

国際統合データベースによる海洋表層CO₂分圧と栄養塩類のマッピングに関する研究

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター	大気・海洋モニタリング推進室	中岡慎一郎
	同	林 一宏
	同	野中勇夫
	同	和田千里

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	小埜恒夫
-------	------------	------

平成26～28年度合計予算額 64,827千円

(うち、平成28年度当初予算額 19,667千円)

[要旨] 本課題は、太平洋域を中心とした大気と海洋表層における二酸化炭素分圧 (pCO₂) と海洋表層中栄養塩類の循環について把握するため観測・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) 国立環境研究所が国際的な海洋表層pCO₂統合データベースの太平洋の責任機関として観測データの品質管理活動に参画することで国際活動に貢献する。(2) pCO₂統合データベースを用いてニューラルネットワーク手法から全球のpCO₂分布推定を行うとともに、大気海洋間CO₂交換量に関する知見を得る。(3) 国内協力船の表層海水採取ネットワークを構築し、本ネットワークによって得られた試料の栄養塩分析を行うとともに、連続測定が可能な硝酸センサーの利用可能性について検討する。更に、採水試料から得られた栄養塩類濃度データに基づいて北太平洋域栄養塩マッピング手法を開発する。(4) 水産調査船によるpCO₂観測と表層採水観測を推進し、表層海水採取ネットワークの拡充を図る。本課題機関を通じて、(1)については国際統合データベースであるSOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas)で各国の研究機関から寄せられた太平洋域の観測データの品質管理を行った。(2)については全球のpCO₂分布推定を行い大気海洋間CO₂交換量について評価を行った。(3)については各研究機関等から提供された栄養塩観測データを統合して栄養塩の時空間分布推定を行った。更に連続硝酸塩計を日本—北米間を航行する協力商船New Century 2で運用し、得られた結果について解析した。(4)については水産研究・教育機構の漁業調査船によるpCO₂と連続硝酸塩計の観測から得られた結果を解析した。

[キーワード] 海洋表層CO₂分圧、栄養塩、分布推定、国際統合データベース、
大気海洋間CO₂交換量、年々変動

1. はじめに

海洋は地球上で最大の自然CO₂貯蔵庫であり、その貯蔵量は膨大である。海水中のCO₂が大気と十分にガス交換するには時定数が極めて大きいため、現代大気のCO₂濃度に対し非平衡状態にある。そのため海洋表層CO₂分圧 (pCO₂) の平均は大気CO₂分圧より低く、その分圧差が海洋CO₂吸収の駆動力になっている。その結果、海洋による人為起源CO₂吸収が毎年2 - 3PgC以上働いている

と見積もられ、大気CO₂濃度増加抑制に寄与している。この海洋CO₂吸収量の時空間変動を明らかにすることは、全球炭素循環モデルによる海洋吸収の将来予測の精度向上への貢献はもとより、地球温暖化が自然CO₂吸収源に与える影響を把握し海洋CO₂吸収の脆弱性を明らかにすることを通して、人為起源CO₂排出削減必要量の評価に関連する情報を与える重要な地球観測課題である。

国立環境研究所では、北太平洋においては1995年から、西太平洋においては2006年からpCO₂観測を20年間にわたっておおむね途切れることなく観測を継続しており、北太平洋中緯度以北のCO₂放出・吸収の平均分布とその時系列変化を明らかにしてきた。pCO₂は直接観測でしか測定できないパラメータであるので、観測網の維持・運用を国際間で分担・協力する体制が作られた。その中で日本は北太平洋と西太平洋での観測推進を求められており、長期にわたる気象庁の定線観測と国立環境研究所における定常観測体制は国際的に高く評価されている。

2007年からはUNESCO/IOCCP (International Ocean Carbon Coordination Project) のもとでSOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas) 計画が推進され、全球を対象に表層pCO₂データを客観的に集約統合し、国際的に流通させるシステムが構築された。本課題は、国立環境研究所の北太平洋・西太平洋の協力商船観測をサポートしSOCATへの観測データの迅速な登録を進めるとともに、太平洋域の観測を実施する他研究機関のデータを国際センターに登録あるいは登録支援するハブ機能を、国立環境研究所が果たすことを目的の一つとして提案された。太平洋域における海洋CO₂観測の推進と観測データの発信は、環太平洋地域に属するわが国に求められている地球観測におけるリーダーシップ活動で、それを国立環境研究所がリードすることに本課題が貢献している。SOCATは2011年9月に第1版、2013年6月に第2版、2015年9月に第3版、2016年9月には第4版の公開がなされており、国立環境研究所が北太平洋域の責任機関としてデータの品質確認を主導してきた。

また、SOCATの国際データベースから得られた全球pCO₂観測データを利用し、ニューラルネットワーク等の手法を用いて、全球のpCO₂分布推定を行うことも本課題の狙いの一つである。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pCO₂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pCO₂を非線形的に推定する手法であり、海域毎のCO₂吸収放出量を推算するインバース解析などの精度向上に貢献できる。さらに水産研究・教育機構とともに進めている観測ネットワーク構築のグローバル展開を目指すため太平洋の表層栄養塩観測ネットワークを立ち上げ、北太平洋の栄養塩時空間分布推定に着手した。

2. 海洋表層pCO₂観測データマネジメントと国際データベースSOCATへの貢献

(1) 研究目的

国立環境研究所では、北太平洋の日本～アメリカ間を約5～8週間で往復する商船 New Century 2 と、西部太平洋の日本～オーストラリア～ニュージーランド間を6週間で航行する商船 Trans Future 5 を利用して、下層大気と表層海洋のpCO₂観測を実施しており、データ確定後速やかに国立環境研究所が運営するデータベースサイト SOOP (<http://soop.jp>) に登録されている。またSOCATの新版作成時期には、確定済みデータセットをSOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas) に提出し、品質確認がなされた後に公開されている。

SOCATはUNESCO/IOC(国連教育科学文化機関/政府間海洋学委員会)とICSU/SCOR(国際科学会議/海洋研究委員会)が設立したIOCCP(International Ocean Carbon Coordination Project: 国際

海洋炭素共同プロジェクト)が2007年4月に立ち上げたプロジェクトである。そのねらいは各機関が測定したpCO₂データを統合し、SOCATが規定したガイドラインに基づいて品質確認を行うことである。さらに、基準を満たしたデータのみを公開し、1年～数年毎に更新を行いながら観測データとメタデータを長期安定的に確保しデータ利用促進を図ることである。国立環境研究所はSOCAT発足以来、北太平洋海域(北緯30度以北)の責任機関として国立環境研究所のみならず他研究機関によって観測された観測データの品質確認作業を行うこととなった。また2015年以降SOCATはGlobal Carbon Projectが発行する年次レポートGlobal Carbon Budgetに貢献するために、1年毎にデータを更新し、海洋CO₂吸収量推定に利用されている。

(2) 研究方法

国立環境研究所では、太平洋域で運航している民間協力商船の協力を得て、洋上大気と表層海洋のpCO₂観測を実施している。pCO₂データを高い精度で品質管理するために、大気圧・塩分・海面水温(船底水温)・平衡器水温・平衡器気圧・pCO₂の連続観測値に対して、精度の高いセンサー校正、独立測定法との比較などを活用し、可能な限り正確なデータ確定に努めている。現在までのところNew Century 2、Trans Future 5ともに2016年11月までのデータ確定を終えており、直ちに国立環境研究所が運営するデータベースSOOP (Ship Of Opportunity, <http://soop.jp>)にて公開している。

全球の表層海洋におけるCO₂の挙動把握を目的とするSOCATは、2016年9月に第4版が公開された。SOCATにおいて、国立環境研究所は自らの観測データを迅速に登録するだけでなく、北太平洋域の責任機関として各機関で観測されたデータの品質確認を行っている。今夏に予定されている第5版発行のため、2016年末までに各研究機関が登録した観測データについての品質確認を2017年3月末までに実施した。具体的には、新たに登録された北太平洋や太平洋赤道域、北大西洋の観測データについてその品質を保証するフラグ付けをSOCATが提供するLive Access Server (LAS)上で行った。この品質保証作業においては、他機関が発行する観測メタデータの不備で悪いフラグを付ける必要が生じた場合に観測代表者に連絡を取り不備の点を指摘するとともに、メタデータの整備をサポートすることでフラグの改善に繋げる活動を行った。

(3) 結果・考察

①国立環境研究所観測データの公開について

国立環境研究所では、独自のデータベースサイトとしてSOOPを運営し、観測データを一般に公開している。SOOPでデータを公開している協力商船舶は、Golden Wattle、Alligator Hope、Skaugran、Pyxis、Fujitrans World、Trans Future 1、Trans Future 5、New Century 2であり、現在も運行しているFujitrans World、New Century 2、Trans Future 5の観測データは随時追加更新を行っている。これらの船舶の中には大気CO₂観測データのみを観測しているものも含まれているが、大気CO₂観測データも全球炭素循環モデル検証などに有用であるので、本課題で得られたプログラム等の資源を利用して世界観測網の一環としての迅速なデータ公開を行っている。現在継続中の3隻の観測データについては、2016年までの観測データが公開済みとなった。

このように、国立環境研究所の定期協力商船によるCO₂観測(海洋・大気)は、北太平洋航路、西部太平洋航路、アジア航路のすべてで、本課題のもとで観測データの処理・確定の迅速化が進

み、船上センサーの一部に問題が生じて再較正や再計算が必要とならない限りは、半年以内のデータ公開が可能な体制となった。これは国内外の同種の観測を行っているプログラムの中で最も早いデータ公開であり、データ活用の利便性を高めている。これらの活動と長年にわたる観測が認められ、韓国麗水市で開かれた 2014 年北太平洋海洋科学機構 (PICES) 年次総会において PICES Ocean Monitoring Service Award を国立環境研究所が受賞した。さらに 2016 年には日本海洋学会春季大会において本課題の前代表者野尻幸宏弘前大学教授 (元国立環境研究所上級主席研究員) が宇田賞を受賞した。

②SOCAT 新版公開への貢献について

海洋の CO₂ データは、観測者によって表現や単位、データ処理において異なる手法が用いられることがあるため、SOCAT では計算手法を統一化して観測データの取扱いを容易に行えるようにしている。また SOCAT では、各国の研究者が合意した統一指針に基づき、Web 上のシステム LAS で品質確認を行えるよう、メタデータの確認や緯度経度情報の格子点毎のマッピング、各パラメータ間の散布図 (プロパティ-プロパティプロット)、2 隻以上の船舶が同一時期・同一海域で観測を行った際の観測データ比較 (クロスオーバーチェック) を行えるようになっており、そのサーバー管理と運用を NOAA/PMEL (アメリカ海洋大気庁/太平洋環境研究所) が担っている。一方、観測データの品質確認自体は、観測データの取り扱いに精通した責任機関に所属する研究者らが行っている。北緯 30 度以北の北太平洋における品質確認については、本課題研究代表者を責任者として国立環境研究所が担当しており、国内外の他機関のデータを含む品質確認を実施している。品質確認は、観測データとメタデータを評価対象として航海毎に行った。まず、海洋表層の CO₂ ほか、大気圧、塩分、海面水温、平衡器水温、平衡器気圧の時系列グラフを LAS で参照し、異常値がないか確認する。異常値が発見された場合、その数が 50 個以上であれば品質確認は保留となり、ノルウェーベルゲン大学を通じてデータ提供機関に改定を依頼する。次に、メタデータについて品質確認を行う。ここでは、基本的な測定項目に関する情報 (観測時期、観測地域、観測項目、観測方法、標準ガスの使用本数と濃度情報の明示有無、それぞれの観測装置の精度) について SOCAT の指針を満たしているか精査し、クルーズ毎に良い順から A、B、C、D、E、F、S、X のフラグ付けを行った。ガイドラインとは、(1) xCO₂ から fCO₂ を計算しているか (pH、アルカリ度、全炭酸などのパラメータから fCO₂ を求めていないか)、(2) 連続的な CO₂ 観測を行っているか、(3) 検出は平衡器と NDIR (赤外分光法) や GC (ガスクロマトグラフ法)、あるいは CRDS (キャビティリングダウン法) により行われているか、(4) 校正に使用する標準ガスが 0ppm 以外に 2 種類以上用いられており、それらが WMO (世界気象機関) トレーサブルか、(5) 平衡器水温の測定精度が 0.05°C 以内か、(6) 海面水温の誤差範囲が 0.05°C 以内か、(7) 平衡器気圧の誤差範囲が 2hPa 以内か、という 7 つの要件である。これらの要件は、fCO₂ の測定誤差が 2μatm 以下であることを保証するための基準であると言える。観測データに問題がなく (異常値が 50 個未満)、メタデータが完全で、統一基準をすべて満たしていればフラグ B となり、データ統合に最もふさわしいレベルとされた。統一基準を全ては満たさないもののメタデータ・観測データともに問題がなければ測定誤差は 5μatm 以下であると評価してフラグ C、統一基準とメタデータを全ては満たさないが観測データに問題がなければ測定誤差は 5μatm 以下としてフラグ D、ブイなどで観測したセンサータイプの測定データは測定誤差が 10μatm 以下であると評価してフラグ E、観測データに不備があればフラグ F (Failure)、観測データに不備があるがデータを更新する予定がある

ならフラグ S (Suspend)、観測データが他の航海データと重複しているならフラグ X (exclude) とされる。フラグ A は、同時期に近い場所で観測された（クロスオーバー）データがあり、品質確認済みのデータ同士で観測データの相互比較が行えて妥当さが確認された場合に付与されている。またフラグ E については、センサータイプの観測データを SOCAT に取り込むために Ver. 4 から新たに取り入れられたフラグである。

本課題代表者は SOCAT 関係者と国際学会の開催に合わせ会合を重ねており、新版が披露された IMBER Open Science Conference（2014年6月、ノルウェーベルゲン市）や SOLAS Open Science Conference（2015年9月、ドイツキール市）では、SOCAT に今後盛り込むべき機能やセンサー向けフラグの導入方針について議論するなど緊密な連携を維持した。

国立環境研究所では今年度 58 航海、今課題期間中では 242 航海の観測データを SOCAT に提出した（図 1）。さらに品質確認は 2017 年 3 月 31 日までに完了させることが各海域の責任機関に求められており、国立環境研究所では本課題の下でこれに対応し、今年度は北太平洋を航海観測したデータ計 233 航海分について品質確認作業を実施した（図 2）。国立環境研究所が第 5 版向けに提出した航海データは全航海数の約 6%にあたり、また品質確認作業を行った航海データ数は全航海数の約 28%にあたる。品質確認作業では、観測データについて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、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することができた。国立環境研究所がこれまでに提供した 648 航海のデータについては、フラグ A が 94 航海、フラグ B が 523 航海、フラグ C が 17 航海、フラグ D が 2 航海、フラグ S が 11 航海、フラグ X が 1 航海であった。SOCAT 全体では、フラグ A と B は 2688 航海分が収録されているが、そのうちの 23.0%にあたる 617 航海が国立環境研究所の観測データであった。この割合は昨年公開された Ver. 4 のフラグ A, B に占める割合（25.2%）よりも低下したが、これは SOCAT の啓蒙活動によって各機関が実施する pCO₂ 観測の品質が上がってきたことを示唆している。国立環境研究所は、高品質の pCO₂ 観測を維持するだけでなく SOCAT 品質確認を精力的に実施しており、北太平洋域のハブ機関として果たす役割は引き続き大きい。

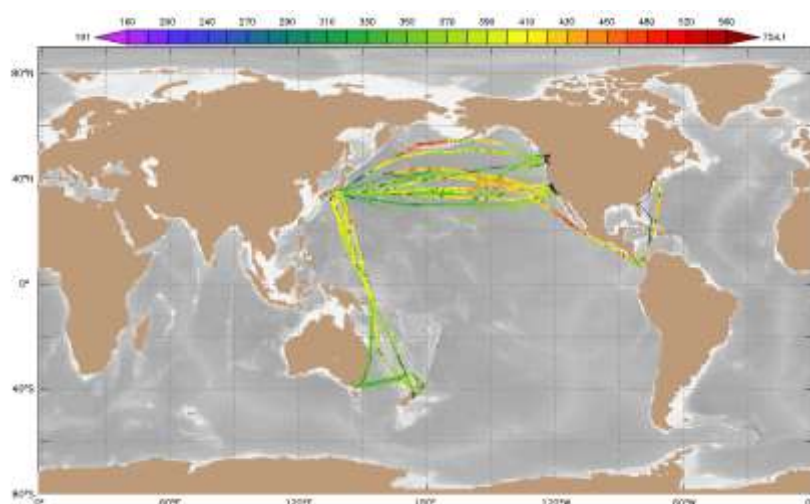


図 1 国立環境研究所が昨年度 SOCAT に提出した pCO₂ 観測データ（計 58 航海分）の分布。航路上の色の違いは pCO₂ 観測値（ μatm ）を表す。

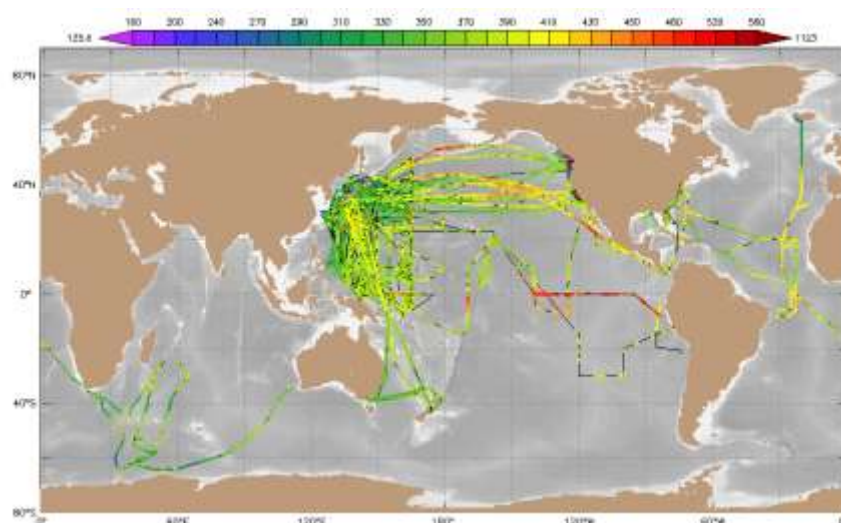


図2 国立環境研究所が新版（Ver.5）向けに品質確認を実施した $p\text{CO}_2$ 観測データ（計 233 航海分）の分布。航路上の色の違いは $p\text{CO}_2$ の観測値（ μatm ）を表す。

3. ニューラルネットワーク法による海洋表層 $p\text{CO}_2$ マッピングのグローバル化

(1) 研究目的

ニューラルネットワークは非線形的な現象を扱うのに優れた手法であり、衛星観測や再解析モデルなどで海盆分布が得られる水温・塩分・クロロフィル a 濃度等と $p\text{CO}_2$ 観測値の計算アルゴリズムに基づいた経験学習によって、海盆スケールの $p\text{CO}_2$ 時空間分布推定を可能にする。

