

気候変動下の洪水リスク評価に関する課題と展望

京都大学防災研究所 社会防災研究部門

佐山敬洋

KYOTO UNIVERSITY

京都大学



Take Home Messages

水文学の視点でモデルの課題を明らかにして予測精度向上を目指す

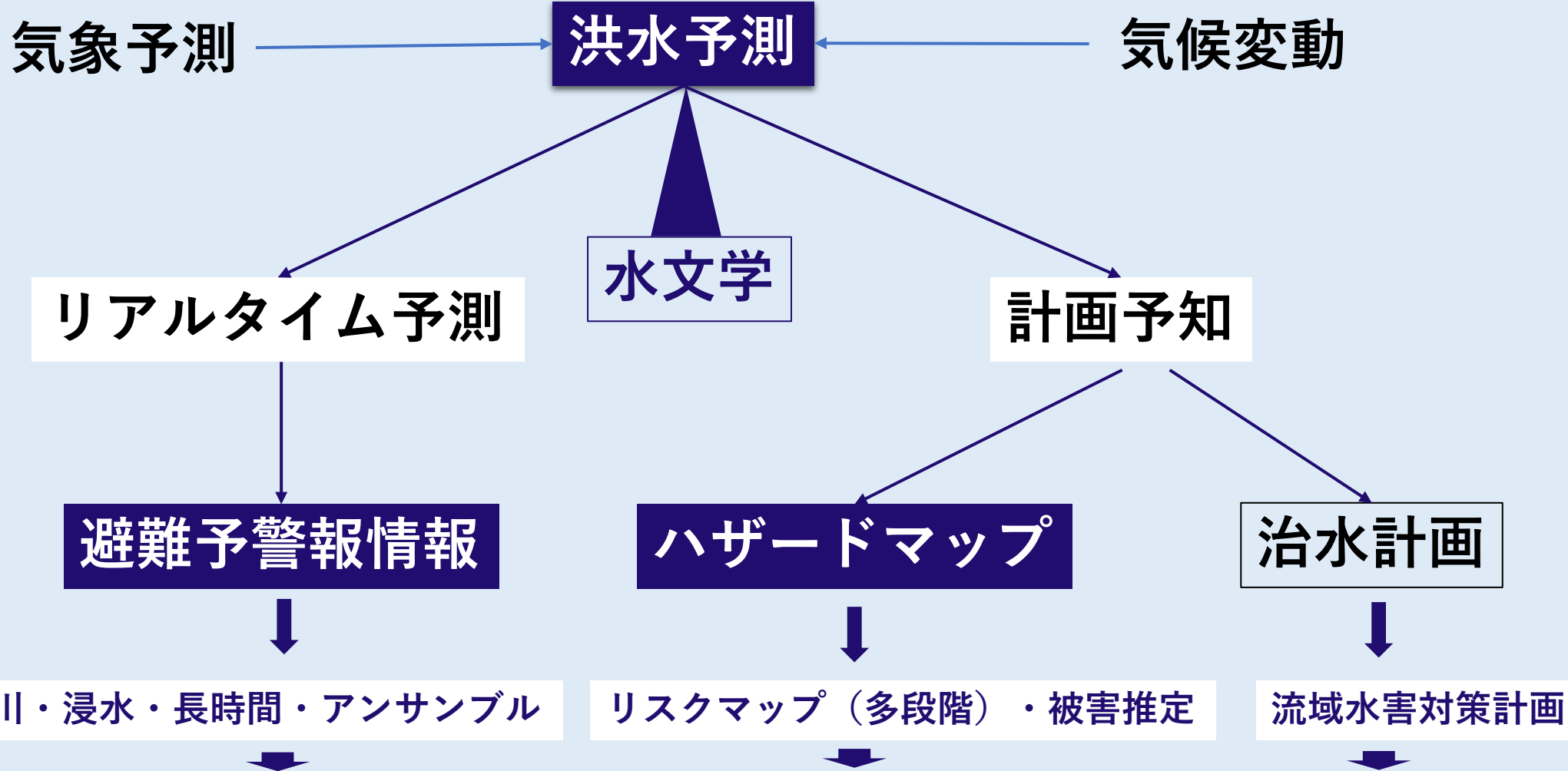
d4PDFなどアンサンブル気候変動プロダクトの多面的な活用を目指す

Table of Contents

1. RRIモデルについて
2. 全国版RRIモデルの開発と精度検証
3. d4PDFデータを用いた確率洪水流量の推定
4. RRIモデル v1 の課題と v2 の開発に向けて（予定）

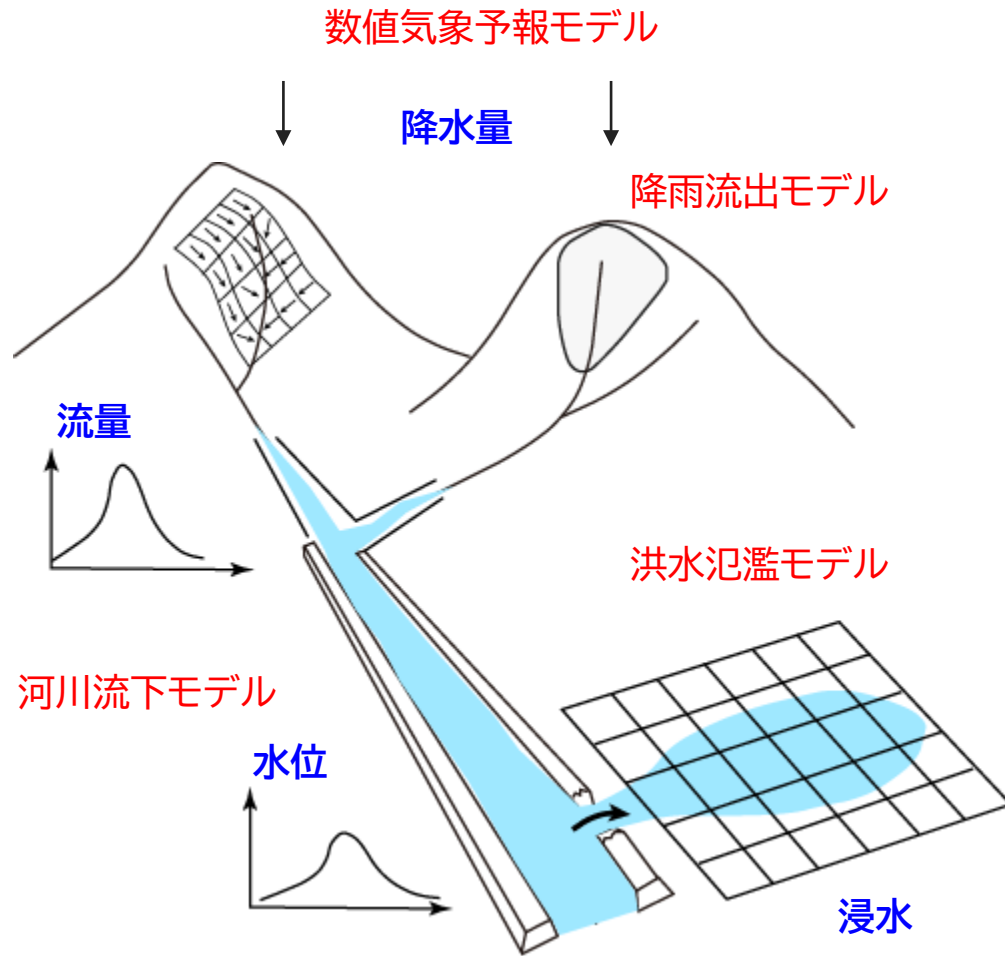
1. RRIモデルについて

洪水予測の対象範囲



降雨流出・洪水氾濫を一体的に解析し、流域対策も含めて、より詳細かつ物理的なシミュレーション技術が求められる

洪水予測に関する4要素とモデル



- **数値気象予測モデル(Numerical Weather Prediction Model):** 降水量の定量的予測
- **降雨流出モデル(Rainfall-Runoff Model):** 降雨から河川流量の予測
- **河川流下モデル(River Routing Model):** 上流の河川流量を境界条件にした洪水の伝播・河川水位の予測
- **洪水氾濫モデル(Flood Inundation Model):** 決壊地点からの越流量を境界条件とした浸水域・浸水深の予測

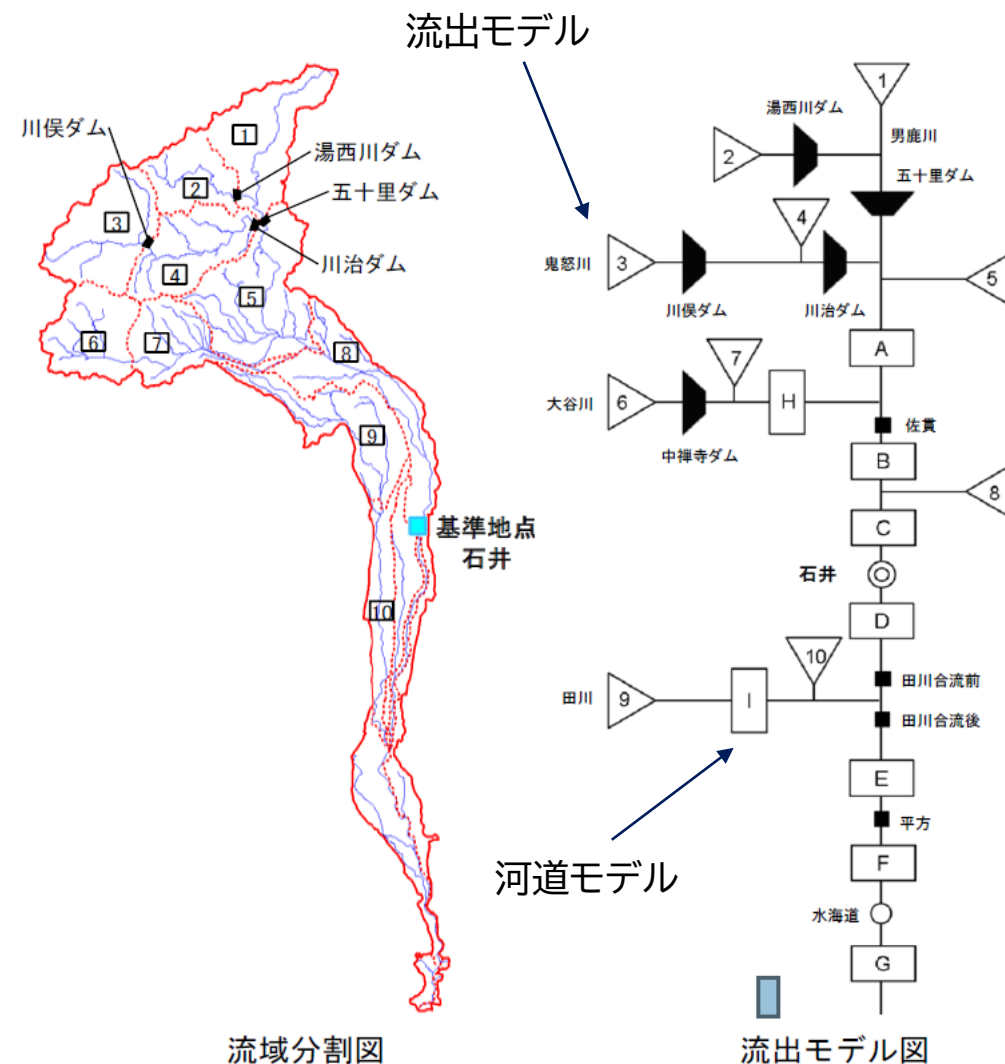
降雨流出モデル

● 集中型モデル

- (部分)流域の降雨流出現象をまとめて扱う。
- 例: 貯留関数法、タンクモデルなど
- 利点: 構造が単純で計算負荷が小さい。
対象地点の洪水はパラメータ調整で再現しやすい。
- 欠点: 物理的根拠を持たない。
流域内部の状態は予測できない。

● 分布型モデル

- 流域をグリッドセルなどに分割して流出過程を物理的な機構に基づいて再現する。
- 例: 土研分布型モデル、RRIモデルなど
- 利点: 水位観測情報の存在しない中小河川も予測の対象となる。



分布型キネマティックウェーブモデル

- キネマティックウェーブとは？

- 開水路水理学の運動方程式(一次元の非定常流)から導出
- 仮定: 斜面勾配が十分に急 → エネルギー勾配 = 斜面勾配
→ 流下方向が変わらない → 地形情報から流下方向を決定

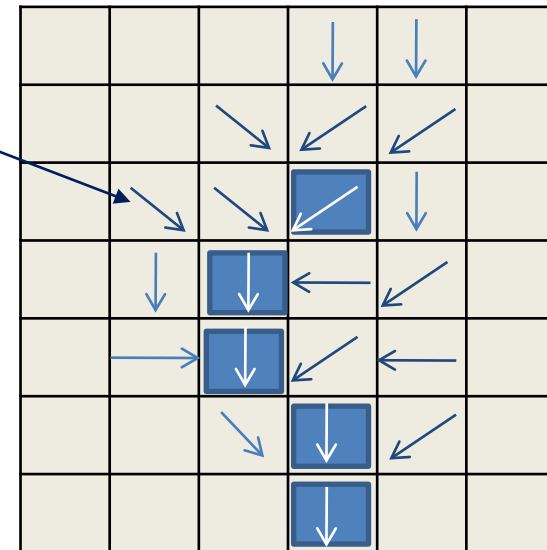
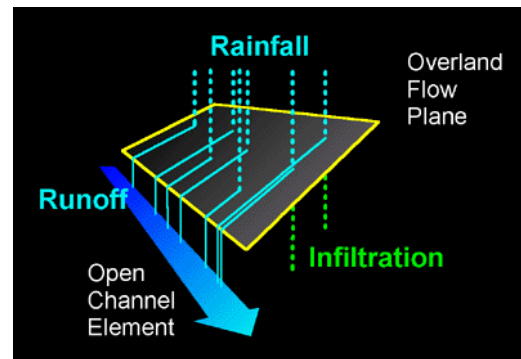
連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r$$

運動方程式

$$q = \frac{\sqrt{i}}{n} h^{5/3}$$

q : 単位幅流量
 h : 水深
 r : 有効降水強度
 i : 斜面勾配
 n : 等価粗度係数



落水線: 地形勾配によって雨水の流動方向を定める。
各单位斜面にキネマティックウェーブ法などを適用する。

開水路水理学の運動方程式（一次元不定流）

連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

運動方程式

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = I_b - I_e$$

A : 流水断面積
 Q : 流量
 v : 断面平均流速
 h : 水深
 x : 流下距離
 I_b : 河床勾配
 I_e : エネルギー勾配



Kinematic Wave: 運動学波



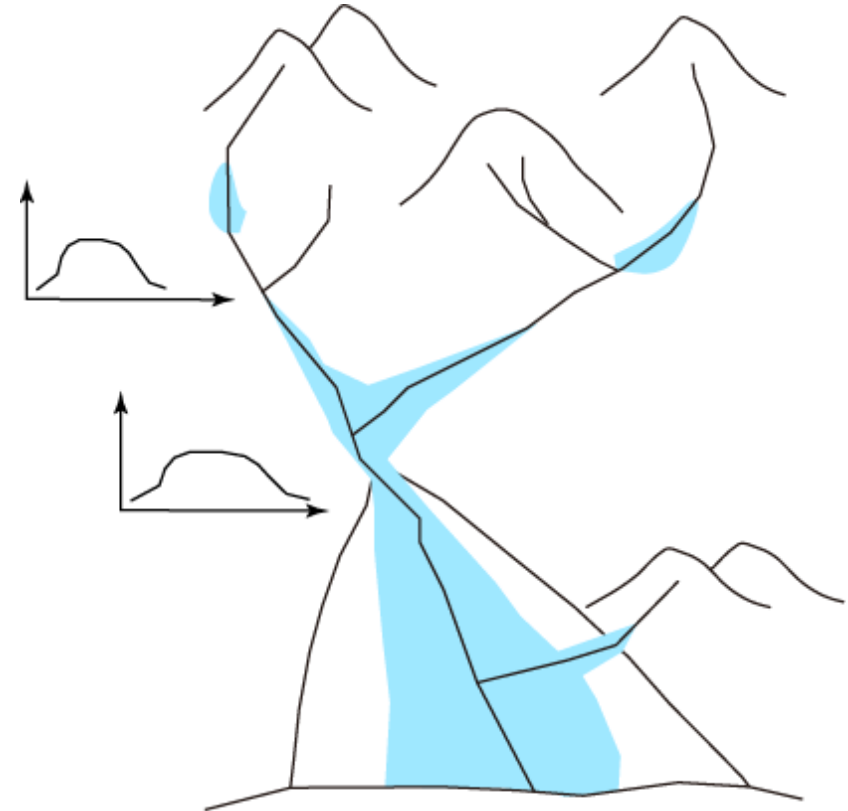
Diffusion Wave: 拡散波



Dynamic Wave: 力学波

降雨流出と洪水氾濫を一体的に考えるべき状況とは何か？

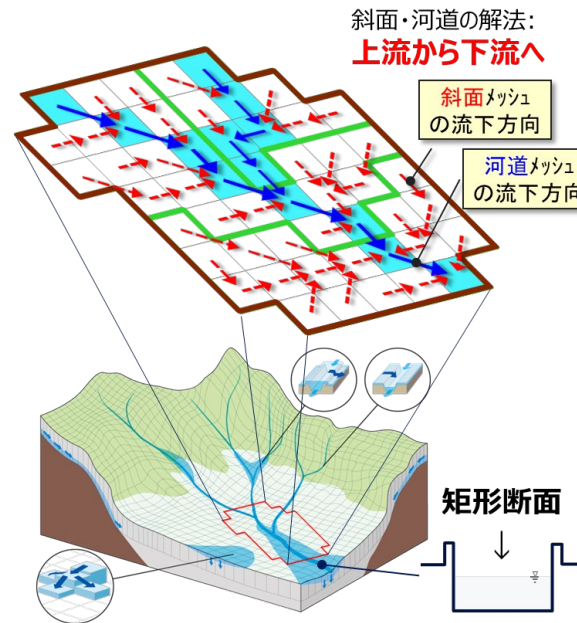
- 既存の分布型モデル、氾濫モデルでカバーできない状況とは？
 - ① 低平地を含む流域で広域に洪水氾濫が広がっていて、降雨流出・洪水氾濫の区別がつかない。
→ タイ・チャオプラヤ川など
 - ② 河川の流量を予測するうえで、洪水氾濫の影響を無視できない。
→ 計画規模や想定最大規模の降雨では上流で氾濫
 - ③ 各地で発生する浸水の状況を降雨を入力として流域全体で迅速に予測したい。
→ 流域スケールの浸水予測、全国のリスク評価など



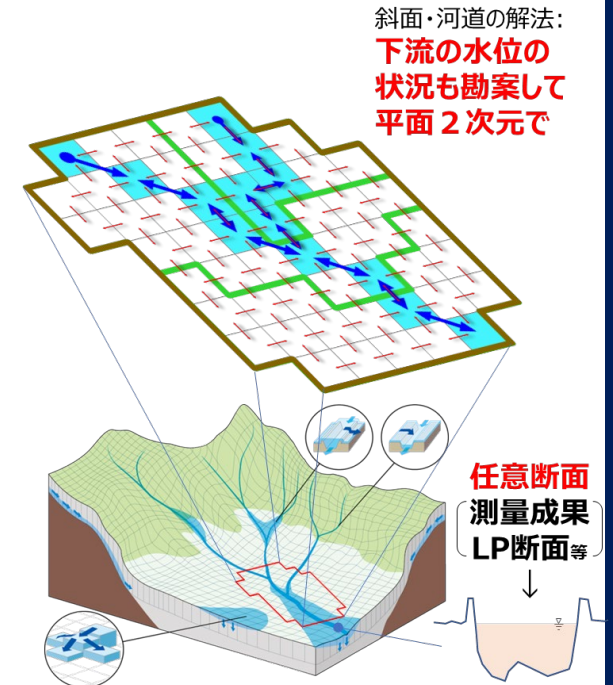
RRIモデル

- Rainfall-Runoff-Inundation (降雨流出氾濫)モデル
- 分布型流出モデルをベースにして、斜面には二次元の拡散波近似式を、河道には一次元の拡散波近似式を適用し、斜面・河川の相互作用を計算するモデル。
- 拡散波近似: エネルギー勾配 = 水位勾配
- 水は高い方から低い方に流下 → 流下方向が変化する
- 降雨流出と洪水氾濫を一体的に適用できるのが特徴。
- 山地の降雨流出解析には、森林土壌の不飽和・飽和側方流を考慮する流量流積関係を利用 → 通常の分布型モデルとしての利用も可能。
- 土木研究所ICHARMのページからDL可能: オープンソース、スタートアップ用にRRI-GUIも提供。

〔典型的な分布型モデル〕



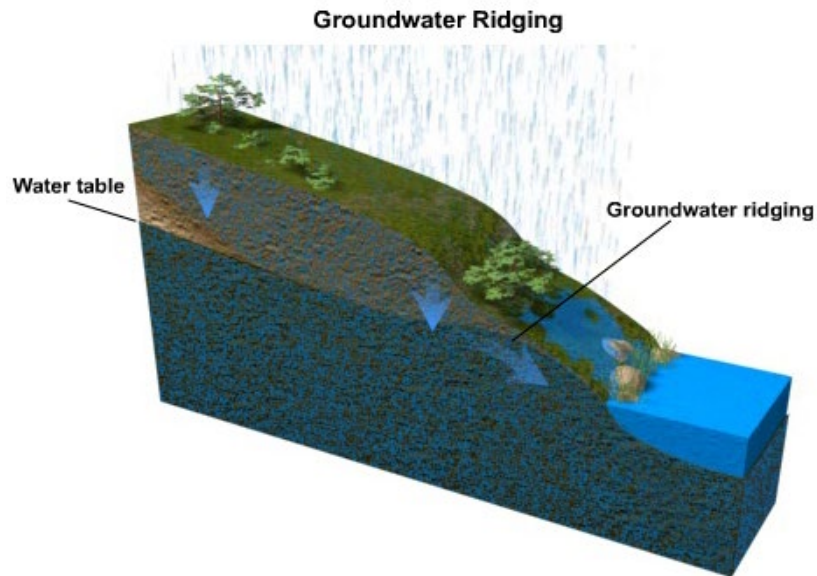
〔RRIモデル〕



降雨流出現象

● 地表付近に基岩が存在しない場合

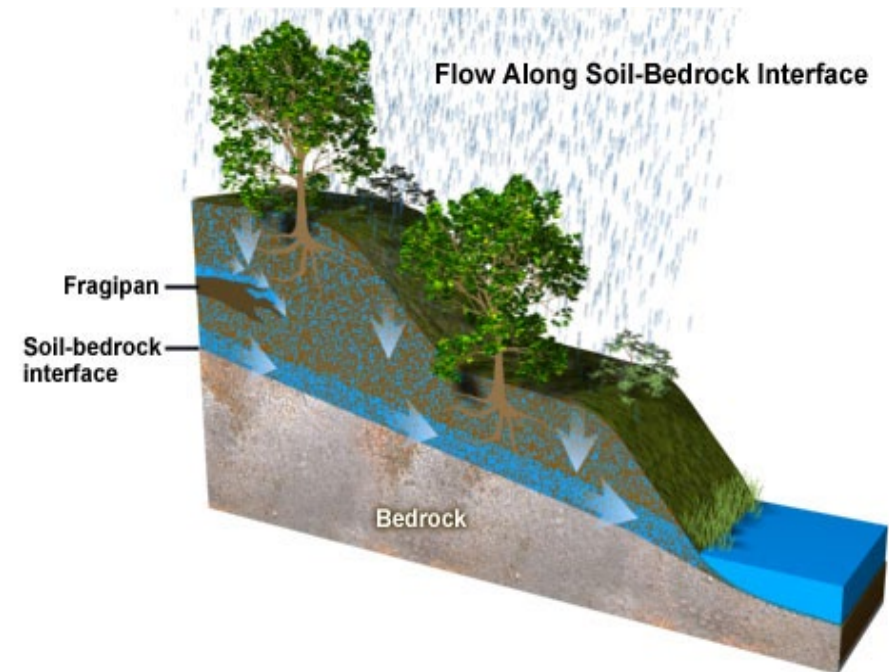
- 地表から数メートル下に地下水面
- 地下水面より上部の土壌は不飽和
- 主に沖積平野、洪積台地、扇状地など
- 豪雨時は地下水位が上昇して表面流
- 浸透余剰型(ホートン方)表面流も発生



©The COMET Program

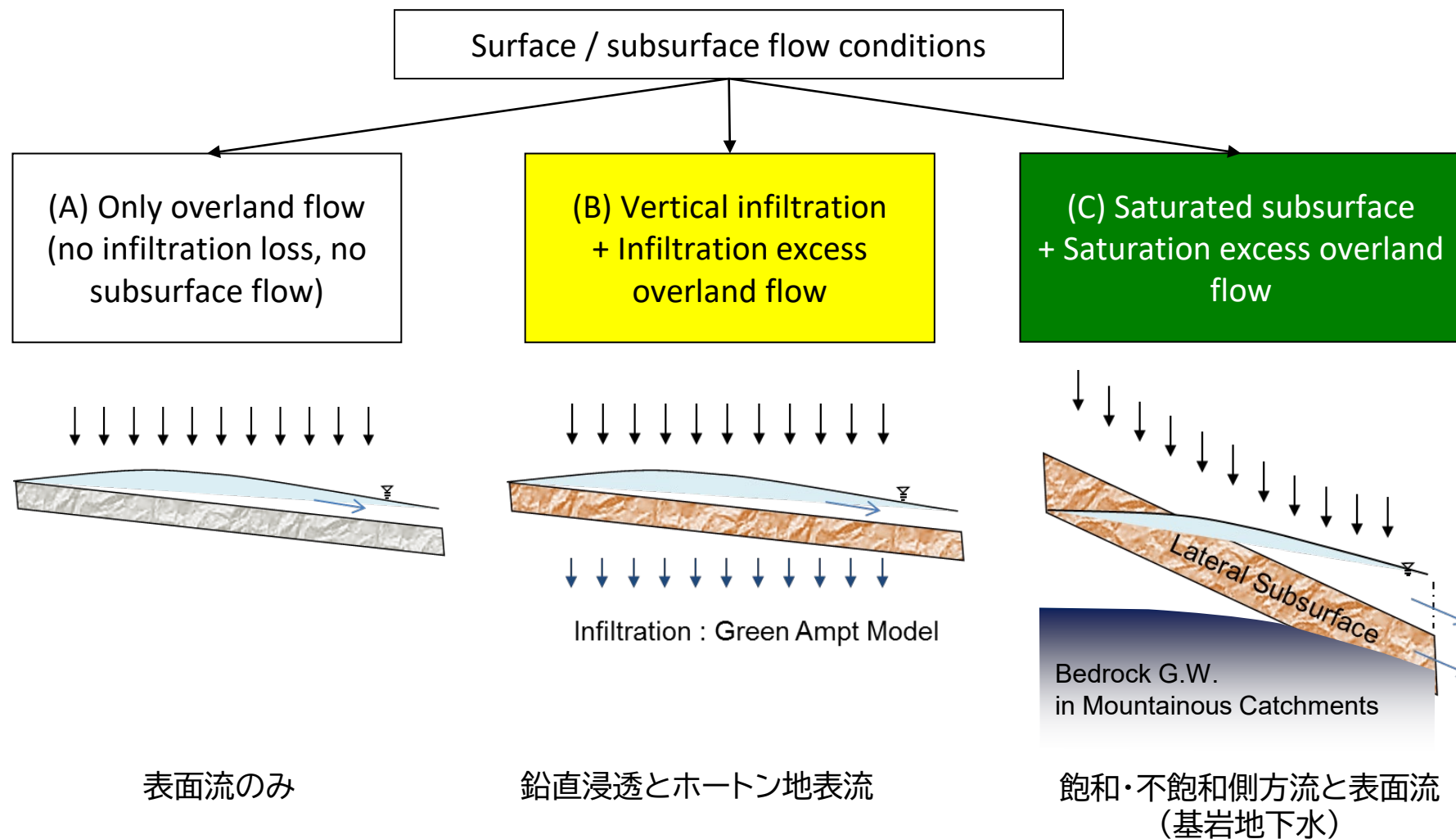
● 地表付近に基岩が存在する場合

- 地表から1~2メートル下に基岩
 - 基岩:透水性低い、森林土壌:透水性高い
 - 主に山地
 - 豪雨時は基岩と土層の境界付近に飽和側方流
- 日本における洪水流出の主な成分

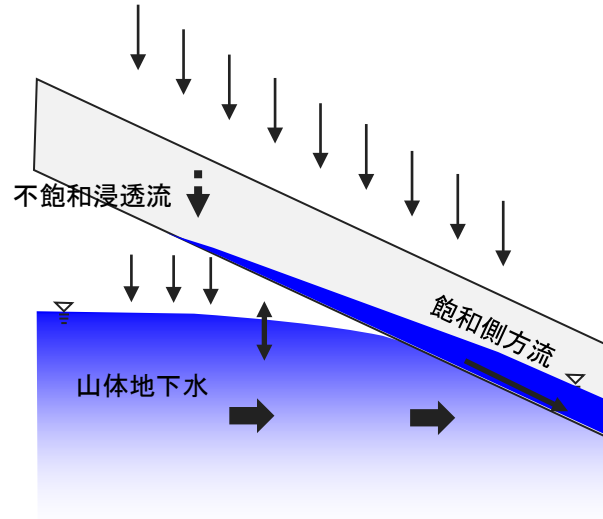


©The COMET Program

RRIモデルで何を重視してきたか？



RRIモデルの斜面流出モデル



デフォルトパラメータ:
飽和側方流・表面流モデル
(不飽和、基岩地下水なし)

Parameters	Default
$n \text{ [m}^{-1/3}\text{s]}$	0.6
$d_a \text{ [m]}$	0.471
$d_m \text{ [m]}$	-
$k_a \text{ [m/s]}$	0.1
$\beta [-]$	-
$n_{river} \text{ [m}^{-1/3}\text{s]}$	0.03

仮説: 飽和側方流が洪水流出の主要成分。飽和側方流への雨水の供給には、土壌(保水性、透水性)と表層地質(特に基岩の透水性)が影響する。

水収支式

$$\gamma \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} + r$$

ダルシー則

$$q = -kh \left(\frac{\partial h}{\partial x} \cos i + \sin i \right)$$

ブーシネスク式

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\gamma} \left[\cos i \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \sin i \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{r}{\gamma}$$

不飽和・飽和側方流・表面流の統合型流量流積関係式

(立川ら、水工、2004)

$$q = \begin{cases} -k_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^\beta d_m I & \dots (h \leq d_m) \\ -[k_m d_m + k_a (h - d_m)] I & \dots (d_m < h \leq d_a) \\ -[k_m d_m + k_a (h - d_m)] I + \frac{\sqrt{I}}{n} (h - d_a)^{\frac{5}{3}} & \dots (d_a < h) \end{cases}$$

↑の式は、山体地下水の考慮はなし

各グリッドセル
は流積 h の
一変数

全国150 m:
約1700万
グリッドセル

RRI-GUIの開発・モデル汎用化

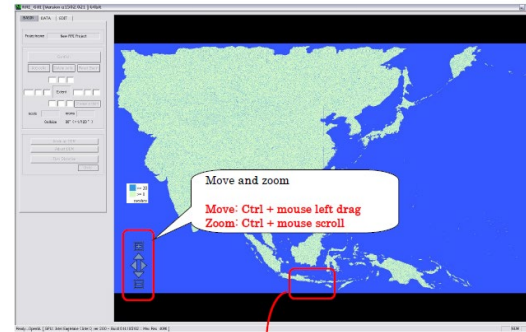
Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model

ver. 1.4.2.5

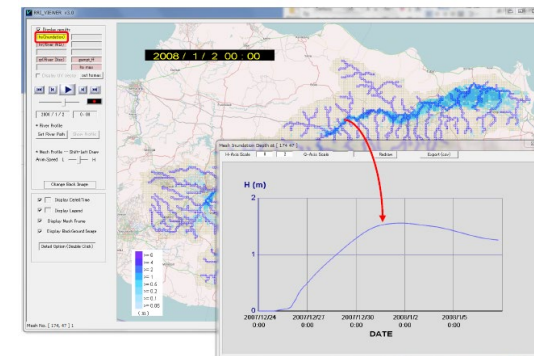
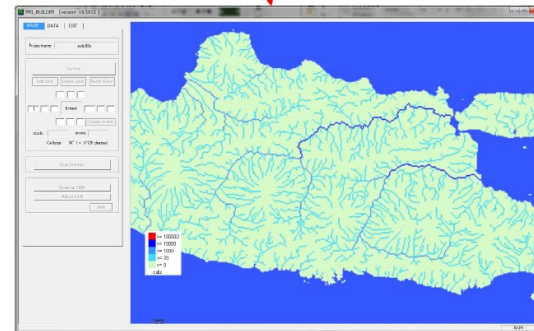
International Center for Water Hazard and Risk Management (ICHARM)
Public Works Research Institute (PWRI)

"Disaster Prevention Research Institute (DPR), Kyoto University

Takahiro SAYAMA"



Zoom into Java Island in Indonesia



土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)

降雨流出氾濫(RRI)モデルプログラム利用許諾規約

利用許諾規約更新日: 2013/11/1

降雨流出氾濫(RRI)モデルプログラム(以下、本プログラム)は、以下で定める利用許諾規約に基づきご利用いただくことができます。この利用許諾規約は、本プログラムの利用における許諾内容及び利用者が従うべき条件を定めています。本プログラムを入手、利用された場合は、この条件に同意されたこととさせていただきます。

1. 本プログラムにおいて、2. の条件に従う場合に許諾されている事項:

- ・ 本プログラムを利用した計算結果を二次利用(公表、頒布)することができます。
- ・ 本プログラムを改変して二次的著作物(プログラム、システム)を作成すること、二次著作物を利用した計算結果を二次利用(公表、頒布)することができます。
- ・ 本プログラムのソースコードの大部分を開示しない限りにおいて、二次著作物を公表、頒布することができます。
- ・ 本プログラムを営利目的で利用することができます。

2. 本利用許諾に基づいて利用する際に従うべき条件:

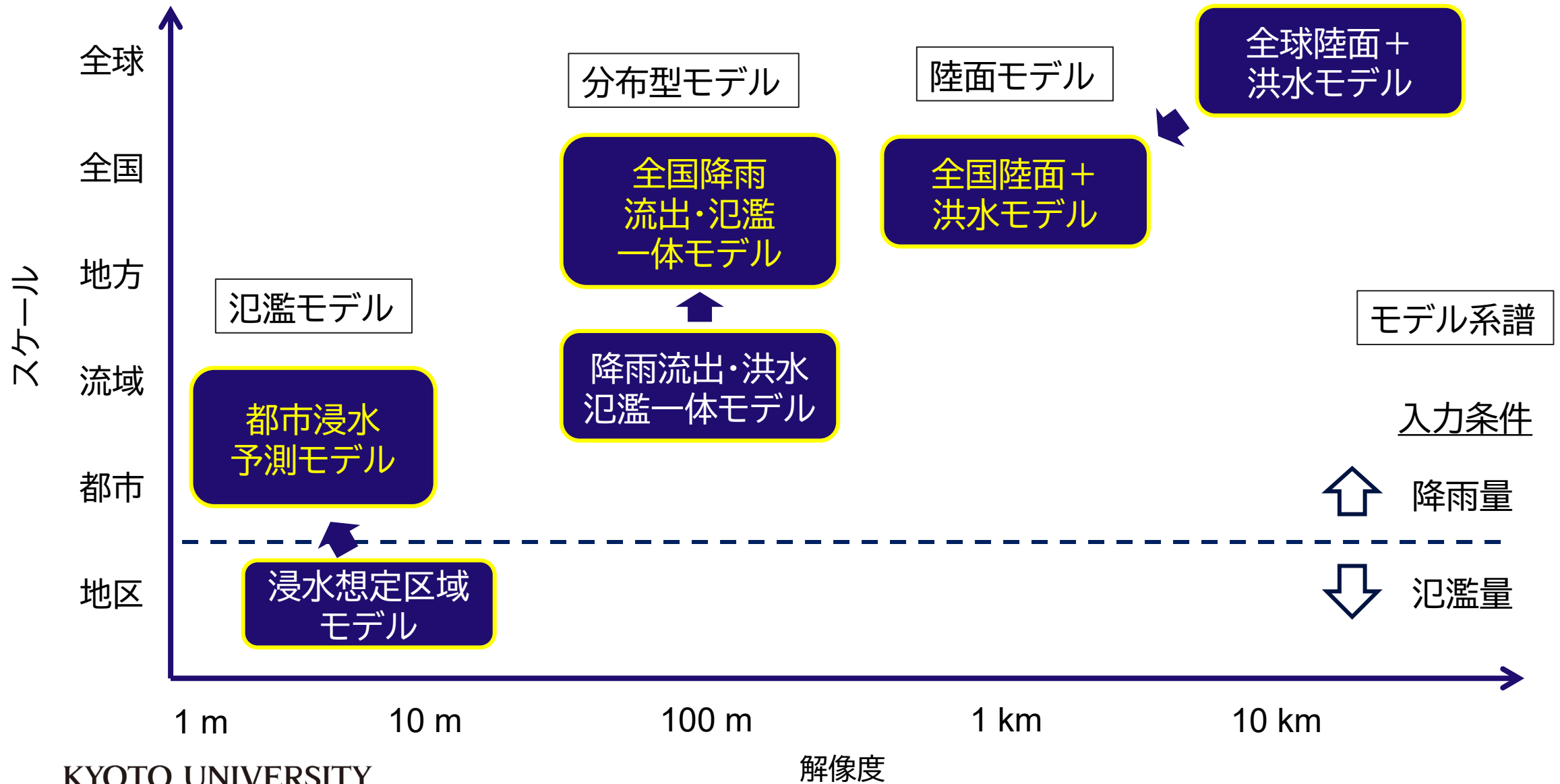
- ・ 本プログラムによる計算結果の公表、頒布に際して、本プログラムの著作権が土木研究所(ICHARM)にある旨を表示しなければなりません。
- ・ 二次著作物による計算結果の公表、頒布に際して、原プログラムの著作権が土木研究所(ICHARM)にある旨を表示しなければなりません。
- ・ 二次著作物による計算結果の場合には、改変されたプログラムによる計算結果である旨を明示しなければなりません。
- ・ 二次著作物の公表、頒布においても、原著物の著作権が土木研究所(ICHARM)にある旨を表示し、その計算結果の公表、頒布に際して表示を継承するよう求めなければなりません。
- ・ 営利目的の場合には下記の連絡先へ営利利用許諾申請をしなければなりません。
独立行政法人 土木研究所 技術推進本部: suishin@pwri.go.jp
申請記載内容: プログラム名、利用目的、利用者(想定している利用者でもよい)
申請付属資料: 貴団体等を確認できる定款等
- ・ 本プログラムおよび二次著作物を利用することによって生じる直接・間接を含む如何なる損害に対しても、土木研究所(ICHARM)は一切の責任を負わないことを了解しなければなりません。
- ・ 本プログラムの取り扱いにおいて外部から容易にアクセスされることのないよう、セキュリティに注意しなければなりません。

