

地球デジタルツインの動向に関するワークショップ 2022/8/8 PM

# 陸域水循環シミュレーションシステム Today's Earthの開発と防災利用

東京大学生産技術研究所グローバル水文予測センター (GHPC)  
JAXA地球観測研究センター (EORC)

芳村圭 & TE開発チーム



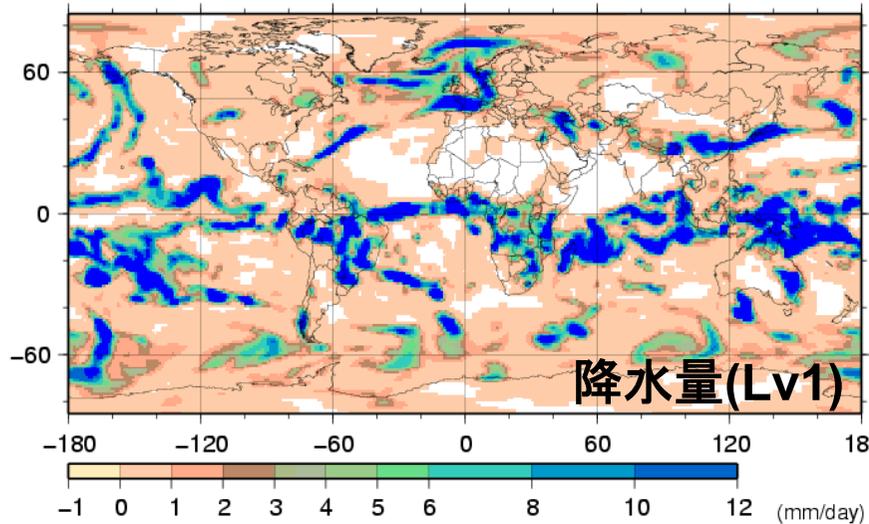
**EORC**



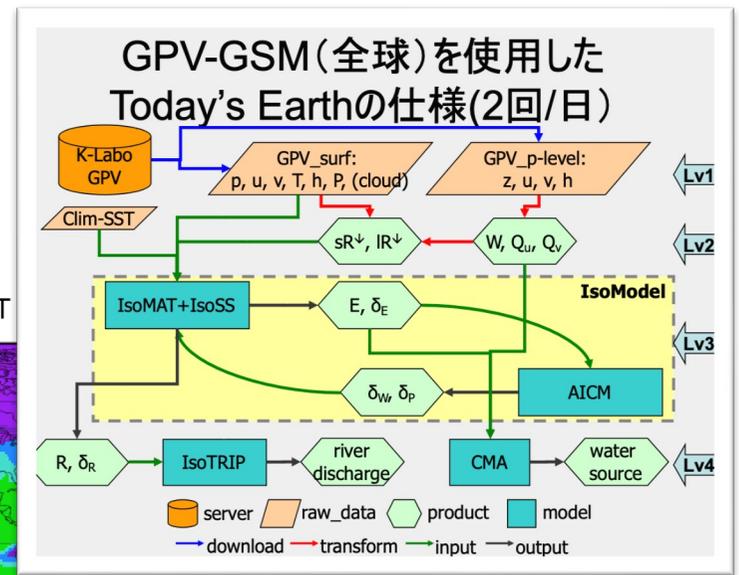
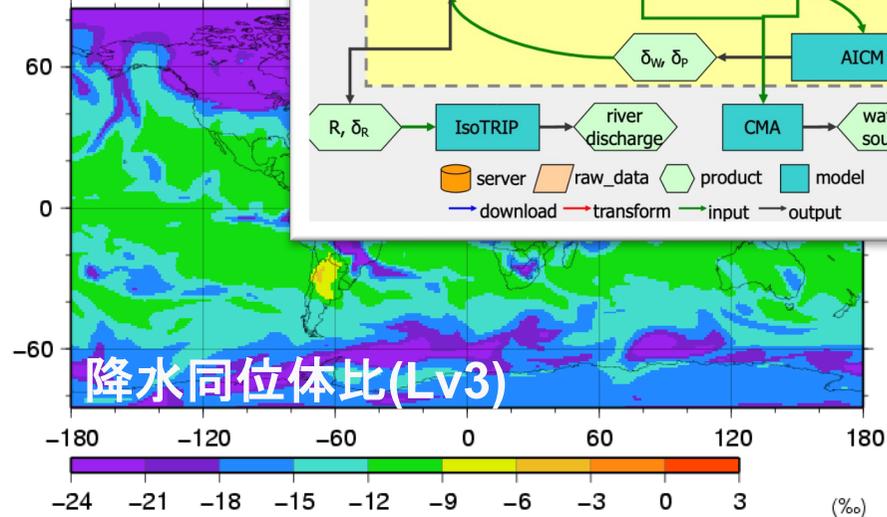
東京大学  
生産技術研究所  
Institute of Industrial Science,  
The University of Tokyo

昔の **全球リアルタイム陸域水循環シミュレーションシステム**  
**Today's Earth/Japan**

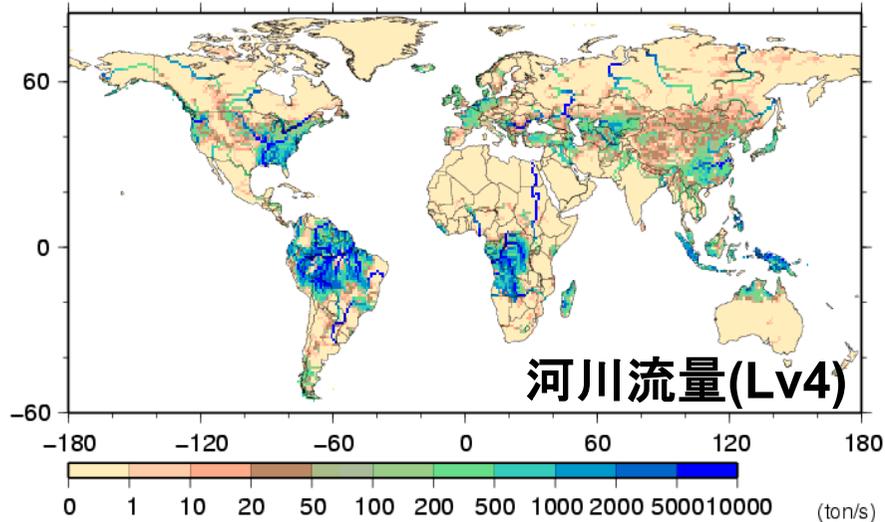
GPV-IsoMAT PRECIP Z=1 6hr-Ave. 2006/02/15 18:00



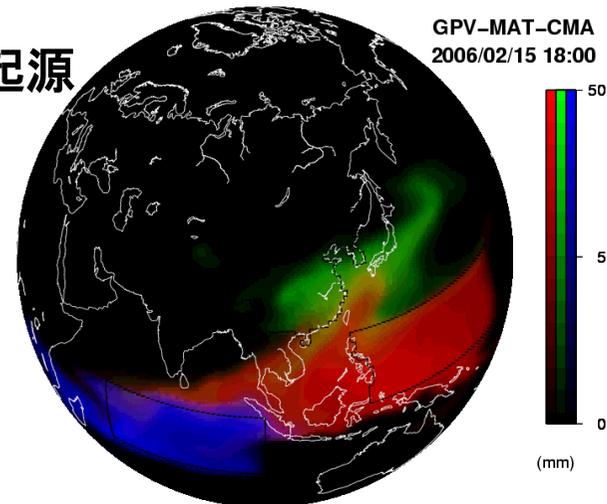
GPV-IsoMAT



GPV-IsoMAT-1°TRIP River Discharge, 2006/02/15 18:00



水蒸気起源 (Lv4)