本課題では、平成27年度までに水温・塩分・クロロフィル濃度などの生物物理化学パラメータだけでなく緯度、経度、時間情報といった時空間パラメータを採用し、誤差逆伝搬（BP）法と呼ばれるニューラルネットワーク手法の一種を用いることによって全球 $p\text{CO}_2$ 分布を推定し、大気海洋間 CO_2 交換量について評価を行った。そこで課題最終年度となる平成28年度では、これまで評価を行ったBP法による推定の他に、平成23年度から平成25年度に実施した先行課題で評価したニューラルネットワーク手法の別手法である自己組織化マップ（SOM）手法（Nakaoka et al., 2013）¹⁾と新たにサポートベクターマシン（SVM）手法と呼ばれる手法を用いて $p\text{CO}_2$ 分布を推定し、それぞれの手法の違いによる $p\text{CO}_2$ 分布や CO_2 交換量の違いについて評価を行った。

(2) 研究方法

ニューラルネットワークは、その名前の通り人間の脳の機能にヒントを得て開発された手法である。本技術でニューロンと呼ばれる複数のセルに情報を入力することによって予めパラメータ間の関係が明らかでない場合について、その関係を観測結果から経験的手法により導くことが可能である。そのアルゴリズムにはいくつかの種類が存在するが、本研究においてはBP法とSOM法、SVM法と呼ばれるアルゴリズムを用いている。昨年度まで本課題で使用していたBP法は、学習パラメータと CO_2 観測値の関係を16個から32個のニューロンが関数として学習することで連続的な関係が得られる。一方、SOM法は一個のニューロンが一つの海況と一つの CO_2 値をマッチングするためBP法よりも多くのニューロンを必要とする。本課題では2万個のニューロンを用いて全球

のCO₂分布を推定した。またSVM法は学習データ（ここでは海況とCO₂）の中で最も他クラスに近い位置にいるもの（これをサポートベクトルと呼ぶ）を基準として、そのユークリッド距離が最も大きく（マージン最大化）なる位置に識別境界を設定する手法である。これによって海況を複数のパターンに分類し、その際のpCO₂値を割り当てることが可能となる。いずれの手法を用いても学習データとなるパラメータとして海面水温(SST)、海面塩分(SSS)及びクロロフィル濃度(CHL)の再解析データセットと緯度(lat)経度(lon)情報、観測月(mon)情報と、前述のSOCATデータベースから取得した全球のpCO₂観測値を、それぞれの手法を用いて関連付け、全球のpCO₂分布を推定する。

$$pCO_2 = \alpha \cdot t + F(CMON, SMON, LAT, CLON, SLON, SST, SSS, CHL), \quad (1)$$

ここで α は海洋のCO₂増加率であり、Zeng et al. (2014)²⁾の結果から1.5 $\mu\text{atm yr}^{-1}$ であるとした。また月、緯度、経度をそれぞれmon, lat, lonで表現すると、 $CMON = \cos(\pi/6 \cdot \text{mon})$, $SMON = \sin(\pi/6 \cdot \text{mon})$, $CLON = \cos(\pi/180 \cdot \text{lon})$, $SLON = \sin(\pi/180 \cdot \text{lon})$ である。また再現期間は1990年から2013年までとした。

また得られたpCO₂分布から大気海洋間CO₂フラックス分布を算出し、全球の大気海洋間CO₂交換量について評価を行った。

大気-海洋間CO₂フラックス f は、風速の関数であるガス交換係数を k 、溶解度を K_0 、海洋表層と大気のCO₂分圧をそれぞれ pCO_2^{sw} 、 pCO_2^{air} 、その分圧差を ΔpCO_2 とすると次式のように表すことができる。

$$f = k \cdot K_0 \cdot (pCO_2^{\text{sw}} - pCO_2^{\text{air}}) = k \cdot K_0 \cdot \Delta pCO_2, \quad (2)$$

式(2)から明らかなように、 f は ΔpCO_2 によって変化する。ここで、 k で用いる風速データはヨーロッパ中期予報センター European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)の再解析データを使用している。また pCO_2^{air} はNOAAが提供するGlobalView-CO₂データを利用している。 pCO_2^{sw} は海面の水温や混合層深度、植物プランクトンによる光合成活動によって時空間的に大きく変化する一方、外洋上における pCO_2^{air} の変化は小さいため、フラックス分布は pCO_2^{sw} 分布によって決まると言ってもよい。そのため全球の大気-海洋間CO₂交換量を見積もるために pCO_2^{sw} の時空間分布を把握することが求められており、本課題でそれに対応している。

(3) 結果・考察

①pCO₂分布の時間変化

図3にそれぞれの推定手法による2005年2月、5月、8月と11月の全球pCO₂分布を示している。それぞれの手法による分布は類似性が高いものの、細かな点で違いもあり手法の違いによるものと考えられる。例えば北太平洋の中緯度帯のpCO₂は2月には低下し8月には高くなる様子はすべての手法で再現されている。さらに太平洋赤道域東部海域では一年を通してpCO₂が高い様子が再現できている。一方手法毎の分布を見ていくと、SOM法による分布は他の手法による分布に比べて不均質に見える。これはSOM法においては一つのニューロンは一つの海況とセットになるpCO₂値しか保持できず、本研究においては20000個のニューロンを用いているため、再現できるpCO₂のパターンは20000通りと不連続になるためである。それとは対照的にBP法やSVM法では海況とpCO₂

の関係は連続的な関係として扱われるため、得られる分布は滑らかに見える。しかし、いずれの推定手法においても推定は観測結果に基づいて行われているため、観測値と推定値との差の標準誤差に大きな違いは見られなかった。

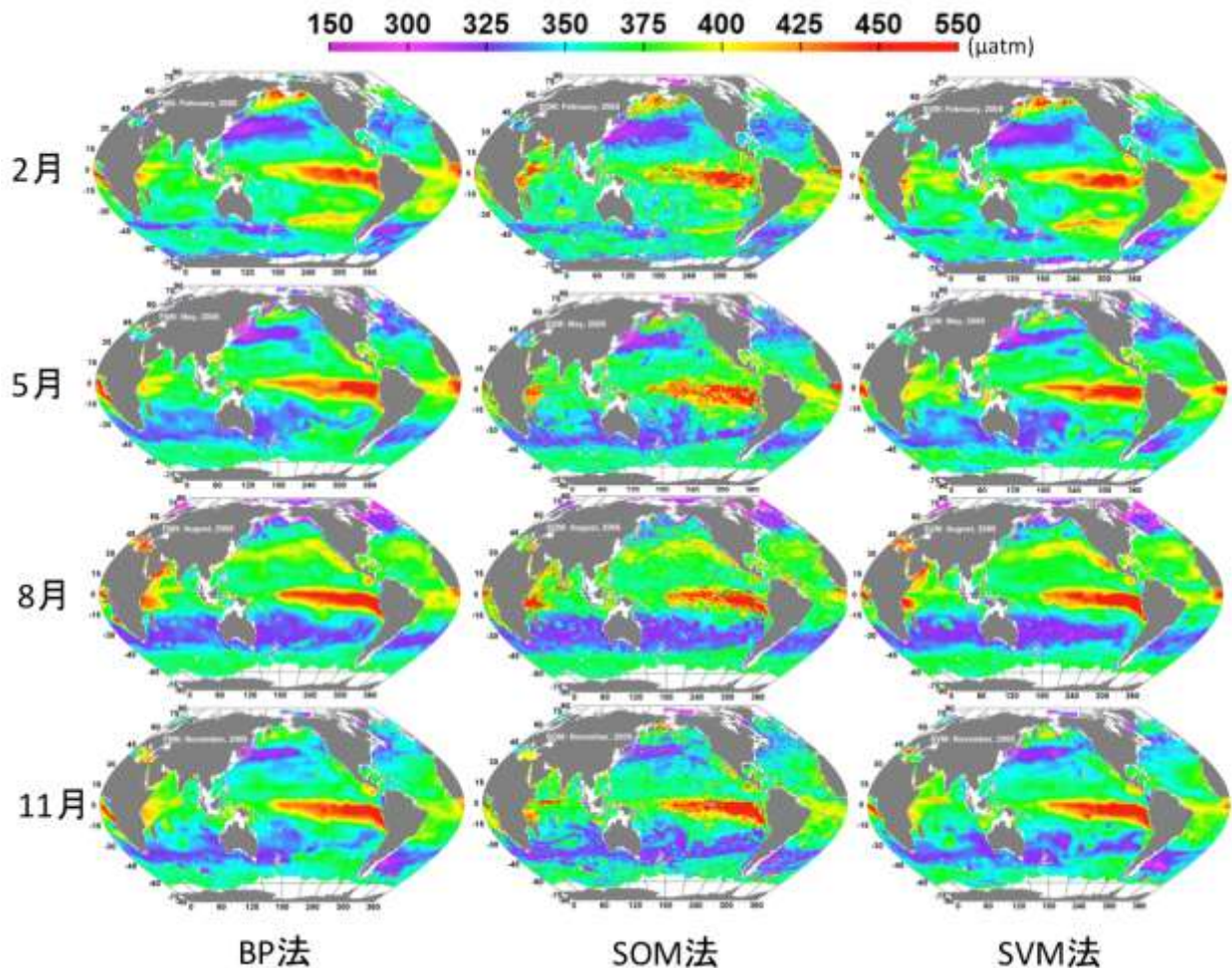


図3 BP法（左）、SOM法（中央）、SVM法による2005年2月、5月、8月、11月の全球 $p\text{CO}_2$ 分布（Zeng et al., 2017³より）

②大気海洋間 CO_2 フラックス分布と、全球海洋 CO_2 吸収量の年々変動

図4は1990年から2015年までの全球大気海洋間 CO_2 交換量の年々変化を示している。いずれの手法を用いても交換量は1990年代には $-2.25 \sim -2.6 \text{ PgC yr}^{-1}$ 程度で推移し、2000年以降急激に低下（海洋の CO_2 吸収量としてみた場合には増加）しており、近年では -3.5 PgC yr^{-1} を下回っている。このことは3つの異なる推定手法で得られた $p\text{CO}_2$ 分布の違いによる CO_2 交換量への影響は少ないということの意味している。一方、これらの見積もりについてはWanninkhof et al. (2013)⁴やQuéré et al. (2016)⁵と比較すると、海洋の CO_2 吸収量とその年々変動の振幅を過大に評価している可能性がある。 $p\text{CO}_2$ の推定値と観測値に有意なバイアスが見られないことを考えると、これは風速データとして使用したECMWFのデータセットと他研究で使用されている風速データセットに違いがあるためであると考えられる。そのため、定量的な議論についてはさらなる検討が必

要である。そこで海洋 CO₂ 吸収量の年々傾向について見てみると、2002 年頃から 2014 年末までの間に海洋による吸収量が増加していることがわかる。これは $p\text{CO}_2^{\text{sea}}$ の年々増加傾向が $p\text{CO}_2^{\text{air}}$ の増加傾向と比較して小さいため、大気海洋間 CO₂ 分圧差 ($\Delta p\text{CO}_2$) が増大し、CO₂ 交換が活発化したためだと考えられる。また 20 世紀最大のエルニーニョが発生したといわれる 1998 年頃には海洋による CO₂ 吸収量が増加し、その後のラニーニャ期には CO₂ 吸収量が低下している。これはエルニーニョによって主としてペルー沖の湧昇が抑えられたことで深層から CO₂ の豊富な水塊が表層へ輸送されず、また同海域で卓越している貿易風が弱まったことでの海洋から大気への CO₂ 放出が抑制され、その後のラニーニャによって今度は逆に大気への CO₂ 放出が促進されたためにこういった変動が引き起こされたと考えられる。

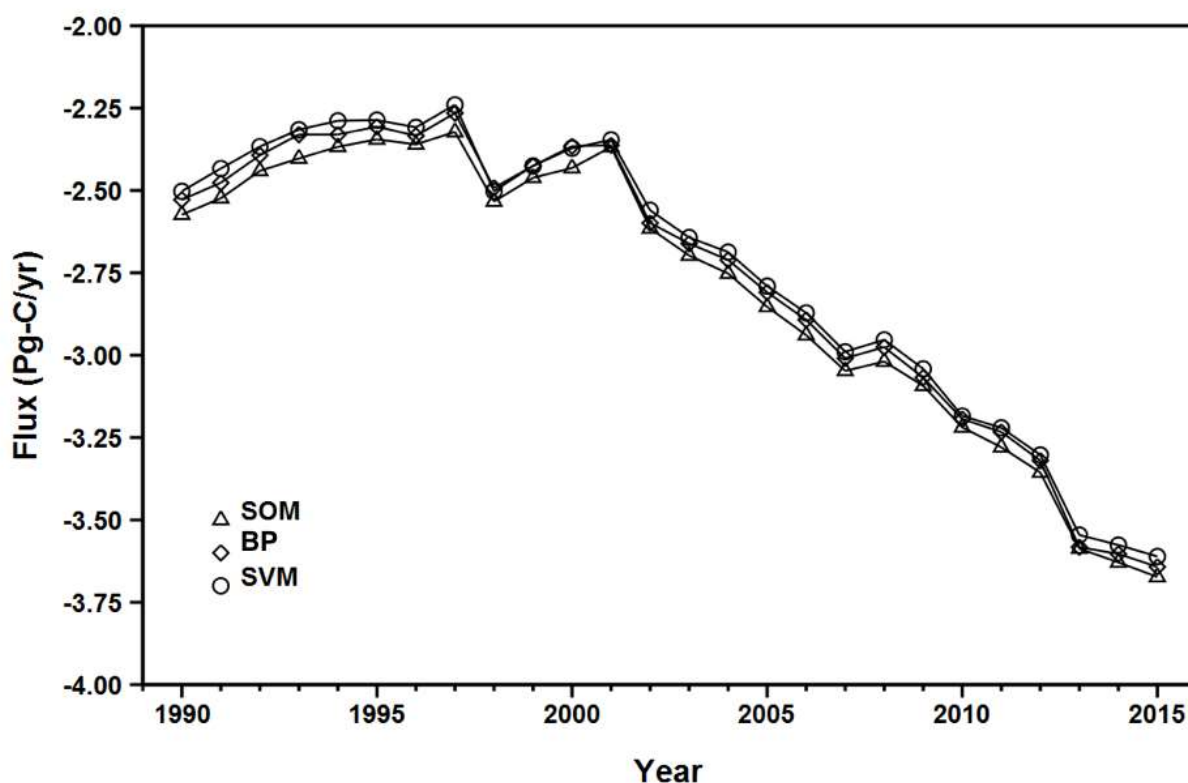


図4 それぞれの $p\text{CO}_2$ 推定手法から計算された大気海洋間CO₂交換量の時間変化（1990年～2014年）。負の値は大気から海洋によるCO₂吸収を示す (Zeng et al. (2017)³より)。

4. 太平洋の表層栄養塩観測ネットワークとデータ利用

(1) 研究目的

海洋における生物地球化学循環は、栄養塩（リン酸塩、硝酸塩、ケイ酸塩）に大きく依存する。これは、栄養塩が一次生産のトレーサーとしての役割を持ち、しばしば生物学的プロセスの限定要因として機能するからである。栄養塩濃度は、季節や空間によって著しく変化し、海洋の生物学的活性の時空間変動を引き起こす(e.g., Wong et al., 2002⁶)。北太平洋のいくつかの海域では、栄養塩の年々変動がエルニーニョ現象や太平洋十年規模振動 (PDO) によく対応することも分かっている(Yasunaka et al., 2014⁷)。

本課題では太平洋域の栄養塩物質循環を詳細に把握することを目的に、国内の観測船のうち表層海水を研究用に連続吸引する（研究用海水）設備のある船舶のネットワーク化を図り、表層海水分析用試料採取を依頼して、環境研に集めて分析する。また、表層海水採取の持ち帰り分析による観測だけでは空間的に密なデータが得にくいいため、紫外線吸収による連続硝酸計を利用し協力商船プラットフォームでの栄養塩濃度連続測定の可能性を検討する。また、表層海水サンプリングネットワークを海外の研究機関にも拡張し統合データベースを作成するとともに、北太平洋の栄養塩分布推定手法を開発する。

（２） 研究方法

①太平洋の表層栄養塩観測ネットワーク構築と硝酸センサーによる連続観測

本課題による表層観測サンプリングネットワーク拡充の一環として水産研究・教育機構の漁業調査船「若鷹丸」と「蒼鷹丸」が平成26年度から、北海道大学の練習船「おしよろ丸」が平成27年度から本格的な表層サンプリングを開始した。また栄養塩濃度の航行中連続測定の可能性を調べるため、協力商船のNew Century 2に連続硝酸計 TriOS 社製「ProPS」あるいは同社製「OPUS」を設置した。

日本と北米を結ぶ協力商船のNew Century 2の連続海水モニタリングシステムに連続硝酸塩計を設置し観測を行った。本研究で用いた連続硝酸塩計は TriOS 社製「ProPS」と同社製「OPUS」である。OPUSはProPSの後継機でありProPSとほぼ同じ設計であるが、ProPSが重水素光源なのに対し、キセノン光源に変わるなどの改善が行われており、OPUSの方がProPSより感度が高く光源寿命が長くなることが期待される。すべての連続硝酸塩計は観測光路幅を2cm、データのサンプリング間隔を10分おきとした。表層海水モニタリングシステムは、他にpCO₂、塩分、水温、pHと蛍光光度（Chlorophyll-*a*）を同時に観測しており、さらに乗船技術員により1日約3回の頻度で栄養塩分析用の表層海水の採取が行なわれ、そのサンプルは冷凍保存し、陸上実験室で海水の栄養塩分析の標準的な方法である比色法を用いて硝酸塩、亜硝酸塩、リン酸塩、珪酸塩の測定を行っている。

予備実験として、臭素イオンの干渉量を見積もるため、硝酸塩濃度がほぼゼロ(<0.02μMNO₃)であるゼロ海水（塩分35.24）と超純水(<18MΩ)を用いて異なる塩分の海水を作成し、それぞれの海水の水温を5~30°Cの間で変化させて紫外線吸収スペクトルを測定し、Sakamoto et al. (2009)⁸⁾同様に217-240 nmのスペクトルを硝酸塩のスペクトルとして抽出しその積分値と各塩分における水温の関係式を作成した。さらに、それらの式の傾きと切片が塩分に関する関数であると考え関係式を作成し、これらをまとめて、塩分と水温から臭素イオンの干渉量を見積もる式を作成した。

観測で得られた連続硝酸塩計の吸光スペクトルデータは同時にモニターしている水温塩分計(Seabird Scientific 社製 SBE21)で得られる値を用いて臭素イオンの干渉量を見積もりその干渉の補正を行った。補正された紫外線吸光度は豊橋入港中に硝酸標準溶液の測定により作成した検量線を用いて硝酸塩濃度に換算した。

