

流域治水計画検討のための降雨流出氾濫(RRI)モデルと非構造格子二次元不定流(UNST-2D)モデルの連成解析法の検討

STRATEGY PROPOSAL OF COUPLED ANALYSIS METHOD OF RAINFALL-RUNOFF-INUDATION (RRI) MODEL AND UNSTRUCTUAL GRID 2D UNSTEADY FLOW (UNST-2D) MODEL FOR INTEGRATED FLOOD MANAGEMENT PLANNING

○山村 孝輝¹・西野 駿治²・山田 真史³・佐山 敬洋⁴・川池 健司⁵・瀧 健太郎⁶

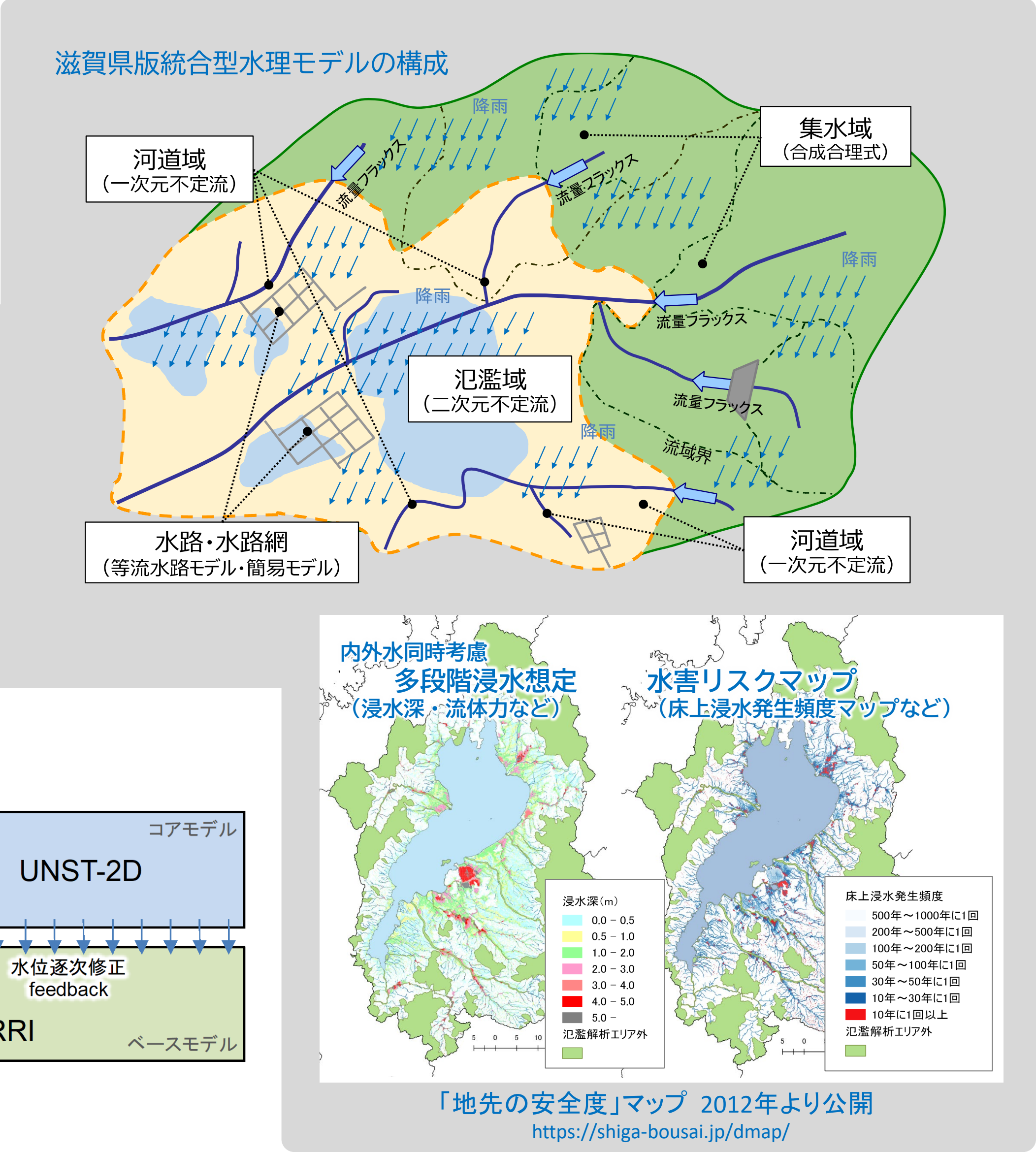
Koki YAMAMURA, Shunji NISHINO, Masafumi YAMADA, Takahiro SAYAMA, Kenji KAWAIKE, Kentaro TAKI

背景・論点

近年の気候変動により極端豪雨や大規模洪水が頻発し、2022年の流域治水関連法制定を受けて全国で流域治水プロジェクトが本格化している。流域治水では河川管理者だけでなく様々な主体が関わるため、

