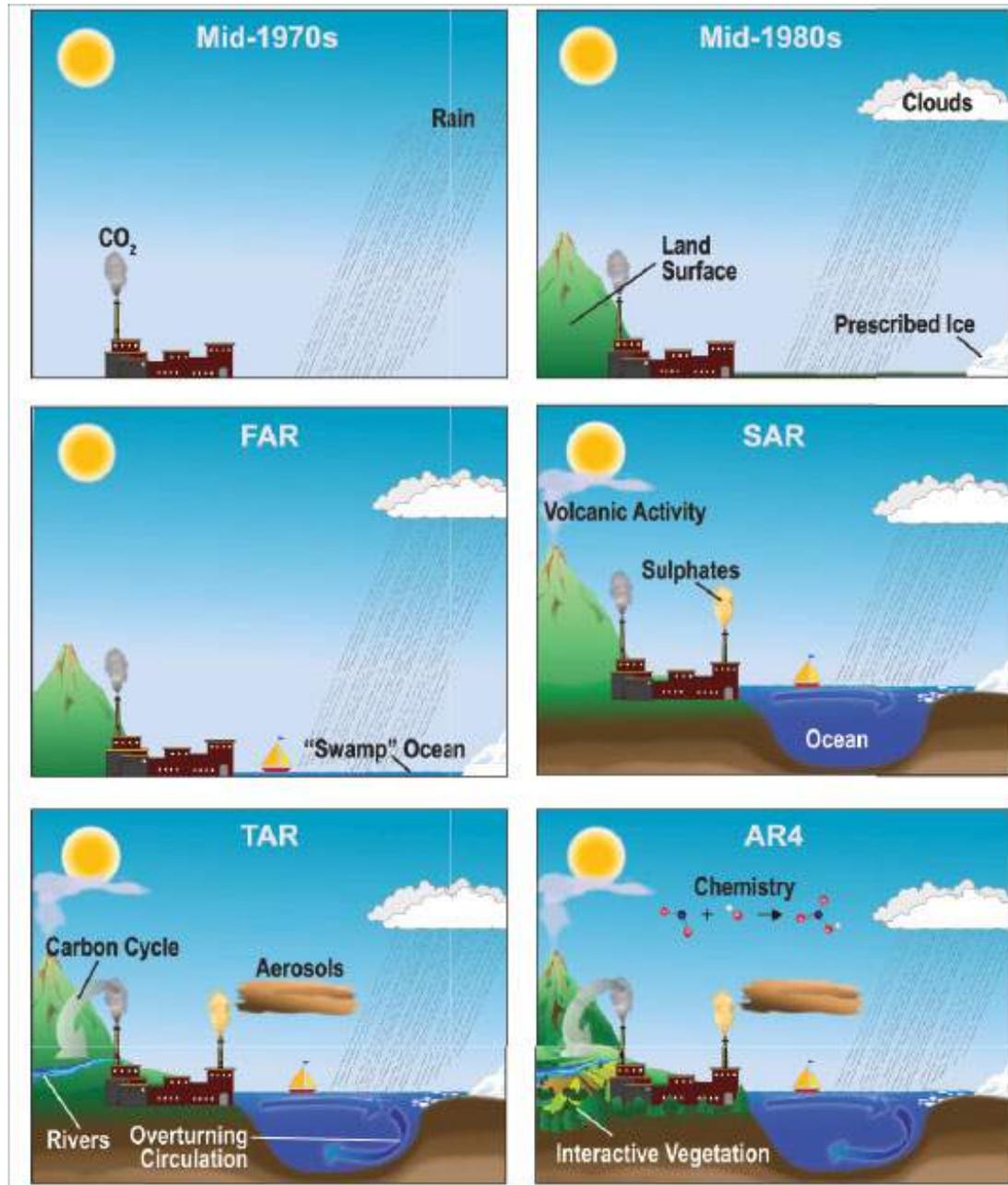
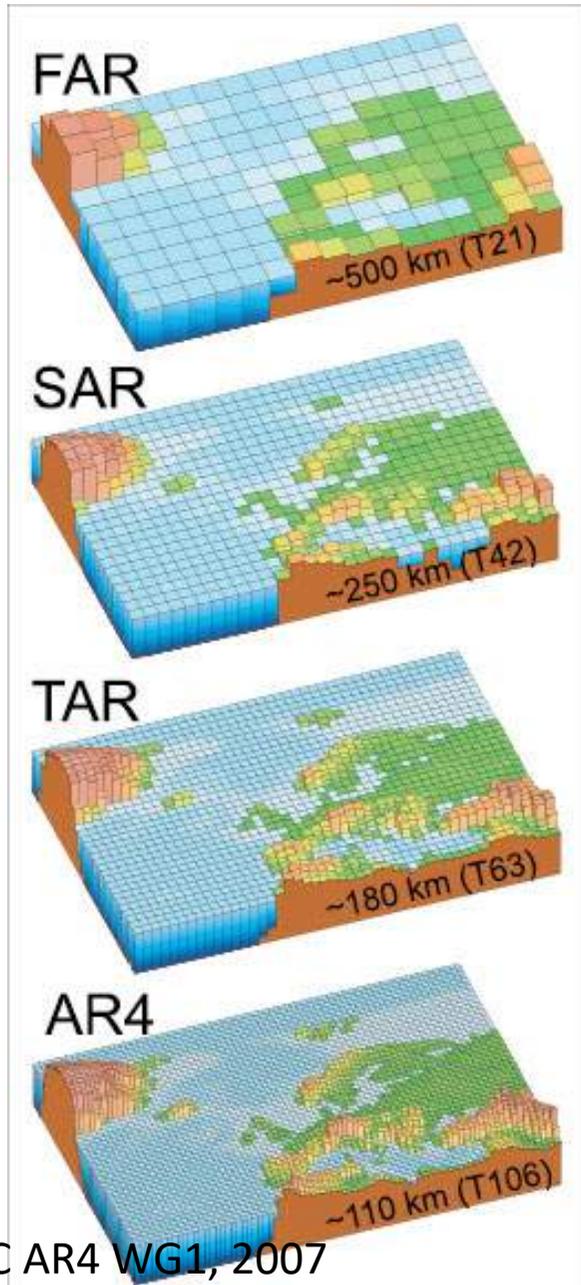


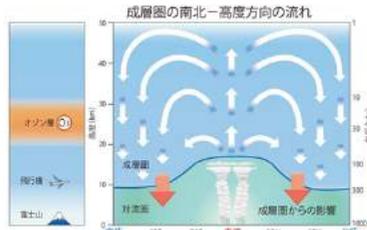
**気候変動を予測／再現するための  
地球システムモデルの開発  
～地球システムモデルでは何がわかるのか～**

東京大学生産技術研究所 芳村圭

# IPCCレポートと気候モデルの進化



# 地球システムモデル (ESM) とは？

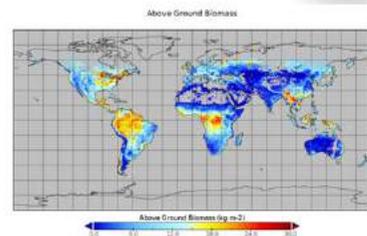


素過程理解と先端要素モデル  
開発 (例：成層圏)

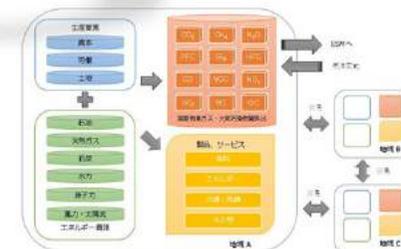
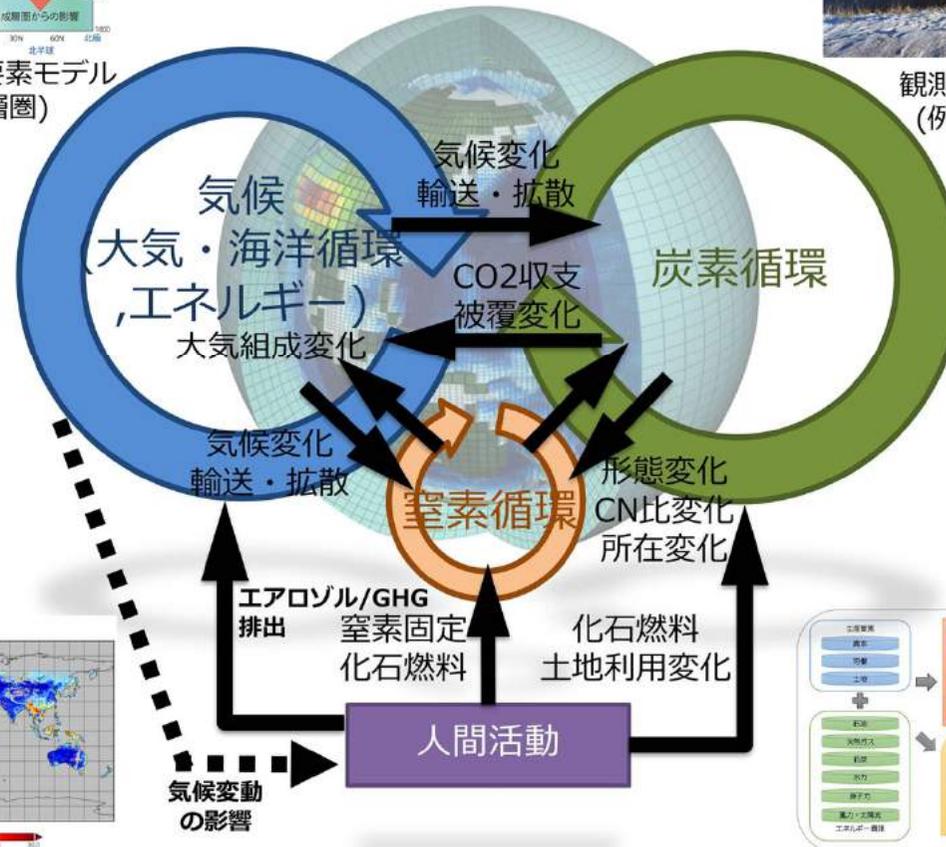