② 最適内挿法による北太平洋の表層栄養塩観測分布

本課題では、昨年度既存の栄養塩データベースを統合した栄養塩時空間分布再現手法を開発し、10°N-60°N、120°E-90°W、期間は2001年1月から2010年12月、時間解像度はひと月毎、空間解像度は1度×1度の分布再現を先行して実施した。そこで今年度は北太平洋域の栄養塩分布推定

については、統合観測データベースを用いた推定を昨年先行して実施したため今年度はデータの充実を図り、最適内挿法による時空間補間を行った。

最適内挿法は、SOM 手法とは違い分布再現に水温や塩分などの物理化学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化を検出することが可能となる。そこで本サブテーマにおいて、最適内挿法を用いて北太平洋全域における表層栄養塩（硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩）の推定を試みている。解析に使用する表層栄養塩のデータは、国立環境研究所、カナダ海洋科学研究所（IOS）、海洋研究開発機構（JAMSTEC）、Pacific Ocean interior carbon (PACIFICA)、World Ocean Database 2013 (WOD13) により 1961 年から 2012 年までに観測された約 82,000 サンプルを 1 度×1 度の解像度で月平均したものを用いた。図 5 は栄養塩観測分布の一例として、

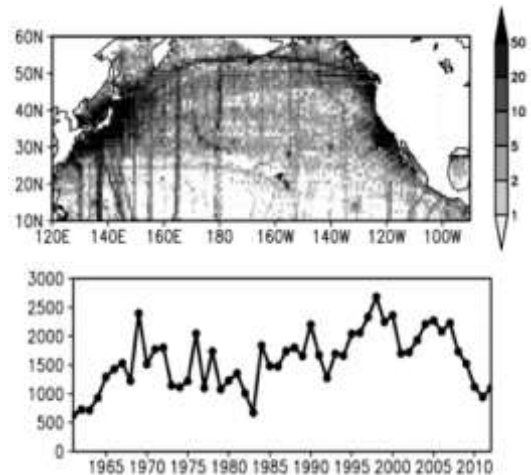


図 5 リン酸塩濃度の観測値の空間分布（上）と時間分布（下）

リン酸塩濃度観測地の空間分布と時間分布を表している。空間分布を見ると日本やアメリカ西海岸周辺で多く観測がなされていることが分かり、日本、アメリカ、カナダなどの先進国が歴史的に海洋化学観測を実施してきた様子がわかる。また南北に沿って何本か観測頻度の高い海域が見られる。これは World Ocean Circulation Experiment (WOCE、世界海洋循環実験計画) と呼ばれるプロジェクトで繰り返し観測がなされている海域で、代表的な測線としては気象庁が実施している東経 137 度と東経 165 度の定期観測がある。観測データについては、統計的な品質管理 (3 σ チェック) をした後、ひと月毎緯度 1 度×経度 1 度に格子化した。次に月平均気候値から、時間、緯度、経度方向の自己ラグ相関を計算し、自己相関スケール (3 か月、東西 23 度、南北 20 度) と SN 比 (1.5) を求めた。その後 Yasunaka et al. (2014)⁷⁾ による 10 年平均場を第 1 推定値とした最適内挿法により、月 1 度×1 度格子の推定値と内挿誤差を計算した。本研究では、絶対値が国立環境研究所による測定の実検出限界以下であり、かつ、内挿誤差が 0.7 を下回る推定値を採用した。

(3) 結果と考察

①太平洋の表層栄養塩観測ネットワーク構築と貨物船観測による連続硝酸計測定

本課題では、太平洋域における表層観測ネットワークの構築を進めており、北海道大学と水産研究・教育機構が所有する実習船や漁業調査船が実施する観測航海時に採水を依頼し、得られた海水試料を国立環境研究所で分析することによりネットワークの拡充に努めてきた。図6は本課題で得られた栄養塩観測点の分布を課題年度ごとに示したものである。国立環境研究所による採水観測は年間1260～1400試料を得ているのに対して、水産研究・教育機構は年間400～550、北海道大学は年間50～100の試料を本課題で得て国立環境研究所で分析することができた(表1)。また図を見ても明らかなように、国立環境研究所による採水観測は北太平洋と南北西太平洋で行われているのに対して、北海道大学と水産研究・教育機構の観測点は日本沿岸に多く分布している。すなわち本課題によって沿岸域と外洋の変動を理解する上で重要な試料を得ることができたとい

える。

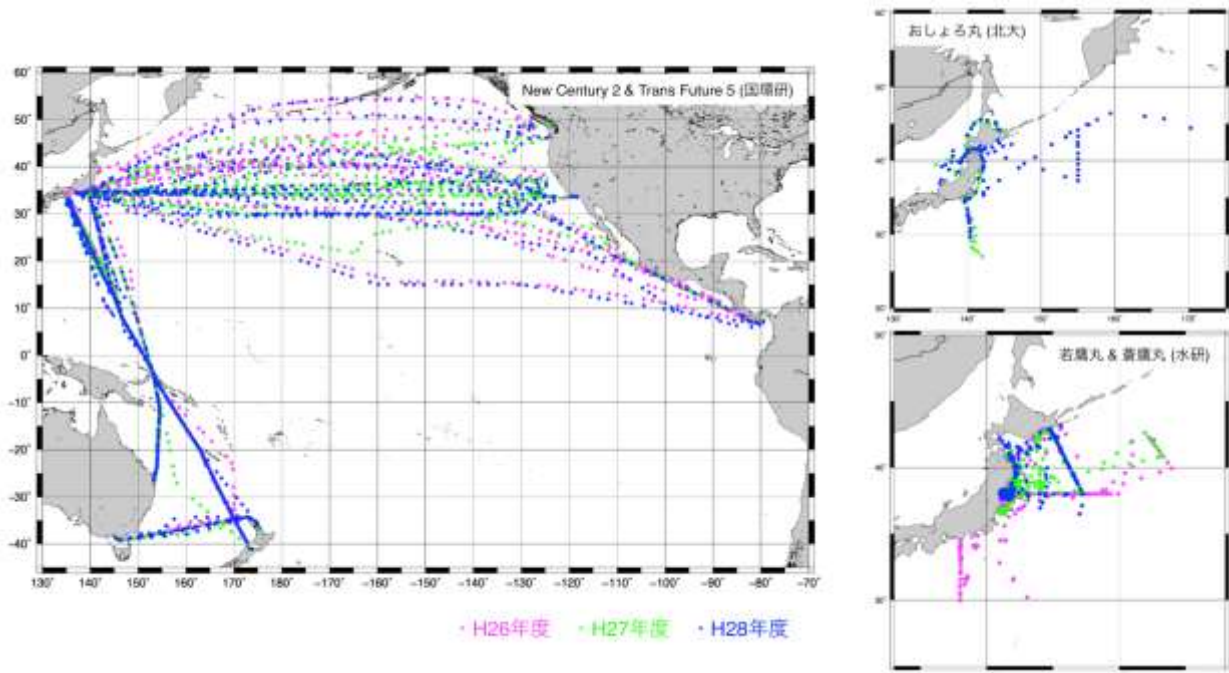


図6 本課題で得られた国立環境研究所（左）、北海道大学（右上）、水産研究・教育機構（右下）の船舶観測による栄養塩採水分布。色の違いは課題期間中の観測年度を示す。

表1 本課題で得られた各研究機関による表層栄養塩観測点数

	国立環境研究所	水産研究・教育機構	北海道大学
H26年度	1391	550	-
H27年度	1284	471	52
H28年度	1260	約400（推計）	92

2016年11月に米国サンディエゴで開かれた北太平洋海洋科学機構（PICES）の炭素気候部会（CC-S）において、課題代表者である中岡と分担者である小埜は日本国内での栄養塩採水ネットワークの拡充について説明し、出席した各国の研究者とともに太平洋を中心とする国際データベースの必要性について議論を行った。現在栄養塩の観測データは一元的な管理がなされておらずWorld Ocean Data（WOD）やGlobal Ocean Data Analysis Project（GLODAP）などに他の化学成分のデータとともに集められているため、表層栄養塩データの一元的な管理体制構築という観点では一定の理解を得ることができた。しかしながら、新たなデータベースを作ることに関しては、これまで以上にデータが散在するとの懸念が提起されるなどしたため、今後もPICESで継続して検討・議論を深めていくこととした。なお、本課題代表者である中岡はPICES CC-Sの委員に推薦され、現在議長である課題分担者の小埜とともにCC-Sでの今後の議論をリードしていくこととなった。

各塩分における 217-240 nm の紫外線吸光度の積算値と水温の関係を図 7(a)に示した。Zielinski et al. (2007)⁹⁾ の結果と同様に各塩分において紫外線吸光度は水温 5-30°Cにおいて直線関係が得られた。さらに各塩分の関係式の傾きと切片について塩分との関係は図 7(b)、(c)に示されるように直線関係にあり、これらの関係式を最小二乗法により求め、その結果、塩分・水温から臭素イオンの干渉量の式を得ることが出来た。本研究では 3 台の連続硝酸塩計 (ProPS 2 台、OPUS 1 台) を用いて運用を行っており、それぞれについて実験を行ったが装置ごとに異なる干渉補正式を必要とすることがわかっている。これは光源の違い、分光器の感度の違いなどが原因と考えられる。

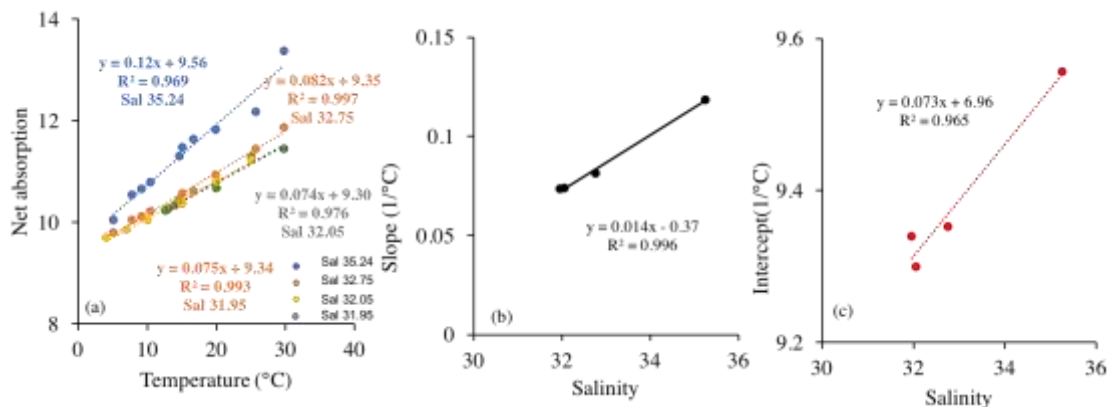


図 7 (a)各塩分における水温と吸光度の関係、 (b)各塩分の水温と吸光度の関係式の傾きと塩分の関係、 (c)塩分と切片の関係

干渉の補正を行い得られる硝酸塩濃度の精度の検証を行うために表層海水サンプリングにより得られた海水の比色法で測定された硝酸塩濃度と比較を行った(図 8(a))。連続硝酸塩計の値と比色法による硝酸塩の間には強い相関があった($r^2=0.827$)。しかし、その傾き(1.29)と切片(1.21)から連続硝酸塩計で得られた濃度は系統的な正のバイアスがあることが示された。傾きが 1 より大きくなる原因として、センサー受光部への生物付着や汚れなどによる光路妨害により紫外線吸光度が上昇し、連続硝酸塩計の見かけ上の硝酸塩濃度が比色法の値より大きくなるため傾きが 1 より大きくなったと考えられた。切片が大きくなった原因として、連続硝酸塩計の値が超純水で調整した硝酸塩標準液を用いて作成した検量線で濃度を計算しているため、実際の海水に含まれる硝酸塩や臭素イオン以外の共存成分の紫外線吸収の分ズレが生じており、切片は海水の共存成分によるズレを示していると考えられた。これらの影響を取り除くため、連続硝酸塩計のデータを一日毎に表層海水サンプリングにより得られた海水の比色法の硝酸塩値を用いてドリフトの補正を行った。補正に用いた値を除いたもので再度比色法との比較を行い、その結果を図 8(b)に示した。この処理を行うことにより、連続硝酸塩計と比色法で得られた硝酸塩の関係は傾きが 0.95 付近、切片が 0.1 付近に改善した。この結果から連続硝酸塩計で得られるデータは臭素イオンの干渉を補正した後に一日毎に比色法で得られた硝酸塩濃度でドリフトの補正を行う計算方法を用いることで十分運用可能であると考えた。

2014 年 9 月の連続硝酸塩計の運用開始から 2016 年 11 月までに観測を行った地点から河川・沿岸水の影響を受ける大陸棚域を除いた航跡を図 9 に示した。図に示されるように、New Century 2 は北太平洋の広い範囲を航走しており表層の硝酸塩の観測に成功している。連続硝酸塩計の運

用状況を表 2 に示す。現在までに本測定により 13 万点近いデータを採取し、そのうち検出限界以下及び異常値を取り除いた有効なデータは 5 万以上となり全観測値の内 43%のデータが使用可能データである (表 2)。これは表層海水試料の比色法による測定で硝酸塩が検出される割合の 45%と近い値となり、この割合を単純に観測のエリアカバー率と考えると、感度の低いとされる連続硝酸塩計でも比色法と同程度の硝酸塩の変動のモニタリングが可能であると考えられる。

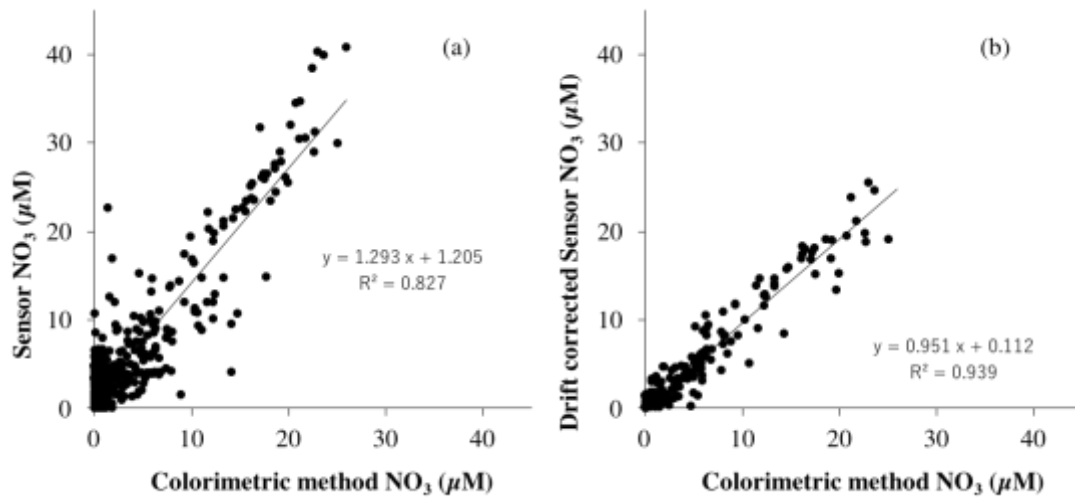


図 8 (a)比色法と連続硝酸塩計の硝酸値の比較 (b)比色法の値を用いてドリフトを補正した連続硝酸塩計の値と比色法の比較 (補正に使用したデータは除く)。

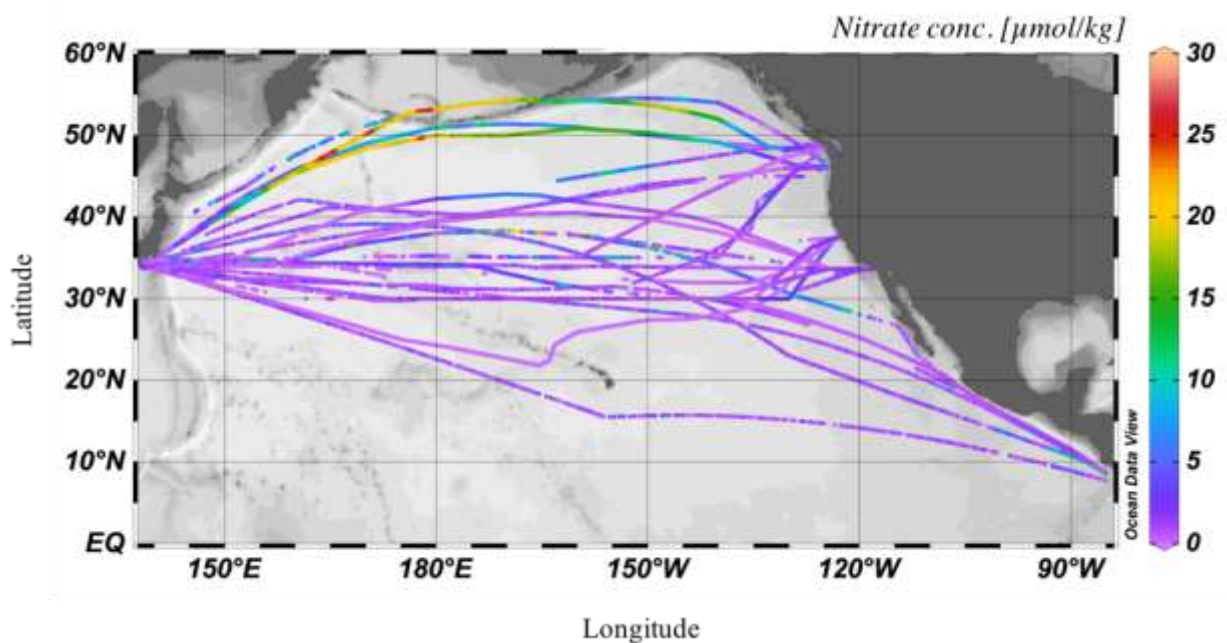


図 9 2016 年 11 月までに得られた硝酸塩の濃度分布。(沿岸と大西洋は除く)