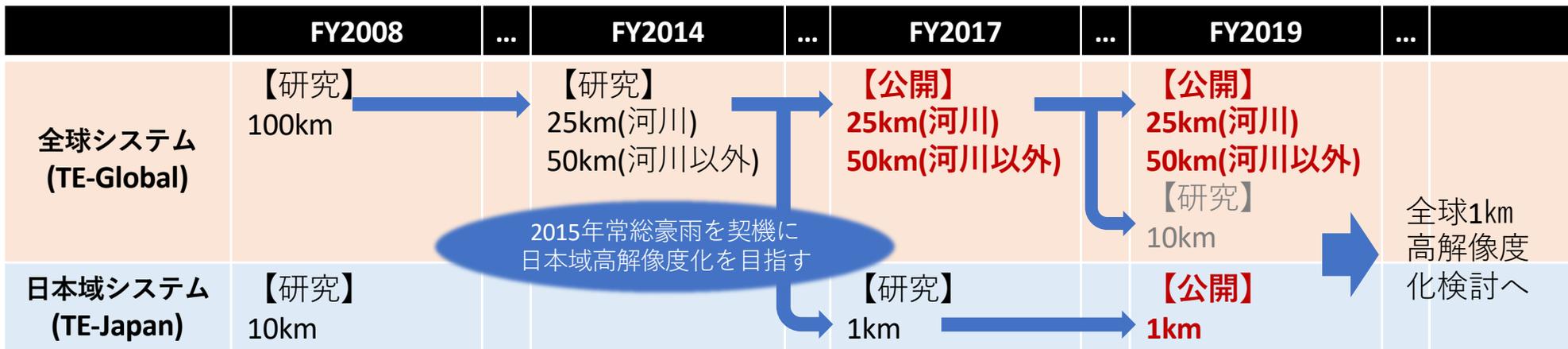


# 抜本的改善の実施 with JAXA



TEの解像度の変遷とそれに伴う開発経緯

<https://www.eorc.jaxa.jp/water/>



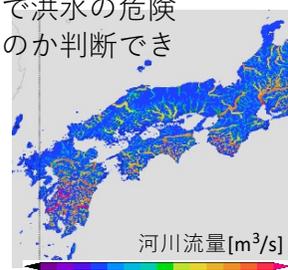
## 【創意工夫1】 衛星データのモデル融合



衛星とモデル間の時空時間解像度の違い、物理量の定義のずれなどを変換するインタープリタを開発し、入力データを融合。

## 【創意工夫3】 危険度指標の計算・提供

流量の絶対値のみではどこで洪水の危険があるのか判断できない。



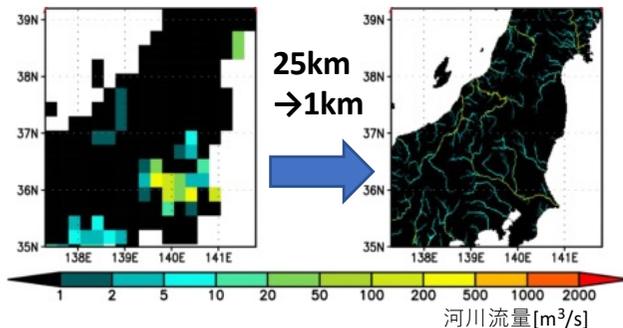
変換

長期シミュレーションによる確率分布から「何年に1度規模の事象か」を算出、危険地域を絞って表示。



## 【創意工夫2】 高解像度化による河川解像

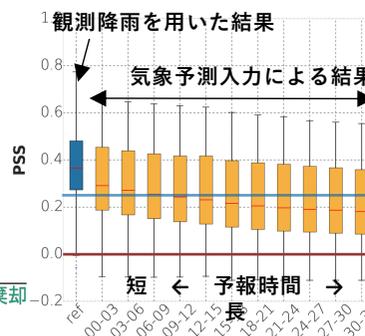
入力データ（降水量、気圧等）、境界条件（地形、植生等）など、モデルで使用される数々の物理量それぞれの特性に合わせた高解像度化手法を開発。



## 【創意工夫4】 洪水予測可能性の研究への展開

構築したモデルに予測可能性を確認し、気象庁の予報データを他機関に先駆けて利用開始。

$$PSS = \frac{\text{的中} - \text{誤警報}}{\text{的中} + \text{見逃し} - \text{誤警報} + \text{正棄却}}$$



高い  
予測精度  
(0.25<PSS)

予測精度有  
(0<PSS<0.25)

3

# 現在の 陸域水循環シミュレーションシステム Today's Earth (TE)

陸上の水循環に関わる物理量（土壌中の水分量や河川流量等）について、衛星観測とモデルシミュレーションを融合し、リアルタイムにて推計・予測している

## Today's Earth -Global (全球システム)

全球50km格子、河川については約25km格子で運用中。  
全球10km化やアンサンプル予測に向けた開発を実施中。

## Today's Earth -Japan (日本域システム)

約1km格子で運用中。  
2020年3月末にリアルタイム運用化(予測を含む)が完了。

	全球システム (TE-Global)	日本域システム (TE-Japan)
空間解像度	陸域：約50km 河川：約25km	約1km
時間解像度	3時間毎	1時間毎
レーテンシ	最短3日程度	<b>リアルタイム</b> ※予測も可（法規制の為限定公開）
使用衛星データ (検討中)	GSMaP, Terra/Aqua MODIS, SRTM30, NOAA AVHRR, (AW3D, GCOM-C)	SRTM30, NOAA AVHRR, (GSMaP, Himawari-8, ALOS HRLC)

**入力データ作成部：**  
衛星観測データと気象庁再解析/予報データを融合、モデル入力用の統合大気データセットを作成

衛星観測データ + 気象庁データ

**モデル計算部：**  
陸面過程モデル（陸・大気間の熱・水収支計算）と河川氾濫モデル（河川における流水計算）の組み合わせによる高度なシミュレーション

陸面過程モデル + 河川氾濫モデル

検証・高度化

**データ提供部：**  
水循環に関連する各種物理量に加え、危険度情報も計算・画像表示し、ウェブサイトを通じて一般公開

### 【主な成果】

- WMO HydroSOSに、GloFAS (EU) WorldWideHyve (瑞) などとともにデータ提供が進められている。
- 内閣府SIP IIに参加し、TE-Japanの予測データを**災害発生前の観測計画最適化に活用中**。  
→ 令和2年7月豪雨では**筑後川氾濫時に実際の災害チャーター撮像範囲決定**に寄与。
- ALOS浸水域推定の事前情報としても**精度向上・計算効率改善に貢献**。

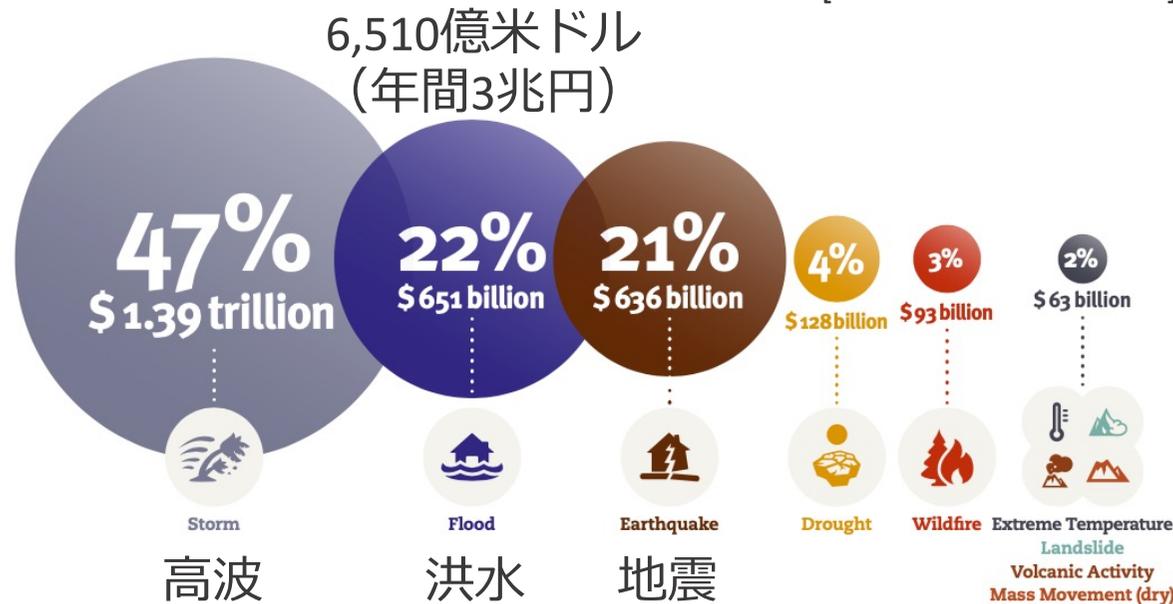
ユーザー登録はこちら：  
<https://www.eorc.jaxa.jp/water/documents.html>



# 解決すべき社会課題：洪水

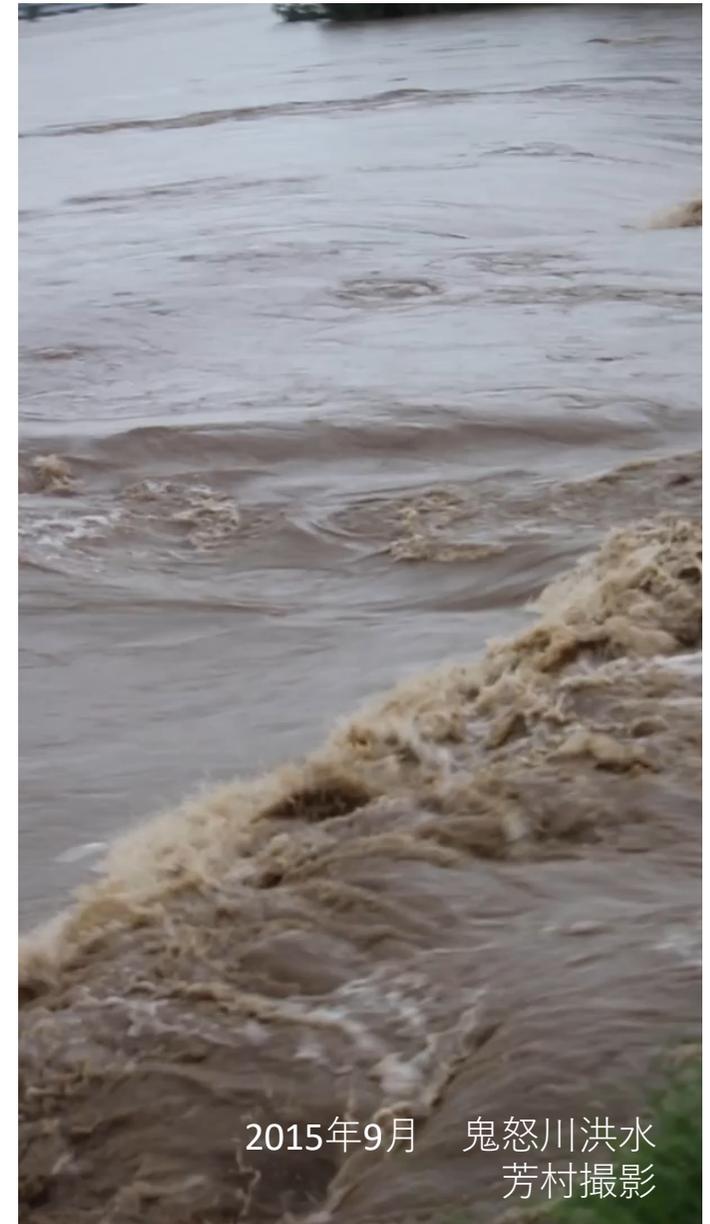
## 自然災害による経済被害（2000-2019）

[国連防災機関、2020]



洪水は世界的に対策が望まれる  
重要な災害の一つ

- 自然災害による経済被害上位10のうち半分が洪水による [EM-DAT]
- 105/139か国が対策すべき重要な課題と位置付け [WMO, 2008]
- 予測技術による対策が期待されている。



