

気候変動適応策としての流域治水

京都大学防災研究所・統合プロD

佐山敬洋

本発表のスコープ

気候変動の予測・影響評価・適応策

何に対する影響評価か？ 風水害：豪雨、強風、洪水、高潮

洪水リスク：ハザード（浸水の規模と発生確率） × 曝露 × 脆弱性

ハザードモデル：リアルタイム予測 と 計画予知 は車の両輪

発表の流れ

1. 「流域治水」とは何か、なぜいま「流域治水」なのか？
2. AR6 WG1の洪水影響評価とは ～統合IPCCシンポジウムを踏まえて
3. 日本の影響評価レポートにおける洪水災害の取り扱い
4. 洪水災害に関連した統合Dの取り組み
5. 国交省による治水計画の見直しについて
6. 全国の河川を対象にしたハザードモデル開発事例
7. 課題と展望：長期連続アンサンブル予測情報を用いたリスク評価に向けて

洪水関連の用語

- **流出**：流域に降った**雨水**が河川に流入する現象
- **洪水**：河川の**流量**や**水位**が普段よりも増大している現象
- **決壊・破堤**：越水などによって**堤防**が破壊される現象
- **(外水) 氾濫**：**河川の水**があふれ広がる現象
- **(内水) 氾濫**：**雨水**が直接あふれ広がる現象
- **浸水**：**氾濫水**によって住宅や田畑が水に浸かる現象
- **流出高 (比流量)**：単位流域面積あたりの流量 [mm/h] ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)

1. 「流域治水」とは何か なぜいま「流域治水」なのか？

なぜ今「流域治水」なのか？

- 2015年関東東北豪雨（鬼怒川）、2017年九州北部豪雨（水・土砂）、2018年西日本豪雨、2019年東日本台風（台風19号）、2020年7月豪雨（球磨川）と近年の水害があまりにも酷いから。
- 国が直接管理する河川（直轄河川）の堤防が決壊したことは衝撃的であり、特に令和元年東日本台風では全国142箇所 で堤防が決壊、その被害額は約1兆8,800億円となり、平成30年7月豪雨による被害額（約1兆2150億円）を上回って、統計開始以来最大の被害額となってしまったから。
- 気候変動の影響が顕在化しており、「このままではいけない」、「総力戦で挑まねばならない」という認識が市民・行政・専門家に広まってきたから。

(佐山私見)

「流域治水」とは何か？

気候変動の影響を踏まえ、あらゆる関係者が協働して流域全体で行う総合的かつ多層的な水災害対策（国交省）

令和3年5月10日公布「特定都市河川浸水被害対策法等の一部を改正する法律」（通称「**流域治水関連法**」）。

- ① 氾濫をできるだけ防ぐ、減らす対策（ハザード）
- ② 被害対象を減少させるための対策（曝露）
- ③ 被害の軽減、復旧・復興のための対策（脆弱性）

*従来から総合治水という概念はあったが、総合治水は、都市化に伴う流出増大の抑制（ハザード制御）に力点が置かれた



国交省資料より

流域治水における土地利用マネジメントについて

② 被害対象を減少させるための対策（曝露）

- 都道府県知事は、改正された「特定都市河川浸水被害対策法」に基づいて、「浸水被害防止区域」（レッドゾーン）を指定可
（従来の浸水想定区域はイエローゾーン（規制なし））
- 一定の開発行為及び建築物の建築または用途の変更の制限
- 住宅や要配慮者施設等の安全性を事前確認（許可制）
- 防災集団移転促進事業のエリア要件の拡充と地区単位の浸水対策など

流域治水プロジェクトの例（那珂川）

那珂川緊急治水対策プロジェクト プロジェクトマップ

- 凡例
- 堤防決壊箇所(国)
 - 堤防決壊箇所(県)
 - 浸水範囲
 - ↔ 大臣(国)管理区間



①多重防御治水の推進 【河道・流域における対策】

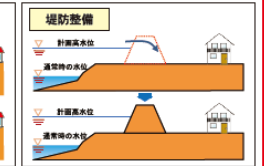
- 河道の流下能力の向上
- 遊水・貯留機能の確保・向上
- 土地利用・住まい方の工夫

全体事業費 約665億円【国:約521億円、県:約144億円】
 災害復旧 約219億円【国:約101億円、県:約117億円】
 改良復旧 約447億円【国:約420億円、県:約27億円】
 事業期間 令和元年度～令和6年度
 目標 令和元年度日本台風洪水における那珂川からの越水防止
 対策内容 河道掘削、遊水地、堤防整備等
 ※四捨五入の関係で合計値が合わない場合があります。

①多重防御治水の推進

①河道の流下能力の向上

例:堤防決壊箇所の復旧

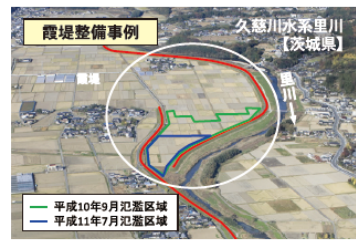
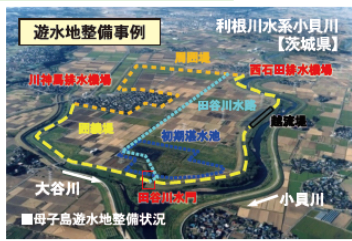


- 堤防、護岸等の被災施設を迅速に復旧します。
- 河道内の土砂掘削、樹木伐採により水位低減を図るとともに、掘削土を活用して堤防整備することで、洪水が円滑に流れやすい河道整備を推進します。
- 施設規模を上回る洪水に対する取組として、堤防決壊までの時間を少しでも伸ばすための堤防裏法尻の補強等を進めます。
- 堤防、水門等の維持管理や、河道内の堆積土砂の撤去、樹木コシ等の植生管理を進めます。

①多重防御治水の推進

②遊水・貯留機能の確保・向上

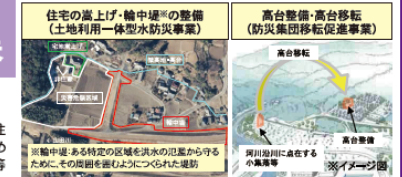
- 地形や現状の土地利用等を考慮した遊水地・霞堤の整備を進めます。既存する霞堤は保全・有効活用します。
- 既存ダムの有効貯水容量を、洪水調節に最大限活用できるよう検証・検討を行い、既存ダムの有効活用を進めます。



①多重防御治水の推進

③土地利用・住まい方の工夫

- 都市計画マスタープランや立地適正化計画等「まちづくりによる水害に強い地域への誘導を進めます。
- 浸水が想定される区域の土地利用制限や家屋移転、住宅の嵩上げ、輪中堤整備、高台整備、高台移転を進めます。



②減災に向けた更なる取組の推進【ソフト施策】

- 越水・決壊を検知する機器の開発・整備
- 危機管理型水位計、簡易型河川監視カメラの設置
- 講習会等によるマイタイムライン普及促進
- 防災メール、防災行政情報伝達システム、防災行政無線等を活用した情報発信の強化
- 要配慮者利用施設の避難確保計画作成の促進
- 緊急排水作業の準備計画策定と訓練実施

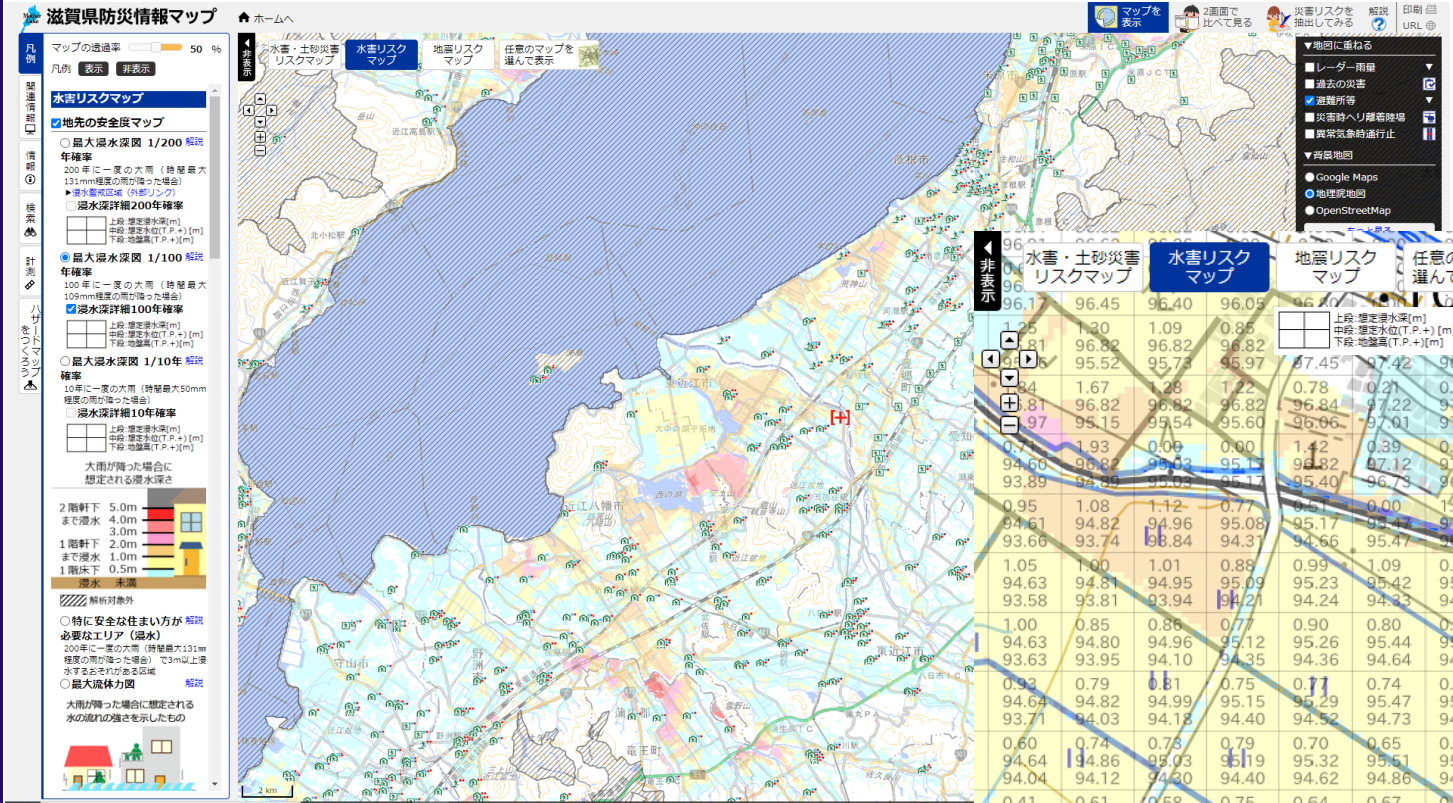
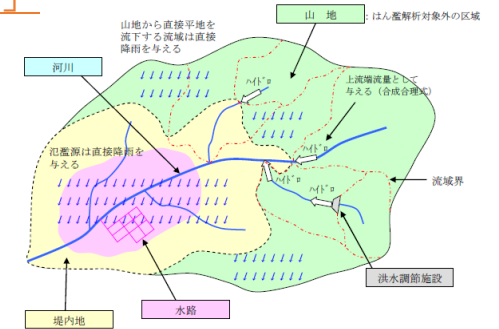


国交省資料より

滋賀県流域治水条例と地先の安全度マップ

流域治水を実現するためには、**気候変動の影響**を踏まえた「**多段階リスク明示型浸水想定図**」
 (様々な発生確率に対応した浸水深の分布情報)が必要(土木学会声明)。

滋賀県の「地先の安全度マップ」はその好事例である。
 ただし、全国に展開するためには、条件設定等で課題もある。



降雨確率	10年に一度	100年に一度	200年に一度
雨の強さ	最大 50mm/hr	最大 109mm/hr	最大 131mm/hr
24時間雨量	170mm/24hr	529mm/24hr	634mm/24hr
気象予報用語	非常に激しい雨	猛烈な雨	
人の受けるイメージ	滝のように降る (ゴーストと降り続く)	これまでに経験したことのないような大雨 ・ 息苦しくなるような圧迫感、恐怖を感じる	
災害発生状況	現在、浸水対策として 河川や下水道整備を進めている降雨規模 ・ 中小河川や水路があるおそれがある	河川や下水道整備の規模を上回る降雨規模 ・ 大規模な災害の発生のおそれが高く、厳重な警戒が必要	

滋賀県の安全度マップにおける計画降雨の時空間分布

- ・ 時間：中央集中型
- ・ 空間：一様

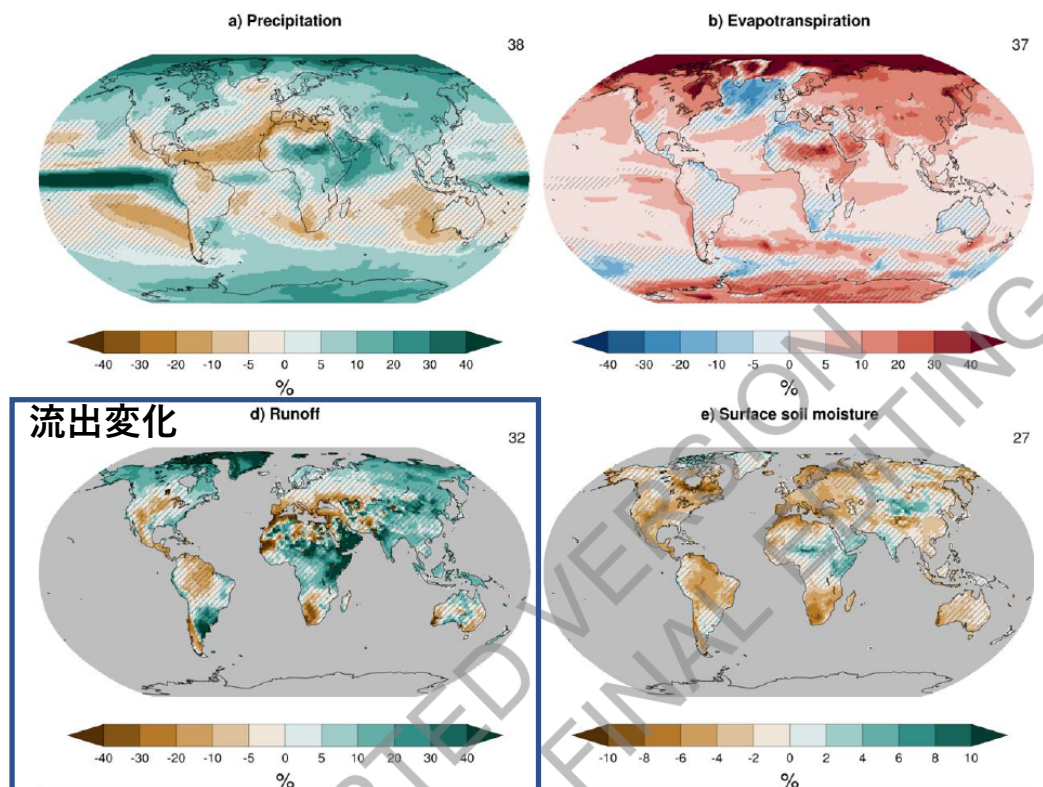
<https://shiga-bousai.jp/dmap/top/index>

2. AR6 WG1の洪水影響評価とは ～統合IPCCシンポジウムを踏まえて

IPCC AR6: TS, Chapter 8 (Water Cycle Change) -- 全球スケールの流出

タイムスライス実験の比 (SSP2-4.5)

Long term water cycle variables changes for SSP2-4.5 (2081-2100 vs 1995-2014)



流出変化

CMIP6: 32モデル

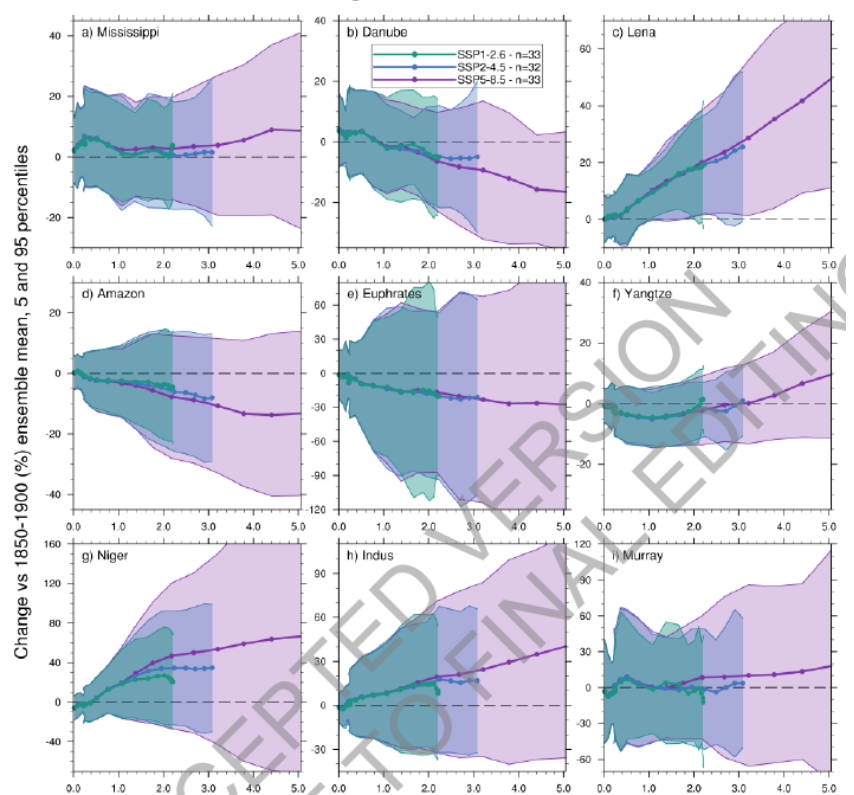
Color High model agreement ($\geq 80\%$)
 Hatched Low model agreement ($< 80\%$)

TS: Box TS.6, Figure 1

世界の主要な河川流域における年間流出量の予測

Rate of change in basin-scale runoff mean

1850-1900年代を基準とした変化率



Warming above 1850-1900, from 1901 to 2100

Chapter 8: Fig 8.26

0.5° 分解能の河道網追跡モデルによる推定

IPCC AR6: Chapter 11 (Weather and Climate Extreme Events)

11.5 Floods

11.5.1 機構と因子：多様なタイプの洪水がある

11.5.2 観測トレンド：全球スケールのピーク流量変化は low confidence。Asiaなどでは増加傾向がみられる

11.5.3 モデル評価：領域スケールの水文モデルは、ピーク流量の再現性にバイアスが残る
全球スケールの水文モデルは、洪水流量の再現にまだ struggle している

11.5.4 アトリビューション：研究事例が少ない。人為的な影響による洪水の変化については low confidence

11.5.5 将来予測：

全球スケールでは、洪水が増加する地域の方が、減少する地域よりも多い (Hirabayashi et al., 2013 なども引用)

全球スケールの洪水変化は medium confidence、領域スケールの洪水変化は low confidence。

水文モデルによる洪水の将来予測研究の多くは、洪水防御対策、政策、将来の土地利用変化など洪水被害に関連する要素を考慮できていない。

IPCC AR6: Annex VI (Climatic Impact-Driver and Extreme Indices)

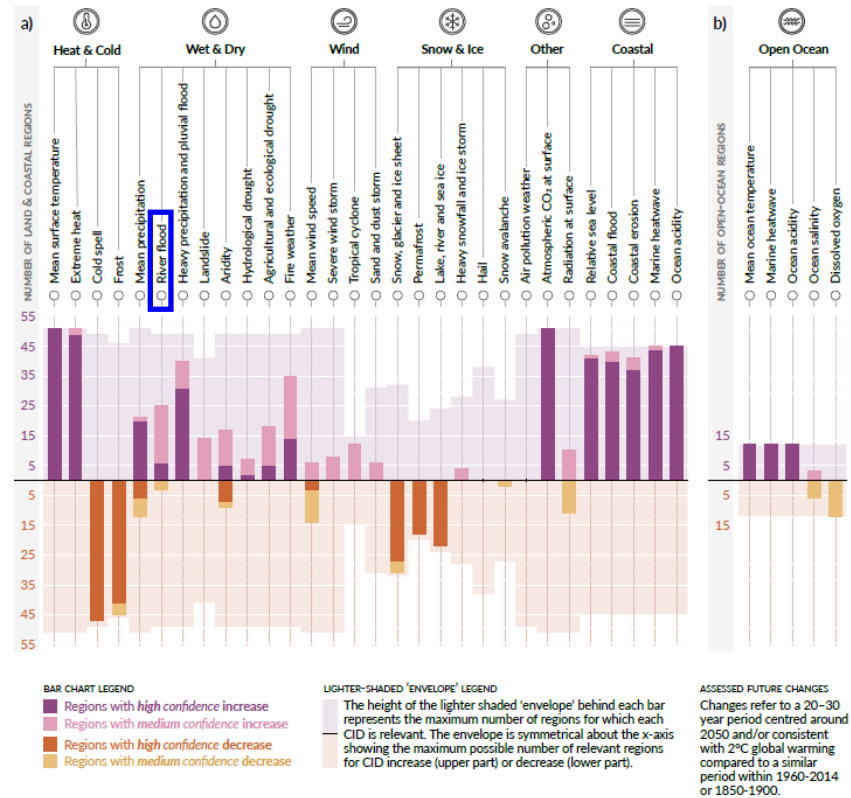
River flood index using runoff (FI)

年超過確率1/100の流量(m^3/s)に着目する。

タイムスライス実験による30年間の年最大流量データにGumbel分布を適用する。

CORDEX地域モデルについては、Total Runoff を CHyM (Coppola et al., 2017, 2018)に入力する。

Number of land & coastal regions (a) and open-ocean regions (b) where each climatic impact-driver (CID) is projected to increase or decrease with high confidence (dark shade) or medium confidence (light shade)

