

海洋表層CO<sub>2</sub>分圧観測国際データベース形成と海洋CO<sub>2</sub>交換広域推定に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

地球環境研究センター		野尻幸宏
地球環境研究センター	上級主席研究員室	安中さやか
	同	原沢寿美子
	同	和田千里
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

平成23～25年度合計予算額	56,803千円
(うち、平成25年度当初予算額)	19,223千円)

[要旨] 高精度の海洋pCO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>分圧) 観測データセットの国際データベース形成とその利用促進を目的として(1) 国立環境研究所(以下、国環研)の海洋pCO<sub>2</sub>観測のデータ処理プロセスを高度化し、運用が開始された国際的海洋表層pCO<sub>2</sub>統合データベースに継続的に登録をすることで国際活動に貢献すること、(2) 海洋pCO<sub>2</sub>の経年変化を含む詳細な変動を明らかにする新たな解析手法であるニューラルネットワークの太平洋海域への適用を行って、海洋のCO<sub>2</sub>吸収・放出変動の広域的な推定を行うこと、の2つについて研究を実施した。(1)については、北太平洋航路、南北太平洋航路における国環研の協力貨物船のpCO<sub>2</sub>データ確定に必要な関連測定項目のデータ取得の改善とデータ確定の迅速化を進め、観測から遅延なくデータ確定作業が進むようデータ処理プロセスを改善した。その結果、国際統合データベースの第2回データ収集および第3回データ収集で、最新の観測データまでの登録を終えた。また、国内機関の過去のpCO<sub>2</sub>データセットの登録支援を行った。国際統合データベース作成活動においては、北太平洋の責任機関として参画し、各国機関から寄せられた観測データの品質管理を行った。(2)については、太平洋の海洋表層pCO<sub>2</sub>の経年変動を含むマッピングをニューラルネットワーク手法で推定する研究を実施し、衛星観測で得られる海面水温分布と客観解析で得られる海洋混合層深度等を使って、1998-2008年の月毎の北太平洋表層海水のpCO<sub>2</sub>分布推定を行い、結果を利用して年々変動の状況とその要因解析を行った。さらに、国際統合データベースを用いて南太平洋と南大洋太平洋セクターを含む全太平洋のpCO<sub>2</sub>分布推定を行った。また、全球推定にむけての新たな手法開発を進めた。加えて、本課題で得られた北太平洋のpCO<sub>2</sub>分布推定を基にして表層海水中の全炭酸の推定を行うことで海洋CO<sub>2</sub>の変動を引き起こす生物生産量の現実的な分布推定を明らかにするとともに、全炭酸の年々変動が太平洋10年規模振動と呼ばれる気候変動と関連があることを明らかにした。

[キーワード] 海洋表層CO<sub>2</sub>分圧、貨物船観測、国際統合データベース、太平洋、分布推定

## 1. はじめに

海洋は地球上で最大の自然CO<sub>2</sub>吸収源でその量は膨大であるが、大気と十分にガス交換するのに必要な時定数が極めて大きいと、現代大気中のCO<sub>2</sub>濃度に対し非平衡状態にある。そのため海洋表層CO<sub>2</sub>分圧 (pCO<sub>2</sub>) の平均は大気CO<sub>2</sub>分圧より低く、その分圧差が海洋CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>吸収が最近10年間（2002-2011年）についての推定では毎年2.4 PgC程度働いていると見積もられ、大気CO<sub>2</sub>濃度増加抑制に寄与している。この海洋CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>吸収源に与える影響を把握し海洋CO<sub>2</sub>吸収の脆弱性を明らかにすることを通して、人為起源CO<sub>2</sub>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。

海洋表層pCO<sub>2</sub>は海洋観測でしか測定できないパラメータであるので、その全世界的な観測網の維持・運用を国際協力のもとで行う体制が作られ、日本は北太平洋と西太平洋で重要な役割を担っている。国環研では、1995年以来北太平洋の海洋表層CO<sub>2</sub>分圧観測を継続実施してきており、1995年から2014年の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、北太平洋中緯度以北および太平洋西部海域のCO<sub>2</sub>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。わが国の海洋pCO<sub>2</sub>観測では、気象庁と国環研において一定海域の定常観測の継続体制が確立されており、国際的に高く評価されている。

海洋表層のCO<sub>2</sub>分圧 (pCO<sub>2</sub>) 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として、UNESCO/IOCCP (International Ocean Carbon Coordination Project) によるSOCAT (Surface Ocean Carbon Atlas) 計画の進行で、全球を対象とした海洋pCO<sub>2</sub>データベースの構築体制（国際データセンター）が確立した。本課題では、国環研の北太平洋・西太平洋の貨物船観測をサポートし、観測データの迅速な登録を進めるとともに、西部太平洋域の観測を実施する他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、国環研が果たすことを目的の一つとして提案された。太平洋域の海洋CO<sub>2</sub>観測推進と観測データの発信は、太平洋域の先進国であ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、それを国環研がリードすることに本課題が貢献している。SOCATは、2011年に第1版を一般公開し、引き続き観測データを追加した第2版を2013年6月に公開した。2013年12月に第3版向けのデータ収集を締め切り、その品質管理と公開に向けたプロセスを現在進めている。この一連のデータベースの形成と国際流通の活動において、国環研は本研究課題のもとで太平洋域のハブの機能を果たしている。

また、国環研のデータセット、国内他機関の観測データセット、SOCATで得られる国際データベースのデータセットを統合解析し、ニューラルネットワーク手法を用いて、年々の月毎のpCO<sub>2</sub>分布推定を行うことが本課題の狙いである。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pCO<sub>2</sub>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pCO<sub>2</sub>を非線形的に推定する手法であり、海域毎のCO<sub>2</sub>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する。本研究課題では、国環研の観測データ利用による北太平洋のpCO<sub>2</sub>推定から、国際データベースのデータを利用する太平洋全域のpCO<sub>2</sub>分布推定と全球推定の手法開発、加えてpCO<sub>2</sub>分布推定結果から全炭酸の分布を得て北太平洋の生物生産分布を解析する研究に発展させた。

## 2. 海洋pCO<sub>2</sub>国際統合データベース (SOCAT) 太平洋ハブ

### 2. (1) 研究目的

国立環境研究所で実施している太平洋域の定期貨物船による海洋表層pCO<sub>2</sub>観測のデータ処理・確定プロセスを迅速化し、速やかなデータ公開の実現により国内外のデータ利用促進を図る

ことを目的とする。地球温暖化対策に貢献する二酸化炭素モニタリングデータの利用促進のための、データ取得技術向上、データ品質向上に加え、効率的なデータ提供システムを整備する。

国立環境研究所では、1995年から日本-北米航路での海洋表層CO<sub>2</sub>分圧観測を始め、さらに2005年からは日本-オセアニア航路にて同様の観測を行っており、これらのデータセットは主に4つのポータルサイトSOCAT (Surface Ocean Carbon Atlas <http://www.socat.info/>)、SOOP (Ship of Opportunity <http://soop.jp/>)、CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center <http://cdiac.ornl.gov/>)、DIAS (地球環境情報統融合プログラム <http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/dias>)から公開している。

本プロジェクトは、UNESCO/IOCCP (International Ocean Carbon Coordination Project) が支援する全球を対象とした海洋pCO<sub>2</sub>を収集する国際データセンターSOCATに一研究機関として最も大量の観測データを提供している。また、国際データ収集の実施に際し太平洋域のハブ機能を果たしている。

## 2. (2) 研究方法

国環研では、太平洋域で運航している民間貨物船の協力を得て、洋上大気と表層海洋のpCO<sub>2</sub>観測を実施している。航行中の観測においては、10秒間隔で大気海洋のCO<sub>2</sub>データを計測するという高頻度データ取得を行っているので、空間的に密なデータセットが得られている。本課題では、この大量に得られる観測データに対してほどこす迅速な高精度品質管理の手法を検討し改良を加えた。また、前項で示した表層海洋pCO<sub>2</sub>国際データベースを作成する進行中のプロジェクトSOCAT (Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas) においては、本課題を活用して日本を含む北太平洋のデータの収集・品質チェックを行い、SOCATの一つの拠点の役割を担っている。本課題のもとで、国環研の観測においてはSOCATのデータ要求に合わせた計測センサーの追加を行うとともに、観測協力船上に設置している観測装置の測定の正確さやデータ取り扱いの確実さを目指すシステム改善を行い、それに合わせたデータ処理の手法改良を行ってきた。

国環研では、日本～アメリカ間を6～8週間程度で航行するトヨフジ海運(株)所属定期貨物船Pyxis (2001年11月より観測開始 2013年4月設備等の老朽化のため機器を撤去して終了)と、日本～オーストラリア～ニュージーランド間を6週間で航行するトヨフジ海運(株)所属定期貨物船Trans Future 5 (2005年11月より観測開始)の2隻で海洋表層のCO<sub>2</sub>観測を行っている。計測しているデータ項目は、大気と海洋(平衡器で平衡にした空気)のCO<sub>2</sub>濃度、大気圧、塩分、海面水温、平衡器水温、平衡器室気圧などで、これらの連続計測データは10秒間隔でデータ収納され、空間・時間的に密なデータセットが得られるようになっている。

表層海水のCO<sub>2</sub>分圧を求めるために、タンデム型気液平衡器により表層海水と平衡にした空気のCO<sub>2</sub>濃度を測定している。タンデム型気液平衡器には、船底に設けた採水口から連続的にポンプ吸引された海水が導入される。平衡器では、流下する海水の下方から注入されるバブリング空気と海水と空気を平衡にしたうえ、上方に配置したミキサー型平衡器で器内の羽根に海水をあてて、気液平衡を十分に達成にする。この平衡器は、海水と空気の平衡プロセスで起こりうる圧力効果を回避するように工夫するように設計された。従来型の手法による海水のCO<sub>2</sub>分圧測定では、平衡器とCO<sub>2</sub>検出器である非分散赤外線分析計(NDIR)との間のループ状流路に空気を循環させる方式の平衡器を用いことが多く、応答速度が比較的遅くなり、時間的に連続な計測を行うこ

とが難しかった。タンデム平衡器を用いることで、NDIR には平衡器から出た空気を連続的に繰り込めばよい仕組み（フロースルー）を実現し、完全な連続計測が早い時定数（2 分以内の応答速度）で行えるようになった。平衡器は大気に解放されている構造のため、平衡器内で海水と空気は計測室の気圧のもとで平衡が達成される。平衡空気は、除湿系を通して NDIR に導入されてその CO<sub>2</sub> 濃度が測定される。

観測データの品質管理のためには、pCO<sub>2</sub> 導出のために必要な種々の連続計測センサー類の定期的な較正が必要である。大気圧および計測室気圧（平衡器圧と極めて近い）を求めるためには、船橋に備え付けられた気象データ通報用の気圧計（名古屋地方気象台が定期的に名古屋港入港時に検定している）と、CO<sub>2</sub> 計測系関連の気圧センサーを比較較正している。海水の塩分は、船上で定期的に採取している海水試料を国環研に持ち帰り国際標準海水と比較測定を行ってボトル値を得て、船上の連続計（サーモサリノグラフ）データを補正する値を得ている。

船底水温と平衡器水温は、これまでは、半年に一度程度の日本入港時に、船底および平衡器の温度計である白金測温抵抗体と高精度水温温度計（SBE社製、SBE-21型サーモサリノグラフ）で恒温水槽の温度を同時計測して校正式を作成していた。しかしながら、白金測温抵抗体の温度分解能は0.02度程度と必ずしも十分ではないので、2011年度に船底水温計をより高精度な温度計（SBE社製、SBE-38型）に交換することで、計測値の精度・確度を高めた。平衡器水温は従来、温度分解能0.02度の白金測温抵抗体を平衡器内に取り付けて計測していたが、最新の小型高精度水温塩分計（SBE社製、SBE-45型）を、平衡器に近い部分で分岐した水路に取り付け、より正確な平衡器水温を得る改良を行った。高精度水温塩分計の計測値は、検証航海において平衡器内に臨時に取り付けた高精度水温計（SBE社製、SBE-38型）と比較して正確さを確認した。2012年度には、平衡器内温度計を白金測温抵抗体計測から、高精度水温計（SBE社製、SBE-38型）に交換した。これら高精度温度計は、米国シーバード社の超精密水槽で校正されており、経年ドリフトが極めて少ないことがわかっている。今回の水温計の高精度化によって、平衡器水温の校正作業が不要となり、不確実さを避けることができるようになった。船底水温計の高精度センサーへの交換と合わせて、pCO<sub>2</sub> 値確定に必要な温度データの信頼性を高めることができ、pCO<sub>2</sub> データ品質管理が向上した。海洋pCO<sub>2</sub> 計測のためのNDIRは、1日2回ゼロガスを含む5種類の標準ガスを導入して計測値を較正している。使用している4濃度の標準ガスは、国環研で長期に維持しているCO<sub>2</sub> 標準ガス濃度スケール（NIES2009スケール）に準拠している。

観測データ回収後に行われるデータ処理のスキームを図1および図2に示す。まずGPSで取得している時刻で全てのデータの時刻を一致させる。大気圧・平衡器室気圧は、保守業務を依頼している船員による1日3回程程度の船橋気圧計読取値で連続センサーデータを較正する。連続計測塩分は、先に示したようにボトル値で連続計データを較正する。大気と海洋のCO<sub>2</sub> 濃度については、標準ガス注入時の測定値から校正式を作り、標準ガスで挟まれた区間に対し較正を行う。その後、xCO<sub>2</sub>（平衡空気の乾燥後のCO<sub>2</sub> モル分率）、pCO<sub>2</sub>（海水のCO<sub>2</sub> 分圧）、fCO<sub>2</sub>（海水のCO<sub>2</sub> の逃散度）の計算を行った後、異常値の検出・評価、船上での機器停止や人為的操作の影響があると思われる区間の削除を行う。収録されている10秒値データから10分平均値データセットを作成し、港内データの削除を行う。10分値データセットの水温、塩分、xCO<sub>2</sub>、pCO<sub>2</sub>、fCO<sub>2</sub> 値には10分間における標準偏差値を加えて最終プロダクトとする。本課題のもとでこの処理プロセスを見直して迅速化を図りデータの早期公開を実現した。

