資料３

環境研究総合推進費（R5−7年）

研究課題名：自然外力の増加に適応する水環境保全に向けた有明海・八代海等の気候変動影響評価

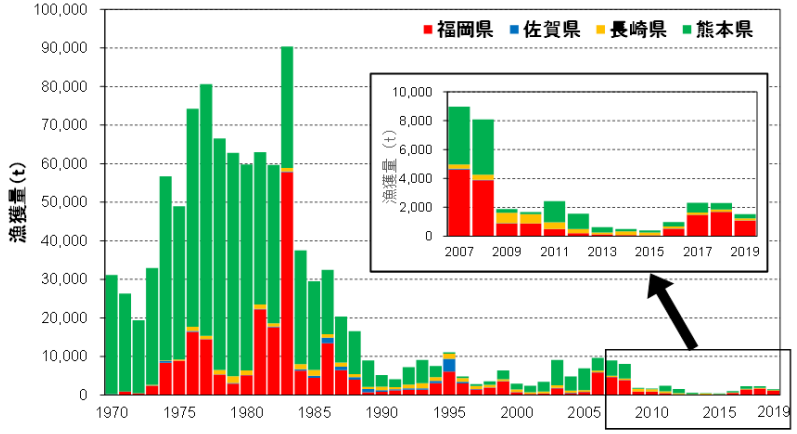
重点課題：主　②ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発
副　⑯大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究

行政要請研究テーマ：（１－７）有明海・八代海等における気候変動を踏まえた流入物質の動態把握及び環境・生態系への影響評価

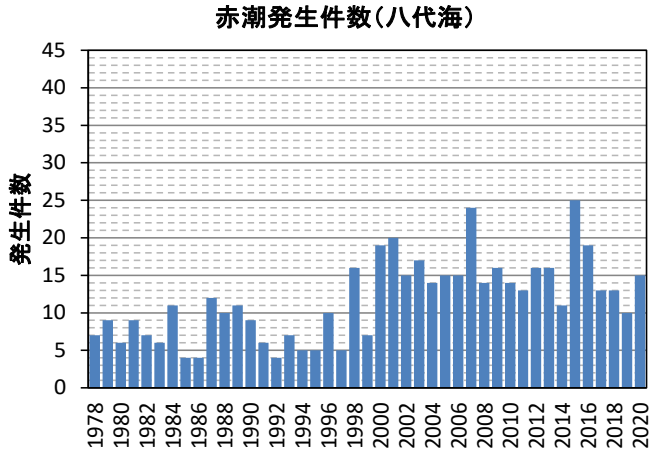
研究代表者所属機関名：九州大学
研究代表者氏名：矢野真一郎

研究の背景・目的:　研究背景（海域環境の状況）

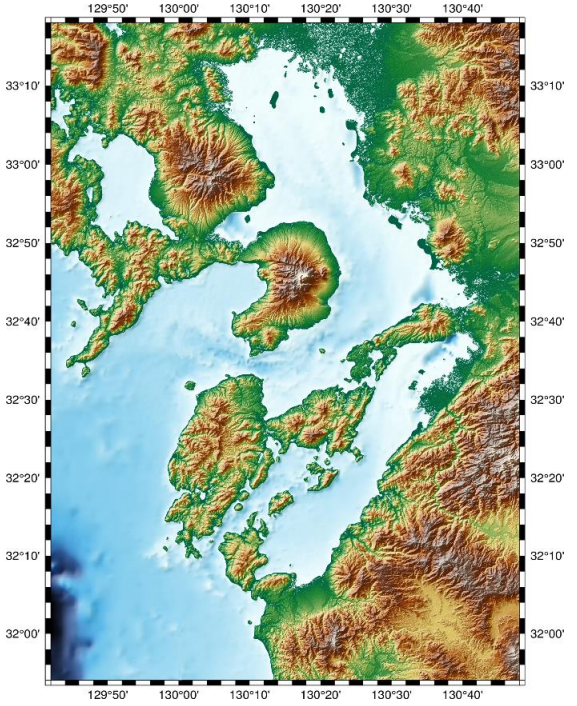
- 有明海：2000年のノリ色落ちに起因する有明海異変、アサリ等二枚貝漁獲の激減
- 八代海：赤潮多発による漁業被害



有明海アサリの漁獲量変化［R4中間取りまとめより］



八代海赤潮発生件数変化［R4中間取りまとめより］



有明海・八代海

2002年11月：「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律」施行
→　2006年12月：「有明海・八代海総合調査評価委員会報告書」
2011年 8月：「有明海及び八代海等を再生するための特別措置に関する法律」改正施行
→　2017年3月：「有明海・八代海等総合調査評価委員会報告」（H28年度委員会報告）：
有明海・八代海を豊かな海として再生するための再生目標の設定 ➡ 目標時期を2026年度（R8年度）と設定
ベントスの変化、有用二枚貝の減少、ノリ養殖問題、魚類等の変化の4項目に対する再生方策の整理
2021年 4月：同法改正施行
→　2022年3月：「中間取りまとめ」：再生方策実施状況を整理、新たな課題が示され、**R8年度報告（2027年3月予定）**に向けた調査・研究の推進の重要性が示された。

有明海・八代海等の再生は長年の課題　　未解決の水環境問題

研究背景（気候変動影響・豪雨頻発化）

中間取りまとめでは(2.2節)，
→有明海・八代海流域で**豪雨災害の頻発化**
→豪雨による土砂生産については調査が進行中
→**海域の水環境・生態系への影響は未解明**

- ✓ 気候変動の影響を受け、R2豪雨のような極端豪雨現象の頻度が上昇、かつ強度も上昇すると予想
- ✓ 将来気候では平均気温2℃上昇で九州で豪雨規模が1.1倍、頻度が2倍と予測[国交省(2021)]

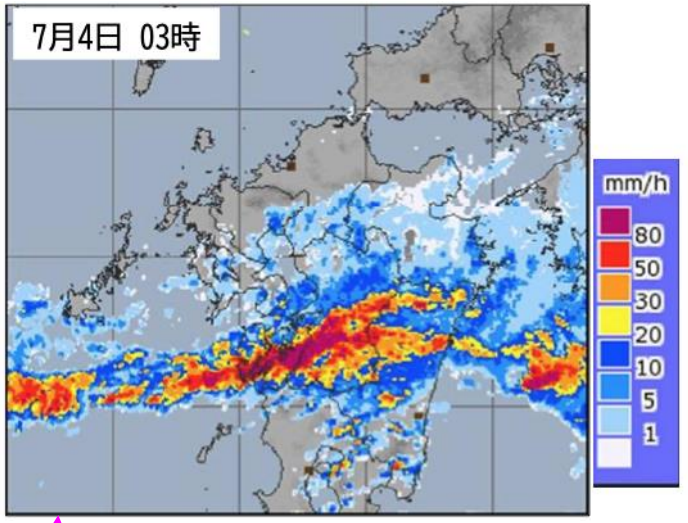
ほぼ毎年豪雨が発生！

表 2.2.1-1 九州北部地方を中心に大雨等が発生した主な気象事例

No.	年	期間	名称	概要
1	2005(平成 17)年	7 月 8 日～10 日	梅雨前線による大雨	九州地方や東海地方で激しい雨
2	2006(平成 18)年	6 月 21 日～28 日	梅雨前線による大雨	熊本県を中心に西日本で大雨
3		7 月 15 日～24 日	平成 18 年 7 月豪雨	長野県、鹿児島県を中心に九州、山陰、近畿、北陸地方の広い範囲で大雨
4	2007(平成 19)年	7 月 1 日～17 日	台風第 4 号と梅雨前線による大雨と暴風	沖縄から東北南部の太平洋側にかけての広い範囲で大雨
5	2009(平成 21)年	7 月 19 日～26 日	平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨	九州北部・中国・四国地方などで大雨
6	2010(平成 22)年	7 月 10 日～16 日	梅雨前線による大雨	西日本から東日本にかけて大雨
7	2011(平成 23)年	6 月 10 日～21 日	梅雨前線による大雨	九州各地で大雨
8	2012(平成 24)年	7 月 11 日～14 日	平成 24 年 7 月九州北部豪雨	九州北部を中心に大雨
9	2016(平成 28)年	6 月 19 日～30 日	梅雨前線による大雨	西日本を中心に大雨
10	2017(平成 29)年	7 月 5 日～6 日	平成 29 年 7 月九州北部豪雨	西日本で記録的な大雨
11	2018(平成 30)年	6 月 28 日～7 月 8 日	平成 30 年 7 月豪雨	西日本を中心に全国的に広い範囲で記録的な雨
12	2019(令和元)年	8 月 26 日～29 日	前線による大雨	九州北部地方を中心に記録的な大雨
13	2020(令和 2)年	7 月 3 日～31 日	令和 2 年 7 月豪雨	西日本から東日本、東北地方の広い範囲で大雨。4 日から 7 日にかけて九州で記録的な大雨。球磨川など大河川で氾濫。

出典：気象庁 HP「災害をもたらした気象事例」及び一般社団法人九州地域づくり協会「九州災害履歴情報データベース」をもとに環境省が作成した。

九州の豪雨災害[R4中間取りまとめより]



R2豪雨のレーダー雨量[XRAINより]

中間取りまとめでは以下の課題を提示(p.158-160)：
- ●気候変動が水環境・生態系に及ぼす影響
- ●頻発化する豪雨と大規模出水による海域環境への長期的・短期的影響

などの調査・研究の推進が重要であり、**R8報告に向けて**この状況を踏まえた取り組みが必要とされた。

有明海・八代海等において豪雨頻発化への対応・気候変動への適応は喫緊の課題

研究目的

閉鎖性海域の水環境保全

過去

過剰な人為的負荷の一方的削減

赤潮・貧酸素水塊の頻発化

⇒ 排水基準や総量削減 ⇒ 水質改善

人為＞自然の時代　**人為影響の知見蓄積**

現在→将来

きめ細やかな栄養塩類の順応的管理

漁獲量低迷（ノリの色落ち、二枚貝減少等）

⇒ 栄養塩類管理制度創設（2021年瀬戸法改正）

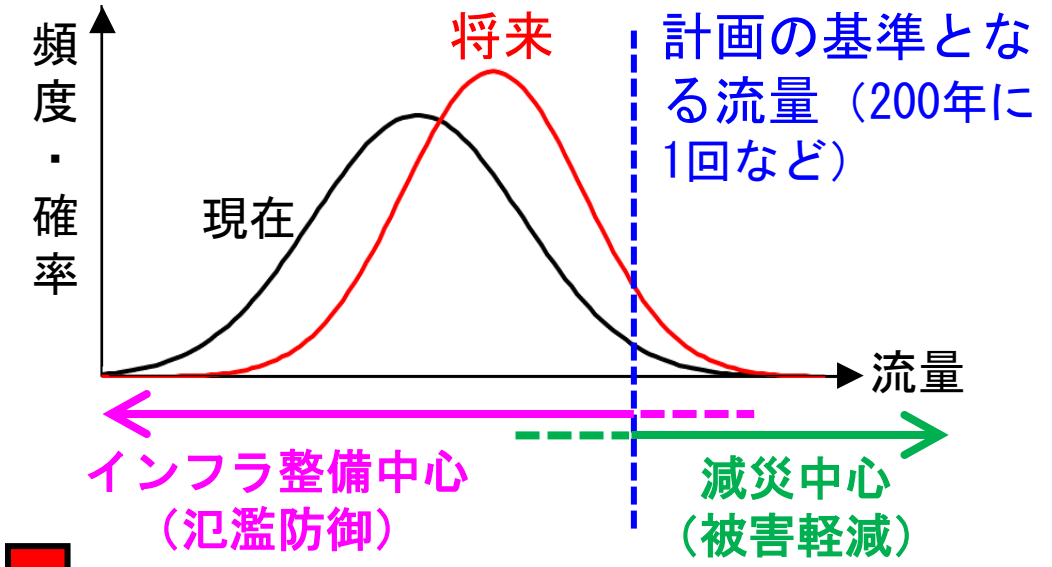
自然・気候変動にも対応する水質管理へ

自然＞人為に移行？　**自然影響の知見不足**

具体的方策の検討が行える状況ではない！

河川・流域の治水計画（防災分野）

自然（降水・流量）の生起確率 ⇒ 計画に



今後の水環境保全に必要な視点

［研究目的］ **有明海・八代海等の水環境・生態系を対象に気候変動の影響を予測**するとともに、豪雨出水などの**自然外力 → 海域の物質循環 → 貧酸素化に至る過程の類型化と生起確率、その将来変化**を明らかにする。⇒ **気候変動適応・再生方策検討の基礎構築**

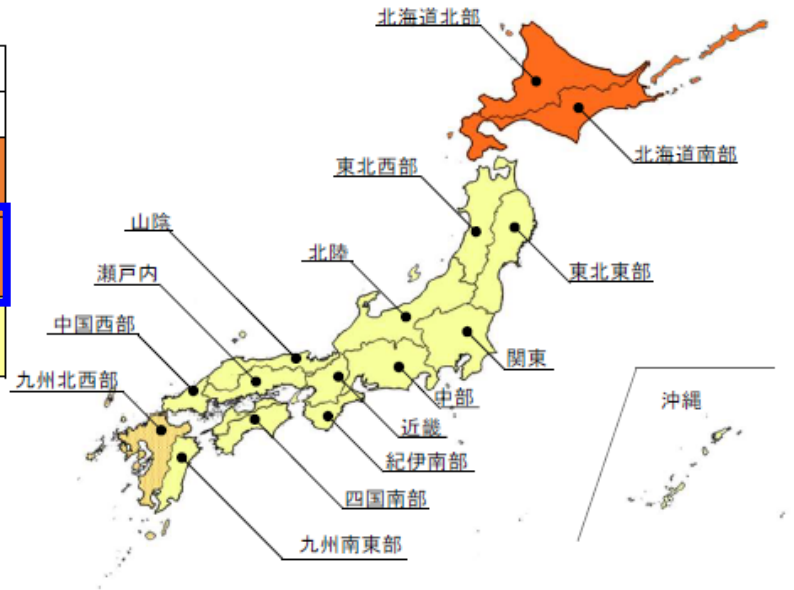
気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言　改訂版【概要】
＜気候変動に伴う降雨量や洪水発生頻度の変化＞

○降雨特性が類似している地域区分ごとに将来の降雨量変化倍率を計算し、将来の海面水温分布毎の幅や平均値等の評価を行った上で、降雨量変化倍率を設定。
○2℃上昇した場合の降雨量変化倍率は、北海道で1.15倍、その他（沖縄含む）地域で1.1倍、4℃上昇した場合の降雨量変化倍率は、北海道・九州北西部で1.4倍、その他（沖縄含む）地域で1.2倍とする。
○4℃上昇時には小流域・短時間降雨で影響が大きいため、別途降雨量変化倍率を設定する。

＜地域区分毎の降雨量変化倍率＞

地域区分	2℃上昇	4℃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℃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時間未満のこと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℃上昇時	約1．1倍	約1．2倍	約2倍
4℃上昇時	約1．3倍	約1．4倍	約4倍

※ 2℃、4℃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℃、4℃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）

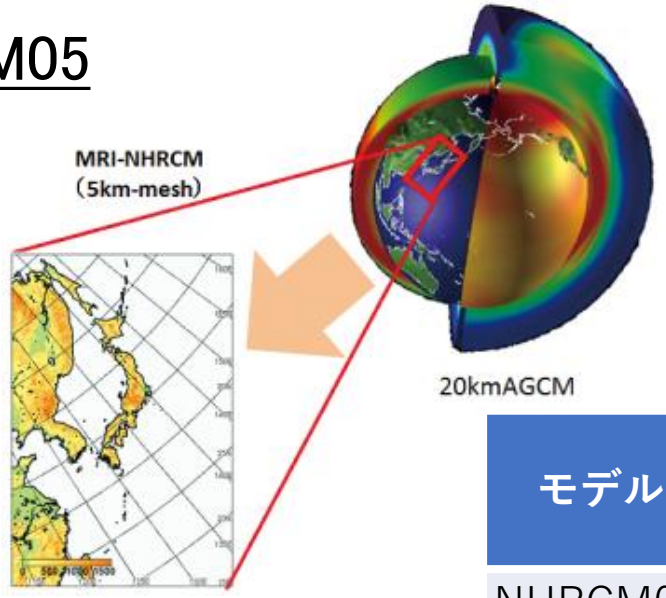
大規模アンサンブル気候予測データセットについて

➢ 非静力学領域気候モデル NHRCM05

・AGCM20の力学的DS：Mizuta *et al.* (2009)
・対流スキーム: Kain and Fritch (1993)

現在気候：1980–2000 (20年)
将来気候：2076–2096 (20年)

・RCP2.6と8.5、それぞれ4SSTアンサンブル



高解像度かつアンサンブル数が豊富な日本周辺の気候変動予測データが充実

各データセットのアンサンブル数×年数

モデル	現在気候	将来気候	
		RCP2.6(+2K)	RCP8.5(+4K)
NHRCM05	20	80	80
d4PDF	3,000	3,240	5,400

➢ d4PDF: database for Policy Decision making for Future climate change

・AGCM60の力学的DS：Sasaki *et al.* (2011)

現在気候：1951–2010 (60年)

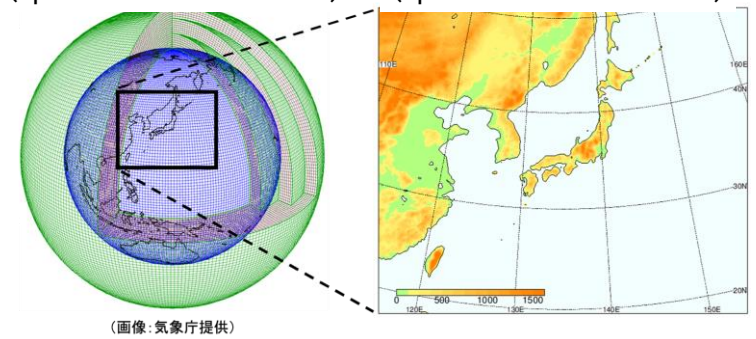
・100members（60km解像度AGCM）
・50members（20km解像度NHRCM）

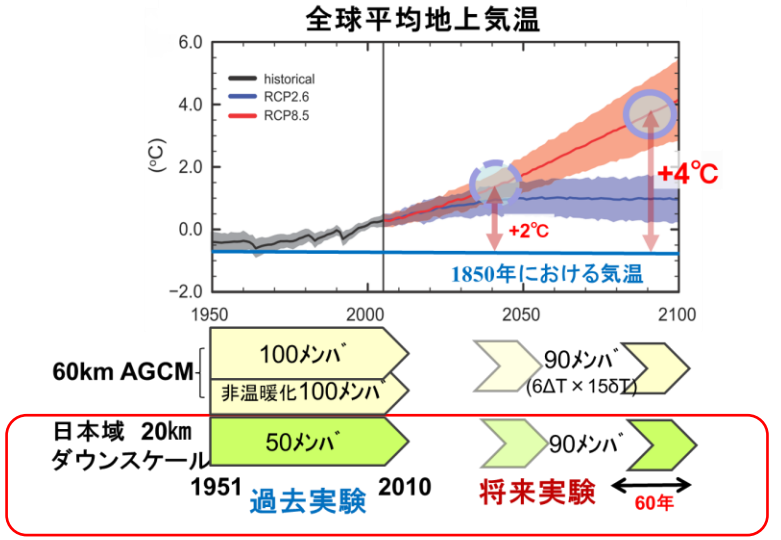
将来気候(+2K)：2040年ごろ (60年)

・54members(6SST (CMIP5) ×9ensembles)
・2度上昇定常状態で計算

将来気候(+4K)：2090年ごろ (60年)

・90members(6SST (CMIP5) × 15ensembles)
・4度上昇定常状態で計算





推進費の全体目標

大規模アンサンブルデータを活用した新たな水環境分野の気候変動影響評価

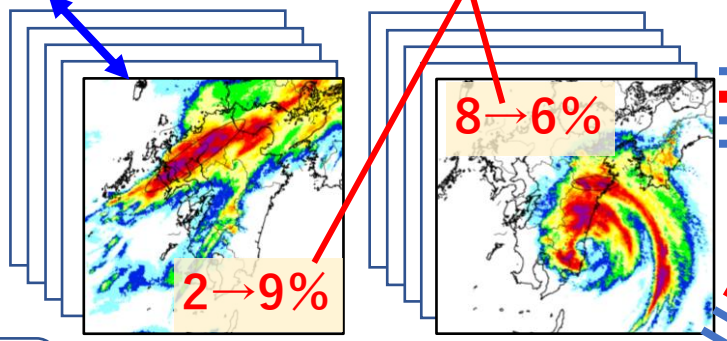
[大気]

豪雨

総降雨量
継続時間
一雨降水量
風速, 気温, etc.

同時/連続生起性　成因背景場

類型化　生起確率→将来変化



前線性豪雨パターン　台風性豪雨パターン

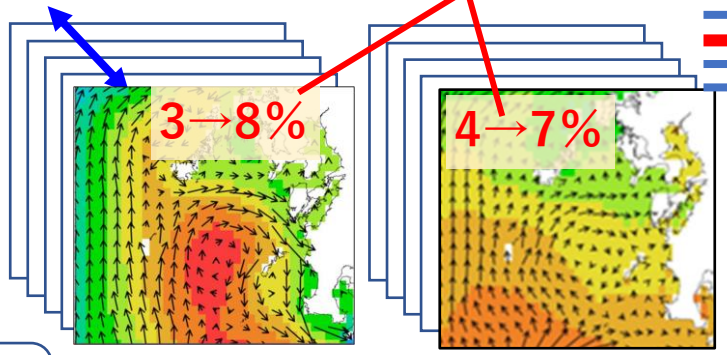
[海洋]

外洋

対馬暖流・暖水渦
海面高度・水温
塩分, 流速, etc.

同時/連続生起性　成因背景場

類型化　生起確率→将来変化



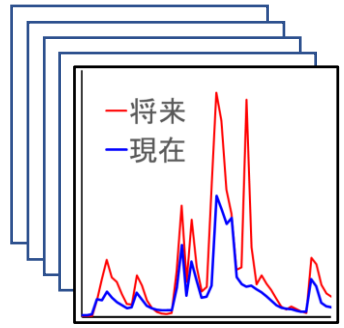
海面高度パターン　海面水温パターン

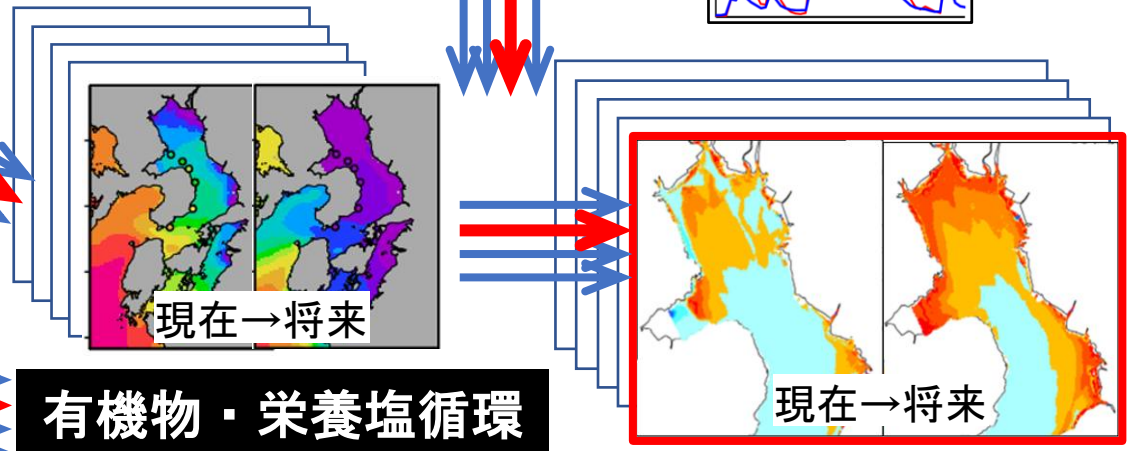
貧酸素に繋がるパターン・頻度を特定

[有明海・八代海等]

陸域流出

淡水・土砂
栄養塩類





有機物・栄養塩循環
海水・物質交換

流動・水質・底質
（水温, 有機物, 栄養塩, etc.）

貧酸素水塊

規模・継続時間

影響評価 → **底生動物** ← 影響評価

空間分布・群集構造

研究目標：　研究体制とサブテーマ構成

研究代表者：
矢野真一郎（九州大学）

有明海・八代海等を対象

全体目標1：
- 陸域ー海域モデル開発
- 大規模アンサンブル気候DBに基づく水環境アンサンブル将来予測DB
- 底層環境から底生生物生息分布を予測

全体目標2：
- 気象場の特性評価
- 物質フロー
- 貧酸素の生起確率
- 貧酸素を発生する自然外力の類型化と気候変動影響評価

ST1：貧酸素化に影響する豪雨パターンの気候変化解析

豪雨

リーダー：中北英一（京都大学）
メンバー：山口弘誠(京都大)・仲ゆかり(京都大)

ST1目標1：特徴的豪雨パターンの貧酸素への影響度評価
ST1目標2：前線性豪雨・台風性豪雨の貧酸素への影響評価

ST2：海水交換および有機物・栄養塩循環の将来変化と底生動物への影響

外洋　物質循環　底生動物

リーダー：東博紀（国立環境研究所）
メンバー：金谷弦(国環研)・牧秀明(国環研)