# 社会情勢：洪水予測の法規制緩和



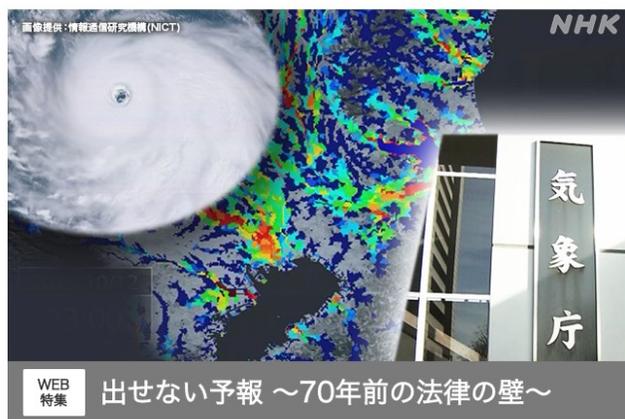
- 『気象庁以外の者が気象、地象、津波、高潮、波浪又は洪水の予報の業務を行おうとする場合は、気象庁長官の許可を受けなければならない』（気象業務法17条1項）
- 『「予報」とは、観測の成果に基く現象の予想の発表をいう』（同2条6項）  
→ ワンボイスまたはシングルボイスと呼ばれる仕組み／ 予測≠予報
- 『なお、地象及び洪水の予報業務については、防災との関連性の観点等から、当面許可しないこととする。』（気象等の予報業務の許可等に関する審査基準）

## → 洪水予測情報は一般に提供できない

- TE-Japanの予測は、希望する自治体等に共同研究用として提供されている。
  - 2022年4月現在、38自治体が参加。
- 2021年より『洪水及び土砂災害の予報のあり方に関する検討会』が始動。

## → 民間による洪水「予報」が許可される方向に。（8/24最終報告書（案）が発出）

2020/9/11 NHK



2020年9月11日 18時58分

9月初めに“最強クラス”で接近した台風10号。この台風に関する「予報」や伝え方

2020/11/12 NHK



“出せない予報”見直しか 洪水の予報 民間許可も視野に検討へ

2020年11月12日 5時10分 大雨

2021/8/24 NHK



洪水などの予報 研究機関や民間事業者にも許可を 気象庁検討会

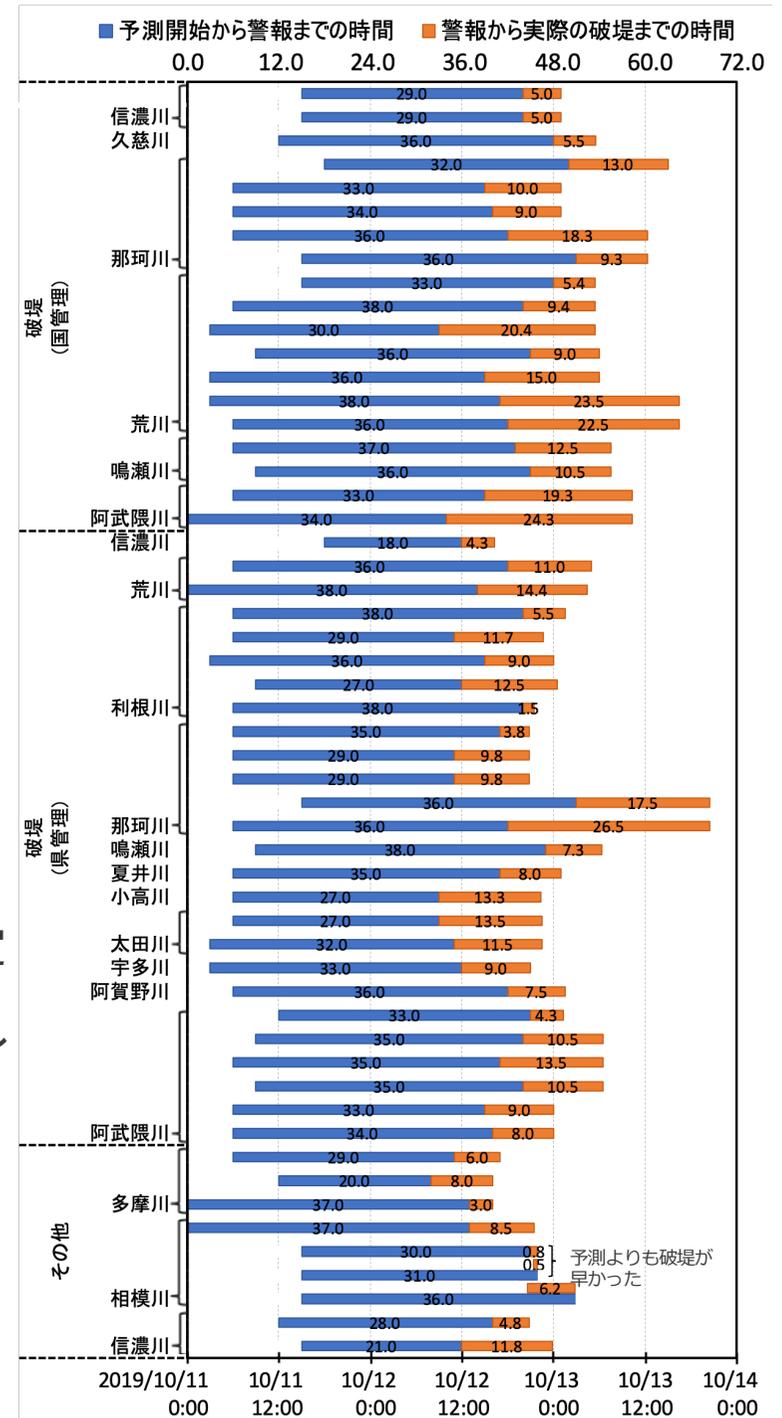
2021年8月24日 22時27分 気象

# 台風19号での予測可能性



©NHK

- 破堤が発生したと報告のあった**142地点中130地点**において、TE-Japanでは200年に一度の規模の洪水の発生(「警報」と定義する)を、**平均32.3時間前から予測していた**(右図青のバー)。また実際の破堤は予測した警報より**8.5時間遅く**発生した(橙のバー)。
- 空振り率は、10月11日3時の時点では90%程度だったが、同日9時以降は70%前後を推移し、12日21時には60%程度にまで上昇した。  
(参考:気象庁の洪水警報の空振り率は70-90%程度;田中ら, 2008)

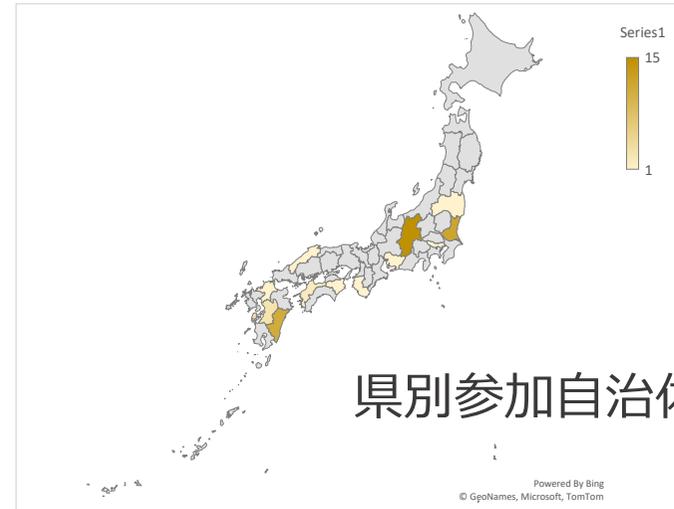


# TE-J予測情報を利用した自治体での実証実験

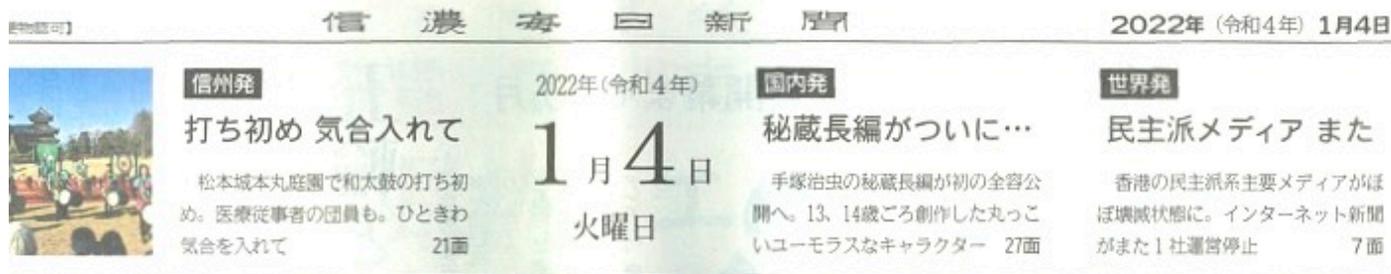
実証研究参加自治体(2022年8月現在): 50

- 宮崎県 宮崎市
- 宮崎県 西都市
- 宮崎県 高鍋町
- 茨城県 水戸市
- 茨城県 常総市
- 茨城県 つくば市
- 茨城県 つくばみらい市
- 長野県 長野市
- 茨城県 境町
- 茨城県 常陸太田市
- 茨城県 ひたちなか市
- 東京都 江戸川区
- 茨城県 龍ヶ崎市
- 徳島県 徳島市
- 長野県 -
- 茨城県 坂東市
- 長野県 池田町
- 宮崎県 都城市
- 宮崎県 日南市
- 宮崎県 日向市
- 宮崎県 門川町
- 熊本県 八代市
- 島根県 益田市
- 福岡県 久留米市
- 長野県 伊那市
- 長野県 軽井沢町
- 長野県 上田市
- 長野県 須坂市
- 長野県 千曲市
- 長野県 長和町
- 長野県 南相木村
- 長野県 南牧村
- 長野県 飯田市

※研究参加を公表可能  
としている自治体のみ



# 長野県での先行強化実施 (JST未来社会創造事業)



## 洪水予測 信州で精度向上

県・東大・JAXAなど 共同研究本格化



国内外で 共同研究で使う「トゥデイズ・アース・ジャパン(TE-J)」は、幅や地形、地質、傾斜などを分析し、降雨や量が川に流れるか計算。東大が設計し、観測Aの陸域観測技術衛星「ちゅうごう」を活用して、TE-Jは39時間まで予測でき、河川200年に1度の大雨を超えると、注意ラート」を出す。19号災害では全国の

