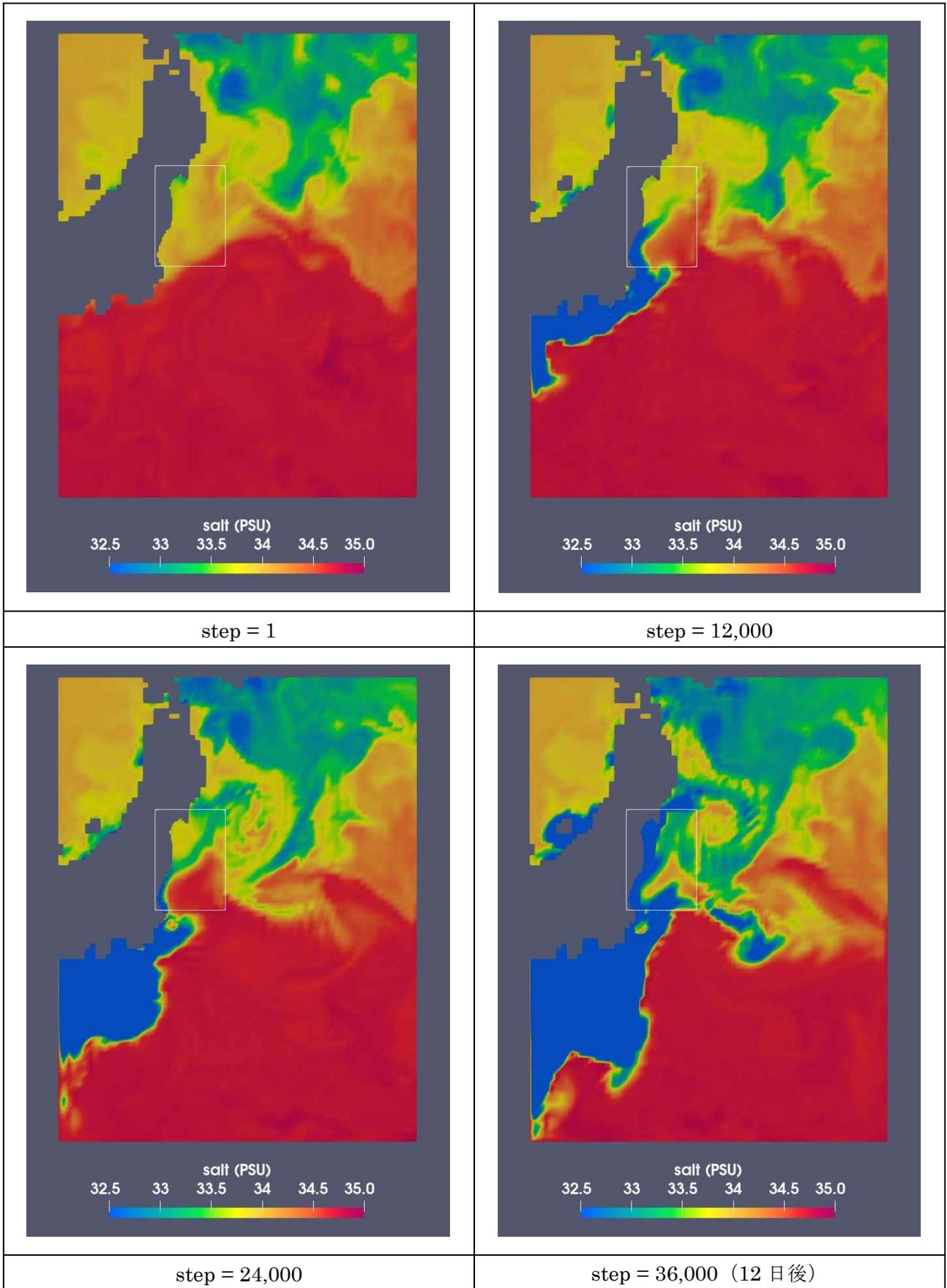


図 6-11 ROMS+3D-Sea-SPEC 計算結果 (salt(PSU) : 塩分濃度 (‰))

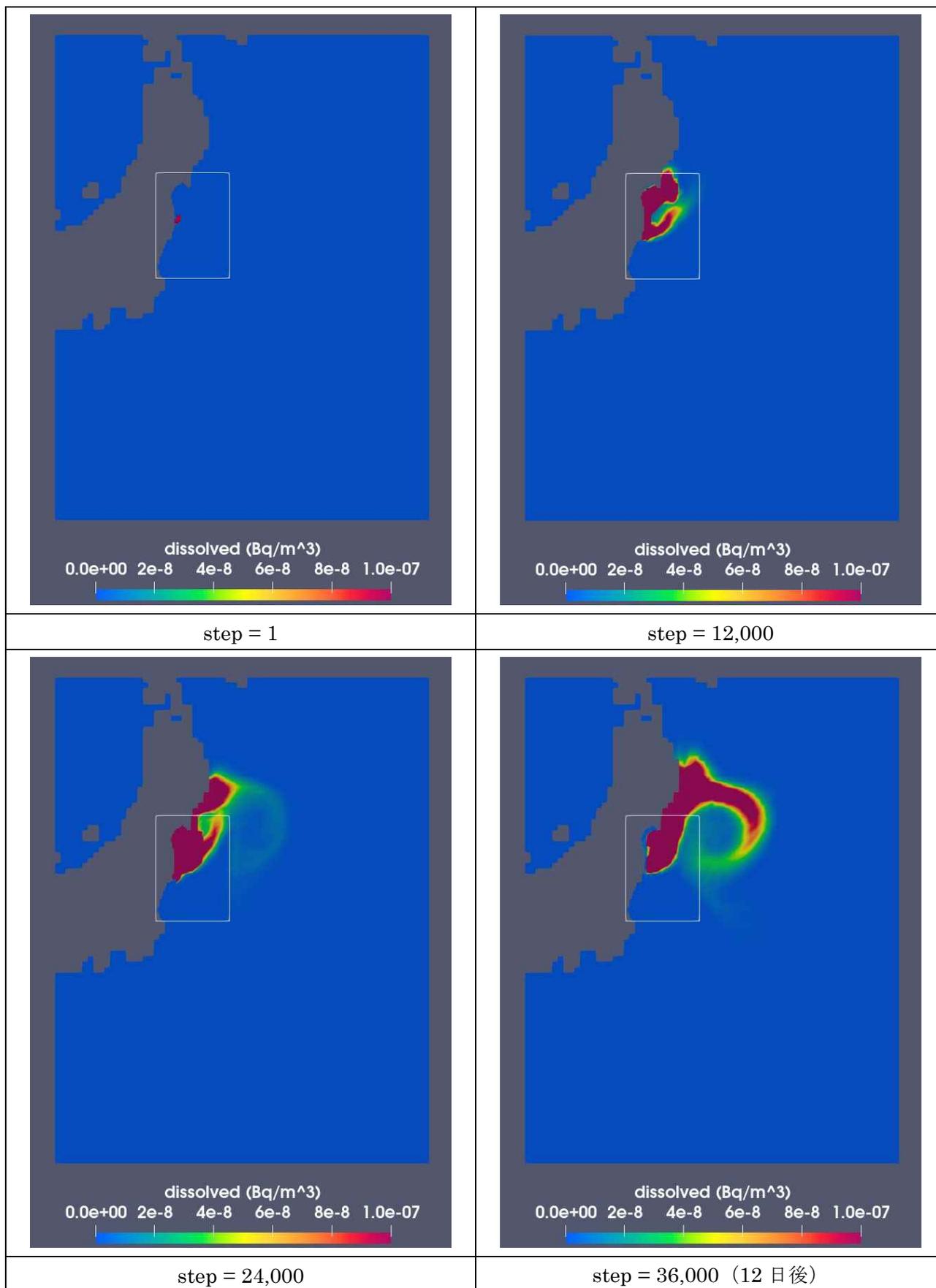


図 6-12 ROMS+3D-Sea-SPEC 計算結果 (dissolved (Bq/m³)) : 溶存態放射性物質濃度 (Bq/m³)

6.4 まとめ

本6章では、3D-Sea-SPEC（沿岸域）とROMS(海域)の接続に係る作業（接続方法を含む）と接続の試解析結果について記した。接続では、両コード共に有するネスティング機能を利用することで、ネスト内側と外側で交換するデータを、ファイルを介して入出力することで両コードの接続を可能にした。尚、ROMSはナッジング機能を有する一方、3D-Sea-SPECはその機能を持たない。従って、ROMSにてナッジング機能を用いる場合、3D-Sea-SPECも同様の機能を使用することが望ましいことが分かる。尚、今般のNRAデータ（2段ネスト構造）を用いて、3D-Sea-SPECとROMS両者の計算結果を比較すると、ROMS(ナッジング off)と3D-Sea-SPECの結果は凡そ一致することが分かった。また、3D-Sea-SPECとROMS(ナッジング off)との接続計算では、境界で物理量が凡そ連続的に変化し、接続による不整合は見られず接続は凡そ妥当と判断できる。更に、ROMSと3D-Sea-SPECの並列化方法を調査した所、共通の並列化手法を採用していることが分かった。従って、その共通の並列化方法を適切に利用することで、並列化効果を得ることが可能であることが分かったが、最適な並列計算を行うためには、ROMSの並列化方法を3D-Sea-SPECの一つの並列化方法へと変更する必要があることが分かった。

以上、本事業では、NRA提供データ（2段ネスト構造）のみを用いて、福島沿岸・沖合での試解析を行ったが、陸域からの河川流出による海域での効果を調べるには、沿岸域のネスト構造を更に細かく、河口域を十分に高い精度で解析可能とする多段ネスト構造を取り、最内側及び内側の数段を3D-Sea-SPECにて解析する必要があると考える。尚、現時点にて、この種の接続は基本的に実装済みであり、原理的には、本事業にて整備したものを直接利用することでシミュレーションが可能になると考えられる。

参考文献

- [6-1] ROMS マニュアル
https://github.com/kshedstrom/roms_manual/blob/master/roms_manual.pdf
- [6-2] 並列化 - WikiROMS <https://www.myroms.org/wiki/Parallelization>
- [6-3] 鉛直座標 - WikiROMS https://www.myroms.org/wiki/Vertical_S-coordinate

■ 7章 陸域・河口域・海域統合モデル（3域の接続）の整備

7.1 本章の概要

5章で開発した陸域モデル：MERCURY/RADFLOW と沿岸域モデル：3D-Sea-SPEC の接続モデルに対し、6章にて開発した沿岸・沖合域に対する 3D-Sea-SPEC と ROMS の接続モデルを加え、計3つのコードの結合コードを開発する。この結合コードが動作すれば、陸域・沿岸域・海域の3つの領域での統合動態コードとなる。尚、5章で開発した MERCURY/RADFLOW・3D-Sea-SPEC の接続モデルは、2コードと共に、結合を整備・試解析等が実施済みであることから、3コードを結合するためには、3D-Sea-SPEC と ROMS が結合できれば良い。一方、3D-Sea-SPEC と ROMS の結合に関しては、ROMS のネスティング機能を用い、内側の領域に対し、3D-Sea-SPEC を利用する整備・試解析を6章にて実施済みであることから、本事業の範囲では、このネスティングの内側にて3D-Sea-SPEC を配置する方法で対応し、3コードの統合試解析を実施する。以下、7章では、7.2にて3域モデルの統合に係る整備について詳細を記した後、7.3にて3域統合モデルの試解析を福島での陸域・沿岸・沖合にて実施した試解析結果を報告し、3域統合モデルの現状と課題について整理する。

7.2 陸域・河口域・海域の3域モデルの統合接続に係る整備

陸域、河口域、海域の3域モデルを接続し、統合モデルとして整備するため、本事業では試験的に、MERCURY・3D-Sea-SPEC・ROMS の3モデルの結合を試みる。尚、陸域と河口域の結合においては、5章にて記した MERCURY と 3D-Sea-SPEC を簡易河道モデルで接続する。但し、3D-Sea-SPEC を ROMS のネスティング機能を利用し、最内側にて、3D-Sea-SPEC を利用し、河口域の詳細な解析を行うには、3D-Sea-SPEC のネスティング機能を利用する必要がある。この機能の活用は原理的に可能だが、以下に示す課題があることが分かった。

まず、3D-Sea-SPEC のネスティング機能を利用し多段のネスティング領域を河口域に作成し ROM に接続すると、3D-Sea-SPEC の CPU 時間が他のモデルと比べて突出して増大し、並列計算が必須となる（超並列計算機等の利用が推奨される）。実際、3D-Sea-SPEC を利用すれば、河口域に対し、10m程度の格子幅にて非静水圧条件での計算を実施することで、河口域での複雑な過程の詳細解析が可能となるが、その際、格子幅を小さくすると、それに合わせて時間ステップも十分に小さくする必要があり、計算コストの増大に繋がることに注意が必要である。

以上の課題があることから、本事業では、3D-Sea-SPEC のネスティング機能を利用せず、ROMS 利用時に内側を 3D-Sea-SPEC にて代行するという接続機能のみを利用（各々のコードが1領域のみ担当し、接続しあう）し、3域統合モデルの試解析を行う。従って、河口域での格子幅は粗く、十分な詳細解析は実施できないが、3域統合モデルの原理的動作確認を優先することとする。尚、本事業で利用した ROMS データを用いる場合、沿岸域の詳細解析は実施できないが、ROMS の多段ネスティング機能を利用し、十分にダウンスケーリングした後、最内側にて 3D-Sea-SPEC に接続するという選択も可能であることが分かる。但し、時間ステップ等の課題は、上記と基本的には変わらないことを記す。いずれにしても、

3域統合解析において、河口域での複雑な懸濁態等の挙動解析をどの程度まで解析する必要があるか、利用可能な計算機資源を考慮し、十分に検討した後、3域統合モデルを整備する必要があることが分かる。

7.3 陸域・河口域・海域統合モデルの試解析（福島陸域・沿岸・沖合）

本事業で実施する3域統合モデルの試解析においては、先ず、陸域と河口域の接続において、5章にて実施した阿武隈川を対象とし、TestM3 η の条件で、MERCURYと3D-Sea-SPECを簡易河道モデルにより結合した。TestM3 η の条件を以下に再び記す。

表 7-1 (表 5-1 試算ケース一覧より TestM3 η のみ抜粋)

	(5-1)式の u_R	u_r 計算式	(5-4)式の u_R	ϕ_R	x_r (暫定)	ϕ_s
TestM3 η	0.025 m/s	(5-7)式	0.050 m/s	500 Bq/m ³	1000m	図 5-4⑥位置

5章では、簡易河道モデル式の η にcos関数の近似水位を利用した(微細なcos関数からの揺らぎを計算にフィードバックすることが難しい)が、本検証試験では、3D-Sea-SPECで得られた水位を用いて実施した(このケースでも発散せずに計算を実施ができたため)。尚、ROMSとの接続の関係より、3D-Sea-SPECのメッシュ幅が5kmであることから、阿武隈川の河川側感潮域を模擬するには適切ではないため、簡易河道モデルの結合位置を阿武隈川河口出口とした(5章参照)。また、これにより、3D-Sea-SPECの格子は粗く、複雑な沿岸でのダイナミクスの一部が緩和され、3D-Sea-SPECが計算する潮位を利用した接続が可能となった(5章の詳細解析で見られた発散が抑制)。

以下にて、実施した試解析の結果を記す。図 7-1、図 7-2 に、計算開始から、(a)18h, (b) 21h, (c) 24h, (d) 27h 経過後の河口付近における水位分布および溶存態分布を示す。水位変動は比較的顕著になり、水位変動と溶存態分布の関係性を詳細に議論することは難しいが、簡易河道モデルでMERCURYから与えられる溶存態濃度は、500Bq/m³で一定に対して、河口出口では比較的顕著な濃度変化が見られることから、水位変動(潮汐等による)の影響を取り込む形でMERCURYと3D-Sea-SPECの接続計算による特徴が良く現れていると考えられる。

次に、図 7-3 にて、計算開始から、(a)20h, (b)40h, (c)60h, (d)80, (e)100h 経過後の沿岸域及び海域での溶存態分布を示す。図中の白枠は、3D-Sea-SPECとROMSの接続境界である。阿武隈川から流出した溶存態が北流に乗って拡散し、両コードの接続境界においても滑らかに接続されている様子がわかる。

以上、MERCURYと3D-Sea-SPECの接続モデルを更にROMSに接続しても問題なく動作したことから、RADFLOW・3D-Sea-SPEC・ROMSの3モデルを結合した計算も実施可能と考えられる。しかし、課題に関しては上記にて挙げた通りであり、計算コストの増大という課題は大きく、大型並列計算機の利用が必要となることが分かる。

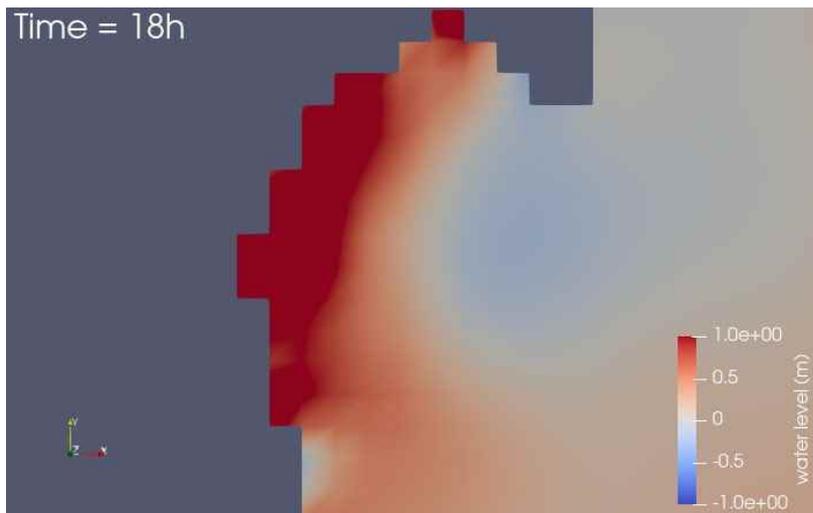


図 7-1(a) 結合モデル検証試験結果 (water level(m) : 水位、計算開始後 18h)

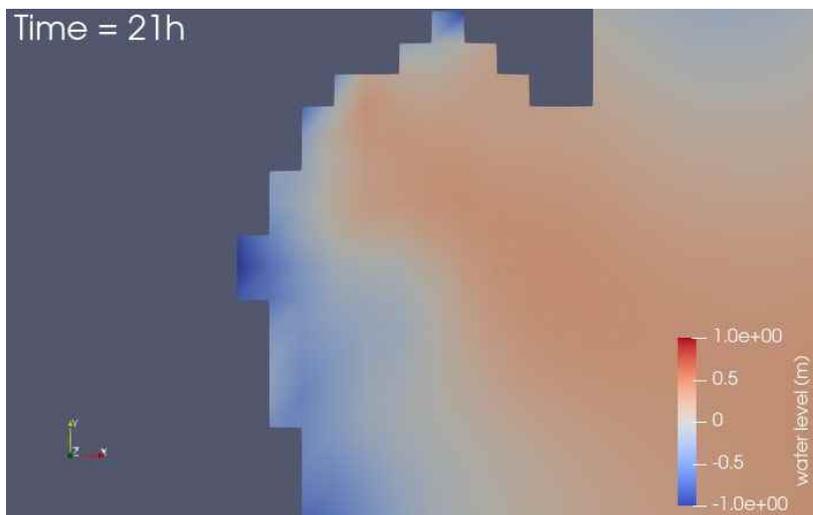


図 7-1(b) 結合モデル検証試験結果 (water level(m) : 水位、計算開始後 21h)

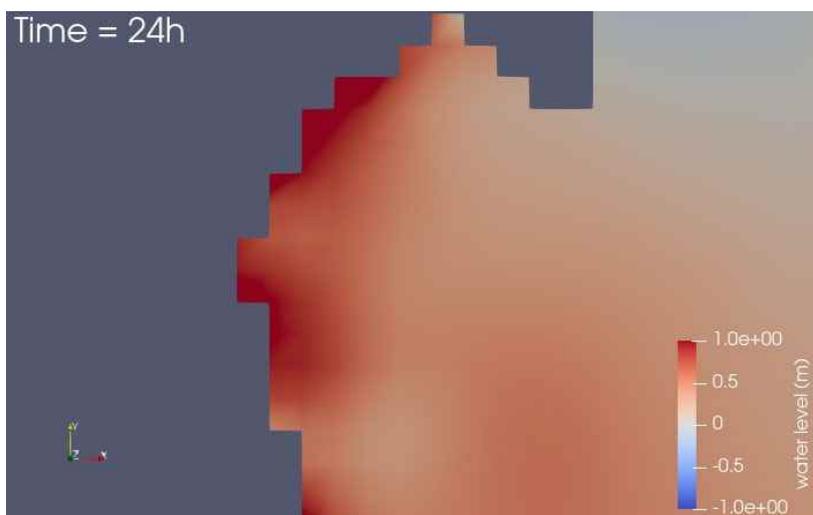


図 7-1(c) 結合モデル検証試験結果 (water level(m) : 水位、計算開始後 24h)

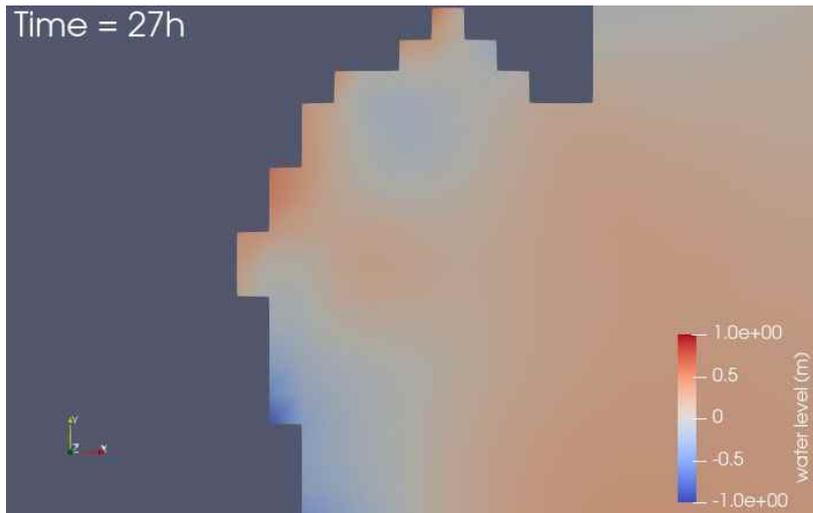


図 7-1(d) 結合モデル検証試験結果 (water level(m) : 水位、計算開始後 27h)

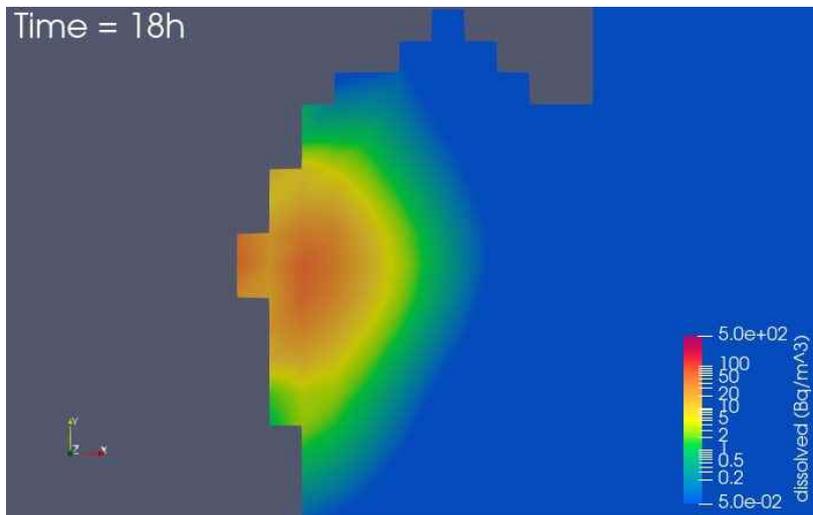


図 7-2(a) 結合モデル検証試験結果 (dissolved(Bq/m³) : 溶存態、計算開始後 18h)

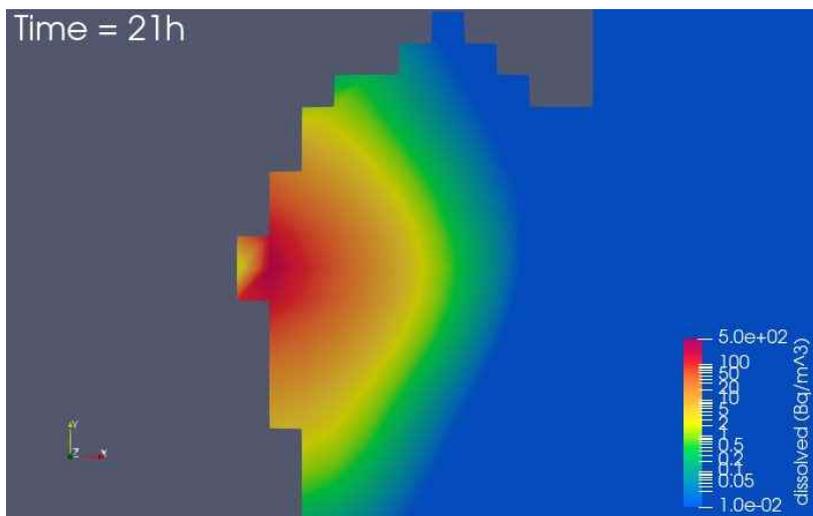


図 7-2(b) 結合モデル検証試験結果 (dissolved(Bq/m³) : 溶存態、計算開始後 21h)

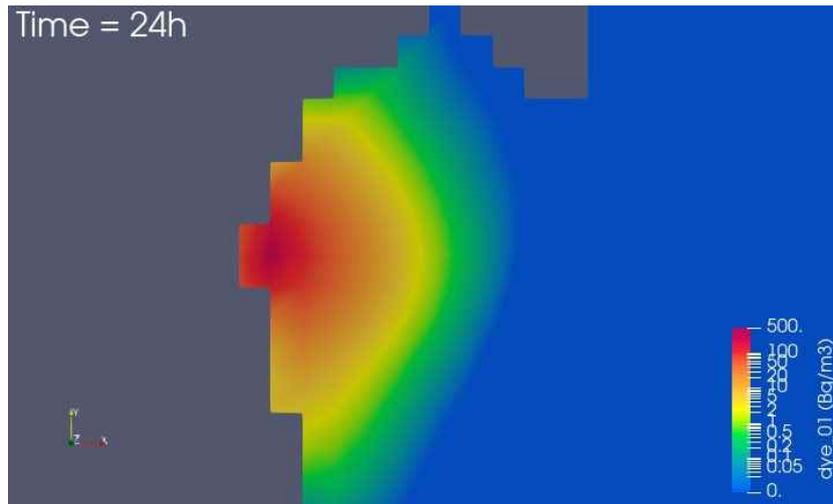


図 2-2(c) 結合モデル検証試験結果 (dissolved(Bq/m³): 溶存態、計算開始後 24h)

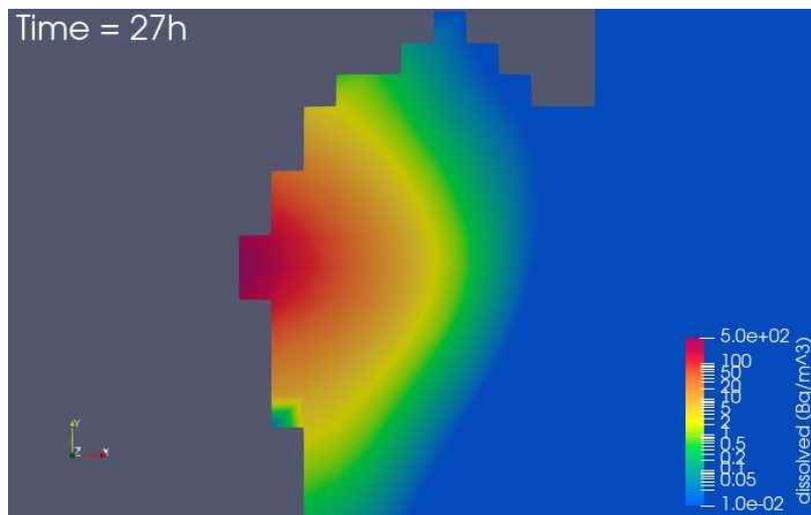


図 7-2(d) 結合モデル検証試験結果 (dissolved(Bq/m³): 溶存態、計算開始後 27h)

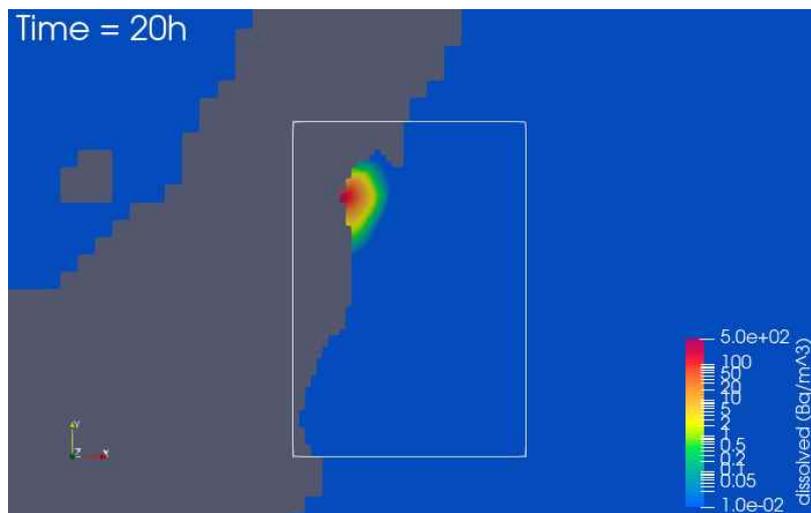


図 7-3(a) 結合モデル検証試験結果 (dissolved(Bq/m³): 溶存態、計算開始後 20h)

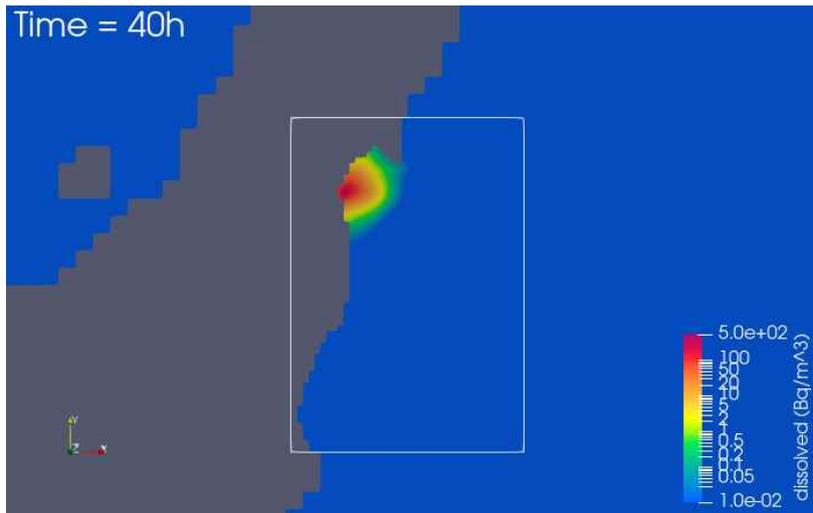


図 7-3(b) 結合モデル検証試験結果 (dissolved(Bq/m³): 溶存態、計算開始後 40h)

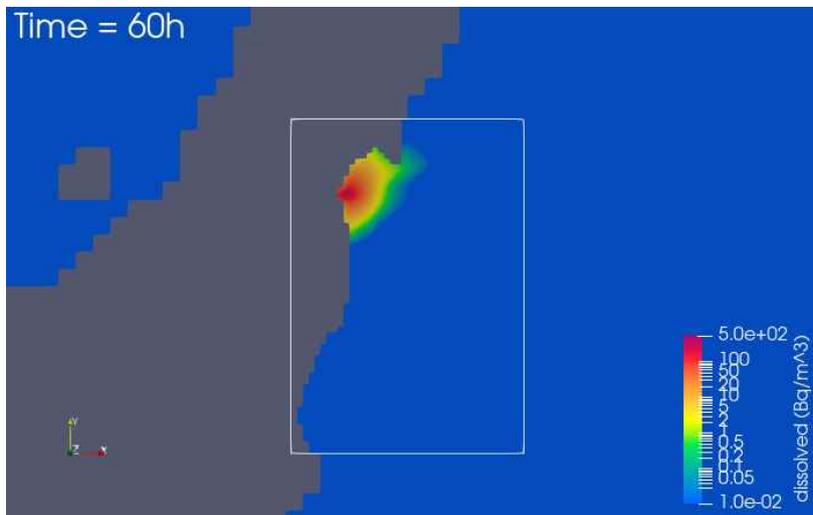


図 7-3(c) 結合モデル検証試験結果 (dissolved(Bq/m³): 溶存態、計算開始後 60h)

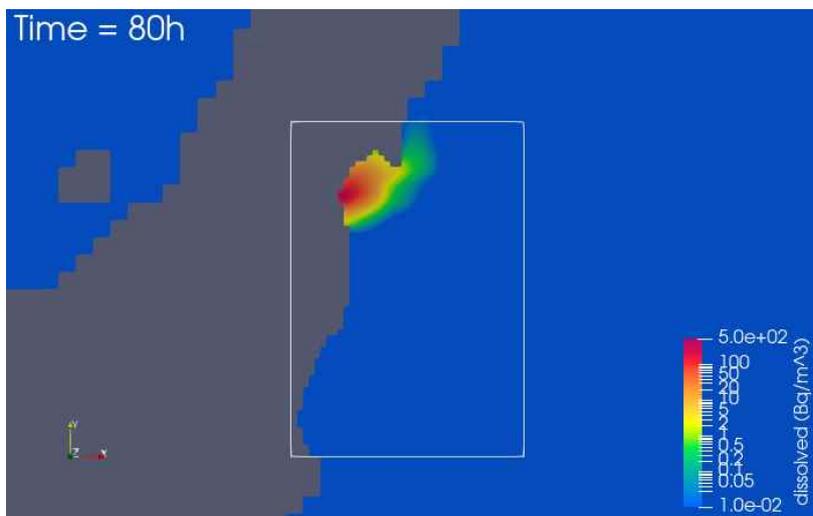


図 7-3(d) 結合モデル検証試験結果 (dissolved(Bq/m³): 溶存態、計算開始後 80h)

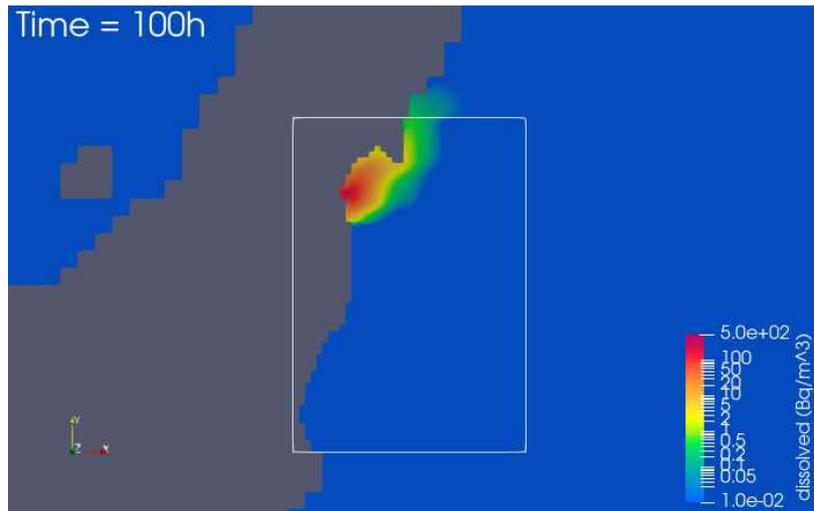


図 7-3(e) 結合モデル検証試験結果 (dissolved(Bq/m³): 溶存態、計算開始後 100h)

7.4 まとめ

以上、5章で開発した MERCURY・3D-Sea-SPEC の接続モデルに対し、6章にて開発した沖合域にて 3D-Sea-SPEC と ROMS の接続モデルを加え、計 3 つのコードの結合コードを開発した。本結合コードの試解析対象として阿武隈河口域を選定し正常動作を確認した。尚、本解析では、沿岸の解析を省力化することで、3域結合による統合モデルの動作確認と課題抽出に注力したため、結果の定量的妥当性や精度を議論できる段階ではないと判断する。しかし、定性的に沿岸解析において課題となっていた接続については、十分に連続的な流出過程を再現できることが確認できたことから、本事業の目的である 3域統合については、概ね達成できたと考えられる。

本結果を踏まえ、計算コストの課題を解決し、長期間に渡る放射性物質の流出解析を実施するには、大型計算機（超並列計算機）の利用が必須である他、沿岸域でのパラメータ取得が必須であることが分かる。陸域からの流出は、複雑なマルチスケールの現象となっており、特に、懸濁態の動態を追跡することの困難さが想定される。しかし、本事業により、それらの現象を理解するためのモデルの準備は整ったと考えられ、今後の一層の研究開発の継続が望まれる。

■ 8章 考察とまとめ

8.1 本章の概要

本報告書では、前半 3、4 章において、放射性物質の陸域動態モデルの整備と試解析結果を報告し、課題を整理した。後半 5、6、7 章では、陸域・沿岸域・河口域の 3 域における各動態モデルの接続による統合化に係る整備と試解析結果を報告し、課題を整理した。本章では、これらの結果と課題に考察を加え、次年度以降、3 域統合モデル開発を進めることを念頭に本報告書のまとめと結論を記す。

本 8 章の概要を以下に記す。まず、8.2 にて陸域動態モデルについて整備した事項と整備済みモデルを用いて実施した試解析結果について考察する。次に 8.3 では、整備した陸域モデルと沿岸域との接続に係る整備と試解析結果についての考察を記す。8.4 は、整備した沿岸域と海域との接続に係る整備と試解析結果の考察とし、8.5 は、陸域・沿岸域・海域の 3 域統合に係る整備と試解析結果の考察を記す。最後の 8.6 にて、上記の課題と考察結果をまとめ、本事業の結論を述べる。

8.2 陸域動態モデルの整備と試解析についての考察

本事業では、陸域での動態モデルとして、2 種類のモデル（集中定数型流出モデルと分布定数型流出モデル）を整備した。整備対象のコードは、日本原子力研究開発機構が開発している MERCURY と、同じく日本原子力研究開発機構が開発している RADFLOW である。

MERCURY の整備と試解析

MERCURY については、地理空間情報を基に GIS ソフトを利用して、流出に係る各パラメータを決定し、日本全国、どの地域の河川にも対応可能とするための整備（GIS 活用パラメータ推定機能整備）を行い、福島県の 4 河川（阿武隈川、請戸川、前田川、熊川）に対し試解析を実施した。その一方、降雨量情報と流出量情報がある際、自動的にパラメータをキャリブレーションする機能として、パラメータを最適化するツールを整備し、同じく福島県の 4 河川に対し試解析を実施した。

前者の GIS 活用パラメータ推定機能整備に対し、令和 2 年度の当該事業では、貯留関数モデルに対し優れた有効性を確認したが、同じくタンクモデルである MERCURY についても確認することができた。しかし、当初、貯留関数モデルより更に優れた性能を示すと期待されたが、格段に性能が向上する結果は得られなかった。しかし、パラメータ数が貯留関数モデルよりも多く、各パラメータと地理空間情報との関係性が複雑となり、それ故、チューニングが難しいという課題が発生することが分かった。今後、上記の関係性について更に検討を加える必要がある。

次に後者のパラメータの自動キャリブレーション機能として、ニュートン法、PSO 法、USE 法、ベイズ最適化法の 4 種を対象に、前者 3 種の方法に対しては、ツールを実際に作成し実装した（ニュートン法、PSO 法、USE 法）他、残りの 1 種の方法（ベイズ最適化法）については、別の目的にて開発されたオープンソースコード（PHYSBO）を利用し実装した。PSO 法、USE 法では、パラメータ推定に当たり、手法特有のパラメータ選定範囲の設定等が必要である等、一定のチューニングが必要だが、本事業では詳細な調査は実施せず、パラメータの絞りこみに係る動作が正常に機能するかのみ試験することとした。その結果、全ての手法において、パラメータ決定に当たり最適化可能であることが判明し、特に PSO 法は優れた性能を示すことが分かった。尚、PSO 法や USE 法では、最適化に係るステップ

数が大きく、一定の計算コストを必要とする一方、ベイズ最適化法は、ステップ数が小さく、最適化へのルートを適切に選択しながら最適化を進めている様子が分かった。これらの結果から、自動キャリブレーション機能を整備し試解析（パラメータ選定条件のチューニング等）を十分に実施し、各手法の性能に係る知見を蓄積した上で最適手法を選択する必要があることが分かる。

RADFLOW の整備と試解析

次に、分布定数型流出モデル RADFLOW の整備作業について記す。RADFLOW は、流域内の各地点での環境の違いを反映させることが可能である一方、その環境を特徴づけるパラメータの決定に高い自由度を有し、決定すべきパラメータ数が多く、それらの適切な設定については、様々なレベルの課題が存在する。本整備では、これらのパラメータ決定に際し、種々の地理空間情報を基に決定する方法について試解析を実施した。その結果、一定の精度が得られることが分かったが、未だ、パラメータ決定に利用した河川数が十分でないため、精度向上は限定的であることが分かった。しかし、本手法を用いることで、日本国内の河川に利用できる汎用的パラメータ範囲を凡そ特定することができた。今後は、これらの結果を活用し、更なる絞り込みを進める必要がある他、パラメータと物理的対応関係について更なる考察を行う必要がある。

上記の汎用的パラメータ設定手法の適用の他、自動キャリブレーション機能として、ベイズ多目的最適化法の適用を進めた。ベイズ最適化法を利用するため、MERCURY と同じく公開されているコード PHYSBO を利用した。その結果、一定の計算コストがかかるが、最適化すべきパラメータ数を限定することで十分に利用できることが分かった他、実際に最適化可能であることも分かった。ベイズ最適化の適用においても、上記と同じくパラメータの物理的対応関係と地理空間情報との関係性をより明確化することで、更なるチューニングが可能であると考えられる。これまで、陸域モデル（集中定数型及び分布定数型の両者）に対してベイズ最適化を適用した例はなく、今後の研究の進展が期待される。

8.3 陸域と沿岸域の動態モデル接続に係る整備と試解析についての考察

本事業の目的である、陸域モデルと沿岸域モデルの接続に際し、2 種類の陸域モデル（MERCURY と RADFLOW）に対応し、各々の接続方法を適用し、阿武隈川河口域のモデルにて試解析を行うことで、その接続方法の妥当性確認を実施した。

MERCURY と 3D-Sea-SPEC の接続に係る整備と試解析

MERCURY は、集中定数型流出モデルであり、河口での流出量の経時変化が主たるアウトプットであり、水位や流速のダイナミクスを直接計算しないため、そのアウトプットは、実際の河口域での流出量の経時変化とは一致しないことが知られている。これは、実際の河口域では、潮汐による水位変動があるため、その変動により、河口域での流量は、潮汐による周期的変動が河川からの流量に重畳することで決まるからである。こうして、MERCURY のような集中定数型流出モデルと沿岸域モデルとの接続においては、簡易河道モデル、即ち、潮汐からの流速変動成分を考慮するモデルを沿岸域モデルの間に挟み接続することで実現可能となる。尚、この潮汐による流速の変動成分については、河口域での流速の観測結果等から推定されるが、3D-Sea-SPEC のような 3 次元の比較的高精度なシミュレーションにより、その観測結果を推定することも可能と考えられる。

本事業では、3D-Sea-SPEC を活用し、事前に河口域の広範囲なシミュレーションを行うことで、代

表的地点にて、流速の経時変化を取得し、潮汐による流速の変動成分を推定することで、MERCURY と 3D-Sea-SPEC を接続する簡易河道モデルを構築した。その結果、流速が周期的変動成分を有することで、放射性物質濃度も河口域にて周期的に変動することが分かった。上記のような、河川により供給される物質濃度が潮汐により影響を受け、河口域から沿岸に拡散する様子が再現されれば、様々な物質動態の詳細な理解が可能になると考えられる。特に放射性セシウムのように、淡水から塩水へとイオン強度が大きく変化する際に、固液分配係数が大きく変化すると共に、吸着体となっている粘土鉱物の凝集沈殿等が起こる場合、極めて複雑な動態を示す可能性が指摘されているが、河口域での河川水の正確な挙動を再現することが前提条件となる。本事業では、上記の簡易河道モデルによる接続が有効であることが分かったが、パラメータ設定に係る不確実性があり、この課題を解決するには、事前に観測結果か精度の高いシミュレーションによる十分な解析が必要となる。また、精度の高い沿岸解析を実施するには計算コストが増大することにも注意が必要である。

RADFLOW と 3D-Sea-SPEC の接続に係る整備と試解析

RADFLOW では、河川の各地点での水位変化を、キネティックウェイブモデルを用いて解いていることから、水位を河口付近にて、沿岸動態モデルの 3D-Sea-SPEC の水位と直接接続することで、連続した水位変化を計算することが可能となる。本事業では、この接続を実装し試解析を行った。その結果は、妥当であり、水位変化や物質移動も連続的に進行することが確かめられたが、RADFLOW が淡水のみに対応し、塩分濃度変化を考慮していないモデルであり、塩淡混合過程は再現されないという基本的課題があることが分かった。従って、塩淡混合が河口の塩淡境界の狭い領域で起こる強混合のような場合での活用が想定される。尚、その際、接続境界を十分に検討した上で選択する必要があることも分かる。一方、広い範囲で混合が起こるような弱混合の場合、塩分濃度による密度変化等を RADFLOW でも考慮する等の改良が必要となることが分かる。日本の河川の多くは、上流と下流の高低差が比較的大きく、急流に分類され、感潮域の長い河川は少ない。この状況を考慮すれば、接続モデルを適切に選択するか改変は最小限でとどめることが可能と考えられる。

8.4 沿岸域と海域の動態モデル接続に係る整備と試解析についての考察

本事業では、沿岸域モデルであり、非静水圧条件での 3次元計算が可能な 3D-Sea-SPEC と、広く沖合も含めた海域も対象とする ROMS との接続を試みた。ROMS は世界的に利用されている静水圧近似を施した沿岸を含む海域の解析を行うコードであり、福島県沿岸及び沖合での放射性物質の動態解析に最も活用されているコードである。本事業では、原子力規制委員会 (NRA) より供与された ROMS の 2 段ネスティングモデルを利用し、最内側を 3D-Sea-SPEC で計算し、最外側の ROMS と接続する実装を進め、両者間で境界におけるデータ交換を施すことで、各物理量の連続的接続が確認できた。尚、ROMS ではナッジング機能を働かせることが可能だが、3D-Sea-SPEC には、その機能がなく、ROMS において、ナッジング機能を働かせる場合は、3D-Sea-SPEC においても同様とする必要がある。従って、河口域等の領域を絞りこみ、ROMS の多段ネスティングを利用し、限定した最内領域のみをナッジング機能なしの 3D-Sea-SPEC にて高解像度の計算を実施させることが考えられる。尚、高解像度の計算を含ませる場合、計算コストが大きく増大することに注意が必要である。

8.5 陸域・沿岸域・海域の動態モデル統合に係る整備と試解析についての考察

本事業では、陸域に拡散した放射性物質が地表水によって移動する際、河川を通じて海洋へ流出するに至るまでの動態を、降水分布等に基づいて定量的に評価するシミュレーションモデルを整備するため、陸域・沿岸域・海域の3つの領域における動態モデルを接続統合したモデルを構築することを想定し、接続に係る開発と試解析を実施し課題を整理した。

本報告では、接続に係る実装について、5章、6章にて詳述した他、試解析結果と課題を整理した後、7章にて NRA 提供の ROMS2 段ネスティングモデルを用いて、3 領域接続統合試解析を実施した結果を報告した。その結果、ROMS2 段ネスティングによる最内側の解像度が粗く、陸域と沿岸域の接続に係る複雑な動態が、試解析結果に十分に反映されない等の課題があったが、接続に係る問題は発生せず、連続的に物質が拡散する様子が再現された。課題は前節で説明した内容と同様であり、ROMS の多段ネスティング機能の適用により、沿岸域の解像度を段階的に向上させる解析が考えられる。しかし、福島県沿岸全体を解析対象とするような場合、複数の河川をカバーする必要が生じ、計算コストは大きく増大するという課題は更に深刻となる。従って、沿岸及び海域についての動態モデルに対しては、並列性を向上させ、大型計算機等の利用により課題解決を図ることが直接的解決手段と考えられる。

8.6 まとめと結論

本事業のまとめと結論を以下に記す。前節までに記したように、本事業では、陸域モデルを他の領域モデルとの接続のための整備と日本国内の河川への適用性を考慮し汎用化を図る目的でキャリブレーション機能を整備した。また、陸域モデルと沿岸域モデルとの接続モデルを定め実装を行い、試解析を通して、接続モデルの妥当性を確認した。更に、沿岸域モデルと沿岸を含む更に広い海域モデルとの接続も行い、接続の妥当性を確認し、最終的に陸域・沿岸域・海域の3つの接続モデルによる統合試解析を行い、その妥当性確認と課題を整理した。

以上の本事業による結果として、各コードの改良すべき点等が明らかとなった他、各域に対して精度の高い解析を行うには、計算コストの増大という課題が存在し、大型計算機（並列計算機）の利用が必須となることが分かった。特に、放射性セシウムの動態を解析する際、沿岸域でのモデルパラメータの変化は大きく、解像度の高い計算を実施する必要があるが、その分、計算コストは増大するため並列性の向上が鍵となる。また、沿岸域でのモデルパラメータについての知見を深める必要があり、未だ十分な情報がない場合は、感度解析を実施し、観測結果との整合性について十分な分析を行う必要がある。

以上、本事業を通して、世界でもあまり類を見ない、陸域・沿岸域・海域モデルの接続による統合モデルの構築と試解析を実施した。その結果、統合モデルによる解析精度を向上させるためには、領域単位で起こる現象のスケールを見極め、現象のマルチスケール性を意識した統合モデルの構築が必要であることが分かった。また、複雑なマルチスケールの現象を分析するためには、計算コストの課題を並列計算や GPU 等の活用により解決し、分析力向上に向けて努力する必要がある。このような取り組みを継続することで、動態モデルによる予測能力が向上し、シビアアクシデント時やその後の活用が可能になると考えられ、今後の研究開発の継続が切に必要であると結論づけられる。

■ 付録 1 放射性物質陸域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

本付録では、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日本国内の4つの主要な機関に、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、国立環境研究所の福島地域協働研究拠点、電力中央研究所のサステナブルシステム研究本部である。

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、河川流域を対象とした放射性物質の環境動態モデル(分布定数型流出モデル：RADFLOW)の研究開発状況についてインタビューした結果をまとめる。尚、集中定数型流出モデル：MERCURYも開発済みであり、既に福島県の複数の河川に適用し評価が行われている(令和2年度の当該事業報告書にて詳述)。

RADFLOWは地表水及び地下水流動解析をもとに、対象流域内の土砂及び溶存態・懸濁態セシウム動態をシミュレーションするモデルである。地表水はマニング則、地下水はダルシー則に従い流動計算を行い、地表流浸食及び雨滴浸食を考慮することで土砂の浸食堆積挙動をモデル化し、地表水中の土砂輸送を計算する。水の流動と土砂輸送量をもとに、溶存態及び懸濁態セシウム動態を計算する。モデル開発は継続中であるが、福島県太田川上流域を対象に検証計算を実施したところ、河川流量、土砂流出量、放射性セシウム流出量に対して実測値をおおよそ再現することが確認された[付録1-1]。

今後、さらなる検証の継続とともに、流域内の土地利用ごとに特有の現象(ダム湖による放射性セシウムの補足効果やダム湖底泥からの溶出、森林生態系循環のモデル化、水田やため池等からの流出機構のモデル化)についてもモデル開発を実施する予定である。

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、研究開発を行う福島研究開発部門と連携し、特に、福島県の放射性

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。

河川を対象とした流出解析では、優れた2次元の解析コード(iRIC) [付録 1-2]があるが、ダムや貯水池のような3次元性が課題となる陸水域についてのモデルは、十分に開発されていないことを受け、3次元でのモデル開発を福島事故以降行ってきた。これまで、ダムへの適用を実施し、ダム貯留水の成層化現象とその破れが発生する等の現象について詳細解析を行い、計算科学的な課題解決を図る等の成果を挙げている [付録 1-3]。このような3次元的流動現象(特に鉛直方向のダイナミクスに起因する)の課題は、河口域でも重要であり、塩淡混合が起こる地点等での懸濁態粒子の挙動解析等の計算科学課題にも取り組んでいる。特に粒子挙動については、移流拡散方程式を解くのではなく、粒子一つ一つの挙動を追跡する手法との比較検討を行う [付録 1-4] など、モデリングを考える上で有用な情報提供を目標としている。

1.3 国立環境研究所・福島地域協働研究拠点

国立環境研究所では、福島事故後、河川流域を対象とした放射性セシウム動態に関する調査研究を広範囲に実施してきた。数ある調査対象河川の中でも、相馬市に位置する宇多川流域においては、森林、河川、ダム湖における動態調査 [付録 1-5]、河口域に存在する松川浦を対象に系統的な調査を行い、陸域から海洋へ流出する素過程を網羅的に調査している。観測結果から、河川を通じて流出する放射性セシウムは、非常に限定的であるが、流出形態の多くが懸濁態であることが分かっている。河口域に存在する汽水環境の松川浦においては、松川浦内での底泥サンプリングを通じた放射性セシウム蓄積量の調査等が行われている [付録 1-6]。調査研究に加え、松川浦を対象とした放射性セシウム動態シミュレーションも実施していて、事故当初の大気からの初期沈着、外洋からの湾内への侵入、陸域からの流出の比較計算を実施している [付録 1-7]。上記の研究は、陸域及び河口域モデルの接続に係り、重要な参考情報となる他、河口域での複雑な懸濁態と放射性物質の非平衡過程についての知見は今後も注視する必要がある。

1.4 電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部

電力中央研究所では事故当初から福島沿岸域における放射性セシウム動態に関するシミュレーション研究を実施してきた [付録 1-8]。1F 港湾及び河川由来の溶存態セシウムを発生源とした海洋拡散シミュレーション結果から、河川経由の土壌粒子に含まれる放射性セシウムの寄与が沿岸域での放射性セシウム動態を考える際に重要であることが指摘されている [付録 1-9]。また、1F の北側で距離が遠いため直接漏洩の影響が小さい相馬沖においては、松川浦を経由した河川の影響を受けると考えられるが、実際に松川浦の海水中の溶存態放射性セシウム濃度は、宇多川の河川水と相馬沖の海水濃度よりも高いことが指摘されている。松川浦内の底泥中の間隙水に含まれる溶存態セシウム濃度は、松川浦内の海水よ

りも高いことがわかっているが、今後間隙水を経由した底泥からの影響がどの程度なのか定量的に評価を実施する予定である[付録 1-10]。

以上、インタビュー結果から、外洋とは水路でのみ繋がっている潟湖・汽水環境である松川浦の重要性が分かる。松川浦は、河川から流入した放射性セシウムを含む土壌粒子が凝集沈降しやすい環境にあり、溶存態セシウムの供給場となっている可能性も指摘されているため、今後河川と海洋をつなぐ動態モデルを開発する上で、松川浦を対象とした調査研究が重要になると考えられる。今後、懸濁態の凝集沈降及び塩分濃度の変化による溶出過程に関する重要なパラメータを取得できる可能性が示唆される。

1.5 まとめ

以上、陸域・沿岸域・海域での放射性物質の統合流出解析のモデリングに関して、重要な情報を入手していると考えられる上記 4 研究機関をインタビューした。陸域については、集中定数型流出モデルと分布定数型流出モデルの 2 つが開発され、整備が進んでいること分かった他、沿岸での複雑な放射性物質と懸濁態の相互作用を含む移行過程を調べるため、比較的、擾乱の少ない汽水域等の調査研究が進んでいることも分かった。特に、後者の情報は、沿岸域での放射性物質の複雑な過程を精度良くモデリングする際、重要な情報となる。上記機関が実施している研究開発は、今後も十分に注視すべきであると考えられる。

参考文献

- [付録 1-1] 日本原子力学会 2021 年秋の大会. 福島における放射性物質分布調査(16)放射性核種を対象とした陸域動態モデル開発
- [付録 1-2] <https://i-ric.org/ja/> (iRIC: web サイト) .
- [付録 1-3] ダムの 3D-Sea-SPEC を用いた研究成果.
- [付録 1-4] シルトフェンスの 2 つの論文.
- [付録 1-5] 国立環境研究所 広域環境モニタリング調査及び解析 (平成 23 年～25 年度)
https://www.nies.go.jp/fukushima/pdf/PG1PJ1_H23-H25.pdf
- [付録 1-6] 有田ら, 2014. 福島県松川浦における底質の放射性セシウム濃度と蓄積量の実態把握, 土木学会論文集 G (環境), 70, 225-231.
- [付録 1-7] 国立環境研究所 平成 28 年度スーパーコンピュータ利用研究報告会
<https://www.cger.nies.go.jp/ja/activities/supporting/supercomputer/ws/h28/abstract/h28-07.pdf>
- [付録 1-8] Tsumune et al., 2012. Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, *Journal of Environmental Radioactivity*, 111, 100-108.
- [付録 1-9] 国際シンポジウム「原発事故から 10 年後の福島の“森・川・海”と“食”～復興に向けて残された課題～」ポスター発表
- [付録 1-10] ERAN 2020 成果報告書 <https://www.ied.tsukuba.ac.jp/ernc/past-research/>