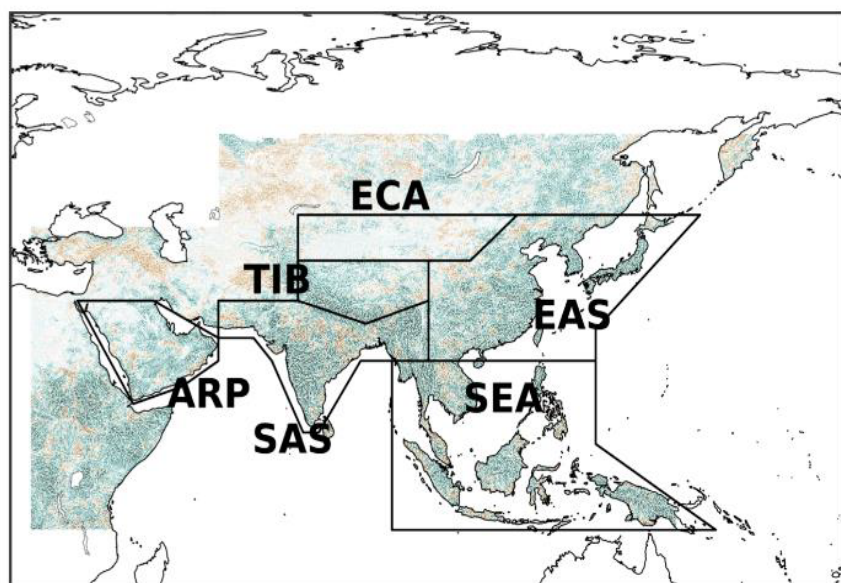


IPCC AR6: Chapter 12 (Regional Impact for Risk Asses.) -- 地域スケールの洪水

12.3.2.2 River flood

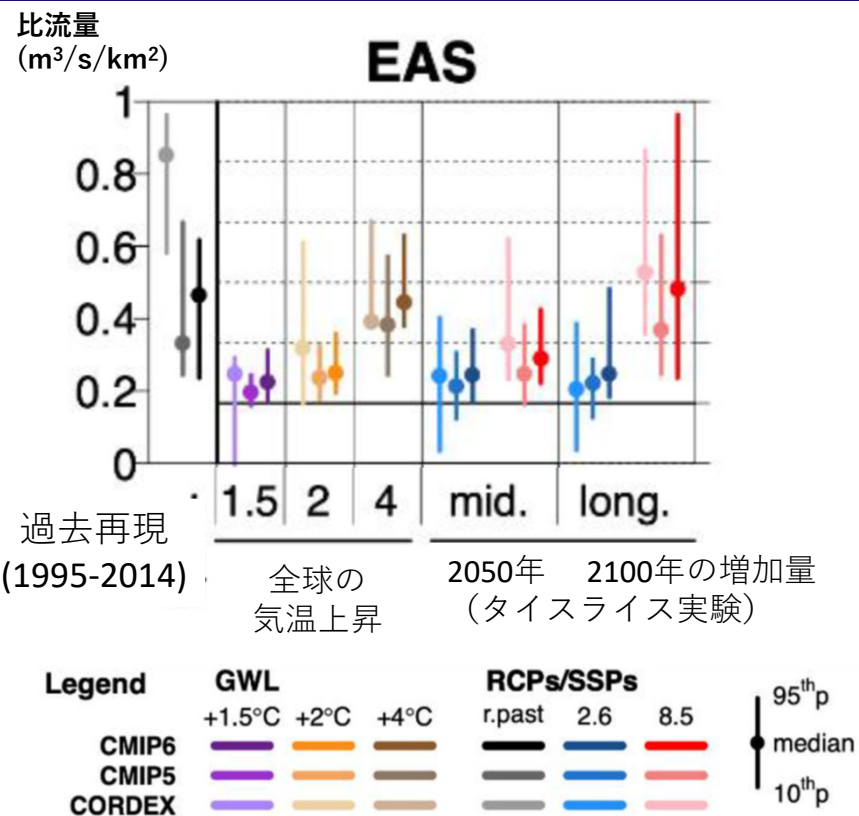
年超過確率1/100の比流量($m^3/s/km^2$)変化(2050年まで)

(a) 1-in-100 yr river discharge per unit catchment area by 2050, CORDEX RCP8.5



-0.2 -0.1 -0.05 -0.02 -0.01 0 0.01 0.02 0.05 0.1 0.2

$m^3 s^{-1} km^{-2}$



過去再現 (1995-2014) 2050年 2100年の増加量 (タイスライス実験)

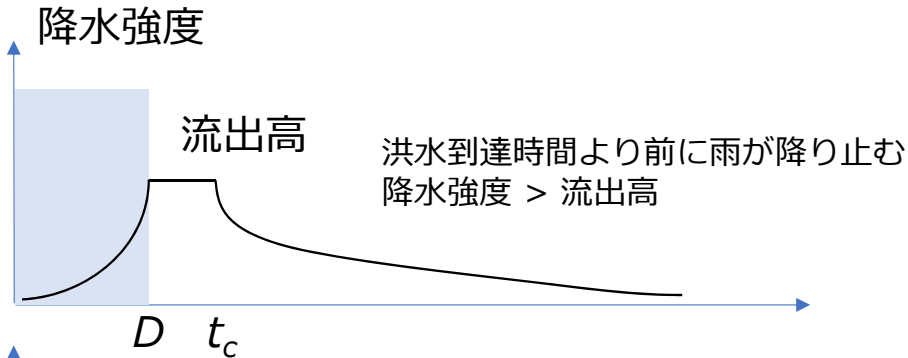
Legend
 GWL: +1.5°C, +2°C, +4°C
 RCPs/SSPs: r.past, 2.6, 8.5
 CMIP6, CMIP5, CORDEX
 95thp, median, 10thp

課題：EASの比流量変化情報をどう解釈すべきか？
 (同じ比流量でも流域面積と地域により値の持つ意味合いが大きく違う)

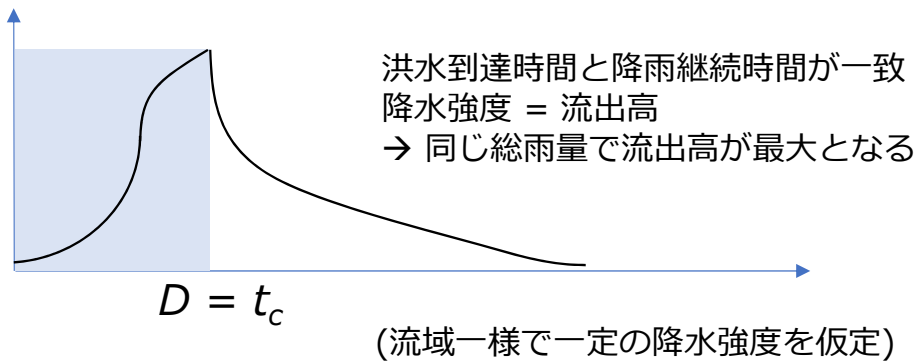
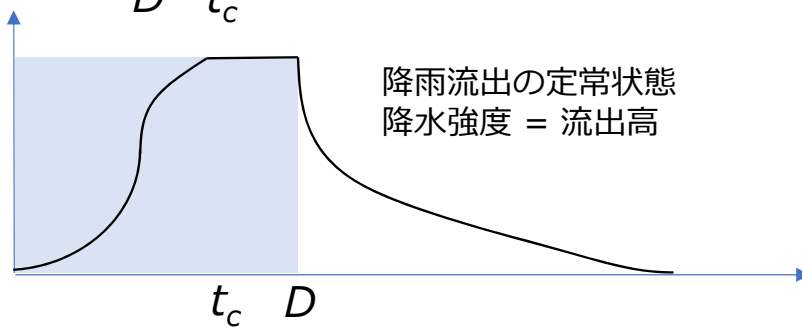
参考：比流量： $1 m^3/s/km^2 =$ ピーク流出高： $3.6 mm/h$
 (日本の中小河川の洪水： $8.3 m^3/s/km^2 = 30 mm/h$)

(参考資料)洪水到達時間と降雨継続時間について

降雨流出が定常状態に達しないため右図の状態が現実的
(例：降水強度 = 50 mm/h > 流出高 = 30 mm/h)



仮に降雨流出が定常状態に達すれば、流域平均の降水強度と洪水の流出高が一致する
(例：降水強度 = 流出高 = 30 mm/h)



洪水到達時間
流域の力学的最遠点に降った雨水の擾乱が流域下流端に伝播する時間(t_c)であり、雨水が流域から河道に入る流入時間と、河道内を伝播する流下時間との和で求められる。

t_c : 洪水到達時間
 D : 降雨継続時間

角屋・福島 (1976) の洪水到達時間推定式

$$t_c = CA^{0.22} r_e^{-0.35}$$

C : 定数 (= 290, 丘陵山地域)
 r_e : 有効降雨強度(10-20 mm/h)

⇒ 湯西川ダム($A = 102 \text{ km}^2$)
洪水到達時間: 5~6時間

3. 日本の影響評価レポートにおける 洪水災害の取り扱い

気象庁：「日本の気候変動2020」：観測事例

日本国内の大雨及び短時間強雨の発生頻度は有意に増加

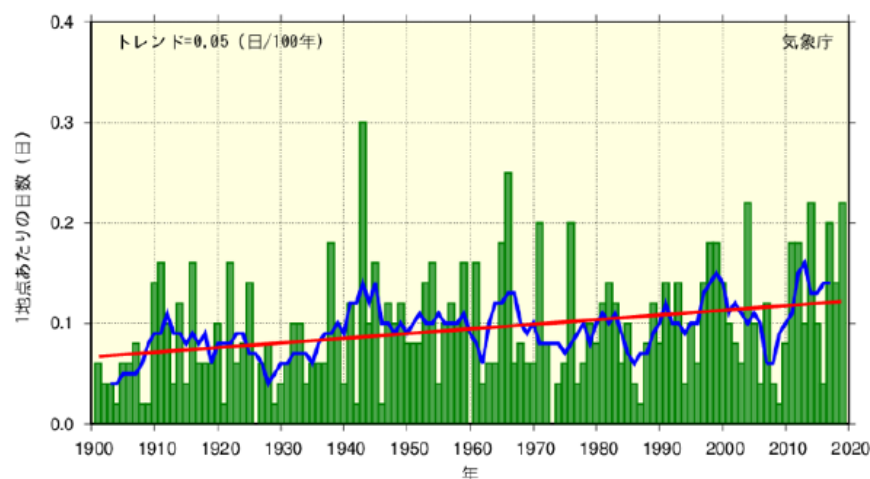


図 4.1 日降水量 200 mm 以上の大雨の年間日数の経年変化 (1901～2019 年)

気象庁の全国51観測地点の降水量データ。統計期間最初の30年(1901-1930)と最近30年(1990-2019)を比べると、200 mm以上の頻度は約1.7倍、100 mm以上は約1.4倍に増加。

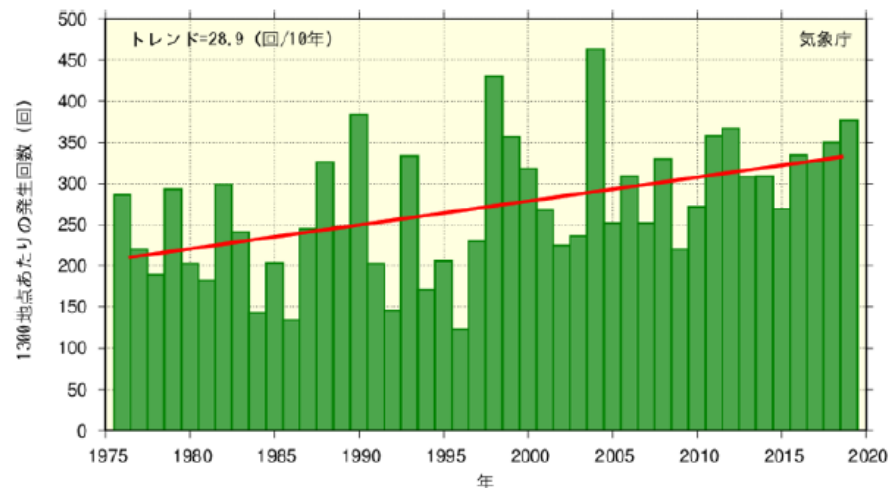


図 4.2 1 時間降水量 50 mm 以上の短時間強雨の年間発生回数の経年変化 (1976～2019 年)

全国約1,300地点のアメダス観測データ。統計期間最初の10年(1976-1985)と最近10年(2010-2019)を比べると、80 mm/h以上の発生回数は約1.7倍、50 mm以上は約1.4倍に増加。

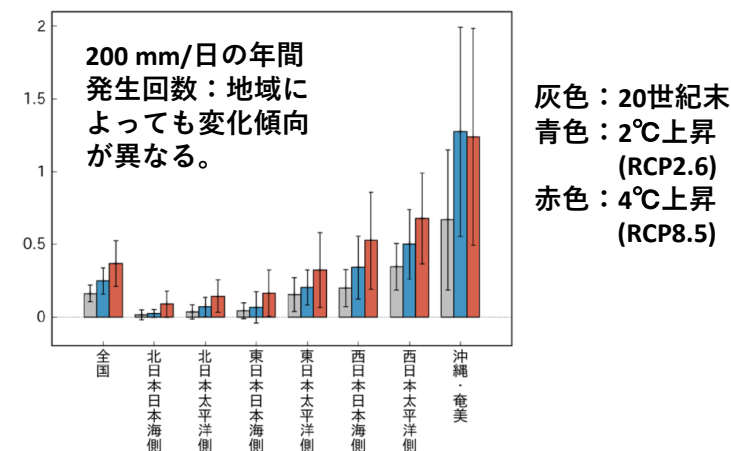
気象庁：「日本の気候変動2020」：将来予測

RCP2.6

RCP8.5

	2°C上昇シナリオによる予測 パリ協定の2°C目標が達成された世界	4°C上昇シナリオによる予測 現時点を超える追加的な緩和策を取らなかった世界
日降水量200 mm以上の年間日数	約1.5倍に増加	約2.3倍に増加
1時間降水量50 mm以上 ^{注)} の頻度	約1.6倍に増加	約2.3倍に増加
日降水量の年最大値	約12% (約15 mm) 増加	約27% (約33 mm) 増加
日降水量1.0 mm未満の年間日数	(有意な変化は予測されない)	約8.2日増加

日本の洪水にとっては、ここが肝心。
これがどのような影響を与えるのか？
どのような流域治水が必要となるか？



「高潮のリスクは増大すると予測される」 → 洪水のリスクは？

環境省：「気候変動影響評価報告書」（2020年）

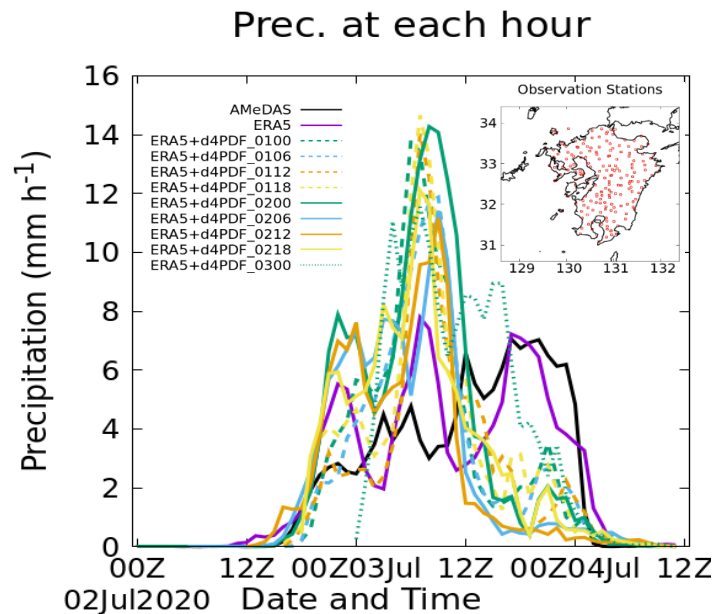
3.4 自然災害・沿岸域 → 洪水

- 主として国内を対象にした影響評価の研究を包括的にレビュー
- トレードオフ（ハザードの再現レベルの忠実性とマルチモデル・アンサンブルなど）の制約の下で手法選択を迫られる
- 「代表的な河川流域について大雨の生起が有意に増大すること、1～3割程度であることについては、多くの文献で見解が一致する」
- 「洪水を発生させる降雨量の増加割合に対して、洪水ピーク流量の増加割合、氾濫発生確率の増加割合とともに大きくなる」

4. 洪水災害に関連した統合Dの取り組み

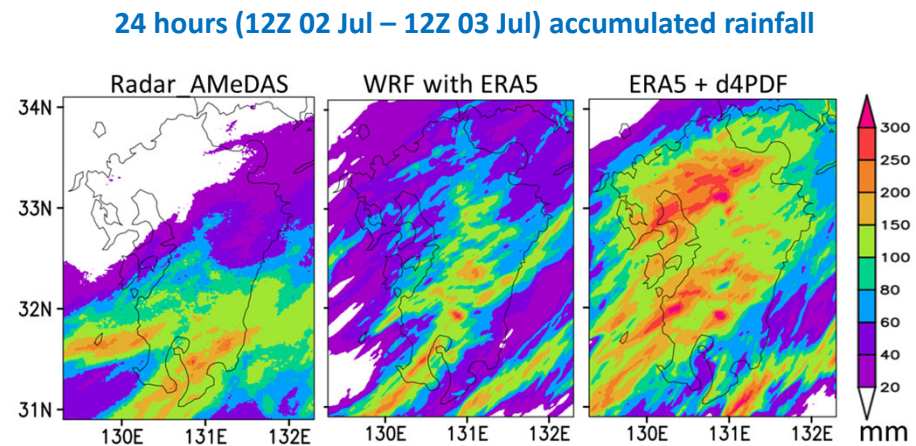
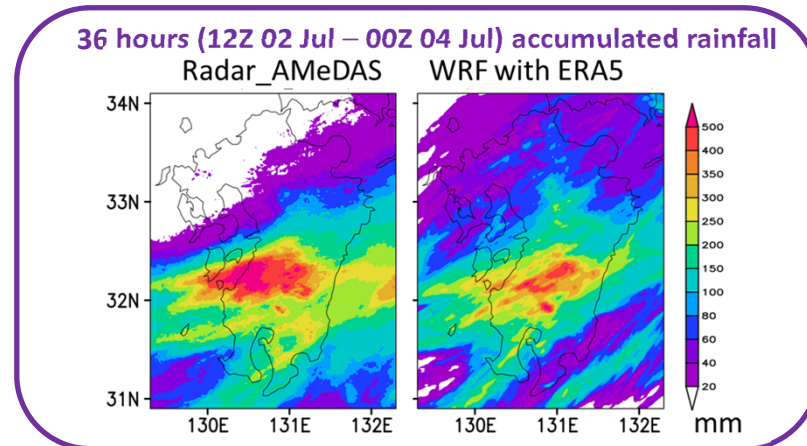
令和2年7月豪雨の温暖化影響（京大防災：竹見先生、Nayakさん）

2020年7月球磨川豪雨のd4PDFによる擬似温暖化実験



Averaged over Kyushu from all stations

- Total duration was 36 hours in Present Climate (WRF captured well)
- Duration decreased to 24 hours under 4K, but much intensified



(Nayak and Takemi)

2017/2018年の7月豪雨のClausius-Clapeyronスケーリング

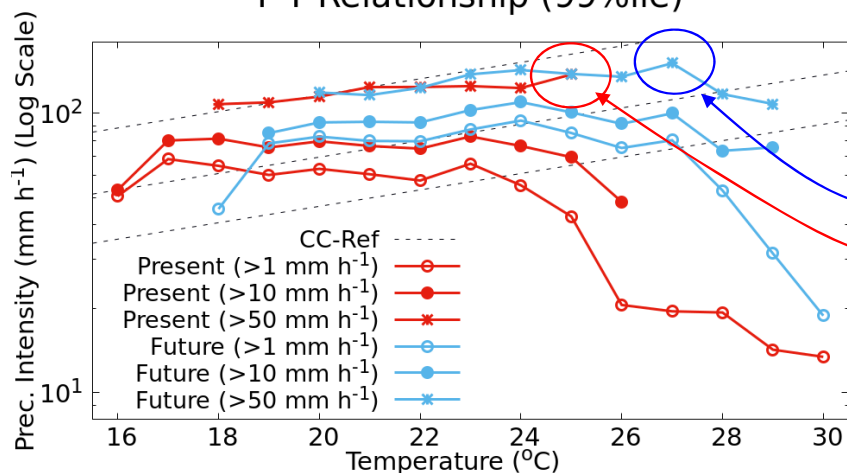
平成29年7月九州北部豪雨・平成30年7月豪雨を対象

現在再現・擬似温暖化実験

極端降水(99%値)の抽出

C-C則との対応

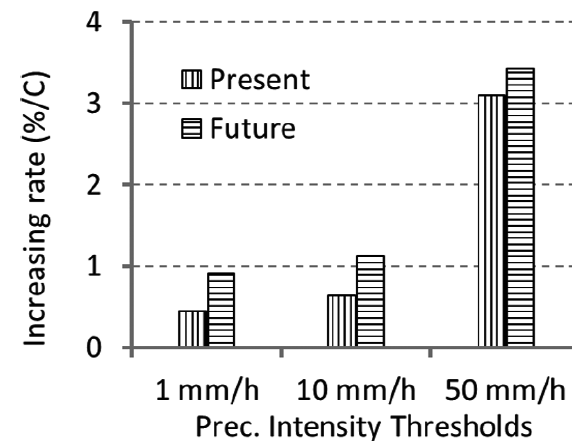
P-T Relationship (99%ile)



一定の閾値（1 mm/h, 10 mm/h, 50 mm/h）以上の降水で分類すると、降水強度が強い場合ほど、CC則に近くなる。ピーク強度は、温暖化条件で強まる。

赤：現在再現
青：擬似温暖化

- 格子解像度 1 kmのWRFで現在気候、擬似温暖化(PGW)実験。
- 現在気候下では22度まで、将来気候下では24度までCCスケーリングに従う。
- 将来気候における降水強度の増加と気温に対する増加率は、大気中の水蒸気および不安定エネルギーが増加することに起因する。



50 mm/h以上の豪雨は、将来気候下で約3.5 %/°Cの増加率
(Nayak and Takemi, JMS2020)

梅雨集中豪雨の将来変化（京大防災：中北先生、小坂田先生ら）

RCM05（6～8月）の降雨出力から**梅雨集中豪雨のみを1事例ずつ抽出**

客観基準（中北・宮宅ら，2012）

➤ 30分降水量

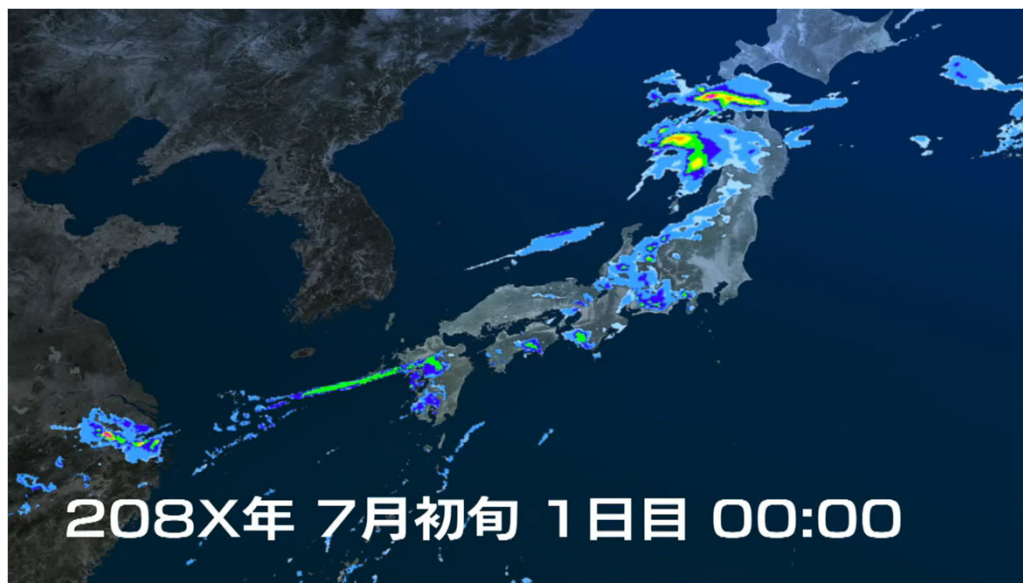
- 時間雨量換算で**50mm以上の雨域が2時間以上同じ場所に停滞**する場合。→“システム”としての停滞
- 時間雨量換算で50mm以上の雨域が2時間以内に同じ場所に複数回出現する場合。

