

## 海洋表層観測網と国際データベースの整備による生物地球化学的な気候変動等の応答検出

## 環境省 国立研究開発法人国立環境研究所

地球システム領域	大気・海洋モニタリング推進室	中岡 慎一郎
	同	高尾 信太郎
	同	所 立樹
	同	和田 千里
地球システム領域	炭素循環研究室	荒巻 能史

## 農林水産省 国立研究開発法人水産研究・教育機構

国際水産資源研究所	外洋資源部	国際資源環境グループ	小笠 恒夫
東北区水産研究所	資源環境部	生態系動態グループ	田所 和明
中央水産研究所	海洋・生態系研究センター	モニタリンググループ	瀬藤 聡

平成29-令和3年度合計予算額	130,593千円
(うち、令和3年度当初予算額)	25,211千円)

【要旨】本課題では、太平洋域の海洋表層における二酸化炭素分圧 ( $p\text{CO}_2$ ) と栄養塩類の循環を把握して生物地球化学的な気候変動等の応答を検出するため、国立環境研究所（以下、国環研）と水産研究・教育機構（以下、水研）が観測・解析両面の基盤を整備することを目的とする。そのために以下の取り組みを実施する。（１） $p\text{CO}_2$ の連続観測と栄養塩やアルカリ度・全炭酸の採水観測及び栄養塩のセンサー観測を実施する。（２）国際的な $p\text{CO}_2$ データベースであるSurface Ocean  $\text{CO}_2$  Atlas (SOCAT) 新版の公開に向け、本課題観測で得られた $p\text{CO}_2$ データを次期SOCAT向け提出データとして整備するとともに、他機関観測データの品質認定を実施しSOCATに貢献する。（３）SOCATデータベースなどを利用して全球 $p\text{CO}_2$ 、大気海洋間 $\text{CO}_2$ フラックス、pH（海洋酸性化指標）、栄養塩分布推定を行う。

本課題期間を通じて、（１）については国環研では貨物船による $p\text{CO}_2$ 連続観測に加えて栄養塩センサー観測と採水によるアルカリ度観測を実施するとともに東京湾をはじめとする大都市圏の日本内湾域における炭素循環について定量的に評価した。水研では、漁業調査船2隻による日本近海の $p\text{CO}_2$ 観測と栄養塩採取、及び全炭酸濃度、アルカリ度測定向けの試料採取を行った。（２）については年毎にSOCAT新版の公開に向けて $p\text{CO}_2$ 観測データの整備を行いSOCATに提出するとともに、他機関観測データを含めて品質認定を行った。（３）については全球の $p\text{CO}_2$ 、大気海洋間 $\text{CO}_2$ フラックス、pH、栄養塩濃度分布を作成した。

【キーワード】二酸化炭素、炭酸系、海洋酸性化、栄養塩、国際データベース、分布推定

## 1. はじめに

産業革命以降、大気中二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 濃度は化石燃料消費や土地利用変化などの人為的な要因により増加の一途をたどっており、近年の温暖化を伴う異常気象との関連が指摘され

ている。海洋は森林などの陸上生物圏とともに大気中に放出されたCO<sub>2</sub>を吸収して貯蔵することで大気中CO<sub>2</sub>濃度の増加をある程度抑えており、結果として地球温暖化の緩和に貢献している。一方で海洋にCO<sub>2</sub>が蓄積することで、海洋中のCO<sub>2</sub>濃度が増加し酸性度の指標であるpHの低下を引き起こすため、海洋の温暖化と酸性化がいわゆる“双子の問題”として海洋生態系に悪影響を及ぼすことが懸念されている。さらに地球温暖化に伴う海洋の温暖化によって海洋循環が変化することや海洋生態系が変化することにより炭酸系だけでなく海洋の一次生産に必要な栄養塩の循環にも影響を与えることが考えられる。CO<sub>2</sub>に関しては、大気中のCO<sub>2</sub>が海水中のCO<sub>2</sub>と十分にガス交換し平衡に達するには時定数が極めて大きいため、全体でみると大気中のCO<sub>2</sub>と海洋表層中のCO<sub>2</sub>は非平衡の状態にある。そのため平均的な海洋のCO<sub>2</sub>分圧 (pCO<sub>2</sub>) は大気のpCO<sub>2</sub>より低く、結果として海洋はCO<sub>2</sub>を毎年2-3 PgC程度吸収していると見積もられている。またエルニーニョ南方振動などの気候変動により、pCO<sub>2</sub>の分布パターンが変化することが報告されており、大気海洋間のCO<sub>2</sub>交換や海洋酸性化傾向の時空間分布がどのように変化するか把握することは非常に重要である。また栄養塩に関しては生物ポンプと呼ばれる植物プランクトンの光合成活動による炭素固定とその鉛直輸送に関与しており、広域的な分布を把握して、気候変動による海洋循環の変化や、海洋生態系の変化による栄養塩分布パターンの変化を検出することが今後重要になると考えられる。

北太平洋の特に日本周辺海域は世界でも有数のCO<sub>2</sub>吸収域として知られている (Takahashi et al., 2009<sup>1)</sup>, Nakaoka et al., 2013<sup>2)</sup>)。しかしこの海域は複雑な水塊構造と高い生物生産力を反映して、pCO<sub>2</sub>の時空間変動が非常に大きいため、年間を通じた正確なCO<sub>2</sub>吸収量を把握するためには、他海域に比べて高い時空間分解能でpCO<sub>2</sub>の変動をモニタリングする必要がある。また海洋のCO<sub>2</sub>吸収は同時に海洋の酸性化も引き起こしているが、沿岸生物の一部は、幼生時期における海水のアラゴナイト飽和度の平均値が1を下回った時点ではなく幼生時期におけるアラゴナイト飽和度の最小値が1を下回った時点で既に酸性化の影響を受け始めることが実験的に示されており (Onizuka et al., 2018<sup>3)</sup>)、また3を下回った段階で成長にストレスを沿岸におけるpCO<sub>2</sub>変動を高い時空間分解能で把握することは、酸性化影響評価のうえでも非常に重要である。

このため、本課題では国環研による篤志貨物船を用いた広域pCO<sub>2</sub>モニタリングに加えて、日本近海域で多くの水産海洋調査を行っている水研の漁業調査船を用いたpCO<sub>2</sub>モニタリングを実施することにより、日本近海域で取得されるpCO<sub>2</sub>観測値の時空間分解能を高め、同海域におけるCO<sub>2</sub>吸収量算定精度の高度化を目指す。また得られたpCO<sub>2</sub>分布を酸性化の影響評価に繋げるために、日本近海域の数点で炭酸系パラメータ (全炭酸、アルカリ度) の試料採取と分析を行い、海洋表層におけるアラゴナイト飽和度及びカルサイト飽和度の現状評価を実施する。

国環研では、貨物船を活用した大気・海洋モニタリング事業において1995年から北太平洋においてpCO<sub>2</sub>観測を継続しており、2006年からは南北太平洋西部海域にも観測範囲を拡張してpCO<sub>2</sub>観測を実施しており、現在トヨフジ海運株式会社の2隻の船舶に協力いただいている。また貨物船観測ではpCO<sub>2</sub>測定以外にも1日3回の採水による栄養塩測定も両船舶で実施しており、さらに2014年からは栄養塩の一つである硝酸塩の連続測定を開始し、より時空間スケールの短い硝酸塩変動のプロセス解明に注力している。また水研では、漁業調査船を用いて

日本の沿岸域を中心とした日本近海の $p\text{CO}_2$ 観測を毎年実施しており、沿岸域の $p\text{CO}_2$ 観測データの充実に大きく貢献している。

$p\text{CO}_2$ 観測に基づいた全球海洋 $\text{CO}_2$ 吸収量の推定は、国際統合データベースであるSurface Ocean  $\text{CO}_2$  Atlas (SOCAT) が公開されて以来、盛んに行われるようになった (Landschützer et al., 2014<sup>4)</sup>, Rödenbeck et al., 2015<sup>5)</sup>)。SOCATは、2007年にInternational Ocean Carbon Coordination Project)の下で、全球を対象に表層 $p\text{CO}_2$ データを集約統合し、国際的に流通させる目的で発足した。データ公開については2011年9月に第1版が出版された後、第3版が出版された2015年9月以降毎年更新されており (Bakker et al., 2016<sup>6)</sup>)、それに伴ってバージョン名が通し番号から西暦表記に改められた。最新版である第2022年版は2022年6月に公開予定である。国環研は発足時からSOCATに参画しており、データの提供だけでなく北緯30度以北の北太平洋データについて品質認定機関としてSOCATに貢献している。 $p\text{CO}_2$ は現場での直接観測でしか測定できないパラメータであるため、観測網の維持・運用を国際間で協力し分担することが重要である。日本においては北太平洋と太平洋西部海域での観測推進を期待されており、長期にわたる気象庁の定線観測と国環研における定常観測体制はこれまでも国際的に高く評価されてきた。

一方、 $p\text{CO}_2$ 以外の炭酸系、例えばpHの変動やトレンドの把握については $p\text{CO}_2$ に比べて進んでいないのが現状である。これは $p\text{CO}_2$ 以外の観測は採水が必要であり、観測データが $p\text{CO}_2$ ほど得られていないのが要因の一つであるが、炭酸系パラメータの一つを $p\text{CO}_2$ とともに観測できれば、海水中での炭酸平衡を利用して、観測を行っていない他の炭酸系パラメータについても推定が可能になることから、海洋酸性化傾向の顕著な海域（いわゆるホットスポット）や海洋生態系の変化に伴う炭酸系の変動を検出することが期待できる。

そこで本課題では、国環研の北太平洋・西太平洋の協力貨物船と水研の漁業調査船による $p\text{CO}_2$ 観測を支援するとともに、 $p\text{CO}_2$ 以外の炭酸系及び栄養塩の変動を理解するための採水観測と連続硝酸塩計による連続観測を実施する。さらに観測データをSOCATに提出するだけでなく、太平洋域の $p\text{CO}_2$ 観測を実施する他研究機関のデータを品質認定することでSOCATのデータ品質を高めることに貢献する。また、SOCATなどの国際データベースから得られた $p\text{CO}_2$ や栄養塩の観測データを利用し、ニューラルネットワーク手法を用いて全球の $p\text{CO}_2$ 分布推定や栄養塩分布推定などを行う。ニューラルネットワークは、水温、混合層深度などの複数の海洋データセットと $p\text{CO}_2$ や栄養塩濃度などの観測値を対照して「脳（コンピュータ）」に学習させ、観測値のない海域の対象パラメータを非線形的に推定する手法である。これにより得られる時空間分布を基に解析を行うことで、観測だけでは明らかにすることができない気候変動等による生物地球化学パラメータの変化を検出して脆弱海域を特定しアラートを発信するとともに、海洋化学モデル精緻化による将来予測精度の向上などに貢献することを目指す。

## 2. 研究目的

(1) 海洋表層採水観測による栄養塩濃度及び炭酸系変動把握

i) 国環研による連続栄養塩観測とアルカリ度観測

国環研では、地球環境モニタリング事業の一環として北太平洋の日本ー北米間を往復する貨物船New Century 2と、南北太平洋西部の日本ーオーストラリアーニュージーランド間を航

行する貨物船Trans Future 5に協力いただき、大気と海洋の温室効果ガス観測を実施している。これらの船舶はトヨフジ海運株式会社が運用、鹿児島船舶株式会社が管理しており、両船舶が年間計17-18往復する間、ほぼ途切れることなくpCO<sub>2</sub>等の観測を実施している。本観測においては定常的に採水による栄養塩観測を実施し、北太平洋における栄養塩類の分布を推定するなどの成果を得た (e.g. Yasunaka et al., 2014<sup>7)</sup>)。これまでの報告によると、表層栄養塩の分布は一般に亜寒帯で高く、亜熱帯、熱帯で低い。また局所的な鉛直混合や中規模渦、生物活動などによりその濃度は変動する。Jenkins (1988)<sup>8)</sup> は、メソスケール (数100 km) のイベントで亜表層から栄養塩が供給され、表層の新生産を支えていると報告した。この新生産量は生物ポンプによる輸送量を示しており、メソスケールのイベントが炭素循環に重要な影響を与えると考えられる。しかし、一般的な栄養塩分析手法である比色法では採取した海水試料を測定するため、貨物船観測で実施している1日3回の採水では詳細な空間変動を捉えることが難しい。そこで先行課題で海洋の栄養塩の一つである硝酸塩の連続測定手法を改良し、現行課題でも硝酸塩の連続観測を実施する。また本課題において国環研の実験室にアルカリ度計を設置し新たに採水試料によるアルカリ度観測をpCO<sub>2</sub>観測と併せて行う。

#### ii) 日本内湾域での大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量評価

外洋におけるCO<sub>2</sub>交換量は過去数十年にわたり解析されている一方、沿岸域 (ここでは陸水の影響が及ぶ範囲の水域と定義) のCO<sub>2</sub>交換過程は外洋と比べて非常に複雑であるため、正確な交換量については未だ確定していない。特に内湾域では、人為的な有機物・栄養塩の流入負荷や土地利用の影響により、将来的な都市化 (人口の増加や産業の拡大) に伴うCO<sub>2</sub>交換量への影響が大きいことが予想される。いくつかの研究例では、日本の都市化された内湾域は年間を通して大気中のCO<sub>2</sub>吸収源であると報告されているが、これまでの研究は湾内の観測データのみを扱っていたため、湾内に流入する河川水や湾外から流入する外洋水の影響を除いた湾内の生物活動によるCO<sub>2</sub>交換量を正確に評価できていない。そこで上記の問題を解決するために、本課題において国環研による湾内と周辺の外洋域の観測データを先行研究の観測データと組み合わせ、湾内の生物活動によるCO<sub>2</sub>交換量を評価する。またそれらの結果から、都市内湾域におけるCO<sub>2</sub>交換過程と将来の気候変動対策についての考察を行う。

#### iii) 漁業調査船による海洋表層炭酸系と栄養塩類の変動把握

水研の漁業調査船2隻を用いて、日本近海のpCO<sub>2</sub>連続観測を行い、日本近海域で取得されるpCO<sub>2</sub>観測値の時空間分解能を高め、同海域におけるCO<sub>2</sub>吸収量算定精度の高度化に寄与する。併せて、日本近海域の数点で炭酸系パラメータ (全炭酸、アルカリ度) の試料採取と分析を行い、日本近海域表層におけるアラゴナイト飽和度及びカルサイト飽和度の現状評価を実施する。

### (2) 国際統合データベースSOCATへの貢献

観測データの流通による有効利用を目指すため、観測データの確定作業を速やかに実施して確定したpCO<sub>2</sub>観測データを国際統合データベースであるSOCAT (<https://www.socat.info/>) に登録するとともに、北太平洋で観測された他研究機関のデータと合わせて品質認定を実施

し、SOCATのデータベース充実だけでなく、その円滑な運営にも貢献することを目的としている。第3版以降Global Carbon Projectが毎年出版しているGlobal Carbon Budget年次レポートに貢献するためSOCATデータベースを毎年更新しており、最新版である2022年版は2022年6月に公開予定である。SOCATに提出された $pCO_2$ 観測データは、Cookbookと呼ばれるガイドラインに基づいて各海域の責任機関を中心とした評価者により品質認定されてきたが、海洋 $CO_2$ 吸収量の評価を精緻化することを目的に、これまでより厳格な精度確認を行う必要性について本課題代表者も交えて議論され、2018年にCookbookが改訂された。毎年6-7月に公開される新版に向けて国環研・水研のデータをSOCATに提出してCookbookに基づいた評価を受けるとともに、世界各国の機関から毎年末に提出される北太平洋域の観測データについて品質認定作業を進める。