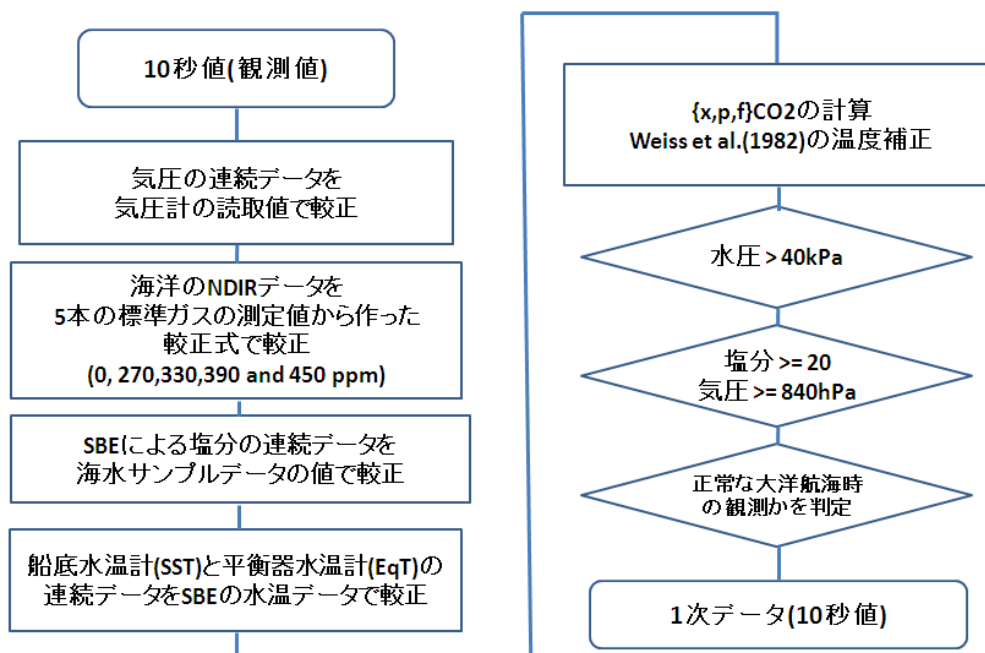


図1  $p\text{CO}_2$ の1次データ(校正済み10秒値)作成スキーム

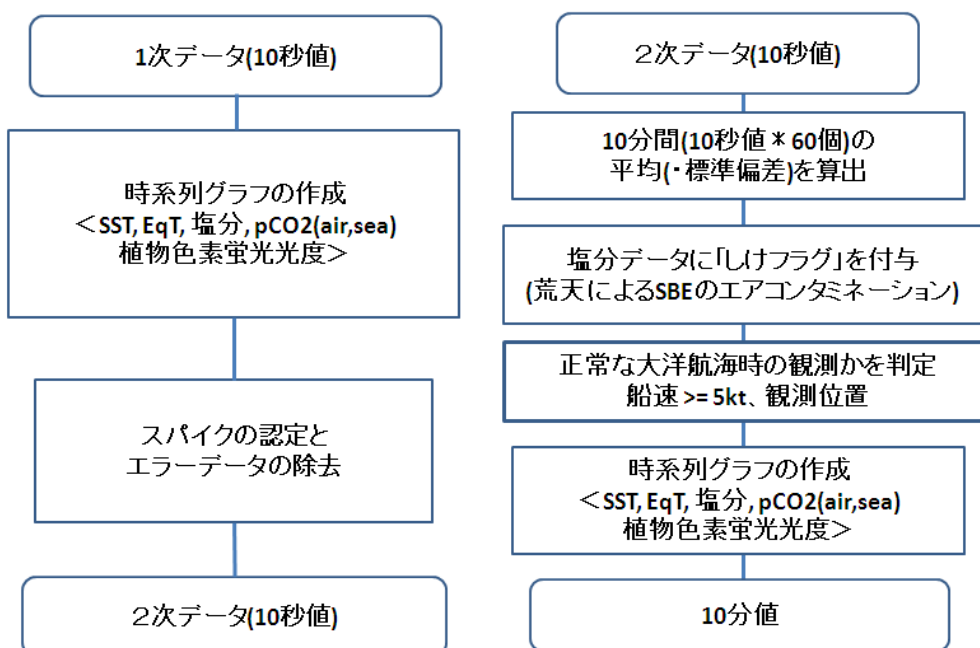


図2  $p\text{CO}_2$ の最終データ(標準偏差付10分平均値)作成スキーム

## (3) 結果・考察

2. (3) ① オセアニア航路における  $pCO_2$  観測値の時系列解析

オセアニア航路の協力貨物船であるTrans Future 5のデータセット確定によって、2000年以降の観測事例が極めて少ない南太平洋西部の $pCO_2$ 観測データカバレッジが良くなり、後述するニューラルネットワーク手法の海域拡大の必要な準備を行うことができた。確定データを利用して、オーストラリア東方海域であるタスマン海の海洋表層 $pCO_2$ やその他の基本項目の季節変動・経年変動特性を解析した。

注目した3海域は、図3に示したTrans Future 5の航路上でデータが多数蓄積された領域であり、タスマン海の亜熱帯域（南緯22.5-27.5度、東経162.5-167.5度の領域平均：図3(a)）・中緯度西部域（南緯32.5-37.5度、東経152.5-157.5度の領域平均：図3(b)）・中緯度東部域（南緯32.5-37.5度、東経167.5-172.5度の領域平均：図3(c)）である。

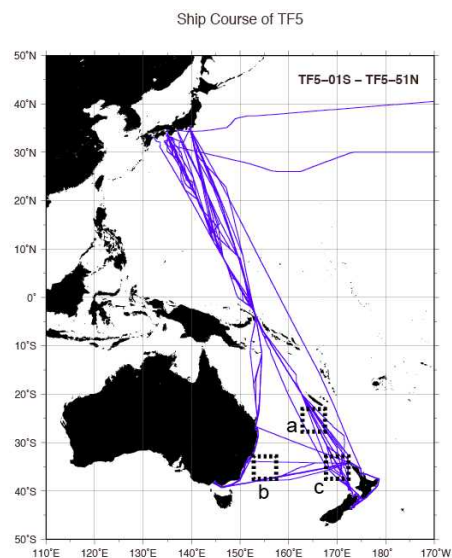


図3 TransFuture 5 の航路と解析対象海域調査対象海域

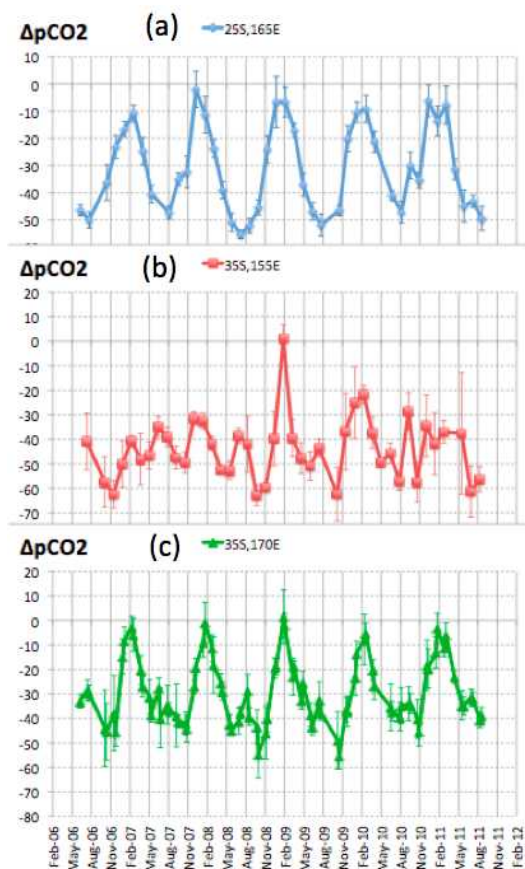


図4 タスマン海3海域における $\Delta pCO_2$  (海洋と大気の $pCO_2$ 差)の時系列

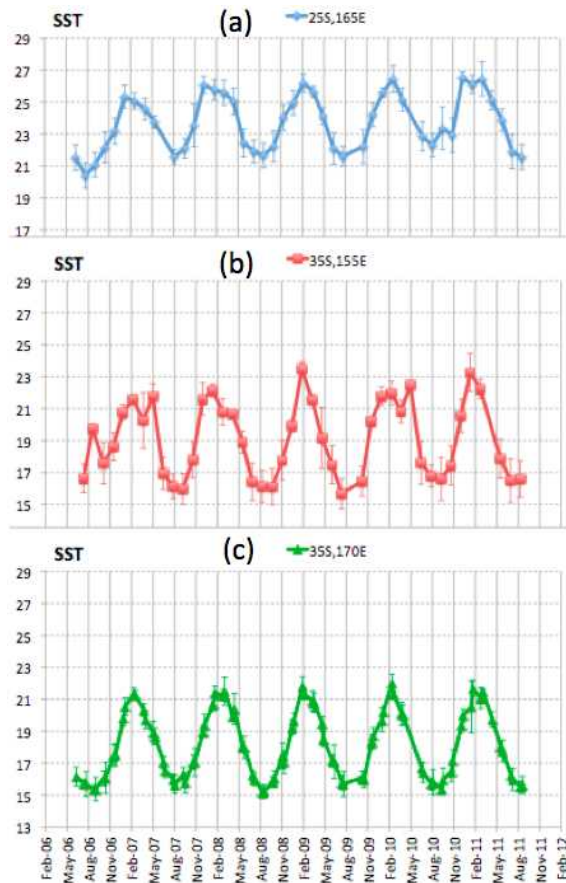


図5 タスマン海3海域における表面水温の時系列



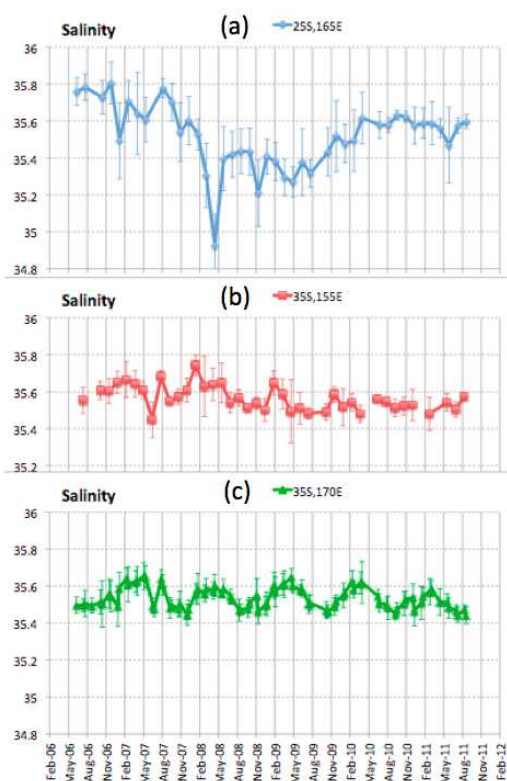


図6 タスマン海3海域における  
表層塩分の時系列

これを見ると、タスマン海の亜熱帯域では5年強のデータで有意水準は低いですが昇温傾向（0.25度/年）がみられる。中緯度海域(b), (c)ではSSTの昇温傾向はほとんどみられない。中緯度東部(c)のSSTはきれいな年周期変動を示すが、中緯度西部(b)ではSSTが年周期変動から外れていることが多く、この海域の $\Delta p\text{CO}_2$ の変動の一因と考えられる。同3海域の平均表層塩分の時系列を図6に示す。これを見ると、亜熱帯域(a)の塩分には季節周期よりも経年変動が卓越していることがわかる。中緯度西部の塩分(b)でも季節周期は不明瞭で、有意水準は低いですが低塩化傾向（-0.022度/年）がみられる。中緯度東部(c)の塩分変動は、他2海域とは異なり、季節周期が卓越している。塩分により変化する $\Delta p\text{CO}_2$ の量は非常に小さいため、 $\Delta p\text{CO}_2$ 変動の直接的要因に表層塩分は関係していないかもしれないが、タスマン海における塩分変動は非常に興味深く、間接的に他の要因（水塊自体の変質など）を示している可能性も示唆された。

## 2. (3) ② SOCAT プロジェクトでの公開作業について

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。SOCAT のねらいは、SOCAT のもとに集められた海洋表層  $p\text{CO}_2$  データについて、均一な品質管理 (QC) を行ってデータベースの作成を行い、定期的に更新しながら一般に広く公開すること、観測データとメタデータのストレージを長期安定に確保することである。SOCAT データベースに登録されるデータ

この3つの各海域で平均した $\Delta p\text{CO}_2$ （ $\Delta p\text{CO}_2$ ：海洋と大気の大気炭素分圧差）の時系列を図4に示す。これを見ると、基本的にこの3海域は $\Delta p\text{CO}_2$ が負で、大気から海洋に $\text{CO}_2$ が吸収される海域である。極小（強い $\text{CO}_2$ の吸収）を示す時期は、タスマン海亜熱帯域(a)では南半球の冬であるが、タスマン海中緯度域(b), (c)では春となる。これは春に増加する植物プランクトンによって特に中緯度で海洋の $\text{CO}_2$ が固定されるためと思われる。極大（弱い $\text{CO}_2$ の吸収）は3海域ともに南半球の夏に出現している。中緯度東部のタスマン海(c)では、南半球の冬に2つめの弱い極大がみられ、年に2周期が卓越している。その第2極大は、8月より前に現れる年(2006, 2009年)と8月より後に現れる年(2008, 2010年)があるほか、第2極大自体が不明瞭な年(2007, 2011年)もあり、この第2極大の年々変動は興味深い。中緯度西部のタスマン海(b)では、季節性が不明瞭で、年々変動が他の2海域より大きい。特に夏の極大の大きさが非常にまちまちで、2009年3月には $\Delta p\text{CO}_2$ は正になり、 $\text{CO}_2$ 吸収のない状態だった。同じく3つの海域内で平均した表面水温(SST)の時系列を図5に示す。こ

