

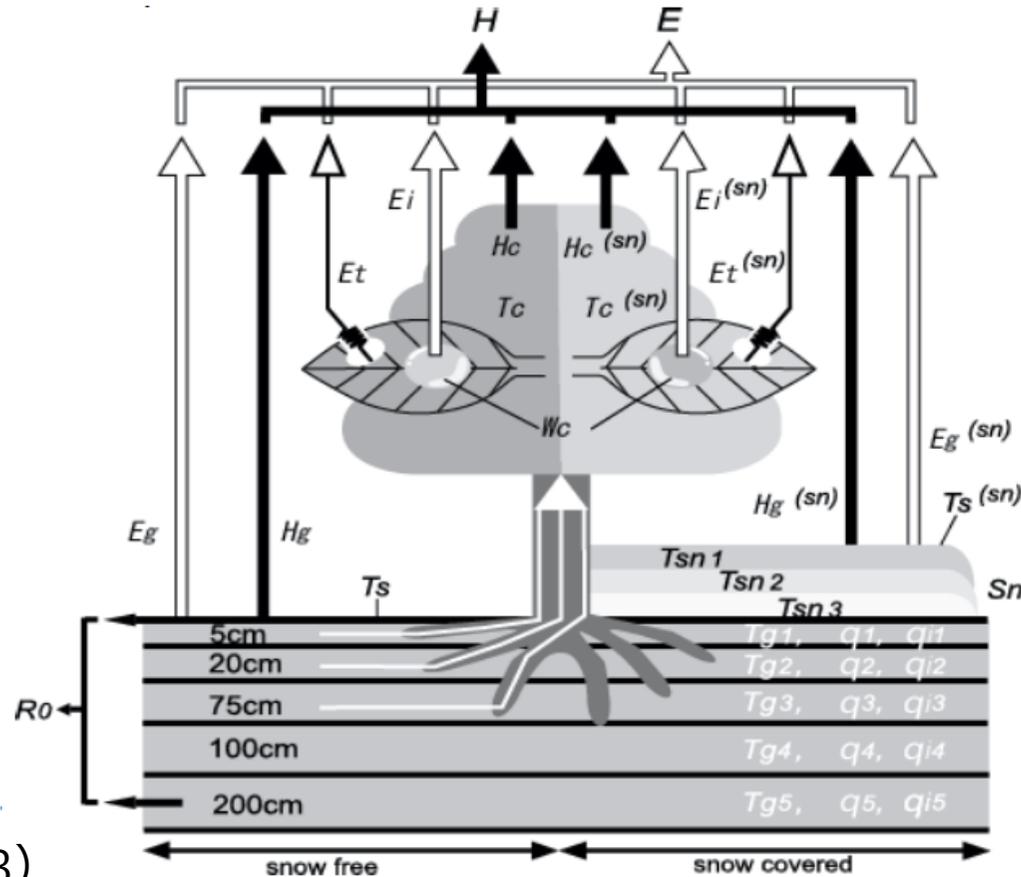
広域陸面モデリングの最前線 ～気候変動下の渇水リスクの求め方～

東京大学大気海洋研究所

芳村圭・佐藤雄亮(テーマC)

沖大幹(テーマD)

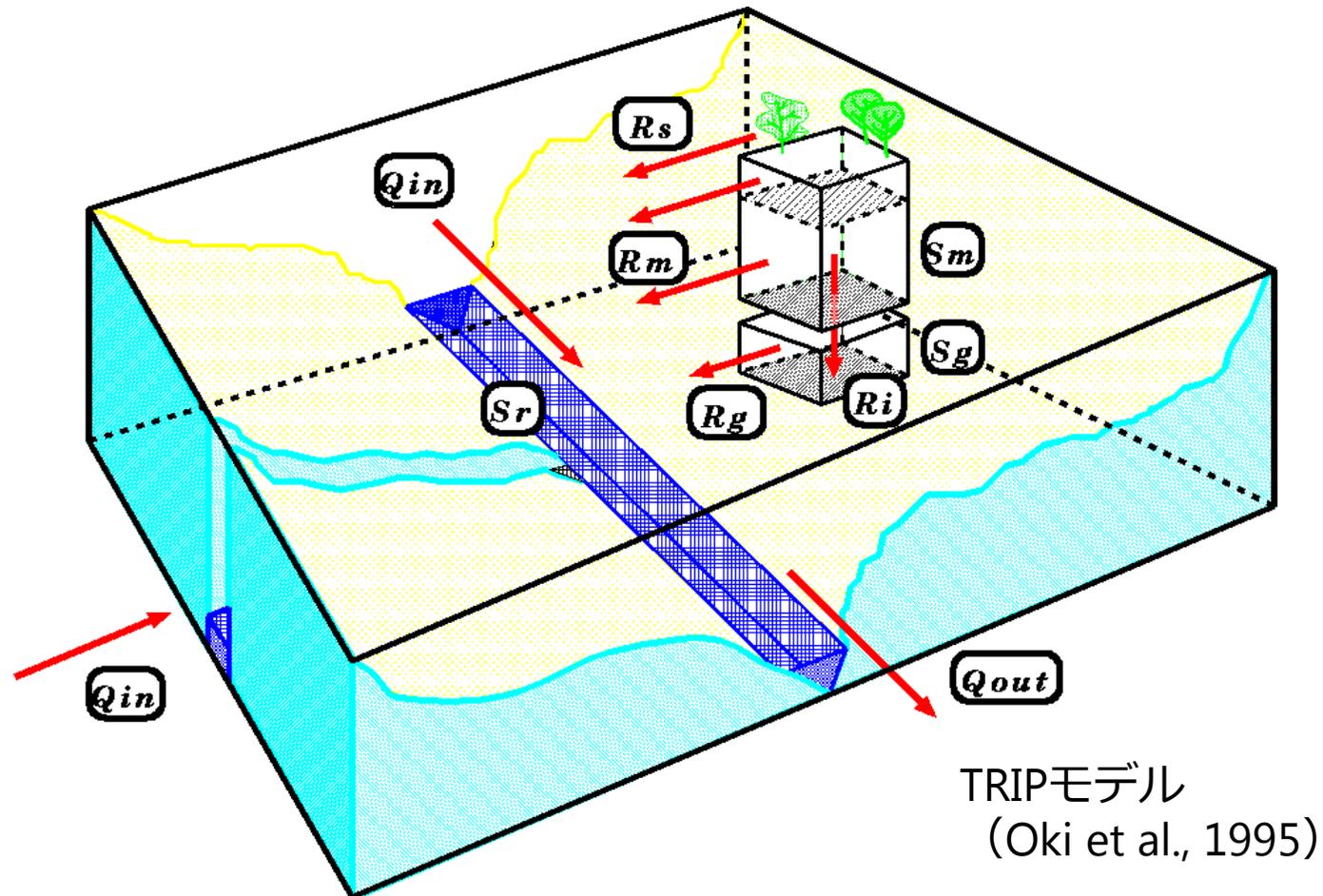
気候モデルにおける陸面



MATSIROモデル
(Takata et al., 2003)

- 大気大循環モデルの下部境界条件を与えるために開発
- 伝統的に鉛直一次元

気候モデルにおける河川

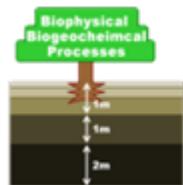


- 海洋大循環モデルの境界条件を与えるために発展
- 伝統的に「暗渠」

人間活動を考慮した陸面過程モデル

HiGW-MAT

[Pokhrel et al. 2011]



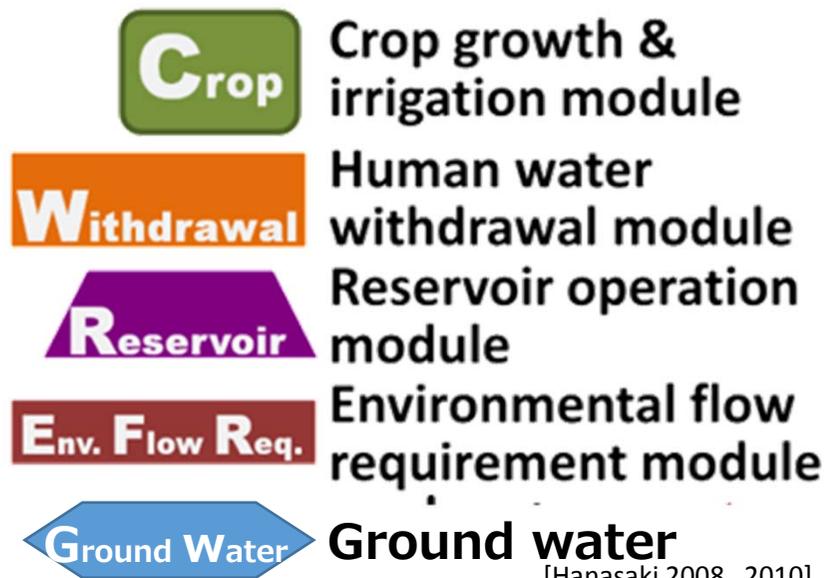
自然の地表面水循環

陸面過程モデル

MATSIRO

[Takata 2003]