ST2目標1：外洋ー内海の海水交換・物質循環の将来予測
ST2目標2：底生動物の空間分布・群集構造への影響評価

ST3：貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価

貧酸素水塊

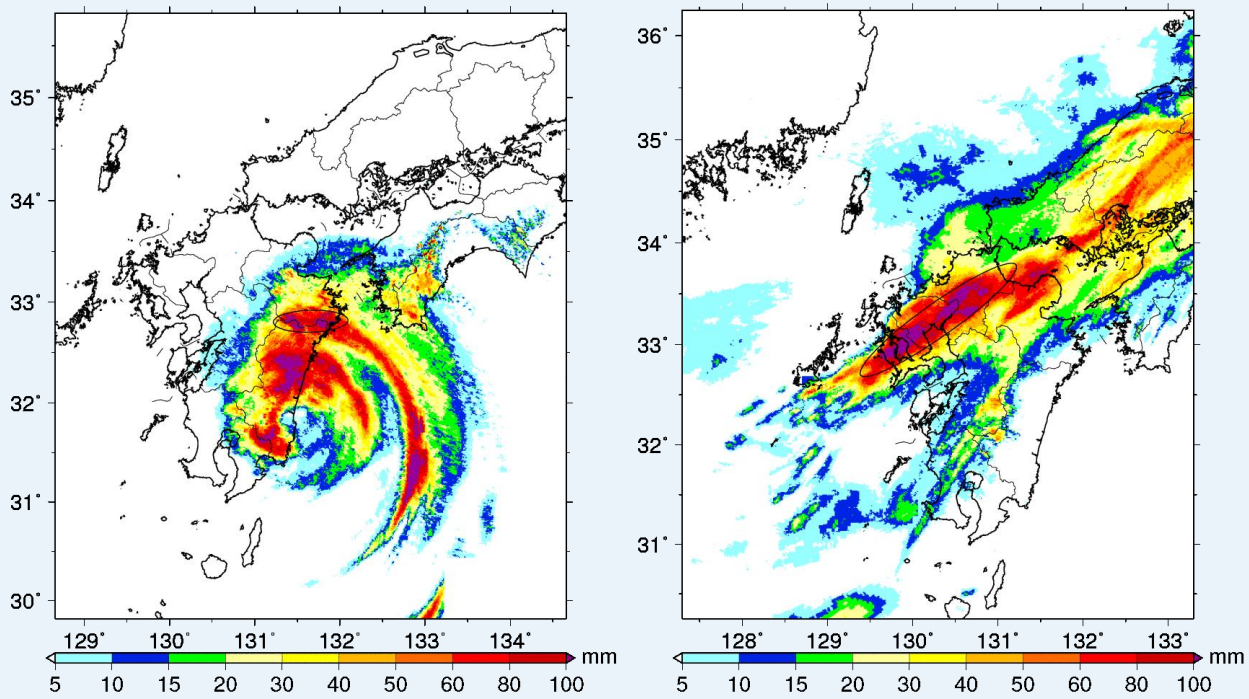
リーダー：矢野真一郎（九州大学）
メンバー：渡部哲史(九州大)・入江政安(大阪大)
・丸谷靖幸(九州大)・HAO LIN（九州大・R6より追加）

ST3目標1：d4PDFを用いた陸域からの水・物質流出変化予測
ST3目標2：アンサンブル水質計算による貧酸素規模の確率表記

貧酸素化に影響を与える気象成因解析

台風・強風 ✖ **前線性豪雨**

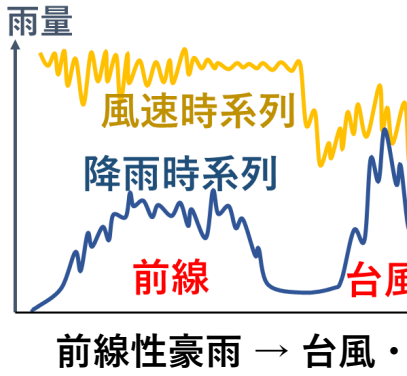
強風の海水撹拌で**貧酸素化解消**　持続的多雨で**貧酸素化促進**



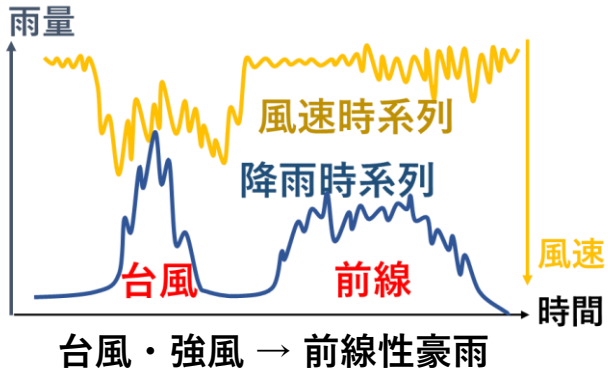
※レーダ雨量による3時間雨量分布

1. 台風・強風／前線性豪雨の生起特性解析

- 貧酸素化に影響を与える気象要因の生起特性
- 各気象要因の**連続生起**特性



前線性豪雨 → 台風・強風



台風・強風 → 前線性豪雨

- 過去の豪雨パターンの成因・生起頻度は？
- 風速時系列と降雨時系列の関係は？

2. 貧酸素化に影響を与える気象要因の定量化

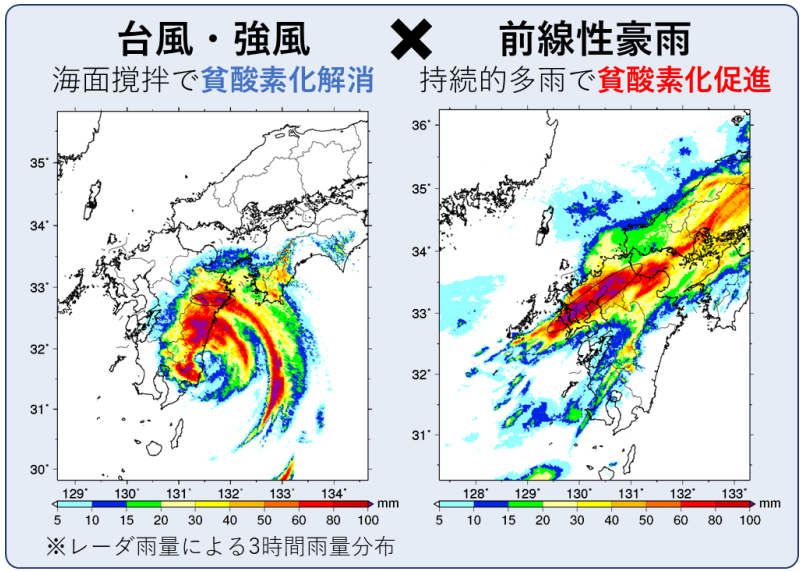
- 各気象パターンの有明海・八代海等の貧酸素化への影響度を評価（サブテーマ2・3と連携）

■ **台風・強風／前線性豪雨**（九州北部で特に重要）に着目
■ **連続生起特性の解析は気象・気候学的にも新規性が高い**

貧酸素化に着目したからこそ出てきた新たな視点
気象・気候と水質環境の協働で学際的な貢献

研究内容：ST1貧酸素化に影響する豪雨パターンの気候変化解析（京都大学）

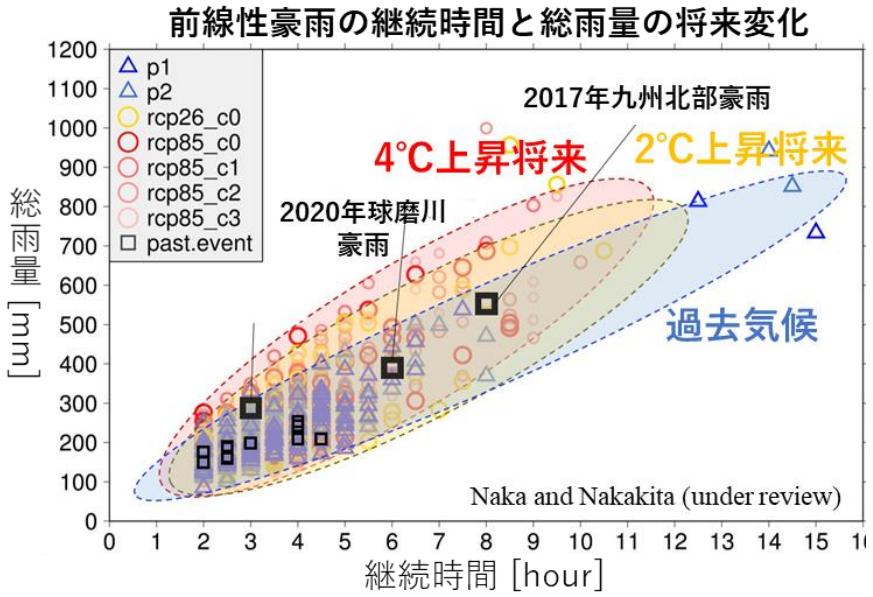
気候モデル予測データを用いた将来予測

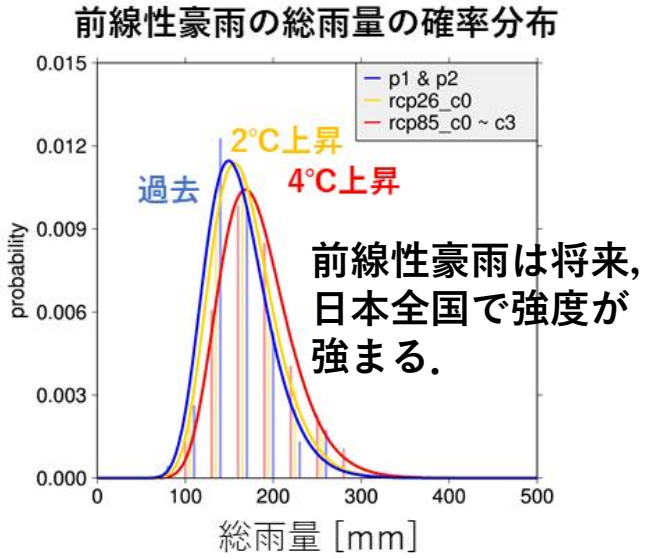


貧酸素に影響を与える気象要因
（台風・強風／前線性豪雨）の
頻度・強度・生起パターン等の
将来変化を解析

1. 高解像度将来予測データ
   →**5kmの高解像度**データ（NHRCM05）で**定量的予測**
2. 大量アンサンブル将来予測データ
   →**最大5400年分の大量のデータ**（d4PDF）で**確率的予測**

※2℃上昇，4℃上昇の温暖化シナリオを想定．





前線性豪雨は将来，日本全国で強度が強まる．

有明・八代海の貧酸素化に影響を与え得る気象要因特性と確率情報を含む将来変化を統合的に提示

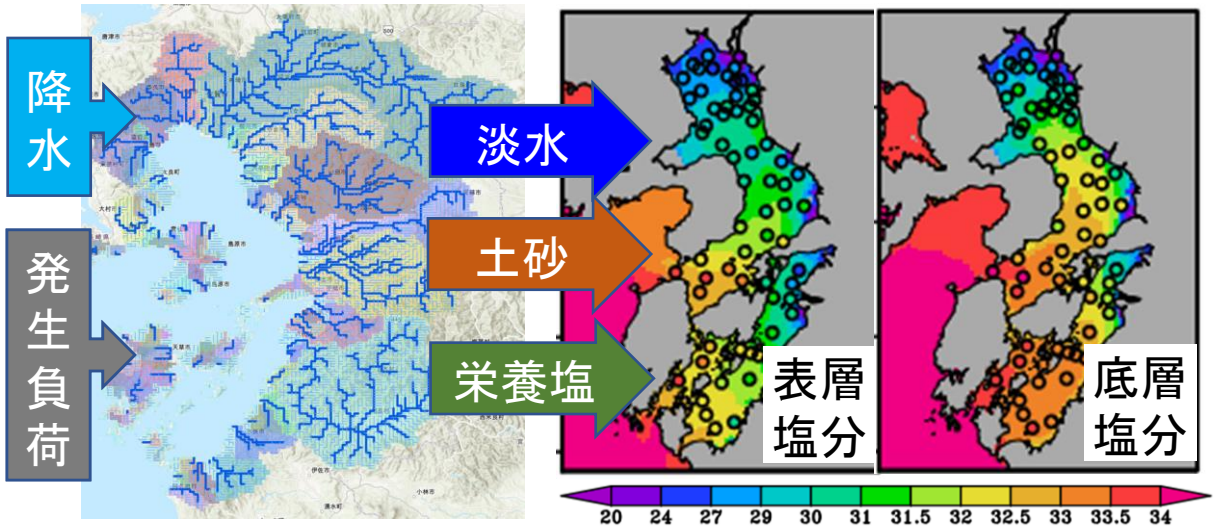
研究内容：

ST2海水交換および有機物・栄養塩循環の将来変化と底生動物への影響（国立環境研究所）
ST3貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価（九州大・大阪大）

ST2：陸域ー海域モデル（国立環境研究所）

行政への貢献実績（瀬戸内海、伊勢湾、東京湾）
・第９次水質総量削減　・気候変動影響予測

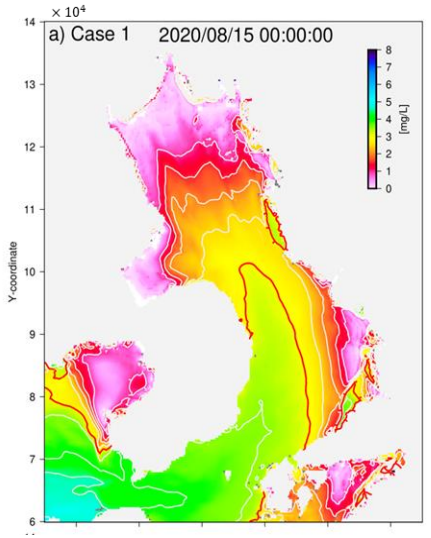
陸域分布型流出モデル　海域流動・水質・底質モデル



ST3：有明海・八代海モデル（九州大学）

有明海・八代海での研究実績（有明海：諫干の影響，気候変動影響評価，八代海：微量残留水銀動態解析，ブルーカーボン動態解析，など）

出水時のDO（2020年）　出水規模と貧酸素継続時間



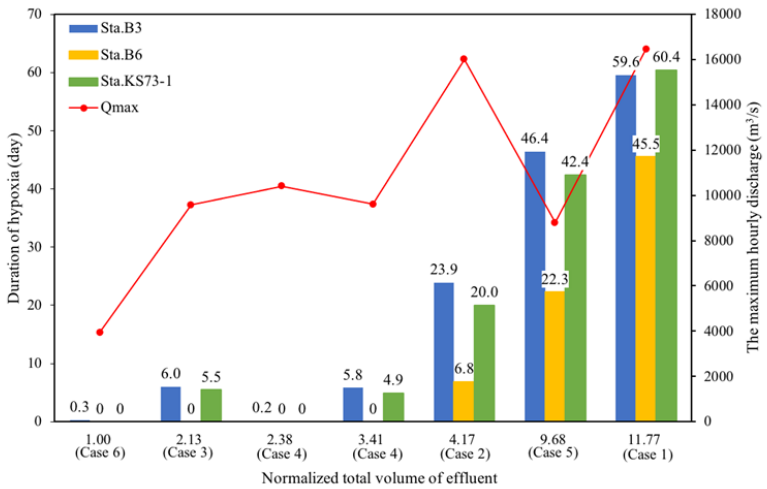


Fig. 18 Relationship of normalized total effluent volume and duration of hypoxia

- 有明海・八代海モデル開発中 ⇒ 物理場（河川流量、海水温、塩分、潮位など）の再現性を確認
- 発生負荷量データ整備中 ⇒ 来年度水質計算開始
- 県の浅海定線調査データ（1970～）等を収集・解析中

- 有明海・八代海モデル開発済み ⇒ 物理場・DOの再現性も確認済み。既発表論文多数。
- 2001年以降のDO計算⇒淡水の総流出量に応じて貧酸素規模の増大が確認された。

➢ サブテーマ2と3の協働で構築，目的に応じて統合化・マルチ化

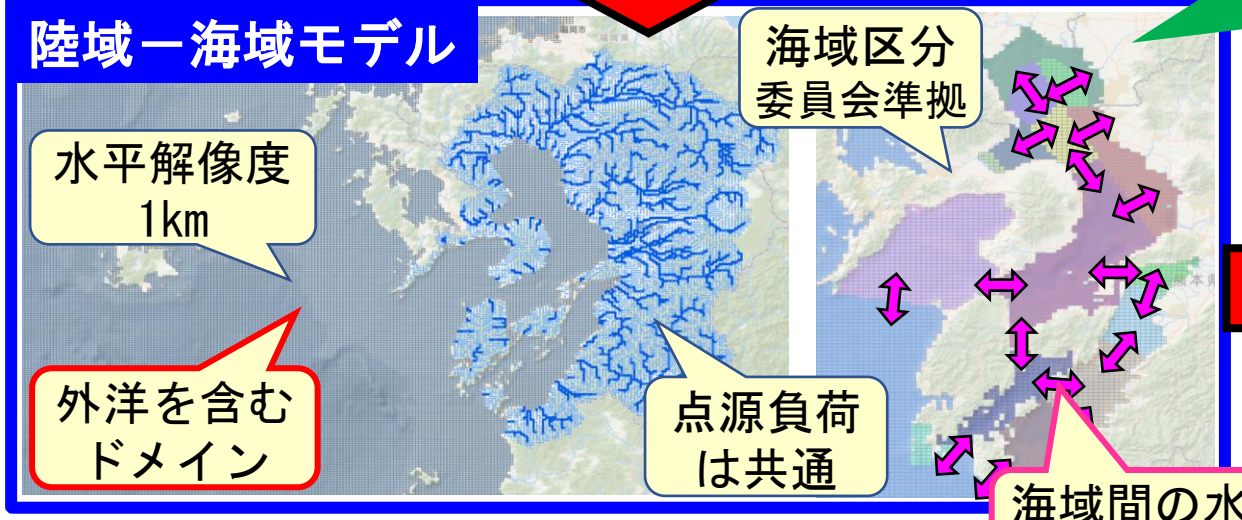
研究内容：ST2海水交換および有機物・栄養塩循環の将来変化と底生動物への影響（国立環境研究所）

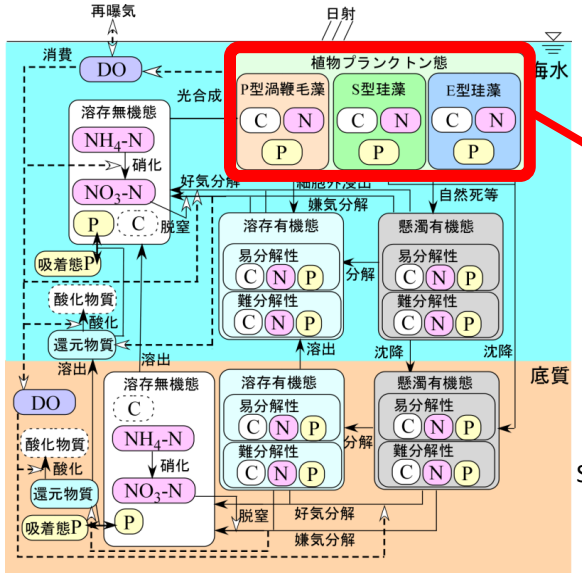
ST2目標1: 海水交換速度や物質滞留時間など、有機物・栄養塩循環への気候変動影響を予測

現況再現＋気候シナリオ（自然外力）　ST1との協働

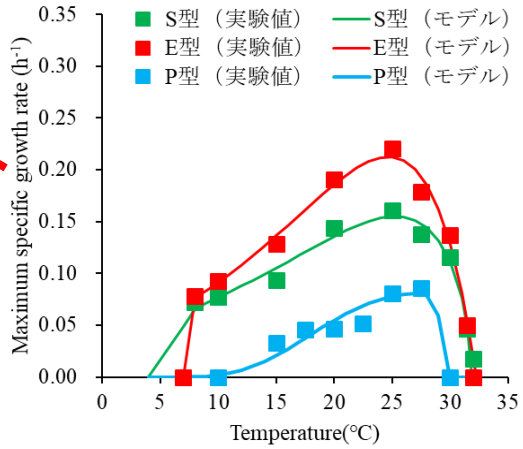
気候	年代	気象データ	海洋データ
現況	2000年代～2022年	GPV-MSM	JCOPE2M
現在	20世紀末（20年間）	NHRCM05	FORA-WNP
将来	21世紀末 RCP2.6/8.5	NHRCM05	FORP-JPN02

陸域－海域モデル





水質・底質モデル



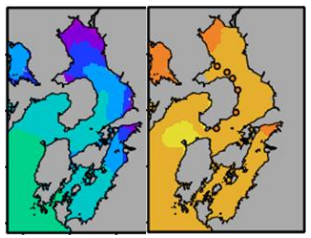
S型：*S. marinoi-dohrnii*, E型：*E. zodiacus*, P型：*P. dentatum*

培養実験に基づくモデル化

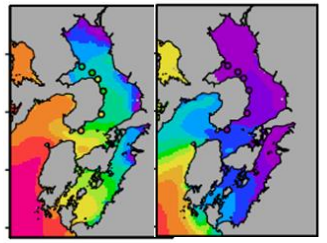
（環境省受託業務⇒推進費5-2202）

各気候20年間連続計算の予測データ

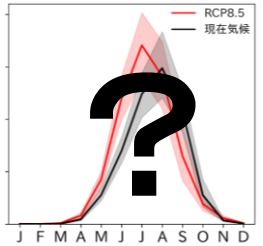
流速, 水温, 塩分, 水質・底質(C-N-P-O), 各フラックス



水温上昇



出水・塩分降下



有機物・DO変化

ST2目標2　底生動物の影響評価

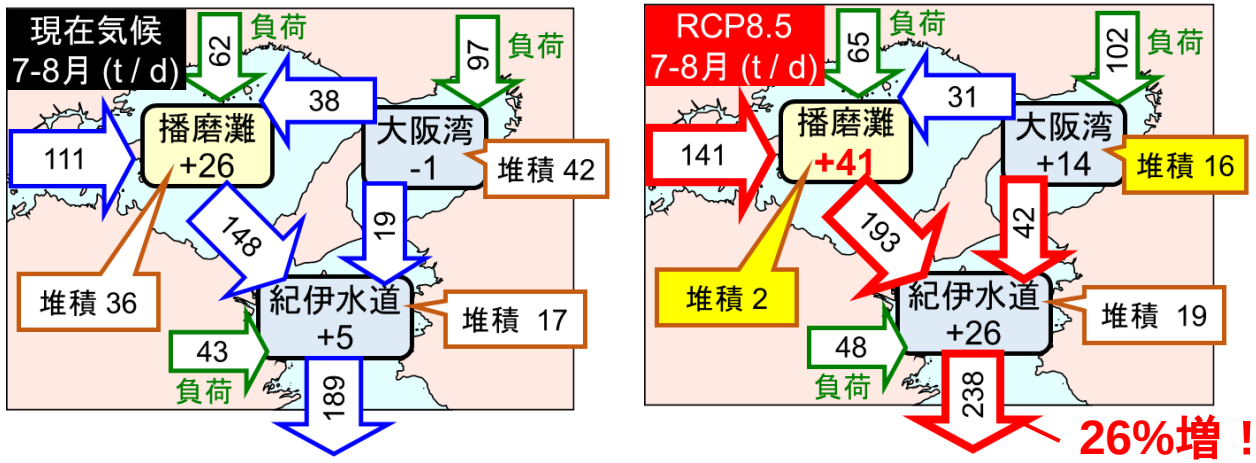
研究内容：ST2海水交換および有機物・栄養塩循環の将来変化と底生動物への影響（国立環境研究所）

