

令和2年度水力発電の導入促進のための事業費補助金  
(水力発電事業性評価等支援事業)のうち  
水力発電の開発・導入のための賦存量調査事業

調査報告書  
(概要版)

令和3年3月

株式会社ニュージェット  
東電設計株式会社  
株式会社ハイドロ総合技術研究所

# 調査報告書 (概要版)

## 目 次

### 第1章 調査概要

1.1	調査の背景と目的.....	1-1
1.2	調査の実施内容.....	1-3
1.2.1	未開発地点における実現可能性の評価 .....	1-3
1.2.2	これまでの賦存量調査結果の総括 .....	1-5
1.2.3	ダム流入量予測の検討.....	1-6
1.3	調査の実施体制.....	1-9
1.3.1	実施体制と実施工程.....	1-9
1.3.2	有識者による委員会.....	1-11

### 第2章 未開発地点の実現可能性の評価

2.1	調査対象地点の選定.....	2-1
2.1.1	農業用ダムにおける調査対象地点の選定 .....	2-1
2.1.2	堤体嵩上げ計画中ダムにおける調査対象地点の選定 .....	2-1
2.2	実現可能性評価の検討内容.....	2-3
2.2.1	現地調査の実施内容.....	2-3
2.2.2	実現可能性評価の検討内容.....	2-4
2.3	実現可能性評価の検討結果.....	2-5
2.3.1	農業用ダムにおける検討結果.....	2-5
2.3.2	堤体嵩上げ計画中ダムにおける検討結果 .....	2-7

### 第3章 これまでの賦存量調査結果の総括

3.1	概要.....	3-1
3.2	既存ダムの発電利用状況調査.....	3-1
3.2.1	調査対象とした既存ダム.....	3-1
3.2.2	発電ポテンシャル算出対象ダムの選定 .....	3-2

3.3	既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャルの調査	3-3
3.3.1	本調査で算出する発電ポテンシャルの位置付け	3-3
3.3.2	発電ポテンシャルの算出方法	3-4
3.3.3	発電ポテンシャルの算出結果	3-10
3.3.4	有望地点の抽出	3-20
3.4	未開発地点における実現可能性の評価	3-26
3.4.1	過去の調査で実施した実現可能性調査の概要	3-26
3.4.2	実現可能性調査実施済み地点の概略経済性の再評価	3-31
3.5	実現可能性調査実施済み地点の現在の開発状況	3-38

#### 第4章 ダム流入量予測の検討

4.1	検討の概要	4-1
4.2	基本方針の検討	4-4
4.2.1	要件の整理	4-4
4.2.2	基本方針の検討	4-5
4.3	対象流域の検討	4-8
4.3.1	対象流域の検討	4-8
4.3.2	対象期間の検討	4-11
4.4	予測雨量プロダクトの検討	4-12
4.4.1	予測雨量プロダクトの整理	4-12
4.4.2	検証対象降雨の選定	4-14
4.4.3	予測雨量の精度比較	4-20
4.4.4	採用する予測雨量プロダクトの決定	4-27
4.4.5	他流域、全国展開に向けての課題	4-28
4.5	予測雨量に対するAI手法（ダウンスケーリング）の検討	4-33
4.5.1	検討概要	4-33
4.5.2	学習・検証用データ	4-36
4.5.3	AI予測モデルの開発	4-39
4.5.4	AIモデルの学習とパラメータチューニング	4-45
4.5.5	AIモデルの精度評価	4-54
4.5.6	考察・まとめ	4-112
4.6	流出予測手法（流出解析モデル）の検討	4-114
4.6.1	候補とする流出解析モデルの検討	4-114

4.6.2	流出解析モデルの作成.....	4-115
4.6.3	パラメータの設定検討.....	4-123
4.6.4	モデルの精度検証.....	4-166
4.6.5	実用化に向けての評価.....	4-168
4.7	流出予測手法（AI手法）の検討.....	4-170
4.7.1	学習・検証用データの検討と収集.....	4-170
4.7.2	学習・検証用データセットの作成.....	4-174
4.7.3	AI予測モデル構成の検討.....	4-177
4.7.4	AIモデルの開発.....	4-178
4.7.5	AIモデルの学習とパラメータチューニング.....	4-180
4.7.6	AIモデルの精度評価.....	4-182
4.7.7	AIによる物理モデル最適化の検討.....	4-221
4.8	積雪・融雪モデルの検討.....	4-228
4.8.1	積雪・融雪モデルの概要.....	4-228
4.8.2	積雪・融雪モデル計算用の入力データの作成.....	4-231
4.8.3	積雪・融雪モデルのカスタマイズ.....	4-234
4.8.4	積雪・融雪モデルの検証.....	4-236
4.8.5	奥只見ダム流域への適用.....	4-237
4.8.6	積雪・融雪モデル計算結果の定量的評価.....	4-242
4.9	流入量予測手法の選定.....	4-243
4.9.1	流入量予測手法の検討結果の整理.....	4-243
4.9.2	検討した手法の組合せ.....	4-246
4.9.3	検討した手法の組合せに関する懸案事項.....	4-248
4.10	事業スキームの検討.....	4-250
4.10.1	流入量予測システムに要求される機能の検討.....	4-250
4.10.2	システム形態の検討.....	4-268
4.10.3	事業スキームの検討.....	4-282

## 第1章 調査概要

### 1.1 調査の背景と目的

非化石エネルギーである水力発電は、純国産でクリーンな再生可能エネルギーの中でも安定的な電力供給を長期に亘り行うことが可能な電源と位置付けられており、地球温暖化に対応するため、開発・導入を支援していく必要がある。政府としても、平成 27 年（2015 年）7 月に決定した「長期エネルギー需給見通し」において、令和 12 年（2030 年）の全電源構成のうち水力発電として 8.8%～9.2%程度を確保することを見込んでいる。

一方、今後の水力開発地点は小規模化、奥地化しており、開発が困難化している状況にある中で、水力開発を推進する観点から「未開発となっている地点」について経済性及び自然・社会環境に関する課題を調査・分析することが重要となっている。

このような背景のもと政府は、平成 30 年 7 月に閣議決定された第 5 次エネルギー基本計画において同第 4 次エネルギー基本計画に引き続き、以下抜粋に示す通り、「現在、発電利用されていない既存ダムへの発電設備の設置や、既に発電利用されている既存ダムの発電設備のリプレースなどによる出力増強等、既存ダムについても関係者間で連携をして有効利用を促進する。」こととし、平成 26 年度より、国土交通省、水資源開発機構、地方公共団体並びに農林水産省が管理する発電利用されていない既存ダムの有効利用の実現に資するため「既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャル調査（賦存量調査）」を実施してきている。

#### 「第 5 次エネルギー基本計画」の抜粋（第 2 章「第 1 節 基本的な方針」、p18より）

##### 4) 水力

水力発電は、渇水の問題を除き、安定供給性に優れたエネルギー源としての役割を果たしており、引き続き重要な役割を担うものである。このうち、一般水力（流れ込み式）については、運転コストが低く、ベースロード電源として、また、揚水式については、発電量の調整が容易であり、ピーク電源としての役割を担っている。

一般水力については、これまで相当程度進めてきた大規模水力の開発に加え、現在、発電利用されていない既存ダムへの発電設備の設置や、既に発電利用されている既存ダムの発電設備のリプレースなどによる出力増強等、既存ダムについても関係者間で連携をして有効利用を促進する。・・・

本事業では、令和元年度調査<sup>1</sup>に引き続き、これまでの調査において明らかにされた「農業用ダム<sup>2</sup>」（以下、同）における発電未開発ダム（地点）を対象に、実現可能性が高いと考えられる地点をしぼり込んだ上で、経済性及び自然・社会環境を踏まえた検討を実施し、その実現可能性の評価を行った。さらに、昨今のダム再生事業の一方策として検討されている「ダム嵩上げ」について、ダム嵩上げ効果による既設発電所の再開発の実現可能性についても検討を実施した（**未開発地点における実現可能性の評価**）。

加えて、平成 26 年度から実施されてきた発電ポテンシャル調査および未開発地点にお

<sup>1</sup> 「令和元年度水力発電の導入促進のための事業費補助金（水力発電事業性評価等支援事業）のうち水力発電の開発・導入のための賦存量調査事業 調査報告書  
令和 2 年 2 月 東電設計、ニュージェック、西日本技術開発、シーテック」

<sup>2</sup> 本事業で調査対象としている「農業用ダム」とは、「ダム年鑑」に記載されている「農業用ダムおよび農業関連ダム」のうち、提高 20m 以上または流域面積 10 km<sup>2</sup>以上のダム（流域面積が不明のダムも含む）のことをいう

る実現可能性評価の検討結果を総括した。特に、過去の調査で実現可能性評価を実施した地点については、各種開発補助制度の最新情報を反映した経済性の概略評価を実施することとし、必要に応じて再計算を行った（**これまでの賦存量調査結果の総括**）。

さらに、既存ダム運用を高度化し発電電力量を増加させるためのダム流入量予測についての検討を行った（**ダム流入量予測の検討**）。

本事業は、上記の調査の実施を通じて、未開発となっている既存ダムにおける水力発電の開発促進に資することを目的とする。

## 1.2 調査の実施内容

### 1.2.1 未開発地点における実現可能性の評価

令和元年度までの「既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャルの調査」において、農林水産省並びに地方公共団体等が管理する農業用ダム（計 824 地点）の中から、最大出力 100kW 以上を期待できる発電未開発地点が抽出された。

令和 2 年度(本事業)では、上記調査で抽出された発電未開発地点を対象として、現地調査及び収集可能な図面等による情報収集を行い、発電所の設置可否、放流管等の既設設備の状況、道路・送電線等の周辺状況、概算工事費などから、当該地点の実現可能性を評価した。

#### [平成 29 年度～令和元年度 既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャルの調査]

農林水産省並びに地方公共団体等が管理する農業用ダム（計 824 地点）を対象として、発電ポテンシャル調査を実施し、以下の内容が整理された。

- 既存ダムの発電利用状況調査
- 発電ポテンシャル調査（最大出力、年間可能発電電力量の算出）
- 発電未開発有望地点の抽出（発電ポテンシャル 100kW 以上となった 78 地点）

#### [令和 2 年度 未開発地点における実現可能性の評価]

上記調査で抽出された未開発有望地点を対象として、現地調査及び収集可能な図面等による情報収集及び概算工事費の検討を行い、当該地点の実現可能性を評価する。

（調査内容）

- a. 概略評価
- b. 実現可能性の評価
- c. 検討結果の報告（抽出された有望地点を管理する農林水産省並びに地方公共団体に対して）

#### a. 概略評価

農業用ダムを対象とした平成 29 年度～令和元年度調査結果より、発電ポテンシャル（最大出力）が 100kW を超える発電未開発の農業用ダムが、計 78 箇所（A-1 方式<sup>3</sup>43 箇所、A-2 方式<sup>4</sup>35 箇所）あることが判った。

本事業ではこれら 100kW を超える発電ポテンシャルを有する発電未開発の農業用ダム 64 箇所（平成 30 年度並びに令和元年度調査にて実現可能性評価を実施済みの 14 地点を除く）を対象に、発電ポテンシャルの算出精度、各地点のポテンシャル算出値、自然社会環境上の現地情勢に係わる関係法令・各種制約事項、これまでの調査結果から推定することができる各地点の概略経済性等を総合的に勘案した「概略評価」を実施し調査対象候補地点を選定した上で、ダム事業者から本調査への協力受諾を頂くことができた未開発地点（ダム）を、調

<sup>3</sup> A-1 方式とは、ダムに「既設放流管がある」場合で、発電計画を策定するにあたり、その放流管を発電設備の一部として利用できることを前提とするもの

<sup>4</sup> A-2 方式とは、ダムに「既設放流管がない」あるいは「利用できない」場合で、「発電設備として取水設備や水圧管路を新設すること」を前提とするもの

査対象地点として選定した。

さらに、ダム嵩上げ効果による既設発電所の再開発の実現可能性を検討するため、「ダム嵩上げを計画中であり」かつ「発電専用の利水容量を持ち、他の利水利用に従属した発電運用ではない」ダムを選定し、本事業の調査対象に加えた。調査対象ダムの選定にあたっては、インターネット等で公開されている情報（国土交通省ホームページ等）よりダム再生事業を計画中のダムを抽出した上で、条件に合致するダム嵩上げ地点を選定した。

#### **b. 実現可能性の評価**

前記「a.」項の概略評価で選定された未開発地点について、現地調査及び情報収集を行い、自然・社会環境条件の整理、最適発電計画の策定、経済性評価を実施し、当該地点における開発の実現可能性を評価した。特に経済性評価においては、kWh 建設単価（円/kWh）による評価に加えて、FIT 制度を考慮の上、建設から運転保守に至る費用を加味できる評価手法として「内部収益率法（Project-IRR の算出）」を導入した。

#### **c. 検討結果の報告**

上記一連の検討結果を取り纏め、ダム管理者に報告する。これによりダム管理者が次の調査ステップへ進むことをサポートした。

## 1.2.2 これまでの賦存量調査結果の総括

本事業（賦存量調査）は、「**既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャルの調査**」と「**未開発地点における実現可能性の評価**」から構成されており、平成26年度から令和2年度までの7年間に渡り実施された。実現可能性の評価は前年度の発電ポテンシャル調査で抽出された有望地点を対象に実施したものである。これまでの調査での実施内容は以下に示す通りである。

### 【既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャルの調査】

以下(1)に示す既存ダムを対象に、ダム管理者への訪問ヒアリングによる発電利用状況調査を実施した上で、個別ダムの発電ポテンシャルを算出し有望地点の抽出を行った。

#### (1) 調査対象ダム（計1,394地点）

- 平成26年度：国交省直轄ダム及び水資源機構ダム（計122地点）
- 平成27年度～28年度：地方公共団体が管理する補助ダム（計448地点）
- 平成29年度～令和元年度：農水省並びに地方公共団体等が管理する農業用ダム（計824地点）

#### (2) 主な調査内容

- 既存ダムの発電利用状況調査
  - ・ 既存ダムの発電利用状況に係る資料・情報の収集
  - ・ ダム基本データ及び流量データの入手
  - ・ 入手データ整理・発電ポテンシャル算出地点（=発電未利用の放流量があるダム）の抽出
- 発電ポテンシャル調査
  - ・ 貯水位及び放流量流況の整理
  - ・ 発電ポテンシャルの算出（計575地点）
- 有望地点の抽出
  - ・ 有望地点の抽出

### 【未開発地点における実現可能性の評価】

上記「発電ポテンシャルの調査」で抽出された未開発有望地点を対象として、現地調査及び収集可能な図面等による情報収集及び概算工事費の検討を行い、当該地点の実現可能性を評価した。

#### (1) 調査対象ダム

- 平成27年度：2ダム（国交省直轄ダム）
- 平成28年度～29年度：12ダム（地方公共団体が管理する補助ダム）
- 平成30年度～令和2年度：19ダム（農水省並びに地方公共団体等が管理する農業用ダム）

#### (2) 主な調査内容

- 調査対象地点の選定
  - ・ 有望地点の概略評価
  - ・ 調査対象地点の選定
- 実現可能性の評価
  - ・ 現地調査の実施
  - ・ 自然・社会環境条件の整理
  - ・ 水路ルートを選定
  - ・ 最適発電計画の策定
  - ・ 概算工事費の算出
  - ・ 経済性の評価（内部収益率法による）

本事業では、平成26年度から実施されてきた上記の賦存量調査結果を総括した。特に、過去の調査で実現可能性の評価を実施した地点については、各種開発補助制度の最新情報を反映した経済性評価を実施することとし、必要に応じて再計算を行った。また、それら地点についての現在の開発状況を、ダム事業者へのヒアリング等により調査した。

### 1.2.3 ダム流入量予測の検討

令和元年度調査では、ダム流入量予測の対象期間やシステムの提供形態についてニーズを把握するため、発電事業者へのアンケート、ヒアリングを実施した。

また、平成30年度 NEDO<sup>5</sup>報告書「発生電力量最大化を目的とした IoT<sup>6</sup>技術の活用による流入量予測精度向上および発電運用効率化技術の開発研究」の流入量予測手法について評価、改善検討を行い、現在公開されている主要な流入量予測手法の比較を行った。

今年度は、令和元年度の調査で導いた方向性に基づき流入量予測手法の深掘りを行い、有力な計算手法の選定を行うとともに、運用フェーズに入った場合の事業スキームについても検討した。

また、昨今、あらゆる分野で人工知能（AI）技術の活用が重要課題となっており、本調査においても、流入量予測手法は AI 技術を取り込んだ計算手法も含め検討を進めるものとした。

#### 【過年度の調査（令和元年度）】

ダム流入量予測の対象期間やシステムの提供形態についてニーズを把握するため、発電事業者へのアンケート、ヒアリングを実施するとともに、主要な流入量予測手法の比較を行った。

（調査内容）

- ・ 流入量予測ニーズのアンケート調査
- ・ 発電事業者ヒアリング
- ・ 流入量予測手法に対する有用性の評価および改善の検討
- ・ 複数の流入量予測手法の優劣比較

#### 【本事業（令和2年度）】

令和元年度の調査で導いた方向性に基づき流入量予測手法の深掘りを行い、有力な計算手法の選定を行うとともに、運用フェーズに入った場合の事業スキームについても検討した。

（調査内容）

- a. 基本方針の検討
  - b. 対象流域の検討
  - c. 予測雨量プロダクトの検討
  - d. 予測雨量に対する AI 手法(ダウンスケーリング)の適用の検討
  - e. 流出予測手法（流出計算モデル）の検討
  - f. 流出予測手法（AI 手法）の検討
  - g. 積雪・融雪モデルの検討
  - h. 流入量予測手法の選定
  - i. 事業スキームの検討
- ①流入量予測手法の深掘り、有力な計算手法の選定
- ②運用フェーズに入った場合の事業スキームの検討

<sup>5</sup> 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

<sup>6</sup> IoT（アイオーティー）：Internet of Things（インターネット オブ シングス）の略で、「様々な物がインターネットにつながる」「インターネットにつながる様々な物」を指す。

### **a. 基本方針の検討**

令和元年度の調査内容について振り返り、今年度の調査において求められる流入量予測手法に係る要件、および、事業スキームに係る要件を整理した。

さらに、上記の要件および今年度の調査目的を踏まえ、具体的な検討方針について検討した。なお、流入量予測手法に関しては、大きな検討方針として下記を基本に考えた。

- 1) 流出計算モデルの有力な候補を複数個選定し、試算を実施する。
- 2) 流出計算モデルへのインプットとなる予測雨量データの与え方について検討する。
- 3) 積雪・融雪モデルについて検討する。
- 4) AIによる手法について検討する。

また、事業スキームの検討に関しては、まず、流入量予測システムで求められる機能について検討し、そこから、その機能に必要なとなるシステム形態の検討、さらに、そのシステムによるサービスの形態という順に検討を進めた。

なお、予測雨量と流出計算や積雪・融雪の各モデルおよびAI手法を組み合わせることで最適な一体型モデルを作成することが理想ではあるが、現時点では、各モデル・手法が十分確立されているとは言えず、一体型を作成することは困難であると考えられた。このため、本業務では、下記のように各現象を適切に予測できるかどうかを個々に評価し、モデル選定に資するものとした。

- ・ 降雨に対して適切な予測が行える方法を評価
- ・ 流出について適切な予測が行える方法を評価
- ・ 積雪・融雪に関して適切な予測が行える方法を評価
- ・ 降雨や流出に関してAIによって適切に予測が行えるかどうかを評価

### **b. 対象流域の検討**

後述の c.~g.（流入量予測手法の深掘り、有力な計算手法の選定を行う）の検討において、試算等を行う対象流域を検討した。

また、計算を行う対象期間についても検討した。

### **c. 予測雨量プロダクトの検討**

流入量予測計算において、流出計算モデル（もしくはAI手法による流入量計算）へのインプットとなる予測雨量プロダクトについて、検討を行った。

日本の国内外の機関から提供される予測雨量プロダクトをリストアップし、その適用性を比較するとともに、実際の予測雨量プロダクトのデータを収集し、その予測精度を調査した。

### **d. 予測雨量に対するAI手法（ダウンスケーリング）の適用の検討**

c.で検討する予測雨量プロダクトに対して、AIを用いたダウンスケーリング手法の適用検証を行った。1週間先までのダム流入量予測を目標とした場合、現在利用できる予測雨量プロダクトでは、例えばGSM<sup>7</sup>ガイダンスでは20kmメッシュの3時間間隔予測であるため、予測対象とするダム流域が数メッシュ程度でしか表現できない可能性が高い。このため、予測雨量プロダクトの統計的ダ

<sup>7</sup> GSM (Global Spectral Model) : 気象庁が降雨予測に用いる全球モデル

ウンスケーリングを行う AI モデルを作成し、ダム流入量の予測精度向上を図った。

#### e. 流出予測手法（流出計算モデル）の検討

令和元年度調査では、代表的な 5 つの流出計算モデル（および、平成 30 年度の NEDO の開発研究において検討されたモデル）について、その特徴とダム流入量予測システムへの適用性の比較が行われた。

今年度は、それらの計算モデル（およびそれ以外の計算モデル）から 2 種類程度を選定し、その試算を行う。試算の結果に基づき実用性の評価を行うとともに、試算の過程で表れる課題の抽出や、その解決策の検討も行った。

その他、流出計算モデルのパラメーターの最適化手法についても検討した。

#### f. 流出予測手法（AI 手法）の検討

近年有力視されている Deep Learning 手法に基づいた AI 流入量予測モデル（統計予測モデル）を作成し、e. で検討する物理過程に基づいた流出計算モデルによる予測との精度比較検証を行った。

#### g. 積雪・融雪モデルの検討

積雪・融雪モデルは、降水量のデータを流出計算モデル（または AI による手法）に与える部分に組み込まれる計算モデルであり（下図）、特に降雪地域においてはこのモデルの必要性が高い。

今年度は、平成 30 年度の NEDO の開発研究において検討された積雪・融雪モデルを対象に、その適用性検討を行った。

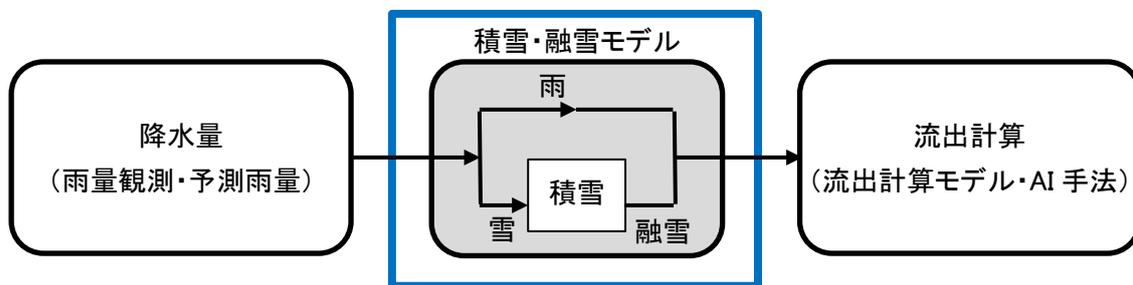


図 1.2-1 積雪・融雪モデル

#### h. 流入量予測手法の選定

c.～g.でとりあげた個々の計算モデルについて、流入量予測システムへの適用の実現性、課題について整理するとともに、適切なモデルを選定した。

#### i. 事業スキームの検討

まず、流入量予測システムで求められる機能について検討し、そこから、その機能に必要なとなるシステム形態の検討、さらに、そのシステムによるサービスの形態という順に検討を進めた。

### 1.3 調査の実施体制

#### 1.3.1 実施体制と実施工程

本事業は、経済産業省資源エネルギー庁の補助事業として、一般財団法人新エネルギー財団が公募により選定した「委託事業者」が、同財団の指導・監理のもと実施した。

また、本事業で実施する調査のうち、「未開発地点における実現可能性の評価」と「これまでの賦存量調査結果の総括」に関わる調査の実施にあたっては、有識者による「発電水力調査検討委員会」を、「ダム流入量予測の検討」に関わる調査の実施にあたっては、有識者による「流入量予測高度化検討委員会」を設置し、その指導・助言のもと調査を行った。

調査の実施体制と実施工程を、図 1.3-1 および図 1.3-2 にそれぞれ示す。

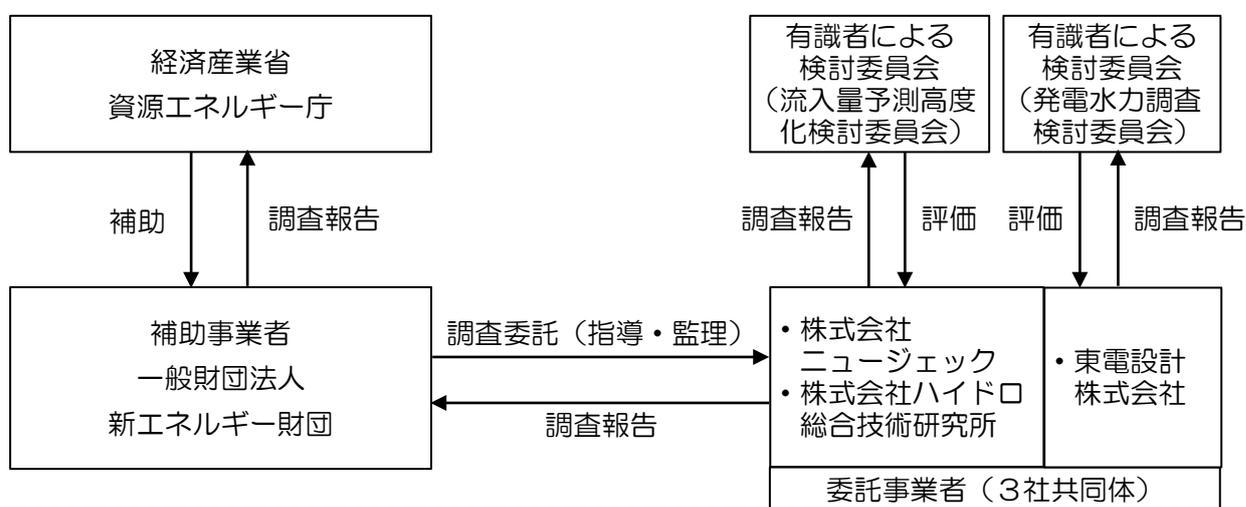


図 1.3-1 調査の実施体制



### 1.3.2 有識者による委員会

#### (1) 「発電水力調査検討委員会」について

本事業で実施する調査のうち、「未開発地点における実現可能性の評価」と「これまでの賦存量調査結果の総括」に関わる調査の実施にあたり、有識者による「発電水力調査検討委員会」を設置した。当該委員会の委員名簿を表 1.3-1 に示す。

本調査の期間中に全2回の委員会を開催した。各回の委員会にて配布した資料については、添付資料-1 を参照のこと。

表 1.3-1 令和2年度 発電水力調査検討委員会の委員名簿

役職	氏名	所属および職名
委員長	日比野 悦久	東京発電株式会社 水力開発推進担当職
委員	河本 映	静岡大学大学院工学領域 電気電子工学系列 准教授
委員	佐藤 隆宏	電力中央研究所 地球工学研究所 流体科学領域リーダー 上席研究員
委員	反町 圭介	公営電気事業経営者会議 主幹
委員	奥山 英俊	電気事業連合会 工務部 副長
委員	岡本 二郎	電源開発株式会社 土木建築部 水力開発室長補佐

(2) 「流入量予測高度化検討委員会」について

本事業で実施する調査のうち、「ダム流入量予測の検討」に関わる調査の実施にあたり、有識者による「流入量予測高度化検討委員会」を設置した。当該委員会の委員名簿を表 1.3-2 に示す。

本調査の期間中に全2回の委員会を開催した。各回の委員会にて配布した資料については、添付資料-2 を参照のこと。

表 1.3-2 令和2年度 流入量予測高度化検討委員会の委員名簿

役職	氏名	所属および職名
委員長	立川 康人	京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授
委員	宮本 仁志	芝浦工業大学 工学部 土木工学科 教授
委員	鈴木 善晴	法政大学 デザイン工学部 都市デザイン工学科 教授
委員	豊田 康嗣	一般財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所 研究推進担当 上席研究員
委員	松原 隆之	電源開発株式会社 土木建築部 ダム整備室(ダム機能高度化) 総括マネージャー

## 第2章 未開発地点の実現可能性の評価

### 2.1 調査対象地点の選定

#### 2.1.1 農業用ダムにおける調査対象地点の選定

平成29年度～令和元年度調査で実施された「既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャルの調査」において、農林水産省並びに地方公共団体等が管理する農業用ダム（計824地点）を対象に、発電に利用されていないダム直下への放流の有無が把握されると共に、これらの放流を発電に利用した場合の発電ポテンシャル値（出力及び年間可能発電電力量）の試算並びに有望地点の整理が行われた。

本調査では、平成29年度～令和元年度調査において発電ポテンシャルが算出された地点のうち、比較的発電規模が大きい未開発地点（最大出力100kW以上）を対象に、机上検討による概略評価結果、当該ダムの水力開発・調査の実施状況並びにダム管理者の調査要望等を踏まえ5地点（ダム）を選定し、現地調査を行うことにより、水路ルート、発電所の設置位置、既存設備の流用可否、道路等のアクセス、系統連系点の候補等について整理した上で、当該5地点の小水力発電開発についてその実現可能性の評価を行った。

これら5地点の農業用ダムと、次節で「堤体嵩上げ計画ダム」における今年度調査対象地点として選定した四十四田ダムを含めた、今年度調査における調査対象地点（ダム）として選定した6ダムの位置図・主要諸元を図2.1-1に示す。

#### 2.1.2 堤体嵩上げ計画ダムにおける調査対象地点の選定

さらに本調査では、昨今のダム再生事業の一方策として検討されている「ダム嵩上げ」について、ダム嵩上げ効果による既設発電所の再開発の実現可能性を検討することとし、「ダム嵩上げを計画中であり」かつ「発電専用の利水容量を持ち、他の利水利用に従属した発電運用ではない」ダムを選定し調査対象に加えた。

調査対象ダムの選定にあたっては、インターネット等で公開されている情報（国土交通省ホームページ等）よりダム再生事業を計画中のダムを抽出した上で、条件に合致するダム嵩上げが計画されている「四十四田ダム」を選定した。当該ダム直下には、以下に示す「四十四田発電所（岩手県企業局）」があり、本調査ではこの発電所を対象に検討を実施した。



発電諸元
最大出力：15,100KW
使用水量：55.0m <sup>3</sup> /s
有効落差：32.7m



①雪谷川ダム

	①雪谷川ダム
所在地・河川名	岩手県・新井田川水系雪谷川
ダム事業者	岩手県
竣工年	1977年
ダム型式/用途	重力式コンクリート/FA
ダム諸元	堤高/堤頂長 /堤体積
元	流域面積



②岩堂沢ダム

	②岩堂沢ダム
所在地・河川名	宮城県・北上川水系岩堂沢
ダム事業者	東北農政局
竣工年	2009年
ダム型式/用途	重力式コンクリート/A
ダム諸元	堤高/堤頂長 /堤体積
元	流域面積



③ニツ石ダム

	③ニツ石ダム
所在地・河川名	宮城県・鳴瀬川水系ニツ石川
ダム事業者	東北農政局
竣工年	2009年
ダム型式/用途	ロックフィル/A
ダム諸元	堤高/堤頂長 /堤体積
元	流域面積



④御前山ダム

	④御前山ダム
所在地・河川名	茨城県・那珂川水系相川
ダム事業者	関東農政局
竣工年	2011年
ダム型式/用途	ロックフィル/A
ダム諸元	堤高/堤頂長 /堤体積
元	流域面積



⑤目谷ダム

	⑤目谷ダム
所在地・河川名	広島県・江の川水系黒瀬川
ダム事業者	中国四国農政局
竣工年	1986年
ダム型式/用途	ロックフィル/A
ダム諸元	堤高/堤頂長 /堤体積
元	流域面積



⑥四十四田ダム

	⑥四十四田ダム
所在地・河川名	岩手県・北上川水系北上川
ダム事業者	東北地方整備局
竣工年	1968年
ダム型式/用途	重力式コンクリート・フィル複合/FP
ダム諸元	堤高/堤頂長 /堤体積
元	流域面積

図 2.1-1 調査対象地点（ダム）の位置図・主要諸元

## 2.2 実現可能性評価の検討内容

### 2.2.1 現地調査の実施内容

#### (1) 現地調査の目的

前項 2.1 で、調査対象地点として選定した計 6 地点について、実現可能性評価を実施するための基礎資料を得るため、ダム事業者並びに管理者を訪問し聞き取り調査を実施すると同時に、各ダム地点の現地調査を実施して、既設設備・発電所の状況、発電所設置スペースの有無、資機材搬出入経路の状況、系統連系の候補地点の確認等を実施した。

#### (2) 現地調査での具体的な実施事項

##### (a) 関連資料の収集

- ダム平面図、縦断図および正面図等
- 既設放流管・放流設備・既設発電所の平面図および縦断図等
- 至近年の最新の貯水位・放流量資料及び既設発電所における発電実績

##### (b) 現地での確認事項

###### ①各種法規制関係（事前に関係 HP 等にて確認）

- 自然公園法、自然環境保全法、野生生物の保護に関する保護規制、国有林野法、森林法等

###### ②現在の維持・利水放流の状況

- 発電に利用されていない維持・利水放流の放流目的とその放流量
- 既得水利権者等との利害関係等、維持・利水放流に係わる特有課題の有無

###### ③既設取水設備・放流設備の概要

- 取水設備および放流設備の位置ならびにその概要（放流目的別の放流箇所等）
- 既設放流管の延長および出口標高
- 現在の維持・利水放流の放流状況

###### ④発電所設置スペース

- 既設放流ゲート室等、既設設備内の水車・発電機等設置スペース
- 発電所新設スペース、水圧管路の分岐点及び水圧管路敷設ルート（既存ダム関連設備のメンテナンスを妨げないこと等を考慮）

###### ⑤資機材搬出入用道路

- 既設設備外に水圧管路および発電所新設の場合の当該発電所位置までの新設道路の必要性

###### ⑥系統連系の候補となる既設の送・配電線

- 発電ポテンシャルが「2,000kW 未満」（高圧連系）の場合は、既設 6.6kV 配電線への連系が基本となるので、発電所新設地点と既設配電線との位置関係およびその直線距離（1/25,000 地形図等を利用して、図上にて計測）
- 発電ポテンシャルが「2,000kW 以上」（特別高圧連系）の場合は、既設送電線（22kV 以上）への連系が基本となるので、発電所新設地点と既設送電線との位置関係およびその直線距離（1/25,000 地形図等を利用して、図上にて計測）

## 2.2.2 実現可能性評価の検討内容

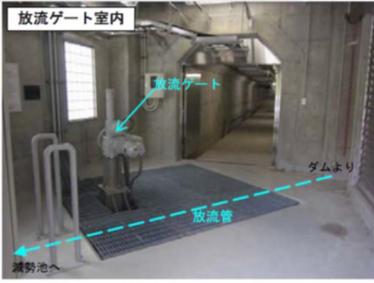
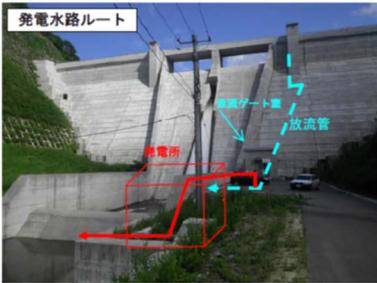
ダム管理者から提供された流量資料・図面等を利用し、かつ現地調査での確認結果を基に、各地点について以下の5項目の検討を実施した。

- ①各種法規制による開発阻害要因の有無の確認
- ②概略水路ルート of 検討（新設水圧管路ルート並びに発電所位置の検討）
- ③最適発電計画の検討（発電規模の経済性比較による最適発電計画の策定）
- ④概算工事費の算出（「水力発電計画工事費積算の手引き<sup>1)</sup>」により算出）
- ⑤経済性の概略評価に基づく実現可能性の評価

- ・ 固定価格買取制度（以下、FIT 制度）を考慮した内部収益率 (Project-IRR、以下 PIRR) の算出と、工事費及び維持管理費用をパラメータとした感度分析の実施
- ・ 維持管理費用については、「コスト等検証委員会報告書 平成 23 年 12 月 19 日 エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会」の「参考資料 1 各電源の諸元一覧」に記載されている「小水力」の算出方法により概算
- ・ 農林水産省所管の助成制度<sup>2)</sup>に基づく「交付金」を適用した場合（国費率 50%）も検討ケースとして考慮

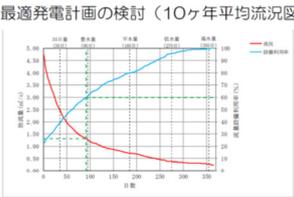
上記に記載の各検討項目の検討イメージは、以下の通りである。

### 概略水路ルート of 検討

### 最新の流量資料を反映した最適発電計画 of 検討

最適発電計画の検討（10ヶ年平均流況図を利用）



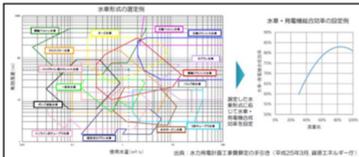
最適発電計画における出力、発電電力量等の算定

継続放流設備	最大使用水量	有効落差	合成効率	最大出力
1.05 m <sup>3</sup> /s	115.84m	0.8217	0.9798	

表 2.2.19 維持放流設備放流年間可能発電電力量算定表

日数	日数	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	有効落差 (m)	合成効率 (%)	平均年電力 (kWh)	発電電力量 (kWh)
16	16	1.05	100	0.8217	979	375,936
35	19	1.05	99	0.8202	965	418,264
65	69	1.05	97	0.8209	957	1,353,440
185	90	0.45	43	0.7123	364	1,427,760
275	90	0.42	40	0.6929	339	1,749,520
355	80	0.24	23	0.5810	153	894,640
365	10	0.20	19	0.5314	121	32,880
計	365				437	4,827,808

表 2.2.20 水車選定・合成効率計算



### 概算工事費 of 算定

積算項目	金額	設備概要	備考
1. 本工事費			
1) 土地補償費	0		(①)+(②)×0.5 全設備が事業者用地の場合は計上しない
2) 建物関係	2,500	地上式	発電所建屋を計上
3) 土木関係	7,381		(①)+(②)
① 水路	6,710		①(6.~)上
a. 取水ダム	0	既設流用	既設流用または必要ない場合は計上しない
b. 取水口	0	既設流用	
c. 沈砂池	0		既設流用または必要ない場合は計上しない
d. 導水路	0		*
e. 水櫃	0		*
f. 余水路	0		*
g. 水門	7,381		*
計	7,381		

### 検討結果 of 整理

〇〇ダム地点 発電計画概略諸元表

項目	諸元
水系・河川名	一級河川〇〇川水系〇〇川
流域面積	7.2km <sup>2</sup>
河川流量(取水可能流量)	〇〇ダム放流量流況(2004年1月~2013年12月、10ヶ年平均) 最大 3.44 35日 0.68 豊水量 0.29 平水量 0.14 低水量 0.08 過水量 0.04 最小 0.04 年平均 0.26
発電所位置	〇〇県〇〇市
取水口位置	同上
放水口位置	同上
発電方式	ダム式
取水水位	EL. 300.00m
放水水位	EL. 274.20m
総落差	25.80m
有効落差	最大 23.90m
使用水量	最大 0.15m <sup>3</sup> /s
出力	最大 26kW (常時出力 0kW)
年間可能発電電力量	145.5MWh
ダム(共用)形式	重力式コンクリート (〇〇ダム)
高さ	46.00m
堤長	115.00m
沈砂池	該当なし
水櫃	該当なし
導水路	該当なし
水圧管路	延長約〇〇m
放水口	延長約〇〇m
余水路	該当なし
発電所	地上式

<sup>1)</sup> 「水力発電計画工事費積算の手引き 平成 26 年 3 月 資源エネルギー庁 新エネルギー財団」  
[URL: http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/electric/hydroelectric/download/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/hydroelectric/download/)

<sup>2)</sup> 助成制度の詳細は「農山漁村地域整備交付金交付要綱」並びに「農山漁村地域整備交付金実施要領」を参照のこと  
[URL: http://www.maff.go.jp/j/study/other/e\\_mura/oomori/n-koufukin.html](http://www.maff.go.jp/j/study/other/e_mura/oomori/n-koufukin.html)

## 2.3 実現可能性評価の検討結果

### 2.3.1 農業用ダムにおける検討結果

表 2.3-1～2.3-2 は、各ダムの発電計画諸元、主要設備諸元、概算工事費及び PIRR 値の感度分析結果（助成制度に基づく交付金を考慮した場合を含む）を取り纏めたもので、経済的観点での実現可能性の評価結果を示すものである。

FIT 制度においては、水力発電の売電単価を設定する際に、事業者の収益として「税前 PIRR7%」を前提条件としており、本調査ではこれを経済性評価の目安とした。

表 2.3-1 に示す、二ツ石並びに目谷ダムについては、同表中の経済性の欄に示されている通り、交付金考慮無しの場合かつ維持管理費用がベースケースでも、8%程度の高い PIRR 値の確保が可能であることが判る。さらに、農水省所管の「交付金」（国費率 50%：概算工事費の半額を交付と仮定）を考慮した場合、その経済性は一層向上し、両地点ともベースケースで約 14%の PIRR 値の確保が可能である。また、本調査では工事費の増減をパラメータとした感度分析も実施しており、これら 2 つの地点については、交付金を考慮した場合、仮に同表中の概算工事費よりも 20%程度増加した場合でも 9～10%程度（維持管理費ベースケースの場合）の PIRR 値を維持することが可能であることが判った。以上の通り、感度分析結果から推定される経済性の傾向を踏まえると、二ツ石並びに目谷ダムにおける小水力発電事業の開発は、非常に高い実現可能性を有していると考えられる。

表 2.3-2 に示す、岩堂沢ダムについては、同表中の経済性の欄に示されている通り、交付金を考慮すれば、維持管理費用をベースケースの 8 割以下程度に抑制すること、あるいは感度分析の結果から工事費について 10%程度以上を削減し、かつ維持管理費用をベースケースの 8～9 割以下程度に抑制することが可能であれば、5～7%程度の PIRR 値を確保できる見込みがあり、その実現可能性が高まると考えられる。ただし、岩堂沢ダムでは、現状、発電所新設候補地点へのアクセスは徒歩のみであることを、現地調査にて確認した。本地点において小水力開発を推進するためには、ダム直下に位置している既設放流設備内の放流バルブ等の機械設備の老朽化に伴う更新工事に併せてアクセス道路を新設する（＝発電計画工事費にはアクセス道路新設費用を含めない）、あるいは発電所施工方法について、アクセス道路を新設することなく設置工事を実施することを指向し合理的・効率的な施工方法を基本設計段階で検討する等の方策を講じることが必要である。

表 2.3-2 に示す、御前山並びに雪谷川ダムについては、同表中の経済性の欄に示されている通り、交付金考慮の有無に関わらず、工事費の感度分析の結果からも大半の検討ケースで PIRR 値が算出不能であり、経済性の観点におけるこれら 2 つのダムにおける小水力発電事業開発の実現可能性は低いと考える。

本調査での検討結果より、農業用ダムの小水力発電開発においては FIT 制度と併用して農水省所管の「交付金」を利用できるというメリットを活かしつつ、今後詳細な調査検討を進める中で工事費の削減を検討・達成した上で、維持管理費用についてもできる限りその削減・抑制を図ることができれば、農業用ダムで発電未開発のまま取り残されている地点についても、その経済性の改善を見込むことができ、開発実現性を高めることができると考える。

表 2.3-1 各地点の発電計画諸元と経済性の概略評価結果

項目		ニツ石ダム（宮城県）		目谷ダム（広島県）		
発電計画諸元	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	1.09		0.60		
	有効落差 (m)	51.39		43.89		
	水車・発電機合成効率	0.80		0.77		
	最大出力 (kW)	441		199		
	年間可能発電電力量 (MWh/年)	2,509		1,137		
	設備利用率 (%)	65%		65%		
	主要設備諸元	取水口	既設取水設備利用			
水圧管路		既設放流管流用部	水圧管路新設部	既設放流管流用部	水圧管路新設部	
		鋼管(埋設)	鋼管(埋設)	鋼管(埋設)	鋼管(埋設)	
管種						
管径 (m)		1.6	0.6	0.7	0.5	
延長 (m)		656	77	358	10	
計 (m)		733		368		
発電所		半地下式		地上式		
放水路・放水口		暗渠				
延長 (m)		10				
水車型式		横軸フランシス水車		パイプライン型フランシス水車		
送配電線	近傍配電線へ高圧連系		近傍配電線へ高圧連系			
延長 (km)	0.4		0.1			
経済性	概算工事費 (百万円)	398		187		
	kW建設単価 (百万円/kW)	0.90		0.94		
	kWh建設単価 (円/kWh)	159		164		
	FITによる売電収入 (百万円/年)	69		37		
	交付金考慮無しPIRR(20年) <sup>*1</sup>	維持管理費	PIRR値	維持管理費	PIRR値	
	維持管理費 (百万円/年)	ベース	22	8.1	14	8.1
		×0.9	19	8.7	13	9.0
		×0.8	17	9.3	12	9.8
	PIRR値 (%)					
	交付金考慮PIRR(20年) <sup>*1</sup>	維持管理費	PIRR値	維持管理費	PIRR値	
	維持管理費 (百万円/年)	ベース	22	14.3	14	14.4
×0.9		19	15.4	13	15.8	
×0.8		17	16.4	12	17.2	
PIRR値 (%)						

※1 法人税控除前のプロジェクト内部収益率(Project-IRR)、当該欄が「-」の場合は算定不能を示す。

表 2.3-2 各地点の発電計画諸元と経済性の概略評価結果

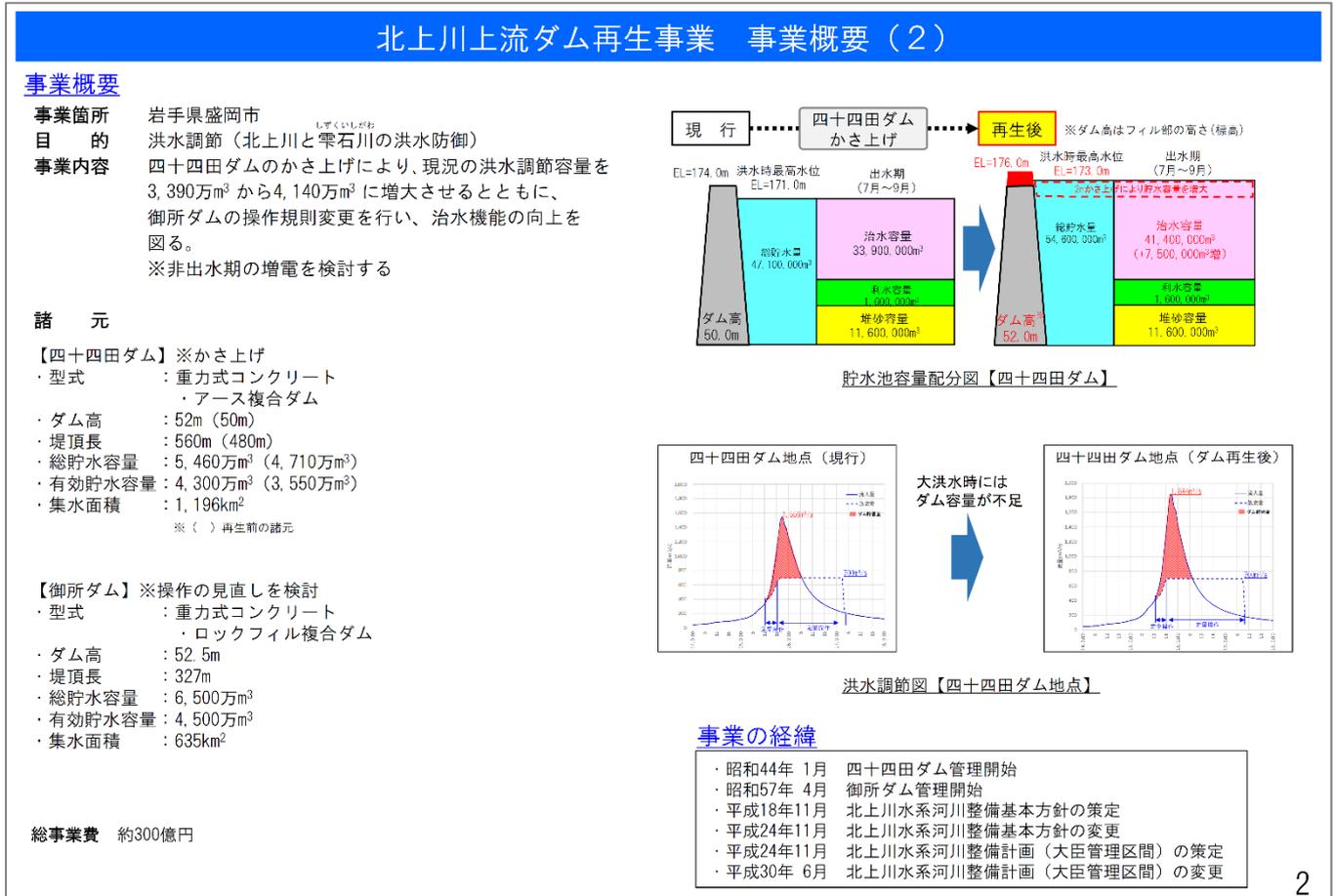
項目		岩堂沢ダム（宮城県）		御前山ダム（茨城県）		雪谷川ダム（岩手県）		
発電計画諸元	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	0.78		0.41		0.99		
	有効落差 (m)	63.32		33.00		7.28		
	水車・発電機合成効率	0.80		0.77		0.65		
	最大出力 (kW)	388		102		46		
	年間可能発電電力量 (MWh/年)	1,413		599		358		
	設備利用率 (%)	42%		67%		89%		
	主要設備諸元	取水口	既設取水設備利用					
水圧管路		既設放流管流用部	水圧管路新設部	既設放流管流用部	水圧管路新設部	既設放流管流用部	水圧管路新設部	
		鋼管(埋設)	鋼管(埋設)	鋼管(埋設)	鋼管(埋設)	鋼管(埋設)	鋼管(埋設)	
管種								
管径 (m)		1.1	0.55	1.4	0.4	0.5	0.6	
延長 (m)		60	84	579	10	25	23	
計 (m)		145		589		48		
発電所		半地下式		地上式		半地下式		
放水路・放水口		暗渠						
延長 (m)		6		-		6		
水車型式		横軸フランシス水車		パイプライン型フランシス水車		クロスフロー水車		
送配電線	近傍配電線へ高圧連系		近傍配電線へ高圧連系		近傍配電線へ高圧連系			
延長 (km)	0.2		0.3		0.1			
経済性	概算工事費 (百万円)	332		205		266		
	kW建設単価 (百万円/kW)	0.86		2.00		5.77		
	kWh建設単価 (円/kWh)	235		341		742		
	FITによる売電収入 (百万円/年)	39		19		12		
	交付金考慮無しPIRR(20年) <sup>*1</sup>	維持管理費	PIRR値	維持管理費	PIRR値	維持管理費	PIRR値	
	維持管理費 (百万円/年)	ベース	19	-	15	-	15	-
		×0.9	17	0.7	14	-	14	-
		×0.8	15	1.7	12	-	12	-
	PIRR値 (%)							
	交付金考慮PIRR(20年) <sup>*1</sup>	維持管理費	PIRR値	維持管理費	PIRR値	維持管理費	PIRR値	
	維持管理費 (百万円/年)	ベース	19	-	15	-	15	-
×0.9		17	1.9	14	-	14	-	
×0.8		15	3.6	12	-	12	-	
PIRR値 (%)								

※1 法人税控除前のプロジェクト内部収益率(Project-IRR)であり、当該欄が「-」の場合は算定不能を示す。

## 2.3.2 堤体嵩上げ計画ダムにおける検討結果

### (1) 堤体嵩上げ後の貯水位諸元の仮定

四十四田ダムの堤体嵩上げは、北上川上流ダム再生事業の一環として実施される。主な目的はダム堤体を2m程度嵩上げし、洪水調整容量を増やし治水機能の向上を図ることである。具体的な検討業務に令和元年度より着手した。本事業の概要は以下の図2.3-1に示す通りである。



2

※出典：国土交通省 社会資本整備審議会 第11回事業評価小委員会(平成30年8月8日)  
 「北上川上流ダム再生事業 ダム事業の新規事業採択時評価 説明資料」より抜粋

図 2.3-1 「北上川上流ダム再生事業」の事業概要

令和2年12月時点で、堤体嵩上げ後の貯水位仕様（洪水時最高水位、常時満水位等）は未定であり、決まった数字はないことを事業関係者への聞き取り調査で確認した。

そこで、本検討では図2.3-1に掲載した「四十四田ダム ダム嵩上げ事業計画の概要」に記載されている情報に従い、「堤体嵩上げ高2m」とした上で、貯水位仕様については表2.3-3に示す通り仮定することとした。

表 2.3-3 堤体 2m 嵩上げ後の貯水位諸元の仮定（赤字部）

期間		貯水位の諸元		備考
非洪水期間	10月1日～6月30日	洪水時最高水位	EL.173.00m	現状：EL.171m
		常時満水位	EL.172.00m	現状：EL.170m
洪水期間	7月1日～9月30日	制限水位	EL.159.00m	洪水期間
		最低水位	EL.158.00m	

(2) 検討ケースの設定

四十四田ダム・四十四田発電所では、融雪期（3月～5月）や洪水期（7月～9月）に、四十四田発電所を経由しないダム放流（無効放流）が発生している年がある。そこで、この無効放流量を発電に有効利用することを指向し、現状の最大使用水量 55m<sup>3</sup>/s から増取水した場合を 4 ケース設定し（Qmax=60～80m<sup>3</sup>/s）、各ケースについて貯水位・放流量運用曲線を作成した上で、発電出力及び年間可能発生電力量を算出した。

さらに、ダム嵩上げ後も四十四田ダム・貯水池の調整率は約 3%程度と小さいため、調整率の小さいダムの発電規模の選択について、「中小水力発電ガイドブック 新エネルギー財団」（p198）に記載されている「利用率を 60%程度とする使用水量規模を中心として概ね 65%～50%程度の範囲内で比較開発規模を選択する」に準拠し、設備利用率が現状（56%）よりも大きくなる 2 ケース（Qmax=45～50m<sup>3</sup>/s）も比較検討ケースに加えた。

(3) 検討結果

各ケースの発電出力・年間可能発電電力量の算出結果と、それらにおける発電計画諸元の変化傾向について比較検討を実施した。その結果を、表 2.3-4 に取り纏めた。

表 2.3-4 各検討ケースの発電諸量の算出結果

項目	現状	ダム嵩上げ後							
		10m <sup>3</sup> /s減取水	5m <sup>3</sup> /s減取水	既設流用	5m <sup>3</sup> /s増取水	10m <sup>3</sup> /s増取水	15m <sup>3</sup> /s増取水	25m <sup>3</sup> /s増取水	
発電計画諸元	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	55	45	50	55	60	65	70	80
	有効落差 (m)	32.7	35.0	34.9	34.7	34.6	34.4	34.3	34.0
	最大出力 (kW)	15,100	13,100	14,600	16,000	17,600	19,000	20,400	23,100
	年間可能発電電力量 (GWh/年)	74.4	72.9	75.5	77.5	78.4	79.4	80.2	81.0
	設備利用率	56%	64%	59%	55%	51%	48%	45%	40%
比較検討	「現状」に対する増分出力 (kW)	-	-2,000	-500	900	2,500	3,900	5,300	8,000
	同上、増分可能電力量 (GWh/年)	-	-1.5	1.0	3.0	3.9	4.9	5.7	6.5
	同上、増分割合	-	-2.0%	1.4%	4.1%	5.3%	6.6%	7.7%	8.7%
	発電停止日数* (10ヶ年合計)	29	29	29	29	132	175	211	299
	「既設流用」に対する増分出力 (kW)	-	-	-	-	1,600	3,000	4,400	7,100
同上、増分可能電力量 (GWh/年)	-	-	-	-	0.9	1.9	2.7	3.5	

※流入量が水車の足切り流量（最大使用水量の25%と想定）以下の場合

表 2.3-4 に示す、各検討ケースにおける発電諸量の比較検討結果より、以下を考察した。

- 融雪期等の無効放流分を発電に利用できるようになるので、増取水量が大きくなるにつれて増分電力量も大きくなる
- 一方、増取水量が大きくなるにつれて、設備利用率は低下する傾向となる。これは水車の足切り流量に起因する発電停止日が増大することによる。現状運用では作業日等の数日を除き、基本的に年間を通じて 24 時間運転（≒流込み式計画）を実施しているので、増取水した場合には発電停止日が現状よりも増える傾向となることに留意する必要がある

上記の考察やアロケーション費用を含めた経済的な観点も踏まえ、本調査の検討結果については、今後、岩手県企業局殿が総合的な判断のもと最適更新規模を決定する際の参考資料として頂きたい。

## 第3章 これまでの賦存量調査結果の総括

### 3.1 概要

本事業（賦存量調査）は、「既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャルの調査」と「未開発地点における実現可能性の評価」から構成されており、平成26年度から令和元年度まで6年間に渡り実施されてきた。この章では、これまでに実施した一連の調査結果を取り纏めると同時に、未開発地点における実現可能性の評価を実施した地点について、今後のFIT制度の変更（FIP制度への移行）等の状況変化も見据え、河川の有効利用、将来の事業環境等、発電事業者毎の水力開発にあたって重視する事項等を踏まえつつ、複数のケースを想定して経済性評価を実施した。

### 3.2 既存ダムの発電利用状況調査

#### 3.2.1 調査対象とした既存ダム

本調査は、調査を実施した各年度毎に、以下に示す既存ダム（計1,394ダム）を対象にして発電ポテンシャル調査を実施した。

- 平成26年度調査  
国土交通省直轄ダム及び水資源機構ダム（計122ダム）
- 平成27年度～28年度調査  
地方公共団体が管理する補助ダム<sup>1</sup>（計448ダム）
- 平成29年度～令和元年度  
農林水産省並びに地方公共団体等が管理する農業用ダム<sup>2</sup>（計824ダム）

本調査では、調査対象ダムを所管するダム事業者に対して「訪問による聞き取り調査」を実施した上で、個別ダム毎に以下に示す図面・資料・データを提供して頂いた。

- ダム関係の図面、既設放流設備関係の図面
- ダム操作規則、水利使用規則
- 至近10ヶ年分のダム放流量・貯水池水位の実績データ（日単位）

上記の提供資料・データを元に、個別ダムの放流設備状況・発電利用状況について整理した上で、発電未利用のダム放流量が確認できたダムを発電ポテンシャル算出対象地点として選定し、後述する算出方法にて発電ポテンシャル（発電出力並びに年間可能発電電力量）を算出した。

<sup>1</sup> 本調査で調査対象とした「補助ダム」とは、一般財団法人日本ダム協会発行「ダム年鑑」に記載されている河川総合開発事業における竣工ダムのうち、補助事業（治水ダムを含む）に係るダムのことをいう

<sup>2</sup> 本調査で調査対象とした「農業用ダム」とは「ダム年鑑」に記載されている「農業用ダム及び農業関連ダム」のうち、「提高20m以上または流域面積10km<sup>2</sup>以上のダム（流域面積が不明のダムも含む）」のことをいう

### 3.2.2 発電ポテンシャル算出対象ダムを選定

これまでの6年間で実施された発電ポテンシャル調査における各年度の調査対象ダムに関する発電利用状況の分類結果、並びに発電ポテンシャル算出対象地点数を取り纏めた結果を表3.2-1に示す。

表3.2-1 発電ポテンシャル調査における調査対象ダムとポテンシャル算出対象地点数

【国交省直轄ダム、水資源機構ダム及び補助ダム（計570ダム）】

発電利用状況		ダム数				合計
		平成26年度調査 (直轄及び水機構ダム)	平成27年度調査 (補助ダム、23団体)	平成28年度調査 (補助ダム、23団体)		
事業用及び管理用の発電所が設置されている地点		16	3	1		20
管理用の発電所だけが設置されている地点		23	42	15		80
事業用の発電所だけが設置されている地点	発電未利用の河川維持放流、利水放流がない地点	70	57	35		162
	発電未利用の河川維持放流、利水放流がある地点	5	15	7		27
発電所が設置されていない地点（発電未利用地点）		8	90	157		255
魚道経由で維持放流し発電利用できない地点や、再開発前後で2重計上されているダム及び副・脇ダム等		13 地点	105 地点	164 地点	15	26
合計		122	218	230		570

計算対象総計：282 地点

【農業用ダム（計824ダム）】

発電利用状況		調査対象ダム数				合計
		平成29年度調査 (農業用ダム)	平成30年度調査 (農業用ダム)	令和元年度調査 (農業用ダム)		
事業用及び管理用の発電所が設置されている地点		0	6	1		7
管理用の発電所だけが設置されている地点		2	5	12		19
事業用の発電所だけが設置されている地点	発電未利用の河川維持放流、利水放流がない地点	21	10	9		40
	発電未利用の河川維持放流、利水放流がある地点	1 (2)	2	1		4 (5)
発電所が設置されていない地点		104 (106)	106	76		286 (288)
発電所開発計画が進行中の地点		108 地点	108 地点	77 地点	9	23
取放水量等の流量資料なし、圧力導水等の理由で発電利用可能は放流水なし、ダム廃止・建設中 等		87	171	187		445
合計		225	304	295		824

■：発電ポテンシャル算出対象地点

計算対象総計：293 地点

上表に示す通り、本調査では発電未利用の放流量が確認された既存ダム計575地点を対象に、発電ポテンシャル（発電出力並びに年間可能発電電力量）を算出した。

### 3.3 既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャルの調査

#### 3.3.1 本調査で算出する発電ポテンシャルの位置付け

本調査では、調査対象とする既存ダムの発電利用状況を調査のうえ発電ポテンシャルの算出対象地点を選定すると共に、ダム事業者から提供された関係資料を基に各地点における発電ポテンシャル（発電出力並びに年間可能発電電力量）を算出した。ここで算出された発電ポテンシャルは、統一的な考え方の基に、発電に利用可能なダム放流量と遊休落差から求める各地点が有する潜在量を示すものであり、図 3.3-1 に示す通り、水力開発の一般的な調査・事業段階における位置付けでは「(1) 事前調査」より更に前の段階のレベルのものであり、事業者が希望する経済性をもって実際に発電所の建設が可能かどうかを技術面も含めて検討する実現可能性に係る評価は行っていない。つまり本調査では、後述する算出方法に示す統一的な考え方を基に、最大使用水量、有効落差及び水車・発電機合成効率を設定のうえ発電ポテンシャルを算出しており、以下に示すような個別地点特有の様々な具体的条件や開発阻害要因は反映されていない。

- ・ 法令に規制された地域への立地による許認可手続きや地元利害関係者等との調整(ダム事業者とダム管理者間の協議を含む)の要否及び解決の難易度等(自然・社会環境条件)
- ・ 発電所並びに水圧管路の設置スペースの有無、既設設備の流用可能範囲、既設放流管の分岐方法と施工の難易度、資機材搬出入の難易度(既設の搬出入路の有無)、系統連系の難易度等(物理的条件)
- ・ 上記の諸条件を反映した工事費の算出と経済性の評価

したがって、事業者が希望する経済性をもって実際に当該発電所の建設が可能かどうかを技術面も含めて評価するためには、「(1) 事前調査」や「(2) 可能性調査(F/S)」を実施することが必須であることに留意する必要がある。

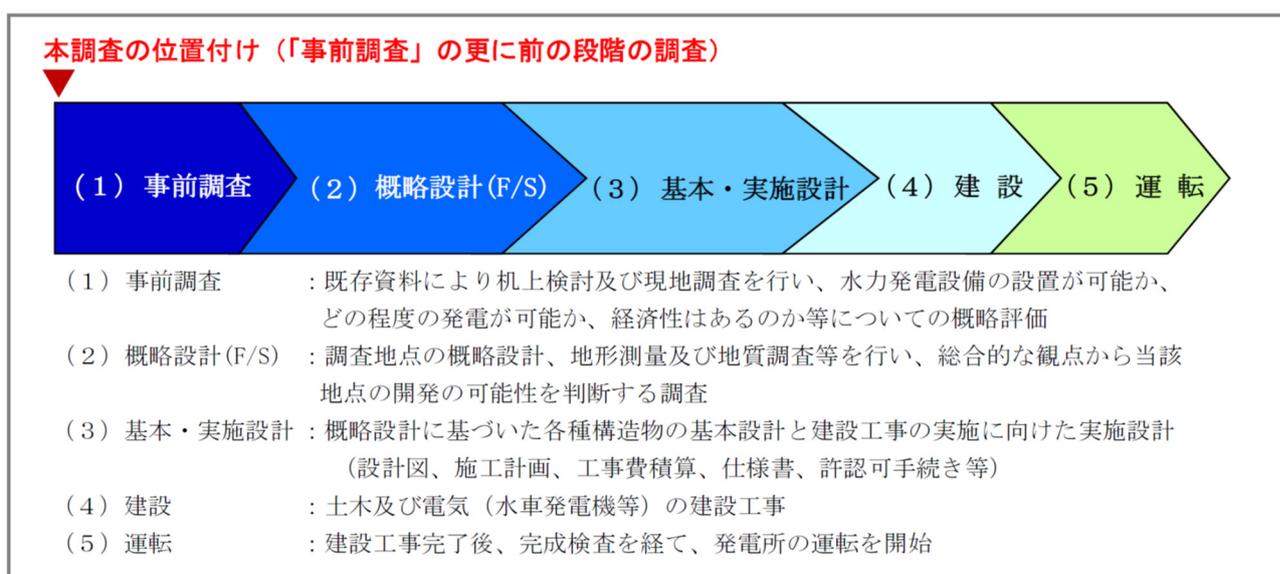


図 3.3-1 水力開発における一般的な事業段階と本調査の位置付け

### 3.3.2 発電ポテンシャルの算出方法

#### (1) 調査対象ダムの既設放流管の有無による算出区分の分類

本事業では、平成 30 年度調査において適用された発電ポテンシャルの算出方法に則り、発電ポテンシャル値（最大出力並びに年間可能発電電力量）の算出を行った。

具体的には、個別ダムの既設放流管の現況に応じた発電設備の設置形態（既設放流管利用／水圧管路新設）の観点で、ダム事業者への聞き取り調査で得られたデータ・情報に基づき、既設放流管有りのダムについては、「発電設備として既設放流管を利用すること」を想定した「A-1 方式」に分類した。一方、「既設放流管がない」あるいは「利用できない（詳細不明を含む）」ダムの場合には、「発電設備として水圧管路を新設すること」を想定した「A-2 方式」に分類した。以下に、A-1 方式と A-2 方式に分類されるダムの具体的な事例を示す。

A-1 方式（既設放流管利用）の具体例として、水資源機構寺内ダムの事例を図 3.3-2 に示す。当該ダムでは発電に利用可能なダム直下への放流が「既設放流管」を通して行われており、この既設放流管を「水圧管路」の一部として利用して発電設備を設置できる可能性<sup>3</sup>がある。これにより、新設する水圧管路の延長を最小限にできると同時に取水設備の新設（ダム堤体穴開け等による）を避けることができるため、建設工事の難易度や工事費用を抑制できると考えられる。

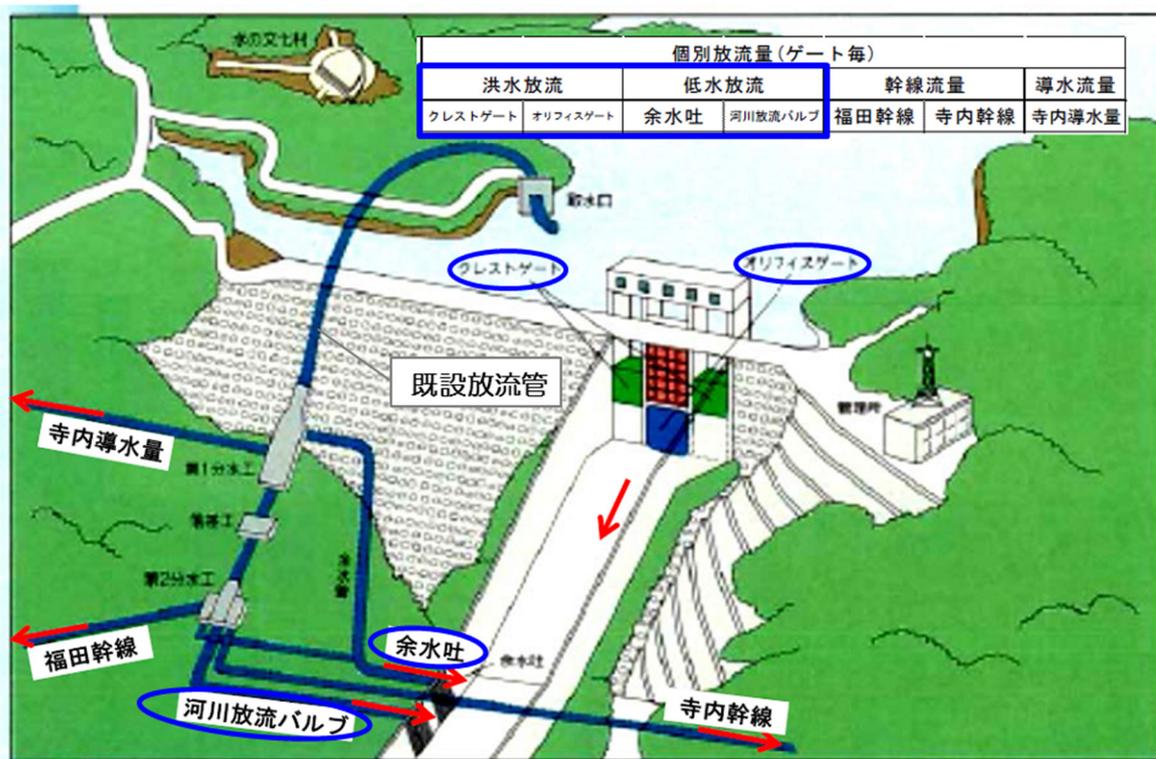


図 3.3-2 算出区分 A-1 方式に分類されるダムのイメージ

<sup>3</sup> 既設放流管を水圧管路として利用する場合、既設放流管の通水能力が課題となるが、地方公共団体が管理する補助ダムを対象に実施した発電ポテンシャル調査（平成 27 年度及び 28 年度調査）では、A-1 方式に分類された 220 ダムのうち 1 箇所を除き、「既設放流管通水能力>発電最大使用水量」の関係にあることを概略評価で確認している。

一方、A-2方式（水圧管路新設）の具体例として、国土交通省近畿地方整備局猿谷ダム（電源開発西吉野第一発電所あり）の事例を図3.3-3に示す。当該ダムでは、既設の堤内放流管（コンジットゲート）の出口はダム堤体背面の下記写真に示す位置にあり、この放流管を発電用に流用することは不可であり、発電所を設置するには「水圧管路新設」が必要となる。このようなダムに発電所を設置する場合、新設する水圧管路の延長が長くなると同時に取水設備の新設（ダム堤体穴開け等による）も必要となり、A-1方式に分類されるダムと比較して、建設工事の難易度が格段に上がると同時に工事費も増大すると考えられる。



図 3.3-3 算出区分 A-2 方式に分類されるダムのイメージ

以上の通り、仮に同程度のポテンシャル量（最大出力、年間可能発電電力量）を有するダムを比較した場合、発電所設置の技術的・経済的な実現可能性は、A-1方式とA-2方式で異なる（=A-1の方がA-2よりも実現可能性は高い）と想定されるので、その差異を考慮してこの算出区分による分類を導入している。

## (2) 発電ポテンシャルの算出

個別地点の発電ポテンシャル（発電出力並びに年間可能発電電力量）は、個別ダム毎にダム事業者から提供頂いた関係図面・実績放流量資料等を利用して、表 3.3-1 に示す方法にて算出した。具体的な検討内容・イメージを以下に示す。

- (a) 10ヶ年平均貯水位の算出
- (b) ダムの既存放流設備の整理と  
10ヶ年平均ダム放流量流況・  
流況表の作成
- (c) 最大使用水量  $Q_{max}$  の設定
- (d) 有効落差の算出
- (e) 水車形式の選定
- (f) 水車・発電機の合成効率の算出
- (g) 発電出力(最大出力)の算出
- (h) 年間可能発電電力量の算出  
(水車の足切り流量を考慮)

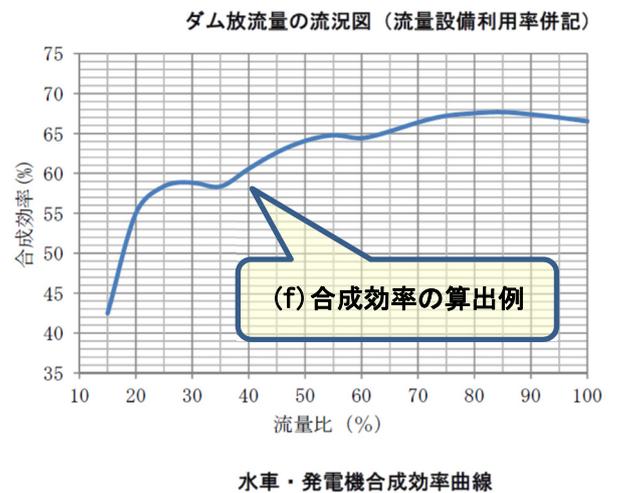
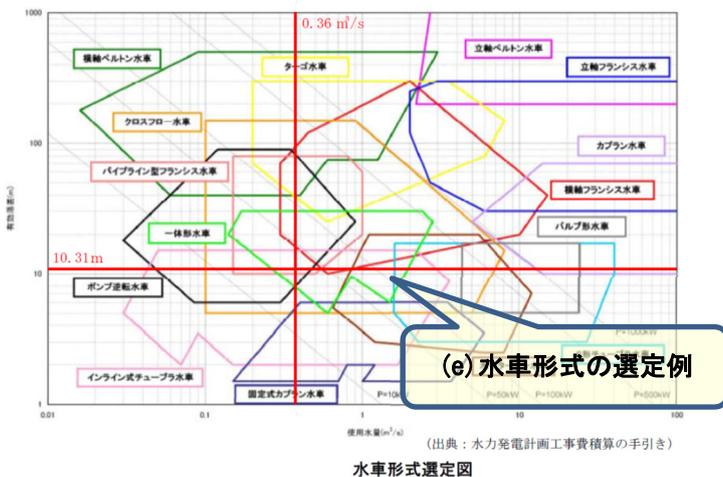
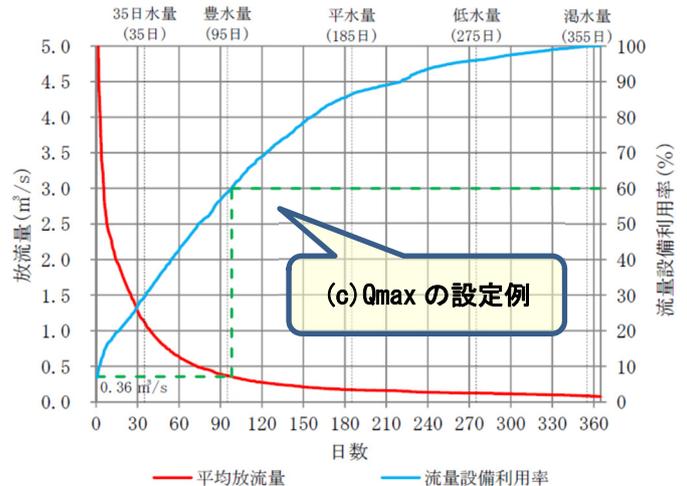
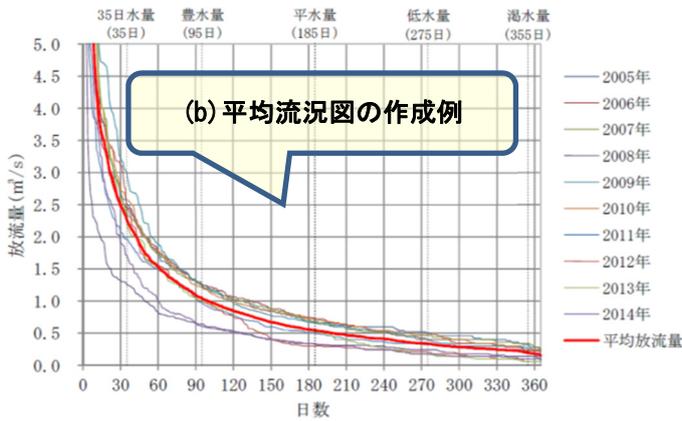
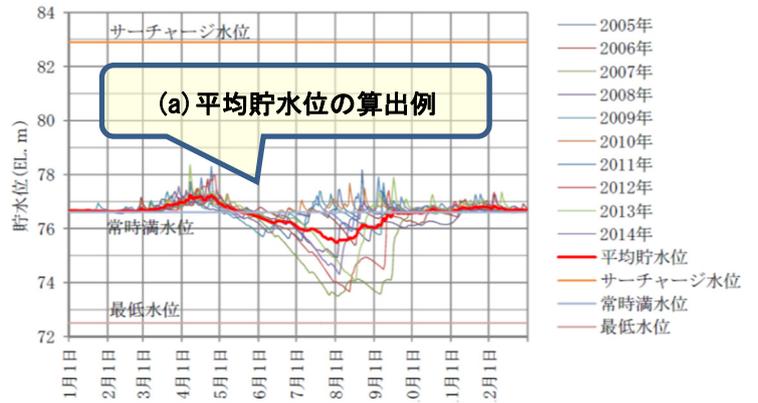


表 3.3-1 発電ポテンシャル算出方法

分類	国交省直轄ダム、水資源機構ダム及び補助ダム		農業用ダム	
	A-1 (既設放流管利用)	A-2 (水圧管路新設)	A-1 (既設放流管利用)	A-2 (水圧管路新設)
①最大使用水量Q [m <sup>3</sup> /s]	発電未利用地点：ダム放流量流況の流量設備利用率60%に相当する流量 <sup>※1</sup> 事業用発電所既設置地点：ダム操作規則等に規定されているダム放流量		ポテンシャル算出対象流況図における「流量設備利用率60%に相当する流量」 あるいは、同流況図における「豊水量 (95日流量)に相当する流量」 <sup>※2</sup>	
②総落差H [m]	ダム水位実績平均値 －放流管出口標高	－	ダム水位実績平均値－放水位 <sup>※3</sup>	
③損失水頭H <sub>loss</sub> [m]	[水圧管路損失]既設放流管延長× (1/200)＋[その他損失]0.5m	－	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリートダム ：総落差H≥10m →H×4.0%<sup>※4</sup> ：総落差H&lt;10m →H×9.0%<sup>※4</sup></li> <li>・フィルタイプダム ：総落差Hによらず →H×10.0%<sup>※4</sup></li> </ul>	
④有効落差H <sub>e</sub> [m]	H <sub>e</sub> = H－H <sub>loss</sub> (= ②－③)	治水目的あり：堤高×65% <sup>※5</sup> 治水目的なし：堤高×80%	H <sub>e</sub> = H－H <sub>loss</sub> (= ②－③)	
⑤水車形式	設定した①最大使用流量および④有効落差から「水力発電計画工事費算定の手引き」 <sup>※6</sup> を基に選定			
⑥水車・発電機合成効率η	選定した⑤水車形式により「水力発電計画工事費算定の手引き」 <sup>※6</sup> を基に算定			
⑦最大出力P [kW]	P = 9.8×Q×H <sub>e</sub> ×η = 9.8×①×④×⑥			
⑧年間可能発電電力量E [kWh]	ダム放流量流況を基に「中小水力発電ガイドブック」 <sup>※7</sup> で示されている流況～効率法(概算法)により算出			

※1 流況曲線における最大流量においても流量設備利用率が60%を超える場合には、最大使用水量＝最大流量とした。

※2 平成29年度調査時(農業用ダムを対象)に実施した整理・分析結果より、収集した流量資料の種類に応じて、下表の通り、最大使用水量Q<sub>max</sub>を設定することとした。

収集資料の種類	流況図作成に利用するデータ	Q <sub>max</sub> の設定法
ダム管理 月報(年報)	実績放流量(通年) (実績取水量を含む年間ダム放流量)	流量設備利用率 60%相当
	実績放流量(灌漑期のみ) (実績取水量を含む灌漑期のみ)のダム放流量)	豊水量相当
取水量記録	実績取水量(通年) (取水量以外のダム放流量を含まない)	豊水量相当
	実績取水量(灌漑期のみ) (取水量以外のダム放流量を含まない)	豊水量相当
水利使用規則	規定取水量	豊水量相当

※3 総落差Hの算出に必要な「放水位」については、A-1方式は「既設放流管出口標高」、A-2方式は「ダム下流減勢池導流壁天端標高-1m」を基本とした。ただし、収集資料から得られる情報に応じて、情報が不足した場合にはA-1方式についても「ダム下流減勢池導流壁天端標高-1m」を採用することとした。

さらに、これら情報(ダム水位実績を含む)が得られず総落差Hの算出が不可の場合には、平成26～28年度調査時(直轄ダム、補助ダム等を対象)においても採用した、「堤高×80%」(治水目的なし)により有効落差を算出した。

※4 これらの比率は、平成27年度並びに28年度調査結果を整理・分析した上で設定した。

※5 未利用落差発電包蔵水力調査(資源エネルギー庁)において発電設備を有する既存ダムの実績より設定された概算式

※6 水力発電計画工事費算定の手引き(平成25年3月 資源エネルギー庁)

※7 中小水力発電ガイドブック(新訂5版)新エネルギー財団 水力地熱本部

### (3) 農業用ダムにおける発電ポテンシャル算出の留意点（算出結果の取り纏め区分）

農業用ダムでは、国土交通省直轄ダムや地方公共団体管理の補助ダムと違い、ダム放流量や利水放流量（農業取水量）の観測記録（実績値）が灌漑期のみとなり、補助ダムのように利水放流量を含めた「年間を通じたダム放流量（実績値）」が把握できないダムもある。

農業用ダムを対象に本調査で実施したダム事業者への訪問・聞き取り調査において、個別ダム毎にダム事業者より入手することができた流量資料の種類は、下記の通りであった。放流・取水量の記録がないダムについては、ダム管理規程や水利使用規則等から「規定取水量」の情報を入手した。

- ・実績放流量（通年、灌漑期のみ）：農業取水量を含む、ダムからの全放流量<sup>4</sup>
- ・実績取水量（通年、灌漑期のみ）：農業取水量のみ
- ・規定取水量（通年、灌漑期のみ）：水利使用規則等で規定されている許可取水量

上記の各種流量資料をベースに、個別地点ごとに流況図を作成し発電ポテンシャルを算出することになるが、利用する流量資料により、算出される発電ポテンシャル値には特に算出精度面で特徴・差異がある。そこで、図 3.3-4 に示す北海道に所在する 2 ダムについての発電ポテンシャル算出結果（平成 29 年度調査）より、以下の特徴・差異があることを考察・確認した。

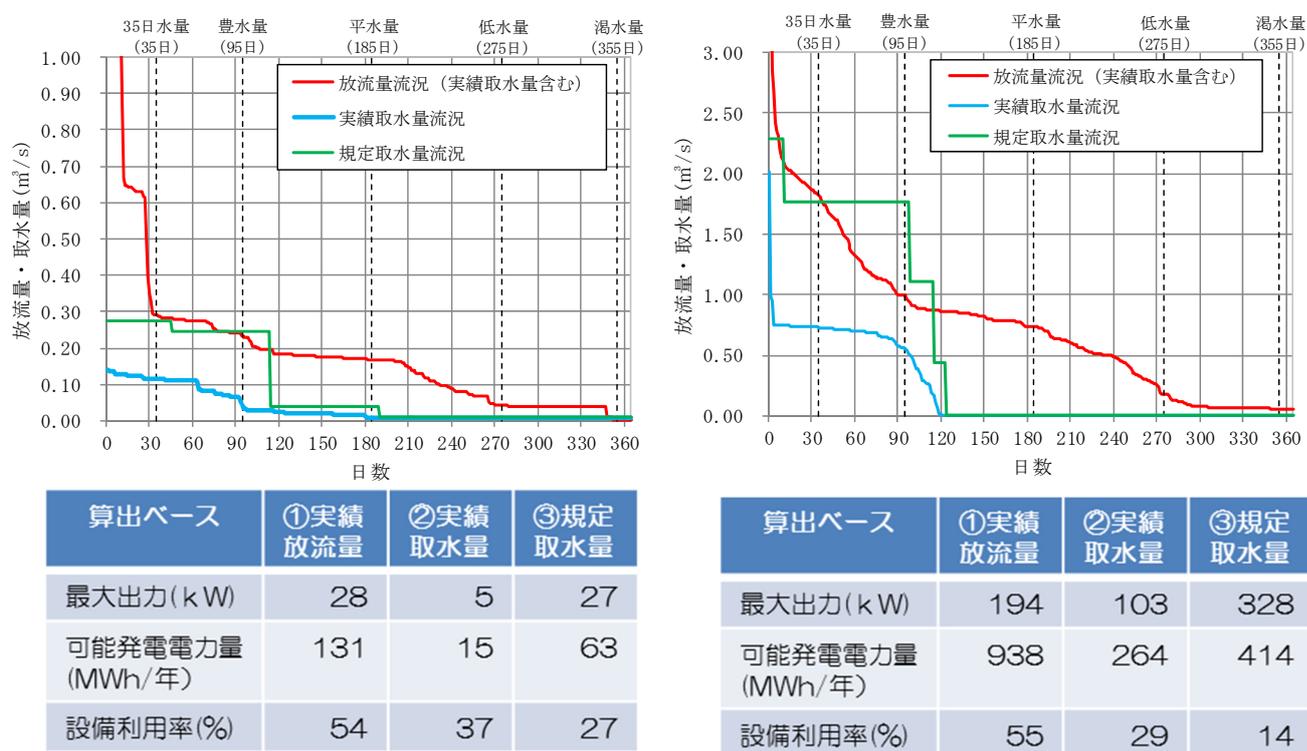


図 3.3-4 流量資料の種類に応じた発電ポテンシャル算出結果の比較

<sup>4</sup> ダムからの全放流量のうち、農業用水量をダムから専用の圧力管路等により直接灌漑流域に導水している場合は、当該水量を発電利用不可とし、発電ポテンシャル算出対象流量から除外している。

## 【考察結果】

ケース①：実績放流量(通年) ベースの算出結果について (図 3.3-4 における赤線)

- 本調査では、当該ダム地点の「遊休落差」と「利用可能な通年のダム放流量(農業取水量を含む)」を最大限利用することを念頭に、潜在している発電ポテンシャル値を算出することを前提条件としている
- 上記の観点で、「実績放流量(通年) ベース」の流量資料にて発電ポテンシャル値を算出することができるダムは、当該ダム地点の通年の河川流況(ダム放流量流況)を反映した本来の発電ポテンシャル値であると言える

ケース②：実績取水量ベースの算出結果について (図 3.3-4 における青線)

- 上記ケース①と比較して、個別ダム地点の現地事情・条件に応じて、今回算出した発電ポテンシャル値には以下の特徴があることに留意する必要がある
  - 本調査での前提条件の通り「取水量以外のダム放流量を通年発電に利用できる」地点であった場合には、今回調査では実績取水量のみで発電ポテンシャルを算出することとなるので、通年の河川流況(ダム放流量流況)を反映できていないため、出力・電力量共、過小評価している傾向となる
  - 一方、現地事情等により「取水量以外のダム放流量を発電に利用できない」地点であった場合には、最大使用水量を実績取水量流況図の「豊水量」に相当するとして算出した今回ポテンシャル値は、過大に評価している可能性がある
  - 「実績放流量(灌漑期のみ)」ベースの算出結果も、個別ダム地点の現地事情・条件(非灌漑期のダム放流量の発電利用の可否)に応じて、上記と同様の傾向となる
  - 以上のことから、ケース②に相当する地点のポテンシャル算出値は、ケース①と比較して、算出精度の面で劣ることに留意する必要がある

ケース③：規定取水量ベースの算出結果について (図 3.3-4 における緑線)

- 取水量・放流量の実績値に基づく算出ではないので、その算出値には実際の河川流況が全く反映されていない。今回示した2ダムの事例では、算出されたポテンシャル値における、ケース①と比較したその大小関係は、ケースバイケースとなっている。以上のことから、その算出精度はケース①と比較して著しく劣っていることに留意する必要がある

以上の考察結果を踏まえて、個別地点ごとのポテンシャル算出結果は、算出結果の精度上の差異を考慮して、「ケース①～③」の区分にて取り纏めることとした。

### 3.3.3 発電ポテンシャルの算出結果

#### (1) 国土交通省直轄ダム及び水資源機構ダムについての調査結果

平成 26 年度調査では、「国土交通省直轄ダム及び水資源機構ダム」を対象に計 13 ダムの発電ポテンシャルを算出した。

表 3.3-2 は、発電ポテンシャル算出結果を所在地別に取り纏めたものである。下表に示す通り、発電未開発の直轄ダムにおいて、合計で 4,294kW、21.297GWh の発電ポテンシャルを有していることが判った。

表 3.3-2 発電ポテンシャル算出結果（国土交通省直轄ダム及び水資源機構ダム）

	所在地	ポテンシャル 算出対象 地点数	①発電 未利用		最大出力 合計 [kW]	算出区分 【A-1】 [kW]	算出区分 【A-2】 [kW]	年間可能発電 電力量 合計 [kWh/年]
			①発電 未利用	②事業用 既設置 (発電未利用 放流あり)				
1	青森県	1	0	1	13	0	13	60,707
2	石川県	1	0	1	979	979	0	4,877,808
3	奈良県	1	0	1	830	0	830	4,027,776
4	島根県	1	1	0	1,391	1,391	0	6,755,016
5	福岡県	1	1	0	662	662	0	3,334,632
6	佐賀県	1	0	1	165	165	0	852,792
7	熊本県	1	0	1	51	51	0	140,112
8	沖縄県	6	6	0	203	155	48	1,248,393
	合計	13	8	5	4,294	3,403	891	21,297,236

算出区分     A-1：既設放流管利用を想定した検討  
              A-2：水圧管路新設を想定した検討

図 3.3-5 は、国土交通省直轄ダム及び水資源機構ダムについて、発電「既開発地点」と本調査で発電ポテンシャルを算出した発電「未開発地点」に区分して、「ダム流域面積と堤高」の関係でグラフ上に整理したものである。

図 3.3-5 に示されている「既開発地点」のプロットの分布状況をみると、「流域面積」及び「堤高」ともその規模の大きいダムについては、発電開発済みであることが判る。図中の青線は、既開発地点の分布状況から線引きした「既開発地点の境界線」を表しており、この境界線の右側及び近傍に分布する未開発地点は、既開発地点と同程度の流域面積及び堤高を有するダムであると考えられる。

本調査で算出した発電未開発地点についても図中の境界線の右側及び近傍に分布している 100kW 以上のポテンシャルを有する地点（図中の○点）が数箇所あり、このような地点（ダム）については中小水力発電開発の可能性を有していると考えられる。

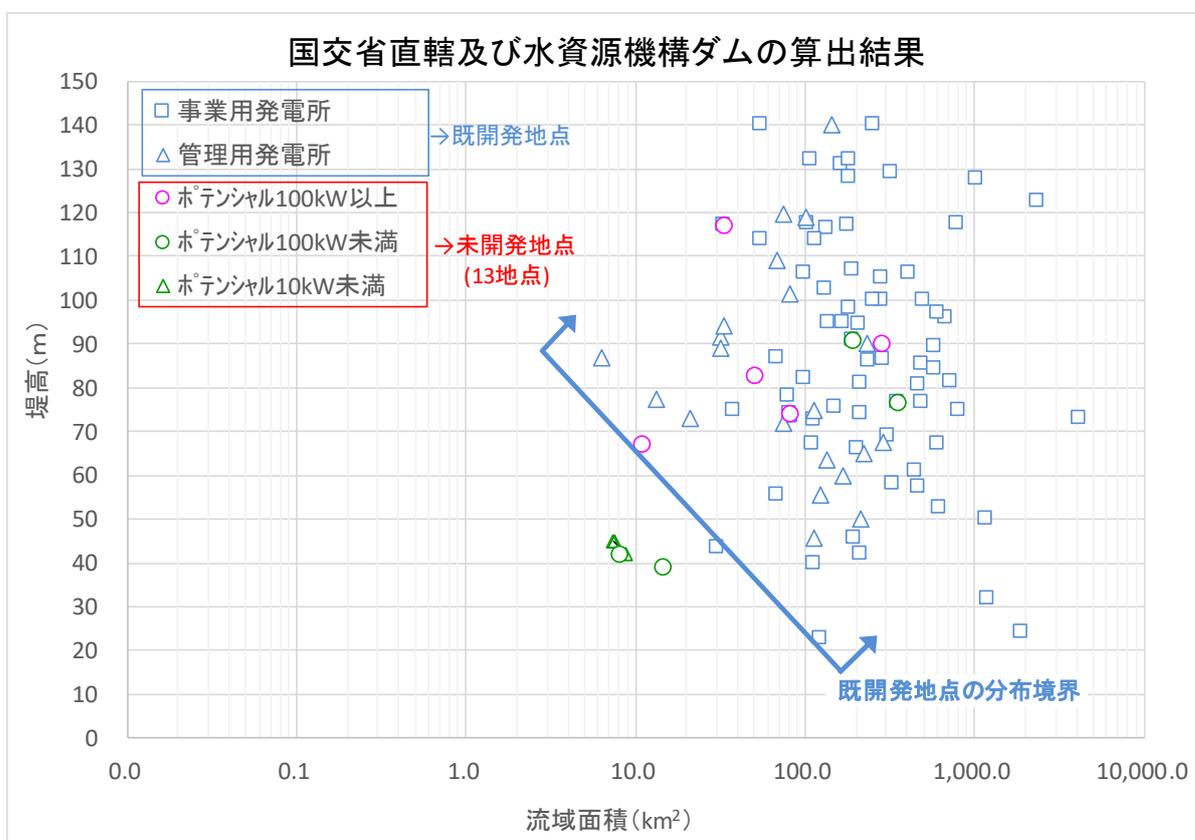


図 3.3-5 発電未開発及び既開発地点についての分析（直轄・水資源機構ダム）

## (2) 地方公共団体が管理する補助ダムについての調査結果

平成 27～28 年度調査では、「地方公共団体が管理する補助ダム」を対象に計 269 ダムの発電ポテンシャルを算出した。

表 3.3-3 は、発電ポテンシャル算出結果を所在地別に取り纏めたものである。下表に示す通り、発電未開発の補助ダムでは、合計 29,257kW、144.377GWh の発電ポテンシャルを有していることが判った。

表 3.3-3 発電ポテンシャル算出結果（地方公共団体が管理する補助ダム）

	所在地	ポテンシャル 算出対象 地点数	①発電 未利用		最大出力 合計 [kW]	算出区分 【A-1】 【A-2】 [kW]		年間可能発電 電力量 合計 [kWh/年]
			②事業用 既設置 (発電未利用 放流あり)					
1	北海道	8	8	0	6,479	6,394	85	31,952,400
2	青森県	4	4	0	309	192	117	1,388,196
3	岩手県	4	3	1	291	227	64	1,837,136
4	宮城県	9	9	0	649	287	362	2,988,202
5	秋田県	4	3	1	1,396	576	820	6,919,392
6	山形県	2	2	0	76	76	0	358,176
7	福島県	5	4	1	3,244	3,244	0	16,393,056
8	茨城県	6	6	0	598	334	264	2,808,494
9	栃木県	4	4	0	455	189	266	2,066,352
10	群馬県	5	5	0	852	295	557	4,111,104
11	埼玉県	2	2	0	464	146	318	2,196,163
12	千葉県	4	4	0	728	728	0	3,326,779
13	神奈川県	1	0	1	48	0	48	360,837
14	新潟県	8	7	1	938	755	183	4,781,712
15	富山県	7	3	4	744	585	159	4,266,696
16	石川県	6	3	3	769	710	59	4,175,640
17	福井県	4	3	1	401	103	298	2,065,207
18	山梨県	2	0	2	64	64	0	508,032
19	長野県	11	11	0	878	878	0	4,277,902
20	岐阜県	3	3	0	103	103	0	501,096
21	静岡県	1	1	0	6	6	0	26,525
22	愛知県	2	2	0	54	54	0	267,334
23	三重県	2	2	0	305	305	0	1,475,408
24	滋賀県	3	3	0	295	0	295	1,442,490
25	大阪府	2	2	0	43	43	0	207,360
26	兵庫県	18	18	0	719	426	293	3,380,901
27	奈良県	5	5	0	242	206	36	1,153,733
28	和歌山県	2	2	0	182	182	0	820,200
29	鳥取県	3	2	1	87	43	44	437,395
30	島根県	5	5	0	837	837	0	4,374,780
31	岡山県	5	5	0	329	50	279	1,557,682
32	広島県	9	8	1	388	388	0	1,863,910
33	山口県	12	12	0	837	308	529	3,937,652
34	徳島県	1	1	0	14	14	0	73,130
35	香川県	15	15	0	410	398	12	1,875,524
36	愛媛県	3	3	0	369	369	0	1,691,016
37	高知県	2	2	0	6	6	0	21,547
38	福岡県	10	8	2	747	747	0	3,581,902
39	佐賀県	12	12	0	425	283	142	1,965,778
40	長崎県	34	34	0	811	811	0	3,830,407
41	熊本県	4	4	0	122	122	0	586,579
42	大分県	8	7	1	1,092	990	103	5,474,565
43	宮崎県	6	4	2	1,348	215	1,133	6,553,440
44	鹿児島県	1	1	0	60	60	0	295,200
45	沖縄県	5	5	0	41	41	0	199,616
	合計	269	247	22	29,257	22,792	6,465	144,376,646

算出区分 A-1：既設放流管利用を想定した検討

A-2：水圧管路新設を想定した検討

図 3.3-6 は、地方公共団体が管理する補助ダムについて、発電「既開発地点」と本調査で発電ポテンシャルを算出した発電「未開発地点」に区分して、「ダム流域面積と堤高」の関係でグラフ上に整理したものである。

図 3.3-6 に示されている「既開発地点」のプロットの分布状況を見ると、「流域面積」及び「堤高」ともその規模の大きいダムについては、発電開発済みであることが判る。図中の青線は、既開発地点の分布状況から線引きした「既開発地点の境界線」を表しており、この境界線の右側及び近傍に分布する未開発地点は、既開発地点と同程度の流域面積及び堤高を有するダムであると考えられる。

本調査で算出した発電未開発地点についても図中の境界線の右側及び近傍に分布している 100kW 以上のポテンシャルを有する地点（図中の○点）が多数箇所あり、このような地点（ダム）については中小水力発電開発の可能性を有していると考えられる。

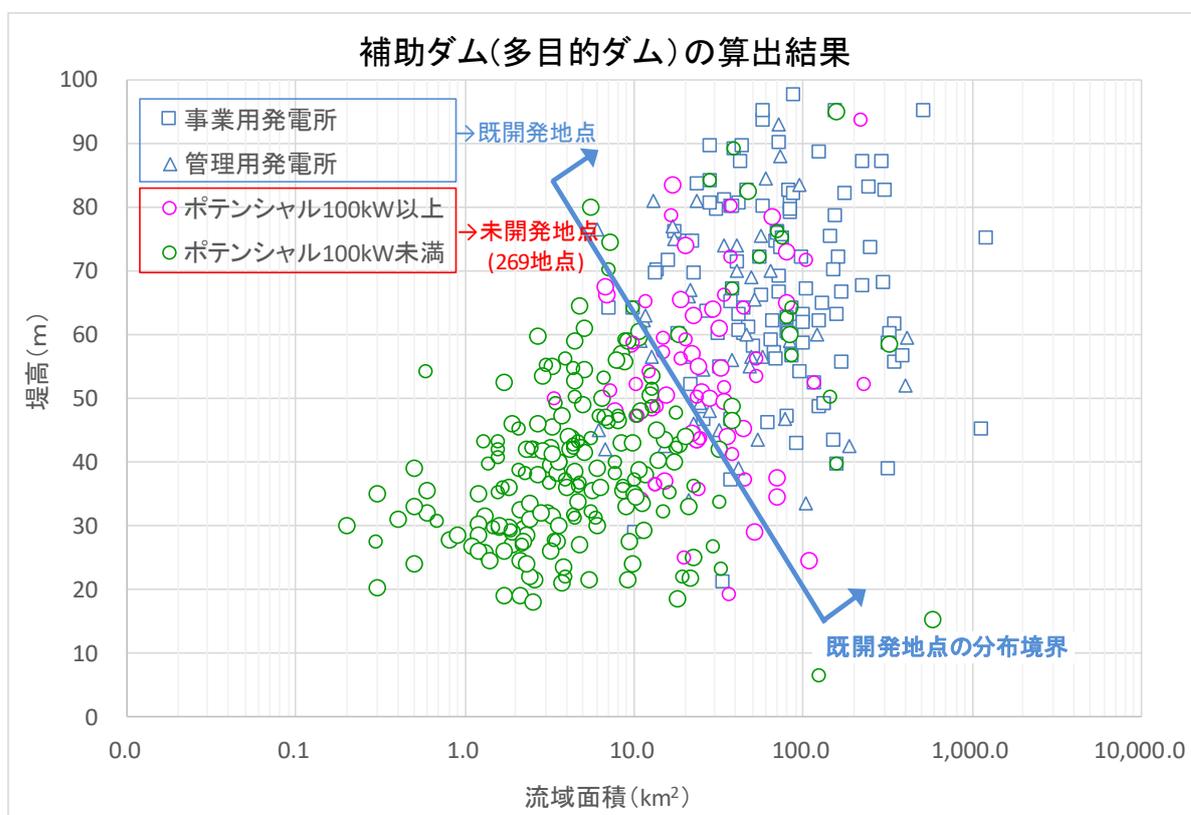


図 3.3-6 発電未開発及び既開発地点についての分析（補助ダム）

### (3) 農林水産省並びに地方公共団体等が管理する農業用ダムについての調査結果

平成 29～令和元年度調査では、「農林水産省並びに地方公共団体等が管理する農業用ダム」を対象に計 293 ダムの発電ポテンシャルを算出した。

農業用ダムでは、前述の通り、発電ポテンシャル算出のベースとなる放流量資料の種類に応じて発電ポテンシャル値の算出精度が異なることから、「ケース①：実績放流量(通年)ベースの算出結果」、「ケース②：実績取水量ベースの算出結果」及び「ケース③：規定取水量ベースの算出結果」の 3 つのケースに区分して、算出結果を取り纏めた。

表 3.3-4～6 は、各ケース毎に発電ポテンシャル算出結果を所在地別に取り纏めたものである。これらの表に示す通り、発電未開発の農業用ダムでは、「ケース①：合計 19,944kW、94.577GWh」、「ケース②：合計 4,799kW、13.320GWh」及び「ケース③：合計 5,742kW、20.438GWh」の発電ポテンシャルを有していることが判った。

表 3.3-4 発電ポテンシャル算出結果（農業用ダム、ケース①：実績放流量（通年）ベース）

	所在地	ポテンシャル 算出対象 地点数	①発電 未利用	②事業用 既設置 (発電未利用 放流あり)	最大出力 合計 [kW]	算出区分		年間可能発電 電力量 合計 [kWh/年]
						【A-1】 [kW]	【A-2】 [kW]	
1	北海道	22	22	0	6,157	5,519	639	28,514,412
2	青森県	7	7	0	1,728	1,397	331	8,264,106
3	岩手県	9	9	0	692	108	584	3,405,223
4	宮城県	7	6	1	1,157	1,157	0	5,206,831
5	秋田県	3	3	0	571	40	531	2,573,957
6	山形県	3	3	0	251	0	251	1,199,801
7	福島県	6	6	0	463	174	289	2,120,755
8	茨城県	1	1	0	122	122	0	594,179
9	栃木県	2	2	0	55	55	0	249,831
10	埼玉県	1	0	1	2,750	0	2,750	13,630,143
11	千葉県	4	4	0	227	227	0	1,105,945
12	新潟県	12	12	0	431	270	161	2,098,289
13	石川県	5	5	0	520	520	0	2,446,945
14	岐阜県	2	2	0	94	0	94	367,824
15	三重県	1	1	0	60	60	0	260,259
16	滋賀県	2	2	0	785	785	0	3,697,536
17	大阪府	2	2	0	152	152	0	741,149
18	兵庫県	8	8	0	269	219	50	1,183,685
19	奈良県	2	2	0	211	211	0	951,384
20	和歌山県	1	1	0	58	58	0	288,840
21	鳥取県	2	2	0	100	100	0	491,496
22	岡山県	9	9	0	216	216	0	1,020,653
23	広島県	5	5	0	346	346	0	1,645,988
24	山口県	2	2	0	63	63	0	304,344
25	愛媛県	8	8	0	123	123	0	568,876
26	福岡県	1	1	0	1	0	1	4,422
27	佐賀県	8	8	0	211	102	109	948,872
28	長崎県	5	5	0	160	160	0	1,195,713
29	大分県	4	3	1	301	301	0	1,391,708
30	宮崎県	4	2	2	619	619	0	2,924,235
31	鹿児島県	7	7	0	1,019	1,019	0	5,037,400
32	沖縄県	1	1	0	31	31	0	142,056
	合計	156	151	5	19,944	14,154	5,789	94,576,857

算出区分      A-1：既設放流管利用を想定した検討  
                   A-2：水圧管路新設を想定した検討

表 3.3-5 発電ポテンシャル算出結果（農業用ダム、ケース②：実績取水量（通年）ベース）

	所在地	ポテンシャル 算出対象 地点数	②事業用 既設置 (発電未利用 放流あり)		最大出力 合計 [kW]	算出区分 【A-1】 [kW]	算出区分 【A-2】 [kW]	年間可能発電 電力量 合計 [kWh/年]
			①発電 未利用					
1	北海道	33	33	0	4,121	1,627	2,495	11,472,229
2	秋田県	2	2	0	187	0	187	102,545
3	山形県	3	3	0	186	0	186	773,064
4	福島県	2	2	0	85	0	85	281,688
5	千葉県	3	3	0	94	44	50	295,795
6	新潟県	2	2	0	7	7	0	20,385
7	石川県	1	1	0	103	0	103	328,111
8	長野県	1	1	0	9	9	0	28,397
9	京都府	1	1	0	6	0	6	18,115
	合計	48	48	0	4,799	1,687	3,112	13,320,329

算出区分 A-1：既設放流管利用を想定した検討

A-2：水圧管路新設を想定した検討

表 3.3-6 発電ポテンシャル算出結果（農業用ダム、ケース③：規定取水量ベース）

	所在地	ポテンシャル 算出対象 地点数	①発電 未利用	②事業用 既設置 (発電未利用 放流あり)	最大出力 合計 [kW]	算出区分		年間可能発電 電力量 合計 [kWh/年]
						【A-1】 [kW]	【A-2】 [kW]	
1	北海道	1	1	0	15	0	15	45,495
2	青森県	1	1	0	17	17	0	34,221
3	岩手県	3	3	0	172	0	172	223,490
4	宮城県	5	5	0	740	0	740	2,791,212
5	秋田県	8	8	0	629	0	629	1,848,369
6	山形県	1	1	0	12	0	12	103,680
7	福島県	2	2	0	363	215	148	1,131,696
8	茨城県	1	1	0	1	0	1	10,205
9	栃木県	1	1	0	55	0	55	215,620
10	埼玉県	3	3	0	58	37	22	208,570
11	千葉県	4	4	0	211	0	211	554,503
12	新潟県	2	2	0	472	0	472	1,762,621
13	石川県	4	4	0	157	3	155	594,797
14	福井県	1	1	0	19	0	19	71,632
15	岐阜県	7	7	0	284	0	284	1,016,412
16	静岡県	5	5	0	666	0	666	2,761,889
17	三重県	6	6	0	292	0	292	1,023,197
18	兵庫県	1	1	0	42	42	0	367,920
19	奈良県	1	1	0	31	31	0	52,741
20	鳥取県	1	1	0	52	52	0	343,200
21	岡山県	2	2	0	67	8	59	194,926
22	広島県	1	1	0	8	8	0	68,328
23	山口県	4	4	0	181	181	0	556,104
24	福岡県	1	1	0	165	165	0	426,784
25	佐賀県	1	1	0	2	2	0	14,262
26	大分県	16	16	0	762	422	340	2,264,333
27	鹿児島県	4	4	0	216	216	0	1,286,688
28	沖縄県	2	2	0	53	53	0	465,156
	合計	89	89	0	5,742	1,451	4,292	20,438,050

算出区分 A-1：既設放流管利用を想定した検討

A-2：水圧管路新設を想定した検討

図 3.3-7～3.3-8 は、農業用ダムについて、発電「既開発地点」と本調査で発電ポテンシャルを算出した発電「未開発地点」に区分して、各ケース毎に「ダム流域面積と堤高」の関係でグラフ上に整理したものである。これらの図に示されている「既開発地点」のプロットの分布状況を見ると、「流域面積」及び「堤高」ともその規模の大きいダムについては、発電開発済みであることが判る。図中の青線は、既開発地点の分布状況から線引きした「既開発地点の境界線」を表しており、この境界線の右側及び近傍に分布する未開発地点は、既開発地点と同程度の流域面積及び堤高を有するダムであると考えられる。

図 3.3-7 は、発電ポテンシャルを算出した 293 ダムのうち、ポテンシャル算出精度が高い「ケース①」に区分された計 156 ダムについて取り纏めた図である。右図に示すように、図中の境界線の右側及び近傍に分布している 100kW 以上のポテンシャル値を有する地点（図中の○点）が多数箇所あり、このような地点については中小水力発電開発の可能性を有していると考えられる。

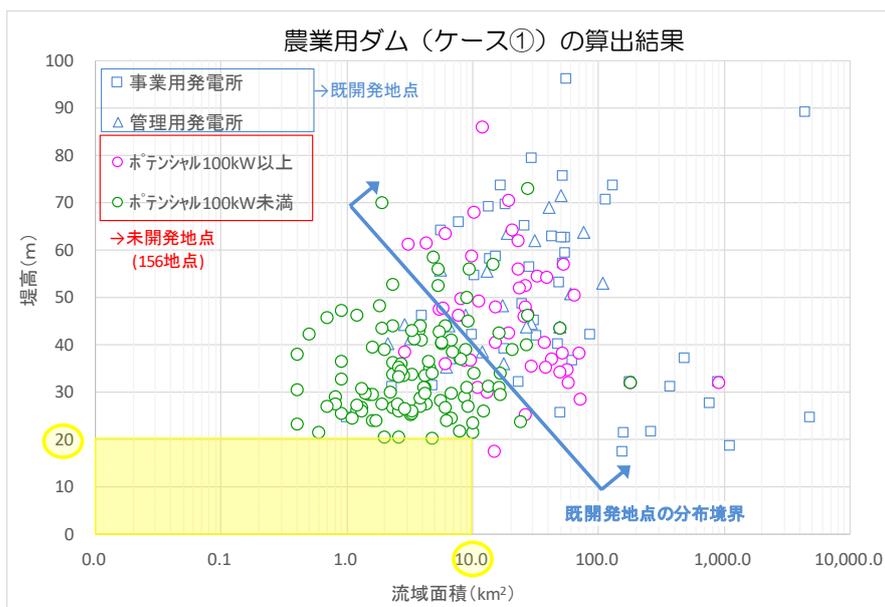


図 3.3-7 発電未開発及び既開発地点についての分析（農業用ダム、ケース①）

一方、ポテンシャル算出精度が高くない「ケース②並びに③」区分に相当するダムでは、計 137 ダムのポテンシャル値を算出した。その取り纏め結果を図 3.3-8 に示す。

下図に示すように、図中の境界線の右側及び近傍に分布している 100kW 以上のポテンシャル値を有する地点がいくつかあるが、これらの地点は、算出に利用した放流量資料が取水量データであり通年ではない、実績データに基づいていない等の課題がありポテンシャル算出精度が低いため、ケース①に区分されたダムと比較して開発優先順位は低いと考える。

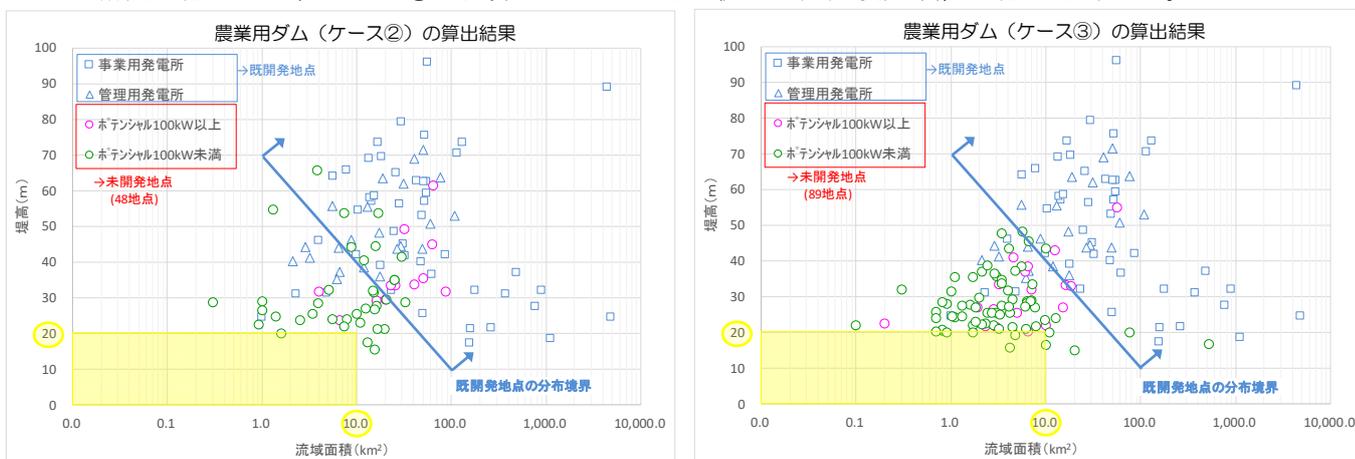


図 3.3-8 発電未開発及び既開発地点についての分析（農業用ダム、ケース②及び③）

### 3.3.4 有望地点の抽出

本調査で発電ポテンシャルを算出した計 575 地点のうち、発電出力 100kW 以上の地点（計 151 地点）を、算出区分 A-1 並びに A-2 に区分して抽出した。その結果をダム種類毎に取り纏めた一覧表を、表 3.3-7～3.3-9 に示す。これら地点のうち、農業用ダムにおけるポテンシャル算出精度が低い「ケース③」に区分される地点（18 箇所）を除いた 133 地点は、「比較的高い発電ポテンシャルを有しており、開発推進を考える上での有望候補地点」と考えることができる。

ただし、これらの 133 地点は比較的高い発電ポテンシャルを有する開発有望な候補地点と考えられるものの、現状発電に利用されていない放流量から求めた各地点が有する潜在量であって、発電所を実際に設置して運用する際の開発阻害要因（自然・社会環境条件、施工条件及び経済性）を考慮した数値ではない。

従って、実際に開発が可能であるかの判断にあたっては、現地調査の実施を通じて、以下の実現可能性に係る事項を確認する必要がある。

- ・ 法令に規制された地域への立地による許認可手続きや地元利害関係者等との調整（ダム事業者とダム管理者間の協議を含む）の要否および解決の難易度等（自然・社会環境条件）
- ・ 水圧管路の敷設ルート・延長、発電所の設置スペースの有無、資機材搬出入の難易度（搬出入路の有無）、系統連系の難易度等（物理的条件）
- ・ 上記の諸条件を反映した工事費の算出とそれに基づく経済性の評価

特にフィルタイプのダムでは、放流設備が「ダム堤体から独立した取水塔設備～既設放流管」から構成されているため、「ダム堤体内に設置された取水設備～既設放流管」を利用する場合（コンクリートダムに多い）と比較して、水圧管路の敷設延長が長くなる傾向にあり、このことは建設工事費の増加要因となるのでコンクリートタイプダムでの発電計画地点と比較して、経済性を低下させる可能性があることに留意する必要がある。

さらに、これら発電未開発地点を開発する場合、電力会社の既設系統に連系して全量を売電するケースが多いと想定されるが、その場合発電所候補地点の近傍の既設配電線に連系することとなる。その際の電力会社との系統連系協議の結果によっては、系統連系に伴い配電線増強費用や電圧変動対策等について費用負担が発生する可能性があり、それが当該発電計画の実現可能性に致命的な影響を及ぼす恐れがあることに十分留意することが必要である。

従ってこれら地点の開発を進める場合には、ダム事業者を含め想定発電事業者により今後実施されるべき F/S 調査等の段階で、系統連系の可否（空き容量の有無等）について電力会社に確認することが必須であることに留意する必要がある。

表 3.3-7(1) 発電ポテンシャル 100kW 以上の有望候補地点の抽出結果（直轄ダム）

【算出区分 A-1 方式、最大出力順に整理、計 5 地点】

No.	ダム諸元							発電ポテンシャル算出結果					
	所在地	ダム名	目的	ダム事業者	流域面積 (km <sup>2</sup> )	型式	堤高 (m)	算出区分	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	有効落差 (m)	最大出力 (kW)	年間可能発電電力量 (kWh/年)	設備利用率 (%)
1	島根県	尾原	FNW	中国地方整備局	289.0	G	90.0	A-1	3.39	51.21	1,391	6,755,016	55.4
2	石川県	手取川	FWIP	北陸地方整備局	247.2	R	153.0	A-1	1.05	115.84	979	4,877,808	56.9
3	福岡県	寺内	FNWA	水資源機構	51.0	R	83.0	A-1	1.31	63.38	662	3,334,632	56.0
4	佐賀県	巖木	FNWIP	九州地方整備局	33.7	G	117.0	A-1	0.38	56.55	165	852,792	59.0
5	沖縄県	羽地	FNWA	沖縄総合事務局	10.9	R	67.0	A-1	0.33	43.89	110	724,224	75.2

表 3.3-7(2) 発電ポテンシャル 100kW 以上の有望候補地点の抽出結果（直轄ダム）

【算出区分 A-2 方式、最大出力順に整理、計 1 地点】

No.	ダム諸元							発電ポテンシャル算出結果					
	所在地	ダム名	目的	ダム事業者	流域面積 (km <sup>2</sup> )	型式	堤高 (m)	算出区分	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	有効落差 (m)	最大出力 (kW)	年間可能発電電力量 (kWh/年)	設備利用率 (%)
1	奈良県	猿谷	NP	近畿地方整備局	82.9	G	74.0	A-2	1.75	59.20	830	4,027,776	55.4

個別ダムの既設放流管の現況に応じた発電設備の設置形態（既設放流管利用／水圧管路新設）の観点で、ダム管理者への聞き取り調査で得られたデータ・情報に基づき、以下の通り分類