表 2 連続硝酸塩計の運用状況

ID	East-bound		Destination port	West-bound		Sensor ID	Sample number	
	Dep. date from Toyohashi	Arr. Date at U.S.A.		Dep. Date from the U.S.A	Return date		Sensor n=	Colorimetric n=
NC112	Sep.10, 2014	Sep.24, 2014	Portland	Sep.25, 2014	Oct.07, 2014	ProPS#1	2300	57
NC113	Oct.11, 2014	Oct.27, 2014	Benicia	Oct.27, 2014	Nov.09, 2014	ProPS#1	1255	25
NC114	Nov.14, 2014	Dec.12, 2014	Newark	Dec.12, 2014	Jan.12, 2015	ProPS#1	4967	30
NC115	Jan.17, 2015	Feb.14, 2015	Newark	Feb.14, 2015	Mar.13, 2015	ProPS#1	5762	60
NC119	Jun.23, 2015	Jul.07, 2015	Portland	Jul.07, 2015	Jul.20, 2015	ProPS#2	2303	26
NC121	Aug.26, 2015	Sep.24, 2015	Newark	Sep.24, 2015	Oct.23, 2015	ProPS#1	6493	8
NC122	Oct.26, 2015	Nov.10, 2015	Vancouver	Nov.11, 2015	Nov.29, 2015	ProPS#2	2478	46
NC123	Dec.16, 2015	Jan.02, 2016	Benicia	Jan.03, 2016	Jan.19, 2016	ProPS#2	4063	37
NC124	Jan.25, 2016	Feb.10, 2016	Benicia	Feb.11, 2016	Feb.25, 2016	ProPS#2	3879	40
NC125	Mar.02, 2016	Mar.18, 2016	Benicia	Mar.19, 2016	Apr.02, 2016	OPUS	3931	46
NC126	Apr.12, 2016	May 1, 2016	Portland	May 1, 2016	May 13, 2016	OPUS	3252	57
NC127	May 16, 2016	Jun.08, 2016	Westminster	Jun.08, 2016	Jun.21, 2016	OPUS	3269	38
NC128	Jun.25, 2016	Jul.21, 2016	Newark	Jul.22, 2016	Aug.19, 2016	OPUS	under processing	
NC129	Aug.26, 2016	Sep.10, 2016	Benicia	Sep.11, 2016	Sep.23, 2016	OPUS	3969	34
NC130	Sep.28, 2016	Oct.13, 2016	Benicia	Oct.14, 2016	Oct.28, 2016	OPUS	3793	49
NC131	Oct.31, 2016	Nov.16, 2016	Benicia	Nov.17, 2016	Nov.30, 2016	OPUS	under processing	

図 10(a)は、113 次航海往路(East-bound)における連続硝酸塩計と表層海水の比色法で得られた硝酸塩濃度の経度分布である。本航海では栄養塩濃度が高いと考えられる亜寒帯循環域と貧栄養な亜熱帯循環域を通過している。日本を出港後最北点(42°N)である 162°E に向かい硝酸塩濃度は上昇し最大値 14.0 μ M となり東進するに連れて減少し、160°W 以東では検出限界以下のデータが多くなった。比色法による硝酸塩 (図 10(a)) も連続硝酸塩計と同様に 165°E を最大(6.6 μ M)に東進するに連れて濃度が減少した。160°W 以東で比色法による栄養塩分析用の海水試料を 22 サンプル採取したが、硝酸塩濃度が検出されたのは 4 サンプルのみであり、165°W–120°W 間は硝酸塩の低い亜熱帯循環域であったことがわかる。176–177°E 付近で硝酸塩濃度は 5.3 μ M まで上昇し(図 10(a))、同時に塩分が 34.2 から 33.6 に水温が 16.2°C から 14.3°C に下がった(図 10(b))。この海域において pCO₂ は 345 μ atm で大きな変動を示さなかったことから鉛直混合による硝酸塩の供給ではなく、低温低塩分を特徴とする北太平洋亜寒帯域の表層水 (Favorite et al. 1976¹⁰) の移流により硝酸塩濃度が高くなったと予想された。本航海で連続硝酸塩計による硝酸塩の最大値は、14.0 μ M であったが、表層海水のサンプリングの間に最大となる海域を通過しているため最大値は 6.6 μ M となり表層の硝酸塩量を少なく見積もっていることがわかる。

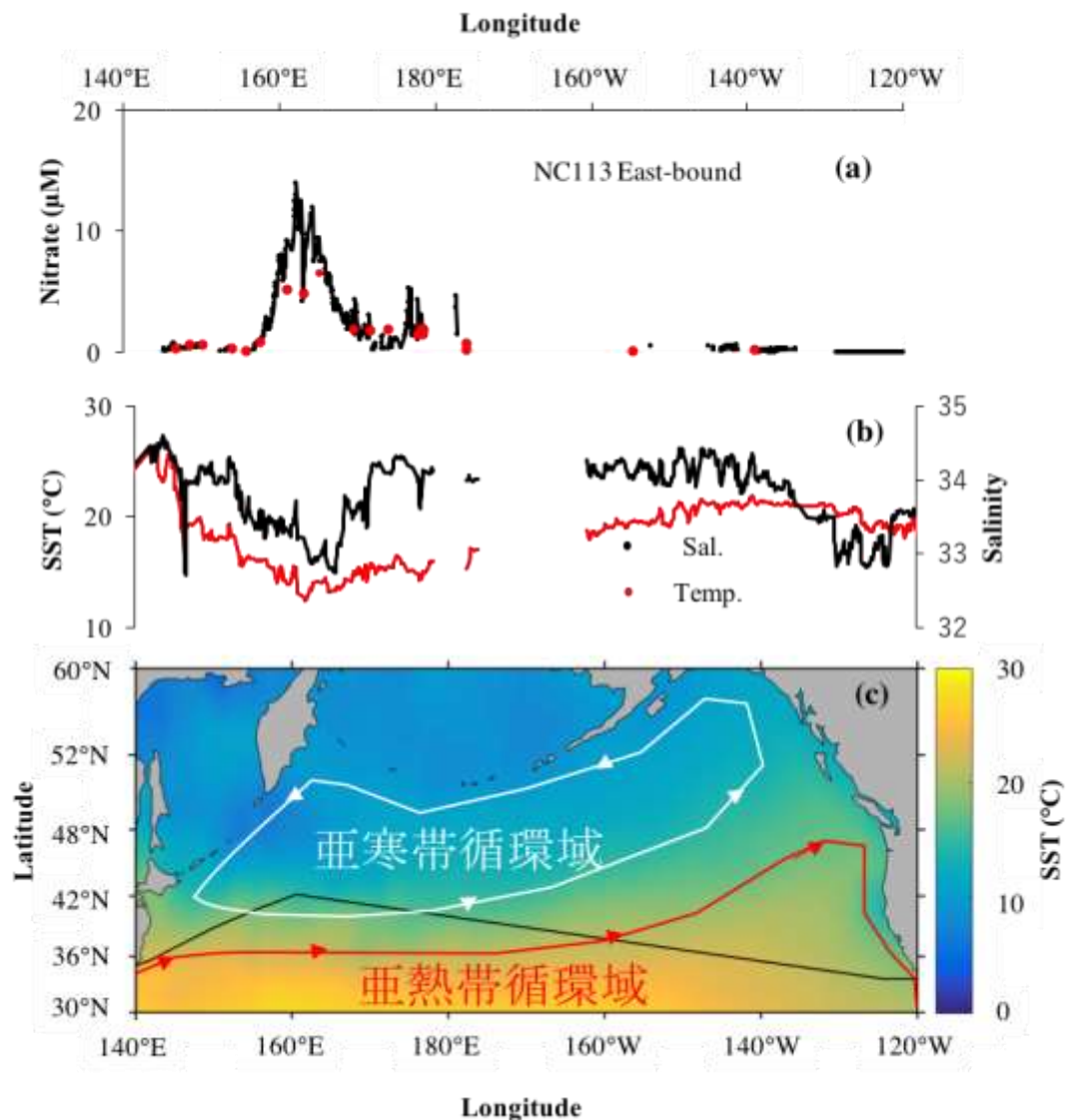


図 10 (a)113 次航海 East bound における硝酸塩の緯度変化 (黒線)。赤丸は比色法で得られた硝酸塩濃度値を示している。(b) 同一航海における塩分 (黒丸) と水温 (赤丸) の緯度変化 (c) 113 次航海 East bound の航跡 (黒線)。背景は NOAA Earth Research Laboratory による NOAA OI SST V2 data website(Reynolds et al. 2007¹¹)より入手した 2014 年 10 月第 1 週の平均海面水温と Favorite et al. (1976)¹⁰を参考に亜寒帯循環域を白色実線、亜熱帯循環域を赤色実線で示している。

次に高空間分解能での表層海水の硝酸塩の変動を観測できる連続硝酸塩計の利点を活用し、従来観測が難しかったメソスケールの Eddy の表層の栄養塩分布を明らかにする目的で、Eddy が発生しやすい、北海道南東沖について衛星データとモデル計算により得られた NASA による Ocean Surface Current Analysis Real-time (OSCAR : Bonjean and Lagerloef, 2002¹²)のデータベースから得られる 5 日平均の表層海流と航跡を合わせて解析した。その結果 112 次航海の復路 (West-bound) と 113 次航海の往路(East-bound)がメソスケール Eddy を通過していることがわかった(図 11(a))。112 次航海復路 (West-bound) は 146.3– 147.6°E で時計回りの回転(図 11(a))を持

つ渦を横切っており、この渦は表面水温と塩分が高くなったことから暖水渦と考えられ、この間硝酸塩濃度は検出限界以下となった(図 11 (b))。硝酸塩は暖水渦の西側の縁辺である 146.1–146.3°E(7.7 μM)と東側の縁辺部である 147.6–148.1°E(6.6 μM)で増加が見られた。これは暖水渦の縁辺部では小規模な湧昇が発生するため硝酸塩の濃度が増加するためである。さらに渦の東縁の硝酸塩のピークの幅が西縁より広がった (図 11(b))。これは東縁が暖水渦の循環によって硝酸塩が豊富な北海道南岸を流れる親潮起源の水塊を取り込むのに対し西縁は硝酸塩の少ない黒潮系の暖水を取り込むことにより硝酸塩濃度分布に差が現れたと考えられる(図 11(a))。一方で、113 次航海往路(East-bound)では、146.3–146.6°E で反時計回りの回転を持つ渦の北寄りを通過している(図 11(a))。この渦は水温と塩分が周辺より低い冷水渦の特徴を持っていることから冷水渦と考えられ(図 11(c))、微量であるが冷水渦通過時に硝酸塩濃度のピークが検出されている。冷水渦の中心部分を通過していないため、硝酸塩の増加量は亜寒帯循環域の値より小さく最大で 0.8 μM 程度であった。

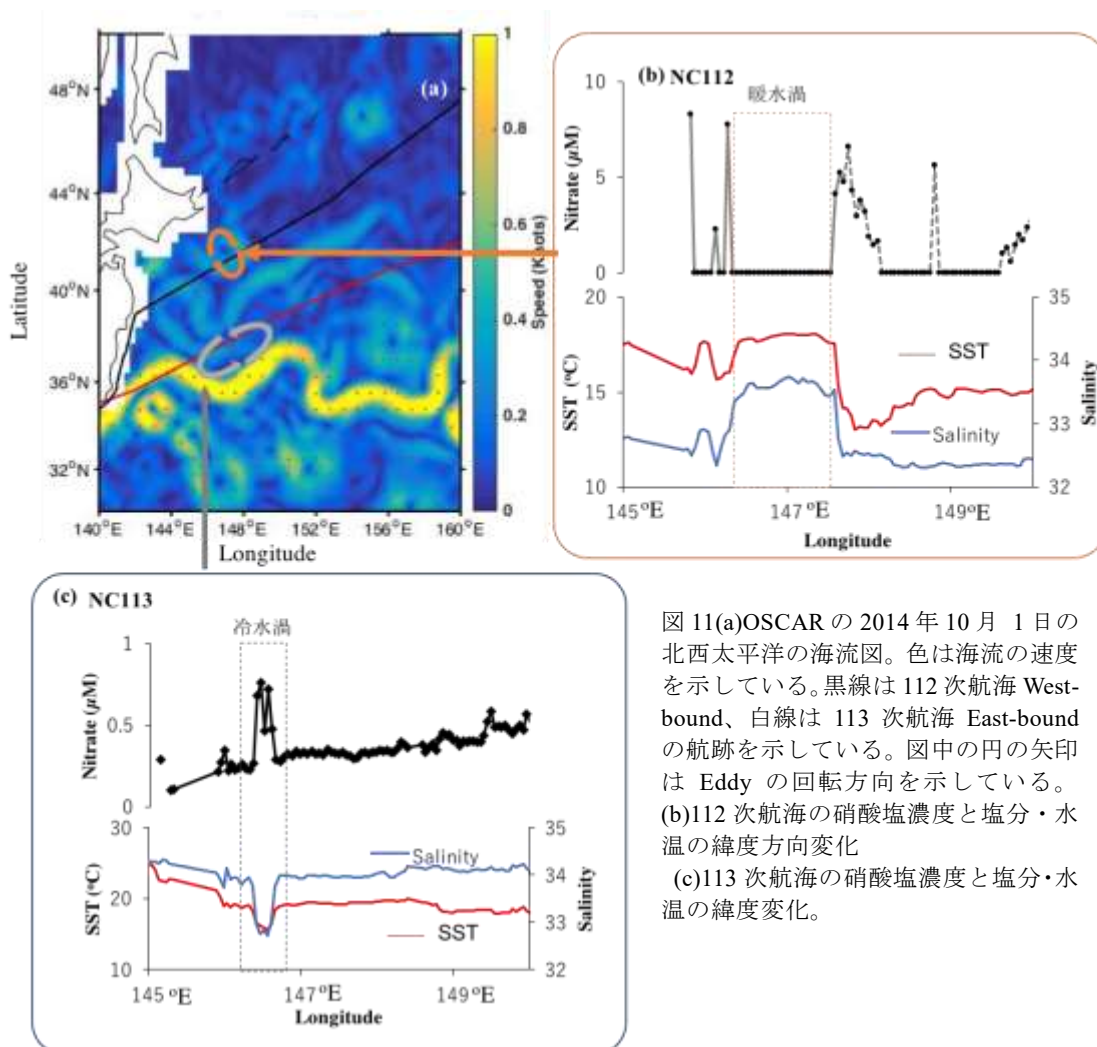


図 11(a)OSCAR の 2014 年 10 月 1 日の北西太平洋の海流図。色は海流の速度を示している。黒線は 112 次航海 West-bound、白線は 113 次航海 East-bound の航跡を示している。図中の円の矢印は Eddy の回転方向を示している。
(b)112 次航海の硝酸塩濃度と塩分・水温の緯度方向変化
(c)113 次航海の硝酸塩濃度と塩分・水温の緯度変化。

New Century2 による観測はその航路が北太平洋の広範囲に渡っていることから硝酸塩の北太平洋の空間分布を把握する上で有効である。一方で連続硝酸塩計を設置して以降の New Century 2

の航路を調べると、35°N 線に沿った航路が 13 航海と最も多く、この内 6 航海が 140°E から 160°W の間を航行しており、これらの観測データから 35°N 線に沿った表層硝酸塩濃度の時系列変化を知ることが可能である。硝酸塩の時系列変化を調べるため降雨による希釈や蒸発散に伴う濃縮の効果を除いて議論を行うため、硝酸塩濃度を塩分 35 で規格化し N-NO_3 と表記する。2016 年の表層の硝酸塩の時系列変化を見るために、123 次(2015 年 12 月)、125 次 (3 月)、126 次(5 月)と 127 次(6 月)の各航海における N-NO_3 の緯度分布を図 12(a)に示した。西部北太平洋における 35°N 付近では黒潮続流のフロント域であり亜熱帯水と亜寒帯水が複雑に入り組んでいる。123 次航海は 12 月の冬期であり鉛直混合により表層に栄養塩が供給されることから、 N-NO_3 が増加することが期待されたが、その最大値は 146°E の $1.3 \mu\text{M}$ であった。図 12(b)の水温分布から明らかのように 123 次航海では表面水温が $18\text{--}23^\circ\text{C}$ と冬期の鉛直混合を起こすには水温が高く、また pCO_2 の値も約 $340 \mu\text{atm}$ と低いことから鉛直混合による硝酸塩の供給はまだされていなかったと考えられた。これに対して厳冬期を過ぎた 125 次航海は西部北太平洋で N-NO_3 濃度が大きく変動している。この変動は pCO_2 の値が低い (図 12(c)) ことから鉛直混合による供給より、黒潮続流の蛇行により亜寒帯水と亜熱帯水が流入した影響を受けたため引き起こされたことが海流分布から予想された (図 12(d))。141、145°E では、それぞれ硝酸塩濃度極大が捉えられているがそれと同時に pCO_2 の上昇も見られることから鉛直混合による亜表層からの高 pCO_2 、高栄養塩の供給が考えられる (図 12(c))。一方で 152–153°E 付近では硝酸塩濃度の増加するものの水温は高く、 pCO_2 は低いため当該海域の水塊が亜熱帯起源であることが示唆された(図 12(a,b,c,d))。西部太平洋における N-NO_3 のピークは 126 次航海以降確認されない。これは黒潮続流が北上したことにより、当該海域が亜熱帯起源の水塊となったこと、一連の春季ブルームが終了し表層の硝酸塩が消費されたことなどが原因と推定される。125 航海以降 N-NO_3 のピークは北太平洋中央部で見られるようになり、125 次航海では $165\text{--}160^\circ\text{W}$ で、126 次航海では $160\text{--}140^\circ\text{W}$ 、127 次航海では $170\text{--}165^\circ\text{W}$ で見られた。両航海とも硝酸塩の増加と同時に水温が下がり (図 12(b))、 pCO_2 が増加する傾向が見られ湧昇の影響を受けた硝酸塩の高い亜寒帯水の移流が予想された(図 12(c))。これは亜寒帯フロントの変動により中央太平洋の 35°N 緯線にまで亜寒帯水が張り出し富栄養な海域が発生したものを観測した結果だと考えられた。すべての航海で硝酸塩のピークの位置が異なることから、中央太平洋のフロントは一ヶ月より短い期間で変動していることを示している。このような中央太平洋の 35°N において硝酸塩のスポットは従来のモデルでは見られない。今後も継続的に観測を行うことにより硝酸塩のホットスポットが形成されるメカニズムを把握することは、北太平洋の栄養塩分布推定の精度向上と海洋生物による一次生産に役立つことが期待できる。

このように本課題においては連続硝酸塩計の予備実験、設置、データの検証と運用を行ない、装置が海洋表層の硝酸塩のモニターに有効であることを示すことができた。連続硝酸塩計を用いることで、より高空間分解能の硝酸塩データの採取が可能になり、メソスケール渦の表層の硝酸塩分布が明らかになることに成功した。これによりメソスケール渦による栄養塩供給のプロセスの理解が進むだろう。これまでに北太平洋の広い範囲でデータを修得し蓄積してきたが、高精度の栄養塩の分布の推定モデルを作成するには高空間分解能のデータの蓄積がさらに必要である。