適用除外:

- ・ 本プログラムにおいて土木研究所から別途許可を得た場合は、上記の許諾条件は適用されません。利用許諾内容の変更を希望される場合は上記の連絡先へご連絡ください。
- ・ ただし、技術的なお問い合わせにはお答えできません。ご了承ください。

2. 全国版RRIモデルの開発と精度検証

様々なスケールを対象とした氾濫モデルの出現と発展

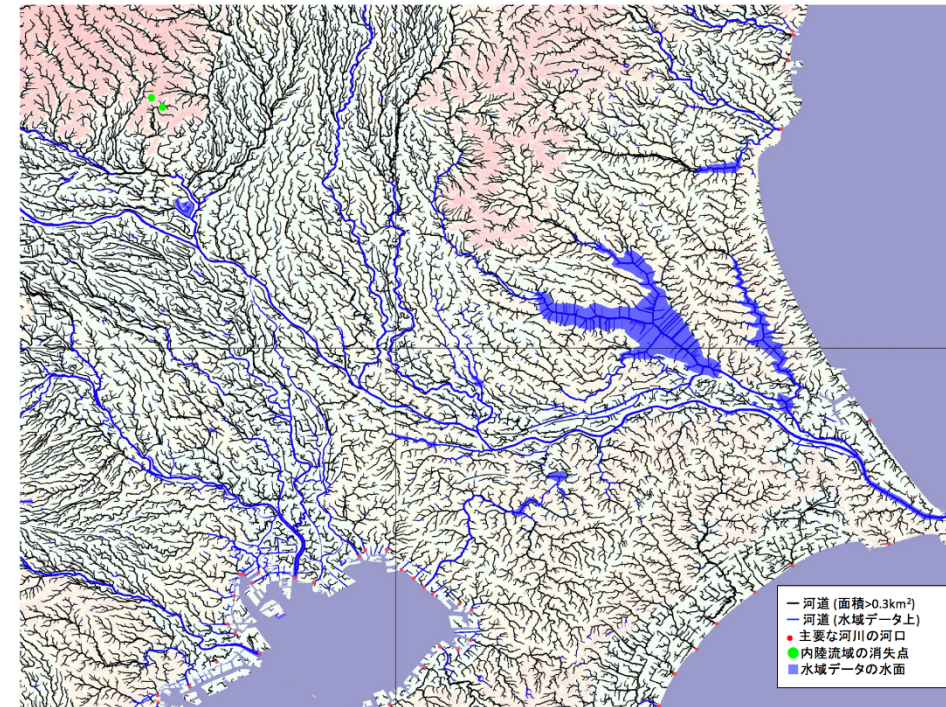
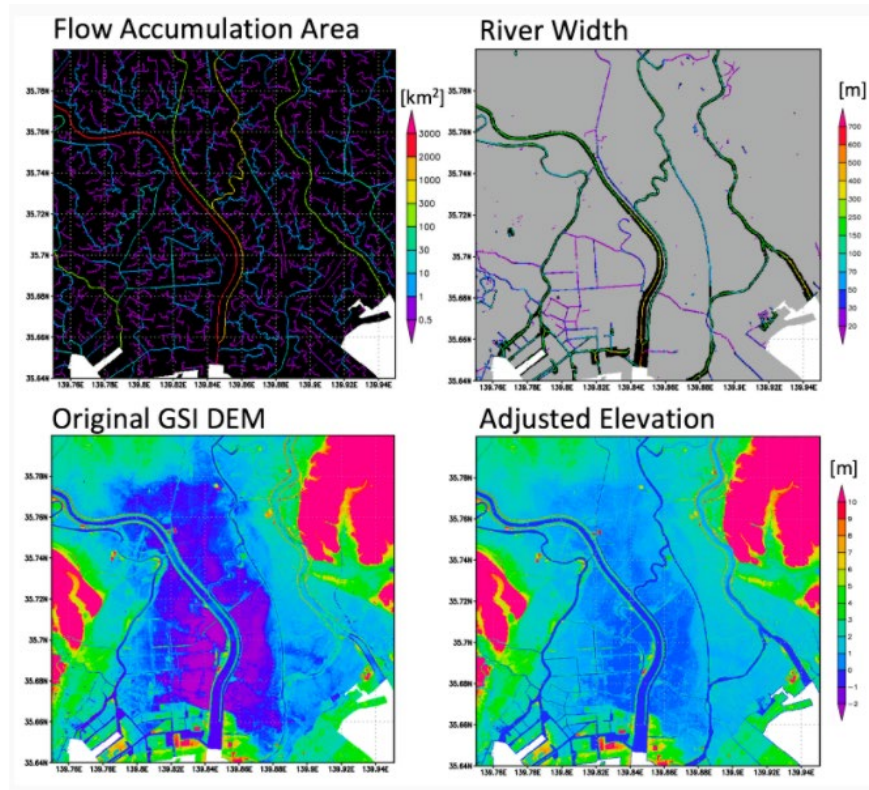


全国水文地形データの整備と高度化

河川ごとに洪水予測モデルを構築する既存手法では日本全域に水平展開するのに多大な時間とコストがかかる。

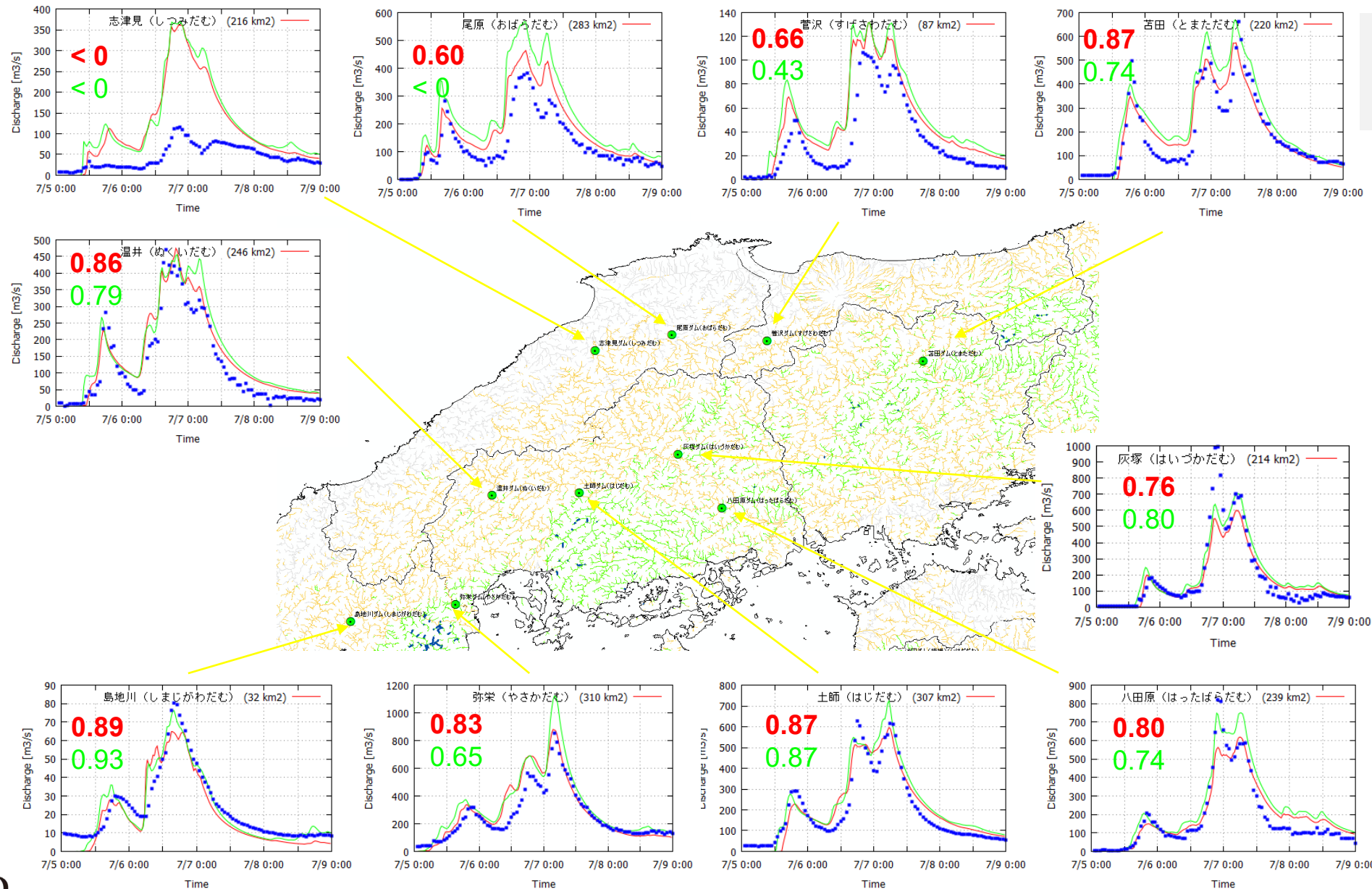


国土地理院の「国土数値情報」「基盤地図情報」を用いて、空間分解能30 m で、各ピクセルにおける表面流の流下方向を示す「表面流向データ」を作成。



「表面流向データ」に整合の取れた「水文補正標高」、「上流集水面積」のデータが含まれる。直轄区間の河道断面データや航空写真の情報を、川幅を含む断面情報の高度化を進める。

平成30年7月豪雨を対象とした広域解析:ダム流入量推定



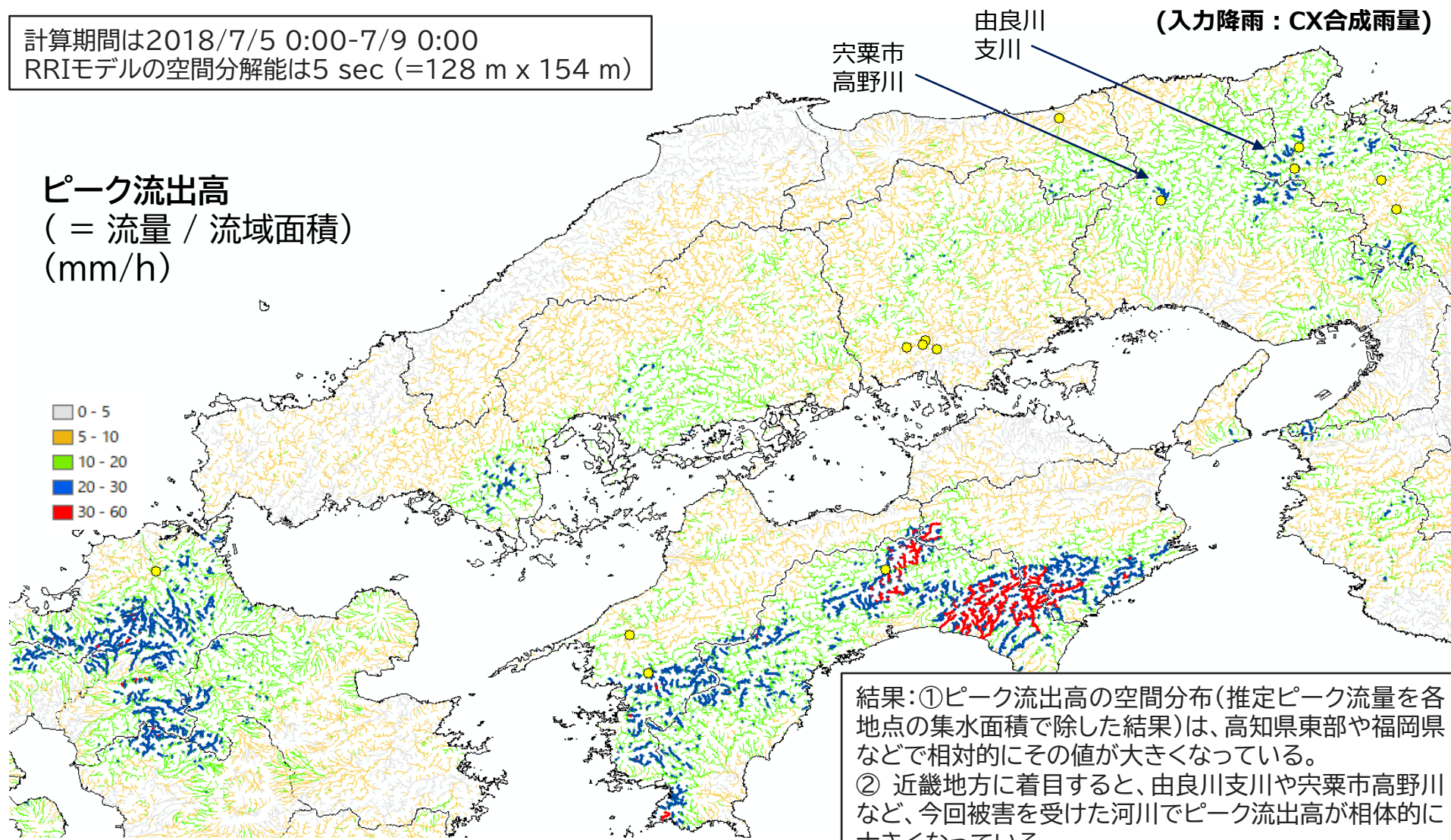
パラメータは空間一様でキャリブレーション無し

平成30年7月豪雨を対象とした広域解析:ピーク流出高

計算期間は2018/7/5 0:00-7/9 0:00
RRIモデルの空間分解能は5 sec (=128 m x 154 m)

ピーク流出高
(= 流量 / 流域面積)
(mm/h)

0 - 5
5 - 10
10 - 20
20 - 30
30 - 60



結果: ①ピーク流出高の空間分布(推定ピーク流量を各地点の集水面積で除した結果)は、高知県東部や福岡県などで相対的にその値が大きくなっている。
② 近畿地方に着目すると、由良川支川や穴粟市高野川など、今回被害を受けた河川でピーク流出高が相対的に大きくなっている。

③ 空間解像度5秒(約150 m)の分解能で西日本全体の解析ができるようになり、中小河川の流量も推定可能になった。しかし、河川災害の危険性を俯瞰的に示すためには、降雨流出と河川流下能力の地域特性を反映することが課題(2018年当時)。

河川・ダム の 長時間洪水予測・防災支援システムの開発(第2期SIP)

- 洪水予測の範囲(領域・時間)の拡大
- 長時間予測によるダム管理の高度化

③統合ダム防災支援システムダム群最適放流操作(事前放流、連携操作)

①長時間洪水予測システム(主要河川の長時間予測)

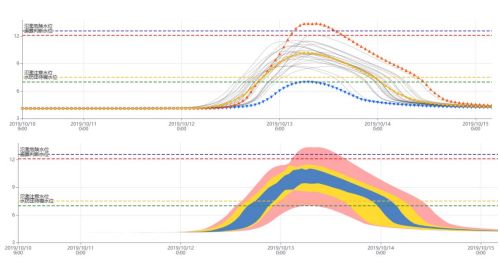
②広域洪水予測システム(全国の中小河川の予測)

15日前予測 120時間前予測 39時間前予測 6時間前予測 → 発災

予測リードタイムの長時間化

予測領域の拡大と高空間分解能化

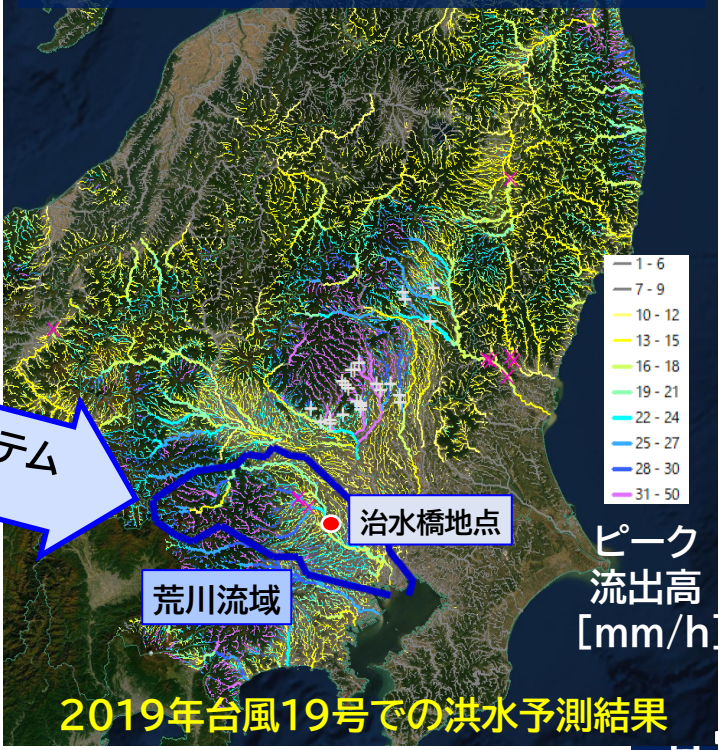
広域洪水予測システム



荒川での長時間アンサンブル水位予測(治水橋地点)

荒川での長時間洪水予測システム(アンサンブル水位予測)

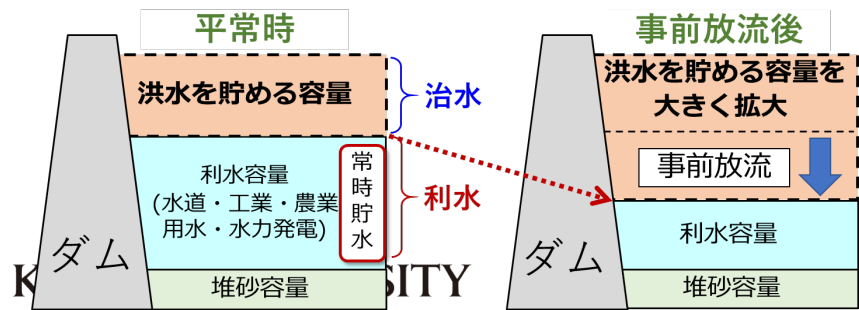
- 全国を150mの空間解像度で覆い、降雨流出から洪水氾濫までをRRIモデルで一体的に解析する洪水予測モデルを構築
- これまで流量・水位の予測情報のなかった中小河川の6時間先水位予測をリアルタイムで実施
- RRIモデルを荒川の1次元不定流モデルに接続し、本川での120時間先までの長時間アンサンブル水位予測を実施



2019年台風19号での洪水予測結果

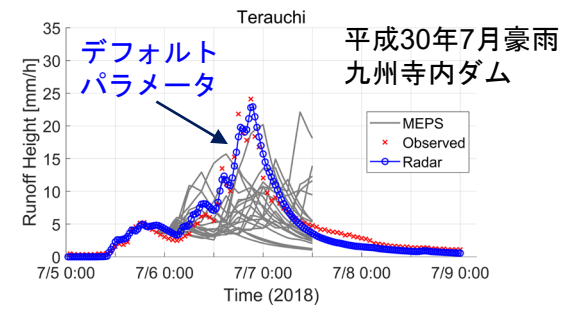
東京都立大学

長時間予測による事前放流の強化とダムの治水容量の増大化

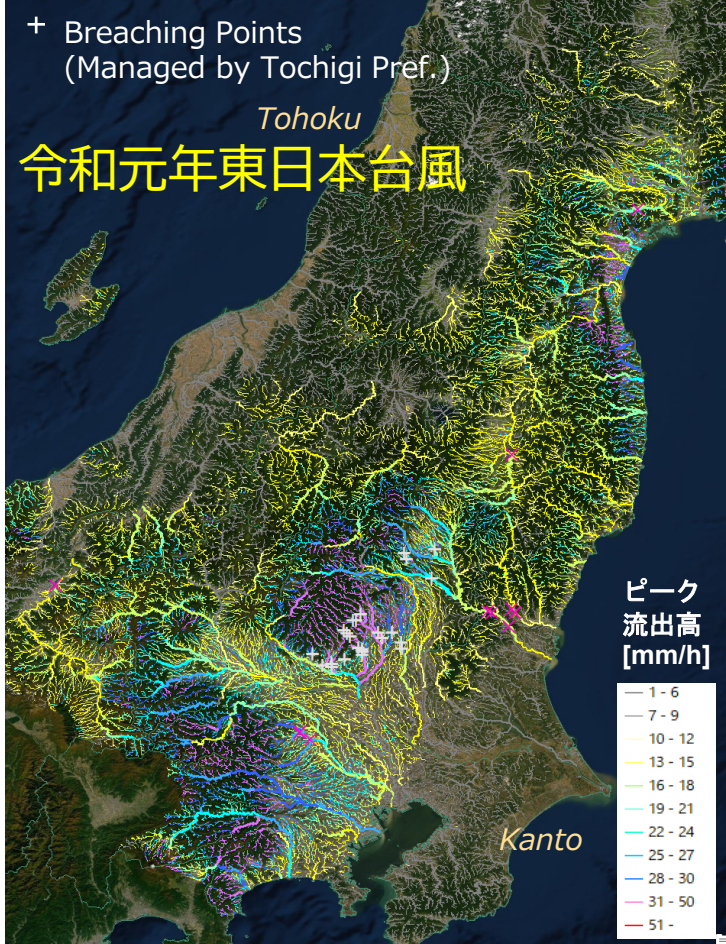


ダム～河道～高潮連携システム

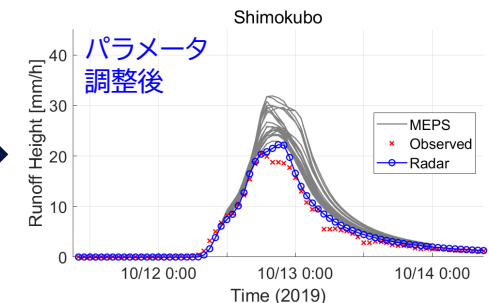
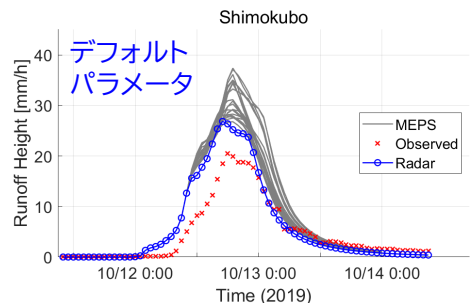
西日本豪雨と東日本台風への適用事例から見えてきた課題



西日本:不飽和部を考慮
しないデフォルトパラメータ
で概ね再現可能。

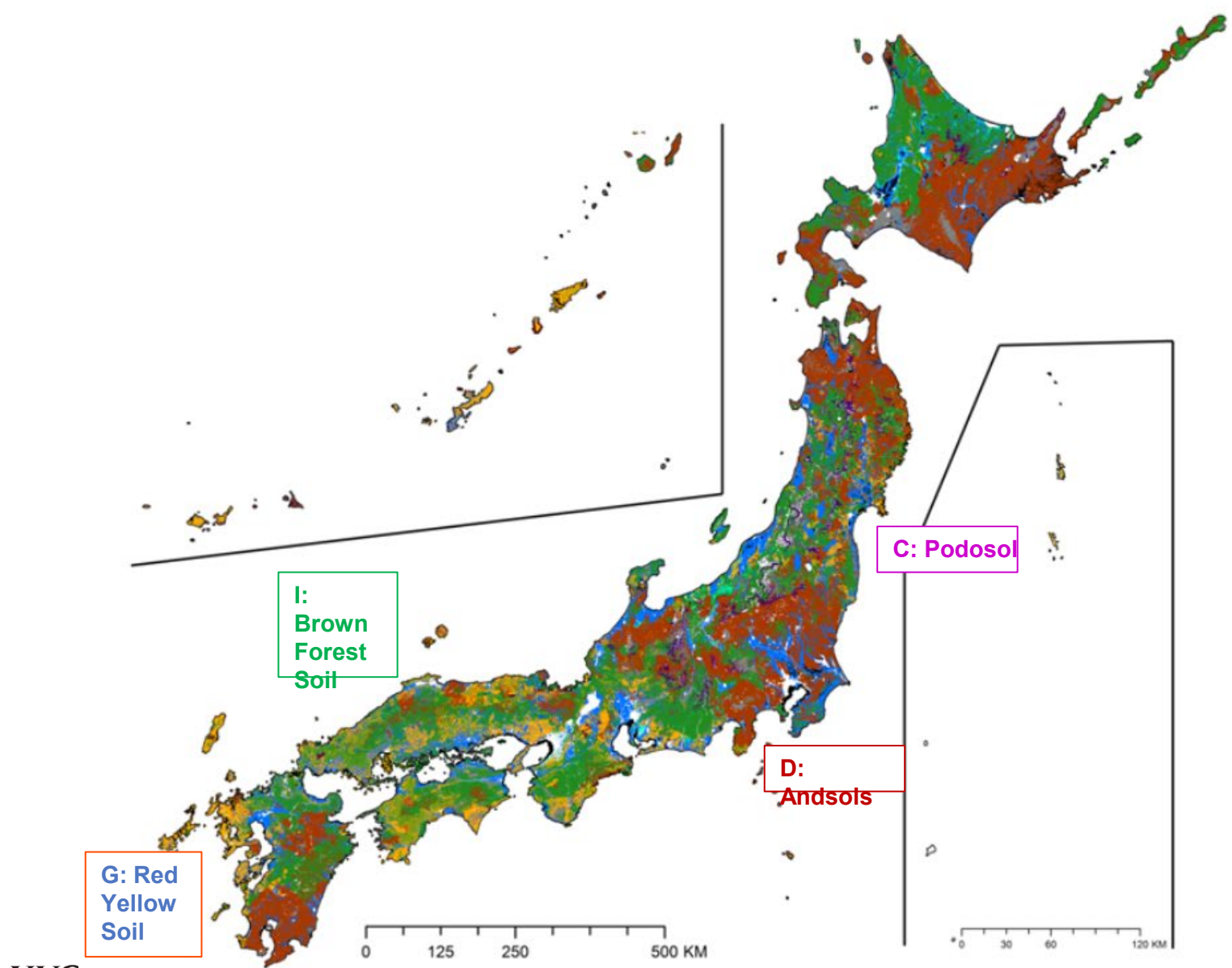


関東:不飽和部を考慮して
洪水流出を抑制する
パラメータの設定が必要。



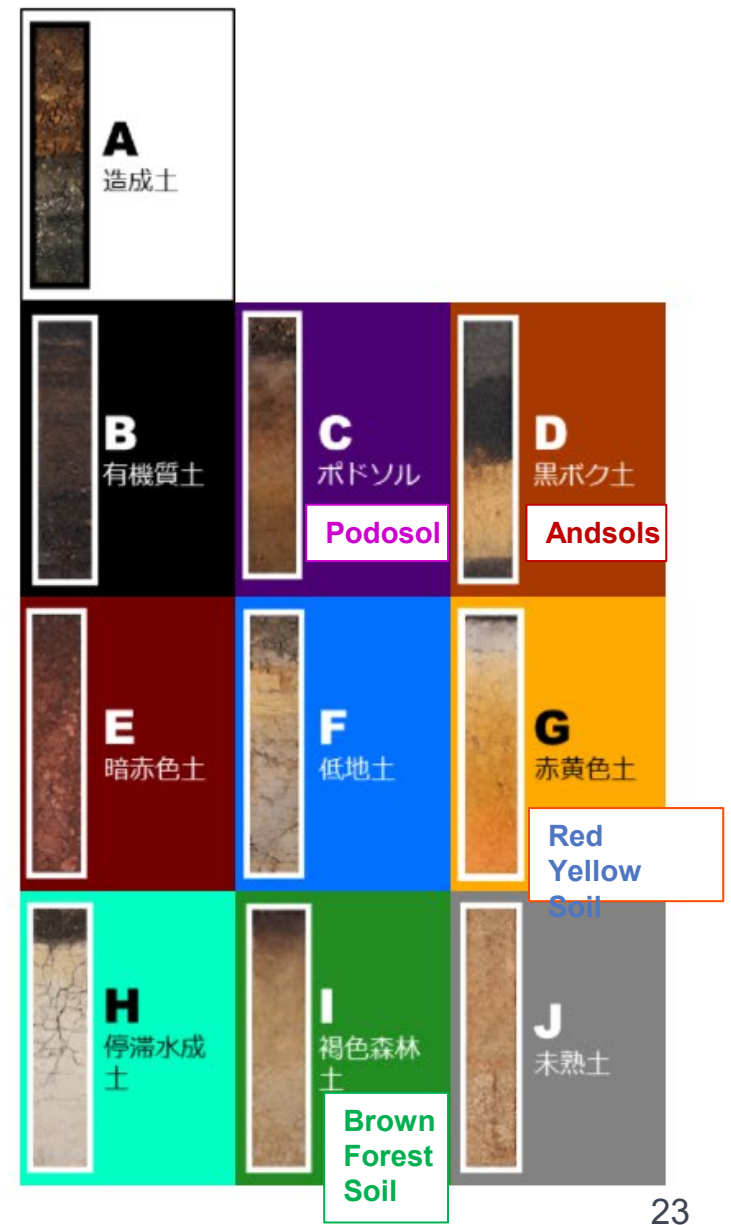
Sayama, T., Yamada, M., Sugawara Y., Yamazaki D. (2020) Ensemble flash flood predictions using a high-resolution nationwide distributed rainfall-runoff model, PEPS.

土壌特性の影響？



KYC

<https://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/>



土壌・地質の空間分布情報を用いたパラメータの地域統合化

■ 目的

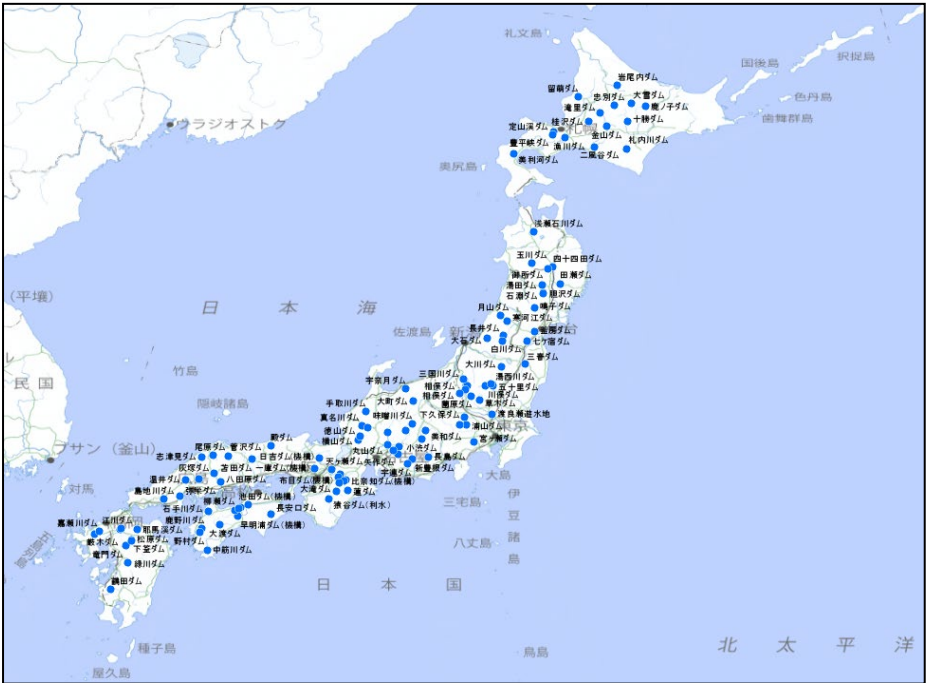
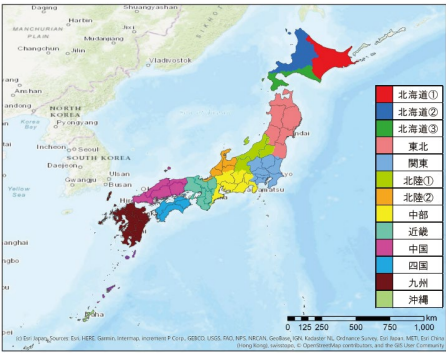
- 豪雨に対する流出応答特性が、土壌や地質によって、どのように異なるかを解明する。
- 土壌マップ・地質マップを用いた全国版RRIモデルのパラメータ地域統合化法を提案する。

■ 考え方

- ・全国に分布する121のダム流域を対象(山地域、流量データ精度)
- ・出水イベントの規模は、凡そ年最大から数年に1度程度を対象
- ・一つのパラメータで複数のイベントを再現することを重視する

■ データセット

- ・2006年から2018年の気象庁解析雨量
- ・全国14地域毎に10出水期間を選定。
うち各ダムで流出量の多い7出水を分析対象



パラメータ地域統合化の準備

Notation	Unit	Parameter values					
n_{slope}	$m^{-1/3}s$	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
γ_a	-	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
γ_m	-	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
k_a	m/s	0.030	0.050	0.075	0.100	0.150	0.200
β	-	4	5	6	7	8	9

- ① 5種類のパラメータをそれぞれ6つに離散化： $6^5 = 15625$ 通りの組み合わせ
121ダム、7出水で全てを試行するのは 困難。同等の応答を示す組み合わせも多い。
- ② 2流域、各2出水イベントを対象に全15625通りの計算を実施したうえで、
ハイドログラフをクラスタリング。異なる挙動をする40組のパラメータセットを抽出し、
ピーク流出量の多いものからパラメータ番号1から40番とした。

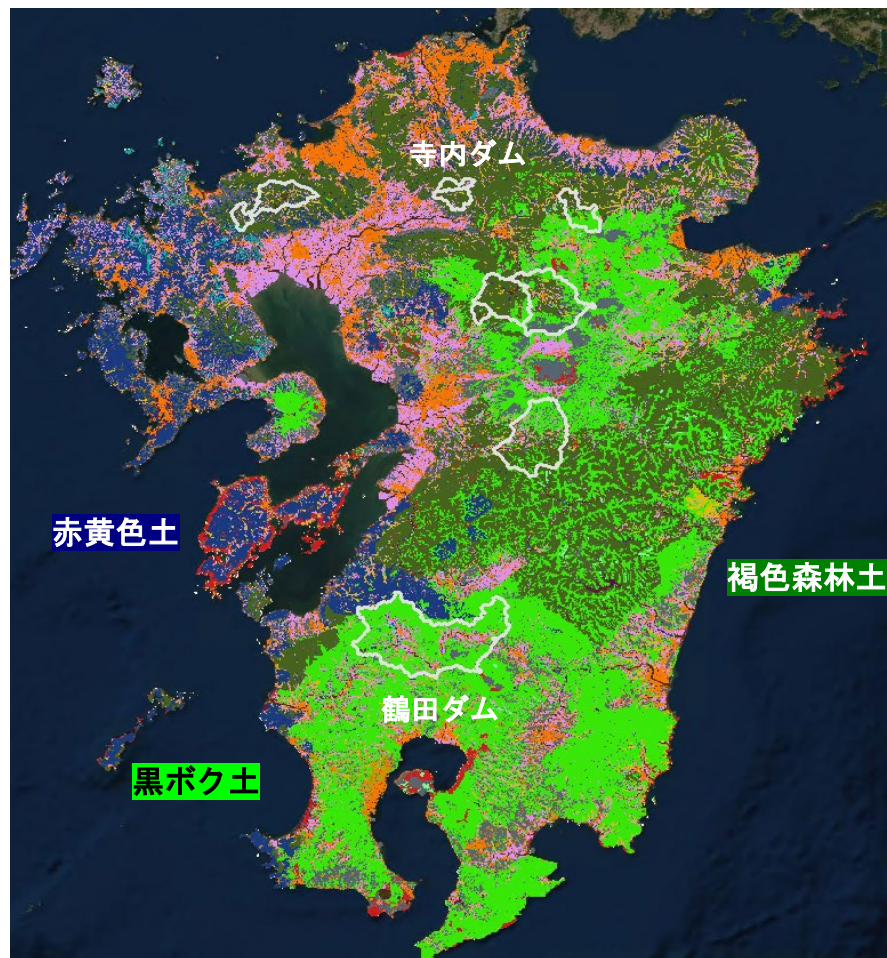
ID	n_{slope} [$m^{-1/3}s$]	γ_a [-]	γ_m [-]	k_a [m/s]	β [-]	$Q_{peak-sum}$ [m^3]
1	0.40	0.35	0.00	0.20	4	5542.22
2	0.30	0.40	0.05	0.20	6	5483.43
3	0.40	0.35	0.10	0.20	7	5450.76
4	0.40	0.30	0.15	0.15	6	5285.43
5	0.40	0.50	0.00	0.20	4	5282.19
6	0.40	0.45	0.05	0.15	6	5145.45
7	0.40	0.40	0.10	0.15	6	5138.47
8	0.40	0.35	0.00	0.10	4	5118.42
9	0.50	0.35	0.05	0.10	7	5086.71
10	0.40	0.30	0.20	0.15	6	5044.15
11	0.40	0.40	0.15	0.15	6	4906.03