出水＋外洋 ⇒ 海水・物質フロー に着目

潮汐の長期変動は検討済み (H28委員会報告) だが、

外洋の海流・暖水渦の影響は未解明

先行研究: 瀬戸内海東部のTNフロー（東ら, 2021）



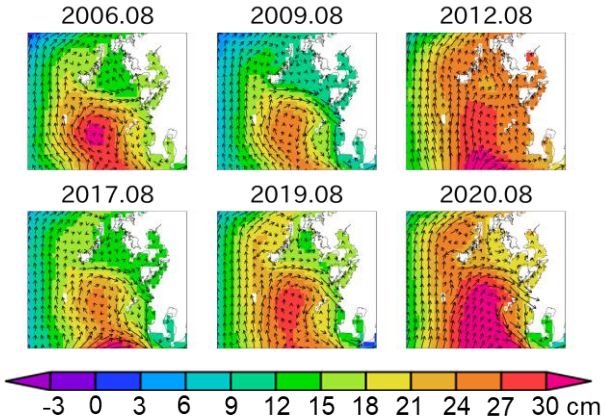
長期 (気候値) : **内海⇒外洋の窒素流出が増加**

原因：夏の高温化⇒　一次生産低下⇒　沈降・堆積減少

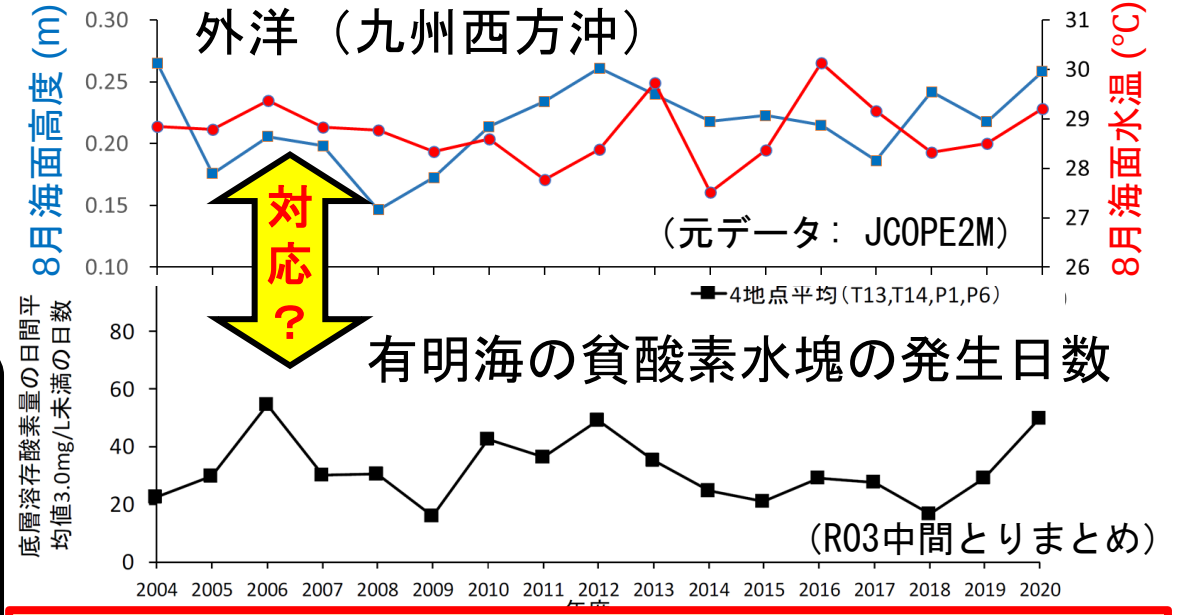
（海水フローや陸域負荷に有意差なし）

ただし、**短期 (年/季節) 変動 >> 長期変動**

原因：**外洋(黒潮の離接岸)**と**陸域からの出水**



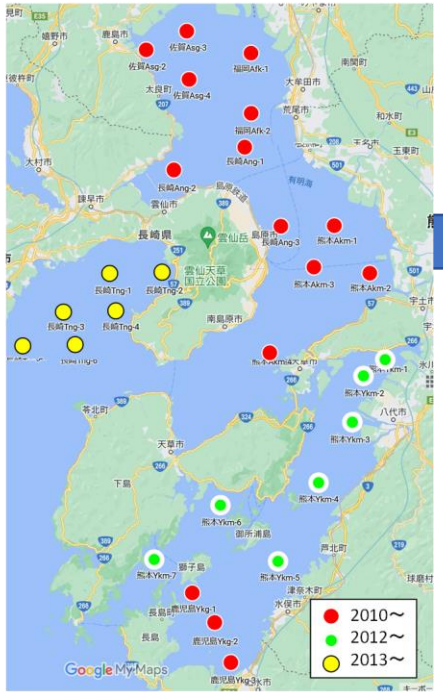
JCOPE2M(JAMSTEC)
の各年8月の海面高度



背景場 ⇒ 海水・物質フロー ⇒ 貧酸素水塊の類型化と生起確率＋将来変化

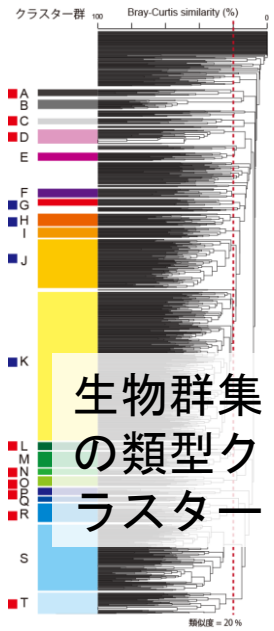
研究内容：ST2海水交換および有機物・栄養塩循環の将来変化と底生動物への影響（国立環境研究所）

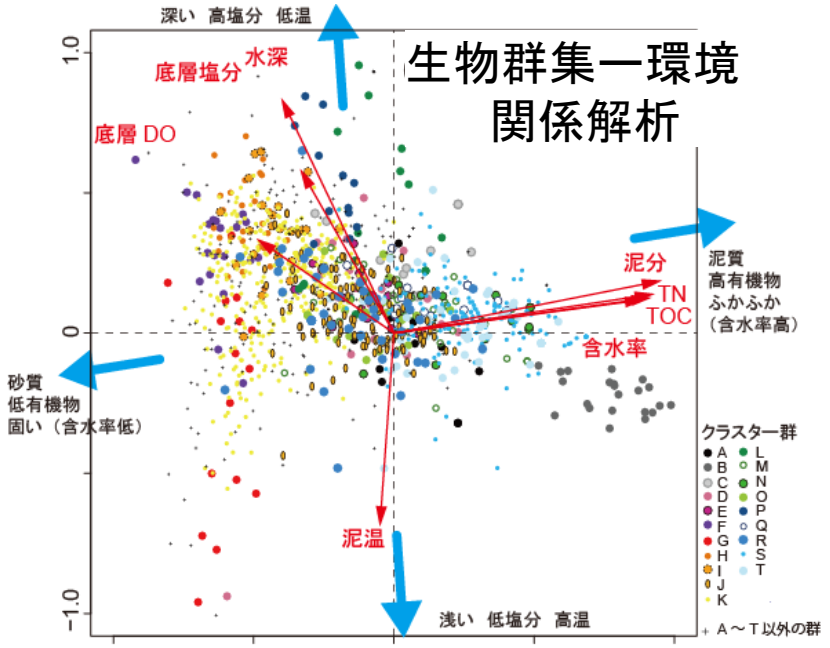
有明海・八代海の底質・底生動物調査データ（環境省2000年代～現在，年2回）



群集構造解析
環境傾度分析

有明海・八代海ではどのような「場」にどのような底生動物群集が成立しているか？

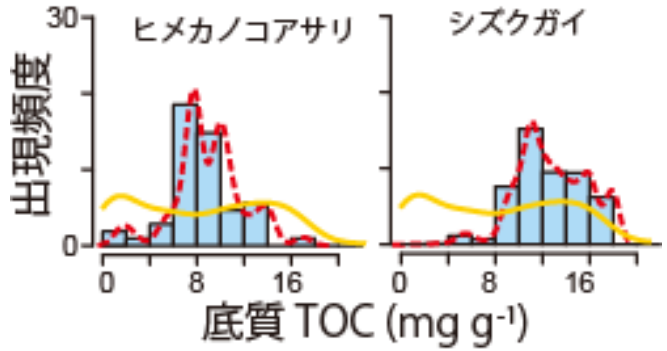




瀬戸内海での先行解析事例：群集構造は底質環境と水深・水温勾配に沿って変化（環境省受託業務）

底層環境―出現頻度解析(種ごと)

他海域の知見や文献情報の活用



瀬戸内海（425地点）の底生動物279種の多くが底質TOCや泥分に対して単峰分布を示した（環境省受託業務）

＋底生動物について文献情報の収集
（タイラギなど水産有用種含む）
→底質，水温・塩分・貧酸素耐性など

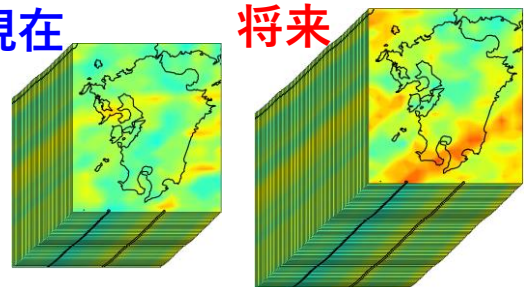
陸域ー海域モデルの将来予測結果
水質環境（水温，DO，塩分など）
底質環境（泥分，底質TOCなど）

ST2目標2：底生動物の空間分布や群集構造への気候変動影響を予測
～どこで、どのように変わるのか？～

研究内容：ST3貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価（九州大・大阪大・京都大）

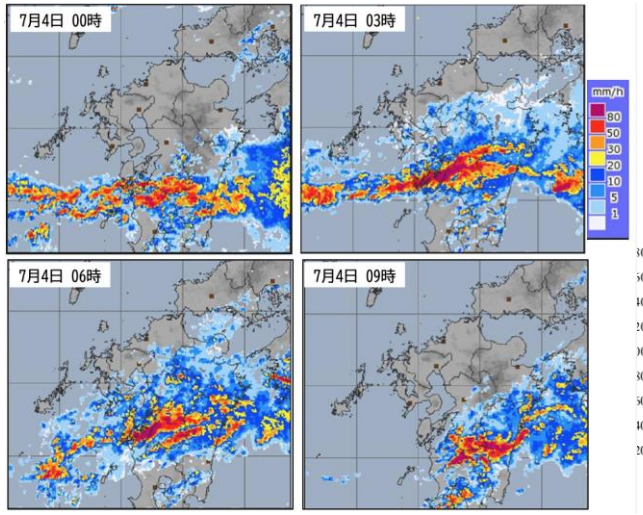
研究のフロー

現在 / 将来

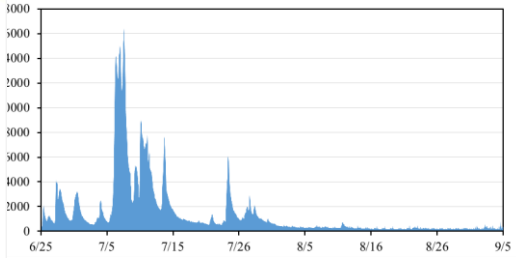


d4PDFなどの気候変動予測アンサンブルデータ
[現在気候：3000年,将来気候：3240年(+2K)，5600年(+4K)]

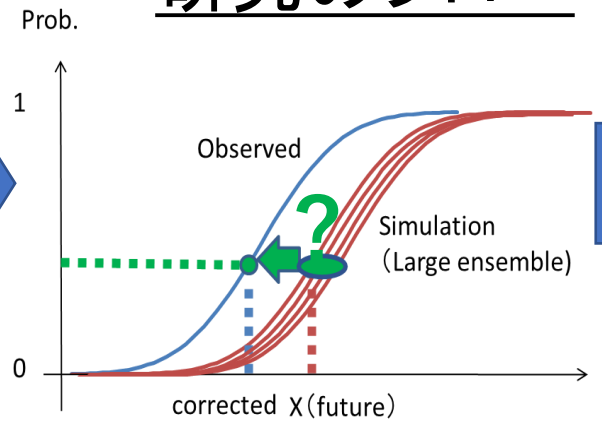
R2豪雨



観測値：気象観測所で100年，レーダー雨量は20年程度．河川流量（時間流量）は2000年以降．



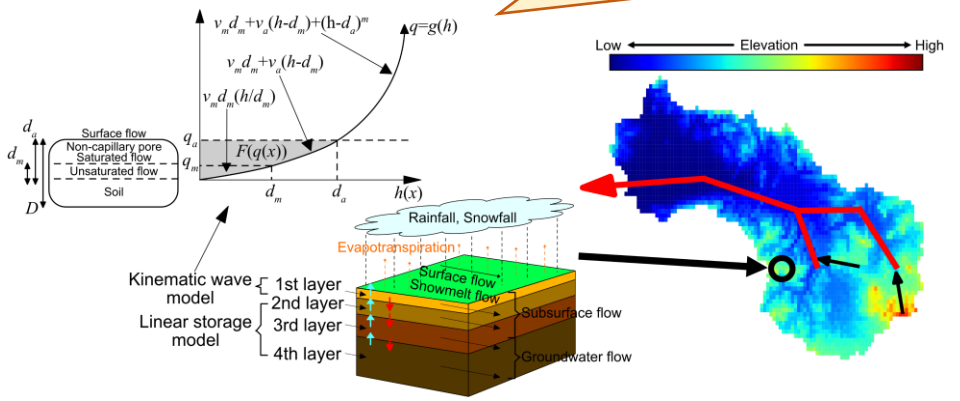
流量ハイドロ・ポリュートグラフ



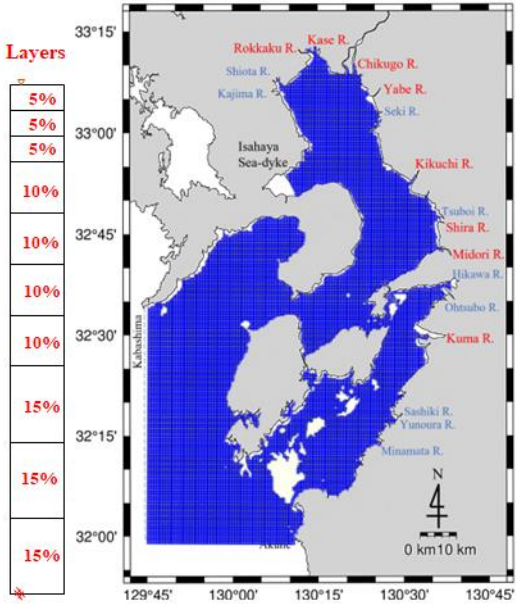
アンサンブルデータのバイアス補正

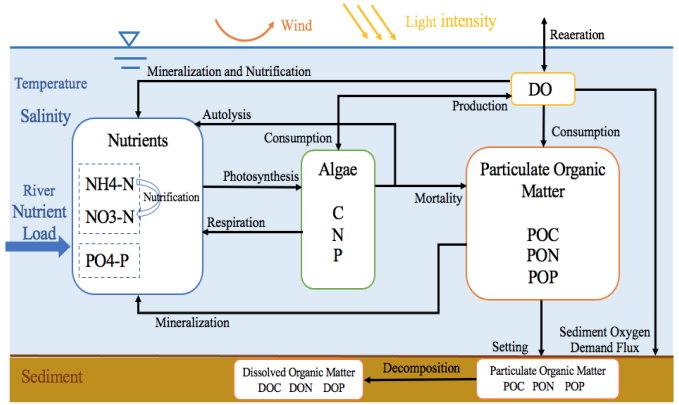
ST1との協働

出水時の物質・土砂流出量観測によりチューニング



分布型水・物質流出モデル（氾濫・ダムを付加）





既往モデルで最高の解像度（Δx=250m ）

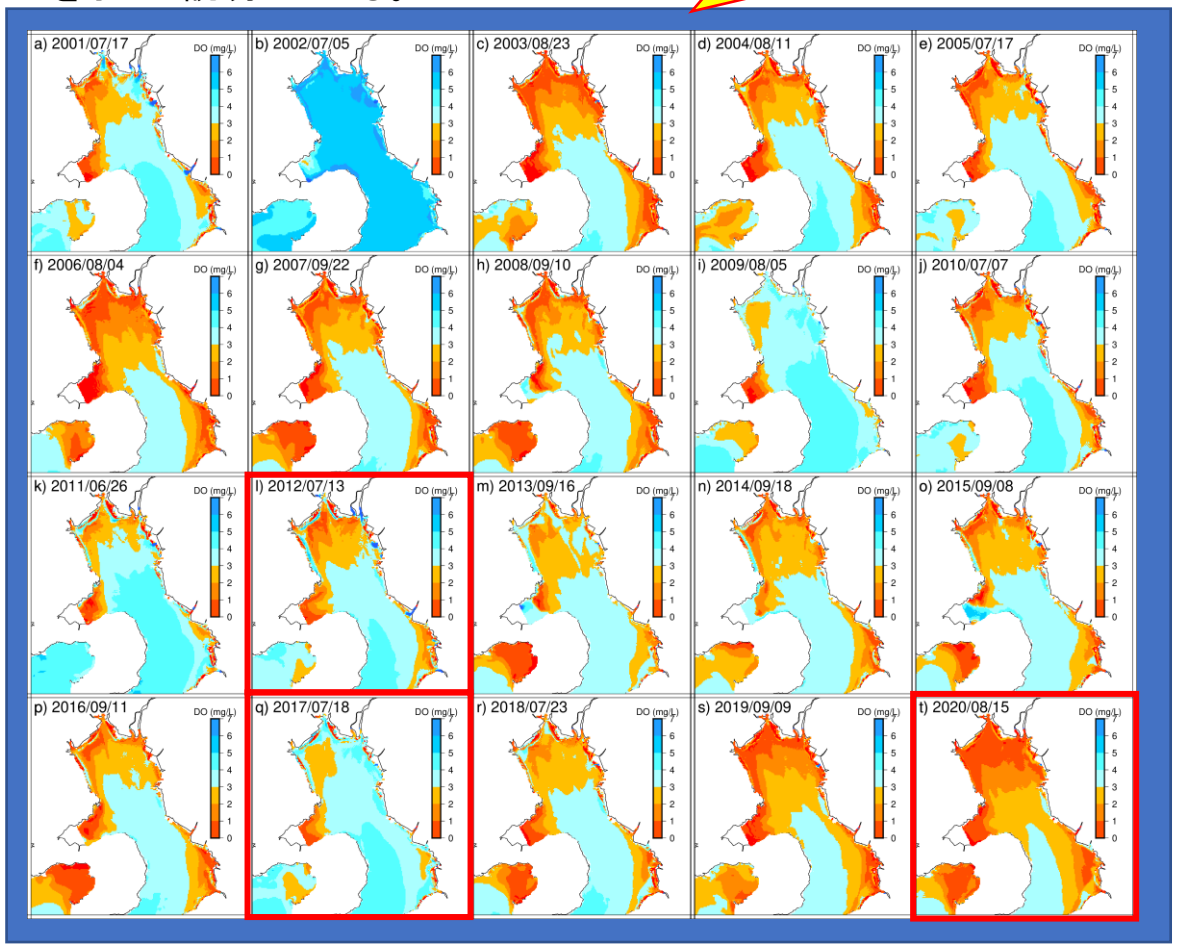
流動モデル＋低次生態系モデル（Delft3D-Flow&WAQ）

研究内容：ST3貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価（九州大・大阪大・京都大）

アウトプットのイメージ

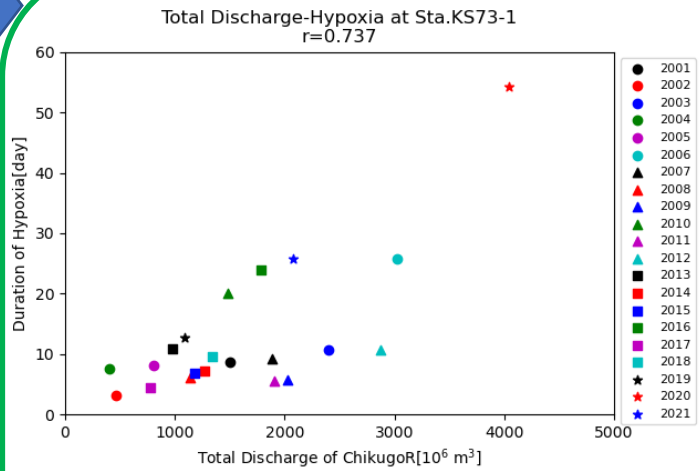
※ここではすでに実行済みの結果を示して説明している。

大量アンサンブル計算の実行を行う

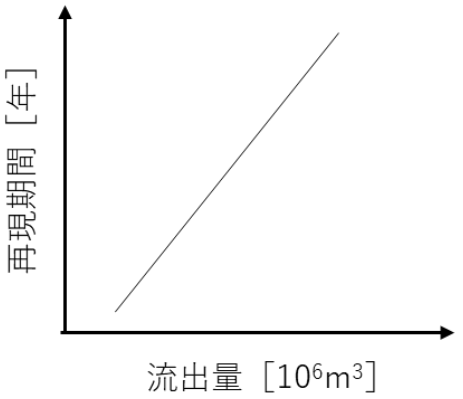


観測値に基づくDO動態（底層，洪水時の貧酸素最大時．2001～2020年）[2012年：H24九州北部豪雨，2017年：H29九州北部豪雨，2020年：R2豪雨]

ある気候条件下での統計的関係評価



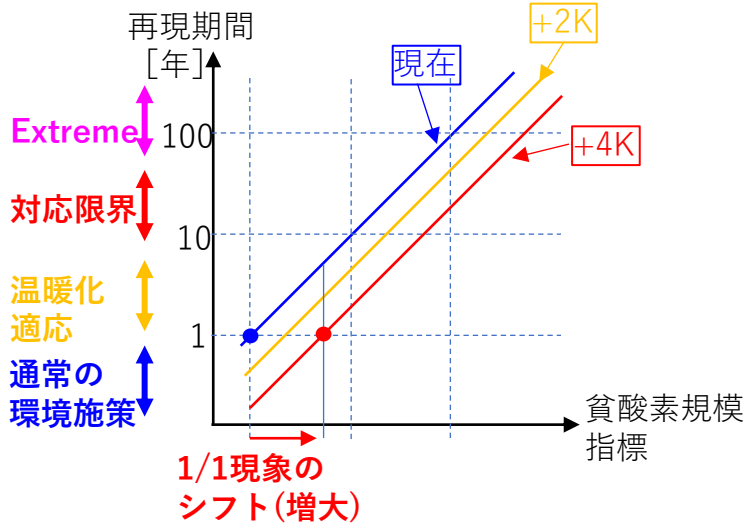
河川流出量（横軸）に対する貧酸素継続時間（縦軸）の関係



河川流出量と再現期間の統計的関係

アウトプット・イメージ：

- ✓ 気候条件ごとの貧酸素規模やポリュートと再現期間の関係性．
- ✓ 環境行政対応や温暖化適応策検討の基礎．

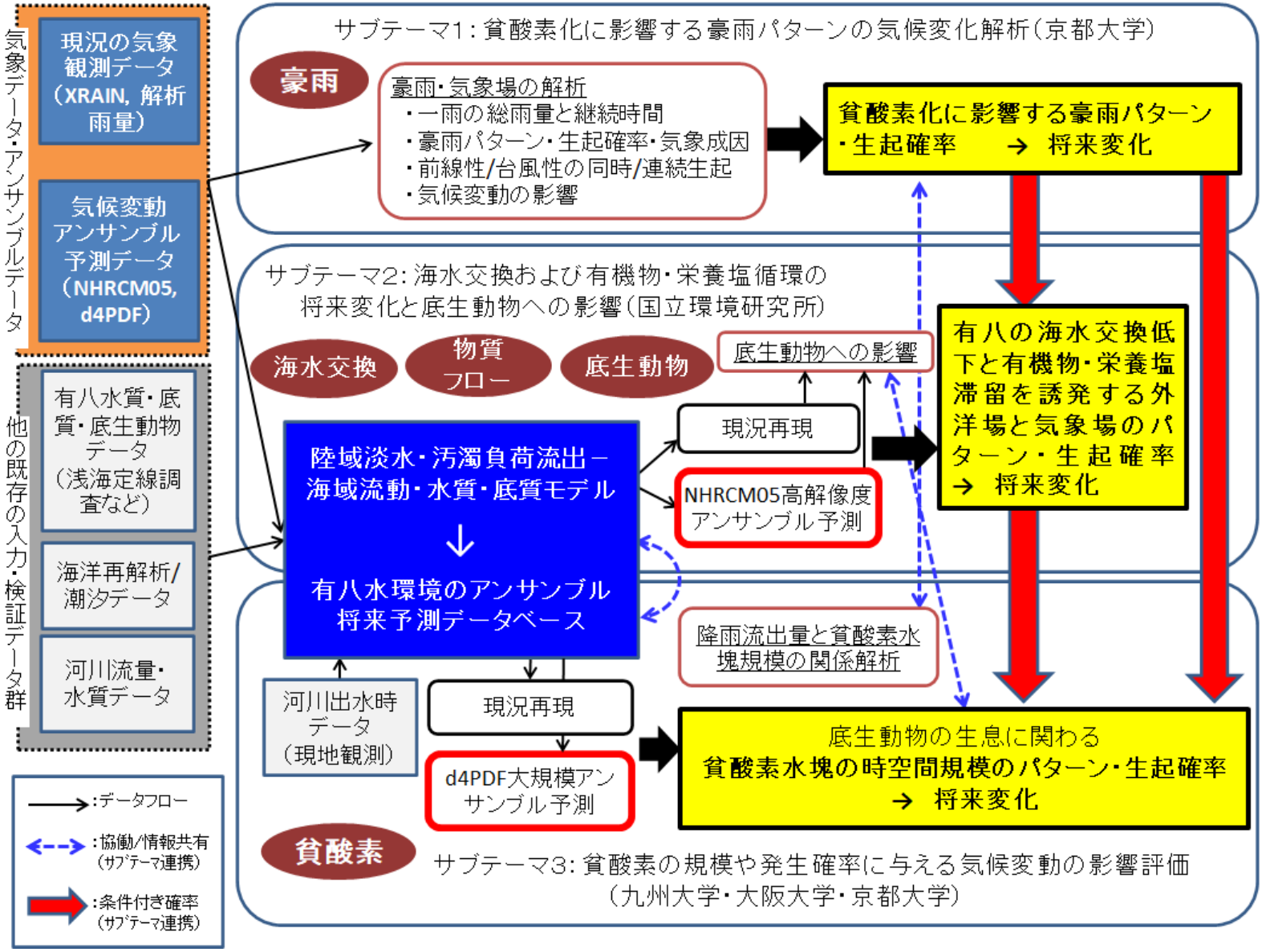


全体構想

自然外力の増加に適応する水環境保全に向けた有明海・八代海等の気候変動影響評価

研究代表者：矢野真一郎（九州大学）

大規模アンサンブル予測を活用した新たな水環境分野の気候変動影響評価



環境政策貢献

- R8評価委員会報告
- 地域循環共生圏の気候変動適応、防災と環境保全の両立・調和
- きめ細やかな水質管理の方策検討
- 他の閉鎖性海域や水環境問題への展開・応用
- 気候変動影響評価報告書

期待される研究展開

- Deep Learningによる貧酸素予測モデル構築のためのデータ提供
- 過去再現計算における水環境レベルの客観的評価　etc.