### (3) データベースを利用した全球 $pCO_2$ 、大気海洋間 $CO_2$ フラックス、pH、栄養塩分布推定

SOCATでは品質認定がなされた全球海洋の $pCO_2$ 観測データが毎年更新・公開されており、本データベースの利用研究が盛んに行われている。本サブテーマでは、SOCATデータベース等を利用してニューラルネットワーク手法から広域 $pCO_2$ 分布や栄養塩分布について推定するとともに大気海洋間 $CO_2$ フラックス分布を評価して $CO_2$ 交換量を算出する。またpHやカルサイト・アラゴナイト飽和度など海洋酸性化の指標パラメータの分布を推定する。

## 3. 研究方法

### (1) 海洋表層採水観測による栄養塩濃度及び炭酸系変動把握

#### i) 国環研による栄養塩観測とアルカリ度観測

北米航路を航行する協力貨物船New Century 2に2014年9月から設置した連続硝酸塩計を用いて表層海水の硝酸塩濃度観測を10分間隔(約5 km 間隔)で行っている。得られた硝酸塩濃度出力値は1日3回の海水サンプリングによって得られた硝酸塩濃度値を用いて補正を行う。得られた観測データを用いて、各海域の硝酸塩濃度と水温、塩分、 $pCO_2$ との関係を調べることで海洋における物理学的変化(例えば黒潮蛇行)が硝酸塩変動へ与える影響を評価する。さらにNew Century 2においてアルカリ度測定用に1航海あたり10-15試料の表層海水を採取し、国環研において海水試料中のアルカリ度を測定する。また貨物船による観測とは別に、北海道大学(以下、北大)の実習船「おしよる丸」に協力を依頼し、表層栄養塩用サンプルを取得する。これらは船舶航行中に船底から汲み上げたポンプを用いて採水して船上で冷凍した後、国環研に持ち帰って分析を行う。

#### ii) 日本内湾域での大気海洋間 $CO_2$ 交換量評価

内湾域での $CO_2$ 交換量評価を行うために使用した国環研の観測データは篤志貨物船(Pyxis, New Century 2, Trans Future 5)による2005年から2016年までの東京湾・伊勢湾・大阪湾の都市内湾域及び外洋域の観測データ(大阪湾のみ2011年から2016年まで)である。また、東京湾・大阪湾においては、それぞれ東京海洋大学と神戸大学の調査船(青鷹丸、おのころ)による観測データを併用した。河川水・外洋水による $CO_2$ 交換量はそれらの単純混合を仮定した無機炭酸系パラメータモデルから時空間変動を算出し、それらと測定値との差分を湾内の

生物活動の影響として評価する。

### iii) 漁業調査船による海洋表層炭酸系と栄養塩類の変動把握

水研が保有する漁業調査船に搭載した海洋表層pCO<sub>2</sub>計測システムを継続的に運転し、日本近海域のpCO<sub>2</sub>観測を実施するとともに、これら調査船で表層海水を採取し、炭酸系パラメータ（全炭酸、アルカリ度）及び栄養塩類の分析試料採取を行う。我が国の調査船や民間船を利用する表層海水の篤志サンプリングネットワークについて、維持・拡充に努める。

### (2) 国際統合データベースSOCATへの貢献

本サブテーマではまず国環研の貨物船によるpCO<sub>2</sub>観測データについて、校正した計測機器を用いて大気圧、塩分、海面水温（船底水温）、平衡器水温、平衡器気圧、pCO<sub>2</sub>などを観測するとともに、試料海水による塩分測定とセンサーによる塩分測定の比較結果を用いて補正を行う。上記の高精度な観測は、SOCATのCookbookと呼ばれる指針が推奨するものであり、結果としてpCO<sub>2</sub>を2 μatm以内の高精度で観測することに貢献している。国環研で確定作業が済んだpCO<sub>2</sub>と水温や塩分などの関連パラメータを含むデータは、観測項目や精度について詳細に記載したメタデータとともにSOCATに提出する。さらに、国環研はSOCATにおいて北太平洋の品質認定責任機関と位置づけられており、他機関の観測データを含めて品質認定作業を行う際にはSOCATのCookbookに基づき1航海毎にA（±2 μatm以内での観測と他船とのクロスオーバー観測を実現）からE（±10 μatm以内での観測）までのフラグを付与し、不審なデータに関してはS（保留）を付与する。その際、各パラメータとpCO<sub>2</sub>データの関係を調べることで、その関係から逸脱したデータについては疑義のあるデータであることを判別できるように明示する。データの品質認定は、本課題代表者も含めた作業チームが2018年に改訂したCookbookに基づいて各海域の責任者らが実施する。

### (3) データベースを利用した全球pCO<sub>2</sub>・大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス・pH・栄養塩分布推定

本サブテーマでは、全球のpCO<sub>2</sub>分布を再現したZeng et al. (2017)<sup>9)</sup>のニューラルネットワーク手法等を基に、より現実的なpCO<sub>2</sub>時空間分布と栄養塩分布の再現を目指している。全球のpCO<sub>2</sub>分布について、Zeng et al. (2017)<sup>9)</sup>ではアメリカ海洋大気局(NOAA)が提供するOptimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) V2を用いて海面水温の年々変動を学習パラメータとして入力したが、海面塩分と海面クロロフィル濃度(CHL)についてはWorld Ocean Atlasや衛星海色データの気候値（長期平均値）を使用しているため、塩分や海洋生物活動の年々変動に伴うpCO<sub>2</sub>の変化は再現することができていない。そのため複数の海洋物理プロダクトについて現実的な年々変動や経年トレンドが再現できているか本課題で評価を行い、水温と塩分、混合層深度については海洋研究開発機構が提供するGrid Point Value of the Monthly Objective Analysis using the Argo data (MOAA\_GPV)のデータを採用することとした。MOAA\_GPVはアルゴ計画に基づいて全海洋で展開するArgoフロートの水温・塩分観測データを最適内挿法によって2001年1月から月ごと、1度ごとの時空間格子データに変換して提供しており、観測に基づくデータセットであることから数値モデルの出力値よりも現実的なデータセットと評価できる。また、CHLについてはEuropean Service for Ocean Colorの

GlobColour Projectが提供する衛星CHLデータ観測値を用い、データが欠損する時空間領域のみ気候値（長期平均値）を用いることとする。さらにヨーロッパ中期予報センターが提供するERA5の海上風速データセットと気象庁が提供する表層大気CO<sub>2</sub>濃度(Nakamura et al., 2015<sup>10</sup>)を用いて大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス分布とCO<sub>2</sub>交換量を評価する。また、本課題で得られたpCO<sub>2</sub>分布と気象庁が提供している表層海洋アルカリ度分布を用いて、CO<sub>2</sub>SYS (Lewis and Wallace, 1998)<sup>11</sup>から表層全炭酸濃度とpHの全球分布を推定することとする。栄養塩分布については、Global Ocean Data Analysis Project Ver. 2 (GLODAPv2, Olsen et al., 2016<sup>12</sup>)の表層から深さ30 mまでの硝酸塩濃度の観測値（およそ6万点）を学習パラメータとして入力することでニューラルネットワーク手法を基にした硝酸塩分布推定を行うとともに、最適内挿法を用いて北太平洋と赤道域の栄養塩（硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩）分布推定を行い、太平洋10年規模振動(Pacific Decadal Oscillation: PDO)やエルニーニョ南方振動(El Niño-Southern Oscillation: ENSO)等との気候変動と栄養塩変動との関係性を評価する。最適内挿法による栄養塩の分布推定については、GLODAPv2などの国際データベースに登録されているデータだけでなく、国環研や海洋研究開発機構、北海道大学、カナダ海洋科学研究所、NOAA等の観測データを集積してそれぞれ北太平洋と太平洋赤道域について実施した(Yasunaka et al., 2019<sup>13</sup>), Yasunaka et al., 2021<sup>14</sup>)。本手法はニューラルネットワーク手法とは異なり、水温や塩分、CHLなどの物理生物パラメータを必要としないためパラメータデータセットの期間に依存せず長期変動を検出することが可能である。また時空間的に近接する観測欠損領域を埋めることが目的であるためにすべての時空間格子点データが得られる訳ではないが、北太平洋や太平洋赤道域のように観測データが充実した海域では長期平均場の月分布や長期変動成分の検出には有用な手法である。本報告書では北太平洋での分布推定との解析結果について報告する。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 海洋表層採水観測による栄養塩濃度及び炭酸系変動把握

###### i) 国環研による連続栄養塩観測とアルカリ度観測

本課題中の2017年5月から2020年10月までNew Century 2に搭載した連続硝酸塩計を用いて表層海水の硝酸塩濃度観測を行った。連続硝酸塩計により得られた硝酸塩濃度の測定精度は、比色法によって測定した海水試料の硝酸塩濃度と比較することで確認した。連続硝酸塩計と比色法による観測値は、1:1の直線上に分布し両者間の二乗平均誤差は1.2 μMであったことから本装置を用いた観測は硝酸塩濃度が十分な観測精度を有していると評価できた。

本課題で得られた観測データから、黒潮蛇行が北太平洋西部海域の硝酸塩変動へ与える影響を評価するため、黒潮の非蛇行期(2015年10月-2016年11月)と大蛇行期(2017年6月-2018年5月)における東経140度から155度間の北緯35度線沿いにおける水塊の特性を調査した。図1に連続観測で得られた非蛇行期(a)と大蛇行期(b)の水温、塩分、硝酸塩濃度の関係を示す。当該海域においては、非蛇行期には塩分が33.9から34.9まで変動しており、低温低塩分の亜寒帯起源と高温高塩分の亜熱帯起源の水塊が当該海域内で共存している様子が見られた。一方、大蛇行期には非蛇行期に比べて塩分や水温が狭い範囲で変動しており、主な水塊が亜熱帯起源であることが示唆された。硝酸塩濃度の時系列変化から冬季混合により表層へ供給

された硝酸塩濃度を見積もった結果、非蛇行期が $8.5 \pm 5.9 \mu\text{M}$ 、大蛇行期が $2.4 \pm 2.1 \mu\text{M}$ となり、大蛇行期における硝酸塩供給の減少が示唆された。これは、非蛇行期の当該海域における海水の最大密度 $\sigma$ が25.97であったのに対して大蛇行期が25.76と軽いことから、冬季の鉛直混合深度が浅くなった結果として亜表層からの表層への硝酸塩供給量が減少したと考えられる。

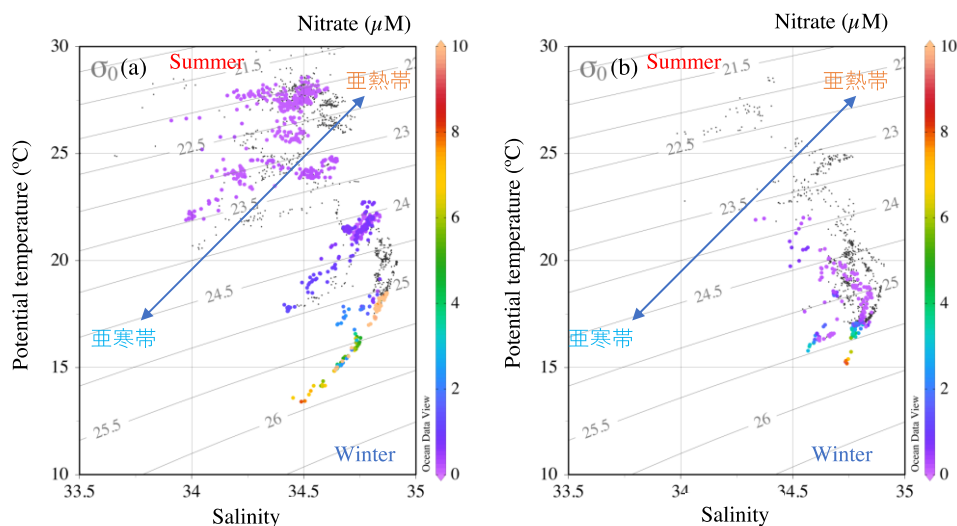


図 1. 北緯35度、東経140度から155度付近における (a) 非蛇行期、(b) 大蛇行期の水温、塩分、硝酸塩濃度の関係。点の色は硝酸塩濃度を示し黒は非検出であることを示している。(二次利用不可)

次に本課題によって2019年5月から2022年2月の期間に北太平洋で得られたアルカリ度観測分布とGLODAPv2に収録された表層10 m以浅のアルカリ度観測点の分布を図2に示す。GLODAPv2には北太平洋域(北緯10–65度、東経120–西経100度)において1973年1月以降のアルカリ度データ4722点が収録されており、その一部は世界海洋循環実験計画(World Ocean Circulation Experiment: WOCE)に基づいて実施された観測であることから、例えば気象庁が実施している東経137度や165度の観測など、南北や東西の測線上に沿った分布を示している。一方、本課題では2019年からの観測により特に北太平洋中央部から北米大陸にかけて大きな偏りなくサンプリングを実施できたことがわかる。例えばカリフォルニア沖の南西側や北緯30度から47度、西経180度から165度で囲まれた海域など、GLODAPv2に観測データが収録されていない海域でデータが得られたことはアルカリ度や全炭酸濃度、pHなどの炭酸系分布推定を精緻に行う上で重要なデータを取得できた。次にアルカリ度の空間分布、アルカリ度と塩分、水温との関係についてそれぞれ図3(a)–(c)に示す。図3(a)のアルカリ度分布から高緯度域の東部海域で特に低く、次いで同西部海域で低くなる様子が見てとれる。一方中緯度帯では高いアルカリ度が分布しており、水塊の違いによってアルカリ度が異なることが示唆された。また図3(b), (c)から、アルカリ度と塩分の間には明瞭な関係が見られるのに比べて、アルカリ度と水温の関係は不明瞭であるものの、低水温でアルカリ度が低く、高水温で高くなる傾向が示唆された。これはLee et al. (2006)<sup>15)</sup>などの先行研究とも整合的な結果である。



Lee et al. (2006)<sup>15)</sup> ではアルカリ度と水温、塩分の関係を利用して分布推定を行っているが、その分布には東西方向のバイアスが生じることが知られている。本報告書では誌面の都合上示すことができないが本課題では、GLODAPv2と本課題で得られた観測データを統合し、ニューラルネットワーク手法を用いて北太平洋のアルカリ度分布推定を試行実験として行ったところ、空間的なバイアスが低減された分布を得ることができた。そのため今後の後継課題で表層アルカリ度観測を継続してアルカリ度分布推定に取り組むことで高い信頼性を有する炭酸系分布を作成していきたいと考えている。

