

環境研究総合推進費【2-1604】

温暖化に対して脆弱な日本海の循環システム変化が もたらす海洋環境への影響の検出

(研究実施期間：H28～H30年度 累積予算額：116,038千円 (H28：39,335千円, H29：39,335千円, H30：37,368千円))

研究代表者

荒巻能史 (国立研究開発法人国立環境研究所)

研究体制 (○：サブテーマ代表, 下線：報告会出席者)

(サブテーマ1) 海水循環および炭素循環の変動の検出

○荒巻能史, 越川海, 東博紀, 中岡慎一郎 ((国研) 国立環境研究所)

(サブテーマ2) 深層水の構造変化とそれにとともなう深層流の変化

○千手智晴 (九州大学応用力学研究所)

連携機関：北海道大学

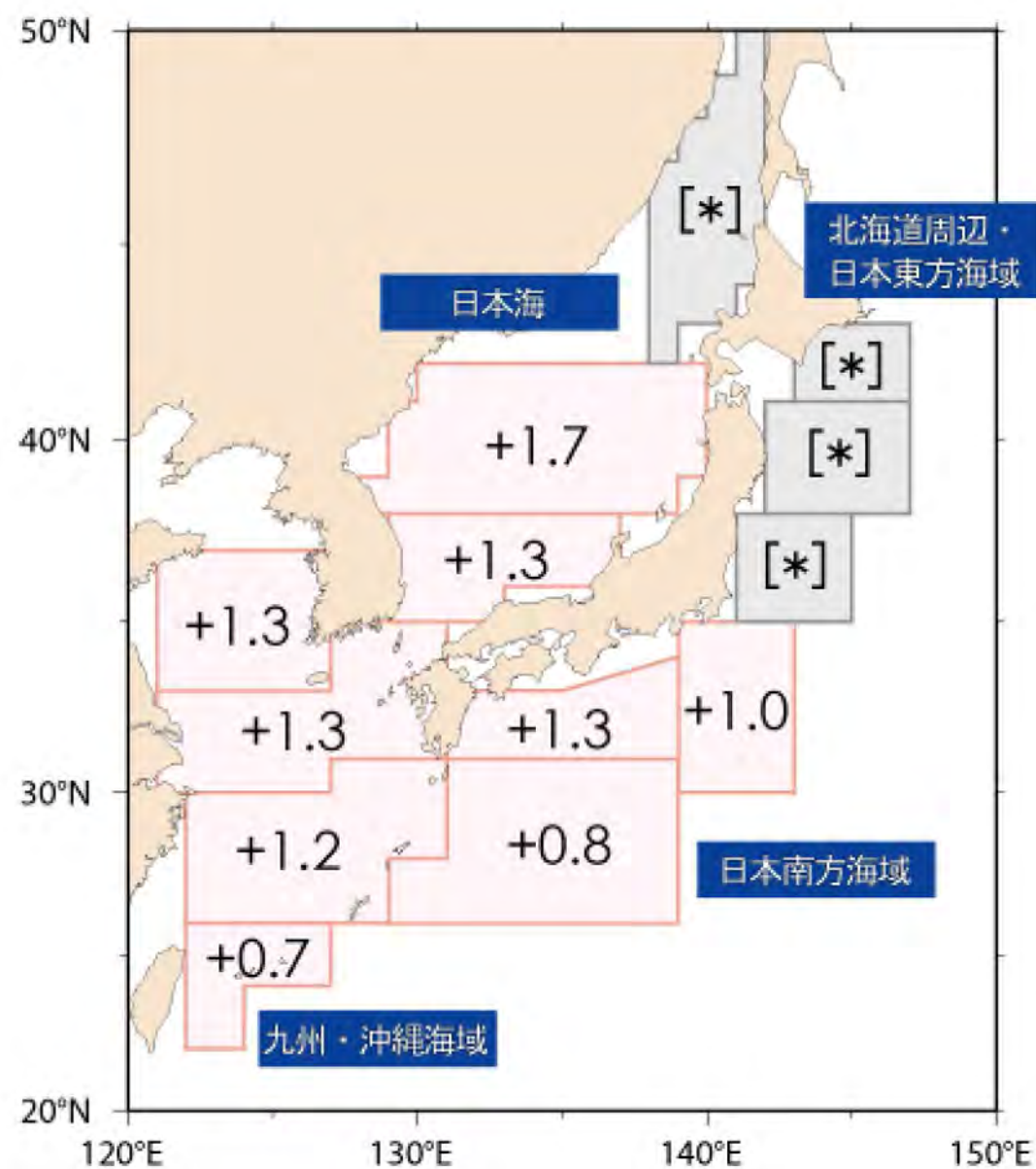
(サブテーマ3) 海洋生物生産量の変動の検出

○熊本雄一郎, 笹岡晃征, 松本和彦 ((国研) 海洋研究開発機構)

連携機関：(国研) 日本原子力研究開発機構

日本海：独自の熱塩循環を持つ世界でも希有な縁海 “ミニチュア大洋”

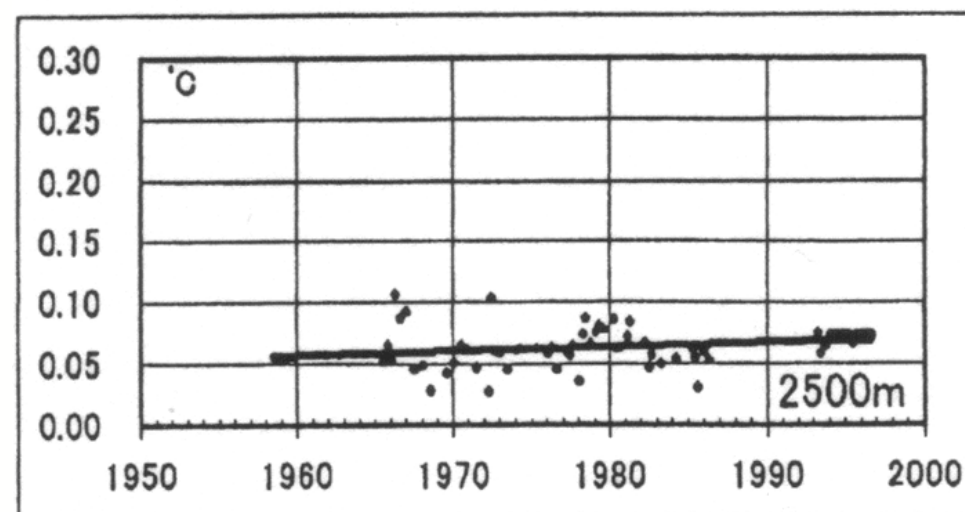
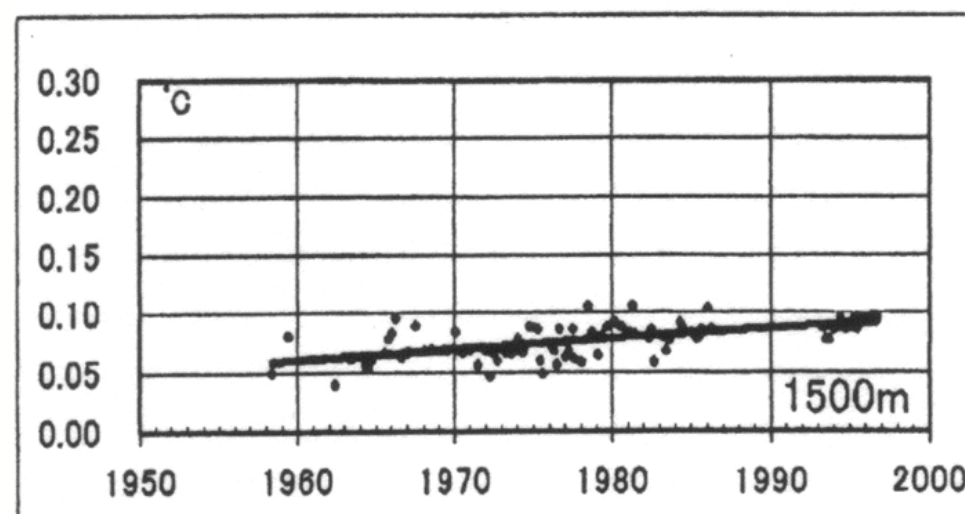
日本近海の海域平均海面水温（年平均）の長期変化傾向（℃/100年）



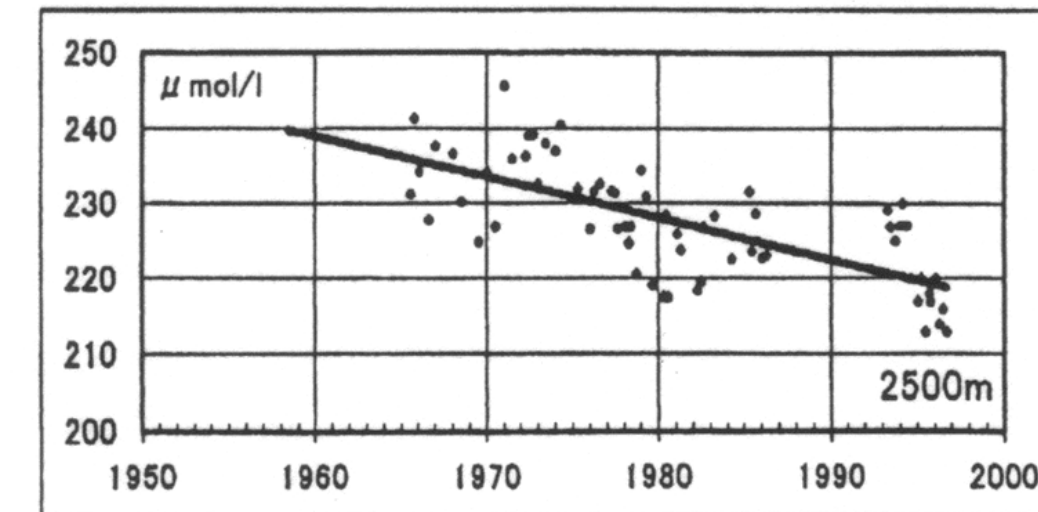
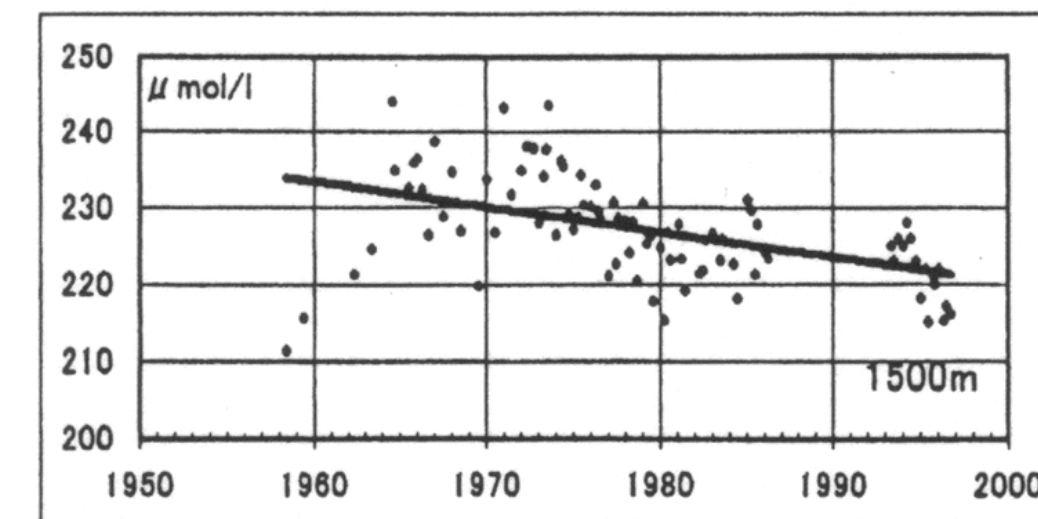
(気象庁: http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html)