A-1 方式：「既設放流管がある」場合は、発電設備として既設放流管を利用することを想定

A-2 方式：「既設放流管がない」あるいは「利用できない」場合は、発電設備として水圧管路を新設することを想定

表 3.3-8(1) 発電ポテンシャル 100kW 以上の有望候補地点の抽出結果（補助ダム）

【算出区分 A-1 方式、最大出力順に整理、計 47 地点】

No.	ダム諸元							発電ポテンシャル算出結果					
	所在地	ダム名	目的	ダム事業者	流域面積 (km <sup>2</sup> )	型式	堤高 (m)	算出区分	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	有効落差 (m)	最大出力 (kW)	年間可能発電電力量 (kWh/年)	設備利用率 (%)
1	北海道	当別	FNAW	北海道	231.1	CGS	52.0	A-1	15.60	26.30	3,545	18,167,304	58.5
2	福島県	木戸	FNWI	福島県	224.8	G	93.5	A-1	5.50	57.40	2,610	12,408,168	54.3
3	北海道	徳富	FNAW	北海道	65.3	G	78.4	A-1	5.83	49.73	2,386	11,175,672	53.5
4	大分県	稲葉	FN	大分県	53.8	G	56.0	A-1	4.71	18.75	687	3,117,600	51.8
5	秋田県	砂子沢	FNW	秋田県	17.0	G	78.5	A-1	1.35	45.67	487	2,293,080	53.7
6	千葉県	亀山	FNW	千葉県	69.7	G	34.5	A-1	2.44	19.69	371	1,577,273	48.5
7	島根県	大長見	FNW	島根県	106.2	G	71.5	A-1	1.27	34.72	339	1,618,056	54.4
8	福島県	堀川	FNW	福島県	15.2	R	57.0	A-1	1.15	37.21	335	1,685,232	57.5
9	新潟県	鱒石川	FN	新潟県	46.0	G	37.0	A-1	3.88	12.01	328	1,672,848	58.3
10	三重県	君ヶ野	FNWI	三重県	80.0	G	73.0	A-1	1.07	36.26	297	1,439,238	55.3
11	愛媛県	山財	FNAW	愛媛県	29.4	G	64.0	A-1	1.27	28.34	275	1,262,184	52.4
12	千葉県	高滝	FNW	千葉県	107.1	G	24.5	A-1	3.08	12.39	264	1,316,070	56.9
13	島根県	山佐	FW	島根県	19.2	G	56.0	A-1	1.37	23.54	245	1,166,040	54.2
14	長崎県	菅瀬（再）	FNW	長崎県	18.9	G	65.5	A-1	1.15	28.05	245	1,136,896	53.0
15	新潟県	柿崎川	FNW	新潟県	12.5	R	54.0	A-1	0.93	33.73	243	1,175,976	55.3
16	北海道	美唄	FNWI	北海道	24.6	G	35.5	A-1	1.96	15.88	237	1,063,632	51.3
17	石川県	北河内	FNW	石川県	10.6	G	47.0	A-1	0.94	31.25	227	1,064,712	53.5
18	福島県	小玉	FNWIP	福島県	67.8	G	102.0	A-1	0.48	58.77	216	1,892,160	100
19	石川県	新内川	NP	金沢市	37.3	G	18.9	A-1	5.29	5.43	208	1,085,184	59.6
20	島根県	笹倉	N	島根県	13.5	G	36.2	A-1	1.18	23.27	208	1,376,592	75.6
21	長野県	横川	FN	長野県	38.8	G	41.0	A-1	2.81	10.59	205	1,045,272	58.3
22	宮城県	小田	FA	宮城県	23.4	R	43.5	A-1	1.05	23.88	193	864,553	51.1
23	広島県	御調	FN	広島県	54.0	G	53.1	A-1	1.32	18.65	186	826,584	50.8
24	青森県	久吉	FNW	青森県	21.8	G	57.0	A-1	1.10	21.88	185	792,484	48.9
25	長野県	片桐	FNW	長野県	15.1	G	59.2	A-1	1.54	15.93	185	877,704	54.2
26	長野県	箕輪	FNW	長野県	38.2	G	72.0	A-1	0.49	47.64	179	880,992	56.1
27	長崎県	神浦	FNW	長崎県	25.0	G	51.0	A-1	1.04	22.03	172	835,206	55.4
28	栃木県	三河沢	FNW	栃木県	13.9	G	48.5	A-1	1.21	18.67	170	818,880	55.1
29	兵庫県	青野	FNW	兵庫県	51.8	G	29.0	A-1	1.14	19.35	166	787,560	54.2
30	香川県	内場	FNW	香川県	28.0	G	50.0	A-1	0.58	36.90	164	759,106	52.8
31	奈良県	初瀬	FNW	奈良県	24.2	G	55.0	A-1	0.82	25.66	158	769,896	55.6
32	茨城県	藤井川	FNAW	茨城県	70.0	G	37.5	A-1	1.99	11.20	153	762,457	56.9
33	岩手県	入畑	FNWIP	岩手県	38.0	G	80.0	A-1	0.40	53.40	150	1,130,000	85.8
34	埼玉県	合角	FNW	埼玉県	32.1	G	60.9	A-1	0.53	36.06	146	645,209	50.4
35	富山県	白岩川	FNW	富山県	24.0	GF	50.0	A-1	3.12	6.88	144	730,128	57.7
36	福岡県	力丸	FWI	福岡県	34.1	G	49.5	A-1	0.63	29.59	142	685,969	55.1
37	富山県	舟川	FNS	富山県	3.4	G	49.8	A-1	0.56	31.60	135	651,336	55.1
38	和歌山県	切目川	FNW	和歌山県	21.9	G	44.5	A-1	0.92	18.68	128	567,624	50.6
39	山口県	黒杭川上流	FN	山口県	7.7	G	48.0	A-1	0.52	33.01	128	620,326	55.3
40	石川県	八ヶ川	FNWI	石川県	10.4	G	52.0	A-1	0.65	24.59	119	566,856	54.5
41	福岡県	油木	FNWI	福岡県	32.6	G	54.6	A-1	0.41	36.92	115	554,378	55.0
42	福岡県	鳴淵	FNW	福岡県	6.8	G	67.4	A-1	0.34	44.40	114	564,146	56.5
43	茨城県	花貴	FNWI	茨城県	44.0	G	45.3	A-1	0.50	29.91	113	543,411	54.9
44	福岡県	陣屋	FNWI	福岡県	12.6	G	48.5	A-1	0.57	26.45	112	527,995	53.8
45	宮崎県	長谷	FN	宮崎県	11.8	G	65.0	A-1	0.66	22.16	108	519,955	54.8
46	群馬県	坂本	N	群馬県	13.7	G	36.3	A-1	0.70	20.29	108	506,904	53.8
47	大分県	床木	FN	大分県	10.0	G	58.5	A-1	0.47	29.58	105	499,968	54.3

表 3.3-8(2) 発電ポテンシャル 100kW 以上の有望候補地点の抽出結果（補助ダム）

【算出区分 A-2 方式、最大出力順に整理、計 20 地点】

No.	ダム諸元							発電ポテンシャル算出結果					
	所在地	ダム名	目的	ダム事業者	流域面積 (km <sup>2</sup> )	型式	堤高 (m)	算出区分	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	有効落差 (m)	最大出力 (kW)	年間可能発電電力量 (kWh/年)	設備利用率 (%)
1	宮崎県	広渡	FN	宮崎県	34.4	G	66.0	A-2	3.30	42.90	1,133	5,332,282	53.7
2	秋田県	旭川	F	秋田県	34.4	G	51.5	A-2	6.55	17.48	820	4,186,752	58.3
3	群馬県	霧積	FN	群馬県	20.4	G	59.0	A-2	1.83	38.35	557	2,668,296	54.7
4	宮城県	七北田	FNW	宮城県	20.0	R	74.0	A-2	0.90	48.10	339	1,545,631	52.0
5	埼玉県	有間	FNW	埼玉県	16.9	R	83.5	A-2	0.75	54.28	318	1,550,954	55.7
6	福井県	二ツ屋分水堰	FNAWI	福井県	20.3	G	24.7	A-2	2.06	16.06	252	1,173,264	53.2
7	栃木県	西荒川	FN	栃木県	24.8	G	43.5	A-2	0.97	28.28	212	953,664	51.4
8	山口県	川上	FWI	山口県	22.2	G	63.0	A-2	0.62	38.65	184	871,408	54.1
9	茨城県	小山	FNWI	茨城県	79.7	G	65.0	A-2	1.48	15.59	174	744,633	48.9
10	岡山県	鳴滝	FNW	岡山県	11.0	G	34.0	A-2	1.16	19.65	171	830,808	55.5
11	滋賀県	石田川	FN	滋賀県	23.4	R	43.5	A-2	3.38	7.33	167	832,866	56.9
12	富山県	上市川	FNP	富山県	44.7	G	64.0	A-2	0.50	41.60	159	777,192	55.7
13	新潟県	久知川	FNW	新潟県	7.4	G	51.0	A-2	0.60	33.15	152	717,768	53.9
14	佐賀県	伊岐佐	FNW	佐賀県	9.6	G	58.5	A-2	0.64	29.66	142	669,323	53.8
15	山口県	中山川	FNW	山口県	15.0	G	37.0	A-2	0.73	25.52	139	640,788	52.6
16	兵庫県	石井	FR	兵庫県	6.9	G	66.2	A-2	1.04	16.61	129	617,448	54.6
17	兵庫県	安富	FN	兵庫県	15.5	G	50.5	A-2	0.69	23.08	118	567,720	54.9
18	岡山県	八塔寺川	FNW	岡山県	35.2	G	44.0	A-2	0.71	20.58	108	503,088	53.2
19	大分県	芹川	FAP	大分県	118.0	G	52.2	A-2	0.40	33.93	103	902,280	100
20	山口県	荒谷	FNW	山口県	8.1	G	56.0	A-2	0.40	33.50	101	467,238	52.8

個別ダムの既設放流管の現況に応じた発電設備の設置形態（既設放流管利用／水圧管路新設）の観点で、ダム管理者への聞き取り調査で得られたデータ・情報に基づき、以下の通り分類

A-1 方式：「既設放流管がある」場合は、発電設備として既設放流管を利用することを想定

A-2 方式：「既設放流管がない」あるいは「利用できない」場合は、発電設備として水圧管路を新設することを想定

表 3.3-9(1) 発電ポテンシャル 100kW 以上の有望候補地点の抽出結果（農業用ダム）

【算出区分 A-1 方式、最大出力順に整理、計 43 地点】

No.	所在地	ダム諸元						発電ポテンシャル算出結果					
		ダム名	目的	ダム事業者	流域面積 (km <sup>2</sup> )	型式	堤高 (m)	算出区分	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	有効落差 (m)	最大出力 (kW)	年間可能発電電力量 (kWh/年)	設備利用率 (%)

【ケース①：実績放流量（通年）ベースの流量資料に基づく算出結果】

1	北海道	苫前	A	北海道開発局農水部	56.4	G	34.8	A-1	7.33	29.71	1,756	8,211,546	53.4
2	北海道	上磯	A	北海道開発局農水部	56.8	R	32.0	A-1	6.85	25.60	1,399	6,476,072	52.8
3	青森県	天間	FA	青森県	63.5	G	50.5	A-1	7.17	16.27	835	4,148,838	56.7
4	滋賀県	野洲川（再）	A	近畿農政局	32.5	G	54.4	A-1	2.61	35.09	723	3,381,264	53.4
5	北海道	駒ヶ岳	A	北海道開発局農水部	48.8	G	43.6	A-1	3.08	28.19	684	3,085,282	51.5
6	宮城県	二ツ石	A	東北農政局	19.1	R	70.5	A-1	1.60	51.55	658	3,027,720	52.5
7	鹿児島県	松元	A	鹿児島県	2.9	G	38.5	A-1	3.30	23.96	612	3,011,029	56.2
8	石川県	医王	FA	石川県	9.7	R	58.8	A-1	1.66	36.35	469	2,208,701	53.7
9	北海道	穂別	A	北海道開発局農水部	70.5	R	38.2	A-1	2.28	20.88	366	1,683,307	52.4
10	宮城県	古賀根橋	AP	宮城県	180.0	G	32.0	A-1	1.28	32.43	319	1,451,587	51.9
11	青森県	二庄内	A	東北農政局	11.9	R	86.0	A-1	0.67	54.08	282	1,350,222	54.7
12	北海道	真駒内	A	北海道開発局農水部	49.5	R	34.3	A-1	4.59	8.63	275	1,361,809	56.6
13	大分県	日出生	A	九州農政局	26.0	R	48.0	A-1	1.07	33.11	271	1,268,433	53.5
14	広島県	目谷	A	中国四国農政局	8.1	R	49.7	A-1	0.71	44.79	243	1,182,864	55.6
15	青森県	早瀬野	A	東北農政局	22.8	R	56.0	A-1	1.20	26.12	238	1,053,591	50.5
16	鹿児島県	大川（再）	AW	奄美市	11.1	R	49.2	A-1	1.12	27.51	234	1,217,184	59.4
17	宮城県	岩堂沢	A	東北農政局	10.1	G	68.0	A-1	0.52	53.98	216	946,366	50.0
18	北海道	しろがね	A	北海道開発局農水部	6.0	R	63.5	A-1	0.69	39.09	208	888,451	48.7
19	北海道	知内	A	北海道開発局農水部	15.1	G	40.5	A-1	1.04	24.21	194	937,885	55.3
20	奈良県	津風呂	AW	近畿農政局	38.8	G	54.3	A-1	0.61	40.32	185	826,872	51.0
21	北海道	神居	A	北海道開発局農水部	37.1	G	40.4	A-1	1.57	15.55	184	749,454	46.6
22	福島県	羽鳥	A	東北農政局	42.7	E	37.1	A-1	1.06	21.81	174	749,184	49.2
23	兵庫県	鴨川	A	近畿農政局	19.2	G	42.4	A-1	0.99	21.85	163	709,248	49.7
24	千葉県	三島	A	小糸川沿岸土地改良区	26.1	E	25.3	A-1	1.11	18.16	151	742,812	56.1
25	大阪府	滝畑	FNAW	大阪府	22.9	G	62.0	A-1	1.07	18.18	145	694,560	54.7
26	北海道	古梅	A	北海道開発局農水部	15.0	R	48.0	A-1	1.07	18.22	145	684,241	53.9
27	宮城県	木之川内	A	九州農政局	20.7	R	64.3	A-1	0.40	45.51	137	586,761	48.9
28	宮城県	切原	A	九州農政局	3.1	G	61.3	A-1	0.35	49.09	130	594,331	52.2
29	宮城県	栗駒	FAP	宮城県	53.0	G	57.0	A-1	0.54	32.18	129	567,672	50.2
30	北海道	大野	AW	北海道開発局農水部	5.4	G	47.5	A-1	0.64	26.02	127	608,680	54.8
31	茨城県	御前山	A	関東農政局	23.3	R	52.0	A-1	0.50	32.23	122	594,179	55.6
32	宮城県	村田	A	宮城県	8.5	E	36.7	A-1	0.55	28.25	118	533,616	51.6
33	北海道	落合	A	北海道開発局農水部	38.0	R	35.3	A-1	1.69	9.94	114	562,088	56.3
34	新潟県	新穂第2	A	新潟県	4.3	G	61.4	A-1	0.36	38.48	105	523,966	57.0

【ケース②：実績取水量ベース（灌漑期のみ）の流量資料に基づく算出結果】

1	北海道	沼田	AW	北海道開発局農水部	62.6	R	44.9	A-1	1.63	35.73	457	1,206,865	30.1
2	北海道	ペーバン	A	北海道開発局農水部	32.0	R	49.2	A-1	1.20	29.01	270	832,981	35.3
3	北海道	温根別	A	北海道開発局農水部	40.1	R	33.7	A-1	1.30	17.68	173	512,108	33.8
4	北海道	新十津川	A	北海道開発局農水部	16.0	E	29.2	A-1	1.04	20.52	159	172,498	12.4
5	北海道	風連	A	北海道開発局農水部	23.0	R	33.6	A-1	0.99	14.89	109	304,092	32.0

【ケース③：規定取水量ベース（水理使用規則）に基づく算出結果】

1	福島県	坂下	A	福島県	12.5	G	43.0	A-1	1.04	27.36	215	588,240	31.2
2	福岡県	小川	A	福岡県	6.1	R	37.0	A-1	0.84	26.23	165	426,784	29.5
3	大分県	並石	A	大分県	6.5	R	38.5	A-1	0.69	27.39	142	211,641	17.0
4	大分県	石山	A	大分県	4.5	R	41.0	A-1	0.58	27.00	117	94,062	9.2

表 3.3-9(2) 発電ポテンシャル 100kW 以上の有望候補地点の抽出結果（農業用ダム）

【算出区分 A-2 方式、最大出力順に整理、計 35 地点】

No.	所在地	ダム諸元						発電ポテンシャル算出結果					
		ダム名	目的	ダム事業者	流域面積 (km <sup>2</sup> )	型式	堤高 (m)	算出区分	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	有効落差 (m)	最大出力 (kW)	年間可能発電電力量 (kWh/年)	設備利用率 (%)

【ケース①：実績放流量（通年）ベースの流量資料に基づく算出結果】

1	埼玉県	玉淀	AP	埼玉県	893.0	G	32.0	A-2	21.19	16.00	2,750	13,630,143	56.6
2	秋田県	水沢	FA	秋田県	27.0	R	46.5	A-2	3.25	20.22	513	2,289,014	50.9
3	北海道	厚真	A	北海道開発局農水部	52.0	R	38.2	A-2	2.06	18.40	290	1,415,213	55.7
4	岩手県	衣川1号	FA	岩手県	29.0	E	35.5	A-2	3.27	11.86	271	1,339,087	56.5
5	青森県	相馬	FA	青森県	25.9	R	52.4	A-2	1.50	23.05	264	1,184,288	51.2
6	新潟県	外山	A	北陸農政局	7.7	GF	46.1	A-2	0.57	36.88	161	764,196	54.2
7	岩手県	雪谷川	FA	岩手県	70.9	G	28.4	A-2	2.70	7.83	141	701,856	56.8
8	岩手県	篤宿	FA	岩手県	14.8	G	17.5	A-2	4.24	4.76	136	679,248	57.0
9	山形県	生居川	A	山形県	5.8	R	47.8	A-2	0.50	32.35	123	588,432	54.6
10	福島県	関柴	A	福島県	13.0	E	30.0	A-2	0.72	22.17	119	570,960	54.8
11	山形県	菴蒲川	A	山形県	11.0	GF	31.1	A-2	0.85	18.70	118	560,064	54.2
12	北海道	余市	A	北海道開発局農水部	9.6	R	36.8	A-2	0.53	28.74	116	504,976	49.5
13	福島県	松ヶ房	A	福島県	25.6	R	46.0	A-2	0.46	32.00	112	534,768	54.5
14	佐賀県	打上	A	九州農政局	6.0	R	36.1	A-2	0.55	26.96	109	435,804	45.6

【ケース②：実績取水量ベース（灌漑期のみ）の流量資料に基づく算出結果】

1	北海道	双葉	A	北海道開発局農水部	63.4	FA	61.4	A-2	4.42	41.41	1,478	4,224,447	32.6
2	北海道	日新	A	北海道開発局農水部	20.3	R	29.5	A-2	1.52	17.54	201	646,937	36.8
3	北海道	尾白利加	A	北海道開発局農水部	87.0	R	31.8	A-2	1.04	25.15	197	505,898	29.3
4	北海道	羽幌二股	A	北海道開発局農水部	25.8	E	33.6	A-2	1.02	23.44	183	524,296	32.7
5	北海道	恵岱別	A	北海道開発局農水部	50.0	R	35.5	A-2	1.25	15.39	143	377,461	30.0
6	秋田県	湯尻第1	A	秋田県	4.0	E	31.8	A-2	0.52	30.33	120	77,135	7.3
7	石川県	神子原	A	飯山川山地改良区	6.6	E	23.7	A-2	0.99	14.12	103	328,111	36.2

【ケース③：規定取水量ベース（水理使用規則）に基づく算出結果】

1	宮城県	牛野	A	宮城県	3.0	R	21.4	A-2	3.60	16.11	443	1,786,176	46.0
2	静岡県	都田川	FAW	静岡県	56.0	R	55.0	A-2	1.48	36.18	415	1,722,327	47.4
3	新潟県	新穂	A	新潟県	16.0	E	33.2	A-2	1.17	26.56	236	1,047,556	50.6
4	新潟県	小倉川	A	新潟県	18.3	E	33.1	A-2	1.18	26.48	236	715,065	34.6
5	宮城県	嘉太神	FA	大和町	15.0	E	27.0	A-2	1.32	21.75	218	779,568	40.8
6	三重県	滑湖	A	三重県	6.4	E	20.3	A-2	1.31	16.24	160	510,660	36.4
7	秋田県	堀田沢溜池	A	秋田県	0.2	E	22.6	A-2	1.20	17.63	159	468,329	33.7
8	秋田県	大滝沢溜池	A	秋田県	2.8	E	26.6	A-2	0.93	21.28	148	434,447	33.4
9	福島県	千野平溜池	A	福島県	5.0	E	25.5	A-2	0.97	20.40	148	543,456	41.9
10	静岡県	丹野	A	勝俣土地改良区	2.3	E	21.7	A-2	1.13	17.36	147	609,186	47.3
11	千葉県	荒木根	A	千葉県	3.2	E	33.5	A-2	0.64	27.18	129	293,549	26.0
12	岐阜県	小沢溜池	A	岐阜県	7.1	E	32.0	A-2	0.60	25.47	113	497,465	50.3
13	秋田県	八塩溜池	A	秋田県	1.9	E	27.0	A-2	0.65	21.60	104	308,743	34.0
14	静岡県	東富士	A	静岡県	10.0	FA	22.0	A-2	0.80	17.10	101	419,257	47.4

個別ダムの既設放流管の現況に応じた発電設備の設置形態（既設放流管利用／水圧管路新設）の観点で、ダム管理者への聞き取り調査で得られたデータ・情報に基づき、以下の通り分類

A-1 方式：「既設放流管がある」場合は、発電設備として既設放流管を利用することを想定

A-2 方式：「既設放流管がない」あるいは「利用できない」場合は、発電設備として水圧管路を新設することを想定

発電ポテンシャルを算出する際に、ベースとした流量資料の種類に応じて、以下の通り分類

ケース①：通年の実績放流量（農業取水量を含む）ベースの流量資料に基づき、発電ポテンシャルを算出した地点。ダムによる流量調整後の通年の河川流況を反映した、本来のポテンシャル値

ケース②：実績取水量ベースの流量資料に基づき、発電ポテンシャルを算出した地点。農業用水の取水量（実績値）のみでダムからの維持放流量等の放流量を含んでおらず、ケース①よりもポテンシャル算出精度が劣る

ケース③：規定取水量（水利使用規則等に記載）に基づき、発電ポテンシャルを算出した地点。ダムからの取水・放流量の実績値が一切反映されておらず、ケース①や②よりもポテンシャル算出精度が著しく劣る

### 3.4 未開発地点における実現可能性の評価

#### 3.4.1 過去の調査で実施した実現可能性調査の概要

上記 3.3 節で記載した「既存ダム有効利用に係る発電ポテンシャルの調査」にて抽出された、比較的高い発電ポテンシャルを有する有望候補地点について、経済的な実現可能性を評価することを目的に、以下に示す内容にて「実現可能性調査」を実施した。

##### 【未開発地点における実現可能性調査の概要】

「発電ポテンシャルの調査」で抽出された未開発有望地点を対象として、現地調査及び収集可能な図面等による情報収集及び概算工事費の検討を行い、当該地点の実現可能性を評価した。

- (1) 本事業で実現可能性調査を実施した地点
  - 平成 27 年度：2 ダム（国交省直轄ダム）
  - 平成 28 年度～29 年度：12 ダム（地方公共団体が管理する補助ダム）
  - 平成 30 年度～令和 2 年度：19 ダム（農水省並びに地方公共団体等が管理する農業用ダム）
- (2) 主な調査内容
  - 調査対象地点の選定
    - ・調査対象地点の概略評価
    - ・調査対象地点の選定
  - 実現可能性の評価
    - ・現地調査の実施
    - ・自然・社会環境条件の整理
    - ・水路ルートを選定
    - ・最適発電計画の策定
    - ・概算工事費の算出
    - ・経済性の評価（内部収益率法による）

前節「3.3.4」において抽出した、100kW 以上の発電ポテンシャルを有する発電未開発候補地点の中から、発電ポテンシャルの算出精度、各地点の最大出力・年間可能発電電力量・設備利用率、並びにこれまでの実現可能性調査結果と各地点のポテンシャル算出値より推定することができる概略経済性を総合的に勘案して、比較的实现可能性が高いと考えられる調査対象候補地点を選定した。

次に、選定された調査対象候補地点について、自然社会環境上の個別地点毎の現地情勢に係わる関係法令・各種制約事項を、国土地理院発行の 1/25,000 地形図やインターネット情報等を利用して収集・整理し、致命的な開発阻害要因の有無を確認した上で、調査対象候補ダムを所管するダム事業者から本調査受け入れ可能との回答を得た地点を、実現可能性調査の調査対象地点として選定した。

各年度調査において、実現可能性調査を実施した地点は以下に示す計 33 地点（ダム）である。

##### 【平成 27 年度調査】

国交省所管の直轄ダム（計 2 ダム）

- ・巖木ダム（所在地：佐賀県、発電出力：196kW）
- ・羽地ダム（所在地：沖縄県、発電出力：197kW）

【平成 28 年度調査】

地方公共団体所管の補助ダム（計 6 ダム）

- ・木戸ダム（所在地：福島県、発電出力：1,641kW）
- ・霧積ダム（所在地：群馬県、発電出力：654kW）
- ・片桐ダム（所在地：長野県、発電出力：191kW）
- ・箕輪ダム（所在地：長野県、発電出力：194kW）
- ・堀川ダム（所在地：福島県、発電出力：164kW）
- ・坂本ダム（所在地：群馬県、発電出力：120kW）

【平成 29 年度調査】

地方公共団体所管の補助ダム（計 6 ダム）

- ・七北田ダム（所在地：宮城県、発電出力：195kW）
- ・君ヶ野ダム（所在地：三重県、発電出力：582kW）
- ・亀山ダム（所在地：千葉県、発電出力：194kW）
- ・有間ダム（所在地：埼玉県、発電出力：612kW）
- ・小田ダム（所在地：宮城県、発電出力：144kW）
- ・高滝ダム（所在地：千葉県、発電出力：119kW）

【平成 30 年度調査】

農水省あるいは地方公共団体所管の農業用ダム（計 7 ダム）

- ・木之川内ダム（所在地：宮崎県、所管：農水省、発電出力：138kW）
- ・羽鳥ダム（所在地：福島県、所管：農水省、発電出力：110kW）
- ・新穂第二ダム（所在地：新潟県、所管：新潟県、発電出力：150kW）
- ・切原ダム（所在地：宮崎県、所管：農水省、発電出力：130kW）
- ・真駒内ダム（所在地：北海道、所管：開発局、発電出力：199kW）
- ・神居ダム（所在地：北海道、所管：開発局、発電出力：149kW）
- ・しろがねダム（所在地：北海道、所管：開発局、発電出力：376kW）

【令和元年度調査】

農水省あるいは地方公共団体所管の農業用ダム（計 7 ダム）

- ・医王ダム（所在地：石川県、所管：石川県、発電出力：199kW）
- ・野洲川ダム（所在地：滋賀県、所管：農水省、発電出力：713kW）
- ・天間ダム（所在地：青森県、所管：青森県、発電出力：575kW）
- ・二庄内ダム（所在地：青森県、所管：農水省、発電出力：199kW）
- ・日出生ダム（所在地：大分県、所管：農水省、発電出力：199kW）
- ・早瀬野ダム（所在地：青森県、所管：農水省、発電出力：198kW）
- ・津風呂ダム（所在地：奈良県、所管：農水省、発電出力：198kW）

【令和 2 年度調査】

農水省あるいは地方公共団体所管の農業用ダム（計 5 ダム）

- ・二ツ石ダム（所在地：宮城県、所管：農水省、発電出力：441kW）
- ・目谷ダム（所在地：広島県、所管：農水省、発電出力：199kW）

- ・岩堂沢ダム（所在地：宮城県、所管：農水省、発電出力：388kW）
- ・御前山ダム（所在地：茨城県、所管：農水省、発電出力：102kW）
- ・雪谷川ダム（所在地：岩手県、所管：岩手県、発電出力：46kW）

これまでの調査において、上記の計 33 地点のそれぞれについて、以下の検討を実施した上で、その実現可能性を評価した。

- (1) 自然・社会環境条件の整理
- (2) 発電水路ルート of 検討
- (3) 10 ヶ年平均貯水位の算出
- (4) 10 ヶ年平均ダム放流量流況の算出
- (5) 最適開発規模の検討
- (6) 経済性の概略評価（内部収益率、感度分析）
- (7) 実現可能性の評価

これまでの調査で実施した実現可能性調査における「経済性の概略評価」では、以下の条件・内容を考慮した上で、内部収益率（Project-IRR、以下 PIRR）を算出した。

- ・固定価格買い取り制度（FIT 制度）の適用
- ・農業用ダムについては、農林水産省所管の助成制度による交付金（工事費の 50%を補助）の有無を考慮
- ・直轄・補助ダムについては、アロケーション負担の有無を考慮
- ・「発電所運転開始後の年間の運転・維持管理費用」と「概算工事費」をパラメータとして、それらの変化が PIRR に及ぼす影響を把握するための「感度分析」を実施
- ・FIT 制度において水力発電の売電単価を設定する際に、想定発電事業者の収益として「税前 PIRR7%」程度を前提条件としており、これを経済性評価の目安として採用

内部収益率（Project-IRR、以下 PIRR）の算出にあたっての諸条件は表 3.4-1 に示す通りとした。なお、内部収益率の算出結果に大きな影響を及ぼす、発電所の年間の「運転・維持費用」については、「コスト等検証委員会報告書<sup>5</sup>」の「参考資料 1 各電源の諸元一覧」に記載のある「一般水力及び小水力」の条件を参考に算出した。

<sup>5</sup> 「コスト等検証委員会報告書 平成 23 年 12 月 19 日 エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会」  
 ※平成 23 年 7 月 29 日の『『革新的エネルギー・環境戦略』策定に向けた中間的な整理』を踏まえ、新たなエネルギーベストミックスの検討を国民合意を得つつ行うべく、各電源の発電コストなどについて、網羅的に、かつ整合性を持った客観的なデータの提供を行うため、エネルギー・環境会議に、内閣府副大臣（国家戦略担当）を委員長とする「コスト等検証委員会」（以下「委員会」という。）を設置する。

[http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02\\_hokoku.html](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02_hokoku.html)

表 3.4-1 内部収益率算定における諸条件

建設工事費	: 概算工事費（エネ庁発行「工事費積算の手引」きによる）
発電事業期間	: 20年（FIT適用期間、表-1参照）
借入	: なし
売電価格	: FIT価格（表-1参照）
運転・維持費	: 下表による（コスト等検証委員会報告書(平成23年12月)より）

		発電規模		1,000kW以上	1,000kW未満
運転・維持費	修繕費	円/年	建設費×	0.5%	1.0%
	人件費	円/年	固定値	20,000,000	7,000,000
	一般管理費	円/年	(修繕費+人件費+その他経費)×	14.3%	14.0%
	その他経費	円/年	建設費×	0.2%	2.0%

※ダムの維持管理分担金を考慮する場合：ダムの維持管理費(百万円/年)×負担率

減価償却	: 定率法
固定資産税	: 1.4%（標準税率）
法人事業税	: 1.365%（平成28年度の税制改正を反映、電気・ガス供給業、東京都を参考）

表-1 各再生可能エネルギーの調達期間と調達価格

電源	太陽光		風力		地熱		中小水力		
	10kW以上	10kW未満(季節変動)	20kW以上	20kW未満	1.5万kW以上	1.5万kW未満	1,000kW以上200kW未満	200kW以上1,000kW未満	200kW未満
建設費	32.5万円/kW	46.6万円/kW	30万円/kW	125万円/kW	79万円/kW	123万円/kW	85万円/kW	80万円/kW	100万円/kW
運転維持費(1年あたり)	10万円/kW	4.7万円/kW	6.0万円/kW	-	33万円/kW	48万円/kW	9.5万円/kW	69万円/kW	75万円/kW
税率	6%	3.2%(*1)	8%	1.8%	13%(*2)	7%	7%	7%	7%
税込(円)	42.00円	42円(*1)	23.10円	57.75円	27.30円	42.00円	25.20円	30.45円	35.70円
税抜	40円	42円	22円	55円	26円	40円	24円	29円	34円
調達期間	20年	10年	20年	20年	15年	15年	20年		

ただし、H29年度からの改正FIT法により、下記の区分が導入されることを考慮  
 ・1,000kW以上～5,000kW未満  
 →調達価格：27円/kWh(税抜き)  
 ・5,000kW以上～30,000kW未満  
 →調達価格：20円/kWh(税抜き)

出典：再生可能エネルギーの固定価格買取制度について 平成24年7月 経済産業省 資源エネルギー庁

また、本検討で調査対象にした農業用ダムにおいて、地方公共団体あるいは土地改良区等が主体となり小水力発電事業を実施する場合、当該事業主体は助成制度<sup>6</sup>「農山漁村地域整備交付金のうち地域用水環境整備事業」を利用することができる。

この助成制度では、「農業水利施設の包蔵水力を活用した小水力発電のための施設整備（新設・更新・部分改修）」を実施する事業主体に対して、施設整備に要した費用のうち「国費率（補助率）50%」にて交付金を受け取ることができる。この助成制度では、「小水力発電施設であって、土地改良施設等の維持管理費の節減及び二酸化炭素の排出削減を図ることを目的に実施するもの」であれば、施設整備（小水力発電整備）を単独で行うことができる<sup>7</sup>。

また、この助成制度を利用した小水力発電施設整備については、FIT 制度との併用が可能である。ただし、平成 31 年 3 月 27 日付け農林水産省よりの通達<sup>8</sup>により、FIT 制度に基づく売電収入の一部を国庫に納付することが義務づけられることとなった。

以上を踏まえ、本検討における経済性評価では、上記助成制度を利用した場合についても参考として PIRR を算出し、当該発電計画に及ぼす経済的な効果を概略評価した。この概略評価における PIRR 値算出では、「平成 31 年 3 月 27 日付け通達」を踏まえ FIT 制度に基づく売電収入額から「国庫納付額」を差し引いた額を「実質の売電収入額」として適用した。な

<sup>6</sup> 助成制度の詳細は「農山漁村地域整備交付金交付要綱」並びに「農山漁村地域整備交付金実施要領」を参照のこと。[http://www.maff.go.jp/j/study/other/e\\_mura/oomori/n-koufukin.html](http://www.maff.go.jp/j/study/other/e_mura/oomori/n-koufukin.html)

<sup>7</sup> 「農山漁村地域整備交付金実施要領」の「別紙 2（水利施設整備に係る運用）より記載内容の一部を抜粋

<sup>8</sup> 「農業農村整備事業等により整備された小水力等発電施設整備に関する補助事業等と固定価格買取制度との調整について」農林水産省農村振興局長、最終改正 平成 31 年 3 月 27 日付け 30 農振興 3310 号

お、考慮される交付金は概算工事費の 50%とし、PIRR 算出時のキャッシュフロー計算における「初期投資費用に充当」という単純な仮定を設けて算出することとし、交付金を受けた場合の厳密な税制上の取り扱い等については考慮しない。

### 3.4.2 実現可能性調査実施済み地点の概略経済性の再評価

#### (1) 概略経済性の再評価の概要

本調査では、これまでの調査で実現可能性調査を実施した計 33 ダムの「概略経済性評価」について、以下に示す観点に着目し、今後の FIT 制度の変更（FIP 制度への移行）等の状況変化も見据え、河川の有効利用、将来の事業環境等、発電事業者毎の水力開発にあたって重視する事項等を踏まえつつ、複数のケースを想定して概略経済性の再評価を実施した。

- ・各種補助・助成制度の最新情報を反映した再評価
- ・水力発電開発においては河川資源の有効利用の観点が重要であり、その意味でも FIT 制度にとらわれず、発電事業者が開発を行う上での助けとなるような検討結果を提示する
- ・FIT 制度や各種補助金を考慮しない経済性評価を実施し、水力開発候補地点としての純粋な経済性を把握・提示する
- ・FIT 制度の適用を前提に売電単価が高くなる 200kW 未満のケースを最適規模として選定する場合に加えて、kWh 建設単価が最も安価となるケースでは発生電力量が多くなることを考慮し、運転期間を 20 年ではなく水力発電所の一般的な運用期間として 40 年とするケースの経済性を把握・提示する

この再評価により、ダム事業者を含めた想定発電事業者に個別地点の特徴・優位性を把握・アピールできるような経済性指標を示すことで、開発推進に向けた支援・助けとなるような資料を提供する。

#### (2) 検討ケースの設定

上記(1)に記載した観点・目的を踏まえ、概略経済性の再評価にあたり、以下の通り①～④の検討ケースを設定した。

##### 【検討ケース】

発電事業期間 40 年とするケースでは、機器の法定耐用年数 22 年を踏まえ、23 年目に水車・発電機更新の有無を考慮する。

- ・ケース①：発電事業期間を 20 年とし、FIT 制度を適用したケース
- ・ケース②：発電事業期間を 40 年とし、最初の 20 年は FIT 制度を適用したケース
  - 多目的ダム：発電事業者の差異によるアロケーション負担の有無を考慮
  - 農業用ダム：農山漁村地域整備交付金の有無を考慮
- ・ケース③：発電事業期間を 20 年とし、FIT 制度を適用しないケース（非 FIT）
- ・ケース④：発電事業期間を 40 年とし、FIT 制度を適用しないケース（非 FIT）
  - 多目的ダム：想定発電事業者の差異によるアロケーション負担の有無、社会資本整備総合交付金の有無を考慮
  - 農業用ダム：農山漁村地域整備交付金の有無を考慮

なお、ケース③及び④で前提とする「非FIT」条件での検討では、過去の検討においてFIT制度の適用を前提に kWh 建設単価が最安となる規模ではなく、売電単価が高くなる 200kW 未満のケースを最適規模として選定した地点については、最適開発規模を「kWh 建設単価が最安」となる規模に見直した上で本検討を実施した。

経済性評価の検討ケース①～④について、ダム種類、開発目的、想定発電事業者、並びに開発助成制度等の検討条件との関係を取り纏めたものを表 3.4-2 に示す。

表 3.4-2 各検討ケースにおいて想定している各種条件

ダム種類	ダム事業者	ダム管理者	開発目的	想定発電事業者	開発助成制度			アロケーション負担	経済性評価ケース区分	
					FIT	農山漁村地域整備交付金	社会資本整備総合交付金		事業期間 20年	事業期間 40年
多目的ダム (直轄及び補助ダム)	国交省・ 地方公共団体	同左	事業用	ダム事業者	○	-	-	-	ケース①	ケース②
				民間事業者	○	-	-	○		
				ダム事業者	-	-	-	-	ケース③	ケース④
				民間事業者	-	-	-	○		
			管理用*	ダム事業者	-	-	○ (補助ダム対象)	-	ケース③'	ケース④'
農業用ダム	農水省・ 地方公共団体	同左 及び 土地改良 組合等	事業用 (管理用)	ダム事業者・ ダム管理者	○	-	-	-	ケース①	ケース②
					○	○	-	-		
					-	-	-	-	ケース③	ケース④
					-	○	-	-		

※ ケース③' 及び④' については、補助ダムにおけるダム事業者による「管理用」目的での開発とし、以下の検討条件を想定した。

- ・ 国土交通省所管の「社会資本整備総合交付金」の適用を考慮（適用要件、以下を参照）する。

【社会資本整備総合交付金の適用要件】

国交省ホームページ掲載の「社会資本整備総合交付金交付要綱」資料より抜粋  
(附属第Ⅱ編 交付対象事業の要件)

イ-3-(16) 堰堤改良事業

(2) 堰堤改良事業

都道府県が管理するダムにおける、以下の改良等。

③ダム管理用水力発電設備設置事業

管理用発電設備の設置工事

(附属第Ⅲ編 国費の算定方法)

国費率：4/10

- ・ ダム管理用電力以外の「余剰電力量」を電力市場にて売電することとし、売電電力量を年間可能発生電力量の8割と想定する。

### (3) FIT 制度を考慮しない場合（非 FIT）の売電単価の設定検討ケースの設定

発電事業期間において、FIT 売電単価を適用しない期間における売電単価については、以下に示す2つのケースを設定した。

#### 【ケース A】

以下に示す、kWh 価値と容量価値の合計により売電収入を算出する。それぞれの価値の算出根拠は、表 3.4-3 に示す通り。

- ・ kWh 価値による収入：  
kWh 価値と非化石価値を合計した「9.13 円/kWh<sup>\*</sup>」×有効電力量（kWh/年）  
※9.13 円/kWh = 7.93 円/kWh（kWh 価値）+1.20 円/kWh（非化石価値）
- ・ 容量価値による収入：  
容量価値「7082.6 円/kW」×設備容量（発電端）

#### 【ケース B】

売電単価の逆算ケース：発電事業期間 40 年間で PIRR7%程度を確保できる売電単価（kWh 単価）を逆算する。

表 3.4-3 kWh 価値と容量価値の算出根拠

#### 【kWh価値による単価の設定】

- ・ 売電の方法  
日本卸電力取引所（JEPX）における約定実績において、売電単価の高い「スポット市場」で売電すると想定
- ・ バランシングコスト  
見込まない<sup>\*</sup>
- ・ kWh単価  
2019年度のスポット取引（システムプライス）平均価格を採用：**7.93円/kWh**  
※本検討で対象としている発電計画地点は、ダムからの維持流量発電に相当する計画なので、インバランスはほぼゼロと想定した。  
また、「経済産業省 再生可能エネルギー主力電源化制度改革小委員会（第11回）」で提示された、発電事業者へのバランシングコスト1.0円/kWhはFIP移行を促すためのスタートアップ単価であり、これを本検討における非FIT期間のコストとして見込むことはしない。

#### 【非化石価値による単価の設定】

JEPXの2020年度非化石価値取引市場における「非FIT非化石証書（再エネ指定）」の約定価格を採用：**1.20円/kWh**

#### 【容量価値による単価の設定（電力広域的運営推進機関による容量市場メインオークション結果（2020年9月約定結果公表）を参考）

- ・ 電源等の区分  
今回の検討では、大半の計画地点の期待容量が1,000kW未満であるため、変動電源（アグリゲート）に相当すると想定
  - ・ 容量価値による収入の計算  
容量価値＝（設備容量－所内消費電力<sup>\*</sup>）×調整係数×約定単価  
＝設備容量×0.501×14,137円/kW  
＝設備容量×**7082.6円/kW**
- ここで、  
約定単価：14,137円/kW（2024年度向け容量市場メインオークションの約定結果を採用）  
調整係数：50.1%（2024年度向け容量市場メインオークション用調整係数のうち、「変動電源（一般水力（自流式）」）における各エリアの平均値を採用）  
※所内消費電力  
個別地点の所内電力は算定できないため、本検討では「設備容量（発電端）」で計算

#### (4) 概略経済性の再評価結果

上記(2)及び(3)に記載した検討条件にて、実現可能性調査を実施済みの33地点(ダム)について、概略経済性の再評価を実施した。PIRRの算出においては、これまでの調査と同様に、「発電所運転開始後の年間の運転・維持管理費用」と「概算工事費」をパラメータとして、それらの変化がPIRRに及ぼす影響を把握するための「感度分析」を実施している。個別地点の概略評価結果を取り纏めた一覧表を表3.4-4~3.4-5に示す。

今回検討した概略経済性の再評価について、「FIT制度を考慮した場合」と「FIT制度を考慮しない場合(非FIT)」に分けて、検討結果に考察を加えて取り纏めた結果を以下に示す。

##### 【FIT制度を考慮した場合】

FIT制度を考慮した発電事業期間20年と40年とした場合のPIRR値の算出・感度分析において、23年目に水車・発電機の更新費用を見込んだ試算では、事業期間20年と40年でPIRR値において改善効果は認められなかった。その理由は以下の通りと考察する。

- ・ 一般に投資期間後半になるほど、収益のNPVは指数関数的に小さくなりPIRR値への影響も小さくなる傾向にある。さらに、21年目以降の収益(=売電収入-維持運営費用 他)自体もFIT期間と比較して小さくなるので、事業期間を長くしても有利にならない傾向となる
- ・ 水車・発電機の更新費用を見込んだこと自体が、40年目のPIRR値を押し下げる要因となっている
- ・ 一方、水車・発電機の更新を見込まない場合で、かつ21年目以降の収益において設備容量が比較的大きいため容量価値に相当する収入が多くなる地点(多目的ダム：木戸及び霧積等、農業用ダム：野洲川、天間及び二ツ石等)については、事業期間を40年とした場合のPIRR値は、事業期間20年とした時よりも若干ではあるが大きくなる傾向がみられる

将来市場における非化石電源として水力の価値が売電単価にどの程度反映されるかにも影響されるが、21年目以降の売電収入が今回設定した条件によるものと近い状況である場合、FIT制度の適用を受けられる場合には「20年を事業期間とした場合」が発電事業として、機器故障を含めた各種リスク回避・収益性の観点で優位と考える。

現実的な想定のもと、なるべく高いPIRR値を確保できる条件(以下の枠内)において、同値5%程度以上を見込める地点は以下に示す18地点(多目的ダム8地点、農業用ダム10地点)である。これら地点は経済的な観点で比較的高い実現可能性を有していると考ええる。

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>・ FIT制度を利用した20年事業期間</li><li>・ ベースケースより、「概算工事費×0.9」かつ「維持管理費×0.9」を考慮</li><li>・ 多目的ダムではアロケ負担なし、農業用ダムでは交付金を考慮</li></ul> |
|---|

(上記条件の下、比較的高い実現可能性を有していると考えられる地点)

- ・ 多目的ダム：計8地点

木戸、霧積、片桐、七北田、箕輪、君ヶ野、亀山及び巖木ダム

・農業用ダム：計 10 地点

医王、ニツ石、目谷、野洲川、日出生、天間、二庄内、早瀬野、岩堂沢及び  
木之川内ダム

【FIT 制度を考慮しない場合（非 FIT）】

今回検討にける「非 FIT」の条件のもとでは、「木戸ダム（多目的ダム）」が比較的高い PIRR 値を見込める地点として、経済的な観点で比較的高い実現可能性を有していると考えられる。

一方、木戸ダム以外の地点については、PIRR 値 7%程度を確保するための売電単価（kWh 単価）を逆算した試算結果から、大半の地点で「20～30 円/kWh」程度以上の単価にて売電することが必要となることが判った。

今回検討では、現状の市場相場・環境を参考に、kWh 価値、非化石価値並びに容量価値を想定した上で売電収入を試算し、非 FIT 条件での経済性評価を実施した。未開発で残されたこれらのダムにおいて、ある程度の事業性を確保することを前提とした上で開発促進を図るためには、水力発電を含めた再生可能エネルギー電源の将来における、kWh 価値、非化石価値並びに容量価値のさらなる価値向上が期待される。

なお、現在国で検討されている「発電側基本料金制度」（託送料金の一部負担を発電事業者に求めるもの）については、今回検討に反映されていない。この制度の導入により発電事業者の費用負担が増えることになり、FIT 並びに非 FIT に関わらず今回検討で算出した経済性指標が悪化する傾向となることに留意する必要がある。

表 3.4-4 概略経済性の再評価結果

(直轄・補助ダム 計 14 ダム、水車・発電機の更新を見込まない場合)

項目		木戸ダム (福島県)		霧積ダム (群馬県)		片桐ダム (長野県)		七北田ダム (宮城県)		箕輪ダム (長野県)		君ヶ野ダム (三重県)		亀山ダム (千葉県)		
発電計画諸元	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	4.30		1.50		0.70 0.90		0.43 0.60		0.54		1.83		1.37		
	有効落差 (m)	47.1		55.4		36.2 37.5		58.9 60.5		48.8		40.6		18.8		
	最大出力 (kW)	1,641		654		191 258		195 279		194		582		194		
	年間可能発電電力量 (MWh/年)	9,551		3,851		1,438 1,740		1,498 1,804		979		2,277		1,389		
	設備利用率 (%)	66%		67%		86% 77%		88% 74%		58%		45%		82%		
	概算工事費 (百万円)	828		578		289 330		350 412		212		511		345		
	kW建設単価 (百万円/kW)	0.50		0.88		1.51 1.28		1.79 1.47		1.09		0.88		1.78		
	kWh建設単価 (円/kWh)	87		150		201 190		234 228		216		224		248		
FIT	発電事業期間	20 40		20 40		20 40		20 40		20 40		20 40		20 40		
	アロケーション負担なし	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	
	感度分析 (%)	ベースケース	21.6	21.7	9.9	10.1	5.6	4.6	3.2	-	2.6	-	2.0	1.1	2.0	-
	×0.9ケース	24.4	24.5	12.4	12.6	8.2	8.0	5.8	5.2	5.5	4.3	4.5	4.6	4.6	3.7	
非FIT	アロケーション負担あり	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	
	感度分析 (%)	ベースケース	18.7	18.9	9.5	9.7	3.2	-	-	-	-	-	1.5	-	0.2	-
	×0.9ケース	21.0	21.1	12.0	12.2	5.6	4.9	1.7	-	-	-	4.0	4.0	2.9	-	
	発電事業期間	40 40		40 40		40 40		40 40		40 40		40 40		40 40		
FIT	アロケーション負担なし	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	6.0	11.3	-	21.6	-	29.2	-	34.1	-	36.5	-	32.6	-	38.0
	×0.9ケース	7.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	アロケーション負担あり	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
非FIT	感度分析 (%)	ベースケース	4.7	12.6	-	22.0	-	32.5	-	41.2	-	48.4	-	33.5	-	41.6
	×0.9ケース	5.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	交付金考慮(アロケ負担なし)	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	7.2	10.6	-	20.8	-	28.7	-	33.2	-	36.7	-	31.5	-	37.3
×0.9ケース	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
発電計画諸元	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	0.40		0.50		0.60		1.03		0.74		1.64		0.67		
	有効落差 (m)	63.7		42.9		27.5		74.7		25.6		10.6		38.3		
	最大出力 (kW)	196		164		120		612		144		119		197		
	年間可能発電電力量 (MWh/年)	956		957		698		2,376		811		877		358		
	設備利用率 (%)	56%		67%		66%		44%		64%		84%		21%		
	概算工事費 (百万円)	214		230		170		748		270		306		243		
	kW建設単価 (百万円/kW)	1.09		1.40		1.41		1.22		1.87		2.57		1.24		
	kWh建設単価 (円/kWh)	224		240		243		315		332		349		679		
FIT	発電事業期間	20 40		20 40		20 40		20 40		20 40		20 40		20 40		
	アロケーション負担なし	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	
	感度分析 (%)	ベースケース	1.9	-	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	×0.9ケース	4.8	3.2	3.7	0.8	1.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
非FIT	アロケーション負担あり	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	
	感度分析 (%)	ベースケース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	×0.9ケース	-	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	発電事業期間	40 40		40 40		40 40		40 40		40 40		40 40		40 40		
FIT	アロケーション負担なし	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	-	37.7	-	39.7	-	43.4	-	44.2	-	53.1	-	54.5	-	110.7
	×0.9ケース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	アロケーション負担あり	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
非FIT	感度分析 (%)	ベースケース	-	63.6	-	52.2	-	45.7	-	48.5	-	75.9	-	72.1	-	189.5
	×0.9ケース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	交付金考慮(アロケ負担なし)	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	-	-	-	39.7	-	44.2	-	42.3	-	52.7	-	53.8	-	-
×0.9ケース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

- ※ 「発電計画諸元」欄において2列表記となっている地点は、左列：FIT、右列：非FITの場合の発電計画を示す
- ※ 「感度分析」欄における「×0.9ケース」は、ベースケースより「概算工事費×0.9」かつ「維持管理費×0.9」を考慮したケースを示す
- ※ 「逆算単価」欄は、ベースケースにてPIRR値7%を確保できる売電単価を示す
- ※ 「PIRR」欄の「-」は、算出不能を示す

表 3.4-5 概略経済性の再評価結果  
(農業用ダム 計 19 ダム、水車・発電機の更新を見込まない場合)

項目		医王ダム (石川県)		二ツ石ダム (宮城県)		目谷ダム (広島県)		野洲川ダム (滋賀県)		日出生ダム (大分県)		天間ダム (青森県)		
発電計画諸元	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	0.70	1.01	1.09		0.60		2.61		0.78		4.57		
	有効落差 (m)	37.6	37.5	51.4		43.9		34.6		33.8		17.8		
	最大出力 (kW)	199	290	441		199		713		199		575		
	年間可能発電電力量 (MWh/年)	1,599	1,994	2,509		1,137		3,368		1,185		3,385		
	設備利用率 (%)	92%	79%	65%		65%		54%		68%		67%		
	概算工事費 (百万円)	262	314	398		187		557		206		610		
	kW建設単価 (百万円/kW)	1.31	1.08	0.90		0.94		0.78		1.04		1.06		
	kWh建設単価 (円/kWh)	164	158	159		164		165		174		180		
	発電事業期間	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	
	交付金なし	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	
FIT	感度分析 (%)	ベースケース	9.6	9.4	8.1	8.2	8.1	7.5	7.9	8.1	7.3	6.6	6.4	6.6
	×0.9ケース	12.3	12.3	10.6	10.8	10.9	10.8	10.4	10.7	10.1	9.9	8.9	9.2	
非FIT	感度分析 (%)	ベースケース	16.8	16.7	14.3	14.4	14.4	14.1	14.1	14.2	13.0	12.6	11.6	11.7
	×0.9ケース	21.3	21.3	18.5	18.6	19.0	19.0	18.2	18.3	17.6	17.5	15.6	15.8	
FIT	発電事業期間	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
	交付金なし	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	-	24.5	-	23.8	-	28.6	-	23.8	-	29.5	-	25.7
	×0.9ケース	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
非FIT	発電事業期間	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
	交付金なし	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	-	18.0	-	17.3	-	21.8	1.3	17.0	-	22.4	-	18.3
	×0.9ケース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

項目		二庄内ダム (青森県)		早瀬野ダム (青森県)		岩釜沢ダム (宮城県)		木之川内ダム (宮城県)		真駒内ダム (北海道)		新穂第二ダム (新潟県)		
発電計画諸元	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	0.45		0.97		0.78		0.34		1.94		2.53		
	有効落差 (m)	57.5		26.9		63.3		53.1		15.0		14.7		
	最大出力 (kW)	199		198		388		138		199		257		
	年間可能発電電力量 (MWh/年)	1,337		1,035		1,413		721		1,168		1,378		
	設備利用率 (%)	77%		60%		42%		60%		67%		61%		
	概算工事費 (百万円)	264		246		332		170		351		401		
	kW建設単価 (百万円/kW)	1.33		1.24		0.86		1.23		1.77		1.56		
	kWh建設単価 (円/kWh)	197		238		235		236		301		291		
	発電事業期間	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	
	交付金なし	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	
FIT	感度分析 (%)	ベースケース	5.6	4.6	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	
	×0.9ケース	8.3	8.1	4.2	2.4	2.5	1.6	2.3	-	1.0	-	0.4	-	
非FIT	感度分析 (%)	ベースケース	10.3	9.6	3.1	-	-	-	-	-	-	-	-	
	×0.9ケース	14.7	14.5	7.9	6.5	4.9	4.0	4.6	-	2.3	-	1.3	-	
FIT	発電事業期間	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
	交付金なし	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	-	31.7	-	38.8	-	36.2	-	42.1	-	43.5	-	45.7
	×0.9ケース	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
非FIT	発電事業期間	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
	交付金なし	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	-	23.6	-	29.0	-	26.5	-	32.4	-	31.5	-	35.1
	×0.9ケース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

項目		羽鳥ダム (福島県)		切原ダム (宮城県)		神居ダム (北海道)		御前山ダム (茨城県)		津風呂ダム (奈良県)		しろがねダム (北海道)		雪谷川ダム (岩手県)		
発電計画諸元	最大使用水量 (m <sup>3</sup> /s)	0.68		0.34		0.80		0.41		0.66		1.19		2.07		
	有効落差 (m)	21.9		50.2		25.0		33.0		39.7		40.6		23.6		
	最大出力 (kW)	110		130		149		102		198		373		376		
	年間可能発電電力量 (MWh/年)	635		595		956		599		855		1,203		1,073		
	設備利用率 (%)	66%		52%		73%		67%		49%		37%		33%		
	概算工事費 (百万円)	160		160		297		205		296		385		442		
	kW建設単価 (百万円/kW)	1.45		1.23		1.99		2.00		1.50		1.03		1.18		
	kWh建設単価 (円/kWh)	252		268		311		341		346		320		412		
	発電事業期間	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	
	交付金なし	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	PIRR	
FIT	感度分析 (%)	ベースケース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	×0.9ケース	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
非FIT	感度分析 (%)	ベースケース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	×0.9ケース	1.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
FIT	発電事業期間	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
	交付金なし	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	-	45.5	-	48.8	-	48.8	-	58.1	-	48.2	-	60.8	-	119.1
	×0.9ケース	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
非FIT	発電事業期間	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
	交付金なし	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	PIRR	逆算単価	
	感度分析 (%)	ベースケース	-	35.1	-	37.7	-	36.0	-	44.1	-	35.0	-	43.8	-	88.6
	×0.9ケース	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

- ※「発電計画諸元」欄において2列表記となっている地点は、左列：FIT、右列：非FITの場合の発電計画を示す
- ※「感度分析」欄における「×0.9ケース」は、ベースケースより「概算工事費×0.9」かつ「維持管理費×0.9」を考慮したケースを示す
- ※「逆算単価」欄は、ベースケースにてPIRR値7%を確保できる売電単価を示す
- ※「PIRR」欄の「-」は、算出不能を示す

### 3.5 実現可能性調査実施済み地点の現在の開発状況

平成 27 年度～令和元年度までに実現可能性調査を実施した計 28 地点（多目的ダム：14 箇所、農業用ダム：14 箇所）について、ダム事業者殿へのヒアリング調査やインターネット上での公開情報を調査し、現在の開発状況を確認した。

その結果、以下の 4 ダムについて、発電開発事業が推進中（事業着手予定を含む）であることが判った。

- ・木戸ダム（所在地：福島県、補助ダム）
- ・霧積ダム（所在地：群馬県、補助ダム）
- ・片桐ダム（所在地：長野県、補助ダム）
- ・箕輪ダム（所在地：長野県、補助ダム）

## 第4章 ダム流入量予測の検討

(概要版)

### 目次

4.1	検討の概要	1
4.2	基本方針の検討	4
4.2.1	要件の整理	4
4.2.2	基本方針の検討	5
4.3	対象流域の検討	8
4.3.1	対象流域の検討	8
4.3.2	対象期間の検討	11
4.4	予測雨量プロダクトの検討	12
4.4.1	予測雨量プロダクトの整理	12
4.4.2	検証対象降雨の選定	14
4.4.3	予測雨量の精度比較	20
4.4.4	採用する予測雨量プロダクトの決定	27
4.4.5	他流域、全国展開に向けての課題	28
4.5	予測雨量に対する AI 手法（ダウンスケーリング）の検討	33
4.5.1	検討概要	33
4.5.2	学習・検証用データ	36
4.5.3	AI 予測モデルの開発	39
4.5.4	AI モデルの学習とパラメータチューニング	45
4.5.5	AI モデルの精度評価	54
4.5.6	考察・まとめ	112
4.6	流出予測手法（流出解析モデル）の検討	114
4.6.1	候補とする流出解析モデルの検討	114
4.6.2	流出解析モデルの作成	115
4.6.3	パラメータの設定検討	123
4.6.4	モデルの精度検証	166
4.6.5	実用化に向けての評価	168
4.7	流出予測手法（AI 手法）の検討	170
4.7.1	学習・検証用データの検討と収集	170
4.7.2	学習・検証用データセットの作成	174
4.7.3	AI 予測モデル構成の検討	177
4.7.4	AI モデルの開発	178
4.7.5	AI モデルの学習とパラメータチューニング	180
4.7.6	AI モデルの精度評価	182
4.7.7	AI による物理モデル最適化の検討	221
4.8	積雪・融雪モデルの検討	228
4.8.1	積雪・融雪モデルの概要	228

4.8.2	積雪・融雪モデル計算用の入力データの作成.....	231
4.8.3	積雪・融雪モデルのカスタマイズ.....	234
4.8.4	積雪・融雪モデルの検証.....	236
4.8.5	奥只見ダム流域への適用.....	237
4.8.6	積雪・融雪モデル計算結果の定量的評価.....	242
4.9	流入量予測手法の選定.....	243
4.9.1	流入量予測手法の検討結果の整理.....	243
4.9.2	検討した手法の組合せ.....	246
4.9.3	検討した手法の組合せに関する懸案事項.....	248
4.10	事業スキームの検討.....	250
4.10.1	流入量予測システムに要求される機能の検討.....	250
4.10.2	システム形態の検討.....	268
4.10.3	事業スキームの検討.....	282

## 第4章 ダム流入量予測の検討

### 4.1 検討の概要

ダム流入量予測の検討は、図 4.1-1 に示すフローに従い実施した。

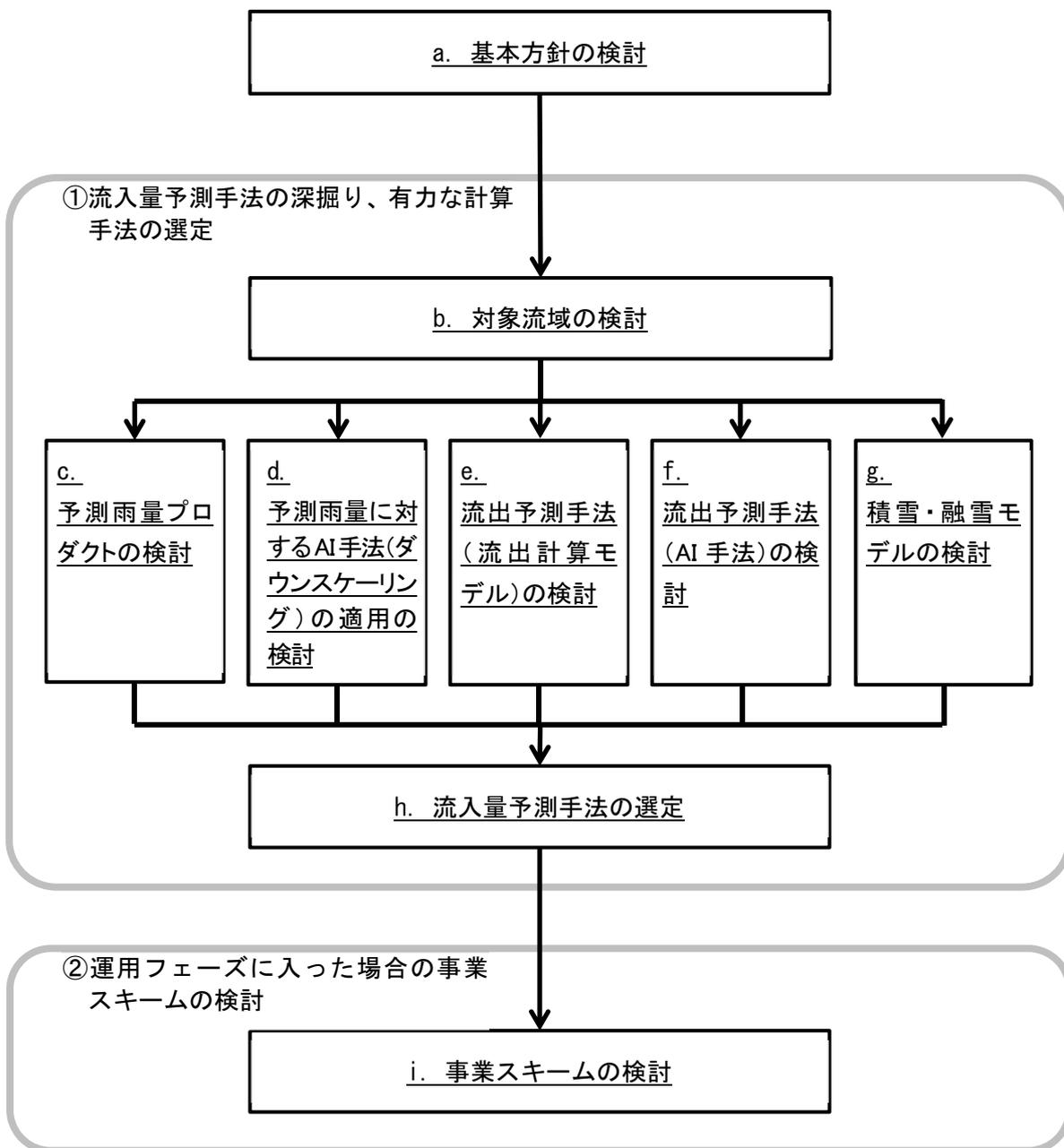


図 4.1-1 「ダム流入量予測の検討」実施フロー

令和元年度調査では、ダム流入量予測の対象期間やシステムの提供形態についてニーズを把握するため、発電事業者へのアンケート、ヒアリングを実施した。

また、平成30年度NEDO報告書「発生電力量最大化を目的としたIoT技術の活用による流入量予測精度向上および発電運用効率化技術の開発研究」の流入量予測手法の評価と改善検討、および、現在公開されている主要な流入量予測手法の比較を行った。

その結果、下記の方向性が示された。

- ダム流入量予測システムが対象とする予測時間の長さ：
  - ➔ 1週間程度先までを目安とする。
- ダム流入量予測システムの提供形態：
  - ➔ 「データセンター方式（クラウド方式）」とする。

今年度は、令和元年度の調査で導いた方向性に基づき流入量予測手法の深掘りを行い、有力な計算手法の選定を行うとともに、運用フェーズに入った場合の事業スキームについても検討した。

また、昨今、あらゆる分野でAI技術の活用が重要課題となっており、本調査においても、流入量予測手法はAI技術を取り込んだ計算手法も含め検討を進めるものとした。

流入量予測手法の深掘りに関しては、流入量予測を次ページの図4.1-2（および表4.1-1）に示す要素に分けて考え、下記のとおり、要素ごとに個別に検討を行った。

- 流出計算モデルへのインプットとなる予測雨量データについて検討する。→ c., d.
- 流出計算モデルの有力な候補を複数個選定し、試計算を実施する。→ e., f.
- 積雪・融雪モデルについて検討する。→ g.
- AIによる手法について検討する。→ d., f.

また、事業スキームの検討方針に関しては、まず、流入量予測システムで求められる機能について検討し、そこから、その機能に必要なとなるシステム形態の検討、さらに、そのシステムによるサービスの形態という順に検討を進めた。→ i.

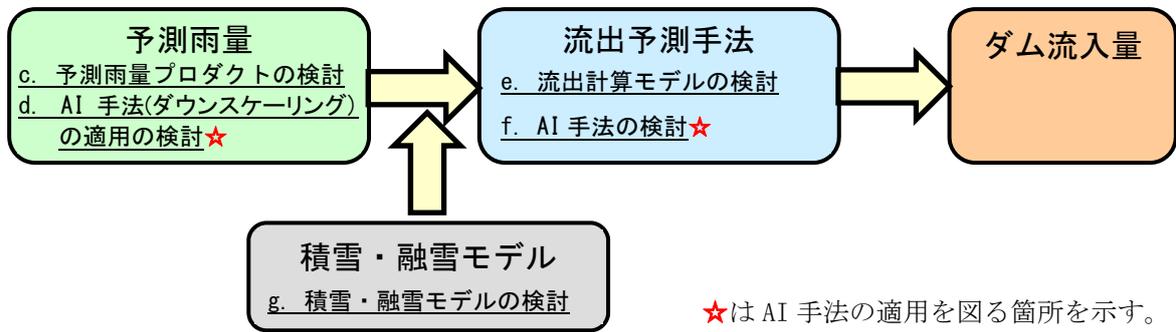


図 4.1-2 ダム流入量予測の構成要素と本調査における検討項目 (c. ~g.)

表 4.1-1 ダム流入量予測の構成要素と本調査における検討項目 (c. ~g.)

構成要素	検討項目	実施事項	調査のアウトプット	
予測雨量	c. 予測雨量プロダクトの検討	実績降雨(5降雨程度)の予測データによる比較検証	⇒ 使用する予測雨量の評価	
	d. 予測雨量に対する AI 手法(ダウンスケーリング)の適用の検討★	学習データ1万時間分程度、検証データ10降雨程度によるニューラルネットワーク解析		
流出予測手法	e. 流出計算モデルの検討	2種類程度のモデルを対象に実績降雨(10~20降雨程度)による比較検証	⇒ 有効な流出予測手法の評価	
	f. AI手法の検討	AIによる流量計算★		⇒ 30~50降雨程度の学習データによるニューラルネットワーク解析
		流出計算モデルのパラメータ自動設定検討★		
積雪・融雪モデル	g. 積雪・融雪モデルの検討	2ヵ年(豊水年・渇水年)を対象に精度を検証	⇒ 積雪・融雪モデルの適用性の評価	

⇒ ダム流入量予測手法の選定

★はAI手法の適用を図る箇所を示す。  
各検討項目とも、対象流域は2流域とする。

## 4.2 基本方針の検討

### 4.2.1 要件の整理

#### (1) 過年度検討内容の確認

令和元年度調査では、ダム流入量予測システムの構築に関する検討として、その基本となる条件を把握するため、下記の調査を実施した。

- ・ 流入量予測ニーズのアンケート調査
- ・ 発電事業者ヒアリング
- ・ 流入量予測手法に対する有用性の評価および改善の検討
- ・ 複数の流入量予測手法の優劣比較

その結果、下記の方向性が示された。

- ダム流入量予測システムが対象とする予測時間の長さ：  
➔ 1週間程度先までを目安とする。
- ダム流入量予測システムの提供形態：  
➔ 「データセンター方式（クラウド方式）」とする。

今年度は、引き続きダム流入量予測システムの検討を進めるにあたり、まず、上記の調査について振り返り、上記に挙げられた今後の方向性、およびそれに付随して検討された内容を再度確認した。

#### (2) 流入量予測手法に係る要件

令和元年度に実施した発電事業者へのヒアリング結果より、(1)に示す1週間先までの流入量予測を目指すことが方向付けられた。さらに「1週間先までは日総流入量、2日先までは毎正時流入量のデータが欲しい」というご意見をいただいている。

代表的な予測雨量のプロダクトとしては、気象庁のGSM<sup>1</sup>、MSM<sup>2</sup>等が挙げられるが、今年度の流入量予測高度化検討委員会において、今年度に取り組む流入量予測モデルの方向性が議論され、次の方針が得られた。

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>① GSMの132時間予測雨量を活用し「日総流入量」をアウトプットとする長期予測モデル</li><li>② MSMの39時間予測雨量を活用し「毎正時流入量」をアウトプットとする短期予測モデル</li></ul> |
|---|

- 将来的には1週間程度先までの予測を目標とするとしても、まずは②の39時間先までの流入量予測の検討（流出モデルの比較、AI予測モデルの検討、予測雨量のダウ

<sup>1</sup> GSM (Global Spectral Model) : 気象庁が降雨予測に用いる全球モデル

<sup>2</sup> MSM (MesoScale Model) : 気象庁が降雨予測に用いるメソ気象モデル

GSMを境界条件として日本域を対象とした予測シミュレーションを行っている。GSMと比較してMSMは空間解像度が細かく地形表現等が精緻化されているため、集中豪雨等の激しい気象現象の量的な予測精度がGSMと比較して高いと言われている。

ンスケーリング)を行う。

- その後、それらを基に、より長い①の 132 時間先までの予測への適用に取り組んでいく。

### (3) 事業スキームに係る要件

事業スキームに関しては、令和元年度調査に実施した発電事業者へのヒアリング結果より、上記(1)に示すとおり、ダム流入量予測システムの提供形態を、各ユーザーのもとに計算サーバーを置く「個別サーバー方式(オンプレミス<sup>3</sup>)」ではなく、データセンターで一括して全ユーザー用の計算を行う「データセンター方式(クラウド方式)」とする方針が示された。

しかしながら、こうしたシステムの要件の検討を行うにあたっては、まずシステム構築の要件定義のあり方について示した文書を参考に、「要件定義に必要となるタスクの検討」および「既存の類似システムの調査」といった観点で整理したうえで、システム形態について検討することが望ましいことから、4.10に後述する検討を行った。

## 4.2.2 基本方針の検討

### (1) 流入量予測手法の検討方針

流入量予測手法の検討方針は、下記を基本とした。

- 1) 流出計算モデルの有力な候補を複数個選定し、試計算を実施する。
- 2) 流出計算モデルへのインプットとなる予測雨量データの与え方について検討する。
- 3) 積雪・融雪モデルについて検討する。
- 4) AIによる手法について検討する。

### 1) 流出計算モデルの試計算について (検討項目 e., f.)

流出計算手法の選定にあたって考慮すべき条件を考えるうえで、まず日本の電力ダムの分類について表 4.2-1 に整理した。

---

<sup>3</sup> IT 関連用語としての「オンプレミス (on-premises)」は、サーバー機器などのハードウェアおよび業務用アプリケーションなどのソフトウェアを、使用者の管理する施設内に設置して運用することを言う。

表 4.2-1 日本の電力ダム分類

	説明	ダムの例	流域・貯水池の傾向	ゲート操作
第1類	その設置に伴い下流の洪水量が著しく増加するダムで、これによって生じる災害を防止するため、当該増加流量を調節することができると思われる容量を確保して洪水に対処する必要があるもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>・奥只見ダム</li> <li>・御母衣ダム</li> <li>・池原ダム</li> <li>・佐久間ダム</li> <li>など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大きい貯水池を持つ。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・初期放流</li> <li>・予備放流</li> <li>・遅らせ操作</li> <li>・洪水処理（遅らせ操作で上昇した水位を低下させる）</li> <li>・事前放流</li> </ul>
第2類	堆砂によりその上流の河床が上昇したダム又はその設置者が貯水池の敷地として権限を取得した土地の広さが十分でないダムで、洪水時にその上流の水位が上昇することによって生じる災害を防止するため、貯水池の水位を予備放流水位として洪水に対処する必要があるもの		<ul style="list-style-type: none"> <li>・大河川の中流部のダムが多い。</li> <li>・貯水池は比較的小さい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・初期放流</li> <li>・予備放流</li> <li>・事前放流</li> </ul>
第3類	貯水池の容量に比して洪水吐の放流能力が大きいダム又は洪水吐ゲートの操作の方法が複雑であるダムで、貯水池の水位を予備放流水位として洪水に対処することが、災害の発生の防止上適切と認められるもの		同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・初期放流</li> <li>・予備放流</li> <li>・事前放流</li> </ul>
第4類	貯水池の水位を常時満水位として洪水に対処しても災害の発生の防止上支障がないダム		<ul style="list-style-type: none"> <li>・山奥に位置し下流に人家の無いダム、ごく小さい流域のダム、等がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・初期放流</li> <li>・事前放流</li> </ul>

電力ダムで流入量予測が必要となるケースとして、大きく次が挙げられる。

- ① 年間、月間、週間、翌日、当日の発電計画を立案する際に、予測される流入量を参考に  
にする。
  - ・流入量が多いと予測される場合は、無効放流が生じないように、多めの発電使用水量を計画する、等
- ② 初期放流や予備放流の実施の是非やタイミングを精度よく予測する。
  - ・第2類、第3類ダムが対象となる。
  - ・放流の開始に先立ち適切な通知通報、パトロール等を行うため、数時間先までの精度の良い予測が必要となる。
  - ・放流量の増加の限度を超える放流を行う場合についても、適切な通知通報を行うため、予測が必要である。
- ③ 河川管理者からの治水のための事前放流などの要請に対し、発電電力量を確保した対応を図る。
  - ・第1類ダムが対象になる場合が多いと考えられる。
  - ・第1類ダムの特徴として遅らせ操作を行うことが挙げられ、総流入量やピーク流入量を精度よく予測することにより、遅らせ操作で貯留される水量を精度よく把握できることが望ましい。
  - ・洪水吐ゲートが高い位置にあり、常時満水位よりも水位を下げる場合には時間を要する場合がある。

今年度の検討においては、令和元年度調査で抽出した代表的な下記 6 つの流出計算モデルから 2 種類程度を選定し、その試算を行う。

- ・平成 30 年度 NEDO モデル (H30NEDO モデル)
- ・国土交通省洪水予測基幹システム
- ・RRI モデル
- ・WEB-DHM
- ・HYDREEMS (電中研モデル)
- ・京大モデル

⇒ 4.6.1 参照

## 2) 予測雨量の検討について (検討項目 c., d.)

令和元年度調査では、気象庁(および NCEP<sup>4)</sup>、JAXA<sup>5)</sup>) が配信する気象予測情報の概要について一覧表の形で整理した。今年度はそれらのデータの合目的性について比較検討した。

⇒ 4.4 参照

また、合わせて、下記 4) で AI による降雨予測データの補正(統計的ダウンスケーリング)についても検討するものとし、それらの具体的な検討方法を計画した。

⇒ 4.5 参照

## 3) 積雪・融雪モデルの検討について (検討項目 g.)

積雪・融雪モデルについては、上記の 1) に示した流出計算モデルで積雪・融雪の計算も組み込まれたものがあるが、流出計算と切り離しての検討も可能と考えられるため、今年度は積雪・融雪の計算部分だけを独自に検討するものとし、その具体的な検討方法について計画した。

⇒ 4.8 参照

## 4) AI 手法について (検討項目 d., f.)

AI 手法として特に、Deep Learning を用いた下記の検討を行うものとし、その具体的な検討方法について計画した。

- ・AI による降雨予測データの統計的ダウンスケーリング  
⇒ 4.5 参照
- ・AI による流出計算(インプット:雨量など、アウトプット:ダム流入量)  
⇒ 4.7 参照
- ・AI による流出モデルの最適パラメータの探索  
⇒ 4.7.7 参照

---

<sup>4</sup> NCEP (National Center for Environmental Prediction) : 国立環境予測センター (米国)

<sup>5</sup> JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) : 宇宙航空研究開発機構 (日本)

### 4.3 対象流域の検討

#### 4.3.1 対象流域の検討

4.2.2 で挙げた 1) 複数の流出計算モデルの検討、2) 予測雨量の検討、3) 積雪・融雪モデルの検討、およびそれらとともに行う 4) AI による手法の検討は、共通のダム流域で行うものとし、その対象流域について検討する。

対象流域は、上流側のダムの影響を考慮しなくてもよい最上流のダムとする。(上流側のダムの操作の影響をどのように計算するかについては、流出計算モデルや積雪・融雪の計算手法が固まった後に検討する必要がある、今年度はまず、上流側のダムの影響を考慮せず、流出計算モデルや積雪・融雪の計算のみに特化した検討を行うものとする。)

対象流域の個数は、実際に実施が可能な作業量を考慮し、2 箇所とする。また、特にそのうちの 1 流域は、令和元年度の調査で取り上げた H30NEDO モデルの黒部ダム流域とし、もう 1 流域についても積雪・融雪を考慮する必要性の高い流域として、図 4.3-1 に挙げた 4 水系 (5 ダム) を候補とした。

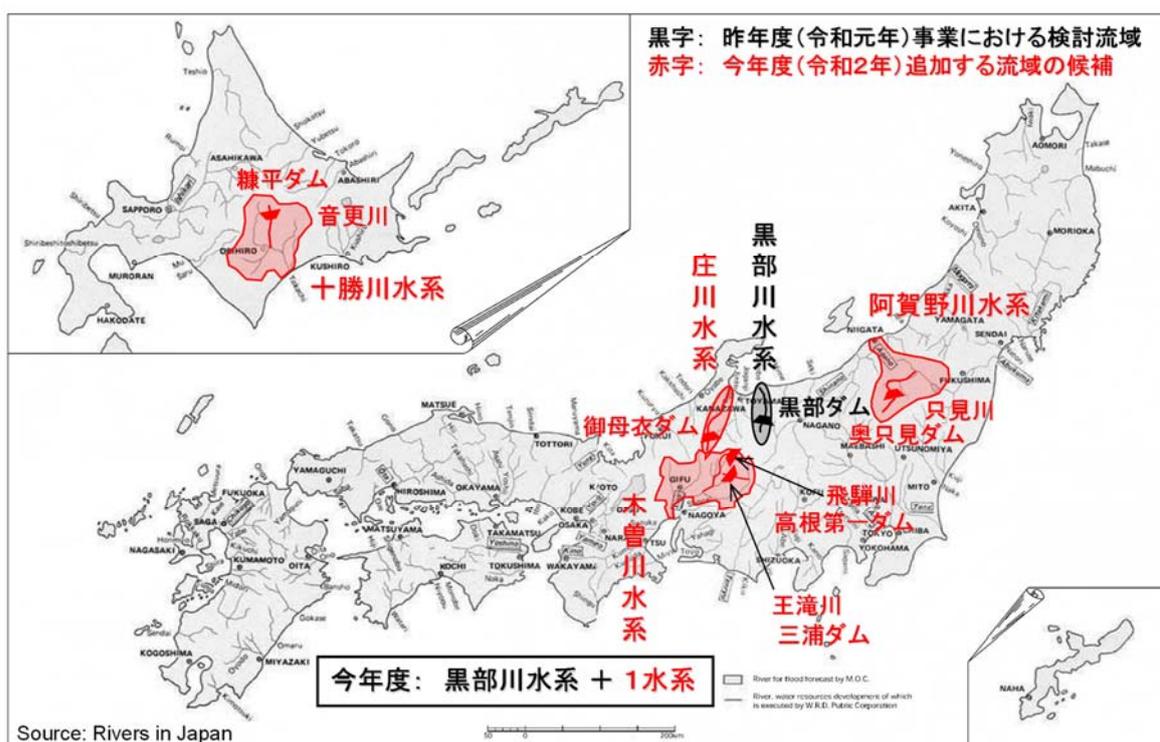


図 4.3-1 今年度事業における検討対象流域の候補

4 水系 (5 ダム) の諸元比較を表 4.3-1 に示す。対象流域の選定は、流入量予測高度化検討委員会 (第 1 回) およびその後の議論を経て、最終的に阿賀野川水系 (支川只見川) の奥只見ダムに決定した。

表 4.3-1 4 水系 (5 ダム) の諸元比較表 (1/2)

対象水系	黒部川水系(参考)	十勝川水系	阿賀野川水系	庄川水系	
水系情報	流域面積	682 km <sup>2</sup>	9,010 km <sup>2</sup>	7,710 km <sup>2</sup>	
	幹川流路延長	85 km	156 km	210 km	
	年平均気温	9 °C(仙人谷)	6.4 °C(帯広)	10 °C(只見)	
	年平均降水量	4,000 mm超(仙人谷)	919.5 mm(帯広)	2,100 mm(只見)	
対象ダム	黒部ダム	糠平ダム	奥只見ダム	御母衣ダム	
貯水池情報	対象支(本)川	黒部川	音更川	只見川	
	ダム形式	アーチ式コンクリート	重力式コンクリート	重力式コンクリート	
	流域面積	188.5 km <sup>2</sup> (直接:184.5 間接:4.0)	387.8 km <sup>2</sup>	595.1 km <sup>2</sup> (直接:425.6 間接:169.5)	442.8 km <sup>2</sup> (直接:395.7 間接:47.1)
	総貯水容量	199,285,000 m <sup>3</sup>	193,900,000 m <sup>3</sup>	601,000,000 m <sup>3</sup>	370,000,000 m <sup>3</sup>
	有効貯水容量	148,843,000 m <sup>3</sup>	160,500,000 m <sup>3</sup>	458,000,000 m <sup>3</sup>	330,000,000 m <sup>3</sup>
発電所情報	最大出力	335,000 kW	44,200 kW	560,000 kW	
	最大使用水量	72.0 m <sup>3</sup> /s	45.0 m <sup>3</sup> /s	387.0 m <sup>3</sup> /s	
	設計洪水量	1,260 m <sup>3</sup> /s	-	1,500 m <sup>3</sup> /s	3,000 m <sup>3</sup> /s
	事業者	関西電力(株)	電源開発(株)	電源開発(株)	電源開発(株)
流域面積の評価	-	黒部ダムの約2.1倍	黒部ダムの約3.2倍	黒部ダムの約2.3倍	
積雪の評価	12~4月で十分見込める。 (積雪深 2~3m)	12~4月で十分見込める。 (積雪深 0.6~1.2m)	12~4月で十分見込める。 (積雪深 1~3m)	近年は減少傾向。 (積雪深 0.5~1.5m)	
流入量の評価	5~7月に融雪の影響。出水数も検証に十分。	5~6月に融雪の影響。出水数はそう多くない。	4~6月に融雪の影響。出水数は検証に十分。	3~5月に融雪の影響。出水数は検証に十分。	
備考			間接流域が大きい		
R02年度の候補	R01年度で選定済	△	◎	○	

表 4.3-1 4 水系 (5 ダム) の諸元比較表 (2/2)

対象水系		黒部川水系(参考)	木曾川水系
水系情報	流域面積	682 km <sup>2</sup>	5,275 km <sup>2</sup>
	幹川流路延長	85 km	229 km
	年平均気温	9 °C(仙人谷)	9.2 °C
	年平均降水量	4,000 mm超(仙人谷)	3,000 mm(御嶽山周辺)
対象ダム		黒部ダム	高根第一ダム
貯水池情報	対象支(本)川	黒部川	飛騨川
	ダム形式	アーチ式コンクリート	アーチ式コンクリート
	流域面積	188.5 km <sup>2</sup> (直接:184.5 間接:4.0)	159 km <sup>2</sup> 73.4 km <sup>2</sup> (直接:69.4 間接:4)
	総貯水容量	199,285,000 m <sup>3</sup>	43,568,000 m <sup>3</sup> 62,216,000 m <sup>3</sup>
	有効貯水容量	148,843,000 m <sup>3</sup>	34,013,000 m <sup>3</sup> 61,600,000 m <sup>3</sup>
発電所情報	最大出力	335,000 kW	340,000 kW 7,700 kW
	最大使用水量	72.0 m <sup>3</sup> /s	300.0 m <sup>3</sup> /s 17.5 m <sup>3</sup> /s
	設計洪水量	1,260 m <sup>3</sup> /s	- 460 m <sup>3</sup> /s
	事業者	関西電力(株)	中部電力(株) 関西電力(株)
流域面積の評価		-	黒部ダムの約0.8倍 黒部ダムの約0.4倍
積雪の評価		12~4月で十分見込める。 (積雪深 2~3m)	12~3月で見込める。 (積雪深 0.4~1.0m)
流入量の評価		5~7月に融雪の影響。出水数も検証に十分。	3~4月に融雪の影響。出水数は検証に十分。
備考			混合揚水式発電所の上池
R02年度の候補		R01年度で選定済	△

### 4.3.2 対象期間の検討

4.3.1 で選定した流域において、1) 複数の流出計算モデルの検討、2) 予測雨量の検討、3) 積雪・融雪モデルの検討、および4) AIによる手法の検討の計算を行う対象期間について検討した。

対象期間は、データの入手が可能であることが重要となるが、その他、下記について考慮した。

#### (1) 流出計算モデルの対象期間 (検討項目 e.)

実績の流入量が得られる期間として、2007年から直近(2020年6月末)までを対象とした。このなかで、数日程度の洪水時データを10~20個程度抽出して計算対象とした。

⇒ 4.6 参照

#### (2) 予測雨量の検討 (検討項目 c.)

予測雨量データが入手可能な近年を対象とし、洪水時データを5降雨程度抽出し、精度を検証した。

⇒ 4.4 参照

#### (3) 積雪・融雪モデルの検討 (検討項目 g.)

積雪・融雪の計算に必要な気象データが入手可能な近年を対象とし、秋季の降雪開始時期から夏季のほぼ融雪が終了する時期を対象とした計算を2ヵ年分程度行うものとする。

#### (4) AI手法の検討 (検討項目 d., f.)

AI手法による流量計算は、1週間以上の洪水時データを30~50降雨程度抽出して計算対象とする。最適パラメータ探索については、上記(1)に準ずる。

また、降雨予測データの統計的ダウンスケーリングの検討については、1万時間程度の学習データ、10降雨程度の検証データを用いる。

## 4.4 予測雨量プロダクトの検討

### 4.4.1 予測雨量プロダクトの整理

表 4.4-1 に、2020 年 9 月時点で利用可能な予測雨量プロダクトの一覧を示す。気象庁提供の降雨予測情報以外には、NCEP、JAXA によるプロダクトが存在する。

- NCEP による降雨予測プロダクトは、インターネット上に公開されており、無料で利用可能という利点がある反面、事前周知なしにファイルの内容が変更される場合があり、システム導入後の安定性という観点では大きな問題がある。
- ECMWF による降雨予測プロダクトは、240 時間（10 日）先までの予測雨量は約 9km メッシュの高解像度で提供されるプロダクトであるが、データ購入のためのシステム導入および運用コストが高額（システム導入経費：約 500 万円 運用経費：約 500 万円/年）になるという問題がある。
- JAXA によるプロダクトは、1 時間更新で 6 時間先までの予測を 10km メッシュで行うというものであり、10 分更新で 6 時間先までの予測を 1km メッシュで行う気象庁提供の降水短時間予報に対する優位な点は無い。

以上のことから、予測雨量プロダクトとしては、気象庁提供のプロダクトを用いることが望ましいと評価した。

表 4.4-1 予測雨量プロダクト一覧

NO.	所管	名称	予測時間	空間 解像度	時間 解像度	更新 頻度	メンバー 数
1	気象庁	降水短時間予報1	6 時間	約1km	1 時間	10 分	1
2		降水短時間予報2	15 時間	約5km	1 時間	1 時間	1
3		MSM1	39 時間	約5km	1 時間	3 時間	1
4		MSM2	51 時間	約5km	1 時間	6 時間	1
5		メソアンサンブル(MEPS)	39 時間	約5km	1 時間	6 時間	21
6		GSM1	84 時間	約20km	1 時間	6 時間	1
7		GSM2	264 時間	約20km	3 時間	24 時間	1
8		週間アンサンブル	264 時間	約50km	3 時間	12 時間	27
9		1ヶ月アンサンブル	816 時間	約50km	3 時間	12 時間	50
10		3ヶ月アンサンブル	120 日	約250km	1 日	30 日	51
11	NCEP <sup>※1</sup>	GFS1	192 時間	約50km	3 時間	6 時間	1
12		GFS2	384 時間	約100km	3 時間	6 時間	1
13	ECMWF <sup>※2</sup>	HRES	240 時間	約9km	6 時間	12 時間	1
14		ENS	360 時間	約20km	6 時間	12 時間	50
15	JAXA <sup>※3</sup>	GSMaP_RNC	6 時間	約10km	1 時間	1 時間 (10~17時のみ)	1

※1 (米国) 国立環境予測センター (National Centers for Environmental Prediction; NCEP)

※2 ヨーロッパ中期予報センター (European Center for Medium-Range Weather Forecasts ;ECMWF)

※3 宇宙航空研究開発機構

#### 4.4.2 検証対象降雨の選定

表 4.4-2 に示す 2017 年以降の黒部ダム上流域および奥只見ダム上流域における総雨量上位 5 事例を対象として、予測雨量の精度検証を行った。検証対象雨量データは、予測期間で積算した各ダム流域平均雨量とした。図 4.4-1、図 4.4-2 に対象降雨の時系列グラフを示す。

表 4.4-2 検討対象降雨一覧

##### (1) 黒部ダム流域

NO.	降雨期間 開始	降雨期間 終了	時間 数	黒部ダム流域平均雨量			降雨要因
				総雨量 (mm)	ピーク (mm/hr)	ピーク時刻	
1	平成29(2017)年 06/29 16時	07/05 17時	146	433	20	07/04 05時	前線
2	平成30(2018)年 07/04 00時	07/08 15時	112	350	18	07/05 18時	前線
3	平成30(2018)年 09/06 03時	09/11 08時	126	231	16	09/10 09時	前線
4	平成29(2017)年 08/05 15時	08/09 17時	99	199	16	08/08 17時	台風5号
5	平成29(2017)年 08/22 07時	08/26 07時	97	157	13	08/25 11時	前線

##### (2) 奥只見ダム流域

NO.	降雨期間 開始	降雨期間 終了	時間 数	奥只見ダム流域平均雨量			降雨要因
				総雨量 (mm)	ピーク (mm/hr)	ピーク時刻	
1	平成29(2017)年 06/29 20時	07/06 17時	166	263	13	07/03 06時	前線
2	令和元(2019)年 10/11 03時	10/15 11時	105	193	17	10/12 18時	台風19号
3	平成29(2017)年 10/21 02時	10/24 01時	72	160	12	10/23 05時	台風21号
4	令和元(2019)年 08/19 11時	08/25 19時	153	148	16	08/20 14時	前線
5	平成29(2017)年 10/28 11時	10/31 17時	79	116	8	10/30 02時	低気圧

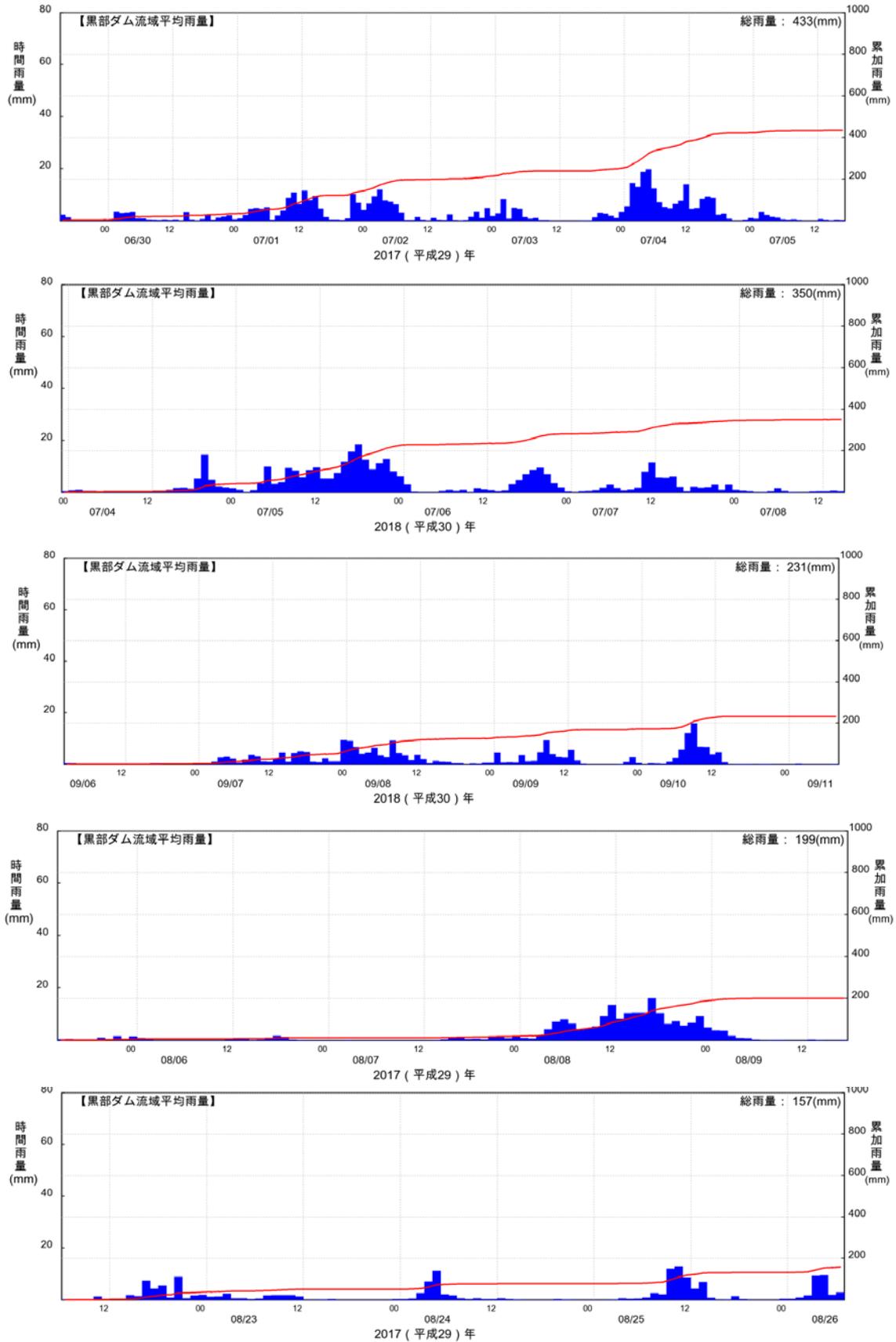


図 4.4-1 検討対象降雨の降雨量時系列 (1) 黒部ダム流域

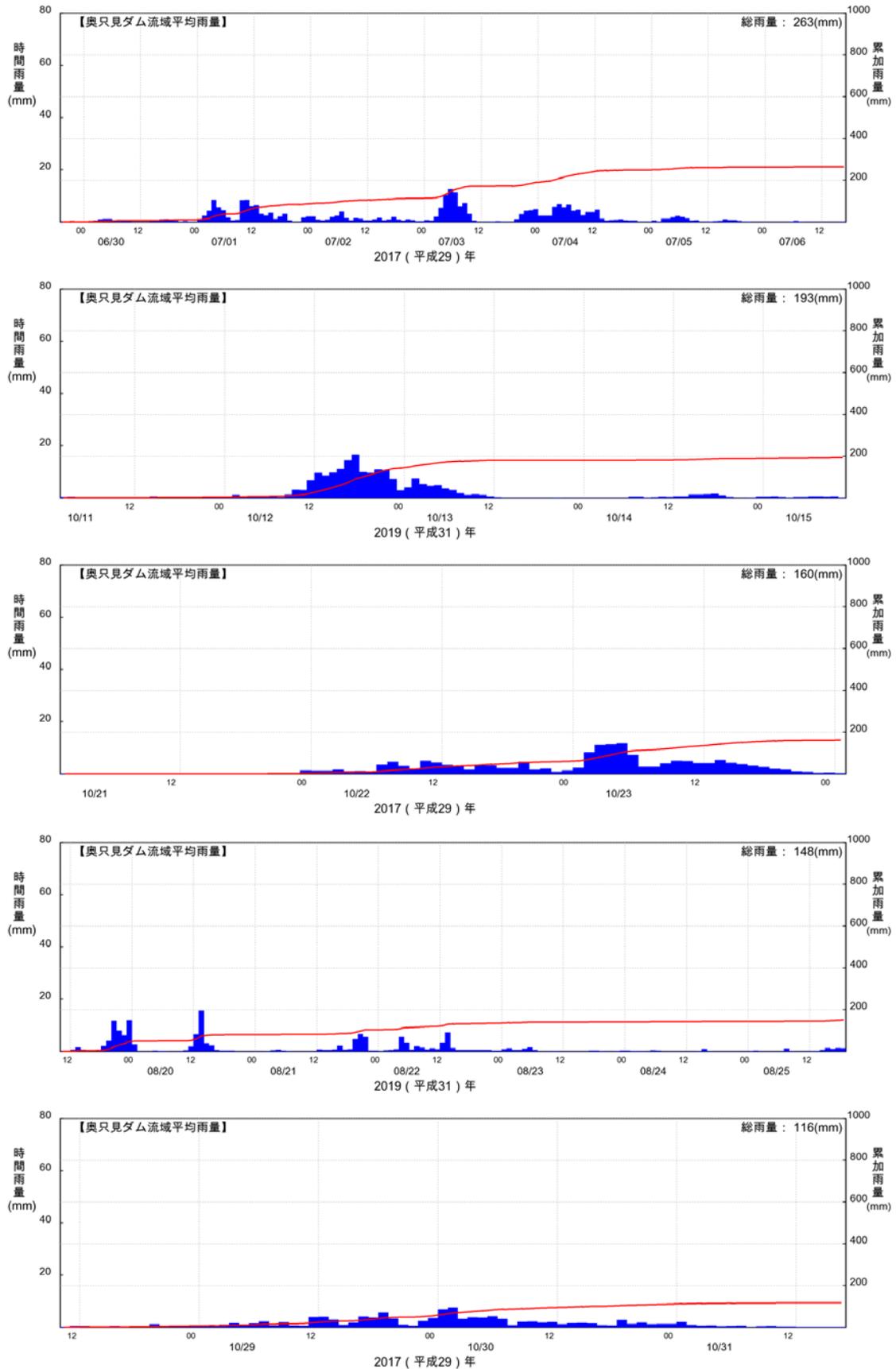


図 4.4-2 検討対象降雨の降雨量時系列 (2) 奥只見ダム流域

流域平均雨量の算出方法を以下に示す。

#### **実績流域平均雨量の算出方法**

国土交通省解析雨量の 1km メッシュの中心位置がダム流域内に存在するメッシュの雨量を算術平均し、ダム流域平均雨量実績値とした。流域平均雨量の算出方法としては、地上雨量観測データを用いてティーセン法により算出する方法もあるが、ティーセン法による流域平均雨量の算出では、雨量観測点以外の地点で局地的な大雨が発生した場合に、その影響を流域平均雨量に反映出来ないという問題がある。国土交通省解析雨量は気象庁および国土交通省の気象レーダー観測網により観測された雨量分布を気象庁、国土交通省、自治体等所管の地上雨量観測データで補正しているため、精度の高いメッシュ雨量であると考えられる。また、国土交通省解析雨量は日本全国を対象としたプロダクトであるため、同データを利用することは汎用性の観点でも有利である。以上のことから、1km メッシュ国土交通省解析雨量を用いて実績流域平均雨量を算出することとした。

#### **予測流域平均雨量の算出方法**

予測雨量のメッシュを東西方向・南北方向それぞれについて 10 分割し、分割した  $10 \times 10 = 100$  メッシュの中心位置がダム流域に含まれる割合を算出し、メッシュ雨量予測値の重み付け平均によりダム流域雨量予測値とする。図 4.4-3、図 4.4-4 に MSM、GSM のメッシュ毎の重み係数を示す。

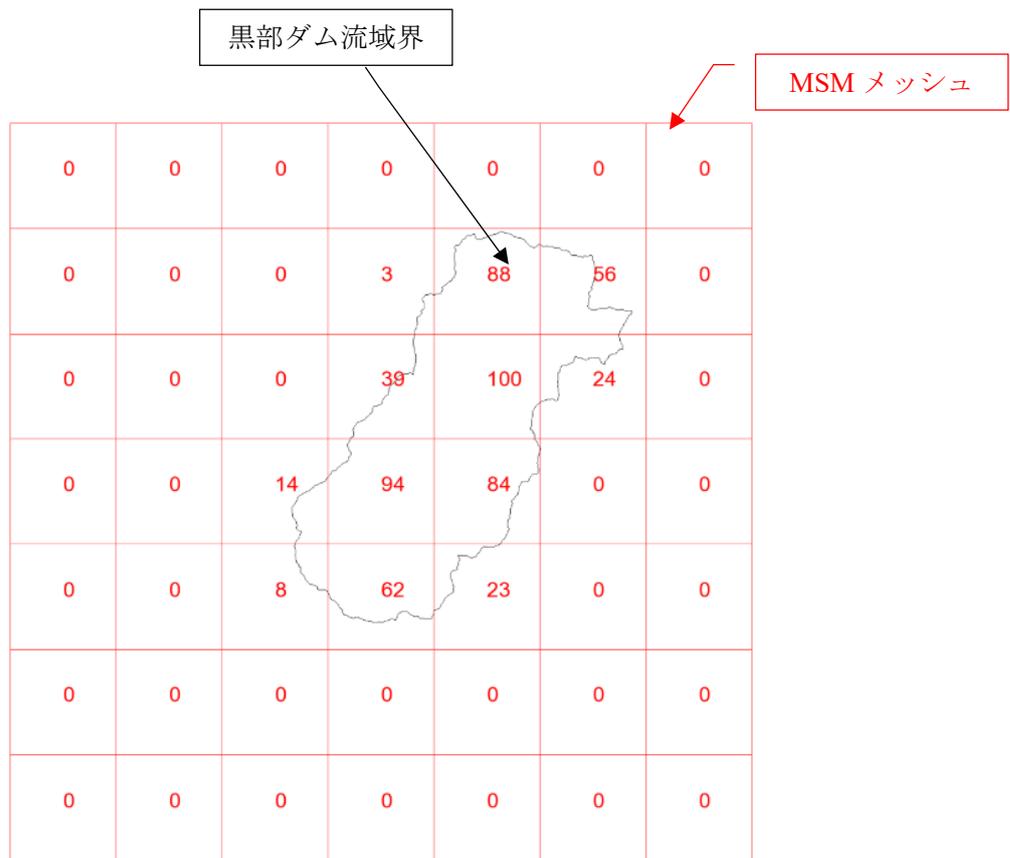


図 4.4-3 黒部ダム流域平均雨量算出に用いたメッシュ毎の重み係数  
 (上段 : MSM (5km メッシュ) 下段 : GSM (20km メッシュ))

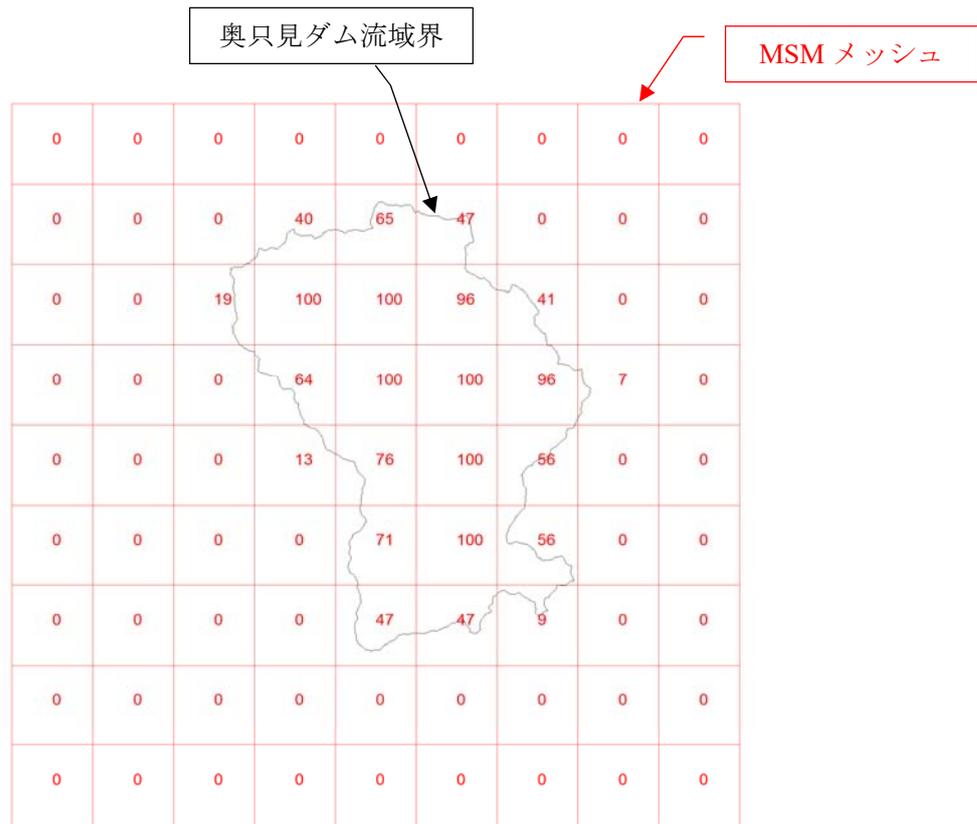


図 4.4-4 奥只見ダム流域平均雨量算出に用いたメッシュ毎の重み係数  
 (上段 : MSM (5kmメッシュ) 下段 : GSM (20kmメッシュ))

### 4.4.3 予測雨量の精度比較

図 4.4-5 に、精度評価対象とした予測雨量の設定方法を示す。図に示すように、予測雨量期間が降雨期間に初めて含まれる予測初期時刻から、予測雨量期間の終わりが降雨期間に含まれる最後の予測初期時刻の降雨予測データを精度評価対象とした。

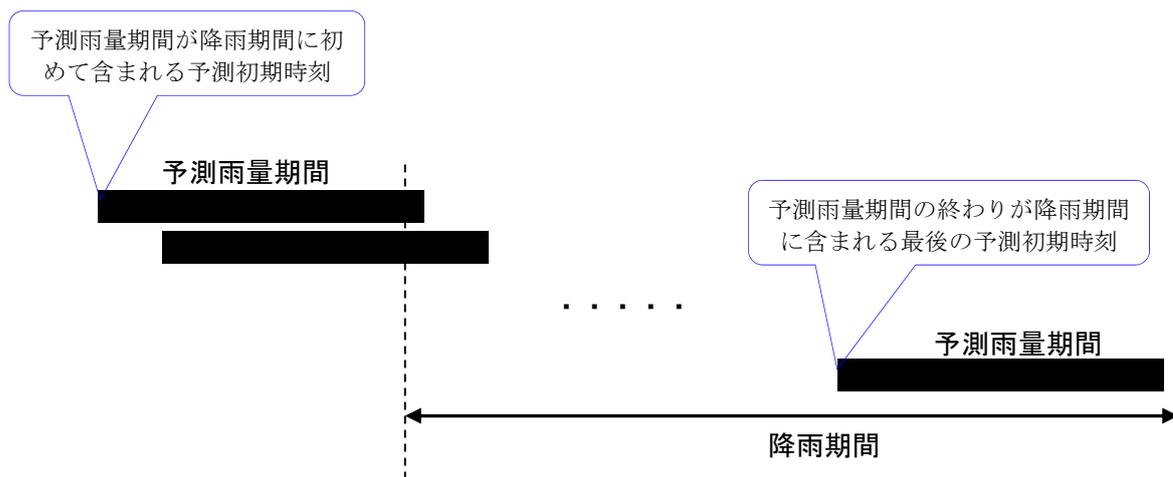


図 4.4-5 精度評価対象とした予測雨量の設定方法

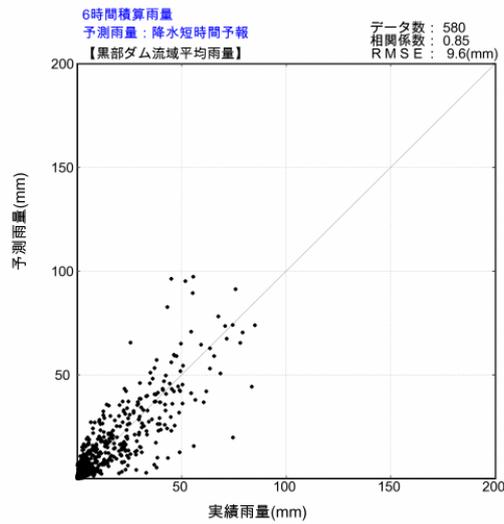
降水短時間予報、MSM、GSM の各プロダクトを対象として予測精度の検証を行った。また、各プロダクトを組み合わせた予測情報の精度についても検証を行った。図 4.4-6～図 4.4-11 に検証結果を示す。図から以下のことが分る。

#### 【黒部ダム流域】

- ・ 相関係数による評価では、降水短時間予報、MSM、GSM の順であり、降水短時間予報の精度が最も高かった。
- ・ GSM は過小予測傾向が顕著であり、洪水時の降雨予測プロダクトとしては適さないと考えられる。
- ・ 各予測プロダクトを組合せることにより、精度向上することが確認されたが、その精度向上幅は大きくなかった。

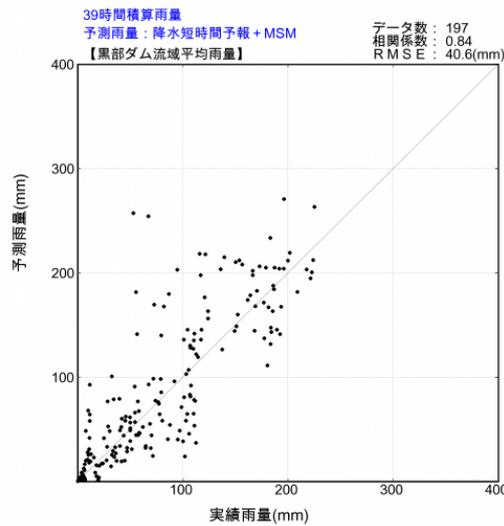
#### 【奥只見ダム流域】

- ・ 相関係数による評価では、降水短時間予報と MSM が相関係数 0.91 と高精度であった。GSM は相関係数が 0.72 であり、降水短時間予報、MSM と比較して精度が低かった。
- ・ GSM は過小予測傾向が顕著であり、洪水時の降雨予測プロダクトとしては適さないと考えられる。
- ・ GSM に MSM を組み合わせることにより精度向上したが、降水短時間予報を組み合わせることにより精度向上するケースは無かった。

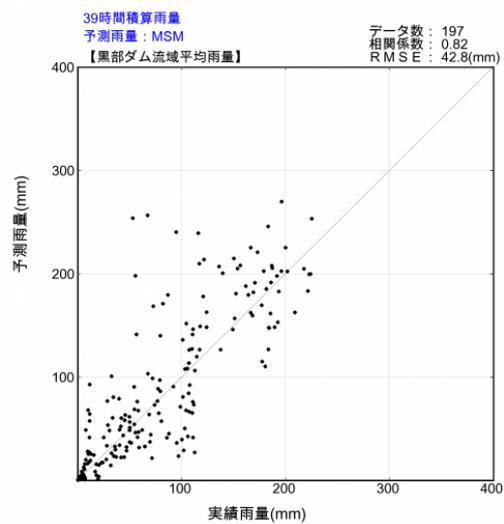


(a) 降水短時間予報+MSM

図 4. 4-6 黒部ダム域平均雨量の精度検証結果（6 時間先予測（6 時間積算雨量））

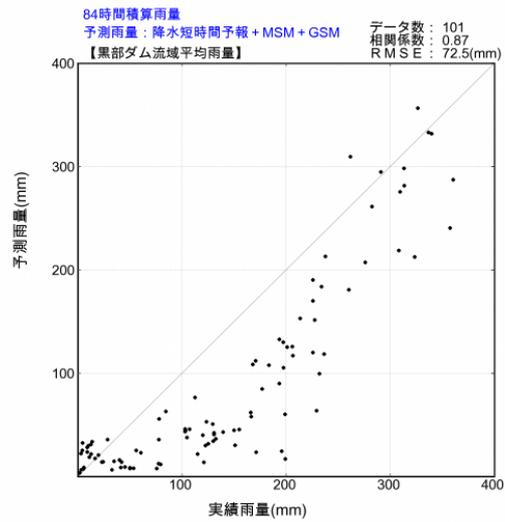


(a) 降水短時間予報+MSM

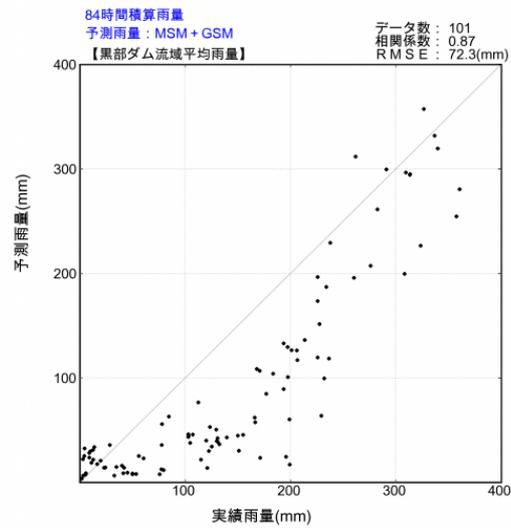


(b) MSM

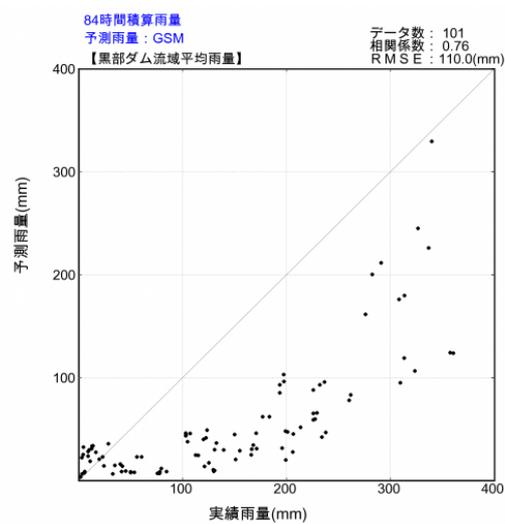
図 4. 4-7 黒部ダム域平均雨量の精度検証結果（39 時間先予測（39 時間積算雨量））



(a) 降水短時間予報 + MSM + GSM



(b) MSM + GSM



(c) GSM

図 4.4-8 黒部ダム域平均雨量の精度検証結果 (84 時間先予測 (84 時間積算雨量))

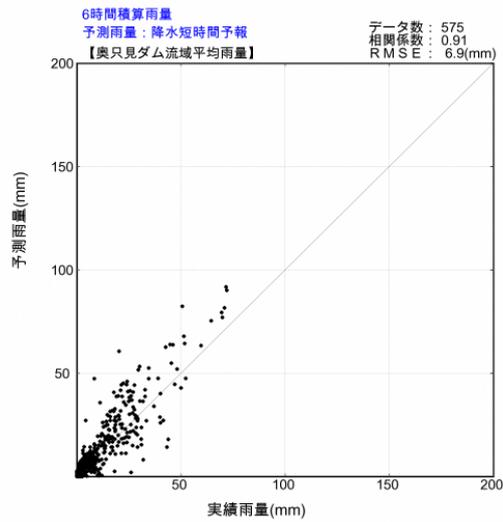
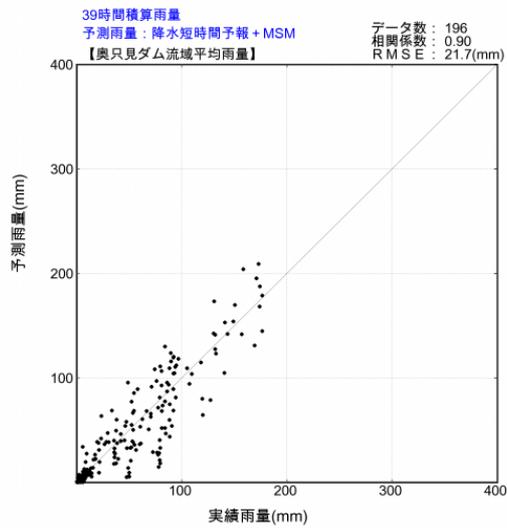
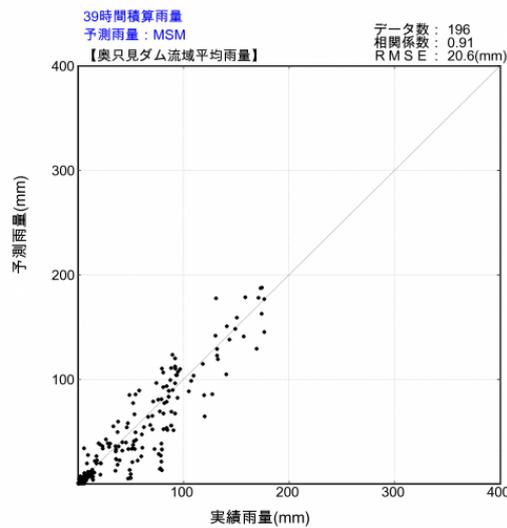


図 4. 4-9 奥只見ダム域平均雨量の精度検証結果（6 時間先予測（6 時間積算雨量））

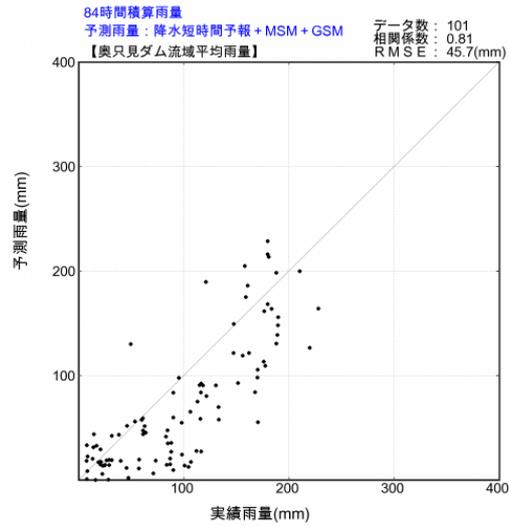


(a) 降水短時間予報 + MSM

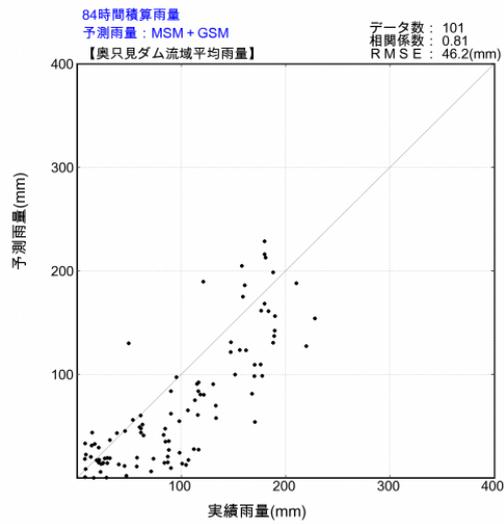


(b) MSM

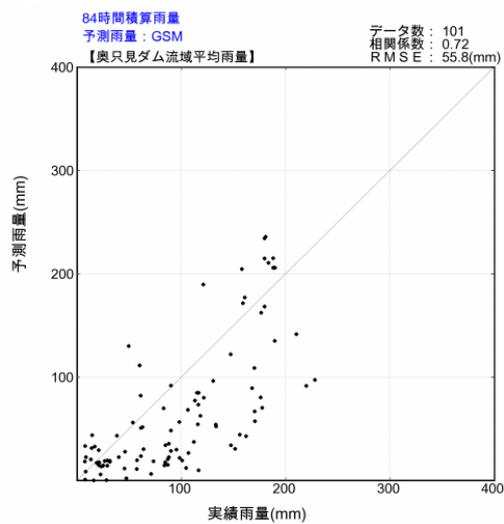
図 4. 4-10 奥只見ダム域平均雨量の精度検証結果（39 時間先予測（39 時間積算雨量））