は、観測者によって表現や単位、データ処理方法が異なり、特に  $fCO_2$  については、その算出過程が標準化されているわけではなく、水蒸気圧補正、水温補正などの補正項の計算法の違いにより値が変化してしまうので、処理方法の違いによる差をなくしデータセットを統一化するために、基本計測項目に共通の計算法を適用し、統一単位で表現することとした。この目的で、データセンターがノルウェーのベルゲン大学に置かれた。SOCAT プロジェクトでは、Web 上で QC を行えるよう閲覧機能を充実させ、緯経度の格子点毎のマッピング、観測要素間の散布図（プロパティ間プロット）、データ比較やダウンロードなどを可能にしたプログラム LAS (Live Access Server) を開発し、サーバー管理を含め NOAA/PMEL (アメリカ海洋大気庁/太平洋環境研究所) が維持している (図 7)。データの QC は、関係研究者でなくては行えないものであるため、地域代表研究者が分担して引き受けることとした。30 度以北の北太平洋の QC について、本課題研究代表者が責任者として国環研で引き受け、国内外の他機関のデータを含む QC を実施することとなった。

QC 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  $CO_2$  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 QC は保留となり、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、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、観測装置の精度: 表 1) が充足しているか、SOCAT が定めた統一基準を満たしているかを精査し、個々のクルーズに A、B、C、D、F、S、X のフラグ付けを行った。統一基準とは、(1) 観測に基づく  $xCO_2$  から  $fCO_2$  を計算しているか (pH、アルカリ度、全炭酸など炭酸系の  $pCO_2$  以外のパラメータから求めた  $fCO_2$  でないか)、(2) 連続的な  $CO_2$  観測を行っているか、(3) 検出は平衡器と IR (infrared、赤外分光法) もしくは GC (gas chromatography、ガスクロマトグラフ法) により行われているか、(4) 較正に使用する  $CO_2$  標準ガスがゼロガス ( $CO_2$  濃度が 0 ppm の空気) 以外に 2 種類以上用いられており、それは WMO (世界気象機関) の標準ガスに対してトレーサブルな標準ガスか、(5) 平衡器水温の測定誤差が  $0.05\text{ }^\circ\text{C}$  以内か、(6) 海面水温の測定誤差が  $0.05\text{ }^\circ\text{C}$  以内か、(7) 平衡器気圧の測定誤差が  $0.5\text{ hPa}$  以内か、という 7 つの要件のことである (表 2)。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フラグ D、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 (表 3)。フラグ A は、同時期に近い場所で観測されたデータがあり、QC 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るが、同時期の  $pCO_2$  観測のあるデータの数は SOCAT 収録データの中で極めて少数である。



表1 SOCAT Version2 におけるメタデータ必須情報

	メタデータ必須情報
1	観測者代表
2	船名
3	日時範囲
4	観測分析方法
5	CO <sub>2</sub> の種類(xCO <sub>2</sub> , pCO <sub>2</sub> , fCO <sub>2</sub> )
6	使用標準ガスの数と濃度、トレーサビリティ
7	観測装置の精度 7.a.1 平衡器海水温度計 7.a.2 表層海水温度の温度計 7.b.1 平衡器内圧力計

表2 SOCAT Version2 における統一基準

	統一基準 SOP(standard operating procedure)
1	xCO <sub>2</sub> から fCO <sub>2</sub> を計算している (pH、アルカリ度、全炭酸などのパラメータから求めた fCO <sub>2</sub> でない)
2	連続的な CO <sub>2</sub> 観測である
3	検出は平衡器と IR (:infrared、赤外分光法) もしくは GC (:gas chromatography、ガスクロマトグラフ法)
4	較正に使用する標準ガスが 0ppm 以外に 2種類以上である、 それらは WMO (世界気象機関) の標準ガスに対してトレーサブルな標準ガス
5	平衡器水温の誤差範囲が 0.05°C 以内である
6	海面水温の誤差範囲が 0.05°C 以内である
7	平衡器気圧の誤差範囲が 0.5hPa 以内である

表3 SOCAT Version2 における品質管理基準

評価基準	○:完全 △:不完全 ×:不良/不足	FLAG				
		A	B	C	D	F
統一基準を満たしている		○	○	△	△	
メタデータに必須情報が全て記載されている		○	○	○	△	
観測データが正常である (異常値が 50 個未満)		○	○	○	○	×
同時期に近辺の他のデータがある		○	×	—	—	—

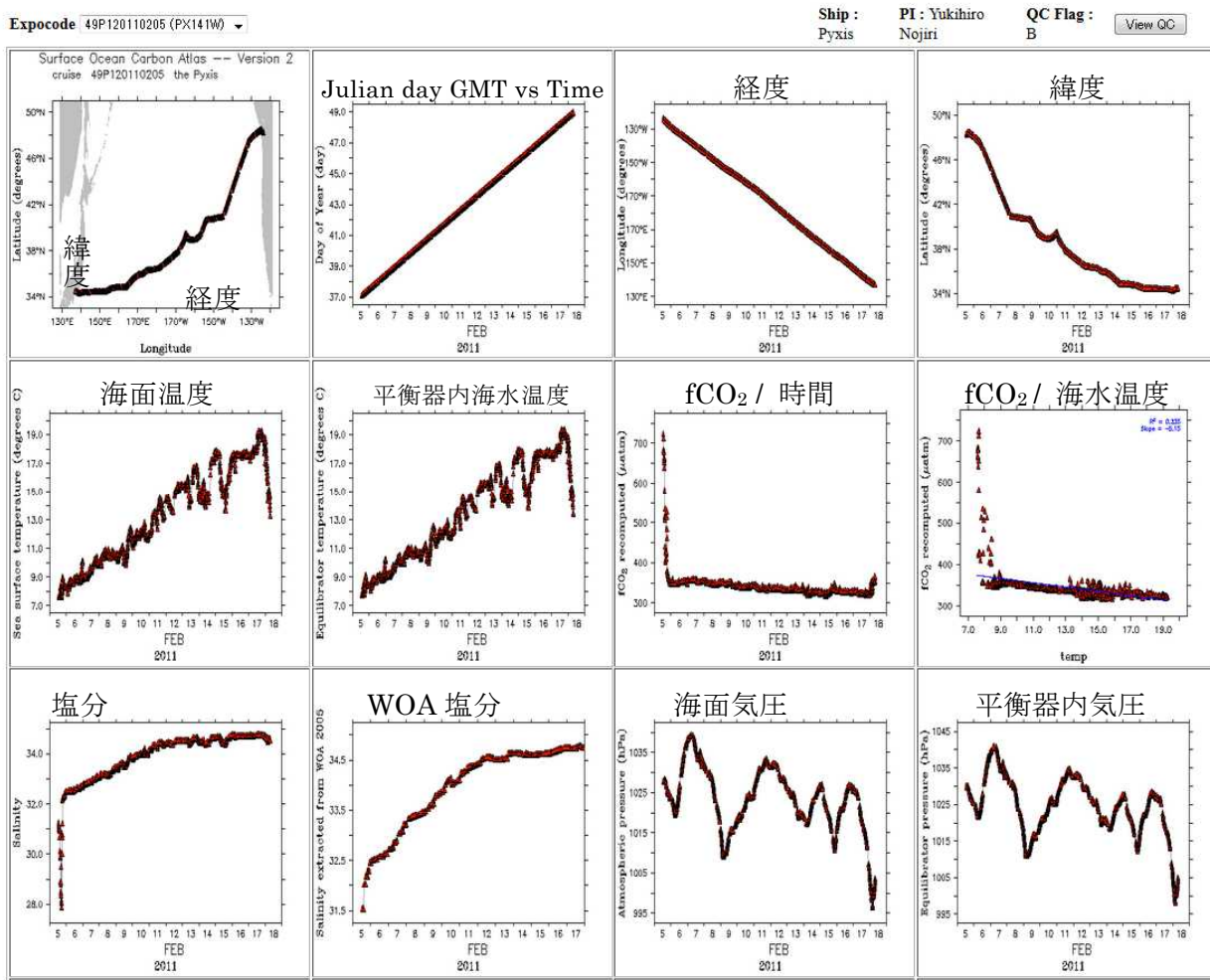


図7 LASによる1次精度管理のためのプロット図一括作成 (Pyxis141の西向き航路の例)  
各サムネール図をクリックすると拡大され、データ品質管理作業が容易に行える

SOCATの最初のバージョン(第1版: ver 1.5)は2011年9月14日にUNESCO本部で開催された海洋表層のデータ統合に関する国際会合でリリースされた(<http://www.socat.info/>)。このバージョンは、1968年から2007年までの1851航海分のデータと630万もの海洋表層のfCO<sub>2</sub>データを収録している(図8)。国環研はトヨフジ海運(株)所属Pyxisによる62航海、Alligator Hope(1999年11月から2001年5月まで協力を得た商船三井(株)所属コンテナ貨物船で、日本と北米西岸間をシアトル・バンクーバー間を5週間周期で定期運航)による31航海、カナダSeaboard社所属Skaugran(1995年4月から1999年10月まで協力を得た北米西岸・日本間を運航する材木貨物船であり、6~8週間周期で運航)による71航海の合計164航海のデータを提出した(図9)。この数はSOCATに収録された全データの8.8%を占める。北太平洋航路データは、そのうちの162航海にあたるので、国環研の観測は北太平洋全データ(409航海)の39.6%を占めた。国環研の提供したすべての航海データにはフラグBが付与されている。

この会合では、データ期間を拡張した2011年までのデータを格納するSOCAT第2版の作成について議論され、各観測機関に観測データの登録とメタデータの作成が呼びかけられた。国環研

では、Alligator Hope による 1 航海、Skaugran による 1 航海、Pyxis による 84 航海 Trans Future 5 による 142 航海の、合わせて 228 航海の観測データとメタデータを作成し、2011 年末に第 2 版に向けて追加提供した。これより、国立環境研究所が SOCAT へ提供したデータ数は 392 航海となった (図 10)。

2012 年 7 月 3-5 日、つくば国際会議場で、SOCAT 関係者が集まり SOCAT 第 2 版のスケジュールと将来予定される SOCAT 第 3 版の方針について話し合われた。具体的には、SOCAT 第 2 版のデータベース作成のために 2011 年までの観測データとメタデータの登録が完了したこと、SOCAT 第 2 版では沿岸域の QC を行う必要があり、処理ソフトウェア LAS はそのためのデータ閲覧機能を充実させること、SOCAT 第 2 版の一般公開を 2013 年 1 月目標とすることなどであった。データベースの定期的な更新とそのため全体のプロセスのスピードアップを目的に、SOCAT 第 3 版では観測データおよびメタデータの提出をデータ提供者が Web 上で行えるようにするためのユーザーインターフェースの設計についても話し合われた。

SOCAT 第 3 版用に、メタデータフォーマットが改定され、PYXIS、Trans Future5 のメタデータを再提出した。2012 年 1 月から 2013 年 5 月 Pyxis の 38 航海分、および、2012 年 1 月から 2013 年 8 月の Trans Future5 の 80 航海分を 2013 年年末に提出した (図 11)。

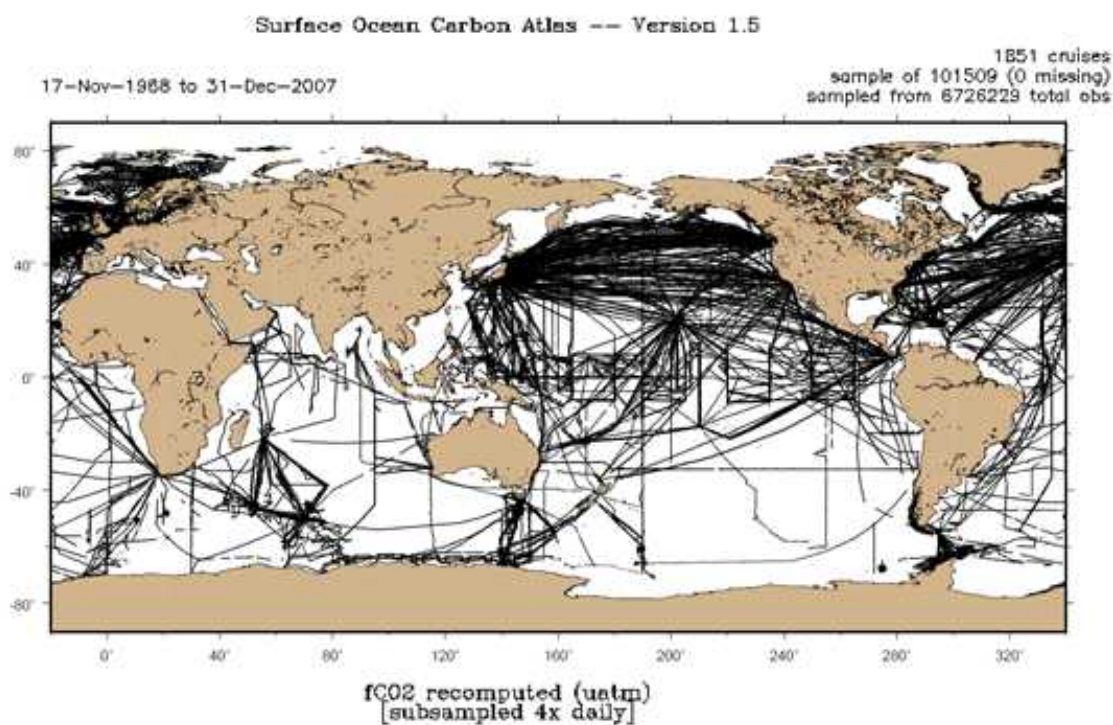


図 8 SOCAT に含まれる 1968 年から 2007 年までの海洋表層 fCO<sub>2</sub> (SOCAT 第 1 版: ver 1.5)

