

地球一括計上

課題名	国際統合データベースによる海洋表層CO ₂ 分圧と栄養塩類のマッピングに関する研究		
担当研究機関	国立研究開発法人国立環境研究所 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		
研究期間	平成26-28年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	64,827千円 (うち28年度 19,667千円)

研究体制

- (1) 海洋表層pCO₂観測データマネージメントと国際データベースSOCATへの貢献
(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (2) ニューラルネットワーク法による海洋表層pCO₂マッピングの全球化
(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (3) 太平洋の表層栄養塩観測ネットワークとデータ利用 (国立研究開発法人国立環境研究所)
- (4) 水産調査船による海洋表層pCO₂観測と栄養塩類サンプリングネットワーク
(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)

研究概要

1. 序 (研究背景等)

重要な生物地球化学パラメータであるCO₂化学種と栄養塩類の海洋表層における分布の広域面的推定 (マッピング) は、地球規模炭素循環モデルの重要な検証データとなるため、推定の元になる全球海洋観測データセット形成が急務である。本課題では、海洋表層CO₂分圧(pCO₂)の国際統合データベース(SOCAT)において国立環境研究所が果たしている太平洋域担当中核機関の役割とそのデータ発信機能を強化する。先行研究で確立したニューラルネットワーク法のpCO₂マッピングへの適用を全球マッピングに拡張する。同じく観測データを元にした広域マッピングを表層海水の栄養塩類 (硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩) で行うために、新たな観測ネットワークを開始し、北太平洋のマッピングに着手する。

2. 研究目的

現在、全世界の海洋CO₂観測研究者が共同で取り組んでいる地球観測国際統合データベースであるSOCAT: Surface Ocean Carbon Atlasの活動を全面的に支援し、国立環境研究所の貨物船観測データを迅速に確定するとともに、国立環境研究所がSOCATの太平洋ハブとしての役割を果たす。

国際統合データベースSOCATを利用して、高い空間分解能でpCO₂の広域面的推定 (マッピング) を全球海洋で行い、大気海洋間CO₂交換量の年々変動に関する知見を得る。また、海洋炭素循環モデルの構築と検証に必要な海水中の全炭酸濃度の時空間変動マッピングをpCO₂マッピングの応用として行う。

次に今後のグローバルな観測ネットワーク構築を目指して、太平洋の表層栄養塩観測国際ネットワークを立ち上げ、水産研究・教育機構とともにネットワークの拡充を図る。また商船への硝酸塩センサー設置によって得られた観測データを用いて北太平洋域の硝酸塩濃度分布推定手法について開発する。さらに空間分解能の高い北太平洋広域のマッピングに着手する。

3. 研究の内容・成果

(1) 海洋表層pCO₂観測データマネージメントと国際データベースSOCATへの貢献

国立環境研究所の定期貨物船によるCO₂観測は、本課題のもとで北太平洋航路、西部太平洋航路、アジア航路のすべてについて観測データ処理・確定の迅速化が進み、半年以内のデータ公開が可能な体制となっている。海洋CO₂観測データについては国際データベースであるSOCATに提出され品質確認がなされた上で最新版である第4版が昨年9月に公開された。国立環境研究所では新版の公開に向けて今課題期間中に242航海分の観測データを提出しただけでなく、北太平洋海域や

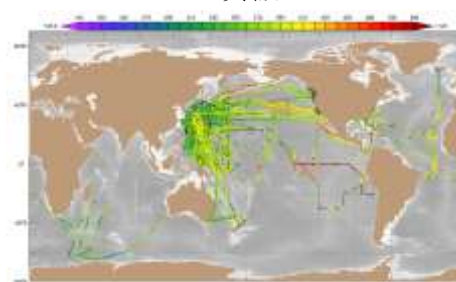


図1 SOCAT第5版向けに実施した品質確認分布

太平洋赤道域（南緯30°～北緯30°）、北大西洋域で各研究機関が実施した航海データ1250航海分以上の品質確認を行った。次期新版となる第5版向けに実施した品質確認のデータ分布を図1に示す。確認作業では、一部研究機関の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ため、各観測担当者やSOCATの管理者に連絡を取りメタデータの改善をサポートするなどして、良いフラグ付けを行うことができた。SOCAT全体では、国立環境研究所の観測データについてフラグAとBが占める割合は23.0%にあたり、太平洋域のハブ機関として国立環境研究所が果たす役割が依然として大きいことを示している。