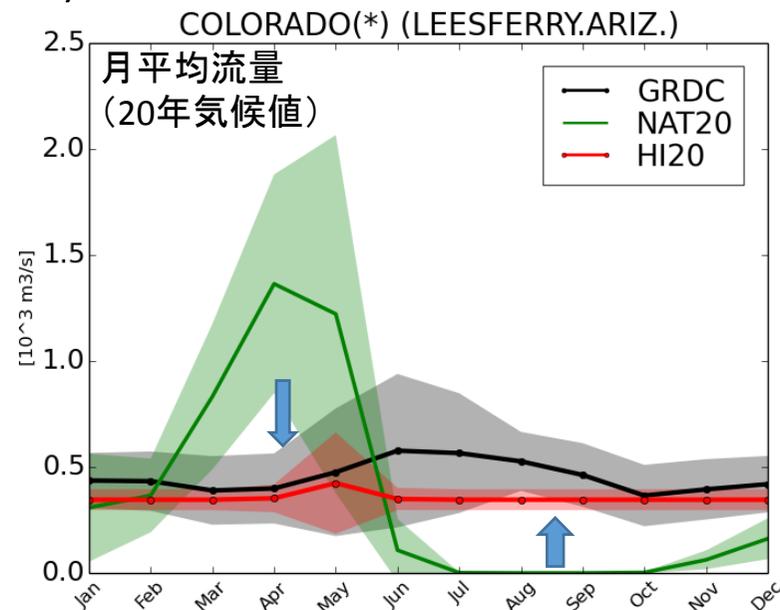
水資源管理基盤	on 河川	on 灌漑地
河川灌漑	河川から水を奪う。 流量は減少 ↓	地表面に水を供給。 流出増加 ↑
地下水灌漑	流量増加 ↑	←
貯水池操作	変動を緩和。 低水量を増加させる ↑	None



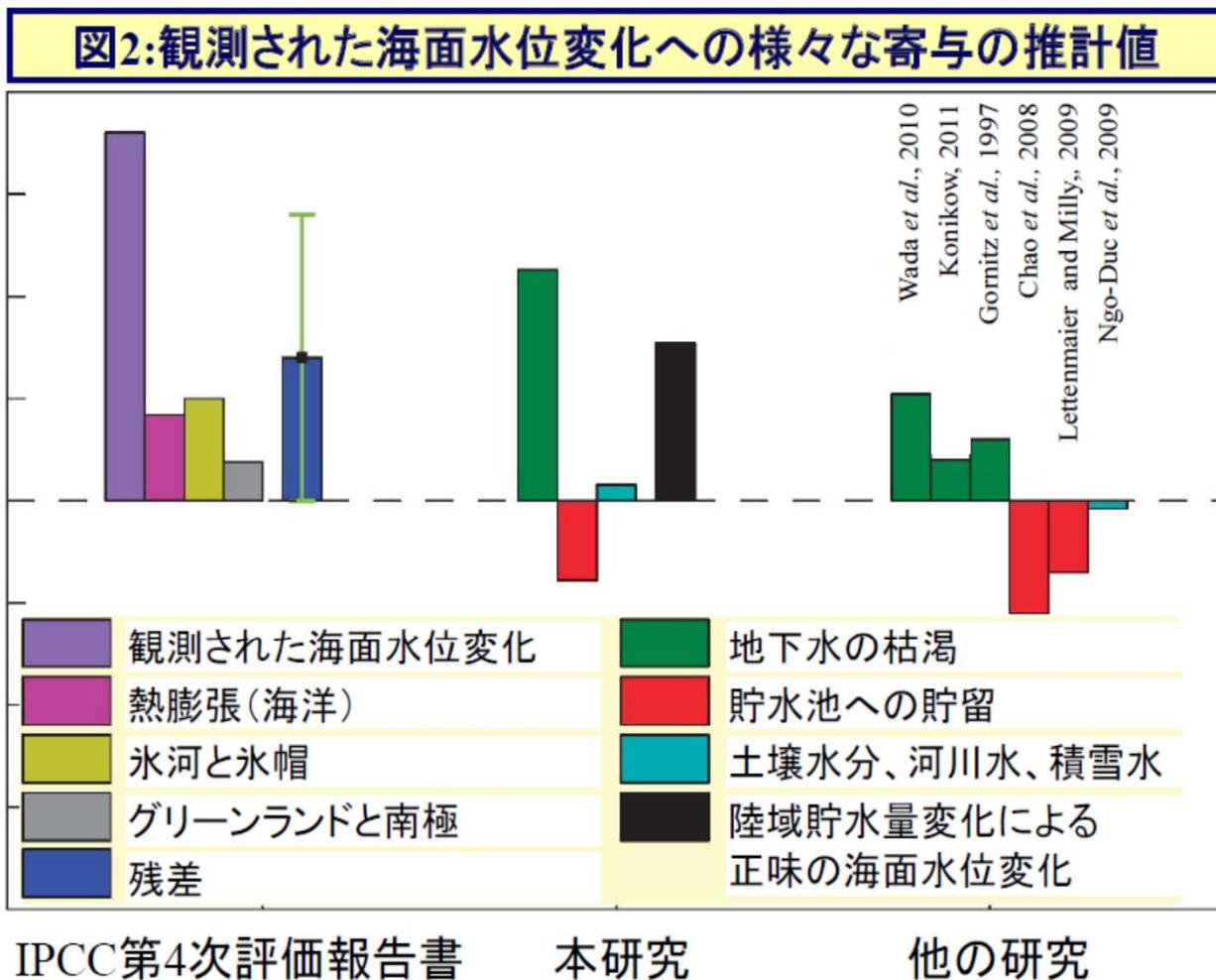
[Hanasaki 2008, 2010]

地表面水循環に対する人為的な水資源管理行為

Ex)

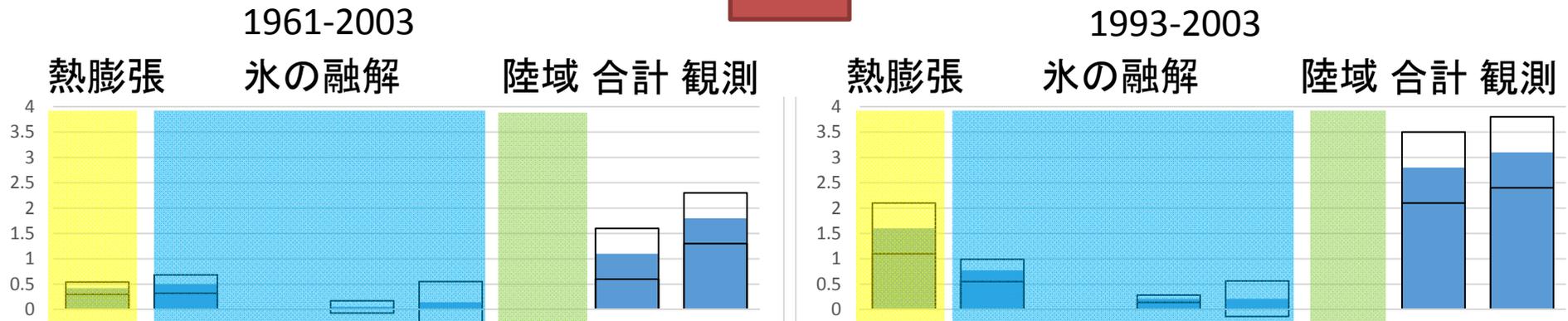


陸域からの海面水位変動寄与

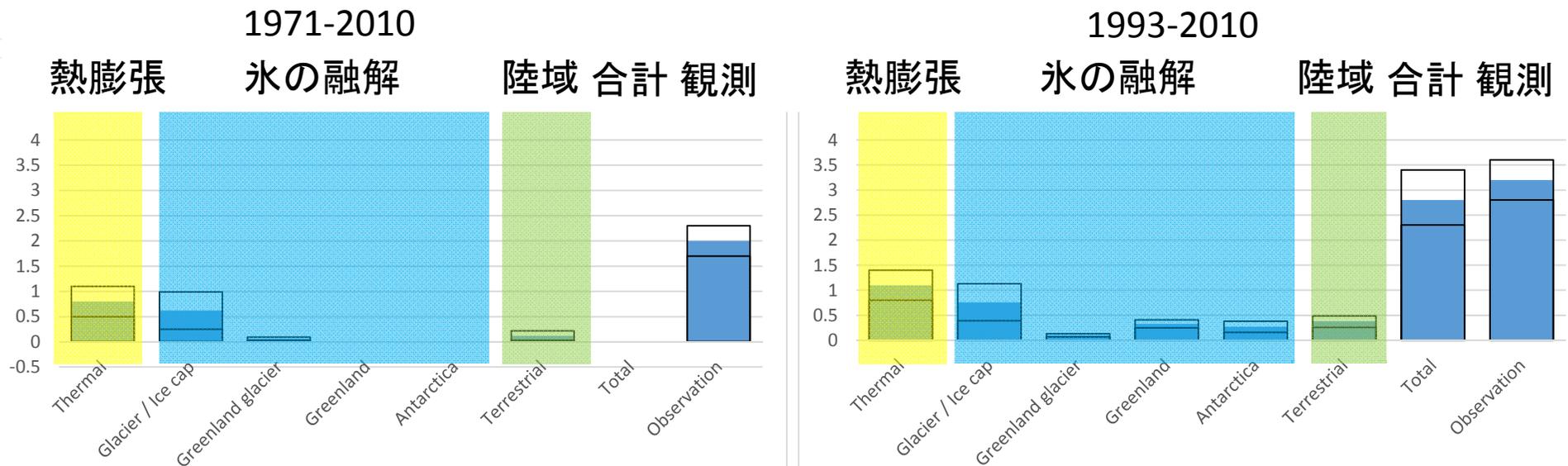


IPCC AR4とAR5における 海面水準変化 (mm/yr) への寄与

AR4



AR5



人間活動を考慮した陸面過程モデル

HiGW-MAT

[Pokhrel et al. 2011]