観測研究との連携  
(例：永久凍土)

<https://www.jamstec.go.jp/cema/j/esm/>



衛星データを用いた評価解析



社会経済モデルとの連携

大気海洋陸面結合モデルに炭素循環をはじめ、様々な要素との相互作用を組み込んだ気候・環境予測及び再現のためのモデル。

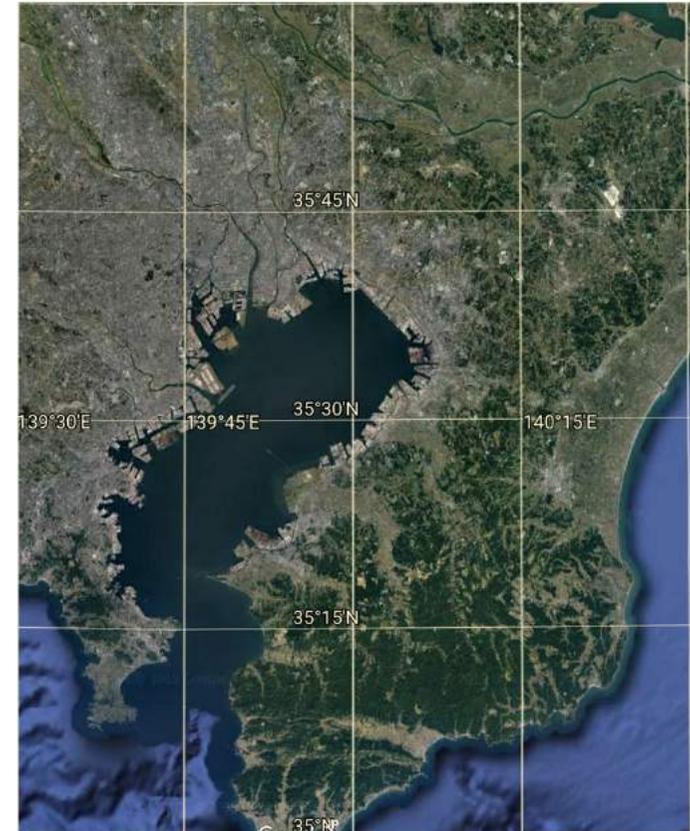
# ESMにおける陸域固有の問題： 空間の不均一性&人間活動

## 背景

- 陸域は大気・海洋に比べて空間的に複雑/多様なため、大気/海洋に対して、相対的に高解像度である必要がある
- 人間活動は、陸域そのものを大きく改変しており、自然プロセスだけでは表現できない。

## 目的

- 適切な格子系で高解像度化と詳細な要素モデルの簡易な実装を実現しつつ、大気・海洋モデル、その他のモデルとも結合可能なフレームワークを開発する。
- ESMの下部境界の一部としてだけでなく、様々な用途（e.g., 洪水予測）に耐えるものを構築する。（後述）

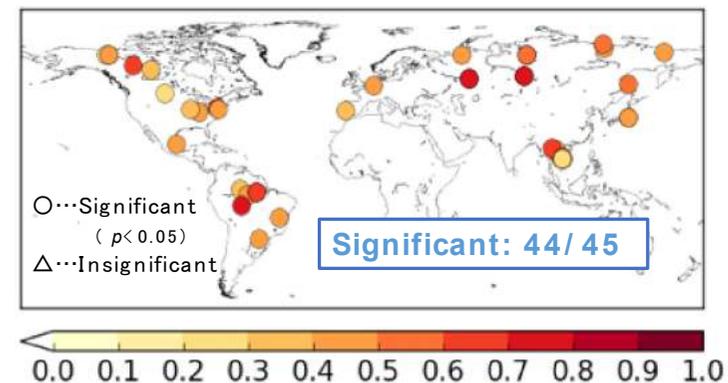
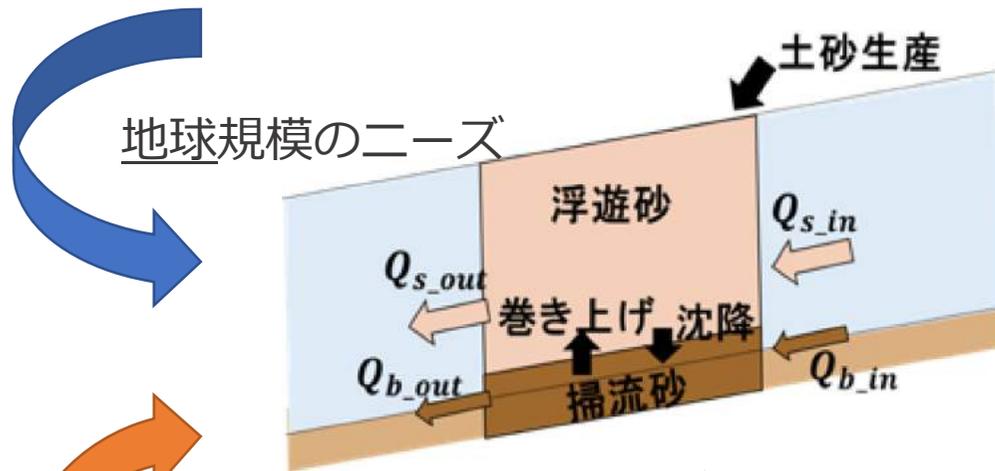


1° x 1° (約100km x 100km)

©Google Earth

# 開発指針：地球システムスケールで重要かつ、地域・局所スケールでも役立つ

- 例：土砂動態モデリング→河川沿岸環境
  - 地球規模での物質循環の観点から重要。地形形成の観点からも重要。



【計画】 3-1 気候変動による水産業及び生物生息基盤(藻場、アマモ場等)への影響調査

【分野:水産業、対象地域:石川県、三重県】

地域適応コンソーシアム中部地域事業

目的

- 気候変動に伴う気温水温の上昇等の現象により、海域の水質、水温が変化し、養殖マガキ等の斃死\*といった水産業への影響が顕在化しており、今後生物の生息基盤となるアマモ等

河川・沿岸環境に関する地域適応コンソーシアム事業等からのリアルなニーズ

影響調査

調査後、秋の産卵までの特徴を持つ。このころ、サクラマスは越冬に加え、山形県特有の産卵を行う。

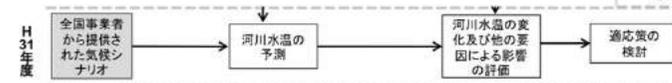
調査の検討

図. マガキ(上)およびアマモ(右) (日本ミクニヤ(株)撮影)