■ 付録 2 分布型定数モデルの整備と試解析（4章付録）

本付録では、4章「分布型定数モデルの整備と試解析」の作業を行うにあたり、調査した内容および実装したツール・プログラムの詳細について記載する。それぞれの節で記載した内容を以下に列挙する。

- 1 節：地理空間情報
- 2 節：RADFLOW の改修（version1.2.5）
- 3 節：テーブルデータの作成
- 4 節：ベイズ最適化
- 5 節：実装とキャリブレーション機能の開発
- 6 節：課題
- 7 節：GIS に関する基礎概念
- 8 節：地理空間情報の加工方法
- 9 節：4 河川の情報

4章2節では、現状版の RADFLOW を対象に地理空間情報を基に透水係数の設定改良に係る作業内容を記載した。その際、GIS から取得した地理空間情報のデータの詳細を1節に記載した。GIS に関する基礎概念について7節にまとめ、地理空間情報の QGIS による加工方法の手順について8節にまとめた。取得した地理空間情報のデータ一覧の可視化図を9節に列挙した。そして、RADFLOW の改修項目の詳細について2節、3節に記載した。

また、RADFLOW において、地下水の流動を計算する際に必要となるパラメータである透水係数（間隙率、粗度係数）などのモデル定数に対して、それをベイズ最適化を用いてキャリブレーションする機能開発を行い、4節ではその作業内容を記載した。本付録の8節と9節では、開発したキャリブレーション機能の詳細について記載した。

2.1 地理空間情報の取得方法

2.1.1 測地系/座標系

データ作成のために主に使用する測地系/座標系のリストを表2-1に示す。特に、RADFLOW のメッシュデータやノードの座標値は、「JGD2011/UTM zone 54N (EPSG : 6691)」の測地系/座標系で定義するものとする。

表 2-1 測地系/座標系

記号	測地系・座標系	EPSG コード
JGD2000	日本測地系 緯度経度	4612
WGS84	世界測地系 緯度経度	4326
JGD2000/UTM zone 54N	日本測地系 UTM 座標系東日本地域 54N	3100
JGD2011/UTM zone 54N	日本測地系 UTM 座標系東日本地域 54N	6691

ここで、「測地系・座標系」や「UTM 座標系」、「EPSG コード」については、2.7 で説明を与えている。

2.1.2 データ：地形（DEM）

① ダウンロード

解析地形の数値標高データ（DEM）は下記サイトからダウンロードする。

- WEB サイト：
『基盤地図情報ダウンロードサービス』
<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>

今回の解析で使用した DEM のリストを表 2-2 に列挙した。また、それらの DEM を可視化した結果を図 2-1 に示した。このとき 4 河川(阿武隈川、請戸川、前田川、熊川)を赤線で表示している。

② 変換方法（XML→GeoTIFF）

WEB サイト『基盤地図情報ダウンロードサービス』からダウンロードされるのは、総務省統計局にて定義されている 2 次区画地域メッシュごとの zip 形式ファイルである。その中には、xml 形式の標高データが入っているが、そのままでは QGIS で読み込むことができない。

従って、下記の WEB サイトで紹介されている Python スクリプト「zdem2tif.py」を利用して、DEM データを xml 形式から GeoTIFF 形式に変換する。

- WEB サイト：
『Python を用いた基盤地図情報 数値標高データの geotiff 変換@HidKamiya』
<https://qiita.com/HidKamiya/items/66b1d98503301446460c>
- WEB サイト『Python で JPGIS(GML)形式 DEM を Geotiff ファイルに変換』
<https://tm23forest.com/contents/python-jpgis-gml-dem-geotiff>
- WEB サイト『Python で基盤地図情報の数値標高モデルを解析して GeoTiff に変換する』
<https://www.gis-py.com/entry/2016/01/10/163027>
- WEB サイト『fgddem.py：国土地理院の基盤地図情報 数値標高モデル JPGIS(GML)形式を GeoTIFF に変換する Python スクリプト。』
<https://github.com/minorua/fgddem.py>

ただし、この Python スクリプトは GDAL モジュールを利用しており、別途このモジュールをダウンロードする必要がある。今回は下記のバージョンの Python と GDAL モジュール（wheel ファイル）を使用した。

Python：3.9.4

GDAL：「GDAL-3.3.3-cp39-cp39-win_amd64.whl」

なお、GDAL の wheel ファイルは次の WEB サイトから取得できる。

WEB サイト『Unofficial Windows Binaries for Python Extension Packages@Christoph Gohlke』
<https://www.lfd.uci.edu/~gohlke/pythonlibs/#gdal>

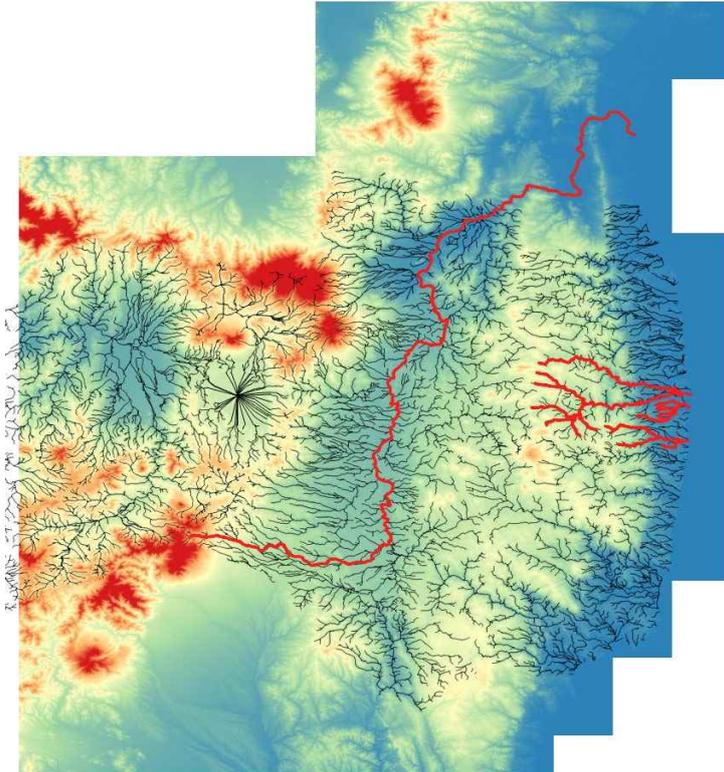


図 2-1 4 河川を包含する領域の DEM 可視化結果（黒線と赤線は河川データ）

2.1.3 データ：河川（XML, geojson）

① 対象河川

【情報一覧】

今回の業務において、解析対象となる4河川(阿武隈川、請戸川、前田川、熊川)の情報について以下に列挙する。

表 2-3 阿武隈川

水系	水系名	阿武隈川水系
	水系コード	820201
河川	河川名	阿武隈川
	河川コード	8202010001
関係する都道府県		福島県、宮城県
関係する地区町村		角田市、岩沼市、柴田郡柴田町、伊具郡丸森町、福島市、郡山市、白河市、須賀川市、二本松市、伊達市、本宮市、伊達郡国見町、西白河郡西郷村、西白河郡中島村、西白河郡矢吹町、石川郡石川町、石川郡玉川村
WEB サイトリンク		「Geoshape リポジトリ > 国土数値情報河川データセット」 https://geoshape.ex.nii.ac.jp/river/resource/820201/8202010001/ 「川の名前を調べる地図」 https://river.longseller.org/rc/8202010001.html

表 2-4 請戸川

水系	水系名	請戸川水系
	水系コード	070014
河川	河川名	請戸川
	河川コード	0700140001
関係する都道府県		福島県
関係する地区町村		田村市、双葉郡浪江町、双葉郡葛尾村
WEB サイトリンク		「Geoshape リポジトリ > 国土数値情報河川データセット」 https://geoshape.ex.nii.ac.jp/river/resource/070014/ 「川の名前を調べる地図」 https://river.longseller.org/ws/70014.html

表 2-5 前田川

水系	水系名	前田川水系
	水系コード	070015
河川	河川名	前田川
	河川コード	0700150001
関係する都道府県		福島県
関係する地区町村		双葉郡双葉町
WEB サイトリンク		「Geoshape リポジトリ > 国土数値情報河川データセット」 https://geoshape.ex.nii.ac.jp/river/resource/070015/ 「川の名前を調べる地図」 https://river.longseller.org/ws/70015.html

表 2-6 熊川

水系	水系名	熊川水系
	水系コード	070018
河川	河川名	熊川
	河川コード	0700180001
関係する都道府県		福島県
関係する地区町村		双葉郡富岡町、双葉郡大熊町
WEB サイトリンク		「Geoshape リポジトリ > 国土数値情報河川データセット」 https://geoshape.ex.nii.ac.jp/river/resource/070018/ 「川の名前を調べる地図」 https://river.longseller.org/ws/70018.html

【河川コードとは】

なお、河川コード（水系コード）は河川に付与された識別 ID のことである。

- 河川コード：

コードは、一級河川、二級河川、準用河川及び普通河川に対して付与される。ただし、普通河川については、当該河川の管理者が必要と認める場合に付与されるものとし、農業用水路等に付与が必要な場合は普通河川として取り扱われるものとする。コードの付与は、河川種類及び河川管理者の数にかかわらず、1河川1コードである。同一水系内の河川については、地域番号及び水系番号は同一である。（河川コード仕様書より引用）

- 河川コード仕様書：

『河川コード仕様書 国土交通省河川局』

http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00037/k00290/river-hp/kasen/code/data/050401_siyou01%5B1%5D.pdf

② 河川網のXMLファイル

【ダウンロード】

支流も含めた河川網のデータは、国土交通省の国土数値情報ダウンロードから河川データとして取得した。WEBサイトと河川データの特徴は下記の通りである。

- WEBサイト：
『国土交通省>国土数値情報>河川データ』
<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-W05.html>
- 内容：
河川法による1級直轄区間、1級指定区間、2級河川区間、その他流路について、形状(線)、区間種別(1級直轄区間、1級指定区間、2級河川区間等)、河川名、原典資料種別等を整備したものである。また、河川中心線の「流路」の接続状況を明示的に示す端点について、位置(点)、標高値等を整備したものである。(上記WEBサイトより抜粋)
- データフォーマット：
JPGISに準拠した符号化(XML形式)

今回の業務において、解析対象となる4河川(阿武隈川、請戸川、前田川、熊川)は福島県内(と宮城県内の一部)に位置するため、2県の河川網データを取得した。具体的には次のzipファイルをWEBサイトからダウンロードした。

- 福島県>国土数値情報>河川データ：W05-07_07.zip
- 宮城県>国土数値情報>河川データ：W05-07_04.zip

ダウンロードした河川データの可視化図を図2-2に示した。

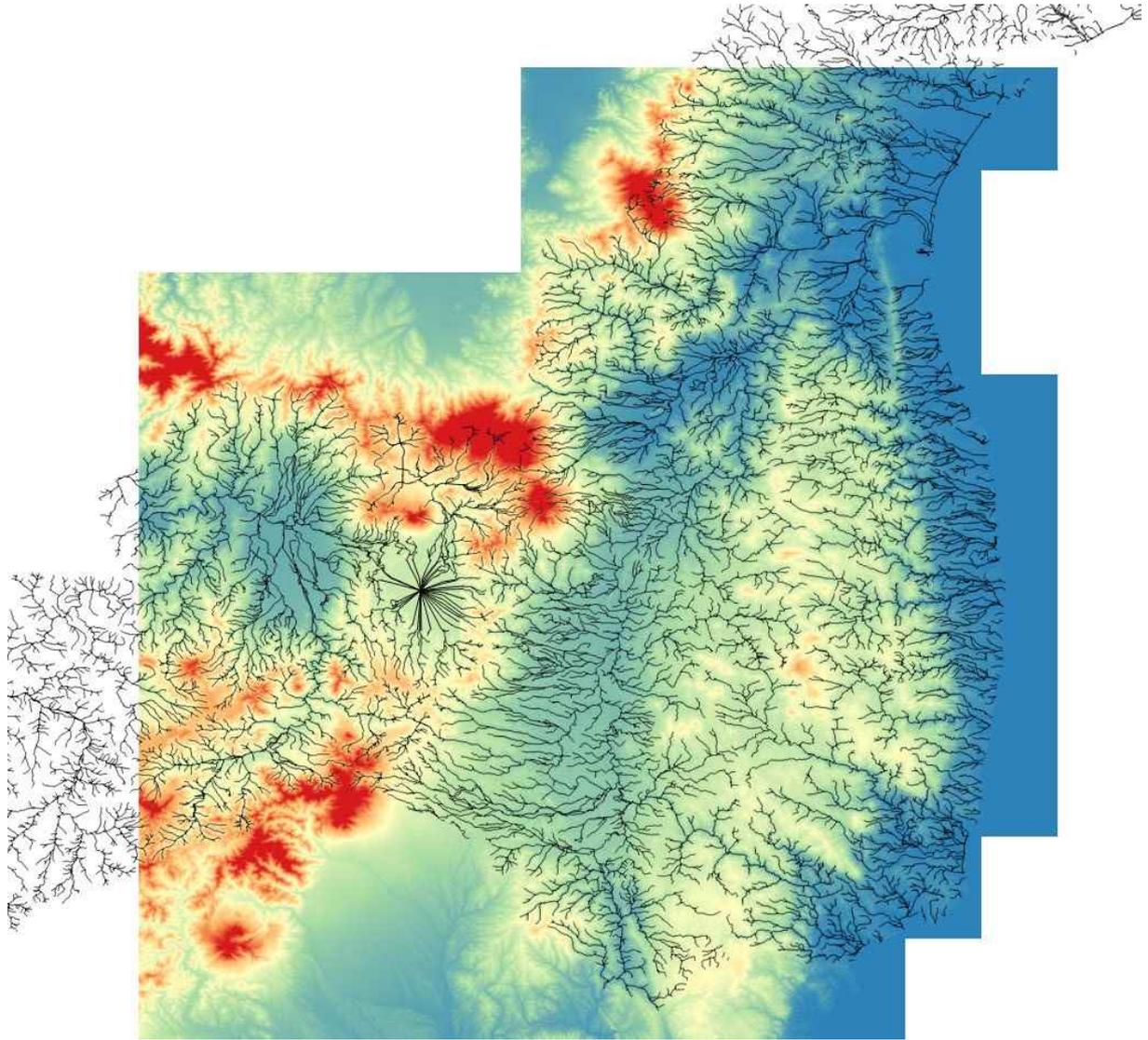


図 2-2 福島県と宮城県の河川データ (国土数値情報 XML 形式)

【変換方法 (XML→shp)】

国土数値情報の河川データは XML 形式であるが、そのままでは QGIS で読み込むことができないため、国土数値情報が配布している変換ツール「KsjTool」を利用して、XML 形式から shp 形式にフォーマット変換する。

- WEB サイト :

『国土数値情報データ変換ツール : KsjTool』

https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/jpgis_tool.html

- 概要 :

このツールは国土交通省から提供されたものであり、国土数値情報 (JPGIS 準拠データ) をシェイプ形式 (GIS 業界で幅広く利用されているフォーマット) のデータに変換するために使用される。

③ 個別河川の GeoJSON ファイル

【ダウンロード】

今回の業務において、解析対象となる 4 河川(阿武隈川、請戸川、前田川、熊川)の個別の地理形状データを「国土数値情報河川データセット | Geoshape リポジトリ」から取得した。WEB サイトとデータの特徴は下記の通りである。

- WEB サイト :

『Geoshape リポジトリ > 国土数値情報河川データセット』

<https://geoshape.ex.nii.ac.jp/river/>

- 概要 :

国土数値情報河川データセットとは、国土交通省が提供する河川データを、水系コード、河川コードごとに地図表示し、地理形状データをダウンロードできるサービスである。シェープファイル形式で提供されるデータを GeoJSON 形式に変換したベクター形式データが提供される。

- データの取得方法 :

WEB サイトの TOP から、「メニュー」 > 「2. 河川名・水系名による検索」と進む。

- データフォーマット :

GeoJSON 形式

抜粋はじめ「GeoJSON は JavaScript Object Notation (JSON) を用いて空間データをエンコードし非空間属性を関連付けるファイルフォーマットである。属性にはポイント (住所や座標)、ライン (各種道路や境界線)、ポリゴン (国や地域) などが含まれる。他の GIS ファイル形式との違いとして、Open Geospatial Consortium ではなく世界各地の開発者達が開発し管理している点で異なる。」 <https://ja.wikipedia.org/wiki/GeoJSON> より抜粋

ダウンロードした河川データの可視化図を図 2-3 と図 2-4 に示した。

【変換方法 (GeoJSON→shp)】

GeoJSON 形式データは、そのままでも QGIS でベクタファイルとして読み込むことができる。また、QGIS の機能で shp 形式に変換することもできる。具体的には、GeoJSON ファイルを QGIS で開き、

「レイヤパネルから GeoJSON ファイルを選択して右クリック」>「エクスポート」>「地物の保存」と進んで、「ESRI Shapefile」として保存すればよい。このとき、座標参照系（CRS）として所望の測地系/座標系に変換することもできる。

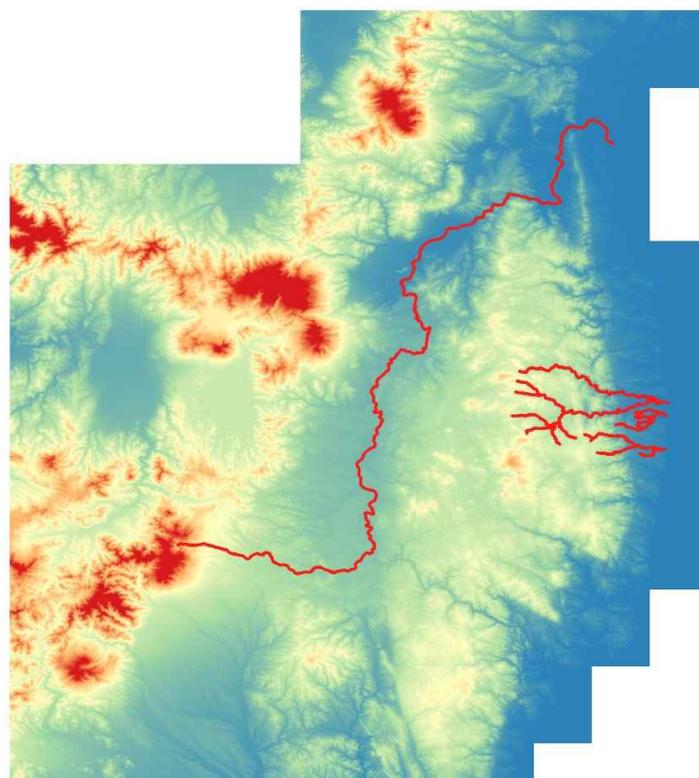


図 2-3 解析対象となる 4 河川(阿武隈川、請戸川、前田川、熊川)の GeoJSON データ

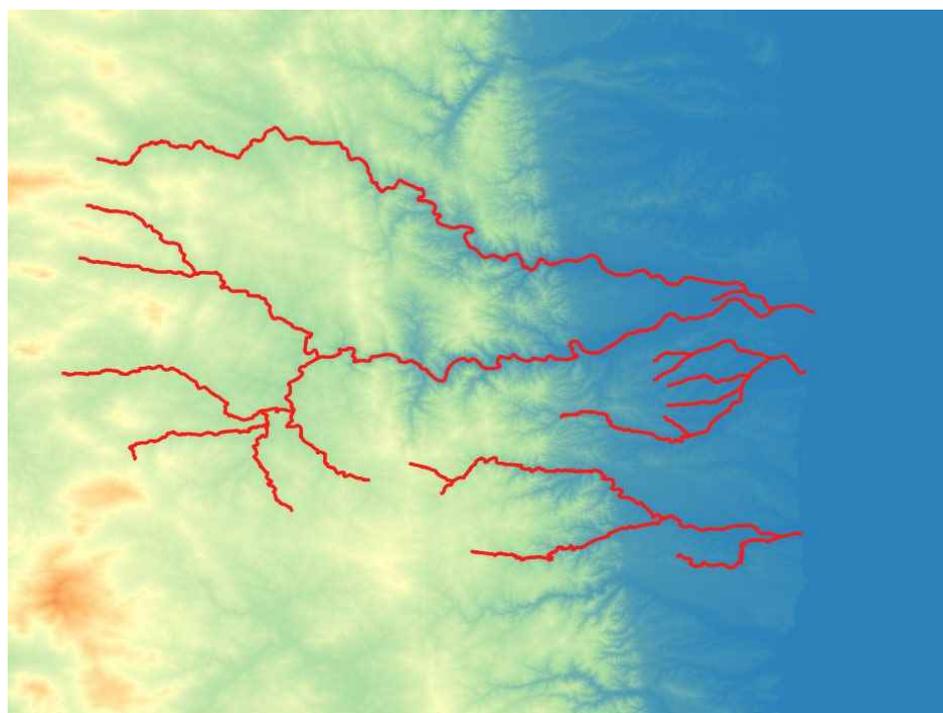


図 2-4 請戸川、前田川、熊川の GeoJSON データの拡大図

2.1.4 データ：流域界データ

① 収集方法

河川の流域界を与えるデータは、国土交通省の国土数値情報ダウンロードから流域メッシュデータとして取得した。WEB サイトと流域メッシュデータの特徴は下記の通りである。

- WEB サイト：
『国土交通省>国土数値情報>流域メッシュデータ』
<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-W07.html>
- 内容：
流域メッシュは、日本全国において、3次メッシュ 1/10 細分区画（100m メッシュ）毎に、どの河川の流域界に属するかについての情報を GIS データとして整備したものである。
- 座標系：
JGD2000 EPSG:4612（日本測地系）
- 属性：

表 2-7 流域メッシュデータの属性

ラベル	属性名	説明
W07_001	細分メッシュコード	100m（1/10 細分）メッシュ単位のコード番号。
W07_002	水系コード	該当流域界における河川コード表の河川コードの上位 6 桁の番号ただし、整備データが存在しない場合は、「県コード」+”0000”
W07_003	河川コード	流域界が内包する河川の河川コード 1 級河川、2 級河川、準用河川、普通河川に該当する個別の河川を一意に特定するために付与された 10 桁の番号（該当流域界の河川コード表に示される河川コード）。 ※整備データが存在しない場合は、「県コード」+”00000000”
W07_004	水系名	水系の名称 水系域コードが「0000」以外の場合は、対応する名称とする。「0000」の場合は管内図等の資料から分かる場合はその名称、不明の場合は「名称不明」
W07_005	河川名	管内図に示される河川名、不明の場合は「名称不明」。
W07_006	単位流域コード	同一水系域の流域界を区別するための 1 から始まる河川流路の下流側から付番した通し番号

- データフォーマット：
シェープファイル形式

今回の業務において、解析対象となる 4 河川(阿武隈川、請戸川、前田川、熊川)の流域界データを作成するために、WEB サイトから次の zip ファイルをダウンロードした。

表 2-8 流域界データの zip ファイルリスト

W07-09_5741-jgd_GML.zip
W07-09_5539-jgd_GML.zip
W07-09_5540-jgd_GML.zip
W07-09_5541-jgd_GML.zip
W07-09_5639-jgd_GML.zip
W07-09_5640-jgd_GML.zip
W07-09_5641-jgd_GML.zip
W07-09_5740-jgd_GML.zip

② データ加工

ダウンロードした「流域メッシュデータ」は個別の 100.0m メッシュで分離しているため、これらを水系ごとにまとめて一つの流域界のベクターデータを作成する。それには次の手順でデータを加工する。

1. 複数の流域メッシュデータ(shp ファイル)を、一つのファイルにマージする。
「ベクタ」タブ>「データ管理ツール」>「ベクタレイヤのマージ」を選択する。この機能で、複数の shp ファイルを融合して、一つの shp ファイルを作成する。
2. 水系ごとに流域メッシュを融合する。
「プロセッシングツールボックス」>「ベクタジオメトリ」>「融合 (dissolve)」を選択する。このとき、「基準となる属性」オプションとして、水系名に対応する「W07_004」属性を指定する。
3. 対象流域のポリゴンを選択し、選択地物を shp ファイルとして保存する。
「ポリゴンの選択」>「対象レイヤー上で右クリック」>「エクスポート」>「選択地物の保存」を選択して、流域界ごとの個別の shp ファイルとして保存する。
4. 対象流域から漏れた未分類領域を単一ポリゴンとしてまとめる。
(ア) 「名称不明」のポリゴンを選択し、選択地物として「tmp.shp」に一時的に保存する。
(イ) 「tmp.shp」を選択して、「プロセッシングツールボックス」>「ベクタジオメトリ」>「マルチパートをシングルパートに変換」を選択して、ポリゴンを細分する。
(ウ) 細分され過ぎたポリゴンを流域ごとに選択して、ベクターデータの和集合処理により、一つのポリゴンにまとめる。つまり、「プロセッシングツールボックス」>「ベクタオーバーレイ」>「和集合 (選択地物に対して)」を実行する。
(エ) 以上の手順を完了したら、不要な一時レイヤーは削除する。
5. 対象流域のポリゴンとそれから漏れた未分類領域を結合して、完全版の流域ポリゴンを作成する。つまり、「ベクタ」タブ > 「空間演算ツール」 > 「和集合(union)」を選択する。
6. 流域界が作成される。

手順 2.が完了した時点で得られた shp ファイルを下記リンクに配置した。また、このときの可視化結果を図 2-5 に示した (黒い領域は「名称不明」のポリゴンである)。

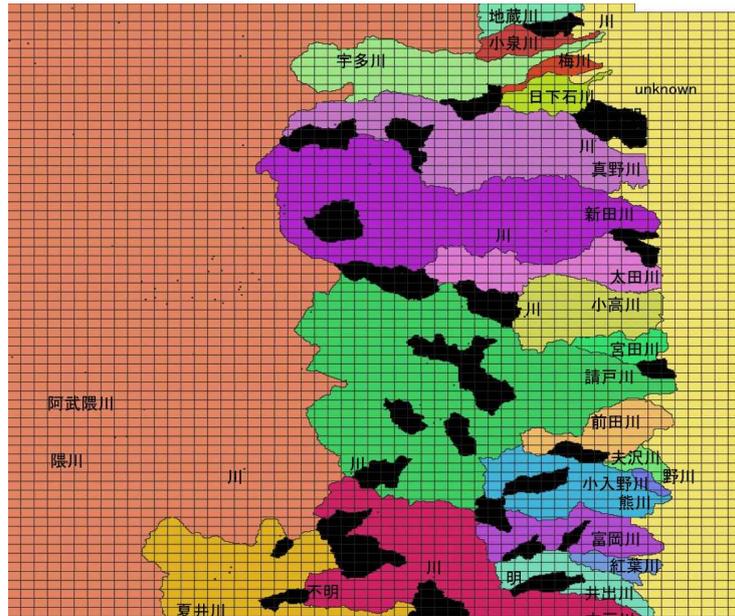


図 2-5 流域界の作成（手順 2 完了時）

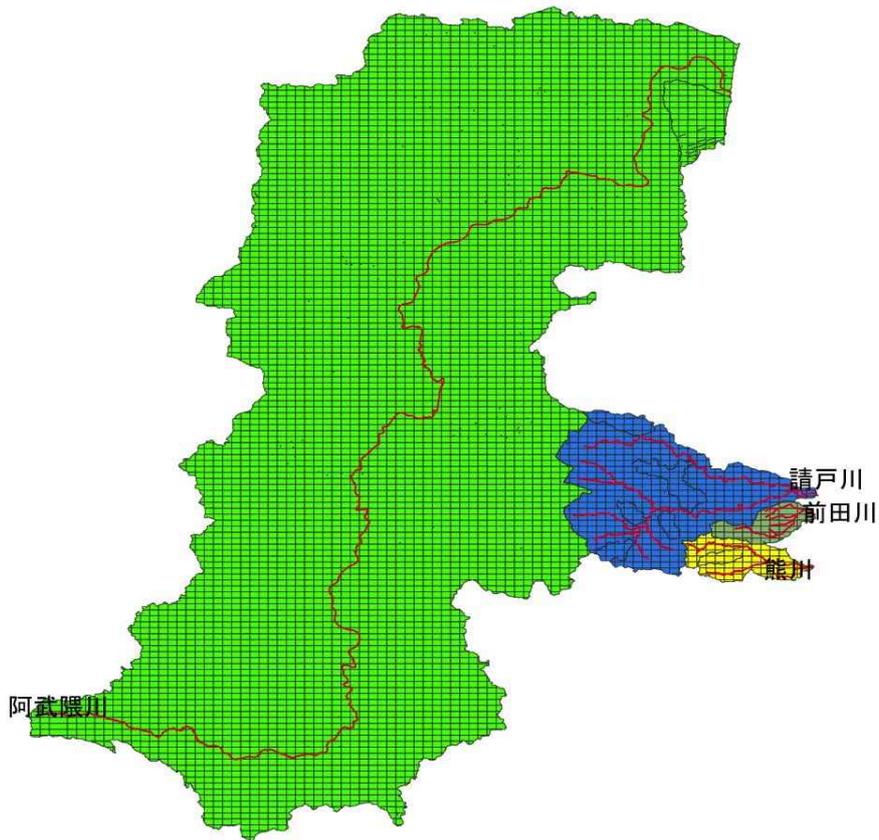


図 2-6 流域界の作成（作成完了時その 1）

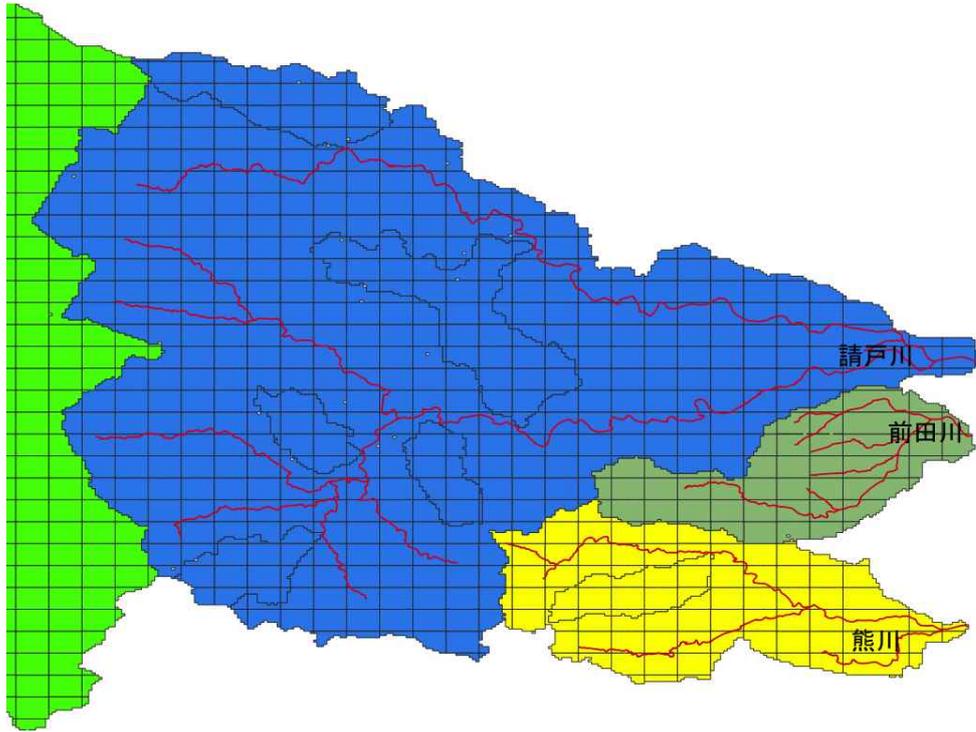


図 2.7 流域界の作成（作成完了時 その2）

2.1.5 データ：土地利用 (Land Use)

① ダウンロード

土地利用データとして、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 地球観測研究センター (EORC)が配布している日本域高解像度土地利用土地被覆図【2014～2016年】(バージョン 18.03) を取得した。WEB サイトとデータの特徴は下記の通りである。

- WEB サイト：
『ALOS 利用推進研究プロジェクト>高解像度土地利用土地被覆図>日本域高解像度土地利用土地被覆図【2014～2016年】(バージョン 18.03)』
仕様解説：
https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/lulc/lulc_v1803_j.htm
ダウンロードサイト：
https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/data/index_j.htm
- 内容：
JAXA により提供されている土地被覆分類図データ。
- 座標系：
緯度経度直交座標系 (GRS80 楕円体、ITRF94)
EPSG:4612 - JGD2000
- メッシュサイズ：
メッシュサイズ: (1/4,000) 度 × (1/4,000) 度 (およそ 30m × 30m に相当)
- ファイル命名規則：
例えば、LC_N45E142.tif は北緯 45 から 46 度、東経 142 から 143 度を示します。
- データフォーマット：
GeoTIFF 形式
- 画素のデジタル値：
画素デジタル値のデータタイプは 8bit 符号なし整数 (Byte) である。そして、その値は分類カテゴリの ID 番号に対応する (表 2-9 参照)。

表 2-9 画素デジタル値と分類カテゴリの対応

ID 番号	分類カテゴリ
0	未分類 (Unclassified)
1	水域 (Water)
2	都市 (Urban and built-up)
3	水田 (Rice paddy)
4	畑地 (Crops)
5	草地 (Grassland)
6	落葉広葉樹 (DBF)
7	落葉針葉樹 (DNF)
8	常緑広葉樹 (EBF)
9	常緑針葉樹 (ENF)
10	裸地 (Bare land)
255	データなし (No data)

今回の業務において、WEB サイトから次の zip ファイルをダウンロードした。

- 日本域 30m 解像度土地利用土地被覆図【2014～2016年】(バージョン 18.03)
「ver1803_LC_GeoTiff.zip」

High-Resolution Land Use and Land Cover Map Products

- > Home > データセット > 高解像度土地利用土地被覆図 > ダウンロード
- > 日本域 30m 解像度土地利用土地被覆図【2014～2016年】(バージョン 18.03)
- > 全域一括ダウンロード
- > 30m 相当解像度版日本全域 GeoTiff 形式データ (107MB)

https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/data/ver1803_LC_GeoTiff.zip

② データ加工

1.5.1 でダウンロードした「ver1803_LC_GeoTiff.zip」は、表 2-10 に示したように、日本列島全域を包括する小領域の土地利用データの集合である。今回の業務においては、解析対象となる 4 河川(阿武隈川、請戸川、前田川、熊川)を包括する範囲の土地利用データを作成するために、表 2-11 でリストアップした GeoTiff ファイルを利用した。

土地利用データの作成では 2.8 で記載した手順に従い、QGIS により複数の GeoTiff ファイルを結合した。このとき、結合ラスタのデータタイプは「8bit 符号なし整数 (Byte)」として指定することに注意すること。

また、QGIS で可視化した結果を図 2-8、図 2-9 に示した。

表 2-10 ダウンロードした土地利用データ「ver1803_LC_GeoTiff.zip」

LC_N20E136.tif	LC_N31E131.tif	LC_N35E135.tif	LC_N41E139.tif
LC_N24E122.tif	LC_N32E128.tif	LC_N35E136.tif	LC_N41E140.tif
LC_N24E123.tif	LC_N32E129.tif	LC_N35E137.tif	LC_N41E141.tif
LC_N24E124.tif	LC_N32E130.tif	LC_N35E138.tif	LC_N41E143.tif
LC_N24E125.tif	LC_N32E131.tif	LC_N35E139.tif	LC_N42E139.tif
LC_N24E131.tif	LC_N32E132.tif	LC_N35E140.tif	LC_N42E140.tif
LC_N24E141.tif	LC_N32E133.tif	LC_N36E132.tif	LC_N42E141.tif
LC_N24E153.tif	LC_N32E139.tif	LC_N36E133.tif	LC_N42E142.tif
LC_N25E123.tif	LC_N33E128.tif	LC_N36E135.tif	LC_N42E143.tif
LC_N25E124.tif	LC_N33E129.tif	LC_N36E136.tif	LC_N42E144.tif
LC_N25E131.tif	LC_N33E130.tif	LC_N36E137.tif	LC_N42E145.tif
LC_N25E141.tif	LC_N33E131.tif	LC_N36E138.tif	LC_N43E140.tif
LC_N26E126.tif	LC_N33E132.tif	LC_N36E139.tif	LC_N43E141.tif
LC_N26E127.tif	LC_N33E133.tif	LC_N36E140.tif	LC_N43E142.tif
LC_N26E128.tif	LC_N33E134.tif	LC_N37E131.tif	LC_N43E143.tif
LC_N26E142.tif	LC_N33E135.tif	LC_N37E136.tif	LC_N43E144.tif
LC_N27E127.tif	LC_N33E136.tif	LC_N37E137.tif	LC_N43E145.tif
LC_N27E128.tif	LC_N33E139.tif	LC_N37E138.tif	LC_N43E146.tif
LC_N27E129.tif	LC_N34E129.tif	LC_N37E139.tif	LC_N44E141.tif
LC_N27E140.tif	LC_N34E130.tif	LC_N37E140.tif	LC_N44E142.tif
LC_N27E142.tif	LC_N34E131.tif	LC_N37E141.tif	LC_N44E143.tif
LC_N28E128.tif	LC_N34E132.tif	LC_N38E138.tif	LC_N44E144.tif
LC_N28E129.tif	LC_N34E133.tif	LC_N38E139.tif	LC_N44E145.tif
LC_N28E130.tif	LC_N34E134.tif	LC_N38E140.tif	LC_N44E146.tif
LC_N29E129.tif	LC_N34E135.tif	LC_N38E141.tif	LC_N44E147.tif
LC_N30E129.tif	LC_N34E136.tif	LC_N39E139.tif	LC_N45E140.tif
LC_N30E130.tif	LC_N34E137.tif	LC_N39E140.tif	LC_N45E141.tif
LC_N30E131.tif	LC_N34E138.tif	LC_N39E141.tif	LC_N45E142.tif
LC_N30E140.tif	LC_N34E139.tif	LC_N39E142.tif	LC_N45E147.tif
LC_N31E128.tif	LC_N35E132.tif	LC_N40E139.tif	LC_N45E148.tif
LC_N31E129.tif	LC_N35E133.tif	LC_N40E140.tif	
LC_N31E130.tif	LC_N35E134.tif	LC_N40E141.tif	

表 2-11 今回の業務で使った GeoTiff ファイル（土地利用データ）のリスト

LC_N36E139.tif, LC_N36E140.tif, LC_N37E139.tif, LC_N37E140.tif, LC_N37E141.tif,
LC_N38E139.tif, LC_N38E140.tif, LC_N38E141.tif

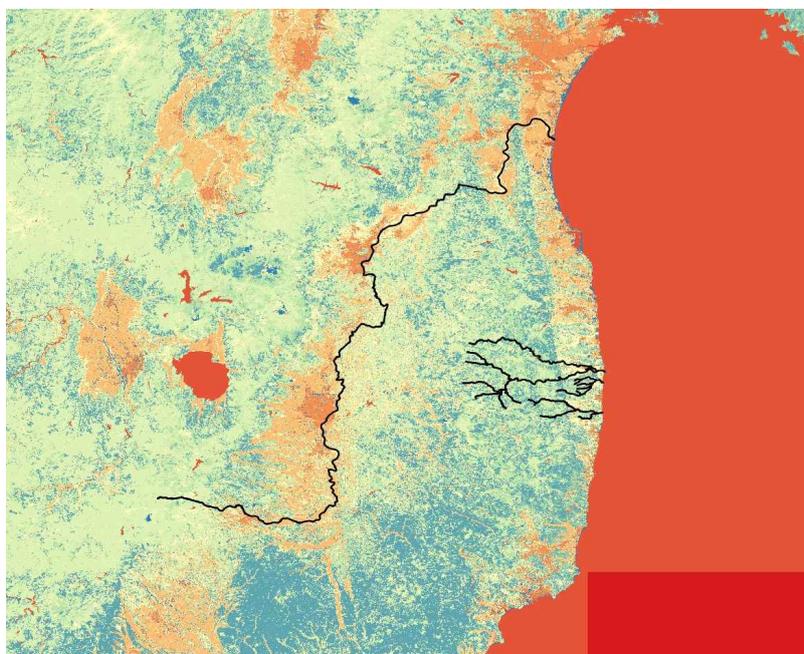


図 2-8 4 河川を包括する範囲の土地利用データ 福島県全域

※黒実線は 4 河川（阿武隈川、請戸川、前田川、熊川）

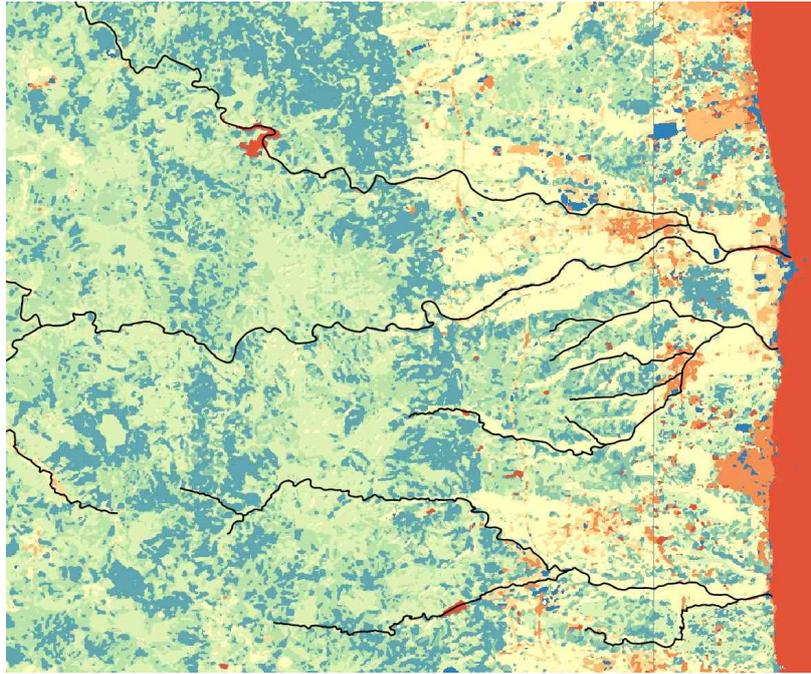


図 2-9 4 河川を包括する範囲の土地利用データ 3 河川（請戸川、前田川、熊川）部分拡大
※黒実線は 4 河川（請戸川、前田川、熊川）

2.1.6 データ：土壌 (Soil)

① ダウンロード

土壌図データとして、国土交通省の「50 万分の 1 土地分類基本調査」をダウンロードした。WEB サイトとデータの特徴は下記の通りである。

- WEB サイト：
『国土交通省＞土地分類調査・水調査＞50 万分の 1 土地分類基本調査＞土壌図 (soil.zip)』
ダウンロードサイト：
https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/l_national_map_50-1.html
- 内容：
国土全域の自然的要素（地形、表層地質、土壌）の類型区分を概括する目的で、土地の地形、表層地質、土壌を分類・調査し、縮尺 50 万分の 1 に相当する精度の地図をまとめたもの。
- 座標系：
EPSG:4612 - JGD2000
- データフォーマット：
シェープファイル形式
- 属性：

表 2-12 土壌図 (soil.zip) の属性

ID	属性
0	ID
1	NO
2	PREF
3	土壌区分名
4	SILNAME11
5	土壌大区分
6	SOINAME12
7	SOINAME22
8	SOINAME21

- 属性「土壌大区分」の値：

表 2-13 属性「土壌大区分」の値

土壌大区分
グライ土
ポトゾル
灰色低地土
褐色森林土
褐色低地土
岩屑土
黒ボク土
水面
赤黄色土
泥炭土
埋立地
未熟土
未定義
その他

また、QGIS で可視化した結果を図 2-10 と図 2-11、図 2-12 に示した。

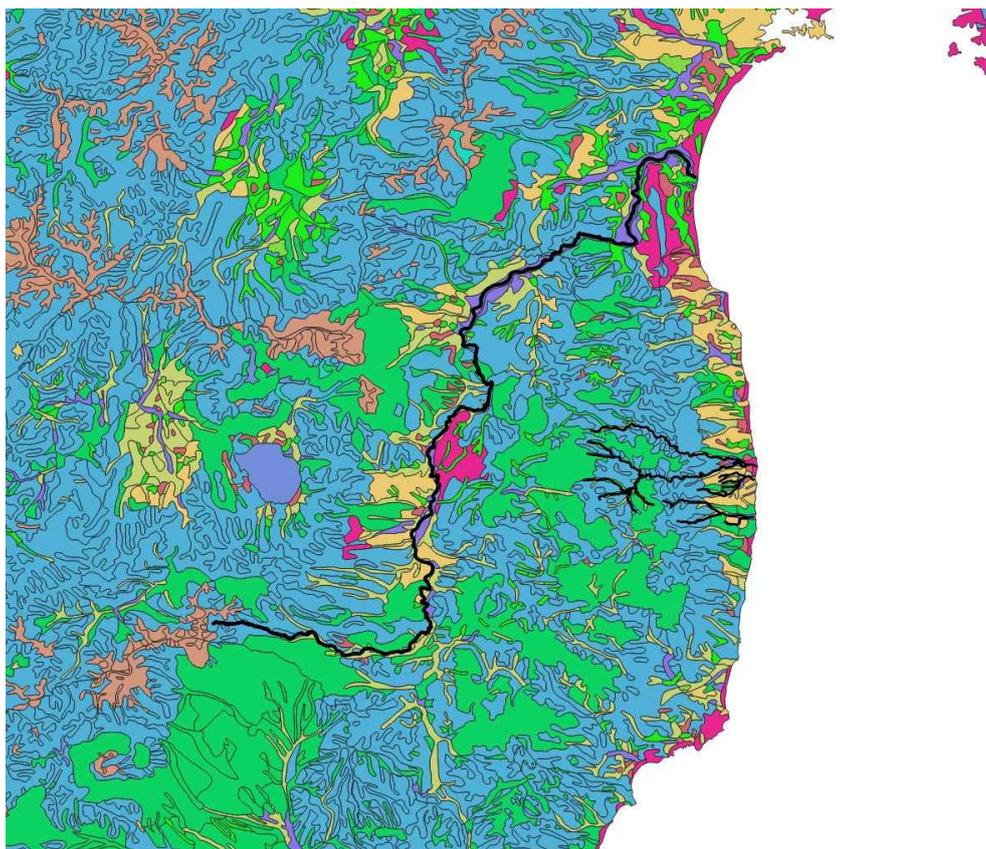


図 2-10 4 河川を包括する範囲の土壌図データ 福島県全域
 ※黒実線は 4 河川 (阿武隈川、請戸川、前田川、熊川)

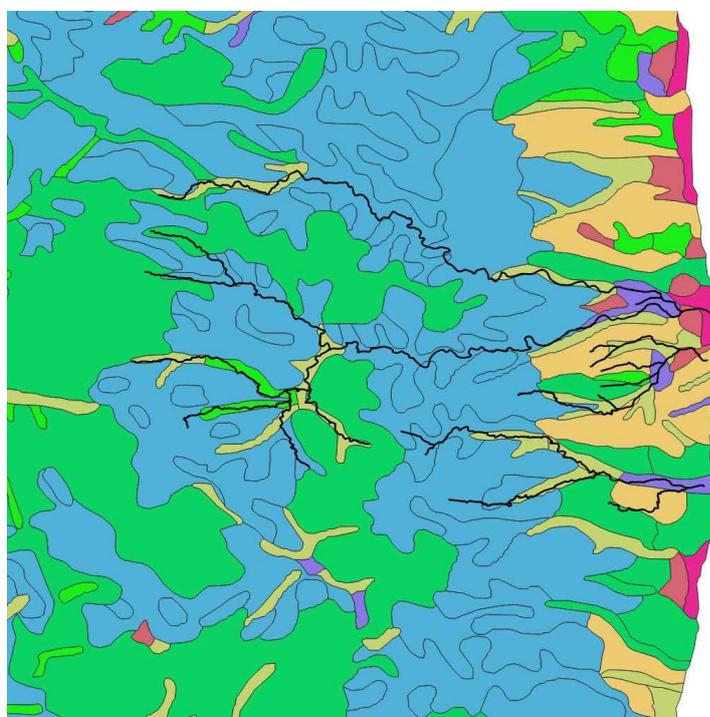


図 2-11 4 河川を包括する範囲の土壌図データ 3 河川 (請戸川、前田川、熊川) 部分拡大
 ※黒実線は 4 河川 (請戸川、前田川、熊川)

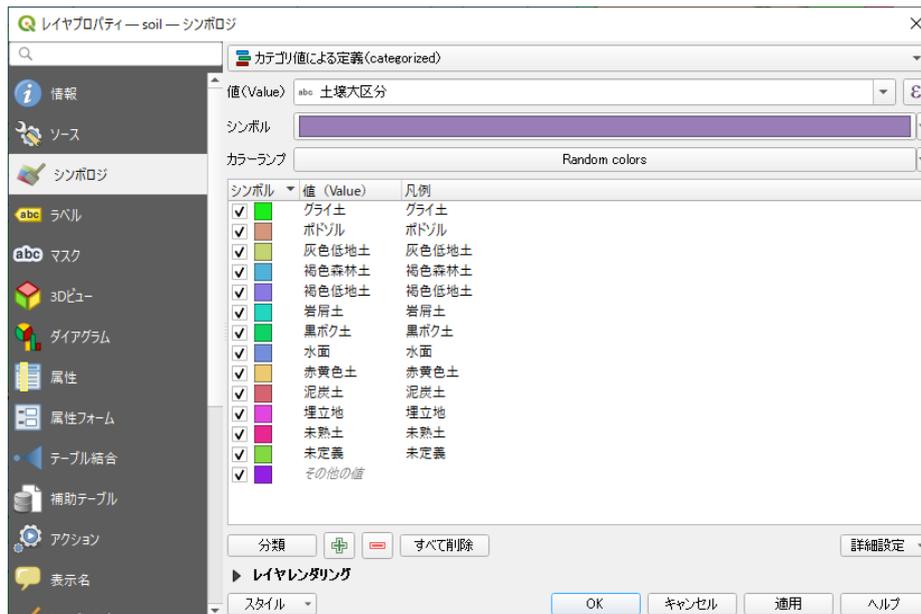


図 2-12 属性「土壌大区分」の凡例

2.1.7 データ：表層地質（Geology）

① ダウンロード

表層地質データとして、国土交通省の「50 万分の 1 土地分類基本調査」をダウンロードした。WEB サイトとデータの特徴は下記の通りである。

- WEB サイト：

『国土交通省＞土地分類調査・水調査＞50 万分の 1 土地分類基本調査＞表層地質図 (geology.zip)』

ダウンロードサイト：
https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/l_national_map_50-1.html
- 内容：

国土全域の自然的要素（地形、表層地質、土壌）の類型区分を概括する目的で、土地の地形、表層地質、土壌を分類・調査し、縮尺 50 万分の 1 に相当する精度の地図をまとめたもの。
- 座標系：

EPSG:4612 - JGD2000
- データフォーマット：

シェープファイル形式

- 属性：

表 2-14 表層地質図 (geology.zip) の属性

ID	属性
0	ID
1	NO
2	PREF
3	地質記号
4	地質区分名
5	地質区分 2
6	地質区分 3
7	地質時代 1
8	地質時代 2
9	地質時代 3

- 属性「地質区分名」の値：

表 2-15 属性「地質区分名」の値

地質区分名
安山岩類
火山灰・ローム
花崗岩類
結晶片岩類
玄武岩類
洪積砂礫(段丘堆積物を含む)
砂岩・泥岩・礫岩など
砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
砂岩・頁岩・礫岩など
砂丘砂
砂礫・粘土
蛇紋岩・橄欖岩
水域
石灰岩
粘板岩・砂岩・チャート・シヤールスタイン (輝緑凝灰岩)
斑れい岩・輝緑岩
片麻岩類
埋立地
溶結凝灰岩
流紋岩類
その他

また、QGIS で可視化した結果を図 2-13 と図 2-14、図 2-15 に示した。

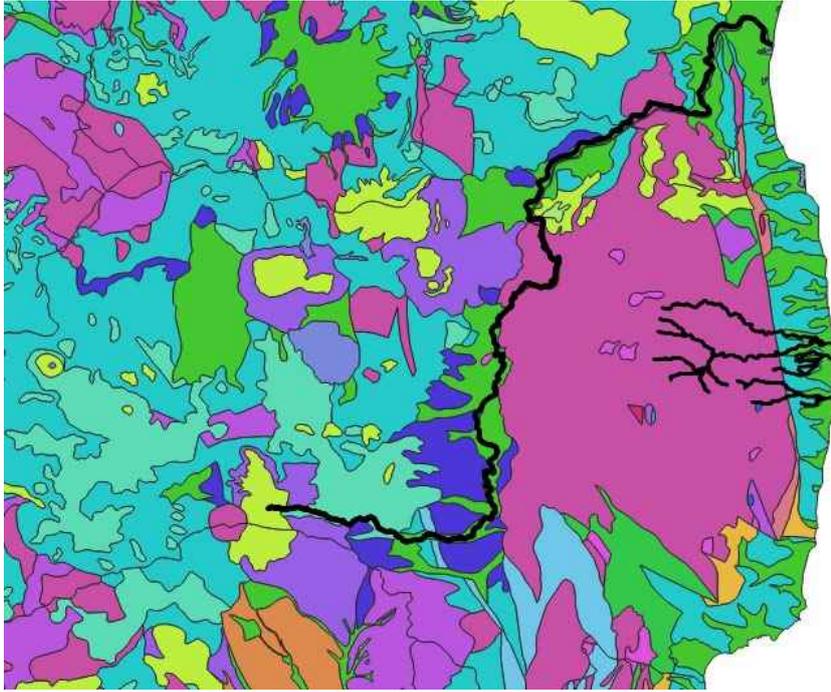


図 2-13 4 河川を包括する範囲の表層地質図データ 福島県全域
 ※黒実線は 4 河川（阿武隈川、請戸川、前田川、熊川）

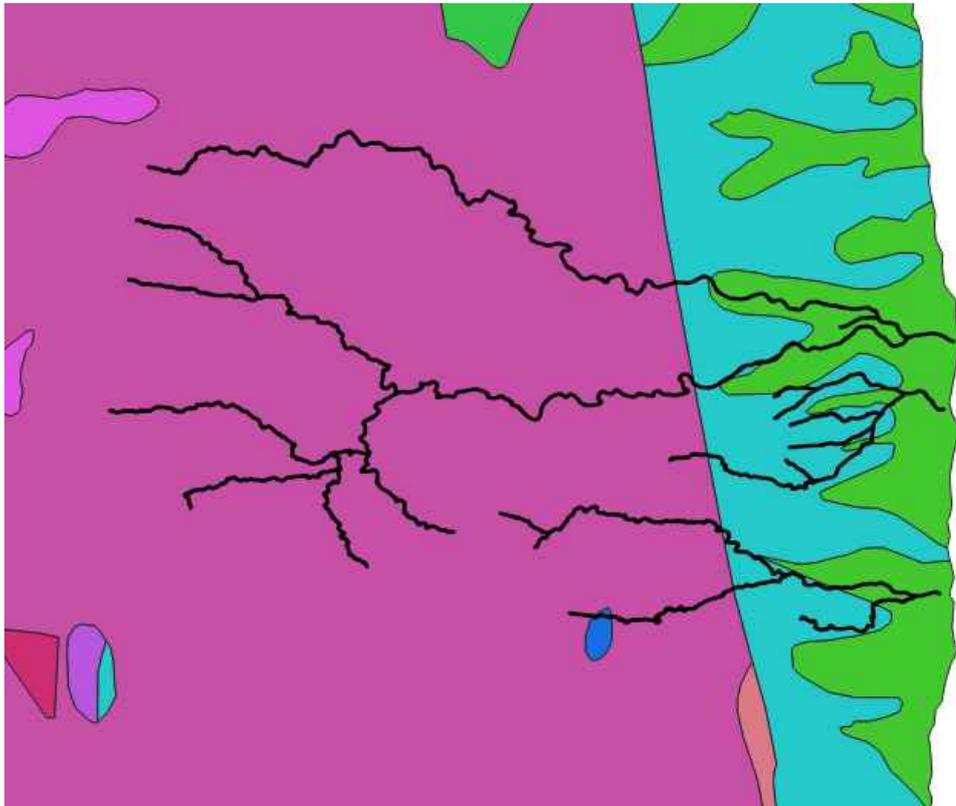


図 2-14 4 河川を包括する範囲の表層地質図データ 3 河川（請戸川、前田川、熊川）部分拡大
 ※黒実線は 4 河川（請戸川、前田川、熊川）

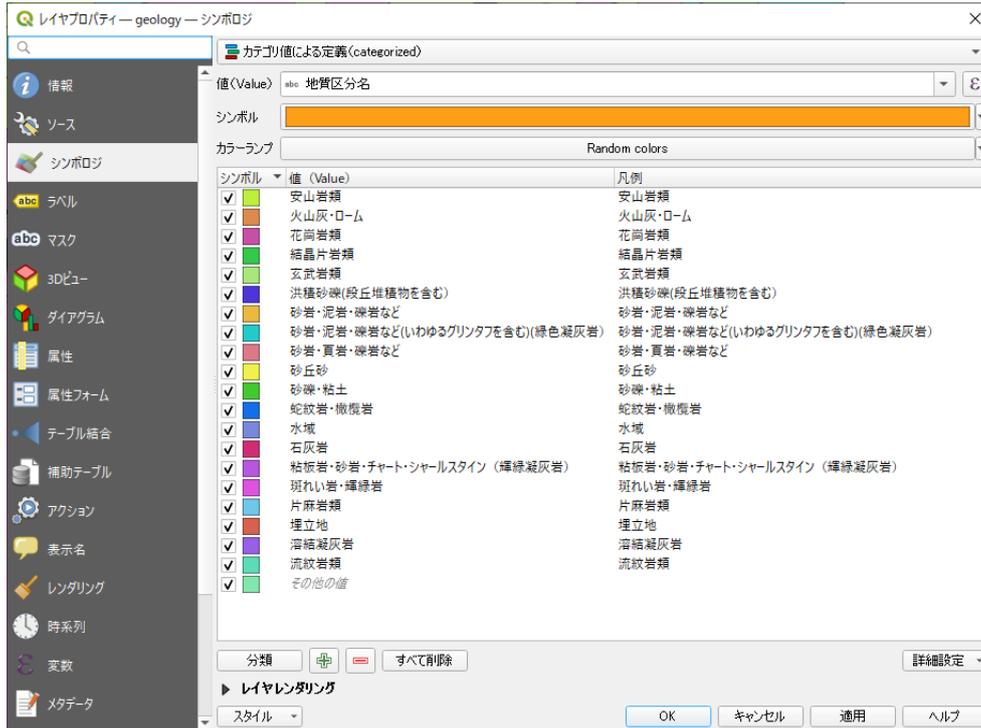


図 2-15 属性「地質区分名」の凡例

2.2 RADFLOW(version1.2.5)の改修

2.2.1 プログラム変更点

- テーブルデータの読み込み機能

GIS から得た地理空間情報の分布をもとに、RADFLOW のモデル定数（透水係数、間隙率、マニング粗度係数）を設定できる機能を組み込んだ。詳細は 3.3 「RADFLOW への機能組み込み 1（テーブルデータの読み込み機能）」を参照すること。