「流域全体の水収支把握」と「地先レベルの氾濫現象」

を同時に評価できる解析モデルが求められている。



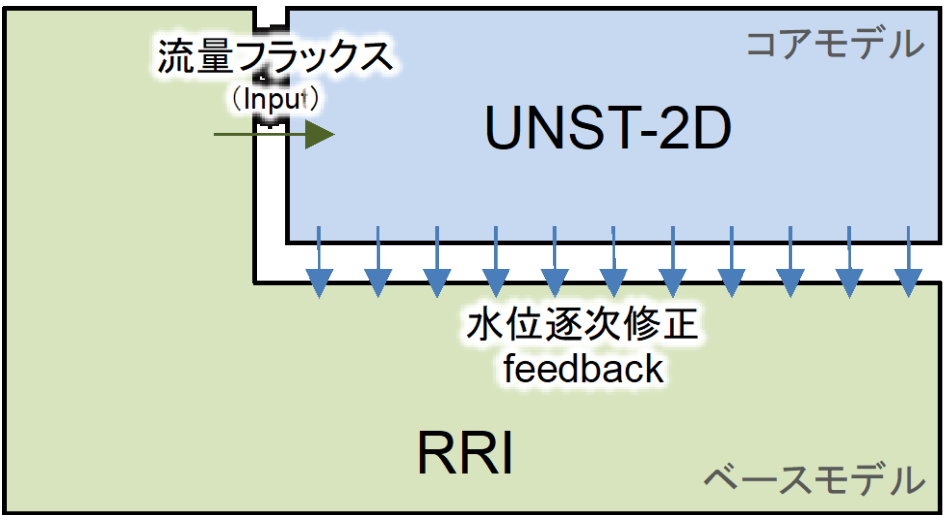
流域治水検討用モデルの展開

- 合成合理式（集水域）・一次元河道・二次元氾濫（氾濫域）を結合した滋賀県版の統合型水理モデル¹⁾
- 計算結果を多段階で整理し、「地先の安全度」マップを作成²⁾
- 流出、氾濫、統合型など水理モデルの高度化が進んでいる³⁾

「RRIモデル」×「UNST-2Dモデル」で
滋賀県版統合型水理モデルの高度化を意識

研究の目的

- 佐山らの（洪水流計算を拡散波近似法で扱う）RRIモデル⁴⁾と、川池らの（移流項を考慮した）非構造格子二次元不定流モデル⁵⁾（UNST-2D）
- 一方向ではなく**双方向のやり取りを伴う連成計算**が可能な解析法を提案
- 流域治水計画検討用モデルとしての有用性を確認
- RRIをベース**（流域全体）、**UNST-2Dをコア**（河道域・氾濫域）にして、双方向に流量・水位の受け渡し可能な構成



各モデルの特徴

Base model

降雨流出氾濫（RRI）モデル⁴⁾
- ベースモデル

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f$$

運動方程式

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w}$$
$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w}$$

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right]$$
$$q_y = -\frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial y} \right]$$

水位(地盤高+水深)から水面勾配を求め流量を計算

拡散波近似により高速で計算
広域での概要を把握するための解析向き

時間経過

拡散波の伝わり方



Point - 水位駆動型

水位差が与えられると計算が駆動
(流速・流量フラックスを計算)

h : 水深
 u, v : x, y 方向の流速
 q_x, q_y : x, y 方向の流量
 r : 降雨強度
 f : 鉛直浸透強度

Core model

非構造格子二次元不定流（UNST-2D）モデル⁵⁾
- コアモデル

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f$$

運動方程式

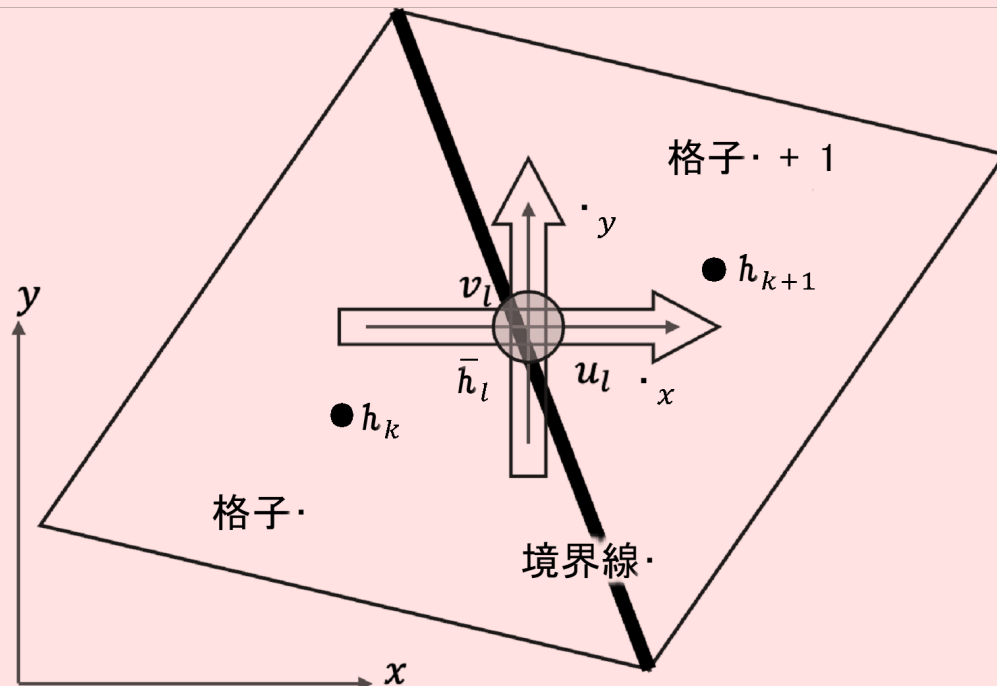
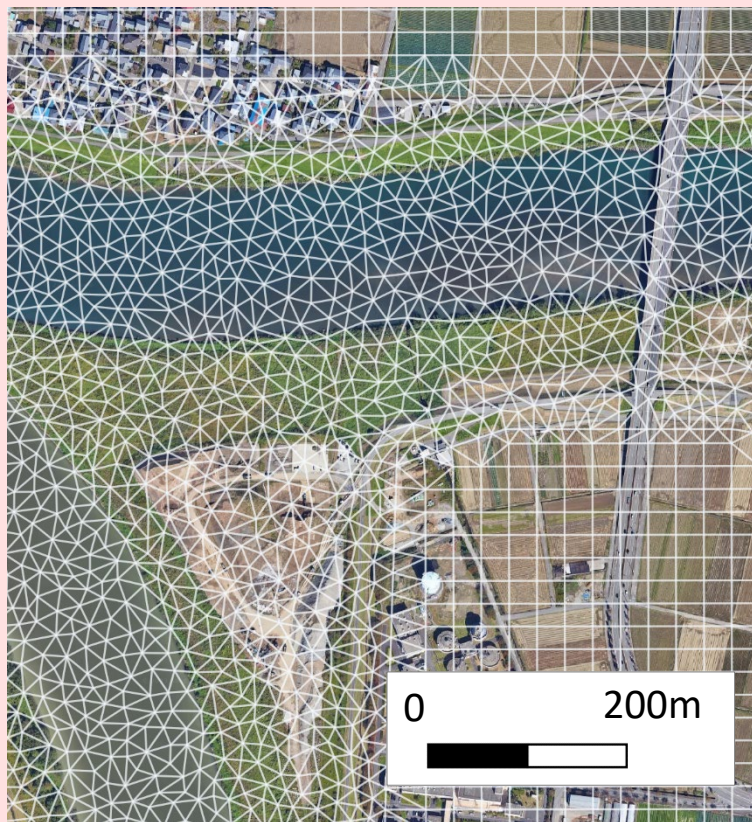
$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w}$$
$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w}$$



