

令和4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10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	4
■ 2章 陸域動態モデルと海域（沿岸及び沖合）モデルの整備に向けて	6
2.1 本章の概要	6
2.2 集中定数型流出モデルの整備方針	6
2.3 分布定数型流出モデルの整備方針	7
2.4 海域（沿岸及び沖合）モデルの整備方針	7
2.5 まとめ	8
■ 3章 集中定数型流出モデル MERCURY の整備と試解析	10
3.1 本章の概要	10
3.2 集中定数型流出モデル MERCURY の整備	10
3.3 集中定数型流出モデルによる試解析（5年間：前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）	76
3.4 まとめ	89
■ 4章 分布定数型流出モデル RADFLOW の整備と試解析	92
4.1 本章の概要	92
4.2 分布定数型流出モデル RADFLOW の整備	92
4.3 分布定数型流出モデルの試解析(降水イベント：前田川、熊川、請戸川、阿武隈川)	101
4.4 まとめ	132
■ 5章 陸域からの流出と海域間（沿岸及び沖合）接続に係る整備と試解析	147
5.1 本章の概要	147
5.2 海域（沿岸及び沖合）モデルの整備と試解析計算条件	147
5.3 海域（沿岸及び沖合）での試解析（塩分濃度と Cs-137 の挙動）	161
5.4 作業項目⑥ モニタリング結果との比較	173
5.5 まとめ	175
■ 6章 陸域及び海域統合モデルと GUI（WEB アプリ利用）機能の整備	176
6.1 本章の概要	176
6.2 海域（沿岸及び沖合）統合モデルの整備	176
6.3 海域統合モデルの GUI（WEB アプリ）機能の整備	184
6.4 陸域及び海域統合モデルと GUI（共通 UI 及び WEB アプリ）機能の整備	187
6.5 まとめ	194
■ 7章 考察とまとめ	195
7.1 本章の概要	195
7.2 陸域モデルの整備と試解析結果の考察	195
7.3 海域（沿岸及び沖合）モデルの整備と試解析結果の考察	196
7.4 統合モデルの整備とその機能の考察	197
7.5 まとめと結論	197

## ■ 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や放出後の分布を推定するには、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必須となる。しかし、各対象域のモデル化に当たり、多くの課題が残されている他、陸域と海域との接続部等においては、複雑な挙動が観測されており、適切な統合モデルの構築は1つの大きな課題として残されている。本事業では、放出後、陸域に拡散した放射性物質の河川による移行と海洋への流出を評価する統合シミュレーションモデルを整備し、試解析を通して課題を整理する。

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、地表に沈着した放射性物質の一部は、地表を流れる流水により運ばれ、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、流水だけでなく、同時に運搬される土砂の移行も重要となる。

土砂と共に移行する放射性物質の挙動を知るには、一般に、土砂と流出水の間で固液平衡条件を課すモデルを採用し、放射性物質の動態（溶存態成分及び懸濁態成分の動態）を推定する。放射性物質は、そのモデルと共に陸域を移行した後、陸域と海域の接続領域に達するが、そこでは、水中の塩分濃度を始めとして、その化学環境が大きく変化するため、懸濁態との吸脱着や懸濁態の凝集・沈殿等の複雑な現象が見られ、放射性物質の移行挙動に影響を及ぼすことが知られている。

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及び海域（沿岸及び沖合域）シミュレーションモデルを、各々整備し統合することで、陸域から発する放射性物質の移行が最終的に海へと到達し、移流・拡散する様子をシミュレーション可能とする統合シミュレーションモデルを試作する。また、その統合モデルの試解析を通して、生じる課題を抽出・整理する。

### 1.2 本事業の概要

陸域に拡散した放射性物質は、溶存体の場合、主に地表水の流れと共に移動し、河川を通じて海洋へ流出する。その一方、懸濁態に吸着した放射性物質（放射性セシウム：Cs-137）は、地表水及び河川水との間で脱離・吸着を繰り返すことから、懸濁粒子自身の移行と共に、懸濁態と水と間での分配を考慮する必要がある。本件では、降水分布に基づき、水の移行の他、懸濁粒子と放射性物質の挙動を定量的に評価可能とするシミュレーションモデルを整備するため、以下の項目①～③を実施する。

#### ①陸域動態モデル

##### （①－1）モデルの整備

降水分布から河川流量、懸濁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として、集中定数型モデルと分布定数型モデルを整備する（各々のモデルに対し一つのコードを整備）と共に、それらを運用するための共通インターフェイスを整備する。また、モデル

における入力パラメータを自動で最適化する手法を整備する。

### ①－２）試解析

以下の４河川（福島県内を流域とし、太平洋に流入する河川）について、河川流量及び土壌流量について観測値との比較及びモデル間の比較を行い、モデルの予測結果を検証する。

#### 阿武隈川、請戸川、前田川、熊川

更に、上記４河川による１Ｆ事故後５年間程度の放射性セシウム流出量の評価を行う。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その適用上の課題についても整理する。

## ②河口域モデル

### ②－１）モデルの整備

河口域では、潮位変動等により、河川からの放射性物質の流出に係る動態が変化することが知られており、特に、満潮時に河川に流入する海水は、懸濁粒子の動態自身と粒子からの放射性物質の溶出に大きく影響する。これらの複雑な現象を評価可能とするため、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（潮位変動等による塩水遡上等の現象を再現可能とする）。
- 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、塩淡混合も含め水の流動を表現できること（特に非静水圧条件での塩淡混合を含む流動場の計算を実施可能とすること）。
- 水面における風応力や放射による強制場を考慮できること。
- 放射性物質については、溶存体としての挙動と懸濁粒子との分配も考慮し、併せて移流・拡散挙動を表現できること。

### ②－２）海洋モデル ROMS との接続インターフェ이스の整備

上記②－１）で整備したモデルの計算結果を海洋シミュレーションモデル ROMS (Regional Ocean Modeling System[1-1]) に結合するためのインターフェ이스を整備する。

### ②－３）試解析

特定の河口域を対象に１０日間程度のシミュレーションを行い、放射性物質（Cs-137：溶存体、懸濁態）の輸送に係る保存則の確認を実施する他、懸濁粒子の挙動に関しては、各種パラメータに対する感度解析を行うことで、海洋への影響評価を行う。また、関連する文献を調査し、文献値（理論値及び観測値）との比較等から、その解析の妥当性と、課題について整理する。

以上、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移行挙動を降水分布等に基づいて定量的に評価する陸域モデルを整備する。整備対象としては、集中定数型モデル（コード名：MERCURY[1-2][1-3]）と分布定数型モデル

(コード名:RADFLOW2[1-4])とする。これらのコードは、日本原子力研究開発機構(原子力機構)が2011年に発生した1F事故を受け、放射性物質(特にCs-137)の動態を解析する目的で開発したコードであり、MERCURYは迅速に河川流量及び懸濁態流量と共にCs-137の流量(溶存態及び懸濁態流量)を推定することが可能である一方、RADFLOWは陸域での流出分布を詳細に分析する際に有用なコードであり、MERCURYと同様の移行量を推算することが可能だが、計算コストが高くより詳細なモデル化等が必要である。

次に、陸域モデルによる河川の推定流出量を基に、本事業では、沿岸及び沖合での放射性物質の挙動を分析可能とする沿岸及び沖合モデルの整備と、それらの連成モデルを整備する。沿岸モデルとしては、上記のMERCURYやRADFLOWと同様に、原子力機構が2011年1F事故以降に開発した3D-Sea-SPEC[1-5]を整備対象とし、沖合については、世界中で利活用が行われているROMS(Regional Ocean Modeling system)[1-1]を整備対象とする。尚、本事業では、3D-Sea-SPECとROMSを接続させ、3D-Sea-SPECが河口を含む沿岸部でのCs-137の複雑な挙動を担当し、ROMSに接続することで、広く沿岸及び沖合海域での挙動分析を可能とすることを本事業の目標とする。

以上の目標達成のため、具体的には以下、1.2.1~1.2.2に記す整備項目を実施する。1.2.1は陸域動態モデルにおける事業実施項目の概要であり、1.2.2は海域(沿岸・沖合)モデルにおける事業実施項目の概要を記す。尚、1.2.2は陸域及び海域との接続に係る実施項目も含む。

### 1.2.1 陸域動態モデルの整備及び試解析(実施項目)

#### ① モデルの整備

降水分布から河川流量、浮遊土壌粒子及びCs-137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。集中定数型モデル:MERCURYについては、地理空間情報を用いたパラメータ設定方法の整備と試解析による課題整理の他、観測降雨量と観測流量からパラメータを自動的にキャリブレーションする機能の整備を行い、流出量推定機能の強化を図ると同時に、モデル利用に当たったの利便性向上に向けた取り組みも実施する。分布定数型モデル:RADFLOWについても、MERCURYと同様の方法論(地理空間情報を用いたパラメータ設定の後、観測データを用いてキャリブレーション)にて推定機能の強化を図り、利便性向上に向けた整備もおこなう。

#### ② 整備モデルの試解析

整備する陸域動態モデル:MERCURY・RADFLOWを用いて、以下の4河川について、水流量及び土壌発生量(流量)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。

前田川、熊川、請戸川、阿武隈川 (MERCURY)

前田川、熊川、請戸川、阿武隈川 (RADFLOW)

上記検証を基に、MERCURYについては、上記4河川による1F事故後5年間のCs-137流出量の評価を行う他、他の河川、他の地域に適用する際に必要となるデータと実施上の課題についても整理する。RADFLOWについても、上記4河川において、Cs-137流出量の評価を行う。

### 1.2.2 沿岸・沖合海域モデルの整備及び試解析(実施項目)

#### ① モデルの整備

海水中に流入する放射性物質（Cs-137）の動態を評価するため、沿岸域モデルを整備する。沿岸域モデルとしては、3D-Sea-SPEC を整備対象とする。3D-Sea-SPEC では、固液分配係数の塩分濃度依存性を考慮可能としている他、懸濁粒子の凝集・沈殿に係る現象もシミュレーション可能となっている。これらの基本機能を整備し、試解析可能とする他、1F 近傍の沿岸域（流入する河川としては阿武隈川を除く 3 河川のみ考慮）でのシミュレーションの準備と試解析を行う。

## ② 整備モデルの試解析

福島の上記 3 河川の河口域を含む沿岸とその沖合を対象に、シミュレーションを実施し、沿岸域への Cs-137（溶存態及び懸濁態の両成分）の流出という観点から、固液分配係数の塩分濃度依存性や、懸濁粒子の凝集・沈殿の効果について、試解析結果を整理し、課題を整理する。

## ③ 沖合モデルとの結合

上記の沿岸（河口域含む）モデル：3D-Sea-SPEC と沖合モデルとして、広く世界中で利用されている海洋シミュレーションモデル ROMS への接続を可能とするためのインターフェイスを整備し、試解析を通してその検証を行う。

## 1.3 本事業報告書の概要

以下、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標に従い、1.2 に記した本事業の実施項目の詳細（整備事項と試解析結果と整理した課題等）を記す。

2 章では、本事業の主要目的である、令和 4 年度に実施する陸域モデル（集中定数型及び分布定数型モデル）と海域モデル（沿岸及び沖合モデル）の整備方針についてまとめる。対象とする陸域モデルとしては、手法が異なる二つのモデルとする一方、海域モデルは、沿岸、沖合で用いるモデルが、各々異なる。以上より、整備項目は多岐に渡るが、現状の課題とその解決のための方策について整理する。

3 章及び 4 章では、令和 4 年度に実施する陸域動態モデルの整備内容と、試解析を行い生じ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（MERCURY）について報告し、4 章では、分布定数型流出モデル（RADFLOW）の整備とその試解析結果について報告する。令和 3 年度の当該事業においても、MERCURY の整備を実施したが、令和 4 年度は、主に令和 3 年度の課題とその課題解決に当たる整備を中心に行ったことを記す。一方、RADFLOW においても、MERCURY と同様に令和 3 年度の課題を中心に、その解決に当たるための整備を行った。その試解析結果と課題を報告する。

5 章では、上記の陸域モデルから得られる海域への推定流出量を基に海域（沿岸域及び沖合）モデルについての整備と、試解析により生じた課題を整理し報告する。沿岸域モデルとしては、3D-Sea-SPEC を用いる一方、沖合モデルでは、世界的に利用されているコード ROMS を用いる。尚、どちらかのコードのみで、両海域（沿岸及び沖合）をカバー可能とする整備も行う。その後、実際に試解析を行い生じた課題を整理する。

7 章は、本事業全体のまとめと考察である。

## 参考文献

- [1-1] Regional Ocean Modeling System (ROMS), <https://www.myroms.org/>
- [1-2] 佐久間一幸、「MERCURY バージョン 1.1 理論/ユーザーマニュアル」.

- [1-3] Kazuyuki Sakuma, Takahiro Nakanishi, Kazuya Yoshimura, Hiroshi Kurikami, Kenji Nanba, Mark Zheleznyak, “A modeling approach to estimate the  $^{137}\text{Cs}$  discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017”, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 216, May 2020, Pages 106201.
- [1-4] 佐久間一幸、「RADFLOW 簡易マニュアル」.
- [1-5] S. Yamada, M. Machida, H. Kurikami, Applications of Radiocesium Migration Models to Fukushima Environmental Issues: Numerical analysis of radiocesium transport in temperature-stratified reservoirs by 3D-Sea-SPEC, *Proc. of SNA+MC2020*, (2020), 140-146. <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/BB2019-1620.pdf>

## ■ 2章 陸域動態モデルと海域（沿岸及び沖合）モデルの整備に向けて

### 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推定することがモデリングの主たる目的となる一方、放射性セシウム(Cs-137)のように、土壌中の粘土鉱物等に強く吸着する放射性物質の場合は、河川による流出水だけでなく、同時に運搬される土砂量も重要となり、一般に土砂と流出水の間で固液平衡条件を課すモデルが用いられ、溶存態成分と懸濁態成分の両者の流出が重要と考えられてきた。

本事業では、陸域に降着し河川から海域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年度の調査報告を基に、原子力機構が開発したコード: MERCURY[2-1][2-2]と RADFLOW[2-3]に対し、令和3年度に実施した整備項目と生じた課題を基にその整備を行う。ここでは、推定精度を向上させるため、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の整備が主要な整備項目となる。次に、陸域から海域へと流出した放射性物質の挙動を追跡するため、沿岸及び沖合において、3D-Sea-SPEC(原子力機構開発)[2-4]及び ROMS[2-5]に対し、放射性物質の移流・拡散解析を実施するための整備を行う。

### 2.2 集中定数型流出モデルの整備方針

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って、陸域を移動した後、河川に流入し、その後、河川流を通じて海域へと流出する。この海域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、発生する地表水や地下からの湧水等による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(Cs-137)のように、土砂等の河川水中の固相成分へ強く吸着する場合、そ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。陸域における集中定数型流出モデルに対しては、原子力機構が開発した MERCURY を整備対象とするが、本事業での整備項目は下記の2つとなる。

- 1) 河川流域の地理空間情報を基に GIS を活用したパラメータの設定 ⇒ 3.2.1 にて詳述
- 2) 自動キャリブレーション機能によるパラメータの最適化 ⇒ 3.2.2 にて詳述

上記 1) は、未知の河川(任意の河川への適用を意味する)に対し、MERCURY が流出量を推定するためのパラメータの決定方法に該当する。それは、過去の観測量(降水量と流出量)を基にパラメータをキャリブレーションする通常の方法ではなく、過去の観測量が存在しない場合でも、河川流域の地理空間情報のみから推定可能とするための整備項目である。しかし、3章にて記すように、任意の河川に対し、過去の観測量を用いたキャリブレーションなしでのパラメータ設定は、容易に達成可能な課題ではないことを付記する(その理由や整備後の試解析による評価は3章にて詳述)。尚、本事業では、地理空間情報を用いてパラメータを設定した後、適用河川でのキャリブレーションを行うが、その操作は最小限の観測量で済むことを記す。

上記 2)は、対象河川に対し、観測量（降雨量及び流量）がある場合、MERCURY パラメータを自動で設定及び調整可能とする機能の開発・整備に当たる。令和 3 年度、従来のキャリブレーション機能として複数の最適化アルゴリズムが提案されていることを報告したが、当該事業では、それらの代表的複数のアルゴリズムを実装し、最も優れた性能を示すパラメータを手法間の評価値の比較を通して、河川毎に最適値を定める自動キャリブレーション機能とする。MERCURY のような 3 段タンクモデルでは、パラメータ数が多く、パラメータ空間の構造が複雑となるため、複数の最適化手法を適用し、最も優れた最適化性能を示すパラメータを各河川のパラメータとして採用すべきと考えられる。本事業では、4 つの最適化手法（Newton 法、PSO 法、SCE-UA 法、ベイズ最適化法）を採用し、各手法による最適化パラメータ値を求め、河川毎に最も優れた値を採択する。

## 2.3 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流出モデルには、前節に記した集中定数型モデルの他、分布定数型モデルがある。前者は、流域全体を複数のタンク等で表現する簡便なモデルである一方、後者は、流域を一定のスケールから成る格子を用いて区画し、格子単位で、その格子を特徴づける特有の定数を付与する他、格子間の水や懸濁態の移行は、物理法則を模擬するモデル（方程式を直接用いる場合もある）により記述される。従って、分布定数型モデルの場合、計算コストは高いが、最近の計算機の発達により、PC でも手軽に計算が可能となっているモデルも存在する。

原子力機構では、1F 事故後、分布定数型モデルとして、放射性核種（Cs-137）の移行挙動を記述する RADFLOW を開発してきた。RADFLOW は、水の挙動に対し、モデル化により計算コストが比較的低いと、設定すべきパラメータが多く、その適切な設定方法が利用上の大きな課題となっている。この課題に対し、令和 3 年度当該事業では、地理空間情報を基に、それらの情報が関与するパラメータを定め、おおよその値を設定する機能を実装した他、事前に付与されたパラメータをキャリブレーションする機能として、ベイズ最適化を適用した。しかし、一般に決定すべきパラメータ数が多い場合、ベイズ最適化は、必要なメモリー量が多く、計算コストが高いため、パラメータ数を限定する必要があると、十分なキャリブレーションが実施できないという課題があった。そこで、前節に記したように、計算コストは低いと、最適化性能の高い PSO 法及び SCE-UA 法を採用し実装する。

## 2.4 海域（沿岸及び沖合）モデルの整備方針

陸域から流出した放射性物質の海域（沿岸及び沖合）における動態を記述するモデルについては、1F 事故後、様々な研究が行われてきた。1F 事故では、大気中に放出された放射性物質の海洋への降下と共に、1F 港湾からの汚染水の直接流出も起こり、直接流出の海洋への影響をシミュレーションする解析が数多く行われてきた。その結果、福島沿岸や沖合における海水流動場の特徴が明らかになる他、放射性物質に特有の様々な挙動に対する知見も得られてきた。最近では、1F 事故から年月を経るに連れ、Cs-137 の場合、陸域に降下し沈着した Cs-137 の河川による移行挙動が注目されており、河川から流出した放射性物質の海域（沿岸及び沖合）での動態も新たな研究対象となっている。尚、河川により移行する放射性物質（Cs-137）は、海域に到達する際、大きな化学環境の変化（例：塩分濃度）を経るため、下記の複雑な挙動を示すことが知られている。

- 1) 固液分配係数（溶存態成分と懸濁態成分の分配）の塩分濃度による変化
- 2) 懸濁態成分の海水塩分下での凝集・沈降の促進

上記の現象は、感潮域が内陸にまで及ぶ大河川の場合、河口域より遥か上流から生起する一方、感潮域が殆どなく、沿岸に河川水（淡水）が直接流出するような中小河川では、同様の現象は沿岸域にて起こると考えられる。実際、福島沿岸では、阿武隈川以外に感潮域を持つ河川は少なく、Cs-137の河川流出量が無視できない河川の多くがはっきりとした感潮域を持たず、上記現象は沿岸にて生起するものと考えられる。従って、本事業では、沿岸にて、上記現象をモデル化可能な3D-Sea-SPECを利用し、その影響について、福島沿岸での試解析を行い、分析することとした。以上、本事業では、沿岸にて、上記挙動を解析可能な3D-Sea-SPECを利用する他、沖合においては、より大きなスケールの海域の挙動を記述するROMSとの接続を含めて統合コードを整備する。

## 2.5 まとめ

以上、本2章では、本事業で中核となる放射性核種の2つの陸域動態モデルについての整備方針と陸域から流出する放射性核種の海域（沿岸及び沖合）での移行挙動を記述する海域動態モデルの整備方針について記した。

陸域では、懸濁態と溶存態の2成分の移行挙動が重要だが、その基本となる降雨による河川水の移行挙動の推定予測は最も基本的な課題である。この課題の解決を図るため、本事業では、集中定数型流出モデルMERCURYに対して、GISによる地理空間情報を利用するパラメータ設定法を基に精度向上を図る他、発生する課題を整理する。また、自動パラメータキャリブレーション機能として、複数の最適化アルゴリズムを適用し、結果を比較することで最良のパラメータを取得するための整備を行う。

分布定数型流出モデルRADFLOWに対しては、パラメータキャリブレーション機能として、新たに計算コストの低いPSO法やSCE-UA法を実装し、多数のパラメータのキャリブレーションを高速に実施するための整備を行う。

海域においては、放射性物質Cs-137に対し、懸濁態成分の複雑な挙動を解析可能とするための整備と試解析を3D-Sea-SPEC（河口及び沿岸域での懸濁態の複雑な挙動をモデル化し追跡可能とする）を用いて行い、福島沿岸での試解析を実施する。一方、沖合では、塩分濃度等の海水環境が一定と考えられることから、海域で広く解析コードとして用いられているROMSの利用を想定し、3D-Sea-SPECとの接続機能を整備する。

以上、本事業では、最終的に陸域モデルと海域モデルを接続し統合することで、陸域から流出する放射性核種の挙動を、陸域から海域まで連続的に解析可能な統合モデルの整備を行う。尚、上記統合モデルを整備すると同時に、これらのモデルの利用を促進する取り組みについても検討する。作業項目としては、GUIの整備や解析結果をWEB公開するための整備項目（WEBアプリ開発）についても試作を行い、課題を整理し報告する。

## 参考文献

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

- [2-3] 佐久間一幸、「RADFLOW 簡易マニュアル」.
- [2-4] S. Yamada, M. Machida, H. Kurikami, Applications of Radiocesium Migration Models to Fukushima Environmental Issues: Numerical analysis of radiocesium transport in temperature-stratified reservoirs by 3D-Sea-SPEC, Proc. of SNA+MC2020, (2020), 140-146. <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/BB2019-1620.pdf>
- [2-5] Regional Ocean Modeling System (ROMS), <https://www.myroms.org/>

## ■ 3章 集中定数型流出モデル MERCURY の整備と試解析

### 3.1 本章の概要

3章では、本事業にて実施した集中定数型流出モデル MERCURY[3-1][3-2]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 は、令和2年度当該事業により、整備すべき集中定数型流出モデルとして選定したコードであり、令和3年度当該事業での整備と試解析結果を基に整理した課題解決を図ることを目的とし、令和4年度に実施した整備事項について報告する。

MERCURY は、原子力機構がIF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したモデル（3段タンクモデル）を実装したコードであり、河川水量の推定と共に放射性物質の溶存態成分及び懸濁態成分の流出量も推定可能とし、放射性物質の陸域（河川）での動態を評価することが可能なコードである。また、既に福島県において、浜通りを中心とする河川からの放射性物質の流量を解析する研究が当該コードを用いて行われ、海域の放射性物質のシミュレーションに陸域からのインプットを付与する目的で使用される等、広く環境動態研究に用いられてきた実績を有するコードである。以下、本事業での二つの整備事項を記す。

- 1) 河川流域の地理空間情報を基に GIS を活用したパラメータの設定 ⇒ 3.2.1 詳述
- 2) 自動キャリブレーション機能によるパラメータの最適化 ⇒ 3.2.2 詳述

1) については令和3年度の当該事業において初めて実施したが、学習した河川数が少なく(回帰分析のデータとして用いた河川数が少ない)、福島県の4河川でのみ実施したため、汎化性能（未知の河川にも適用可能性を有する）が十分ではないと判断し、令和4年度事業では、日本全国の河川（24河川）に拡張し、重回帰分析を行い、広く日本全国の河川の情報を反映させることを試みた。また、併せて自動キャリブレーション機能（最適化機能）も強化し、上記24河川のパラメータの取得のための重回帰分析に用いるデータ取得に際し、有効に機能することを確認した。以下では、上記の整備項目に従い、実施した内容を記した後、福島県の4河川に対し、試解析を行った結果を報告し、課題を整理する。

### 3.2 集中定数型流出モデル MERCURY の整備

本節では、集中定数型流出モデル MERCURY に対し、上記整備事項 1)2)の詳細と、その結果及び課題を記す。

#### 3.2.1 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

##### ① 概要

上記整備項目 1)において、令和2年度の当該事業では、GIS（ソフトウェア：QGIS）を用いて、貯留関数モデルのパラメータ設定(未知の河川に適用)に対し、文献[3-3]に従い実装し、その設定パラメータを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 を用いて得られる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、流量予測精度の向上が期待される一方、自由度の高さからパラメータ空間が複雑となり、パラメータ設定には地理空間情報の詳細な分析が必要となる可能性もある。本事業では、令和3年度事業と同様の手法を日本全国

の 24 河川に対して適用し、汎化性能が向上するかを調査し、設定方法としての妥当性及び改善事項を検討した。

以下では、先ず簡単に MERCURY の特徴を説明しよう。MERCURY は、河川流出量の予測モデルとして、図 3-1 模式図に示した 3 段のタンクモデルを使用する（縦方向の矢印は水の鉛直方向の動き、横方向の矢印は流域からの流出を示す。尚、モデルが持つパラメータは 5 つである（式 (3-4) 参照）。

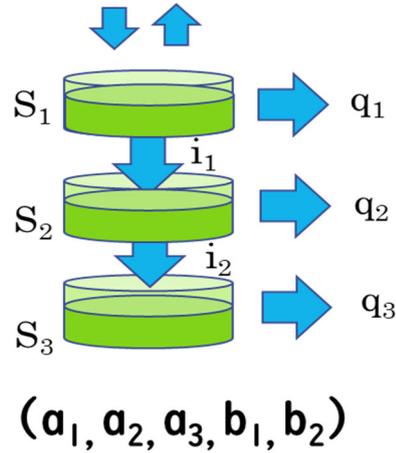


図 3-1 MERCURY の 3 段タンクモデルの模式図

各タンクに対し、河川へ流出する水量、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。

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

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

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

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

$$i_1 = b_1 S_1, \quad i_2 = b_2 S_2.$$

$$Q = \sum_i^3 q_i \times \text{流域面積}(m^2) \times 10^{-3}. \quad (3-5)$$

ここで、 $S_n$  :各タンクの貯水高さ (mm) ( $n=1-3$ )、 $q_n$  :各タンクからの流出比 (mm/h) ( $n=1-3$ )、 $i_n$  :浸透量 (mm/h) ( $n=1-2$ )、 $P$  :降水量 (mm/h)、 $E$  :蒸発散量 (mm/h)、 $a_n$  :流出比に関する経験パラメータ( $n=1-3$ )、 $b_n$  :浸透量に関する経験パラメータ( $n=1-2$ )、 $Q$  :流域から流出する流量 (m<sup>3</sup>/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を活用し、地理空間情報を基に推定する方法を整備し、試解析を行い、課題を調査し整理する。

MERCURY パラメータ設定の考え方としては、上段タンクに係るパラメータ設定に対し、土地利用や標高及び傾斜等のデータ（下記データのリスト参照）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ことが妥当と考えられる[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（下記データのリスト参照）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 データを取り扱うことで、更なる精度の高い調整機能が期待できると考えられる。しかし、設定すべきパラメータが多くなると、パラメータ空間が複雑となり、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適合性（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）

## 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：<https://qgis.org/ja/site/>）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データの分布等を、前田川（福島県）を例にとって示す。尚、MERCURYのパラメータとの相関関係を推定するため、重回帰分析を行うが、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必要がある。例えば、図3-2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3-3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。

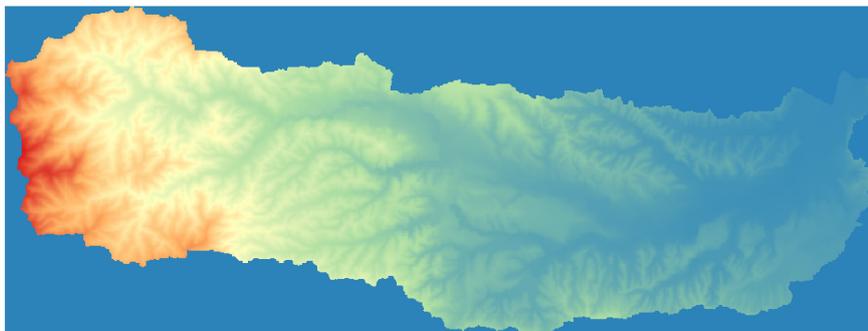


図 3-2 流域（前田川）と連続値属性（標高）の分布

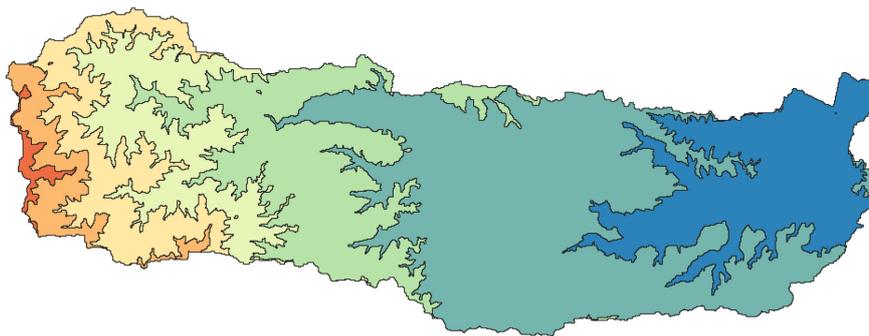


図 3-3 離散化した属性値（標高）の分布

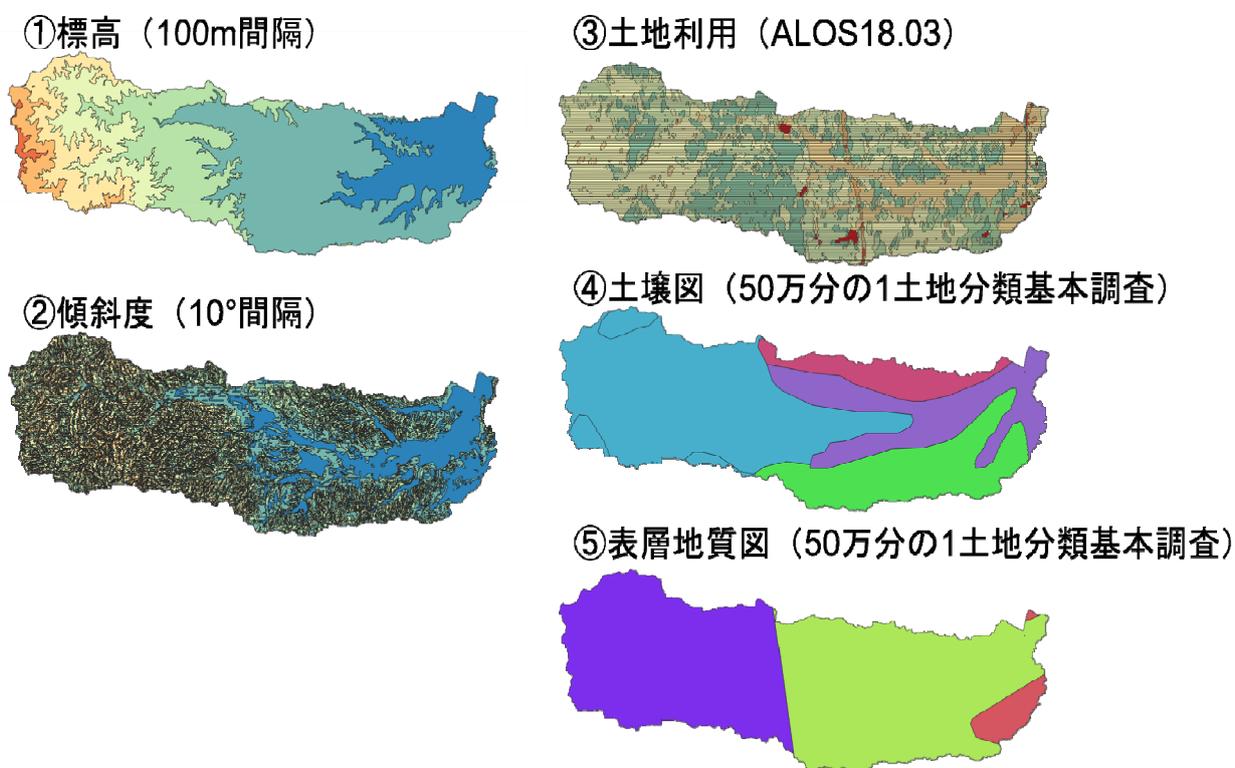


図 3-4 離散化した各属性値の分布

③ 地質パラメータの属性値一覧

MERCURY のモデル定数（パラメータ）と相関すると考えられる地理空間情報として、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する。

表 3-1 標高データ（100.0m 間隔にクラス分け）

Data	ID	Range		
		Elevation	0	0
	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対しては、対象流域を反映したパラメータを求めることが可能となる。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、抽出した地理空間情報：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し、重回帰分析を実施することで、MERCURYのパラメータが地理空間情報にどのように相関するかが分かる。

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

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

尚、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 $k_{i,j}, g_i$ が求まれば、観測データがなく、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、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がおおよそ推定可能になると考えられる。その際、説明変数は表 3-1～表 3-5 において列挙したもの（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）となる。

## ⑤ 重回帰分析の理論

本節では、重回帰分析手法の概要を説明する。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、 $\epsilon$ 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、 $\lambda$ 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。

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

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

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

#### ⑥ 対象とする河川（学習データとして用いる日本全国の河川）

重回帰分析を行う対象とする日本全国の河川については、表 3-6 で列挙されている 24 河川とし、その流域を図 3-5 に示した。おおよそ、日本全国を隈なく網羅しており、パラメータの推定精度（汎化性能）が向上すると単純に考えられる。尚、表 3-6 の「流出量観測所」は、水文水質データベースに記録されている観測所の中で、今回の解析で流出量時刻歴データを使用した観測所の名前を記している。

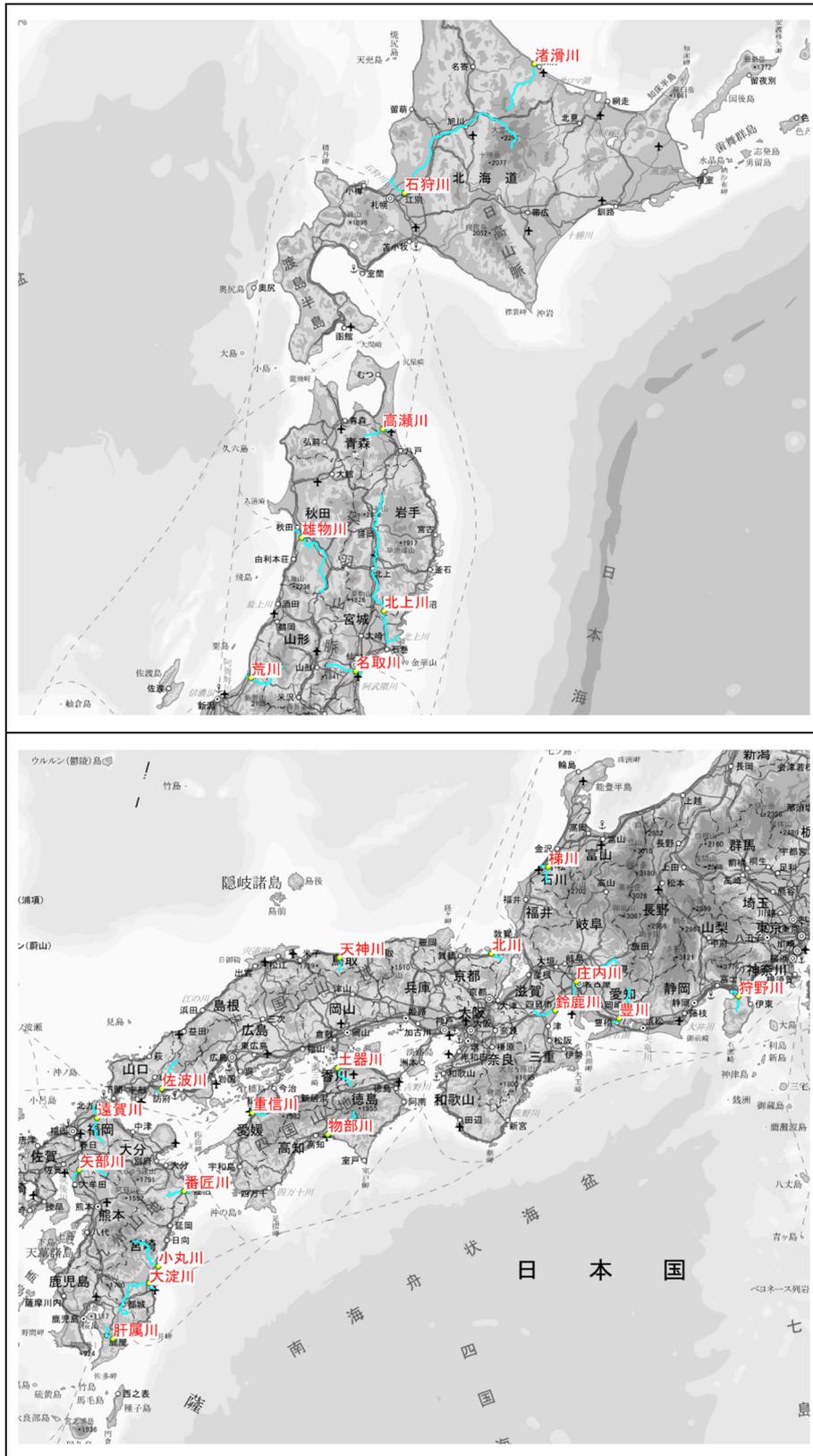


図 3-5 学習対象とする日本全国の河川（地図上の位置）上図：東北・北海道の対象河川、下図：その他の対象河川

表 3-6 検証対象とする日本全国の河川

地方	河川	河川 (かな)	河川 (ローマ字)	水文水質データベース 流出量観測所
北海道	石狩川	いしかり	Ishikari	石狩大橋
	渚滑川	しょこつ	Shokotsu	渚滑橋
東北	高瀬川	たかせ	Takase	上野
	名取川	なとり	Natori	名取橋
	雄物川	おももの	Omono	椿川
	北上川	きたかみ	Kitakami	七日町
北陸	荒川	あら	Ara	葛籠山
	梯川	かけはし	Kakehasi	埴田
中部	豊川	とよ	Toyo	当古
	庄内川	しょうない	Shounai	枇杷島
	鈴鹿川	すずか	Suzuka	高岡
	狩野川	かの	Kano	千歳橋
近畿	北川	きた	Kita	高塚
中国	天神川	てんじん	Tenjin	小田
	佐波川	さば	Saba	新橋
四国	土器川	どき	Doki	丸亀橋
	物部川	ものべ	Monobe	深淵 (無堤)
	重信川	しげのぶ	Shigenobu	出合
九州	肝属川	きもつき	Kimotsuki	俣瀬
	小丸川	おまる	Omaru	小丸大橋
	番匠川	ばんじょう	Banjo	番匠橋
	遠賀川	おんが	Onga	日の出橋
	矢部川	やべ	Yabe	船小屋
	大淀川	おおよど	Oyodo	柏田

### ⑦ 検証解析：学習データの用意

以下、対象とする日本全国の河川（24 河川）に対し、重回帰計算により、MERCURY パラメータの探索及び決定を行った。尚、計算条件としては下記の点に着目した。先ず、パラメータの探索及び決定には 3.3 で詳述する最適化手法を用いて最適値を求め、それらの値を目的変数として、重回帰計算を行う。

- 計算期間は雪の影響が少ない 7 月～9 月までの 3 か月間とした。(文献[3-3]参照)
- 蒸発散量については大きな影響はないと考えられ考慮しない。(文献[3-3]参照)
- 各対象河川について、MERCURY の入力として平均降雨を与え続ける定常計算を実施し、初期の 3 段タンクの貯水高さを求めた。

表 3-7 計算条件①：流域面積、計算期間、蒸発散量

地方	河川	流域面積(km <sup>2</sup> )	計算期間	蒸発散量(mm/h)
北海道	石狩川	12780.01	2011/07/11～2011/10/11	0.000
	渚滑川	1231.56	2011/07/01～2011/10/01	0.000
東北	高瀬川	349.75	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	名取川	462.34	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	雄物川	4046.61	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	北上川	7756.94	2011/07/01～2011/10/01	0.000
北陸	荒川	1092.58	2013/07/01～2013/10/01	0.000
	梯川	157.76	2011/07/01～2011/10/01	0.000
中部	豊川	658.74	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	庄内川	622.99	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	鈴鹿川	272.87	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	狩野川	398.52	2011/07/01～2011/10/01	0.000
近畿	北川	201.53	2014/07/01～2014/10/01	0.000
中国	天神	475.72	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	佐波	421.66	2011/07/01～2011/10/01	0.000
四国	土器	132.01	2013/07/01～2013/10/01	0.000
	物部	468.79	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	重信	455.39	2011/07/01～2011/10/01	0.000
九州	肝属川	314.91	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	小丸川	436.07	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	番匠川	279.95	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	遠賀川	716.55	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	矢部川	465.50	2011/07/01～2011/10/01	0.000
	大淀川	2131.82	2011/07/01～2011/10/01	0.000

表 3-8 計算条件②：初期のタンク貯水高さ

地方	河川	タンクの貯水高さ		
		S <sub>1</sub> (mm)	S <sub>2</sub> (mm)	S <sub>3</sub> (mm)
北海道	石狩川	0.2774	6.9357	17.3393
	渚滑川	0.2154	5.3843	13.4607
東北	高瀬川	0.3147	7.8667	19.6667
	名取川	0.2873	7.1829	17.9571
	雄物川	0.4703	11.7571	29.3929
	北上川	0.3259	8.1486	20.3714
北陸	荒川	0.5361	13.4019	33.5048
	梯川	0.6158	15.3952	38.4881
中部	豊川	0.4993	12.4829	31.2071
	庄内川	0.4079	10.1981	25.4952
	鈴鹿川	0.4237	10.5914	26.4786
	狩野川	0.5997	14.9929	37.4821
近畿	北川	0.5042	12.6052	31.5131
中国	天神川	0.5339	13.3471	33.3679
	佐波川	0.4648	11.6200	29.0500
四国	土器川	0.3351	8.3786	20.9464
	物部川	0.7243	18.1062	45.2655
	重信川	0.3685	9.2124	23.0310
九州	肝属川	0.7218	18.0448	45.1119
	小丸川	0.6761	16.9014	42.2536
	番匠川	0.4872	12.1791	30.4476
	遠賀川	0.4642	11.6052	29.0131
	矢部川	0.5303	13.2571	33.1429
	大淀川	0.7031	17.5786	43.9464

表 3-9 計算条件③：MERCURY パラメータの初期設定

河川	MERCURY の経験パラメータ				
	a1	a2	a3	b1	b2
対象河川すべて	0.025	0.010	0.004	0.500	0.010

※上記初期設定は、文献[3-2]の Table2” MERCURY model's parameters for each catchment.”の前田川の経験パラメータを基に設定している。

### 最適化結果：最適化手法ごとの評価値

- 検証対象とする日本全国の河川（24 河川）については、誤差(RSE)が 0.4 以下、つまり NSE(Nash-Sutcliffe efficiency)に対し、0.6 以上の値を達成した（章末補足事項参照）。また、過半数の河川について、NSE が 0.7 以上の値を達成している。尚、河川毎に最も優れた値を取得した手法、RSE 及び各パラメータ値を赤字で記した。
- 誤差（RSE）と流域面積のとの散布図を図 3-6、図 3-7 に示した。

表 3-10 最適化結果：最適化手法ごとの評価値

River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
石狩川	Newton	0.322	2.765E-02	1.161E-02	3.841E-03	1.193E+00	1.042E-02
	Bayes	0.325	1.000E-05	1.000E-02	1.000E-04	4.291E-01	1.000E-04
	<b>PSO</b>	<b>0.275</b>	<b>1.422E-02</b>	<b>1.221E-02</b>	<b>4.624E-04</b>	<b>3.419E-03</b>	<b>5.908E-01</b>
	SCE-UA	0.314	5.608E-03	1.000E-10	1.278E-02	2.459E-01	1.972E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
渚滑川	Newton	0.677	1.980E-02	1.107E-02	4.452E-03	9.747E-01	1.411E-02
	<b>Bayes</b>	<b>0.270</b>	<b>1.000E-05</b>	<b>1.000E-02</b>	<b>1.000E-04</b>	<b>5.719E-01</b>	<b>1.437E-02</b>
	PSO	0.285	4.822E-03	1.640E-01	4.636E-04	1.873E-02	5.585E-01
	SCE-UA	0.272	3.274E-03	2.756E-02	7.184E-04	3.773E-02	8.349E-02
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
高瀬川	<b>Newton</b>	<b>0.217</b>	<b>1.000E-10</b>	<b>5.090E-02</b>	<b>8.637E-03</b>	<b>1.223E-01</b>	<b>9.820E-02</b>
	Bayes	0.287	3.334E-02	1.000E-02	1.000E-06	1.000E+00	1.000E-04
	PSO	0.273	2.500E-02	1.000E-02	4.000E-03	5.000E-01	1.000E-02
	SCE-UA	0.269	3.557E-02	2.448E-02	1.063E-02	1.474E-01	6.053E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
名取川	Newton	0.171	5.594E-02	1.000E-10	3.803E-02	1.000E-10	5.894E-01
	<b>Bayes</b>	<b>0.151</b>	<b>6.667E-02</b>	<b>8.890E-03</b>	<b>1.200E-05</b>	<b>1.000E-03</b>	<b>1.000E-04</b>
	PSO	0.174	9.376E-02	1.749E-01	4.095E-02	1.367E-01	3.734E-01
	SCE-UA	0.265	2.459E-02	4.601E-01	3.575E-01	7.315E-02	2.905E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
雄物川	Newton	0.560	2.216E-02	1.131E-02	5.898E-03	9.883E-01	1.371E-02
	Bayes	0.541	1.000E-05	1.000E-02	1.000E-04	4.291E-01	1.437E-02
	PSO	0.494	4.228E-03	6.576E-02	3.122E-03	1.723E-02	8.384E-02
	<b>SCE-UA</b>	<b>0.379</b>	<b>1.000E-10</b>	<b>1.608E-02</b>	<b>2.886E-04</b>	<b>9.745E-02</b>	<b>1.259E-02</b>
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
北上川	Newton	0.399	2.313E-02	1.131E-02	5.770E-03	1.005E+00	1.304E-02
	Bayes	0.425	1.000E-05	1.000E-02	1.000E-06	2.864E-01	1.000E-04

	PSO	0.322	1.082E-02	2.257E-02	5.191E-04	7.838E-03	4.180E-01
	SCE-UA	0.385	2.970E-03	1.000E-10	1.073E-02	4.299E-01	3.755E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
荒川	Newton	0.277	3.305E-02	6.283E-03	1.000E-10	2.784E-02	1.000E-10
	Bayes	0.335	3.334E-02	3.340E-03	8.900E-05	1.000E-03	1.000E-04
	PSO	0.296	5.581E-03	8.160E-02	1.646E-02	3.684E-01	2.478E-01
	SCE-UA	0.271	2.539E-02	5.067E-02	9.974E-03	5.775E-01	1.022E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
梯川	Newton	0.436	1.583E-02	9.336E-03	3.616E-03	1.968E-02	3.405E-02
	Bayes	0.499	1.112E-02	5.560E-03	3.400E-05	1.000E-03	5.719E-02
	PSO	0.390	1.930E-02	5.023E-02	6.865E-04	2.432E-02	3.941E-01
	SCE-UA	0.387	2.030E-02	6.966E-03	7.151E-04	1.863E-02	6.583E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
豊川	Newton	0.272	5.955E-02	1.000E-10	2.373E-02	1.765E-03	6.676E-02
	Bayes	0.230	7.778E-02	1.000E-05	1.000E-06	1.000E-03	4.291E-02
	PSO	0.239	9.376E-02	1.749E-01	4.095E-02	1.367E-01	3.734E-01
	SCE-UA	0.262	3.395E-02	5.631E-01	1.669E-02	7.803E-02	7.721E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
庄内川	Newton	0.308	8.250E-02	1.689E-01	7.357E-03	3.481E-02	6.578E-01
	Bayes	0.328	1.000E-01	1.000E-02	1.000E-06	1.000E-03	1.000E-01
	PSO	0.283	1.015E-01	2.702E-01	5.968E-03	8.991E-02	4.119E-01
	SCE-UA	0.295	8.885E-02	5.251E-01	5.476E-03	4.451E-02	8.630E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
鈴鹿川	Newton	0.304	5.574E-02	7.525E-03	1.000E-10	3.327E-02	1.000E-10
	Bayes	0.384	4.445E-02	1.000E-02	1.000E-04	1.000E-03	8.573E-02
	PSO	0.296	7.877E-02	8.465E-02	7.930E-03	4.224E-01	8.296E-02
	SCE-UA	0.285	3.505E-02	2.677E-01	1.373E-02	1.829E-01	2.816E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
狩野川	Newton	0.360	6.178E-02	1.416E-02	5.268E-03	1.293E-01	4.438E-02
	Bayes	0.340	7.778E-02	7.780E-03	1.000E-06	1.437E-01	1.000E-04
	PSO	0.334	8.034E-02	1.224E-02	1.560E-03	1.406E-01	2.800E-02
	SCE-UA	0.323	7.768E-02	6.195E-03	1.000E-10	1.313E-01	2.010E-03
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
北川	Newton	0.248	4.547E-02	1.426E-02	1.000E-10	5.996E-02	1.859E-02
	Bayes	0.268	7.778E-02	7.780E-03	4.500E-05	1.437E-01	1.437E-02

	PSO	0.282	4.966E-02	4.388E-03	8.210E-04	4.390E-02	3.954E-01
	SCE-UA	0.263	3.218E-02	1.062E-01	1.620E-05	4.614E-02	3.266E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
天神川	Newton	0.084	4.305E-02	3.362E-03	1.000E-10	3.416E-02	1.000E-10
	Bayes	0.119	7.778E-02	1.000E-02	8.900E-05	1.437E-01	1.437E-02
	PSO	0.193	7.005E-03	2.050E-01	3.978E-03	2.629E-01	4.945E-01
	SCE-UA	0.274	1.259E-01	2.056E-01	3.966E-03	2.655E-01	6.043E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
佐波川	Newton	0.462	1.483E-02	1.153E-02	6.803E-03	5.031E-01	1.816E-02
	Bayes	0.420	1.112E-02	1.000E-02	8.900E-05	8.573E-01	1.437E-02
	PSO	0.368	1.290E-02	1.105E-02	2.392E-04	5.935E-03	5.788E-01
	SCE-UA	0.429	1.223E-02	3.206E-02	5.046E-03	4.276E-02	1.499E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
土器川	Newton	0.267	1.000E-10	6.993E-02	3.949E-04	2.710E-01	4.895E-02
	Bayes	0.432	3.334E-02	4.450E-03	4.500E-05	1.000E-03	5.719E-02
	PSO	0.295	1.388E-02	1.513E-01	1.425E-03	1.031E-01	2.090E-01
	SCE-UA	0.293	3.248E-02	1.577E-01	7.509E-04	4.920E-02	3.288E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
物部川	Newton	0.159	3.763E-02	1.182E-02	1.048E-02	2.600E-02	2.545E-02
	Bayes	0.214	6.667E-02	1.000E-02	1.200E-05	1.437E-01	1.000E-04
	PSO	0.165	4.688E-02	5.809E-02	1.975E-02	1.691E-01	2.694E-01
	SCE-UA	0.194	4.771E-02	6.784E-02	2.665E-02	6.346E-01	7.464E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
重信川	Newton	0.284	6.880E-02	6.452E-03	1.000E-10	2.392E-02	1.000E-10
	Bayes	0.332	6.667E-02	1.000E-02	1.000E-04	1.000E-03	5.719E-02
	PSO	0.298	8.601E-02	1.511E-01	2.013E-03	4.717E-02	5.831E-01
	SCE-UA	0.298	4.770E-02	3.496E-01	3.856E-03	5.540E-02	3.538E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
肝属川	Newton	0.211	2.509E-02	3.273E-03	3.182E-04	1.296E-01	1.494E-02
	Bayes	0.322	5.556E-02	7.780E-03	3.400E-05	8.573E-01	1.437E-02
	PSO	0.297	2.709E-02	1.060E-01	4.077E-04	1.672E-01	9.712E-01
	SCE-UA	0.279	4.353E-02	3.542E-02	4.930E-04	8.842E-01	2.070E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
小丸川	Newton	0.327	5.525E-02	1.000E-10	1.678E-02	1.000E-10	4.274E-02
	Bayes	0.357	5.556E-02	1.000E-02	1.000E-04	1.000E-03	1.000E-04

	PSO	0.343	7.639E-03	2.045E-01	5.560E-03	7.004E-02	4.082E-03
	SCE-UA	0.332	1.000E-10	7.458E-02	1.024E-03	3.195E-01	1.000E-10
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
番匠川	Newton	0.265	9.381E-02	1.000E-10	5.173E-02	1.000E-10	1.008E+00
	Bayes	0.253	1.000E-01	1.000E-02	8.900E-05	1.000E-03	1.437E-02
	PSO	0.244	8.555E-02	4.690E-01	1.340E-02	6.322E-02	8.010E-02
	SCE-UA	0.260	5.043E-02	4.559E-01	1.069E-01	3.261E-01	7.796E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
遠賀川	Newton	0.584	1.000E-10	1.193E-01	7.176E-03	1.368E-01	3.090E-01
	Bayes	0.446	3.334E-02	1.000E-02	8.900E-05	7.146E-01	1.437E-02
	PSO	0.343	1.300E-02	1.161E-01	5.281E-04	5.682E-02	3.330E-01
	SCE-UA	0.332	7.746E-03	1.233E-01	5.094E-04	1.034E-01	2.949E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
矢部川	Newton	0.312	3.174E-02	1.000E-10	7.627E-03	8.919E-03	3.420E-03
	Bayes	0.299	5.556E-02	2.230E-03	1.200E-05	1.000E-03	2.864E-02
	PSO	0.298	4.688E-02	5.809E-02	1.975E-02	1.691E-01	2.694E-01
	SCE-UA	0.295	2.794E-02	1.753E-01	1.760E-02	9.698E-02	5.320E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
大淀川	Newton	0.153	1.000E-10	3.516E-02	1.168E-03	5.012E-01	1.815E-02
	Bayes	0.250	2.223E-02	8.890E-03	4.500E-05	1.000E-03	1.437E-02
	PSO	0.276	1.955E-02	3.912E-02	3.595E-03	3.831E-02	7.174E-01
	SCE-UA	0.296	7.621E-03	8.435E-02	2.054E-02	3.358E-01	7.614E-01

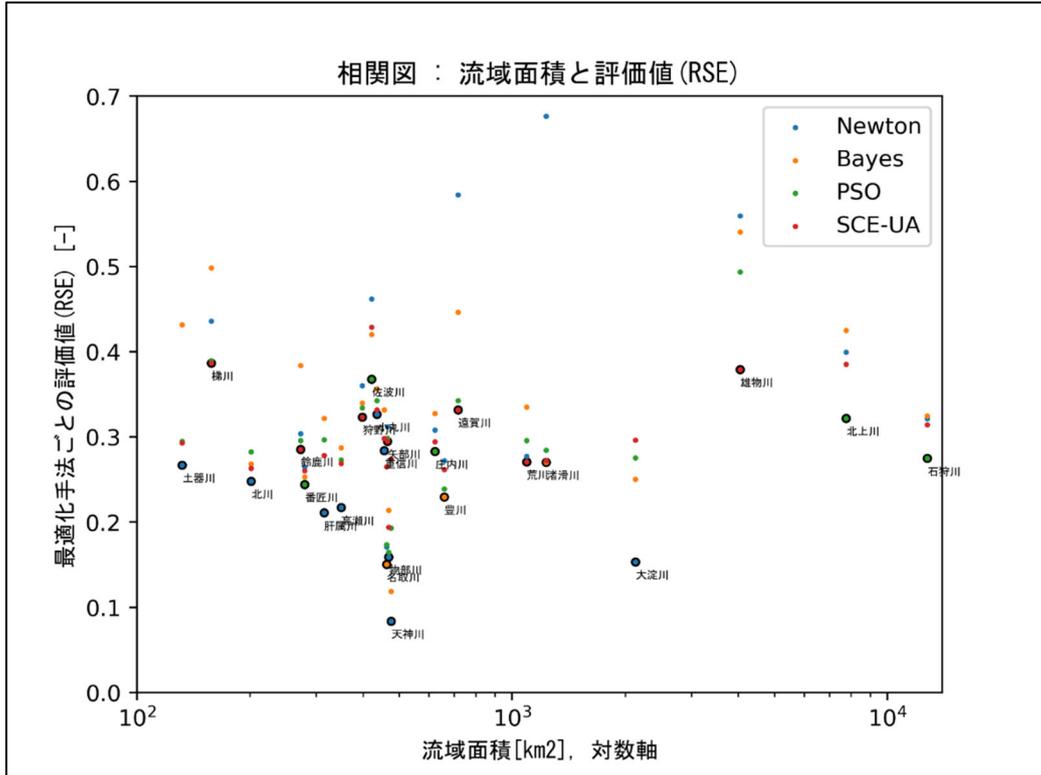


図 3-6 最適化手法ごとの評価値 (RSE 誤差) 横軸：流域面積、縦軸：評価値

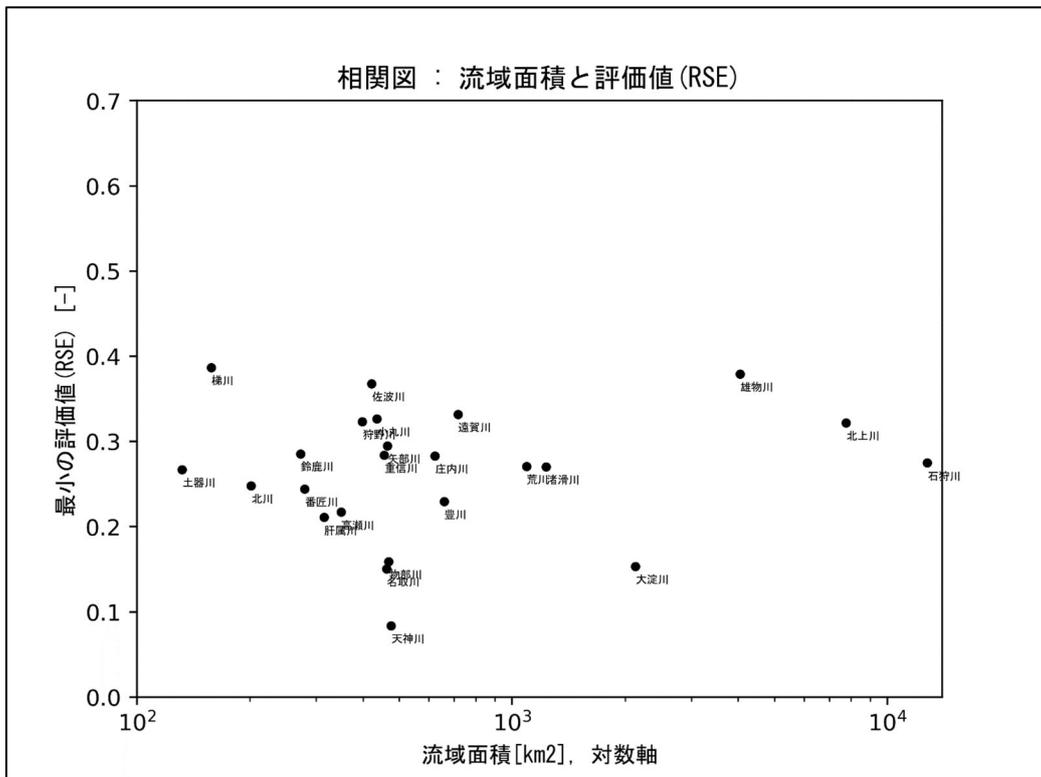


図 3-7 最小評価値 (RSE 誤差) 横軸：流域面積、縦軸：評価値

## 最適化結果（一例）：流出量時刻歴の比較

以下、石狩川、雄物川、梯川、土器川、大淀川の5河川について、各最適化手法（Newton法、Bayes最適化、PSO法、SCE-UA法）による自動パラメータキャリブレーションを実施した際の、流出量時刻歴の計算値と観測値との比較図を以下の順番で列挙する。

- A) 石狩川
  - 1. Newton法
  - 2. Bayes最適化
  - 3. PSO法
  - 4. SCE-UA法
- B) 雄物川
  - 1. Newton法
  - 2. Bayes最適化
  - 3. PSO法
  - 4. SCE-UA法
- C) 梯川
  - 1. Newton法
  - 2. Bayes最適化
  - 3. PSO法
  - 4. SCE-UA法
- D) 土器川
  - 1. Newton法
  - 2. Bayes最適化
  - 3. PSO法
  - 4. SCE-UA法
- E) 大淀川
  - 1. Newton法
  - 2. Bayes最適化
  - 3. PSO法
  - 4. SCE-UA法

No.1 : 石狩川

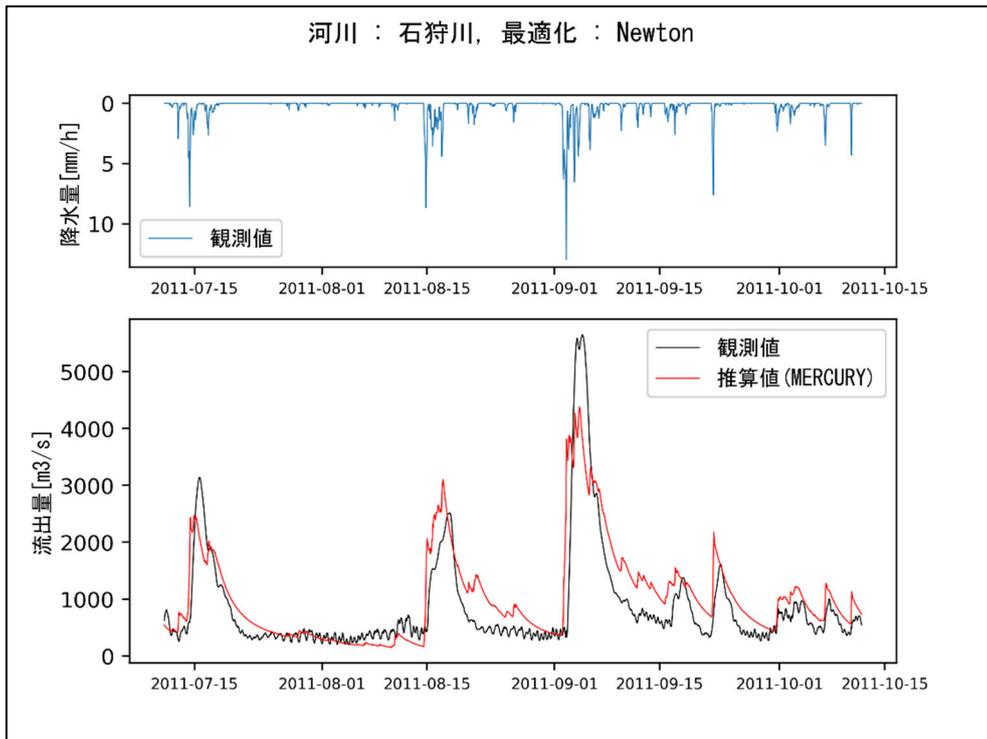


図 3-8 流出量時刻歴結果（最適化手法：Newton 法）（石狩川）

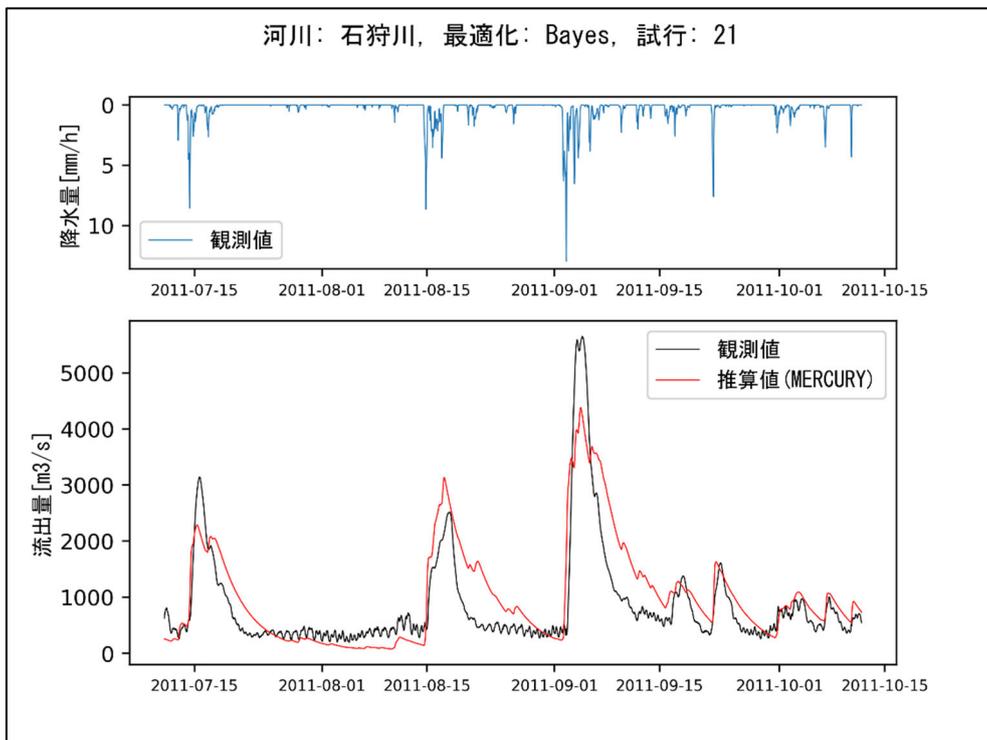


図 3-9 流出量時刻歴結果（最適化手法：Bayes 最適化）（石狩川）

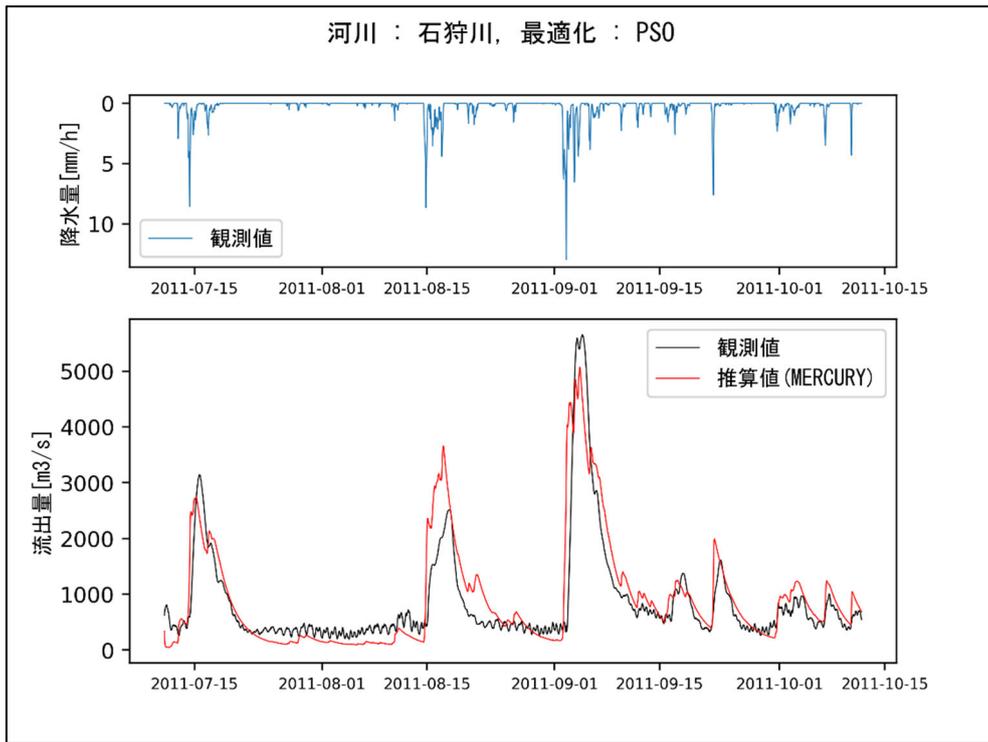


図 3-10 流出量時刻歴結果（最適化手法：PSO 法）（石狩川）

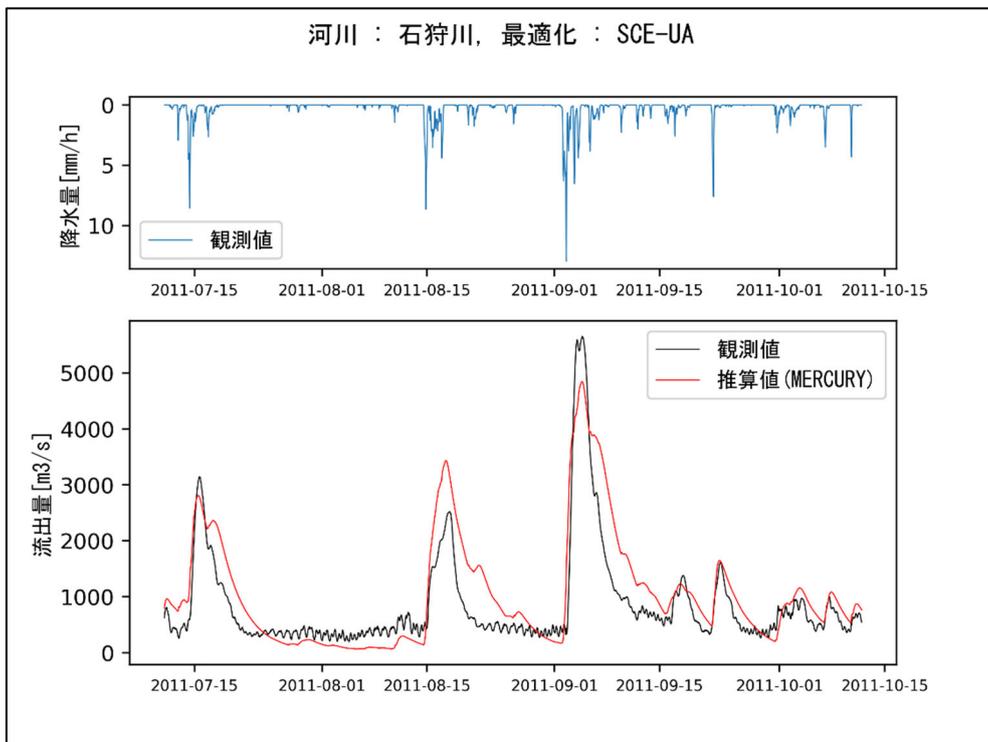


図 3-11 流出量時刻歴結果（最適化手法：SCE-UA 法）（石狩川）

No.5 : 雄物川

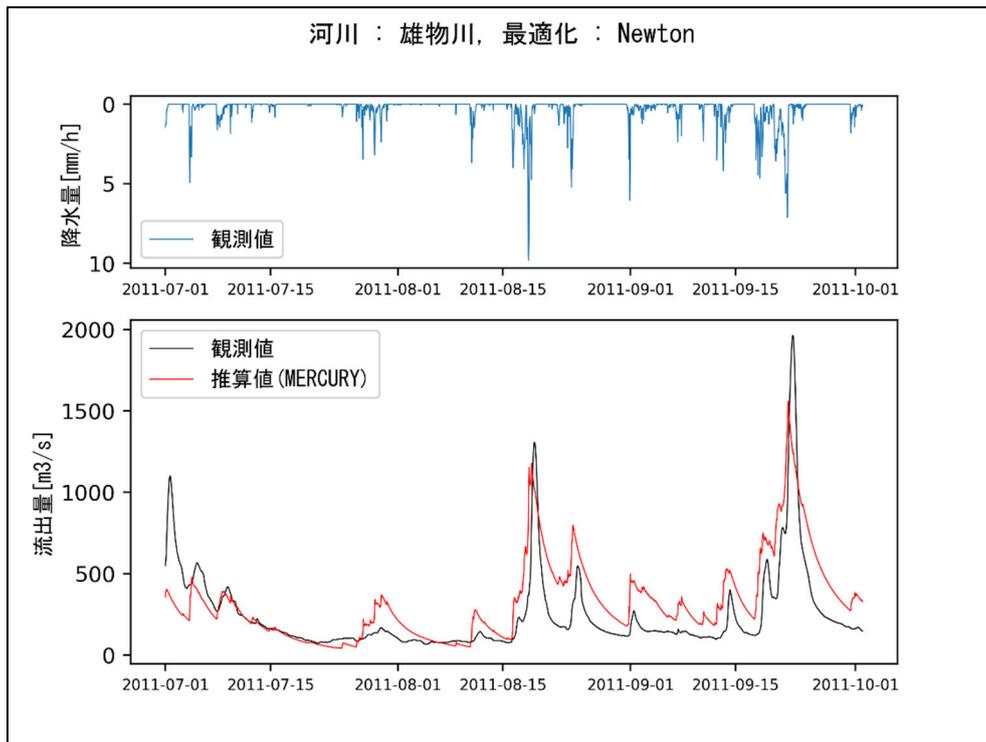


図 3-12 流出量時刻歴結果 (最適化手法 : Newton 法) (雄物川)

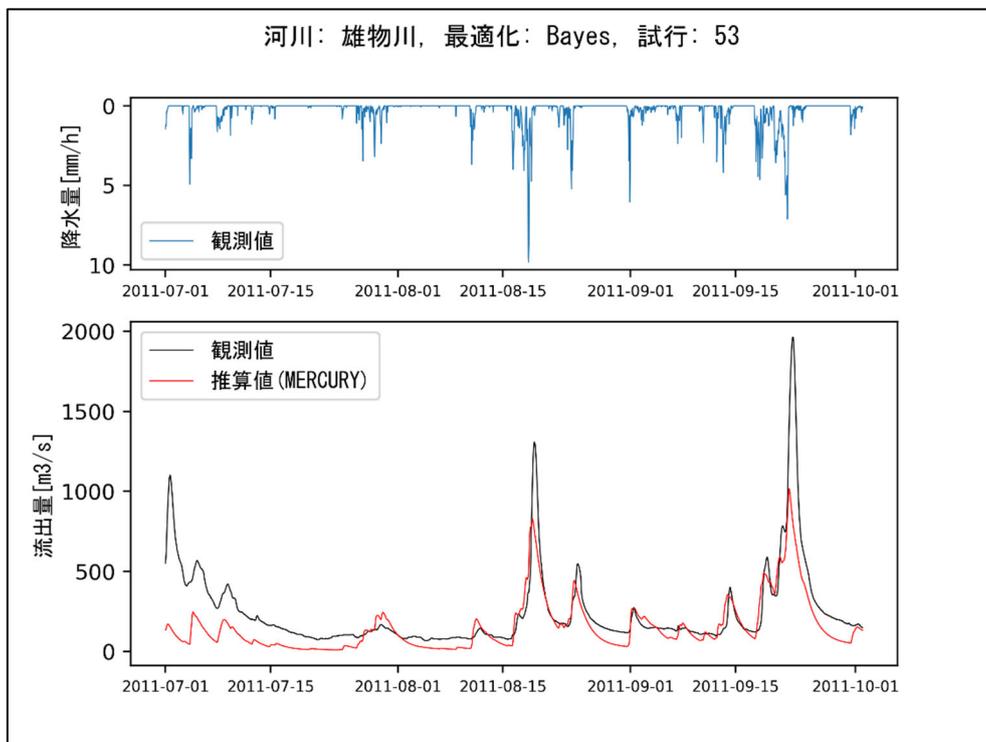


図 3-13 流出量時刻歴結果 (最適化手法 : Bayes 最適化) (雄物川)