- 時刻刻みの動的変更機能

降雨量に応じて、時刻刻みは動的に変更する機能を組み込んだ。詳細は 3.4 「RADFLOW への機能組み込み 2（時刻刻みの動的変更機能）」を参照すること。

- 流出量のモニタリング機能

流出量のモニタリングエッジを複数設定できるように改修した。具体的には、RADFLOW の入力制御ファイル「input.dat」について、namelist"control"の中に項目"monitoring_discharge_file"を追加して、この項目で指定したファイル内でモニタリングエッジを指定できるようにした。（File 2-1 参照）

File 2-1 入力制御ファイル「input.dat」

```
...omitted...
&control
  calculation_time = 15552000.0 !sec 180.0 day
  delta_t = 20d0 !sec
  output_interval = 2592000.0 !sec 30.0 day
  output_file = 'res'
  calc_debris = 'yes'
  calc_radioactive = 'yes'
  id_edge_discharge = -1
  monitoring_discharge_file = "monitoring_edge.dat"
  restart_file = 'restart¥sp3_res_15768000.dat'
/
...omitted...
```

※id_edge_discharge=-1 のときに、

エッジ定義ファイルは File 2-2 のようなフォーマットで記載する。つまり、

- num_edge でエッジの数
- id_shift で指定した値だけノード番号をシフトする。
- 3 行名以降は、エッジの両端を構成する 2 点のノード番号の組を指定する。

File 2-2 エッジ定義ファイル「monitoring_discharge_file」

```
num_edge, 2
id_shift, 1
116, 428
49, 100
```

この例では、ノード番号 117 と 429 を繋ぐエッジと、ノード番号 50 と 101 を繋ぐエッジについて、流出量のモニタリングデータが出力される。

2.3 テーブルデータの作成方法

2.3.1 テーブルデータの自動作成スクリプト (GeoTIFF 版)

① 概要

ユーザーが設定したノード位置に対して地理空間情報を自動検索する Python スクリプトを作成した。このスクリプトは、入力データとして制御ファイルとノード座標値のリスト、GeoTIFF 形式の地理空間情報の計 3 ファイルを受け取り、出力として各ノードと地理空間情報の対応表 (CSV) を返す。

スクリプトの動作イメージを図 2-16 に示す。

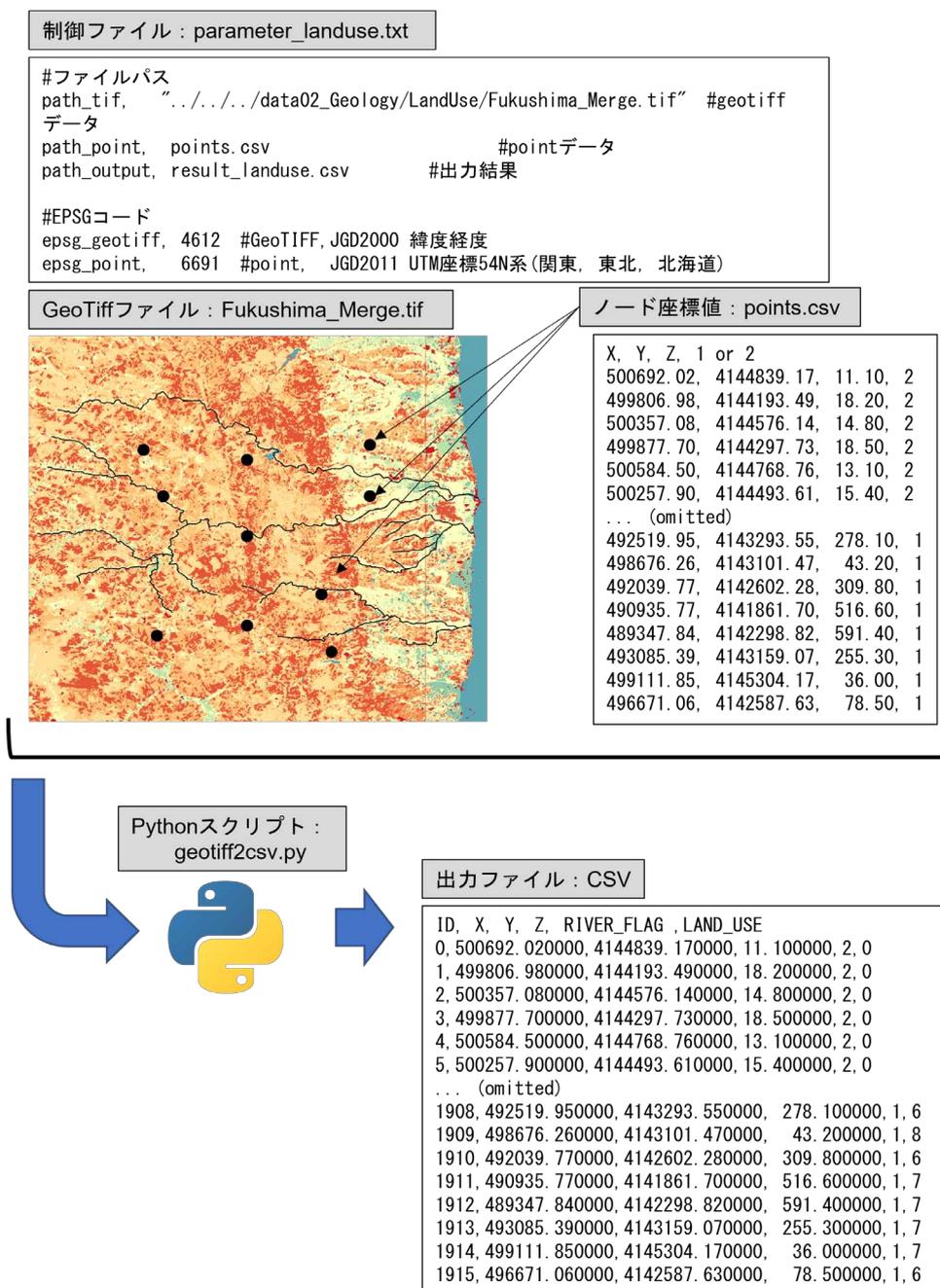


図 2-16 Python スクリプト「geotiff2csv.py」の動作イメージ

② スクリプト仕様

【スクリプト名】

- geotiff2csv.py

【入力ファイル】

Python スクリプト「geotiff2csv.py」の入力として以下の3ファイルを与える。

- 制御ファイル
- 土地利用データファイル (GeoTIFF 形式)
- ノード座標値のリスト (CSV 形式)

制御ファイルは、スクリプトのコマンドライン引数として与える。制御ファイルには、File 2-3 で示したように、各項目に対応した制御情報を指定する。

- path_tif : 土地利用データのファイルパス
- path_point : ノード座標値リストのファイルパス
- path_output : 出力結果のファイルパス
- epsg_geotiff : 土地利用データの測地系/座標系情報 (EPSG コードで指定)
- epsg_point : ノード座標値の測地系/座標系情報 (EPSG コードで指定)

File 2-3 「geotiff2csv.py」の制御ファイル

```
#ファイルパス
path_tif,  "../.../data02_Geology/LandUse/Fukushima_Merge.tif" #geotiff データ
path_point,  points.csv #point データ
path_output, result_landuse.csv #出力結果

#EPSG コード
epsg_geotiff, 4612 #GeoTIFF,JGD2000 緯度経度
epsg_point, 6691 #point, JGD2011 UTM 座標 54N 系(関東, 東北, 北海道)
```

※先頭カラムが「#」の行と、空行は処理に影響しない。

土地利用データは 1.5 「データ：土地利用 (Land Use)」でダウンロードした GeoTIFF ファイルを与える。

ノード座標値のリスト (CSV) は File 2-4 のような形式で与える。ただし、Z 座標値は読み込むものの、スクリプトの内部処理では使われない。

- 「X, Y, Z」のカラム：ノード座標値を設定
- 「1 or 2」のカラム：RADFLOW において「河川ノード」の場合は「2」を指定する。それ以外の場合は「1」を指定する。

File 2-4 「geotiff2csv.py」のノード座標値のリスト (CSV 形式)

```
X, Y, Z, 1 or 2
500692.02, 4144839.17, 11.10, 2
499806.98, 4144193.49, 18.20, 2
500357.08, 4144576.14, 14.80, 2
499877.70, 4144297.73, 18.50, 2
500584.50, 4144768.76, 13.10, 2
500257.90, 4144493.61, 15.40, 2

...omitted

492519.95, 4143293.55, 278.10, 1
498676.26, 4143101.47, 43.20, 1
492039.77, 4142602.28, 309.80, 1
490935.77, 4141861.70, 516.60, 1
489347.84, 4142298.82, 591.40, 1
493085.39, 4143159.07, 255.30, 1
499111.85, 4145304.17, 36.00, 1
496671.06, 4142587.63, 78.50, 1
```

【出力ファイル】

Python スクリプト「geotiff2csv.py」の出力は、以下の1ファイルである。

- 各ノードと地理空間情報の対応表の CSV ファイル
 ※制御ファイルの項目「path_output」で指定したファイルパスに生成される。

出力ファイルは File 2-5 のような形式で与えられる。

- 「ID」のカラム：ノードのインデックス
- 「X, Y, Z」のカラム：ノード座標値
- 「RIVER_FLAG」のカラム：「河川ノード」の場合は「2」、それ以外は「1」
- 「LAND_USE」のカラム：土地利用データの分類カテゴリの ID 番号 (1.5.1 の表 2.9 を参照すること。) ただし、「河川ノード」の場合は「0」が割り当てられる。

File 2-5 「geotiff2csv.py」の出力ファイル

```
ID, X, Y, Z, RIVER_FLAG, LAND_USE
0,500692.020000,4144839.170000,11.100000,2,0
1,499806.980000,4144193.490000,18.200000,2,0
2,500357.080000,4144576.140000,14.800000,2,0
3,499877.700000,4144297.730000,18.500000,2,0
4,500584.500000,4144768.760000,13.100000,2,0
5,500257.900000,4144493.610000,15.400000,2,0

...omitted

1908,492519.950000,4143293.550000,278.100000,1,6
1909,498676.260000,4143101.470000,43.200000,1,8
1910,492039.770000,4142602.280000,309.800000,1,6
1911,490935.770000,4141861.700000,516.600000,1,7
1912,489347.840000,4142298.820000,591.400000,1,7
1913,493085.390000,4143159.070000,255.300000,1,7
1914,499111.850000,4145304.170000,36.000000,1,7
1915,496671.060000,4142587.630000,78.500000,1,6
```

③ 動作環境

この Python スクリプトは GDAL モジュールを利用しており、別途このモジュールをダウンロードする必要がある。今回は下記のバージョンの Python と GDAL モジュール (wheel ファイル) を使用した。

Python : 3.7.5

GDAL : 「GDAL-3.3.2-cp37-cp37m-win_amd64.whl」

なお、GDAL の wheel ファイルは次の WEB サイトから取得できる。

WEB サイト『Unofficial Windows Binaries for Python Extension Packages@Christoph Gohlke』

<https://www.lfd.uci.edu/~gohlke/pythonlibs/#gdal>

2.3.2 テーブルデータの自動作成スクリプト (shp 版)

ユーザーが設定したノード位置に対して地理空間情報を自動検索する Python スクリプトを作成した。このスクリプトは、入力データとして制御ファイルとノード座標値のリスト、shp 形式の地理空間情報の計 3 ファイルを受け取り、出力として各ノードと地理空間情報の対応表 (CSV) を返す。

スクリプトの動作イメージを図 2-17 に示す。

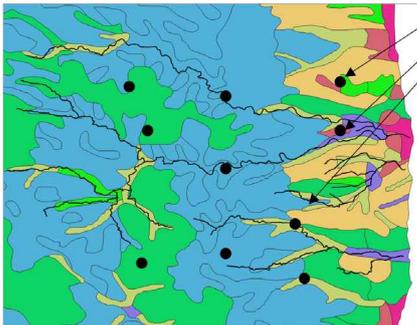
制御ファイル : parameter_soil.txt

```
#ファイルパス
path_shp, ".../.../data02_Geology%Soil%soil%/soil.shp" #shpデータ
path_point, points.csv #pointデータ
path_output, result_soil.csv #出力結果

#EPSGコード
EPSG_shp, 4612 #shp, JGD2000 緯度経度
EPSG_point, 6691 #point, JGD2011 UTM座標54N系(関東, 東北, 北海道)

#参照する属性ラベル
attribute_label, "土壤大区分"
```

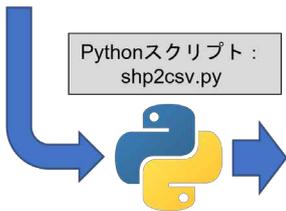
shpファイル : soil.shp



ノード座標値 : points.csv

```
X, Y, Z, 1 or 2
500692.02, 4144839.17, 11.10, 2
499806.98, 4144193.49, 18.20, 2
500357.08, 4144576.14, 14.80, 2
499877.70, 4144297.73, 18.50, 2
500584.50, 4144768.76, 13.10, 2
500257.90, 4144493.61, 15.40, 2
... (omitted)
492519.95, 4143293.55, 278.10, 1
498676.26, 4143101.47, 43.20, 1
492039.77, 4142602.28, 309.80, 1
490935.77, 4141861.70, 516.60, 1
489347.84, 4142298.82, 591.40, 1
493085.39, 4143159.07, 255.30, 1
499111.85, 4145304.17, 36.00, 1
496671.06, 4142587.63, 78.50, 1
```

Pythonスクリプト : shp2csv.py



出力ファイル : CSV

ID.	X.	Y.	Z.	FLAG_RIVER.	LABEL
0.	500692.02000,	4144839.17000,	11.10000,	2.	褐色低地土
1.	499806.98000,	4144193.49000,	18.20000,	2.	グライ土
2.	500357.08000,	4144576.14000,	14.80000,	2.	褐色低地土
3.	499877.70000,	4144297.73000,	18.50000,	2.	グライ土
4.	500584.50000,	4144768.76000,	13.10000,	2.	褐色低地土
5.	500257.90000,	4144493.61000,	15.40000,	2.	グライ土
...	(omitted)				
1908.	492519.95000,	4143293.55000,	278.10000,	1.	褐色森林土
1909.	498676.26000,	4143101.47000,	43.20000,	1.	灰色低地土
1910.	492039.77000,	4142602.28000,	309.80000,	1.	褐色森林土
1911.	490935.77000,	4141861.70000,	516.60000,	1.	褐色森林土
1912.	489347.84000,	4142298.82000,	591.40000,	1.	褐色森林土
1913.	493085.39000,	4143159.07000,	255.30000,	1.	褐色森林土
1914.	499111.85000,	4145304.17000,	36.00000,	1.	赤黄色土
1915.	496671.06000,	4142587.63000,	78.50000,	1.	褐色森林土

図 2-17 Python スクリプト「shp2csv.py」の動作イメージ (土壤図「soil.shp」の場合)

① スクリプト仕様

【スクリプト名】

- shp2csv.py

【入力ファイル】

Python スクリプト「shp2csv.py」の入力として以下の3ファイルを与える。

- 制御ファイル
- shp ファイル（土壌図データもしくは表層地質図データ）
- ノード座標値のリスト（CSV 形式）

制御ファイルは、スクリプトのコマンドライン引数として与える。制御ファイルには、File 2-6 で示したように、各項目に対応した制御情報を指定する。

- path_shp : 土壌図データもしくは表層地質図データのファイルパス（shp ファイル）
- path_point : ノード座標値リストのファイルパス
- path_output : 出力結果のファイルパス
- epsg_shp : shp ファイルの測地系/座標系情報（EPSG コードで指定）
- epsg_point : ノード座標値の測地系/座標系情報（EPSG コードで指定）
- attribute_label : 検索する属性を与える。土壌図データの場合は「土壌大区分」を指定する。表層地質図データの場合は「地質区分名」を指定する。

File 2-6 「shp2csv.py」の制御ファイル

```
#ファイルパス
path_shp,    ".././../data02_Geology¥Soil¥soil¥/soil.shp" #shp データ
path_point,  points.csv           #point データ
path_output, result_soil.csv      #出力結果

#EPSG コード
EPSG_shp,    4612 #shp, JGD2000 緯度経度
EPSG_point,  6691 #point,JGD2011 UTM 座標 54N 系(関東, 東北, 北海道)

#参照する属性ラベル
attribute_label, "土壌大区分"
```

※先頭カラムが「#」の行と、空行は処理に影響しない。

shp ファイルは 1.6「データ：土壌（Soil）」、もしくは 1.7「データ：表層地質（Geology）」でダウンロードした shp 形式のファイルを与える。

ノード座標値のリスト（CSV）は File 2-7 のような形式で与える。ただし、「Z」と「1 or 2」カラムの情報は読み込むものの、スクリプトの内部処理では使われない。

- 「X, Y, Z」のカラム：ノード座標値を設定
- 「1 or 2」のカラム：RADFLOW において「河川ノード」の場合は「2」を指定する。それ以外の場合は「1」を指定する。

File 2-7 「shp2csv.py」のノード座標値のリスト (CSV形式)

```
X, Y, Z, 1 or 2
500692.02, 4144839.17, 11.10, 2
499806.98, 4144193.49, 18.20, 2
500357.08, 4144576.14, 14.80, 2
499877.70, 4144297.73, 18.50, 2
500584.50, 4144768.76, 13.10, 2
500257.90, 4144493.61, 15.40, 2

...omitted

492519.95, 4143293.55, 278.10, 1
498676.26, 4143101.47, 43.20, 1
492039.77, 4142602.28, 309.80, 1
490935.77, 4141861.70, 516.60, 1
489347.84, 4142298.82, 591.40, 1
493085.39, 4143159.07, 255.30, 1
499111.85, 4145304.17, 36.00, 1
496671.06, 4142587.63, 78.50, 1
```

【出力ファイル】

Python スクリプト「shp2csv.py」の出力は、以下の1ファイルである。

- 各ノードと地理空間情報の対応表の CSV ファイル
 ※制御ファイルの項目「path_output」で指定したファイルパスに生成される。

出力ファイルは File 2-8 のような形式で与えられる。

- 「ID」のカラム：ノードのインデックス
- 「X, Y, Z」のカラム：ノード座標値
- 「RIVER_FLAG」のカラム：「河川ノード」の場合は「2」、それ以外は「1」
- 「LABEL」のカラム：shp ファイルから検索された当該ノード位置での属性値。土壌図データの場合は属性「土壌大区分」の値が返る (表 2-13 参照)。表層地質図データの場合は属性「地質区分名」の値が返る (表 2-15 参照)。

File 2-8 「shp2csv.py」の出力ファイル

ID,	X,	Y,	Z,	FLAG_RIVER,	LABEL
0,	500692.02000,	4144839.17000,	11.10000,	2,	褐色低地土
1,	499806.98000,	4144193.49000,	18.20000,	2,	グライ土
2,	500357.08000,	4144576.14000,	14.80000,	2,	褐色低地土
3,	499877.70000,	4144297.73000,	18.50000,	2,	グライ土
4,	500584.50000,	4144768.76000,	13.10000,	2,	褐色低地土
5,	500257.90000,	4144493.61000,	15.40000,	2,	グライ土
...omitted					
1908,	492519.95000,	4143293.55000,	278.10000,	1,	褐色森林土
1909,	498676.26000,	4143101.47000,	43.20000,	1,	灰色低地土
1910,	492039.77000,	4142602.28000,	309.80000,	1,	褐色森林土
1911,	490935.77000,	4141861.70000,	516.60000,	1,	褐色森林土
1912,	489347.84000,	4142298.82000,	591.40000,	1,	褐色森林土
1913,	493085.39000,	4143159.07000,	255.30000,	1,	褐色森林土
1914,	499111.85000,	4145304.17000,	36.00000,	1,	赤黄色土
1915,	496671.06000,	4142587.63000,	78.50000,	1,	褐色森林土

② 動作環境

この Python スクリプトは GeoPandas モジュールを利用しており、別途このモジュールをダウンロードする必要がある。また、GeoPandas には Fiona モジュールが必要で、これが無いとインストールに失敗する。そして、Fiona には GDAL モジュールが必要で、これが無いと Fiona のインストールにも失敗する。従って、下記の順にインストールしていく。

- GDAL→Fiona→GeoPandas

今回は下記のバージョンを使用した。

Python : 3.7.5

GDAL : 「GDAL-3.3.2-cp37-cp37m-win_amd64.whl」

Fiona : 「Fiona-1.8.20-cp37-cp37m-win_amd64.whl」

GeoPandas : 0.10.2

なお、GDAL の wheel ファイルは次の WEB サイトから取得できる。

WEB サイト『Unofficial Windows Binaries for Python Extension Packages@Christoph Gohlke』
<https://www.lfd.uci.edu/~gohlke/pythonlibs/#gdal>

Fiona の wheel ファイルは次の WEB サイトから取得できる。

WEB サイト『Unofficial Windows Binaries for Python Extension Packages@Christoph Gohlke』
<https://www.lfd.uci.edu/~gohlke/pythonlibs/#fiona>

2.3.3 RADFLOW への機能組み込み 1 (テーブルデータの読み込み機能)

① 概要

地理空間情報の分布をもとに、RADFLOW のモデル定数 (透水係数、間隙率、マニング粗度係数) を設定できる機能を組み込む。具体的には、表層および地下 1-2 層は土地利用、3-5 層は土壌図、6 層以降は表層地質図をもとに、モデル定数をそれぞれ設定する。

地理空間情報の区分ごとのモデル定数 (透水係数、間隙率、マニング粗度係数) についてのテーブルデータは事前に作成して、それを RADFLOW に与えることとする。

② テーブルデータ (地理空間情報とモデル定数の対応)

表 2-17~表 2-19 に、地理空間情報の区分ごとのモデル定数 (透水係数、間隙率、マニング粗度係数) についてのテーブルデータを示す。それぞれの定数を設定する際に参考にした資料は表 2-16 の通りである。また、参考にした資料がなく、モデル定数を仮設定した箇所については表中で「仮定」と記載した。

表 2-16 参考文献リスト

番号	文献情報
抜粋 2-1	H25 GETFLOWS 報告書 →表 5.8 透水係数と有効間隙率と表 5.9 地質と水理条件(1)
抜粋 2-2	H25 GETFLOWS 報告書 →図 5.3 いろいろな岩の透水係数
抜粋 2-3	H25 GETFLOWS 報告書 →表 3.11 地下地質構造区分に与える水理物性値
抜粋 2-4	岩石・岩盤の透水係数 (その2) -コラム(Feel&Think) 地層科学研究所 →表 -1 岩石の透水係数と岩盤の透水係数の比較
抜粋 2-5	S2 GETFLOWS 報告書 →表 3-3 表層土壌 (層厚 1m) の基本条件 https://www.geolab.jp/column/2005/01/experiment-017.php
抜粋 2-6	社団法人 日本道路協会 道路土工-排水工指針 22 ページ → https://isabou.net/soft/petit/common/waterway/flowcalc/ReferRoughCoef.asp

表 2-17 テーブルデータ (土地利用データ)

属性ID	Label	ラベル	透水係数(m/s)	粗度係数	間隙率(-)	参考資料		
						透水係数	粗度係数	間隙率文献
0	River	河川	1.00E-04	0.030	0.50	抜粋2-3	抜粋2-6	仮定
1	Water	水域	1.00E-04	0.030	0.50	仮定	抜粋2-6	仮定
2	Urban	都市	1.00E-06	0.300	0.25	抜粋2-5	抜粋2-6	抜粋2-5
3	Rice paddy	水田	1.00E-07	0.100	0.20	抜粋2-5	抜粋2-6	抜粋2-5
4	Crop	畑地	1.00E-03	0.300	0.50	抜粋2-5	仮定	抜粋2-5
5	Grassland	草地	1.00E-03	0.300	0.50	抜粋2-5	仮定	抜粋2-5
6	Deciduous broad-leaved forest	落葉広葉樹(DBF)	1.00E-03	0.500	0.50	抜粋2-5	仮定	抜粋2-5
7	Deciduous needle-leaved forest	落葉針葉樹(DNF)	1.00E-03	0.500	0.50	抜粋2-5	仮定	抜粋2-5
8	Evergreen broad-leaved forest	常緑広葉樹(EBF)	1.00E-03	0.500	0.50	抜粋2-5	仮定	抜粋2-5
9	Evergreen needle-leaved forest	常緑針葉樹(ENF)	1.00E-03	0.500	0.50	抜粋2-5	仮定	抜粋2-5
10	Bare land	裸地	1.00E-03	0.300	0.50	仮定	仮定	仮定
11	Snow and ice	雪氷	1.00E-03	0.300	0.50	仮定	仮定	仮定
253	Other	その他	1.00E-04	0.030	0.50	仮定	仮定	仮定
255	No data	データなし	1.00E-04	0.030	0.50	仮定	仮定	仮定

表 2-18 テーブルデータ (土壌図データ)

Label	透水係数(m/s)	間隙率(-)	参考資料	
			透水係数	間隙率
グライ土	1.00E-07	0.20	抜粋2 - 5	抜粋2 - 5
ポドゾル	1.00E-04	0.30	農研機構日本土壌インベントリー	仮定
灰色低地土	1.00E-07	0.20	抜粋2 - 5	抜粋2 - 5
褐色森林土	1.00E-03	0.50	抜粋2 - 5	抜粋2 - 5
褐色低地土	1.00E-03	0.50	農研機構日本土壌インベントリー	仮定
岩屑土	1.00E-03	0.50	農研機構日本土壌インベントリー	仮定
黒ボク土	1.00E-03	0.50	抜粋2 - 5	抜粋2 - 5
水面	1.00E-05	0.30	仮定	仮定
赤黄色土	1.00E-07	0.20	抜粋2 - 5	仮定
泥炭土	1.00E-05	0.70	抜粋2 - 5	抜粋2 - 5
埋立地	1.00E-05	0.70	仮定	仮定
未熟土	1.00E-03	0.50	農研機構日本土壌インベントリー	仮定
未定義	1.00E-04	0.30	仮定	仮定
その他	1.00E-04	0.30	仮定	仮定

表 2-19 テーブルデータ (表層地質図)

Label	透水係数(m/s)	間隙率(-)	参考資料	
			透水係数	間隙率
安山岩類	1.00E-06	0.10	抜粋2 - 2	抜粋2 - 1
火山灰・ローム	1.00E-07	0.60	1986_地下水学会誌_安池	抜粋2 - 1
花崗岩類	1.00E-09	0.25	抜粋2 - 2	抜粋2 - 1
結晶片岩類	1.00E-09	0.25	抜粋2 - 4	仮定
玄武岩類	1.00E-07	0.10	抜粋2 - 1	抜粋2 - 1
洪積砂礫(段丘堆積物を含む)	1.00E-06	0.30	仮定	仮定
砂岩・泥岩・礫岩など	1.00E-06	0.30	抜粋2 - 1、抜粋2-2	仮定
砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリーンタフを含む)(緑色凝灰岩)	1.00E-06	0.30	抜粋2 - 1、抜粋2-2	仮定
砂岩・頁岩・礫岩など	1.00E-06	0.10	抜粋2 - 1、抜粋2-2	抜粋2 - 1
砂丘砂	1.00E-06	0.30	仮定	仮定
砂礫・粘土	1.00E-05	0.30	抜粋2 - 1	仮定
蛇紋岩・橄欖岩	1.00E-08	0.30	仮定	仮定
水域	1.00E-06	0.30	仮定	仮定
石灰岩	1.00E-09	0.20	抜粋2 - 4	抜粋2 - 1
粘板岩・砂岩・チャート・シャルスタイン (輝緑凝灰岩)	1.00E-07	0.30	抜粋2 - 2	仮定
斑れい岩・輝緑岩	1.00E-08	0.15	仮定	抜粋2 - 1
片麻岩類	1.00E-09	0.30	抜粋2 - 2	仮定
埋立地	1.00E-07	0.30	仮定	仮定
溶結凝灰岩	1.00E-10	0.30	1992_応用地質_尾方ら	仮定
流紋岩類	1.00E-08	0.30	仮定	仮定
その他	1.00E-08	0.30	仮定	仮定

抜粋 2 - 1 「H25 GETFLOWS 報告書、表 5.8、表 5.9」

表 5.8 透水係数と有効間隙率

表3.1.1 透水係数と(有効)空隙率透水係数(水理公式引用46年版より)					岩 盤 (多数の実測値を整理した)					
透水係数 k (cm/sec)	10 ⁻¹⁰ 10 ⁻⁹ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁴ 10 ⁻³ 10 ⁻² 10 ⁻¹				岩 質	風化程度	空隙率 (%)	岩 質	風化程度	空隙率 (%)
	きれいな砂利	きれいな砂 きれいな砂と 砂利の混合	非常に細かい 砂、シルトな ど	不透水性の 土、粘土な ど						
未固結堆積物										
地 層	空隙率 (%)	有効空隙率 (%)	地 層	空隙率 (%)	有効空隙率 (%)	花崗岩	新成 かなり風化の 混んだもの	安山岩		1~7
沖積礫層	35	15	沖積砂礫層	30	15~20	はん れい岩	新成 かなり風化の 混んだもの	玄武岩	新成目ないもの 少し新成目 あるもの	0.1~5 5~7
細 砂	35	15	砂 層	35~40	30	石灰岩	新成 多孔質なもの	タフ (大谷石)	新成 多孔質なもの	20~25 25~50
中~細砂	30~35	20	ローム層	50~70	20	頁 岩	新成の粗いもの 粗成の粗いもの	砂 岩	新成の粗いもの 粗成の粗いもの	0.6~7 20~42
電柱土質層	45~50	15~20	泥層粘土層	50~70	5~10					

表 5.9 地質と水理条件(1)

11.17 地質と水理条件 (菅原 捷)

地 質	間 隙 率		透水係数の範囲 (cm/sec)	井戸産出量 高 中 低	帯水層単元の型
	1 次 的 (数字)	2 次 的 (感 應)			
未固結堆積物	%				
礫	30~40		—	—	帯水層
粗 砂	30~40		—	—	帯水層
中~細砂	30~35		—	—	帯水層
シルト	40~50	時としてまれ(泥 のフラック)	—	—	不透水層
固 結 堆 積 物					
石灰岩・白雲岩	1~50	節理、節理面	—	—	帯水層あるいは不透水層
粗~中粒砂岩	<20	節理、破碎	—	—	帯水層あるいは不透水層
細粒砂岩・泥岩	<10	節理、破碎	—	—	帯水層あるいは不透水層
頁岩・シルト岩	—	節理、破碎	—	—	不透水層あるいは帯水層
火 山 岩					
玄 武 岩	—	節理、破碎	—	—	帯水層あるいは不透水層
隱性火山岩	—		—	—	不透水層あるいは帯水層
結 晶 質 岩					
深成岩・変成岩		節理、破碎	—	—	不透水層あるいは帯水層

抜粋 2-2 「H25 GETFLOWS 報告書、図 5.3」

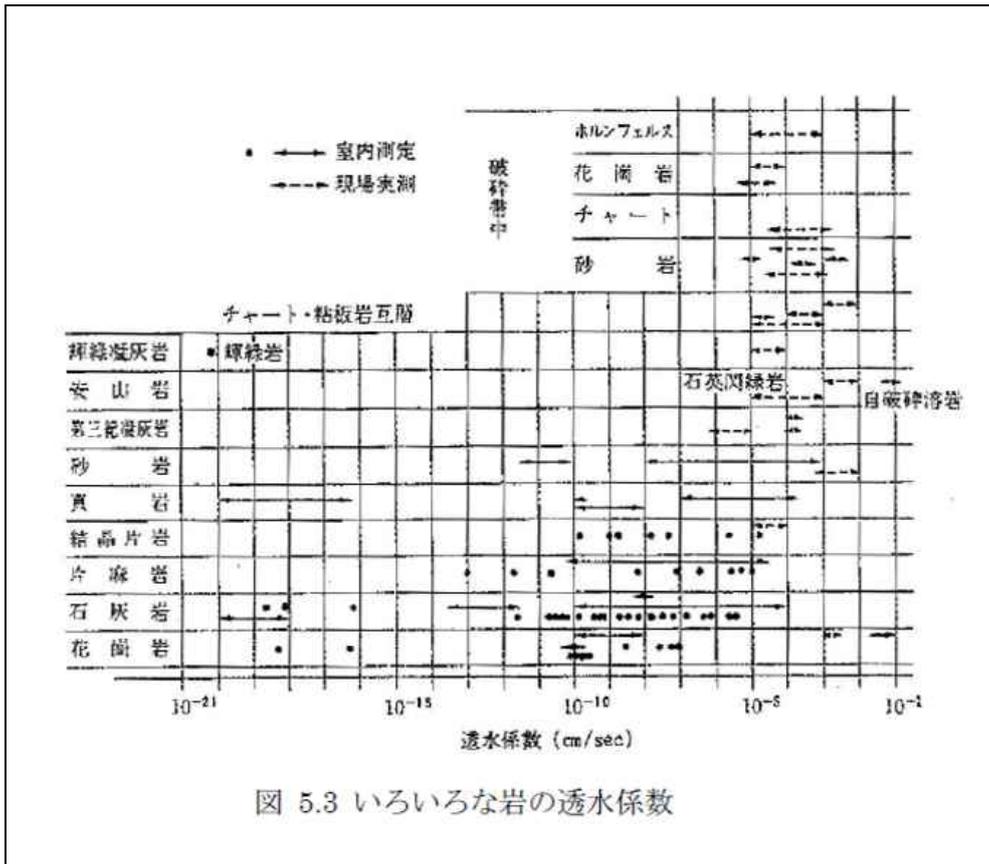


図 5.3 いろいろな岩の透水係数

抜粋 2-3 「地下地質構造区分に与える水理物性値、表 3.11」

表 3.11 地下地質構造区分に与える水理物性値

地質時代	区分	細区分	水理特性			厚さ (m)	備考		
			透水係数 (cm/s)	有効空隙率 (-)	不飽和物性				
完新世 (一部更新世)	表土層 (厚さ計 1m)	表層土壌	Tsu	分布地域の土地利用、植生及び土壌区分等により、水理物性を推定する (表 3.9 参照)	小	0.3	水田、畑地の耕土、森林の土壌層、市街地の道路舗装、建造物等。表層 2cm は土砂交換層 (可動層) とする。		
		一般部・ローム	Te			0.7 (一部 1.7m)			
	山間の 山腹斜面堆積物等	河床砂礫	Ag	1×10^{-2}	0.3	小	5	河川の中・上流部	
		山腹斜面堆積物	Dt	3×10^{-3}	0.3	中	5		
	海岸平野の 沖積層	地すべり土壌	La	3×10^{-3}	0.3	中	別途設定	海岸付近は考慮しない	
		砂の多い地域	As	$H: 1 \times 10^{-2}$ $V: 1 \times 10^{-3}$	0.3	中	コンタ	深度方向には一括 (上部砂層、中部粘土、基底砂・礫層) の区分をしない。粘土主体の地域と砂の多い地域を区分する。	
粘土主体地域		Ac	$H: 1 \times 10^{-3}$ $V: 1 \times 10^{-3}$	0.2	大				
更新世	段丘	低位段丘	Tl	3×10^{-4}	0.3	小	5	川成段丘、砂礫質 (L, M2, M3, M4)	
		中位段丘	Tm		0.3				
		海成段丘	Tmm		0.3				中
		高位段丘	Th		0.3				中
新第三紀 鮮新世	大年寺層 (仙台層群)	上部互層	Du	$H: 1 \times 10^{-3}$ $V: 1.1 \times 10^{-6}$	0.3	中	コンタ		
		中部泥岩層	Dm	1.1×10^{-6}	0.2	大	コンタ		
		下部砂岩層	Di	$H: 1 \times 10^{-4}$ $V: 1 \times 10^{-5}$	0.3	中	コンタ		
新第三紀中新世 ～ 中生代	基盤岩 大年寺層以外の岩盤	風化部	西部	Bw1	$H: 5 \times 10^{-5}$ $V: 1 \times 10^{-4}$	0.2	中	接谷面法を用いて風化基底面を推定	川畑断層西側、マサ状風化、厚い。尾根部で最大厚さ 100m 程度。
			東部	Bw2	1×10^{-4}	0.2	小		川畑断層東側、岩盤の地み、薄い。地形が戸出した部分で最大厚さ 50m 程度。
		新鮮部	Bf	1×10^{-6}	0.1	極小	花崗岩類、安山岩類、頁岩類、古第三紀層、大年寺層より下位の鮮第三紀層		

抜粋 2・4 「表-1 岩石の透水係数と岩盤の透水係数の比較、表-1」

	水温 20°C の時の岩の透水係数 (cm/sec)	
	室内試験	原位置試験
砂岩 (Sandstone)	$3 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-8}$
Navajo 砂岩	2×10^{-3}	
Berea 砂岩	4×10^{-5}	
グレーワッケ (Greywacke)	3.2×10^{-8}	
頁岩 (Shale)	$10^{-9} \sim 5 \times 10^{-13}$	$10^{-8} \sim 10^{-11}$
Pierre 頁岩	5×10^{-12}	$2 \times 10^{-9} \sim 5 \times 10^{-11}$
石灰岩, 苦灰岩	$10^{-5} \sim 10^{-13}$	$10^{-3} \sim 10^{-7}$
Salem 石灰岩	2×10^{-6}	
玄武岩 (Basalt)	10^{-12}	$10^{-3} \sim 10^{-7}$
花崗岩 (Granite)	$10^{-7} \sim 10^{-11}$	$10^{-4} \sim 10^{-9}$
片岩 (Schist)	10^{-8}	2×10^{-7}
き裂性片岩 (Fissured schist)	$1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$	

* Brace (1978), Davis De Wiest (1966), Serafim (1968) との文献からのデータ

表-1 岩石の透水係数と岩盤の透水係数の比較¹⁾

抜粋 2・5 「表層土壌 (層厚 1m) の基本条件、表 3-3」

表 3-3 表層土壌 (層厚 1m) の基本条件

土地利用・被覆 ・表層土壌	水理特性			土壌の粒度組成						
	透水係数 (cm/s)	有効 間隙率 (-)	2 相流 パラメータ	主たる組成	粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	礫
					φ5μm 以下	φ5~ 74μm	φ74μm ~ 0.25mm	φ0.25 ~ 0.5mm	φ0.5~ 2mm	φ2mm 以上
市街地	5×10^{-5}	0.25	C	-	-	-	-	-	-	-
緑の多い住宅地	5×10^{-3}	0.3			(地質に依存)					
水田	1×10^{-5}	0.2	A	粘土~シルト	0.2	0.6	0.1	0.05	0.05	-
山林・荒地・畑地 (グライ土壌分布域を 除く)	1×10^{-1}	0.5			(地質に依存)					
砂丘植生分布域	1×10^{-1}	0.5	B	細砂	-	0.3	0.5	0.2	-	-
畑地に分布するグライ 土・灰色低地土・黒ボ ク土等	1×10^{-1}	0.5	A	粘土~シルト	0.2	0.5	0.2	0.05	0.05	-
グライ土, 灰色低地土	1×10^{-5}	0.2	A	粘土~シルト	0.2	0.5	0.2	0.05	0.05	-
黒ボク土	1×10^{-1}	0.5	A	粘土~砂	0.1	0.4	0.2	0.2	0.1	-
泥炭~黒泥土	1×10^{-3}	0.7	A	粘土~シルト	0.2	0.6	0.2	-	-	-

マンニングの粗度係数 n			
水路の形式	水路の状況	n の範囲	n の標準値
カルバード	現場打ちコンクリート		0.015
	コンクリート管		0.013
	コルゲートメタル管 (1形)		0.024
	〃 (2形)		0.033
	〃 (ペーピングあり)		0.012
	塩化ビニル管		0.010
ライニングした水路	コンクリート2次製品		0.013
	鋼, 塗装なし, 平滑	0.011~0.014	0.012
	モルタル	0.011~0.015	0.013
	木, カンナ仕上げ	0.012~0.018	0.015
	コンクリート, コテ仕上げ	0.011~0.015	0.015
	コンクリート, 底面砂利	0.015~0.020	0.017
	石積み, モルタル目地	0.017~0.030	0.025
	空石積み	0.023~0.035	0.032
	アスファルト, 平滑	0.013	0.013
	ライニングなし水路	土, 直線, 等断面水路	0.016~0.025
土, 直線水路, 雑草あり		0.022~0.033	0.027
砂利, 直線水路		0.022~0.030	0.025
岩盤直線水路		0.025~0.040	0.035
自然水路	整正断面水路	0.025~0.033	0.030
	非常に不整正な断面, 雑草, 立木多し	0.075~0.150	0.100

社団法人 日本道路協会 道路土工—排水工指針 22ページ

③ 入力制御について

「RADFLOW_v1.2.5」の入力制御ファイル「input.dat」について、地質に関するモデル定数（透水係数、粗度係数、間隙率）の設定方法を下記の通り変更した。

- namelist として「geology_factor」の項目を新規に追加した。この項目内に、地質情報に関するパラメータを集約した。
- 「mode」では、「Uniformly」と「Distributedly」のどちらか一つを選択する。
 - 「Uniformly」であれば既存機能によって、各層に一様にモデル定数を設定する。
 - 「Distributedly」であれば、次の二種類のファイルの情報をもとに、地理空間情報の分布に応じたモデル定数を設定する。
 - ・ permiability_table_file
地理空間情報とモデル定数（透水係数、粗度係数、間隙率）の対応表
File 2-10 参照
 - ・ geometry_attribute_file
サンプル点での地理空間情報（土地利用図、土壌図、表層地質図）
File 2-11 参照

入力ファイル「input.at」について、新規追加した namelist 「geology_factor」の項目を File 2-9 に示した。モードの値（Uniformly/Distributedly）に依存して、計算に反映されるパラメータが異なること

に注意する（それぞれの枠囲み内のパラメータが反映される）。

File 2-9 入力制御ファイル「input.dat」

```

mode = "UNIFORMLY"

&geology_factor
  mode = " DISTRIBUTEDLY "
  ! "UNIFORMLY" or
  "DISTRIBUTEDLY"
  permeability= 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-5, 1d-8, 1d-8, 1d-10 !m/s      ! used at mode "UNIFORMLY"
  porosity      = 0.3d0, 0.3d0, 0.3d0, 0.3d0, 0.3d0, 0.3d0, 0.2d0, 0.2d0, 0.1d0      ! used at mode "UNIFORMLY"
  permeability_river=1d-6 !for 1-6 layers      ! used at mode "UNIFORMLY"
  permeability_paved=1d-6 !for 1-2 layers      ! used at mode "UNIFORMLY"
  factor_of_roughness_river  = 0.03d0      ! used at mode "UNIFORMLY"
  factor_of_roughness_forest = 0.5d0      ! used at mode "UNIFORMLY"
  factor_of_roughness_paved  = 0.1d0      ! used at mode "UNIFORMLY"
  factor_of_roughness_unpaved = 0.3d0      ! used at mode "UNIFORMLY"
  factor_of_roughness_others = 0.3d0      ! used at mode "UNIFORMLY"
  permeability_table_file = 'Table_PermeabilityCoefficient.dat' ! used at mode "DISTRIBUTEDLY"
  geometry_attribute_file = 'cs137_landuse_soil_geology.dat' ! used at mode "DISTRIBUTEDLY"
/
mode = "DISTRIBUTEDLY"
  
```

また、モード「Distributedly」について、入力が必要な2種類のファイルフォーマットを File 2-10 と File 2-11 に示した。特に、File 2-10 は地理空間情報とモデル定数に対応させるテーブルデータであり、表 2-17～表 2-19 を CSV 形式で一つのファイルにまとめたものである。

File 2-10 namelist 「geology_factor/permeability_table_file」で指定するファイルの情報

#land_use				
!	ATTRIBUTE_ID,	PERMIABILITY[M/S],	ROUGHNESS,	POROSITY[-],
	0,	1.00E-04,	0.030,	0.50,
	1,	1.00E-04,	0.030,	0.50,
	2,	1.00E-06,	0.300,	0.25,
	3,	1.00E-07,	0.100,	0.20,
	4,	1.00E-03,	0.300,	0.50,
	5,	1.00E-03,	0.300,	0.50,
	6,	1.00E-03,	0.500,	0.50,
	7,	1.00E-03,	0.500,	0.50,
	8,	1.00E-03,	0.500,	0.50,
	9,	1.00E-03,	0.500,	0.50,
	10,	1.00E-03,	0.300,	0.50,
	11,	1.00E-03,	0.300,	0.50,
	253,	1.00E-04,	0.030,	0.50,
	255,	1.00E-04,	0.030,	0.50,
#soil				
!	LABEL,	PERMIABILITY[M/S],	POROSITY[-],	
	グライ土,	1.00E-07,	0.20,	
	ポドゾル,	1.00E-04,	0.30,	
	灰色低地土,	1.00E-07,	0.20,	
	褐色森林土,	1.00E-03,	0.50,	
	褐色低地土,	1.00E-03,	0.50,	
	岩屑土,	1.00E-03,	0.50,	
	黒ボク土,	1.00E-03,	0.50,	
	水面,	1.00E-05,	0.30,	
	赤黄色土,	1.00E-07,	0.20,	
	泥炭土,	1.00E-05,	0.70,	
	埋立地,	1.00E-05,	0.70,	
	未熟土,	1.00E-03,	0.50,	
	未定義,	1.00E-04,	0.30,	
	その他,	1.00E-04,	0.30,	

#geology	PERMIABILITY[M/S],	POROSITY[-],
!LABEL,		
安山岩類,	1.00E-06,	0.10,
火山灰・ローム,	1.00E-07,	0.60,
花崗岩類,	1.00E-09,	0.25,
結晶片岩類,	1.00E-09,	0.25,
玄武岩類,	1.00E-07,	0.10,
洪積砂礫(段丘堆積物を含む),	1.00E-06,	0.30,
砂岩・泥岩・礫岩など,	1.00E-06,	0.30,
砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩),	1.00E-06,	0.30,
砂岩・頁岩・礫岩など,	1.00E-06,	0.10,
砂丘砂,	1.00E-06,	0.30,
砂礫・粘土,	1.00E-05,	0.30,
蛇紋岩・橄欖岩,	1.00E-08,	0.30,
水域,	1.00E-06,	0.30,
石灰岩,	1.00E-09,	0.20,
粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩),	1.00E-07,	0.30,
斑れい岩・輝緑岩,	1.00E-08,	0.15,
片麻岩類,	1.00E-09,	0.30,
埋立地,	1.00E-07,	0.30,
溶結凝灰岩,	1.00E-10,	0.30,
流紋岩類,	1.00E-08,	0.30,
その他,	1.00E-08,	0.30,

File 2-11 namelist 「geology_factor/ geometry_attribute_file」で指定するファイルの情報

IX	Y	Z	Cs-137	land_use	soil	geology
1916						
500692.0	4144839.2	11.1	0.0	0	褐色低地土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
499807.0	4144193.5	18.2	0.0	0	グライ土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
500357.1	4144576.1	14.8	0.0	0	褐色低地土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
499877.7	4144297.7	18.5	0.0	0	グライ土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
500584.5	4144768.8	13.1	0.0	0	褐色低地土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
500257.9	4144493.6	15.4	0.0	0	グライ土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
500461.0	4144653.3	14.9	0.0	0	褐色低地土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
500057.3	4144420.6	14.2	0.0	0	グライ土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
499686.8	4144164.1	18.0	0.0	0	グライ土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
498317.6	4142198.7	28.9	0.0	0	赤黄色土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
498353.9	4142326.6	28.0	0.0	0	灰色低地土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
498117.4	4142290.4	32.0	0.0	0	灰色低地土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
498527.4	4142434.7	26.3	0.0	0	灰色低地土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
... omitted						
496218.1	4145680.4	101.6	0.0	6	赤黄色土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
491417.2	4144217.1	313.1	0.0	7	褐色森林土	花崗岩類
494889.4	4143996.7	157.9	0.0	9	黒ボク土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
498507.3	4141814.7	70.3	0.0	6	赤黄色土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
500683.4	4145999.4	9.2	0.0	8	褐色低地土	砂礫・粘土
498113.7	4145430.1	55.6	0.0	5	赤黄色土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
489477.2	4144852.3	436.6	0.0	8	褐色森林土	花崗岩類
497777.0	4146923.5	47.2	0.0	8	赤黄色土	砂礫・粘土
492520.0	4143293.6	278.1	0.0	6	褐色森林土	花崗岩類
498676.3	4143101.5	43.2	0.0	8	灰色低地土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
492039.8	4142602.3	309.8	0.0	6	褐色森林土	花崗岩類
490935.8	4141861.7	516.6	0.0	7	褐色森林土	花崗岩類
489347.8	4142298.8	591.4	0.0	7	褐色森林土	花崗岩類
493085.4	4143159.1	255.3	0.0	7	褐色森林土	花崗岩類
499111.9	4145304.2	36.0	0.0	7	赤黄色土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)
496671.1	4142587.6	78.5	0.0	6	褐色森林土	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩)

④ データ構造と内部処理について (モード「Distributedly」の場合)

機能実装について、地理空間情報の区分とモデル定数(透水係数、間隙率、マニング粗度係数)の対応表を与えるデータ構造について説明する。まず、テーブルの各レコード(1行)を構成する派生型を SourceCode 2-1 のように定義した。土地利用データのテーブルでは、1レコードに対して属性番号、透

水係数、粗度係数、間隙率の 4 項目の情報が格納される。土壌図データもしくは表層地質図データのテーブルでは、1 レコードに対して属性ラベル、透水係数、間隙率の 3 項目の情報が格納される。

SourceCode 2-1 テーブルの 1 レコード分の派生型

```

! 土地利用テーブル用の派生型定義
type IdPerm
  integer:: attribute_id    ! 属性番号
  real(8):: perm           ! 透水係数
  real(8):: rough         ! 粗度係数
  real(8):: poro          ! 間隙率
end type

! 土壌図テーブルおよび表層地質図テーブル用の派生型定義
type LabelPerm
  character(len=MAXSTRING):: label ! 属性ラベル
  real(8):: perm           ! 透水係数
  real(8):: poro          ! 間隙率
end type

```

レコード派生型をひとまとめにして、一つのテーブルデータを構成するのが、配列「Table_LandUse, Table_Soil, Table_Geology」である (SourceCode 2-2 と図 2-18 参照)。また、ノードに対して、各地理空間情報の値をテーブルデータから参照するために用意した参照配列が「table_id_landuse, table_id_soil, table_id_geology」である (SourceCode 2-2 参照)。これらの参照配列は引数にノード ID を受け取り、戻り値としてテーブルデータ配列の ID を返す。

SourceCode 2-2 各地理空間情報のテーブルデータとアクセス用配列

```

! テーブルデータ
type(IdPerm) ,allocatable:: Table_LandUse(:)!(TableSize_L) 土地利用
type(LabelPerm),allocatable:: Table_Soil (:)!(TableSize_S) 土壌
type(LabelPerm),allocatable:: Table_Geology(:)!(TableSize_G) 表層地質

! テーブルにアクセスするための配列
integer, allocatable :: table_id_landuse(:)    !(nnode) 土地利用
integer, allocatable :: table_id_soil (:)      !(nnode) 土壌
integer, allocatable :: table_id_geology(:)    !(nnode) 表層地質

```

実際に、ノード ID からテーブルデータ配列がもつ各種パラメータへのアクセス方法を SourceCode 2-3 に例示した。土地利用データの場合について説明すると、ノード ID 「ind」に対して参照配列「id=table_id_landuse(ind)」によって、テーブルデータ配列「Table_LandUse」への参照インデックスを取得する。このとき、各種モデル定数（透水係数、粗度係数、間隙率）の情報は「permeability=Table_LandUse(id)%perm」のようにして取得できる。また、アクセス方法のイメージを図 2-19 に示した。

SourceCode 2 - 3 テーブルが持つ情報へのアクセス方法

! 土地利用テーブルに対して、ノード番号から各モデル定数を参照する方法

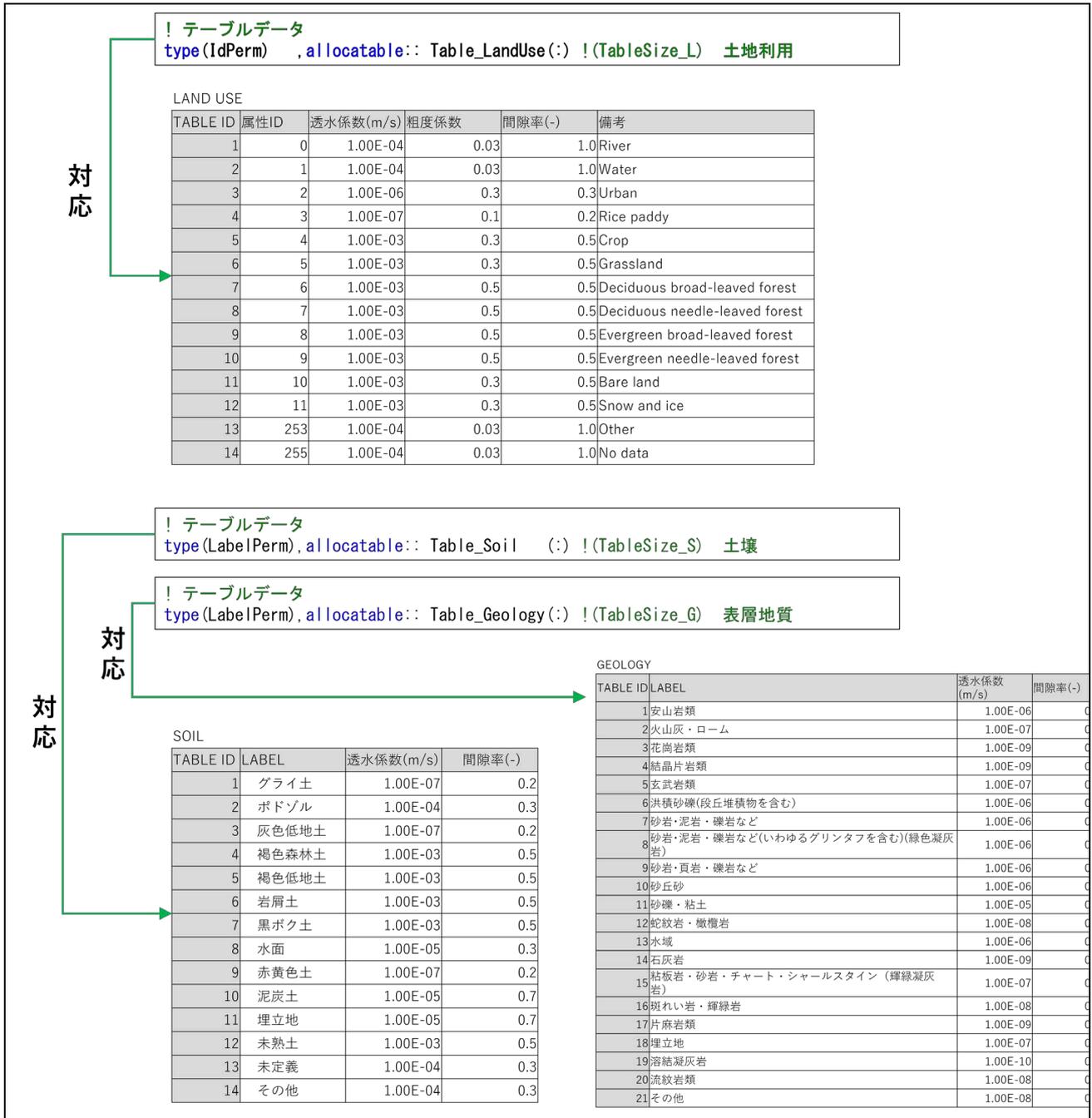
```
RefLandUse : block
integer:: ind, id
do ind = 1, nnode
  id = table_id_landuse(ind)
  permeability = Table_LandUse(id)%perm
  roughness    = Table_LandUse(id)%rough
  porosity     = Table_LandUse(id)%poro
enddo
end block RefLandUse
```