(a) 降水短時間予報 + MSM + GSM

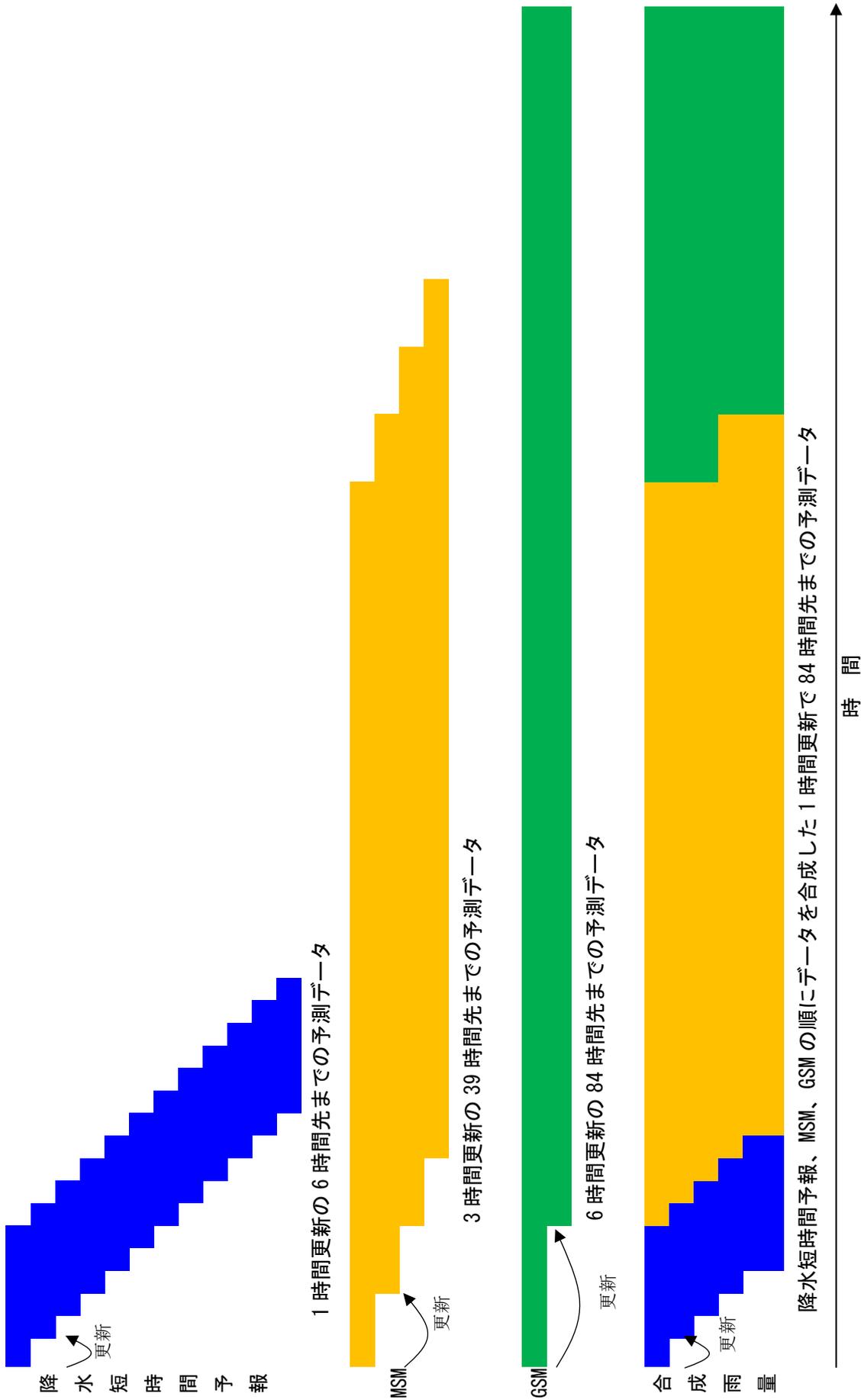


(b) MSM + GSM



(c) GSM

図 4.4-11 奥只見ダム域平均雨量の精度検証結果 (84 時間先予測 (84 時間積算雨量))



参考図 予測雨量の合成のイメージ ( ■ : 降水短時間予報 ■ : MSM ■ : GSM )

#### 4.4.4 採用する予測雨量プロダクトの決定

降水短時間予報は、予測精度は高いが予測時間が6時間までであり、洪水時のダム運用に用いる情報としては予測時間が不足すると考えられる。以上のことから、降水短時間予報、MSM、GSMの比較ではダム運用に用いる降雨予測情報としてはMSMが最適であると考えられる。

また、MSMの予測時間（現在、最長51時間）を超える流入量予測を行う場合には、GSMを用いる必要がある。

GSMよりも空間解像度の低い週間アンサンブル、1ヶ月アンサンブル、3ヶ月アンサンブルでは、GSMよりも過小傾向が顕著になると想定されることから、ダム運用に用いる予測雨量プロダクトとしては、MSMが最適であると考えられる。また、令和元（2019）年6月から提供が開始されたメソアンサンブル予報システム（MEPS）については今後の洪水事例での精度検証が必要であると考えられる。

なお、MSM、GSMの出力値には、降水量以外に、気温、湿度、風向・風速、日射量等の予測値が含まれており、これらの予測情報は積雪・融雪モデルへの入力値として利用することが可能であり、積雪・融雪モデルの高度化に貢献する可能性があるデータである。

#### 4.4.5 他流域、全国展開に向けての課題

上記では、黒部ダム流域、奥只見ダム流域平均雨量を対象として精度評価を行ったが、全国のダム流域への展開を想定した場合、より小さな流域も多く存在する。そこで、全国のダム流域への展開を想定し、MSM、GSM について、各予測プロダクトの最小単位のメッシュ毎の予測精度を検証し、流域平均雨量の精度と差異を評価した。

図 4.4-12 に黒部ダム流域と重複する GSM メッシュの精度一覧を示す。図から、流域の西側で相関係数が高く流域の東側では相関係数が小さいことが分る。また、RMSE で見ると上流で小さく、下流で大きな値となっている。

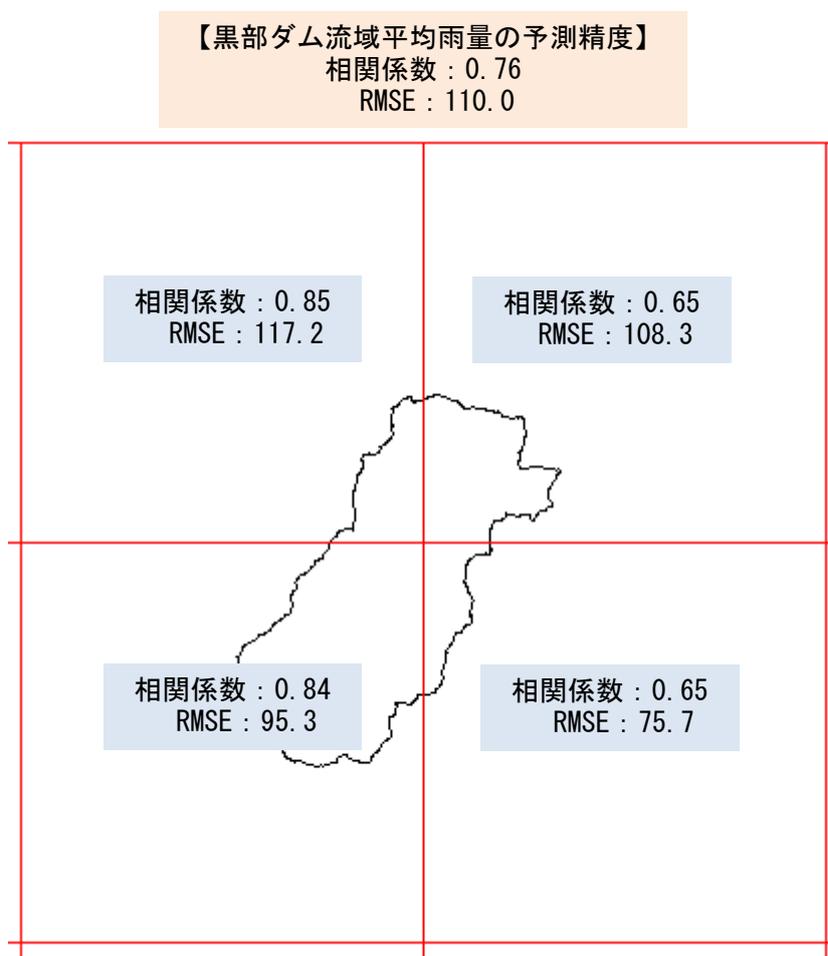


図 4.4-12 黒部ダム流域と重複するメッシュにおける  
GSM84 時間積算雨量と実績 84 時間積算雨量の精度  
(実績雨量 : GSM メッシュ内の解析雨量メッシュの算術平均により算出)

図 4.4-13 に黒部ダム流域と重複する MSM メッシュの精度一覧を示す。図から、流域の上流で相関係数が高い傾向があることが分る。また、RMSE で見ると東側で小さく、西側で大きな値となっている。

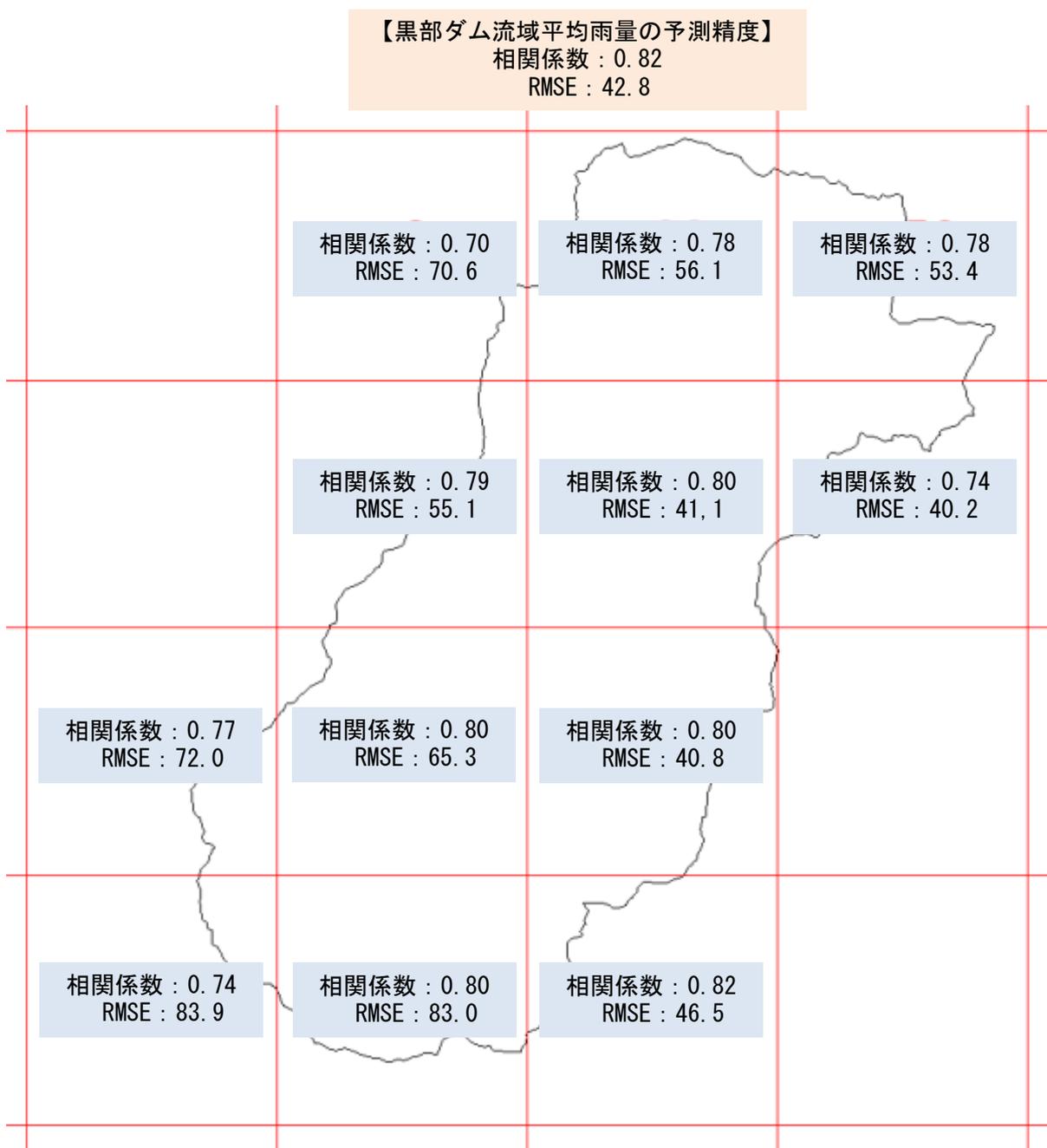


図 4.4-13 黒部ダム流域と重複するメッシュにおける  
 MSM39 時間積算雨量と実績 39 時間積算雨量の精度  
 (実績雨量 : MSM メッシュ内の解析雨量メッシュの算術平均により算出)

図 4.4-14 に奥只見ダム流域と重複する GSM メッシュの精度一覧を示す。図から、流域の上流で相関係数が高く流域の下流で相関係数が小さい傾向にあること、RMSE でみると上流で小さく、下流で大きな値となっている。相関係数、RMSE のいずれの評価指標で見ても上流で精度が高い傾向にあった。

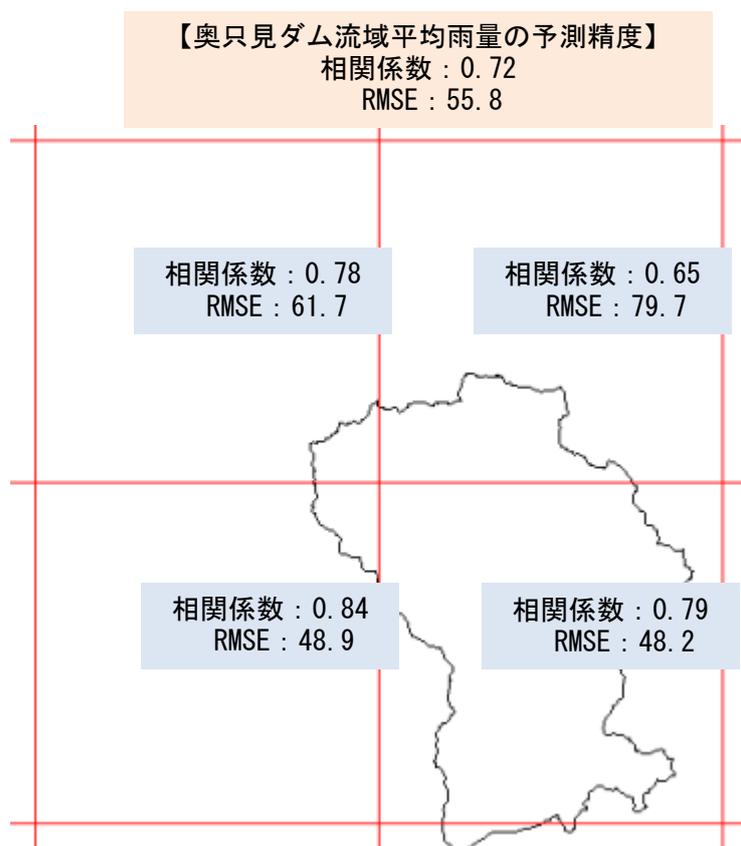


図 4.4-14 奥只見ダム流域と重複するメッシュにおける GSM84 時間積算雨量と実績 84 時間積算雨量の精度 (実績雨量 : GSM メッシュ内の解析雨量メッシュの算術平均により算出)

図 4.4-15 に奥只見ダム流域と重複する MSM メッシュの精度一覧を示す。図から、流域の上流で相関係数が高く流域の下流で相関係数が小さい傾向にあること、RMSE でみると上流で小さく、下流で大きな値となっている。相関係数、RMSE のいずれの評価指標で見ても上流で精度が高い傾向にあった。



図 4.4-15 奥只見ダム流域と重複するメッシュにおける  
 MSM39 時間積算雨量と実績 39 時間積算雨量の精度  
 (実績雨量 : MSM メッシュ内の解析雨量メッシュの算術平均により算出)

メッシュ毎の精度に関して、GSM では流域の上流西側で相関係数が高く RMSE が小さく精度が高くなっており、MSM では流域の上流西側で相関係数が高く RMSE が小さく精度が高くなっている。MSM、GSM ではそれぞれ 5km メッシュ、20km メッシュ範囲で平滑化されたモデル地形上で気象現象をシミュレーションし、雨量が計算される。実地形とモデル地形の差異が予測誤差の大きな要因であると考えられるが、その差異の程度、特性はモデル毎、メッシュ毎に異なるため、予測誤差（予測精度）の特性はモデル毎、メッシュ毎に異なると考えられる。全国のダム流域への適用に際しては、予測誤差の特性を流域毎に確認することが重要である。

## 4.5 予測雨量に対する AI 手法（ダウンスケーリング）の検討

### 4.5.1 検討概要

ダムへの流入量を正確に予測するには、ダム流域における空間的・時間的に詳細な降雨量の予測が必要となる。しかし、一般的に用いられている降雨予測では、メッシュのサイズが大きい、予測の時間刻みが長いなどの課題がある。

空間的なメッシュのサイズについては、ダム流域の面積に比べメッシュのサイズが大きいとダム流域よりも広い領域の平均的な雨量となりダム流域内の雨量を適切に捉えられないこと、また、時間的な刻みの長さについては、刻みが粗いと短時間の降雨量の変化を捉えきれないこととなり、どちらも流入量の正確さに影響を与える。

そこで、AI 技術のうち教師あり学習を用いたダウンスケーリングを行うことにより、降雨予測のデータの空間解像度及び時間解像度を向上させる手法について検討を行った。

ダウンスケーリングした結果の空間解像度及び時間解像度は、ダム流域の降雨量からダムへの流出量を計算するにあたり、妥当と考えられる 1km 及び 1 時間を目標に設定した。

一方、4.4 でも述べたように、予測雨量プロダクトには様々なものが存在するが、既存ダムにおける降水予測をはじめとして広く用いられている MSM（メソ数値予報モデル GPV）と GSM（全球数値予報モデル GPV）の降雨予測データをダウンスケーリングすることを念頭に検討することとした。MSM と GSM の空間解像度及び時間解像度はそれぞれ表 4.5-1 の通りである。

表 4.5-1 MSM 及び GSM の空間解像度及び時間解像度

	空間解像度	時間解像度	備考
MSM	5km	1 時間	予報発表は、毎日 0,3,6,9,12,15,18,21 時の 3 時間毎
GSM	20km	1 時間／3 時間	予報発表は、毎日 3,9,15,21 時の 6 時間毎、毎日 9,21 時の 12 時間毎、毎日 21 時の 24 時間毎のいずれか 0～84 時間先までの時間解像度は 1 時間、それ以降の時間解像度は 3 時間

MSM と GSM の予測降雨の空間解像度と時間解像度から、目標とする 1km の空間解像度、1 時間の時間解像度を得るために、以下の 3 つの教師有り学習モデルを構築することとした。

- 20km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング
- 5km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング
- 20km3h→1km1h 時空間ダウンスケーリング

表 4.5-2 及び図 4.5-1 に示すように、これらの 3 つのモデルを単体または組み合わせることで、MSM 及び GSM の予測降雨の空間解像度と時間解像度の全ての組み合わせから、目標とする 1km の空間解像度及び 1 時間の時間解像度の結果を得ることができるためである。

表 4.5-2 構築するモデルの空間及び時間ダウンスケーリングの組み合わせ

	空間ダウンスケーリング 20km → 5km	空間ダウンスケーリング 5km → 1km
時間ダウンスケーリング 3h → 1h	①	—
時間ダウンスケーリング 無し	②	③

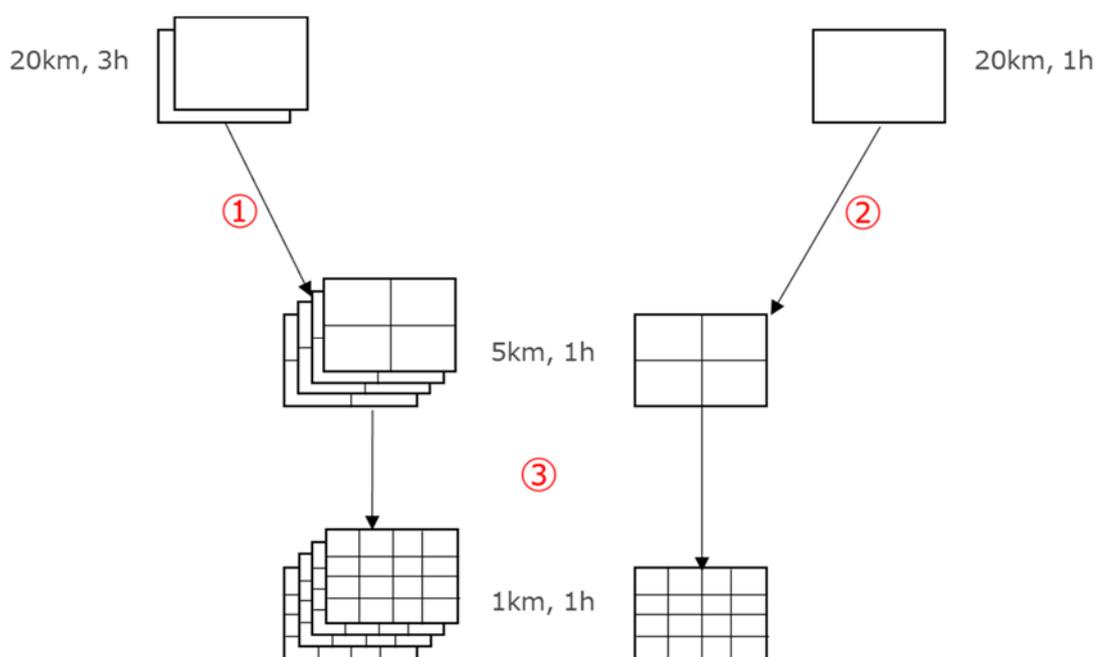


図 4.5-1 構築するモデル間の接続構成

ここで、①→③及び②→③は、それぞれ①または②のモデルを用いて MSM または GSM の降

雨予測データを入力として空間解像度 5km・時間解像度 1 時間にダウンスケーリングを行い、そこで得られた結果を入力として③でさらに空間解像度 1km・時間解像度 1 時間にダウンスケーリングを行うことを意味している。

教師有り学習のモデルを構築するためには、教師データが必要となり、その空間解像度及び時間解像度は、目標とする 1km 及び 1 時間以上のものが必要である。しかし、MSM と GSM を含め様々な降雨予測プロダクトを調査したが、空間解像度及び時間解像度が共に目標とする 1km 及び 1 時間以上の解像度を持つものは存在しない。また、降雨予測の数値は常に正しい値では無く、様々な要因による実際の降雨との誤差を含んでいる。このため、MSM と GSM を含めて降雨予測プロダクトそのものの値を教師データとして用いるのは望ましくない。

以上の理由から、教師データには、空間解像度及び時間解像度を目標とする 1km 及び 1 時間以上のものであり、実際の降雨との誤差が少ない気象庁発行の解析雨量を用いることとした。解析雨量は、気象レーダーとアメダスなどの雨量を組み合わせでつくった雨量分布である。気象レーダーは量的には不正確だが面的な雨量分布は正確である一方、雨量計は地点的にはまばらだが量的には正確である。このため、解析雨量は気象レーダーの面的分布と雨量計の量的分布の長所をいかした精度の高い雨量分布情報となっている。

また、降雨量のみを入力データ及び教師データとして学習を行ったとしても、ダウンスケール範囲の各地域における違いを表すデータが無いことから、各地域における気候の特徴を踏まえた結果を得ることは難しい。そこで、降水量をはじめとする気象観測値は各地域の地盤高の影響を大きく受けると考えられることから、平均地盤高も入力データとして与えることとした。但し、地盤高の入力データはダウンスケーリングを行った後の空間解像度と同じ解像度のデータである。

データ及び AI 学習モデルの詳細については、以降で詳しく述べる。

## 4.5.2 学習・検証用データ

### (1) ダウンスケーリング対象範囲

学習・検証用データを作成するにあたり、AI を用いた雨量予測においては、空間方向へのダウンスケーリングだけでなく、時間方向へのダウンスケーリングも必要となる。具体的には、降雨予測プロダクトとして想定している MSM 及び GSM の時間解像度で最も粗いものは 3 時間である。AI を用いたダウンスケーリングにおいては、時間解像度 1 時間の結果を得ることを目標としていることから、時間方向へのダウンスケーリングは 3 時間→1 時間となる。そこで、以下に挙げる条件から、東西 480km、南北 480km の領域をダウンスケーリング対象領域に設定することとした。

- 黒部ダム及び奥只見ダムの流域は東西、南北共に 100km 未満である。
- 3 時間→1 時間の時間ダウンスケーリングを行うため、ダム流域を中心として、東西南北に雲の 3 時間分の移動距離(雲の移動速度は～約 50km/h と想定)以上の領域を設ける必要がある。
- 雲は主に西及び南から東及び北方向に移動するため、西及び南については、ダウンスケール対象領域の幅を広めに設定する。
- AI を用いてダウンスケール行う際に CNN (Convolution Neural Network) 等を用いるため、領域のグリッドサイズは(2<sup>自然数</sup>)倍であることが望ましい。

黒部ダム及び奥只見ダムにおけるダウンスケーリング対象範囲を図 4.5-2 及び図 4.5-3 に示す。

図 4.5-2 及び図 4.5-3 で設定した黒部ダム及び奥只見ダムのダウンスケーリング対象範囲について、降雨量データ及び地盤高データの収集を行った。

### (2) 降雨量データ

降雨量データとして、気象庁が発行している解析雨量を採用することにしたため、そのうち 2006 年 1 月～2020 年 9 月分を収集した。収集したデータのうち、2006 年 1 月～2015 年 12 月分を学習用データ、2016 年 1 月～2020 年 9 月分を検証用データとして用いることとした。

### (3) 地盤高データ

降雨量データだけでは地域による差異が生じないことから、降雨量データに加えて地盤高データも学習・検証用データとして採用した。地盤高データは、国土数値情報の「標高・傾斜度 3 次メッシュ」より取得した。これには、1km メッシュ毎の平均地盤高、最高地盤高、最低地盤高が含まれているが、これらのうち平均地盤高を採用することとした。

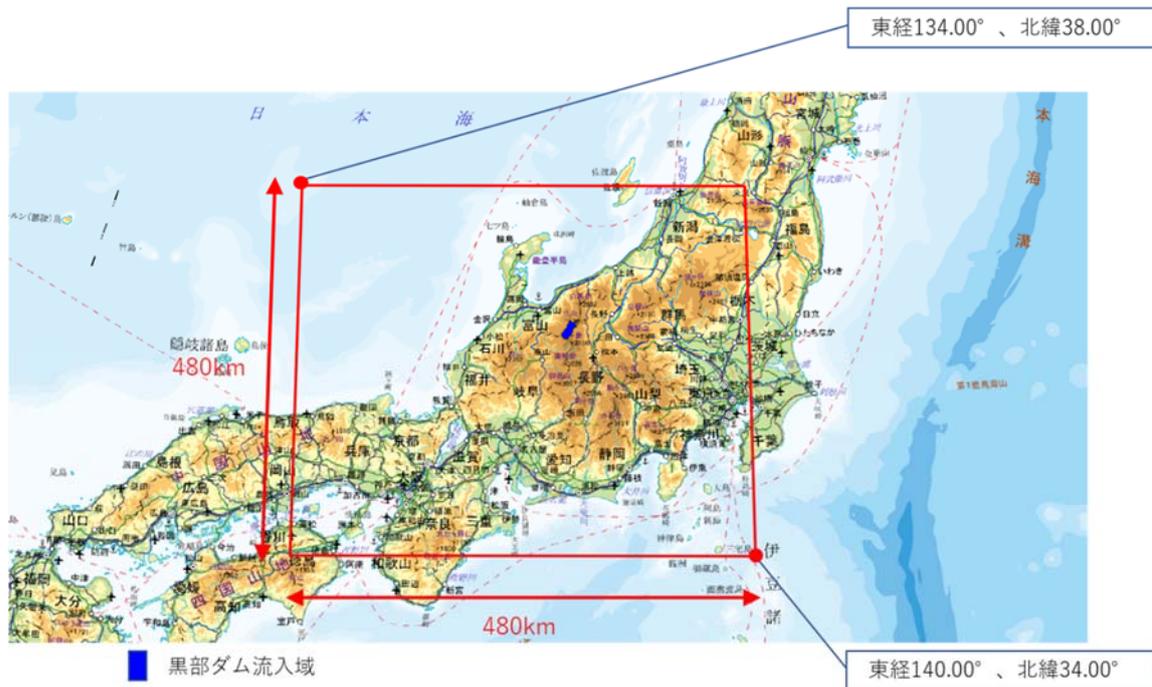


図 4.5-2 黒部ダム流域を中心としたダウンスケーリング対象範囲



図 4.5-3 奥只見ダム流域を中心としたダウンスケーリング対象範囲

上記「AI 予測モデルの検討」において述べたように、黒部ダム流域、奥只見ダム流域のそれぞれを含む東西 480km、南北 480km の範囲をダウンスケーリングの対象とするため、それぞれの流域に該当する「標高・傾斜度 3 次メッシュ」のデータを収集した。

なお、「標高・傾斜度 3 次メッシュ」のデータは、陸域が含まれているメッシュのデータのみであることから、東西 480km、南北 480km の領域のうち、「標高・傾斜度 3 次メッシュ」のデータにメッシュが含まれていない領域については、全て海面として地盤高を 0 として扱うこととした。

#### (4) 学習・検証用データ

降雨予報プロダクトが MSM と GSM であることを前提として、これらに合わせる形で学習用・検証用データを作成することとした。ダウンスケーリングにより得られる雨量分布の空間解像度は 1km、時間解像度は 1 時間としているため、

- 空間解像度 20km・時間解像度 1 時間
- 空間解像度 5km・時間解像度 1 時間
- 空間解像度 20km・時間解像度 3 時間

の 3 つの空間解像度と時間解像度の組み合わせのいずれかを入力とし、全ての入力の組み合わせにおいて、空間解像度 1km 時間解像度 1 時間の結果が得られるようにする必要がある。このために、収集した降雨量データと地盤高データについて、以下の組み合わせの学習・検証用データを作成した。なお、収集した降雨量データと地盤高データの空間解像度はそれぞれ 1km であるため、5km 及び 20km の空間解像度における降雨量データと地盤高データは 5km メッシュまたは 20km メッシュに含まれる 1km メッシュの降雨量と地盤高の数値を平均して算出することとした。

- 入力データ：20km メッシュ(グリッドサイズ：24x 24)の降雨量  
1km メッシュ(グリッドサイズ：480x480)の地盤高  
教師データ：1km メッシュ(グリッドサイズ：480x480)の降雨量
- 入力データ：5km メッシュ(グリッドサイズ：96x 96)の降雨量  
1km メッシュ(グリッドサイズ：480x480)の地盤高  
教師データ：1km メッシュ(グリッドサイズ：480x480)の降雨量
- 入力データ：20km メッシュ(グリッドサイズ：24x 24)の 3 時間間隔  
2 回分の降雨量  
1km メッシュ(グリッドサイズ：480x480)の地盤高  
教師データ：1km メッシュ(グリッドサイズ：480x480)の 1 時間間隔  
4 回分の降雨量

### 4.5.3 AI 予測モデルの開発

#### (1) 既存のダウンスケーリングモデル

AI モデルを開発するにあたり、AI を用いた単一画像のダウンスケーリング技術（超解像と呼ばれることが多い）としてよく知られている SRCNN をについて調査をおこなった。

SRCNN は、Chao Dong らによって 2014 年に提示された手法で、単一画像のダウンスケーリングにおいて、初めて CNN(Convolution Neural Network)を本格的に用いた革新的な手法として知られている。SRCNN では、図 4.5-4 に示すように低解像度画像を入力として受け取り、それを一般的な画像の引き延ばし手法である双三次補間(BiCubic)を用いて高解像度画像と同じサイズの画像に変換し、これに対して非線形補正を行うことで高解像度の画像に変換(マッピング)する。この変換(マッピング)の非線形補正のパラメータを、学習データを用いることで学習する手法である。SRCNN のニューラルネットワークは、3 層の CNN から構成されており、それぞれパッチの抽出、非線形マッピング、再構築に対応するようになっている。

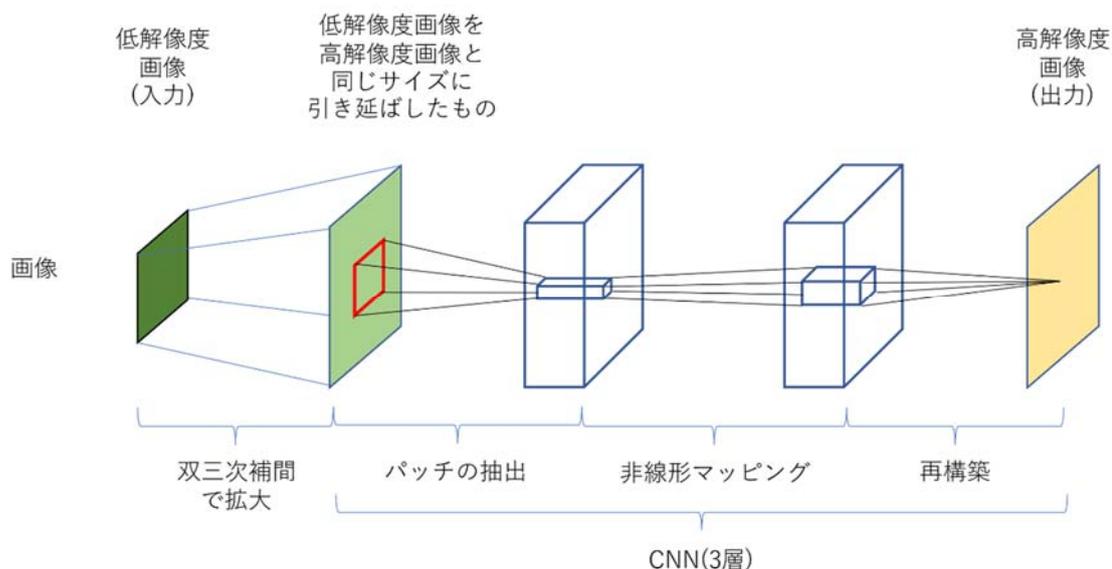


図 4.5-4 SRCNN の構成

また、上記の SRCNN を利用した降雨データの空間ダウンスケーリング手法として、Vandal によって 2017 年に提示された DeepSD についても調査を行った。

DeepSD は、図 4.5-5 に示すように画像データと見なした降雨データに加え、ダウンスケーリング対象範囲の平均地盤高の分布を表す画像も入力として与える拡張した SRCNN で、降雨データのダウンスケーリングの精度を高める手法である。

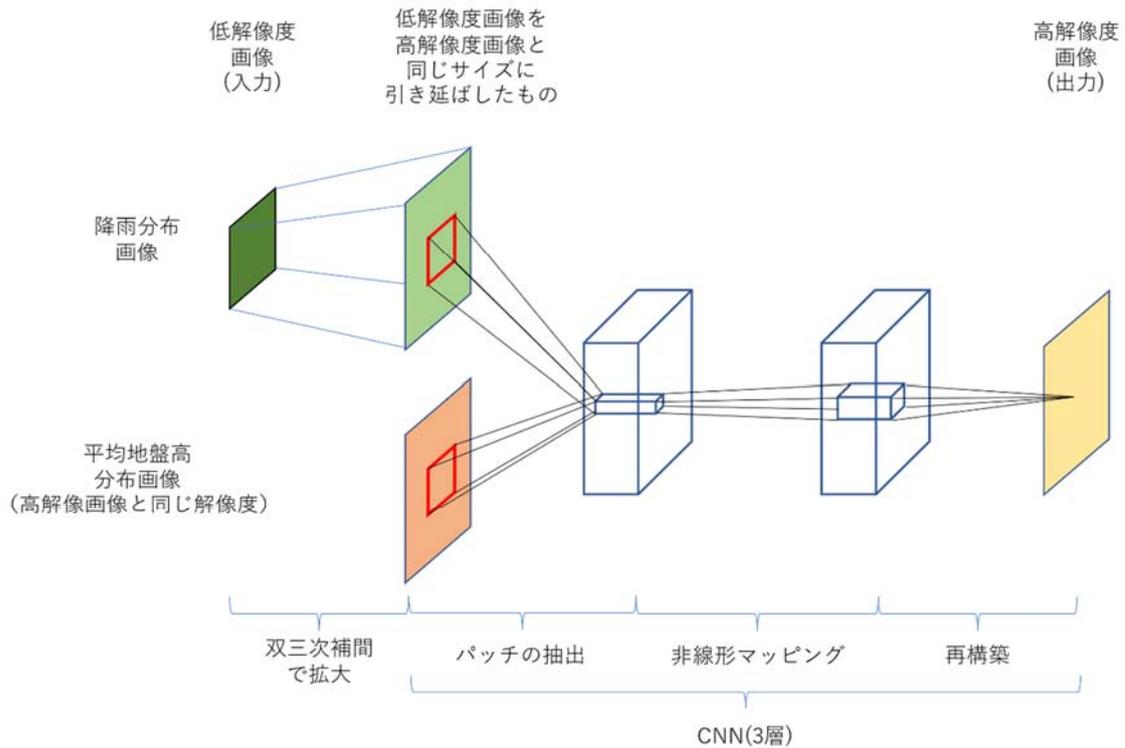


図 4.5-5 DeepSD で用いられている拡張された SRCNN の構成

また、DeepSD では、図 4.5-6 に示すように複数の拡張 SRCNN を積み重ねることで、低解像度画像と高解像度画像の解像度の差が大きい場合でも、段階的にダウンスケーリングを行うことで精度の良い結果を得る手法についても提案がなされている。

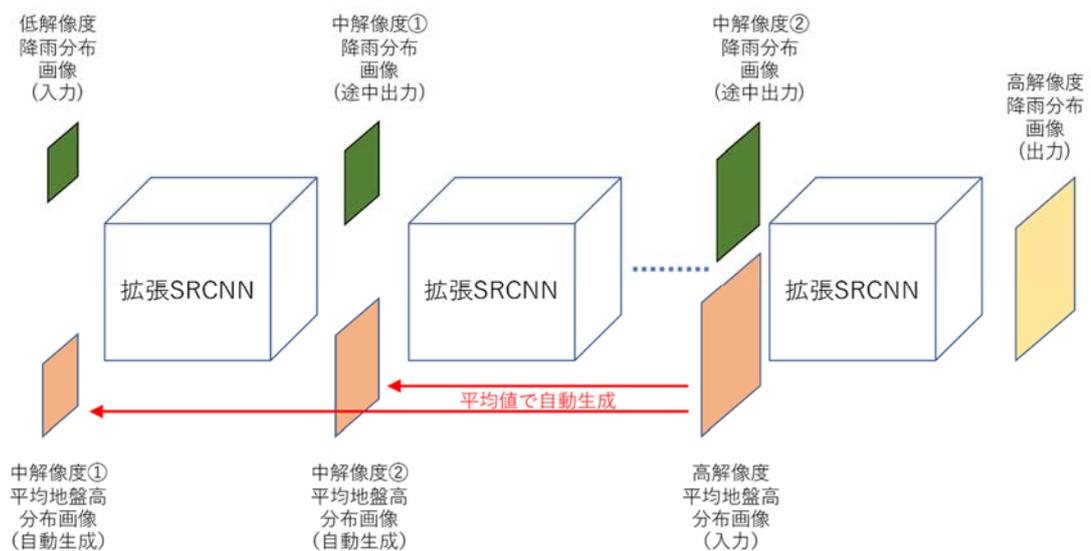


図 4.5-6 DeepSD における拡張 SRCNN を積み重ねた構成

ここで、各拡張 SRCNN はそれぞれ独立したモデルであり、学習もそれぞれのモデル毎に行われるようになっている。このため、複数の異なる解像度の低解像度画像・中解像度画像を

入力として同じ高解像度の結果を出力する場合は、入力する低解像度画像の解像度の違いによって入力する拡張 SRCNN の位置を変えることで、様々な解像度の低解像度画像の入力に対応できるようになっていると共に、モデルとその学習結果を共有することができるようになっている。なお、入力データのうち平均地盤高については、最終的な出力となる高解像度降雨分布画像と同じ解像度の高解像度平均地盤高分布画像を入力することで、各拡張 SRCNN が必要とする中解像度平均地盤高分布画像は平均値より自動的に生成されるようになっている。

## (2) 今回開発するダウンスケーリングモデル

そこで、今回開発する AI 学習モデルにおいては、SRCNN 及び DeepSD の仕組みを基本とし、そこから変更・拡張を行うこととした。図 4.5-7～図 4.5-10 において、高解像度を 1km、中解像度 5km、低解像度を 20km とする。

まず、時間方向のダウンスケーリングを含まない空間ダウンスケーリングのみの場合 (20km→5km 及び 5km→1km) においては、図 4.5-7 に示すように DeepSD の構成をそのまま踏襲することとした。

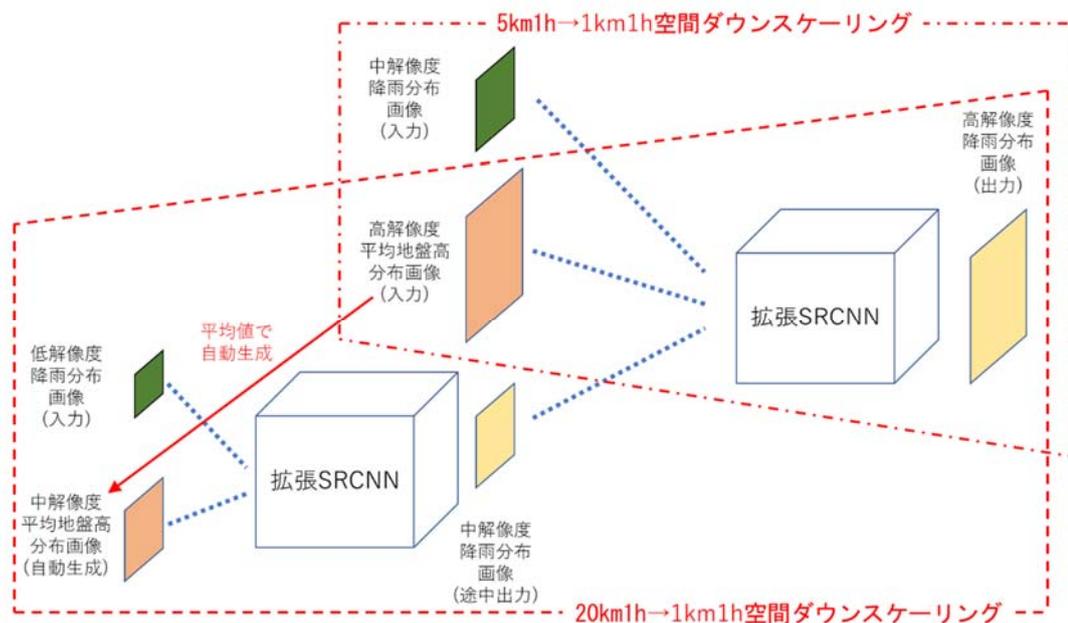


図 4.5-7 空間ダウンスケーリングのモデルの構成 (全体)

但し、拡張 SRCNN において、入力の低解像度の降雨分布画像から出力である高解像度の画像サイズに拡張する処理では、図 4.5-8 に示すように SRCNN 及び DeepSD で用いられていた双三次補間 (BiCubic) ではなく、最近傍補間 (Nearest neighbor) に変更している。

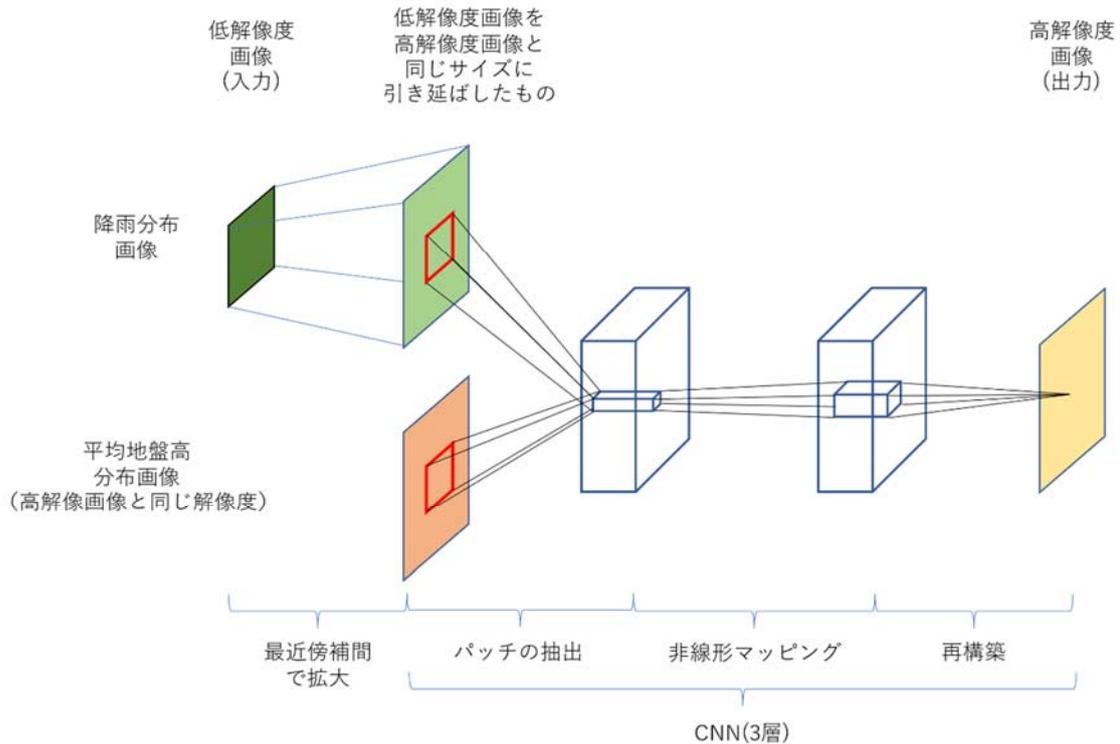


図 4.5-8 開発モデルにおける拡張 SRCNN 構成

これは、学習データにおいて入力データを教師データと同じ画像サイズに引き延ばして教師データと比較する作業を代表的な下記3つの補間法で実施したところ、最近傍補間(Nearest neighbor)で引き延ばした入力データが教師データと最も誤差が少なく（二乗平均平方根誤差(RMSE)で比較を行った）、その他の指標でも良い結果を示したことによる（詳細は後で述べる）。拡張 SRCNN の処理において、入力の低解像度画像を出力の高解像度画像と同じサイズに引き延ばした直後の画像と教師データとの誤差が少ないほど、ダウンスケーリングを行った結果と教師データの誤差が小さくなり、より良い結果が得られると考えられるためである。

- 双一次補間(BiLinear)
- 双三次補間(BiCubic)
- 最近傍補間(Nearest neighbor)

一方、今回開発する AI 学習モデルにおける時空間ダウンスケーリングの場合(20km・3h→1km・1h)については、図 4.5-9 に示すように DeepSD における拡張 SRCNN をさらに時間方向ダウンスケーリングに対応するように拡張したモデルを開発し、これを低解像度から途中の中解像度へのダウンスケーリングに適用した。

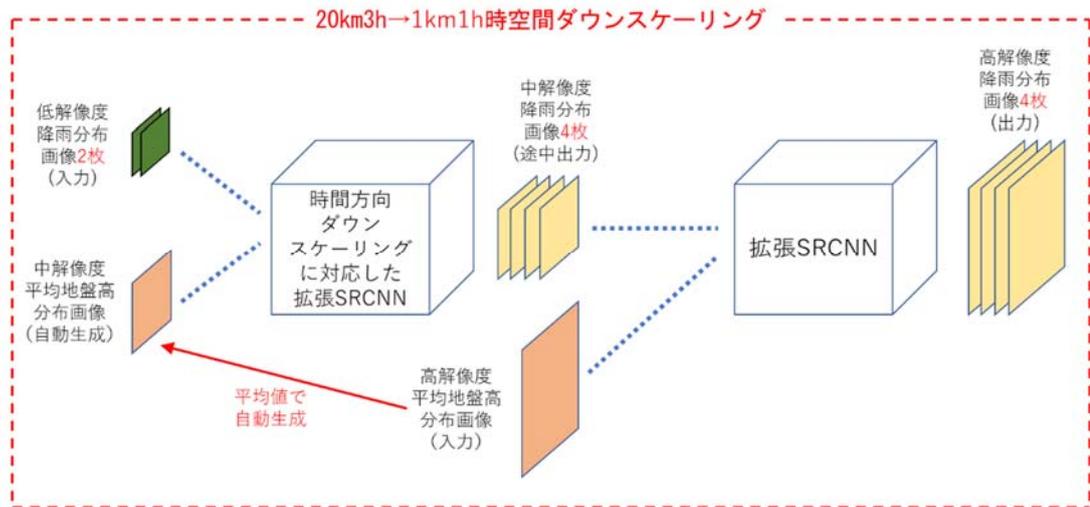


図 4.5-9 時空間ダウンスケーリングのモデルの構成

具体的には、図 4.5-10 に示すように低解像度の入力の降雨分布画像を 2 枚 (3 時間間隔)、高解像度の出力の降雨分布画像を 4 枚 (1 時間間隔で、先頭と最後の時刻は入力の時刻と同じ) となるモデルに拡張した。

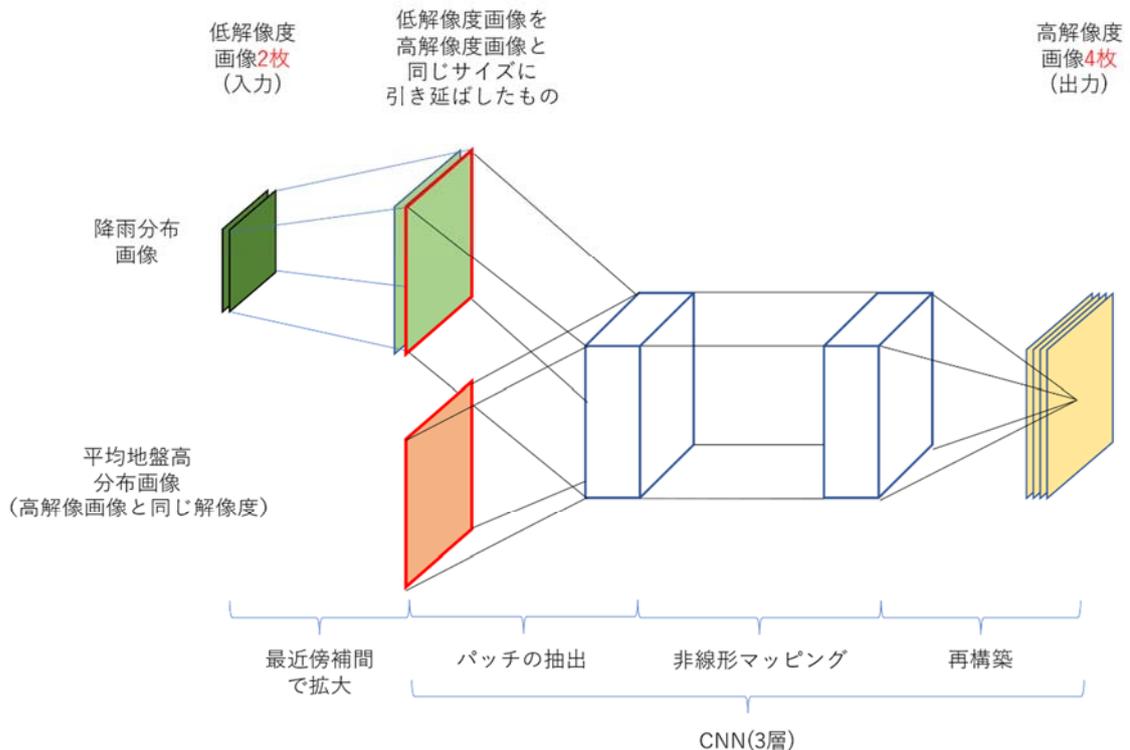


図 4.5-10 開発モデルにおける時間方向ダウンスケーリングに対応した拡張 SRCNN の構成

但し、パッチの抽出は SRCNN 及び DeepSD の拡張 SRCNN のように入力画像の一部ではなく全体となるように変更した (SRCNN では入力画像に対して複数枚のパッチ画像が生成されるが、時空間ダウンスケーリングモデルでは 1 枚で、入力画像全体と同じになる)。これは、時

空間ダウンスケーリングでは、降雨地域が時間と共に移動することに対応する必要があるためである。パッチの範囲を入力画像の全範囲とすることで、ダウンスケーリング範囲内において任意の地点の降雨が時間の経過と共に他の地点に移動する状況を学習データから学習することが可能となる（パッチが入力画像の全範囲でない場合は、パッチの限られた範囲内では降雨地域の移動が学習できなくなる）。

#### 4.5.4 AIモデルの学習とパラメータチューニング

##### (1) 学習について

学習は、以下の3つのAIモデルに対して行った。

- 20km1h→5km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル
- 5km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル
- 20km3h→5km1h 時空間ダウンスケーリング AI モデル

各AIモデルにおいて、2006年1月～2015年12月分の教師データから、ランダムに抽出した1000000件のデータを用いて学習させた(バッチサイズは100、ステップ回数は10000、エポック数は約2.28である)。また、黒部ダム/奥只見ダムそれぞれについて、学習に要した時間は、NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti 11GBのGPUを1台搭載したPC(CPU: Intel i7-7700 3.6GHz、MEM: 16GB)環境において、表4.5-3～表4.5-4の通りであった。5km1h→1km1h空間ダウンスケーリングAIモデルにおいて、特に学習時間が長いのは、他のモデルに比べて入力データのサイズが16倍、出力データのサイズが25倍となるため、処理に時間を要するためである。

表 4.5-3 黒部ダム：各AIモデルの学習所要時間

モデル	学習所要時間
20km1h→5km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル	18分25秒
5km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル	9時間5分15秒
20km3h→5km1h 時空間ダウンスケーリング AI モデル	28分27秒

表 4.5-4 奥只見ダム：各AIモデルの学習所要時間

モデル	学習所要時間
20km1h→5km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル	42分52秒
5km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル	8時間23分32秒
20km3h→5km1h 時空間ダウンスケーリング AI モデル	40分54秒

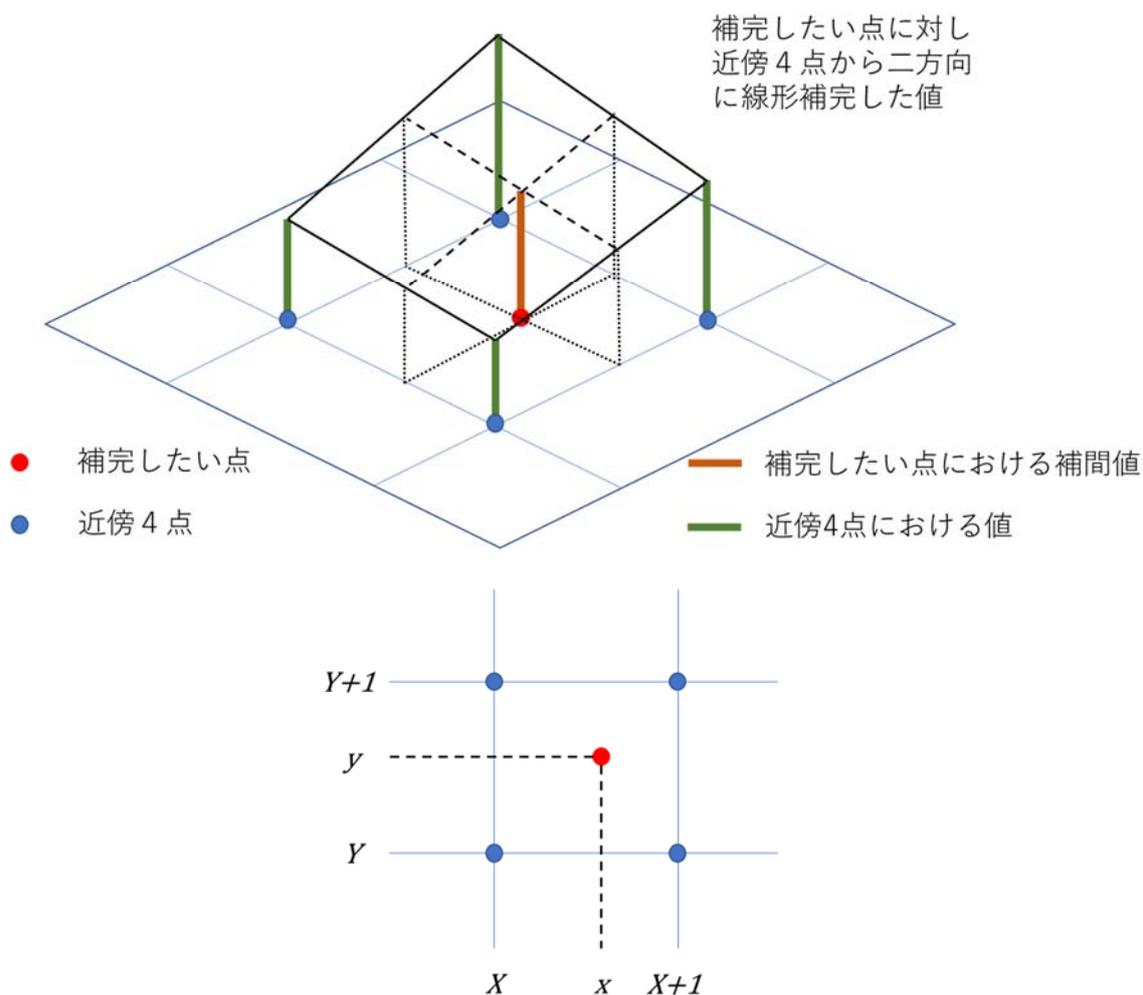
##### (2) 入力データの変換手法の比較

今回開発するAIモデルでは、入力データを高解像度に変換する際に、図4.5-8及び図4.5-10に示すようにSRCNN及びDeepSDで用いられていた双三次補間(BiCubic)ではなく、最近傍補間(Nearest neighbor)に変更している。この点について説明する。

低解像度の画像を高解像度の画像にダウンスケーリングする際、その補間法として、以下の3つの方法が用いられることが多い。

- 双一次補間(BiLinear)
- 双三次補間(BiCubic)
- 最近傍補間(Nearest neighbor)

双一次補間(BiLinear)は、図 4.5-11 に示すように、補間したい点の近傍 4 点の値から縦横二方向に 1 次直線を設定し、補間したい点における 1 次直線の値を補間したい点における補間値とする補間法である(図中の V はその地点における降雨量を表す)。

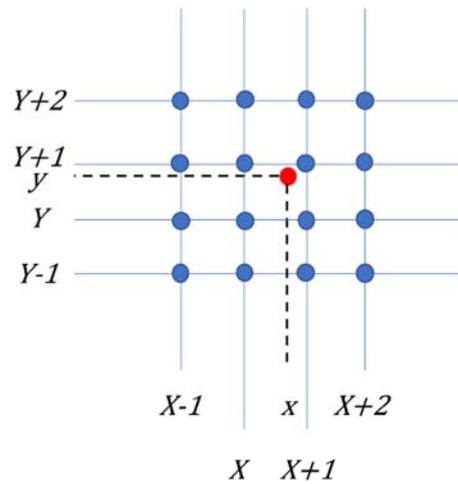
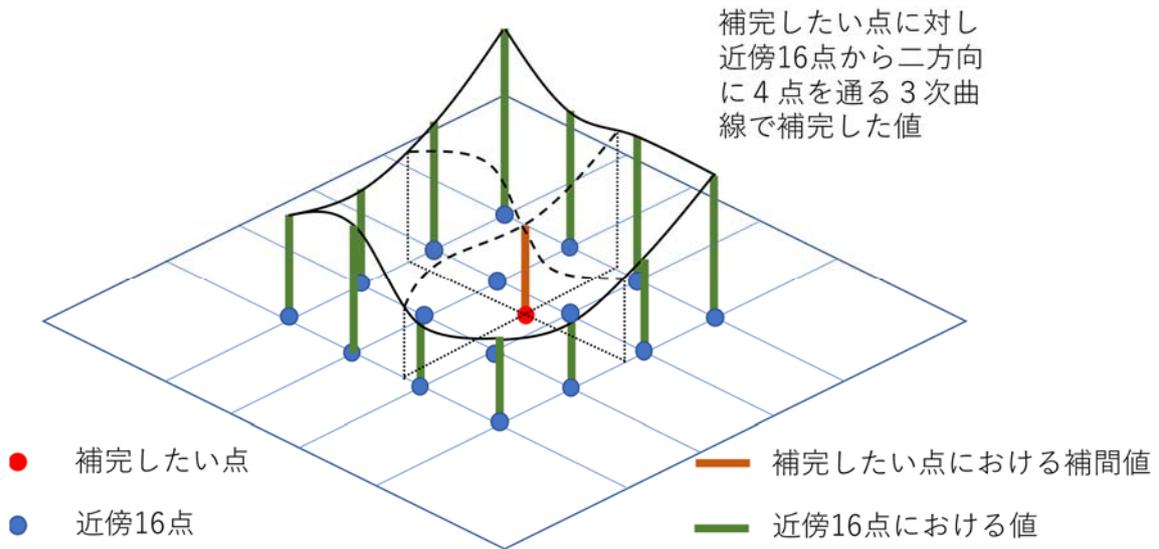


$$V(x, y) = ([y] + 1 - y, y - [y]) \begin{pmatrix} V([x], [y]), & V([x] + 1, [y]) \\ V([x], [y] + 1), & V([x] + 1, [y] + 1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [x] + 1 - x \\ x - [x] \end{pmatrix}$$

([]は小数部切り捨て)

図 4.5-11 双一次補間(BiLinear)の仕組み

双三次補間(BiCubic)は、図 4.5-12 に示すように、補間したい点の近傍 16 点の値から縦横二方向に 3 次曲線を設定し、補間したい点における 3 次曲線の値を補間したい点における補間値とする補間法である(図中の V はその地点における降雨量を表す)。



$$V(x, y) = (h(y1) \ h(y2) \ h(y3) \ h(y4))A(h(x1) \ h(x2) \ h(x3) \ h(x4))$$

$$A = \begin{pmatrix} V(X-1, Y-1) & V(X, Y-1) & V(X+1, Y-1) & V(X+2, Y-1) \\ V(X-1, Y) & V(X, Y) & V(X+1, Y) & V(X+2, Y) \\ V(X-1, Y+1) & V(X, Y+1) & V(X+1, Y+1) & V(X+2, Y+1) \\ V(X-1, Y+2) & V(X, Y+2) & V(X+1, Y+2) & V(X+2, Y+2) \end{pmatrix}$$

$$x1 = 1 + x - [x] \quad x2 = x - [x] \quad x3 = [x] + 1 - x \quad x4 = [x] + 2 - x$$

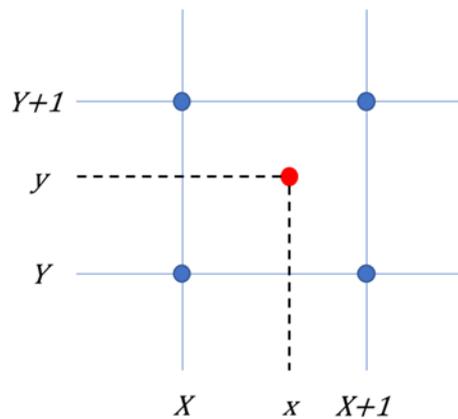
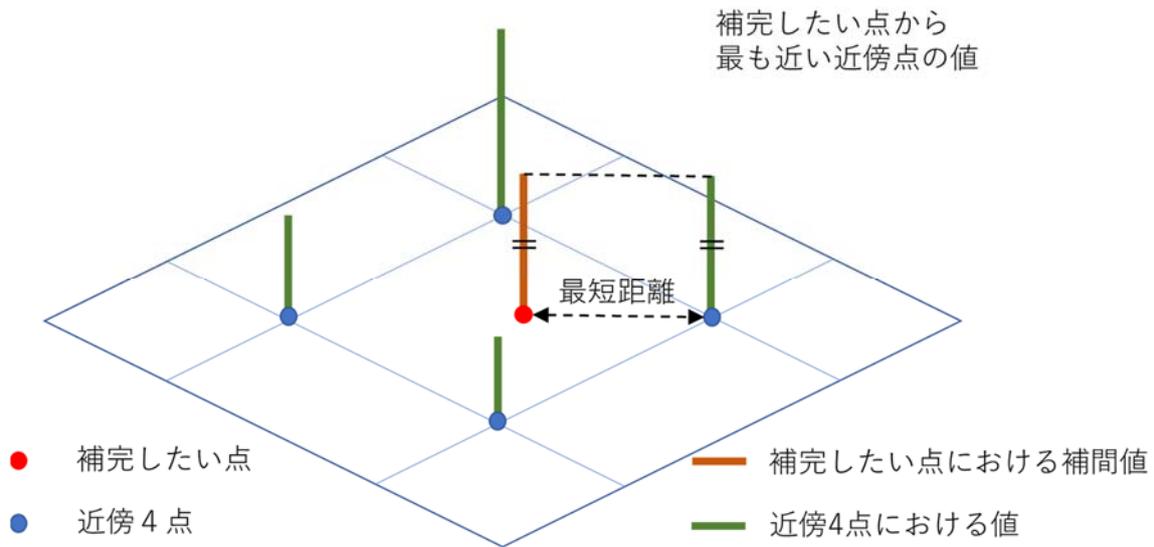
$$y1 = 1 + y - [y] \quad y2 = y - [y] \quad y3 = [y] + 1 - y \quad y4 = [y] + 2 - y$$

([]は小数部切り捨て)

$$h(t) = \begin{cases} (a+2)|t|^3 - (a-3)|t|^2 + 1 & |t| \leq 1 \text{ のとき} \\ a|t|^3 - 5a|t|^2 + 8a|t| - 4a & 1 < |t| \leq 2 \text{ のとき} \\ 0 & 2 < |t| \text{ のとき} \end{cases}$$

図 4.5-12 双三次補間(BiCubic)の仕組み

最近傍補間(Nearest neighbor)は、図 4.5-13 に示すように、補間したい点から最も近い点の値を補間したい点における補間値とする補間法である(図中の V はその地点における降雨量を表す)。



$$V(x, y) = V([x + 0.5], [y + 0.5])$$

([]は小数部切り捨て)

図 4.5-13 最近傍補間(Nearest neighbor)の仕組み

SRCNN、DeepSD 及び今回開発する AI モデルでは、入力の解像度と出力の解像度を合わせるために、入力に対して画像の解像度変更に用いられる一般的な補間法を用いて解像度を出力に合わせた中間データを生成する必要がある。SRCNN 及び DeepSD では、この補間法に双三次補間(BiCubic)を用いているが、入力の変換を上記の一般的な 3 種類の補間法のいずれかとするモデルをそれぞれ用意し、各モデルで学習を行ってダウンスケーリングを試行した後にその結果を評価した。その結果、図 4.5-14～図 4.5-15 及び表 4.5-5～表 4.5-11 に示すように、入力を最近傍補間(Nearest neighbor)で変換した場合において、多くの評価値で他の二種類の補間法より良い結果を示した。このため、入力データの変換は、SRCNN 及び DeepSD で用いられている双三次補間(BiCubic)から最近傍補間(Nearest neighbor)に変更することとした。

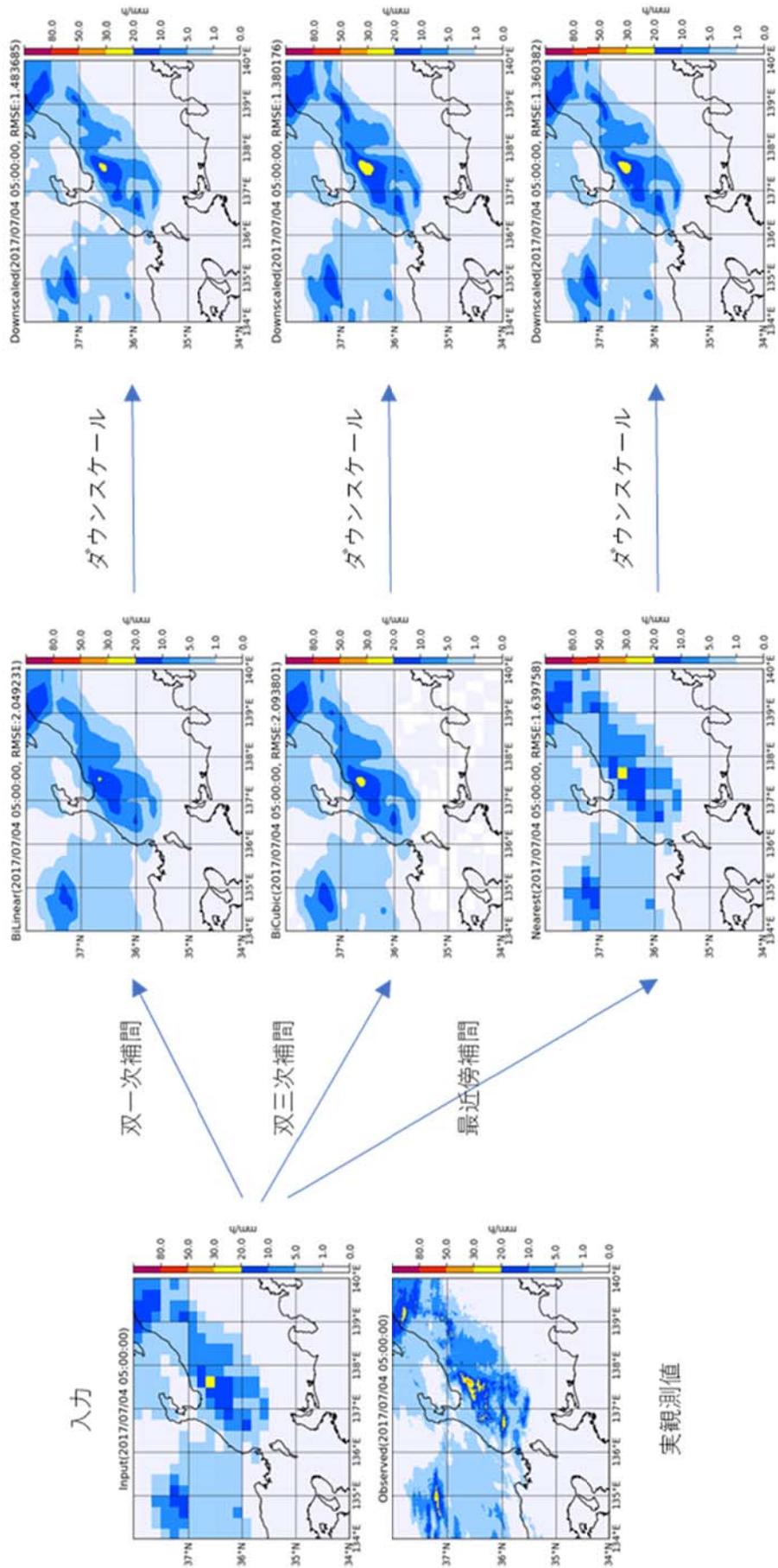


図 4.5-14 入力データ変換手法の違いによるダウンスケーリング結果(全体)の比較例

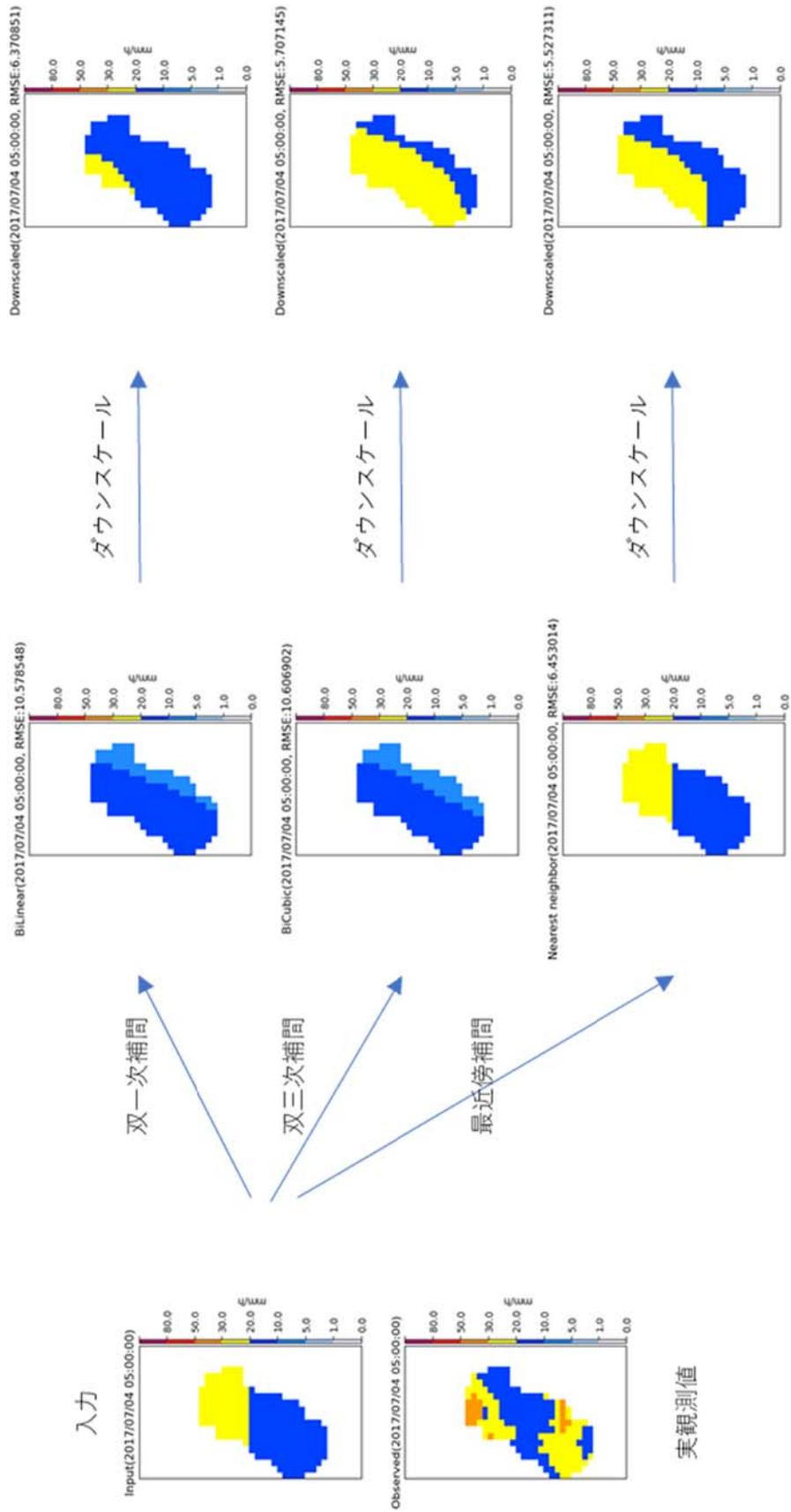


図 4.5-15 入力データの変換手法の違いによるダウンスケール結果(流域)の比較例

表 4.5-5 入力データ変換手法の違いによるメッシュ毎 RMSE の比較例

入力データの変換手法	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
入力データを変換したものによる評価			
双一次補間	2.81mm/h	1.49mm/h	3.37mm/h
双三次補間	2.75mm/h	1.48mm/h	3.37mm/h
最近傍補間	1.92mm/h	1.22mm/h	3.07mm/h
入力データを変換したものをを用いて AI モデルでダウンスケールした結果による評価			
双一次補間	1.88mm/h	1.04mm/h	2.28mm/h
双三次補間	1.74mm/h	1.05mm/h	2.13mm/h
最近傍補間	1.73mm/h	1.01mm/h	2.19mm/h

(小数点第 3 位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-6 入力データ変換手法の違いによる流域全体 RMSE の比較例

入力データの変換手法	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
入力データを変換したものによる評価			
双一次補間	1.88mm/h	0.44mm/h	2.53mm/h
双三次補間	1.82mm/h	0.43mm/h	2.52mm/h
最近傍補間	0.70mm/h	0.10mm/h	2.06mm/h
入力データを変換したものをを用いて AI モデルでダウンスケールした結果による評価			
双一次補間	0.84mm/h	0.21mm/h	1.38mm/h
双三次補間	0.66mm/h	0.24mm/h	1.16mm/h
最近傍補間	0.62mm/h	0.06mm/h	1.22mm/h

(小数点第 3 位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-7 入力データ変換手法の違いによる流域平均降雨量の比較例

入力データの変換手法	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
入力データを変換したものによる評価			
双一次補間	133.03mm (0.70)	184.22mm (0.96)	133.53mm (0.68)
双三次補間	139.31mm (0.73)	186.93mm (0.98)	139.57mm (0.72)
最近傍補間	173.79mm (0.91)	189.63mm (0.99)	175.24mm (0.90)
入力データを変換したものをを用いて AI モデルでダウンスケールした結果による評価			
双一次補間	166.16mm (0.87)	186.38mm (0.97)	164.16mm (0.85)
双三次補間	203.94mm (1.07)	198.69mm (1.04)	191.30mm (0.99)
最近傍補間	186.50mm (0.97)	192.39mm (1.01)	184.56mm (0.96)

(小数点第 3 位以下を四捨五入、括弧内の比率が 1.0 に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-8 入力データ変換手法の違いによる降雨波形の相関値の比較例

入力データの変換手法	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
入力データを変換したものによる評価			
双一次補間	0.9558	0.9937	0.8762
双三次補間	0.9416	0.9932	0.8684
最近傍補間	<b>0.9910</b>	<b>0.9997</b>	<b>0.8946</b>
入力データを変換したものをういて AI モデルでダウンスケールした結果による評価			
双一次補間	<b>0.9870</b>	0.9997	0.9750
双三次補間	0.9856	0.9997	<b>0.9794</b>
最近傍補間	0.9841	<b>0.9998</b>	0.9715

(小数点第 5 位以下を四捨五入、1.0 に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-9 入力データ変換手法の違いによる降雨空間分布の相関値の比較例

入力データの変換手法	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
入力データを変換したものによる評価			
双一次補間	0.9483	0.9754	0.9429
双三次補間	0.9462	0.9755	0.9094
最近傍補間	<b>0.9582</b>	<b>0.9779</b>	<b>0.9431</b>
入力データを変換したものをういて AI モデルでダウンスケールした結果による評価			
双一次補間	0.9656	0.9819	0.9535
双三次補間	0.9676	0.9807	0.9547
最近傍補間	<b>0.9680</b>	<b>0.9819</b>	<b>0.9552</b>

(小数点第 5 位以下を四捨五入、1.0 に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-10 入力データ変換手法の違いによるピーク値の比較例

入力データの変換手法	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
入力データを変換したものによる評価			
双一次補間	11.31mm (44.87%)	18.1mm (11.79%)	11.31mm (33.97%)
双三次補間	11.24mm (45.24%)	18.33mm (10.67%)	11.24mm (34.41%)
最近傍補間	<b>18.07mm (11.92%)</b>	<b>20.12mm (1.96%)</b>	<b>18.07mm (5.50%)</b>
入力データを変換したものをういて AI モデルでダウンスケールした結果による評価			
双一次補間	17.20mm (16.20%)	19.53mm (4.81%)	15.08mm (26.52%)
双三次補間	21.77mm (6.07%)	21.24mm (3.50%)	<b>18.84mm (8.19%)</b>
最近傍補間	<b>20.40mm (0.57%)</b>	<b>20.49mm (0.15%)</b>	17.6mm (14.21%)

(小数点第 3 位以下を四捨五入、括弧内の誤差率が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-11 入力データ変換手法の違いによるピーク時刻差の比較例

入力データの変換手法	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
入力データを変換したものによる評価			
双一次補間	0h	0h	1h
双三次補間	0h	0h	1h
最近傍補間	0h	0h	1h
入力データを変換したものをういて AI モデルでダウンスケールした結果による評価			
双一次補間	0h	0h	0h
双三次補間	0h	0h	0h
最近傍補間	0h	0h	0h

(単位は時間、0に近いほど望ましく赤字が絶対値が最小のもの)

なお、最近傍補間(Nearest neighbor)では、図 4.5-16 に示すように補間対象となる点を含むメッシュが入力変換の補間処理前の入力のメッシュの縦横を自然数で分割したものである場合、補間対象のメッシュは入力変換の補間処理前のメッシュのいずれかに完全に含まれることになり、そのメッシュの中心が補間対象メッシュの中心の最近傍となる。このため、入力の画像と入力を最近傍補間(Nearest neighbor)で変換した画像は、解像度の違いを除いて画像全体の見た目は全く同じになることに注意が必要である。

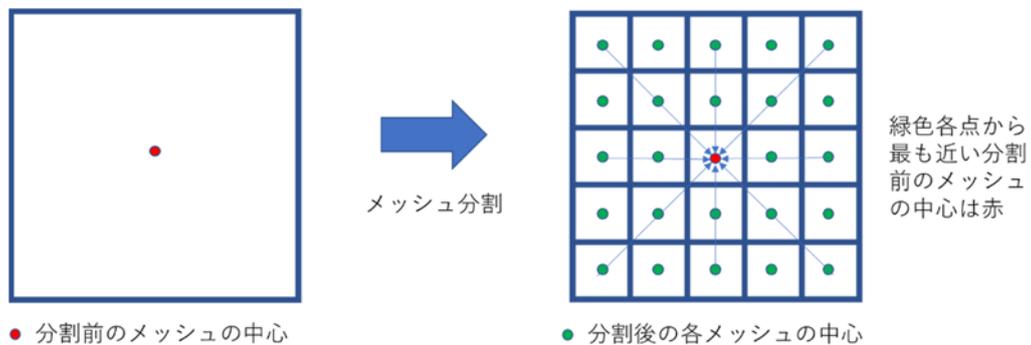


図 4.5-16 入力と入力に最近傍補間(Nearest neighbor)を適用した結果の関係

## 4.5.5 AI モデルの精度評価

### (1) 評価方法

AI モデルの精度評価は、検証データ期間における、各ダム流域の累加雨量の上位 10 件（4.5.5 の(3)で述べる）の降雨期間それぞれに対して行った。累加降雨とは、降り始めからの雨量を累計した（足し合わせた）雨量であり、6 時間連続して無降雨を観測した場合にリセットされる値である。但し、各ダム流域共に山間部であることから、大半の期間で少量の降雨があることから降雨期間が極端に長くなってしまう。このため、流域における降水量が 1mm/h 未満である場合は無降雨として扱うこととした。

AI 手法を用いたダウンスケーリングは、

- 20km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング  
以下の AI モデルを組み合わせることで行う
  - 20km1h→5km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル
  - 5km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル
- 5km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング  
以下の AI モデルを用いて行う
  - 5km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル
- 20km3h→1km1h 時空間ダウンスケーリング  
以下の AI モデルを組み合わせることで行う
  - 20km3h→5km1h 時空間ダウンスケーリング AI モデル
  - 5km1h→1km1h 空間ダウンスケーリング AI モデル

の 3 つで行っている。そこで、黒部ダム周辺に最も降雨が発生している時間を対象とし、AI 手法を用いたダウンスケーリングの結果及び比較対象として超解像における一般的な補間手法を用いたダウンスケーリングの結果を上記降雨期間毎に示す。さらに、20km3h→1km1h 時空間ダウンスケーリングにおいて、時間方向ダウンスケーリングの結果を検証するため、入力データが存在する基準時刻及び基準時刻+180 分の 2 つの時点における AI 手法を用いた時空間ダウンスケーリング結果を用いて、時間方向に双一次補間(BiLinear)を用いてダウンスケーリングした結果との比較を上記降雨期間毎に示す。

4.5.5 の(4)及び(5)における図の降雨分布図の並びは、以下の通りである。

- 空間ダウンスケーリングの場合
  - 縦方向：(データ、手法)
    - AI 手法を用いたダウンスケーリングにおける入力データ（空間ダウンスケーリング前）
    - 正解データ（観測された 1km メッシュの降雨データ）

- AI手法を用いた空間ダウンスケーリングにおける結果データ（空間ダウンスケーリング後）
  - 双一次補間(BiLinear)を用いた空間ダウンスケーリング結果データ
  - 双三次補間(BiCubic)を用いた空間ダウンスケーリング結果データ
  - 最近傍補間(Nearest neighbor)を用いた空間ダウンスケーリング結果データ
  - 横方向：無し
- 時空間ダウンスケーリングの場合
- 縦方向：(データ、手法)
    - AI手法を用いたダウンスケーリングにおける入力データ（時空間ダウンスケーリング前）
    - 正解データ（観測された1kmメッシュの降雨データ）
    - AI手法を用いた時空間ダウンスケーリングにおける結果データ（時空間ダウンスケーリング後）
    - AI手法を用いた時空間ダウンスケーリングにおける結果データのうち、基準時刻と基準時刻から180分後の結果から、双一次補間(BiLinear)を用いて時間ダウンスケーリングを行った場合の基準時刻から60分後と基準時刻から120分後のデータ
  - 横方向：(時間：20km3h→1km1h 時空間ダウンスケーリングのみ)
    - 基準時刻
    - 基準時刻から60分後のデータ
    - 基準時刻から120分後のデータ
    - 基準時刻から180分後のデータ

4.5.5の(4)及び(5)における表で示す評価指標は、以下の通りである(各評価指標の詳細については、4.5.5の(2)で述べる)。

- ダウンスケーリング対象範囲における評価
  - メッシュ毎二乗平均平方根誤差(RMSE)の平均値
  - メッシュ毎ピーク S/N 比(PSNR)の平均値
- ダム流域に限定した範囲における評価
  - メッシュ毎二乗平均平方根誤差(RMSE)の平均値
  - 流域全体二乗平均平方根誤差(RMSE)の平均値
  - 流域総雨量及びその比率
  - 降雨波形の相関値
  - 降雨空間分布の相関値
  - 降雨量ピーク値及びその誤差率
  - 降雨量ピークの時刻差

## (2) 評価指標

評価指標の詳細について、それぞれ以下に述べる。

なお、 $X(\text{lat}, \text{lon})$ は緯度  $\text{lat}$ ・経度  $\text{lon}$  における 1km メッシュのダウンスケール前(入力)／ダウンスケール後 (AI によるダウンスケーリング結果) ／双一次補間(BiLinear)／双三次補間(BiCubic)／最近傍補間(Nearest neighbor)のいずれかの 1 時間あたり降雨量、 $O(\text{lat}, \text{lon})$ は緯度  $\text{lat}$ ・経度  $\text{lon}$  における 1km メッシュの実観測値の 1 時間あたり降雨量を表すものとし、緯度  $\text{lat}$ ・経度  $\text{lon}$  が同じ場合はメッシュの位置は同じであることを意味する。

また、 $X(\text{流域平均降雨量})$ はダウンスケール前(入力)／ダウンスケール後 (AI によるダウンスケーリング結果) ／双一次補間(BiLinear)／双三次補間(BiCubic)／最近傍補間(Nearest neighbor)のいずれかの流域平均降雨量、 $O(\text{流域平均降雨量})$ は実観測値の 1 時間あたり流域平均降雨量を表すものとし、流域平均降雨量は流域に含まれる 1km メッシュの降雨量の平均値である (メッシュの一部しか流域に含まれない場合は、流域に含まれる面積の 1km メッシュ全体に占める割合を乗じている)。

- メッシュ毎二乗平均平方根誤差 (RMSE) の平均値

メッシュ毎二乗平均平方根誤差 (RMSE) の平均値は、以下の式で計算される値で、単位は mm/h である。

$$\frac{1}{\text{降雨期間各時点の個数}} \sum_{\text{降雨期間各時点}} \sqrt{\frac{1}{\text{総メッシュ数}} \sum_{\text{各メッシュ}} (X(\text{lat}, \text{lon}) - O(\text{lat}, \text{lon}))^2}$$

値が小さいほど誤差が小さく望ましい。

- 流域全体二乗平均平方根誤差 (RMSE) の平均値

流域全体二乗平均平方根誤差 (RMSE) の平均値は、以下の式で計算される値で、単位は mm/h である。

$$\frac{1}{\text{降雨期間各時点の個数}} \sum_{\text{降雨期間各時点}} \sqrt{(X(\text{流域平均降雨量}) - O(\text{流域平均降雨量}))^2}$$

値が小さいほど誤差が小さく望ましい。

- メッシュ毎ピーク S/N 比 (以下、PSNR) の平均値

メッシュ毎ピーク S/N 比 (以下、PSNR) の平均値は、以下の式で計算される値で、単位は dB である。式中のピーク値 (170) は雨量の最大値を示し、対象範囲 (図 4.5-2、図 4.5-3) における解析雨量データ (2006~2020 年) の最大の雨量が 170mm/h 前後であったことによる。

$$\frac{1}{\text{降雨期間各時点の個数}} \sum_{\text{降雨期間各時点}} 10 \log_{10} \left( \frac{\text{ピーク値}(170)^2}{\frac{1}{\text{総メッシュ数}} \sum_{\text{各メッシュ}} (X(\text{lat}, \text{lon}) - O(\text{lat}, \text{lon}))^2} \right)$$

値が大きいほど異常値が少なく望ましい。

- 流域総雨量及びその比率

流域総雨量は、ダウンスケール前(入力)／ダウンスケール後 (AIによるダウンスケーリング結果) ／双一次補間(BiLinear)／双三次補間(BiCubic)／最近傍補間(Nearest neighbor)のいずれかの降雨期間における各時刻(毎時)の流域平均降雨量の合計値である。流域平均降雨量は流域に含まれる1kmメッシュの降雨量の平均値である(メッシュの一部しか流域に含まれない場合は、流域に含まれる面積の1kmメッシュ全体に占める割合を乗じている)。

また、その比率は実観測値の流域総雨量と比較した際の実観測値の流域総雨量に対する比率(同値であれば1.0)を表している。

比率の値が1.0に近いほど望ましい。

- 降雨波形の相関値

降雨波形の相関値は、以下の式で計算される値で、無単位である。

$$\frac{1}{\text{総メッシュ数}} \sum_{\text{各メッシュ}} \left( \frac{\sum_{\text{降雨期間各時点}} (X(\text{lat}, \text{lon}) - \bar{X})(O(\text{lat}, \text{lon}) - \bar{O})}{\sqrt{(\sum_{\text{降雨期間各時点}} (X(\text{lat}, \text{lon}) - \bar{X})^2) (\sum_{\text{降雨期間各時点}} (O(\text{lat}, \text{lon}) - \bar{O})^2)}} \right)$$

$\bar{X}$ 及び $\bar{O}$ は各メッシュの時間平均降雨量

値は、-1.0~1.0の範囲となり、1.0に近いほど強い正の相関があることを表し、-1.0に近いほど強い負の相関があることを表す。一方、0.0に近い場合はほとんど相関が無いことを表す。値が1.0に近いほど望ましい。

- 降雨空間分布の相関値

降雨空間分布の相関値は、以下の式で計算される値で、無単位である。

$$\frac{1}{\text{降雨期間各時点の個数}} \sum_{\text{降雨期間各時点}} \left( \frac{\sum_{\text{各メッシュ}} (X(\text{lat}, \text{lon}) - \bar{X})(O(\text{lat}, \text{lon}) - \bar{O})}{\sqrt{(\sum_{\text{各メッシュ}} (X(\text{lat}, \text{lon}) - \bar{X})^2) (\sum_{\text{各メッシュ}} (O(\text{lat}, \text{lon}) - \bar{O})^2)}} \right)$$

$\bar{X}$ 及び $\bar{O}$ は各時点の空間平均降雨量

値は、-1.0~1.0の範囲となり、1.0に近いほど強い正の相関があることを表し、-1.0に近いほど強い負の相関があることを表す。一方、0.0に近い場合はほとんど相関が無いことを表す。値が1.0に近いほど望ましい。

- 降雨量ピーク値及びその誤差率

降雨量ピーク値は、ダウンスケール前(入力)／ダウンスケール後 (AIによるダウンスケーリング結果) ／双一次補間(BiLinear)／双三次補間(BiCubic)／最近傍補間(Nearest neighbor)のいずれかの降雨期間における各時刻(毎時)の流域平均降雨量のうち、最大(ピーク)の値で、単位はmm/hである。

また、その誤差率は実観測値の降雨量ピーク値と比較した際の誤差の絶対値の実観測値の降雨量ピーク値に対する割合(%)を表している。

誤差率の値が0.0に近いほど望ましい。

- 降雨量ピークの時刻差

降雨量ピークの時刻差は、ダウンスケール前(入力)／ダウンスケール後 (AI によるダウンスケーリング結果) ／双一次補間(BiLinear)／双三次補間(BiCubic)／最近傍補間(Nearest neighbor)のいずれかの上記降雨量ピーク値となる時刻と実観測値の上記降雨量ピーク値時刻の差で、単位はhである。

値が0に近いほど望ましい。

### (3) 評価対象

黒部ダム流域の2016年1月～2020年9月における累加雨量の上位10件の降雨期間は、表4.5-12の通りである。

表 4.5-12 2016年1月～2020年9月における黒部ダム流域の累加雨量上位3件

	降雨開始時間	降雨終了時間	ダム流域平均累加雨量
降雨①	2020/07/06 04:00	2020/07/08 12:00	223.30mm
降雨②	2018/07/04 15:00	2018/07/06 01:00	204.51mm
降雨③	2017/07/03 19:00	2017/07/05 05:00	179.68mm
降雨④	2017/08/07 21:00	2017/08/09 03:00	179.25mm
降雨⑤	2017/06/30 14:00	2017/07/02 07:00	161.16mm
降雨⑥	2016/09/17 14:00	2016/09/19 10:00	149.34mm
降雨⑦	2020/07/27 10:00	2020/07/28 23:00	131.68mm
降雨⑧	2020/07/24 20:00	2020/07/26 20:00	114.77mm
降雨⑨	2018/08/30 21:00	2018/09/01 15:00	110.98mm
降雨⑩	2018/07/06 08:00	2018/07/08 06:00	108.34mm

奥只見ダム流域の2016年1月～2020年9月における累加雨量の上位10件の降雨期間は、表4.5-13の通りである。

表 4.5-13 2016年1月～2020年9月における奥只見ダム流域の累加雨量上位3件

	降雨開始時間	降雨終了時間	ダム流域平均累加雨量
降雨①	2019/10/12 01:00	2019/10/13 11:00	166.75mm
降雨②	2017/01/10 16:00	2017/01/15 04:00	156.11mm
降雨③	2017/10/29 03:00	2017/10/31 01:00	101.54mm
降雨④	2017/06/30 17:00	2017/07/02 18:00	97.41mm
降雨⑤	2018/08/28 06:00	2018/08/29 03:00	77.51mm
降雨⑥	2017/07/18 03:00	2017/07/18 16:00	72.39mm
降雨⑦	2017/07/03 20:00	2017/07/04 14:00	71.93mm
降雨⑧	2019/06/16 01:00	2019/06/17 04:00	71.08mm
降雨⑨	2020/07/28 11:00	2020/07/29 08:00	66.68mm
降雨⑩	2016/04/28 03:00	2016/04/29 23:00	65.76mm

それぞれのダム流域で、これらの各降雨期間において評価を行う。

#### (4) 黒部ダム流域における評価

黒部ダム流域において、1km メッシュ単位の降雨量の数値をダウンスケール前のメッシュサイズに合わせて平均化した値を入力とし、元の 1km メッシュ単位の降雨量の数値を正解データとした場合のダウンスケーリング結果について評価を行う。

参考として、同じ入力に対して AI を用いないで行う一般的なダウンスケーリング（補間法）である双一次補間・双三次補間・最近傍補間で元の 1km メッシュ単位の降雨量に補間した場合の評価も併せて示す。

なお、4.5.5 の(2)で説明したように、各図の降雨分布図と各表の評価値において、入力と参考の最近傍補間では全く同じ結果となるため、留意する必要がある。

表 4.5-12 に挙げた対象降雨のうち上位 3 件の評価結果を次ページ以降に示す。

1) 黒部ダム：降雨①のダウンスケーリング結果と評価

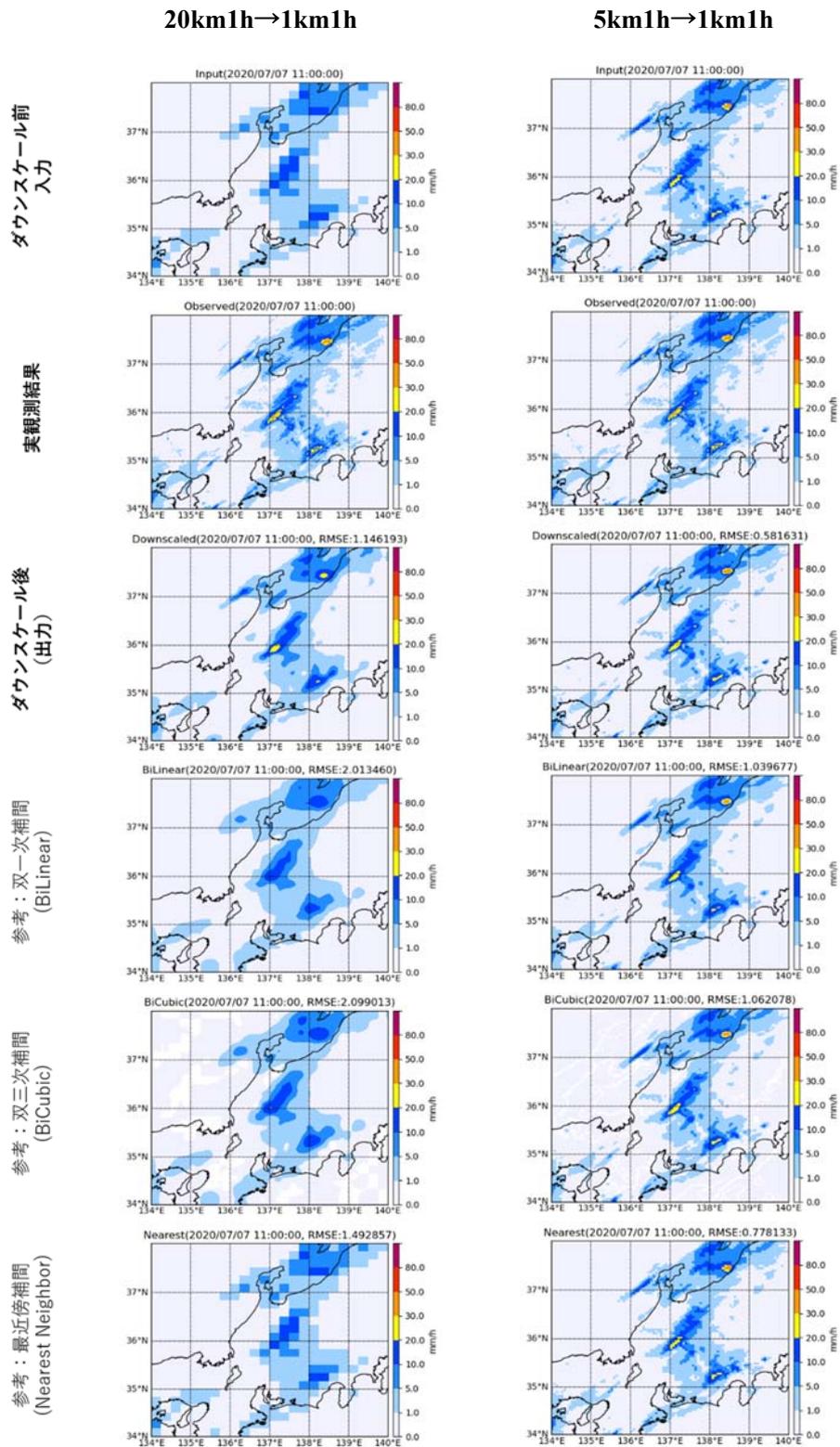
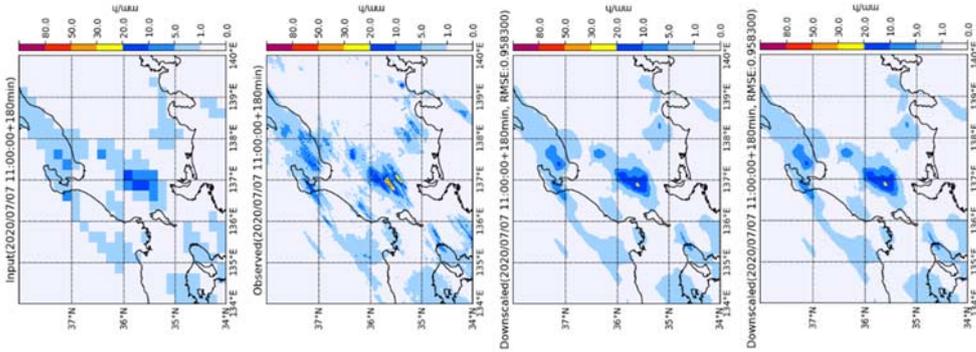
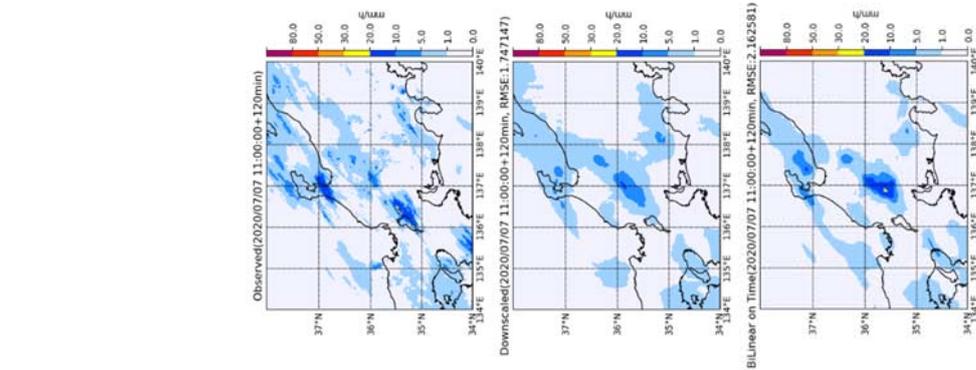


図 4.5-17 黒部ダム：空間ダウンスケーリング(全体)結果及び比較の一例①

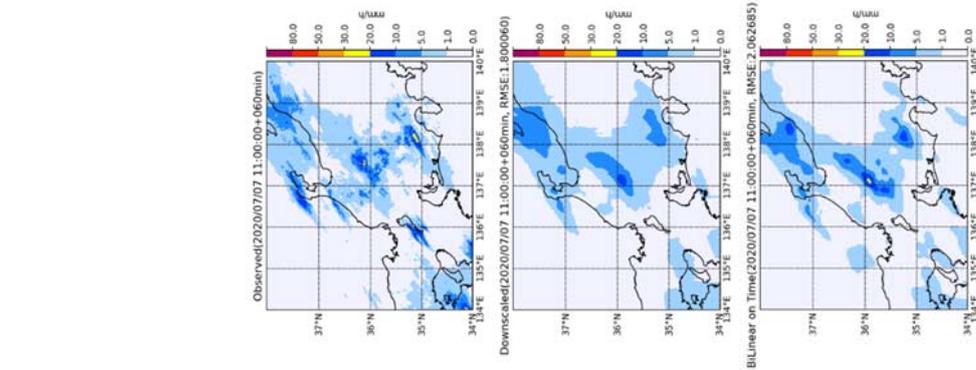
基準時刻の 3 時間後



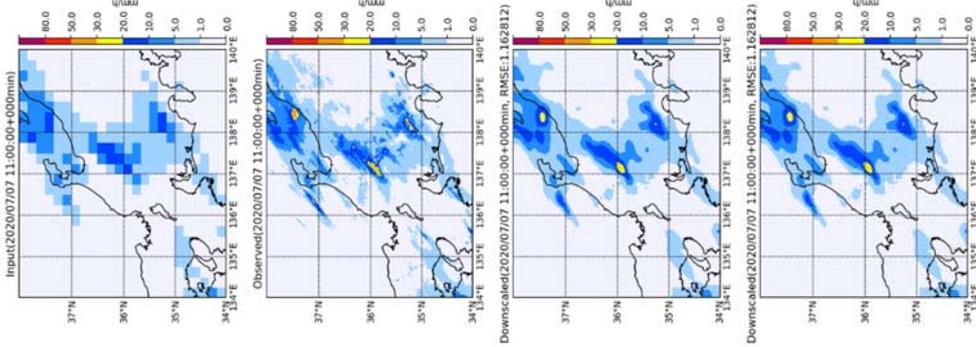
基準時刻の 2 時間後



基準時刻の 1 時間後



基準時刻



ダウンスケール前  
(入力)

観測結果

ダウンスケール後  
(出力)

BiLinear  
双一次補間

図 4.5-18 黒部ダム：時間間ダウンスケールリング(全体)結果及び比較の一例①

表 4.5-14 黒部ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 RMSE の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	1.45mm/h	0.74mm/h	2.45mm/h
ダウンスケール後	1.06mm/h	0.55mm/h	1.72mm/h
参考：双一次補間	1.99mm/h	1.00mm/h	2.67mm/h
参考：双三次補間	2.07mm/h	1.03mm/h	2.77mm/h
参考：最近傍補間	1.45mm/h	0.74mm/h	2.45mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-15 黒部ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 PSNR の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	41.68dB	47.53dB	38.10dB
ダウンスケール後	44.39dB	50.10dB	41.07dB
参考：双一次補間	39.07dB	44.87dB	36.91dB
参考：双三次補間	38.72dB	44.65dB	36.58dB
参考：最近傍補間	41.68dB	47.53dB	38.10dB

(小数点第3位以下を四捨五入、値が大きいほど望ましく赤字が最大値)

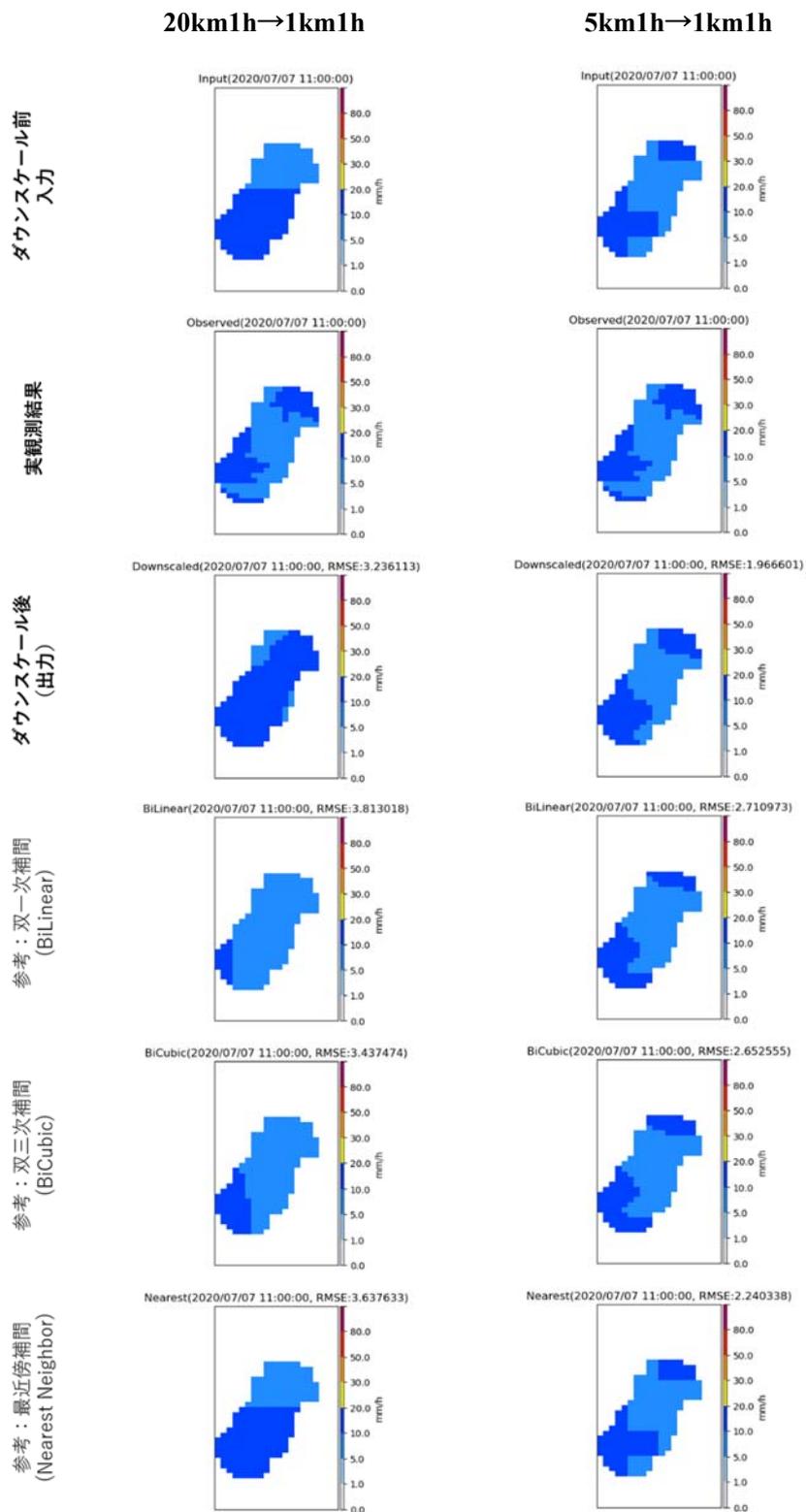


図 4.5-19 黒部ダム：空間ダウンスケーリング(流域)結果及び比較の一例①

基準時刻の 3 時間後

基準時刻の 2 時間後

基準時刻の 1 時間後

基準時刻

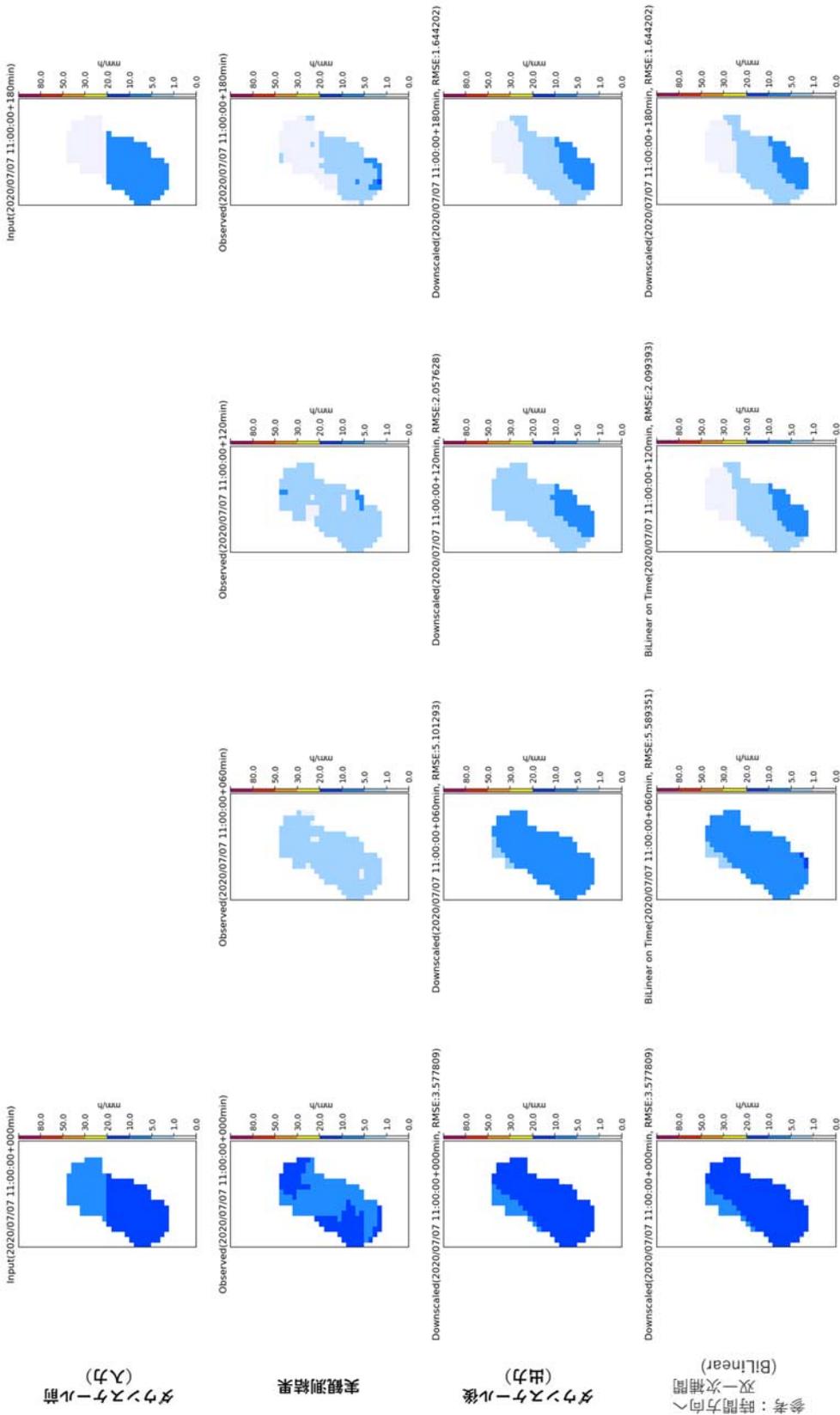


図 4.5-20 黒部ダム：時間空間ダウンスケールリング (流域) 結果及び比較の一例①

表 4.5-16 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のメッシュ毎 RMSE の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	1.86mm/h	1.01mm/h	2.71mm/h
ダウンスケール後	1.83mm/h	0.81mm/h	2.20mm/h
参考：双一次補間	2.02mm/h	1.28mm/h	2.64mm/h
参考：双三次補間	2.12mm/h	1.30mm/h	2.77mm/h
参考：最近傍補間	1.86mm/h	1.01mm/h	2.71mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-17 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域全体 RMSE の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.85mm/h	0.08mm/h	1.84mm/h
ダウンスケール後	1.01mm/h	0.04mm/h	1.44mm/h
参考：双一次補間	1.07mm/h	0.40mm/h	1.86mm/h
参考：双三次補間	1.15mm/h	0.38mm/h	1.98mm/h
参考：最近傍補間	0.85mm/h	0.08mm/h	1.84mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-18 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域平均降雨量の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	279.71mm (1.17)	242.38mm (1.01)	280.63mm (1.14)
ダウンスケール後	297.52mm (1.25)	238.50mm (1.00)	289.75mm (1.21)
参考：双一次補間	240.87mm (1.01)	248.48mm (1.04)	241.28mm (0.98)
参考：双三次補間	256.85mm (1.08)	246.19mm (1.03)	257.15mm (1.04)
参考：最近傍補間	279.71mm (1.17)	242.38mm (1.01)	280.63mm (1.14)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の比率が1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-19 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨波形の相関値の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9519	0.9992	0.7584
ダウンスケール後	0.9529	0.9997	0.9110
参考：双一次補間	0.8512	0.9847	0.7170
参考：双三次補間	0.8200	0.9851	0.6778
参考：最近傍補間	0.9519	0.9992	0.7584

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-20 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨空間分布の相関値の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9662	0.9846	0.9579
ダウンスケール後	0.9722	0.9896	0.9633
参考：双一次補間	0.9636	0.9792	0.9595
参考：双三次補間	0.9642	0.9778	0.9393
参考：最近傍補間	0.9662	0.9846	0.9579

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-21 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク値の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	12.52mm (3.25%)	12.39mm (2.20%)	12.52mm (18.46%)
ダウンスケール後	14.23mm (17.37%)	11.95mm (1.47%)	12.34mm (1.80%)
参考：双一次補間	13.51mm (11.40%)	12.14mm (0.14%)	13.51mm (27.80%)
参考：双三次補間	13.76mm (13.49%)	12.2mm (0.64%)	13.76mm (30.20%)
参考：最近傍補間	12.52mm (3.25%)	12.39mm (2.20%)	12.52mm (18.46%)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の誤差率が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-22 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク時刻差の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0h	0h	-2h
ダウンスケール後	0h	0h	0h
参考：双一次補間	3h	3h	1h
参考：双三次補間	3h	3h	1h
参考：最近傍補間	0h	0h	-2h

(単位は時間、0に近いほど望ましく赤字が絶対値が最小のもの)

2) 黒部ダム：降雨②のダウンスケーリング結果と評価

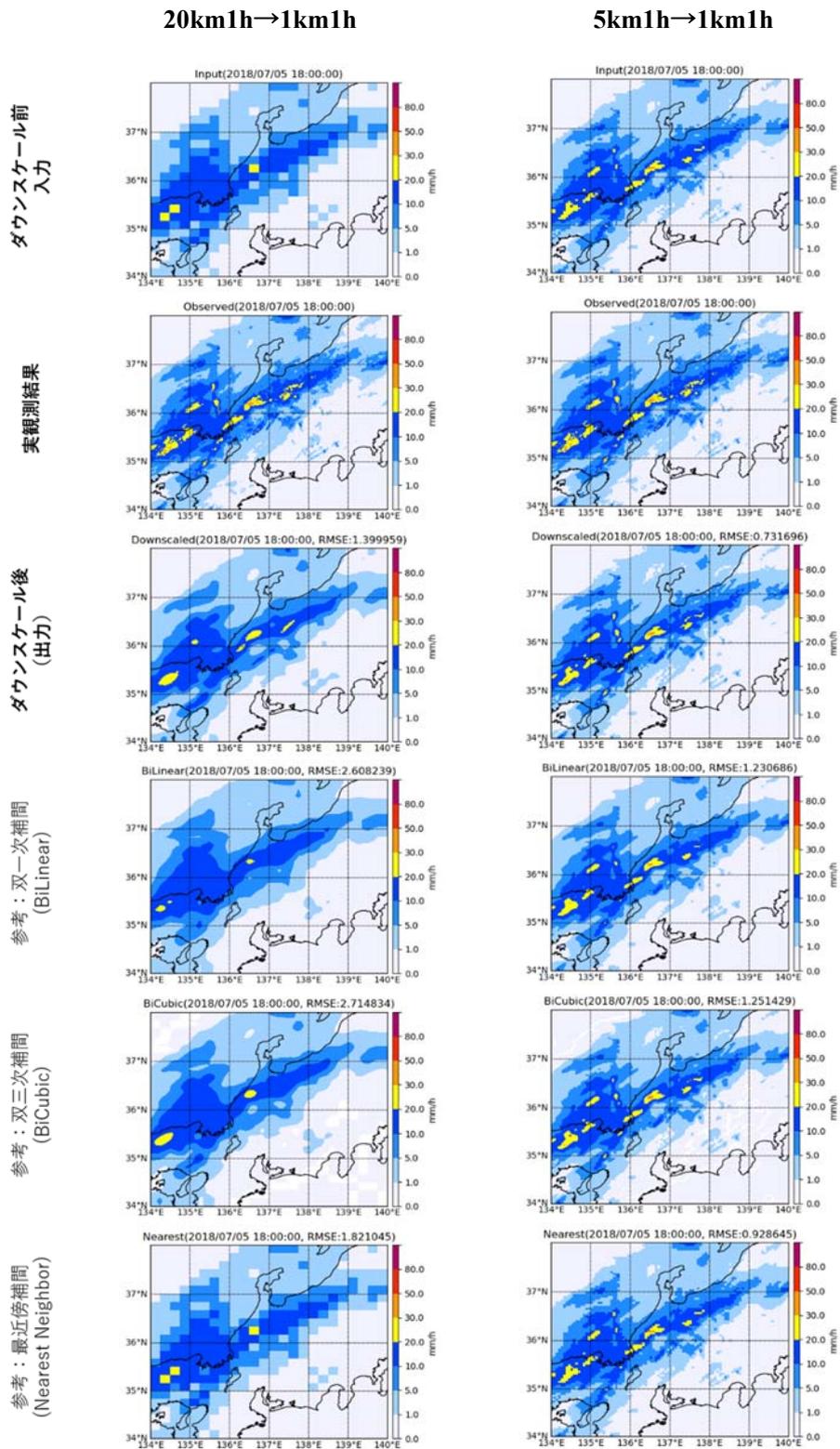


図 4.5-21 黒部ダム：空間ダウンスケーリング(全体)結果及び比較の一例②

基準時刻の 3 時間後

基準時刻の 2 時間後

基準時刻の 1 時間後

基準時刻

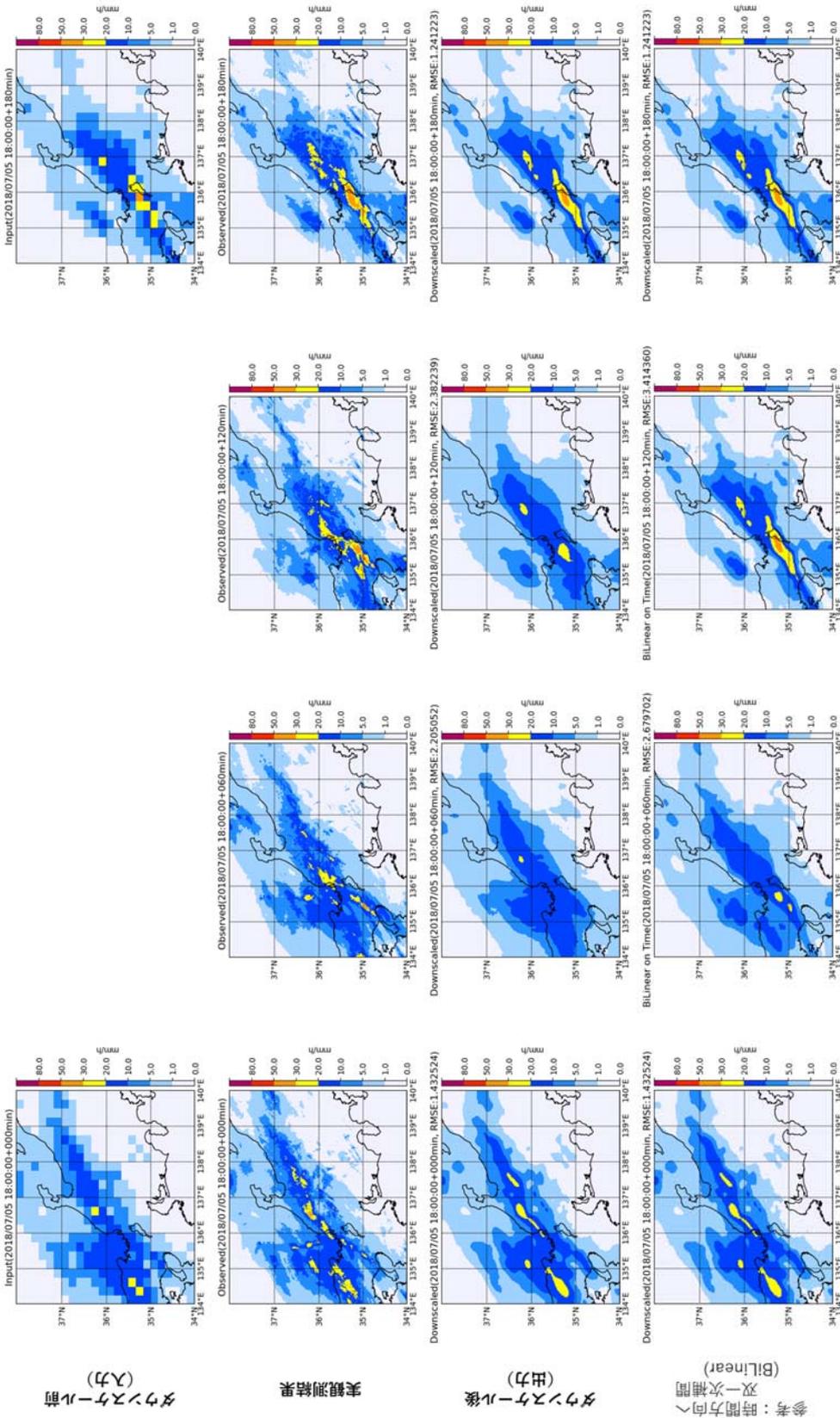


図 4.5-22 黒部ダム：時空間ダウンスケールリング(全体)結果及び比較の一例②

表 4.5-23 黒部ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 RMSE の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	1.78mm/h	0.88mm/h	2.68mm/h
ダウンスケール後	1.29mm/h	0.63mm/h	1.89mm/h
参考：双一次補間	2.43mm/h	1.23mm/h	2.92mm/h
参考：双三次補間	2.54mm/h	1.26mm/h	3.05mm/h
参考：最近傍補間	1.78mm/h	0.88mm/h	2.68mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-24 黒部ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 PSNR の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	39.74dB	45.83dB	36.76dB
ダウンスケール後	42.55dB	48.72dB	39.57dB
参考：双一次補間	37.06dB	42.93dB	35.59dB
参考：双三次補間	36.69dB	42.70dB	35.22dB
参考：最近傍補間	39.74dB	45.83dB	36.76dB