(2) ニューラルネットワーク法による海洋表層pCO₂マッピングの全球化

本研究では、学習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、ニューラルネットワーク手法ある逆誤差伝搬(BP)法、自己組織化マップ(SOM)法、サポートベクターマシーン(SVM)法を用いて関連付け、全球のpCO₂分布を推定した。最終的に1990年から2014年のpCO₂分布を再現するとともに、大気海洋間CO₂交換量の年々変動について明らかにし(図2)、大気と海洋循環の変動により、20世紀最大のエルニーニョが発生したと言われる1998年には海洋による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とを示した。また近年は、全球海洋の年間CO₂吸収量が顕著な増加傾向にあることが示された。

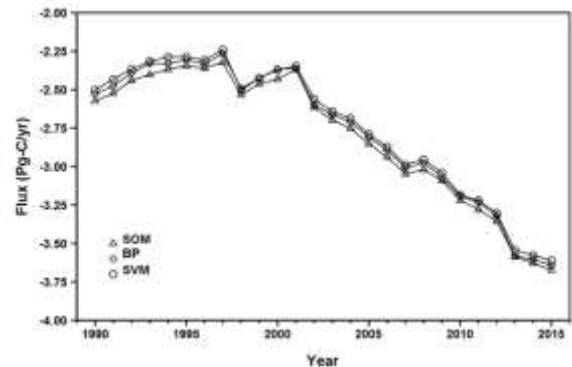


図2 異なる推定手法による全球海洋大気海洋間CO₂交換量の年々変動。負の値は海洋によるCO₂吸収を意味している。(Zeng et al., 2017より)

(3) 太平洋の表層栄養塩観測ネットワークとデータ利用

本課題では、日本-北米間を航行する協力船舶New Century2に連続硝酸センサーTrisOS社製ProPSを設置し、継続して観測を行っている。本研究では連続硝酸塩計の干渉の補正式を作成し比色法の測定値と比較し検証を行った。その結果相関係数 r^2 で0.94と非常に高い相関が得られ、この補正式を用いることで連続硝酸塩計による観測が可能であることを示した。図3(a)は観測で捉えられた暖水渦の表面の硝酸塩濃度と海面水温と塩分の分布である。時計回りの暖水渦の中心部は栄養塩が枯渇しているが、その縁辺部は硝酸塩濃度が高く、特に渦の東側縁辺は親潮起源の硝酸塩の豊富な海水を取り込むため、渦の西側縁辺部に含まれる硝酸塩の量より多くなっている様子を観測した。次に反時計回りの冷水渦を捉えた観測結果を図3(b)に示す。冷水渦は中心に近づくとき栄養塩が高くなり、縁辺部は栄養塩が低くなる。このように、本課題で連続硝酸塩計を用いることにより北太平洋域においてメソスケール渦の表層の硝酸塩分布変動を初めて明らかにすることができた。さらに、New Century 2が35°N線に沿って航海することが多いことから、この海域の硝酸塩の時系列変化の解析を試み、その結果北太平洋中部は硝酸塩濃度変動が大きいことがわかった。今後栄養塩供給のプロセスの理解が進み高精度の栄養塩の分布の推定モデルに大きく寄与することが期待される。