! 土壌図テーブルに対して、ノード番号から各モデル定数を参照する方法

```
RefSoil : block
integer:: ind, id
do ind = 1, nnode
  id = table_id_soil(ind)
  permeability = Table_Soil(id)%perm
  porosity     = Table_Soil(id)%poro
enddo
end block RefSoil
```

! 表層地質図テーブルに対して、ノード番号から各モデル定数を参照する方法

```
RefGeology : block
integer:: ind, id
do ind = 1, nnode
  id = table_id_geology(ind)
  permeability = Table_Geology(id)%perm
  porosity     = Table_Geology(id)%poro
enddo
end block RefGeology
```



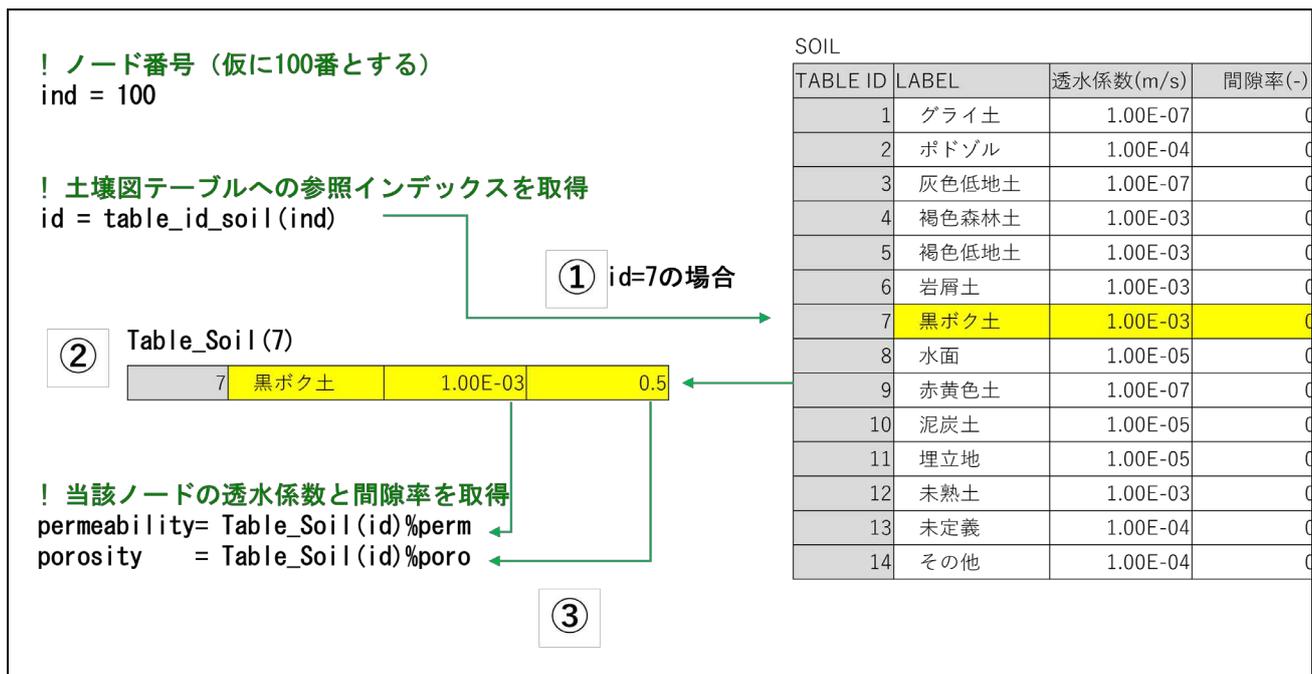


図 2-19 テーブルデータ配列への参照方法

テーブルデータ配列への参照配列「table_id_landuse, table_id_soil, table_id_geology」の作成方法について概略を説明する。作成には、namelist「geology_factor」で指定する二種類のファイルの情報が必要となる。

ファイル A : namelist 「geology_factor/ permeability_table_file」

ファイル B : namelist 「geology_factor/geometry_attribute_file」

- I. ファイル B から、計算ノード(ind)についてそれに最も近いサンプル点を探索して、地理空間情報(土地利用、土壌図、表層地質図)の属性値(属性番号もしくは属性ラベル)を取得する。(図 2-20 の①、②、③に相当)
- II. ファイル A で定義されたテーブルデータ配列から、取得した属性値を正引きして、テーブルデータ配列の該当レコードの配列インデックスを取得する。その配列インデックスが参照配列の返り値 table_id(ind)として登録される。

2.3.4 RADFLOW への機能組み込み 2 (時間刻みの動的変更機能)

① 概要

RADFLOW については、平水時では各地点での流速は小さい値で計算され、降雨イベントが発生した後の出水時には流速は大きい値で計算される。そのため、出水時に計算される大きい流速に備えて時間刻み dt を小さく取ると、平水時は無用に細かい時間解像度で計算することになり、効率的ではない。

そこで、時間刻みの動的変更機能を RADFLOW に追加して、平水時には粗い時間刻み dt で計算して、降雨イベント後の出水時は細かい時間刻みで計算できるようにした。

この機能は、ある閾値以上の降雨が検出された場合に、一定期間の間だけ時間刻み dt を細かくして RADFLOW の時間発展を計算するものである。

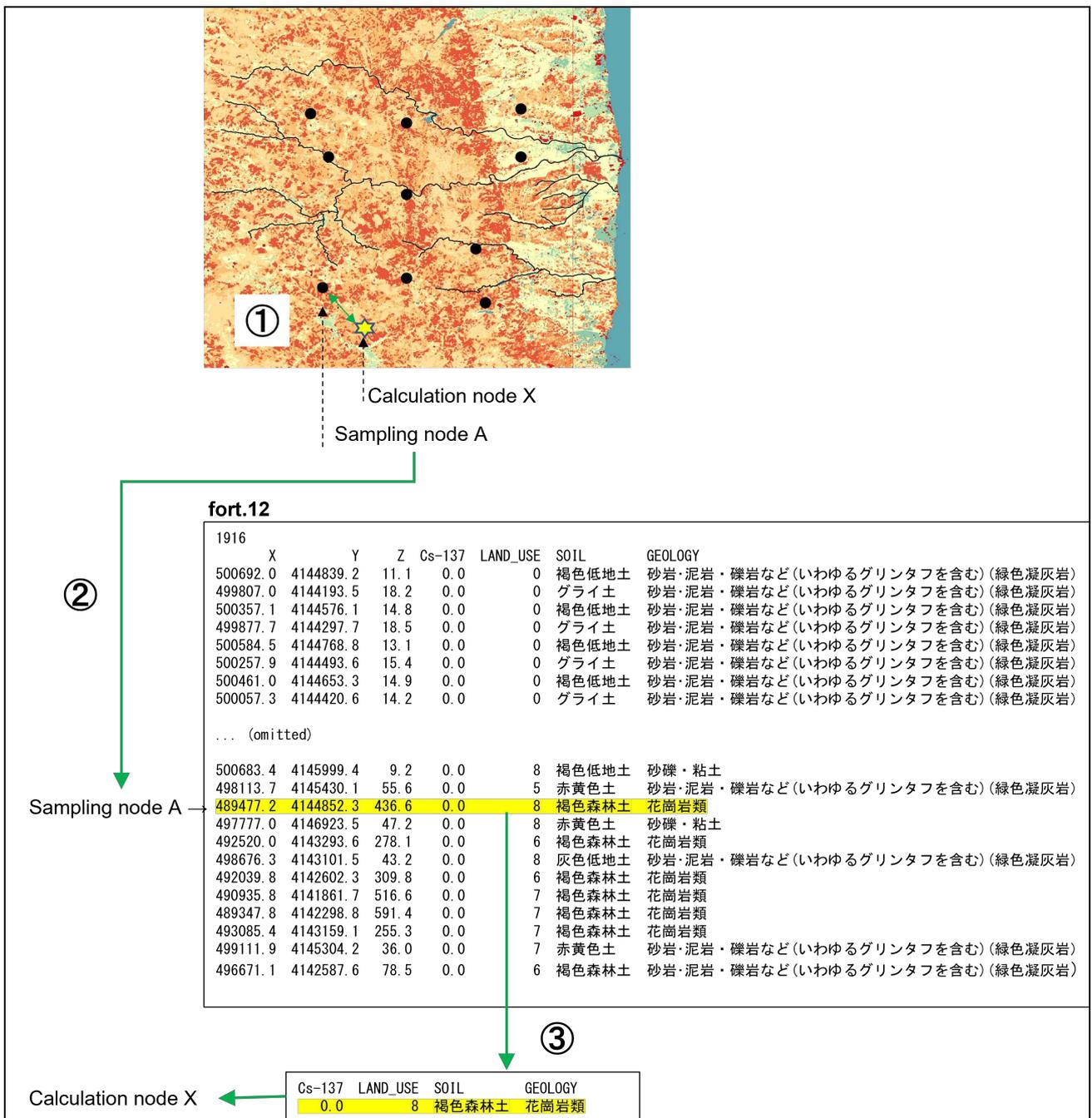


図 2-20 計算ノードの地理空間情報の属性値取得の流れ

② 入力制御について

「RADFLOW_v1.2.5」の入力制御ファイル「input.dat」について、時間刻みの動的変更機能を制御する項目を追加した。つまり、namelist として「dynamic_dt」の項目を新規に追加した。この項目内で、時間刻みの動的変更機能の設定情報を与える。namelist 「dynamic_dt」の各項目の役割を下記に列挙する。

- “is_apply@dynamic_dt”を”.true.”で与えると、「時間刻みの動的変更機能」が適用される。
”.false.”の場合、この機能は適用されない。

- “number_of_dt_division@dynamic_dt”で、デフォルトでの時間刻みの分割数を指定する。
- “threshold_rainfall@dynamic_dt”で、「時間刻みの動的変更機能」が動作するための条件として、降雨量の閾値を設定する。つまり、ここで指定した閾値を上回る降雨量が検知されたときに、デフォルトでの時間刻みの細分化して、細かい時間刻みで RADFLOW を計算する。
- “duration_time_of_rainfall_impact@dynamic_dt”で、「時間刻みの動的変更機能」の持続時間を設定する。

File 2-12 入力制御ファイル「input.dat」

```

...omitted...
&control
  calculation_time = 15552000.0 !sec    180.0 day
  delta_t = 20d0 !sec
  output_interval = 2592000.0 !sec    30.0 day
  output_file = 'res'
  calc_debris = 'yes'
  calc_radioactive = 'yes'
  id_edge_discharge = -1
  monitoring_discharge_file = "monitoring_edge.dat"
  restart_file = 'restart¥sp3_res_15768000.dat'
/
&dynamic_dt
  is_apply = .true.
  number_of_dt_division = 4
  threshold_rainfall = 2.0 ! [mm/h]
  duration_time_of_rainfall_impact = 259200.0 ! [sec]    3.0 [day]
/
...omitted...

```

入力制御ファイル「input.dat」での、namelist「dynamic_dt」の入力例を File 2-12 に示す。この設定のとき、降雨量 r (mm/h)が $r > 2.0$ の場合にデフォルトの時間刻み $dt = 20.0$ (sec)が4分割されて、細かい時間刻み $dt = 5.0$ (sec)で RADFLOW が計算される。そして、持続時間259200.0(sec)が経過すると、再びデフォルトの時間刻み $dt = 20.0$ (sec)に戻って計算が継続される。

③ 検証

ここでは、新たに追加「時間刻みの動的変更機能」について動作検証の結果を示す。対象河川を熊川として表 2-20 のように 2 パターン（粗い時間刻みに当該機能を適用したケースと常に細かい時間刻みで計算するケース）の計算を実施する。

表 2-20 観測値との誤差（前田川）

ケース ID	図凡例のケース名	dt(sec)	時間刻みの動的変更機能
C1	Distributedly_rh2(dt=20)_DT-DYNA	20.0	適用する
			時間刻みの分割数：4 降雨量の閾値：2.0(mm/h) 持続時間：3.0 日間
C2	Distributedly_rh2(dt=10)	10.0	適用しない

※その他の条件は 3.5 の熊川の解析時と同じである。

入力する降雨量の時刻歴データを図 2-21 に示す。図中の点線で示した閾値 2.0mm/h を上回る降雨がある場面において時間刻みは動的に細分化されて、細かい時間解像度で計算が実行される。

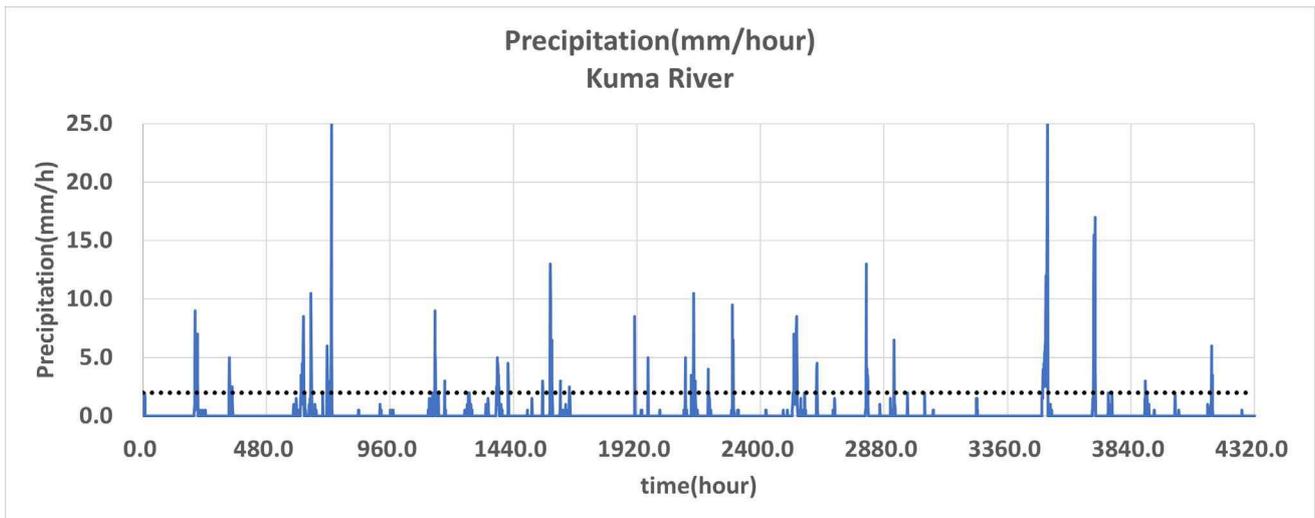


図 2-21 熊川の降雨量時刻歴

2 パターンの計算結果について、流出量の時刻歴の比較図を図 2-22 と図 2-23 に示した。「時間刻みの動的変更機能」を適用したケース C1 は、粗い時間刻み $dt = 20.0\text{sec}$ で計算する平水時において流出量の振動が見られるが、細かい時間刻みで $dt = 5.0\text{sec}(=20.0/4)$ で計算する出水時においては、ケース C2 と流出量の結果が一致するため、機能は正常に動作していることが確認できる。

なお計算時間について、ケース C1 では 15947.0sec であり、ケース C2 では 21521.7sec であるため、「時間刻みの動的計算機能」を適用することで計算時間を節約することができることがわかる。

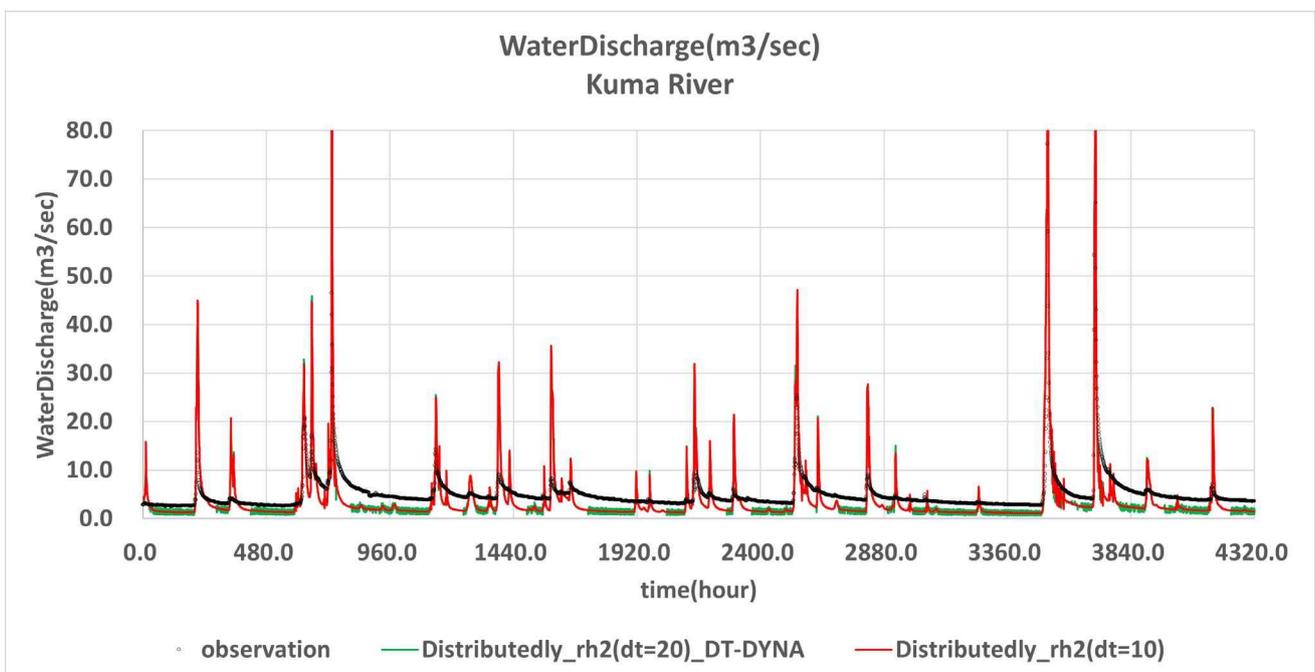


図 2-22 熊川の流出量時刻歴（全期間）

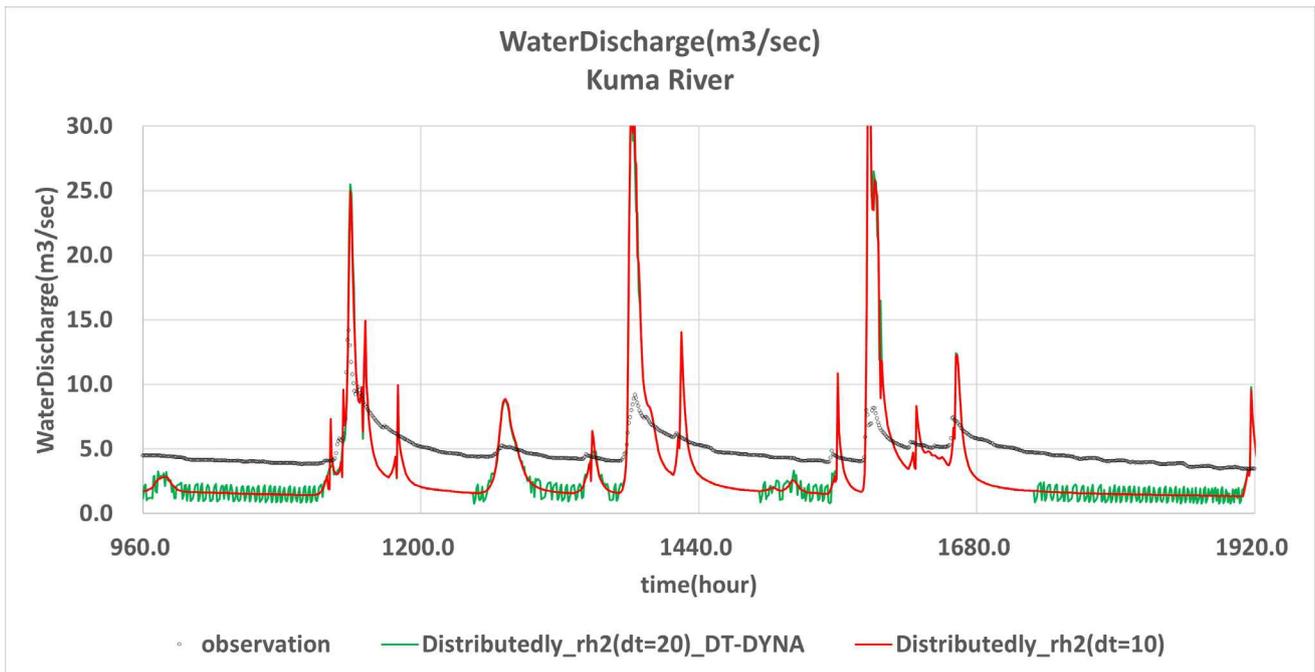


図 2-23 熊川の流出量時刻歴（一部期間）

2.3.5 検証

地理空間情報の分布をもとに RADFLOW のモデル定数（透水係数、間隙率、マニング粗度係数）を設定できる機能の検証を目的として、前田川、熊川、請戸川、阿武隈川の 4 河川を対象として、試解析を実施した。

3.5.1 では試解析に使用した観測データの詳細について説明する。3.5.2 では 4 河川それぞれの計算領域についての可視化図を示す。3.5.3 では RADFLOW の計算条件について示す。3.5.4 では計算ケースの一覧を示す。3.5.5 では RADFLOW で計算した河川流出量と観測流出量の比較を行い、当該機能の効果の結果について報告する。3.5.6 では検証に使用した計算ケースごとのデータについてそのリンク先を列挙する。

① 降雨量と流出量

試解析に使用した降雨量と流出量の観測データについて説明する。それぞれの河川について、観測地点の情報を 3.5.1.A に示した。また、実際の観測データについて 3.5.1.B にまとめた。

降水量データは AMeDAS から取得した。請戸川・高瀬川は浪江と津島観測所の平均、前田川は浪江観測所、熊川は富岡観測所である。阿武隈川については、福島県の石川観測所、長沼観測所、郡山観測所、二本松観測所、福島観測所と、宮城県の丸森観測所、岩沼観測所の平均とした。AMeDAS のデータは下記の WEB サイトから取得することができる。

AMeDAS

国土交通省>気象庁>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>

流出量データについては、前田川と熊川、請戸川の3河川については原子力機構殿から受領した比流出量データを使用した。阿武隈川については国土交通省の水文水質データベースから岩沼観測所の流出量データを使用した。水門水質データベースのWEBサイトには次のリンクからアクセスできる。

水門水質データベース

国土交通省>水文水質データベース>岩沼観測所

<http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SiteInfo.exe?ID=302011282206030>

【観測位置】

それぞれの河川について、比流出量(mm/h)および流出量の観測地点を表2-21にまとめた。また、観測地点の位置を図2-24～図2-28に可視化図として示した。

表 2-21 流出量の観測地点

流域名	河川	流域面積 (km ²)	観測地点	緯度/経度
前田川	前田川	21.0	MAER-6	37度26分21.9948秒 /141度00分01.2204秒
熊川	熊川	63.9	KUMR-2	37度23分02.8248秒 /141度01分37.1388秒
請戸川	請戸川	148.7	UKER-7	37度29分50.8884秒 /141度00分05.6880秒
	高瀬川	238.6	TAKR-3	37度29分08.2716秒 /140度59分52.6632秒
阿武隈川	阿武隈川	5432.0	岩沼(流量)	38.09583333度 140.8716667度

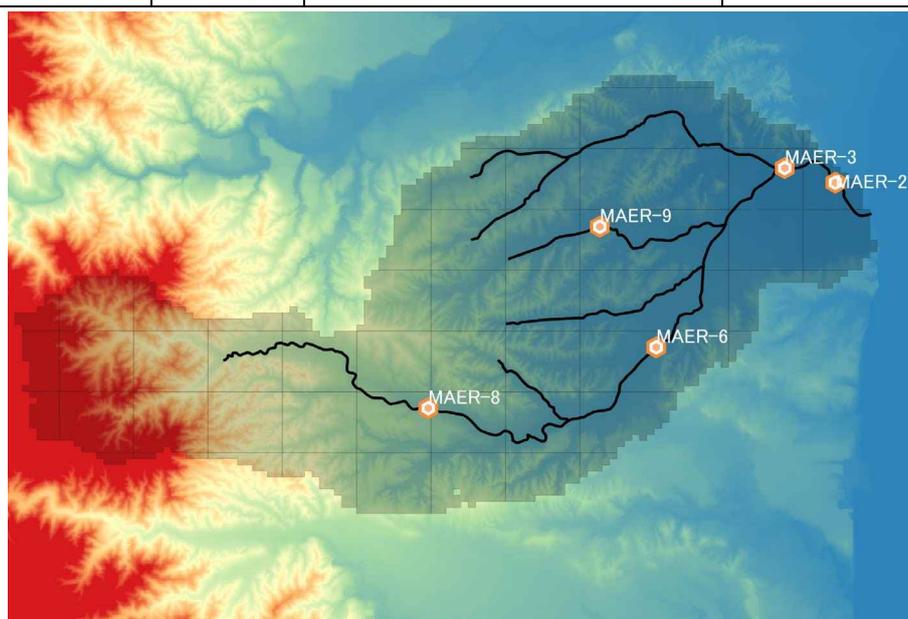


図 2-24 観測所位置 (前田川)



図 2-25 観測所位置 (熊川)

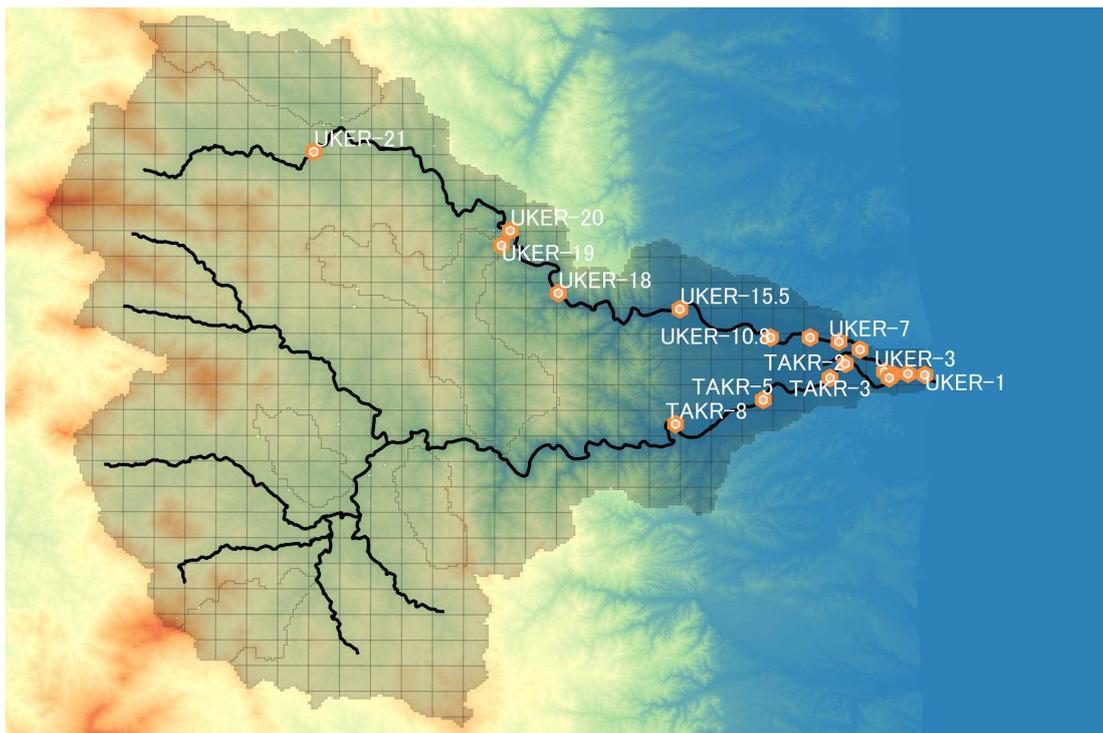


図 2-26 観測所位置 (全域) (請戸川)



図 2-27 観測所位置 (拡大) (請戸川)

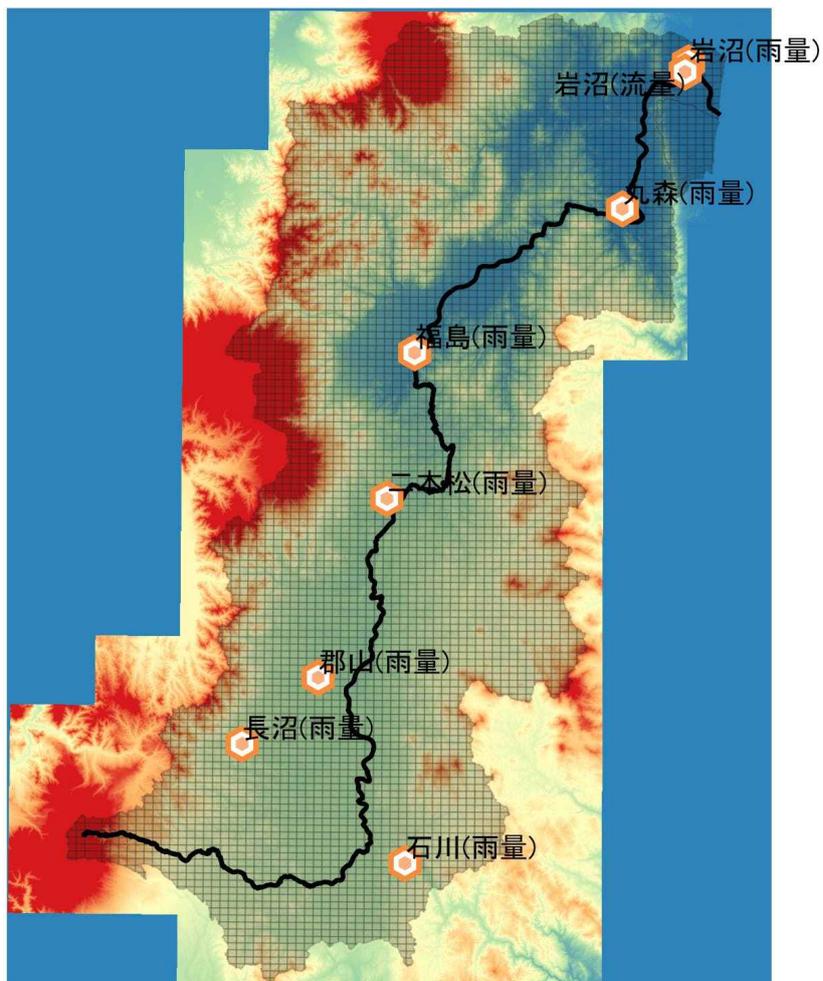


図 2-28 観測所位置 (阿武隈川)

【観測データ】

- 降雨量と降水量の観測データ（前田川）

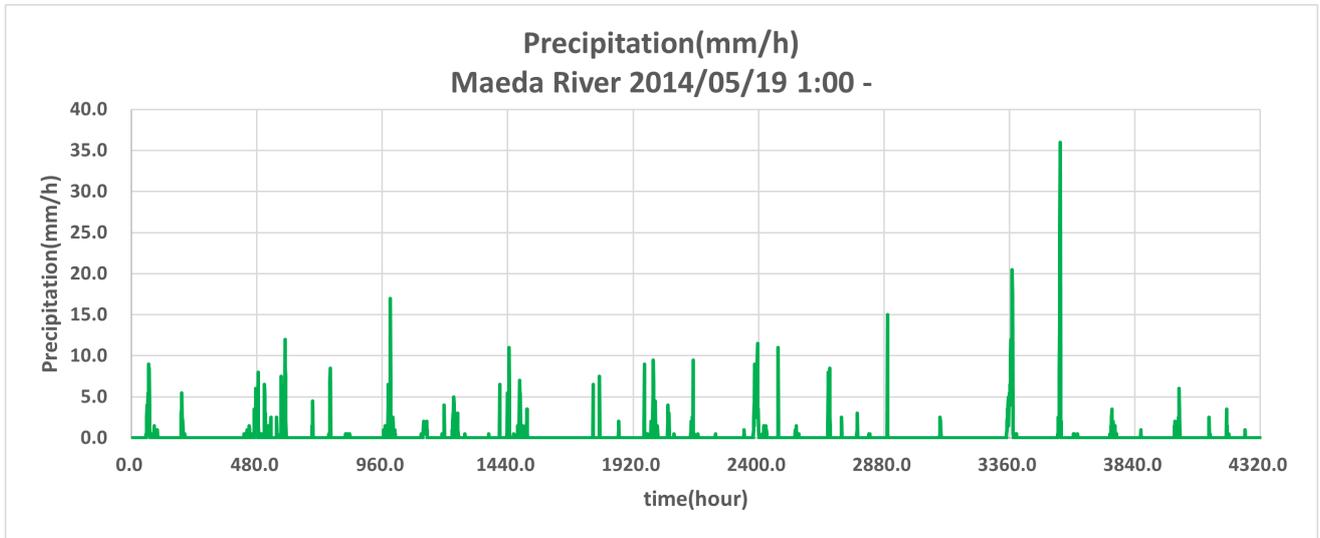


図 2-29 観測：降雨量（前田川） 平均降雨量：0.191(mm/h)

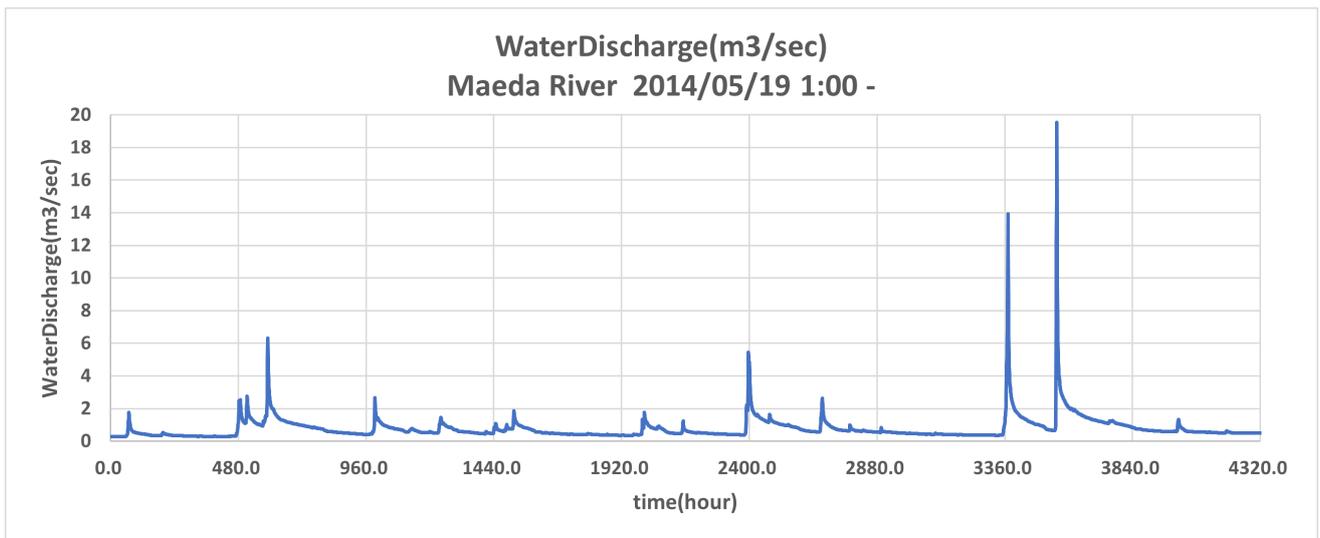


図 2-30 観測：流出量（前田川）

● 降雨量と降水量の観測データ（熊川）

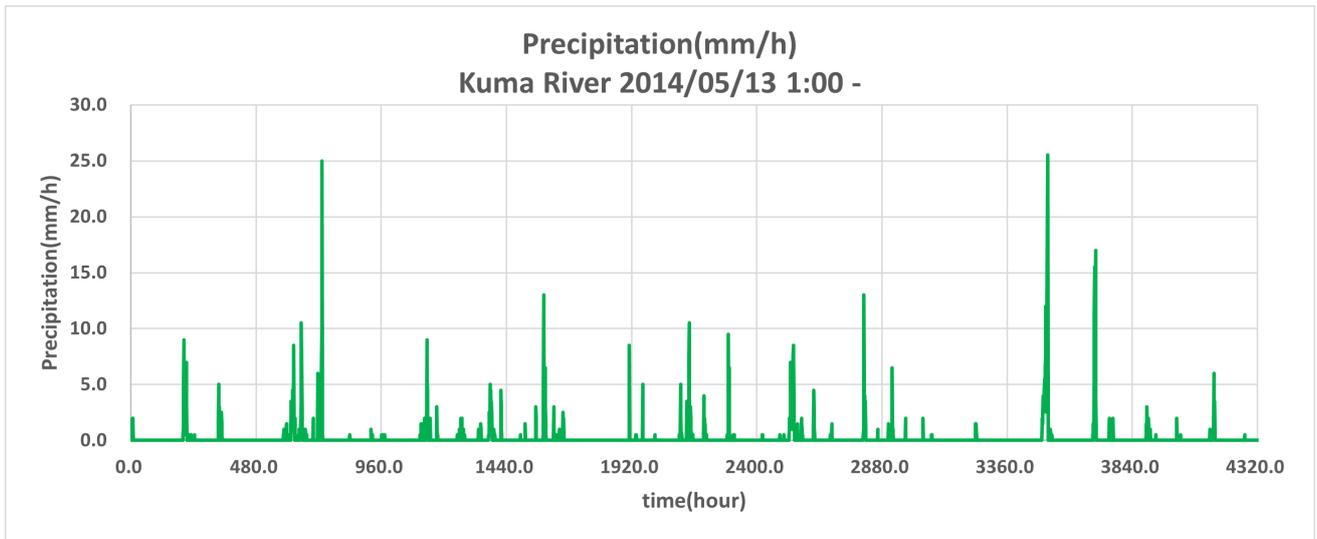


図 2-31 観測：降雨量（熊川） 平均降雨量：0.228(mm/h)

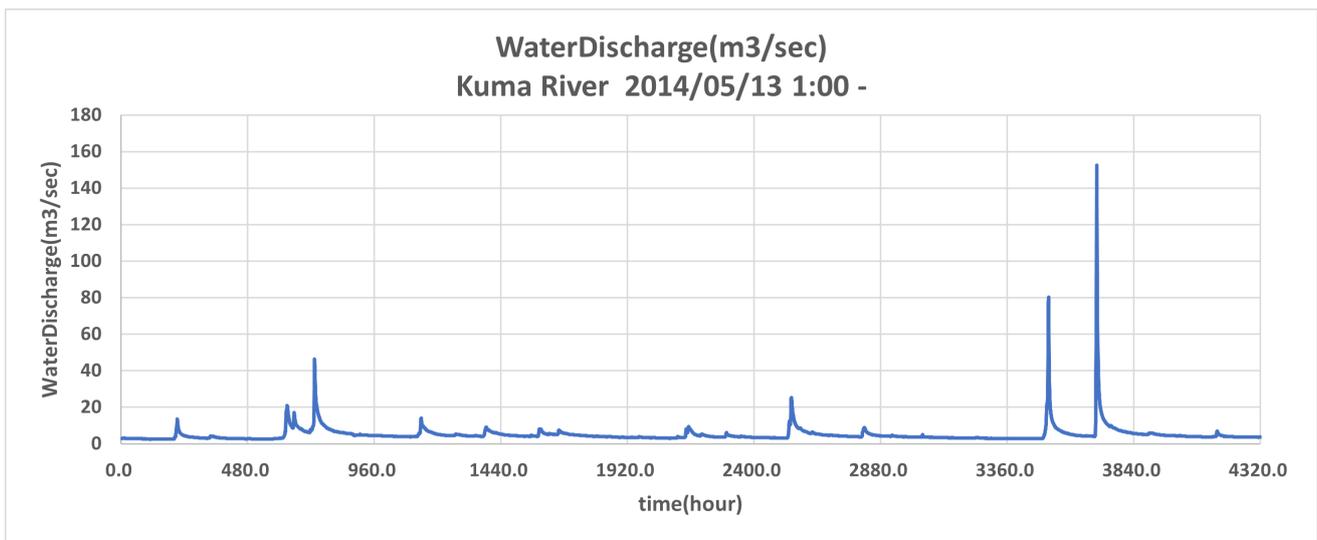


図 2-32 観測：流出量（熊川）

● 降雨量と降水量の観測データ（請戸川と高瀬川）

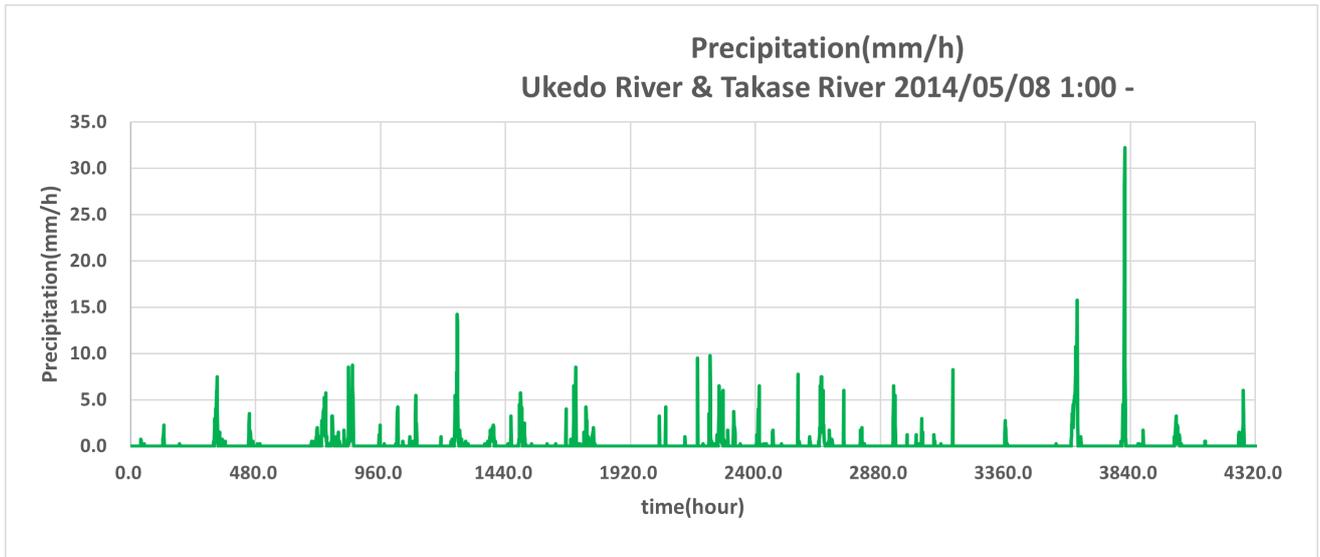


図 2-33 観測：降雨量（請戸川） 平均降雨量：0.182(mm/h)

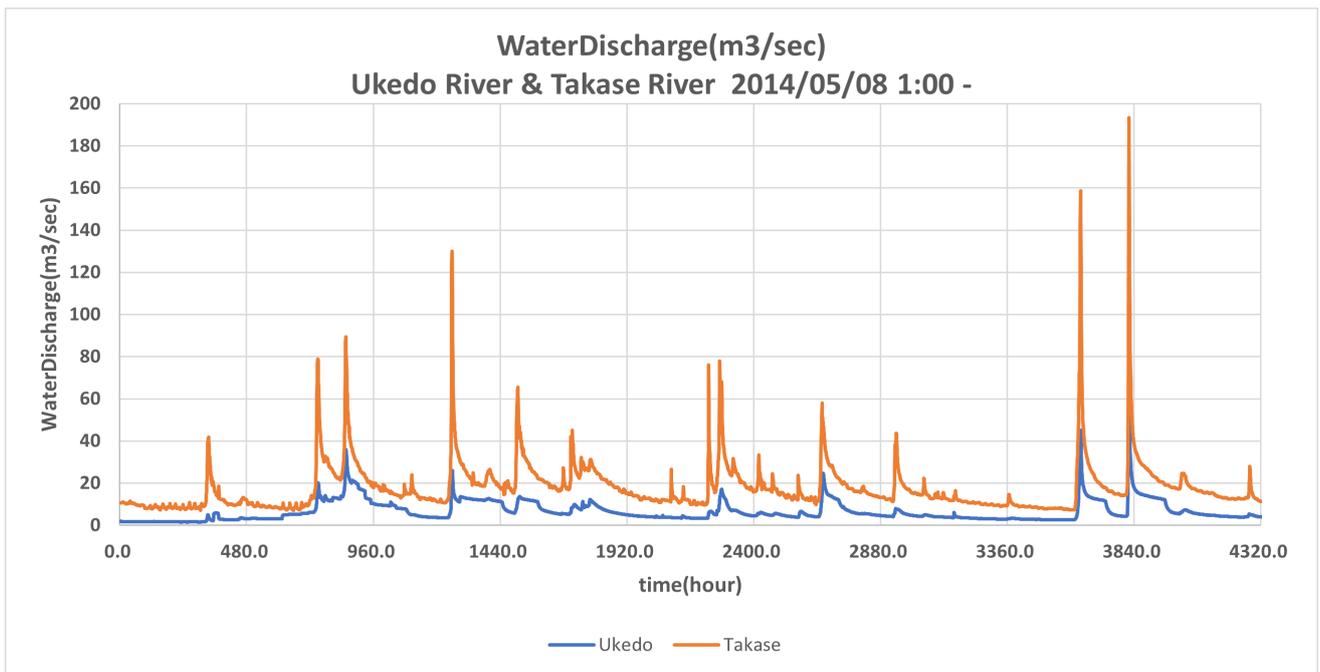


図 2-34 観測：流出量（請戸川）

● 降雨量と降水量の観測データ (阿武隈川)

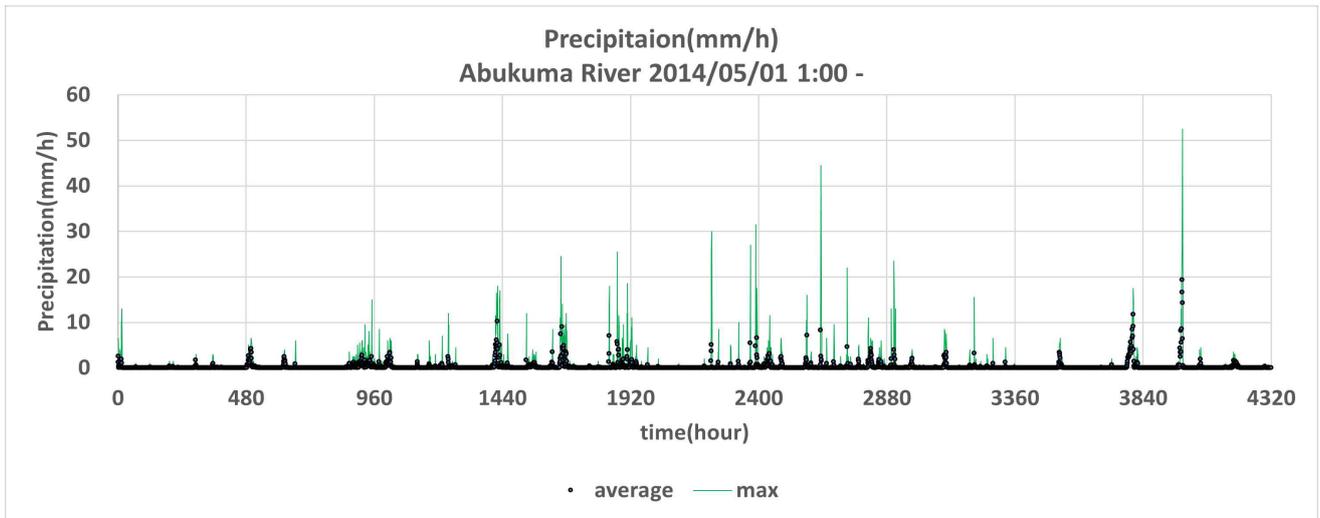


図 2-35 観測：降雨量 (阿武隈川) 平均降雨量：0.180(mm/h)

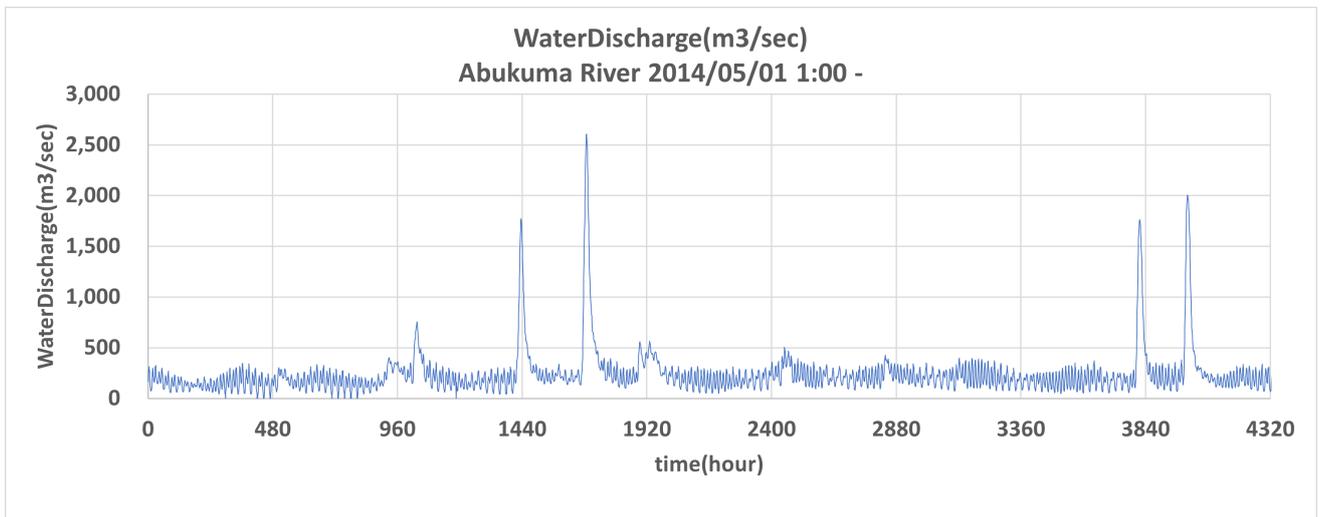


図 2-36 観測：流出量 (阿武隈川)

【前田川】

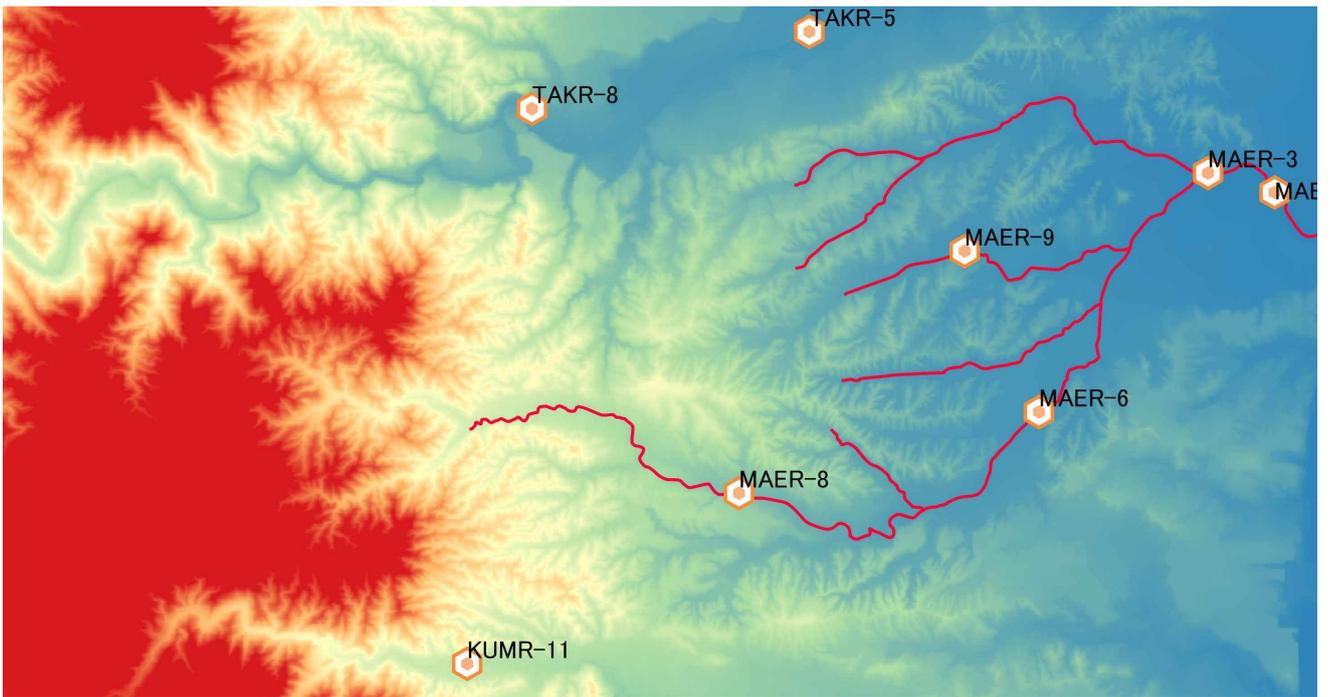


図 2-37 数値標高データおよび河川形状（前田川）

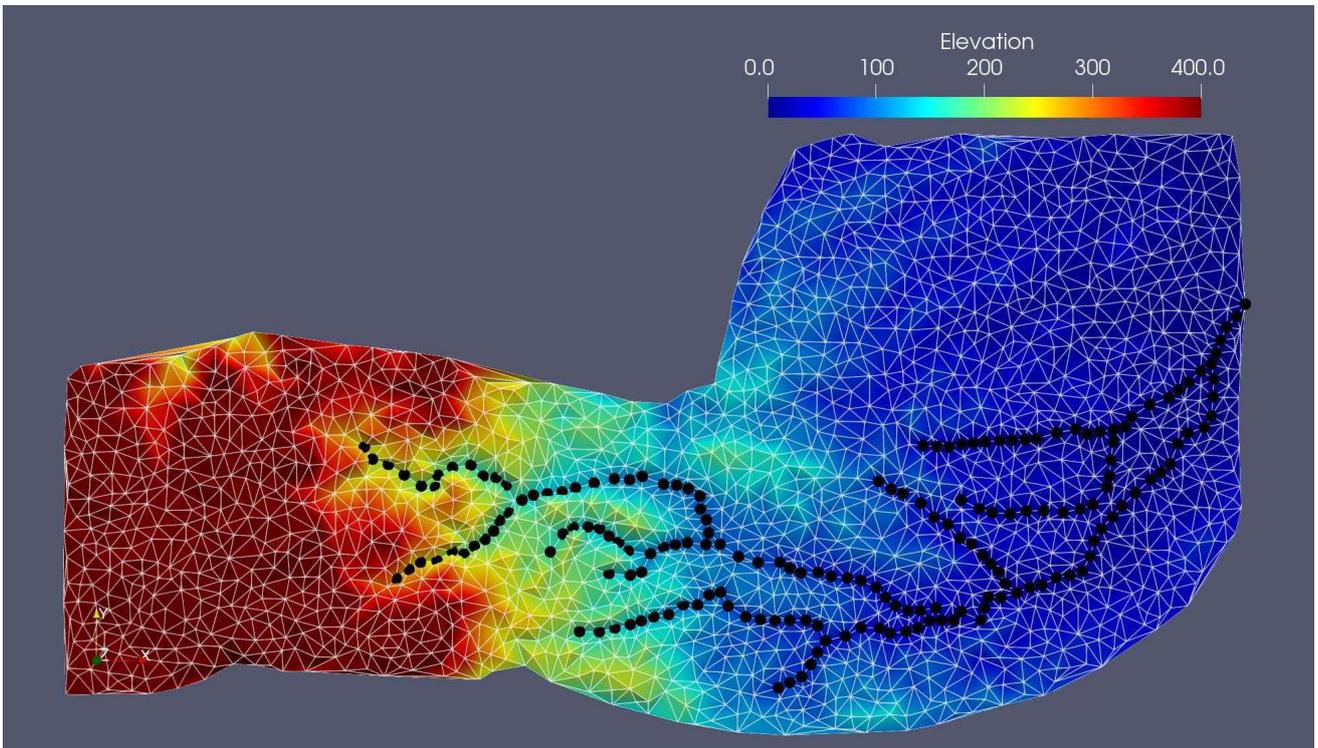


図 2-38 計算メッシュ①（前田川）

【熊川】

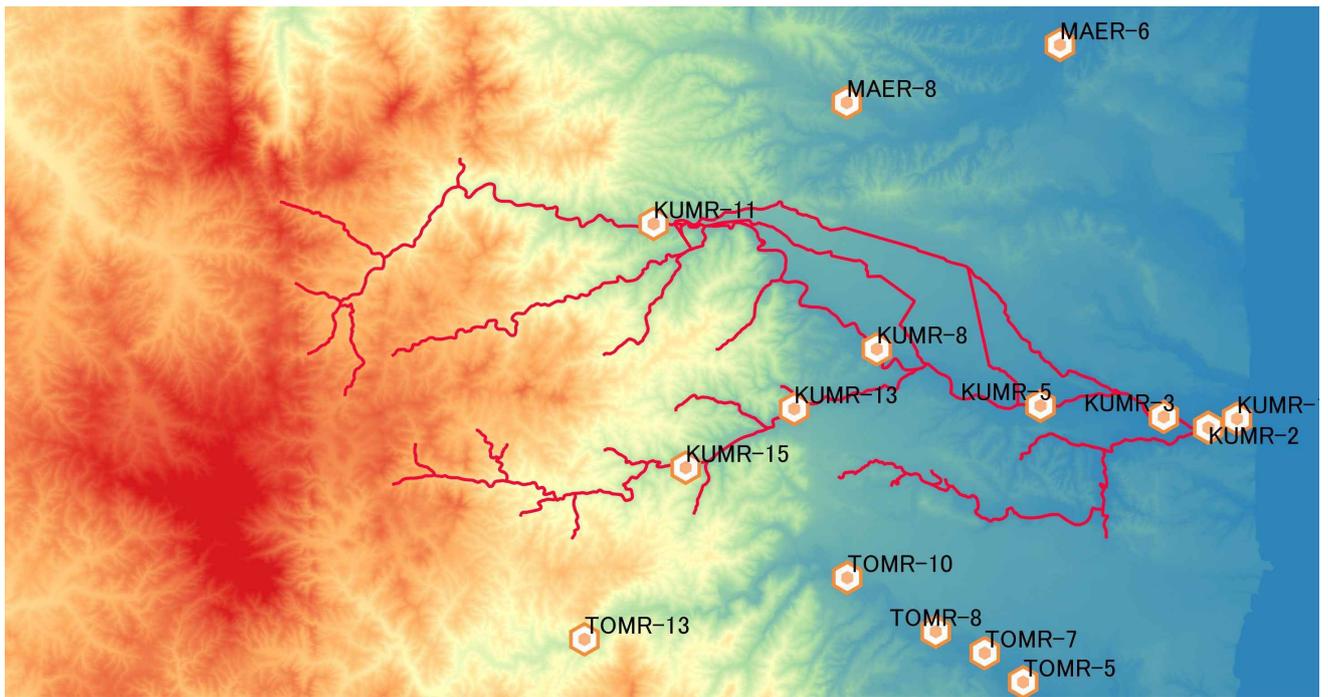


図 2-39 数値標高データおよび河川形状 (熊川)