Point - 流量駆動型

流量が与えられると計算が駆動
(水位・流速を計算)

g : 重力加速度
 t : 時間
 H : 水位
 τ_x, τ_y : 底面摩擦
 ρ_w : 水の密度



地形に応じて計算格子を設定し、慣性項を考慮。
局所での詳細な解析向き

1 正会員 修(環境科学) 株式会社建設技術研究所 東京本社河川部 (〒330-6030 さいたま市中央区新都心11-2)
2 学生会員 滋賀県立大学大学院 環境科学研究科 (〒522-0057 彦根市八坂町2500)
3 正会員 博(工) 京都大学防災研究所 水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
4 正会員 博(工) 京都大学防災研究所 社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
5 正会員 博(工) 京都大学防災研究所 気候変動適応センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
6 正会員 博(工) 滋賀県立大学大学院 環境科学研究科 (〒522-0057 彦根市八坂町2500)

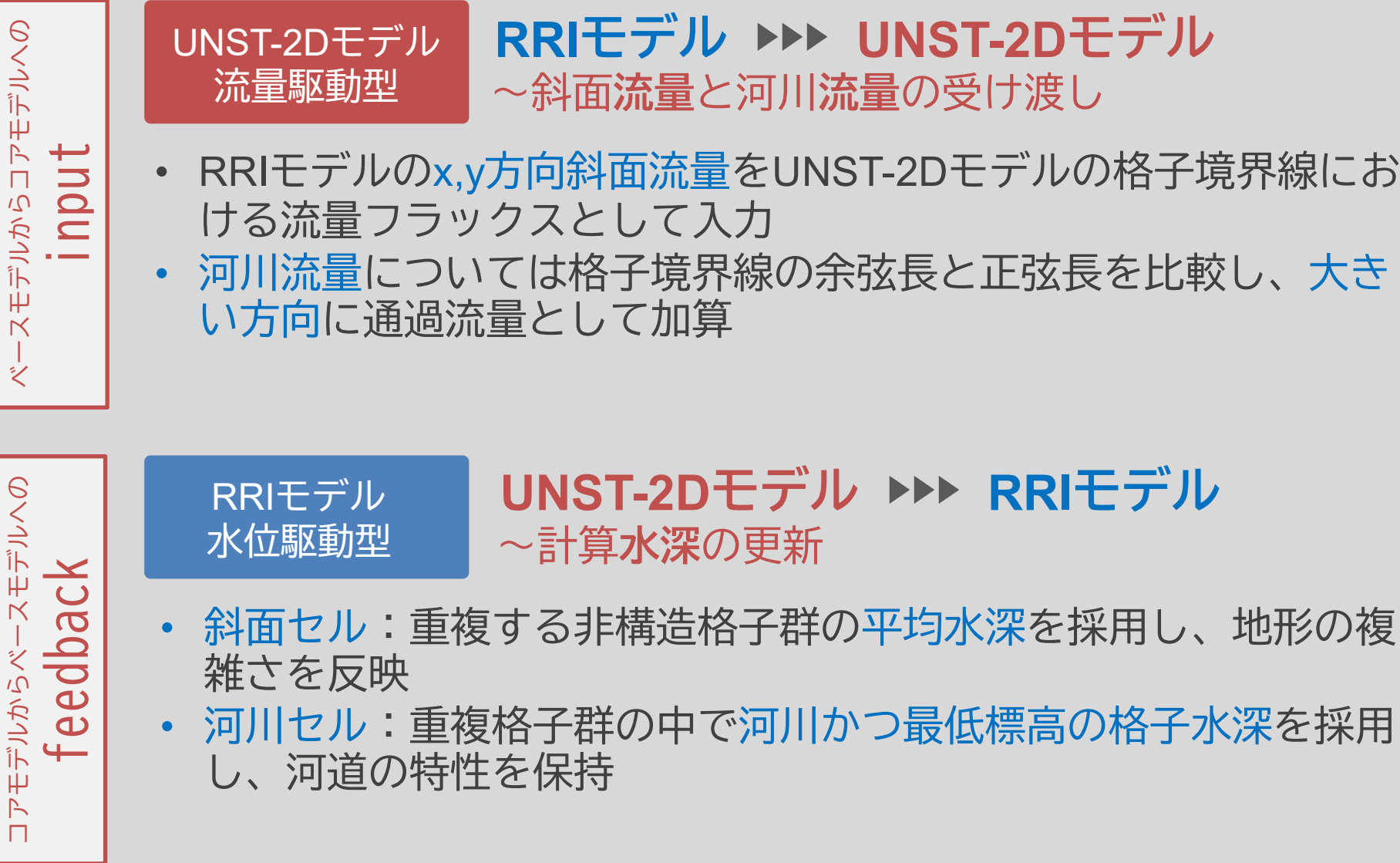
email: kuk-yamamura@ctie.co.jp

email: taki.k@ses.usp.ac.jp

方法 — RRI と UNST-2D 結合

計算格子の設定

- 全域にRRIモデルの構造格子を配置し、基盤となる計算領域を確保
- 任意の範囲にUNST-2Dモデルの非構造格子を重ねて配置し、詳細計算を実行
- 縁端部の格子をRRIモデル格子と同サイズ・同位置に設定