日本海の深海における水温・溶存酸素の長期変動

水温



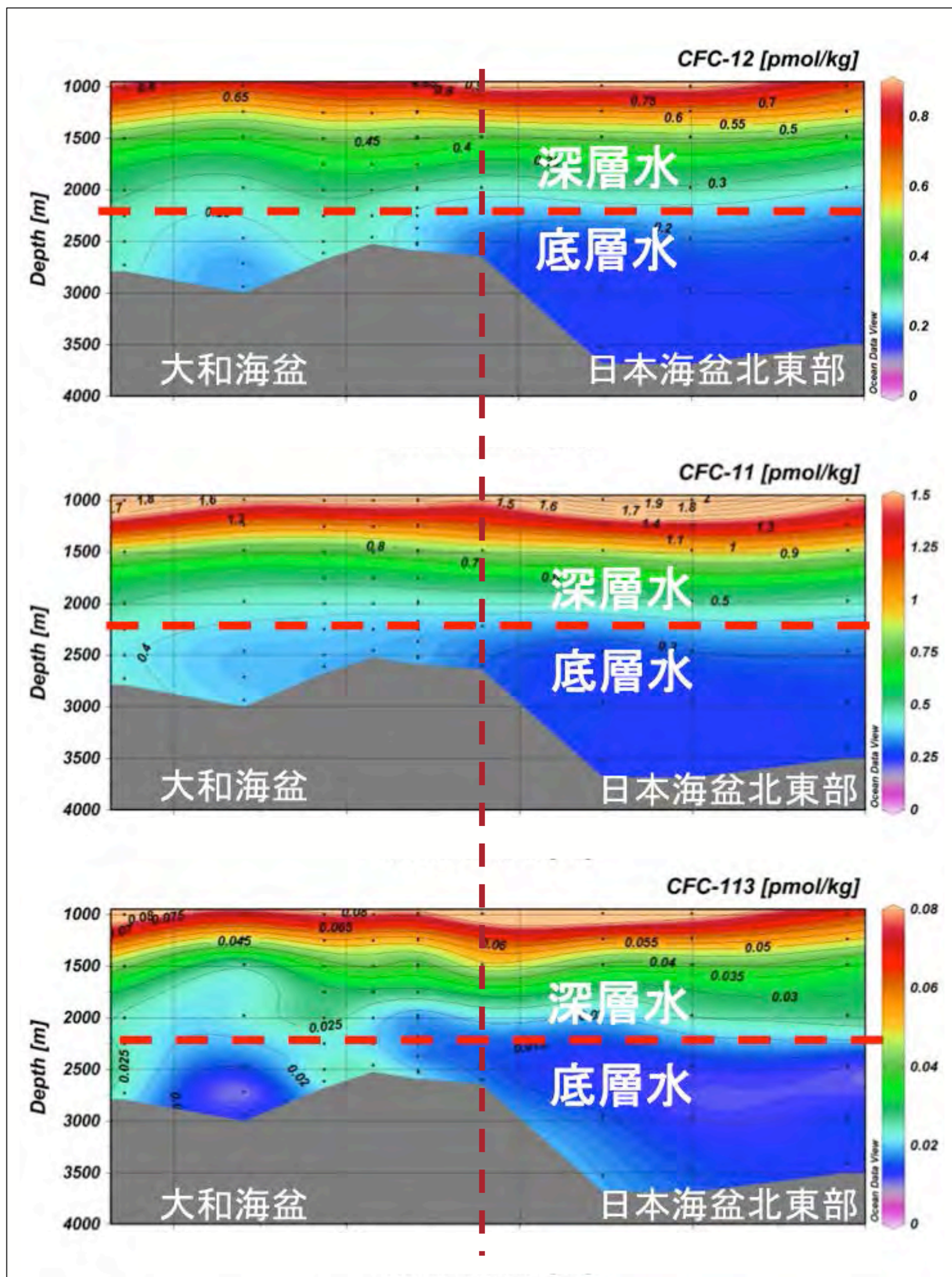
溶存酸素



Minami et al., 1999

近年の温暖化 → 冬季の海洋表層の冷却が緩和
→ 熱塩循環弱化の懸念

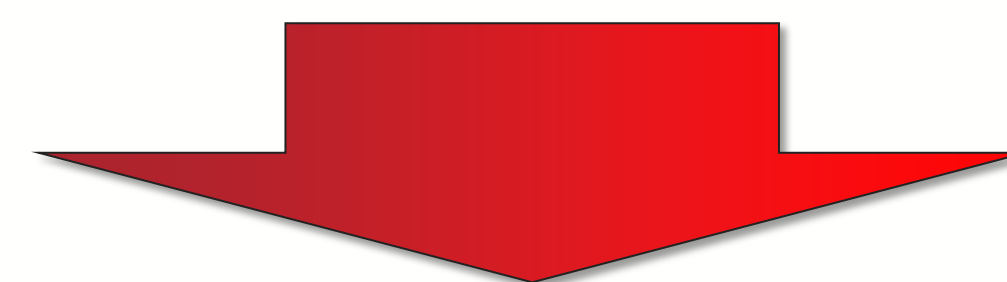
推進費A-1002課題の研究成果：CFCs（フロン類）を活用した熱塩循環弱化の定量化



1930～2011年の間に表層水が深層水と底層水にそれぞれ取り込まれた割合（1年あたりの表層水が深・底層水への寄与した割合，%/年）を数値計算から見積もった。

	深層水		底層水	
	1975年以前 (%/年)	1975年以降 (%/年)	1975年以前 (%/年)	1975年以降 (%/年)
日本海盆	1.10	0.33	0.31	0.13
大和海盆北部域	1.21	0.27	0.47	0.14
大和海盆南部域	1.68	0.35	1.04	0.16

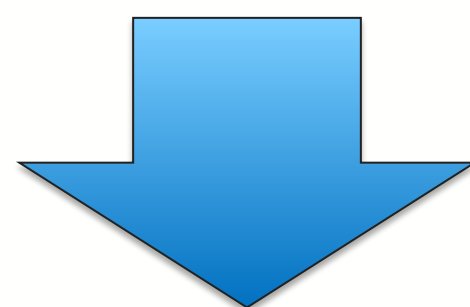
1975年以降，底層水形成速度がそれ以前の15～40%にまで激減



温暖化の影響を受けて日本海の海水循環システムはすでに大きく変化している

温暖化の影響を受けて日本海の海水循環システムは確実に変化を始めている！

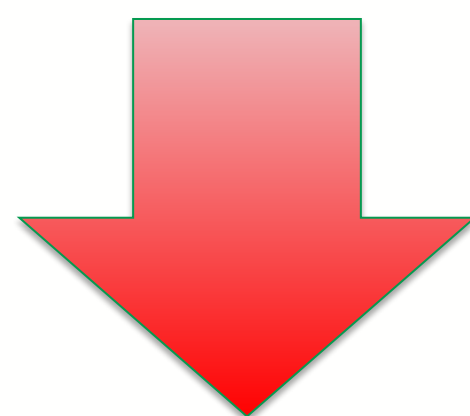
サブ2 (九州大学)
海洋構造の変化と深層流の変化の解析



サブ3 (海洋研究開発機構)
溶存酸素存在量の経年変化の把握

この変化に対して、生物生産や炭素循環などの海洋生態系はどのように応答し、変化しているのか？

サブ1 (国立環境研究所)
炭素循環の変化と酸性化進行度の把握



サブ3 (海洋研究開発機構)
生物生産量の経年変化の把握

- ・ 温暖化に対するグローバルな海洋応答の典型例を明示
- ・ 日本海保全に向けた政策決定に対する情報の提供

海水循環の変化に対して、生物生産や炭素循環などの海洋生態系はどのように応答し、変化しているのか？

サブ1 (国立環境研究所)
炭素循環の変化と酸性化進行度の把握

サブ3 (海洋研究開発機構)
生物生産量の経年変化の把握

サブ2 (九州大学)
海洋構造変化と物質循環変動の関係

サブ1 (国立環境研究所)
物質循環シミュレーションモデルの開発

- ・ 温暖化に対するグローバルな海洋応答の典型例を明示
- ・ 日本海保全に向けた政策決定に対する情報の提供

H28年度新規課題に対する行政ニーズ

【重点課題⑧】 地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

【重点課題⑦】 気候変動への適応策に係る研究・技術開発



H28-30年度公募航海採択（荒巻）の利用

共同観測

サブ1：CO₂関連化学種
サブ3：生物起源粒子

サブ1：化学トレーサー
サブ2：物理観測

サブ1：動態シミュレーション
サブ3：酸素・基礎生産

R/V Eardo
(韓国海洋科学技術院, KIOST)



KIOST・国環研（荒巻）
国際共同研究の活用

長崎丸
(長崎大)