国内外で

国内で毎年のように豪雨。東京大、宇宙航空研究開発機構システムの精度向上に向け、019年10月の台風19号洪水の水位などのデータを整理するシステムを構築。加わって、洪水の備え。国内外での活用も視野に

市町村に参加

### 洪水予測の精度向上へ共同研究開始 長野県が東大やJAXAと連携

2022/01/27 12:00 長野県 社会 主要 台風19号 県・県議会

県や東京大、宇宙航空研究開発機構(JAXA)などは26日、洪水予測システムの精度向上に向けた共同研究を開始したと発表した。東大が設計し、運用している「トゥデイズ・アース・ジャパン(TE-J)」に、県がダムや河川の水位などのデータを提供。現場のデータをシステム上で連携・活用して研究の精度を高め、先進的な流域治水の在り方を探る。



- 〈リアルタイム情報〉
- TE-J洪水予測
- cmap建物被害予測
- SNS解析情報(JX通信社FASTALERT)
- 防災気象情報(気象庁)
- 〈静的情報(平時から確認可能)〉
- 県保有施設(長野県)
- 避難先情報(ファーストメディア株式会社)
- 避難所混雑情報(株式会社バカン)
- 洪水・土砂ハザードマップ(国土地理院)

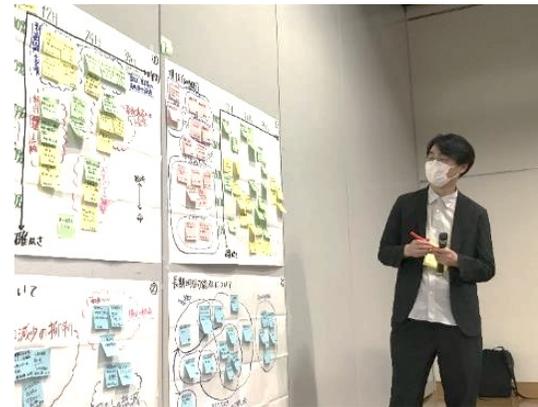
利用者は県庁職員に限定されます。

https://

<https://www.youtube.com/watch?v=S3byygZFjXc>

# 洪水予測ワークショップの実施

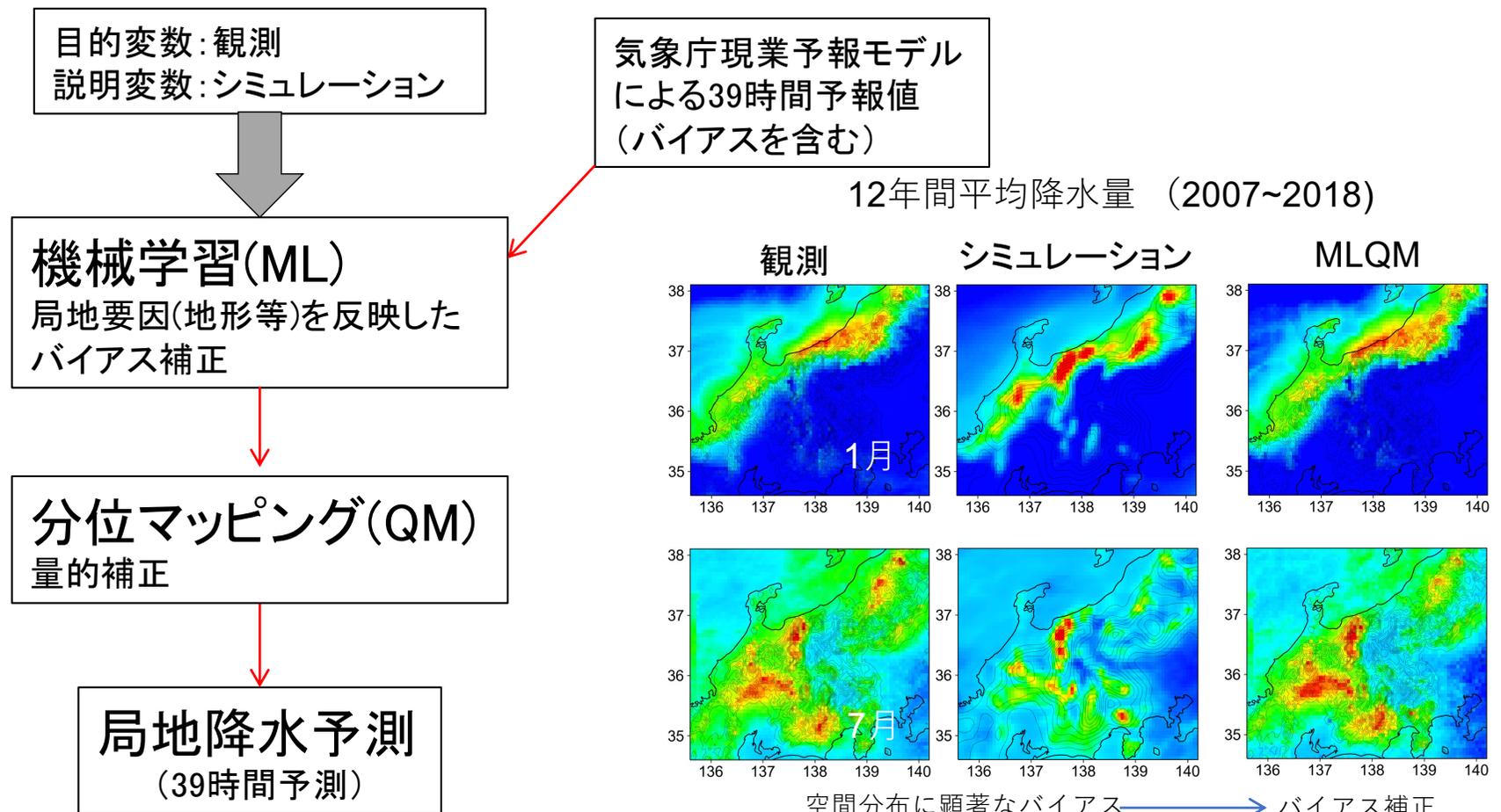
(2022/5/24-25 ; 2021年度開始のJST未来社会創造事業の課題によるもの)



# AIによる降水予測精度の改善

機械学習を用いたバイアス補正手法を気象庁MSM39時間予報値に適用して局地降水の39時間予測を実施した。

利点： 低気圧の移動や季節風の強弱など気象現象の時間変化を反映した数値モデルによる予測値を適用することにより、比較的長時間の局地降水予測が可能。

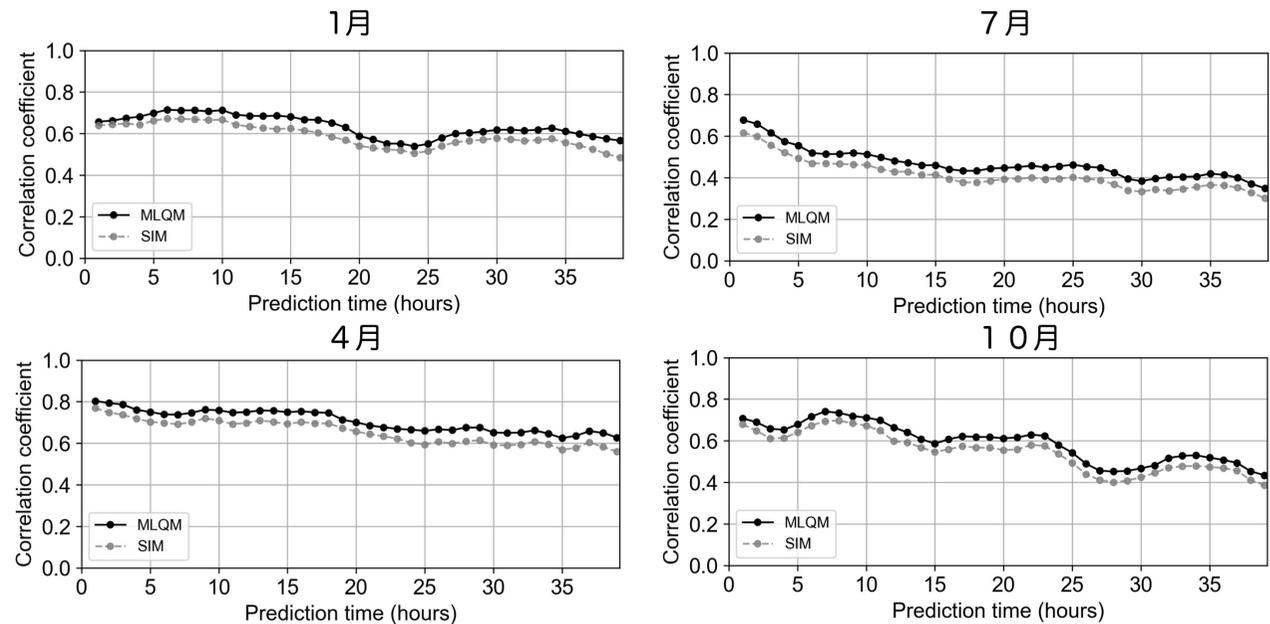


# AIによる降水予測精度の改善

(Yoshikane and Yoshimura, 2022;  
Yin et al., 2022)

- 長い時間かかってPLOS Waterに掲載。その後、すぐさまJ. Hydrol.
- Today's Earth-Japanでの洪水予測に実装済み。(短期予測精度の向上に寄与)
- d4PDFやCMIP6など、モデル予測のバイアス補正・DSへの応用を試行中(長期予報の精度向上に寄与予定)