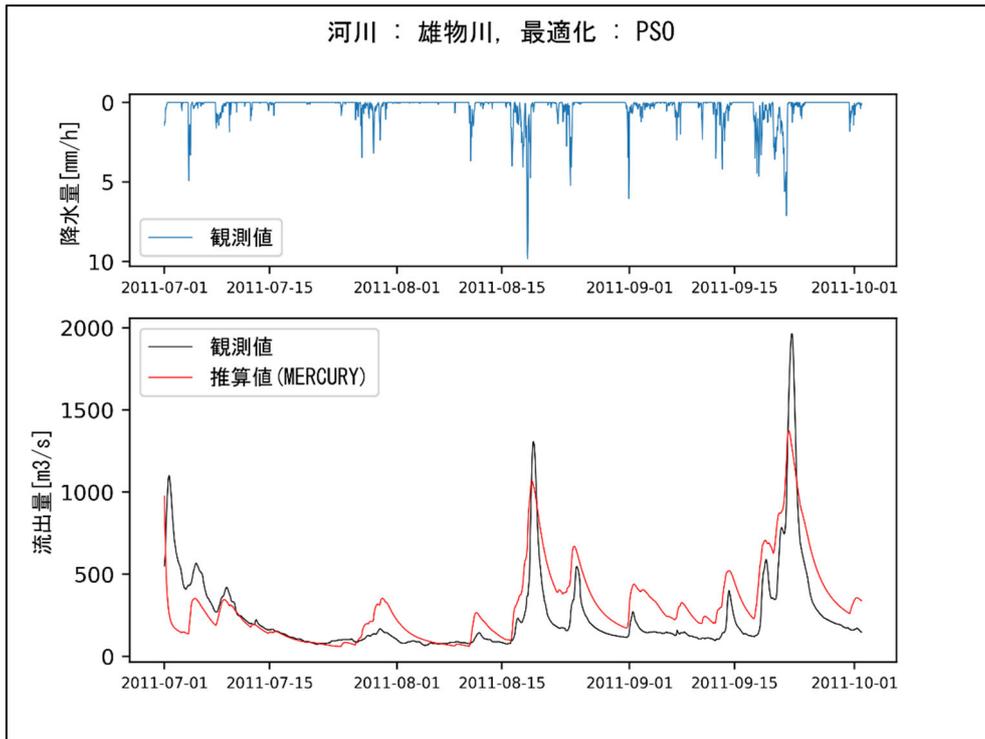


図 3-14 流出量時刻歴結果（最適化手法：PSO 法）（雄物川）

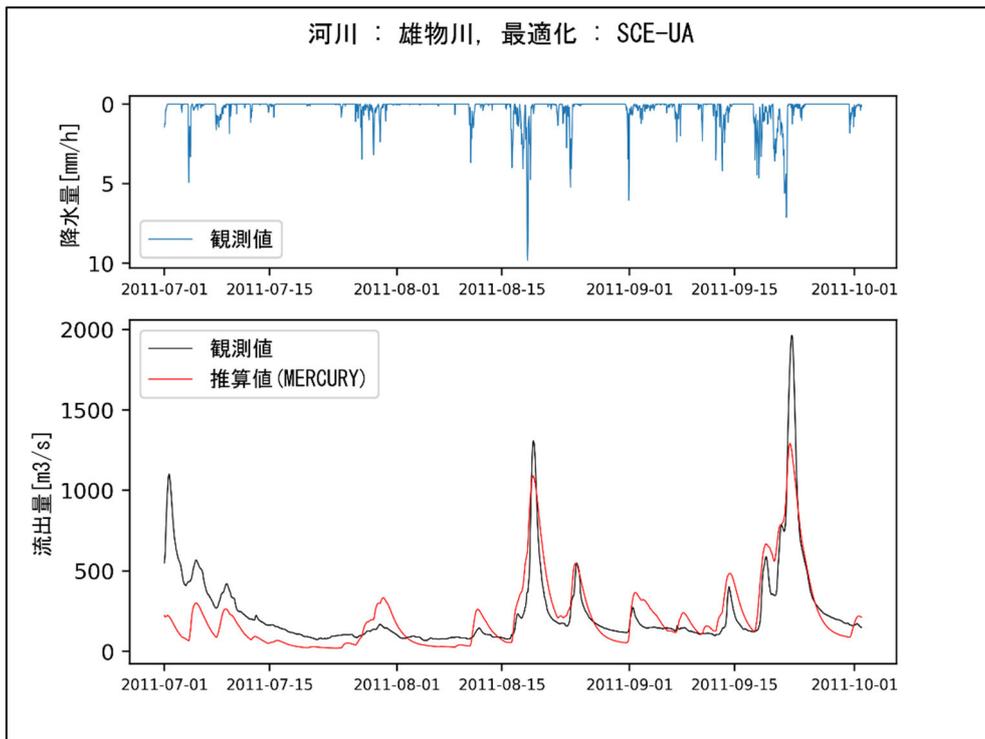


図 3-15 流出量時刻歴結果（最適化手法：SCE-UA 法）（雄物川）

No.8 : 梯川

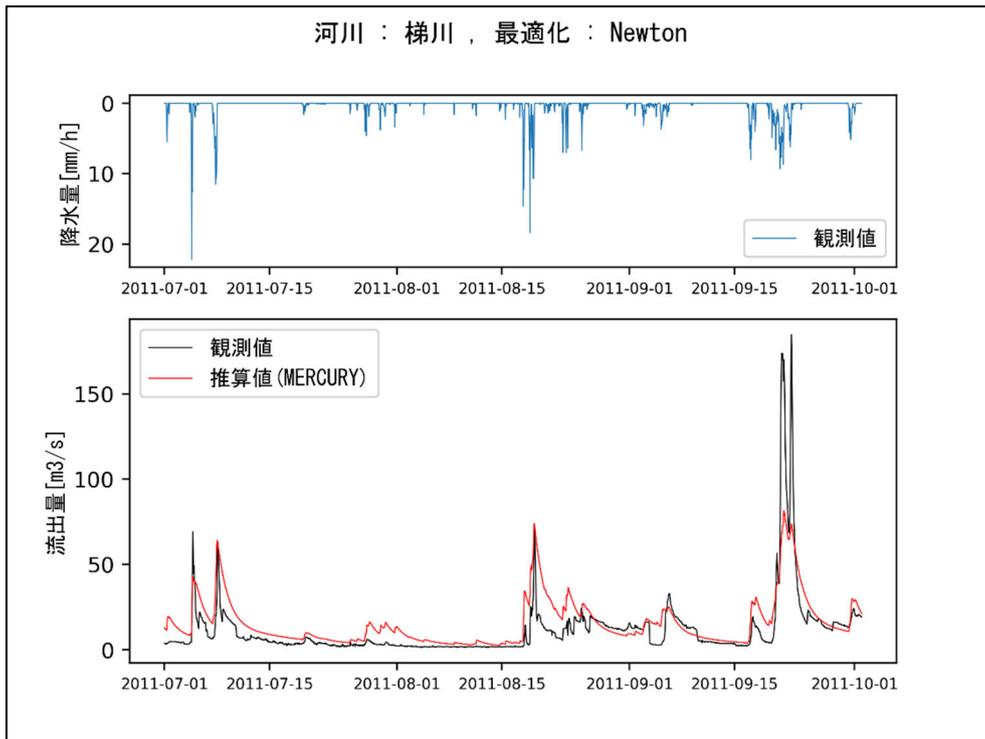


図 3-16 流出量時刻歴結果 (最適化手法 : Newton 法) (梯川)

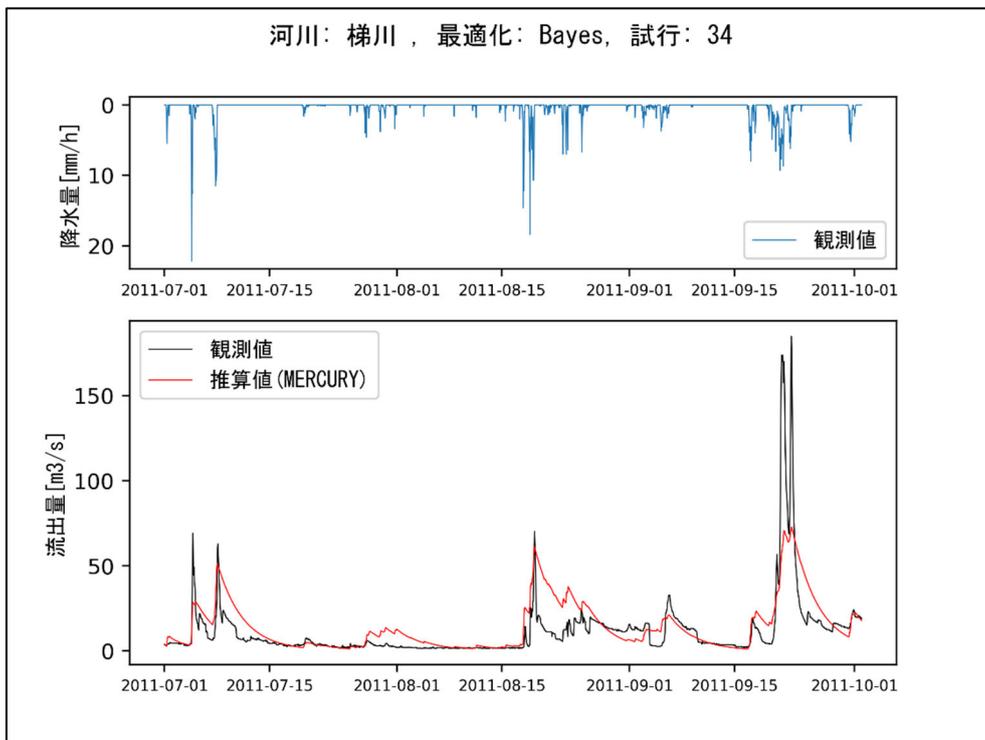


図 3-17 流出量時刻歴結果 (最適化手法 : Bayes 最適化) (梯川)

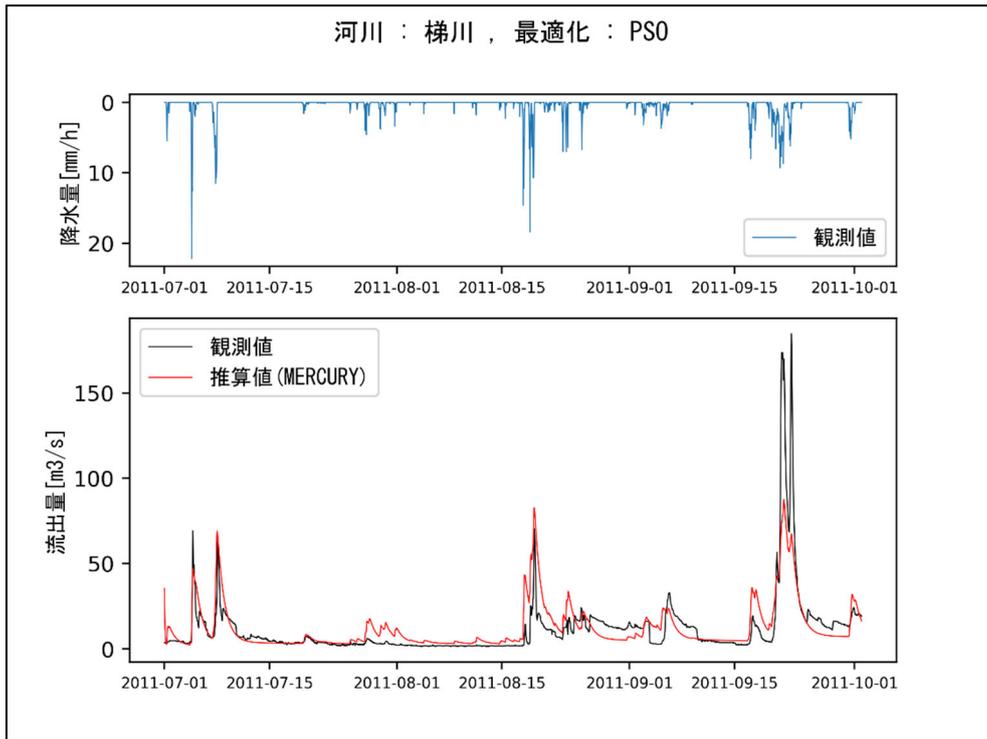


图 3-18 流出量時刻歴結果（最適化手法：PSO 法）（梯川）

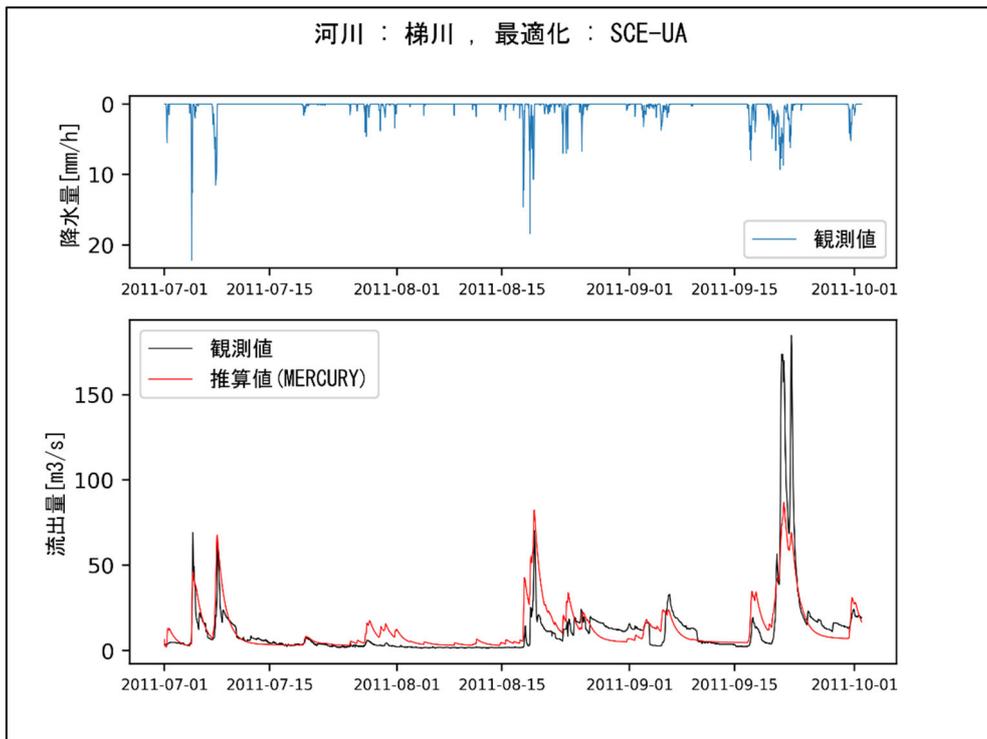


图 3-19 流出量時刻歴結果（最適化手法：SCE-UA 法）（梯川）

No.16 : 土器川

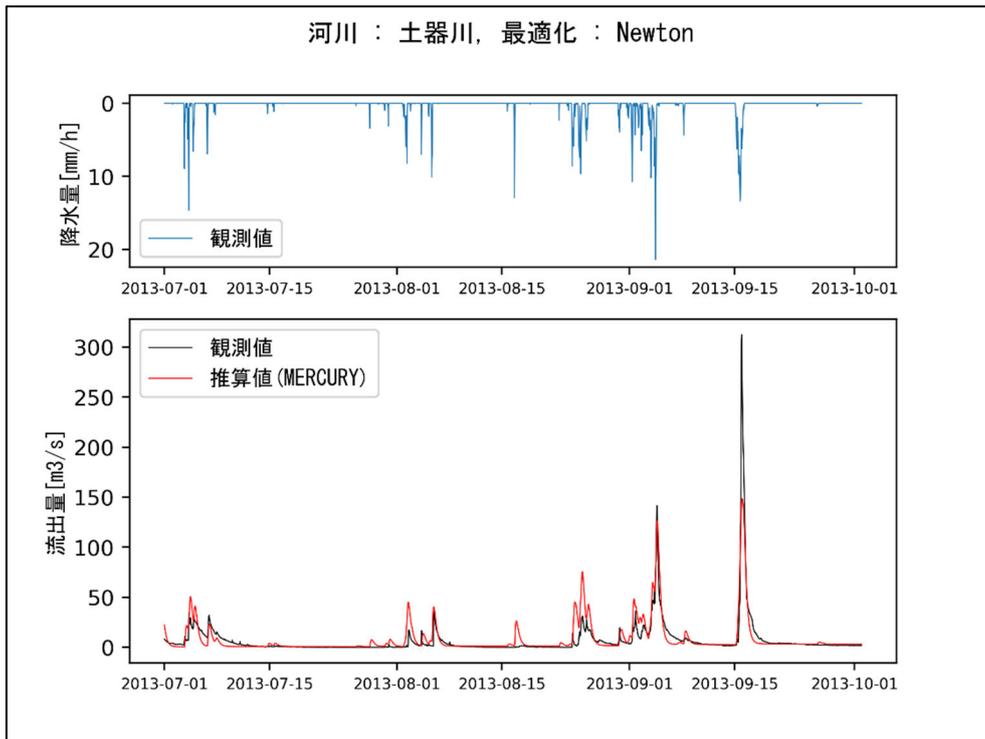


図 3-20 流出量時刻歴結果（最適化手法：Newton 法）（土器川）

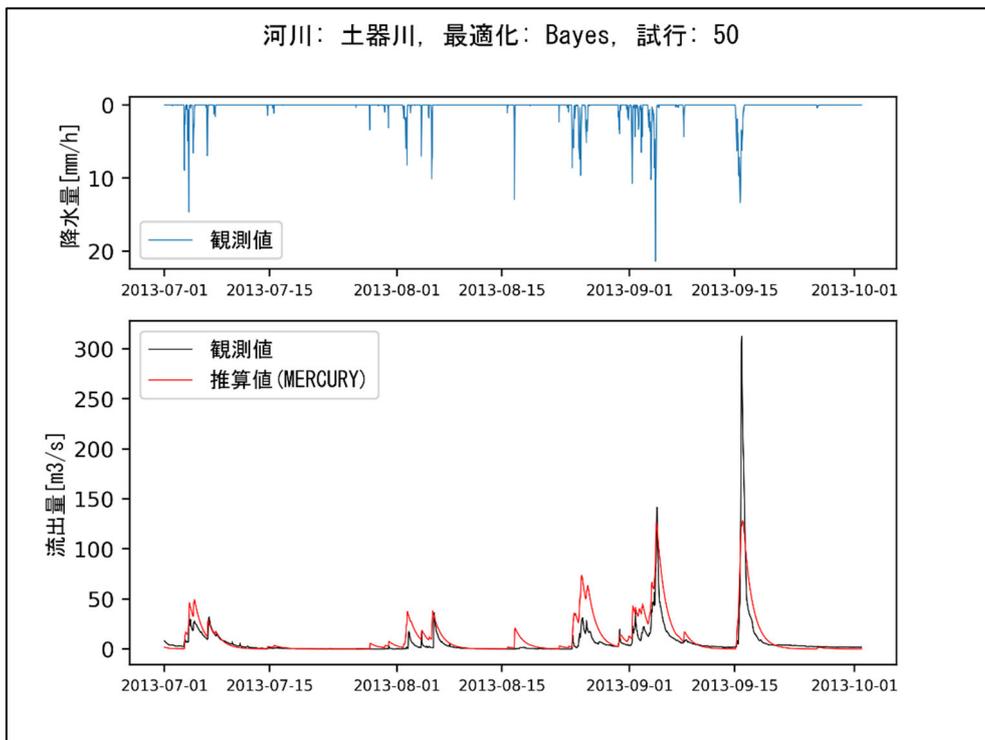


図 3-21 流出量時刻歴結果（最適化手法：Bayes 最適化）（土器川）

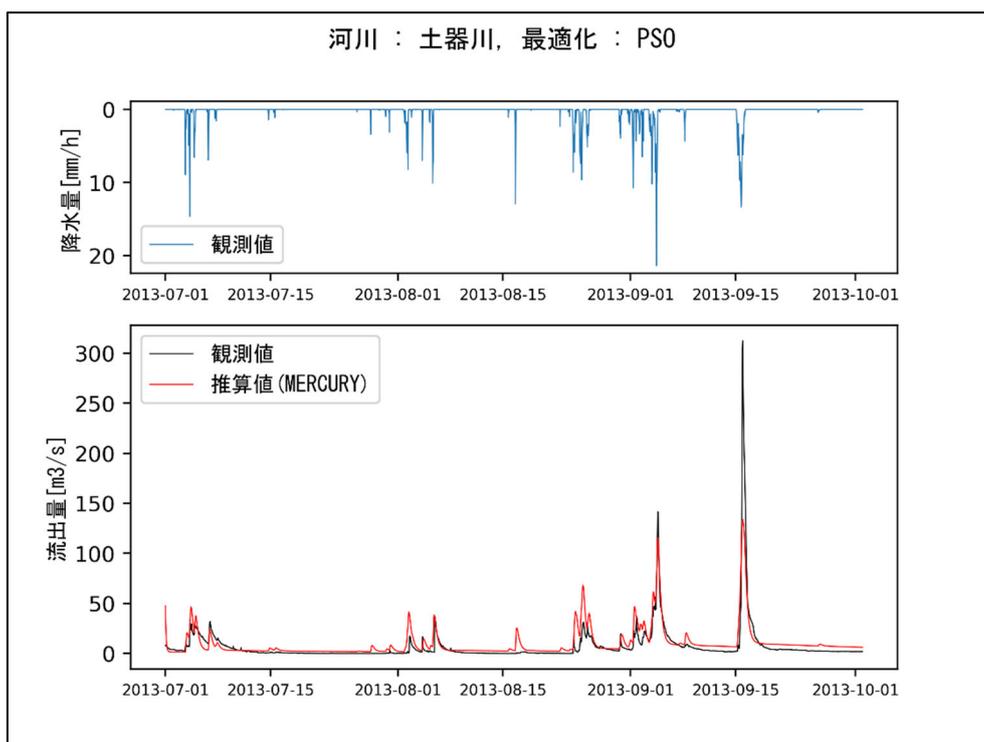


図 3-22 流出量時刻歴結果（最適化手法：PSO 法）（土器川）

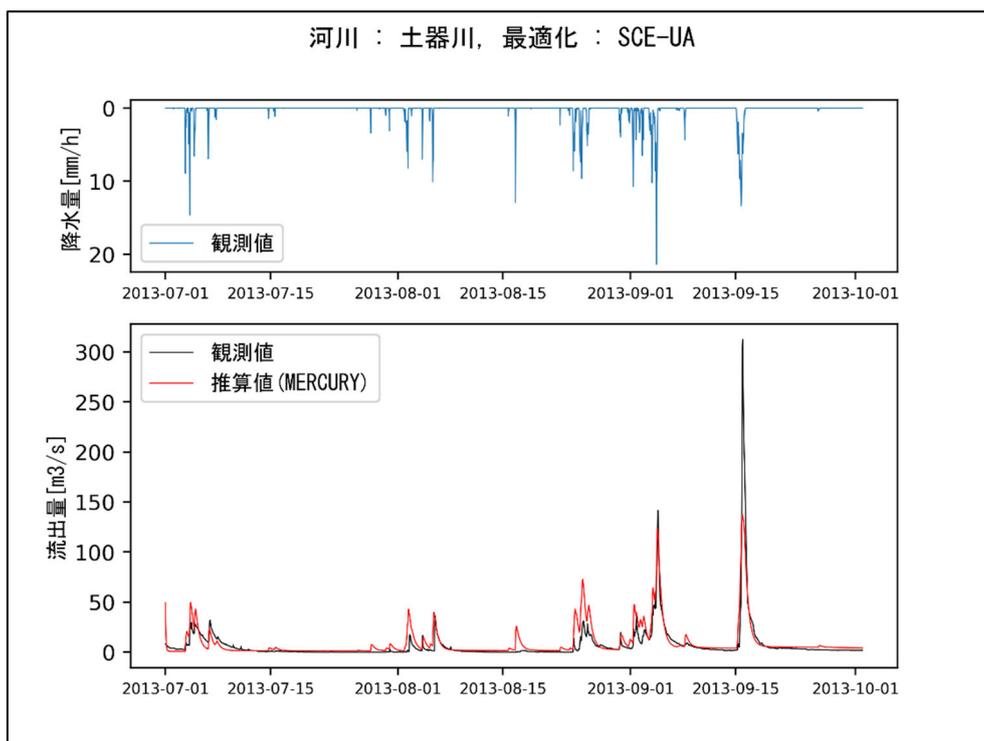


図 3-23 流出量時刻歴結果（最適化手法：SCE-UA 法）（土器川）

No.24 : 大淀川

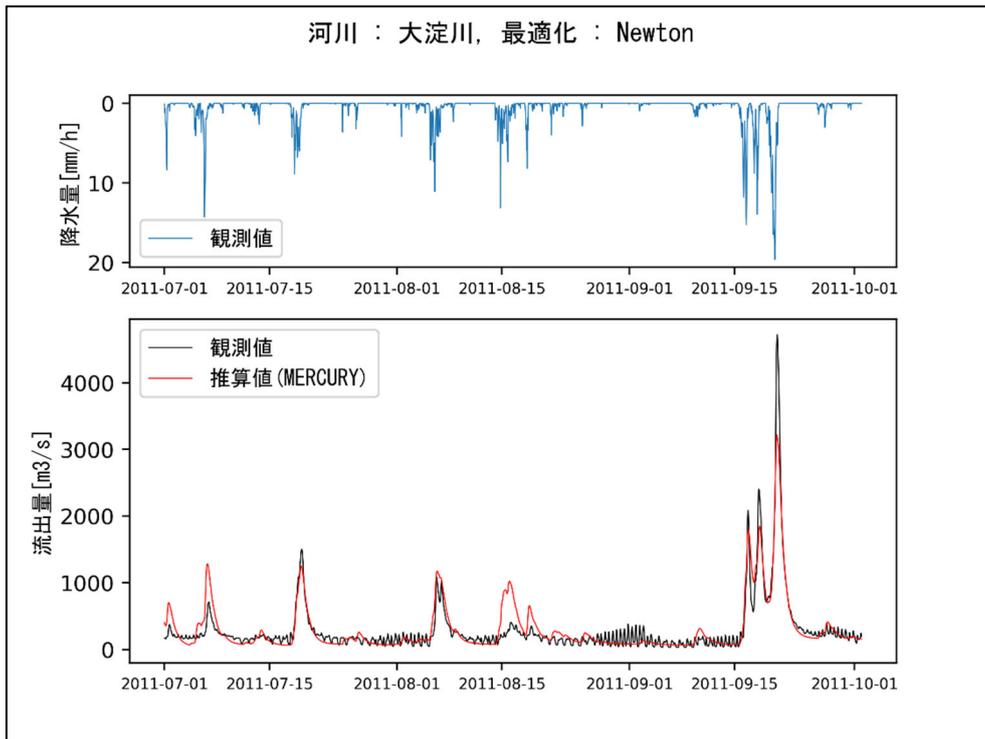


図 3-24 流出量時刻歴結果（最適化手法：Newton 法）（大淀川）

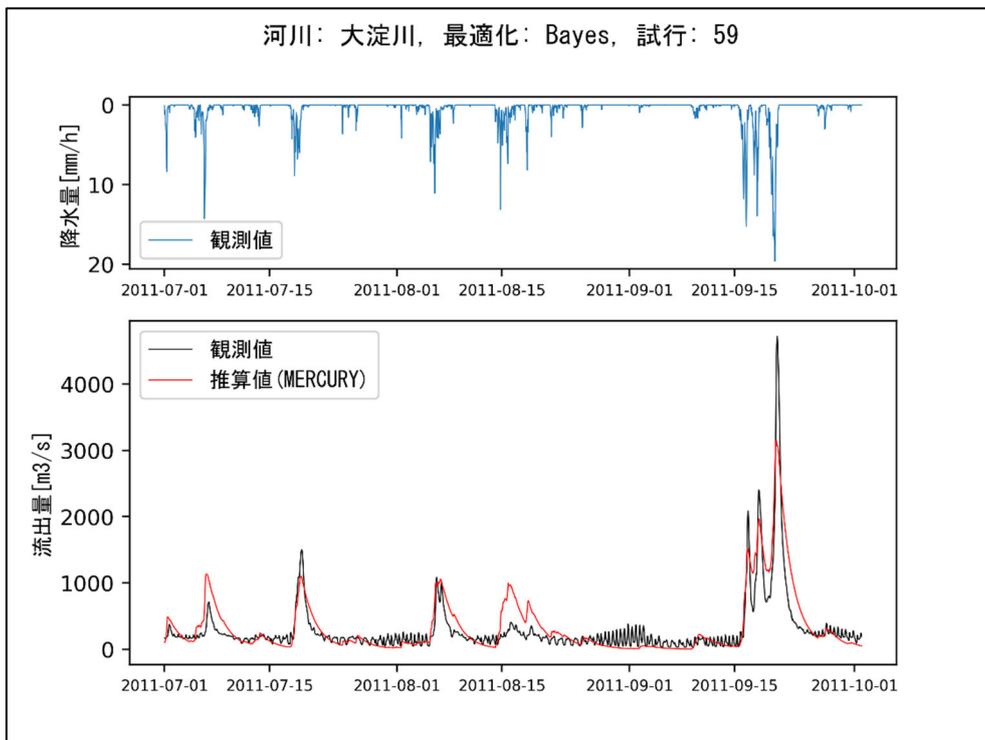


図 3-25 流出量時刻歴結果（最適化手法：Bayes 最適化）（大淀川）

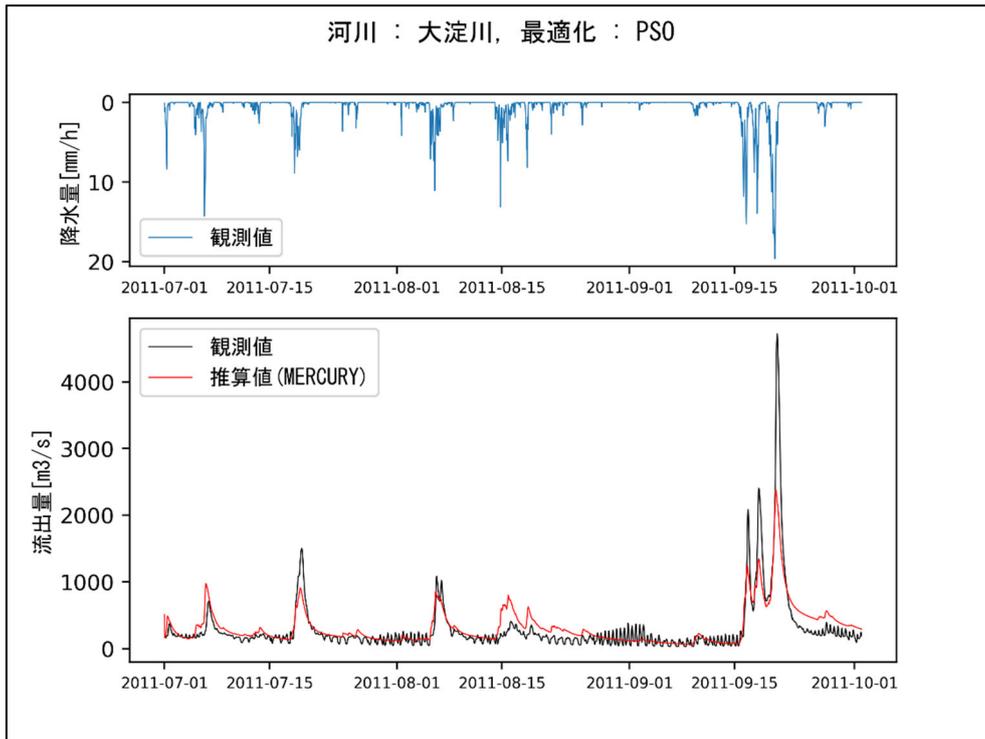


図 3-26 流出量時刻歴結果（最適化手法：PSO 法）（大淀川）

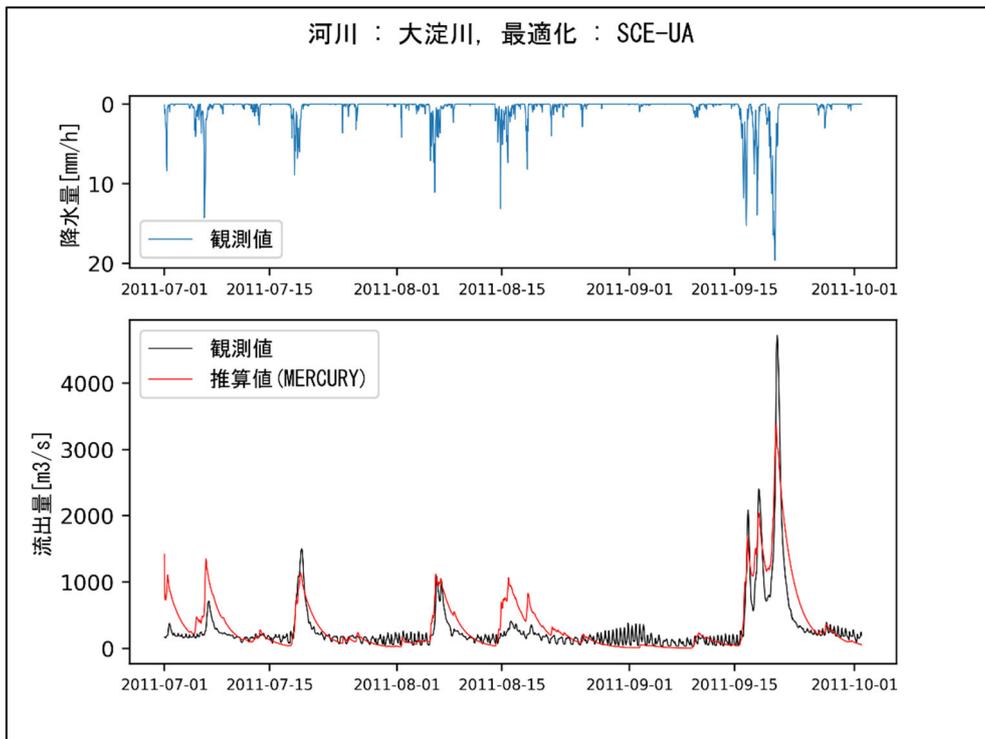


図 3-27 流出量時刻歴結果（最適化手法：SCE-UA 法）（大淀川）

## 検証解析②：重回帰分析による係数（各地理空間情報に対する回帰係数）の決定

GIS ソフトウェア（QGIS）及び重回帰分析を用いて、各地理空間情報に対する回帰係数を決定した。

● 次のデータを使用して、重回帰分析の重回帰係数を求めた。

1. 検証対象とした日本全国の河川（24 河川）ごとの GIS データの面積比率（説明変数）
2. 河川ごとにチューニングした MERCURY の最適パラメータ（目的変数）

● 福島の主要 5 河川（前田川、熊川、高瀬川、請戸川、阿武隈川）について、次のデータを使用して MERCURY パラメータを推定した。

1. 重回帰係数（24 河川を利用し、重回帰係数として取得したもの）
2. 福島の主要河川ごとの GIS データの面積比率（説明変数）

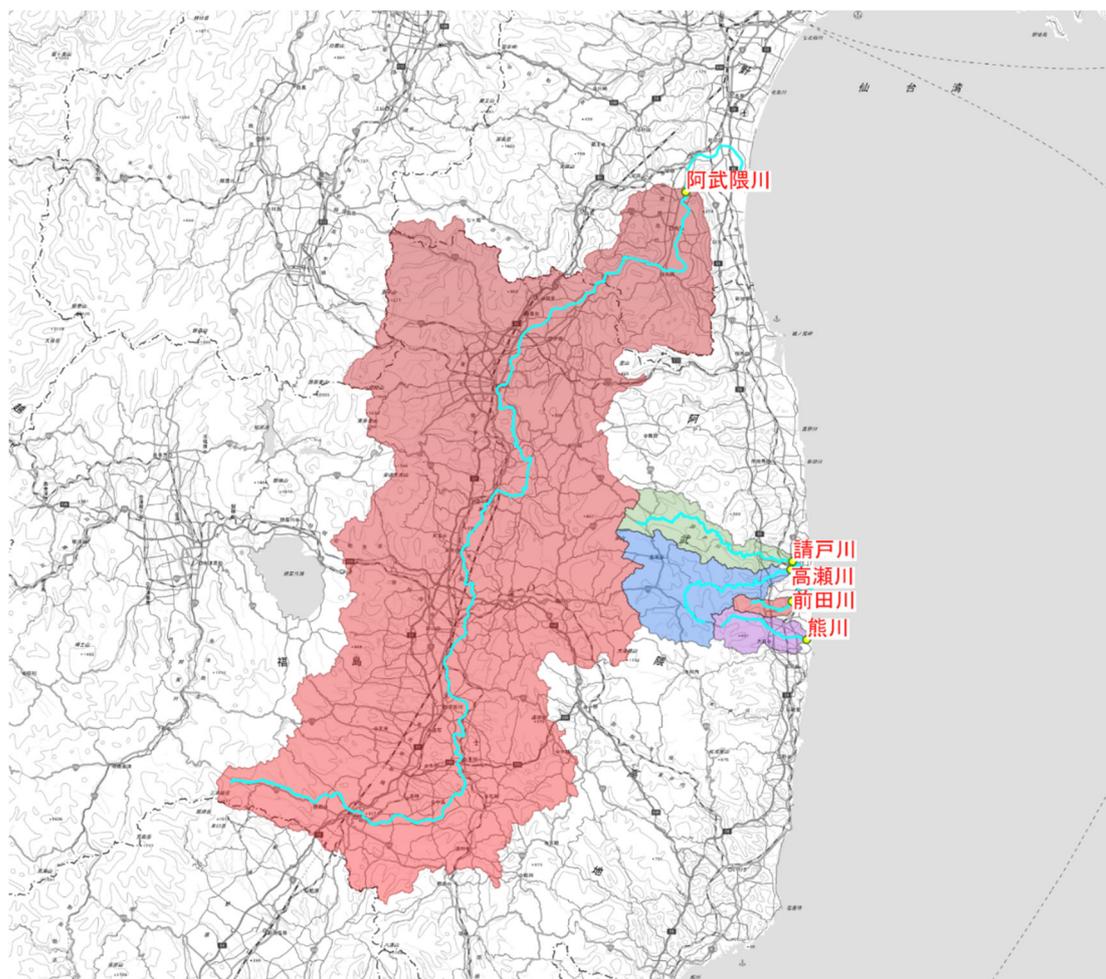


図 3-28 検証対象とする福島県内の主要 5 河川の地図上の位置と流域①

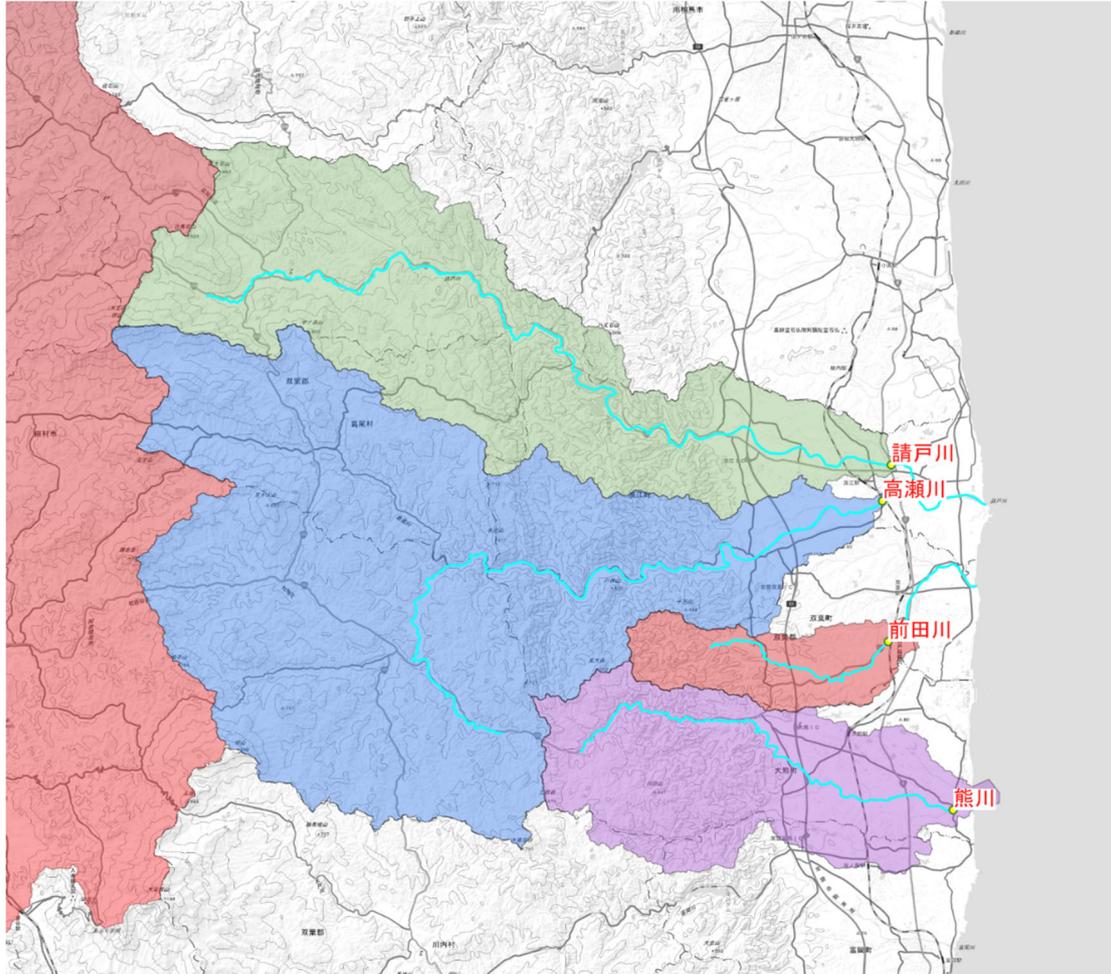


図 3-29 検証対象とする福島県内の主要 5 河川の地図上の位置と流域②

### 検証計算（福島的主要 5 河川）の条件

- 計算期間は半年間から一年間とする。
- 各対象河川について、MERUCRY の入力として平均降雨を与え続ける定常計算を実施して、初期の 3 段タンクの貯水高さを求め、初期条件とする。
- 重回帰分析（24 河川を対象）を行う際に使用する説明変数については、次の 2 ケースを考慮し、上記福島的主要 5 河川に適用する。

Case1： 標高値、傾斜度、土地利用、土壌、表層地質

Case2： 傾斜度、土地利用、土壌、表層地質

- 重回帰分析（リッジ回帰）にて、必要となるハイパーパラメータ $\lambda$ の値として、次のケースを求める（24 河川を対象）

$$\lambda = 0.01, 0.1, 0.5, 1.0, 10.0, 100.0, 1000.0$$

表 3-11 計算条件①：流域面積、計算期間、蒸発散量

河川	流域面積(km <sup>2</sup> )	計算期間	蒸発散量(mm/h)
前田川	21.0	2014/05/19～2015/08/19	0.050
熊川	63.9	2014/05/13～2014/11/12	0.045
高瀬川	238.6	2014/05/08～2015/08/25	0.050
請戸川	148.7	2014/05/07～2015/08/25	0.050
阿武隈川	4500.8	2013/05/01～2014/06/21	0.050

表 3-12 計算条件②：流量観測所位置

河川	観測所位置	
	緯度	経度
前田川	37.4394	141.0003
熊川	37.3841	141.0270
高瀬川	37.4856	140.9980
請戸川	37.4975	141.0016
阿武隈川	38.0296	140.8081

表 3-13 計算条件③：初期のタンク貯水高さ

河川	タンクの貯水高さ		
	S <sub>1</sub> (mm)	S <sub>2</sub> (mm)	S <sub>3</sub> (mm)
前田川	0.2182	5.4538	13.6344
熊川	0.2275	5.6864	14.2161
高瀬川	0.2139	5.3464	13.3661
請戸川	0.2139	5.3464	13.3661
阿武隈川	0.1673	4.1834	10.4585

表 3-14 計算条件④：重回帰分析に使用する説明変数のリスト

ケース	条件：重回帰分析の説明変数として利用する 面積比率の属性の種類	説明変数の個数
Case1	標高値、傾斜度、土地利用、土壌、表層地質	90
Case2	傾斜度、土地利用、土壌、表層地質	59

表 3-15 計算条件④：リッジ回帰のハイパーパラメータ $\lambda$

$\lambda$
0.01
0.1
0.5
1.0
10.0
100.0
1000.0

計算結果：重回帰分析による MERCURY パラメータの推定値

- 福島の対象河川（5 河川）に対して、リッジ回帰のハイパーパラメータ $\lambda$ ごとに、重回帰分析により MERCURY パラメータを推定した。
- 上記推定したパラメータを使用して MERCURY の解析を実施して、それから得られた計算結果と観測値との誤差をまとめた。
- 重回帰分析を実施する際の説明変数の選び方（Case1 と Case2）による結果の違いも比較した。

No.1：前田川

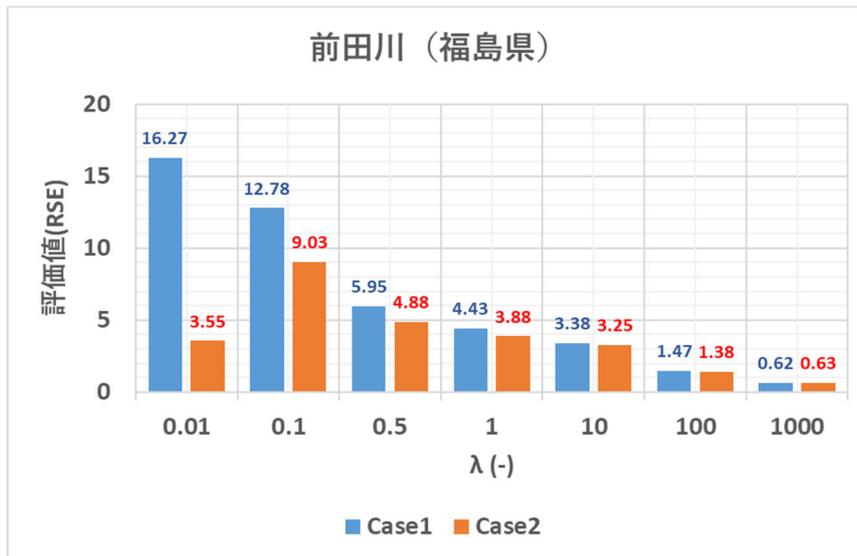


図 3-30 ハイパーパラメータ $\lambda$ と RSE 誤差（前田川）

表 3-16 Case1 (前田川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	16.2746	0.06390	0.19227	0.00860	0.08418	0.14804
0.1	12.7762	0.04823	0.17665	0.00857	0.16327	0.18463
0.5	5.9487	0.03555	0.10034	0.00497	0.16496	0.20655
1	4.4335	0.03230	0.08028	0.00403	0.15794	0.20747
10	3.3811	0.02716	0.05473	0.00318	0.11436	0.15626
100	1.4675	0.01107	0.02180	0.00133	0.04219	0.05775
1000	0.6226	0.00157	0.00309	0.00019	0.00591	0.00809

表 3-17 Case2 (前田川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	3.5511	0.05972	0.02201	0.00558	0.24403	0.05298
0.1	9.0316	0.04964	0.11293	0.00722	0.22107	0.17406
0.5	4.8805	0.03744	0.07747	0.00468	0.18631	0.19500
1	3.8762	0.03370	0.06626	0.00394	0.16939	0.19727
10	3.2529	0.02692	0.05137	0.00315	0.11324	0.15034
100	1.3834	0.01052	0.02033	0.00127	0.04010	0.05426
1000	0.6311	0.00147	0.00284	0.00018	0.00552	0.00749

No.2 : 熊川

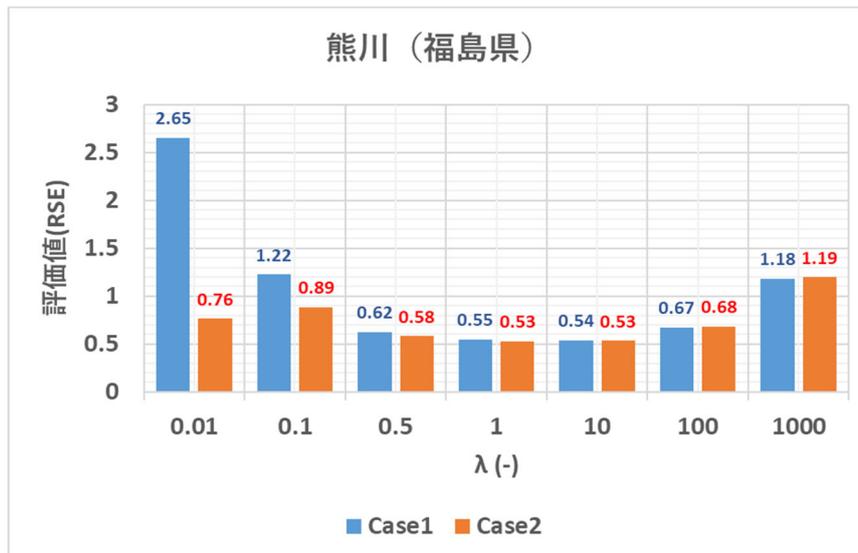


図 3-31 ハイパーパラメータ $\lambda$ と RSE 誤差 (熊川)

表 3-18 Case1 (熊川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	2.6496	0.05492	0.20878	0.00800	0.28986	0.08031
0.1	1.2249	0.04453	0.13045	0.00667	0.22940	0.13272
0.5	0.6235	0.03362	0.08003	0.00425	0.18762	0.16377
1	0.5453	0.03128	0.06967	0.00368	0.16811	0.17554
10	0.5352	0.02718	0.05426	0.00318	0.11323	0.14951
100	0.6696	0.01104	0.02172	0.00133	0.04185	0.05679
1000	1.1803	0.00157	0.00308	0.00019	0.00587	0.00799

表 3-19 Case2 (熊川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	0.7622	0.04262	0.09015	0.00557	0.29145	0.14640
0.1	0.8854	0.04255	0.10061	0.00548	0.24838	0.14017
0.5	0.5803	0.03383	0.07284	0.00386	0.19768	0.16210
1	0.5274	0.03159	0.06542	0.00347	0.17406	0.17340
10	0.5321	0.02691	0.05249	0.00313	0.11244	0.14618
100	0.6806	0.01055	0.02053	0.00127	0.04004	0.05391
1000	1.1949	0.00147	0.00286	0.00018	0.00552	0.00746

No.3 : 高瀬川

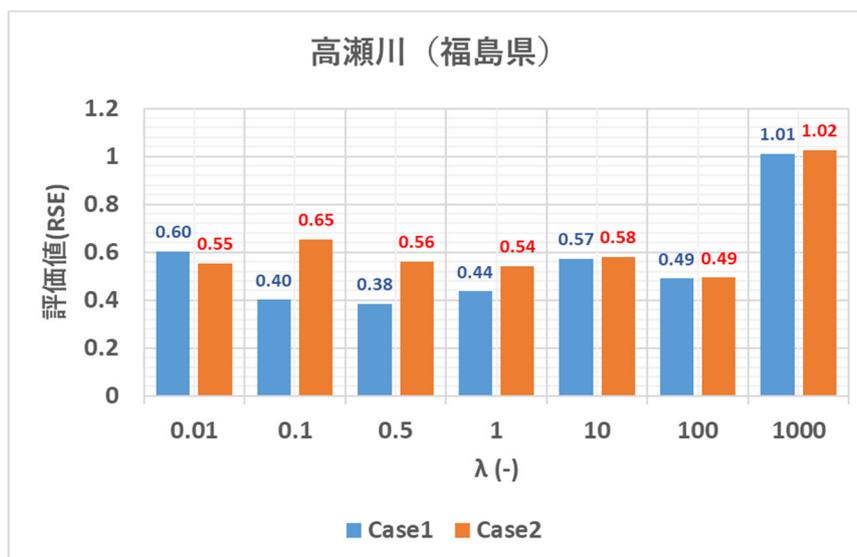


図 3-32 ハイパーパラメータ $\lambda$ と RSE 誤差 (高瀬川)

表 3-20 Case1 (高瀬川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	0.6038	0.03769	0.05984	0.00597	0.90351	0.14828
0.1	0.4011	0.04871	0.02558	0.00475	0.47607	0.08624
0.5	0.3830	0.03732	0.02898	0.00377	0.28221	0.11609
1	0.4359	0.03430	0.03799	0.00358	0.22201	0.14101
10	0.5715	0.02823	0.05078	0.00330	0.11920	0.14399
100	0.4897	0.01125	0.02155	0.00136	0.04273	0.05658
1000	1.0095	0.00159	0.00307	0.00019	0.00597	0.00799

表 3-21 Case2 (高瀬川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	0.5536	0.04409	0.08256	0.00491	0.83167	0.37511
0.1	0.6519	0.04947	0.05560	0.00404	0.46776	0.14474
0.5	0.5611	0.03671	0.05006	0.00345	0.27577	0.13813
1	0.5426	0.03367	0.05217	0.00333	0.21798	0.15684
10	0.5787	0.02801	0.05241	0.00324	0.11878	0.14635
100	0.4934	0.01090	0.02097	0.00131	0.04145	0.05499
1000	1.0246	0.00152	0.00293	0.00018	0.00570	0.00763

No.4 : 請戸川

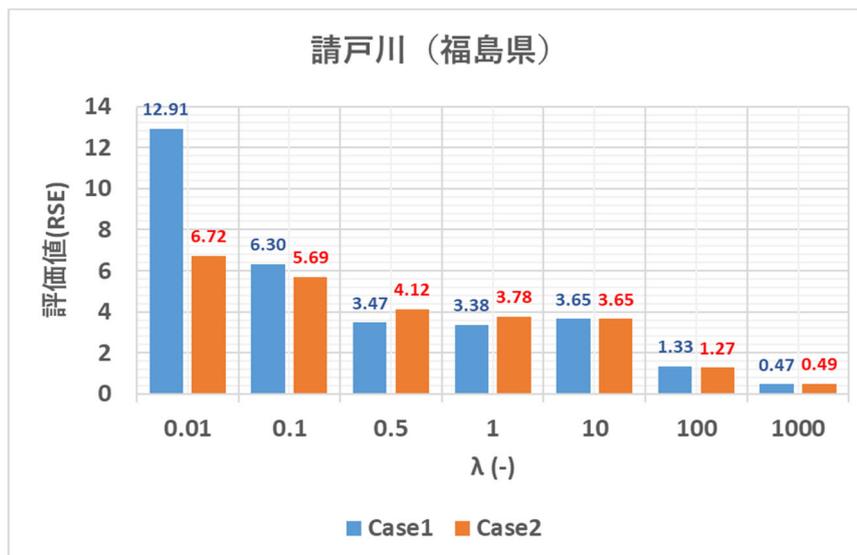


図 3-33 ハイパーパラメータ $\lambda$ と RSE 誤差 (請戸川)

表 3-22 Case1 (請戸川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	12.9106	0.04859	0.17009	0.00670	0.76658	0.20742
0.1	6.3028	0.05069	0.07060	0.00493	0.42830	0.12512
0.5	3.4690	0.03743	0.04680	0.00393	0.26465	0.13918
1	3.3758	0.03444	0.04896	0.00371	0.21307	0.15703
10	3.6460	0.02870	0.05308	0.00338	0.12031	0.14872
100	1.3337	0.01148	0.02212	0.00139	0.04349	0.05794
1000	0.4705	0.00163	0.00315	0.00020	0.00609	0.00817

表 3-23 Case2 (請戸川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	6.7190	0.05194	0.15556	0.00522	0.68660	0.41140
0.1	5.6910	0.05019	0.07614	0.00432	0.41509	0.16801
0.5	4.1201	0.03691	0.05807	0.00370	0.25950	0.15168
1	3.7787	0.03397	0.05715	0.00354	0.21015	0.16596
10	3.6506	0.02844	0.05373	0.00333	0.11961	0.14929
100	1.2729	0.01107	0.02136	0.00134	0.04203	0.05594
1000	0.4871	0.00154	0.00299	0.00019	0.00579	0.00775

No.5 : 阿武隈川

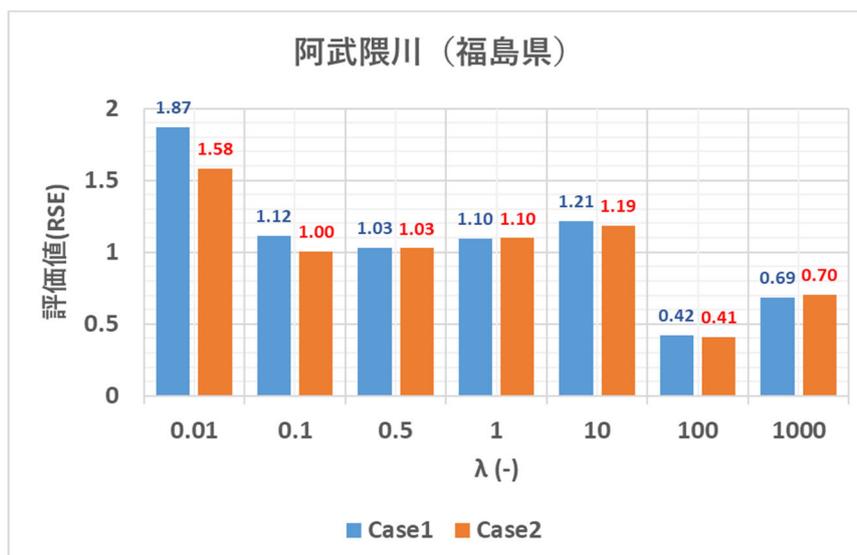


図 3-34 ハイパーパラメータ $\lambda$ と RSE 誤差 (阿武隈川)

表 3-24 Case1 (阿武隈川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	1.8699	0.02088	0.12397	0.00140	0.40204	0.40874
0.1	1.1160	0.02157	0.04505	0.00094	0.28102	0.30079
0.5	1.0295	0.02270	0.03766	0.00180	0.20696	0.21458
1	1.0955	0.02414	0.04174	0.00221	0.17912	0.19677
10	1.2150	0.02525	0.04825	0.00289	0.11184	0.14538
100	0.4201	0.01051	0.02044	0.00126	0.04054	0.05470
1000	0.6861	0.00150	0.00291	0.00018	0.00567	0.00769

表 3-25 Case2 (阿武隈川)

$\lambda$	評価値(RSE)	a1	a2	a3	b1	b2
0.01	1.5802	0.00688	0.08998	0.00001	0.31350	0.48486
0.1	1.0030	0.01652	0.04178	0.00096	0.24532	0.28382
0.5	1.0279	0.02029	0.04220	0.00182	0.19313	0.20613
1	1.0976	0.02245	0.04520	0.00217	0.17154	0.19262
10	1.1868	0.02464	0.04775	0.00283	0.11002	0.14305
100	0.4077	0.01002	0.01946	0.00120	0.03878	0.05214
1000	0.7027	0.00140	0.00273	0.00017	0.00534	0.00721

計算結果（一例）：流出量時刻歴の比較

● 前田川と阿武隈川の 2 河川について、24 河川を学習データとしてリッジによる重回帰計算のハイパーパラメータ $\lambda$ の値に応じて推定されたパラメータを使用し、MERCURY による推定を行い、その際の流出量時刻歴の計算値と観測値に関する比較結果を以下の順番で列挙する。

A) 前田川（説明変数リスト：Case2）

1.  $\lambda = 0.01$
2.  $\lambda = 1.0$
3.  $\lambda = 100.0$
4.  $\lambda = 1000.0$

B) 阿武隈川（説明変数リスト：Case2）

1.  $\lambda = 0.01$
2.  $\lambda = 1.0$
3.  $\lambda = 100.0$
4.  $\lambda = 1000.0$

ここで、注意すべき結果として、前田川では $\lambda = 1000.0$ のときに最も観測値との誤差 (RSE) を小さくなる MERCURY パラメータを与えるが (図 3-30 参照)、この条件では、流出量時刻歴の計算値は観測値の流出量ピーク値を十分に再現できていないことがわかる (図 3-38 参照)。

これらの結果を系統的に見た所、複数の地理空間情報を用いて、日本全国の 24 河川に対する重回帰計算を行い、各地理空間情報の面積比率による推定を福島県の主要 5 河川に試みたが、凡そ $\lambda = 1.0$ において、流出時刻歴 (特に降雨時のピーク値) を再現できることが分かった。しかし、RSE 値は十分ではなく、本手法を用いた場合、ピーク値と基底流出を併せて再現することが難しいことも分かった。前田川と請戸川では、 $\lambda = 1000$  の時に RSE が十分な値となるが、その原因は基底流出を凡そ再現できたことにあり、逆に、上記のようにピーク値の再現が困難となっており、そのまま、 $\lambda = 1000$  の際のパラメータを採用することはできないことが分かる。

以上の結果から、MERCURY が用いる 3 段タンクモデルの場合、モデルパラメータの自由度が比較的大きく、十分な地理空間情報量と十分な学習データ (24 河川) を用いたが、RSE 値を十分に低減させることは出来ないことが分かった。この原因として、各流域が上記地理空間情報では十分にカバーできていない特徴量を有する可能性が示唆される。しかし、凡そ $\lambda = 1.0$ でピーク流量と基底流出量 (十分ではないが) を同時に推定可能となっていることから、そこで得られるパラメータ値を初期として、流量観測情報 (最小限の観測量で済むものと考えらえる) を基に自動キャリブレーションすることで、その流域特有の状況が反映可能になると考えられる。これについては、3.2.2 において説明する。

1 No.1 : 前田川 (説明変数リスト : Case2)

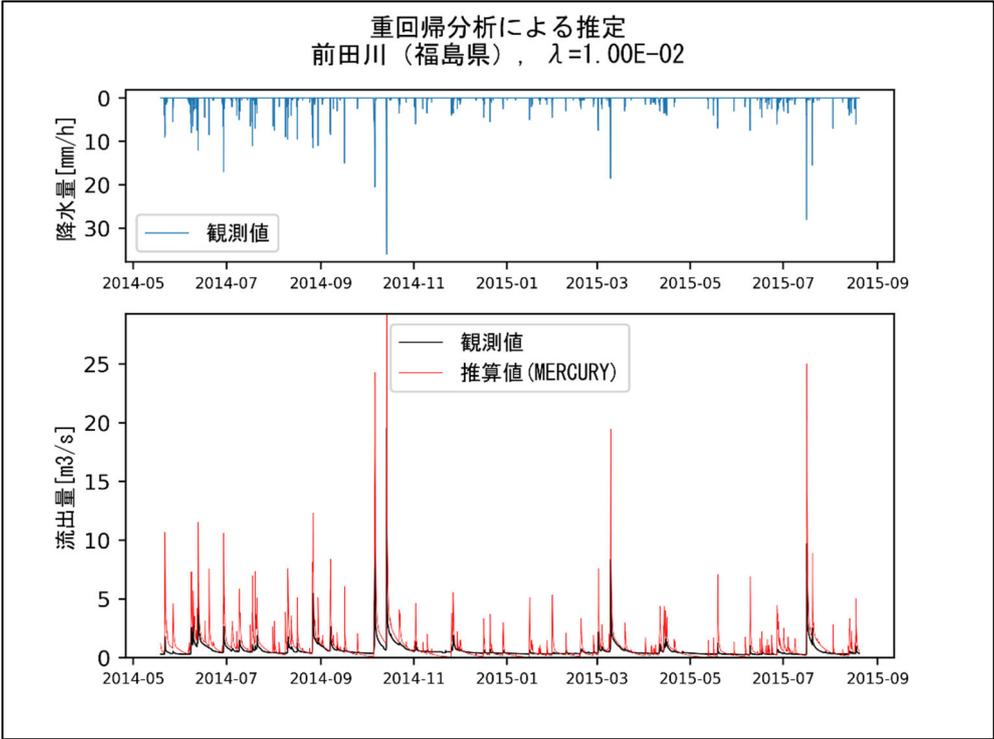


図 3-35 流出量時刻歴結果 (前田川、説明変数リスト Case2) :  $\lambda = 0.01$

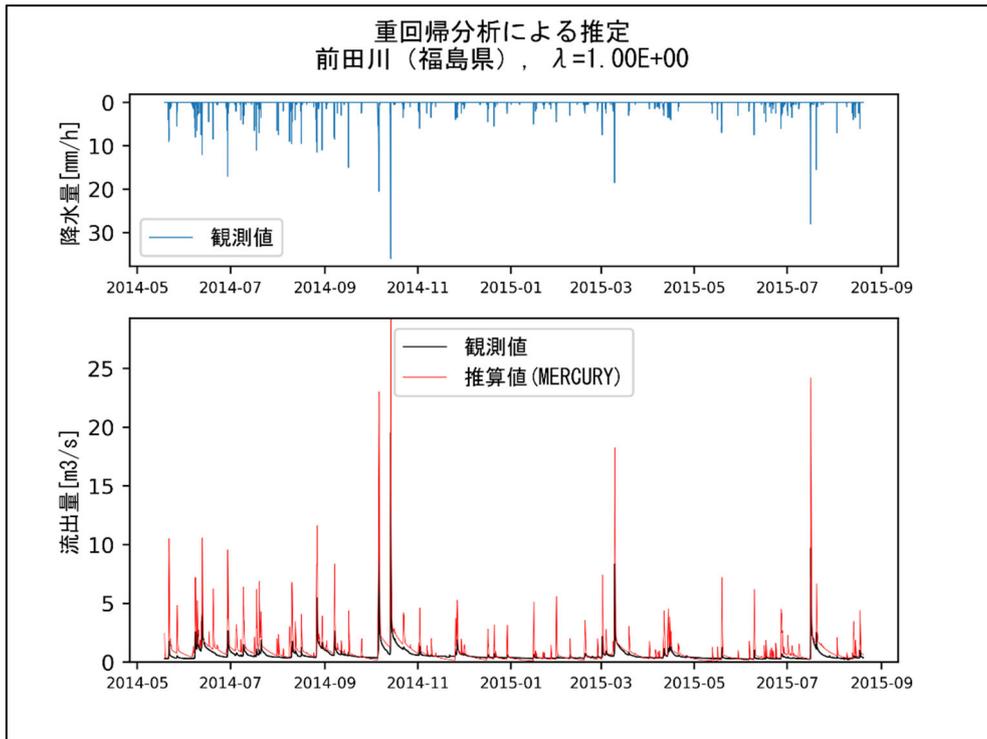


図 3-36 流出量時刻歴結果（前田川、説明変数リスト Case2）： $\lambda = 1.0$

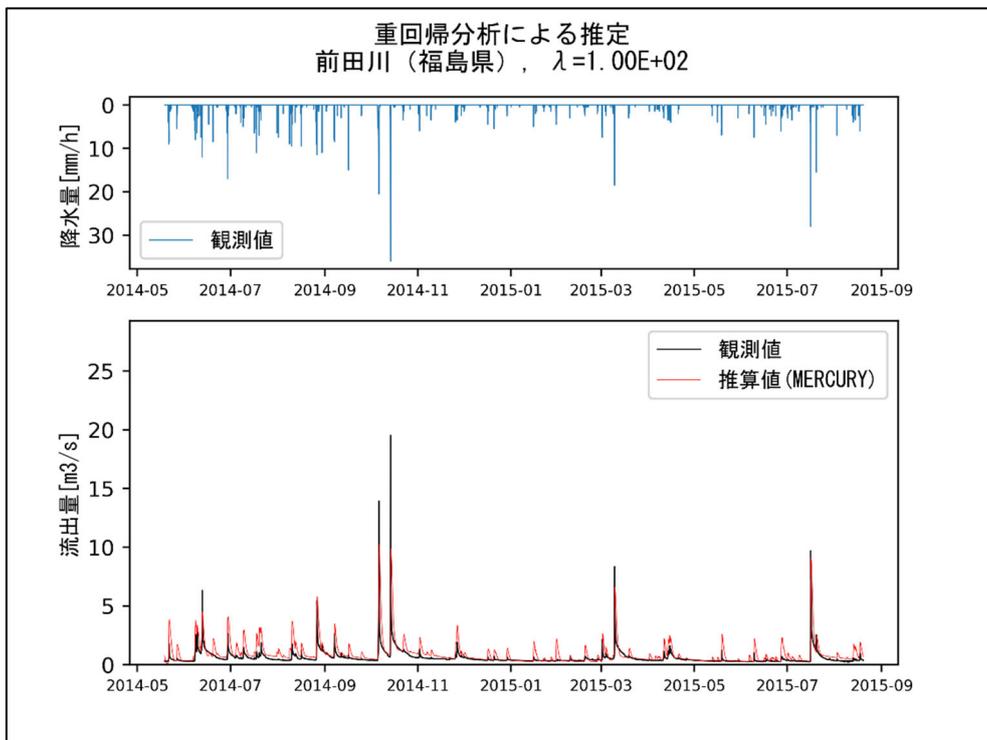


図 3-37 流出量時刻歴結果（前田川、説明変数リスト Case2）： $\lambda = 100.0$

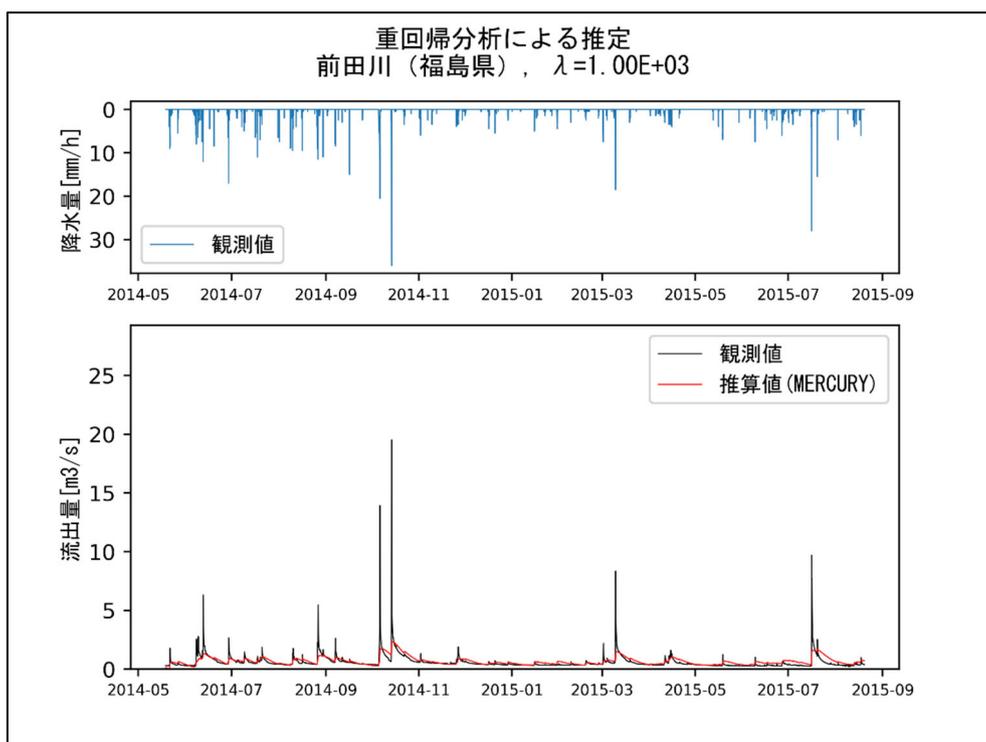


図 3-38 流出量時刻歴結果（前田川、説明変数リスト Case2）： $\lambda = 1000.0$

No.5 : 阿武隈川（説明変数リスト : Case2）

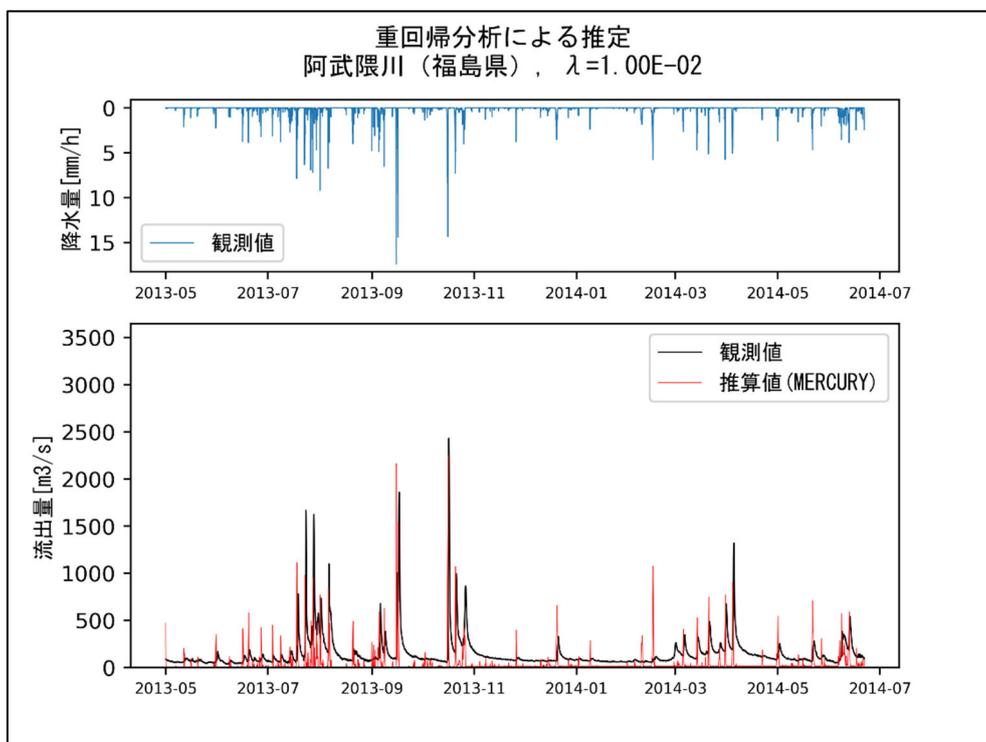


図 3-39 流出量時刻歴結果（阿武隈川、説明変数リスト Case2）： $\lambda = 0.01$

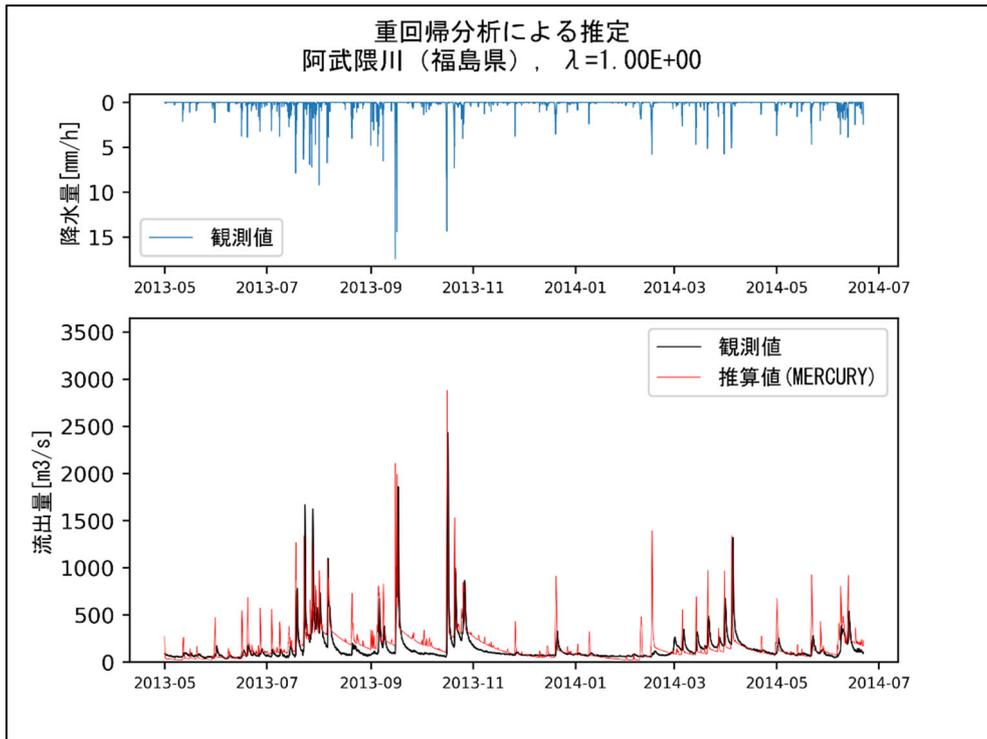


図 3-40 流出量時刻歴結果（阿武隈川、説明変数リスト Case2）： $\lambda = 1.0$

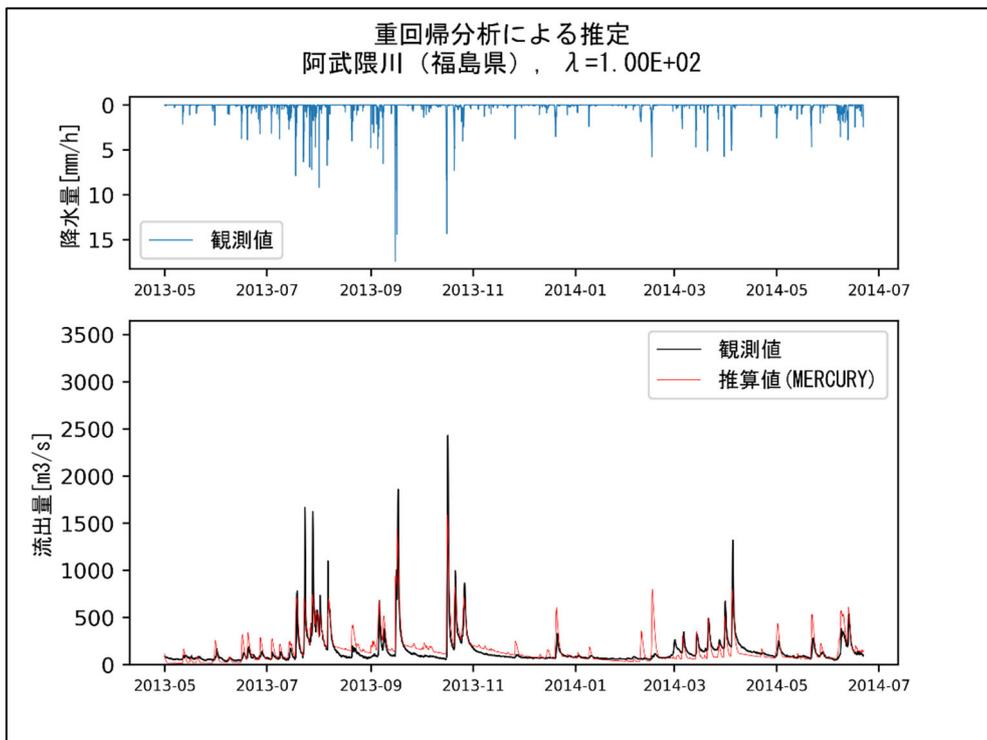


図 3-41 流出量時刻歴結果（阿武隈川、説明変数リスト Case2）： $\lambda = 100.0$

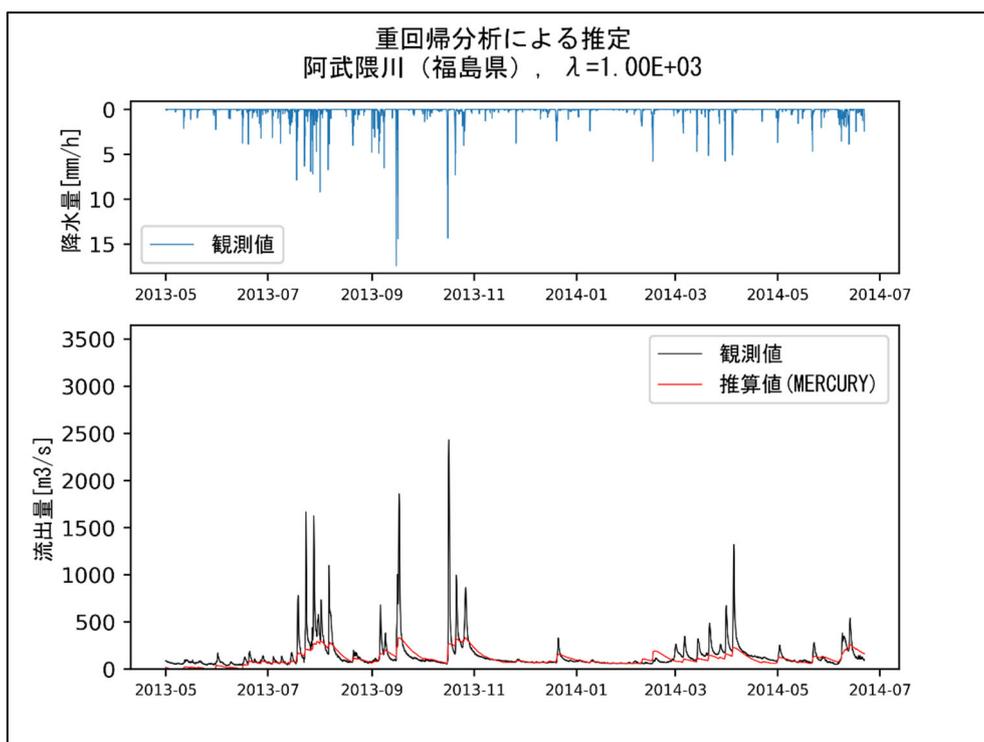


図 3-42 流出量時刻歴結果（阿武隈川、説明変数リスト Case2）： $\lambda = 1000.0$

### 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、実際の学習結果と課題について記したが、本 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。この選定に当たっては、令和 3 年度の当該事業において開発済みであり、河川毎に、最も観測値との差異が少ない RSE 値を示す最適化手法は異なっていることが分かっており、複数の手法による結果を比較することで、より良いパラメータ値が得られることから、下記の 4 つの手法による結果を比較し、最適値を採用する。