(小数点第3位以下を四捨五入、値が大きいほど望ましく赤字が最大値)

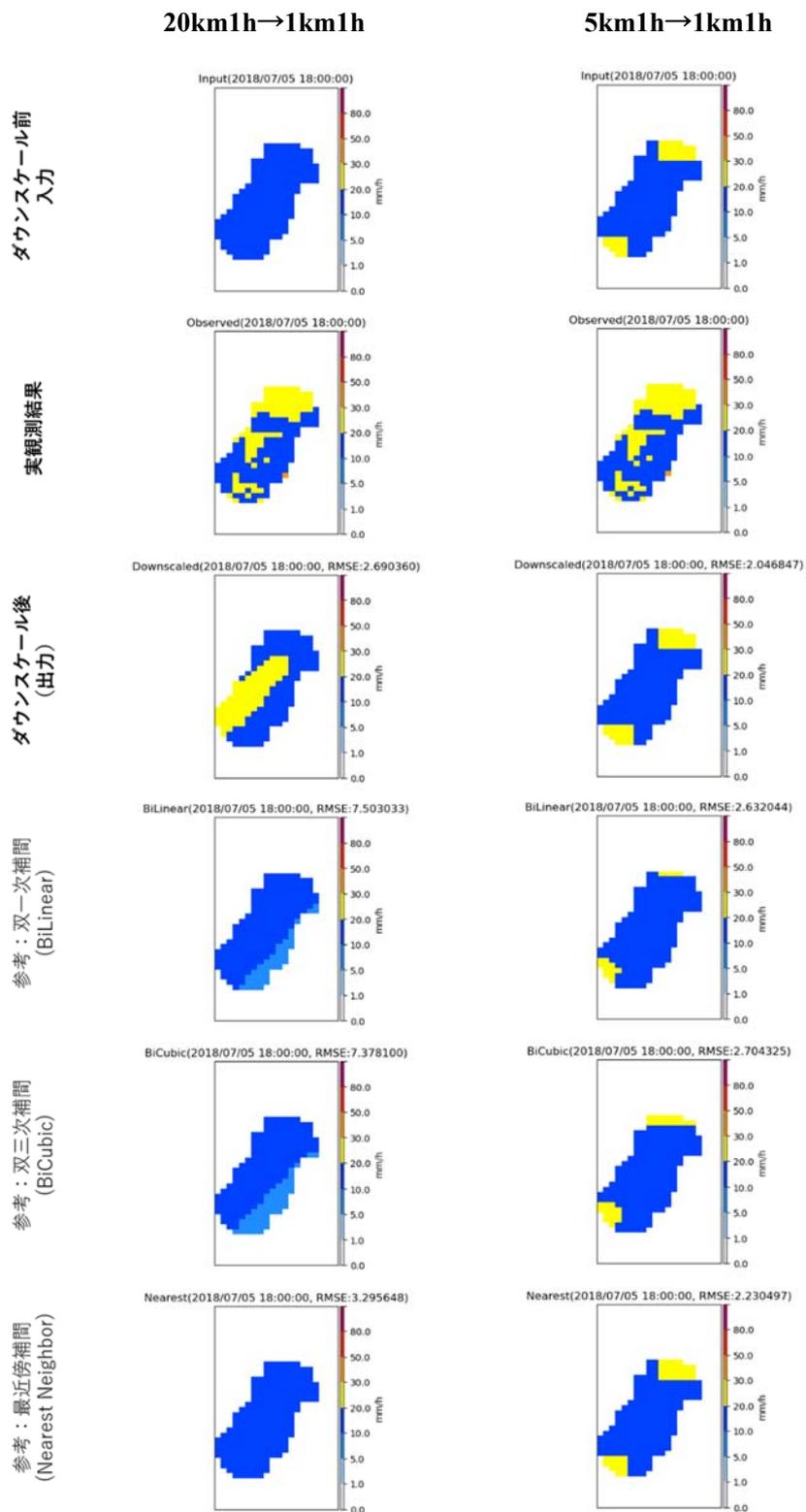


図 4.5-23 黒部ダム：空間ダウンスケーリング(流域)結果及び比較の一例②

基準時刻の3時間後

基準時刻の2時間後

基準時刻の1時間後

基準時刻

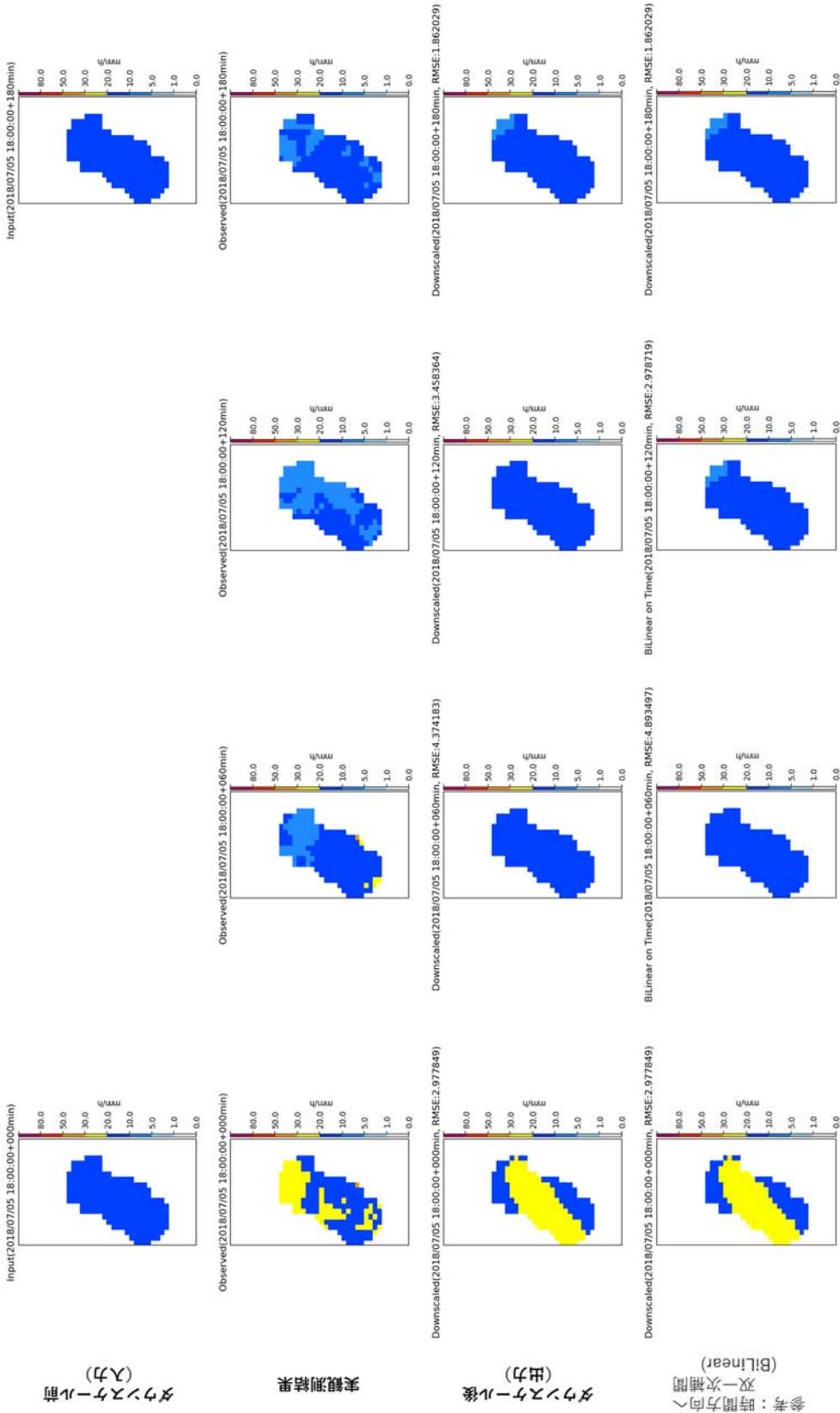


図 4.5-24 黒部ダム：時間空間ダウンスケージング(流域)結果及び比較の一例②

表 4.5-25 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のメッシュ毎 RMSE の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	2.64mm/h	1.48mm/h	4.13mm/h
ダウンスケール後	2.13mm/h	1.18mm/h	2.79mm/h
参考：双一次補間	3.42mm/h	1.85mm/h	3.98mm/h
参考：双三次補間	3.65mm/h	1.91mm/h	4.17mm/h
参考：最近傍補間	2.64mm/h	1.48mm/h	4.13mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-26 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域全体 RMSE の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	1.12mm/h	0.11mm/h	2.70mm/h
ダウンスケール後	0.90mm/h	0.07mm/h	1.61mm/h
参考：双一次補間	2.38mm/h	0.78mm/h	2.89mm/h
参考：双三次補間	2.64mm/h	0.80mm/h	3.09mm/h
参考：最近傍補間	1.12mm/h	0.11mm/h	2.70mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-27 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域平均降雨量の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	238.85mm (1.09)	222.11mm (1.02)	239.28mm (1.06)
ダウンスケール後	244.63mm (1.12)	218.26mm (1.00)	249.61mm (1.14)
参考：双一次補間	184.35mm (0.84)	219.96mm (1.01)	185.17mm (0.82)
参考：双三次補間	186.27mm (0.85)	218.37mm (1.00)	186.88mm (0.83)
参考：最近傍補間	238.85mm (1.09)	222.11mm (1.02)	239.28mm (1.06)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の比率が1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-28 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨波形の相関値の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9607	0.9996	0.7848
ダウンスケール後	0.9773	0.9998	0.9636
参考：双一次補間	0.7989	0.9776	0.7818
参考：双三次補間	0.7309	0.9760	0.7243
参考：最近傍補間	0.9607	0.9996	0.7848

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-29 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨空間分布の相関値の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9280	0.9676	0.9129
ダウンスケール後	<b>0.9473</b>	<b>0.9810</b>	0.9110
参考：双一次補間	0.9273	0.9647	<b>0.9144</b>
参考：双三次補間	0.9221	0.9647	0.8984
参考：最近傍補間	0.9280	0.9676	0.9129

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-30 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク値の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	17.34mm/h (6.94%)	<b>18.61mm/h (0.16%)</b>	17.34mm/h (14.66%)
ダウンスケール後	<b>19.75mm/h (5.96%)</b>	18.74mm/h (0.53%)	<b>18.46mm/h (0.95%)</b>
参考：双一次補間	12.77mm/h (31.49%)	17.54mm/h (5.88%)	12.77mm/h (15.59%)
参考：双三次補間	14.68mm/h (21.20%)	17.68mm/h (5.14%)	14.68mm/h (2.92%)
参考：最近傍補間	17.34mm/h (6.94%)	<b>18.61mm/h (0.16%)</b>	17.34mm/h (14.66%)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の誤差率が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-31 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク時刻差の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	-1h	<b>0h</b>	-1h
ダウンスケール後	<b>0h</b>	<b>0h</b>	<b>0h</b>
参考：双一次補間	-22h	<b>0h</b>	-22h
参考：双三次補間	-22h	<b>0h</b>	-22h
参考：最近傍補間	-1h	<b>0h</b>	-1h

(単位は時間、0に近いほど望ましく赤字が絶対値が最小のもの)

3) 黒部ダム：降雨③のダウンスケーリング結果と評価

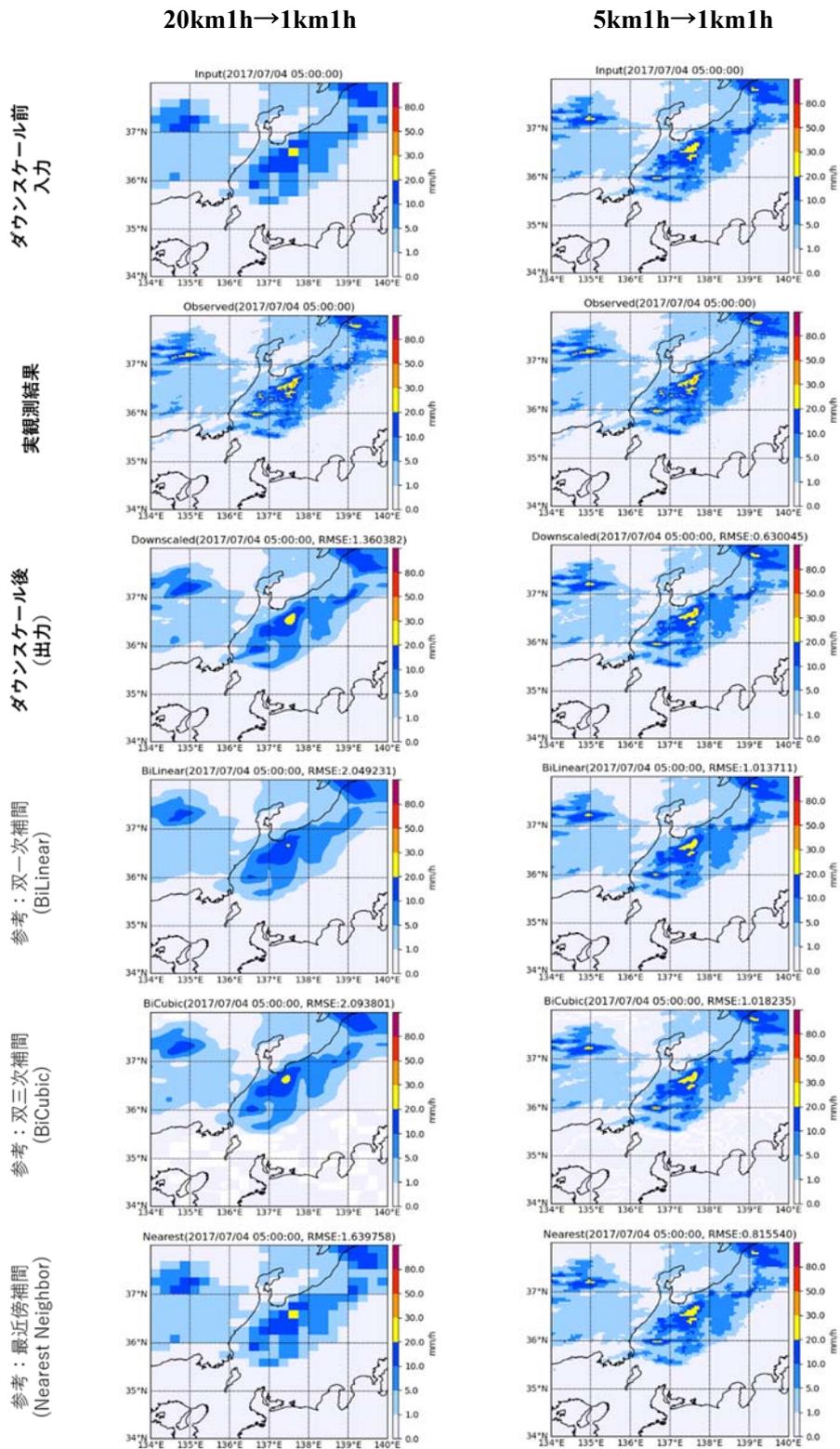


図 4.5-25 黒部ダム：空間ダウンスケーリング(全体)結果及び比較の一例③

基準時刻の 3 時間後

基準時刻の 2 時間後

基準時刻の 1 時間後

基準時刻

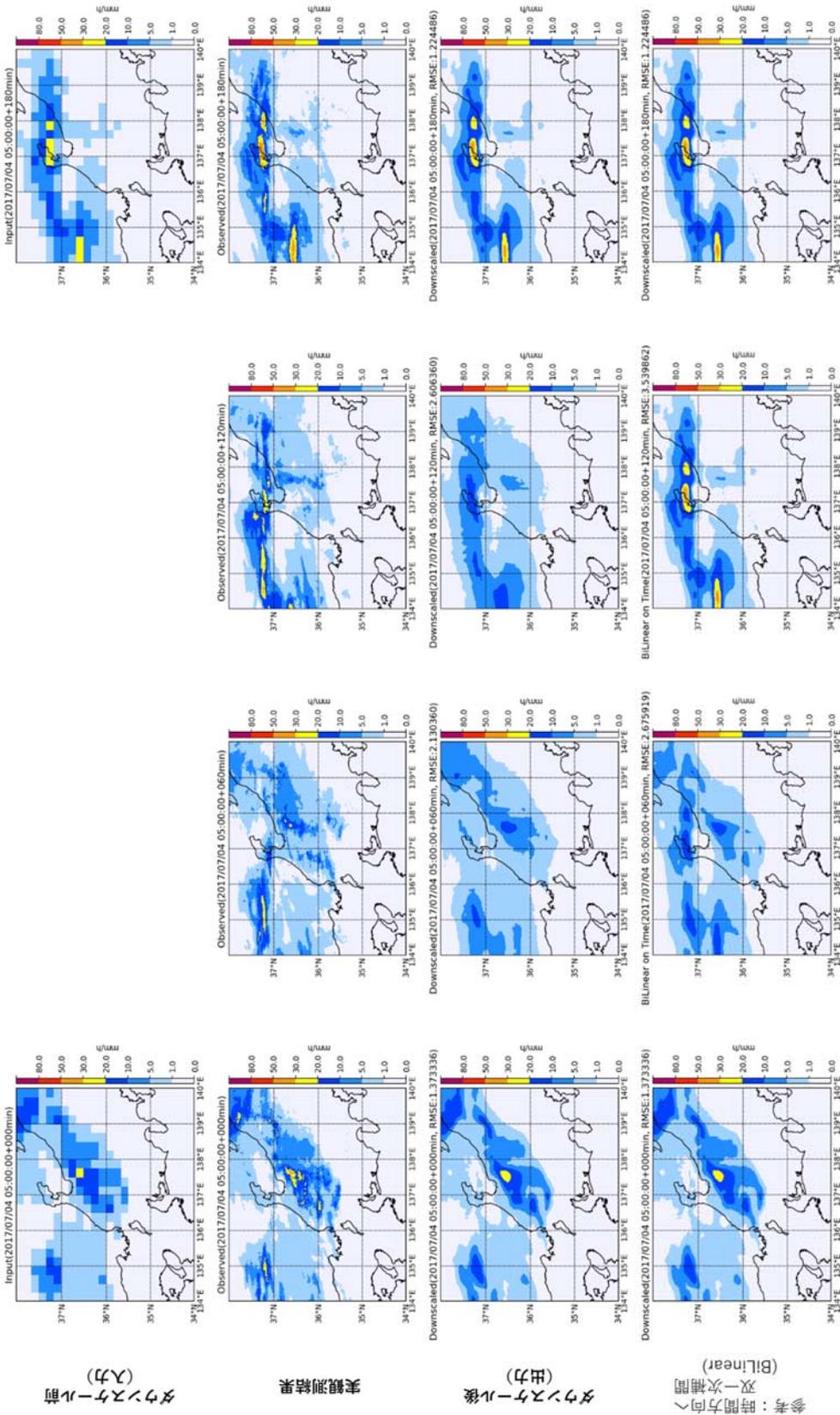


図 4.5-26 黒部ダム：時空間ダウンスケールリング(全体)結果及び比較の一例③

表 4.5-32 黒部ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 RMSE の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	1.59mm/h	0.78mm/h	2.84mm/h
ダウンスケール後	1.21mm/h	0.57mm/h	1.91mm/h
参考：双一次補間	2.12mm/h	1.02mm/h	2.98mm/h
参考：双三次補間	2.19mm/h	1.04mm/h	3.08mm/h
参考：最近傍補間	1.59mm/h	0.78mm/h	2.84mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-33 黒部ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 PSNR の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	41.22dB	47.33dB	37.06dB
ダウンスケール後	43.54dB	49.92dB	40.28dB
参考：双一次補間	38.77dB	45.13dB	36.09dB
参考：双三次補間	38.54dB	45.03dB	35.84dB
参考：最近傍補間	41.22dB	47.33dB	37.06dB

(小数点第3位以下を四捨五入、値が大きいほど望ましく赤字が最大値)

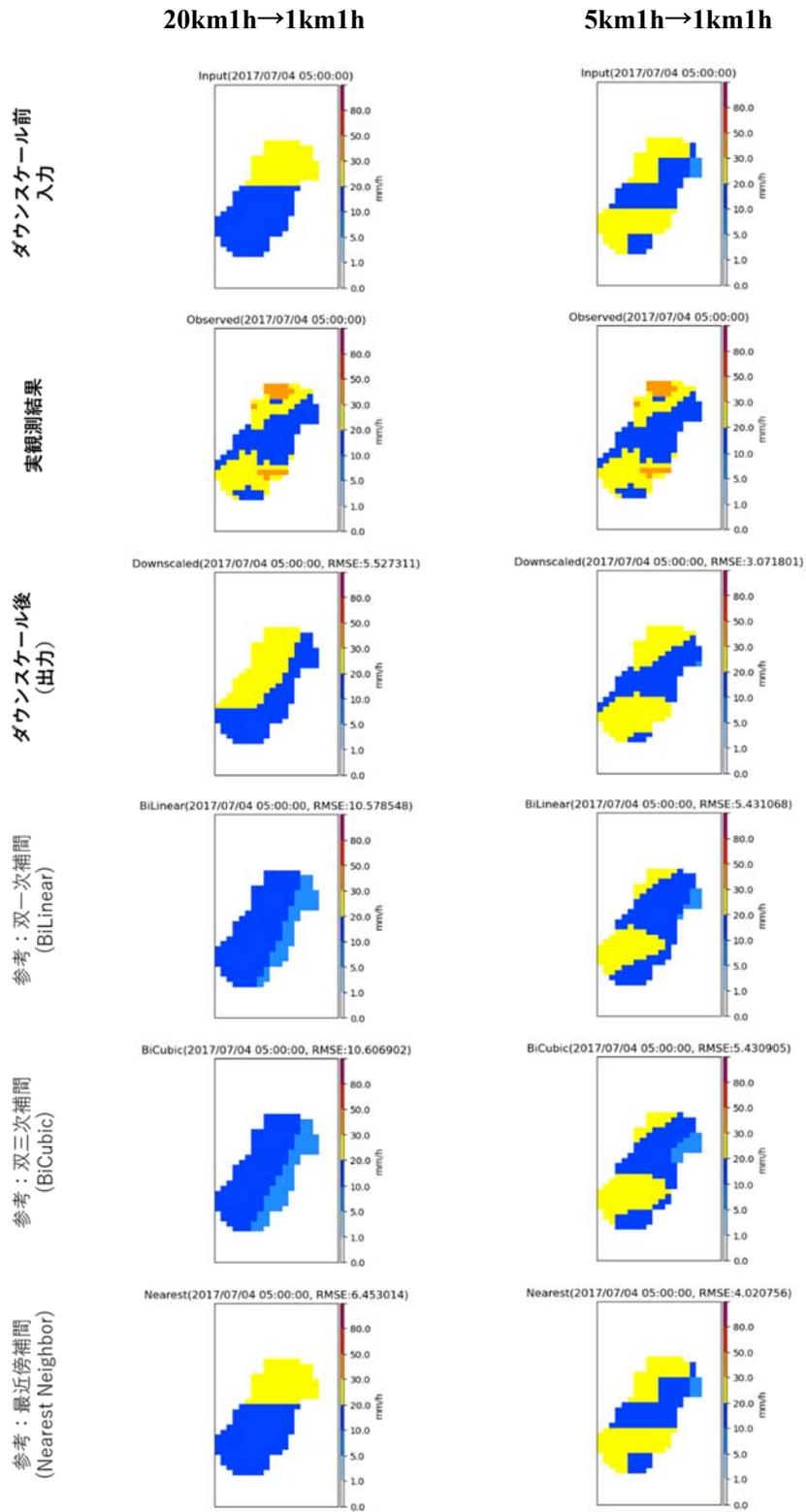


図 4.5-27 黒部ダム：空間ダウンスケーリング(流域)結果及び比較の一例③

基準時刻の 3 時間後

基準時刻の 2 時間後

基準時刻の 1 時間後

基準時刻

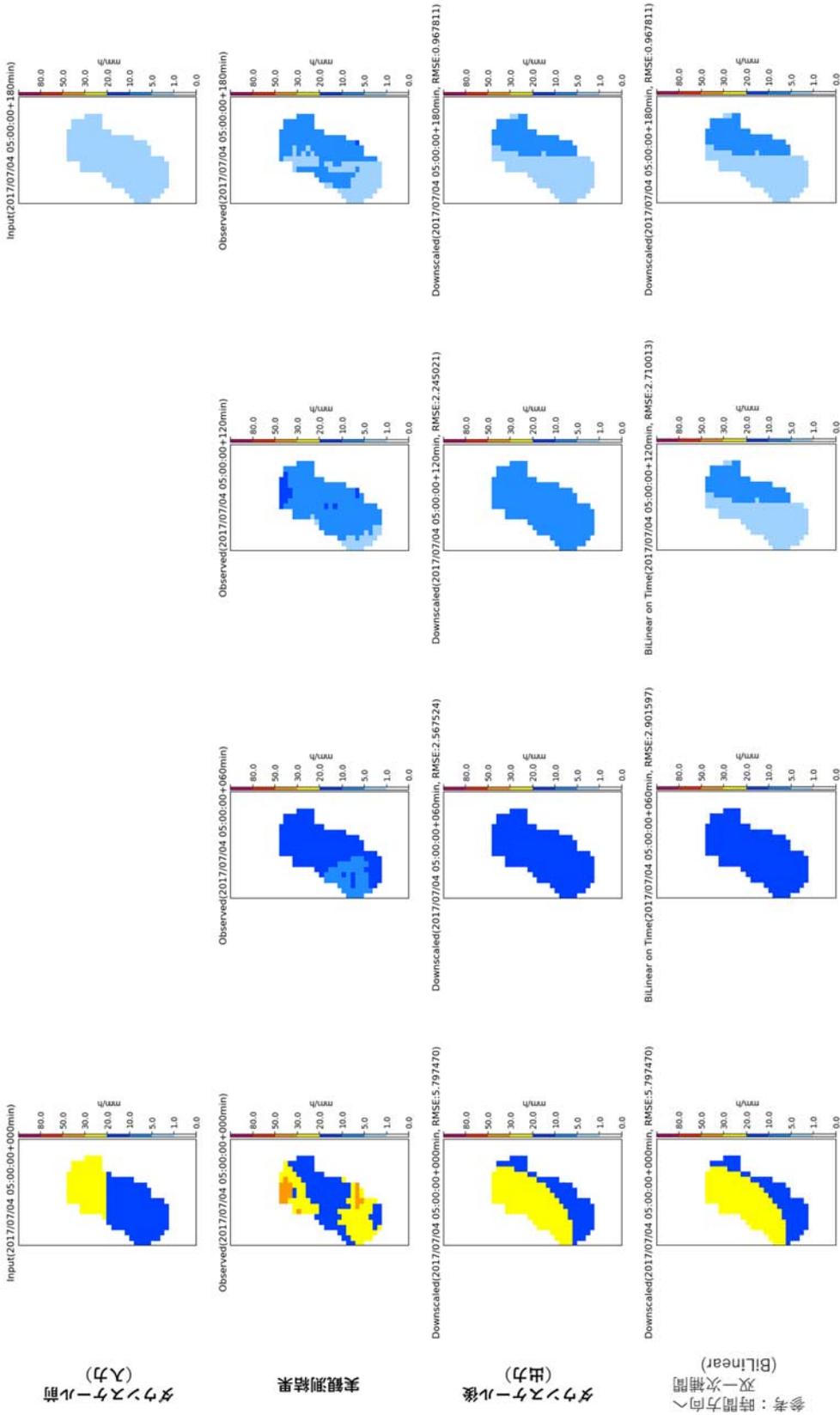


図 4.5-28 黒部ダム：時間空間ダウンスケージング(流域)結果及び比較の一例③

表 4.5-34 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のメッシュ毎 RMSE の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	1.92mm/h	1.22mm/h	3.07mm/h
ダウンスケール後	1.73mm/h	1.01mm/h	2.19mm/h
参考：双一次補間	2.81mm/h	1.49mm/h	3.37mm/h
参考：双三次補間	2.75mm/h	1.48mm/h	3.37mm/h
参考：最近傍補間	1.92mm/h	1.22mm/h	3.07mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-35 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域全体 RMSE の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.70mm/h	0.10mm/h	2.06mm/h
ダウンスケール後	0.62mm/h	0.06mm/h	1.22mm/h
参考：双一次補間	1.88mm/h	0.44mm/h	2.53mm/h
参考：双三次補間	1.82mm/h	0.43mm/h	2.52mm/h
参考：最近傍補間	0.70mm/h	0.10mm/h	2.06mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-36 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域平均降雨量の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	173.79mm (0.91)	189.63mm (0.99)	175.24mm (0.90)
ダウンスケール後	186.50mm (0.97)	192.39mm (1.01)	184.56mm (0.96)
参考：双一次補間	133.03mm (0.70)	184.22mm (0.96)	133.53mm (0.68)
参考：双三次補間	139.31mm (0.73)	186.93mm (0.98)	139.57mm (0.72)
参考：最近傍補間	173.79mm (0.91)	189.63mm (0.99)	175.24mm (0.90)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の比率が1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-37 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨波形の相関値の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9910	0.9997	0.8946
ダウンスケール後	0.9841	0.9998	0.9715
参考：双一次補間	0.9558	0.9937	0.8762
参考：双三次補間	0.9416	0.9932	0.8684
参考：最近傍補間	0.9910	0.9997	0.8946

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-38 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨空間分布の相関値の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9582	0.9779	0.9431
ダウンスケール後	<b>0.9680</b>	<b>0.9819</b>	<b>0.9552</b>
参考：双一次補間	0.9483	0.9754	0.9429
参考：双三次補間	0.9462	0.9755	0.9094
参考：最近傍補間	0.9582	0.9779	0.9431

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-39 黒部ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク値の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	18.07mm/h (11.92%)	20.12mm/h (1.96%)	<b>18.07mm/h (5.50%)</b>
ダウンスケール後	<b>20.4mm/h (0.57%)</b>	<b>20.49mm/h (0.15%)</b>	17.6mm/h (14.21%)
参考：双一次補間	11.31mm/h (44.87%)	18.1mm/h (11.79%)	11.31mm/h (33.97%)
参考：双三次補間	11.24mm/h (45.24%)	18.33mm/h (10.67%)	11.24mm/h (34.41%)
参考：最近傍補間	18.07mm/h (11.92%)	20.12mm/h (1.96%)	<b>18.07mm/h (5.50%)</b>

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の誤差率が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-40 ダウンスケーリング(流域)結果のピーク時刻差の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	<b>0h</b>	<b>0h</b>	1h
ダウンスケール後	<b>0h</b>	<b>0h</b>	<b>0h</b>
参考：双一次補間	<b>0h</b>	<b>0h</b>	1h
参考：双三次補間	<b>0h</b>	<b>0h</b>	1h
参考：最近傍補間	<b>0h</b>	<b>0h</b>	1h

(単位は時間、0に近いほど望ましく赤字が絶対値が最小のもの)

#### (5) 奥只見ダム流域における評価

奥只見ダム流域において、1km メッシュ単位の降雨量の数値をダウンスケール前のメッシュサイズに合わせて平均化した値を入力とし、元の 1km メッシュ単位の降雨量の数値を正解データとした場合のダウンスケーリング結果について評価を行う。

参考として、同じ入力に対して AI を用いないで行う一般的なダウンスケーリング（補間法）である双一次補間・双三次補間・最近傍補間で元の 1km メッシュ単位の降雨量に補間した場合の評価も併せて示す。

なお、4.5.5 の(2)で説明したように、各図の降雨分布図と各表の評価値において、入力と参考の最近傍補間では全く同じ結果となるため、留意する必要がある。

表 4.5-13 に挙げた対象降雨のうち上位 3 件の評価結果を次ページ以降に示す。

1) 奥只見ダム：降雨①のダウンスケーリング結果と評価

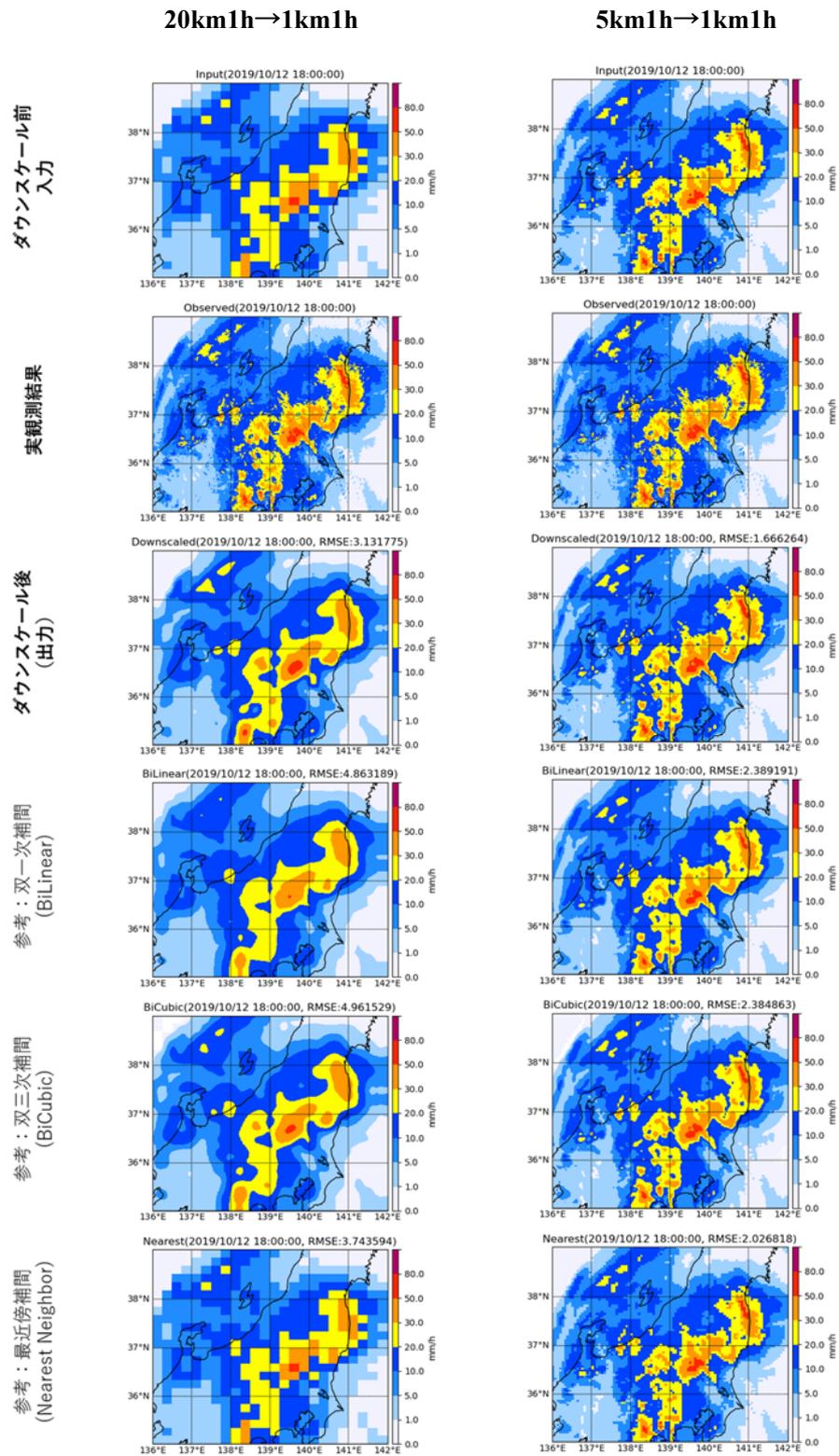


図 4.5-29 奥只見ダム：空間ダウンスケーリング(全体)結果及び比較の一例①

基準時刻の 3 時間後

基準時刻の 2 時間後

基準時刻の 1 時間後

基準時刻

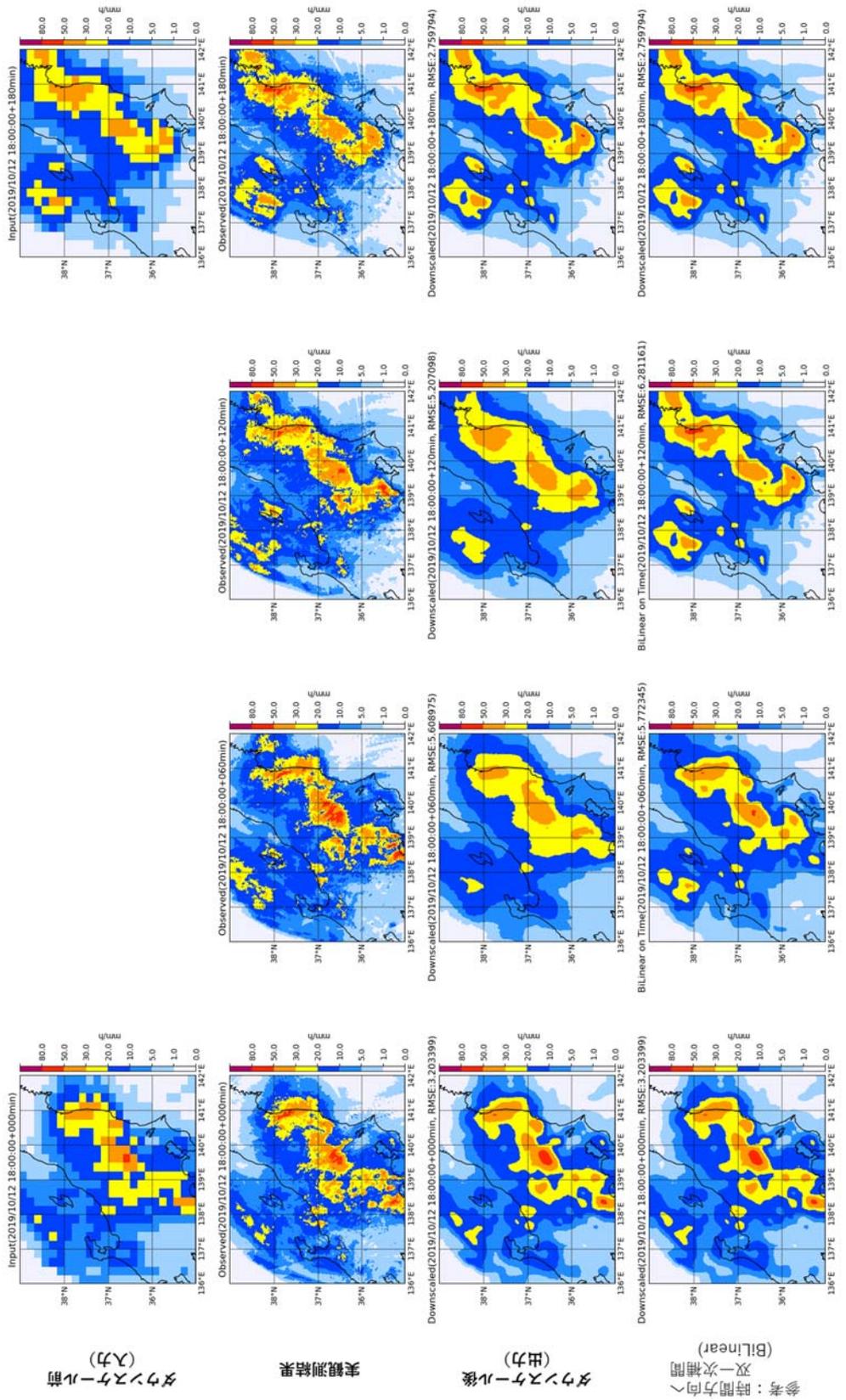


図 4.5-30 奥只見ダム：時空間ダウンスケールリング(全体)結果及び比較の一例①

表 4.5-41 奥只見ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 RMSE の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	1.89mm/h	1.03mm/h	3.16mm/h
ダウンスケール後	1.57mm/h	0.86mm/h	2.19mm/h
参考：双一次補間	2.39mm/h	1.21mm/h	3.47mm/h
参考：双三次補間	2.43mm/h	1.21mm/h	3.54mm/h
参考：最近傍補間	1.89mm/h	1.03mm/h	3.16mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-42 奥只見ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 PSNR の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	41.27dB	46.21dB	38.27dB
ダウンスケール後	42.81dB	47.72dB	41.12dB
参考：双一次補間	39.41dB	44.82dB	37.19dB
参考：双三次補間	39.26dB	44.84dB	37.04dB
参考：最近傍補間	41.27dB	46.21dB	38.27dB

(小数点第3位以下を四捨五入、値が大きいほど望ましく赤字が最大値)

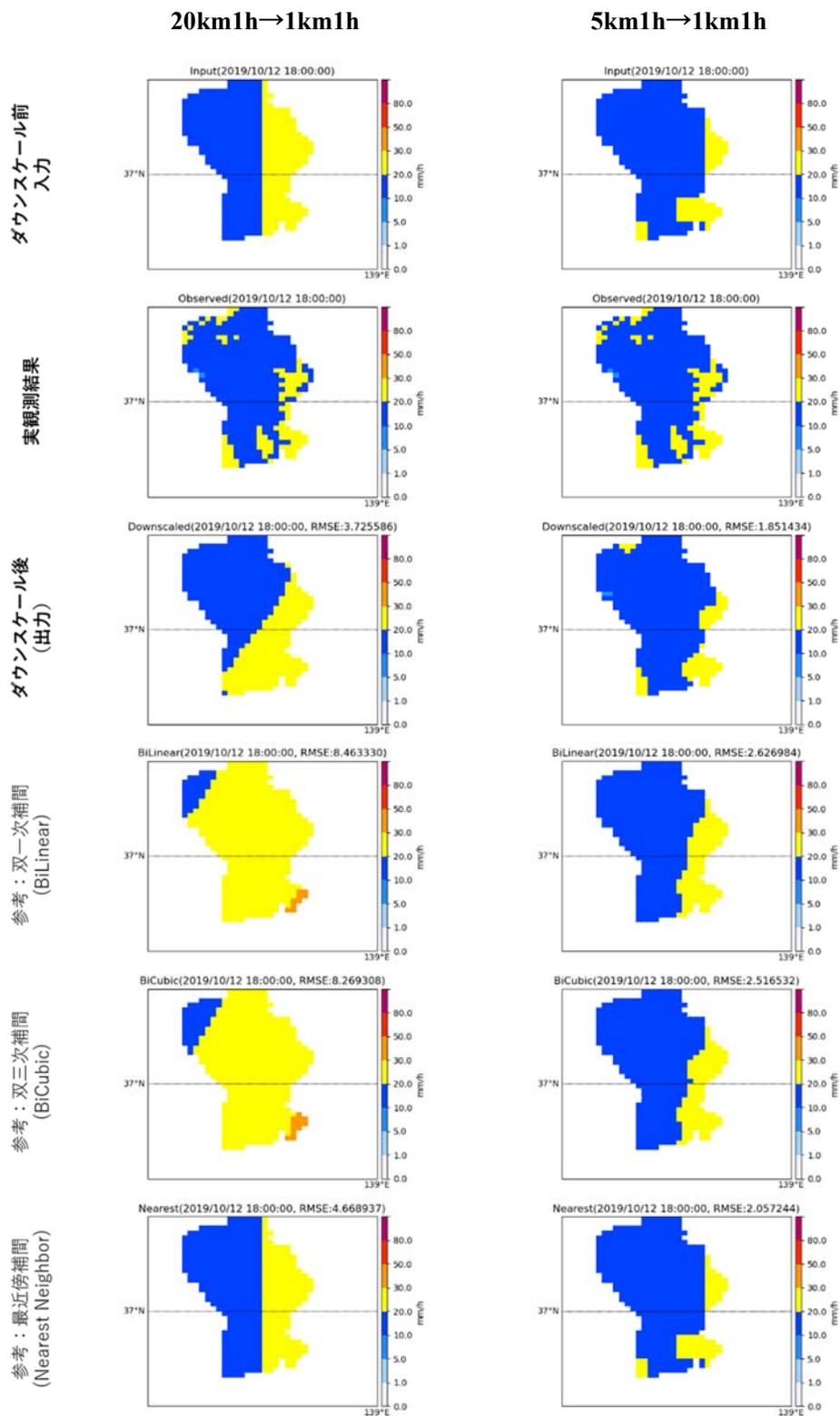


図 4.5-31 奥只見ダム：空間ダウンスケーリング(流域)結果及び比較の一例①

基準時刻の 3 時間後

基準時刻の 2 時間後

基準時刻の 1 時間後

基準時刻

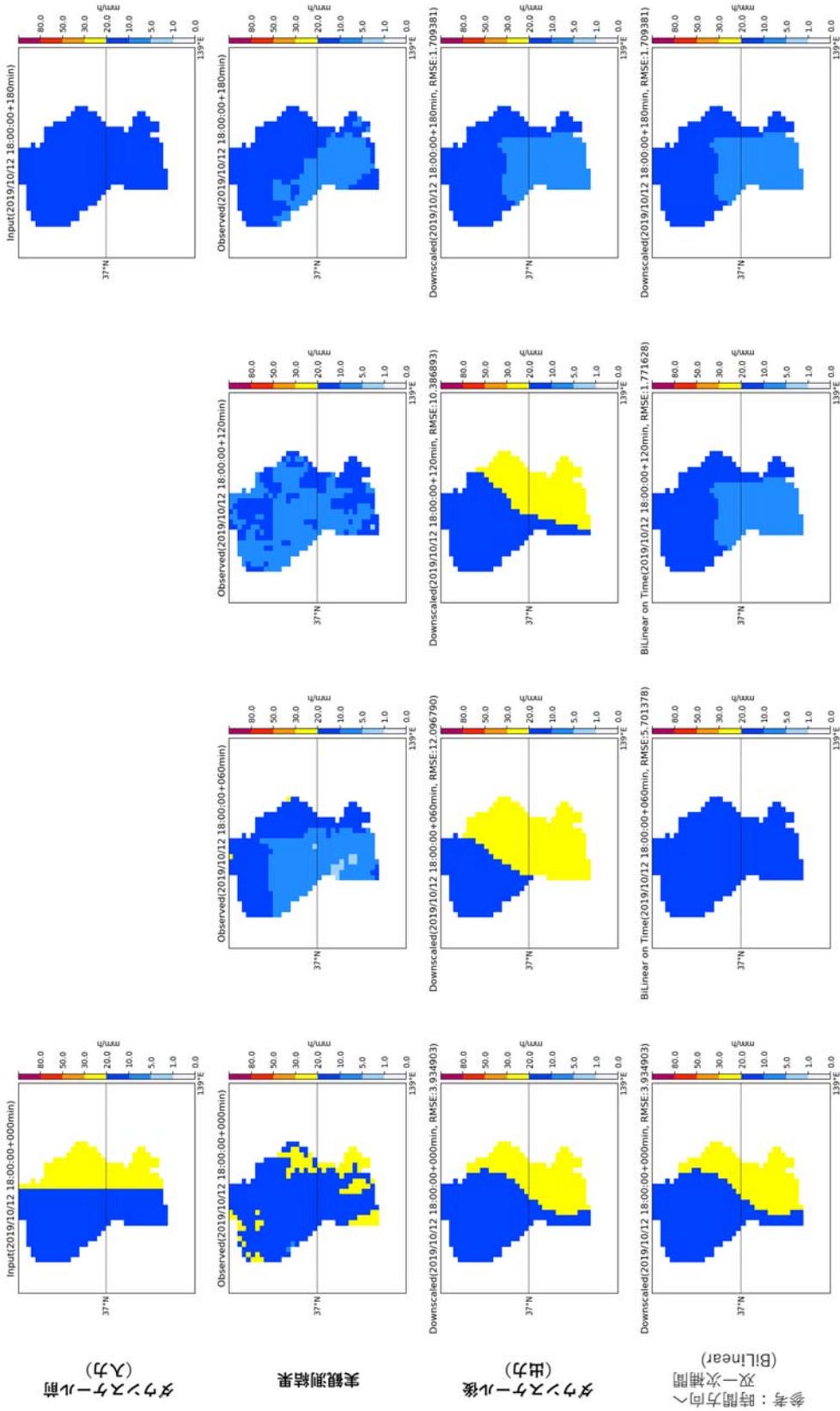


図 4.5-32 奥只見ダム：時空間ダウンスケージング(流域)結果及び比較の一例①

表 4.5-43 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のメッシュ毎 RMSE の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	2.60mm/h	1.42mm/h	3.24mm/h
ダウンスケール後	1.93mm/h	1.27mm/h	2.73mm/h
参考：双一次補間	4.09mm/h	1.65mm/h	4.70mm/h
参考：双三次補間	4.01mm/h	1.61mm/h	4.65mm/h
参考：最近傍補間	2.60mm/h	1.42mm/h	3.24mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-44 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域全体 RMSE の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.80mm/h	0.07mm/h	1.65mm/h
ダウンスケール後	0.51mm/h	0.07mm/h	1.46mm/h
参考：双一次補間	3.20mm/h	0.49mm/h	3.81mm/h
参考：双三次補間	3.05mm/h	0.43mm/h	3.73mm/h
参考：最近傍補間	0.80mm/h	0.07mm/h	1.65mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-45 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域平均降雨量の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	199.26mm (1.14)	175.51mm (1.01)	200.21mm (1.13)
ダウンスケール後	192.50mm (1.10)	177.06mm (1.02)	218.79mm (1.25)
参考：双一次補間	240.01mm (1.38)	177.61mm (1.02)	240.28mm (1.36)
参考：双三次補間	236.55mm (1.36)	176.06mm (1.01)	236.78mm (1.34)
参考：最近傍補間	199.26mm (1.14)	175.51mm (1.01)	200.21mm (1.13)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の比率が1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-46 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨波形の相関値の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9921	0.9999	0.9463
ダウンスケール後	0.9963	1.0000	0.9781
参考：双一次補間	0.9241	0.9940	0.8583
参考：双三次補間	0.9224	0.9949	0.8446
参考：最近傍補間	0.9921	0.9999	0.9463

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-47 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨空間分布の相関値の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9239	0.9674	0.9082
ダウンスケール後	0.9474	0.9730	0.9041
参考：双一次補間	0.9470	0.9623	0.9390
参考：双三次補間	0.9495	0.9613	0.9396
参考：最近傍補間	0.9239	0.9674	0.9082

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-48 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク値の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	18.79mm/h (14.39%)	16.55mm/h (0.75%)	18.79mm/h (39.05%)
ダウンスケール後	18.28mm/h (11.28%)	16.63mm/h (1.24%)	19.44mm/h (18.38%)
参考：双一次補間	24.39mm/h (48.51%)	17.33mm/h (5.53%)	24.39mm/h (80.52%)
参考：双三次補間	24.22mm/h (47.47%)	17.07mm/h (3.96%)	24.22mm/h (79.26%)
参考：最近傍補間	18.79mm/h (14.39%)	16.55mm/h (0.75%)	18.79mm/h (39.05%)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の誤差率が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-49 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク時刻差の比較①

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0h	0h	0h
ダウンスケール後	0h	0h	0h
参考：双一次補間	0h	0h	0h
参考：双三次補間	-1h	0h	-1h
参考：最近傍補間	0h	0h	0h

(単位は時間、0に近いほど望ましく赤字が絶対値が最小のもの)

2) 奥只見ダム：降雨②のダウンスケーリング結果と評価

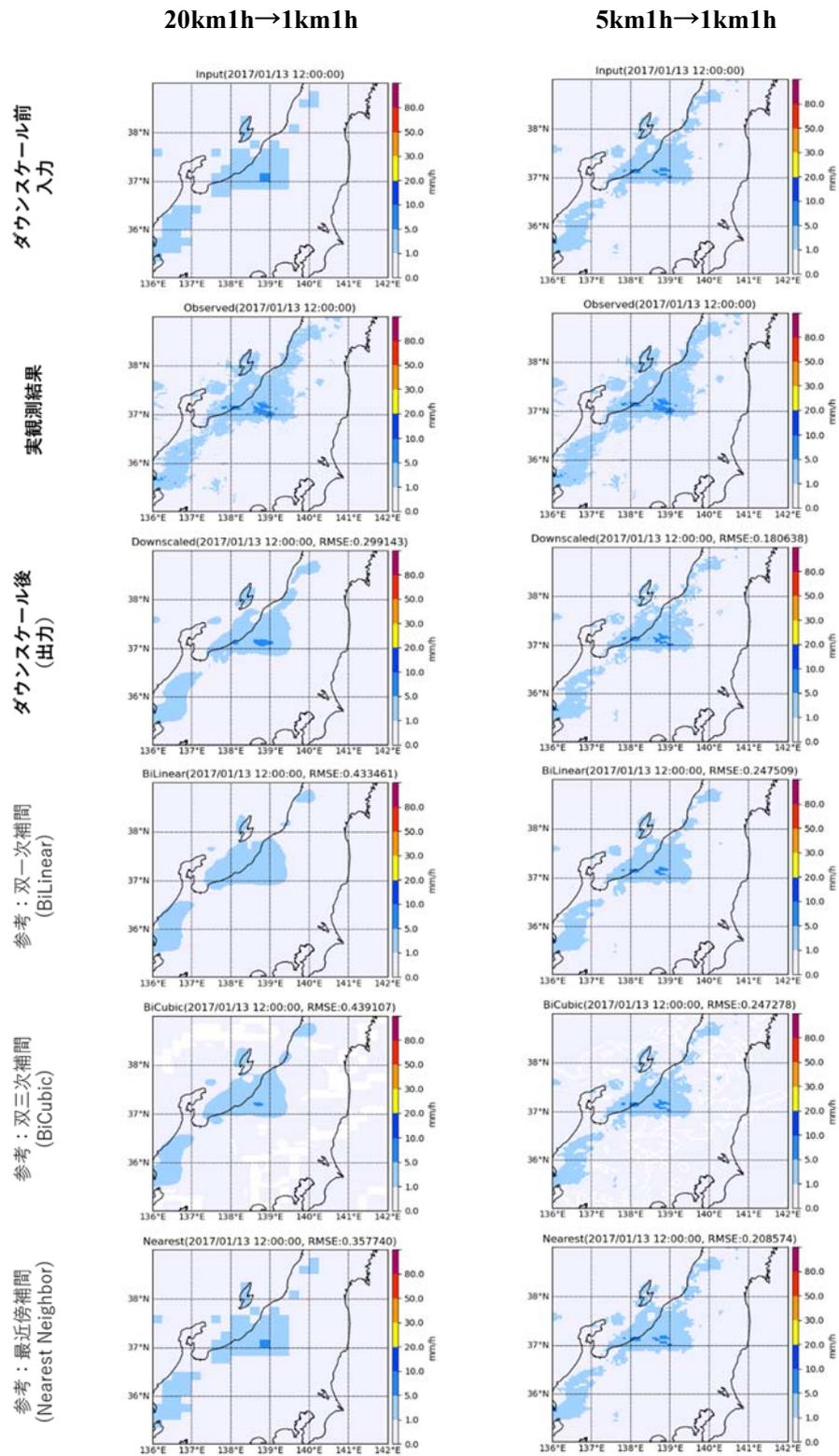


図 4.5-33 奥只見ダム：空間ダウンスケーリング(全体)結果及び比較の一例②

基準時刻の 3 時間後

基準時刻の 2 時間後

基準時刻の 1 時間後

基準時刻

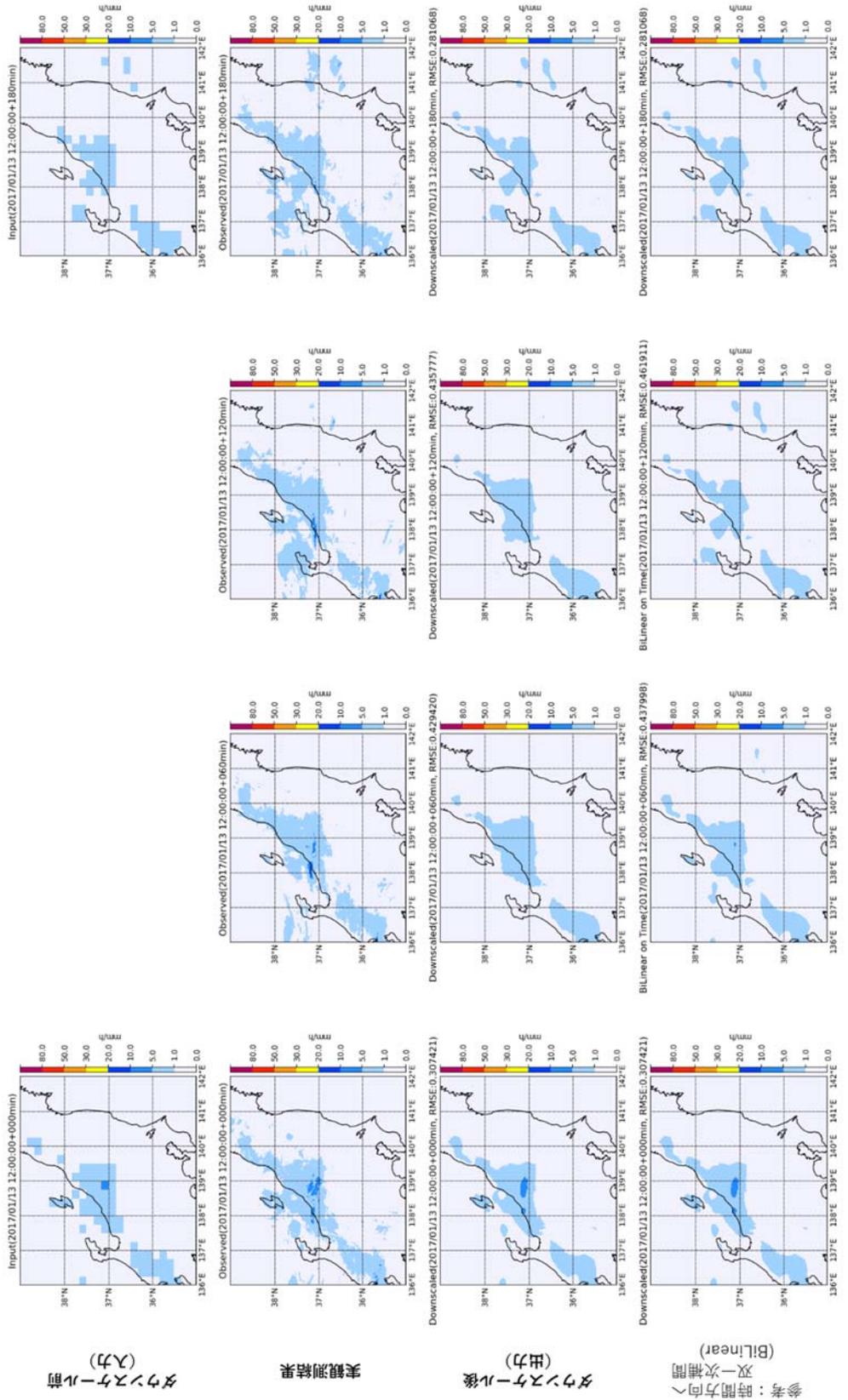


図 4.5-34 奥只見ダム：時空間ダウンスケリング(全体)結果及び比較の一例②

表 4.5-50 奥只見ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 RMSE の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.30mm/h	0.19mm/h	0.38mm/h
ダウンスケール後	0.26mm/h	0.16mm/h	0.32mm/h
参考：双一次補間	0.37mm/h	0.22mm/h	0.41mm/h
参考：双三次補間	0.37mm/h	0.22mm/h	0.42mm/h
参考：最近傍補間	0.30mm/h	0.19mm/h	0.38mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-51 奥只見ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 PSNR の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	55.27dB	59.44dB	53.53dB
ダウンスケール後	56.51dB	60.75dB	54.97dB
参考：双一次補間	53.55dB	58.15dB	52.63dB
参考：双三次補間	53.42dB	58.14dB	52.44dB
参考：最近傍補間	55.27dB	59.44dB	53.53dB

(小数点第3位以下を四捨五入、値が大きいほど望ましく赤字が最大値)

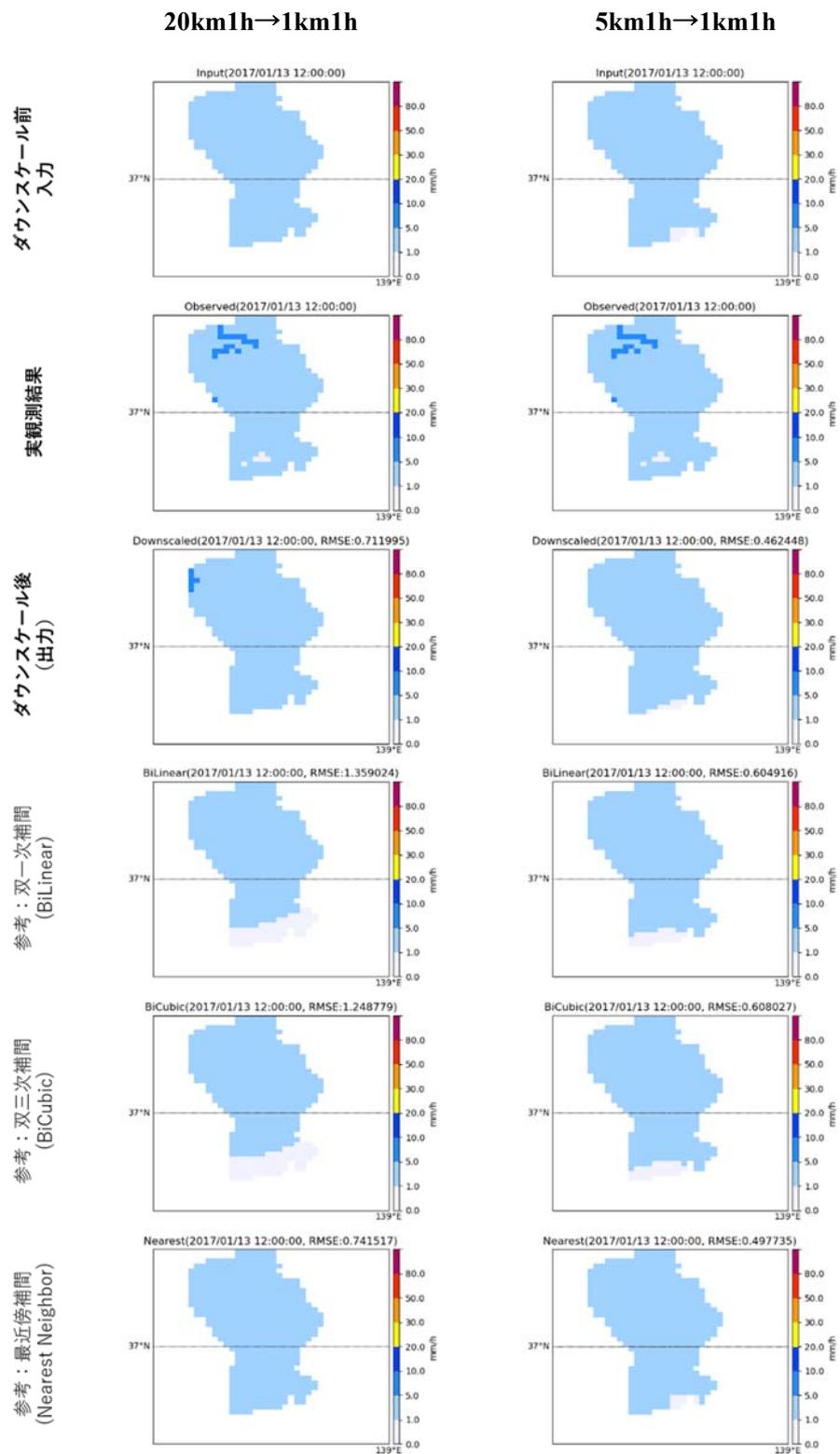


図 4.5-35 奥只見ダム：空間ダウンスケーリング(流域)結果及び比較の一例②

基準時刻の3時間後

基準時刻の2時間後

基準時刻の1時間後

基準時刻

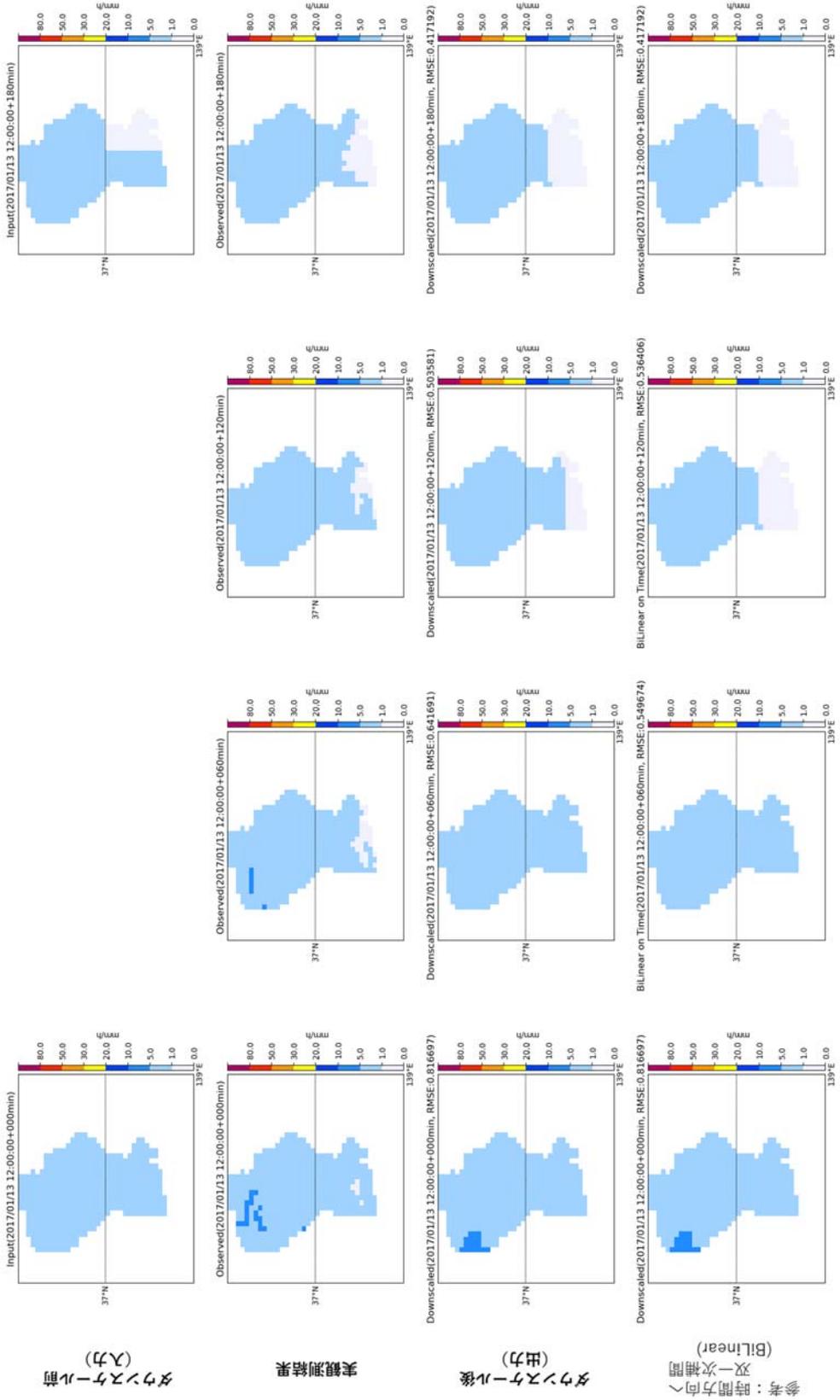


図 4.5-36 奥只見ダム：時空間ダウンスケリング(流域)結果及び比較の一例②

表 4.5-52 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のメッシュ毎 RMSE の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.51mm/h	0.32mm/h	0.69mm/h
ダウンスケール後	0.41mm/h	0.29mm/h	0.54mm/h
参考：双一次補間	0.76mm/h	0.36mm/h	0.82mm/h
参考：双三次補間	0.75mm/h	0.36mm/h	0.82mm/h
参考：最近傍補間	0.51mm/h	0.32mm/h	0.69mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-53 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域全体 RMSE の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.08mm/h	0.01mm/h	0.32mm/h
ダウンスケール後	0.07mm/h	0.02mm/h	0.26mm/h
参考：双一次補間	0.59mm/h	0.13mm/h	0.64mm/h
参考：双三次補間	0.58mm/h	0.13mm/h	0.63mm/h
参考：最近傍補間	0.08mm/h	0.01mm/h	0.32mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-54 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域平均降雨量の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	160.71mm (0.99)	162.47mm (1.00)	162.38mm (0.98)
ダウンスケール後	167.57mm (1.03)	163.18mm (1.01)	174.83mm (1.06)
参考：双一次補間	97.71mm (0.60)	148.28mm (0.91)	99.24mm (0.60)
参考：双三次補間	99.54mm (0.61)	148.45mm (0.91)	101.15mm (0.61)
参考：最近傍補間	160.71mm (0.99)	162.47mm (1.00)	162.38mm (0.98)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の比率が1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-55 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨波形の相関値の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9914	0.9999	0.8697
ダウンスケール後	0.9953	0.9999	0.9603
参考：双一次補間	0.8995	0.9963	0.8259
参考：双三次補間	0.8945	0.9964	0.8166
参考：最近傍補間	0.9914	0.9999	0.8697

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-56 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨空間分布の相関値の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9650	0.9853	0.9611
ダウンスケール後	0.9773	0.9874	0.9733
参考：双一次補間	0.9712	0.9835	0.9686
参考：双三次補間	0.9679	0.9831	0.9648
参考：最近傍補間	0.9650	0.9853	0.9611

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-57 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク値の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	3.18mm/h (2.47%)	3.25mm/h (0.36%)	3.18mm/h (2.37%)
ダウンスケール後	3.40mm/h (4.51%)	3.31mm/h (1.74%)	3.25mm/h (0.35%)
参考：双一次補間	2.09mm/h (35.95%)	2.98mm/h (8.41%)	2.09mm/h (35.89%)
参考：双三次補間	2.21mm/h (31.99%)	2.99mm/h (8.13%)	2.21mm/h (31.93%)
参考：最近傍補間	3.18mm/h (2.47%)	3.25mm/h (0.36%)	3.18mm/h (2.37%)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の誤差率が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-58 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク時刻差の比較②

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0h	0h	-1h
ダウンスケール後	0h	0h	0h
参考：双一次補間	31h	0h	30h
参考：双三次補間	31h	0h	30h
参考：最近傍補間	0h	0h	-1h

(単位は時間、0に近いほど望ましく赤字が絶対値が最小のもの)

3) 奥只見ダム：降雨③のダウンスケーリング結果と評価

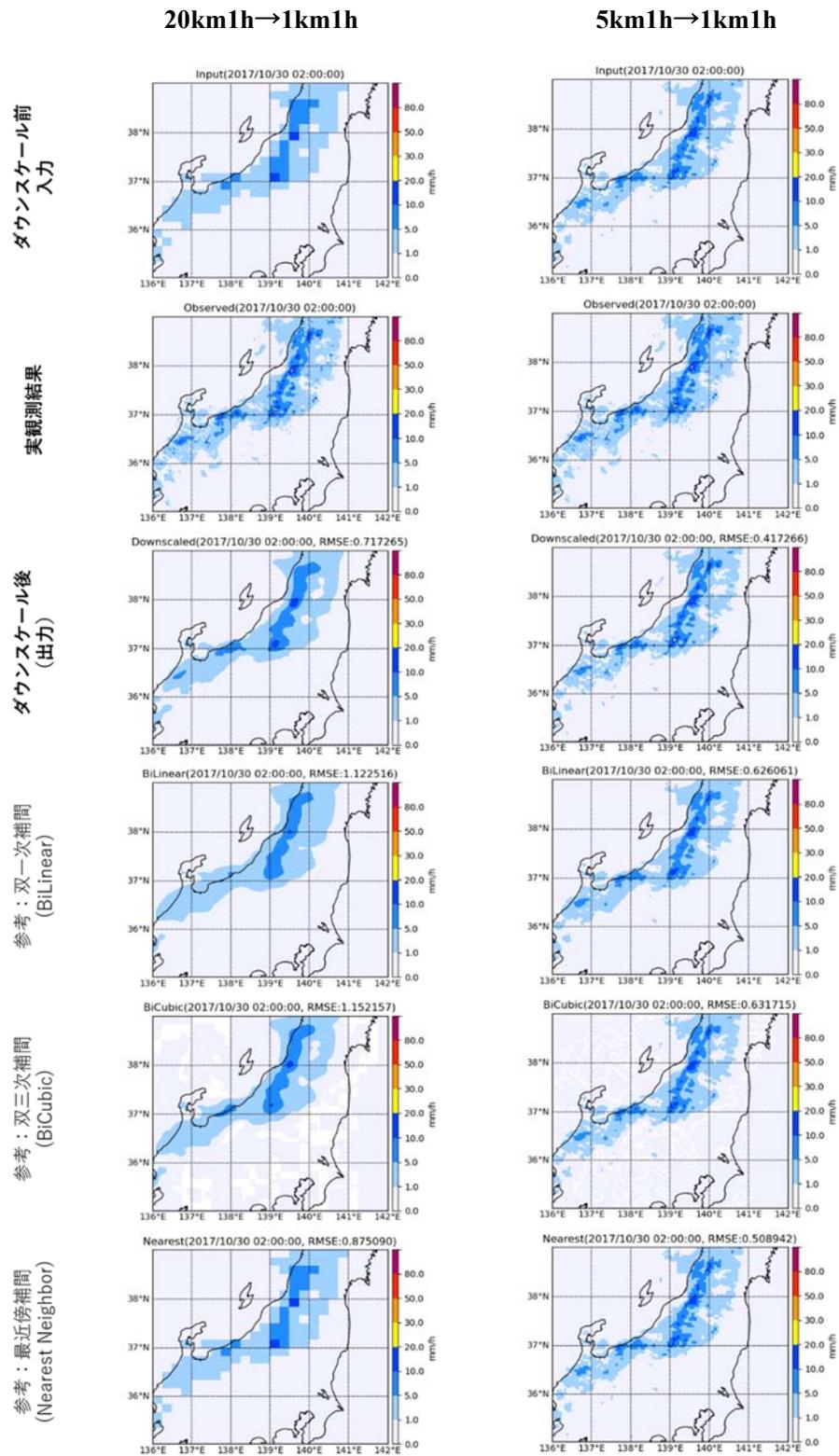


図 4.5-37 奥只見ダム：空間ダウンスケーリング(全体)結果及び比較の一例③

基準時刻の3時間後

基準時刻の2時間後

基準時刻の1時間後

基準時刻

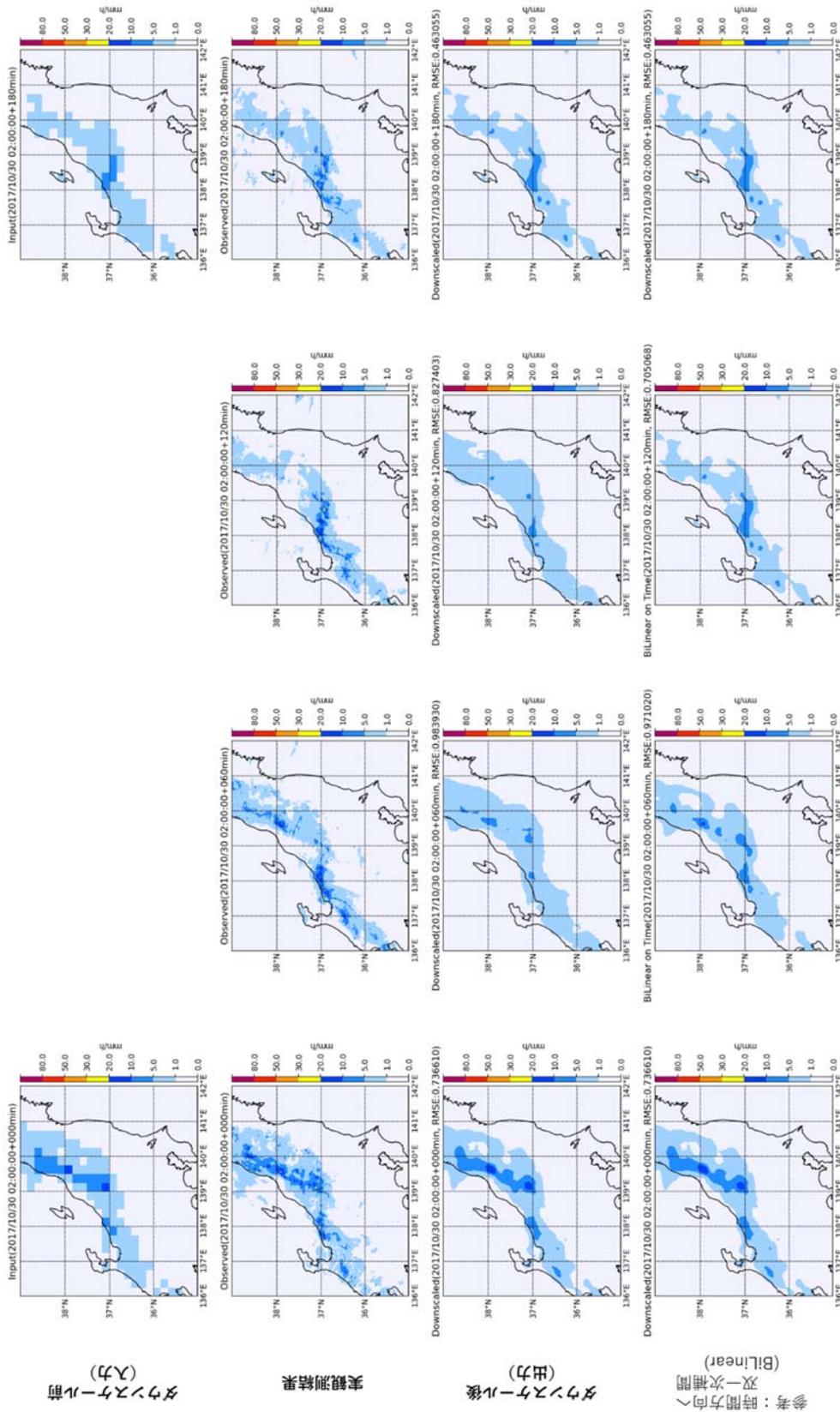


図 4.5-38 奥只見ダム：時空間ダウンスケールリング(全体)結果及び比較の一例③

表 4.5-59 奥只見ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 RMSE の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.66mm/h	0.38mm/h	1.24mm/h
ダウンスケール後	0.54mm/h	0.32mm/h	0.85mm/h
参考：双一次補間	0.86mm/h	0.47mm/h	1.32mm/h
参考：双三次補間	0.89mm/h	0.47mm/h	1.36mm/h
参考：最近傍補間	0.66mm/h	0.38mm/h	1.24mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-60 奥只見ダム：ダウンスケーリング(全体)結果のメッシュ毎 PSNR の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	50.04dB	54.62dB	46.99dB
ダウンスケール後	51.52dB	56.02dB	49.21dB
参考：双一次補間	48.15dB	53.11dB	46.08dB
参考：双三次補間	47.99dB	53.07dB	45.89dB
参考：最近傍補間	50.04dB	54.62dB	46.99dB

(小数点第3位以下を四捨五入、値が大きいほど望ましく赤字が最大値)

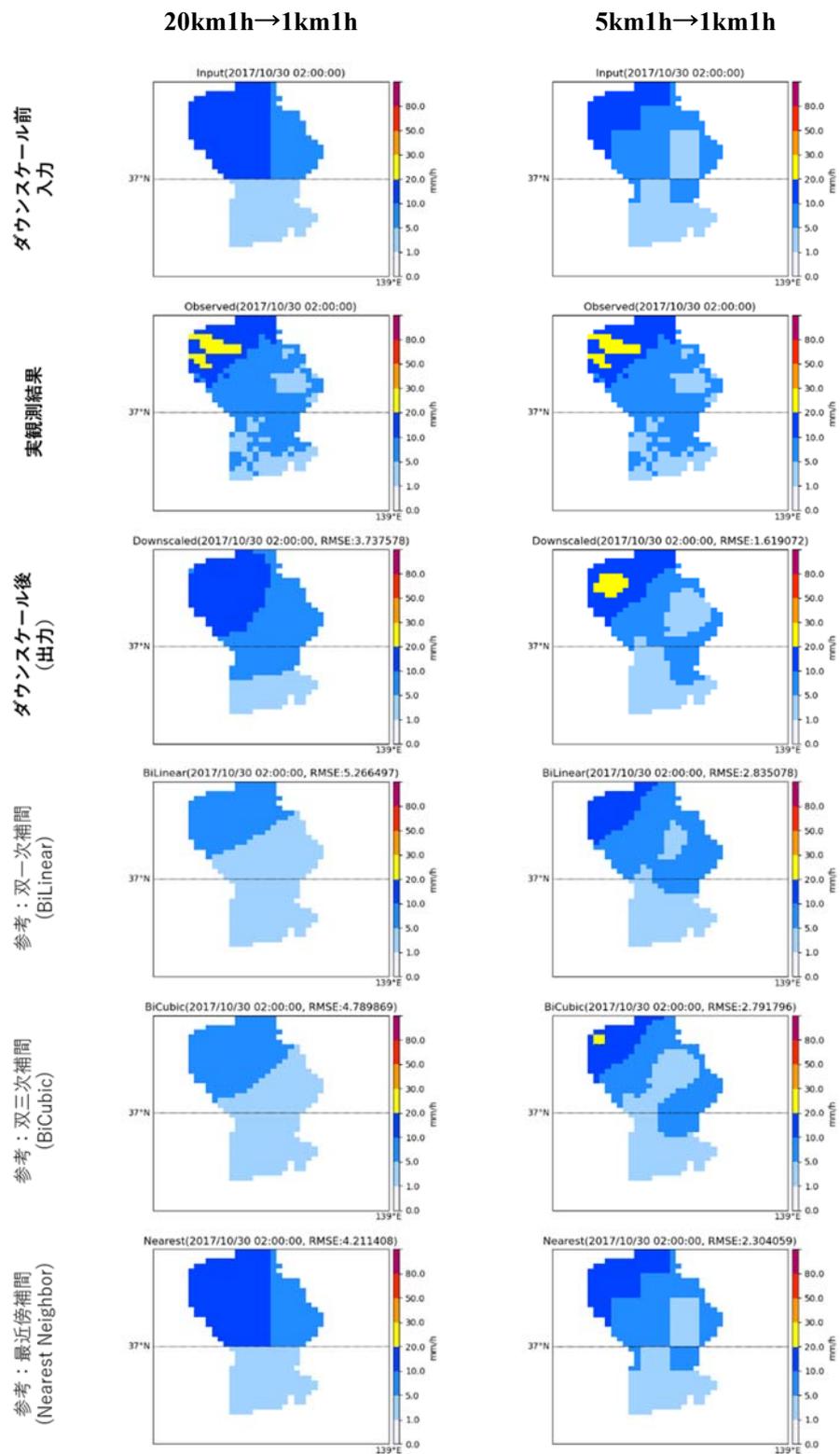
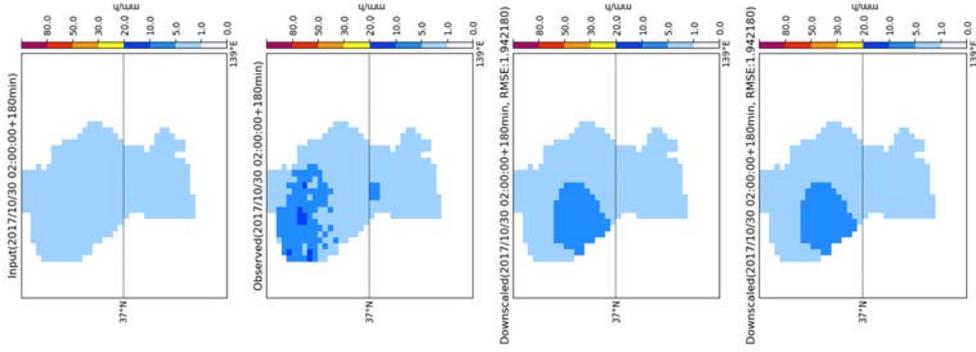
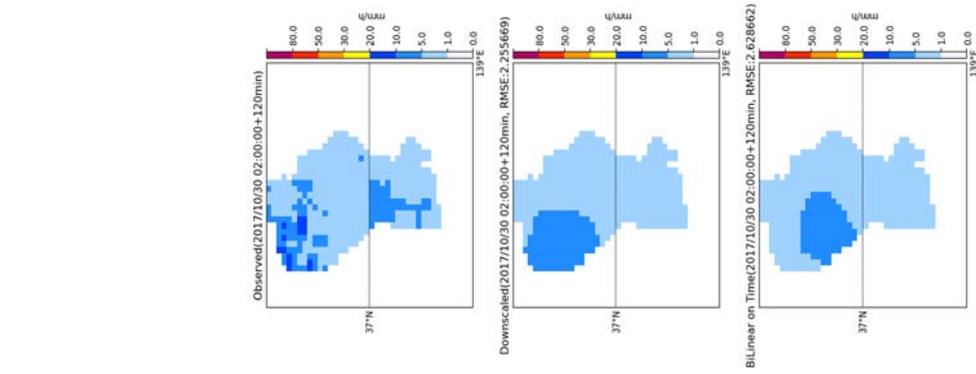


図 4.5-39 奥只見ダム：空間ダウンスケーリング(流域)結果及び比較の一例③

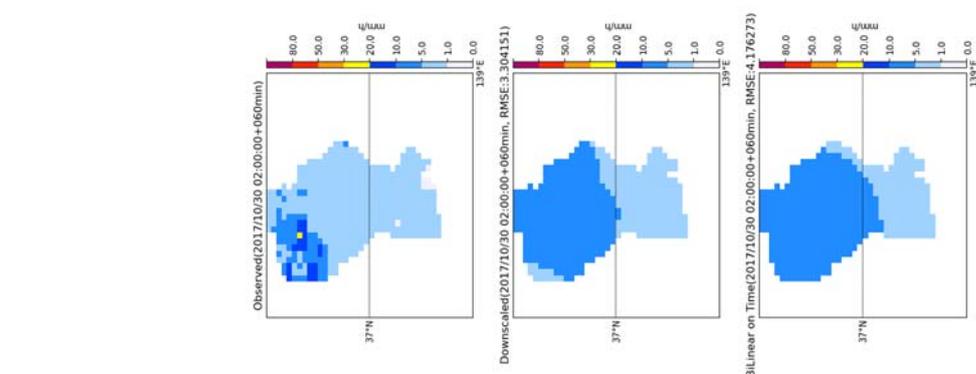
基準時刻の 3 時間後



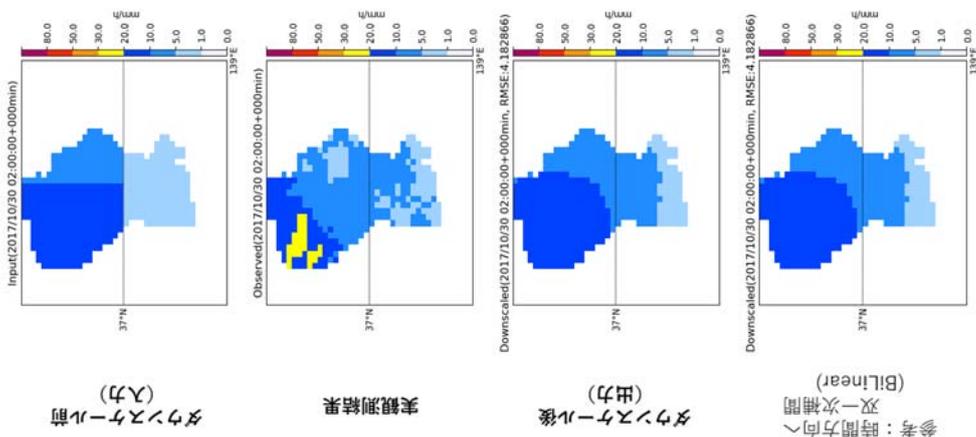
基準時刻の 2 時間後



基準時刻の 1 時間後



基準時刻



ダウンスケール前  
(入力)

観測結果

ダウンスケール後  
(出力)

線形 : 時間方向  
< 双一次補間  
(BiLinear)

図 4.5-40 奥只見ダム：時空間ダウンスケージング(流域)結果及び比較の一例③

表 4.5-61 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のメッシュ毎 RMSE の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.96mm/h	0.64mm/h	1.49mm/h
ダウンスケール後	0.86mm/h	0.58mm/h	1.16mm/h
参考：双一次補間	1.26mm/h	0.75mm/h	1.60mm/h
参考：双三次補間	1.22mm/h	0.74mm/h	1.59mm/h
参考：最近傍補間	0.96mm/h	0.64mm/h	1.49mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-62 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域全体 RMSE の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.19mm/h	0.03mm/h	0.85mm/h
ダウンスケール後	0.12mm/h	0.03mm/h	0.53mm/h
参考：双一次補間	0.79mm/h	0.19mm/h	1.15mm/h
参考：双三次補間	0.74mm/h	0.17mm/h	1.13mm/h
参考：最近傍補間	0.19mm/h	0.03mm/h	0.85mm/h

(小数点第3位以下を四捨五入、値が小さいほど望ましく赤字が最小値)

表 4.5-63 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の流域平均降雨量の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	99.99mm (0.95)	104.63mm (0.99)	101.97mm (0.93)
ダウンスケール後	106.72mm (1.01)	107.21mm (1.01)	109.32mm (1.02)
参考：双一次補間	79.43mm (0.75)	98.51mm (0.93)	80.05mm (0.73)
参考：双三次補間	81.95mm (0.78)	99.11mm (0.94)	82.55mm (0.76)
参考：最近傍補間	99.99mm (0.95)	104.63mm (0.99)	101.97mm (0.93)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の比率が1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-64 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨波形の相関値の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9905	0.9997	0.7663
ダウンスケール後	0.9965	0.9999	0.9633
参考：双一次補間	0.7986	0.9871	0.5914
参考：双三次補間	0.8161	0.9878	0.6052
参考：最近傍補間	0.9905	0.9997	0.7663

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-65 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果の降雨空間分布の相関値の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0.9570	0.9782	0.9478
ダウンスケール後	0.9640	0.9809	0.9571
参考：双一次補間	0.9564	0.9723	0.9488
参考：双三次補間	0.9529	0.9720	0.9435
参考：最近傍補間	0.9570	0.9782	0.9478

(小数点第5位以下を四捨五入、1.0に近いほど望ましく赤字が最良値)

表 4.5-66 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク値の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	7.45mm/h (5.34%)	7.66mm/h (2.70%)	7.45mm/h (28.41%)
ダウンスケール後	8.61mm/h (9.34%)	7.96mm/h (1.10%)	7.06mm/h (10.31%)
参考：双一次補間	6.05mm/h (23.23%)	6.59mm/h (16.28%)	6.05mm/h (4.15%)
参考：双三次補間	6.19mm/h (21.42%)	6.61mm/h (16.04%)	6.19mm/h (6.59%)
参考：最近傍補間	7.45mm/h (5.34%)	7.66mm/h (2.70%)	7.45mm/h (28.41%)

(小数点第3位以下を四捨五入、括弧内の誤差率が小さいほど望ましく赤字が最小値)

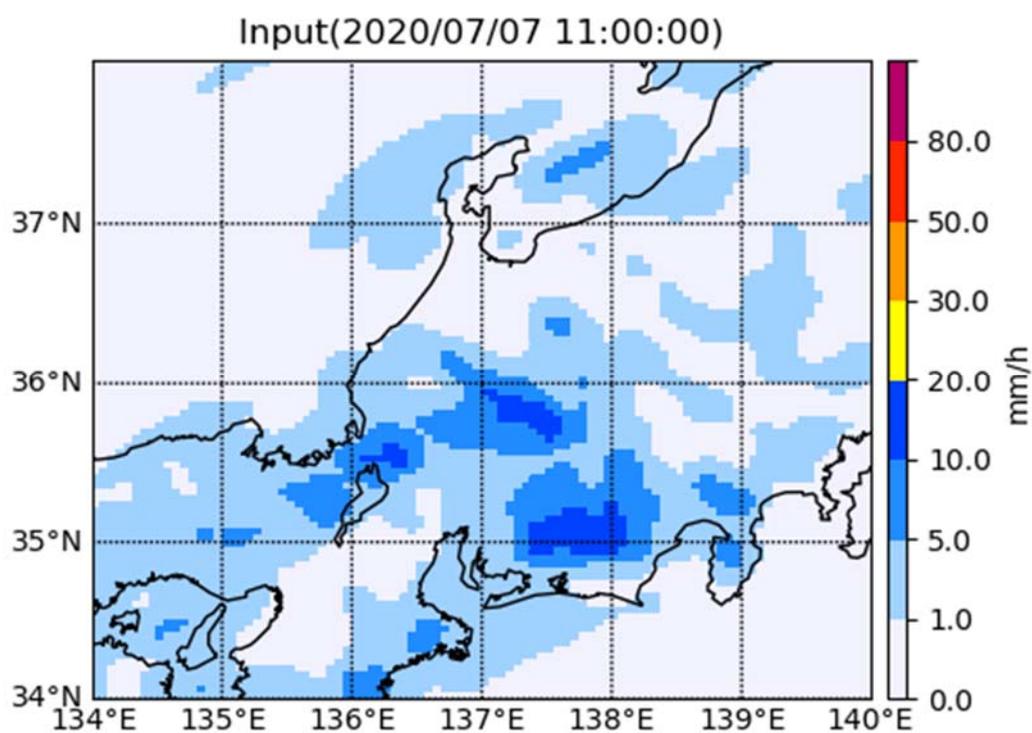
表 4.5-67 奥只見ダム：ダウンスケーリング(流域)結果のピーク時刻差の比較③

	20km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	5km1h→1km1h 空間 ダウンスケーリング	20km3h→1km1h 時空間 ダウンスケーリング
ダウンスケール前	0h	0h	-2h
ダウンスケール後	0h	0h	0h
参考：双一次補間	-7h	0h	-9h
参考：双三次補間	-7h	0h	-9h
参考：最近傍補間	0h	0h	-2h

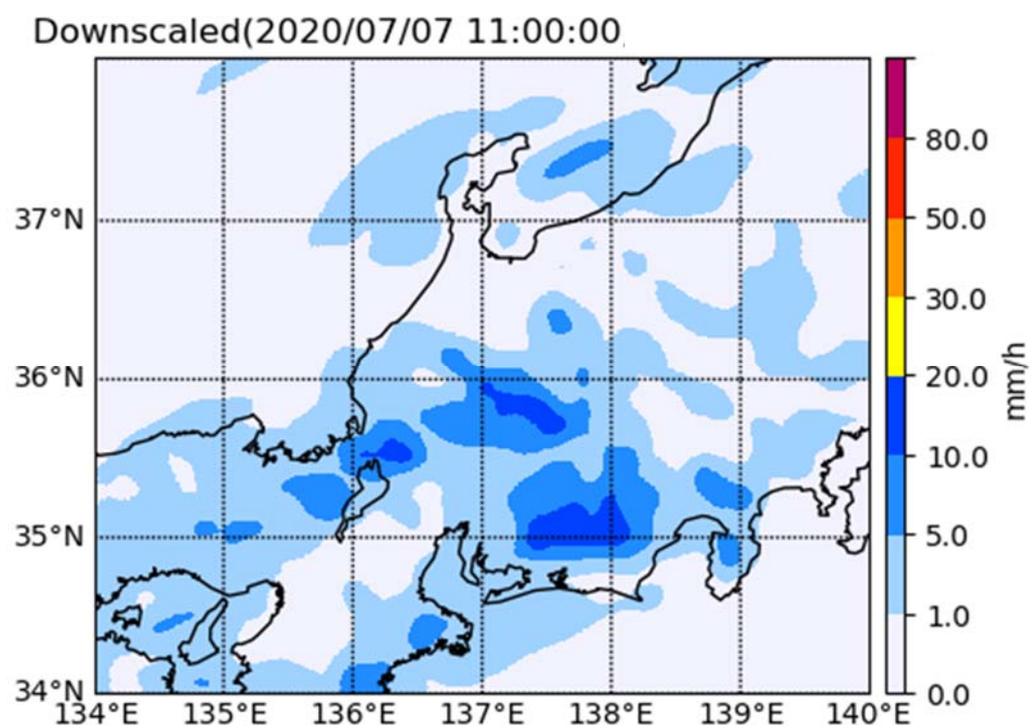
(単位は時間、0に近いほど望ましく赤字が絶対値が最小のもの)

#### (6) 予報プロダクトを入力データとしたダウンスケーリング例

MSM や GSM 等の降雨予報の予報値を入力とした場合のダウンスケーリングの結果例を以下に示す。入力する降雨予報には予報誤差が含まれており、それに対してダウンスケーリングを行った場合の正解データとなり得るものは存在しない（実観測値も正解データとはならない）ため、誤差等の評価は不可能である。このため、例として入力の画像とダウンスケーリングの結果の画像を示す。



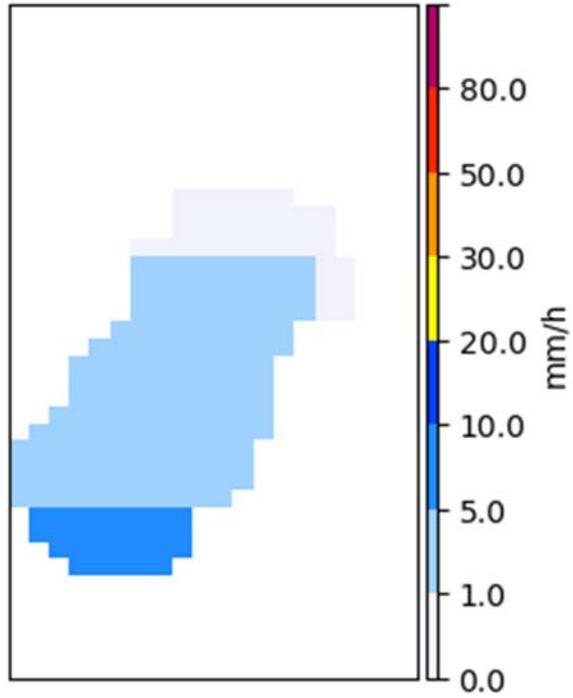
入力した予報値



出力したダウンスケーリング結果

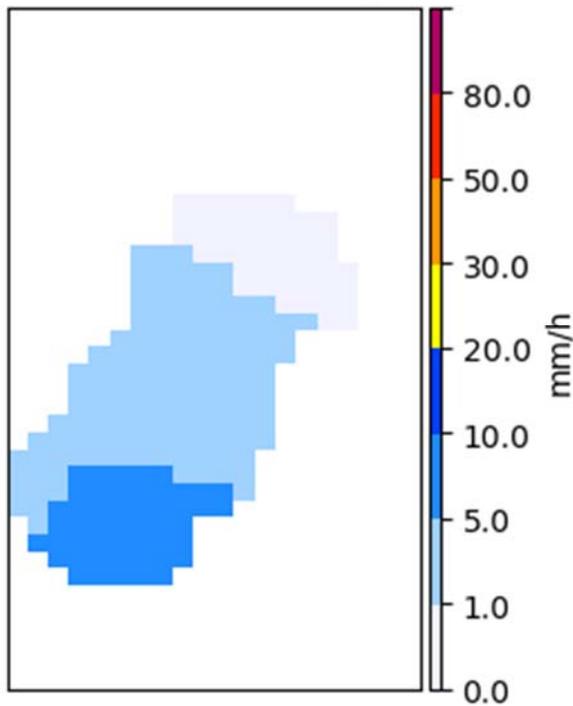
図 4.5-41 黒部ダム：MSM の予報値を入力とした場合のダウンスケーリング例①

Input(2020/07/07 11:00:00)



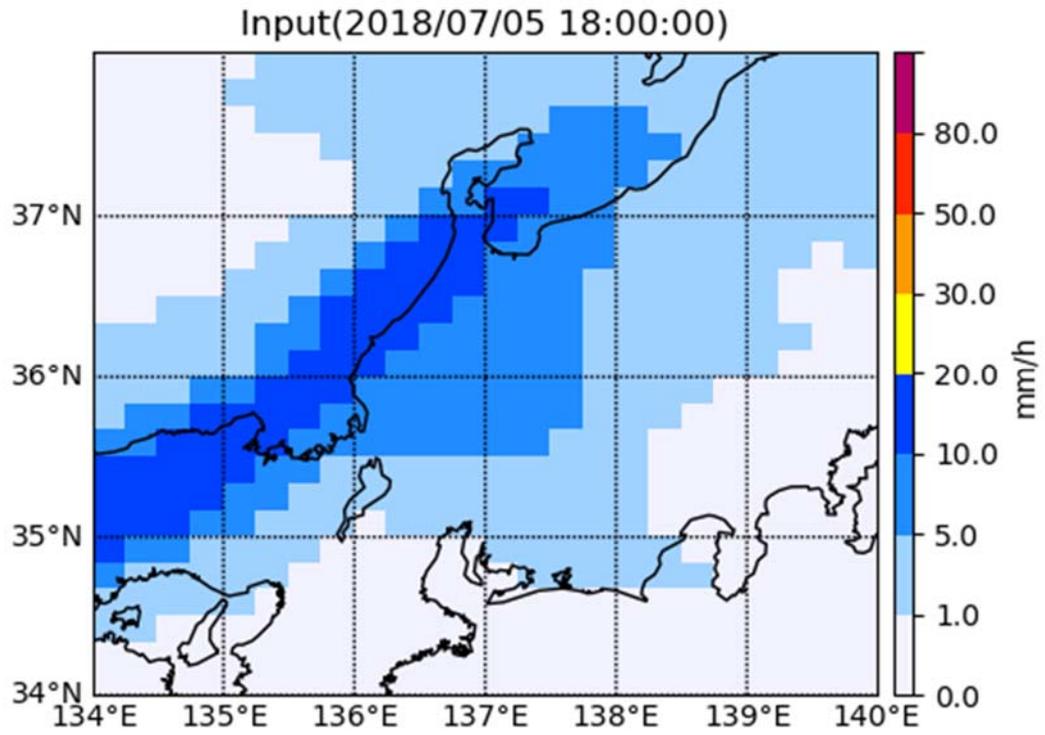
入力した予報値

Downscaled(2020/07/07 11:00:00)

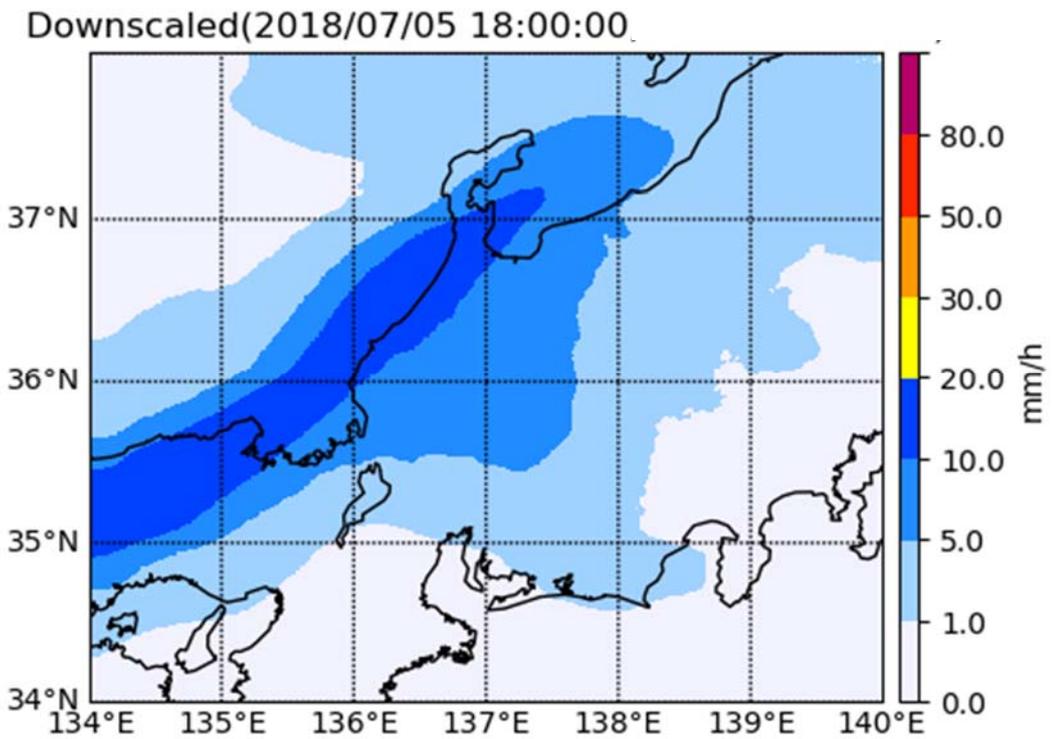


出力したダウンスケーリング結果

図 4.5-42 黒部ダム : MSM の予報値を入力とした場合のダウンスケーリング例②



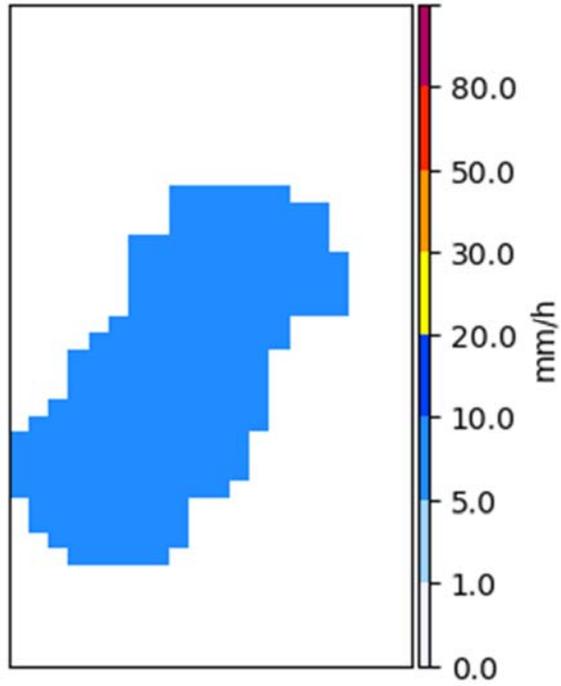
入力した予報値



出力したダウンスケーリング結果

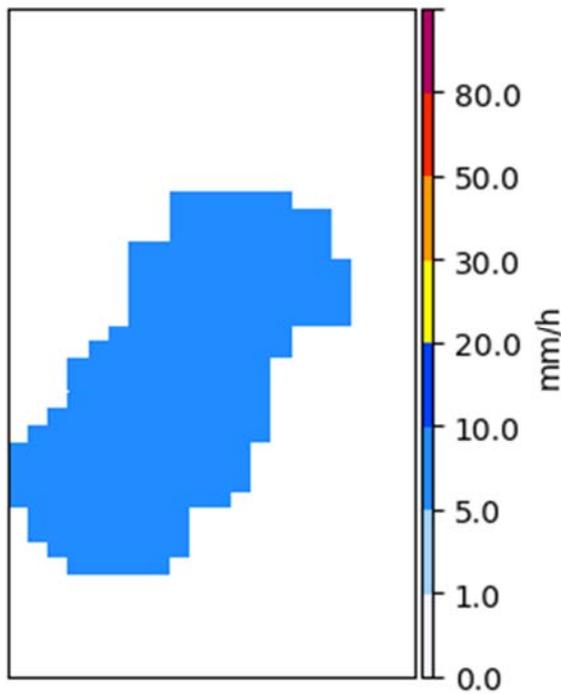
図 4.5-43 黒部ダム：GSMの予報値を入力とした場合のダウンスケーリング例①

Input(2018/07/05 18:00:00)



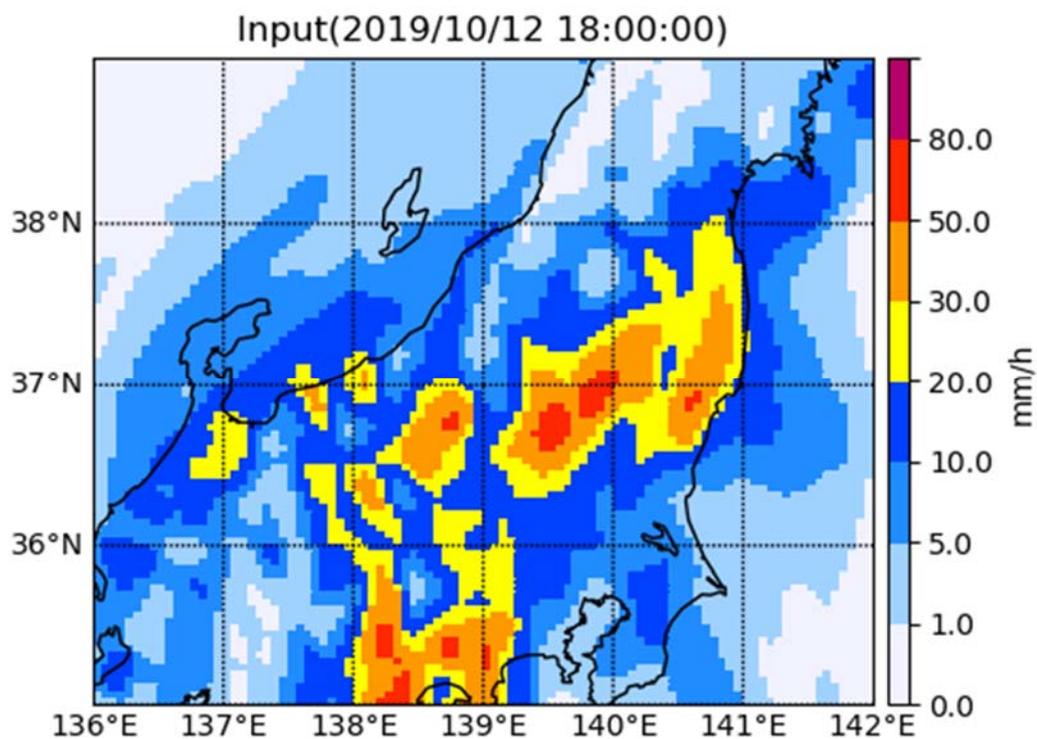
入力した予報値

Downscaled(2018/07/05 18:00:00)