長崎大・九大応力研（千手）
共同研究の活用

温暖化にともなう日本海の
循環システム変化の詳細な把握

炭素循環の
変化の検出

酸性化進行度
の検出

酸素減少傾向
の監視

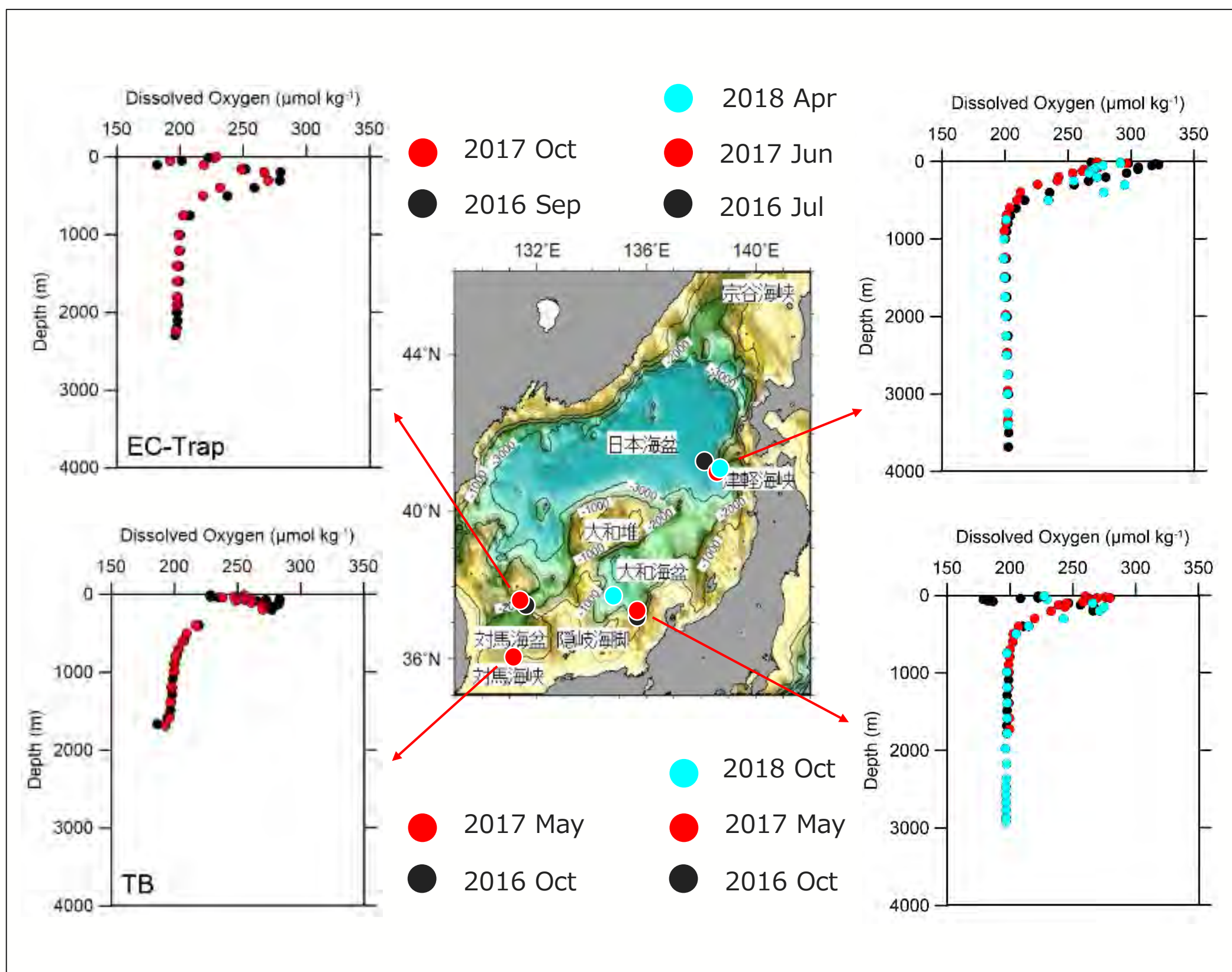
生物生産量の
変化の検出

循環システム変化がもたらす
海洋環境への影響の把握

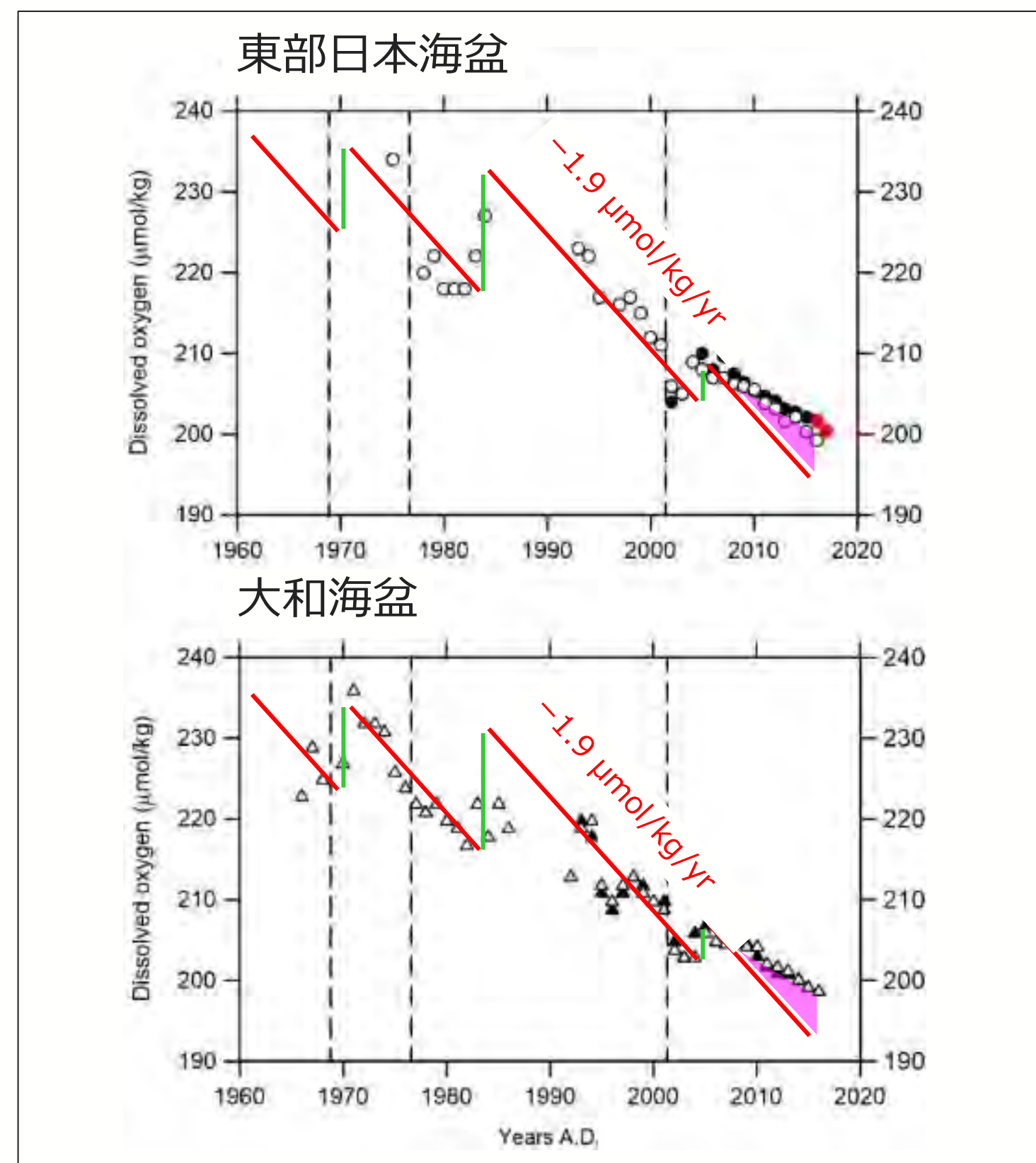
国内連携機関：気象庁，日本原子力研究開発機構，水産総合研究センター中央水産研究所，北海道大学（ほか）
国外連携機関：韓国・海洋科学技術研究院，ロシア・ロシア科学アカデミー極東支部（ほか）

深海における溶存酸素濃度の変化

2016年～2018年の溶存酸素濃度鉛直分布の比較

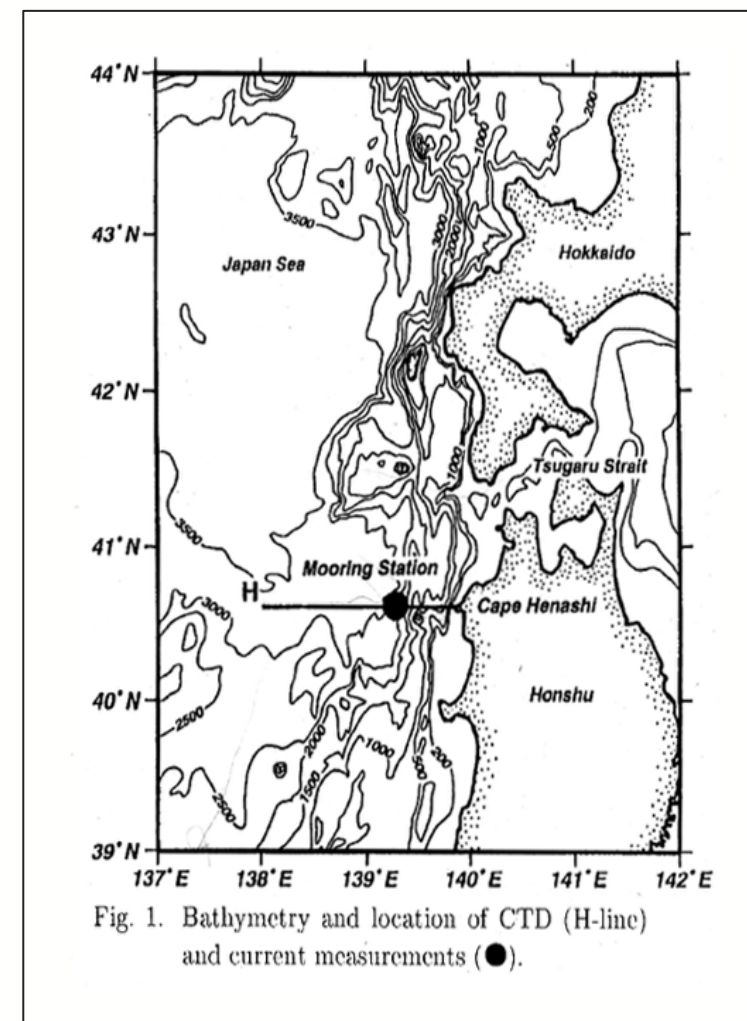
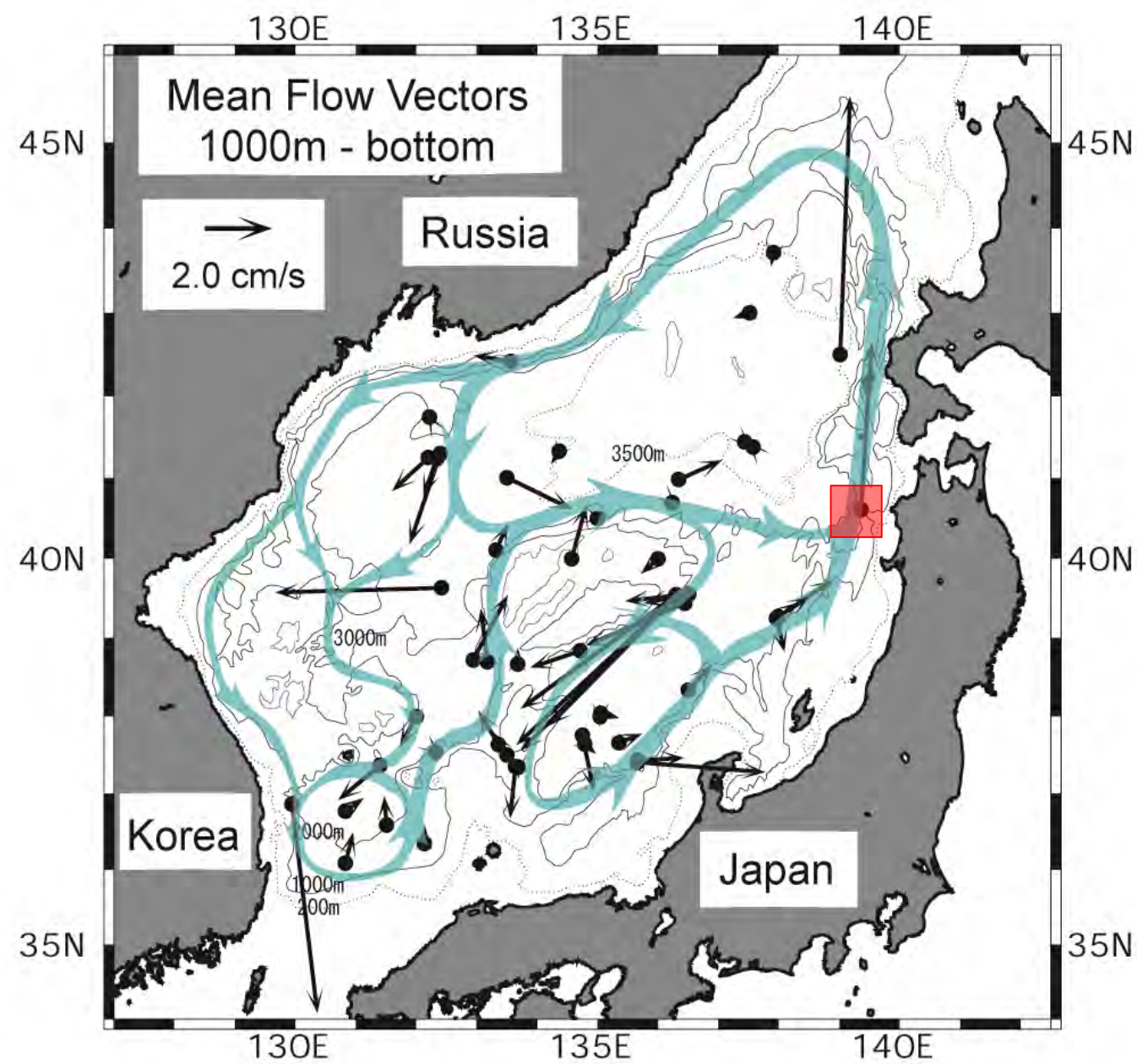