➤ 3時間降水量

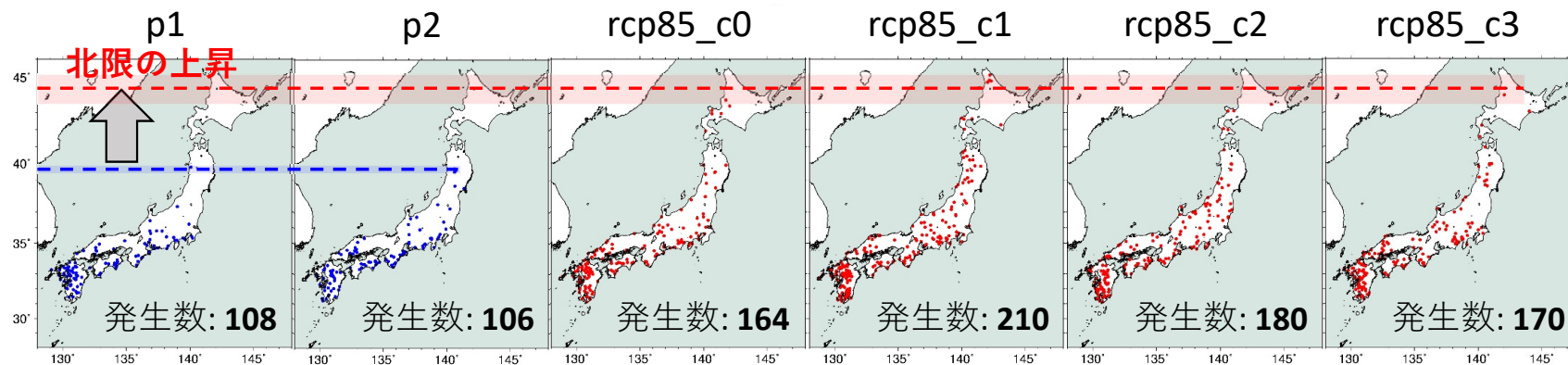
- 150mm以上の雨域が出現した場合。
- 100-150mmの雨域が3時間以上停滞する場合。

➤ 梅雨前線の確認

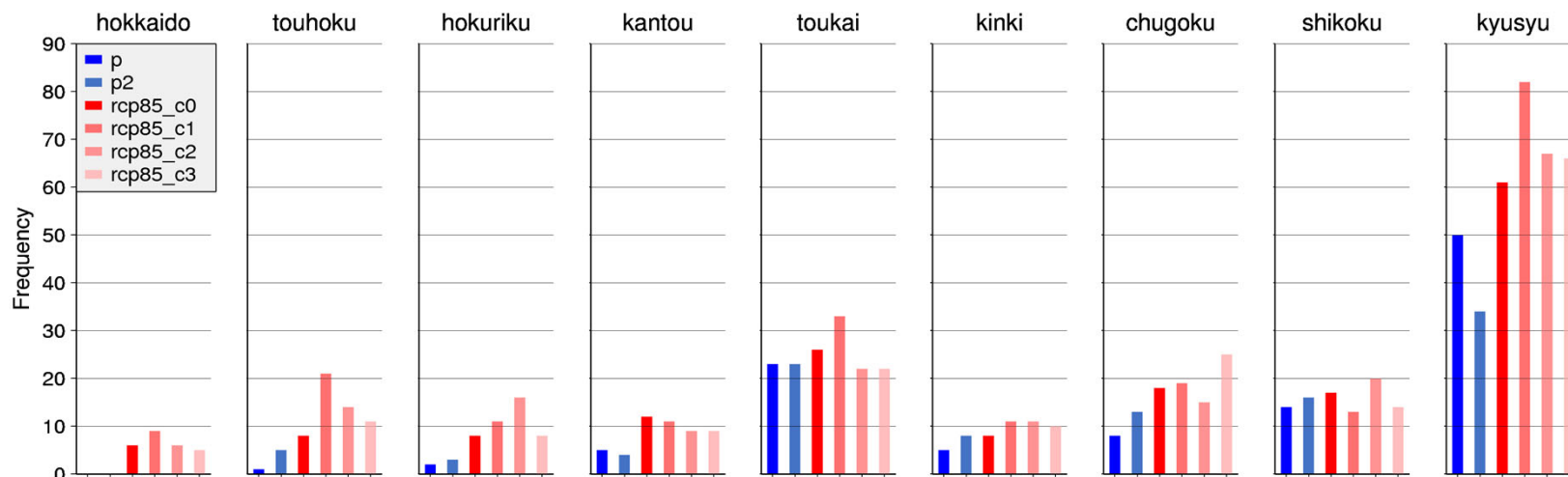
- 相当温位の南北勾配が大きいこと。
- 太平洋高気圧の縁辺から等，水蒸気が南から供給されていること。



梅雨集中豪雨の将来変化（京大防災：中北先生、小坂田先生ら）



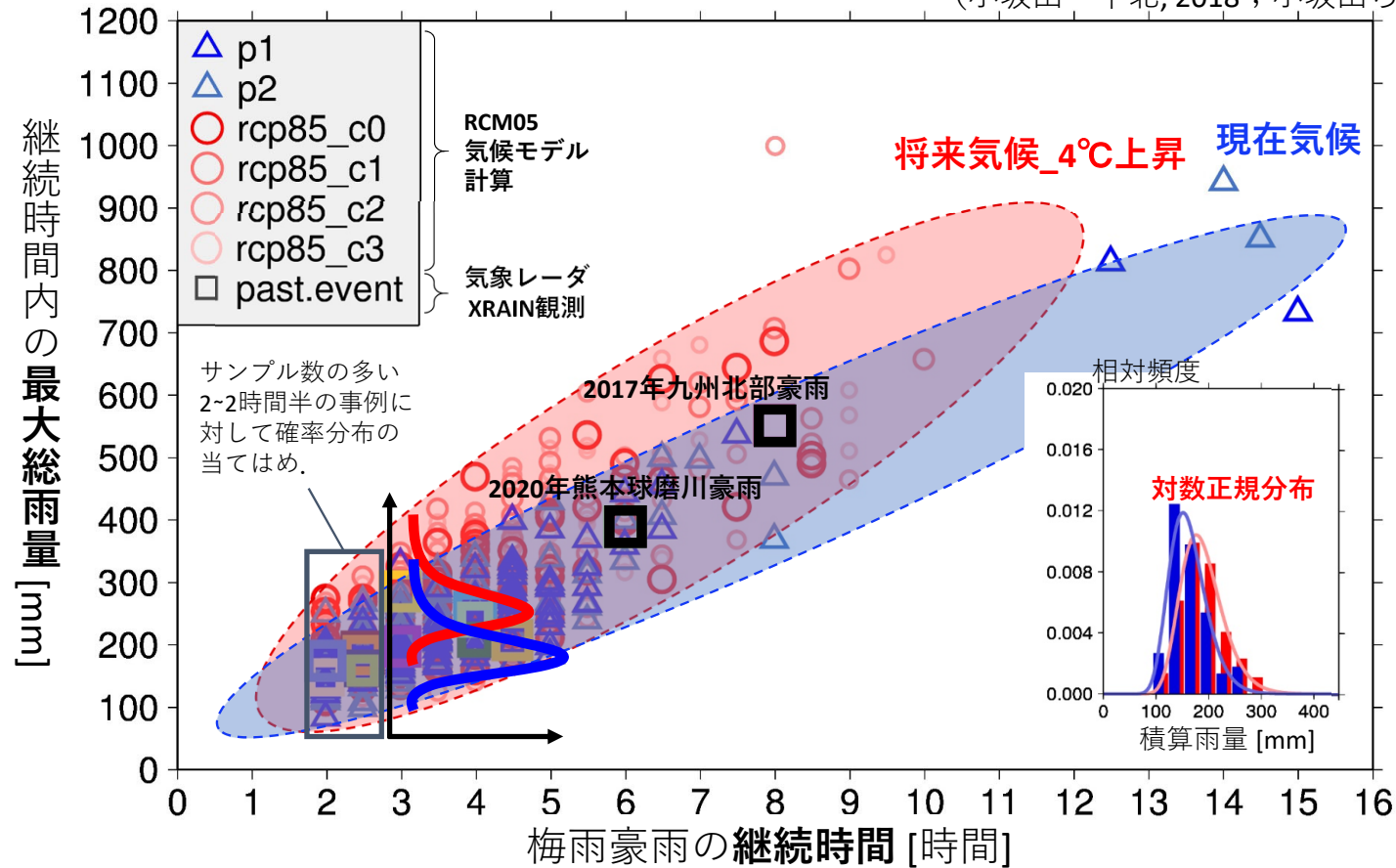
（中北・小坂田，2018；Osakada and Nakakita，2018；小坂田ら，2020）



- ◆ 全国的に、集中豪雨の発生頻度は**将来増加傾向**にあり、発生地域の**北限は北上**する。
- ◆ 北海道では、現在で1度も集中豪雨が発生していないが、将来で発生し始める。
- ◆ 太平洋側の地域ではあまり有意な増加が見られない。

豪雨の継続時間と雨量の将来変化

(小坂田・中北, 2018; 小坂田ら, 2020)

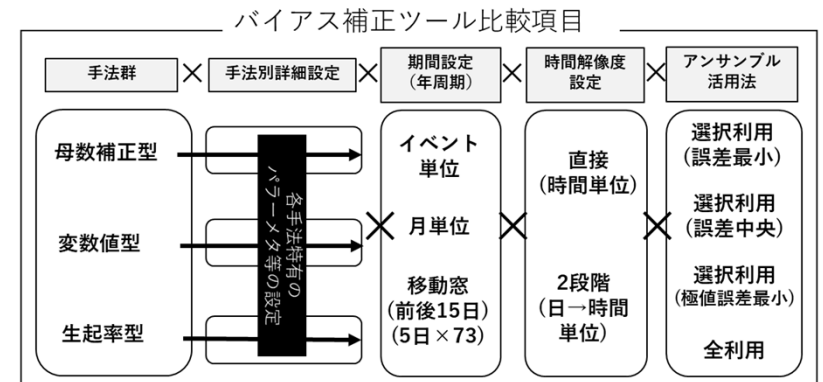


- 将来気候では梅雨豪雨の**継続時間あたり総雨量が増加**する。
- 近年の**2017年九州北部豪雨**等は現在気候では非常に極端で、むしろ将来の事例に近い。
- 総雨量の確率分布は**対数正規分布**が当てはまり、総雨量の増加は**統計的にも1%有意**。

d4PDFバイアス補正（京大防災：渡部先生ら）

- アメダス観測点（全国1176地点、約20 km間隔）を対象としたd4PDF バイアス補正降水量データセットを開発
 - 特徴①：アメダスデータ点毎に1500年(現在), 5400年(将来) のデータを作成
 - 特徴②：大規模アンサンブルデータ(d4PDF)の特徴を踏まえた補正手法

- 補正手法を検証
 - 日本域d4PDFデータセット・アメダスデータを用いて
 - 検証①：長期データを対象とした（較正－検証）実験
 - 検証②：計画降雨（流域平均雨量）再現性比較
 - 検証③：“時間→日単位”と“日単位→時間単位”の比較



手法の選択と
 手法独自の設定項目の選択

補正を行う
 単位期間の
 設定

時間データ
 作成方法の
 設定

アンサンブル
 実験の活用法の
 設定

低頻度：
 イベント型
 長期：
 移動窓
 (前後15日)

基本的に
 日→時間
 を利用

水文・水資源学会誌
 J. Japan Soc. Hydrol. and Water Resour.
 Vol. 33, No. 6, Nov. 2020 pp. 243-252

気候モデル出力値のバイアス補正 (1)
 特徴に基づく手法の整理

渡部 哲史¹⁾

¹⁾ 東京大学大学院 工学系研究科
 (〒113-8656 東京都文京区本郷 5-3-1)

¹⁾連絡先著者 (Corresponding Author) E-mail: stwata@hydro.tokyo.ac.jp

水文・水資源学会誌 第33巻第6号 (2020)

Hydrological Research Letters 14(3), 117-122 (2020)
 Published online in J-STAGE (www.jstage.jst.go.jp/browse/hrl). DOI: 10.3178/hrl.14.117

Bias correction of d4PDF using a moving window method and their
 uncertainty analysis in estimation and projection of design rainfall depth

Satoshi Watanabe¹, Masafumi Yamada², Shiori Abe³ and Misako Hatono⁴

¹School of Engineering, the University of Tokyo, Japan

²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan

³Mitsui Consultants, co., Ltd., Japan

⁴Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Japan

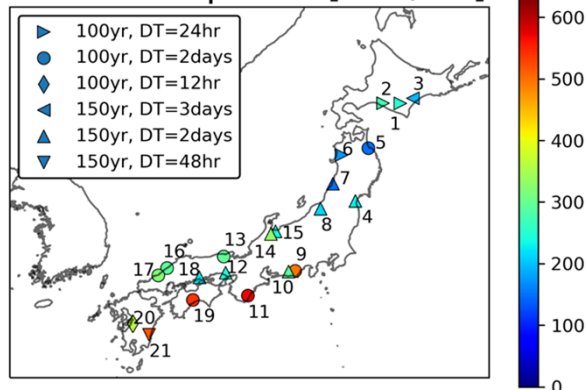
水文水資源学会誌、2020(6)

HRL, 14(3), 2020

d4PDFバイアス補正（京大防災：渡部先生ら）

アメダス地点でバイアス補正したd4PDFを用いて河川流域の計画降雨の変化率を推定

Reference points [mm/DT]



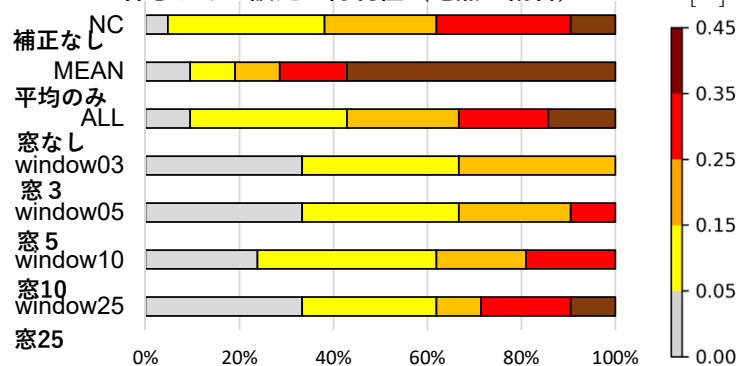
基準地点が流域面積の大部分をカバーしているもの、複数の降雨観測地点があるものを選択

	雄物川	肱川
規模	1/150年	1/100年
単位	mm/2day	mm/2day
計画降雨	258.7	340.0
補正結果	250.4	349.7

数%の誤差

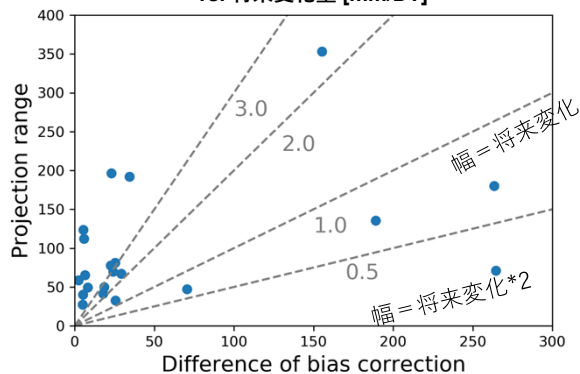
計画降雨を数%の誤差で再現できる

各窓サイズ設定の再現性（地点の割合）

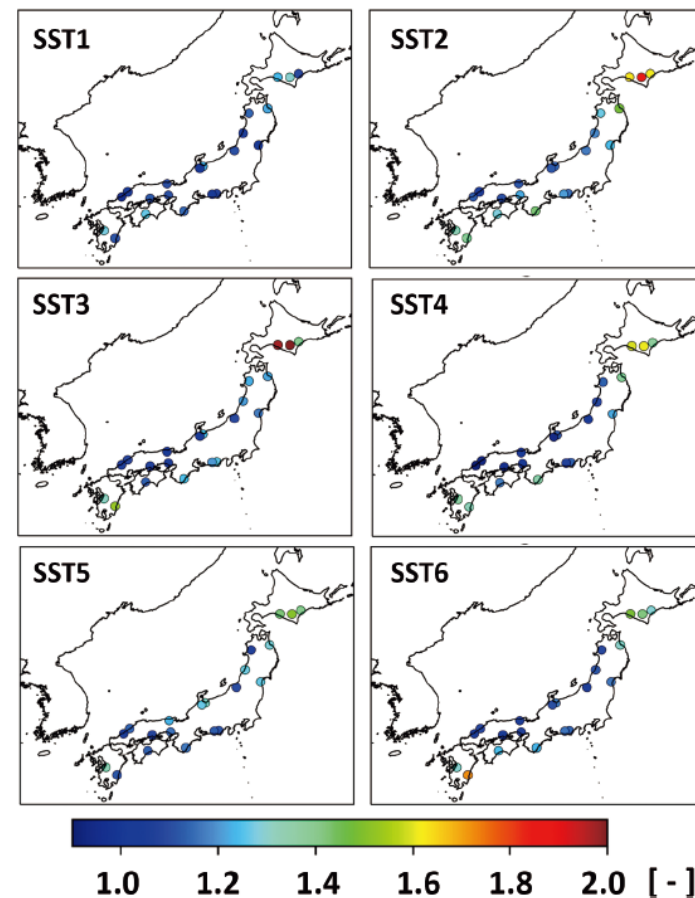


観測値 3～5個の場合に再現性が最も高くなる

バイアス補正による結果の差（移動窓なし vs. 異動窓3） vs. 将来変化量 [mm/DT]



水系によっては将来変化量と同等の差が生じる
手法（移動窓の幅）の選択によって生じる

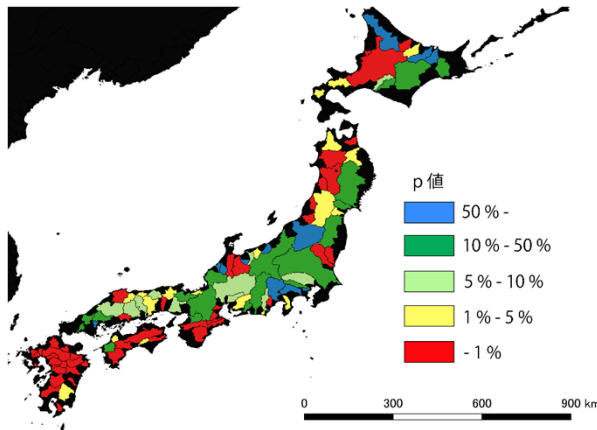


計画降雨の変化率：
SSTによって変化率は大きく異なる

d4PDFを用いた全国の洪水影響評価（京大工：立川先生、田中智先生ら）

d4PDFの分析

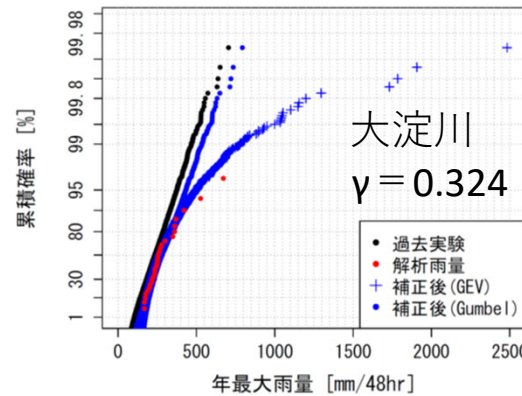
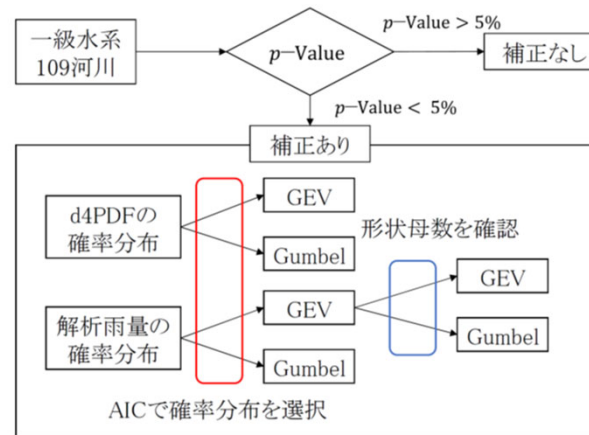
- 109水系の基準点上流を対象
- d4PDFから年最大流域平均雨量を算定
- 解析雨量から上記の変数を算定
- 両者の確率分布の適合度を統計検定



- 109水系中62水系で「異なる分布といえない」（有意水準1%）となる。
- 流域面積3,000km²以上の流域で再現性が特に高い
- 九州・四国・紀伊半島29水系で、過小評価傾向

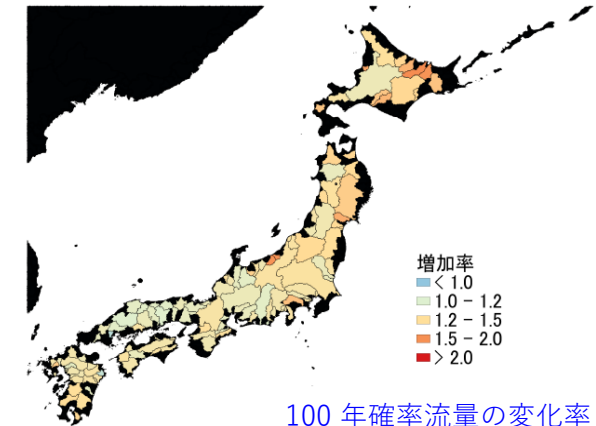
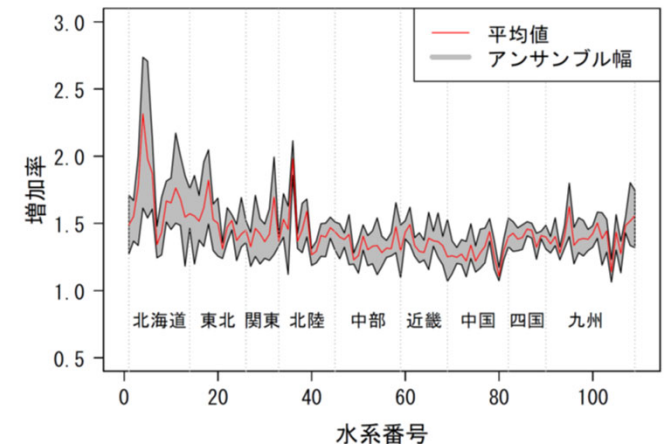
バイアス補正

年最大流域平均雨量の確率分布に応じたバイアス補正手法の提案



全国109水系の洪水流量変化

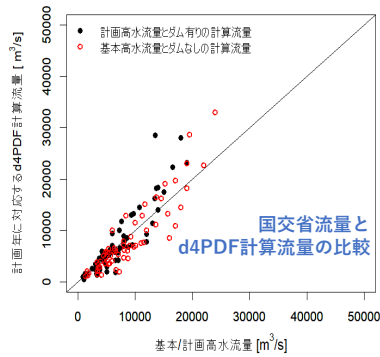
100年確率流量は全国的に約 1.5 倍程度増加。北海道や東北地方で顕著に増加



100年確率流量の変化率

d4PDFを用いた全国の洪水影響評価（京大工：立川先生、田中智先生ら）

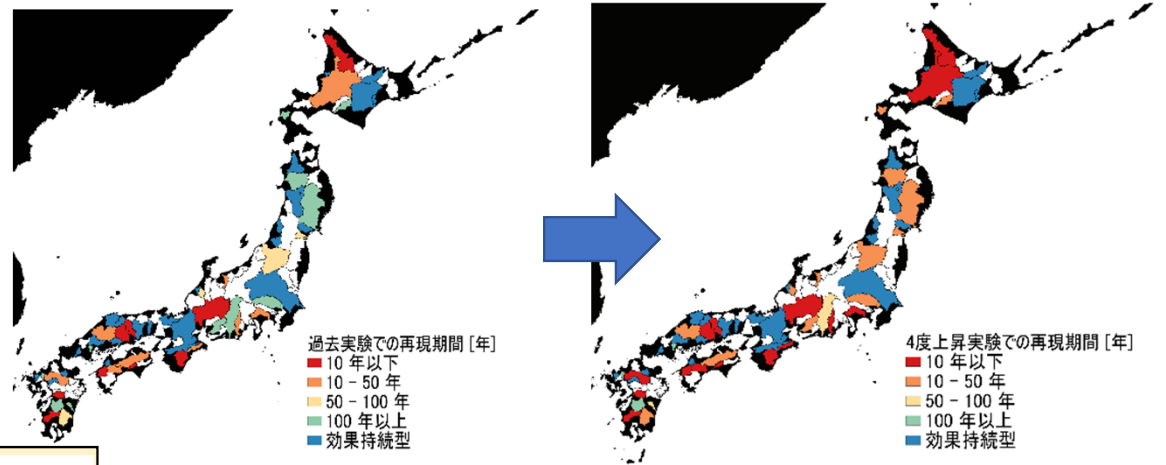
基本高水（横軸の）とd4PDF自然流量（縦軸）は45度線上で対応している（赤丸）