代表パラメータセット 1~40

- ③ 代表パラメータセット40を用いて、121ダム流域を対象に7出水の流出計算を実施。
NSE、KGE、相関係数、ピーク相対誤差(PE)などで再現性を分析。

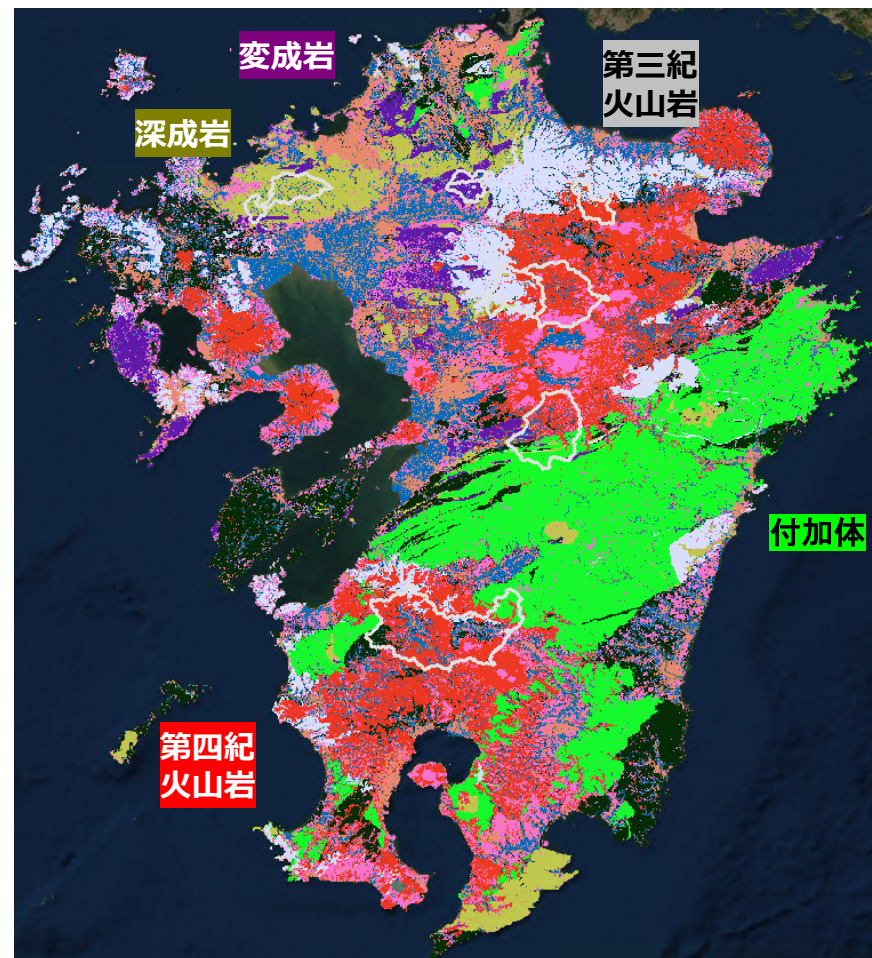
土壌と地質の分布(九州の例)

土壌分布



農研機構:包括的土壌分類第1次試案に基づいた1/20万日本土壌図

地質分布



産総研:シームレス地質図(1/20万)

パラメータ地域統合化:各流域でのパラメータ尤度決定手順

- ① 流出計算の実行と再現性指標の算定
40通りのパラメータで各流域7イベントを対象
- ② 再現性の判定基準を満たすイベント数(右上表)
判定基準:ピーク相対誤差 < 15 %, 相関係数 > 0.85
- ③ 合格数に応じて流域をクラス分け(A | B | C)
同じパラメータセットで、7イベント中
Aクラス:6, 7 イベント合格
Bクラス:3, 4, 5 イベント合格
Cクラス:0, 1, 2イベント合格
- ④ 流域毎に算定したパラメータセットの尤度 $p(q_k|d_j)$ (右下表)
A, B, Cクラスの基準を満たす要因となっている
パラメータセットの割合を尤度 $p(q_k/d_j)$ とする

d_j : ダム流域 j ($j = 1 \cdots n$)
 q_k : パラメータセット k ($k = 1 \cdots l$)

再現性の判定基準を満たす
イベント数(最大7)

パラメータセット

表1	クラス	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8	...	q_j
d_1	B	3	3	5	0	0	0	1	0		3
d_2	A	1	0	0	7	1	2	0	0		1
d_3	B	0	3	2	4	3	2	3	0		0
d_4	C	0	1	2	0	0	1	0	0		0
d_5	B	5	5	0	0	1	1	0	0		0
d_6	B	6	4	0	0	2	2	6	0		3
...											
d_{121}	A	0	0	0	0	1	2	4	0		9

パラメータセットの尤度
 $p(q_k|d_j)$: 横軸の合計は 1

パラメータセット

表2	クラス	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8	...	q_j
d_1	B	1/3	1/3	1/3	0	0	0	0	0		0
d_2	A	1/2	0	0	1/2	0	0	0	0		0
d_3	B	0	1/3	2	1/3	0	0	1/3	0		0
d_4	C	0	0	0	0	0	0	0	0		0
d_5	B	1/2	1/2	0	0	0	0	0	0		0
d_6	B	1/3	1/3	0	0	0	0	1/3	0		0
...											
d_{121}	A	0	0	0	0	0	0	0	0		1

パラメータ地域統合化:条件付確率法



s_j : 土壌(地質)分類 j ($j = 1 \dots m$)
 d_j : ダム流域 j ($j = 1 \dots n$)
 q_k : パラメータセット k ($k = 1 \dots l$)

D_J : ダム流域グループ J ($J = 1 \dots N$)
 Q_K : パラメータグループ K ($K = 1 \dots L$)

$p(q_k|d_j)$: 流域毎のパラメータセットの尤度(既知)

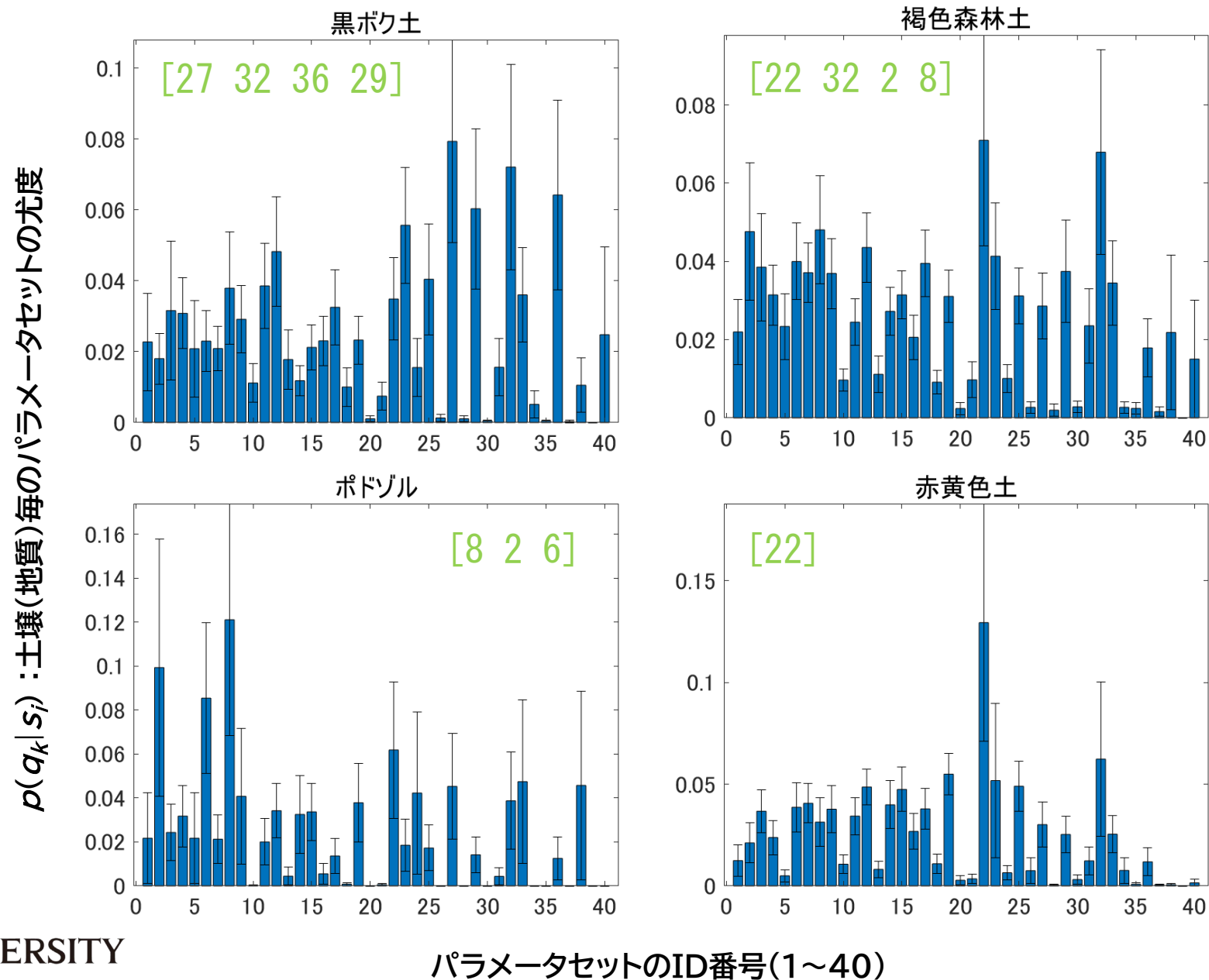
$p(q_k|s_i)$: 土壌(地質)毎のパラメータセットの尤度(未知)

提案手法: 条件付確率法

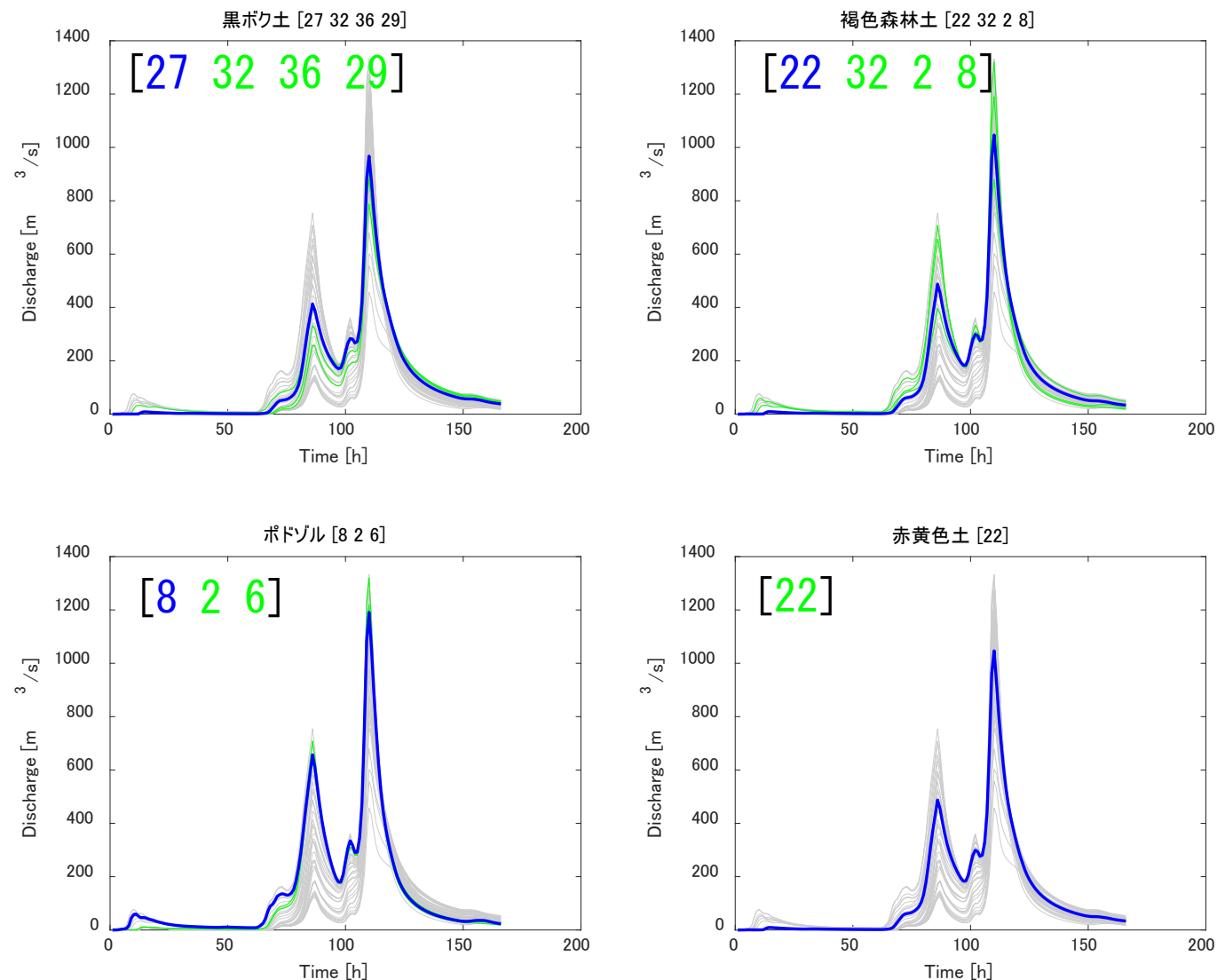
$$\begin{aligned}
 & p(q_k|s_i) \\
 &= \sum_{j=1}^n p(d_j|s_i) p(q_k|d_j) \\
 &= \sum_{j=1}^n \frac{p(s_i|d_j) p(d_j)}{p(s_i)} p(q_k|d_j)
 \end{aligned}$$

流域毎に求めたパラメータ尤度 $p(q_k|d_j)$ と各流域の土壌(地質)面積率 $p(s_i|d_j)$ から、ベイズの定理を用いて、土壌(地質)毎に適したパラメータセットを選択する方法。ブートストラップ法による不確実性評価も可

条件付確率法の結果:各土壌で求めたパラメータセットの尤度

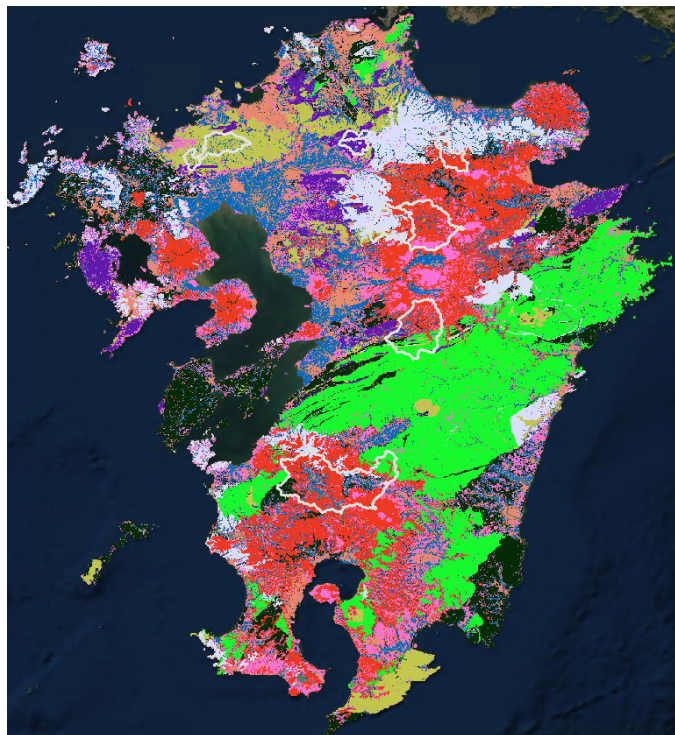


条件付確率法の結果: 設定パラメータによる流出量の違い

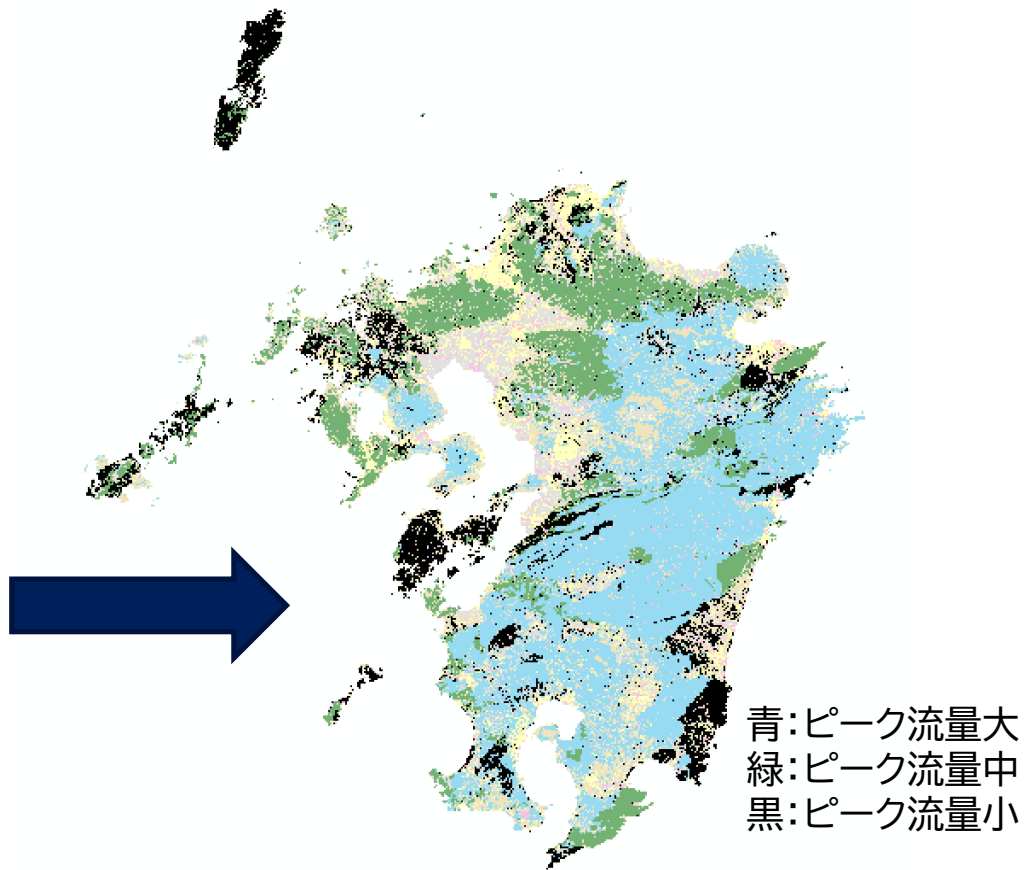


土壌・地質分布を反映したパラメータ

土地利用分布で森林となっている場所を対象に、土壌図と地質図をそれぞれ利用して、パラメータ分布を推定。

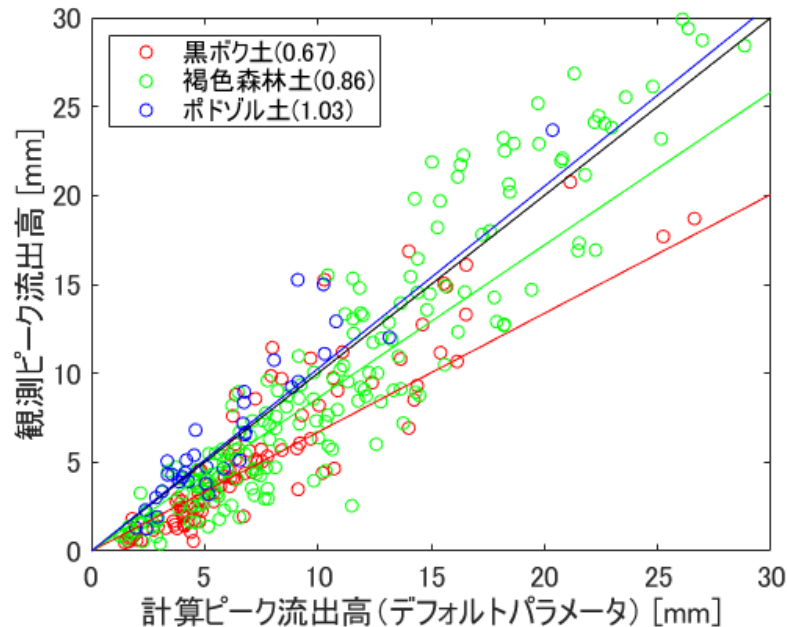
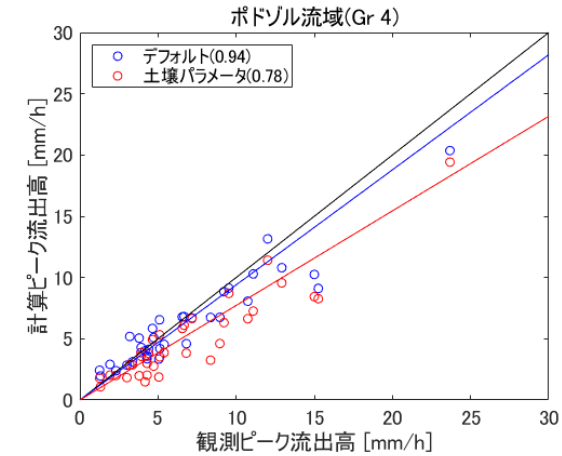
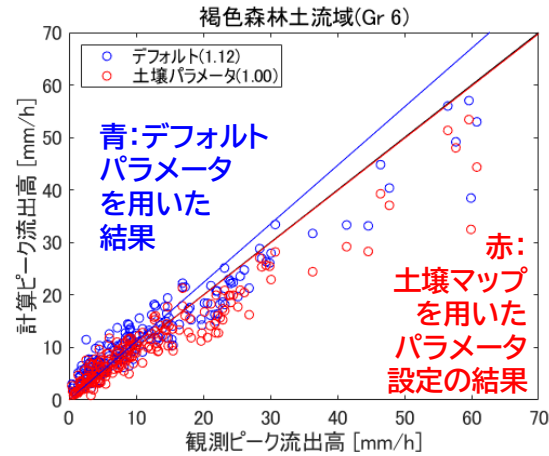
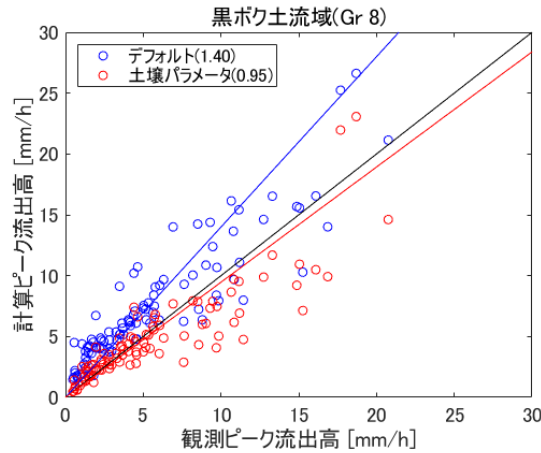


地質図(九州地方)



地質分布を反映したパラメータ

流域土壌による洪水流出の違い

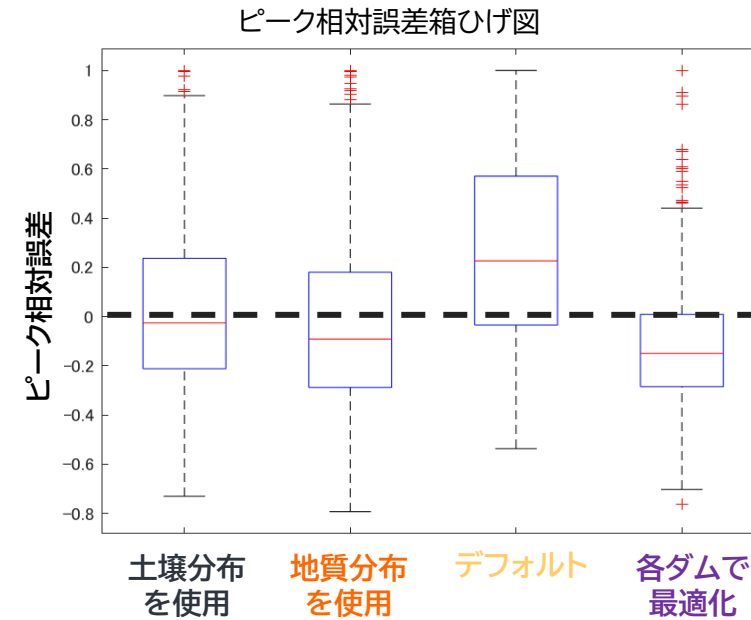
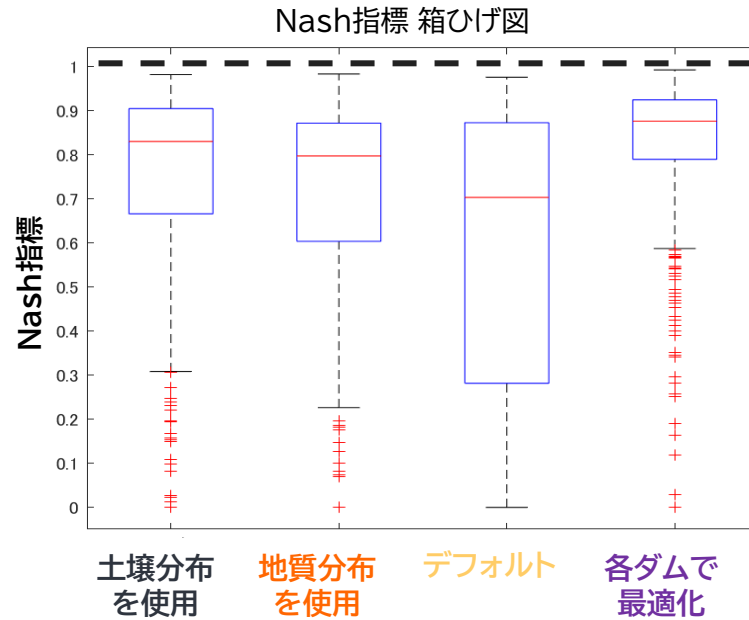


デフォルトパラメータの結果:地形・降雨の時空間分布は反映しつつ、流出機構を単純化した(不飽和の効果を考慮しない)計算結果。それによるピーク流量を1とした場合の、観測ピーク流量の比率、

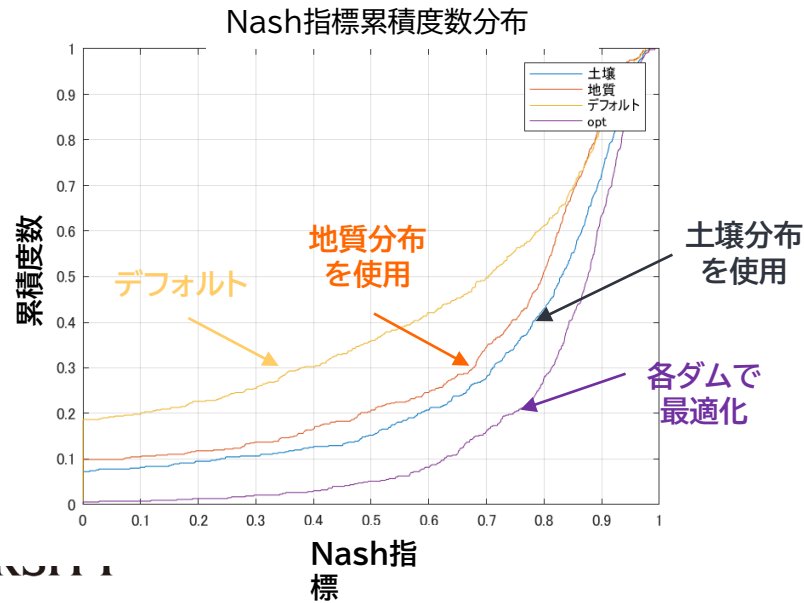
流域土壌による洪水ピーク流量の違いは、

黒ボク土:褐色森林土:ポドゾル
= 0.7 : 0.9 : 1.0

結果: 全国のダム流域を対象とした洪水流出計算の検証



33

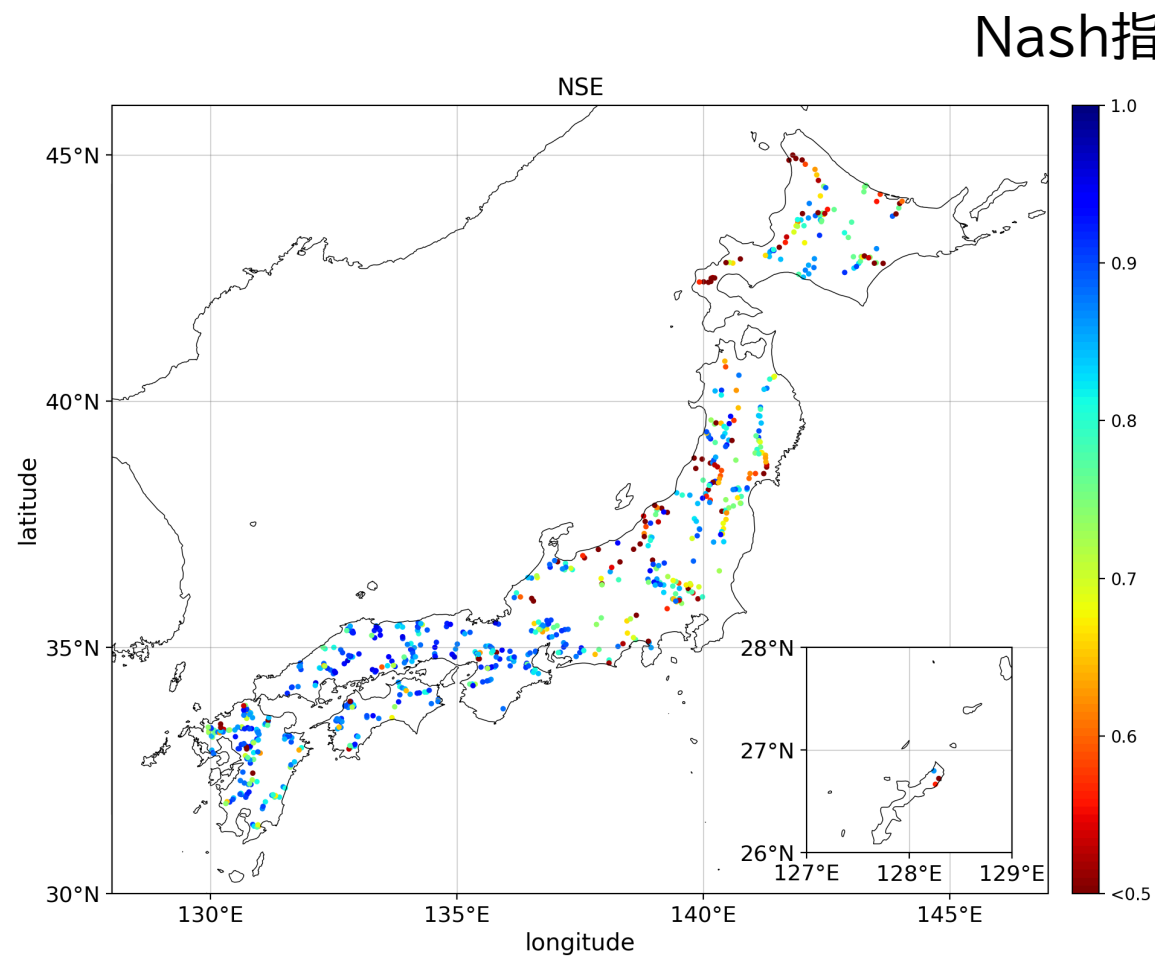


条件付確率法に基づく地域統合化の結果

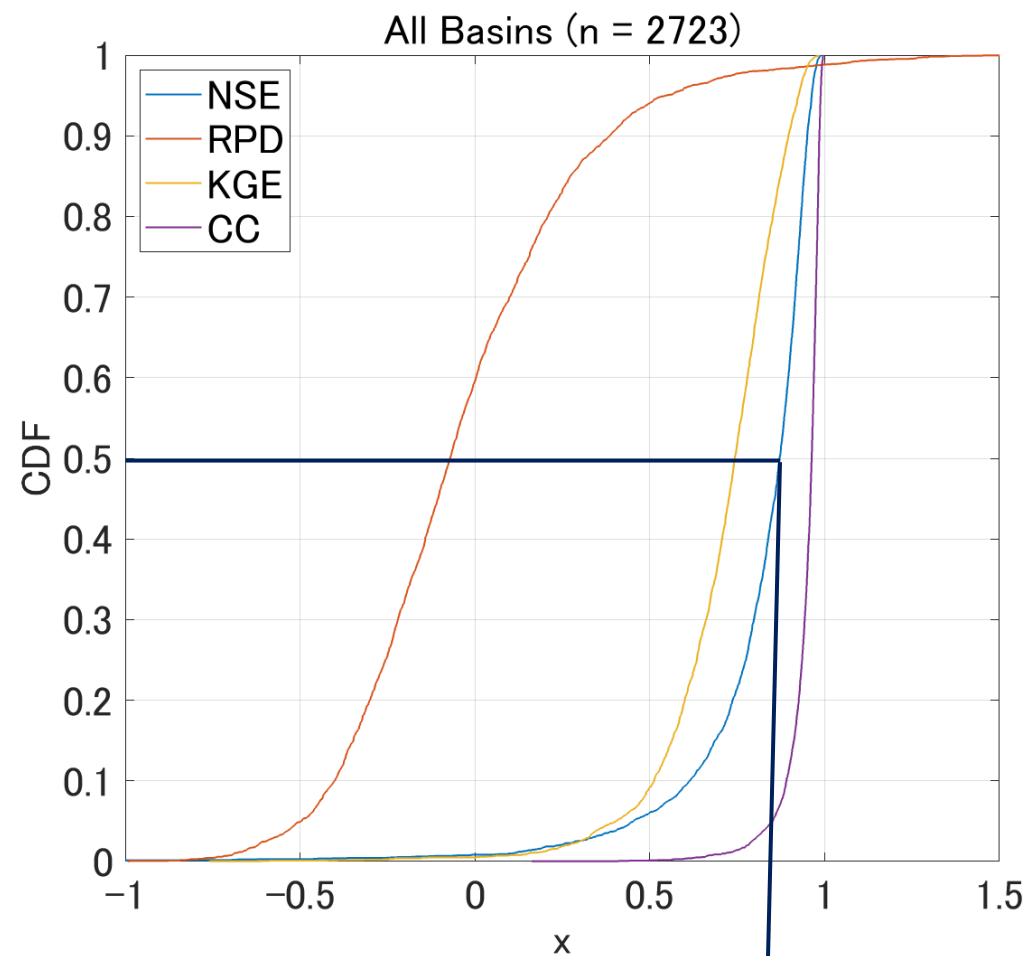
(全国A, Bクラスの75のダムを対象に各ダム7出水で検証)

- ・土壌分布を使用した地域統合化の結果、Nash指標の中央値(0.83)は、各ダムで最適化した場合の結果(0.87)に近付く。
- ・特にデフォルトで顕著であったピーク相対誤差のバイアスが地域統合化によって改善される。
- ・今回の事例では、土壌マップを用いた方が地質マップを用いるよりも好成績。