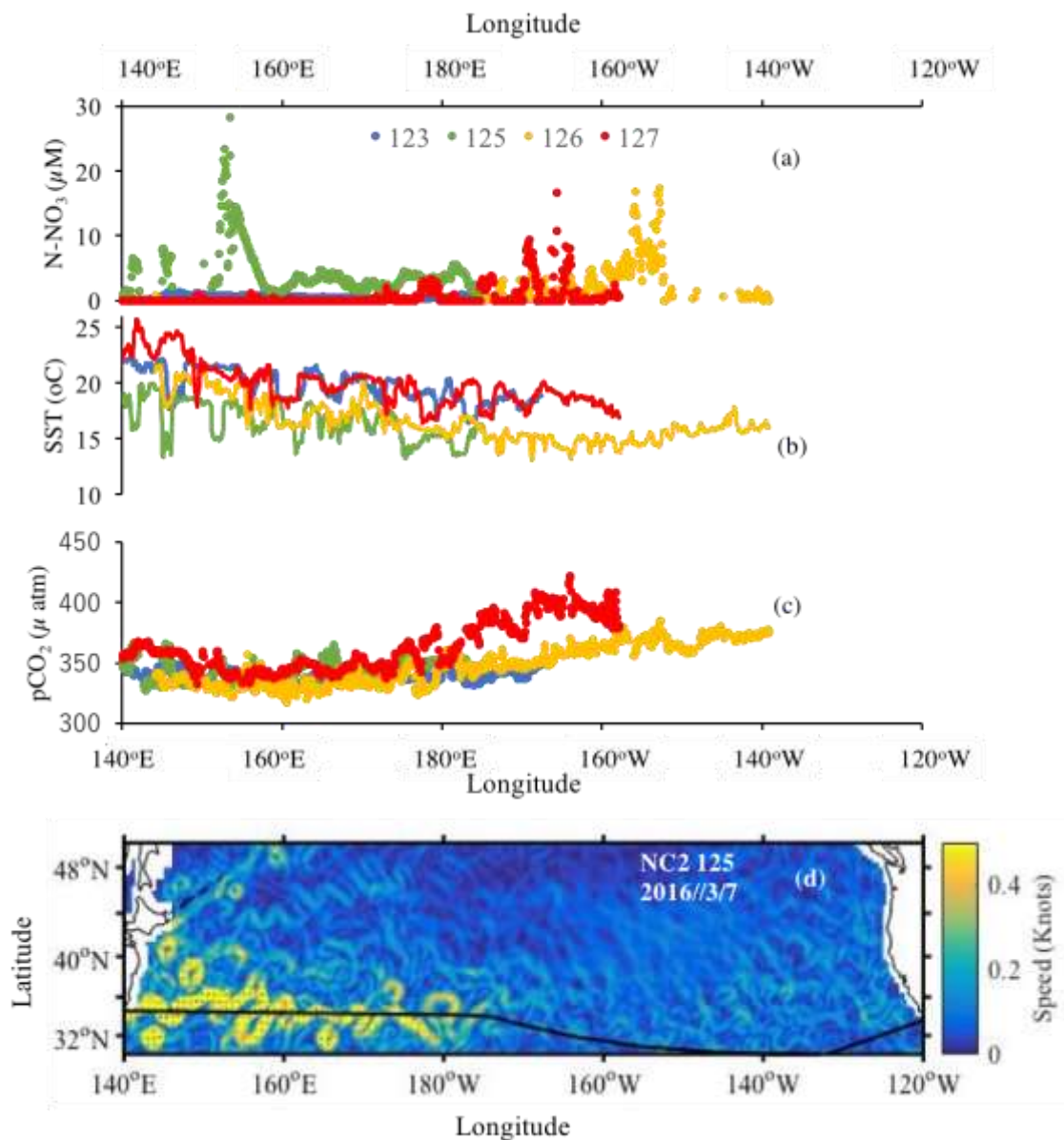


図 12 35°N 緯線上での(a)硝酸塩,(b)水温,(c)pCO₂の時系列変化。硝酸塩は塩分 35 で規格化している。35°N から外れる航路データは除く。(d) OSCAR による 2016 年 3 月 7 日の表層海流と黒線は 125 次航海の航跡図

②最適内挿法による北太平洋の表層栄養塩観測分布

北太平洋における栄養塩分布推定については、カナダ海洋研究所との観測データ統合が順調に進んだため、まず先行して分布推定を行い解析した。初めに、マッピング結果の不確実性を評価するために、再現された 2001 年から 2010 年の表層栄養塩濃度の推定値と観測値の散布図を作成した(図 13)。相関係数は、リン酸塩が 0.90、硝酸塩が 0.92、ケイ酸塩が 0.89 となり、標準自乗誤差(RMSD)はリン酸塩が 0.15 $\mu\text{mol/L}$ 、硝酸塩が 1.86 $\mu\text{mol/L}$ 、ケイ酸塩が 3.66 $\mu\text{mol/L}$ となった。いずれの散布図も、推定値と観測値が 1 対 1 の直線関係で対応をしており、よく一致していることがわかる。次に、領域平均時系列における推定値と観測値、WOD13、WOA 2013 (WOA13) の比較を行った(図 14)。検証する領域には、WOD13 データが十分に存在する、日本近海

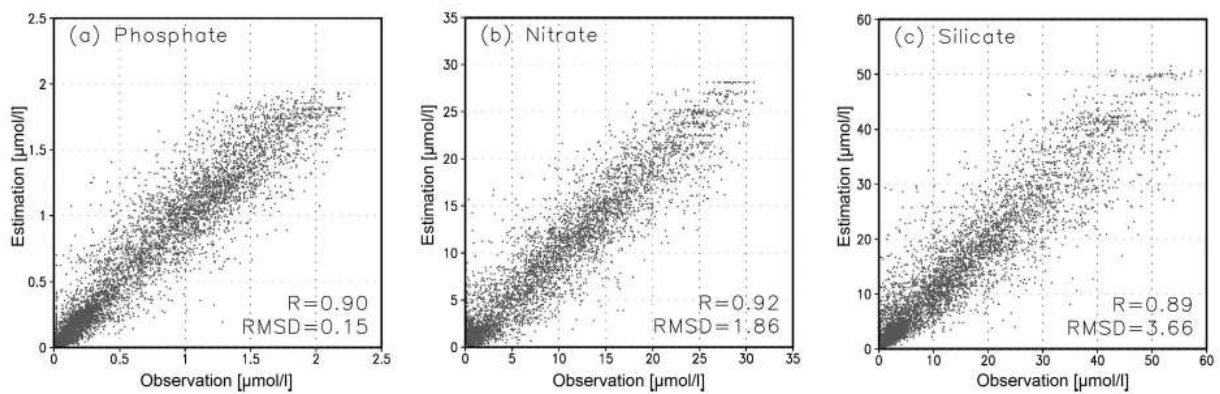


図 13 表層(a)リン酸塩、(b)硝酸塩、(c)ケイ酸塩濃度の観測値と推定値の散佈図 (Yasunaka et al., 2014⁷⁾ より)。

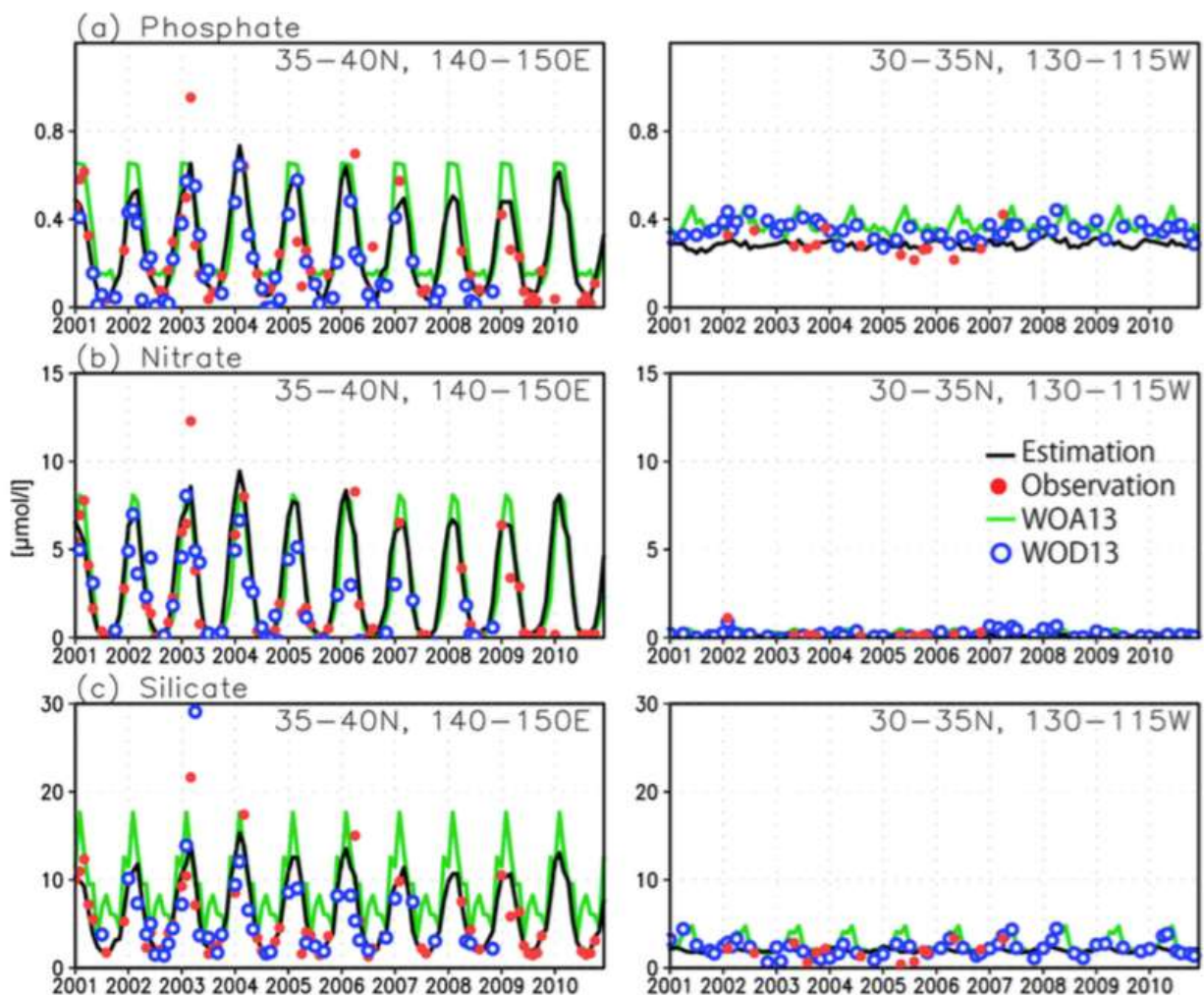


図 14 日本近海エリア (35°N-40°N、140°E-150°E) とカリフォルニア沖エリア (30°N-35°N、130°W-115°W) における(a)リン酸塩 (b) 硝酸塩 (c) ケイ酸塩濃度の時間変化 (Yasunaka et al., 2014⁷⁾より)。

エリア (35°N-40°N、140°E-150°E) とカリフォルニア沖エリア (30°N-35°N、130°W-115°W) の

2つを選出した。図 14 を見ると、推定値は観測値だけでなく WOD13 データともよく一致していることがわかる。さらに、海域による絶対値・季節変化の違いをよく表している。特に、日本近海では、夏季に枯渇し、冬季に供給される表層栄養塩の季節変化がよく再現されている。推定値と観測値の年々変動も一致度が高く、日本近海の 2001 年から 2002 年および 2007 年から 2009 年の冬の濃度は、2003 年から 2006 年の冬に比べて推定値、観測値ともに低くなるという結果を示した。さらに、本研究で再現されたマップが、WOA13 より細かな解像度で WOA13 に見られる表層栄養塩濃度分布を再現していることも確認できる。次に、表層栄養塩推定値の 10 年間月平均と DIC 推定値 (Yasunaka et al., 2013)¹³⁾ の 2002 年 1 月から 2007 年 12 月の 7 年間月平均を作成し、季節変化についての検討を行った。

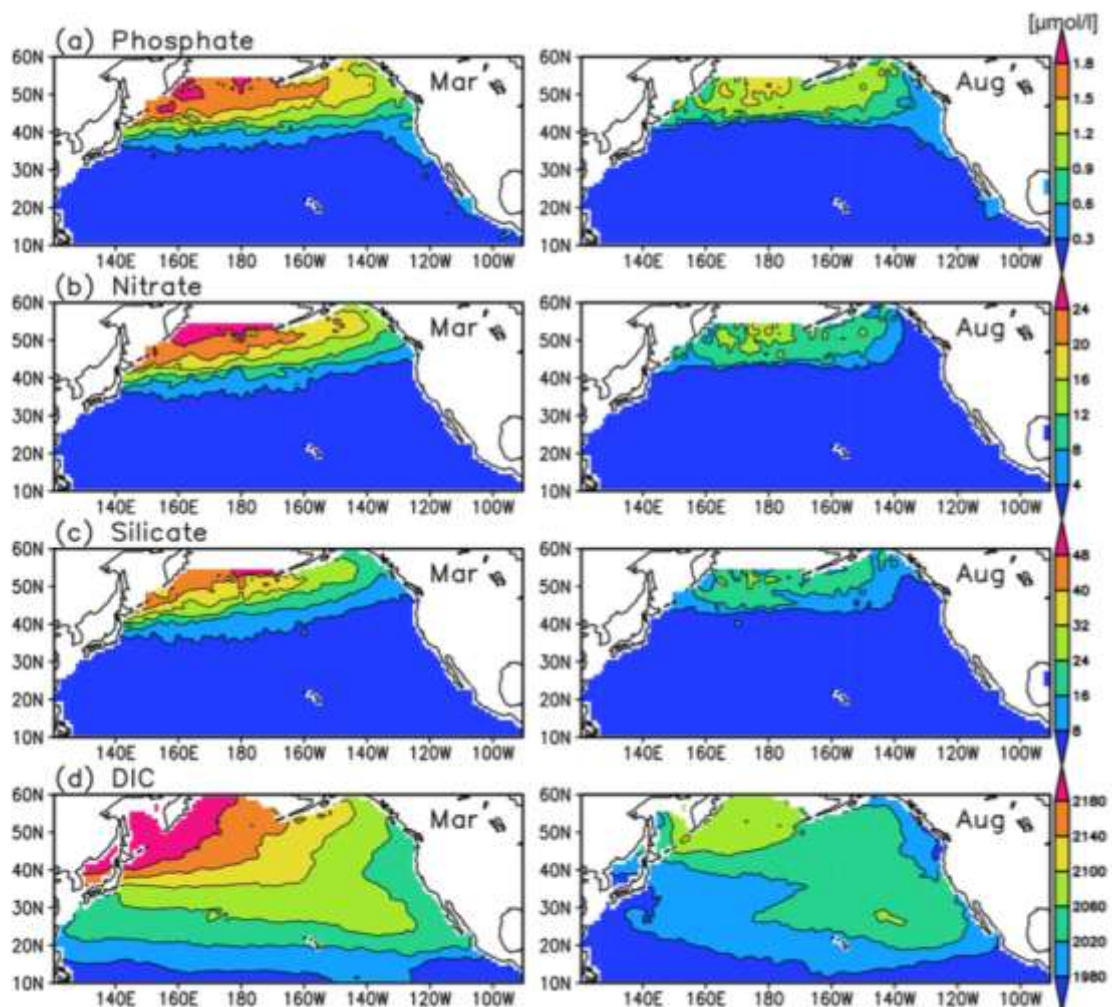


図 15 3 月 (左) と 8 月 (右) における (a) リン酸塩、(b) 硝酸塩、(c) ケイ酸塩、
(d) 全炭酸濃度分布 (Yasunaka et al., 2014⁷⁾ より)

図 15 は、作成した 2 つの長期月平均の 3 月と 8 月のマップである。この長期月平均を、k-mean 法により表層栄養塩濃度と DIC 濃度の関係の類似度で 9 つのエリアに分割したのが図 16(a)であり、分割した各エリアの月平均を計算したのが図 16(b)から図 16(e)となる。これらの図によると、表層栄養塩濃度および DIC 濃度は、年間を通して亜寒帯 (エリア A、B、C、および D) で高く、

亜熱帯（エリア G、H、および I）で低いことがわかる。また、すべてのエリアで、3月に最大濃度となり、8月または9月に最小濃度となる。亜寒帯から亜寒帯-亜熱帯境界付近にかけて存在する表層栄養塩の南北勾配は、DIC に比べて大きく、特に冬はその差が顕著である。DIC の南北勾配が小さい理由は、塩分が作用して、DIC 濃度の南北差を小さくしていることが考えられる（Yasunaka et al., 2013¹³）。夏の表層栄養塩は、亜寒帯（エリア A、B、C、および D）および亜寒帯-亜熱帯境界付近（エリア E）にとどまるっている。冬から夏にかけて、表層栄養塩と DIC は減少していくが、亜寒帯東部（エリア B、C、および D）より亜寒帯西部（エリア A）の方が高いのは変わらない。これは、冬季の鉄の供給量の違いであると考えられる。亜熱帯（エリア G、H、および I）では、だいたいどの季節も表層栄養塩は枯渇状態となっている。一方、DIC は、南北の濃度差があり、季節変化も存在する。