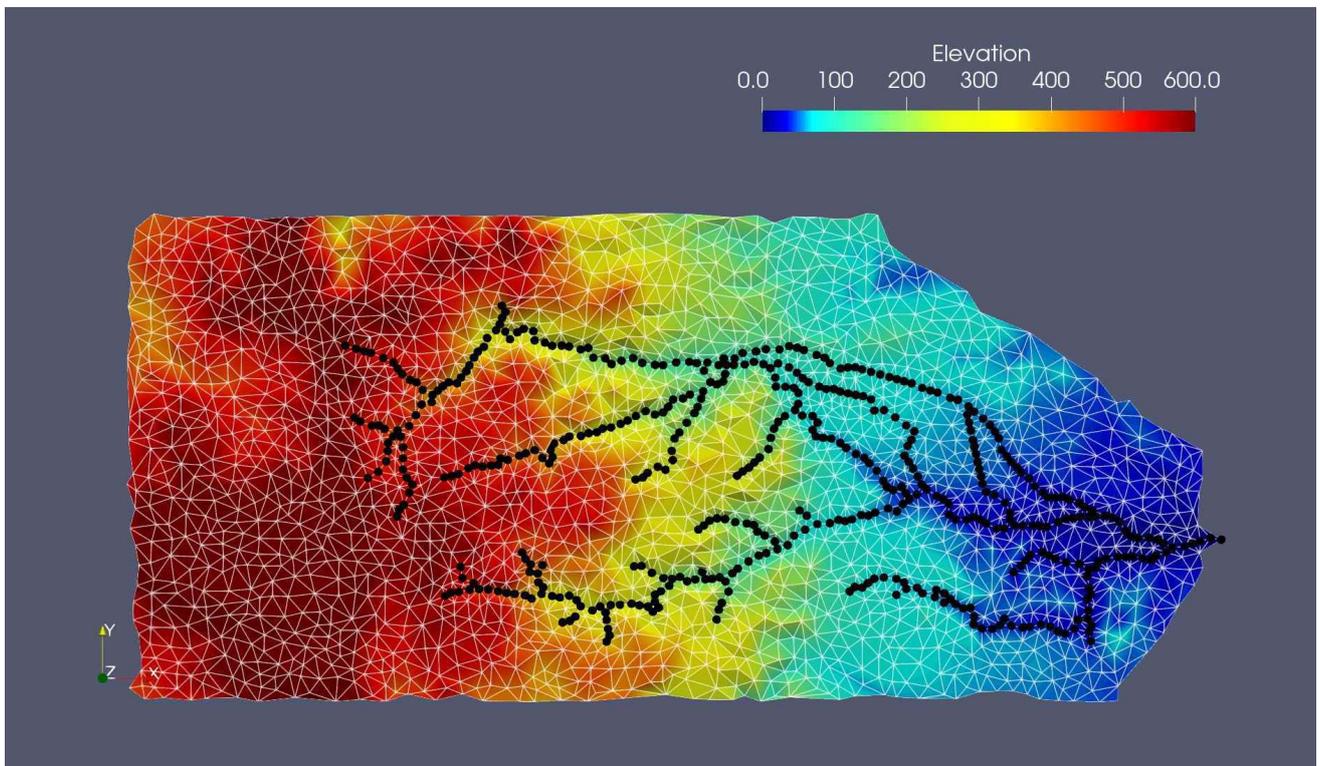


図 2-40 計算メッシュ① (熊川)

【請戸川】

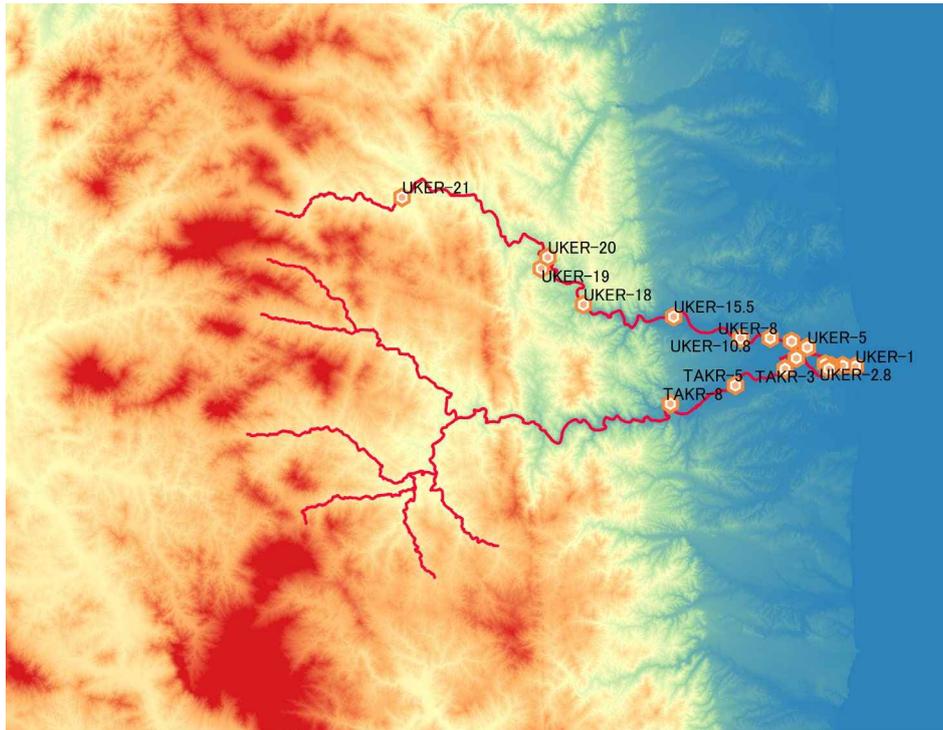


図 2-41 数値標高データおよび河川形状（請戸川）

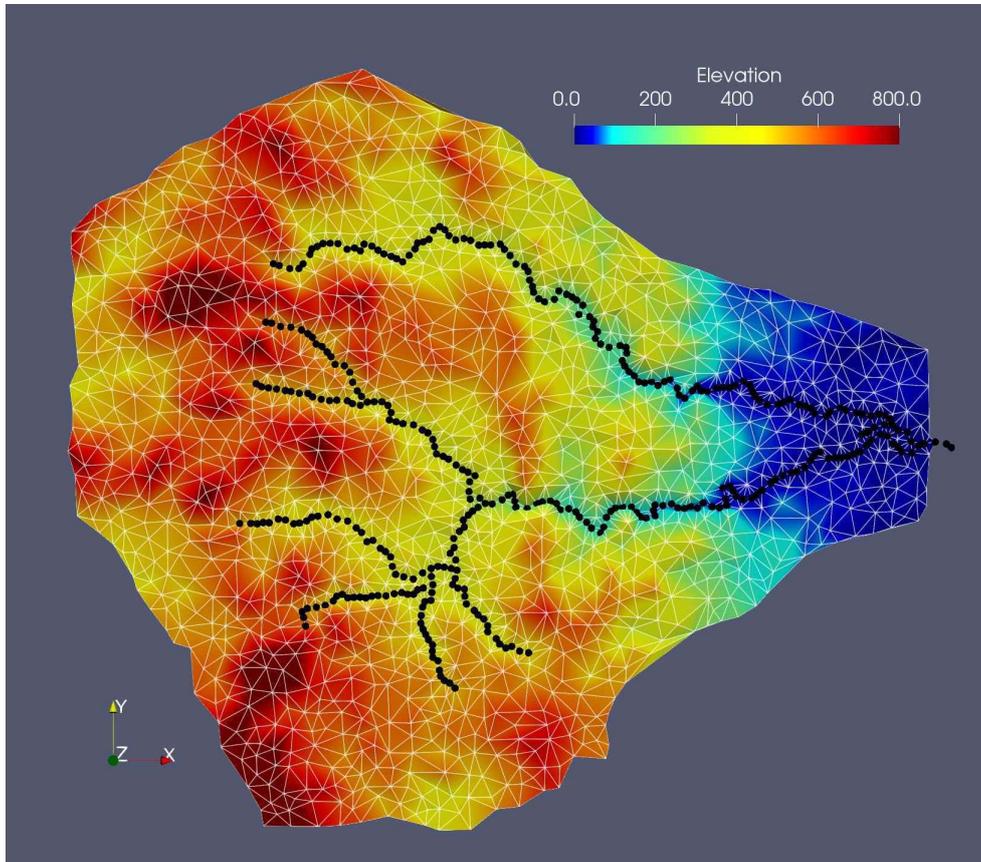


図 2-42 計算メッシュ① (請戸川)

【阿武隈川】

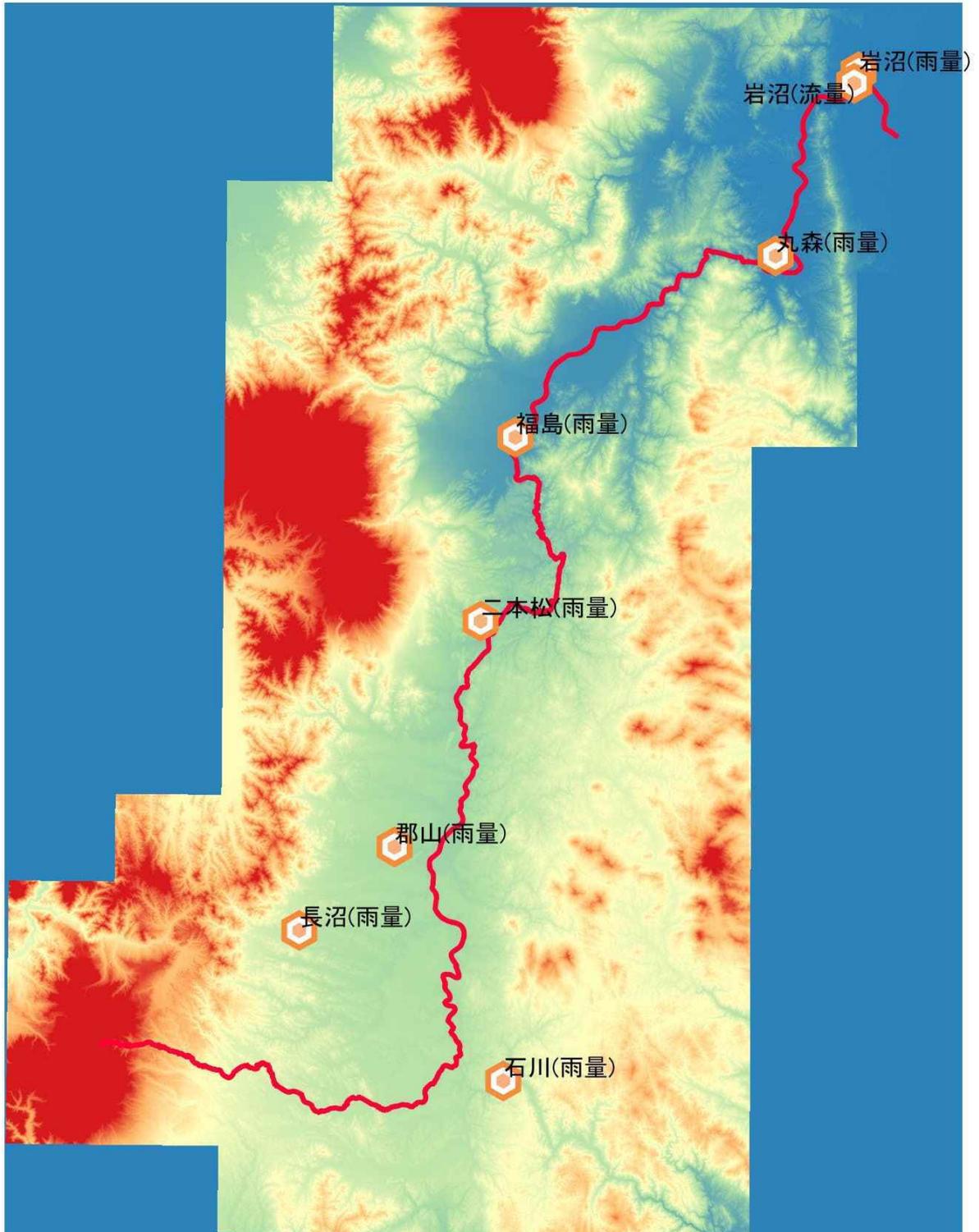


図 2-43 数値標高データおよび河川形状 (阿武隈川)

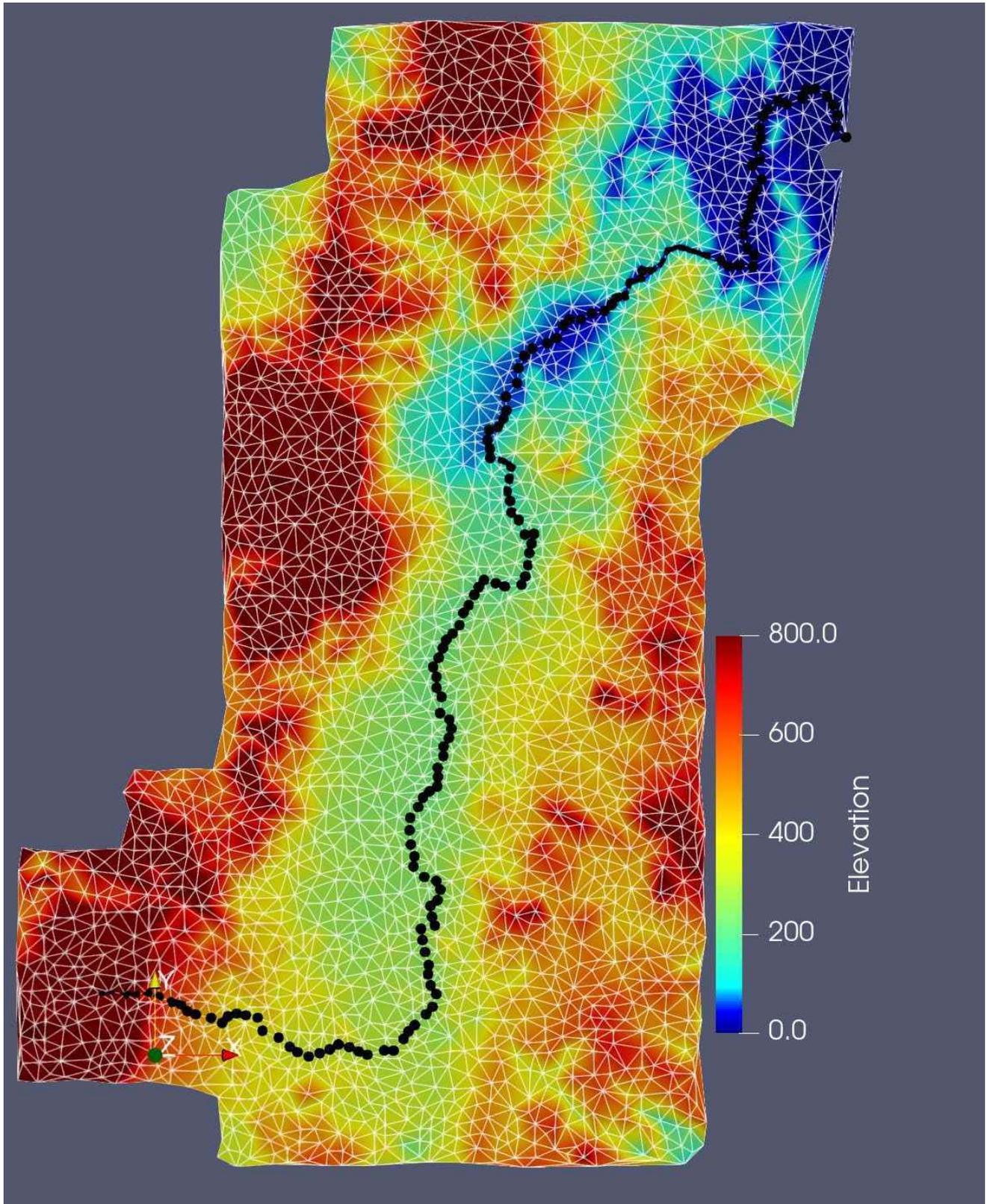


図 2-44 計算メッシュ① (阿武隈川)

2.4 ベイズ最適化の適用

RADFLOW のキャリブレーション機能を開発するために、Python の多目的ベイズ最適化ライブラリ「PHYSBO」を利用した。

2.4.1 PHYSBO の概要

PHYSBO は、高速でスケーラブルなベイズ最適化のための Python ライブラリである。ベイズ最適化は、複雑なシミュレーションや実験タスクなど、目的関数値（特性値など）の評価にコストが要する際に利用できる手法である。ベイズ最適化では、探索するパラメータの候補をあらかじめリストアップし、候補の中から目的関数値が最大と考えられる候補を機械学習（ガウス過程回帰を利用）による予測をうまく利用することで選定する。その候補に対して実験・シミュレーションを行い目的関数値を評価する。そして、機械学習による選定・実験シミュレーションによる評価を繰り返すことにより、少ない回数でのパラメータの最適化が可能となる。

特に、PHYSBO では以下の特徴的な機能を有しており、これらにより高いスケーラビリティを実現している。

- トンプソン サンプリング
- ランダム特徴写像
- ハイパーパラメータの自動チューニング

上記の内容は PHYSBO の公式を引用したものである。詳細については次の WEB サイトを参照すること。

WEB サイト「PHYSBO>PHYSBO について」

<https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/physbo/about/>

2.4.2 PHYSBO の詳細・使い方

PHYSBO の理論と使用方法についての詳細は、次の文献を参照すること。

Yuichi Motoyama, Ryo Tamura, Kazuyoshi Yoshimi, Kei Terayama, Tsuyoshi Ueno, Koji Tsuda,

Bayesian optimization package: PHYSBO, arXiv:2110.07900. Available from

<https://arxiv.org/abs/2110.07900>.

2.5 実装とキャリブレーション機能の実装方法

RADFLOW についてデータをベイズ最適化によりキャリブレーションするシステムを開発した。ベイズ最適化には Python のライブラリ「PHYSBO」を利用した。（4.1 参照）このシステムを、以降では簡単に最適化システムと記載する。

2.5.1 最適化システムの概要

最適化システムの概要を説明する。最適化システムの入出力仕様と内部データフローを図 2-45 に示す。

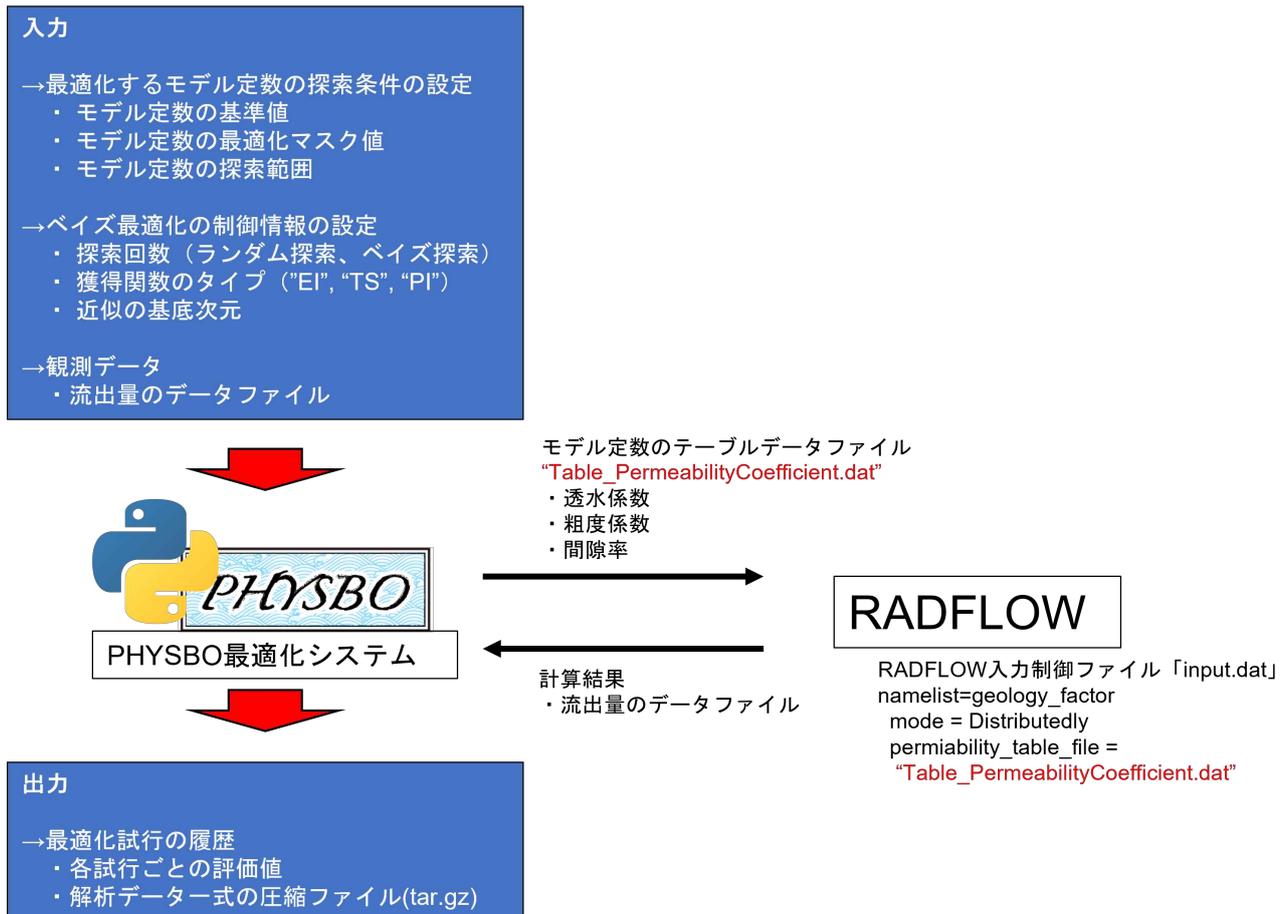


図 2-45 システム概要（PHYSBO 最適化システム）

① RADFLOW の設定

最適化システムは内部動作として、最適化試行の度に RADFLOW をコールして計算を実行する。このときコールされた RADFLOW は、最適化システムにより提案されたモデル定数のテーブルデータに従って計算を実行する。RADFLOW については以下の設定が必要である。

- モデル定数のテーブルデータの読み込み機能をアクティブにする
 RADFLOW の入力制御ファイル「input.dat」について、`namelist="geology_factor"`の中で、`mode="Distributedly"`に設定する。詳細については 3.3 を参照すること。

モデル定数のテーブルデータのフォーマットは File 2-10 に従う。最適化システムは、探索候補ごとに自動でこのテーブルデータのファイル生成を行う。

② 入力仕様

最適化システムを動作する前に次の制御情報の設定とデータ準備が必要である。

- ベイズ最適化の制御情報の設定
 最適化システムのスクリプト内部「Constant.py」で下記の項目を設定する。
 詳細は 5.2.3 を参照すること。
 - ・ データパス

- 入力データのファイルパス
 - 出力データのファイルパス
 - RADFLOW の実行ファイルと解析フォルダのパス
 - 流出量の時刻歴データのファイルパス（計算結果と観測結果）
 - ・ 探索の試行回数（ランダム探索、ベイズ探索）
 - ・ 獲得関数のタイプ（“EI”, “TS”, “PI”）
 - ・ 近似の基底次元
- 最適化するモデル定数の探索条件の設定
 - ・ モデル定数の最適化マスク値 「Table_Mask.dat」
 - 定義ファイルのフォーマットは 5.2.4.A を参照すること。
 - マスク値が「1」のとき最適化対象となる。「0」のとき最適化されない。
 - ・ モデル定数の基準値 「Table_Base.dat」
 - 定義ファイルのフォーマットは 5.2.4.B を参照すること。
 - マスク値が 0 のモデル定数について、この基準値が設定される。
 - ・ モデル定数の探索範囲 「Table_CandidateRange.dat」
 - 定義ファイルのフォーマットは 5.2.4.C を参照すること。
 - 探索範囲として、区間（上限、下限）と区間分割数、分割方法を指定する。分割方法として線形に等分割する方法と、対数的に等分割する方法の 2 種類がある。
- 観測データ
 - ・ 流出力のデータファイル

③ 出力仕様

出力データについて、最適化システムを開始すると逐次的に次の履歴が出力される。

- 試行ごとに提案されたモデル定数のテーブルデータ
- 試行ごとに評価値
- 試行ごとの解析データ一式の圧縮ファイル（tar.gz）

2.5.2 使用方法

① 動作環境

最適化システムは Python スクリプトであり、次の Python インタープリタとライブラリが必要である。ただし、5.2.2 で記載した通り、Windows 用の環境構築バッチファイルを用意した。

python	3.10
numpy	1.22.1
pandas	1.3.5

physbo	1.0.1
psutil	5.9.0
python-dateutil	2.8.2
pytz	2021.3
scipy	1.7.3
textfile	0.1.4

次のプラットフォームでの動作は確認した。

OS : Windows10 Pro (21H1)

② 最適化制御

制御情報は、PHYSBO の最適化システムを構成するスクリプト「Constant.py」内部にハードコーディングする。具体例を File 2-13 に示す。

File 2-13 PHYSBO 最適化システムの入力制御「Constant.py」

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# -----
NUM_RANDOM_SEARCH = 3
NUM_BAYESIAN_SEARCH = 30
FLAG_SCORE = "EI"
NUM_RAND_BASIS = 5000

# -----
#Table Information
FILEPATH_IN_TABLE_BASE = r"TableInfo/Table_Base.dat"
FILEPATH_IN_TABLE_MASK = r"TableInfo/Table_Mask.dat"
FILEPATH_IN_TABLE_CANDIDATE = r"TableInfo/Table_CandidateRange.dat"

#RADFLOW
EXE = r"run_v4.1.bat"
DIRPATH_CALCULATION = r"../xcal_with_sp3"
FILENAME_OUT_TABLE_FOR_RADFLOW = r"Table_PermeabilityCoefficient.dat"

FILEPATH_IN_OBSERVATION_VALUE = [r"../obs/discharge_Maeda_Area21.0.dat" ]
FILEPATH_IN_CALCULATION_VALUE = [r"../xcal_with_sp3/output_edge_00001.dat"]
INTERVAL_TIME_OBSERVATION_VALUE = 3600.0
INTERVAL_TIME_CALCULATION_VALUE = 3600.0

LAST_TIME_EVALUATE = 3600.0 * 24.0 * 180.0
INTERVAL_TIME_EVALUATE = 3600.0
UPPER_LIMIT_EVALUATION_VALUE = 1.0E+8

DIRPATH_RESULT = r"../result"
INDEX_TRIAL_HISTORY = r"Index_TrialHistory.dat"
ARCHIVE_LABEL = r"Trial"
FILENAME_OUT_CHECK_TABLE_INFO = r"check_setting_table_information.dat"

...omitted...
```

- PHYSBO の制御は下記のパラメータで行う
 - NUM_RANDOM_SEARCH ランダム探索の回数
 - NUM_BAYESIAN_SEARCH ベイズ探索の回数

- ・ FLAG_SCORE 獲得関数のタイプ指定。”EI”、”PI”、”TS”の中から選択する。
 - ・ NUM_RAND_BASIS ランダム特徴写像の次元
- ※それぞれのパラメータの役割については、4「ベイズ最適化」を参照すること。

● 入力データ

モデル定数に関する3つの定義ファイルのパスを指定する。

- ・ FILEPATH_IN_TABLE_BASE モデル定数の最適化マスク値
- ・ FILEPATH_IN_TABLE_MASK モデル定数の基準値
- ・ FILEPATH_IN_TABLE_CANDIDATE モデル定数の探索範囲

● 出力データ

次のパラメータは出力ファイルに関係する。

- ・ DIRPATH_RESULT 出力データの生成先となるフォルダパス
- ・ INDEX_TRIAL_HISTORY 試行ごとの評価値履歴が記録されるファイルの名前
- ・ ARCHIVE_LABEL 解析データ一式の圧縮ファイルの名前の頭文字
- ・ FILENAME_OUT_CHECK_TABLE_INFO デバッグ用ファイルの名前

● RADFLOW 関連

- ・ EXE 実行ファイルの名前
- ・ DIRPATH_CALCULATION 実行ファイルが存在するフォルダパス
- ・ FILENAME_OUT_TABLE_FOR_RADFLOW :
生成するモデル定数のテーブルデータのファイル名

● 評価値計算

流出量の時刻歴データのファイルパスは、次のパラメータで指定する。File 2-13にあるとおり、複数地点での流出量の比較ができるように。このパラメータにはリストで定義する。

- ・ FILEPATH_IN_OBSERVATION_VALUE 流出量の観測結果のファイルパス
- ・ FILEPATH_IN_CALCULATION_VALUE 流出量の RADFLOW の計算結果のファイルパス
- ・ INTERVAL_TIME_OBSERVATION_VALUE 観測結果データの時間間隔
- ・ INTERVAL_TIME_CALCULATION_VALUE 計算結果データの時間間隔

評価値は誤差関数 RSE()により計算する。下記のパラメータは誤差関数の計算に関係する。

- ・ LAST_TIME_EVALUATE 誤差関数を計算する際の最終時刻
- ・ INTERVAL_TIME_EVALUATE 誤差関数を計算する際に線形内挿する間隔
- ・ UPPER_LIMIT_EVALUATION_VALUE RADFLOW の計算が発散した場合は評価値を得ることができない。そのために、このパラメータの値で評価値を設定する。(大きい値を設定すること)

③ 入力データ

【モデル定数の最適化マスク値「Table_Mask.dat」】

マスク値が「1」のモデル定数が最適化対象となる。「0」のモデル定数は最適化されない。

File 2-14 「Table_Mask.dat」

#land_use				
! ATTRIBUTE_ID,	PERMIABILITY[M/S],	ROUGHNESS,	POROSITY[-],	
0,	0,	0,	0,	
1,	0,	0,	0,	
2,	0,	0,	0,	
3,	0,	0,	0,	
4,	0,	0,	0,	
5,	1,	1,	0,	
6,	1,	1,	0,	
7,	1,	1,	0,	
8,	1,	1,	0,	
9,	1,	1,	0,	
10,	0,	0,	0,	
11,	0,	0,	0,	
253,	0,	0,	0,	
255,	0,	0,	0,	
#soil				
!LABEL,	PERMIABILITY[M/S],	POROSITY[-],		
グライ土,	0,	0,		
ポドゾル,	0,	0,		
灰色低地土,	0,	0,		
褐色森林土,	0,	0,		
褐色低地土,	0,	0,		
岩屑土,	0,	0,		
黒ボク土,	0,	0,		
水面,	0,	0,		
赤黄色土,	0,	0,		
泥炭土,	0,	0,		
埋立地,	0,	0,		
未熟土,	0,	0,		
未定義,	0,	0,		
その他,	0,	0,		
#geology				
!LABEL,	PERMIABILITY[M/S],	POROSITY[-],		
安山岩類,	0,	0,		
火山灰・ローム,	0,	0,		
花崗岩類,	0,	0,		
結晶片岩類,	0,	0,		
玄武岩類,	0,	0,		
洪積砂礫(段丘堆積物を含む) ,	0,	0,		
砂岩・泥岩・礫岩など,	0,	0,		
砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩) ,	0,	0,		
砂岩・頁岩・礫岩など,	0,	0,		
砂丘砂,	0,	0,		
砂礫・粘土,	0,	0,		
蛇紋岩・橄欖岩,	0,	0,		
水域,	0,	0,		
石灰岩,	0,	0,		
粘板岩・砂岩・チャート・シャルスタイン(輝緑凝灰岩) ,	0,	0,		
斑れい岩・輝緑岩,	0,	0,		
片麻岩類,	0,	0,		
埋立地,	0,	0,		
溶結凝灰岩,	0,	0,		
流紋岩類,	0,	0,		
その他,	0,	0,		

【モデル定数の基準値「Table_Base.dat」】

マスク値が0のモデル定数について、この基準値が設定される。

File 2-15 「Table_Base.dat」

#land_use				
! ATTRIBUTE_ID,	PERMIABILITY[M/S],	ROUGHNESS,	POROSITY[-],	
0,	1.00E-04,	0.030,	0.50,	
1,	1.00E-04,	0.030,	0.50,	
2,	1.00E-06,	0.300,	0.25,	
3,	1.00E-07,	0.100,	0.20,	
4,	1.00E-03,	0.300,	0.50,	
5,	1.00E-03,	0.300,	0.50,	
6,	1.00E-03,	0.500,	0.50,	
7,	1.00E-03,	0.500,	0.50,	
8,	1.00E-03,	0.500,	0.50,	
9,	1.00E-03,	0.500,	0.50,	
10,	1.00E-03,	0.300,	0.50,	
11,	1.00E-03,	0.300,	0.50,	
253,	1.00E-04,	0.030,	0.50,	
255,	1.00E-04,	0.030,	0.50,	
#soil				
!LABEL,	PERMIABILITY[M/S],	POROSITY[-],		
グライ土,	1.00E-07,	0.20,		
ボドゾル,	1.00E-04,	0.30,		
灰色低地土,	1.00E-07,	0.20,		
褐色森林土,	1.00E-03,	0.50,		
褐色低地土,	1.00E-03,	0.50,		
岩屑土,	1.00E-03,	0.50,		
黒ボク土,	1.00E-03,	0.50,		
水面,	1.00E-05,	0.30,		
赤黄色土,	1.00E-07,	0.20,		
泥炭土,	1.00E-05,	0.70,		
埋立地,	1.00E-05,	0.70,		
未熟土,	1.00E-03,	0.50,		
未定義,	1.00E-04,	0.30,		
その他,	1.00E-04,	0.30,		
#geology				
!LABEL,		PERMIABILITY[M/S],	POROSITY[-],	
安山岩類,		1.00E-06,	0.10,	
火山灰・ローム,		1.00E-07,	0.60,	
花崗岩類,		1.00E-09,	0.25,	
結晶片岩類,		1.00E-09,	0.25,	
玄武岩類,		1.00E-07,	0.10,	
洪積砂礫(段丘堆積物を含む) ,		1.00E-06,	0.30,	
砂岩・泥岩・礫岩など,		1.00E-06,	0.30,	
砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩) ,		1.00E-06,	0.30,	
砂岩・頁岩・礫岩など,		1.00E-06,	0.10,	
砂丘砂,		1.00E-06,	0.30,	
砂礫・粘土,		1.00E-05,	0.30,	
蛇紋岩・橄欖岩,		1.00E-08,	0.30,	
水域,		1.00E-06,	0.30,	
石灰岩,		1.00E-09,	0.20,	
粘板岩・砂岩・チャート・シャルスタイン(輝緑凝灰岩) ,		1.00E-07,	0.30,	
斑れい岩・輝緑岩,		1.00E-08,	0.15,	
片麻岩類,		1.00E-09,	0.30,	
埋立地,		1.00E-07,	0.30,	
溶結凝灰岩,		1.00E-10,	0.30,	
流紋岩類,		1.00E-08,	0.30,	
その他,		1.00E-08,	0.30,	

【モデル定数の探索範囲定義「Table_CandidateRange.dat」】

探索範囲として、区間（上限、下限）と区間分割数、分割方法を指定する。分割方法として線形に等分割する方法(LIN)と、対数的に等分割する方法(LOG)の2種類がある。

それぞれのモデル定数について、この探索範囲の情報を4つ組のリストとして設定する。ただし、区切り文字はコロン”:"とする。

#land_use	ATTRIBUTE_ID,	PERMIABILITY[M/S],	ROUGHNESS,	POROSITY[-],
	0,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	1,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	2,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	3,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	4,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	5,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	6,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	7,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	8,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	9,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	10,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	11,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	253,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
	255,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.02: 0.5: 3: "LIN"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],
#soil	!LABEL,	PERMIABILITY[M/S],	POROSITY[-],	
	グライ土,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	ポドゾル,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	灰色低地土,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	褐色森林土,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	褐色低地土,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	岩屑土,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	黒ボク土,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	水面,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	赤黄色土,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	泥炭土,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	埋立地,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	未熟土,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	未定義,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	その他,	[1.0E-7: 1.0E-3: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
#geology	!LABEL,	PERMIABILITY[M/S],	POROSITY[-],	
	安山岩類,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	火山灰・ローム,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	花崗岩類,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	結晶片岩類,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	玄武岩類,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	洪積砂礫(段丘堆積物を含む) ,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	砂岩・泥岩・礫岩など,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	砂岩・泥岩・礫岩など(いわゆるグリンタフを含む)(緑色凝灰岩) ,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	砂岩・頁岩・礫岩など,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	砂丘砂,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	砂礫・粘土,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	蛇紋岩・橄欖岩,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	水域,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	石灰岩,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩) ,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	斑れい岩・輝緑岩,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	片麻岩類,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	埋立地,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	溶結凝灰岩,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	流紋岩類,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	
	その他,	[1.0E-9: 1.0E-5: 3: "LOG"],	[0.2: 0.7: 3: "LIN"],	

④ 出力データ

出力データについて、最適化システムを開始すると逐次的に次の履歴が記録される。履歴データは制御パラメータ DIRPATH_RESULT (5.2.3 参照) で指定したフォルダに生成される。

- 試行ごとに提案されたモデル定数のテーブルデータ (図 2-46 の青色部分)
- 試行ごとに評価値 (図 2-46 の橙色部分)

- 試行ごとの解析データ一式の圧縮ファイル (tar.gz) (図 2-46 の赤色部分)

以下に、File 2-13 で例示した最適化制御ファイルについて、最適化システムを実行した際の結果として、履歴データを示す。