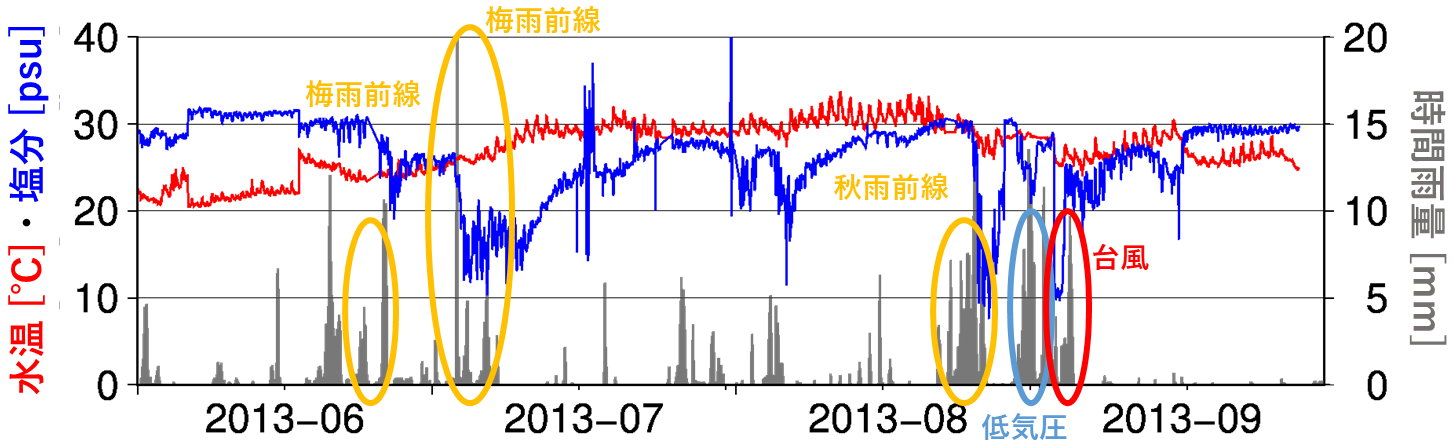
サブテーマ1
貧酸素化に影響する豪雨パターンの気候変化解析

京都大学防災研究所
気候変動適応研究センター

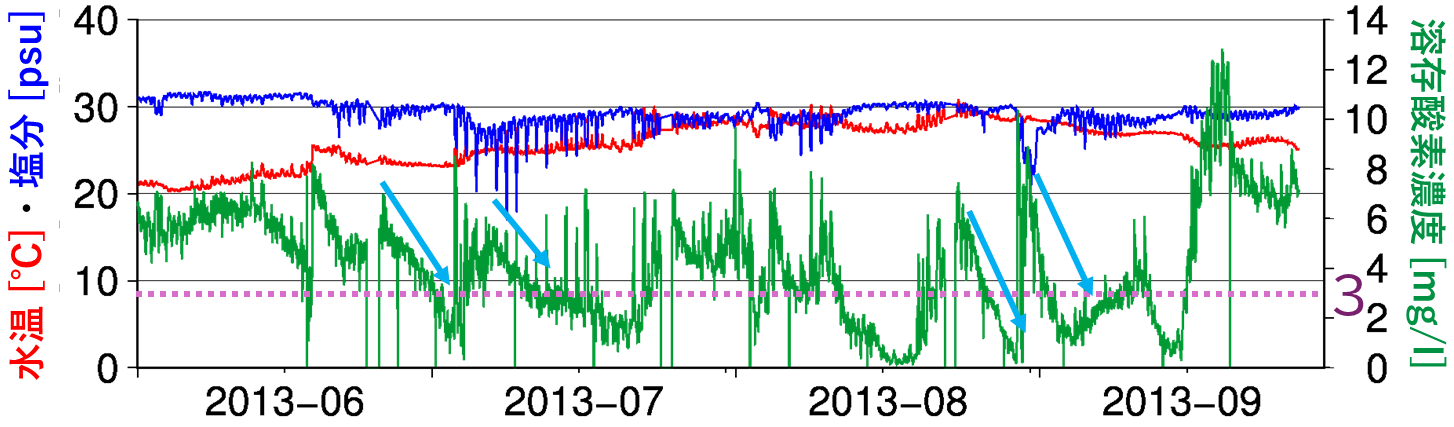
中北英一・山口弘誠・仲ゆかり

2013年6～9月の有明海における貧酸素化

表層
@0.5m



底層
@海底上0.2m

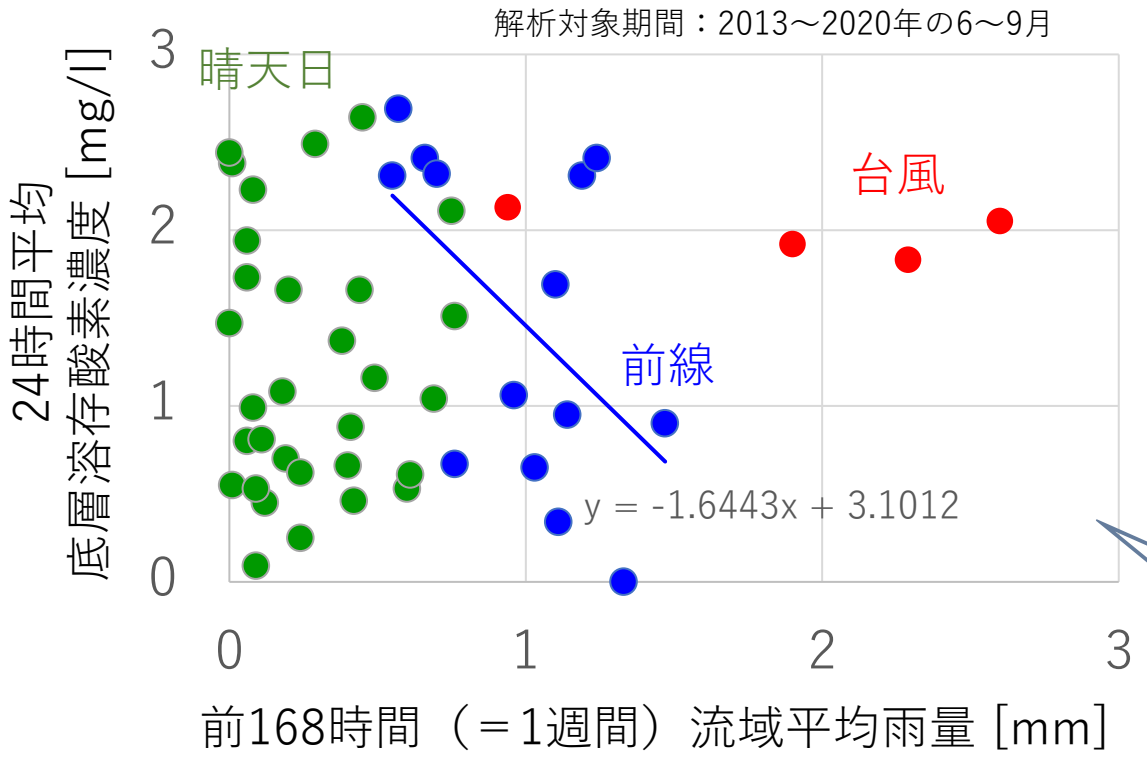


気象庁解析雨量を用いて、筑後川流域平均雨量を算出した。

環境省事業において水産研究・教育機構が取得した有明海の水質環境連続観測データを使わせていただいた。

- 年に数回程度の頻度で3mg/lを切ることがある。（2013～2020年の8年間では50回。）
- 比較的大きな降雨イベント後、1週間程度をかけて貧酸素化が進行することが多い。
- 一方、台風事例では貧酸素化が進行しない場合もあった。

なぜ気象特性をみるのか？



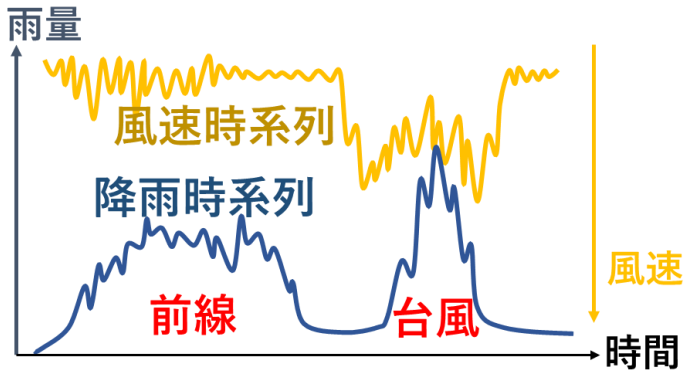
- 8年間で50回の貧酸素化。6割は晴天日型。4割が降雨型。
- 前線の場合、雨量と貧酸素化に相関がある。
- 前線と台風で傾向が異なる。
  台風は強風を伴い、撹拌による鉛直混合のため、貧酸素化が進みにくい。
- 「前線→１週間以内に台風」が2事例でいずれも貧酸素化せず。「台風→1週間以内に前線」が3事例でいずれも貧酸素化あり。

気象特性による貧酸素化の要因：

①連続晴天日タイプ
夏場、日射により海の表面が温められて成層化し、表面の水と底の水が混ざりにくくなる。

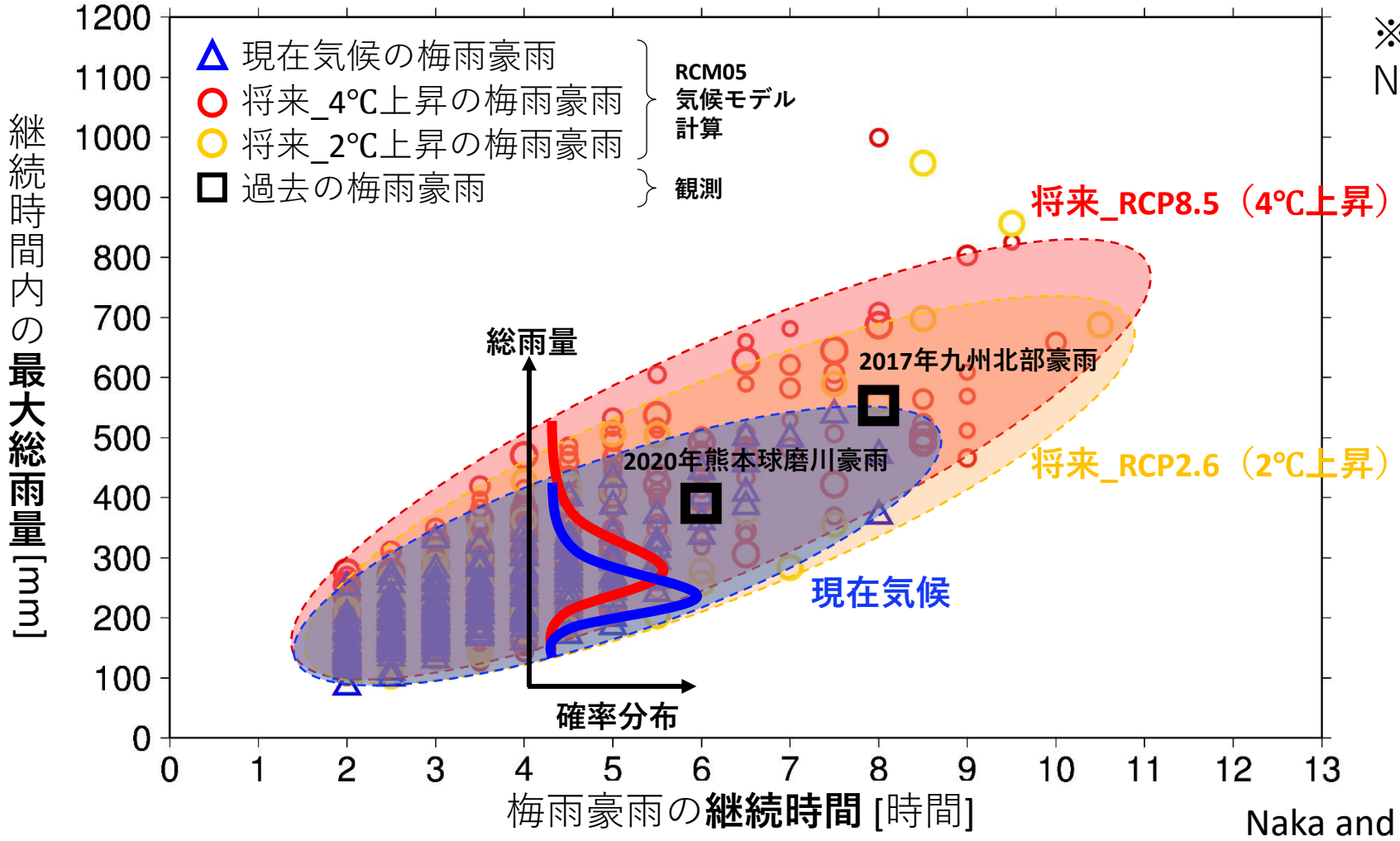
②降雨タイプ
降水によって多量の淡水が海域に流入し、成層化する。
河川由来の栄養塩・有機物質が流入し、酸素を消費する。

降雨の時はその成因（前線、台風など）を考慮し、かつ、連続生起特性をも考慮する必要がある。



梅雨豪雨“ひと雨”の将来変化（日本全国）

※降雨の継続時間と総雨量は治水計画等を考える上で非常に重要な**工学的指標**.



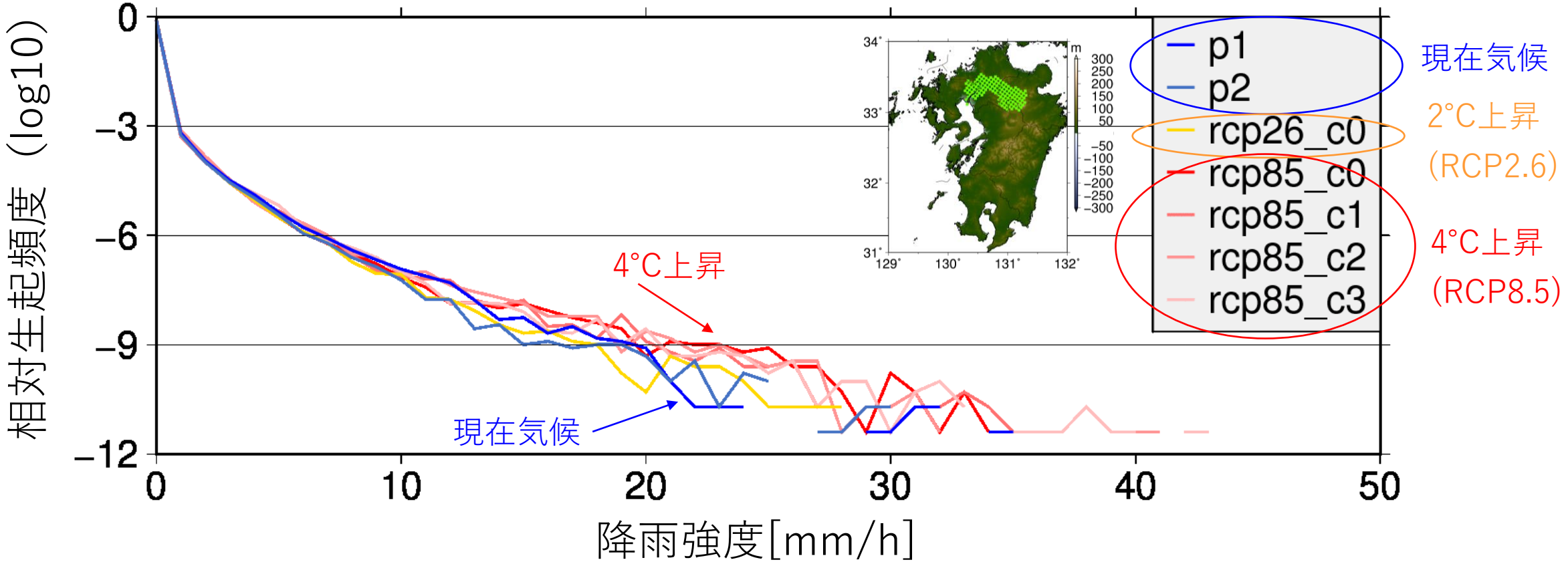
※領域気候モデル
NHRCM05による

Naka and Nakakita, 2023.

■ 将来気候では梅雨豪雨の**継続時間・総雨量共に増加**（総雨量は統計的有意）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.

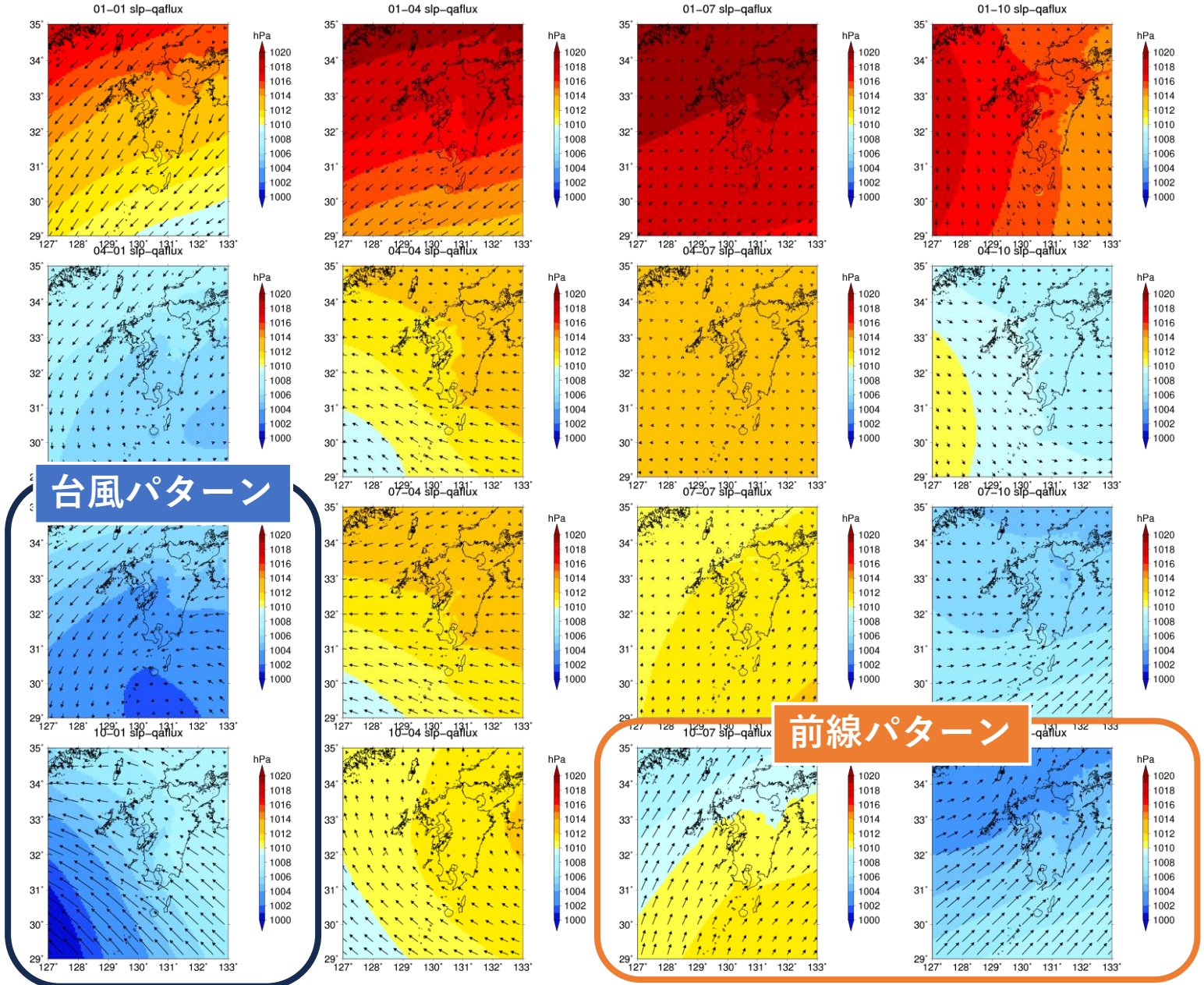
筑後川流域平均雨量の将来変化



2°C上昇シナリオ（黄色）では顕著な変化は見えないものの,
4°C上昇シナリオ(赤色)は10mm/h以上くらいから顕著な増加を確認できる

4°C上昇シナリオでは、貧酸素化をもたらしうる雨量の生起頻度が有意に増大する

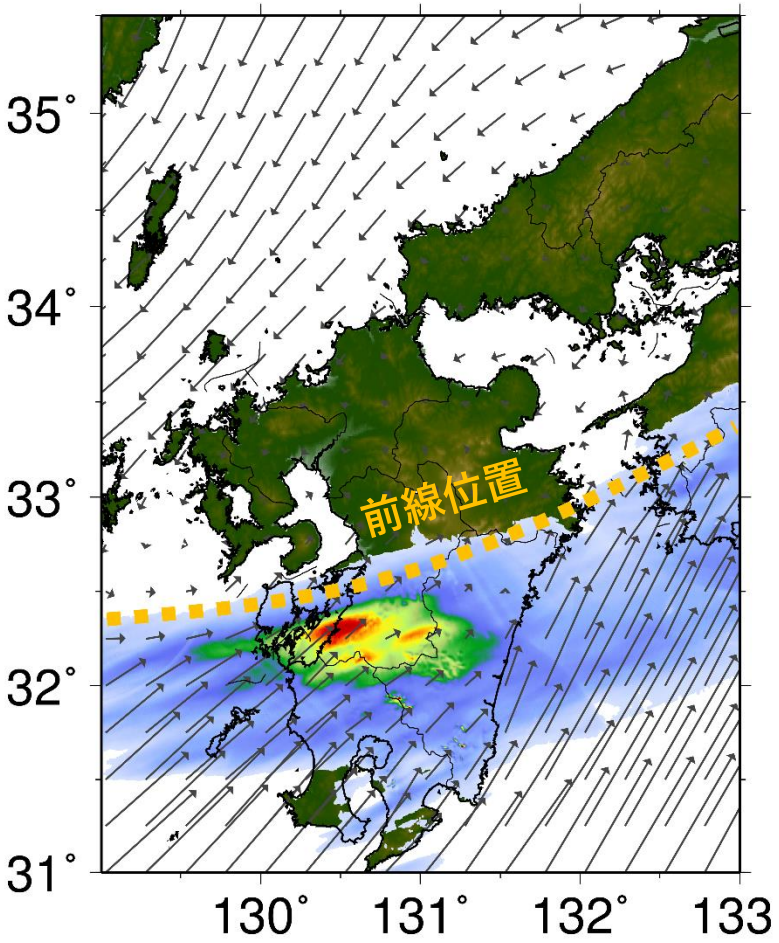
気象特性のパターン分類　（開発中です）



- 2013~2023年の5~10月のMSM解析値（3時間毎）を使用
- マップは10x10
  - 間引いて示している
- 入力ベクトル
  - 海面更正気圧
  - 地表面風速
  - 地表面水蒸気混合比
- 分類された大気場のSOMマップ上での時系列を追うことで，台風→前線パターンや，前線→台風パターンの頻度解析などできないか

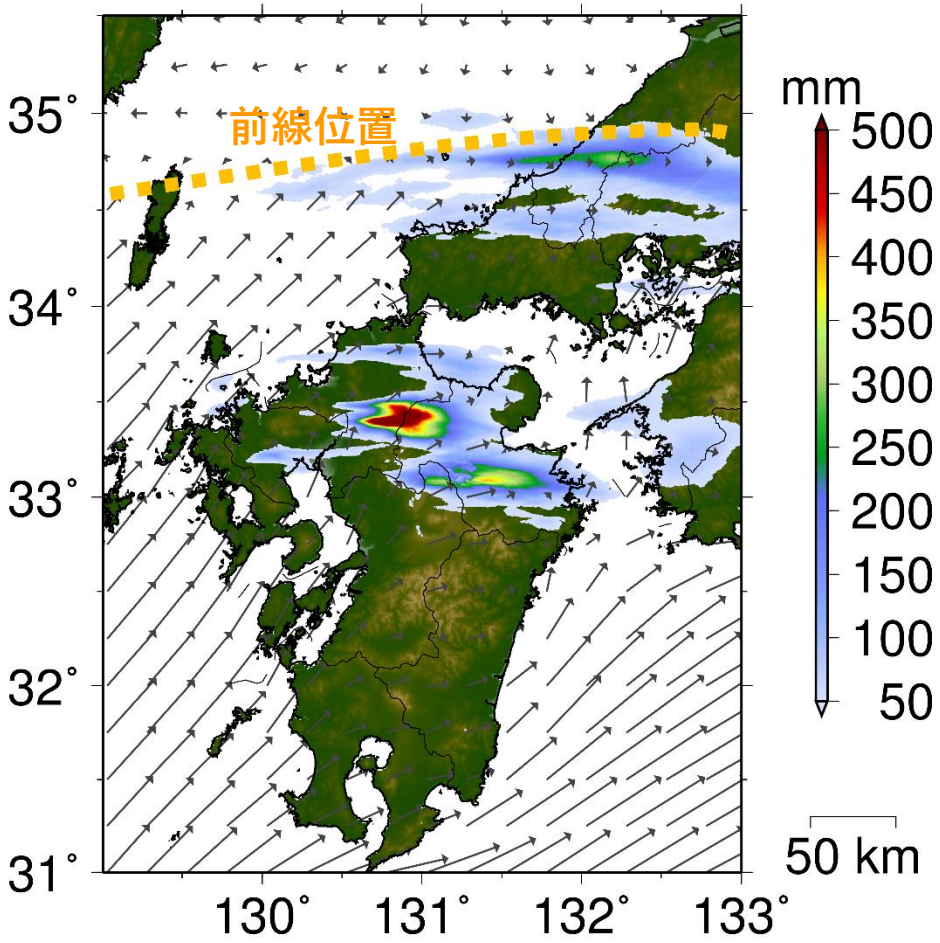
前線豪雨にもタイプがあります

前線付随型豪雨（大規模）



球磨川豪雨（2020年）

孤立局所型豪雨（小規模）



九州北部豪雨（2017年）

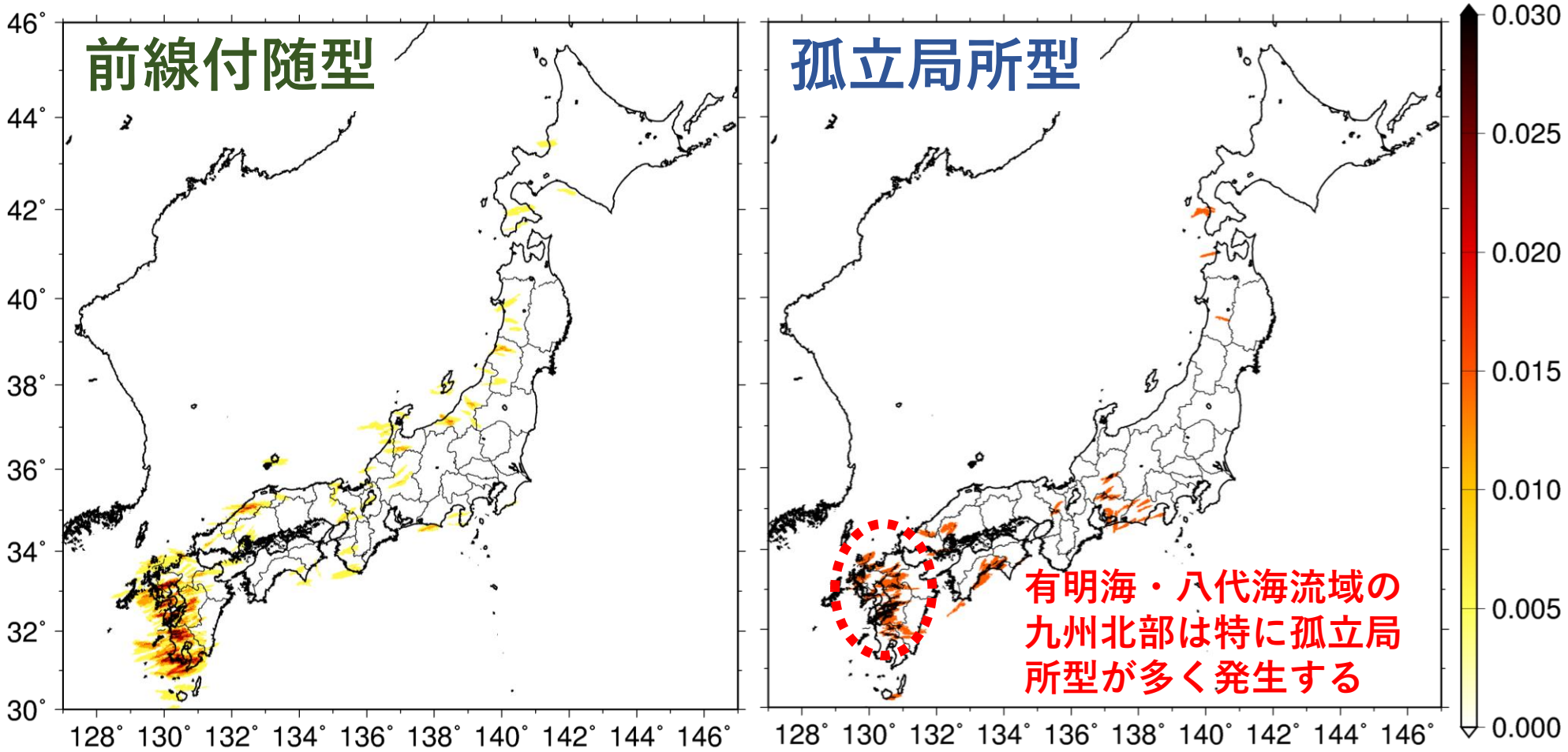
- 前線付随型豪雨
  - ✓継続時間は長い
  - ✓降雨強度は弱め
- 孤立局所型豪雨
  - ✓継続時間は短め
  - ✓降雨強度が強い

Naka and Nakakita, 2023.