- 1) ニュートン法 文献[3-6]参照
- 2) PSO 法（粒子群最適化法） 文献[3-7]参照
- 3) SCE-UA 法 文献[3-8]参照
- 4) ベイズ最適化法

尚、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が、計算コストが高いという欠点がある。また、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ると同時に、評価関数の最適化の過程も利用し、パラメータ空間を探索できることから、適用すべき手法と考えられる。更に、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、その詳細を記す。

#### 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記す。文献[3-6]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[3-6]の方法を踏襲する。

MERCURY モデルは、3 段モデルタンクであり、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り、それらの式を基に最適化手法を導出する。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 $\chi$ 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 $\Delta K$ 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：

$$J(K^{m+1}) = (E^{m+1})^T E^{m+1} \quad (3-68)$$

$$= J(E^m) + (\Delta K)^T \{-2W^T E^m + (W^T W)\Delta K\}.$$

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 $\Delta K$ 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[3-7]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 3-43 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。

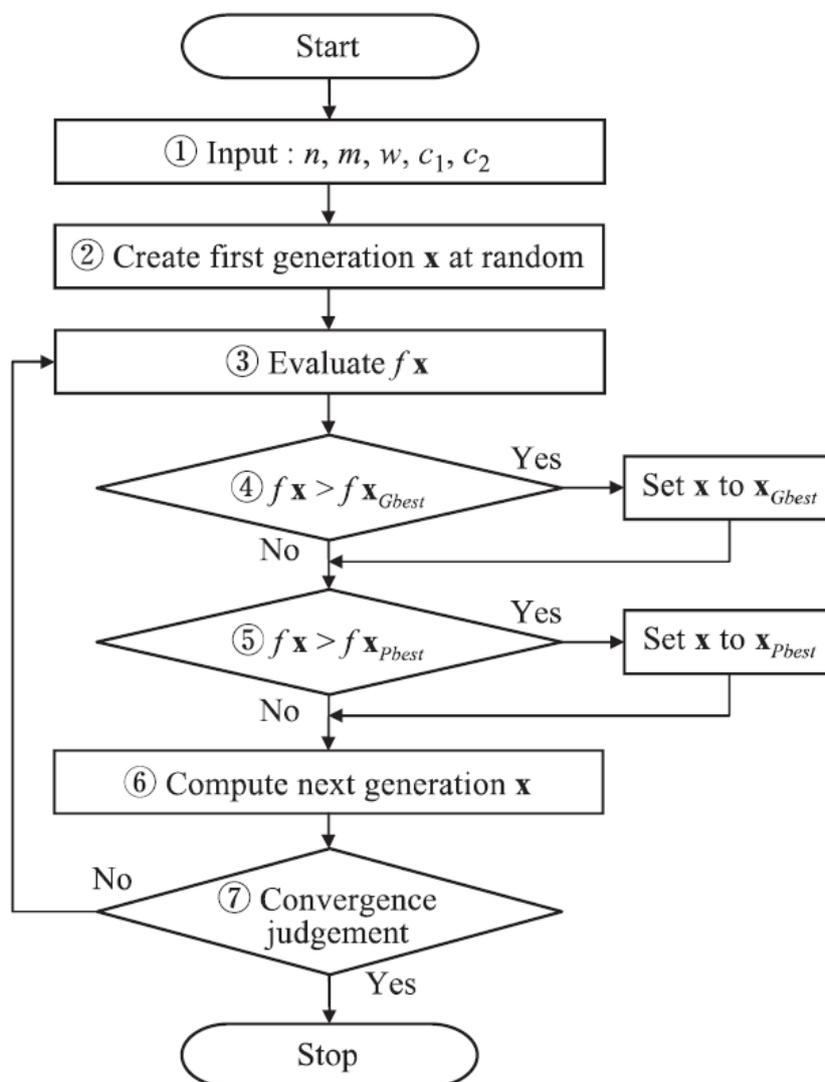


図 3-43 PSO アルゴリズムの手順

尚、文献[3-7]では、図 3-43 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（下記）を実装した。それらの詳細については、文献[3-7]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[3-8]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 3-44 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 3-45 に示す。

- (1) 点数 $q$ 、反復回数 $\alpha, \beta$  を選択する。ここで、 $2 \leq q \leq m, \alpha \geq 1, \beta \geq 1$ である。
- (2)  $A^\kappa$ 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)  $A^\kappa$ 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。

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

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  $\Omega$  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  $\beta$  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  $\beta$  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。

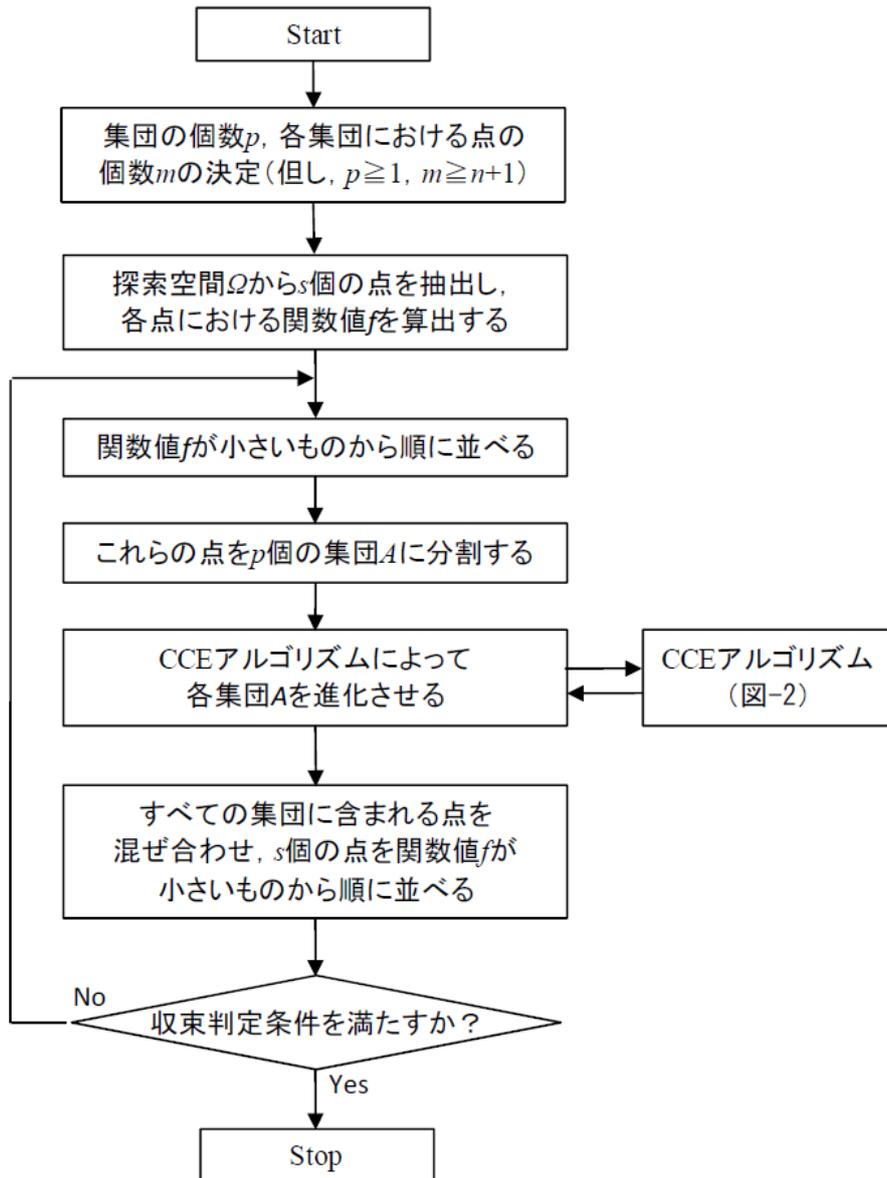


図 3-44 SCE-UA 法のアルゴリズム

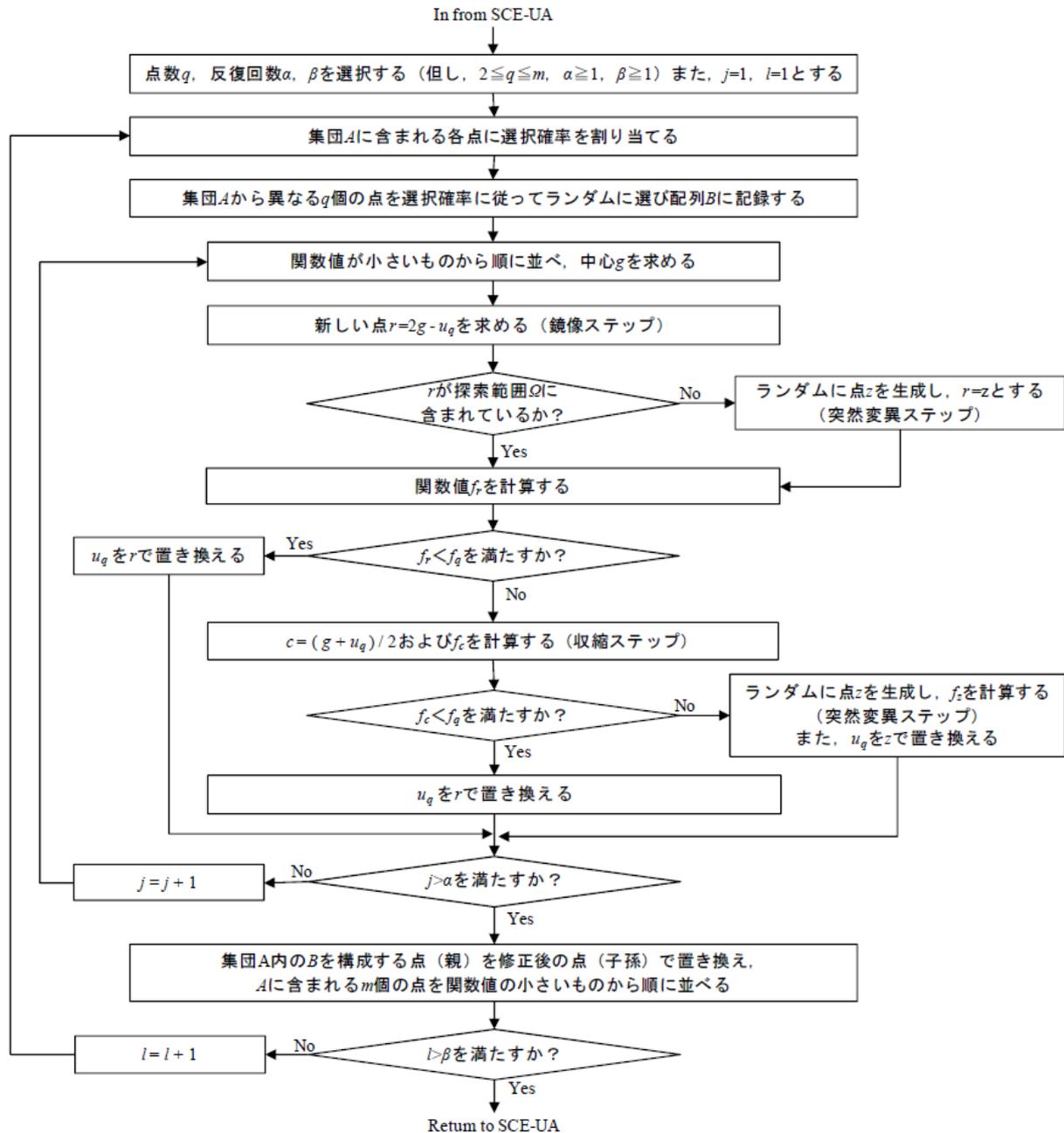


図 3-45 CCE アルゴリズム

#### 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[3-10]から参照できる。ベイズ最適化は、様々な最適化問題に利用されており、その手法を解説する成書や文献は膨大にあることから、本報告書では、その詳細の説明は割愛する。以下、本事業での実施項目のみについて記す。

- ・ 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、効率よく最適解を見つける必要がある場合、利用すべき手法である。
- ・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（最小）と考えられる候補を機械学習（ガウス過程回帰を利用）による予測を活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、大量のデータを扱うことが困難となる。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が、計算資源の確保が課題となる。本事業では、通常の PC 等の利用を想定しており、その優れた性能は十分享受できていないことを注意する。

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

## ⑤ 自動キャリブレーション機能による MERCURY パラメータのチューニング

### 作業概要

3.2.1 で実施した MERCURY パラメータを初期設定として、福島 5 河川（前田川、熊川、高瀬川、請戸川、阿武隈川）に対し、2011 年以降の半年間～1 年間の期間、令和 3 年度実装済みの自動パラメータキャリブレーション機能（Newton 法、Bayes 最適化、PSO 法、SCE-UA 法）を用いて MERCURY パラメータのチューニングを行う。

### 計算条件

- 計算期間は半年間から 1 年間。
- 各対象河川について、MERCURY の入力として平均降雨を与え続ける定常計算を実施して、初期の 3 段タンクの貯水高さを求める。
- パラメータを最適化する際の初期設定として次の 2 ケースを考慮した。詳細は表 3-28 を参照。

CaseA：対象河川に依存しない一様な値。（表 3-29 参照）

CaseB：対象河川ごとに重回帰分析を使用して推定した値。（表 3-30 参照）

表 3-26 計算条件①：流域面積、計算期間、蒸発散量

河川	流域面積(km <sup>2</sup> )	計算期間	蒸発散量(mm/h)
前田川	21.0	2014/05/19～2015/08/19	0.050
熊川	63.9	2014/05/13～2014/11/12	0.045
高瀬川	238.6	2014/05/08～2015/08/25	0.050
請戸川	148.7	2014/05/07～2015/08/25	0.050
阿武隈川	4500.8	2013/05/01～2014/06/21	0.050

表 3-27 計算条件②：初期のタンク貯水高さ

河川	タンクの貯水高さ		
	S <sub>1</sub> (mm)	S <sub>2</sub> (mm)	S <sub>3</sub> (mm)
前田川	0.2182	5.4538	13.6344
熊川	0.2275	5.6864	14.2161
高瀬川	0.2139	5.3464	13.3661
請戸川	0.2139	5.3464	13.3661
阿武隈川	0.1673	4.1834	10.4585

表 3-28 計算条件③：MERCURY パラメータの初期設定

ケース	条件：MERCURY パラメータの初期設定	設定値
CaseA : Parameter fixed	対象河川に依存しない一様に設定した値	表 3-29
CaseB : Parameter determined by regression	重回帰分析で決定した値。 0 の Case2 ( $\lambda = 1.0$ ) の値を採用した。	表 3-30

表 3-29 MERCURY パラメータの初期設定①：対象河川に依存しない一様に設定した値

河川	MERCURY の経験パラメータ				
	a1	a2	a3	b1	b2
前田川	0.025	0.010	0.004	0.500	0.010
熊川					
高瀬川					
請戸川					
阿武隈川					

※この初期設定は、文献[3-2]の Table2”MERCURY model's parameters for each catchment.”の前田川の経験パラメータを基に設定している。

表 3-30 MERCURY パラメータの初期設定②：重回帰分析による推定値。Case2 ( $\lambda = 1.0$ ) を使用。

河川	MERCURY の経験パラメータ				
	a1	a2	a3	b1	b2
前田川	0.033704	0.066263	0.003938	0.169387	0.197268
熊川	0.031587	0.065421	0.003472	0.174056	0.173400
高瀬川	0.033672	0.052172	0.003331	0.217975	0.156842
請戸川	0.033971	0.057150	0.003544	0.210145	0.165958
阿武隈川	0.022445	0.045203	0.002171	0.171536	0.192615

チューニング結果：最適化手法ごとの評価値

- MERCURY パラメータの初期設定の方法に依らず、福島県の 5 河川について、RSE が 0.4 以下、つまり NSE(Nash-Sutcliffe efficiency)が 0.6 以上の値を達成した。
- 最適化手法として Newton 法を採用した場合は、MERCURY パラメータの初期設定の方法に依存して最適化の性能結果に差異が現れた。(表 3-33 参照)

表 3-31 パラメータ初期設定 CaseA：対象河川に依存しない一様に設定した値

River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
前田川	Newton	0.9743	1.834E-02	8.176E-03	4.470E-03	2.694E-01	2.604E-02
	Bayes	0.3840	1.112E-02	6.670E-03	1.000E-04	7.146E-01	1.437E-02
	PSO	0.5847	2.099E-02	1.833E-02	1.343E-04	6.033E-01	4.276E-01
	SCE-UA	0.2100	3.098E-02	3.227E-03	1.223E-04	4.299E-01	3.266E-03
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
熊川	Newton	0.3767	3.650E-02	3.613E-03	8.336E-03	8.620E-02	1.000E-10
	Bayes	0.5198	4.445E-02	7.780E-03	1.000E-04	1.437E-01	1.000E-04
	PSO	0.4135	4.872E-02	3.372E-03	4.329E-03	1.494E-01	7.847E-01
	SCE-UA	0.4133	4.800E-02	1.000E-10	4.197E-03	1.452E-01	1.000E+00
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
高瀬川	Newton	0.3496	2.069E-02	2.939E-03	7.393E-03	5.590E-02	1.000E-10
	Bayes	0.4805	3.334E-02	7.780E-03	1.200E-05	1.437E-01	1.000E-04
	PSO	0.2999	8.590E-03	7.395E-02	4.056E-03	2.754E-01	4.581E-01
	SCE-UA	0.2996	3.630E-04	1.189E-01	3.820E-03	2.621E-01	5.900E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
請戸川	Newton	0.5711	4.384E-03	6.524E-03	4.268E-03	2.367E-01	1.784E-02
	Bayes	0.4656	2.223E-02	3.340E-03	4.500E-05	1.000E+00	1.000E-04
	PSO	0.3095	4.000E-03	7.874E-02	1.893E-04	2.591E-03	6.657E-01
	SCE-UA	0.2953	4.326E-03	1.765E-02	2.165E-04	3.448E-03	9.861E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
阿武隈川	Newton	0.5084	1.871E-02	1.152E-02	2.815E-03	1.349E+00	1.236E-02
	Bayes	0.4352	1.000E-05	1.000E-02	1.000E-04	7.146E-01	1.437E-02
	PSO	0.3987	5.448E-03	1.412E-01	4.848E-04	1.047E-02	4.907E-01
	SCE-UA	0.3123	1.000E-10	1.897E-02	5.608E-04	9.505E-02	2.978E-02

表 3-32 パラメータ初期設定 CaseB : 重回帰分析により決定した値

River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
前田川	Newton	0.4066	1.375E-02	1.000E-10	1.289E-04	5.886E-02	1.960E+00
	Bayes	0.3840	1.112E-02	6.670E-03	1.000E-04	7.146E-01	1.437E-02
	PSO	0.4805	9.500E-03	1.658E-03	1.851E-04	7.164E-02	4.352E-01
	SCE-UA	0.2100	3.098E-02	3.227E-03	1.223E-04	4.299E-01	3.266E-03
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
熊川	Newton	0.4510	3.320E-02	1.244E-02	2.984E-03	1.026E-01	6.272E-02
	Bayes	0.5198	4.445E-02	7.780E-03	1.000E-04	1.437E-01	1.000E-04
	PSO	0.4135	4.872E-02	3.372E-03	4.329E-03	1.494E-01	7.847E-01
	SCE-UA	0.4133	4.800E-02	1.000E-10	4.197E-03	1.452E-01	1.000E+00
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
高瀬川	Newton	0.3296	1.000E-10	2.048E-02	2.829E-03	1.217E+00	5.079E-02
	Bayes	0.4805	3.334E-02	7.780E-03	1.200E-05	1.437E-01	1.000E-04
	PSO	0.2996	5.957E-03	8.691E-02	3.840E-03	2.677E-01	4.519E-01
	SCE-UA	0.2996	3.630E-04	1.189E-01	3.820E-03	2.621E-01	5.900E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
請戸川	Newton	0.4634	5.677E-03	1.189E-01	1.675E-03	2.680E-02	1.907E+00
	Bayes	0.4656	2.223E-02	3.340E-03	4.500E-05	1.000E+00	1.000E-04
	PSO	0.3127	2.572E-03	2.374E-01	1.554E-04	5.009E-03	5.362E-01
	SCE-UA	0.2953	4.326E-03	1.765E-02	2.165E-04	3.448E-03	9.861E-01
River	Type	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
阿武隈川	Newton	0.3006	1.000E-10	7.984E-02	3.858E-04	5.055E-02	7.714E-02
	Bayes	0.4352	1.000E-05	1.000E-02	1.000E-04	7.146E-01	1.437E-02
	PSO	0.3837	5.163E-03	5.929E-02	9.248E-04	2.145E-02	2.045E-01
	SCE-UA	0.3123	1.000E-10	1.897E-02	5.608E-04	9.505E-02	2.978E-02

表 3-33 パラメータ初期設定 CaseA と CaseB の比較（最適化手法：Newton 法）

River	Type	Case	RSE	a1	a2	a3	b1	b2
前田川	Newton	Case A	0.9743	1.834E-02	8.176E-03	4.470E-03	2.694E-01	2.604E-02
		Case B	0.4066	1.375E-02	1.000E-10	1.289E-04	5.886E-02	1.960E+00
熊川		Case A	0.3767	3.650E-02	3.613E-03	8.336E-03	8.620E-02	1.000E-10
		Case B	0.4510	3.320E-02	1.244E-02	2.984E-03	1.026E-01	6.272E-02
高瀬川		Case A	0.3496	2.069E-02	2.939E-03	7.393E-03	5.590E-02	1.000E-10
		Case B	0.3296	1.000E-10	2.048E-02	2.829E-03	1.217E+00	5.079E-02
請戸川		Case A	0.5711	4.384E-03	6.524E-03	4.268E-03	2.367E-01	1.784E-02
		Case B	0.4634	5.677E-03	1.189E-01	1.675E-03	2.680E-02	1.907E+00
阿武隈川		Case A	0.5084	1.871E-02	1.152E-02	2.815E-03	1.349E+00	1.236E-02
		Case B	0.3006	1.000E-10	7.984E-02	3.858E-04	5.055E-02	7.714E-02

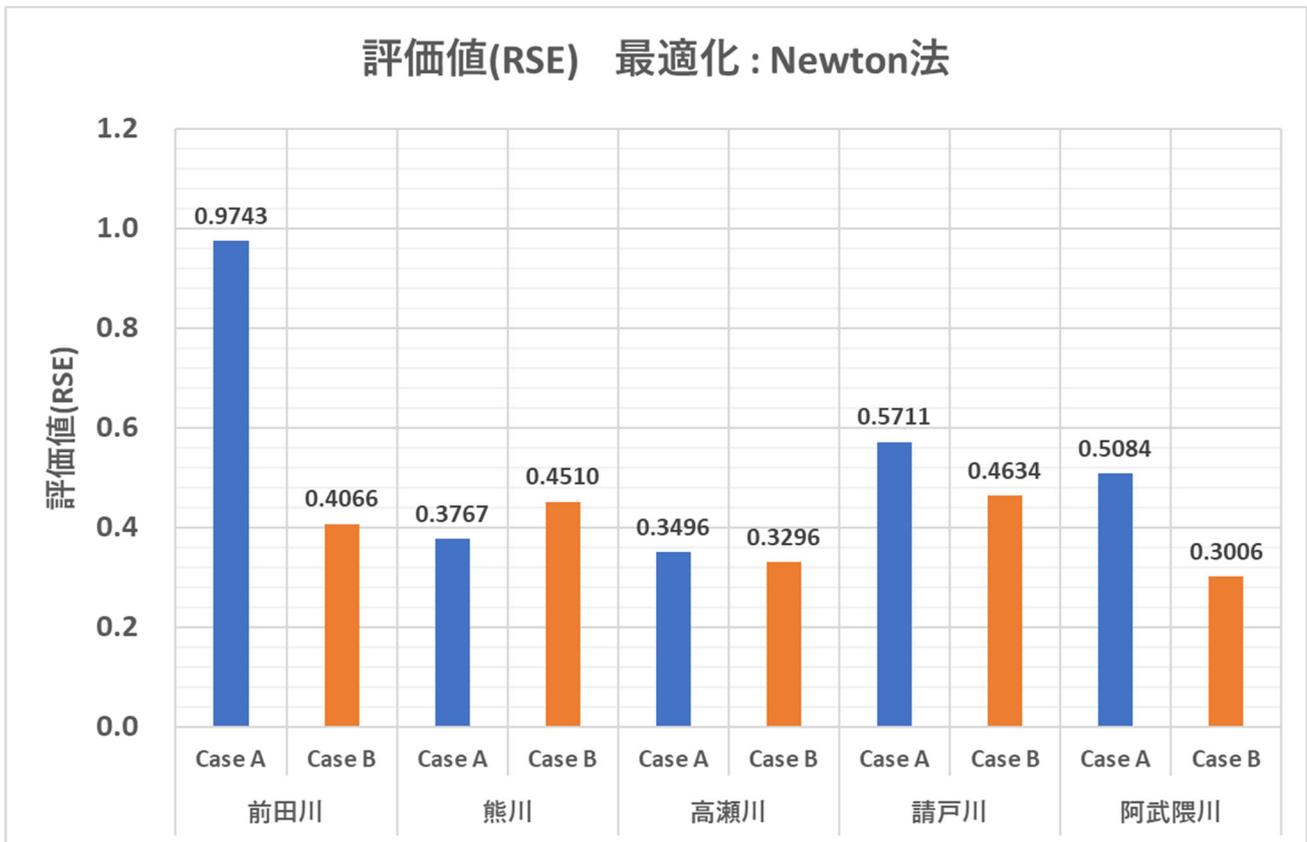


図 3-46 パラメータ初期設定 CaseA と CaseB の比較（最適化手法：Newton 法）

## チューニング結果（一例）：流出量時刻歴の比較（最適化手法：Newton 法）

● 福島県の 5 河川（前田川、熊川、高瀬川、請戸側、阿武隈川）について、Newton 法による自動パラメータキャリブレーションを実施した際の、流出量時刻歴の計算値と観測値との比較図を以下の順番で列挙する。

- A) 前田川
  - 1. MERCURY パラメータの初期設定：CaseA
  - 2. MERCURY パラメータの初期設定：CaseB
- B) 熊川
  - 1. MERCURY パラメータの初期設定：CaseA
  - 2. MERCURY パラメータの初期設定：CaseB
- C) 高瀬川
  - 1. MERCURY パラメータの初期設定：CaseA
  - 2. MERCURY パラメータの初期設定：CaseB
- D) 請戸川
  - 1. MERCURY パラメータの初期設定：CaseA
  - 2. MERCURY パラメータの初期設定：CaseB
- E) 阿武隈川
  - 1. MERCURY パラメータの初期設定：CaseA
  - 2. MERCURY パラメータの初期設定：CaseB

※ CaseA：対象河川に依存しない一様な値。（表 3-29 参照）

※ CaseB：対象河川ごとに重回帰分析を使用して推定した値。（表 3-30 参照）

No.1 : 前田川

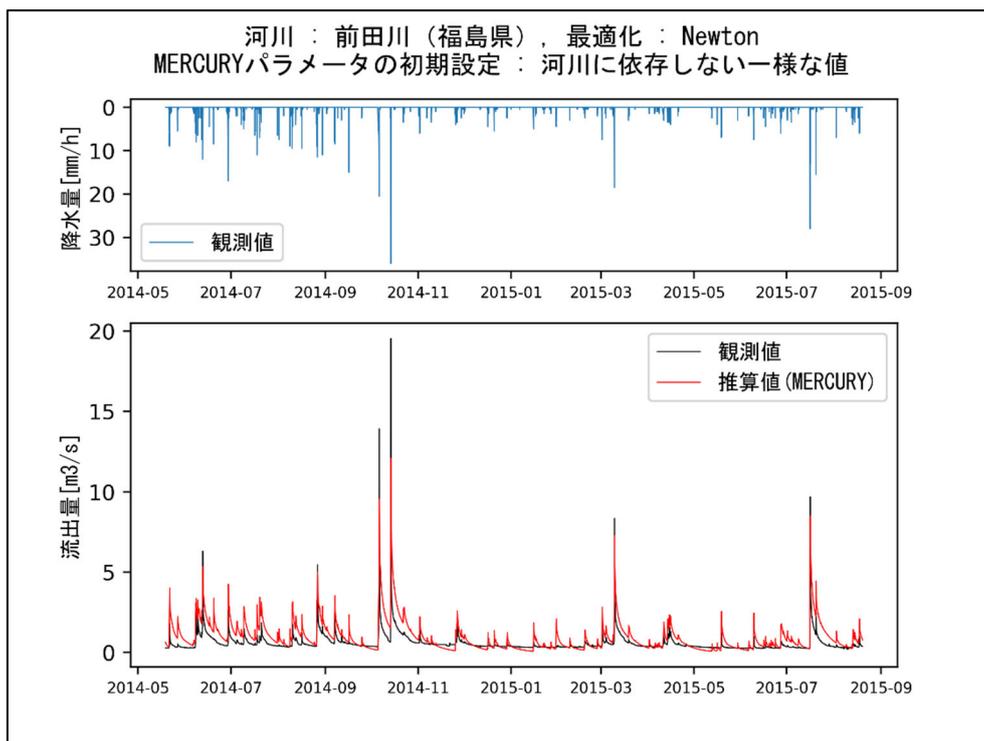


図 3-47 チューニング結果（前田川、最適化手法：Newton 法、CaseA）

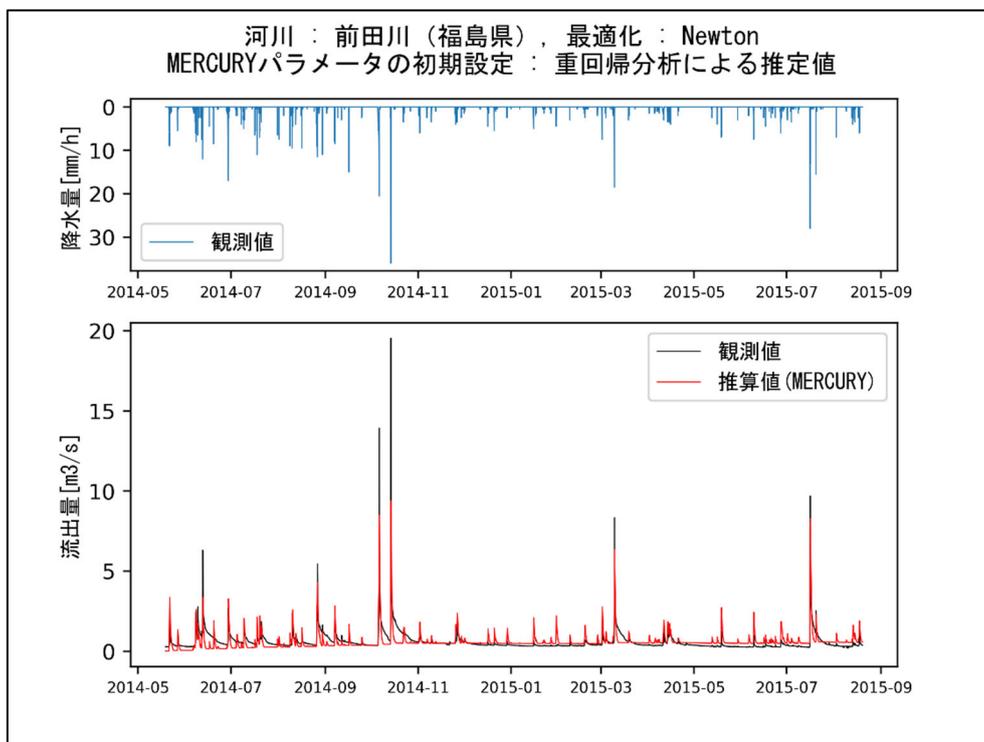


図 3-48 チューニング結果（前田川、最適化手法：Newton 法、CaseB）

No.2 : 熊川

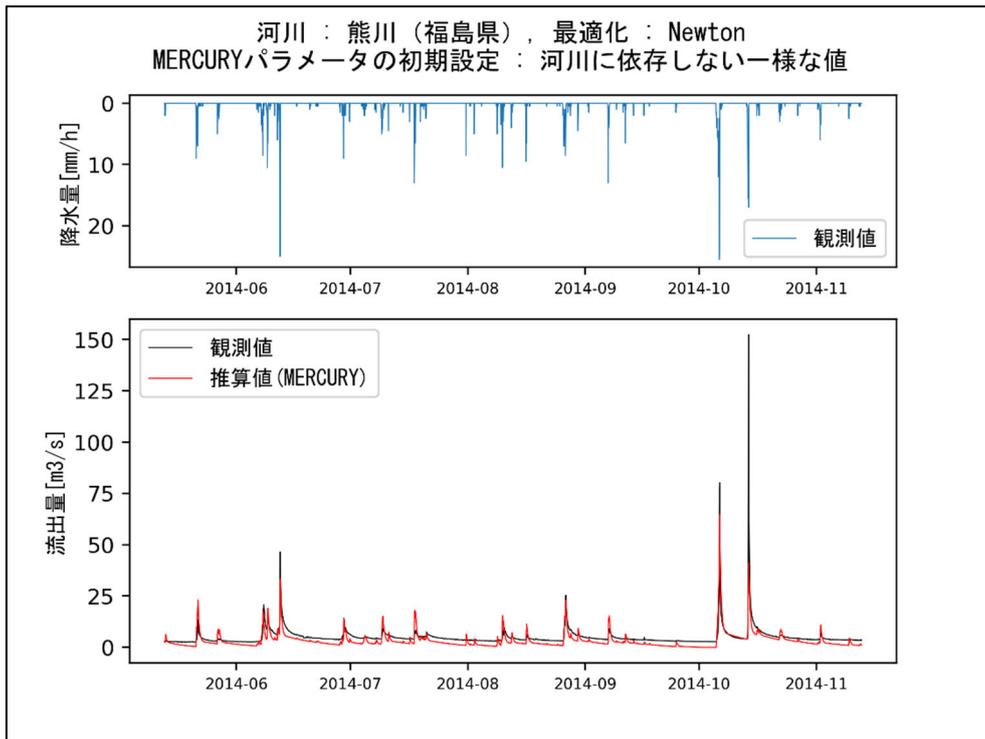


図 3-49 チューニング結果（熊川、最適化手法：Newton 法、CaseA）

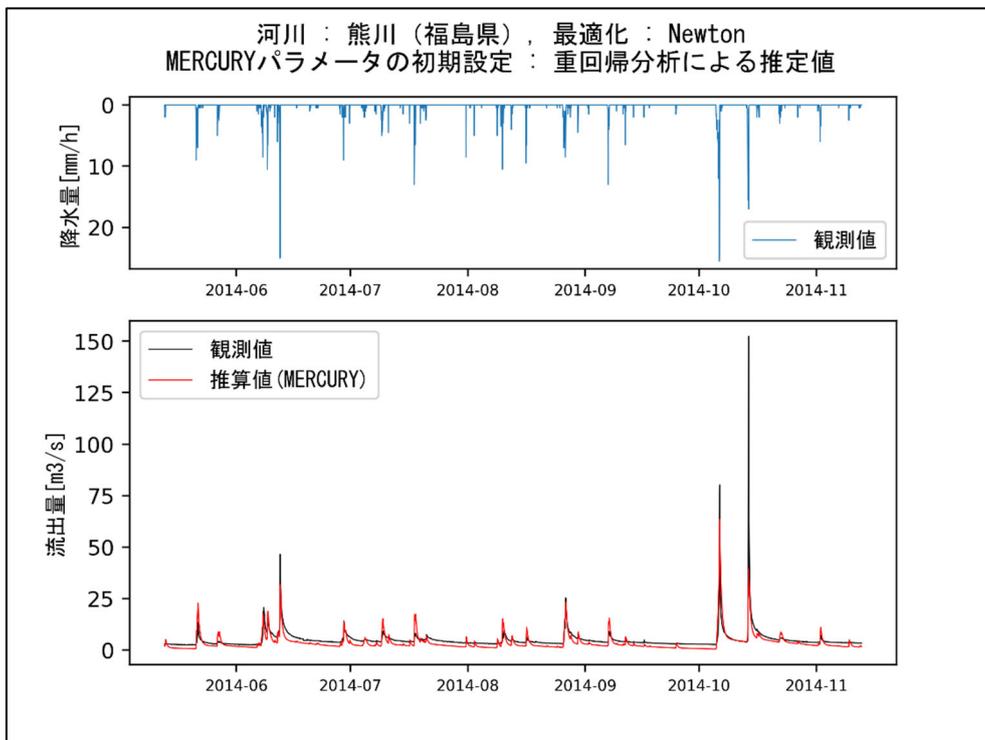


図 3-50 チューニング結果（熊川、最適化手法：Newton 法、CaseB）

No.3 : 高瀬川

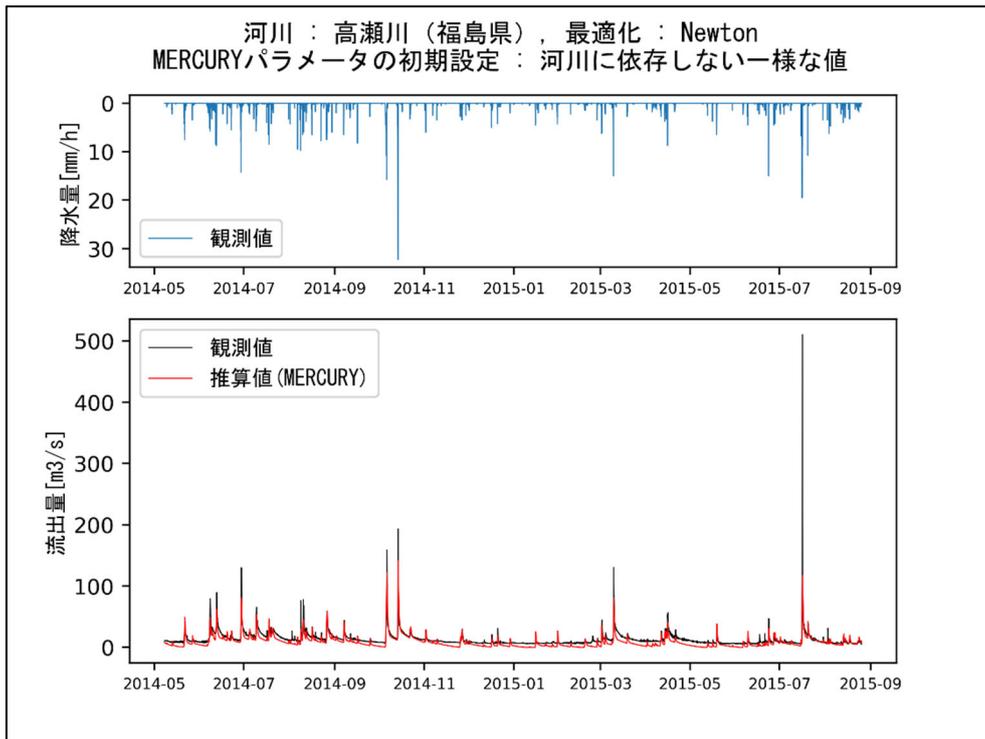


図 3-51 チューニング結果（高瀬川、最適化手法：Newton 法、CaseA）

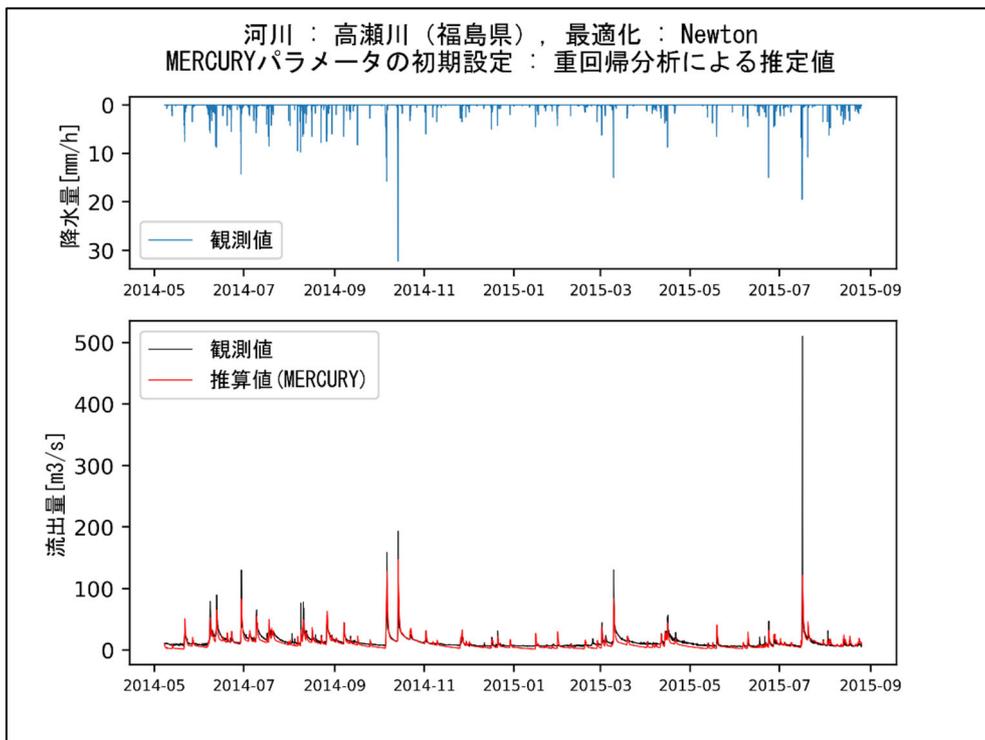


図 3-52 チューニング結果（高瀬川、最適化手法：Newton 法、CaseB）

No.4 : 請戸川

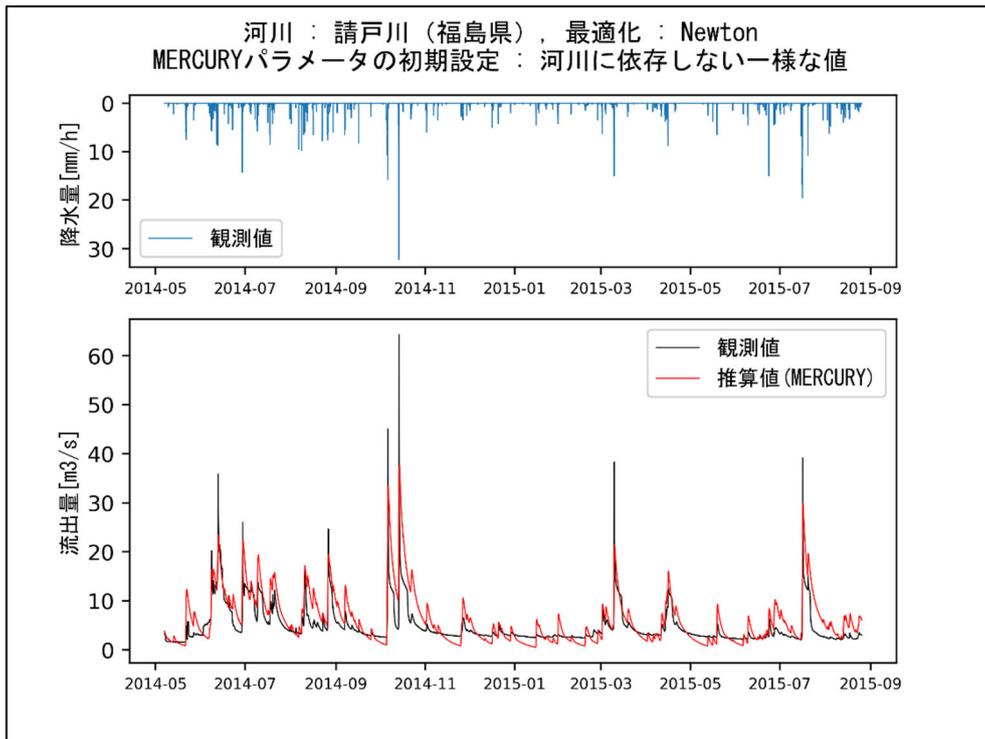


図 3-53 チューニング結果（請戸川、最適化手法：Newton 法、CaseA）

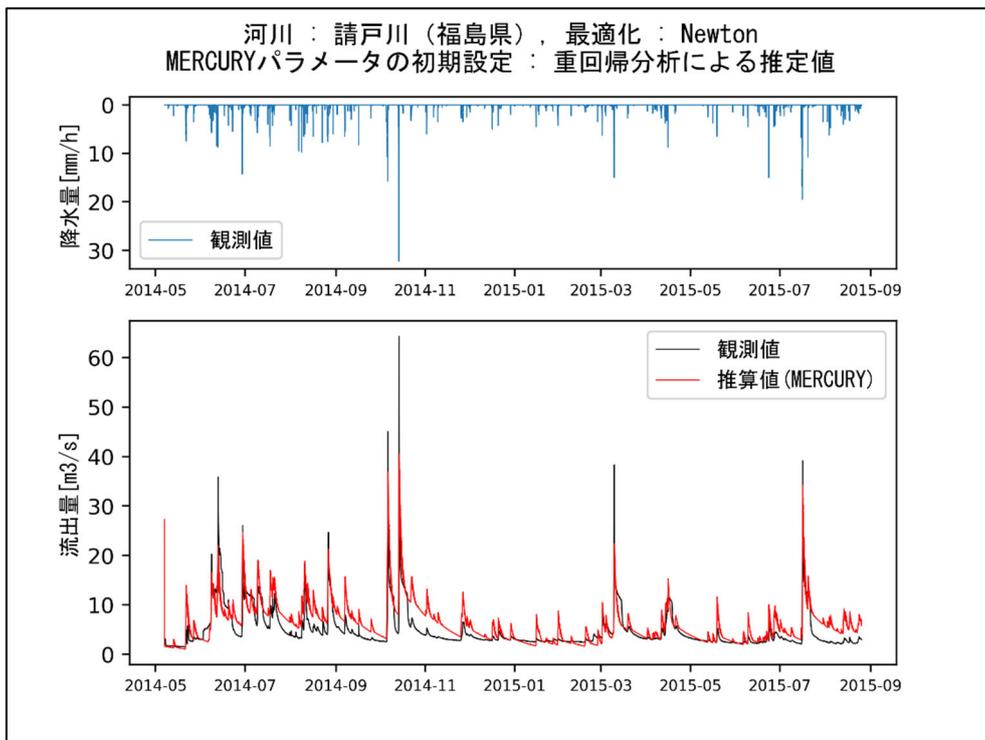


図 3-54 チューニング結果（請戸川、最適化手法：Newton 法、CaseB）

No.5 : 阿武隈川

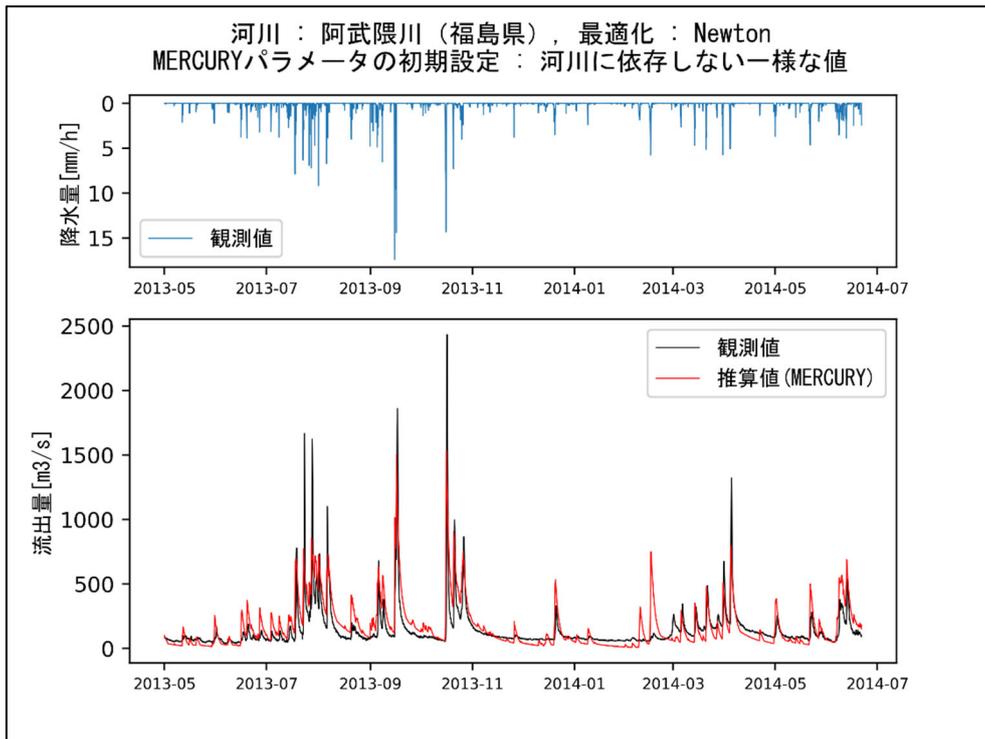


図 3-55 チューニング結果（阿武隈川、最適化手法：Newton 法、CaseA）

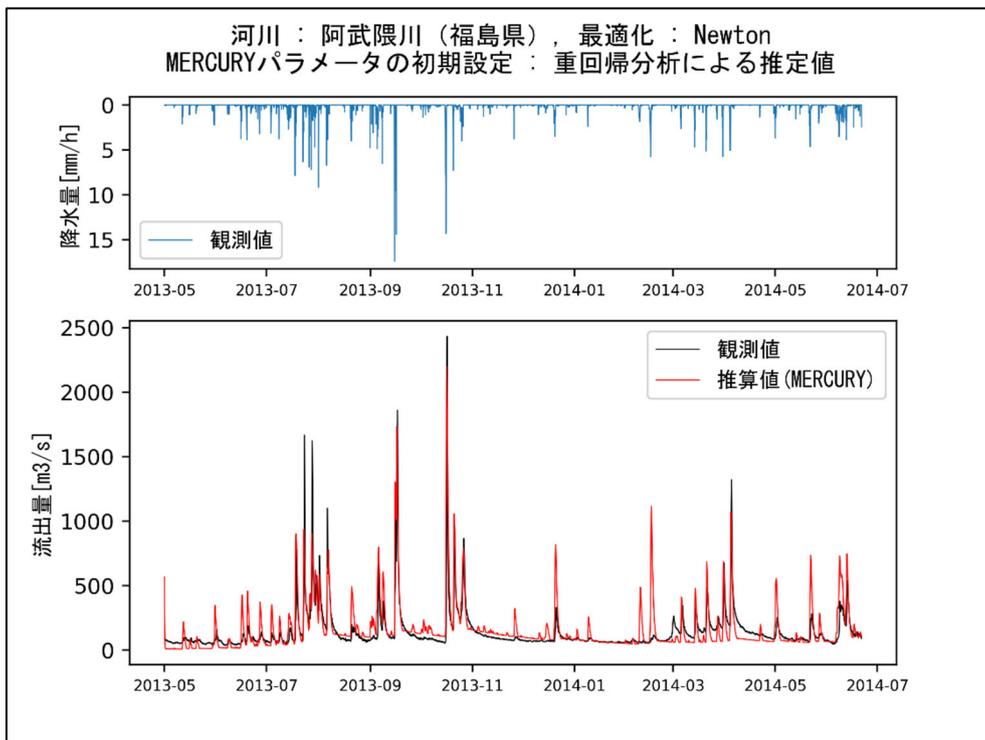


図 3-56 チューニング結果（阿武隈川、最適化手法：Newton 法、CaseB）

### 3.3 集中定数型流出モデルによる試解析（5年間：前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）

3.2 において MERCURY のパラメータ設定方法を調査し検討を進めた結果を基に、福島 5 河川（前田川、熊川、高瀬川、請戸川、阿武隈川）に対し、最適パラメータを取得し、2011 年以降の 5 年間に渡る長期の流出量の経時変化に関する試解析を行い、その結果を評価する。

#### 計算条件の設定

- 計算期間は 2011 年以降の 5 年間
- 各対象河川について、MERUCRY の入力として平均降雨を与え続ける定常計算を実施して、初期の 3 段タンクの貯水高さを設定。
- MERCURY の 3 段タンクモデルに関するパラメータは、3.2 で対象河川ごとにチューニングした値を設定した（表 3-36 参照）。

表 3-34 計算条件①：流域面積、計算期間、蒸発散量

河川	流域面積(km <sup>2</sup> )	計算期間	蒸発散量(mm/h)
前田川	21.0	2011/03/20～2016/03/19	0.050
熊川	63.9	2011/03/20～2016/03/19	0.045
高瀬川	238.6	2011/03/20～2016/03/19	0.050
請戸川	148.7	2011/03/20～2016/03/19	0.050
阿武隈川	4500.8	2011/03/20～2016/03/19	0.050

表 3-35 計算条件②：初期時刻のタンクの貯水高さ

河川	タンクの貯水高さ		
	S <sub>1</sub> (mm)	S <sub>2</sub> (mm)	S <sub>3</sub> (mm)
前田川	0.2182	5.4538	13.6344
熊川	0.2275	5.6864	14.2161
高瀬川	0.2139	5.3464	13.3661
請戸川	0.2139	5.3464	13.3661
阿武隈川	0.1673	4.1834	10.4585

表 3-36 計算条件③：MERCURY 経験パラメータ

河川	a1	a2	a3	b1	b2	備考：情報源
前田川	3.098E-02	3.227E-03	1.223E-04	4.299E-01	3.266E-03	CaseB, Newton
熊川	3.650E-02	3.613E-03	8.336E-03	8.620E-02	1.000E-10	CaseA, Newton
高瀬川	3.630E-04	1.189E-01	3.820E-03	2.621E-01	5.900E-01	CaseB, SCE-UA
請戸川	4.326E-03	1.765E-02	2.165E-04	3.448E-03	9.861E-01	CaseB, SCE-UA
阿武隈川	1.000E-10	7.984E-02	3.858E-04	5.055E-02	7.714E-02	CaseB, Newton

※「チューニング結果：最適化手法ごとの評価値」の表 3-31 及び表 3-32 から、最良と思われる MERCURY パラメータを選定。

表 3-37 計算条件④：流量観測所位置

河川	観測所位置	
	緯度	経度
前田川	37.4394	141.0003
熊川	37.3841	141.0270
高瀬川	37.4856	140.9980
請戸川	37.4975	141.0016
阿武隈川	38.0296	140.8081

#### 計算条件：L-Q 式

文献[3-12]では、粒径の微細な浮遊土砂 (SS) について、SS モニタリングデータを収集し、日本全国の河川を対象とした浮遊土砂輸送量 $L$ と流量 $Q$ に関するデータベースを作成し、それに基づいて $L-Q$ 関係の基本特性やそれと流域情報との関連性を明らかにすることを試みている。特に、構築したデータベースを教師データとしたニューラルネットに基づく $L-Q$ 式の経験パラメータの推定方法を提案している。

文献[3-12]によれば、SS 輸送に関する浮遊土砂輸送量 $L$ と流量 $Q$ に対して、比浮遊土砂輸送量 $L' (= L/A)$ と比流量 $Q' (= Q/A)$ の関係は式(3-1)として推定できる。このとき、経験パラメータは $a' = 13.83$ ,  $b' = 1.62$ である。

$$L' = a' Q'^{b'} \quad (3-1)$$

$$L' = L/A \quad (3-2)$$

$$Q' = Q/A \quad (3-3)$$

ただし、 $L'$ [ton/day/km<sup>2</sup>]、 $Q'$ [m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>]である。

表 3-38 計算条件⑤：L-Q 式の経験パラメータ

河川	流域面積(km <sup>2</sup> )	$a'$	$b'$
前田川	21.0	13.83	1.62
熊川	63.9	13.83	1.62
高瀬川	238.6	13.83	1.62
請戸川	148.7	13.83	1.62
阿武隈川	4500.8	13.83	1.62

本事業では、この L-Q 式を用いて SS 流出量の経時変化を推定する。

計算条件：懸濁態及び溶存態放射性セシウム(Cs-137)の規格化 2 成分指数減衰モデル

上記 L-Q 式と流量から、懸濁態及び溶存態放射性セシウム (Cs-137) の規格化 2 成分指数減衰モデルを用いて放射性セシウムの懸濁態成分及び溶存成分の流出量の経時変化を推定可能となる。2 成分モデルでの各パラメータは文献[3-2]の Table2” MERCURY model's parameters for each catchment.”に従う。

表 3-39 計算条件⑥：放射性セシウムの規格化 2 成分指数減衰モデル

河川	$C_{par}$				$C_{dis}$			
	$A$	$B$	$k_1$	$k_2$	$C$	$D$	$k_3$	$k_4$
	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	y <sup>-1</sup>	y <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>	y <sup>-1</sup>	y <sup>-1</sup>
前田川	0.62	0.050	6.0	0.27	1.3E-3	2.4E-4	4.8	0.27
熊川	0.62	0.050	6.0	0.27	1.3E-3	2.4E-4	4.8	0.27
高瀬川	0.62	0.050	6.0	0.27	1.3E-3	2.4E-4	4.8	0.27
請戸川	0.62	0.050	6.0	0.27	1.3E-3	2.4E-4	4.8	0.27
阿武隈川	2.0	0.086	5.0	0.46	1.3E-3	2.4E-4	4.8	0.27

計算結果：

以下では、上記設定条件に基づく事故後 5 年間の計算結果を示す。

No.1：前田川

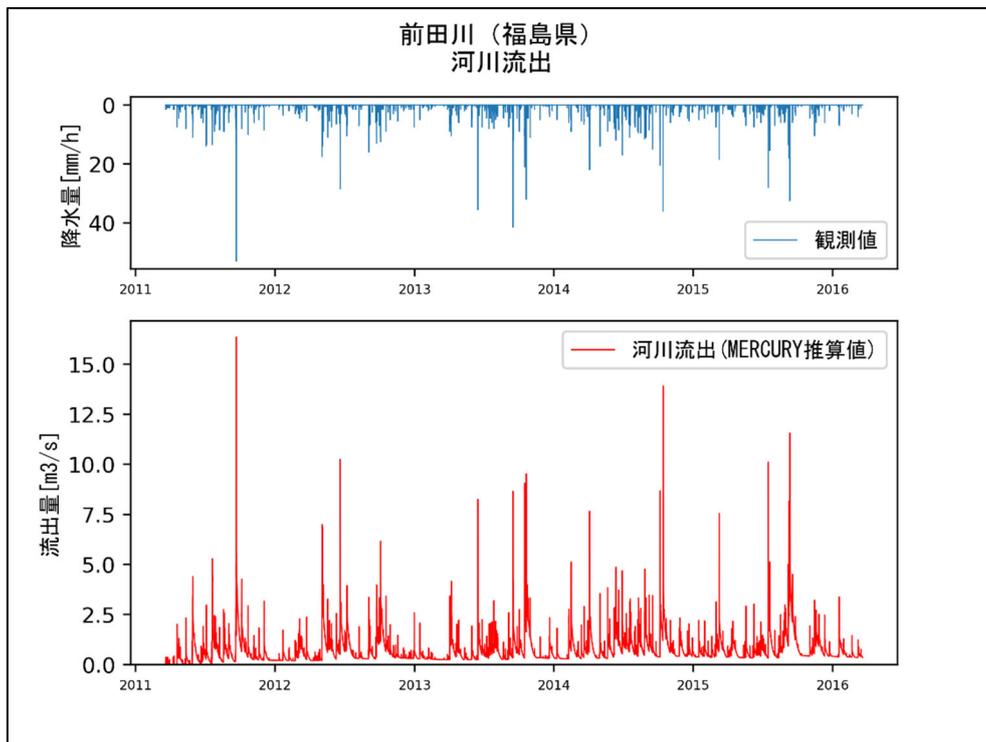


図 3-57 長期推定結果（前田川、河川流出）

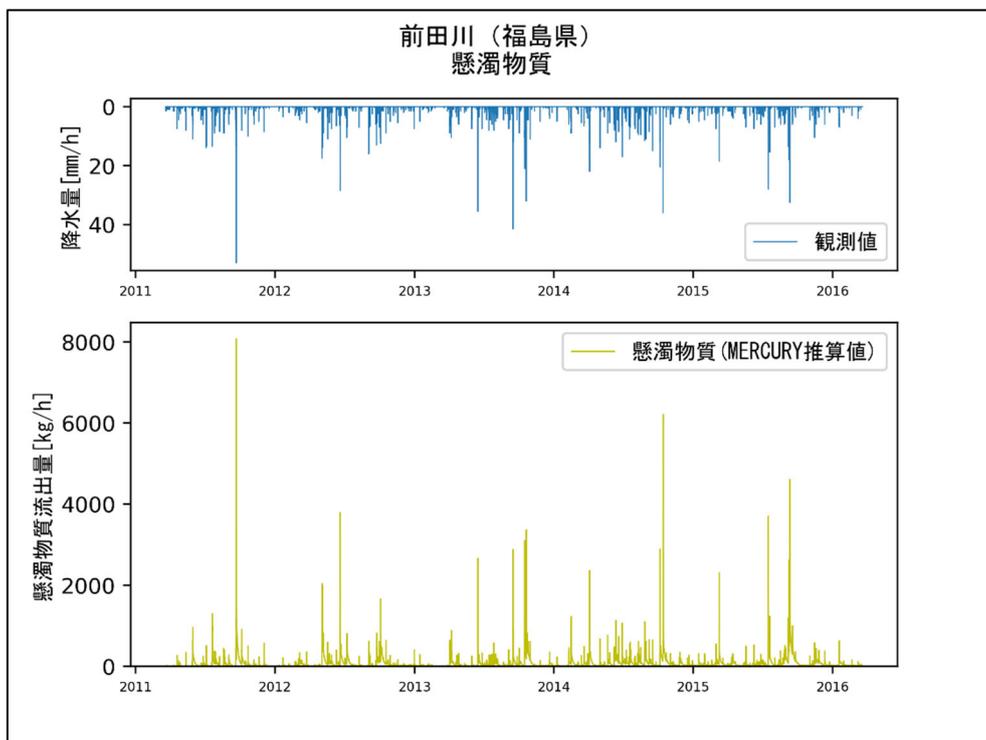


図 3-58 長期推定結果（前田川、懸濁物質）

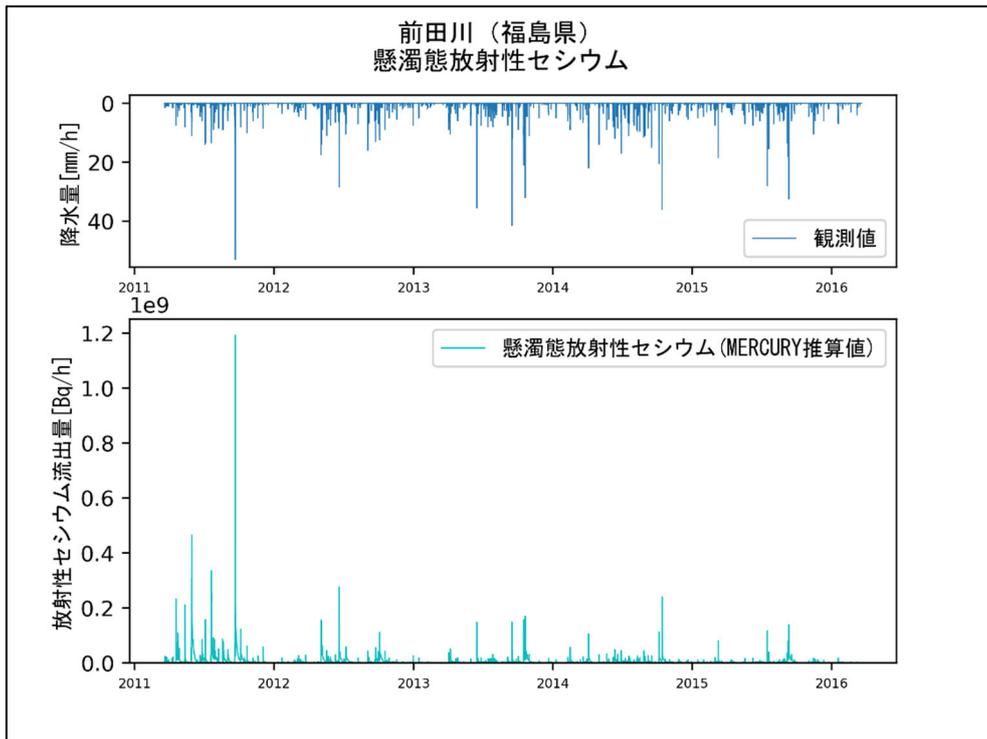


図 3-59 長期推定結果（前田川、懸濁態放射性セシウム）

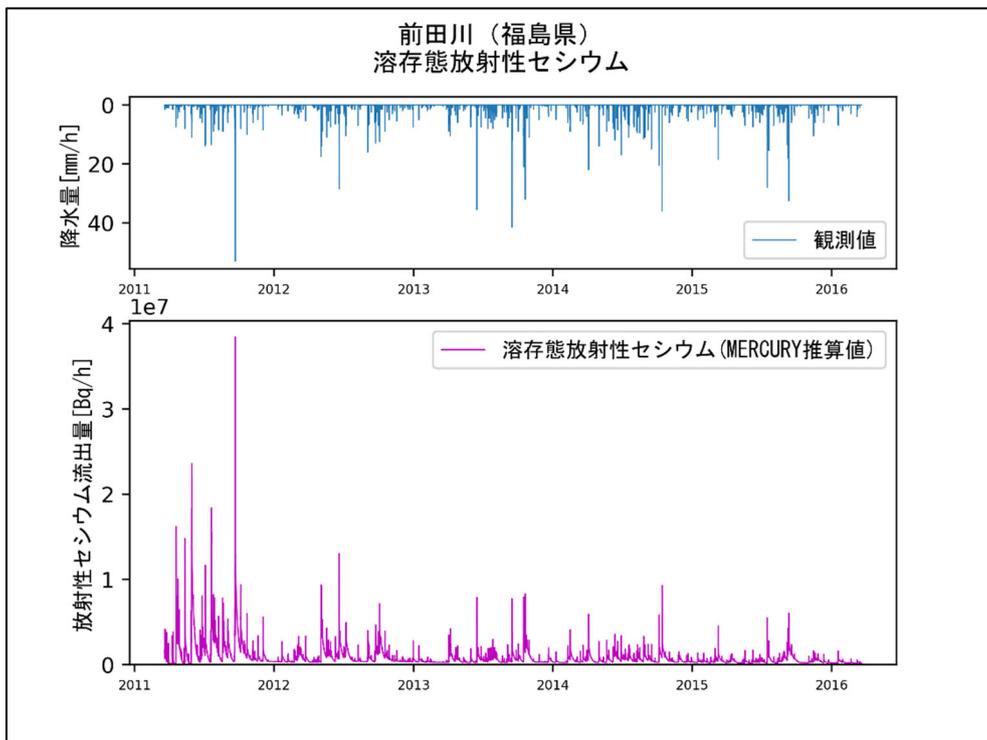


図 3-60 長期推定結果（前田川、溶存態放射性セシウム）

No.2 : 熊川

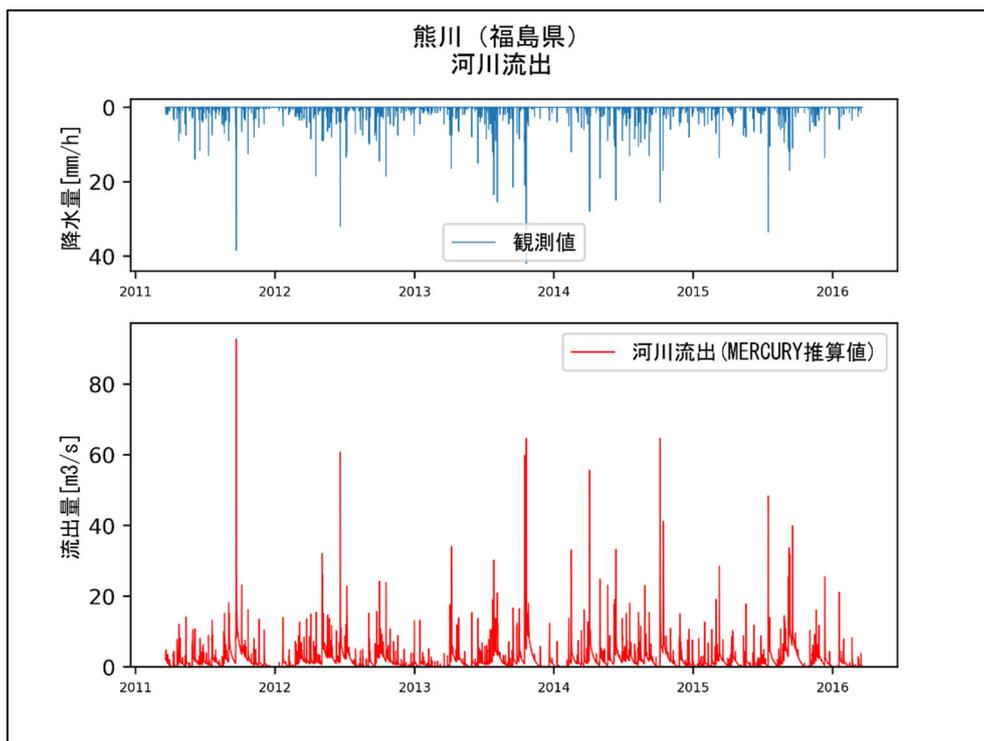


図 3-61 長期推定結果（熊川、河川流出）

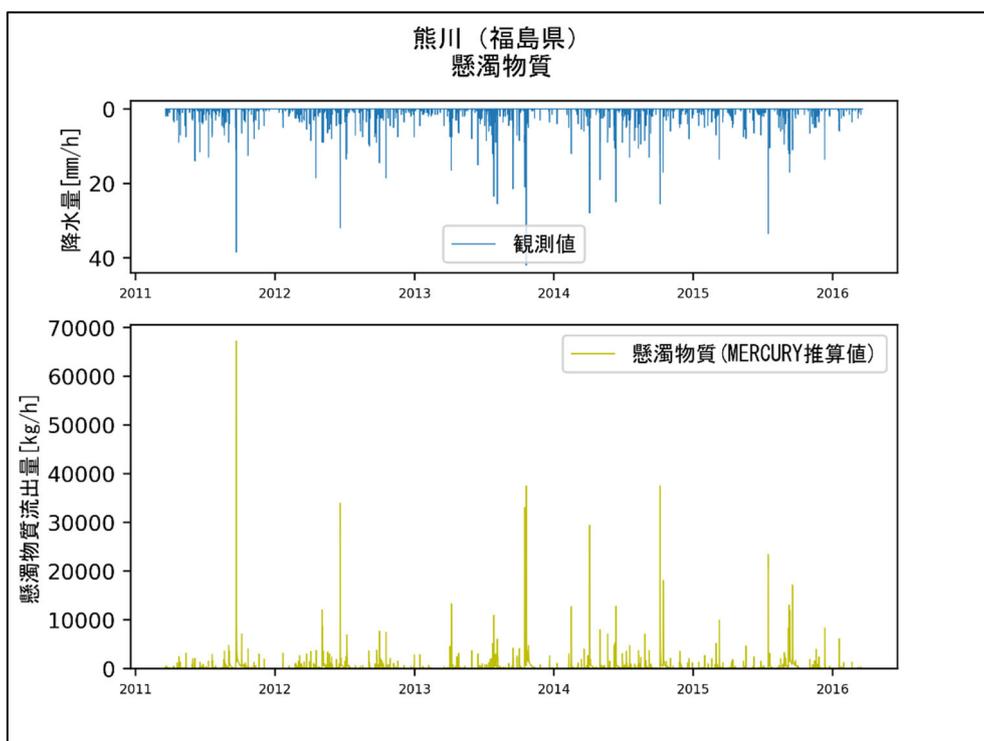


図 3-62 長期推定結果（熊川、懸濁物質）

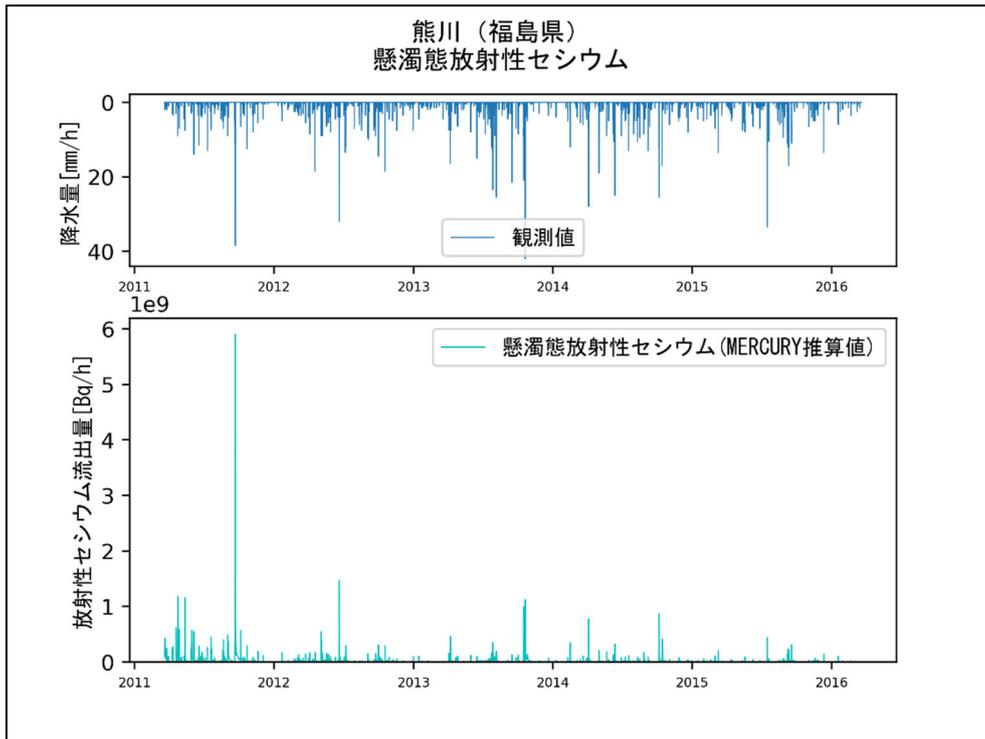


図 3-63 長期推定結果（熊川、懸濁態放射性セシウム）

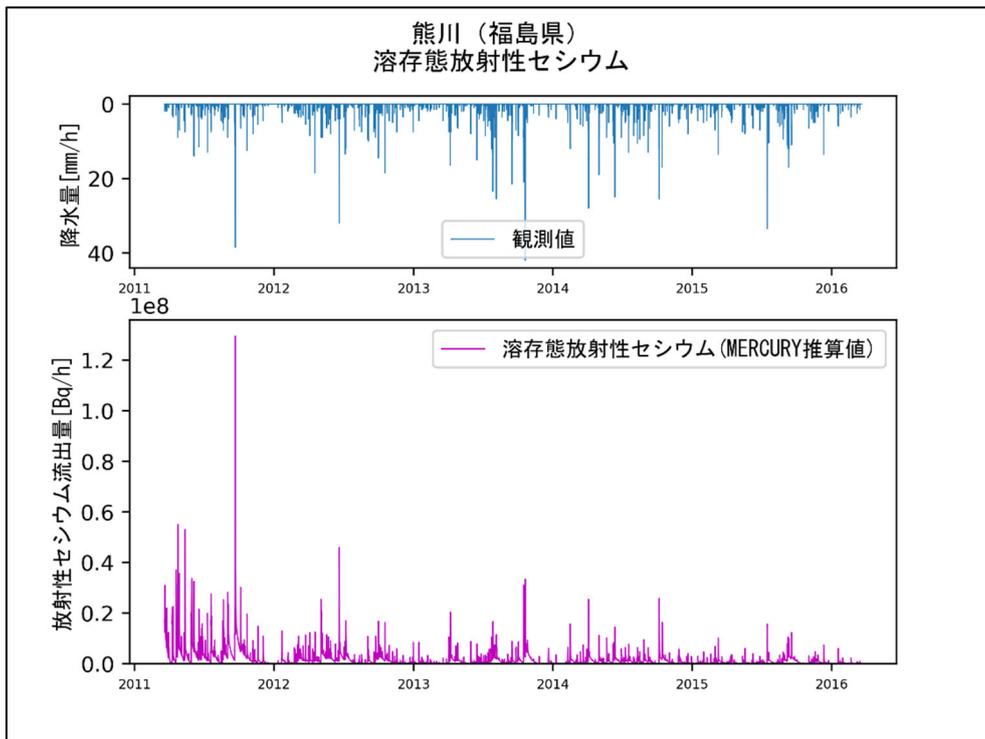


図 3-64 長期推定結果（熊川、溶存態放射性セシウム）

No.3 : 高瀬川

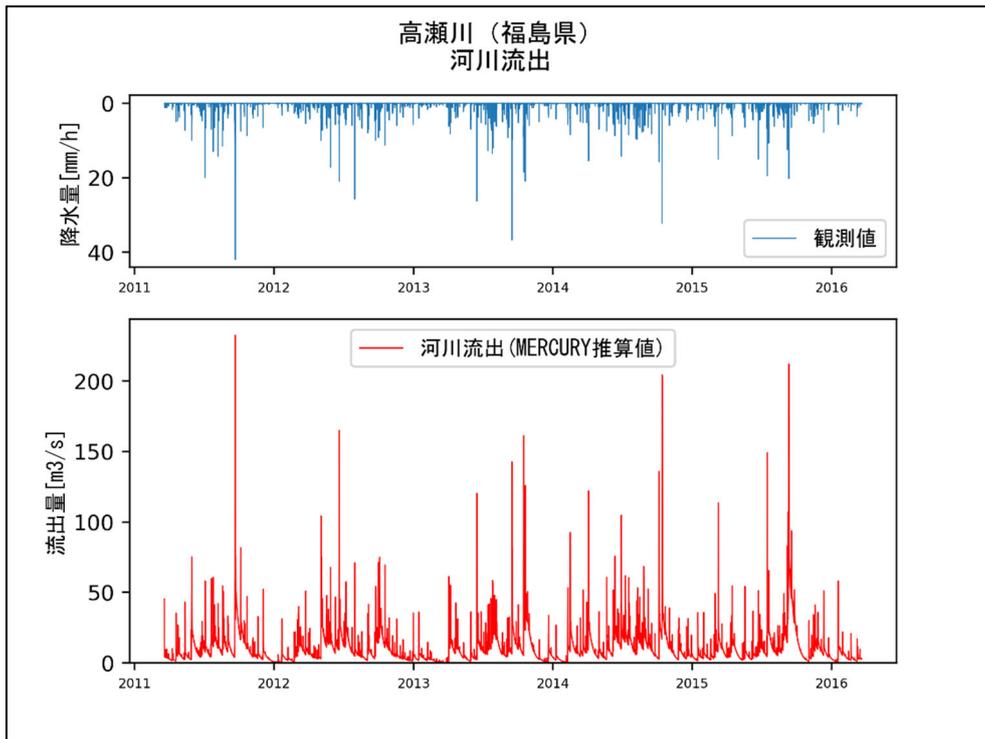


図 3-65 長期推定結果 (高瀬川、河川流出)