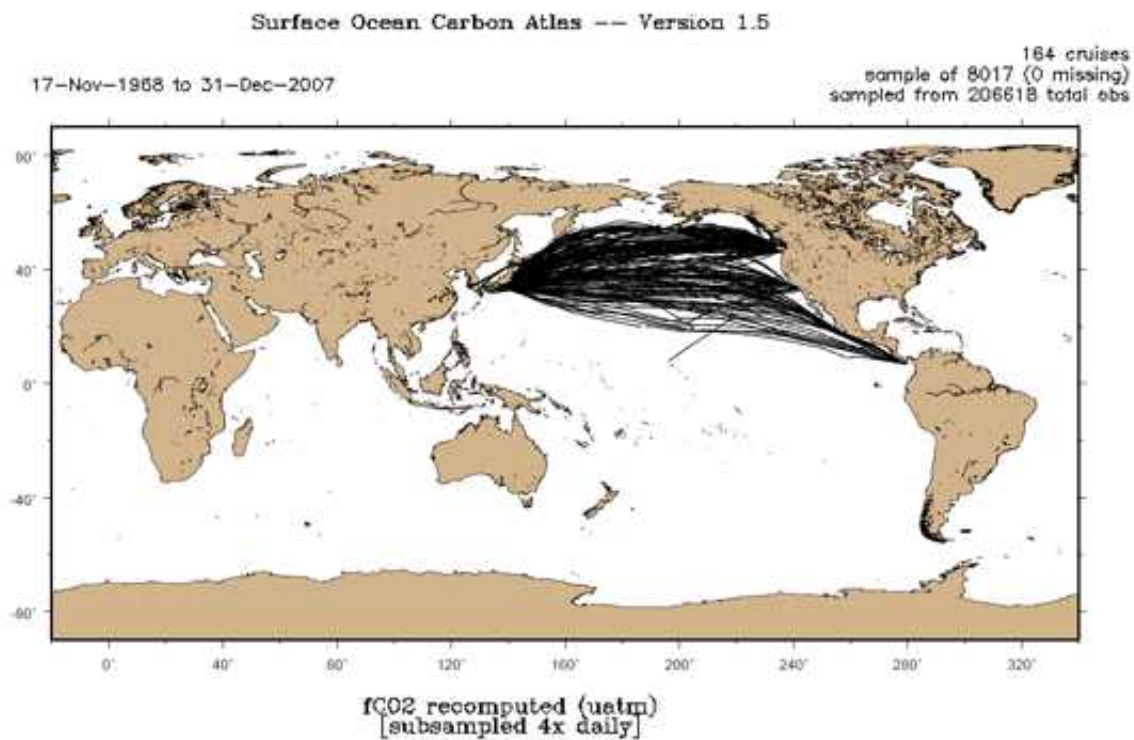


図9 国環研が提供した海洋表層 fCO<sub>2</sub> のデータ (SOCAT 第1版: ver.1.5)

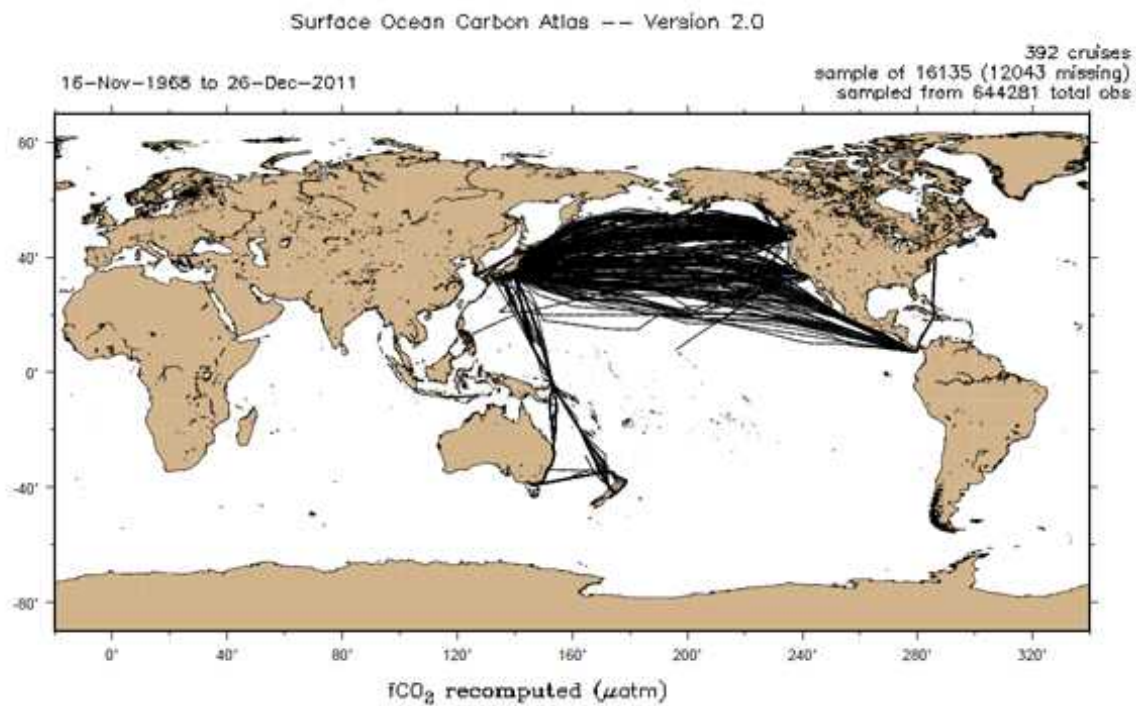


図10 国環研が提供した海洋表層 fCO<sub>2</sub> のデータ (SOCAT 第2版: ver.2.0)



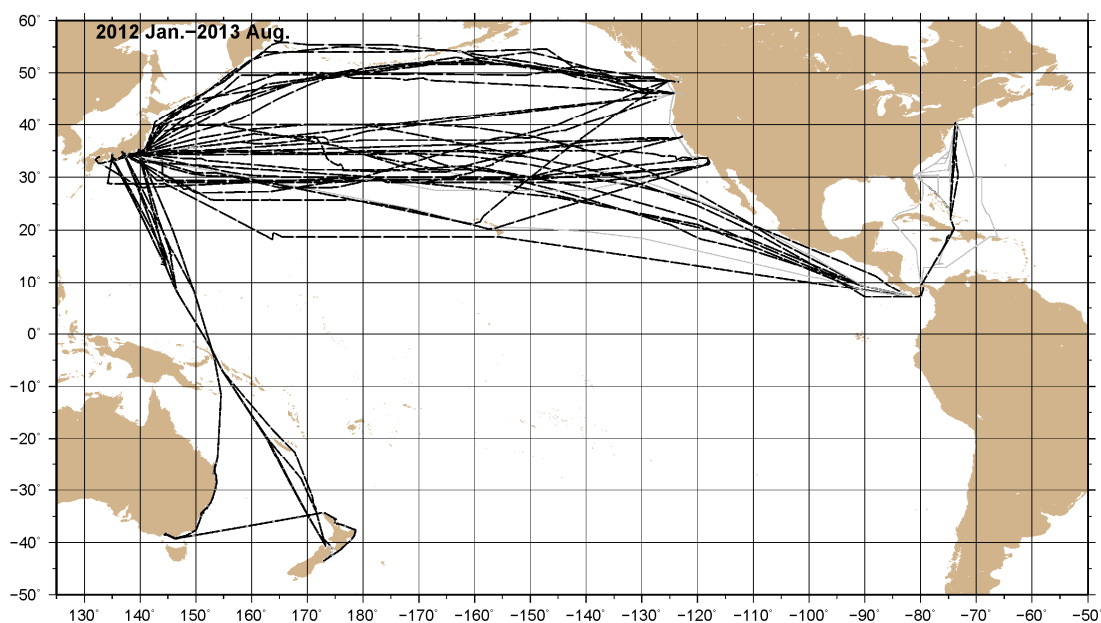
PYXIS & TF5 Routes and ocean fCO<sub>2</sub>

図 11 国環研が SOCAT 第 3 版用に追加提供した海洋表層 fCO<sub>2</sub> のデータ

2012年10月2-4日、シアトルのPMEL本部で、4カ国18名のSOCAT関係者が集まり、新規参加者のためのLASによるQCのトレーニングが行われた。この会合の目的は、参加者が実際に沿岸地域のfCO<sub>2</sub>データのQCを行うことからSOCATのQC手法を身につけること、LASの使い方に慣れること、会期中にできるだけ多くの沿岸地域についてQCを進めることとされ、国環研から2名のデータマネージャーが参加し、特に北太平洋西部の沿岸地域のQCを行いSOCAT第2版データベース完成に貢献した。

その後、SOCAT第2版の一般公開が2013年6月に変更され、2013年1月14日までにQCを完了させることが各機関に呼びかけられた。国環研では本課題のもとでそれに対応し、北太平洋地域の704航海について期日までにQCを行った。国環研が提供した392航海データについては、フラグAが38航海、フラグBが295航海、フラグCが32航海、フラグDが2航海、フラグSが7航海、フラグXが18航海であった。フラグBはSOCATに全部で836航海収録されていたが、そのうちの35.2%にあたる295航海が国環研の観測データであった。フラグC、Dは平衡器気圧計の精度情報がメタデータに記載されていない、または平衡器気圧が報告されていないために付加された。国環研では、平衡器気圧と計測（平衡器設置）室の室内気圧に差がほとんどないことを経験上知っていたため、計測室の室内気圧のみを計測しており、平衡器気圧の計測は行っていなかった。これを受けて、協力貨物船の観測現場の平衡器に計測室との差圧を計測するセンサーを付加し、圧力差の確認を行った。このことから、計測室気圧測定と平衡器気圧測定は同等であり、SOCATのfCO<sub>2</sub>算出過程に与える影響がないことが確認され、従来データにさかのぼる改定を行う必要はないことが明らかになった。フラグSまたはXは、海洋表層CO<sub>2</sub>分圧が何らかのトラブルで計測されなかった25航海について付与されたものであった。



## 2. (3) ③ 国環研観測データの公開について

国環研では、独自のデータ提供プラットフォームとして Web ページ SOOP (<http://soop.jp>) を作成し公開している (図 12)。SOOP では、SOCAT の統一フォームでは公開しきれない情報、たとえば観測装置の設置状況を示す画像や、観測船の要目、連続計測データの標準偏差まで公開している。このような情報は、専門的な解析に有用であるし、これから観測を始める機関、観測を充実させようとしている機関にとって非常に有用な情報になりえるため、今後も積極的に行っていく必要があると考えている。

SOOP で海洋表層の pCO<sub>2</sub> データを公開している観測船は、既に述べた Alligator Hope、Skaugran、Pyxis、Trans Future 5 の他、過去に西部太平洋で観測を行っていた Golden Wattle (2001 年 10 月から 2002 年 5 月まで協力を得た日本～オーストラリア～韓国間を運航する商船三井 (株) 所属コンテナ貨物船で Alligator Hope の設備をそのまま維持して配置換えとなった船で、4 週間周期で運航) を含む。現在も運行している Trans Future 5 の観測データは随時追加更新を行っている。Pyxis では、2001 年 11 月に観測が開始されたが、2013 年 4 月設備等の老朽化のため終了とした。その後続船として New Century 2 (トヨフジ海運 (株) 所属) に装置を搭載することを関係船社に認めていただき、主な設備を Pyxis から移設する作業を行い、2014 年 4 月からは観測を開始した。また、東南アジア海域で大気 CO<sub>2</sub> を観測しているトヨフジ海運 (株) 所属定期貨物船 Fuji Trans World (2007 年 10 月より観測開始)、同じく Trans Future 1 (2010 年 11 月より観測開始) の 2014 年 4 月までのデータも新たに公開した。海洋 CO<sub>2</sub> 観測のみならず、大気 CO<sub>2</sub> 観測データも、全球炭素循環モデル検証に有効なデータセットであり、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。これら、現在継続中の 4 隻の観測データについては、2014 年 3 月までの観測データの確定がすべて完了し、公開済みとなった。

このように、国環研の定期貨物船による CO<sub>2</sub> 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校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。

## PX160E

## Leg Wide Results

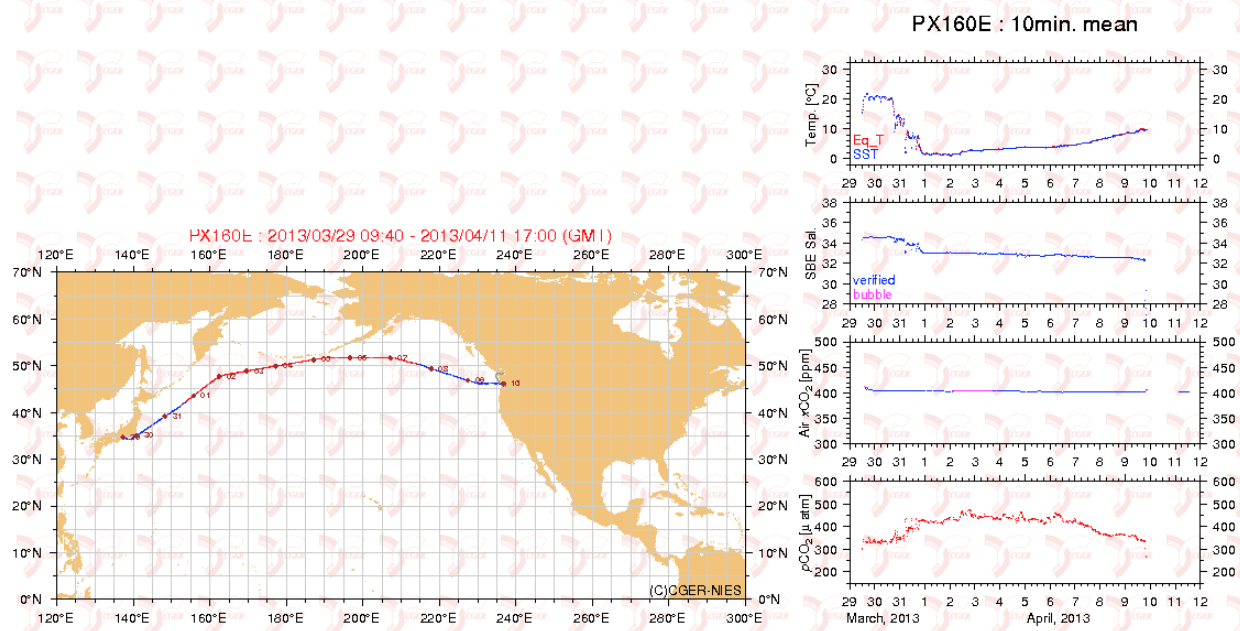


図 12 SOOP <http://soop.jp>における航路図とデータグラフのページの例：左図が航路、右図は上から表面水温 (°C)、表面塩分、大気 CO<sub>2</sub> 濃度 (ppm)、海洋 pCO<sub>2</sub> (µatm)、PX160E は Pyxis による 2013 年 4 月の北米西岸から日本への航海であることを示す。