2006～2020年の前線豪雨の発生場所

✓前線付随型(174事例)：全国的に発生，夜間が多い → **発生場所が限定されない**

✓孤立局所型(68事例) ：太平洋側，九州西部，日中にもピーク → **発生場所が限定**



仲・福田・中北（2024）

まとめと今後に向けて

まとめ

- 降雨成因による有明海の貧酸素化について、筑後川流域雨量（前168時間雨量）との関連がみられた
- 梅雨豪雨時は貧酸素化しやすく、台風豪雨時はやや貧酸素化しにくい
- 梅雨豪雨と台風の連続生起について、発生順が貧酸素化のふるまいを大きく変化させる
- 領域気候モデル（NHRCM05）の解析から，筑後川流域平均10mm/h以上の雨が将来有意に増加
- 停滞性前線豪雨に着目すると，九州北部の有明・八代海流域では局所的かつ降雨強度の強い線状対流系（線状降水帯）が発生しやすい地域と言える

今後に向けて

- 気象成因ごと（台風・前線性豪雨）の分析と連続生起特性の解析と将来変化解析
- 風や気温も対象に入れた将来変化解析

National Institute for Environmental Studies, Japan

有明海・八代海の栄養塩動態に外洋・気候変動が及ぼす影響

国立研究開発法人国立環境研究所
地域環境保全領域海域環境研究室
東　博紀・金谷　弦・牧　秀明

謝辞：本研究は、環境省請負業務「令和４年度閉鎖性海域における気候変動による影響評価検討業務」及び環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20231003）により実施した。水産研究・教育機構、福岡県水産海洋技術センター有明海研究所、佐賀県有明水産振興センター、長崎県総合水産試験場、熊本県水産研究センターには水質観測データをご提供いただいた。数値計算には国立環境研究所のスーパーコンピュータ（NEC SX-Aurora TSUBASA）を使用した。

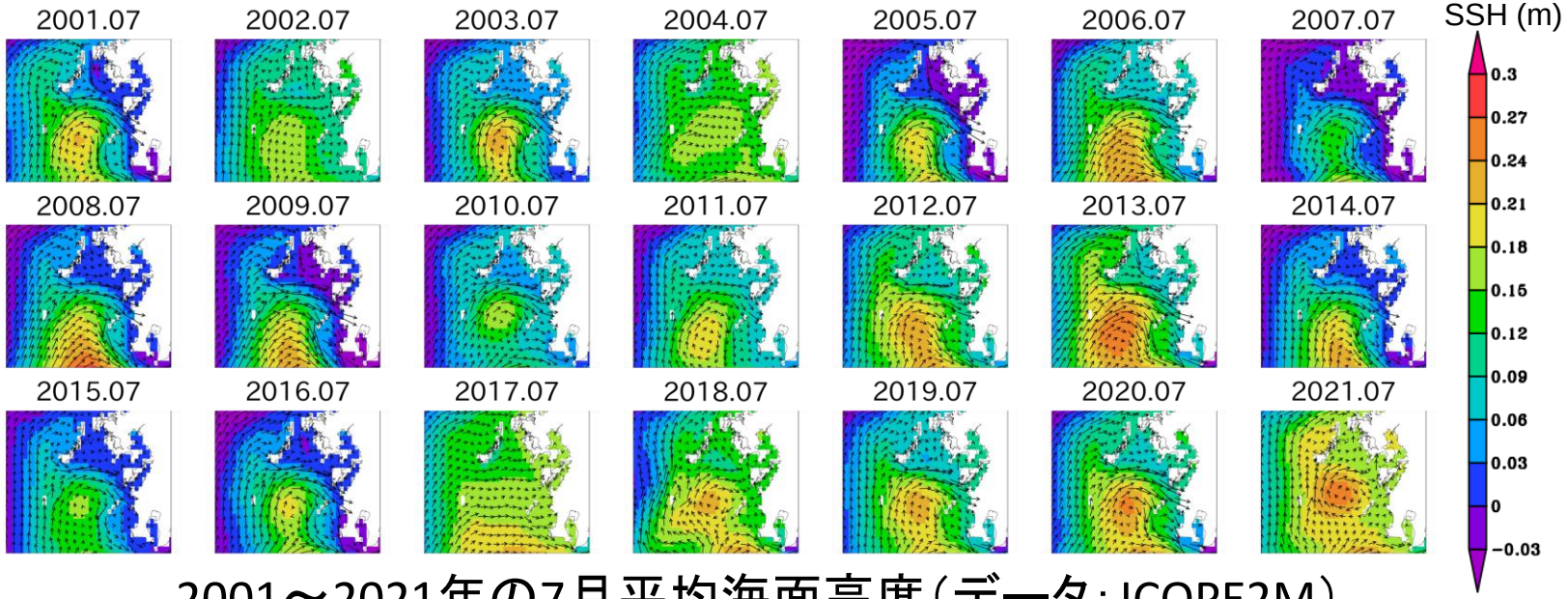
研究の背景と目的

閉鎖性海域の水環境は、気象や陸域からの流出に加え、外洋の影響も受ける

瀬戸内海の通過流は黒潮の離接岸に強く依存（駒井ら, 2008; 内山ら, 2014他）

伊勢湾の中層に外洋水が貫入すると貧酸素水塊が発達（赤石ら, 2005他）

しかし、有明海・八代海等については外洋影響の科学的知見が乏しい！



2001～2021年の7月平均海面高度（データ：JCOPE2M）

目的：気候変動影響予測を通じて水・物質循環への外洋影響を明らかにする

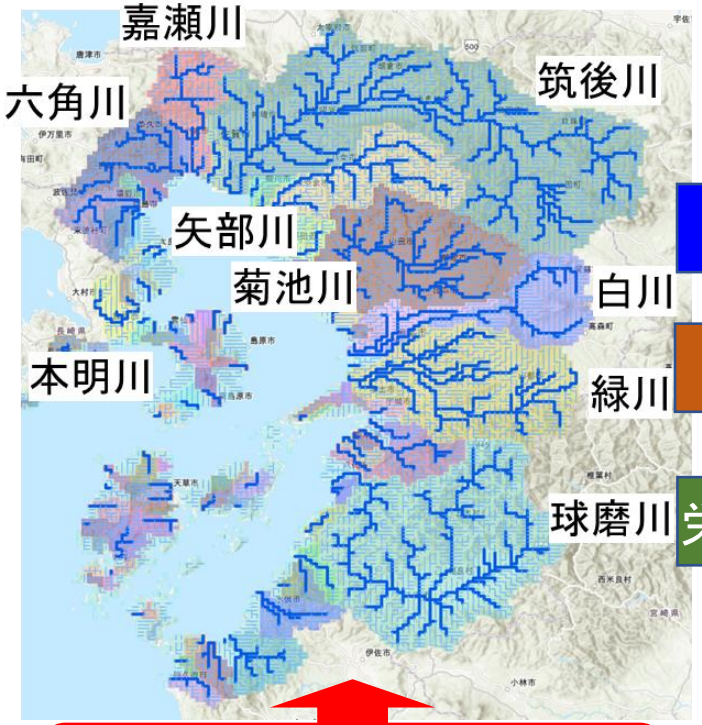
⇒「流入が多いのは陸域？外洋？」「気候変動の影響は？」を報告（暫定版）

有明海・八代海等の陸域ー海域モデル

自然外力・気候変動

降水　蒸発散位　海上気象　外洋海象

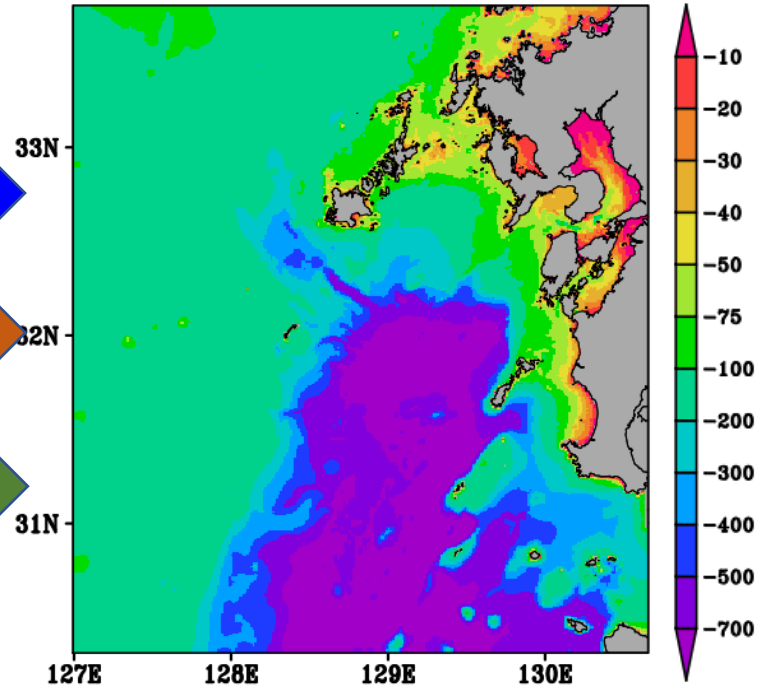
陸域分布型流出モデル



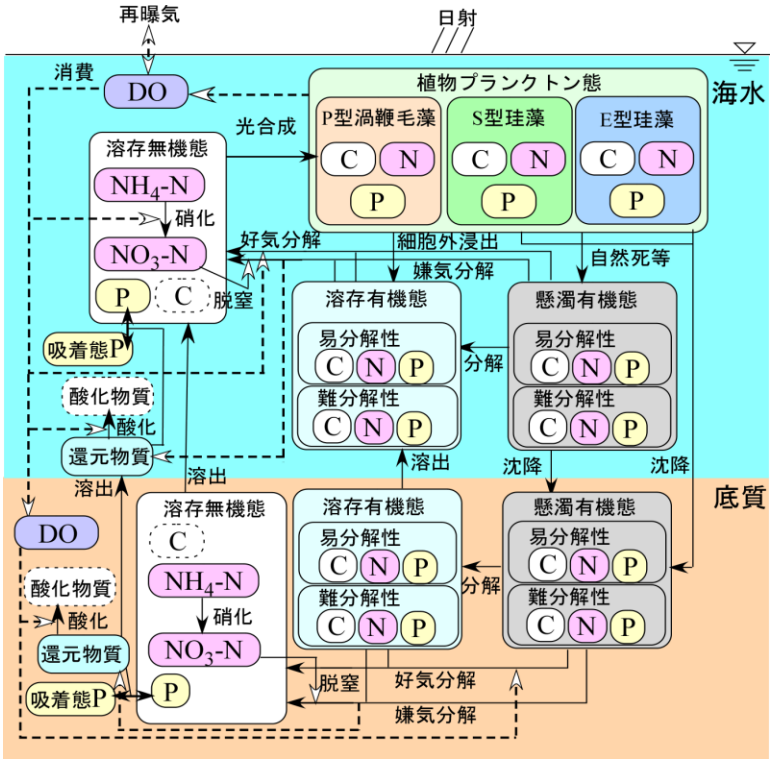
淡水　土砂　栄養塩

点源発生負荷量
（2019年度環境省調査データ）

海域流動・水質・底質モデル



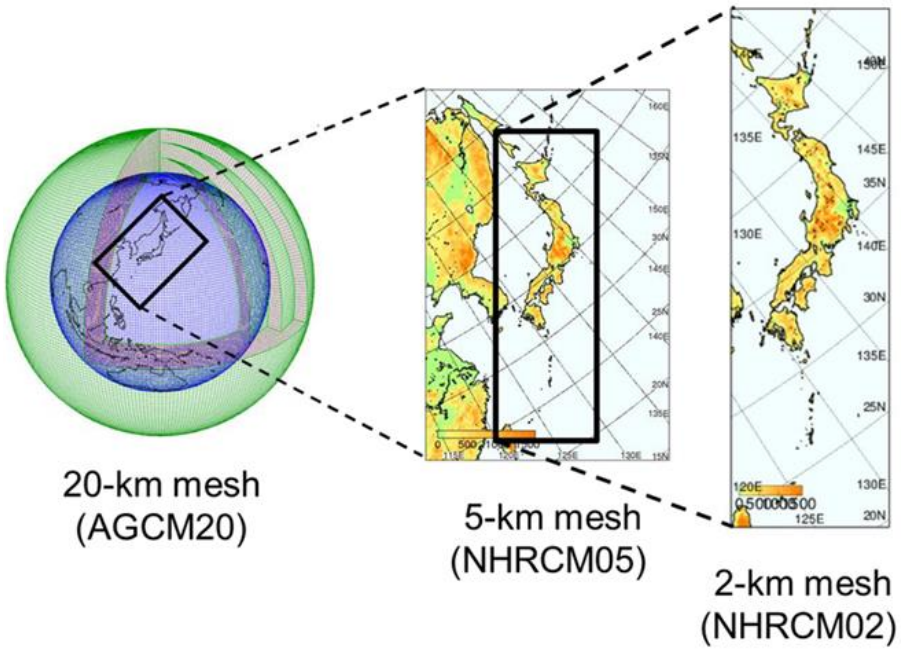
計算領域と海底地形（m）
格子数：292×412×50層



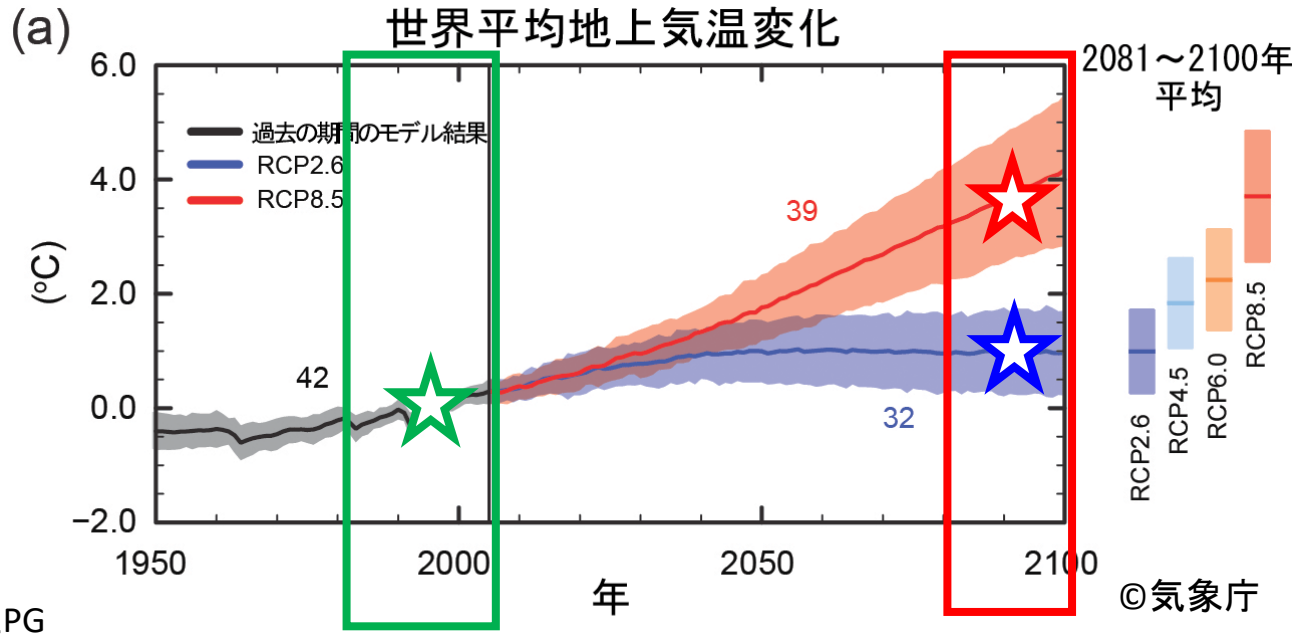
水質・底質モデル

3次メッシュ（水平解像度約1km）の陸域ー海域モデル

予測に用いた気候シナリオ



©文科省創生PG



©気象庁

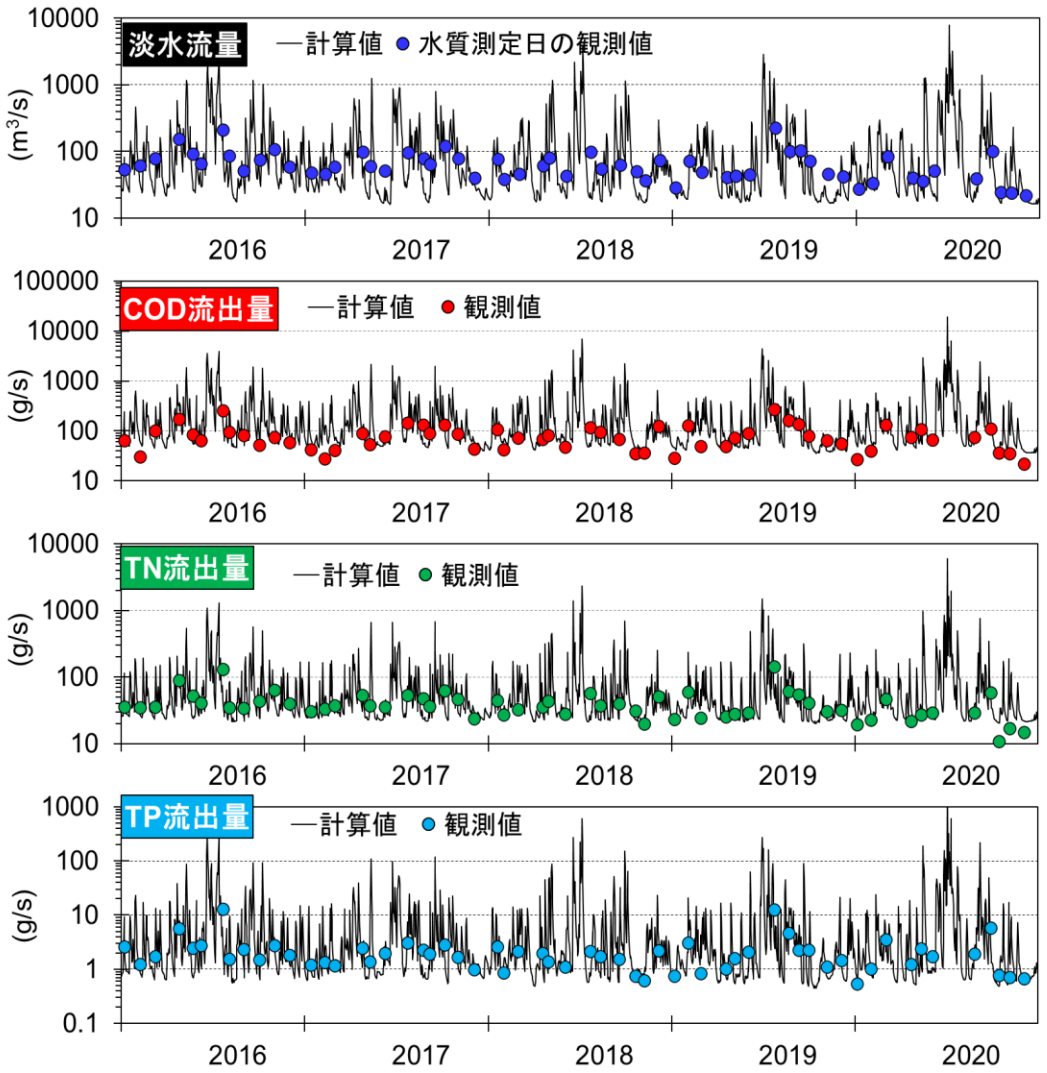
創生プログラム2km格子NHRCM日本域気候予測データセット

☆現在気候20世紀末（1982～2000年使用）
☆RCP2.6将来気候21世紀末（2078～2096年）
☆RCP8.5将来気候21世紀末（2078～2096年）
の陸域ー海域シミュレーションを実施

月別平均値（気候値）の変化を考察

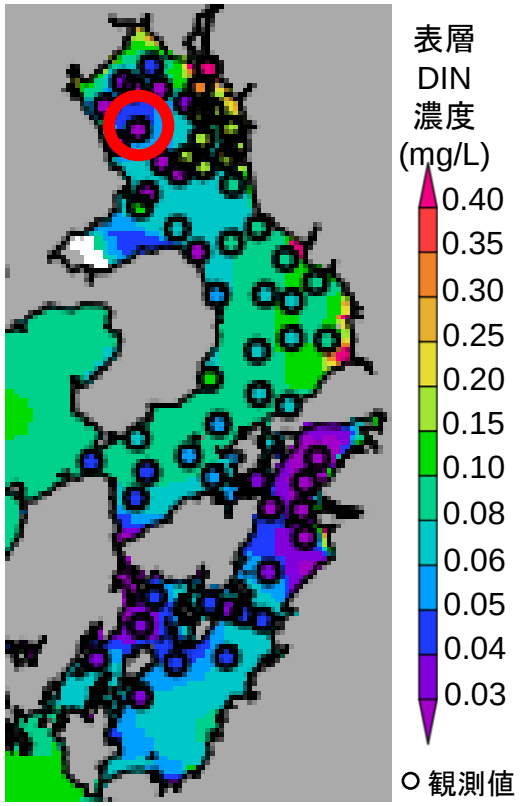
陸域のCOD・TN・TP負荷流出条件は共通
外洋水温・塩分は再解析＋MIROC5の変化量