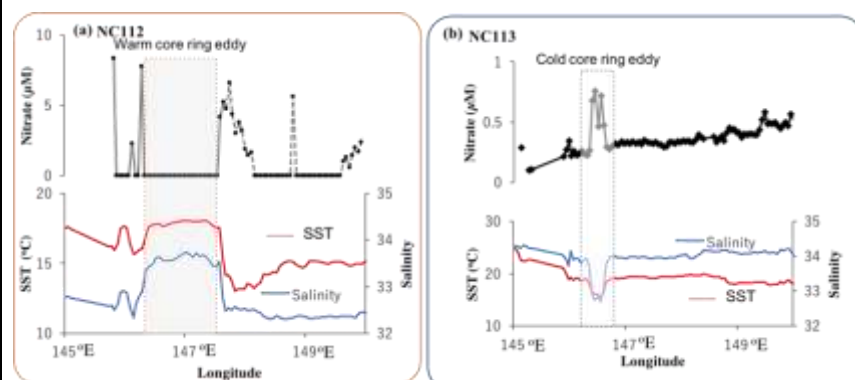


図3(a) NC2第112次航海における硝酸塩濃度と海面水温、塩分の経度変化。(b) NC2第113次航海における硝酸塩濃度と海面水温、塩分の経度変化。

さらに本課題では、国内外の機関による採水観測で得られた栄養塩データを利用し、北太平洋における栄養塩分布をニューラルネットワーク手法で推定した。図4は、作成した2つの10年間平均の3月と8月の栄養塩分布である。表層栄養塩濃度は、年間を通して亜寒帯域で高く、亜熱帯で低い。また、すべての海域で、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、全炭酸(DIC)濃度の勾配に比べて大きく、特に冬はその差が顕著である。冬から夏にかけて、表層栄養塩は減少していくが、亜寒帯東部海域より亜寒帯西部海域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。亜熱帯海域では、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。さらにこれら栄養塩の時空間分布から、北太平洋海域が9つの海域に区分できることを初めて示した。さらに別手法の分布推定手法として最適内挿法による推定を行い、本手法が各海域でのトレンドや長期変動を評価する解析に適した手法であると評価できた。

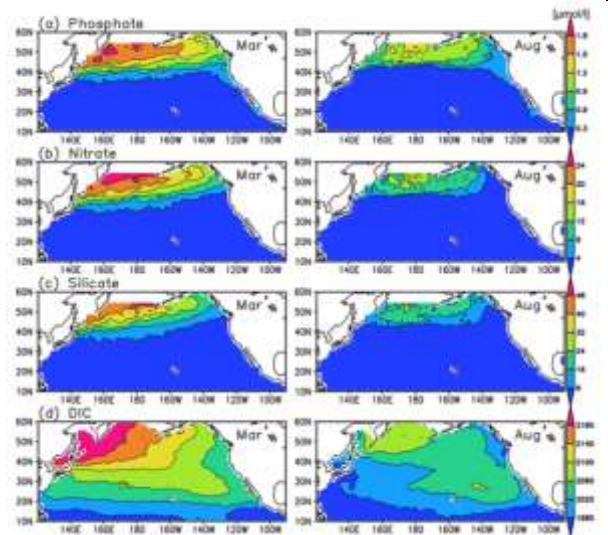


図4 3月(左)と8月(右)における(a)リン酸塩、(b)硝酸塩、(c)ケイ酸塩、(d)全炭酸濃度分布 (Yasunaka et al. 2014 より)

(4) 水産調査船による海洋表層 pCO₂ 観測と栄養塩類サンプリングネットワーク

国立環境研究所の貨物船による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、北太平洋海域の海洋表層のpCO₂及び栄養塩類の時空間分布再現の精緻化を目指して、水産研究・教育機構の水産調査船2隻より、日本近海のpCO₂観測と栄養塩類測定のための航走中の表面海水採取を行った。水産調査船による航走pCO₂観測と表層採水観測については昨年まで33航海のべ440日分の観測データを取得した(図5)。得られた観測データはデータ確定を行った後にSOCATへのデータ登録を済ませ、本課題による解析にも用いた。観測された沿岸域のpCO₂トレンドは、大気中のCO₂増加率と同程度である一方、水温塩分の低い領域では大気CO₂増加率よりも高い値を示した。また水産研究・教育機構が所有する調査船「蒼鷹丸」には国立環境研究所と同様に連続硝酸計を取り付けてpCO₂-硝酸塩濃度同時測定を実現した。遠州灘沖である東経138°測線上におけるpCO₂と硝酸塩濃度の緯度分布からpCO₂と硝酸塩濃度の変動には密接な関連があることが分かる。硝酸塩とpCO₂の相関プロットから、硝酸塩で4μMほどの変化が、pCO₂では約15μatmの変化に対応している事がわかる。もしこの硝酸塩変化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4μMの硝酸塩の消費に伴って約30μmol/kgの全炭酸が消費され、40μatm以上のpCO₂変動に相当するはずであり、観測されている15μatm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とそれらの混合過程を捉えたものと推定された。

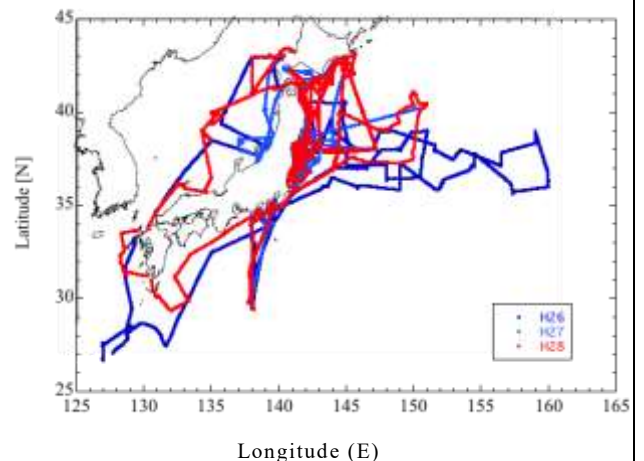


図5 各年度の水産調査船の観測航路

4. 考察

本課題では、国立環境研究所が実施している協力商船観測について迅速なデータ公開を行っている。さらにpCO₂観測の国際的な統合データベースであるSOCATに北太平洋海域の責任機関として貢献を行うため、国立環境研究所の観測データをSOCATに登録しただけでなく、各研究機関が集めた1250航海以上の観測データとそのメタデータについて品質確認を本課題期間中に実施した。また本