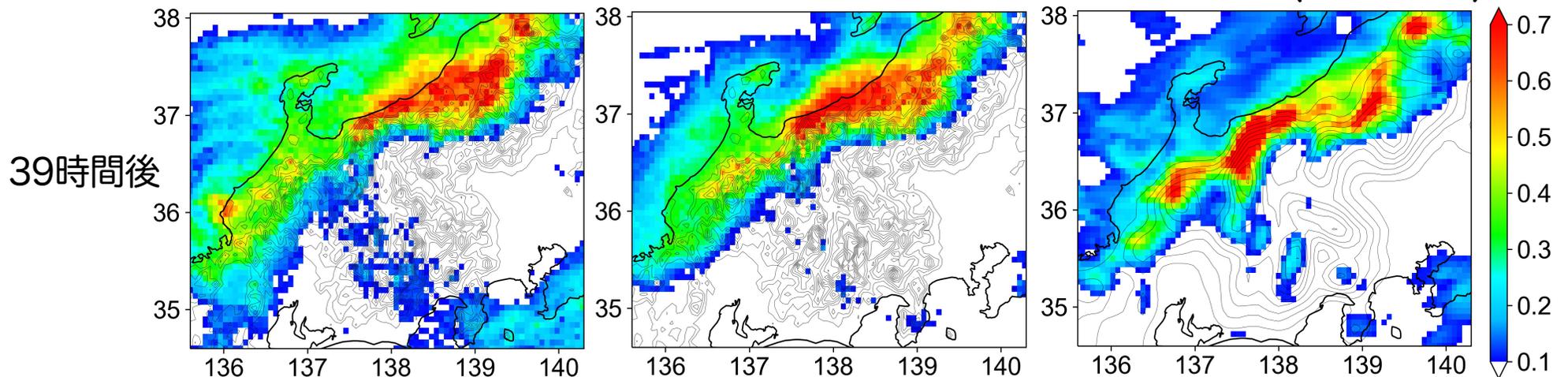
降水量の機械学習推定・シミュレーションと観測値との相関係数(1~39時間先)



観測

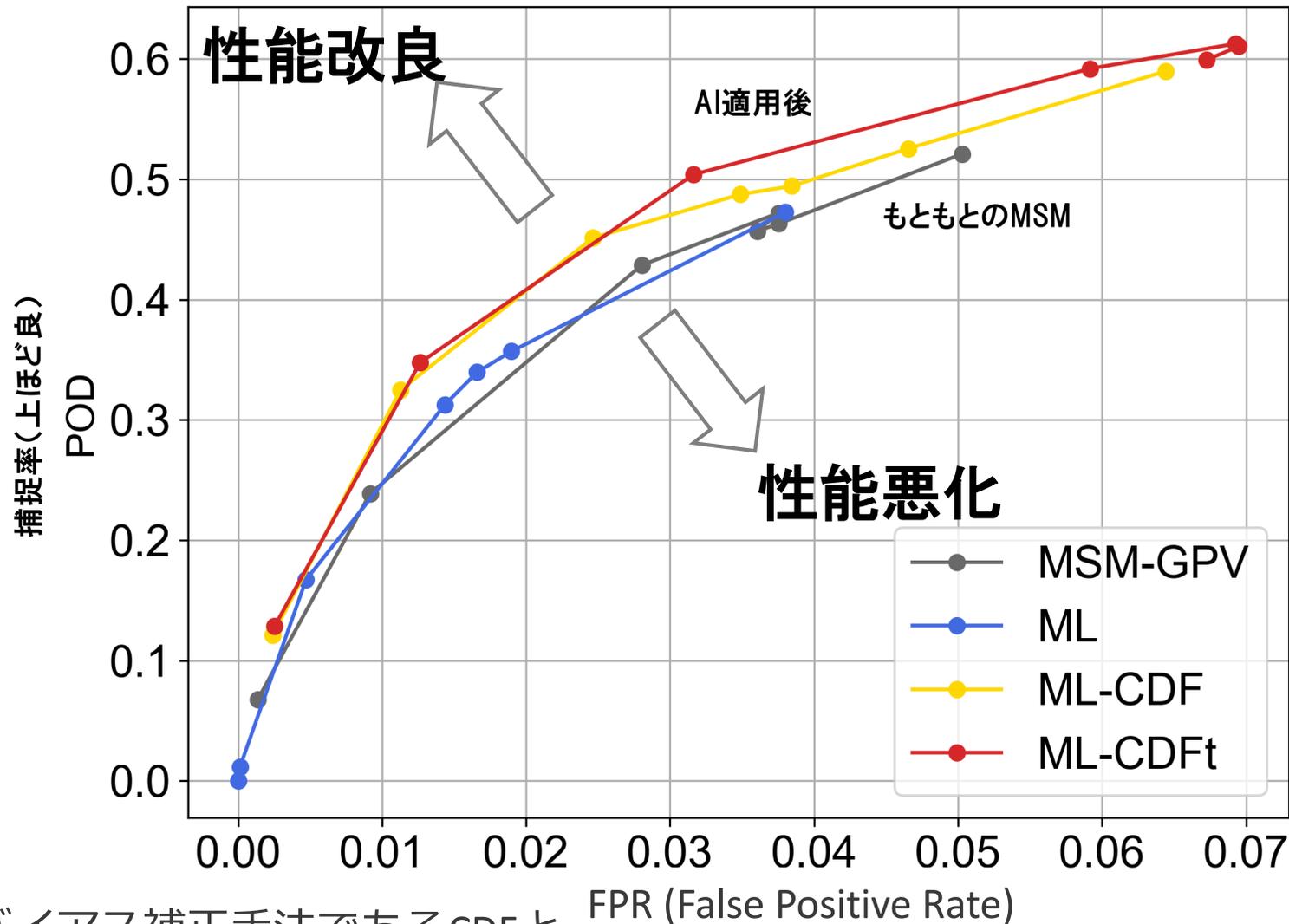
本手法

気象庁予報値 (MSMGPV)



# AIによる降水予測精度の改善

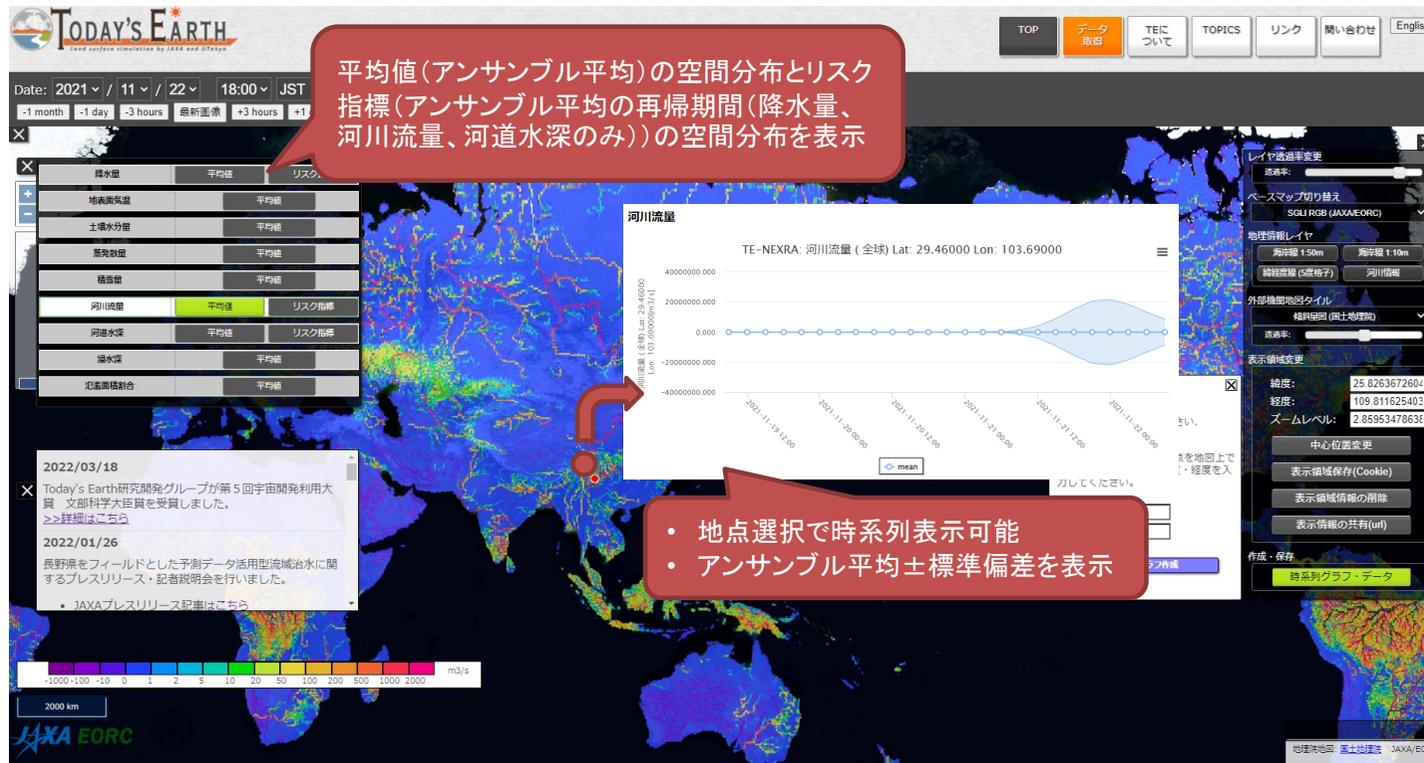
Receiver operating characteristic (ROC) curves



既存のバイアス補正手法であるCDFと機械学習SVMとの組み合わせが良い

# デジタルツインに向けたさらなる高度化の検討 : TE-Global/JapanのNEXRA利用

- NEXRA (112km, 128アンサンプル) を用いたTE-Globalの定常的な運用を開始。
- アンサンプルシミュレーションのデータ形式・可視化手法に関して、東大・JAXA・RESTECのコアメンバで複数回打合せを実施、方針について合意。今年度中にExperimental productを可視化ウェブサイトと合わせて一般公開予定。



- NEXRA14km解像度, 5アンサンプル, 5日予測のランが定常運用化されたことに伴い、来年度は10km化を検討している全球版での利用を視野に検討を進める予定（日本域1kmシステムでは既にテストランを実施済）。

# デジタルツインに向けたさらなる高度化の検討： 30m解像度での浸水深表示の試作

TE-Japanを用いて  
計算した200年に1度  
の洪水時の浸水深  
(長野市・千曲川)