連成計算の空間構成

UNST-2D
モデル上の処理

RRI
モデル上の処理

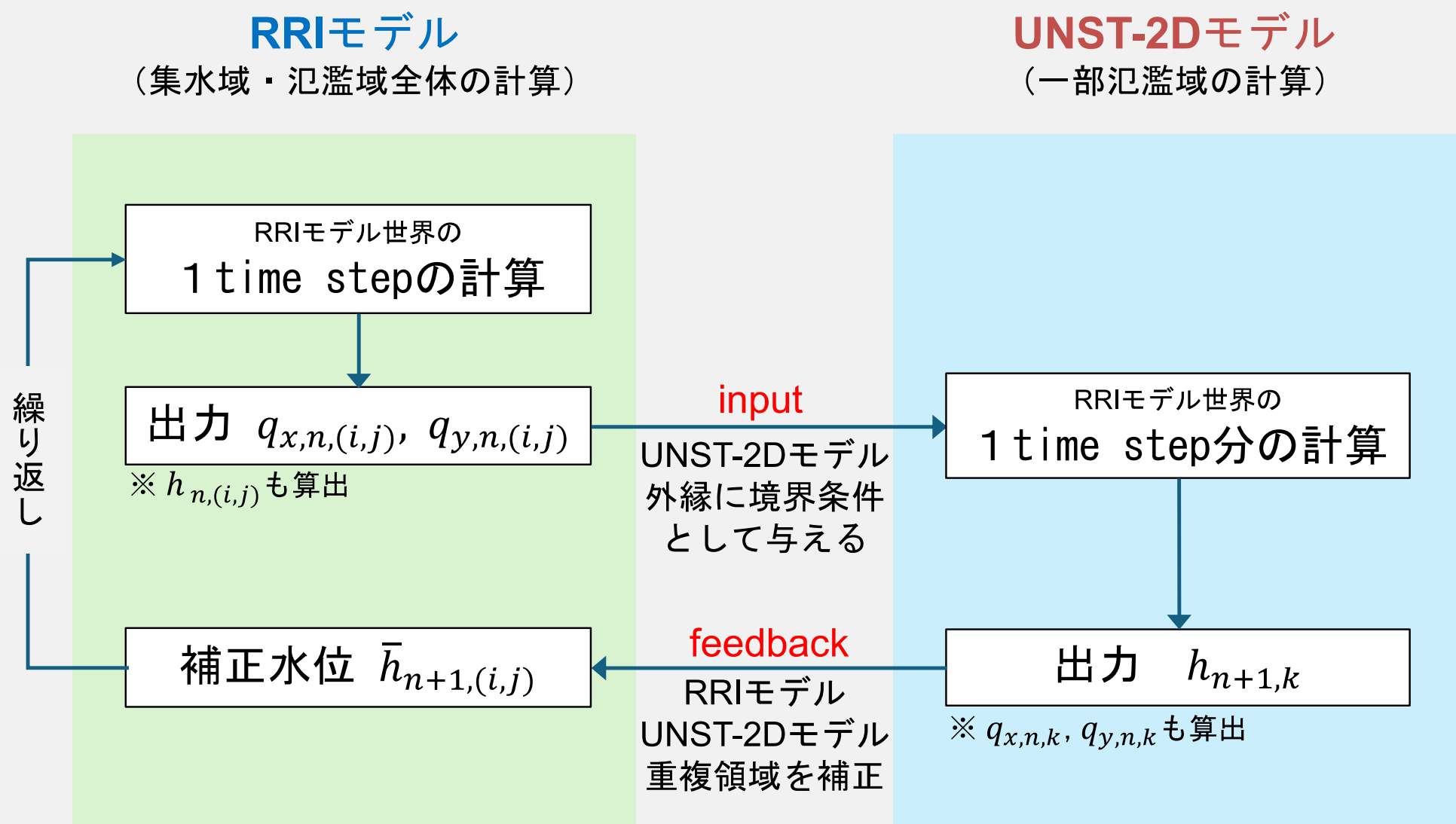
- RRIモデル計算領域
- UNST-2Dモデル計算領域
- RRIモデル - UNST-2Dモデル境界格子

UNST-2Dモデルの
格子境界線Lに
RRIモデルの出力
(q_x, q_y)を与える

UNST-2Dモデルの
出力 h を
RRIモデルの水深 $\bar{h}$ に
換算し更新



連成計算の時間進行



n	RRIモデル世界の時間ステップ	
i, j	RRIモデルの格子番号（構造格子）	
k	UNST-2Dモデルの格子番号（非構造格子）	
$q_{x,n,(i,j)}$	時間ステップ n における格子 i, j からの x 方向の流量フラックス	
$q_{y,n,(i,j)}$	//	格子 i, j からの y 方向の流量フラックス
$h_{n,k}$	//	格子 k の水位
$\bar{h}_{n,(i,j)}$	//	UNST-2Dモデルの出力 $h_{n,k}$ で補正されたRRIモデルの水位



連成計算の過程では、逐次、**UNST-2Dモデル**（流量駆動）は縁端部で流量フラックスを与えられ、**RRIモデル**（水位駆動）は重複部全体で面的に更新水位を与えられる。