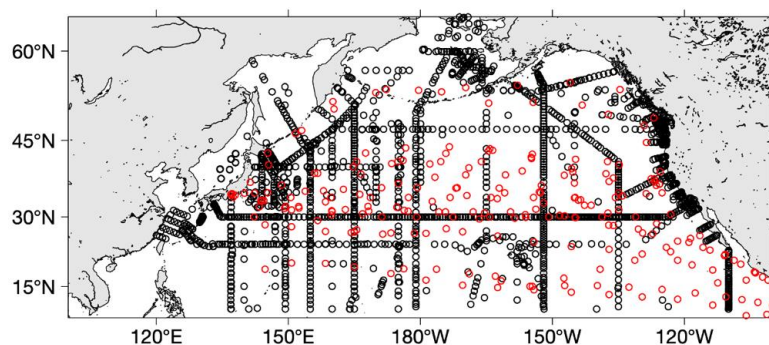


図2. GLODAPv2 (黒丸) および本課題 (赤丸) で得られた海洋表層 (10 m以浅) のアルカリ度分布

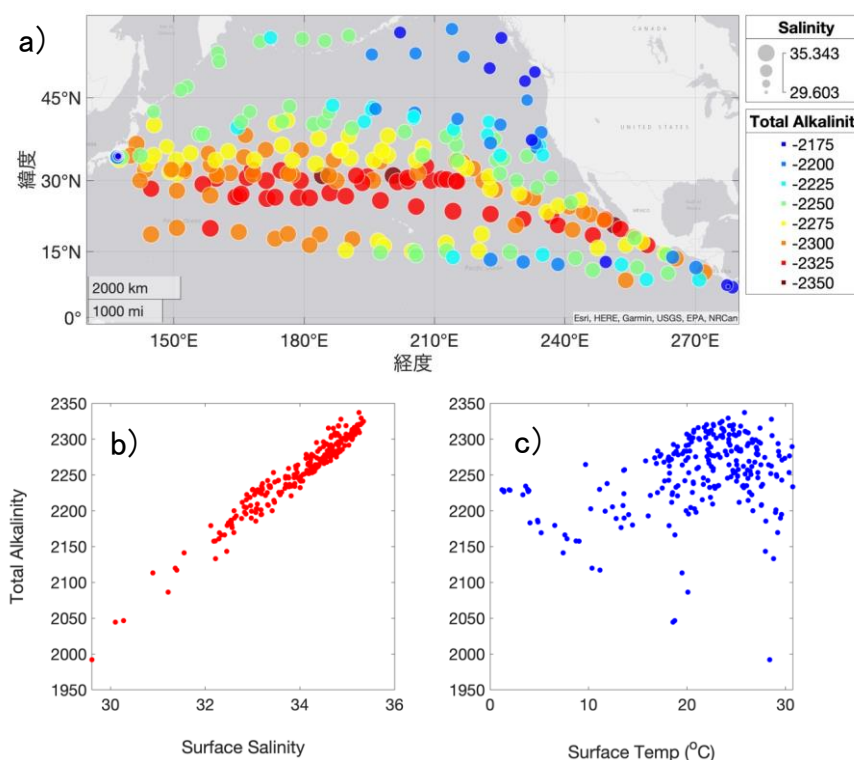


図3. (a) 2019年5月-2022年2月までの航海で得られた海洋表層のアルカリ度分布。円の大きさは塩分を、色はアルカリ度の値を表している（暖色はアルカリ度が高いことを示す）。観測されたアルカリ度と(b)塩分、(c)水温との関係（二次利用不可）。

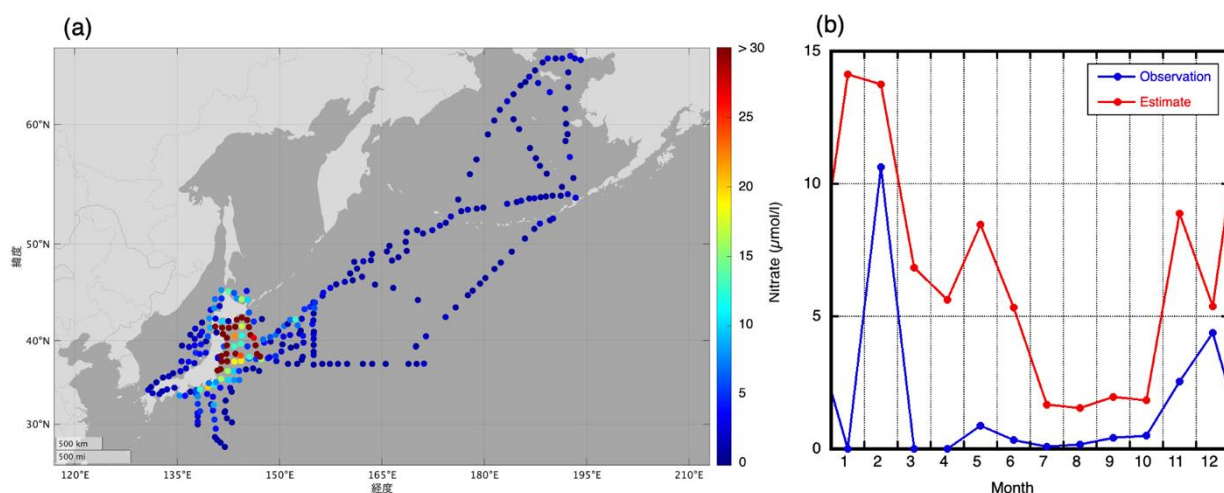


図 4. (a) 本課題で得られた分析済み表層栄養塩のサンプリング分布（暖色は緯度経度 1 度格子中のサンプリング回数が多いことを示している）。(b) 本課題（青線）と World Ocean Atlas 2018（赤線）による北緯 41.5 度、東経 141.5 度における硝酸塩濃度。（二次利用不可）

国環研で実施した栄養塩向け海水試料サンプリングでは、2019-20年度にはコロナウィルス感染拡大の影響により多くの観測が中止を余儀なくされたが、水研の漁業調査船 2 隻と北海道大学の実習船「おしよろ丸」がサンプリングを行うことで、沿岸域から外洋域にかけての広範囲にわたる表層栄養塩データ（計 3586 点）を取得することができた。図 4 (a), (b) に本課題期間中で得られた分析済み海水試料のサンプリング分布と、観測点数が特に多かった北緯 41.5 度、東経 142.5 度における観測結果とサブテーマ 3 で実施した硝酸塩濃度推定による季節変化をそれぞれ示す。図 4 (a) から北海道沖や三陸沖で特に栄養塩のサンプリングが充実した様子が見られる。次に図 4 (b) から赤線で示された推定結果と比べて観測された硝酸塩の濃度は低い値を示しており、春から秋にかけて枯渇している様子が見られる。このような季節変化の違いは GLODAPv2 データベースに日本近海域の収録データが少ないため引き起こされているものと考えられる。近海域の栄養塩分布推定を精緻化するためには、得られた観測データを国際データベースに登録し、広く利用してもらうことが不可欠であるため、本課題で得られた観測データを海上保安庁日本海洋データセンター経由で World Ocean Database などの国際データベースに登録することを検討している。

#### ii) 日本内湾域での大気海洋間 CO<sub>2</sub> 交換量評価

東京湾、伊勢湾、大阪湾における大気海洋間 CO<sub>2</sub> 交換量について、観測された CO<sub>2</sub> 交換量、河川水と太平洋起源の外洋水の混合効果による CO<sub>2</sub> 交換量、湾内の海洋生物活動が寄与した CO<sub>2</sub> 交換量を評価した。その結果を図 5 に示す。3 つの湾は大気中 CO<sub>2</sub> の吸収源であり、湾内における単位面積当たりの吸収量の平均値（東京湾：2.84 mol m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>、伊勢湾：3.13 mol m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>、大阪湾：2.37 mol m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>）は周辺の外洋域のもの（2.23 mol m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>）よりも高い値を示した。また、海洋生物活動による CO<sub>2</sub> の吸収は明瞭な季節変化を示しており、東京湾・伊勢湾

では7月、大阪湾では5月に最大を示した。どの水域でもCO<sub>2</sub>吸収量は湾奥から20 kmほどの水域で最大となっており、湾奥から5 km以内の水域では河川水由来と考えられるCO<sub>2</sub>放出の傾向が確認された。海洋生物活動によるCO<sub>2</sub>吸収量は東京湾・伊勢湾・大阪湾で観測された吸収量のそれぞれ27 %、12 %、6 %であった。海洋生物活動によるCO<sub>2</sub>吸収量の寄与が最も高かった東京湾では栄養塩濃度も最も高く（表1）、栄養塩供給によって海洋生物による光合成活動が促進されていたことが示唆された。湾内の栄養塩濃度は主に下水処理水に因って供給されており、また国内の下水処理水は分解されやすい有機物の大半が流入前に除去されているため、湾内の海洋生物活動によるCO<sub>2</sub>吸収は、周辺人口に比例した下水処理水の流入量に左右されていたと考えられる。一方、大阪湾では、海洋生物活動によるCO<sub>2</sub>吸収の寄与や栄養塩濃度は周辺人口から予想される値よりも低く、強い潮流や瀬戸内海と接続していることによる高い海水交換率によって栄養塩が希釈され、海洋生物活動の影響が低減されたと考えられる。

上記の解析結果は、都市化（周辺人口の増加）に対応した下水処理により有機物を効果的に除去する一方、適度の栄養塩濃度を保つことが海洋生物活動を介した大気中CO<sub>2</sub>吸収の促進に有効であることを示唆している。沿岸域の都市化は今後数十年で世界的に拡大することが予想されているため、上記の下水処理によるCO<sub>2</sub>吸収が今後の大気中CO<sub>2</sub>濃度増加の抑制策の一つになることが期待される。

表1. 東京湾、伊勢湾、大阪湾における下水処理水生成量と湾内の平均栄養塩濃度と下水処理水の栄養塩濃度比、および海洋生物活動によるCO<sub>2</sub>吸収の寄与率

	Tokyo Bay	Ise Bay	Osaka Bay
Population of urban area ( $\times 10^6$ )* <sup>1</sup>	37	9	19
Wastewater discharge ( $m^3 s^{-1}$ )* <sup>2</sup>	14.9 (Morigasaki)	2.4 (Uchide)	8.6 (Toba)
Nitrate and Phosphate in inner bay ( $mg L^{-1}$ )* <sup>3</sup>	0.8 (N) 0.06 (P)	0.3 (N) 0.03 (P)	0.4 (N) 0.04 (P)
C:N:P in the treated water* <sup>2</sup>	6:21:1	26:81:1	10:28:1
Percentage of biotic CO <sub>2</sub> flux (%)	27	12	6

\*1: Global Metro Monitor (<https://www.brookings.edu/research/global-metro-monitor/>) より

\*2: 2010年の最大の処理能力を持つ下水処理プラントの値（日本下水道協会統計資料<sup>16)</sup>）

\*3: 環境省広域総合水質調査 (<https://www.env.go.jp/council/09water/y0917-07/ref02.pdf>) より

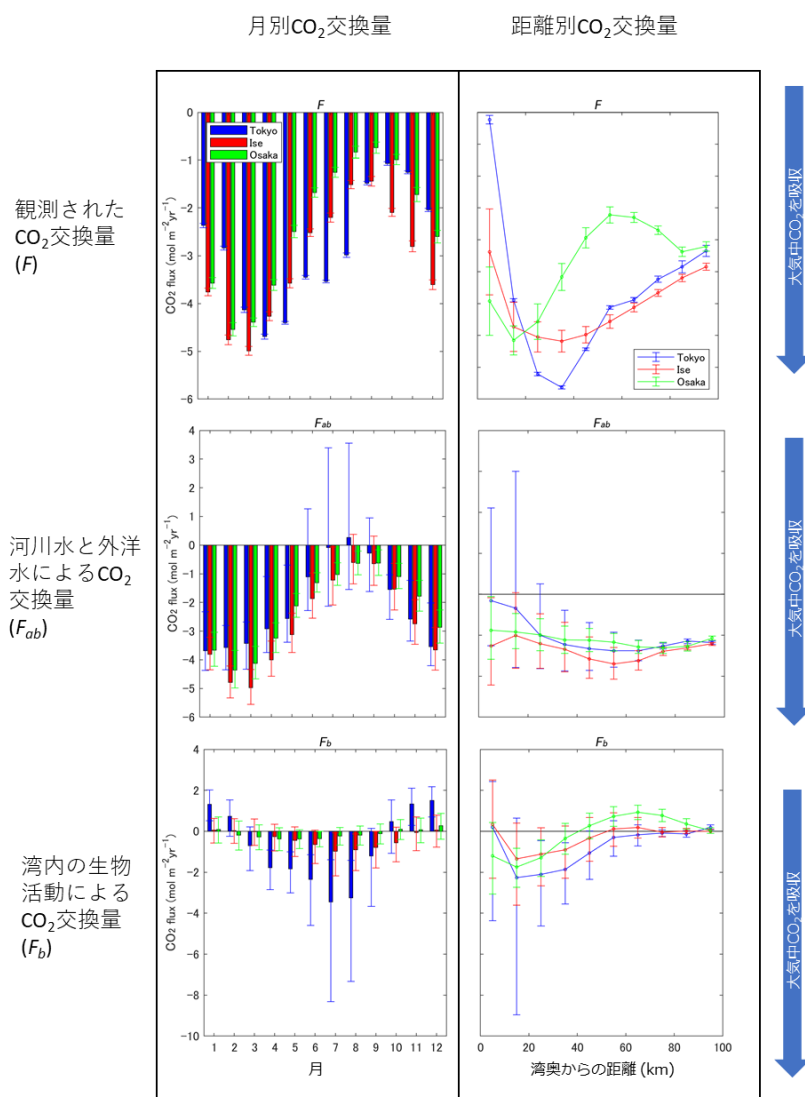


図5. 東京湾（青）、伊勢湾（赤）、大阪湾（緑）における生物活動の影響によるCO<sub>2</sub>交換量の平均値。湾内の生物活動によるCO<sub>2</sub>交換量（下段： $F_b$ ）は観測された値（上段： $F$ ）と河川水と外洋水による交換量（ $F_{ab}$ ）の差分（ $F_b = F - F_{ab}$ ）に該当する。

### iii) 漁業調査船による海洋表層炭酸系と栄養塩類の変動把握

本課題後半はコロナウィルスの影響により数航海の観測中止を余儀なくされたが、2017-2021年度中に蒼鷹丸、若鷹丸の2隻の漁業調査船により計51航海分のpCO<sub>2</sub>観測を実施することができた。このうち2021年12月までの観測データをSOCATに登録した（図6）。さらに2017年度と2018年度の3航海では炭酸系試料の採水・分析を行った。

日本周辺海域のうち、オホーツク海は近年の観測データが極めて少なく、SOCATのデータ登録数も少ないため、多くの大気海洋CO<sub>2</sub>フラックス算定研究においては、隣接する太平洋域のデータを使ってオホーツク海内のpCO<sub>2</sub>分布を推定し、フラックス計算を行っている。本課題では夏期のオホーツク海南部におけるpCO<sub>2</sub>観測を定期的に継続しており、4年分の観測データ（2017年7月、2019年8月、2020年6月、2021年9月）が蓄積されたため、これらのうち2017-2020年のデータを統合して夏期のオホーツク海南部海域におけるpCO<sub>2</sub>分布決定要因の

解析を行った。

夏期のオホーツク海南部では、北海道沿岸部に帯状に存在する宗谷暖流系水（塩分33.5-34.0）と、その沖合に広く広がるクリル海盆水（塩分31.5-32.5）とが明瞭にわかれて分布している。そこで、3年間の観測データから塩分31.5-32.5と塩分33.5-34.0のサブデータを抽出し、それぞれのサブデータ内での $p\text{CO}_2$ の月間変動を解析したところ、図7のようになった。

6-8月のクリル海盆水の $p\text{CO}_2$ は、水温に対して正相関を示すひとまとまりのデータ集合を形成した。この集合の中点（水温 14 °C、 $p\text{CO}_2$  334  $\mu\text{atm}$ 、塩分 32.0）に対して、夏期のクリル海盆水で過去の観測例 (Oguma et al., 2011)<sup>17)</sup>で報告されたアルカリ度 (2258  $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ) を仮定し、CO2SYS (Lewis and Wallace, 1998)<sup>11)</sup>を用いてこの $p\text{CO}_2$ 値に対応する全炭酸濃度 (DIC, 2034.6  $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ) を算出した。次にこのアルカリ度とDIC、及び塩分を保持したまま、水温だけを変化させた場合に生じる $p\text{CO}_2$ の変化をCO2SYSで計算すると、図7の黒点線のようになった。クリル海盆水で取得された $p\text{CO}_2$ データは、この黒点線にほぼ沿う形で分布していることから、夏期のクリル海盆水では生物活動やガス交換、及び水塊混合等による炭酸系の変動は殆ど発生せず、専ら水温変化に伴う熱力学的な $p\text{CO}_2$ の変動だけが生じていることが示唆された。またこの観測期間中に目立った水塊の交換も生じていないことから、クリル海盆水中の $p\text{CO}_2$ の分布はほぼ一様であること、従ってオホーツク海南部の日本EEZ水域で取得された $p\text{CO}_2$ と水温の関係式をそのままクリル海盆全体に拡張適用してオホーツク海南部の $p\text{CO}_2$ 分布を推定しても大きな誤差が生じないことが示唆された。