### 3 ニューラルネットワーク手法による pCO<sub>2</sub> 分布推定の広域適用

#### 3. (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・混合層深度・クロロフィル *a* 濃度と pCO<sub>2</sub> 観測値を用いて、計算機にアルゴリズムに基づいた経験学習を行わせ、海盆スケールの pCO<sub>2</sub> 時空間分布推定を可能にすることを目的とする。本課題では、ニューラルネットワーク手法を、pCO<sub>2</sub> 観測データが十分に得られる海域から乏しい海域へと適用拡大することとする。最も観測データの多い海域である北太平洋での研究の実績を踏まえて、観測データの比較的多い赤道域・南西部太平洋と、観測データの最も少ない南太平洋東部海域を含む解析を行う。このことから、観測データの少ない海域へのニューラルネットワーク手法の適用性を評価する。さらには、今後の手法展開のために、全球推定を可能とする手法の検討を行う。

また、海洋表層の生物生産や鉛直混合で変化する海水中の CO<sub>2</sub> の挙動をより直接的に表現するパラメータである全炭酸濃度のマッピングを行うことで、その長期平均場や季節変動を明らかにして、海域の CO<sub>2</sub> 吸収・放出の制御要因を明らかにする研究を行う。

#### 3. (2) 研究方法

国環研では、1995年から日本-北米航路での海洋表層 CO<sub>2</sub> 分圧 (pCO<sub>2</sub>) 観測を始め、さらに2006年からは日本-オセアニア航路で同様の観測を行っている。これらのデータセットは、SOOP

(<http://soop.jp>) やCDIAC (<http://cdiac.ornl.gov/>)、あるいは前述のSOCAT (<http://www.socat.info/>) を通して公開され、世界各国の研究機関で広く利用されている。本研究ではパラメータ間の非線形・不連続関係を推定することが可能なニューラルネットワーク技術を用いて、これまでの解析手法では再現することが困難であった海盆スケールのpCO<sub>2</sub>時空間分布を再現し、得られた分布から大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量を算出することで、Takahashi et al. (2009) の研究では明らかにすることができなかったpCO<sub>2</sub>と大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量の年々変動についての知見を得ることとする。本課題の2年度目までに北太平洋 (Nakaoka et al., 2013) と太平洋赤道域および南太平洋のpCO<sub>2</sub>分布推定を行ってきた。最終年度においては、対象海域を太平洋全域と南大洋太平洋セクターにまで広げてpCO<sub>2</sub>分布推定に取り組み、当該海域の大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量を見積もった。

本課題の解析で用いる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。この手法は、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、パラメータ間の関係が当初は明らかでない関係を、観測結果から経験的手法で導くことである。そのアルゴリズムにはいくつかの種類が存在するが、本研究においては自己組織化マップ (Self Organizing Map: SOM) と呼ばれるアルゴリズムを用いた。SOM手法を用いた本研究のpCO<sub>2</sub>分布推定には、トレーニングプロセス、ラベリングプロセス、マッピングプロセスと呼ばれる3つのプロセスが存在する。トレーニングプロセスでは、pCO<sub>2</sub>以外の海洋物理生物パラメータ間の関連性を調べることにより、ひとつひとつのニューロンに海況情報を格納する。すなわち、出現頻度の高い海況は多数のニューロンによって細かな違いが把握されてそれぞれ格納され、逆に出現頻度の低い海況は複数の海況情報が平均化され比較的少ない数のニューロンに格納される。次のステップであるラベリングプロセスでは、トレーニングプロセスでトレーニングされたニューロンに観測時の海況が一致したpCO<sub>2</sub>を各ニューロンに割り当てる。さらにマッピングプロセスでは、トレーニングプロセスで使用した各データセットとpCO<sub>2</sub>値がラベリングされたニューロンを用いて、それぞれの海況に応じたpCO<sub>2</sub>を割り当てていく。

本研究では、北太平洋から南大洋太平洋セクター域 (南緯75°から北緯60°、東経120°から西経70°) までのpCO<sub>2</sub>分布が、極座標で表現できる位置情報とSST (海面水温)、MLD (混合層深度)、CHL (クロロフィル a 濃度)、SSS (海面塩分) の自然変動項、さらに大気中に放出されたCO<sub>2</sub>が海水中に溶解しpCO<sub>2</sub>が増加する人為変動項によって駆動されていると仮定してpCO<sub>2</sub>分布を再現する。すなわち、SOMのラベリング過程でpCO<sub>2</sub>を概念的に以下の式で記述する。

$$pCO_2 = f_{som}(x, y, z, SST, SSS, MLD, CHL) + \alpha*(t-t_{ref}) \quad (1)$$

ここで、 $x, y, z$ はそれぞれ、 $\cos(Lat)*\cos(Lon)$ ,  $\cos(Lat)*\sin(Lon)$ ,  $\sin(Lon)$ であり、 $\alpha$ はpCO<sub>2</sub>の経年増加率を示していて本研究においては解析期間中の大気CO<sub>2</sub>増加率と同じ $1.76 \mu\text{atm yr}^{-1}$ を用いた。また $t_{ref}$ は基準となる年を意味しており、ここでは2005年とし、推定期間は1998年1月から2009年12月までとした。 $Lat$ および $Lon$ は緯度と経度である。

トレーニングプロセスと (1) 式で表されるマッピングプロセスで使用されるデータセットは4つのデータセット (SST, MLD, CHL, SSS) から構成されている。SST, SSS およびMLDのデータセットには、フランス Mercator Research Centre の GLObal Ocean ReanalYses and Simulations (GLORYS) によるモデル出力結果を用いた。CHLデータセットは、NASA/GFSC/DAAC (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) から提供される Aqua-MODIS 衛星の Level 3 データ (1日毎、9

km x 9 km 格子の解像度) を利用した。それぞれのデータセットは、半月間平均し、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  で再格子化したデータとしてトレーニングプロセスに用いた。

ラベリングプロセスで使用する $p\text{CO}_2$ 観測値は、前述したSOCATデータベースに登録されている当該海域の1995年から2009年までの観測データを、トレーニングデータセットと同様の時空間格子に格納して利用した。図13に使用した $p\text{CO}_2$ データの分布を示す。この図からも明らかなように、北太平洋（北緯15度以北）では観測が1回以上行われている領域が占めており、特に日本近海では国環研を始めとする日本の研究機関による観測によって観測頻度が多い。また、南大洋太平洋セクター（南緯45度以南）についても海域によっては観測データが充実していることが分かる。一方、南太平洋中央部から東部海域では海洋表層 $p\text{CO}_2$ 観測が非常に少なく、このことが $\text{CO}_2$ 収支を推定する際の不確実性を生む主要因となりうる。

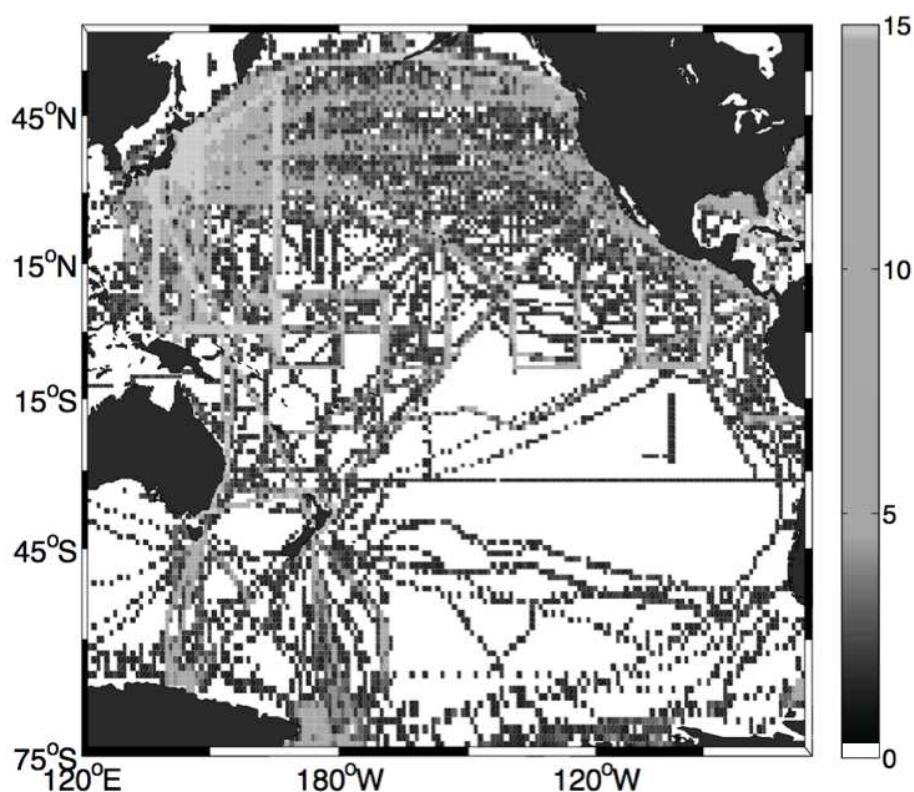


図13 SOCAT第2版 (2013) による推定期間内 (1998-2009年) の $p\text{CO}_2$ 観測の頻度分布。

本報告では、本研究で得られた $p\text{CO}_2$ 分布の妥当性を評価するために、はじめに推定誤差について検討を行い、次に気候学的な $p\text{CO}_2$ の時空間分布の検討としてTakahashi et al. (2009) の気候学的な $p\text{CO}_2$ 分布結果と比較した。さらに、エルニーニョ・ラニーニャ期の $p\text{CO}_2$ 分布応答について、ニューラルネットによる分布推定の結果について調べた。また、今後の全球 $p\text{CO}_2$ 分布再現手法開発として、別のニューラルネットワーク手法である誤差逆伝搬法 (Back-Propagation: BP) を用いた全球海洋 $p\text{CO}_2$ 分布推定の試行と評価を行った。

加えて、北太平洋の海洋表層全炭酸分布の推定とその時空間変化特性の研究を行った。ここでは、 $p\text{CO}_2$ マッピングの結果を用いて、海洋表層の生物生産や鉛直混合で変化する海水中の $\text{CO}_2$ の



挙動をより直接的に表現するパラメータである全炭酸濃度のマッピングを行った。まず、Lee et al. (2006) によるアルカリ度推定の経験式を用いて、海面水温分布と海面塩分分布から、2002年～2008年の全アルカリ度のマッピングを行った。次に、CO2SYSプログラム (van Heuven et al., 2009) を用いて、 $p\text{CO}_2$ とアルカリ度のマッピング結果から、全炭酸濃度のマッピングを行った。マッピングに必要な水温と塩分には、 $p\text{CO}_2$ マッピングに使用したのと同じ気象庁全球日別海面水温解析値と気象庁海洋データ同化システムMOVE・MRI.COM-G (Usui et al., 2006) の海面塩分を使用した。また、リン酸塩濃度およびケイ酸塩濃度は、World Ocean Atlas 2009 (Garcia et al., 2009) による気候値を用いた。年々変化を含む栄養塩のマッピングデータは存在しないので、やむをえず気候値を用いたが、そのことによる推定誤差は、他の誤差要因に比べて十分に小さいと考えられた。マッピングの対象期間は2002年1月～2008年12月、時空間解像度は、 $1^\circ \times 1^\circ$ 月平均値とした。

### 3. (3) 結果・考察

#### 3. (3) ① $p\text{CO}_2$ 推定誤差の評価

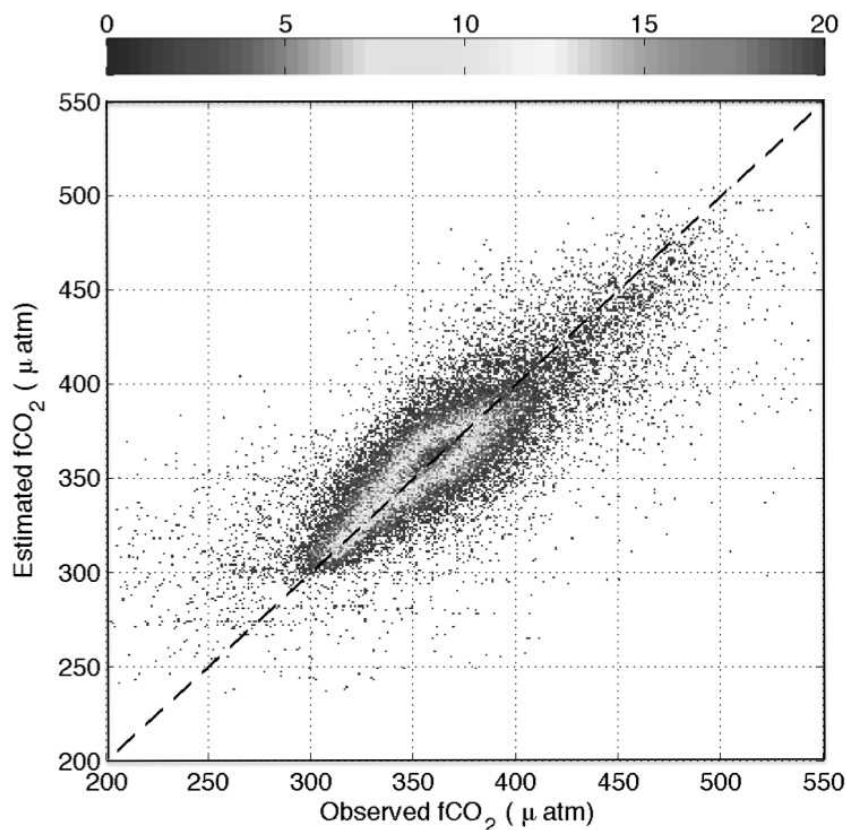


図14  $p\text{CO}_2$ 観測値と本研究推定値の散布図。点斜線は1対1プロット。

始めに推定手法の妥当性を評価するために、推定値と観測値の比較を行った(図14)。横軸が解析に用いた $p\text{CO}_2$ 観測値、縦軸が推定値である。この図は、1対1直線の周辺に観測値と推定値の組が密に分布しており、本手法による推定が妥当であることを示唆している。また、本研究による推定誤差は $21.1 \mu\text{atm}$ であった。これは、北太平洋での $p\text{CO}_2$ 推定 ( $17.6 \mu\text{atm}$ ) や昨年度に報告した太平洋赤道域・南太平洋の $p\text{CO}_2$ 推定 ( $20.6 \mu\text{atm}$ ) よりやや大きい。これは推定期間をのぼし、