適用

連成計算の出力とRRIモデル単体の出力、実績水位とを比較

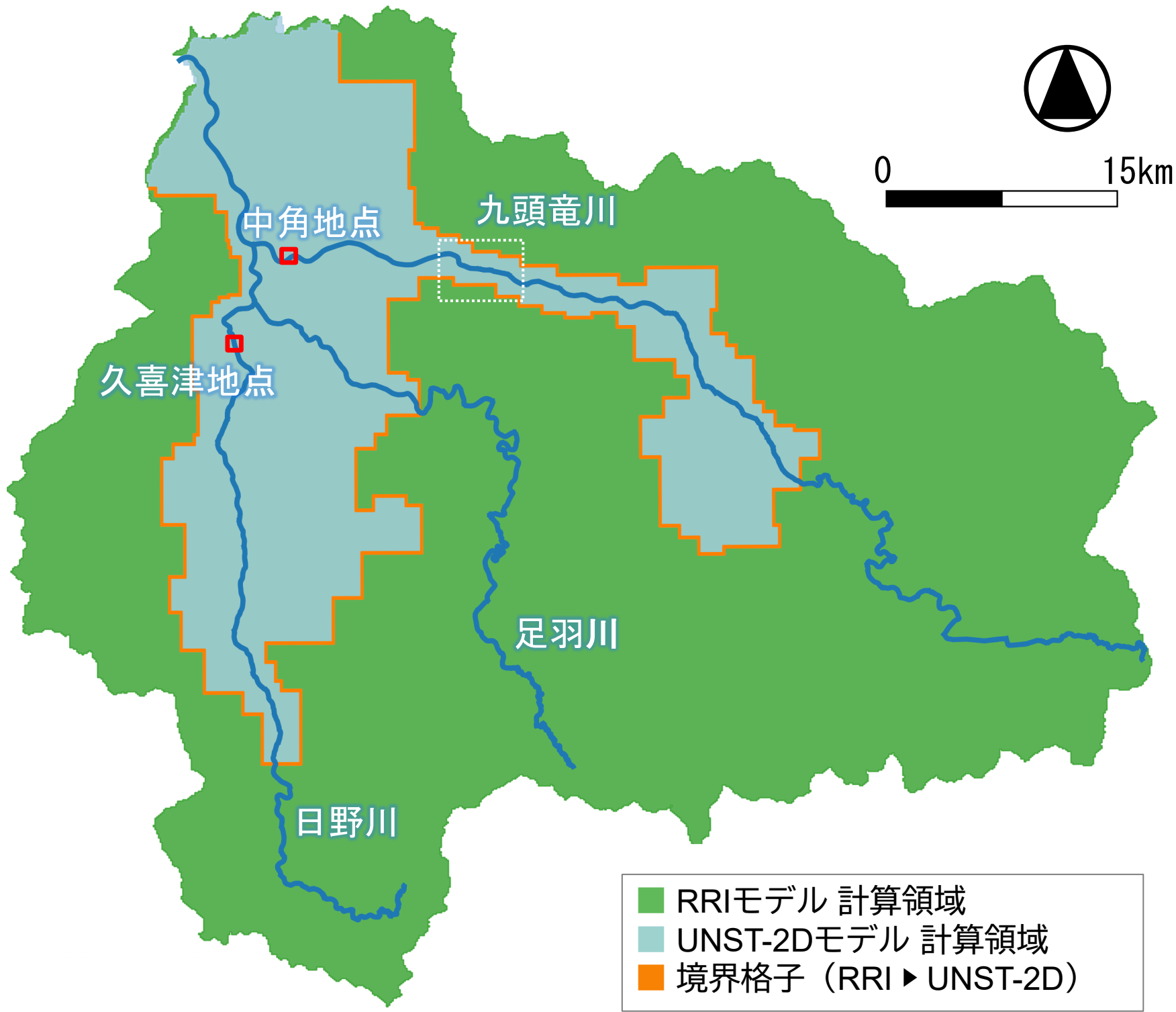
対象流域

九頭竜川流域（流域面積 2,930km²）

検証外力

2018年台風13号 及び 2023年7月12～14日豪雨（解析雨量）

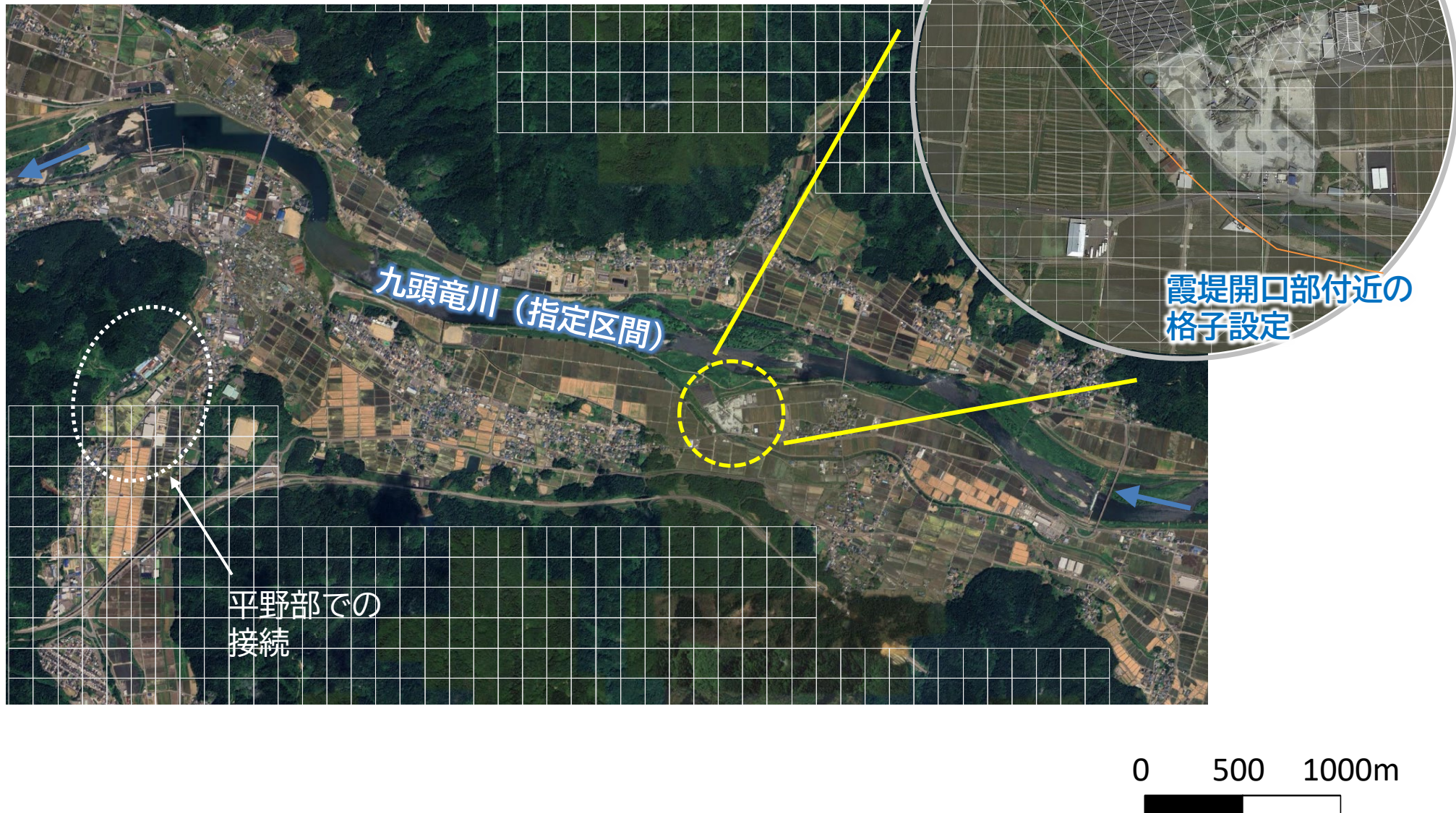
計算領域



計算条件