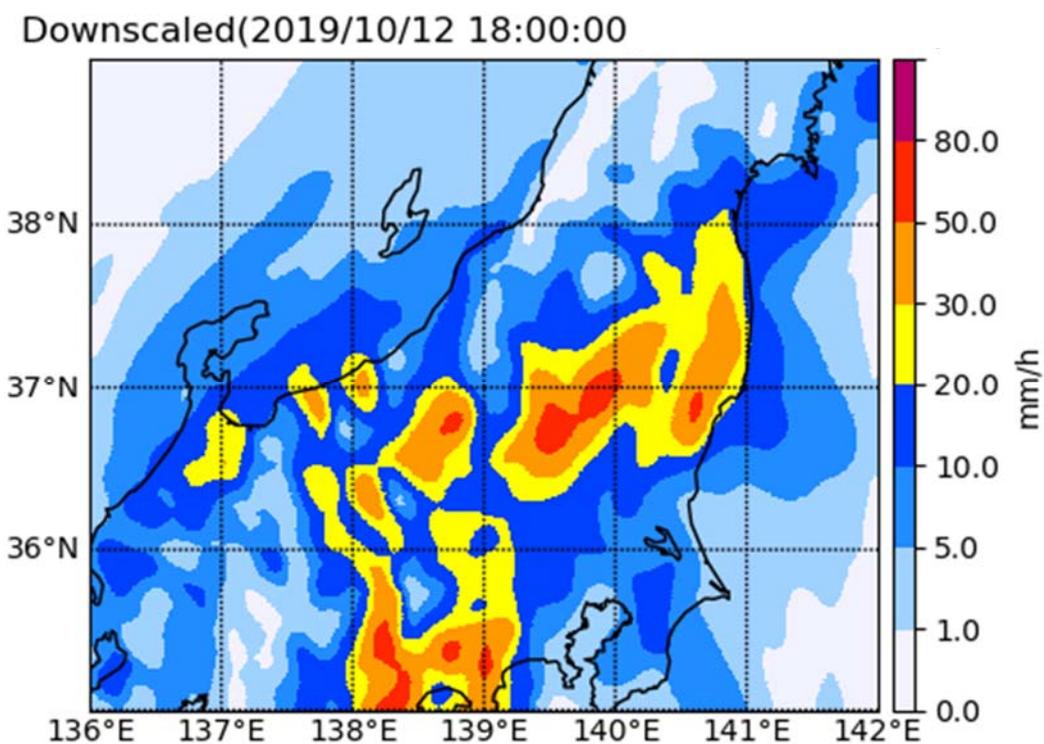


出力したダウンスケーリング結果

図 4.5-44 黒部ダム : GSM の予報値を入力とした場合のダウンスケーリング例②

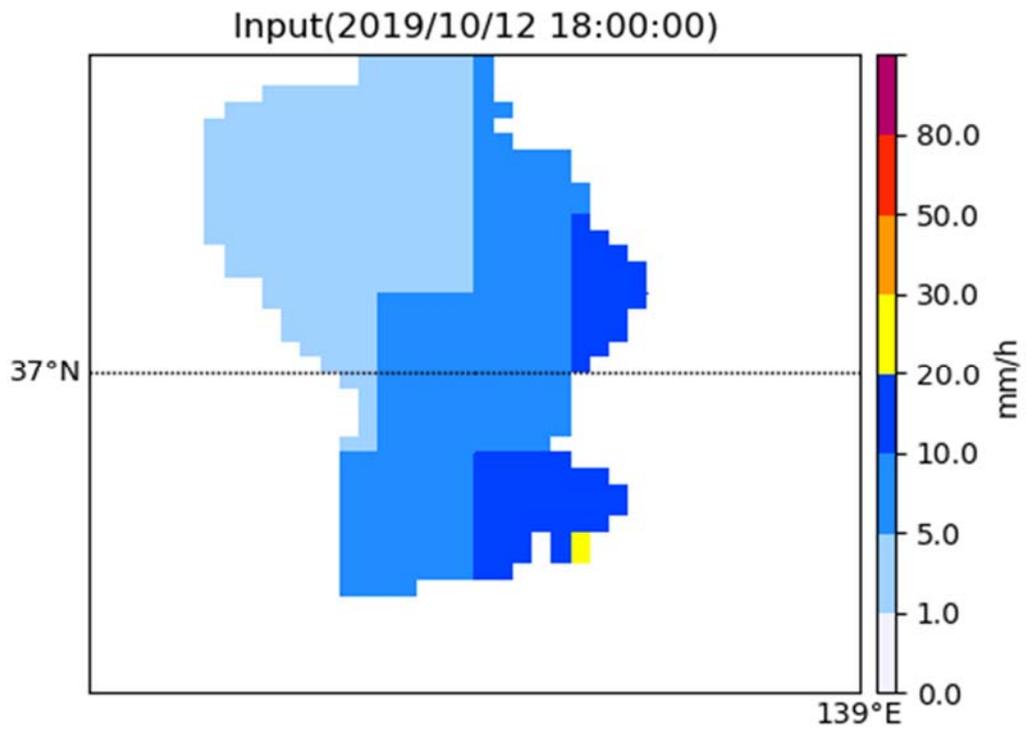


入力した予報値

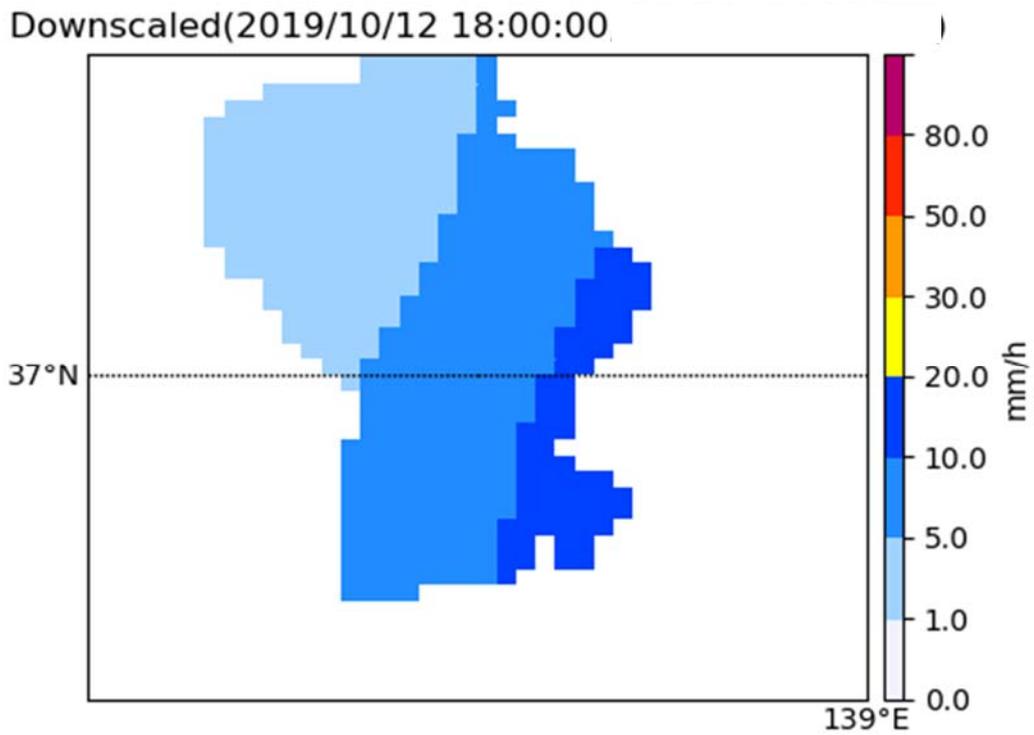


出力したダウンスケーリング結果

図 4.5-45 奥只見ダム：MSMの予報値を入力とした場合のダウンスケーリング例①

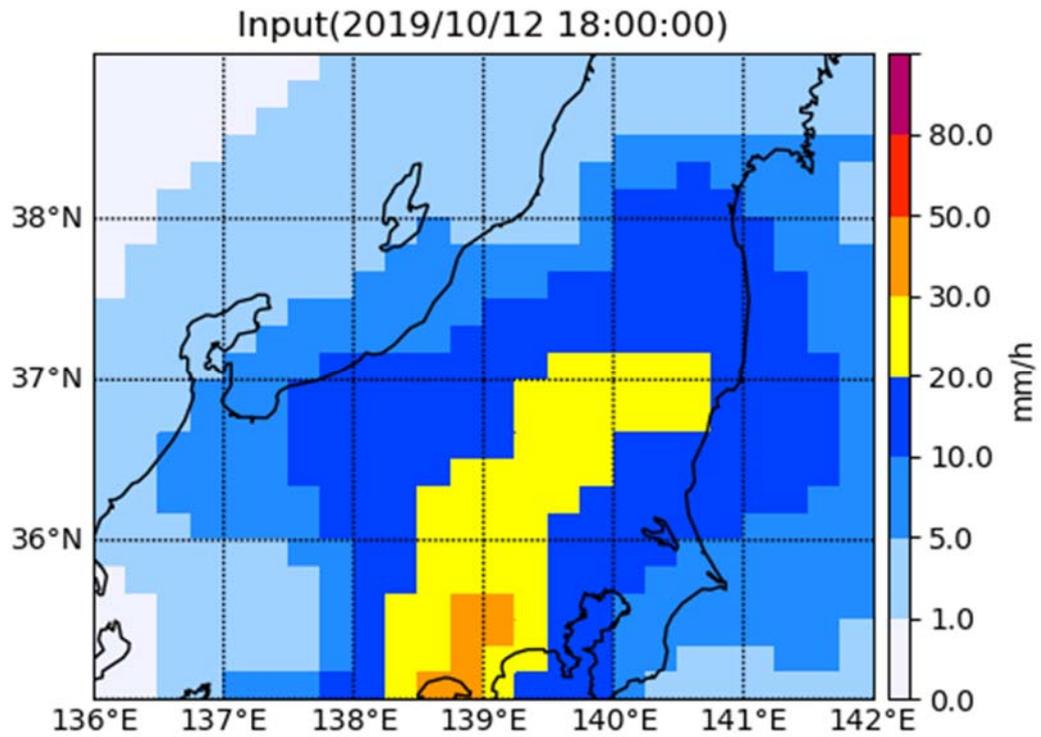


入力した予報値

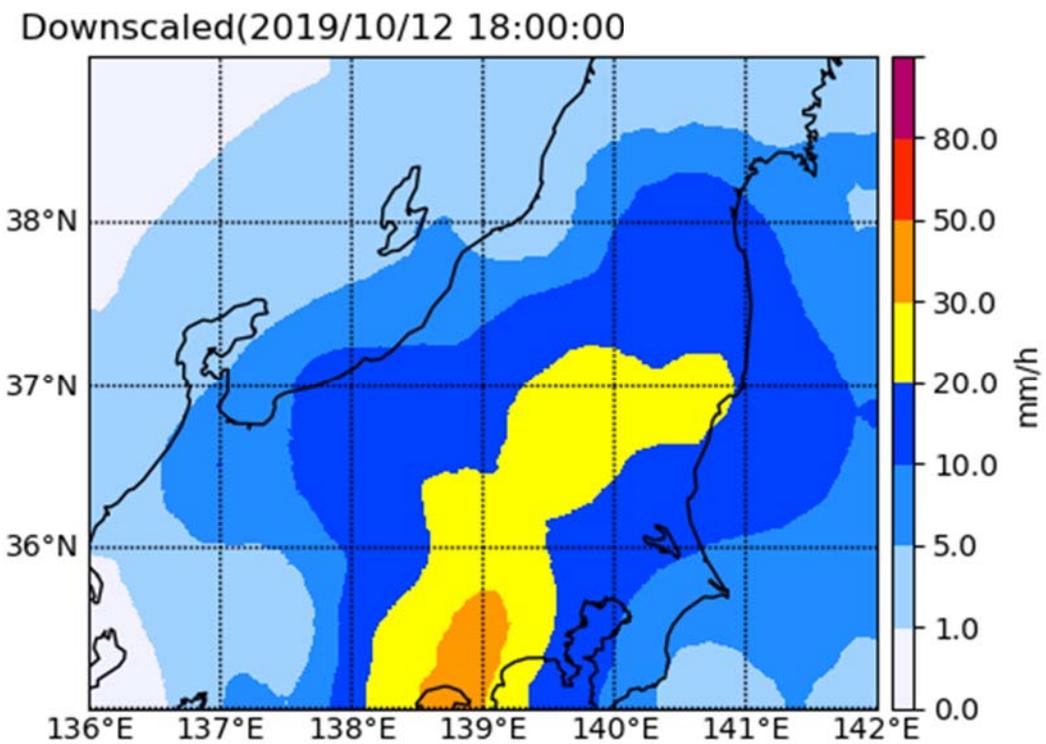


出力したダウンスケーリング結果

図 4.5-46 奥只見ダム : MSM の予報値を入力とした場合のダウンスケーリング例②

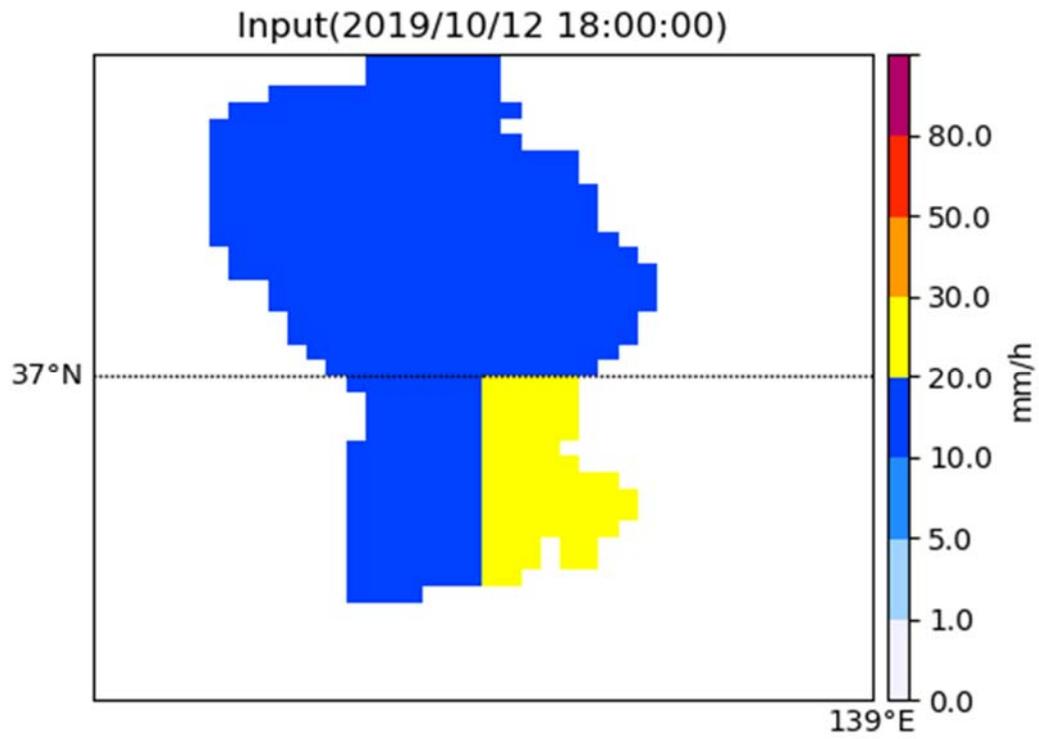


入力した予報値

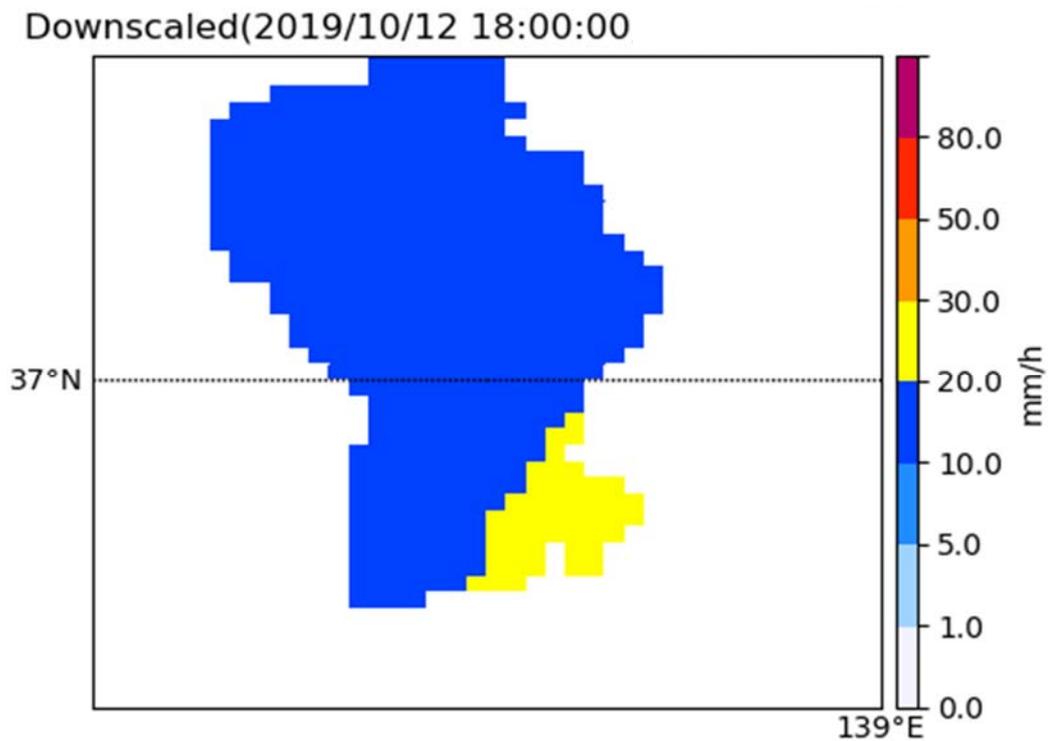


出力したダウンスケーリング結果

図 4.5-47 奥只見ダム : GSM の予報値を入力とした場合のダウンスケーリング例①



入力した予報値



出力したダウンスケーリング結果

図 4.5-48 奥只見ダム : GSM の予報値を入力とした場合のダウンスケーリング例②

#### 4.5.6 考察・まとめ

本検討では、ダムへの流入量の予測に用いる降雨データの精度を高めるため、AI 技術を用いて降雨データの空間解像度及び時間解像度を向上させる手法について検討を行った。

AI 技術を用いた画像のダウンスケーリング技術として知られている SRCNN と、降雨データに特化して SRCNN を拡張した DeepSD を基礎とし、降雨データのより良いダウンスケーリング結果が得られるようにこれらの技術の一部手順を改良すると共に、時間方向へのダウンスケーリングに対応するように拡張した AI モデルを開発した。

黒部ダム流域及び奥只見ダム流域の 2 流域を対象として、それぞれについて開発した AI モデルの検証を行った。その結果、次のことが分かった。

検証を行った大半の降雨において、メッシュサイズが粗い元の入力データよりも、誤差が少なく、評価指標が良好な結果が得られた。また、AI 技術を用いない一般的なダウンスケーリング手法である 3 つの補間手法でダウンスケーリングを行った結果と比較しても、誤差が少なく、評価指標が良好な結果が得られた。

時間方向へのダウンスケーリングにおいて、ダウンスケーリングで生成された降雨データ(入力の 3 時間毎の 2 つの降雨データの間の時間に相当するダウンスケーリング結果)については、空間方向へのダウンスケーリング結果よりも誤差が大きくなっているため、今後検討の余地がある。

今後の AI モデルの拡張・改良として、以下のようなものが考えられる。

- 時間方向へのダウンスケーリングの精度向上について、入力を 3 時間毎の 2 つの降雨画像だけでなくその前後を含めた 3 時間毎 4 つ以上の降雨画像にすることや、雲の移動が関係することから風速や風向など雲の移動に大きく関係すると思われる気象データも入力データとして加えることなどが考えられる。ただし、近年頻発しているゲリラ豪雨等の短時間降雨については、入力の 3 時間毎の 2 つの降雨画像では降雨が無いにもかかわらず、その間の時間には降雨が発生する場合などが考えられ、上記の方法でも対応が難しい。今回検討を行った MSM や GSM の予報は 3, 6, 12, 24 時間間隔(いずれも 24 の約数)で行われることから、GSM の 3 時間間隔の予報は 1 日のうちの決まった時刻の予報ということになり、3 時間間隔の間の時刻の予報は一切存在しない。そこで、同じ 3 時間間隔の予報であっても、予報の更新頻度がより高い予報プロダクトを検討することなどが考えられる。
- 本検討で開発した AI モデルは、先行研究である SRCNN 及び SRCNN を拡張した DeepSD を基礎としているが、SRCNN を他の AI 技術を用いた画像のダウンスケーリング手法に置き換えることでさらに精度が向上する可能性がある。しかし、地域による違いを反映させるために用いた地盤高データを同じように適用できるか、入力から出力

まで一気にダウンスケーリングするのではなく段階的にダウンスケーリングをすることができるか、時間方向へのダウンスケーリングをすることができるか、などの検討が必要である。

- 本検討で開発した AI モデルでは、空間方向へのダウンスケーリングにおいて、20km→5km→1km と途中で 5km のメッシュサイズを挟んでいる。20km→1km の空間方向へのダウンスケーリングは、20km→5km と 5km→1km の空間方向へのダウンスケーリングにそれぞれ特化した異なる AI モデルを連結させることで実現している。これをさらに細かくして、20km→10km→5km→3km(または 2km)→1km 等の途中のメッシュサイズを設け、それぞれのメッシュサイズ間のダウンスケーリングに特化した多数の AI モデルを連結させることで、より結果が向上する可能性があり、検討が必要である。
- 本検討では、ダム流域毎にモデルを構築すると共に、学習データ及びそれを用いた学習もダム流域毎に行っている。一方、日本全国の任意ダム流域におけるダウンスケーリング結果を得るためには、地域を限定しないモデルが望ましい。しかし、日本全国をカバーする AI モデルは巨大になることから、その計算に膨大なリソースを要すると考えられる。そこで、日本全国を複数の地域に分割し、それぞれの地域に限定したモデルを複数構築して、これらの結果を重ね合わせることで任意のダム流域に対応する方法が考えられる。また、ダウンスケール範囲の狭い1つのモデルに対して異なる地域の降雨と地盤高データを学習データとして与えて学習させることで、複数地域に対応する（日本全国をカバーするモデルに比較して）規模の小さいモデルを構築する方法(ただし、特定地域に特化したモデルと比べて精度が落ちると考えられるため、比較検証が必要)などが考えられる。

## **参考文献**

C. Dong, Chen Change Loy, Kaiming He, X. Tang, Image Super-Resolution Using Deep Convolutional Networks, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2016

Thomas Vandal, Evan Kodra, Sangram Ganguly, Andrew Michaelis, Ramakrishna Nemani, Auroop R Ganguly, DeepSD: Generating High Resolution Climate Change Projections through Single Image Super-Resolution, Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining August 2017

## 4.6 流出予測手法（流出解析モデル）の検討

### 4.6.1 候補とする流出解析モデルの検討

今年度の検討においては、令和元年度調査で抽出した代表的な下記6つの流出計算モデルから2種類を候補として選定し、その試計算を行う。

- ・平成30年度 NEDO モデル（H30NEDO モデル）
- ・国土交通省洪水予測基幹システム
- ・RRI モデル
- ・WEB-DHM
- ・HYDREEMS（電中研モデル）
- ・京大モデル

流入量予測システムの計算モデルとして用いることの実現可能性について整理すると表4.6-1のとおりである。

今年度の流入量予測高度化検討委員会において、候補とする流出計算手法についても議論され、次の方針が得られた。

- 令和元年度に概略検討を行った H30NEDO モデルについて、今年度の試計算に用いる。
- RRI モデルは、令和元年度の委員会でも比較対象の候補として挙がっていたモデルであり、今年度の試計算に用いる。

表 4.6-1 候補とする流出解析モデル

	H30NEDOモデル	国土交通省洪水予測基幹システム	RRIモデル	WEB-DHM	HYDREEMS（電中研モデル）	京大モデル
①プログラムの利用・カスタマイズのしやすさ	○	△	○	×	△	○
②想定される予測精度	○	△	○	○	○	△
③計算速度	○	△	○	○	○	○
④モデルのパラメーター設定の容易性	△	△	△	△	△	△
⑤他流域への展開の容易性	○	○	○	○	○	○
総合評価	○		○			

以上より、候補とする流出解析モデルは、H30NEDO モデルと RRI モデルの2種類とした。

## 4.6.2 流出解析モデルの作成

### (1) 解析範囲

図 4.6-1 及び図 4.6-2 中の黒枠で示す黒部ダム上流域および奥只見ダム上流域を解析対象範囲とした。

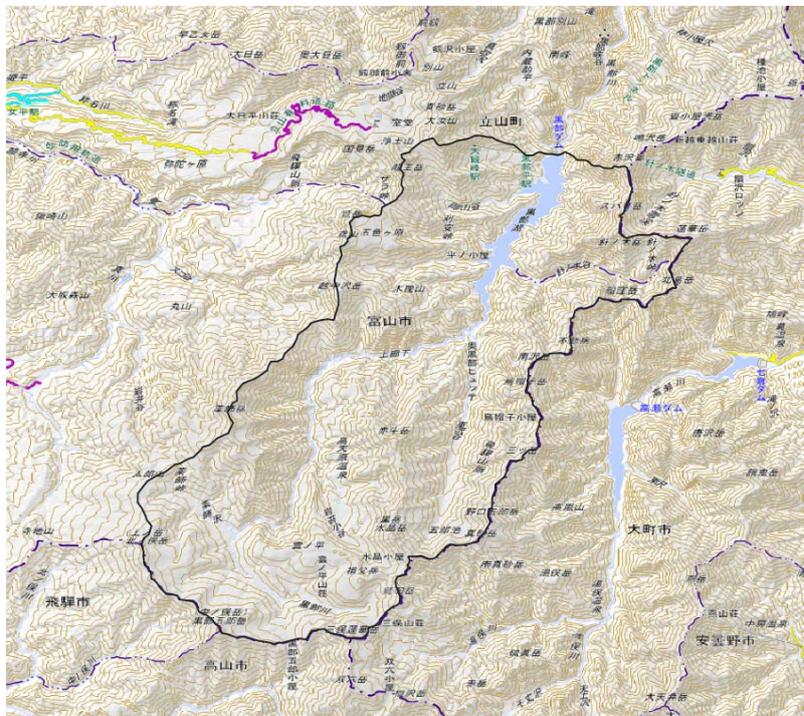


図 4.6-1 黒部ダム流域図（地形図は国土地理院 地理院地図を使用）

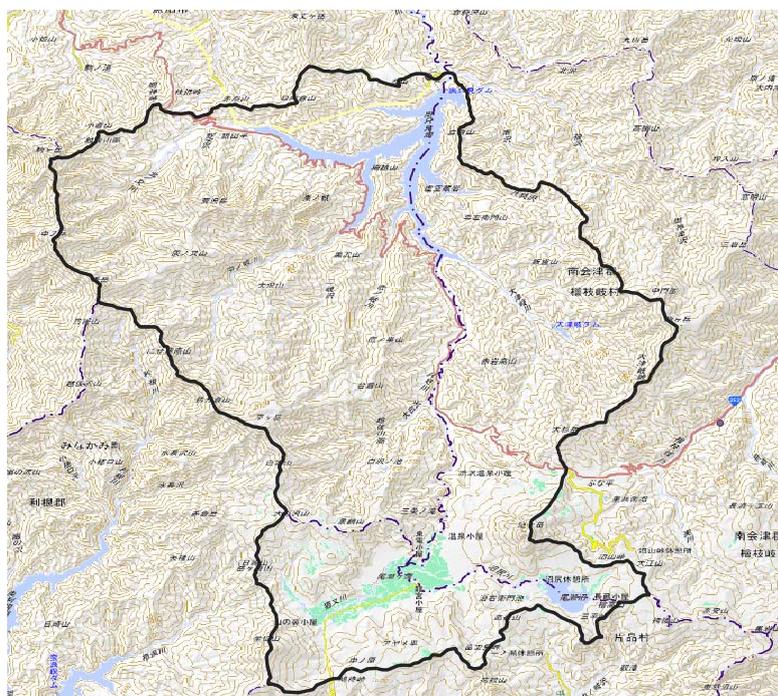


図 4.6-2 奥只見ダム流域図（地形図は国土地理院 地理院地図を使用）

入力降雨データとしては平成 30 年度に行われた「発生電力量最大化を目的とした IoT 技術の活用による流入量予測精度向上および発電運用効率化技術の開発研究」業務で開発された融雪モデルの解析結果を用いる。この融雪モデルは解析雨量データを基に 1km メッシュ、1 時間ごとに融雪量の評価を行っている。解析雨量データおよび融雪モデルデータの例を図 4.6-3 に示す。

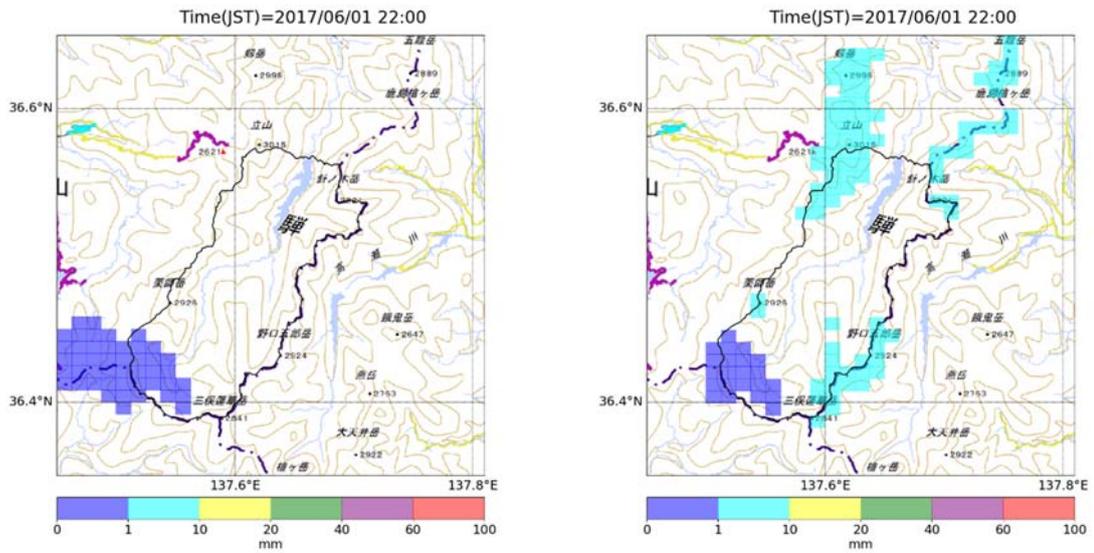


図 4.6-3 解析雨量(左)および融雪モデル(融雪量+降雨量)(右)の例(黒部ダム流域)  
(融雪モデルについては黒部川流域セルのみ表示、地形図は国土地理院 地理院地図を使用)

## (2) 水収支に関する検討

解析雨量の各年の10月から翌年の9月までの1年を単位として計算した解析雨量流域平均と流入量データの年間雨量・流入量を図4.6-4に示す。解析雨量(青)と流入量(橙)を比較すると流入量の方が大きく、水収支がとれていないことがわかる。解析雨量データの作成に用いられるレーダー雨量計は降水量を把握することを目的として設計されており、降雪量の精度について課題があることが知られている。NEDO 報告書に従い11月から3月までを降雪期とし、2倍の割増率をかける(図4.6-4の灰色)と、2008年および2009年については比較的水収支が取れる結果となった。ただし、それ以外の特に2013年以降は水収支が取れておらず実際の流入量に対して降雨量が過小であることがわかる。

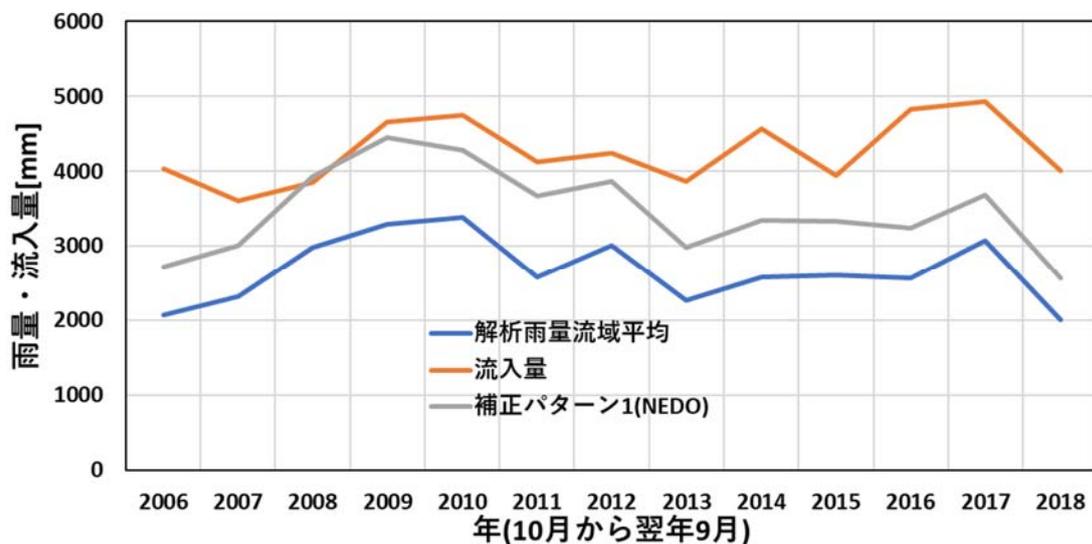


図4.6-4 解析雨量流域平均(青色)と黒部ダム流入量(橙色)、および冬期に対して補正係数を乗じた場合(灰色)の比較

融雪モデルの結果をそのまま入力として用いた場合、降雨量が過小となってしまう。パラメータ最適化手法であるSCE-UA法を適用するには水収支が取れていることが重要であると考えられるので、今回は各年の水収支を満たすように既往融雪モデル計算結果のうち、融雪量分に補正係数をかけることで対応した。補正係数一覧は表4.6-2にまとめた。

表 4.6-2 融雪量に乗じる補正係数表

年	解析雨量流域平均	黒部ダム流入量	夏の降雨量	流入量－夏の降雨量	融雪量	融雪量に乗じる補正係数
2006	2074.7	4031.0	1424.0	2607.0	1301.3	2.0
2007	2322.2	3607.0	1631.8	1975.2	1380.9	1.4
2008	2982.9	3857.8	2035.5	1822.3	1894.8	1.0
2009	3291.5	4662.1	2130.2	2531.9	2322.5	1.1
2010	3386.6	4754.4	2497.1	2257.2	1778.9	1.3
2011	2575.7	4119.0	1481.6	2637.4	2188.1	1.2
2012	3005.8	4246.5	2150.5	2096.0	1710.5	1.2
2013	2268.6	3859.6	1553.0	2306.6	1431.3	1.6
2014	2574.8	4562.9	1803.4	2759.5	1542.8	1.8
2015	2599.6	3948.9	1868.5	2080.4	1462.1	1.4
2016	2562.8	4821.6	1885.2	2936.4	1355.2	2.2
2017	3070.3	4934.9	2451.8	2483.1	1237.1	2.0
2018	2000.8	4013.2	1440.4	2572.9	1120.9	2.3

<奥只見ダム流域に関する検討>

奥只見流域の解析雨量流域平均と流入量データの年間雨量・流入量を図 4.6-5 に示す。奥只見ダム流域についても黒部ダム流域同様に流入量が解析雨量流域平均より大きくなる結果であった。奥只見流域については、今回は補正係数に乗じることなしに対応した。

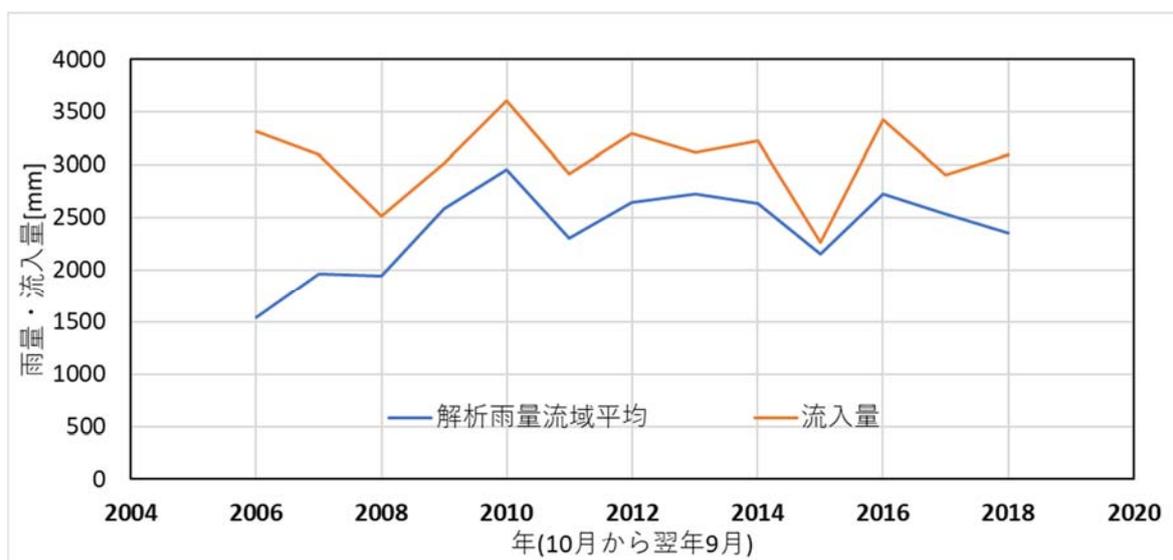


図 4.6-5 解析雨量流域平均(青色)と黒部ダム流入量(橙色)、および冬期に対して補正係数に乗じた場合(灰色)の比較

### (3) 奥只見ダム流域の流量データに関する取り扱い

奥只見ダム流域には間接流域があり、桧枝岐・舟岐川からの取水を行っている。取水量(日平均流量で1~10m<sup>3</sup>/sec程度)は出水時のピーク流量と比較すると小さいが、基底流量と比較すると無視できないと考えられるので、奥只見ダム流入量から実績取水量を引いた残りを直接流域分の流入量とし、流出解析による予測を行うこととした。

ここで奥只見ダム流入量データは図4.6-6の青線で図示するように基底流量の変動が大きく、単純に実績取水量を引いた場合、直接流域からの流入量が負になる場合がある問題が生じた。今回は流量100m<sup>3</sup>/secより小さい時点のデータについて5時間の移動平均をとる手法により平滑化を行い、平滑化後のデータから実績取水量を引くことによって対応した。100m<sup>3</sup>/secの制限を設けている理由は一律に移動平均などの短周期成分を除去する手法により平滑化を行った場合、ピーク流量が小さくなってしまうためである。

なお、黒部ダム流域の間接流域は小さく、この問題は生じない。

- ① 平滑化後の奥只見ダムの実績流入量から桧枝岐・舟岐川の実績取水量を差し引き直接流域分の流出量とする。この直接流域分のデータ例を図4.6-6の灰色線で示した。
- ② ①の流量とRRIモデルまたはH30NEDOモデル計算結果(直接流域分)との比較を行い、パラメータ最適化を行う。
- ③ 奥只見ダム流入量の計算値としては、直接流域分の計算値に桧枝岐・舟岐川の実績取水量を足す。

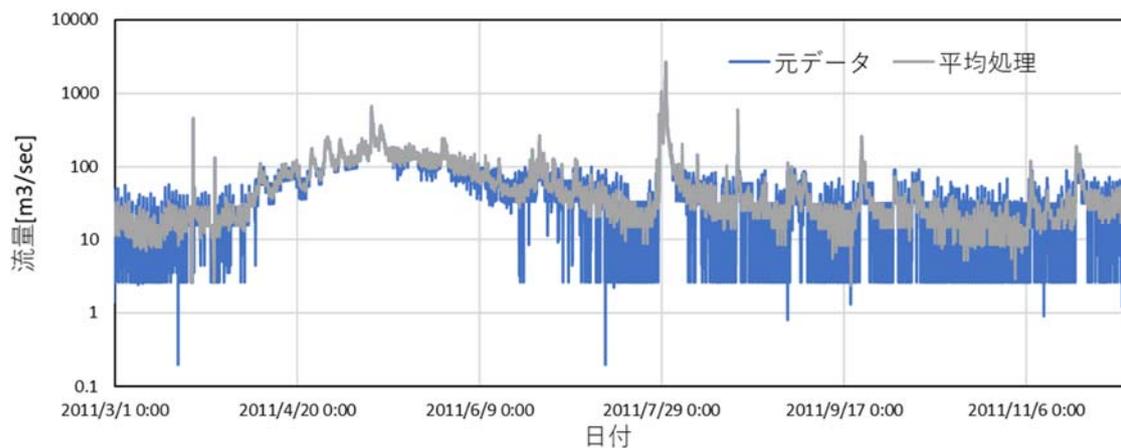


図4.6-6 奥只見ダム流入量データ例(2011年)

#### (4) RRI モデル

RRI (Rainfall-Runoff-Inundation) モデルは佐山ら[1]により開発された降雨を入力として河道流量から洪水氾濫までを流域スケールで一体的に解析できる降雨流出氾濫モデルである。

RRI モデルでは以下の地理入力データを用いる。

- ・地盤高データ
- ・落水方向データ (8 方向データ)
- ・地点上流のセル数データ

黒部ダム流域、奥只見ダム流域の地理データをそれぞれ図 4.6-7、図 4.6-8 に図示する。

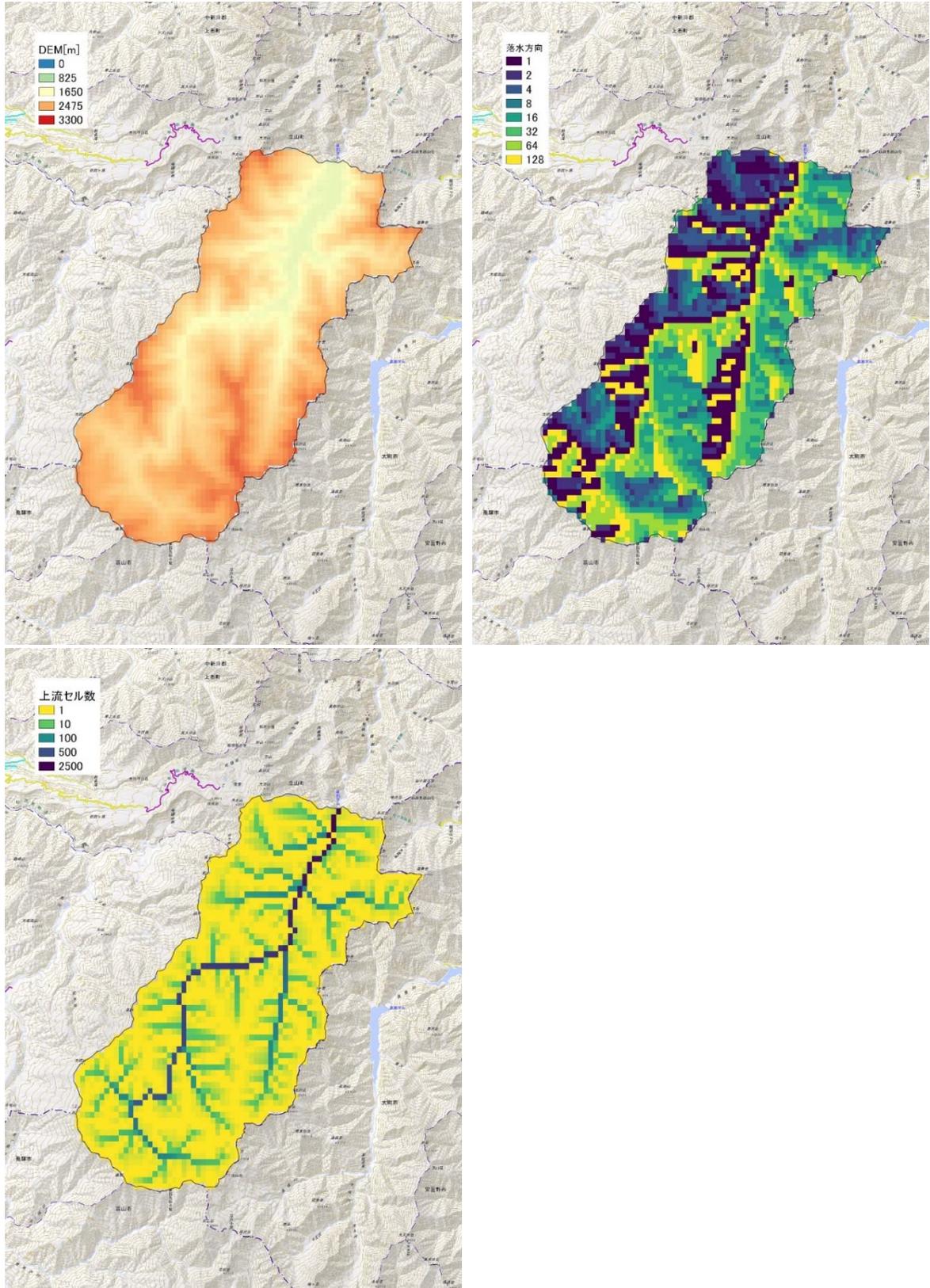


图 4.6-7 黒部ダム流域地盤高(左上)、落水方向(右上)、上流セル数(左下)

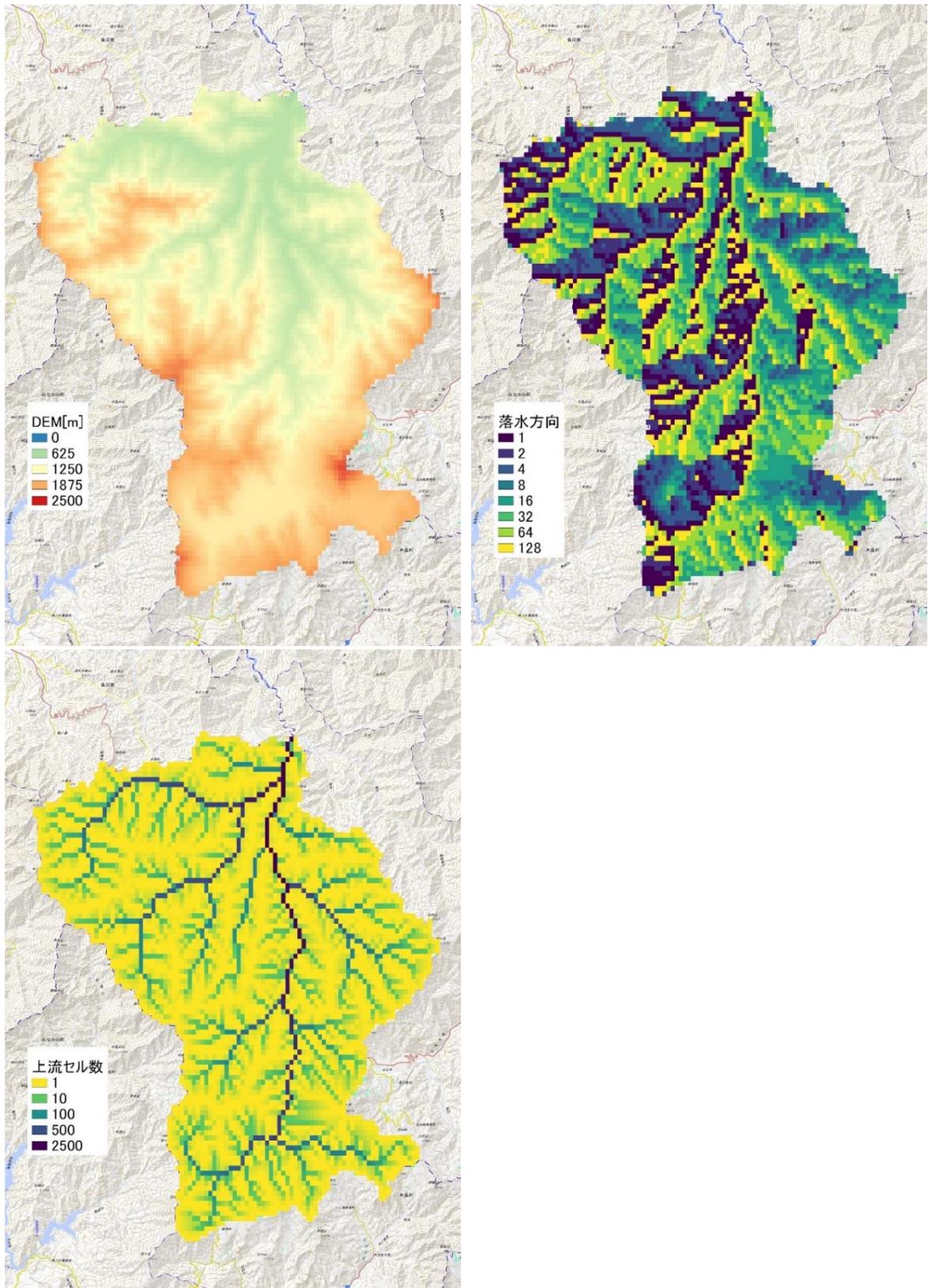


图 4.6-8 奥只見ダム流域地盤高(左上)、落水方向(右上)、上流セル数(左下)

### 4.6.3 パラメータの設定検討

#### (1) RRI モデルのパラメータ設定について

##### 1) 黒部ダム流域のパラメータ設定

パラメータ調整は最適化手法である SCE-UA 法を用いて実施する。調整前の試算用のパラメータとして、文献などを参考に物理的に適切と考えられる値を与えた。設定パラメータを表 4.6-3 および表 4.6-4 に示す。河道の断面形状としては RRI モデルの標準的な手法になり、矩形断面を設定し川幅および深さは Regime 理論により各断面までの上流域の面積から計算した。上流面積と川幅、深さの関係を図 4.6-9 および図 4.6-10 に示す。

表 4.6-3 設定パラメータ(黒部ダム流域、RRI モデル)

項目	設定値	備考
河道設定の閾値	10	単位：セル数
川幅パラメータ( $C_W$ )	5	デフォルト値
川幅パラメータ( $S_W$ )	0.35	デフォルト値
水深パラメータ( $C_D$ )	0.95	デフォルト値
水深パラメータ( $S_D$ )	0.2	デフォルト値
河道のマニング粗度係数[ $m^{-\frac{1}{3}}s$ ]	0.02	
土地利用種類数	1	
初期地下水面までの深さ	20m	領域一定とする。

表 4.6-4 斜面の設定パラメータ(黒部ダム流域、RRI モデル)

項目	設定値
斜面上の粗度係数[ $m^{-\frac{1}{3}}s$ ]	0.2
土壌深さ[m]	0.2
実効空隙率( $\gamma_a$ )	0.475
飽和透水係数( $k_a$ ) [m/s]	0.1
実効空隙率( $\gamma_m$ )	0.05
不飽和時のパラメータ( $\beta$ )	8
基岩の透水係数( $k_{gv}$ )(長期計算時) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-6}$
基岩の空隙率( $\gamma_g$ )	0.037
基岩上面における側方の飽和透水係数( $k_{g0}$ ) [m/s]	$5.0 \cdot 10^{-5}$
飽和透水係数の鉛直方向の低減( $f_{pg}$ )	0.05
系外への流出パラメータ( $\gamma_{gl}$ ) [m/s]	0.0

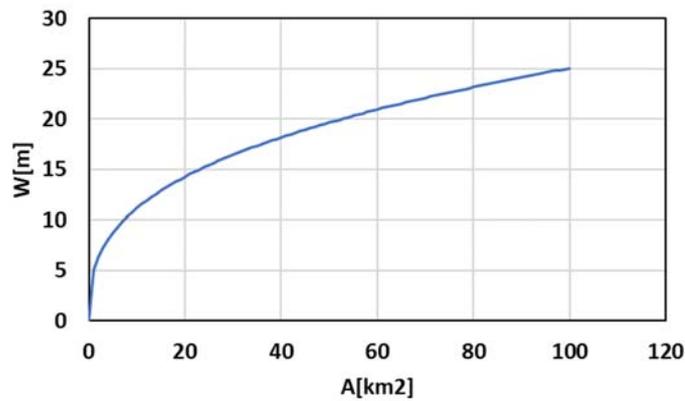


図 4.6-9 上流域面積と川幅の関係

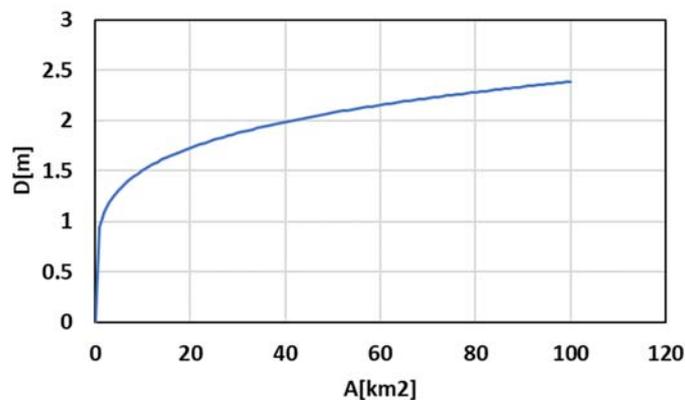


図 4.6-10 上流域面積と川の深さの関係

<黒部ダム流域長期計算結果>

2007年～2017年を対象に、各年の4月1日から11月1日までの長期計算を行った。その計算結果の例を示す。計算には表4.6-4に示したパラメータを用い、各年とも3月1日から助走期間として計算を行った。計算結果を見ると、各年についておおむね長期の流量変動をとらえることができている。なお、解析降雨データは降雨、降雪の区別がないため、冬期は対象範囲外としている。

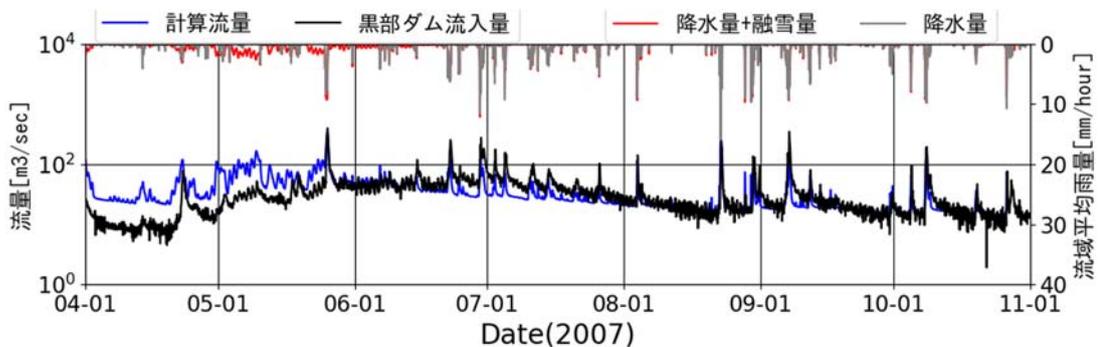


図 4.6-11 長期計算結果の例(黒部ダム流域、RRI モデル)

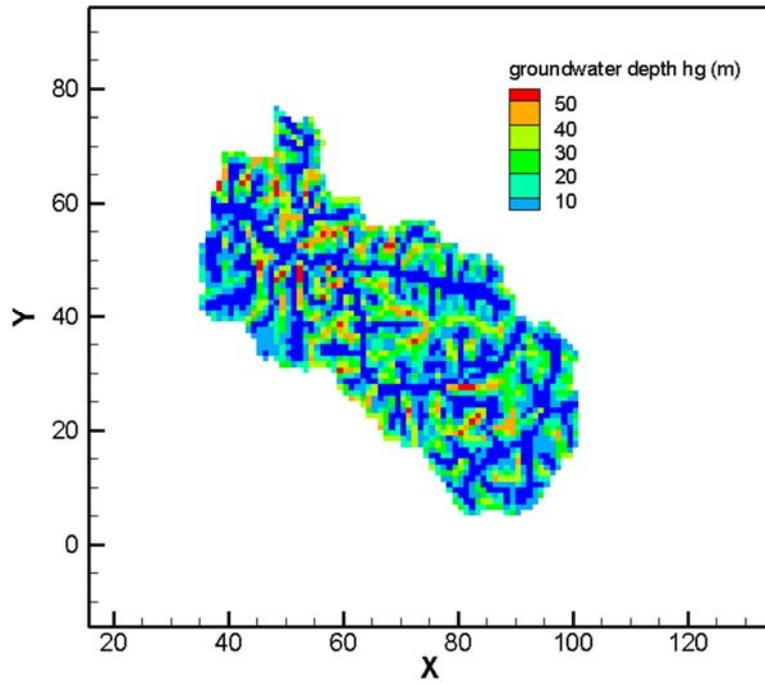


図 4.6-12 一定時間経過後の地下水面までの深さ分布

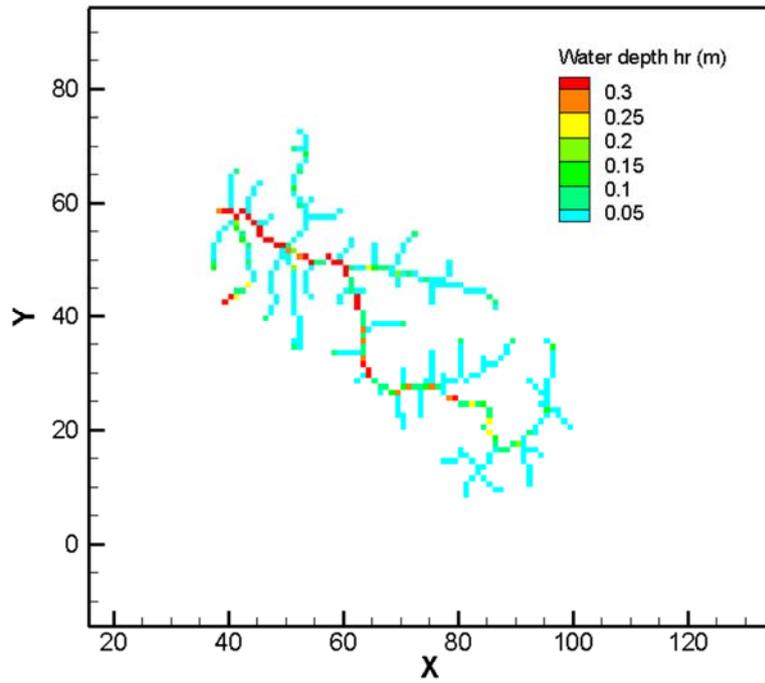


図 4.6-13 上図と同じ時刻での河川水深分布

## 2) 奥只見ダム流域のパラメータ設定

奥只見ダム流域についても黒部ダム流域同様に計算を行った。用いた斜面の設定パラメータは表 4.6-5 の通りである。河道の設定は黒部ダム流域と同じとした。

表 4.6-5 斜面の設定パラメータ(奥只見ダム流域、RRI モデル)

項目	設定値
斜面上の粗度係数 $[m^{-\frac{1}{3}}s]$	0.27
土壌深さ[m]	1.7
実効空隙率( $\gamma_a$ )	0.7
飽和透水係数( $k_a$ ) [m/s]	0.2
実効空隙率( $\gamma_m$ )	0.06
不飽和時のパラメータ( $\beta$ )	10
基岩の透水係数( $k_{gv}$ )(長期計算時) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-6}$
基岩の空隙率( $\gamma_g$ )	0.037
基岩上面における側方の飽和透水係数( $k_{g0}$ )[m/s]	$1.0 \cdot 10^{-5}$
飽和透水係数の鉛直方向の低減( $f_{pg}$ )	0.1
系外への流出パラメータ( $\gamma_{gl}$ )[m/s]	0.0

### <奥只見ダム流域長期計算結果>

2007年～2019年を対象に、黒部ダム流域同様に各年の4月1日から11月1日までの長期計算を行った。その計算結果の例を示す。計算には表 4.6-5 に示したパラメータを用い、各年とも3月1日からを助走期間として計算を行った。計算結果を見ると、各年についておおむね長期の流量変動をとらえることができている。

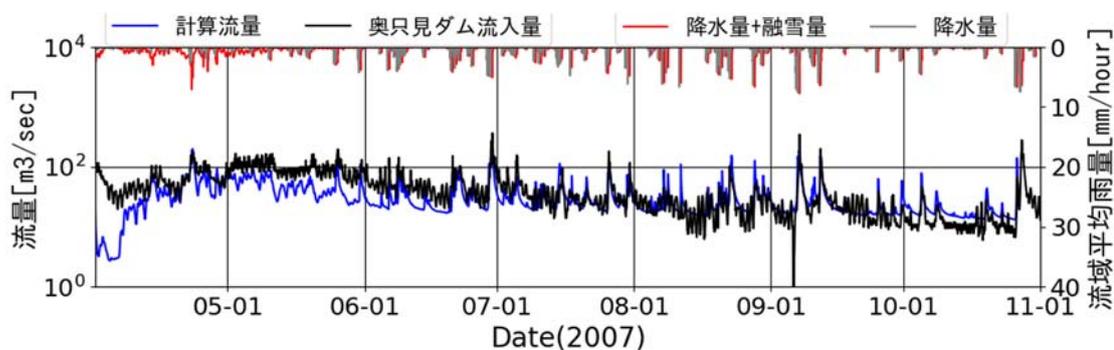


図 4.6-14 長期計算結果の例(奥只見ダム流域、RRI モデル)

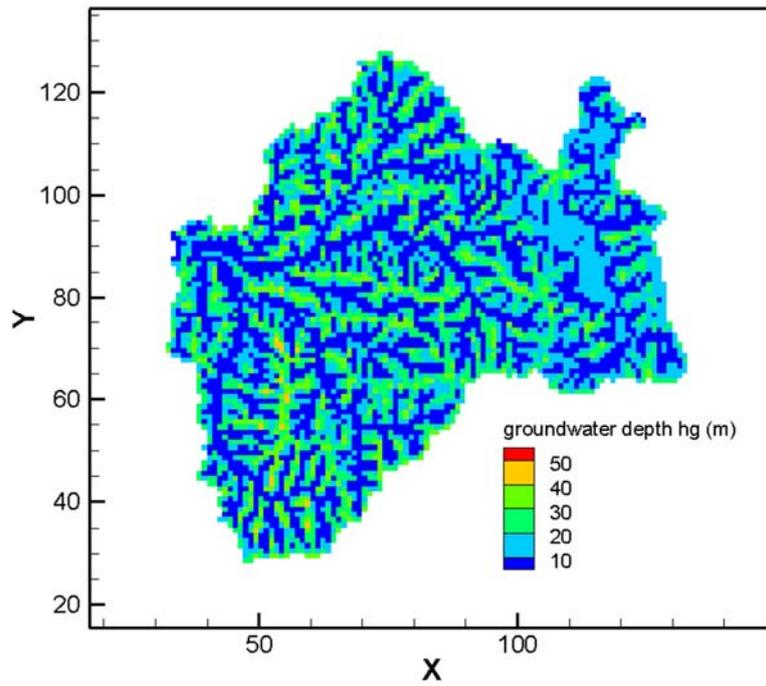


図 4.6-15 一定時間経過後の地下水面までの深さ分布

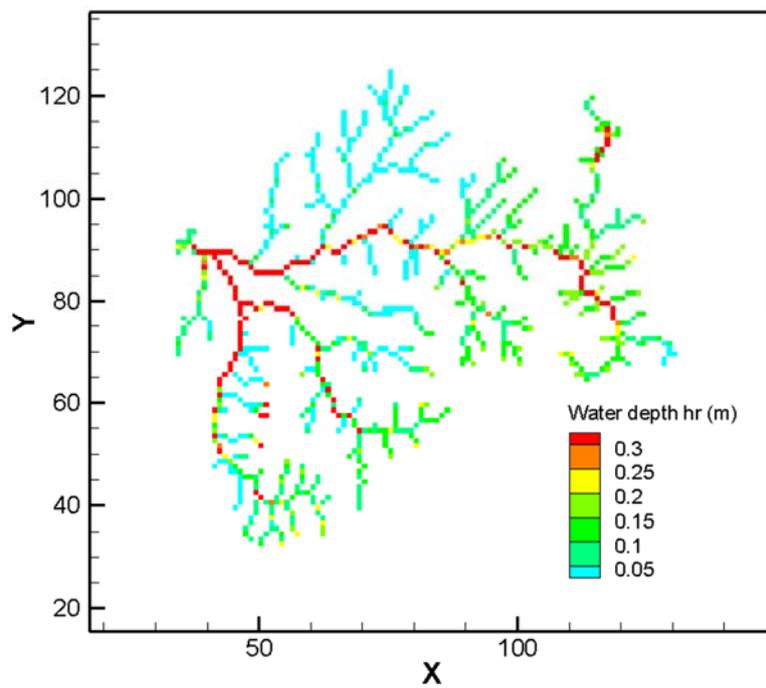


図 4.6-16 上図と同じ時刻での河川水深分布

## (2) H3ONEDO モデルのパラメータ設定について

### 1) H3ONEDO モデル

NEDO による平成 30 年度「発生電力量最大化を目的とした IoT 技術の活用による流入量予測精度向上および発電運用効率化技術の開発研究」で開発された流出計算モデルを使用する。モデルの詳細は、同報告書に示されるとおりである。

このモデルは、**図 4.6-17** に示すように、まず 50m メッシュの落水線上で計算を行う詳細な流出計算モデルを作成し、そのあと、その詳細なモデルを数 km<sup>2</sup> の部分流域ごとに集中型のモデルで近似することにより、計算所要時間を短縮している。

しかし本業務においては、今後、黒部川流域以外の河川へ展開することを考慮し、人為的な判断を含む手作業的な集中化の作業を行わないものとし、元の詳細なモデルをそのまま用いるものとした。

ただし、50m メッシュの細かさで計算を行うと長い計算時間を要し、今後、実働のシステムで稼働させることや、後述の SCE-UA 法の適用が困難になるため、250m メッシュ、1km メッシュのモデルを作成し、最終的に、250m メッシュのモデルを採用するものとした。

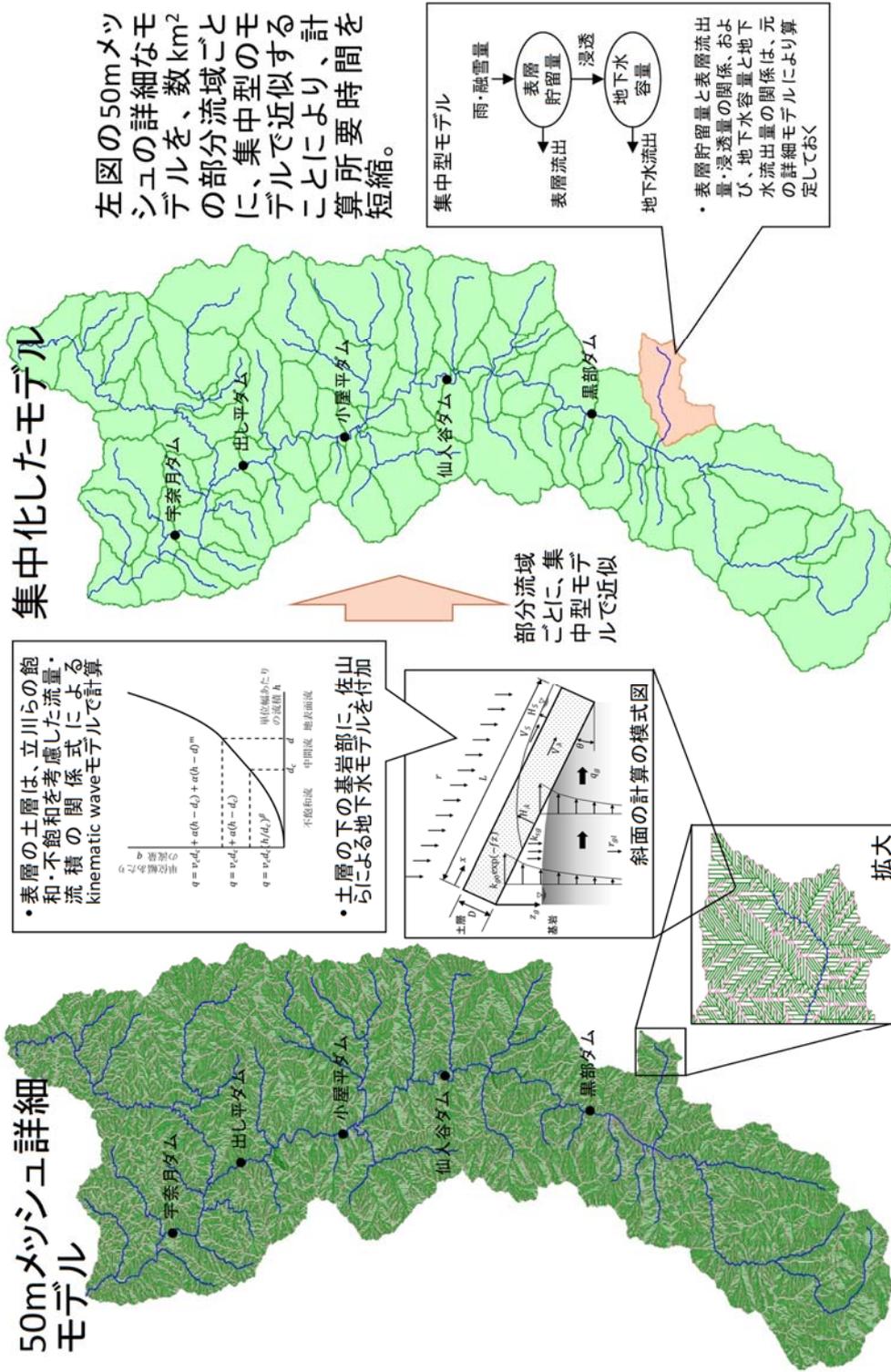


図 4. 6-17 H3ONEDO モデルの流域データ

## 2) 黒部ダム流域のパラメータ設定

パラメータ調整は最適化手法である SCE-UA 法を用いて実施する。調整前の試計算用のパラメータとして、文献などを参考に物理的に適切と考えられる値を与えた。設定パラメータを表 4.6-6 および表 4.6-7 に示す。

表 4.6-6 設定パラメータ(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

項目	設定値	備考
表面流のキネマティックウェーブの係数	5/3	
土地利用種類数	1	
初期地下水面までの深さ	20m	領域一定とする。

表 4.6-7 斜面の設定パラメータ(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

項目	設定値
斜面上の粗度係数 $[m^{-\frac{1}{3}}s]$	0.2
土壌深さ[m]	0.2
実効空隙率( $\gamma_a$ )	0.475
飽和透水係数( $k_a$ ) [m/s]	0.1
実効空隙率( $\gamma_m$ )	0.05
不飽和時のパラメータ( $\beta$ )	8
基岩の透水係数( $k_{gv}$ )(長期計算時) [m/s]	$8.0 \cdot 10^{-6}$
基岩の空隙率( $\gamma_g$ )	0.037
基岩上面における側方の飽和透水係数( $k_{g0}$ )[m/s]	$1.0 \cdot 10^{-5}$
飽和透水係数の鉛直方向の低減( $f_{pg}$ )	0.05
系外への流出パラメータ( $\gamma_{gl}$ )[m/s]	0.0

### <H3ONEDO モデル黒部ダム流域長期計算>

RRI モデルと同様に、2007 年～2017 年を対象に各年の 4 月 1 日から 11 月 1 日までの長期計算を行った。その計算結果の例を示す。パラメータは対象年によらず同じ値を用いている。

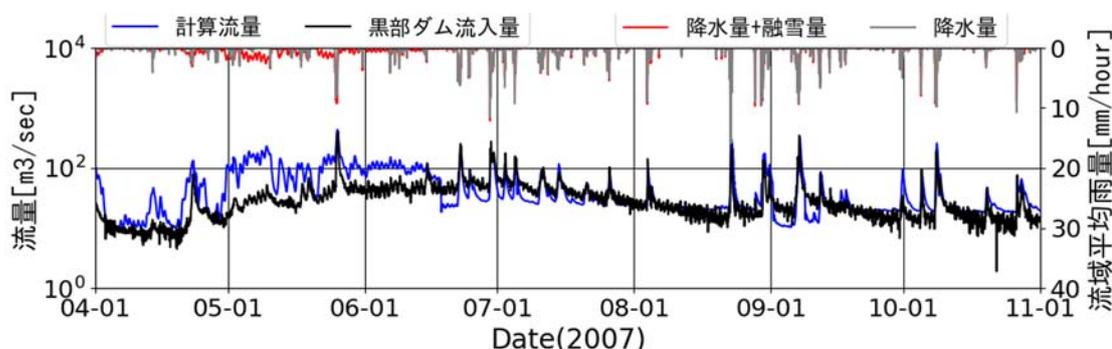


図 4.6-18 長期計算結果の例(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

### 3) 奥只見ダム流域のパラメータ設定

H3ONEDO モデルに与えた奥只見ダムの設定パラメータを表 4.6-8 および表 4.6-9 に示す。

表 4.6-8 設定パラメータ (奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

項目	設定値	備考
表面流のキネマティックウェーブの係数	5/3	
土地利用種類数	1	
初期地下水面までの深さ	20m	領域一定とする。

表 4.6-9 斜面の設定パラメータ (奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

項目	設定値
斜面上の粗度係数 $[m^{-\frac{1}{3}}s]$	0.27
土壌深さ[m]	1.7
実効空隙率 $(\gamma_a)$	0.588
飽和透水係数 $(k_a)$ [m/s]	0.3
実効空隙率 $(\gamma_m)$	0.03
不飽和時のパラメータ $(\beta)$	5
基岩の透水係数 $(k_{qv})$ (長期計算時) [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-5}$
基岩の空隙率 $(\gamma_g)$	0.037
基岩上面における側方の飽和透水係数 $(k_{g0})$ [m/s]	$1.0 \cdot 10^{-5}$
飽和透水係数の鉛直方向の低減 $(f_{pg})$	0.5
系外への流出パラメータ $(\gamma_{gl})$ [m/s]	0.0

<H3ONEDO モデル奥只見ダム流域長期計算>

RRI モデルと同様に、2007 年～2019 年を対象に各年の 4 月 1 日から 11 月 1 日までの長期計算を行った。その計算結果の例を示す。パラメータは対象年によらず同じ値を用いている。

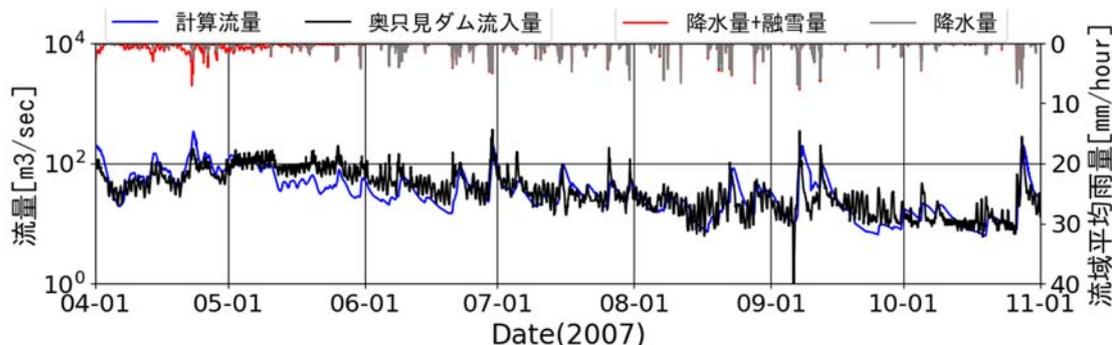


図 4.6-19 : 長期計算結果の例 (奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

### (3) パラメータの設定検討

#### 1) SCE-UA 法のアルゴリズム

パラメータセットの最適化には SCE-UA ( shuffled complex evolution method developed at the university of Arizona )法 ([2])を適用する。SCE-UA 法はランダム探索法や滑降シンプレックス法、遺伝的アルゴリズムに類似した概念を備えており、大域的探索法と局所探索法とのハイブリッド型の最適化手法であるという。流出解析モデルへの適用事例も多く、有用なパラメータ同定手法であるとされている。SCE-UA 法のアルゴリズムを以下に示す。また、フローを図 4.6-20 に示す。

##### ● ステップ 1

集団の個数  $p$  ( $\geq 1$ ) と各集団における個体の数  $m$  ( $m \geq n + 1$ ) を設定する。ここで、 $n$  は探索対象のパラメータの個数 (次元) である。

##### ● ステップ 2

$s (= pm)$  個の個体  $X_1, \dots, X_s$  を探索空間  $\Omega \in R^n$  からランダムに生成する。ここで各  $X = (x_1, \dots, x_n)^T$  は  $n$  個の探索対象パラメータをまとめたベクトルである。各個体における目的関数値  $f_1, \dots, f_s$  を計算し、各個体を目的関数値の小さい順に並べ替える。

##### ● ステップ 3

$s$  個の個体を  $m$  個の個体を含む  $p$  個の集団  $A^1, \dots, A^p$  に分割する (集団分割)。ここで、 $A^k = \{X_j^k \mid X_j^k = X_{k+p(j-1)}, j = 1, \dots, m\}$  とする。

##### ● ステップ 4

各集団  $A^k$  を以下で説明する CCE (competitive complex evolution) アルゴリズムによって進化させる。

##### ● ステップ 5

すべての集団に含まれる個体を混ぜ合わせる (集団混合)。 $s$  個の個体について目的関数値の小さい順に並べ替える。

##### ● ステップ 6

収束判定を行う。収束判定基準が満たされれば終了し、そうでない場合はステップ 3 に戻る。

ステップ 4 で呼び出す CCE アルゴリズムは以下の通りである。

● ステップ 1

親個体の数  $q$  ( $2 \leq q \leq m$ ) および反復回数、を設定する。

● ステップ 2

$A$  に含まれる個体  $X_j^k$  について選択確率  $p(X_j^k) = \frac{2(m+1-j)}{m(m+1)}$  を与える。ただし、 $j = 1, \dots, m$  である。選択確率に従って個体を  $q$  個だけ非復元抽出する。

● ステップ 3

$q$  個の個体を親 ( $U_1, \dots, U_q$ ) として、以下の手順に従って子個体を生成する。

● ステップ 4

$q$  個の個体を目的関数値の小さい順に並び替え、それらのうち目的関数値が最も大きい個体となる  $U_q$  を省いた個体群について、その重心  $G = \frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^{q-1} U_i$  を求める。

● ステップ 5

子個体  $R = 2G - U_q$  を求める (鏡像ステップ)。もし、 $R$  が探索空間  $\Omega$  に含まれているのであれば目的関数値  $f_R$  を計算してステップ 6 に進む。そうでない場合は、ランダムに探索空間  $\Omega$  内に子個体  $Z$  を生成する (突然変異ステップ)。そして目的関数値  $f_Z$  を計算し、 $R = Z$ 、 $f_R = f_Z$  とする。

● ステップ 6

もし  $f_R < f_{U_q}$  ならば、 $U_q = R$  としてステップ 8 へ進む。そうでなければ、子個体  $C = (G + U_q)/2$  を生成し (収縮ステップ)、目的関数値を計算する。

● ステップ 7

もし  $f_C < f_{U_q}$  ならば、 $U_q = C$  として、ステップ 8 へ進む。そうでなければ、ランダムに探索空間  $\Omega$  内に子個体  $Z$  を生成し (突然変異ステップ)、目的関数値を計算する。

● ステップ 8

ステップ 4 からステップ 7 を  $\alpha$  回繰り返す。

● ステップ 9

子個体により置き換わった  $q$  個の個体を  $A^k$  に戻す。そして  $A^k$  に含まれる  $m$  個の個体を目的関数値の小さい順に並べ替える。

● ステップ 10

ステップ 2 からステップ 9 までを  $\beta$  回繰り返す。

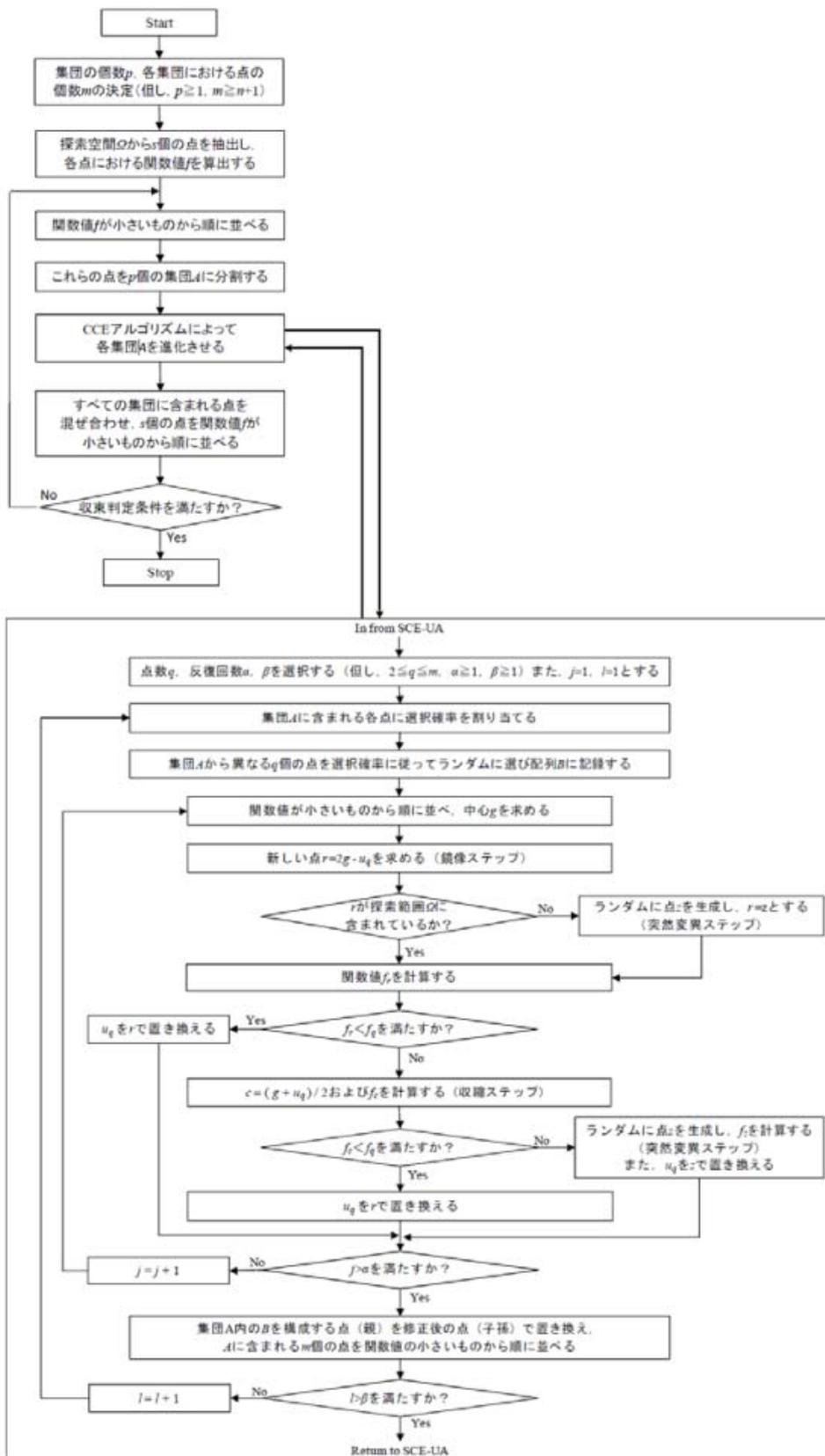


図 4.6-20 SCE-UA 法のアルゴリズムフロー図(文献[3]より抜粋)

SCE-UA 法のパラメータについて、Duan らは  $m = (2n + 1)$ ,  $q = (n + 1)$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = (2n + 1)$  を推奨している。本検討ではこれに準じて設定した。集団の個数  $p$  は 5 とした。

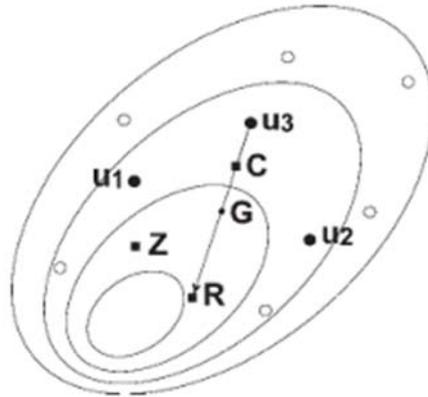


図 4.6-21 CCE アルゴリズムの概念図(文献[4]より抜粋)

< 目的値関数 >

SCE-UA 法において用いる目的値関数としては以下の①RMSE(二乗平均平方根誤差)、②ピーク流入量誤差、およびそれらの組み合わせを使用し検討を行った。ここで目的値関数評価に用いるステップの期間としては、各出水のピーク生起ステップを含む 2 日間(1 時間ごとの 48 データ)を用いた。RMSE のみの場合は出水の波形をとらえることはできるが、ピーク流量は小さめな結果になることが多かった。ピーク流量誤差のみを用いたときはピーク流量は再現できるものの、波形の誤差が大きかった。このため、今回は RMSE とピーク流入量誤差の平均で対応した。

① RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{ci} - Q_{oi})^2}$$

$N$ : データ数、 $Q_{ci}$ : ステップ  $i$  の計算流量、 $Q_{oi}$ : ステップ  $i$  の観測流量

② ピーク流入量誤差

$$J_{pe} = \frac{(Q_{cp} - Q_{op})}{Q_{op}}$$

$Q_{cp}$ : 計算流量のピーク値、 $Q_{op}$ : 観測流量のピーク値

③ ①RMSE と②ピーク流入量誤差の重みづけ平均

## 2) 評価対象期間

各出水については各出水のピーク流量が生起する時間を含む日の 5 日前の午前 0:00 を計算開始日時とし、1 週間(7 日)の計算を行った。

## 3) 最適化対象パラメータ

最適化対象パラメータとして、RRI モデルについては以下の 10 個のパラメータを最適化対象とした。

河道粗度係数、斜面粗度係数、土層厚、空隙率、飽和透水係数、マトリックス部空隙率、 $\beta$ 、基岩鉛直方向の飽和透水係数、基岩上面における側方の飽和透水係数、飽和透水係数の鉛直方向の低減を規定する定数

同様に H3ONEDO モデルについては以下の 9 個のパラメータを最適化対象とした。

斜面粗度係数、土層厚、空隙率、飽和透水係数、マトリックス部空隙率、 $\beta$ 、基岩鉛直方向の飽和透水係数、基岩上面における側方の飽和透水係数、飽和透水係数の鉛直方向の低減を規定する定数

<最適化対象パラメータの変動範囲>

最適化対象パラメータの変動範囲としては表 4.6-10 および表 4.6-11 のように設定した。

表 4.6-10 : RRI モデル最適化対象パラメータの変動範囲

河道粗度係数 $[m^{-\frac{1}{3}}s]$	0.005-0.2
斜面粗度係数 $[m^{-\frac{1}{3}}s]$	0.1-0.6
土層厚[m]	0.1-2.0
空隙率	0.1-1.0
飽和透水係数[m/s]	0.01-0.5
マトリックス部空隙率	0.0-0.1
$\beta$	5-20
基岩鉛直方向の飽和透水係数[m/s]	$10^{-7} - 10^{-6}$
基岩上面における側方の飽和透水係数[m/s]	$10^{-5} - 10^{-4}$
飽和透水係数の鉛直方向の低減を規定する定数	0.01-0.1

表 4.6-11 : H3ONEDO モデル最適化対象パラメータの変動範囲

斜面粗度係数 $[m^{-\frac{1}{3}}s]$	0.1-0.6
土層厚[m]	0.1-2.0
空隙率	0.1-1.0
飽和透水係数[m/s]	0.01-0.5
マトリックス部空隙率	0.0-0.1
$\beta$	5-20
基岩鉛直方向の飽和透水係数[m/s]	$10^{-6} - 10^{-5}$
基岩上面における側方の飽和透水係数[m/s]	$10^{-5} - 10^{-4}$
飽和透水係数の鉛直方向の低減を規定する定数	0.01-0.1

#### 4) 精度評価

SCE-UA 法の試行ごとの最適化した目的値関数の値の変動が 1%以下に収まったときに収束とした。

##### <精度評価指標>

モデルの評価指標としては以下に示す 4 つの精度評価指標を用いて検討を行った。RMSE とピーク流入誤差の説明は先の「1) SCE-UA 法のアルゴリズム」に示したものと同一なので割愛する。

##### ① Nash-Sutcliffe 係数

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{Q_{ci} - Q_{oi}\}^2}{\sum_{i=1}^N \{Q_{oi} - Q_{ave}\}^2}$$

$N$ : データ数、 $Q_{ci}$ : ステップ  $i$  の計算流量、 $Q_{oi}$ : ステップ  $i$  の観測流量、  
 $Q_{ave}$ : 観測流量の平均

Nash-Sutcliffe 係数(以下 NS 係数)は 1970 年に Nash および Sutcliffe により提唱された係数である[5]。対象期間にわたる平均値を予測値とした場合に 0 となり、予測が完全に正確な場合に最大値 1 となる。このため、指標値が 0 以下の場合は予測効果が無いとみなすことができる。

一般には 0.7 以上で再現性が高い、0.0~0.7 で再現性がある、0.0 以下で再現性がない、として扱われる[6]。

##### ② 流入ボリューム誤差

$$E_V = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{ci} - \sum_{i=1}^N Q_{oi}}{\sum_{i=1}^N Q_{oi}}$$

##### ③ ピーク流入量相対誤差

##### ④ RMSE

## 5) 解析対象の出水

2007年から2019年までの出水についてピーク流量上位50位までの出水を選択し、雪解け期(4月～6月)、夏期(7,8月)、秋期(9月,10月)別にピーク流量の多い順に並べた表を表4.6-12(黒部ダム流域)、表4.6-13(奥只見ダム流域)に示す。表の日付はピーク流量の生起する日時を示し、ピーク流量が大きい順で示している。解析対象降雨としては黒部ダム流域、奥只見流域についてそれぞれ期別に上位(赤)、中位(青)、下位(緑)の出水から2つずつ、計18の出水を選択した。

表 4.6-12 各期の流量表(黒部ダム流域)

雪解け期		夏期		秋期	
Date	流量 (m <sup>3</sup> /sec)	Date	流量 (m <sup>3</sup> /sec)	Date	流量 (m <sup>3</sup> /sec)
2013/6/19	547.8	2017/7/4	783.8	2015/10/2	499.4
2009/6/23	494.7	2018/7/5	498.9	2007/9/7	343.7
2020/6/14	488.3	2009/7/9	412.0	2019/10/12	266.2
2011/5/10	400.5	2010/7/12	376.9	2011/9/20	259.7
2007/5/25	393.2	2017/8/8	351.2	2018/9/10	252.1
2019/6/30	373.8	2011/7/8	341.0	2009/10/8	236.4
2016/6/25	351.7	2012/7/7	317.4	2010/9/13	220.2
2011/6/25	310.3	2013/7/5	299.4		
2015/4/4	308.6	2016/7/27	278.3		
2008/6/29	305.9	2019/8/29	274.2		
2016/5/11	304.8	2011/7/28	264.3		
2010/6/27	290.1	2015/7/1	260.2		
2012/6/17	276.1	2013/8/23	257.6		
2007/6/29	273.5	2013/7/29	252.5		
2010/5/24	270.8	2007/8/22	248.6		
2018/5/19	268.0	2020/7/1	248.3		
2018/4/25	251.7	2012/7/20	237.2		
2008/5/25	226.4	2015/7/23	235.8		
2015/5/19	225.8	2010/8/12	233.0		
2018/5/3	225.6	2014/8/16	232.2		
2015/4/21	225.3	2009/7/29	229.2		
2010/6/19	223.8	2017/8/25	226.5		

表 4.6-13 各期の流量表(奥只見ダム流域)

雪解け期		夏期		秋期	
Date	流量 (m <sup>3</sup> /sec)	Date	流量 (m <sup>3</sup> /sec)	Date	流量 (m <sup>3</sup> /sec)
2011/5/10	665.7	2011/7/30	2664.9	2019/10/12	699.3
2019/5/21	457.9	2013/7/23	923.7	2013/9/16	667.1
2007/6/29	376.6	2017/7/18	612.0	2017/10/23	498.1
2010/6/27	374.2	2011/8/18	594.3	2013/10/16	423.6
2008/5/20	370.9	2008/7/27	591.7	2018/10/13	385.7
2019/6/16	334.0	2017/7/3	551.1	2007/9/7	355.9
2015/4/21	330.3	2013/8/1	536.8	2015/9/9	326.0
2018/5/17	322.8	2013/7/14	393.7	2007/10/27	287.4
2018/4/25	309.4	2018/8/28	366.0	2015/10/2	272.6
2014/5/22	299.6	2012/7/8	339.9	2018/10/1	269.6
2010/5/6	296.7	2017/8/17	306.4	2011/9/21	261.6
2017/5/11	286.3	2020/7/28	299.1		
2012/5/18	284.8	2010/7/6	281.9		
2013/4/7	278.6	2019/7/28	274.2		
2015/5/5	270.1				
2011/6/25	266.2				
2017/5/21	261.2				
2010/5/24	259.6				
2008/5/4	256.8				
2011/4/28	255.7				
2014/5/1	255.3				

## 6) パラメータ最適化結果

<黒部ダム流域、RRI モデル>

各出水に対する最適化を行った結果を以下にまとめた。目的値関数としては RMSE とピーク誤差の重み 0.5:0.5 を用いた。全体的によく観測流入量の再現ができており、表 4.6-14 に示すようにおおむねどの出水に対しても NS 係数で 0.65 以上の値を示した。ピーク流量については小さめの流量になる傾向があるものの、誤差の大きい場合でも 30%程度の差で再現できた。総ボリュームについては誤差の大きい場合でも 10%程度の差で再現できた。特に単一の峰の形状を示すシンプルな出水の再現性は特によく NS 係数で 0.9 以上の結果を示した。一方で一連の出水の中で峰が複数に分かれるような出水(例：2017年7月4日、2018年7月5日)についてはすべての峰について再現できているわけではなく課題を残した。それでも NS 係数では 0.7 程度の結果になっている。

① 雪解け期

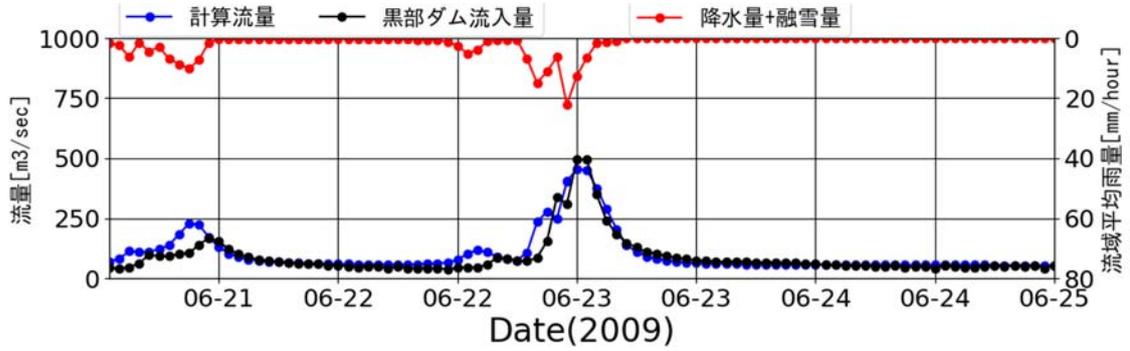


図 4.6-22 融雪期上位(黒部ダム流域、RRI モデル)

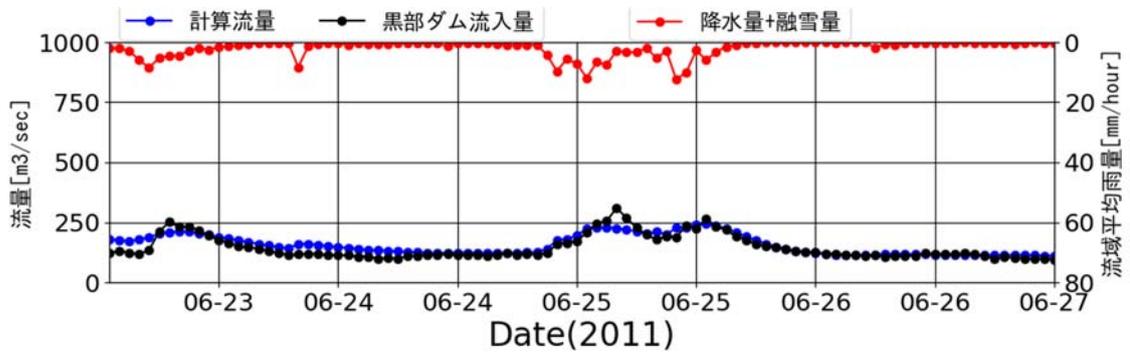


図 4.6-23 融雪期中位(黒部ダム流域、RRI モデル)

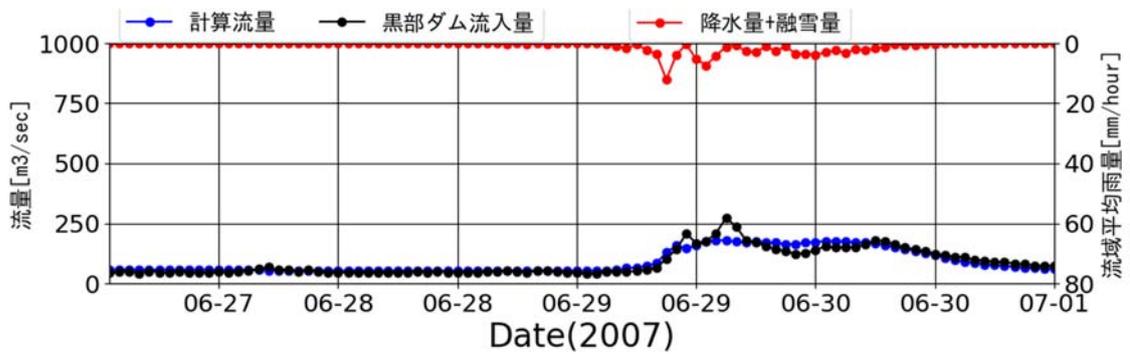


図 4.6-24 融雪期下位(黒部ダム流域、RRI モデル)

② 夏期

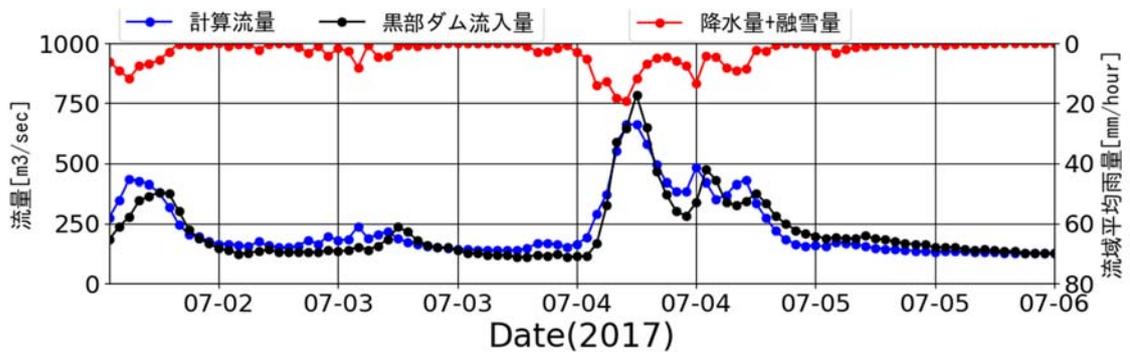


図 4.6-25 夏期上位(黒部ダム流域、RRI モデル)

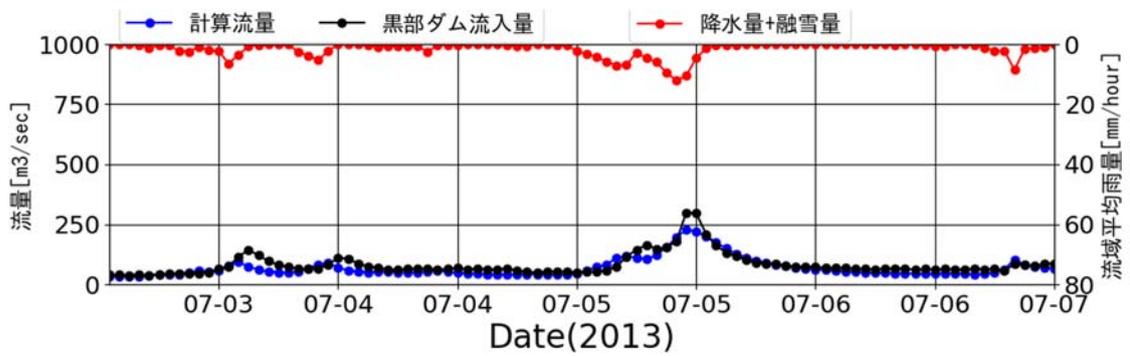


図 4.6-26 夏期中位(黒部ダム流域、RRI モデル)

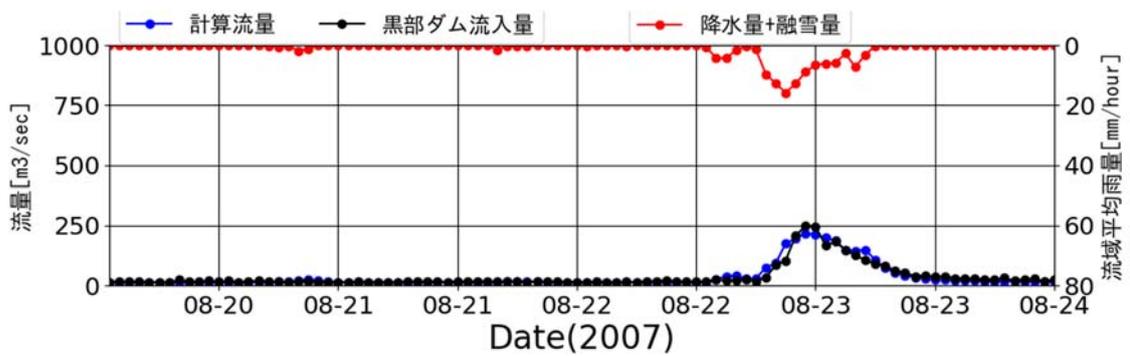


図 4.6-27 夏期下位(黒部ダム流域、RRI モデル)

③ 秋期

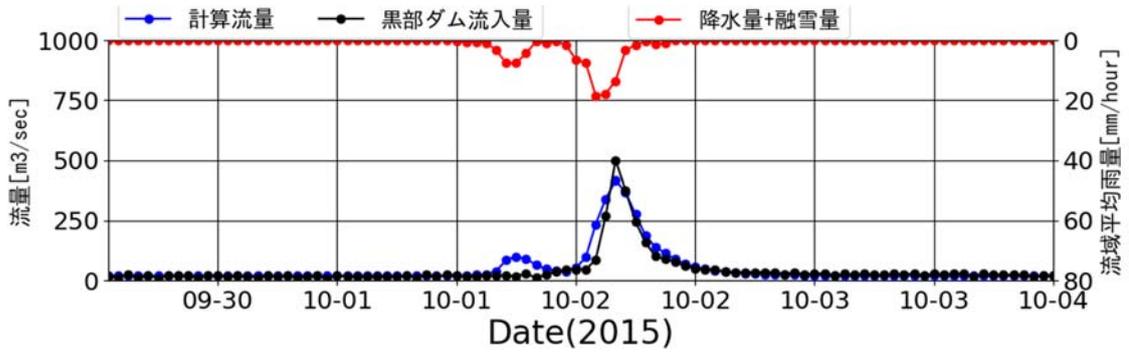


図 4.6-28 秋期上位(黒部ダム流域、RRI モデル)

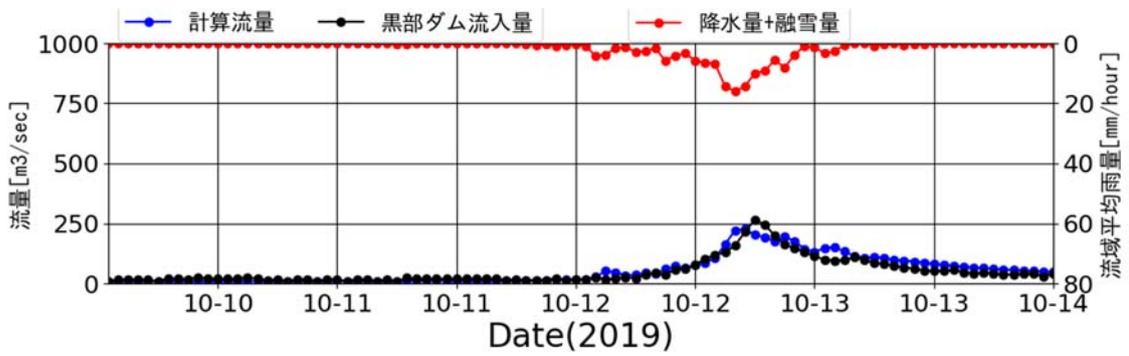


図 4.6-29 秋期中位(黒部ダム流域、RRI モデル)

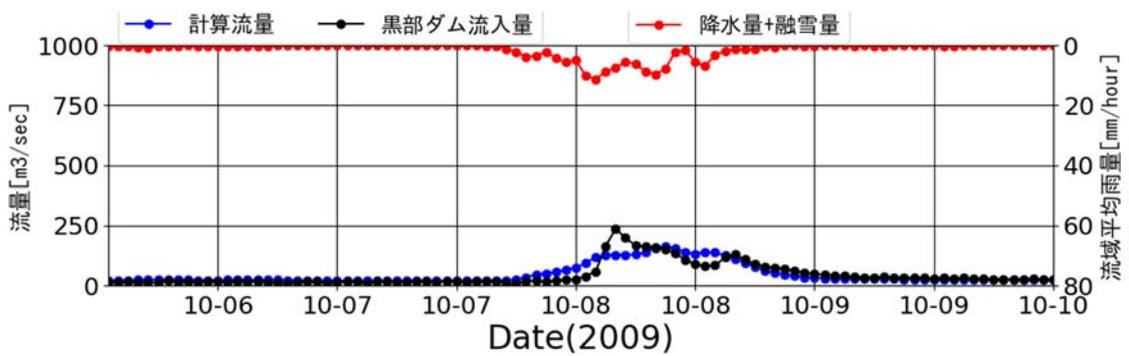


図 4.6-30 秋期下位(黒部ダム流域、RRI モデル)

表 4.6-14 各出水に対する精度検証(黒部ダム流域、RRI モデル)

日付	NS係数	総ボリューム誤差(%)	ピーク誤差(%)	RMSE(m <sup>3</sup> /s)
2007/6/29	0.770	-0.6	-33.6	25.8
2007/8/22	0.917	1.1	-12.4	18.0
2007/9/7	0.940	-0.3	-16.3	18.8
2009/6/23	0.976	-2.1	-8.6	15.4
2009/10/8	0.685	-5.6	-31.1	30.0
2010/5/24	0.929	-0.3	-7.2	18.0
2010/9/13	0.829	-12.4	-30.1	19.5
2011/6/25	0.885	0.9	-21.5	19.2
2011/9/20	0.834	1.6	-7.9	24.4
2013/6/19	0.900	3.5	-4.6	43.4
2013/7/5	0.828	-9.3	-23.7	23.3
2013/7/29	0.808	3.6	-5.5	25.7
2015/10/2	0.900	5.9	-16.8	29.6
2016/5/11	0.922	-1.5	-1.9	21.6
2016/7/27	0.841	-0.8	-26.3	19.0
2017/7/4	0.874	-2.0	-15.7	55.4
2018/7/5	0.664	-5.2	-23.1	63.7
2019/10/12	0.793	18.6	-14.7	27.1
平均	0.850	-0.3	-16.7	27.7

表 4.6-15 最適化パラメータ一覧(黒部ダム流域、RRI モデル) (1)

日付	土層厚[m]	空隙率	斜面の側方 飽和透水係数 [m/s]	マトリックス 部空隙率	$\beta$
2007/6/29	0.248	0.803	0.066	0.007	13.570
2007/8/22	0.968	0.401	0.216	0.042	12.698
2007/9/7	0.519	0.706	0.194	0.022	13.523
2009/6/23	1.596	0.740	0.496	0.038	10.403
2009/10/8	1.389	0.623	0.198	0.057	15.939
2010/5/24	1.814	0.382	0.314	0.067	16.258
2010/9/13	1.180	0.489	0.131	0.028	13.946
2011/6/25	1.501	0.525	0.449	0.086	16.833
2011/9/20	0.906	0.503	0.137	0.073	17.736
2013/6/19	0.187	0.255	0.426	0.048	7.535
2013/7/5	0.656	0.705	0.085	0.045	11.262
2013/7/29	0.627	0.664	0.075	0.022	8.860
2015/10/2	0.554	0.131	0.158	0.100	14.114
2016/5/11	0.446	0.331	0.119	0.054	17.034
2016/7/27	0.699	0.468	0.346	0.038	12.053
2017/7/4	0.985	0.583	0.310	0.018	13.337
2018/7/5	0.143	0.147	0.326	0.047	11.332
2019/10/12	1.574	0.636	0.027	0.089	14.821

表 4.6-16 最適化パラメータ一覧(黒部ダム流域、RRI モデル) (2)

日付	河道粗度係数 [m <sup>-1/3</sup> s]	斜面粗度係数 [m <sup>-1/3</sup> s]	基岩鉛直方向の 飽和透水係数 [m/s]	基岩上面の 側方飽和透水係 数 [m/s]	飽和透水係数の 鉛直方向の低減 を規定する定数
2007/6/29	0.026	0.336	1.02E-07	6.65E-05	5.80E-02
2007/8/22	0.015	0.425	9.93E-07	4.82E-05	9.91E-02
2007/9/7	0.013	0.432	5.65E-07	6.86E-05	5.15E-02
2009/6/23	0.011	0.313	5.13E-07	2.84E-05	3.43E-02
2009/10/8	0.033	0.464	9.68E-07	2.28E-05	4.66E-02
2010/5/24	0.045	0.172	8.77E-07	2.04E-05	9.10E-02
2010/9/13	0.026	0.539	9.42E-07	2.06E-05	7.95E-02
2011/6/25	0.031	0.243	9.04E-07	6.98E-05	3.77E-02
2011/9/20	0.017	0.568	7.68E-07	1.30E-05	3.76E-02
2013/6/19	0.052	0.183	1.99E-07	4.57E-05	3.90E-02
2013/7/5	0.019	0.406	7.26E-07	2.18E-05	4.40E-02
2013/7/29	0.011	0.204	8.56E-07	4.86E-05	8.44E-02
2015/10/2	0.011	0.394	2.18E-07	4.83E-05	7.66E-02
2016/5/11	0.014	0.220	3.78E-07	3.49E-05	4.59E-02
2016/7/27	0.022	0.341	8.22E-07	7.52E-05	9.99E-02
2017/7/4	0.008	0.355	9.97E-07	9.03E-05	3.24E-02
2018/7/5	0.139	0.109	5.37E-07	6.98E-05	5.09E-02
2019/10/12	0.014	0.565	3.76E-07	1.86E-05	8.47E-02

<黒部ダム流域、H3ONEDO モデル>

H3ONEDO モデルを用いた各出水に対する最適化結果を以下に示す。RRI モデル同様に各出水に対して比較的良好に観測流入量を再現することができ、表 4.6-17 に示すようにいずれの出水に対しても NS 係数で 0.8 以上の結果を示すことができた。

① 融雪期

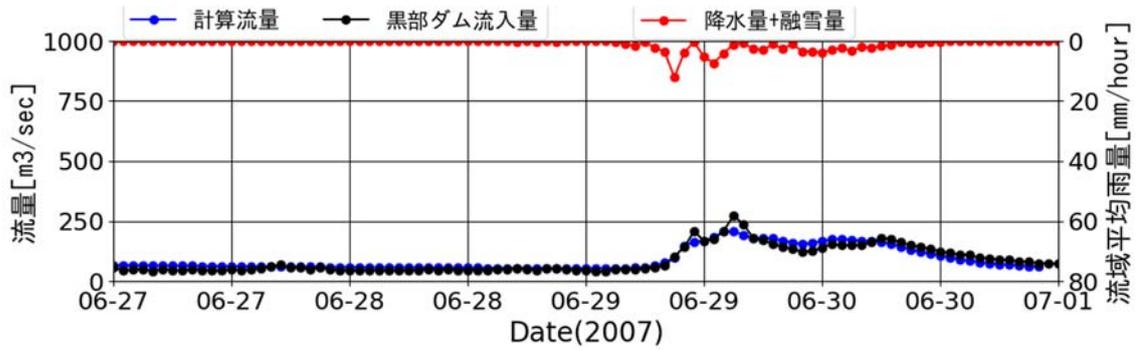


図 4.6-31 融雪期上位(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

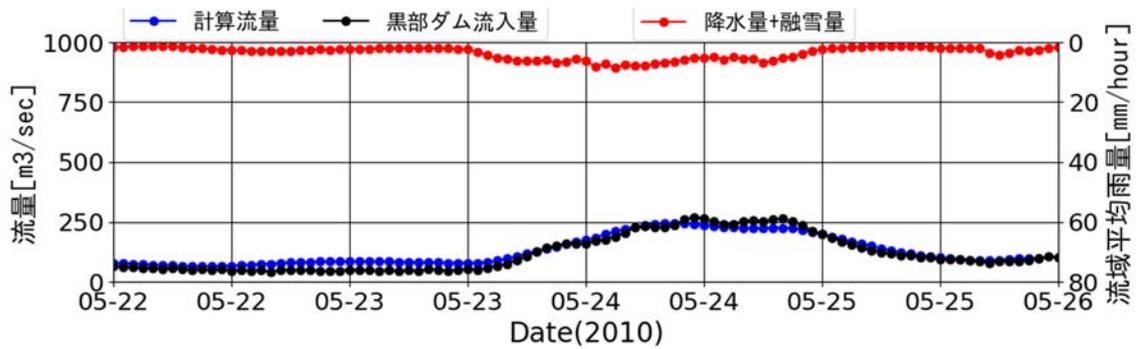


図 4.6-32 融雪期中位(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

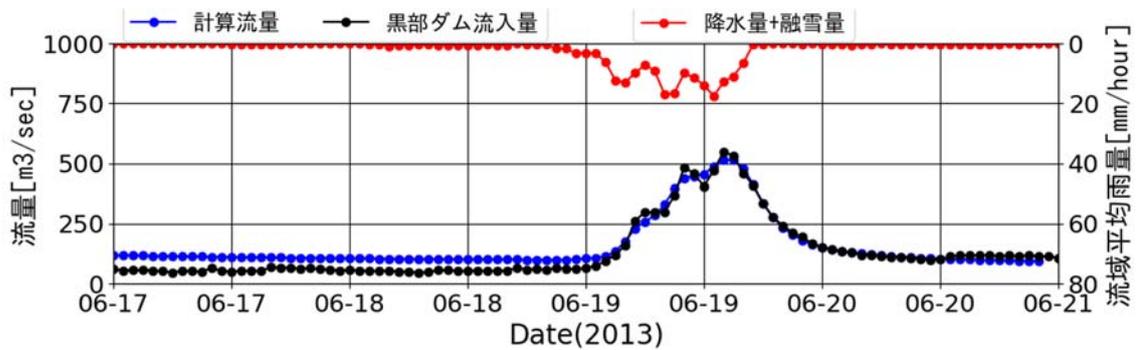


図 4.6-33 融雪期下位(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

② 夏期

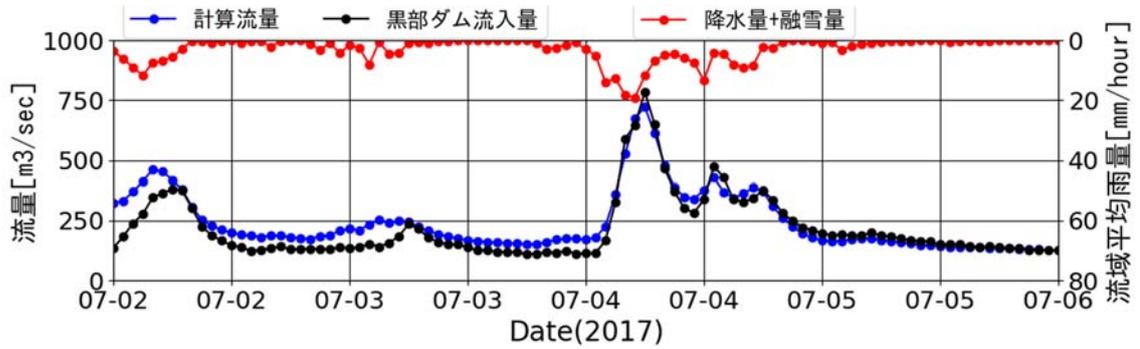


図 4.6-34 夏期上位(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

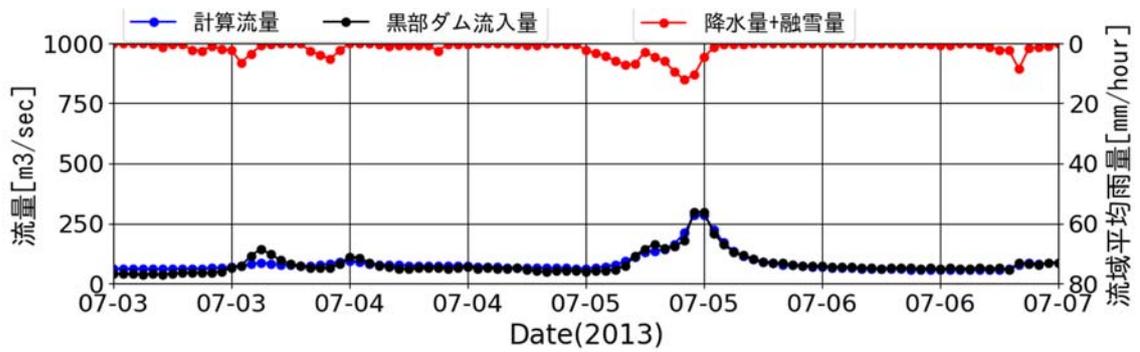


図 4.6-35 夏期中位(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

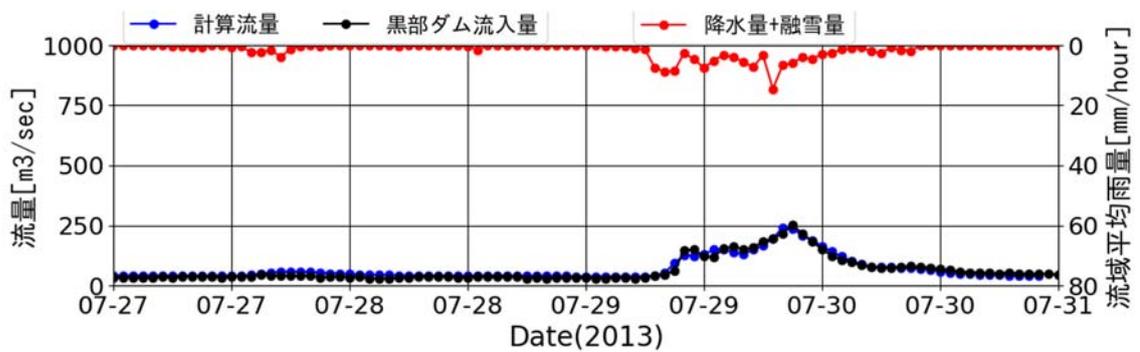


図 4.6-36 夏期下位(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

③ 秋期

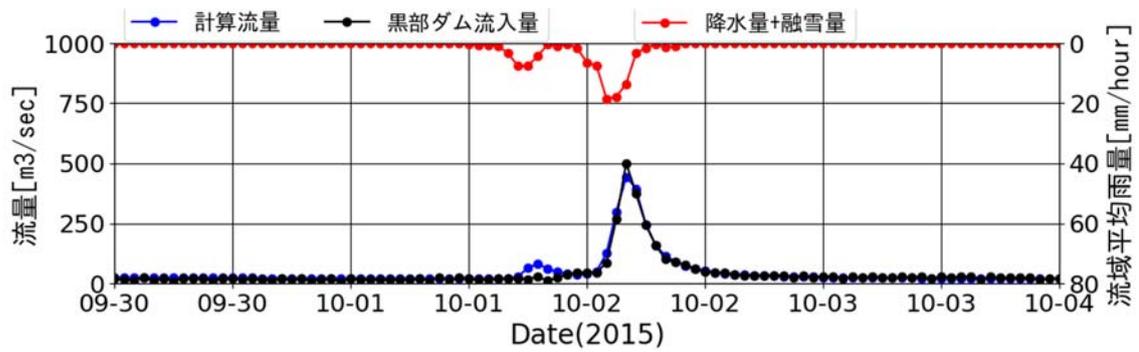


図 4.6-37 秋期上位(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

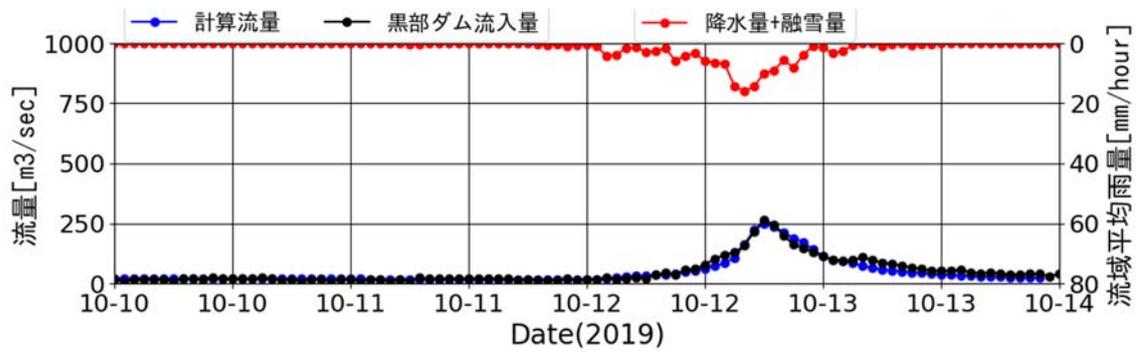


図 4.6-38 秋期中位(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

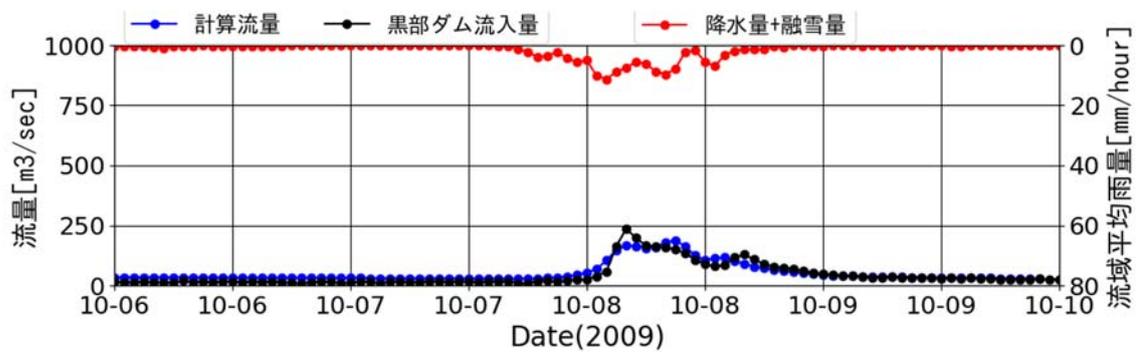


図 4.6-39 秋期下位(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル)

表 4.6-17 精度比較表(黒部ダム流域、H30NEDO モデル)

日付	NS係数	総ボリューム誤差(%)	ピーク誤差(%)	RMSE(m <sup>3</sup> /s)
2007/6/29	0.842	-1.9	-24.4	21.6
2007/8/22	0.976	-4.0	-0.3	9.7
2007/9/7	0.955	-1.1	-16.8	16.1
2009/6/23	0.993	1.0	-0.6	8.4
2009/10/8	0.855	2.0	-21.0	20.4
2010/5/24	0.934	0.2	-9.6	17.2
2010/9/13	0.976	-0.6	-2.4	7.3
2011/6/25	0.899	-0.7	-12.7	17.7
2011/9/20	0.951	0.8	-13.4	13.4
2013/6/19	0.977	-0.5	-5.9	20.8
2013/7/5	0.967	-0.2	-5.1	10.3
2013/7/29	0.954	-0.8	-4.3	12.7
2015/10/2	0.983	-0.5	-11.4	12.0
2016/5/11	0.936	0.7	4.2	19.4
2016/7/27	0.909	-4.0	-20.3	14.4
2017/7/4	0.956	-1.0	-7.9	32.6
2018/7/5	0.901	1.5	-6.3	34.6
2019/10/12	0.921	-10.4	-5.8	16.9
平均	0.938	-1.1	-9.1	17.0

表 4.6-18 最適化パラメータ(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル) (1)

日付	土層厚[m]	空隙率	斜面の側方 飽和透水係数 [m/s]	マトリックス 部空隙率	$\beta$
2007/6/29	0.678	0.690	0.232	0.014	12.924
2007/8/22	0.546	0.164	0.252	0.088	18.837
2007/9/7	0.660	0.290	0.471	0.049	6.100
2009/6/23	0.640	0.232	0.409	0.099	15.393
2009/10/8	0.523	0.198	0.209	0.095	7.384
2010/5/24	0.779	0.514	0.064	0.042	15.833
2010/9/13	0.435	0.136	0.251	0.097	5.263
2011/6/25	0.200	0.466	0.164	0.091	19.438
2011/9/20	0.834	0.184	0.248	0.074	10.443
2013/6/19	0.977	0.297	0.179	0.070	13.033
2013/7/5	0.573	0.148	0.462	0.095	5.720
2013/7/29	0.578	0.216	0.406	0.098	15.902
2015/10/2	0.567	0.111	0.384	0.097	7.343
2016/5/11	0.565	0.280	0.213	0.035	15.522
2016/7/27	0.563	0.179	0.287	0.081	11.615
2017/7/4	0.457	0.228	0.462	0.068	11.713
2018/7/5	0.329	0.236	0.066	0.027	13.198
2019/10/12	0.569	0.219	0.057	0.050	18.567

表 4.6-19 最適化パラメータ(黒部ダム流域、H3ONEDO モデル) (2)

日付	斜面粗度係数 [m <sup>-1/3</sup> s]	基岩鉛直方向の 飽和透水係数 [m/s]	基岩上面の 側方飽和透水係 数 [m/s]	飽和透水係数の 鉛直方向の低減 を規定する定数
2007/6/29	0.243	4.23E-06	7.43E-05	2.27.E-02
2007/8/22	0.312	6.56E-06	5.88E-05	7.65.E-02
2007/9/7	0.426	8.79E-06	5.25E-05	2.89.E-02
2009/6/23	0.131	8.47E-06	9.80E-05	2.52.E-02
2009/10/8	0.201	8.57E-06	8.82E-05	4.65.E-02
2010/5/24	0.228	4.13E-06	2.15E-06	8.14.E-02
2010/9/13	0.100	3.86E-06	4.92E-05	5.64.E-02
2011/6/25	0.551	5.39E-06	5.95E-05	1.14.E-02
2011/9/20	0.142	9.77E-06	2.86E-05	2.92.E-02
2013/6/19	0.312	9.77E-06	6.80E-05	1.32.E-02
2013/7/5	0.107	7.23E-06	2.82E-05	1.29.E-02
2013/7/29	0.240	9.97E-06	3.03E-05	1.98.E-02
2015/10/2	0.116	2.29E-06	7.21E-05	5.74.E-02
2016/5/11	0.130	3.95E-06	6.75E-05	2.30.E-02
2016/7/27	0.276	8.23E-06	7.35E-05	5.95.E-02
2017/7/4	0.268	6.92E-06	9.07E-05	1.10.E-02
2018/7/5	0.352	8.15E-06	8.63E-05	1.23.E-02
2019/10/12	0.207	7.82E-06	5.36E-05	6.06.E-02