2000m深における溶存酸素濃度の経時変化



最後の底層水新形成イベント以後の2003年以降も、
 深海の酸素は単調減少し続けるものの、その速度が鈍化する傾向に！

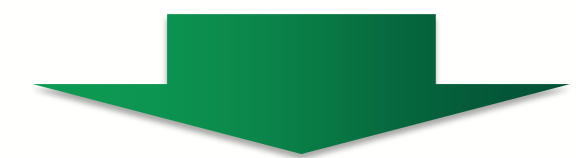
深層流の変化



1994年4月～1995年4月

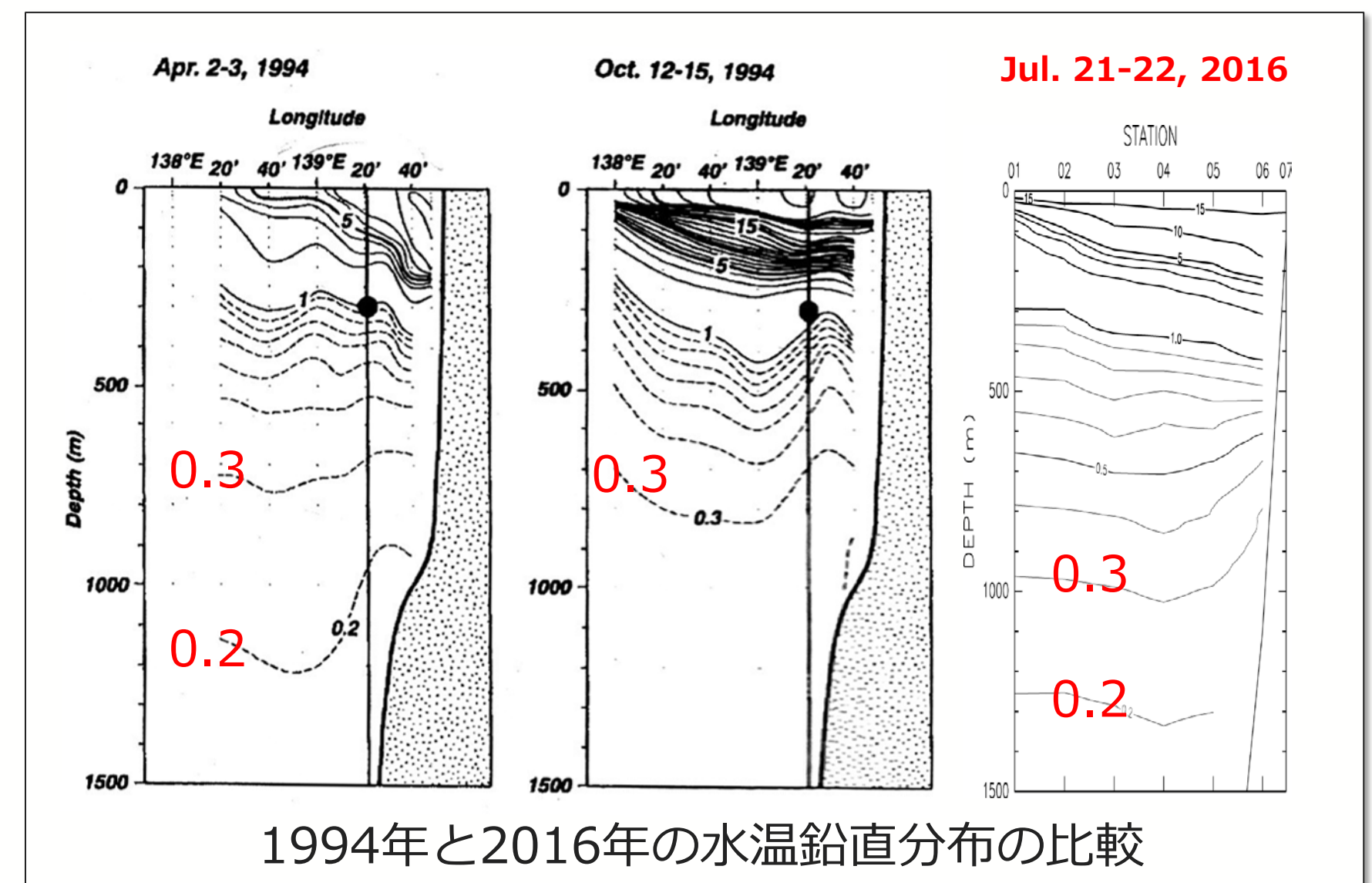
- ✓ 海洋観測 (水温・塩分)
- ✓ 深海での流向流速観測

森ほか (2001)



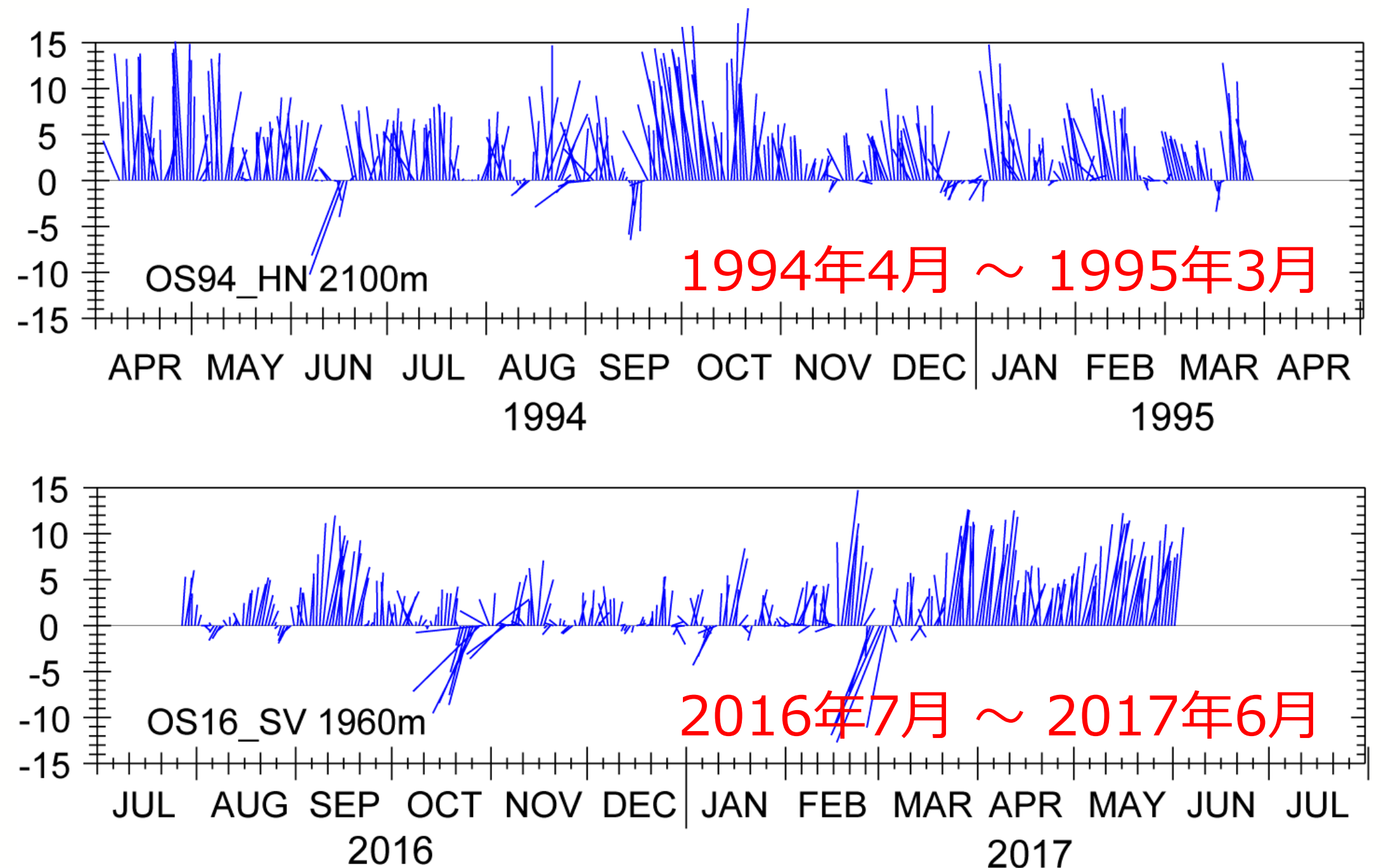
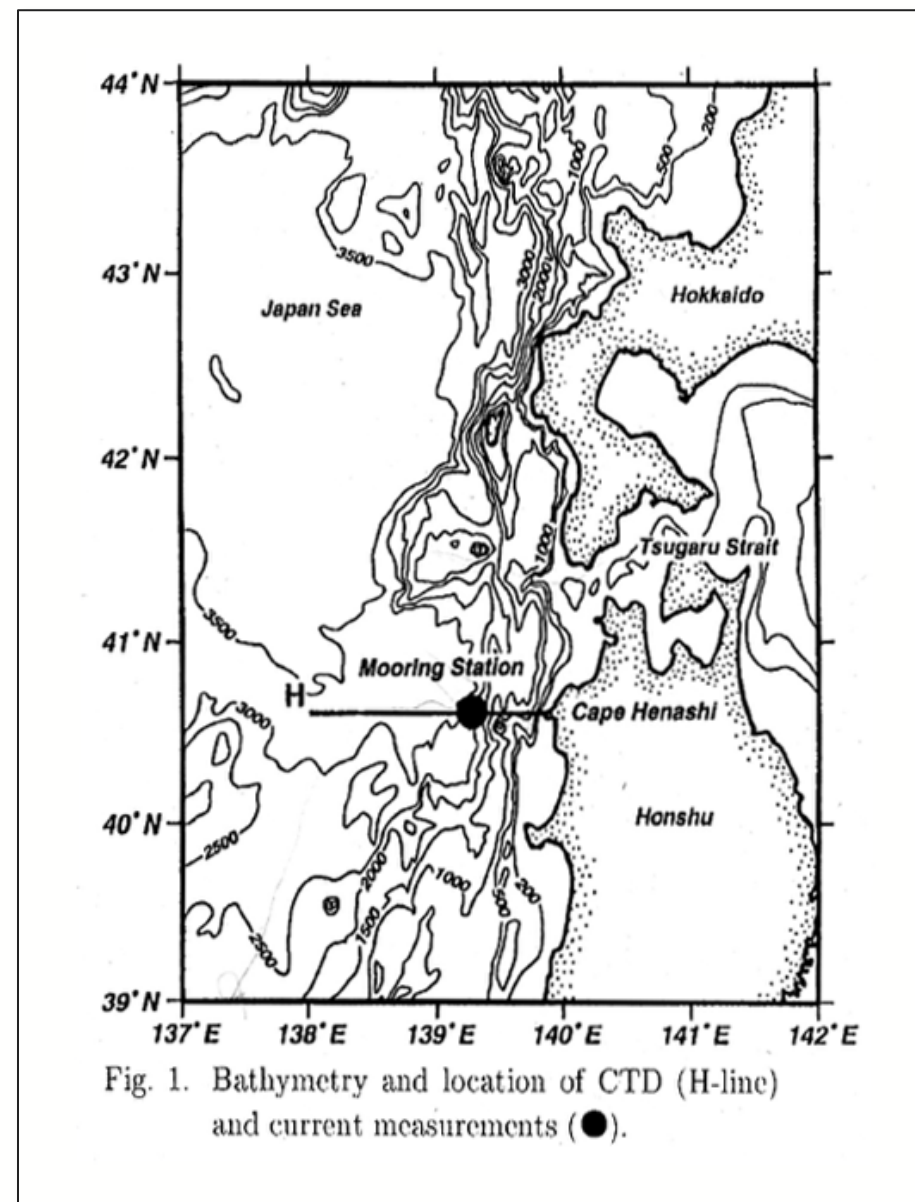
2016年7月～2017年6月