全国の観測地点における検証結果



全国711地点:2,723 出水イベントによる検証

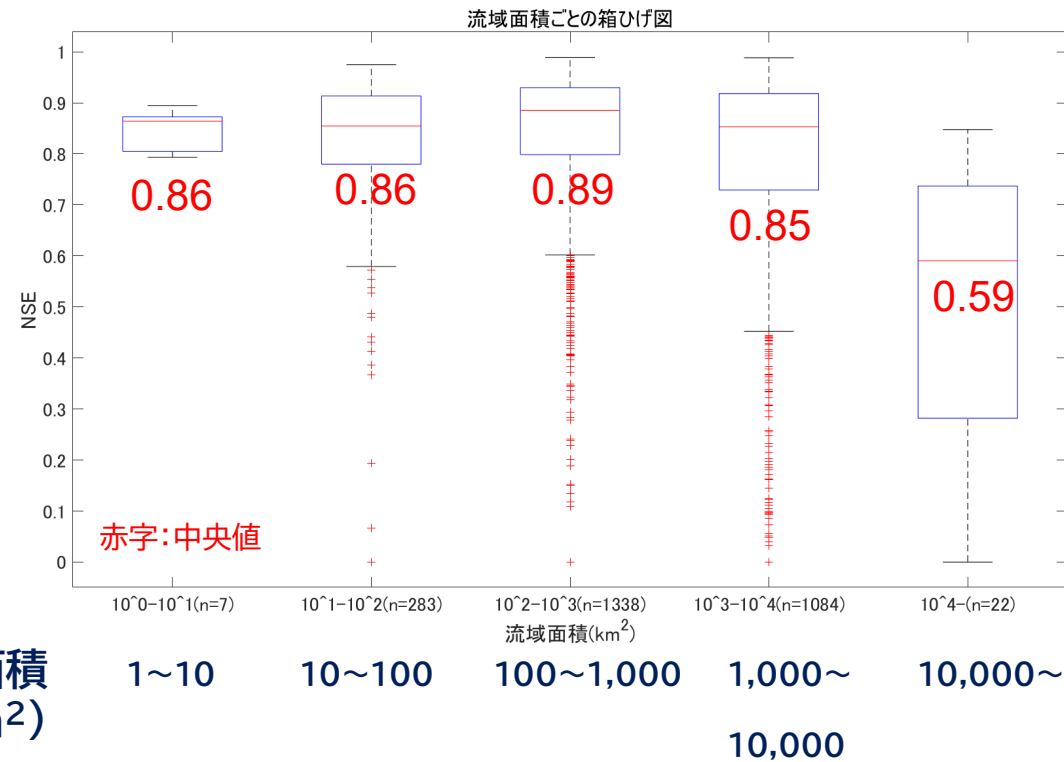


Nash指標の中央値: 0.87

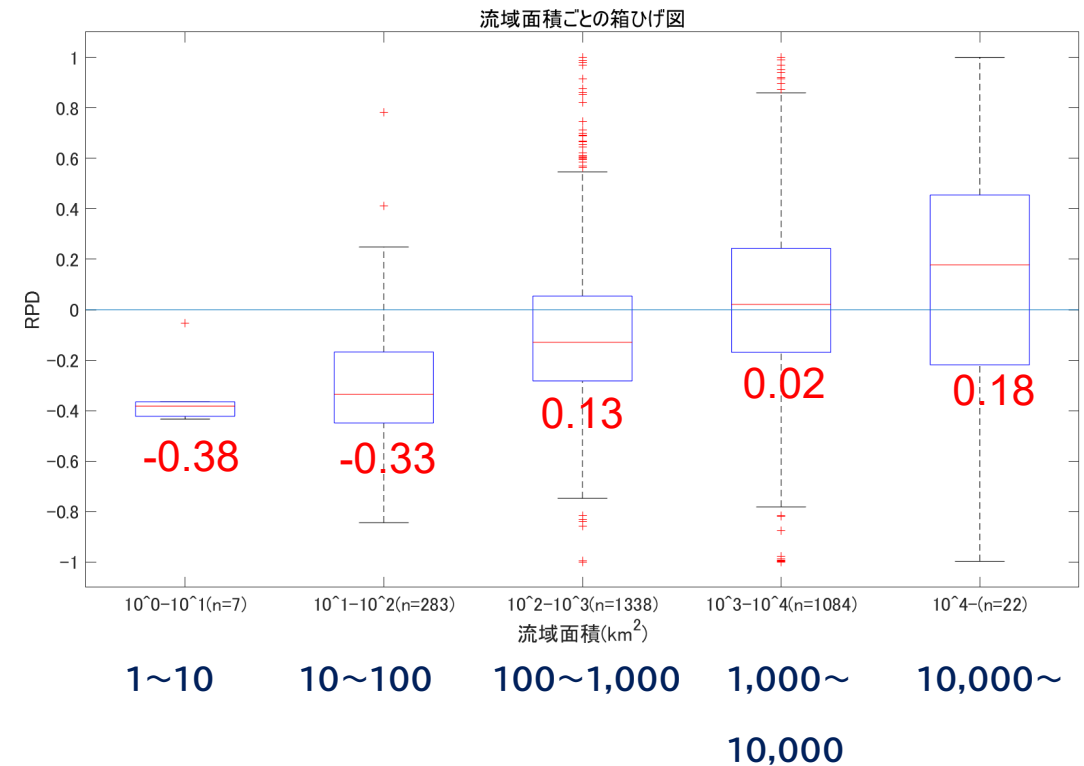
予測精度の傾向分析: 流域面積区分

全国の観測点 (711地点、2732 イベント)

Nash指標



ピーク相対誤差

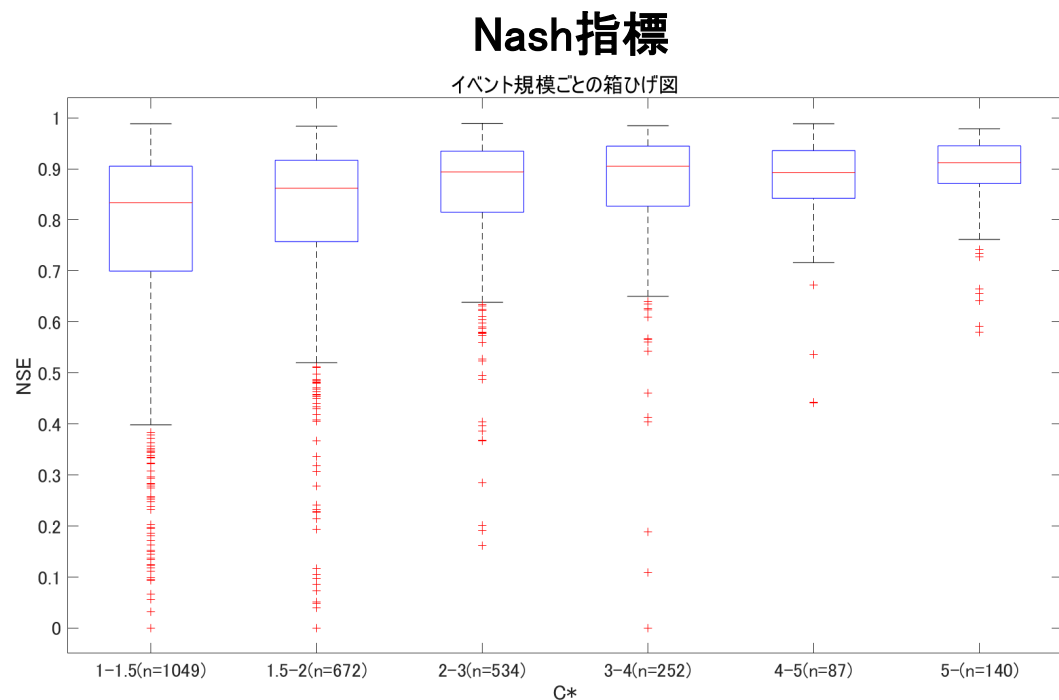


- ✓ 流域面積(10~10,000 km²) で精度に大差はない
- ✓ 流域面積が大きい範囲(10,000 km²~)で精度が低下の傾向
- ✓ 流域面積が小さい範囲(~100 km²)でピーク流量を過小評価の傾向

山田ら(土論2022):
一級水系直轄管理区間の
72.9 %にあたる7734.7 km
に計26032断面を反映:
大河川再現精度向上に期待

予測精度の傾向分析: イベント規模区分

全国の観測点 (711地点、2732 イベント)

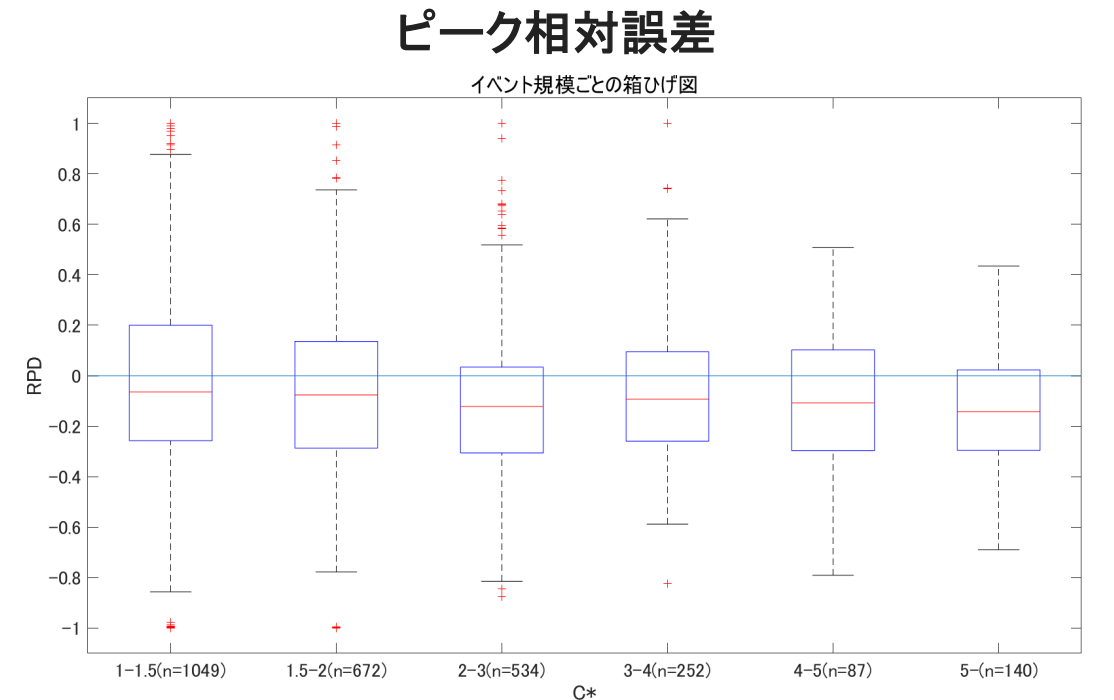


イベント規模 小



イベント規模 大

イベント規模 小



イベント規模 小



イベント規模 大

- ✓ イベント規模が大きくなるほど精度(Nash指標)がやや良好になる傾向
- ✓ ピーク相対誤差はイベント規模にそれほど影響を受けない

C*: 洪水イベント規模の指標
年最大ピーク比流量の平均値(全国平均値)に対する比率
(例: C*2 → 全国平均で年最大ピーク流量の2倍程度に相当)

3. d4PDFデータを用いた確率洪水流量の推定

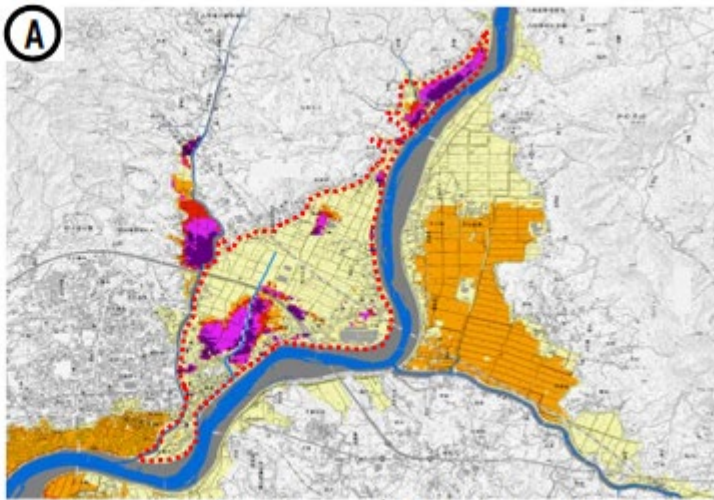
浸水頻度情報の重要性



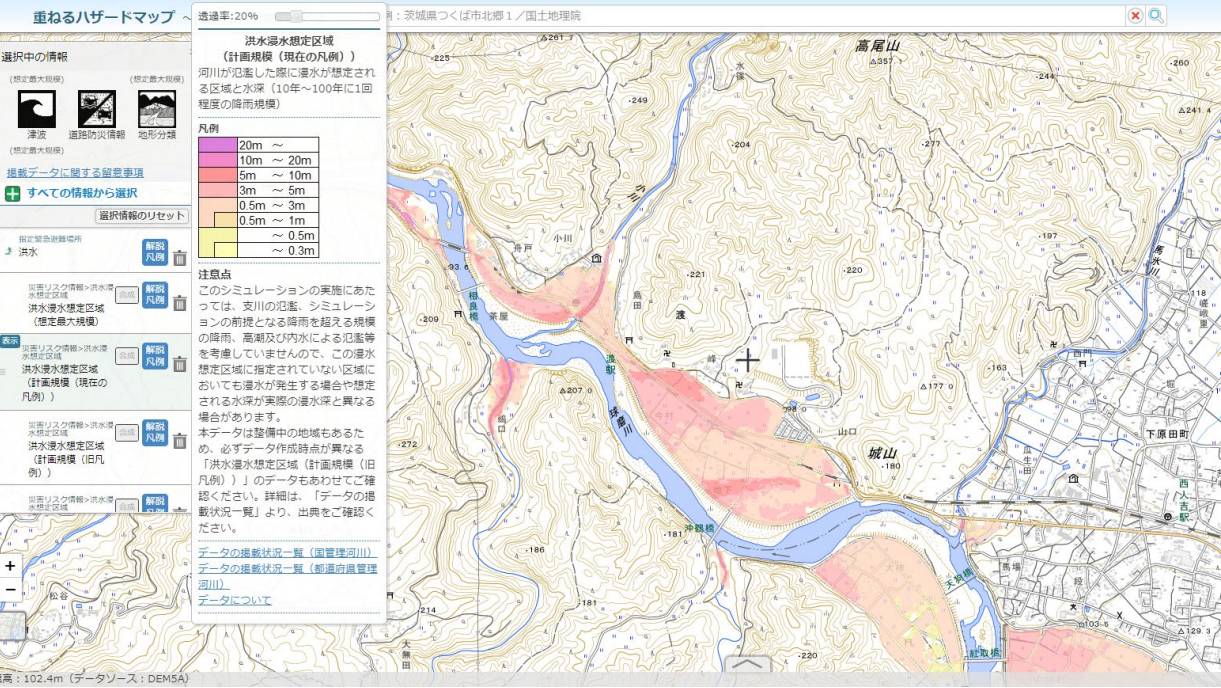
○水害リスクマップ※1



※2 上記凡例の()内の数値は確率規模を示していますが、これは例示です。



..... 内水氾濫浸水解析対象範囲 ※1 当資料の水害リスクマップは床上浸水相当(50cm以上)の浸水が発生する範囲を示しています。【暫定版】



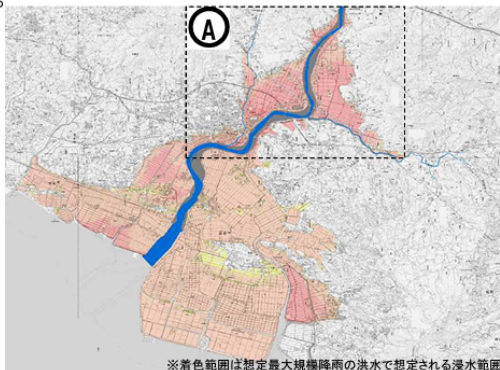
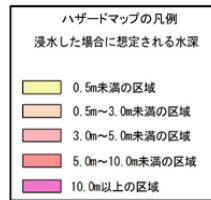
水害リスク情報

水害リスク情報の充実(水害リスクマップ(浸水頻度図)の整備)

- 従来、想定最大規模降雨の洪水で想定される浸水深を表示した水害ハザードマップを提供し、洪水時の円滑かつ迅速な避難確保等を促進。
- 今後は、これに加えて、浸水範囲と浸水頻度の関係をわかりやすく図示した「水害リスクマップ(浸水頻度図)」を新たに整備し、水害リスク情報の充実を図り、防災・減災のための土地利用等を促進。

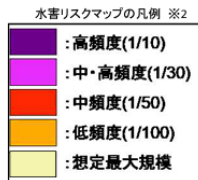
水害リスク情報の充実

○水害ハザードマップ

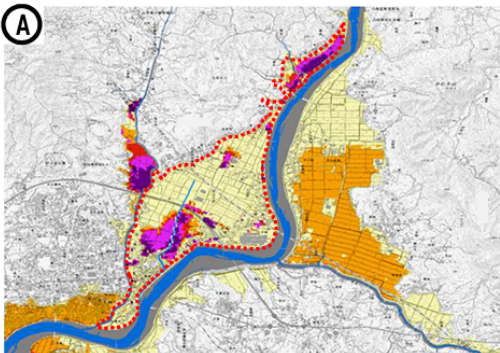


※着色範囲は想定最大規模降雨の洪水で想定される浸水範囲

○水害リスクマップ※1



※2 上記凡例の()内の数値は確率規模を示していますが、これは例示です。



..... 内水氾濫浸水解析対象範囲

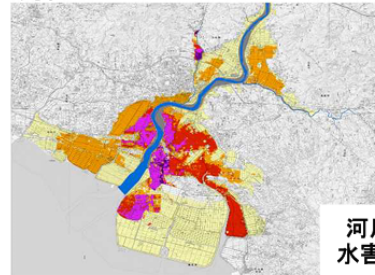
※1 当資料の水害リスクマップは床上浸水相当(50cm以上)の浸水が発生する範囲を示しています。(暫定版)

水害リスクマップの活用イメージ

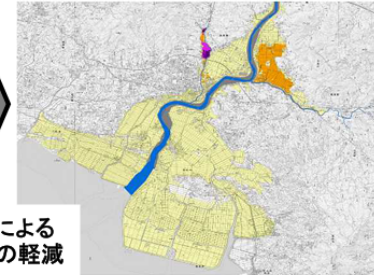
現在の水害リスクと今後実施する河川整備の効果を反映した将来の水害リスクを提示し、以下に取り組む

- 住居・企業の立地誘導・立地選択や水害保険への反映等に活用することで、水害リスクを踏まえた土地利用・住まい方の工夫等を促進
- 企業BCPへの反映を促進することで、洪水時の事業資産の損害を最小限にとどめることにより、事業の継続・早期復旧を図る

現在(外水氾濫のみ)



整備後(外水氾濫のみ)



河川整備による
水害リスクの軽減

【令和4年度の国土交通省としての取組】

- ・全国109の一級水系において、外水氾濫を対象とした水害リスクマップの作成を完了させるとともに、先行して、特定都市河川や水災害リスクを踏まえた防災まちづくりに取り組む地区において、内水も考慮した水害リスクマップを作成

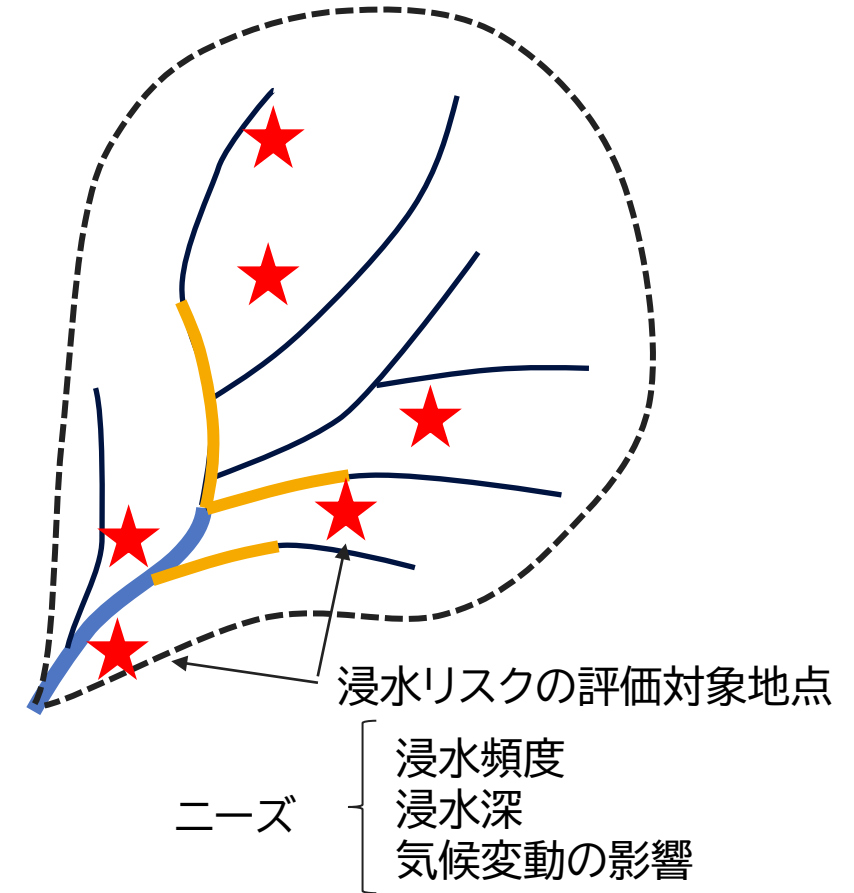
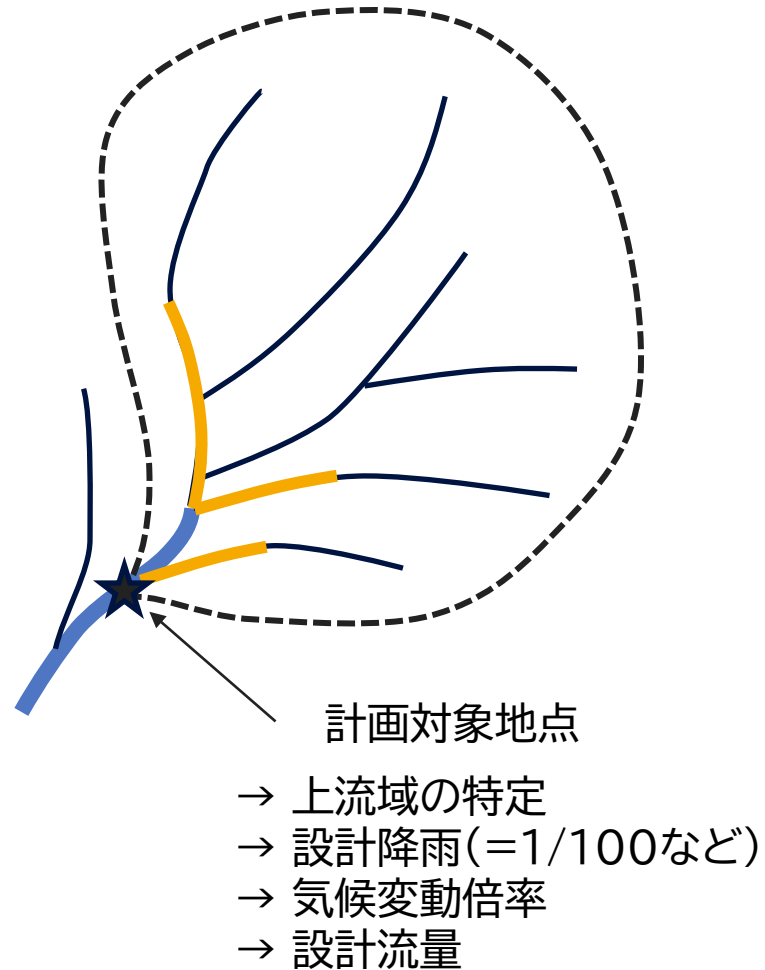
今後の課題

- ・気候変動の影響評価
- ・日本全国の水害リスク評価
- ・一級水系外水以外の河川氾濫
- ・幹川・支川の同時氾濫
- ・企業BCPなど多様化するニーズへの対応

治水計画上の確率評価と地先の浸水リスク評価の違い

A: 気候変動の影響を反映した治水計画論

B: 気候変動の影響を反映した地先の浸水リスク評価

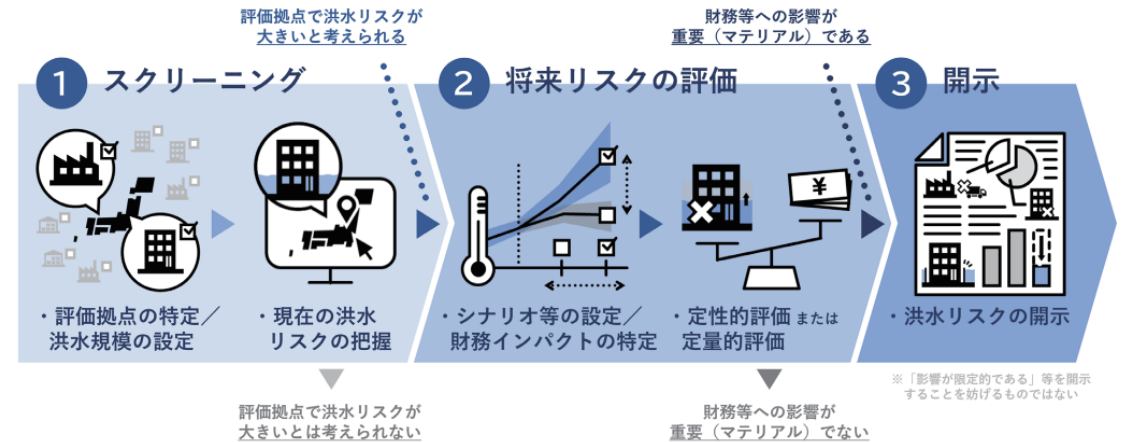
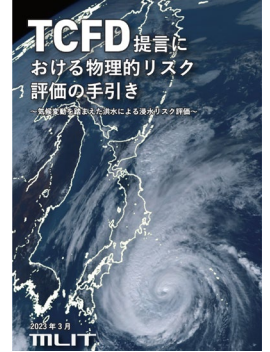


全国の浸水リスクを詳細に推定することは困難。
しかし、全ての河川において、気候変動を考慮
した確率流量と対応するハイドロがあれば、
それを境界条件にした氾濫解析は実施可能では。

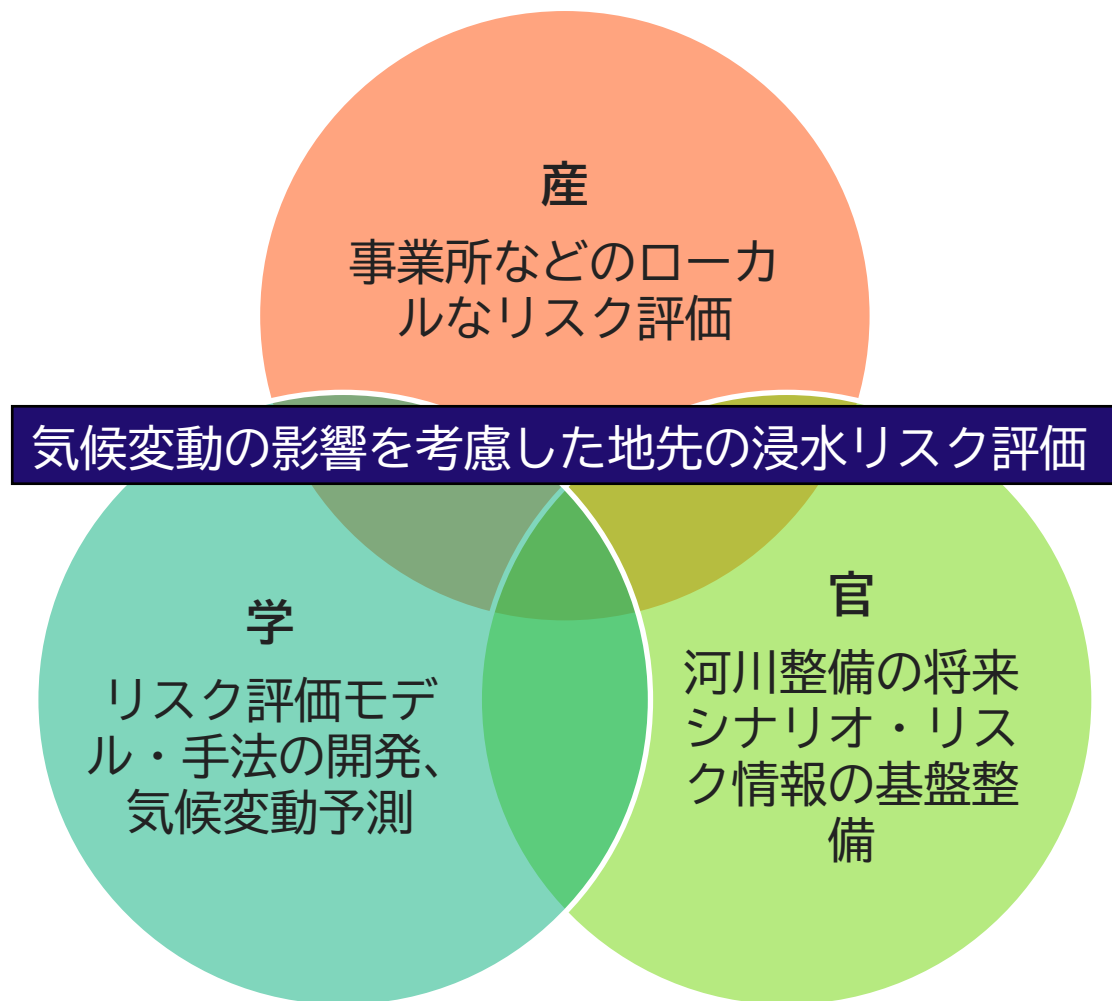
TCFD提言：物理的リスク評価

- TCFD (Task Force on Climate-related Financial Disclosures: 気候関連財務情報開示タスクフォース)提言(2017)
- 国内でもプライム市場上場企業はTCFDまたは同等の枠組みに基づく情報開示を進めるようコーポレートガバナンス・コードが改訂(2022.4)
- 2023年には国際サステナビリティ基準審議会(ISSB)が公表するIFRS S2号(気候関連開示)に継承され、財務報告書における気候関連のリスクと機会に関する情報開示を要求

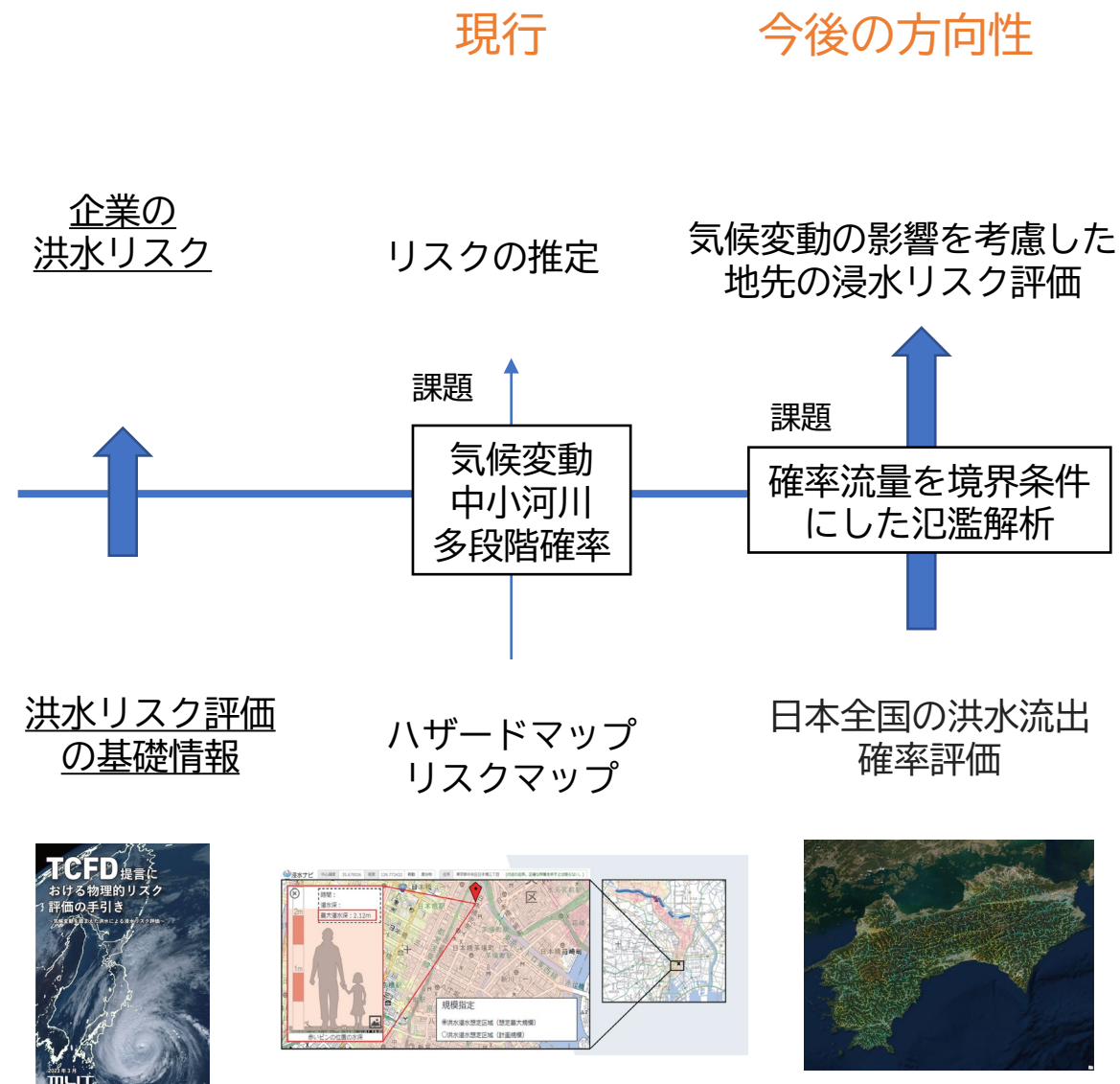
- 国交省:TCFD提言における物理的リスク評価の手引き(2023)



企業の浸水リスク評価における産官学連携



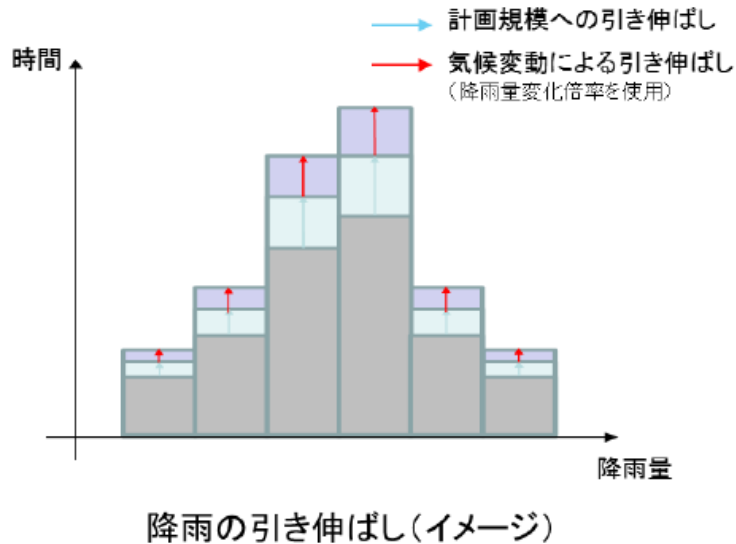
KYOTO UNIVERSITY



「気候変動を踏まえた治水計画に見直す手法」

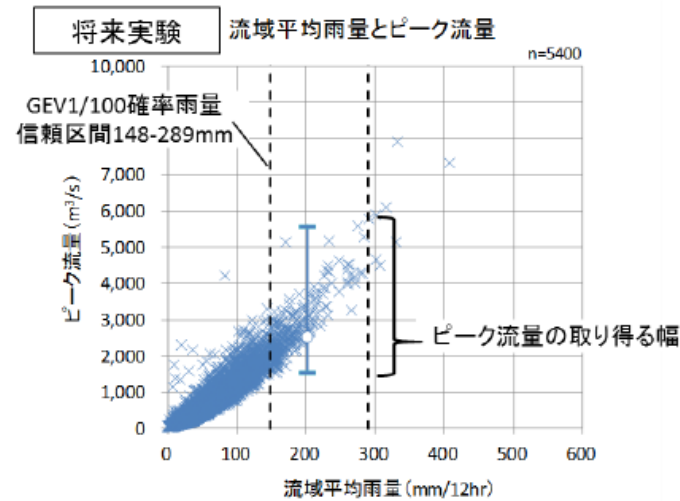
当面の手法①

過去降雨
(計画規模) × 気候変動倍率
【雨確率】



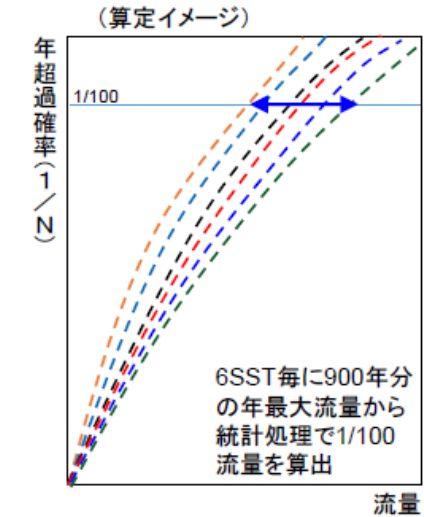
今後の手法②

将来予測降雨
(計画規模・中央値)(d4PDFデータ)
【降雨確率】



今後の手法③

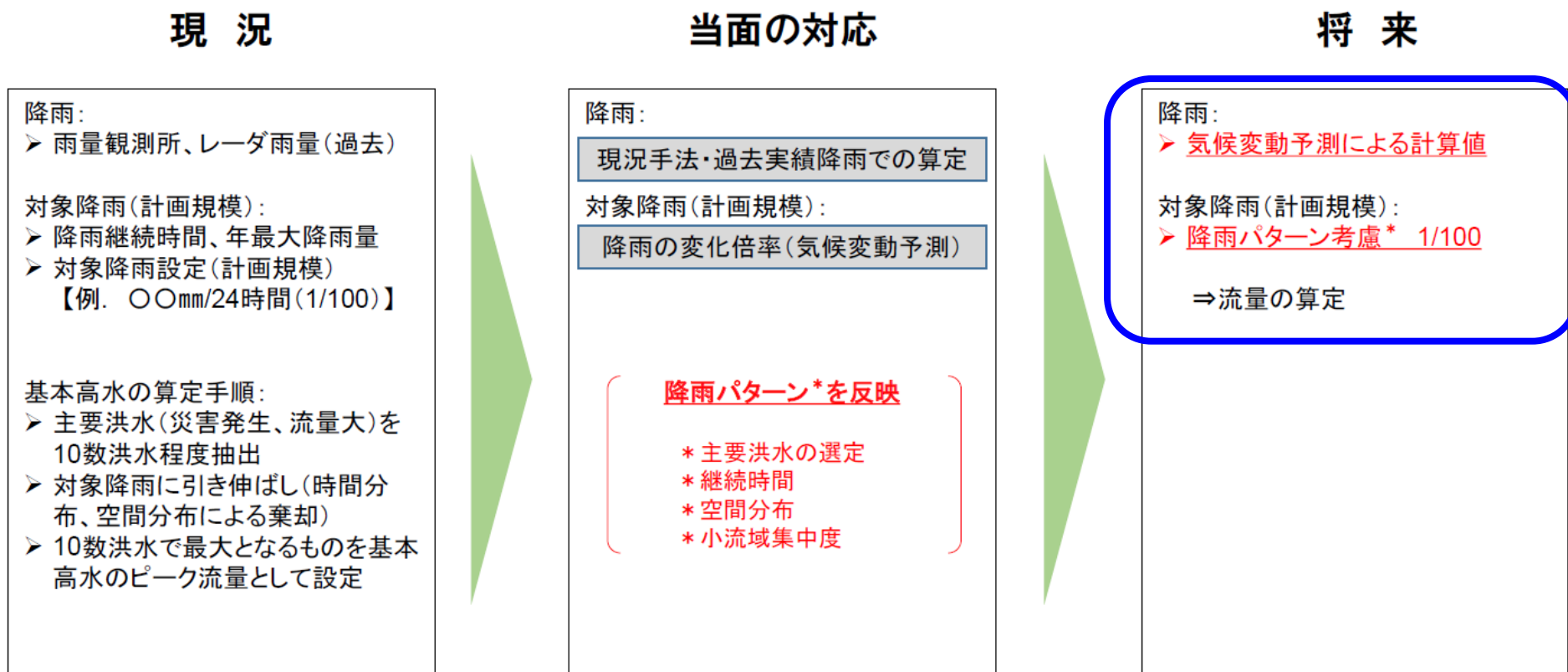
将来予測降雨
(計画規模)(d4PDFデータ)
【流量確率】



「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言より

当面の手法①: 気候変動による降雨量倍率を用いて、計画降雨を設定し、流出計算により基本高水を設定
今後の手法②: 将来予測降雨を用いて多数の流出計算を実施。確率雨量に対するピーク流量から基本高水を設定
今後の手法③: 将来予測降雨を用いて多数の流出計算を実施。流量の年超過確率から基本高水を設定