一方宗谷暖流系水の $p\text{CO}_2$ -水温プロットは、年・月毎に離れたデータ集合を形成し、またこれらの集合間の $p\text{CO}_2$ -水温関係は、DIC・アルカリ度が一定の条件下で水温変化に伴う熱力学的な $p\text{CO}_2$ の変動を仮定した場合よりも、はるかに傾きが小さかった。これらのことから、宗谷暖流系水は単一ソースの水塊ではなく、月毎に異なる混合過程を経た水塊が日本海側から流入してきているものと考えられる。

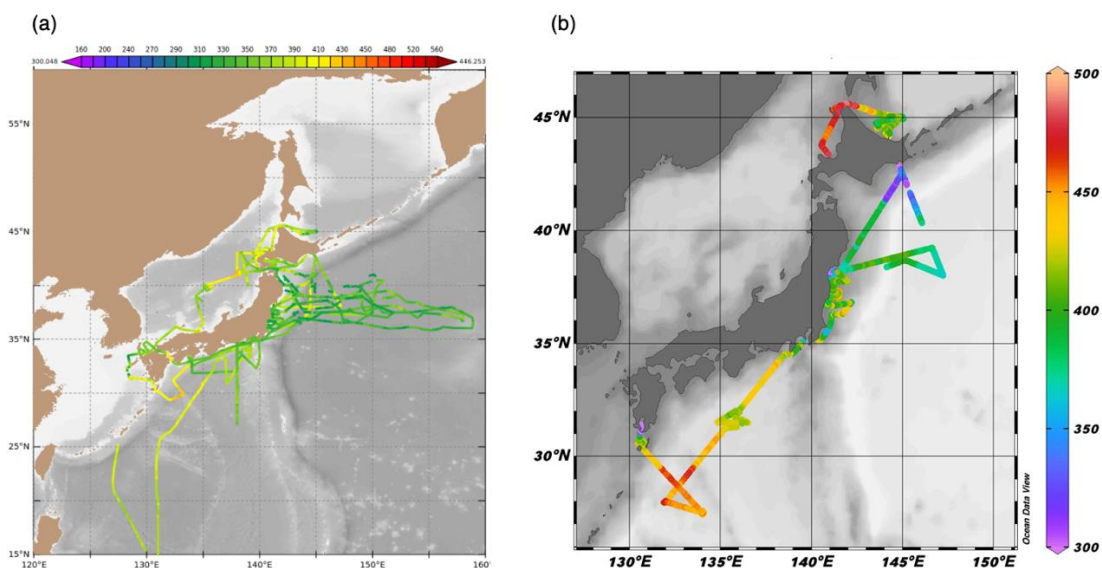


図6. 本課題で実施した漁業調査船による $p\text{CO}_2$ 観測分布。(a) SOCAT 公開済み。(b) 次期バージョンで公開予定。航路上の色の違いは $p\text{CO}_2$ 観測値 ( $\mu\text{atm}$ ) を表す。

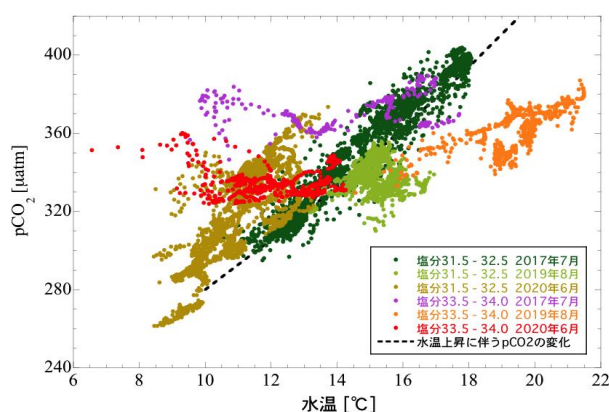


図7. 6-8月のクリル海盆水（塩分31.5-32.5）と宗谷暖流系水（塩分33.5-34.0）における水温と $pCO_2$ の関係。黒点線は2017年7月のクリル海盆水観測値の中央値を基点に、DICとアルカリ度を保存したまま水温だけを変化させた場合の熱力学的な $pCO_2$ の変化を示す。（二次利用不可）

栄養塩については北太平洋域の栄養塩長期データセットを再解析し、これまで発生機構が不明であった親潮域中層における他の化学パラメータ（溶存酸素、リン酸塩、硝酸塩等）に比べて特異的に高いケイ酸塩濃度の増加現象（Whitney et al., 2013<sup>18)</sup>）（図8）の機構解明を試みた。その結果、オホーツク海における表層～中層の水温が温暖化により上昇したことで、オホーツク海中層の各等密度面の深度が引き下げられていること、またこれにより、オホーツク海と親潮域間の等密度面混合によってオホーツク中層から親潮域中層に輸送されるケイ素量の増加が、同じ機構で引き起こされる溶存酸素輸送量の減少に比べて極めて大きくなることをモデル計算によって示すことができた。この結果は、温暖化が縁辺海でより顕著に発現することにより、縁辺海に近い外洋域にも間接的な影響を与え得ることを示唆しており、今後注視していく必要があると考えている。

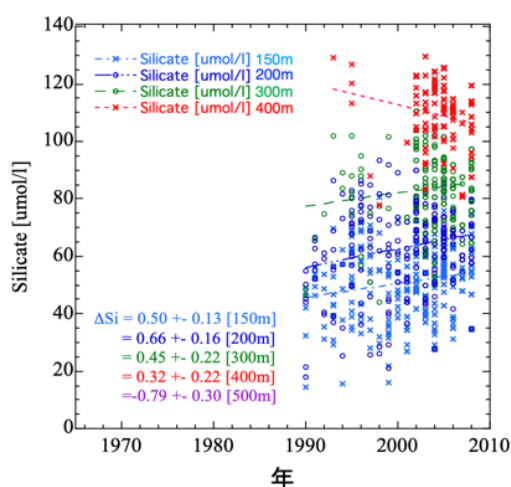


図8. 親潮域における各深度上のケイ酸塩濃度の時系列変動とその線形トレンド。（二次利用不可）

2018-2019年度の調査においては、黒潮大蛇行時における夏季内側域の $pCO_2$ 分布データを取得することができたため、このデータとSOCATに登録された過去の非大蛇行時の $pCO_2$ 観測データを比較することで、黒潮内側域における大蛇行時・非大蛇行時の $pCO_2$ 分布パターンの差異について解析を行った。非大蛇行期の夏季内側域における $pCO_2$ 観測値は345-420  $\mu atm$ の範囲で変動しており、水温-塩分- $pCO_2$ プロット上では高温・高塩領域から低温・低塩領域に向けてなだらかに $pCO_2$ が逡減する単調構造を示した(図9a)。一方、SY1808の水温-塩分- $pCO_2$ プロットは水温27.5  $^{\circ}C$ 以上の領域では非大蛇行期と同様な高温・高塩領域から低温・低塩領域に向けた $pCO_2$ の逡減構造を示すものの、それ以下の水温では $pCO_2$ が逆に低温領域に向けて僅かに増加するようになり、低温領域側での構造が非大蛇行期と大きく異なった(図9b)。この結果、大蛇行期の黒潮内側域における $pCO_2$ の空間変動は約380-400  $\mu atm$ の、非大蛇行期に比べて比較的狭い範囲に納まっていた。非大蛇行期において低温・低塩水塊が観測された面積範囲は非常に狭く、内側域に侵入した黒潮由来の暖水が内側域内で冷却されてこの水塊が形成されたと考えられる一方、大蛇行期に観測された低温・低塩水塊の面積範囲は比較的広く、また黒潮流軸のやや内側に線状に分布しており、黒潮と内側域との境界付近における垂表層水の鉛直的な供給によって形成されたものである可能性が高いと考えられた。このような内側域における低温・低塩の形成要因の違いが、観測された大蛇行期・非大蛇行期間の水温-塩分- $pCO_2$ プロットの差異を生み出しているものと考えられる。

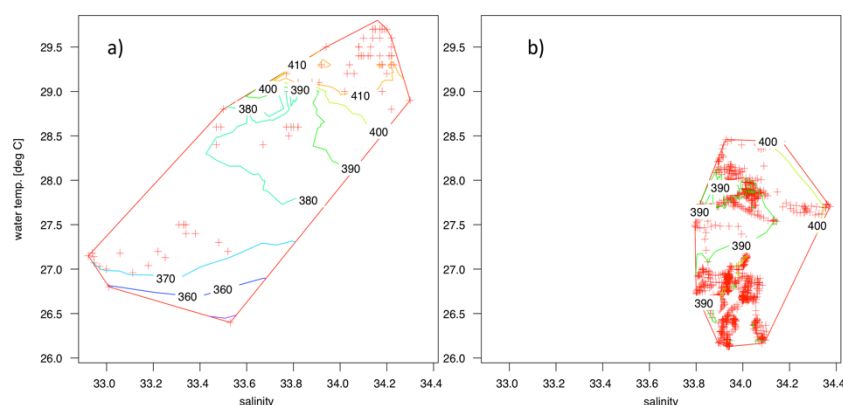


図9. (a)大蛇行期と(b)非大蛇行期における夏季黒潮内側域における水温-塩分- $pCO_2$ プロット(二次利用不可)

次に本州東方の混合水域で2017年5月に採取した表層海水のDICを分析し、1996-2002年の同月・同海域における全炭酸濃度と比較したところ、2測点では濃度が上昇していたが、1測点では濃度の低下が認められた(図10)。春期の海洋表層の全炭酸濃度は大気 $CO_2$ とのガス交換の他、生物活動によっても変動するため、生物活動に対しての全炭酸保存量である $Cp0$ (Ono et al., 2005<sup>19</sup>)を算出し比較したところ、 $Cp0$ は2017年の全ての測点で、1996-2002年の観測値を上回っていた。このことから、混合水域表層の全炭酸濃度は大気中 $pCO_2$ の上昇に応じて広い海域で上昇しているが、それに加えて生物活動による季節的・空間的な濃度変動が反映されるため、場合によっては後者が前者の効果を上回ることが確認出来た。海表面 $pCO_2$ も同様に大気中 $pCO_2$ の上昇に対する応答と、現場の生物活動の双方によって変動しているが、

全炭酸と栄養塩の観測データを組み合わせることで、観測された $p\text{CO}_2$ の変動から大気中 $p\text{CO}_2$ の上昇に対する応答成分だけを抽出することができると考えられる。

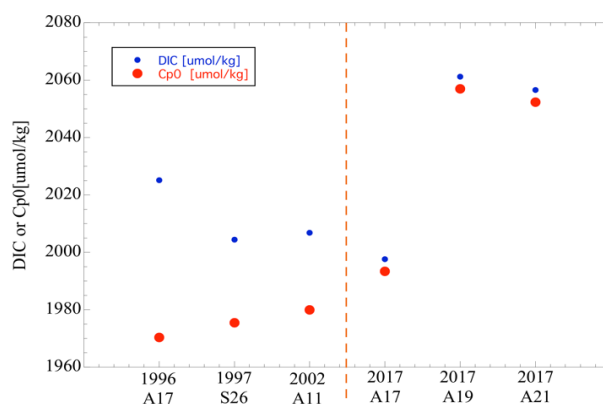


図10. 混合水域における2017年度の表層全炭酸濃度（図右）と、1996-2002年の同海域における全炭酸濃度（左）。青丸が観測値、赤丸がCpO計算値。

## （2）国際統合データベースSOCATへの貢献

国環研による2021年11月までの $p\text{CO}_2$ 観測データ（198航海分）は、2021年末までにSOCATに提出した。さらに国環研が担当する北太平洋域を中心とした観測データの品質認定を2022年3月末に完了させた。本課題中にSOCATに提出した国環研の $p\text{CO}_2$ 観測航路図を図11に示す。品質認定作業ではCookbookに基づいてメタデータに不備がないことを確認して各測定項目の精度を評価してフラグ付けを行った。さらに観測データやメタデータの不備などで悪いフラグがつくことが懸念されたものについては、各機関の観測担当者に連絡を取りメタデータの改善について助言を行うことで当初より良いフラグ付けを行えるようサポートしている。例えば気象研の $p\text{CO}_2$ 観測データに不備があったため、観測データを再提出すよう助言した。またNOAAの研究者からの要請で、品質フラグを改善するために観測機器を更新するなどして精度を向上するよう助言を行った。最新版であるSOCAT2021年版においては全6752航海・ブイ観測数のうち国環研のデータは795航海と約12%を占めており、かつ直近のデータまでSOCATに提出していることからGlobal Carbon ProjectによるGlobal Carbon Budget 年次レポート（最新版は Friedlingstein et al., 2022<sup>20</sup>）の全球海洋 $\text{CO}_2$ 収支評価にも国環研や水研の観測データが生かされている。また国環研の観測データに付与されたフラグは198航海中194航海が測定誤差 $2 \mu\text{atm}$ 以下であることを示すA~Bであった。日本国内の機関によるSOCATへのデータ提出は国環研や水研だけでなく海洋研究開発機構や気象庁がほぼ毎年実施しており、データ提供機関が固定化されつつあったが、本課題期間中に国立極地研究所と北海道大学がそれぞれ東京海洋大学の実習船「海鷹丸」と水産庁の調査船「開洋丸」で観測した $p\text{CO}_2$ データについてメタデータ作成と観測データ登録の支援を行なった。さらに気象庁では2019年まで観測を実施してから2年以上過ぎた観測データをSOCATに登録していたが、日本としてGlobal Carbon Budgetの年次レポートにより貢献するため、直近のデータまで登録することを要請し、SOCAT2020年版から実現することができた。上記の通り、国環研は高品質の $p\text{CO}_2$ 観測を維持するだけでなく他機関の観測データ提出支援やデータ品質認定を精力的に実施しており、



北太平洋域のハブ機関としてだけでなくSOCAT全体で果たす役割は大きく、今後も信頼性の高いデータベースを維持するため活動していきたいと考えている。

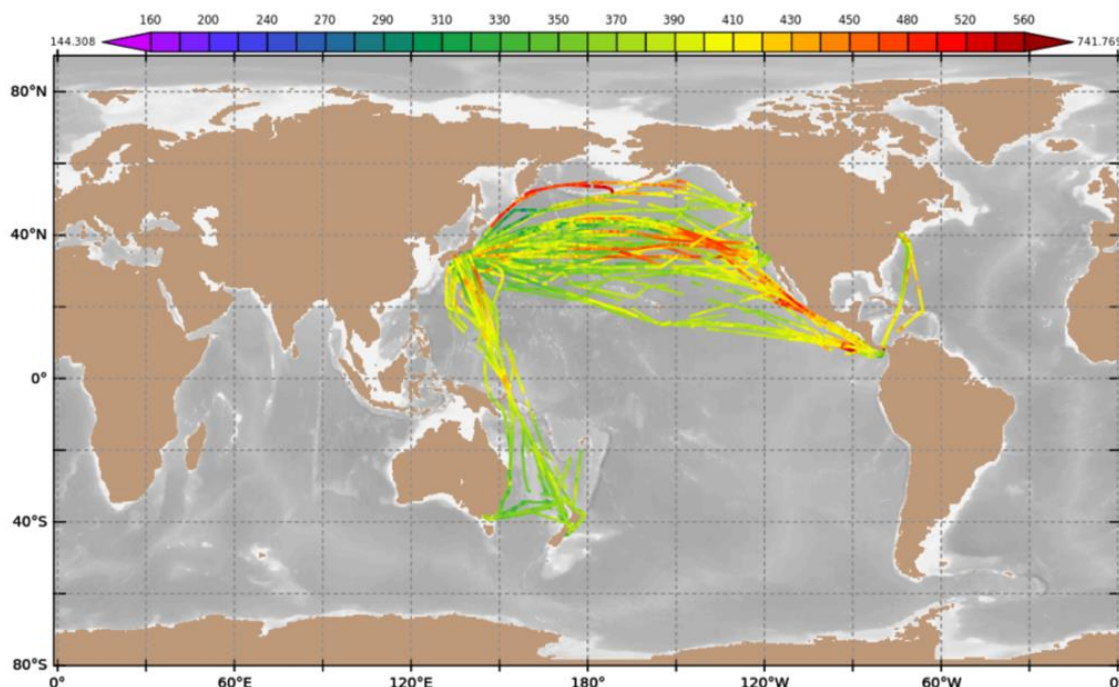


図11. 国環研が本課題期間中にSOCATに提出したpCO<sub>2</sub>観測データ（計198航海分）の分布。航路上の色の違いはpCO<sub>2</sub>観測値（ $\mu\text{atm}$ ）を表す。