サクラマス

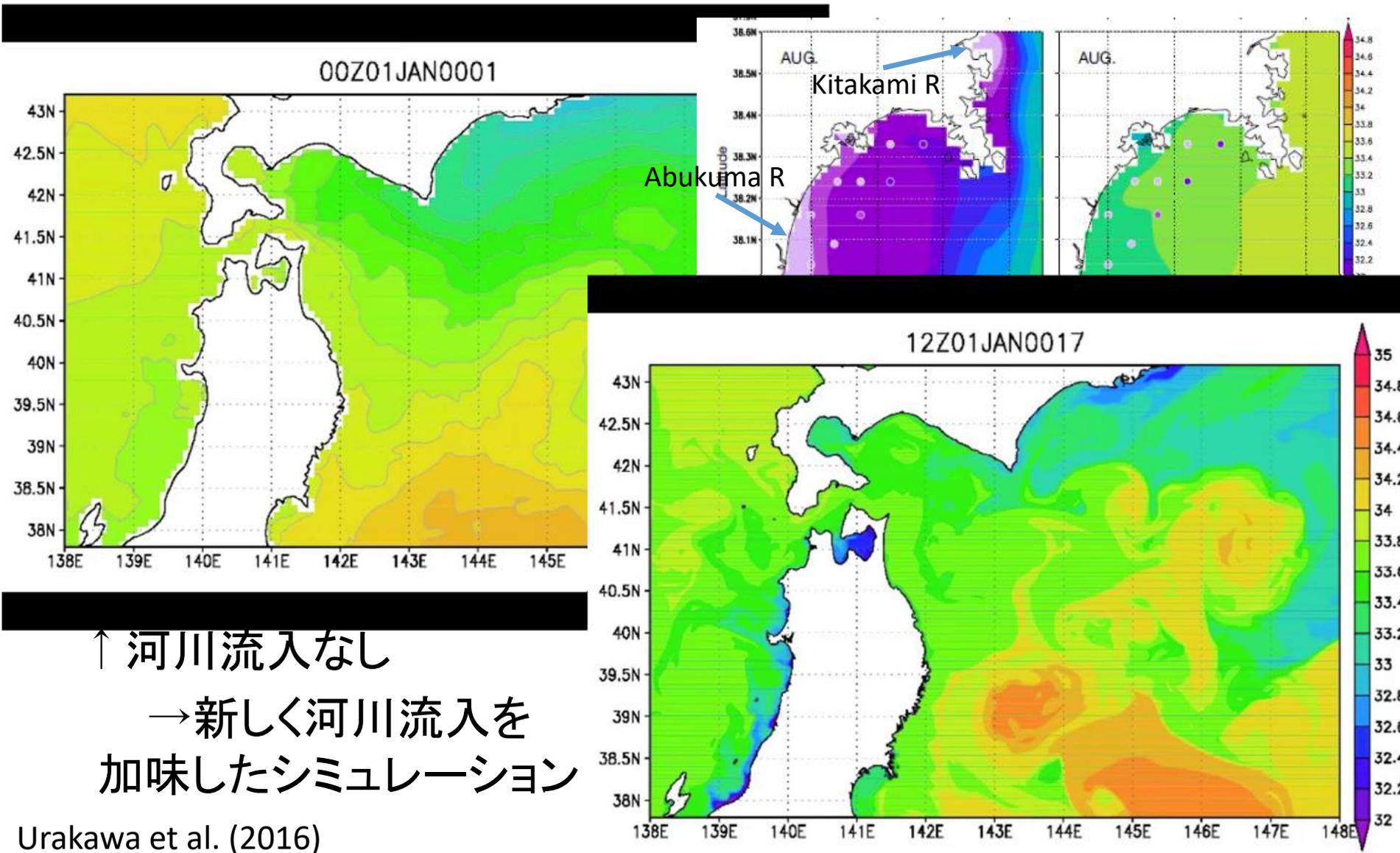
出典: 山形県水産振興課提供

<http://www.adaptation-platform.nies.go.jp/lets/conso/index.html>



# 開発指針：地球システムスケールで重要 かつ、地域・局所スケールでも役立つ

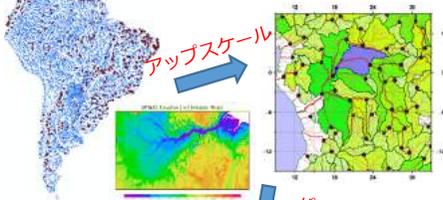
- 例その2：海洋における淡水流入→沿岸域での養殖漁業



# 統合陸域シミュレータ(ILS) 開発

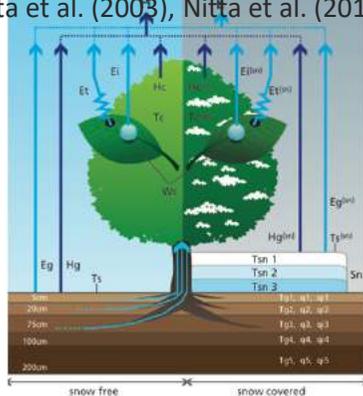
## 基本理念

- ・最新のスタンドアロンモデルを、最小限のコード改変で移植。
- ・それぞれのモデルを任意の解像度・時間ステップで動かしながら、必要に応じてカプラがデータを送受信・リグリッドする。



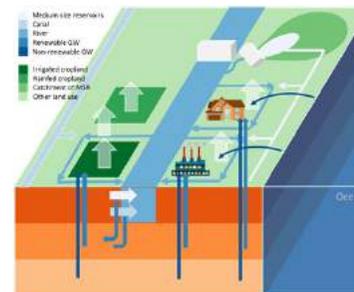
## 1次元化した陸面過程モデルMATSIRO

Takata et al. (2003), Nitta et al. (2014)



## その他、

- ・土砂輸送モデル
  - ・水温・水質モデル
  - ・地下水モデル
  - ・斜面流出モデル
  - ・治水ダム操作モデル
- などが鋭意開発中



## 人間活動水資源モデル H08 (Hanasaki et al., 2008)

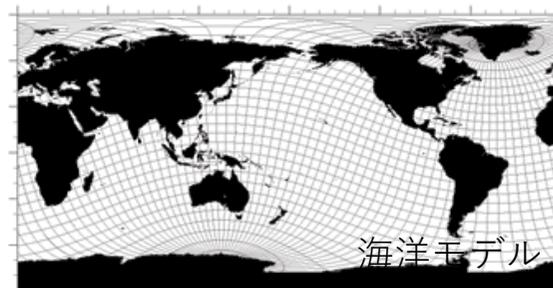
## 汎用カプラ

(Jcup; Arakawa et al., 2011)

I/O モジュール



大気モデル

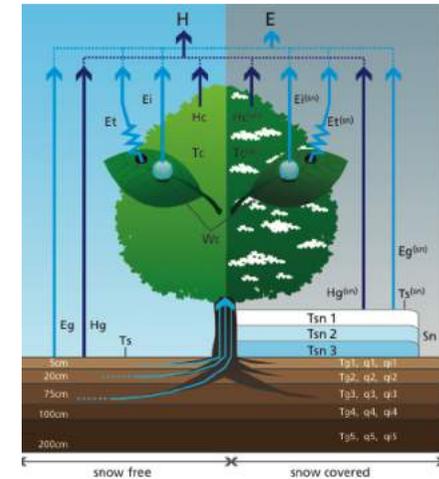


海洋モデル

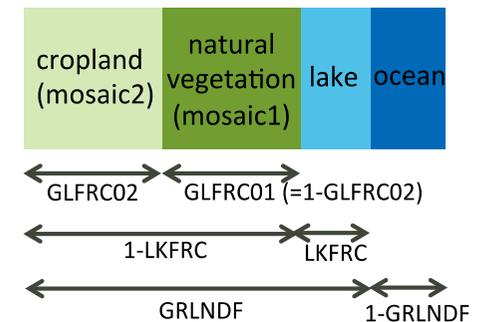
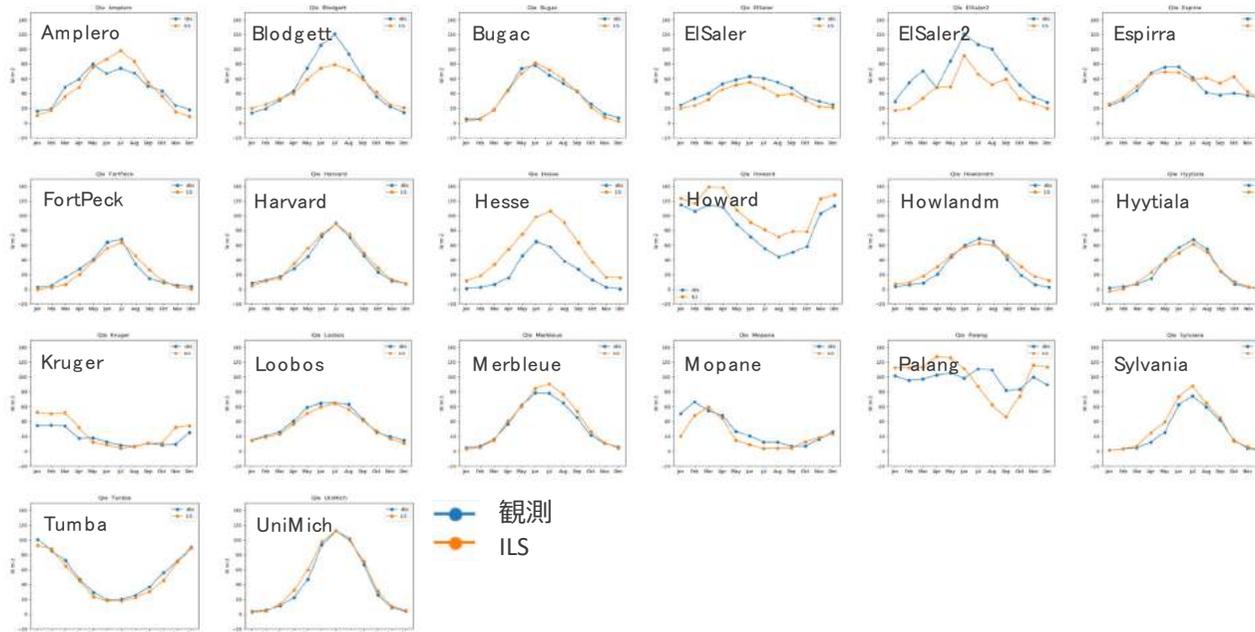
全球/領域の陸の過去復元・実時間解析/予報・将来気候予測等様々な目的に利用

# MATSIRO

- 古く（90's）からあるMIROC・NICAMの陸モデル
- 影響評価研究にも利用されてきた
- 土壌6層（14 m）、積雪3層、単層キャノピーから成り、様々な陸域の物理過程（キャノピーの放射伝達、バルク係数、積雪、流出、土壌特性等）を含む

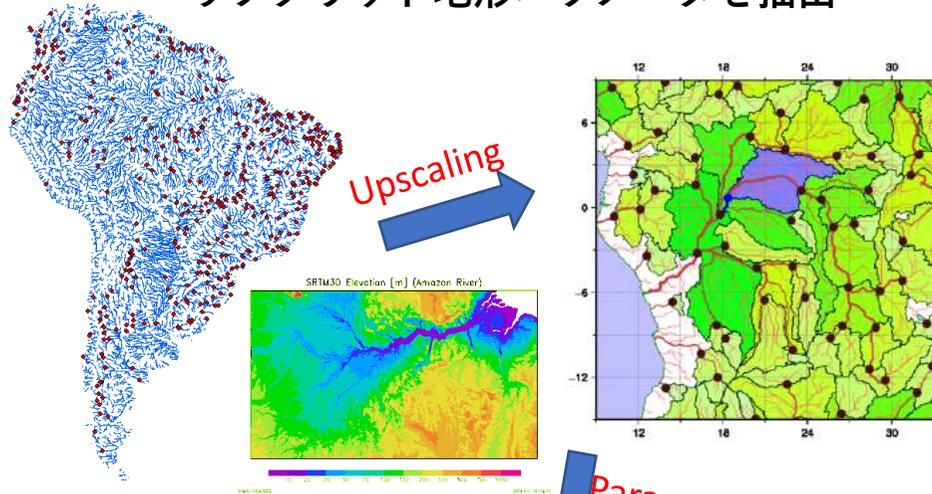


顕熱フラックスの検証



# CaMa-Flood

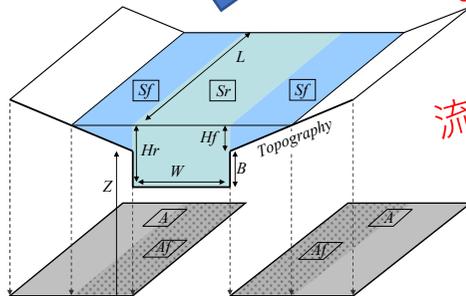
高解像度DEMから河川モデルの  
サブグリッド地形パラメータを抽出



| Parameter                    | Symbol                 |
|------------------------------|------------------------|
| Channel Elevation            | $Z$                    |
| Channel Length               | $L$                    |
| Channel Width                | $W$                    |
| Embankment Height            | $B$                    |
| Catchment Area               | $A$                    |
| Floodplain Elevation Profile | $f(\text{Topography})$ |

| Variables          | Symbol |
|--------------------|--------|
| River Storage      | $S_r$  |
| Floodplain Storage | $S_f$  |
| River Water Depth  | $H_r$  |
| Floodplain Depth   | $H_f$  |
| Inundated Area     | $A_f$  |