水資源管理基盤	on 河川	on 灌漑地
河川灌漑	河川から水を奪う。 流量は減少 ↓	地表面に水を供給。 流出増加 ↑
地下水灌漑	流量増加 ↑	←
貯水池操作	変動を緩和。 低水量を増加させる ↑	None

水資源管理モジュールも気候の変化に応答

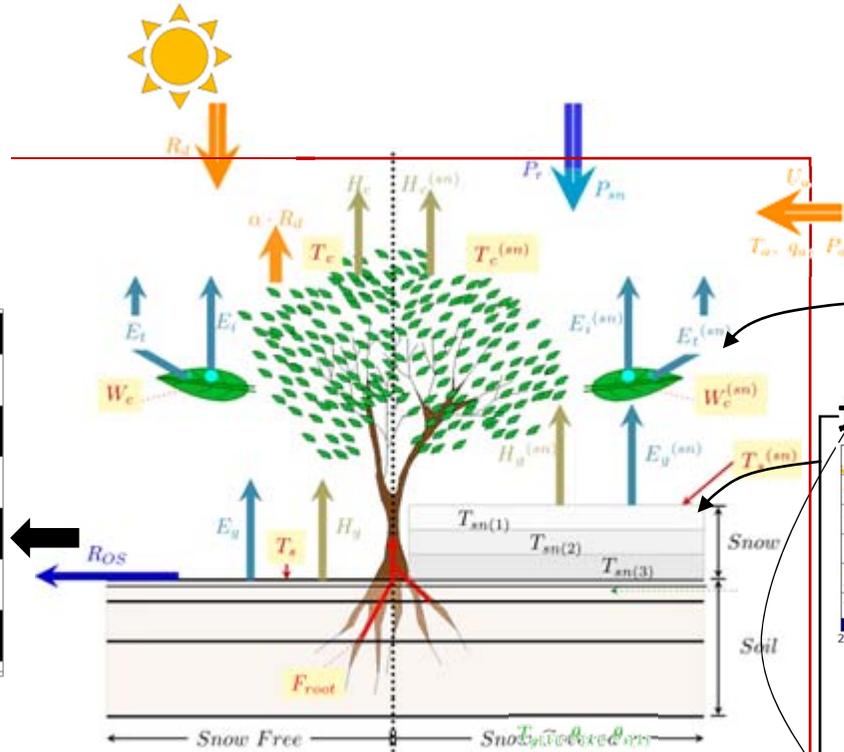
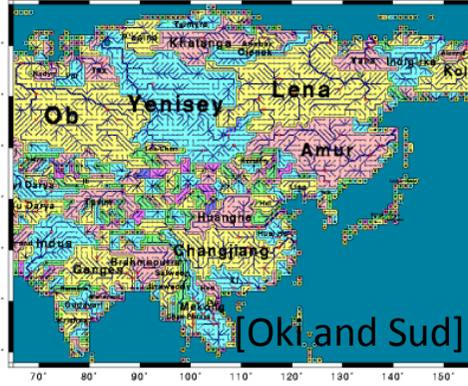
		将来推計 I	将来推計 II
 Crop	Crop growth & irrigation module		
	気候に応じた植物の成長 気候に応じた農事歴を設定	○	○
 Withdrawal	Human water withdrawal module		
	気候に応じて灌漑需要が変化 (工業用・家庭用需要は一定と仮定)	○	○
 Reservoir	Reservoir operation module		
	流量の気候値に合わせて 放流・貯留月を設定	○	
 Env. Flow Req.	Environmental flow requirement module		
 Ground Water	Ground water		
	気候に応じて灌漑需要が変化	○	○

入力データ

HiGW-MAT

河川モデルTRIP

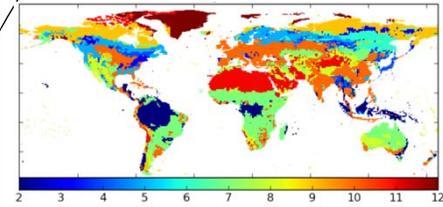
Rivers in Asia on TRIP in 1°x1° mesh



気象データ (7変数)

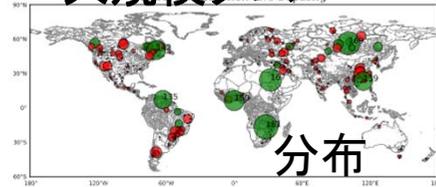
- ・降水(雨, 雪)
- ・気温
- ・比湿
- ・風速
- ・長波放射
- ・短波放射
- ・気圧

地表データ



- ・土地被覆
- ・平均傾斜
- ・アルベド
- ・LAI
- ・土壌タイプ
- ・標高標準偏差

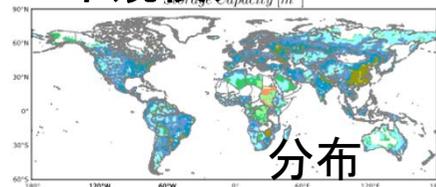
大規模ダム



分布

- ・貯留・放水月
- ・貯水池目的
- ・最大貯留量

中規模ダム



分布

1e+03 1e+04 1e+05 1e+06 1e+07 1e+08 1e+09 1e+10

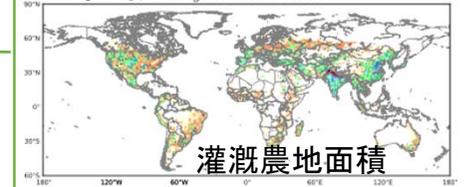


環境流量タイプ

- ・工業用水需要
- ・家庭用水需要

灌漑

Irrigated Area Fraction



灌漑農地面積

0.000 0.001 0.010 0.050 0.100 0.200 0.350 0.500 0.700 0.900 1.000

- ・作物タイプ
- ・農事歴

Hydrological Drought

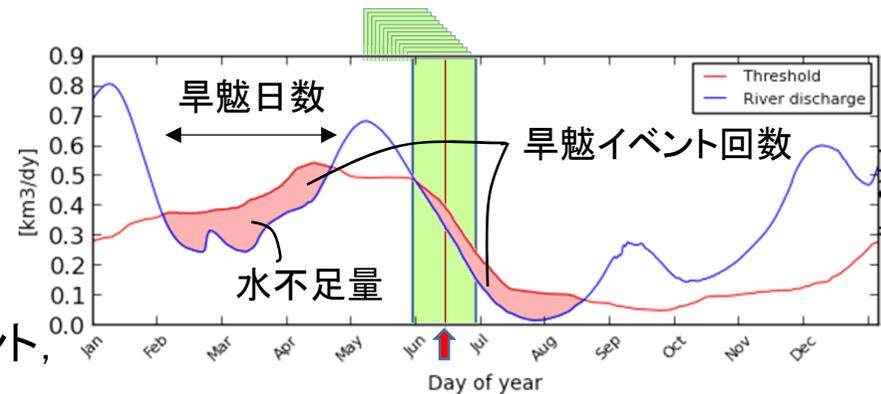
旱魃の定義:

- ・日流量が定めた閾値を以下となった場合。

・1週間以上継続した場合にイベントをカウント、その間の旱魃日を有効旱魃日数とする。

- ・1週間以上続く旱魃には含まれた短い(4日以下)中断は無視

[IT法; Fleig 2006]



Variable threshold level method [Stahl et al., 2001]