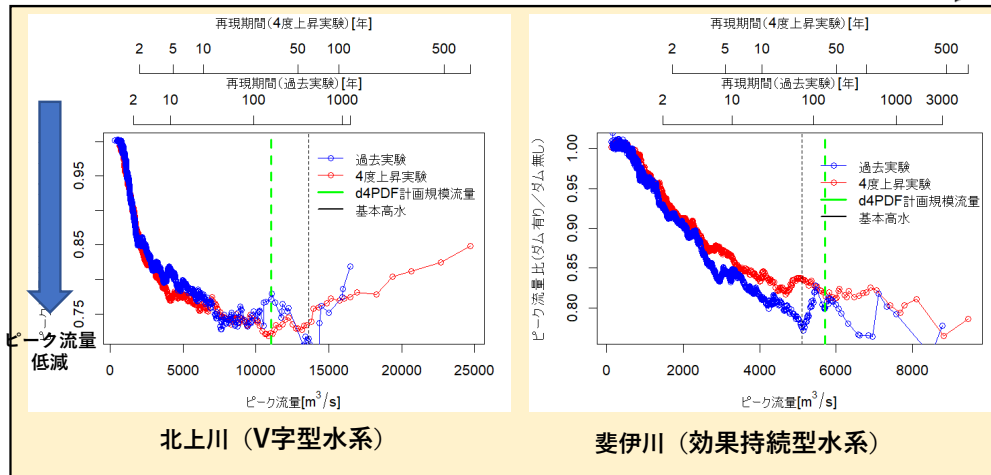
バイアス補正済みd4PDF年最大雨量をダムあり/なしモデルに入力し、年最大ピーク流量の比率をダムありのピーク流量で整理した

洪水規模ごとのピーク流量比率（ダムあり/なし）

ピーク流量比率（ダムあり/なし）がV字型となる水系の再現期間の将来変化（将来の最大事例でも効果を発揮し続ける効果持続型水系は青色で示す）



計画規模（緑・黒点線）付近で最大の効果を発揮している



効果が、あるところで低減するV字型水系と効果持続型水系を分類し、V字型水系で効果が低減し始める再現期間の将来変化を推定した（北上川では約140年⇒30年）

- 効果持続型（d4PDFの最大クラスでもダムが効果を発揮し続ける）はダムの個数が多い利根川・淀川および中国地方や四国地方瀬戸内海側、東北地方に見られる
- V字型水系は太平洋側や九州地方に多く、過去実験では計画規模程度で最大の効果を発揮する水系が多いが4度上昇実験ではその再現期間が10-50年ほどになる
- 将来の極端洪水時は既設ダムによるピーク流量低減の寄与が小さくなる可能性がある

三大都市圏の浸水解析（中部大学：武田先生、京大防災：川池先生）

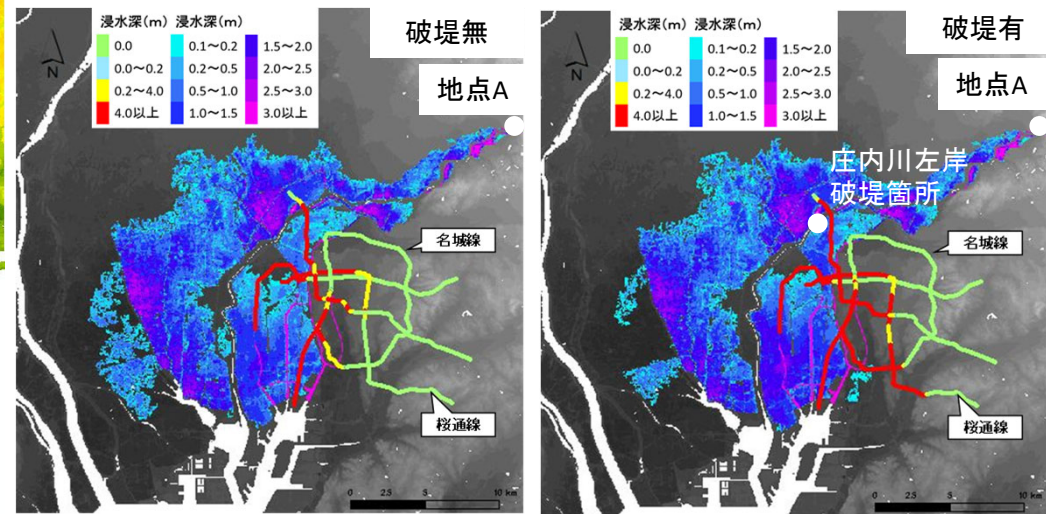
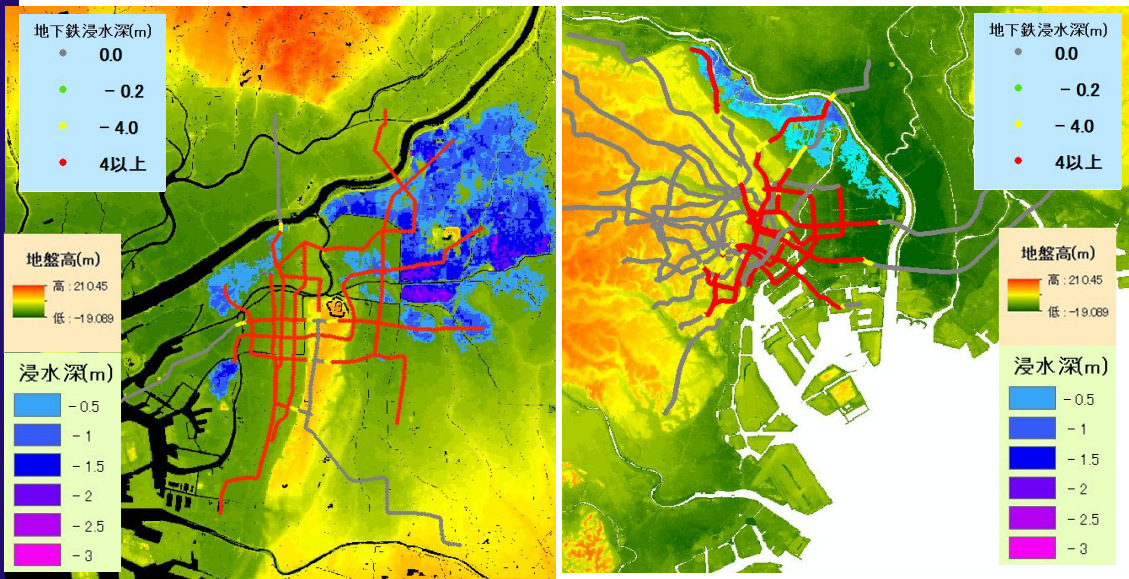
想定破堤氾濫解析による最大浸水深分布

大阪

東京

最大規模の洪水*による名古屋の浸水解析

名古屋



地下空間を含めた詳細な氾濫モデルにより最大クラスの洪水氾濫を分析する

- ◆ 破堤の有無を比較したところ、全域における地上の最大浸水深に大きな差は生じないが、破堤が有る場合に地下鉄線路の浸水が大きくなった。

*立川ら(2017). 超多数アンサンブル気候予測実験データを用いた極値河川流量の将来変化の分析. 土木学会論文集 B1 (水工学), 73(3), 77-90.

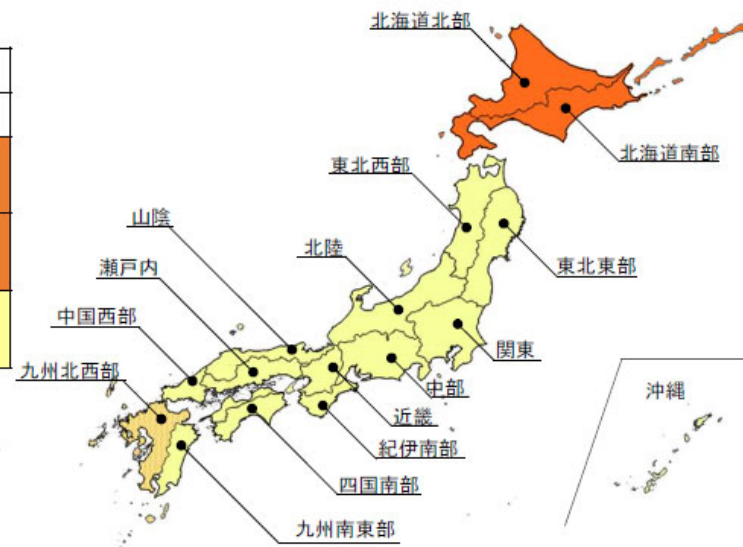
5. 国交省による治水計画の見直しについて

「気候変動を踏まえた治水計画に見直し」提言（改訂版）

＜地域区分毎の降雨量変化倍率＞

地域区分	2°C上昇	4°C上昇	
			短時間
北海道北部、北海道南部	1.15	1.4	1.5
九州北西部	1.1	1.4	1.5
その他(沖縄含む)地域	1.1	1.2	1.3

- ※ 4°C上昇の降雨量変化倍率のうち、短時間とは、降雨継続時間が3時間以上12時間未満の3時間未満の降雨に対しては適用できない
- ※ 雨域面積100km²以上について適用する。ただし、100km²未満の場合についても降雨量変化倍率が今回設定した値より大きくなる可能性があることに留意しつつ適用可能とする。
- ※ 年超過確率1/200以上の規模(より高頻度)の計画に適用する。



＜参考＞降雨量変化倍率をもとに算出した、流量変化倍率と洪水発生頻度の変化の一級水系における全国平均値

気候変動シナリオ	降雨量	流量	洪水発生頻度
2°C上昇時	約1.1倍	約1.2倍	約2倍
4°C上昇時	約1.3倍	約1.4倍	約4倍

- ※ 2°C、4°C上昇時の降雨量変化倍率は、産業革命以前に比べて全球平均温度がそれぞれ2°C、4°C上昇した世界をシミュレーションしたモデルから試算
- ※ 流量変化倍率は、降雨量変化倍率を乗じた降雨より算出した、一級水系の治水計画の目標とする規模(1/100～1/200)の流量の変化倍率の平均値
- ※ 洪水発生頻度の変化倍率は、一級水系の治水計画の目標とする規模(1/100～1/200)の降雨の、現在と将来の発生頻度の変化倍率の平均値(例えば、ある降雨量の発生頻度が現在は1/100として、将来ではその発生頻度が1/50となる場合は、洪水発生頻度の変化倍率は2倍となる)

d4PDFを20 kmから5 kmにダウンスケールした結果で大雨(年超過確率1/100など)の変化傾向を分析(国交省) 全国の1級水系で治水計画の対象とする降雨量の変化倍率はRCP2.6で約1.1倍、流量は1.2倍。発生頻度は2倍 # 詳細な統計的分析を行ったうえで上記の表のようにシンプルな形でまとめられている。

『なぜ降雨より流出の方が倍率が高くなるのか？』：概念的説明

現在気候

降雨 100 mm/h

流出 60 mm/h

(流域貯留を40 mm/hと仮定)

将来気候

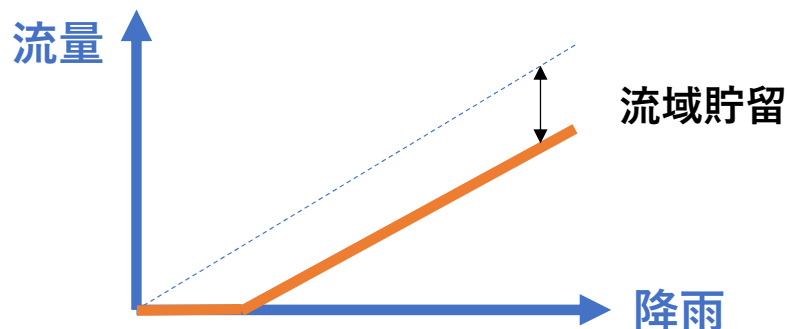
降雨 120 mm/h

流出 $120 - 40 = 80$ mm/h

(流域貯留を同じと仮定)

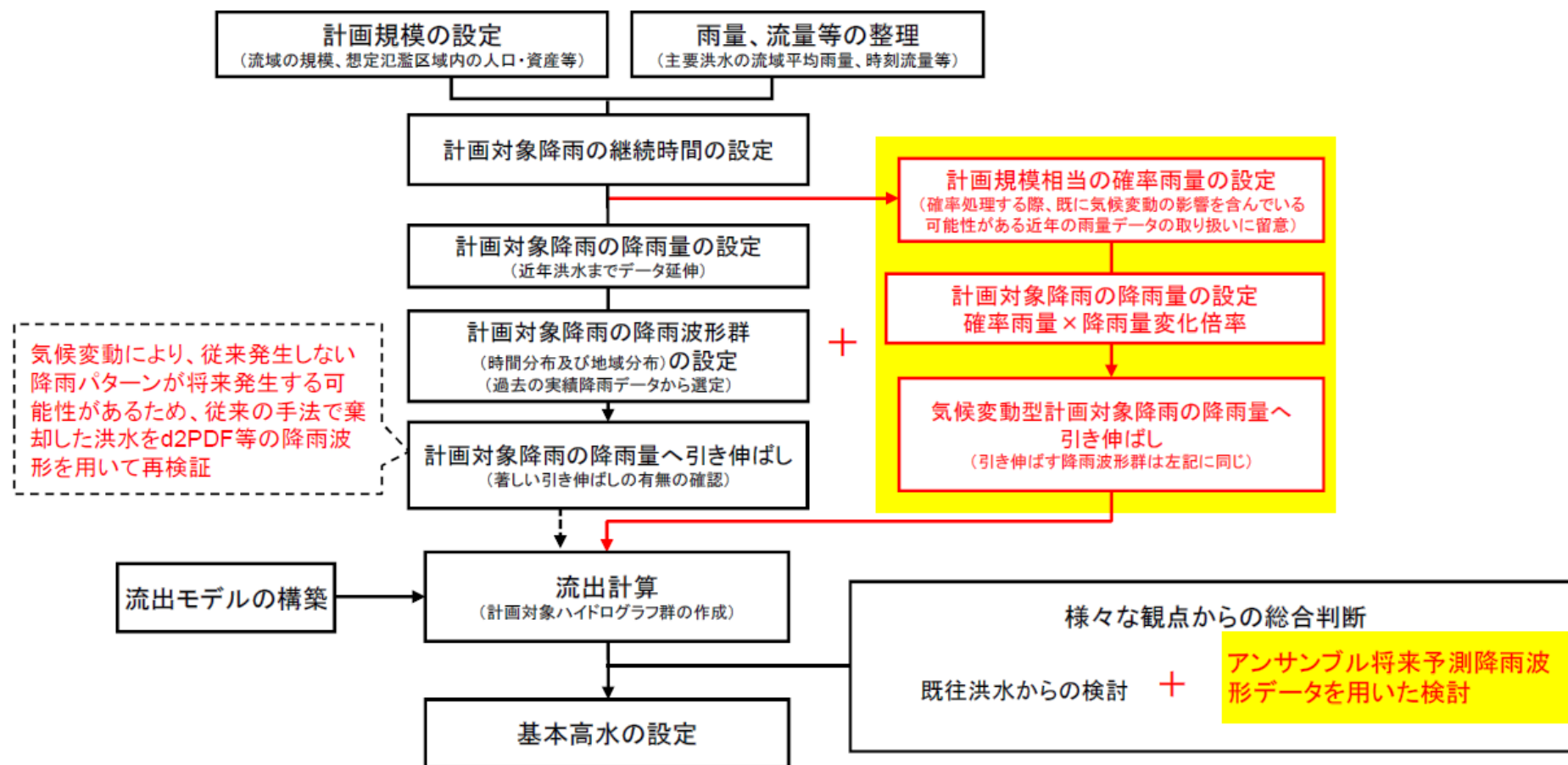
降雨の変化率： $120 / 100 = 1.2$ 倍

流出の変化率： $80 / 60 = 1.33$ 倍



実際には、降雨の増加に伴い流域貯留も増加するはずである。ただし、流域貯留の増加量が降雨の増加量を上回ることはない。
∴ 降雨の増加率 > 流量の増加率

気候変動の影響を踏まえた基本高水の設定の流れ



(国土交通省)

「気候変動を踏まえた治水計画に見直す手法」 (国交省)

現況

降雨:

- 雨量観測所、レーダ雨量(過去)

対象降雨(計画規模):

- 降雨継続時間、年最大降雨量
- 対象降雨設定(計画規模)
【例. ○○mm/24時間(1/100)】

基本高水の算定手順:

- 主要洪水(災害発生、流量大)を10数洪水程度抽出
- 対象降雨に引き伸ばし(時間分布、空間分布による棄却)
- 10数洪水で最大となるものを基本高水のピーク流量として設定

当面の対応

降雨:

現況手法・過去実績降雨での算定

対象降雨(計画規模):

降雨の変化倍率(気候変動予測)

降雨パターン*を反映

- * 主要洪水の選定
- * 継続時間
- * 空間分布
- * 小流域集中度

将来

降雨:

- 気候変動予測による計算値

対象降雨(計画規模):

- 降雨パターン考慮* 1/100

⇒流量の算定

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)

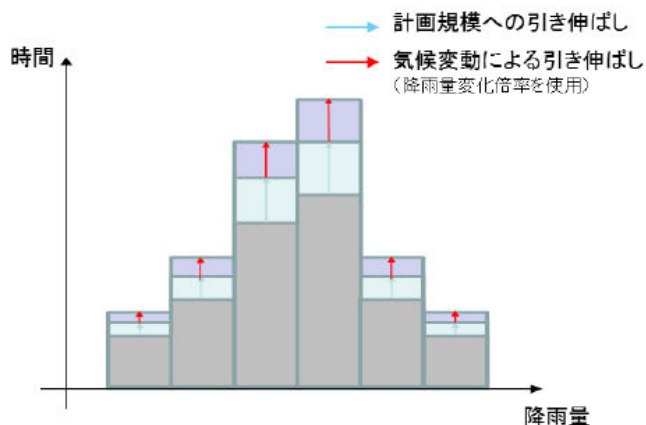
当面の対応：降雨の変化倍率を求め、降雨パターンを反映して、流量を算定

将来：将来降雨の予測データを活用して流量を算定

「気候変動を踏まえた治水計画に見直す手法」 (国交省)

当面の手法①

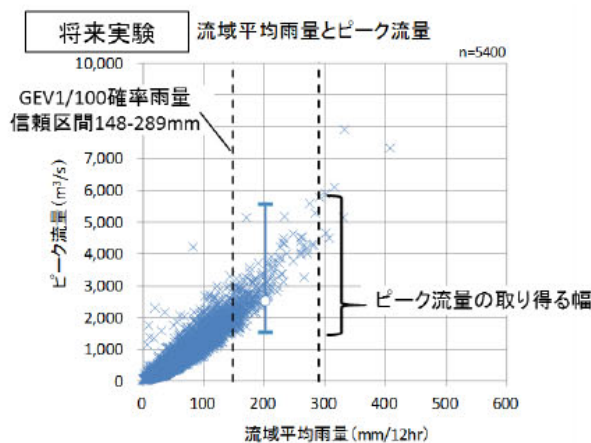
過去降雨
(計画規模) × 気候変動倍率
【雨確率】



降雨の引き伸ばし(イメージ)

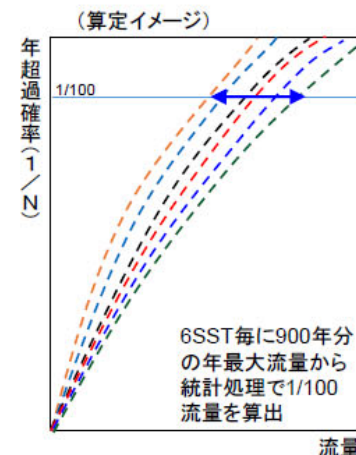
今後の手法②

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】



- 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

治水計画等の見直しの考え方（国交省）

①治水計画の見直しの方向性		②施設設計上の対応	③危機管理上の対応
(河川整備基本方針)	(河川整備計画)		
<p>【採用する外力の考え方】 ○RCP2.6(平均値)を反映 ※現時点で定量的に評価されている降雨の変化倍率を活用。</p>	<p>【採用する外力の考え方】 ○RCP2.6(平均値)を反映 ※RCPシナリオは20～30年後以降、温度の状況には違いはないため、今世紀末の予測結果を20～30年後の予測に流用 ○RCP8.5シナリオの活用 事業内容等の検討にあたって手戻りの確認等に活用する外力</p>	<p>【採用する外力の考え方】 ○RCP2.6(平均値)を活用 施設の供用終了や更新時点における外力を設計に反映 ○RCP8.5シナリオの活用 ※更なる温度上昇に備えて、構造変更を容易にする工夫等を検討する場合の外力</p>	<p>【採用する外力の考え方】 ○RCP2.6シナリオ(平均値)を活用 現時点の気候(約1℃上昇)から概ね10年程度(次期見直しまで) ※RCP2.6から、現在や10～20年後の変化率の換算値を設定 ○RCP8.5シナリオの活用 特に長期的にわたり、最悪の場合を想定する場合の外力</p>
<p>【見直しの具体的な手順】 ○気候変動の予測の不確実性や今後も状況変化が予測されるが、河川整備基本方針は、変更の必要が生じた水系から優先的に見直し</p>	<p>【具体の対応策】 ○河川整備計画の点検と見直し ・目標の見直し、メニューの追加 ・目標とする流量以上の洪水に対する減災効果も考慮 ・施設構造の工夫や危機管理上の対応(洪水調節施設の操作等)とも一体となった減災対策の充実 ・複合災害(海面水位、土砂流木対策)に対する減災対策 ・河道の変化も考慮して維持管理</p>	<p>【具体の対応策】 ○2度上昇による外力増を設計に反映。 ○さらに4度上昇でも手戻りなく増設等が容易になる工夫 ・堰(門柱の増設、敷高変更等) ・ダム(放流設備の位置) ○4度上昇にも施設の増設が可能な用地の確保 ・排水機場(機場、水路幅) ○順次対応可能な構造 ・ポンプ設備 ○決壊までの時間を少しでも引き延ばすための堤防構造の工夫</p>	<p>【具体の対応策】 ○アンサンプル予測を活用した事前放流や事後放流の実施 ○施設計画を超える洪水が予測された場合の操作ルールの検討</p>

河川整備計画は、当面は2度上昇を踏まえた整備計画目標に見直す
 手戻りの少ない整備手順、施設能力を上回る洪水にも減災効果の高い対策を選定
 原則として2℃上昇に対応した設計に加えて、4度上昇のシナリオも視野に入れた構造上の工夫を実施

6. 全国の河川を対象にしたハザードモデル 開発事例

今後の洪水ハザードモデルに求められること

- 広域俯瞰的な洪水の研究や国交省の治水計画の見直しは、主要な河川の基準点における洪水流量に着目。
- 基本高水は、ダムや遊水地など様々な流況制御の影響、及び上流の氾濫の影響を除いて計算された設計流量。
- 実際の流域に豪雨が降った場合には、上流部で氾濫が生じるため、河道が有する流下能力を大幅に超えて洪水流が下流に伝搬することは無い。
- 流域治水は、河道だけで対処できない洪水を、いかに流域で対処するか、仮に氾濫した場合でもいかに被害を最小限に食い止めるかという概念に基づいた治水思想。
- 本川・支川を含め、現実的な河道の状況を踏まえて、洪水流量や浸水の規模と発生頻度を推定する技術。
- 従来の流出モデルは流量ベース。今後は、流量と水位の両方を再現し、浸水も一体的に推定できるモデルを全国で展開していきたい。
- 三大都市圏や特定の地域を対象にした複雑な氾濫現象は、今後もそれに相応しい氾濫モデルを適用することになるが、そのベースともなり得る全国スケールの洪水ハザードモデルの開発が重要であると考えている。