Revisit 観測を実施



最近20年の間に**深海においても明らかな昇温**

深層流の変化

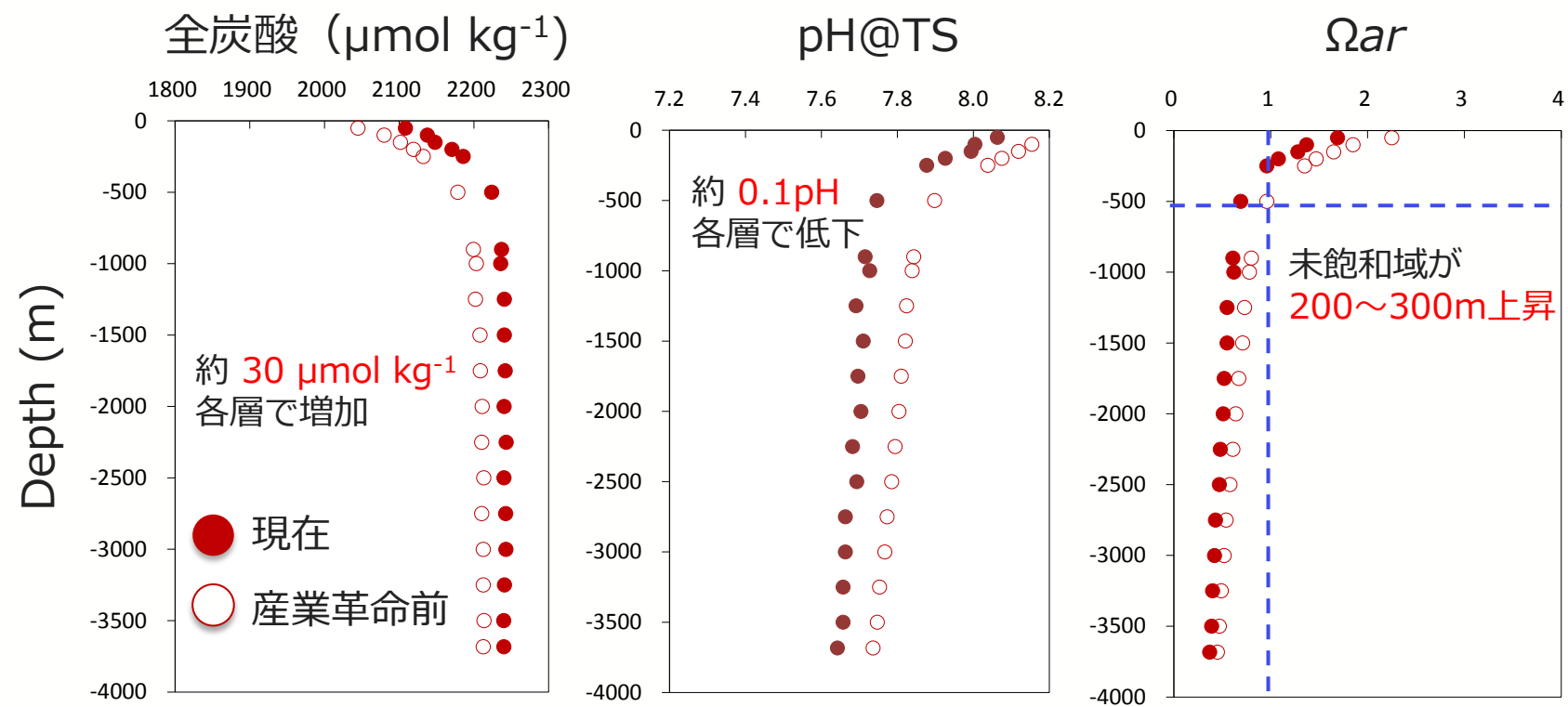


青森県西方での流速計の再係留観測の結果、2000m深の平均流速が22年間で約2/3にまで減少していたことを発見

**温暖化による熱塩循環の弱화를、
世界ではじめて直接測流観測によって明らかにした**

炭素循環の変化

日本海盆 (北海道奥尻沖) におけるCO₂関連成分の鉛直分布



試料採取: 2016年7月

中層・深層水 (300m以深) における炭素循環の変化

	観測年	人為起源二酸化炭素 (μmol kg ⁻¹)	pH (TS unit)	Ωar (未飽和域上昇)
本研究	2016~2018	~30	0.1	200~300
Park et al., (2006)	1999	~15	---	80~220

TrOCA*法 (Touratier et al., 2007)

*Tracer combining Oxygen inorganic Carbon, and total Alkalinity

$$(1) TrOCA = O_2 + 1.279DIC - 0.6395TA$$

$$(2) TrOCA^0 = O_2^0 + 1.279DIC^0 - 0.6395TA^0$$

$$TA = TA^0, O_2 = O_2^0, (1)-(2)より,$$

$$(3) C_{Ant} = DIC - DIC^0 = \frac{TrOCA - TrOCA^0}{1.279}$$

$$TrOCA^0 = \exp(7.511 - (1.087 \times 10^{-2})\theta - 7.81 \times 10^5 / TA^2)$$

最近20年で人為起源二酸化炭素量が急激に増加

2000~2001年の底層水新形成以後, 底層水形成は未観測
→ 「表層水 (大気) からの供給の急増」では説明できない

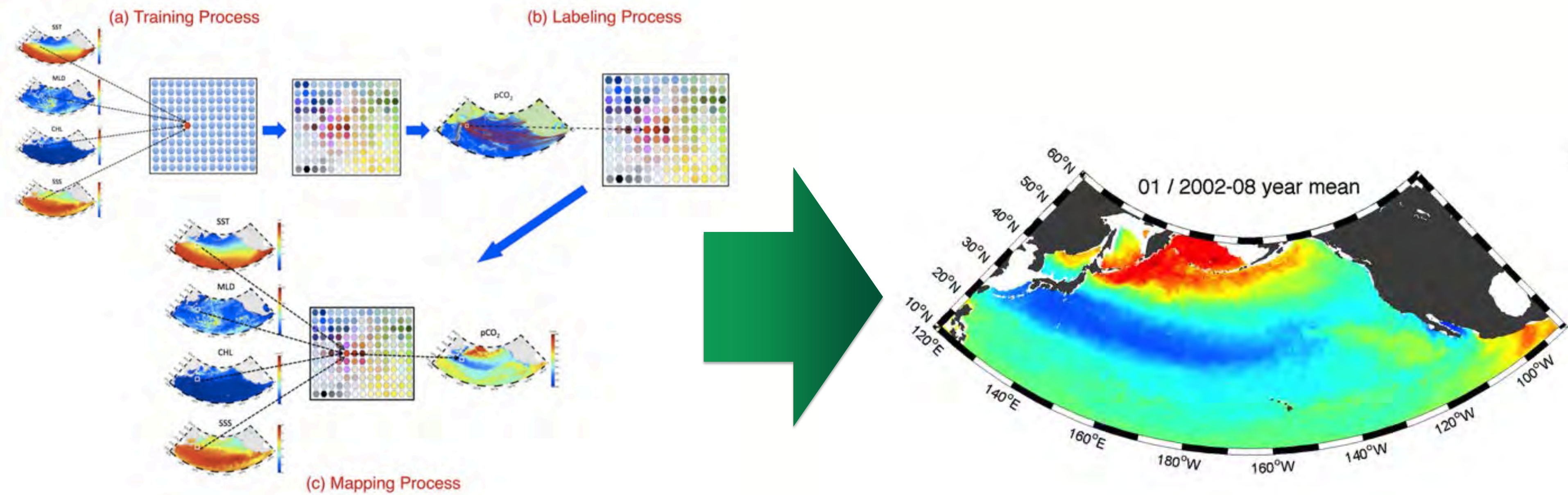
熱塩循環 (深層循環) の弱化が影響したのか?

- 深層の有機物分解が増加している可能性を示唆?
- 深層における溶存酸素の消費速度が加速 (溶存酸素の経時変化とは矛盾する結論)

温暖化に伴う熱塩循環の弱化が 炭素循環様式を変化させる のかもしれない

日本海表層のpCO₂水平分布の推定

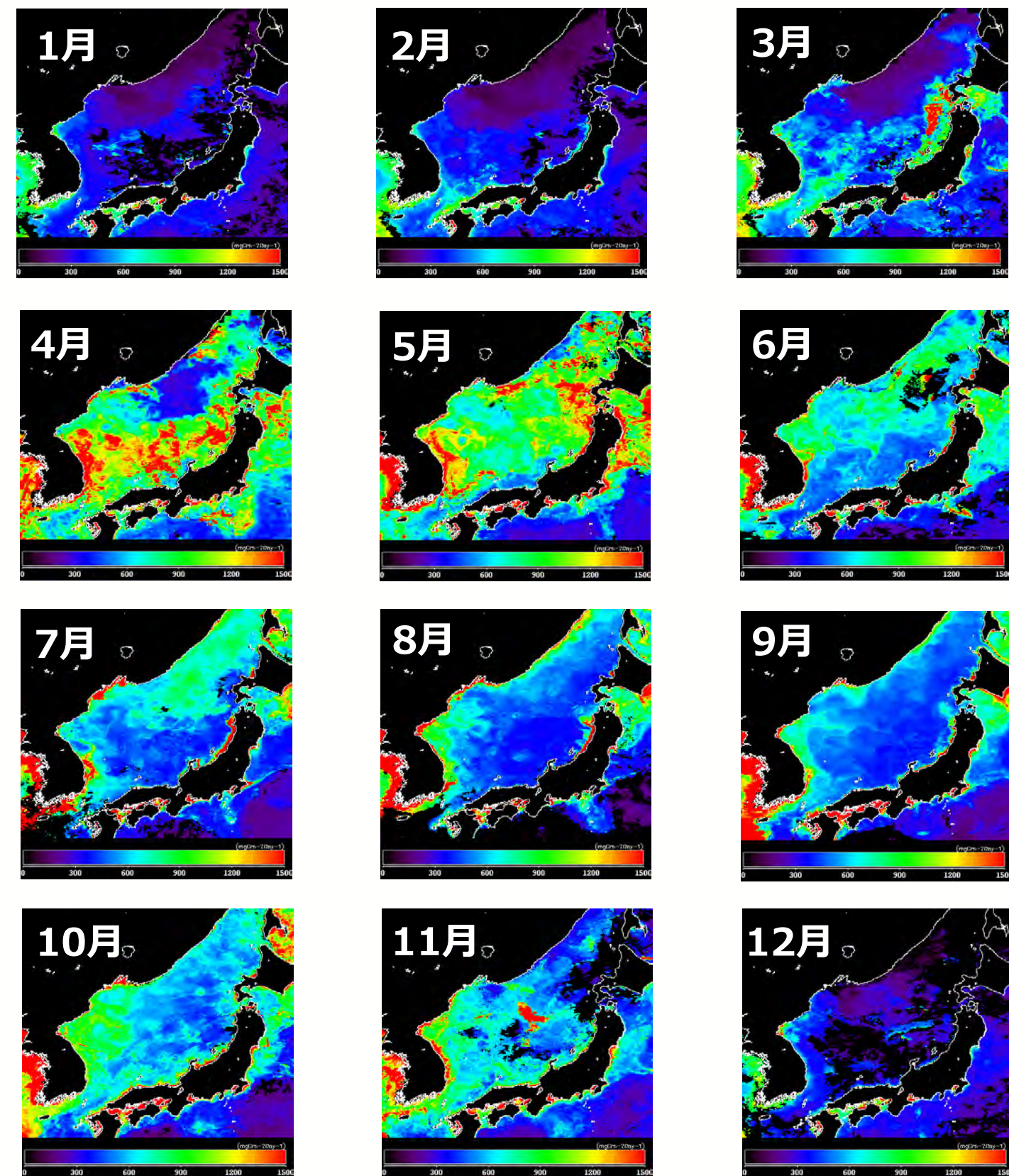
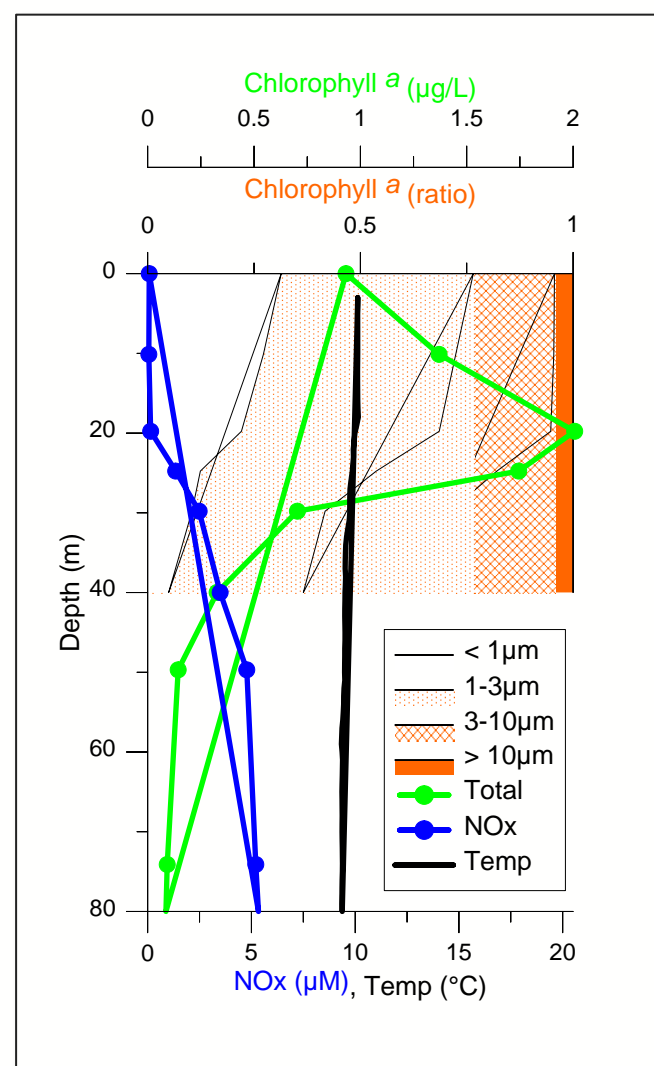
ニューラルネットワーク手法を用いて、**時空間的にカバーされたデータセットと観測されたpCO₂結果に基づいて**、pCO₂を経験的に推定する (Nakaoka *et al.*, 2013)。