```

check_setting_table_information.dat
Index_TrialHistory.dat
Table_PermeabilityCoefficient_0000_random.dat
Table_PermeabilityCoefficient_0001_random.dat
Table_PermeabilityCoefficient_0002_random.dat
Table_PermeabilityCoefficient_0003_bayesian.dat
Table_PermeabilityCoefficient_0004_bayesian.dat
... omitted ...
Table_PermeabilityCoefficient_0029_bayesian.dat
Table_PermeabilityCoefficient_0030_bayesian.dat
Table_PermeabilityCoefficient_0031_bayesian.dat
Table_PermeabilityCoefficient_0032_bayesian.dat
Trial_0000_random.tar.gz
Trial_0001_random.tar.gz
Trial_0002_random.tar.gz
Trial_0003_bayesian.tar.gz
Trial_0004_bayesian.tar.gz
... omitted ...
Trial_0029_bayesian.tar.gz
Trial_0030_bayesian.tar.gz
Trial_0031_bayesian.tar.gz
Trial_0032_bayesian.tar.gz

```

図 2-46 最適化システムの実行結果

2.5.3 内部設計

5.3.1 にスクリプト一覧、5.3.2 にクラス図、5.3.3 にフローチャートを示した。

① 最適化システムのスクリプト

それぞれのスクリプトファイルは次の役割を持つ。

- BayesianOptimizer_with_PHYSBO.py 最適化システムのメインモジュール
- Constant.py 制御パラメータの定義モジュール (5.2.3 参照)
- CandidateSpace.py 探索空間の管理モジュール
- Evaluator.py 評価値の計算モジュール
- ParameterTable.py モデル定数のテーブルデータ作成を管理するモジュール
- ParameterTableInformation.py モデル定数の探索条件を管理するモジュール
(5.1.2 参照)
- Utility.py 付属品

② クラス



図 2-47 クラス図 (PHYSBO 最適化システム)

③ フローチャート

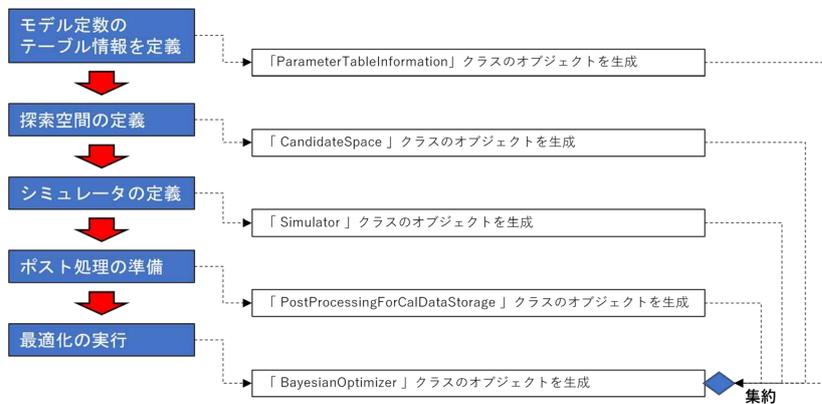


図 2-48 フローチャート (全体) (PHYSBO 最適化システム)

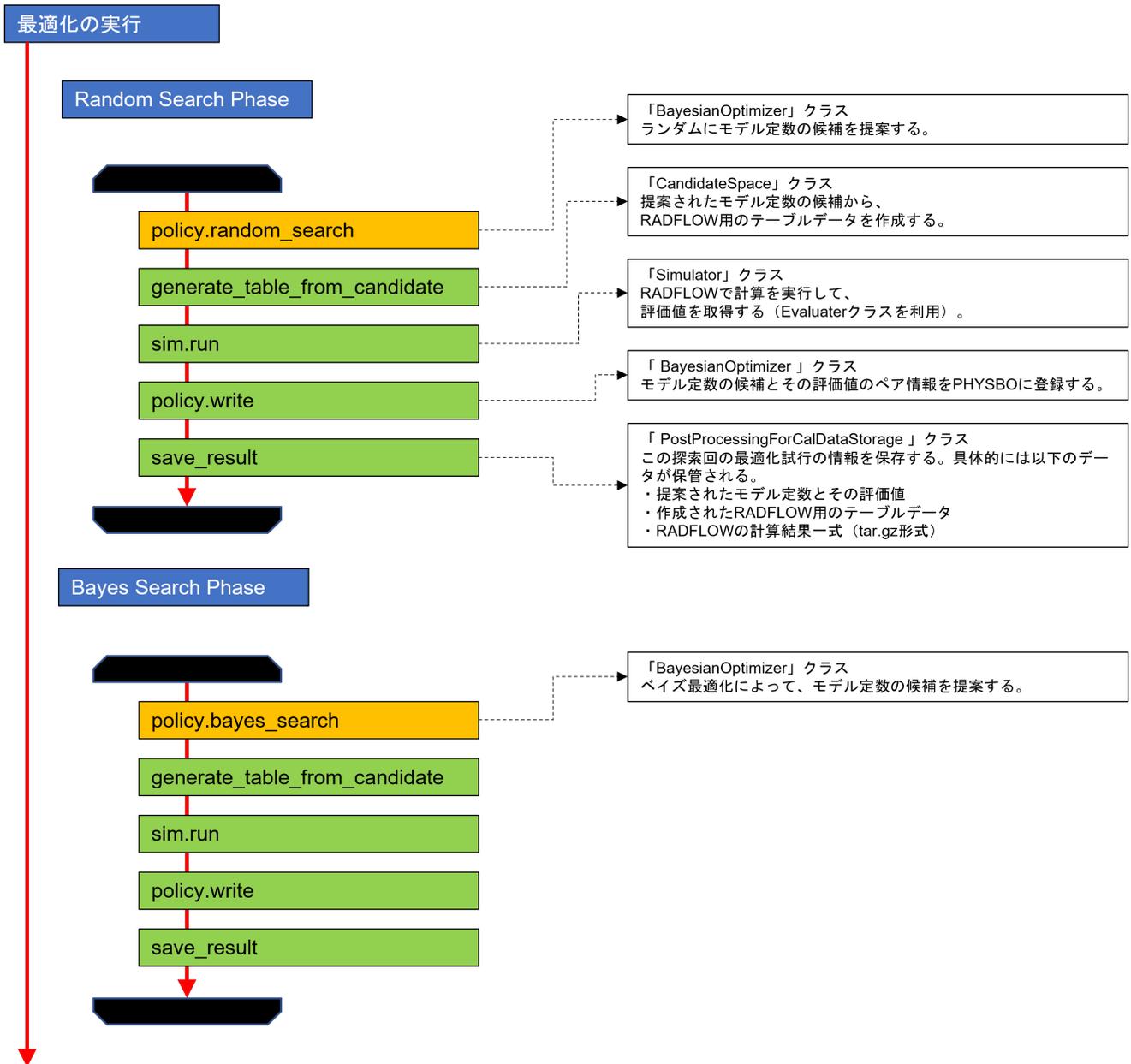


図 2-49 フローチャート（最適化処理部分）（PHYSBO 最適化システム）

2.6 課題

2.6.1 他のベイズ最適化ライブラリについて

➤ Optuna（Preferred Networks Inc.）

PHYSBO ではパラメータの探索候補を、ユーザーが明示的に、そして離散的にリストアップする必要があるが、Optuna では下記リンクにあるとおり、パラメータが動く範囲（下限、上限）を設定するだけでよい。

https://optuna.readthedocs.io/en/stable/tutorial/10_key_features/002_configurations.html

一方で、Optuna の公式サイトで説明がある通り、最適化するパラメータの個数を大きくすればす

るほど、ベイズ最適化は困難になるため、パラメータの個数は小さく設定することが推奨されている。

公式サイト：

<https://optuna.org/>

<https://optuna.readthedocs.io/en/stable/index.html>

2.6.2 最適化システムの動作環境について

現状での RADFLOW の PHYSBO 最適化システムは、Windows-OS 上での動作が確認できているのみである。Linux-OS や WSL 上の Ubuntu-OS での動作の対応はしていない。

2.7 GIS に関する基礎概念

2.7.1 測地系と座標系

● 測地系：

実際の地球には起伏が存在する。測地系はそのような地球を滑らかな楕円形モデルで近似したものである。当然、測地系が異なると、同じ位置でもそれを表現する座標値が異なることに注意すること。(次の WEB サイトから引用)

WEB サイト「大塚商会>BIM/CIM のまめ知識>座標系と測地系」

https://www.cadjapan.com/topics/cim/useful/words/171017_02.html

現在、日本測地系 2011 と世界測地系 WGS84 が標準的な測地系として採用されている。それぞれの測地系は使用している準拠楕円体や地心直交座標系の種類が異なるが、相互の差異はごくわずかであるため、座標値の誤差はほとんどないものとみなされる。(次の WEB サイトから引用)

WEB サイト「ESRI ジャパン>GIS 基礎知識>測地系」

<https://www.esri.com/gis-guide/coordinate-and-spatial/datum/>

測地系	別称	準拠楕円体	座標系
日本測地系	・旧日本測地系 ・東京測地系	Bessel 1841	日本独自に設定
日本測地系 2000	・世界測地系 ・JGD 2000	GRS 1980	地心直交座標系 (ITRF 1994)
日本測地系 2011	・世界測地系 ・JGD 2011	GRS 1980	地心直交座標系 (西日本と北海道：ITRF 1994 東日本と北陸：ITRF 2008)
WGS 84	・世界測地系 ・WGS 1984	WGS 84	地心直交座標系 (WGS 84)

図 2-50 測地系 (WEB サイトより抜粋)

- 座標系：

「座標系」についての内容の説明は、次のサイトから引用を行う。

WEB サイト「ESRI ジャパン>GIS 基礎知識>座標系」

<https://www.esri.com/gis-guide/coordinate-and-spatial/coordinate-system/>

地球上の位置を座標で表すための原点や座標の単位などの取り決めのことを座標系と呼ぶ。この取り決めにしたがって座標を表現することで、複数の GIS データを重ね合わせて表現したり解析したりすることが容易となる。GIS で扱う座標系には、地理座標系、投影座標系、鉛直座標系があるが、ここでは地理座標系と投影座標系について説明を行う。

地理座標系は、3 次元である地球上の位置を緯度と経度で表現する座標系である（図 2-51 参照）。緯度は、赤道を 0 度として南北方向にそれぞれ 90 度まで表す。経度は、本初子午線と呼ばれる経線を 0 度として東西方向にそれぞれ 180 度まで表す。地理座標系では、地球の重心を原点とし、座標の単位は角度で与える。「原点」、「赤道の面」、「目標物の位置」の関係を角度で表したものが緯度であり（図中の北緯 40 度）、「原点」、「本初子午線の面」、「目標物の経線の面」の関係を角度で表したものが経度である（図中の東経 50 度）。

ただし、地球の形状は完全な球体ではなく楕円体であり、さまざまな楕円体の形状が定義されている。また、地球の重心と楕円体の重心を一致させるかどうかなどの基準もあり、国によって採用している楕円体の形状や重心位置の基準は異なることに注意する。

投影座標系は、3 次元である地球を 2 次元の平面に投影し、XY 座標で表現する座標系のことである（図 2. 52 参照）。2 次元に投影するための方法を地図投影法と呼び、用いる投影法や設定する原点などの違いによって、さまざまな投影座標系が存在する。投影座標系における座標は、原点からの XY 軸方向への距離（メートルなど）で決まる（図 2-53 参照）。投影座標系では地球の形状なども考慮して投影を行うため、地理座標系の定義も含まれる。平面直角座標系、UTM 座標系は投影座標系であり、日本で使用される座標系の一種である。

地理座標系は、日本全国や世界などの広域に渡る範囲を一定の尺度を持った 1 つのデータとして管理できるという利点があるが、その一方で地理座標系の座標は 3 次元における角度で表されるため、その座標を平面上で表現した場合、距離・面積・角度のいずれも不正確となる。図 2-54 は、地球表面に描いた同じ大きさの円を、地理座標系のまま 2 次元に表示した地図である。地域によって形状が楕円に変化したり大きさが異なったりしており、面積や角度などが正確に表現されていないことがわかる。

投影座標系では、用いる投影法によって、距離・面積・角度のいずれかを正確に表現できるという特徴がある。したがって、正しい形状での地図表現、図形の作図、距離や面積による解析などを行う場合は、投影座標系が用いられる、図 2. 55 は、地球表面に描いた同じ大きさの円を、正角図法（角度が正しくなる図法）の一種であるメルカトル図法を用いて投影した地図である。この例では、どの地域でも形状は円のままであり、角度を正しく表現できていることがわかる。しかし、地域によって円の大きさが異なり、面積を正しく表現できていないことがわかる。そのため、正確に表現したい要素に合わせた投影法を選

択する必要がある。

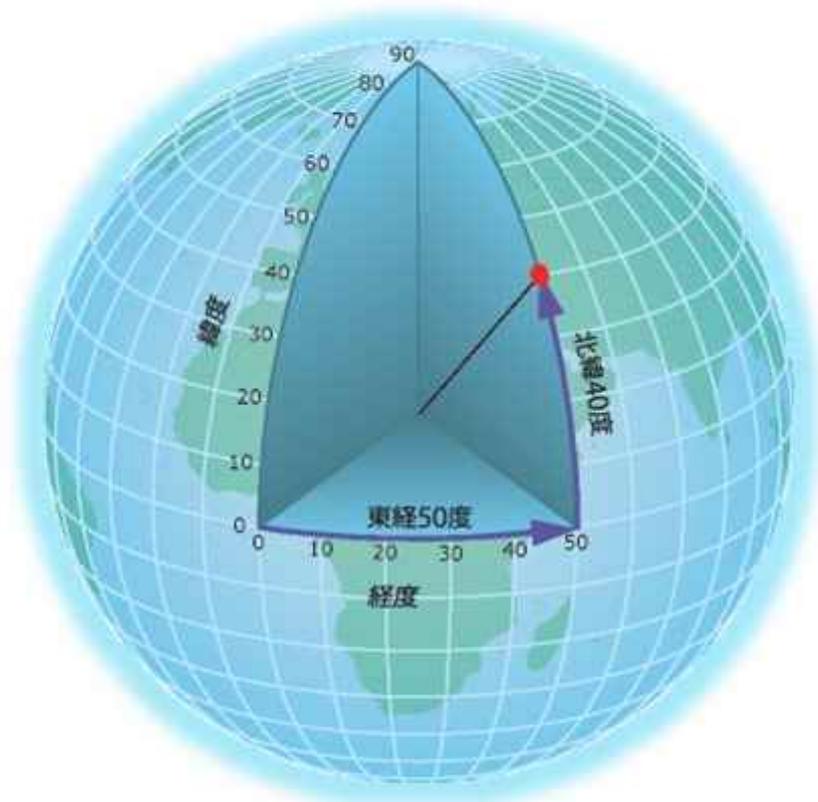


図 2-51 地理座標系 (WEB サイトより抜粋)

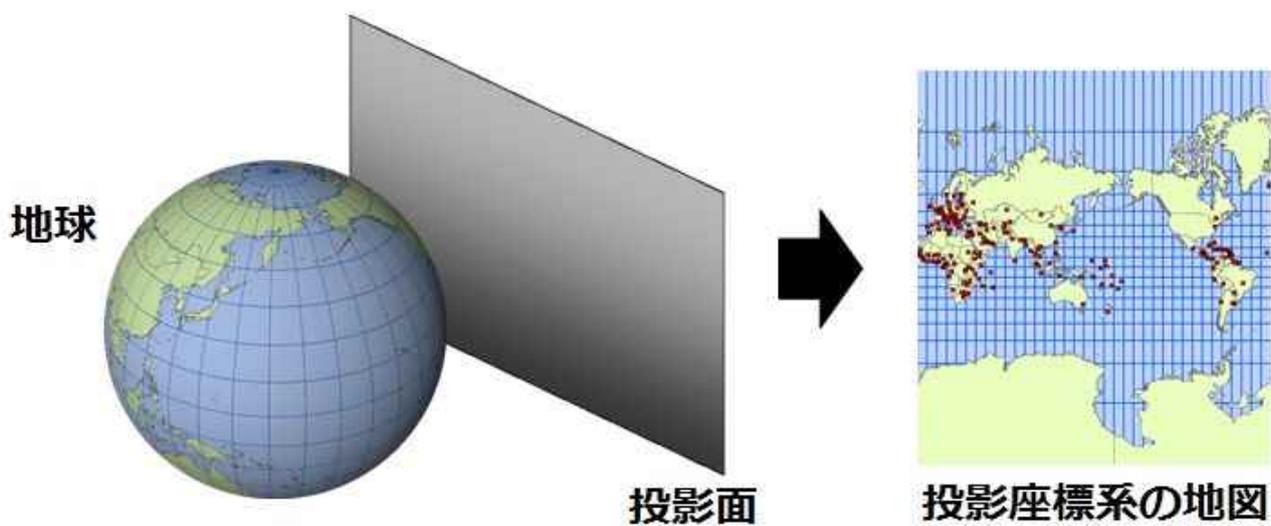


図 2-52 投影座標系 (WEB サイトより抜粋)

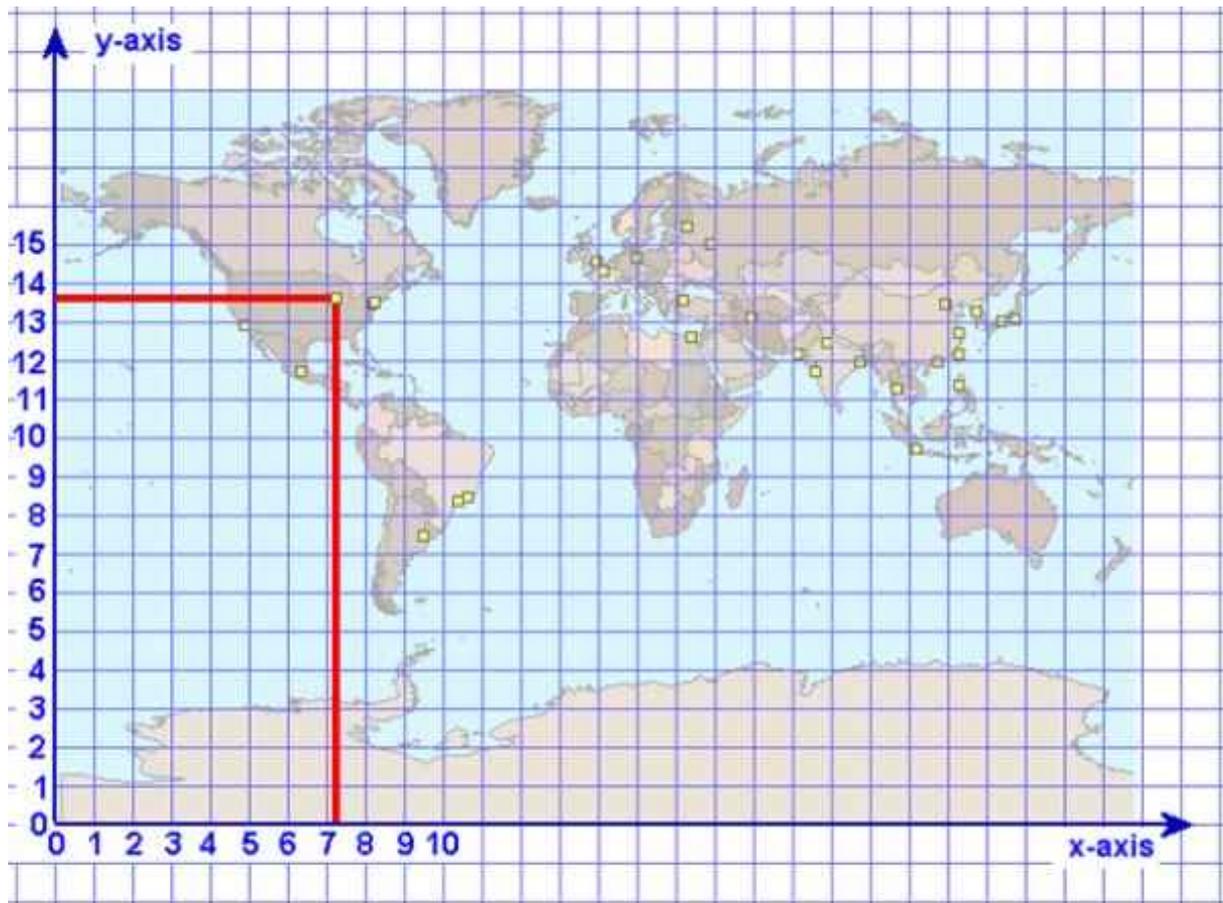


図 2-53 投影座標系 (WEB サイトより抜粋)

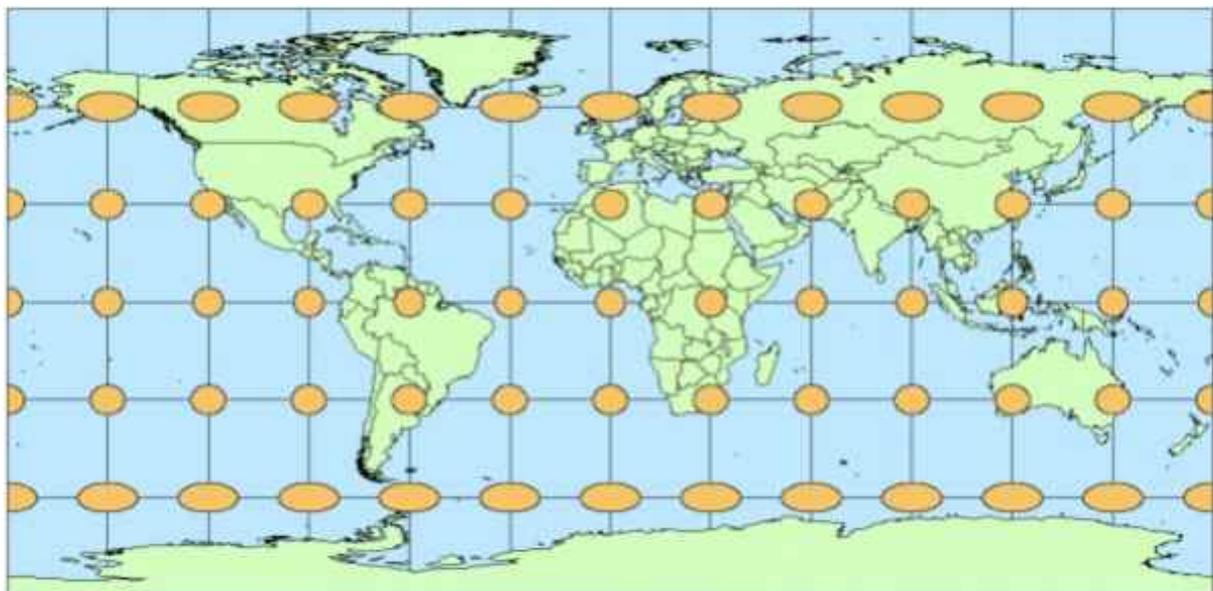


図 2-54 投影座標系 (WEB サイトより抜粋)

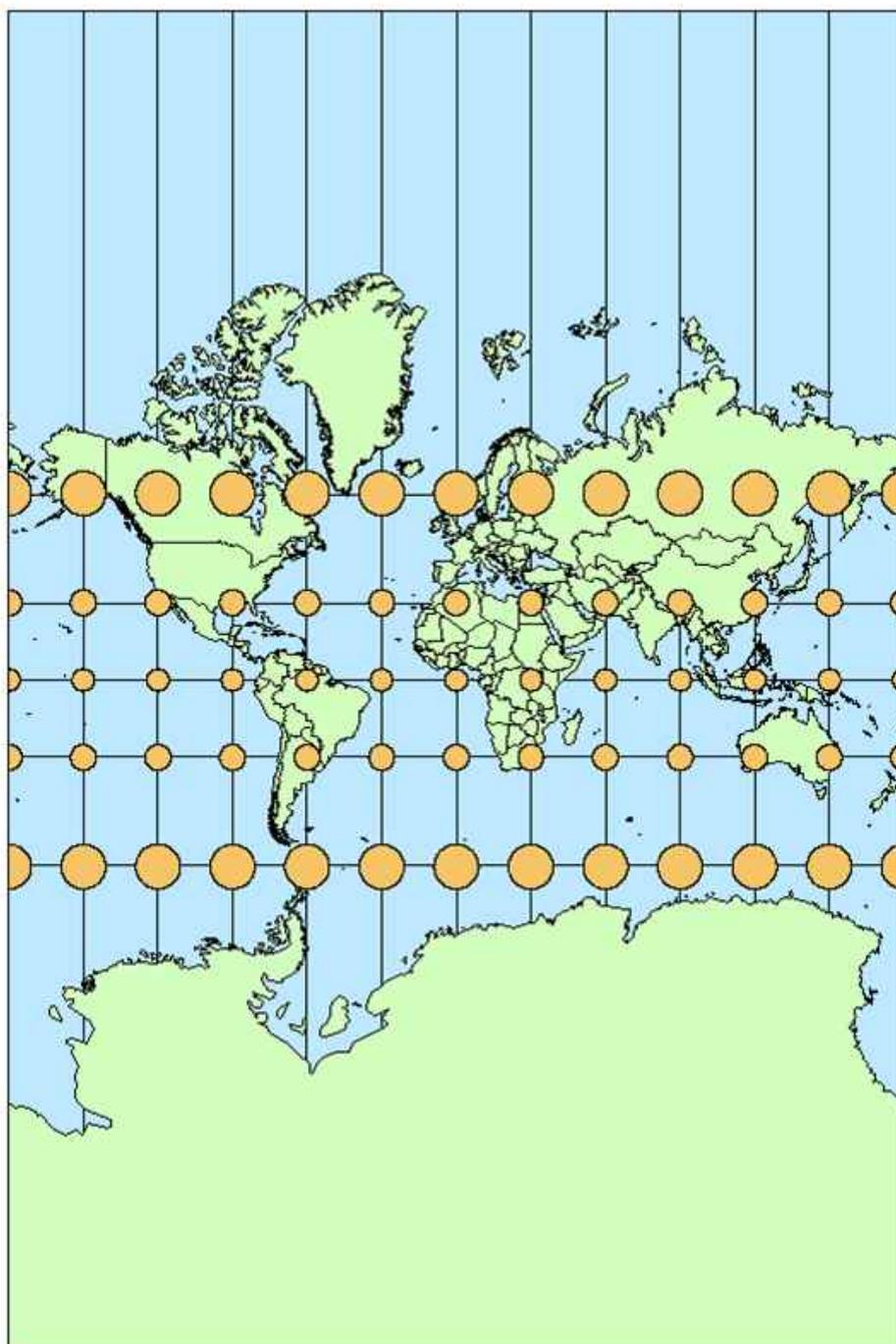


図 2-55 投影座標系 (WEB サイトより抜粋)

2.7.2 EPSG コード

EPSG コードとは、GIS で使用される様々な要素に必要なパラメータを 1 つにまとめ、そのパラメータの集合体どうしを区別するためにコードを割り振ったコード体系のことである。GIS で使用される要素には、座標参照系、測地系、本初子午線、地図投影法などがある。

2.8 地理空間情報の加工方法 (QGIS or ParaView)

2.8.1 作業環境

OS : Windows 10 Pro 21H1

QGIS : version 3.16.14

ParaView : version 5.9.0 (Qt version 5.15.1)

2.8.2 メッシュの作成

QGIS の機能を用いてポイントの発生、座標、標高値を与える。その後、ParaView の機能を用いて stl ファイル (ASCII フォーマット) を作成する

① QGIS による点群の生成

河川ノードのデータ作成は以下の手順で実施する。

1. 河川ベクターデータ (shp 拡張子ファイルを想定) と、数値標高データ (DEM、ラスタ形式) を QGIS に新たなレイヤーとして追加する。
2. 「プロセッシングツールボックス」>「ベクタ作成」>「線に沿ったランダム点群」を選択する。オプションとして、点の数、点間距離の最小値を設定して (※)、河川ベクターデータ上に点群を生成する。『河川点群レイヤ 1』とする。
※点間距離の最小値は、詳細パラメータ>点間最小距離 (全体) [オプション]で指定する。
3. 「プロセッシングツールボックス」>「ベクタテーブル」>「X/Y フィールドの追加」を選択して、『河川点群レイヤ 1』の属性テーブルに座標値 X/Y フィールドを追加する。このとき、オプションの CRS として解析に使用する座標系を指定することに注意する。
4. 「プロセッシングツールボックス」>「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 10mDEM (※) が持つ標高値をポイントに付与する。つまり、パラメータとして入力レイヤを『河川点群レイヤ 1』とし、ラスタレイヤを DEM とする。オプションとして、「ラスタ値を収納するカラム名の接頭辞」を「Elevation」と指定する。『河川点群レイヤ 2』とする。