解像度1分の出力を1  
秒(30m)にダウン  
スケーリング

検証が必要



# 洪水時におけるモデルと衛星観測の融合

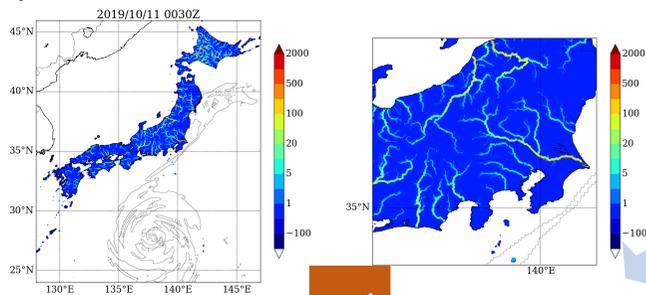


## 高度化した浸水域情報の提供に向けて



### 【発災/観測数日前～数時間前】

- TE-Japanによる定常的な予測情報の提供



時間の流れ

データ提供

データ提供

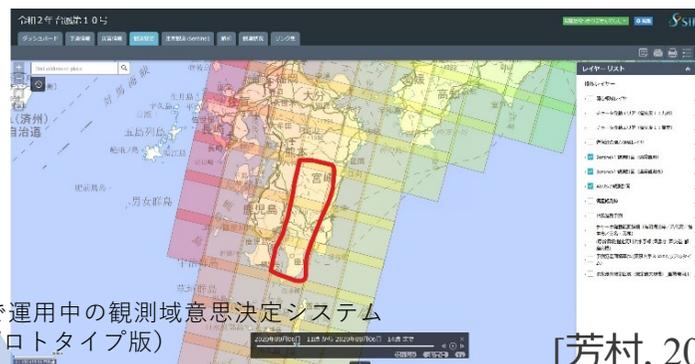
衛星緊急観測  
(だいち2号等)



発災

### 【発災/観測数日前～数時間前】

- TE-Japan予測に基づく衛星観測の撮像域決定 (画像は2020年9月台風10号の際の事例)

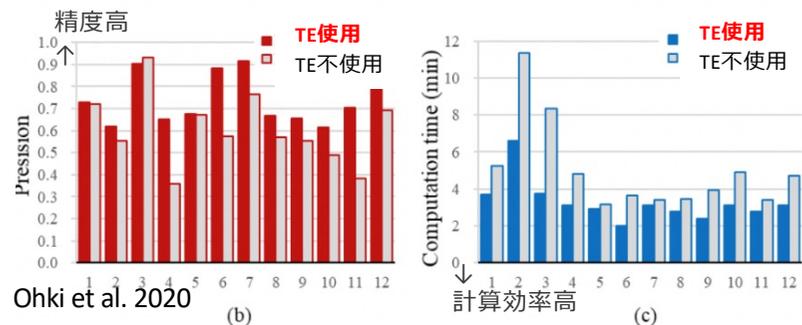


SIPで運用中の観測域意思決定システム (プロトタイプ版)

[芳村, 2021]

### 【発災/観測時～数時間後】

- TE-Japanの推定値を用いた浸水域推定精度と計算効率の改善

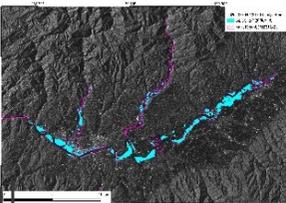


Ohki et al. 2020

(b)

(c)

迅速かつ高精度な水面域推定



情報提供

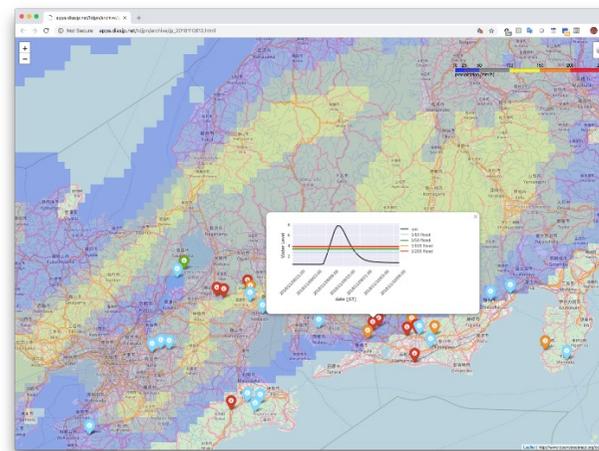


地方自治体・関係機関等

フィードバック

### 【研究途上・検討中】

- TE-Japan推定浸水域のとの検証・比較
- 浸水域等の衛星観測のデータ同化及び予測



[Ohki et al., 2020]

# リアルタイム予測（避難）から 気候リスク予測（予防）へ

- ポイント：気候リスク予測の根拠に、リアルタイム予測を用いる。
- 実時間洪水予測の実証により、情報気候変動下におけるレジリエントな社会の実現に必要な投資判断や計画策定を支援するハザード予測の信頼性について検証・向上を図り、気候サービス産業の形成を促進する。
- 世界に先駆けて、実時間予測と物理気候モデルによる予測（中長期予測）をシームレスにつなぐことで、より確かなハザード予測に基づいたより信頼性の高い気候サービスの提供を可能とする。

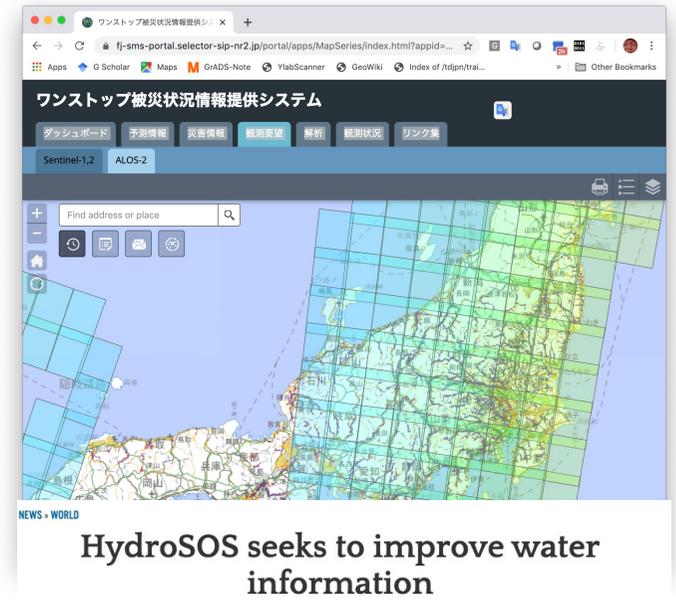
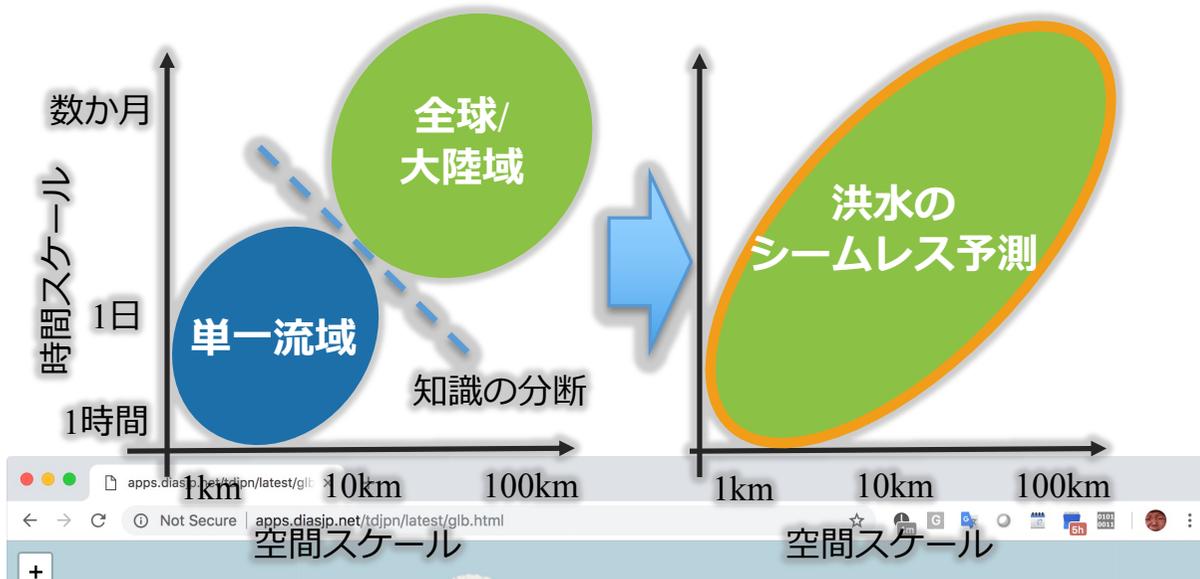
[https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/pdf/220401sip\\_pd1.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/pdf/220401sip_pd1.pdf)

SIP3 PD決定(5/27)。推進機関は防災科研。

気象変動等の予測  
(22件；気候レジリエンス、  
気候サービス創出、TCFD、  
地球システムモデル)

8	スマート防災ネットワークの構築	気候変動等に伴い災害が頻発・激甚化する中で、平時から災害に備える総合的防災対策を強化するとともに、災害時対応として、災害・被災情報をきめ細かく予測・収集・共有し、個人に応じた防災・避難支援、自治体による迅速な救助・物資提供、民間企業と連携した応急対応などを行うネットワークを構築する。	くすのき こういち 楠 浩一	東京大学 地震研究所 災害科学系研究部門教授
---	-----------------	--	-------------------	------------------------

# 世界展開構想



全球スケールから市町村スケールまでをシームレスにダウンスケールし、世界の大河川から市町村サイズの河川までの洪水を予測するシステムを構築することで、気候変動下における甚大な水災害の被害軽減に資することを旨とする。



事故受付データとの比較

# 「地球デジタルツイン」には可視化も重要 既存の球面ディスプレイシステム



自家発光型  
(科学未来館Geo-Cosmos)



リアプロジェクション型  
(JVCデジタル地球儀)



直接プロジェクション型  
(NOAA SOS)



直接プロジェクション型  
(ダジックアース)