### （3）データベースを利用した全球pCO<sub>2</sub>、大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス、pH、栄養塩分布推定

本サブテーマで再現した2001年から2019年の平均の2月と8月のpCO<sub>2</sub>分と大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス分布を示す(図12)。pCO<sub>2</sub>分布もCO<sub>2</sub>フラックス分布も長期平均場で見ると赤道域では大きな季節変化が見られない。例えば太平洋赤道域では東部海域から中央部海域にかけて400  $\mu\text{atm}$ を大きく超える高pCO<sub>2</sub>が見られ、それに伴い強いCO<sub>2</sub>の放出域となっている。一方、高緯度域では特に北半球で大きな季節変化が見られている。例えばベーリング海とその周辺海域では2月に赤道域と同様に400  $\mu\text{atm}$ を大きく超える高pCO<sub>2</sub>を示しCO<sub>2</sub>の放出域となるものの、夏にはCO<sub>2</sub>の吸収域となっている。さらに北太平洋の中緯度域（北緯30–40度）では8月にpCO<sub>2</sub>が上昇してCO<sub>2</sub>の放出域となるものの、2月にはpCO<sub>2</sub>が低下することで強いCO<sub>2</sub>の吸収域となっている。得られた大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス分布は、先行研究であるTakahashi et al. (2009)<sup>1)</sup>と定性的には良い一致を示しているものの、例えば先に述べた北太平洋中緯度域の8月におけるCO<sub>2</sub>放出が先行研究ではより弱い傾向にあるなどの違いが見られる。その要因の一つは、先行研究がより長期（およそ35年）の平均場としてCO<sub>2</sub>フラックスを評価しているのに対し、本課題では2001年から2014年までの間の平均場として評価しているため、解析期間の違いとそれに伴うエルニーニョ・ラニーニャの発生数や強度の違いなどを反映している可能性がある。このことは長期間による海洋へのCO<sub>2</sub>吸収によりCO<sub>2</sub>の蓄積が進むことで大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス分布が変化していることを示唆している可能性がある。

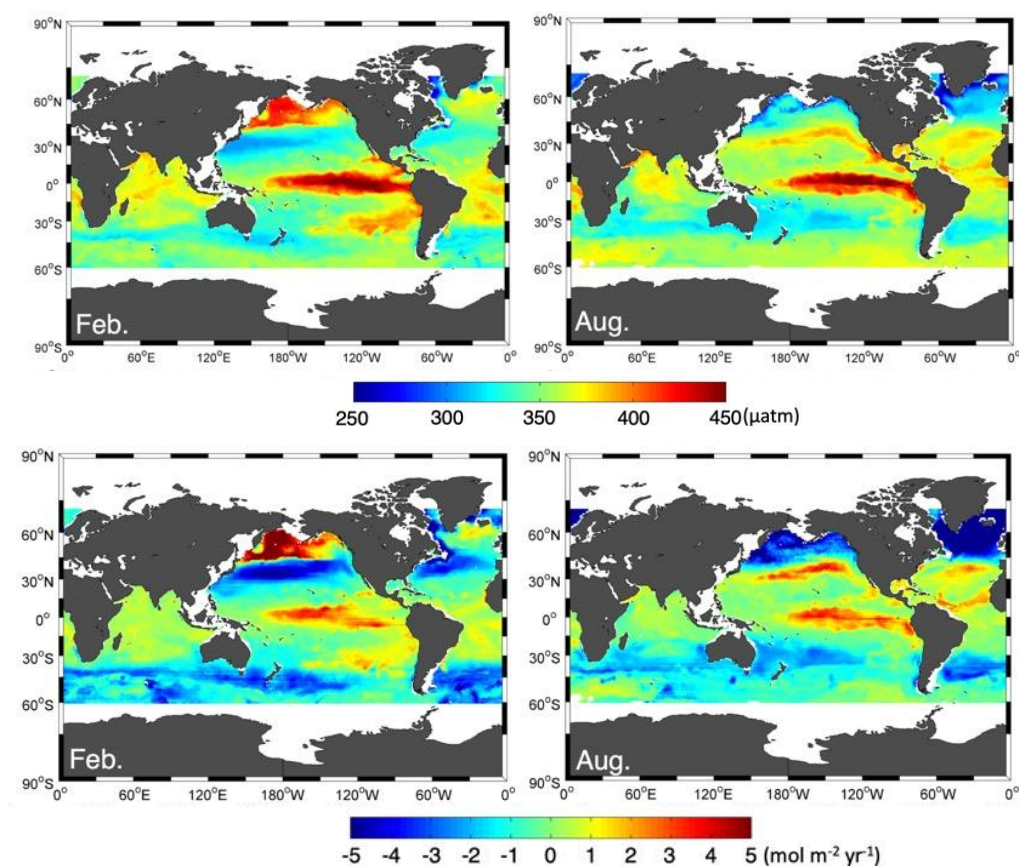


図12. 推定期間平均の2月と8月におけるpCO<sub>2</sub>分布（上段）と大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス分布（下段）

次に全球における大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量と大気海洋間CO<sub>2</sub>分圧差 $\Delta p\text{CO}_2$  ( $=p\text{CO}_2^{\text{sea}}-p\text{CO}_2^{\text{air}}$ ) の年変化と推定期間中の大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス変化の分布について図13(a)-(c)に示す。図13(a)から2001年から2011年ごろまで約2~2.5 PgC yr<sup>-1</sup>と比較的穏やかに推移していたCO<sub>2</sub>吸収量が2012年以降急激に増加し、2019年には3.0 PgC yr<sup>-1</sup>まで達することが明らかとなった。本CO<sub>2</sub>交換量の年々変化についてはGlobal Carbon Projectによる年次レポート (e. g. Friedlingstein et al., 2022<sup>20</sup>) の報告結果とも比較的整合的であった。次に $\Delta p\text{CO}_2$ の時間変化を見ていくとCO<sub>2</sub>交換量の時間変化と同様に2011年ごろまでは比較的安定していたものの、2012年以降 $\Delta p\text{CO}_2$ が負の方向に増大している様子が見取れる。このことから2012年以降のCO<sub>2</sub>吸収量の増加は主に $\Delta p\text{CO}_2$ の変化が駆動していることが示唆された。特に2015年から2016年にかけて $\Delta p\text{CO}_2$ が急激に負方向に低下しているが、それまで2 μatm yr<sup>-1</sup>程度であった大気pCO<sub>2</sub>増加率が3 μatm yr<sup>-1</sup>と急増する一方海洋の平均pCO<sub>2</sub>増加率は1~2 μatm yr<sup>-1</sup>まで低下しており $\Delta p\text{CO}_2$ が拡大する要因になったと考えられる。次に推定期間中のCO<sub>2</sub>吸収増加がどの海域で引き起こされているか明らかにするために大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックスの経年トレンドを図13(c)で調べたところ、インド洋や大西洋熱帯~亜熱帯域、北太平洋亜熱帯~温帯域を除く多くの海域でCO<sub>2</sub>吸収が強化されたり、放出が弱化したりしていることが明らかとなった。例えば亜表層からの湧昇によってCO<sub>2</sub>放出が顕著な北太平洋高緯度域や太平洋赤道

域東部海域では湧昇の弱化に伴ってCO<sub>2</sub>放出が弱まった可能性が示唆された。

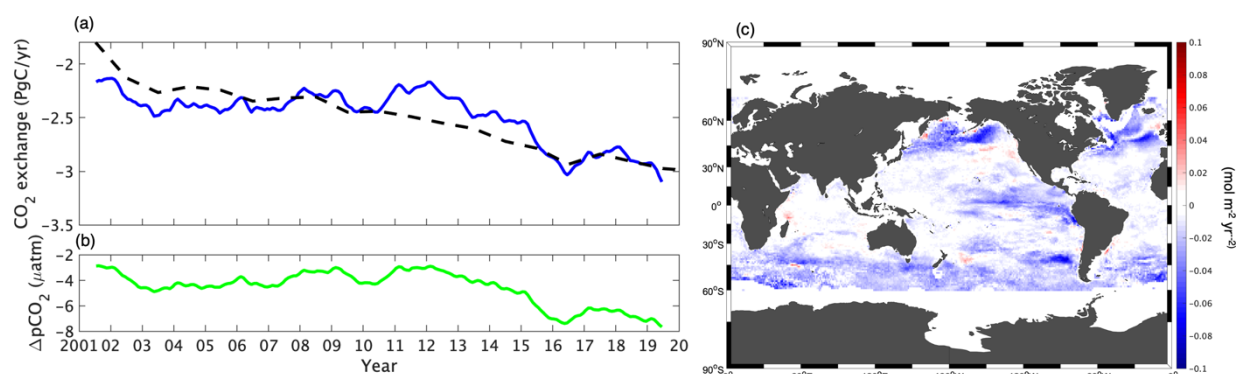


図13. 2001年から2019年の全球海洋における(a)大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量(青線)と(b)平均的な大気海洋間CO<sub>2</sub>分圧差(ΔpCO<sub>2</sub>)の時間変化(13ヶ月移動平均)、および(c)推定期間における大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックスの経年トレンド分布。図(a)の黒点線はGlobal Carbon Budget 2021による報告値を示し、図(c)の負の値(青色)はCO<sub>2</sub>吸収が強化もしくは放出が弱化することを、正の値(赤色)はその逆を意味する。

次にCO<sub>2</sub>交換のトレンドが海域によって異なる要因について検討するため、全球pCO<sub>2</sub>の長期トレンド分布を図14に示す。大気中CO<sub>2</sub>の経年トレンドは空間的にほぼ一様(約2.0 μatm yr<sup>-1</sup>)であるのに対して、海洋pCO<sub>2</sub>トレンドは0.5~3.0 μatm yr<sup>-1</sup>と大きく変化することがこの図からわかる。これはpCO<sub>2</sub>が大気からのCO<sub>2</sub>吸収によって引き起こされていることに加えて、海水中で分子や炭酸イオン、重炭酸イオンとして存在するCO<sub>2</sub>の存在比率が水温や塩分の年々変化によって変化したり、鉛直混合や植物プランクトンの年々変化によって亜表層からのCO<sub>2</sub>供給や植物プランクトンの光合成活動に伴うCO<sub>2</sub>消費が年々変動したりすることを反映するためである。図14から明らかなように、太平洋赤道域東部から中央部付近にpCO<sub>2</sub>トレンドが1 μatm yr<sup>-1</sup>前後の低い領域で見られる。この海域ではエルニーニョ南方振動によってペルー沖での湧昇の強さが制御されており、亜表層から表層へ輸送される高CO<sub>2</sub>水塊の分布が変化することから、エルニーニョやラニーニャによってpCO<sub>2</sub>トレンドも大きく変化することが考えられる。気象庁HP ([https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/elnino/learning/faq/elnino\\_table.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/elnino/learning/faq/elnino_table.html))によると、推定期間の末期にあたる2018年秋季から2019年春季までエルニーニョ期であったことから、このような低いpCO<sub>2</sub>トレンドは湧昇の弱化に伴って高CO<sub>2</sub>水塊がペルー沖から東方へと輸送されなくなったため引き起こされたといえる。また図13(c)のCO<sub>2</sub>フラックスのトレンド分布から当該海域でのCO<sub>2</sub>放出弱体化がエルニーニョによる影響を強く受けていることが強く示唆された。さらにベーリング海縁辺部を除く北太平洋高緯度域でもpCO<sub>2</sub>トレンドが1.5 μatm yr<sup>-1</sup>前後と推定期間中の平均的な大気CO<sub>2</sub>トレンド(約2.2 μatm yr<sup>-1</sup>)よりも比較的低い値を示しており(図14)、季節的にCO<sub>2</sub>吸収が強化されたり放出が抑制されたりした結果を反映したものと考えられる(図13)。これらの結果から、全球海洋平均としては、ΔpCO<sub>2</sub>が増大することで海洋CO<sub>2</sub>吸収量が増加していることが示唆されたが、CO<sub>2</sub>交換のトレンドは一様でなくエルニーニョ南方振動などの気候変動によっ

て影響を受けることが示された。全球海洋で観測を継続することによりpCO<sub>2</sub>トレンドが今後どのように変化するか注視する必要がある。

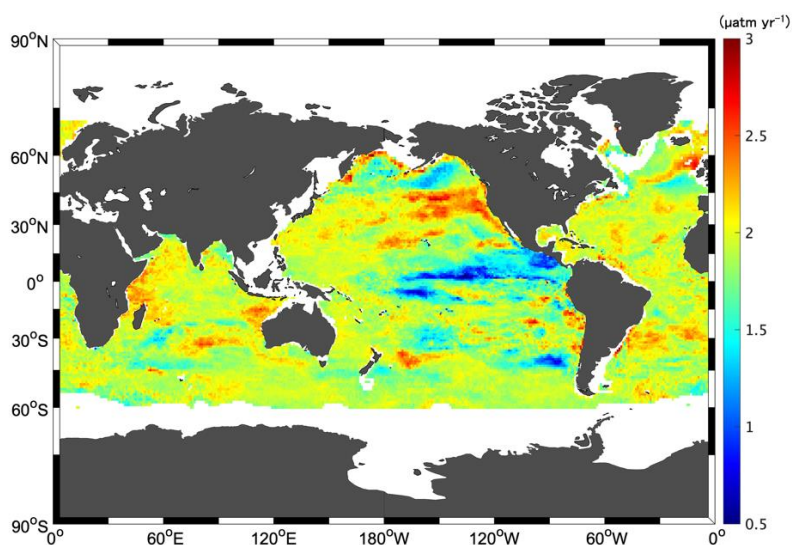


図 14. 2001 年-2019 年における全球海洋の pCO<sub>2</sub>トレンド分布（二次利用不可）

次に上記で作成した全球pCO<sub>2</sub>分布を用いて全炭酸（DIC）濃度やpH、アラゴナイト飽和度（ $\Omega_{ar}$ ）やカルサイト飽和度（ $\Omega_{ca}$ ）の分布推定を行った。再現されたDIC分布結果とGLODAPv2（Olsen et al., 2016<sup>12)</sup>）の表層DIC観測値と推定値を比較したところ、推定誤差は $\pm 15.6 \mu\text{mol kg}^{-1}$ と評価できた。図15に2001-19年平均の2月と8月のDIC濃度、pH、 $\Omega_{ar}$ 、 $\Omega_{ca}$ の分布を示す。得られた空間分布はそれぞれTakahashi et al. (2014)<sup>21)</sup>の気候学的（長期平均的）な2月と8月の分布と整合的であった。炭酸系の化学平衡から、基本的に両者の間にはDICが高ければ（低ければ）、pHが低く（高く）なるという関係があり、例えば北太平洋の高緯度域では2月にDICが高く、pHは低い値を示していることがわかる。Takahashi et al. (2014)<sup>21)</sup>では、平均場としての季節変化のみを議論したが、本課題では解析的に得られたpCO<sub>2</sub>トレンドを用いて各炭酸パラメータの分布再現を行っており、経年トレンド分布を議論することが可能となった。図16に2001から2019年までのDIC、pH、 $\Omega_{ar}$ 、 $\Omega_{ca}$ の経年トレンド分布をそれぞれ示す。DICのトレンド分布については、多くの海域では大気から海洋へのCO<sub>2</sub>吸収に伴うDICの上昇が見られているが、ベーリング海に接する北太平洋の高緯度域では負のトレンドが捉えられている。これは当該海域での温暖化に伴う海洋成層の強化が垂表層からの高CO<sub>2</sub>(DIC)水塊の輸送を抑制しているためと考えられる。一方、太平洋赤道域西部から北太平洋亜熱帯域東部にかけてもDICは増加傾向を示しておらず、エルニーニョによる海洋循環変化による炭酸系変化を反映している。pHについては太平洋赤道域東部から中央部以外の多くの海域で顕著な低下傾向が見られている。全球海洋表層におけるDIC、pH、アラゴナイト飽和度とカルサイト飽和度の平均経年トレンドはそれぞれ $0.73 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{yr}^{-1}$ 、 $-0.0018 \text{yr}^{-1}$ 、 $-0.0076 \text{yr}^{-1}$ 、 $-0.012 \text{yr}^{-1}$ であった。Iida et al. (2021)<sup>22)</sup>は、海域ごとに重回帰分析を行い再現した分布結果からpHとアラゴナイト飽和度のトレンドをそれぞれ $-0.0018 \text{yr}^{-1}$ 、 $-0.0082 \text{yr}^{-1}$ と評価しており本解析による値とpHについては一致し、アラゴナイト飽和度の報告値とも近いことから、