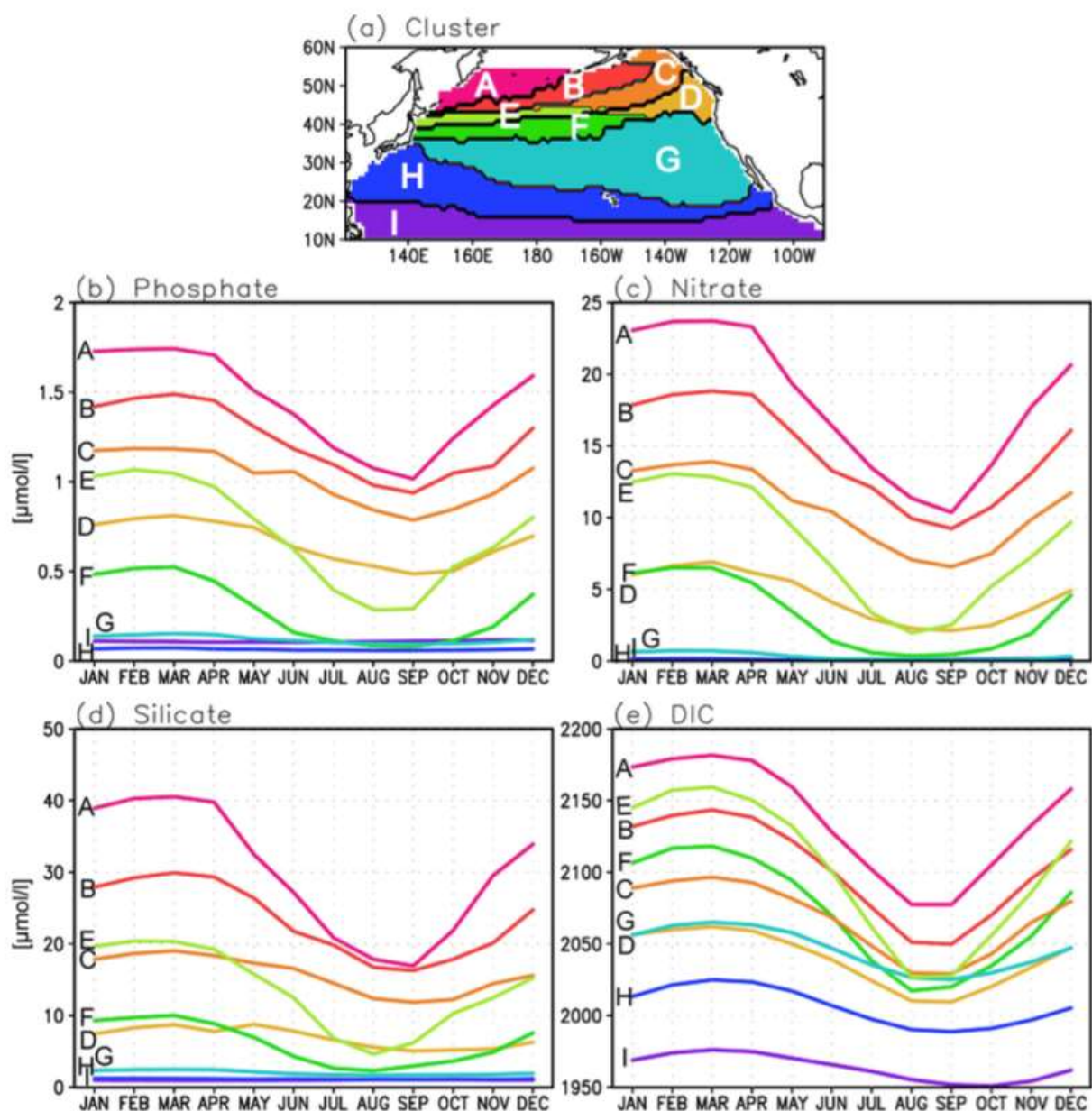


図 16 k-mean 法による各クラスター領域における平均季節変化（Yasunaka et al., 2014⁷ より）

次に別手法の分布推定手法として最適内挿法による推定について検討した。本手法は水温や塩分などの物理化学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となった。一方、本手法は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、長期変動やトレンド成分検出には有用な手法であると言える。本手法による推定誤差は、それぞれ $1.15\mu\text{mol/kg}$ (硝酸塩)、 $0.10\mu\text{mol/kg}$ (リン酸塩)、 $2.25\mu\text{mol/kg}$ (ケイ酸塩) であり、バイアスは 0 であった。結果の例として、2010年2月と8月における硝酸塩濃度について、観測データ分布と最適内挿法を用いた分布結果を図17に示す。この結果から明らかなように、観測データのみとの分布と比較して最適内挿法適用後の硝酸塩濃度分布は、より広範囲の空間分布を示しており、さらに2010年2月には観測データのない、日本周辺の北緯30度近辺の濃度も再現している。これは、同年1月や3月などのデータを用いて時空間内挿によって2月のデータとして再現したことを表している。しかし、いずれの時期においても北太平洋全体の分布を推定することは難しいことがわかる。結論として、時空間的に欠損のない分布を把握したい場合には昨年度の報告書で示した Self Organizing Map (SOM) のようなニューラルネットワーク手法を用いて推定を行うことが適当であり、各海域でのトレンドや長期変動を評価するような解析研究には最適内挿法が適した手法であるといえる。

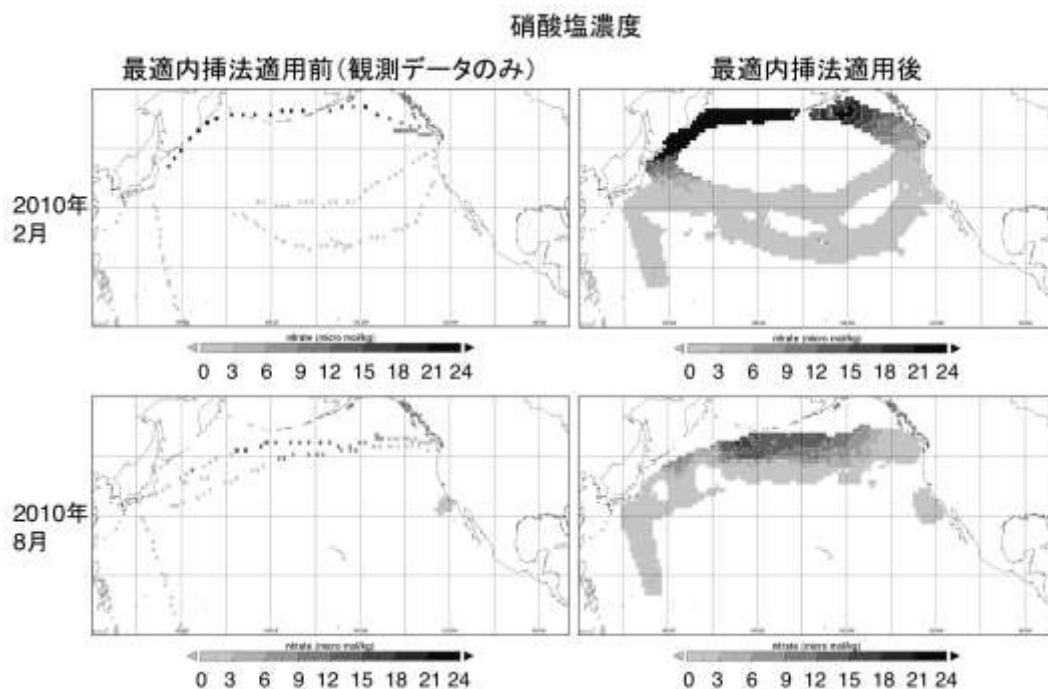


図17 2010年2月(上段)と8月(下段)における表層硝酸塩濃度($\mu\text{mol/kg}$)の観測値(左)と最適内挿法適用後の分布(右)

5. 水産調査船による海洋表層 pCO_2 観測と栄養塩類サンプリングネットワーク

(1) 研究目的

国立環境研究所では上述のように協力商船を用いた海洋観測を通して太平洋域の pCO_2 および

栄養塩の分布推定に取り組んできた。協力商船による協力商船観測には高頻度な観測が可能になるなどの大きなメリットがあるものの、特に日本周辺海域の詳細な物質循環を把握するためには観測データが不足していた。そこで本課題では、水産研究・教育機構の水産調査船2隻を用いて、日本近海のpCO₂連続観測を行い、日本近海域で取得されるpCO₂観測値の時空間分解能を高め、同海域におけるCO₂吸収量算定精度の高度化に寄与する。また同海域におけるpCO₂時空間変動の主要因である、海洋表層における生物生産の時空間変動を把握するために、漁業調査船を用いた海洋表層栄養塩濃度の連続観測を行い、その解析により生物生産とpCO₂時空間変動の関係について考察を加える。

(2) 研究方法

水産研究・教育機構の水産調査船「蒼鷹丸」、「若鷹丸」において、航走中のpCO₂観測と表層海水の試料採取を実施した。また平成27年度より、連続硝酸塩計SUNA-1を用いた表層硝酸塩濃度の連続測定を上記二船において開始した。

(3) 結果・考察

平成26年度から28年度までの間に、蒼鷹丸・若鷹丸の2船で合計33航海、のべ440日間のpCO₂データを取得した(図18)。データ取得範囲は北緯26度-北緯44度、東経127度-東経161度の日本近海域である。3年間の取得データ点数は647,584点にのぼり、北太平洋でも特に大きなCO₂吸収海域であり、同時にpCO₂の時空間変動が北太平洋内で最大である日本近海域のデータ取得密度を飛躍的に向上させることに

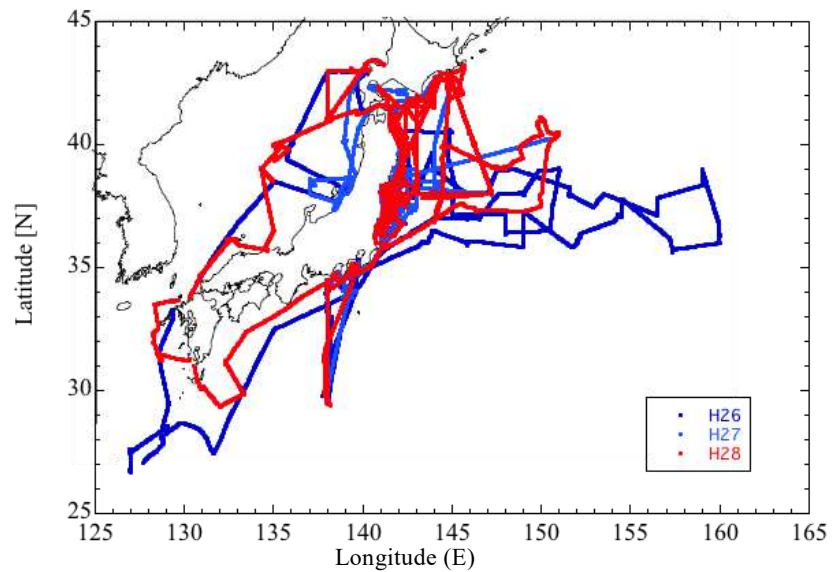


図18 各年度の水産調査船の観測航路

寄与した。取得されたデータを用いたpCO₂分布予測アルゴリズムの再調整により、同海域におけるpCO₂分布およびCO₂大気海洋フラックスの推定精度が向上されることが期待できる。これらの取得データのうち、2016年10月までの取得データはSOCATへの登録および精度評価(QC)作業が終了しており、2017年度中に発行予定の国際データベースSOCAT ver.5に採録される予定である。11月以降の取得データについても順次1次QC作業を実施中であり、この作業が終了し次第次期SOCAT新版への登録を行う。また、上記の33航海において表層栄養塩試料の採取を約600測点で実施した。このうち若鷹丸で採取された試料は順次国立環境研究所へ送付し測定を実施している。蒼鷹丸で採取された試料は連続硝酸塩計観測の校正データとしても使用する為、水産研究・教育機構で測定を実施し、データを国立環境研究所に送付した。

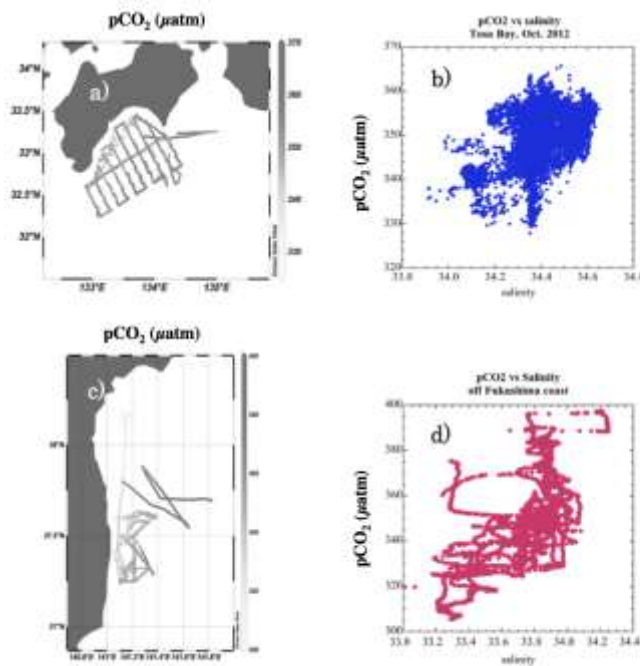


図19 沿岸部における $p\text{CO}_2$ 低下の一例。a)土佐湾における $p\text{CO}_2$ の空間分布（薄色が低 $p\text{CO}_2$ 値）。b)土佐湾における $p\text{CO}_2$ と表層塩分のプロット。c)福島沖沿岸部における $p\text{CO}_2$ の空間分布。d)福島沿岸における $p\text{CO}_2$ と表層塩分のプロット。

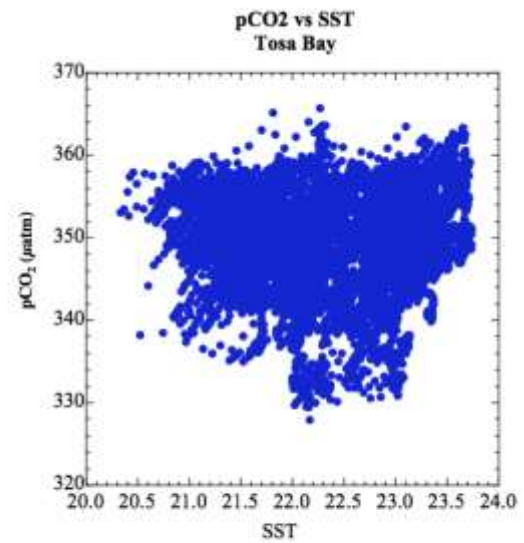


図20 土佐湾における表層水温(SST)と $p\text{CO}_2$ のプロット

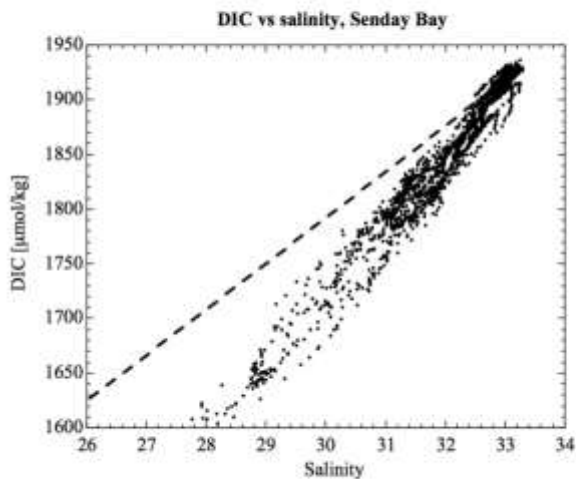


図21 $p\text{CO}_2$ から変換された全炭酸濃度(DIC)の塩分に対するプロット。仙台湾において複数回行われた航海のデータを合わせて表示している。 $p\text{CO}_2$ から全炭酸への変換は、仙台湾に流入する主要一級河川である阿武隈川の河川水アルカリ度計測値と各航海の仙台湾外で観測されたアルカリ度をエンドメンバーとした希釈直線を仮定して、各塩分に対応したアルカリ度値を推定し、この値と観測された $p\text{CO}_2$ 、水温、塩分を元にした平衡計算により行った。点線は阿武隈河川水の全炭酸濃度(実測値)と仙台湾外の全炭酸濃度をエンドメンバーとした全炭酸の希釈直線。低塩分側では希釈直線と実際の観測データに基づいた全炭酸推定値の間に差が生じ、この差が各点で陸域栄養塩に基づく生物活動により消費された全炭酸量に対応する。

水産研究・教育機構の水産調査船は日本の近海域を中心に観測を行っており、沿岸部では水深数10mのごく浅海域でも $p\text{CO}_2$ 観測を実施している。この特性を活かし、これまでの取得された $p\text{CO}_2$ データを統合して日本沿岸部における $p\text{CO}_2$ 分布特性の解析を行った。この結果、日本の多くの沿岸域で陸に向けた表層塩分勾配が存在し、かつそれに対応して陸方向に向けた $p\text{CO}_2$ の低下傾向が存在することがわかった(図19)。陸周辺の低塩分・低 $p\text{CO}_2$ 領域は海岸線から距岸10

マイルほどの広さで日本列島を覆っていると推定でき、陸域沿岸部にこれまで認識されていなかった新たな $p\text{CO}_2$ 吸収域が存在している可能性を示唆している。

陸域沿岸部の $p\text{CO}_2$ 低下領域において、 $p\text{CO}_2$ と表層水温の間には明瞭な相関関係が見られず、このことから沿岸域における水温変動（特に水温低下）が $p\text{CO}_2$ の低下をもたらしている可能性は低いと考えられた（図 20）。各沿岸部における $p\text{CO}_2$ 値を全炭酸濃度に変換し、塩分に対してプロットすると、該当沿岸部に流入する一級河川水と外洋海水をエンドメンバーとした希釈直線上の値よりも常に低くなる事から、陸域沿岸部の $p\text{CO}_2$ 低下領域では何らかの生物活動によって実際に全炭酸が消費され、このことにより $p\text{CO}_2$ が低下していることが推定された（図 21）。このように陸域沿岸部の広い範囲でプラスの群集純生産をもたらす要因として、河川水により供給される陸域栄養塩の寄与が考えられる。特に観測データ密度の高い仙台湾の沿岸部低 $p\text{CO}_2$ 領域において、各塩分の海水中における全炭酸の減少量（河川水-外洋海水の希釈直線上におけるその塩分の全炭酸濃度と、観測された $p\text{CO}_2$ から推定される全炭酸濃度との差）をその塩分の海水の存在量で積算し、仙台湾沿岸部全域における全炭酸減少量を求めたところ、298 tonC/月となった。通常のレッドフィールド比を仮定すると、この全炭酸減少を引き起こすためには 45ton/月の窒素の供給が必要である。既存報告値によれば、仙台湾に流入する一級河川からの溶存態窒素流入量は 282ton/月なので、我々の観測結果から、仙台湾においては陸域から流入する窒素の約 16%が河口域で消費されずに沿岸域に流出し、沿岸部低塩分領域で消費されて全炭酸と $p\text{CO}_2$ の減少を引き起こしていることが推定された。同様の手法を用いて、夏季の東京湾、伊勢湾についても湾内における $p\text{CO}_2$ の低下量、そこから計算される全炭酸の減少量、更にその全炭酸減少を引き起こすために必要な、陸域から湾内への窒素負荷量の湾内における消費率を計算すると、表 3 の様になった。陸域栄養塩が沿岸の $p\text{CO}_2$ 低下に利用される割合は湾によって 11%~70%と大きく異なっており、現在この割合を決める要因について更に解析を進行中である。

表3 夏季の各湾における陸域栄養塩由来の CO_2 吸収量推定値

	仙台湾	東京湾 (浦賀水道含む)	伊勢湾
面積[km^2]		1320	1738
閉鎖度		1.8	1.5
海水の平均滞留時間 [日]	14	50	20
炭素固定量 [tonC/月]	298	1707	5866
消費栄養塩量 [ton/月]	N	P	N
	45	41.6	1032
陸域栄養塩負荷量[ton/月]	282	381	1500
陸域栄養塩の利用率[%]	16	11	69

空間分布の解析と並行して、日本周辺海域の中でも特に歴史的観測データの集積が進んだ黒潮内側域について、 $p\text{CO}_2$ の経年変動解析を実施した。SOCAT ver.4から、夏季の黒潮内側域（駿河灘）で観測された1995年から2015年までのデータを抽出し、4つの期間の全てに観測値が存在する、水温 24°C - 26°C 、塩分33.0-33.5 (LTLS)、水温 24°C - 26°C 、塩分34.0-34.5 (LTHS)、水温 26°C - 28°C 、