# Today's Earthと球面ディスプレイの歩み

※SPHERE社とのコラボレーション

2018年一般公開の様子



2022年



2021年研究室紹介動画



ご清聴ありがとうございました。  
ございました。

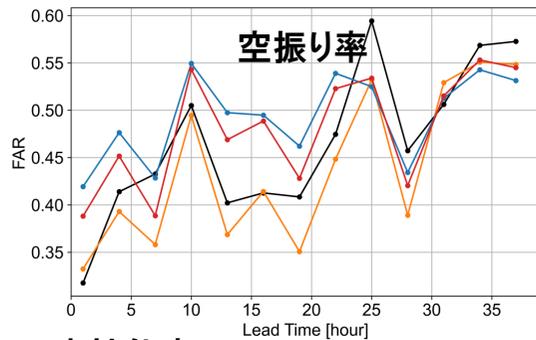
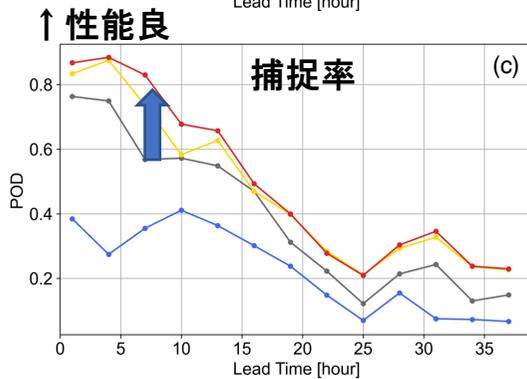
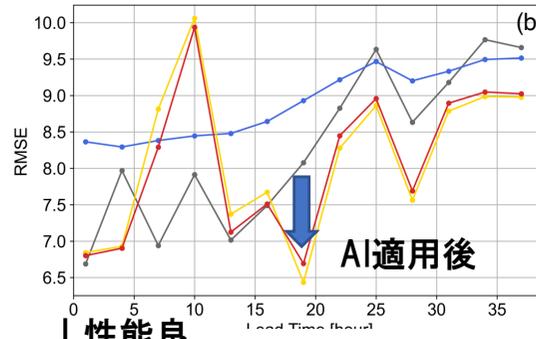
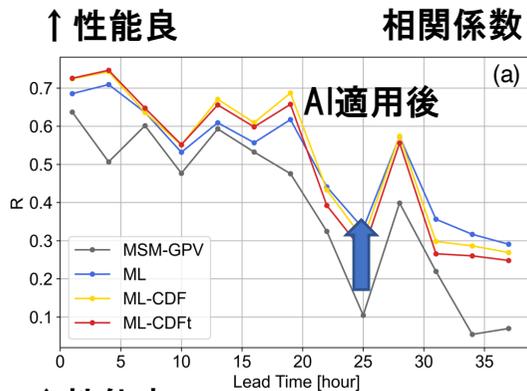
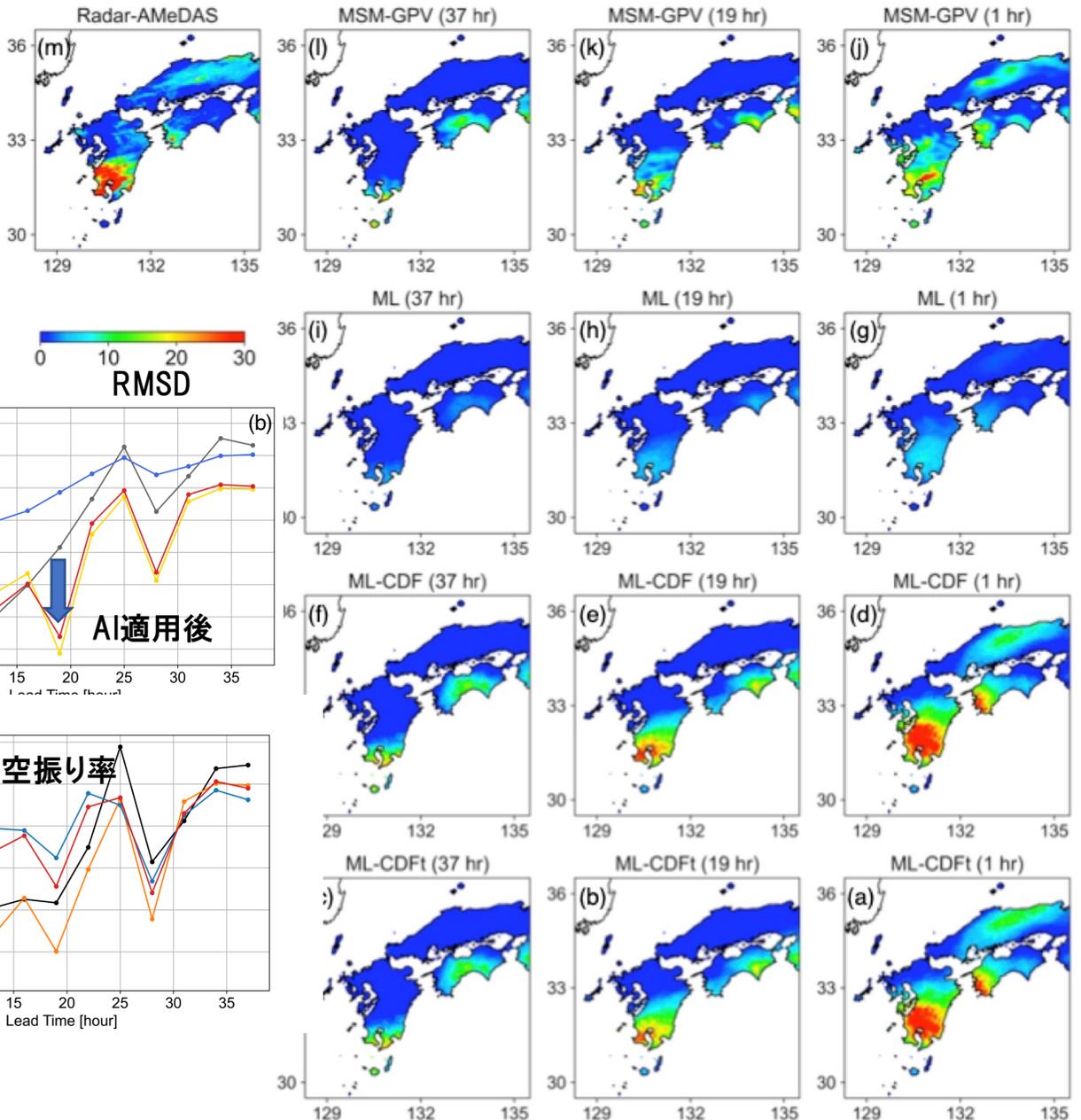


<https://www.eorc.jaxa.jp/water/>



# 2020年7月豪雨事例の場合

- FAR (空振り率) を除いて明らかな性能向上。
- FARが必ずしも良くならないのは、MLの特性で弱い雨が出やすく、それをQuantile Mappingで増やしているため。



横軸: 予測時間

# 確率的予測に向けたアンサンブルデータの活用

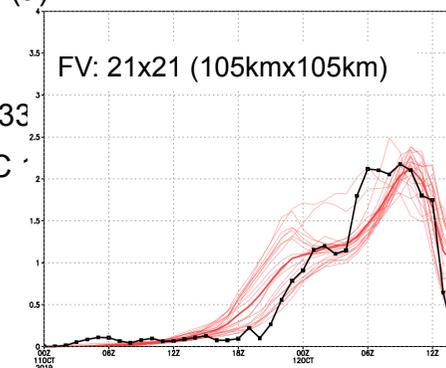
- 気象庁メソアンサンブル予測データ (MEPS) に、AIによる時空間補正を適用。

Temporal variation of the area-average precipitation in Tone river basin using MEPS data

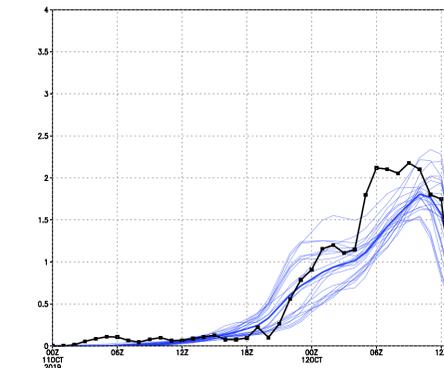
Initial time: 0UTC 11 Oct. 2019



(a) MLQM-Linear (hourly)



(b) MEPS-Linear (hourly)

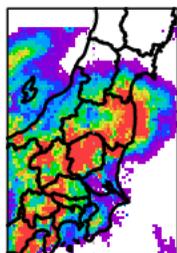


Spatial distribution of precipitation 33

Initial time: 0UTC

(Radar-AMeDAS)

OBS



ens-1

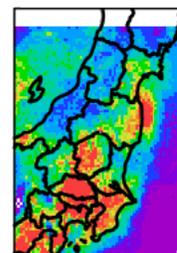
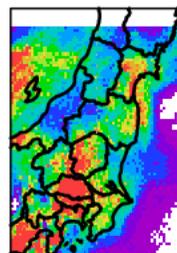
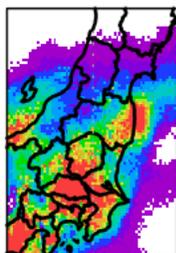
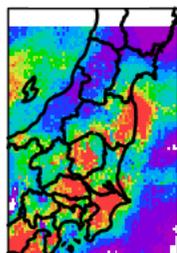
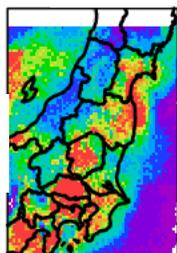
ens-2

ens-3

ens-4

ens-ave

MLQM-Linear



140E

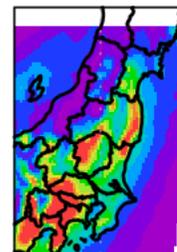
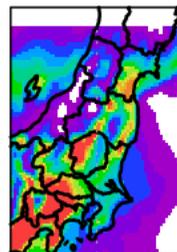
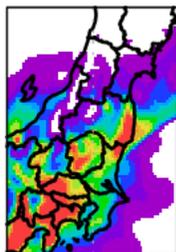
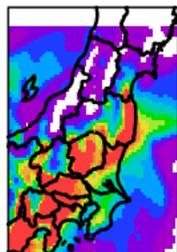
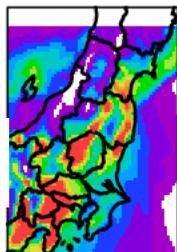
140E