<奥只見ダム流域、RRI モデル>

RRI モデルを用いた各出水に対する最適化結果を以下に示す。各出水に対して比較的良好に観測流入量を再現することができ、表 4.6-20 に示すように大半の出水に対し NS 係数で 0.7 以上、またそれ以外の 3 出水についても NS 係数で 0.5 以上の結果を示すことができた。

① 融雪期

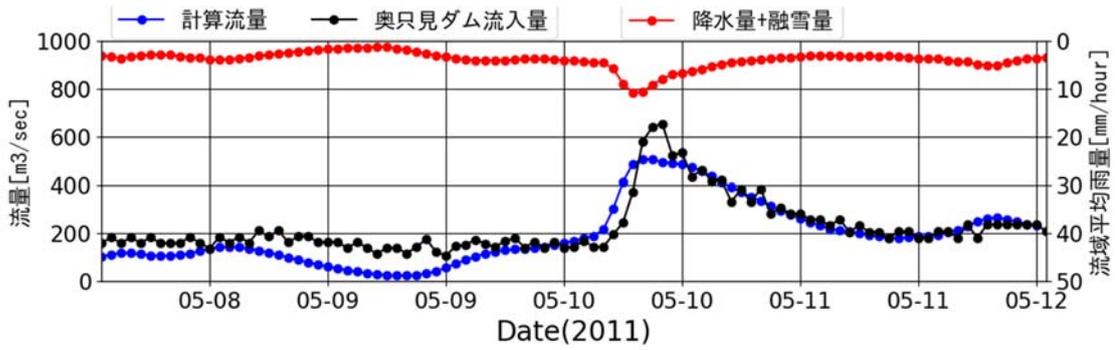


図 4.6-40 融雪期上位(奥只見ダム流域、RRI モデル)

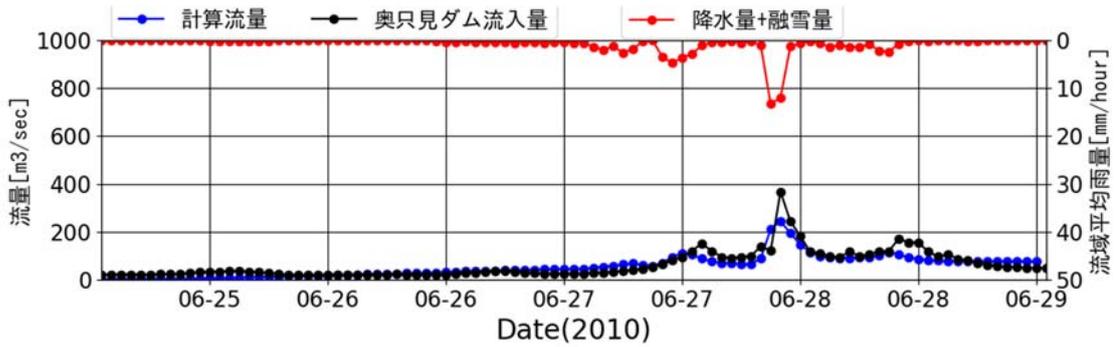


図 4.6-41 融雪期中位(奥只見ダム流域、RRI モデル)

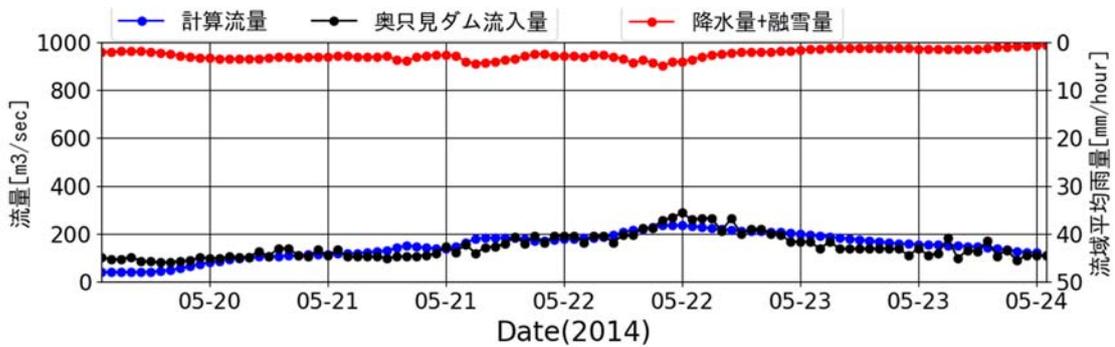


図 4.6-42 融雪期下位(奥只見ダム流域、RRI モデル)

② 夏期

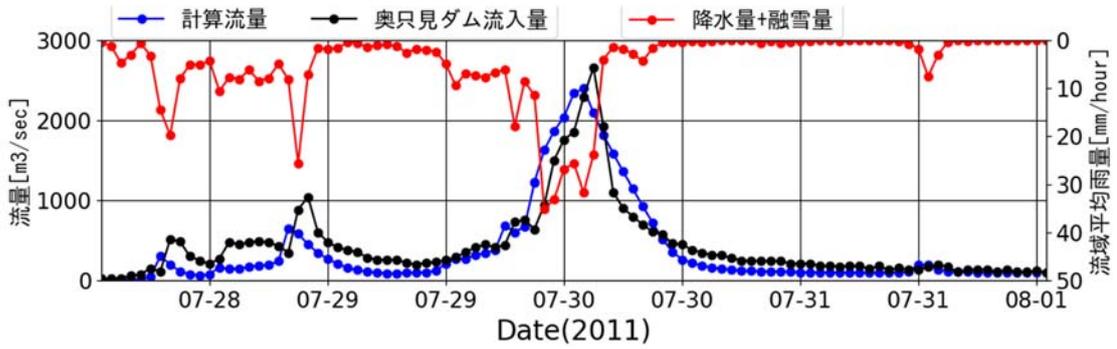


図 4.6-43 夏期上位(奥只見ダム流域、RRI モデル)

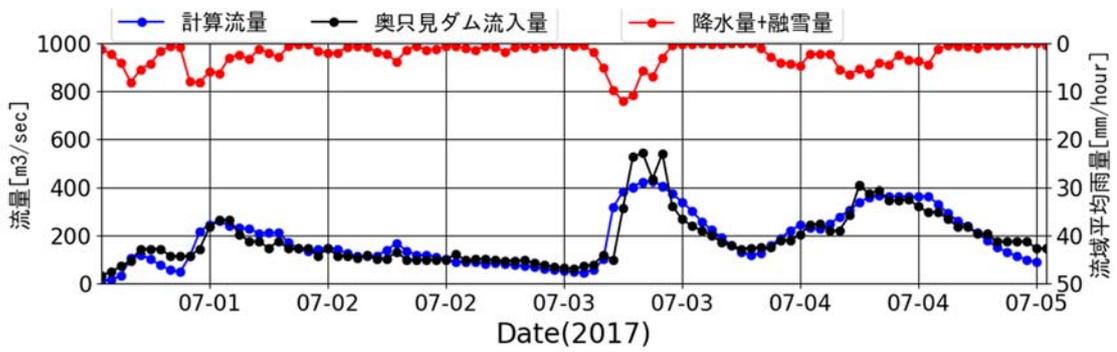


図 4.6-44 夏期中位(奥只見ダム流域、RRI モデル)

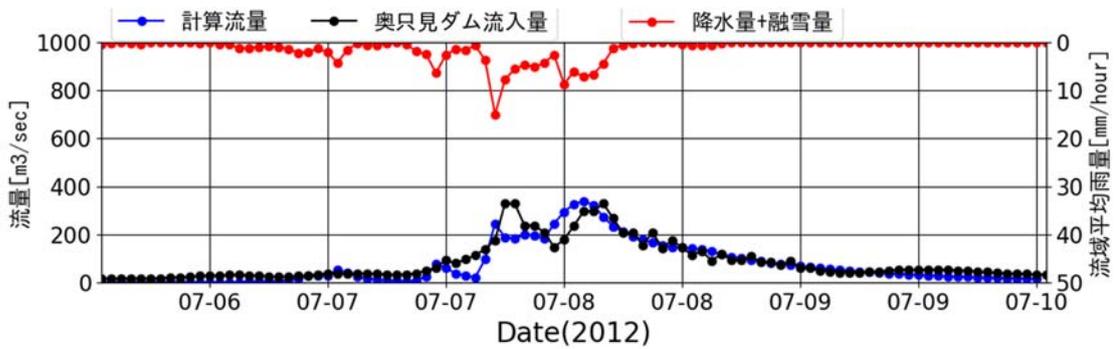


図 4.6-45 夏期下位(奥只見ダム流域、RRI モデル)

③ 秋期

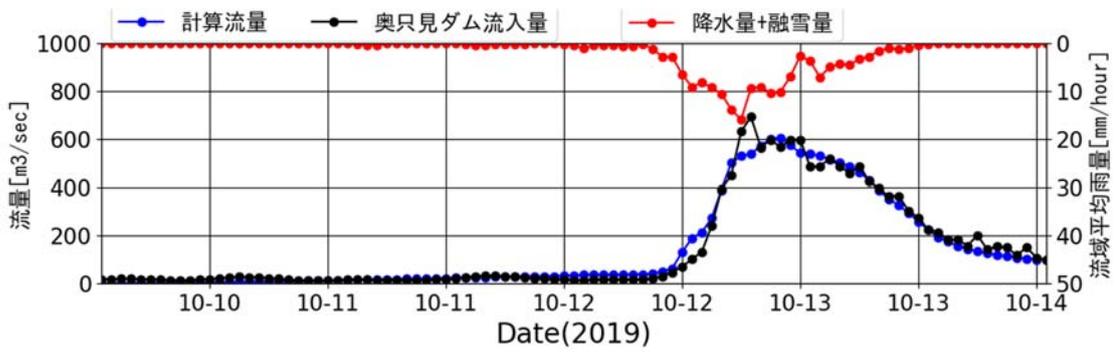


図 4.6-46 秋期上位(奥只見ダム流域、RRI モデル)

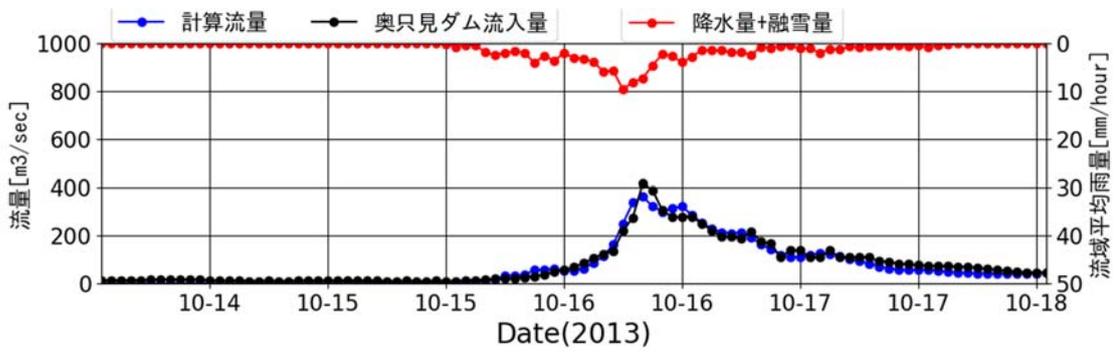


図 4.6-47 秋期中位(奥只見ダム流域、RRI モデル)

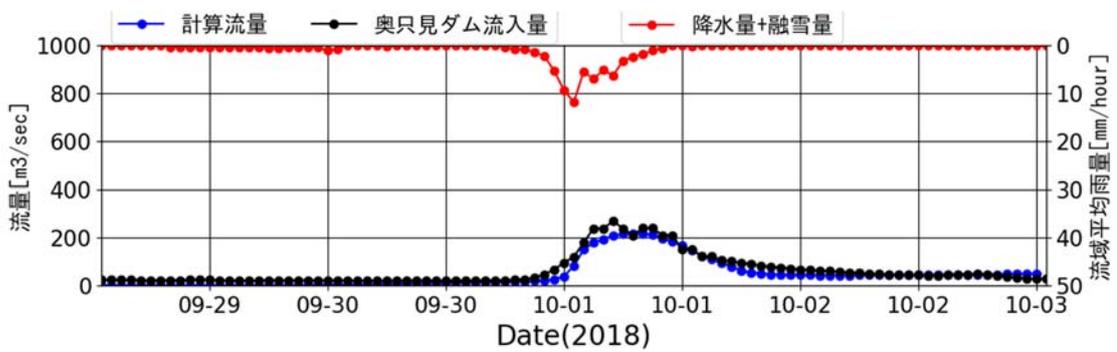


図 4.6-48 秋期下位(奥只見ダム流域、RRI モデル)

表 4.6-20 最適化精度比較(奥只見ダム流域、RRI モデル)

日付	NS係数	総ボリューム誤差(%)	ピーク誤差(%)	RMSE(m <sup>3</sup> /s)
2007/9/7	0.671	0.6	-41.0	36.6
2008/5/20	0.925	2.5	-11.6	20.1
2010/6/27	0.633	-9.4	-34.8	37.3
2011/5/10	0.828	-2.7	-24.0	54.3
2011/7/30	0.905	-6.3	-10.0	185.4
2012/5/18	0.539	-3.6	-28.8	29.5
2012/7/8	0.823	-8.3	0.1	34.4
2013/7/23	0.916	0.2	-12.1	54.0
2013/8/1	0.741	-1.3	-29.6	52.4
2013/9/16	0.766	-25.5	-34.3	66.7
2013/10/16	0.900	-9.0	-14.2	28.9
2014/5/22	0.702	-0.9	-21.2	27.9
2015/10/2	0.836	-2.0	-25.0	23.3
2017/7/3	0.776	-2.3	-22.7	57.0
2017/8/17	0.778	4.0	-30.9	26.8
2018/10/1	0.864	-14.6	-19.1	26.7
2019/5/21	0.916	0.0	-11.7	28.3
2019/10/12	0.957	-1.2	-13.5	44.3
平均	0.804	-4.4	-21.3	46.3

表 4.6-21 最適化パラメータ(奥只見ダム流域、RRI モデル) (1)

日付	土層厚[m]	空隙率	斜面の側方 飽和透水係数 [m/s]	マトリックス 部空隙率	$\beta$
2007/9/7	0.516	0.540	0.176	0.022	13.816
2008/5/20	1.327	0.816	0.498	0.007	15.904
2010/6/27	1.263	0.205	0.191	0.016	16.479
2011/5/10	1.651	0.991	0.102	0.018	15.118
2011/7/30	1.793	0.836	0.397	0.077	9.543
2012/5/18	1.598	0.178	0.038	0.066	15.455
2012/7/8	0.915	0.685	0.043	0.054	8.779
2013/7/23	1.056	0.545	0.247	0.047	12.969
2013/8/1	0.732	0.520	0.464	0.030	9.928
2013/9/16	0.592	0.903	0.275	0.075	18.653
2013/10/16	1.561	0.842	0.174	0.029	15.255
2014/5/22	1.365	0.671	0.025	0.096	18.339
2015/10/2	0.364	0.847	0.076	0.012	8.581
2017/7/3	0.649	0.887	0.097	0.056	6.479
2017/8/17	0.640	0.943	0.272	0.028	8.903
2018/10/1	0.547	0.651	0.138	0.017	14.968
2019/5/21	1.434	0.439	0.363	0.043	11.171
2019/10/12	0.751	0.652	0.083	0.032	15.146

表 4.6-22 最適化パラメータ(奥只見ダム流域、RRI モデル) (2)

日付	河道粗度係数 [m <sup>-1/3</sup> s]	斜面粗度係数 [m <sup>-1/3</sup> s]	基岩鉛直方向の 飽和透水係数 [m/s]	基岩上面の 側方飽和透水係 数 [m/s]	飽和透水係数の 鉛直方向の低減 を規定する定数
2007/9/7	0.031	0.358	4.46.E-07	3.43.E-05	2.55.E-02
2008/5/20	0.036	0.589	7.11.E-07	8.34.E-05	3.48.E-02
2010/6/27	0.021	0.550	7.27.E-07	2.55.E-05	1.99.E-02
2011/5/10	0.009	0.566	6.17.E-07	2.84.E-05	8.80.E-02
2011/7/30	0.007	0.329	7.10.E-07	6.48.E-05	3.88.E-02
2012/5/18	0.040	0.355	2.86.E-07	7.81.E-05	8.63.E-02
2012/7/8	0.008	0.357	1.29.E-07	2.29.E-05	6.22.E-02
2013/7/23	0.006	0.328	4.16.E-07	6.52.E-05	3.34.E-02
2013/8/1	0.024	0.345	9.70.E-07	4.78.E-05	2.81.E-02
2013/9/16	0.016	0.454	4.73.E-07	6.05.E-05	4.56.E-02
2013/10/16	0.007	0.242	2.37.E-07	2.24.E-05	2.22.E-02
2014/5/22	0.022	0.452	1.93.E-07	6.85.E-05	8.80.E-02
2015/10/2	0.019	0.202	7.02.E-07	3.87.E-05	3.28.E-02
2017/7/3	0.016	0.584	1.91.E-07	5.15.E-05	5.35.E-02
2017/8/17	0.014	0.294	4.80.E-07	8.20.E-05	4.44.E-02
2018/10/1	0.033	0.441	5.45.E-07	6.39.E-05	3.99.E-02
2019/5/21	0.023	0.376	7.95.E-07	5.12.E-05	4.03.E-02
2019/10/12	0.012	0.470	6.14.E-07	6.44.E-05	3.74.E-02

<奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル>

H3ONEDO モデルを用いた各出水に対する最適化結果を以下に示す。各出水に対して比較的良好に観測流入量を再現することができ、表 4.6-23 表に示すように大半の出水に対し NS 係数で 0.7 以上、またそれ以外の 4 出水についても NS 係数で 0.5 程度以上の結果を示すことができた。

① 融雪期

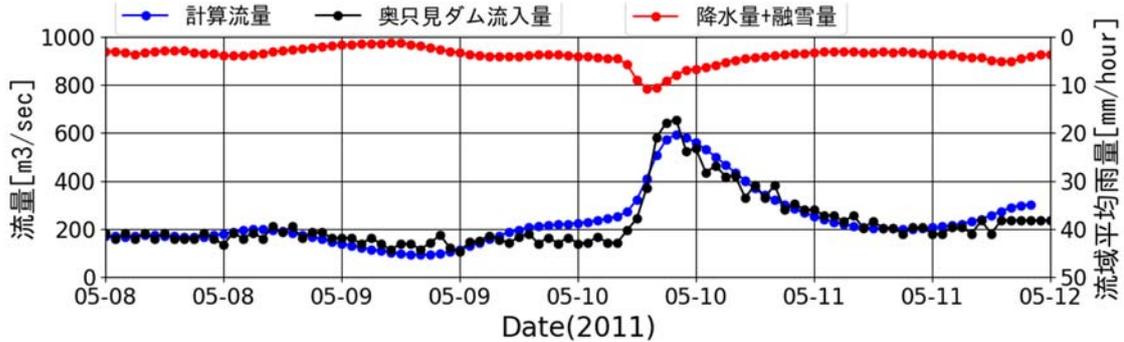


図 4.6-49 融雪期上位(奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

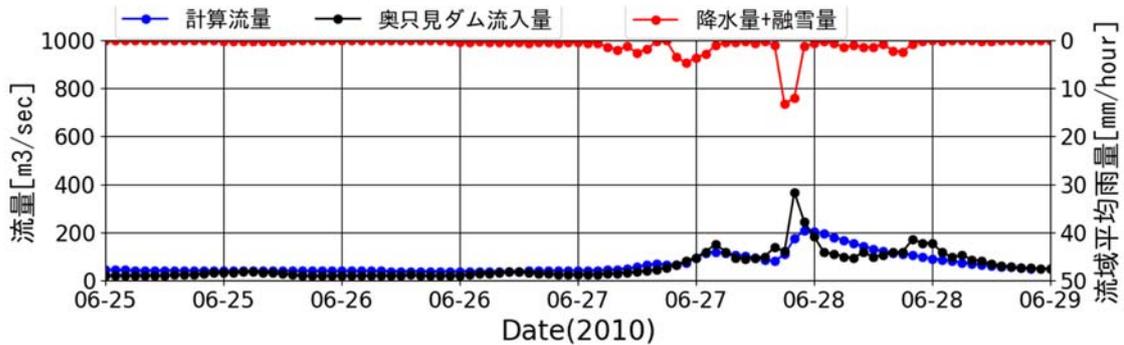


図 4.6-50 融雪期中位(奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

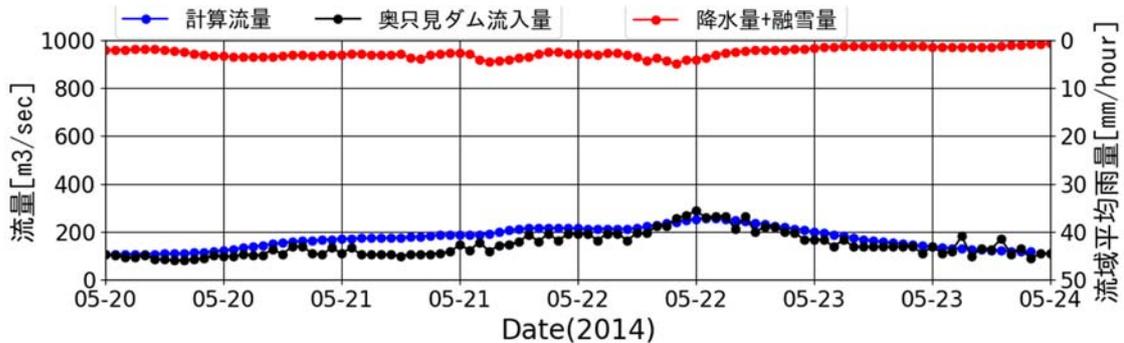


図 4.6-51 融雪期下位(奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

② 夏期

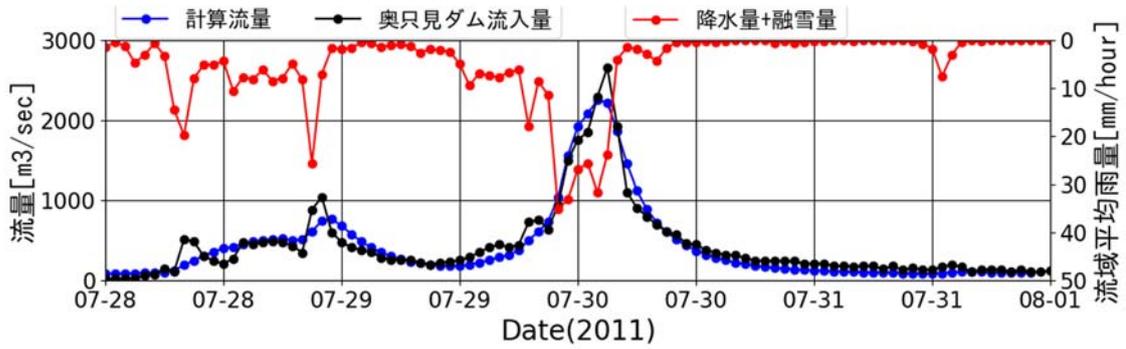


図 4.6-52 夏期上位 (奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

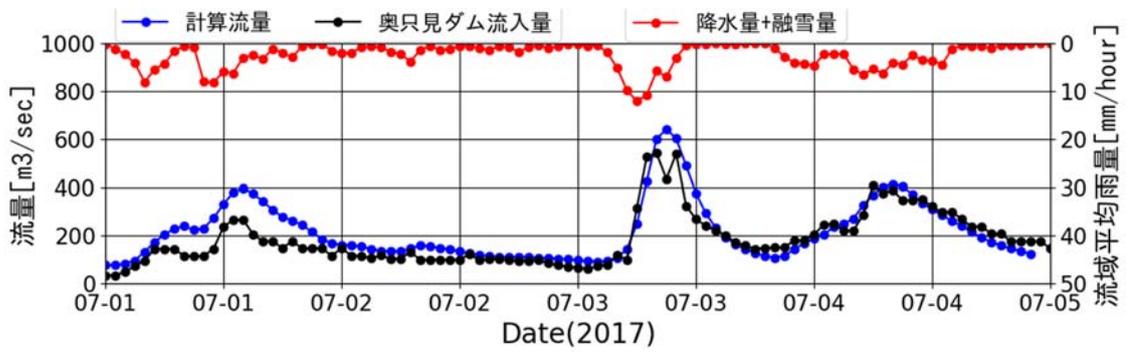


図 4.6-53 夏期中位 (奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

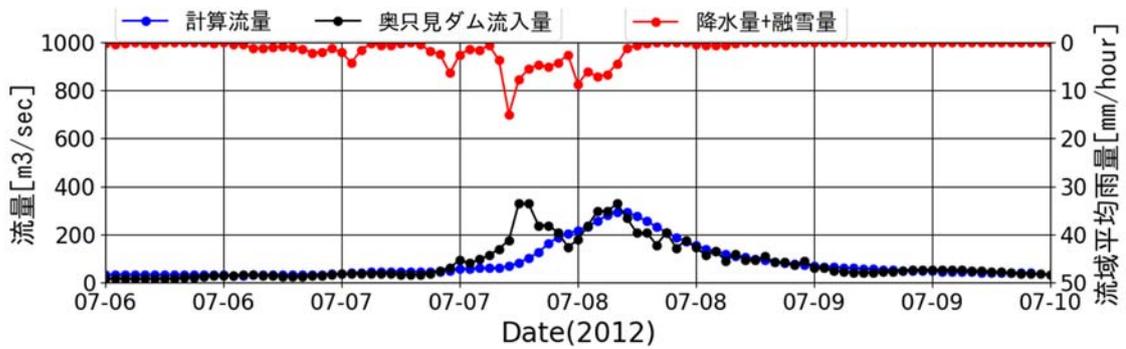


図 4.6-54 夏期下位 (奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

③ 秋期

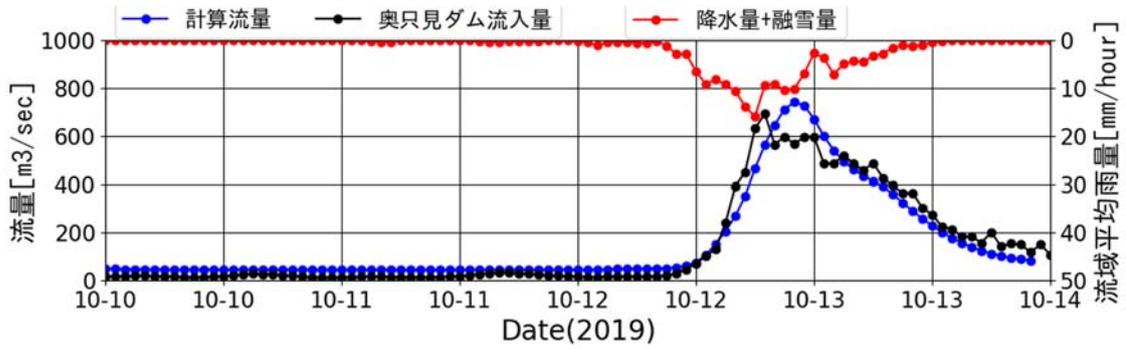


図 4.6-55 秋期上位(奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

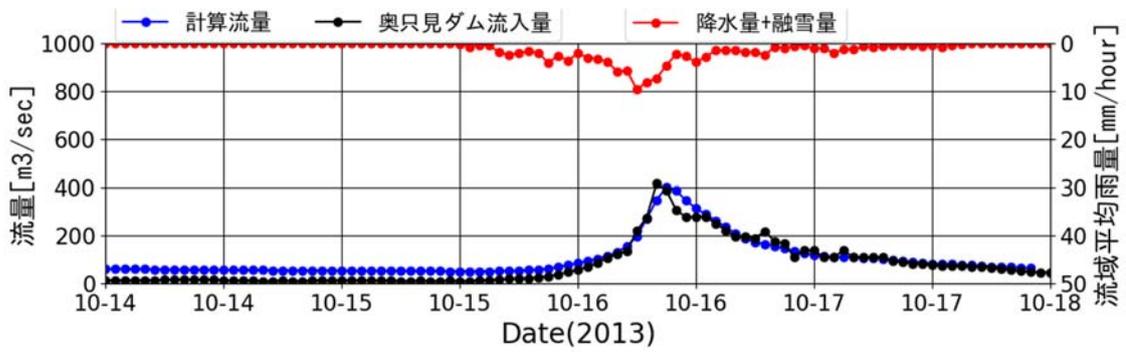


図 4.6-56 秋期中位(奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

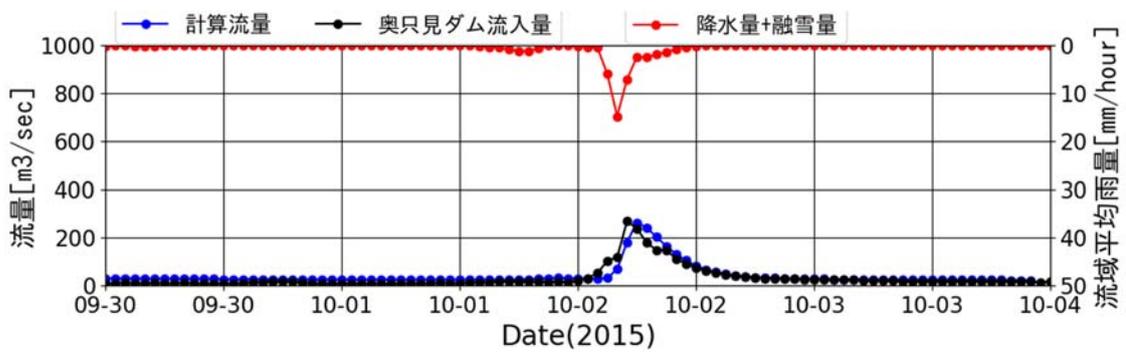


図 4.6-57 融雪期下位(奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

表 4.6-23 最適化精度比較(奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

日付	NS係数	総ボリューム誤差(%)	ピーク誤差(%)	RMSE(m <sup>3</sup> /s)
2007/9/7	0.591	6.4	-49.6	40.8
2008/5/20	0.796	-4.6	-10.5	32.8
2010/6/27	0.499	-2.3	-44.6	44.0
2011/5/10	0.868	3.7	-10.9	47.9
2011/7/30	0.965	-8.2	-15.5	115.5
2012/5/18	0.632	-1.7	-20.7	26.1
2012/7/8	0.896	-0.5	-13.7	26.2
2013/7/23	0.780	-27.9	-0.2	87.3
2013/8/1	0.761	-6.2	-20.0	50.7
2013/9/16	0.862	-6.3	3.7	51.3
2013/10/16	0.915	-0.3	-5.6	26.6
2014/5/22	0.785	0.6	-14.1	23.3
2015/10/2	0.765	9.1	-3.4	27.8
2017/7/3	0.789	-1.3	16.3	56.2
2017/8/17	0.638	-4.3	-33.1	34.5
2018/10/1	0.898	-7.5	0.4	22.8
2019/5/21	0.946	2.7	2.1	22.5
2019/10/12	0.901	-3.4	6.1	68.1
平均	0.794	-2.9	-11.8	44.7

表 4.6-24 最適化パラメータ(奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル) (2)

日付	土層厚[m]	空隙率	斜面の側方 飽和透水係数 [m/s]	マトリックス 部空隙率	$\beta$
2007/9/7	1.053	0.424	0.400	0.035	8.937
2008/5/20	1.314	0.826	0.417	0.049	14.600
2010/6/27	0.280	0.537	0.453	0.063	10.892
2011/5/10	0.692	0.281	0.301	0.047	8.589
2011/7/30	1.163	0.308	0.239	0.066	12.473
2012/5/18	1.388	0.613	0.082	0.027	15.556
2012/7/8	0.689	0.526	0.078	0.068	10.772
2013/7/23	0.117	0.513	0.452	0.089	17.262
2013/8/1	0.384	0.322	0.385	0.059	16.999
2013/9/16	0.363	0.259	0.247	0.039	19.531
2013/10/16	0.643	0.345	0.344	0.093	12.085
2014/5/22	1.388	0.613	0.082	0.027	15.556
2015/10/2	0.534	0.138	0.337	0.012	12.535
2017/7/3	0.580	0.399	0.427	0.010	14.530
2017/8/17	0.175	0.206	0.430	0.048	9.069
2018/10/1	0.315	0.398	0.306	0.015	12.439
2019/5/21	0.361	0.373	0.294	0.060	16.042
2019/10/12	0.327	0.623	0.254	0.025	8.442

表 4.6-25 最適化パラメータ(奥只見ダム流域、H3ONEDO モデル)

日付	斜面粗度係数 [m <sup>-1/3</sup> s]	基岩鉛直方向の 飽和透水係数 [m/s]	基岩上面の 側方飽和透水係 数 [m/s]	飽和透水係数の 鉛直方向の低減 を規定する定数
2007/9/7	0.518	8.41.E-06	5.97.E-05	4.14.E-02
2008/5/20	0.181	9.90.E-06	3.74.E-05	1.59.E-02
2010/6/27	0.440	9.59.E-06	6.73.E-05	3.38.E-02
2011/5/10	0.113	9.11.E-06	6.64.E-06	4.46.E-02
2011/7/30	0.236	9.64.E-06	7.46.E-05	3.06.E-02
2012/5/18	0.102	7.38.E-06	2.96.E-05	9.66.E-02
2012/7/8	0.175	5.59.E-06	7.97.E-05	5.84.E-02
2013/7/23	0.198	7.91.E-06	7.71.E-05	3.73.E-02
2013/8/1	0.185	9.83.E-06	8.13.E-05	1.98.E-02
2013/9/16	0.119	7.57.E-06	3.22.E-05	2.89.E-02
2013/10/16	0.102	9.16.E-06	6.95.E-05	2.73.E-02
2014/5/22	0.102	7.38.E-06	2.96.E-05	9.66.E-02
2015/10/2	0.129	7.92.E-06	6.42.E-05	4.90.E-02
2017/7/3	0.115	9.45.E-06	7.22.E-05	2.36.E-02
2017/8/17	0.150	4.64.E-06	4.10.E-05	3.12.E-02
2018/10/1	0.226	8.47.E-06	8.77.E-05	3.10.E-02
2019/5/21	0.374	9.20.E-06	5.41.E-05	1.61.E-02
2019/10/12	0.466	8.47.E-06	1.72.E-05	1.10.E-02

#### 4.6.4 モデルの精度検証

##### (1) 流入量予測計算方法の検討

流出解析モデルによるダム流入量予測を行う場合、時々刻々得られるダム流入量のデータを用いてモデルの計算を随時補正することで、流入量予測の精度を高める処理が行われる。この処理は、ダム流入量データのデータ同化あるいはフィードバックと呼ばれる。

近年、比較的多く適用が進められつつあるデータ同化の手法として、「粒子フィルタ」が挙げられる。

粒子フィルタでは、パラメータ等の計算条件を変えた多数ケースの計算を同時並行で実行する。この多数のケースのうち、実際の流入量との整合性のよい計算結果を重視しつつ、多数ケースの多様性も確保しながら、計算条件を設定しなおすことを繰り返し、全体として精度の高い計算を維持する手法である。

4.6.3 では出水ごとに最適なパラメータを求めており、得られたパラメータはバラツキを持つ。このバラツキを参考にして、粒子フィルタにおける計算条件のバラツキを設定することにより、粒子フィルタを適用することが考えられる。

ただし、粒子フィルタの欠点として、多数ケースの計算を同時並行で行うため、計算負荷が高いことが挙げられる。

また、H30 NEDO モデルについては、データ同化の処理も合わせて開発がされており、データ同化の手法として「拡張カルマンフィルタ」が用いられている。

拡張カルマンフィルタは、粒子フィルタに比べ計算負荷が軽いのが、流出解析モデルを設計する際に拡張カルマンフィルタの適用を前提にして設計する必要がある、RRI モデルへの適用は難しい。

データ同化を導入すると、予測のスタート時刻におけるモデルの状態を観測データに整合させ、そこから予測の計算をスタートするため、短時間（数時間程度）先までの予測において特に威力を発揮する。しかし、1日先～1週間先の予測になると、予測雨量の精度や流出解析モデルが本来持つ精度の方が重要となる。

また、1日先～1週間先といった長い計算期間を対象とする計算は、短時間の計算に比べ、計算量も多いことから、データ同化については計算負荷を高めないことを重視する必要がある。

こうしたことから、本調査の流入量予測においては、データ同化の処理を行わない、もしくは、粒子フィルタや拡張カルマンフィルタよりも簡便な手法（例えば、計算された流入量と実際の流入量の差分を単純に差し引いて補正する等）で行うのが良いと考えられる。

## (2) 流出予測シミュレーション

データ同化の処理を行わないものとした場合の流出予測シミュレーションを、RRI モデルおよび H30NEDO モデルについて実施した。

流出予測シミュレーションの結果は、次章の 4.7.6(8)において、AI 手法による予測の結果も合わせて示す。

## (3) 精度の検証

次章 4.7.6(8)に示す予測シミュレーションにおいて、下記の傾向が見られた。

- RRI モデル、H30NEDO モデルともおおむね良好な精度となった（詳細は 4.7.6(8)に示す）。
- RRI モデルと H30NEDO モデルのどちらの精度が良いかについては、洪水によって異なり、特に傾向を示すことはできない。
- 黒部ダムと奥只見ダムでは、両モデルとも黒部ダムにおける精度の方が良い。

## 4.6.5 実用化に向けての評価

### (4) 実用性の検討

#### ○観点1：精度

RRI モデル、H3ONEDO モデルともに、計算精度についてはパラメータの選択による。各出水に対して適切なパラメータを選択することができれば、前節において示したように比較的精度の高い予測(NS 係数で 0.7 以上)の予測が可能である。しかしながら、パラメータの組み合わせによって流出率も大きく異なり、不適切なパラメータを選択した場合、ピーク流量、出水時の総ボリュームが予想と実測とで大きく異なるという事態も生じえる。

精度の高い予測のためには、予想される降雨に対して適切なパラメータを選択する仕組みを構築する必要がある。

#### ○観点2：計算速度

RRI モデル、H3ONEDO モデルともに 1 週間の計算に要する時間は短く、リアルタイム予測を実施するのに十分な計算速度である。

#### ○観点3：他流域への展開の容易性

流出解析モデルのデータ設定自体は公開データのみで可能である。ただし、モデルパラメータチューニングには、ダム流入量や積雪量などダム管理者からのデータを提供頂く必要がある。

#### ○観点4：モデルのパラメータ設定の容易性

RRI モデル、H3ONEDO モデルともに、対象とする流域ごとに多数の出水を対象としてパラメータの最適化を行う必要がある。最適化のためには、雨量データ・流入量データの確認を含め、細かい検討が必要になる。

### (5) 高速化の可能性

RRI モデルはすでに OpenMP による並列化が実装されている。また、H3ONEDO モデルについてもプログラム構築に用いられている水文モデル構築システム OHyMoS が OpenMP に対応しており、並列化した計算が可能である。このため 1 ケース(1 週間)あたりの計算時間は短く、実運用する際の計算コストは大きくないと考えられる。

粒子フィルタなどによるデータ同化を行う場合は、多数の計算を行う必要があるので、並列化について、より検討を加え、多数の計算を同時に行う仕組みを構築する必要がある。

## 参考文献

- [1] Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall-runoff-unundation analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrol. Sci. J. 57(2),pp.298-312,2012
- [2] Duan, Q., Sorooshin, S. and Gupta, V.K.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resources Research, Vol.28, No.4, pp.1015-1031, 1992
- [3] 杉浦成満・福田慎哉・倉本和正・荒木義則・朝位孝二・古川浩平:土木学会論文集 F6(安全問題),Vol67,No.1,1-13,2011 「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」
- [4] 藤井厚紀 :福岡工業大学研究論集,Vol.44,NO.1,(2011) 45-52 「関数最適化アルゴリズム SCE-UA 法の性能評価と改良」
- [5] Nash, J.E and Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10, 282-290
- [6] 第 5 回気候変動による水資源への影響検討会 今年度の検討状況について  
<http://www.mlit.go.jp/common/001027844.pdf>

## 4.7 流出予測手法 (AI 手法) の検討

### 4.7.1 学習・検証用データの検討と収集

検討対象とした黒部ダム流域に対して、学習・精度検証用のデータ収集を行った。利用するデータ種別は降水量データ(解析雨量)、予測地点の流入量データを基本とした。本検証では予測降水量として解析雨量を用いるため、予測精度評価から降水量予測精度の影響は除外した。

#### (1) 黒部ダムの観測データの収集

- 予測地点の流入量データ

2006年1月1日0:00～2020年7月1日0:00の1時間平均の流入量データを収集した。4月ごろより融雪による流入量の増加が見られ、5月～8月頃まで融雪による流入が定常的に発生している期間が続いていた。

- 降水量データ(解析雨量)

降水量データとして2006年1月1日0:00～2020年7月1日0:00の解析雨量を収集した。解析雨量のうち黒部ダム流域の範囲のデータを流域平均雨量として算出した。

- 降雨データと予測地点の流入量データの関連性の考察

流域の平均雨量と流入量を並べて表示したグラフを以下に示す。

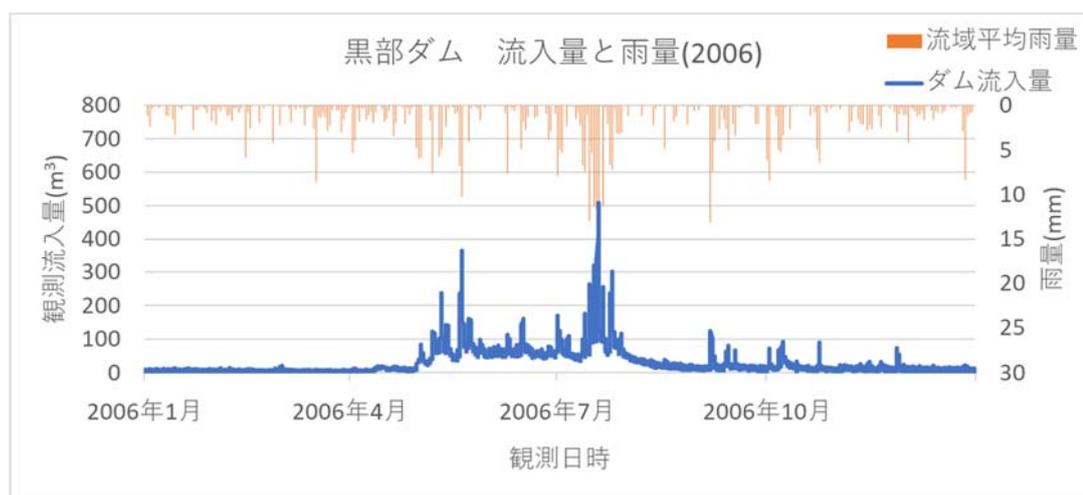


図 4.7-1 黒部ダム流入量と流域平均雨量の時間変化(2006年)

これより、降水量に対する流入量の増加量が季節によって大きく変化していることがわかった。これには以下の要因があると考えた。

- 解析雨量は降雪も降水量とカウントされるため、降雨と降雪の区別ができない。
- 積雪上にまとまった雨が降る現象 rain-on-snow (ROS) と呼ばれる現象が発生して、降雨によって融雪が促進され、流入量が増大している。

このため、解析雨量からだけでは流入量を学習することは困難と考えた。また、ダム流入量が季節に依存していることを確認するため、ダム流入量の周期をFFTで分析すると以下のようになった。

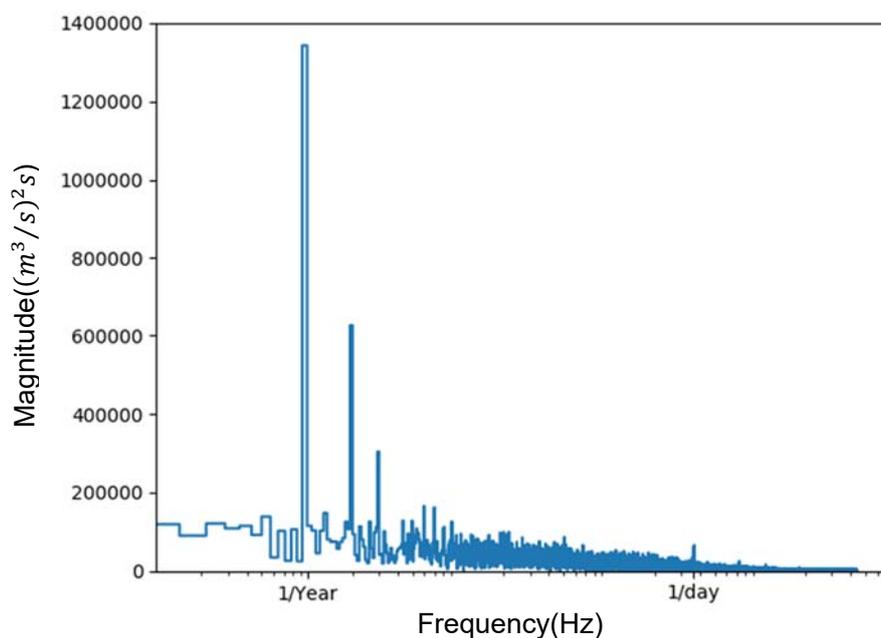


図 4.7-2 黒部ダム流入量の周波数解析結果

この結果から見て1年の周期性をもっており、季節を反映できるデータが追加が必要になると考えた。なお、他の2つのピークは半年周期、四半期周期に出ていた。

● 追加の気象データ

利用可能なデータのうち、1年の周期性をもっており、季節を反映できるデータは以下の2つであった。

- 黒部ダムの観測気温
- 黒部ダムの観測積雪深

これらのデータについても必要に応じて学習データに追加することにした。

(2) 黒部ダムの特徴的な出水イベントの選出

特徴的な出水イベントとして、1週間以上の洪水時データを30~50程度抽出して計算対象とすることにした。洪水の明確な基準はなかったため、累加雨量を算出して上位50件を抽出し、累加雨量対象期間を含む1週間を計算対象とした。

### (3) 奥只見ダムの観測データの収集

- 予測地点の流入量データ

2006年1月1日0:00～2020年7月1日0:00の1時間平均の流入量データを収集した。

黒部ダムと比較すると流入量の振動の影響が大きいことを除けば、4月ごろより融雪による流入量の増加が見られ、5月～8月頃まで融雪による流入が定常的に発生している期間が続いている点は共通している。奥只見ダムの流入量は貯水位から計算されていると考えられるが、1cmの水位変化をした場合、1時間に100,000m<sup>3</sup>の流入超過 (=1cm×湛水面積約10km<sup>2</sup>)が発生し、秒で換算すると30m<sup>3</sup>/sとなる。つまり、表現できる最小単位が30m<sup>3</sup>/sとなっており、このことが流入量データが振動している要因の1つと考えられる。その他にもノイズと思われる異常値データもいくつか見られた。

- 降水量データ(解析雨量)

降水量データとして2006年1月1日0:00～2020年7月1日0:00の解析雨量を収集した。

解析雨量のうち以下に示す奥只見ダム流域の範囲の雨量データを流域平均雨量として算出した。

- 降水量データと予測地点の流入量データの関連性の考察

流域の平均雨量と流入量を並べて表示したグラフを以下に示す。

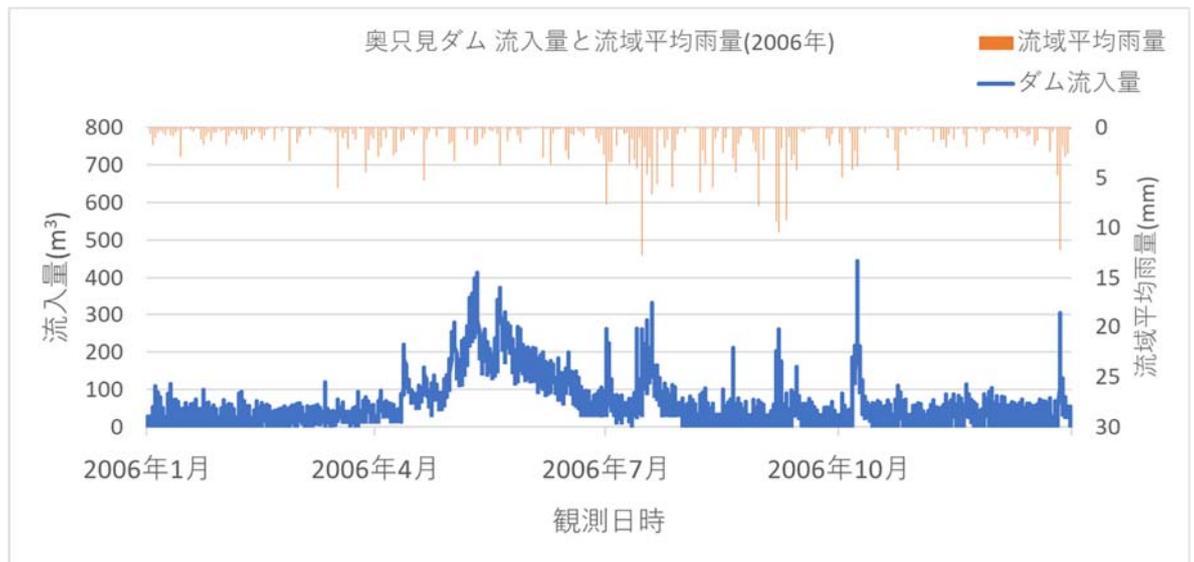


図 4.7-3 奥只見ダム流入量と流域平均雨量の時間変化(2006年)

黒部ダムと同様で降水量に対する流入量の増加量が季節によって大きく変化していることがわかった。これには以下の要因があると考えた。

- 解析雨量は降雪も降水量とカウントされるため、降雨と降雪の区別ができない。
- 積雪上にまとまった雨が降る現象 rain-on-snow (ROS) と呼ばれる現象が発生して、降雨によって融雪が促進され、流入量が増大している。

このため、解析雨量からだけでは流入量を学習することは困難と考えた。また、ダム流入量が季節に依存していることを確認するため、ダム流入量の周期をFFTで分析すると以下のようなになった。

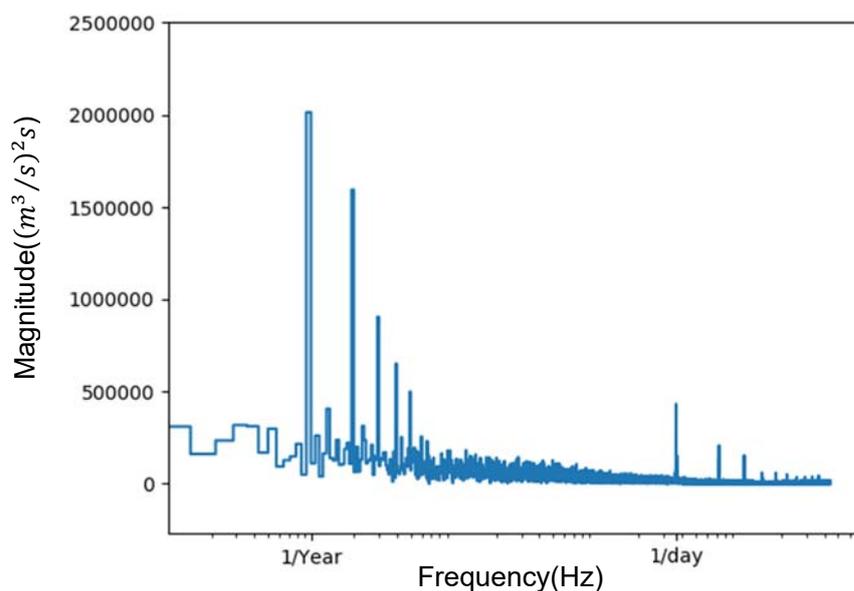


図 4.7-4 奥只見ダム流入量の周波数解析結果

この結果から見て1年の周期性をもっており、季節を反映できるデータが追加で必要になると考えた。なお、他の2つのピークは半年周期、四半期周期に出ていた。

● 追加の気象データ

奥只見ダムにおける気温と積雪深は観測頻度が1日1回であり、時間単位の解析に利用しにくい。このため、近隣のアメダス観測所である檜枝岐観測所のデータを利用するものとした。

- アメダス檜枝岐観測所の観測気温
- アメダス檜枝岐観測所の観測積雪深

これらのデータについても必要に応じて学習データに追加することにした。

(4) 奥只見ダムの特徴的な出水イベントの選出

特徴的な出水イベントとして、1週間以上の洪水時データを30~50程度抽出して計算対象とすることにした。洪水の明確な基準はなかったため、累加雨量を算出して上位50件を抽出し、累加雨量対象期間を含む1週間を計算対象とした。

## 4.7.2 学習・検証用データセットの作成

収集したデータから、AI モデルの学習・検証で利用するデータセットを作成する。

### (1) データセット作成の方針

企画時点では「過去データの中から洪水等の特徴的な出水イベントを 30~50 程度選定し、各出水イベントに対して、予測対象とする 1 週間以上の期間を決定する。その後、決定した予測対象期間に対する連続時系列データを上記データ種別について収集する。」と計画していた。しかしながら、実際のデータを確認したところ、ダム流入量は季節に依存していることがわかっており、降水量データとの相関も低い。よって、出水イベントだけに着目した学習では、効果が低い可能性があると考えた。

よって、当初の計画を変更し、全期間のデータを収集し、学習データに利用する方針とした。検証の結果、学習が困難であった場合は、改めて出水イベントだけに絞った学習を検討することとした。

AI の精度検証は用意できるデータの量に応じて以下の 2 つが主に用いられる。

- leave one out 法

交差検証のひとつで、標本群から 1 つの事例だけを抜き出してテスト事例とし、残りを訓練事例とする方法である。これを全事例が一回ずつテスト事例となるよう検証を繰り返す。交差検証とは統計学において標本データを分割し、その一部をまず解析して、残る部分でその解析のテストを行い、解析自身の妥当性の検証・確認に当てる手法を指す。

- hold-out 法

データ全体を学習用データとテストデータに分割し、モデルの精度を確かめる手法である。leave one out 法と異なり、全事例がテスト事例になることはない。

今回、学習データは豊富に存在するため、精度検証は当初計画していた leave one out 法による交差検証ではなく、データが豊富に存在する場合に用いられる hold-out 法による学習データとテストデータの分割によっておこなうことにした。ただし、「4.7.6 AI モデルの精度評価」において、評価対象が少ない場合は必要に応じて leave one out 法を用いて学習したモデルを利用する。

### (2) 作成したデータセット

データを hold-out 法により、トレーニング、検証、およびテストセットに分割した。標準的には 70%, 20%, 10% の割合で分割するが、4.7.1 で述べたとおり、黒部ダム、奥只見ダムともに年単位の周期性を持っているため、年単位で分割することにした。

データは14年分存在しているので、今回はトレーニングとして10年(71.4%)、検証で2年(14.3%)、テストセットで2年(14.3%)に分割した。具体的には2006年1月1日0:00~2015年12月31日23:00をトレーニング、2016年1月1日0:00~2017年12月31日23:00を検証、テストセットを2018年1月1日0:00~2019年12月31日23:00とした。

観測データはニューラルネットワークをトレーニングする前に、データの正規化を行った。正規化は、このスケーリングを行う一般的な方法を使い、平均を差し引き、各特徴の標準偏差で割ることで正規化した。モデルが検証セットとテストセットの値にアクセスできないように、平均と標準偏差はトレーニングデータのみで計算した。

4.7.1にて収集したデータをもとに以下の5種類データを用意し、学習セットを作成した。

- ダム流入量

黒部ダム並びに奥只見ダムのダム流入量については1時間間隔の観測値が得られたので、その値を利用する。欠損がある期間については、前後の値を使って線形補間した。

- 流域平均雨量

解析雨量は30分ごとのデータであったが、ダム流入量に合わせて1時間毎のデータのみを利用することにした。解析雨量から流域平均雨量に算出する方法は4.7.1で述べたとおり、ダム流域の範囲の雨量データを流域平均雨量として算出した。

- 気温

黒部ダムにて観測された気温データを用いる。データの観測時間が毎日0時、6時、9時、(10時)、12時、18時と間隔が一定でないため(10時のデータはほとんど記録されていないが、時々記録されていた)、線形補間で1時間間隔のデータに加工して利用した。

奥只見ダムの気温データは1日1回の観測頻度であり、AI学習においては正確な地点のデータでなくとも、気温の毎時の変化のトレンドが学習できれば良いので、近隣のアメダス観測所である檜枝岐観測所の観測機能を利用することにした。

- 積雪深

黒部ダムの積雪深は、黒部ダムの気温と同様にデータの観測時間が毎日0時、6時、9時、(10時)、12時、18時と間隔が一定でないため(10時のデータはほとんど記録されていないが、時々記録されていた)、線形補間で1時間間隔のデータに加工して利用した。

奥只見ダムの積雪深データは、奥只見ダムの気温データと同じく1日1回の観測頻度であるため、気温同様に檜枝岐観測所の積雪深データを利用することにした。

- 日時

観測値とは別にデータの周期性を学習させるために、日時情報として1年を周期とする sin、cos 関数の値を与えた。うるう年を考慮して1年を 365.25 日として計算した。具体的な式は t を(データは1時間間隔で存在するとして)データのステップ数とすると以下のとおりである。

$$\sin \frac{t}{365.25 * 24}$$

$$\cos \frac{t}{365.25 * 24}$$

### 4.7.3 AI 予測モデル構成の検討

企画時点では先行研究で報告の多い4層のFCN (Full Connected Neural Network) を基本構成とし、1 時間間隔で逐次予測する形式と数時間分を一括予測する形式に対して、CNN (Convolutional Neural Network) 構成やRNN (Recurrent Neural Network) 構成を適宜追加した複数のモデル構成を検討し、予測精度の比較検討対象とする有力構成を選定する方針を立てていた。

今回取り扱うデータの特徴である周期性を考慮するならば、時系列のための時間的な動的振る舞いを表現できるRNNが有力と考えられた。また、先行研究で報告の多いFCNについては、洪水イベント前後のデータのみを学習対象としており、融雪の影響がほぼないと思われる地域のダム(近畿、九州)が対象になっている。

このような背景から、今回のダムの流入予測ではRNN (Recurrent Neural Network) 構成を基本構成として検討をすすめることにした。さらに長期化への対応を容易にするため、RNN構成を発展させ、RNNの出力結果を自己反映しながら1STEPずつ予測する構成としている。この構成はTensorFlowの気象情報の時系列予測の事例で紹介されている構成である。

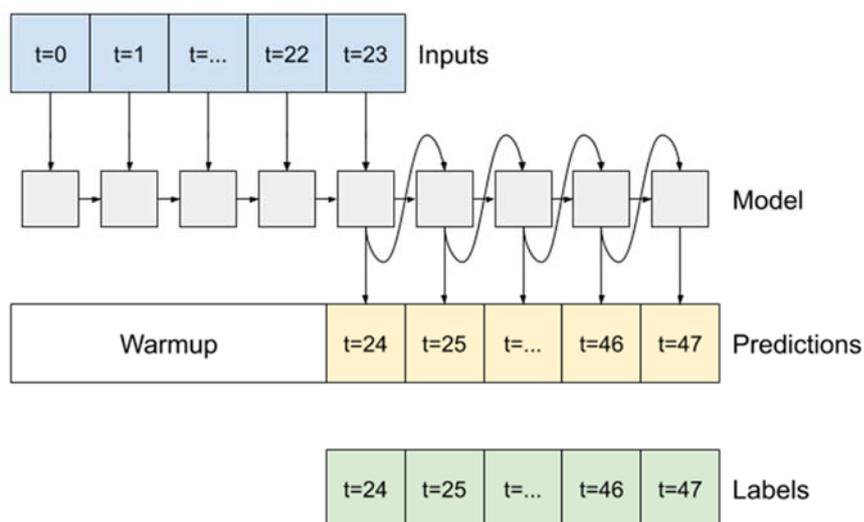


図 4.7-5 AI 予測モデルの構成図

([https://www.tensorflow.org/tutorials/structured\\_data/time\\_series](https://www.tensorflow.org/tutorials/structured_data/time_series) より引用)

この構成を採用したのは、1STEP ずつ予測結果を反映しながら、予測時間を拡張していく手法であるため、短期の予測モデルを構築しつつ、長期への拡張が容易であるためである。先行事例が多いFCN (Full Connected Neural Network) の場合、6 時間先までを予測するモデルと、24 時間先までの予測するモデルの構成は別であるが、このモデルは同じ構成のまま拡張することが可能である。(学習データセットは必要に応じて変更する必要がある。)

本業務では 39 時間先までの予測をターゲットにしているが、今後 1 週間先の予測に拡張することも可能となっている。

#### 4.7.4 AI モデルの開発

モデルの作成は Google が開発したオープンソース Tensorflow を利用して作成した。Tensorflow についてはいくつか推定事例が公開されており、今回は時系列予測の自己回帰モデルを参考に作成した。

([https://www.tensorflow.org/tutorials/structured\\_data/time\\_series#advanced\\_auto\\_regressive\\_model](https://www.tensorflow.org/tutorials/structured_data/time_series#advanced_auto_regressive_model))

実際に作成したソースコードについては参考資料として添付するが、ここではポイントとなる処理の概要を説明する。

##### (1) データの分割

データをトレーニング、検証、およびテストセットに分割した。標準的には 70%, 20%, 10% の割合で分割するが、4.7.1 で述べたとおり、年単位の周期性を持っているため、年単位で分割することにした。データは 14 年分存在しているため、今回はトレーニングとして 10 年 (71.4%)、検証で 2 年 (14.3%)、テストセットで 2 年 (14.3%) に分割した。具体的には 2006 年 1 月 1 日 0:00~2015 年 12 月 31 日 23:00 をトレーニング、2016 年 1 月 1 日 0:00~2017 年 12 月 31 日 23:00 を検証、テストセットを 2018 年 1 月 1 日 0:00~2019 年 12 月 31 日 23:00 としている。

##### (2) データの正規化

ニューラルネットワークをトレーニングする前に、データの正規化を行う。正規化は、このスケールリングを行う一般的な方法を使い、平均を差し引き、各特徴の標準偏差で割ることで正規化する。モデルが検証セットとテストセットの値にアクセスできないように、平均と標準偏差はトレーニングデータを使用してのみ計算する必要がある。



#### 4.7.5 AI モデルの学習とパラメータチューニング

作成したモデルに対して、作成データセットによる hold-out 法を用いた学習と精度検証を行い、ハイパーパラメータをチューニングした。チューニング対象は大きく、ネットワーク構成関連、学習手法関連、損失関数関連、データ前処理関連、入出力データ範囲関連、に分けられる。それぞれについて、作成したモデルの内容と調整する場合の考え方について述べる。なお、パラメータチューニングは基本的に黒部ダムの計算で実行しており、奥只見ダムについては同じハイパーパラメータで計算した。

##### (1) ネットワーク構成関連

今回採用したモデルのネットワーク構成は RNN の一種である LSTM を利用した構成で入力層、LSTM 層、全結合層、出力層の 4 層構成になっている。図 4.7-5 で示した通り、自己回帰型のモデルであるため、LSTM の出力結果が次ステップの入力となる。入力層の長さ、出力層のステップ数は任意に変更できるネットワーク構成としている。検証の結果によっては、必要に応じて層数を増やす、入力雨量を流域平均からメッシュ情報に戻して、入力前に CNN を挟むなどの変更を加える。

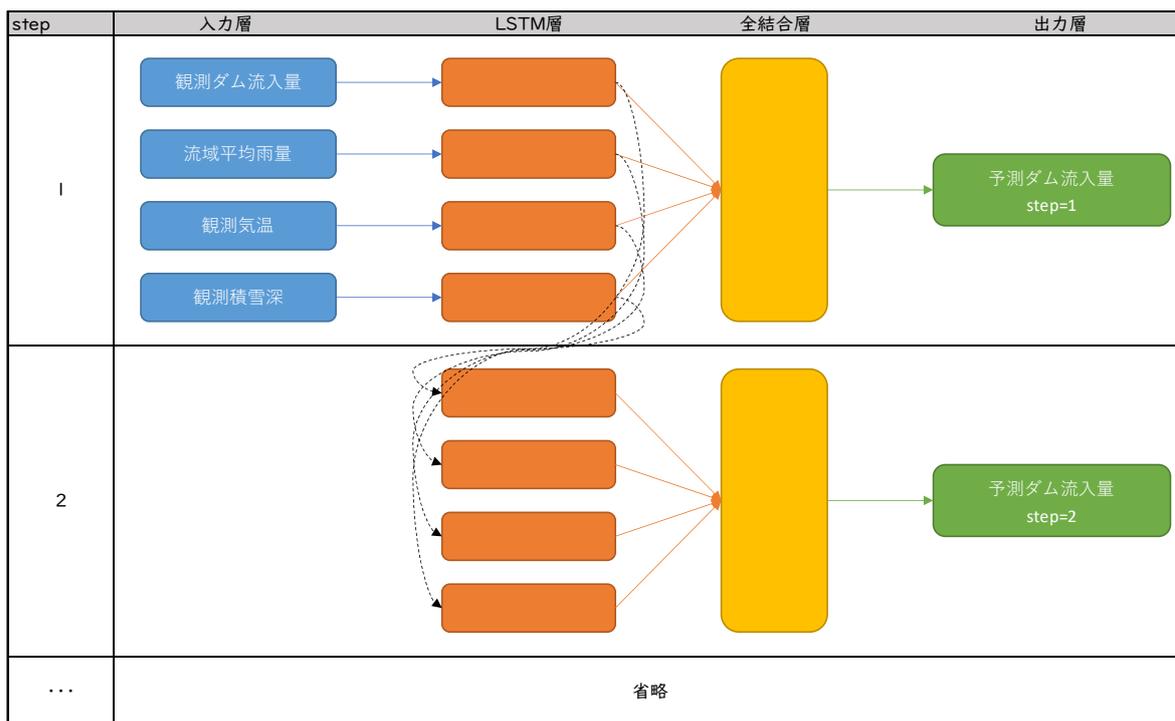


図 4.7-7 モデルのネットワーク構成図

##### (2) 学習手法関連

学習手法は 4.7.2 で述べたとおり「hold-out 法」を採用する。ただし、検証の結果学習が進まない場合は必要に応じて、「leave one out 法」を適用する。

### (3) 損失関数関連

損失関数は平均二乗誤差を利用している。学習効率が悪い場合や、過学習になる場合は別の損失関数を試す。

### (4) データ前処理関連

雨量データについてはメッシュ情報である解析雨量から流域に該当するメッシュを特定して、流域平均雨量に換算した。また、その他のデータについて毎正時のデータが欠損等で存在しない場合は線形補完処理でデータを補填した。

### (5) 入出力データ範囲関連

入出力データについては調整しやすいモデルを選択しているため、いくつかのパターンを用意して検証を実施した。この業務での最終的な目標は 39 時間予測であるが、短い予測を実施して、入出力データ範囲関連以外のハイパーパラメータについて調整の要否を確認してから、長期予測を実施した。

#### ① ダム流入量 12 時間予測短期モデルの学習(予測雨量なし)

最初にベースラインとして、解析雨量、ダム流入量、積雪深、気温について過去 120 時間(5 日間)のデータを入力として、12 時間後までの予測を実施するモデルを学習し精度評価を実施した。

精度評価の結果の詳細は 4.7.6 に述べるが、降水量に依存しない基底流量については問題なく予想できた。よって、次のステップとして予測雨量を与えて洪水イベントの予測ができるか検証した。

#### ② ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量あり)

次にダム流入量、積雪深、気温について過去 120 時間(5 日間)、解析雨量について過去 111 時間+予測 9 時間の合計 120 時間のデータを入力として 12 時間後までを予測するモデルを学習し精度評価を実施した。9 時間とした理由は 0~12 時間で試した結果、9 時間以降ではほぼ差がなく、僅かな差で 9 時間が最もよい結果となったためである。

基底流量については十分な精度が出ていたことから、基底流量の予測に関わっていると思われる、ダム流入量、積雪深、気温については変更せず、雨量のみ予測雨量をデータに加え、その分過去の履歴を減らして学習させた。

この結果、12 時間の予測については十分な精度で予測できることがわかった。よって、入出力データ範囲関連以外のハイパーパラメータについては仮決定とし、同様の方針で 39 時間の予測モデルを学習することにした。

#### ③ ダム流入量 39 時間予測モデルの学習

次にダム流入量、積雪深、気温について過去 120 時間(5 日間)、解析雨量について過去 84 時間+予測 36 時間の合計 120 時間のデータを入力として 39 時間後までを予測するモデルを学習し精度評価を実施した。

#### 4.7.6 AIモデルの精度評価

チューニング過程の各AIモデルに対し、hold-out法を用いて予測精度を整理した。また、同データに対して4.6で構築した物理モデルによる予測を行い、予測精度を比較検証した。

##### (1) 黒部ダムにおけるAIモデルのチューニング過程の予測精度評価

以下の2点について予測精度の評価を実施した。なお、4.7.2に述べた方針でデータを分割しているため、精度評価については2018年、2019年の出水に限定して実施した。

- 代表的な出水時の予測(詳細は下記を参照)
- 降水量が少ない時の予測(2月、5月、8月、11月の任意の期間)

評価対象とした出水は以下の通り。

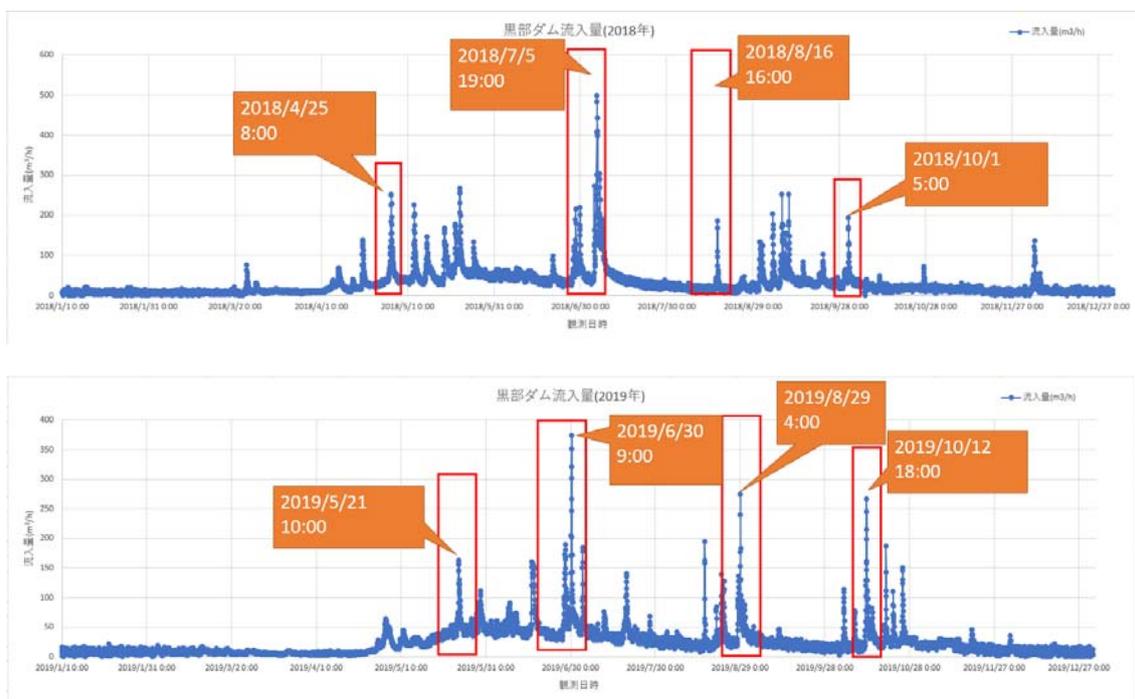


図 4.7-8 2018年、2019年の黒部ダムの流入量

① ダム流入量 12 時間予測短期モデルの学習(予測雨量なし)の精度評価  
 評価対象について、モデルでの予測結果をグラフで示す。

● 出水時の予測結果の一例

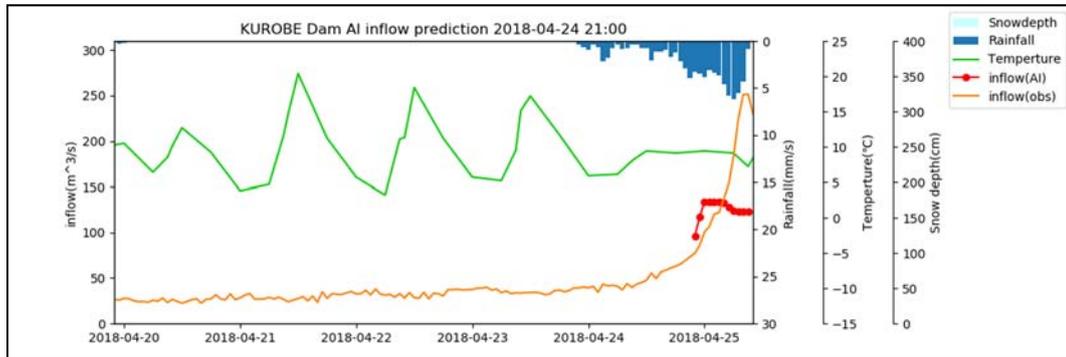


図 4.7-9 2018/4/25 8:00 頃の出水の予測結果

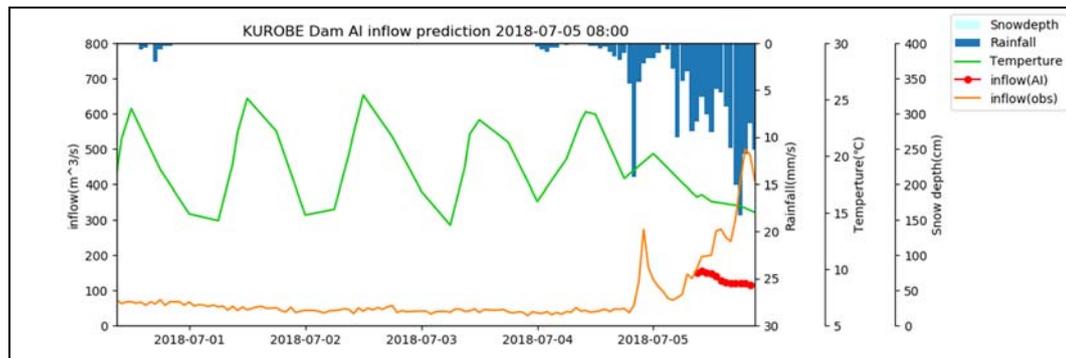


図 4.7-10 2018/7/5 19:00 頃の出水の予測結果

● 降水量が少ない時の予測結果の一例

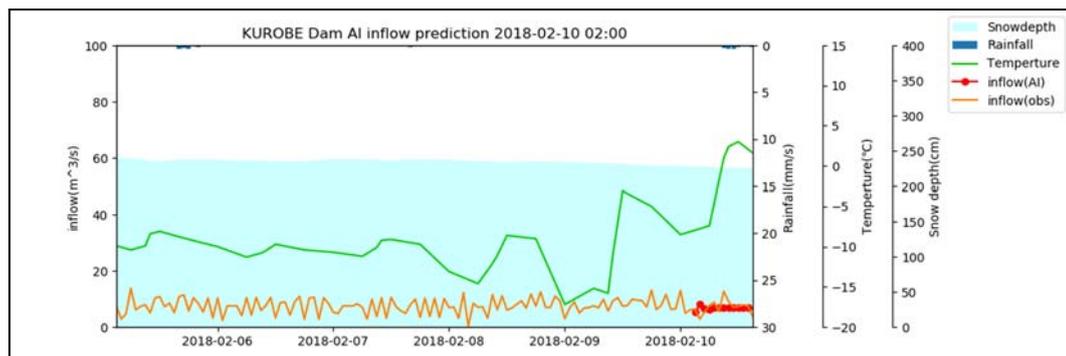


図 4.7-11 2018 年 2 月の降水量が少ない期間の予測結果

② ダム流入量 12 時間予測短期モデルの学習(予測雨量あり)の精度評価  
 評価対象について、モデルでの予測結果をグラフで示す。

● 代表的な出水時の予測結果の一例

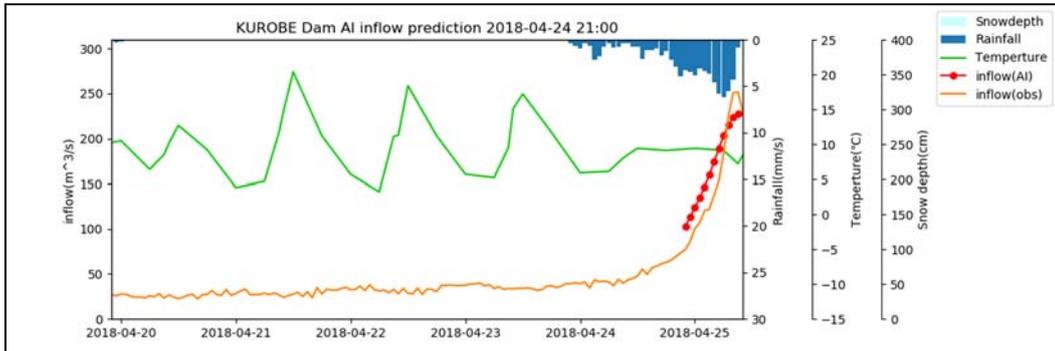


図 4.7-12 2018/4/25 8:00 頃の出水の予測結果

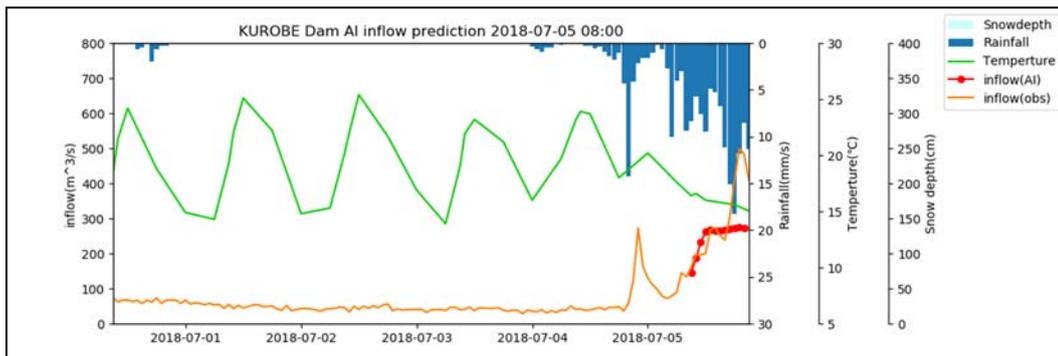


図 4.7-13 2018/7/5 19:00 頃の出水の予測結果

● 降水量が少ない時の予測結果の一例

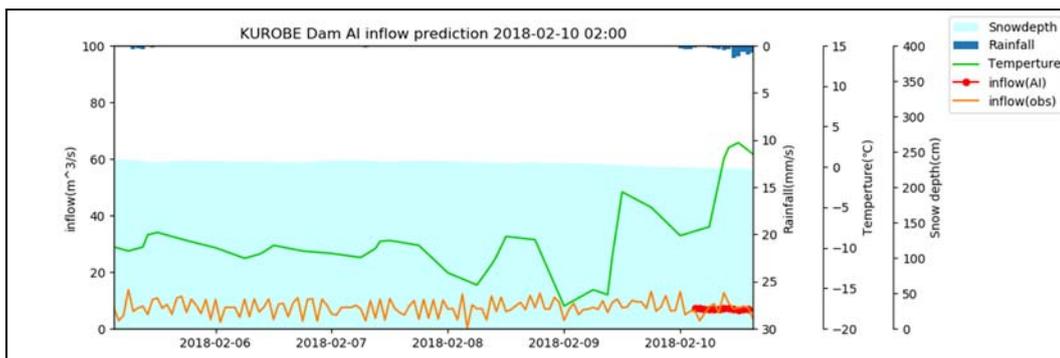


図 4.7-14 2018 年 2 月の降水量が少ない期間の予測結果

- ③ ダム流入量 39 時間予測モデルの精度評価  
 評価対象について、モデルでの予測結果をグラフで示す。

- 代表的な出水時の予測結果の一例

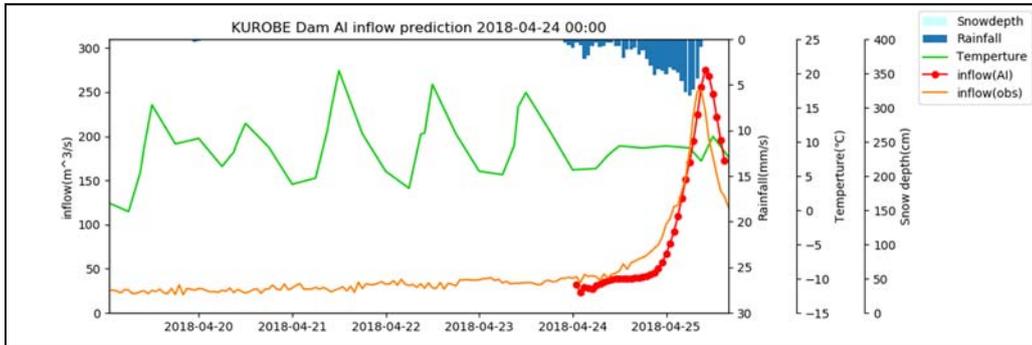


図 4.7-15 2018/4/25 8:00 頃の出水の予測結果

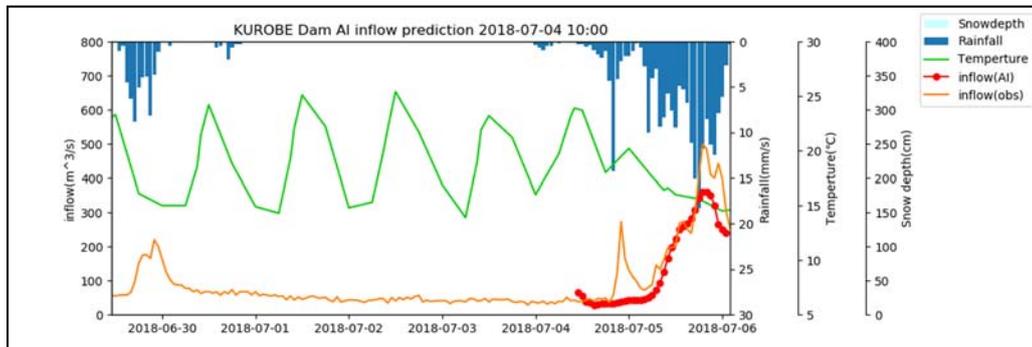


図 4.7-16 2018/7/5 19:00 頃の出水の予測結果

- 降水量が少ない時の予測結果(2月、5月、8月、11月の任意の期間)

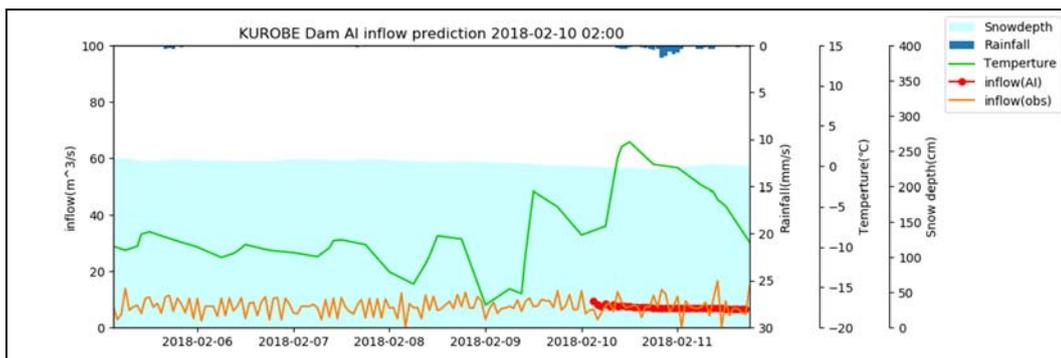


図 4.7-17 2018 年 2 月の降水量が少ない期間の予測結果

(2) 黒部ダムにおける AI モデルのチューニング過程の考察

AI モデルのチューニングの過程では以下の評価基準を用いた。

表 4.7-1 精度評価に用いた誤差指標の一覧

名称	説明	数式
RMSE	観測流量と計算流量の平均二乗誤差。	$\sqrt{\frac{\sum_{k=0}^n (Q_{obs,k} - Q_{calc,k})^2}{n}}$
Nash-Sutcliffe 係数	対象期間にわたる平均値を予測値とした場合に 0 となり、予測が完全に正確な場合に最大値 1 となる。このため、指標値が 0 以下の場合には予測効果が無いとみなすことができる。	$1 - \frac{\sum_{k=1}^n \{Q_{calc,k} - Q_{obs,k}\}^2}{\sum_{k=1}^n \{Q_{obs,k} - Q_{obs,ave}\}^2}$
流入ボリューム誤差	計算期間にわたる総流入量の誤差の合計を観測流量の合計で割ったもの。	$\frac{\sum_{k=1}^n Q_{obs,k} - \sum_{k=1}^n Q_{calc,k}}{\sum_{k=1}^n Q_{obs,k}}$
ピーク誤差	観測流量と計算流量のピーク時の流量の差分の絶対値を観測流量のピークで割ったもの。	$\frac{ Q_{obs,po} - Q_{calc,pc} }{Q_{obs,pc}}$

ここで、 $Q_{obs,k}$  は k ステップ目の観測流量、 $Q_{calc,k}$  は k ステップ目の計算流量、 $Q_{obs,ave}$  は計算期間中の観測流量の平均値を表す。観測流量がピークの時を  $k=po$  とし、計算流量がピークの時を  $k=pc$  としている。計算対象区間の最初のステップを  $k=0$ 、最後のステップを  $k=n$  としている。

誤差評価は予測開始時刻とピーク時刻の関係で 12 時間予測は 3 点、39 時間予測は 5 点で評価した。

- ◇ 12 時間予測の誤差評価
  1. ピーク発生の 9 時間前に予測
  2. ピーク発生の 6 時間前に予測
  3. ピーク発生の 3 時間前に予測
  
- ◇ 39 時間予測の誤差評価
  1. ピーク発生の 36 時間前に予測
  2. ピーク発生の 24 時間前に予測
  3. ピーク発生の 18 時間前に予測
  4. ピーク発生の 12 時間前に予測
  5. ピーク発生の 3 時間前に予測

- ① ダム流入量 12 時間予測短期モデルの学習(予測雨量なし)の精度評価結果の考察と次の学習についての検討  
 精度評価対象の予測結果について、誤差評価の結果を以下に示す。

表 4.7-2 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量なし)の精度評価結果 (RMSE)

対象予測結果	9 時間前	6 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	18.564	16.722	15.811
2018/07/05 19:00 頃の出水	64.040	67.734	63.366
2018/08/16 16:00 頃の出水	16.744	18.888	13.332
2018/10/01 05:00 頃の出水	25.556	22.540	11.320
2019/05/21 10:00 頃の出水	18.910	10.122	6.203
2019/06/30 09:00 頃の出水	48.657	36.523	29.763
2019/08/29 04:00 頃の出水	28.600	28.706	15.276
2019/10/12 18:00 頃の出水	31.471	30.999	19.337

表 4.7-3 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量なし)の精度評価結果 (NS 係数)

対象予測結果	9 時間前	6 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	-0.396	-0.758	-0.294
2018/07/05 19:00 頃の出水	-3.677	-6.380	-4.005
2018/08/16 16:00 頃の出水	-0.231	-0.738	-0.004
2018/10/01 05:00 頃の出水	-1.665	-2.738	0.152
2019/05/21 10:00 頃の出水	-1.484	-0.356	-0.246
2019/06/30 09:00 頃の出水	-2.247	-1.490	-0.103
2019/08/29 04:00 頃の出水	-1.386	-1.663	0.429
2019/10/12 18:00 頃の出水	-1.607	-3.338	-0.404

表 4.7-4 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量なし)の精度評価結果 (ボリューム誤差)

対象予測結果	9 時間前	6 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	-0.205	-0.206	-0.151
2018/07/05 19:00 頃の出水	-0.566	-0.588	-0.552
2018/08/16 16:00 頃の出水	-0.344	-0.568	-0.164
2018/10/01 05:00 頃の出水	-0.685	-0.574	-0.229
2019/05/21 10:00 頃の出水	-0.460	-0.197	0.122
2019/06/30 09:00 頃の出水	-0.615	-0.420	-0.279
2019/08/29 04:00 頃の出水	-0.524	-0.540	-0.073
2019/10/12 18:00 頃の出水	-0.567	-0.545	-0.352

表 4.7-5 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量なし)の精度評価結果  
(ピーク誤差)

対象予測結果	9 時間前	6 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	0.431	0.409	0.312
2018/07/05 19:00 頃の出水	0.619	0.617	0.613
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.679	0.787	0.591
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.816	0.728	0.373
2019/05/21 10:00 頃の出水	0.592	0.304	0.027
2019/06/30 09:00 頃の出水	0.758	0.573	0.492
2019/08/29 04:00 頃の出水	0.728	0.735	0.456
2019/10/12 18:00 頃の出水	0.715	0.630	0.484

表 4.7-6 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量なし)の精度評価結果  
(降水量が少ない期間)

対象予測結果	RMSE	ボリューム誤差
2018 年 02 月の降水量が少ない期間	0.739	-0.082
2018 年 05 月の降水量が少ない期間	1.172	0.062
2018 年 08 月の降水量が少ない期間	1.140	-0.045
2018 年 11 月の降水量が少ない期間	1.353	-0.074

予測雨量を与えていないので、降水由来の出水について予測ができないことは、ほぼ想定どおりと言える。この精度評価結果を基準にして、予測雨量を与えたときの評価を比較する。

- ② ダム流入量 12 時間予測短期モデルの学習(予測雨量あり)の精度評価結果の考察と次の学習についての検討  
 精度評価対象の予測結果について、誤差評価の結果を以下に示す。

表 4.7-7 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量あり)の精度評価結果 (RMSE)

対象予測結果	9 時間前	6 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	5.674	5.671	6.393
2018/07/05 19:00 頃の出水	26.102	28.681	29.437
2018/08/16 16:00 頃の出水	6.489	6.838	5.353
2018/10/01 05:00 頃の出水	11.274	9.854	11.458
2019/05/21 10:00 頃の出水	3.321	3.357	1.798
2019/06/30 09:00 頃の出水	17.199	14.629	9.355
2019/08/29 04:00 頃の出水	8.147	9.568	9.424
2019/10/12 18:00 頃の出水	7.906	5.358	7.603

表 4.7-8 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量あり)の精度評価結果 (NS 係数)

対象予測結果	9 時間前	6 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	0.870	0.798	0.788
2018/07/05 19:00 頃の出水	0.223	-0.323	-0.080
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.815	0.772	0.838
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.481	0.286	0.131
2019/05/21 10:00 頃の出水	0.923	0.851	0.895
2019/06/30 09:00 頃の出水	0.594	0.600	0.891
2019/08/29 04:00 頃の出水	0.806	0.704	0.783
2019/10/12 18:00 頃の出水	0.835	0.870	0.783

表 4.7-9 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量あり)の精度評価結果 (ボリューム誤差)

対象予測結果	9 時間前	6 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	0.042	0.013	0.008
2018/07/05 19:00 頃の出水	-0.120	-0.202	-0.179
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.015	0.097	-0.015
2018/10/01 05:00 頃の出水	-0.214	-0.204	-0.311
2019/05/21 10:00 頃の出水	0.055	0.061	-0.005
2019/06/30 09:00 頃の出水	-0.208	-0.182	-0.090
2019/08/29 04:00 頃の出水	-0.122	-0.167	-0.162
2019/10/12 18:00 頃の出水	-0.154	-0.090	-0.061

表 4.7-10 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量あり)の精度評価結果  
(ピーク誤差)

対象予測結果	9 時間前	6 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	0.077	0.100	0.099
2018/07/05 19:00 頃の出水	0.336	0.354	0.359
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.175	0.176	0.251
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.264	0.181	0.237
2019/05/21 10:00 頃の出水	0.085	0.085	0.035
2019/06/30 09:00 頃の出水	0.206	0.173	0.128
2019/08/29 04:00 頃の出水	0.251	0.267	0.237
2019/10/12 18:00 頃の出水	0.032	0.031	0.054

表 4.7-11 黒部ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量あり)の精度評価結果  
(降水量が少ない期間)

対象予測結果	RMSE	ボリューム誤差
2018 年 02 月の降水量が少ない期間	0.671	-0.050
2018 年 05 月の降水量が少ない期間	1.067	0.071
2018 年 08 月の降水量が少ない期間	0.941	-0.010
2018 年 11 月の降水量が少ない期間	1.427	-0.115

予測雨量を入力データに与えた結果、一部の出水を除いて NS 係数が 0.6 以上を示した。NS 係数については、1 から $-\infty$ までの範囲の値をとるが、Moriyas et al (2007) は、月単位で評価したときの NSE 値を $\leq 0.50$ 、 $0.50 \sim 0.65$ 、 $0.65 \sim 0.75$  及び $> 0.75$  に 4 区分し、それぞれ、モデル適合性が unsatisfactory、satisfactory、good 及び very good と評価している。それに照らし合わせて考えると十分な予測精度を得られたと言える。また、基底流量についても出水の学習によって指標値は悪化しておらず、予測精度を維持できている。

NS 係数についてピーク発生の 12 時間前からの各出水イベントの時系列変化を示すと以下のようになった。(凡例の event01~event08 は出水イベントを発生順に番号付けしたもの。)

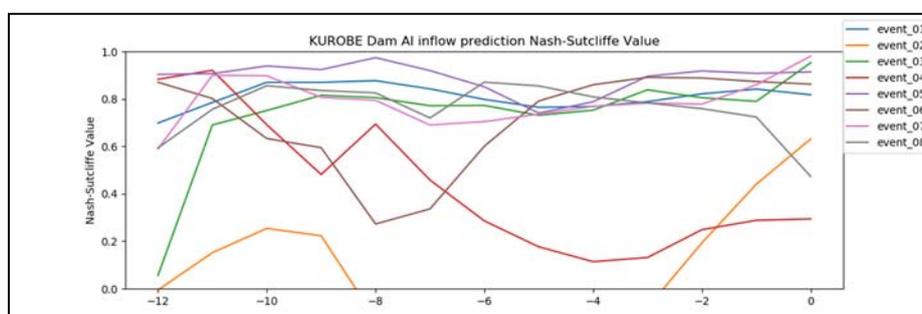


図 4.7-18 NS 係数の時系列変化(12 時間予測)

このグラフを見ると NS 係数が悪化しているのは event02(2018/07/05 19:00 頃の出水)と event04(2018/10/01 05:00 頃の出水)の 2 つである。

それぞれ詳細を確認すると、event02(2018/07/05 19:00 頃の出水)については長い期間降水量が発生しており、出水イベント中にピークが複数個発生している。ピークが複数個あるケースは学習データでも少ないと思われ、12 時間分しか学習していないことで複数ピークの波形を学習できていないと考えられる。例えば、ピークの 12 時間前の予測結果では最初のピークのみを予測している。

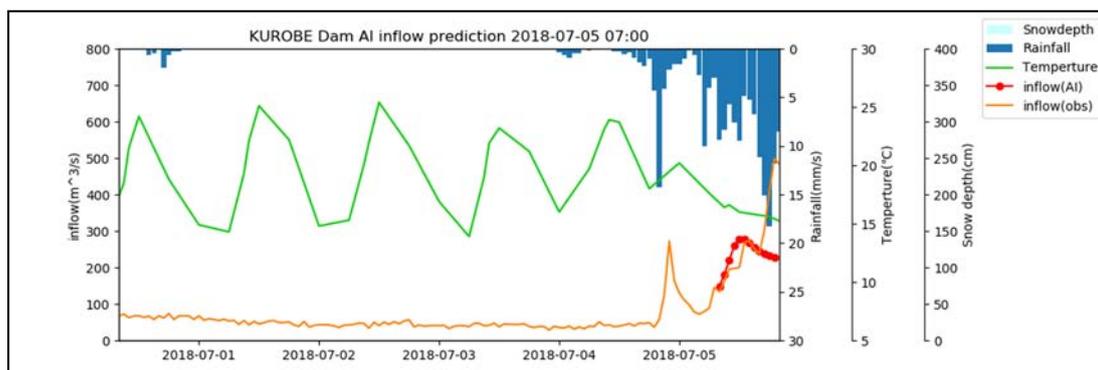


図 4.7-19 2018/07/05 19:00 頃の出水を 12 時間前から予測した結果

このようなケースでは予測期間を長期化するほうが複数ピークの学習データが増えるため改善する可能性があると考えられる。また、event04(2018/10/01 05:00 頃の出水)については、12 時間前の時点では NS 係数が 0.883 であり、この時点の予測精度は悪くない。一番悪化している 4 時間前の予測結果を確認すると以下ようになった。

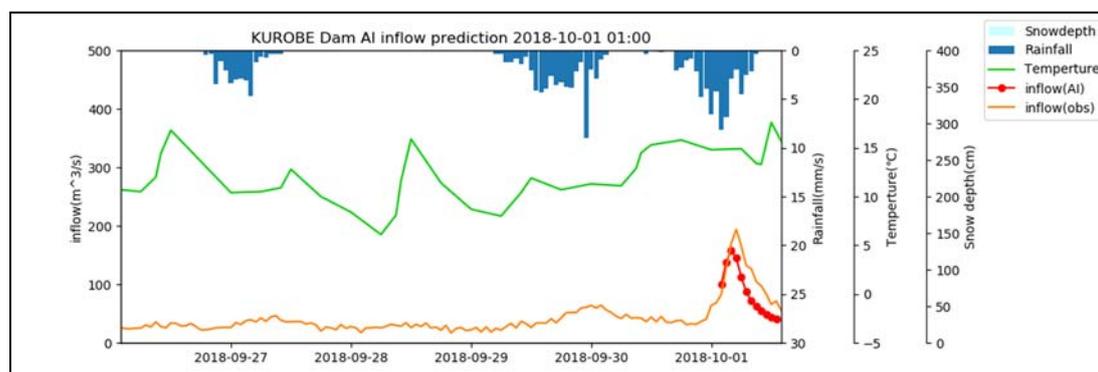


図 4.7-20 2018/10/01 05:00 頃の出水を 4 時間前から予測した結果

見た目の波形に対して NS 係数が 0.114 と非常に低いが、これは予測値のピーク位置が 1step ずれたことで、NS 係数の分子が非常に大きくなり評価値が下がったものと思われる。このようなケースでは他の指標値においても評価が悪くなるため、評価値だけでは判断できないケースと考えられる。

一部 NS 係数ではよい評価とならないケースもあったが、全体的に例外的なケースを除けば NS 係数 0.6 以上をキープできていることから、次は同じ方針で長期化することにした。

- ③ ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果の考察  
 精度評価対象の予測結果について、誤差評価の結果を以下に示す。

表 4.7-12 黒部ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
 (RMSE)

対象予測結果	36 時間前	24 時間前	18 時間前	12 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	4.652	4.079	4.181	4.822	3.935
2018/07/05 19:00 頃の出水	12.330	11.653	6.157	9.433	12.007
2018/08/16 16:00 頃の出水	4.832	6.060	6.087	6.507	3.350
2018/10/01 05:00 頃の出水	2.348	2.812	3.561	3.721	3.094
2019/05/21 10:00 頃の出水	2.174	2.457	2.625	2.065	1.988
2019/06/30 09:00 頃の出水	7.046	5.265	5.952	6.238	3.183
2019/08/29 04:00 頃の出水	6.713	8.244	7.799	8.759	5.956
2019/10/12 18:00 頃の出水	5.889	3.933	3.995	4.122	4.022

表 4.7-13 黒部ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
 (NS 係数)

対象予測結果	36 時間前	24 時間前	18 時間前	12 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	0.800	0.811	0.774	0.709	0.838
2018/07/05 19:00 頃の出水	0.663	0.629	0.893	0.697	0.544
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.383	-0.062	-0.119	-0.245	0.705
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.871	0.823	0.718	0.690	0.788
2019/05/21 10:00 頃の出水	0.866	0.828	0.766	0.862	0.889
2019/06/30 09:00 頃の出水	0.784	0.865	0.821	0.804	0.946
2019/08/29 04:00 頃の出水	0.494	-0.153	0.083	-0.051	0.509
2019/10/12 18:00 頃の出水	0.728	0.864	0.836	0.807	0.835

表 4.7-14 黒部ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
 (ボリューム誤差)

対象予測結果	36 時間前	24 時間前	18 時間前	12 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	-0.253	-0.019	0.060	0.187	0.215
2018/07/05 19:00 頃の出水	-0.211	-0.195	-0.067	-0.104	-0.186
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.057	0.159	0.185	0.343	0.306
2018/10/01 05:00 頃の出水	-0.119	-0.158	-0.147	-0.038	-0.119
2019/05/21 10:00 頃の出水	-0.147	-0.111	-0.124	-0.008	0.021
2019/06/30 09:00 頃の出水	0.051	-0.032	0.040	0.067	-0.002
2019/08/29 04:00 頃の出水	-0.338	-0.401	-0.341	-0.227	-0.157
2019/10/12 18:00 頃の出水	0.002	-0.121	-0.171	-0.198	-0.204

表 4.7-15 黒部ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
(ピーク誤差)

対象予測結果	36 時間前	24 時間前	18 時間前	12 時間前	3 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	0.059	0.061	0.081	0.040	0.054
2018/07/05 19:00 頃の出水	0.285	0.275	0.186	0.139	0.195
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.092	0.015	0.041	0.137	0.094
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.080	0.157	0.152	0.081	0.181
2019/05/21 10:00 頃の出水	0.059	0.134	0.155	0.227	0.235
2019/06/30 09:00 頃の出水	0.059	0.117	0.086	0.081	0.029
2019/08/29 04:00 頃の出水	0.174	0.337	0.284	0.263	0.464
2019/10/12 18:00 頃の出水	0.114	0.072	0.084	0.104	0.280

表 4.7-16 ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量あり)の精度評価結果  
(降水量が少ない期間)

対象予測結果	RMSE	ボリューム誤差
2018 年 02 月の降水量が少ない期間	0.537	-0.037
2018 年 05 月の降水量が少ない期間	0.809	0.046
2018 年 08 月の降水量が少ない期間	0.628	-0.064
2018 年 11 月の降水量が少ない期間	0.626	-0.099

39 時間に予測時間を延長したが、一部の出水を除いて NS 係数が 0.6 以上を示しており、十分な予測精度を保っている。基底流量についても指標値は悪化しておらず、予測精度を維持できている。

NS 係数についてピーク発生の 39 時間前からの各出水イベントの時系列変化を示すと以下のようになった。(凡例の event01~event08 は出水イベントを発生順に番号付けしたもの。)

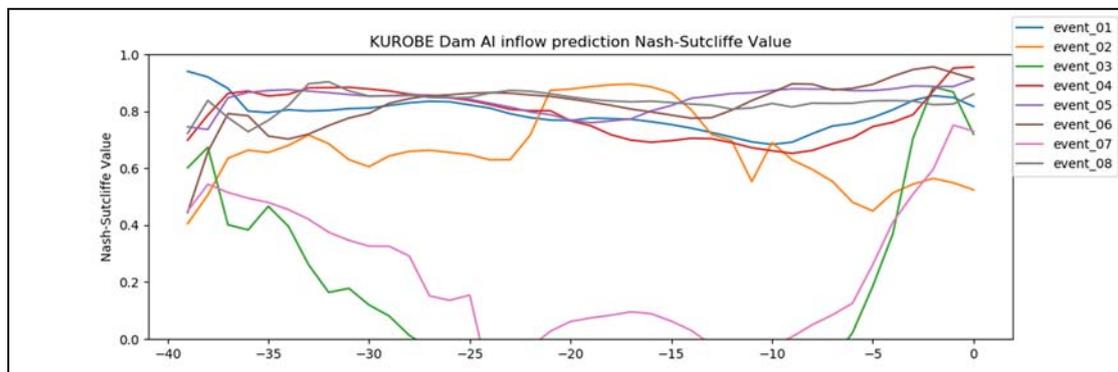


図 4.7-21 NS 係数の時間変化

このグラフを見ると NS 係数が悪化しているのは event03(2018/08/16 16:00 頃の出水)と event07(2019/08/29 04:00 頃の出水)の 2 つである。それぞれの予測結果の例を示す。

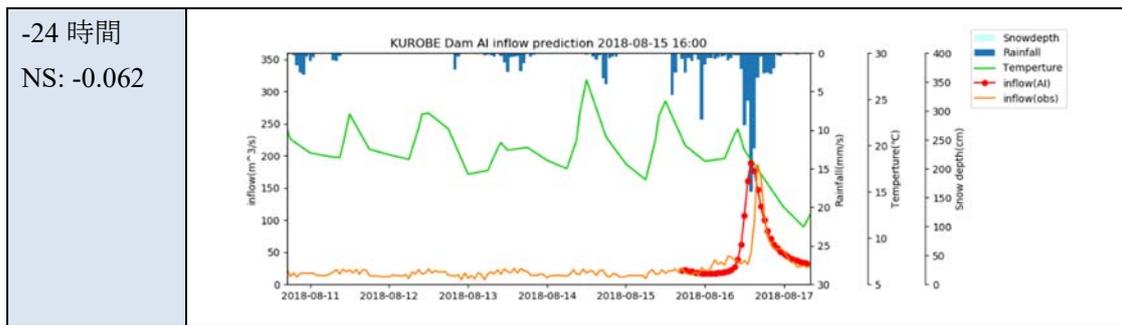


図 4.7-22 event03 (2018/08/16 16:00 頃の出水)の予測例 (24 時間前予測)

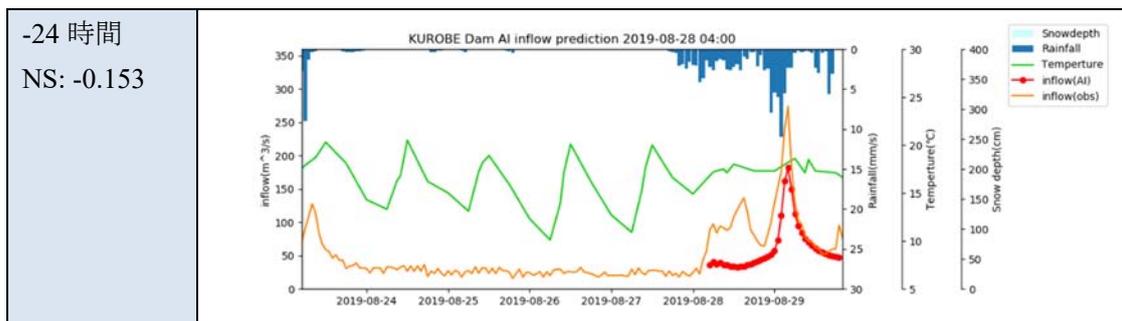


図 4.7-23 event07 (2019/08/29 04:00 頃の出水)の予測例 (24 時間前予測)

event03 については予測流入量のピークが観測流入量よりも 1step 前に出ており、かつ観測流入量の波形にはピークの立ち上がり前に小さい落ち込みが見られることが原因で非常に指標値が低くなっている。定量的な分析ではないが、グラフの波形を確認する限りでは、予測値として利用できる精度であると考えられる。

event07 については、ピークの前にやや長めの出水が発生しており、これを予測することができていない。ピーク手前の降水で土壌に水分が蓄積されていたため、その後の降水が少なくてもピークが高くなったと考えられるが、それを予測するには同様の条件が学習データに不足していたと考えられる。

event01 のように降水量に対してシンプルなシングルピークを持つケースは NS 係数が終始高く、波形観察でも良好な結果を得ることができた。

event03 のような指標値の性質の問題を除けば、シングルピークのイベントに関しては NS 係数も高く良好な結果が得られと言える。一方、複数のピークが 39 時間以内に発生するケースでは最も高いピークの位置は捉えられるが、他のピークの予測やそこまでの土壌の状態を考慮した予測を計算するには学習データが不足していると考えられる。

今後、event03 や event07 と同じような性質を持つ出水が何度か発生し、学習データとして蓄積されていくことで、予測の精度を改善できると期待される。

### (3) 黒部ダムにおける AI モデル過学習に関する検証

次に過学習が起きていないか検証するために、学習回数ごとの訓練データ、検証データの RMSE のスコアを示す。なお、この RMSE の値は 4.7.4 で示した正規化処理を施した状態での値であるため、精度検証の RMSE とは異なる。

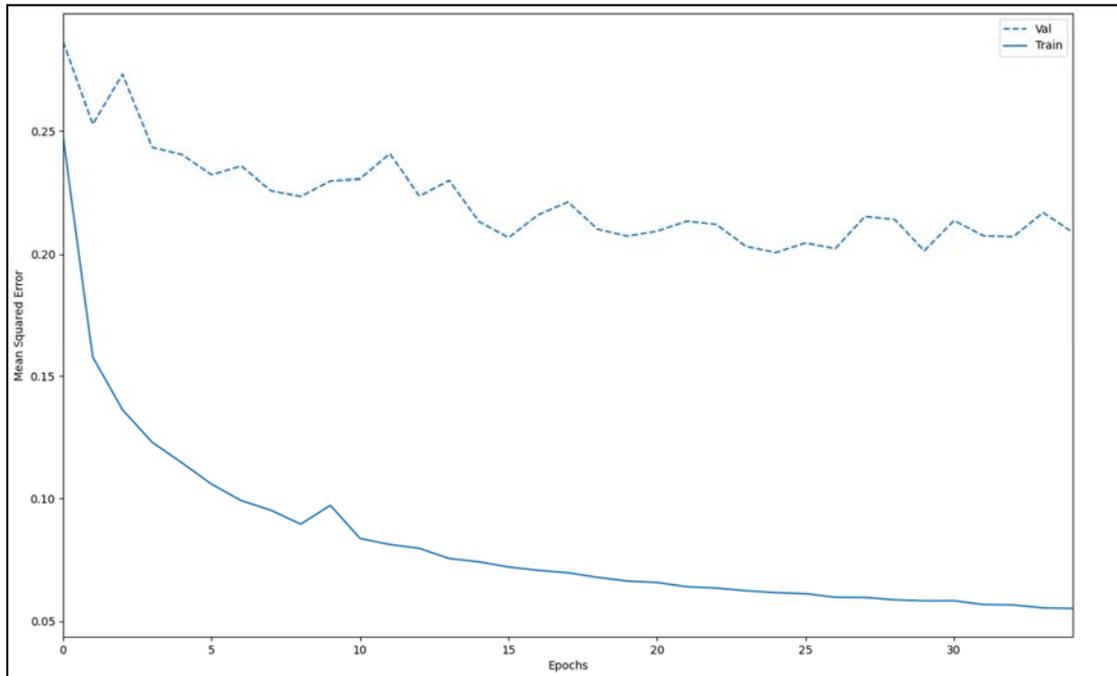


図 4.7-24 学習回数ごとの訓練データと検証データの評価値の推移

(Epochs は学習回数、Train は訓練データの RMSE 値、Val は検証データの RMSE 値)

このグラフから学習回数が増えていっても検証データの評価値が上がっている様子は見られないため、過学習は発生しておらず、適切な回数で学習できていると言える。

#### (4) 奥只見ダムの AI 流入量予測の学習方針

(2)と(3)の結果を受けて、奥只見ダムの学習モデルも黒部ダムと同様の方針とする。ハイパーパラメータは4.7.5で示したとおりとし、過去120時間(5日間)、解析雨量について過去84時間+予測36時間の合計120時間のデータを入力として39時間後までを予測するモデルで予測をおこなうこととした。

#### (5) 奥只見ダムにおける AI モデルのチューニング過程の予測精度評価

以下の2点について予測精度の評価を実施した。なお、4.7.2に述べた方針でデータを分割しているため、精度評価については2018年、2019年の出水に限定して実施した。

- 代表的な出水時の予測(詳細は下記を参照)
- 降水量が少ない時の予測(2月、5月、8月、11月の任意の期間)

評価対象とした出水は以下の通り。

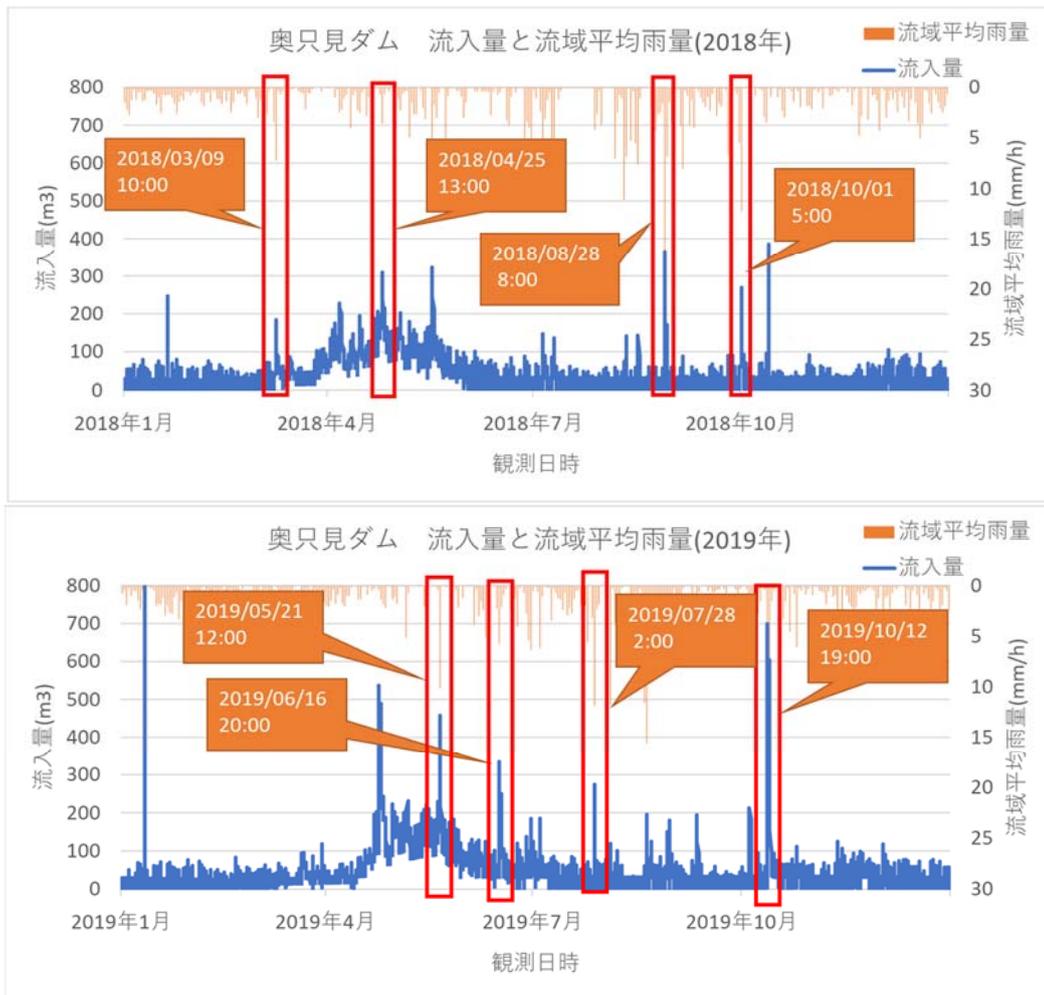


図 4.7-25 2018年、2019年の奥只見ダムの流入量と流域平均雨量

評価対象について、モデルでの予測結果をグラフで示す。

- 代表的な出水時の予測結果の一例

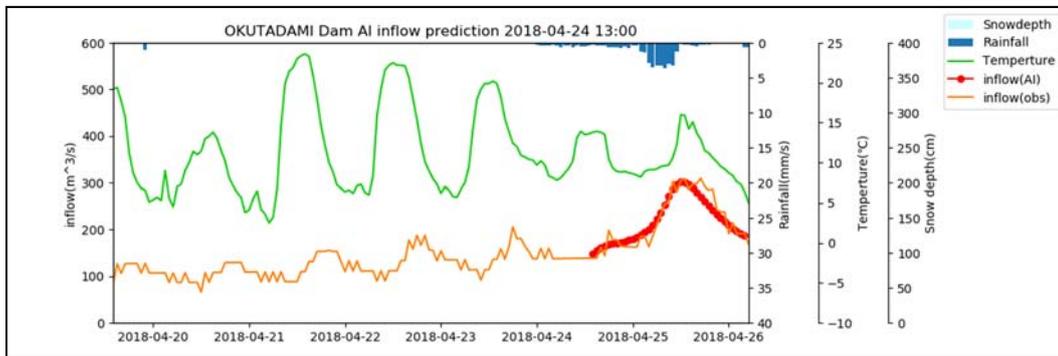


図 4.7-26 2018/04/25 13:00 頃の出水の予測結果

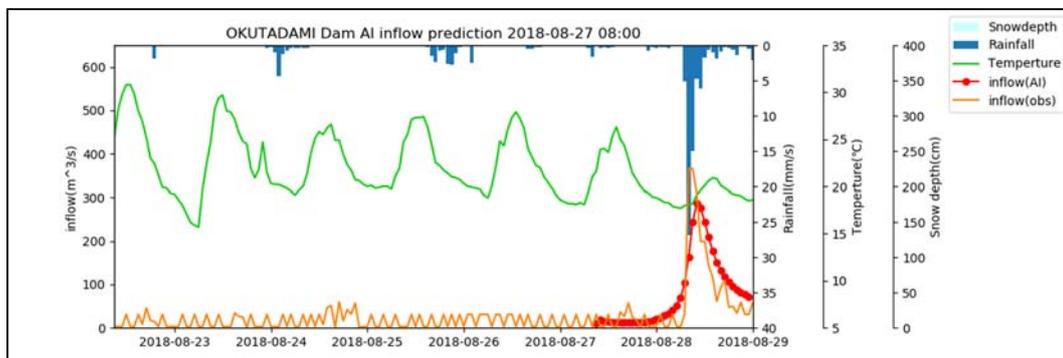


図 4.7-27 2018/08/28 8:00 頃の出水の予測結果

- 降水量が少ない時の予測結果の一例

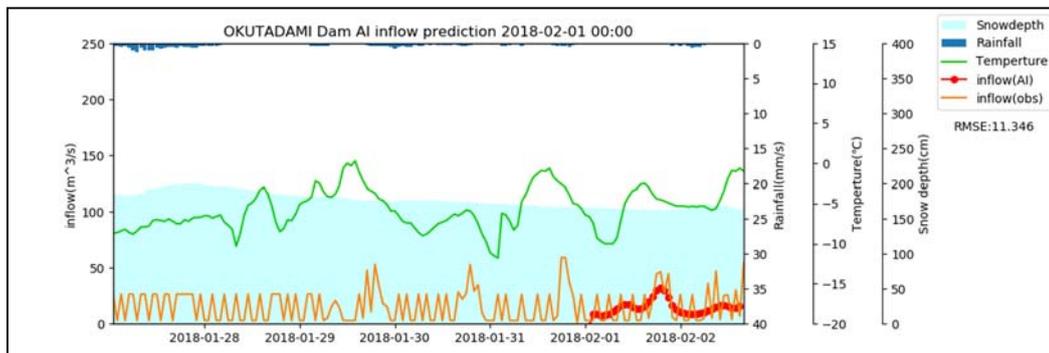


図 4.7-28 2018 年 2 月の降水量が少ない期間の予測結果

(6) 奥只見ダムにおける AI モデルの精度評価の考察

精度評価の指標は(2)で示す指標と同じものを利用した。

評価するポイントも黒部ダムと同じく、予測開始時刻とピーク時刻の関係で以下の5点で評価した。

◇ 39 時間予測の誤差評価

1. ピーク発生の 36 時間前に予測
2. ピーク発生の 24 時間前に予測
3. ピーク発生の 18 時間前に予測
4. ピーク発生の 12 時間前に予測
5. ピーク発生の 3 時間前に予測

精度評価対象の予測結果について、誤差評価の結果を以下に示す。

表 4.7-17 奥只見ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
(RMSE)