※DEM の窪地を埋める方法は、「プロセッシングツールボックス」>「GRASS」>「ラスタ」>「r.fill.dir」を利用する。
5. レイヤパネルにある対象のレイヤ『河川点群レイヤ 2』を右クリック>「エクスポート」>「地物の保存」を選択する。このときに、csv ファイルとして保存する (※)。『random_points_on_river.csv』とする。このとき、shp ファイルとしても保存しておく、やり直しが効く。
※オプションとして、エクスポートするフィールドを選択する。座標値 X/Y フィールドと標高値フィールド (Elevation) のデータが出力されるようにする。

河川ノードに続いて、流域内のノードデータは以下の手順で作成する。

1. 「プロセッシングツールボックス」>「ベクタ作成」>「ランダム点群」を選択する。オプションとして、作成範囲を「キャンバスに描画」モードで指定する。また、点の数、点間距離の最小値を設定して (※)、点群を発生させる。『流域点群レイヤ 1』とする。
※点間距離の最小値は「詳細パラメータ>点間最小距離 (全体) [オプション]」で指定する。

2. レイヤパネルにある対象のレイヤ『流域点群レイヤ1』を右クリック>「編集モード切替」を選択する。そして、「ツールバー」>「頂点ツール（現在のレイヤ）」をクリックして、河川ノード近くに発生した流域ノードを河川沿いに移動する（※）。また、不要なノードは削除する。編集が完了したときには、編集内容を保存する。
※窪地を埋めた 90mDEM を見ながら、同じ 90mDEM 値内に 2 つのノードが存在しないように注意する（同じ標高が存在すると水が流れなくなる）。可能な範囲で河川沿いにノードを作成する、あるいは計算対象領域外からノードを移動してくる。
3. 河川ノードと同様な方法で、属性テーブルに座標値 X/Y フィールドと標高値フィールドを追加する。『流域点群レイヤ2』とする。
4. csv ファイルとしてエクスポートする。『random_points_in_basin.csv』とする。このとき、shp ファイルとしても保存しておく、やり直しが効く。

EXCEL で出力した 2 つの csv ファイルをマージし、カラムが X,Y,Z, (1or2) となるように編集する。ここで、フラグは河川ノードには 2、それ以外は 1 を割り当てる。また、このときに河川ノードの標高を 0.0m~1.0m 程度下げる（掘る）ことで、シミュレーション時に河川ノード上に川（主流）が形成されやすくなる。

- 『random_points_on_river.csv』
- 『random_points_in_basin.csv』

ここで作成したファイルを、『points.csv』とする。

② ParaView によるメッシュの生成

前のステップで作成した 『points.csv』 について、ParaView の機能でメッシュを生成する。次の手順で行う。

1. ParaView に 『points.csv』 を読み込ませる。
2. 「Filters」タブ>「Alphabetical」>「TableToPoints1」を選択して、点群オブジェクト『PointsObject』を生成する。ただし、「Properties」で X,Y,Z 座標に対応する表カラム位置を適切に指定する。このとき、点群オブジェクトを「Point Gaussian」モードで表示すると見やすくなる。
3. 作成した点群オブジェクト『PointsObject』を選択して、「Filters」タブ>「Alphabetical」>「Delaunay2D」を選択して、2次元ドロネー分割によりメッシュを作成する。ここで、投影方向を適切に指定する必要がある（「Properties」の「Projection Plane Mode」を「XY Plane」とする）。これを『MeshObject』とする。
4. 不要なセルを削除する場合は、次の手順を踏む。
 - A) レンダリングウィンドウの上部に付いた「Select Cells on」や「Interactive Select Cells on」などボタンの機能を使って、削除したいセルを選択する。
 - B) 「Edit」タブ>「Find Data」を選択する。そこで、「Current Selection」という項目に、選択したセルのリストが表示される。このときに「Invert selection」のチェックボックスを ON にして、選択リストを反転させる（“削除しないセル”のリストが表示される）。次に、「Extract Selection」を選択すると、不要なセルを除いたメッシュデータが新たなオブジェクトとして生

成される。これを『MeshObject2』とする。

- C) 『MeshObject2』のタイプは「Unstructured Grid」である。一方で、STL 出力をサポートしているのは、「Polydata」タイプだけであるので、このタイプへの変換が必要となる。従って、『MeshObject2』に「ExtractSurface」フィルターを適用して、「Polydata」タイプのメッシュオブジェクトを生成する。これを『MeshObject3』とする。

5. 「File」タブ>「Save Data」を選択して、『MeshObject3』を stl データで保存する。ただし、「FileType」として Ascii を指定する。

以上、手順により所望のメッシュデータ (stl 形式) が得られる。

2.8.3 Tips

① プロセッシングツールボックスの表示

「プロセッシング」タブ>「ツールボックス」を選択する。

② ベクタファイル (shp, geojson など) の座標変換

次の手順に従う。

- レイヤの座標系を確認する。
 - 「レイヤ」タブ>「レイヤのプロパティ」>「情報」を選択する。この項目で「座標参照系 (CRS)」で、レイヤの座標系が確認できる。
- レイヤの座標系を定義する (座標系が未定義の場合、この作業が必要)。
 - 「プロセッシングツールボックス」>「シェープファイルの投影法の定義」>「CRS」に適切な座標系を設定する。
- 異なる座標系の shp ファイルを作成する。
 - 「レイヤ」タブ>「名前を付けて保存」を選択する。
 - 「ファイル名」を設定し、「座標参照系 (CRS)」に変更後の座標系を指定する。
 - 「領域」のチェックボックスにチェックを付ける。
 - 「OK」ボタンを押して、保存する。
- ウィンドウの座標値パネルの設定変更。
 - このパネルにより、カーソル位置での座標値を取得できる。
 - この座標値の「座標参照系 (CRS)」を変更したい場合は次の手順を踏む。
 - 「プロジェクト」タブ>「プロパティ」>「座標参照系」を選択する。
 - 適切な「CRS」を選択して「適用」ボタンを押すと、ウィンドウの座標値パネルの座標系が変更される。

③ ラスタファイル (geotiff など) の座標変換

- レイヤの座標系を確認する。
 - 「レイヤ」タブ>「レイヤのプロパティ」>「情報」を選択する。この項目で「座標参照系 (CRS)」で、レイヤの座標系が確認できる。

2. レイヤの座標系を定義する（座標系が未定義の場合、この作業が必要）。
 - 「ラスタ」タブ>「投影法」>「投影法の割り当て」を選択する。
3. 異なる座標系のラスタファイルを作成する。
 - 「ラスタ」タブ>「投影法」>「再投影（warp）」を選択する。このとき、オプションで変換後の CRS を設定する。

④ レンダリングのスタイルを複数レイヤーで統一

1. ある代表レイヤーについて、レンダリングを設定する。
2. ブラウザで代表レイヤーを選択して、「レイヤ」タブ>「スタイルのコピー」を選択する。
3. ブラウザで他のレイヤーを選択して、「レイヤ」タブ>「スタイルの貼り付け」を選択すると、代表レイヤーのスタイルが他のレイヤーに反映される。

⑤ 標高ラスタレイヤから窪地のない標高レイヤを生成する

QGIS の機能の「r.fill.dir」を使用する。r.fill.dir は、所定の標高ラスタレイヤから、窪地のない標高レイヤと流れ方向レイヤをフィルタリングして生成する。

「プロセッシングツールボックス」>「GRASS」>「ラスタ」>「r.fill.dir」を選択する。

⑥ 複数のラスターをマージ（結合）して、一つのラスターデータにまとめる。

「ラスター」タブ>「その他」>「結合（gdal_merge）」を選択する。「入力レイヤ」という項目で結合するレイヤを複数選択する。また、結合するラスタレイヤのデータ型を適切に入力する必要がある。レイヤのデータ型は「プロパティ>情報>データタイプ」から確認ができる。

詳細については、以下のサイトを参考にする。

WEB サイト『CRACKPOT QGIS で複数のラスターを結合する』

<https://ryotts.wordpress.com/2018/09/12/qgisで複数のラスターを結合する/>

⑦ 複数のベクターをマージ（結合）して、一つのベクターデータにまとめる。

「ベクター」タブ>「データ管理ツール」>「ベクターレイヤのマージ」を選択する。詳細については、以下のサイトを参考にする。

WEB サイト『QGIS 入門 08. いくつかの shape ファイルを一つにまとめる』

<https://sites.google.com/site/qgisnoiriguchi/vector01/08>

⑧ 無効な入力地物への対応

プロセッシングツールで処理をした際に、「処理設定を[無効な入力地物を無視する]オプションに変更してください」と警告が出た場合、以下のツールで対処が可能ながある。

- ジオメトリの修復

この付属ツールは、入力レイヤの頂点を欠損することなく、無効なジオメトリの修復を実行する。また、有効なジオメトリはそのまま返される。

- 有効性のチェック

このアルゴリズムは、ベクタレイヤのジオメトリの有効性をチェックする。ジオメトリは、有効・無効・エラーの3グループに分類され、それぞれの地物を含むレイヤが生成される。ただし、オプションとして、「自己交差のリングを無視する」をオンにすると、チェック精度は粗くなる（QGISのヘルプより引用）。

2.9 4河川（前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）の情報

ここでは、試解析の対象の4河川について、3.5.2で省略した地理空間情報の分布図を掲載する。

2.9.1 地理空間情報の分布

① 前田川

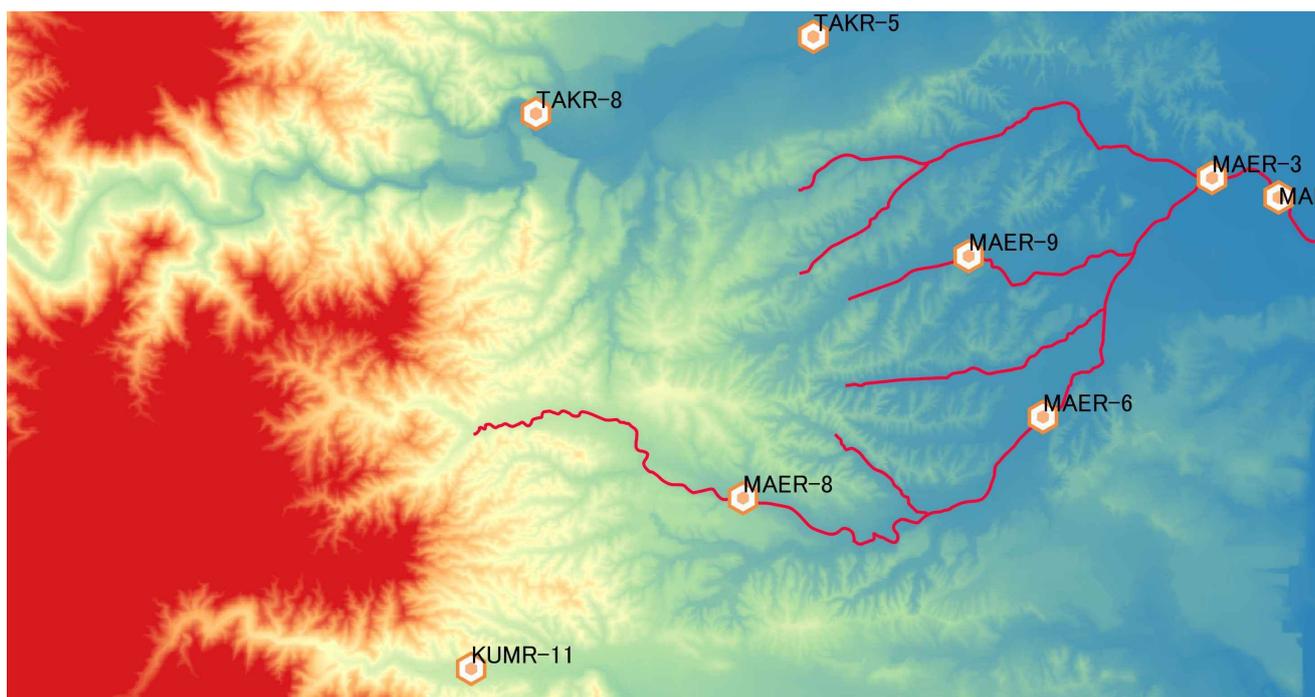


図 2-56 数値標高データおよび河川形状（前田川）

※数値標高データは 1.2 「データ：地形（DEM）」で取得したデータ。

※河川ノードは 1.3 「データ：河川（XML, geojson）」で取得したデータ。

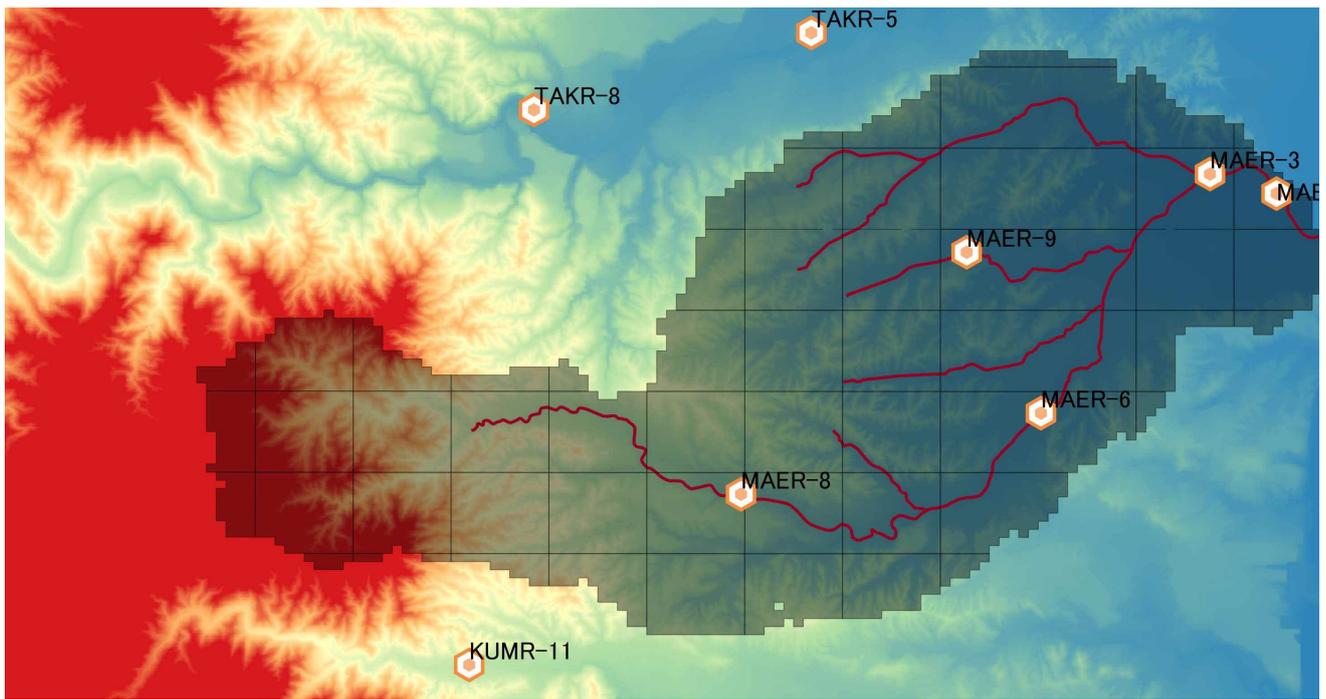


図 2-57 流域（前田川）

※流域は 1.4「データ：流域界データ」で取得したデータ。

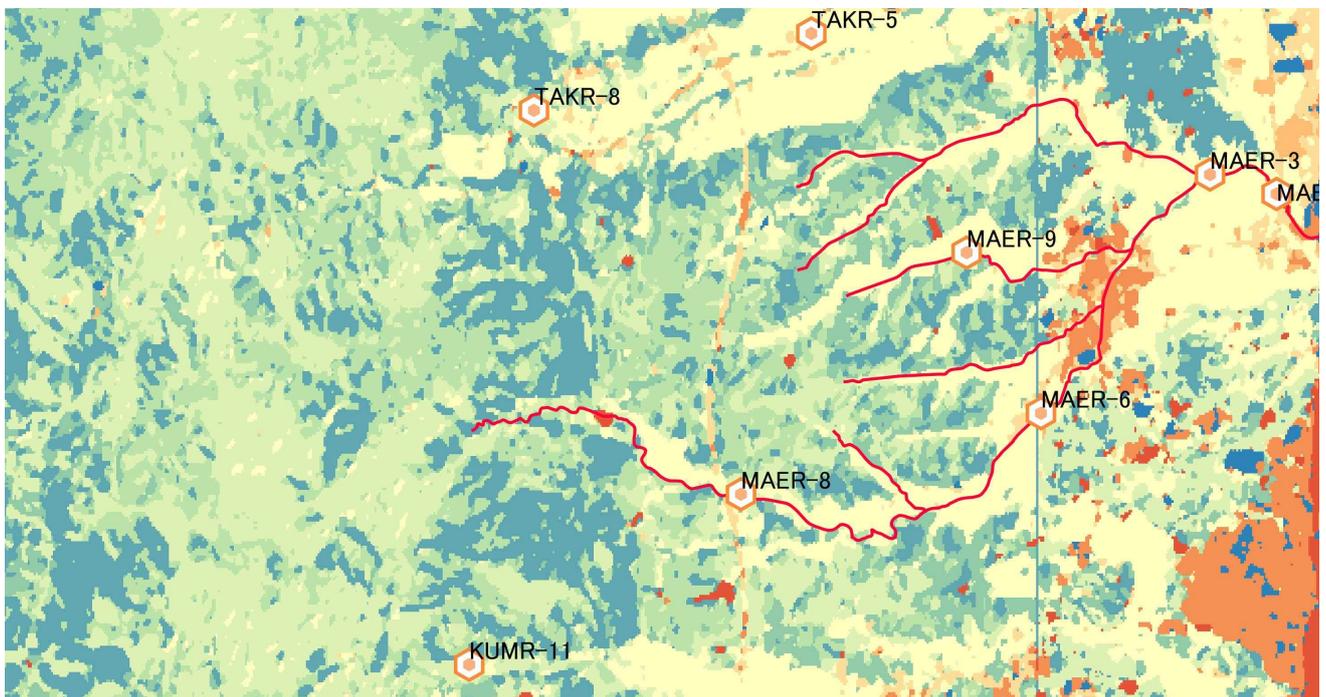


図 2-58 土地利用データの分布（前田川）

※土地利用は 1.5「データ：土地利用（Land Use）」で取得したデータ。

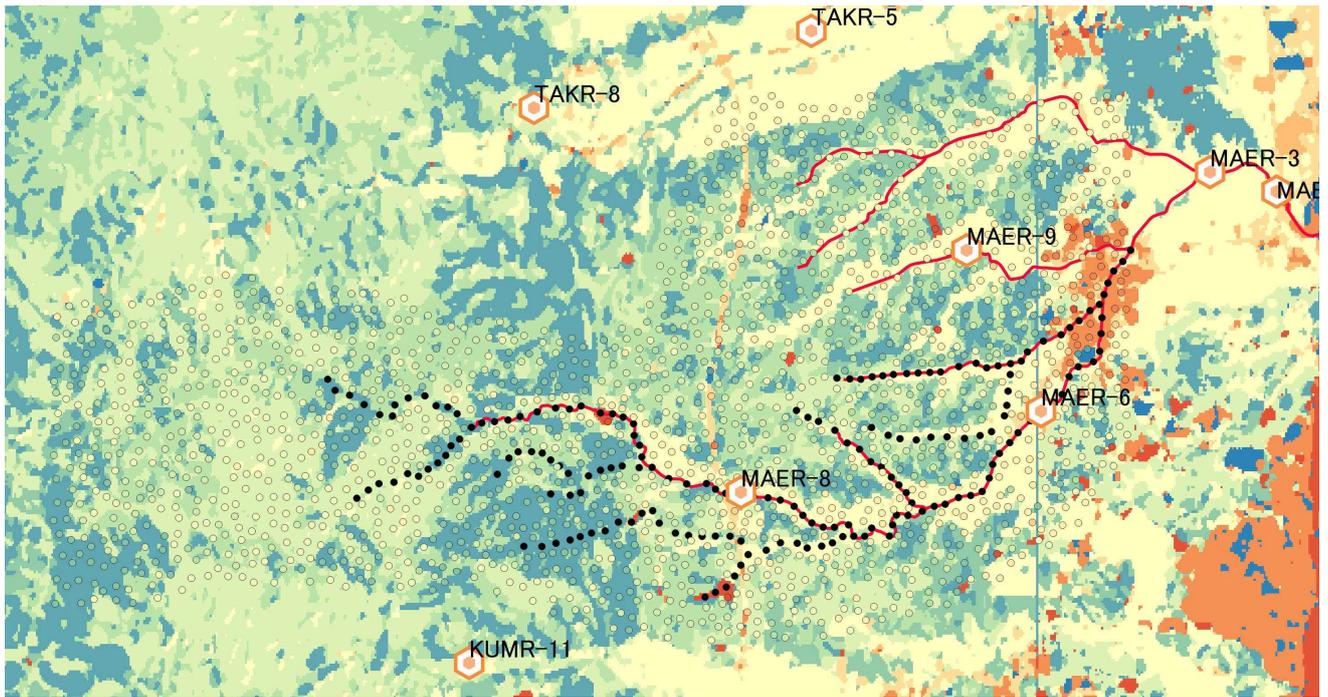


図 2-59 計算ノードの土地利用属性①（前田川）
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

図 2-59 について、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な土地利用属性が設定されていることを確認できる。

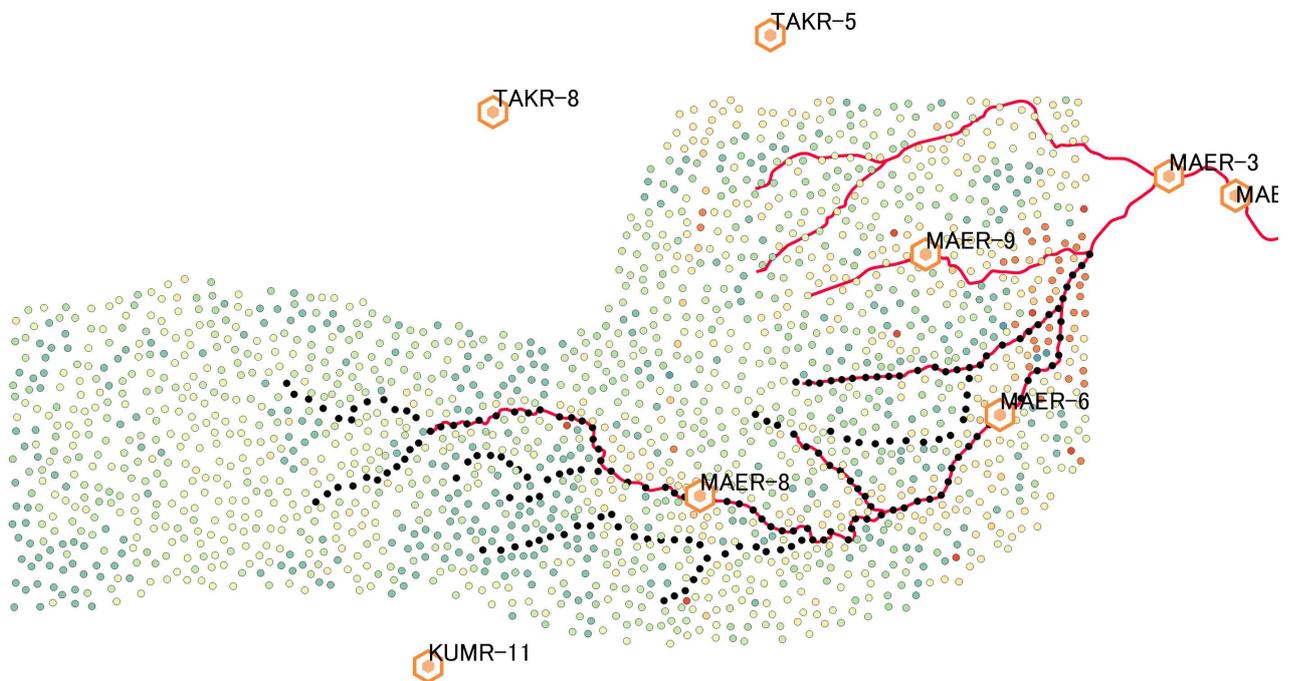


図 2-60 計算ノードの土地利用属性②（前田川）
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

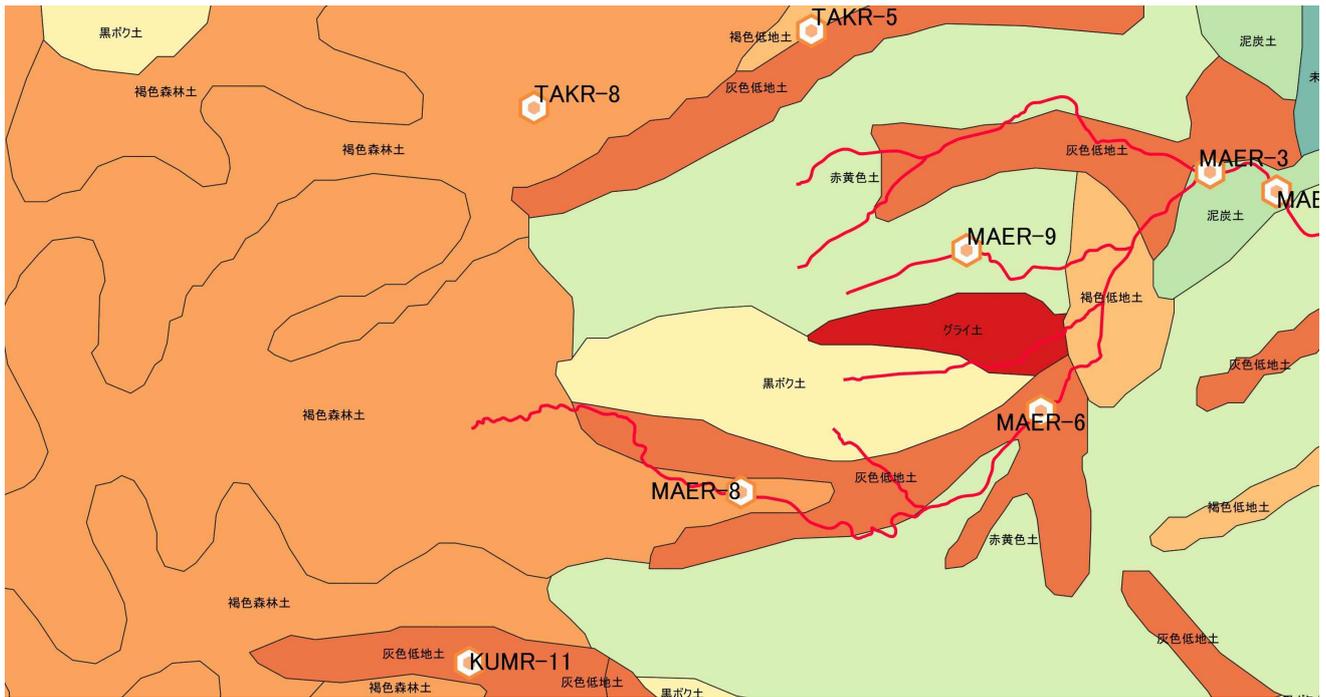


図 2-61 土壌図データの分布 (前田川)

※土壌図は 1.6 「データ：土壌 (Soil)」 で取得したデータ。

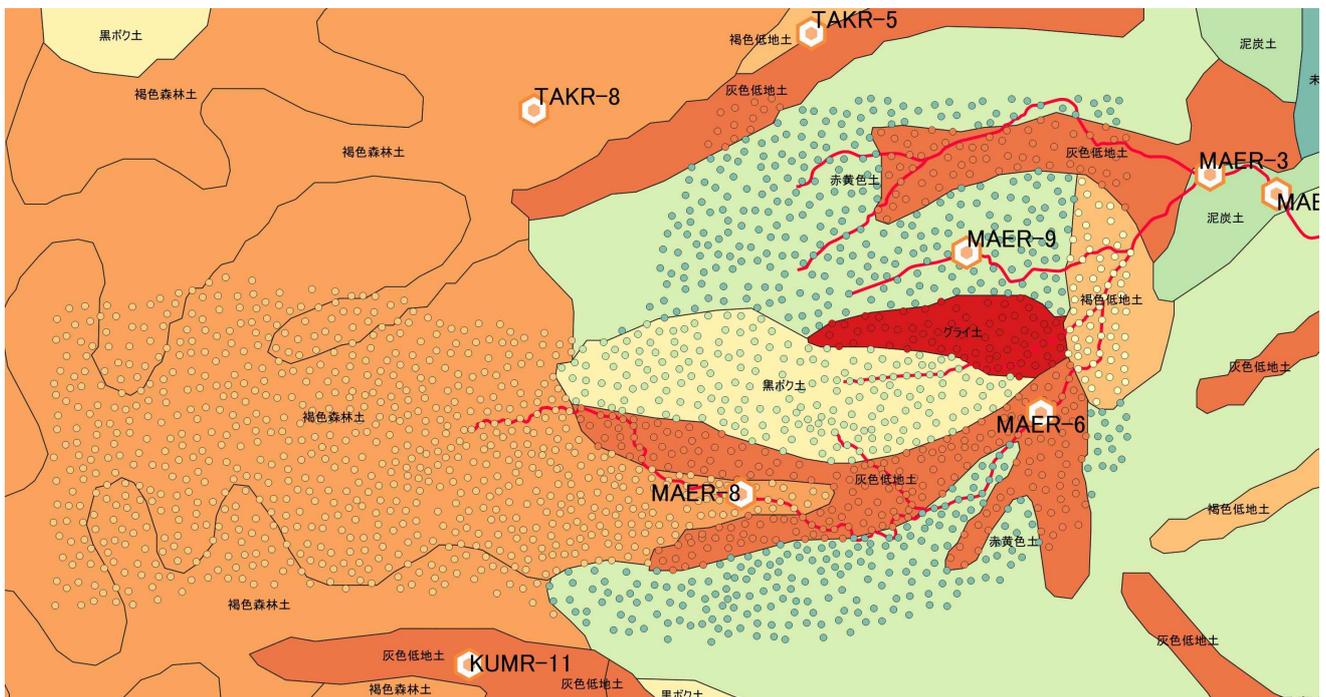


図 2-62 計算ノードの土壌属性① (前田川)

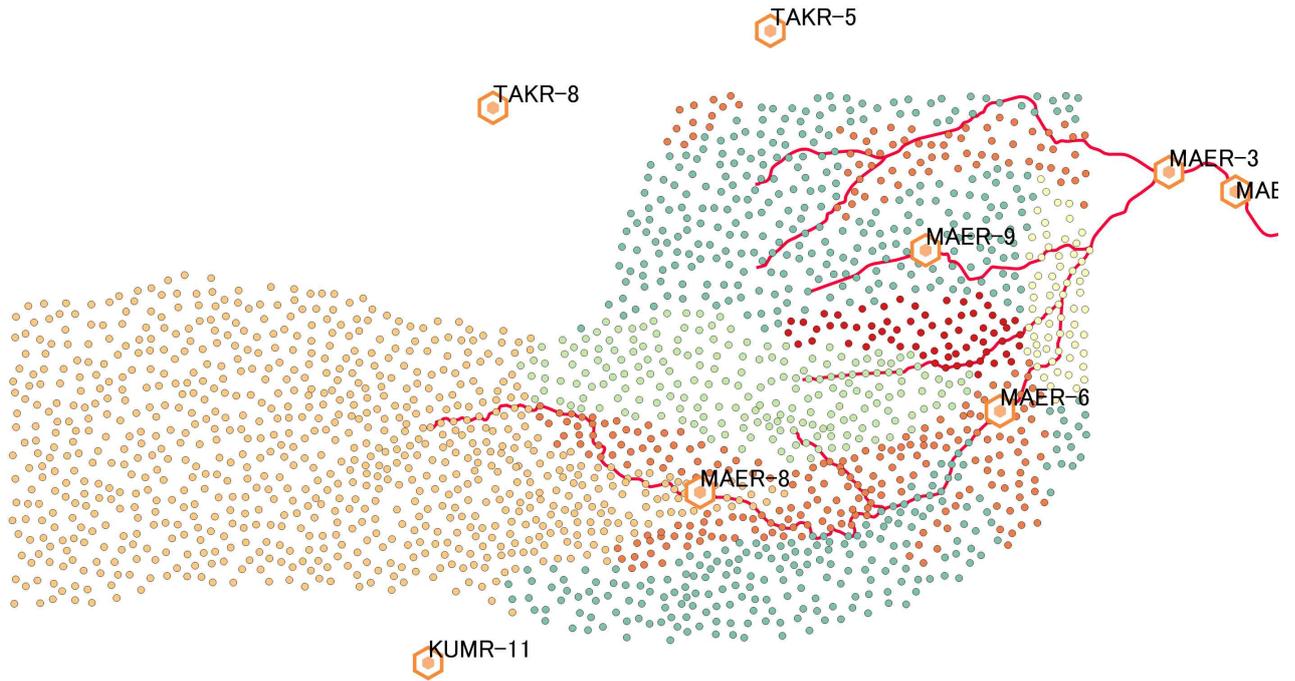


図 2-63 計算ノードの土壌属性② (前田川)