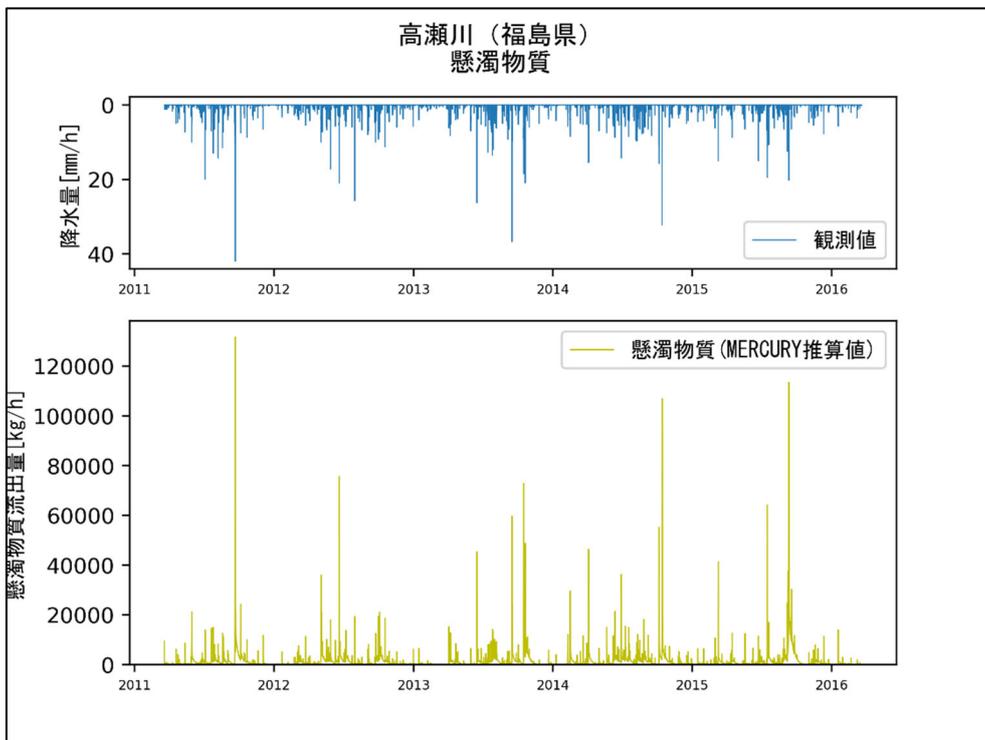


図 3-66 長期推定結果 (高瀬川、懸濁物質)

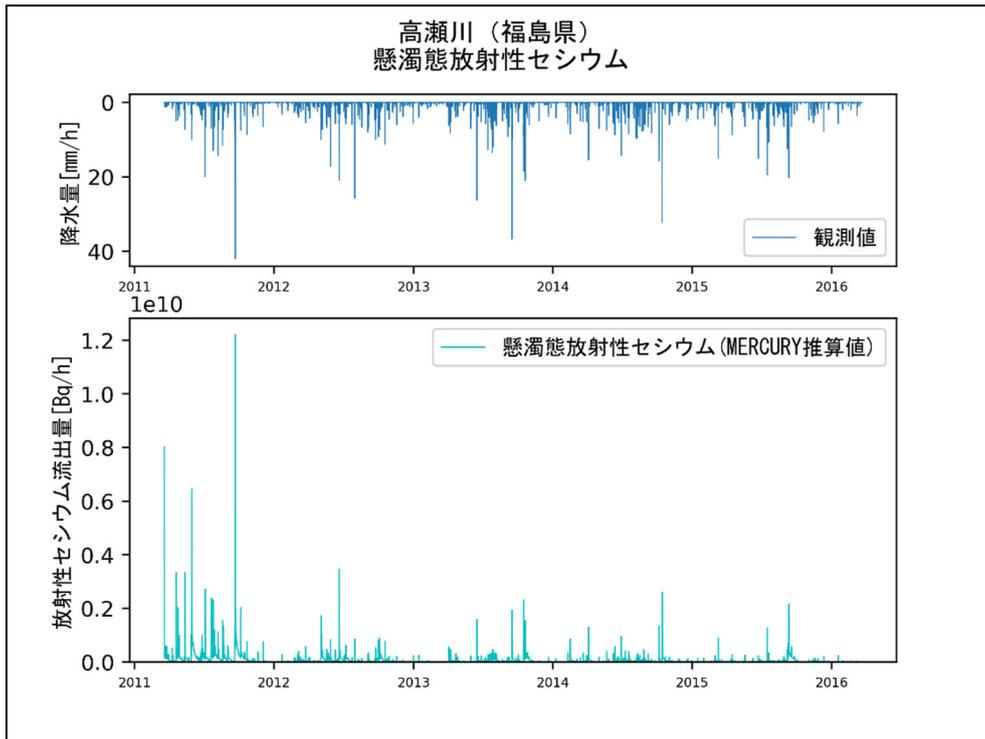


図 3-67 長期推定結果（高瀬川、懸濁態放射性セシウム）

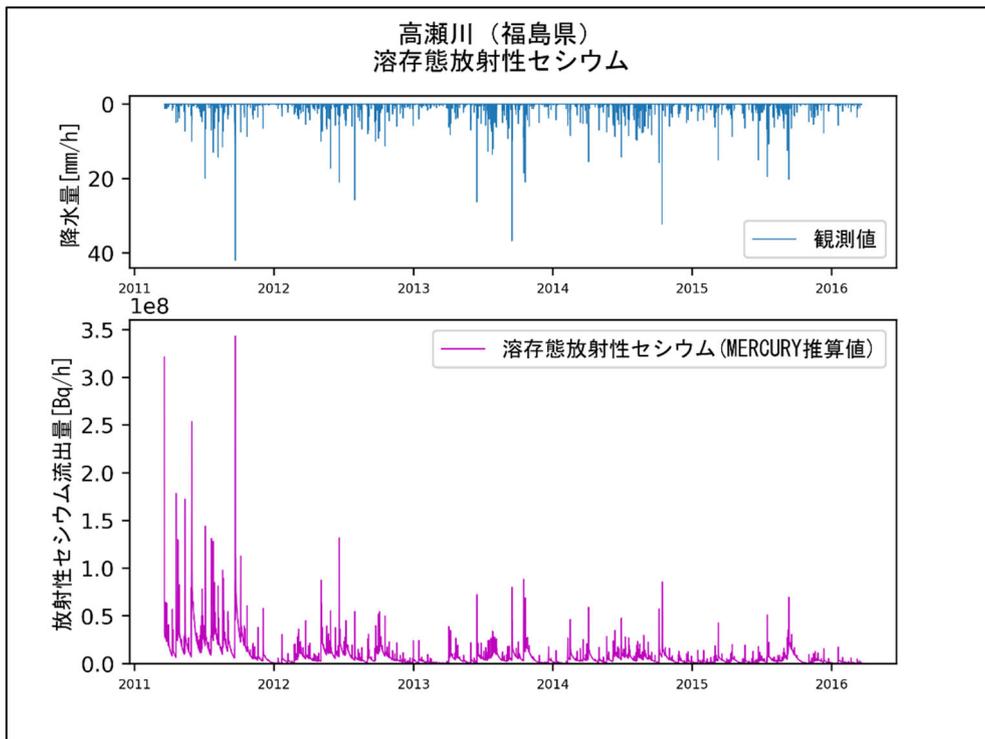


図 3-68 長期推定結果（高瀬川、溶存態放射性セシウム）

No.4 : 請戸川

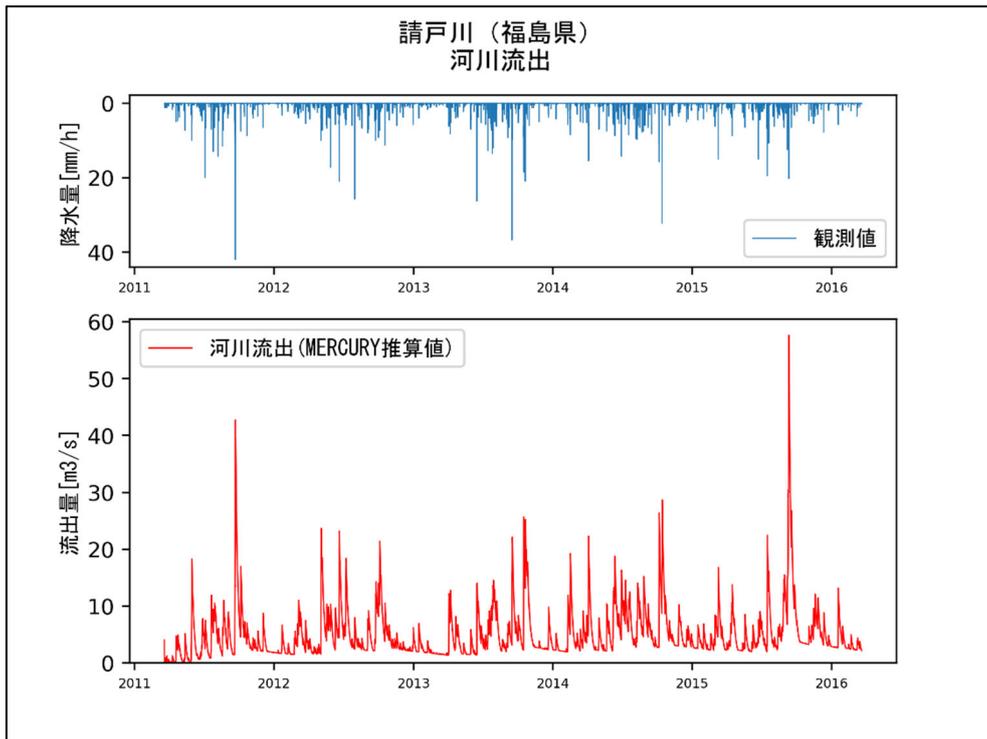


図 3-69 長期推定結果 (請戸川、河川流出)

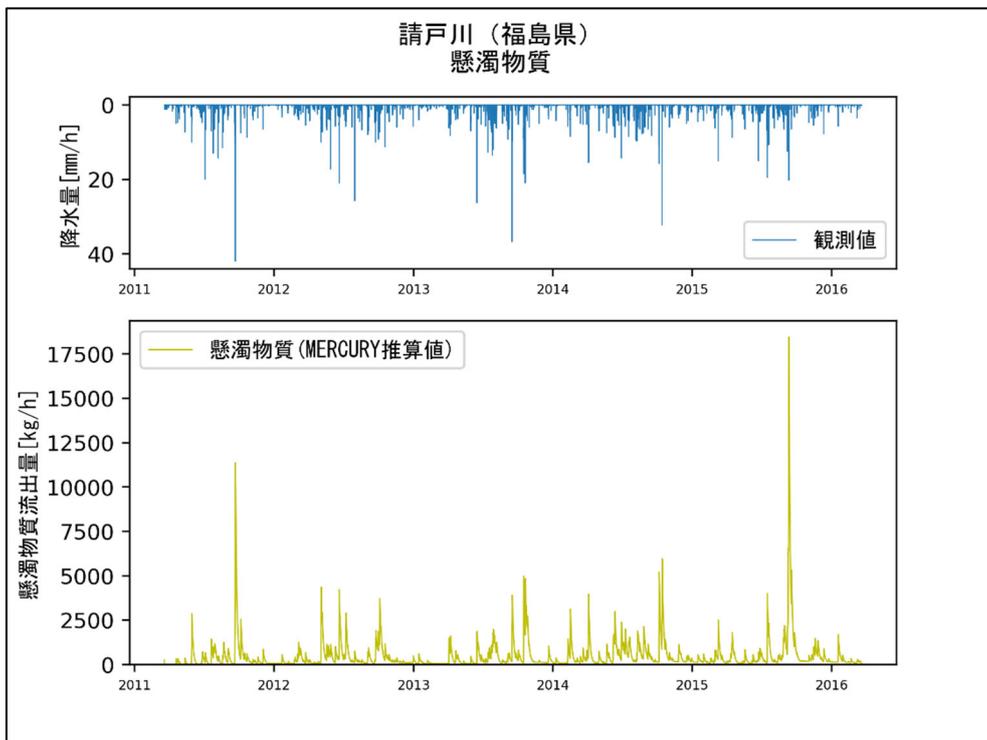


図 3-70 長期推定結果 (請戸川、懸濁物質)

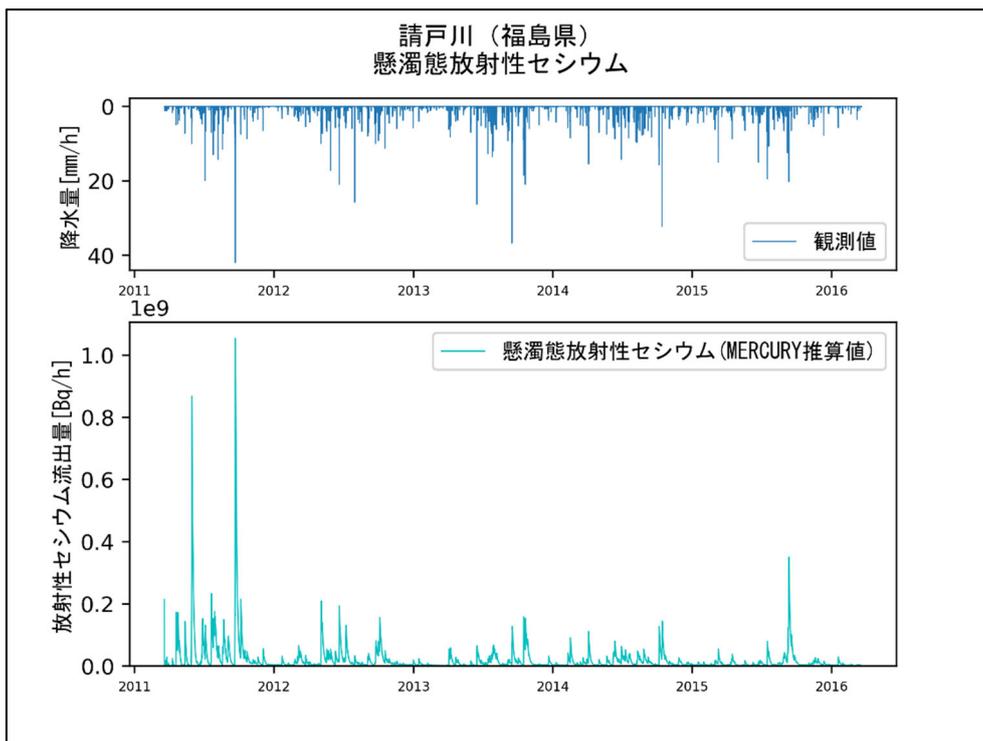


図 3-71 長期推定結果（請戸川、懸濁態放射性セシウム）

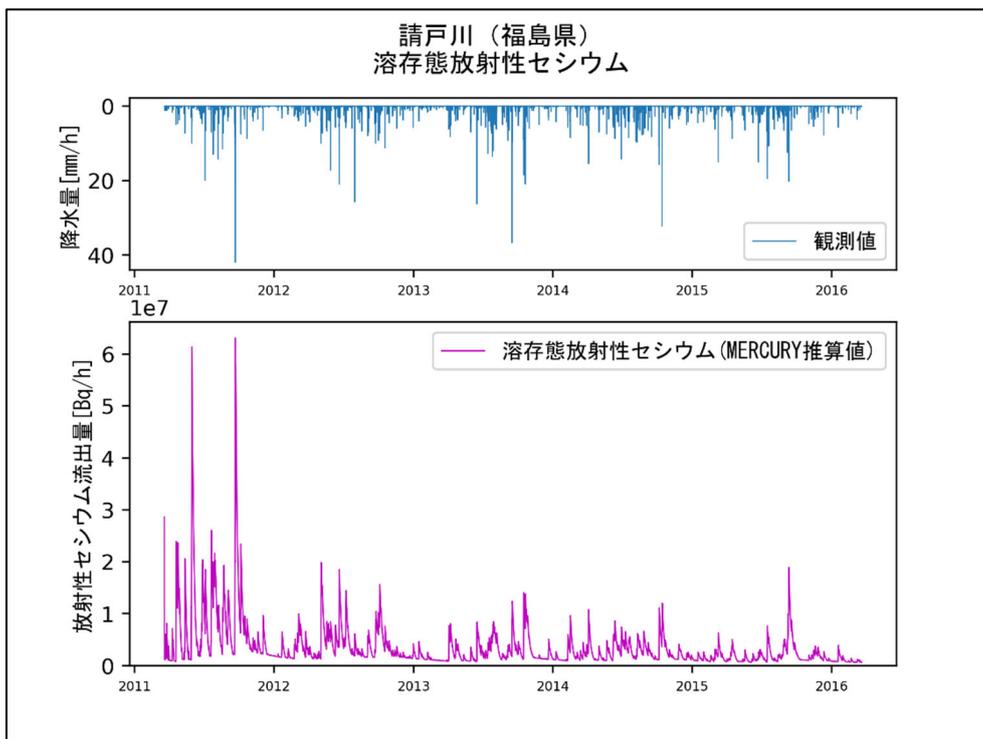


図 3-72 長期推定結果（請戸川、溶存態放射性セシウム）

No.5 : 阿武隈川

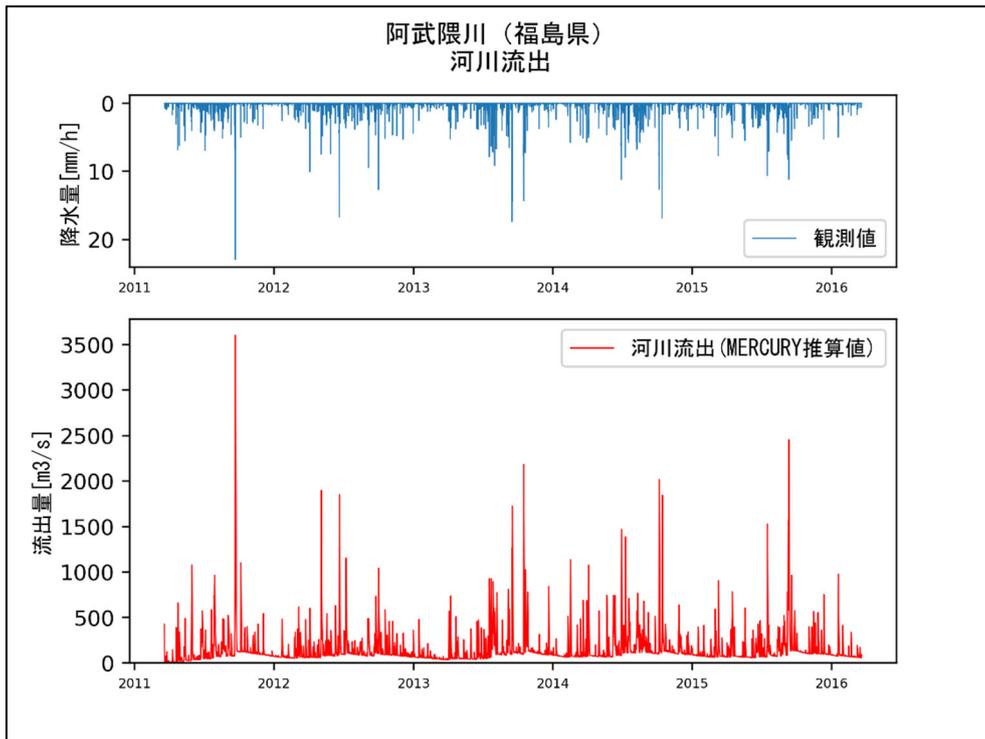


図 3-73 長期推定結果（阿武隈川、河川流出）

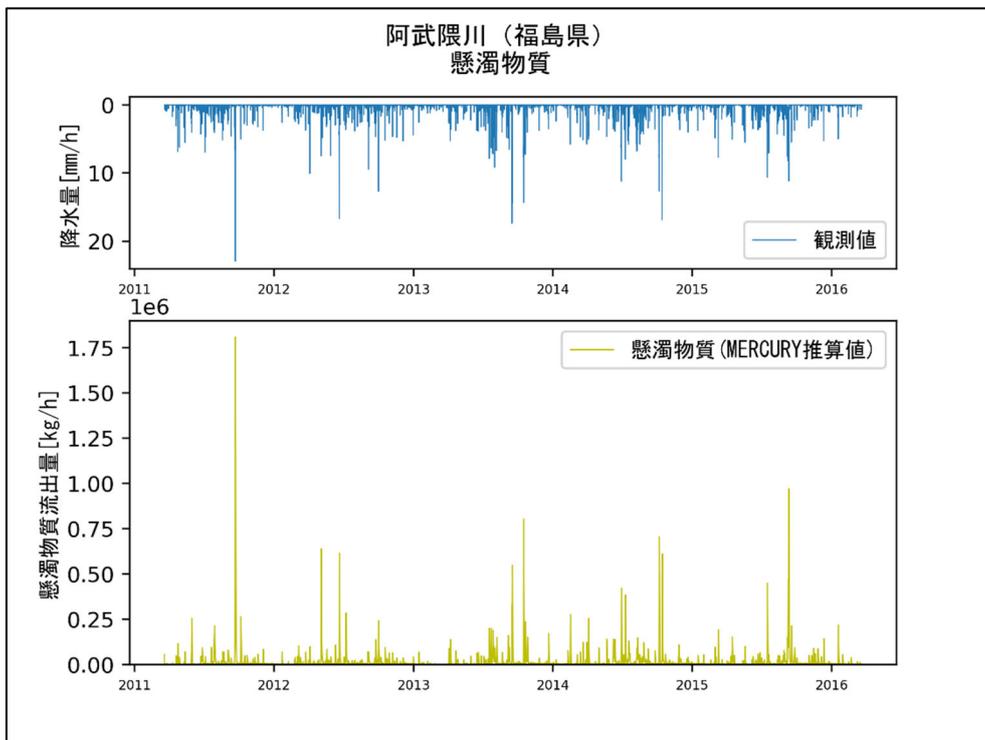


図 3-74 長期推定結果（阿武隈川、懸濁物質）

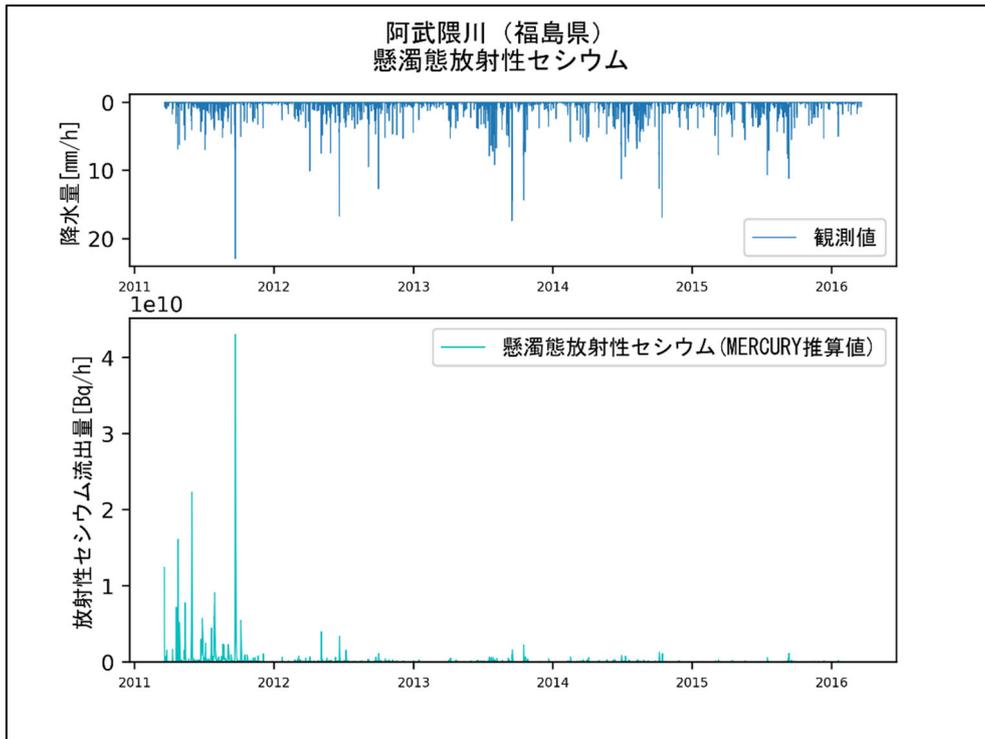


図 3-75 長期推定結果（阿武隈川、懸濁態放射性セシウム）

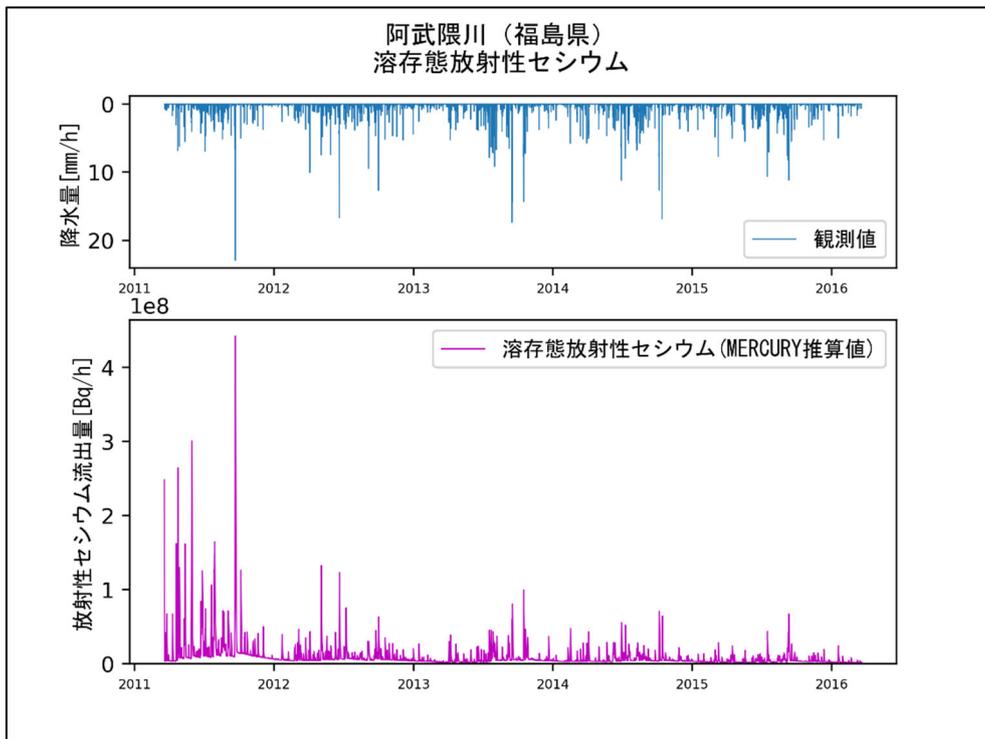


図 3-76 長期推定結果（阿武隈川、溶存態放射性セシウム）

### 3.4 まとめ

本章では、集中定数型モデル MERCURY の整備を、令和 3 年度の課題を基に実施し、機能強化を図った他、福島県の代表 4 河川に対し、試解析を実施し、課題を整理した。

まず、一つ目の機能強化として、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汎化能力の強化を目的とし、日本全国 24 河川を学習データとして、リッジ回帰を用いて重回帰分析を行い、各地理空間情報の面積比を基に MERCURY パラメータ値を求め、福島県の代表 4 河川に適用する試解析を行った。その結果、リッジ回帰のハイパーパラメータ  $\lambda$  に対し、各河川の RSE (誤差) は異なる依存性を示した他、十分な RSE の低減 ( $RSE < 0.4$ ) という目標達成には至らなかったが、 $\lambda = 1.0$  付近に、4 河川共通のパラメータセットが得られることが分かった ( $\lambda = 1.0$  で得られたパラメータと観測値を比較すると、基底流出と降雨時のピーク流出の両者を併せて凡そ再現できる)。従って、得られたパラメータ値を初期条件として、最小限の観測データさえあれば、ニュートン法 (最も計算コストの少ない最適化計算法) を用いて迅速にパラメータをキャリブレーションできることが判明した。

次に、二つ目の機能強化として、観測データを基に自動キャリブレーション機能の強化を図ったが、本事業では、複数 (本事業では 4 つ) の定評ある最適化方法を実装し、観測データを基に、それらの最適化方法を動作させ、最良のパラメータ値を取得するという手法を採択すれば、日本全国の 24 河川において、十分な精度 ( $RSE < 0.4$ ) で流出水量を推定可能であることが分かった。実際、この方法を用いて MERCURY の各パラメータを求めた後、GIS を利用した重回帰計算の結果から、福島県の主要 4 河川にて低計算コストでキャリブレーションした所、およそ十分な精度 ( $RSE < 0.4$ ) が得られることが分かった。

以上の整備により、十分な精度で推定可能な MERCURY のパラメータを取得できたことから、福島県の主要 4 河川に対し、1F 事故後の 5 年間に渡り、流出する水量、懸濁態量、Cs-137 溶存態量、Cs-137 懸濁態量を推定した。これら取得した推定量は、十分な精度の範囲内にあると考えられる。

### 章末補足事項

以下、推定流量と観測流量との誤差評価 (誤差関数) に用いられる NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)、RSE (Relative Squared Error) について、その定義と利用に当たっての注意事項について記す。

#### 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(3-4)によって定義される。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (3-4)$$

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[3-13]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(3-5)で定義される。

$$RSE = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (3-5)$$

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](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 Nanba, Mark Zheleznyak, “A modeling approach to estimate the 137Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017”, Journal of Environmental Radioactivity, 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/](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](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] 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>.
- [3-7] 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/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/20/5/20_5_450/_article/-char/ja/)
- [3-8] 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/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejsp/67/1/67_1_1/_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/](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”, Computer Physics Communications, Volume 278, September 2022, pp.108405, <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108405>
- [3-12] 武川一樹、二瓶泰雄、「日本の河川における浮遊土砂輸送量と流量の相関関係」土木学会論文集

B2 (海岸工学) ,Vol.69, No.2, I\_1221-I\_1225(2013).

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/69/2/69\\_I\\_1221/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/69/2/69_I_1221/_article/-char/ja/)

#### 章末補足参考文献

- [3-13] 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](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejer/72/5/72_I_35/_pdf)

## ■ 4 章 分布定数型流出モデル RADFLOW の整備と試解析

### 4.1 本章の概要

本章にて対象とする陸域モデルは分布定数型流出モデルである。本章では、1F 事故以後、原子力機構が開発した陸域動態コード RADFLOW を整備した後、試解析を行い、発生する課題を整理し報告する。

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、水及び懸濁粒子と放射性物質の動態解析に力点をおいて開発された。物質（水・懸濁粒子）の移動に関しては簡単なモデルを採用しており、改良整備は比較的容易である（詳細は文献[4-1][4-2]参照）。一般に分布流出型モデルの多くは、陸域の特徴を詳細にモデル化し、水及び懸濁粒子の移行に際しては、それらを記述する物理法則を基に構成されるが、その取扱いは簡単ではない場合が多い。一方、RADFLOW は、陸域での水や懸濁態の挙動の本質を抽出し、簡便にそれらを記述するモデルに位置付けられる。

本事業では、上記 RADFLOW の改良整備を目標とし、令和 3 年度当該事業における課題を解決するための整備を行う。その後、福島県の代表 4 河川（請戸川、熊川、前田川、阿武隈川）に対する試解析を実施し、更なる課題を整理し報告する。本事業で実施する整備項目は、主に RADFLOW パラメータの最適化手法の改良となる。まず、対象とする流域に対し、重要な地理空間情報（即ち、流域内にて面積比率の大きい情報）を抽出し、それらと RADFLOW パラメータとの関係を定め、それらのパラメータの最適化を実施する。令和 3 年度の当該事業では、最適化手法としてベイズ最適化を適用したが、計算時間やメモリー等の計算コストが比較的高く、十分な計算を実施することが困難となった。そこで、本事業では、集中定数型モデルで利用し、計算コストが比較的低く実装も簡便な最適化手法として、PSO 法と SCE-UA 法を適用する。

本章の構成は、下記の通りである。4.2 において、現状版の RADFLOW を概説すると共に、対象流域の地理空間情報を基にパラメータである透水係数等を設定する方法と、その後、それらのパラメータを最適化する方法を記し、最適化手法として採用する PSO 法と SCE-UA 法の適用結果について記す。

4.3 では、上記手法により最適化されたパラメータを用いて、福島県の 4 河川に適用し、流出量等を評価する一方、一例として水の移行挙動を可視化し、空間を移行する変化を観察し考察を加えた他、生じた課題を整理する。

### 4.2 分布定数型流出モデル RADFLOW の整備

#### 4.2.1 陸域動態モデル RADFLOW の概要

まず、分布定数型流出モデルである陸域動態コード RADFLOW について、その概要を記す。RADFLOW は、流域内の地表水及び地下水流動を対象とし、水位、水頭、地表水中の浮遊砂濃度（粘土、シルト、砂）、地表水及び地下水中の溶存態 Cs-137 濃度、地表水中の懸濁態 Cs-137 濃度（粘土、シルト、砂）の時間発展を計算対象とする。尚、時空間の離散化手法としては、時間発展はオイラー陽解法を採用し、空間は有限体積法を採用する。空間離散化の方法としては、地表面と地下層を水平方向 2 次元的に非構造格子として分割する。具体的には、流域が図 4-1 のような場合、格子分割は、図 4-2 のように三角形要素で分割する。この三角形要素の重心点を結んで構成される多角形ポリゴンは、有限体積法の計算単位であるコントロールボリュームに対応する。

地下層は複数層を仮定する。その際、支配方程式の時間発展は、層毎に独立し計算され、鉛直方向はそのソース項として、上下層間にてやり取りを行う。

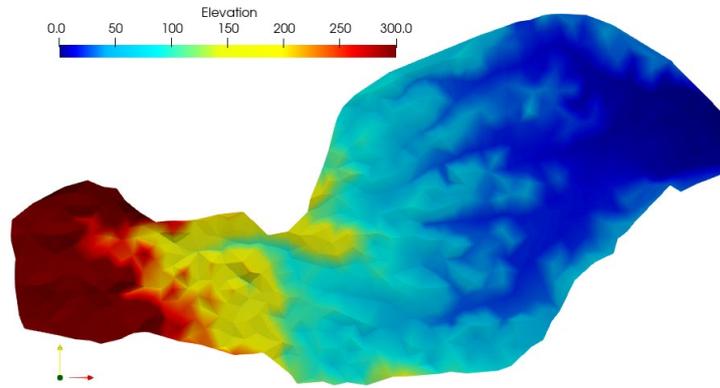


図 4-1 対象流域（水平方向、標高値カラーマップ）

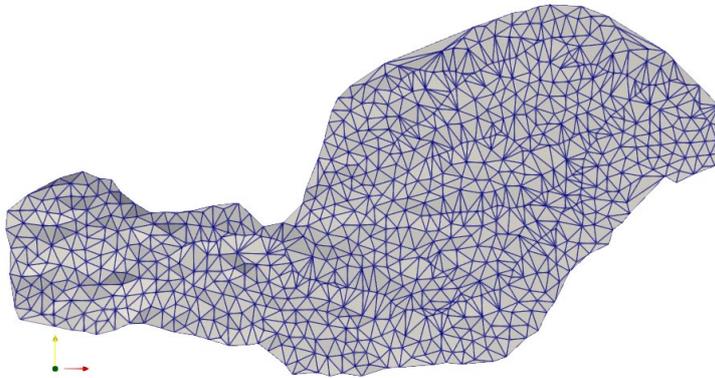


図 4-2 対象流域の三角形分割（水平方向）

地表水及び地下水流動の支配方程式は、式(4-1)として定義される。ただし、水深を $h$ 、流速（地表流、地下水流）を $(u_x, u_y)$ 、ソース項を $q$ とする。 $t$ は時間変数とし、 $x, y$ は空間変数とする。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_x h) + \frac{\partial}{\partial y}(u_y h) = q \quad (4-1)$$

式(4-1)に現れる流速 $\vec{u} = (u_x, u_y)$ については、地表流の場合、式(4-2)のマニング則、地下水流は、式(4-3)のダルシー則により、各々、与えられる。どちらも水面勾配 $\vec{\nabla}H$ に比例する。ただし、変数 $H$ は位置水頭 $z$ と水深 $h$ の和で表される全水頭 $H = z + h$ として定義される。式(4-2)、(4-3)の係数 $N, k$ は、各々、マニング粗度係数、及び透水係数である。

$$\vec{u}_j = \frac{1}{N_j} h_j^{\frac{2}{3}} (\vec{\nabla} H_j)^{\frac{1}{2}} \quad (4-2)$$

$$\vec{u}_j = -k(\vec{\nabla}H_j) \quad (4-3)$$

地表面と各地下層で水平方向 2 次元的に生成される非構造格子を図 4-3 に示す。図の三角形要素の頂点をポイント (node)、ポイントを結ぶ青線をエッジ (edge) と呼び、要素の重心 (face) を結ぶように赤色で囲まれた一つの多角形をポリゴンという。この計算格子上で定義される物理量の一覧を表 4-1 に示す。

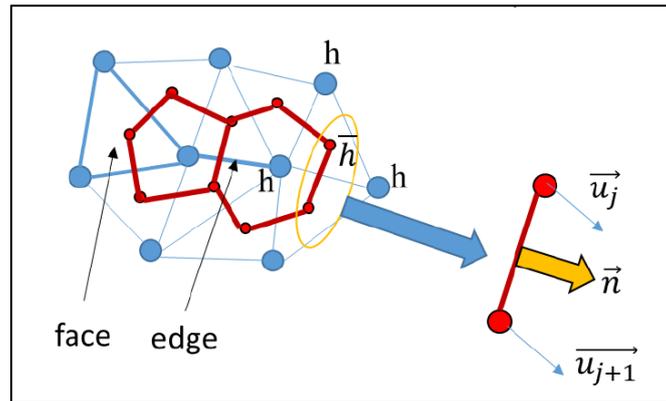


図 4-3 空間の計算格子

表 4-1 計算格子上で定義される物理量 (水平方向)

記号	物理量	定義位置
$h$	水深	ポイント
$\bar{h}$	平均水深	ポリゴン頂点
$u$	流速	ポリゴン頂点
$l$	ポリゴンの境界辺長さ	
$n$	ポリゴン境界辺における外法線ベクトル	
$A$	ポリゴンの面積	
$k$	透水係数	
$N$	マンニングの粗度係数	

以上より、水の流動の支配方程式(4-1)に対する離散化方程式は、次の式(4-4)で与えられる。

$$h_i(t + \Delta t) = h_i(t) + \Delta t \left( -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^m \left( \frac{u_j \bar{h}_j + u_{j+1} \bar{h}_{j+1}}{2} \right) n_j l_j + (\lambda_{i,s} r_{i,s} - \lambda_{i,s+1} f_{i,s+1}) \right) \quad (4-4)$$

ここで、 $r_{i,s}$ と $f_{i,s+1}$ は、各々、上層からの浸透速度と下層への浸透速度を意味する。また、 $\lambda_{i,s}$ と $\lambda_{i,s+1}$ は自分の層の間隙率と一つ下の層の間隙率を意味する。それぞれの変数の役割については模式図を図 4-4

に示した。尚、鉛直方向の水の移動に関わる物理量の一覧を表 4-2 に示した。

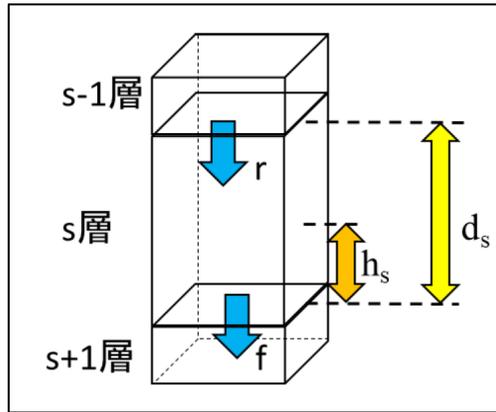


図 4-4 鉛直方向の水の移動

表 4-2 計算格子上で定義される物理量（鉛直方向）

記号	単位	物理量	備考
$h_{i,s}(=h_i)$	m	層の水深	
$d_s$	m	層の厚さ	$h_s > d_s$ のときは溢れた分の水を上層に移動する。
$r_{i,s}$	m/s	上層からの浸透速度	地表層では降雨を意味する
$f_{i,s}$	m/s	下層への浸透速度	
$\lambda_{i,s}$	-	間隙率	

※添え字"i,s"は、「s層のi節点」という空間位置を意味する。

次に、水の流動によって輸送される浮遊砂濃度の輸送方程式（離散化方程式）を式(4-5)に示す。粒径毎（粘土、シルト、砂）に、下記離散化方程式を解くことで、各々の移行挙動が追跡可能となる。また、浮遊砂濃度の計算に関わる物理量の一覧を表 4-3 に示す。

$$\begin{aligned}
 R_i^{SS}(t + \Delta t)h_i(t + \Delta t) &= R_i^{SS}(t)h_i(t) \\
 &+ \Delta t \left( -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^m \left( \frac{\overline{R_j^{SS}}u_j\bar{h}_j + \overline{R_{j+1}^{SS}}u_{j+1}\bar{h}_{j+1}}{2} \right) n_j l_j \right) \\
 &+ \Delta t (E_i(1 - \lambda_{i,s=1}) - D_i)
 \end{aligned} \tag{4-5}$$

表 4-3 浮遊砂濃度

記号	単位	物理量	定義位置
$R_{i,s}^{SS}(=R_i^{SS})$	kg/m <sup>3</sup>	浮遊砂濃度	ポイント
$\overline{R_{j,s}^{SS}}(=\overline{R_j^{SS}})$	kg/m <sup>3</sup>	浮遊砂濃度の空間平均	ポリゴン頂点
$E_i$	kg/m <sup>2</sup> /s	ポリゴン内で生成される浸食量	
$D_i$	kg/m <sup>2</sup> /s	堆積量	

放射性物質（放射性セシウム）についても、浮遊砂濃度と同様の考え方で計算が可能となる。但し、放射性セシウムは、2種類（溶存態及び懸濁態）の状態に移行するため、溶存態濃度と懸濁態濃度を定義し、上記離散方程式を解くことで移行挙動が、各々、追跡可能となる。尚、放射性セシウムは、一定の分配係数により溶存態及び懸濁態間にて平衡状態となる他、その非平衡状態については、平衡に達する時定数を導入することで、その分配の時間変化が記述される。RADFLOWでは、上記概念に従い、以下の二つの様態の移行挙動を追跡可能としてある（吸脱着については単純化してある）。

- 溶存態放射性セシウム
- 懸濁態放射性セシウム

溶存態放射性セシウム濃度（地表と地中2層、 $s = 0,1,2$ ）については、式(4-6)の輸送方程式によって時間発展する。

$$\begin{aligned}
 R_i^{cw}(t + \Delta t)h_i(t + \Delta t) &= R_i^{cw}(t)h_i(t) \\
 &+ \Delta t \left( -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^m \left( \frac{\overline{R}_j^{cw} u_j \bar{h}_j + \overline{R}_{j+1}^{cw} u_{j+1} \bar{h}_{j+1}}{2} \right) n_j l_j \right) \\
 &+ \Delta t \left( -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^m \left( D^{cw} \frac{\nabla R_j^{cw} \bar{h}_j + \nabla R_{j+1}^{cw} \bar{h}_{j+1}}{2} \right) n_j l_j \right) \\
 &+ \Delta t (q_i^{cw} - \lambda^{dec} R_i^{cw}(t)h_i(t) - m_i)
 \end{aligned} \tag{4-6}$$

懸濁態放射性セシウム（地表、 $s = 0$ ）は、式(4-7)の輸送方程式によって時間発展する。

$$\begin{aligned}
 R_i^{cs}(t + \Delta t)R_i^{ss}(t + \Delta t)h_i(t + \Delta t) &= R_i^{cs}(t)R_i^{ss}(t)h_i(t) \\
 &+ \Delta t \left( -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^m \left( \frac{\overline{R}^{cs} \overline{R}^{ss}_j u_j \bar{h}_j + \overline{R}^{cs} \overline{R}^{ss}_{j+1} u_{j+1} \bar{h}_{j+1}}{2} \right) n_j l_j \right) \\
 &+ \Delta t (\lambda^{dec} R_i^{cs}(t)R_i^{ss}(t)h_i(t) + m_{i,s=0}) \\
 &+ \Delta t \{E_i(1 - \lambda_{i,s=1})R_{i,s=1}^{cs}(t) - D_i R_{i,s=0}^{cs}(t)\}
 \end{aligned} \tag{4-7}$$

また、放射性セシウムの計算に関わる物理量の一覧を表 4-4 と表 4-5 に示す。

表 4-4 溶存態放射性セシウム

記号	単位	物理量	定義位置
$R_{i,s}^{cw} (= R_i^{cw})$	Bq/m <sup>3</sup>	溶存態放射性セシウム濃度	ポイント
$\overline{R}_{j,s}^{cw} (= \overline{R}_j^{cw})$	Bq/m <sup>3</sup>	溶存態放射性セシウム濃度の空間平均	ポリゴン頂点
$D^{cw}$	m <sup>2</sup> /s	拡散係数	
$q_{i,s}^{cw} (= q_i^{cw})$	Bq/m <sup>2</sup> /s	単位面積当たりの放射性セシウム濃度の鉛直移行速度	
$\lambda^{dec}$	1/s	放射性セシウムの崩壊定数	
$m_{i,s} (= m_i)$	Bq/m <sup>2</sup> /s	吸脱着反応量	

表 4-5 懸濁態放射性セシウム

記号	単位	物理量	定義位置
$R_{i,s}^{cs} (= R_i^{cs})$	Bq/kg	懸濁態放射性セシウム濃度	ポイント
$\overline{R}_{j,s}^{cs} (= \overline{R}_j^{cs})$	Bq/kg	懸濁態放射性セシウム濃度の空間平均	ポリゴン頂点
$\lambda^{dec}$	1/s	放射性セシウムの崩壊定数 (表 4-4 と同じ)	
$E_i$	kg/m <sup>2</sup> /s	ポリゴン内で生成される浸食量 (表 4-3 と同じ)	
$D_i$	kg/m <sup>2</sup> /s	堆積量 (表 4-3 と同じ)	
$m_{i,s} (= m_i)$	Bq/m <sup>2</sup> /s	吸脱着反応量 (表 4-4 と同じ)	

#### 4.2.2 地理空間情報による透水係数の設定

陸域動態モデル RADFLOW は、降雨により地下に浸透する地下水の流動を計算する。その際、必須なパラメータである透水係数（間隙率及び粗度係数）に対し、地点毎に公開されている地理空間情報を基に、既に作成されているテーブルデータを参照することで、おおよそのパラメータが決定可能となる。対象となる地理空間情報は、以下の3種（土地利用図、土壌図、表層地質図）となる。地理空間情報の取得方法やそれらの加工方法の詳細は、令和3年度当該事業報告書の付録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には、地理空間情報を取り扱うGISに関する基礎概念を簡単にまとめている。

- ・土地利用図（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）

なお、RADFLOW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、表層および地下1～2層については土地利用図、3～5層は土壌図、6～9層（それ以降の下層）については、表層地質図を基に透水係数等を適切に設定する必要がある。以下、その設定の詳細について説明する。

まず、各計算点で地理空間情報として、3種類（土地利用、土壌、表層地質）の属性値が割り振られる。具体例として図4-5右図で示した一つの格子点を指定した場合、土地利用の属性値として「草地」、土壌の属性値として「花崗岩類」、表層地質の属性値として「褐色森林土」が割り振られる。その結果を基に地理空間情報の属性値に応じてRADFLOWのモデルパラメータの値が決定される。ここで、RADFLOWのモデルパラメータとは、表4-1と表4-2にある透水係数、粗度係数、間隙率である。

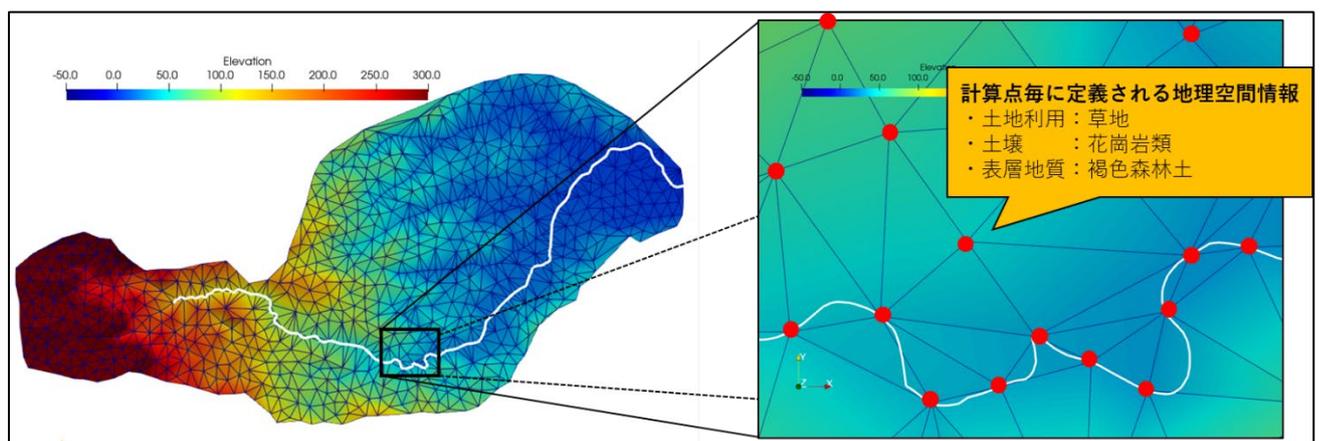


図 4-5 計算点毎に定義される地理空間情報（土地利用、土壌、表層地質）

なお、テーブルデータの属性値一覧とそれに対応するRADFLOWのモデルパラメータ値については、文献等を参考に設定される（詳細は[4-3]～[4-8]参照：これらのデータ値は初期パラメータ値となり、キャリブレーションにより変更される）。また、具体的なテーブルデータは表4-7～表4-9の通りとなる。テーブルデータは3種類あるが、層の位置ごとにモデルパラメータの値を参照するテーブルを表4-6の

ように切り替える。その模式図を図 4-6 に示した。

表 4-6 地理空間情報とモデルパラメータの対応テーブル

層	参照先の地理空間情報テーブル	テーブルから取得するモデルパラメータ	備考
表層	土地利用データ	透水係数 $k$ 、マニング粗度係数 $N$	表 4-1
地下 1~2 層	土地利用データ	透水係数 $k$ 、間隙率 $\lambda$	表 4-1、表 4-2
地下 3~5 層	土壌データ	透水係数 $k$ 、間隙率 $\lambda$	表 4-1、表 4-2
地下 6~層	表層地質データ	透水係数 $k$ 、間隙率 $\lambda$	表 4-1、表 4-2

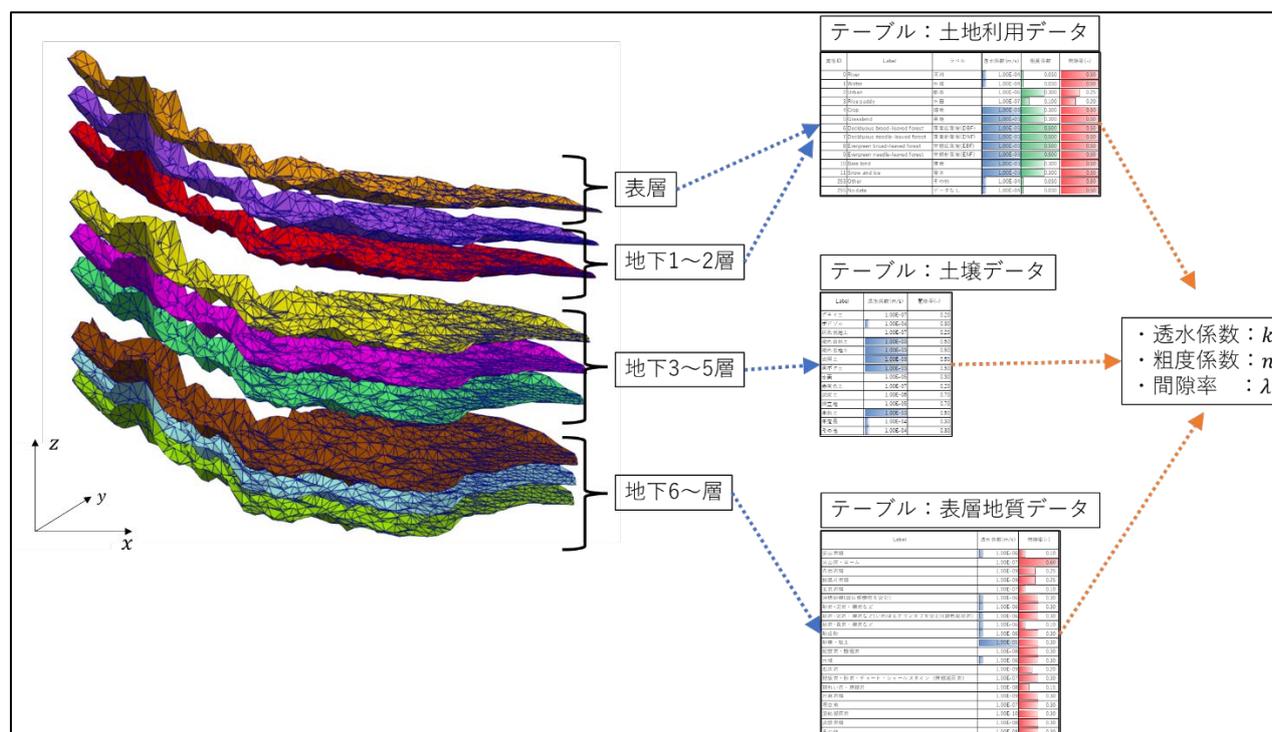


図 4-6 地理空間情報（土地利用、土壌、表層地質）からモデルパラメータの参照イメージ

表 4-7 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 4-8 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 4-9 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

### 4.2.3 最適化による透水係数のキャリブレーション

上記テーブルデータの値を初期値とし、対象流域に対し、データをキャリブレーションする機能が必要となる。実際にキャリブレーションする際、今年度は PSO 法と SCE-UA 法を採用し実装した。これは、令和 3 年度当該事業において、ベイズ最適化の適用を計画し、Python の多目的ベイズ最適化ライブラリ「PHYSBO」を利用したが、メモリーや計算量が大きく、十分な最適化効果を得ることができなかったためである。PSO 法と SCE-UA 法については、既に MERCURY において適用済みであり、優れた計算性能を示すことを確認しており、計算コストの課題を解決する際、採用すべき方法と位置付けられる。尚、PSO 法、SCE-UA 法のアルゴリズムの詳細は、3 章にて詳述済みである（3.2.2 を参照）。

## 4.3 分布定数型流出モデルの試解析（降水イベント：前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）

上記 4.2 節において記した最適化手法（PSO 法及び SCE-UA 法）を用いて、福島県における河川（前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）に対し、試解析を実施する。尚、試解析は、単一及び複数の降水イベントでのキャリブレーションを行った後、パラメータを限定して行う。

### 4.3.1 最適化手法の適用

#### ① 概要

RADFLOW では、対象流域ごとの地理空間情報（土地利用、土壌、表層地質）の分布に応じて、各計算点における RADFLOW のモデルパラメータ（透水係数、粗度係数、間隙率）を設定する。その際、地理空間情報の属性とモデルパラメータの対応関係を与えるテーブルデータを基準値として使用する（4.2 参照）。RADFLOW のキャリブレーション機能として実装する最適化手法（PSO 法と SCE-UA 法）は、このテーブルデータの情報を調整する（書き換える）ことで、RADFLOW 計算値（流量）を観測値に適合させる。このテーブルデータの基準値一覧を 4.3.1.② に示す。尚、テーブルデータのモデルパラメータを調整する際の調整範囲については、4.3.1.③ の表 4-16 に示した（大きな逸脱が起こらないようにするため）。

テーブルデータに含まれる RADFLOW のモデルパラメータの総数は 106 個である。その内訳は表 4-10 に示す通りだが、最適化の際、これらのパラメータ全てを最適化対象として調整することは困難である。従って、地理空間情報（土地利用、土壌、表層地質）の分布において、各々のデータ属性の分布比率を基に対象を絞りこむ。尚、上記分布比率は、4.3.1.④（図 4-7～図 4-9）に示す通り、対象流域ごとに異なる等、特徴がある。従って、面積比率が大きいデータ属性に対応する RADFLOW モデルパラメータを変更すれば、河川の流出量への影響が大きいと考えられる。反対に、面積比率が仮に 0.0% の属性に対応するモデルパラメータを変更しても、河川の流出量は変化しないと考えられる。こうして、各々の対象河川ごとに地理空間情報（土地利用、土壌、表層地質）の面積比率を決定し、面積比率が十分に大きいデータ属性に対し、対応するモデルパラメータを各最適化手法（PSO 法と SCE-UA 法）によってキャリブレーションする。尚、河川毎に地理空間情報のデータ属性に関する面積比率の詳細を付録の 4.6.3 に示した。

表 4-10 パラメータの総数

地理空間情報	属性の個数	属性に対応するモデルパラメータ	
		個数	種類
土地利用	14	3	透水係数、粗度係数、間隙率
土壌	14	2	透水係数、間隙率
表層地質	18	2	透水係数、間隙率

PSO 法と SCE-UA 法の詳細は、3 章に記載済みだが、各々のアルゴリズムで設定するハイパーパラメータのリストを表 4-11 と表 4-12 に列挙した。

表 4-11 PSO 法のハイパーパラメータ

記号	値	役割
$n$	--	探索空間の次元
$m$	5 or 100	粒子数
$w$	0.9	粒子の慣性パラメータ
$c_1$	2.0	自身の既往最良位置に戻ろうとする強度パラメータ
$c_2$	2.0	群の最良位置に近づこうとする強度パラメータ

表 4-12 SCE-UA 法のハイパーパラメータ

記号	値	役割
$n$	--	探索空間の次元
$p$	1 or 2	集団の個数
$m$	$2n + 1$	各集団の点（粒子）の個数
$q$	$n + 1$	CCE アルゴリズムで使用

※参考文献では集団の個数 $p$ の推奨値は 20 であるが、計算コストの節約のために今回は $p = 1 \text{ or } 2$ とした。

② パラメータの基準値

表 4-13 土地利用データの基準値

土地利用データ				
属性 ID	ラベル	透水係数(m/s)	粗度係数	間隙率(-)
0	河川	1.0000E-04	0.0300	0.5000
1	水域	1.0000E-04	0.0300	0.5000
2	都市	1.0000E-06	0.3000	0.2500
3	水田	1.0000E-07	0.1000	0.2000
4	畑地	1.0000E-03	0.3000	0.5000
5	草地	1.0000E-03	0.3000	0.5000
6	落葉広葉樹(DBF)	1.0000E-03	0.5000	0.5000
7	落葉針葉樹(DNF)	1.0000E-03	0.5000	0.5000
8	常緑広葉樹(EBF)	1.0000E-03	0.5000	0.5000
9	常緑針葉樹(ENF)	1.0000E-03	0.5000	0.5000
10	裸地	1.0000E-03	0.3000	0.5000
11	雪氷	1.0000E-03	0.3000	0.5000
253	その他	1.0000E-04	0.0300	0.5000
255	データなし	1.0000E-04	0.0300	0.5000

表 4-14 土壌データの基準値

土壌データ		
属性ラベル	透水係数(m/s)	間隙率(-)
グライ土	1.0000E-07	0.2000
ポドゾル	1.0000E-04	0.3000
灰色低地土	1.0000E-07	0.2000
褐色森林土	1.0000E-03	0.5000
褐色低地土	1.0000E-03	0.5000
岩屑土	1.0000E-03	0.5000
黒ボク土	1.0000E-03	0.5000
水面	1.0000E-05	0.3000
赤黄色土	1.0000E-07	0.2000
泥炭土	1.0000E-05	0.7000
埋立地	1.0000E-05	0.7000
未熟土	1.0000E-03	0.5000
未定義	1.0000E-04	0.3000
その他	1.0000E-04	0.3000

表 4-15 表層地質データの基準値

表層地質データ		
属性ラベル	透水係数(m/s)	間隙率(-)
安山岩類	1.0000E-06	0.1000
火山灰・ローム	1.0000E-07	0.6000
花崗岩類	1.0000E-09	0.2500
結晶片岩類	1.0000E-09	0.2500
玄武岩類	1.0000E-07	0.1000
洪積砂礫(段丘堆積物を含む)	1.0000E-06	0.3000
砂岩・泥岩・礫岩など	1.0000E-06	0.3000
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)	1.0000E-06	0.3000
砂岩・頁岩・礫岩など	1.0000E-06	0.1000
砂丘砂	1.0000E-06	0.3000
砂礫・粘土	1.0000E-05	0.3000
蛇紋岩・橄欖岩	1.0000E-08	0.3000
水域	1.0000E-06	0.3000
石灰岩	1.0000E-09	0.2000
粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩)	1.0000E-07	0.3000
斑れい岩・輝緑岩	1.0000E-08	0.1500
片麻岩類	1.0000E-09	0.3000
埋立地	1.0000E-07	0.3000
溶結凝灰岩	1.0000E-10	0.3000
流紋岩類	1.0000E-08	0.3000
その他	1.0000E-08	0.3000

③ パラメータの調整範囲

表 4-16 パラメータの調整範囲(下限と上限)

データ	パラメータ	調整範囲	
		下限	上限
土地利用データ	透水係数(m/s)	1.0000E-07	1.0000E-03
	粗度係数	0.02	0.5
	間隙率(-)	0.2	0.7
土壌データ	透水係数(m/s)	1.0000E-07	1.0000E-03
	間隙率(-)	0.2	0.7
表層地質データ	透水係数(m/s)	1.0000E-09	1.0000E-05
	間隙率(-)	0.2	0.7

④ 調整するパラメータと地理空間情報の面積比率

④-1 土地利用データの面積比率

福島県における4河川（前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）について、土地利用データに関する属性の面積比率を図4-7に示す（面積比率の内訳の詳細は付録の4.6.3参照）。

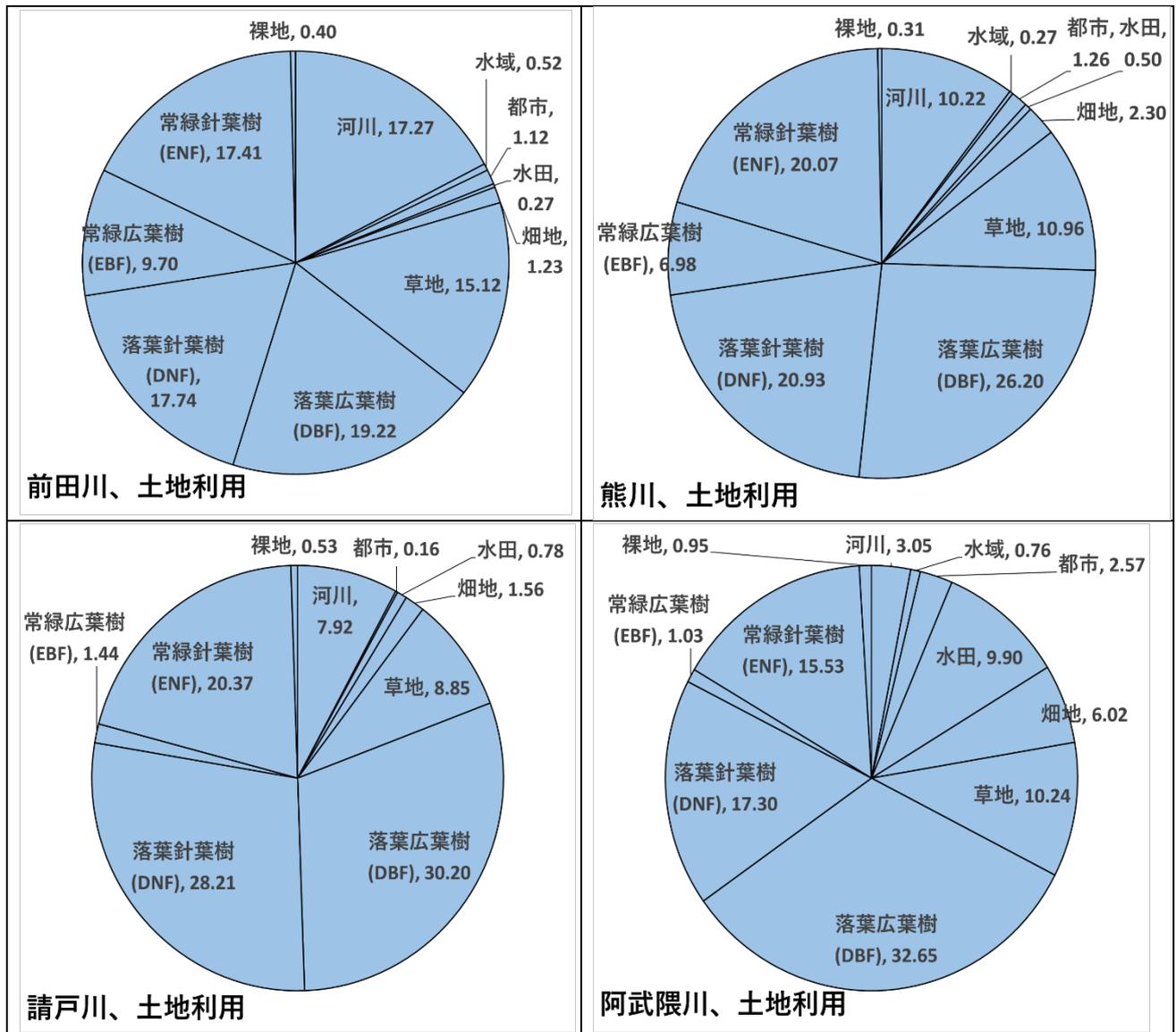


図 4-7 土地利用データの面積比率

#### ④-2 土壌データの面積比率

福島県における4河川（前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）について、土壌データに関する属性の面積比率を図4-8に示す（面積比率の内訳の詳細については、付録の4.6.3参照）。

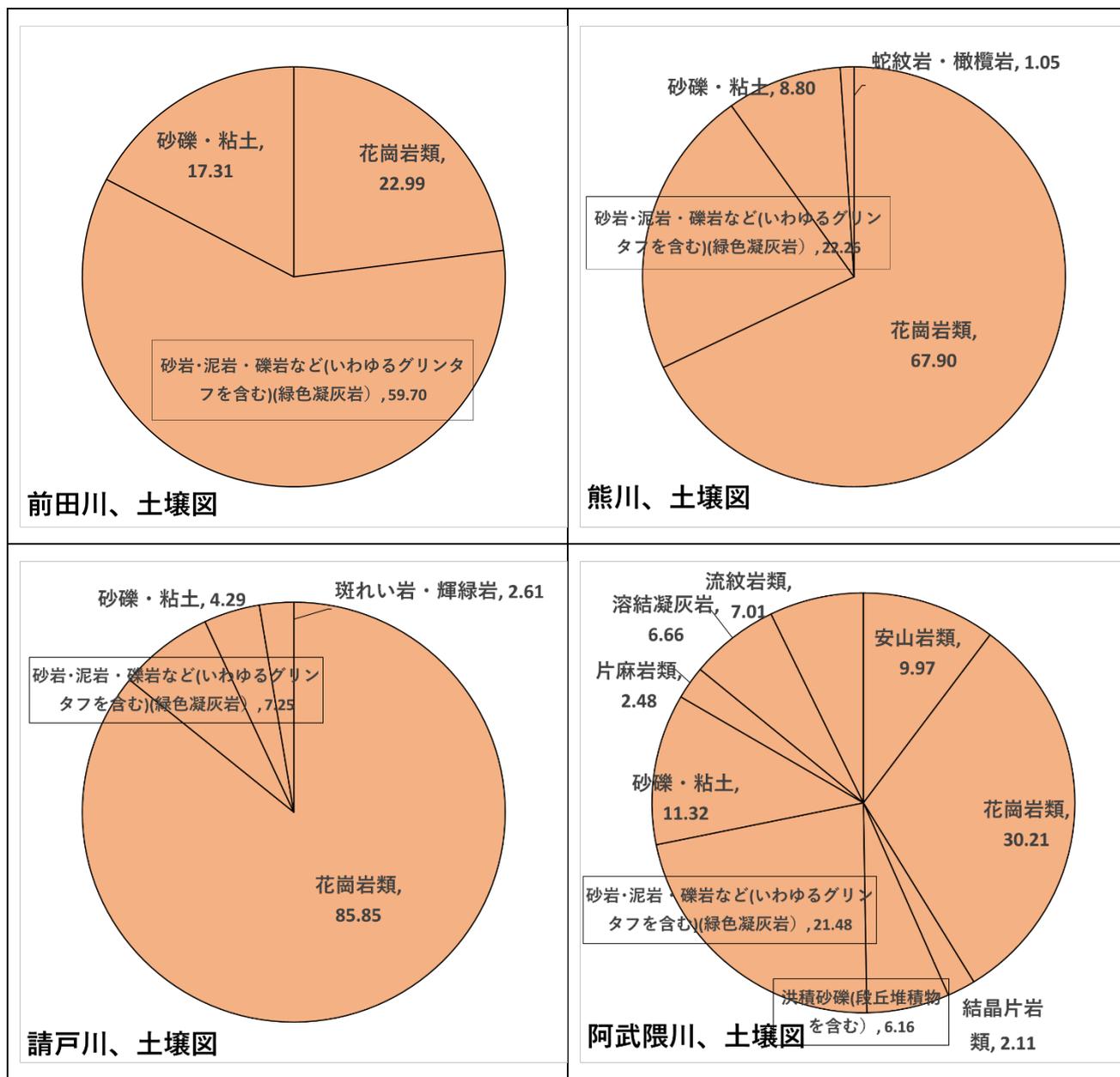


図 4-8 土壌データの面積比率

#### ④-3 表層地質データの面積比率

福島県における4河川（前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）について、表層地質データに関する属性の面積比率を図4-9に示す（面積比率の内訳の詳細は、付録の4.6.3参照）。