本解析結果の妥当性をサポートする結果であると言える。

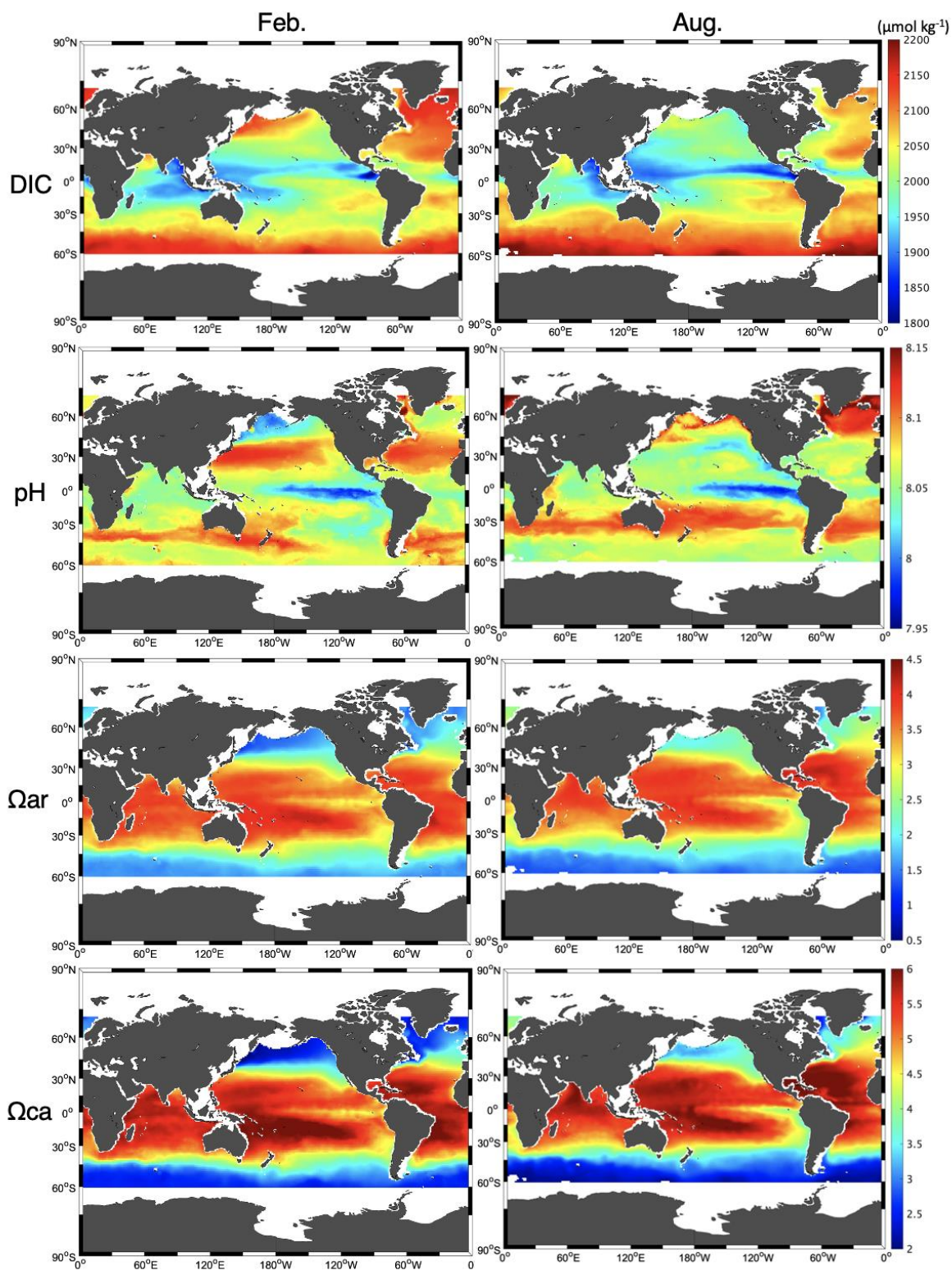


図15. 2001-19年平均の2月（左側）と8月（右側）の（上から）DIC濃度、pH、 $\Omega_{ar}$ 、 $\Omega_{ca}$ の空間分布。（二次利用不可）

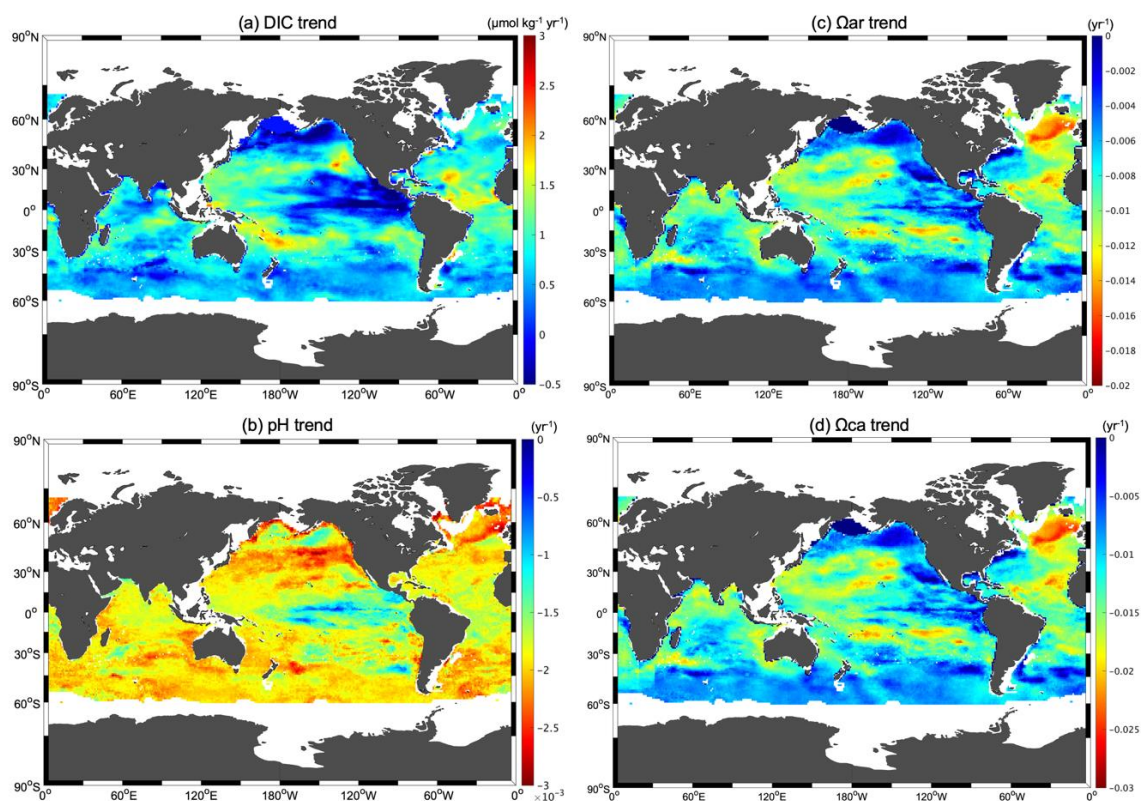


図 16. (a)DIC 濃度、(b) pH、(c)  $\Omega_{ar}$  と (d)  $\Omega_{ca}$  のトレンド分布（二次利用不可）

次に  $\Omega_{ar}$  のトレンド分布を利用して海洋酸性化に伴ってアラゴナイトを形成する生物（例えば帆立や牡蠣、ウニ、サンゴ）の生育に影響が出る時期を評価した。 $\Omega_{ar}$  の値がどの程度下がると生物の生育に影響が出るかについては、 $\Omega_{ar}$  が 3 を下回ると成長が阻害されやすくなると考えられている ([https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/6/6-1/qa\\_6-1-j.html](https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/6/6-1/qa_6-1-j.html)) ため、ここでは季節変化の最大値が 3 を下回る年と定義して評価した（図17）。この分布結果から南北両半球ともに中緯度帯から高緯度帯ではすでに生物の生育に影響が出ている可能性が示唆された。また現在影響が出ていない中緯度帯の一部海域でも今後数十年の間に影響が出ることが示唆された。このような海域、例えば帆立や牡蠣の養殖が盛んでウニの産地としても知られる北海道、東北地方やサンゴが生育する本州南岸では  $\Omega_{ar}$  の低下により外骨格の形成にこれまでよりも成長にエネルギーが必要になるため、病気にかかりやすく死滅するなどのリスクも考えられる。本計算には海洋酸性化が現在のペースで進行する、つまり人為的な  $\text{CO}_2$  排出が今後も同レベルで推移する、という仮定が含まれるだけでなく温暖化の進行による海水温の上昇影響が考慮されていないため、より精緻な将来予測を行うためには海洋生物物理化学モデルを用いることが不可欠であると考えられる。一方、当該モデルには  $\text{pCO}_2$  分布再現や  $\text{CO}_2$  交換量の評価が観測に基づく推定と整合的でないという指摘もあるため (e.g. Ilyina et al., 2013<sup>23)</sup>, Hauck et al., 2020<sup>24)</sup>)、観測とモデルに関わる研究者が協力して将来予測の精緻化に取り組む必要があると考えている。

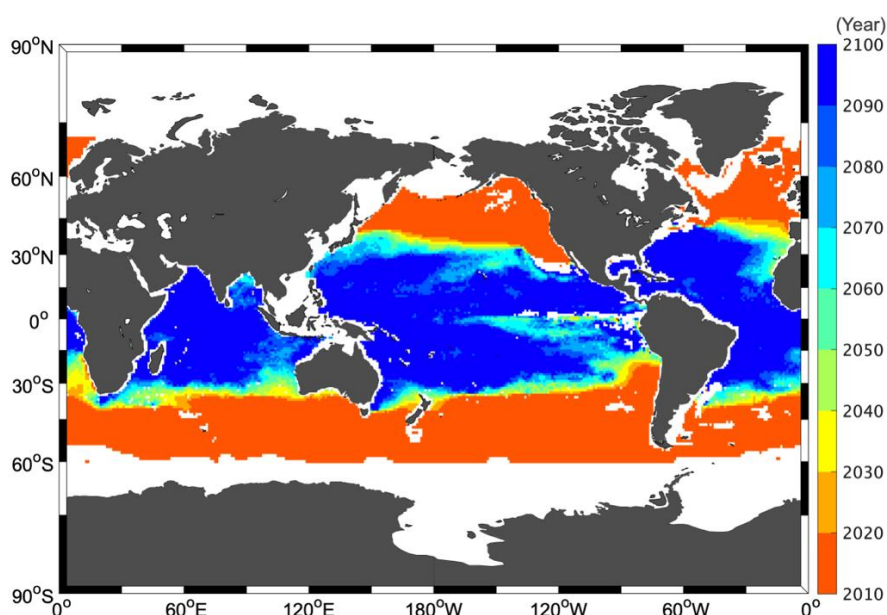


図17.  $\Omega_{ar}$ の季節変化の最大値が3を下回る時期（年）の分布。暖色系の色は炭酸カルシウム（アラゴナイト）を形成する生物の生育に現在、もしくは近い将来に影響を受ける可能性があることを示す。（二次利用不可）

最後に栄養塩の分布推定について述べる。栄養塩についてはニューラルネットワーク手法による推定と最適内挿法と呼ばれる補間法を用いた推定を行った。このうちニューラルネットワーク手法で再現した栄養塩については2001-14年の全球硝酸塩濃度分布を作成した（図18）。再現された全球硝酸塩濃度は両半球とも高緯度域で高く、低緯度で低くなる分布を示しており、季節的には特に高緯度域で冬（2月）に高く、夏（8月）に低い傾向であった。これは、まず秋季から冬季にかけて鉛直混合の活発化に伴い亜表層から栄養塩が供給され、春から夏にかけて植物プランクトンの光合成活動により栄養塩が消費されるためである。また、推定値と観測値の多くは一対一の直線近傍に分布しており、推定誤差は0.67  $\mu\text{M}$ であった。さらに得られた結果とWorld Ocean Atlas 2013 version 2 (Boyer et al., 2013<sup>25</sup>)の長期平均分布と比較したところ、いずれの月においても整合的な分布変化を示していた。これらの結果から特に外洋域においては硝酸塩濃度分布の推定結果が妥当であるといえる。ニューラルネットワーク手法を用いた本分布推定については、2020年以降まで推定期間を延ばしたプロダクト作成を進めており、完成次第データ公開を行う予定である。

次に最適内挿法による栄養塩（硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩）の分布推定結果として北太平洋における平均的な3月と8月の分布を図19に示す。得られた分布はニューラルネットワーク手法で再現した硝酸塩濃度分布（図18）と同様に高緯度域で高く低緯度域から中緯度域にかけては低い分布を示し、また高緯度域では冬季に極大、夏季に極小となる変化を示すなど、両者の結果は整合的であった。そこで次に、各格子点での栄養塩濃度の時間変化を気候変動要素である太平洋10年規模振動（Pacific Decadal Oscillation: PDO）指数と北太平洋旋回振動（North Pacific Gyre Oscillation: NPGO）指数、各栄養塩濃度の経年トレンドで回帰計算した。回帰係数と経年トレンドの分布を図20に示す。まず各栄養塩濃度とPDOの関

係を見てみると、北太平洋の西部から中央部の海域ではPDOに対して正、東部海域では負の応答を示しており、例えばPDO Indexが+1変化した場合に日本近海ではリン酸塩濃度が $0.02 \sim 0.04 \mu\text{mol l}^{-1}$ 増加し、米国とカナダの国境付近の海域では $0.02 \sim 0.04 \mu\text{mol l}^{-1}$ 低下することが明らかとなった。一方、各栄養塩濃度とNPGOの関係には東西方向、あるいは南北方向に明瞭なコントラストは見られず大部分の海域で正の応答を示した。また各栄養塩濃度のトレンドは、リン酸塩濃度とケイ酸塩濃度については大部分の海域で低下傾向にある一方、硝酸塩濃度は日本近海で強い増加傾向、アリューシャン列島から北米大陸の沿岸域にかけて弱い増加傾向を示し、両者に挟まれた海域で減少傾向を示していた。これは海洋の温暖化に伴う混合層の弱体化により亜表層からの（硝酸塩を含む）栄養塩供給が抑制される一方、大気からの窒素沈着により海域によっては硝酸塩が供給されることを示唆している。亜表層からの栄養塩供給減少は海洋基礎生産量の低下をもたらし、結果として漁獲量の減少など日本の社会経済に深刻な影響を与えかねない。そのため、亜表層からの栄養塩供給の減少と大気からの供給について観測結果や大気輸送モデル等に基づいて定量的な評価を行い、将来予測の精緻化へと繋げていきたいと考えている。