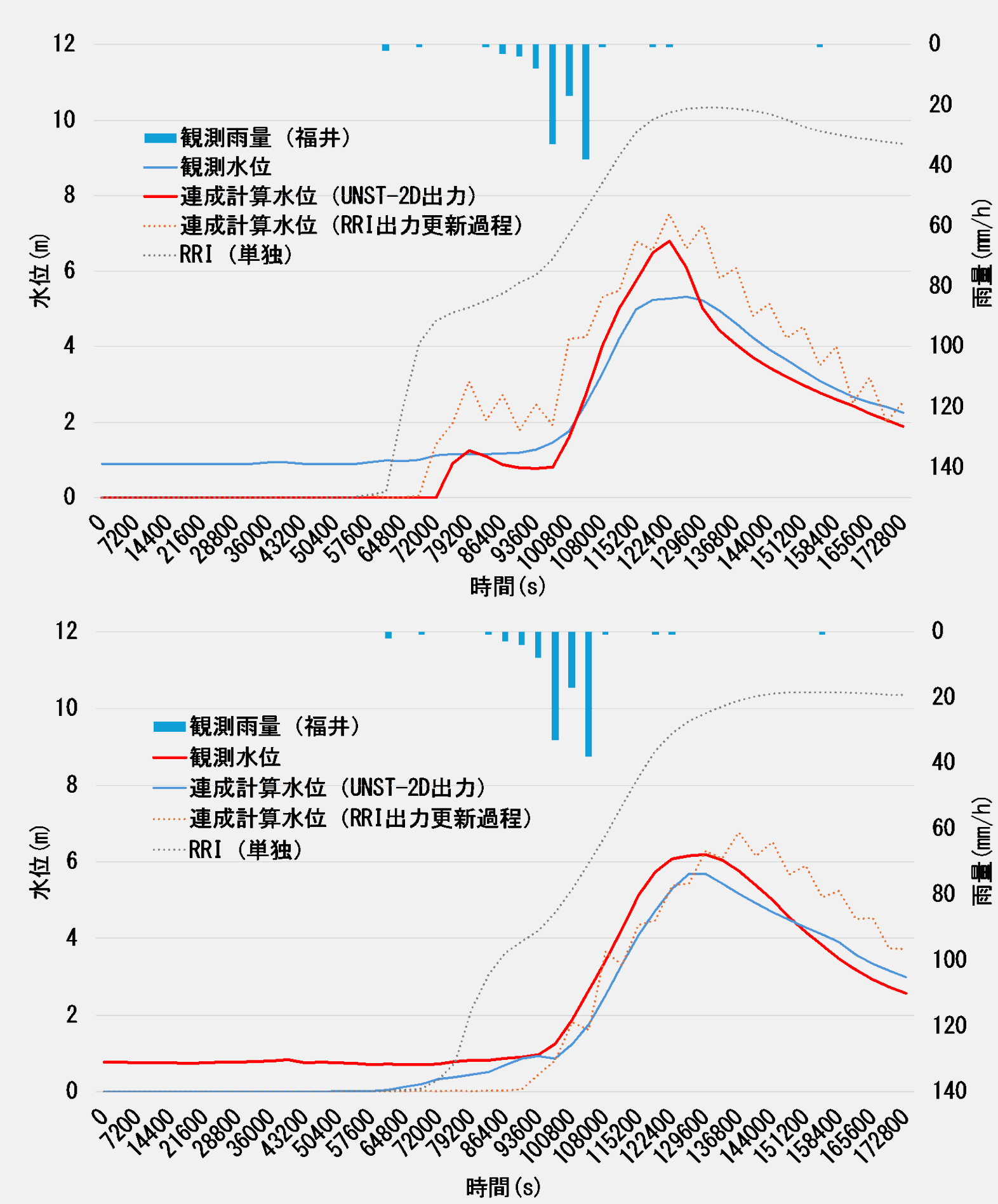
	RRIモデル (ベースモデル)	UNST-2Dモデル (コアモデル)
計算領域	流域・氾濫域全体	概ね平野部（山間部以外）
計算格子	構造格子 約150m×150m	非構造格子 境界線長 約2～25m ※ RRIモデルとの接続縁端部は150m
各パラメタ	標準値（デフォルト値）	底面粗度 0.067（氾濫域） 0.030（河道域） 鉛直浸透は無視
計算時間間隔	600秒	0.1秒