140E

140E

140E

MEPS-Linear



140E

140E

140E

140E

140E

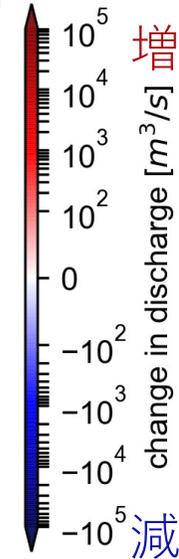
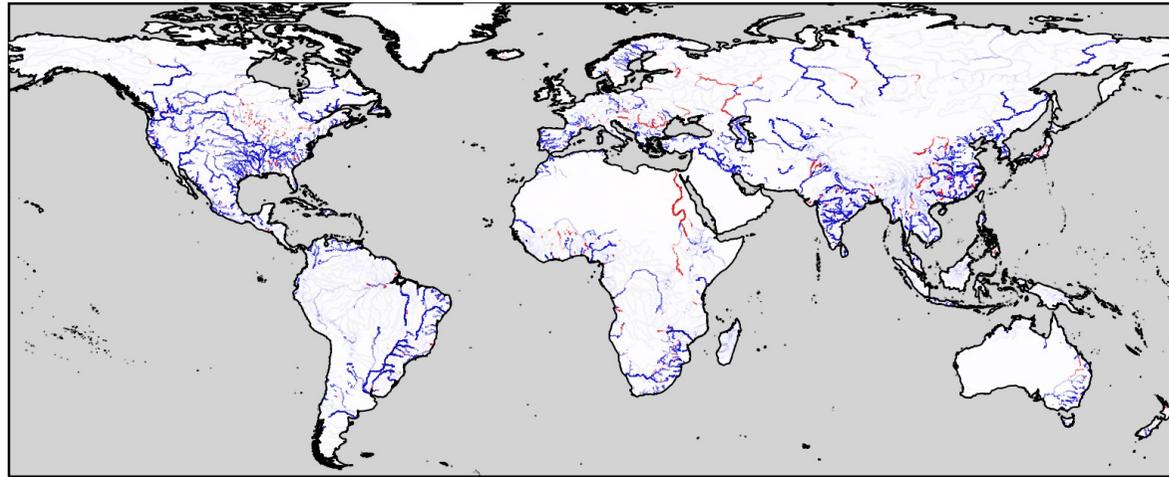


GRADS/COLA

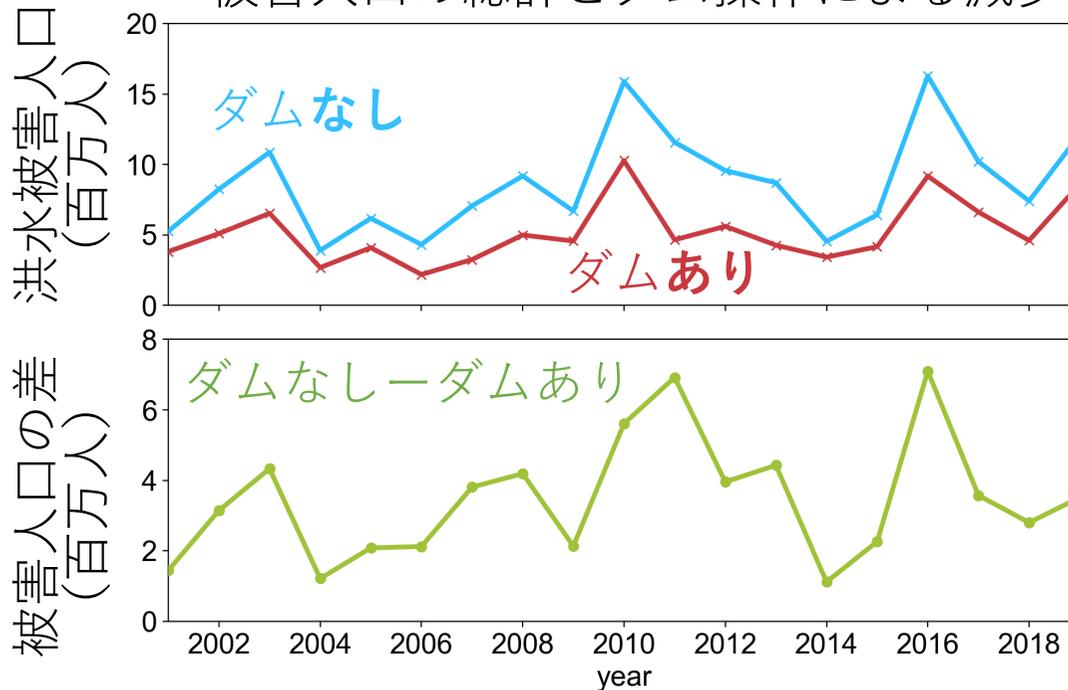
# ダムモデルのILS実装

(Hanazaki et al., 2022)

100年に一度の洪水流量の変化 (ダムありーダムなし)



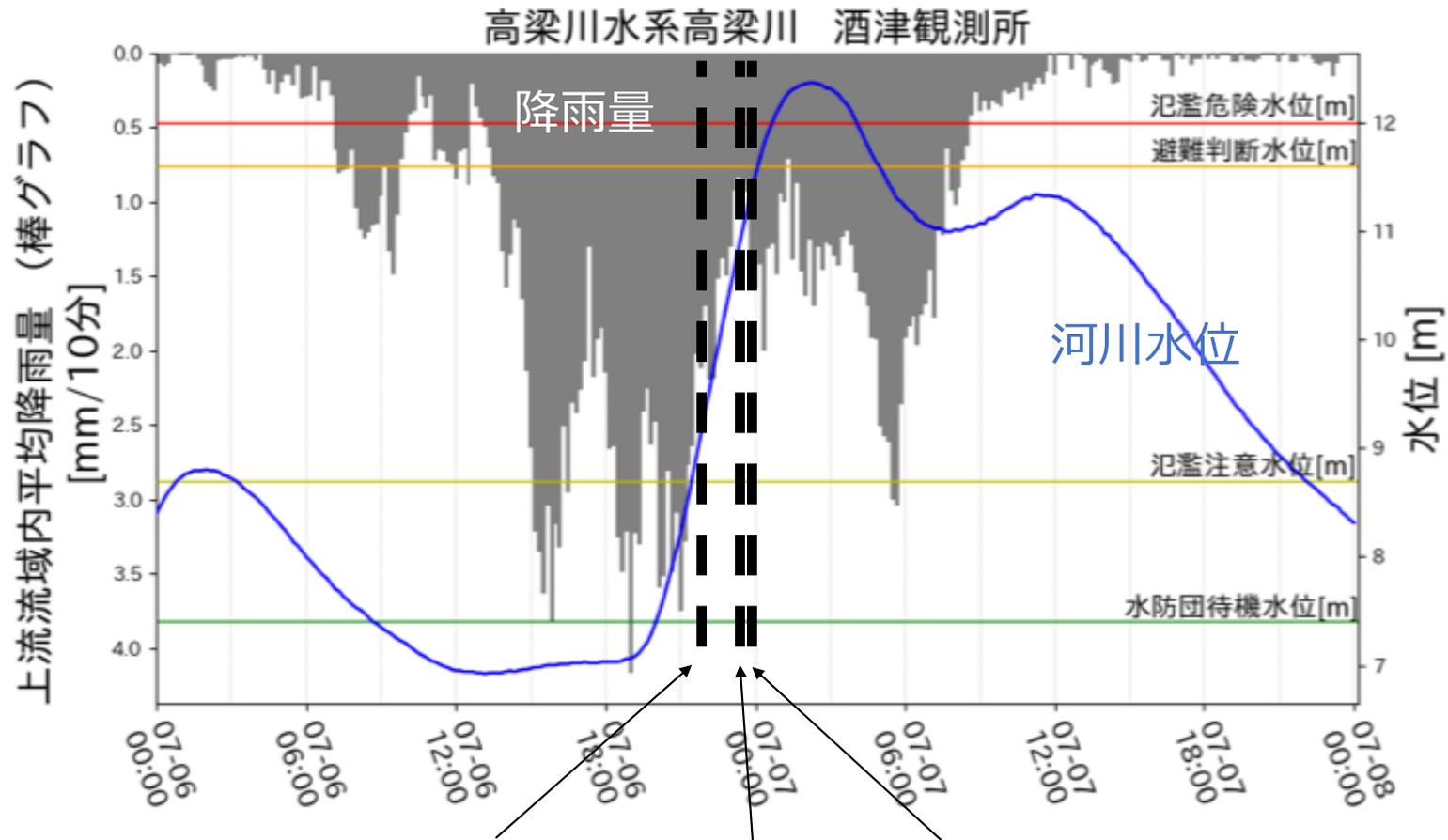
100年に一度の洪水に対する  
被害人口の総計とダム操作による減少



Boulangue et al. (2021)の  
手法に基づき推定

ダム操作により世界の多くの  
川で洪水流量が減少し、  
最大で年間約700万人が  
被害を免れることを推定

# 平成30年豪雨：岡山県真備町 高梁川・小田川洪水（2018年7月7日）



7月6日22時頃にレベル4（はん濫危険情報）、真備全域に避難勧告  
0時頃に大規模な氾濫が発生  
0:30にレベル5（はん濫発生情報）

23:45より避難指示

# 平成30年豪雨：岡山県真備町 高梁川・小田川洪水（2018年7月7日）

## 〔図1〕死者の8割が高齢者

真備町における水害の死者数。70代以上の高齢者が8割を占める。深夜に小田川などが破堤したことや、高い浸水深が広範囲にわたったことなどが、被害者が増える要因となった

（資料：取材を基に本誌が作成）