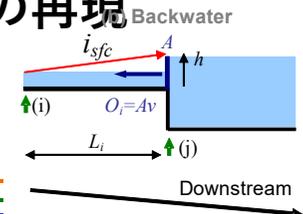
地形パラメータをもった河道・氾濫原貯水槽  
水深と氾濫面積も陽に予測

Diffusive Wave Equation  
水面標高の調整・逆流の再現

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + i_0 - i_f = 0$$

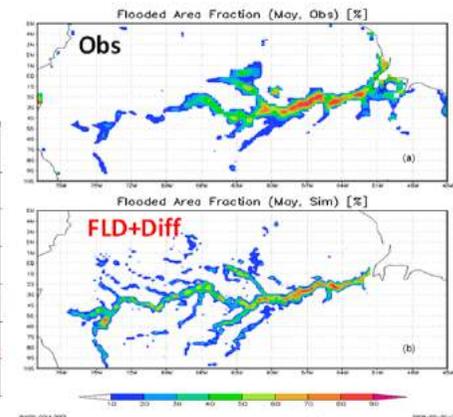
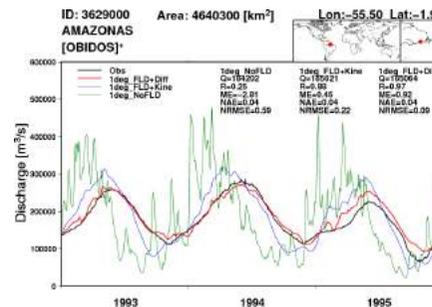
Dynamic     Diffusive     Kinematic

St. Venant Momentum Equation



流量に加えて水面標高と氾濫面積を予測  
衛星観測と比較可能

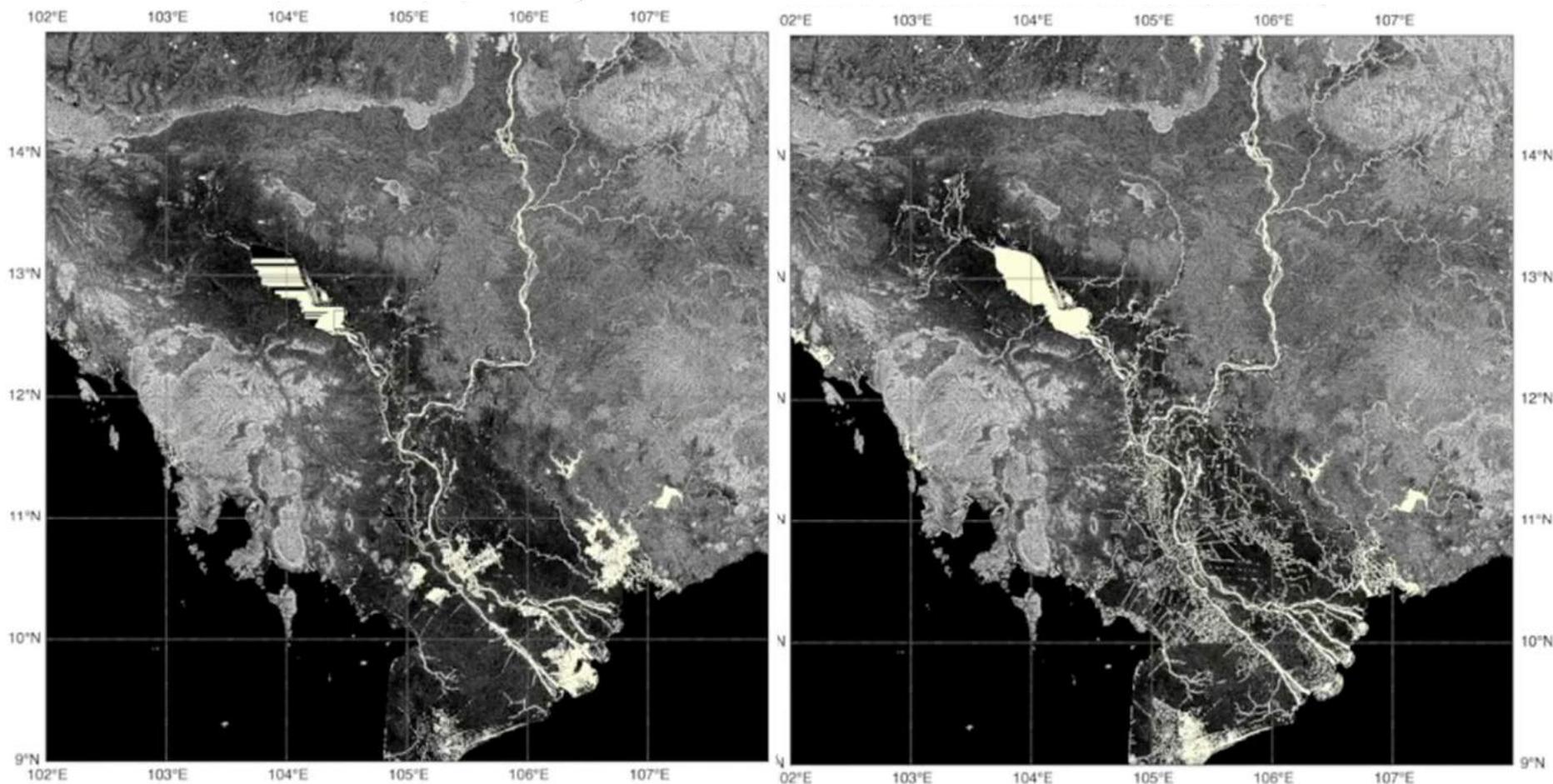
流量・水面標高・氾濫面積の予測



# 最新地形を統合した河川モデルがほぼ完成

[Old] SRTM + HydroSHEDS

[New] MERIT Hydro

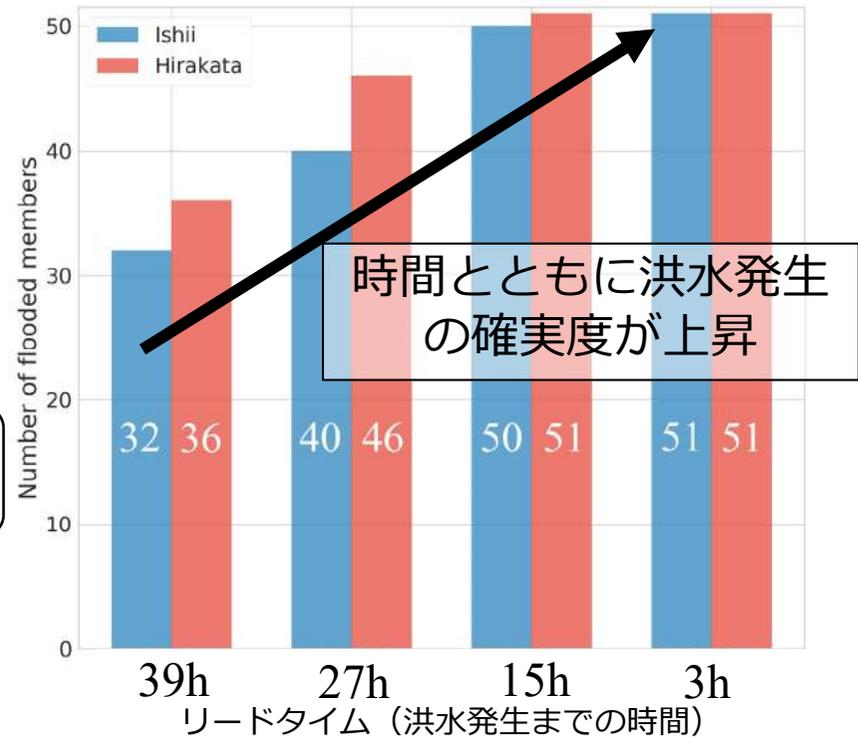
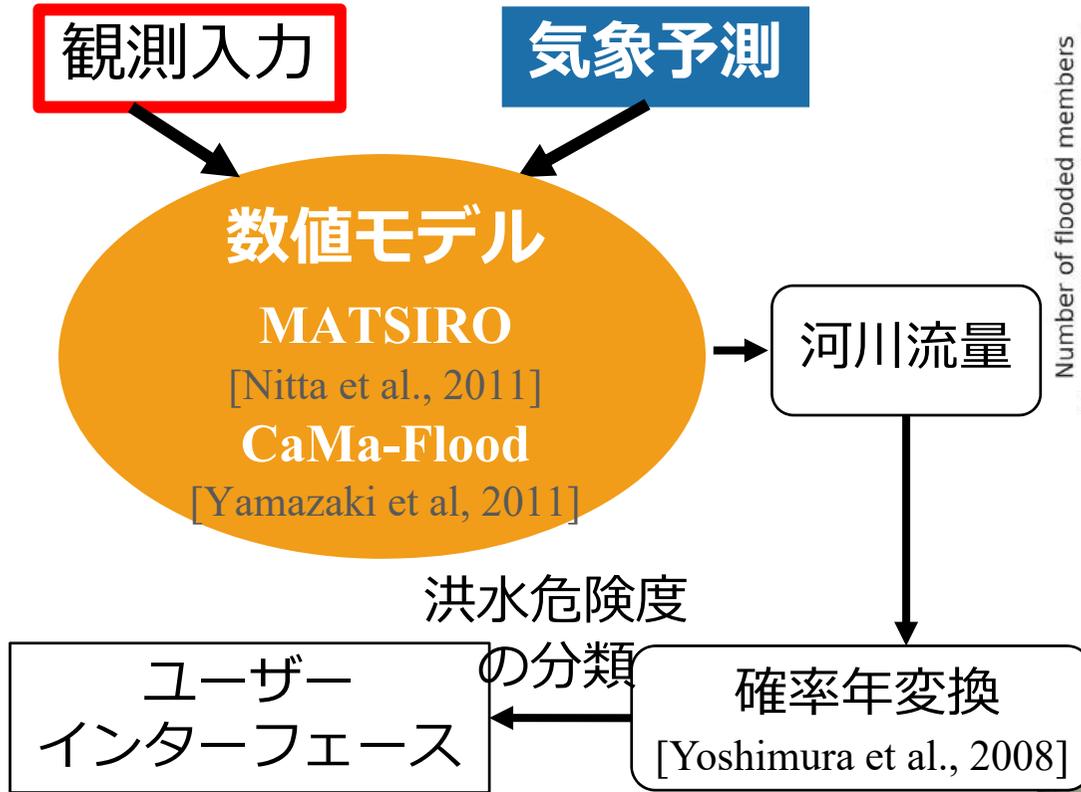