対象予測結果	36 時間前	24 時間前	18 時間前	12 時間前	3 時間前
2018/03/09 10:00 頃の出水	5.600	6.478	7.027	4.141	4.425
2018/04/25 19:00 頃の出水	3.757	2.988	3.440	4.091	3.260
2018/08/28 08:00 頃の出水	12.676	8.659	9.264	9.964	11.572
2018/10/01 05:00 頃の出水	3.937	4.844	5.427	5.887	5.110
2019/05/21 12:00 頃の出水	5.802	9.744	12.394	9.671	8.874
2019/06/16 20:00 頃の出水	4.387	4.652	4.122	5.198	5.910
2019/07/28 02:00 頃の出水	5.871	5.719	5.892	5.762	6.173
2019/10/12 19:00 頃の出水	15.392	22.958	23.000	23.730	18.149

表 4.7-18 奥只見ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
(NS 係数)

対象予測結果	36 時間前	24 時間前	18 時間前	12 時間前	3 時間前
2018/03/09 10:00 頃の出水	0.615	0.452	0.101	0.633	0.601
2018/04/25 19:00 頃の出水	0.841	0.887	0.842	0.783	0.876
2018/08/28 08:00 頃の出水	0.280	0.676	0.620	0.544	0.328
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.909	0.874	0.821	0.762	0.816
2019/05/21 12:00 頃の出水	0.854	0.589	0.390	0.653	0.733
2019/06/16 20:00 頃の出水	0.881	0.870	0.869	0.755	0.740
2019/07/28 02:00 頃の出水	0.667	0.744	0.713	0.697	0.632
2019/10/12 19:00 頃の出水	0.791	0.656	0.584	0.453	0.669

表 4.7-19 奥只見ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
(ボリューム誤差)

対象予測結果	36 時間前	24 時間前	18 時間前	12 時間前	3 時間前
2018/03/09 10:00 頃の出水	-0.178	-0.331	-0.376	-0.123	-0.212
2018/04/25 19:00 頃の出水	0.007	-0.004	0.011	-0.042	-0.050
2018/08/28 08:00 頃の出水	-0.184	0.194	0.048	0.221	-0.012
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.095	-0.097	-0.163	-0.173	-0.162
2019/05/21 12:00 頃の出水	-0.012	0.083	0.221	0.187	0.063
2019/06/16 20:00 頃の出水	0.078	0.042	-0.022	-0.090	0.060
2019/07/28 02:00 頃の出水	-0.088	0.060	0.043	0.060	0.089
2019/10/12 19:00 頃の出水	-0.259	-0.017	0.007	-0.138	-0.195

表 4.7-20 奥只見ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
(ピーク誤差)

対象予測結果	36 時間前	24 時間前	18 時間前	12 時間前	3 時間前
2018/03/09 10:00 頃の出水	0.365	0.267	0.362	0.132	0.325
2018/04/25 19:00 頃の出水	0.064	0.027	0.048	0.013	0.010
2018/08/28 08:00 頃の出水	0.728	0.217	0.319	0.175	0.366
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.152	0.145	0.116	0.128	0.031
2019/05/21 12:00 頃の出水	0.059	0.032	0.020	0.130	0.162
2019/06/16 20:00 頃の出水	0.251	0.248	0.251	0.233	0.266
2019/07/28 02:00 頃の出水	0.502	0.076	0.032	0.033	0.037
2019/10/12 19:00 頃の出水	0.342	0.192	0.207	0.210	0.344

表 4.7-21 奥只見ダム流入量 12 時間予測モデルの学習(予測雨量あり)の精度評価結果  
(降水量が少ない期間)

対象予測結果	RMSE	ボリューム誤差
2018 年 02 月の降水量が少ない期間	2.267	0.035
2018 年 05 月の降水量が少ない期間	3.985	0.175
2018 年 08 月の降水量が少ない期間	2.125	0.075
2018 年 11 月の降水量が少ない期間	2.297	0.047

一部の出水を除いて NS 係数が 0.6 以上を示しており、十分な予測精度を保っている。基底流量については、流量振動の影響で指標値は黒部ダムと比べると悪いが、波形を観察する限り問題ない予測精度と考えられる。

黒部ダムと同様に NS 係数についてピーク発生 of 39 時間前からの各出水イベントの時系列変化を示すと以下ようになった。(凡例の event01～event08 は出水イベントを発生順に番号付けしたもの。)

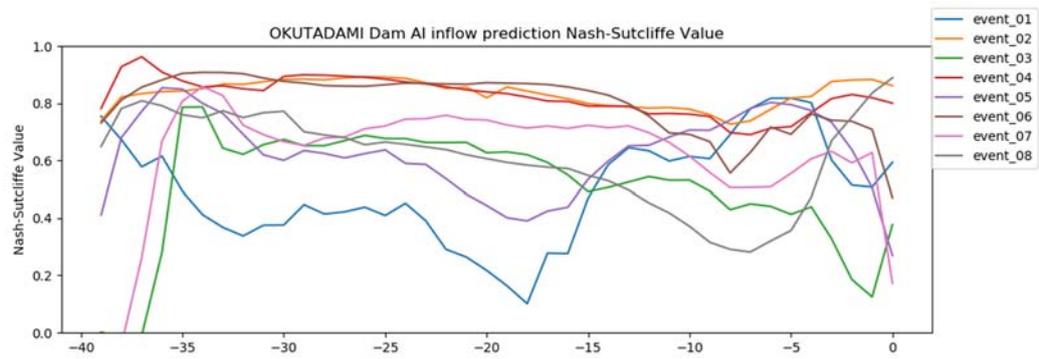


図 4.7-29 NS 係数の時間変化

このグラフを見ると NS 係数が悪化しているのは event01 (2018/03/09 10:00 頃の出水) と event03 (2018/08/28 08:00 頃の出水) の 2 つである。

event01 については融雪の影響が出ているケースとなっている。ピーク 39 時間前の時点では流量が不足しており、融雪の影響が考慮できていないように見受けられる。一方、12 時間前ぐらい徐々にピークに沿う形になっていく。これは融雪については予測データが存在しないため、AI の学習に置いて過去 5 日分積雪深の観測データしか与えておらず、予測時間分のデータは考慮されていないことで発生していると考えられる。

event03 については、瞬間的に豪雨が発生しており、その結果かなり観測流入量のピークが鋭くなっている。AI の予測はピークが遅れており、39 時間前の時点では洪水の予測ができていないが、33 時間前以降はピーク発生が遅れたままだが、波形はある程度予測できており、NS 係数も 0.6 を超えている。

その後、15 時間前ごろに 2 つ目のピークが現れるが、ここに反応していない。その結果、その後の NS 係数が悪化している。ここに関してはそもそも観測流入量の振動の問題で、ノイズとの区別が難しいことが考えられる (振幅に対して観測流量のピークが十分に大きくない)。奥只見ダムの観測流量には常にノイズが入っているため、AI の学習もノイズを考慮したものになる。例えば次に示すケースではノイズを無視して予測するように学習している。

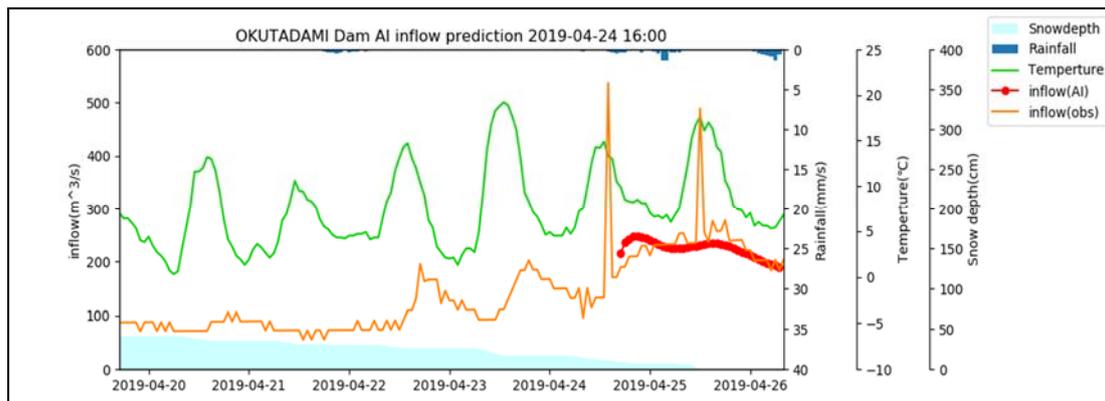


図 4.7-30 入力データにノイズが含まれているが、予測結果に影響が少ない例

event02 のように降水量に対してシンプルなシングルピークを持つケースは NS 係数が終始高く、波形観察でも良好な結果を得ることができた。

event01 のような融雪由来の問題学習ケースを蓄積すればある程度解消されると思われるが、雪解け期に降水が発生しているケースを学習する必要がある。また、観測積雪深の入手方法にも工夫が必要な可能性がある。

### (7) 奥只見ダムにおける AI モデル過学習に関する検証

次に過学習が起きていないか検証するために、学習回数ごとの訓練データ、検証データの RMSE のスコアを示す。なお、この RMSE の値は 4.7.4 で示した正規化処理を施した状態での値であるため、精度検証の RMSE とは異なる。

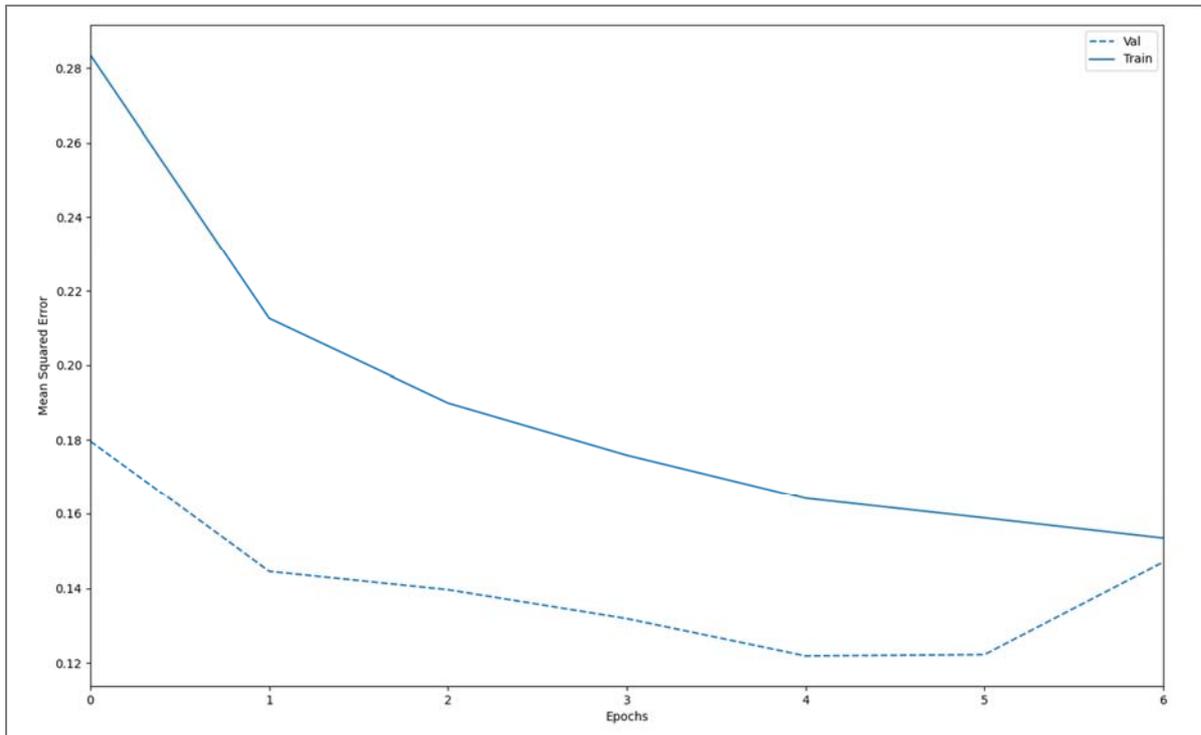


図 4.7-31 学習回数ごとの訓練データと検証データの評価値の推移

(Epochs は学習回数、Train は訓練データの RMSE 値、Val は検証データの RMSE 値)

このグラフから学習回数が増えていっても検証データの評価値が上がっている様子は見られないため、過学習は発生しておらず、適切な回数で学習できていると言える。

## (8) 計算モデルとの精度比較

4.6にて作成した H3ONEDO モデルと RRI モデルの計算結果と、AI の流入量予測の計算結果について比較した。なお、計算モデルは 4.6.3 で示した通り、流入量データを使ってパラメータを最適化しているため、計算モデルの結果は既知の洪水に対する計算になっていることに対して、AI モデルは未知の洪水に対する計算になっているという違いがある。つまり、ここでの比較検討においては、AI モデルの方が厳しい条件下であるといえる。

4.6.4 でも述べているようにパラメータによって流出量は変化するため、この比較は仮に計算モデルが未知の洪水に対しても最適なパラメータを選択できた場合、という前提の比較となる。

### ● 黒部ダム 2018/07/05 19:00 頃の出水(event02)の予測結果比較

黒部ダムの 2018/07/05 19:00 頃の出水について RRI、H3ONEDO の計算結果と AI の予測結果を比較する。比較はピークの 36 時間前、24 時間前、12 時間前で実施した。

#### ◇ ピークの 36 時間前に予測した結果

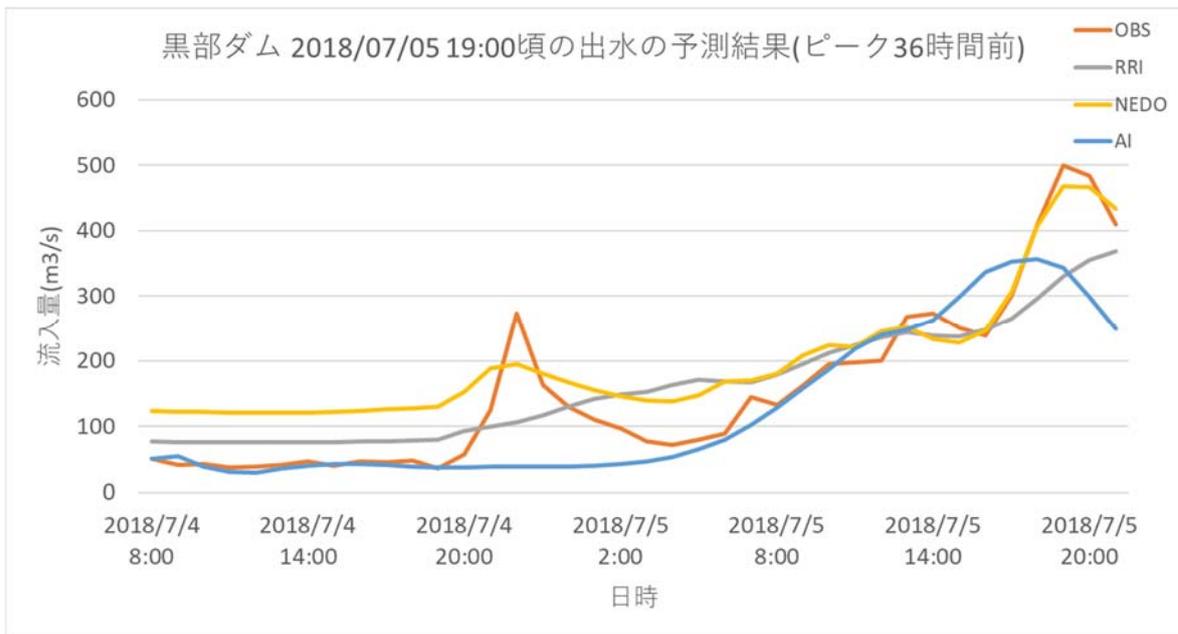


図 4.7-32 計算モデルと AI の比較 黒部ダム 2018/07/05 19:00 頃の出水  
(ピークの 36 時間前)

◇ ピークの24時間前に予測した結果

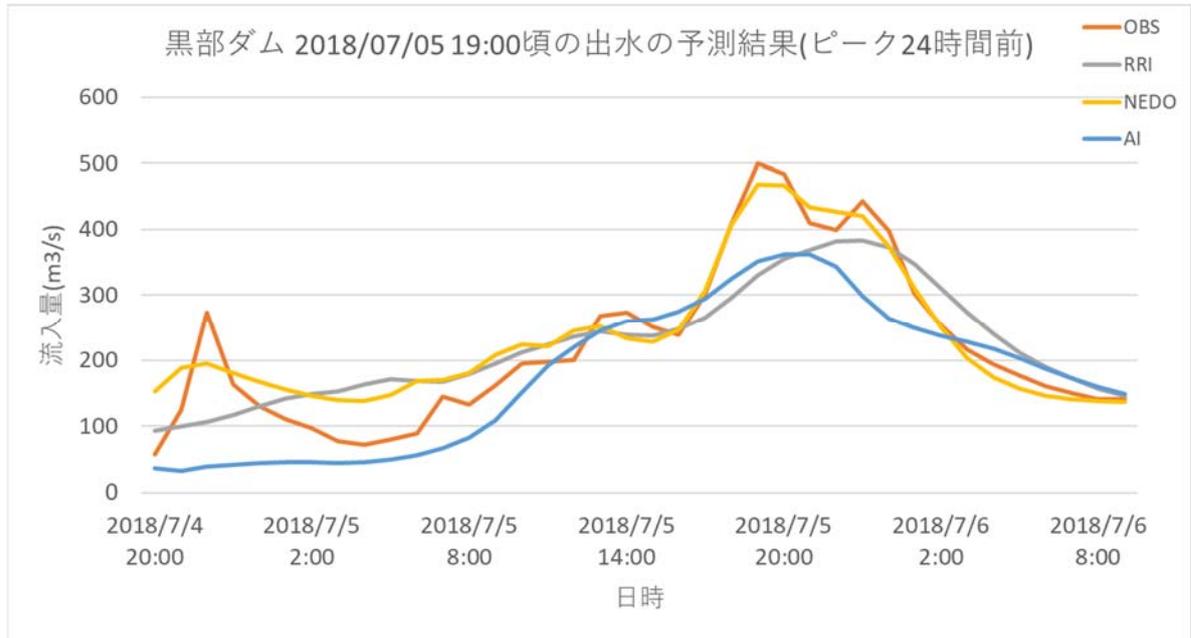


図 4.7-33 計算モデルと AI の比較 黒部ダム 2018/07/05 19:00 頃の出水 (ピークの24時間前)

◇ ピークの12時間前に予測した結果

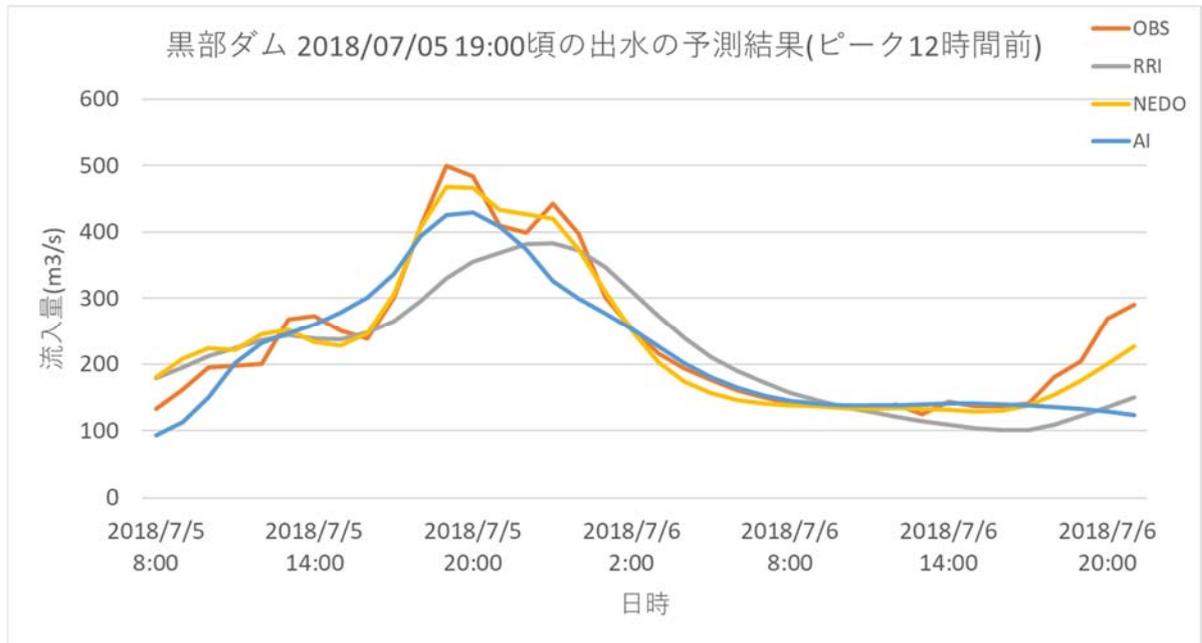


図 4.7-34 計算モデルと AI の比較 黒部ダム 2018/07/05 19:00 頃の出水 (ピークの12時間前)

それぞれの結果を NS 係数で精度評価した結果を以下に示す。AI が未知の洪水に対する計算であることを踏まえれば、計算モデルに対してやや低めの NS 係数であることは想定どおりと言える。また、12 時間前の予測に関して言えば H30NEDO には劣るものの、RRI を超える精度を出せている。

表 4.7-22 計算モデルと AI モデルの NS 係数の比較  
(黒部ダム 2018/07/05 19:00 頃の出水)

	36 時間前	24 時間前	12 時間前
RRI	0.768	0.728	0.683
H30NEDO	0.785	0.891	0.941
AI	0.679	0.624	0.770

● 黒部ダム 2019/10/12 18:00 頃の出水(event08)の予測結果比較

黒部ダムの 2019/10/12 18:00 頃の出水について RRI、H30NEDO の計算結果と AI の予測結果を比較する。比較はピークの 36 時間前、24 時間前、12 時間前で実施した。

◇ ピークの 36 時間前に予測した結果

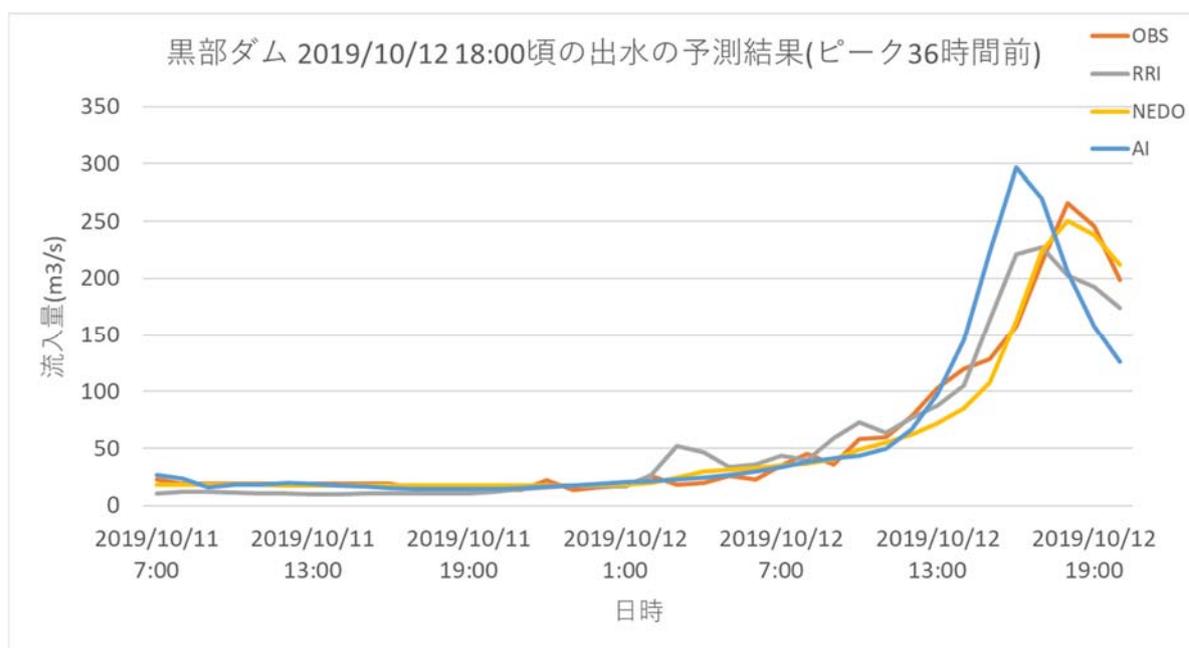


図 4.7-35 計算モデルと AI の比較 黒部ダム 2019/10/12 18:00 頃の出水  
(ピークの 36 時間前)

◇ ピークの24時間前に予測した結果

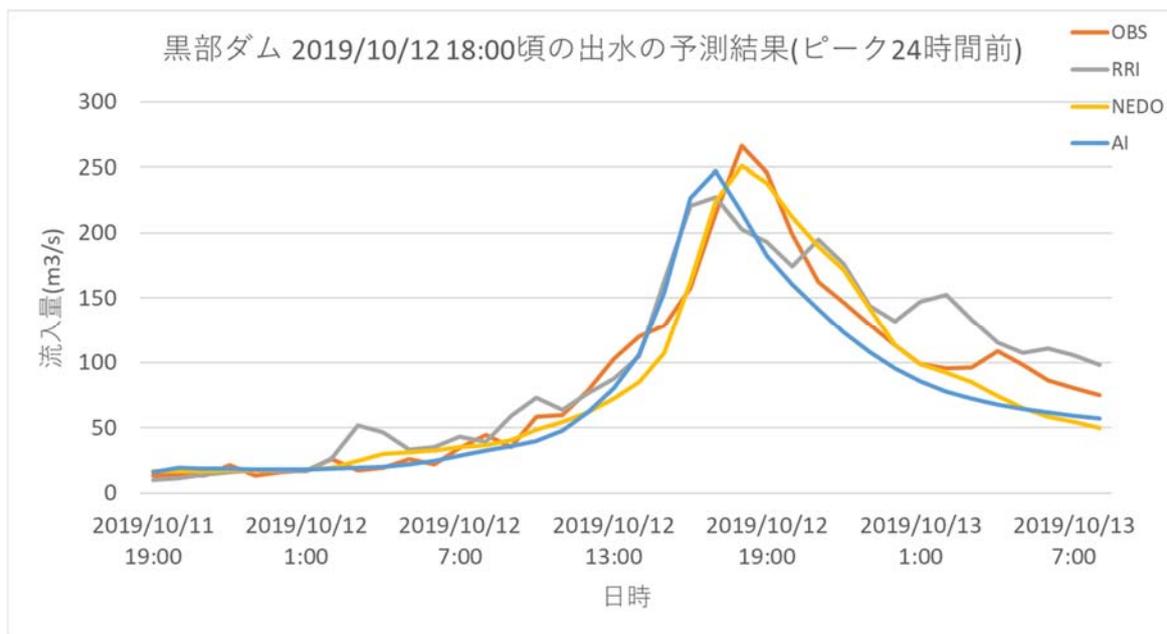


図 4.7-36 計算モデルと AI の比較 黒部ダム 2019/10/12 18:00 頃の出水 (ピークの24時間前)

◇ ピークの12時間前に予測した結果

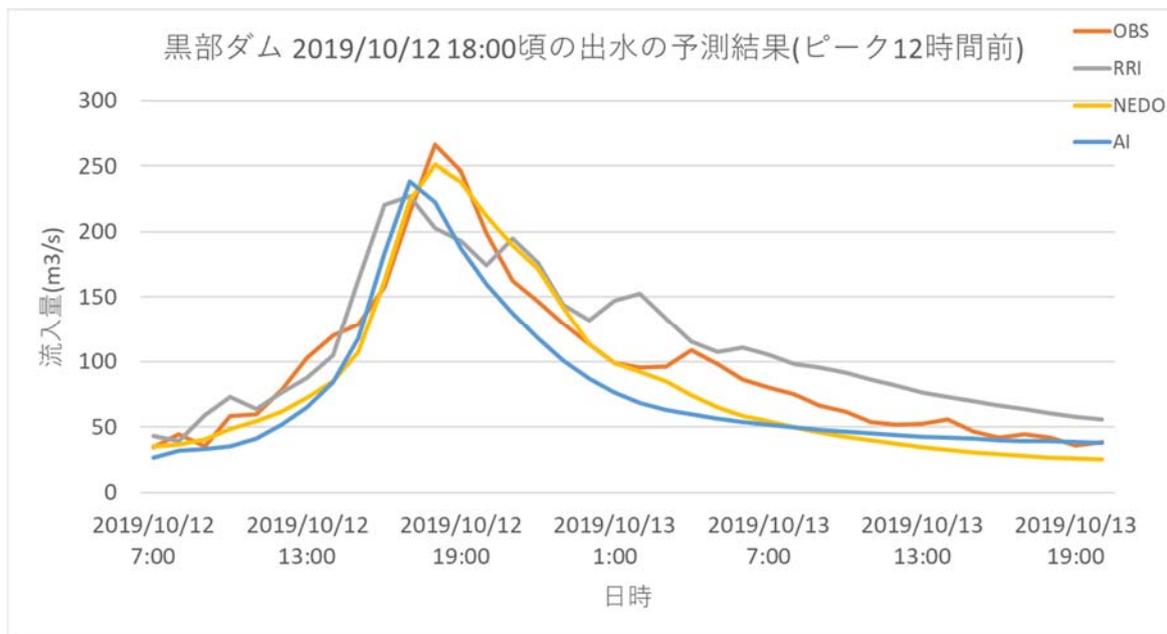


図 4.7-37 計算モデルと AI の比較 黒部ダム 2019/10/12 18:00 頃の出水 (ピークの12時間前)

それぞれの結果を NS 係数で精度評価した結果を以下に示す。この出水イベントに関して言えば、RRI と AI の差はほとんど見られない。

これらの結果を踏まえると、黒部ダム AI モデルは未知の洪水に対する計算であっても、既知の洪水に対する計算モデルの予測結果と遜色のないレベルで予測できていると言える。

表 4.7-23 計算モデルと AI モデルの NS 係数の比較  
(黒部ダム 2018/07/05 19:00 頃の出水)

	36 時間前	24 時間前	12 時間前
RRI	0.906	0.840	0.752
H30NEDO	0.977	0.942	0.902
AI	0.730	0.864	0.803

● 奥只見ダム 2018/10/01 05:00 頃の出水 (event04) の予測結果比較

奥只見ダムの 2018/10/01 05:00 頃の出水について RRI、H30NEDO の計算結果と AI の予測結果を比較する。比較はピークの 36 時間前、24 時間前、12 時間前で実施した。

◇ ピークの 36 時間前に予測した結果

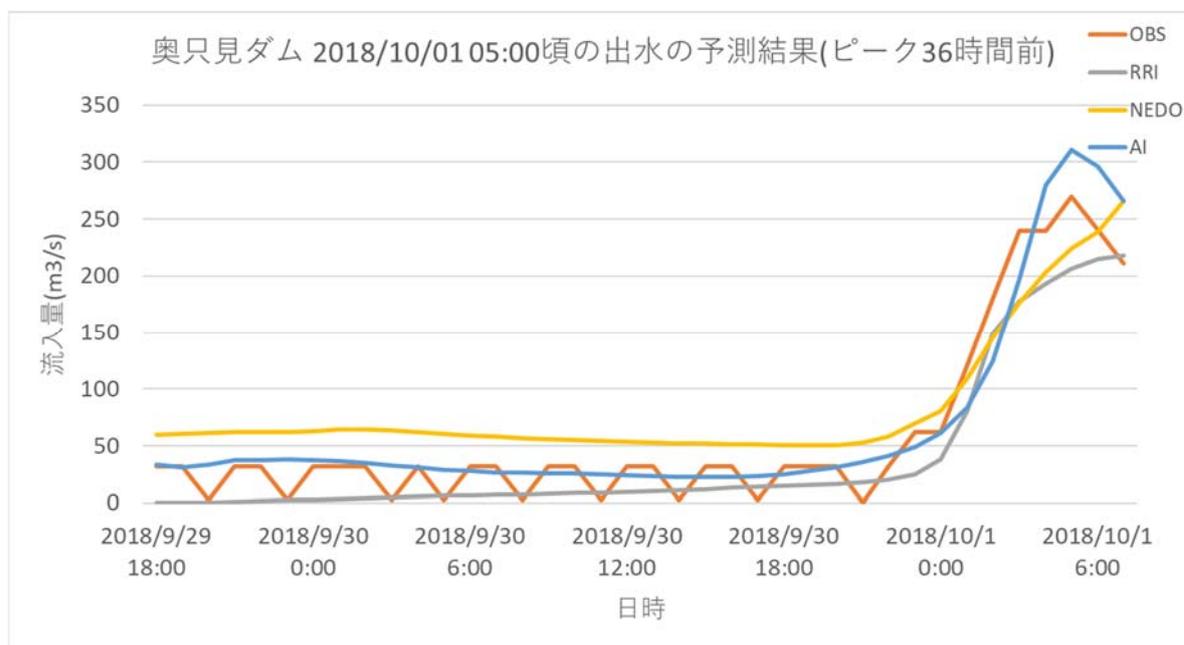


図 4.7-38 計算モデルと AI の比較 奥只見ダム 2018/10/01 05:00 頃の出水  
(ピークの 36 時間前)

◇ ピークの24時間前に予測した結果

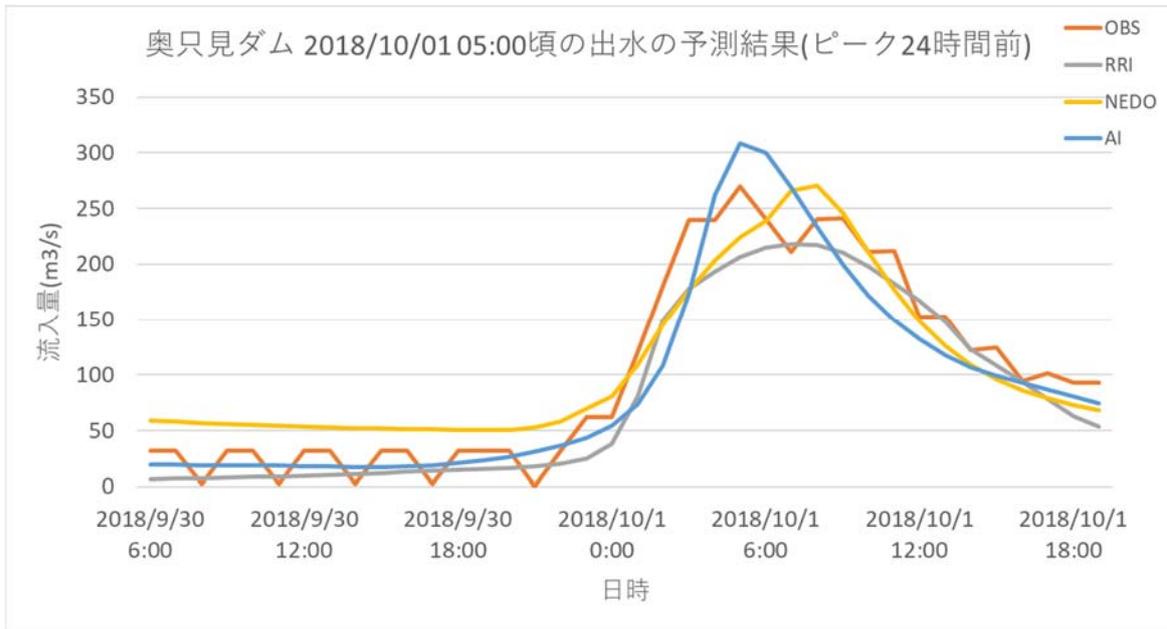


図 4.7-39 計算モデルと AI の比較 奥只見ダム 2018/10/01 05:00 頃の出水  
(ピークの24時間前)

◇ ピークの12時間前に予測した結果

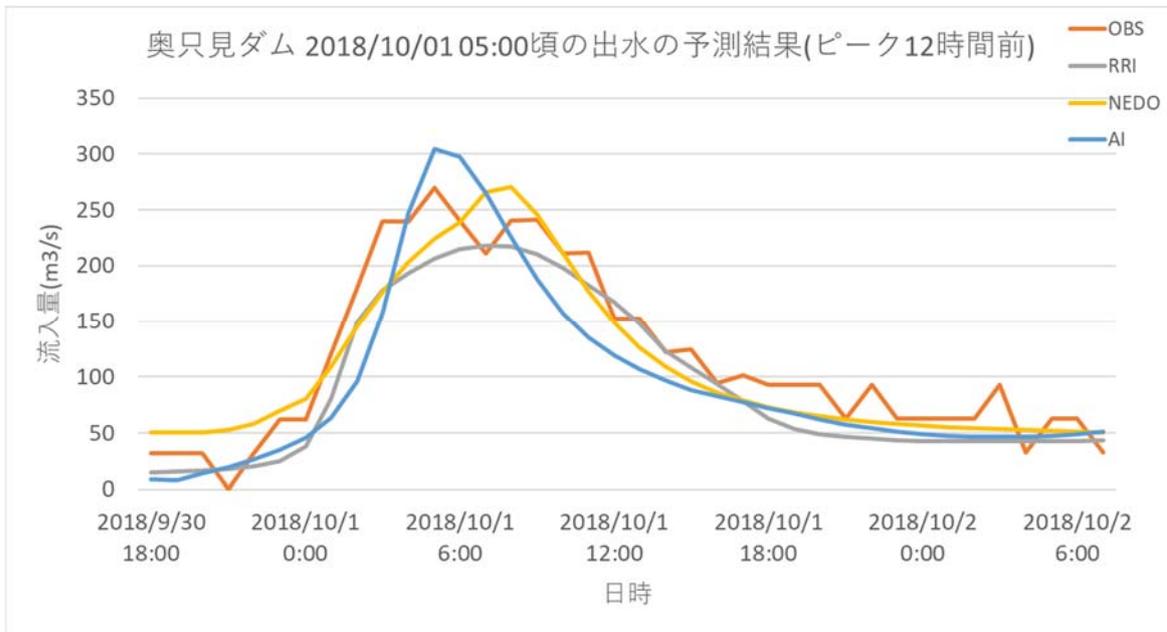


図 4.7-40 計算モデルと AI の比較 奥只見ダム 2018/10/01 05:00 頃の出水  
(ピークの12時間前)

それぞれの結果を NS 係数で精度評価した結果を以下に示す。黒部ダムに比べると H3ONEDO の評価値が下がっており、3 種類の予測にほとんど差が見られない。

表 4.7-24 計算モデルと AI モデルの NS 係数の比較  
(奥只見ダム 2018/10/01 05:00 頃の出水)

	36 時間前	24 時間前	12 時間前
RRI	0.877	0.906	0.855
H3ONEDO	0.769	0.872	0.879
AI	0.896	0.876	0.760

● 奥只見ダム 2019/05/21 12:00 頃の出水 (event05) の予測結果比較

奥只見ダムの 2019/05/21 12:00 頃の出水について RRI、H3ONEDO の計算結果と AI の予測結果を比較する。比較はピークの 36 時間前、24 時間前、12 時間前で実施した。

◇ ピークの 36 時間前に予測した結果

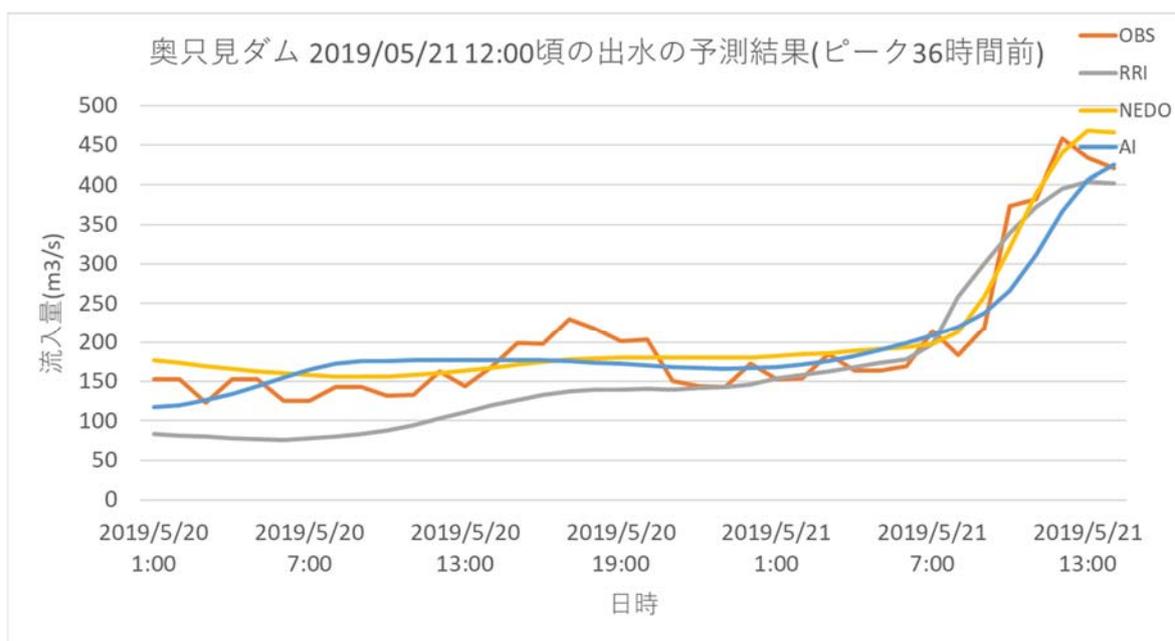


図 4.7-41 計算モデルと AI の比較 奥只見ダム 2019/05/21 12:00 頃の出水  
(ピークの 36 時間前)

◇ ピークの24時間前に予測した結果

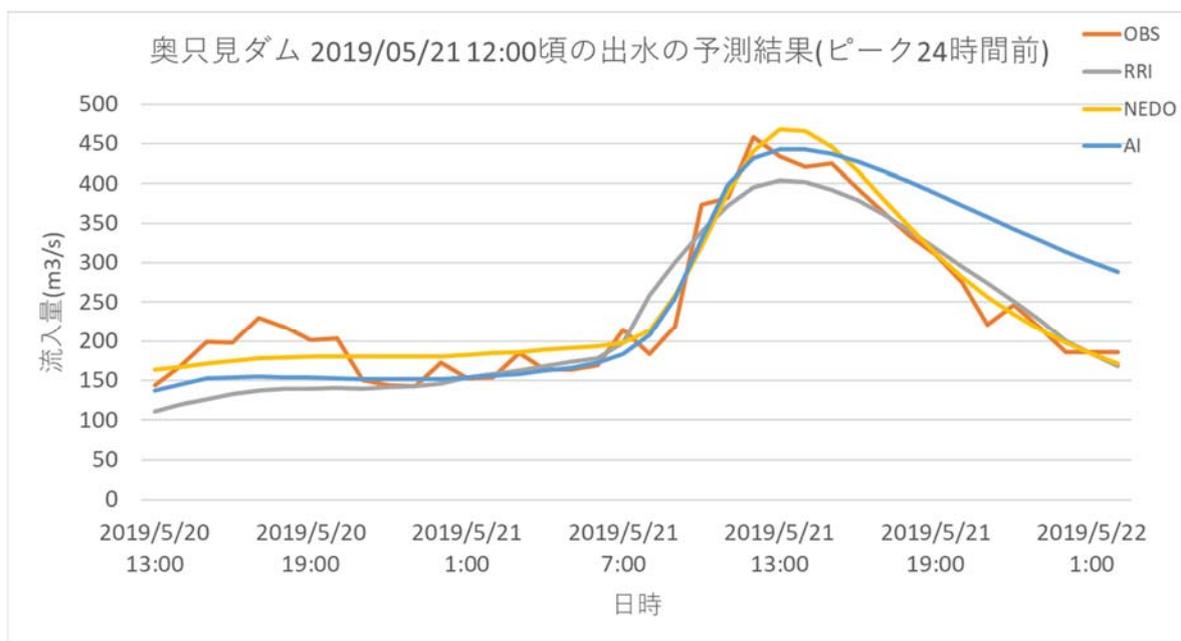


図 4.7-42 計算モデルと AI の比較 奥只見ダム 2019/05/21 12:00 頃の出水 (ピークの24時間前)

◇ ピークの12時間前に予測した結果

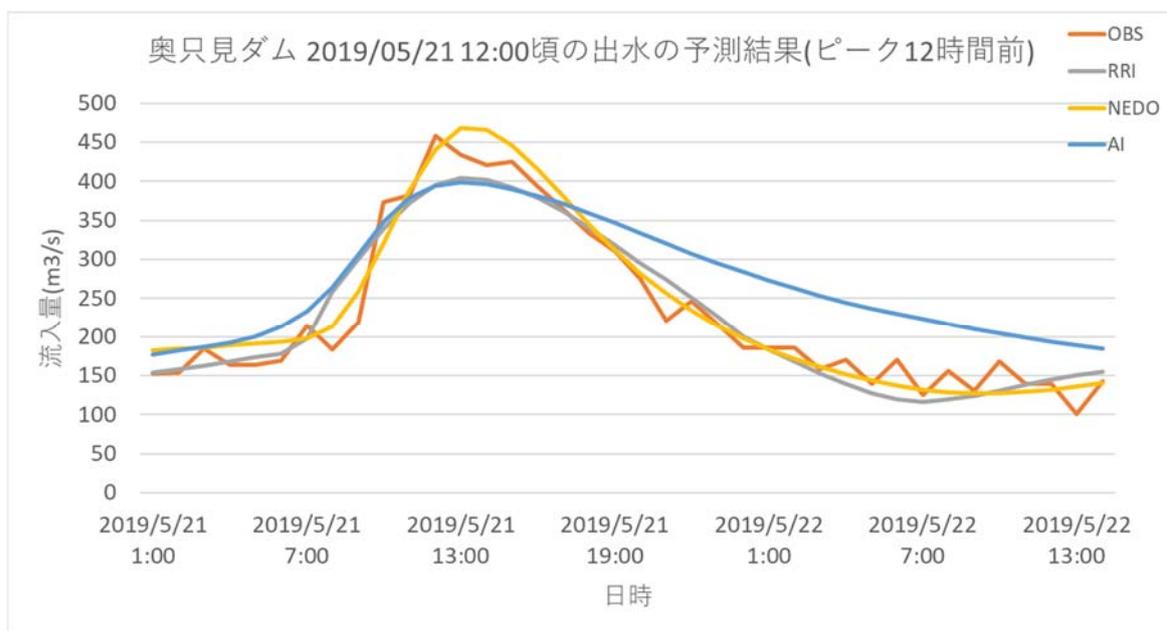


図 4.7-43 計算モデルと AI の比較 奥只見ダム 2019/05/21 12:00 頃の出水 (ピークの12時間前)

それぞれの結果を NS 係数で精度評価した結果を以下に示す。先程の洪水イベントに比べると AI の評価値がやや低い。ピーク後の波形に沿っていないことでピークに近づくにつれて評価値が下がっている。

表 4.7-25 計算モデルと AI モデルの NS 係数の比較  
(奥只見ダム 2018/10/01 05:00 頃の出水)

	36 時間前	24 時間前	12 時間前
RRI	0.672	0.822	0.915
H3ONEDO	0.897	0.923	0.947
AI	0.830	0.622	0.651

● 奥只見ダム 2019/10/12 19:00 頃の出水 (event08) の予測結果比較

奥只見ダムの 2019/10/12 19:00 頃の出水について RRI、H3ONEDO の計算結果と AI の予測結果を比較する。比較はピークの 36 時間前、24 時間前、12 時間前で実施した。

◇ ピークの 36 時間前に予測した結果

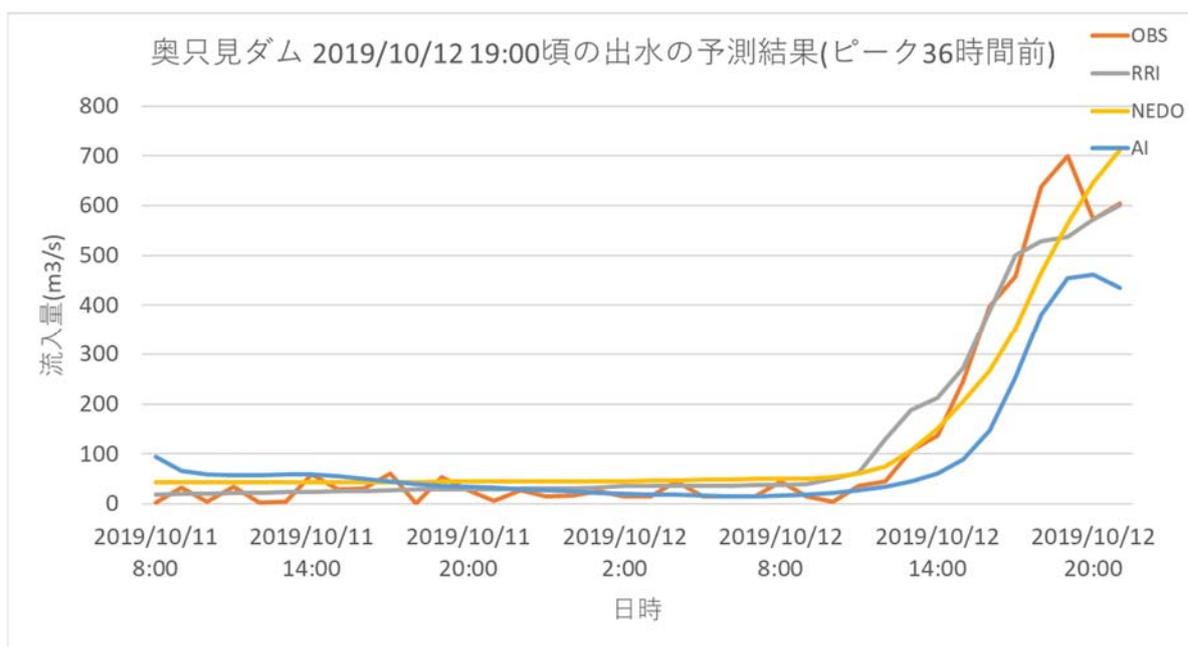


図 4.7-44 計算モデルと AI の比較 奥只見ダム 2019/10/12 19:00 頃の出水  
(ピークの 36 時間前)

◇ ピークの24時間前に予測した結果

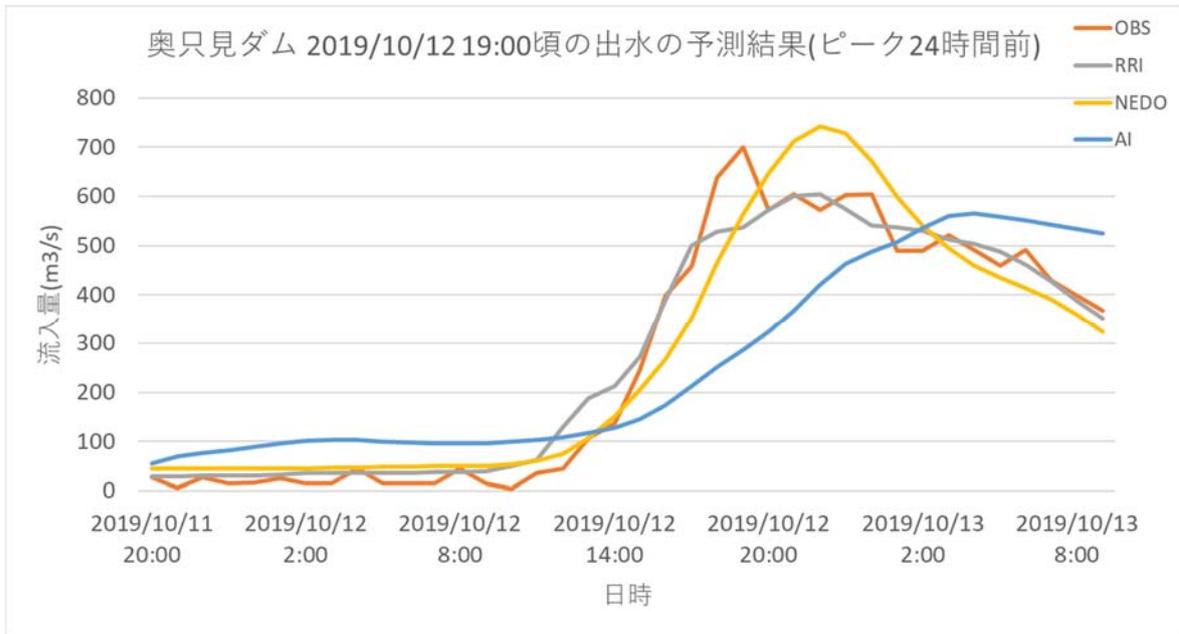


図 4.7-45 計算モデルと AI の比較 奥只見ダム 2019/10/12 19:00 頃の出水 (ピークの24時間前)

◇ ピークの12時間前に予測した結果

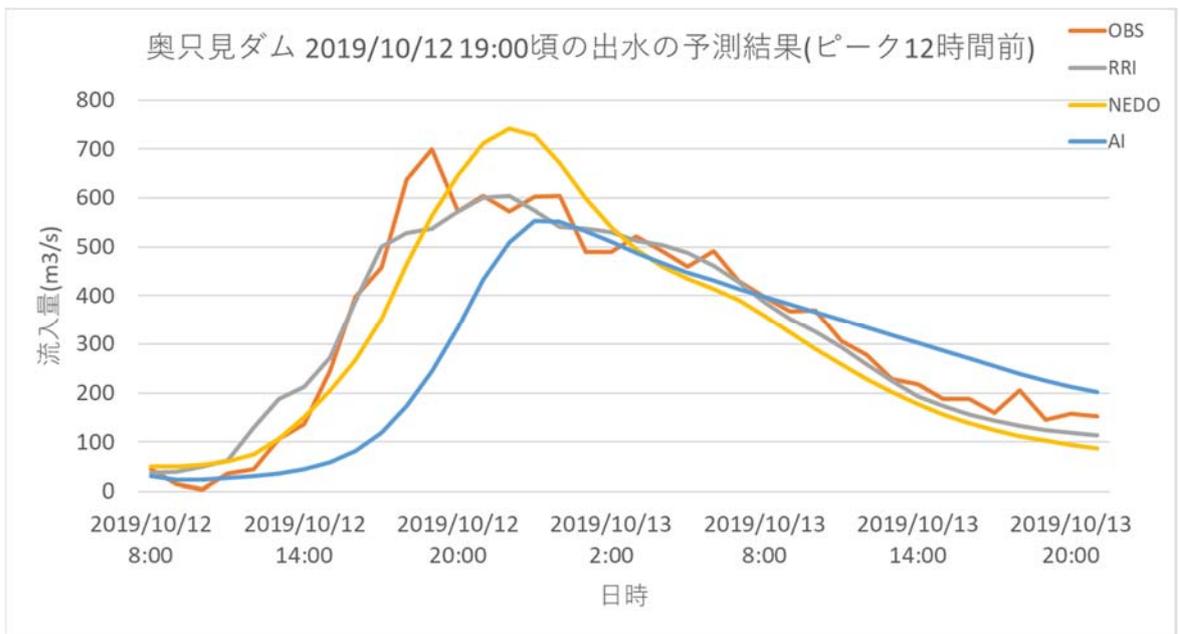


図 4.7-46 計算モデルと AI の比較 奥只見ダム 2019/10/12 19:00 頃の出水 (ピークの12時間前)

それぞれの結果を NS 係数で精度評価した結果を以下に示す。先程の洪水イベントに比べると AI の評価値がやや低い。ピーク後の波形に沿っていないことでピークに近づくにつれて評価値が下がっている。

表 4.7-26 計算モデルと AI モデルの NS 係数の比較  
(奥只見ダム 2019/10/12 19:00 頃の出水)

	36 時間前	24 時間前	12 時間前
RRI	0.952	0.966	0.942
H3ONEDO	0.922	0.920	0.859
AI	0.783	0.664	0.441

#### (9) 計算モデルとの精度比較結果の考察

洪水イベントによって精度の差はあるが、NS 係数による精度評価において計算モデルと遜色のない結果を得ることができた。さらに AI モデルは未知の洪水に対する計算になっているという違いがあり、AI モデルの方が厳しい条件下で評価していることを考慮すれば、今後も検討をすすめる価値があると考えられる。

- 予測の長期化に向けた考察

NS 係数の傾向として、予測のスタート時刻がピークに近いほど精度が上がるとは限らず、むしろ洪水イベントによってはピークよりも離れている方が NS 係数が高いケースもある。よって、予測の長期化についても同じ方針で検討をすすめることができると考える。また、4.7.3 で述べたとおり、自己回帰型のモデルとして構築しているため、モデルの構成としても長期予測への対応が容易であり、今後も同じモデルを使って検討をすすめることができる。この考えに基づいて黒部ダムの 132 時間予測を検証した。これについては 0 で述べる。

- AI モデルの他の流域への展開についての考察

次に他のダム流域への応用について検討する。今回検証したダムは以下の点で共通していた。

- 融雪による流入量が発生する流域であった。
- 上流に他のダムはなかった。
- ダムの規模が日本有数の大きさであった。

よって、これらの特徴をもつ流域については応用可能と考える。一方で以下のようなケースでは追加の検討が必要と思われる。

- 融雪が発生しない地域のダムの予測計算  
融雪のないダムについては、本調査のモデル構成とは異なるが、先行事例は多い。よって、対応可能な可能性は高いと考える。

- 上流に他のダムがある、河川の中腹に存在するダムの予測計算  
 こちらは追加データが必要になると考える。例えば、上流側のダムの放流量や河川の水位観測情報が必要になる可能性が高い。ただ、学習に使えるデータは増えると考えられるので、対応可能な可能性は高いと考える。
- 小規模なダム  
 小規模なダムについては観測データなどが十分に揃っていない可能性がある。この場合、学習データを必要とする AI 固有の問題というよりは、計算モデルの最適化も難しくなるため、計算モデルによる予測がそもそも難しい可能性がある。小規模なダムの場合は事前放流ガイドラインに示されているような、簡易式による流入量予測など、より簡単な方法も検討して必要があると考ええる。

● H30 年度の成果との予測結果比較

黒部ダムの 2019/10/12 18:00 頃の出水について H30 年時点(最適化前)の NEDO モデルを比較した。比較はピークの 36 時間前、24 時間前、12 時間前で実施した。

◇ ピークの 36 時間前に予測した結果

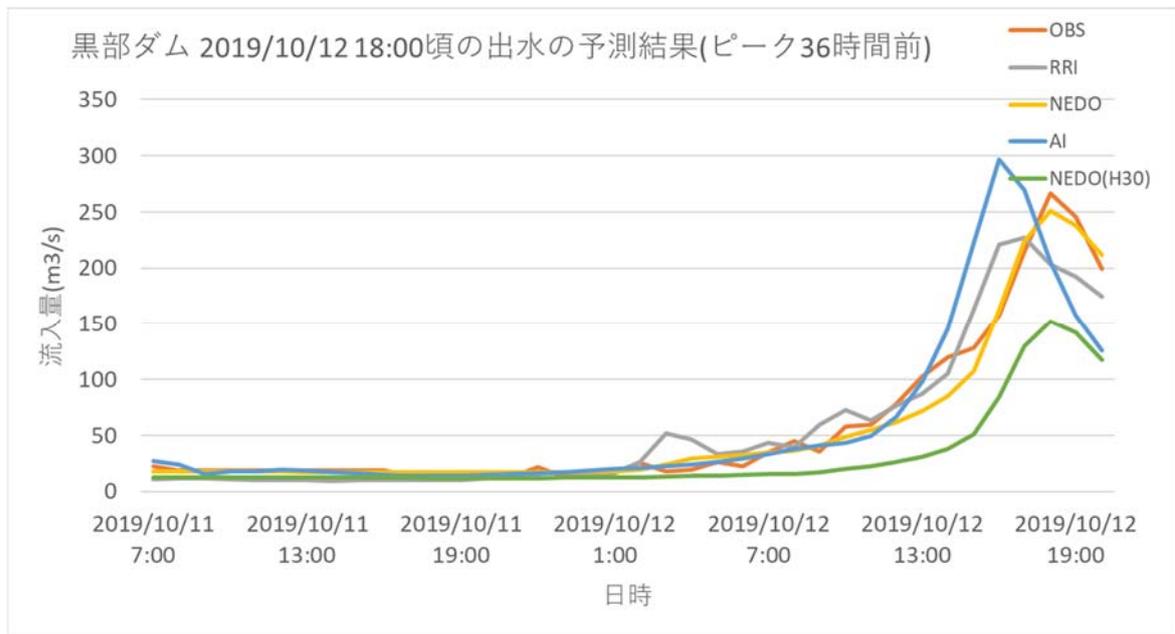


図 4.7-47 計算モデルと AI の比較 黒部ダム 2019/10/12 18:00 頃の出水 (ピークの 36 時間前)

◇ ピークの24時間前に予測した結果

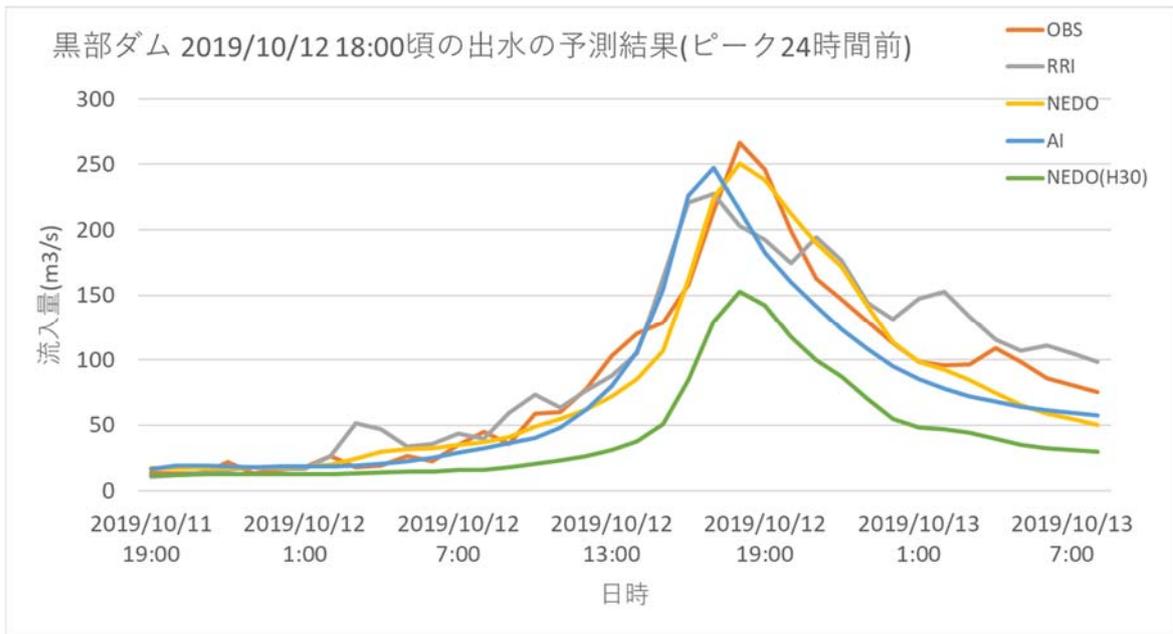


図 4.7-48 計算モデルと AI の比較 黒部ダム 2019/10/12 18:00 頃の出水 (ピークの24時間前)

◇ ピークの12時間前に予測した結果

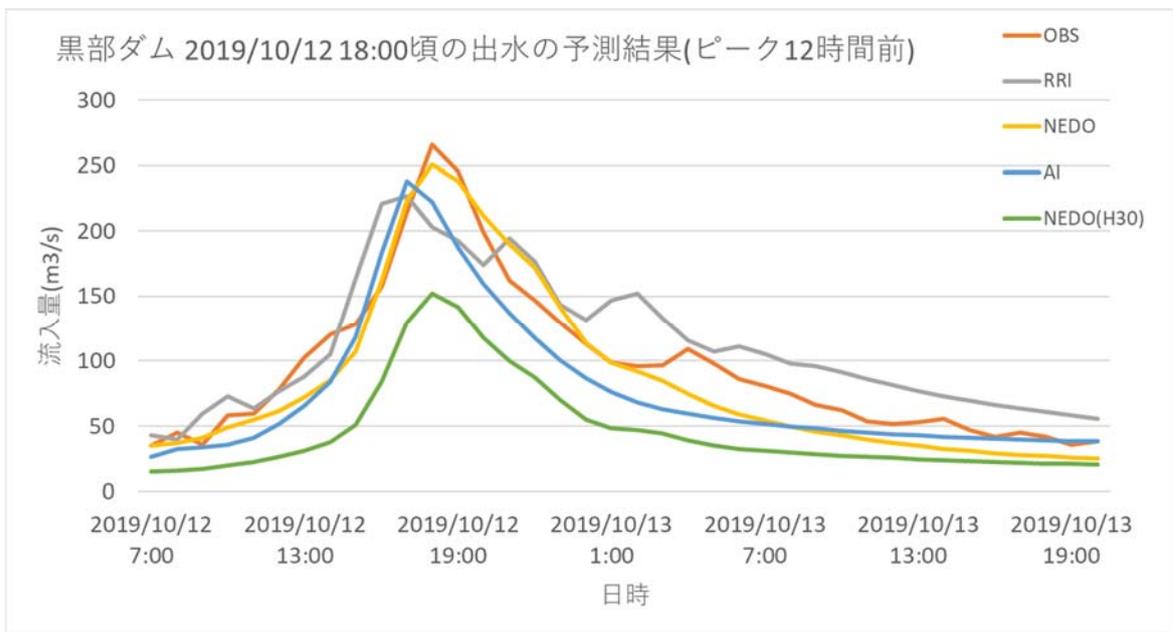


図 4.7-49 計算モデルと AI の比較 黒部ダム 2019/10/12 18:00 頃の出水 (ピークの12時間前)

最適化前の NEDO モデルは AI と同じく未知の洪水に対する計算になっているが、NS 係数による評価では AI の方が良い結果になった。また、波形観察でもわかるように最適化前の NEDO モデルは流量が全体的に不足しており、総ボリューム誤差でも AI のほうが良い結果になっている。

RRI モデル、最適化後の NEDO モデルも全体的に NS 係数も改善しており、特に総ボリューム誤差で比較すると、最適化前の H30 年度の NEDO モデルに比べると RRI では 35%~45%、最適化後の H30NEDO モデルでは 40%~45%、AI では 31%~44%と大幅な改善が見られた。

表 4.7-27 計算モデルと AI モデルの NS 係数の比較  
(黒部ダム 2018/07/05 19:00 頃の出水)

	36 時間前	24 時間前	12 時間前
RRI	0.906	0.840	0.752
H30NEDO	0.977	0.942	0.902
AI	0.730	0.864	0.803
H30NEDO(最適化前)	0.284	0.781	0.774

表 4.7-28 計算モデルと AI モデルの総ボリューム誤差の比較  
(黒部ダム 2018/07/05 19:00 頃の出水)

	36 時間前	24 時間前	12 時間前
RRI	-1.8%	+11.8%	+16.4%
H30NEDO	-4.1%	-5.3%	-11.2%
AI	+2.9%	-12.0%	-20.0%
H30NEDO(最適化前)	-46.7%	-49.8%	-51.3%

(10) 長期化に向けた検証

予測の長期化に向けて以下の条件で検証をおこなった。

- 対象のダムは黒部ダム
- 予測時間は 132 時間(5.5 日)
- 入力情報は 120 時間から、240 時間に拡張
- 学習に使うデータの期間と検証に使う洪水イベントは 39 時間予測時と同じものを使う

精度評価の結果を以下に示す。

表 4.7-29 黒部ダム流入量 132 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
(RMSE)

対象予測結果	120 時間前	96 時間前	72 時間前	48 時間前	24 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	1.901	2.671	2.836	2.437	2.045
2018/07/05 19:00 頃の出水	4.155	7.722	6.613	5.369	5.887
2018/08/16 16:00 頃の出水	1.163	1.145	1.122	1.140	1.184
2018/10/01 05:00 頃の出水	1.901	1.899	1.715	1.633	1.567
2019/05/21 10:00 頃の出水	1.365	1.316	1.235	1.214	1.350
2019/06/30 09:00 頃の出水	5.463	5.514	5.385	3.891	5.620
2019/08/29 04:00 頃の出水	2.750	2.872	2.949	2.862	2.703
2019/10/12 18:00 頃の出水	2.602	2.477	2.482	2.572	2.865

表 4.7-30 黒部ダム流入量 132 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
(NS 係数)

対象予測結果	120 時間前	96 時間前	72 時間前	48 時間前	24 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	0.797	0.573	0.490	0.616	0.725
2018/07/05 19:00 頃の出水	0.786	0.311	0.446	0.599	0.482
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.700	0.703	0.713	0.704	0.682
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.432	0.409	0.510	0.541	0.585
2019/05/21 10:00 頃の出水	0.693	0.699	0.727	0.733	0.662
2019/06/30 09:00 頃の出水	0.096	-0.014	-0.036	0.422	-0.128
2019/08/29 04:00 頃の出水	0.482	0.423	0.350	0.342	0.384
2019/10/12 18:00 頃の出水	0.606	0.630	0.620	0.567	0.437

表 4.7-31 黒部ダム流入量 132 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
(ボリューム誤差)

対象予測結果	120 時間前	96 時間前	72 時間前	48 時間前	24 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	-0.036	0.152	0.172	0.144	0.114
2018/07/05 19:00 頃の出水	-0.019	0.394	0.258	0.162	0.170
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.080	0.094	0.099	0.134	0.145
2018/10/01 05:00 頃の出水	-0.368	-0.323	-0.292	-0.268	-0.176
2019/05/21 10:00 頃の出水	-0.182	-0.065	-0.072	-0.074	-0.090
2019/06/30 09:00 頃の出水	-0.172	-0.251	-0.243	-0.067	-0.030
2019/08/29 04:00 頃の出水	-0.130	-0.255	-0.298	-0.301	-0.260
2019/10/12 18:00 頃の出水	-0.263	-0.207	-0.225	-0.254	-0.290

表 4.7-32 黒部ダム流入量 39 時間予測モデルの学習の精度評価結果  
(ピーク誤差)

対象予測結果	120 時間前	96 時間前	72 時間前	48 時間前	24 時間前
2018/04/25 08:00 頃の出水	0.012	0.061	0.063	0.042	0.031
2018/07/05 19:00 頃の出水	0.400	0.397	0.395	0.399	0.399
2018/08/16 16:00 頃の出水	0.494	0.486	0.467	0.451	0.452
2018/10/01 05:00 頃の出水	0.493	0.433	0.371	0.300	0.266
2019/05/21 10:00 頃の出水	0.254	0.242	0.244	0.244	0.249
2019/06/30 09:00 頃の出水	0.432	0.547	0.547	0.518	0.550
2019/08/29 04:00 頃の出水	0.580	0.533	0.522	0.469	0.425
2019/10/12 18:00 頃の出水	0.398	0.441	0.390	0.375	0.384

NS 係数についてピーク発生の 132 時間前からの各出水イベントの時系列変化を示すと以下ようになった。(凡例の event01~event08 は出水イベントを発生順に番号付けしたものの。)

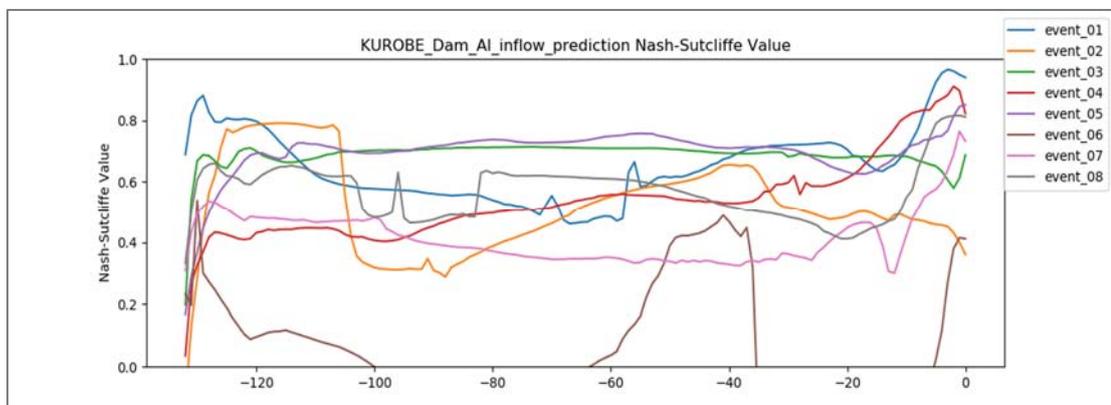
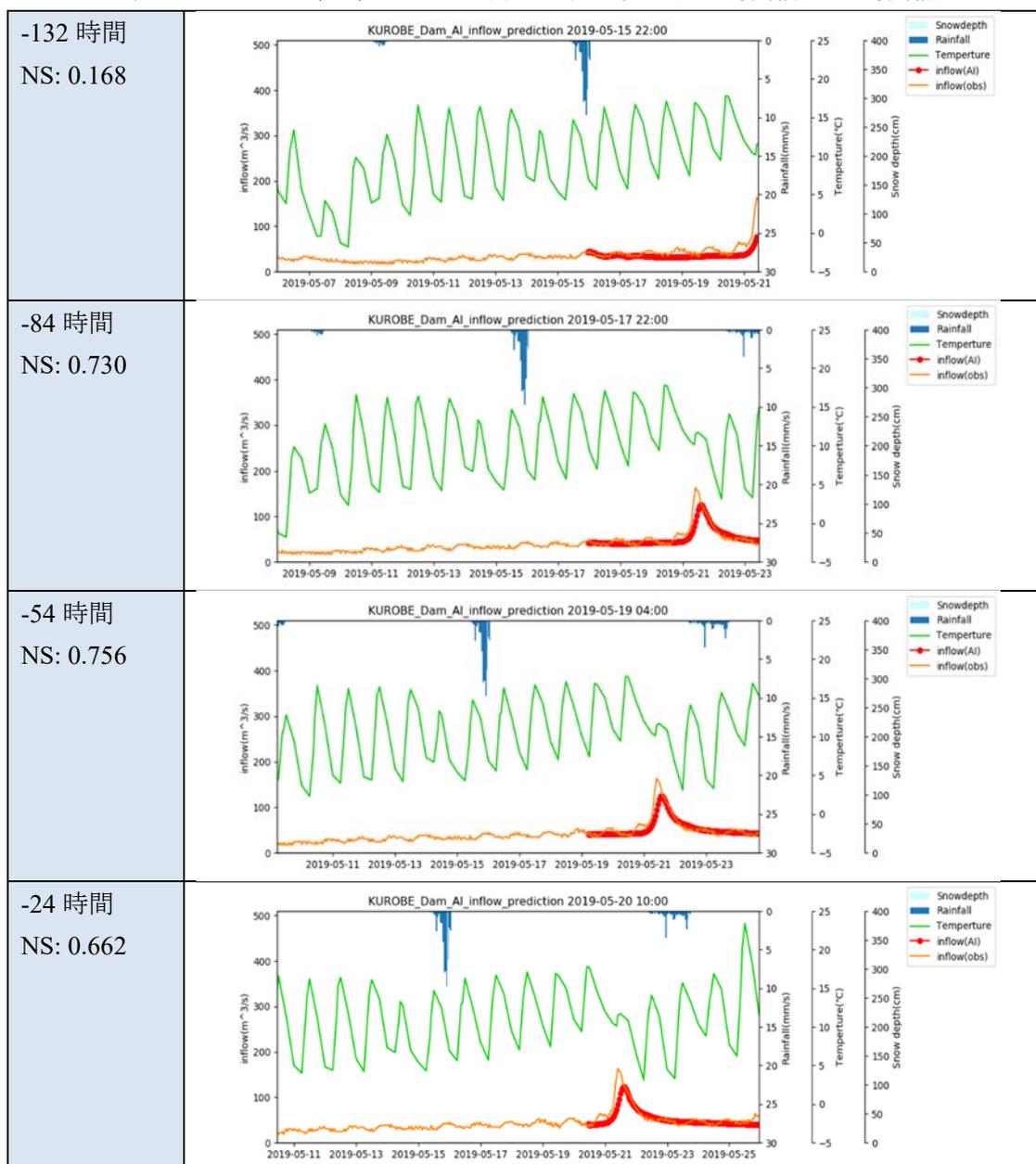


図 4.7-50 NS 係数の時間変化

このグラフを見ると NS 係数が安定して高い状態を維持しているのは event01, 03, 05。良い結果になっていないのは event06。それ以外は 0.5 前後で推移している。良い結果の場合と悪い結果の場合を event05, 06 をサンプルとして次に示す。

- 予測結果が良い洪水イベントの場合

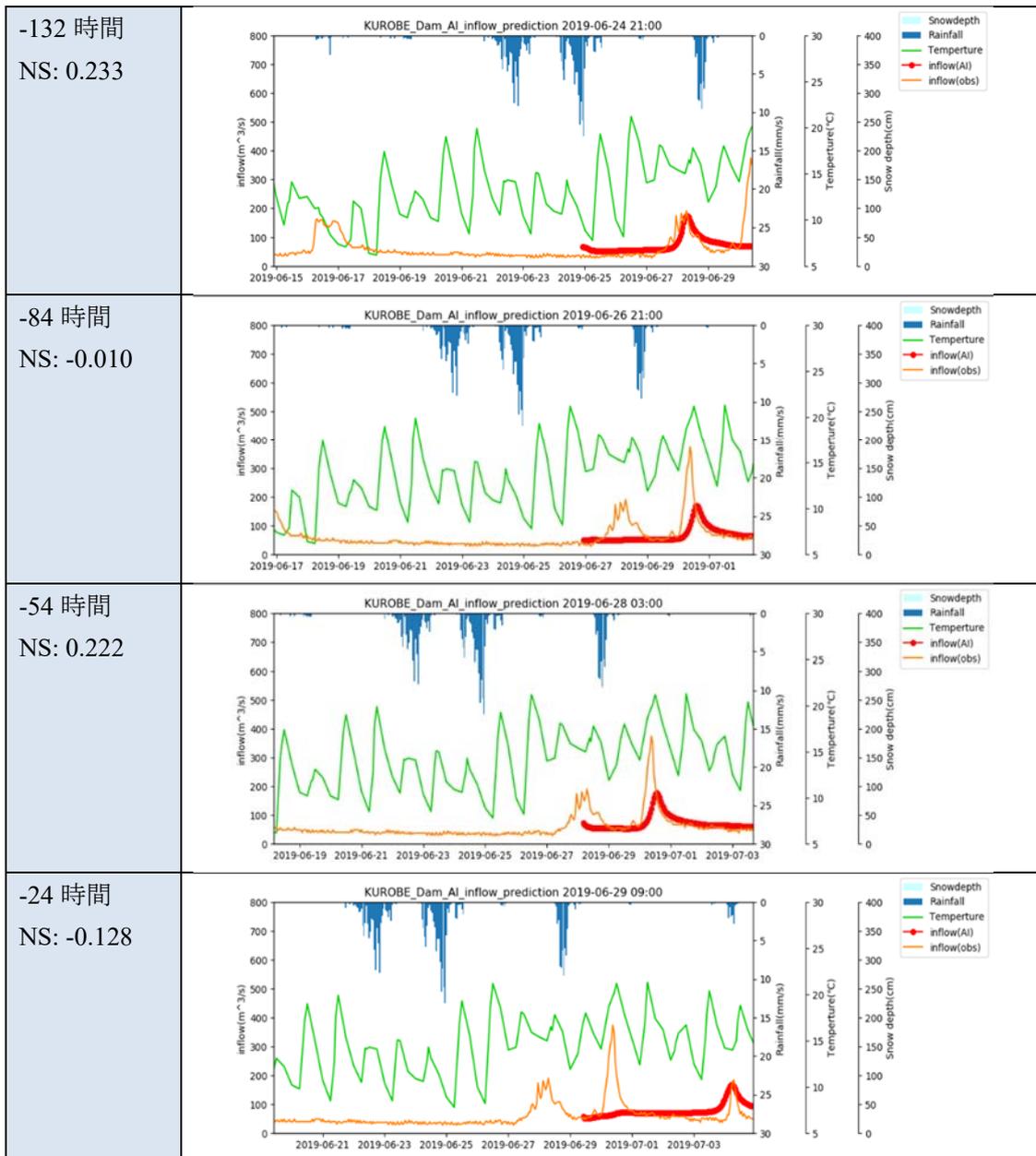
表 4.7-33 2019/05/21 10:00 頃の出水の予測 (132 時間前～24 時間前)



39 時間予測の時と同じ用に降水量に対してシンプルなシングルピークを持つケースは NS 係数が終始高く、波形観察でも良好な結果を得ることができた。

- 予測結果が悪い洪水イベントの場合

表 4.7-34 2019/06/16 20:00 頃の出水の予測 (132 時間前～24 時間前)



複数ピーク時の場合に NS 係数が低いのは同じ特徴であるが、予測が長期化したことで予測対象が変わるという現象が見られるようになった。最大のピークを予測するというよりは、最も未来のピークを予測するという傾向になっている。

最も未来のピークを予測できているということから、長期化への応用は実現可能と考えるが、一方で近い予測の精度に課題が残るという結果になった。この課題については以下の 2 点について今後検討していく必要がある。

1. 損失関数の検討
2. 予測時間ごとに複数のモデルを組み合わせる

#### 4.7.7 AIによる物理モデル最適化の検討

一般的には、洪水予測システムではどのような出水に対しても同じパラメータを用いているが、予測精度を向上する方法として、洪水イベント特性に応じたパラメータを用いることが挙げられる。「e. 流出予測手法の検討（4.6 参照）」では物理モデル(RRI モデル、H3ONEDO モデル)に対して洪水イベントごとにパラメータの最適化を行った。ここでは、洪水イベントの降雨データと最適化されたパラメータセットとの関係を AI によって学習させ、予測降雨に対して適切なパラメータを自動で設定する手法の検討を行った。このパラメータ自動設定のフローを図 4.7-51 に示した。

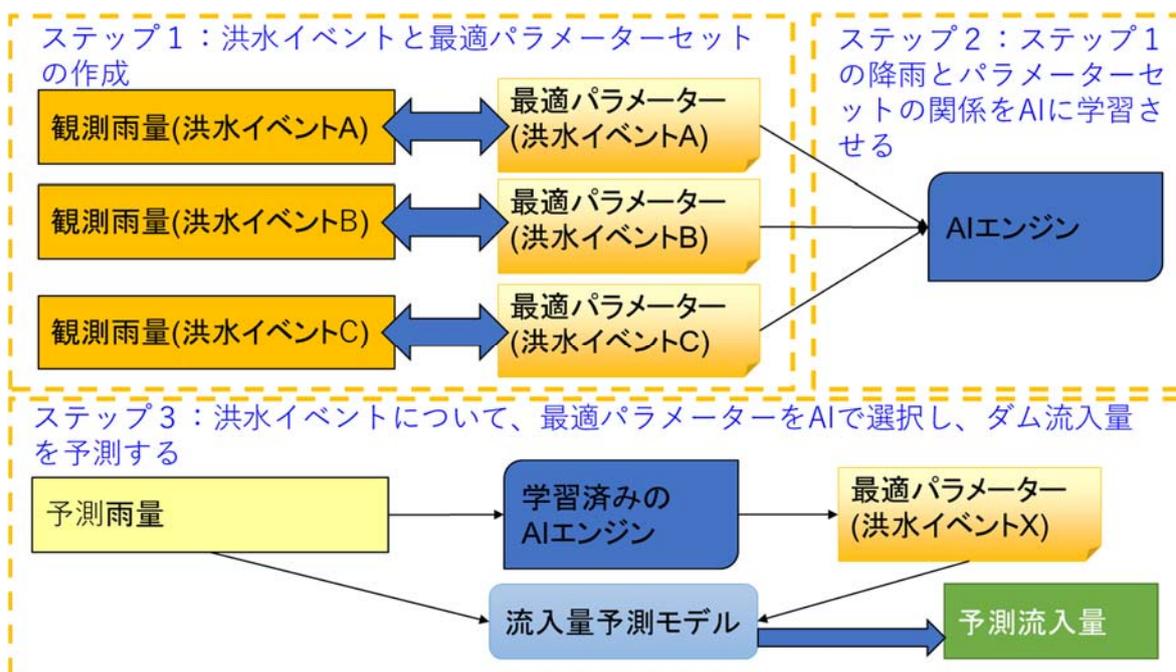


図 4.7-51 AIによる物理モデルパラメータ自動設定のフロー図

##### (1) ステップ1：洪水イベントと最適パラメータセットの作成

ステップ1では「e. 流出予測手法の検討」で行った SCE-UA 法により得られた最適化パラメータと各出水の特性との相関について解析を行った。4.6で行った SCE-UA 法により最適化した RRI モデルのパラメータとピーク雨量及びピーク以前の 12 時間雨量との相関を調べたが、パラメータと降雨との間に明確な相関を確認することはできなかった。

18 通りのパラメータを用いて 3 通りの同じ降雨に対して黒部ダム流域を対象に RRI モデルを用いて流出解析を行った結果を図 4.7-52 に示す。ここで 3 つの降雨は 2013 年 6 月 19 日、2013 年 7 月 5 日、2017 年 7 月 4 日の降雨である。図 4.7-52 の赤線は各出水に対する SCE-UA 法を用いた最適化結果であり、灰色線はそれ以外のパラメータによる結果を示す。18 通りの流出解析結果についてピーク流量を用いて順位付けを行った結果が表 4.7-35 である。計算対象降雨によって若干のばらつきはあるものの、ピーク流量の順位はおおむね計算対象降雨によらずに決まり、パラメータの組によって出水時の流出ボリュームが決まることがわ

かる。降雨前の流域の乾湿条件やピーク雨量生起前の降雨の継続時間といった降雨の特性によりピーク雨量前の土壌中の状態が変わり、流出するボリュームが変わってくると考えられる。パラメータセットごとに流出ボリュームが決まることは、これらのパラメータセットが流域の貯留特性を表現していることを示している。

今回の検討においては、3つの降雨に対する順位の平均をとり、パラメータセットについて上から1位～4位を高流出率クラス、5位～14位を中流出率クラス、15位～18位を低流出率クラスとして分類する。分類結果は図4.7-53および表4.7-35に示すとおりである。予想降雨の特性および先行降雨指数と出水前の基底流量によって特徴づけられる流域の乾湿条件から、予想降雨に伴う流出がどの流出率クラスに該当するかをAIにより予測し、対応するパラメータの組を用いた流出解析を行うシステムを構築した。

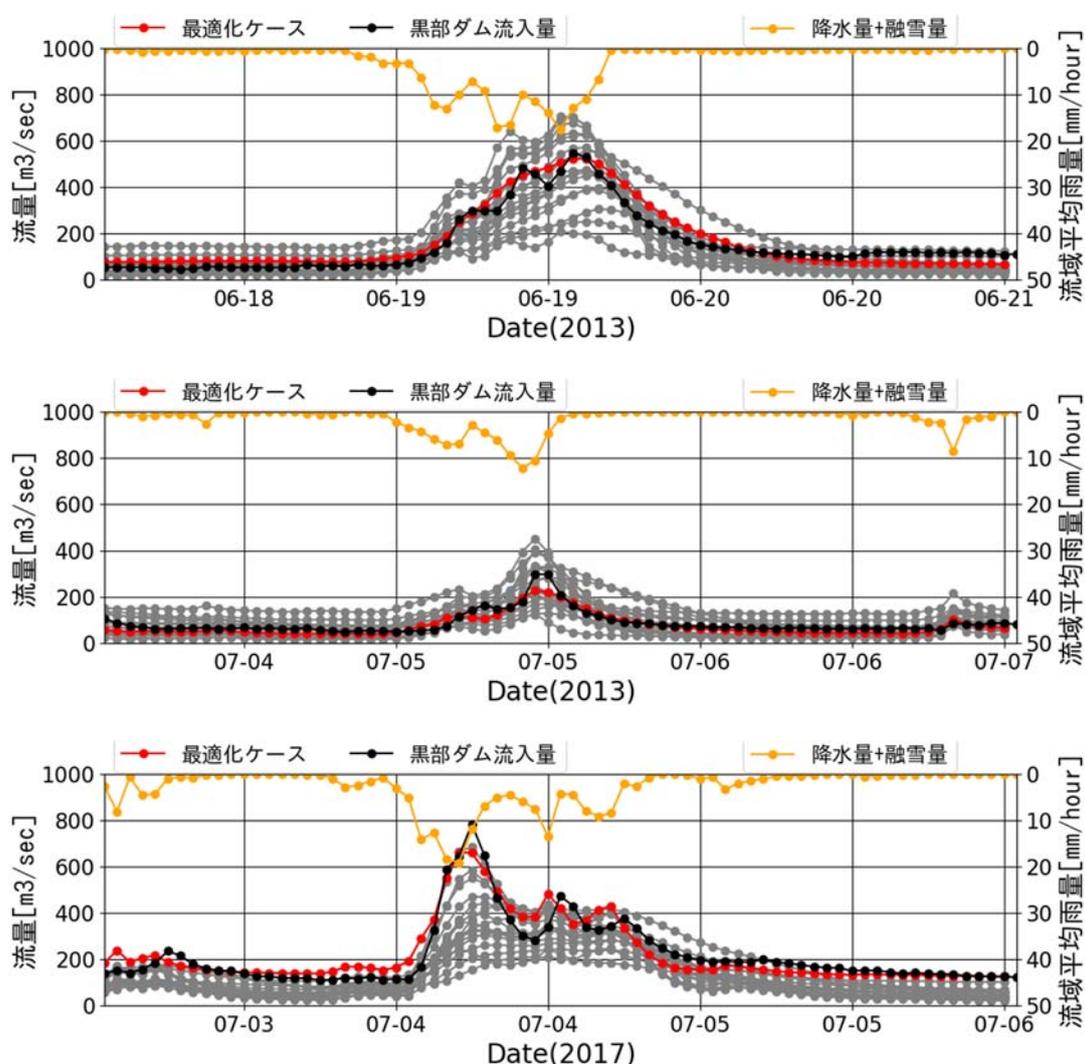


図 4.7-52 パラメータの組による流出解析結果の違い

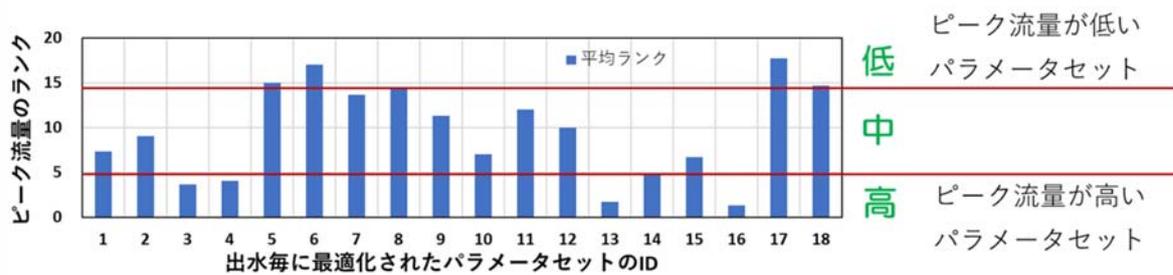


図 4.7-53 ピーク流量によるランク付け

表 4.7-35 ピーク流量によるランク付け結果およびクラス分類結果  
(ここでランクが小さいほどピーク流量が大きいことを示す。)

ID	2013/6/13	2013/6/30	2017/7/4	平均ランク	流出率クラス分類
1	7	7	8	7.3	中
2	8	10	9	9.0	中
3	4	3	4	3.7	高
4	3	6	3	4.0	高
5	14	16	15	15.0	低
6	16	18	17	17.0	低
7	13	15	13	13.7	中
8	15	14	14	14.3	中
9	10	12	12	11.3	中
10	9	5	7	7.0	中
11	12	13	11	12.0	中
12	11	9	10	10.0	中
13	2	2	1	1.7	高
14	5	4	5	4.7	中
15	6	8	6	6.7	中
16	1	1	2	1.3	高
17	18	17	18	17.7	低
18	17	11	16	14.7	低

高・中・低の3クラスを代表するパラメータセットは次のように決めた。各クラスに属するパラメータを用い、各クラスに属する降雨に対して流出解析を行った。流出解析の精度をNS係数で評価し、それぞれのパラメータセットについてNS係数の平均を求めた。このうち、最も平均NS係数が大きいパラメータセットを各クラスを代表するパラメータセットと決めた。

(2) ステップ2：ステップ1の降雨とパラメータセットの関係をAIに学習させる

3つにクラス分類したパラメータセットと降雨特性との関係についてランダムフォレストによるクラスタリングを行った。ランダムフォレストとは弱学習器を統合させて汎化能力を向上させる、アンサンブル学習アルゴリズムの1種であり、近年多くの分野で盛んに利用されている。ランダムフォレストは以下の特徴を持つ。

- ・全データの集合に対して複数の変数を組み合わせた分割をデータから自動的に生成する決定木を利用。
- ・多数の決定木を組み合わせることで性能を高める。

ランダムフォレストに用いた目的変数及び説明変数は表 4.7-36 の通りである。ここで、先行降雨指数(API)とは、以下の式で定義される流域の乾湿条件を示す指標である。

$$API = \sum_{i=1}^n \alpha^i R_i$$

$n(=20)$ ：日数、 $\alpha(=0.85)$ ：係数、 $R_i$ ： $i$  日前の日降水量(mm/day)

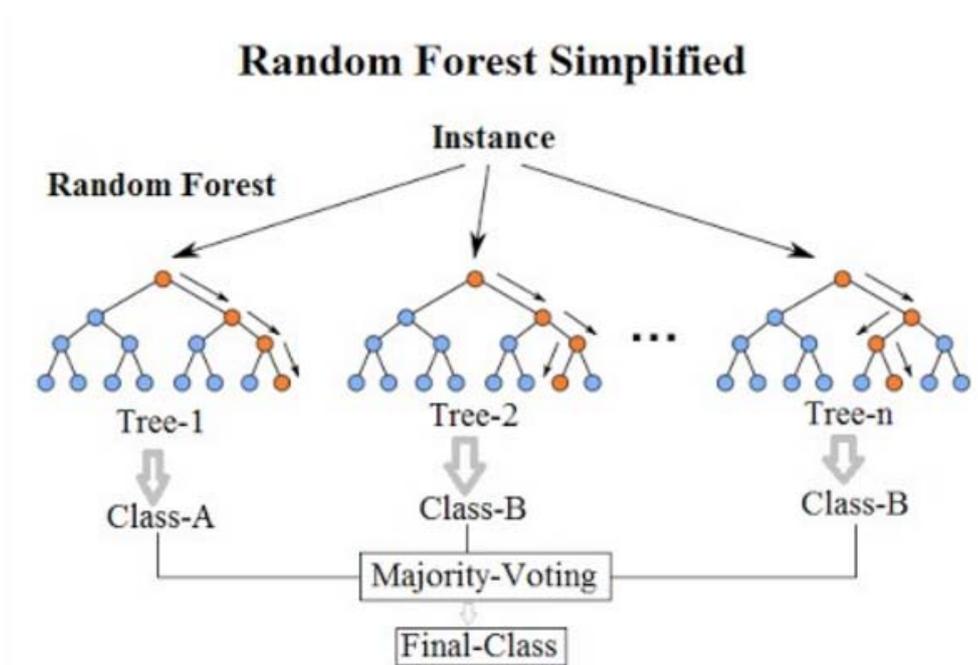


図 4.7-54 ランダムフォレストの概要

(Venkata Jagannath <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=68995764> より引用)

表 4. 7-36 目的変数及び説明変数

目的変数	ピーク流量によるクラス分類(高 or 中 or 低)
説明変数	(1) 降雨のピーク以前の 1 時間雨量(6 時間分)
	(2) ピーク生起 1 日前の流量(基底流量とみなす)
	(3) 先行降雨指数(API)

ランダムフォレストでは 3 つの降雨(2013 年 6 月 19 日、2013 年 7 月 5 日、2017 年 7 月 4 日)をテストデータとし、残りの 15 降雨のうち、訓練用データとして 12 降雨(80%)、検証データとして 3 降雨(20%)に分割した。

**(3) ステップ 3 : 洪水イベントについて、最適パラメータを AI で選択し、ダム流入量を予測する**

検証の結果、学習に用いる乱数のシードによって正答率が異なるものの、おおむね 50% の確率の正答率であった。今回の検討においてはデータ数が少ないという問題があり、今後データ数を増やすことによって正答率を上昇させることができると考えられる。

テストデータの 3 つの降雨(2013 年 6 月 19 日、2013 年 7 月 5 日、2017 年 7 月 4 日)に関して、ランダムフォレストにより正しい流出率クラスを選択できたとした時の流出解析結果を図 4. 7-55 から図 4. 7-57 に示す。同時に他の流出率クラスのパラメータを用いた時の結果も点線で示した。中流出率クラスに属する 2013 年 6 月 19 日、2013 年 7 月 5 日の降雨については、クラス(中)のパラメータセットで比較的良好に再現ができる。一方で、2017 年 7 月 4 日の降雨については、出水ピークをとらえきれていない結果となった。

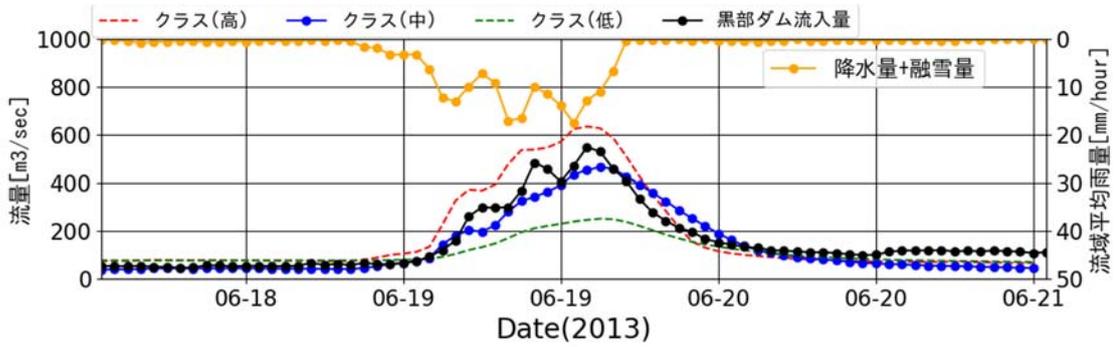


図 4.7-55 ランダムフォレストにより中流出率クラスを選択した時の結果  
(同時に他の流出率ケース(点線)の結果を図示)

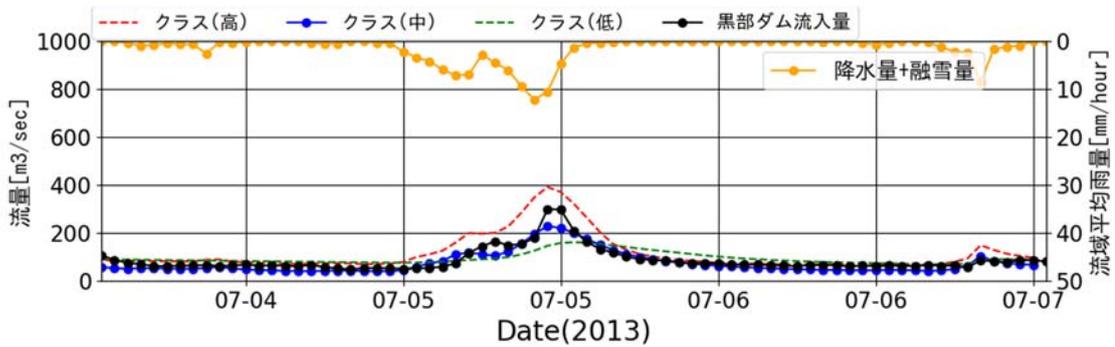


図 4.7-56 ランダムフォレストにより中流出率クラスを選択した時の結果  
(同時に他の流出率ケース(点線)の結果を図示)

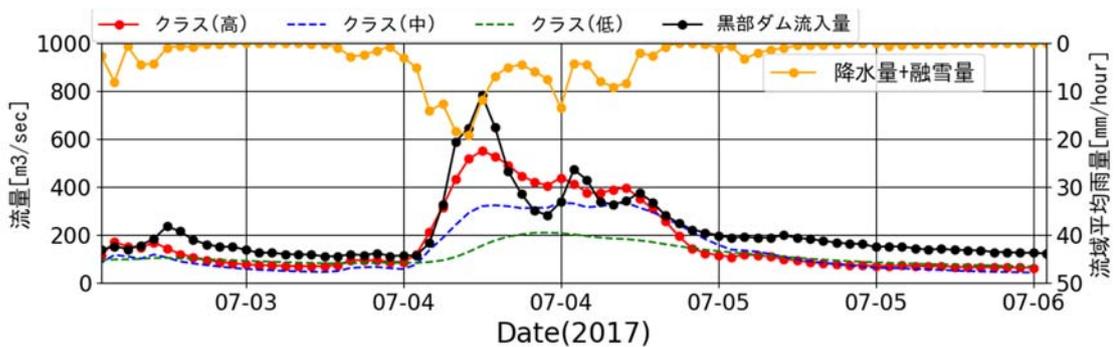


図 4.7-57 ランダムフォレストにより高流出率クラスを選択した時の結果  
(同時に他の流出率ケース(点線)の結果を図示)

#### (4) AI による物理モデル最適化の検討に関するまとめ

- 今回の検討により、最適化済みのパラメータセットと観測雨量の関係を学習し、予測降雨に適するパラメータセットを AI で決定する一連のフローを確立することができた。
- 学習データ数、説明変数の選択の妥当性、SCE-UA 法によるパラメータ最適化手法(変数の数、収束条件など)、などの課題があり、さらなる検討が必要である。
- 今回は、融雪量を含む流域であったが、今後、融雪の少ない流域を対象に検討するなど、課題を切り分ける必要がある。

## 4.8 積雪・融雪モデルの検討

### 4.8.1 積雪・融雪モデルの概要

積雪融雪モデルには、平成 30 年度の NEDO の開発研究において検討された積雪・融雪モデルを使用した。

この積雪・融雪モデルの特徴として、

- 1) 積雪・融雪期を通して連続的に計算ができる。
- 2) 積雪の冷却・凍結過程がモデルに組み込める。
- 3) 積雪内貯留過程がモデルに組み込める。
- 4) 計算過程のなかで、積雪水量、積雪深、積雪密度、雪温、含水量などの積雪の状況を表わす諸要素が算出される

といったことをあげることができる。図 4.8-1 に積雪・融雪モデルの模式図を、図 4.8-2 に計算フローを示す。

積雪・融雪モデルの検討は、NEDO の開発研究で実施された黒部川水系の黒部ダム上流域と阿賀野川水系の奥只見ダム上流域を対象として実施した。

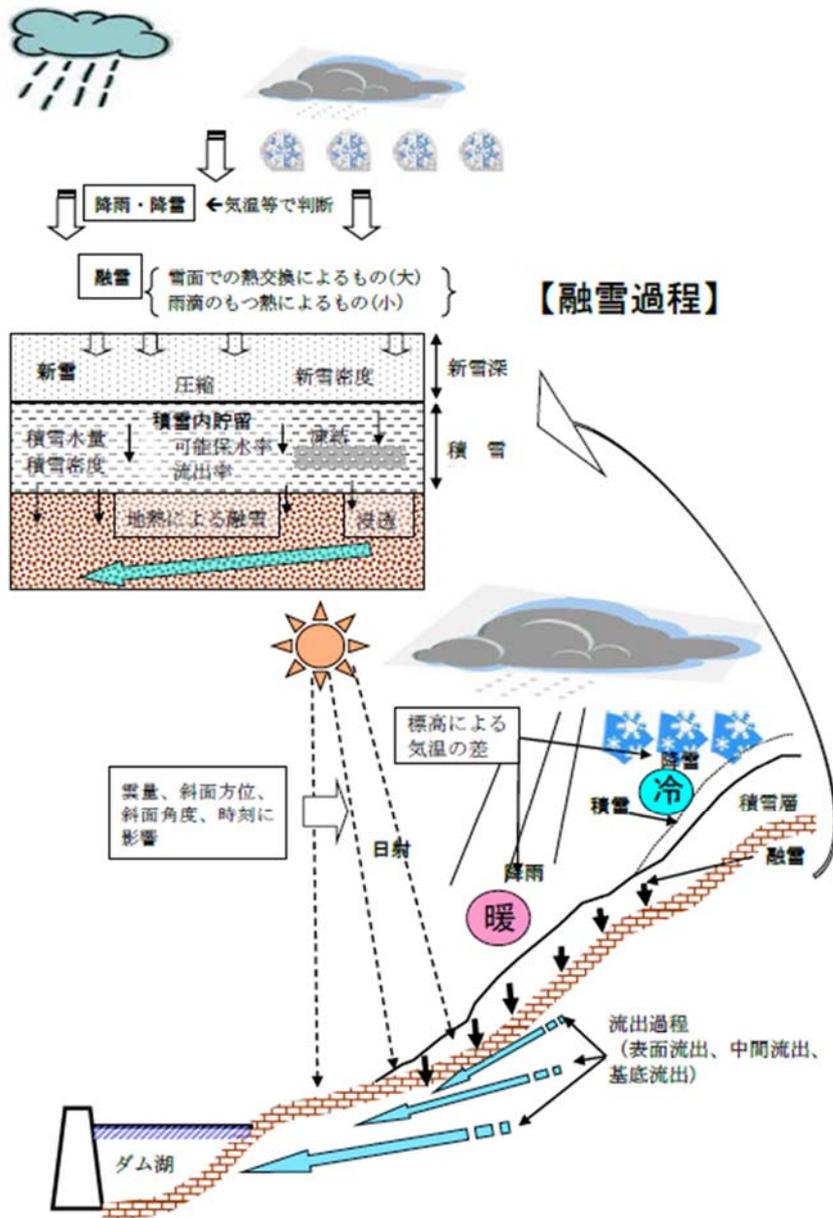


図 4.8-1 積雪・融雪モデルの模式図

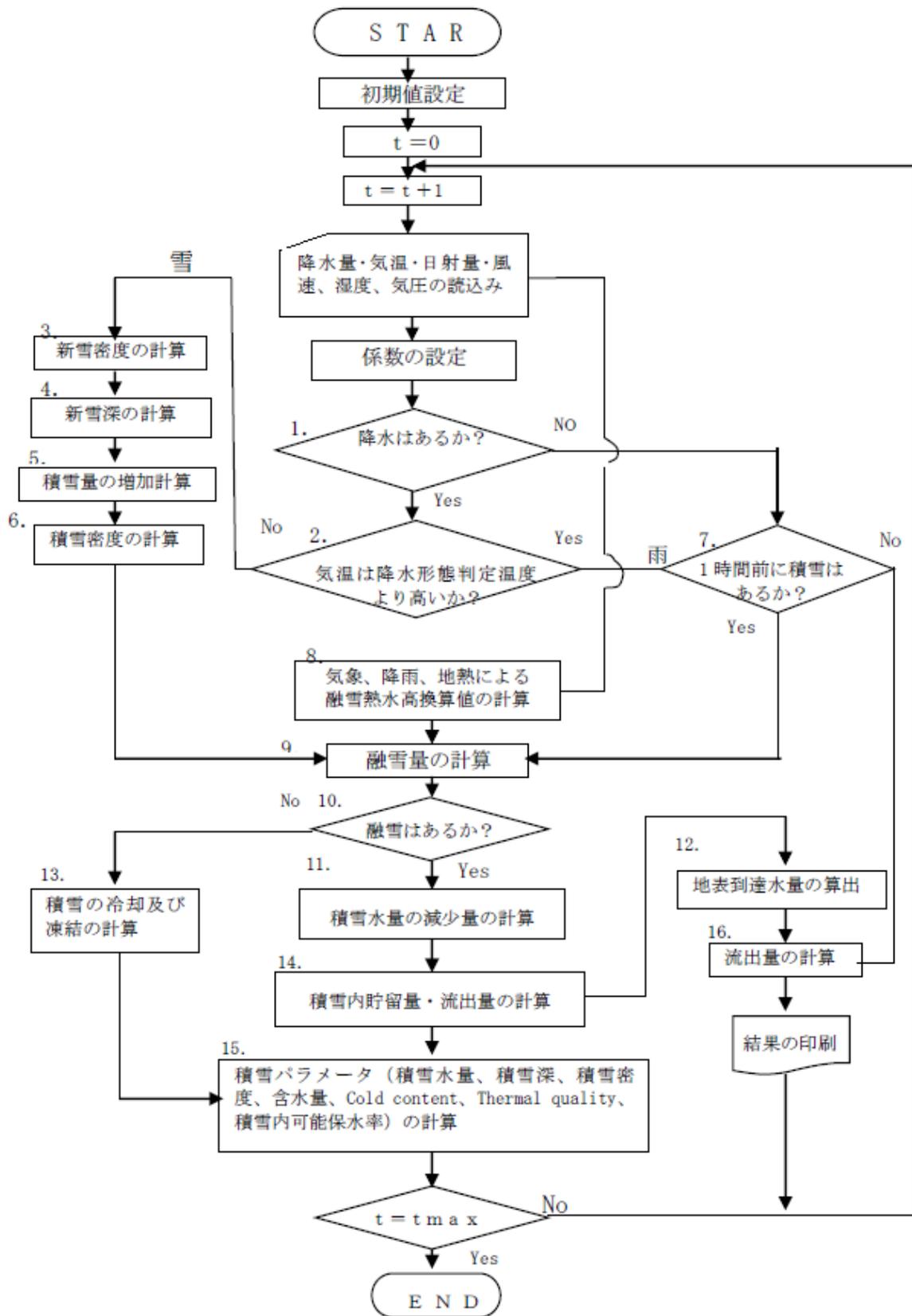


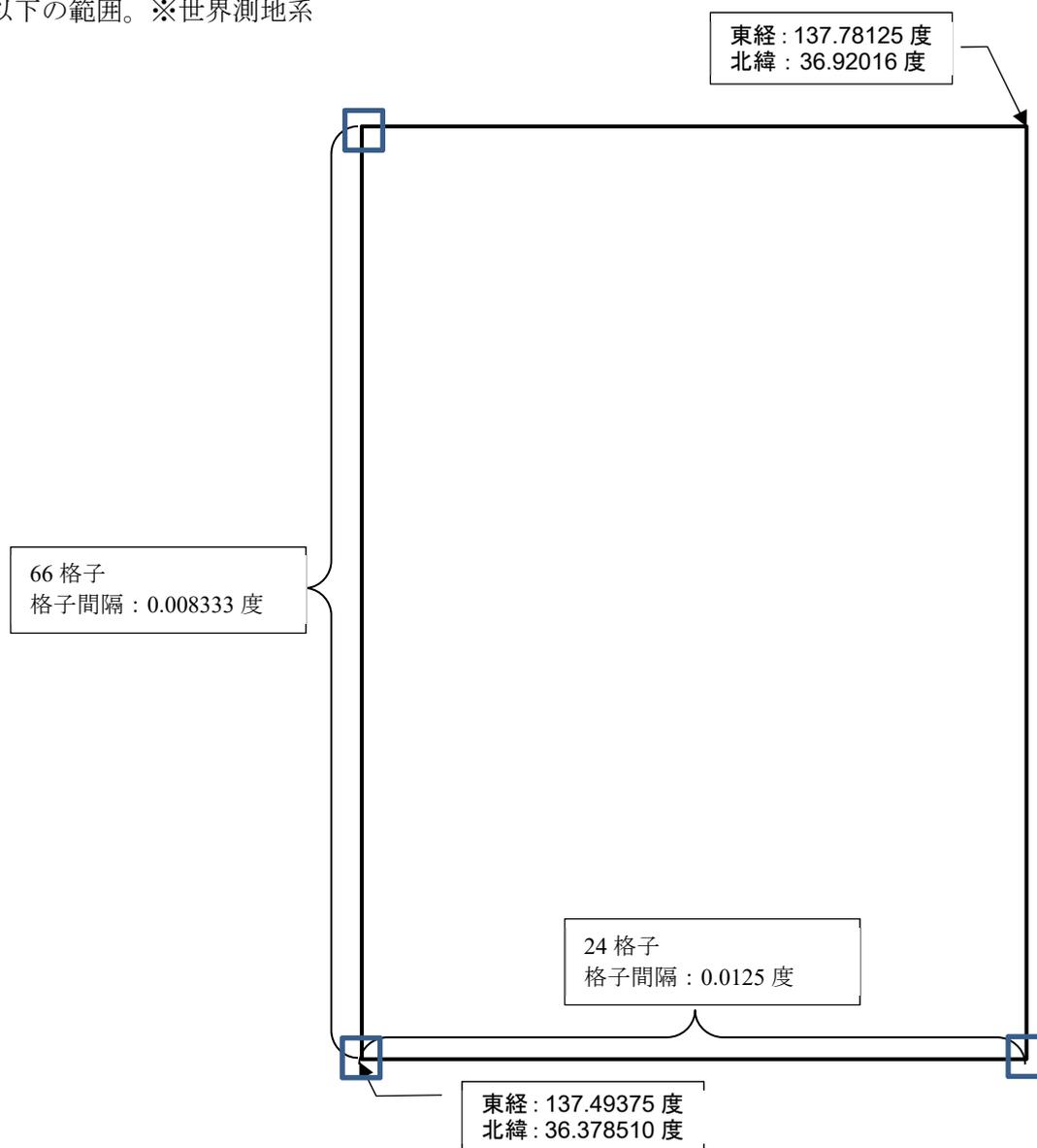
図 4.8-2 積雪・融雪モデルの計算フロー

## 4.8.2 積雪・融雪モデル計算用の入力データの作成

黒部ダム流域の積雪・融雪モデル計算用入力データとして、以下に示す範囲のデータを作成した。データ項目は、降水量と気温とした。

### 【データ範囲】

以下の範囲。※世界測地系



### 【ファイル形式】

上記の範囲を CSV 形式で出力。(24 列 66 行 ※改行コード: LF )

### ①降水量データ

降水量は、積雪・融雪モデルメッシュに対応する 1km メッシュの 1 時間単位の国土交通省解析雨量を用いた。図 4.8-3 に 1km 標高メッシュと 1km メッシュ解析雨量（月積算雨量）の一例を示す。

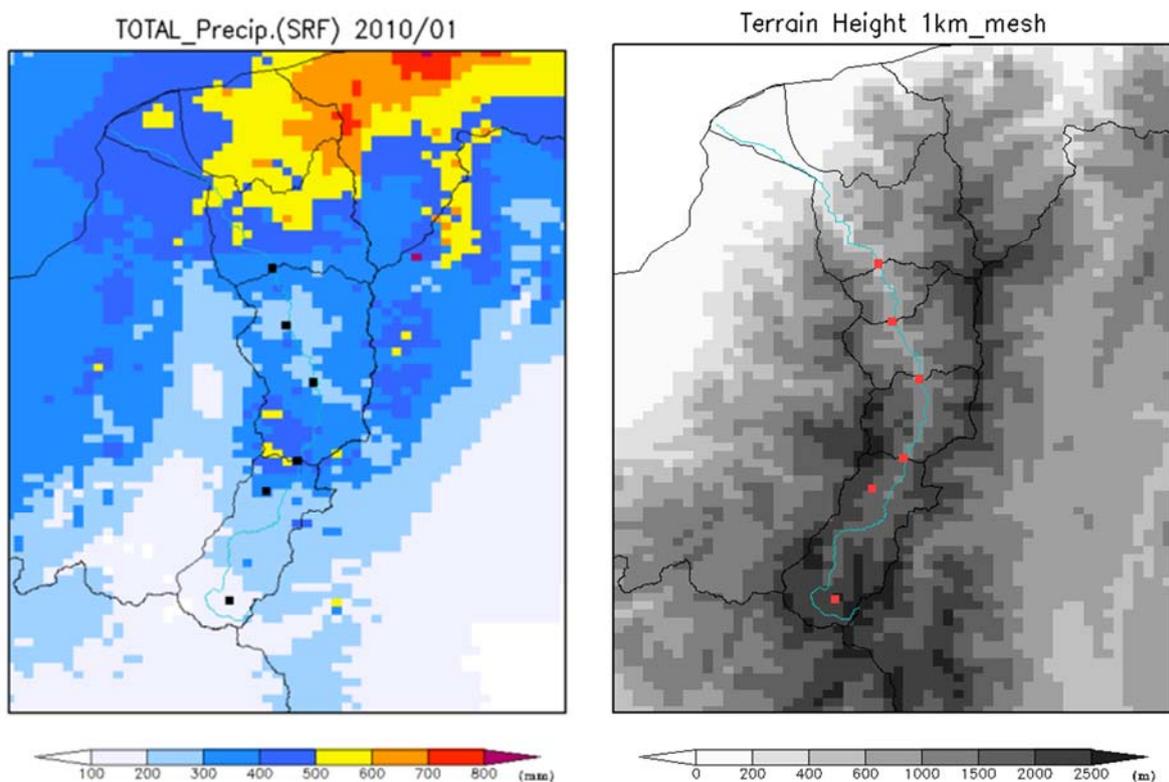


図 4.8-3 1km メッシュ標高と 1km 解析雨量（月積算降水量）の対応例

### ②気温データ

気温データは、MSM (5km メッシュ) を 1km メッシュに単純線形内挿後、標高補正して積雪・融雪モデルの入力データとした。

気温は標高依存性が高いため標高による補正が必須である。1km メッシュの気温データの作成は、5km メッシュの MSM データの空間内挿により 1km メッシュデータを作成し、MSM のモデル標高と 1km メッシュ標高の差を用いて、 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  の気温減率を用いて 1km メッシュの気温データを作成した。図 4.8-4 に MSM の 5km メッシュ標高と 1km メッシュ標高、図 4.8-5 に MSM 気温、1km メッシュに内挿した MSM 気温、1km メッシュ標高を用いて作成した 1km メッシュ気温の一例を示す。

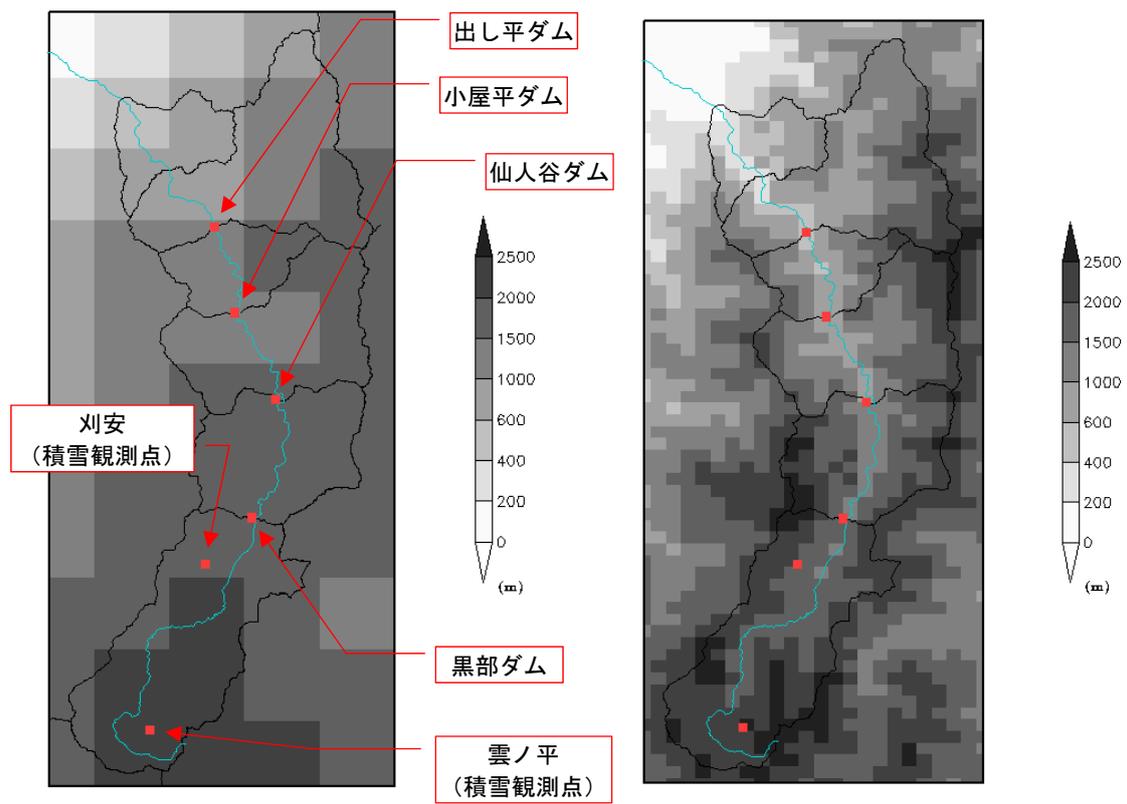


図 4.8-4 5km メッシュの MSM モデル標高 (左) と 1km メッシュ標高 (右)