塩分33.0-33.5 (HTLS)、水温26°C -28°C、塩分34.0-34.5 (HTHS) の4つの水温塩分領域においてpCO₂の経年変動を解析した。その結果、HTLS、HTHSおよびLTHSにおいては、 $+1.9 \pm 0.3 \mu\text{atm yr}^{-1}$ という共通のpCO₂増加トレンドが得られた。この値は、黒潮内側域の一点で気象庁により継続されているpCO₂経年観測データに基づくpCO₂の増加トレンド (Ishii et al., 2014)¹⁴⁾と誤差範囲で等しく、SOCATに収録されている多機関の観測データの間には顕著な系統誤差が存在せず、このような経年変動解析を実施しても何ら問題が無いことが改めて証明された。一方、LTHSではpCO₂の上昇トレンドは $+2.8 \pm 0.5 \mu\text{atm yr}^{-1}$ と、他の水温塩分領域に対して有意に高い値を示した (図22)。それぞれの水温塩分領域のデータの地理的・時間的分布の解析から、LTHS、HTHSはそれぞれ7月、8月の黒潮外側域の水塊にほぼ対応し、LTHS、HTLSはそれぞれ7月、8月の内側域の水塊にほぼ対応することがわかった。つまり黒潮流軸内側域では同じ夏季でも7月と8月でpCO₂の上昇トレンドは異なっており、特に7月では外洋域の一般的な値に比べてより大きな速度でpCO₂が上昇してきていることがわかった。黒潮内側域では春季から夏季にかけての季節的なpCO₂の上昇速度が近年になるにつれて急激になり、より早い時期に季節的なpCO₂の最高値に達するようになってきていると考えられる。このことはまた、沿岸域においてはpCO₂の空間変動、季節変動だけでなく、長期トレンドのような長いスケールの時間変動についても海域・月ごとに違った特性を持っていることを示しており、沿岸域でのCO₂吸収量変動を高精度で把握するためには、本課題で実施しているような高分解能・長期のpCO₂モニタリングが必須であることを改めて示した。pCO₂の連続観測と並行して、冬期の駿河灘、春期の親潮・黒潮混合水域など、栄養塩濃度が高く、かつ生物生産も活発におきており、そのため表層栄養塩濃度の時空間変動が非常に大きくなっている海域において、連続硝酸塩計SUNA-1 (Satlantic社) による表層硝酸塩濃度の連続観測を実施した。2015年10月の航海中にセンサーの試験運用を行い、船上での長期ドリフト軽減方法の開発、また発生した長期ドリフトの補正方法の開発を行った。機器自身の発熱によるセンサー周辺の温度変化が長期ドリフトの主要因と考えられ、機器全体を流水中に水没させて機器の温度を安定させることで長期ドリフトが大きく軽減されること、また残ったドリフトも定期的に濃度既知の海水を測定させることで補正を行えることがわかった。この検討を経て、2016年3月の航海からpCO₂と表層硝酸塩濃度の同時航走観測を開始した。東経138度線沿いに黒潮流軸を横切った遠州灘沖の観測ではpCO₂と表層硝酸塩濃度の南北断面 (図23) から、連続硝酸塩計の測定精度は $\pm 1 \mu\text{M}$ と、機器の公称精度とほぼ同じ精度で測定を実施できていることが確認出来た。また観測海域においてpCO₂は数マイルから20マイルまでの広い空間スケールで様々な変動を示しているが、硝酸塩濃度もほぼこれに対応した空間変動を示しており、両者の空間変動が非常に密接に関係していることがわかった。硝酸塩とpCO₂の相関プロットからは、硝酸塩で $4 \mu\text{M}$ ほどの変動規模の空間変動が、pCO₂では約 $15 \mu\text{atm}$ の変動規模の空間変動に対応していることがわかる (図24)。もしこの硝酸塩の変動が生物による消費を表しているとする、通常の海洋表層生態系では $4 \mu\text{M}$ の硝酸塩の消費に伴って約 $30 \mu\text{mol/kg}$ の全炭酸が消費され、これは黒潮域の水温・塩分範囲では40ppm以上のpCO₂変動に相当するはずなので、観測されている $15 \mu\text{atm}$ の変動では小さすぎる。このことから、3月期の遠州灘沖ではまだ黒潮期における顕著な生物生産の増加は発生しておらず、観測された硝酸塩とpCO₂の空間変動は、異なる硝酸塩濃度とpCO₂値をもった複数水塊の配置の少空間スケール変動を拾ったものと推定された。一方で、春期の親潮・黒潮混合水域で取得された表層硝酸塩濃度の分布は、水塊によってpCO₂の変動と表層栄養塩の変動が正相関する場合と、逆相関する場合の双方のパタ

ーンが現れた（図25）。前者は冬期黒潮域と同様に、生物生産よりも水塊配置の影響で $p\text{CO}_2$ と硝酸塩濃度の変動が生じている海域、後者は逆に、生物生産が $p\text{CO}_2$ と栄養塩濃度の変動を主にコントロールしている海域と推定された。更に一部の海域では、 $p\text{CO}_2$ 、硝酸塩濃度ともに空間変動が乏しく、低い $p\text{CO}_2$ 値とほぼ枯渇した硝酸塩濃度が安定して分布していた。

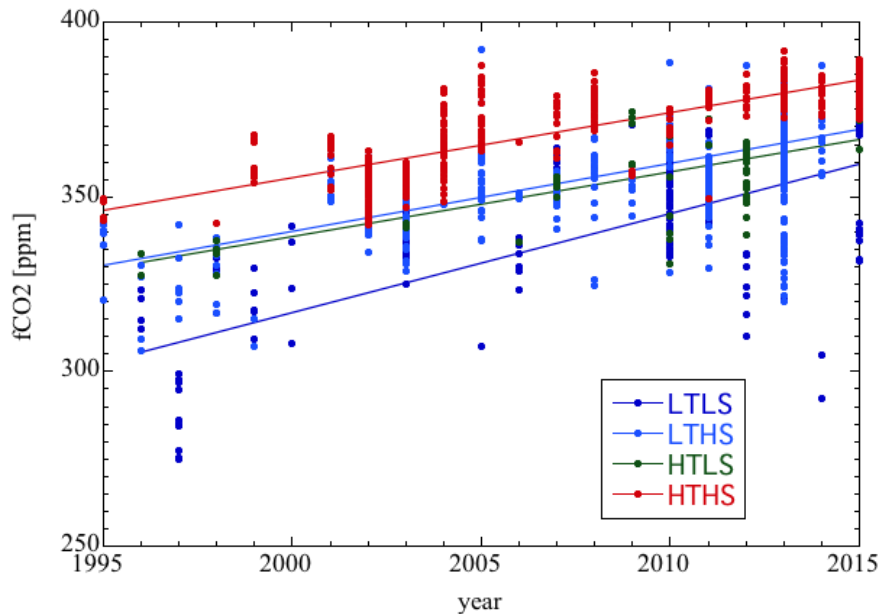


図 22 夏季黒潮内側域の 4 つの水塩分領域における、 $p\text{CO}_2$ の経年変化

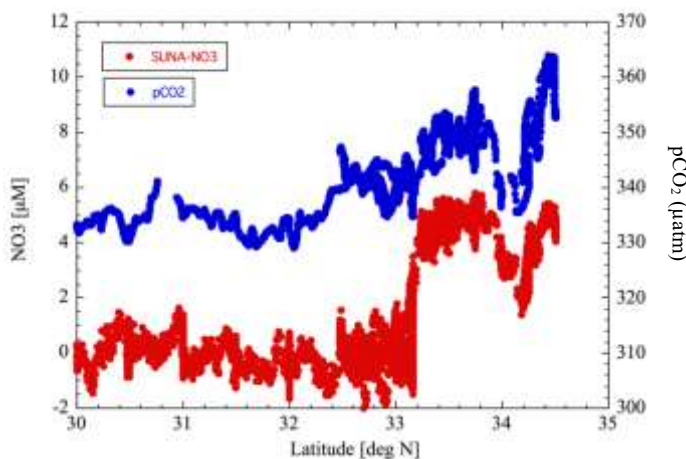


図 23 遠州灘沖における 2016 年 3 月の $p\text{CO}_2$ (青) と表層硝酸塩濃度 (赤) の緯度分布。

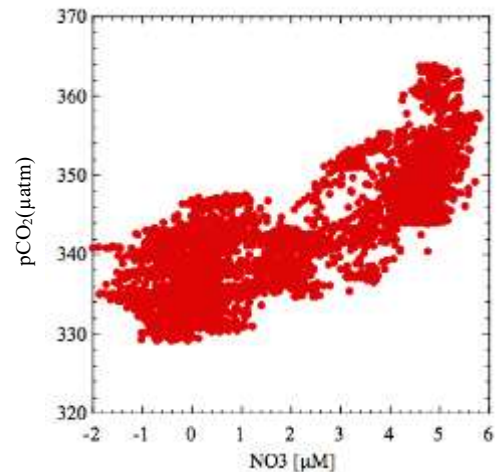


図 24 遠州灘沖における 2016 年 3 月の $p\text{CO}_2$ と表層硝酸塩濃度の相関プロット

春期の同海域は $p\text{CO}_2$ 変動が小さい時空間変動スケールで大きく変動することが要因で、ニューラルネットによる $p\text{CO}_2$ の空間外挿誤差が他海域より大きくなっているため、栄養塩等も加味し

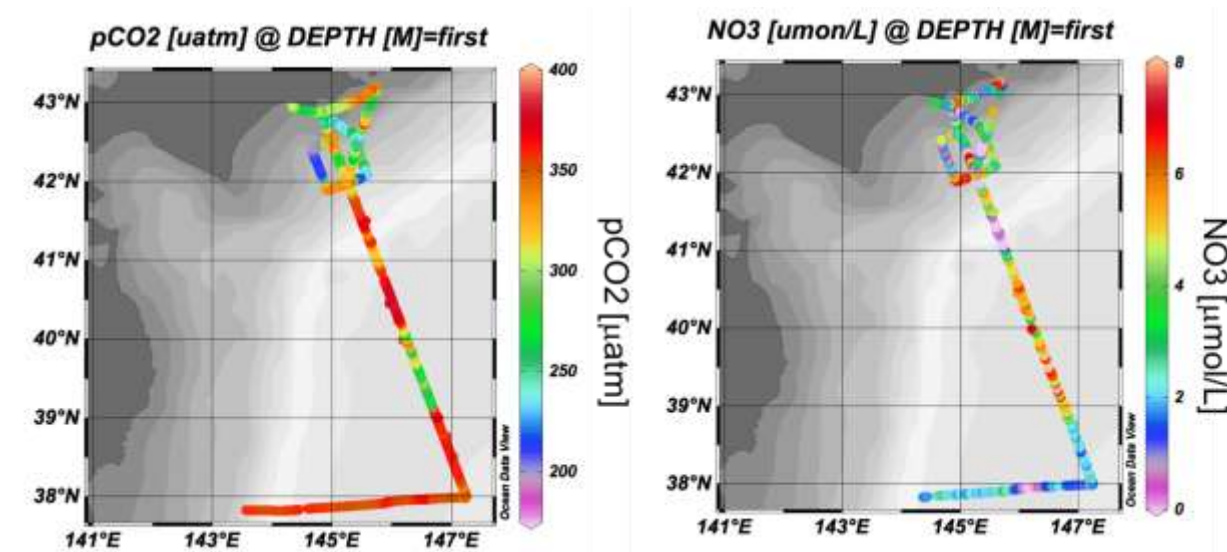


図 25 春期の親潮・黒潮混合水域における、 $p\text{CO}_2$ (左) と表層硝酸塩濃度 (右) の分布

た詳細な $p\text{CO}_2$ 変動プロセスの理解が必要となっている。今回の観測により、春期の同海域で進行する3つの $p\text{CO}_2$ 変動プロセス、すなわちa)鉛直混合による高 $p\text{CO}_2$ ・高硝酸塩濃度水塊の形成、b)生物活動によるa)の低 $p\text{CO}_2$ ・高硝酸塩濃度水塊への変質、c)b)のプロセスが更に進行する事による、低 $p\text{CO}_2$ ・低硝酸塩濃度水塊の形成と生物活動の終了、の全ての進行現場をリアルタイムに識別・データ収集することに成功した。今後取得データに基づいた各プロセスの詳細な解析を進展させる事により、同海域における $p\text{CO}_2$ 推定精度の向上に資することが期待される。本観測データも $p\text{CO}_2$ と同じく、1次QC作業が終了し次第SOCATに登録予定である。

6. 引用文献

- 1) Nakaoka, S., M. Telszewski, Y. Nojiri, S. Yasunaka, C. Miyazaki, H. Mukai and N. Usui, (2013) Estimating temporal and spatial variation of ocean surface $p\text{CO}_2$ in the North Pacific using a self-organizing map neural network technique, *Biogeosciences* 10, 6093-6106, doi:10.5194/bg-10-6093-2013.
- 2) Zeng, J., Y. Nojiri, P. Landschützer, M. Telszewski and S. Nakaoka, (2014) A Global Surface Ocean $f\text{CO}_2$ Climatology Based on a Feed-Forward Neural Network, *Journal of atmospheric and oceanic technology* 31, 1838-1849, doi: 10.1175/JTECH-D-13-00137.1.
- 3) Zeng, J., Matsunaga, T., Saigusa, N., Shirai, T., Nakaoka, S., Tan, Z.-H (2017, in press) Technical note: Evaluation of three machine learning models for surface ocean CO_2 mapping, *Ocean Sci.*
- 4) Wanninkhof, R., G.-H. Park, T. Takahashi, C. Sweeney, R. Feely, Y. Nojiri, N. Gruber, S.C. Doney, G.A. McKinley, A. Lenton, C.L.Q.C. Heinze, J. Schwinger, H. Graven and S. Khatiwala, (2013) Global ocean carbon uptake: magnitude, variability and trends, *Biogeosciences* 10, 1983-2000, doi:10.5194/bg-10-1983-2013.
- 5) Quéré, C.L., R.M. Andrew, J.G. Canadell, S. Sitch, J.I. Korsbakken, G.P. Peters, A.C. Manning, T.A. Boden, P.P. Tans, R.A. Houghton, R.F. Keeling, S. Alin, O.D. Andrews, P. Anthony, L. Barbero, L.

- Bopp, F. Chevallier, L.P. Chini, P. Ciais, K. Currie, C. Delire, S.C. Doney, P. Friedlingstein, T. Gkritzalis, I. Harris, J. Hauck, V. Haverd, M. Hoppema, K.K. Goldewijk, A.K. Jain, E. Kato, A. Körtzinger, P. Landschützer, N. Lefèvre, A. Lenton, S. Lienert, D. Lombardozzi, J.R. Melton, N. Metzl, F. Millero, P.M.S. Monteiro, D.R. Munro, J.E.M.S. Nabel, S.-i. Nakaoka, K. O'Brien, A. Olsen, A.M. Omar, T. Ono, D. Pierrot, B. Poulter, C. Rödenbeck, J. Salisbury, U. Schuster, J. Schwinger, R. Séférian, I. Skjelvan, B.D. Stocker, A.J. Sutton, T. Takahashi, H. Tian, B. Tilbrook, I.T. van der Laan-Luijkx, G.R. van der Werf, N. Viovy, A.P. Walker, A.J. Wiltshire and S. Zaehle, (2016) Global Carbon Budget 2016, *Earth Syst. Sci. Data* 8, 1-45, doi:10.5194/essd-8-1-2016.
- 6) Wong, C. S., N. A. D. Waser, F. A. Whitney, W. K. Johnson, and J. S. Page (2002), Time-series study of the biogeochemistry of the North East subarctic Pacific: reconciliation of the C org/N remineralization and uptake ratios with the Redfield ratios. *Deep-Sea Res. II*, 49, 5717–5738.]
- 7) Yasunaka, S., Y. Nojiri, S. Nakaoka, T. Ono, F.A. Whitney and M. Telszewski, (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) Sakamoto, C. M., Johnson, K. S., Coletti, L. J. (2009). Improved algorithm for the computation of nitrate concentrations in seawater using an in situ ultraviolet spectrophotometer. *Limnology and Oceanography-Methods*, 7, 132–143. <https://doi.org/10.4319/lom.2009.7.132>
- 9) Zielinski, O., Fiedler, B., Heuermann, R., Kortzinger, a., Kopiske, E., Meinecke, G., Munderloh, K. (2007). A new nitrate continuous observation sensor for autonomous sub-Surface applications: Technical design and first results. *OCEANS 2007 - Europe*, (JULY), 1–4. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2007.4302300>
- 10) Favorite, F., Dodimead, A. J., & Nasu, K. (1976). Oceanography of the Subarctic Pacific region. *Bulletin of International North Pacific Community*, 33, 1–187. <https://doi.org/10.1139/f63-011>
- 11) Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, (2007). Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*, 20, 5473–5496, doi:10.1175/JCLI-D-14-00293.1.
- 12) Bonjean, F., and G. S. E. Lagerloef, (2002). Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 32, pg. 2938-2954.
- 13) Yasunaka, S., Y. Nojiri, S.-i. Nakaoka, T. Ono, H. Mukai and N. Usui, (2013) Monthly maps of sea surface dissolved inorganic carbon in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal variation, *J. Geophys. Res.* 118, 3843-3850, doi:10.1002/jgrc.20279.
- 14) Ishii, M., N. Kosugi, D. Sasano, S. Saito, T. Midorikawa, and H. Y. Inoue (2011), Ocean acidification off the south coast of Japan: A result from time series observations of CO₂ parameters from 1994 to 2008. *Journal of Geophysical Research.*, 116, C06022, doi: 10.1029/2010JC006831.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Bakker, D.C.E., Pfeil, B., Smith, K., Hankin, S., Olsen, A., Alin, S.R., Cosca, C., Harasawa, S., Kozyr, A., Nojiri, Y., O'Brien, K.M., Schuster, U., Telszewski, M., Tilbrook, B., Wada, C., Akl, J.,