「気候変動を踏まえた治水計画に見直す手法」



「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言より

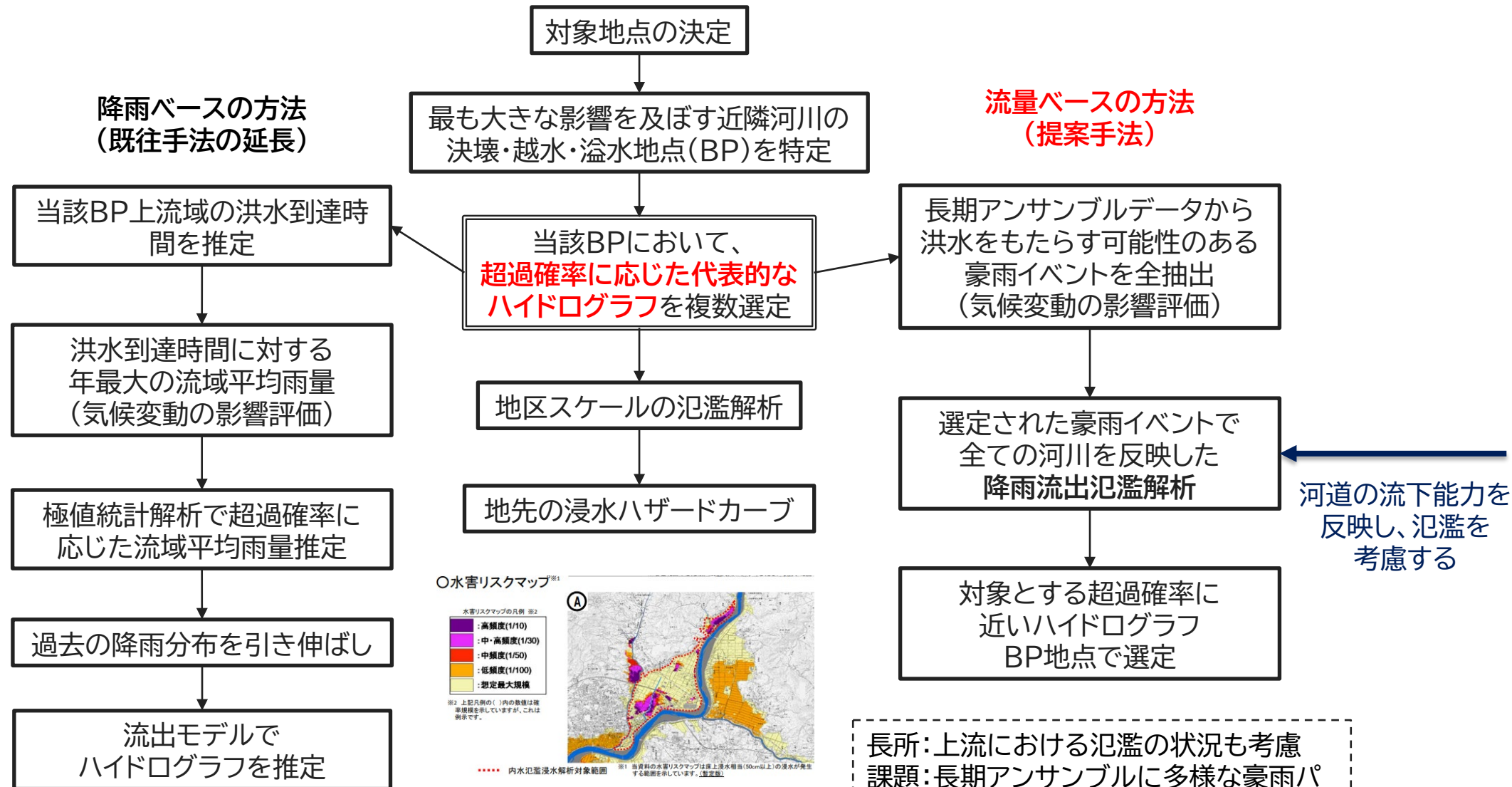
現在:過去の降雨を統計解析して、流量を算定

(データが数十年しかないことを前提とした確率的な治水計画手法)

当面の対応:降雨の変化倍率を求め、降雨パターンを反映して、流量を算定

将来:将来降雨の予測データを活用して流量を算定

日本全国を対象にした地先の水害リスク評価に向けて

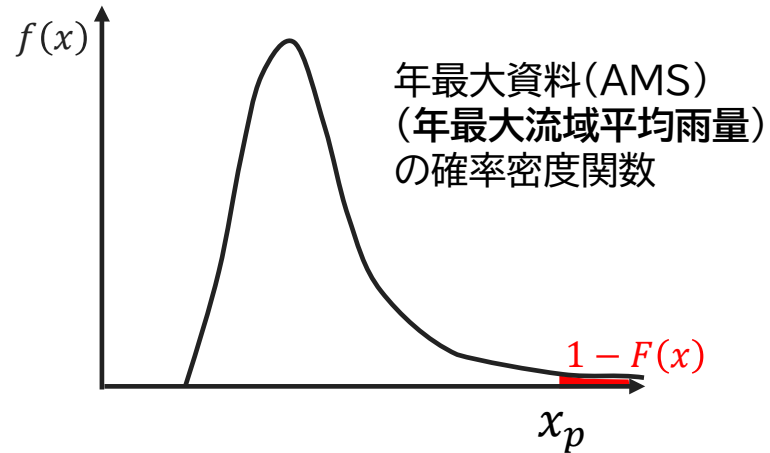


長所: 現行の治水計画に準じた方法
課題: 全国全てのBPで独立して推定が必要

長所: 上流における氾濫の状況も考慮
課題: 長期アンサンブルに多様な豪雨パターンが含まれることが前提

極値統計解析の対象と方法

降雨ベース(既往手法の延長)



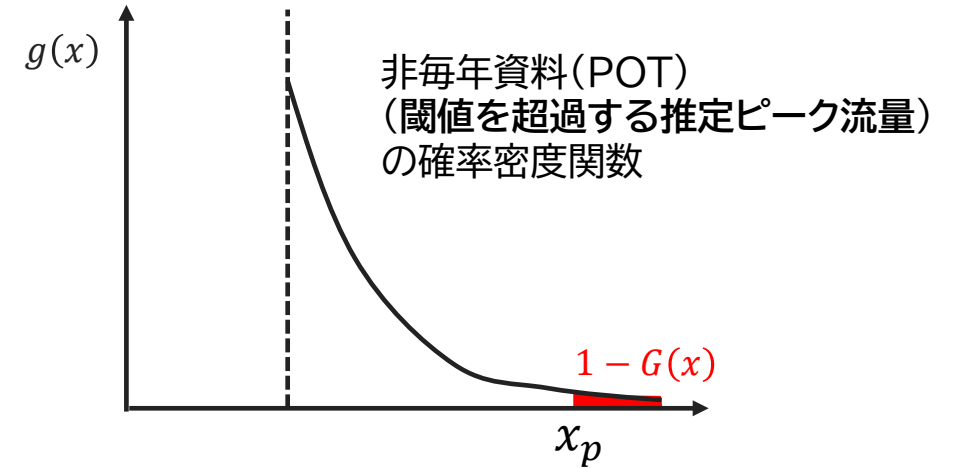
一般極値分布(GEV) $k = 0$ の場合は Gumbel分布

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left(1 - k \frac{x - c}{a}\right)^{1/k}\right\} & k \neq 0 \\ \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x - c}{a}\right)\right\} & k = 0 \end{cases}$$

x_p に対応するリターンピリオド T

$$T = \frac{1}{1 - F(x_p)}$$

流量ベース(提案手法)



一般化パレート分布(GPD) $k = 0$ の場合は 指数分布

$$G(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 - k \frac{x - x_0}{\alpha}\right)^{1/k} & k \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{x - x_0}{a}\right) & k = 0 \end{cases}$$

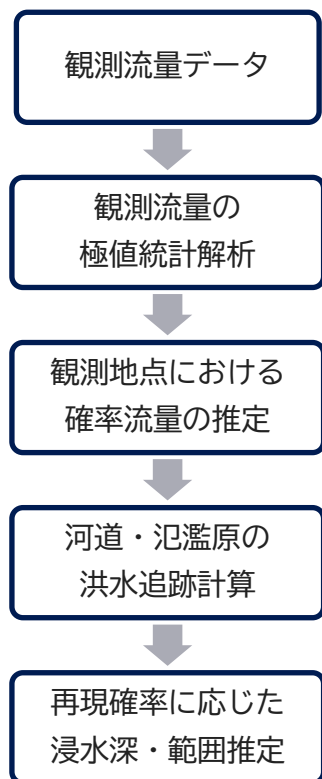
閾値を超える事象がポアソン分布に従って生起する場合の、
年最大資料(AMS)と非毎年資料(POT)の分布関数の関係:

$$F(x) = \exp\{-\lambda(1 - G(x))\}$$

λ : 1年あたりの平均発生回数

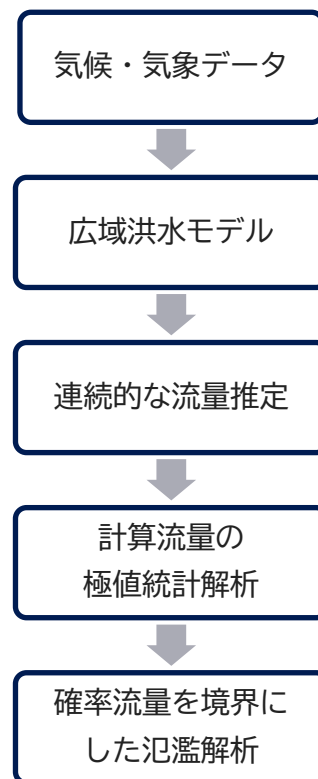
全国を対象にした水害リスク評価の方法

● 観測流量データに基づく方法



利点：観測流量データを用いるのでバイアス小
広域のモデルを必要としないので簡便

● 広域洪水モデルに基づく方法



利点：気候変動の影響（降雨の変化）を反映できる

新たな研究課題の背景：

1. d4PDF-5kmなどアンサンブル気候変動データの出現と精度向上により、広域洪水モデルに基づく方法に対する期待が高まってきた。
2. 中小河川も対象とするような高解像度（例：150 m）の広域洪水モデルで、長期アンサンブルデータ（例：720年分）を用いた連続ランは計算負荷が大きく事実上困難。
3. ① 長期アンサンブルデータから洪水をもたらすイベントをいかに抽出するか、
② 抽出したイベントの流量計算からいかに確率流量を求めるかが課題。

全国の河川を対象にした確率流量情報

d4PDF 5-km の最新データセット

Identifying Robust Changes of Extreme Precipitation in Japan From Large Ensemble 5-km-Grid Regional Experiments for 4K Warming Scenario

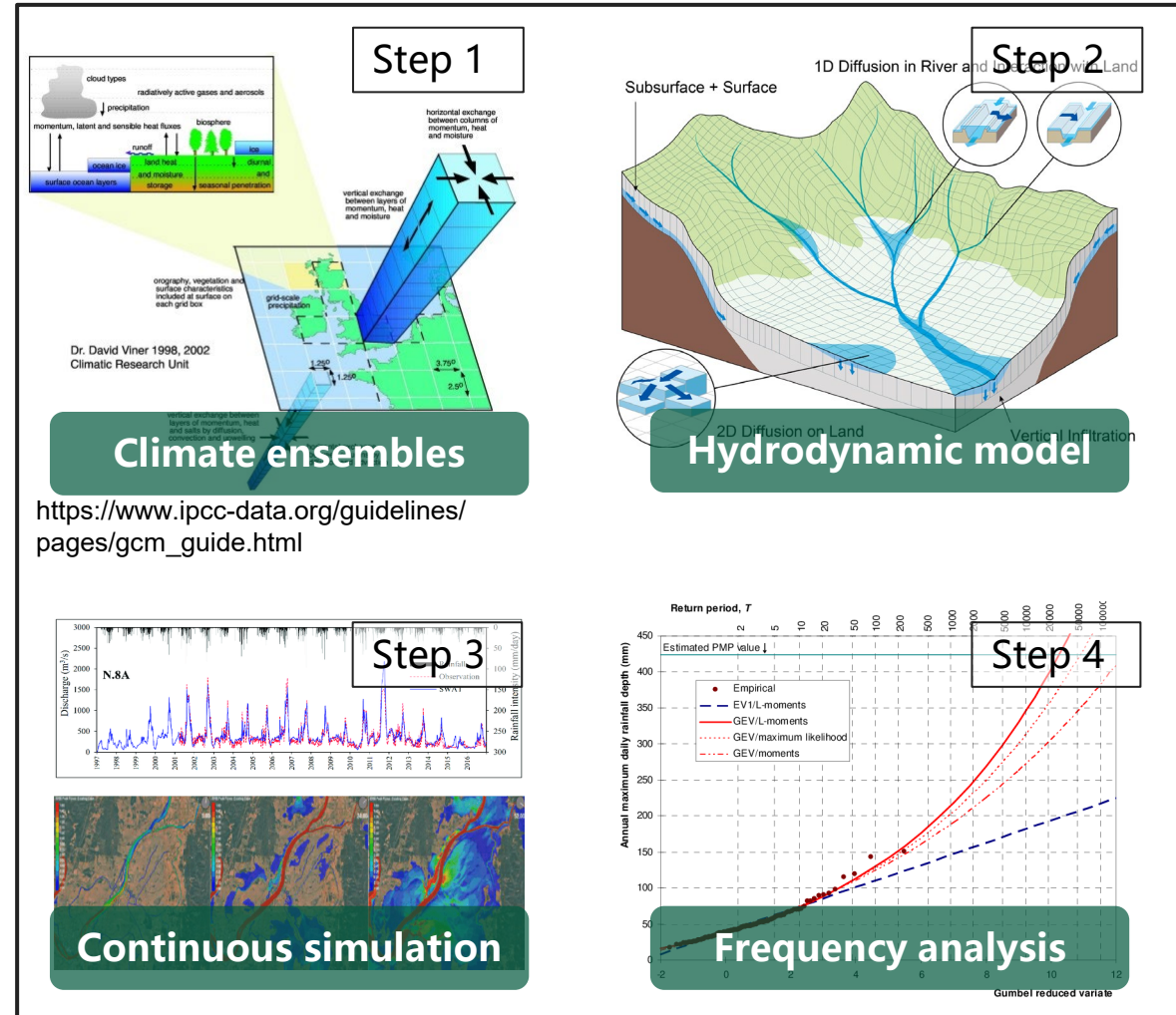
H. Kawase¹, M. Nosaka¹, S. I. Watanabe¹, K. Yamamoto², T. Shimura², Y. Naka², Y.-H. Wu², H. Okachi³, T. Hoshino⁴, R. Ito⁵, S. Sugimoto⁵, C. Suzuki⁵, S. Fukui¹, T. Takemi², Y. Ishikawa⁵, N. Mori², E. Nakakita², T. J. Yamada³, A. Murata¹, T. Nakaegawa¹, and I. Takayabu¹

¹Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Japan, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan, ³Faculty of Engineering, Hokkaido University, Hokkaido, Japan, ⁴Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Hokkaido, Japan, ⁵Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokohama, Japan

JGR, 2023

720年分のアンサンブルデータが利用可能に
・現在気候、気候変動(2度, 4度上昇下)

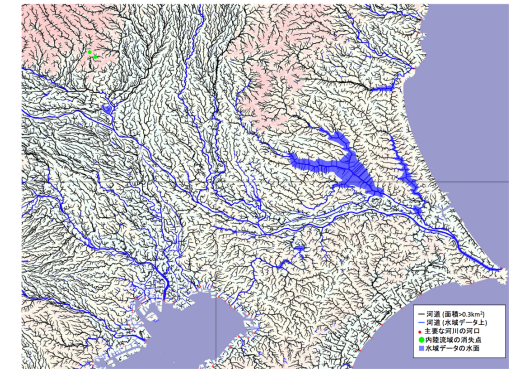
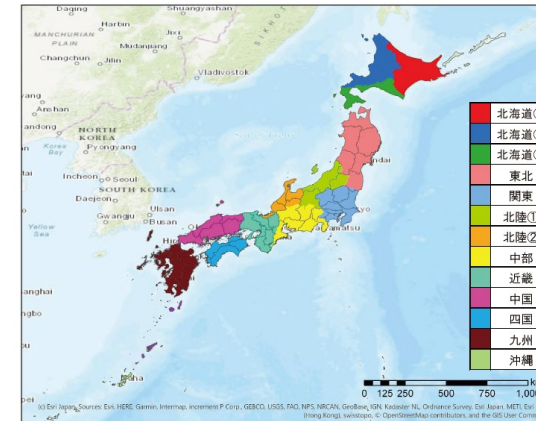
温暖化の影響を加味した水害リスク評価の方法



全国を対象にした長期連続の流出計算には膨大な時間を要する

全国版RRIモデル

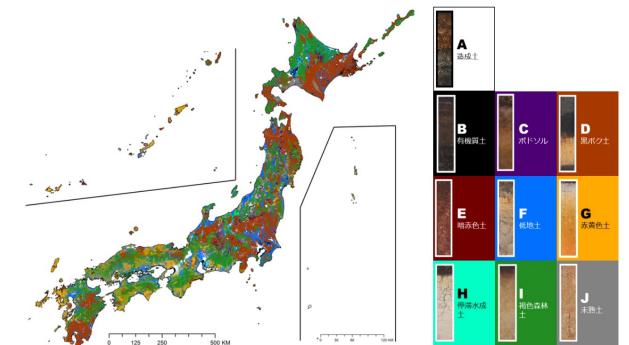
- 全国版RRIモデル: 日本全国を対象に、空間解像度150 mのRRIモデルを適用
 - 全国を14の地域に分割して実行
 - 中小河川を含む全国全ての河川で水位、流量、氾濫を解析可能
 - 第2期SIP(2018年度～2022年度)で重点開発
 - リアルタイム運用も試行中
-
- 地形データ: 日本域表面流向マップ(30 m)を150 mにスケールアップして活用。
 - 河道データ: 一級水系直轄区間の約73% (7735km)で、26032の断面を反映
 - その他の河道: レジーム測で川幅・深さ推定
 - ダム: 全国121の国管理・水資源機構管理の洪水操作を反映
 - パラメータ: 全国土壌データに基づいて地域統合化



東大生研 (山崎先生)・日本域表面流向マップ (J-FlwDir)
<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/JapanDir/>



山田ら (土木学会論文集, 2022)

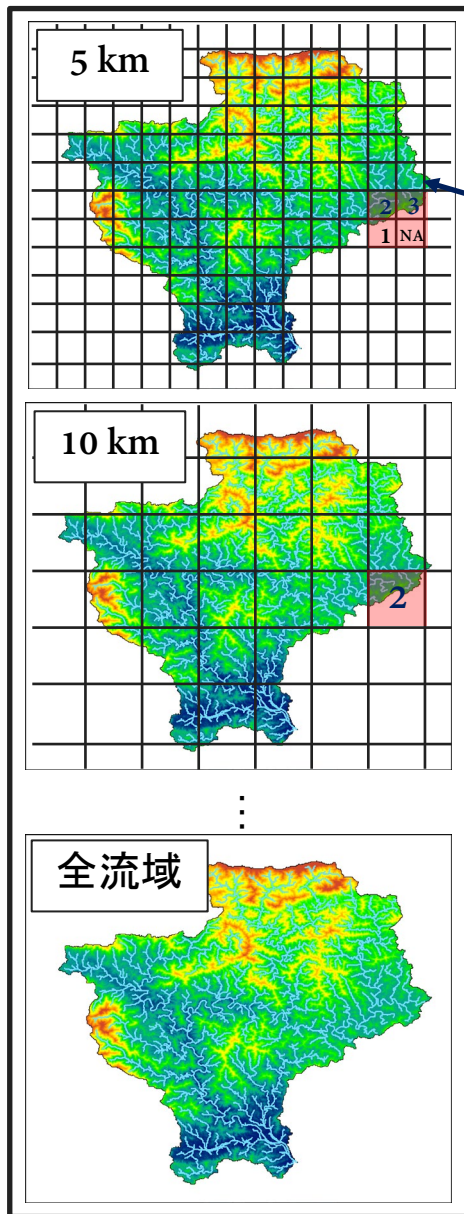


農研機構・日本土壌インベントリー
<https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/figure.html>

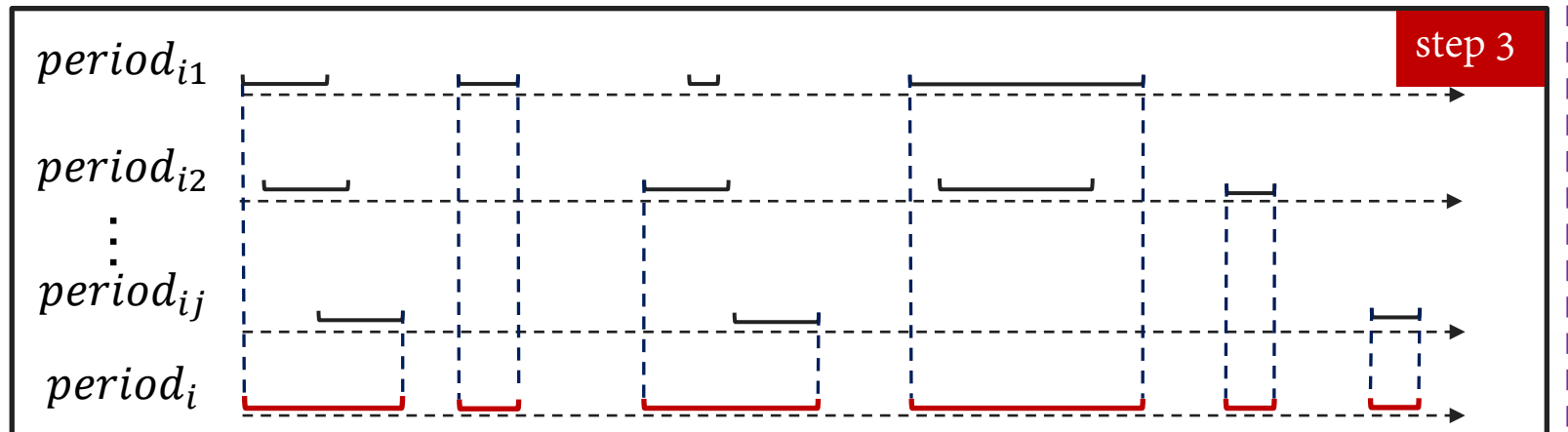
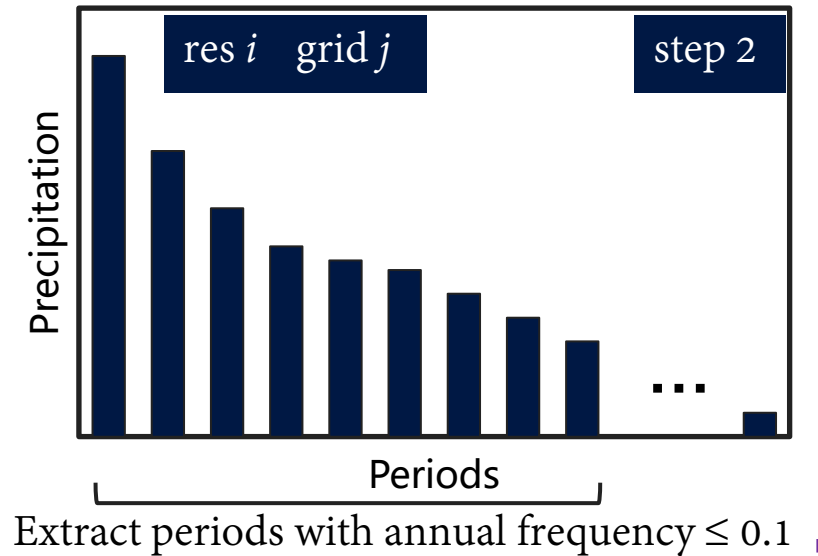
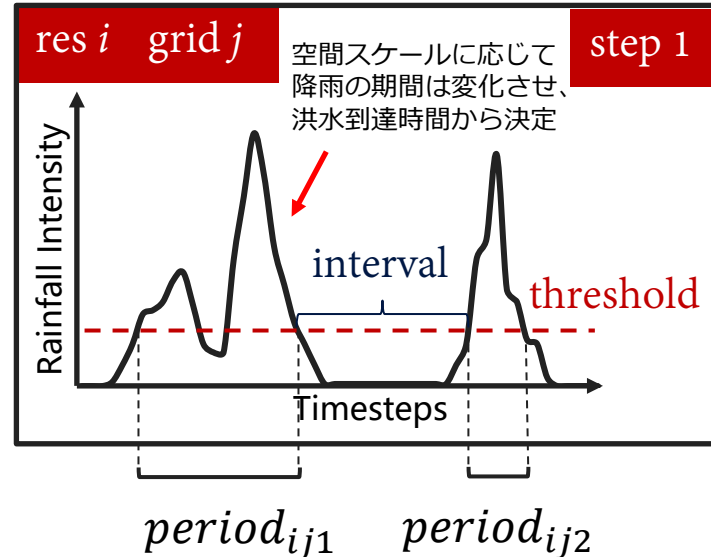
Aggregating Grid Event Extraction Method (AGE法)

Chen and Sayama, 2024, under Review

d4PDF-5kmのアンサンブルデータ（720年分）を用いて、中小河川を含めた全ての河川で確率流量を効率的に推定するための豪雨イベント抽出法



領域スケール(e.g. 四国全体など)を流域分割し、さらにd4PDF (5km)の最小解像度から順にスケールアップして豪雨イベントの期間を選定



方法

■ 対象降雨の選定方法

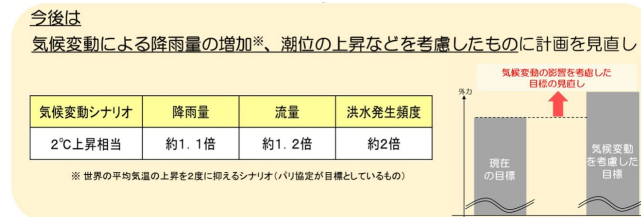
- ① 全国を14の地方に分割。以下は各地方で実施。
 - ② 5 kmの空間解像度で、グリッドセル毎に降水強度の時系列を算定。以下の手順は全グリッドセルで実施。
 - ③ 洪水到達時間に相当する期間の累積雨量(25 km²の場合:6時間)を計算し、720年間で上位72期間を抽出。
 - ④ 解像度を10x10 km²、20x20 km²、40x40 km²と粗くしながら、②、③の手順を実行。
 - ⑤ ③で抽出された期間を統合して降雨イベントと定義(各地方約5000イベント)
- 各地方、どこかで洪水をもたらすような降雨イベントは原則網羅している。

■ 確率流量の算定方法

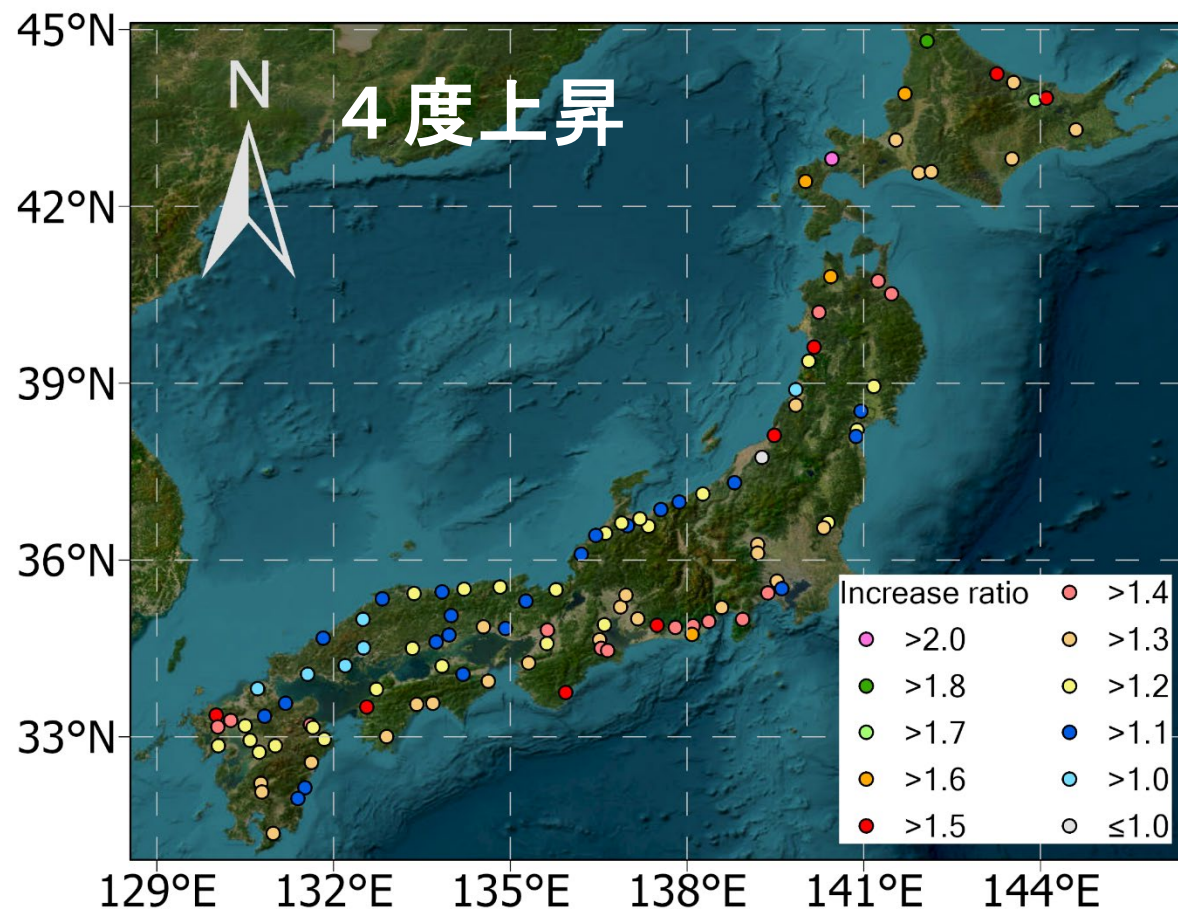
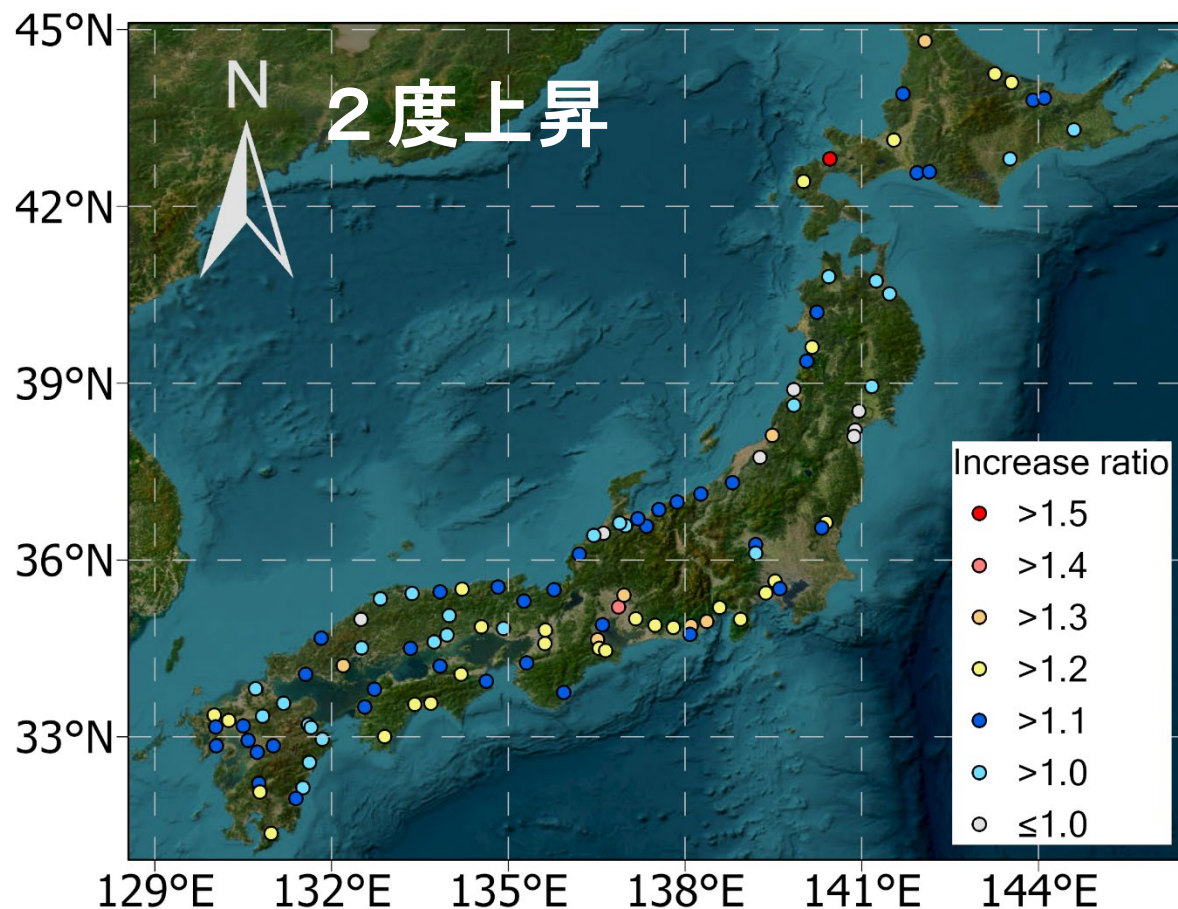
- ① 各地方のRRIモデルに上記⑤の全降雨イベントを入力して全ての河道地点でピーク流量を算定
 - ② 各地点上位72のピーク流量を閾値にしてPOT(非毎年資料の極値統計解析)を実施→確率流量を算定。
- 上位72(10年に1度相当)までのピーク流量は原則網羅している。→ 1/10以上の確率流量は推定可。