CaMa-Flood simulation at 0.1deg resolution + Diagnostic downscaling to 3sec

ECMWFの統合予測システムIFSへの導入決定。作業進行中。  
(UK MetOfficeのHydro-JULESからもモデル結合への協力打診あり)

山崎大@東大

# 2015年鬼怒川豪雨での事例



各リードタイムにおいて基本高水を超える予報をしたメンバーの数

2015年9月に発生した鬼怒川洪水

- 10日午前6時ごろに越水による浸水
- 同日午後1時ごろには破堤が発生

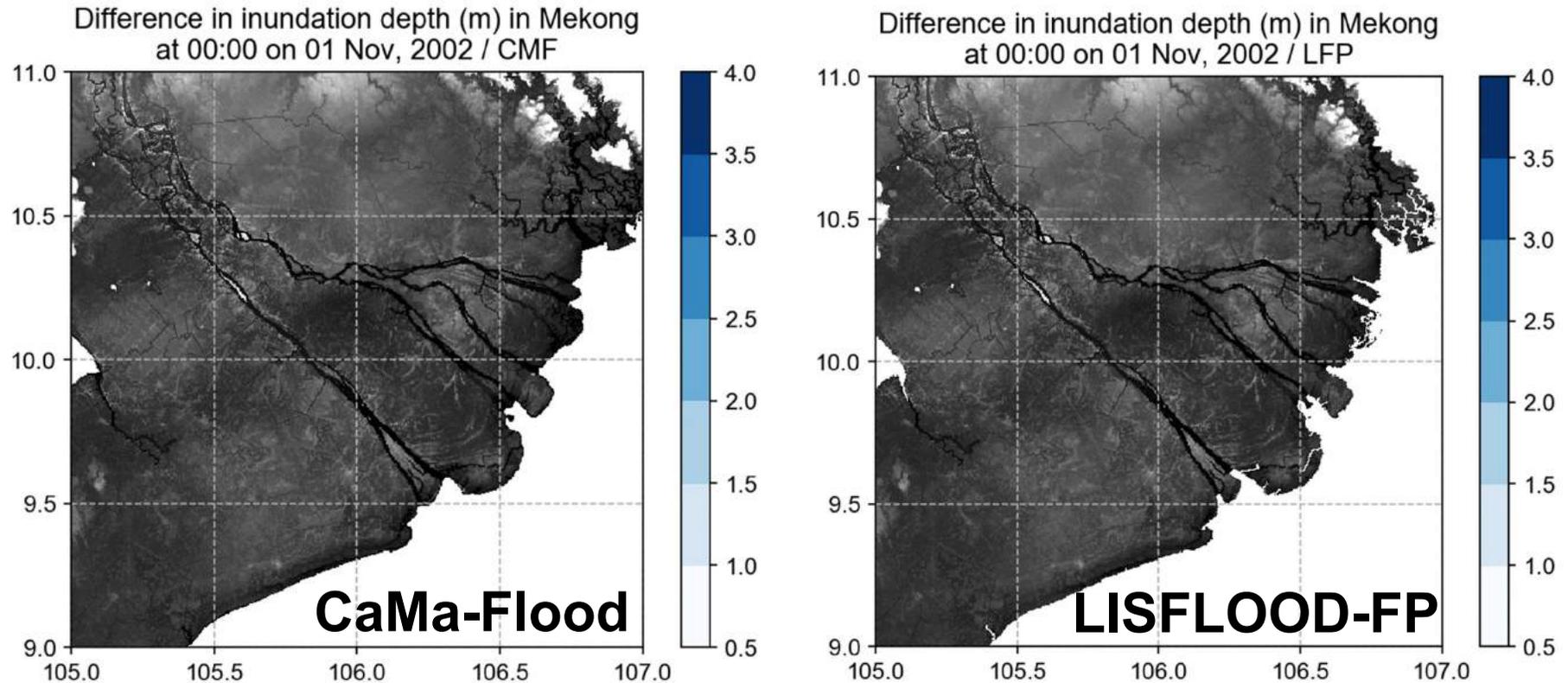
システムは39時間前に洪水発生を示唆、15時間前には高い確度で洪水を予測した。



2015/9/9 3pmを初期値とした予報による危険度の表示 (バーが高いほど、より危険)

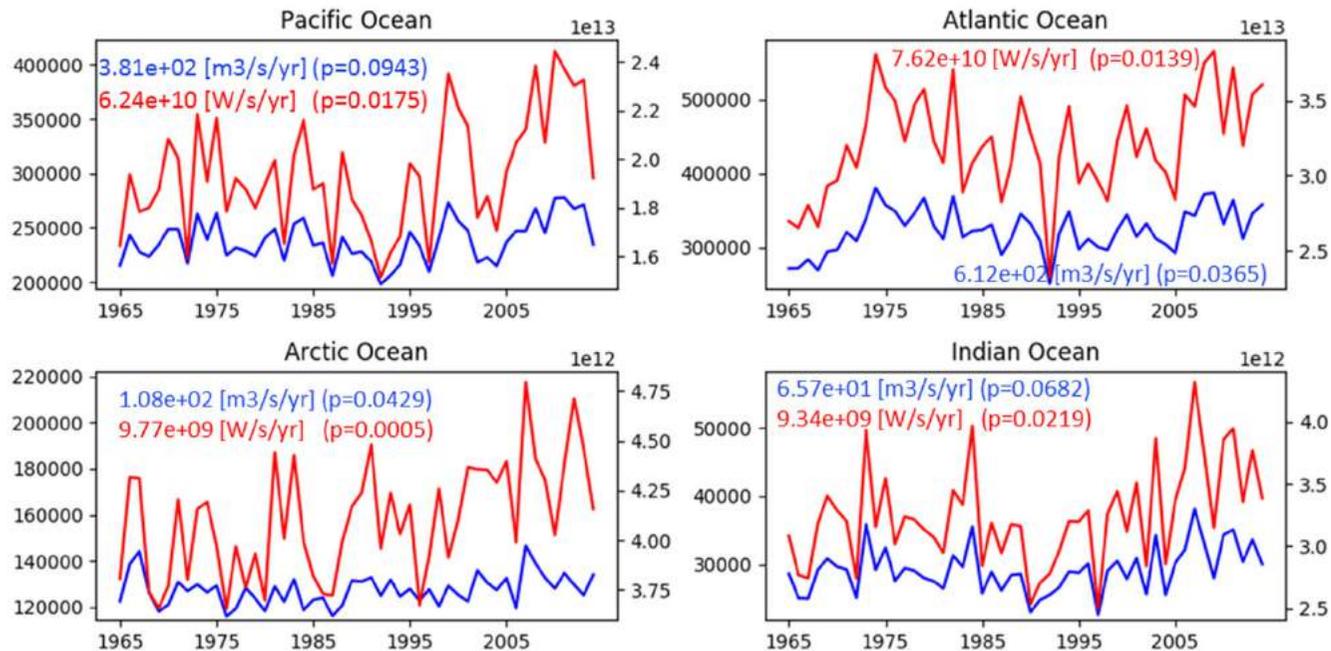
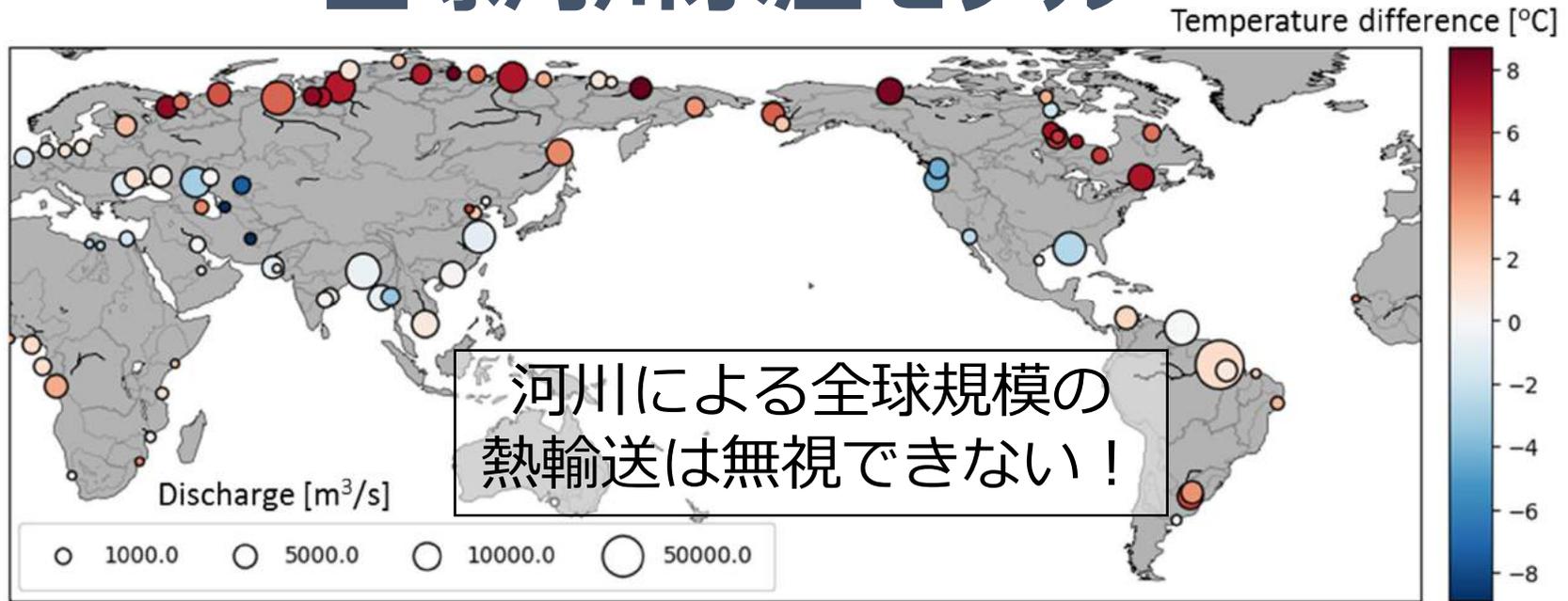
# これからの開発の取り組み