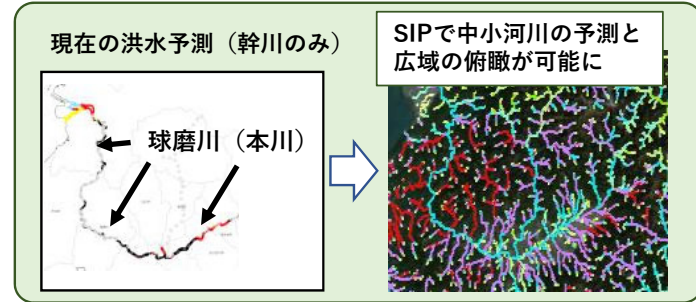
河川・ダムの大時間洪水予測・防災支援システムの開発



- (解決方法)
- 長時間洪水予測システムを開発
 - 不確実性を考慮したアンサンブル水位予測を実現

長時間予測

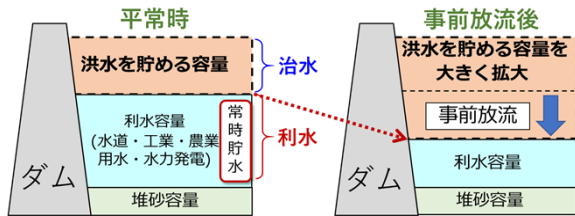
予測領域の拡大と高空間分解能化



- (解決方法)
- 全国の高解像度水文地形データを整備
 - 広域洪水予測システムを開発

広域予測

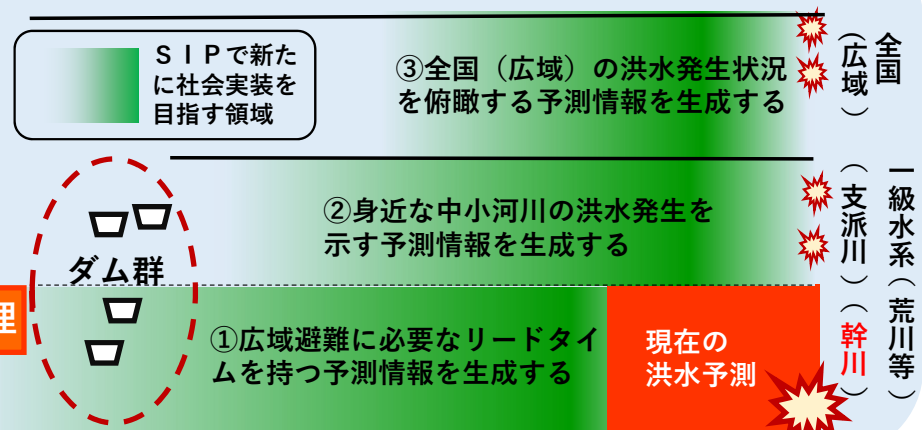
長時間予測による事前放流の強化とダムの治水容量の増大化



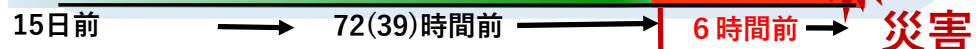
- (解決方法)
- 統合ダム防災支援システムを開発
 - ダム群最適放流操作を実現（事前放流、連携操作）

ダム管理

SIP技術による洪水予測の展開



予測リードタイムの長時間化



立川、中安、佐山：アンサンブル予測を活用した長時間／広域洪水予測と社会実装、河川、p.86-92, 202

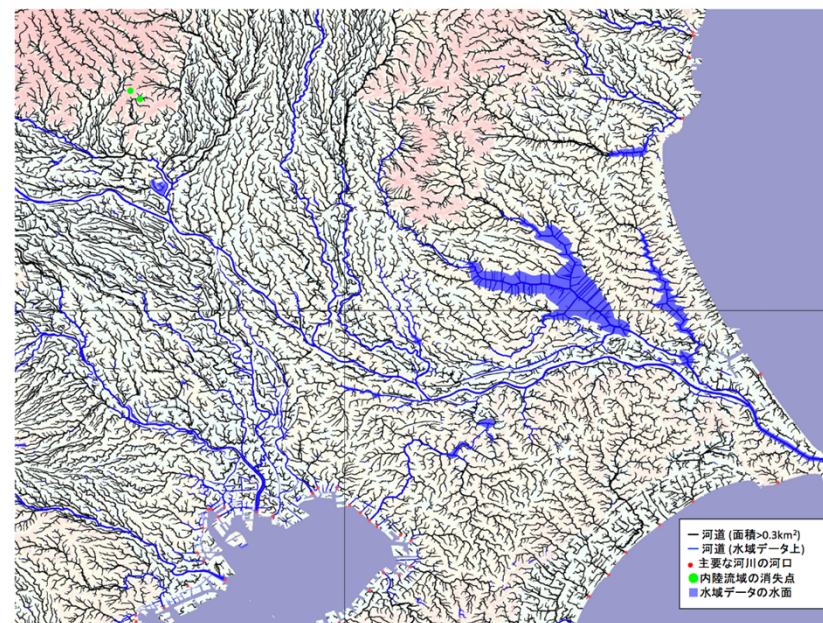
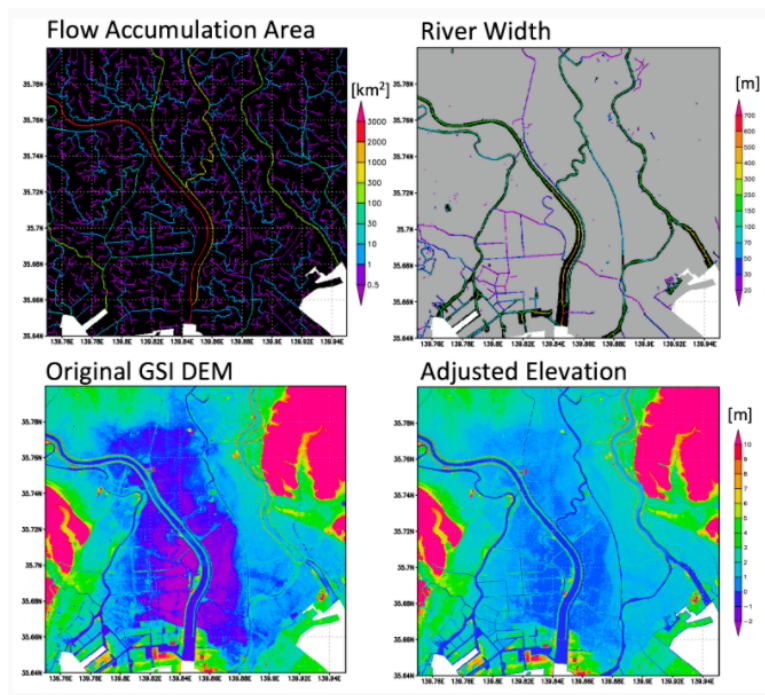


全国水文地形データの整備と高度化

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。

降雨流出氾濫(RRI)モデル

従来の降雨流出モデル：

降雨から河川流量を予測
(空間分布型のモデルでも氾濫の影響は解けない)

従来の洪水氾濫モデル：

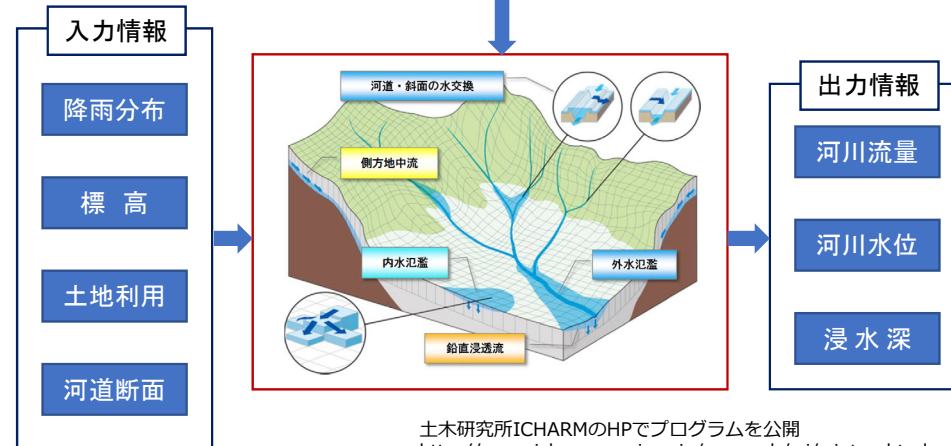
破堤地点での流入量境界条件をもとに氾濫原の浸水を詳細に解析
→ 浸水想定域の計算に利用

降雨(Rainfall) – 流出 (Runoff) – 氾濫 (Inundation) → RRIモデル

Rainfall-Runoff-Inundation Model (RRIモデル)

降雨流出から洪水氾濫までを流域全体で一体的に解析

土壌への浸透や地中流など、降雨流出モデルの特性も備える



土木研究所ICHARMのHPでプログラムを公開
http://www.icharm.pwri.go.jp/research/rri/rri_top.html

Sayama et al. (2012) Hydrological Sciences Journal

全国版RRIモデルの開発：空間解像度150 m(5秒)で、全国を14地域に分割してカバーする。
集水面積 1km²以上の河川をモデルで取り扱い、任意地点の水位や流量を出力する。
第二期SIP(2018年度～2022年度)で開発中

精度の高い浸水予測を実現するための4ステップ

STEP1 河川の流量を正しく推定する

- パラメータの地域統合化
- 全国主要ダムモデリング

達成度

70%

90%

STEP2 河川の水位を正しく推定する

- 河道断面情報の反映
- 中小河川の断面推定

(直轄区間26,036断面反映済み)

80%

20%

STEP3 越流氾濫を正しく推定する

- 河道・氾濫原周りの地形を的確に表現

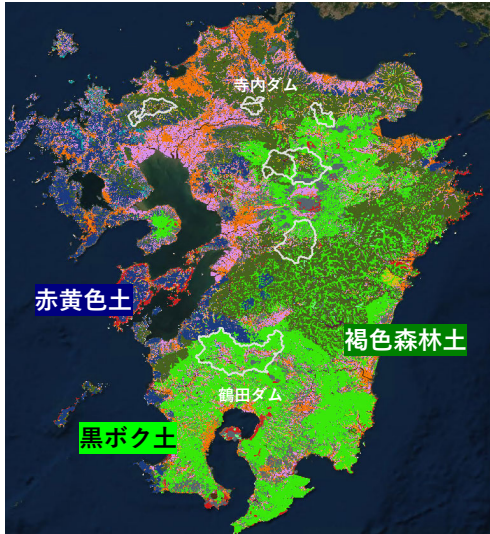
40%

STEP4 破堤氾濫を正しく推定する

- 破堤の発生を確率的なモデルで表現

土壌や地質の洪水流出への影響：全国版RRIモデルのパラメータ地域統合化

土壌・地質マップを活用して観測情報の無い中小河川流域のモデルパラメータを推定



農研機構：1/20万日本土壌図

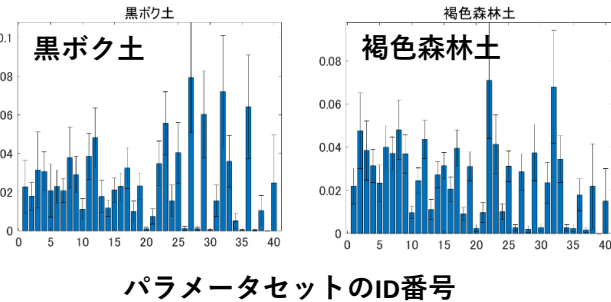
提案手法：条件付確率に基づく推定法

$$p(q_k|s_i) = \sum_{j=1}^n p(d_j|s_i)p(q_k|d_j)$$

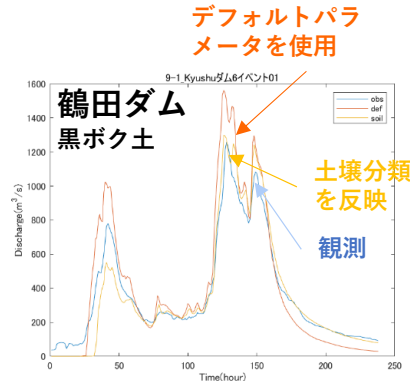
$$= \sum_{j=1}^n \frac{p(s_i|d_j)p(d_j)}{p(s_i)} p(q_k|d_j)$$

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を考案。ブートストラップ法による不確実性評価も可能。

各土壌におけるパラメータセットの尤度

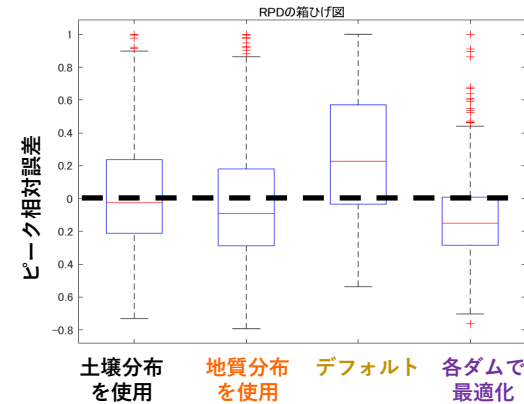
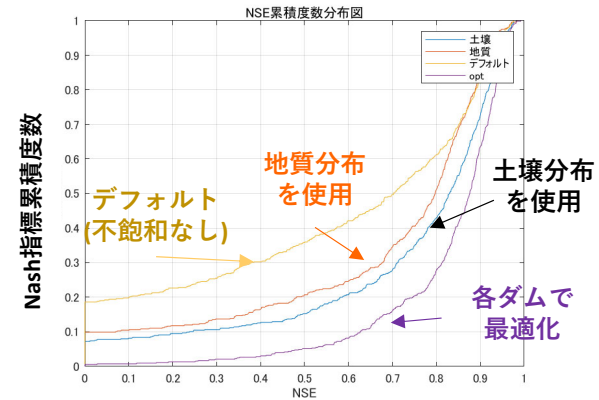


土壌分類によって適切なパラメータセットが異なる



鶴田ダムの事例：土壌分類を用いた地域統合化によりデフォルトパラメータの過大評価傾向が改善

ダム流域を対象にした地域統合化の検証結果



土壌分類を用いた地域統合化により、ピーク相対誤差の四分位値は、±20程度となりバイアスが小さく

まとめ

全国120のダム流域・各7出水のデータを用いて、土壌分類・地質分類に対応してパラメータを地域統合化。検証は75ダム・7出水。

1) 土壌分類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)に近付いた。

2) 不飽和流出を考慮しないデフォルトパラメータ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で大幅に改善。

3) 今回の事例では、表層モデルのパラメータを対象としたためか、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となった。

河道断面情報の反映と地形補正による精度向上

水位の予測精度向上をさせるための地形データ補正方法を検討し、多数の実河道断面情報を反映

- 河道周辺の地形情報を補正（氾濫原の地形情報から人口構造物や河川の影響を除去）
- 実河道断面情報を導入することによる水位予測精度向上の効果を多地点で検証。

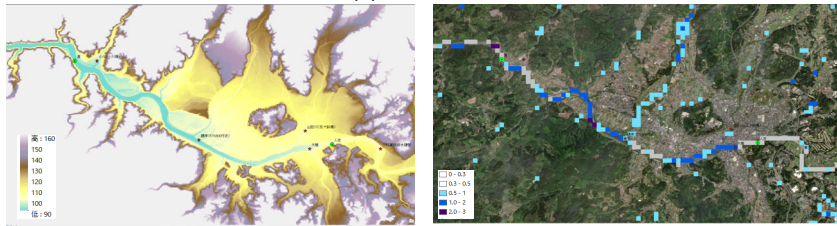
- 地形補正技術の導入
→ 浸水深の推定精度向上

- 一級水系直轄区間の73%にあたる77735 kmに、計26,032の河道断面を導入 → 水位の予測精度向上

断面情報反映前・地形補正前

標高 (m)

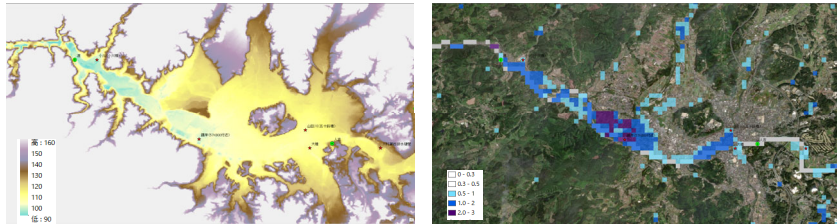
最大浸水深 (m)



断面情報反映後・地形補正後

標高 (m)

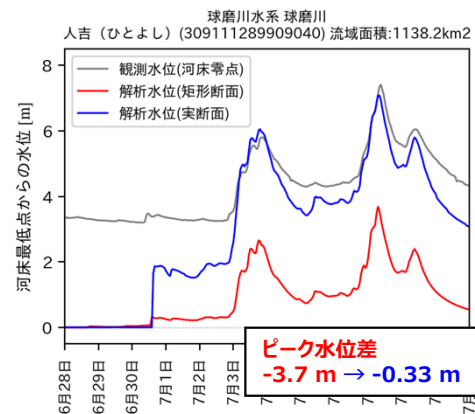
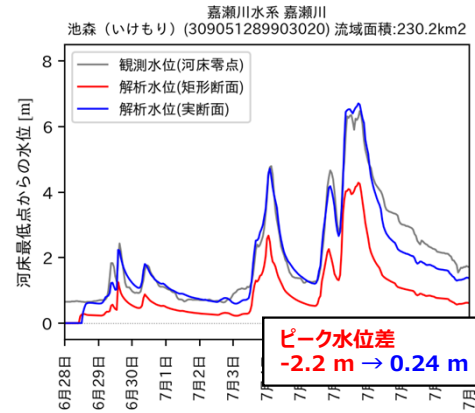
最大浸水深 (m)



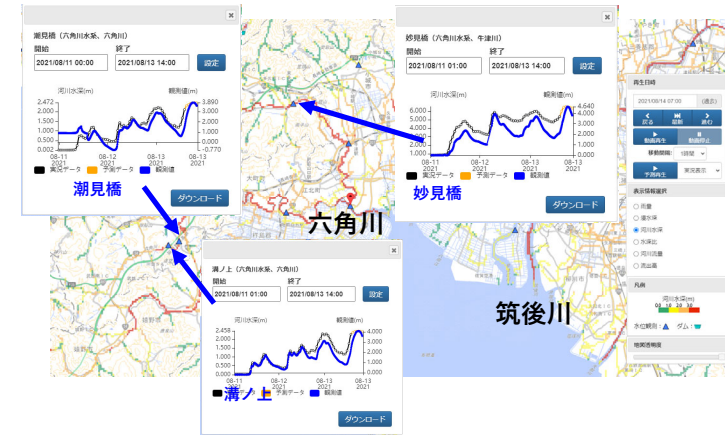
地形補正：三井共同建設コンサルタントとの共同研究より

上図：2020年球磨川洪水を対象に、地形補正の導入あり、無しで、浸水深の空間分布を比較検証した。堤防や河道の地形を除去する補正方法の有効性が明らかになった。

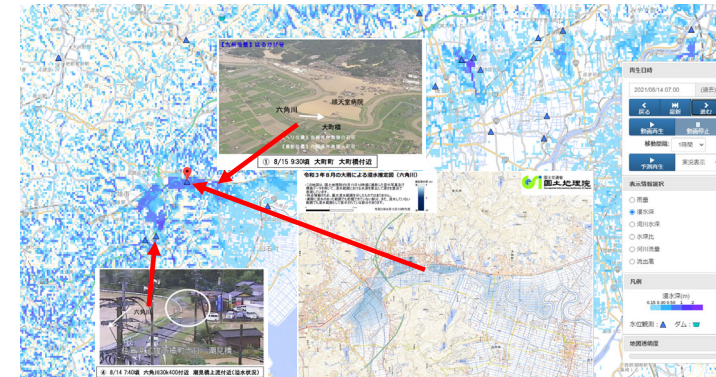
右図：2018年西日本豪雨で増水した51地点における水位と流量の推定精度を検証。実断面を導入することで、ピーク水位差の平均・標準偏差が $-2.04 \pm 1.70m$ から $0.14 \pm 0.88m$ に改善。右図は嘉瀬川（池森地点）、球磨川（人吉）値地点における西日本豪雨の水位解析事例



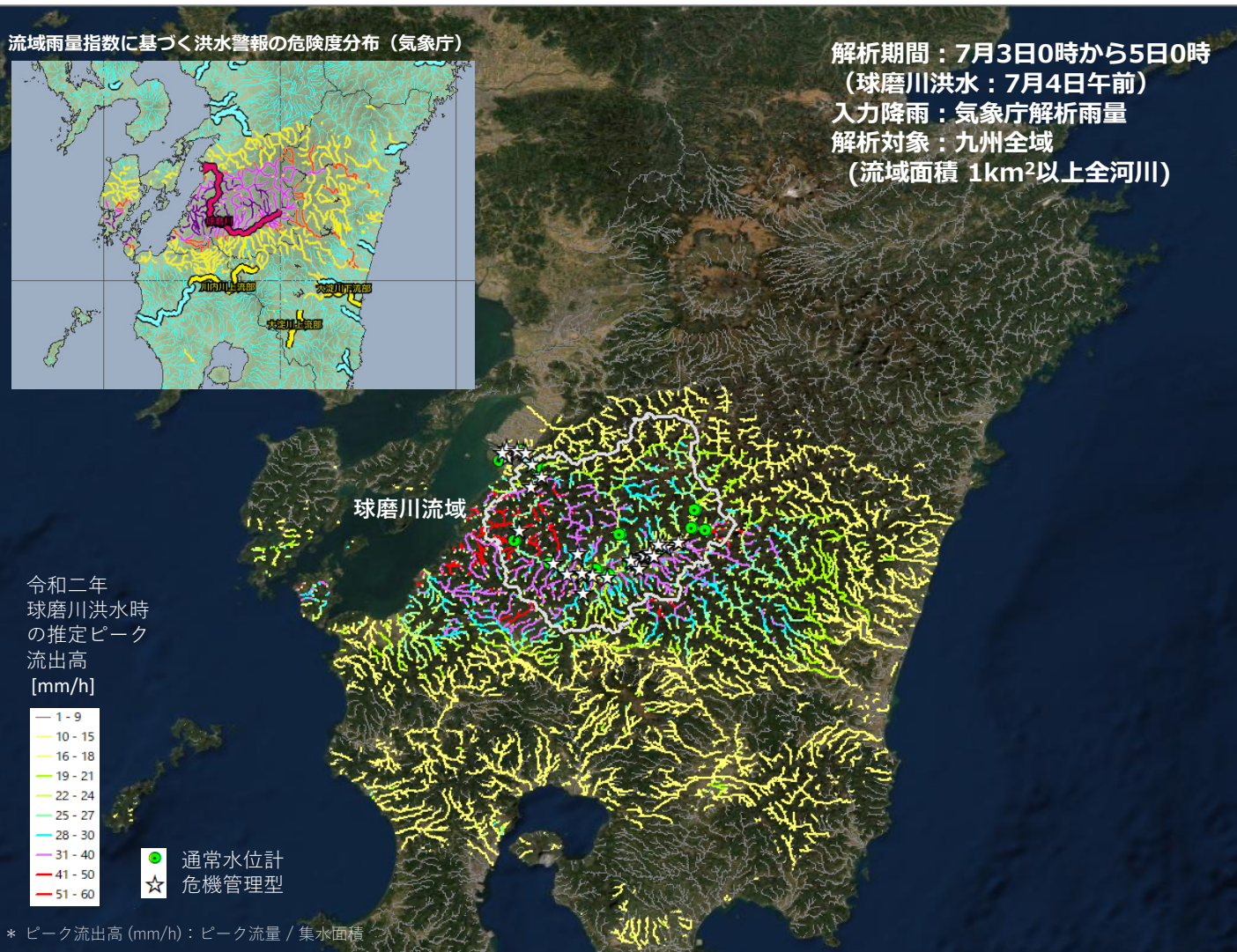
広域洪水予測システムによるリアルタイム現況計算と予測（水深）2021年8月14日（土曜日）7時：六角川