109水系の主要地点を対象にした再現確率

100年に相当する洪水流量(Q100)の変化倍率



参考：気候変動を踏まえた河川整備基本方針（国交省）

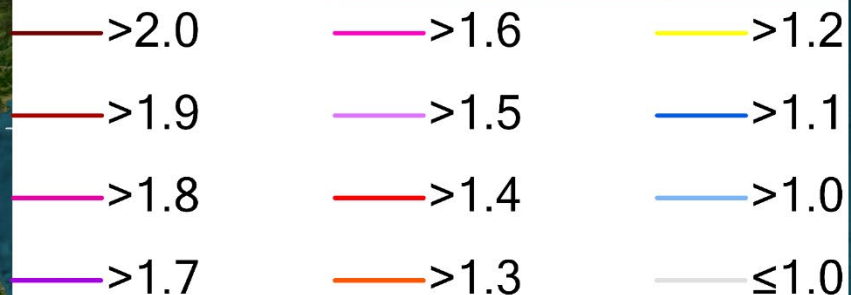


➤ 2度上昇下では洪水流量が約1.1～1.3倍:d4PDF 20kmを用いた既往研究や国交省の算定と符合

130°E 132°E 134°E 136°E 138°E 140°E 142°E 144°E 146°E 148°E 150°E

Q100の変化倍率 2度上昇

Increase Ratio



子吉川

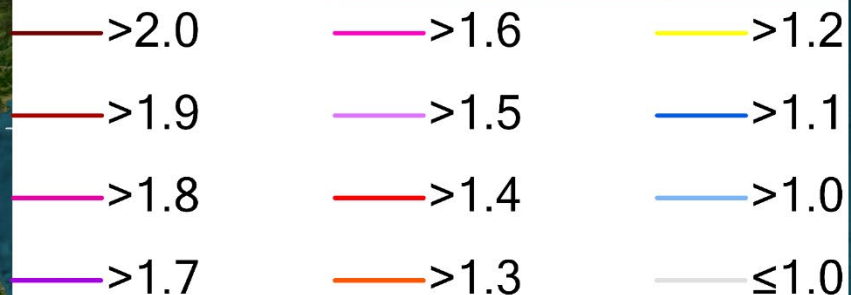
最上川

- 支川レベルで見るとQ100の変化率はばらつきが大きい
- 北海道や東北日本海側では、局所的に1.4倍以上も

130°E 132°E 134°E 136°E 138°E 140°E 142°E 144°E 146°E 148°E 150°E

Q100の変化倍率 4度上昇

Increase Ratio



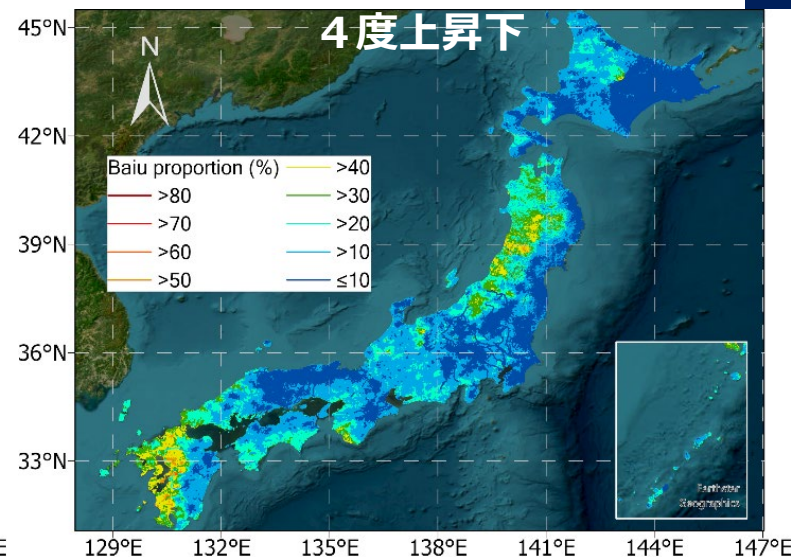
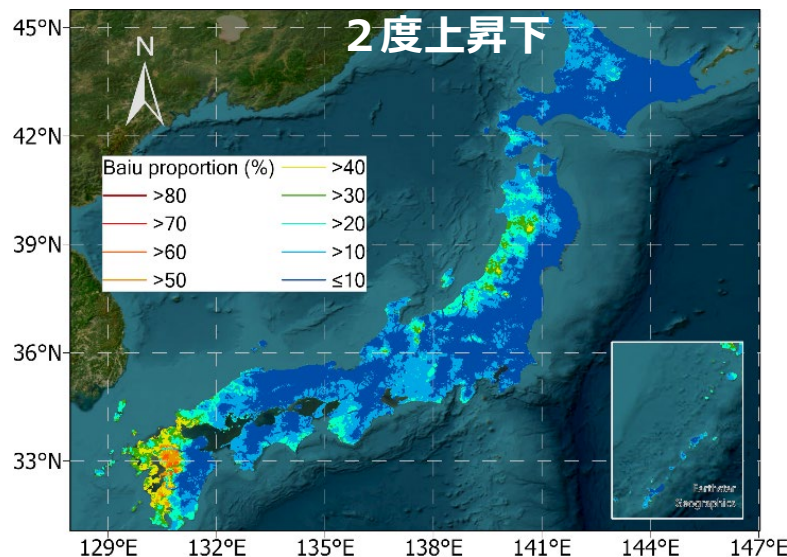
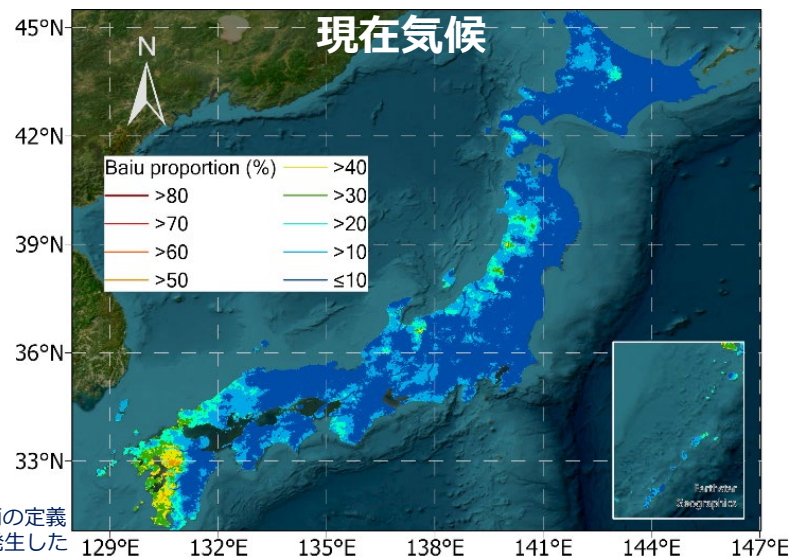
子吉川

最上川

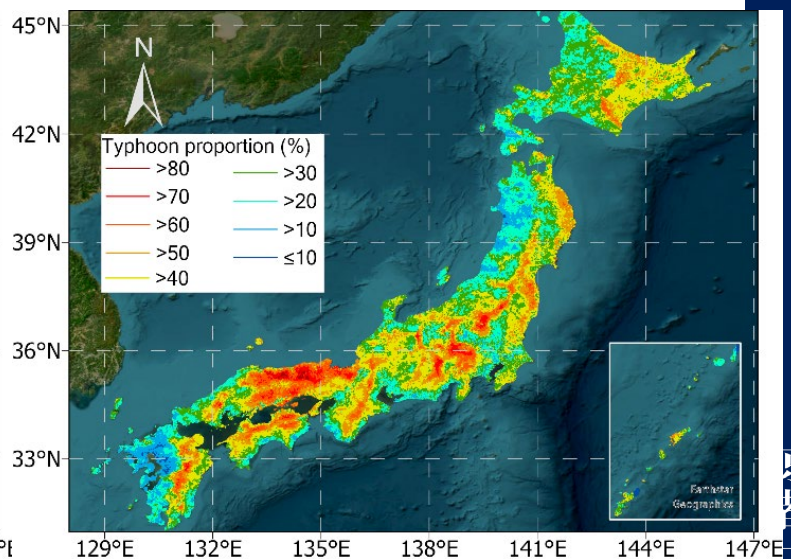
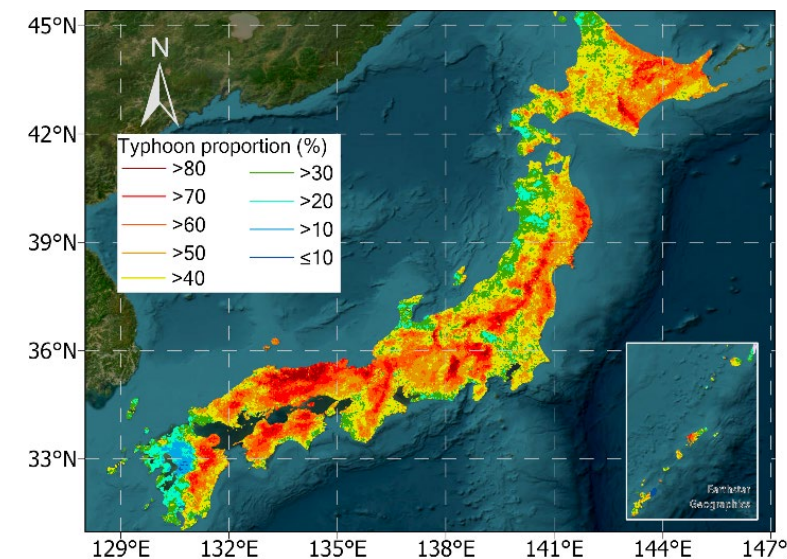
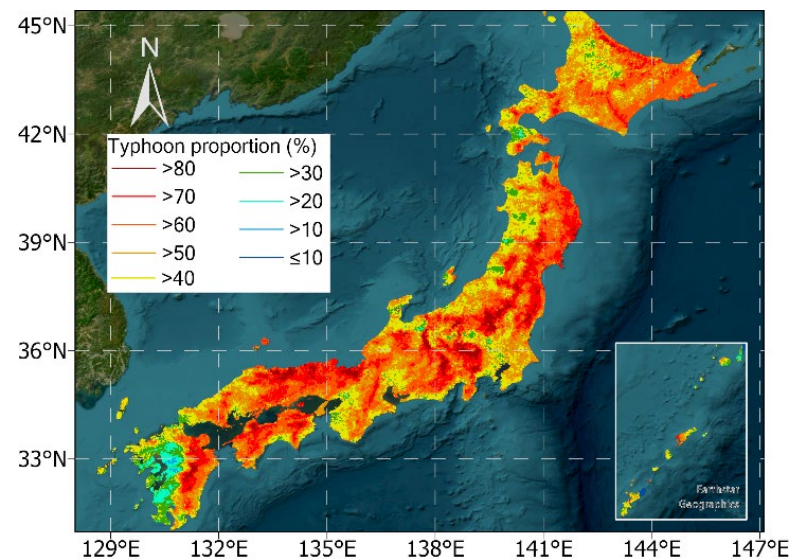
➤ 4度上昇になると特に北海道や東北地方でQ100が顕著に増加

リターンピリオド10年以上の洪水(720年中上位72洪水)の成因割合 (各河道地点で算定)

梅雨



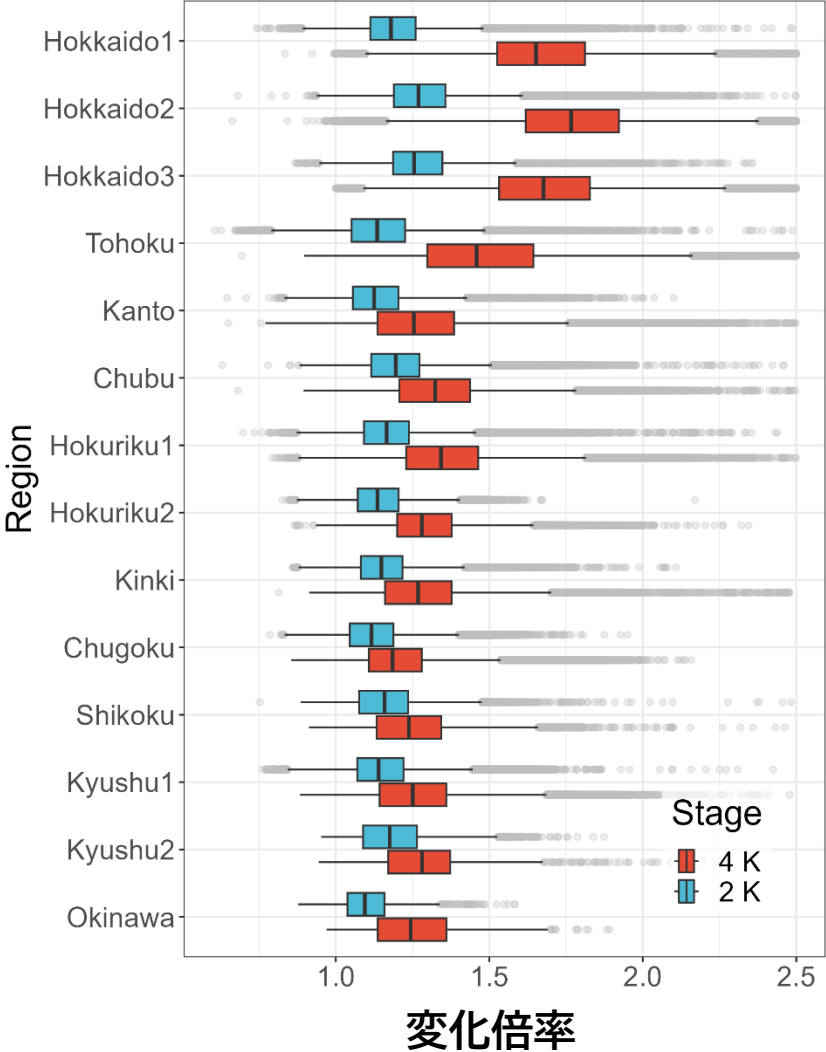
台風



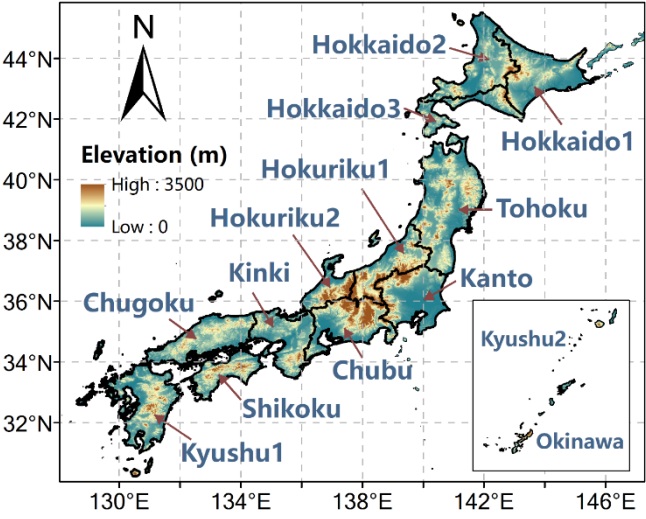
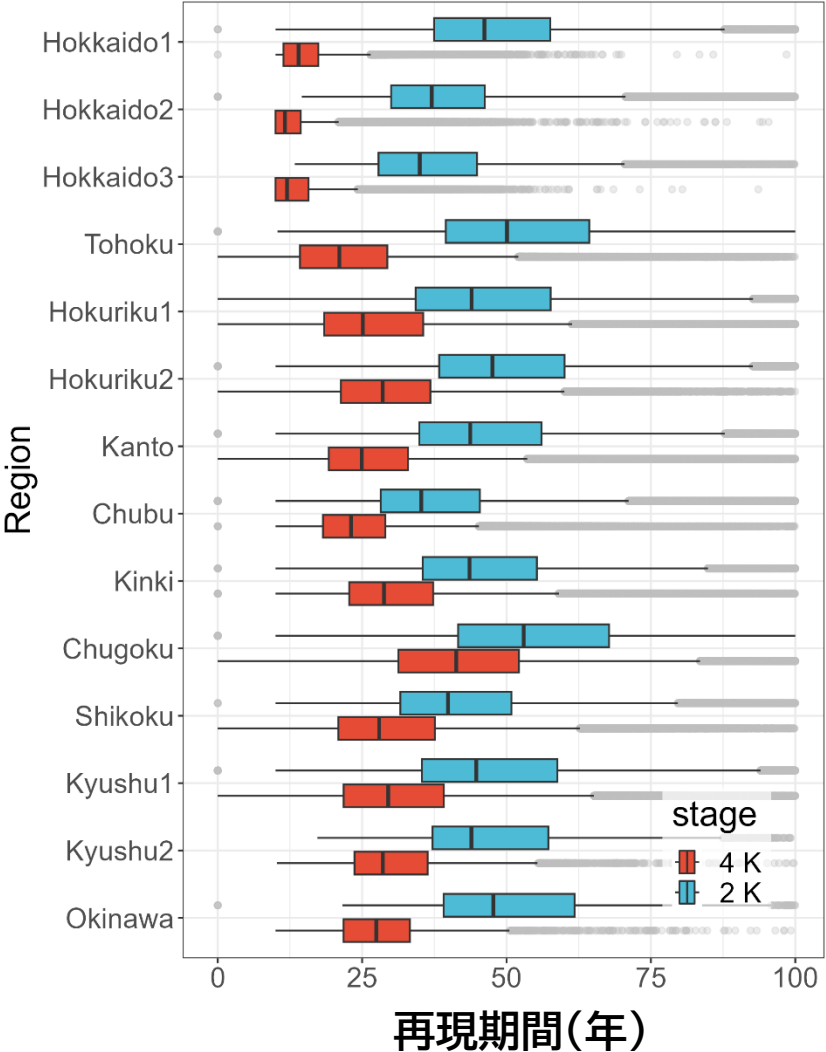
- 温暖化に伴い再現確率10年以上の洪水の成因は梅雨豪雨の割合が高まる？
- 特に東北地方や北海道の日本海側で顕著

中小河川を含む全河道区間を対象としたQ100の変化倍率と再現期間

Q100の変化倍率

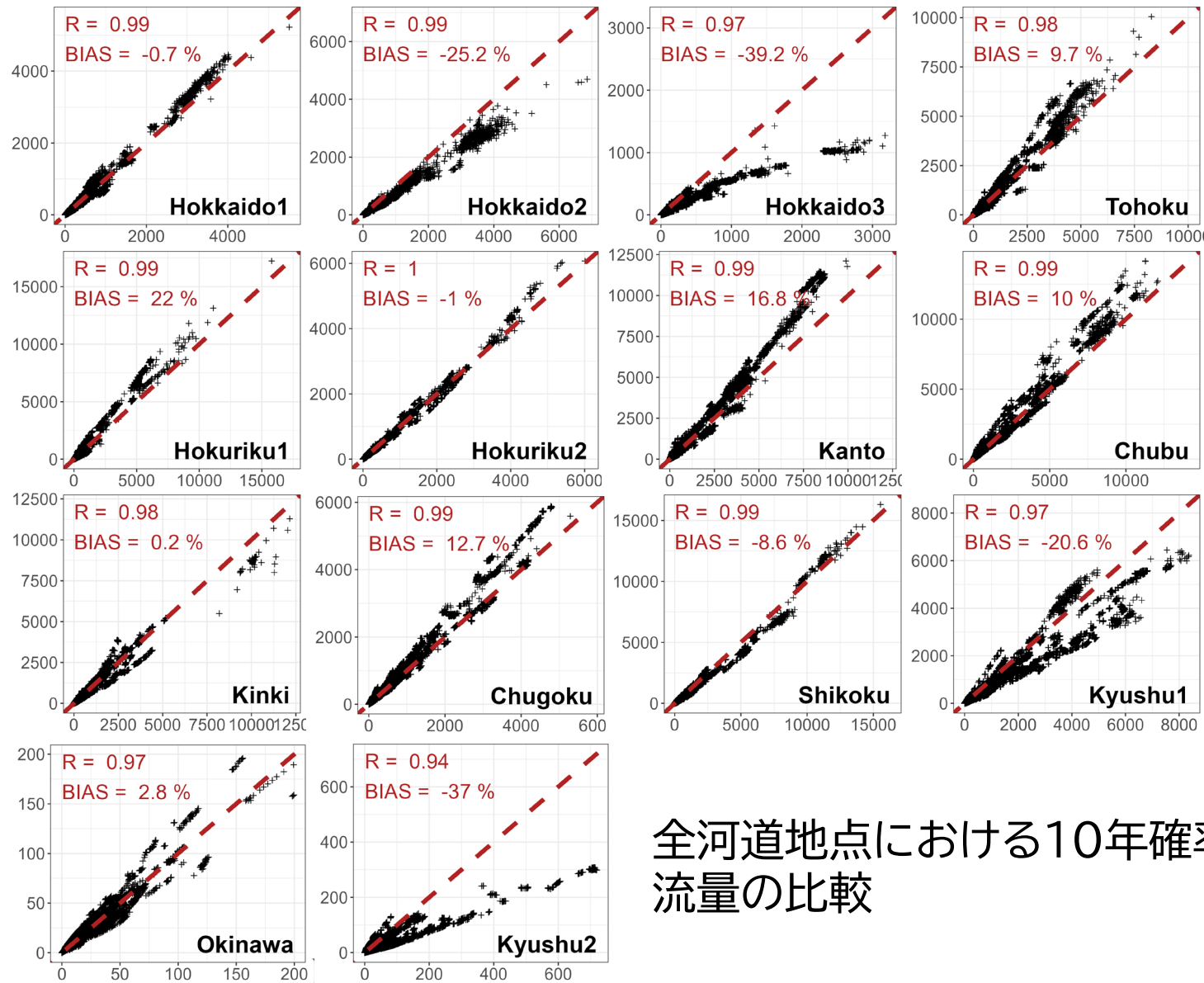


現在気候下Q100の将来の再現期間



- 2度上昇下
- 変化倍率: 1.1~1.3
- RP: 30~60年程度

10年確率流量の検証(解析雨量に基づく推定結果との比較)



横軸:解析雨量による推定結果

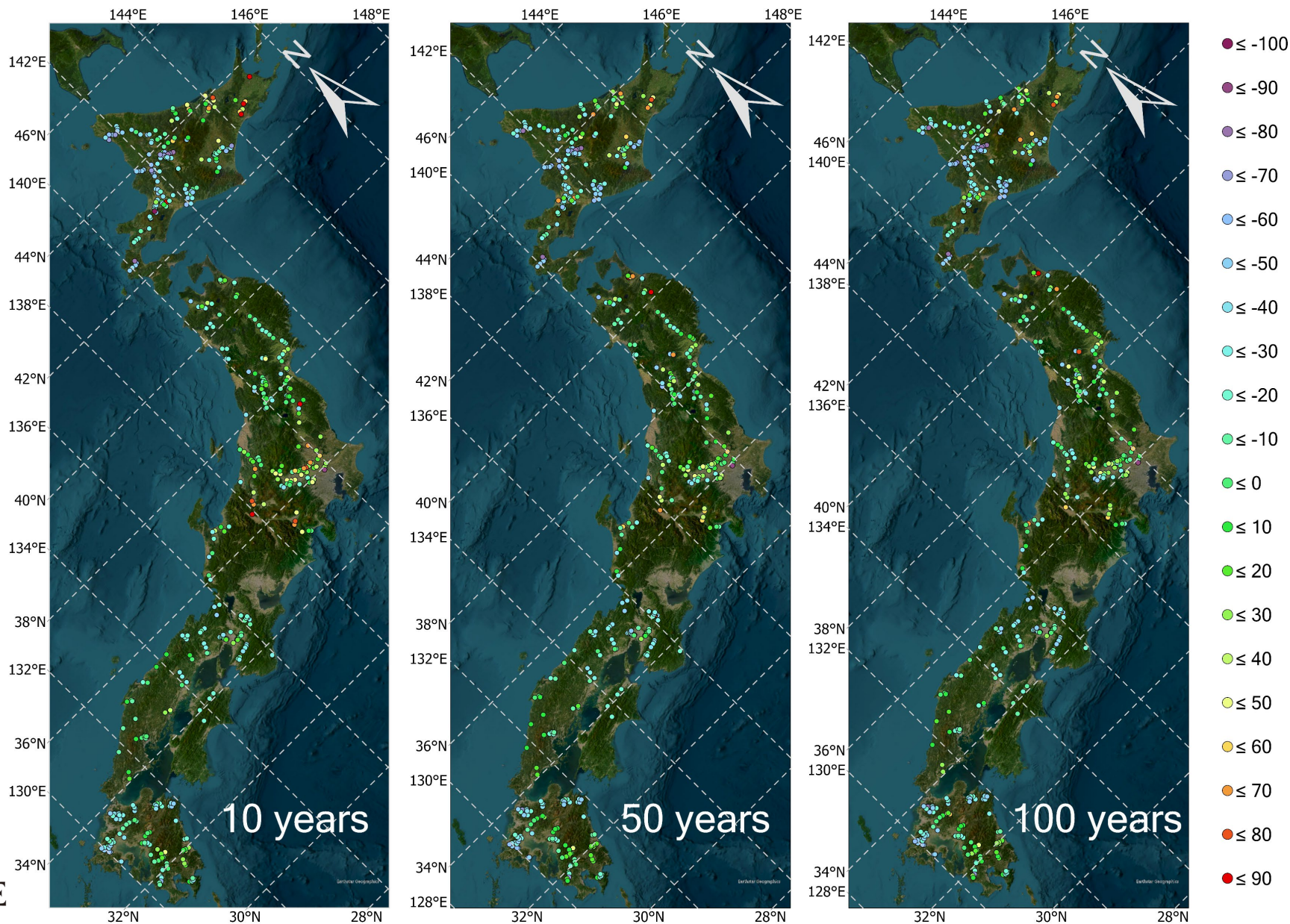
縦軸:d4PDF 5 kmによる推定結果

対象:10年確率流量

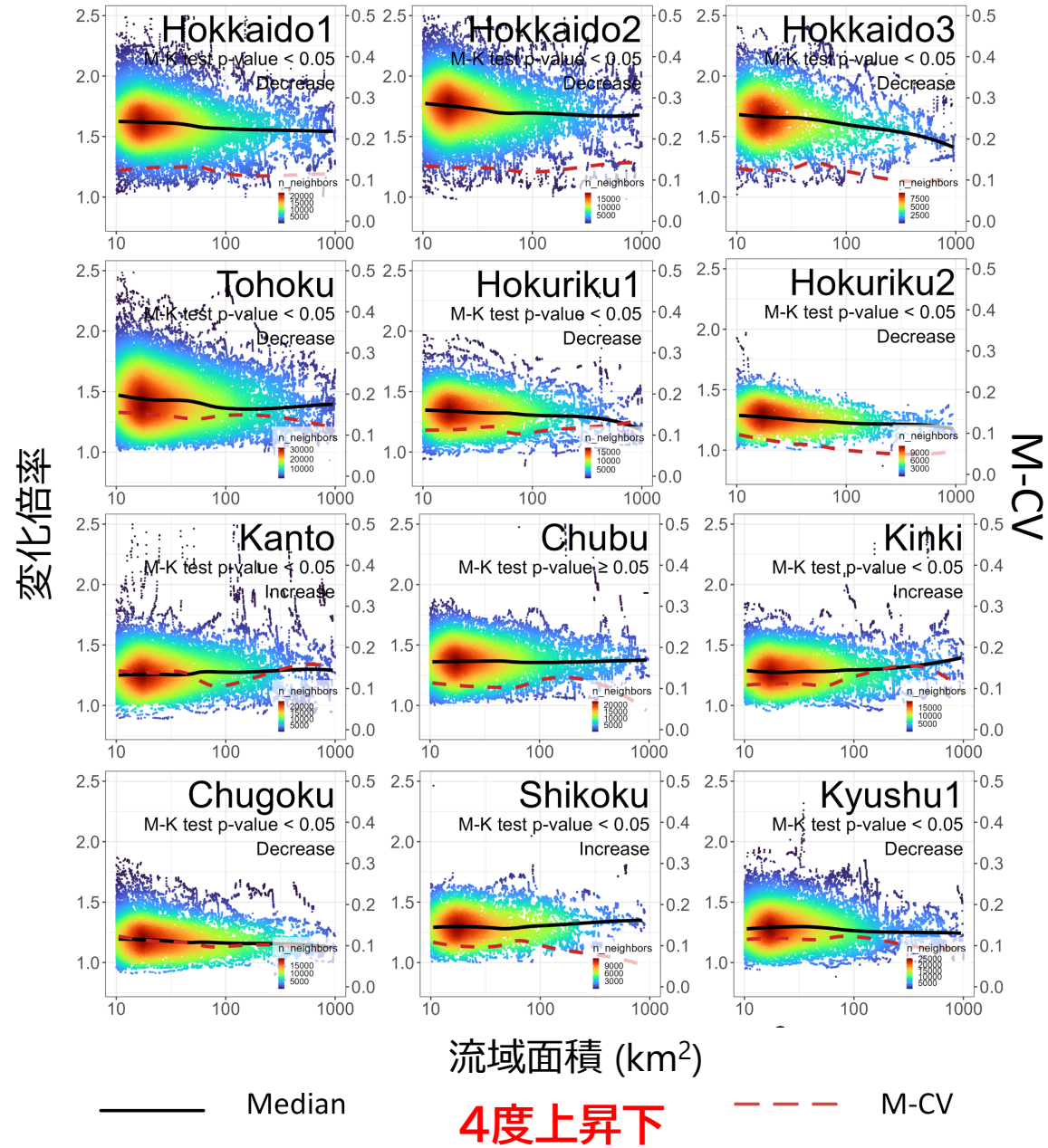
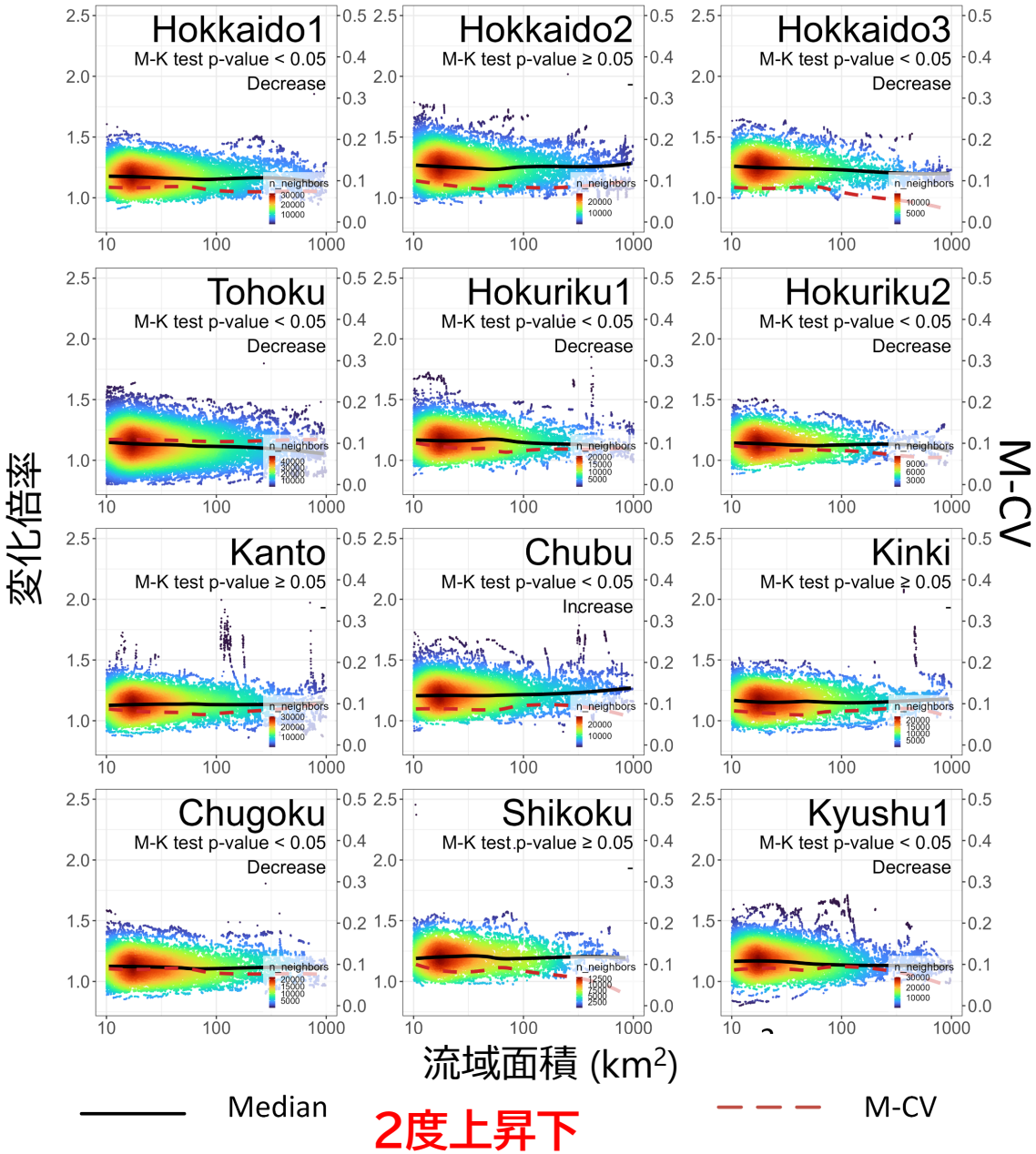
期間:1989-2010年

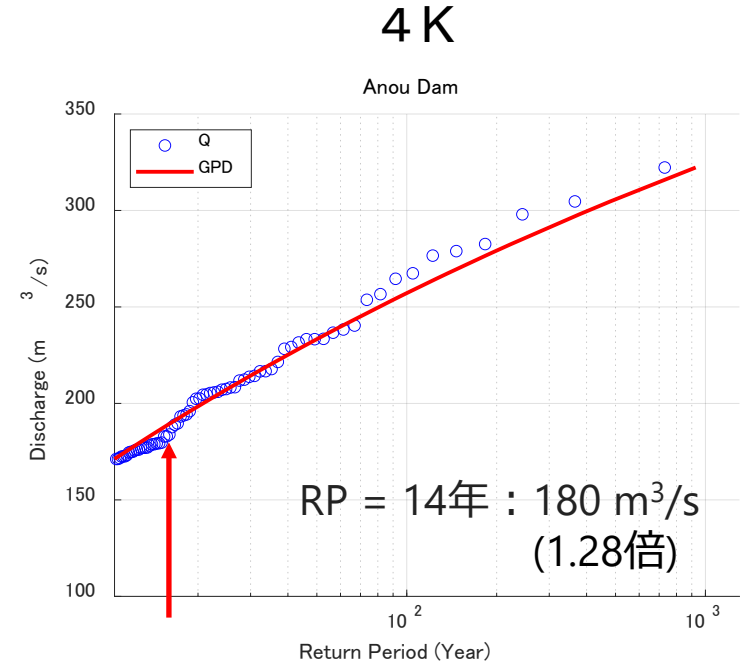
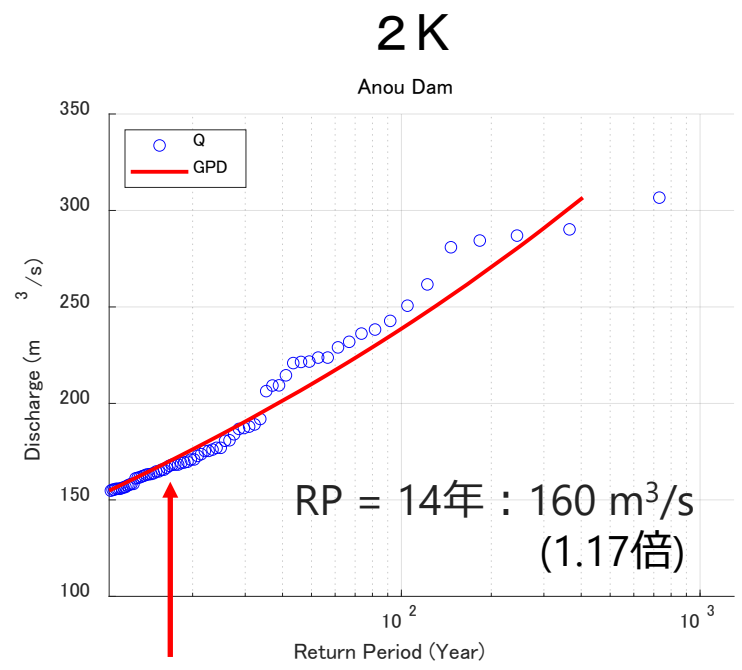
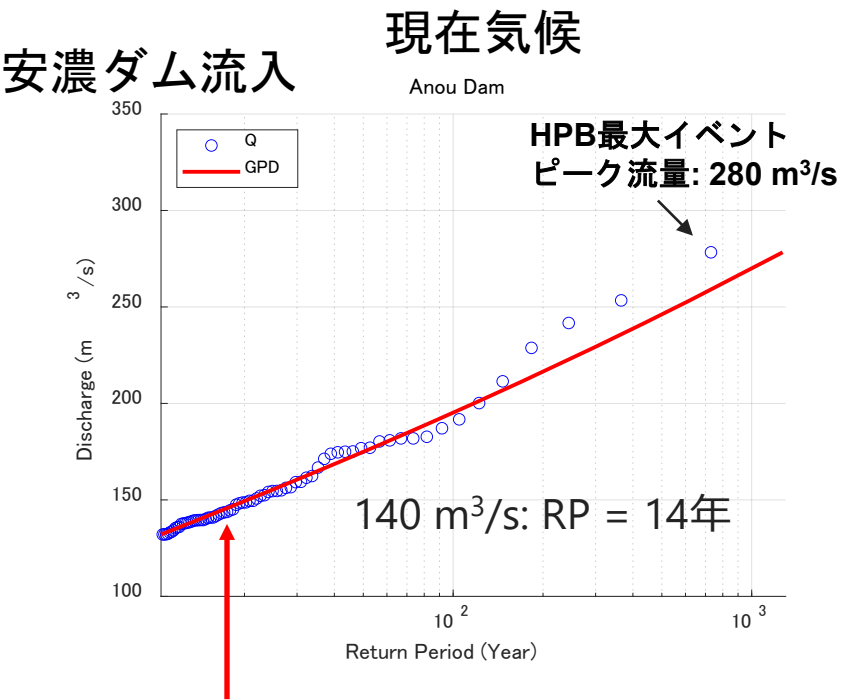
全河道地点における10年確率
流量の比較