計算格子の設定（RRIモデルとUNST-2Dの接続）



結果&考察

2023年7月豪雨の再現計算



- UNST-2Dモデルとの連成計算ではRRIモデルの**計算水位**（橙破線）がUNST-2Dモデルにより**逐次更新**
- RRIモデル単体の計算結果（黒破線）と比較すると、実測水位に近い結果に修正されている

※ RRIモデルのパラメタはデフォルト値で調整していない（比較のため）

課題

- ベースとなるRRIモデルのパラメタ調整、計算時間間隔の短縮
- コアとなるUNST-2Dモデルのメッシュ分割や粗度設定

▼▼▼

連成計算の更なる精度向上

計算コスト

- Apple社 Mac Mini 2023 (Apple M2 Pro 3.5GHz, 16GB RAM, SSD 512GB) で**約6時間**
- gfortranでコンパイル
- 現段階では実時間予測での活用は困難

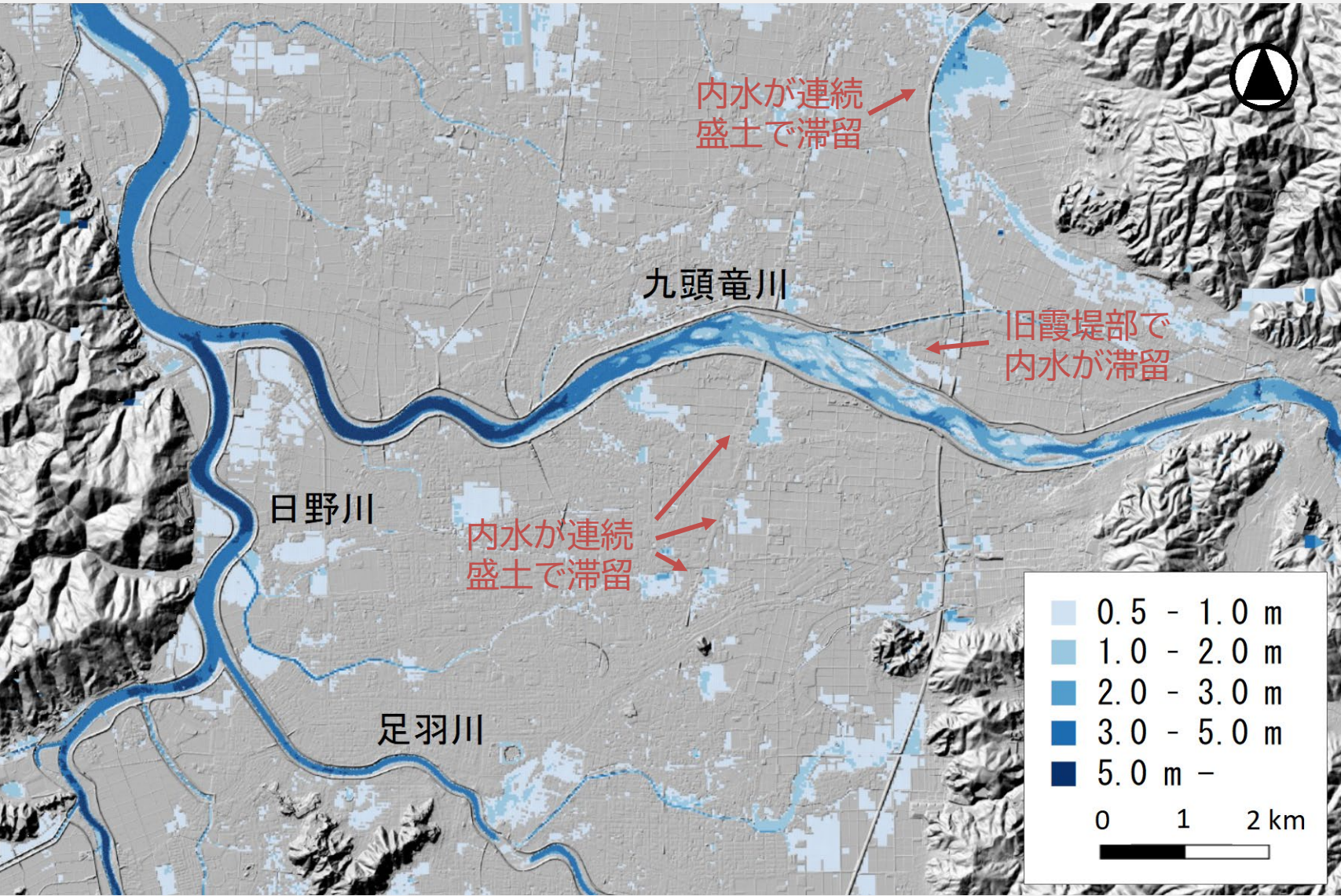
水位再現精度の向上

- 2つのモデルを連成させることで、**実測水位**が良好に再現
- Nash係数 中角：0.76 久喜津：0.89 2023年7月豪雨時
中角：0.84 久喜津：0.92 2018年台風13号