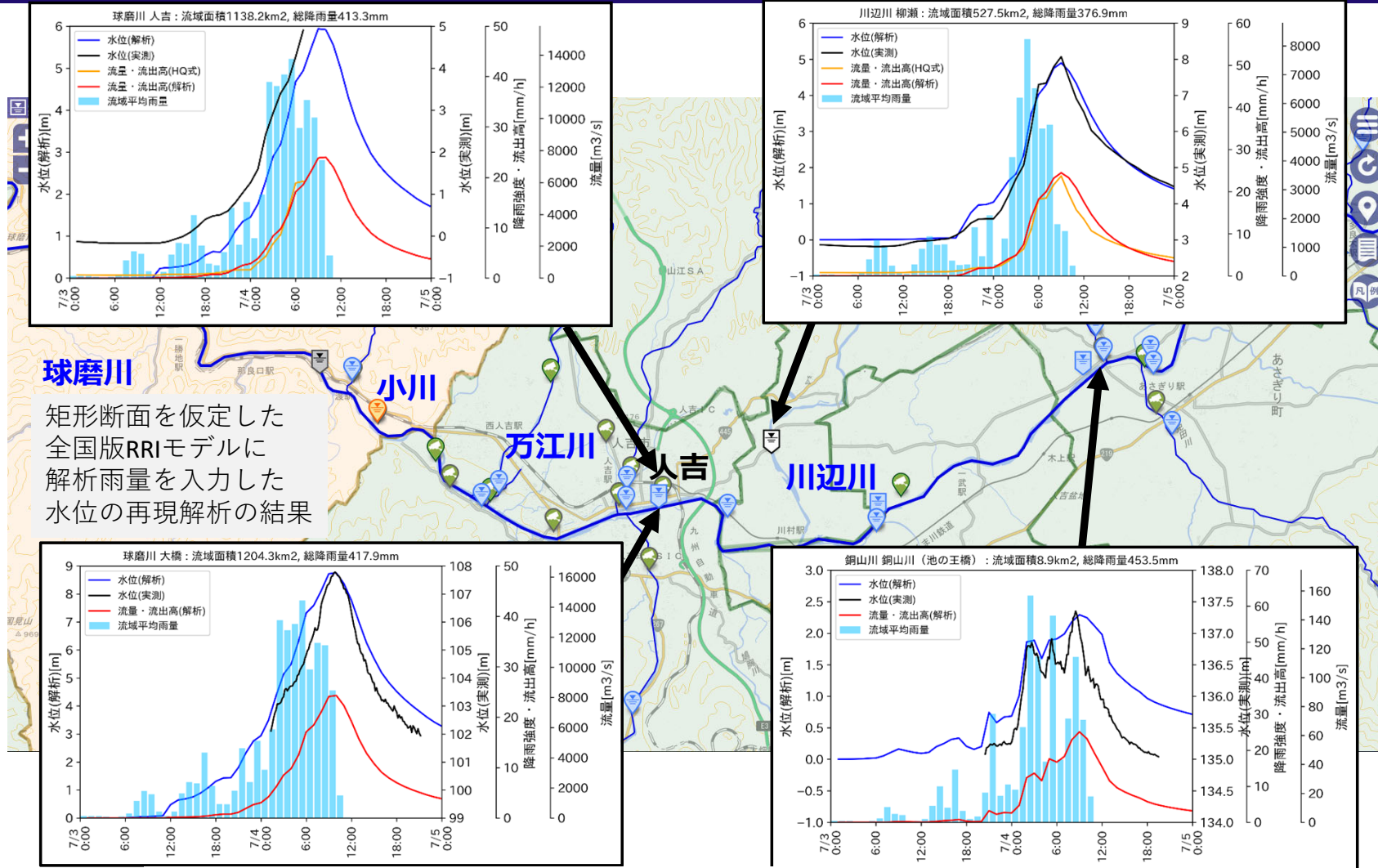
浸水深の予測結果



令和2年7月豪雨（球磨川洪水）解析：洪水流出推定



危機管理型水位計地点での観測値と予測値の比較（球磨川洪水）



球磨川

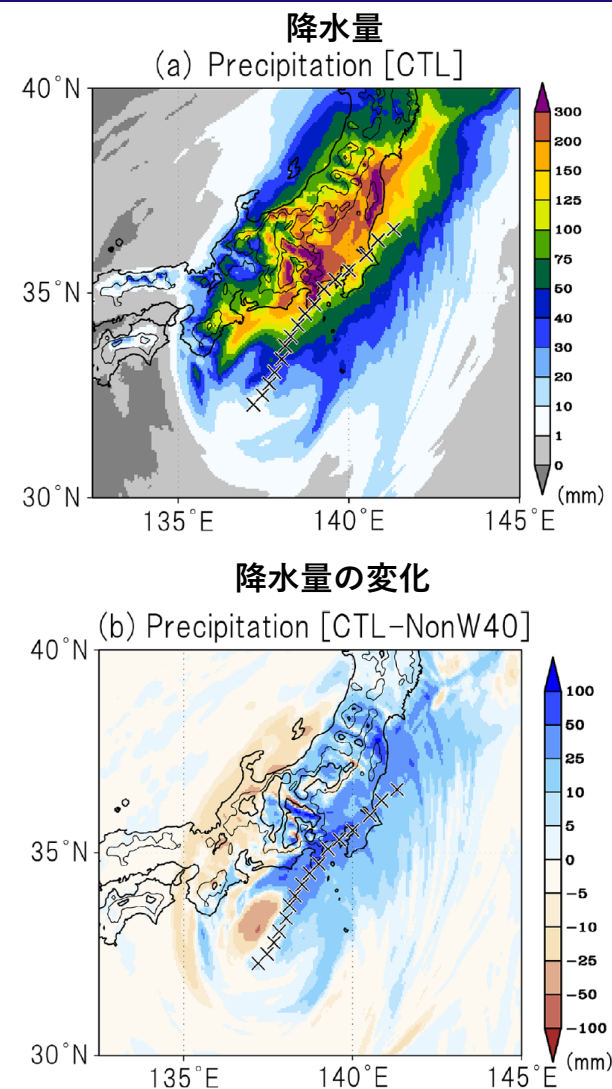
矩形断面を仮定した
全国版RRIモデルに
解析雨量を入力した
水位の再現解析の結果

予測情報が存在しない河川を含む40地点平均で、洪水ピークまでの水位変化を26%の誤差で推定
⇒ 全国各地の危機管理型水位計で6時間先までの水位予測を目指す（現状は観測水位周知のみ）

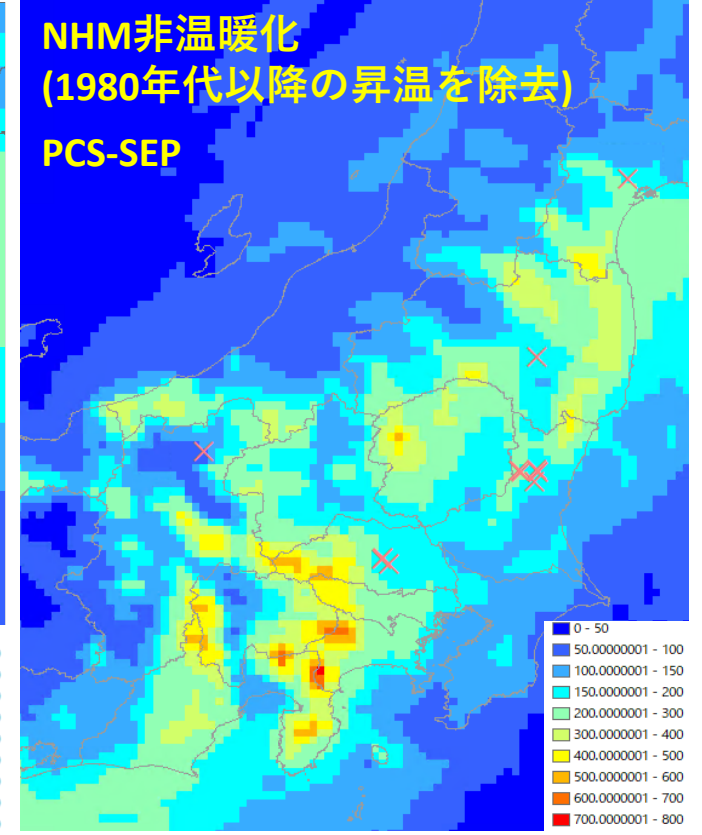
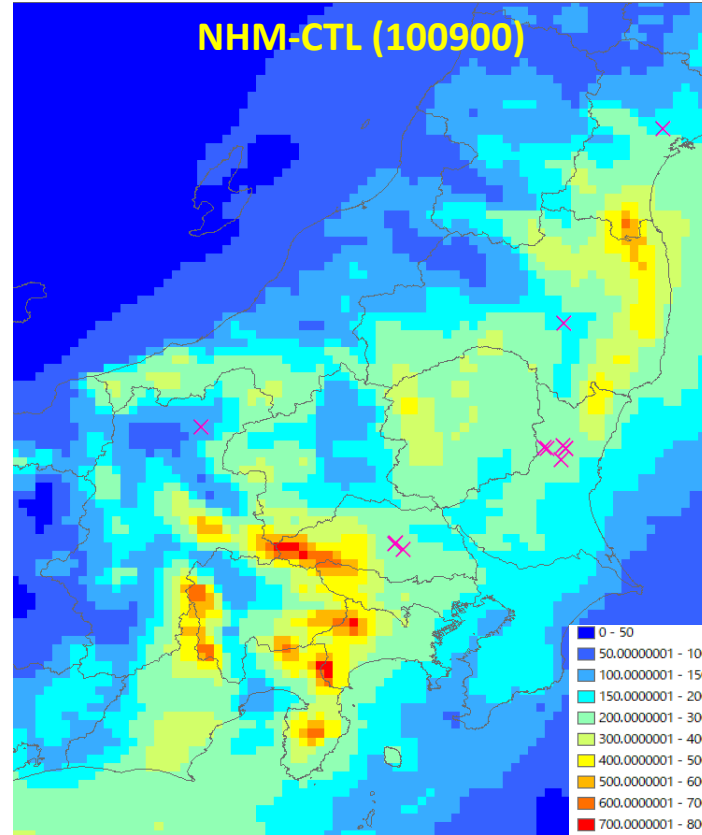
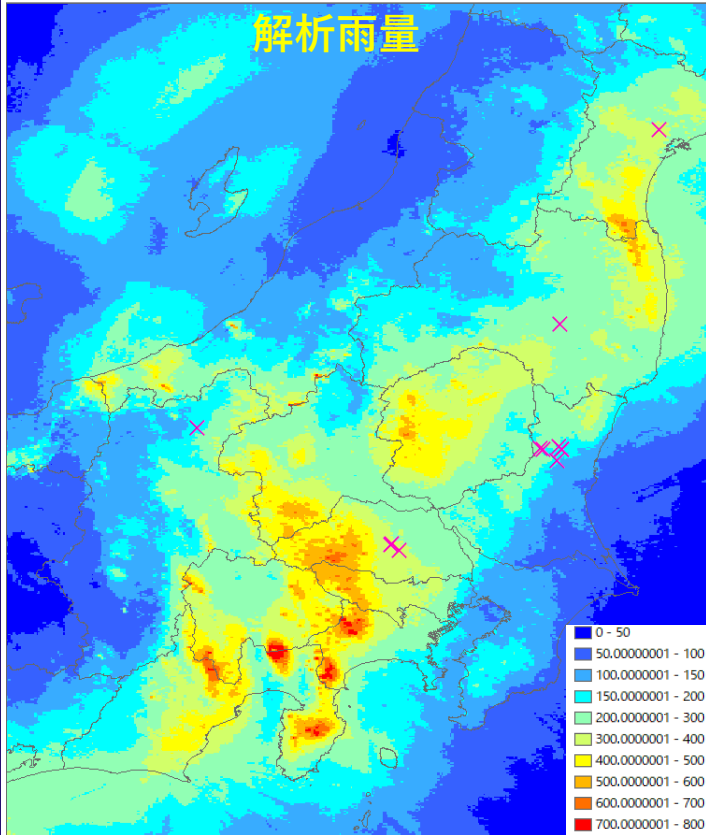
令和元年東日本台風の非温暖化／擬似温暖化

- 気象庁非静力学モデル(JMA-Nonhydrostatic Model): 5 km分解能
 - 再現解析 (CTL) : 4ケース (初期時刻の違い)
 - 非温暖化 (NAT) : 4×5ケース (初期時刻の違い×降温パターン)
 - 工業化前の状況想定
 - 2度上昇 (2K) : 4×5ケース (初期時刻の違い×昇温パターン)
 - 4度上昇 (4K) : 4×5ケース (初期時刻の違い×昇温パターン)
 - 非温暖化 (PCS) : 4×5ケース (初期時刻の違い×降温パターン)
 - 1980年以降のSSTおよび気温の昇温トレンドを除去 (NonW40)
 - : 既に約1度上昇

Kawase, et al., SOLA 2020



令和元年東日本台風の非温暖化：累積雨量の空間分布



× 国管理河川の破堤位置

2019/10/11/ 9:00 - 10/14 9:00 累積雨量

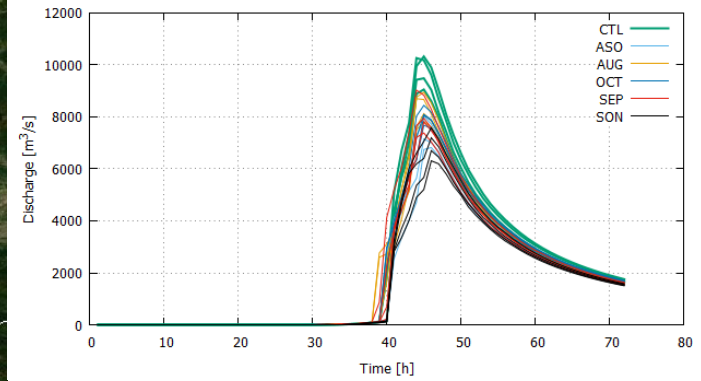
令和元年東日本台風の非温暖化：河川流量の推定

NHM再現実験(CTL)+RRI

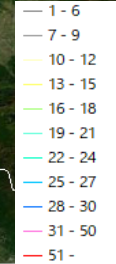
NHM非温暖化+RRI
(1980年代以降の昇温を除去)

推定流量（穂保）

Hoyasu



流出高
[mm/h]



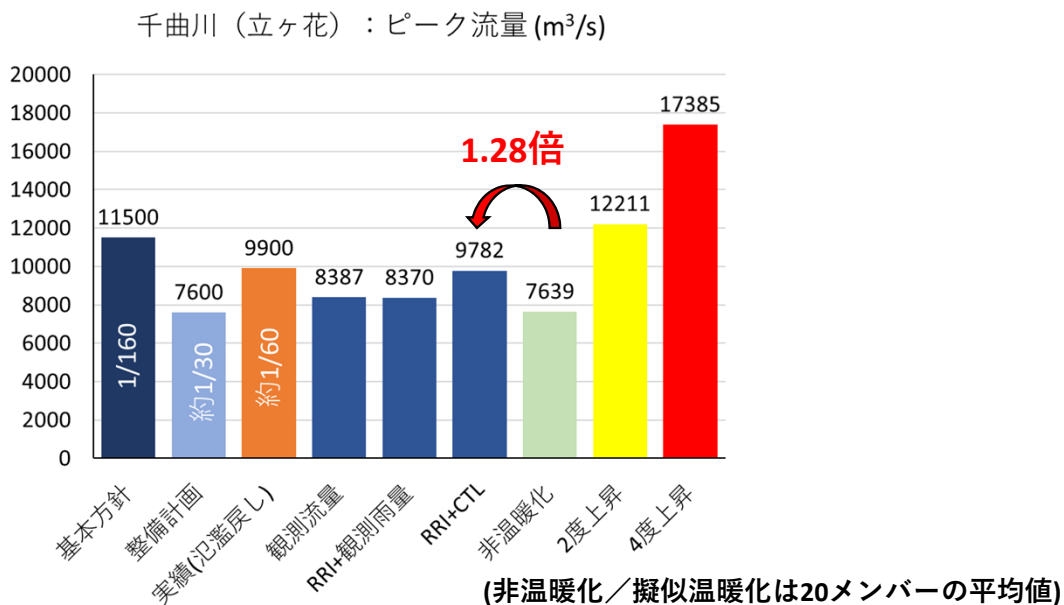
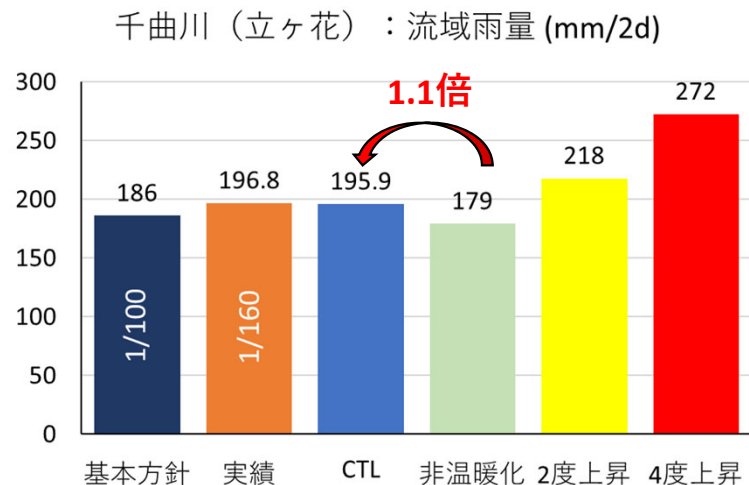
NHM-CTL (100900)

流出高
[mm/h]



PCS-SEP

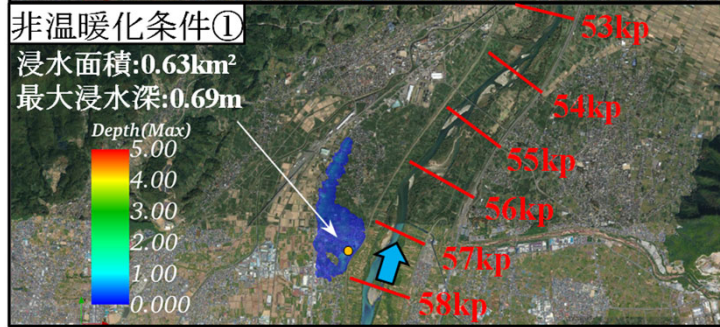
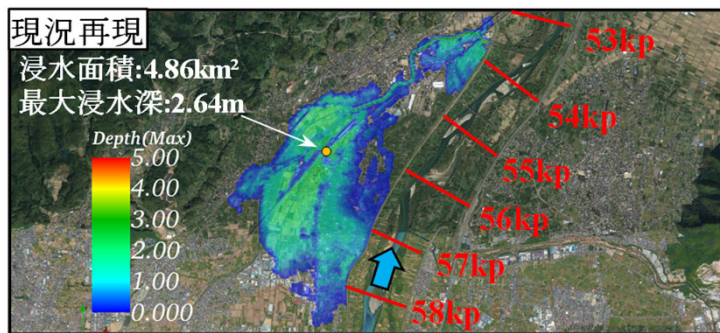
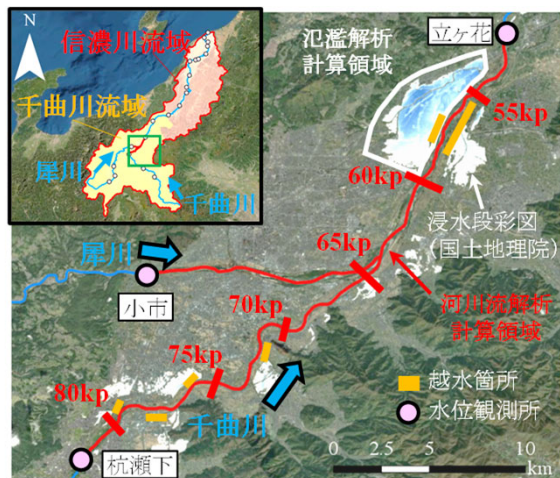
令和元年東日本台風の非温暖化：千曲川（立ヶ花）



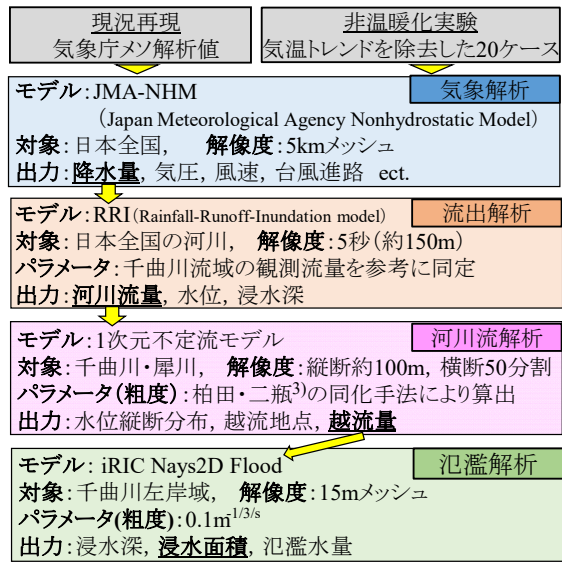
千曲川（立ヶ花）のまとめ

- ・ 非温暖化と実績との比較から、過去40年で温暖化の影響が出ていることが分かる（降雨量で1.1倍、流量で1.28倍）
- ・ 1/60の今回の台風が、2℃上昇下で、基本方針（1/160）の水準を超えてしまう
- ・ 4℃上昇下では基本方針(1/160)をはるかに上回る雨量と流量規模になる
- ・ 非温暖化（約7600 m³/s）で越水が生ずるかどうかは、より詳細な水理解析が必要。