解析海域が拡大したことが要因であると考えられる。

### 3. (3) ② 気候学的なpCO<sub>2</sub>時空間分布

当該海域における平均的なpCO<sub>2</sub>分布の季節変化を調べるために、再現された1998年から2009年のpCO<sub>2</sub>分布を月毎に平均化して得られた太平洋赤道域・南太平洋のpCO<sub>2</sub>気候値マップとTakahashi et al. (2009) によって示された当該海域のpCO<sub>2</sub>気候値マップを比較した(図15)。本研究で得られたpCO<sub>2</sub>分布は特徴的な時空間変動について、細かな違いは見られるものの、Takahashiらの結果と概ね良く一致していることが分かる。例えば、冬季(1~3月)には北太平洋のベーリング海から北海道沖にかけては、375 μatmを超える高pCO<sub>2</sub>な水塊が見られる一方、北緯20度から40度の緯度帯においては、325 μatmを下回る低pCO<sub>2</sub>が分布している様子を再現している(ただしTakahashi et al. (2009)の結果は低pCO<sub>2</sub>水塊が南北により広範囲に分布している)。さらに、熱帯域では東部海域から中央部にかけては400 μatmを超える高いpCO<sub>2</sub>水塊が一年を通して見られる。南緯15度から45度の南太平洋西部海域から中央部にかけて、350 μatm以下の低pCO<sub>2</sub>水塊が広がっている。一方、本研究の再現によれば、南太平洋西部海域から広がる低pCO<sub>2</sub>水塊が5月から9月にかけて東部海域まで到達している様子がとらえられているものの、Takahashi et al. (2009)にはそのような分布は見られていない。また、南大洋太平洋セクター(南緯45度以南)では、7-9月の両者のpCO<sub>2</sub>分布で南極大陸沖に375 μatmを超える値が見られる点は一致しているが、同時期でも本研究では400 μatmを超える値が見られないことや、その他の時期の分布が異なっており、その原因については今後の研究において詳細に調べて行く予定である。海域全体として見ると、両者の差(本研究 - Takahashi et al. 2009)は約0.6 μatmと非常に小さく、年間の大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量推定に与える影響は小さいと考えられる。

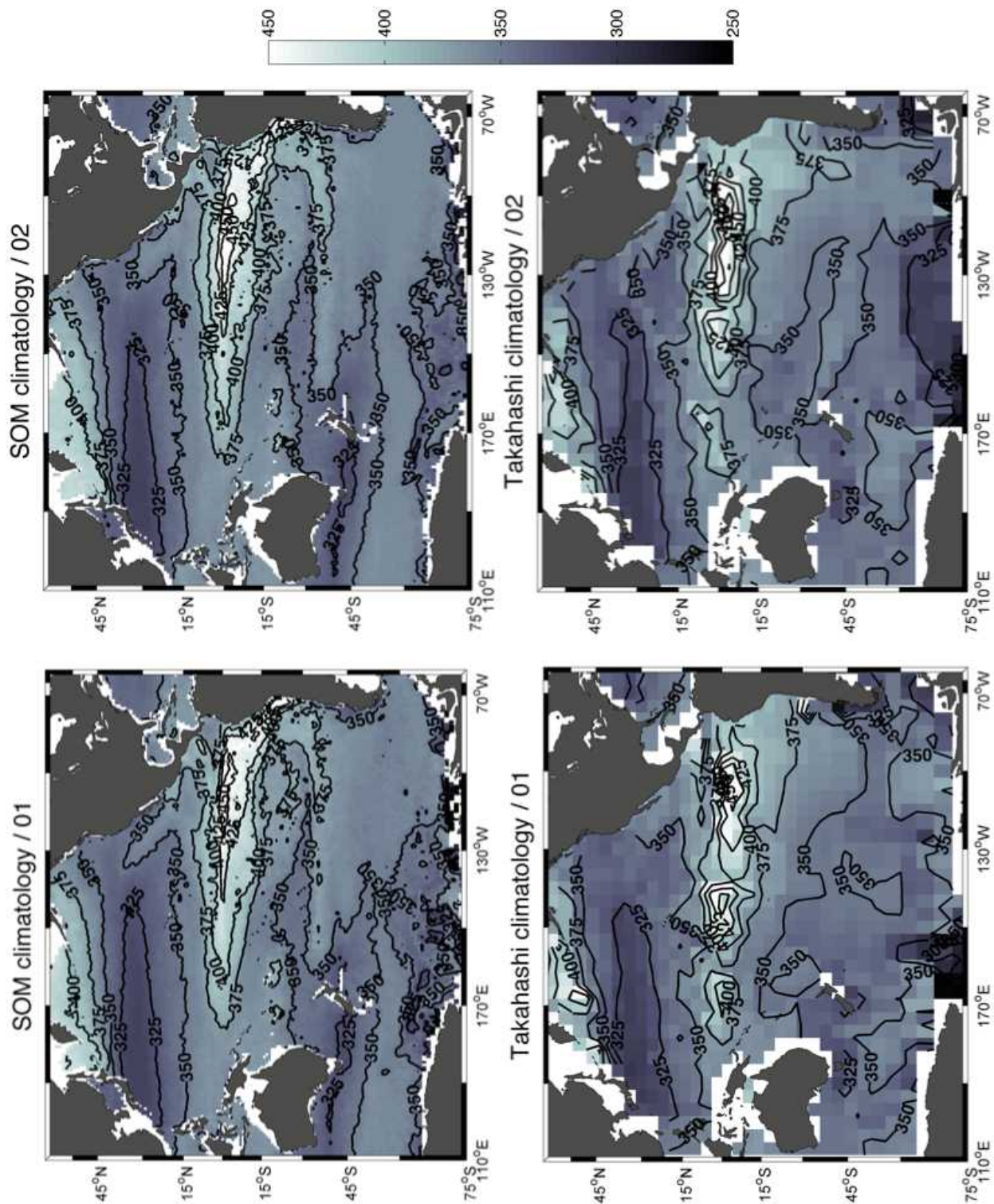


図 15-1 1-2 月の本研究（上段）と Takahashi et al. (2009)（下段）で得られた  $p\text{CO}_2$  分布（単位は  $\mu\text{atm}$ ）

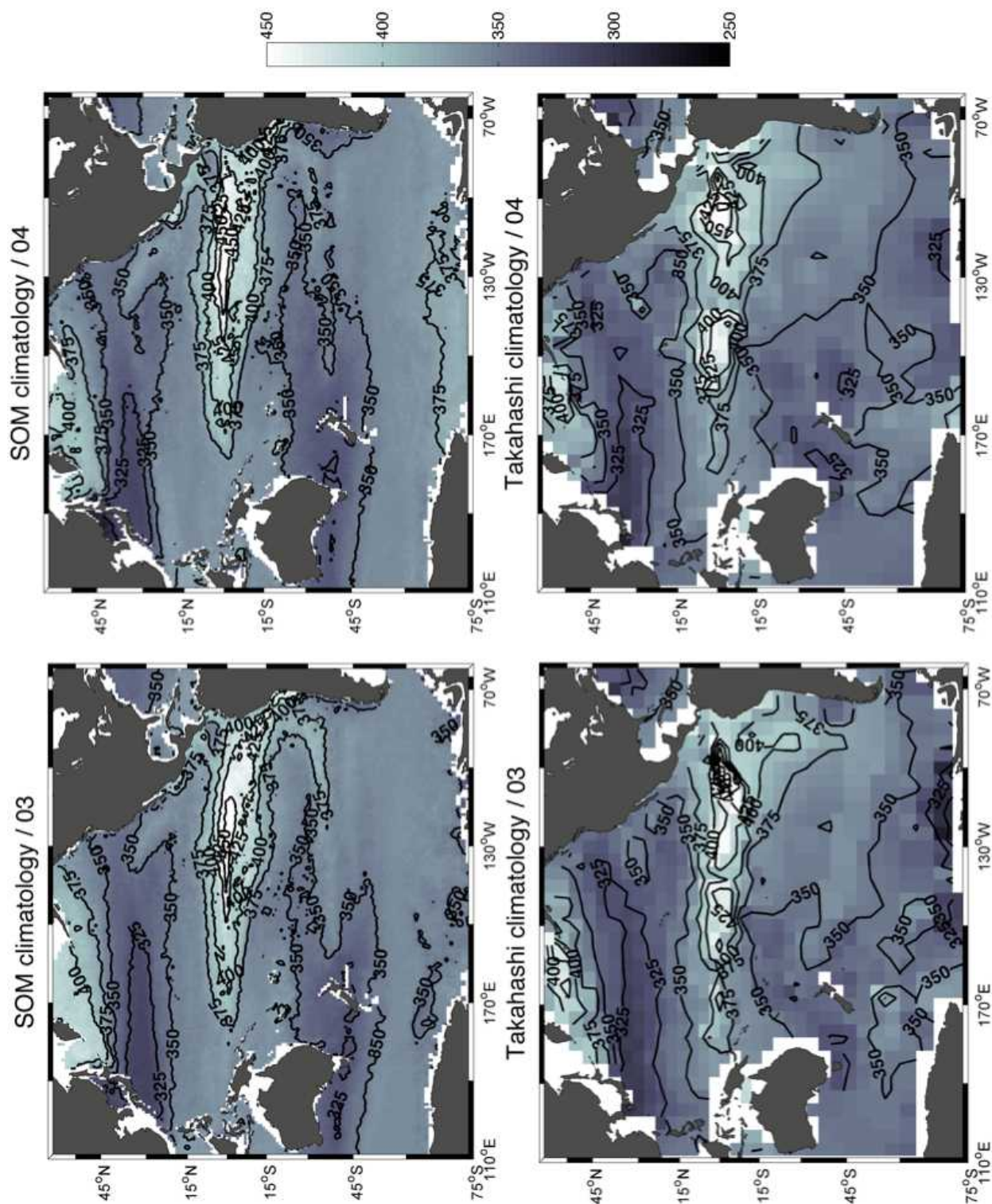


図 15-2 3-4 月の本研究（上段）と Takahashi et al. (2009)（下段）で得られた pCO<sub>2</sub> 分布（単位は μatm）



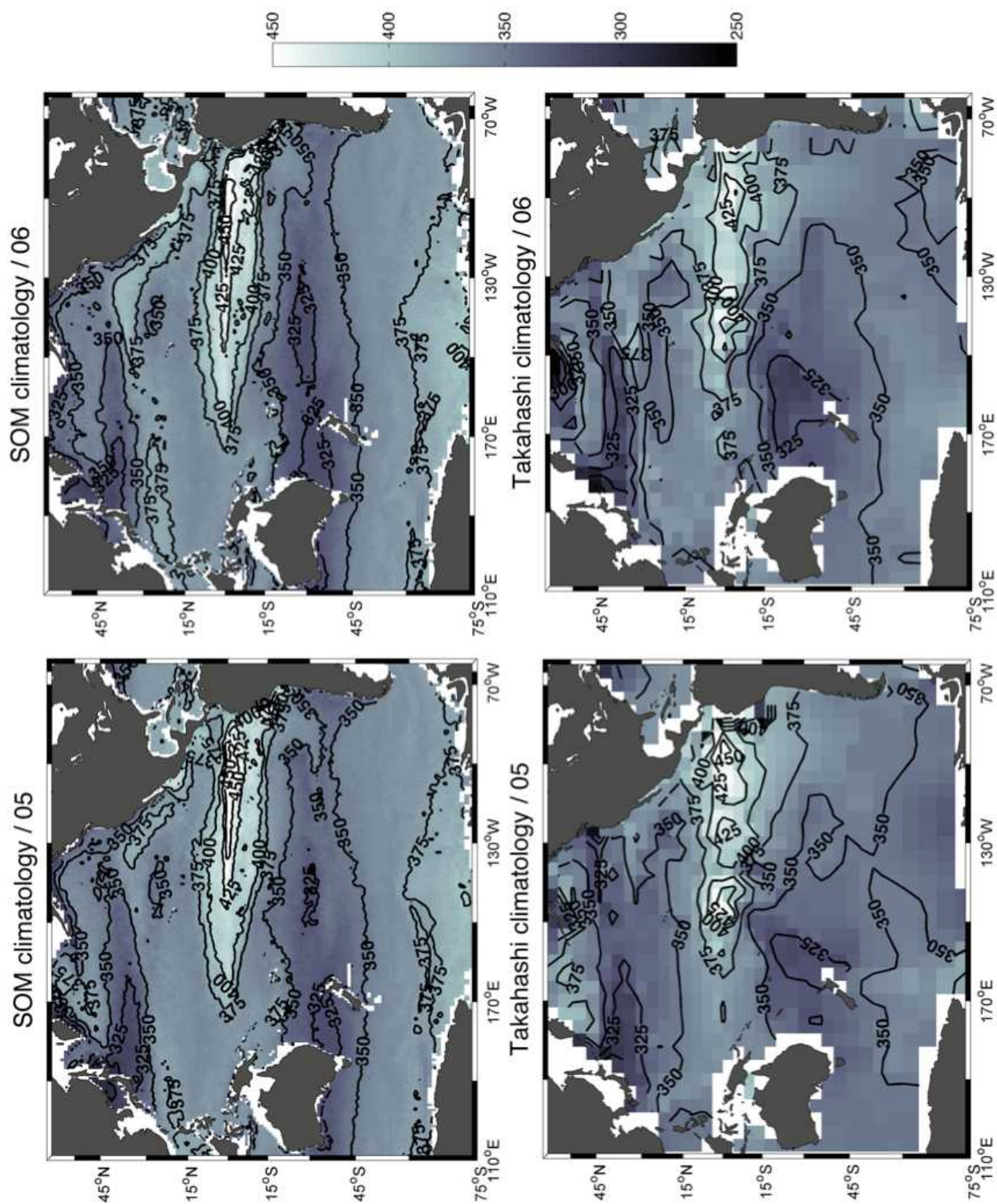


図 15-3 5-6 月の本研究（上段）と Takahashi et al. (2009)（下段）で得られた pCO<sub>2</sub> 分布（単位は μatm）