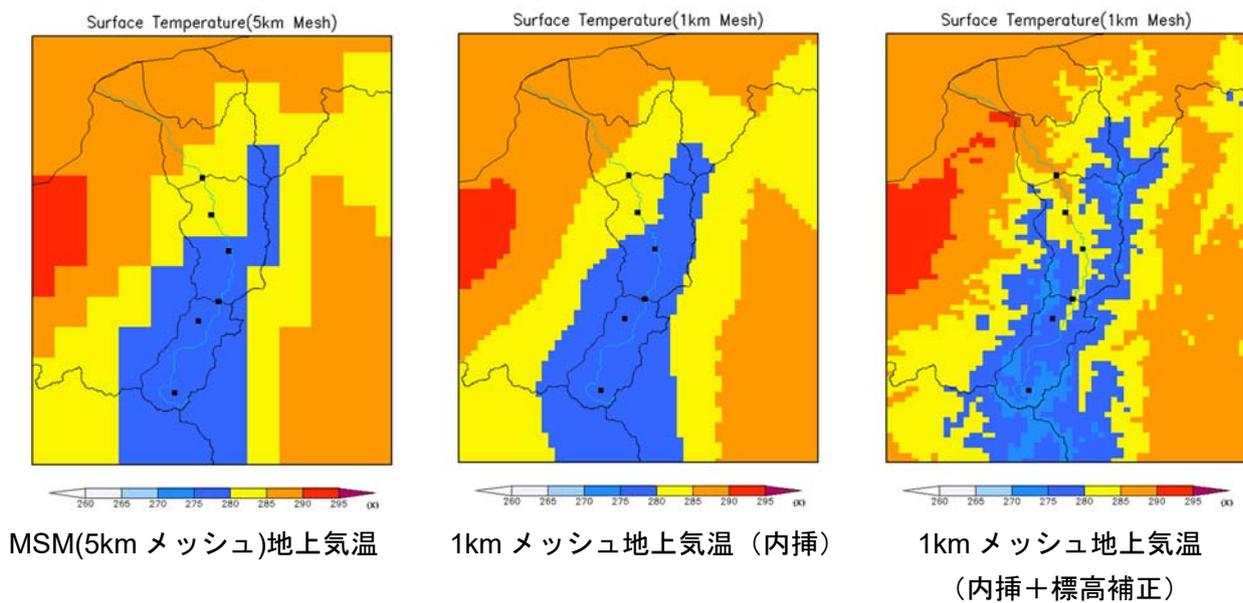


図 4.8-5 1km メッシュ気温データの作成例

### 4.8.3 積雪・融雪モデルのカスタマイズ

積雪のピークに達するまでは、ほとんど融雪はなく、検討するパラメータは、入力降水量データに対する割増率となる。また、積雪量を増加させた分、消雪の時期が遅れるので、融雪係数を大きくして消雪時期を調整する必要がある。

NEDO の報告書では、入力降水量に対する割増率を 2.0 倍に設定し、融雪係数を 0.4mm/°C/hr に設定している。ただし、このパラメータで 2012 年 9 月までは、比較的良く適合しているが、2012 年 10 月からは積雪のピークが低く計算されており、解析雨量の特性の変化に対応して割増率をさらに大きくする必要があると指摘されている。

まず、2017～2018 年を対象に入力降水量に対する割増率を設定せず、融雪係数 0.4mm/°C/hr の条件で積雪・融雪モデルによる計算を行った。図 4.8-6 に計算積雪と実績積雪深の比較を示す。図から以下のことが分る。

- ・ 計算された積雪深は観測積雪深と比較して低い。
- ・ 計算された積雪の消雪時期（積雪深さがゼロになる時期）は観測による消雪時期よりも早い。



図 4.8-6 黒部ダム地点における積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較

上記の計算結果と NEDO の報告書記載事項を踏まえて入力降水量に対する割増率を 2.5 倍として計算条件のカスタマイズを行い、カスタマイズを行った積雪・融雪モデルによる計算を行った。図 4.8-7 に黒部ダム地点におけるカスタマイズした積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較結果を示す。降水量に対する補正係数を設定し、モデル計算条件を設定カスタマイズすることにより、消雪時期は計算値と概ね一致したが、積雪深が過大となる傾向となった。

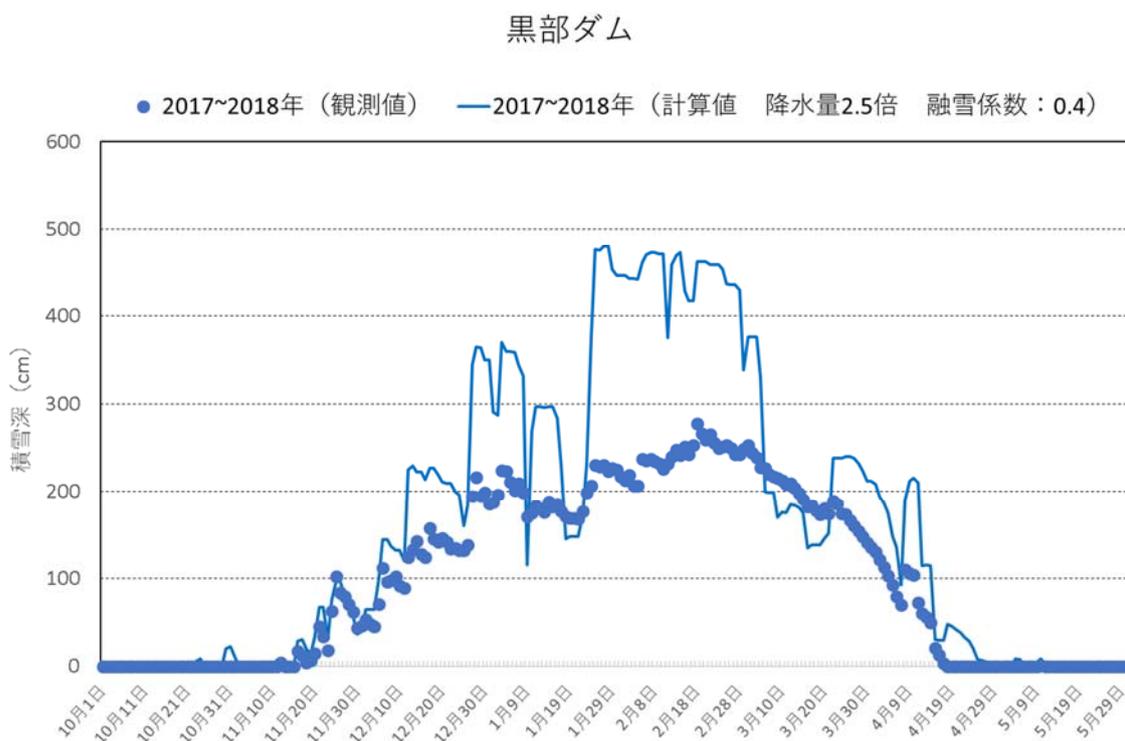


図 4.8-7 黒部ダム地点におけるカスタマイズした積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較

#### 4.8.4 積雪・融雪モデルの検証

豊水年：2018～2019年 渇水年：2019～2020年 の2ヵ年を対象として、カスタマイズした黒部ダム流域の積雪・融雪モデルによる計算を実施し、積雪・融雪モデルの検証を実施した。図4.8-8に黒部ダム地点におけるカスタマイズした積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較結果を示す。図から豊水年、渇水年共に積雪・融雪モデルによる計算値は観測値に対して大きくなっており、消雪時期も遅くなっていることが分る。

NEDOの検討では、2016年まで観測が行われていた刈安、雲ノ平で観測された積雪水量で積雪・融雪モデルのパラメータがチューニングされていた。積雪深観測データは局地的な観測環境（地形による吹き溜まり、建物等）の影響を大きく受ける。黒部ダム地点の積雪深データが黒部ダム上流域を代表しているとするのは無理があると考えられる一方、積雪深観測値は黒部ダム地点しか存在しない。積雪・融雪モデルに用いる解析雨量に対する補正係数の妥当性評価は、ダム流入量データとメッシュ降水量データを用いた水収支解析により行う必要があると考えられる。

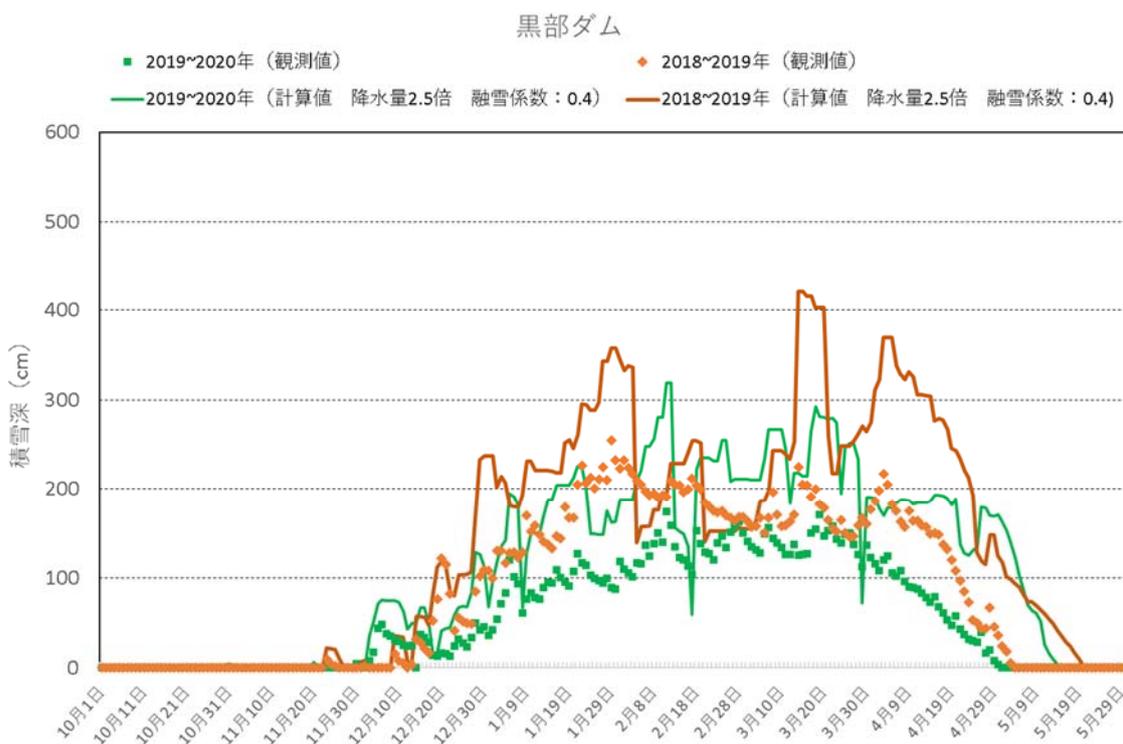


図4.8-8 黒部ダム地点におけるカスタマイズした積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較（検証事例）

#### 4.8.5 奥只見ダム流域への適用

##### (1) 奥只見ダム流域への適用

奥只見ダム流域の積雪・融雪モデル計算用入力データとして、以下に示す範囲のデータを作成した。データ項目は、降水量と気温とした。

##### 【データ範囲】

以下の範囲。※世界測地系

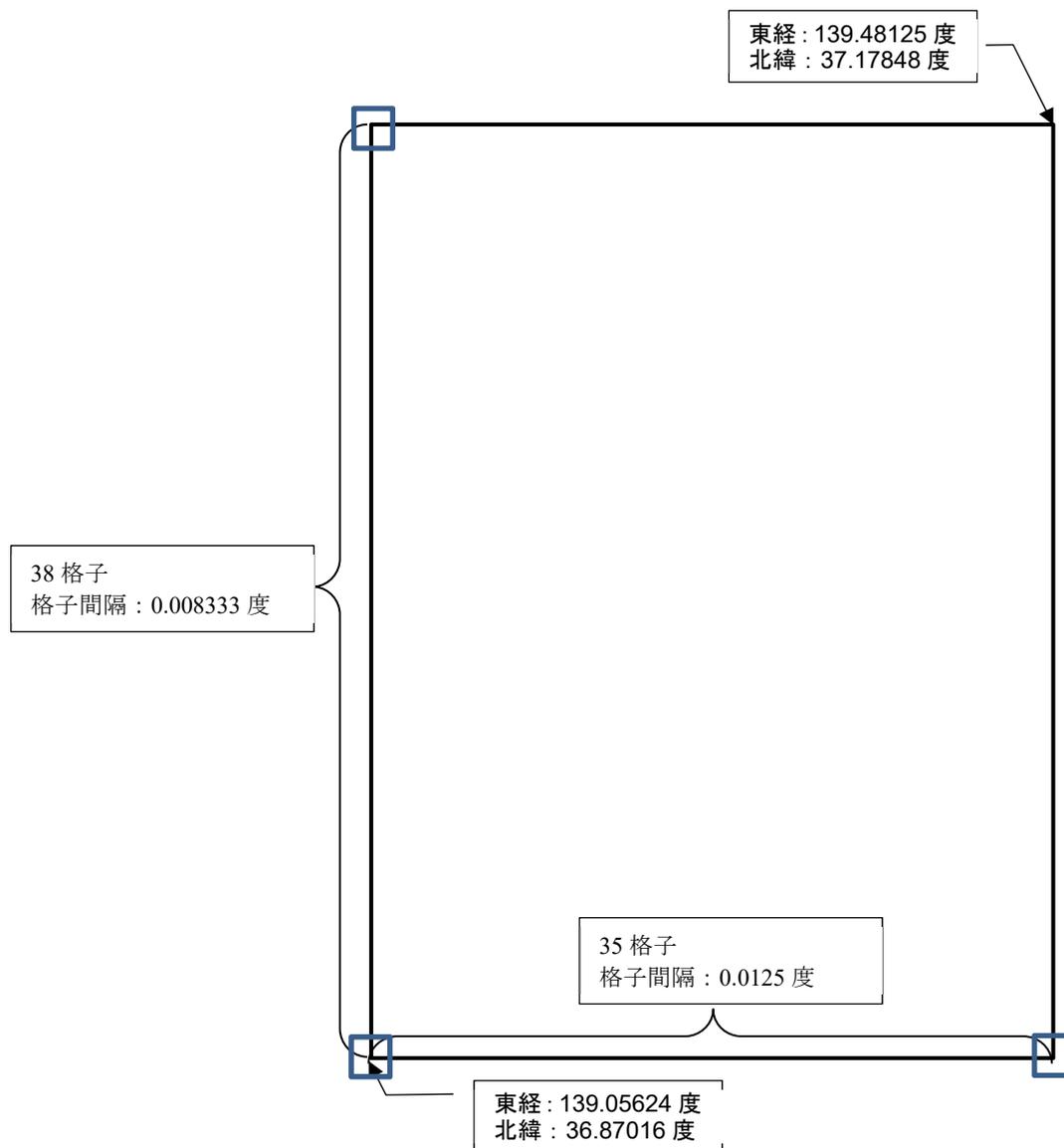


図 4.8-9 に奥只見ダム流域周辺の 1km メッシュの標高地形と積雪深観測点位置を示す。「奥只見」「桧枝岐」はいずれも電源開発(株)所管の積雪深観測点であり、「桧枝岐(アメダス)」は気象庁観測点である。検証対象期間は、2017年10月～2018年6月、2018年10月～2019年6月、2019年10月～2020年6月の3期間とした。ただし、「奥只見」「桧枝岐」については2019年12月までのデータしか入手できなかったため、2019年10月～2020年6月の期間を検証対象外とした。

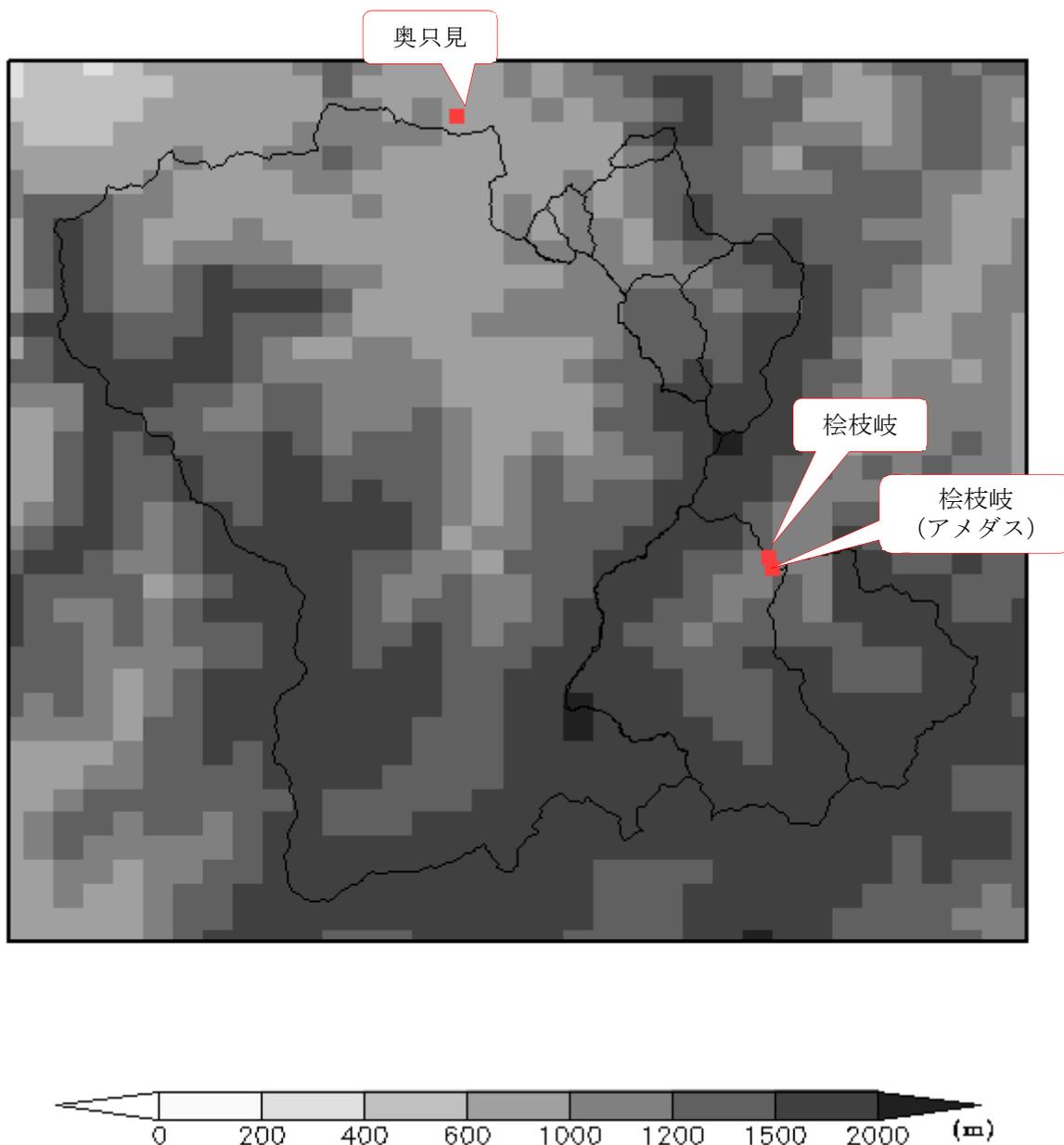


図 4.8-9 奥只見ダム流域周辺の 1km メッシュの標高地形と積雪深観測点位置 (■)

まず、降水量の補正を行わずに積雪・融雪モデルによる計算を行った。図 4.8-10 に、奥只見地点における積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較結果を示す。図から積雪・融雪モデルによる計算結果は実績積雪深と比較して値が小さく、消雪時期も早いことが分る。

次に、降水量に対する補正係数、融雪係数を変化させた計算を行い、実績積雪深と計算値の乖離が少なくなる設定について検討を行った。検討の結果、降水量に対する補正係数:2.5、融雪係数:0.4を最適設定とした。図 4.8-11 に、奥只見地点における積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較結果を示す。図から積雪・融雪モデルによる計算結果は積雪深の値、消雪時期共に実績と良く合致していることが分る。ただし、黒部ダム流域の検討で指摘したように、観測地点の積雪深データがダム上流域を代表しているとするのは無理があると考えられるため、積雪・融雪モデルに用いる解析雨量に対する補正係数の妥当性評価は、ダム流入量データとメッシュ降水量データを用いた水収支解析により行う必要があると考えられる。

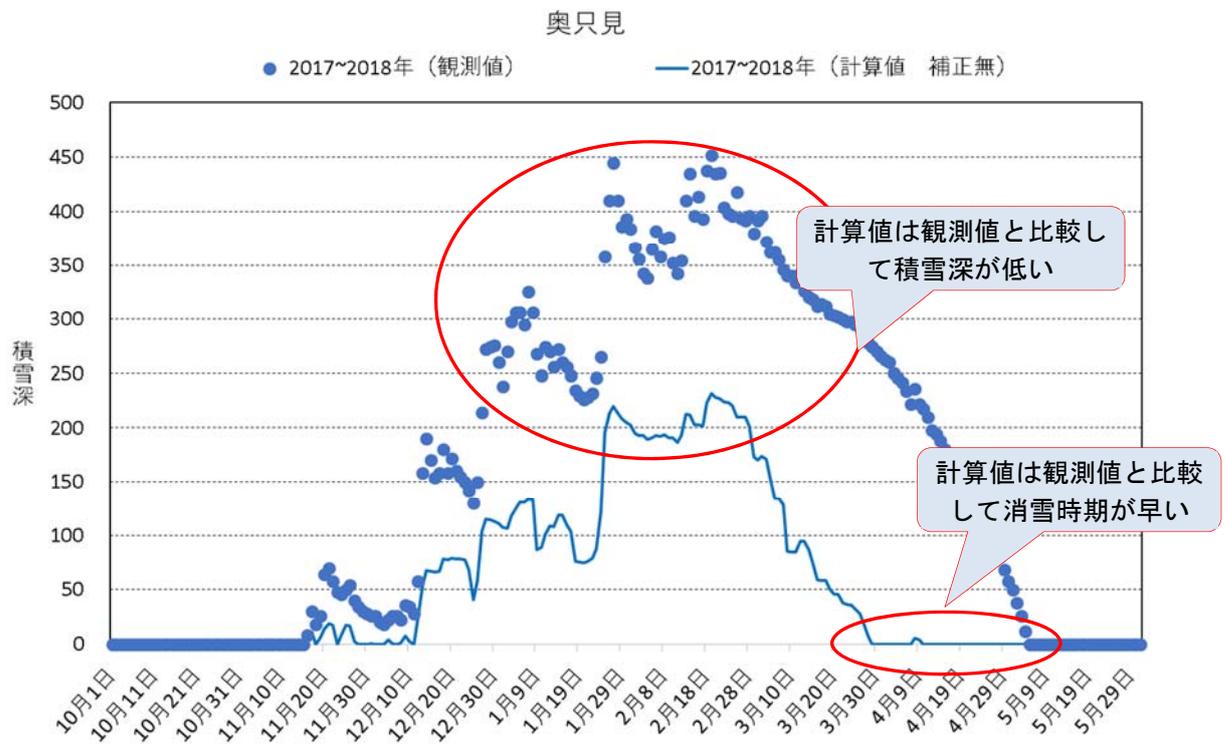


図 4. 8-10 積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較（降水量補正無）

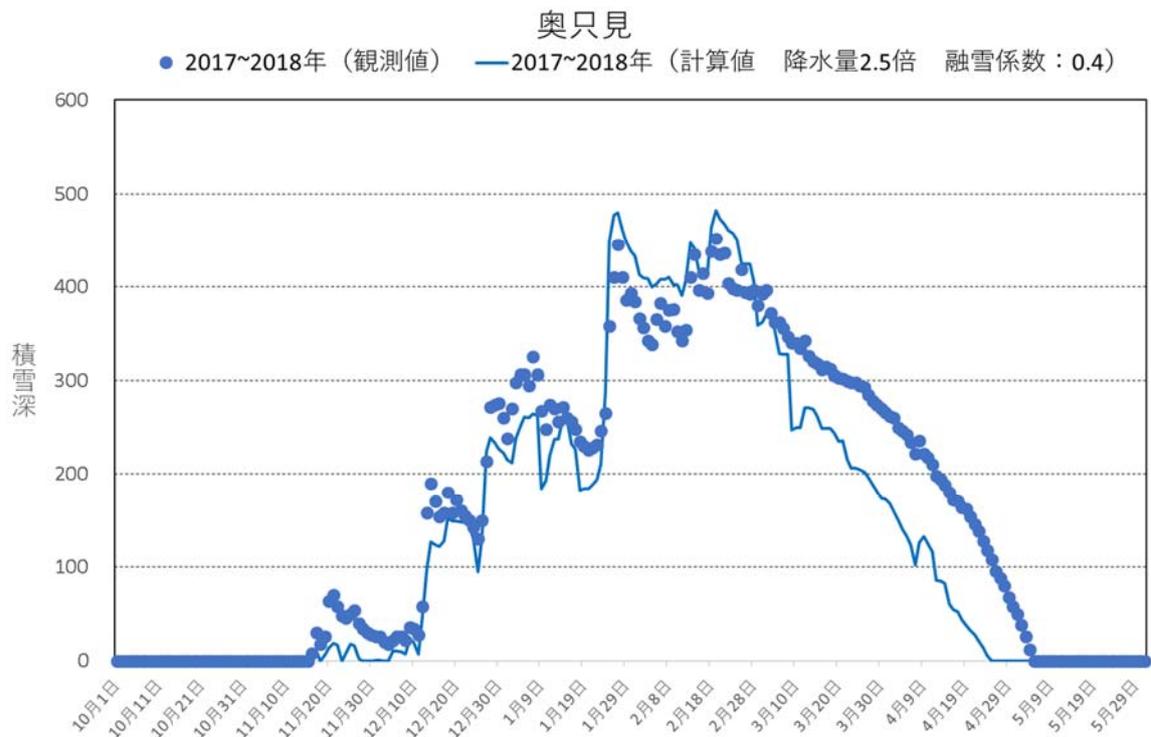


図 4. 8-11 積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較（降水量 2.5 倍補正）

## (2) 積雪・融雪モデルの検証

豊水年：2018～2019年 渇水年：2019～2020年 の2ヵ年を対象として、カスタマイズした奥只見ダム流域の積雪・融雪モデルによる計算を実施し、積雪・融雪モデルの検証を実施した。図4.8-12に桧枝岐（アメダス）地点におけるカスタマイズした積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較結果を示す。図から豊水年、渇水年共に積雪・融雪モデルによる計算値は観測値と良く合致していることが分かる。

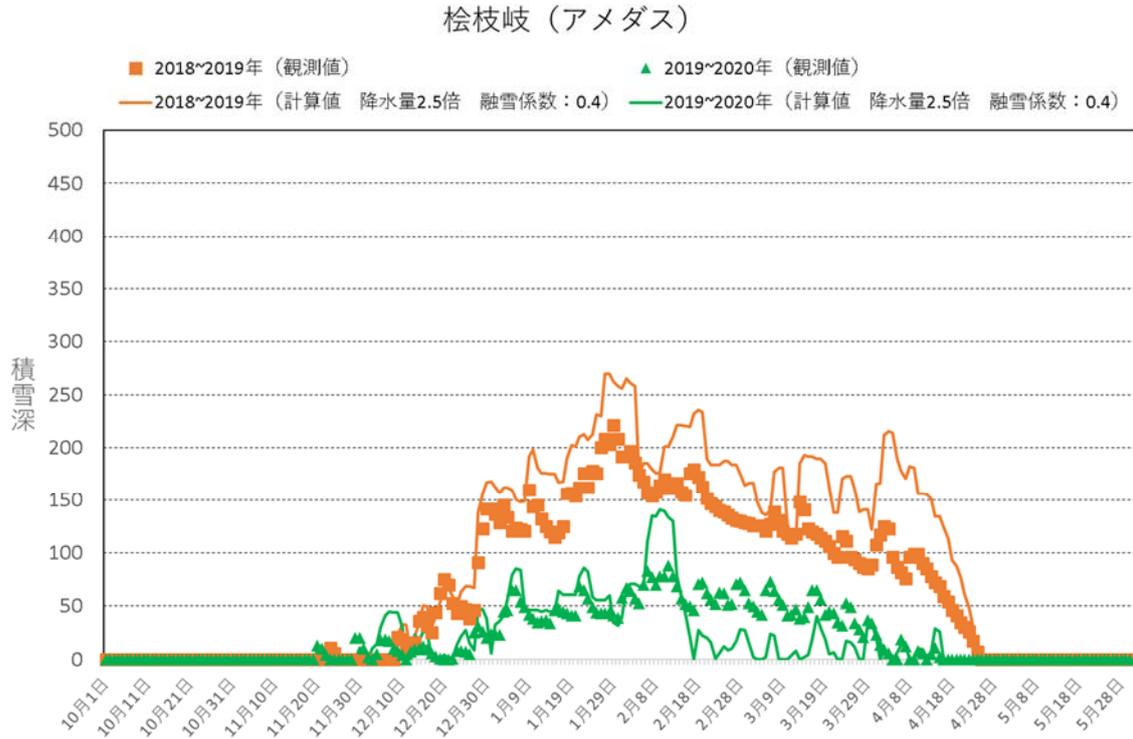


図4.8-12 カスタマイズした積雪・融雪モデルによる計算結果と実績積雪深の比較

#### 4.8.6 積雪・融雪モデル計算結果の定量的評価

積雪深が1cm以上であった日を積雪日とし、年間の積雪日数を実績積雪深、計算積雪深それぞれについて整理し、計算積雪日数／実績積雪日数により積雪日数比を算出し、計算積雪期間の定量的評価を行った。また、日々の積雪深を積算した年間総積雪深を実績積雪深、計算積雪深それぞれについて算出し、計算総積雪深／実績総積雪深により総積雪深比を算出し積雪量の定量的評価を行った。積雪日数比、積雪深比は共に1である場合に計算値が実績値と整合していることを示し、値が1より小さいと計算値が実績値に対して過小傾向にあること、値が1より大きいと計算値が実績値に対して過大傾向にあることを示す。ただし、積雪深が同じでも積雪密度により相当水量が異なるため、上記の積雪深比による積雪量の定量的評価はあくまで参考扱いとなる点に留意が必要である。

表4.8-1に黒部ダム流域における積雪・融雪モデル計算結果の定量的評価を示す。表4.8-1から黒部ダム流域ではカスタマイズによりやや過大傾向にあるものの過小傾向を回避できていることが分る。また、検証期間においても総積雪深比が1.57以上と過大傾向にあるが、積雪日数比は1.11、1.15と1に近い値を取っている。

表4.8-2に奥只見ダム流域における積雪・融雪モデル計算結果の定量的評価を示す。表4.8-2から奥只見ダム流域についてはカスタマイズ前後で計算値の過小傾向が、積雪日数比で0.72から0.89に、総積雪深比で0.35から0.85へと大幅に向上していることが分る。また、検証期間では積雪日数比が1に近い値となっていることが確認できた。

表4.8-1 黒部ダム流域における積雪・融雪モデル計算結果の定量的評価

	2017～2018年 (検討期間)		2018～2019年 (検証期間 豊水年)	2019～2020年 (検証期間 渇水年)	備考
	カスタマイズ前	カスタマイズ後	カスタマイズ後	カスタマイズ後	
積雪日数比 (計算積雪日数／ 実績積雪日数)	0.99	1.15	1.15	1.11	
総積雪深比 (計算総積雪深／ 実績総積雪深)	0.71	1.57	1.57	1.95	

表4.8-2 奥只見ダム流域における積雪・融雪モデル計算結果の定量的評価

	2017～2018年 (検討期間)		2018～2019年 (検証期間 豊水年)	2019～2020年 (検証期間 渇水年)	備考
	カスタマイズ前	カスタマイズ後	カスタマイズ後	カスタマイズ後	
積雪日数比 (計算積雪日数／ 実績積雪日数)	0.72	0.89	1.01	0.92	検討は奥只見 地点のデータ により実施。 検証は桧枝岐 (アメダス)の データにより 実施。
総積雪深比 (計算総積雪深／ 実績総積雪深)	0.35	0.85	1.36	0.87	

## 4.9 流入量予測手法の選定

### 4.9.1 流入量予測手法の検討結果の整理

4.4～4.8において、流入量予測の計算を構成する要素ごとに、実用性を持つと思われる手法の検討を行った。

その検討結果を以下に整理する。

- 予測雨量プロダクトの検討（第4.4節）

流入量予測システムの計算へのインプットとして、どの予測雨量データを用いるのが適切であるか、気象庁から配信されている予測雨量プロダクトを中心に検討した。

経費、安定性の観点から、気象庁の予測雨量プロダクトを用いることが、他機関のプロダクトに比べ適切と考えられる。

また、気象庁の予測雨量プロダクトの中では、MSM（最長51時間先まで）の実用性が高いが、51時間を超える流入量予測を行う場合にはGSMを用いる必要がある。

- 予測雨量に対するAI手法（ダウンスケーリング）の適用の検討（第4.5節）

20kmメッシュの雨量データ（GSMのメッシュサイズに相当）や、5kmメッシュの雨量データ（MSMのメッシュサイズに相当）をもとに、1kmメッシュの詳しい雨量データを推定することを検討した。

AI手法に基づくダウンスケーリングにより、黒部ダム、奥只見ダムとも5kmメッシュや20kmメッシュの雨量データをそのまま用いるより1kmメッシュにダウンスケーリングすることで精度が向上する効果が見られ、手法の有効性を確認できた。

表 4.9-1 実績1kmメッシュデータとの誤差（RSME）の比較

(a) 黒部ダム流域

	20km・1h→1km・1h 空間ダウンスケーリング	5km・1h→1km・1h 空間ダウンスケーリング	20km・3h→1km・1h 時空間ダウンスケーリング
ダウンスケーリング無し	1.86mm/h	1.01mm/h	2.71mm/h
ダウンスケーリングあり	1.83mm/h	0.81mm/h	2.20mm/h

(b) 奥只見ダム流域

	20km・1h→1km・1h 空間ダウンスケーリング	5km・1h→1km・1h 空間ダウンスケーリング	20km・3h→1km・1h 時空間ダウンスケーリング
ダウンスケーリング無し	0.96mm/h	0.64mm/h	1.49mm/h
ダウンスケーリングあり	0.86mm/h	0.58mm/h	1.16mm/h

- 流出予測手法（流出計算モデル）の検討（第 4.6 節）

流出計算モデルとして RRI モデルおよび H30NEDO モデルを用い、流出予測計算を行うことについて検討した。黒部ダム、奥只見ダムを対象に流出計算モデルのパラメータ最適化および流出計算を実施し、両モデルとも問題なく計算が行えること、および、パラメータ最適化の有効性を確認できた。

表 4.9-2 流出計算モデルによる黒部ダム流入量の計算の精度（NS 係数）の比較  
（2018/07/05 19:00 頃の出水、NS 係数は 1 に近いほど精度が良好）

	36 時間前	24 時間前	12 時間前
H30NEDO モデル （従来のパラメータ値を使用. 最適化なし.）	0.284	0.781	0.774
RRI モデル （今年度最適化で求めたパラメータ値を使用）	0.906	0.840	0.752
H30NEDO モデル （今年度最適化で求めたパラメータ値を使用）	0.977	0.942	0.902

- 流出予測手法（AI 手法）の検討（第 4.7 節）

- AI モデルによる流入量予測

雨量や気温、積雪深等のインプットデータから、ダム流入量のアウトプットデータを得る AI モデルを作成し、その有効性を確認した。

表 4.9-3 流出計算モデルと AI モデルの黒部ダム流入量の  
計算の精度（NS 係数）の比較

（2018/07/05 19:00 頃の出水、NS 係数は 1 に近いほど精度が良好）

	36 時間前	24 時間前	12 時間前
H30NEDO モデル （従来のパラメータ値を使用. 最適化なし.）	0.284	0.781	0.774
AI による流入量	0.730	0.864	0.803

- AI によるパラメータ自動設定

第 4.6 節で扱った RRI モデルおよび H30NEDO モデルを用い、計算パラメータセットを複数用意してその中から AI モデルにより洪水ごとに最適なパラメータセットを選択するという手法について検討した。

作成した AI モデルは正常に動作し、パラメータセットを AI で決定するという一連のフローを確立することができた。

しかし、パラメータセット選択の正答率はおおむね 50%程度にとどまっており、精度を向上させるためにさらなる検討が必要である。

- 積雪・融雪モデルの検討（第4.8節）

降水量データ、気温データをインプットとして1kmメッシュ毎に積雪・融雪の計算を行った。実績の積雪深データとの比較によりモデルを評価するものとし、下表の積雪日数比、総積雪深比を評価の指標とした。

流域ごとにカスタマイズを施したことにより、カスタマイズ前の過少傾向を修正できた。

表 4.9-4 黒部ダム流域における積雪・融雪モデル計算結果の定量的評価

	2017～2018年 (検討期間)		2018～2019年 (検証期間 豊水年)	2019～2020年 (検証期間 渇水年)	備考
	カスタマイズ前	カスタマイズ後	カスタマイズ後	カスタマイズ後	
積雪日数比 (計算積雪日数/ 実績積雪日数)	0.99	1.15	1.15	1.11	
総積雪深比 (計算総積雪深/ 実績総積雪深)	0.71	1.57	1.57	1.95	

表 4.9-5 奥只見ダム流域における積雪・融雪モデル計算結果の定量的評価

	2017～2018年 (検討期間)		2018～2019年 (検証期間 豊水年)	2019～2020年 (検証期間 渇水年)	備考
	カスタマイズ前	カスタマイズ後	カスタマイズ後	カスタマイズ後	
積雪日数比 (計算積雪日数/ 実績積雪日数)	0.72	0.89	1.01	0.92	検討は奥只見 地点のデータ により実施。 検証は桧枝岐 (アメダス)の データにより 実施。
総積雪深比 (計算総積雪深/ 実績総積雪深)	0.35	0.85	1.36	0.87	

## 4.9.2 検討した手法の組合せ

4.4～4.8 で検討した手法を組み合わせて、以下の3 ケース (①～③) の流入量予測システムを考えることができる。

③の AI モデルは、積雪・融雪モデルを必要としないように構築したため、下の図では、③は積雪・融雪モデルを外している。一方、①の RRI モデル、②の H3ONEDO モデルについては、融雪の計算結果をインプットとする必要があるため、フロー中に積雪・融雪モデルが入っている。

また、4.7 の AI によるパラメータ自動設定について、正答率はまだあまり高くはないものの、手法の一連のフローを機能させることができたため、①の RRI モデル、②の H3ONEDO モデルには AI によるパラメータ自動設定を入れている。

4.5 の予測雨量に対する AI 手法 (ダウンスケーリング) の適用の検討は、手法の有効性が見られたため、①～③の各ケースとも、AI による予測雨量のダウンスケーリングを入れている。

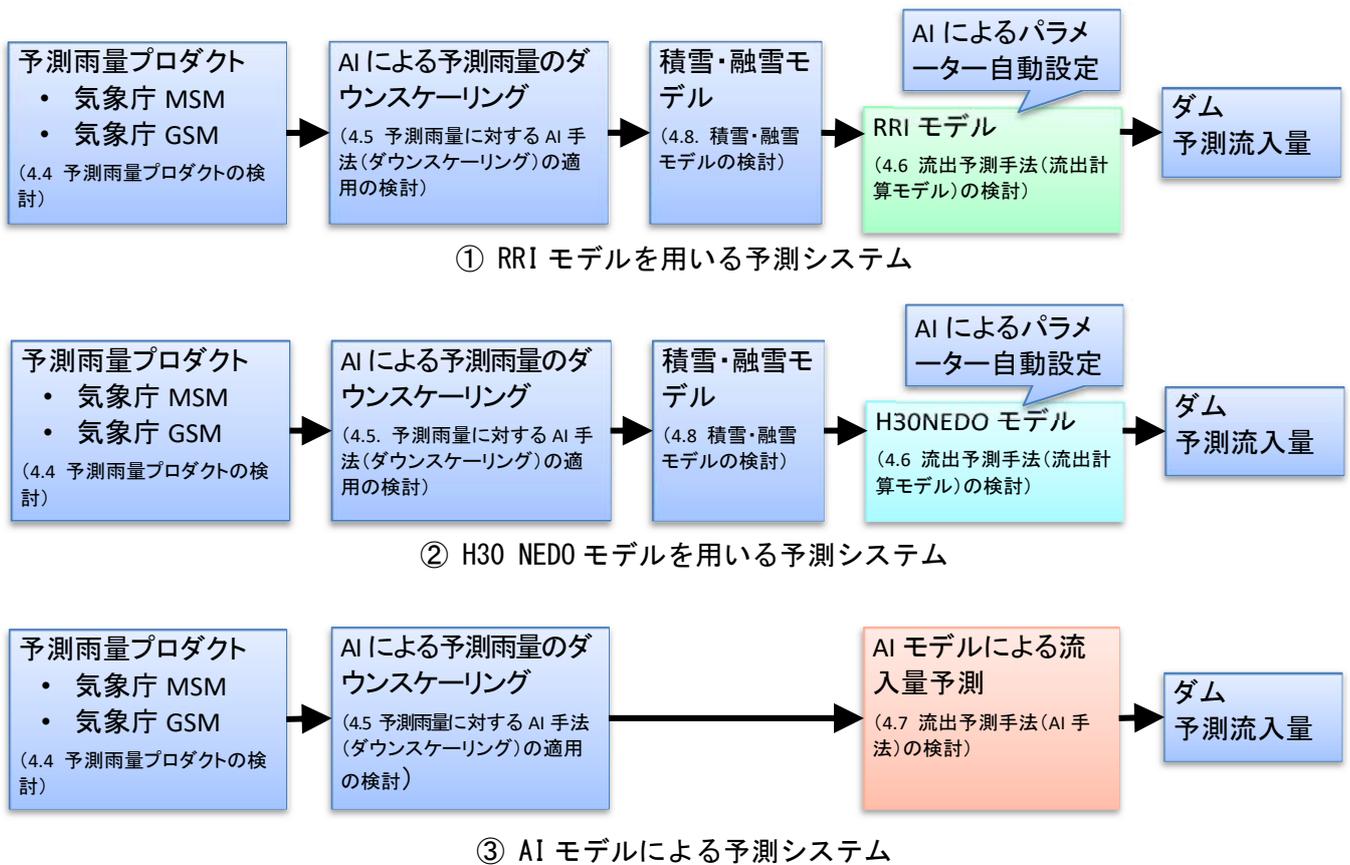


図 4.9-1 ダム流入量予測システムを構成する手法の組合せ

流入量予測システム（①～③）の比較について、黒部ダム、奥只見ダムにおける予測シミュレーションの結果から、下記の傾向が見られた。

- ①(RRI モデル)と②(H30NEDO)は、洪水によって、①の方が精度の良い場合および②の方が精度の良い場合がある。
- ③(AI 予測)は、①②に比べ精度が劣る場合が多いものの、①②と遜色ない精度となる場合もあった。(③のシミュレーションだけ未知の洪水に対する計算としたため、パラメータ同定と同じ洪水でシミュレーションした①②に比べ、③は厳しい条件下での比較となっており、単純に精度が低いとまでは言えない。)

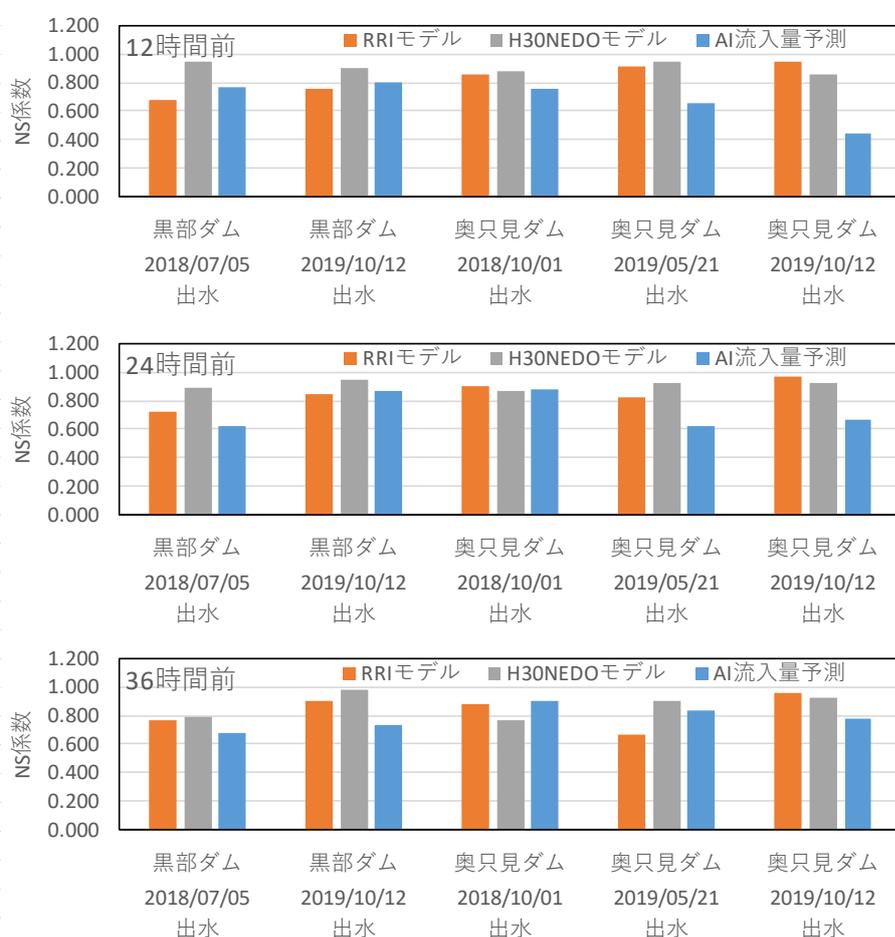


図 4.9-2 流出計算モデルと AI モデルの NS 係数の比較  
(実績降水量データを用いた予測シミュレーションの結果)  
(NS 係数は 1 に近いほど精度が良好であることを示す)

### 4.9.3 検討した手法の組合せに関する懸案事項

#### (1) 融雪量の補正について

今年度の検討では、積雪・融雪モデルのアウトプットのうち、融雪量の値に年ごとの補正係数を掛けたうえで、流出計算モデル（①RRI モデル、②H3ONEDO モデル）へのインプットとした（図 4.9-3）。

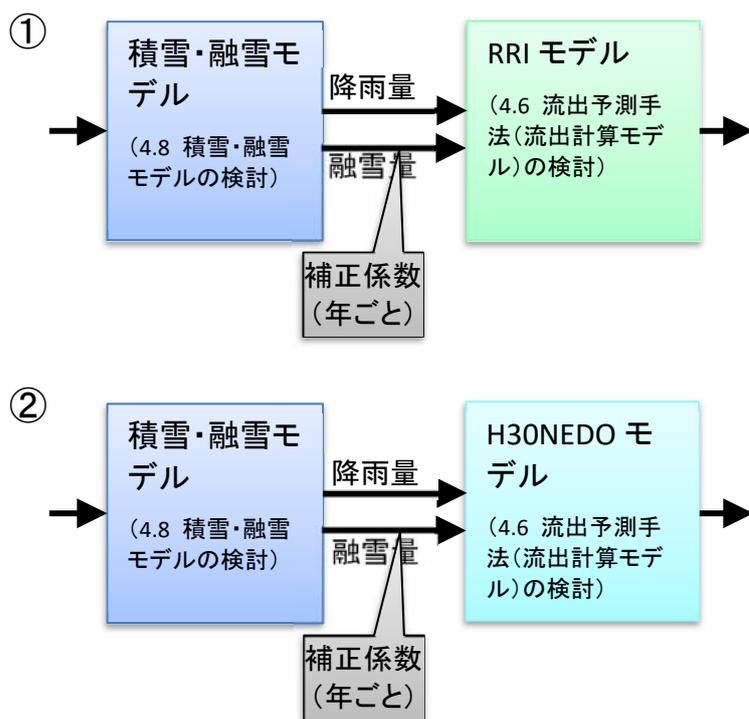


図 4.9-3 融雪量に対する補正係数

上記の措置は、積雪・融雪モデルからのアウトプット（降雨量+融雪量）の年間総量が、実績のダム流入量の年間総量に比べて小さく、水収支的に釣り合わなかったために行った。

今年度の検討においては、当該年の水収支を見たうえで、年ごとに補正係数を設定したが、実働のシステムでは事前に自動的に補正係数を設定する必要がある。このことは、実働のシステムの予測精度が今年度のシミュレーションに比べ悪くなるという要因となりうる。

補正係数の自動的な設定のしかたとしては、「前年度の水収支（ダム総流入量/流域総降水量）に基づく」という方法が考えられる。

現行の補正係数は融雪量に対して掛けているが、将来的には、「積雪・融雪モデル」の中に補正処理を組み込み、それが反映された降雨量、融雪量が算出されることが望ましい（図 4.9-4）。

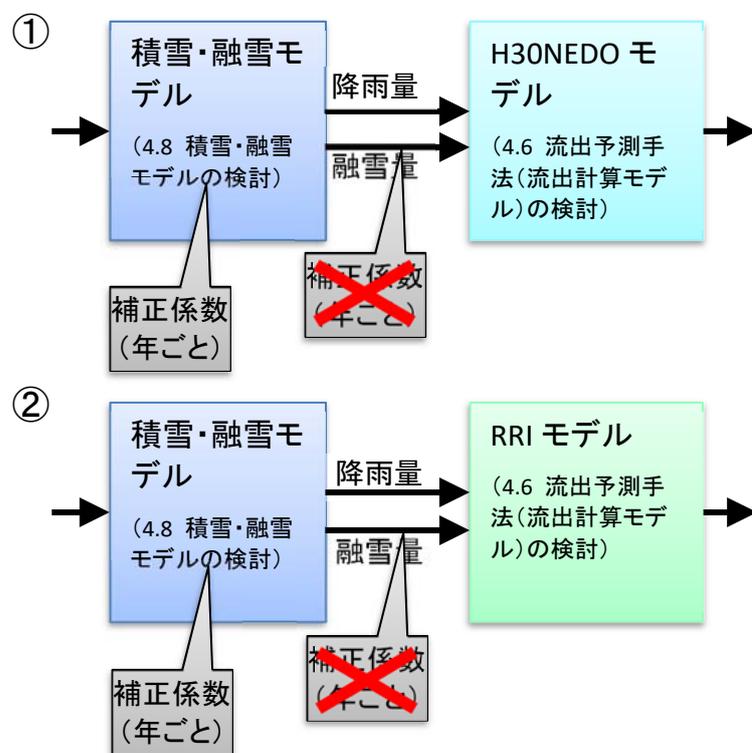


図 4.9-4 積雪・融雪モデルに対する補正係数

「積雪・融雪モデル」中の補正処理を適切に構築することができれば、今年度行った「融雪量に補正係数を掛ける」という方法に比べ、実働のシステムにおいてはより適切な予測を行うことができると考えられる。

なお、「積雪・融雪モデル」中で補正が必要となる原因は、現行のレーダー等の観測設備で山間部の降雪や降雨を十分に捉えきれていないという要因が大きく、補正の係数は流域ごとに異なると考えられる。また、観測設備の増強等が行われない限り、補正の係数の特性は変わらないと考えられる。

このことから、図 4.9-4 の補正係数処理を自動的に設定する方法は、前ページに述べたのと同様に、前年度の水収支（ダム総流入量／流域総降水量）に基づき行うのが良いと考えられる。

## 4.10 事業スキームの検討

### 4.10.1 流入量予測システムに要求される機能の検討

ダム流入量予測の事業スキームを検討するにあたり、ダム流入量予測システムはどのような機能を持ったシステムとするのか、また、その機能を実現するためどのようなシステム形態とすべきかについて検討する必要がある。

こうしたシステムの要件の検討を行うにあたり、以下ではまず、一般に公開されているシステム構築の要件定義のあり方について示した文書を参考に、「要件定義に必要となるタスクの検討」及び「既存の類似システムの調査」という観点で整理するものとした。

なお、ダム流入量予測システムの具体的な機能としてどのような機能が要望されているか把握することを目的として、当初、アンケート調査の実施を予定していた。

しかしながら、現時点においては、副次的な機能を省き、基本的な機能に特化したシステムを目指すものとし、今年度の取り組みにおいては利用者から欲しい機能の希望を聞くアンケート調査は行わないものとした。

## (1) 要件定義に必要となるタスクの検討

システムの要件定義に必要となるタスクについて、IPA（独立行政法人情報処理推進機構）が一般に公開している「ユーザーのための要件定義ガイド第2版」（以下、「要件定義ガイド」）を参考に検討を行う。

IPA は、経済産業省所管の政策実施機関として 2004 年に発足し、IT 社会の動向調査・分析・基盤構築の元、情報セキュリティ対策の実現や、IT 人材の育成、指針の提言及びガイドラインの公開などの IT 施策の一翼を担う活動を行っている。

### ● 要件定義の位置付け<sup>[1]</sup>

要件定義は、システム開発の初期に実施される工程であり、前後に企画、基本設計（外部設計）という工程がある。一般的にはこれらの工程を総合して上流工程と表現する。

企画工程では、一般的に経営上のニーズ、課題を実現、解決するための新たな業務の全体像と実現に向けたシステム構想を立案する。この工程では、システム化構想を具現化するために、運用や効果等の実現性を考慮したシステム化計画、プロジェクト計画を具現化し、ステークホルダの合意を得る。

要件定義工程では、企画工程で立案したシステム化計画をインプットに、ステークホルダのニーズ、要望、課題を分析し、利用者や他のステークホルダが必要とするサービスを提供するシステムに対する要求を定義し、ステークホルダと合意して、要件とする。

基本設計（外部設計）では、要件定義で合意した要件をシステムの技術的要件やソフトウェアの構成要素の要件に詳細化する。

図 4.10-1 に企画工程、要件定義工程、基本設計（外部設計）工程の主な目的を示す。

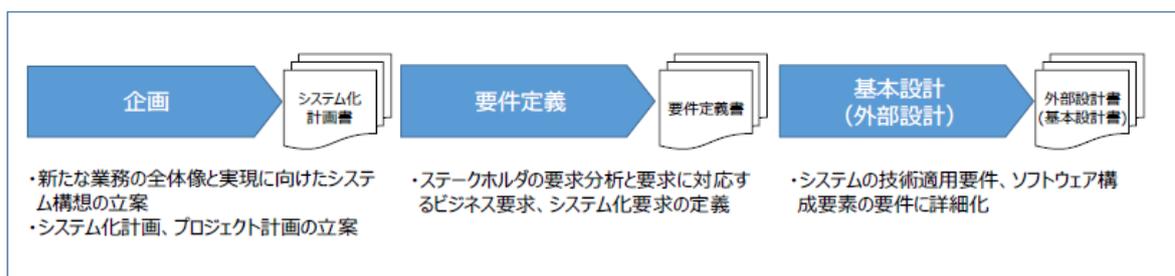


図 4.10-1 企画工程、要件定義工程、基本設計（外部設計）工程の主な目的

● 要件定義プロセス<sup>[1]</sup>

要件定義ガイドでは、要件定義工程におけるタスクを分類し、図 4.10-2 に示す要件定義タスクカテゴリマップに対応付けている。

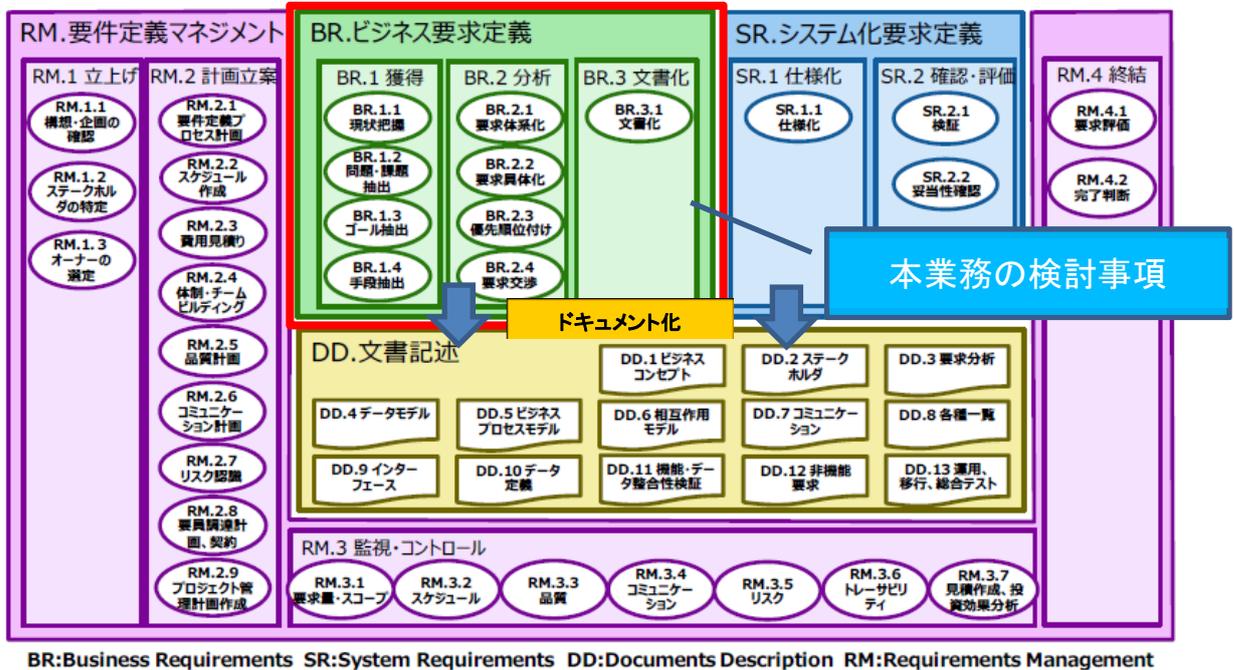


図 4.10-2 要件定義 タスクカテゴリマップ

以下に、タスクカテゴリマップの分類を説明する。

- 「BR. ビジネス要求定義」では、企画工程で整理された経営レベルの要求に基づき、利害関係者の要求事項として業務の観点から要求を獲得（BR.1 ビジネス要求の獲得）、ビジネス要求の項目間の関連の整理・優先度付け・具体化（BR.2 ビジネス要求の分析）、それらの文書化（BR.3 ビジネス要求の文書化）のステップに分類している。
- 「SR. システム化要求定義」では、「BR. ビジネス要求定義」で定義した要求を機能要件・非機能要件の観点で仕様化（SR.1 システム化要求の仕様化）、その仕様の検証や妥当性確認（SR.2 システム化要求の確認・評価）のステップに分類している。
- 「RM. 要件定義マネジメント」では、要件定義開始にあたっての確認・準備（RM.1 立上げ）、要件定義プロジェクトの計画（RM.2 計画立案）、「BR. ビジネス要求定義」や「SR. システム化要求定義」の活動中における監視・コントロール（RM.3 監視・コントロール）、要件定義工程の実行結果の評価と完了判断を行う終結作業（RM.4 終結）のステップに分類している。
- 「DD. 文書記述」では、ドキュメントの種類に分類し、各ドキュメントの記載項目を提示している。

なお、タスクカテゴリマップは、あくまでもタスクを分類したマップであり、マップに示す作業分類以外にも必要に応じて作業を追加する必要があるとされている。

タスクカテゴリマップの各項目で想定されている主な実施項目を、表 4.10-1 に示す。

この表 4.10-1 のうち、流入量予測の事業スキームについて検討する必要がある部分は、大分類「BR. ビジネス要求定義」が該当する。

表 4.10-1 カテゴリマップの各項目における主な実施事項 (1/4)

大分類 (記載箇所)	中分類 (記載箇所)	小分類 (記載箇所)	主な実施事項
BR. ビジネス要求定義	BR. 1 ビジネス要求の獲得	BR. 1.1 現状の把握	正確な分析をする上で、ビジネスアナリストが現状のシステムを理解する
		BR. 1.2 問題・課題の抽出	すべてのステークホルダが各自の現状の課題を認識するとともに、他の人や組織が抱える課題と、システム全体の課題を抽出する
		BR. 1.3 ゴールの抽出	ステークホルダの現状の課題に基づいて、人、または組織が達成すべきゴール、および維持すべきゴールをステークホルダとビジネスアナリストとが共有している状態にする
		BR. 1.4 手段の抽出	ゴールを達成する手段と合理的な根拠を明らかにする
	BR. 2 ビジネス要求の分析	BR. 2.1 要求の体系化	抽出した要求（問題・課題・ゴール・手段）を分類、整理、構造化し、要求が重複、矛盾、抜け漏れがないことを明らかにする

本業務の範囲

表 4.10-1 カテゴリマップの各項目における主な実施事項 (2/4)

大分類 (記載箇所)	中分類 (記載箇所)	小分類 (記載箇所)	主な実施事項
		BR. 2.2 要求の具体化	整理した要求を実現する手段を明確にする
		BR. 2.3 優先順位付け	限られたリソース（期間、コスト、人など）内で競合する要求をステークホルダの期待に沿う形で適切に優先順位を決定する
		BR. 2.4 要求の交渉	優先順位をつけた要求の中で、実現すべき妥当な要求をステークホルダと合意する
	BR. 3 ビジネス要求の文書化	BR. 3.1 文書化	すべての要求を正確にかつ漏れなく記述することで、経営者からエンドユーザまでのすべてのステークホルダに理解できる文書を作成する
SR. システム化要求定義	SR. 1 仕様化	SR. 1.1 仕様化	情報システムに関与するステークホルダが、実現手段の外観を理解し、導入する情報システムや製品が技術面、運用面で実現可能か、利用面で問題ないかの確認できる文書を作成する
	SR. 2 確認・評価	SR. 2.1 検証	要件が構造的、意味的な正しさを確認することで要求の内容を明確にし、要求の妥当性確認ができるようにする
		SR. 2.2 妥当性確認	ビジネス要求に照らし合わせて、ステークホルダが期待している初期の要求を満たしているかを確認する
RRM. 要求マネジメント	RM. 1 立上げ	RM. 1.1 構想・企画の確認	適切なプロジェクト計画を立案するためのプロジェクトコンテキストを理解する
		RM. 1.2 ステークホルダの特定	的確な要求分析、ならびに適切なプロジェクト遂行に向け、それらに影響を及ぼす可能性があるステークホルダを特定する
		RM. 1.3 オーナーの選定	プロジェクトの成果に対する結果責任の所在を明らかにする

今後、検討が必要

表 4.10-1 カテゴリマップの各項目における主な実施事項 (3/4)

大分類 (記載箇所)	中分類 (記載箇所)	小分類 (記載箇所)	主な実施事項
	RM. 2 計画立案	RM. 2.1 要件定義プロセス計画	プロジェクトを遂行するにあたり、プロセスの内容と管理活動を作成し、文書化し、ステークホルダ間で共通認識を合意する
		RM. 2.2 スケジュール作成	要件定義の範囲に基づき、実現可能なスケジュールを作成する。
		RM. 2.3 費用見積り	要件定義を進める上でのコストを算出する
		RM. 2.4 体制・チームビルディング	プロジェクト目標を達成するために、チームを形成、動機付けし、高い成果を上げられるチームワークを育む環境を確立する
		RM. 2.5 品質計画	プロジェクト、およびその成果物の品質要求事項、品質標準を特定し、それらを遵守するための方法を文書化、ステークホルダと合意する
		RM. 2.6 コミュニケーション計画	定義したステークホルダの特性を分析し、最良のコミュニケーションアプローチを定義することで、ステークホルダとの効果的な業務上の関係を築いて維持する
		RM. 2.7 リスク認識	プロジェクト全体のリスクをステークホルダと共通認識する
		RM. 2.8 調達計画と契約	ベンダ等との契約など、要件定義を進める上での必要リソースの調達をする
		RM. 2.9 プロジェクト管理計画の作成	進捗、課題、変更、リスクなどの管理方法を検討し、文書化とメンバへの周知を行う
	RM. 3 監視・コントロール	RM. 3.1 要求量・スコープ	スコープの状況を監視し、適切なスコープコントロールを実施する
		RM. 3.2 スケジュール	進捗状況を監視し、遅延の予防やリカバリなどのコントロールを実施する
		RM. 3.3 品質	プロジェクトパフォーマンスをモニタリングし、プロジェクトの成果物が完全かつ正確で、ステークホルダの期待を満たしていることを保証する

表 4.10-1 カテゴリマップの各項目における主な実施事項 (4/4)

大分類 (記載箇所)	中分類 (記載箇所)	小分類 (記載箇所)	主な実施事項
		RM. 3.4 コミュニケーション	プロジェクトとステークホルダとのコミュニケーションが望ましい効果を発揮しているかを明確にする
		RM. 3.5 リスク	特定したリスクの追跡、ならびに新しいリスクを特定・分析し、適切な対応が実施されていることを維持する
		RM. 3.6 トレーサビリティ	個々の要求項目の発生から実装までを記録することで要求分析、システム化要求定義にわたる一貫性を確保するため。また、要求変更発生時の影響分析をする
		RM. 3.7 見積作成・投資効果分析	「ビジネス要求 (BR)」「システム化要求 (SR)」の内容に基づき投資額の見積りと効果分析をする
	RM. 4 終結	RM. 4.1 要求評価	文書化されたビジネス要求、ならびに文書化されたシステム化要求の品質評価結果を確認し、適切に要件定義が遂行されたことを確認するため。また、未定義の要件を確認し、対応策についてステークホルダと合意する
		RM. 4.2 完了判断	要求評価結果、ならびに要求マネジメント結果をもとに、要件定義工程の完了をオーナーと合意する

● 実施事項に対応する本業務の検討事項

事業スキームとして検討すべき内容は、表 4.10-1 のうちの大分類「BR. ビジネス要求定義」が該当する。それぞれの項目についてここまでに検討できていること、これから検討すべきことを整理する。

➤ BR. 1.1 現状の把握

ダム流入量予測のシステムを新規に導入する案件であるため「現状のシステム」は存在しないため省略する。

➤ BR. 1.2 問題・課題の抽出

ダム流入量予測の高度化が実施できていないということが、解決すべき課題であると言える。

- 至近の流況、過去実績、気象予測情報、立案者の経験等に基づき判断していることのシステム化が難しい。
- 大手の事業者は各自、予測の高度化に取り組んでいる所もあるが、小規模な組織においてそれが難しい場合がある。

➤ BR. 1.3 ゴールの抽出

本業務のゴールは以下の通りである。

- ダムの流入量予測を高度化することにより、効率的な貯水池運用、ならびに発電電力量の増大に資する。

➤ BR. 1.4 手段の抽出

本業務で検討してきた「流入量予測手法の深掘り、有力な計算手法の選定」として実施してきた 4.4~4.8 で有効な手段を検討・抽出する。また、どのような利用形態にするかを 4.10.2 で検討する。

➤ BR. 2.1 要求の体系化

ダム流入量予測の手段が決定した上で、抽出した要求（問題・課題・ゴール・手段）を分類、整理、構造化して、矛盾や漏れがないことを整理する。ここまでが本業務の範囲となる。

➤ BR. 2.2 要求の具体化

今後、本業務で体系化した要求についてより具体的な実現手段を明確にする必要がある。必要に応じてダムの事業者にアンケート調査を実施したり、システム構築に必要なコストを業者に見積もってもらい、要求を達成するためのタスクを具体化する。

➤ BR. 2.3 優先順位付け

具体化したタスクに対して、限られたリソース内で競合する要求を適切に優先付けしていく。

➤ BR. 2.4 要求の交渉

優先順位付けした要求に対して、達成すべき要求のレベルを発注者、ダム事業者と合意する。

➤ BR. 3.1 文章化

本報告書も作成されるべき文章の一部であるが、具体化し優先づけした結果と合意した各要求の達成度を明確に文章化する。

● 要件定義ドキュメント<sup>[1]</sup>

本業務では対象外ではあるが、「BR. ビジネス要求定義」、「SR. システム化要求定義」を定義した後、後続する設計、実装、テスト工程につなぐために必要となる要件定義ドキュメントのうち主要な項目を表 4.10-2 に示す。

表 4.10-2 主要な要件定義ドキュメント (1/2)

大分類	中分類	ドキュメント名
DD. 文書記述	DD. 1 ビジネスコンセプト	ビジネスコンセプト確認ドキュメント (SWOT、バランススコアカード、ビジネスモデルキャンパス)
	DD. 2 ステークホルダ	ステークホルダ関連図
		ステークホルダー一覧
		リッチピクチャ
	DD. 3 要求分析	問題・ニーズ・課題一覧
		問題原因分析図
		要求構造図
		要求一覧
	DD. 4 データモデル	管理対象分類図
		概念データモデル (ER 図)
	DD. 5 ビジネスプロセスモデル	ビジネスプロセス関連図
		業務機能構成表
		ビジネスプロセスフロー (業務フロー)
		ビジネスプロセスフロー (システム化業務フロー)
		業務処理定義書
	DD. 6 相互作用モデル	状態遷移図
	DD. 7 コミュニケーション	業務用語定義
		ビフォーアフター図

表 4.10-2 主要な要件定義ドキュメント (1/2) (2/2)

大分類	中分類	ドキュメント名
	DD. 8 各種一覧	システム化業務一覧
		画面一覧
		帳票一覧
		外部インターフェース一覧
		エンティティ一覧
	DD. 9 インターフェース	システム化要求仕様
		UI 標準
		画面遷移図
		画面／帳票レイアウト
	DD. 10 データ定義	エンティティ定義書／データ項目定義書
		ドメイン定義書
		コード体系定義書／コード内容定義書
	DD. 11 機能・データ整合性検証	CRUD 図
	DD. 12 非機能要求	非機能要件書
	DD. 13 運用、移行、総合テスト	運用要件書
		全体移行計画書
		総合テスト計画書

## (2) 既存の類似システムの調査

既存のダム流入量予測システムについて、ダム管理事務所より仕様書ならびに報告書を収集し、標準的なユーザーインターフェース（UI）や必要とされる機能について検討した。

### ● 事例1：日本気象協会によるダム流入量予測システム<sup>[2]</sup>

#### ➤ 概要

分布型流出モデル<sup>(※)</sup>を用いて、ダム流入量や河川流量を予測するシステムである。急激な出水時の安全なダム操作や効率的な水力発電運用を行うには、精度の高いダム流入量予測が有効である。メッシュ単位の降雨情報を入力データとして、任意地点の流量変化を予測する分布型流出モデルの活用により、効率的なダム管理を支援する。

(※) 分布型流出モデル・・・ダム流域を100～500mの格子（メッシュ）に区切り、隣接する格子間の水の移動を逐次計算することで、ダム流域内の任意箇所で見られる流量変化を予測計算するモデル

#### ➤ ユーザーインターフェース（UI）

- ・ 降雨量・ダム流入量グラフ
- ・ 降雨分布図
- ・ 流量分布図
- ・ 実況監視図など

UI のイメージ



図 4.10-3 ダム流入量予測システムのイメージ

➤ サービス

表 4.10-3 サービス一覧

予測種別	短時間予測	短期予測
予測時間	最大 6 時間先まで	最大 72 時間先まで
予測間隔	10 分ごと	1 時間ごと
更新頻度	10 分ごと	1 時間ごと
要素 (実況・予測)	流量、雨量	

➤ 機能

- ・ 実況雨量や予測雨量のリアルタイム取り込み
- ・ ダム流入量や河川流量のリアルタイム予測
- ・ 降雨量・ダム流入量の時系列グラフや降雨量・各メッシュの流量分布図の表示

➤ 特徴

- ・ 任意地点の流量の変化を予測可能である。
- ・ 高解像度化したメッシュ単位の降雨情報を入力データとして用いることにより、局地的豪雨による出水も精度良く計算可能である。
- ・ 実況雨量や予測雨量をリアルタイムに取り込み、刻々と変わる気象状況に応じて自動的にダム流入量を予測できる。
- ・ 積雪・融雪モデルの導入、ダム放流モデルの構築が可能である。

● 事例 2：日水コンによるダム流入量予測システム<sup>[3]</sup>

➤ 概要

分布型流出モデルを用いて、ダム貯水量、流入量及び放流量などをリアルタイム（10分間隔）に予測できる。

➤ ユーザーインターフェース（UI）

- ・自動計算 グラフ表示 など

UI のイメージ

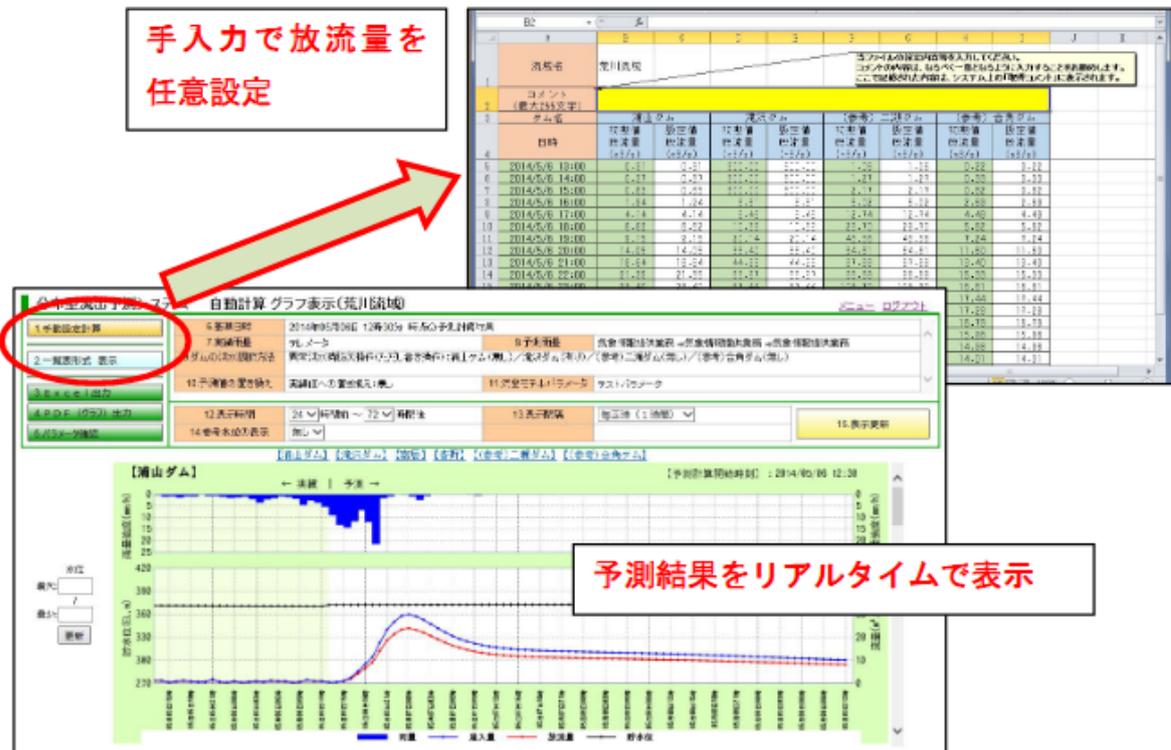


図 4.10-4 ダム流入量予測システムのイメージ

➤ サービス

表 4.10-4 サービス一覧

予測時間	最大 72 時間先まで
予測間隔	10 分ごと
更新頻度	プルダウンで変更可能 (例: 1 時間)
要素 (実況・予測)	流量、雨量

➤ 機能

・国土交通省・気象庁のレーダー雨量 (実績値) および、気象庁のメッシュ予測雨量の取り込み

- ・各ダムで定められた操作規則に基づく洪水調節計算 (ただし書き操作を含む)
- ・各ダムの洪水調節計算 (放流量) に応じた下流河川の水位・流量予測
- ・感度分析

例) 予測降雨量を 1.2 倍にする場合、また、任意に与えた場合の流出量の計算 操作規則と異なった放流量を与えた場合の貯水量や下流河川の水位・流量の計算

- ・予測結果の補正

➤ 特徴

・実績雨量 (レーダー雨量)、予測雨量 (メッシュデータ) 等のデータ取得、分布型洪水予測モデルの計算および計算結果の表示を、常時 (365 日 24 時間) 自動的に行うので、いつでもリアルタイムで計算結果の確認が可能である。

・ダム貯水量や放流量等の予測結果を見て、任意に雨量や放流量を変更した場合の予測計算が実施可能であり、このシステムでさまざまな分析が可能である。

- ・ダム・河川の特性や顧客のニーズに合った、表示レイアウトや機能を持つ。

● 事例3：中電技術コンサルタント株式会社によるダム流入量予測システム<sup>[4]</sup>

➤ 概要

洪水時のダム流入量を的確に予測することで、ダム貯水池の効率的運用および安全・適正な出水対応を可能とする。

➤ ユーザーインターフェース (UI)

UIのイメージ

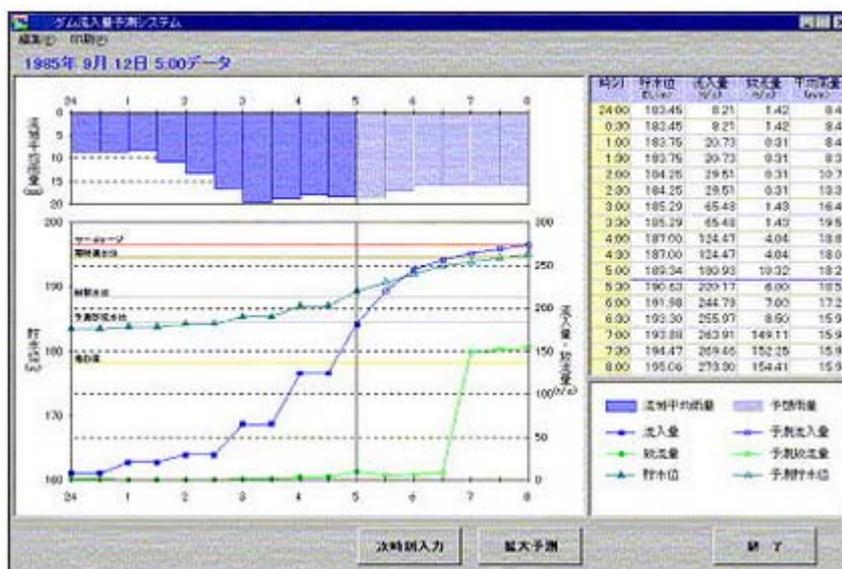


図 4.10-5 ダム流入量予測システムのイメージ

➤ 機能

- ・リアルタイム流入量予測
- ・予測雨量入力シミュレーション
- ・放流量入力シミュレーション

➤ 特徴

□ リアルタイム流入量予測

ダム貯水位と流入量、放流量、雨量をもとにリアルタイムでダム流入量を予測する。気象庁等から提供される実測・予測メッシュ雨量を採用することも可能。

【ダム流入量予測モデル】

- ①流入量予測には貯留関数法モデルを適用
- ②定数変化モデルを採用（貯留関数の定数を自動変更）
  - ・下流部に集中豪雨が発生した場合の予測の立ち遅れを回避
  - ・急激な雨量増加が発生した場合の予測の立ち遅れを回避
  - ・累加雨量がある一定量を超過した場合に流出率の変化を考慮
- ③予測値と実測値に生じる誤差を補正（フィードバックモデル機能）

□ 予測雨量入力シミュレーション

予測雨量を手入力し、今後の流入量のシミュレーション計算が可能。

□ 放流量入力シミュレーション

今後の放流量を設定し、シミュレーションをすることにより、貯水位の変化を把握することができる。

- まとめ

標準的なユーザーインターフェース (UI) や必要と考えられる機能についてまとめた。

- ユーザーインターフェース (UI)

- ・ 降雨量・ダム流入量グラフ
- ・ 降雨量分布図
- ・ ダム流入量分布図

- 機能

- ・ 実況雨量や予測雨量のリアルタイム取り込み
- ・ ダム流入量や河川流量のリアルタイム予測
- ・ 降雨量・ダム流入量の時系列グラフ
- ・ 降雨量・各メッシュの流量分布図の表示
- ・ 日総流入量の出力

- 時系列グラフ表示詳細 (実況・予測)

- 短時間予測

- ・ 予測時間：最大 6 時間先まで
- ・ 予測間隔：10 分ごと
- ・ 更新頻度：10 分ごと

- 短期予測

- ・ 予測時間：最大 72 時間先まで
- ・ 予測間隔：1 時間ごと
- ・ 更新頻度：1 時間ごと

- 1 週間予測

- ・ 予測時間：最大 1 週間先まで
- ・ 予測間隔：1 日ごと
- ・ 更新頻度：1 日ごと

## 4.10.2 システム形態の検討

システム形態の検討に対し、「システムインフラの検討」及び「システム利用形態の検討」について記載する。

以下の図 4.10-6 は検討対象である流入量予測システムのシステム構成図である。

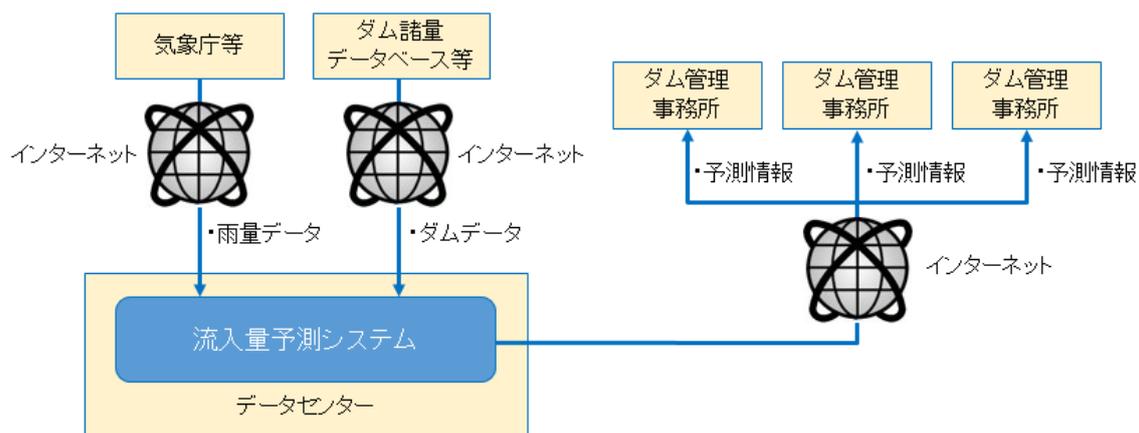


図 4.10-6 流入量予測システム構成

### (1) システムインフラの検討

昨年度調査にて、個別サーバー方式よりデータセンター方式が良いという方向性が定まった上で、データセンター方式については、データセンターにオンプレミスのサーバーを構築するか、クラウド業者のサービスを利用するか、どちらにするか「セキュリティ」「性能」「可用性」「コスト」の観点で比較検討を行った。

表 4.10-5 観点ごとのクラウドとオンプレミスの比較

	オンプレミス	クラウド
セキュリティ	<p>利用者の自社内で閉鎖的なネットワークを構築するため、セキュリティ面に強いという特徴がある。</p> <p>ファイアウォールや侵入検知システムなどのセキュリティ機器は、利用者自身で導入・運用する必要がある。OSやミドルウェアのバージョンアップやセキュリティパッチの適用も利用者自身で行う必要がある。</p> <p>オンプレミスのシステム構成については、図 4.10-7 に示す。</p>	<p>クラウドベンダーに依存するが、多くのベンダーでは、ファイアウォールのようなセキュリティ機能は、基本機能として提供されている。データベースなどのマネージドサービスでは、ミドルウェアの運用管理をベンダーが行うため、利用者がセキュリティ対策を意識する必要がない。</p> <p>クラウドのシステム構成については、図 4.10-8 に示す。</p>
性能	<p>利用者がシステムに必要なスペックに合わせて自由にサーバーのスペックを構成することができる。</p>	<p>サーバーのスペックは自動的に増減させることが可能である。</p> <p>一般のクラウドベンダー3社を例にサーバーのスペックについて、検討した内容を表 4.10-6 に示す。</p>
可用性	<p><b>【通常時】</b> ハードウェアや回線を冗長化して災害などによる障害時に切り替えるという運用を行う。</p> <p><b>【災害時】</b> 災害や障害などのトラブルによってデータが破損した場合のデータの復旧に非常に時間が掛かるだけでなく、場合によっては復旧が不可能なケースがある。</p> <p><b>【災害時の対策】</b> 「サーバー」「ストレージ」「ネットワーク」「電源」の各要素におけるオンプレミスによる冗長化の実現方法を表 4.10-7 のオンプレミスの項目に示す。</p>	<p><b>【通常時】</b> インフラ部分を管理するクラウドベンダーが内部的に冗長性を確保しているため、利用者が特別な意識しなくても、一定の可用性を確保できる。</p> <p><b>【災害時】</b> データもインターネット上に置いているため、万が一データが破損しても比較的容易に復旧することができる。</p> <p><b>【災害時の対策】</b> 「サーバー」「ストレージ」「ネットワーク」「電源」の各要素におけるクラウドによる冗長化の実現方法を表 4.10-7 のクラウドの項目に示す。</p>
コスト	<p><b>【初期費用】</b> 利用者がすべての環境を整える必要があるため、サーバーの導入やパッケージの購入など初期費用に膨大な費用が掛かる。</p> <p><b>【ランニングコスト】</b> パッケージ製品の保守費用やライセンス費用などの一定の金額が常に掛かる。</p> <p><b>【管理コスト】</b> 設備運用は多くの場合、利用者で行う必要があるため、管理コストが掛かる。保守運用を外注するケースもあるが、多くはない。</p>	<p><b>【初期費用】</b> 初期費用を安く済ますことや、初期費用がまったく掛からないケースもある。</p> <p><b>【ランニングコスト】</b> サービスを使用した分だけで費用が掛かる。</p> <p><b>【管理コスト】</b> クラウドベンダーがシステムの保守運用を行うため、ユーザー側では管理運用のコストが少なく済む。</p> <p><b>【コストの算出】</b> 一般のクラウドベンダー3社を例にコストについて、検討した内容を表 4.10-6 に示す。</p>

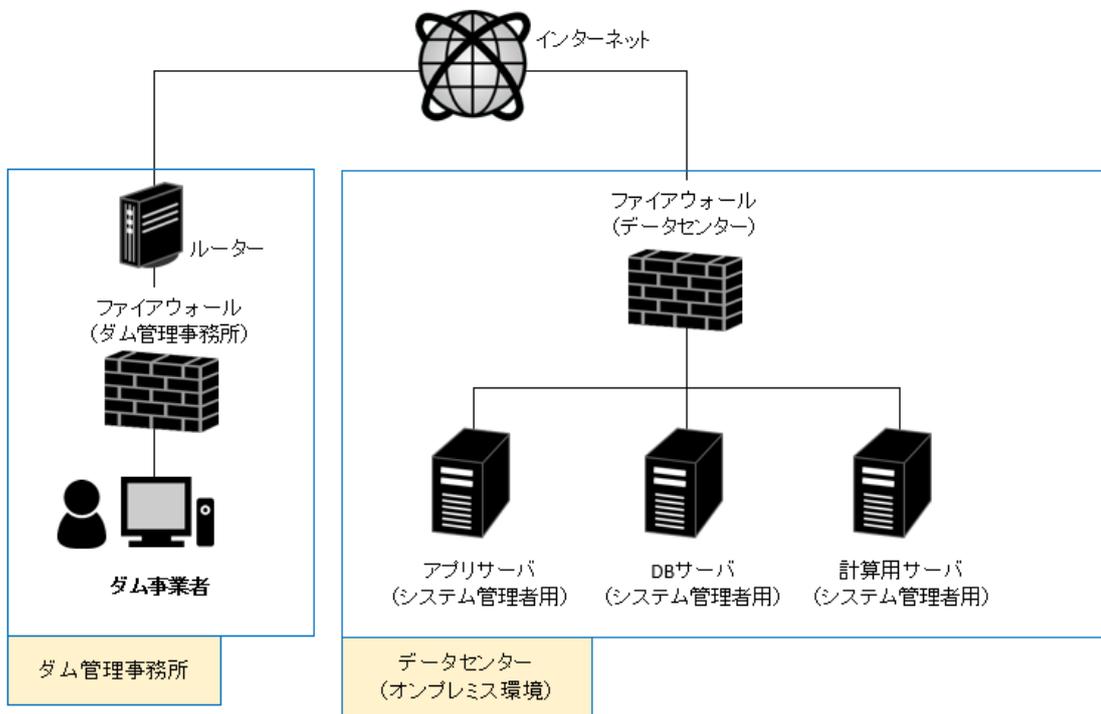


図 4.10-7 オンプレミス環境でのシステム構成例

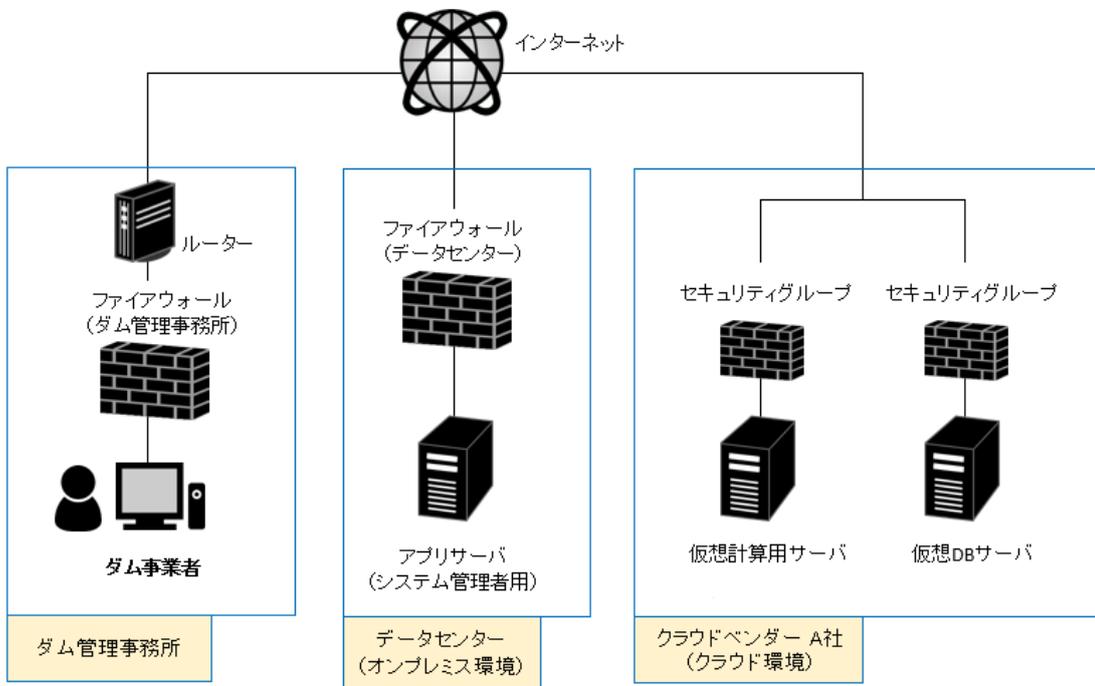


図 4.10-8 クラウド環境でのシステム構成例

以下に示す表では、クラウドベンダー3社が提供するクラウドサービスにおけるGPU、CPU、メモリ及びストレージのマシンスペックに応じた、初期費用及び利用料金の範囲を示している。

必要となるスペックは導入する事業者数や予測結果出力までの猶予時間、利用するモデルやデータの種類によっても変化するため、現時点で具体的に示すことはできない。ただし、少なくともAIによるダウンスケーリングや流入量予測を実施する場合は、GPUの搭載が必要になる。

表 4.10-6 クラウドベンダー3社によるコスト算出例 (1/3)

提供会社	A社				
OS	Linux				
タイプ	P3	P2	G4		G3
インスタンス	p3.2xlarge p3.8xlarge p3.16xlarge p3dn.24xlarge	p2.xlarge p2.8xlarge p2.16xlarge	g4dn.xlarge g4dn.2xlarge g4dn.4xlarge g4dn.8xlarge g4dn.16xlarge	g4dn.12xlarge g4dn.metal	g3s.xlarge g3.4xlarge g3.8xlarge g3.16xlarge
GPU	1~8	1~16	1	4~8	1~4
GPU タイプ	NVIDIA Tesla V100	NVIDIA K80	NVIDIA T4 Tensor Core		NVIDIA Tesla M60
GPU メモリ(GB)	16~256	61~732	16	64~128	8~32
vCPU	8~96	4~64	4~64	48~96	4~64
メモリ(GB)	61~768	61~732	16~256	192~384	30.5~448
ストレージ (GB)	EBS or 2x900 NVMe SSD	EBS	125 ~1x900	1x900 ~2x900	EBS
初期費用	不要	不要	不要	不要	不要
利用料金(JPY/月)※	321,470.10~ 3,279,316.95	118,194.30~ 1,891,108.80	54,421.50~ 450,318.75	404,788.65~ 809,577.30	79,716.00~ 484,428.00
備考	税込み	税込み	税込み		・グラフィック集約型アプリ向け ・税込み

※時間単位でUSD表記であった金額を月単位(730時間)のJPYに換算したもの(A社のみ対象)

表 4.10-6 クラウドベンダー3社によるコスト算出例 (2/3)

提供会社	M 社				
OS	Linux (CentOS または Ubuntu)				
タイプ	-			NV	
インスタンス	NC6 Promo NC12 Promo NC24 Promo NC24r Promo	NC6s v3 NC12s v3 NC24s v3 NC24rs v3	NC4as T4 v3 NC8as T4 v3 NC16as T4 v3 NC64as T4 v3	NV6 NV12 NV24	NV12s v3 NV24s v3 NV48s v3
GPU	1~4	1~4	1~4	1~4	1~4
GPU タイプ	NVIDIA K80	NVIDIA Tesla V100	NVIDIA T4	NVIDIA Tesla M60	NVIDIA Tesla M60
GPU メモリ(GB)					
vCPU	6~24	6~24	4~64	6~24	12~48
メモリ(GB)	56~224	112~448	28~448	56~224	112~448
ストレージ (GB)	340 ~1440	736 ~2948	180 ~2880	340 ~1440	736 ~2948
初期費用	不要	不要	不要	不要	不要
利用料金(JPY/月)	55,842.08~ 245,770.56	342,901.44~ 1,371,605.76	58,049.60~ 480,340.00	129,180.80~ 516,641.44	129,180.80~ 516,723.20
備考	税込み			<ul style="list-style-type: none"> <li>・強力なりモート視覚化のワークロード、グラフィック処理の多いアプリケーション向け</li> <li>・税込み</li> </ul>	

表 4.10-6 クラウドベンダー3社によるコスト算出例 (3/3)

提供会社	S社				
OS	Linux (Ubuntu 18.04 / Ubuntu 16.04 / CentOS 7)				
タイプ	スタンダード		アドバンスド		
インスタンス	-	-	-	-	-
GPU	1	2	1	2	4
GPUタイプ	NVIDIA Tesla V100 for PCI Express (32GB HBM2 メモリ搭載)				
GPUメモリ(GB)	32	64	32	64	128
vCPU	4		8		
メモリ(GB)	64		128		
ストレージ (GB)	480 SSD (RAID 1)				
初期費用	799,000.00	1,519,000.00	936,000.00	1,656,000.00	3,096,000.00
利用料金(JPY/月)	89,000.00	138,000.00	115,000.00	164,000.00	262,000.00
備考	税抜き				

- ・上記の表より、利用料金は、スペックによってかなり大きな幅があることが分かる。
- ・ただし、このうち特に利用料金の高いものは、備考欄にも示されているとおり、負荷の高いグラフィック処理等に対応する場合に利用されるものであり、本調査で対象とする流入量予測計算では、そのようなグラフィック処理が必要となる可能性は低い。
- ・具体的な計算の方法を決定し、必要となる処理速度や記憶容量を明らかにしたうえで、費用を見積もる必要がある。
- ・流入量予測のシステムは、全国を対象にすることを前提にしているが、計算内容の特徴として、水系ごとに計算を行うこととなるため、クラウドの計算処理を1つに集約して高度なスペックのものを選択することは必ずしも必要ではない可能性があり、多数に分割したり、あるいは、少数の水系から始めて順次増やすことも可能であるといったことに留意する必要がある。

表 4.10-7 要素ごとの冗長化の比較

	オンプレミス	クラウド
サーバー	<p>以下の2つの方法がある。</p> <p>(1) サーバーの予備機を用意し、障害時に切り替える。</p> <p>(2) 障害時に切り替えるのではなく、常にサーバーを複数台稼働させておき、ロードバランサーを用いて分散処理させる。</p>	<p>自動フェイルオーバーの機能を利用する。その際、当機能を提供しているクラウドベンダーを選定する必要がある。</p> <p>自動フェイルオーバーとは、仮想サーバーが動作している物理サーバーが停止した場合、自動的に他の物理サーバー上で仮想サーバーを再起動する機能である。</p>
ストレージ	<p>以下の2つの方法がある。</p> <p>(1) RAID を利用してサーバー内でストレージを冗長化する。</p> <p>(2) ストレージを格納する筐体自体を二重化する。 ソフトウェアによって筐体間でデータをミラーリングするという方法がある。</p>	<p>クラウドベンダーによっては、内部でRAIDの冗長化が行われている。その場合、利用者がサーバー内であらためてRAIDを組む必要はなく、ストレージのメンテナンス時も無停止で利用できる。</p>
ネットワーク	<p>ネットワークの経路を構成する個々の要素を冗長化し、障害時には経路を切り替える。冗長化を実現するためには以下の対策がされる。</p> <p>(1) サーバーでは複数のNICを束ねて利用する</p> <p>(2) ネットワークでは複数の転送経路を確保する</p> <p>(3) 複数のルーターで仮想的なルーターを構築する</p> <p>なお、データセンターとインターネットを接続する上位のキャリア回線も複数のシステムを用意する必要がある。</p>	<p>ネットワークはクラウドベンダーによって冗長化されているため利用者が意識する必要がない。</p>
電源	<p>サーバーの電源ユニットを冗長化し、サーバーラックに2系統の電源を引き込み、それぞれの電源ユニットに給電する構成を取る。</p> <p>上記を行うためにはラックに複数系統の電源が引き込まれていなければならないため、データセンターによっては実現できない場合もあり、注意が必要である。</p>	<p>クラウドベンダーの管理下にある部分のため、利用者が電源について意識する必要がない。</p>

- 検討結果

本システムの利用環境において、サーバーのセキュリティパッチの適用や、OSのリプレイスが発生した際に、オンプレミスの場合は利用者側で対応する必要があるが、クラウドの場合はその必要がなく、費用についてもその内容が含まれているため、ランニングコスト及び管理コストの面においてはオンプレミスに対し、掛からない。

セキュリティ面ではオンプレミスの方が対策次第で優れているが、クラウドの場合、セキュリティ機能が基本機能として提供され、災害時における可用性においても、クラウドの場合、オンプレミスと比較し復旧が容易であることを踏まえ、総合的に判断した場合、クラウドを選択することが望ましいと考えられる。

## (2) システム利用形態の検討

システムの利用形態についてはユーザーのニーズと利用環境を調査した上で、Web サービス方式、サーバー・クライアント方式、データ配信 API 方式について比較を行い、メリット・デメリットを整理して検討した。また必要な認証方式についても検討した。

### 【システムの利用形態ごとのメリット・デメリット】

#### ① Web サービス方式

##### 1. 概要

Web サービスはインターネット経由で利用できるサービスやシステムである。基本的にパソコンやスマートフォンといった Web ブラウザが搭載されている機器で利用することができ、Windows、Linux、もしくは Android、iOS などの OS を問わない。Web サービスはサーバー上にデータが保存されており、インターネット環境さえあれば、どこからでも Web サイトにアクセスし、サービスを利用できる。サーバーのキャパシティの範囲内であれば、不特定多数のユーザーによる同時アクセスが可能である。

##### 2. メリット

- ▶ アプリケーションをパソコンにインストールする必要がない  
自分で用意したサーバー（レンタルサーバーやクラウドサーバー等）に設置しておけば、ユーザーはパソコンにインストールされているブラウザソフトを使ってアクセスするだけで Web サービスを利用することができる。
  
- ▶ サーバーで一元管理され更新が容易である  
Web サービスのプログラムはサーバーで一元管理されるので、サービスのバージョンアップやバグの修正をしやすい。  
また、サーバー・クライアント方式の場合は、ユーザーが自身のパソコンにインストール（アップデート）し直す必要があるが、Web サービスの場合は、サーバー上のプログラムを更新するだけで機能の修正・更新が可能のため、メンテナンス性が高い。
  
- ▶ 複数の異なる仕様の機種や OS での対応が容易である  
サーバー・クライアント方式の場合、アプリケーションを Windows 用/Linux 用とそれぞれ個別に作成する必要があるが、Web サービスはブラウザが OS の違いを解決するため、全てのプラットフォームで使用することができる。

### 3. デメリット

- 使用するブラウザ毎の制約がある  
あるブラウザでは正しく表示されていても、他のブラウザではうまく表示されない場合がある。  
回避策としては、Web サービスの推奨ブラウザを提示することが挙げられる。  
推奨ブラウザに絞って開発を行えば、問題の回避は可能と考えられる。

## ② サーバー・クライアント方式

### 1. 概要

システムを利用する前にアプリケーションをパソコンにインストールする必要がある。

クライアント側でクライアント特有のデータやプログラムを保持しているため、クライアント端末上でプログラムが処理される。

### 2. メリット

- サーバーとの通信量を少なくできる  
クライアント側の端末にアプリケーションをインストールすることでサーバーとの通信量を少なくできる。そのため、通信が遅くなりやすく、細かい仕様のプログラムでも対応できる。

### 3. デメリット

- メンテナンス性が低い  
システム上のバグ修正や機能追加の場合には、利用開始時と同じようにパソコンにアプリケーションをインストールする手間が発生する。
- 保守・管理が困難  
インストールされているプログラムのバージョン管理をする必要がある。また、不具合が発生すると、そのパソコンのログを取得して調査をする必要がある。
- セキュリティ対策のコストが高い  
すべてのパソコンにセキュリティ対策が必要となる。  
そのため、全体のセキュリティ対策を行うには手間も費用も掛かる。

### ③ データ配信 API 方式

#### 1. 概要

インターネットの URL を介して必要なデータを必要なタイミングでデータ配信により、取得することができる。Web サービス方式では Web サーバーがサービス提供を担うのに対し、データ配信 API 方式では機能ごとに分かれた複数のサーバーが連携してサービスの提供を実現し、その連携においては既存の他システムが提供する機能（API）を活用することも多く行われる。

#### 2. メリット

##### ➤ 開発コストを削減できる

データを取得するためのプログラムを自力で一から開発する必要がない。そのため、システムやプログラムの開発コストを抑えながら、効率化を図ることができる。

##### ➤ web サービスと共存できる

既に予測結果を表示する web サービスがある場合でも、データ配信により取得したデータを個別に Excel 帳票で表示したいというニーズがある場合、それ自体に開発のコストが掛からないため、共存して利用することができる。

#### 3. デメリット

##### ➤ 仕様変更やサービスの提供の停止の可能性がある

API を提供しているサービスでデータの仕様を変更した場合や、提供を停止した場合には表示システムに影響が出る。

##### ➤ サーバーに障害が発生すると正確にデータを取得できない可能性がある

複数のサーバーが連携してサービスの提供を行う方式であるため、その中の一部のサーバーにだけ何らかの障害が発生した場合でも、データを正確に取得することができなくなる可能性がある。

これに比べ、Web サービス方式や、サーバー・クライアント方式はシステムの範囲が限られるため、システム障害に対する対策を打ちやすい。

表 4.10-8 各方式におけるメリット・デメリットのまとめ

	メリット	デメリット
Web サービス方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アプリケーションをパソコンにインストールする必要がない</li> <li>・サーバーで一元管理、及びすぐに更新できる</li> <li>・複数の異なる仕様の機種やOSでの対応が容易である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用するブラウザ毎の制約がある</li> </ul>
サーバー・クライアント方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サーバーとの通信量を少なくできる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・メンテナンス性が低い</li> <li>・保守・管理が困難</li> <li>・セキュリティ対策のコストが高い</li> </ul>
データ配信API方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・開発コストを削減できる</li> <li>・webサービスと共存できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・仕様変更やサービスの提供の停止の可能性がある</li> <li>・サーバーに障害が発生すると正確にデータを取得できない可能性がある</li> </ul>

## 【必要な認証方式】

認証方式について、電力制御システムセキュリティガイドライン<sup>[5]</sup>の「第5-6条 アクセス制御」（本文から引用）に示す「2. 認証」の内容に従い、検討した。

### 第5-6条 アクセス制御

#### （推奨的事項）

##### 1. 接続制御

予め許可された機器以外の接続を許可しない仕組みを講じることが望ましい。

##### 2. 認証

通信相手が予め許可された機器であることを確認する仕組みを講じることが望ましい。

##### 3. ネットワーク分割

電子制御用ネットワーク内において、利用目的等に応じてネットワークを分割することが望ましい。

## ● 認証方式

### ➤ 公開鍵認証方式

## ● 認証方法

PCなどの情報機器から、システムやネットワークにアクセスする際に、その機器の正当性を確認するために、機器固有の識別番号であるMACアドレスを用いる機器認証方式があるが、ネットワーク管理用など特殊な用途向けにアドレスの変更が可能な装置も存在するため、悪意を持ってなりすましなどを行おうとする攻撃者には無力であり、セキュリティ対策としての意味はほとんどない。

よって、機器固有の識別ではないが、公開鍵認証方式による認証を利用することが望ましいと考えられる。公開鍵認証方式を利用すれば、図4.10-9に示すように、秘密鍵を所有している機器のみシステムにアクセスでき、パスワードが正しくてもログインできないようにできる。さらに接続元のIPアドレスを固定化し、許可されたIPアドレスのみ接続するといった運用ルールと組み合わせることで不特定多数の機器からはアクセスできないように制御することができる。

※秘密鍵と公開鍵は物理的な鍵ではなく、PC上で作成されるデータファイルである。

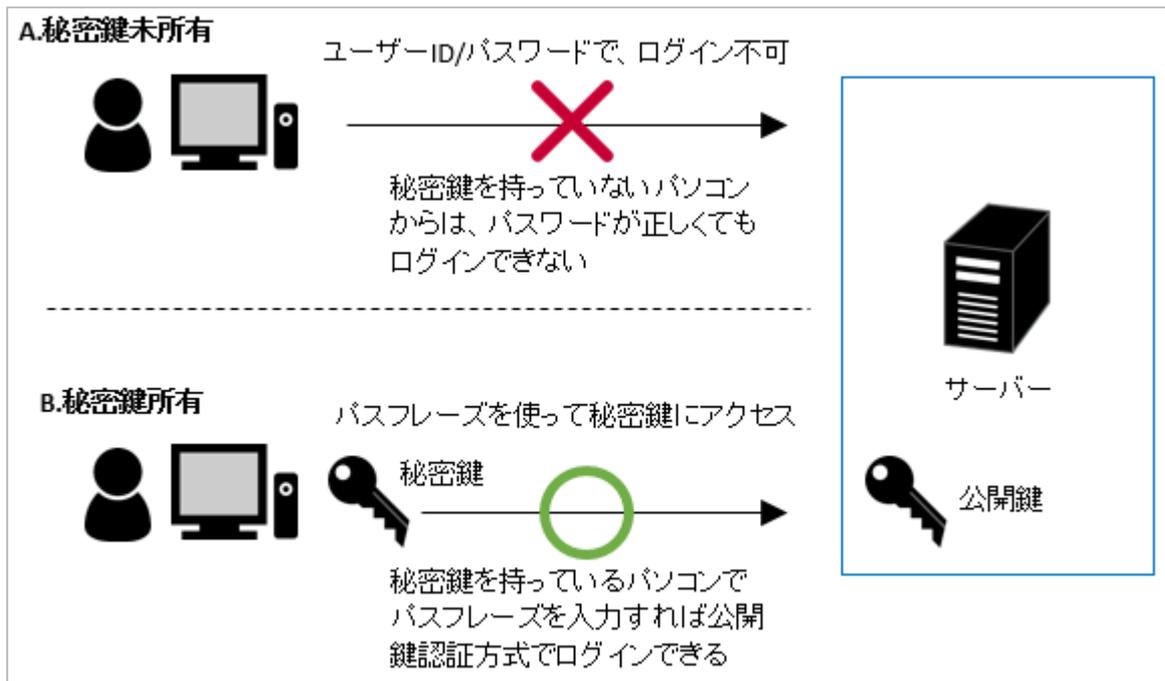


図 4.10-9 公開鍵認証方式

### 4.10.3 事業スキームの検討

事業スキームの検討に対し、「計算モデル構築方法の検討」、「事業化に向けたサービス形態の検討」及び「事業化に向けた工程の検討」について記載する。

#### (1) 計算モデル構築方法の検討

流入量の予測計算を行うためには予測モデルの構築作業が必要になるが、事業化にあたっては全国のダムモデルの構築とパラメータの最適化を実施する必要がある。モデルの構築に必要な情報を整理し、モデルの構築方法と最適化の手法を確立した標準的なコストと工程について検討した。

モデルの構築に必要な情報及び検討した内容を表 4.10-9 に示す。

表 4.10-9 モデルの構築方法と最適化の手法を確立した標準的なコストと工程

	モデル構築に必要となる情報	モデルの構築方法	最適化の手法を確立した標準的なコストと工程
AIダウン スケージング	①メッシュ降水量データ (解析雨量) ②メッシュ地形データ (国土数値情報の標高・傾斜度 3 次メッシュ) ③予報プロダクト (予報に対してダウンスケージングを行う場合)	①ダム流域を中心としたダウンスケージング範囲の決定 ②メッシュ降雨データの整理 ③メッシュ地形データの整理 ④モデルの構築 ⑤②,③のデータを入力として、④のモデルによる学習と検証を繰り返す。 ⑤で十分な成果が得られない場合は、データやモデルを組み替えるなどして②～④のいずれかからやり直す。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1 流域のシステム導入に要するコスト：1 億円程度 (※1)</li> <li>・1 流域のシステム運用コスト：0.1 億/年程度 (※1)</li> <li>・1 流域のシステム導入までにかかる実作業期間：1 ～2 ヶ月程度 (※2)</li> </ul>
積雪・融雪 モデル	①過去の積雪深 (可能であれば積雪相当水量) 実績値 ②地形データ ③メッシュ降水量データ ④メッシュ気温データ ※①はユーザーから提供いただく必要有。	①積雪モデル計算に用いる入力データの整理 (メッシュ毎の降水量、気温) ②地形データを用いた対象地域のモデル構築 (標準モデル) ③①のデータを入力として、②の標準モデルによる積雪・融雪計算を実行 ④③の計算結果 (積雪深) を実績積雪深と比較し、検証・評価 ⑤④の評価結果を踏まえて②のモデルを修正 ②～⑤を繰り返す。	※1: 導入コストは、本調査や平成 30 年度 NEDO 研究における作業量に今後実働システムを構築するのに必要な作業を加味し想定した。運用開始後初期の段階での状況を想定しているが、対象流域の増加に伴い定型的な作業へと大幅に整理することができればコストは下げられる可能性がある。運用コストはここでは導入コストの 1 割とした。
流出計算 モデル (RRIモデル、 H30 NEDO モデル)	①地形データ ②メッシュ降水量データ ③融雪モデル計算結果 ④ダム流入量	①地形データの作成 (地盤高、河道設定) ②ダム流入量データと融雪モデル計算結果を用いて RRI モデルのパラメータセットを SCE-UA 法により最適化 (1 週間程度の各出水 (20~30 出水程度選ぶ) に対する最適化と通年計算に対する最適化の 2 通りを行う) ③雨量データと最適化したパラメータセットの関係を機械学習により学習させ、予測雨量に応じてパラメータセットを予測するシステムの構築	※2: 実作業期間については、左記の各モデル構築を並行して行うことを想定したが、実運用においてはデータの授受の設定やユーザー登録の管理等、必要な処理があると考えられ、不確定要素として挙げられる。
AI流入量 予測	①過去の流域平均雨量 (※1) ②ダム流入量 ③気温 (※2) ④積雪深 (※2) ※1: メッシュ雨量から流域平均雨量を算出する必要がある場合は、流域の GIS 情報が必要 ※2: 融雪発生地域の場合に必要	①流域ごとに必要なデータを収集、整形 ②学習と検証の繰り返し (数回) ③②で十分な成果が得られない場合は、モデルを組み替える。入力情報を見直すなどして、①からやり直す。	

## (2) 事業化に向けたサービス形態の検討

既存のデータ配信事業のサービス形態を調査し、どういったサービス形態が一般的に存在するかをリストアップし、それぞれのサービス形態のメリット・デメリットを整理して、本プロジェクトに適したサービス形態を検討した。

### ● データ配信事業のサービス形態

#### ➤ 概要

データ配信事業のサービスとしては、様々な企業でサービスを提供している気象データ配信サービスが一般的である。

気象データ配信サービスは、気象庁発表の気象データを受信し、必要なデータを分析の上、配信するサービスである。

例えば、気象データ自体は気象庁が公開しているため、誰でもアクセスできるが、データの仕様や公開形式が複雑で、気軽な利用は困難である。

気象データ配信システムでは、対象エリアや、よりピンポイントの場所、時間帯など、必要に応じた部分のみを対象システムに受信し、取り込み活用することもできる。

#### ➤ サービス形態（配信方法）

気象データ配信サービスにおける一般的なサービス形態（データの配信方法）をリストアップした。

##### □ API 方式

API 方式の場合は、リクエストされた地点（緯度経度）のデータを瞬時に JSON 形式で提供することができる。

##### □ HTTP 方式（GET 方式）

利用者がインターネット上の提供サービス側の HTTP サーバーからデータファイルをダウンロードする方式である。提供サービス側の FTP サーバーから取得する FTP 方式（GET 方式）もある。

##### □ FTP 方式（PUT 方式）

インターネット上の配信サーバーから利用者の FTP サーバーにデータファイルを配信する方式である。通信の安定性、即時性を必要とする場合のために専用線を用いたサービス形態もある。

- サービス形態毎のメリット・デメリット

表 4.10-10 サービス形態毎のメリット・デメリット

	メリット	デメリット
API 方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・システム開発で使用しやすい JSON 及び JSONP 形式で取得することができる。</li> <li>・特定地点のデータ取得に向いている。</li> <li>・アクセス数が少ない場合は、無料から低料金でデータを取得できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アクセス数に応じた従量課金制を採用する提供会社が多い。</li> <li>・従量課金制の場合、利用者が多くなるほど、費用が増大する。</li> </ul>
HTTP 方式 (GET 方式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・利用者が必要とするタイミングでデータを取得できる。</li> <li>・月額固定料金であるため、費用を見積もりやすい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・データ取得のためのシステムの構築が必要となる。</li> </ul>
FTP 方式 (PUT 方式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各データの配信周期でデータ更新され、ほぼリアルタイムでデータを受信できる。</li> <li>・月額固定料金であるため、費用を見積もりやすい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・利用環境に FTP サーバーを別途用意する必要があるため、その分のコストが掛かる。</li> </ul>

- 検討結果

API 方式について、システム開発で利用しやすい JSON 及び JSONP 形式でデータを取得できるということは大きなメリットであり、ダムのような特定の観測地点を対象とした場合においても、本プロジェクトにおいて適していると考えられる。

一般的に公開されるシステムの場合、データを取得するタイミング（アクセス数）は多くなる可能性が高いため、費用も掛かることが懸念されるが、今回のシステムにおいては、利用者がダム事業者であり、アクセス過多になる可能性も低いと考えられる。なお、HTTP 方式と FTP 方式の費用については、月額固定料金であるため、費用の増大の懸念材料はない。

HTTP 方式について、利用者が必要とするタイミングでデータ取得できる。取得のためのシステムの構築が必要となるが、元々それを踏まえたシステム構築が想定されているため、問題はない。

FTP 方式について、データをほぼリアルタイムで取得することができるが、そのための FTP サーバーを別途用意する必要があるため、その分のコストが掛かる。

以上を踏まえ、本プロジェクトに適したサービス形態について総合的に検討した結果、API 方式、HTTP 方式の両方が適していると考えられるが、どちらかを選ぶならば、システム開発で利用しやすいデータ形式で受信できる API 方式が望ましいと考えられる。

### (3) 事業化に向けた工程の検討

4.10.1(1)の「要件定義に必要となるタスクの検討」で示した本業務以降に検討が必要となる「要求の具体化」「優先順位付け」「要求の交渉」「文章化」などの項目の検討結果を整理し、システム要件を確定した上で、システムの構築と事業化までに必要な工程を作成した。

作成した工程を図 4.10-10 にその関係者を表 4.10-11 に示す。

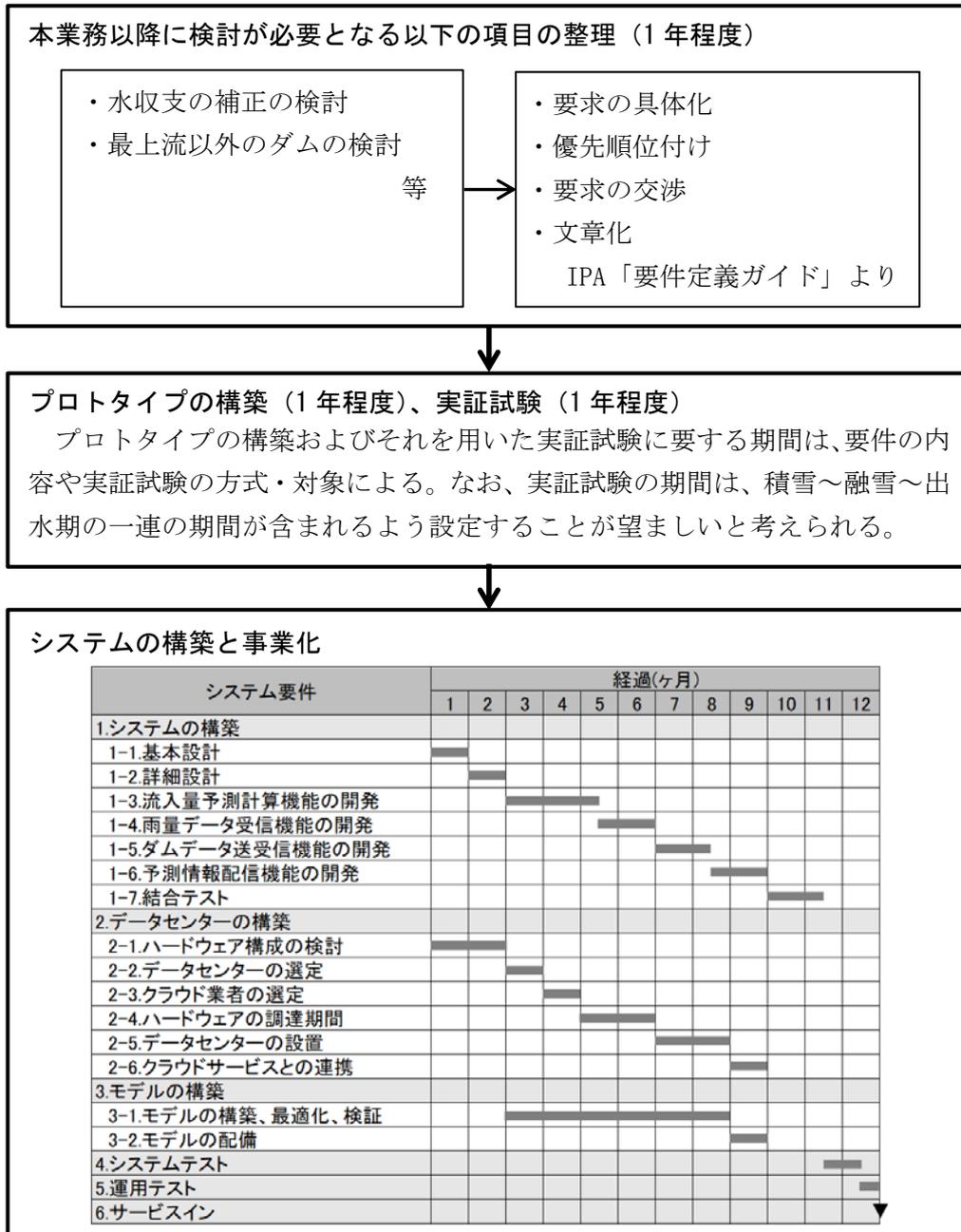


図 4.10-10 今後の事業化までの流れ

表 4.10-11 システムの構築と事業化の関係者

関係者	担当する分担業務の内容	備考
業務発注者	※業務全体の管理・統括	
ダム事業者	5.運用テスト 6.サービスイン	
業務受注者	1.システムの構築 2.データセンターの構築 3.モデルの構築 4.システムテスト	

## **参考文献**

- [1] IPA, ユーザのための要件定義ガイド 第2版 要件定義を成功に導く 128 の勘どころ, IPA, 2019 : <https://www.ipa.go.jp/ikc/reports/20190912.html>
  
- [2] 日本気象協会, ダム流入量予測システム, <https://www.jwa.or.jp/service/weather-risk-management/flood-hazard-04/>
  
- [3] 株式会社日水コン, ダム流入量予測システム, <http://www.nissuicon.co.jp/wp/wp-content/themes/wp/pdf/kasen/kouzui-yosoku.pdf>
  
- [4] 中電技術コンサルタント株式会社, ダム流入量予測システム, <https://www.cecnet.co.jp/service/jouhou-dam.html>
  
- [5] 日本電気技術規格委員会, 電力制御システムセキュリティガイドライン 電子技術指針情報編, 2019