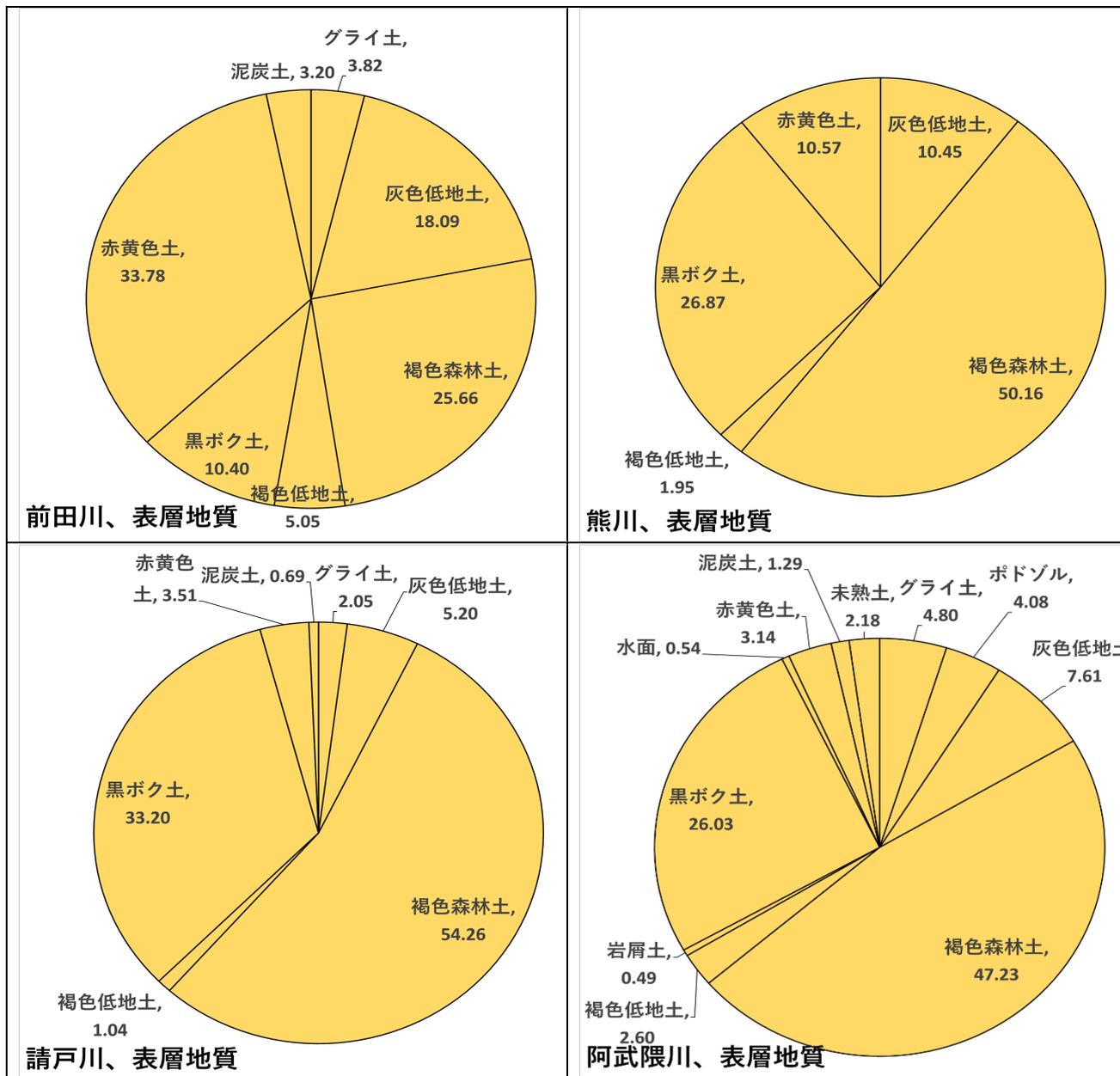


図 4-9 表層地質データの面積比率

### 4.3.2 対象河川

パラメータキャリブレーションの対象となる4河川（前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）の地図上での位置を図4-10と図4-11に示す。また、河川ごとの流域面積と河川水流出量のモニタリング地点の位置情報を表4-17に示す。尚、高瀬川と請戸川は、下流にて合流する（図4.10及び図4.11参照）ことから、まとめて一つの河川として扱い解析を実施する。その際、河川水の流出量については、それぞれの観測地点で得た流出量の合計値に対して最適化の評価を行う。以後、上記のように一つにまとめた河川を「請戸川」と呼称する。各河川の標高データおよび計算格子の可視化図は付録4.6.1に記した。流出量の観測地点の位置も可視化図に示す。

表 4-17 流量観測所位置

番号	河川	流域面積 (km <sup>2</sup> )	流出量観測位置		
			緯度	経度	名称
1	前田川	21.0	37.4394	141.0003	—
2	熊川	63.9	37.3841	141.0270	—
3	高瀬川	238.6	37.4856	140.9980	—
	請戸川	148.7	37.4975	141.0016	—
4	阿武隈川	4500.8	38.0296	140.8081	江尻観測所（水文水質観測所）

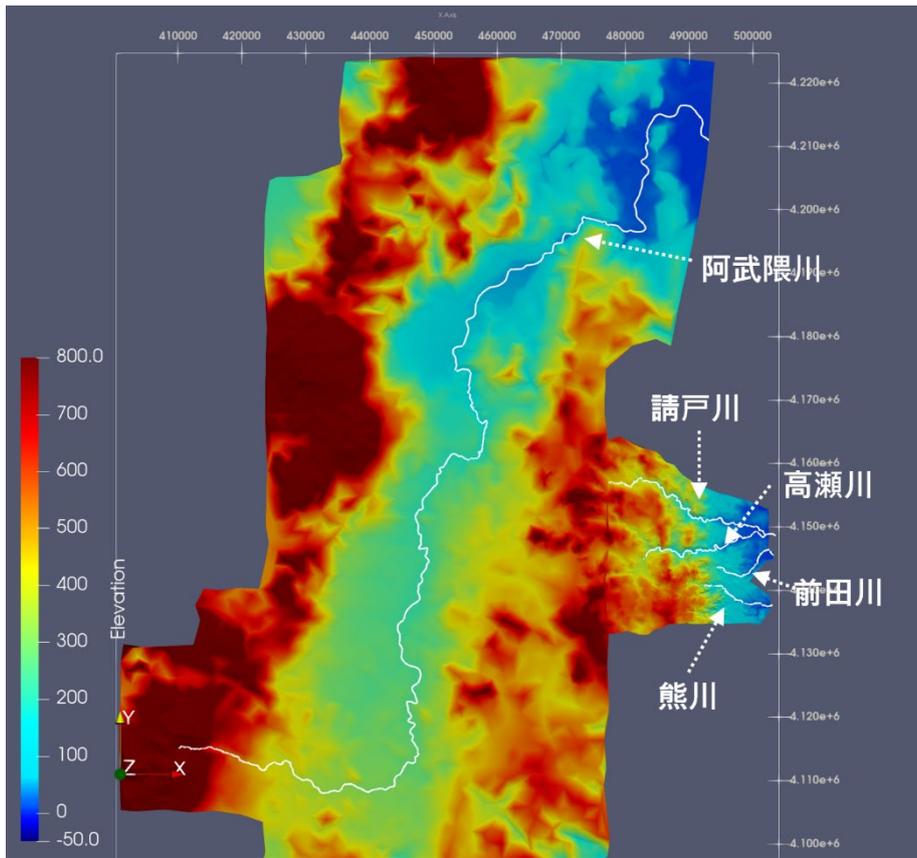


図 4-10 福島県内の対象河川①

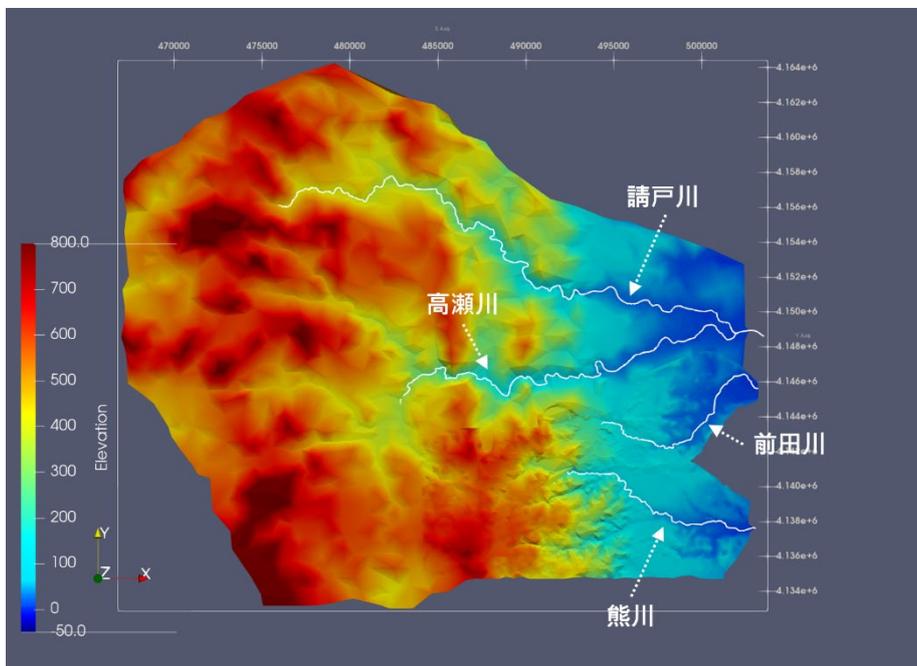


図 4-11 福島県内の対象河川②

### 4.3.3 試解析①：単一の降水イベント期間でのキャリブレーション

本項では、単一の降水イベント期間における、RADFLOW モデルパラメータのキャリブレーションについて試解析を行いその結果についてまとめる。通常は、複数の降水イベントに対し、キャリブレーションするが計算コストがかかるため、本報告では単一の期間とした（それによる課題については後述）。

#### ① 計算条件

河川ごとの計算期間及び RADFLOW の時間刻みと計算ステップ数の一覧を表 4-18 に示す。キャリブレーションにおいて、PSO 法と SCE-UA 法の最適化効果を得るには、多量の計算試行回数が必要となることが想定される。従って、一回の試行に要する計算コストを節約するために、計算期間は降雨イベントを含む 2～3 日間の長さとした（実際の適用においては、十分長期の計算期間を設けることが望ましい。本報告では、次項に示す複数の降雨イベントに対するキャリブレーションと比較する）。

表 4-18 計算期間

	対象期間	計算期間	時間刻み	計算ステップ
前田川	開始：2014年10月5日 3:00 終了：2014年10月7日 15:00	60 hour	$\Delta t = 20.0 \text{ sec}$	10800
熊川	開始：2014年8月25日 23:00 終了：2014年8月28日 01:00	50 hour	$\Delta t = 10.0 \text{ sec}$	18000
請戸川	開始：2014年6月6日 23:00 終了：2014年6月9日 01:00	80 hour	$\Delta t = 60.0 \text{ sec}$	3000
阿武隈川	開始：2014年10月2日 21:00 終了：2014年10月6日 08:00	80 hour	$\Delta t = 30.0 \text{ sec}$	9600

また、本項の解析では表 4-19 に列挙したパラメータを対象として、キャリブレーションを実施するが、地理空間情報（土地利用、土壌、表層地質）の面積比率が 0.0 以上の値を取る属性についてのみ、対応するパラメータを調整するため、河川ごとに調整するパラメータの総数（探索空間の次元）が異なることに注意。

表 4-19 最適化対象とするパラメータ

河川	対象パラメータ	パラメータ総数
前田川	透水係数、粗度係数、間隙率	53
熊川	透水係数、粗度係数、間隙率	51
請戸川	透水係数、粗度係数、間隙率	54
阿武隈川	透水係数、粗度係数、間隙率	83

#### ② 結果：最適化の性能評価

最適化手法（PSO 法と SCE-UA 法）を用いて、RADFLOW のモデルパラメータをキャリブレーションした結果を河川ごとに本項の表 4-20～表 4-23 にまとめた。表は、手法毎に、評価値を最小化した試行結果（達成した最小評価値、RADFLOW の計算回数、経過時間）を記す。

その結果は、どの河川についても、初期設定のモデルパラメータより、キャリブレーションした後の評価値の方が格段に減少していることが分かる（即ち、キャリブレーション機能が動作している）。尚、阿武隈川については、評価値を見ると十分な値を達成しているが、河川規模が大きいため、格子は粗く降水イベントに対する応答は比較的緩やかなためと考えられる。

表 4-20 最適化の性能評価：前田川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)	経過時間 day hour:minute	環境
前田川	初期設定	1	5.1299		
	PSO 法	5303	1.0128	0d 21:02	PC1
	SCE-UA 法	11333	1.0042	1d 07:39	PC2

表 4-21 最適化の性能評価：熊川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)	経過時間 day hour:minute	環境
熊川	初期設定	1	5.6732		
	PSO 法	1301	1.0604	1d 05:50	PC1
	SCE-UA 法	1604	0.9134	1d 01:53	PC2

表 4-22 最適化の性能評価：請戸川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)	経過時間 day hour:minute	環境
請戸川	初期設定	1	3.0633		
	PSO 法	11945	1.3573	1d 06:48	PC1
	SCE-UA 法	14342	1.3043	1d 01:52	PC2

表 4-23 最適化の性能評価：阿武隈川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)	経過時間 day hour:minute	環境
阿武隈川	初期設定	1	0.9750		
	PSO 法	1151	0.3135	0d 16:24	PC1
	SCE-UA 法	3013	0.2065	0d 02:59	PC2

表 4-24 検証環境

PC1	CPU	Intel(R) Core(TM) i7-4790K CPU @ 4.00GHz	4.00 GHz
	RAM	32.0 GB	
PC2	CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz	3.19 GHz
	RAM	64.0 GB	

#### 4.3.4 試解析②：複数の降水イベント期間でのキャリブレーション（透水係数、粗度係数、間隙率）

本項では、複数の降水イベント期間における RADFLOW モデルパラメータのキャリブレーションについて試解析を行い、その結果についてまとめる。複数の降水イベントに対応する（学習データを増やす）ことで、パラメータの最適化が進むと考えられる。

##### ① 計算条件

河川ごとの計算期間、及び RADFLOW の時間刻みと計算ステップ数の一覧を表 4-25 に示す。キャリブレーションに用いる計算期間は、降雨イベントを複数含む 20～30 日間とした。

表 4-25 計算期間

	対象期間	計算期間	時間刻み	計算ステップ
前田川	開始：2014年10月3日 11:00 終了：2014年11月1日 15:00	700 hour	$\Delta t = 20.0 \text{ sec}$	126000
熊川	開始：2014年6月4日 21:00 終了：2014年7月4日 01:00	700 hour	$\Delta t = 5.0 \text{ sec}$	504000
請戸川	開始：2014年10月4日 23:00 終了：2014年10月29日 23:00	600 hour	$\Delta t = 30.0 \text{ sec}$	72000
阿武隈川	開始：2014年7月24日 4:00 終了：2014年8月14日 0:00	500 hour	$\Delta t = 30.0 \text{ sec}$	60000

また、本項の解析では、表 4-26 に列挙した 3 種類のパラメータ（透水係数、粗度係数、間隙率）を対象として、キャリブレーションを実施する。なお、地理空間情報（土地利用、土壌、表層地質）の面積比率が 0.0 以上の値を取る属性について、それに対応するパラメータのみを調整するため、河川ごとに調整するパラメータの総数（探索空間の次元）が異なる。

表 4-26 最適化対象とするパラメータ

河川	対象パラメータ	パラメータ総数
前田川	透水係数、粗度係数、間隙率	53
熊川	透水係数、粗度係数、間隙率	51
請戸川	透水係数、粗度係数、間隙率	54
阿武隈川	透水係数、粗度係数、間隙率	83

② 結果：最適化の性能評価

最適化手法（PSO 法と SCE-UA 法）を用いて、RADFLOW のモデルパラメータをキャリブレーションした結果を河川ごとに本項の表 4-27～表 4-30 にまとめた。表には手法ごとに評価値を最小化した試行結果について、達成した最小評価値の値と RADFLOW の計算回数、経過時間を記した。どの河川についても、初期設定のモデルパラメータで RADFLOW を計算したときの評価値と比較して、キャリブレーションした後の評価値の方が小さくなる結果となった。

表 4-27 最適化の性能評価：前田川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)	経過時間 day hour:minute	環境
前田川	初期設定	1	4.0428		
	PSO 法	807	0.9373	1d 13:52	PC2
	SCE-UA 法	1525	0.9272	2d 23:00	PC2

表 4-28 最適化の性能評価：熊川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)	経過時間 day hour:minute	環境
請戸川	初期設定	1	1.9713		
	PSO 法	201	0.6217	5d 05:21	PC2
	SCE-UA 法	246	0.6085	6d 09:25	PC2

表 4-29 最適化の性能評価：請戸川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)	経過時間 day hour:minute	環境
請戸川	初期設定	1	5.9960		
	PSO 法	807	1.1443	2d 01:30	PC2
	SCE-UA 法	1195	1.1176	3d 01:14	PC2

表 4-30 最適化の性能評価：阿武隈川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)	経過時間 day hour:minute	環境
阿武隈川	初期設定	1	0.4344		
	PSO 法	908	0.2250	3d 13:02	PC2
	SCE-UA 法	835	0.2527	3d 06:12	PC2

表 4-31 検証環境

PC2	CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz	3.19 GHz
	RAM	64.0 GB	

### ③ 結果：評価値比較（単一イベントと複数イベント）

ここで、単一と複数の降水イベントに対応することで、どれ程、パラメータの最適化が進むかについてみるため、単一イベント複数イベントとの比較を表 4-32～表 4-35 にまとめた。尚、表中の「評価値 (RSE)」と「RADFLOW 計算回数」には、設定（手法、計算期間）ごとに実施したキャリブレーションの中で、評価値 (RSE) の最小化を達成した試行結果について、達成した最小評価値の値とそれを得るまでに実行した RADFLOW の計算の試行回数を示した。「単一イベント (2～3 日間)」よりも「複数イベント (20～30 日間)」の方が、計算期間が長いため、キャリブレーションにおける一回の試行に要する計算コストは「複数イベント」の方が当然大きい。この理由より、以下に示した各評価値比較において、「複数イベント」で示した計算回数の方が「単一イベント」のそれよりも相対的に少ない結果で評価値を出力させている。この結果から、本検証解析における過半数のケースに対して、「複数イベント」で達成した最小評価値 (RSE) の方が、「単一イベント」のそれよりも概ね小さい値を取ったことから、学習するデータが増えたことで、より最適化が進んだものと考えられる。

表 4-32 最適化の性能評価：前田川

対象河川	最適化手法	計算期間	評価値 (RSE)	RADFLOW 計算回数
前田川	初期設定	単一イベント	5.1299	1
		複数イベント	4.0428	1
	PSO 法	単一イベント	1.0128	5303
		複数イベント	0.9373	807
	SCE-UA 法	単一イベント	1.0042	11333
		複数イベント	0.9272	1525

表 4-33 最適化の性能評価：熊川

対象河川	最適化手法	計算期間	評価値 (RSE)	RADFLOW 計算回数
熊川	初期設定	単一イベント	5.6732	1
		複数イベント	1.9713	1
	PSO 法	単一イベント	1.0604	1301
		複数イベント	0.6217	201
	SCE-UA 法	単一イベント	0.9134	1604
		複数イベント	0.6085	246

表 4-34 最適化の性能評価：請戸川

対象河川	最適化手法	計算期間	評価値 (RSE)	RADFLOW 計算回数
請戸川	初期設定	単一イベント	3.0633	1
		複数イベント	5.9960	1
	PSO 法	単一イベント	1.3573	11945
		複数イベント	1.1443	807
	SCE-UA 法	単一イベント	1.3043	14342
		複数イベント	1.1176	1195

表 4-35 最適化の性能評価：阿武隈川

対象河川	最適化手法	計算期間	評価値 (RSE)	RADFLOW 計算回数
阿武隈川	初期設定	単一イベント	0.9750	1
		複数イベント	0.4344	1
	PSO 法	単一イベント	0.3135	1151
		複数イベント	0.2250	908
	SCE-UA 法	単一イベント	0.2065	3013
		複数イベント	0.2527	835

#### ④ 結果：流出量時刻歴の比較

ここで、キャリブレーションにおいて評価値を最小にしたモデルパラメータを用いて計算した RADFLOW の流出量計算値と観測値を比較した結果を図 4-12～図 4-19 に示す。尚、河川ごとの結果の要点を以下にまとめた。

##### ● 前田川

初期設定による計算値は、観測値に比べて流出量を過大評価している。一方、キャリブレーションした後の計算値は、その流出量のピーク値は観測値と同程度であり、その観点で、流出量の推定精度は向上したと考えられる。しかし、キャリブレーションした後の計算値は、降雨イベントのピーク時刻と比べて遅れて流出量のピークが現れている。

##### ● 熊川

初期設定による計算値は、観測値に比べて流出量を過大評価している。一方、キャリブレーションした後の計算値は、その流出量のピーク値は観測値より下回る値を取った。また、キャリブレーションした後の計算値は、降雨イベントのピーク時刻と比べて遅れて流出量のピークが現れており、観測値を正しく再現できていない。

##### ● 請戸川

初期設定による計算値は、観測値に比べて流出量を過大評価している。一方、キャリブレーションした後の計算値は、流出量のピーク値が遅れ、観測値を正しく再現できていない。

##### ● 阿武隈川

初期設定による計算値は、観測値に比べて流出量を過小評価している。一方、キャリブレーションした後の計算値については、流出量のピーク値が増加しており、流出量の推定精度は向上したと考えられる。

以上、河川ごとのキャリブレーション結果について考察したが、最適化手法（PSO 法と SCE-UA 法）による流出量時刻歴の違いは僅かであることがわかった。

(A) 前田川

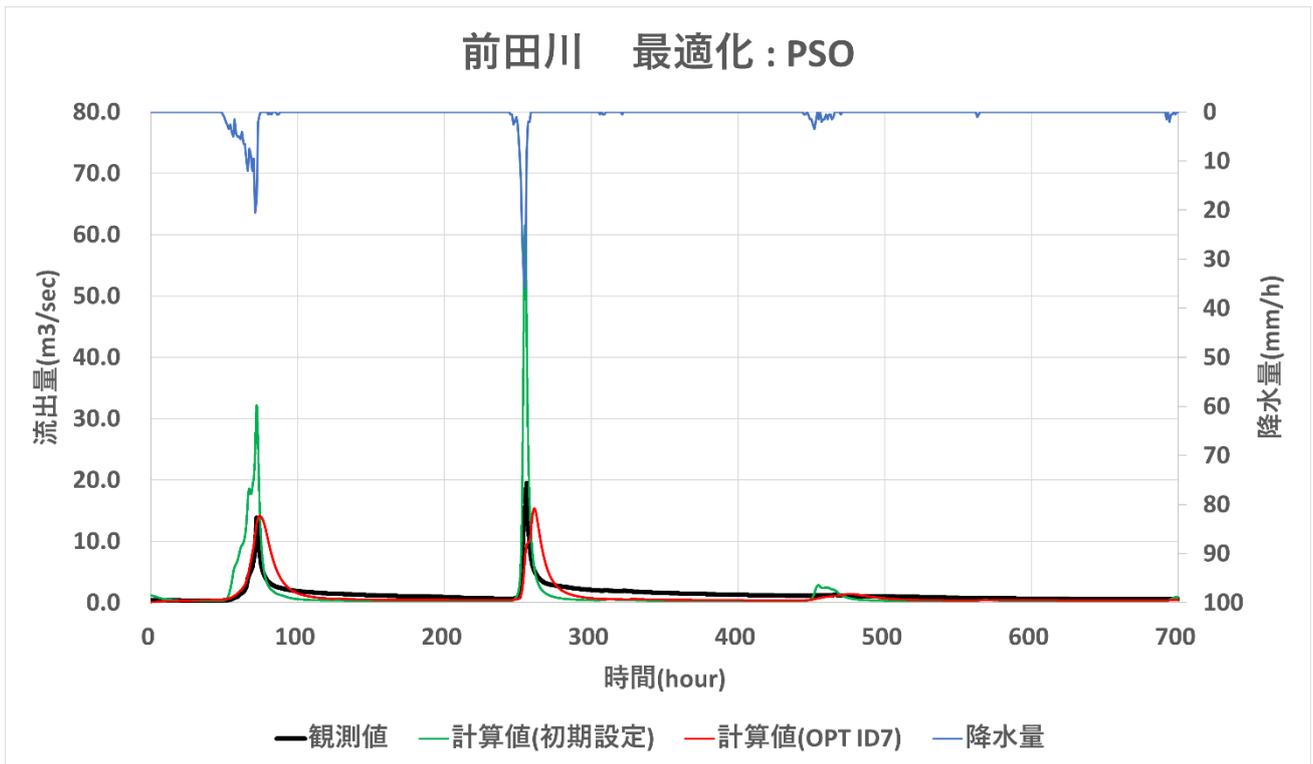


図 4-12 流出量時刻歴、PSO 法最適化、前田川、対象：(透水係数、粗度係数、間隙率)

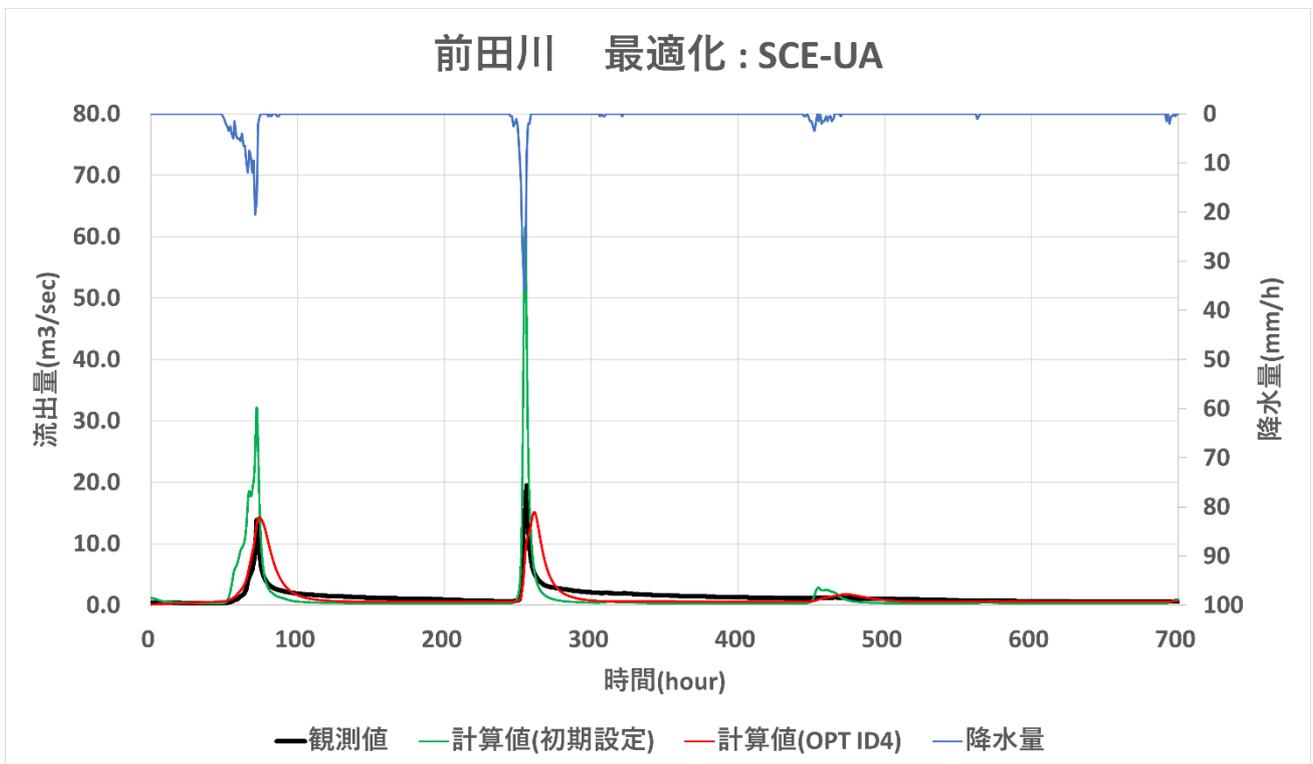


図 4-13 流出量時刻歴、SCE-UA 法最適化、前田川、対象：(透水係数、粗度係数、間隙率)

(B) 熊川

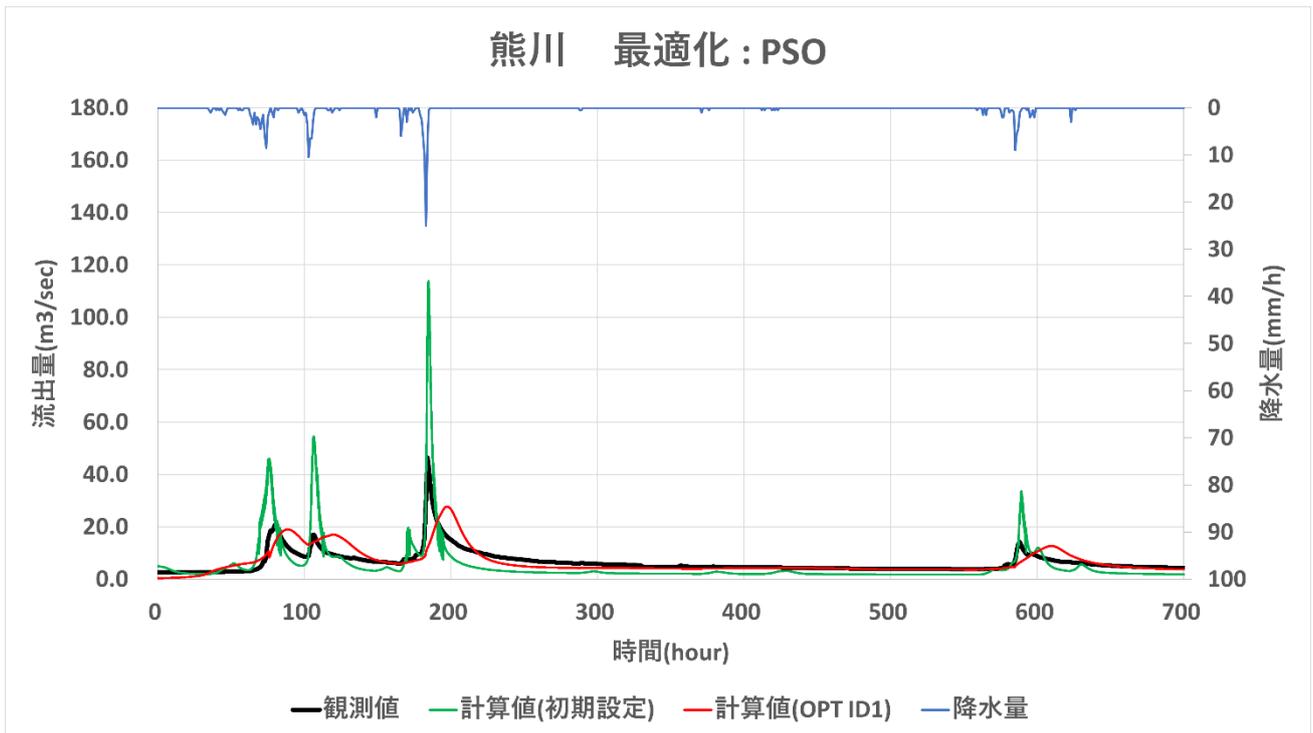


図 4-14 流出量時刻歴、PSO 法最適化、熊川、対象：(透水係数、粗度係数、間隙率)

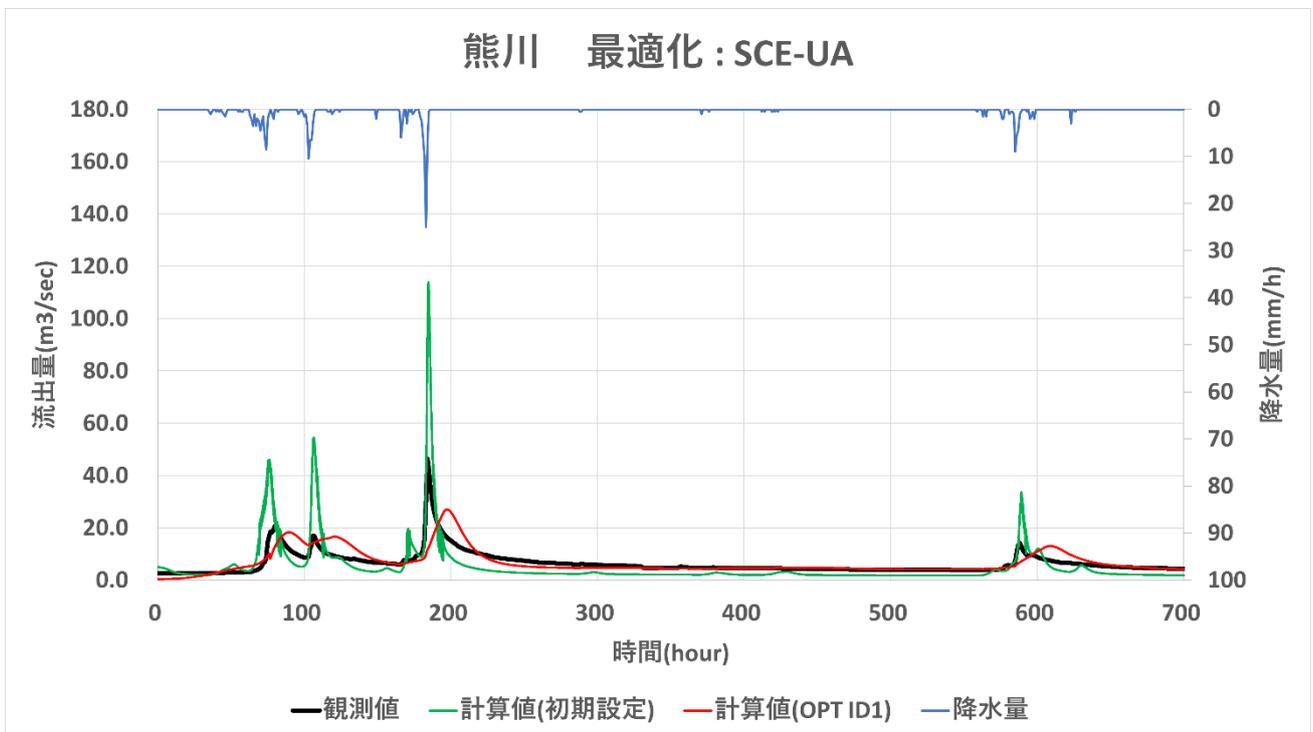


図 4-15 流出量時刻歴、SCE-UA 法最適化、熊川、対象：(透水係数、粗度係数、間隙率)

(C) 請戸川

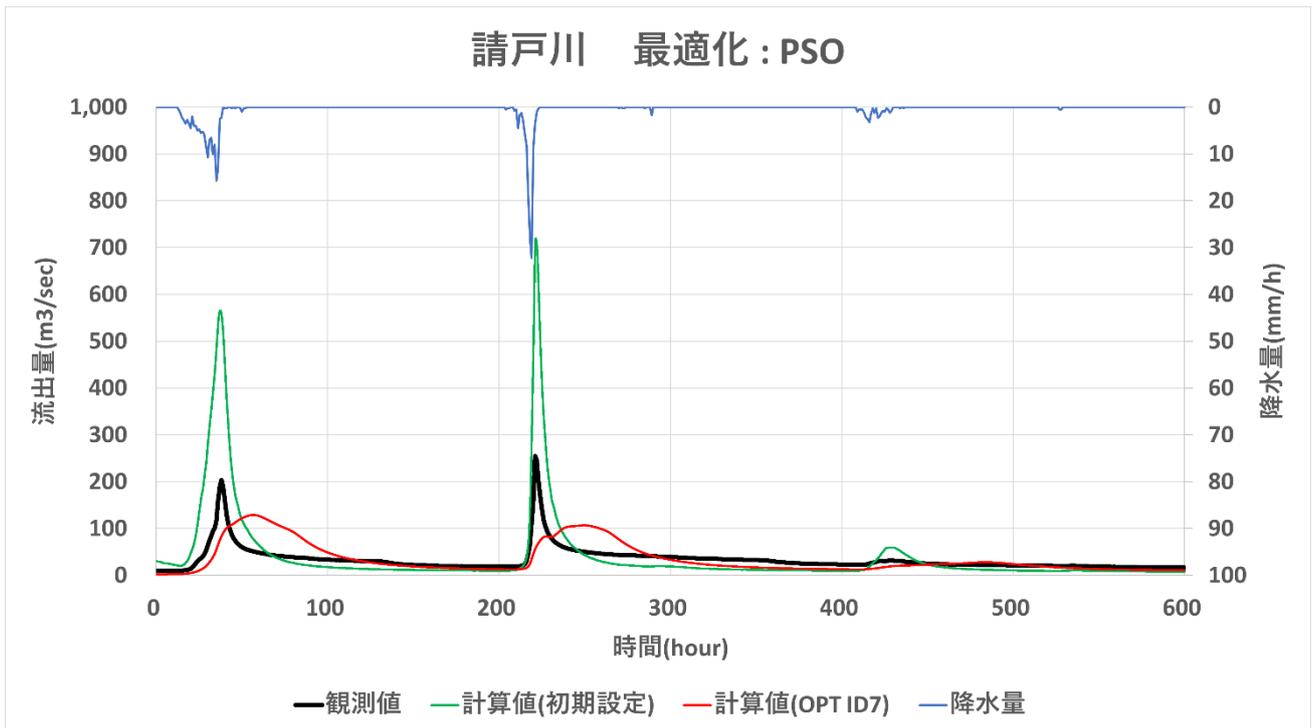


図 4-16 流出量時刻歴、PSO 法最適化、請戸川、対象：(透水係数、粗度係数、間隙率)

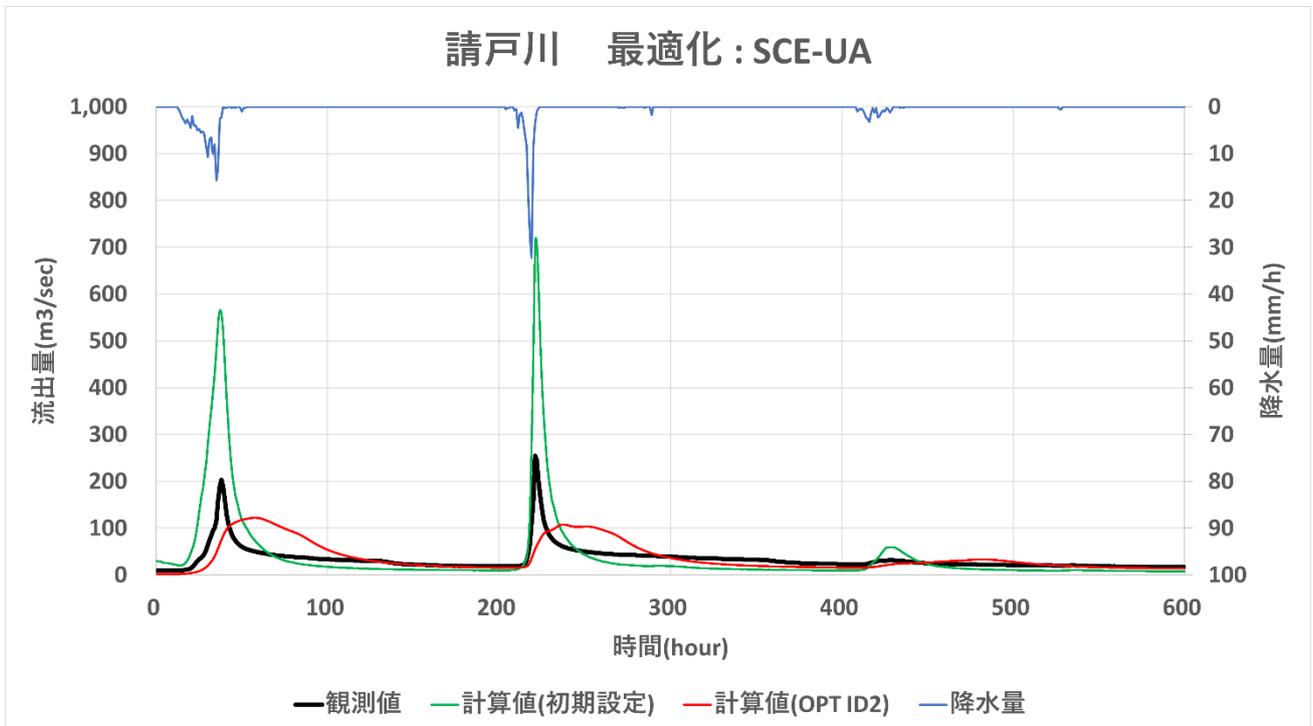


図 4-17 流出量時刻歴、SCE-UA 法最適化、請戸川、対象：(透水係数、粗度係数、間隙率)

(D) 阿武隈川



図 4-18 流出量時刻歴、PSO 法最適化、阿武隈川、対象：(透水係数、粗度係数、間隙率)

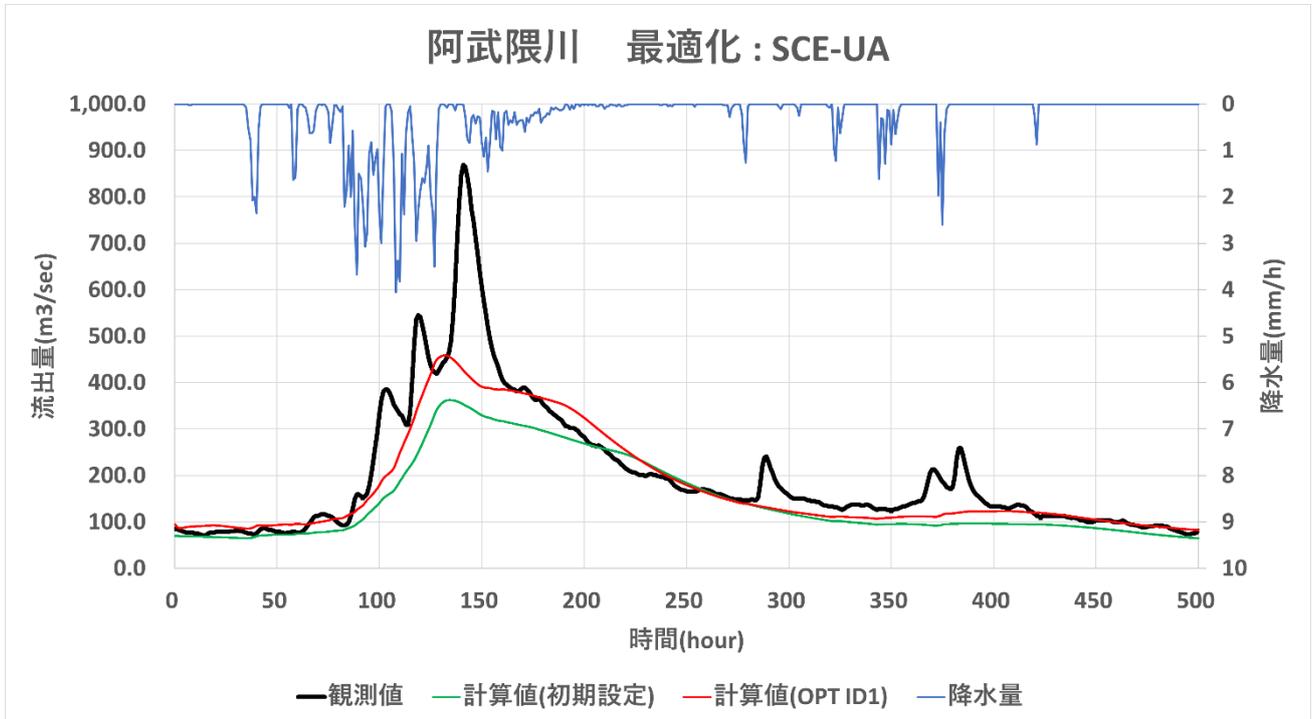


図 4-19 流出量時刻歴、SCE-UA 法最適化、阿武隈川、対象：(透水係数、粗度係数、間隙率)

#### 4.3.5 試解析③：複数の降水イベント期間でのキャリブレーション（透水係数、間隙率）

本項では、前項での複数の降水イベント期間における RADFLOW モデルパラメータのキャリブレーション解析結果において、流出時刻歴の遅れが顕著となっていたため、粗度係数をオーバーフィットしたものと考え、透水係数と間隙率のみをキャリブレーション対象として試解析を行った。

##### ① 計算条件

河川ごとの計算期間、及び RADFLOW の時間刻みと計算ステップ数の一覧を表 4-36 に示す。ここでの計算期間は、降雨イベントは、前項と同じく、複数を含む 20～30 日間の長さとした。

表 4-36 計算期間

	対象期間	計算期間	時間刻み	計算ステップ
前田川	開始：2014年10月3日 11:00 終了：2014年11月1日 15:00	700 hour	$\Delta t = 20.0 \text{ sec}$	126000
熊川	開始：2014年6月4日 21:00 終了：2014年7月4日 01:00	700 hour	$\Delta t = 5.0 \text{ sec}$	504000
請戸川	開始：2014年10月4日 23:00 終了：2014年10月29日 23:00	600 hour	$\Delta t = 30.0 \text{ sec}$	72000
阿武隈川	開始：2014年7月24日 4:00 終了：2014年8月14日 0:00	500 hour	$\Delta t = 30.0 \text{ sec}$	60000

また、本項の解析では表 4-37 に列挙した 2 種類のパラメータ（透水係数、間隙率）を対象としたことと、地理空間情報（土地利用、土壌、表層地質）の面積比率が 0.0 以上の値を取る属性についてのみ、対応するパラメータを調整するため、河川ごとに調整するパラメータの総数（探索空間の次元）が表 4-37 のように異なる。

表 4-37 最適化対象とするパラメータ

河川	対象パラメータ	パラメータ総数
前田川	透水係数、間隙率	42
熊川	透水係数、間隙率	40
請戸川	透水係数、間隙率	44
阿武隈川	透水係数、間隙率	72

##### ② 結果：最適化の性能評価

最適化手法（PSO 法と SCE-UA 法）を用いて、RADFLOW のモデルパラメータをキャリブレーションした結果を河川ごとに本項の表 4-38～表 4-41 にまとめた。各表では、手法ごとに評価値を最小化した試行について、達成した最小評価値の値と RADFLOW の計算回数を列挙した。阿武隈川を除いて、初期設定のモデルパラメータで RADFLOW を計算したときの評価値と比較して、キャリブレーションした後の評価値の方が小さくなる。

表 4-38 最適化の性能評価：前田川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)
前田川	初期設定	1	4.0428
	PSO 法	1154	2.1589
	SCE-UA 法	2420	2.1645

表 4-39 最適化の性能評価：熊川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)
請戸川	初期設定	1	1.9713
	PSO 法	146	1.2000
	SCE-UA 法	334	0.9901

表 4-40 最適化の性能評価：請戸川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)
請戸川	初期設定	1	5.9960
	PSO 法	902	5.1347
	SCE-UA 法	1844	5.2150

表 4-41 最適化の性能評価：阿武隈川

対象河川	最適化手法	RADFLOW 計算回数	評価値 (RSE)
阿武隈川	初期設定	1	0.4344
	PSO 法	566	3.4203
	SCE-UA 法	1020	3.4232

### ③ 結果：流出量時刻歴の比較

キャリブレーションにより評価値を最小にしたモデルパラメータを用いて計算した RADFLOW の流出量計算値と観測値を比較した結果を図 4-20～図 4-27 に示す。以下にて、河川ごとに結果の要点をまとめる。

#### ● 前田川

初期設定による計算値は、観測値に比べて流出量を過大評価している。一方、キャリブレーションした後の計算値については、その流出量のピーク値が観測値に近づく方向に減少しており、流出量の推定精度は向上している。また、流出量の経時変化プロファイルは観測値と近く、祖度係数のキャリブレーションによる過適合を避けることに成功したと考えられる。但し、ピーク値の過大評価傾向は残存したままである。

#### ● 熊川

初期設定による計算値は、観測値に比べて流出量を過大評価している。一方でキャリブレーションした後の計算値については、その流出量のピーク値が観測値に近づく方向に減少しており、流出量の推定精度は向上している。また、経時変化傾向と流出量のピーク値については、前田川と同じ課題がある。

#### ● 請戸川

初期設定による計算値は、観測値に比べて流出量を過大評価している。一方でキャリブレーションした後の計算値については、その流出量のピーク値が観測値に近づく方向に減少しており、流出量の推定精度は向上している。また、経時変化傾向と流出量のピーク値については、前田川と同じ課題がある。

#### ● 阿武隈川

初期設定による計算値は、観測値に比べて流出量を過小評価している。一方、キャリブレーションした後の計算値は、その流出量のピーク値が増加する。しかし、その変化は僅かである。

以上、祖度係数を除いたパラメータに対するキャリブレーション結果を考察した。阿武隈川を除く中小河川では、流出経時変化傾向において前項にて見られた流出遅れが抑制されたが、流出量ピーク値への適合が十分でなく、満足できる評価値が得られていないという課題が残る。課題解決に当たり、実施すべき事項は下記の通り。

- ・キャリブレーションしたパラメータを用いて十分なスピンアップ計算を行う。
- ・層毎にパラメータの感度解析を行うことで更なるキャリブレーションパラメータの絞りこみ。

なお、流出量とその時刻歴に対し、最適化手法（PSO 法及び SCE-UA 法）間の違いは僅かである。

(A) 前田川

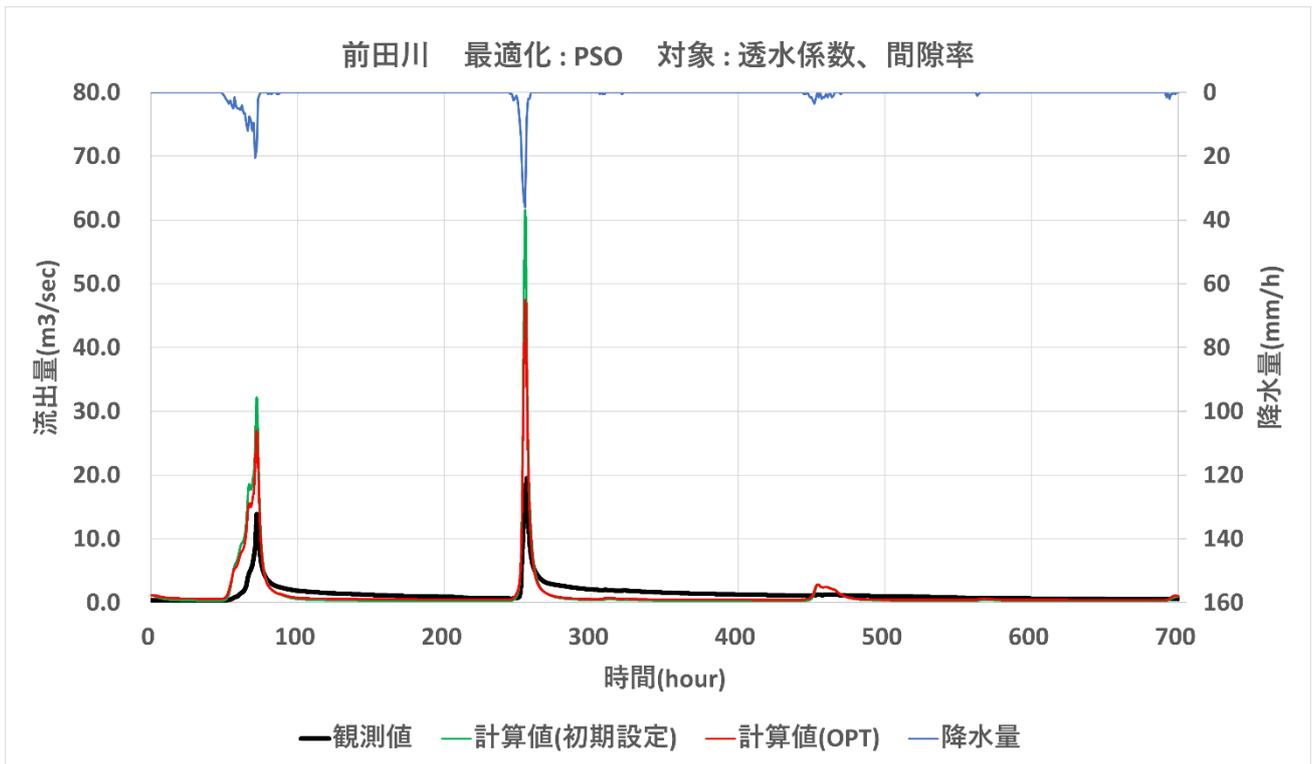


図 4-20 流出量時刻歴、PSO 法最適化、前田川、対象: (透水係数、間隙率)

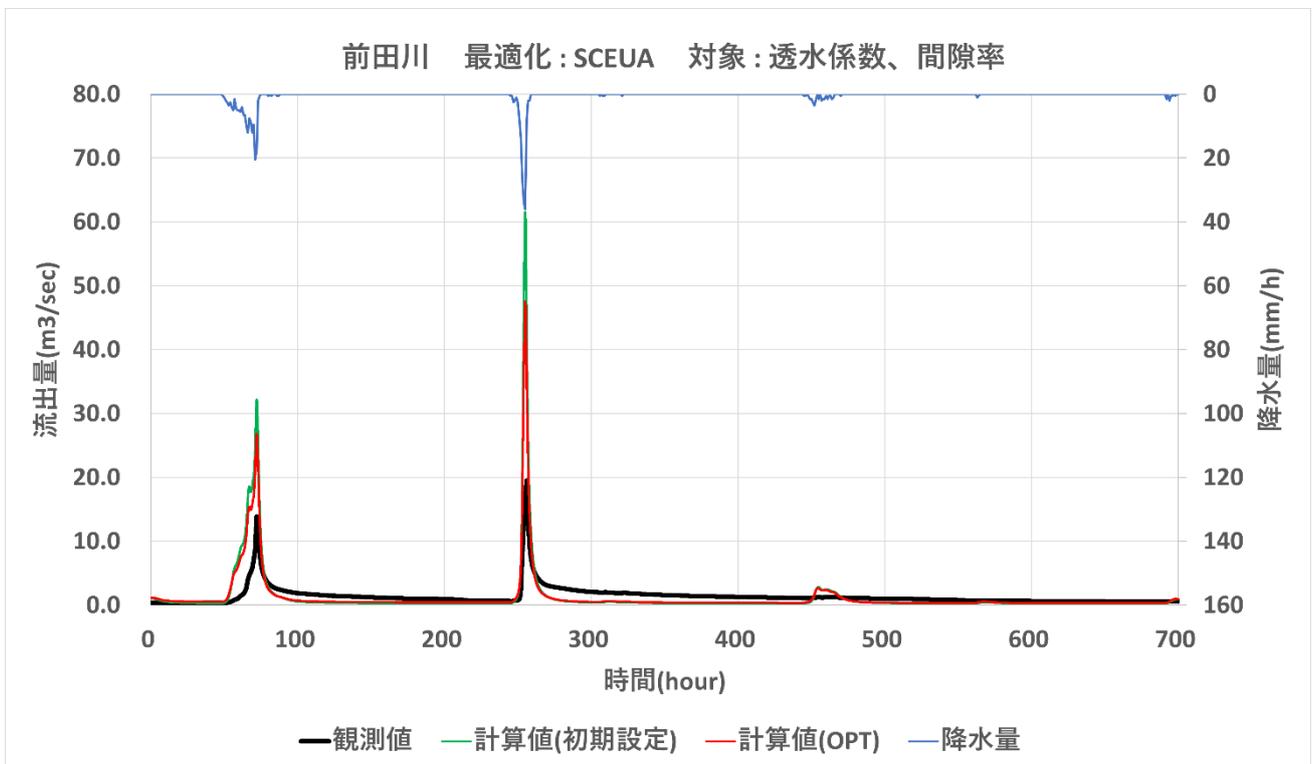


図 4-21 流出量時刻歴、SCE-UA 法最適化、前田川、対象: (透水係数、間隙率)

(B) 熊川

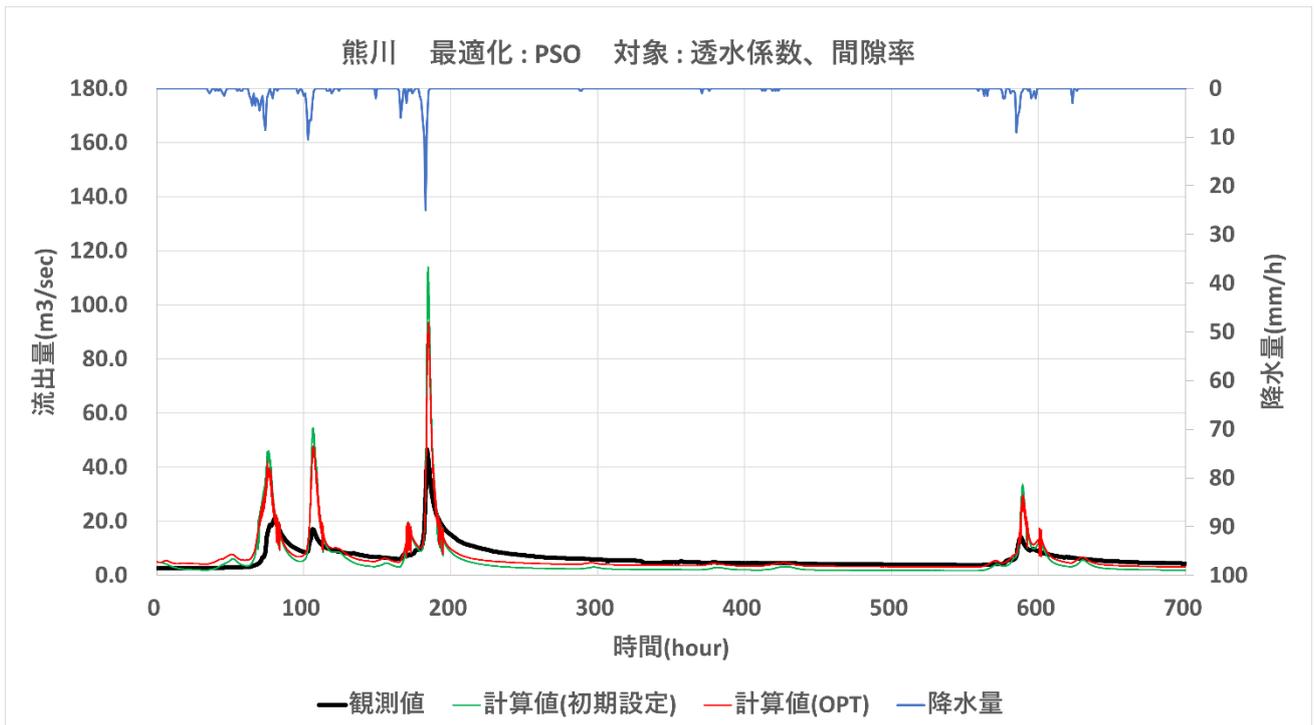


図 4-22 流出量時刻歴、PSO 法最適化、熊川、対象 : (透水係数、間隙率)

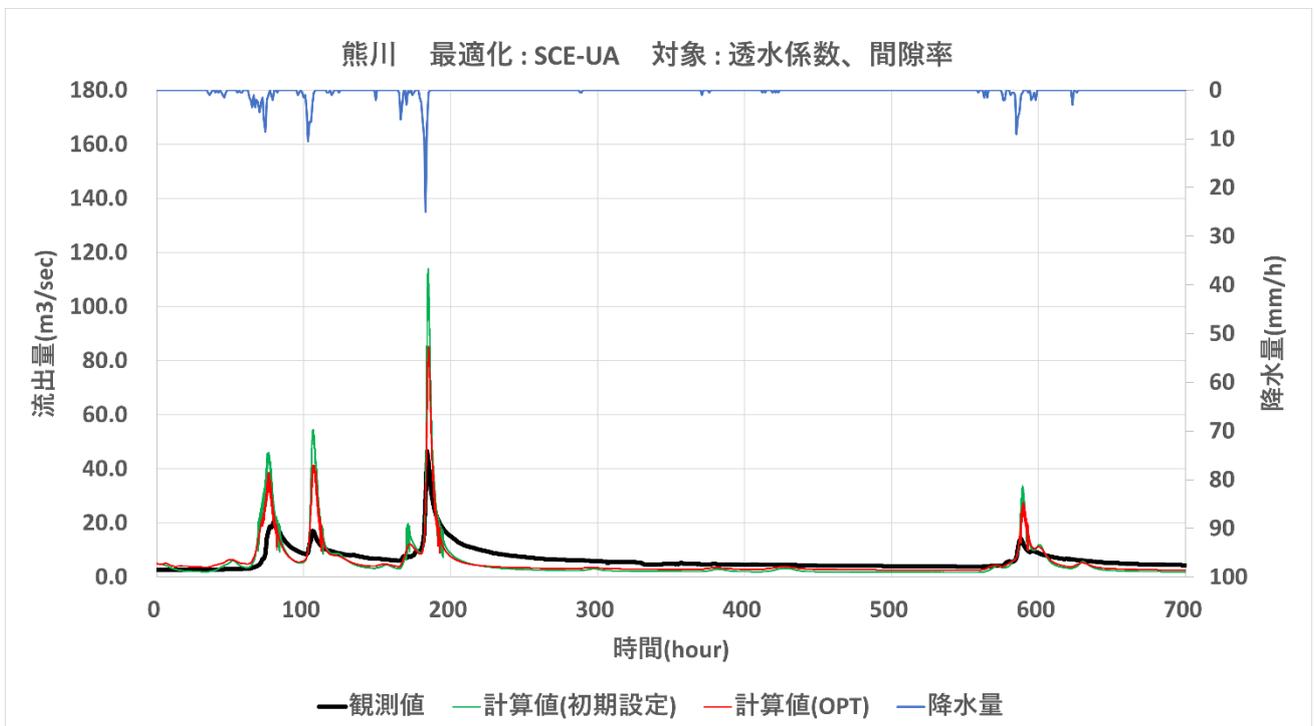


図 4-23 流出量時刻歴、SCE-UA 法最適化、熊川、対象 : (透水係数、間隙率)

(C) 請戸川

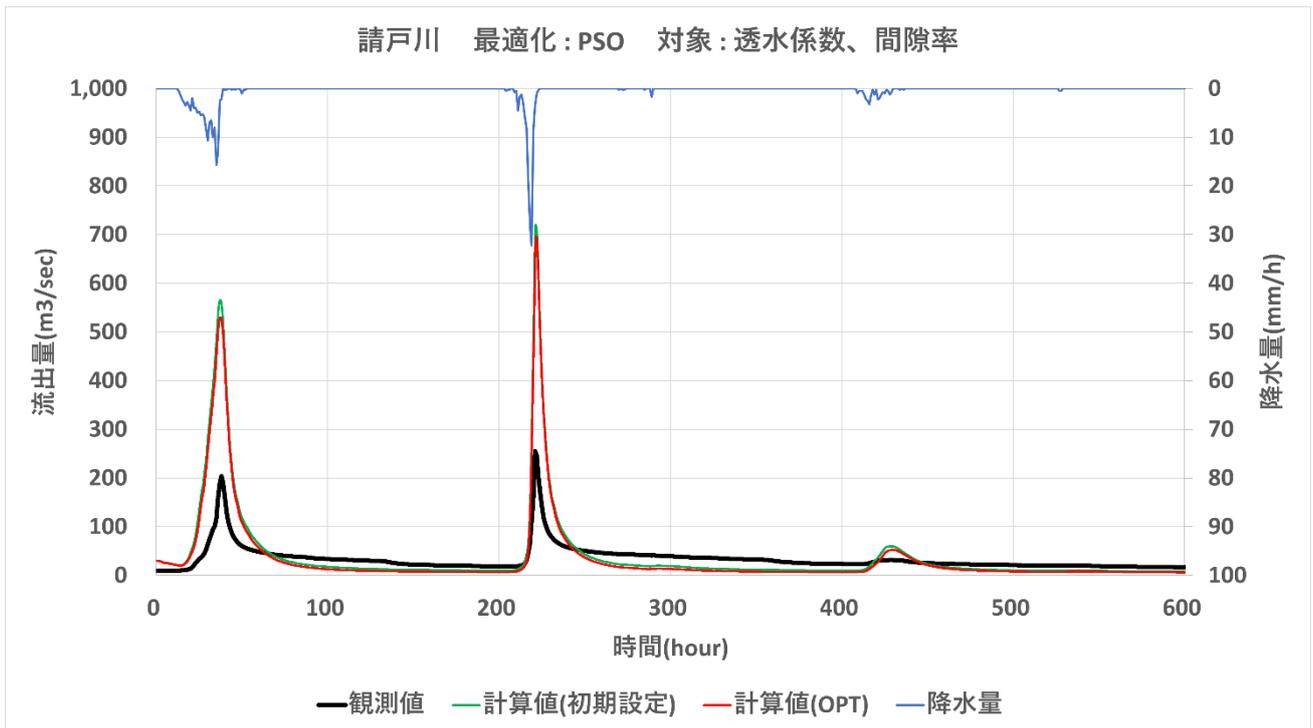


図 4-24 流出量時刻歴、PSO 法最適化、請戸川、対象：(透水係数、間隙率)

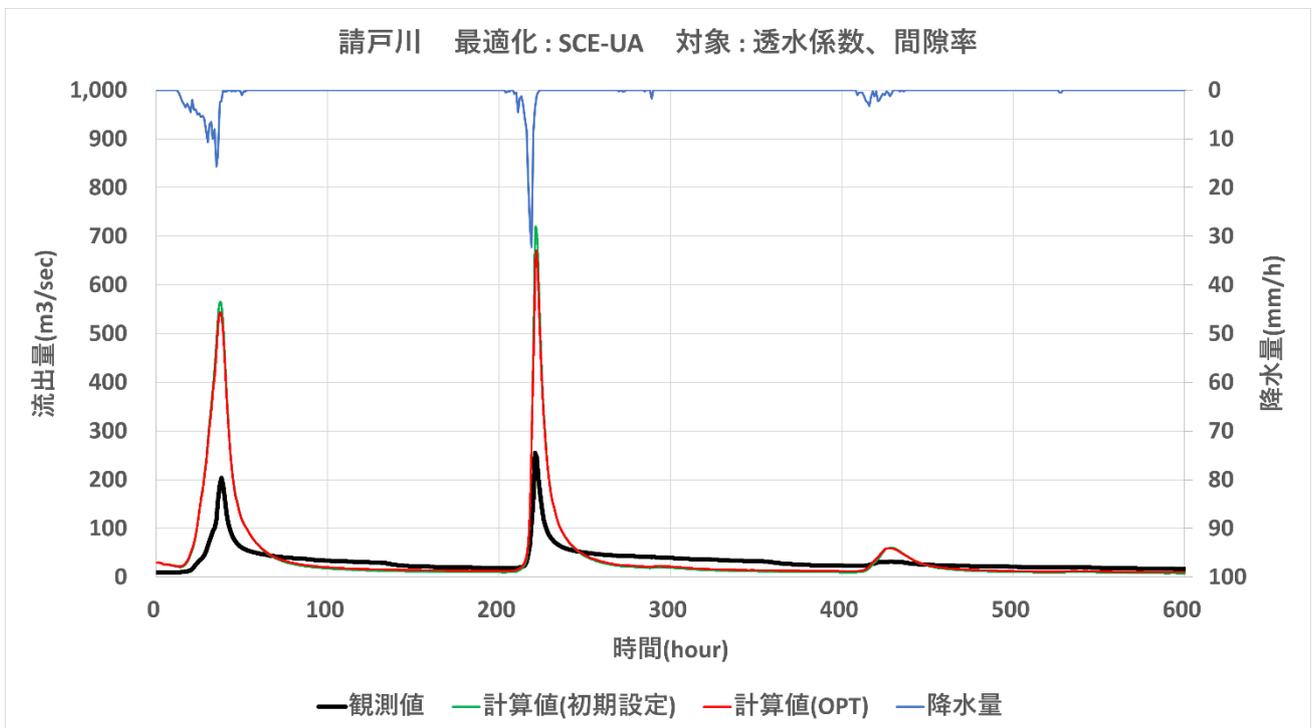


図 4-25 流出量時刻歴、SCE-UA 法最適化、請戸川、対象：(透水係数、間隙率)

(D) 阿武隈川

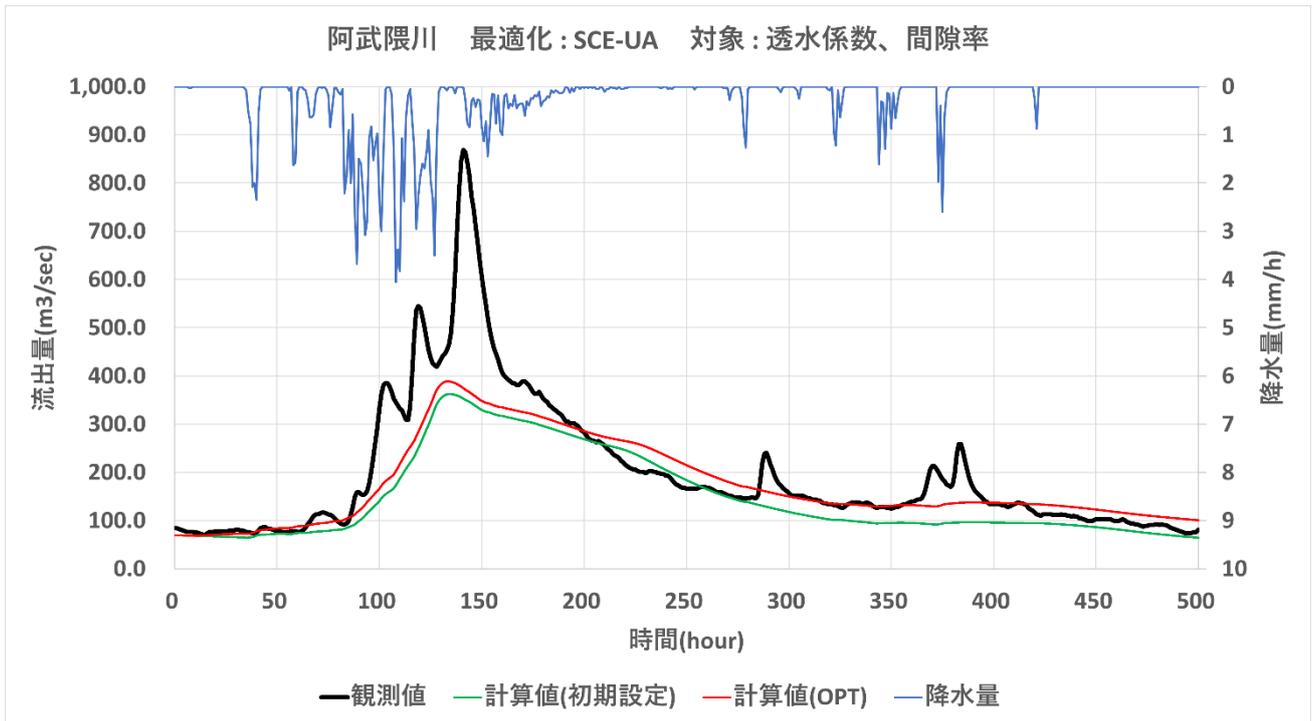


図 4-26 流出量時刻歴、PSO 法最適化、阿武隈川、対象 : (透水係数、間隙率)



図 4-27 流出量時刻歴、SCE-UA 法最適化、阿武隈川、対象 : (透水係数、間隙率)

#### ④ キャリブレーションパラメータを用いた水位分布及び流出量分布の経時変化（前田川）

本項で実施した前田川のキャリブレーション（PSO法）結果（表 4-38）を用いて、時刻 250 時（経時時間）ごろに発生する降水イベント前後の表層水位の分布図を図 4-28～図 4-31（経時変化）に示し、河川流出量の分布図の経時変化を図 4-32～図 4-35 に示す。

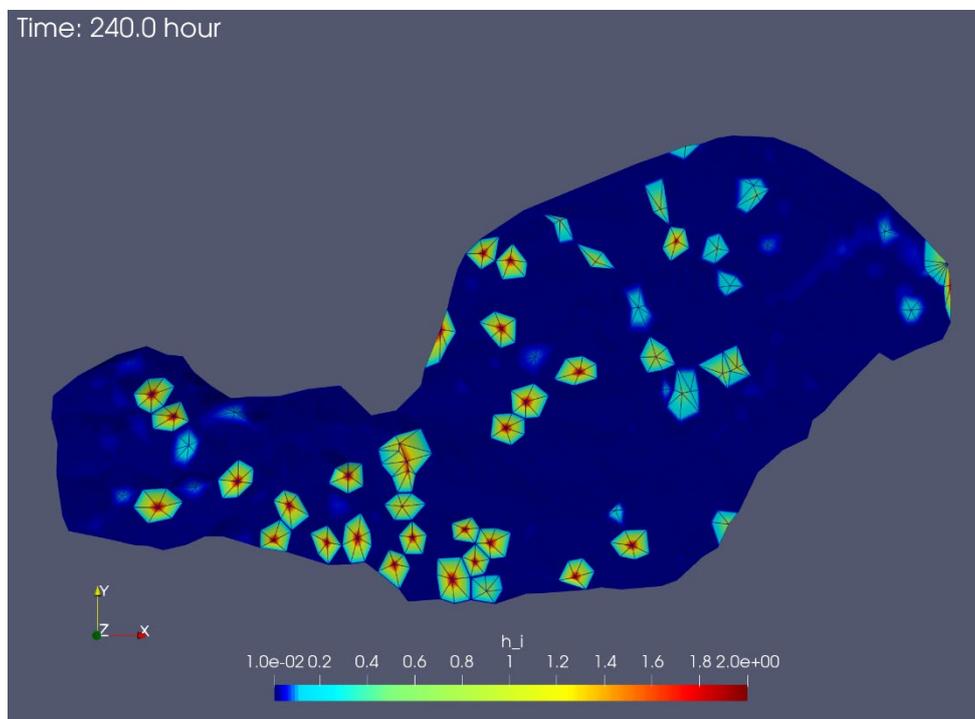


図 4-28 表層水位(単位:メートル)の分布図、前田川、時刻 240 hour

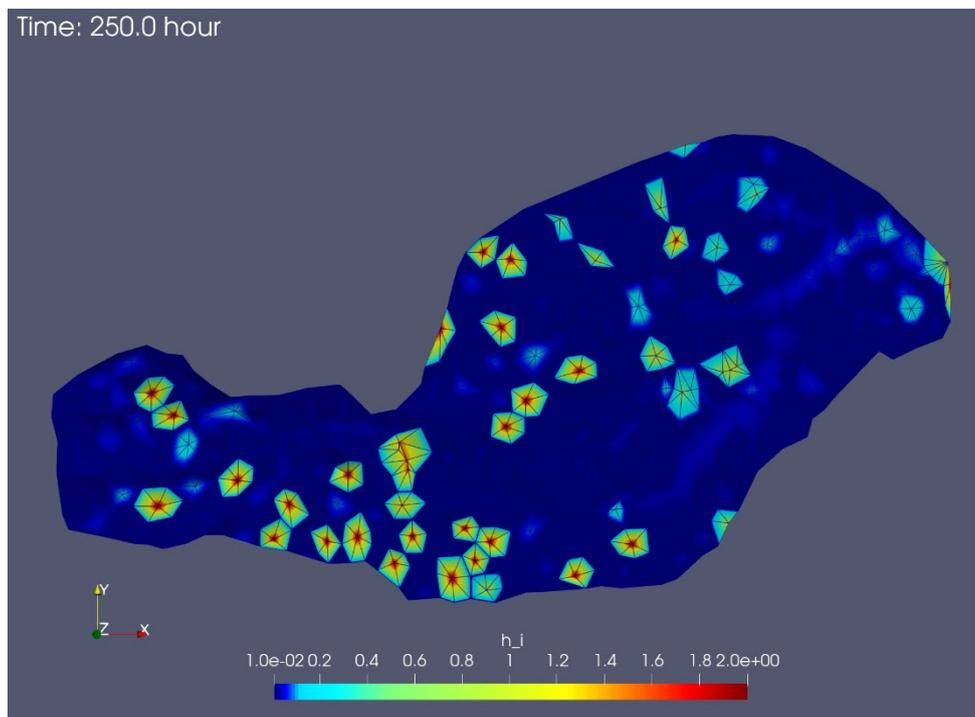


図 4-29 表層水位(単位:メートル)の分布図、前田川、時刻 250 hour

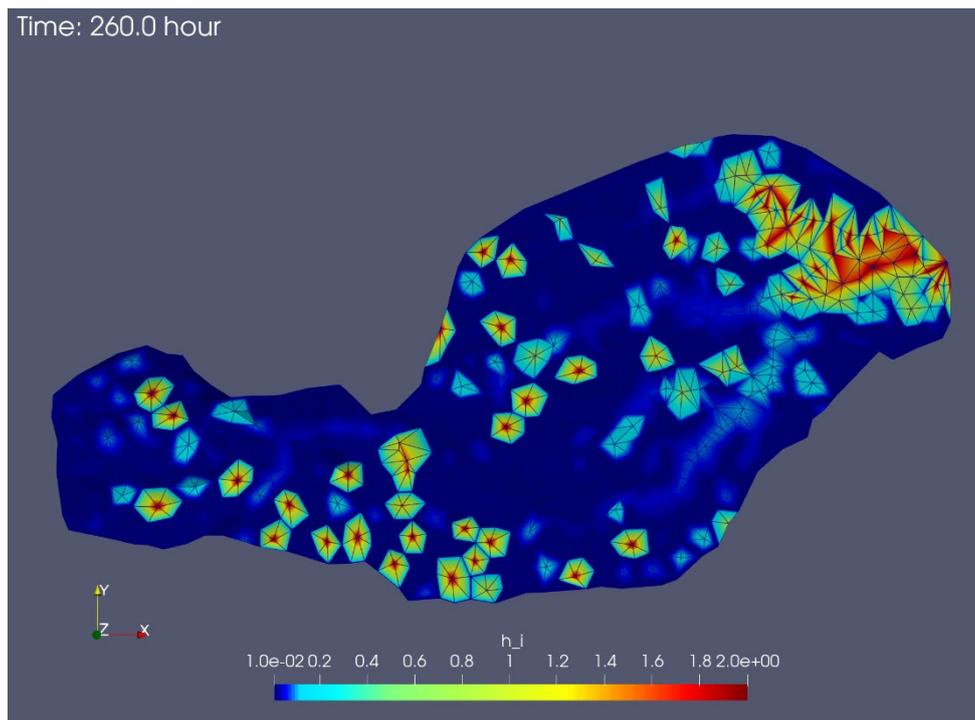


図 4-30 表層水位(単位:メートル)の分布図、前田川、時刻 260 hour

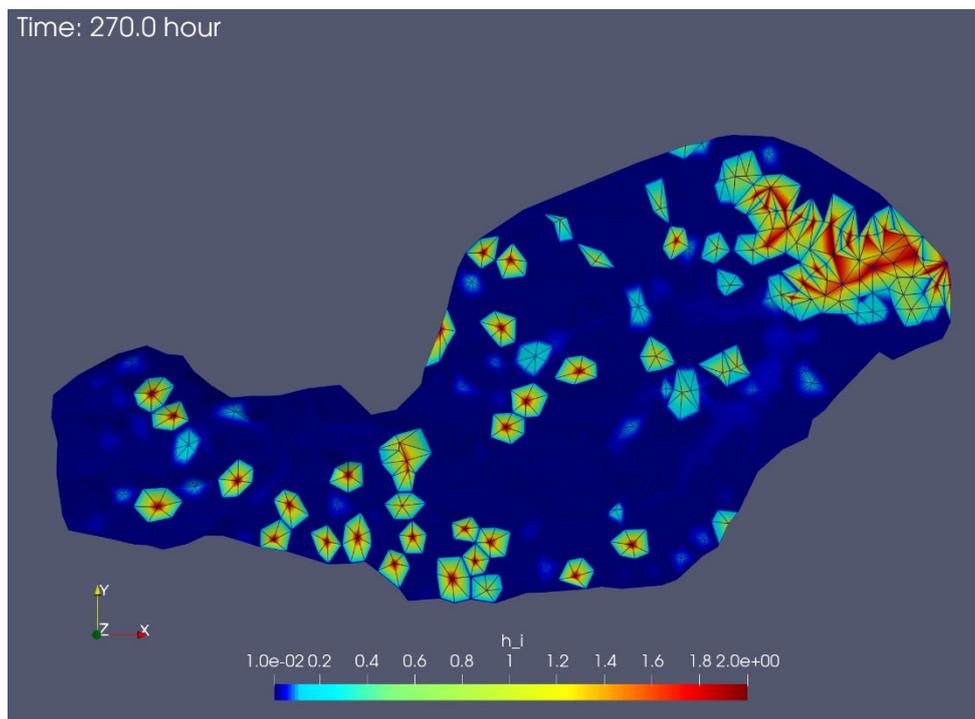


図 4-31 表層水位(単位:メートル)の分布図、前田川、時刻 270 hour

図 4-28～図 4-31 の結果より、メッシュ単位での水位分布の経時変化を追跡しているため、一見すると不自然な紋様の分布が見られるが、これらは、窪地の分布を示しており、その中心点で高い水位が見られているためである。尚、降雨と共に、河川上のメッシュでの水位が上昇していることが明らかに分かる。