陸域ー海域モデルの2016～2020年の再現性



球磨川（横石、2016～2020年）

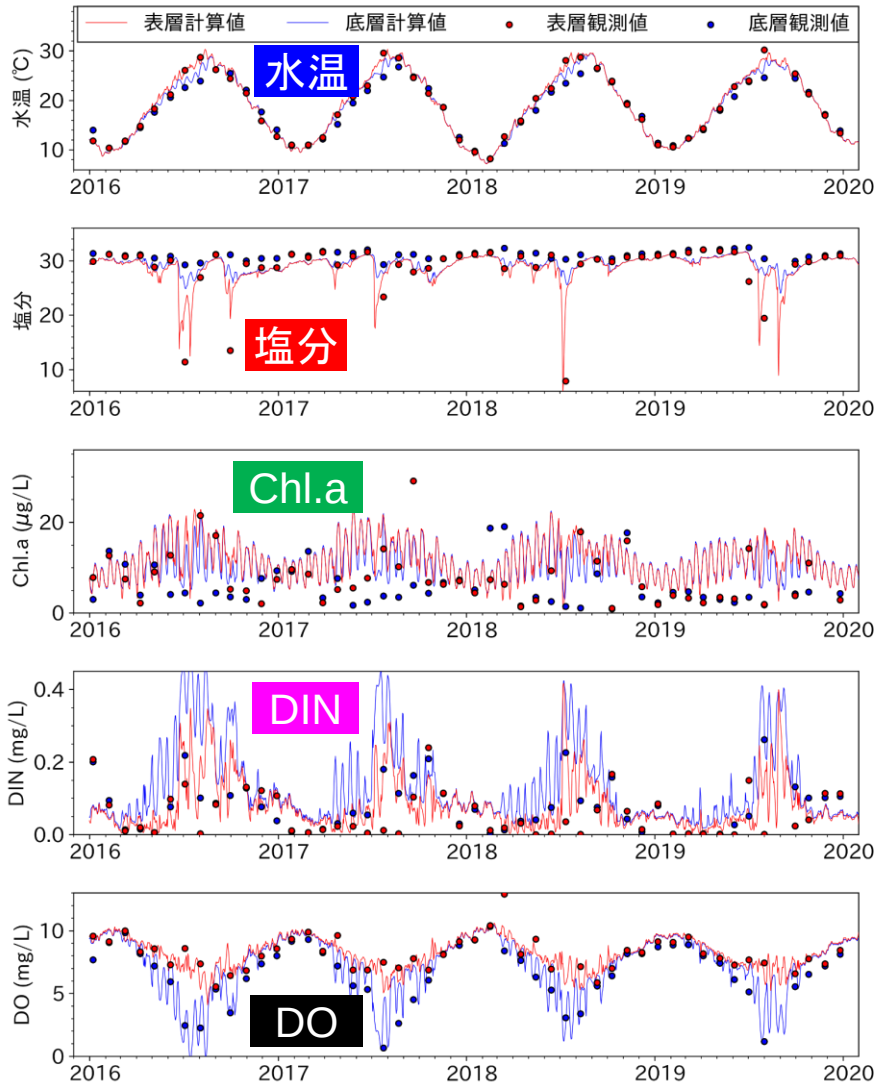
観測値：水文水質データベース



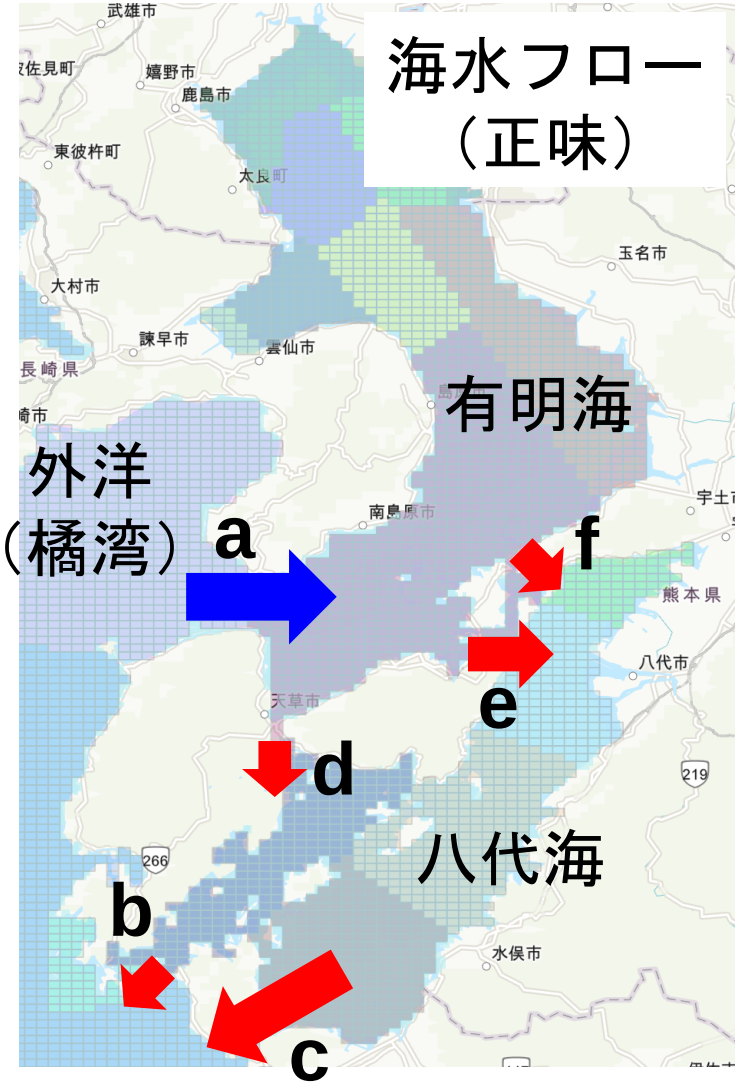
2014年1月の表層DIN濃度の計算値（月平均）と観測値（同一月内観測）の比較

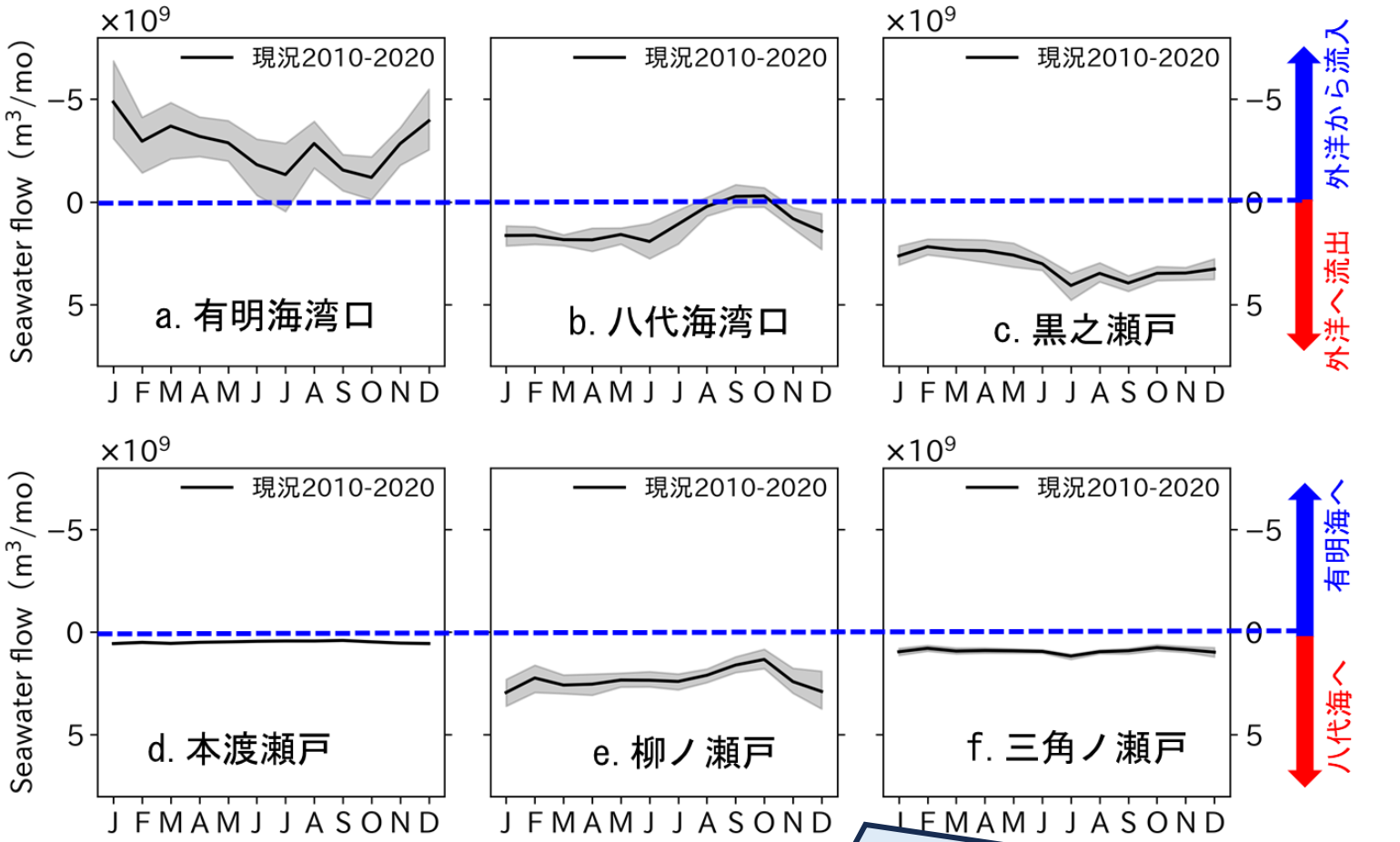
観測値：4県の水質観測データ

○ 佐賀県5（有明海湾奥南西部A3海域）



有明海・八代海等の正味海水フロー





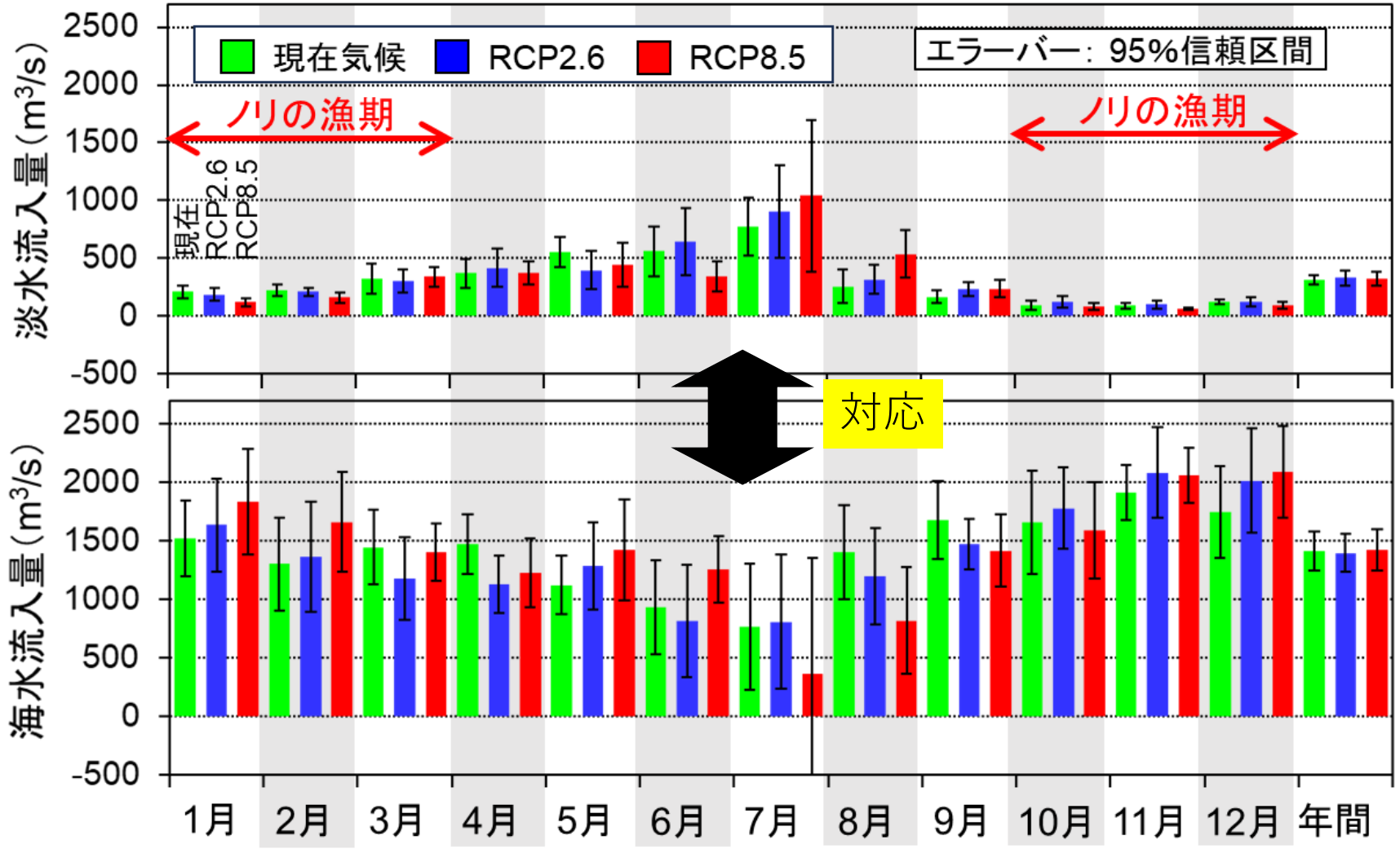
計算値(平均) 1021 m^3/s ⇔ 観測値(ADCP数時間) 4000 m^3/s

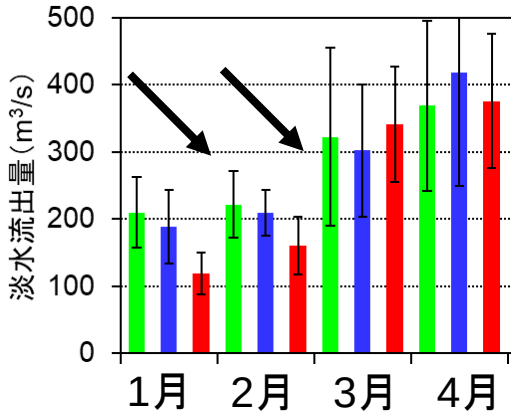
- 基本的に正味海水フローは **外洋 → 有明海 → 八代海 → 外洋**
- 有明海湾口の正味流入フローは、**冬に強まり、夏に弱まる**

予測結果：陸域/外洋から有明海への淡水/海水流入量（月別気候値）

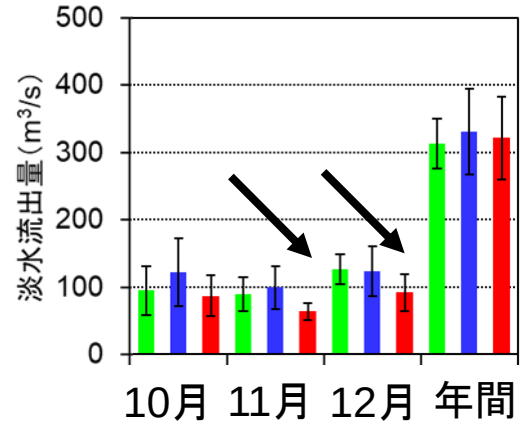
陸域淡水

外洋海水





漁期の淡水流入は減少？

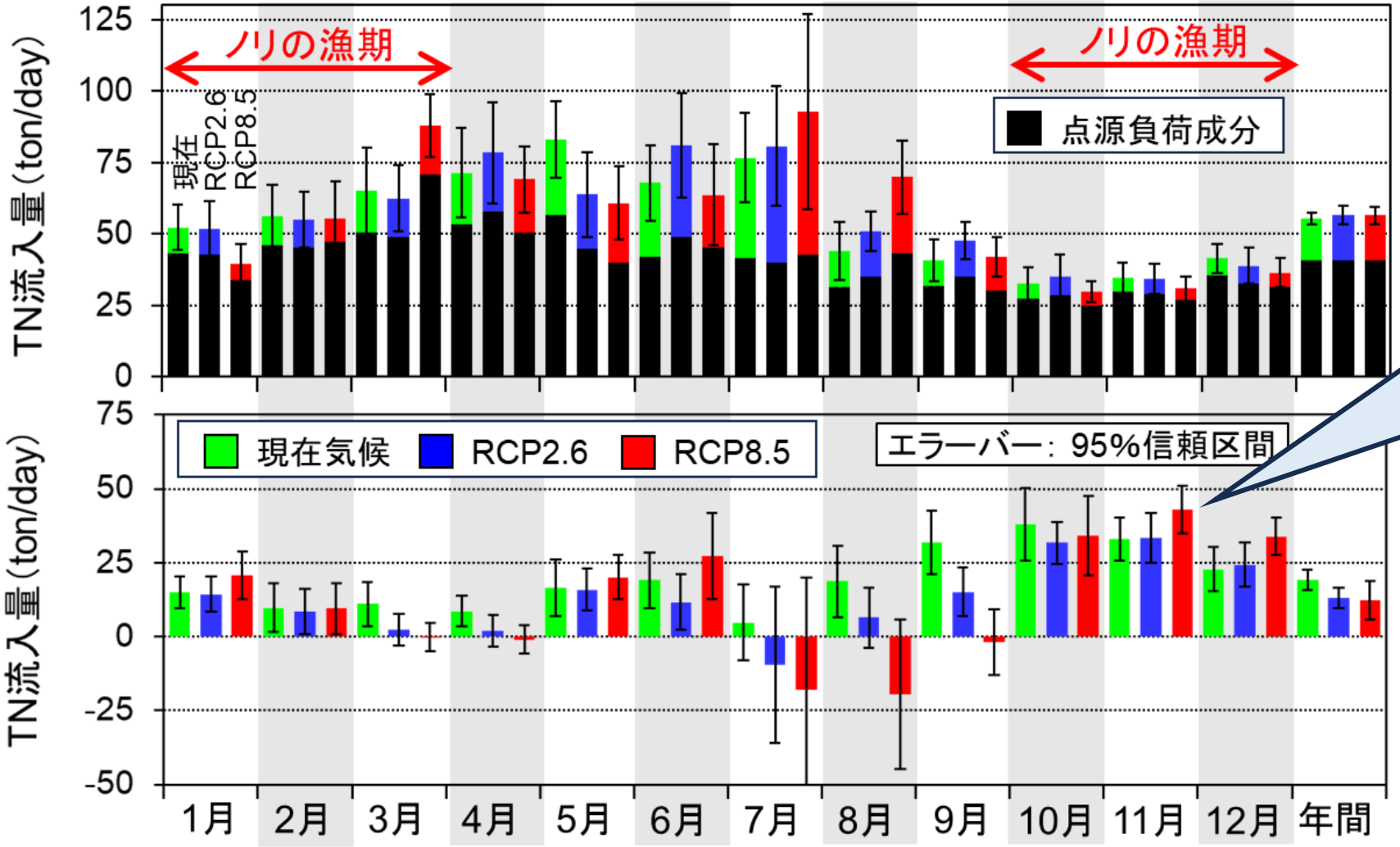


- 有明海のノリ漁期は陸域からの淡水流入が少ない時期　⇒　減少傾向？
- 有明海の 陸域淡水流入量 ＜ 外洋正味海水流入量

予測結果：陸域/外洋から有明海へのTN流入量（月別気候値）

陸域 TN

外洋 TN



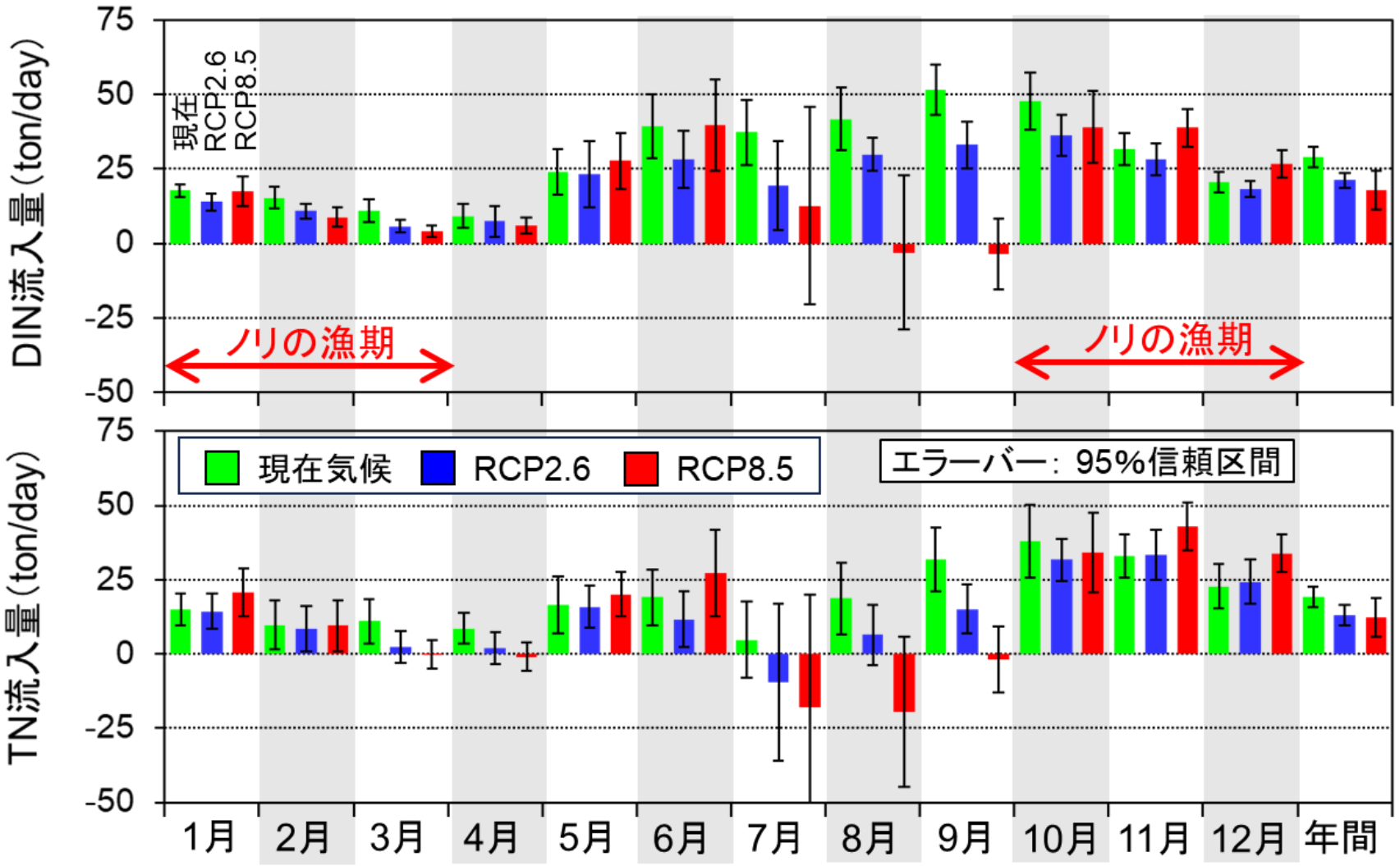
ノリの漁期の外洋TN流入量は陸域からの流入量に匹敵

- **有明海のノリ漁期は陸域からのTN流入が少ない時期** ⇒ ほぼ変化なし
- **有明海の 陸域TN流入量 ＞ 外洋正味TN流入量（漁期10～11月は同水準）**