- Barbero, L., Bates, N., Boutin, J., Cai, W.-J., Castle, R.D., Chavez, F.P., Chen, L., Chierici, M., Currie, K., Baar, H.J.W.d., Evans, W., Feely, R.A., Fransson, A., Gao, Z., Hales, B., Hardman-Mountford, N., Hoppema, M., Huang, W.-J., Hunt, C.W., Huss, B., Ichikawa, T., Johannessen, T., Jones, E.M., Jones, S.D., Jutterström, S., Kitidis, V., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lauvset, S.K., Lefèvre, N., Manke, A.B., Mathis, J.T., Merlivat, L., Metzl, N., Murata, A., Newberger, T., Ono, T., Park, G.-H., Paterson, K., Pierrot, D., Ríos, A.F., Sabine, C.L., Saito, S., Salisbury, J., Sarma, V.V.S.S., Schlitzer, R., Sieger, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sullivan, K., Sun, H., Sutton, A.J., Suzuki, T., Sweeney, C., Takahashi, T., Tjiputra, J., Tsurushima, N., Heuven, S.M.A.C.v., Vandemark, D., Vlahos, P., Wallace, D.W.R., Wanninkhof, R., Watson, A.J. (2014), An update to the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT version 2). *Earth System Science. Data* 6, 69-90.
- ② Quéré, C.L., Peters, G.P., Andres, R.J., Andrew, R.M., Boden, T., Ciais, P., Friedlingstein, P., Houghton, R.A., Marland, G., Moriarty, R., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Arvanitis, A., Bakker, D.C.E., Bopp, L., Canadell, J.G., Chini, L.P., Doney, S.C., Harper, A., Harris, I., House, J.I., Jain, A.K., Jones, S.D., Kato, E., Keeling, R.F., Goldewijk, K.K., Körtzinger, A., Koven, C., Lefèvre, N., Omar, A., Ono, T., Park, G.-H., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M.R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Schwinger, J., Segschneider, J., Stocker, B.D., Tilbrook, B., Heuven, S.v., Viovy, N., Wanninkhof, R., Wiltshire, A., Zaehle, S., Yue, C. (2014), Global Carbon Budget 2013. *Earth System Science. Data* 6, 235-263.
- ③ Yasunaka, S., Nojiri, Y., Nakaoka, S., Ono, T., Mukai, H., Usui, N. (2014), North Pacific dissolved inorganic carbon variations related to the Pacific decadal oscillation. *Geophysical Research Letters* 41, 1005-1011.
- ④ Yasunaka, S., Nojiri, Y., Nakaoka, S., Ono, T., Whitney, F., Telszewski, M. (2014), Mapping of Sea Surface Nutrients in the North Pacific: Basin-wide Distribution and Seasonal to Interannual Variability. *Journal of Geophysical Research* 19, 7756-7771.
- ⑤ Quéré, C.L., Moriarty, R., Andrew, R.M., Peters, G.P., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S.D., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Boden, T.A., Bopp, L., Bozec, Y., Canadell, J.G., Chini, L.P., Chevallier, F., Cosca, C.E., Harris, I., Hoppema, M., Houghton, R.A., House, J.I., Jain, A.K., Johannessen, T., Kato, E., Keeling, R.F., Kitidis, V., Goldewijk, K.K., Koven, C., Landa, C.S., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I.D., Marland, G., Mathis, J.T., Metzl, N., Nojiri, Y., Olsen, A., Ono, T., Peng, S., Peters, W., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M.R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Salisbury, J.E., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Segschneider, J., Steinhoff, T., Stocker, B.D., Sutton, A.J., Takahashi, T., Tilbrook, B., Werf, G.R.v.d., Viovy, N., Wang, Y.-P., Wanninkhof, R., Wiltshire, A., Zeng, N. (2015), Global Carbon Budget 2014. *Earth System Science. Data* 7, 47-85.
- ⑥ Quéré, C.L., Moriarty, R., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Sitch, S., Korsbakken, J.I., Friedlingstein, P., Peters, G.P., Andres, R.J., Boden, T.A., Houghton, R.A., House, J.I., Keeling, R.F., Tans, P., Arneeth, A., Bakker, D.C.E., Barbero, L., Bopp, L., Chang, J., Chevallier, F., Chini, L.P., Ciais, P., Fader, M., Feely, R.A., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Ilyina, T., Jain, A.K., Kato, E., Kitidis, V., Goldewijk, K.K., Koven, C., Landschützer, P., Lauvset, S.K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lima,

- I.D., Metzl, N., Millero, F., Munro, D.R., Murata, A., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S., Nojiri, Y., O'Brien, K., Olsen, A., Ono, T., Pérez, F.F., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Rödenbeck, C., Saito, S., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Steinhoff, T., Stocker, B.D., Sutton, A.J., Takahashi, T., Tilbrook, B., Laan-Luijkx, I.T.v.d., Werf, G.R.v.d., Heuven, S.v., Vandemark, D., Viovy, N., Wiltshire, A., Zaehle, S., Zeng, N. (2015), Global Carbon Budget 2015. *Earth System Science. Data* 7, 349-396.
- ⑦ Zeng, J., Y. Nojiri, S. Nakaoka, H. Nakajima and T. Shirai (2015) Surface ocean CO₂ in 1990–2011 modelled using a feed-forward neural network, *Geosci. Data J.* 2, 47-51, doi: 10.1002/gdj3.26.
- ⑧ Rödenbeck, C., D.C.E. Bakker, N. Gruber, Y. Iida, A.R. Jacobson, S. Jones, P. Landschützer, N. Metzl, S. Nakaoka, A. Olsen, G.-H. Park, P. Peylin, K.B. Rodgers, T.P. Sasse, U. Schuster, J.D. Shutler, V. Valsala, R. Wanninkhof and J. Zeng, (2015) Data-based estimates of the ocean carbon sink variability - first results of the Surface Ocean pCO₂ Mapping intercomparison (SOCOM), *Biogeosciences* 12, 7251-7278, doi:10.5194/bg-12-7251-2015.
- ⑨ Xiong, X., Matsuda, Y., Hashioka, T., Ono, T., Yamanaka, Y. (2015), Effect of seasonal change in gas transfer coefficient on air–sea CO₂ flux in the western North Pacific. *Journal of Oceanography* 71, 685-701. doi: 10.1007/s10872-015-0313-5
- ⑩ Yamamoto-Kawai, M., Kawamura, N., Ono, T., Kosugi, N., Kubo, A., Ishii, M., Kanda, J. (2015), Calcium carbonate saturation and ocean acidification in Tokyo Bay, Japan. *Journal of Oceanography* 71, 427-439.
- ⑪ Bakker, D.C.E., Pfeil, B., Landa, C.S., Metzl, N., O'Brien, K.M., Olsen, A., Smith, K., Cosca, C., Harasawa, S., Jones, S.D., Nakaoka, S., Nojiri, Y., Schuster, U., Steinhoff, T., Sweeney, C., Takahashi, T., Tilbrook, B., Wada, C., Wanninkhof, R., Alin, S.R., Balestrini, C.F., Barbero, L., Bates, N.R., Bianchi, A.A., Bonou, F., Boutin, J., Bozec, Y., Burger, E.F., Cai, W.-J., Castle, R.D., Chen, L., Chierici, M., Currie, K., Evans, W., Featherstone, C., Feely, R.A., Fransson, A., Goyet, C., Greenwood, N., Gregor, L., Hankin, S., Hardman-Mountford, N.J., Harlay, J., Hauck, J., Hoppema, M., Humphreys, M.P., Hunt, C.W., Huss, B., Ibánhez, J.S.P., Johannessen, T., Keeling, R., Kitidis, V., Körtzinger, A., Kozyr, A., Krasakopoulou, E., Kuwata, A., Landschützer, P., Lauvset, S.K., Lefèvre, N., Monaco, C.L., Manke, A., Mathis, J.T., Merlivat, L., Millero, F.J., Monteiro, P.M.S., Munro, D.R., Murata, A., Newberger, T., Omar, A.M., Ono, T., Paterson, K., Pearce, D., Pierrot, D., Robbins, L.L., Saito, S., Salisbury, J., Schlitzer, R., Schneider, B., Schweitzer, R., Sieger, R., Skjelvan, n., Sullivan, K.F., Sutherland, S.C., Sutton, A.J., Tadokoro, K., Telszewski, M., Tuma, M., Heuven, S.M.A.C.V., Vandemark, D., Ward, B., Watson, A.J., Xu, S. (2016), A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth System Science. Data* 8, 383-413.
- ⑫ Quéré, C.L., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Sitch, S., Korsbakken, J.I., Peters, G.P., Manning, A.C., Boden, T.A., Tans, P.P., Houghton, R.A., Keeling, R.F., Alin, S., Andrews, O.D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L.P., Ciais, P., Currie, K., Delire, C., Doney, S.C., Friedlingstein, P., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Hoppema, M., Goldewijk, K.K., Jain, A.K., Kato, E., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J.R., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P.M.S., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S., O'Brien, K., Olsen, A., Omar, A.M., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rödenbeck, C., Salisbury, J., Schuster, U.,

Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B.D., Sutton, A.J., Takahashi, T., Tian, H., Tilbrook, B., Laan-Luijkx, I.T.v.d., Werf, G.R.v.d., Viovy, N., Walker, A.P., Wiltshire, A.J., Zaehle, S. (2016), Global Carbon Budget 2016. Earth System Science. Data 8, 605-649.

- ⑬ Yasunaka, S., Ono, T., Nojiri, Y., Whitney, F.A., Wada, C., Murata, A., Nakaoka, S., Hosoda, S. (2016), Long-term variability of surface nutrient concentrations in the North Pacific. Geophysical Research Letters 43 (7), 3389-3397.
- ⑭ Zeng, J., Matsunaga, T., Saigusa, N., Shirai, T., Nakaoka, S., Tan, Z.-H (2017, in press) Technical note: Evaluation of three machine learning models for surface ocean CO₂ mapping, Ocean Sci..

(2) 口頭発表

- ① 中岡慎一郎、野尻幸宏、安中さやか、小埜恒夫：「太平洋域の大気海洋間CO₂フラックス時空間分布再現」、日本海洋学会2014年秋季大会、2014年9月13-17日、福岡
- ② Nakaoka, S., Y. Nojiri, S. Yasunaka, T. Ono, J. Zeng and M. Telszewski, Ocean surface pCO₂ and air-sea CO₂ flux distributions in the Pacific Ocean from 1998 to 2009, PICES 2014 Annual Meeting, Yeosu, Korea, 2014.
- ③ Harasawa S., Y. Nojiri, S. Nakaoka and C. Wada, Data processing for atmospheric and oceanic CO₂ measurement by Voluntary Observing Ship, PICES 2014 Annual Meeting, Yeosu, Korea, 2014.
- ④ Wada C., Y. Nojiri, S. Nakaoka, S. Harasawa, S. Yasunaka, C. Miyazaki, H. Tanimoto, H. Nara, F. Kondo, Y. Tohjima, Y. Terao, T. Machida and H. Mukai, Data site of atmospheric and oceanic CO₂ observation for the Ship-of-Opportunity program of NIES, PICES 2014 Annual Meeting, Yeosu, Korea, 2014.
- ⑤ Nakaoka, S., Nojiri, Y., Yasunaka, S., Ono, T., Zeng, J., Telszewski, M., 2014. Ocean Surface pCO₂ and air-sea CO₂ flux distributions in the Pacific Ocean from 1998 to 2009. PICES 2014. PICES, Yeosu, Korea, p. 195.
- ⑥ Tadokoro, K., Kuroda, H., Ono, T., 2014. Decadal scale variation in phosphate concentration in the Oyashio and Kuroshi-Oyashio Transition waters, western North Pacific from 1955 to 2010. PICES 2014. PICES, Yeosu, Korea, p. 79.
- ⑦ 小埜恒夫, 2014. 既存栄養塩データを使用した北太平洋の栄養塩時系列解析：変動シグナルと系統誤差ノイズ. 日本海洋学会2014年度春季大会シンポジウム「海洋における長期変動の研究とその研究に必要な計測標準および分析用標準の開発管理 その6」, 東京.
- ⑧ Nakaoka, S., Yasunaka, S., Nojiri, Y., Zeng, J., Ono, T., Takatani, Y., Kojima, A., Nakano, T., Telszewski, M., 2015. Ocean surface pCO₂ and Dissolved Inorganic Carbon distributions in the Pacific Ocean from 1998 to 2009. AOGS 2015. AOGS, Singapore, p. 118.
- ⑨ Ono, T., Kuwata, A., Tadokoro, K., Ichikawa, T., Nojiri, Y., Nakaoka, S., 2015. Seasonal and interannual variation of pCO₂ in Japan coastal waters AOGS 2015. AOGS, Singapore, p. 119.
- ⑩ Ono, T., Kimura, R., Onitsuka, T., Takami, H., Muraoka, D., 2015. Spatio-temporal variation of pCO₂ in shore-reef waters off Arasaki district, Sagami Bay, Japan. PICES 2015. PICES, Qindao, China, p. 108.

- ⑪ Yamamoto-Kawai, M., Kawamura, N., Ono, T., Kosugi, N., Kubo, A., Ishii, M., Kanda, J., 2015. Calcium carbonate saturation and ocean acidification in Tokyo Bay, Japan. PICES 2015. PICES, Qingdao, China, p. 107.
- ⑫ Yasunaka, S., Nojiri, Y., Nakaoka, S., Ono, T., Mukai, H., Usui, N., 2015. Basin-scale Distribution and Seasonal to Inter-annual Variation of Dissolved Inorganic Carbon over the North Pacific AOGS 2015. AOGS, Singapore, p. 119.
- ⑬ 中岡慎一郎, 安中さやか, 野尻幸宏, 小埜恒夫, 高谷祐介, 小嶋惇, 中野俊也, 2015. pCO₂観測に基づく太平洋の表層全炭酸濃度分布再現. 日本海洋学会2015年度春季大会. 日本海洋学会, 東京, p. 247.
- ⑭ 中岡慎一郎, 野尻幸宏, 安中さやか, 小埜恒夫, 向井人史, 2015. 海洋表層CO₂観測と広域分布推定研究の動向. 日本気象学会2015年度秋季大会. 日本気象学会, 京都, p.164.
- ⑮ 安中さやか, 村田昌彦, 細田滋毅, 小埜恒夫, 野尻幸宏, 和田千里, 中岡慎一郎, Whitney, F.A., 2015. 北太平洋表層栄養塩濃度の長期変動特性. 2015年度日本海洋学会秋季大会. 日本海洋学会, 松山, p. 12.
- ⑯ Yasunaka, S., Ono, T., Nojiri, Y., Whitney, F.A., Wada, C., Murata, A., Nakaoka, S., Hosoda, S., 2016. Long-term variability of surface nutrient concentrations in the North Pacific. PICES 2016. PICES, San Diego, p. 171.
- ⑰ 中岡慎一郎, 和田千里, Jiye, Z., 野尻幸宏, 安中さやか, 小埜恒夫, 2016. 日本周辺海域における高解像度CO₂分圧推定手法の開発. 2016年度日本海洋学会春季大会, 東京, pp. 16S26-P22.
- ⑱ 中岡慎一郎, 野尻幸宏, 安中さやか, Jiye, Z., 林一宏, 小埜恒夫, 2016. 太平洋域のpCO₂経年傾向と年々変動要因. 2016年度日本海洋学会秋季大会. 日本海洋学会, 鹿児島, p. 274.
- ⑲ 安中さやか, 橋岡豪人, 吉川知里, 脇田昌英, 村田昌彦, 千葉早苗, 内田裕, 野尻幸宏, 中岡慎一郎, 笹野大輔, 青山道夫, 児玉武稔, 橋濱史典, 古谷研 (2016) 太平洋表層におけるアンモニア・亜硝酸・硝酸の季節変化. 日本海洋学会2016年度秋季大会, p, 69
- ⑳ 中岡慎一郎, 野尻幸宏, 安中さやか, 曾継業, 林一宏, 小埜恒夫 (2016) 太平洋域の pCO₂ 経年傾向と年々変動要因. 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, p. 274
- ㉑ 林一宏, 中岡慎一郎, 野尻幸宏 (2016) 北太平洋表層における硝酸塩と全炭酸の空間分布とその変動要因. 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, p. 280
- ㉒ Nakaoka, S. (2017) Evaluation of oceanic CO₂ uptake based on global pCO₂ observation database “SOCAT”. The 9th GEOSS Asia-Pacific Symposium. Jan. 11th-13th, Tokyo, Japan.
- ㉓ 小埜恒夫, 中岡慎一郎, 野尻幸宏, 石井雅男, 2017. 黒潮内側域における pCO₂ 上昇速度の時空間変動. 2016 年度日本地球惑星科学連合研究大会, 千葉.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

20年超にわたる国立環境研究所の協力商船観測事業ならびに観測データの迅速な公開体制の構築などが評価され、韓国麗水で開かれた2014年北太平洋海洋科学機構年次総会においてPICES

Ocean Monitoring Service Awardを受賞した。さらに元課題代表者の野尻幸宏国立環境研究所上級主席研究員（現：弘前大学教授）が2016年日本海洋学会春季大会において宇田賞を受賞した。

(5)一般への公表・報道等

中岡慎一郎「21世紀の大海原を測る～新しい商船観測プラットフォームNew Century2～」地球環境研究センターニュース 2014年9月号 Vol.25, No.6

野尻幸宏「PICES海洋モニタリングサービス賞を受賞しました」地球環境研究センターニュース 2014年12月号 Vol.25, No.9

(6)その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

太平洋域における海洋CO₂観測の継続とデータ発信は環太平洋域の先進国であるわが国が果たすべき役割であり、本課題が率先してSOCATの太平洋地域活動を推進することは地球観測におけるリーダーシップ活動となる。本課題を用いた国立環境研究所のプログラムにより、各研究機関が有するCO₂観測データのメタデータ改訂をサポートし、データの国際流通促進に貢献することは海洋CO₂の専門家を有する公的機関である国立環境研究所の果たすべき役割である。本課題の下で実施された表層海洋pCO₂国際データベースSOCATの品質確認作業は、SOCAT運営責任者の求めに応じ責任海域である北太平洋域のみならず太平洋赤道域や北大西洋域にまで及び、新版の公開に向けてSOCATに対して積極的な貢献を果たしている。国立環境研究所によるSOCATへの良質かつ大量の観測データ提供や、品質確認作業による貢献は高く評価されている。SOCAT新版の品質確認作業では引き続き国立環境研究所が主導して他機関に観測メタデータの改訂を促し品質フラグの改善につなげており、SOCAT関係者に広く周知することで、今後更に信頼性の高いデータベースがSOCATにおいて構築できるものと期待される。さらに平成26年度からは国立環境研究所が迅速にデータ確定を行っている協力商船観測データを提供することでGlobal Carbon Projectが毎年公表しているGlobal Carbon Budgetに貢献した。これらの成果はPICESや日本海洋学会で評価され、国立環境研究所や前課題代表者の野尻幸宏弘前大教授(前国立環境研究所上級主席研究員)がモニタリングサービス賞や宇田賞を受賞することになった。

また全球のpCO₂分布推定課題に関しては、異なる手法によって再現された複数の全球pCO₂分布データセットを比較する相互比較実験（Surface Ocean CO₂ Mapping intercomparison: SOCOM）計画が平成26年度より開始した。本課題ではBP法による全球pCO₂分布や先行課題で推定に用いたSOM法を発展させた手法によるpCO₂分布データセットを国立環境研究所がSOCOM計画に提供しており、世界各国の研究機関から計13セットものプロダクトを集めて比較がなされた。同年度には国立環境研究所が主催した研究集会がつくばで開催され、その議論を経て成果を論文として出版した。

北太平洋の栄養塩マッピングに関しては、国内外の機関による観測データを統合して利用することにより、ニューラルネットワーク手法と最適内挿法による栄養塩濃度分布推定に取り組み、観測データの時空間補間を行った。これらの研究成果は科学研究費補助金の新学術領域研究で進められた『新海洋像：その機能と持続的利用』におけるメインテーマの一つである「新しい海洋区分の創設」に活用され、栄養塩の季節変動や長期変動と気候変動との関連について解析を進め、成果を論文として出版した。

水産研究・教育機構が本課題で実施している観測研究については、国立環境研究所の観測ではカバーできていない日本沿岸海域のCO₂吸収について日本の河川が果たす役割を明らかにしつつあり、知見の乏しい沿岸域と外洋域をつなぐ成果を得ることにより今後の低炭素社会構築に向けた政策貢献が期待できる。

このように、本課題の遂行によって多くの波及効果があったことは明らかであり、今後新しい課題に引き継ぐことでさらなる研究の発展と政策立案に貢献していきたい。