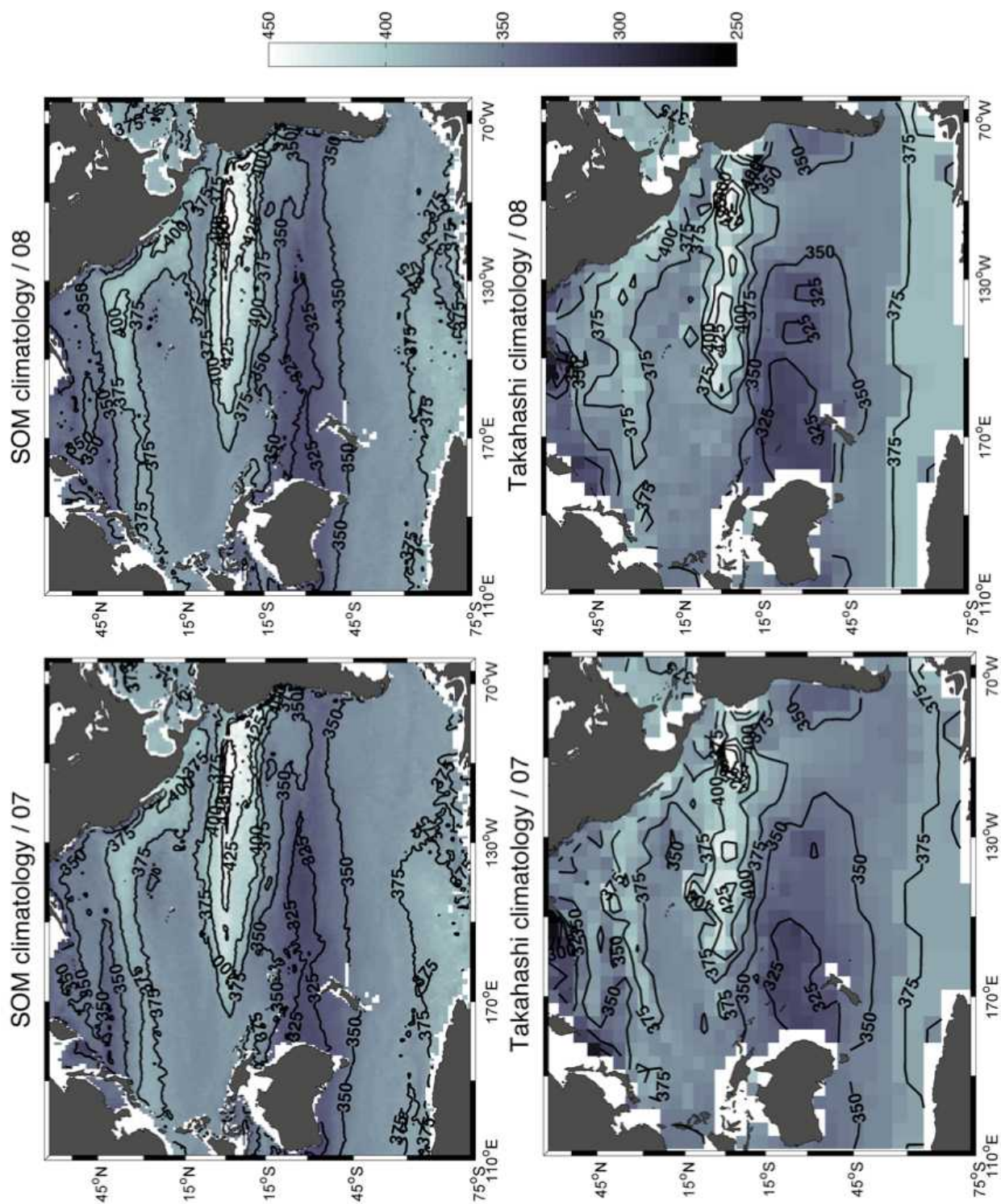


図 15-4 7-8 月の本研究（上段）と Takahashi et al. (2009)（下段）で得られた pCO<sub>2</sub> 分布（単位は μatm）



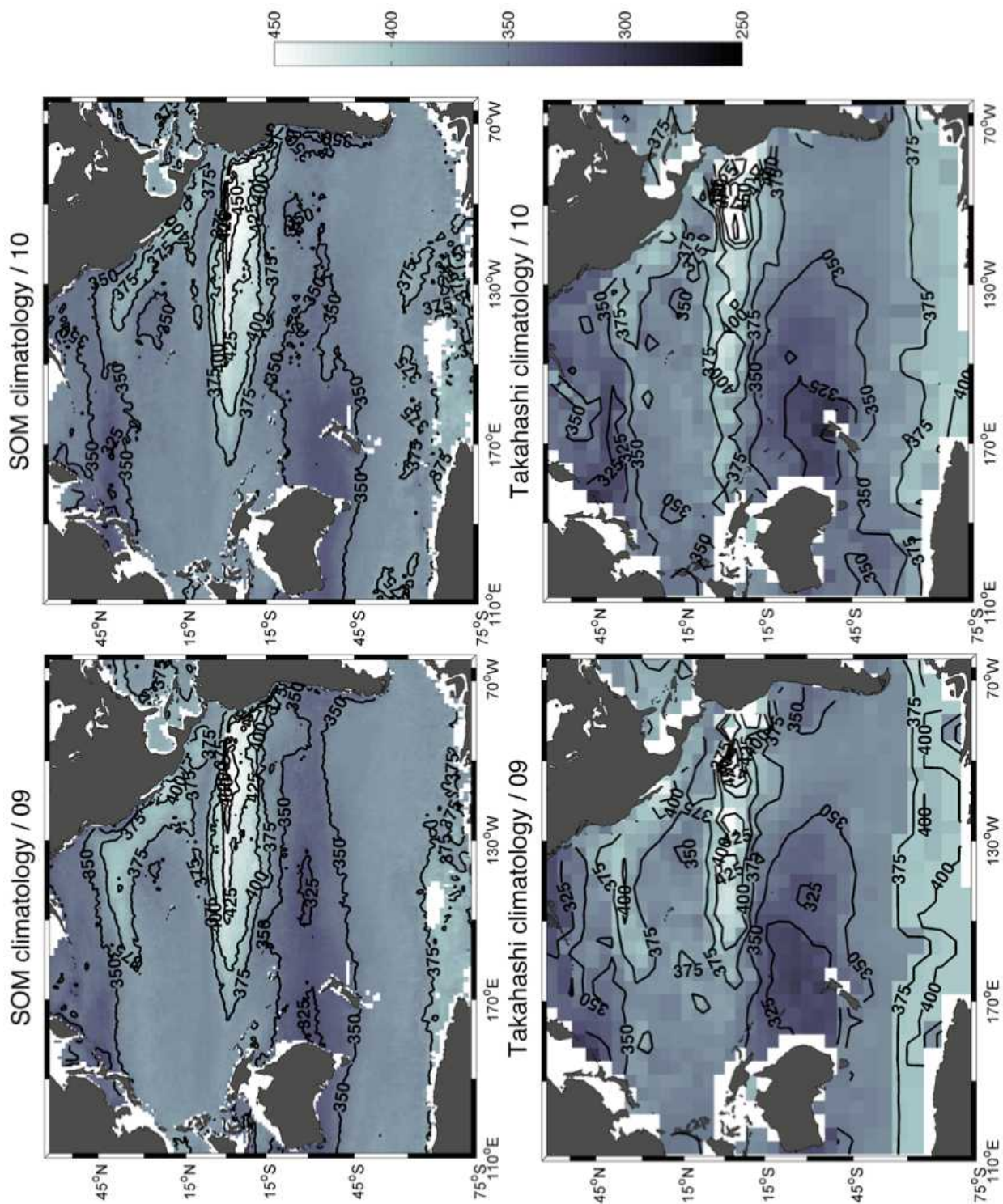


図 15-5 9-10 月の本研究（上段）と Takahashi et al. (2009)（下段）で得られた pCO<sub>2</sub> 分布（単位は μatm）

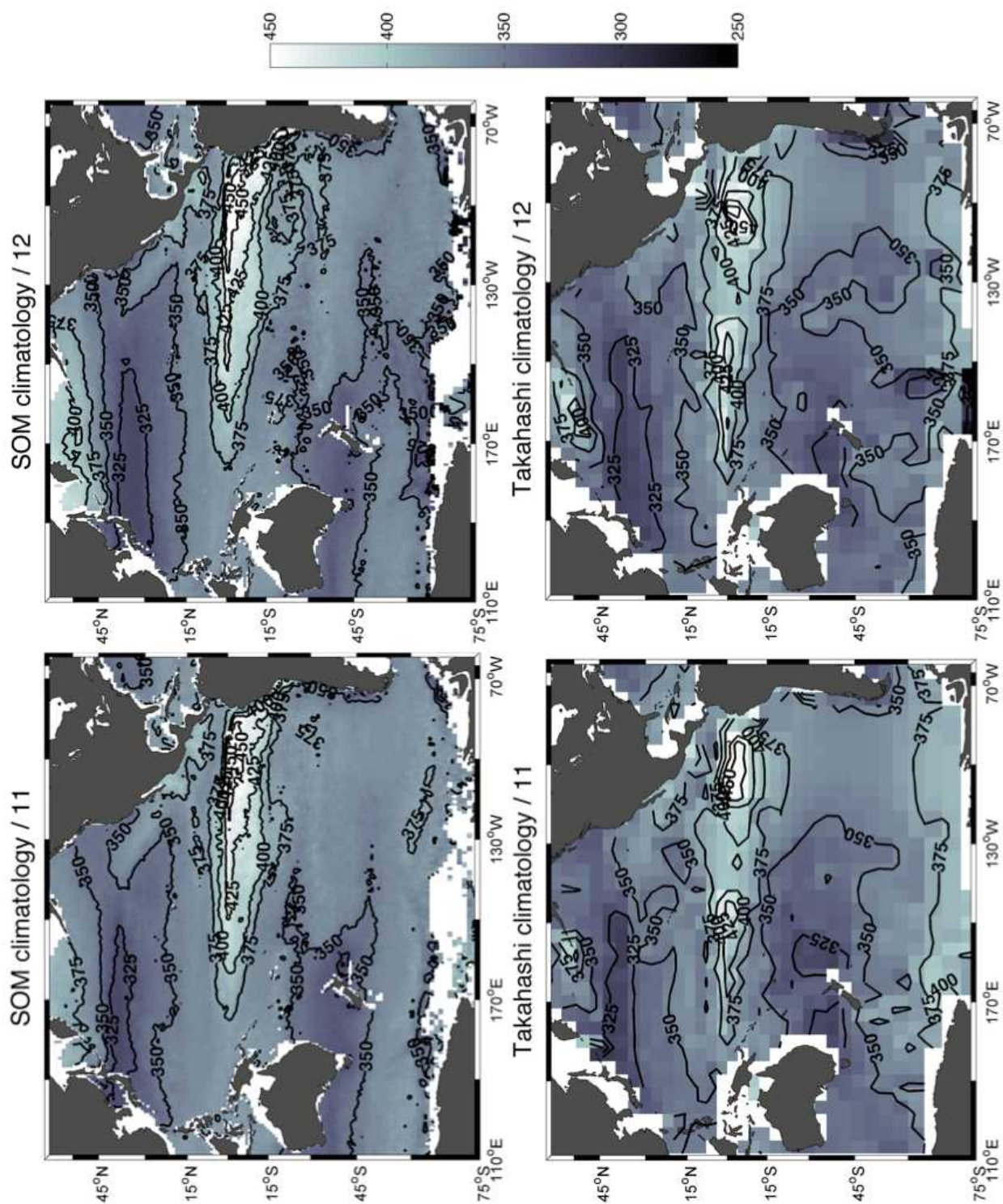


図 15-6 11-12 月の本研究（上段）と Takahashi et al. (2009)（下段）で得られた pCO<sub>2</sub> 分布（単位は μatm）



### 3. (3) ③ エルニーニョ・ラニーニャ期におけるpCO<sub>2</sub>分布の違い

エルニーニョ・ラニーニャサイクルは、全球の気候システムに大きな影響を与えているだけでなく、海洋循環の変化を通して海洋炭素循環にも影響を与えていると考えられている。そこで本研究では、得られた結果を用いてエルニーニョ期とラニーニャ期のpCO<sub>2</sub>分布の違いを検討した。