予測結果：外洋から有明海へのDIN流入量（月別気候値）

外洋
DIN

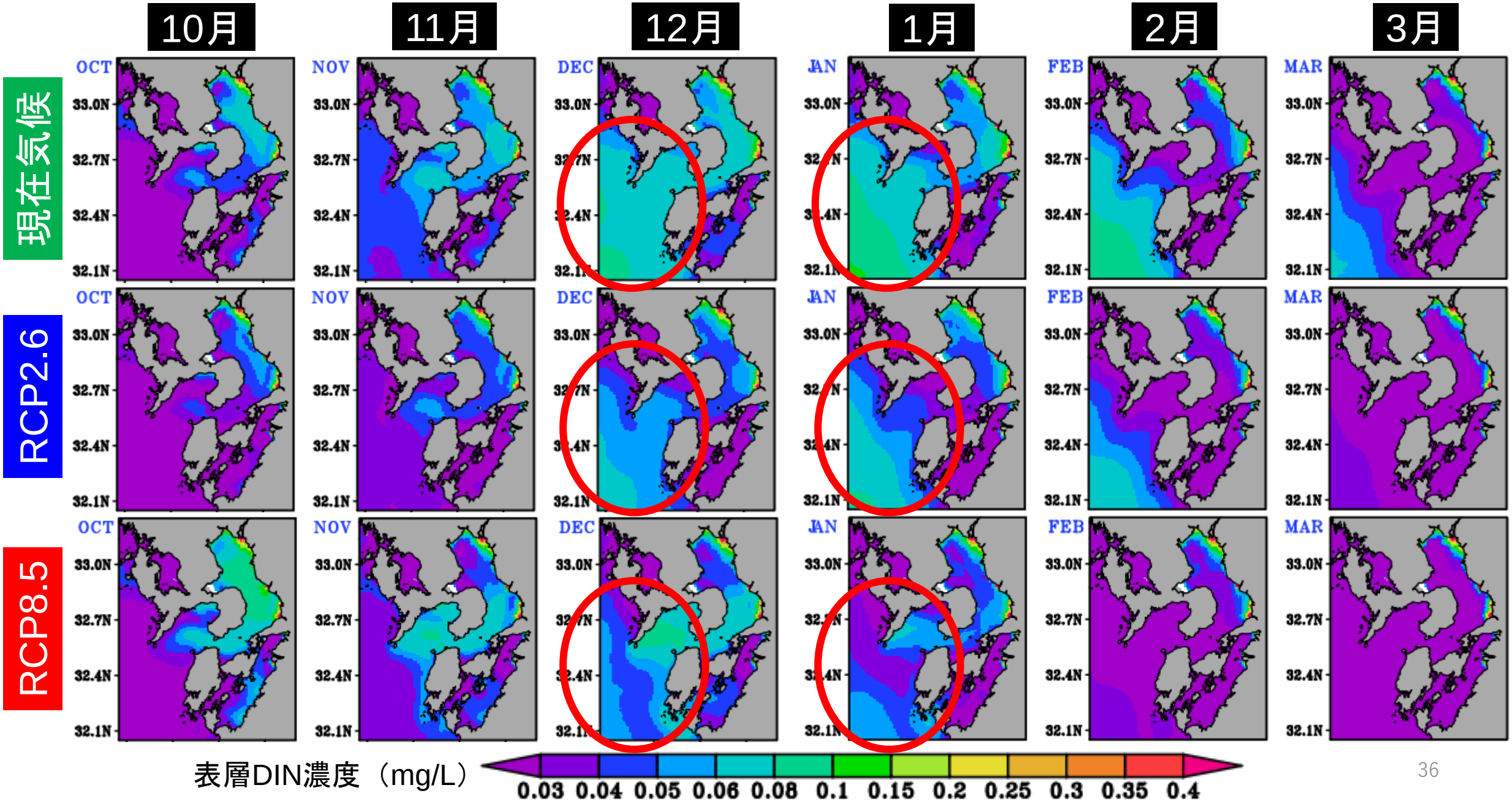
外洋
TN



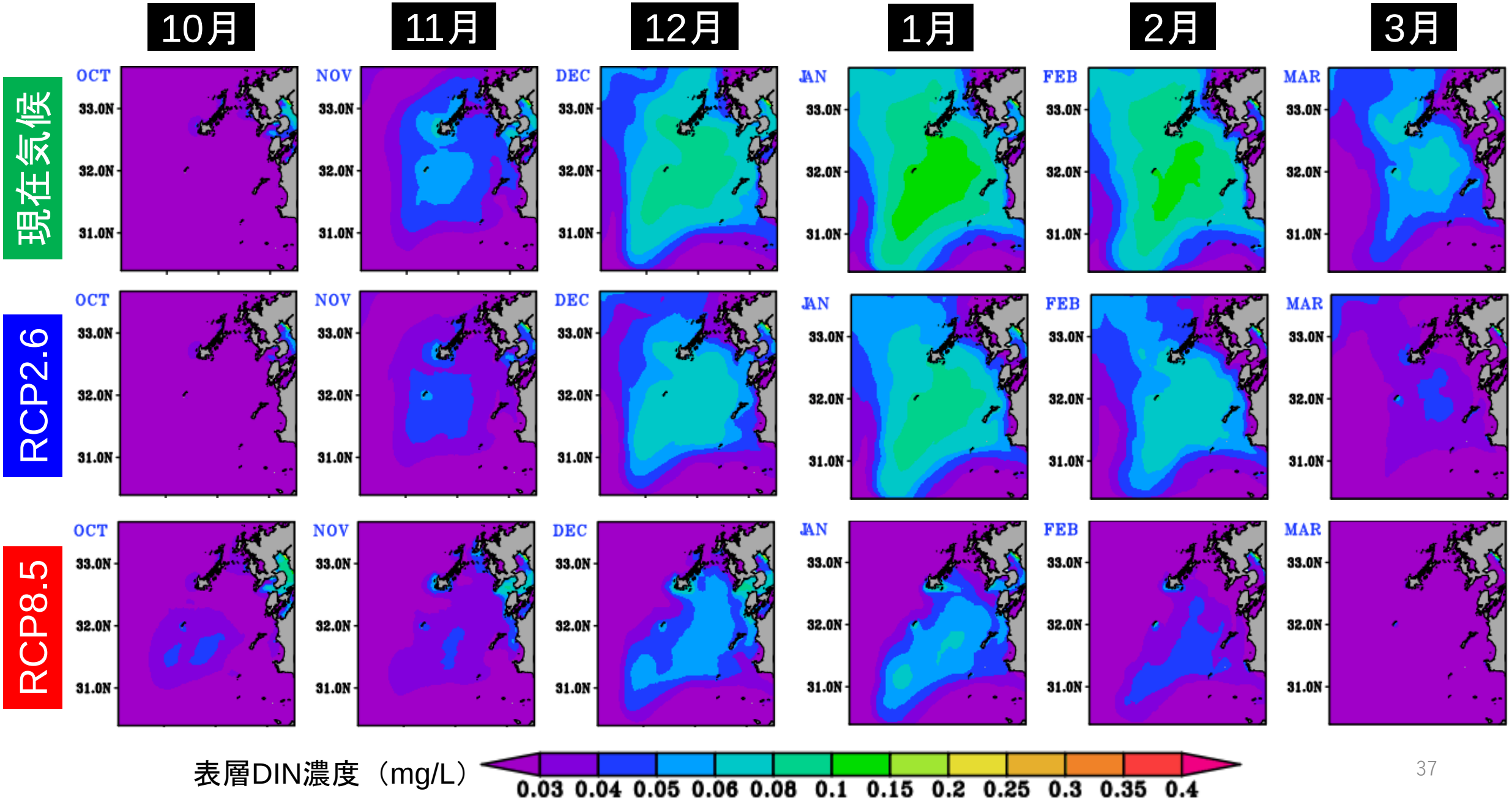
外洋から有明海への流入は栄養塩DIN

有明海から外洋への流出は有機態N

予測結果：気候変動による表層DIN（月別気候値）の変化



予測結果：気候変動による外洋の表層DIN（月別気候値）の変化



まとめと今後の課題

- 陸域から有明海への流入は？気候変動の影響は？
  - ・淡水流入量は、一年の中でノリの漁期が少ない時期だが、気候変動でさらに減少？
  - ・TN流入量もそれに追随するが、点源負荷量が多いため、有意な減少とはいえない？
  - ・気候変動が強まるにつれて流入量の変動は大きくなる⇒栄養塩供給の不安定化

- 外洋から有明海への流入は？気候変動の影響は？
  - ・正味の海水フラックス（流れ）は、外洋（橘湾） → 有明海 → 八代海 → 外洋
  - ・有明海の　陸域淡水流入量　＜　外洋正味海水流入量
    陸域 TN 流入量　＞　外洋正味 TN 流入量　（年間値）
    陸域 TN 流入量　≒　外洋正味 TN 流入量　（ノリ漁期の10～11月）
  - ・外洋から有明海への流入は栄養塩DIN、有明海から外洋への流出は有機態
  - ・ノリ漁期の外洋表層DIN濃度は鉛直混合・湧昇により上昇し、有明海に流入
  - ⇒ 気候変動・水温上昇により、外洋の一次生産が活発化し、表層DIN濃度が低下、有明海へのDIN流入量が減少する

●不確実性：　外洋の計算結果は検証が不十分（与える境界条件によって結果が変わることも確認）　⇒　外洋・橘湾の水質観測・データ収集が必要

ST3：貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価

矢野　真一郎(九州大)・渡部哲史(九州大)・入江政安(大阪大)
・丸谷靖幸(九州大)・HAO LIN（九州大）

研究方法 ＜流動モデル＞

・汎用型沿岸域流動数値モデル**Delft3D**を使用する.

・流動モデルにより水温, 塩分, 流動構造などを計算する.

【鉛直方向の層の設定】
σ座標系で10層　(上から5%×3層, 10%×4層, 15%×3層)

【開境界条件】
長崎県樺島水道から鹿児島県阿久根までを南北と東西に結んだ線上で　計40分潮成分を与える.

【淡水流入】
・1級河川　8つ
筑後川, 六角川, 嘉瀬川, 矢部川, 菊池川, 白川, 緑川, 球磨川
・2級河川　9つ
塩田川, 鹿島川, 関川, 坪井川, 氷川, 大鞘川, 佐敷川, 湯ノ浦川, 水俣川　(図中青字)
・諫早湾締切堤の南北排水門からの流量
1997年以前は締め切りなしで本明川からの流入

【入力データ】
・河川流量　・河川水温　・風速・風向
・気温　・日射量　・開境界の水温, 塩分

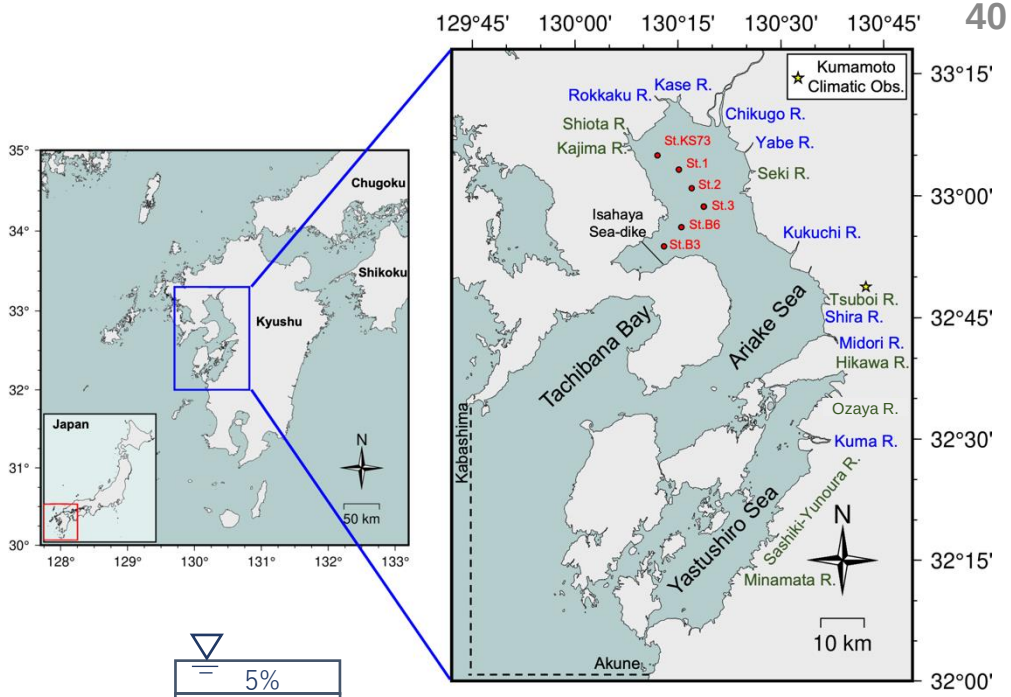


図-9 本研究の研究対象エリア

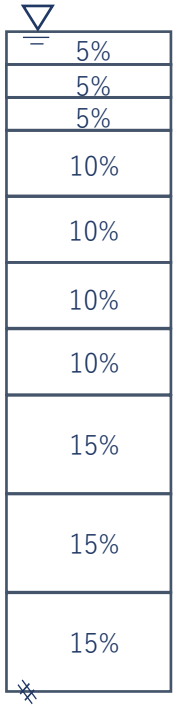


図-8 層の設定

研究方法 ＜流動モデル＞

・汎用型沿岸域流動数値モデル**Delft3D**を使用する.

・流動モデルにより水温, 塩分, 流動構造などを計算する.

【鉛直方向の層の設定】
σ座標系で10層　(上から5%×3層, 10%×4層, 15%×3層)

【開境界条件】
長崎県樺島水道から鹿児島県阿久根までを南北と東西に結んだ線上で　計40分潮成分を与える.

【淡水流入】
・1級河川　8つ
筑後川, 六角川, 嘉瀬川, 矢部川, 菊池川, 白川, 緑川, 球磨川
・2級河川　9つ
塩田川, 鹿島川, 関川, 坪井川, 氷川, 大坪川, 佐敷川, 湯ノ浦川, 水俣川　(図中青字)
・諫早湾締切堤の南北排水門からの流量
1997年以前は締め切りなしで本明川からの流入

【入力データ】
・河川流量　・河川水温　・風速・風向
・気温　・日射量　・開境界の水温, 塩分

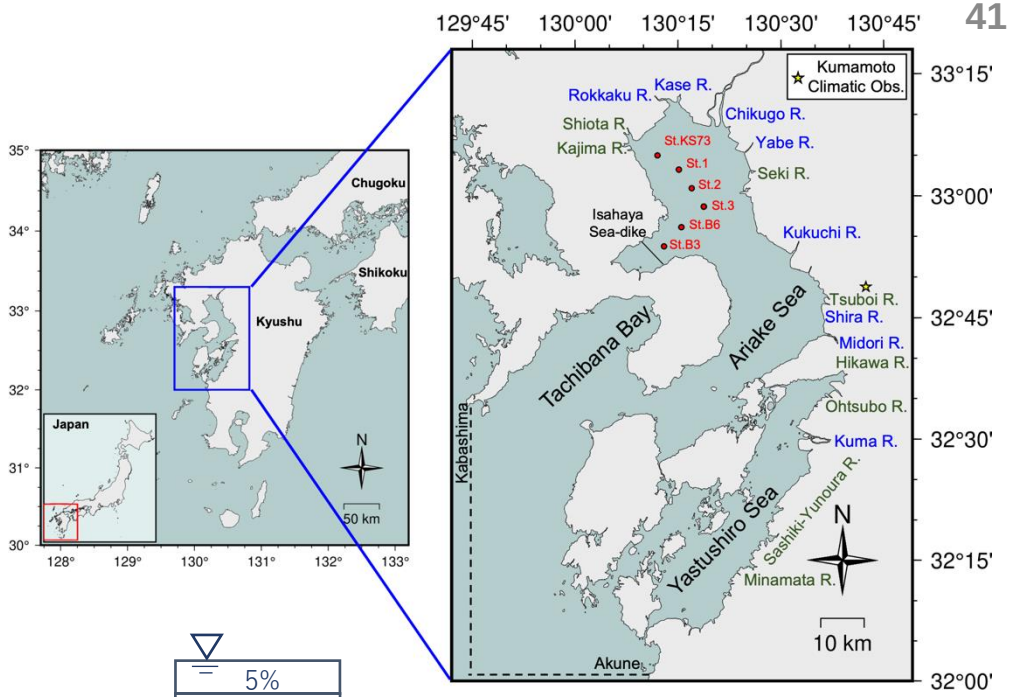


図-9 本研究の研究対象エリア

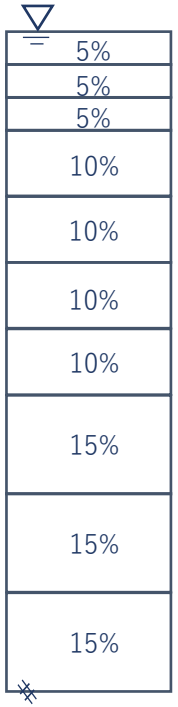


図-8 層の設定

研究方法 ＜低次元生態系モデル＞

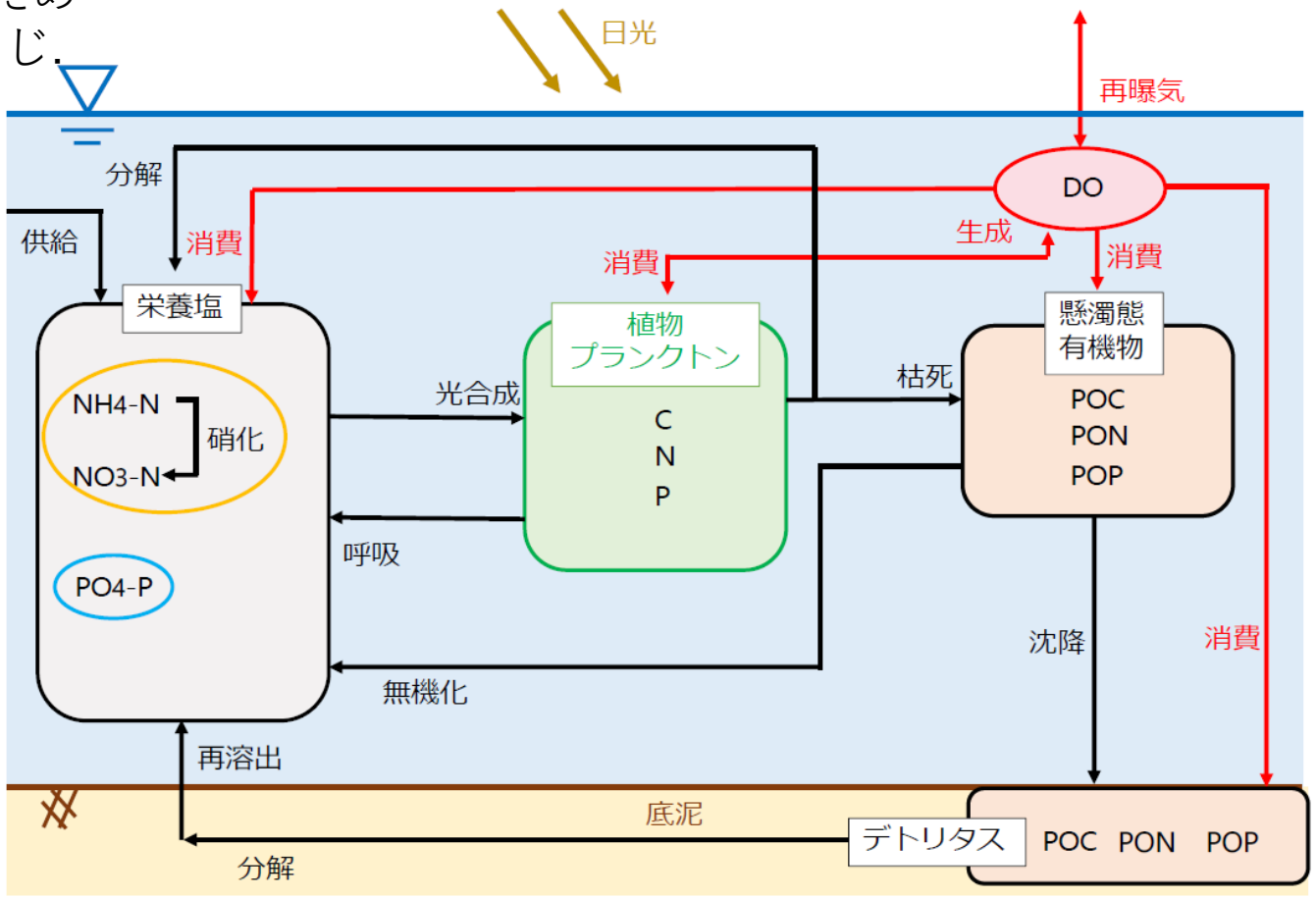
・Delft3Dのサブモデルとして組み込まれている**WAQモデル**を使用する.

・低次元生態系モデルにより水質データ(DOなど)を計算する.

流動モデルの結果(塩分, 水温,流速など)を用いるため
計算領域やσ座標系の層数などは流動モデルと同じ.

【構成コンパートメント】
・植物プランクトン(1種類)
・アンモニア態窒素
・硝酸態窒素
・リン酸態リン
・粒状態有機物POM
・溶存酸素DO

【考慮した素過程】
・光合成, 呼吸, 枯死
・有機物の分解, 沈降
・硝化
・再曝気



低次生態系モデルの構成

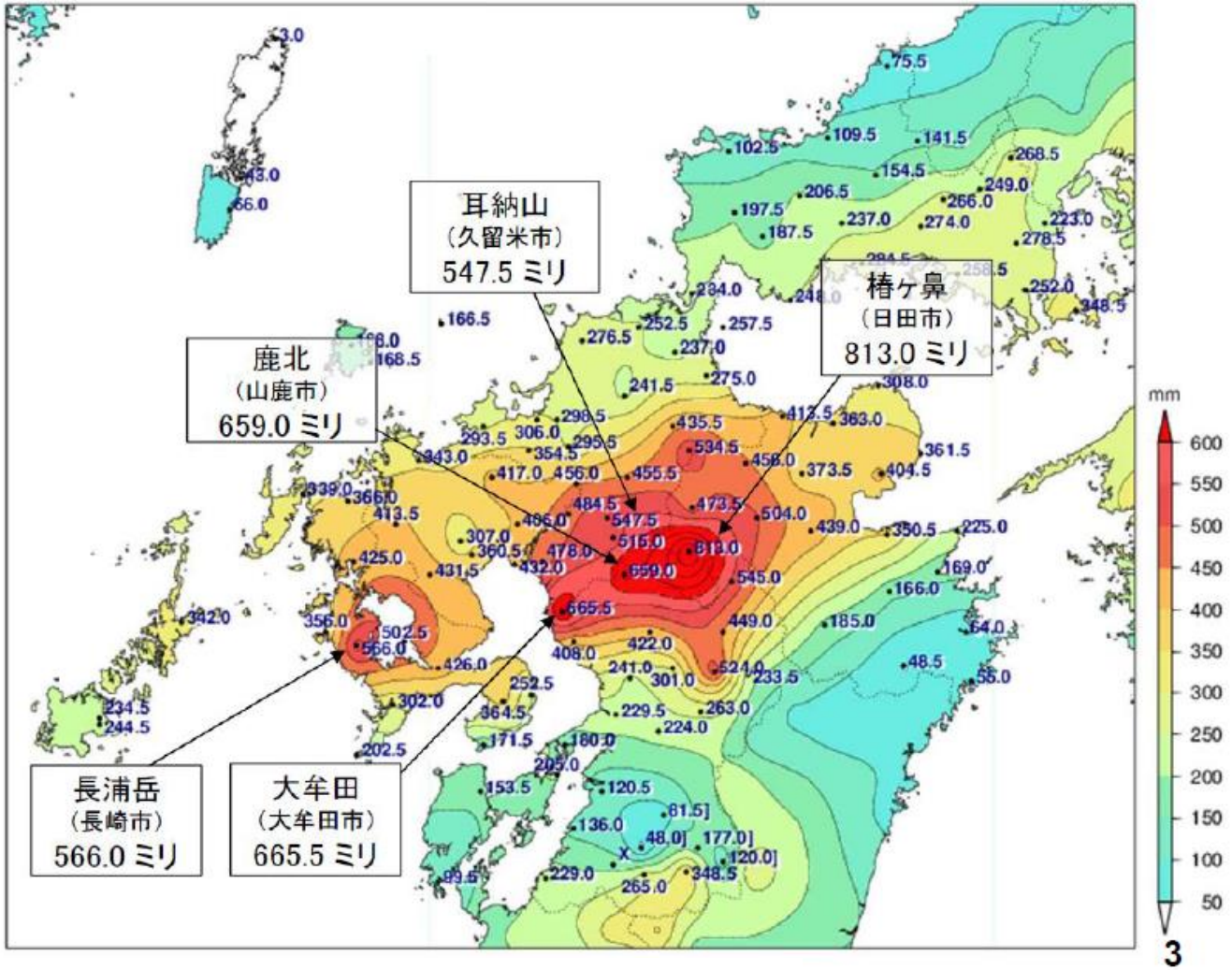
■気象・降雨の概要

九州地方整備局 Kyushu Regional Development Bureau

アメダス総降水量の分布図（7月6日～8日09時）

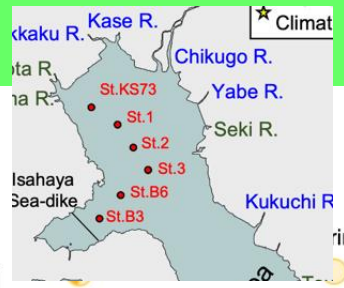
※気象台公表資料

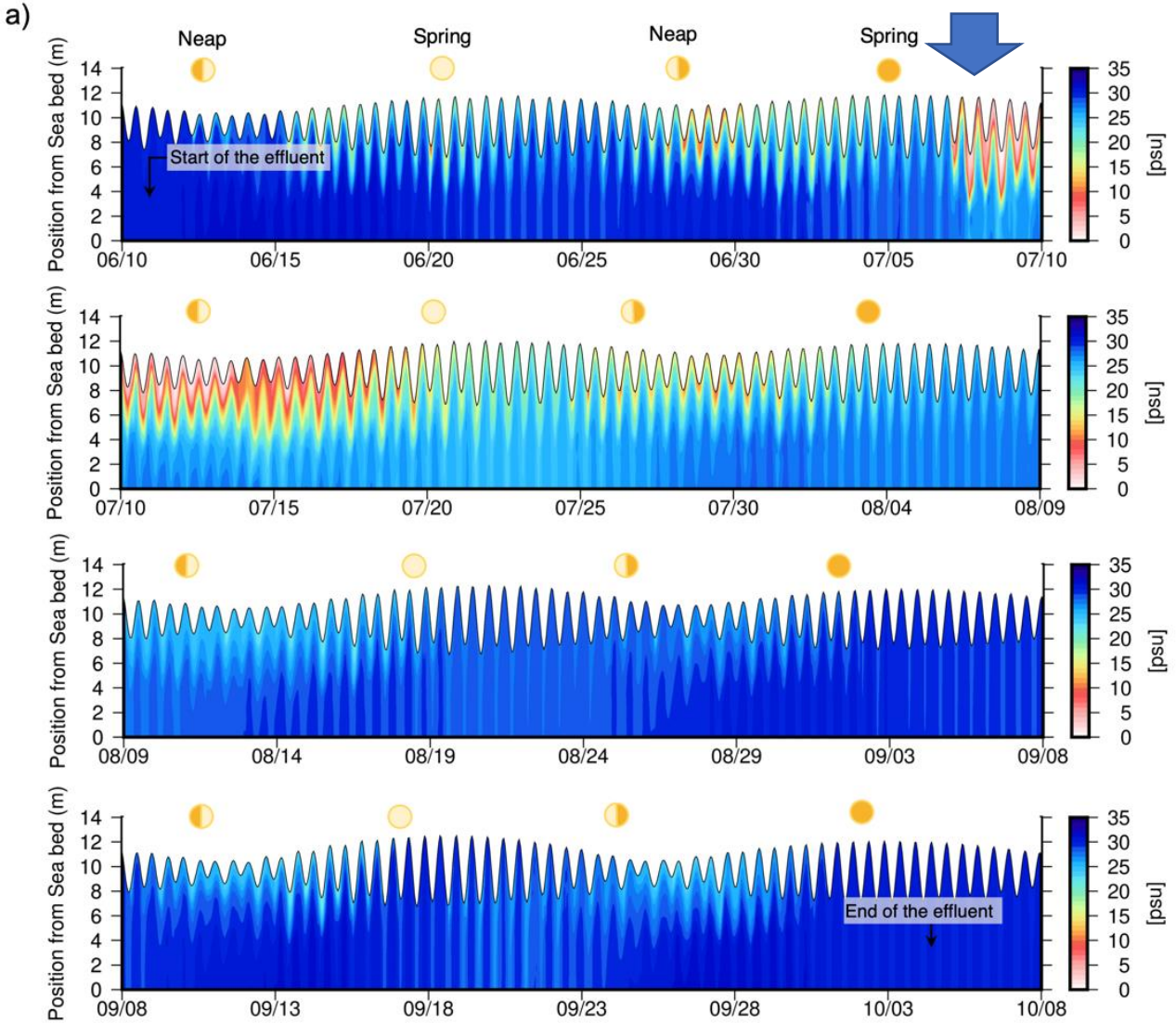
地点名	総雨量（単位：ミリ）
椿ヶ鼻	813.0
大牟田	665.5
鹿北	659.0
長浦岳	566.0
耳納山	547.5
南小国	545.0
英彦山	534.5
南阿蘇	524.0
黒木	515.0
玖珠	504.0
大村	502.5
久留米	484.5
柳川	478.0
日田	473.5
耶馬渓	456.0
鳥栖	456.0
朝倉	455.5
阿蘇乙姫	449.0
湯布院	439.0
添田	435.5