観測流量に基づく推定結果との比較

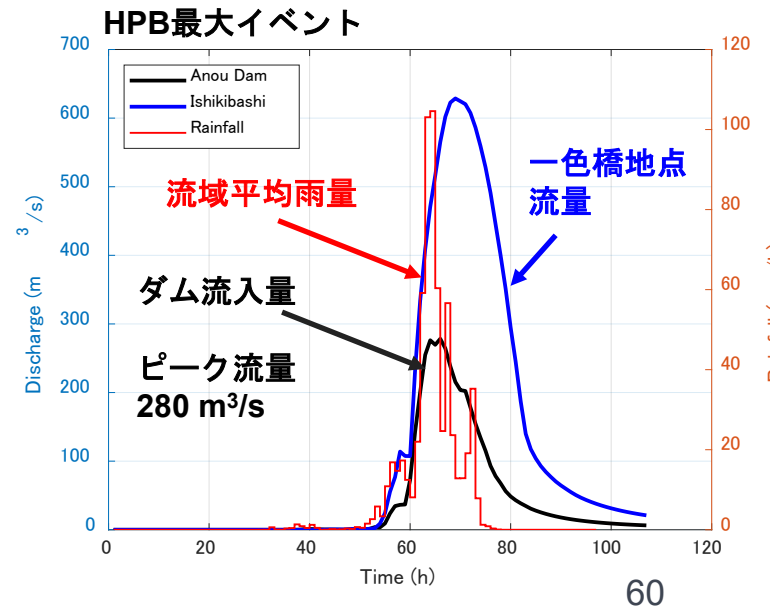
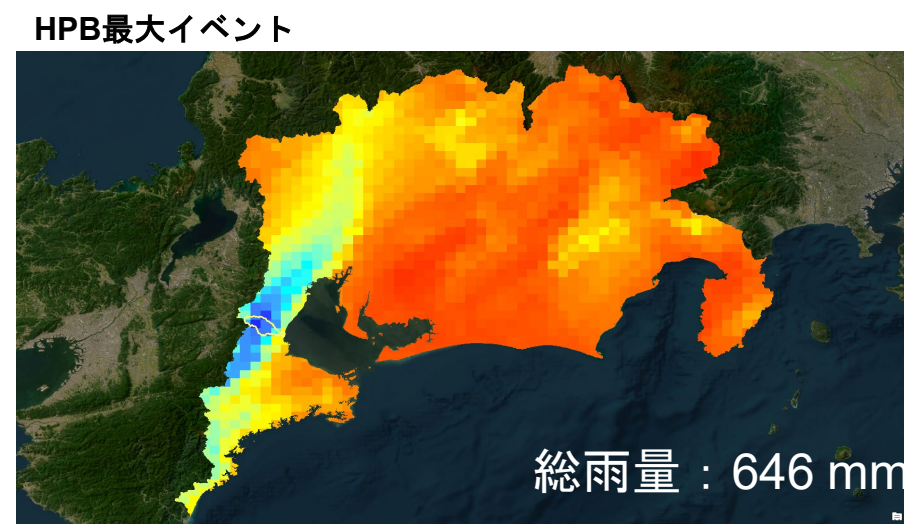


流域面積による変化倍率と再現年の違い(100年確率流量)



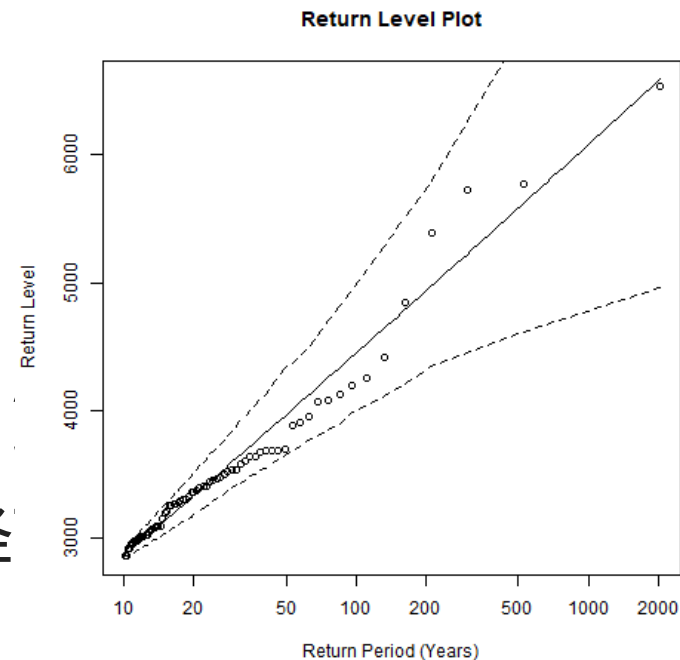


平成16年 台風21号 :
津市内が冠水し、宮川村で災害発生。
安濃ダム最大流入量 : 140m³/sec、
最大放流量 : 75m³/sec。



確率洪水流量データの公開に向けて

- ① 全国の河道地点ID番号(マップで選択)
- ② 対象河道地点における推定確率流量(右図)
- ③ ②の基礎となるTOP72の洪水イベント番号
- ④ 各洪水イベントに対応する d4PDF 5kmのメ
- ⑥ 各洪水イベントに対応する d4PDF 5kmの降



4. RRIモデル v1 の課題と v2 の開発に向けて (資料は更新予定)

全国モデル「現象解明」と「予測精度向上」のスパイラル

Technology

Disaster Risk Reduction

Science

Information
(more data)

Large Sample Hydrology
(Gupta, et al., HESS 2014)

Knowledge
(simple theory)

全国版RRIモデル v.2
土壌マップに対応した
パラメータ地域統合化

全国版RRIモデル
(全国一律パラメータ)

全国711地点(2732出水)で検証
→ モデルの間違い方を分析
⇔ 均質なモデルを「ものさし」
として各流域の豪雨に対する
洪水流出の特性を解明する
→ なぜ間違うかを検討する

121ダムで精度検証
→ 地域差(土壌 / 地質)



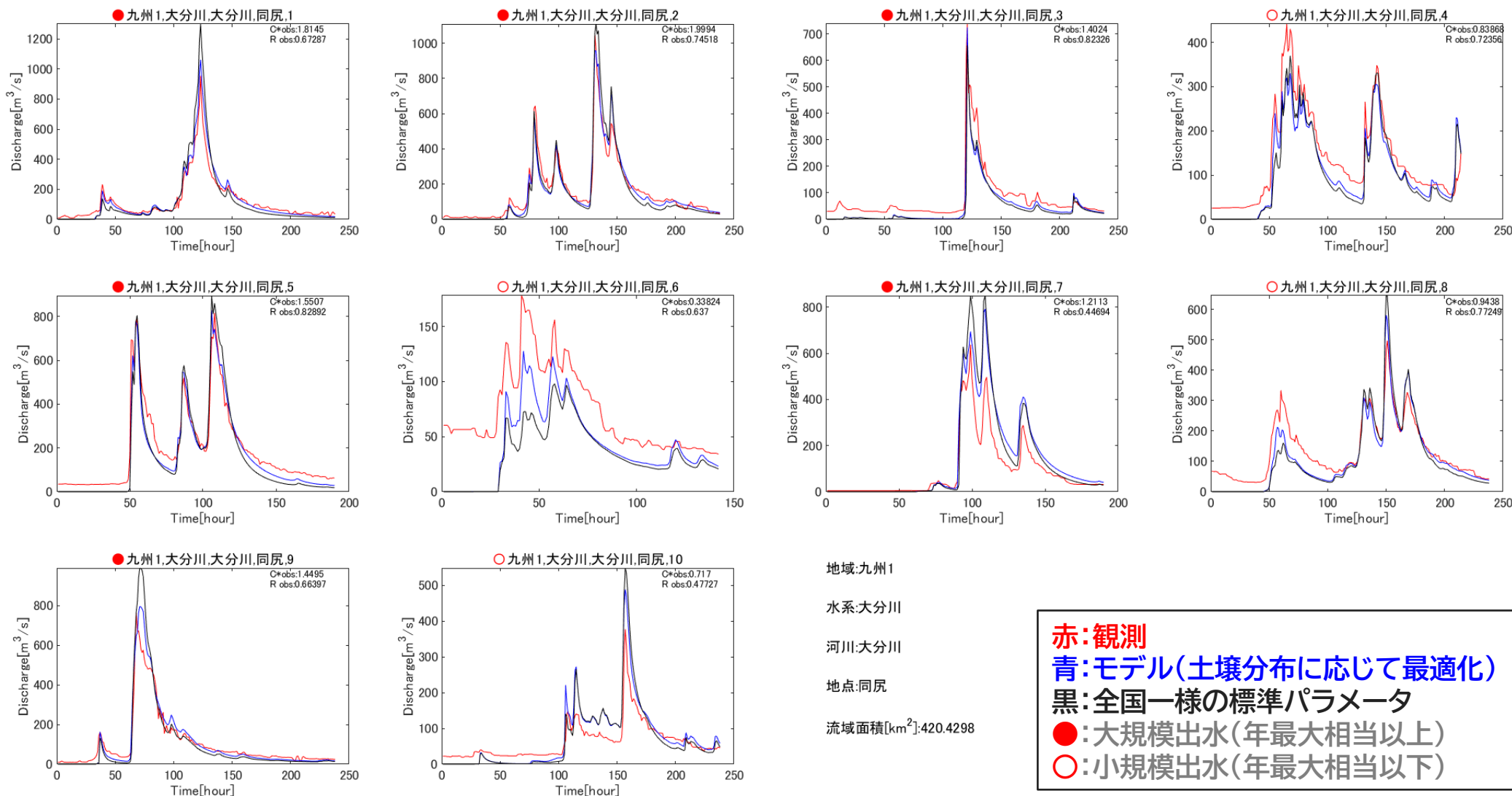
Deductive Inference
(演繹的推論)

Modeling

Inductive Reasoning
(帰納的推論)

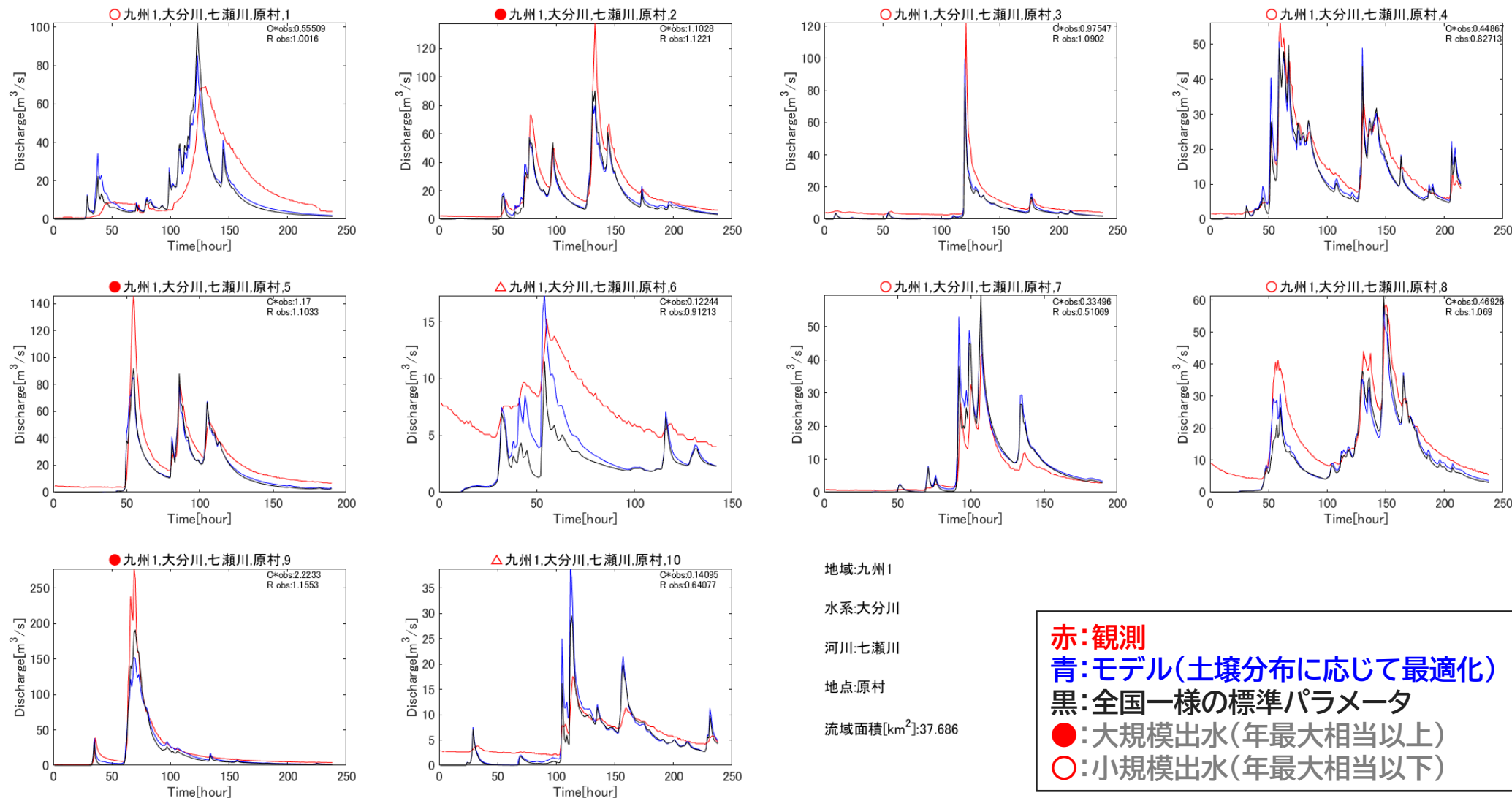


大分川:第四紀火山岩:同尻地点(420 km²)

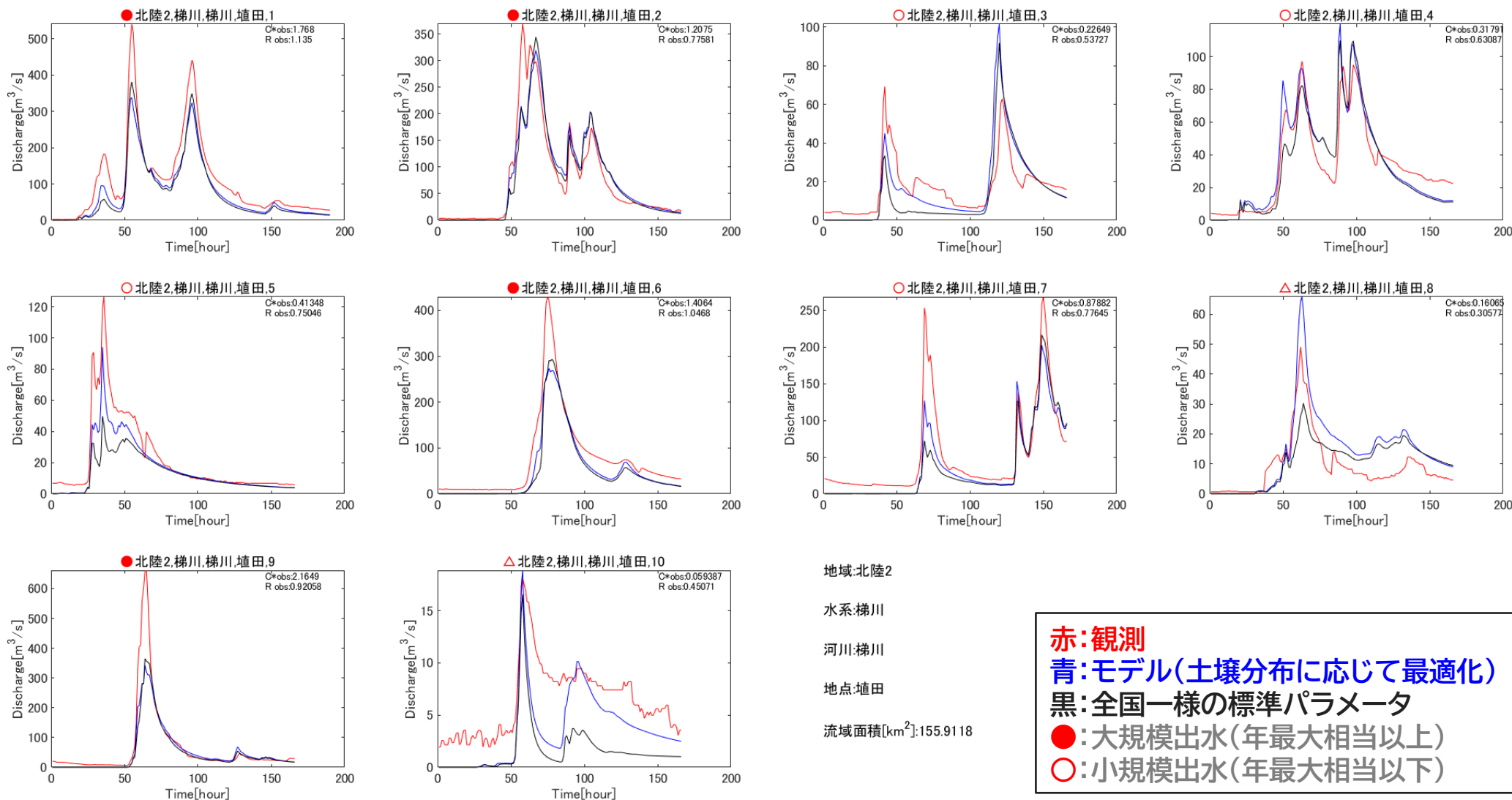


調整後のモデル(青)は観測を凡そ再現
モデルが観測を過大評価するイベントあり

大分川:第四紀火山岩:原村地点(38 km²)

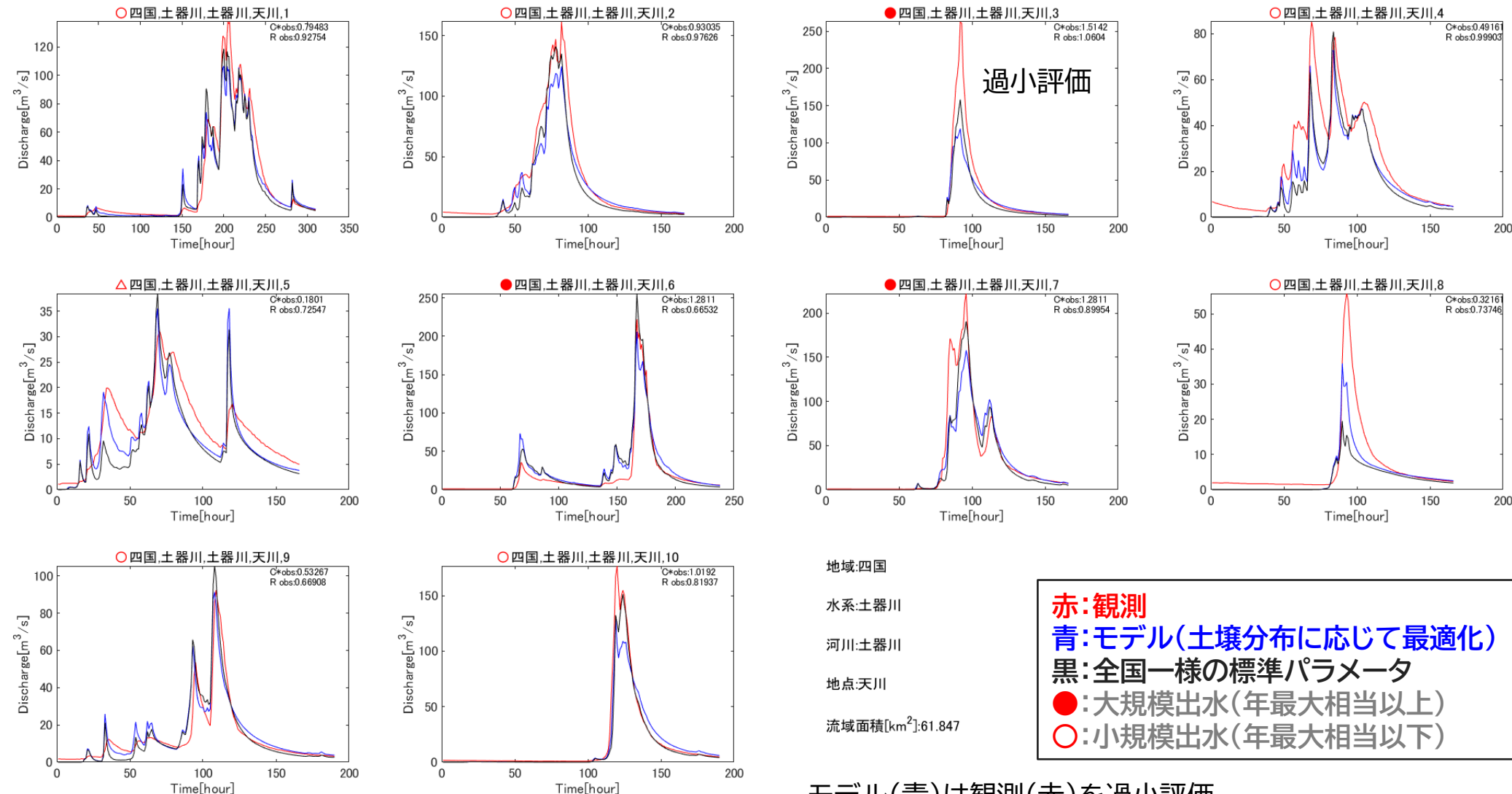


梯川:第三紀火山岩:埴田地点(156 km²)



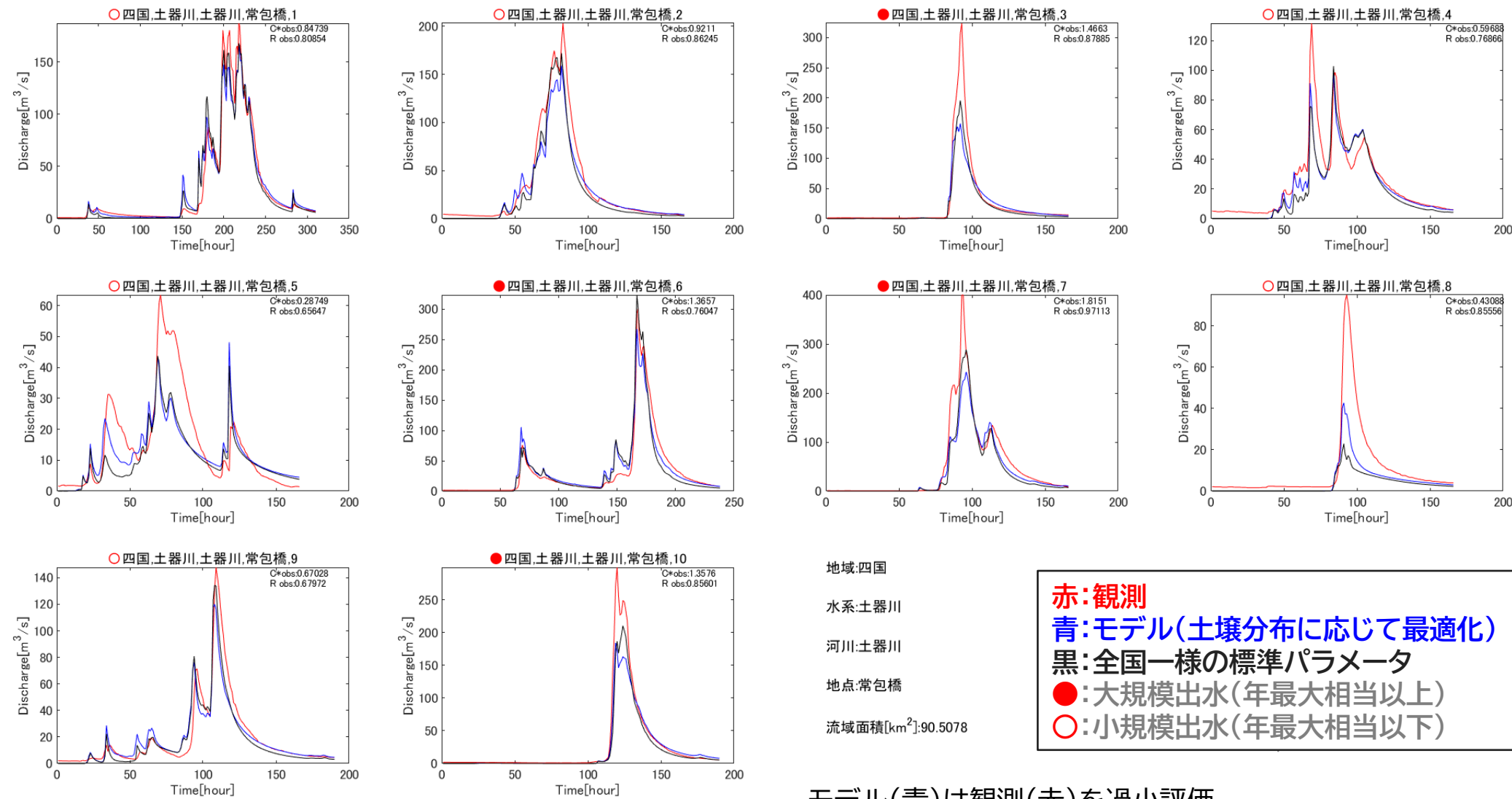
モデル(青)は観測(赤)を過小評価
逓減・出水後の基底流出は良好に再現

土器川:堆積岩:天川地点(62 km²)



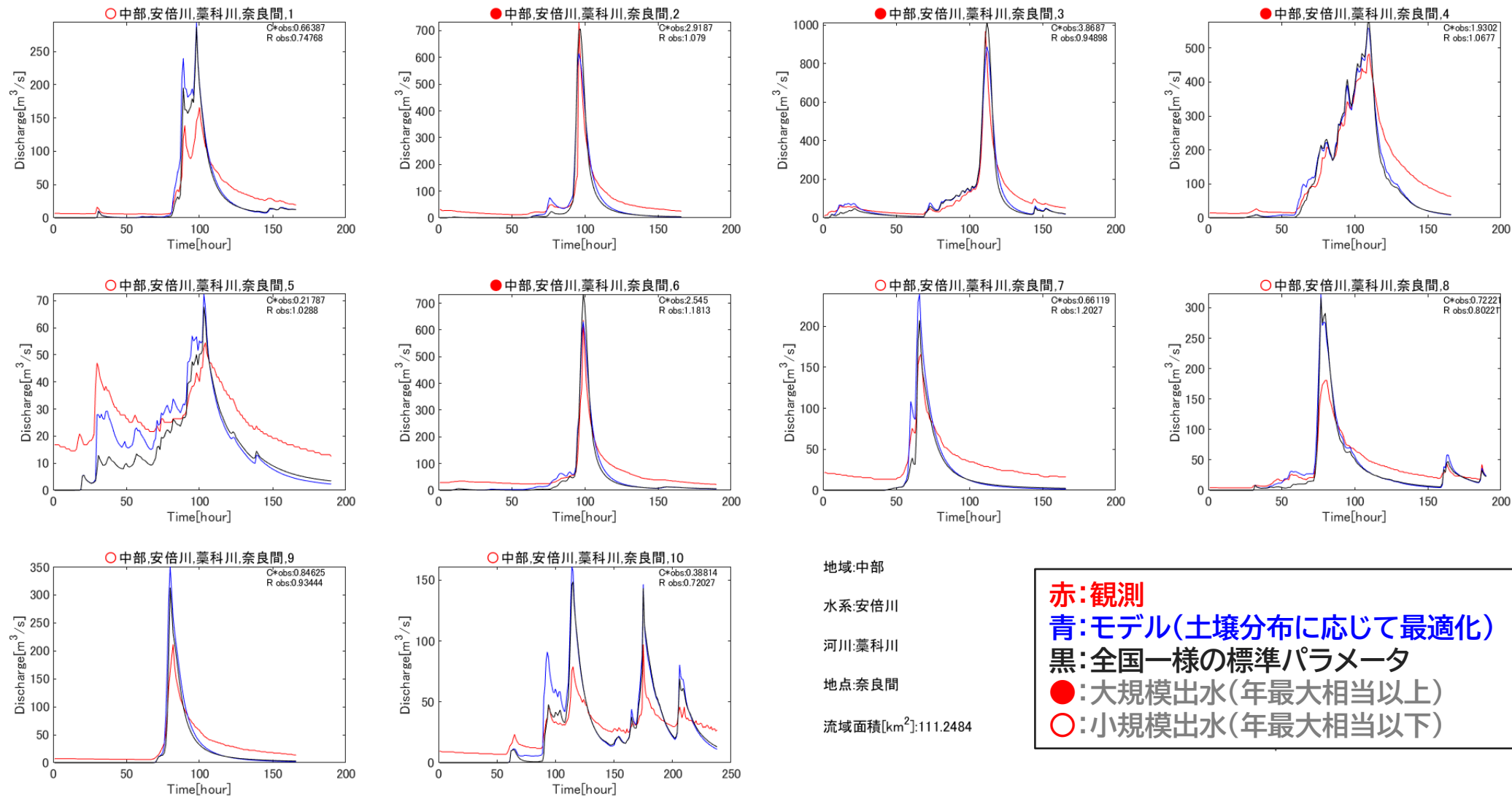
モデル(青)は観測(赤)を過小評価
逡減・出水後の基底流出は良好に再現
観測は降雨に対して鋭敏な応答を示す

土器川:堆積岩:常包橋地点(91 km²)



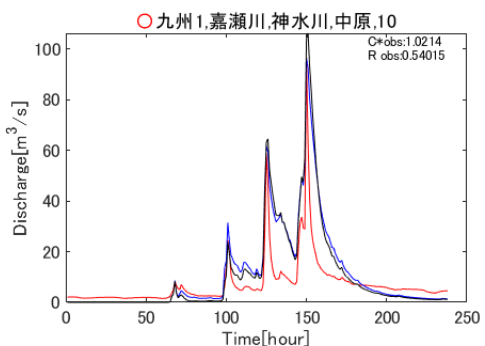
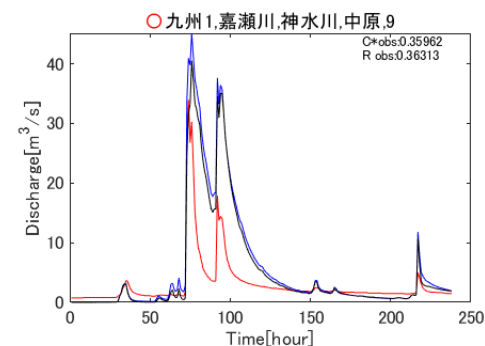
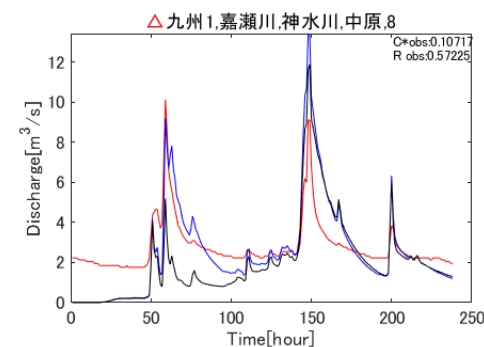
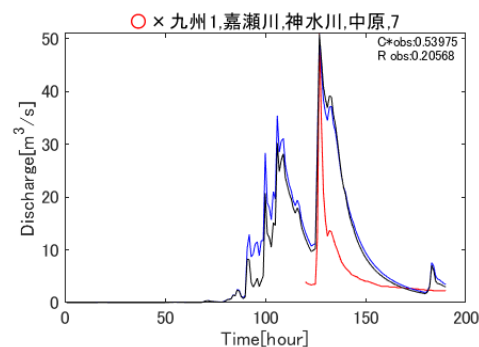
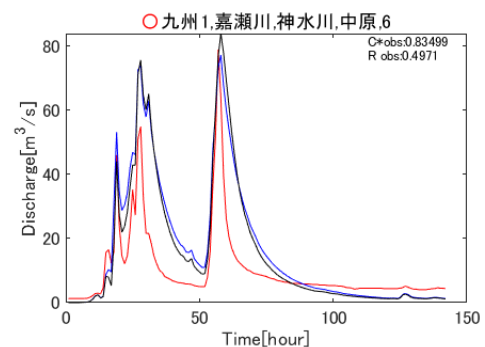
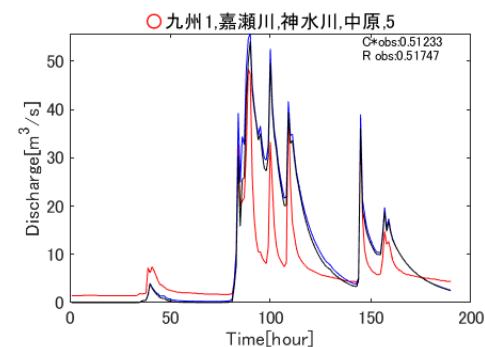
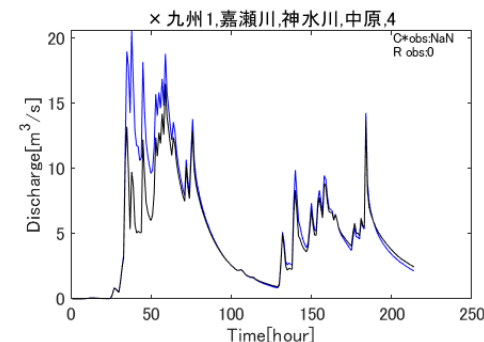
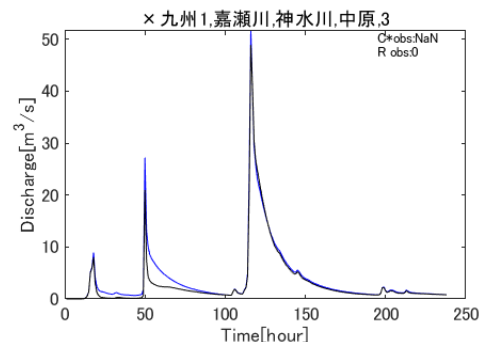
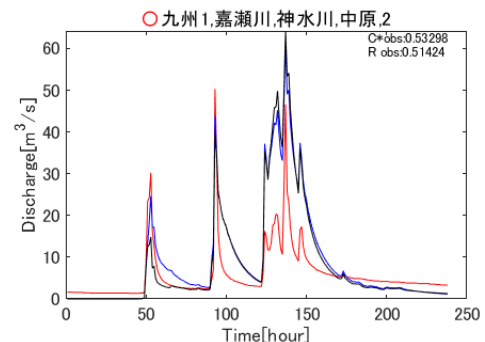
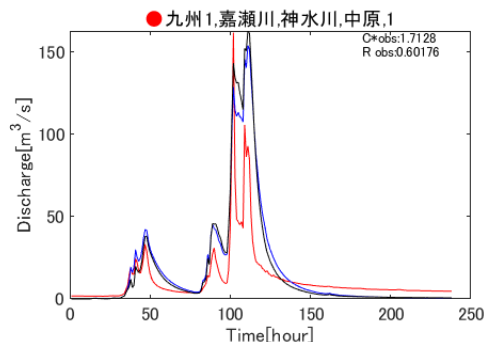
モデル(青)は観測(赤)を過小評価
逡減・出水後の基底流出は良好に再現
観測は降雨に対して鋭敏な応答を示す

安部川:付加体:奈良間地点(111 km²)



モデル(青)は観測(赤)を良好に再現
観測は逡減が遅く・出水後の基底流出安定

嘉瀬川:深成岩:中原地点(25 km²)



地域:九州1

水系:嘉瀬川

河川:神水川

地点:中原

流域面積[km²]:25.2774

赤:観測

青:モデル(土壌分布に応じて最適化)

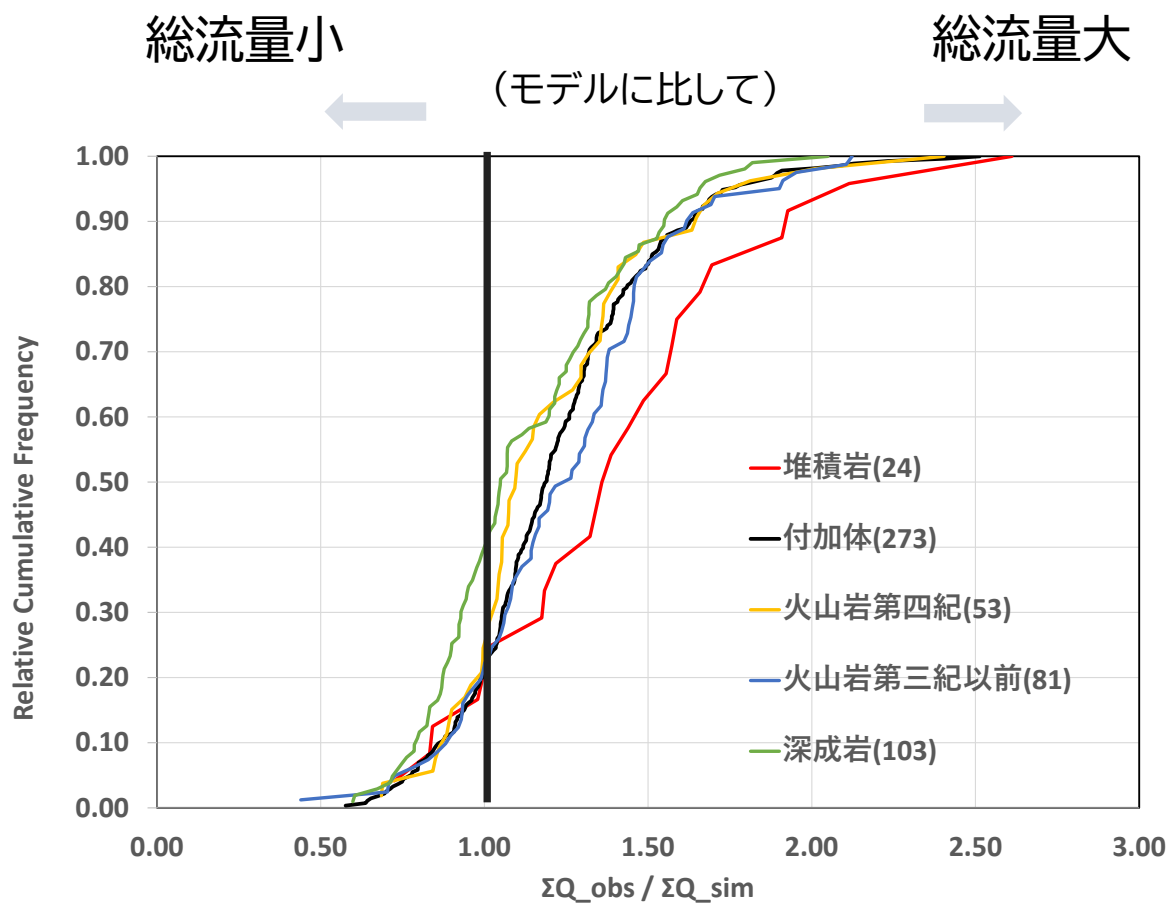
黒:全国一様の標準パラメータ

●:大規模出水(年最大相当以上)