$$pCO_2^{sea} = f(SST, SSS, MLD, CHL) + a \cdot t(\text{year})$$

$$a = 1.5 \mu\text{atm yr}^{-1} \text{ (Zeng et al., 2014)}$$

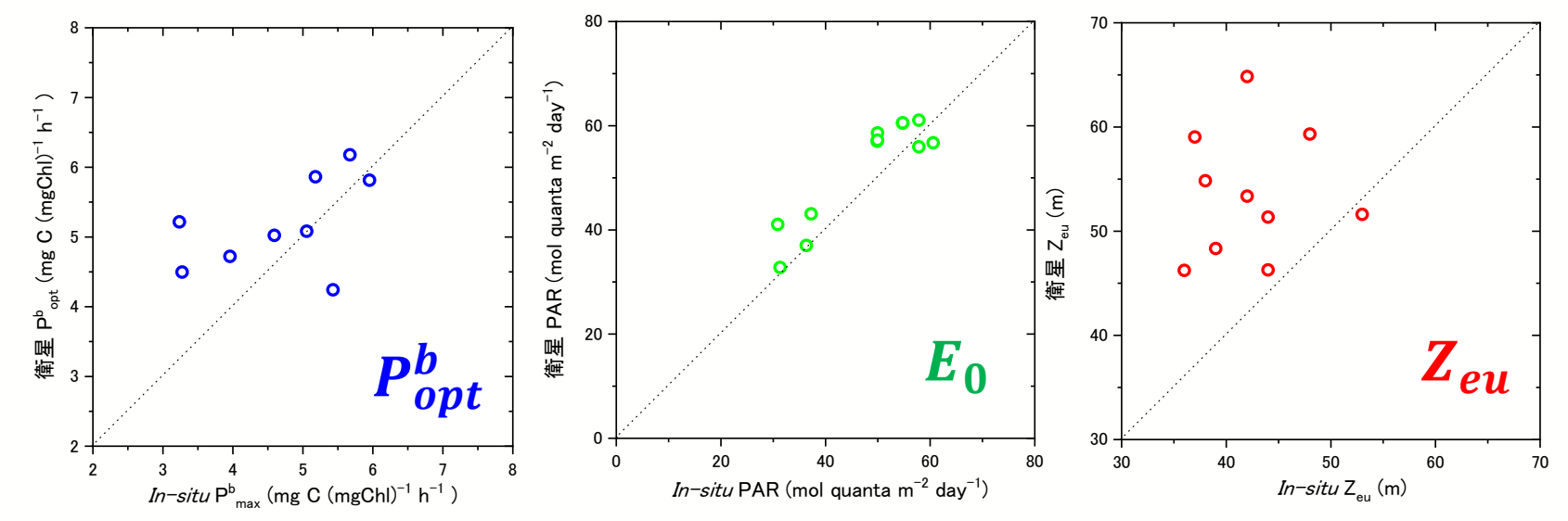
衛星データを活用した基礎生産力の推定



(2017年の月平均を例として)

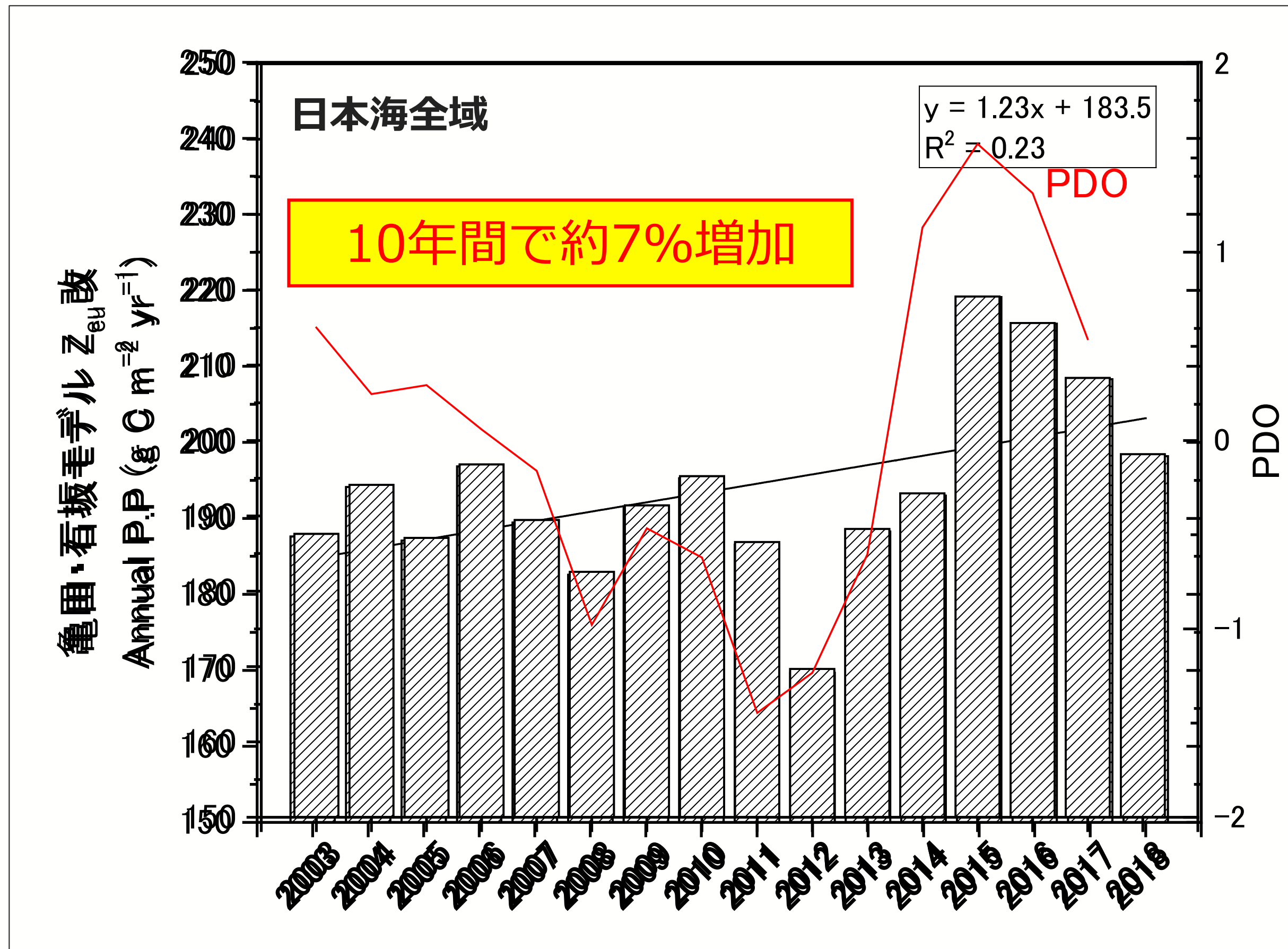
先行研究 (亀田・石坂モデル)

$$PP_{eu} = 0.66125 \times P_{opt}^b \times \left[\frac{E_0}{E_0 + 4.1} \right] \times Z_{eu} \times C_{surf} \times D_{irr}$$