東日本台風の非温暖化：水位・氾濫（東京理科大：二瓶先生、太田さん）



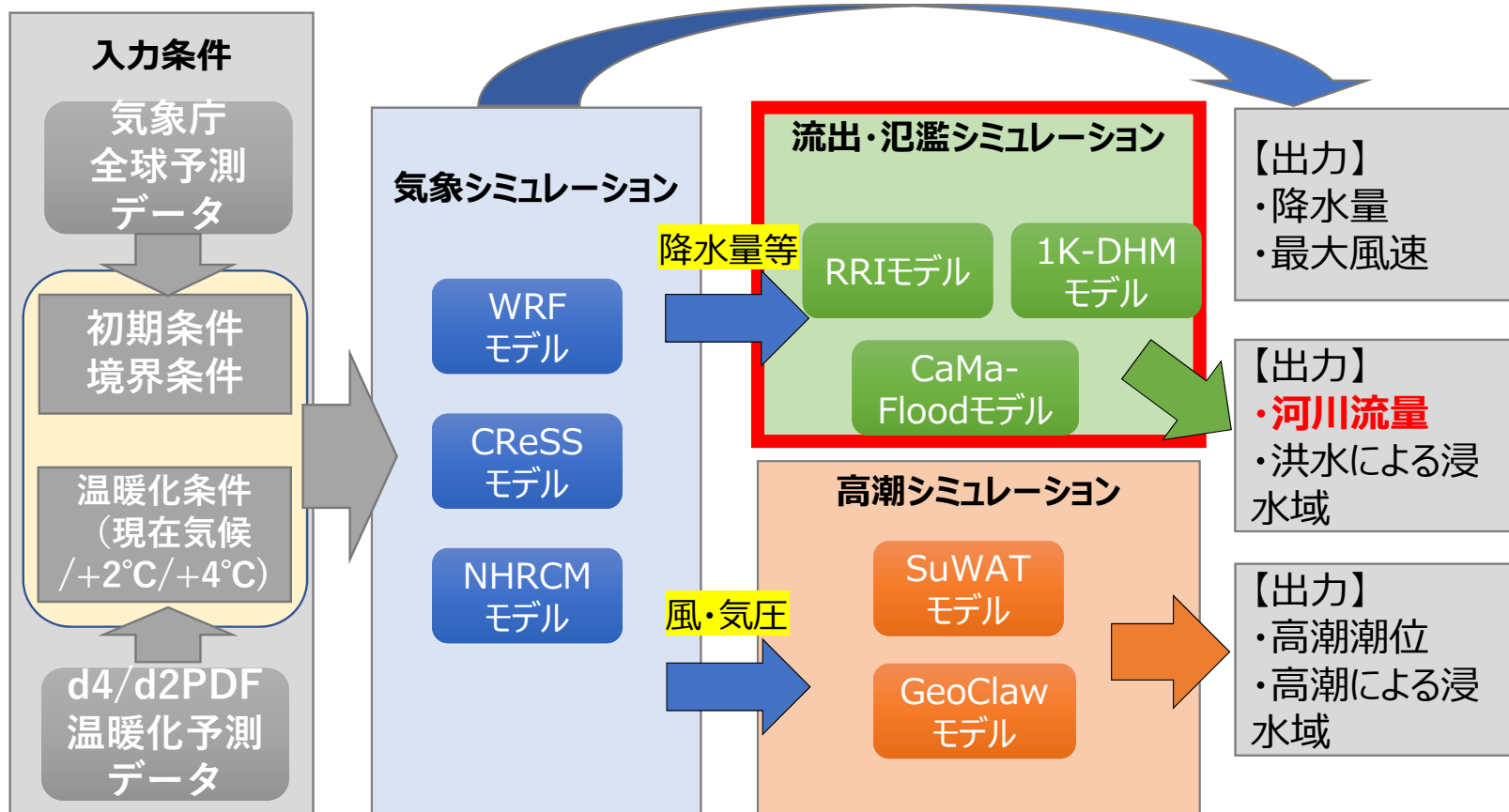
ケース	越流水深 [m]	越流区間 [kp]	総越流量 [万m³]	越流時間 [h]
現況再現	0.07	79.0~79.3	3.77	2.3
	0.44	56.7~57.9	307	5.5
非温暖化条件①	0.11	57.3~57.6	5.54	2.3
非温暖化条件②	0.04	57.3~57.5	1.67	1.3



- 現況再現では、ピーク水位は計算区間の85.8%でHWLを超過、57.5kp地点で最大の11.3時間にわたり超過した。左岸側で2か所越水。
- 非温暖化条件では、HWL超過区間は全体の59.4~82.3%で、現況再現条件と同じく洪水氾濫の危険性が十分高い。しかし、ピーク水位が現況再現条件よりも0.43~1.19m低く、越水が生じたのは1か所で、全20ケース中2ケースのみ。

太田ら：土木学会全国大会、2021

令和元年東日本台風の擬似温暖化実験：環境省プロジェクト

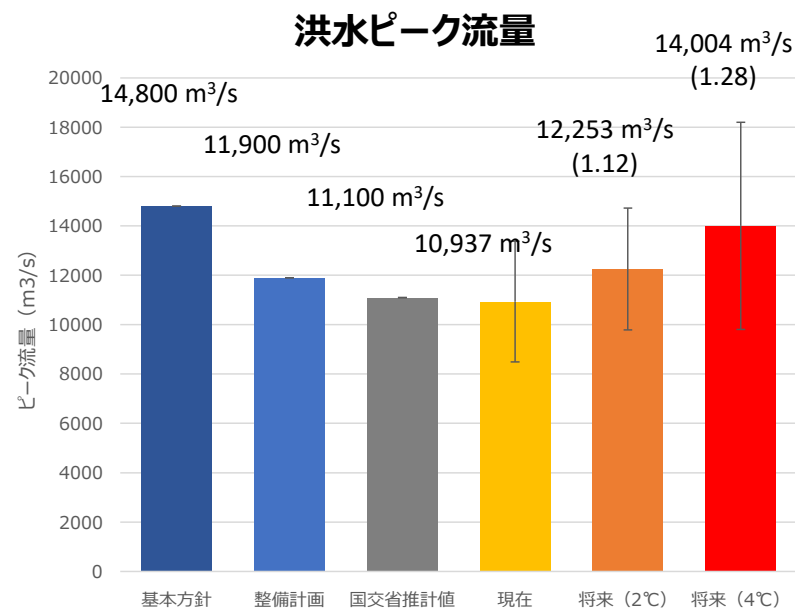
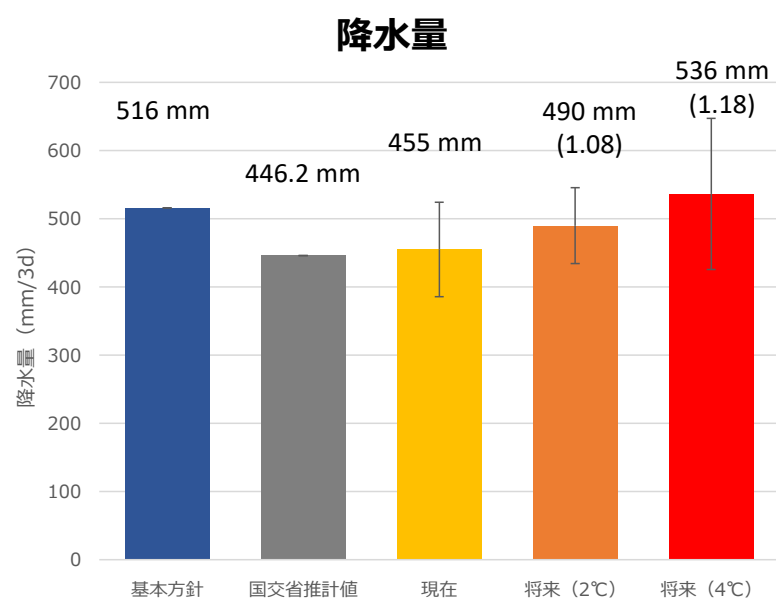


環境省：勢力を増す台風、令和元年度東日本台風の擬似温暖化実験, 2021
<http://www.env.go.jp/earth/tekiou/typhoon2020.pdf>

令和元年東日本台風の擬似温暖化実験：環境省プロジェクト

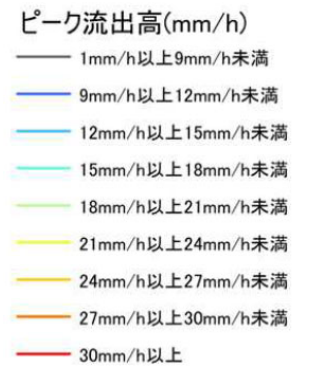
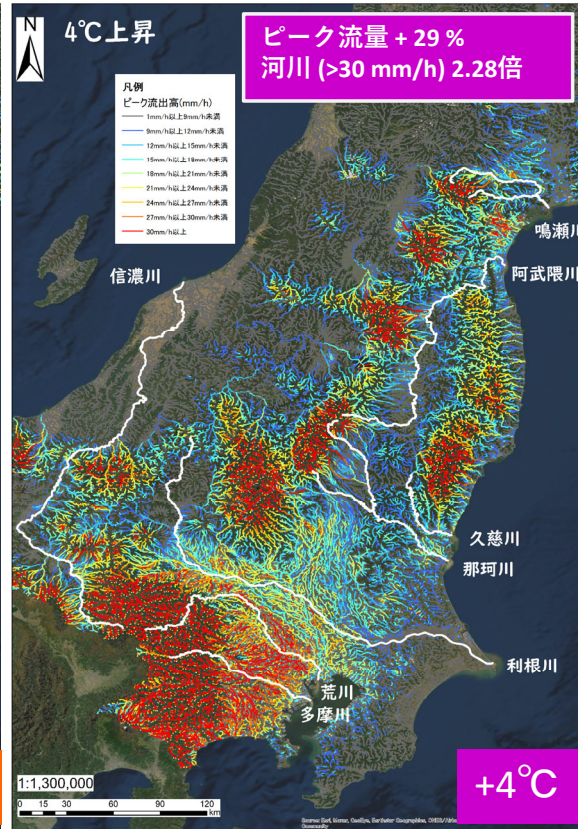
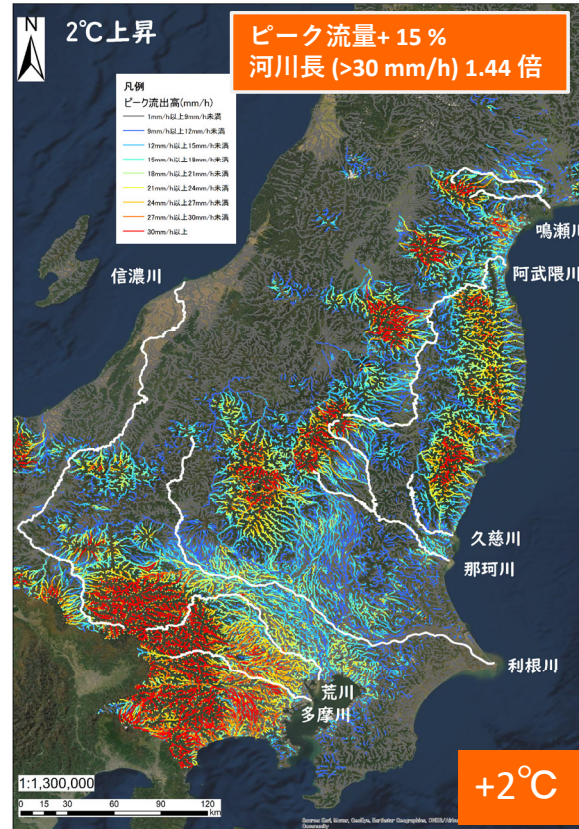
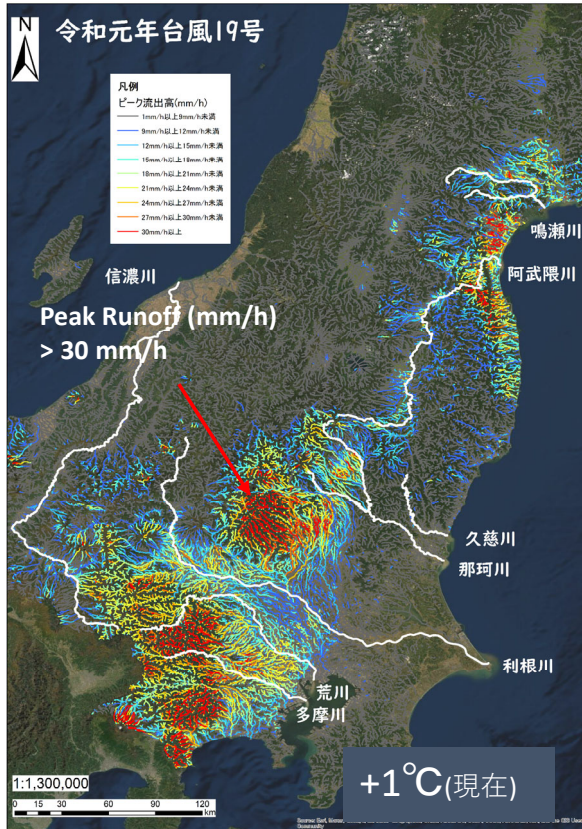
- 降水量、洪水ピーク流量は、現在気候では国交省推計値とよく対応している。
- 将来気候は、2℃上昇シナリオで河川整備計画を上回る洪水流量、4℃上昇シナリオでは基本方針の流量に相当する（ケースによっては上回る）流量となる。

()内の数字は現在気候を1とした場合の比率を示す



注：国交省推計値は氾濫なし・ダム無しの流量
現在・将来は氾濫なし・ダムありの流量

令和元年東日本台風の擬似温暖化実験：環境省プロジェクト



7. 課題と展望：長期連続アンサンブル予測 情報を用いたリスク評価に向けて

「地先」目線でリスクを推定する：全国でマッピングすることの難しさ

1: 自身の住まいを想像してください。

地形上、洪水による浸水リスクはありそうでしょうか？

どの河川が溢れた場合に、浸水の可能性がありますか？

その河川の地点の集水域はどの範囲ですか？

その集水域に降った雨が洪水をもたらすのは、どの程度の期間の豪雨ですか？

その期間（洪水到達時間）に降る雨の頻度と強度はどの程度ですか？

2: 将来の状況を推定しましょう

気候が変化すると、その集水域に降る雨はどのように変化しますか？

将来、その河川および上流河川の整備状況はどのようになっているでしょう？

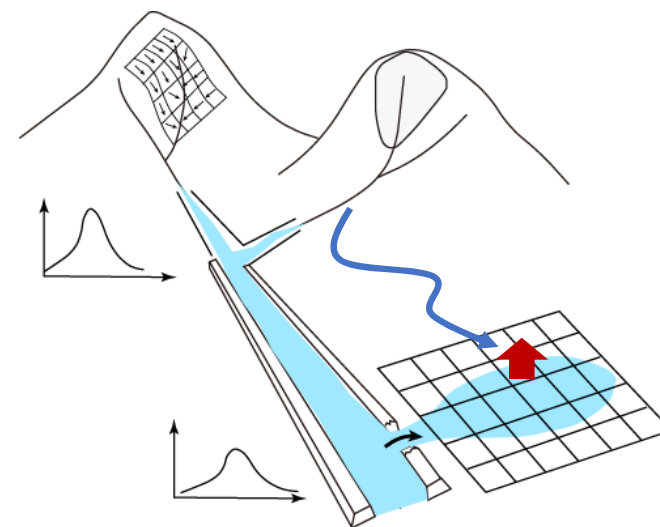
3: 地先の浸水リスクは？

検討対象の河川・区間で破堤や越水が生じた場合に、どのような規模・確率で浸水が発生しますか？

他にも溢れて影響が及びそうな河川が近くにある場合は、同時氾濫や内水氾濫の可能性も含めて同様の検討をしてください。

4: これであなたの住まいの浸水リスクを評価できました。

地域のリスクをマップ化するために、隣の地点でも同様の検討を進めましょう。

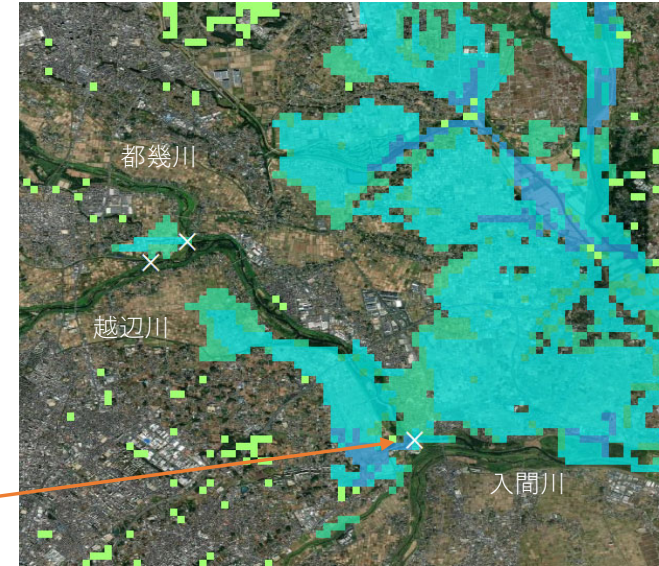
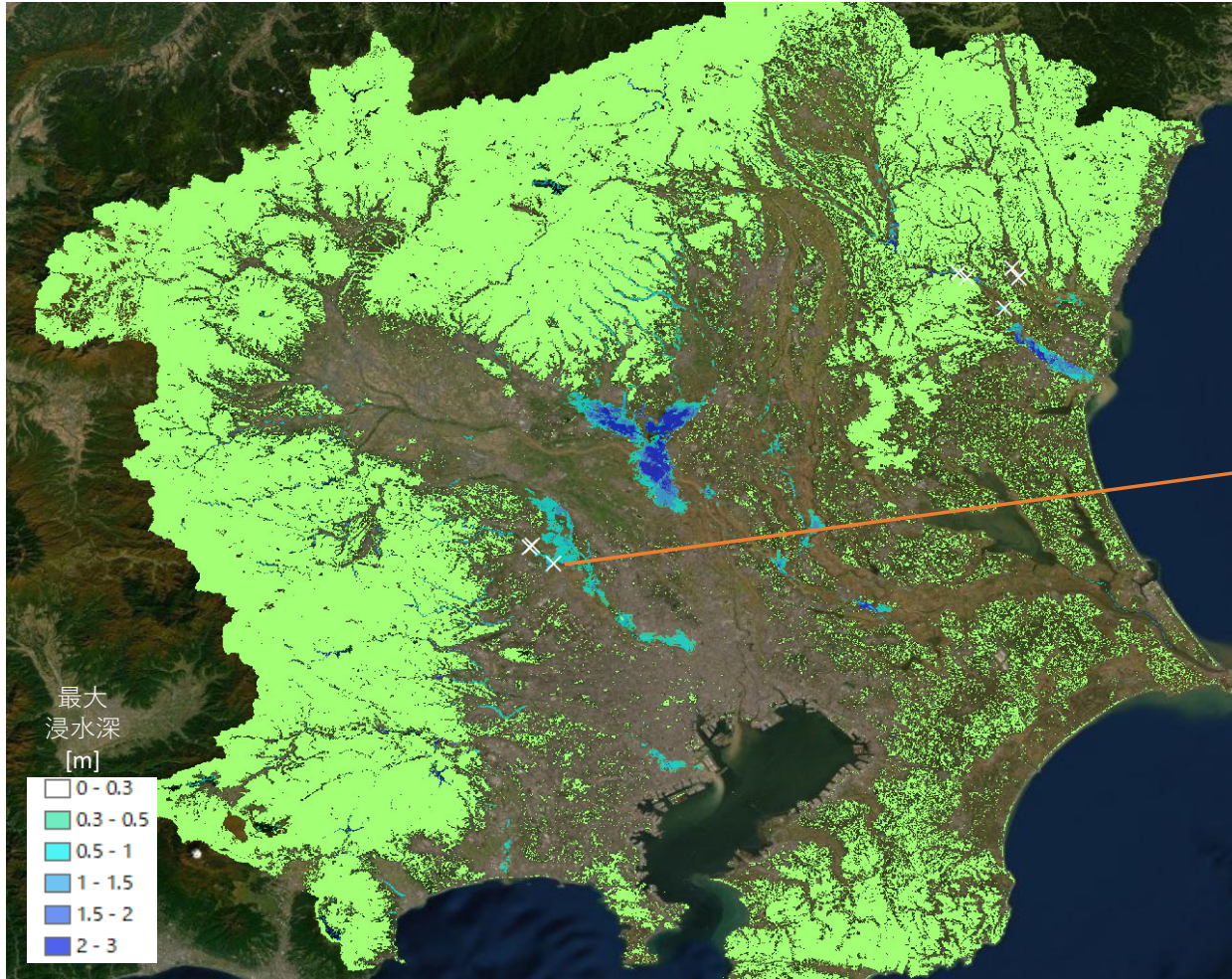


多段階リスク明示型浸水想定図（地先の安全度マップ）を作成するためには、これを全ての地点で実施する必要があるが...

地点別浸水ハザードカーブの推定法の分類

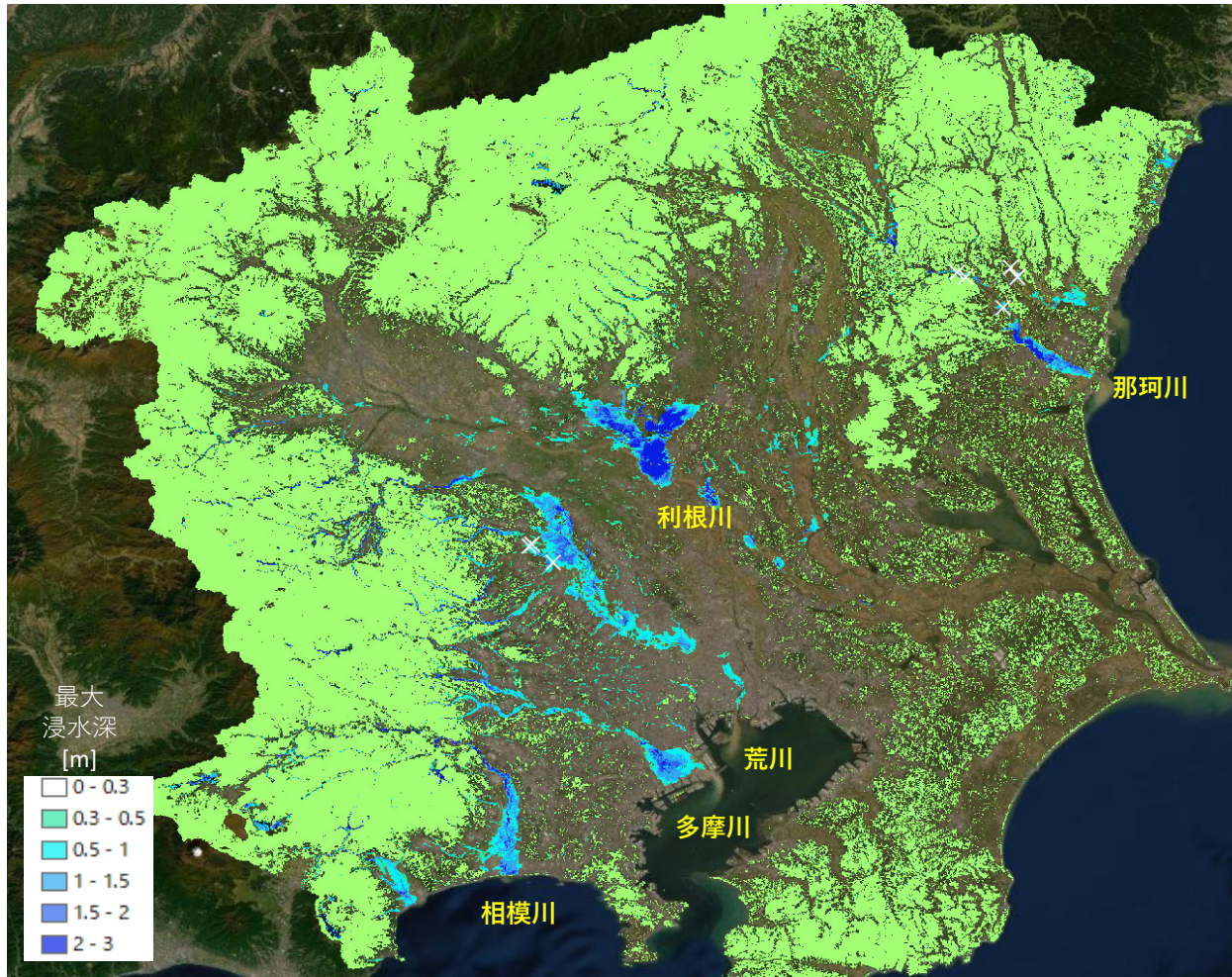
- 降雨ベース（従来手法・引き伸ばし法）：降雨の水文頻度解析をもとに、非超過確率に対応したハイトグラフを決めて、流出氾濫解析。浸水確率 = 降雨確率を仮定。基準点を対象にした推定はできるが、河道区間によって流域平均雨量の超過確率は異なるので、全国全ての河川を対象にした適用は非現実的。
- 流量ベース：全ての河道区間における年最大流量を推定して水文頻度解析を実行し、対象地点に影響する破堤・越流点から氾濫解析。浸水確率 = 破堤・越流確率を仮定。最も現実的では？
- 浸水ベース（正攻法）：当該地点に浸水を発生させる可能性のあるすべての降雨分布を入力して、流出氾濫解析を実行し、年最大浸水深の水文頻度解析。浸水マップとしては、150 mでも解像度が不十分で、浸水解析には局所的な地形や構造物の情報が不可欠。