- ・ Moving windowを用いて各Gridの365日全ての日について閾値を設定

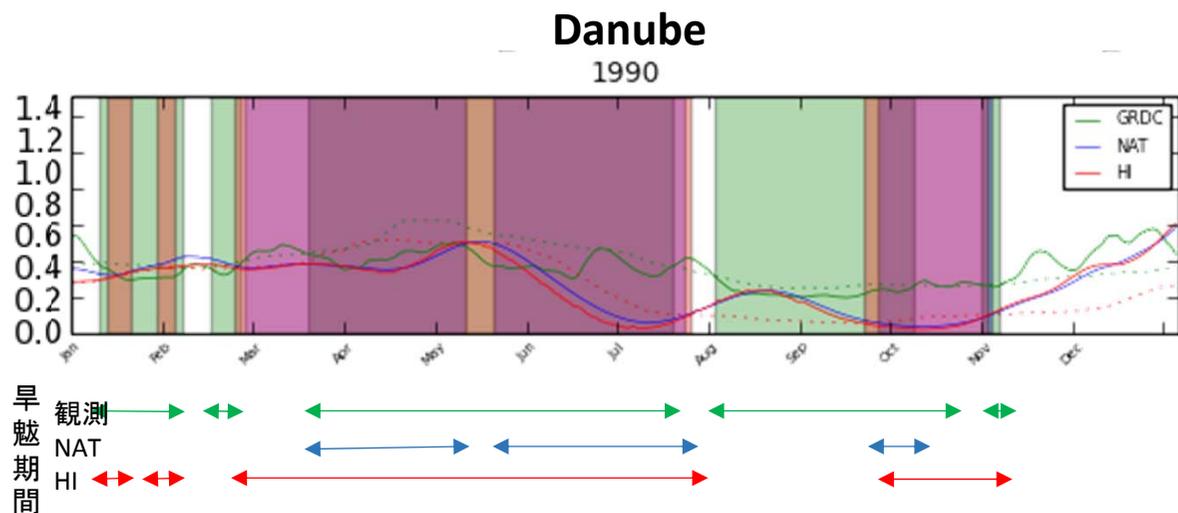
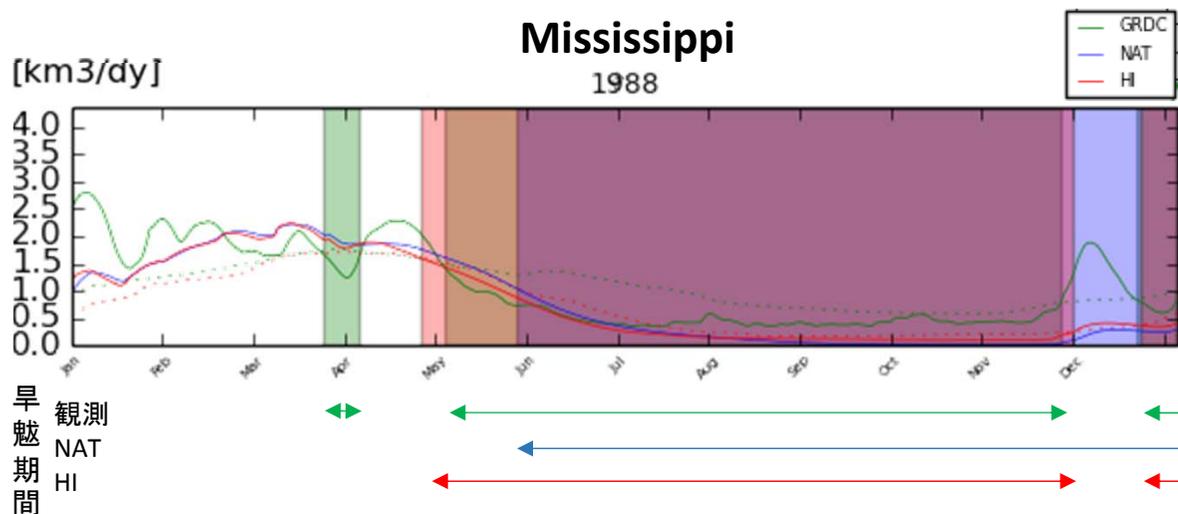
┌ window幅: 31日 (n:31dy × 20yr=620)
└ 閾値 : 下80パーセンタイル

- ・ 現在気候における“その頃の時期”の気候値的な低流量が閾値になる

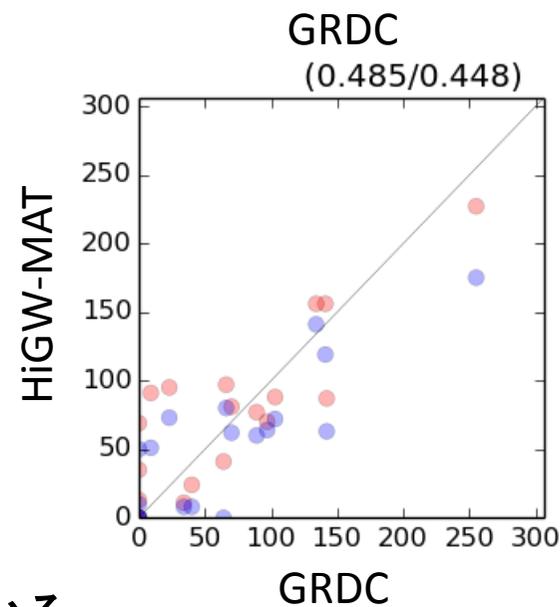
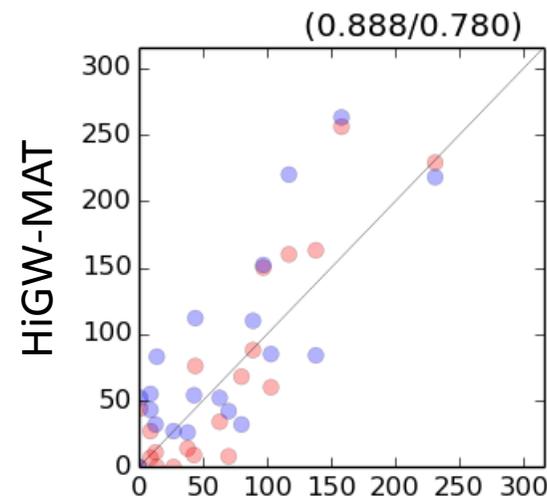
※実験1: 全ての解析に共通して現在気候時HIの閾値を使用

実験2: NATとHIにそれぞれの閾値を適用

旱魃再現性検証



旱魃日数



➡ 記録が残るような大きな旱魃年(イベント)は補足できている
広域のモデルとしてはAcceptableな再現性である

2nd: 将来推計 I

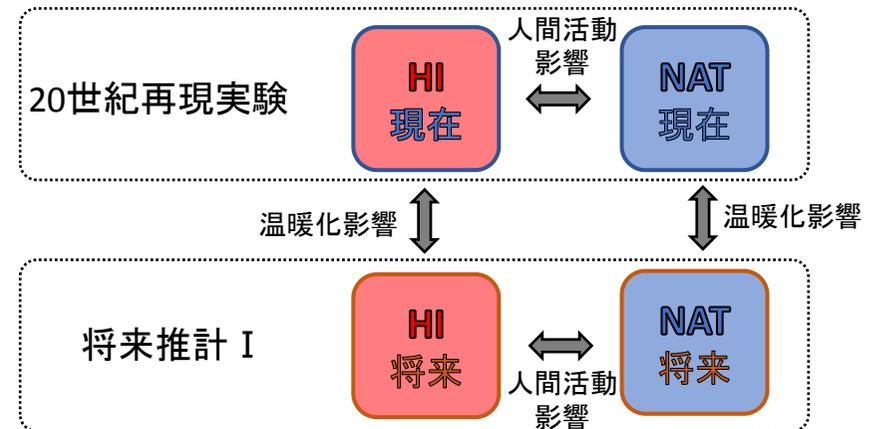
MIROC5の将来気候予測に基づくタイムスライス旱魃解析

- 成果 -

- 旱魃危険地域の抽出
- 温暖化に対する人間活動の影響に関する考察

【計算設定】

- 期間: 2080–2099
 - ▷ 20世紀再現実験の出力 (1980–1999)と比較
 - ▷ 20年のタイムスライス実験
- 空間解像度: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$
- 温暖化シナリオ: RCP8.5
- フォーシング: MIROC5 (3アンサンブル)



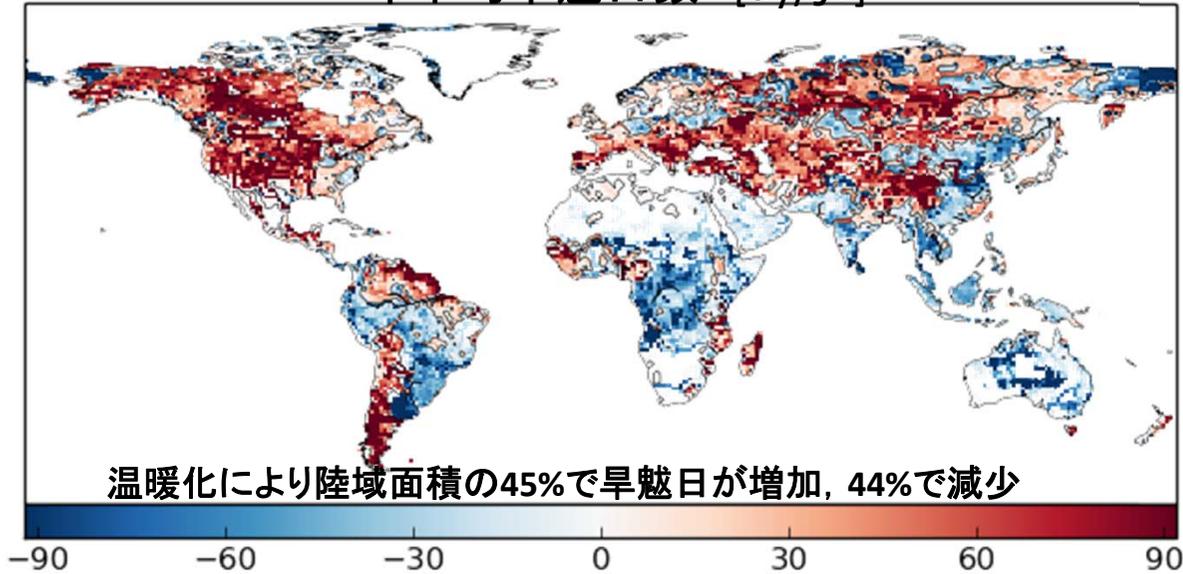
設定の異なる4種類の計算の差異を考察

[実験の仮定]