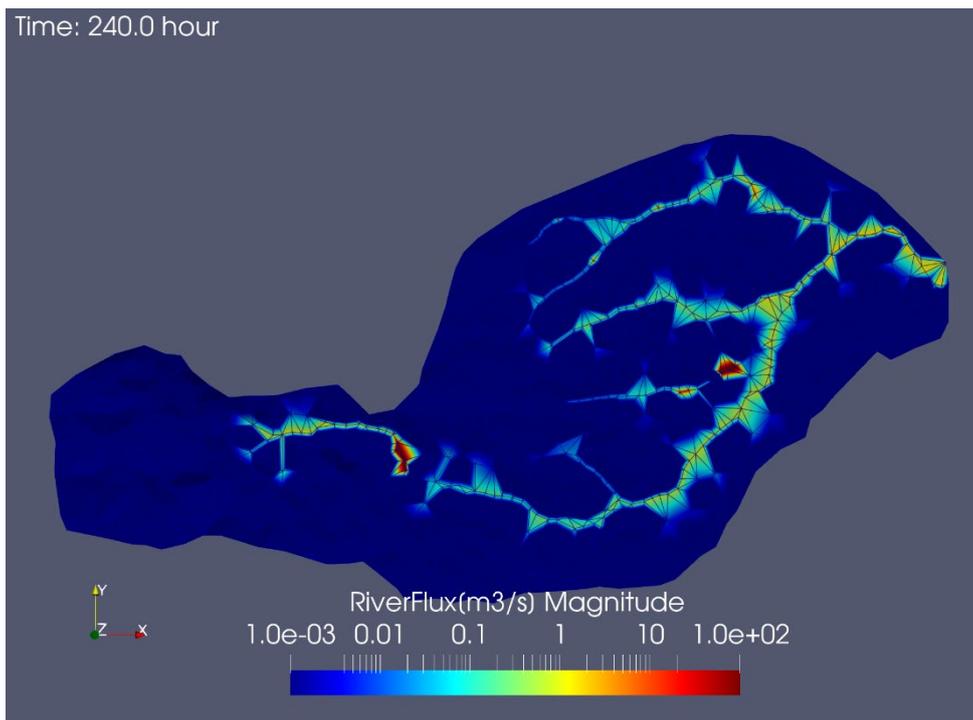


図 4-32 河川流出量(単位:  $\text{m}^3/\text{s}$ )の分布図、前田川、時刻 240 hour

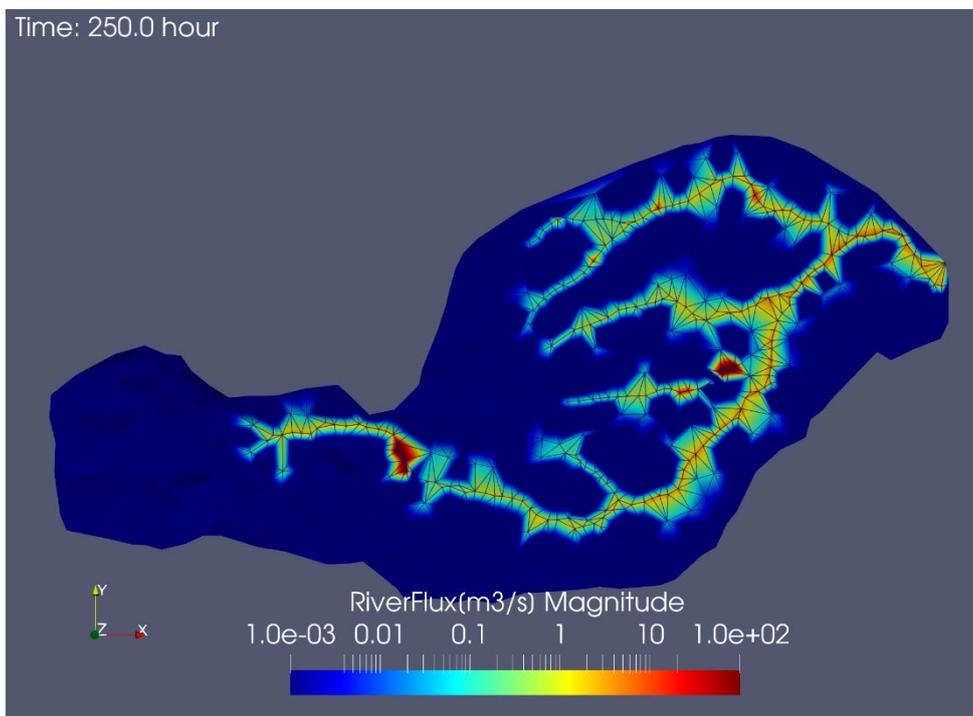


図 4-33 河川流出量(単位:  $\text{m}^3/\text{s}$ )の分布図、前田川、時刻 250 hour

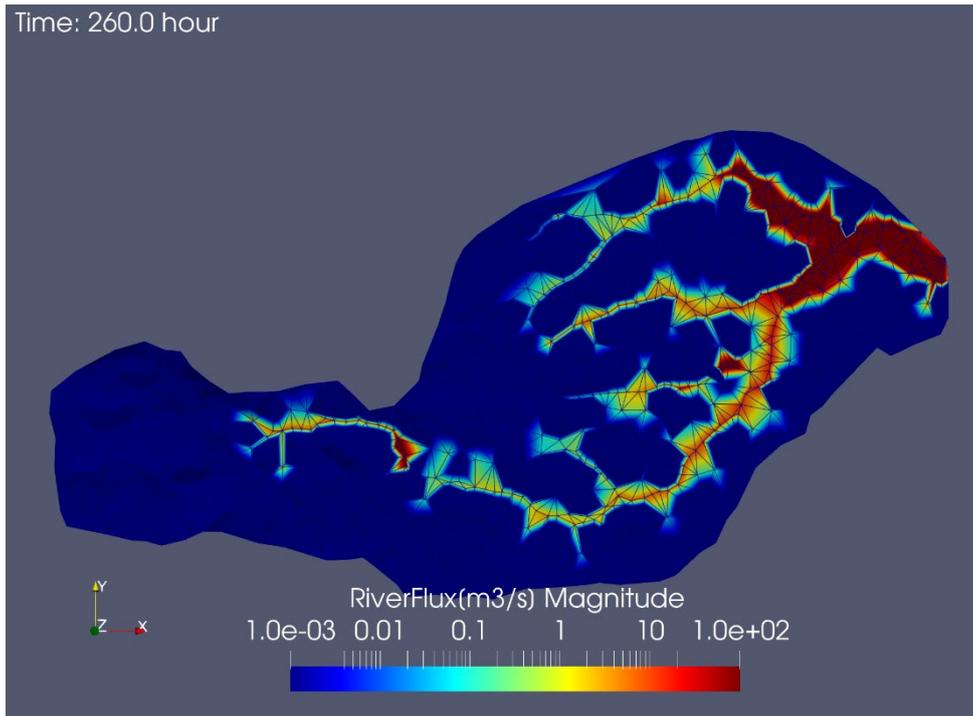


図 4-34 河川流出量(単位:  $\text{m}^3/\text{s}$ )の分布図、前田川、時刻 260 hour

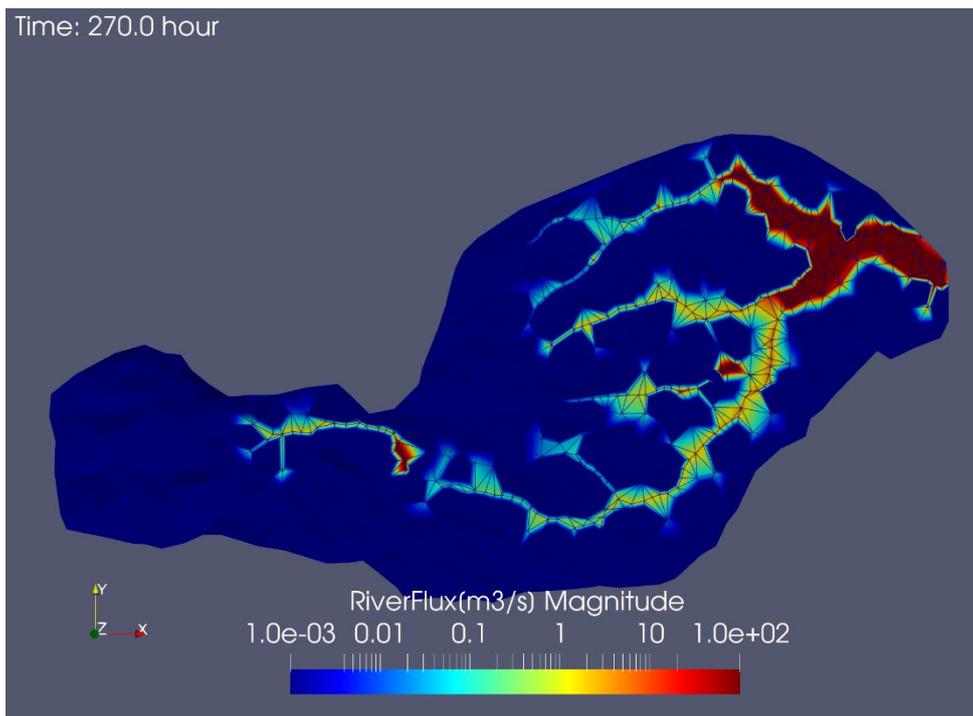


図 4-35 河川流出量(単位:  $\text{m}^3/\text{s}$ )の分布図、前田川、時刻 270 hour

図 4-32～図 4-35 より、降雨と共に河川メッシュの流量が増大し、下流の流量が時間と共に増大していることが見て取れる。これらの結果を詳細に見ると、降水により、その一部は地下に移行する一方、地表水位の上昇と共に地表層の流れが河川に集中し、下流の流量が増大する様子が再現されていることが分かる。以上、水の流れがおおよそ再現されたことで、地表に沈着した放射性物質も地表層の流れと共に移行する現象の再現が可能と考えられる。その際、放射性セシウムは、溶存態及び懸濁態の二つの形態を取り移行するが、そのモデルについては、4.2.1 にて記載した通りである。以上より、降雨による放射性セシウムの移行は、土壌表層での懸濁物質の巻き上げを起点として、溶存態成分及び懸濁態成分の移行を解析することで、その挙動が分析可能となる。それらを詳しく解析することは今後の課題とする。

#### 4.4 まとめ

分布定数型流出モデルの整備要件として、本事業では分布定数型流出モデル RADFLOW のパラメータ設定に際し、次の最適化機能を実装した。

- ① 地理空間情報を基に面積比率の高い地理空間情報と関連するパラメータを選択する。
- ② ①で定めたパラメータに対し PSO 法や SCE-UA 法を実装しキャリブレーションする。

上記の整備を行った RADFLOW に対し、福島県内の 4 河川（前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）流域に対して試解析を実施した。その結果、複数のイベントを含む観測流量の経時変化情報を基にキャリブレーションすることで、観測流量の再現性は高まるが、十分な精度での再現には更なる課題があることが分かった。その原因としては、パラメータ数が多く計算コストが高く、十分なキャリブレーションが困難である一方、キャリブレーションしたパラメータを用いて定常状態を形成する必要もあり、各パラメータを更に分析する必要もあることが分かる。その上、放射性セシウムの移行を取り扱う際には、懸濁態の表層での巻き上げ等をモデル化する必要もあり、今後の更なる分析が必要である。

以上より、分布定数型流出モデルを用いた放射性物質の動態解析を、精度良く実現するためには、水の移行を更に高精度に実施可能とする枠組みを整備した上で、陸域での動態モデルの調査分析を行い、重要なファクターを RADFLOW に取り込む他、各地点での移行挙動の妥当性を評価する必要があることが分かった。

#### 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/](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>.

#### パラメータ最適化機能

- [4-9] 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/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejsp/67/1/67_1_1/article-char/ja/).
- [4-10] 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/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/20/5/20_5_450/article-char/ja/)
- [4-11] “PHYSBO--optimization tools for PHYSics based on Bayesian Optimization”. <https://www.pasums.issp.u-tokyo.ac.jp/physbo/about/>.
- [4-12] 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>.

#### 誤差関数について

- [4-13] 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](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejer/72/5/72_I_35/_pdf)

付録

1. 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(4-8)によって定義される。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \tag{4-8}$$

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[4-13]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(4-9)で定義される。

$$RSE = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \tag{4-9}$$

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](https://www.saedsayad.com/model_evaluation_r.htm))。

2. 対象河川と計算格子

本項の①～④に、福島4河川（前田川、熊川、請戸川、阿武隈川）の標高と流出量観測所位置、及びRADFLOWの計算格子の図を示した。なお、観測所位置は図中の星印で表示している。また、表4-42に各観測所の緯度経度を示し、表4-43に計算格子に関する点数及び要素数を示した。

表 4-42 流量観測所位置

番号	河川	流域面積 (km <sup>2</sup> )	流出量観測位置		
			緯度	経度	名称
1	前田川	21.0	37.4394	141.0003	—
2	熊川	63.9	37.3841	141.0270	—
3	高瀬川	238.6	37.4856	140.9980	—
	請戸川	148.7	37.4975	141.0016	—
4	阿武隈川	4500.8	38.0296	140.8081	江尻観測所（水文水質観測所）

表 4-43 計算格子

	計算格子の点数	計算格子の面数 (三角形)
前田川	1588	838
熊川	4441	2281
請戸川	3204	1650
阿武隈川	5516	2806

③ 前田川

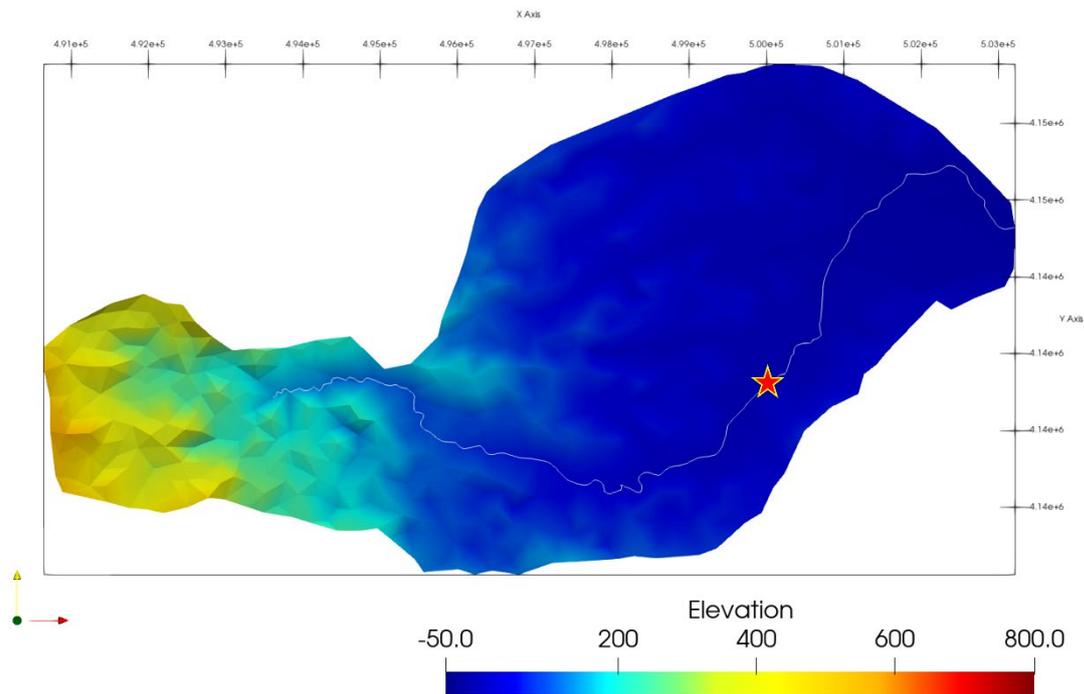


図 4-36 対象河川（前田川） ※星印は流出量観測所の位置

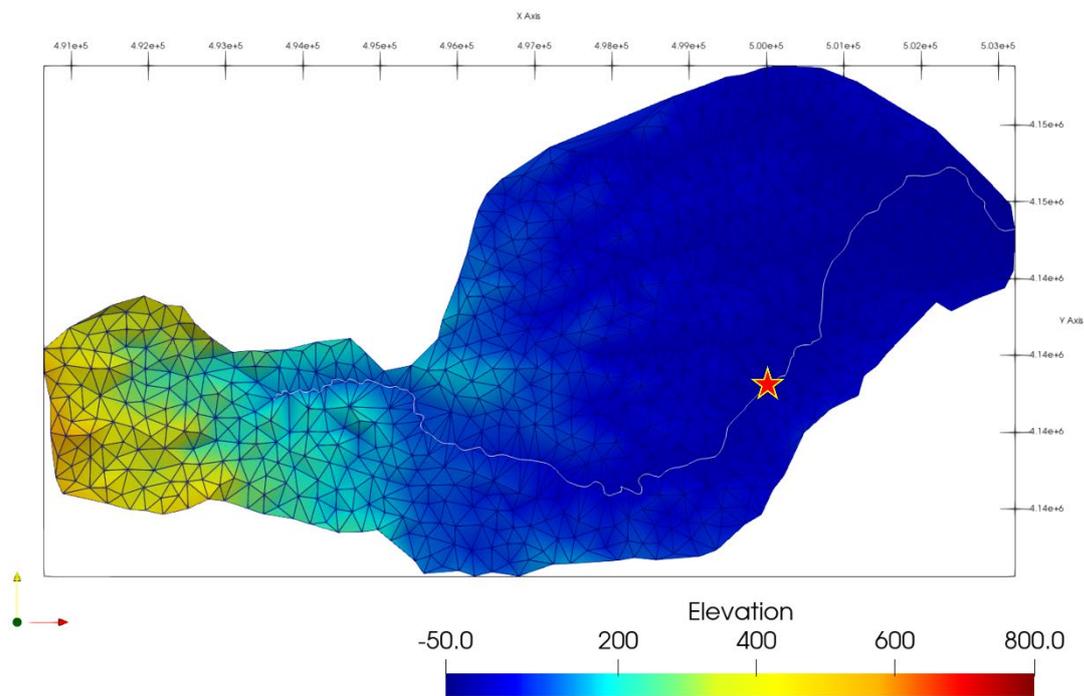


図 4-37 RADFLOW 計算格子（前田川） ※星印は流出量観測所の位置

④ 熊川

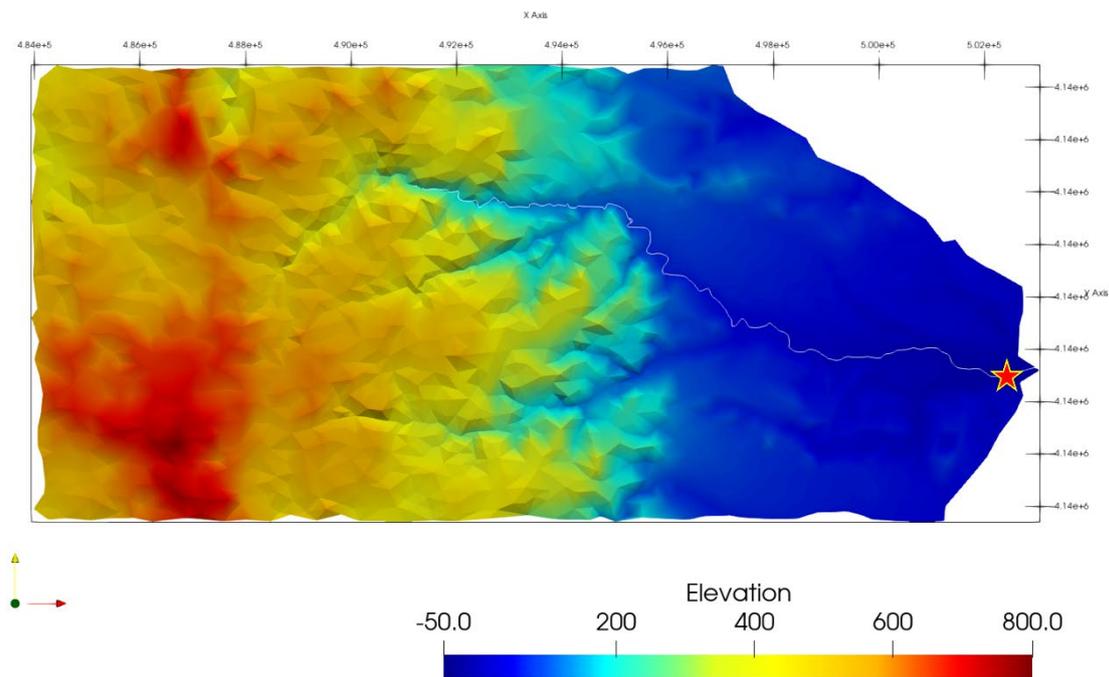


図 4-38 対象河川（熊川） ※星印は流出量観測所の位置

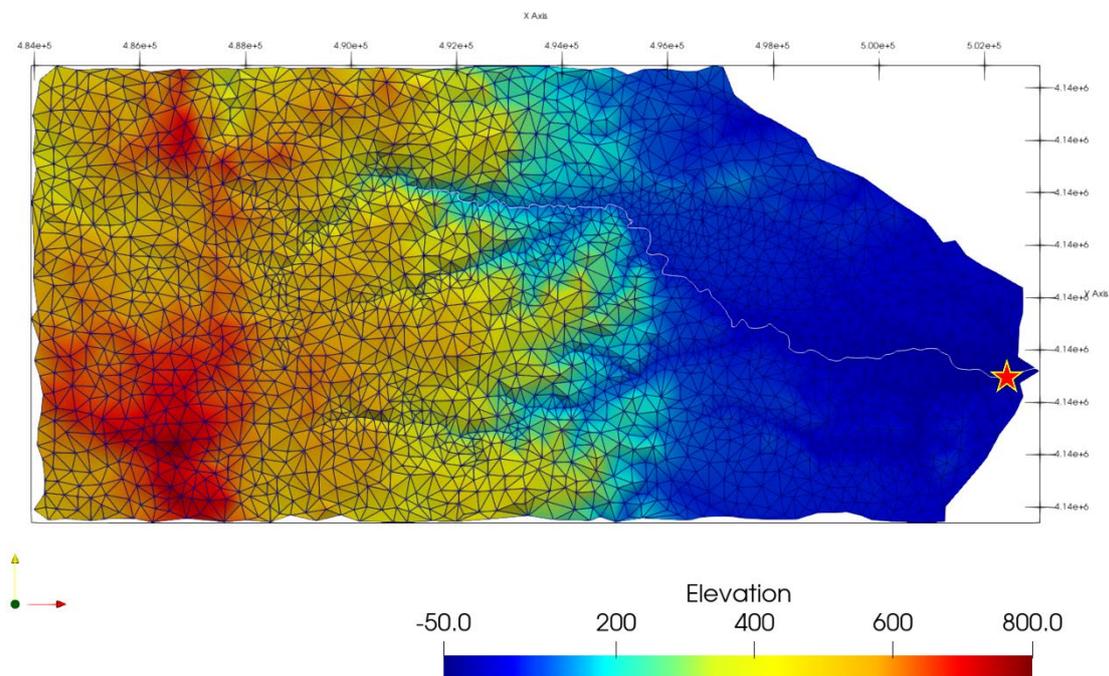


図 4-39 RADFLOW 計算格子（熊川） ※星印は流出量観測所の位置

⑤ 請戸川

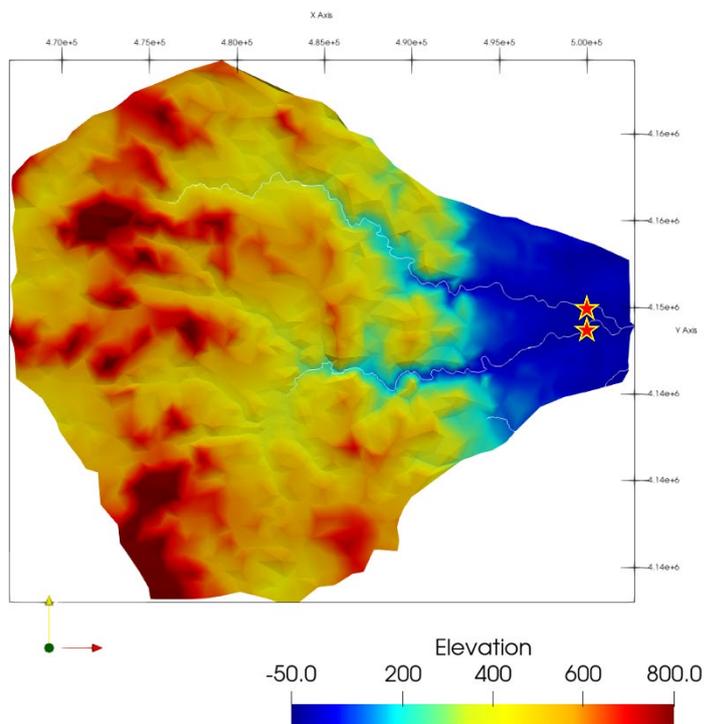


図 4-40 対象河川（請戸川） ※星印は流出量観測所の位置

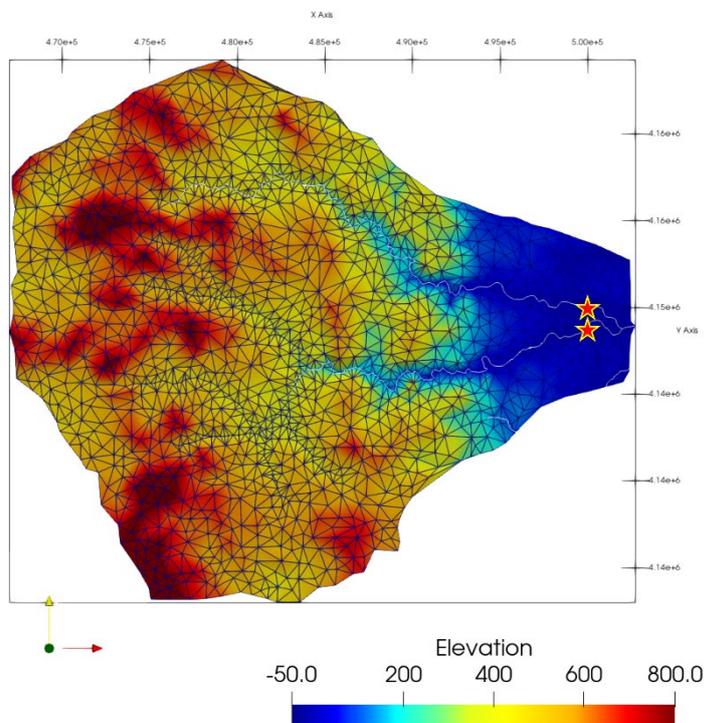


図 4-41 RADFLOW 計算格子（請戸川） ※星印は流出量観測所の位置

⑥ 阿武隈川

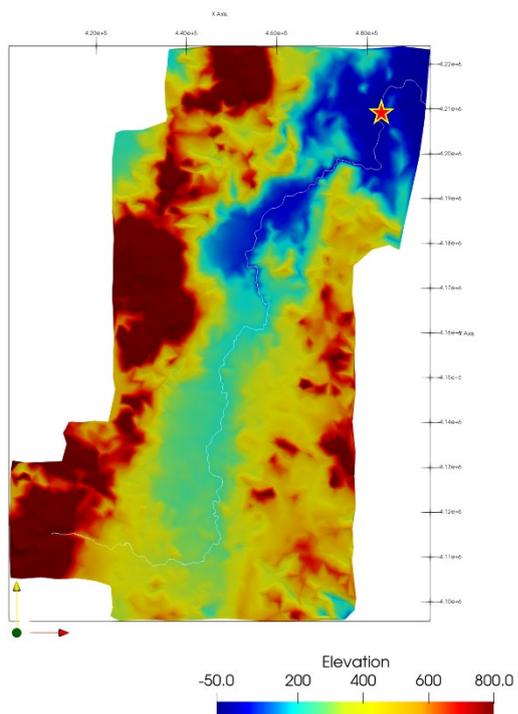


図 4-42 対象河川（阿武隈川） ※星印は流出量観測所の位置

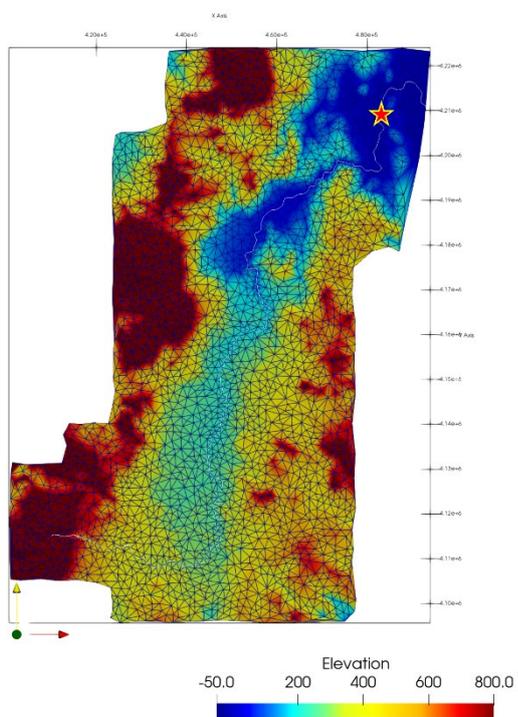


図 4-43 RADFLOW 計算格子（阿武隈川） ※星印は流出量観測所の位置

### 3. 地理空間情報の面積比率一覧

#### ⑦ 前田川

表 4-44 土地利用データの面積比率（前田川）

河川：前田川， 属性：土地利用	面積比率(%)
河川	17.27
水域	0.52
都市	1.12
水田	0.27
畑地	1.23
草地	15.12
落葉広葉樹(DBF)	19.22
落葉針葉樹(DNF)	17.74
常緑広葉樹(EBF)	9.70
常緑針葉樹(ENF)	17.41
裸地	0.40
雪氷	0.00
その他	0.00
データなし	0.00

表 4-45 土壌データの面積比率（前田川）

河川：前田川， 属性：土壌	面積比率(%)
グライ土	3.82
ポドゾル	0.00
灰色低地土	18.09
褐色森林土	25.66
褐色低地土	5.05
岩屑土	0.00
黒ボク土	10.40
水面	0.00
赤黄色土	33.78
泥炭土	3.20
埋立地	0.00
未熟土	0.00
未定義	0.00
その他	0.00

表 4-46 表層地質データの面積比率 (前田川)

河川：前田川, 属性：表層地質	面積比率(%)
安山岩類	0.00
火山灰・ローム	0.00
花崗岩類	22.99
結晶片岩類	0.00
玄武岩類	0.00
洪積砂礫(段丘堆積物を含む)	0.00
砂岩・泥岩・礫岩など	0.00
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)	59.70
砂岩・頁岩・礫岩など	0.00
砂丘砂	0.00
砂礫・粘土	17.31
蛇紋岩・橄欖岩	0.00
水域	0.00
石灰岩	0.00
粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩)	0.00
斑れい岩・輝緑岩	0.00
片麻岩類	0.00
埋立地	0.00
溶結凝灰岩	0.00
流紋岩類	0.00
その他	0.00

⑧ 熊川

表 4-47 土地利用データの面積比率（熊川）

河川：熊川， 属性：土地利用	面積比率(%)
河川	10.22
水域	0.27
都市	1.26
水田	0.50
畑地	2.30
草地	10.96
落葉広葉樹(DBF)	26.20
落葉針葉樹(DNF)	20.93
常緑広葉樹(EBF)	6.98
常緑針葉樹(ENF)	20.07
裸地	0.31
雪氷	0.00
その他	0.00
データなし	0.00

表 4-48 土壌データの面積比率（熊川）

河川：熊川， 属性：土壌	面積比率(%)
グライ土	0.00
ポドゾル	0.00
灰色低地土	10.45
褐色森林土	50.16
褐色低地土	1.95
岩屑土	0.00
黒ボク土	26.87
水面	0.00
赤黄色土	10.57
泥炭土	0.00
埋立地	0.00
未熟土	0.00
未定義	0.00
その他	0.00

表 4-49 表層地質データの面積比率 (熊川)

河川：熊川, 属性：表層地質	面積比率(%)
安山岩類	0.00
火山灰・ローム	0.00
花崗岩類	67.90
結晶片岩類	0.00
玄武岩類	0.00
洪積砂礫(段丘堆積物を含む)	0.00
砂岩・泥岩・礫岩など	0.00
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)	22.26
砂岩・頁岩・礫岩など	0.00
砂丘砂	0.00
砂礫・粘土	8.80
蛇紋岩・橄欖岩	1.05
水域	0.00
石灰岩	0.00
粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩)	0.00
斑れい岩・輝緑岩	0.00
片麻岩類	0.00
埋立地	0.00
溶結凝灰岩	0.00
流紋岩類	0.00
その他	0.00

⑨ 請戸川

表 4-50 土地利用データの面積比率（請戸川）

河川：請戸川， 属性：土地利用	面積比率(%)
河川	7.92
水域	0.00
都市	0.16
水田	0.78
畑地	1.56
草地	8.85
落葉広葉樹(DBF)	30.20
落葉針葉樹(DNF)	28.21
常緑広葉樹(EBF)	1.44
常緑針葉樹(ENF)	20.37
裸地	0.53
雪氷	0.00
その他	0.00
データなし	0.00

表 4-51 土壌データの面積比率（請戸川）

河川：請戸川， 属性：土壌	面積比率(%)
グライ土	2.05
ポドゾル	0.00
灰色低地土	5.20
褐色森林土	54.26
褐色低地土	1.04
岩屑土	0.00
黒ボク土	33.20
水面	0.00
赤黄色土	3.51
泥炭土	0.69
埋立地	0.00
未熟土	0.06
未定義	0.00
その他	0.00

表 4-52 表層地質データの面積比率 (請戸川)

河川：請戸川, 属性：表層地質	面積比率(%)
安山岩類	0.00
火山灰・ローム	0.00
花崗岩類	85.85
結晶片岩類	0.00
玄武岩類	0.00
洪積砂礫(段丘堆積物を含む)	0.00
砂岩・泥岩・礫岩など	0.00
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)	7.25
砂岩・頁岩・礫岩など	0.00
砂丘砂	0.00
砂礫・粘土	4.29
蛇紋岩・橄欖岩	0.00
水域	0.00
石灰岩	0.00
粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン(輝緑凝灰岩)	0.00
斑れい岩・輝緑岩	2.61
片麻岩類	0.00
埋立地	0.00
溶結凝灰岩	0.00
流紋岩類	0.00
その他	0.00

⑩ 阿武隈川

表 4-53 土地利用データの面積比率（阿武隈川）

河川：阿武隈川, 属性：土地利用	面積比率(%)
河川	3.05
水域	0.76
都市	2.57
水田	9.90
畑地	6.02
草地	10.24
落葉広葉樹(DBF)	32.65
落葉針葉樹(DNF)	17.30
常緑広葉樹(EBF)	1.03
常緑針葉樹(ENF)	15.53
裸地	0.95
雪氷	0.00
その他	0.00
データなし	0.00

表 4-54 土壌データの面積比率（阿武隈川）

河川：阿武隈川, 属性：土壌	面積比率(%)
グライ土	4.80
ポドゾル	4.08
灰色低地土	7.61
褐色森林土	47.23
褐色低地土	2.60
岩屑土	0.49
黒ボク土	26.03
水面	0.54
赤黄色土	3.14
泥炭土	1.29
埋立地	0.00
未熟土	2.18
未定義	0.01
その他	0.00

表 4-55 表層地質データの面積比率（阿武隈川）

河川：阿武隈川, 属性：表層地質	面積比率(%)
安山岩類	9.97
火山灰・ローム	0.00
花崗岩類	30.21
結晶片岩類	2.11
玄武岩類	0.13
洪積砂礫(段丘堆積物を含む)	6.16
砂岩・泥岩・礫岩など	0.00
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)	21.48
砂岩・頁岩・礫岩など	0.27
砂丘砂	0.00
砂礫・粘土	11.32
蛇紋岩・橄欖岩	0.00
水域	0.52
石灰岩	0.06
粘板岩・砂岩・チャート・シャールスタイン (輝緑凝灰岩)	1.13
斑れい岩・輝緑岩	0.50
片麻岩類	2.48
埋立地	0.00
溶結凝灰岩	6.66
流紋岩類	7.01
その他	0.00

## ■ 5章 陸域からの流出と海域間（沿岸及び沖合）接続に係る整備と試解析

### 5.1 本章の概要

本5章では、海域（沿岸及び沖合）モデルの整備と試解析を実施した結果を報告する。3章では、集中定数型流出モデル MERCURY[5-1][5-2]による海域への流出量が算定されたが、本5章では、その流出による海域への影響を評価するため実施した整備と、実際に福島の4河川からの流出結果を基に試解析を実施した結果について報告する。

海域（沿岸及び沖合）での流出影響を分析する計算では、沿岸にて3D-Sea-SPEC[5-3]を適用し、沖合ではROMS[5-4]を接続して適用することが想定される。その接続については、令和3年度の当該事業にて報告済みであり、令和4年度は、3D-Sea-SPECが有する、塩分濃度の変化により発生する懸濁態の動的挙動と、それに伴って起こる放射性セシウム（Cs-137）の動的挙動について報告する。尚、本事業では、複数のケースについて、比較検証を実施するため、計算コストを削減し、沿岸域を簡略化（沿岸域の格子解像度1km程度とし、詳細な海岸線は単純化する）する。複雑な地形を有する沿岸域での挙動解析等は将来の課題とした。以下、本章で実施する項目と該当節を記す。

- 1) 海域（沿岸及び沖合）モデルの整備と試解析対象の設定 ⇒ 5.2
- 2) 海域モデルによる試解析（固液分配係数の塩分濃度依存性の考慮と海域でのCs挙動） ⇒ 5.3
- 3) 海域モデルによる試解析（凝集・沈殿に係る塩分濃度依存性の考慮と海域でのCs挙動） ⇒ 5.4

尚、2), 3)については、令和2, 3年度の当該事業において、河川の下流にて現れる汽水域での感度解析を行ったが、本事業では、沿岸域での解析を実施することで、その影響について検討する。

以下、上記の整備及び試解析項目に従い、実施する整備項目の他、試解析の対象領域や計算条件等を記した後、福島の4河川及び1F港湾からの流入（沿岸に対し無視できない寄与を及ぼすため考慮）の影響を解析するため、試解析を行った結果を報告し課題を整理する。

### 5.2 海域（沿岸及び沖合）モデルの整備と試解析計算条件

#### 5.2.1 沿岸モデル（3D-Sea-SPEC） - 沖合モデル（ROMS）による流出解析

令和3年度当該事業により開発した、沿岸モデル（3D-Sea-SPEC）と海域モデル（ROMS）の接続機能を用いて、福島1F近傍の沿岸及び沖合海域の放射性セシウム（Cs-137）の流出拡散の試解析を実施する準備を行った。解析対象期間は、2020/01/25 0:00 ~ 2020/02/10 0:00 の16日間とした。この期間を選んだ理由は、期間中に低気圧が福島県に接近し、河川の流量が増大したため、放射性セシウムの流出量が増大する時期を含んでいたからである。尚、解析範囲は、令和3年度に入手したデータセットの解析範囲と同じとした。図5-1には、実際に利用するメッシュ図を示す。尚、解析メッシュ数は、以下のとおりである。

内側：5kmメッシュ幅 41×59×30= 72,570メッシュ  
外側：15kmメッシュ幅 69×90×30=186,300メッシュ  
合計：258,870メッシュ

図 5-1:左図は、ROMS のみでネスティングした場合と 3D-Sea-SPEC—ROMS との連成解析用メッシュであり、右図は、3D-Sea-SPEC だけで解析する際のメッシュである。水平方向での違いはないが、鉛直方向については、採用する座標系が異なることを注意する。

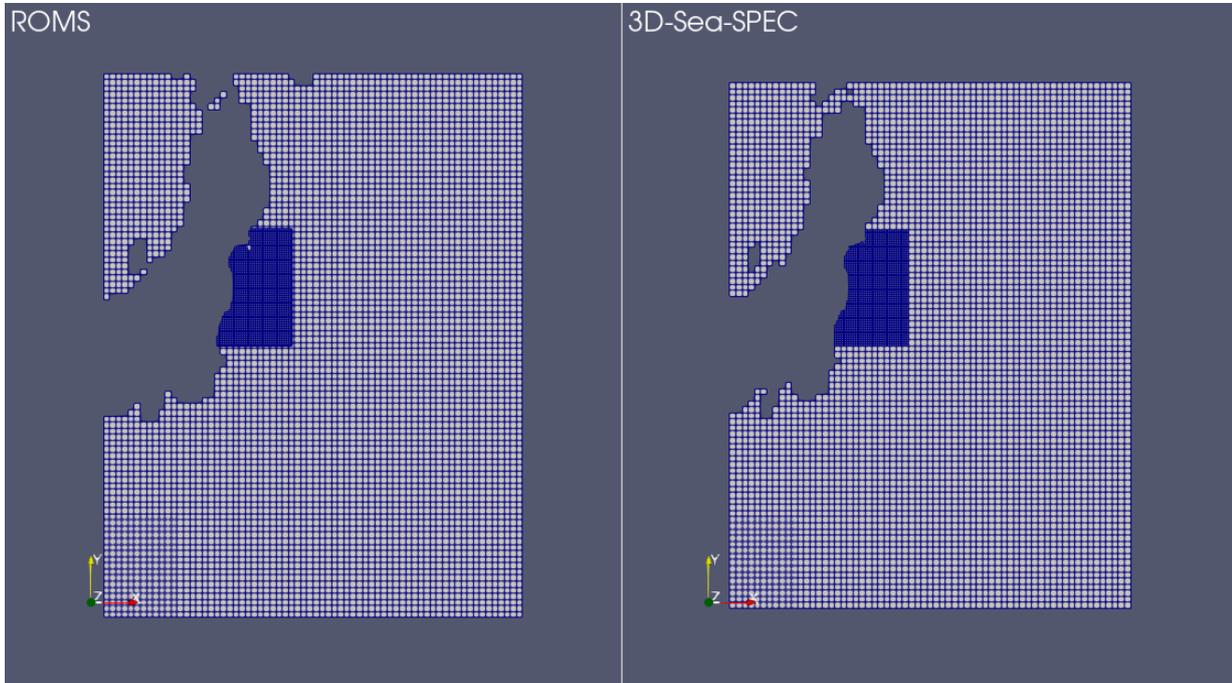


図 5-1 解析メッシュ：左図：ROMS のみでネスティング、または、3D-Sea-SPEC—ROMS との連成解析用メッシュ（外側が ROMS）。右図：3D-Sea-SPEC のみの解析用メッシュ

#### ① 解析対象期間・解析範囲のデータセット作成と試解析

設定した解析対象期間をセットアップするため、HYCOM データサーバ

(<https://www.hycom.org/dataserver>) から海況データを、データ統合・解析システム DIAS

(<https://diasjp.net/>) から気象データをダウンロードし、解析に必要なデータセットを作成した。また、作成したデータセットで滞りなく解析が実施可能かどうか、以下、3 パターンの 2way ネスティングによる試解析を実施した。

- (1) ROMS のみによる試解析
- (2) 3D-Sea-SPEC のみによる試解析
- (3) 3D-Sea-SPEC—ROMS による連成試解析

以下に、解析対象期間最終時刻（2020/02/10 0:00）の表層における、流速  $U$  と水温の空間分布を示す。

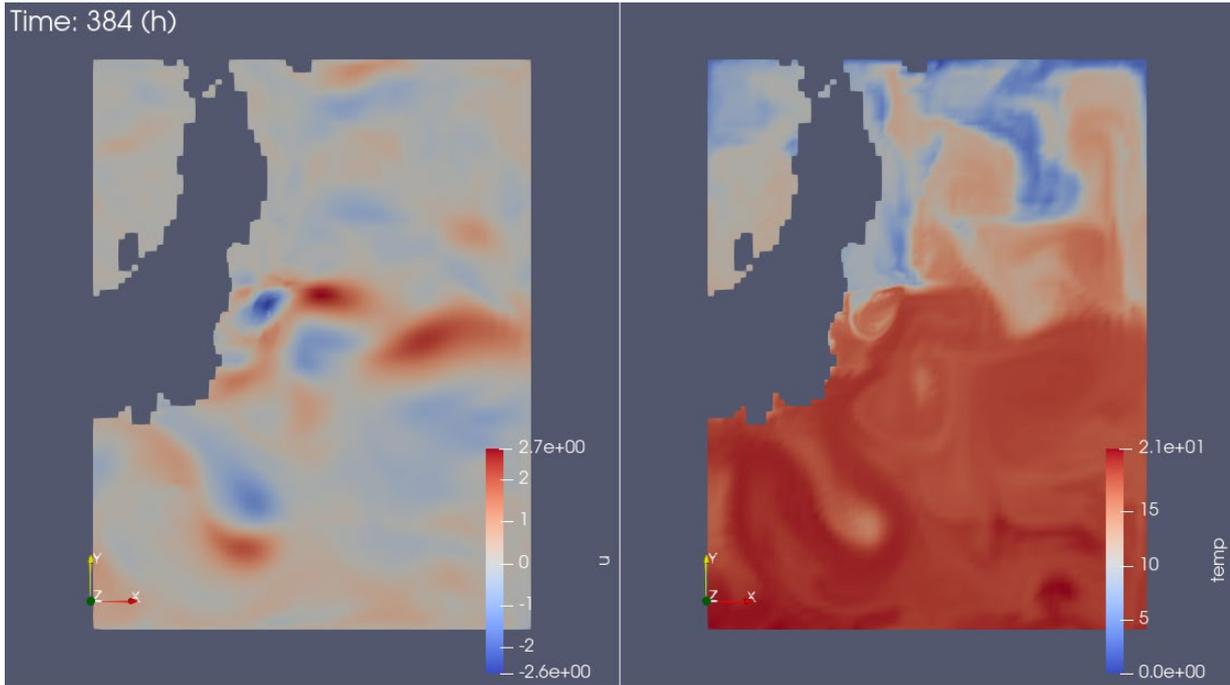


図 5-2 試解析パターン(1) ROMS のみによる試解析結果 (2020/02/10 0:00) 左図：流速  $u$  表層分布 (m/s)、右図：水温 (temp) 表層分布 ( $^{\circ}\text{C}$ )

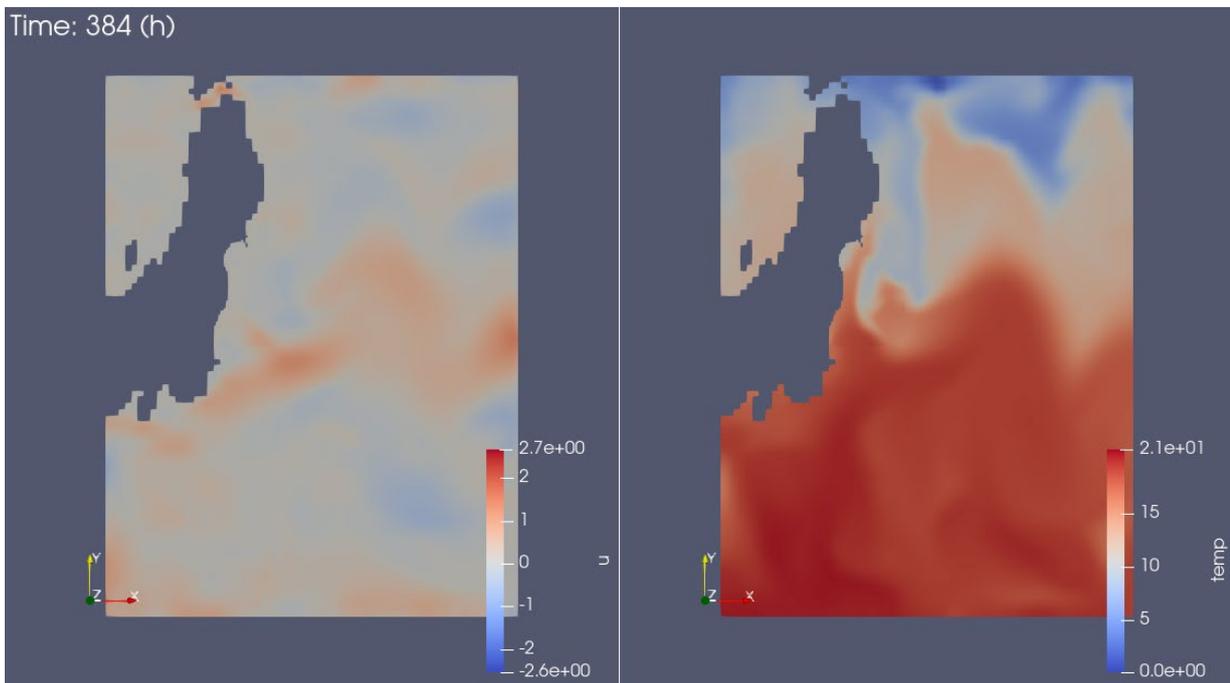


図 5-3 試解析パターン(2) 3D-Sea-SPEC のみによる試解析結果 (2020/02/10 0:00) 左図：流速  $u$  表層分布(m/s)、右図：水温 (temp) 表層分布 ( $^{\circ}\text{C}$ )

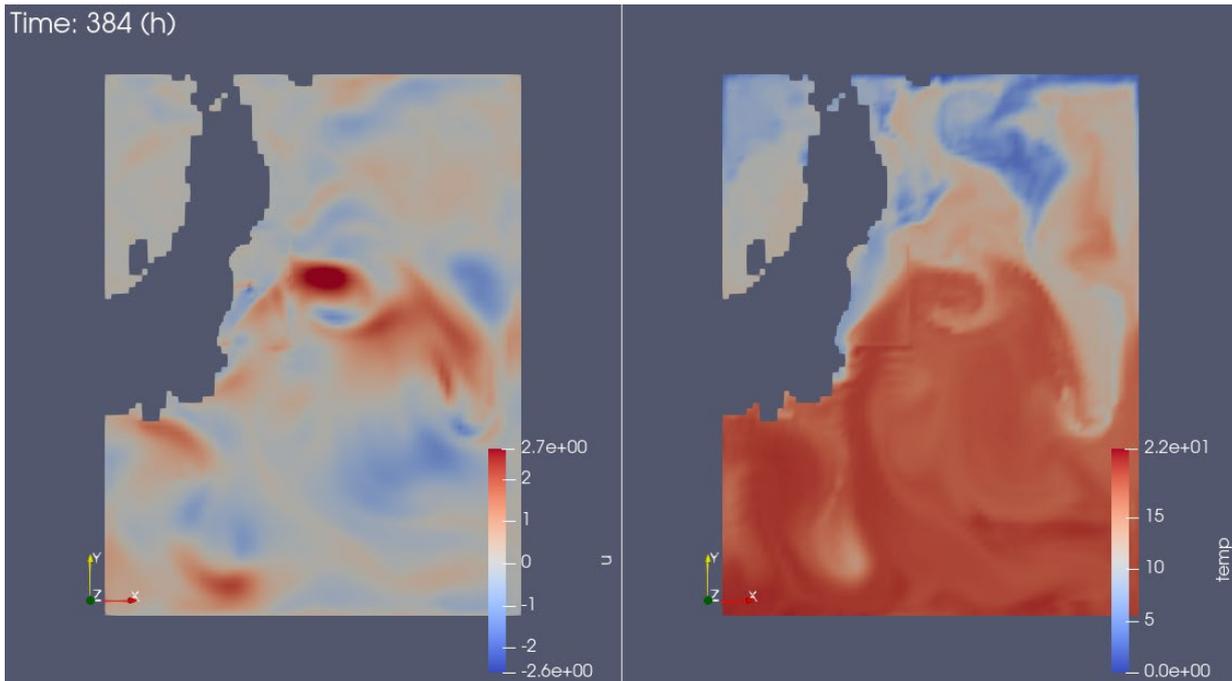


図 5-4 試解析パターン(3) 3D-Sea-SPEC-ROMS による連成試解析結果 (2020/02/10 0:00) 左図 : 流速 u 表層分布(m/s)、右図 : 水温 (temp) 表層分布 (°C)

尚、表 5-1 に、3D-Sea-SPEC および ROMS に適用されている解析スキームの一覧を示す。ROMS と 3D-Sea-SPEC は異なる計算スキームを採用しているため、解析パターンにより結果（流動場及び水温分布）に差異が見られる。ROMS は、令和 3 年度当該事業にて用いたデータセット（NRA 提供）と同じスキームを採用した（表 5-1 参照）。3D-Sea-SPEC では、粘性モデル・拡散モデルに対し、【一定値】／【smagorinsky モデル】の選択が可能だが、その他の項目については、記載されているスキームのみが使用可能である。この試解析から、大局的な状況は、おおよそ同じだが、局所的に見るとその詳細は採用スキームの違いが反映されることが分かる。

表 5-1 適用スキーム一覧

基礎式		ROMS	3D-Sea-SPEC
運動方程式	慣性項	3 次精度風上	1 次精度風上
	粘性項	非解析	2 次精度中心差分
	粘性モデル	—	0.02 [m <sup>2</sup> /s]一定 ※一般値の 1/100 倍程度
移流拡散式	移流項	MPDATA	1 次精度風上
	拡散項	2 次精度中心差分	2 次精度中心差分
	拡散モデル	smagorinsky	0.02/Prt [m <sup>2</sup> /s]一定 Prt=0.7

各々の解析パターンにおける凡その計算時間は以下の通りとなる。

- |  |        |
|--|--------|
| (1) ROMS のみによる試解析                            | ～2 時間  |
| (2) 3D-Sea-SPEC のみによる試解析                     | ～16 時間 |
| ※静水圧近似を用いて実施                                 |        |
| (3) 3D-Sea-SPEC—ROMS による連成試解析                | ～96 時間 |
| ※3D-Sea-SPEC は非静水圧解析を実施した一方、静水圧解析にすると発散している。 |        |

尚、上記の試解析には、以下のスペックの PC を使用した。

【CPU】 Intel Core i7-10700K 3.8GHz 8 コア 16 スレッド  
【メモリ】 32GB

また、上記の試解析では、懸濁態及び懸濁態の Cs-137 は考慮していない。従って、本解析（Cs-137 の挙動を含む計算）においては更に計算時間がかかることを注意する。

## ② ROMS による懸濁態を考慮した解析（調査）

令和 3 年度当該事業では、溶存態の Cs-137 成分のみを解析対象としたが、本事業では、懸濁態や懸濁態 Cs-137 を考慮し、モニタリングポイントにおける観測結果（Cs-137 濃度）との比較を実施する。

尚、ROMS にて、懸濁態や懸濁態 Cs-137、懸濁態の凝集・分解、沈降・巻き上げ、溶存態 Cs-137・懸濁態 Cs-137 間の固液分配を考慮可能かどうかについて文献調査を行った。以下、その調査結果を要約する。

先ず、参考文献[5-1]では、ROMS による懸濁態解析を実施しているが、凝集・分解は非考慮であり、溶存態 Cs-137 と懸濁態 Cs-137 の固液分配に関する記載はない。また、阿武隈川河口における懸濁態 Cs-137 濃度は、以下の式で評価されている。

$$C_{sed} = 4386.2 \left( \frac{6}{\rho_j D_j} \right)^{1.1509}$$

ここで、 $C_{sed}$ ：懸濁態濃度 Cs-137、 $\rho_j$ ：土砂画分 j の密度、 $D_j$ ：土砂画分 j の直径、である。従って、放射性 Cs-137 の固液分配に関しては考慮していないものと考えられる。次に、参考文献[5-2]では、懸濁態の堆積・巻き上げに関する解析の記載があり、初期堆積厚さ分布などのデータを作成する必要がある。

以上より、ROMS による懸濁態の解析では、沈降・巻き上げに関しては考慮可能と考えられるが、初期堆積厚さ等を設定する必要がある一方、凝集・分解及び放射性 Cs-137 の固液分配を考慮する解析には何等かの工夫が必要と考えられるため、ROMS での懸濁態及び懸濁態 Cs-137 の解析には、沈降・巻き上げ、凝集・分解、固液分配に関しては非考慮とし、3D-Sea-SPEC にて考慮することとした。尚、懸濁態成分の挙動は、移流拡散方程式による解析とする。

### ③ モニタリングポイントにおける放射性 Cs-137 観測結果

令和4年度本事業では、モニタリングポイントにおける放射性 Cs-137 濃度の観測結果[5-5]が公開されており、その結果との比較検討を実施する。尚、モニタリングポイントは、沿岸域に7点、沖合の表層及び底層にそれぞれ8点となっている。図5-5～5-7に、モニタリングポイント位置と観測結果を示す。

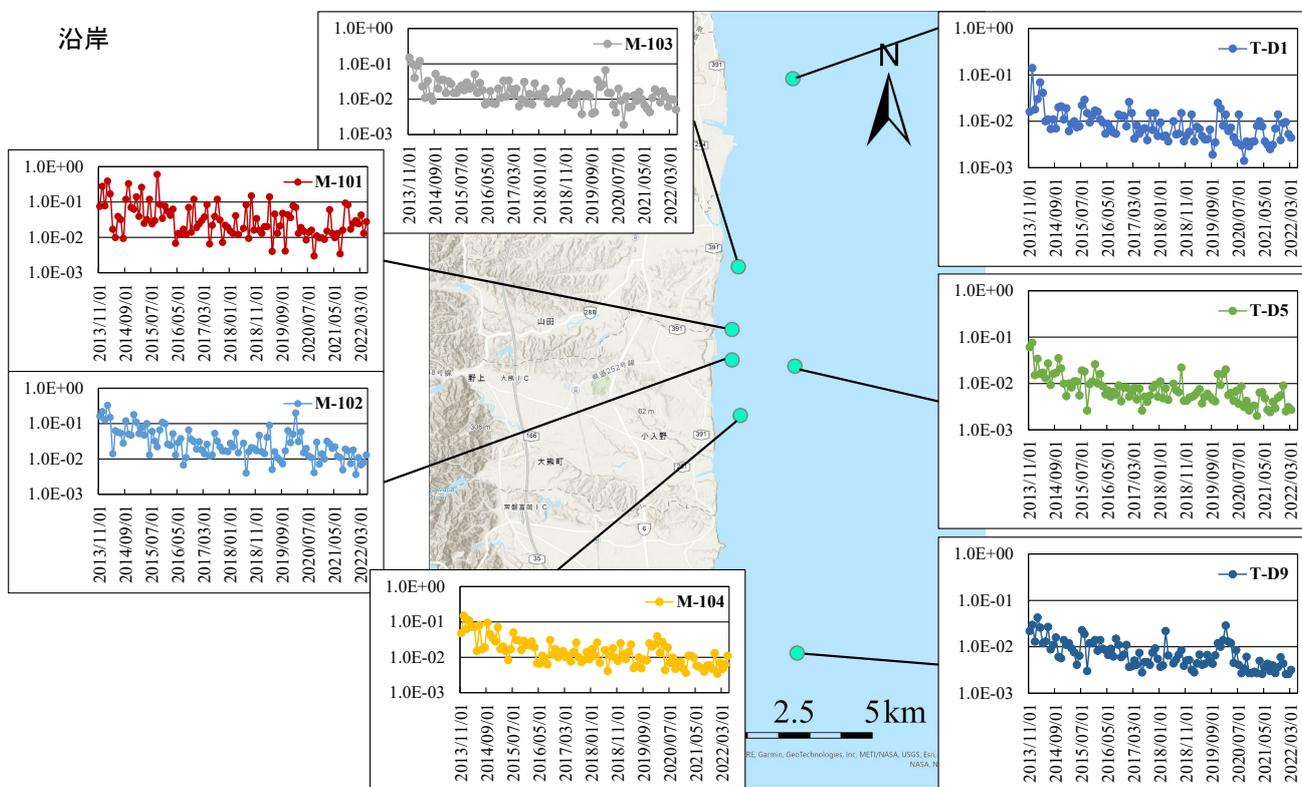


図 5-1 モニタリングポイント位置と観測結果（沿岸）

[Map data: GSI, Esri, HERE, Garmin, GeoTechnologies, Inc., Meti/NASA, USGS, Esri, Intermap, NASA, NGA, USGS].

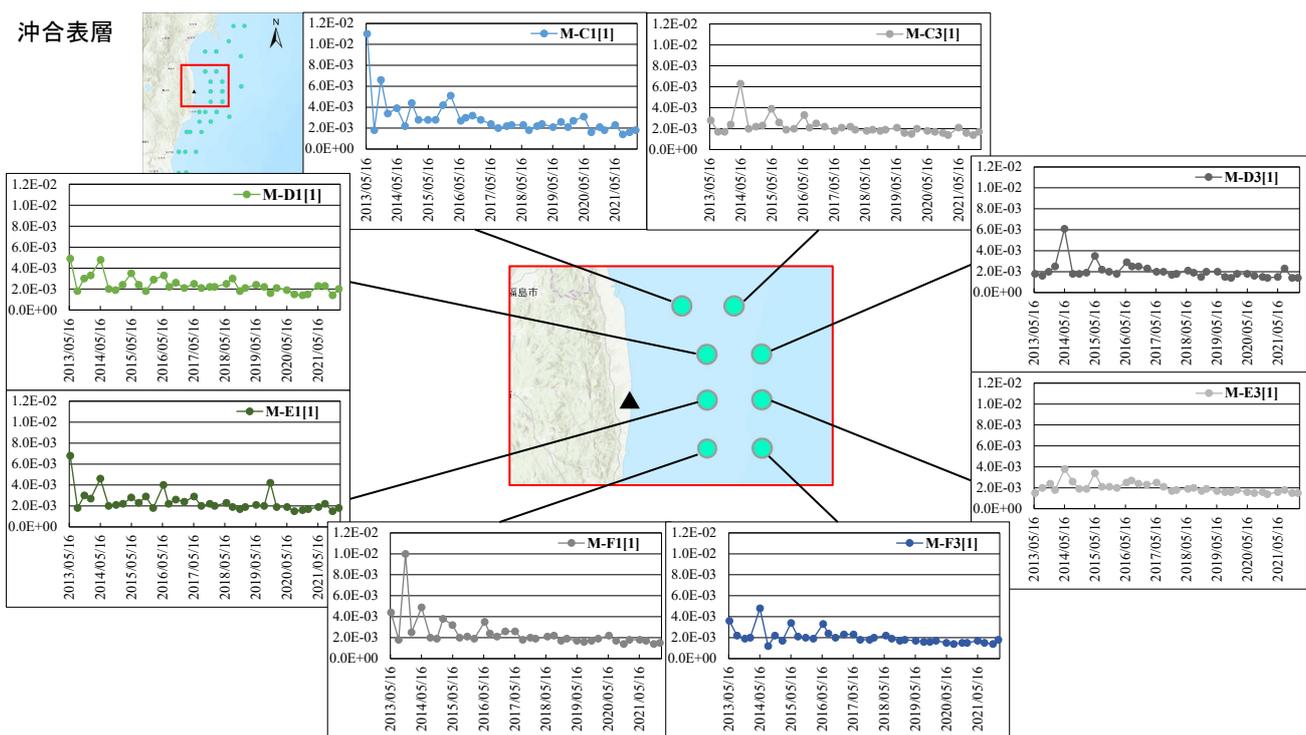


図 5-6 モニタリングポイント位置と観測結果（沖合・表層）

[Map data: Esri, CGIAR, USGS, Esri, HERE, Garmin, FAO, NOAA, USGS].

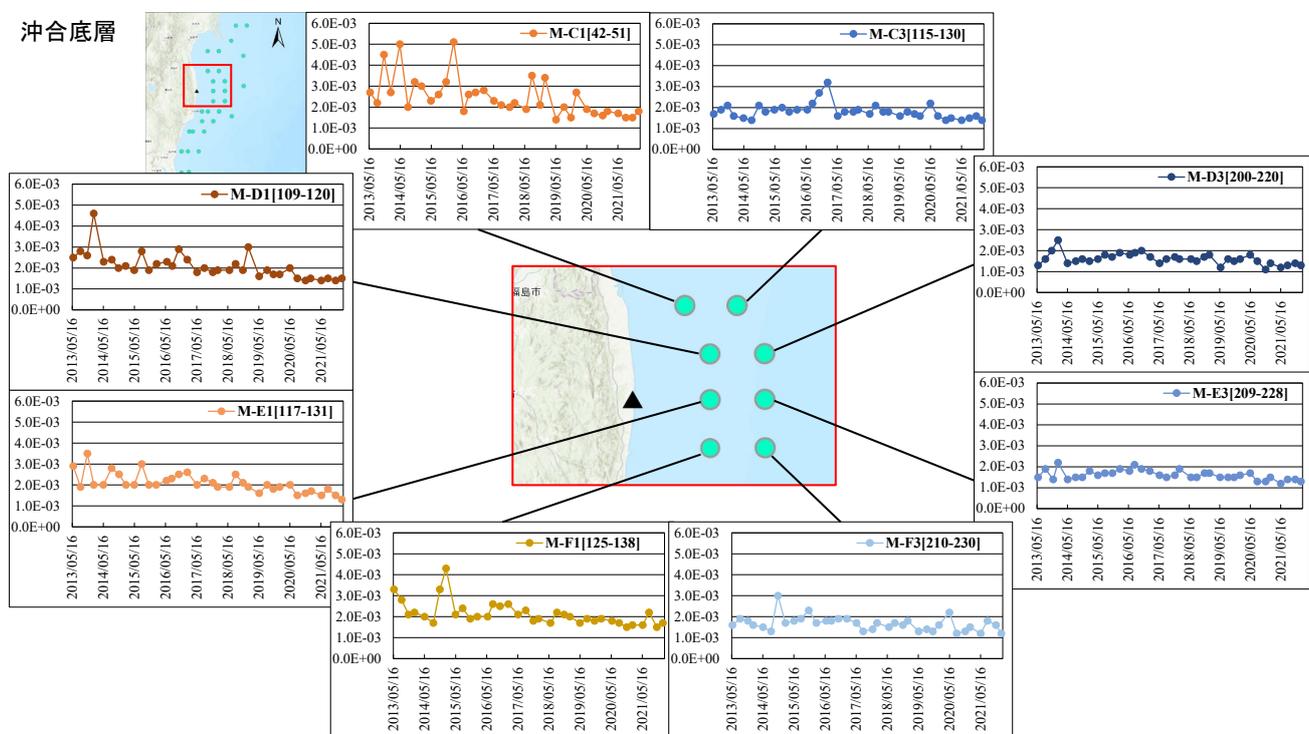


図 5-7 モニタリングポイント位置と観測結果（沖合・底層）

[Map data: Esri, CGIAR, USGS, Esri, HERE, Garmin, FAO, NOAA, USGS].