令和元年東日本台風：広域浸水解析 (work on progress)

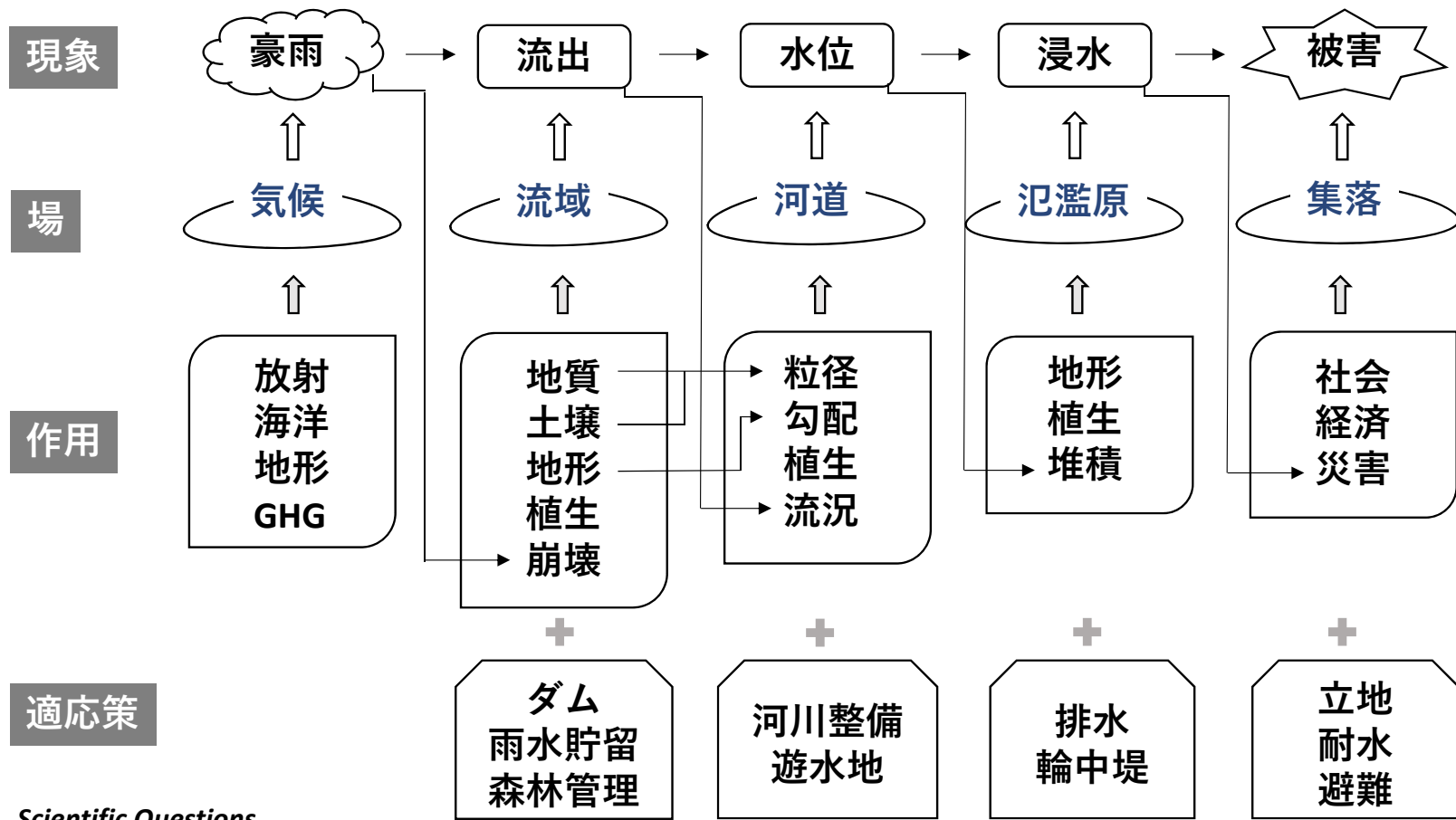


国土地理院：推定浸水深

令和元年東日本台風：広域浸水解析：疑似温暖化(4K上昇)



洪水ハザードモデルの目標：全国で浸水の規模と発生確率を推定



Scientific Questions

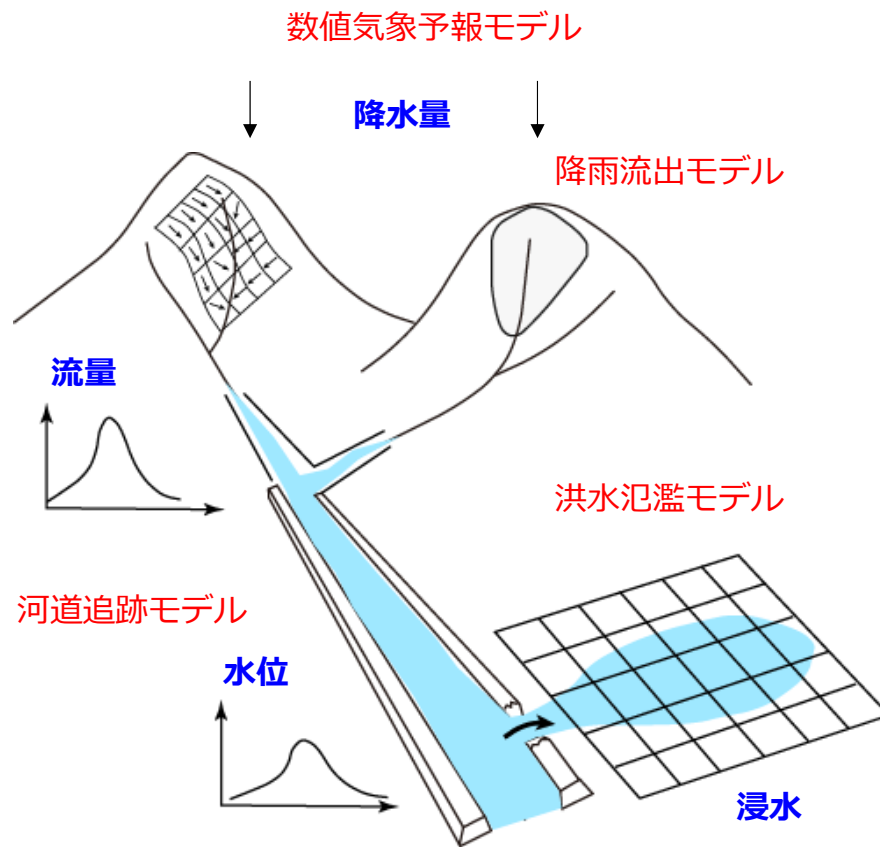
地質や土壌によって洪水流出特性はどう異なるか？

全国を俯瞰して、河道の特性はどう異なるか？気候や流域場の特性が河道に及ぼす影響は？

全国を俯瞰して水害リスクはどのように分布しているか？気候変動や地形の影響は？

以下、追加資料

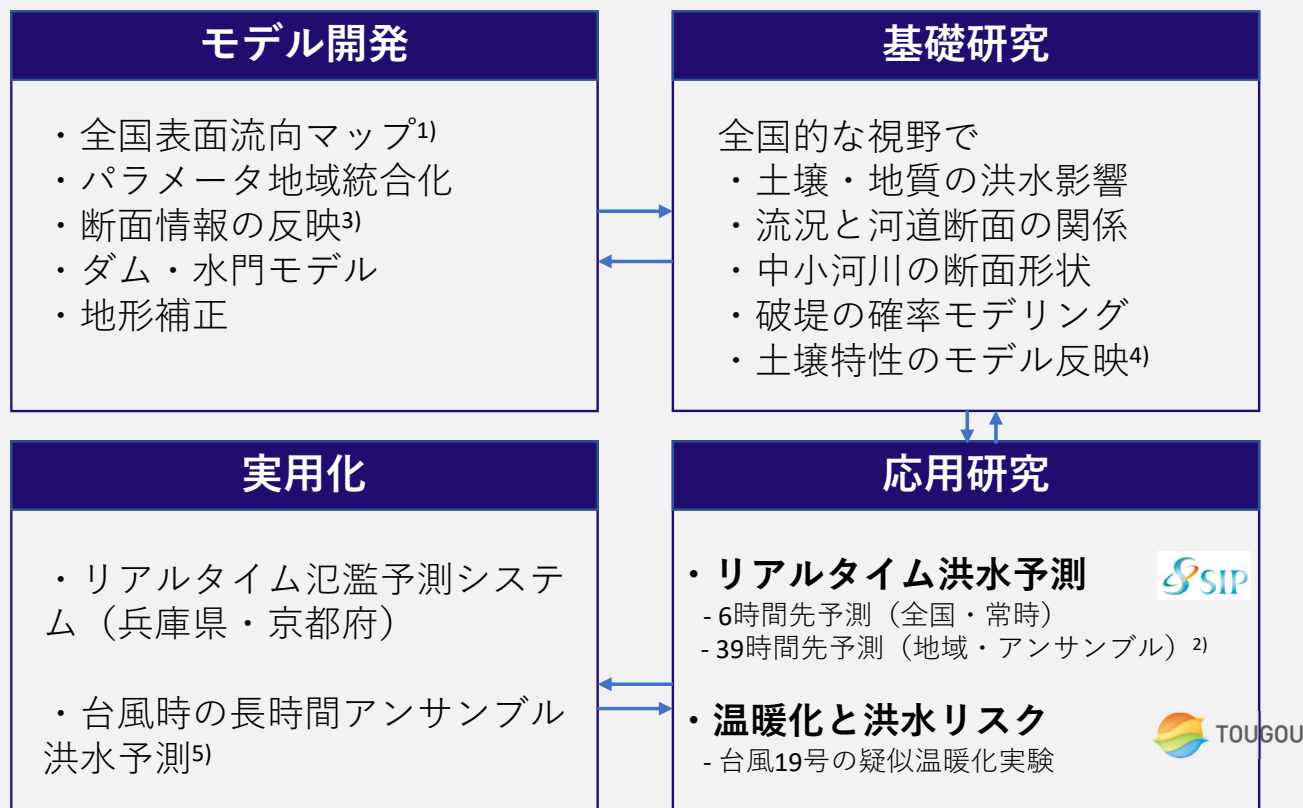
洪水に関する4要素と予測モデル



- **数值気象予測モデル(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

全国版RRIモデルの開発フェーズ（2018年頃～）

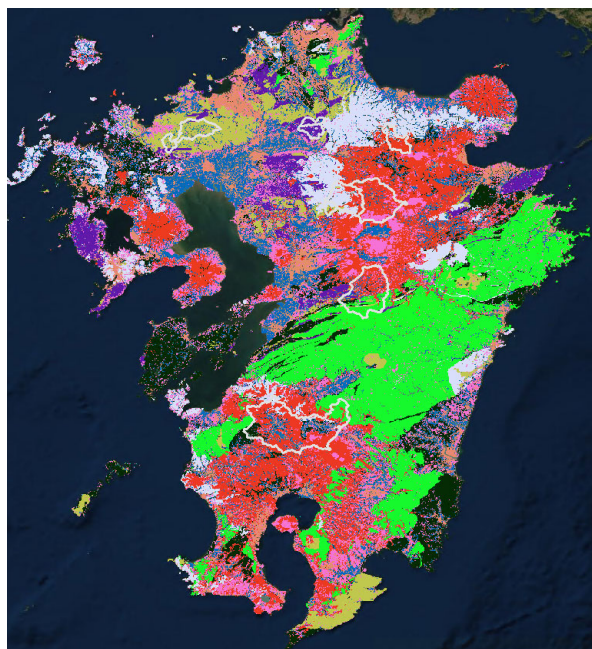
全国版RRIモデルの開発：空間解像度150 m(5秒)で、日本全国を14地域に分割してカバーする。
集水面積 1km²以上の河川をモデルで取り扱い、任意地点の水位、流量、（浸水深）を出力する。



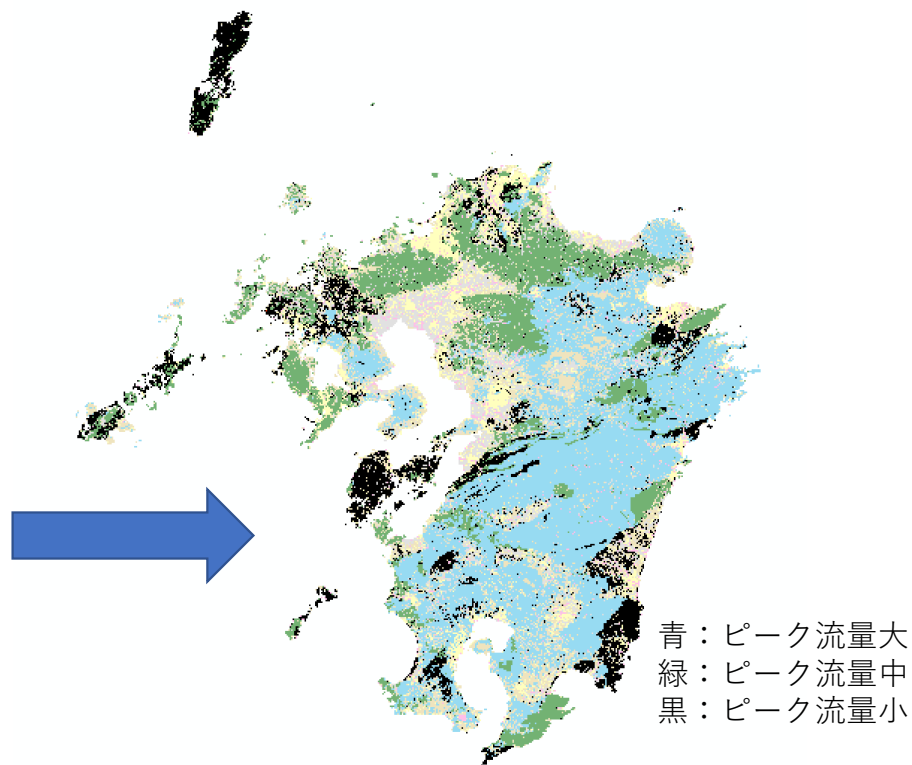
- 1) 山崎大, 富樫冨佳, 竹島澁, 佐山敬洋 (2018) 日本全域高解像度の表面流向データ整備, 土木学会論文集B1 (水工学), 75巻5号, L_163-L_168
- 2) Sayama, T., Yamada, M., Sugawara Y., Yamazaki D. (2020) Ensemble flash flood predictions using a high-resolution nationwide distributed rainfall-runoff model, PEPS.
- 3) 山田真史, 佐山敬洋, 山崎大, 渡辺 恵 (2021) 日本全国の直轄区間観測河道断面を導入した広域洪水予測システムの開発, 土木学会論文集 (投稿中)
- 4) 菅原快人, 佐山敬洋 (2021) 水分保持曲線を反映する流量流積関係式の導出と分布型流出モデルへの適用, 土木学会論文集 (投稿中)
- 5) 立川康人, 中安正晃, 佐山敬洋(2021) アンサンブル予測を活用した長時間/広域洪水予測と社会実装, 河川, p.86-92, 2021

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。

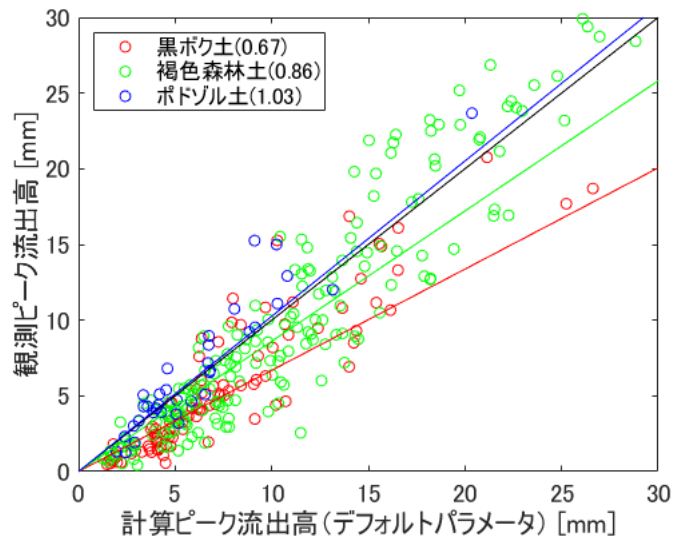
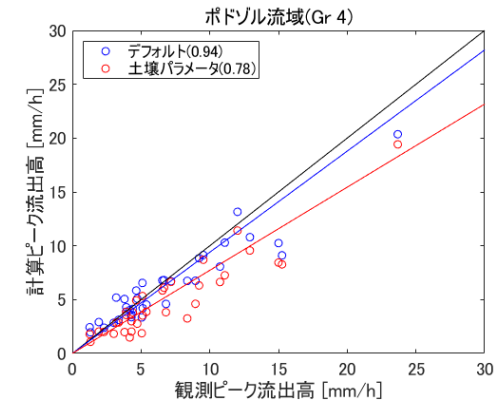
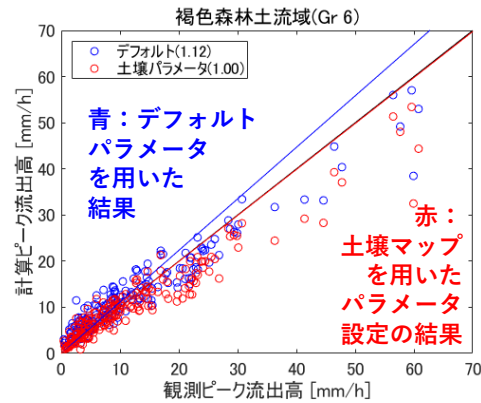
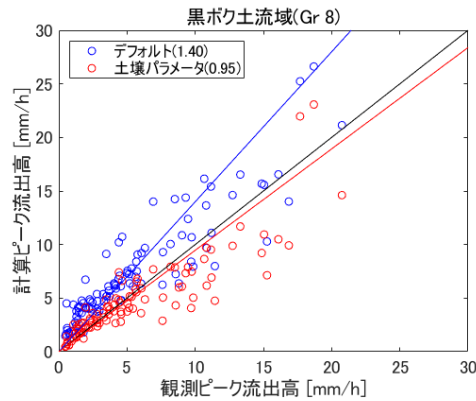


地質図(九州地方)



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

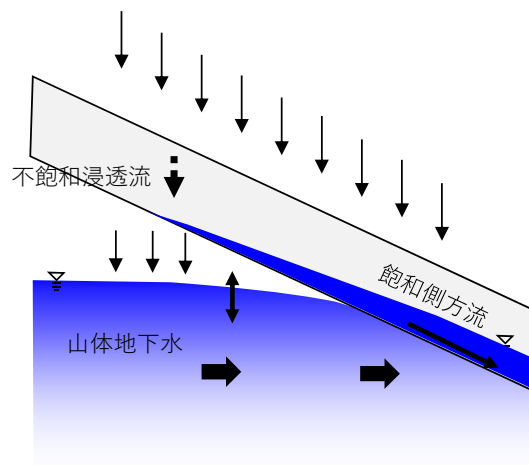


デフォルトパラメータの結果：地形・降雨の時空間分布は反映しつつ、流出機構を単純化した（不飽和の効果を考慮しない）計算結果。それによるピーク流量を1とした場合の、観測ピーク流量の比率、

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**

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 [m]	0.471
d_m [m]	-
k_a [m/s]	0.1
β [-]	-
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

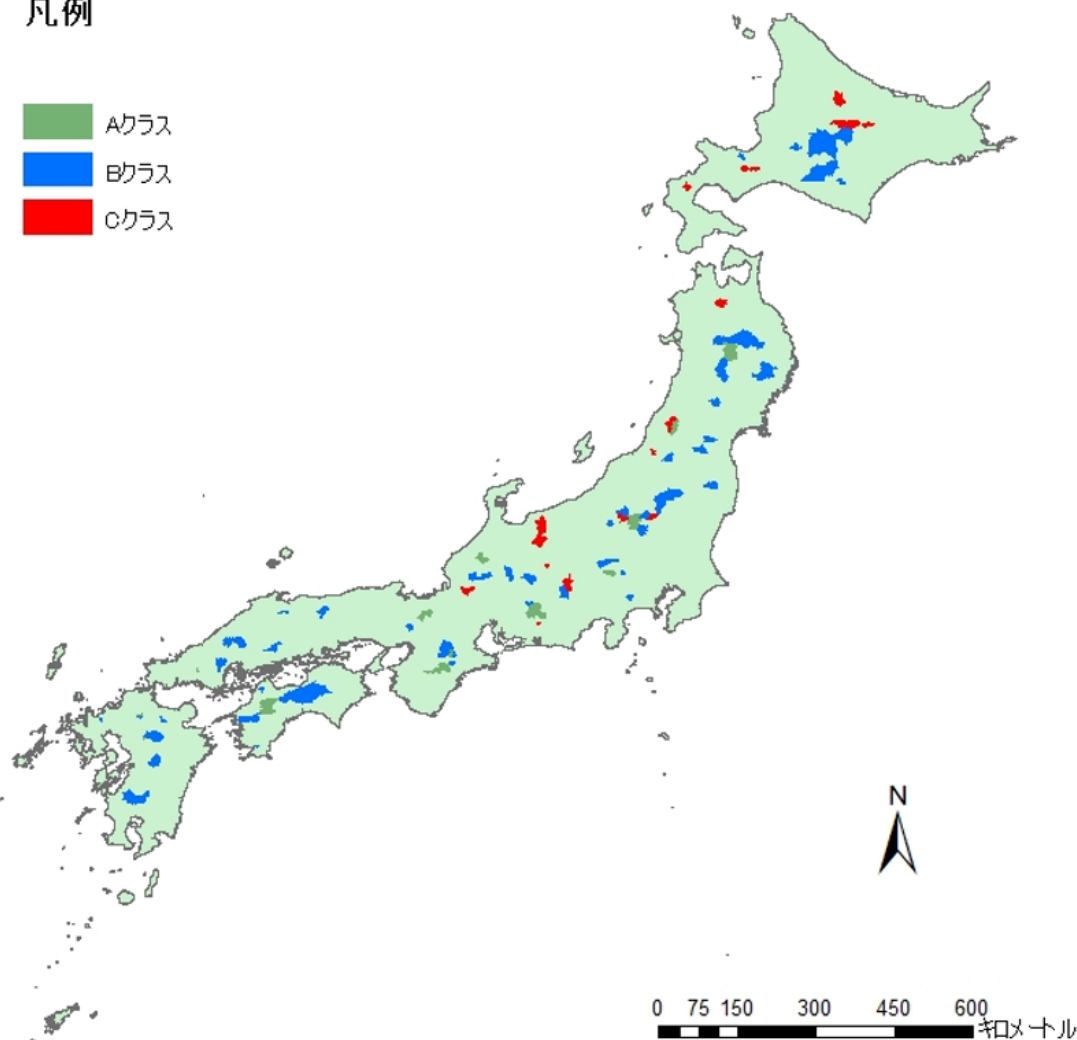
(立川ら、水工、2004)

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

↑の式は、山体地下水の考慮はなし

洪水流出の再現性によるダム流域の分類

凡例



合格数に応じて121ダム流域をクラス分け、
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：15ダム
Bクラス：3,4,5 イベント合格：60ダム
Cクラス：0,1,2 イベント合格：25ダム
するパラメータが一組でも存在する。
イベント数不足などで除外：21ダム

Cクラスの流域が存在 (25/100)

- ・ 現在用いている表層土壌のモデルでは再現不可
- ・ 流域の一部しか流出に寄与していない (印象)
- ・ 山体地下水モデルを導入することで再現可能?