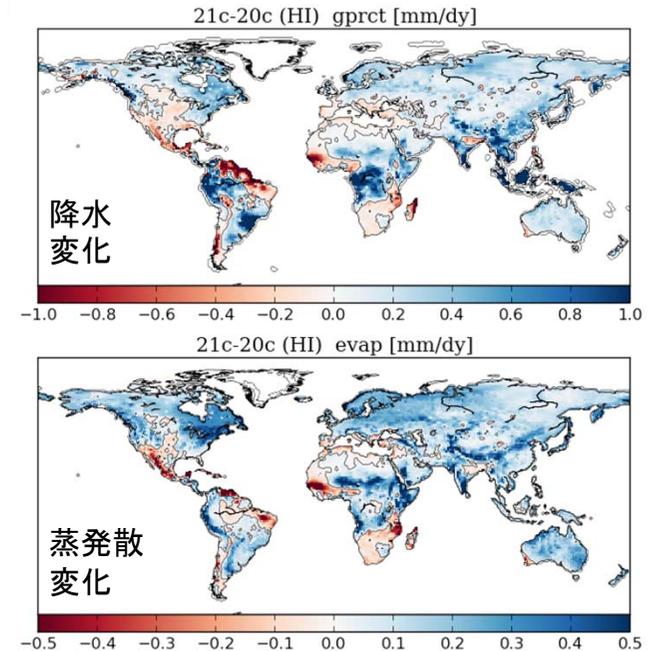
1. 土地利用(灌漑地, 貯水池)分布は将来についても現在のデータを使用
2. 地下水は必要に応じて無尽蔵に汲み上げられる
3. 雨の強度は変化するが降り方(分布や頻度, 期間)は変わらない

旱魃に対する温暖化影響 (HI)

年平均旱魃日数 [dy/yr] (HI)



温暖化により陸域面積の45%で旱魃日が増加, 44%で減少



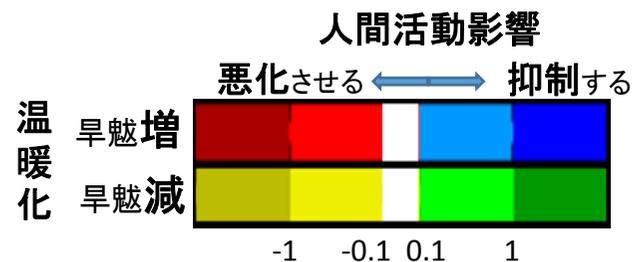
原因	降水	蒸発散	融雪レジームの変化
旱魃 増	アメリカ西部～中央部, 南米北部, チリ, アフリカ西部, 南部, 地中海沿岸域, 高緯度	中緯度(ヨーロッパ～中央 アジア, アメリカ), 高緯度	高緯度
旱魃 減	サブサハラ域, 中東, アフリカ東部, インド, 豪州		(高緯度)

流況への人為的操作が有する温暖化影響への効果

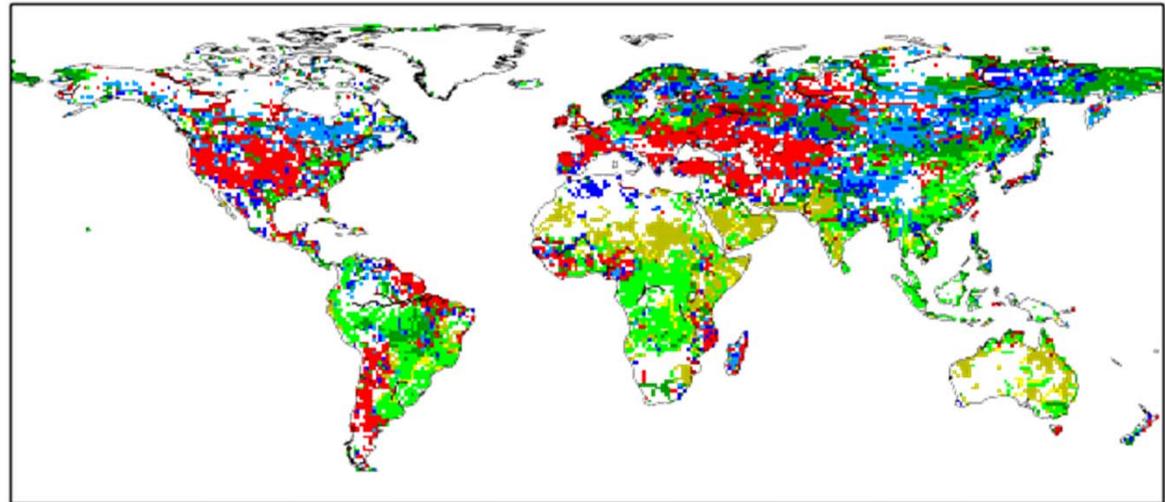
HIとNATの温暖化影響の差は、人間活動が温暖化影響に影響を与える証拠

Impact Alter Ratio (IAR)

$$= \frac{\Delta CC_{NAT} - \Delta CC_{HI}}{|\Delta CC_{HI}|}$$



IARと温暖化影響との組み合わせ



- 赤・青の地域は温暖化によりリスクが増加
 - このうち赤の地域(全陸域の22%)では人間活動によりさらにリスク増
 - 乾燥・半乾燥帯, アメリカやヨーロッパ~中央アジアにかけて取水が悪影響
- 緑や青の地域は地下水や灌漑, 貯水池が有効な緩和効果となっている
 - 面的には地下水の寄与が大きく, 貯水池操作の効果は限定的
- 人間活動影響が温暖化影響よりも強く働く地域も存在

➡ 人間活動による環境調整能力は温暖化の変化に対しても有効

3rd: 将来推計Ⅱ 高解像度長期連続シミュレーションによる温暖化実験

- 成果 -

- ・早魃トレンドの領域単位解析
- ・マルチGCM&マルチシナリオを用いて不確実性を定量化
- ・温暖化に伴う早魃変化の時間方向の地域特性に関する考察

【計算設定】

- 120年の長期計算 : 1980-2099
- 空間解像度 : $0.5^\circ \times 0.5^\circ$
- 温暖化シナリオ : RCP8.5
- フォーシング : ISI-MIP フォーシング [Hempel 2013]

[実験の仮定]

- 土地利用(灌漑地, 貯水池)分布は将来についても2000年のデータを使用
- 地下水は必要に応じて無尽蔵に汲み上げ可能

Historical 1980-1999

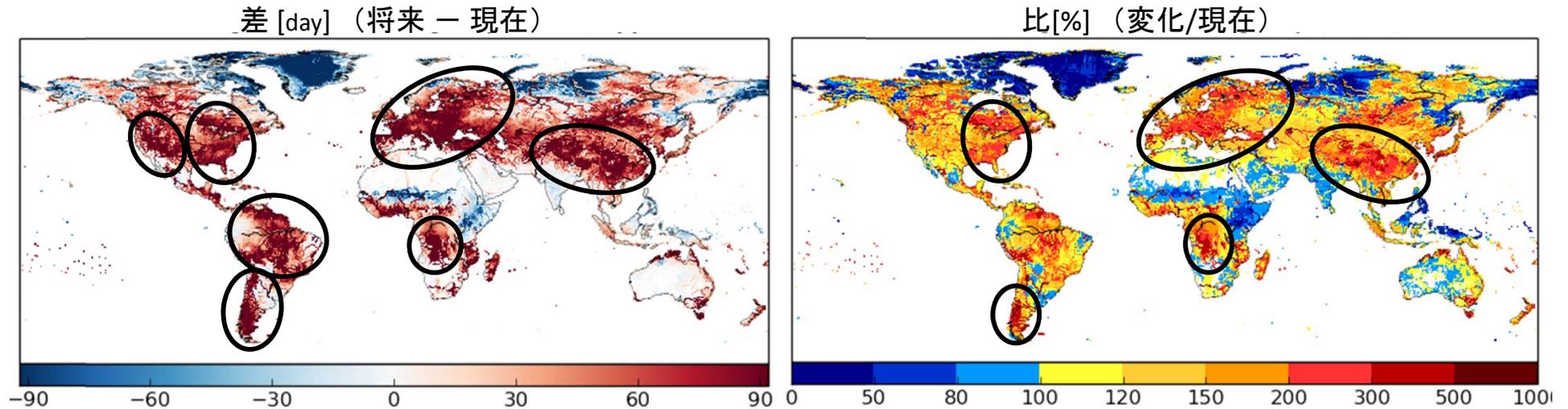
Future 2000-2099

5 GCM

	Nation	Institute
HadGEM2-ES	UK	Met Office Hadley Centre
IPSL-CM5A-LR	France	Institut Pierre-Simon Laplace
GFDL-ESM2M	United States	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
MIROC-ESM-CHE	Japan	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies
NorESM1-M	Norway	Norwegian Climate Centre