作業においては各機関の観測データにより良い品質フラグを付けられるように助言を行うなどのサポートを行った。国立環境研究所を含め各海域の責任機関による新版向けの品質確認作業は2017年3月に終了し、次期改訂版である第5版は2017年8月の10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC 10) で公開される予定である。現在、SOCATはGlobal Carbon Budget年次レポートに貢献するため、毎年データベースを更新することになっており、今後の新版作成においても国立環境研究所の果たす役割は大きいといえる。

SOCATのデータセットを利用して、ニューラルネットワーク手法の一種であるBP法やSOM法、SVM法を用いた全球 $p\text{CO}_2$ 分布推定に取り組んだ。ニューラルネットワーク手法は、非線形的な現象を扱うことができる解析手法であり、複数の手法を用いて1990年から2014年までの全球月間 $p\text{CO}_2$ 分布を再現し、 $p\text{CO}_2$ および大気海洋間 CO_2 交換量の年々変動を評価し、エルニーニョ南方振動が CO_2 交換量の年々変動に与える影響について考察した。

海洋における生物地球化学循環を把握するために、国立環境研究所が観測を実施している協力商船に連続硝酸塩計を設置し連続観測を実施した。その結果、日本近海での冷水渦と暖水渦を横断する航海において、硝酸塩濃度の空間変動に違いが見られることが観測からはじめて明らかとなった。また、国立環境研究所やIOS（カナダ海洋研究所）等との歴史的な観測データを統合することで、ニューラルネットワーク手法から北太平洋の過去10年間にわたる月毎の栄養塩分布を再現することに初めて成功した。その結果、北太平洋は栄養塩の季節変動の違いから9つの海域に区分できることを示した。さらに、硝酸塩やケイ酸塩の変動比が海洋生物種の分布の違いによって空間的に異なることを示した。このような、年々変動を伴う栄養塩時空間分布再現は北太平洋においては初めての試みであり、海洋物質循環モデルの検証のために本手法を用いた全球での栄養塩分布推定への期待が今後高まるものと考えられる。さらにこれらの観測データを利用し、最適内挿法と呼ばれる手法を用いた時空間補間を行った。得られた結果から、同手法は時空間的に欠損がない分布を把握するには適切でないものの、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有用であることがわかった。

水産調査船による $p\text{CO}_2$ 観測および栄養塩測定のための海水サンプリングは予定通り実施しており、貨物船観測ではカバーできない日本沿岸の観測データを得ることが出来た。その結果から、沿岸域の $p\text{CO}_2$ 増加率を評価するとともに、河川からの栄養塩供給が沿岸域の $p\text{CO}_2$ 変動に与える影響を定量的に評価できる可能性が示唆された。また調査船に連続硝酸計を設置し、遠州灘沖における $p\text{CO}_2$ 分布と合わせて解析を行った。その結果、栄養塩の消費では説明できない $p\text{CO}_2$ の変動が示唆され、生物活動だけでなく異なる水塊との混合によってそのような変化が引き起こされていると考えられた。

5. 波及効果

太平洋域における海洋 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 の専門家をも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 $p\text{CO}_2$ 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年度以降、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 $p\text{CO}_2$ 分布推定課題に関しては、複数の全球 $p\text{CO}_2$ 分布プロダクトを比較する相互比較実験（Surface Ocean CO_2 Mapping intercomparison: SOCOM）計画が平成26年度より実施されており、本課題で作成したBP法による全球 $p\text{CO}_2$ 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 $p\text{CO}_2$ 分布データセットもSOCOM計画に提供し、国内外の研究機関から計13セットものプロダクトを集めて比較がなされた。課題期間中には国立環境研究所が主催した研究集会在つくばで開催され、その議論を経て成果を論文として出版することができた。

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として期待できる。

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る。今後はこれまで得られた成果を新しい課題に引き継いでさらに研究に取り組んでいきたい。