#### ④ 1F 港湾および河川からの流入条件

沿岸モデル (3D-Sea-SPEC) – 海域モデル (ROMS) の接続機能による、沿岸及び海域の流出拡散解析では、1F 港湾及び請戸川、前田川、熊川の 3 河川からの懸濁態流入量、懸濁態 Cs-137 及び溶存態 Cs-137 流入量を考慮する。尚、阿武隈川は、上記海域から離れており、流入条件として除外した。

解析対象期間における流入条件は MERCURY にて推算した一方、1F 港湾からの流出に関しては、文献 [5-3] に従い、実測結果から推定した溶存態 Cs-137 (Bq/day) のみの流出量を考慮する (流量 1.0 (m<sup>3</sup>/s) で流入すると仮定し単位 (Bq/m<sup>3</sup>) に変換して解析条件として設定)。

請戸川、前田川、熊川の 3 河川については、集中定数型陸域モデル MERCURY による解析結果を用い、流量 (m<sup>3</sup>/h) ・ 懸濁態 (kg/h) ・ 懸濁態 Cs-137 (Bq/h) ・ 溶存態 Cs-137 (Bq/h) で提供されるが、各々の単位を、流量 (m<sup>3</sup>/h) ・ 懸濁態 (kg/m<sup>3</sup>) ・ 懸濁態 Cs-137 (Bq/m<sup>3</sup>) ・ 溶存態 Cs-137 (Bq/m<sup>3</sup>) に変換し、表 5-2 に示す割合で解析条件として設定した。

表 5-2 河川流入割合

項目	割合 (%)		
	シルト	砂	粘土
懸濁態	60	30	10
懸濁態 Cs	83.6	2.5	13.9

図 5-8～図 5-60 に設定した流入条件の時刻歴グラフを示す。

#### <1F 港湾>

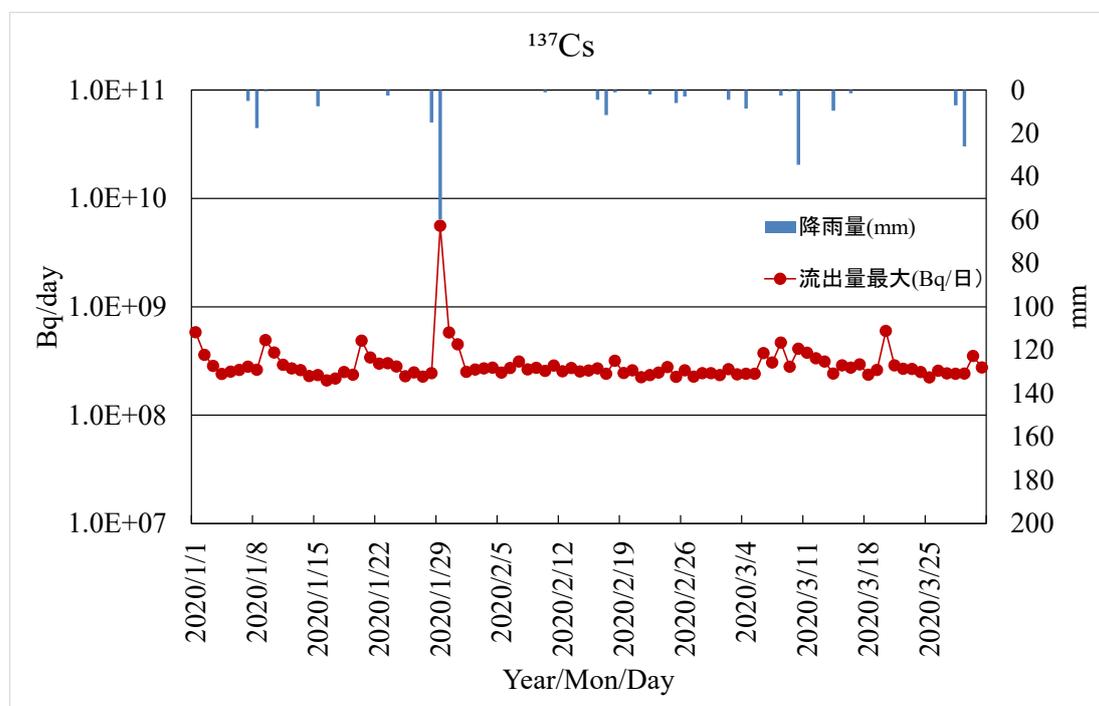


図 5-8 1F 港湾からの流入条件 (Bq/day) と降水量の時刻歴

<請戸川>

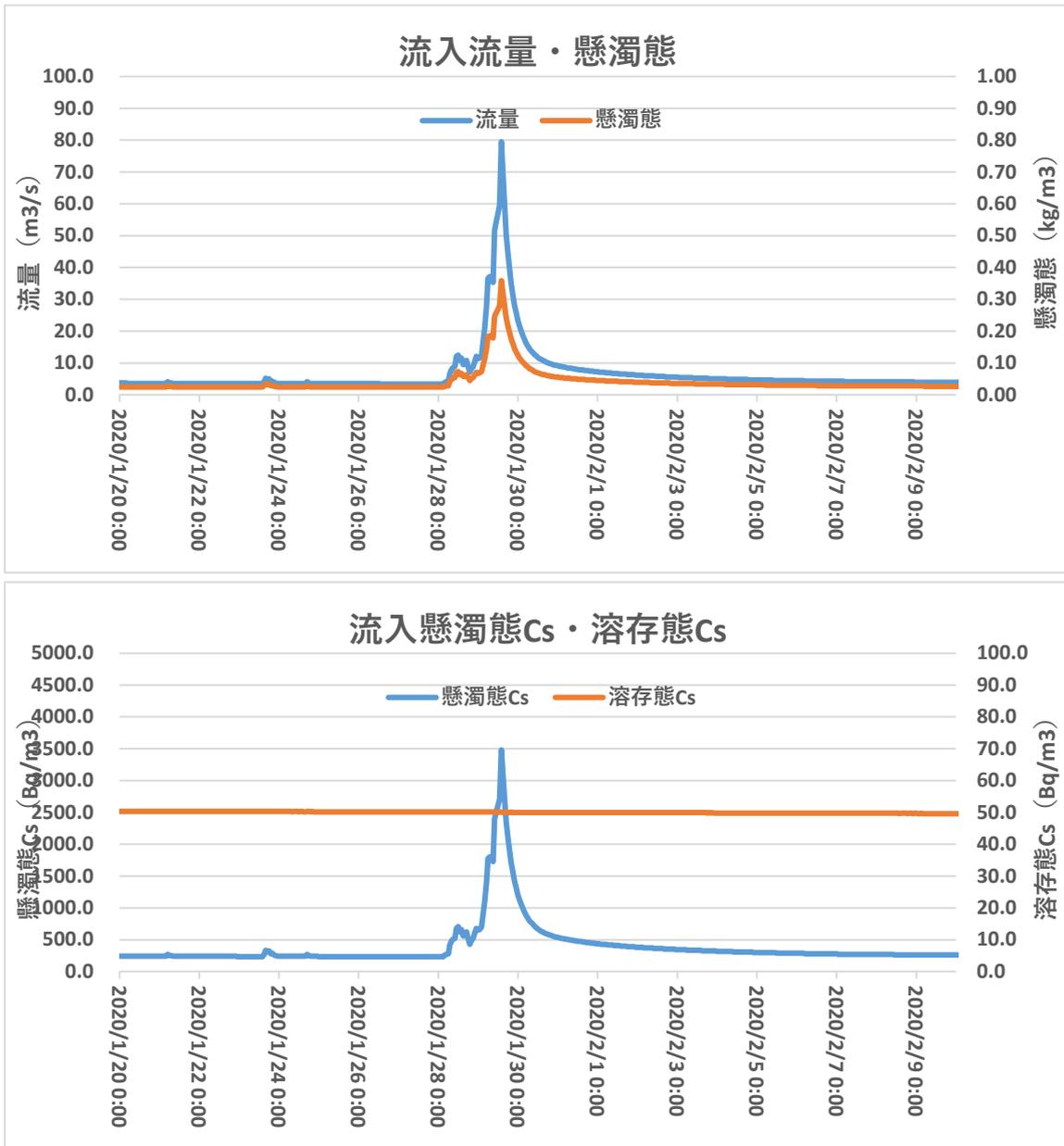


図 5-9 請戸川湾流入条件時刻歴グラフ 上図：河川水流量及び懸濁態流量 下図：懸濁態 Cs-137 流量及び溶存態 Cs-137 流量

<前田川>

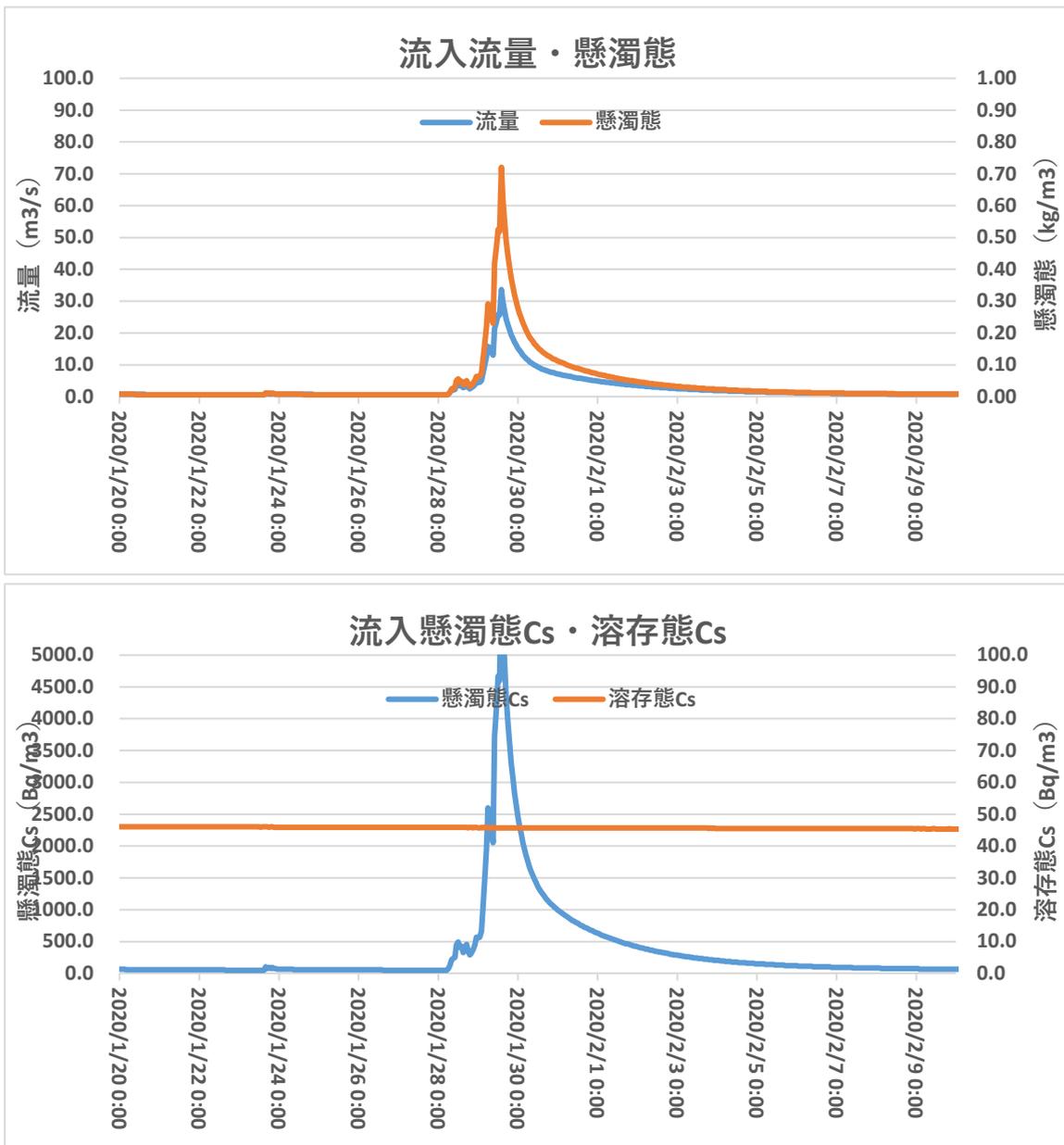


図 5-10 前田川流入条件時刻歴グラフ 上図：河川水流量及び懸濁態流量 下図：懸濁態 Cs-137 流量及び溶存態 Cs-137 流量

<熊川>

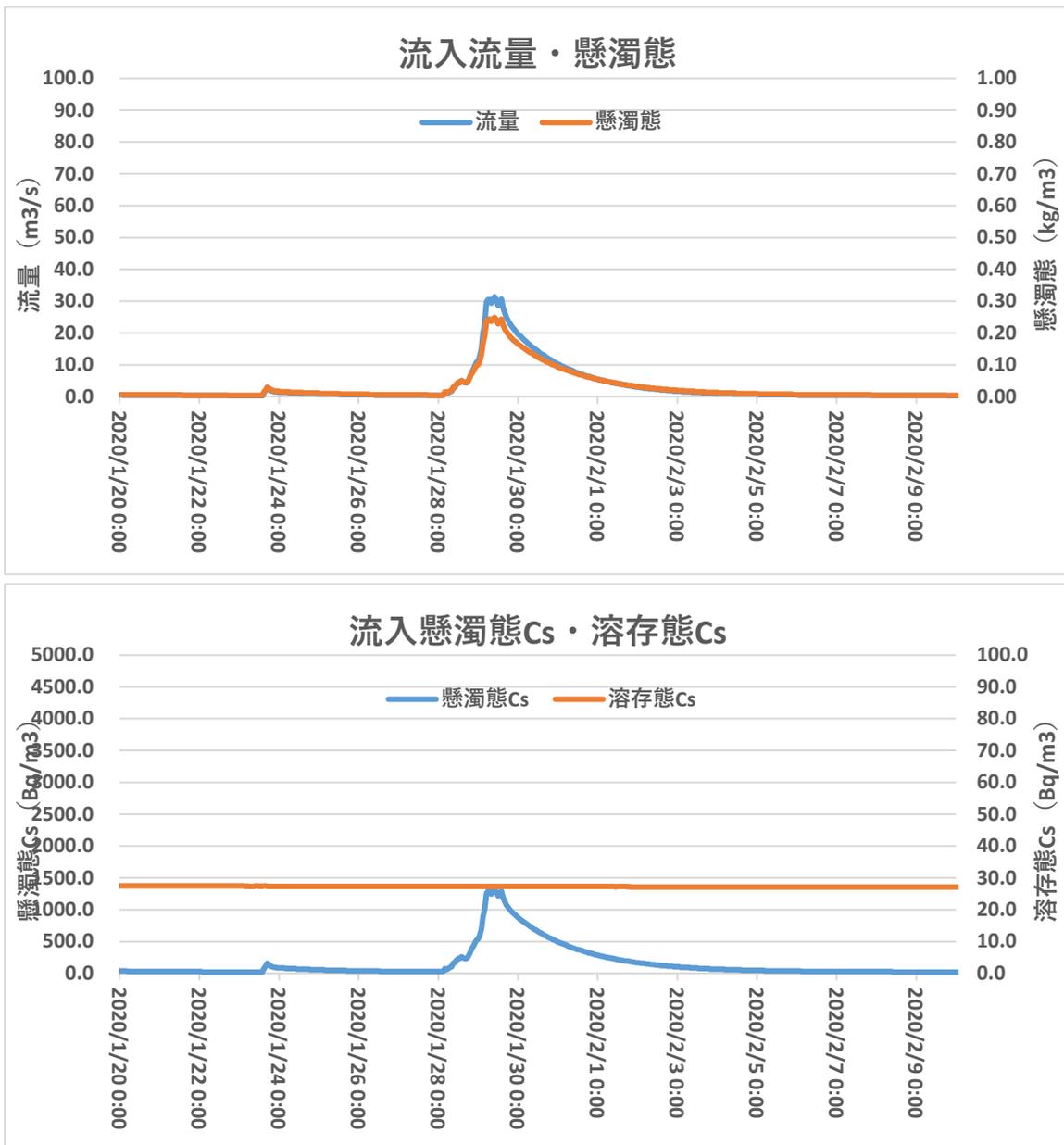


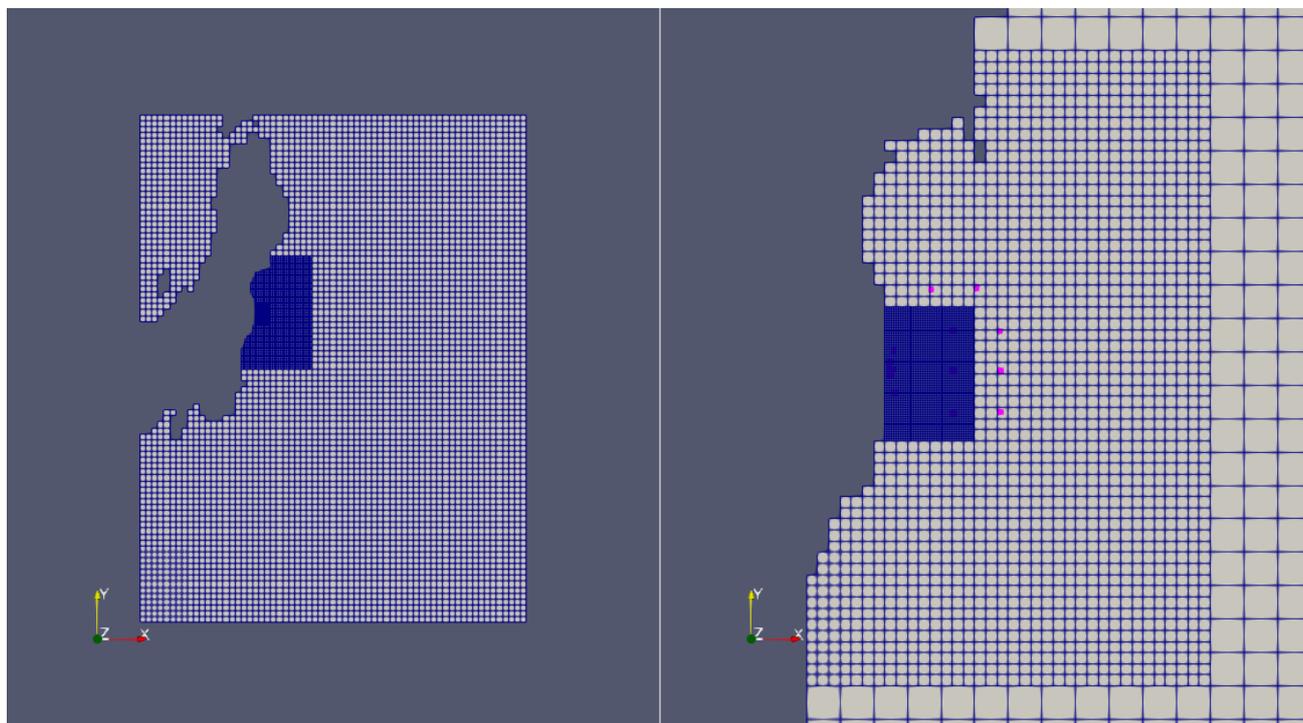
図 5-11 熊川流入条件時刻歴グラフ 上図：河川水流量及び懸濁態流量 下図：懸濁態 Cs-137 流量及び溶存態 Cs-137 流量

⑤ 解析メッシュと解析条件

令和3年度に開発した沿岸モデル(3D-Sea-SPEC)―海域モデル(ROMS)の接続機能による、沿岸及び沖合での流出拡散解析で使用する解析メッシュを図5-12に示す。流入条件設定位置のメッシュ解像度を上げるために、図5-1に対し、さらに内側のネスティング領域を追加してある。解析メッシュ数は以下のとおりである。

最内側：	1km メッシュ幅	42×62×30=	78,120 メッシュ
内側：	5km メッシュ幅	41×59×30=	72,570 メッシュ
最外側：	15km メッシュ幅	69×90×30=	186,300 メッシュ
		合計	: 336,990 メッシュ

解析条件一覧を表 5-3 に示す。水中バックグラウンド濃度は、懸濁態：0.0 (kg/m<sup>3</sup>)、懸濁態 Cs-137：0.0 (Bq/m<sup>3</sup>)、溶存態 Cs-137：1.8 (Bq/m<sup>3</sup>) とした。その値（溶存態濃度）は、モニタリングポイントの観測結果の凡その平均値とした（沿岸と沖合でのバックグラウンド値は大きく異なるが、沖合での値を設定した）。また、1F 港湾、および河川流入の影響を見るため、堆積土砂、および堆積土砂 Cs-137 の初期濃度は、それぞれ 0.0 (kg/m<sup>3</sup>)、0.0 (Bq/m<sup>3</sup>) とした。



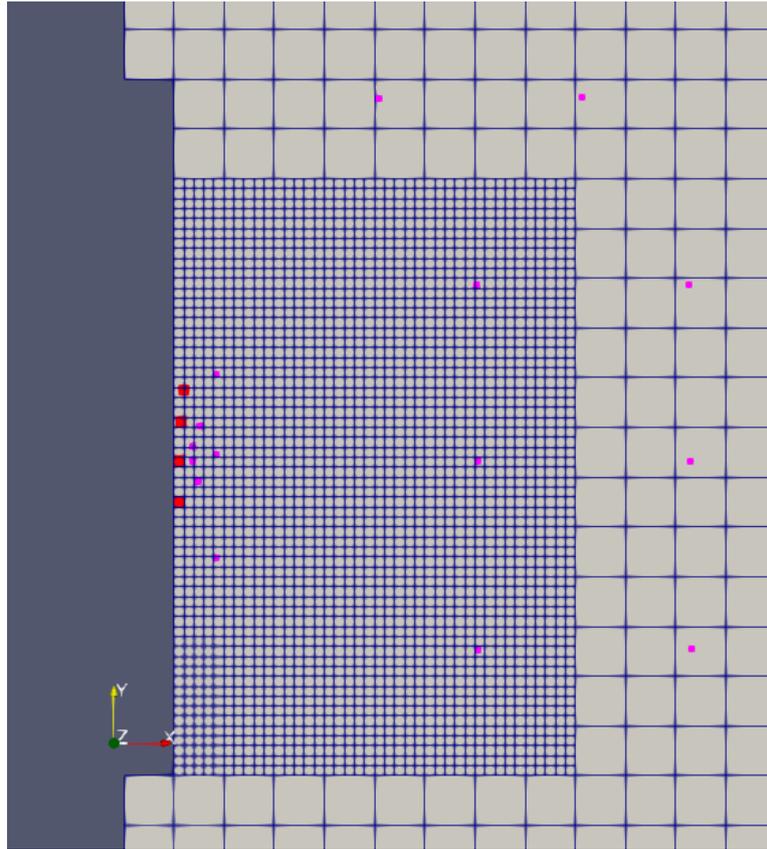


図 5-12 解析メッシュ：上段左図：全域、上段右図：内側領域近傍拡大、下段図：最内側領域近傍拡大図、赤●：北から順番に請戸川、前田川、1F 港湾、熊川の流出位置、紫●：モニタリングポイント位置

表 5-3 解析条件

解析パラメータ		
時間刻み	5.0 sec	
初期堆積土砂厚さ	0.0m	
渦動粘性係数	水平：0.02m <sup>2</sup> /s	鉛直：0.0001m <sup>2</sup> /s
渦動拡散係数	水平：0.02857m <sup>2</sup> /s	鉛直：0.00005m <sup>2</sup> /s
水密度	1027.0kg/m <sup>3</sup> ※懸濁態の沈降速度解析で使用	
水動粘性係数	1.31×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s※懸濁態の沈降速度解析で使用	
土砂モデル		
土砂モデル	TODAM モデル (砂は Toffaleti モデル)	
アーミング係数	1.0	
侵食係数	4.00×10 <sup>-6</sup> kg/m <sup>2</sup> /s	

表 5-1 懸濁態パラメータ

項目	シルト	砂	粘土	備考
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2650	2650	2650	
粒径(m)	3.6×10 <sup>-5</sup>	6.0×10 <sup>-5</sup>	4.2×10 <sup>-6</sup>	
水中初期濃度(kg/m <sup>3</sup> )	0.0	0.0	0.0	
臨界せん断応力 (沈降) (Pa)	0.05	1.0	0.01	
臨界せん断応力 (再浮遊) (Pa)	0.1	2.0	0.2	
海底土砂体積分率(%)	0.0	0.0	0.0	

表 5-5 懸濁態凝集・分解パラメータ (※1.4 では非考慮)

項目	時定数	備考
$k_{-l}$ : 脱着率 (小粒子態 ⇒ 粘土成分)	1.0×10 <sup>-5</sup>	
$k$ : 吸着率 (粘土成分 ⇒ 小粒子態)	1.0×10 <sup>-5</sup>	塩分依存性考慮パラメータ
$\gamma$ : 分解率 (大粒子態、小粒子態 ⇒ 粘土成分)	1.0×10 <sup>-5</sup>	
$r$ : 凝集率 (小粒子態 ⇒ 大粒子態)	1.0×10 <sup>-5</sup>	塩分依存性考慮パラメータ
$r_{-l}$ : 崩壊率 (大粒子態 ⇒ 小粒子態)	1.0×10 <sup>-5</sup>	

表 5-5 放射性物質パラメータ

項目	吸着成分			溶存成分	備考
	シルト	砂	粘土		
水中初期濃度(Bq/m <sup>3</sup> )	0.0	0.0	0.0	1.8	
時定数	5.0×10 <sup>-8</sup>	5.0×10 <sup>-8</sup>	5.0×10 <sup>-8</sup>	—	塩分依存性考慮パラメータ
固液分配係数	500	30	500	—	塩分依存性考慮パラメータ

### ⑥ 固液分配係数の塩分依存性

一般に、河川の下流感潮域において塩分濃度が上昇すると、放射性セシウムが懸濁態より脱離することが知られている。海水成分が河川に侵入する際、イオン強度が高まり、懸濁態と陽イオンとの交換が促進されることが要因と考えられている。従って、固液分配係数 $K_d(i)$  (※ $i$ は土砂画分) の塩分濃度依存性を組み込むことで、上記の現象をシミュレーション可能になると考えられる。また、吸脱着時定数 $R_i$ も変動し、増大することで、懸濁態に吸着した放射性セシウムは脱離し溶存態へと移行しやすくなると考えられる。本事業では、この固液分配係数等の塩分依存性が、沿岸域に到達した河川水が、沿岸にて拡散する際にも重要な役割を果たし、溶存態成分が増加する様子を、シミュレーションによる試解析を通して比較する。

以上の考察と目的に従い、セシウムの吸脱着に関連するパラメータ  $K_d(i)$ 、および  $R_i$  については、3D-Sea-SPEC の設定値を淡水時とみなし、塩分  $S_{Kd\_env}(-)$ 、および塩分  $S_{Ri\_env}(-)$  にて、各々、 $1/C_{Kd}$  倍、 $C_{Ri}$  倍になると仮定して、各解析セルの塩分値  $S_p(-)$  に応じて、以下のように線形補間によってモデル化したパラメータ  $K_d(i)_{mod}$ 、および  $R_{i_{mod}}$  に置き換え塩分依存性を考慮する。尚、本検討では、 $S_{Kd\_env} = 34(-)$ 、 $S_{Ri\_env} = 34(-)$ 、 $C_{Kd} = 100$ 、 $C_{Ri} = 100$  とした。

$$K_d(i)_{mod} = K_d(i) / \left\{ 1 + (C_{Kd} - 1) * \frac{\min(S_{Kd\_env}, S_p)}{S_{Kd\_env}} \right\} \quad (1.1)$$

$$R_{i_{mod}} = R_i * \left\{ 1 + (C_{Kd} - 1) * \frac{\min(S_{Ri\_env}, S_p)}{S_{Ri\_env}} \right\} \quad (1.2)$$

### ⑦ 凝集・沈殿の塩分依存性

上記の固液分配係数の塩分依存性の他、河川感潮域では、懸濁態が凝集・沈殿することが知られている。懸濁態は、淡水中では鉱物中に含まれる酸素により帯電（マイナス）しているが、塩分濃度の高い海水が混入すると、中和され、ファンデルワールス力（引力）のみが働くことで凝集することが知られている。凝集した後は、ある時間が経過すると飽和し、大粒子態となり沈降することも知られている。尚、飽和する時間や凝集懸濁態の粒子径は、河口毎に懸濁態の化学成分や存在するイオン及び有機物（凝集を促進及び抑制する）等が異なるため、河口環境に大きく依存することも知られている。この現象は、上記の固液分配係数の塩分依存性の考慮と同じく、河川水が沿岸域にて拡散する際にも現れ、沿岸域にてその一部は、凝集し沈殿する可能性が考えられる。そこで、それらの現象をシミュレーションするため、凝集に関連するパラメータ  $k$  および  $r$  を 3D-Sea-SPEC では、ユーザーが設定可能としていることを利用し、モデルとしては、上記の固液分配係数と同様に、設定値を淡水時とみなし、塩分  $S_{env}(-)$  で  $C_p$  倍になると仮定して、各解析セルの塩分値  $S_p(-)$  に応じて線形補間によってモデル化したパラメータ  $k_{mod}$  および  $r_{mod}$  に置き換えることで、それらの塩分依存性を考慮する。尚、本事業内では、 $S_{env} = 34(-)$ 、 $C_p = 100$  とした。

$$k_{mod} = k * \left\{ 1 + (C_p - 1) * \frac{\min(S_{env}, S_p)}{S_{env}} \right\} \quad (1.3)$$

$$r_{mod} = r * \left\{ 1 + (C_p - 1) * \frac{\min(S_{env}, S_p)}{S_{env}} \right\} \quad (1.4)$$

## 5.3 海域（沿岸及び沖合）での試解析（塩分濃度と Cs-137 挙動）

### 5.3.1 解析結果 I（固液分配係数の塩分濃度依存性と Cs-137 挙動）

固液分配係数の塩分依存性を考慮した場合と非考慮の場合を比較するため、沿岸及び沖合海域の流出拡散解析を以下の 3 パターンについて実施した。尚、5.2 の条件検討結果より、沿岸モデル (3D-Sea-SPEC) のみを用いて解析を実施した (ROMS では上記条件を考慮できないため)。

- (1) 固液分配係数を非考慮
- (2) 固液分配係数を考慮（塩分濃度依存性は非考慮）
- (3) 固液分配係数を考慮（塩分濃度依存性を考慮）

後述する、モニタリングポイントにおける Cs-137 濃度分布時刻歴より、解析対象期間で最もピークとなる 20/01/30 0:00 及び観測結果のピークが見られる 20/02/07 0:00 において、最も濃度の高い粘土に吸着した Cs-137（図 5-13、図 5-14）濃度と溶存態 Cs-137（図 5-15、図 5-16）濃度の表層における濃度分布図を示す。粘土 Cs-137 濃度分布に関しては、固液分配係数非考慮／考慮（パターン(1)／パターン(2)）では、結果にほとんど違いは見られないが、塩分濃度依存性を考慮したパターン(3)では、パターン(1),(2)よりも濃度が明らかに低く、懸濁態（粘土成分）から脱離する様子が見て取れる。一方、溶存態 Cs-137 濃度分布に関しては、粘土 Cs-137 濃度分布とは、逆の傾向となり、塩分濃度依存性を考慮したパターン(3)では、パターン(1),(2)よりも濃度が明らかに増大し、定性的に塩分濃度依存性が正しく考慮されたシミュレーションが実現できていることが確認できる。尚、図 5-17 には、塩分濃度分布のスナップショットを示す。河川からの淡水流入により塩分濃度分布が影響を受けており、この分布を反映し、懸濁態から Cs-137 の脱着が起これ、懸濁態 Cs-137 が減少する一方、溶存態 Cs-137 が増大していることが分かる。

今後は、これらのパラメータの実際の値を当該沿岸域等にて決定することで、上記の現象を考慮した精度の高いシミュレーションが実現可能になると考えられる。

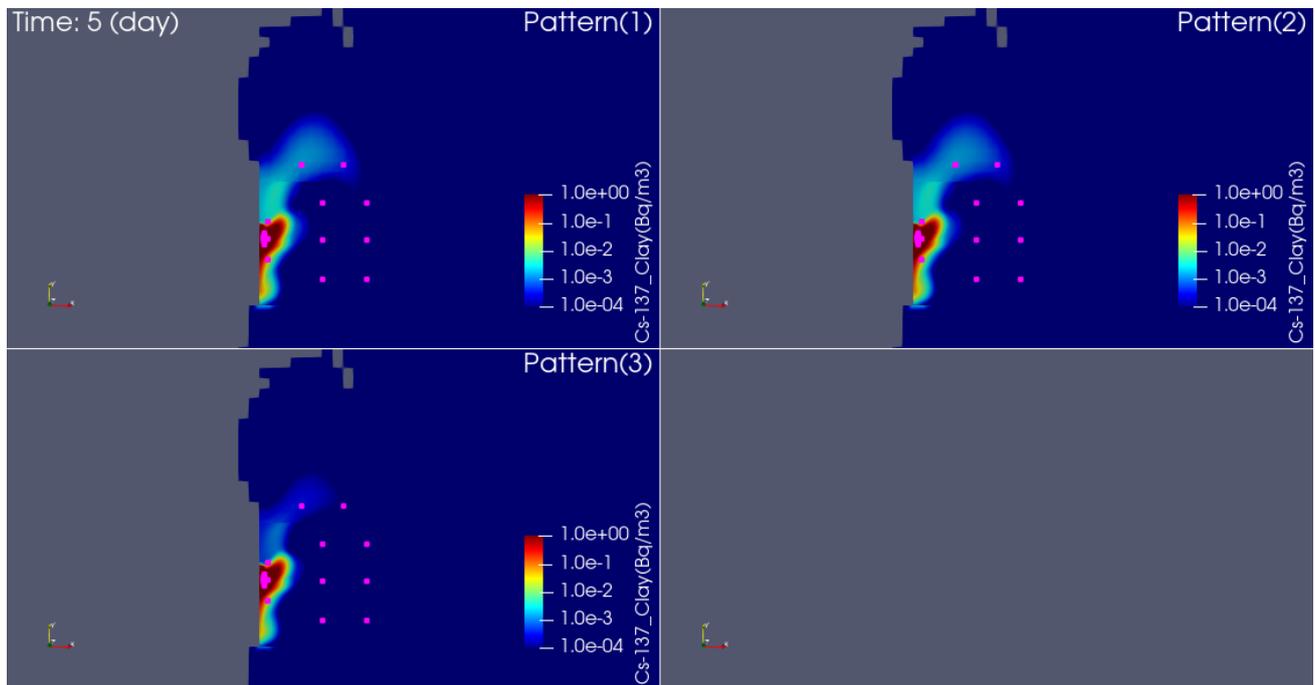


図 5-13 粘土 Cs-137 濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段左図：解析パターン(1)固液分配係数非考慮、上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(3)固液分配係数+塩分依存性考慮

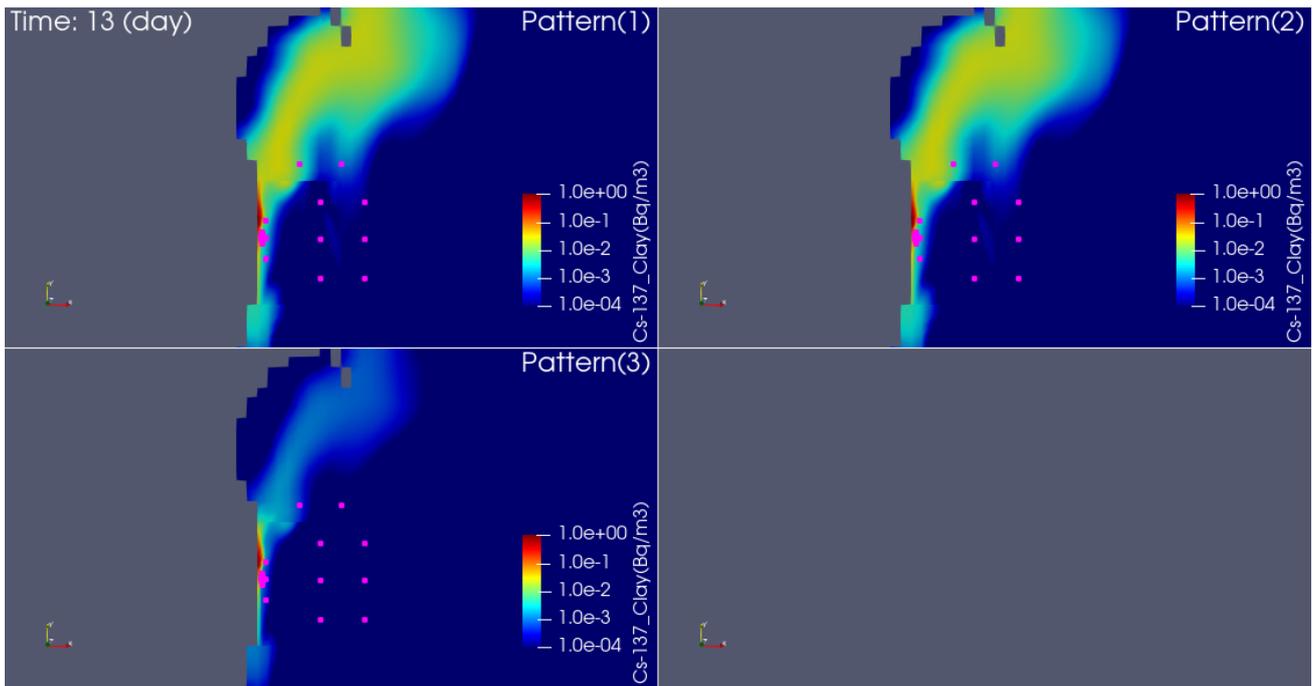


図 5-14 粘土 Cs-137 濃度分布図（表層、20/02/07 0:00）上段左図：解析パターン(1)固液分配係数非考慮、上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(3)固液分配係数+塩分依存性考慮

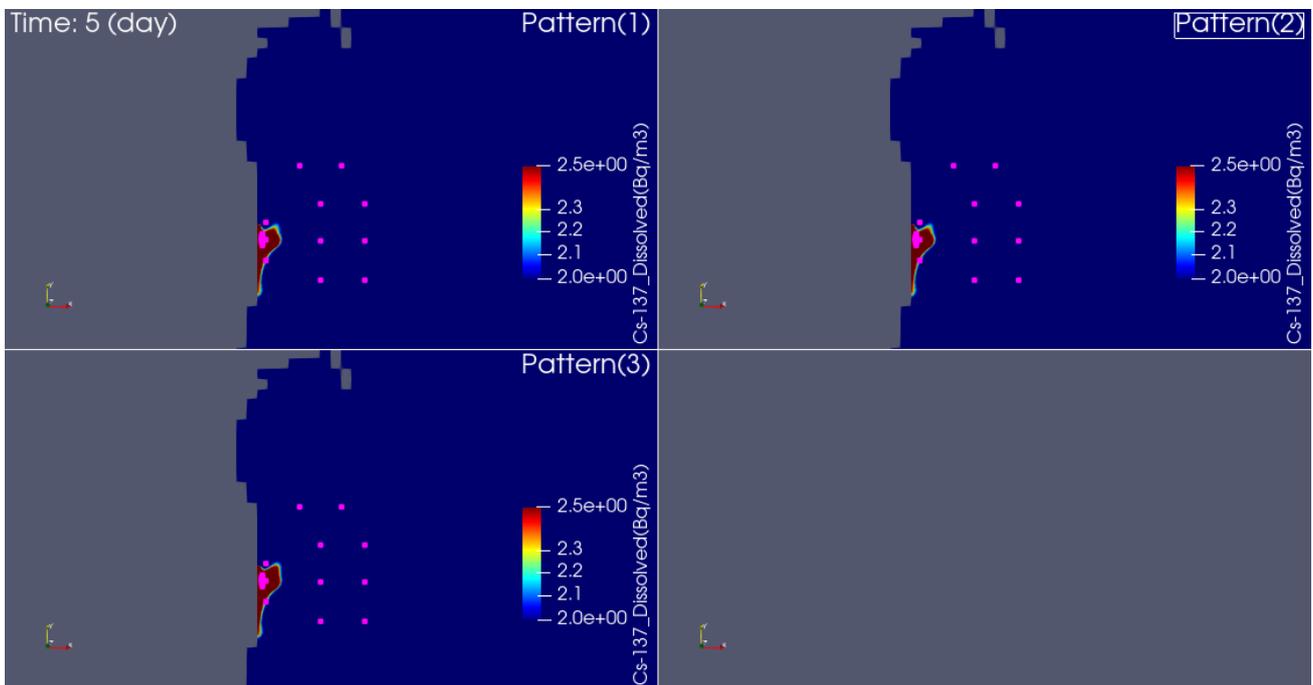


図 5-15 溶存態 Cs-137 濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段左図：解析パターン(1)固液分配係数非考慮、上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(3)固液分配係数+塩分依存性考慮

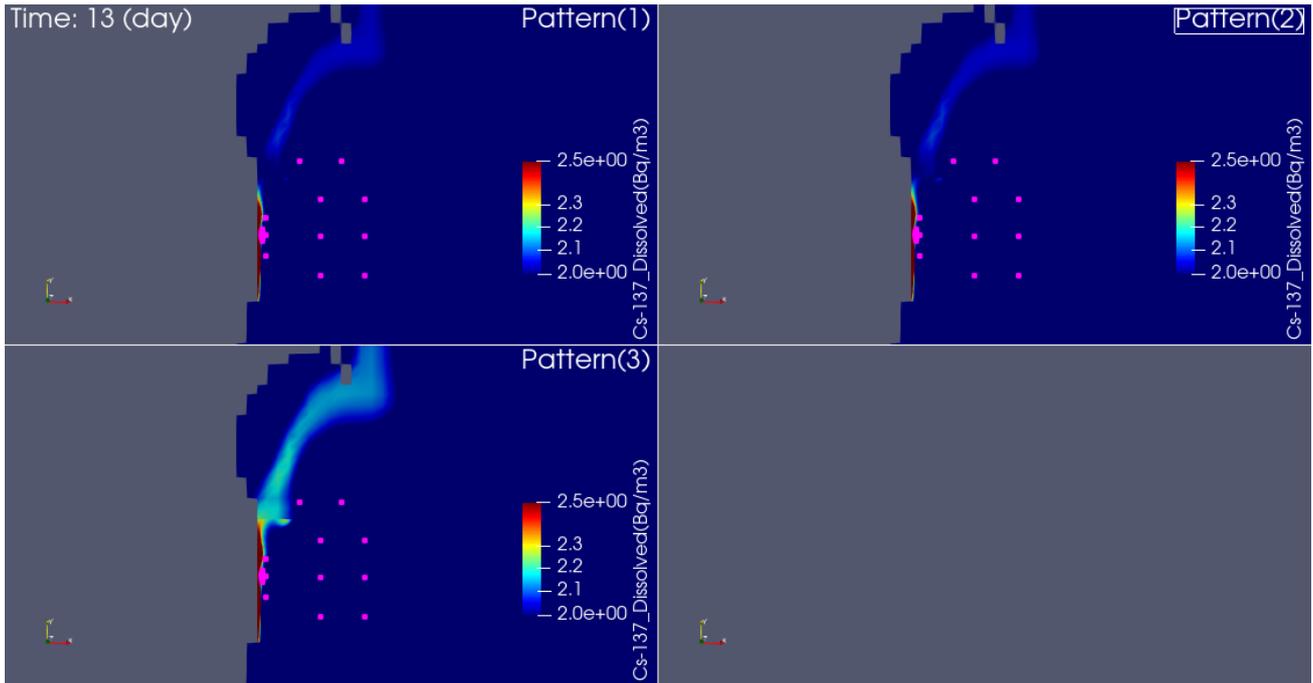


図 5-16 溶存態 Cs-137 濃度分布図（表層、20/02/07 0:00）上段左図：解析パターン(1)固液分配係数非考慮、上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(3)固液分配係数+塩分依存性考慮

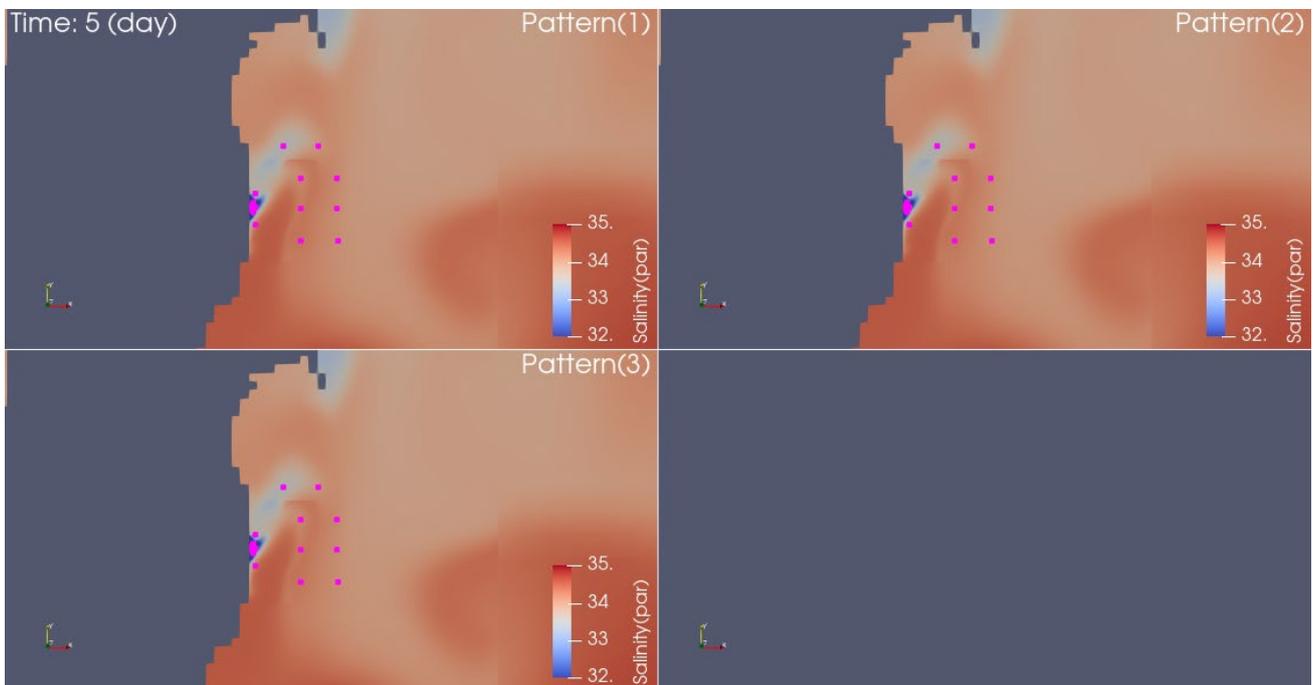


図 5-17 塩分濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段左図：解析パターン(1)固液分配係数非考慮、上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(3)固液分配係数+塩分依存性考慮

### 5.3.2 解析結果II（懸濁態の凝集・沈殿の塩分濃度依存性と Cs-137 挙動）

上記（解析結果 I）で実施した流出解析（塩分濃度依存性非考慮）に対し、更に懸濁態の凝集に対し、塩分濃度依存性を考慮した、以下 2 パターンの流出解析を実施した。

- (4) 解析結果 I (2) + 懸濁態の凝集・分解の考慮
- (5) 解析結果 I (2) + 懸濁態の凝集・分解の塩分濃度依存性の考慮

後述する、モニタリングポイントにおける Cs-137 濃度分布時刻歴より、解析対象期間で最もピークとなる 20/01/30 0:00、および観測結果のピークが見られる 20/02/07 0:00 において、濃度の高い粘土 Cs-137（図 5-17、図 5-18）と溶存態 Cs-137（図 5-19、図 5-20）の表層における濃度分布図を示す。また、懸濁態の凝集に関する塩分濃度依存性を検討するため、粘土（図 5-17、図 5-18）、小粒子態（図 5-19、図 5-20）、大粒子態（図 5-21、図 5-22）、および粘土 Cs-137（図 5-23、図 5-24）、小粒子態 Cs-137（図 5-25、図 5-26）、大粒子態 Cs-137（図 5-27、図 5-28）、溶存態 Cs-137（図 5-29、図 5-30）の表層における濃度分布図も併せて示す。

図 5-19～図 5-22 より、パターン(4)、パターン(5)では、小粒子態・大粒子態(凝集し発生)の濃度分布が見られることから、定性的に凝集（分解）が考慮できていることが確認できる。また、図 5-25～図 5-28 より、パターン(4)、パターン(5)では、小粒子態 Cs-137・大粒子態 Cs-137 の濃度分布が見られることから、定性的に凝集・分解した粒子態にも固液分配係数が考慮できていることが確認できる。

図 5-17、図 5-18 より、パターン(4)と比較してパターン(5)の方が、粘土分布濃度が低いことから、凝集の塩分依存性を考慮したことにより、粘土から小粒子態への凝集が促進されたと考えられる。また、図 5-21、図 5-22 より、パターン(4)と比較してパターン(5)の方が、大粒子態濃度が高いことから、凝集の塩分濃度依存性を考慮したことにより、小粒子態から大粒子態への凝集についても促進されたと考えられる。更に、図 5-23～図 5-28 より、粘土 Cs-137、小粒子態 Cs-137、大粒子態 Cs-137 の全てで、パターン(4)と比較してパターン(5)の方が、Cs-137 濃度が高くなっている。更には、図 5-29、図 5-30 より、溶存態 Cs-137 は、パターン(4)と比較してパターン(5)の方が、Cs-137 濃度が僅かに低くなっていることから懸濁態成分への移行が一部見られることが分かる。

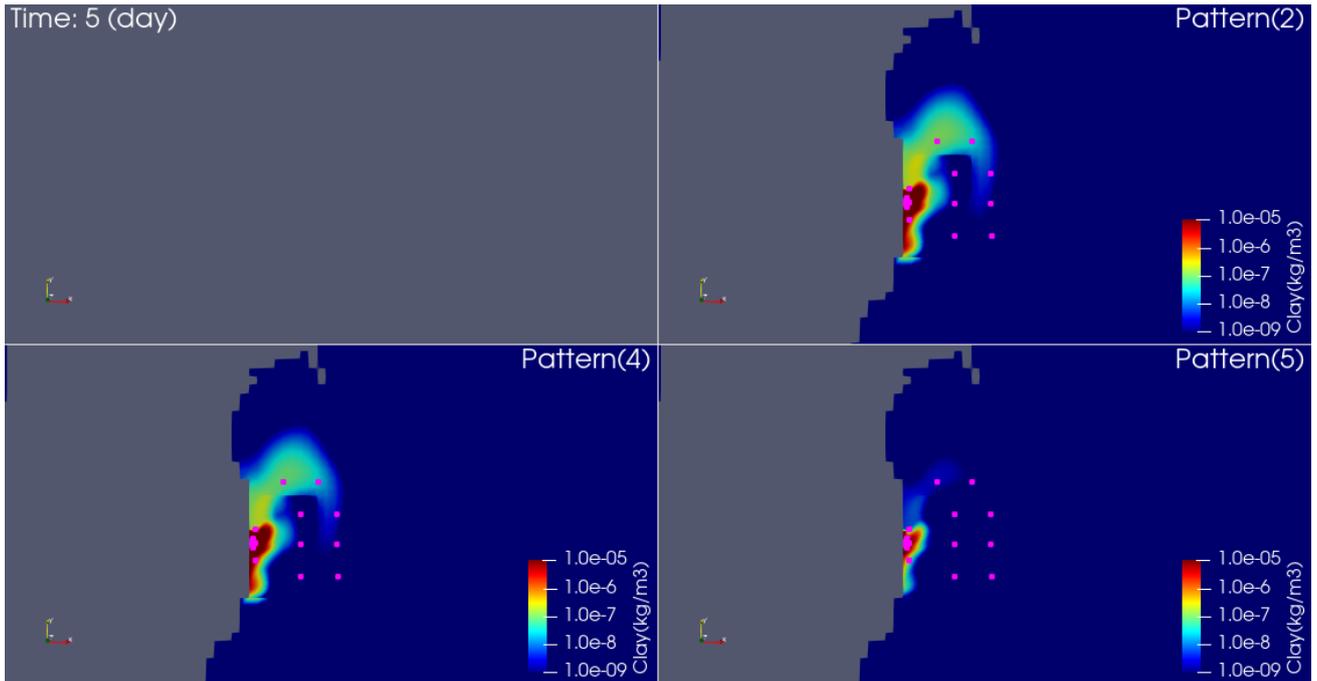


図 5-17 粘土濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

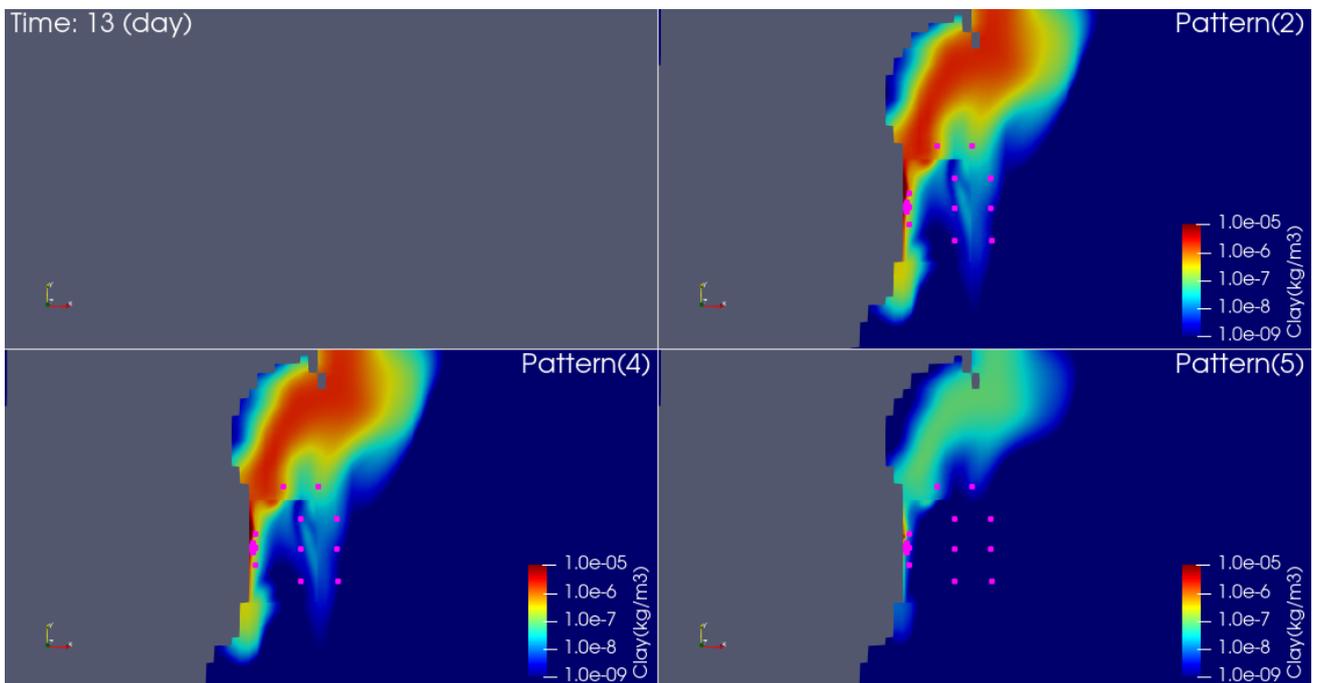


図 5-18 粘土濃度分布図（表層、20/02/07 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

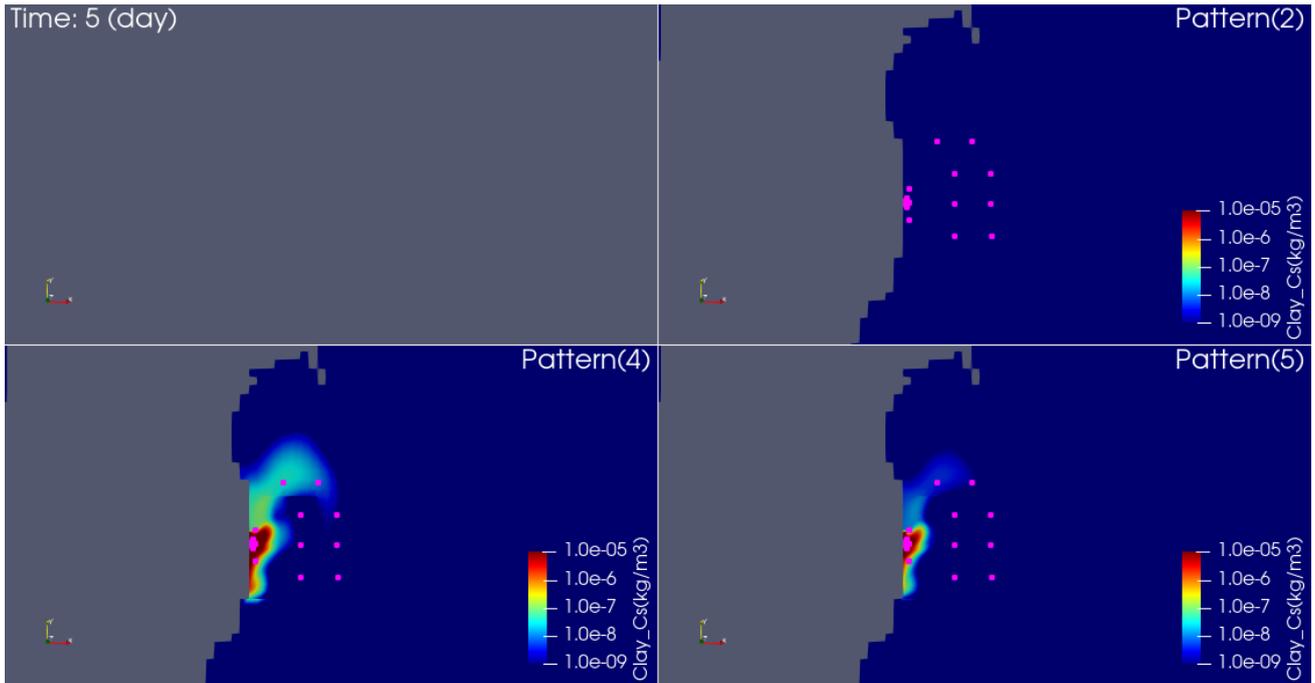


図 5-19 粘土小粒子態濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

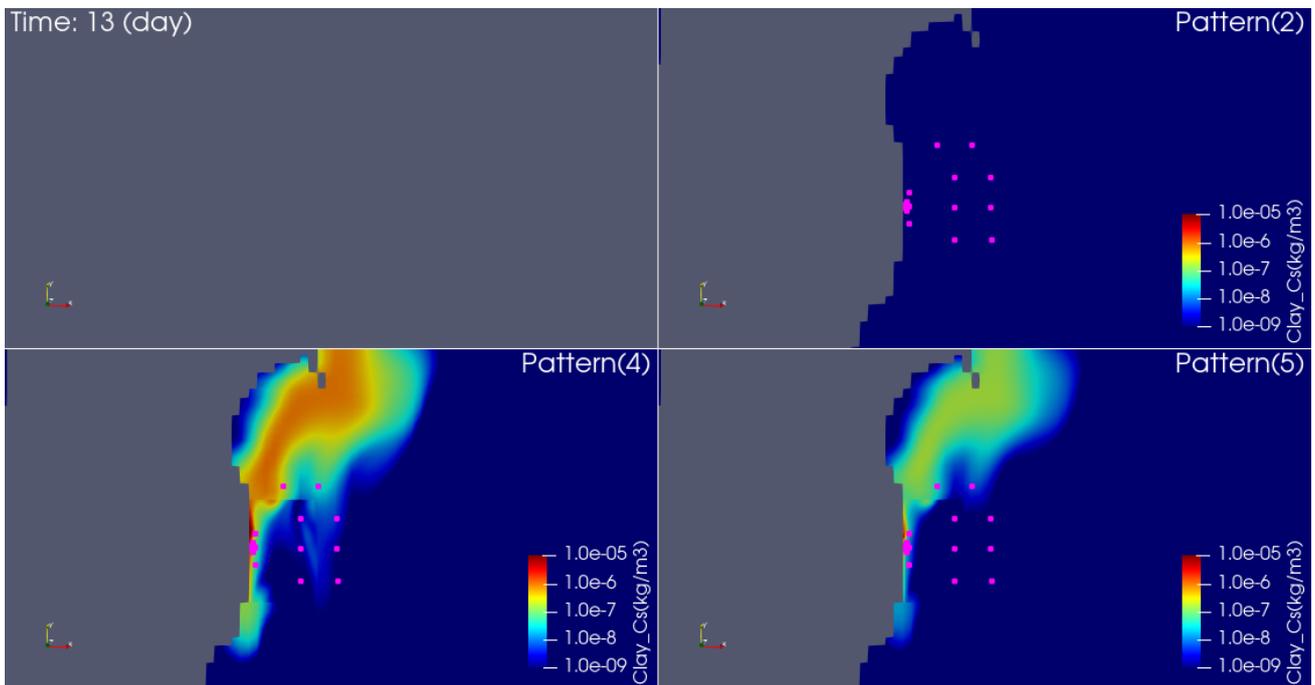


図 5-20 粘土小粒子態濃度分布図（表層、20/02/07 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

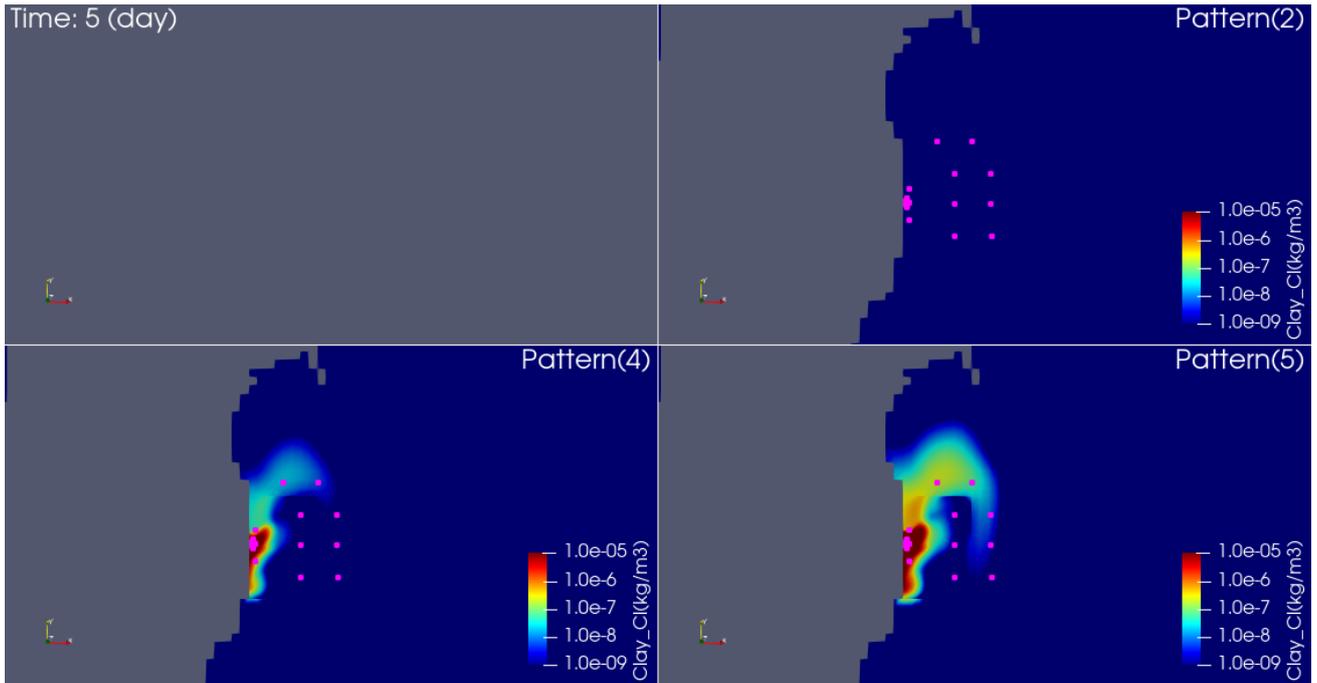


図 5-21 粘土大粒子態濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

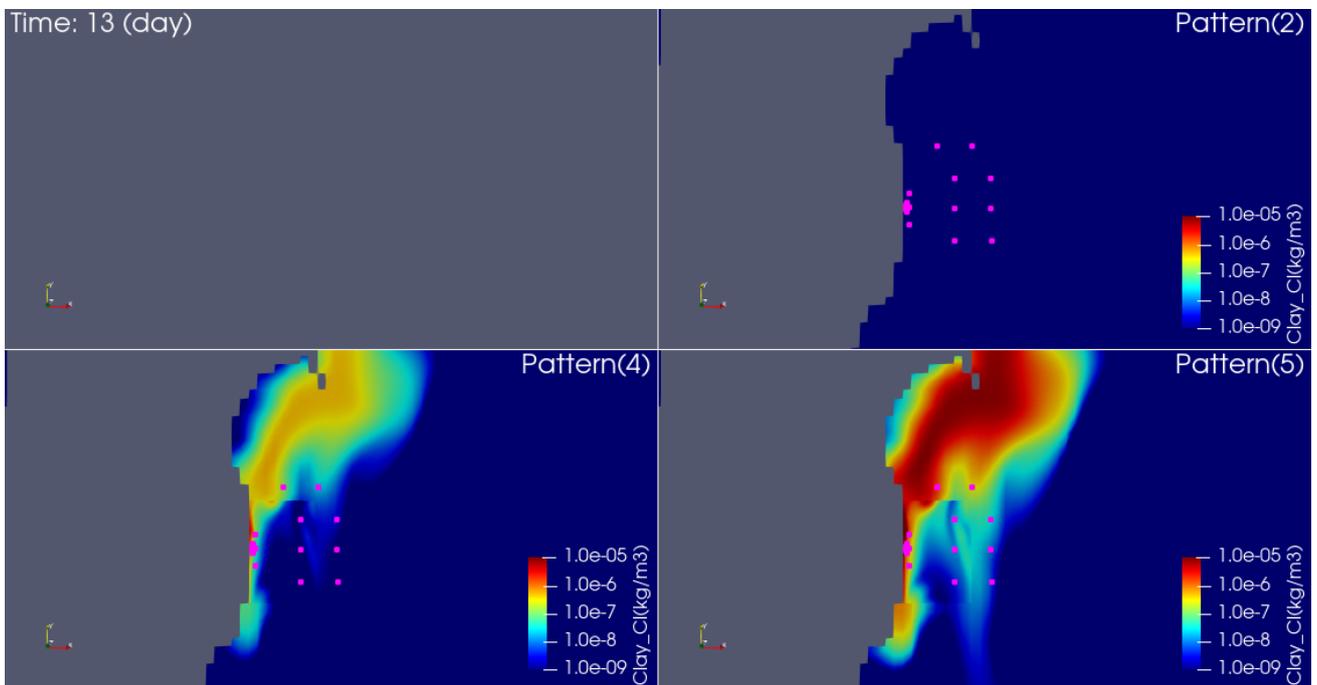


図 5-22 粘土大粒子態濃度分布図（表層、20/02/07 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

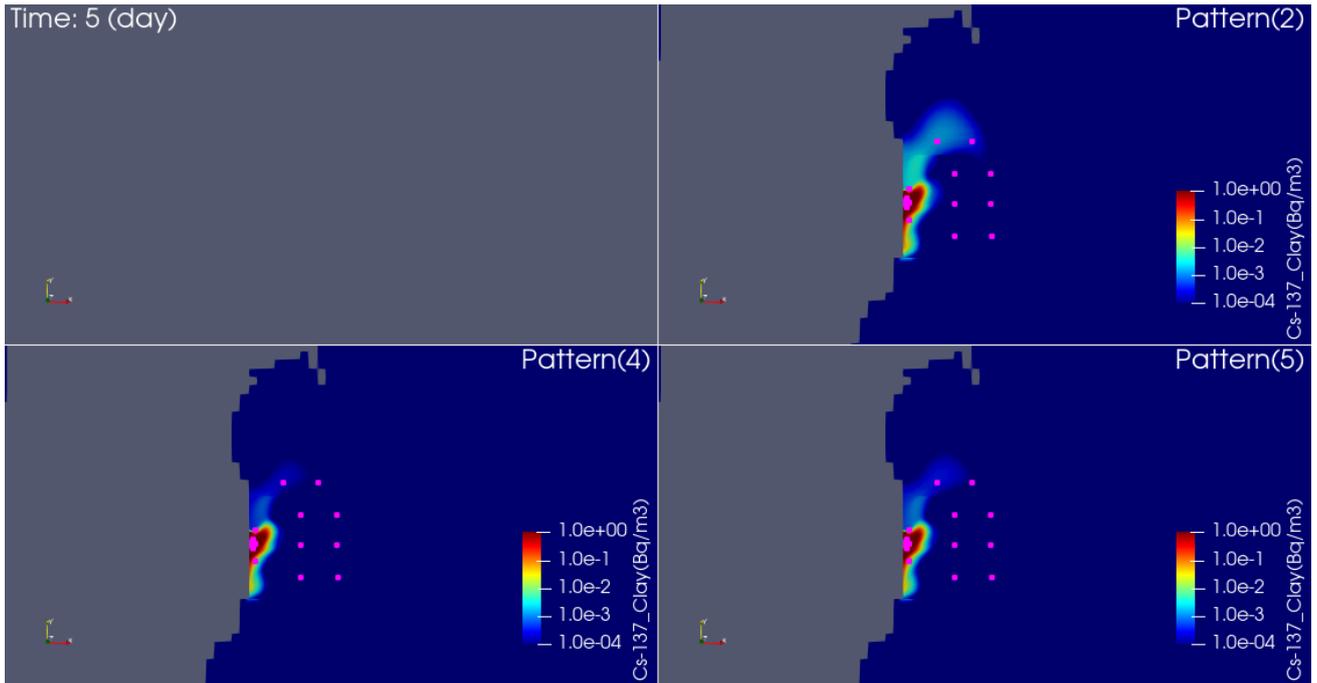


図 5-23 粘土 Cs-137 濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

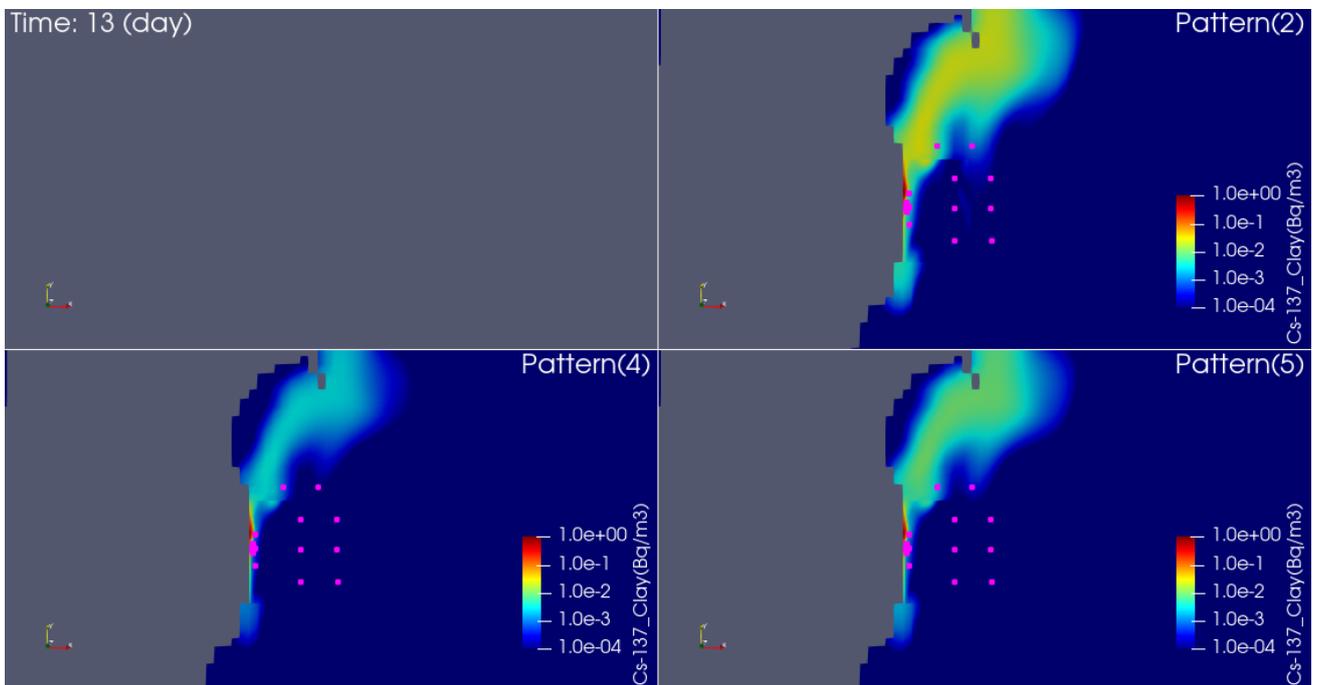


図 5-24 粘土 Cs-137 濃度分布図（表層、20/02/07 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

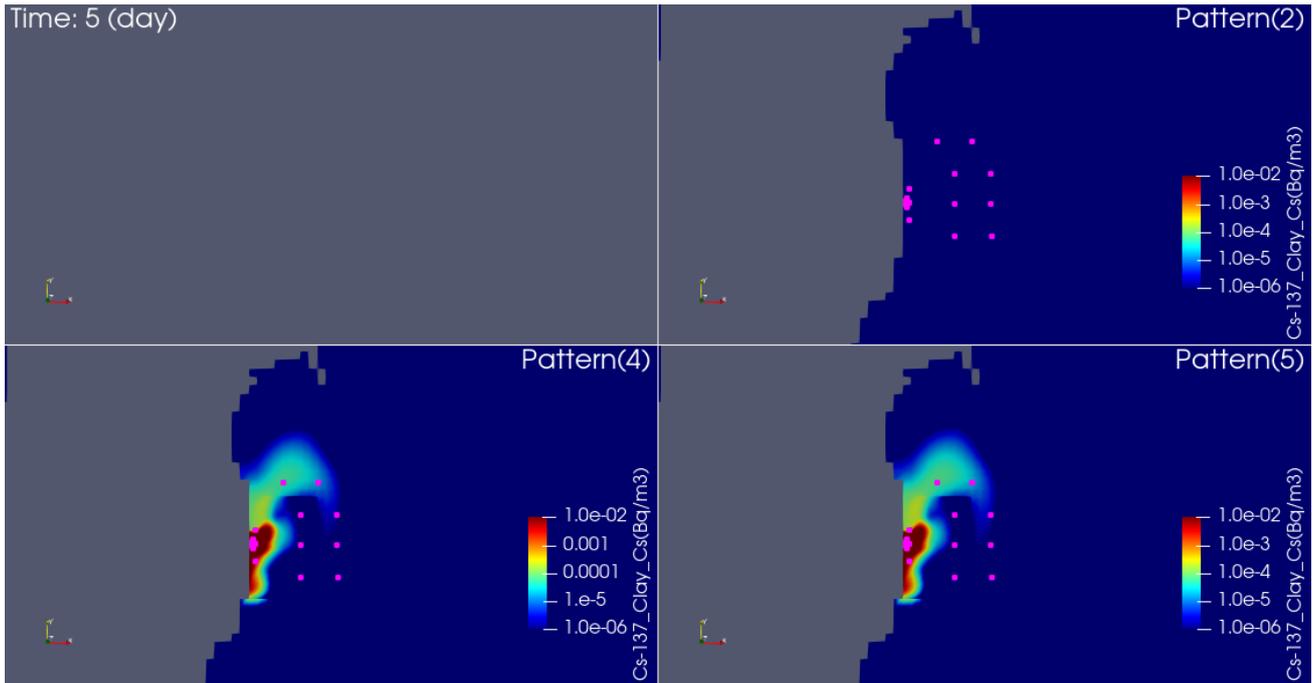


図 5-25 粘土小粒子態 Cs-137 濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

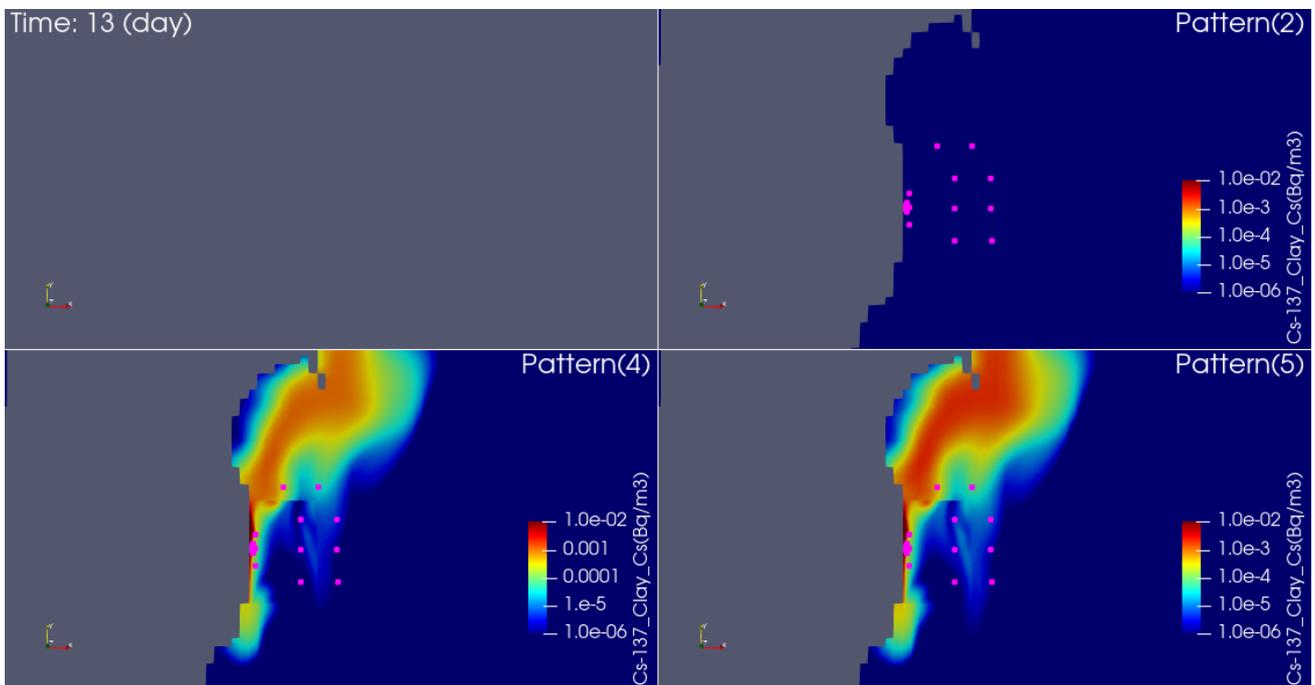


図 5-26 粘土小粒子態 Cs-137 濃度分布図（表層、20/02/07 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

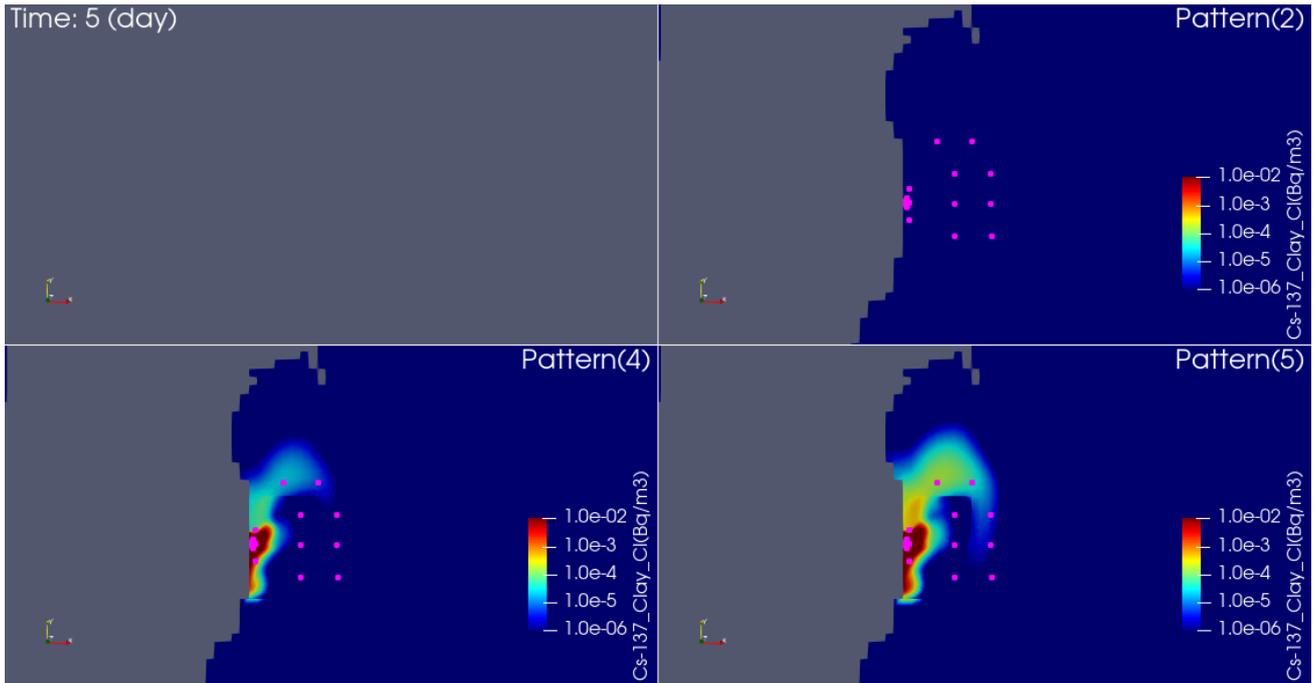


図 5-27 粘土大粒子態 Cs-137 濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

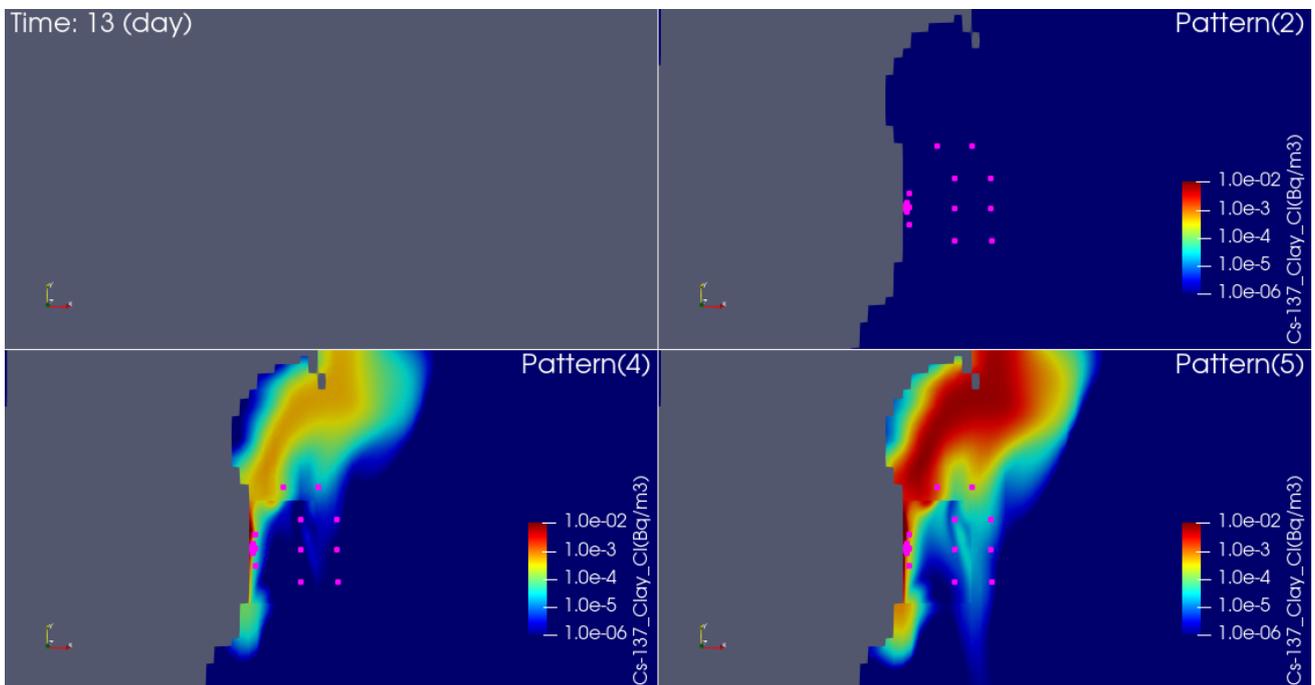


図 5-28 粘土大粒子態 Cs-137 濃度分布図（表層、20/02/07 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