温暖化による年平均有効旱魃日数の変化 (5GCMのEmsenble Mean)

HIにおける 1980-1999と2080-2099の比較 (RCP8.5)

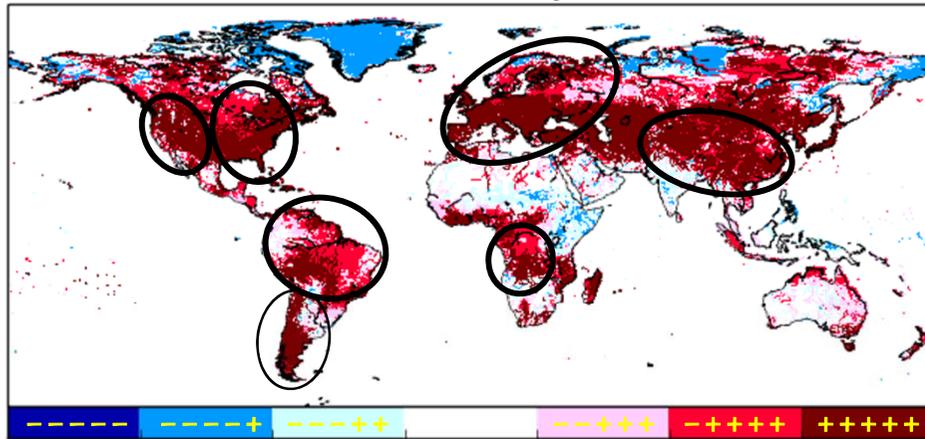


- ・全球陸域のHIでは70.4%で旱魃増加, 23.9%で減少 (NATでの81.6%で増加, 15.7%で減少)
- ・減少する地域もあるが変化の絶対値は増加の方が大きい
- ・北米, 南米, アフリカ中央部, ヨーロッパ~アジアの広域にかけて90日以上増加
北米西部を除いて2倍以上に増加
北米, ヨーロッパ, 東アジアと人口集中域に該当 } ⇒ 旱魃に関する温暖化脆弱地域

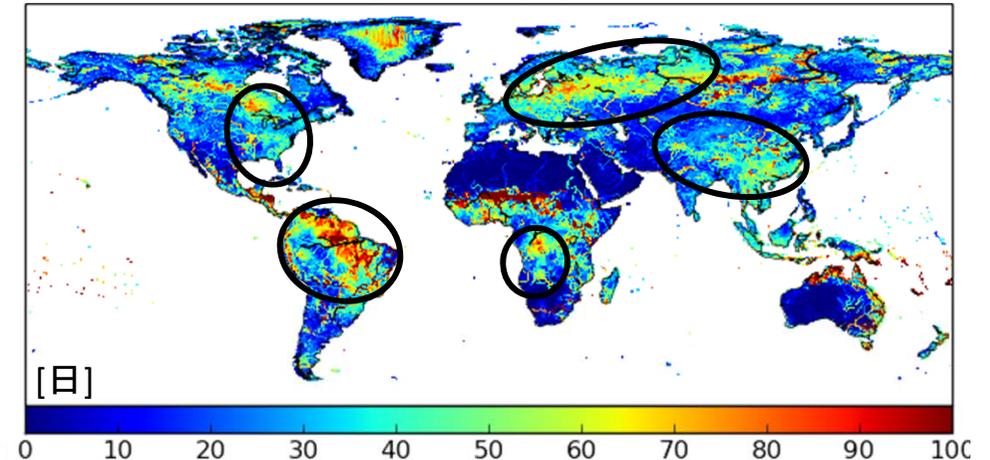
早魃変化の不確実性議論 (5GCMの予測一致度について)

1980-1999と2080-2099の比較 (RCP8.5)

GCM間の合意度



GCM間の変化日数の標準偏差



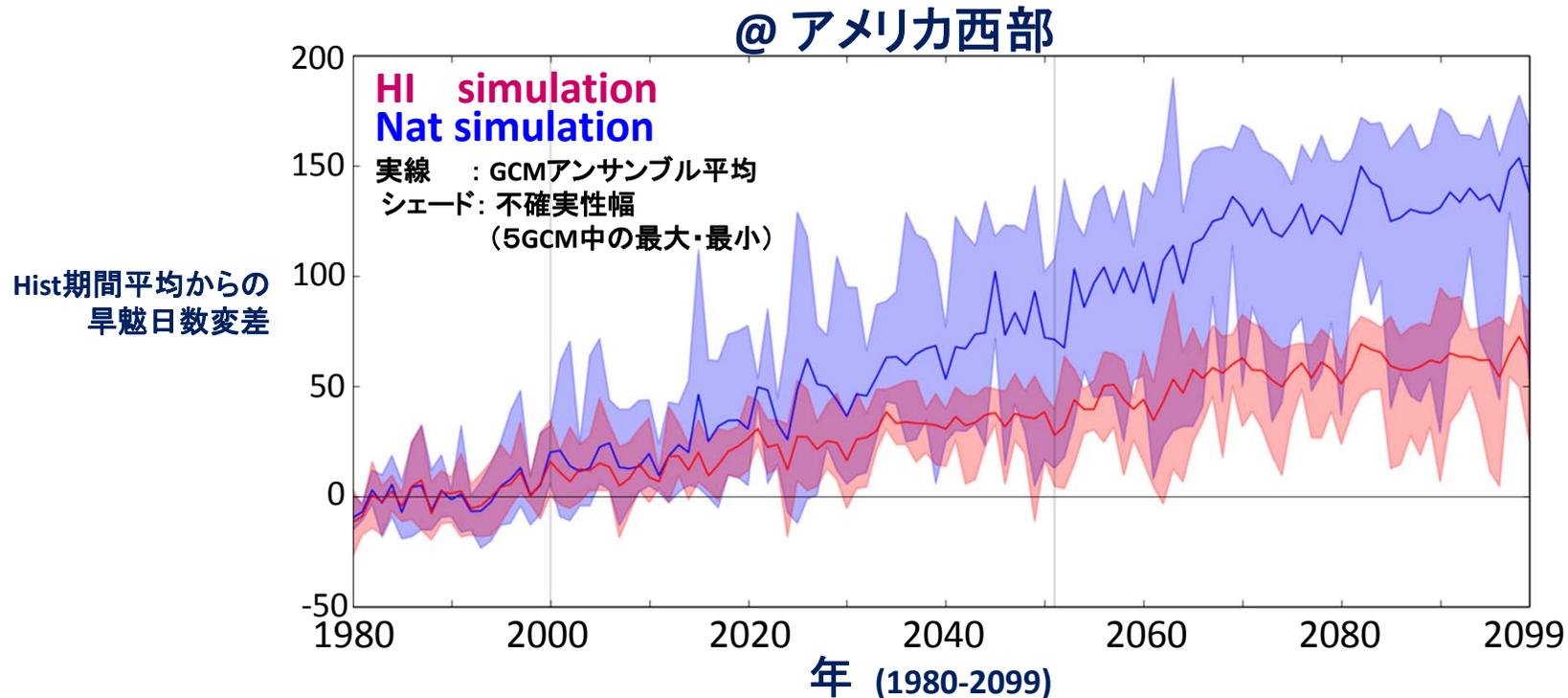
GCM間の変化傾向合意度 (左図)

- 増加傾向を示す地域の合意度は良好
特に顕著な増加を示す地域の合意度は高い → 強い増加トレンドの信頼性は高い
- 低～中緯度で減少傾向を示す地域の合意度は低い

変化量のGCM間標準偏差 (右図)

- 全GCMで変化傾向が一致したとしてもばらつきは大きい
特にアマゾンとサブサハラのはらつきが顕著
- 降水減少によって増加する地域はばらつきが小さく比較的ロバスト
- 中央アジアの早魃増加傾向もロバスト

旱魃日数の領域中央値の時系列変化



(HIとNATの比較)