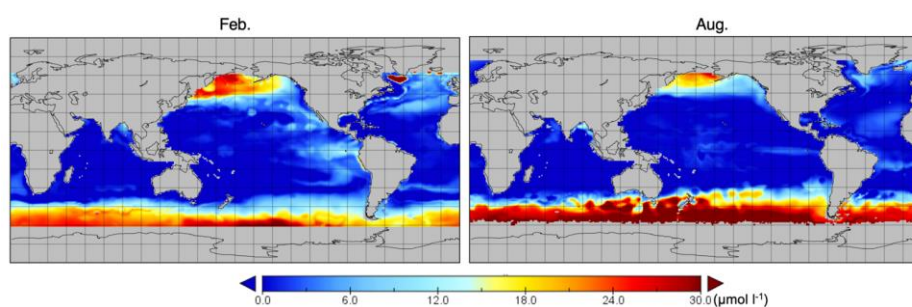


図18. 推定期間（2001年-2014年）で平均した2月（左）と8月（右）の硝酸塩濃度分布

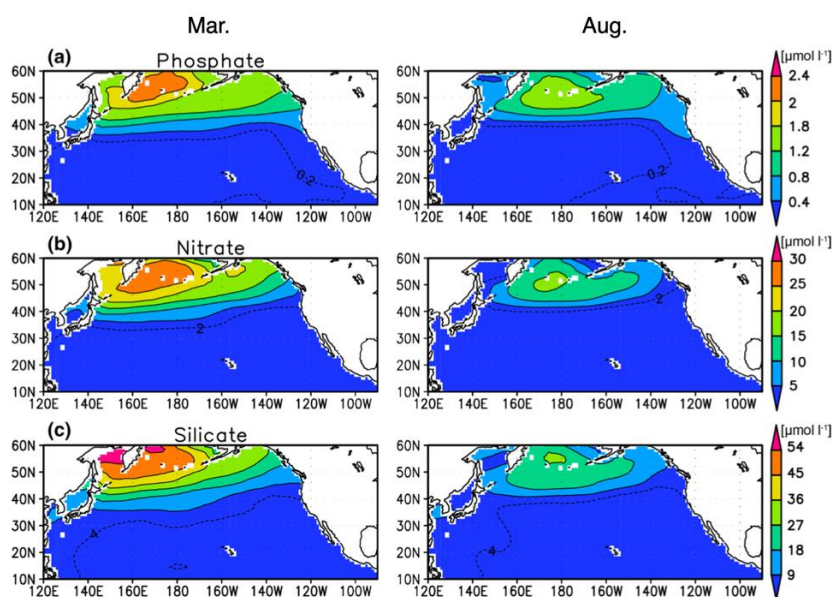


図19. 北太平洋における平均的な3月（左）と8月（右）の(a)リン酸塩濃度、(b)硝酸塩濃度、(c)ケイ酸塩濃度分布 (Yasunaka et al., 2021<sup>14)</sup>)



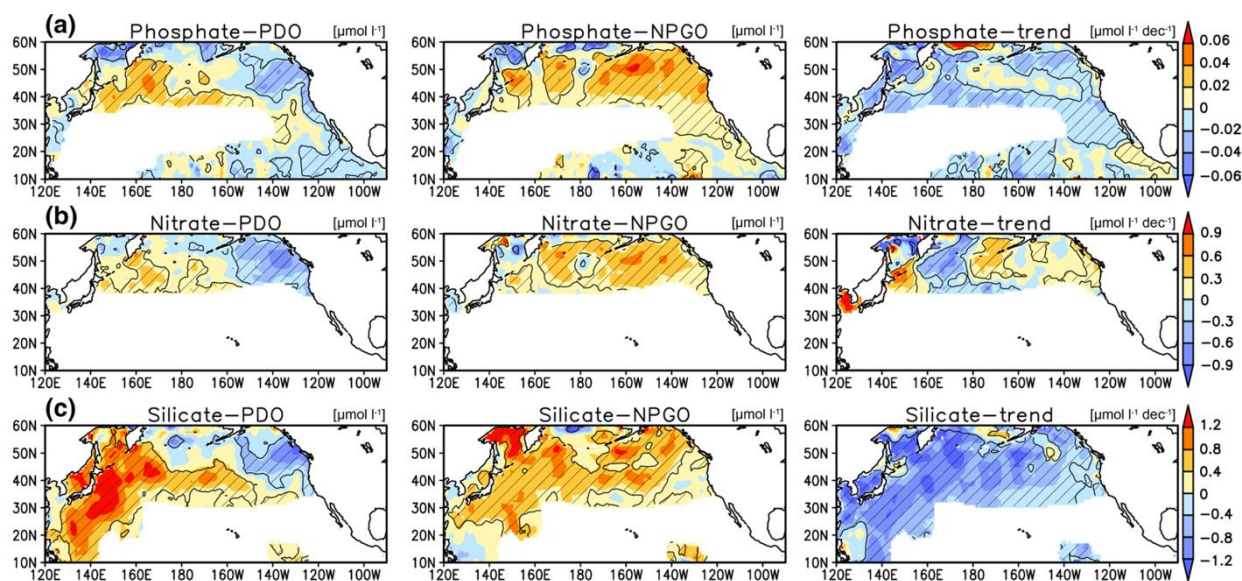


図20. 北太平洋における (a) リン酸塩濃度、(b) 硝酸塩濃度、(c) ケイ酸塩濃度とPDO (左)、NPGO (中央) の回帰係数と各栄養塩の経年トレンド (右) の分布。白抜きのは海域は各栄養塩の濃度が低く、年々変動の振幅も小さいため解析対象外とした。(Yasunaka et al., 2021<sup>14)</sup>)

本課題では、炭酸系と栄養塩について $p\text{CO}_2$ と共に重点的な観測を行いSOCATデータベースに観測データを提供するだけでなく、北太平洋の品質認定機関としてSOCATに貢献してきた。またSOCATやGLODAP等のデータベースを活用してデータ解析を行うことで上記海洋化学パラメータがPDOやENSOといった気候変動に応答する様子を捉えることに成功した。地球温暖化による海水温の上昇や海洋循環の変化はこれら気候変動要素と密接かつ複雑に絡み合っていることから、次期地球一括課題「海洋 $\text{CO}_2$ 吸収量評価の精緻化を目指した低次生態系・炭酸系の広域観測」等の課題でも引き続き観測に取り組むとともに、国環研伊藤が代表を務める学術変革領域研究課題「デジタルバイオスフェア」において本課題代表者である中岡が分担者として参画し、海洋モデルグループと協力して海洋物質循環モデルの精緻化に取り組むと考えている。

## 5. 成果

本課題期間の取り組みによって以下の成果が得られた。

- ・国環研による表層海水の連続硝酸塩観測で得られた結果から、日本近海で近年顕著な黒潮大蛇行による栄養塩濃度の分布変化について非蛇行期の結果と対照することで明らかにした。
- ・国環研によるアルカリ度観測で得られた結果から観測されたアルカリ度の空間分布を把握するとともに塩分や水温との関係を調べて特に塩分との明瞭な関係を見出した。
- ・国環研による東京湾、伊勢湾、大阪湾の観測からこれら内湾での $\text{CO}_2$ 吸収量を評価した。さらに海洋生物活動による $\text{CO}_2$ 吸収促進効果を初めて評価して、都市の高度な下水処理による適度な栄養塩管理が海洋 $\text{CO}_2$ 吸収に有効であることを示した。

- ・水研では2隻の漁業調査船を用いてのべ51航海のpCO<sub>2</sub>観測を実施した。このうち2021年12月までの観測データをSOCATに登録した。またこれらの全航海で栄養塩採水を実施した。
- ・南部オホーツク海で観測された3航海のデータの統合解析の結果、夏期のクリル海盆水では大規模な水塊混合や生物過程に伴う局所的な炭酸系の変動は殆ど存在せず、殆ど水温変動に起因した熱力学的な変動だけでpCO<sub>2</sub>分布が決まっていることが判った。これは、オホーツク海南部の日本EEZ水域で取得されたpCO<sub>2</sub>と水温の関係式をそのままクリル海盆全体に拡張して、オホーツク海南部のpCO<sub>2</sub>分布を推定することが可能であることを示唆する知見である。
- ・大蛇行期および非大蛇行期における夏期黒潮内側域のpCO<sub>2</sub>分布パターンの差異を解析し、非大蛇行期と大蛇行期における黒潮内側域内の低温・低塩分領域の形成要因の違いによって、大蛇行期における夏期黒潮内側域のpCO<sub>2</sub>空間変動幅が抑制されることを見いだした。
- ・国環研では2隻の貨物船舶によるpCO<sub>2</sub>観測実施し、課題期間中に得られた198航海分の観測データをSOCATに登録した。また各機関の観測メタデータ作成とSOCATへの観測データ提出について支援した。
- ・国環研によるSOCATデータベースを利用して2001年から2019年までの全球pCO<sub>2</sub>分布と大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス分布を推定して海洋CO<sub>2</sub>交換量を評価した。その結果、海洋のCO<sub>2</sub>吸収量が2012年以降増加傾向にあることがわかった。また推定期間中に多くの海域でCO<sub>2</sub>吸収が促進もしくは放出が抑制されたことがわかった
- ・国環研によるSOCATデータベースを利用した炭酸系分布推定から、推定期間における全球海洋表層のDICとpH、アラゴナイト飽和度やカルサイト飽和度のトレンドを評価し、全球海洋のほぼ全域で海洋酸性化が進行していることを示した。さらにアラゴナイト飽和度のトレンドから中緯度域の一部海域や高緯度域では既にアラゴナイトの外殻を有する生物の生育に影響が出ている可能性が危惧された。
- ・国環研による栄養塩分布推定から、ニューラルネットワーク手法による全球の硝酸塩濃度分布や最適内挿法による北太平洋、太平洋赤道域の栄養塩（リン酸塩、硝酸塩、ケイ酸塩）濃度分布を明らかにした。また北太平洋や太平洋赤道域での推定結果から、PDOやNPGO、ENSOなど気候変動要素と各栄養塩濃度変動の関係を明らかにするとともに、経年トレンドを評価して温暖化による亜表層からの栄養塩供給低下と大気からの窒素沈着による硝酸塩供給の可能性について指摘した。

## 6. 引用文献

- 1) Takahashi, T., et al., (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans, Deep-Sea Res. II 56, 554-577, doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.009.
- 2) Nakaoka, S., et al., (2013) Estimating temporal and spatial variation of sea surface pCO<sub>2</sub> in the North Pacific using a self organizing map neural network technique, Biogeosciences, 10, 6093-6106, doi:10.5194/bg-10-6093-2013.
- 3) Onizuka, T., et al., (2018) Effects of ocean acidification with pCO<sub>2</sub> diurnal fluctuations on survival and larval shell formation of Ezo abalone, *Haliotis*

- discus hannai. *Marine Environmental Research* 134, 28–36.
- 4) Landschützer, P., et al., (2014) Recent variability of the global ocean carbon sink, *Global Biogeochem. Cycles* 28, 927–949, doi:10.1002/2014GB004853.
  - 5) Rödenbeck, C., et al., (2015) Data-based estimates of the ocean carbon sink variability – first results of the Surface Ocean pCO<sub>2</sub> Mapping intercomparison (SOCOM), *Biogeosciences* 12, 7251–7278, doi:10.5194/bg-12-7251-2015.
  - 6) Bakker, D.C.E., et al., (2016) A multi-decade record of high-quality fCO<sub>2</sub> data in version 3 of the Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT), *Earth Syst. Sci. Data* 8, 383–413, doi:10.5194/essd-8-383-2016.
  - 7) Yasunaka, S., et al., (2014) Mapping of sea surface nutrients in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability, *J. Geophys. Res.*, DOI: 10.1002/2014JC010318.
  - 8) Jenkins, W. J. (1988) The use of anthropogenic tritium and helium-3 to study subtropical gyre ventilation and circulation. *Philos. Trans. R. Soc.* 325:43–61.
  - 9) Zeng, J., et al., (2017) Technical note: Evaluation of three machine learning models for surface ocean CO<sub>2</sub> mapping, *Ocean Sci.*, 13, 303–313, <https://doi.org/10.5194/os-13-303-2017>.
  - 10) Nakamura, T., et al. (2015) Improvement of Atmospheric CO<sub>2</sub> Inversion Analysis at JMA, A31B-0033, AGU Fall Meeting, San Francisco, 14–18 Dec. 2015.
  - 11) Lewis, E., and Wallace, D.W.R., (1998) Program Developed for CO<sub>2</sub> System Calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.
  - 12) Olsen, A., et al., (2016) The Global Ocean Data Analysis Project version 2 (GLODAPv2) - an internally consistent data product for the world ocean, *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 297–323, <https://doi.org/10.5194/essd-8-297-2016>.
  - 13) Yasunaka, S., et al., (2019) Spatio-temporal variability of surface water pCO<sub>2</sub> and nutrients in the tropical Pacific from 1981 to 2015. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 169-170 (October 2018), 104680. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.104680>.
  - 14) Yasunaka, S., et al., (2021) Nutrient and dissolved inorganic carbon variability in the North Pacific. *Journal of Oceanography*. 77:3–16. <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00561-7>.
  - 15) Lee, K., et al., (2006) Global relationships of total alkalinity with salinity and temperature in surface waters of the world oceans, 33, L19605. <https://doi.org/doi:10.1029/2006GL027207>
  - 16) 日本下水道協会 (2010) 平成22年度版下水道統計.
  - 17) Oguma, S., et al., (2011) Flux of low salinity water from Aniva Bay (Sakhalin Is-land) to the southern Okhotsk Sea. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 91, 24–32.

- 18) Whitney, F. A., et al., (2013), Nutrient enrichment of the subarctic Pacific Ocean pycnocline, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2200-2205, doi:10.1002/grl.50439.
- 19) Ono, T., et al., (2005) Seasonal and interannual variation of DIC in the Oyashio mixed layer: A climatological view. *J. Oceanogr.* 61, 1075-1088.
- 20) Friedlingstein, P., et al., (2022) Global Carbon Budget 2021, 14, 1917-2005, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.
- 21) Takahashi, T., et al., (2014) Climatological distributions of pH, pCO<sub>2</sub>, total CO<sub>2</sub>, alkalinity, and CaCO<sub>3</sub> saturation in the global surface ocean, and temporal changes at selected locations. *Marine Chemistry*, 164, 95-125.  
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.06.004>.
- 22) Iida et al., (2021) Global trends of ocean CO<sub>2</sub> sink and ocean acidification: an observation - based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables. *Journal of Oceanography*, 77:323-358, <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00571-5>.
- 23) Ilyina, T., et al., (2013) Global ocean biogeochemistry model HAMOCC: Model architecture and performance as component of the MPI-Earth system model in different CMIP5 experimental realizations, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5, 287-315, doi:10.1029/2012MS000178.
- 24) Hauk, J., et al., (2020) Consistency and Challenges in the Ocean Carbon Sink Estimate for the Global Carbon Budget. *Front. Mar. Sci.* 7:571720. doi: 10.3389/fmars.2020.571720.
- 25) Boyer, T.P., et al., (2013) World Ocean Database 2013, NOAA Atlas NESDIS 72, S. Levitus, Ed., A. Mishonov, Technical Ed.; Silver Spring, MD, 209 pp., <http://doi.org/10.7289/V5NZ85MT>

## 【研究成果の発表状況】（課題開始年度－令和3年度）

### （1）誌上発表（学術誌）

- 1) Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, ..., Nakaoka, S., ..., Ono, T., et al., (2021) Global Carbon Budget 2021, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 1917-2005, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.
- 2) 中岡慎一郎, 高尾信太郎 (2022) 国立環境研究所による民間貨物船舶を用いた大気・海洋温室効果ガス観測と海洋CO<sub>2</sub>吸収量評価への貢献. *地球環境*, 26 (1&2), 27-36.
- 3) Yasunaka, S., Ono, T., Sasaoka, K., Sato, K. (2022). Global distribution of subsurface chlorophyll a concentrations. *Ocean Science* 18, 255-268. doi: 10.5194/os-18-255-2022.
- 4) Tokoro, T., Nakaoka, S., Takao, S., Kuwae, T., Kubo, A., Endo, T., Nojiri, Y., (2021). Contribution of Biological Effects to Carbonate - System Variations and the Air-Water CO<sub>2</sub> Flux in Urbanized Bays in Japan. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 126. <https://doi:10.1029/2020jc016974>
- 5) Yasunaka, S., Mitsudera H. Whitney, F., Nakaoka, S. (2021) Nutrient and dissolved