# 二次元氾濫モデルとの結合（メコンでの高潮浸水）



- 左：全球河川・海岸結合モデル [Ikeuchi et al., 2017]
  - 世界で初めて全球規模で河川洪水・高潮複合水害シミュレーションを実現
  - 一方，全球モデル格子内の水動態が適切に表現されず
- 右：二次元氾濫モデルとの結合
  - 沿岸部や小河川における高潮遡上を表現

# 全球河川水温モデル

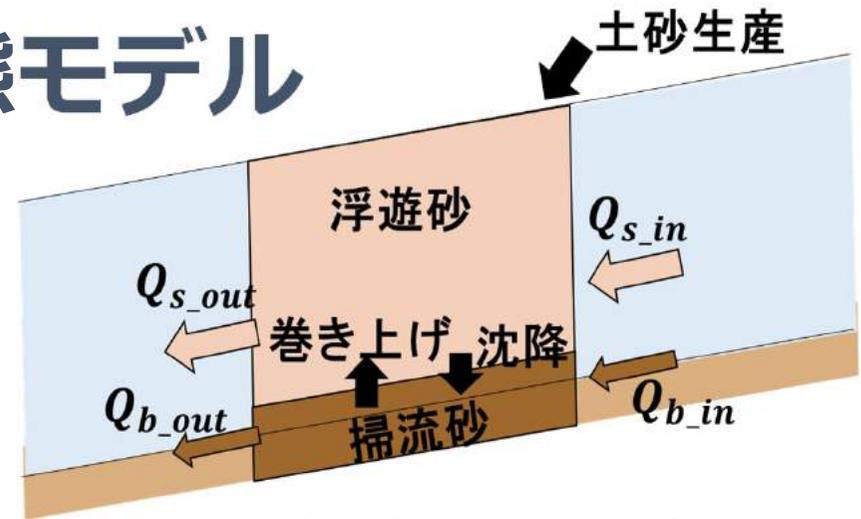


大洋ごとの淡水流入量[m<sup>3</sup>/s]と熱流入量[W]のトレンド

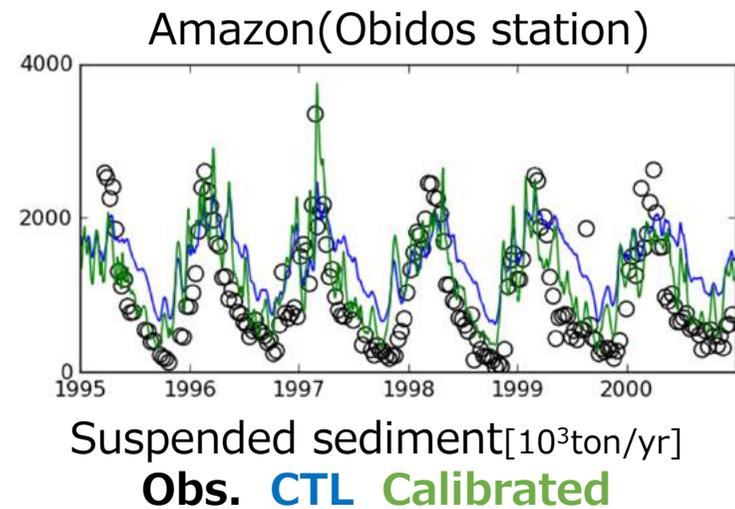
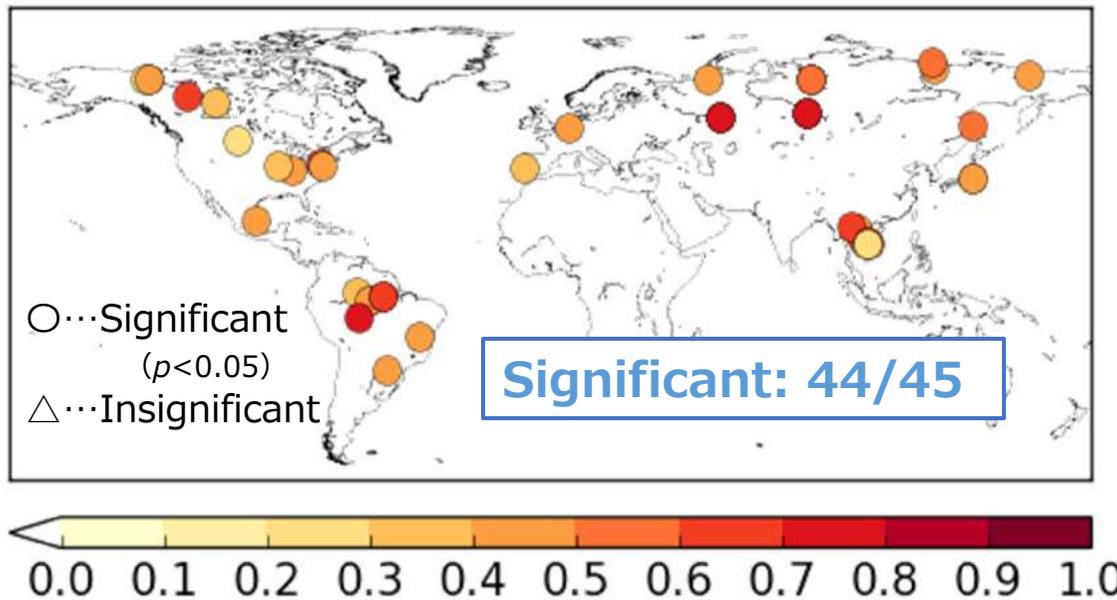
# 全球土砂動態モデル