図 2-62 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な土壌属性が設定されていることを確認できる。ただし、土壌図ポリゴンのカラーリングと計算ノードのカラーリングは一致させていないので、ポリゴンとその上に位置している計算ノードの色は必ずしも整合しないことに注意すること。

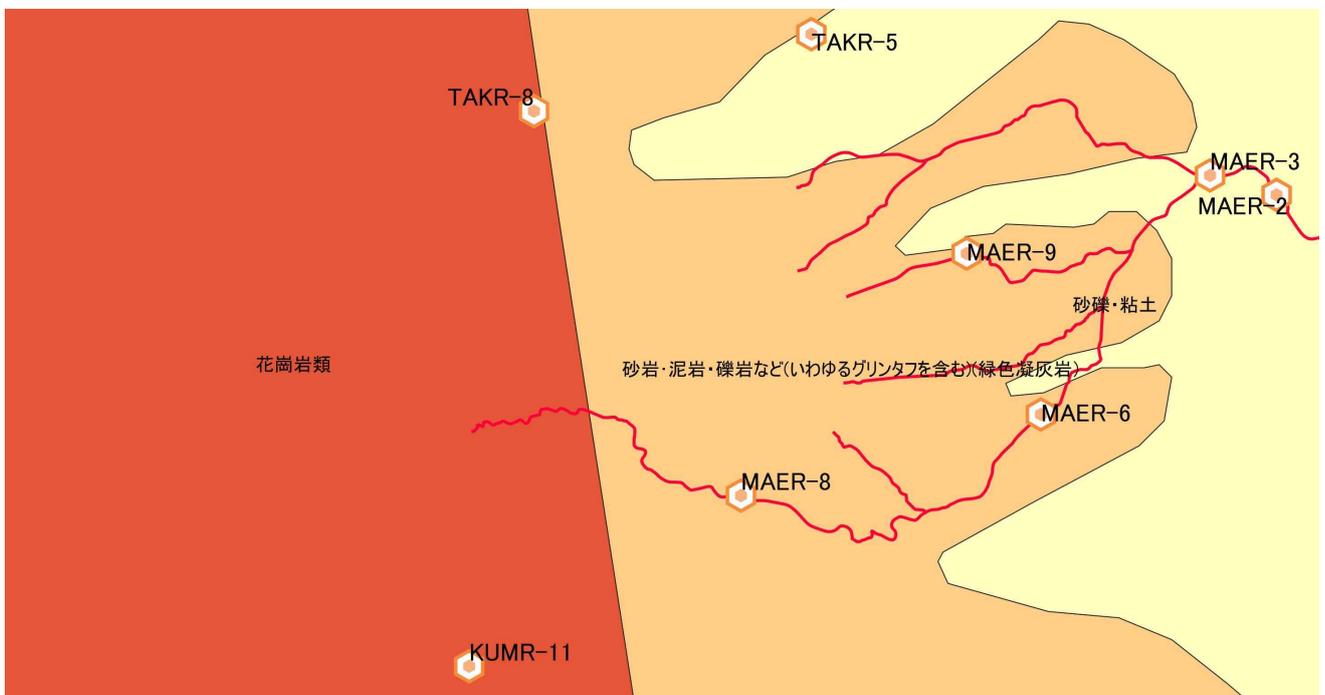


図 2-64 表層地質図データの分布 (前田川)

※表層地質図は 1.7 「データ：表層地質 (Geology)」 で取得したデータ。

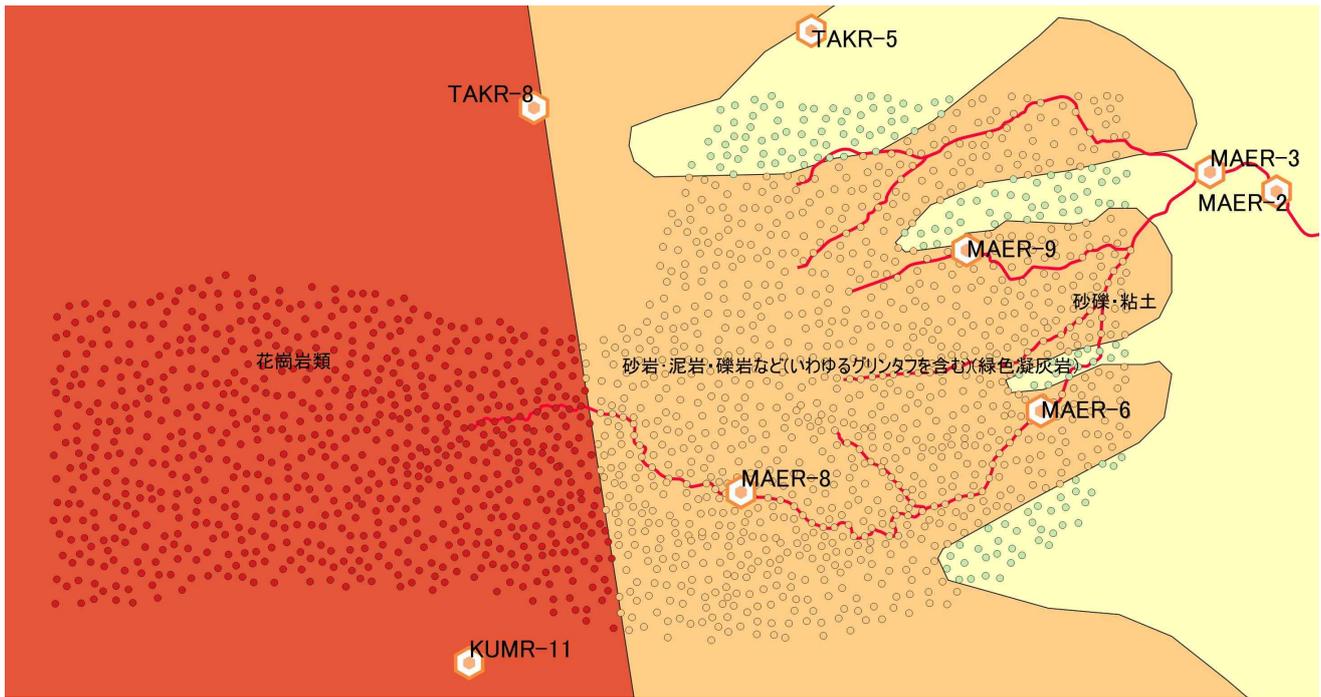


図 2-65 計算ノードの表層地質属性① (前田川)

図 2-65 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な表層地質属性が設定されていることを確認できる。ただし、表層地質図ポリゴンのカラーリングと計算ノードのカラーリングは一致させていないので、ポリゴンとその上に位置している計算ノードの色は必ずしも整合しないことに注意すること。

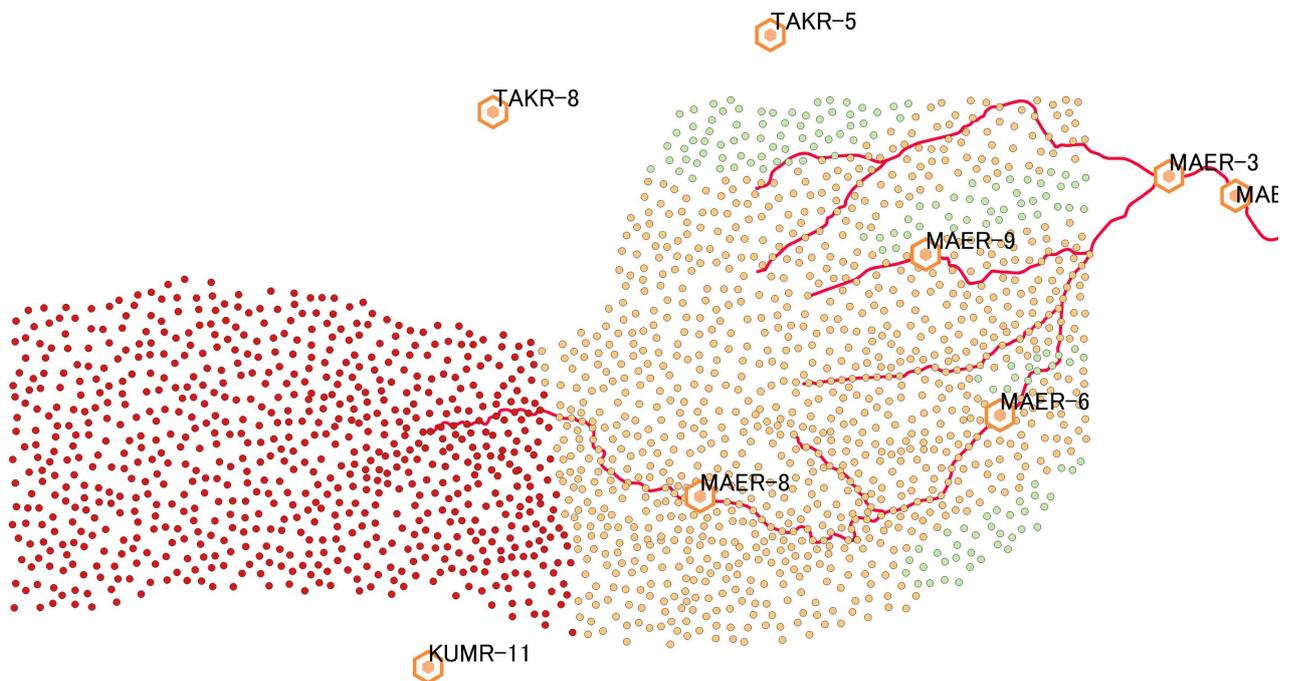


図 2-66 計算ノードの表層地質属性② (前田川)

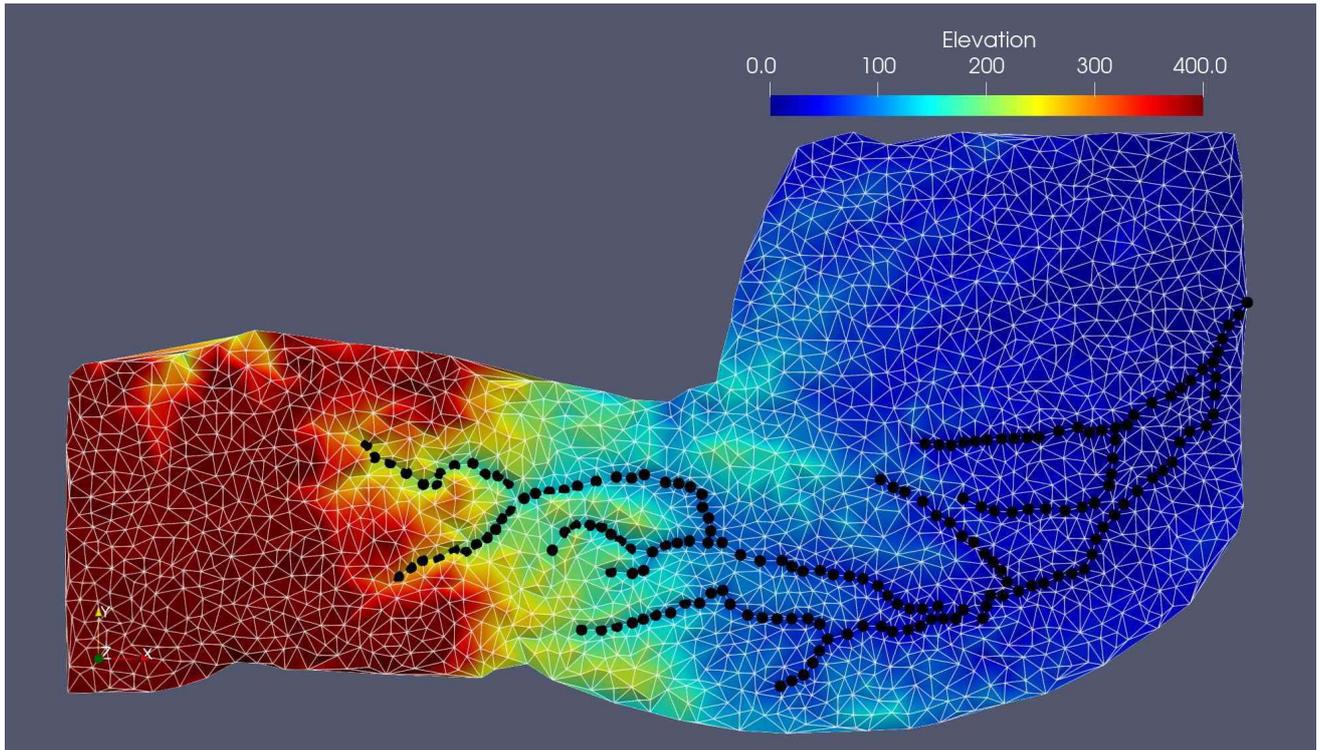


図 2-67 計算メッシュ① (前田川)
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

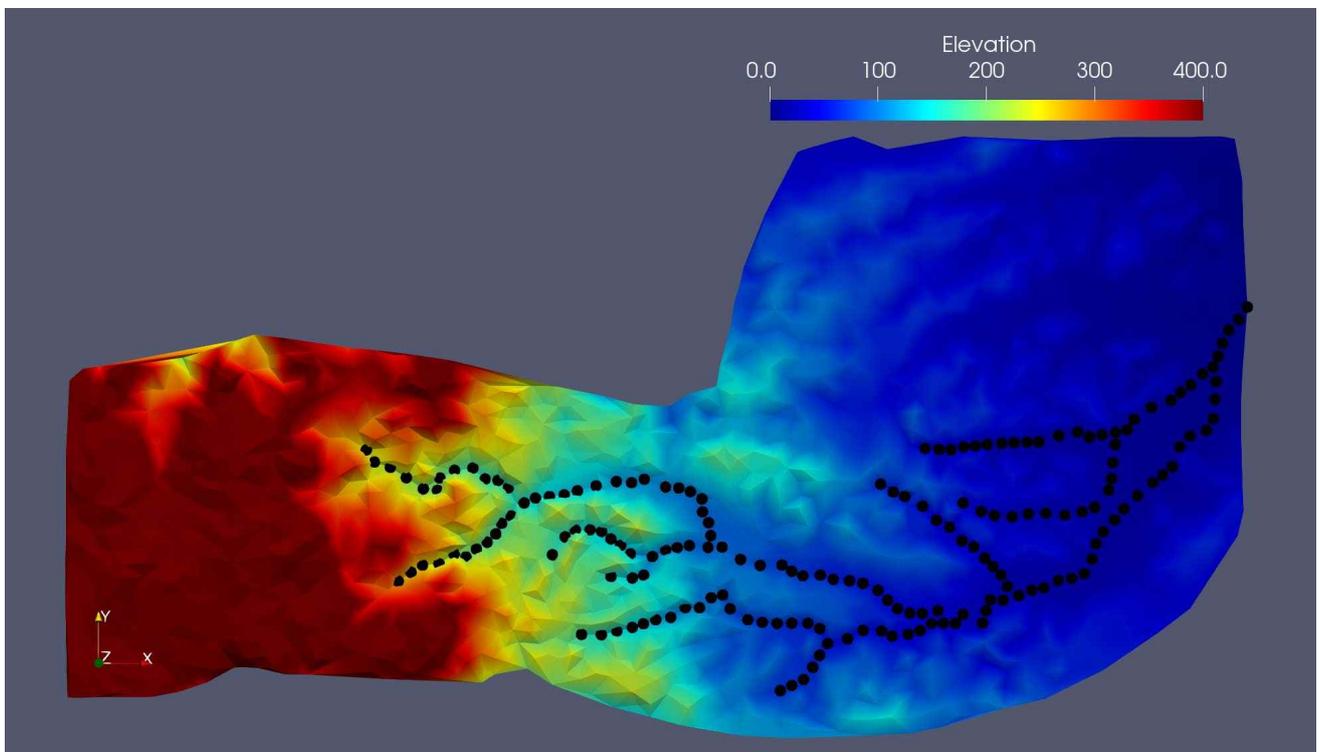


図 2-68 計算メッシュ② (前田川)
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

② 熊川

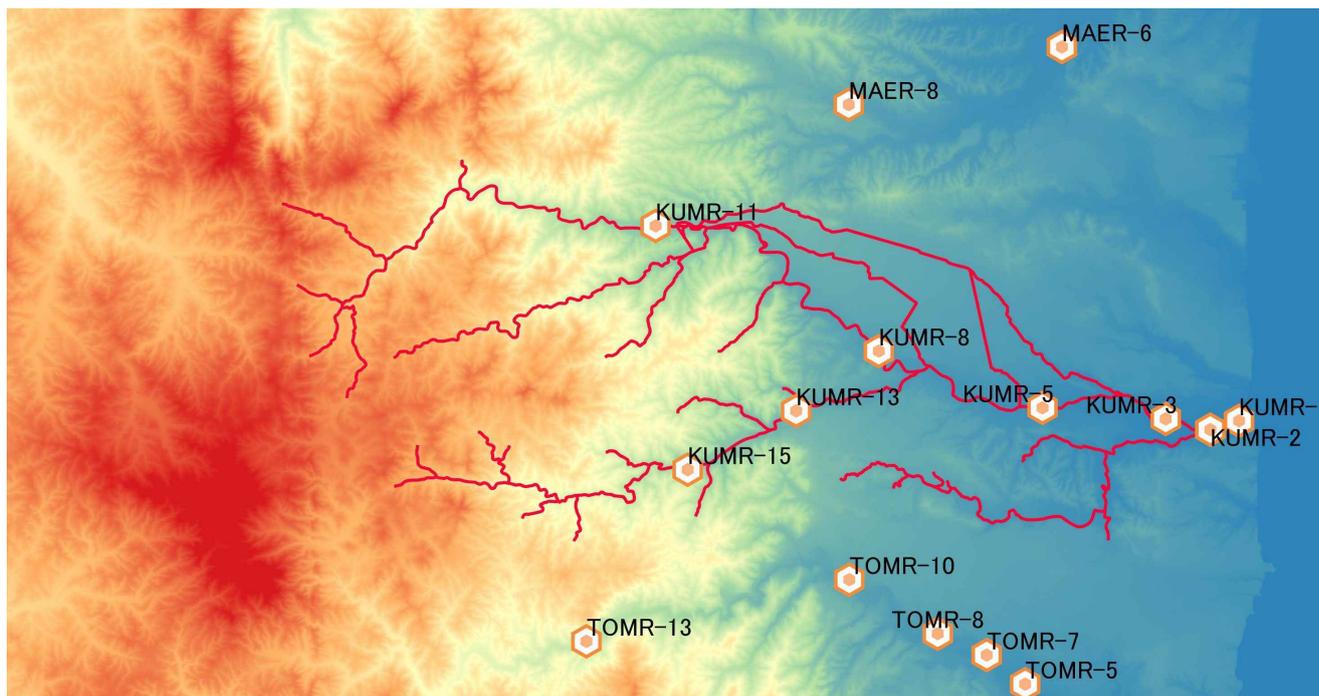


図 2-69 数値標高データおよび河川形状 (熊川)

※数値標高データは 1.2 「データ：地形 (DEM)」 で取得したデータ。

※河川ノードは 1.3 「データ：河川 (XML, geojson)」 で取得したデータ。

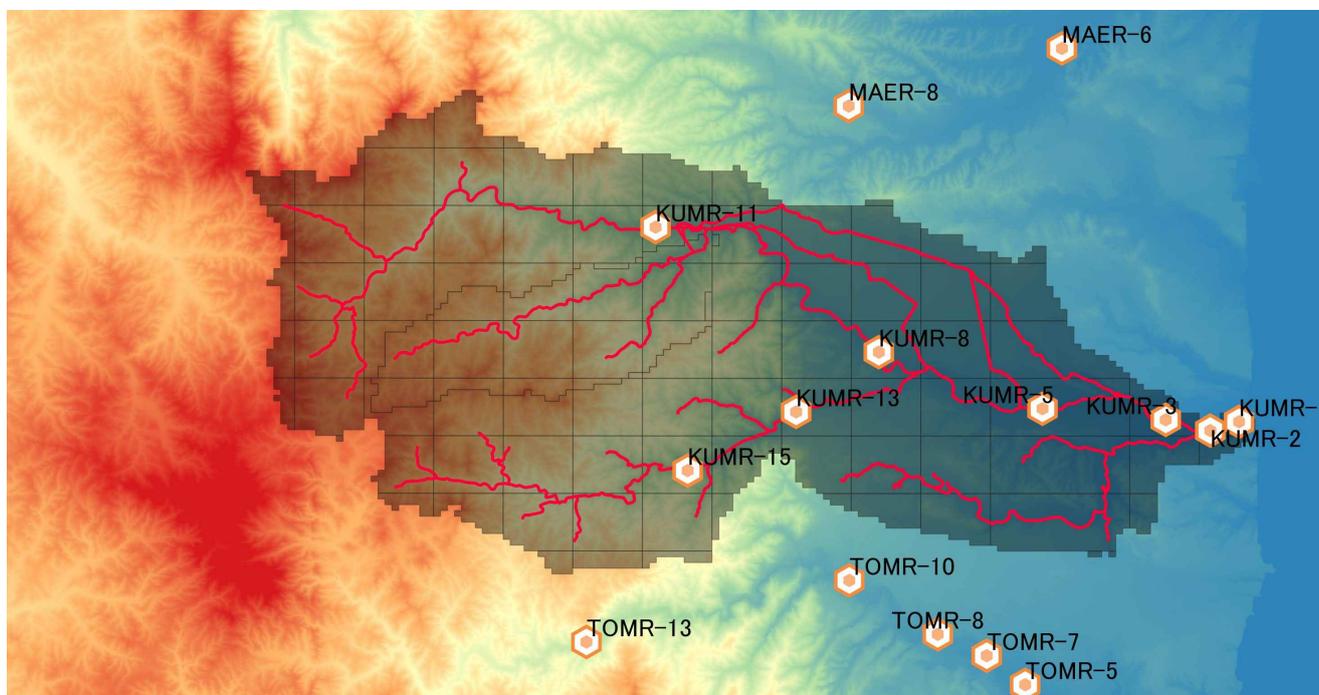


図 2-70 流域 (熊川)

※流域は 1.4 「データ：流域界データ」 で取得したデータ。

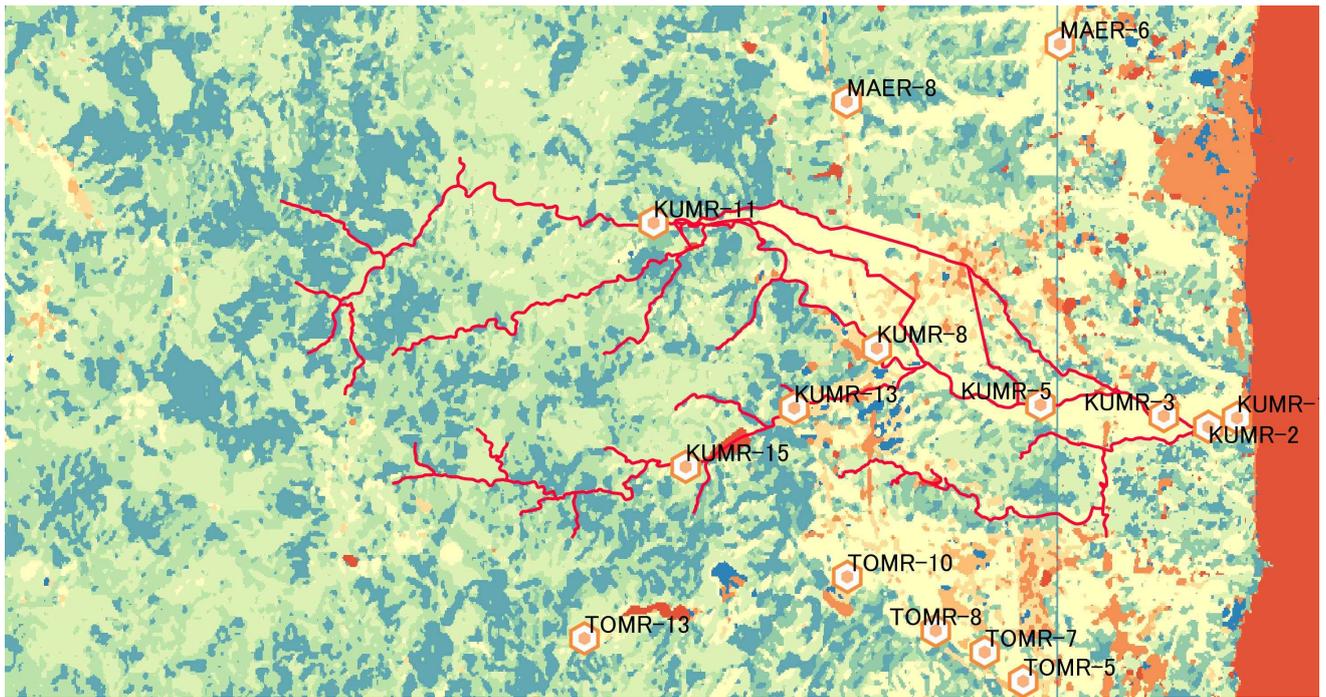


図 2-71 土地利用データの分布 (熊川)

※土地利用は 1.5「データ：土地利用 (Land Use)」で取得したデータ。

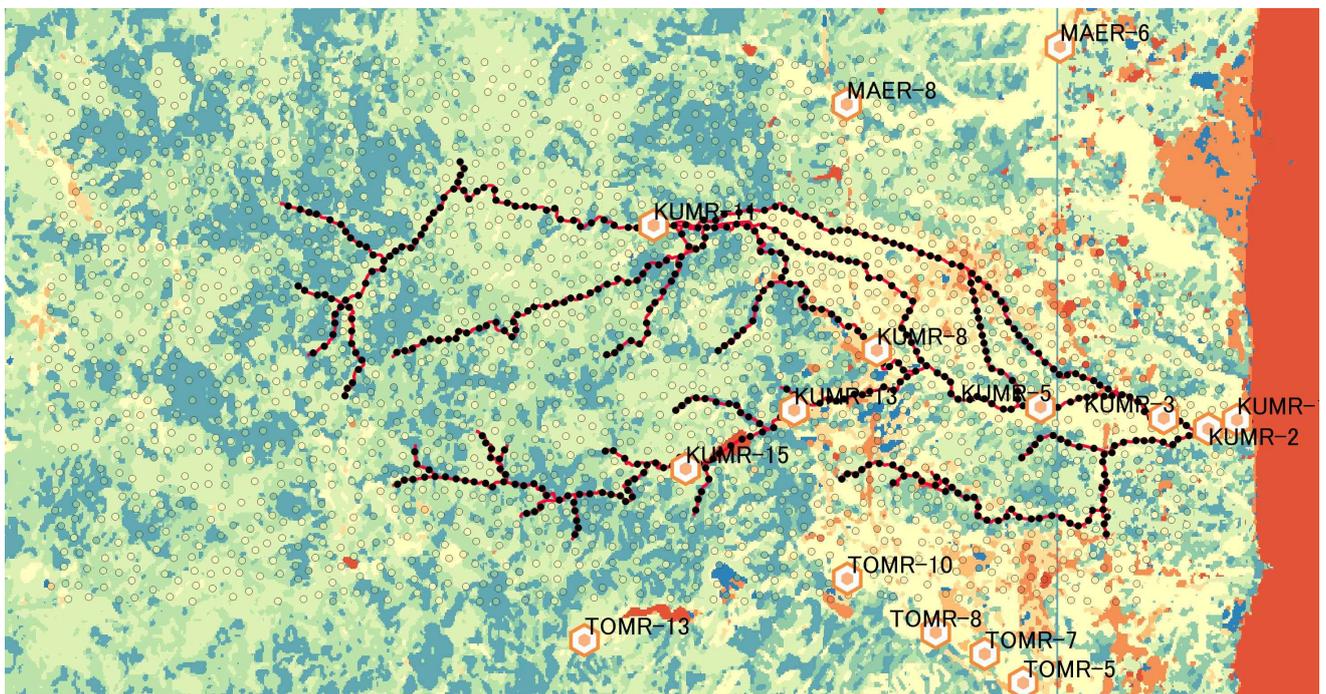


図 2-72 計算ノードの土地利用属性① (熊川)

※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

図 2-72 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な土地利用属性が設定されていることを確認できる。

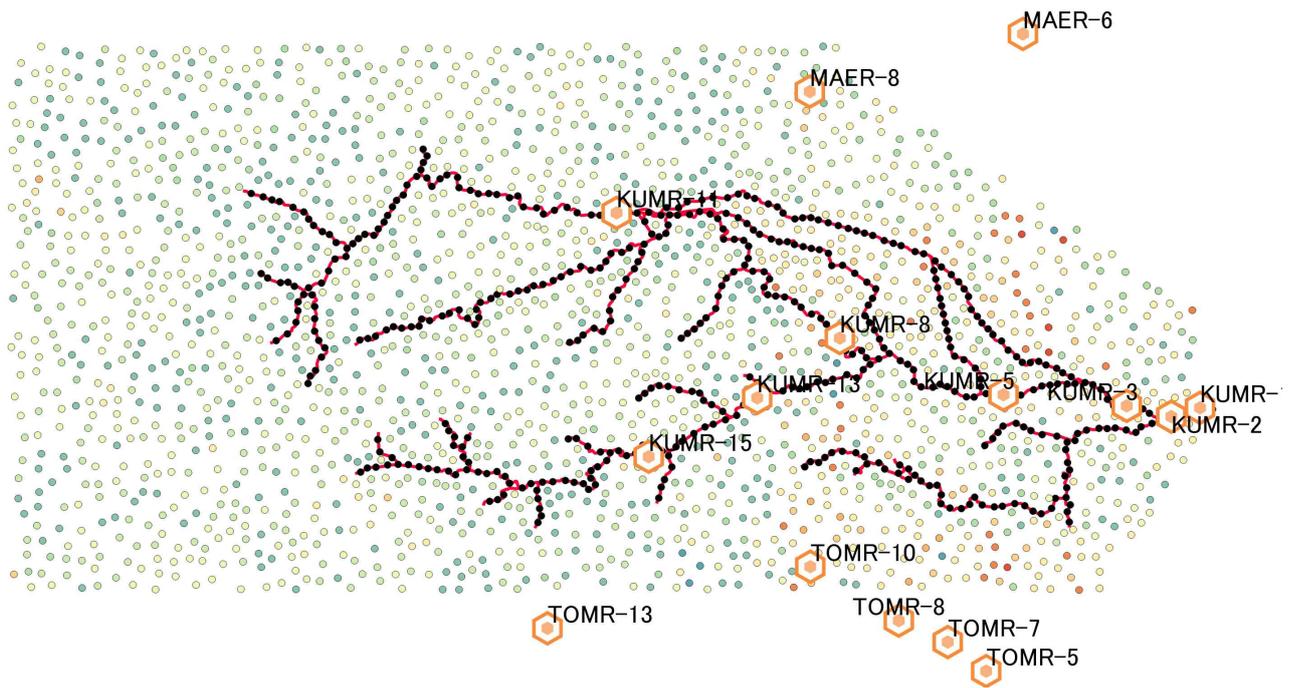


図 2-73 計算ノードの土地利用属性② (熊川)
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

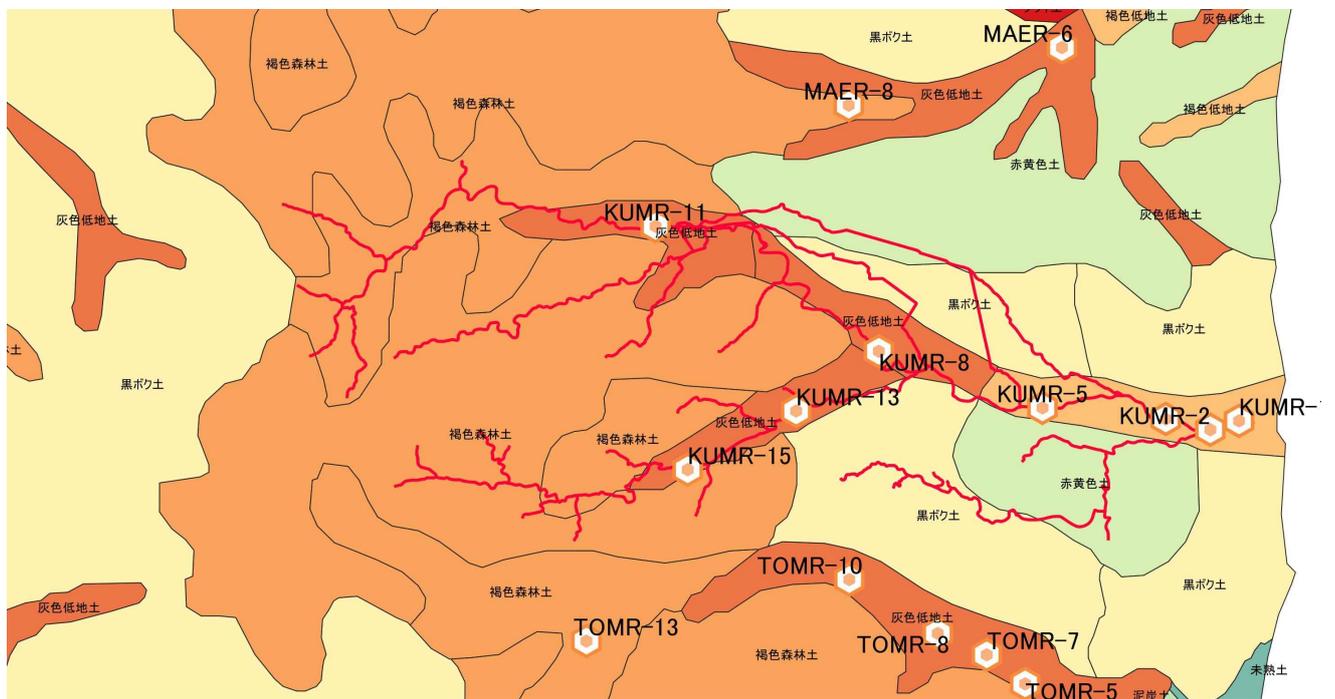


図 2-74 土壌図データの分布 (熊川)
 ※土壌図は 1.6 「データ：土壌 (Soil)」 で取得したデータ。

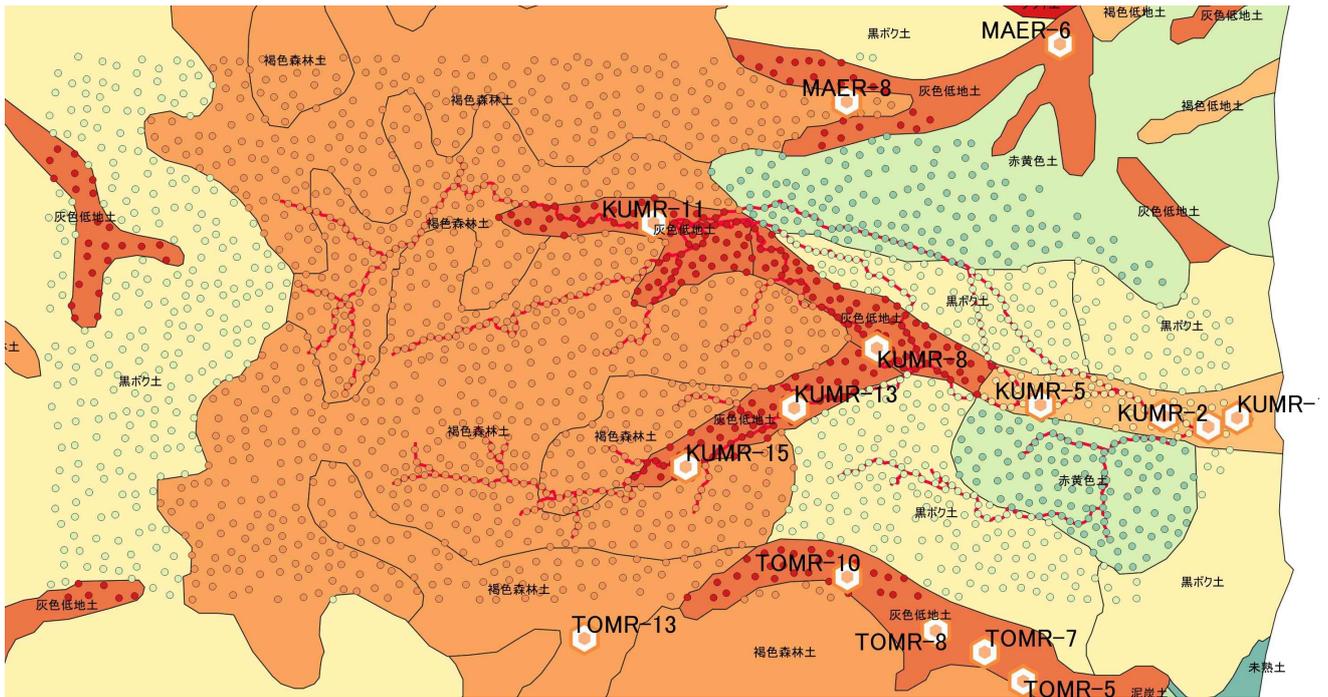


図 2-75 計算ノードの土壌属性① (熊川)

図 2-75 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な土壌属性が設定されていることを確認できる。ただし、土壌図ポリゴンのカラーリングと計算ノードのカラーリングは一致させていないので、ポリゴンとその上に位置している計算ノードの色は必ずしも整合しないことに注意すること。

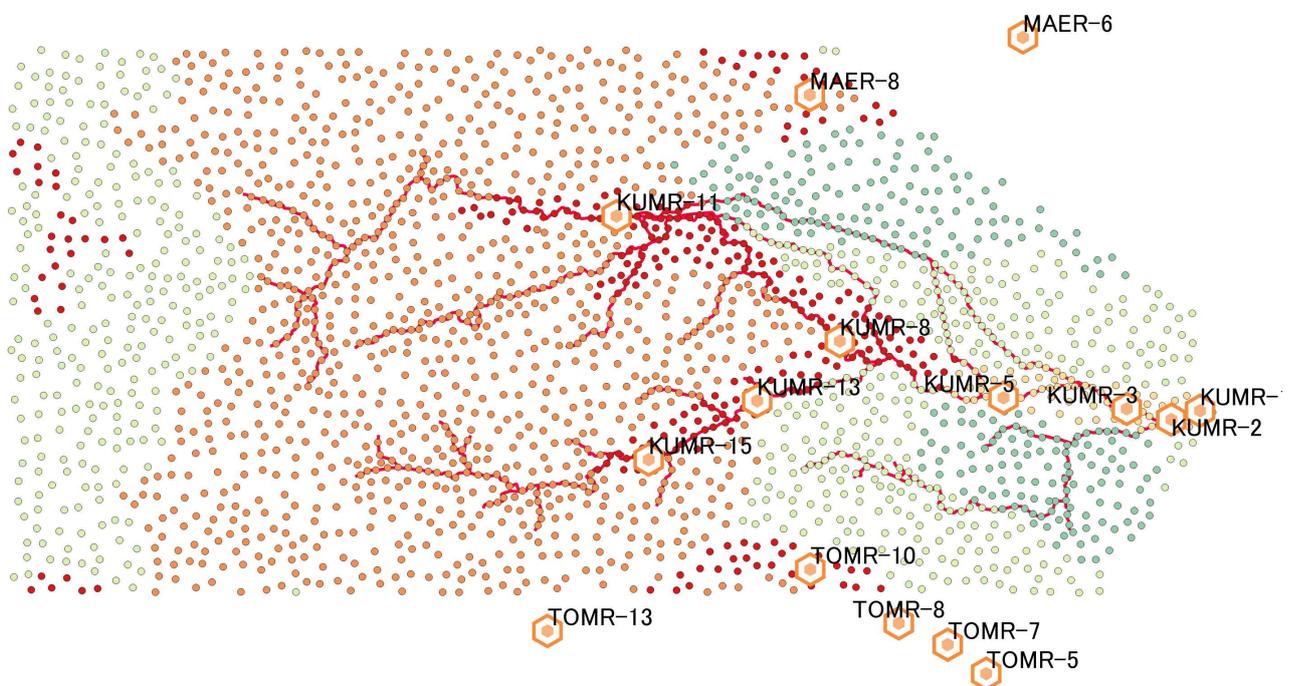


図 2-76 計算ノードの土壌属性② (熊川)

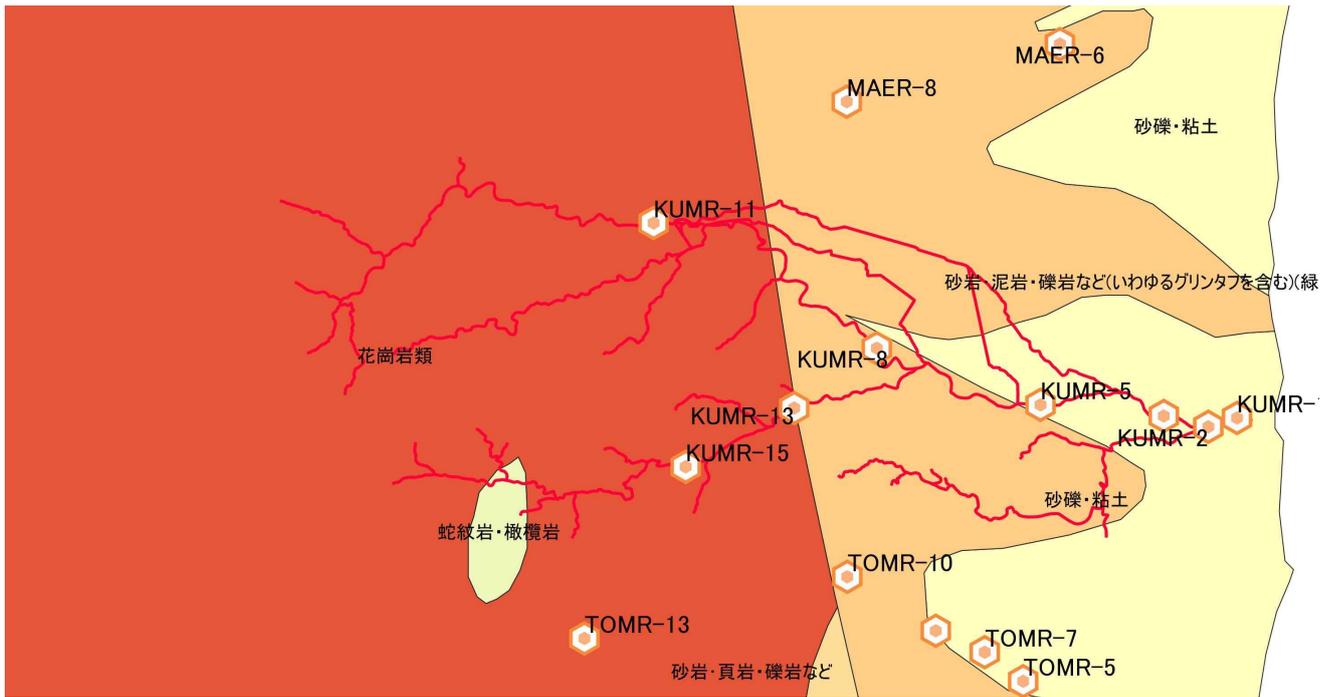


図 2-77 表層地質図データの分布 (熊川)

※表層地質図は 1.7 「データ：表層地質 (Geology)」 で取得したデータ。

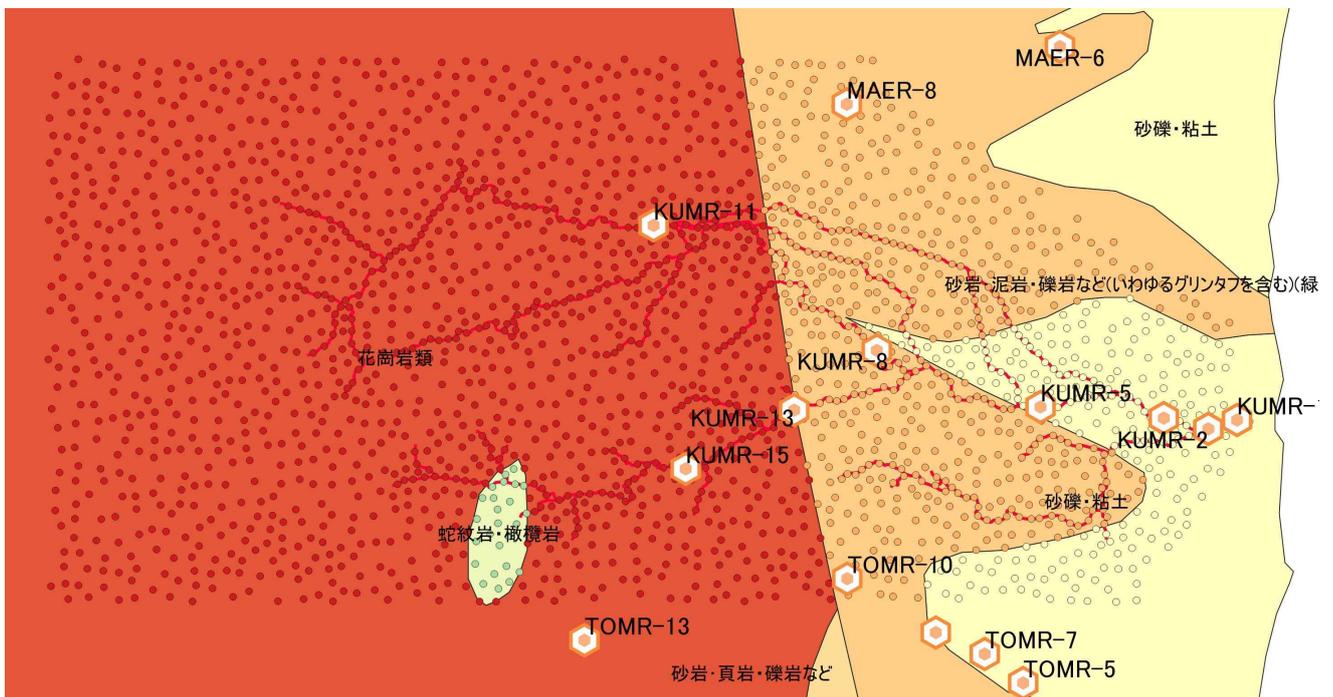


図 2-78 計算ノードの表層地質属性① (熊川)

図 2-78 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な表層地質属性が設定されていることを確認できる。ただし、表層地質図ポリゴンのカラーリングと計算ノードのカラーリングは一致させていないので、ポリゴンとその上に位置している計算ノードの色は必ずしも整合しないことに注意するこ

と。

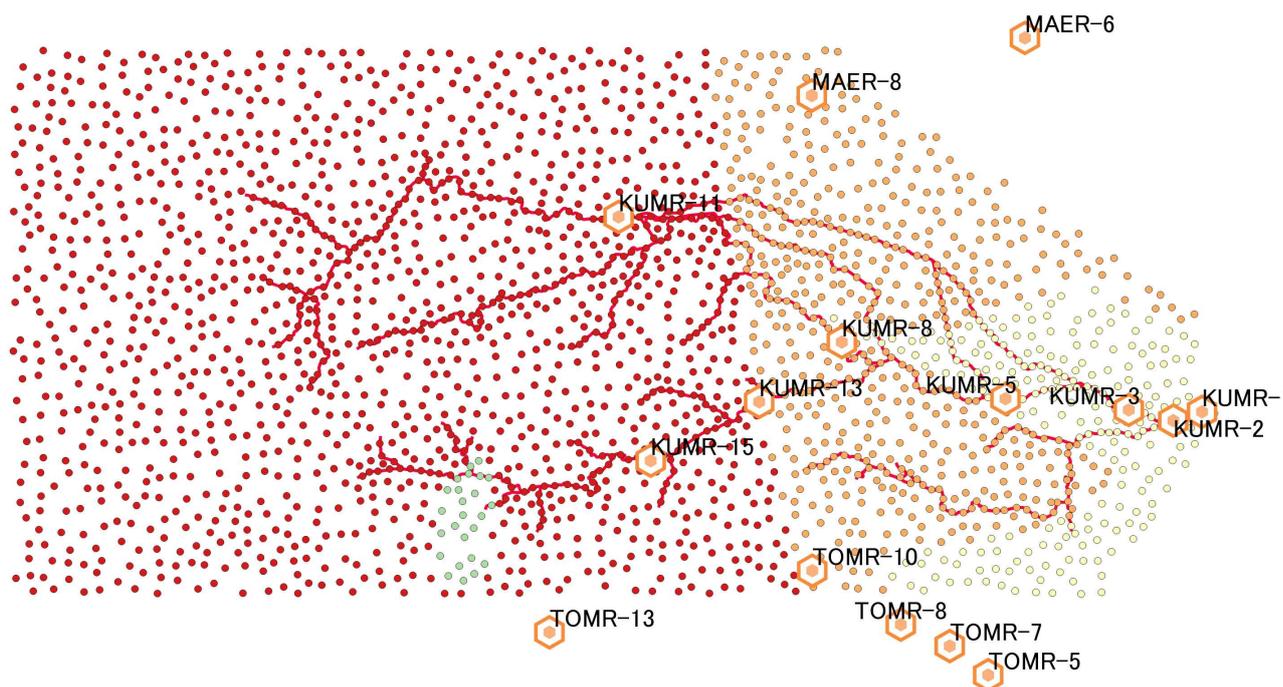


図 2-79 計算ノードの表層地質属性② (熊川)

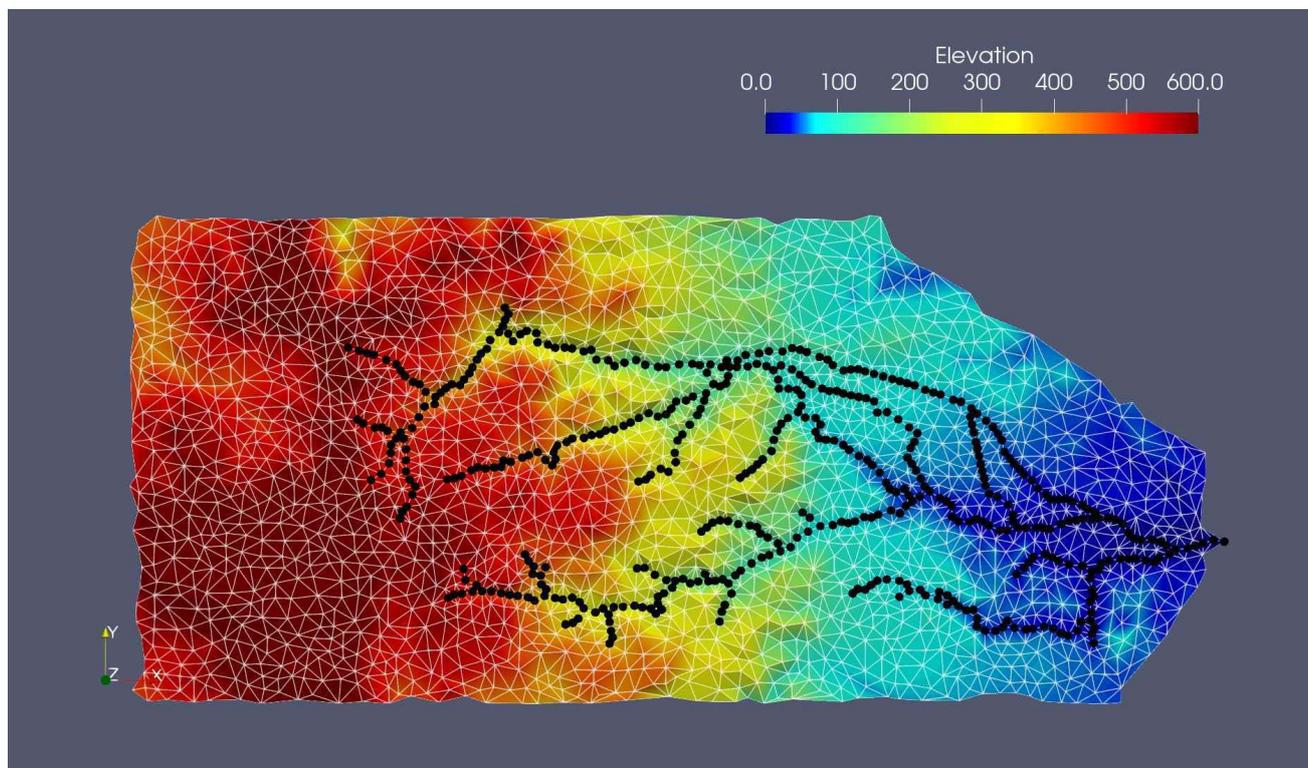


図 2-80 計算メッシュ① (熊川)
※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

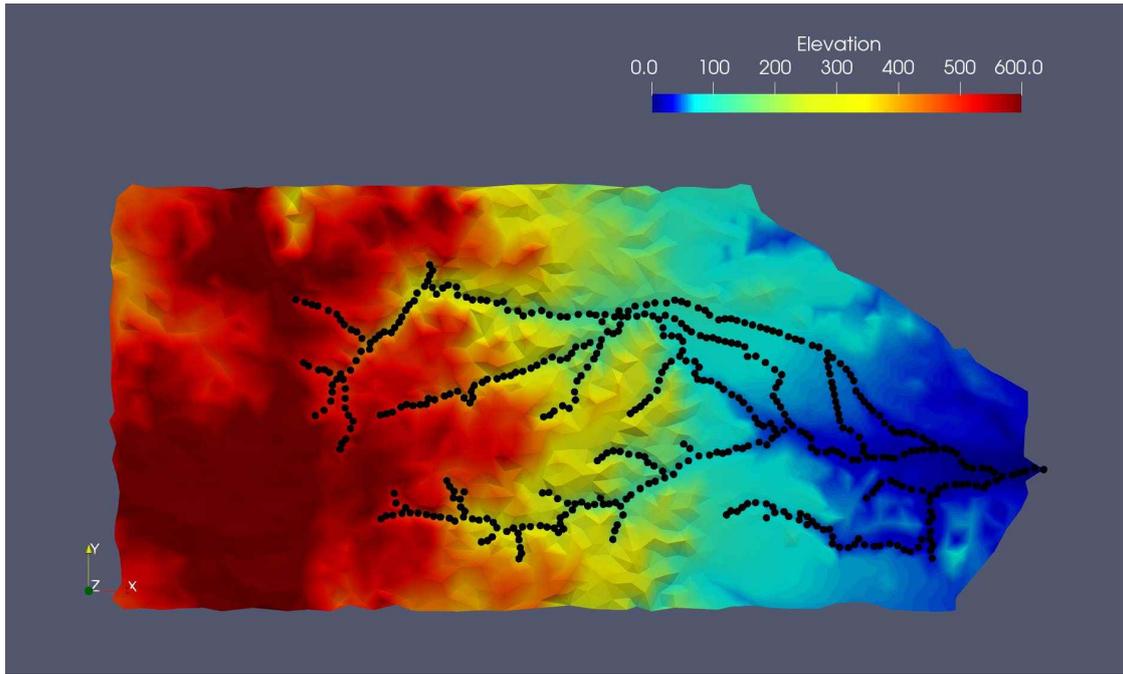


図 2-81 計算メッシュ② (熊川)
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

③ 請戸川

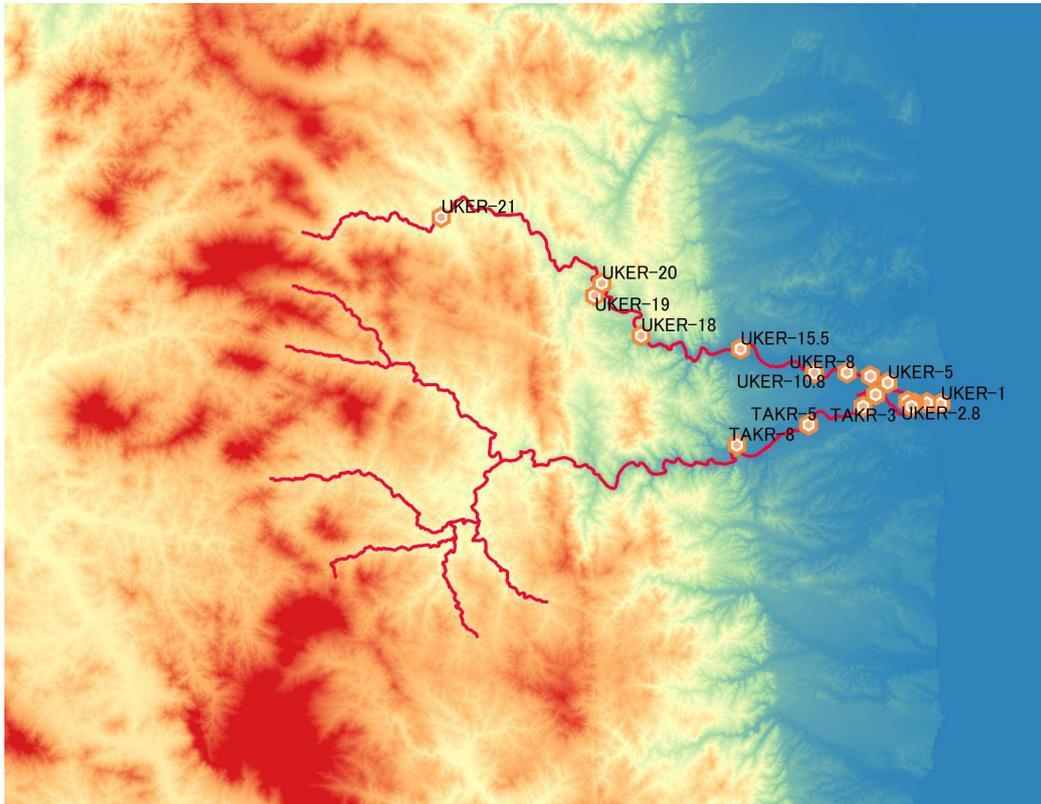


図 2-82 数値標高データおよび河川形状 (請戸川)
 ※数値標高データは 1.2 「データ：地形 (DEM)」 で取得したデータ。
 ※河川ノードは 1.3 「データ：河川 (XML, geojson)」 で取得したデータ。

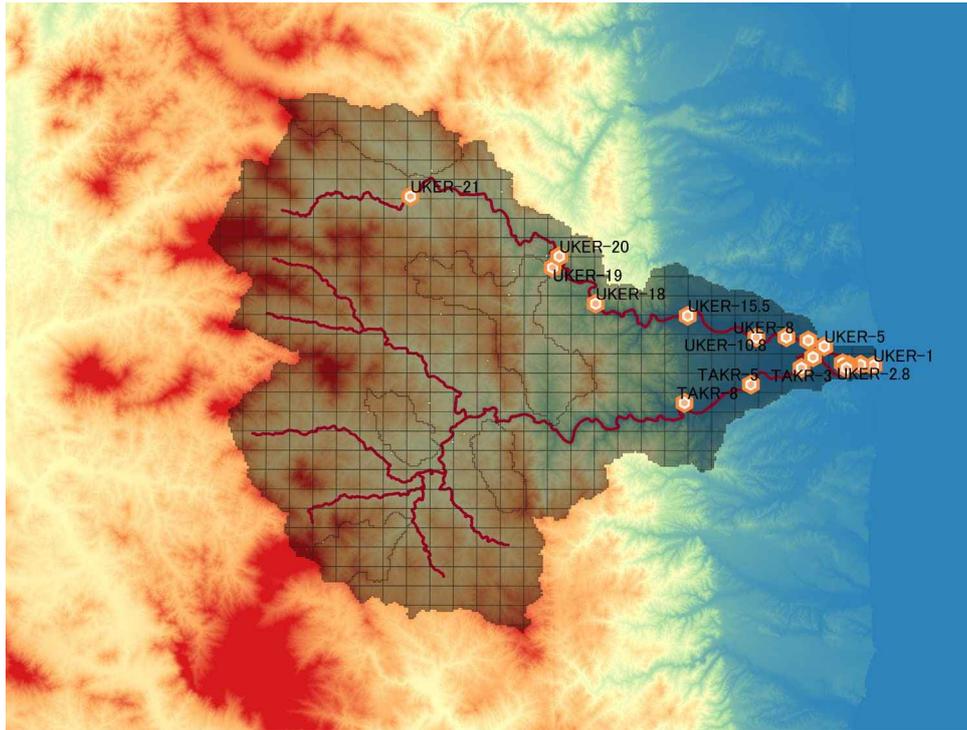


図 2-83 流域（請戸川）

※流域は 1.4 「データ：流域界データ」 で取得したデータ。

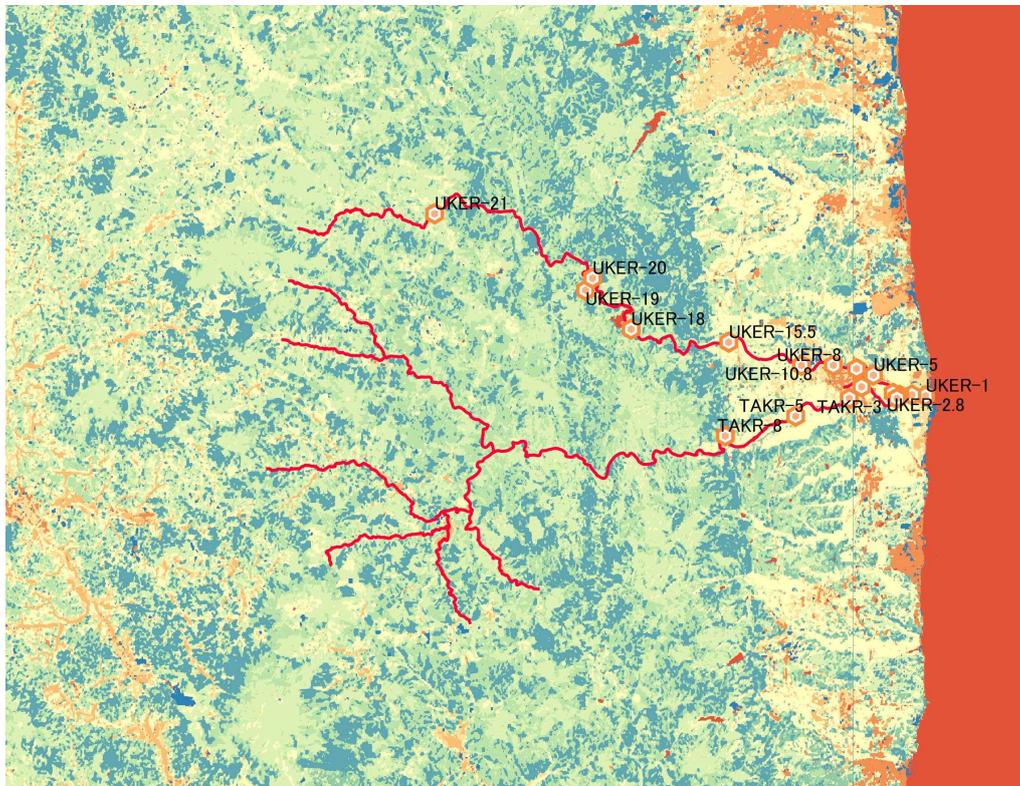


図 2-84 土地利用データの分布（請戸川）

※土地利用は 1.5 「データ：土地利用（Land Use）」 で取得したデータ。

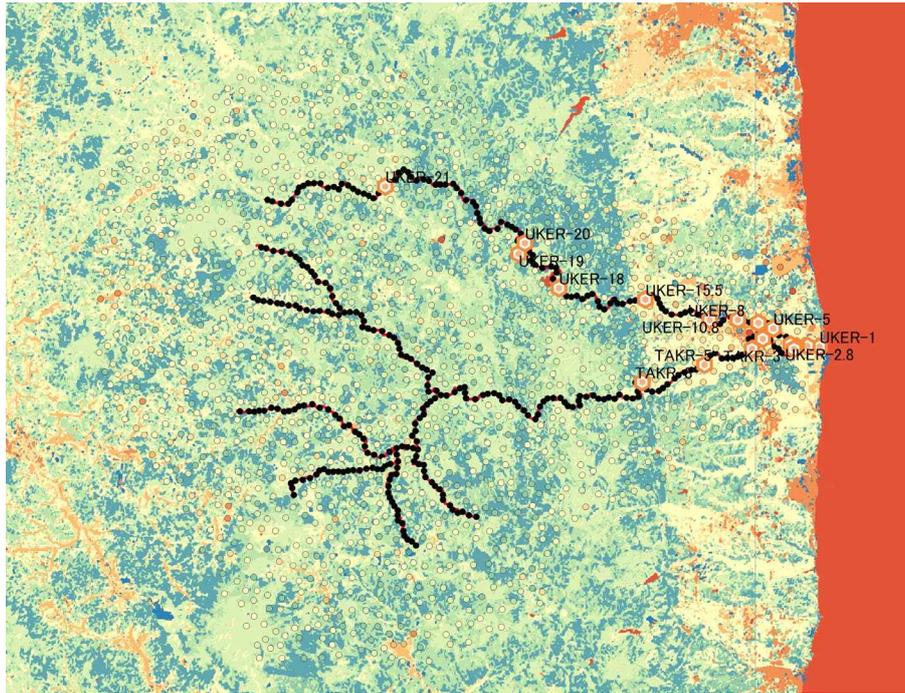


図 2-85 計算ノードの土地利用属性①（請戸川）
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

図 2-85 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な土地利用属性が設定されていることを確認できる。

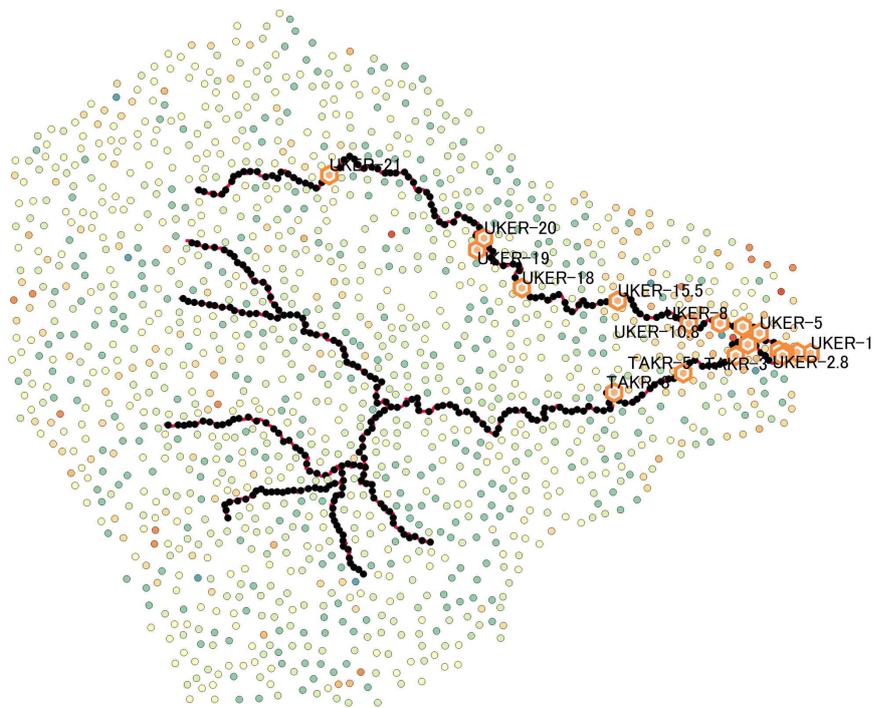


図 2-86 計算ノードの土地利用属性②（請戸川）

※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

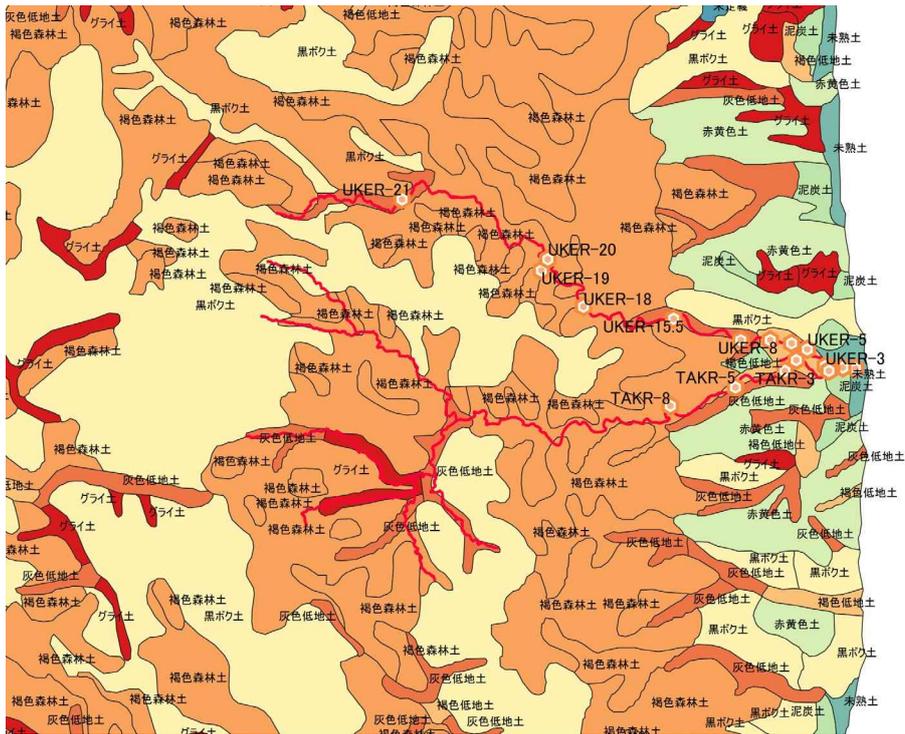


図 2-87 土壌図データの分布 (請戸川)

※土壌図は 1.6 「データ：土壌 (Soil)」 で取得したデータ。



図 2-88 計算ノードの土壌属性① (請戸川)

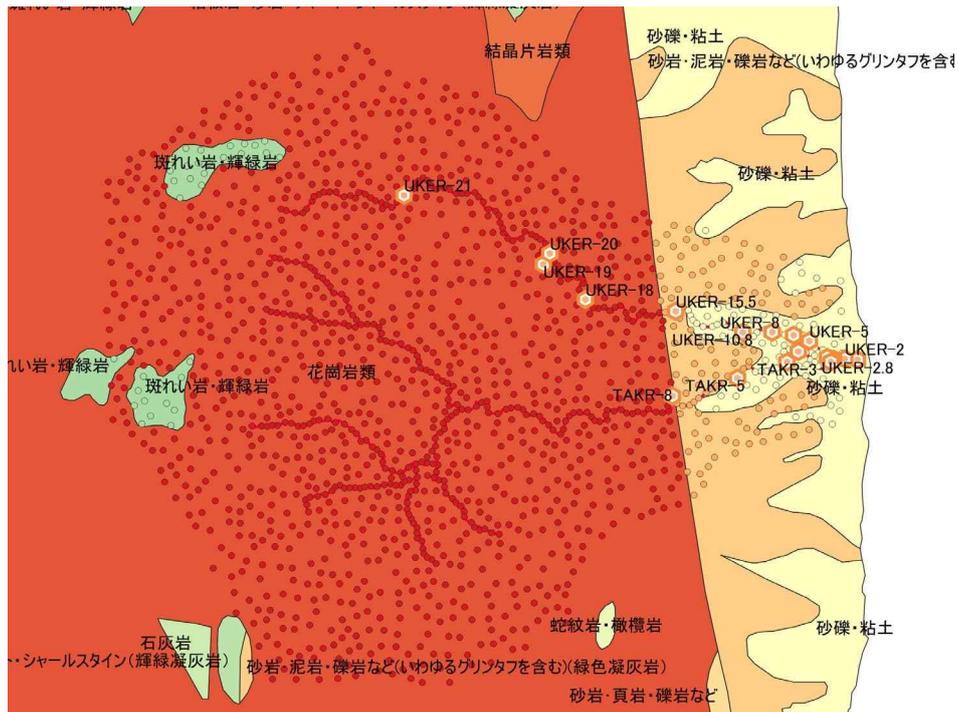


図 2-91 計算ノードの表層地質属性① (請戸川)

図 2-91 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な表層地質属性が設定されていることを確認できる。ただし、表層地質図ポリゴンのカラーリングと計算ノードのカラーリングは一致させていないので、ポリゴンとその上に位置している計算ノードの色は必ずしも整合しないことに注意すること。

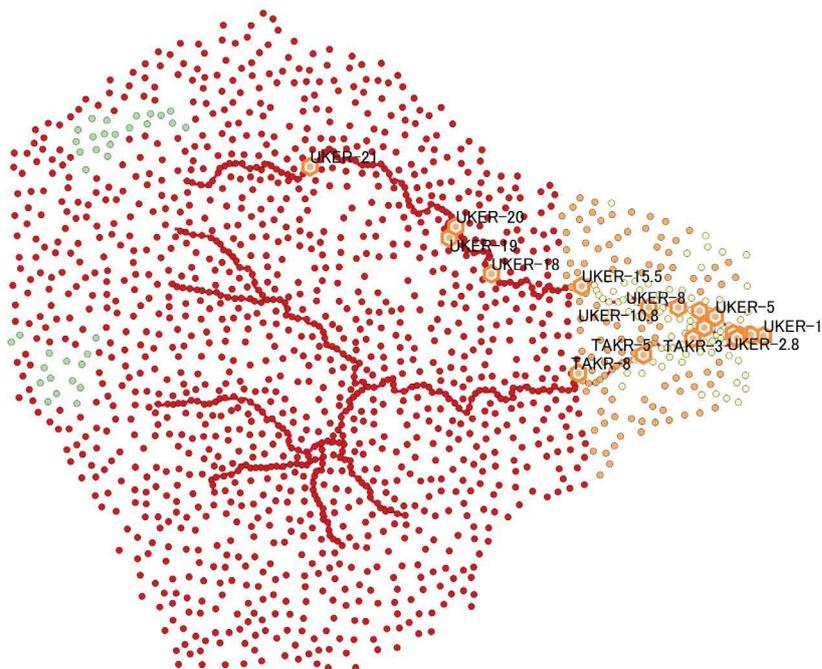


図 2-92 計算ノードの表層地質属性② (請戸川)

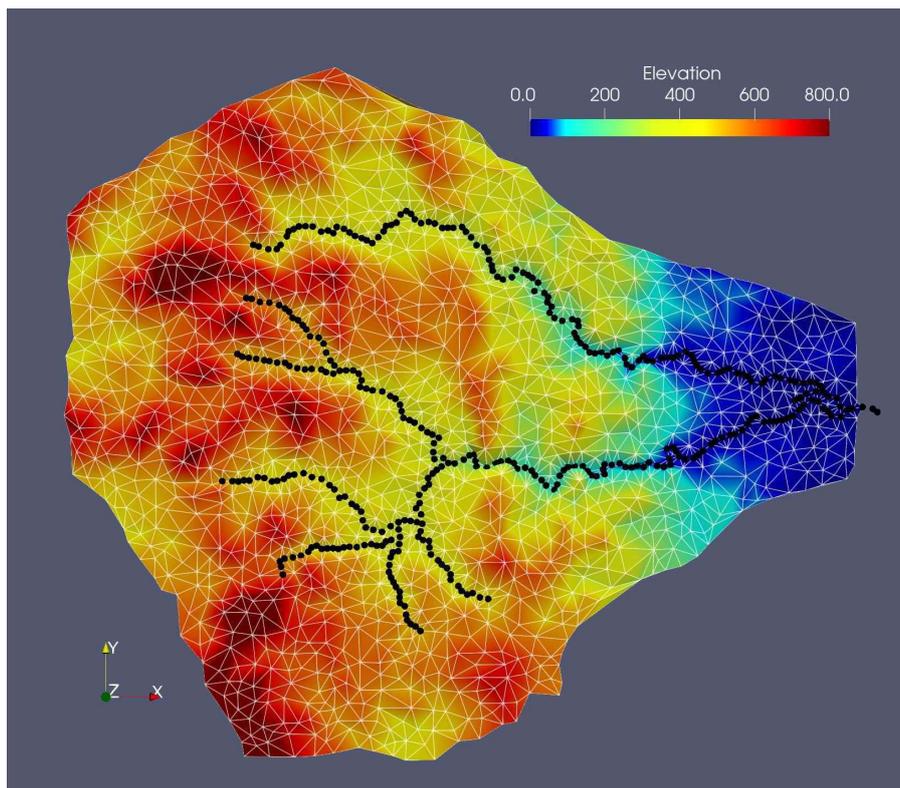


図 2-93 計算メッシュ① (請戸川)
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

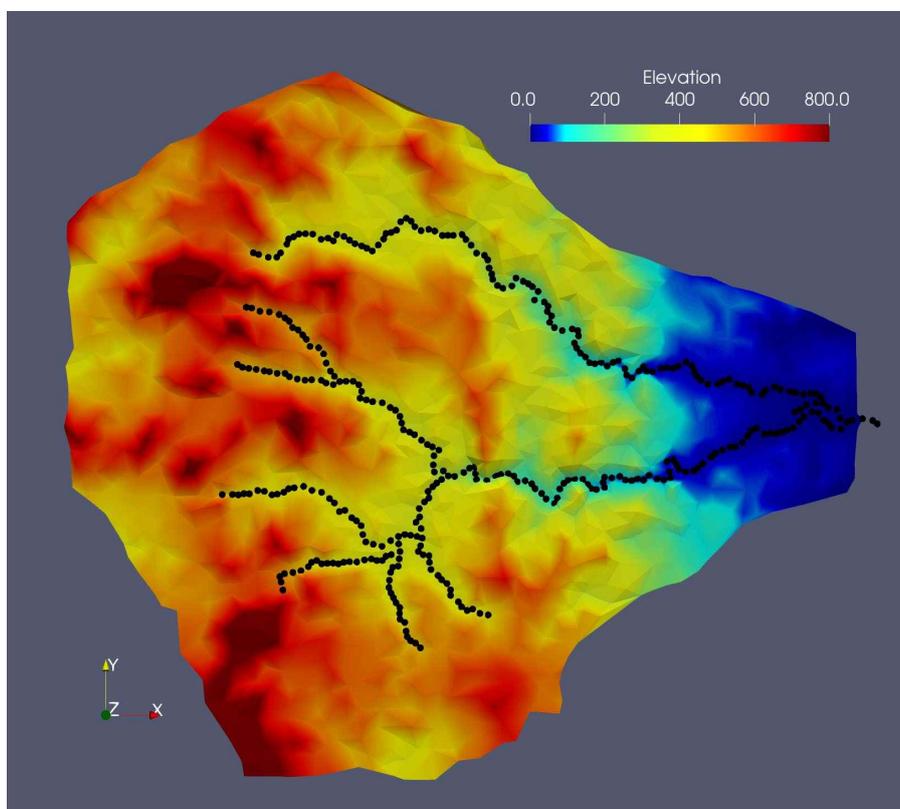


図 2-94 計算メッシュ② (請戸川)
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

④ 阿武隈川

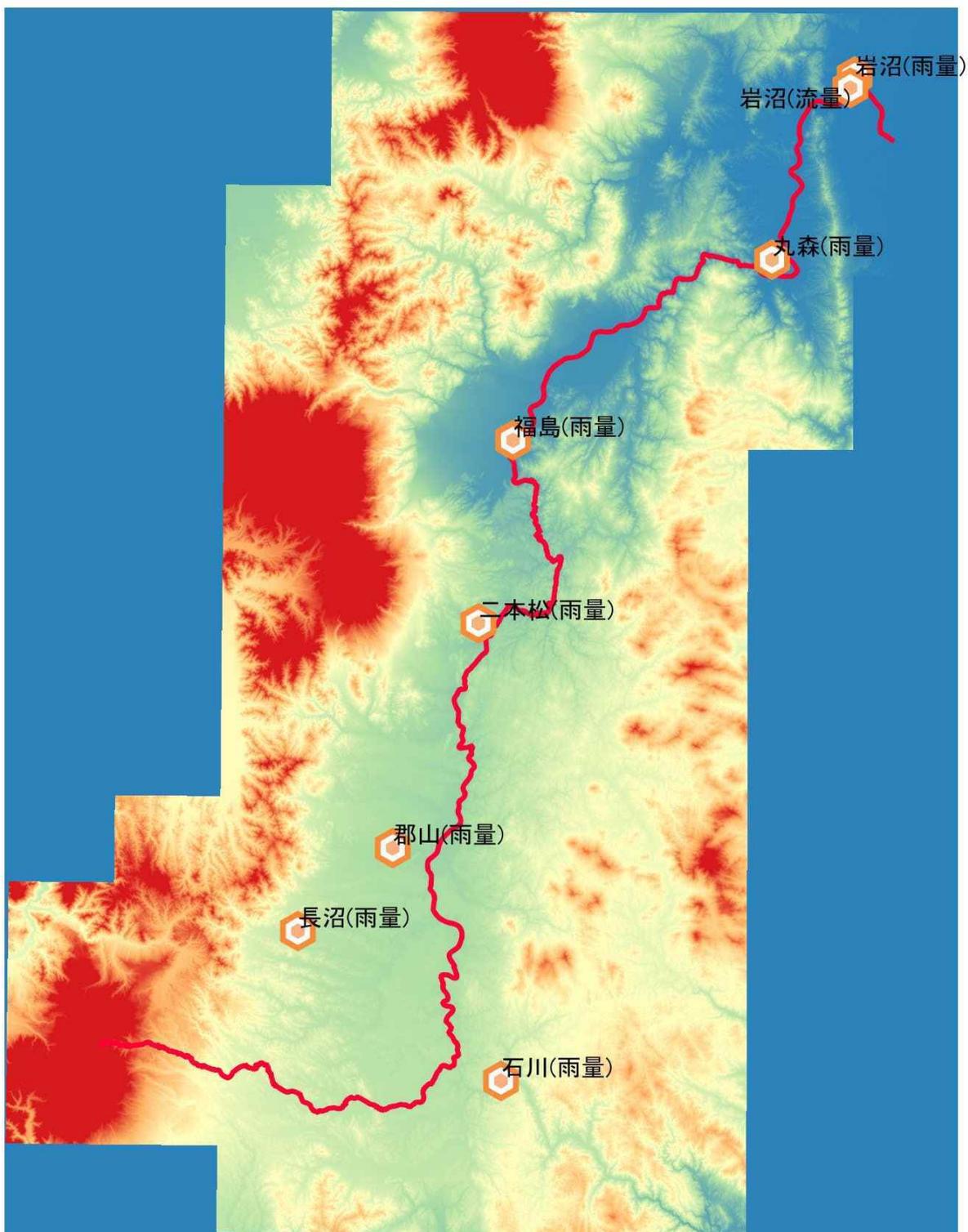


図 2-95 数値標高データおよび河川形状 (阿武隈川)

※数値標高データは 1.2 「データ：地形 (DEM)」 で取得したデータ。

※河川ノードは 1.3 「データ：河川 (XML, geojson)」 で取得したデータ。

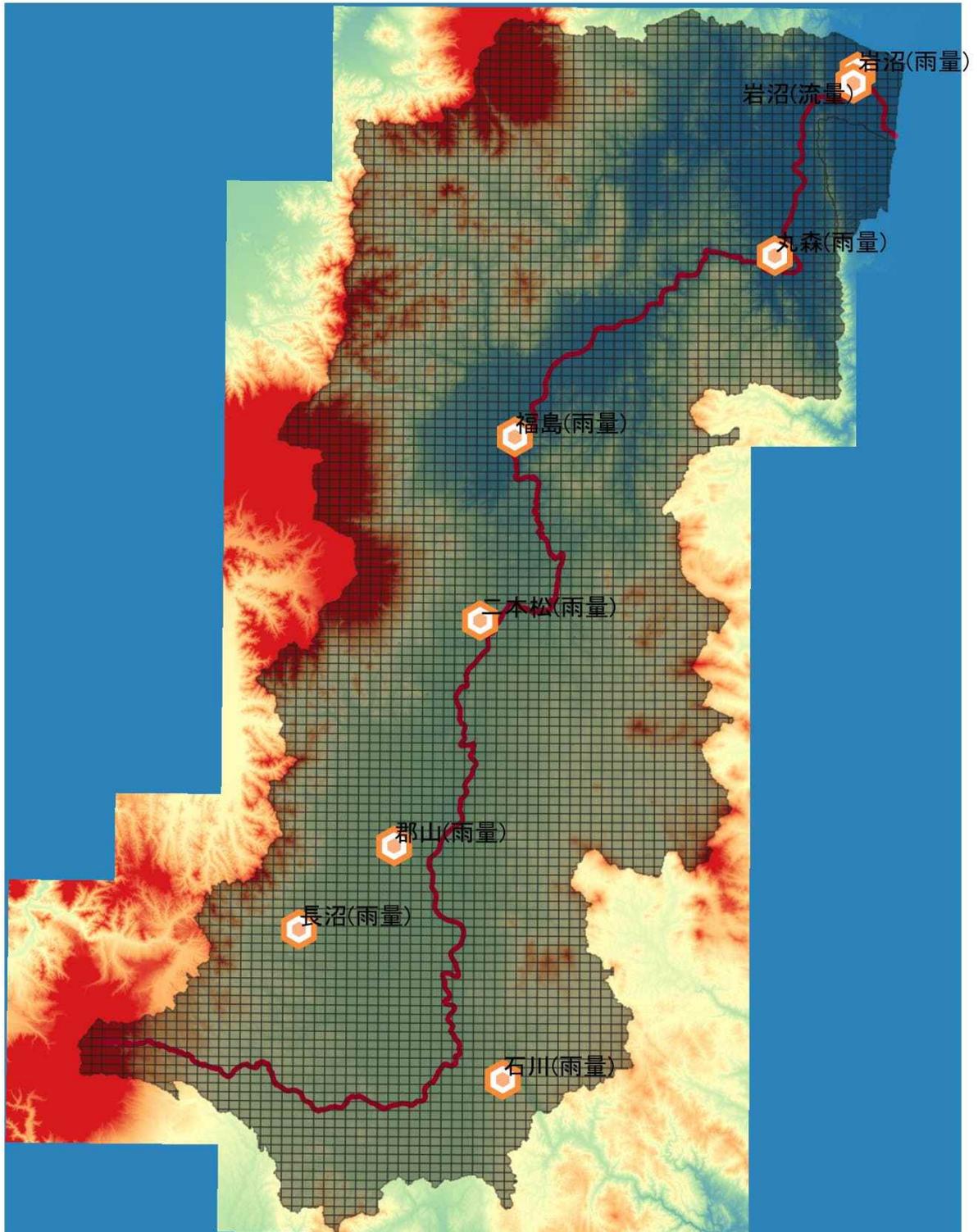


図 2-96 流域 (阿武隈川)

※流域は 1.4 「データ：流域界データ」で取得したデータ。

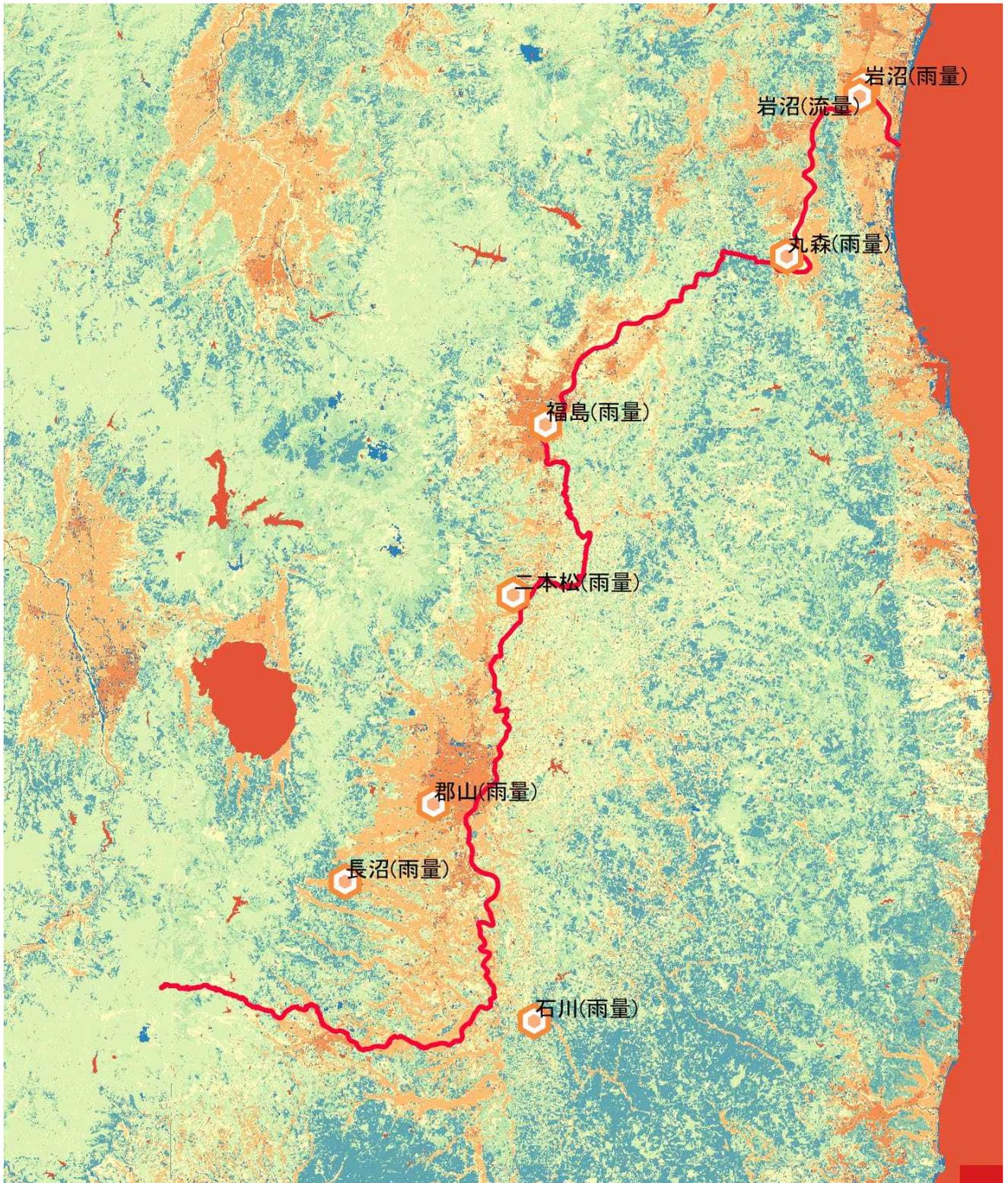


図 2-97 土地利用データの分布 (阿武隈川)

※土地利用は 1.5 「データ：土地利用 (Land Use)」 で取得したデータ。

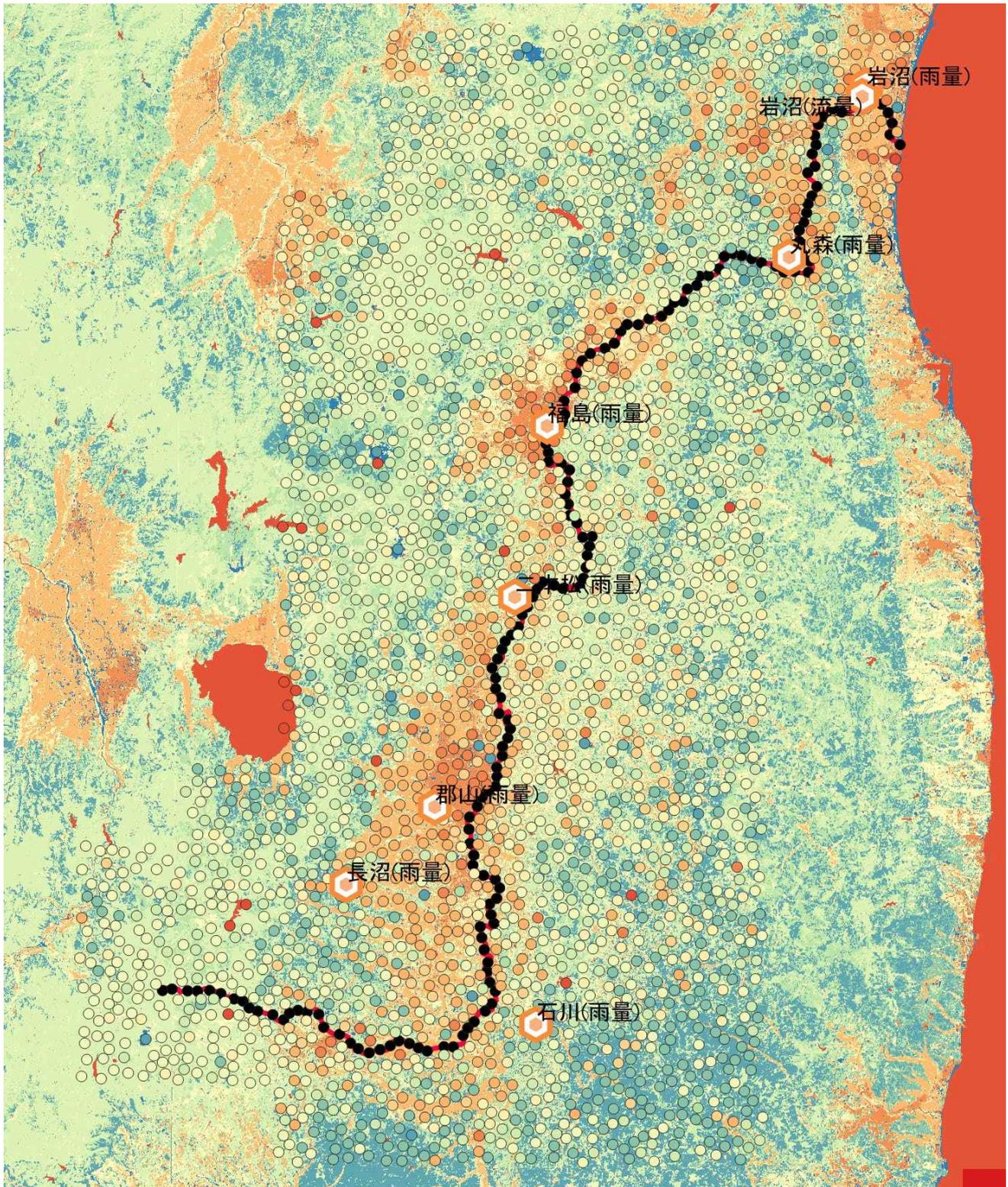


図 2-98 計算ノードの土地利用属性① (阿武隈川)
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

図 2-98 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な土地利用属性が設定されていることを確認できる。

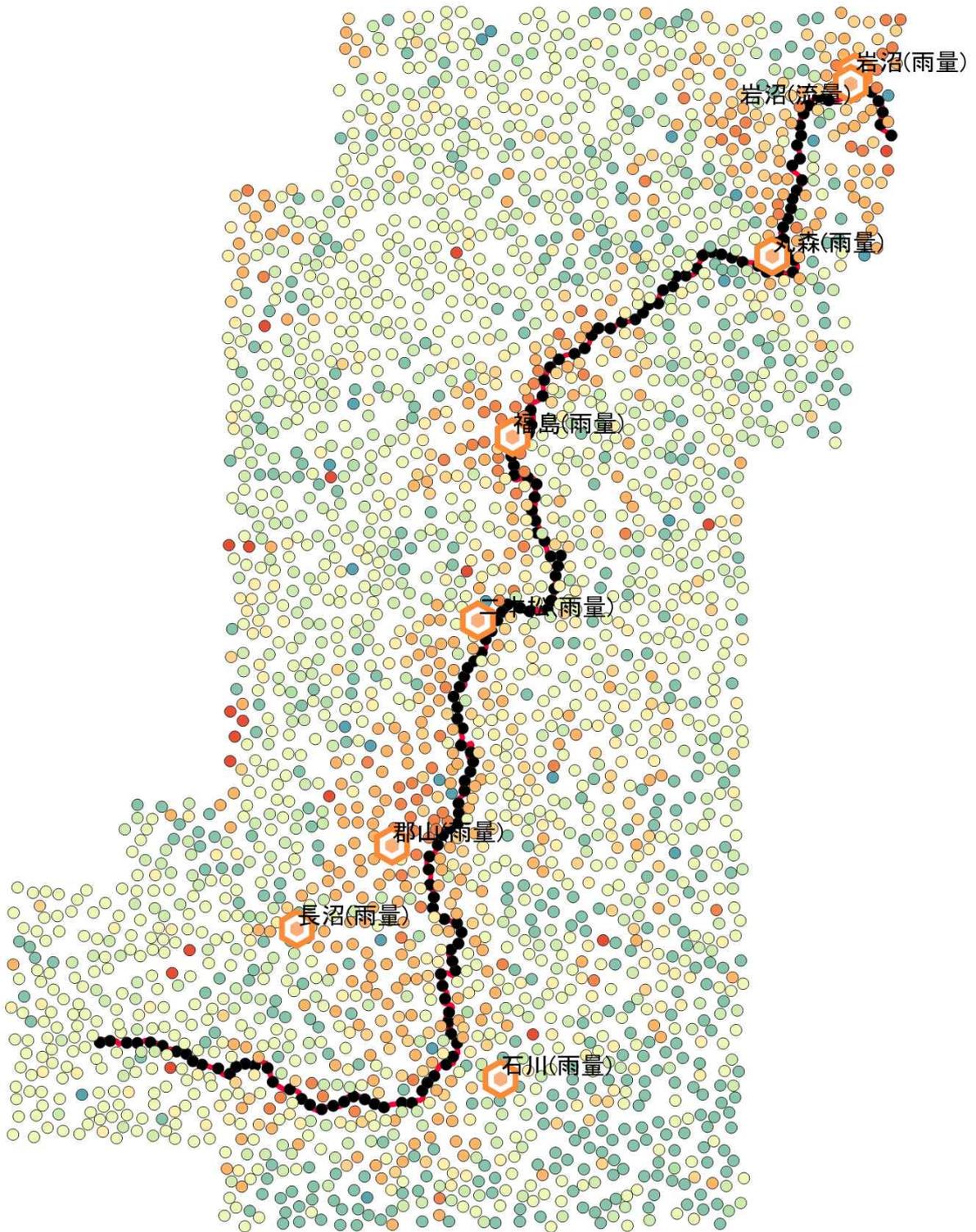


図 2-99 計算ノードの土地利用属性② (阿武隈川)
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

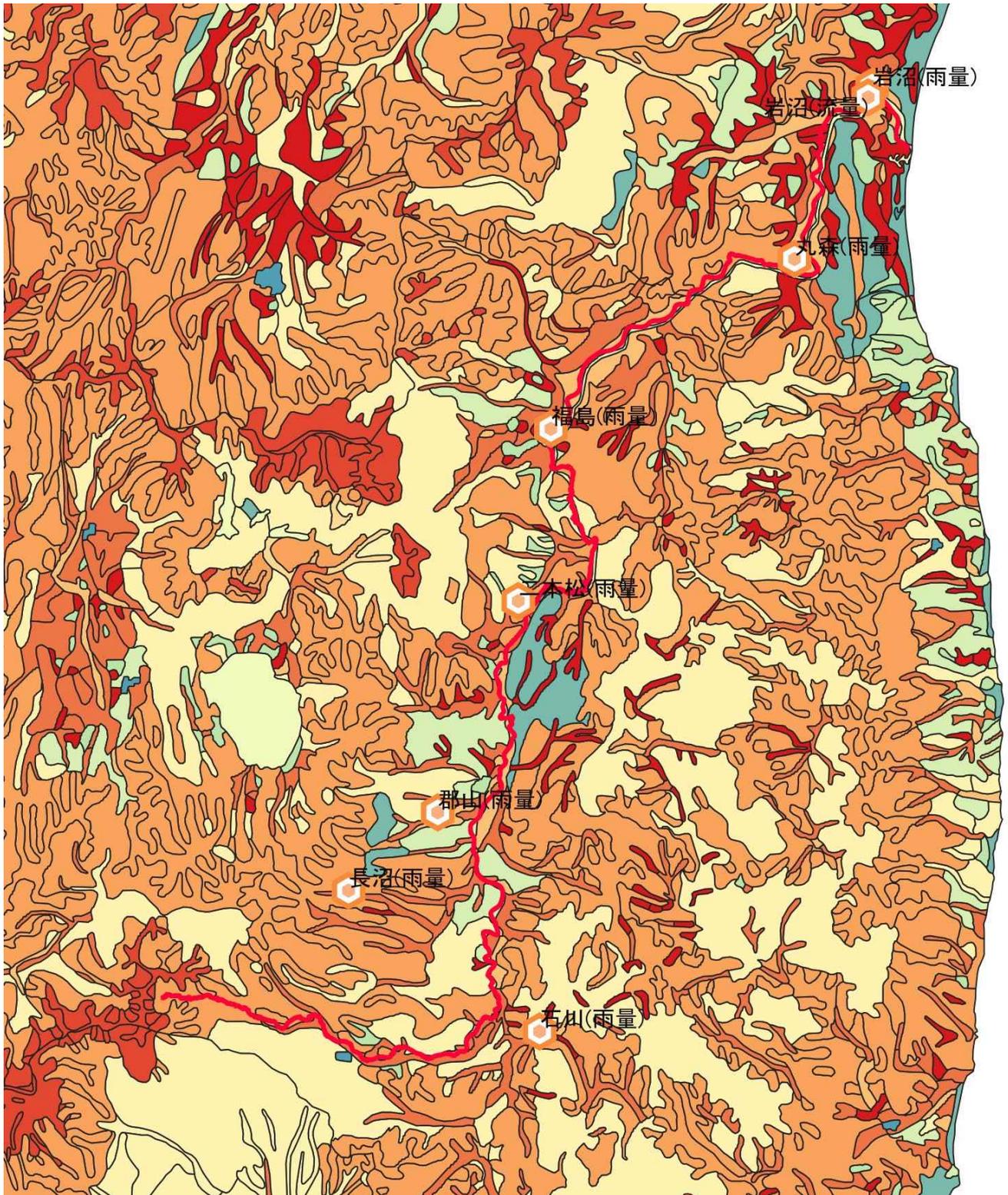


図 2-100 土壌図データの分布 (阿武隈川)

※土壌図は 1.6 「データ：土壌 (Soil)」 で取得したデータ。

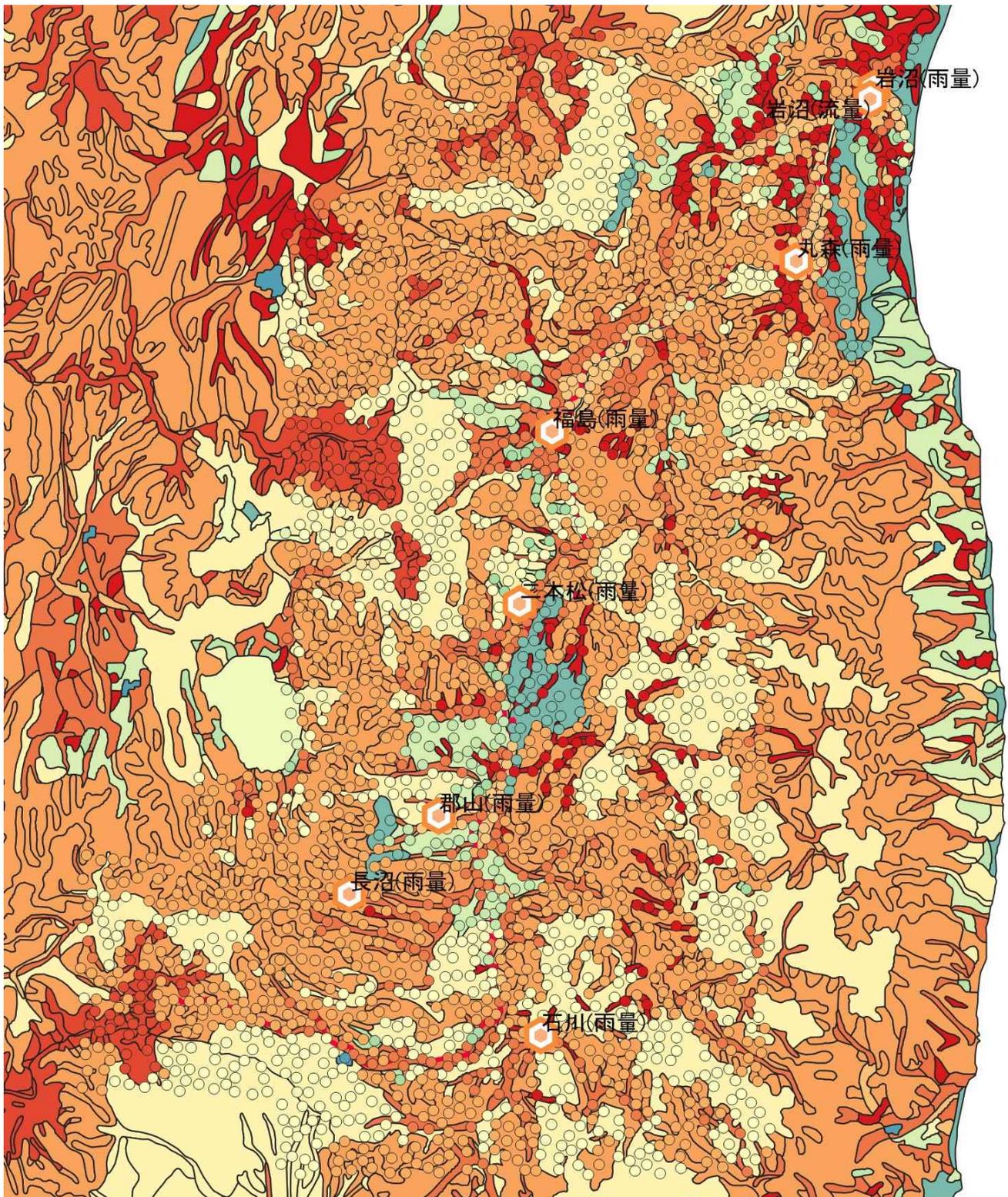


図 2-101 計算ノードの土壌属性① (阿武隈川)

図 2-101 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な土壌属性が設定されていることを確認できる。ただし、土壌図ポリゴンのカラーリングと計算ノードのカラーリングは一致させていないので、ポリゴンとその上に位置している計算ノードの色は必ずしも整合しないことに注意すること。

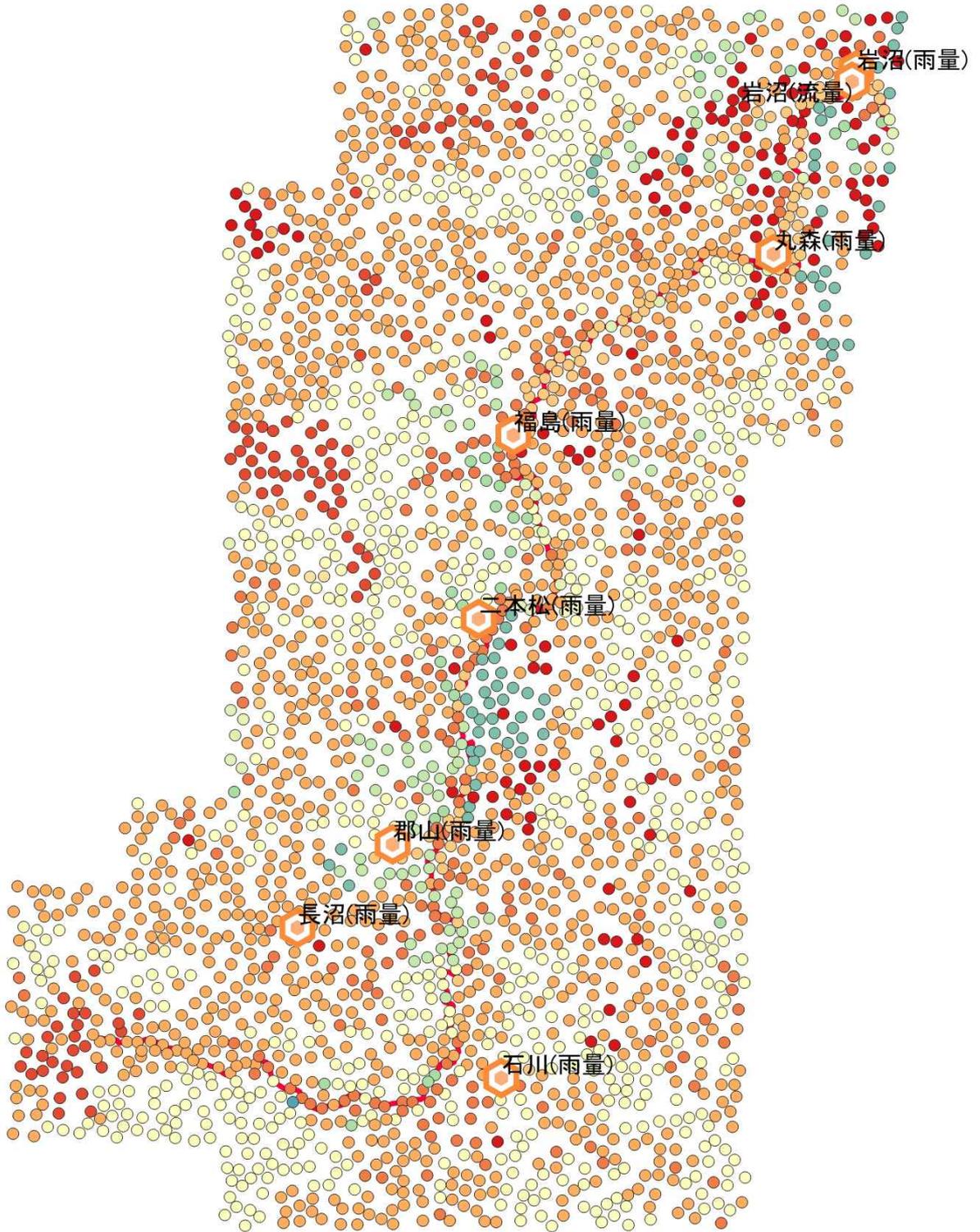


図 2-102 計算ノードの土壌属性② (阿武隈川)

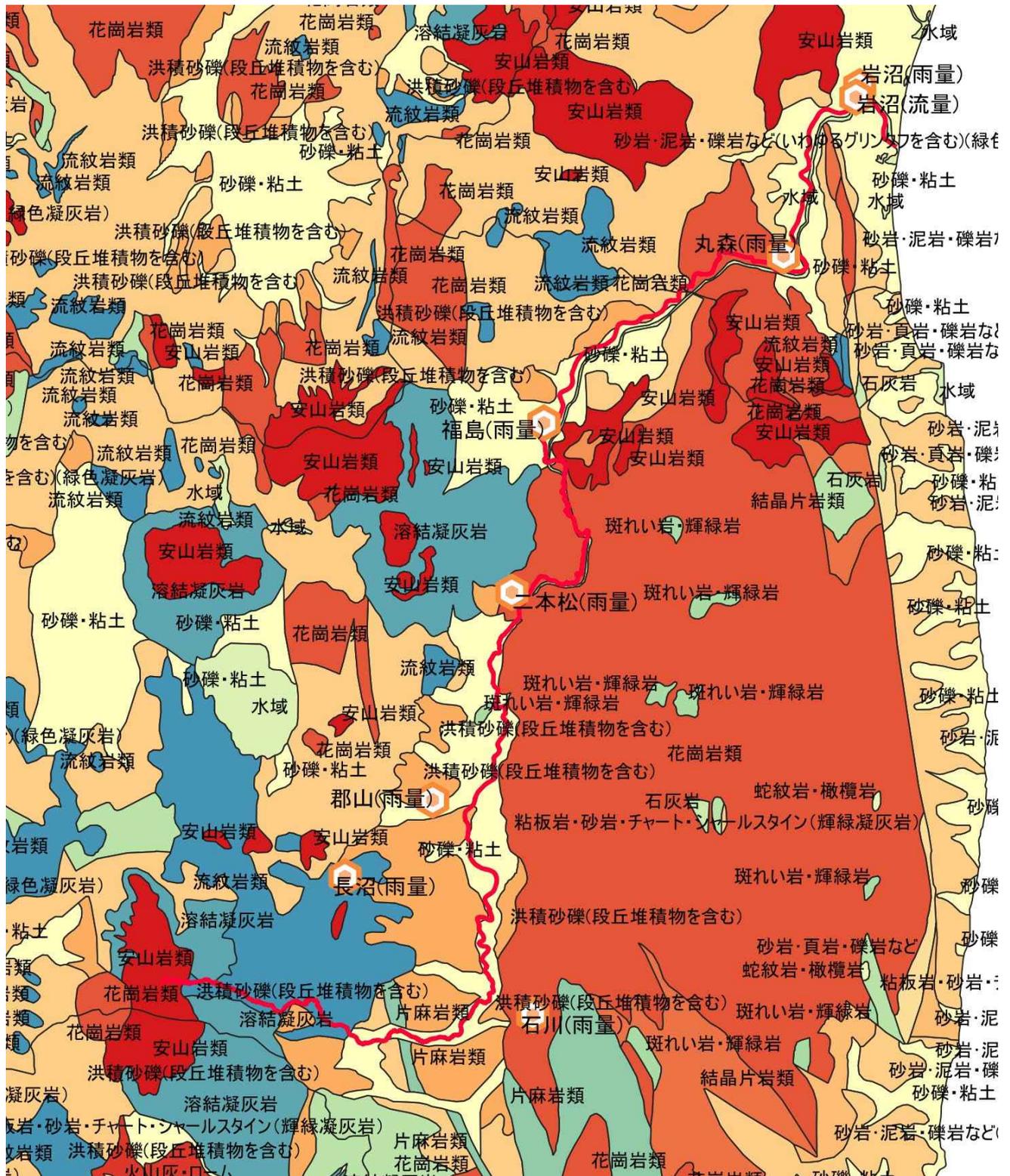


図 2-103 表層地質図データの分布 (阿武隈川)

※表層地質図は 1.7「データ：表層地質 (Geology)」で取得したデータ。

図 2-103 では、各計算ノードについて、その位置に対応した適切な表層地質属性が設定されていることを確認できる。

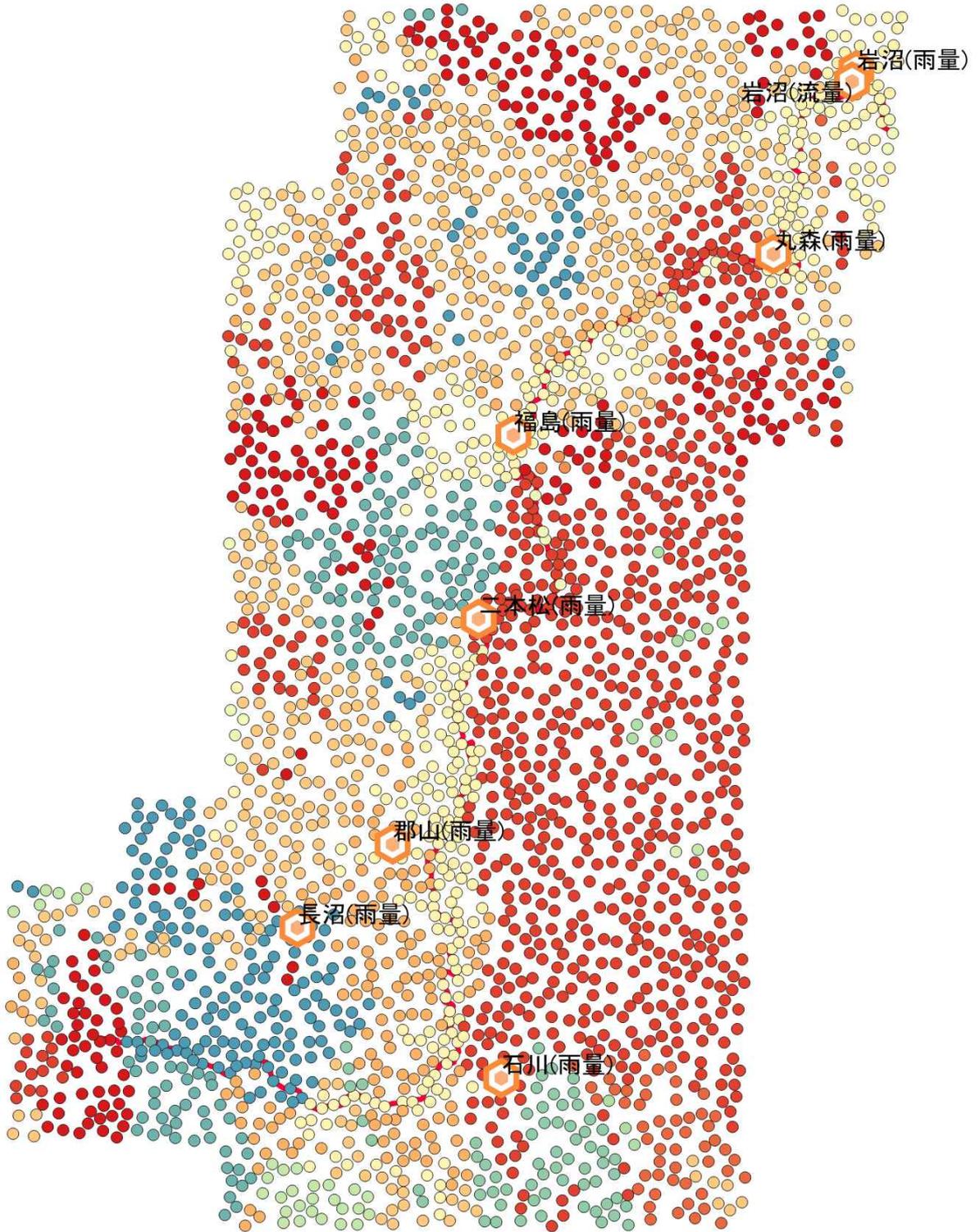


図 2-105 計算ノードの表層地質属性② (阿武隈川)

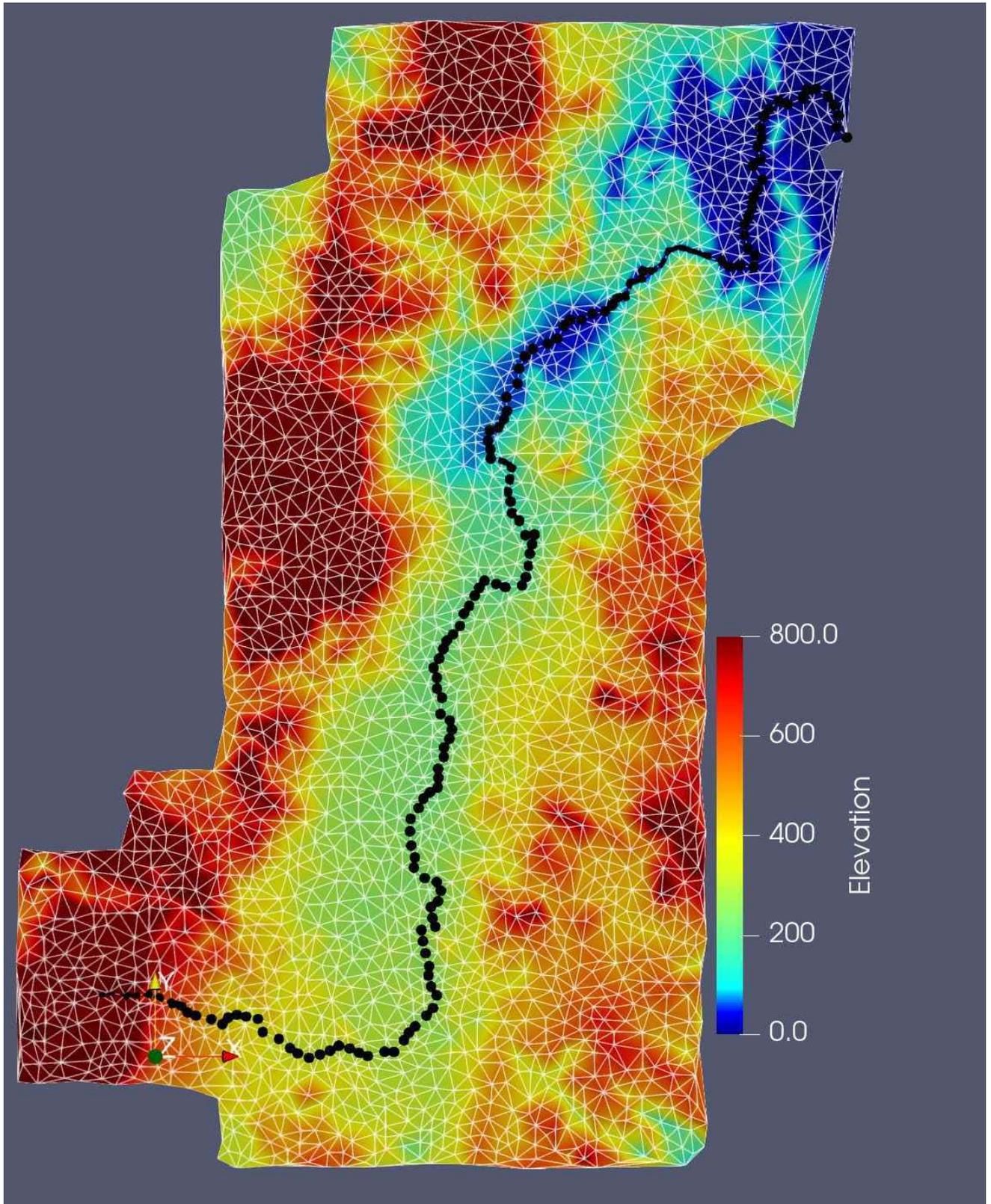


図 2-106 計算メッシュ① (阿武隈川)
※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード

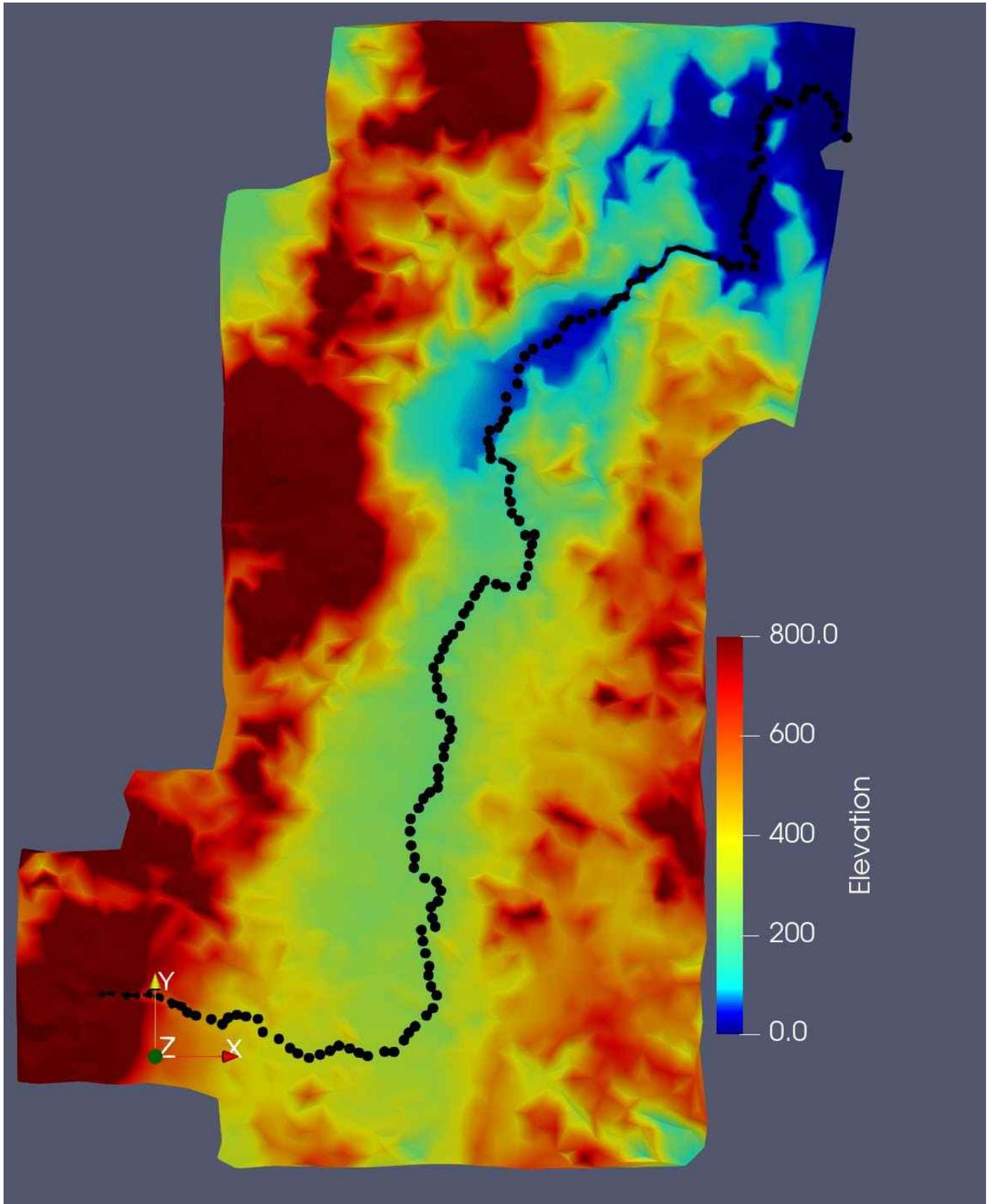


図 2-107 計算メッシュ② (阿武隈川)
 ※黒点は RADFLOW 用に定義した河川ノード