- inorganic carbon variability in the North Pacific. *Journal of Oceanography*. 77:3-16. <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00561-7>.
- 6) Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, ..., Nakaoka, S., ..., Ono, T., et al., (2020) Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269-3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- 7) Yasunaka, S., Kouketsu, S., Strutton, P. G., Sutton, A. J., Murata, A., Nakaoka, S., Nojiri, Y. (2019) Spatio-temporal variability of surface water pCO<sub>2</sub> and nutrients in the tropical Pacific from 1981 to 2015. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 169-170 (October 2018), 104680. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.104680>
- 8) Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Hauck, J., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, ..., Nakaoka, S., ..., Ono, T., et al., (2019) Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data* 11, 1783-1838.
- 9) Wanninkhof R., Pickers P.A., Omar A.M., ..., Nakaoka S., et al., (2019) A Surface Ocean CO<sub>2</sub> Reference Network, SOCONET and Associated Marine Boundary Layer CO<sub>2</sub> Measurements. *Frontiers in Marine Science*, 6(400),1-21.
- 10) Sastri, A., Christian, J.R., Achterberg, E.P., ..., Nakaoka, S., ..., Ono, T., et al., (2019) Perspectives on in situ sensors for ocean acidification research. *Frontiers in Marine Science*. 6:653. doi: 10.3389/fmars.2019.00653.
- 11) Christian, J.R., Ono, T. (Eds.) (2019) *Ocean Acidification and Deoxygenation in the North Pacific Ocean*. PICES Press, Victoria, Canada.
- 12) Le Quéré, C., Andrew, R.M., Friedlingstein, ..., Nakaoka, S., et al., (2018) Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data* 10, 2141-2194.
- 13) 小笠恒夫, 岡崎雄二, 木元克典 (2018) 混合水域中層における炭酸カルシウム飽和度の経年変動. *月刊海洋* 571, 247-253.
- 14) Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, ... Nakaoka, S., et al., (2018) Global Carbon Budget 2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 405-448, <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>.
- 15) Yasunaka, S., Y. Nojiri, T. Hashioka, C. Yoshikawa, T. Kodama, S. Nakaoka, et al., (2017) Basin - scale distribution of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>2</sub><sup>-</sup> in the Pacific Ocean. *Journal of Oceanography*. <http://doi.org/10.1007/s10872-017-0433-1>
- 16) Ritter, R., P. Landschützer, N. Gruber, A. R. Fay, Y. Iida, S. Jones, S. Nakaoka, et al., (2017) Observation-Based Trends of the Southern Ocean Carbon Sink, *Geophysical Research Letters*, 44, 24, 12,339-12,348. DOI: 10.1002/2017GL074837.
- 17) Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, ..., Nakaoka, S., et al., (2018) Global Carbon Budget 2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 405-448, <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>.
- 18) Yasunaka, S., Y. Nojiri, T. Hashioka, C. Yoshikawa, T. Kodama, S. Nakaoka, S. Chiba, F. Hashihama, M. Wakita, K. Furuya, S. Daisuke, A. Murata, H. Uchida, M.

Aoyama, 2017. Basin - scale distribution of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_2^-$  in the Pacific Ocean. Journal of Oceanography. <http://doi.org/10.1007/s10872-017-0433-1>.

## (2) 口頭発表

- 1) 中岡慎一郎, 高尾信太郎, 所立樹, 野尻幸宏 (2021)  $\text{pCO}_2$ 観測に基づく北太平洋表層炭酸系パラメータの時空間分布再現. 日本地球化学会2021年度年会, 同予稿集
- 2) 石田明生, 中岡慎一郎, 野尻幸宏 (2021) 北西部北太平洋における二酸化炭素分圧の年周期・半年周期変動. 日本海洋学会 2021年度秋季大会, 同予稿集
- 3) 所立樹, 中岡慎一郎, 高尾信太郎 (2021) Linear and non-linear analysis for high temperature and acidification event in the Great Barrier Reef based on the observation in the Coral Sea. Japan Geoscience Union Meeting 2021, 同予稿集
- 4) 所立樹, 中岡慎一郎, 高尾信太郎, 野尻幸宏, 桑江朝比呂, 久保篤史, 遠藤徹 (2020) 内湾域における大気中 $\text{CO}_2$ 吸収量と生物活動の影響の評価. 第6回沿岸生態系ワークショップ. 予稿集なし.
- 5) 所立樹, 中岡慎一郎, 高尾信太郎, 桑江朝比呂, 久保篤史, 遠藤徹, 野尻幸宏 (2020) 都市内湾水域における $\text{CO}_2$ 吸収と生物活動の影響. 日本海洋学会2020年度秋季大会. 日本海洋学会, 同予稿集.
- 6) Saigusa N., Machida T., Nakaoka S., Matsunaga T., Tanimoto H., Niwa Y., Terao Y., Ito A. (2020) Greenhouse Gas Analyzing Platform using Ground Sites, Aircraft, Ships, and Satellite-based Data: Japan's Contribution to the Paris Agreement. EGU General Assembly 2020, Abstracts.
- 7) Christian, J., Ono, T., (2019) PICES special publication "ocean acidification and deoxygenation in the north Pacific Ocean": information exchange with social sectors. 4th GOA-ON International workshop. GOA-ON, Hangzhou, China, pp. Session4-Focus5-2.
- 8) Bakker, D. C. E., Lauvset, S. K., Wanninkhof, R., O'Brien, K. M., Pfeil, B., Castaño-Primo, R., Currie K., Jones S., Kozyr A., Landa C. Metzl N., Nakaoka S., et al., (2019). Tracking the increase in surface ocean carbon dioxide with the Surface Ocean  $\text{CO}_2$  Atlas (SOCAT). In Proceeding of EGU 2019, id.3116. Vienna, Austria: 21st EGU General Assembly.
- 9) Nakaoka, S., Nojiri, Y. Yasunaka S., Ono, T., Hayashi, K., Telszewski, M., (2019)  $\text{fCO}_2$  and sea-air  $\text{CO}_2$  flux variability in the global ocean from 2001 to 2014. SOLAS Open Science Conference 2019, Sapporo, abstracts.
- 10) 瀬藤聡, 小埜恒夫, et al., (2019) 黒潮海域における大蛇行時と非大蛇行時における生化学的特性の差異. JpGU2019. pp. AOS17-03. 日本地球惑星科学連合, 幕張.
- 11) 小埜恒夫, 伊藤大樹, 小杉如央, 中岡慎一郎, (2019) 黒潮大蛇行期における夏期黒潮内側域の $\text{pCO}_2$ 空間変動. 日本海洋学会2019年度秋季大会. 日本海洋学会, 富山, pp. 19F-112-11.
- 12) 中岡慎一郎 (2019) Evaluation of ocean  $\text{CO}_2$  uptake on GCB report and the contribution to GCB by NIES VOS measurements. Global Carbon Budgetセミナー, つくば

- 13) 小埜恒夫 (2019) 水産研究・教育機構におけるpCO<sub>2</sub>観測. Global Carbon Budgetセミナー, つくば
- 14) Nakaoka, S., Nojiri, Y., Yasunaka, S., Ono, T., Takao, S., Telszewski, M., (2020) Inter-annual variability of ocean surface carbonate system parameters and their trends in the global ocean since 2001. Ocean Science Meeting 2020. AGU/ASLO, San Diego, pp. OC44A-1493.
- 15) Ono, T., Kimoto, K., Okazaki, Y., (2018) Temporal variation of the saturation state of carbonate in intermediate waters of western North Pacific. PICES/ICES 4th International Symposium on the Effects of Climate Change on the World Oceans. PICES, Washington DC, p. 233.
- 16) Ono, T., Kimoto, K., Okazaki, Y., (2018) Temporal variation of the saturation state of carbonate in intermediate waters of western North Pacific. PICES 2018. PICES, Yokohama, p. 178.
- 17) Yasunaka S., Kouketsu S., Murata A., Strutton P., Sutton A., Nakaoka S., Nojiri Y. (2018) Spatio-temporal variability of sea surface pCO<sub>2</sub> and nutrient in the tropical Pacific from 1981 to 2015. 6th Argo Science Workshop, Abstracts.
- 18) 安中さやか, 纈纈慎也, 村田昌彦, Peter Strutton, Adrienne Strutton, 中岡慎一郎, 野尻幸宏 (2018) 太平洋熱帯域における表層CO<sub>2</sub>分圧・栄養塩の季節・経年変動. 日本海洋学会2018年度秋季大会, 同予稿集, 48.
- 19) Ono, T., (2019) Long-term variation of subsurface oxygen and nutrient in North Pacific: Do they reflect each other? The Fourth Xiamen Symposium on Marine Environmental Sciences. Xiamen University, Xiamen, pp. 0-T-04.
- 20) Yasunaka, S., Nojiri, Y., Ono, T., Whitney, F.A., Nakaoka, S., (2018) Large nutrient variation in the North Pacific Transitional Area. 2018 Pacific Transitional Areas Symposium. PICES, La Paz, p. 26.
- 21) 林一宏, 中岡慎一郎, 野尻幸宏, 小埜恒夫 (2017) 連続硝酸塩計を用いた北太平洋表層の高空間分解能観測 メソスケール渦表面の硝酸塩の変動について. 日本海洋学会2017年度秋季大会, 2017年10月16日, 仙台.
- 22) 小埜恒夫, 岡崎雄二, 木元克典 (2017) 混合水域中層における炭酸カルシウム飽和度の経年変動. 日本海洋学会2017年秋季大会, 2017年10月16日, 仙台.
- 23) Bakker D.C.E., Olsen A., Sabine C., ..., Nakaoka S., et al., (2017) Quantification of the ocean carbon sink using surface ocean observations. 10th International Carbon Dioxide Conference, Abstracts, 281
- 24) Nakaoka S., Nojiri Y., Yasunaka S., Ono T., Zeng J., Hayashi K., Mukai H., Telszewski M. (2017) Distribution of fCO<sub>2</sub> trend due to the anthropogenic CO<sub>2</sub> uptake and bio-geophysical variability in the Pacific Ocean. 10th International Carbon Dioxide Conference, Abstracts, 82
- 25) 林一宏, 中岡慎一郎, 野尻幸宏, 小埜恒夫 (2017) 連続硝酸塩計を用いた北太平洋表層の高空間分解能観測 メソスケール渦表面の硝酸塩の変動について. 日本海洋学会2017年度秋季大

会, 2017年10月16日, 仙台.

- 26) 小笠恒夫, 岡崎雄二, 木元克典 (2017) 混合水域中層における炭酸カルシウム飽和度の経年変動. 日本海洋学会2017年秋季大会, 2017年10月16日, 仙台.

### (3) 出願特許

特になし。

### (4) 受賞等

特になし。

### (5) 一般への公表・報道等

- 1) 地球環境研究センターニュース “温室効果ガス研究の最前線 -パリ協定の目標達成に向けて-” 2022年4月号 [Vol. 33 No. 1] 通巻第377号
- 2) 中岡慎一郎, 「地球を巡る二酸化炭素を追う ~Global Carbon Budget報告~」, 「温室効果ガス研究の最前線 -パリ協定の目標達成に向けて-」 オンライン, 2022年2月10日
- 3) 【報道発表】「Global Carbon Budget 2021」(世界のCO<sub>2</sub>収支2021年版) 発表のお知らせ 2021年11月4日
- 4) 【報道発表】都市内湾域の生物活動による二酸化炭素吸収メカニズムを解明-都市内湾の生物活動による気候変動対策の可能性-(文部科学記者会、科学記者会、神奈川県政記者クラブ、横須賀市政記者クラブ、港湾空港技術研究所関連専門誌複数、静岡県社会部記者室、大阪科学・大学記者クラブ同時配信) 2021年6月24日
- 5) 【報道発表】世界のCO<sub>2</sub>収支 2020年版を公開 ~国際共同研究(グローバルカーボンプロジェクト)による評価~(筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会、水産庁記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会同時配信) 2020年12月11日
- 6) 上記報道発表を受けた日経新聞による報道(2020年12月12日付)
- 7) 【報道発表】“世界のCO<sub>2</sub>排出量は3年連続で増加するも、増加率は低下の見通し~国際共同研究(グローバルカーボンプロジェクト)による評価~”(筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ、環境記者会、水産庁記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会同時配信) 2019年12月3日
- 8) COP 25 side event “The Global Carbon Budget 2019” 2019/12/4, Madrid, Spain
- 9) 上記報道発表を受けた共同通信、毎日新聞、日刊工業新聞による報道(それぞれ2019年12月5日付)
- 10) 地球環境研究センターニュース “GLOBAL CARBON BUDGET 2019に関するセミナーで報告書に携わった研究者が講演しました” 2020年3月号 [Vol. 30 No. 12] 通巻第351号

### (6) 研究分野における成果の発展・牽引

本課題では観測データを迅速にSOCATに登録することにより、Global Carbon Projectを通じて海洋CO<sub>2</sub>吸収量評価に貢献しており、毎年公表されているGlobal Carbon Budgetの年次レポートに成果が反映されている。また日本海洋学会が編纂した「海の温暖化」(朝倉出版、



2017年7月出版)に本課題代表者(中岡)が執筆者の一人として参画し、観測に基づく海と大気のコ<sub>2</sub>交換の評価について解説し、成果の普及に努めた。また北太平洋域の海洋環境及び海洋生物資源に関する国際科学機関である、北太平洋海洋科学機構(North Pacific Marine Science Organization: PICES)の炭素循環と気候に関する小委員会(Section on Carbon and Climate: S-CC)において、本課題分担者(小笠)が共同議長に、本課題代表者(中岡)が日本委員にそれぞれ就任し、CO<sub>2</sub>吸収と酸性化に関するPICES内の議論を主導している。2020年度には、北太平洋域の酸性化進行状況を取りまとめたPICES特別報告書“Ocean Acidification and Deoxygenation in the North Pacific Ocean”および北太平洋域で使用されているpCO<sub>2</sub>、pH各センサーの特性および問題点について議論を行った結果の報告書である“Perspectives on in situ sensors for ocean acidification research”をそれぞれ公表した。

### (7) 政策への寄与・貢献

わが国が面する太平洋において高頻度かつ広範囲な pCO<sub>2</sub>等の観測を行うことで、太平洋域の海洋 CO<sub>2</sub> データ蓄積に貢献するとともに、pCO<sub>2</sub>の国際観測データベース SOCAT に迅速に観測データ提供することで全球海洋の海洋酸性化の進行を把握し、Global Carbon Project の年次レポートが評価する海洋 CO<sub>2</sub> 吸収量の見積もり精度の向上に貢献している。また、本レポートが IPCC 第6次報告書に引用されることでパリ協定が目指す気温上昇を 1.5 度に抑えるための人為起源 CO<sub>2</sub> 排出削減対策を考える上で重要な情報を提供する。さらに、近年ブルーカーボンとして脚光を浴びている沿岸域(特に東京湾や大阪湾などの内湾域)の海洋生物活動の寄与を貨物船観測から明らかにしたことで、例えばカーボンニュートラルを見据えて当該域の炭素固定能を拡充する方策を検討する際の有用なデータとして今後活用できる可能性が挙げられる。また、2020年に公表された「第2次気候変動影響評価報告書」に科学的知見を提供した。これは「環境研究・環境技術開発の推進戦略」(令和元年5月21日環境大臣決定)が「必要な研究」と定める「国際的な環境協力等にも資する地球温暖化現象の解明、予測、対策評価に焦点を当てた」研究に留まらず、統合的に観測・予測を行う枠組みの構築につながる。