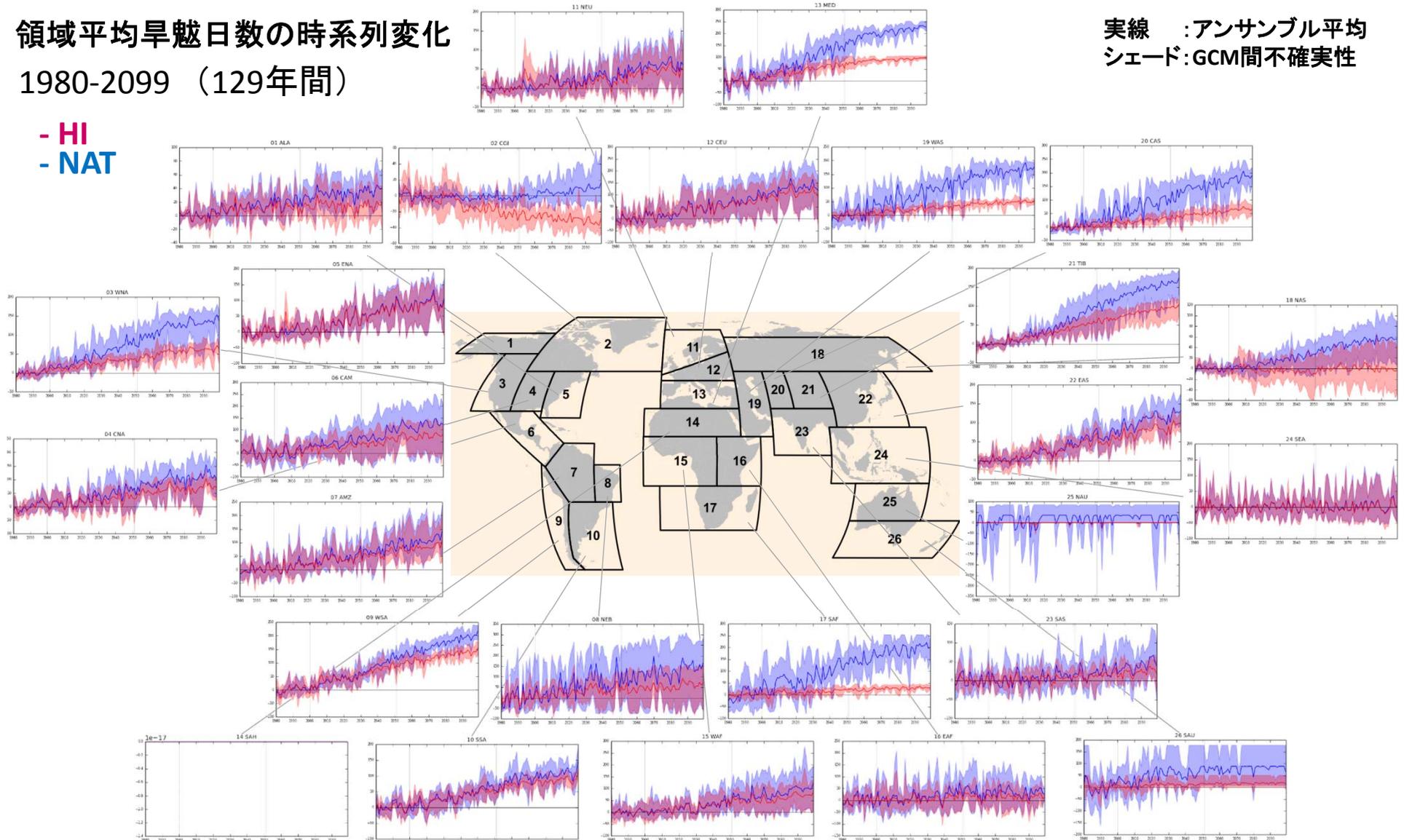
人為的な水資源管理が介在する事で

-
- 年々変動が縮小し, 安定化 → GCMの違いによる不確実性も低減
 - 増加率の緩和 → 人間活動を考慮しないと変化を過大評価

領域平均旱魃日数の時系列変化 1980-2099 (129年間)

- HI
- NAT

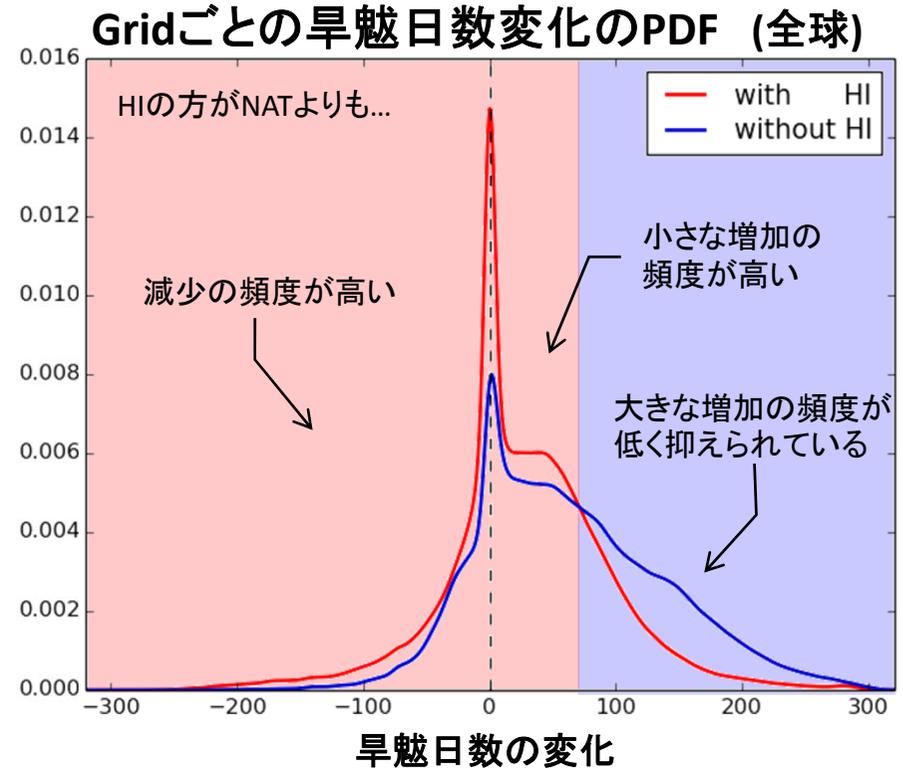
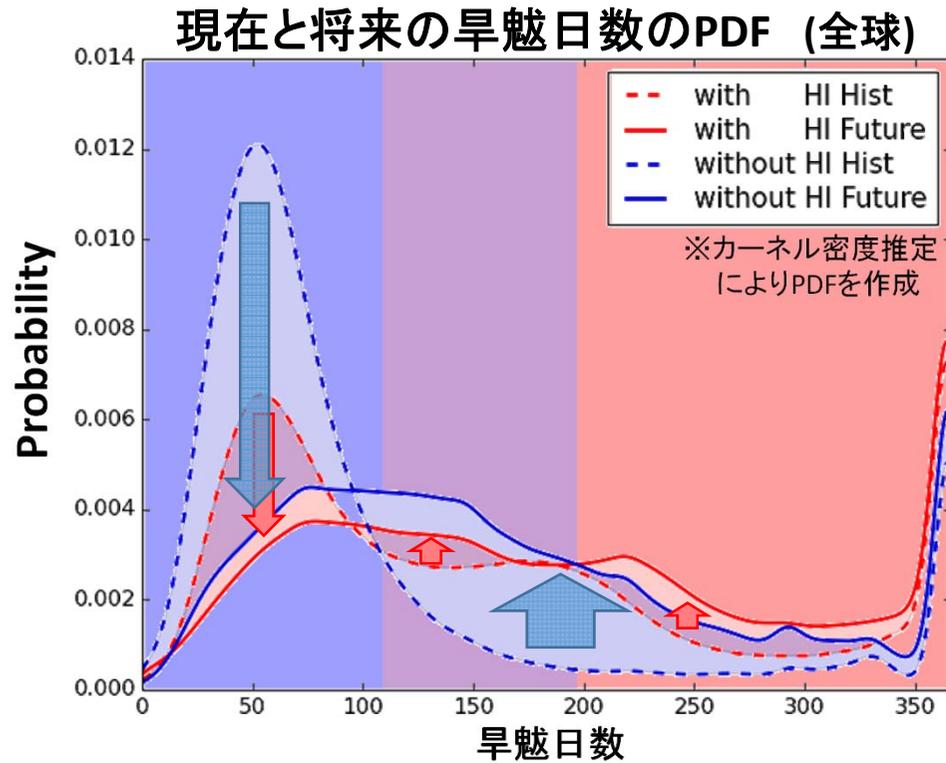
実線 : アンサンブル平均
シェード: GCM間不確実性



- 多くの領域で旱魃日数は線形に増加 (14,16,18,23,24,26は例外。2は減少)
- 系統的に人間活動考慮の方が短期的な変動と長期的な変化が小さい

➡ 水資源管理基盤を用いることで変化に対応している

頻度分布に見るHIの有用性



[HIの分布とNATの分布]

- Hist期間では100日あたり, Future期間では200日あたりを境に頻度の上下関係が逆転

[HIでの変化とNATでの変化]

- HIの方が早魃日数100~250日程度の範囲で増加量が小さく抑えられる (左図)
- HIの方が大きな増加の頻度が低く抑えられる (右図)