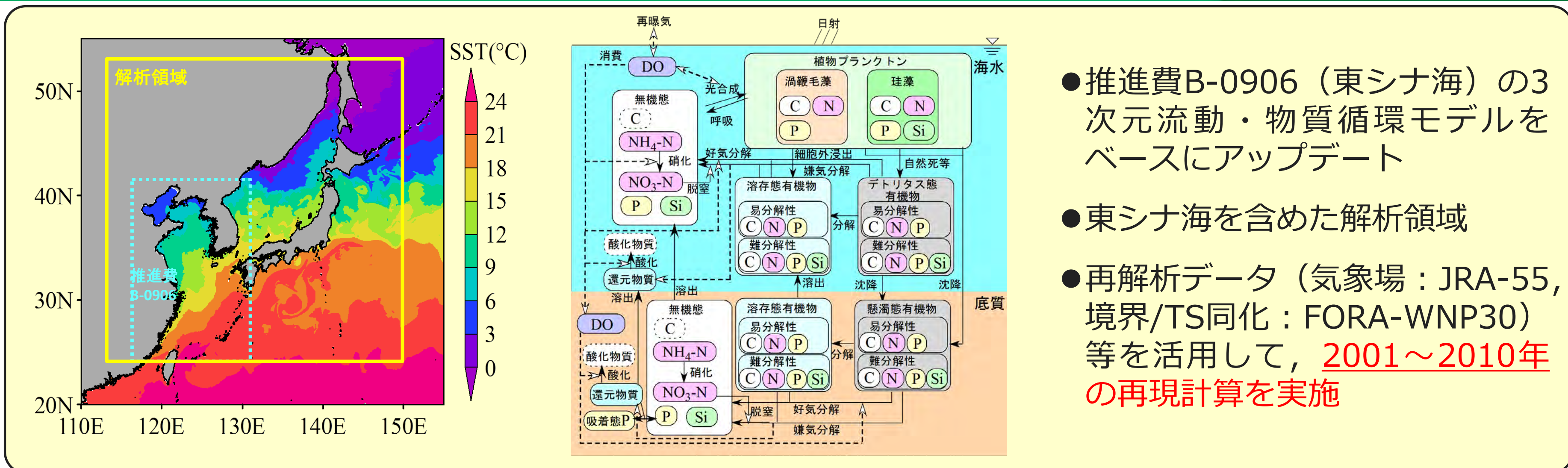


**過去20年にわたる
日本海全域の基礎生産力復元に成功**

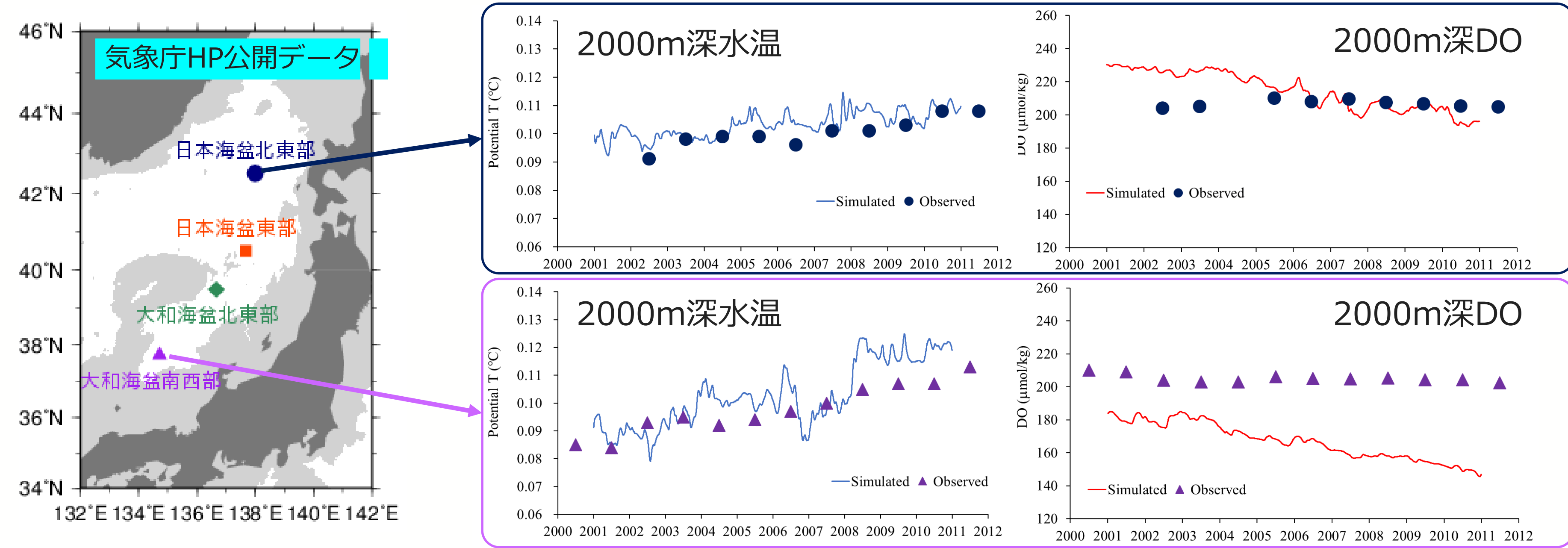
衛星データを活用した基礎生産力の推定



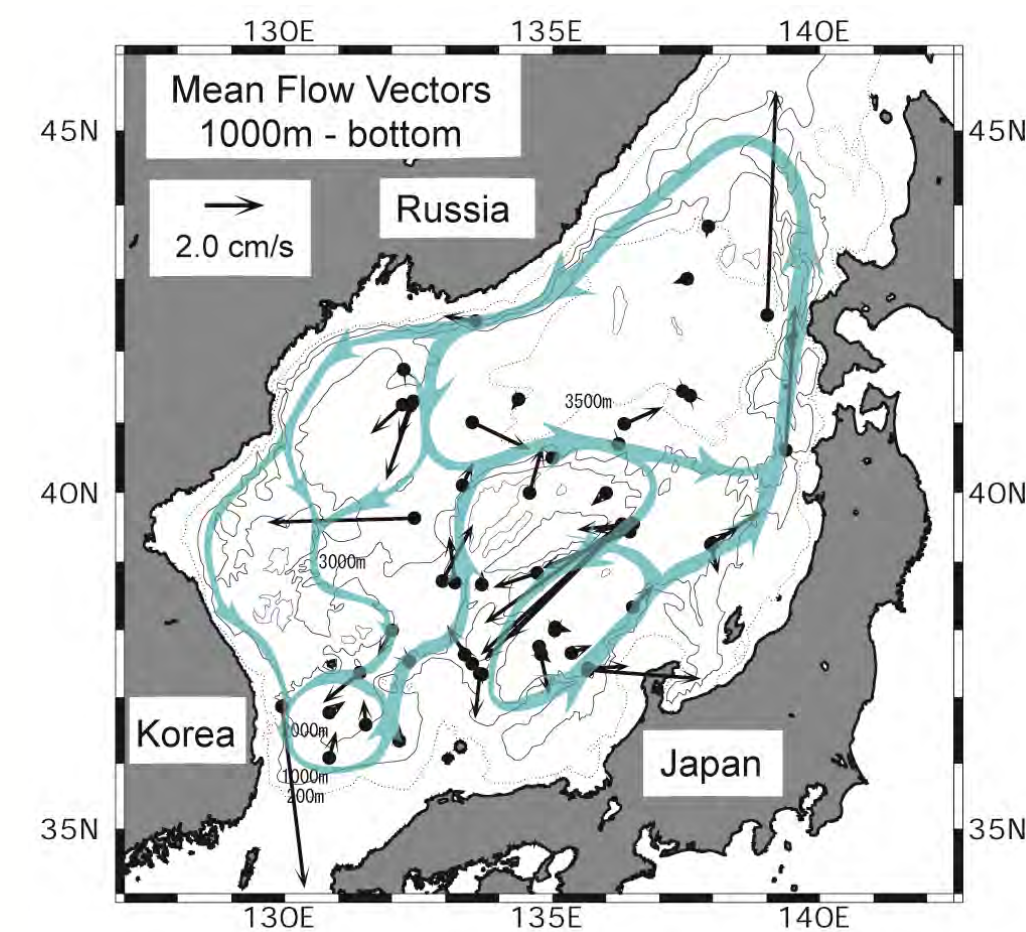
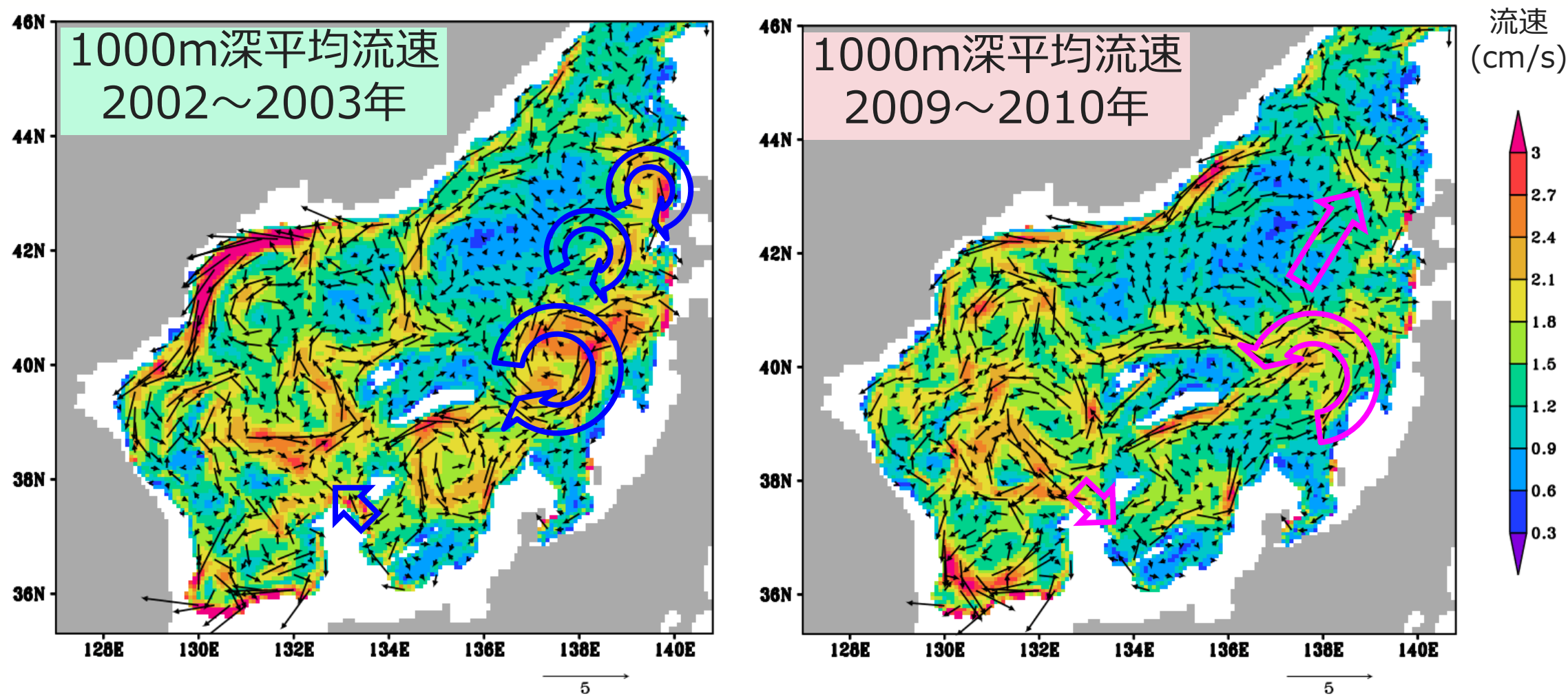
日本海の基礎生産が、PDO (Pacific Decadal Oscillation) など気候変動指標に敏感に応答している可能性が示唆された



- 推進費B-0906 (東シナ海) の3次元流動・物質循環モデルをベースにアップデート
- 東シナ海を含めた解析領域
- 再解析データ (気象場: JRA-55, 境界/TS同化: FORA-WNP30) 等を活用して, **2001~2010年の再現計算を実施**



2000m深の再現性: 水温は概ね良好 大和海盆のDOは過小・減少速度は過大 (今後の課題)

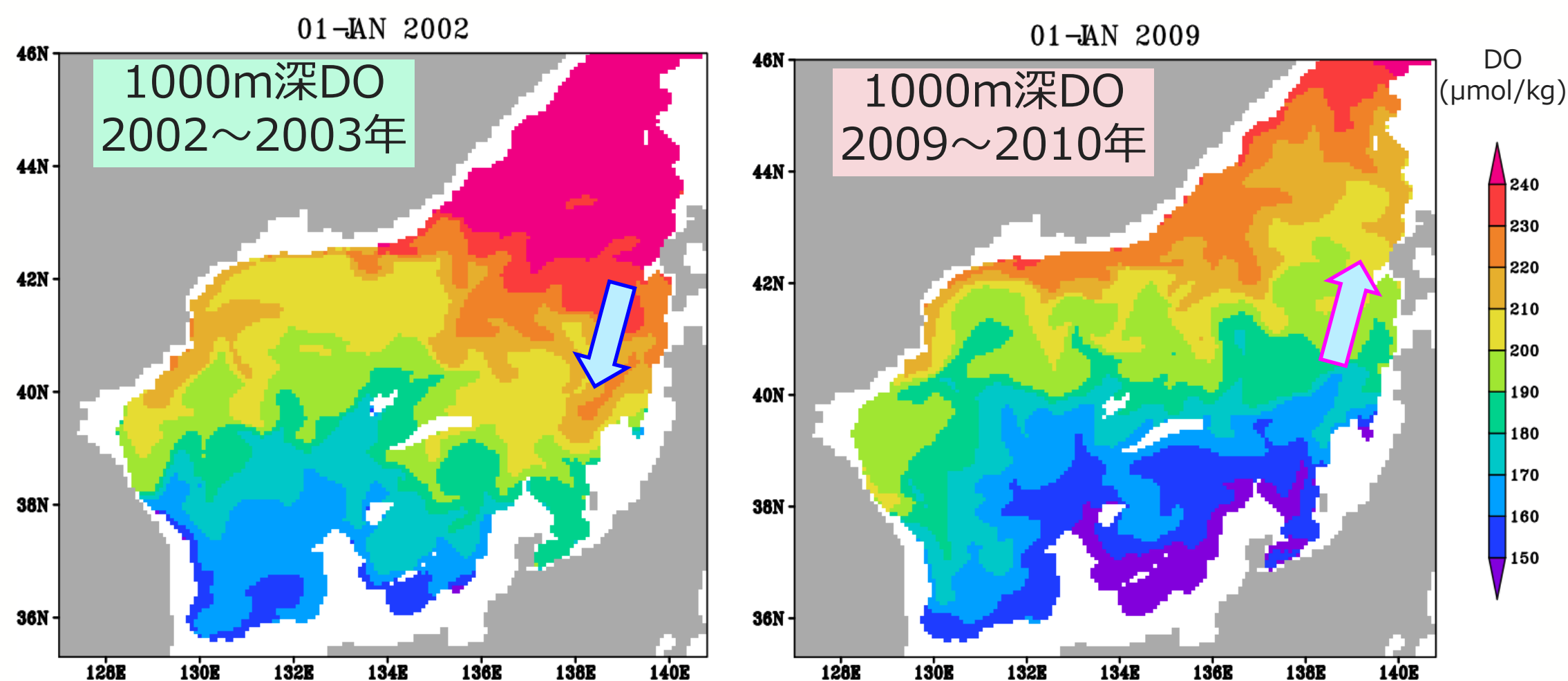


Senjyu et al. (2005)