○:小規模出水(年最大相当以下)

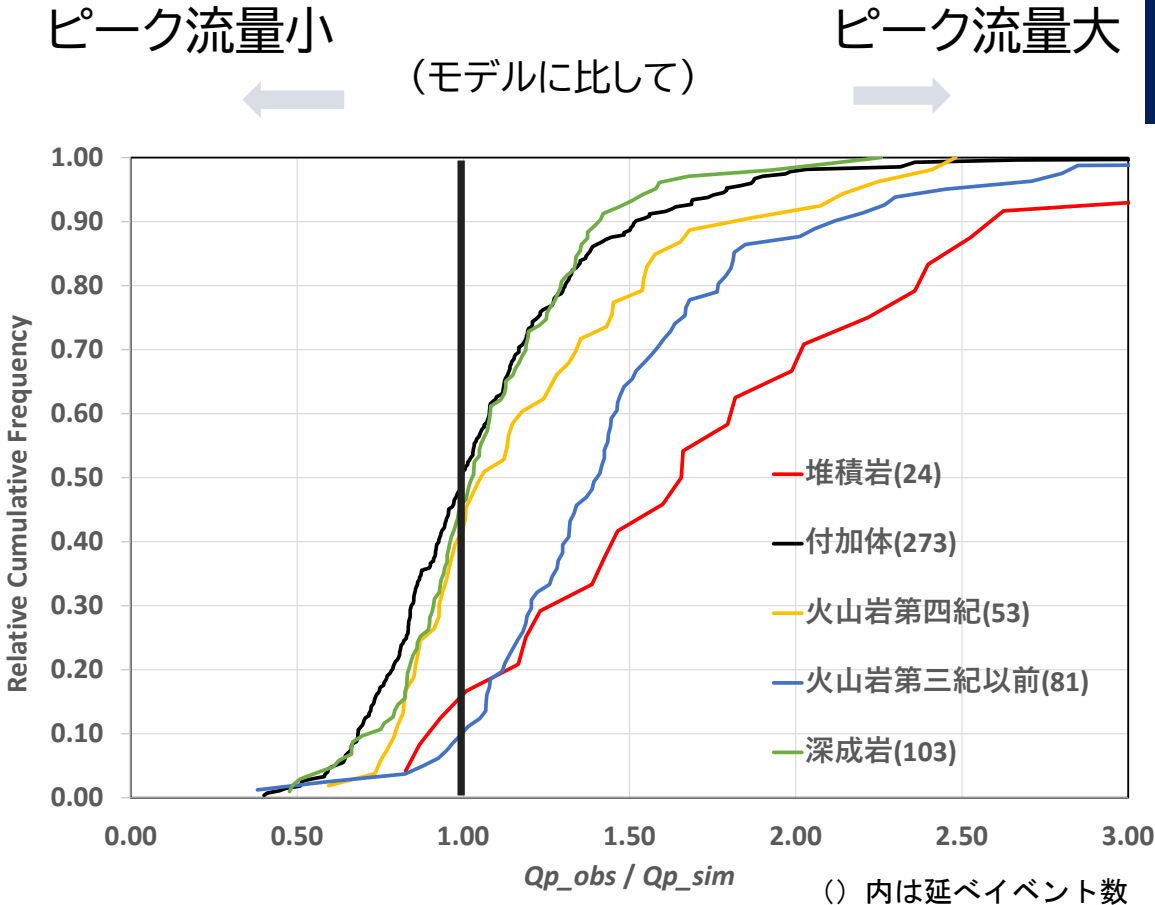
モデル(青)は観測(赤)を全体的に過大評価
観測は逡減が早い、出水後の基底流出は安定

地質による洪水流出特性の違い: 全国モデルを基準として



総流量の小さい順に、中央値では

深成岩 < 第四紀火山岩 < 付加体 < 第三紀火山 < 堆積岩
1.0 : 1.1 : 1.2 : 1.3 : 1.4

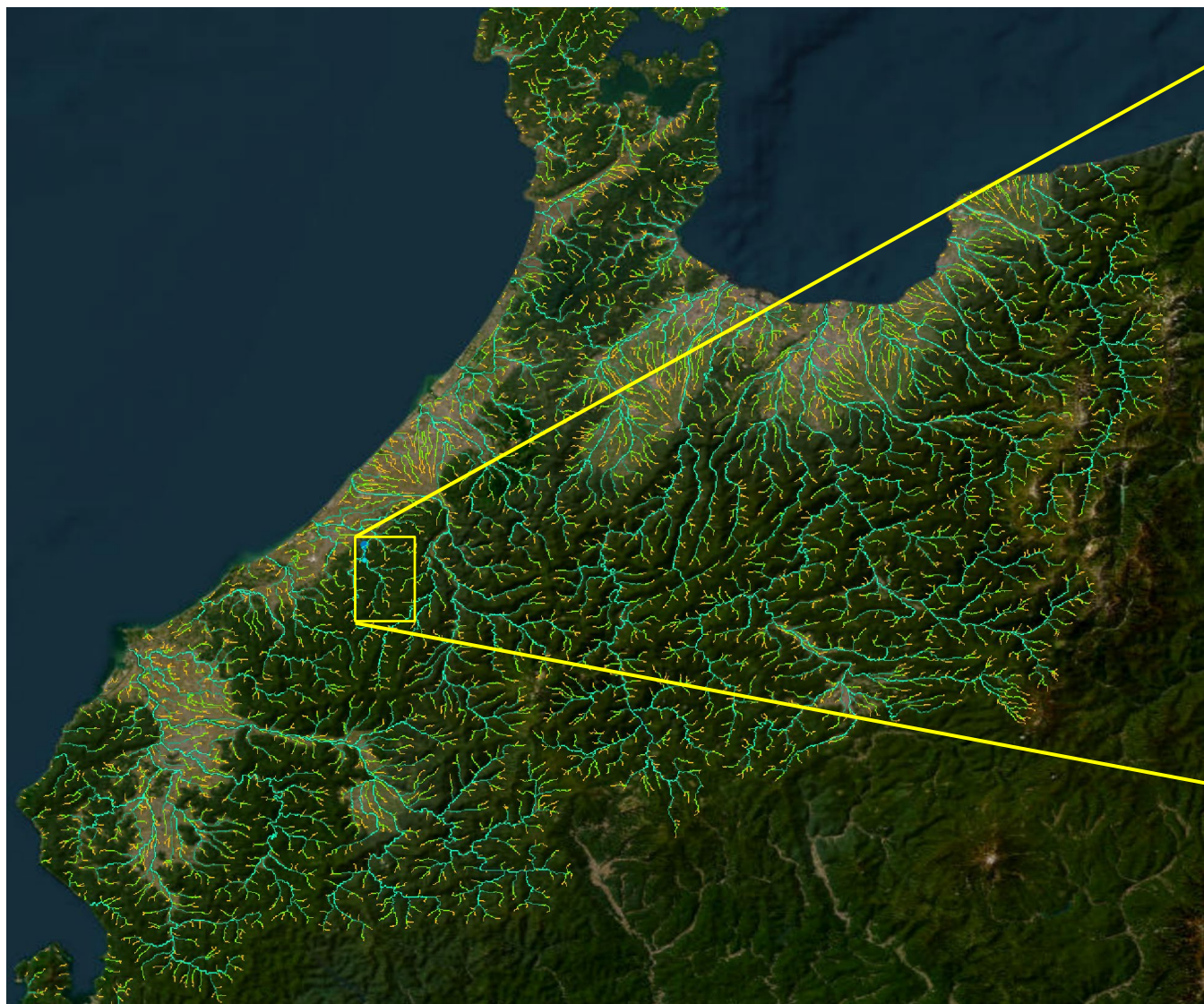


ピーク流量の小さい順に、中央値では

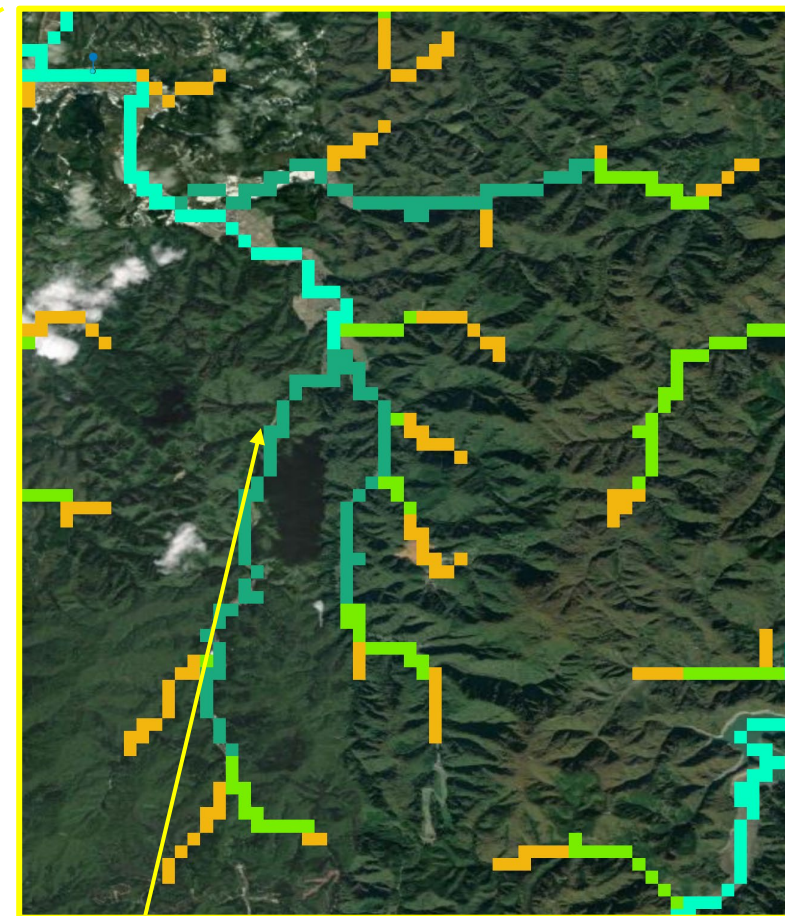
付加体 < 深成岩 < 第四紀火山岩 < 第三紀火山岩 < 堆積岩
1.0 : 1.0 : 1.1 : 1.4 : 1.7

梯川流域(第三紀火山岩)

解像度:150 m, モデル上の河川の始点 $\text{acc_thresh} = 50$ (約 1km^2)



梯川水系金野地点(上流 50 km^2)



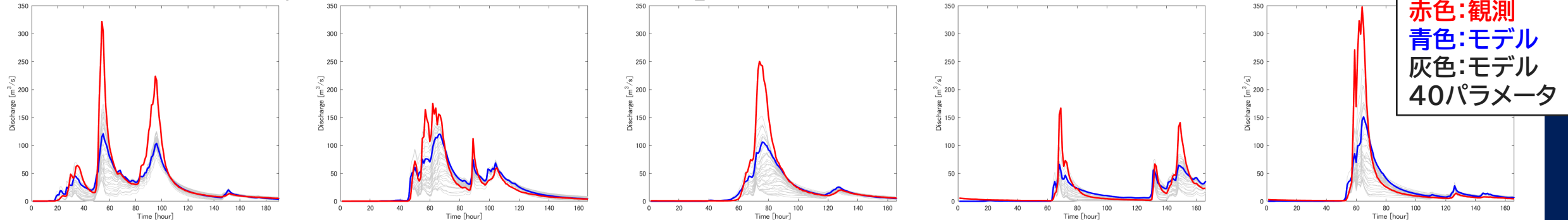
3 km



← 危機管理型水位計
 $\text{acc} : 662 = 13\text{ km}^2$
72

梯川水系:金野地点(50 km²) (40パラメータ)

空間解像度:150 m, 河川の始点:約1 km² (acc_thresh = 50)



灰色:多様な流出特性を反映する40のパラメータセットを用いた計算結果

青色:40種類のパラメータセットのうち、5出水で最適な結果を示すパラメータセットによる計算結果

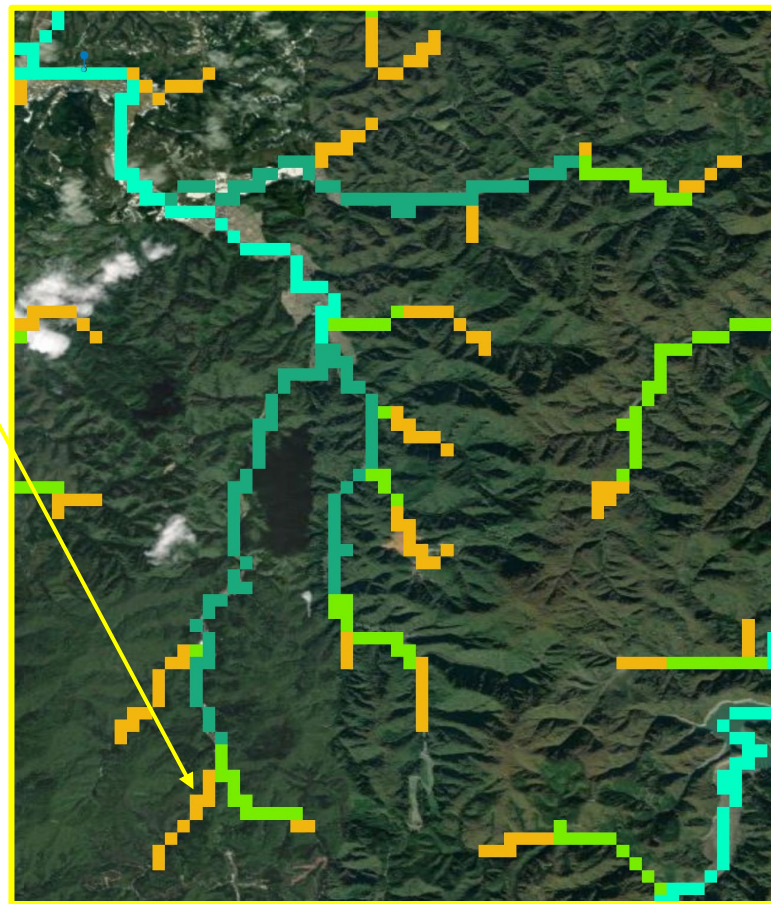
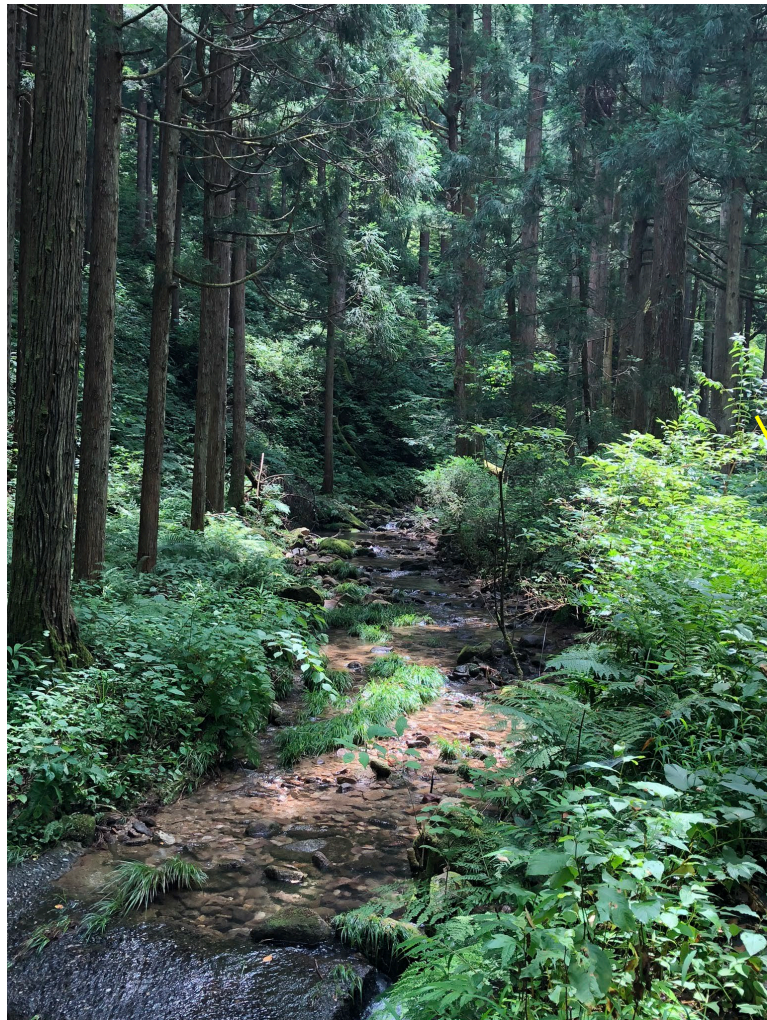
いかなるパラメータを用いても観測流量を過小評価する！

Why...?



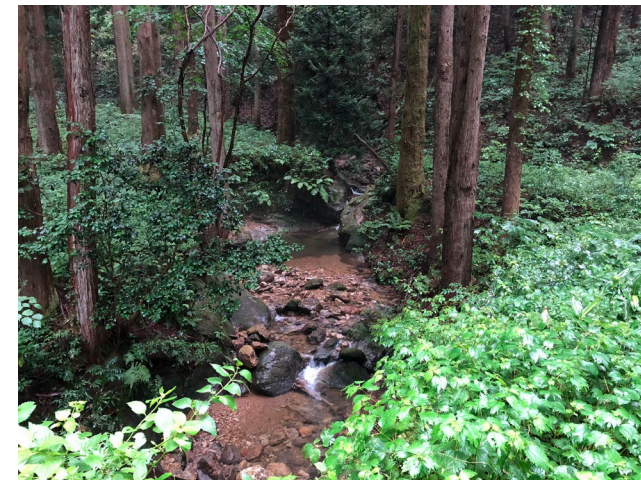
河川の始点をどう設定するか？

acc : 89 (1.8 km²)



集水面積 1km²以下

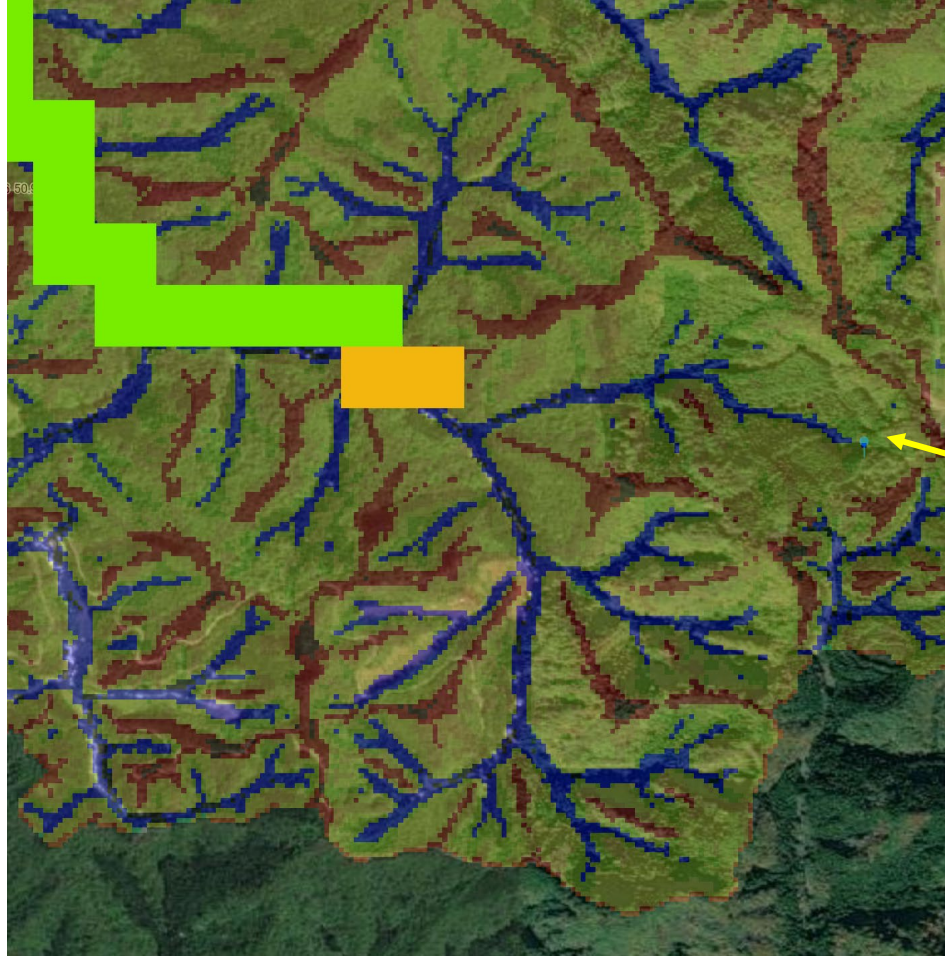
acc: 35 (0.69 km²)



acc: 15 = (0.31 km²)



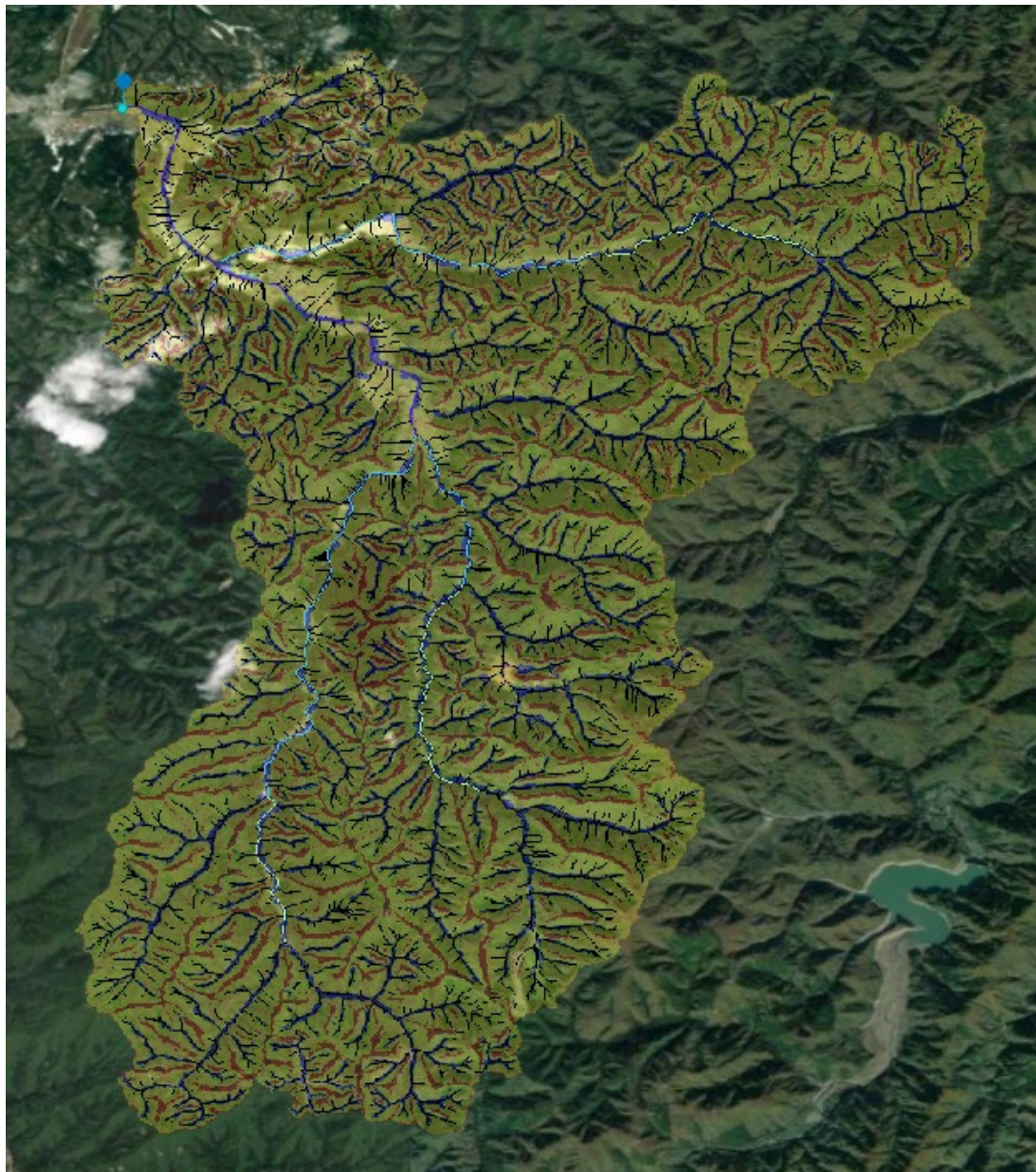
梯川流域の源頭部



集水面積: 約 0.01 km² (1ヘクタール)
10 mメッシュのacc : 74



GISによる地形解析結果(空間解像度:10 m)梯川上流



10 m DEMとArcGISを用いた地形分類

対象流域: 梯川流域金野上流(約50 km²)

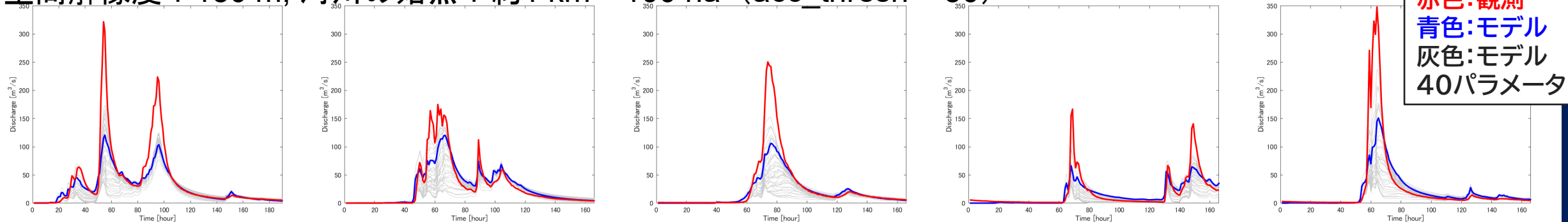
10 m DEMで $acc = 30$ (約0.4 ha)を河川の始まりと定義すると、GIS上の谷地形や現地調査で確認された両側に斜面を有する河川の始点と概ね合致する。

→ 10 m 解像度のモデルであれば、 $acc_thresh = 30$ 程度に設定するのが合理的か？

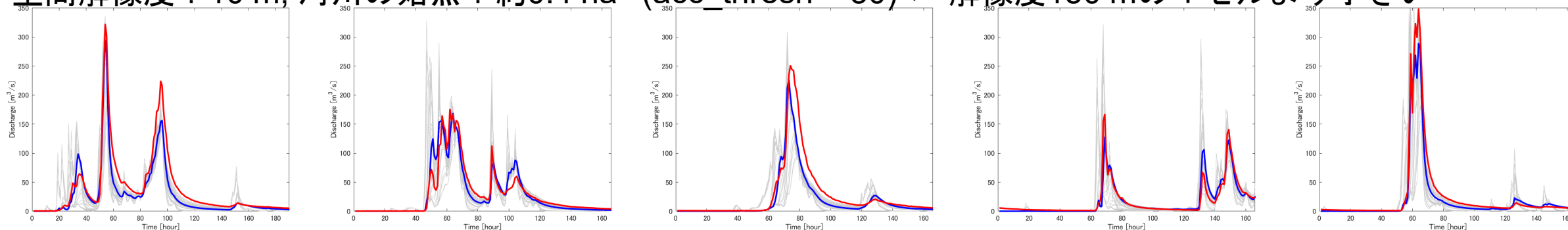
ただし、150 m 解像度では0.2セルに対応するため現状のモデルでは設定不可。

梯川水系:金野地点(50 km²)(40パラメータ)

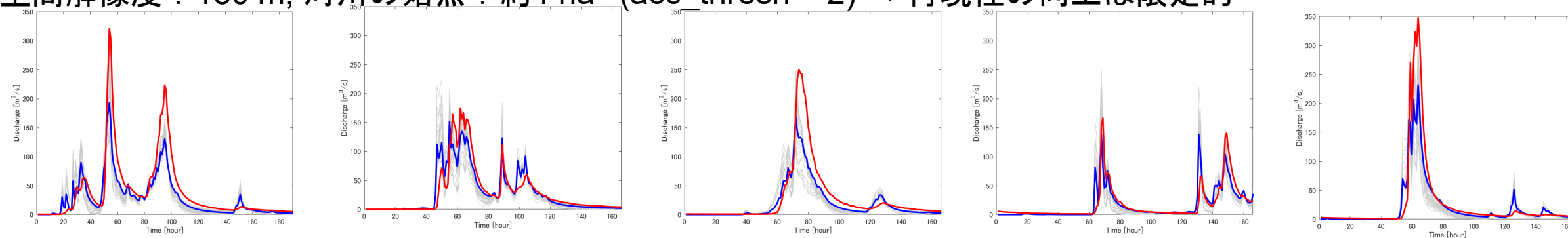
空間解像度: 150 m, 河川の始点: 約1 km² 100 ha (acc_thresh = 50)



空間解像度: 10 m, 河川の始点: 約0.4 ha (acc_thresh = 30) ← 解像度150 mの1セルより小さい

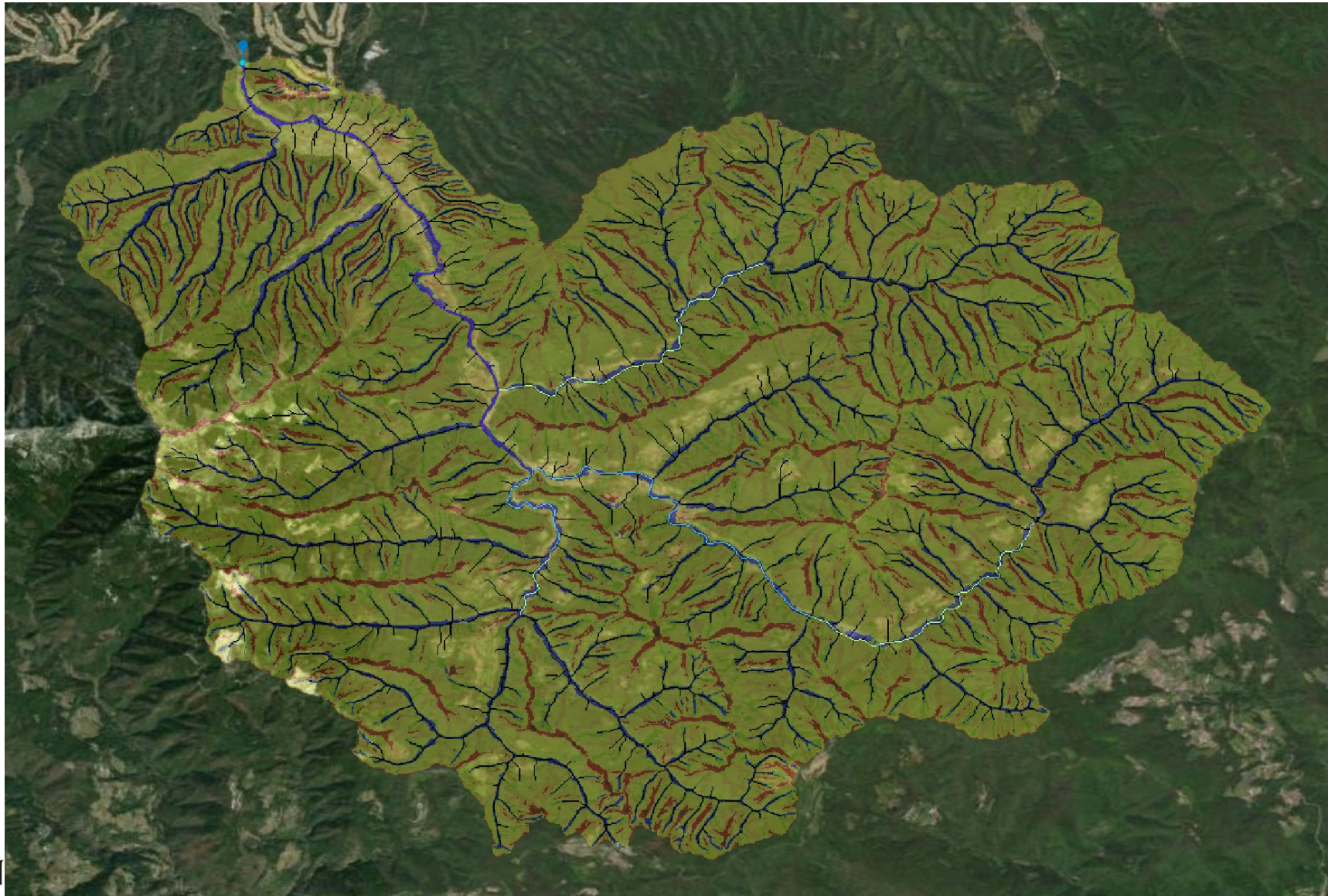


空間解像度: 150 m, 河川の始点: 約4 ha (acc_thresh = 2) → 再現性の向上は限定的



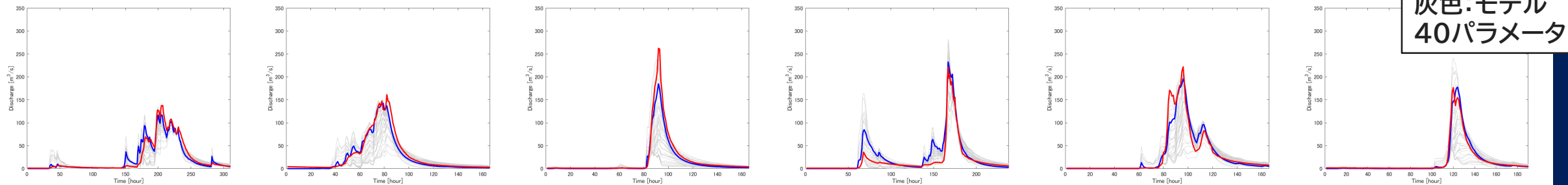
GISによる地形解析結果(空間解像度:10 m)土器川上流

対象流域：土器川流域天川地点上流（約62 km²）

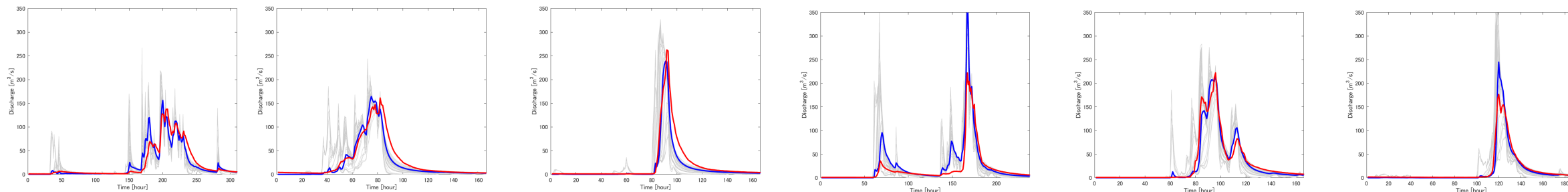


土器川水系:天川地点(62 km²)(40パラメータ)

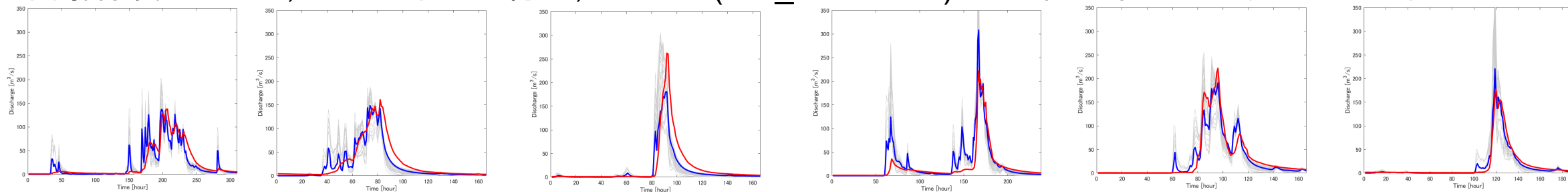
空間解像度: 150 m, 河川の始点: 約1 km² (acc_thresh = 50)



空間解像度: 10 m, 河川の始点: 約3800 m² (acc_thresh = 30) ← 解像度150 mの1セルより小さい



空間解像度: 150 m, 河川の始点: 約40,000 m² (acc_thresh = 2) → 応答が早くなりすぎて再現性悪化



ここまでの考察と現状のRRIモデルの課題

- 空間解像度150 mでacc_thresh = 50の場合、中小河川流域においてピーク流量を過小評価する可能性
- 第三紀火山岩が支配的な梯川流域など、特に流出応答が大きくて速い流域において過小評価
- 実現象とモデルの乖離の原因として、河道の始まり(acc_thresh)の設定上の問題が想定
- これまで、150 m解像度のRRIモデルの acc_thresh は50 (約1 km²)に設定
- 実際の河道は空間解像度10 mでacc_tresh = 30 程度(約0.4 ha)で谷地形がみられる
- 実現象はモデルと比較して斜面長が短く、河道長が長い
- 結果的に、実現象では現行モデルに比較して斜面を流れる時間は相対的に短く、河道を流れる時間は相対的に長くなる(流出を再現するためにモデル上で透水係数を早く設定しているのは、それが原因?)
- 10 mモデルで acc_tresh = 30 程度(約0.4 ha) に設定すると、上記の過小評価は改善される
- 150 mモデルで acc_thresh = 2 に設定しても改善の効果は限定的で、かつ悪化する場合もある
- 150 m分解能でも、斜面長を的確に表現できるモデル構造への改良が今後の課題 → RRI v2 に向けて

Take Home Messages

水文学の視点でモデルの課題を明らかにして予測精度向上を目指す

d4PDFなどアンサンブル気候変動プロダクトの多面的な活用を目指す