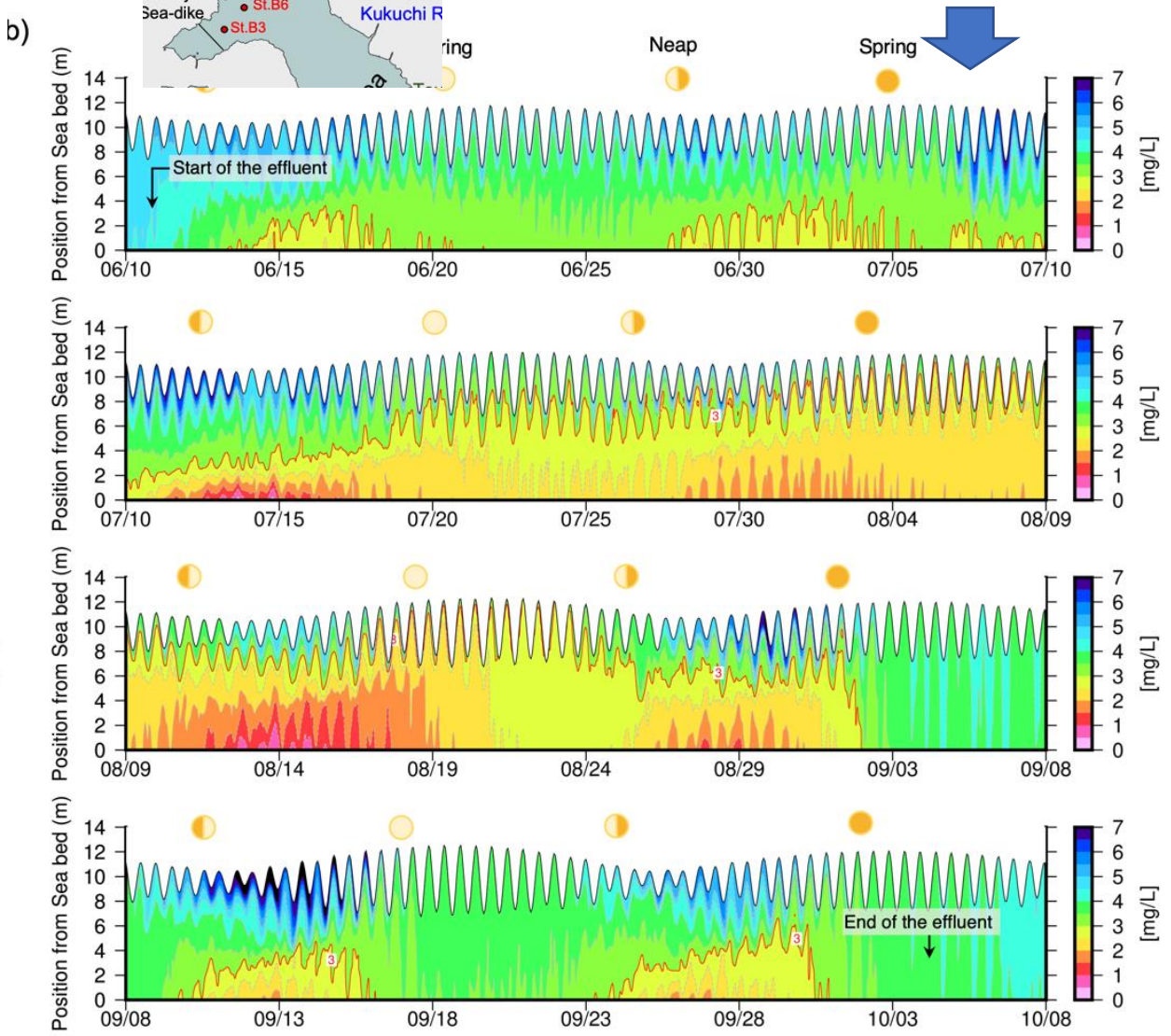


2020年豪雨における筑後川流域の降雨分布

ST3貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価

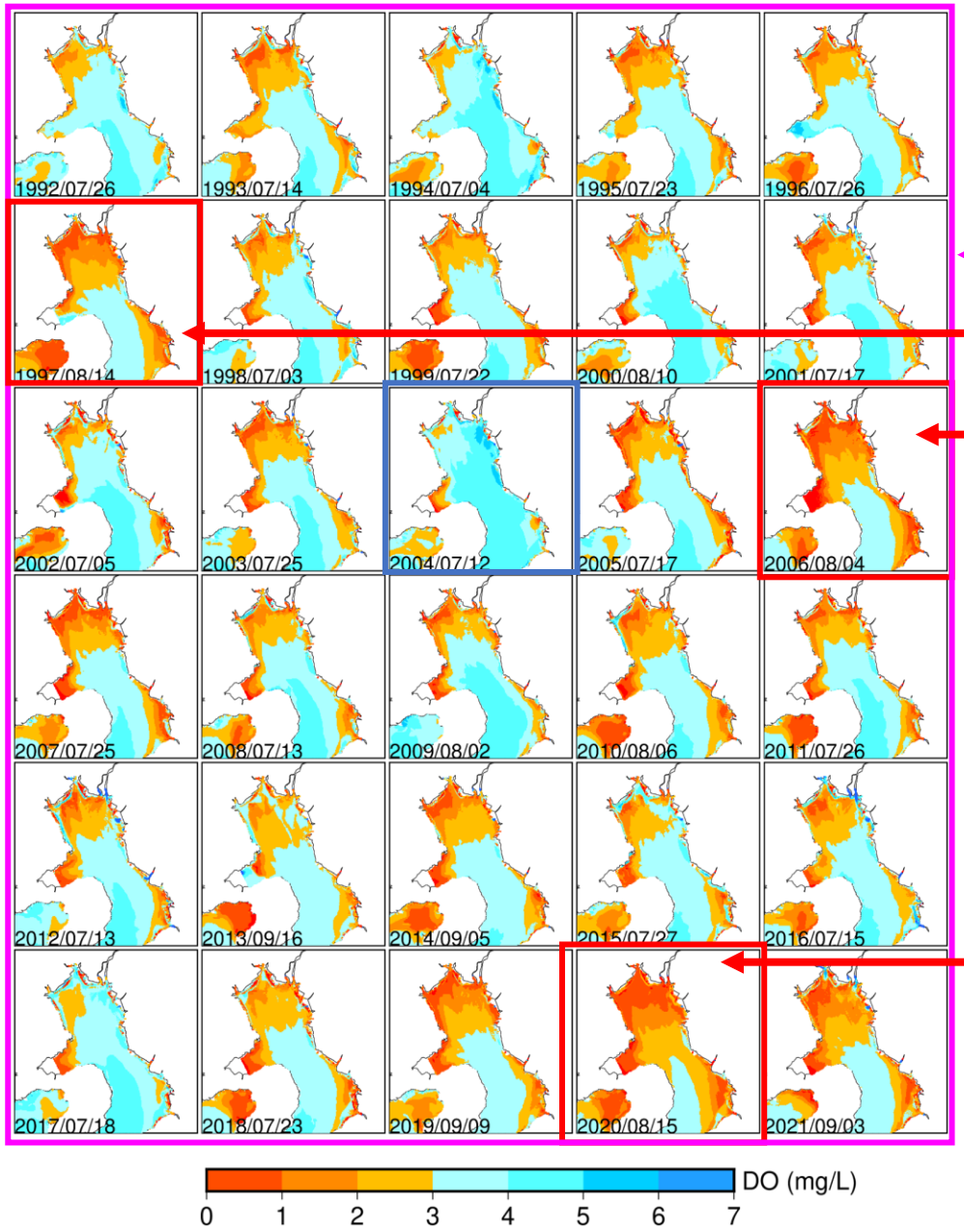






St1における2020年夏季の塩分とDOのシミュレーション結果（DOの赤線は3 mg/L） ［Hao et al. (2024) STOTEN］

ST3貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価



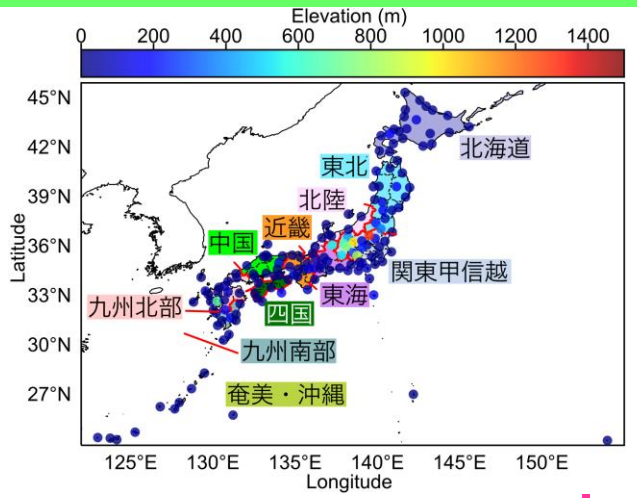
出水規模が小さい年，大規模な貧酸素の発生はない．

出水規模が大きい年（97，06，20など）は大規模貧酸素の発生．

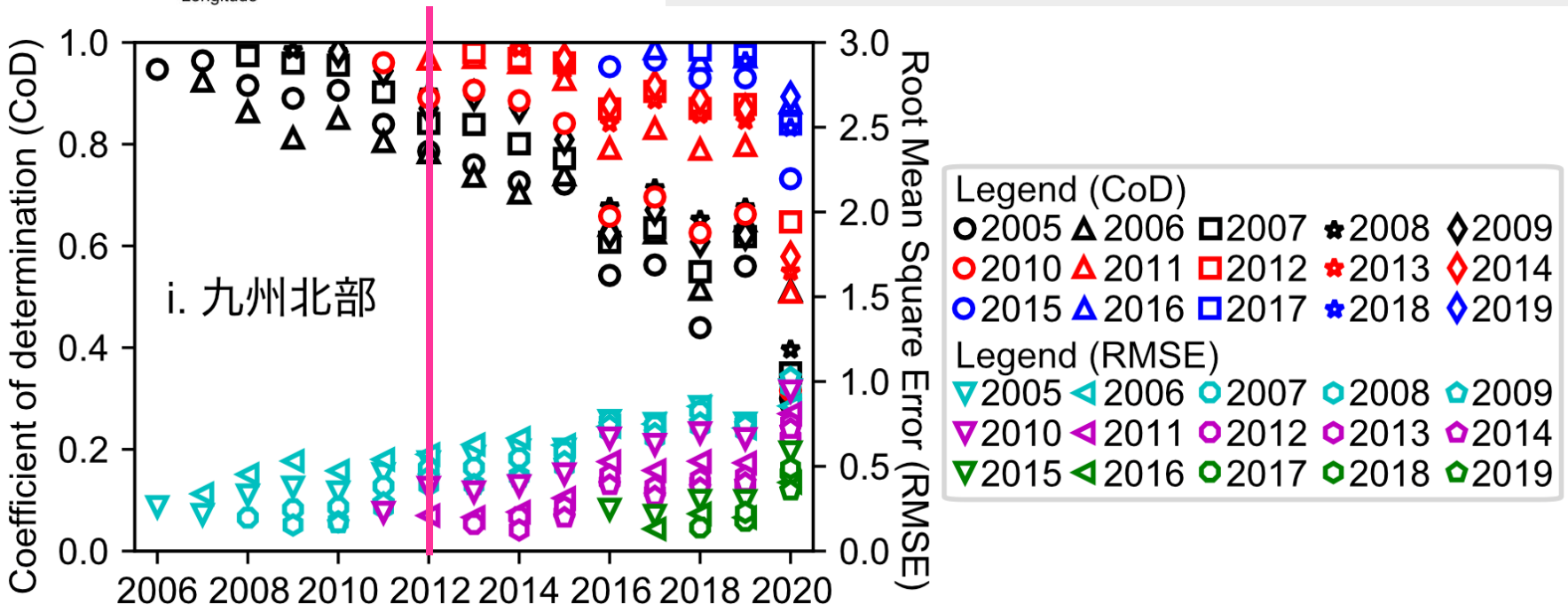
1992～2021年の期間で年最大の空間規模の貧酸素(DO<3mg/L)が起きた状況における底層DO空間分布

[Hao et al. (2024) STOTEN]

ST3貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価

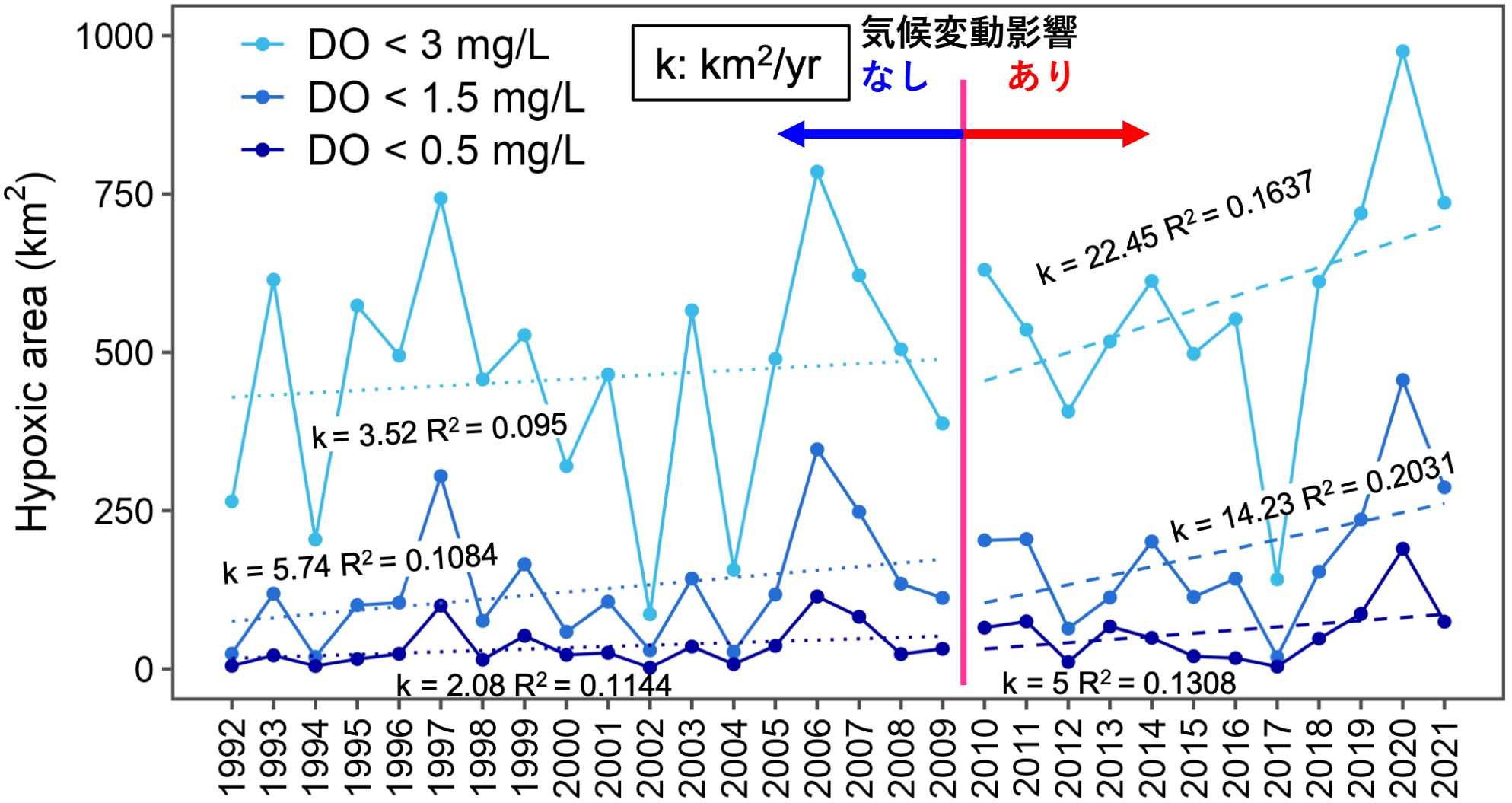


- 国内気象官署（154地点）の降水量に関するCCIのトレンド変化について，解析期間ごとのCCIについてMann-Kendall検定（有意水準5%）を行い，トレンドの変化時期を評価した．
- 気候変動影響が顕著に現れる時期として，日本全体では**2014年**頃，日本を9つの地域に分けると各地域で異なった．
- 筑後川を含む九州北部では**2012年**となった．※河川流域単位でないので，筑後川だけ見た場合にどうなるかは不明．



九州北部地方の気象統計量（降水量のClimate Change Indices：CCI）のトレンド変化　［丸谷ら（2022）土論B1］

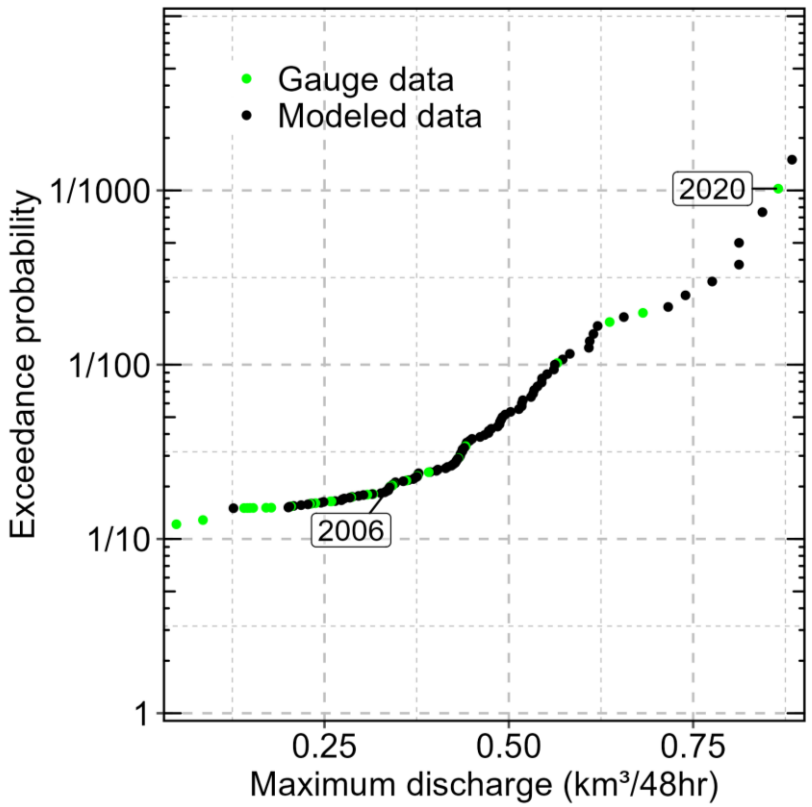
ST3貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価



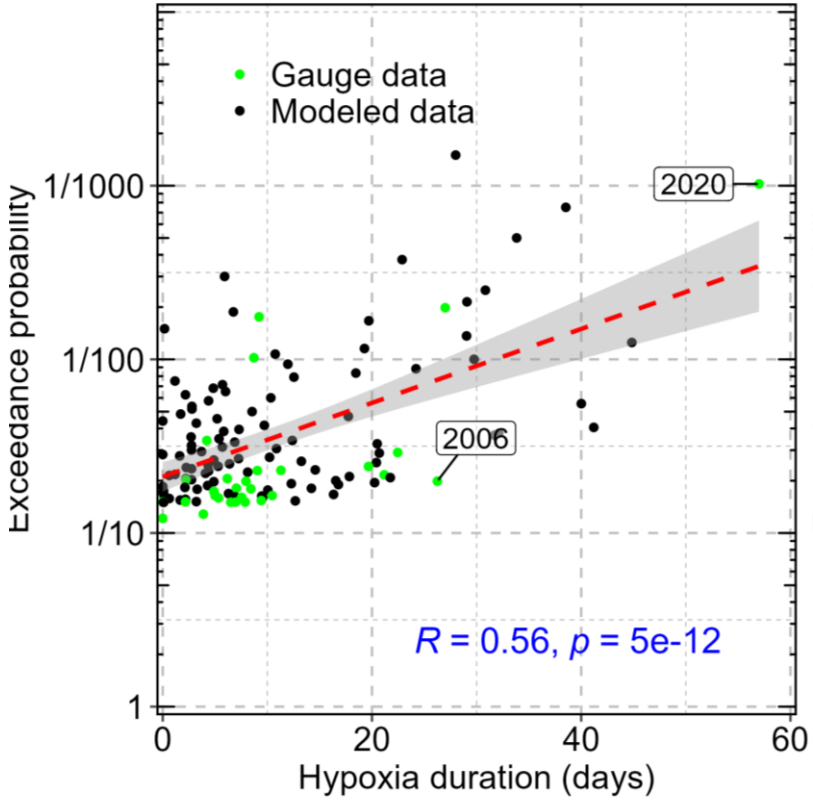
1992～2021年の貧酸素規模の変化（シミュレーション結果から得られた貧酸素レベル毎の最大面積）

［ Hao et al. (2024) STOTENを改変 ］

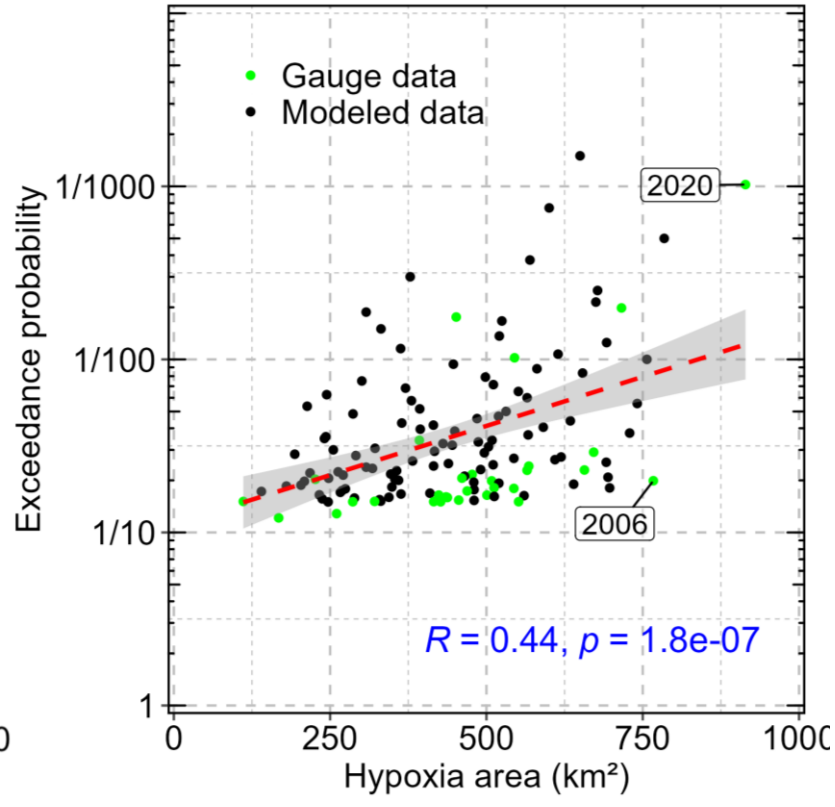
ST3貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価



a) 年最大48時間流出量の確率



b) 貧酸素規模（持続期間）の確率



c) 貧酸素規模（最大面積）の確率

d4PDF現在気候1500年分の筑後川における年最大48時間流出量からランダムに100年分をサンプリングしたイベントと過去30年再現計算による貧酸素規模（持続期間と最大面積）の確率分布 ［未発表］

- 2020年は最大規模の流出事象であった．（ただし，現在気候条件下で）
- 気候変動条件下では，必ずしも最大規模でないとなる可能性が示唆される．

ST3貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価:まとめと今後の課題

まとめ：

- 気候変動の影響を受けて，豪雨が頻発している.
- 豪雨による出水は閉鎖性内湾である有明海・八代海で塩淡成層を強化している.
- 強化された持続的な塩淡成層は底層の貧酸素化を促進する.
- 過去30年間のDOシミュレーション結果から，気候変動による影響を抽出することを試みたところ，明らかに2010年ごろから貧酸素化が強化されている.
- d4PDF(20km，現在気候）から筑後川の年最大48h流出量の確率分布を求め，それに対応する貧酸素イベントを計算し，貧酸素の確率分布を求めた.

課題：

- d4PDF(20km,＋2K,+4K）から気候変動下における確率分布を求める.
- 筑後川年最大48ｈ流出量では，まとめられない部分についての気象学的，水文学的解釈が必要.
- d4PDF(5km)との違いの検討は必要.
- 適応策はありえるか？
- 生物の生息環境への影響評価が必要.