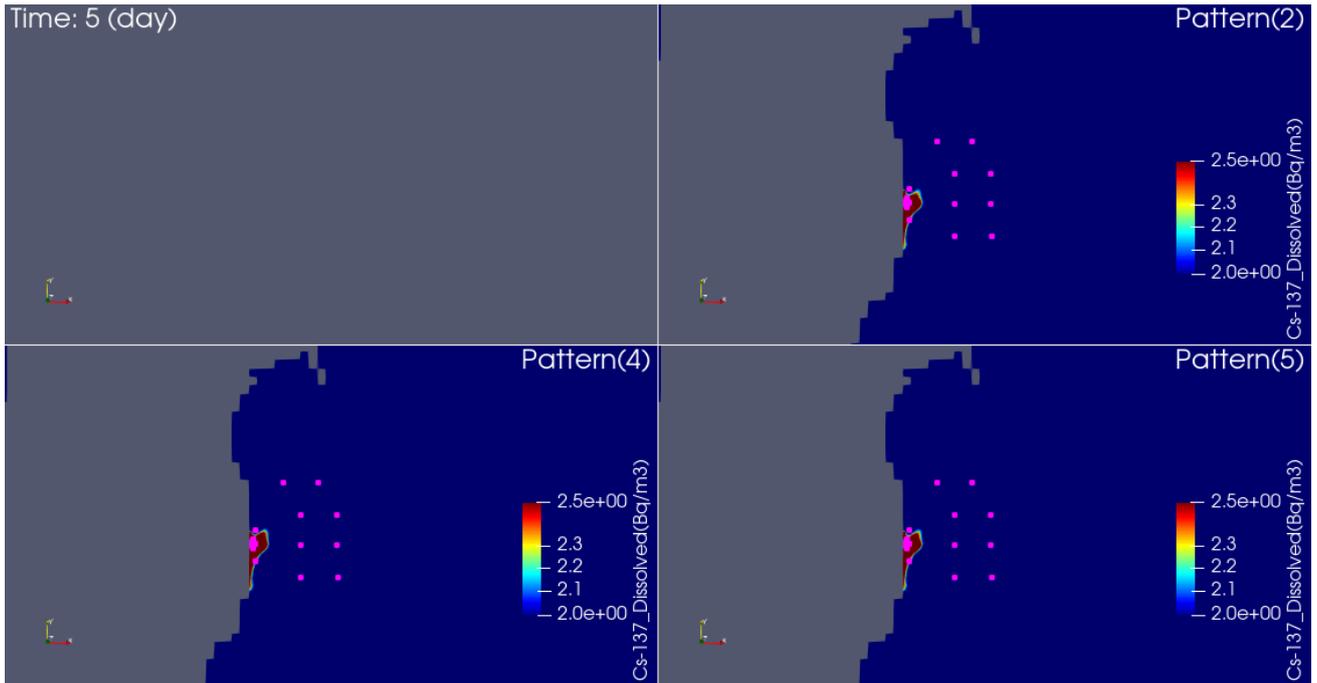


図 5-29 溶存態 Cs-137 濃度分布図（表層、20/01/30 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

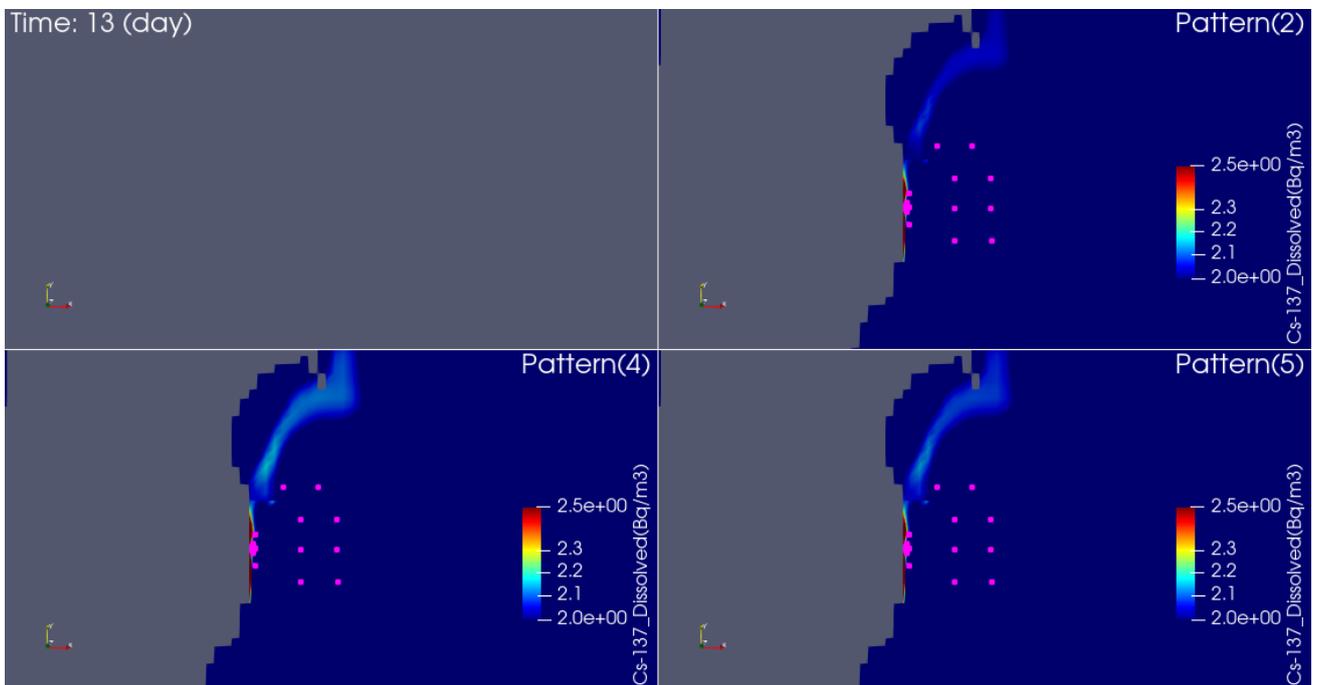


図 5-30 溶存態 Cs-137 濃度分布図（表層、20/02/07 0:00）上段右図：解析パターン(2)固液分配係数考慮、下段左図：解析パターン(4)懸濁態凝集考慮、下段右図：解析パターン(5)懸濁態凝集+塩分依存性考慮

## 5.4 作業項目⑥ モニタリング結果との比較

以下では、モニタリングポイントにおける観測結果と流出解析結果について比較検討する。モニタリングでは各地点の表層の海水濃度が測定されており、おおよそ一月に一回程度のサンプリング頻度で行われ、それらのデータは公開されている。本事業では、モニタリングされる各点間の濃度比とシミュレーションにより得られる濃度比がおおよそ一致することで、結果の確認とする。これは、Cs-137 の場合、懸濁態成分の沈降後の海底土からの溶出等の他、懸濁態成分の挙動が無視できず、単純に海水の溶存態濃度の経時変化のみでは予測できないからである。特に、Cs-137 の場合、場所により、平均濃度レベルは異なっており、比較のため、以下の値を設定し、その濃度にシミュレーション濃度を重畳させる形で濃度を取得し、モニタリング結果と比較する。尚、下記の平均濃度値は、2018年～2020年における凡その平均的値とした。尚、本事業でシミュレーション期間とした時期は、その時期以前より、下記の設定平均濃度値よりも比較的高い値を各点で示しており、下記の平均濃度値は過小評価となっていると考えられるため、シミュレーションと実測値との比のみを検証対象とする（2週間程度の計算により、平均濃度値を再現することは不可能であることも付記する）。

### 【沿岸】

○M101～M104 : 10.0Bq/m<sup>3</sup>

○T-D1～T-D9 : 5.0Bq/m<sup>3</sup>

### 【沖合】

全ての点にて : 1.8Bq/m<sup>3</sup>（バックグラウンド濃度）

比較図を図 5-31 に示す。この図より、M-101,M-103,M-104 のシミュレーション及び実測濃度と T-D1, T-D5, T-D9 のシミュレーション及び実測濃度との関係は、おおよそ一つの直線にのり、比例関係にあり、M-101～M-103 の位置における濃度と T-D1～T-D9 における濃度との間には相関があり、それらについては再現できていることが分かった（但し、M-102 はこの条件から大きく外れていることを付記する）。この結果から、おおよそ陸域から流出した Cs-137 が沿岸を移流拡散する様子を再現できているものと考えられる。

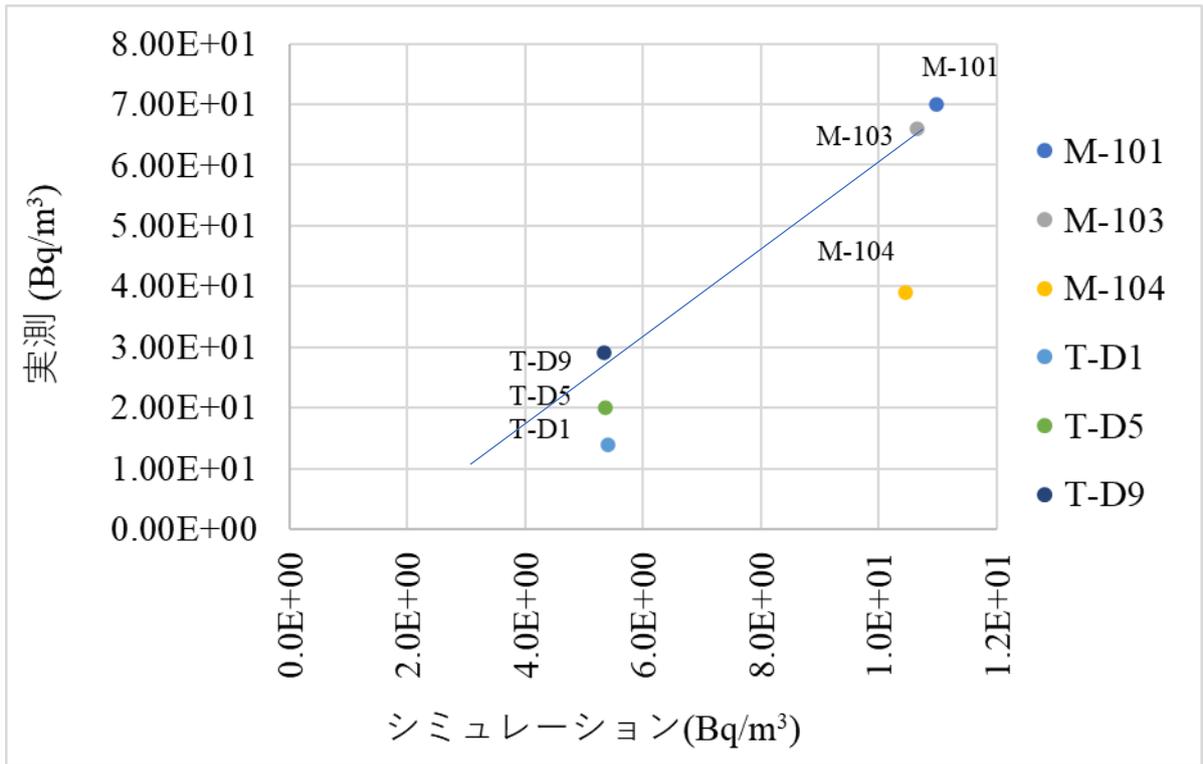


図 5-31 シミュレーション結果（各観測点での濃度）と実測データ（各観測点での濃度）との比較

## 5.5 まとめ

本章では、陸域モデル（集中定数型モデル MERCURY）と海域（沿岸・沖合）モデルの統合モデルを用いて、陸域から流出した放射性物質（Cs-137）の海域での挙動を調べるため実施した整備項目と試解析結果について報告した。

まず、令和3年度に実施した沿岸モデル 3D-Sea-SPEC、沖合モデル ROMS の接続統合モデルの他、両海域に対し、各モデルを単独で適用した結果の3つを比較した。その結果、対象とする海域全体での流動場・温度場等の挙動にはあまり大きな違いは見られないが、詳細に見ると各々の用いるスキームの違いが反映されることが分かる。この結果から、異なるモデルを統合する際は、各域の挙動に対し、最適なスキームを選択した上、適切な境界で接続を実施する必要があることが分かった。

次に、MERCURY からの推定流出量の経時変化を海域モデルに反映させ、海域での Cs-137 の移流・拡散のシミュレーションを実施した。本事業では、沿岸での河川流出による Cs-137 の挙動として、固液分配係数の塩分濃度依存性と、懸濁態粒子が海水塩分により凝集・沈殿が促進される効果を調査するため、沿岸・沖合共に、その効果を考慮可能な 3D-Sea-SPEC を適用し、試解析を行った（ROMS において、同様の機能を動作させることは現時点にて困難と判断したため）。その結果、福島 1F 近傍の沿岸において、河川により流出した Cs-137 の挙動が、上記現象の発現を考慮することで、移流・拡散の状況が異なる様子を確認することができた。本事業では、おおよそ、上記現象の発現に関するパラメータに対し、妥当な値を選択したが、今後は、それらの値を現地での観測や実験等を基に定め、シミュレーションを実施することと結果の評価が必要と考えられる。

以上、陸域から流出する Cs-137 の推定量を基に海域（沿岸・沖合）での移行挙動を試解析するための整備を実施し、1F 近傍の海域で試解析を行った。その結果、異なるモデル間の統合に係る課題や、沿岸域での Cs-137 の移行挙動において、塩分濃度に依存する懸濁態成分の振る舞いに注意する必要があること等が分かった。

## 参考文献

- [5-1] 佐久間一幸、「MERCURY バージョン 1.1 理論/ユーザーマニュアル」。
- [5-2] Kazuyuki Sakuma, Takahiro Nakanishi, Kazuya Yoshimura, Hiroshi Kurikami, Kenji Nanba, Mark Zheleznyak, “A modeling approach to estimate the 137Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017”, Journal of Environmental Radioactivity, Volume 216, May 2020, Pages 106201. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X19303406>.
- [5-3] S. Yamada, M. Machida, H. Kurikami, Applications of Radiocesium Migration Models to Fukushima Environmental Issues: Numerical analysis of radiocesium transport in temperature-stratified reservoirs by 3D-Sea-SPEC, Proc. of SNA+MC2020, (2020), 140–146. <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/BB2019-1620.pdf>
- [5-4] Regional Ocean Modeling System (ROMS), <https://www.myroms.org/>
- [5-5] 原子力規制委員会、放射線モニタリング情報、2. 海域のモニタリング結果、<https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/428/list-1.html>

## ■ 6章 陸域及び海域統合モデルと GUI（WEB アプリ利用）機能の整備

### 6.1 本章の概要

1章にて記したように、1F事故以後、放射性物質の環境動態を、陸域・海域を統合したモデルを用いて評価する研究手段の開発が求められている。しかし、未だ、各域のモデルが複数、独立に提案され、研究開発が実施されているのが現状であり、統合モデルによる解析の例は少ない。

上記の背景下、本事業では、陸域・海域を統合するモデルを開発するべく、下記の各域で開発されたモデルの統合を試みた。

陸域モデル	集中定数型流出モデル	MERCURY
	分布定数型流出モデル	RADFLOW
海域モデル	沿岸モデル	3D-Sea-SPEC
	沖合モデル	ROMS [6-1-6-3]

統合したモデルでは、陸域にて MERCURY[6-4][6-5]か RADFLOW[6-6]のどちらかを選択できる一方、海域モデルにおいては、全てを ROMS で解析するか、3D-Sea-SPEC[6-7]で解析するかを選択できる他、沿岸部のみ 3D-Sea-SPEC とし、沖合では ROMS とすることも選択可能とした。

以下、本章では、整備した統合モデルの詳細を記す。6.2 では海域統合モデルの構成とその利用方法について記す一方、6.3 では、陸域も含めた全域統合モデルの GUI 機能について記す。本事業では計算結果を WEB ブラウザ上で可視化し、広く一般にも公開できる仕組みの一端を試開発した。その結果の概要を記す。

### 6.2 海域（沿岸及び沖合）統合モデルの整備

本節前半では海域モデルの統合について記す。海域では、沿岸モデル 3D-Sea-SPEC と沖合モデル ROMS があり、両者の使い分けをユーザーが選択可能とする。以下では、海域統合モデルとその実行イメージについて記す。

#### 6.2.1 海域統合モデルの構成と使用方法

海域モデルを統合するに際し、開発言語は Python を用いた。統合した海域モデルの実行内容は、おおよそ以下のようになる。

- 1) 計算パラメータの指定：以下のパラメータをユーザーが指定
  - 統合コードの選択
  - 計算期間
  - 計算結果出力間隔
  - 静水圧モデル/非静水圧モデルの選択
- 2) 計算データの準備：受け取ったパラメータを基に、以下を適宜実行
- 3)

- 3D-Sea-SPEC の海域データの作成
  - 3D-Sea-SPEC, ROMS 各入力ファイルの編集
- 4) 計算を実行：統合コードの選択結果より、次のいずれかを実行
- 3D-Sea-SPEC のみ (沿岸及び沖合共に)
  - ROMS のみ (沿岸及び沖合共に)
  - 3D-Sea-SPEC (沿岸) — ROMS (沖合)
- 5) 計算結果の可視化
- GIS 描画ファイル (geoJSON 形式) の作成
  - 観測点におけるデータ抽出

以下に、海域統合モデルのフローチャートを示す。

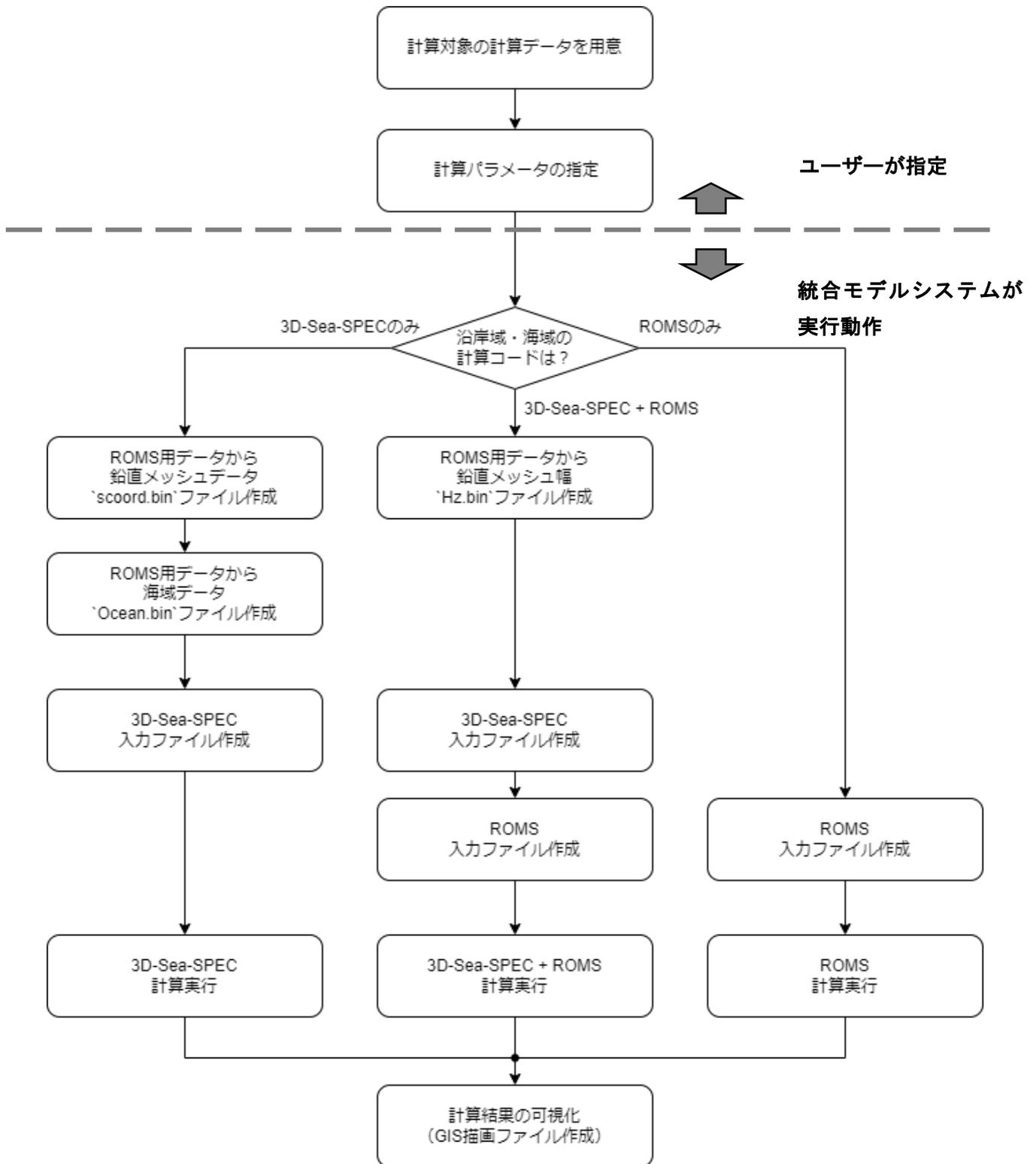


図 6-1 海域統合モデルのフローチャート

尚、図 6-1 に記してある計算パラメータの指定に際し、ユーザーは YAML 形式でパラメータを記述したファイルを作成することで統合モデルを動作させる。

次に、計算結果の可視化について記す。図 6-2 は、可視化結果の一例であり、geoJSON 形式データを QGIS (<https://qgis.org/ja/site/>) で描画したものである。

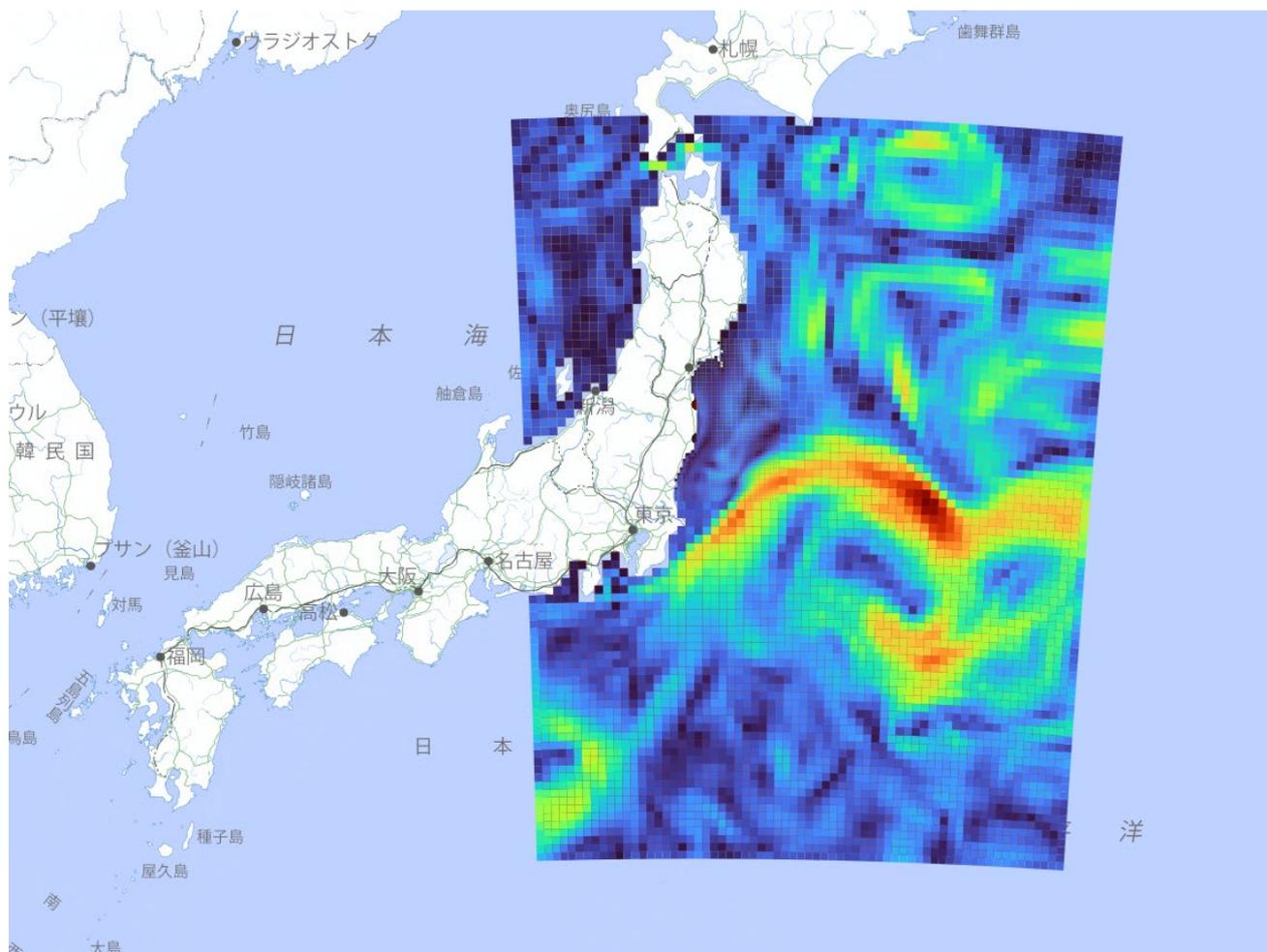
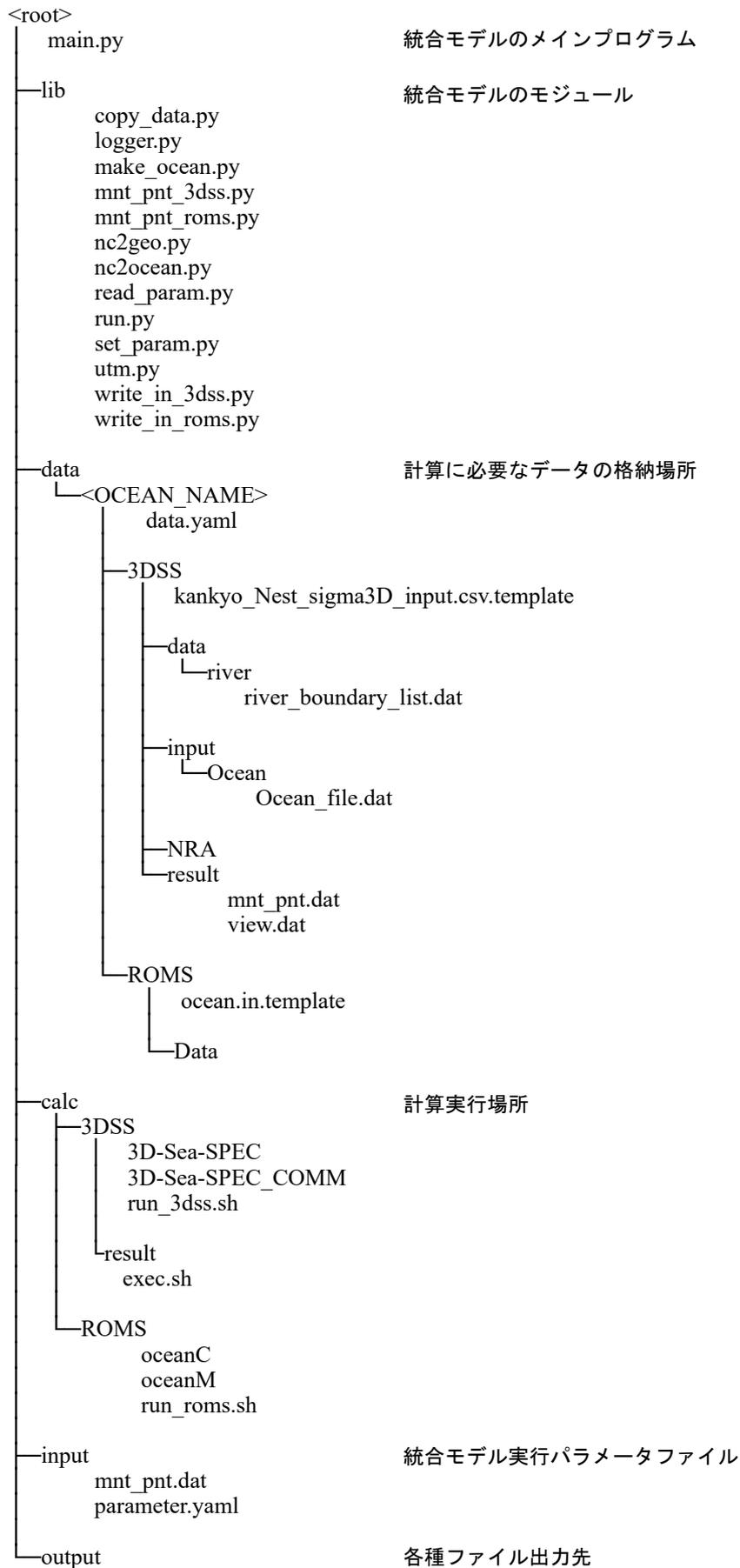


図 6-2 海域統合モデルの出力結果の GIS (QGIS) 上での描画例

以下では、海域統合モデルのプログラムのディレクトリ構成とその使用方法について記す。

#### ① ディレクトリ構成

海域統合モデルのディレクトリ構成を次頁に示す。



## ② 海域統合モデルの使用方法

海域統合モデルの使用方法を以下に記す。

### ・ データの準備

選択するモデル毎に、その使用方法を以下に記す。

### ■ 3D-Sea-SPEC

グリッド情報、積分時間刻み幅、時間反復数、計算結果出力反復回数は以下のように編集する。

【kankyo\_Nest\_sigma3D\_input.csv.template】

---

```
...
"==" 階層 Level,BlockNo,座標(x0,y0),mesh 幅(dx,dy),mesh 数(nx,ny),メッシュフラグ =="
1 1 197500.0 3340000.0 15000.0 15000.0 67 88 $FLAG_OCEANS      outer
2 2 452500.0 4000000.0  5000.0  5000.0 39 57 $FLAG_OFFSHORES  inner
3 3 502500.0 4110000.0  1000.0  1000.0 40 60 $FLAG_OFFSHORES  offshore
...
"積分時間刻み幅(s)"                , $SDTS
"時間反復数"                        , $NTIMESS
"計算結果出力反復回数:開始,間隔"   , 0, $NHIS,
...
```

---

### ■ ROMS

計算ステップ数 (NTIMES)、出力間隔 (NHIS) を以下のように編集する。

【ocean.in.template】

---

```
...
NTIMES == $NTIMES1$ $NTIMES2$ $NTIMES3$
NHIS == $NHIS1$ $NHIS2$ $NHIS3$
...
```

---

■ parameter.yaml

海域統合モデルを実行するのに必要なパラメータを記述したファイルである。記載例を以下に示す。

【parameter.yaml】

---

**MODEL\_LAND:** RADFLOW  
**MODEL\_OFFSHORE:** 3DSS  
**MODEL\_OCEAN:** ROMS  
**OCEAN\_NAME:** fukushima  
**START\_DATE:** 2020/01/25  
**END\_DATE:** 2020/02/10  
**OUT\_INTERVAL:** 1.0  
**3DSS\_AMR\_OFFSHORE:** 2  
**3DSS\_AMR\_OCEAN:** 2

---

尚、各キーワードの説明は表 6-1 に示す。

表 6-1 parameter.yaml

キーワード	内容
MODEL_LAND	陸域モデル [RADFLOW/MERCURY]
MODEL_OFFSHORE	沿岸域モデル [3DSS/ROMS]
MODEL_OCEAN	海域モデル [3DSS/ROMS] ※1
OCEAN_NAME	計算対象海域名 (data 直下のディレクトリ名)
START_DATE	計算開始日 (※0:00)
END_DATE	計算終了日 (※0:00)
OUT_INTERVAL	出力間隔時間 (単位 : h)
3DSS_AMR_OFFSHORE	3D-Sea-SPEC 沿岸域グリッドのメッシュフラグ ※2
3DSS_AMR_OCEAN	3D-Sea-SPEC 海域グリッドのメッシュフラグ ※2

※1 沿岸域モデルに『ROMS』を選択した場合、ROMS しか選択できない。

※2 入力値は`kankyo\_Nest\_sigma3D\_input.csv`に記載する値と同様。

0 : 静水圧モデル、2 : 非静水圧モデル

■ data.yaml

準備した計算対象海域に対して、計算実行時にどのデータを使用するかの対応情報を記述したファイルである。記載例を以下に示す。

【data.yaml】

---

**3DSS:**

**OFFSHORE:** =沿岸域 : 3D-Sea-SPEC—海域 : ROMS 計算

**N\_GRID:** 2

**IN\_TEMPLATE:** kankyo\_Nest\_sigma3D\_input.csv.lb2.template

**DATA\_DIR:** lb2

**OFFSHORE-OCEAN:** =沿岸域 : 3D-Sea-SPEC—海域 : 3D-Sea-SPEC 計算

**N\_GRID:** 3

**IN\_TEMPLATE:** kankyo\_Nest\_sigma3D\_input.csv.lb3.template

**DATA\_DIR:** lb3

**ROMS:**

**OCEAN:** =沿岸域 : 3D-Sea-SPEC—海域 : ROMS 計算

**N\_GRID:** 2

**IN\_TEMPLATE:** ocean\_ng2.in.template

**DATA\_DIR:** 20200125-20200210\_ng2\_NPT7

**OFFSHORE-OCEAN:** =沿岸域 : ROMS—海域 ROMS 計

**N\_GRID:** 3 算

**IN\_TEMPLATE:** ocean\_ng3.in.template

**DATA\_DIR:** 20200125-20200210\_ng3\_NPT7

---

以下、各キーワードの説明を表 6-2 に示す。

表 6-2 data.yaml

キーワード	3D-Sea-SPEC	ROMS
N_GRID	計算ブロック数	
IN_TEMPLATE	入力ファイル	
DATA_DIR	input 内の使用するディレクトリ	Data 内の使用するディレクトリ

## 6.2.2 海域統合モデルの実行

### ① 必要なライブラリ

次に、海域統合モデルで使用している python ライブラリと開発時のバージョンを表 6-3 に示す。開発時の python のバージョンは 3.8 である。

表 6-3 python ライブラリ

ライブラリ名	バージョン	内容・用途
PyYAML	6.0	YAML 形式データの取扱い
geojson	2.5.0	geoJSON データ作成
netCDF4	1.6.1	netcdf データの取扱い
numpy	1.23.3	データ管理
pandas	1.5.0	csv 出力など
pyproj	3.4.0	座標変換
tqdm	4.64.1	進捗バー表示

### ② メインプログラム実行

以下のコマンドを実行することで、海域統合モデルを実行できる。

---

```
$ python main.py
```

---

### ③ 出力ファイル

3D-Sea-SPEC の計算結果は calc/3DSS ディレクトリ内に、ROMS の計算結果は calc/ROMS ディレクトリ内に、各々、出力される。また、GIS 用に可視化されたファイル (.js ファイル) は output ディレクトリ内に出力される。

## 6.3 海域統合モデルの GUI (WEB アプリ) 機能の整備

以下では、上記で開発した海域統合モデル用の WEB (GUI) 機能について報告する。WEB 上で統合モデルの結果を可視化することで、多くの人が同時に且つ遠隔にて可視化結果を共有することが可能となる。上記機能は、計算結果を広く周知する場合、有用且つ便利な機能になると考えられる。本事業では、統合モデル用の WEB(GUI)機能を試験的に整備した。以下、その機能の概要について報告する。

### 6.3.1 海域統合モデルの使用方法および可視化

#### ① パラメータ指定

ユーザーは WEB ブラウザ上で、解析に必要なパラメータをブラウザ上で指定することが可能である (詳細は 6.4.1 を参照)。

## ② 計算結果の可視化

海域統合モデルの結果の可視化の例を下図（図 6.3）に示す。可視化は、GIS フリーソフトである QGIS のプラグインを利用して、OpenLayers 形式（WEB ブラウザで地図データを表示する JavaScript で組まれたオープンソースライブラリ）でインタラクティブマップをエクスポートした環境をベースに開発した。

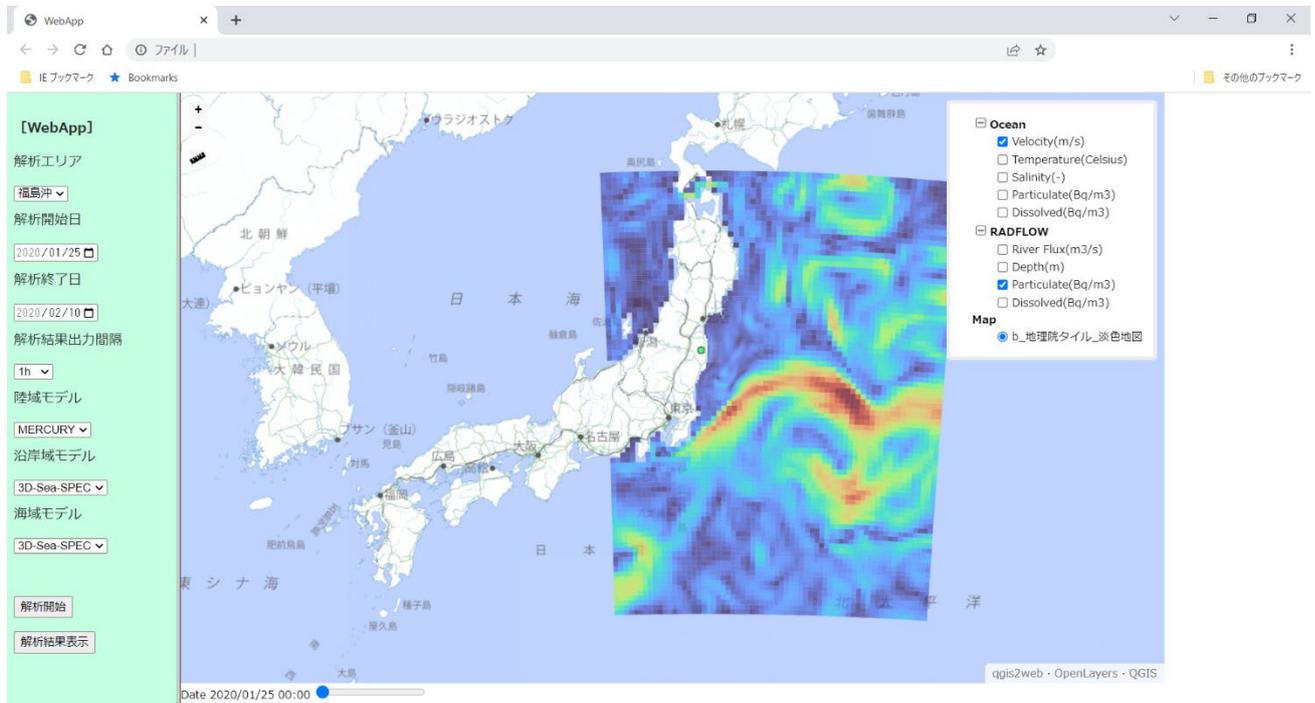


図 6-3 WEB ブラウザでの計算結果の描画例

次に、5 章にて報告済みの海域統合モデルの結果（図 6-4 参照）を WEB ブラウザ上に表示した（図 6-5 参照）。

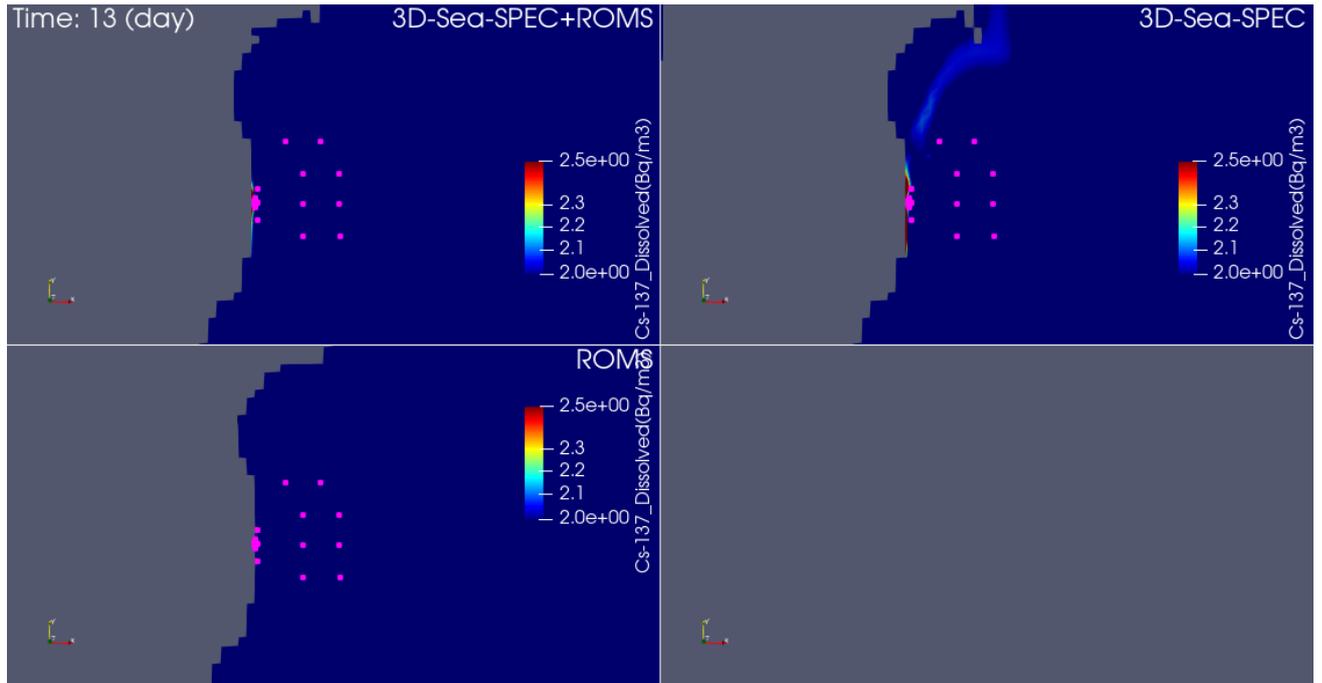


図 6-4 溶存態 Cs-137 濃度分布図（表層：20/02/07 0:00） ParaView による表示、上段左図：3D-Sea-SPEC—ROMS 連成の結果、上段右図：3D-Sea-SPEC のみの結果、下段左図：ROMS のみの結果

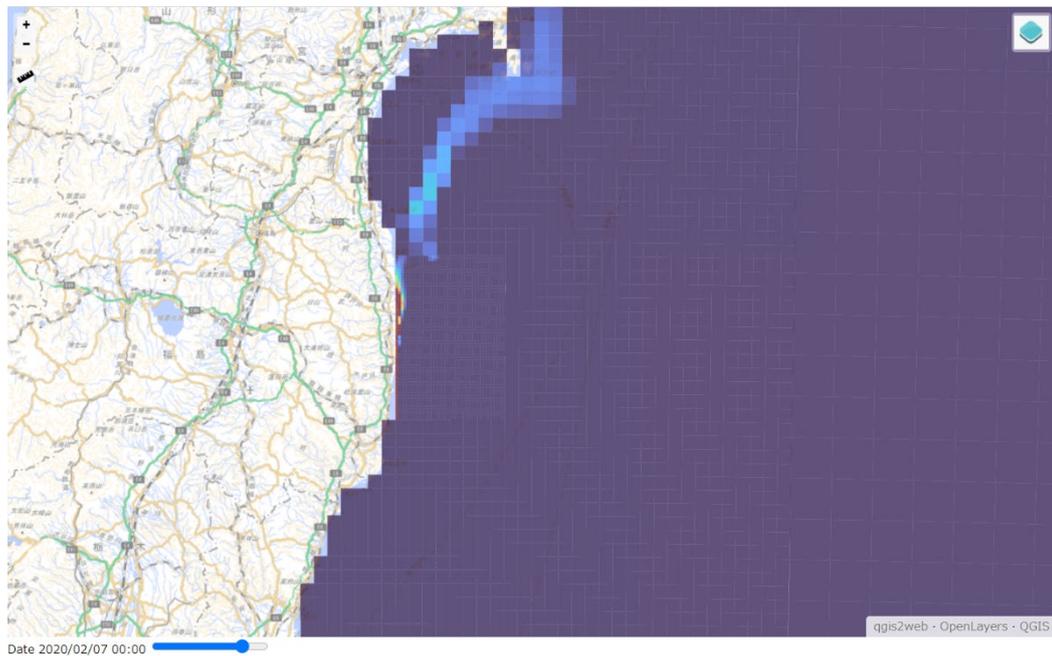


図 6-5 溶存態 Cs-137 濃度分布図（表層、20/02/07 0:00） ※WEB ブラウザにより表示、図 6.4 の上段右図：3D-Sea-SPEC のみの結果を表示

## 6.4 陸域及び海域統合モデルと GUI（共通 UI 及び WEB アプリ）機能の整備

本節では、海域統合モデルに加え、陸域をも統合した全域統合モデルの WEB アプリについて報告する。

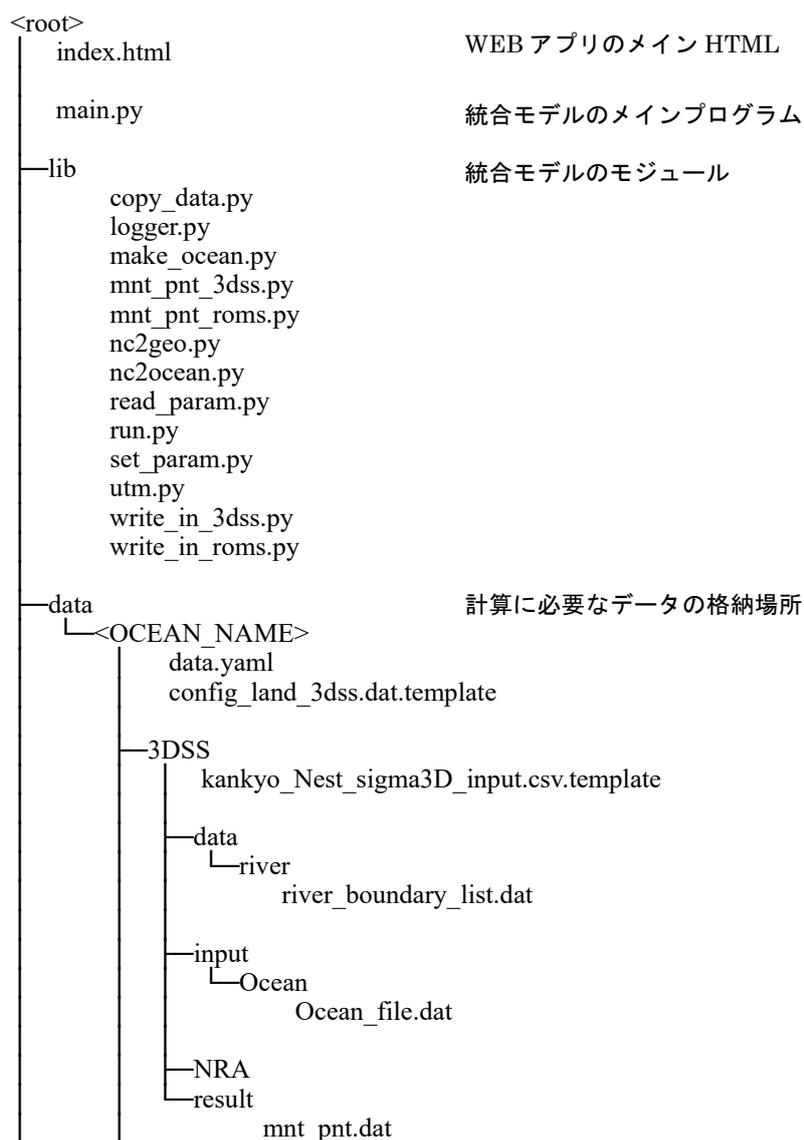
陸域を含む統合モデルでは、陸域モデルとして、MERCURY か RADFLOW のどちらかを選択することができる。但し、モデル毎に入力条件が異なるため、必要とする入力データの全てを準備する必要がある。

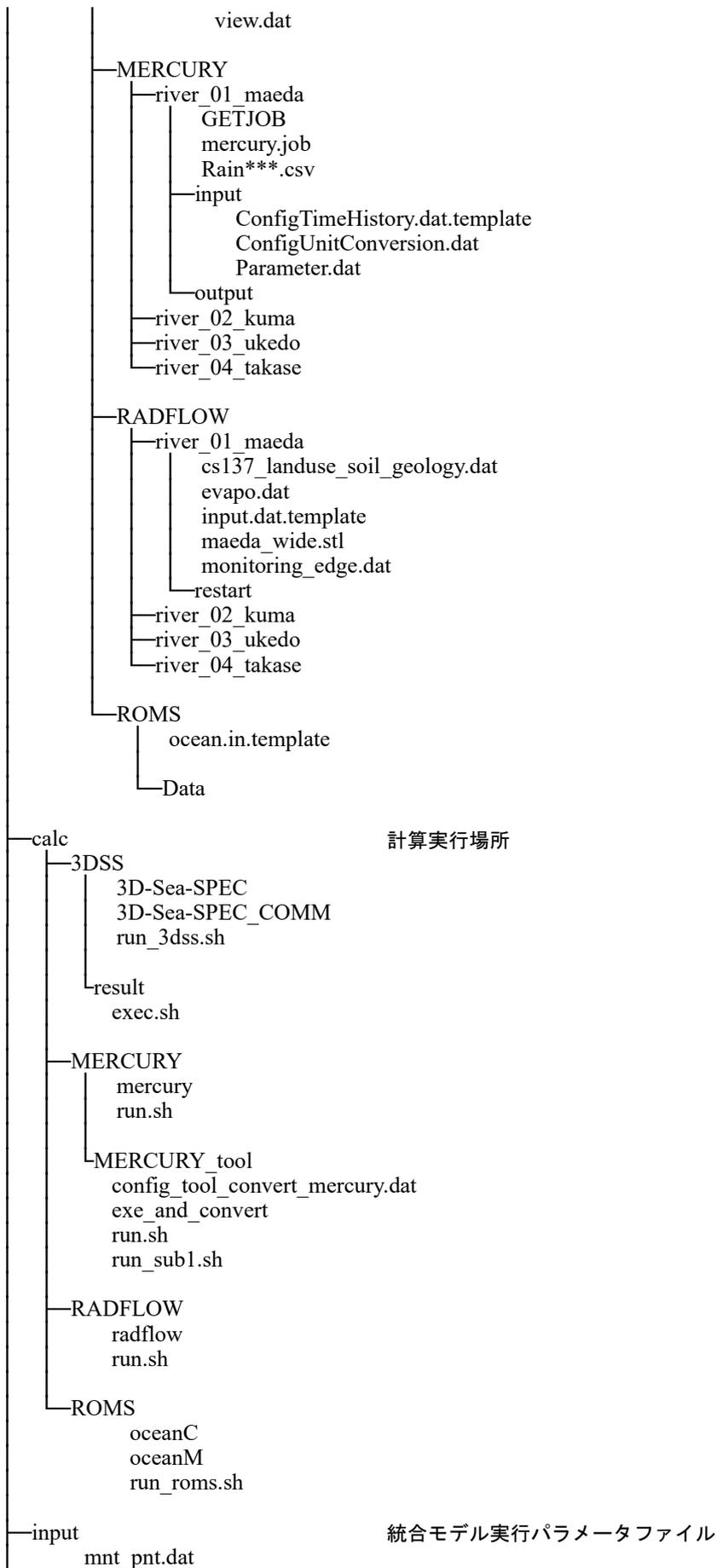
### 6.4.1 全域統合モデルの構成と使用方法

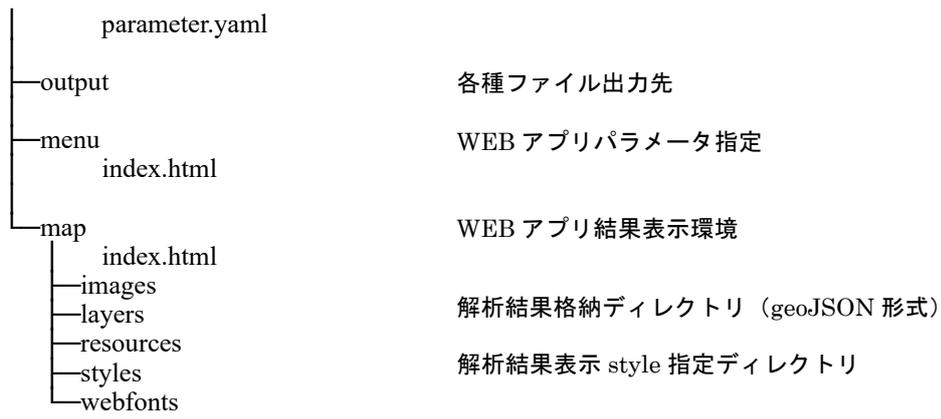
一般に、ユーザーは、最初に対象とする河川と流域を選択するが、長期間に渡る放射性物質の流出量を評価するような場合は、MERCURY の選択が求められる一方、流域内の詳細な情報が必要な場合は、RADFLOW を選択する。従って、両者の一方を選択するという操作は、両者を動作可能とする入力情報が揃っている時のみ、有効となることを注意する。以下では、両者の入力情報が準備されていることを前提とし、統合モデルを動作させる場合について記す。

#### ① ディレクトリ構成

全域統合 WEB アプリ全体のディレクトリ構成を以下に示す。







## ② 全域統合 WEB アプリの画面

開発整備した WEB アプリ画面を以下に示す。

The screenshot shows a web browser window displaying a web application. The interface is divided into several sections:

- Left Sidebar (Parameter Specification):** Contains a title "[WebApp]", a dropdown menu for "解析エリア" (Analysis Area) set to "福島沖" (Off Fukushima), a date picker for "解析開始日" (Analysis Start Date) set to "2020/01/25", another date picker for "解析終了日" (Analysis End Date) set to "2020/02/10", a dropdown for "解析結果出力間隔" (Analysis Result Output Interval) set to "1h", and buttons for "解析開始" (Start Analysis) and "解析結果表示" (Display Analysis Results).
- Central Map (Result Display Area):** Shows a map of Japan with a color-coded visualization of the sea area around the islands. A red box highlights this area.
- Right Sidebar (Visualization Quantity Specification):** Contains a list of physical quantities under "Ocean" and "RADFLOW" categories. Under "Ocean", "Velocity(m/s)" is checked. Under "RADFLOW", "Particulate(Bq/m3)" is checked. A "Map" section at the bottom has "b\_地理院タイル\_淡色" selected.
- Bottom Slider (Date and Time Specification):** A horizontal slider labeled "Date 2020/01/25 00:00" with a blue dot indicating the current time.

Callout boxes with arrows point to these features:

- "解析パラメータ指定" points to the left sidebar.
- "結果表示日時指定スライダー" points to the bottom slider.
- "解析結果表示領域" points to the central map.
- "可視化物理量指定" points to the right sidebar.

### ③ 全域統合 WEB アプリの使用方法

#### ■ 解析パラメータの指定

全域統合 WEB アプリから解析パラメータを指定する。WEB アプリの解析パラメータ指定画面と設定内容を以下にまとめた。

表 6-1 解析パラメータ指定

設定パラメータ	設定値
陸域モデル	[RADFLOW/MERCURY]
沿岸域モデル	[3D-Sea-SPEC/ROMS]
海域モデル	[3D-Sea-SPEC/ROMS] ※1
計算対象海域名	Fukushima など
計算開始日 (※0:00)	カレンダーから指定
計算終了日 (※0:00)	カレンダーから指定
出力間隔時間 (単位 : h)	[1/3/6/12/24]

<p><b>[WebApp]</b></p> <p>解析エリア</p> <p>福島沖 ▾</p> <p>解析開始日</p> <p>2020/01/25 📅</p> <p>解析終了日</p> <p>2020/02/10 📅</p> <p>解析結果出力間隔</p> <p>1h ▾</p> <p>陸域モデル</p> <p>MERCURY ▾</p> <p>沿岸域モデル</p> <p>3D-Sea-SPEC ▾</p> <p>海域モデル</p> <p>3D-Sea-SPEC ▾</p> <p>解析開始</p> <p>解析結果表示</p>
---

※1 尚、沿岸域モデルに『ROMS』を選択した場合、海域では ROMS しか選択できない。

#### ■ 統合モデルによる解析実行

表 6-3 の図に示す『解析開始』ボタンを押すと、指定されたパラメータによる解析が実行される。

#### ■ 統合モデルによる解析実行結果の表示

表 6-3 の図に示す『解析結果表示』ボタンを押すと、解析結果表示領域に解析結果が表示される。以下に示す結果表示日時指定スライダーを移動することで、表示日時が変更可能となる。

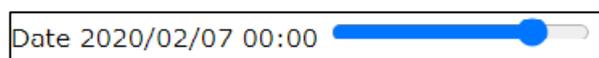


図 6-6 結果表示日時指定スライダー

■ 表示物理量指定

解析結果表示領域の右上部に表示されているのアイコンにマウスカーソルを置くと、以下に示す可視化物理量指定画面が表示される。指定内容に応じて、対応する可視化結果が表示される。

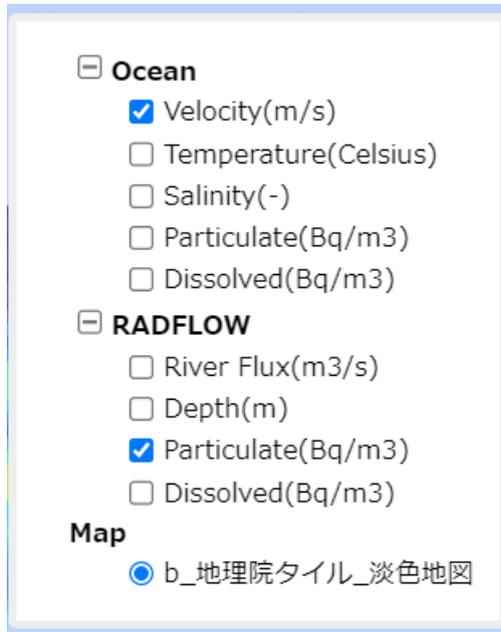


図 6-7 可視化物理量指定画面

表 6-2 可視化物理量

パラメータ	説明
Velocity(m/s)	流速
Temperature(Celsius)	水温
Salinity(-)	塩分
Particulate(Bq/m3)	懸濁態 Cs-137 濃度※1
Dissolved(Bq/m3)	溶存態 Cs-137 濃度
River Flux(m3/s)	流量
Depth(m)	水深

※1 シルト Cs-137、砂 Cs-137、粘土 Cs-137 の合計値

■ 解析結果表示

陸域にて RADFLOW を選択し、沿岸・沖合域の解析結果を同時に表示可能である。以下に、各々、溶存態 Cs-137 濃度を同時に表示した際の可視化例を示す。

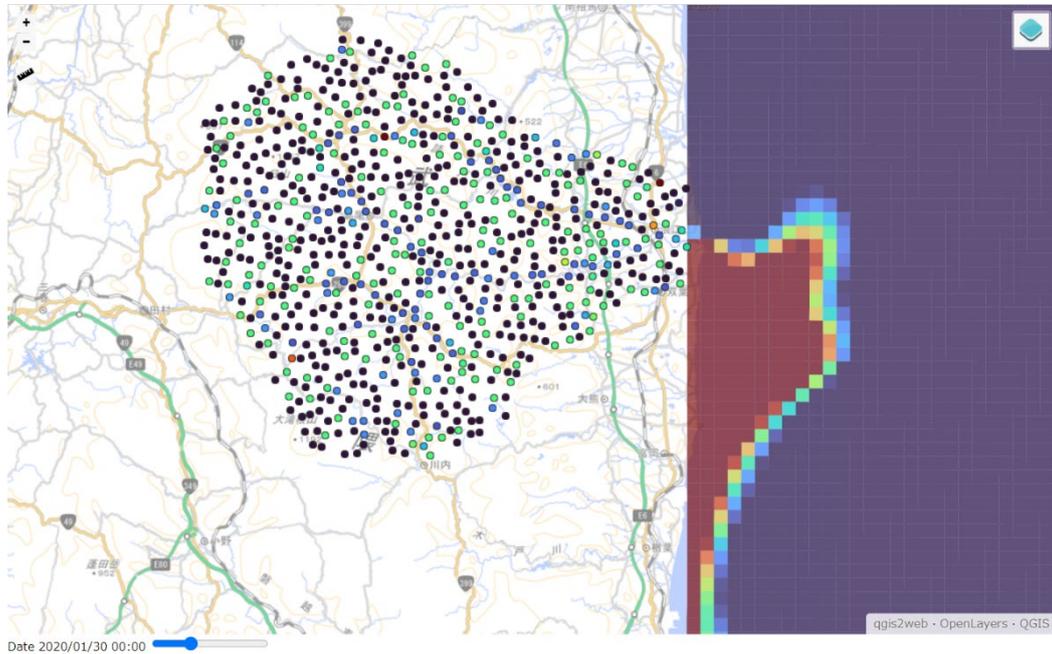


図 6-8 溶存態 Cs-137 濃度分布図表示例（表層、20/01/30 0:00）3D-Sea-SPEC のみ、陸域：請戸川＋高瀬川流域

尚、解析結果表示領域をマウスでクリックすると、以下のように解析結果を数値で確認可能となる。

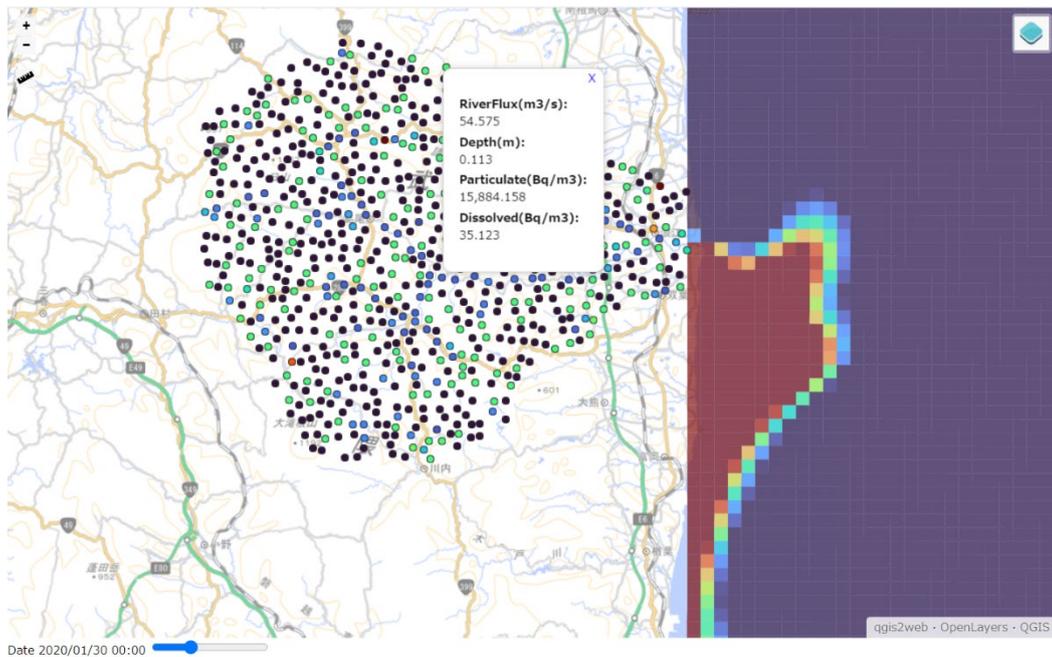


図 6-9 解析結果数値表示例

## 6.5 まとめ

本6章では、陸域と海域を接続し、それらを統合したモデルを動作させ、結果を可視化するWEBアプリを開発し、その試解析結果について記した。

先ず、海域での統合モデルだが、ユーザーは、3D-Sea-SPEC と ROMS のいずれかを選択し、単一のモデルでの解析か、沿岸で 3D-Sea-SPEC とし、沖合を ROMS とする連成解析を選択し、日時を指定した後、スライダーにて海域での経時変化を可視化することが可能なWEBアプリを開発した。WEBアプリは、多くのユーザーが遠隔にて解析結果を確認できる他、共有することも可能であり、解析結果を広く公開する際、有用なアプリとして動作すると考えられる。

次に、陸域と海域を統合したモデルについてもWEBアプリを開発した。ユーザーは陸域モデルとしてMERCURY か RADFLOW のいずれかを選択可能であり、下流地点での流量の可視化と共に、海域での拡散の様子が可視化され、放射性物質の分布やその経時変化を直感的に把握することができる。

以上、本事業では、統合モデルの解析結果を表示する他、結果を広く公開し、情報を周知させる目的で、WEBアプリのプロトタイプを開発した。このような取り組みは、解析結果の積極的公開や周知及びアピールの目的において、非常に有効である。特に、陸域から海域までを広く統合し、環境影響が広範に及ぶ可能性のある原発事故等では、そのシミュレーションによる予測や評価結果を地理空間上にて明示的に確認できるという点において優れている他、多くのユーザーが遠隔からWEBブラウザのみで、シミュレーション結果にアクセスできるという利点を有する。

## 参考文献

- [6-1] ROMS マニュアル [https://github.com/kshedstrom/roms\\_manual/blob/master/roms\\_manual.pdf](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](https://www.myroms.org/wiki/Vertical_S-coordinate)
- [6-4] 佐久間一幸、「MERCURY バージョン 1.1 理論/ユーザーマニュアル」.
- [6-5] Kazuyuki Sakuma, Takahiro Nakanishi, Kazuya Yoshimura, Hiroshi Kurikami, Kenji Nanba, Mark Zheleznyak, “A modeling approach to estimate the 137Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017”, Journal of Environmental Radioactivity, Volume 216, May 2020, Pages 106201.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X19303406>.
- [6-6] 佐久間一幸、「RADFLOW 簡易マニュアル」.

## ■ 7章 考察とまとめ

### 7.1 本章の概要

本7章では、本事業で実施した各域（陸域・海域）モデルの整備と試解析により得られた結果に対し、考察を加え、今後の研究開発の方向性について議論する。また、複数の項目に跨る全体としての課題についても考察を加え、本事業のまとめとする。

以上、本章では、先ず次節(7.2)において、陸域モデルの整備と試解析により得られた課題に対して考察する。7.3では、海域（沿岸及び沖合）モデルの整備と試解析結果に考察を加える。7.4は、全域の統合モデルに対し考察を加え、7.5において、本事業における当初目標に対する達成度と全体を通してのまとめと結論について記す。

### 7.2 陸域モデルの整備と試解析結果の考察

本事業における陸域モデルの整備事項としては、令和3年度当該事業で整理された課題を基に、更に予測推定力を向上させるための機能改善に取り組んだ。以下では、集中定数型流出モデル MERCURY[7-1][7-2]に対する考察、分布定数型流出モデル RADFLOW[7-3]に対する考察を、各々記す。

MERCURYでは、GISを利用し、利用可能な様々な地理空間情報を活用することで、流水量を推定予測するという試みを試験するため、日本全国の24河川を学習データとしたが、テスト問題（福島の主要4河川）に対し、十分な精度（ $RSE < 0.4$ の達成）を取得することは難しいことが判明した。しかし、パラメータ空間の複雑な3段タンクモデルでも、十分に確からしい推定力を有することが分かった。従って、上記結果から、未知の河川のMERCURYパラメータを取得するには、先ずGISを利用した取得パラメータを初期パラメータとして、数か月程度の観測量を用いて、計算コストの最も低く単純な最適化手法であるニュートン法を用いればよいことが分かった。則ち、パラメータのチューニングが最小限の観測値を用いて実施可能である。この結果より、本手法を用いれば、おおよそ日本全国の任意の河川に適用できることが分かる。尚、観測量の全くない河川に対しては、上記のようなパラメータチューニングは不可能となるが、GISを利用し地理空間情報のみで推定されるパラメータを用いても、おおよそその流水量や流水量の経時変化は推定可能であることも分かる（チューニングをすることが推奨されるが）。

以上より、MERCURYの日本全国の河川への適用可能性と実際の適用方法について、本事業の成果により重要な知見を取得できた一方、更なる検討の余地もあることが分かった。例えば、ダムや調整貯水池を有する河川が国内には多く、その影響は無視できない。実際、福島の主要4河川でも、それらが存在することで、流出量の観測値に影響を与えていると考えられ、GIS利用のパラメータ設定の精度向上の課題となっている可能性があり、そのモデル化が必要である。その一方、十分な観測量が存在する河川では、本事業の成果である複数の最適化手法を適用し、それらの結果を比較し、最も優れたものを選択することで、全国24河川に対し、 $RSE < 0.4$ を達成することに成功している。その際、北海道、東北及び北陸の河川では、冬季に降水が降雪に代わることで、春季に融雪により流量が増大することもあり、冬季から初春の時期のデータを除外する必要があることも分かっている。従って、この時期についても、モデル化することができれば、四季を通じてのデータ（数年単位の連続データ）を用いてキャリブレーションすることが可能になり、更に精度が向上することも考えられる。

以上、様々な課題に対する考察と共に今後の改良の方針も見えてきたが、本事業の範囲内でも、おおよそ、日本全国の河川への適用が可能であり、今後の利用が期待される。

次に、RADFLOW について考察を加える。RADFLOW では、GIS データを用いて凡そのパラメータ設定を行い、河川毎の観測流量を基にキャリブレーションする機能を整備した。令和 3 年度当該事業において、キャリブレーションに際し、ベイズ最適化を適用したが、外部プログラムを用いた他、計算コストが高く十分なキャリブレーションが実施できないという課題があったため、自前でプログラム開発が比較的容易である PSO 法と SCE-UA 法による最適化法を導入することで課題解決を図った。その結果、本事業用にカスタマイズ可能となり、最適化に係る計算コストは大きく減少し、RADFLOW の計算コストのみが律速となった。しかし、上記最適化法を実装し、パラメータのキャリブレーションを行った所、RSE 値は減少する傾向を示したが、十分に低減する様子を対象 4 河川に対して、観察することはできなかった。これは、キャリブレーションするための期間が十分でない（RADFLOW の計算コストから十分な計算時間が必要となる）ことが考えられる。今後は、RADFLOW を高速化（並列化や最適化）することが重要になると考えられる。尚、阿武隈川については、十分な RSE 値が得られたが、流域が大きく、応答もゆっくりであるためと考えられる一方、他の河川については、得られたパラメータの物理的な考察と共に、河川の特徴についてもう一度、詳細に調査する必要があると考えられる。尚、RADFLOW を用いると、降雨に伴い、どの地点の流量が上昇し、河川の流量にどのような影響を与えているか、空間的な情報を取得することが可能であり、放射性物質の移行挙動に対し、直感的な理解が得られる。今後は、RADFLOW の整備を更に推し進めていく必要があると考えられる。

### 7.3 海域（沿岸及び沖合）モデルの整備と試解析結果の考察

本事業では、海域（沿岸及び沖合）モデルの整備として、二つのモデル（沿岸 3D-Sea-SPEC と沖合 ROMS）の接続による統合と各モデル間の挙動についての分析を行った他、陸域からの Cs-137 の流出を、陸域モデル MERCURY を用いて推定し、その後の海域での移流・拡散挙動の分析を行った。

以上の整備と試解析を通して、先ず、異なるモデルの統合に際し、注意すべき事項を記す。3D-Sea-SPEC と ROMS を沿岸及び沖合の海域（1F を中心として福島県と隣接する県に跨る海域）にて適用した所、広い海域で見た場合の違いは少ないが、局所的海域での振る舞いは、採用スキームの違いを反映し、異なることが分かった。この結果から、異なるモデルを統合する際は、各モデルの適用性を考慮し、適切な境界にて接続する必要があることが分かった。この事実は、異なるモデル間統合の際の普遍的現象と考えられるが、十分に注意する必要がある。

次に、陸域から流出する Cs-137 に対し、海域での移流・拡散に係る挙動を分析した。分析する対象は、淡水である河川水が沿岸に達した際に生起する現象である。本事業では、既往研究により指摘されてきた二つの現象（懸濁態 Cs-137 が、周囲の塩分濃度が増大するにつれ脱離する現象と懸濁態が塩分濃度の上昇と共に凝集し大粒子態となり沈降する現象）に着目し、1F 近傍の沿岸及び沖合海域での挙動を調べた。その結果、妥当なパラメータの範囲で、沿岸域での移行挙動が、上記の塩分濃度の変化を反映させることで無視できない影響が見られることが分かった。

以上、接続統合に係る課題と陸域と海域の接続に係る懸濁態成分の挙動にかかる課題が整理されたが、前者については、更に異なるモデルも追加し、各々の特徴を列挙し、総合的に判断を加える必要があると考える。そのような試みは、これまでも実施されてきたが、異なるモデルの統合に係る課題として、検討

された例はない。後者については、Cs-137 の沿岸域での挙動に影響を及ぼすことから、今後の主要な研究課題になると考えられる。実際、Cs-137 の沿岸域での海水濃度の減少は緩慢であり、その原因として、懸濁態成分の挙動が複雑であることが指摘されている。

#### 7.4 統合モデルの整備とその機能の考察

本事業では、陸域と海域の接続統合が一つの目標とされ、陸域にて二つのモデルから一つを選択し、海域では、二つのモデルから一つのみ、あるいは二つを連結する統合モデルを整備した。しかし、それらの統合モデルを利用する際、各モデルの特徴を熟知している必要がある他、モデル間の接続についての情報も必須となる等、モデルや対象を詳しく知る研究者が利用可能であるフェーズに到達できた段階と考えられる。尚、統合モデルの結果を評価するに当たっては、結果の時空間変化を視認することが必須であり、GUI を整備することや、可視化エンジン等も必須になると考えられる。

上記課題に対し、本事業では、GUI や結果の可視化を可能にする WEB アプリのプロトタイプを試開発し、その機能の利便性を認識することができた。これらの更なる開発整備により、統合モデル結果の確認が容易となり、現象の把握や課題整理に係る時間が大いに節約されれば、陸域と海域を含む広範な環境において、放射性物質の移行挙動による影響評価が迅速に可能になると考えられる。

#### 7.5 まとめと結論

本事業を実施した整備事項のまとめと、整理した課題についての上記考察を基に、以下にて本事業の結論を記す。

先ず、陸域の整備事項である、集中定数型モデル MERCURY の整備においては、おおよそ想定通りの結果が得られた。未知の河川のパラメータ予測において、観測値によるチューニングが必要となったが、最小限で済むことが判明し、今後の活用が大いに期待できる。その一方、地理空間情報の取捨選択に関し、更なる検討の余地があることも分かった。より重要な情報の絞り込みに係る機械学習技術の適用等が、今後の一つの研究開発の方向性になると考えられる。また、観測量を基にした自動キャリブレーション機能の整備は十分な性能を発揮したことから、実際に活用するフェーズに移行することが可能である。分布定数型モデル RADFLOW の整備においては、計算コストが MERCURY に比べて高く、詳細な整備とその検証にも時間がかかるため、モデルや解析対象に詳しい研究者が動作させる必要があり、汎用的に実際に活用するフェーズではなく、更なる整備が必要であることが分かった。但し、GIS データを用いたパラメータの設定と観測流量を用いたキャリブレーション機能は動作し、パラメータが最適化される状況は確認できた。今後は、RADFLOW の高速化（並列化と最適化）を進めることで、キャリブレーションが高速に実施可能となり、種々の知見が蓄積されることが考えられる。

次に、海域（沿岸・沖合）の整備事項については、以下の二つの重要な課題が整理された。一つ目は、異なるモデルの統合に係る課題であり、二つ目は、河川水に含まれる Cs-137 懸濁態成分の沿岸における挙動である。前者については、更なる検討が必要だが、異なるスケールを対象とする複数のコードを本事業のように接続する研究開発は、異なる分野の様々な場面で実施されており、今後の研究開発の重要なトレンドの一つであり、それらの成果が参考になると考えられる。一方、後者については、現在の Cs-137 の海域での動態に係る重要な研究課題と深く関連しており、これまでに得られた知見を整理する他、現地や実験等による更なる知見の拡充が必要と考えられる。

最後に、本事業で目標とした各域でのモデルの統合に際し、今後、重要となる開発要素について述べる。統合されたモデルを利用する際、各モデルの特徴を熟知している必要がある他、モデル間の接続についての情報も必須となる。しかし、それらを全て把握することは困難と考えられる一方、統合モデルの結果を評価するに当たり、GUIを整備する他、結果を効果的に可視化することが重要になると考えられる。簡単なGUIがあれば、その利用は比較的容易になる他、結果の可視化により、結果の確認が容易となり、現象の把握や課題の整理に係る時間が大いに節約され、環境影響評価という最も重要な取り組みに集中することが可能になると考えられる。

以上、本事業により、陸域モデルの準備は整った他、統合モデルも十分に動作する他、重要な課題にアプローチできることも判明したと考えられ、今後の一層の研究開発の継続が望まれる。

## 参考文献

- [7-1] 佐久間一幸、「MERCURY バージョン 1.1 理論/ユーザーマニュアル」.
- [7-2] Kazuyuki Sakuma, Takahiro Nakanishi, Kazuya Yoshimura, Hiroshi Kurikami, Kenji Nanba, Mark Zheleznyak, “A modeling approach to estimate the 137Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017”, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 216, May 2020, Pages 106201.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X19303406>.
- [7-3] 佐久間一幸、「RADFLOW 簡易マニュアル」.