## 土砂動態のモデル化

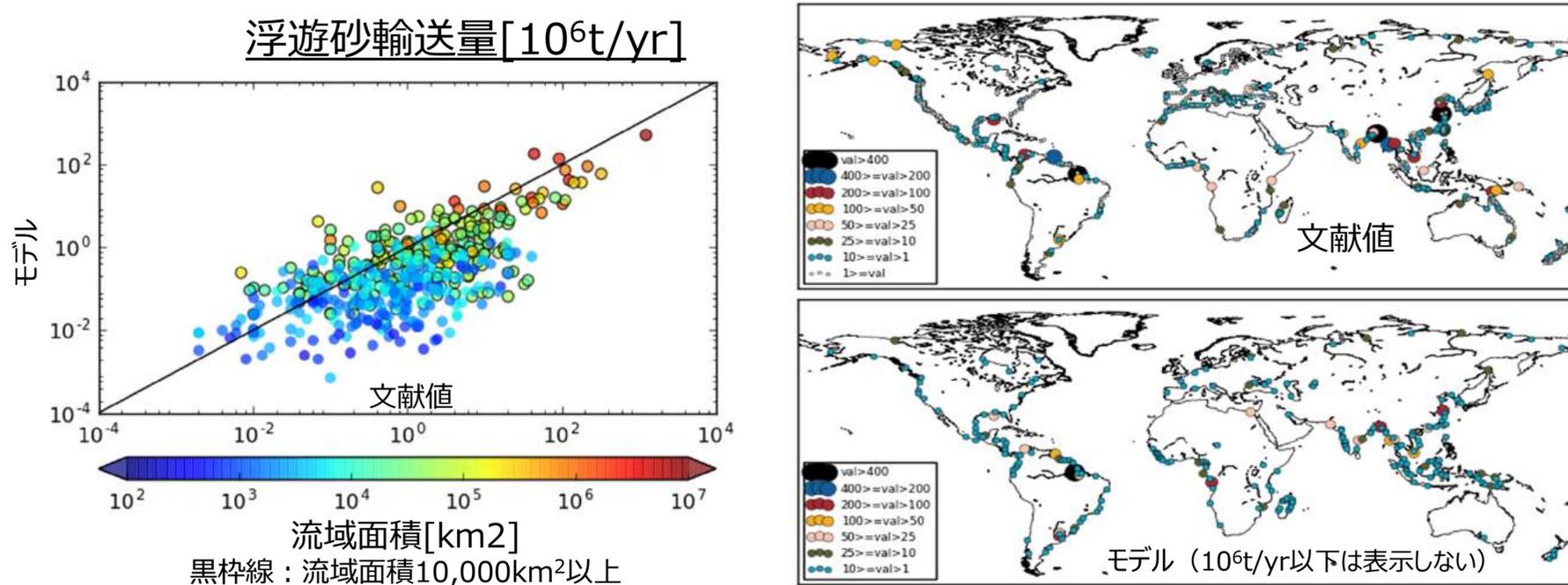
- ✓ ILSのフレームワークに追加
- ✓ 降水量、河川の諸変数を入力値とする
- ✓ 浮遊砂（水とともに流下する砂）、掃流砂（河床付近を移動する砂）を考慮



土砂動態モデルの概念図

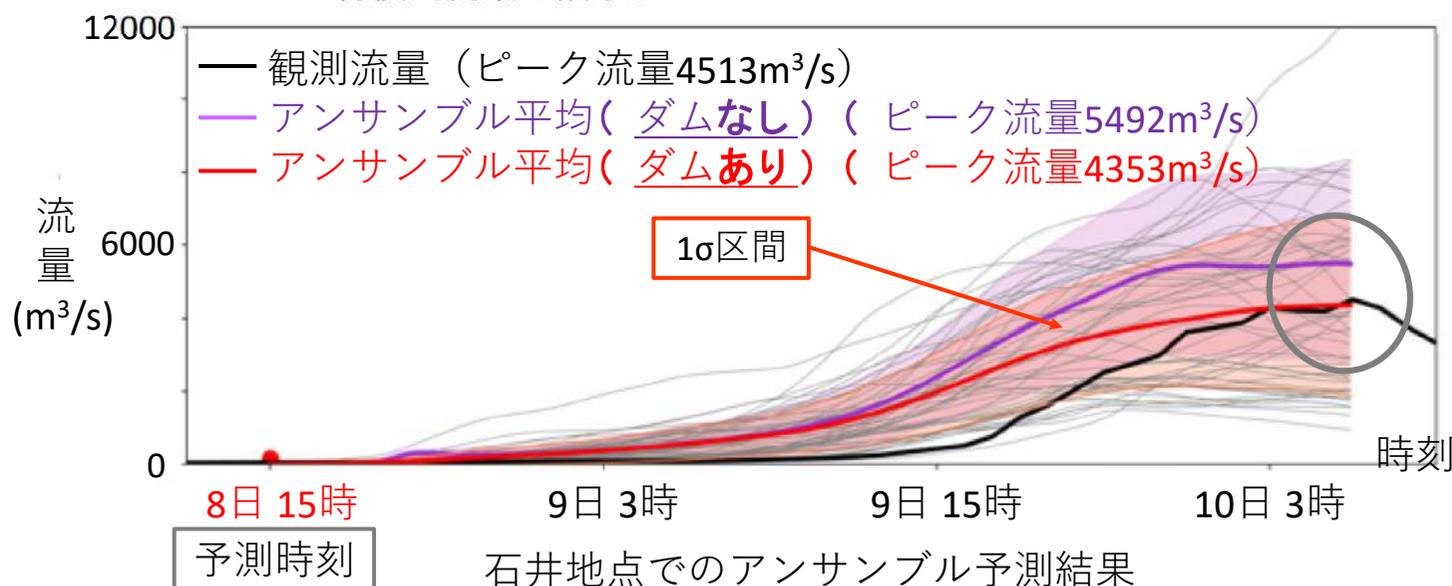
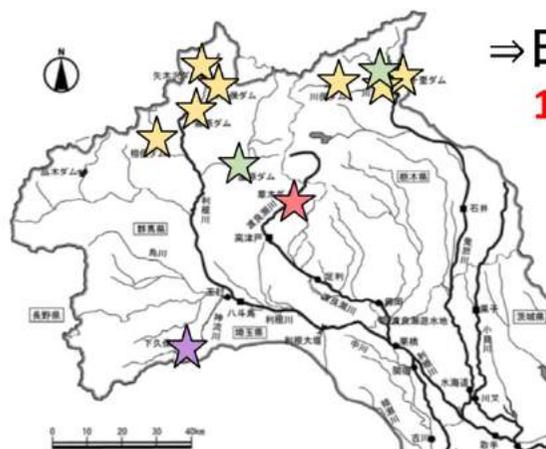


# 全球土砂動態シミュレーション結果



- 過去の推計値 (Milliman&Farnsworth, 2011) との比較
  - モデル内の河口での年平均河川流量 $>1\text{m}^3/\text{s}$ の流域のみ
    - 解像度が粗く、入力の降水量/流出量がない
  - 相関係数：0.92、NASH係数：0.63
    - 空間分布はよく再現できている
  - 合計するとモデル： $1800 \times 10^6\text{t/yr}$ 、文献値： $4400 \times 10^6\text{t/yr}$