2000年代前後半で日本海盆～大和海盆の流向が顕著に変化



北方からの高DO水の南下が止まり, 南方の低DO水が北上



✓ 日本海盆と大和海盆の境界付近では, 南下流と北上流が拮抗

✓ 固有水が形成される寒い年 (+1年程度) は, 全体的に南下流が卓越, 両海盆に高DO水が侵入。



温暖化により熱塩循環が変化
→ DO低下に繋がる

H28年度新規課題に対する行政ニーズ

【重点課題⑧】 地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

【重点課題⑦】 気候変動への適応策に係る研究・技術開発

- ✓ **温暖化による熱塩循環の弱화를，世界ではじめて直接観測により明らかにした**
→ IPCC第5次技術報告書では「現時点で全球熱塩循環の弱化を示す兆候は認められない」と記載。本報告論文（投稿準備中）が高いサイテーションを得ることが期待される上，IPCCなどの国際枠組みへの貢献も期待される。
 - ✓ **熱塩循環の弱化が，海洋炭素循環の仕組みを変化させる可能性を示唆した**
→ 本課題で明らかになった海洋炭素循環の変化は「新たな海洋酸性化問題」と捉えることができる。海洋炭素循環の将来予測（モデル・シミュレーション）を実施する上で極めて重要な示唆だと考えられる。
-
- ✓ **環境省地球環境局総務課研究調査室と「意見交換会」を定期的を実施し，本課題で得られた成果を説明するとともに，行政側ニーズの確認を行った**
→ 3年度で合計4回実施

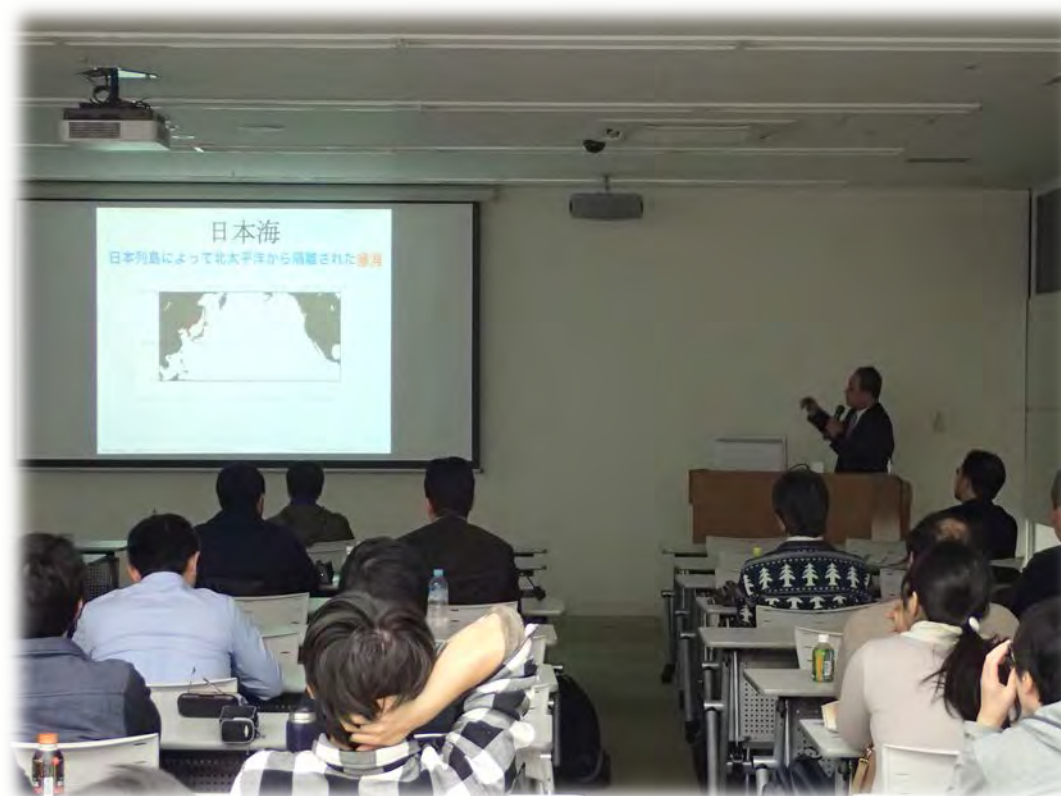
✓ 本課題で得られた成果については、積極的にアウトリーチを行い、国民への温暖化防止対策の啓蒙に努めた

✓ 市民向け講演会の主催

2017年1月22日（日）開催地：金沢市，共催：金沢大学環日本海域環境研究センター，参加者25名

2018年1月21日（日）開催地：新潟市，共催：新潟大学理学部，参加者80名

2019年2月16日（土）開催地：福岡市，共催：九州大学応用力学研究所，参加者30名



✓ 市民向け公開講座での講演

2016年8月20日（土）開催地：福岡県春日市（九州大学筑紫キャンパス），参加者68名

平成28年度九州大学大学院総合理工学府 公開講座「大気と海洋の環境学～地球温暖化から越境汚染まで～」

本課題からの講演者：千手智晴，タイトル：地球温暖化と海－日本海異変

✓ TV放映

1. 2017年9月3日（日） 23:30～24:00 NHK Eテレ・サイエンスZERO
「ミニチュアオーシャン！小さな大洋 日本海からの警告」 荒巻・千手・熊本



2. 2018年2月2日（金） 18:15頃から10分間 北陸朝日放送・HABスーパーJチャンネル
「ミニ大洋 日本海の温暖化を追う」 荒巻
3. 2019年1月9日（水） 00:30～01:00（ほか4回放映） NHKワールド・Science View
「A Warning from the Sea of Japan - a "Miniature Ocean"」 荒巻・千手・熊本

✓ 新聞報道

1. 2017年5月15日（月） 読売新聞夕刊「日本海の海水循環 半減」 荒巻
2. 2018年2月17日（土） 新潟日報朝刊「世界の海の縮図 日本海」 荒巻・松本
3. 2018年4月15日（日） 日本経済新聞朝刊「日本海、温暖化を先取り」 千手・荒巻
4. 2018年7月30日（月） 産経新聞朝刊「日本海で進む「海の温暖化」」 荒巻

- 測定とモデルの両面から効率よく研究を進め、水温上昇や流速減少などの新たな科学的知見を見出している。
- 一定の科学的成果は出ている。
- 実際の高度な科学実験法に基づく、観測データが取得され始めたことを高く評価する。Eテレ、サイエンスゼロでの番組作成への協力は高く評価できる。科学的知見の蓄積を国民に広く周知することによって、国民の海洋循環に関する理解が深まることが、環境行政に間接的にしる、大きな貢献となることが期待される。
→ ご期待に応えるよう、熱塩循環弱化的直接測流や熱塩循環弱化的に伴う炭素循環への影響については論文執筆を鋭意進めており、これら論文が高いサイテーションを得る可能性は高いと思っている。科学的貢献はできていると自負している。
- 日本海的环境をより深く知る意味で科学的に有意義である。しかし、環境省の施策に直接影響を与える方向に、環境省と相談しつつ、研究の進め方を修正することが望まれる。
→ 環境省地球環境局総務課研究調査室と「意見交換会」を定期的実施（3年度で合計4回）し、本課題で得られた成果を説明するとともに行政側ニーズの確認を行いつつ研究を進めた。
- この種の研究が継続して行われることの意義があることを十分に示した成果となっている。適応の政策への寄与が大きくなるようにデータのまとめをしてほしい。
→ 本課題提案時点から直接的な適応政策への貢献が難しいと考えていた。ところが、研究成果が挙がるにつれて、従来から明らかになっていた深層循環の変化だけではなく、海洋生態系への影響も明確に見えてきた。そこで、本課題を通して収集してきたデータや知見、あるいは技術を、例えば魚種・漁獲量変動との関係性となぎ合わせる事ができれば、将来の日本海沿岸域における社会経済のあり方などに関する情報提供が可能となり、適応政策への直接的貢献が可能になると考えられる（本件については、新規テーマをH31年度推進費課題として提案したが残念ながら不採択となった）。
- 日本海での変化の把握、その解析などは定量的に進んでおり、評価できる。これらの成果を広域な外洋に適用する手法はどのように考えているのか判然としない。「政策への貢献」で記述している「世界の海洋の異変の前兆と捉える」ための手法を示すべき。困難ではあろうが、現場の現象に接している研究者が何らかのヒントやアイデアを出せるのではないか。
- 日本海データの蓄積により、海洋環境の変化を詳細把握でき、適応策の活用への貢献できることを期待する。溶存酸素濃度・全炭酸濃度などの変化傾向が明らかになっていること、流向・流速の変化傾向があることなどから、どの時点でモデルにとりこまれ、行政に貢献できるかの検証が必要。
→ 大気海洋結合大循環モデルや日本海循環モデルの開発者らとの意見交換を行う場を複数回設けた。私たちが指摘する日本海での「先取り現象」を、現行のモデルは反映できていないというのが現状であったが、同時に（モデル開発者からは）今後もそのような情報提供を強く期待された。本課題で構築した流動・物質循環モデルは日本海の「先取り現象」を程よくシミュレートできており、これを大気海洋結合大循環モデルと統合すれば、その精緻化が飛躍的に向上するものと思われる。
- 諸々の観測結果、新しい観測結果は出ていると思うが、それによる日本海全体の変化がどういう問題を引き起こす可能性があり、どういう環境政策を考えた方がよいか、そういったつながりをもっと持たせた方がよい。
- 環境政策に対するインプットがはっきりしない。海が環境が大きく変わってきているというアピールが、しっかり出すことができれば評価できる。
- 日本海的环境をより深く知る意味で科学的に有意義である。しかし、環境省の施策に直接影響を与える方向に、環境省と相談しつつ、研究の進め方を修正することが望まれる。
- 科学的に有用な知見が数多く得られつつある。環境行政に反映できるような、取り組みも推進してほしい。
- 後半では、行政ニーズへの対応に留意して進めてほしい。具体的には、循環システムの変化が日本にどのような影響を与えるのか、どのような対策を今から取らなければならないのか、への答えを示してほしい。
→ 地球環境局総務課研究調査室と「意見交換会」を定期的実施（3年度で合計4回）し、私たちが明らかにした科学的成果が環境政策にどのように活用されるかについて相談しながら本課題を遂行してきた。環境省は、今回報告した科学的成果がIPCCなどの国際枠組みへの貢献へつながることを期待してくれている。