➡ 人間活動が入った世界は完全自然状態より変化が緩やかであり, 実質的に適応し易い

対応準備する残り時間はどれほどなのか？

背景

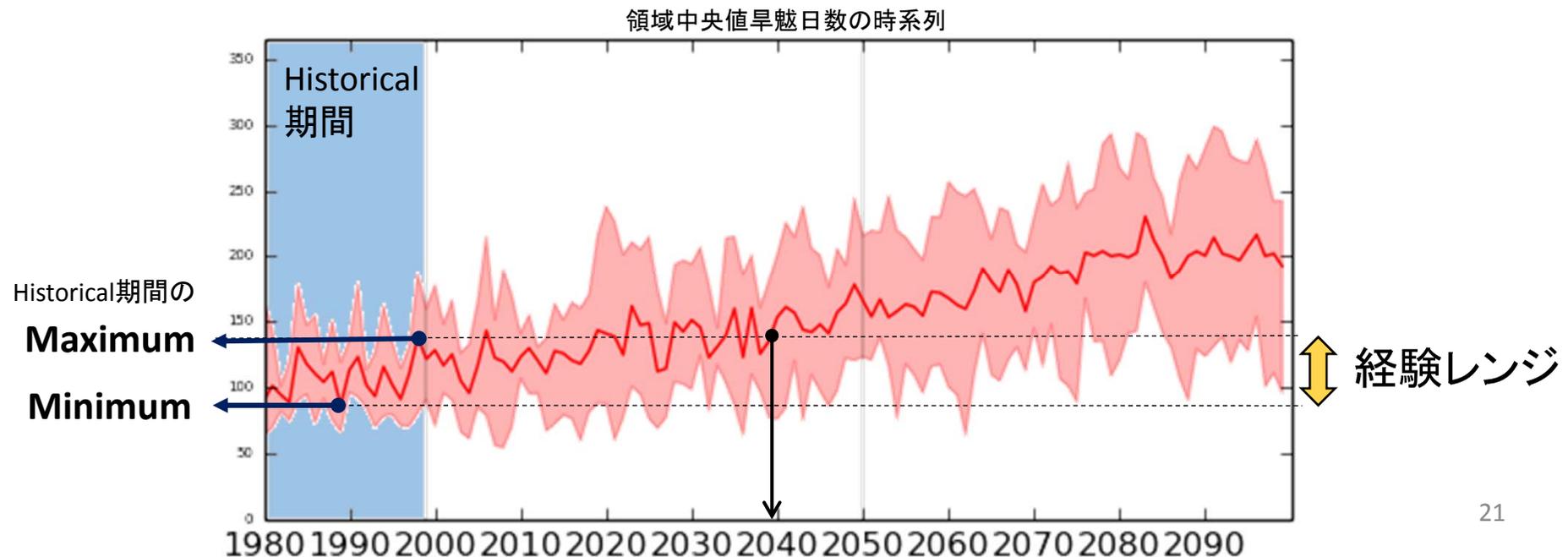
- 既存の水資源管理基盤は過去のデータに基づき経験的・統計的に計画されている
- 統計的な性質が過去のデータと異なるようになるならば新たに何らかの対策が必要

Timing of perception change for drought (TPCD)

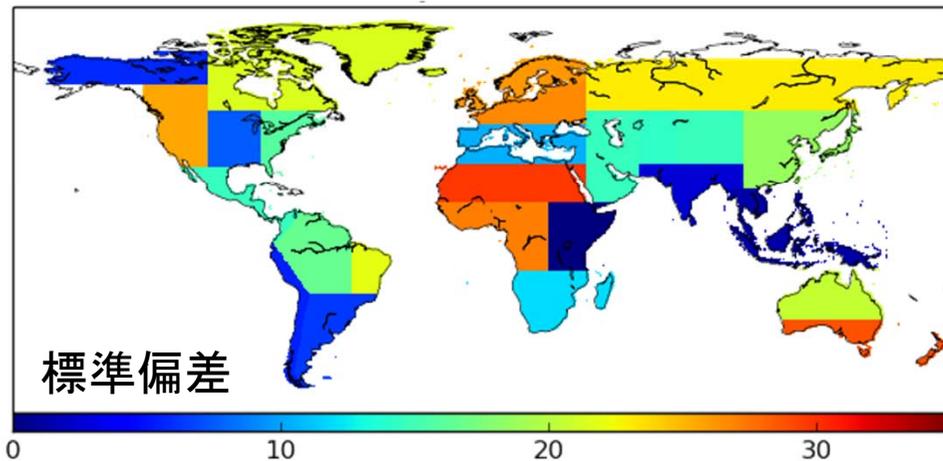
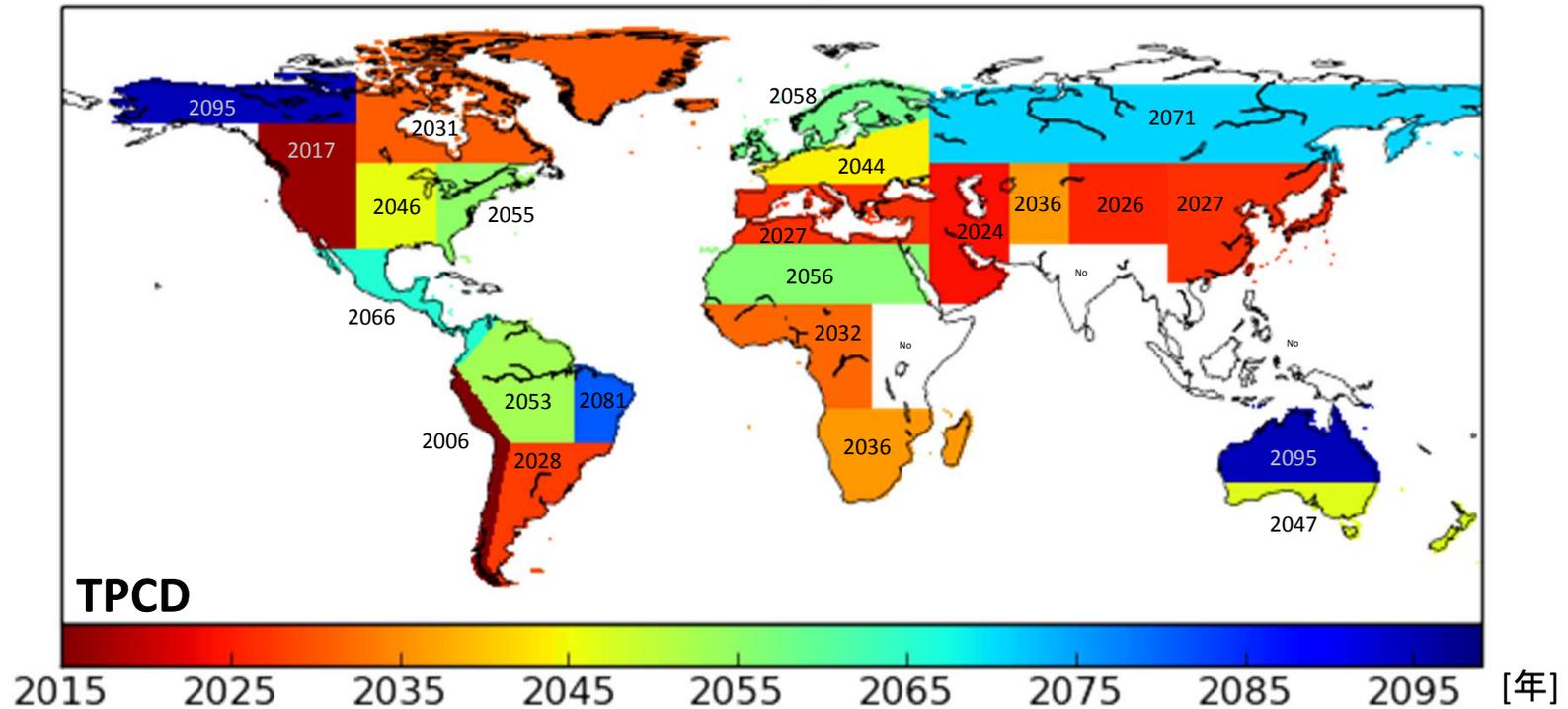
いつ、旱魃が未経験のフェーズに移行するのか？

- 過去に経験した範囲から逸脱し、その後経験範囲内に戻らなくなる時期を調べる
- 領域中央値の時系列を解析

[Mora et al. 2013]



TPCD: 温暖化が進行しいつ“未体験の世界”に突入するか



- チリ(2006), アメリカ西部(2017), 地中海域(2027), 中東(2024), 中央アジア(2036), 中国(2026,2027)ではかなり早期にHist期間の経験範囲から逸脱
- GCM不確実性を考慮しても26地域中13の地域で2050年代までにTPCDを迎える

➡ 残された時間は限られており, 迅速な対応策の立案と行動が必要²

結論

1. 温暖化により世界の旱魃はどのように変化するのか？

- ・全球陸域のHIでは70.4%で旱魃増加, 23.9%で減少
- ・北米, チリ, ヨーロッパ~中央アジア(中緯度帯)にかけては90日を超える旱魃日拡大の可能性
- ・増加が予測される地域の信頼度(GCM間の合意度)は高い

2. 我々の社会はどのような/どれほどの対応能力を持っているのか？

- ・温暖化影響の10%~同程度もしくはそれ以上の効果
- ・地下水供給(と灌漑)が面的, 貯水池は局所的な緩和効果を示す
 - ・アジア域では緩和傾向が広がる
- ・北米とヨーロッパでは取水が悪影響
- ・人間活動が短期的な変動と長期的な変化を緩和

3. 対応準備をするために我々に残された時間はどれほどなのか？

- ・不確実性はあるものの, 26地域中13の地域で2050年代までにこれまでの経験範囲を超えて, 異なるフェーズに入る
- ・迅速な対応策の立案と行動が必要