# 全球治水ダム操作モデル（開発中）



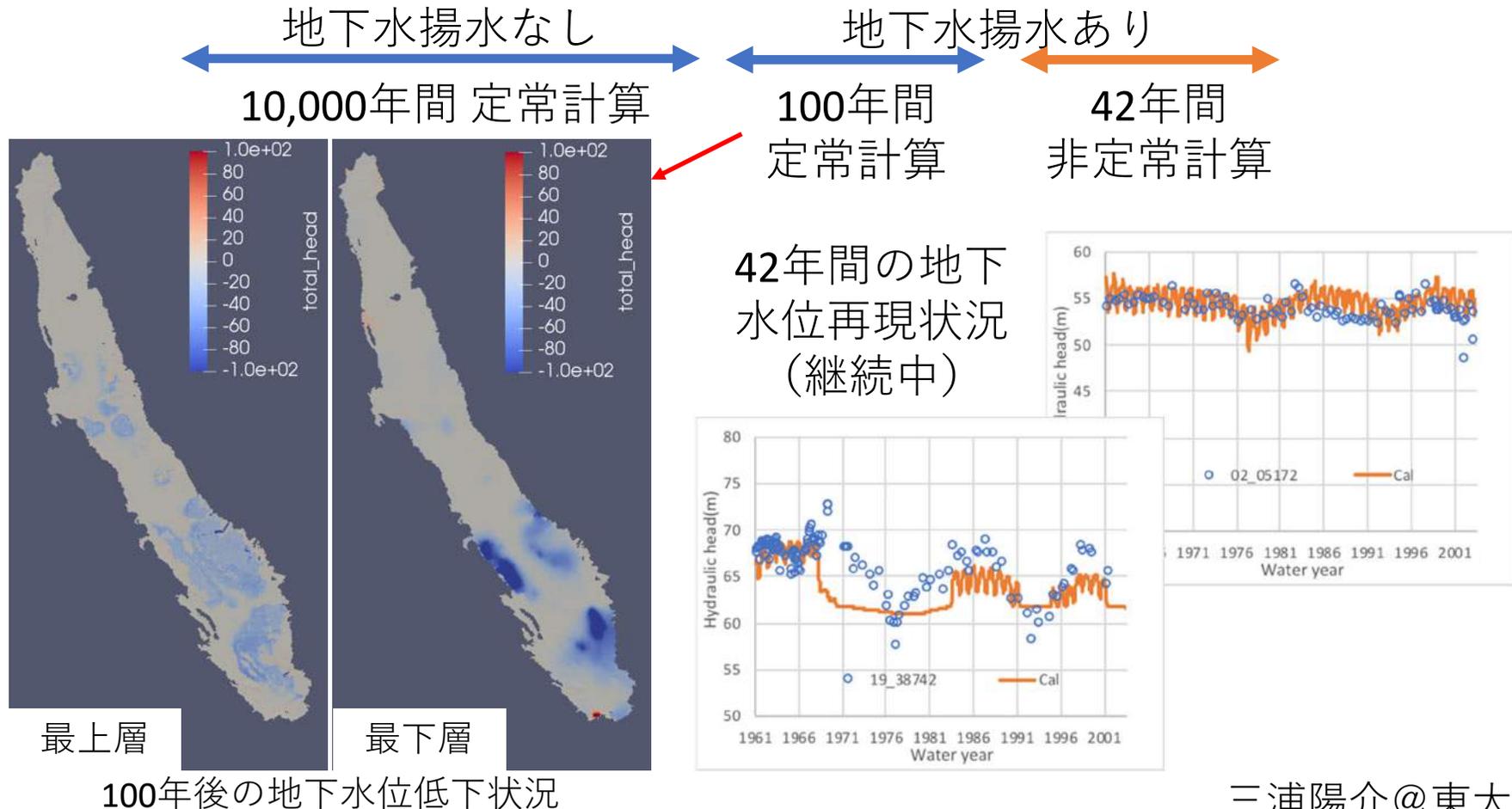
洪水時のダム操作ルール実装により、  
過大評価であったピーク流量の精度が改善

# 全球地下水三次元流動モデル（開発中）

- 様々な時空間分布での複雑な地下水流動を表現することを目指す  
（地表と地下の相互作用、人間活動や地球温暖化による流動変化）

⇒ 飽和・不飽和/不圧・被圧を一体的に扱う方程式を採用

入力：涵養量、河川水位、地下水揚水など 出力：地下水位、水収支、流速



# MIROC-INTEG (INTEGrated Terrestrial Model)

横畠、木下、櫻井、Pokhrel, 伊藤、花崎、藤森、高橋、山形、江守ほか

MIROC-ES2L  
に置き換え予定

## 気候 (陸面過程モデル MATSIRO)

陸面過程モデルを用いて、土壌温度・水分などを計算。

全球0.5度  
～ 1度

## 水資源 H08

水資源モデルを用いて、人間活動(農業や工業)による水の利用を計算。  
河川からの灌漑を考慮。  
窒素負荷なども検討。

## 水の利用 (農業・工業・生活)

農作物収量

肥料投入

森林火災  
によるCO2排出

浸食

土地利用による  
CO2排出

温室効果ガス  
収支

森林伐採

## 生態系 VISIT

陸域生態系モデルを用いて大気-植物-土壌の間の物質(C, N)分配を計算。  
温室効果ガス収支の変化などを求める。

## 作物 PRYSBI2

農作物生産モデルを用いて、穀物収穫量を計算。温暖化対策のためのエネルギー作物の栽培などを考慮。  
温室効果ガス排出や環境窒素負荷などを求めることを検討。

## 土地利用 TELMO

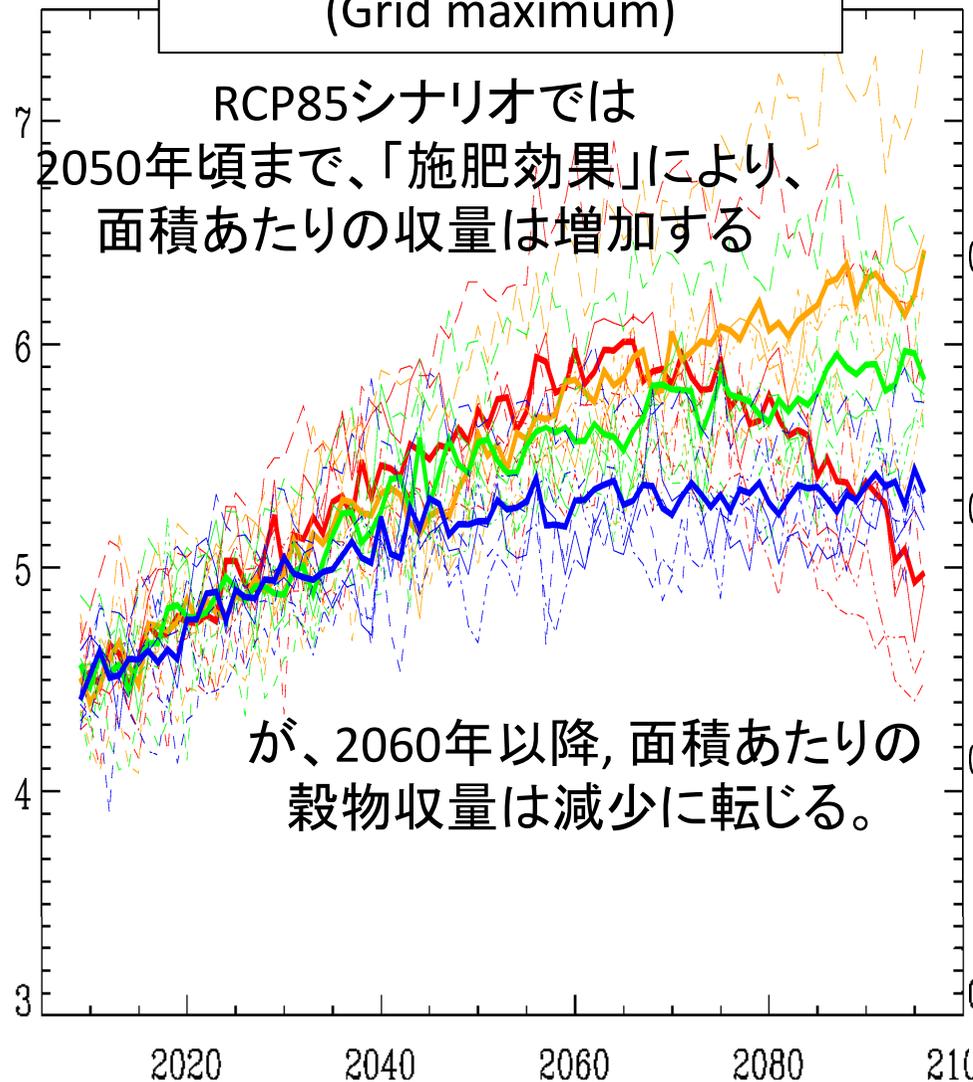
土地利用モデルを用いて、将来シナリオにもとづき土地利用変化(農地-森林)を計算。  
貿易などの経済活動と傾斜などの自然条件を考慮する。

# 穀物収量と穀物面積変化の関係

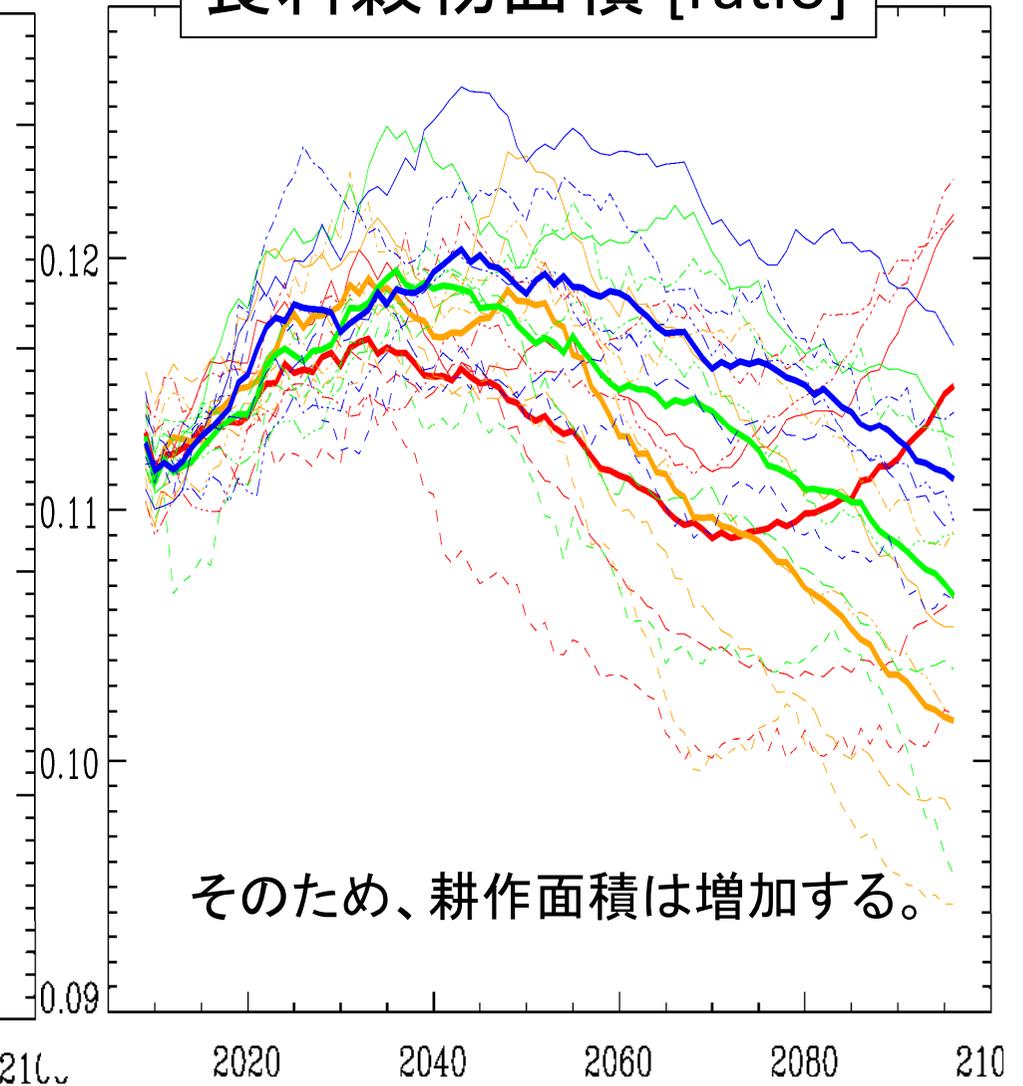
SSP2: RCP85 RCP60 RCP45 RCP26

食料穀物収量 [t/ha]

(Grid maximum)



食料穀物面積 [ratio]



# まとめ

- 地球システムモデルにおける陸域モデル開発の立場を中心に、開発の背景と現在の取り組みを紹介した。
  - 陸域は、空間的に複雑/多様かつ人間活動による改変が顕著のため、それにあつたモデル開発が必須である。
- 統合陸域シミュレータILSというフレームワーク・ツール群を構築し、各要素モデルの開発を進めている。
  - 地球スケールの気候・環境問題だけでなく、地域規模の適応の取り組みなどからの要望にも応えられるようなモデルを目指している。
  - たとえば、台風19号時の洪水予測や、河川沿岸環境の適応策策定などに貢献している。
- 今後も、「地球システム」から「地域適応」までをつなぐ、重要な要素として、陸域のモデル開発を続けていきたい。