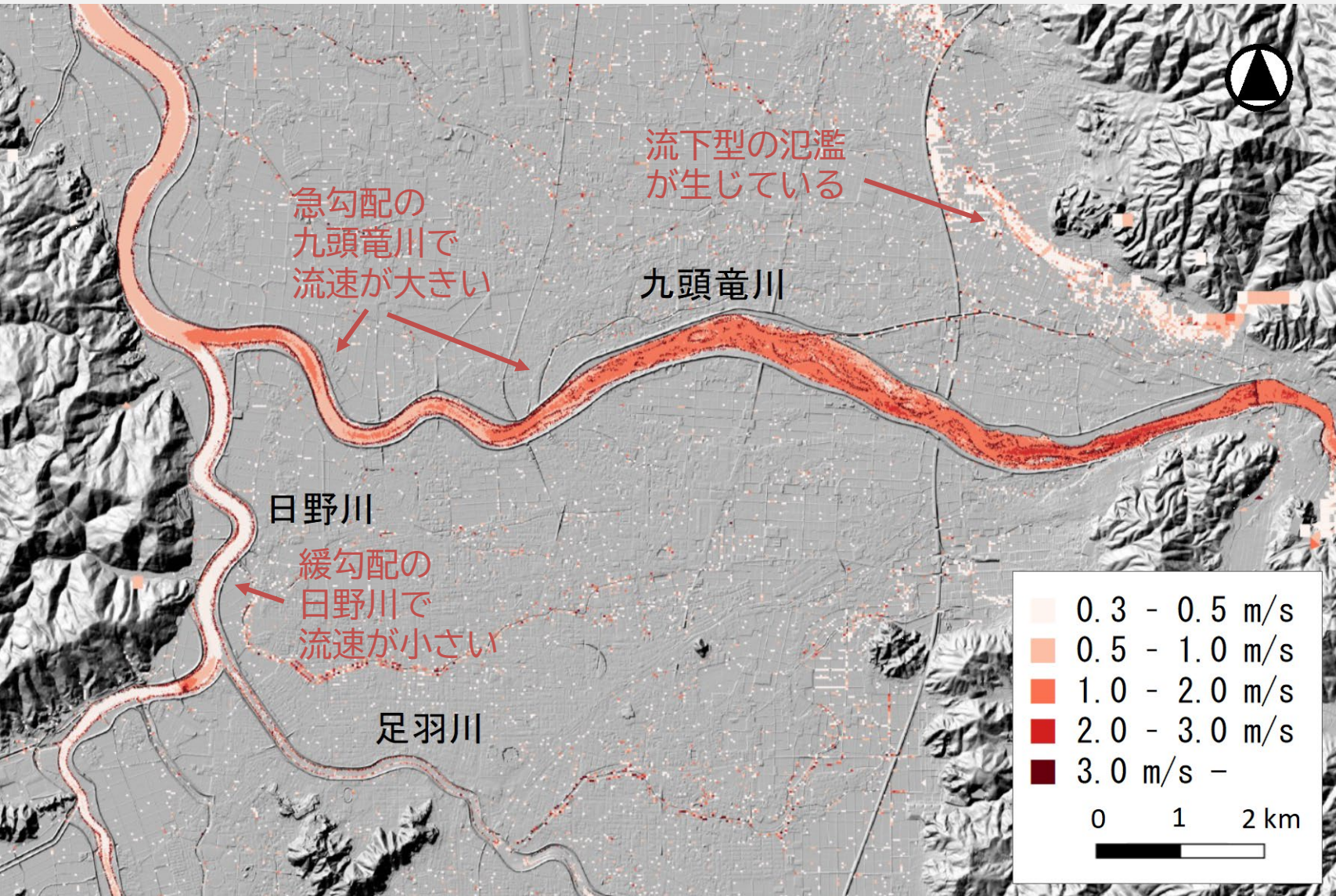
微地形を考慮した洪水流解析

- 移流項の考慮**と**高解像度非構造格子**の適用により、河川域・氾濫域の微地形に応じた流れの状況や、日野川が緩勾配であるため九頭竜川の背水の影響を受ける様子など、**詳細な洪水流の特徴**を表現

最大浸水深（UNST-2Dモデルの出力）



最大流速分布図（UNST-2Dモデルの出力）



結論

本稿では、（洪水流計算を拡散波近似法で扱う）**RRIモデル**と（移流項を考慮した）**UNST-2Dモデル**を結合し、双方向のやり取りを伴う連成計算法を提案

九頭竜川流域にて動作確認

RRIモデル、UNST-2Dモデルともに一般的なパラメタ設定であったが、検証2豪雨（2013年台風18号，2023年7月12～14日豪雨）に対して**良好な再現性**を確認

一般的知見ではあるが...
集水域にはRRIモデル（拡散波近似）の適用性が良く、
氾濫域にはUNST-2Dモデル（移流項考慮）の適用性が良いことを一定確認

効率的な計算資源の活用

- モデリングの**手間**と**計算コスト**を必要な部分に集中

治水計画への応用

- RRIモデルで基本的な水収支を管理しながら、個別の流域治水対策効果をUNST-2Dで評価して流域全体で統合することで、既存河川計画との整合性を確保

プログラム・コードの公開

2025年7月7日に公開（オープンソース化）予定

- 連成計算可能なUNST-2Dモデル（一次元河道，下水道・圃場整備モデル，田んぼダムモデル，樹林帯モデルなどの要素モデルも追加したもの）のソースコード
- 連成計算を行うためのRRIモデルへの追加コード
- GitHub（<https://github.com/TKLabo/RRI2UNST2D>）

参考文献

- 瀧健太郎・他（2010）中小河川群の氾濫域における減災型治水システムの設計，河川技術論文集，16，pp.477-482
- 瀧健太郎・他（2009）中小河川群の氾濫域における超過洪水を考慮した減災対策の評価方法に関する研究，河川技術論文集，15，pp.49-54
- 例えば、三井望・他（2025）降雨流出解析法と河川・氾濫流用平面二次元解析法の融合（RRI-RF2D）モデルの開発と応用，土木学会論文集，81(16)，24-16020
- 佐山敬洋・岩見洋一（2014）降雨流出氾濫（RRI）モデルの開発と応用，土木技術資料，56-6，pp.18-21
- 川池健司・他（2002）都市域の氾濫解析モデルの開発，土木学会論文集，698，II-58，pp.1-10

※ 令和4年度国土交通省研究開発公募(河川技術・流域管理分野 指定型課題)，COI-NEXT JST共創の場形成支援プログラムJPMJPF210，JSPS科研費(JP20H04377，24H02194)により実施