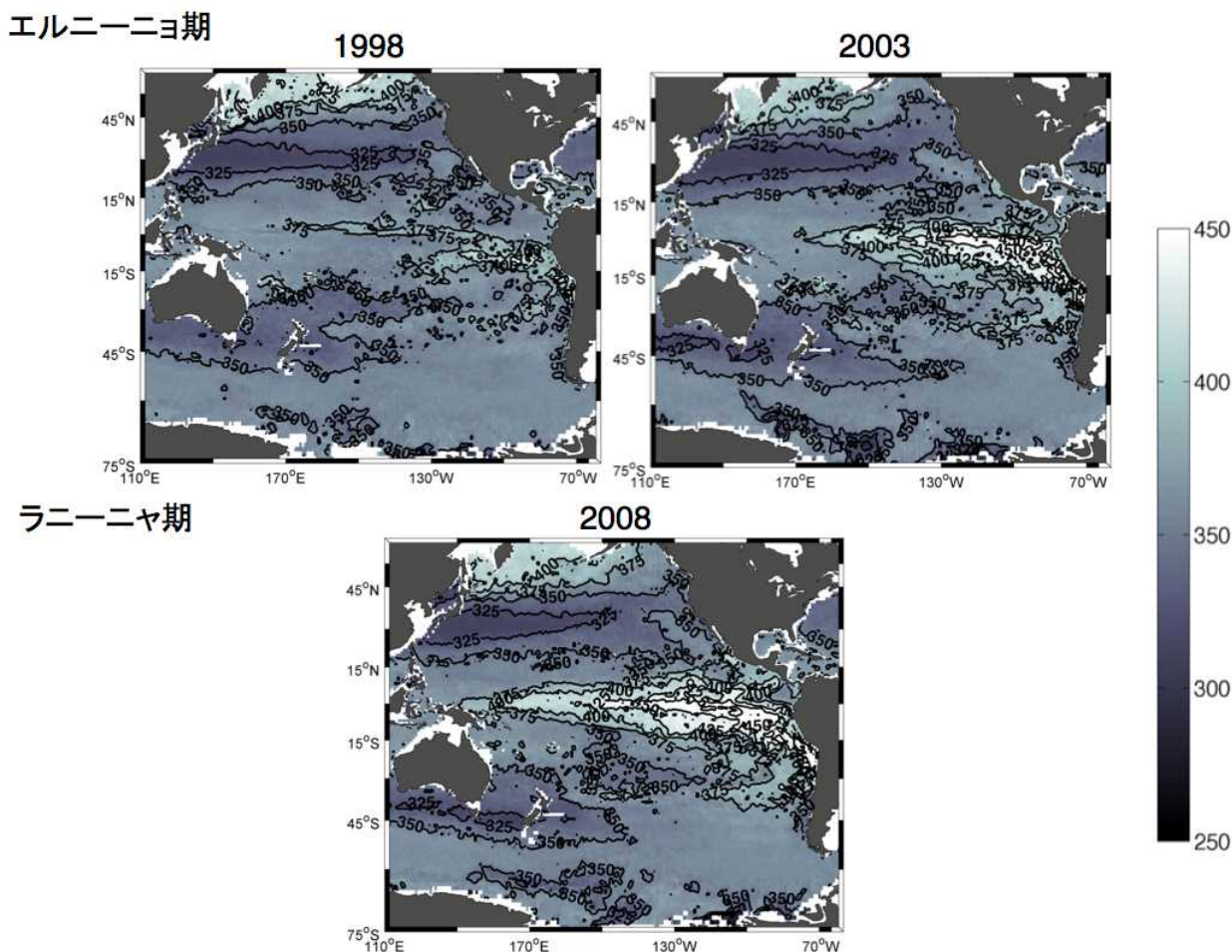


図16 エルニーニョ期（1998年）とラニーニャ期（2008年）における1-3月のpCO<sub>2</sub>分布（ $\mu\text{atm}$ ）

図16は上がエルニーニョ期である1998年と2003年の、下がラニーニャ期である2008年の1-3月のpCO<sub>2</sub>分布を示している。本研究から、20世紀最大のエルニーニョと言われている1998年のエルニーニョ期には、赤道域東部海域での湧昇が抑制され、400  $\mu\text{atm}$ を超える高pCO<sub>2</sub>水塊の分布がほとんど見られないことが分かる。また、同じエルニーニョ期である2003年では、1998年のような顕著な分布の変化は見られないものの、400  $\mu\text{atm}$ を超える高pCO<sub>2</sub>水塊は西経150度程度に留まっている。一方、ラニーニャ期には高pCO<sub>2</sub>水塊は東経150度付近まで分布している様子が見られる。これは、ラニーニャ期に貿易風が強まることでCO<sub>2</sub>が豊富な亜表層からの湧昇が強化され、貿易風によってより西方へと高pCO<sub>2</sub>の水塊が輸送されたためである。このような高pCO<sub>2</sub>水塊分布の年々変動は、2008～2010年度の地球一括計上課題『海洋表層CO<sub>2</sub>分圧観測データ利用促進と太平洋域の変動解析』報告書でも報告したように、Trans Future 5号での太平洋西部海域観測で実際に捉えられており、本研究によるpCO<sub>2</sub>分布推定が観測事実と整合的であることを示している。

3. (3) ④ 太平洋における大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量推定

大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックスを算出する際には、各格子点において以下の式を用いる。

$$f = k \times s \times (p\text{CO}_2^{\text{sea}} - p\text{CO}_2^{\text{air}}) \quad (2)$$

ここで  $k$  はガス交換係数であり Sweeney et al. (2007) によって提案された風速に比例する関数であり、本解析で利用する風速データにはNASAが提供するCross Calibrated Multi Platform (CCMP) wind speed データセットを利用した。また  $s$  は溶解度であり、 $p\text{CO}_2^{\text{sea}}$ と $p\text{CO}_2^{\text{air}}$ は海洋と大気のCO<sub>2</sub>分圧である。 $p\text{CO}_2^{\text{air}}$ を計算するために、GLOBAL-VIEWによる大気CO<sub>2</sub>濃度のデータセットと、NCEP/DOE AMIP-IIの再解析気圧データを用いた。(2)式の定義から明らかなように、CO<sub>2</sub>フラックスが正の値の場合には海洋から大気へのCO<sub>2</sub>放出、負の場合には大気から海洋へのCO<sub>2</sub>吸収を意味している。

(2)式を用いて大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックスを計算して導出した気候学的なCO<sub>2</sub>フラックス分布を図17に示す。この結果から、南北両半球中緯度帯西部海域で-2 mol/m<sup>2</sup>/yr を超える強いCO<sub>2</sub>吸収が見られる。これらの海域では、冬季（北半球は1～3月、南半球は7～9月）に325 μatmを下回る低pCO<sub>2</sub>水塊が現れ、大気とのCO<sub>2</sub>交換が活発になるためである。また南大洋では、ロス海周辺で強いCO<sub>2</sub>吸収が見られる。一方、赤道域東部海域では2 mol/m<sup>2</sup>/yr を超える強いCO<sub>2</sub>放出が見られる。この海域では、1998年のエルニーニョ期を除いて1年を通してpCO<sub>2</sub>が高い値を示しており、また貿易風と呼ばれる東風が卓越するため、海洋から大気へのCO<sub>2</sub>放出が起こっていると考えられる。

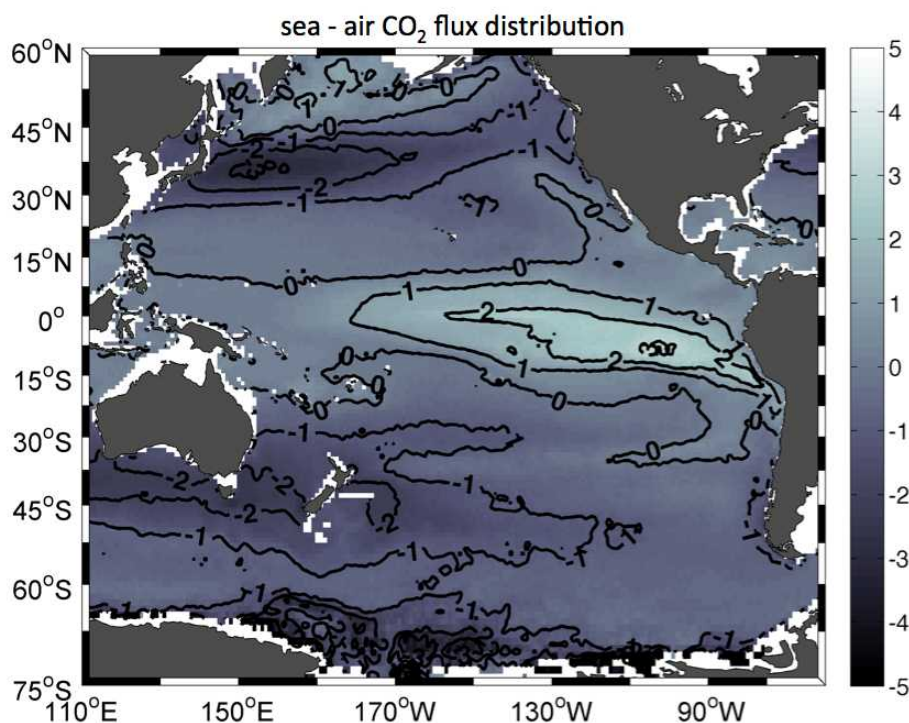


図17 平均的な年間大気海洋間CO<sub>2</sub>フラックス分布 (mol/m<sup>2</sup>/yr)。正の値は海洋から大気へのCO<sub>2</sub>放出、負の値は大気から海洋へのCO<sub>2</sub>吸収を表している。

次に、太平洋全域における大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量とその季節変化と年々変化を図18に示す。本研究の推定期間中の平均的な年間CO<sub>2</sub>吸収量は  $-0.78 \text{ PgC/yr}$  と評価した。また、Takahashi et al. (2009) と比較するため、南緯50度以北の太平洋域のCO<sub>2</sub>交換量を評価したところ $-0.49 \text{ PgC/yr}$  であり、Takahashi et al. (2009) による推定値  $-0.46 \text{ PgC/yr}$  とほぼ一致した。図18aから、太平洋はほぼ1年を通して海洋によるCO<sub>2</sub>の吸収源であることが分かる。その季節変化を見てみると、海洋によるCO<sub>2</sub>吸収は、10月から1月にかけて極大となり、4月から6月に極小となっている。次に、CO<sub>2</sub>交換量の年々変動について見ていくと（図18b）、1998年に海洋によるCO<sub>2</sub>吸収が最大となり、その後2001年にかけて徐々に吸収量は低下している。その後、2004年にかけて吸収量が回復し、比較的安定したCO<sub>2</sub>吸収が2008年まで続いていることが分かる。前述の通り、1998年には20世紀最大のエルニーニョが発生したことにより赤道域東部海域の湧昇が制限され、海洋から大気へのCO<sub>2</sub>放出が弱まった。その結果、正味として太平洋全域のCO<sub>2</sub>吸収量がこの時期に増大したものと考えられる。本研究からCO<sub>2</sub>交換量の年々変動の振幅は約  $0.4 \text{ PgC/yr}$  であると評価した。これは、平均的な年間CO<sub>2</sub>交換量の約半分が年々変化したことを示している。このように、大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量はエルニーニョ・ラニーニャのような気候変動に応答して年々変化しており、その影響は全球に及んでいると考えられる。そのため、本課題で実施したpCO<sub>2</sub>推定を全球に適用し年々変動を再現することで、全球の大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量がどのように変化しているのか把握することが今後重要であると考えられる。

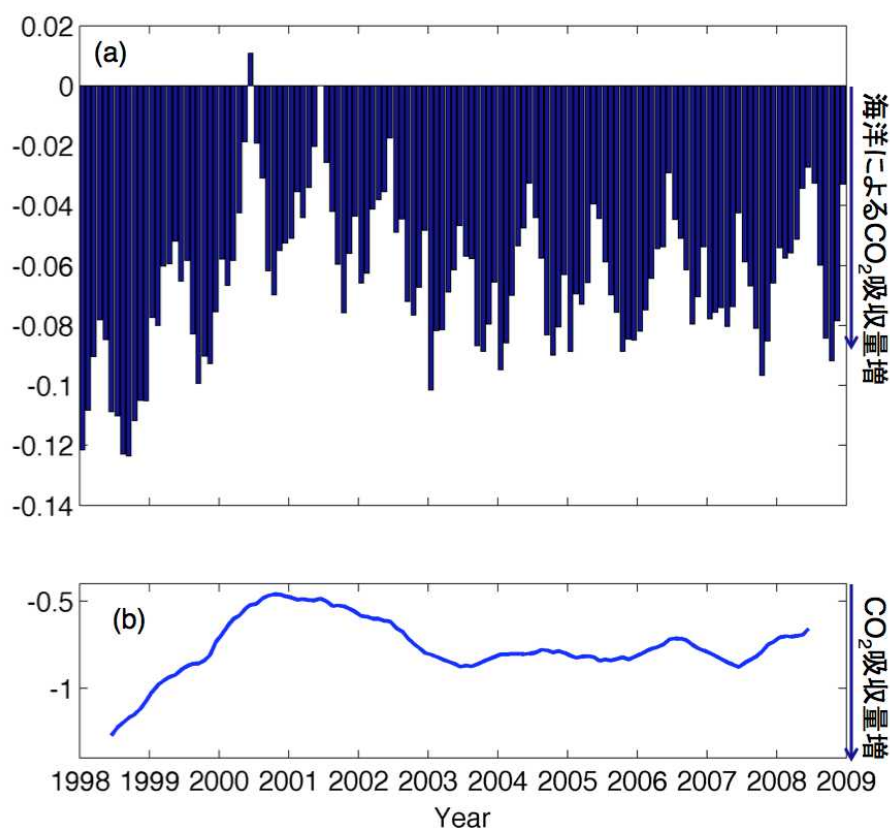


図18 (a) 太平洋における大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量の時間変化（上図、単位は  $\text{PgC/month}$ ）と(b) 6ヵ月の移動平均を施して季節変化成分を除去した年々変化（下図、単位は  $\text{PgC/yr}$ ）。正の値（上向き棒グラフ）は海洋から大気へのCO<sub>2</sub>放出、負の値は大気から海洋へのCO<sub>2</sub>吸収を表している。



### 3. (3) ⑤ 全球pCO<sub>2</sub>分布再現手法開発の試み

本課題ではこれまで、SOMと呼ばれるニューラルネットワーク手法を用いて北太平洋、太平洋赤道域、南太平洋のpCO<sub>2</sub>分布再現に取り組んできたが、前述の通り海洋の炭素循環を把握するためには全球の表層pCO<sub>2</sub>分布を理解することが必要である。そこで、本研究ではこれまで行ってきたSOMによるpCO<sub>2</sub>分布再現とは別に、試行実験としてBack-Propagation法による平均的な月毎のpCO<sub>2</sub>分布推定に取り組んだ。詳しい手法の説明はここでは割愛するが、SOMの手法で全球のpCO<sub>2</sub>分布推定を行うためには計算量が膨大となるのに対して、Back-Propagation手法では計算量を少なくできるという利点があり、全球のpCO<sub>2</sub>分布推定手法として適した手法となる可能性がある。

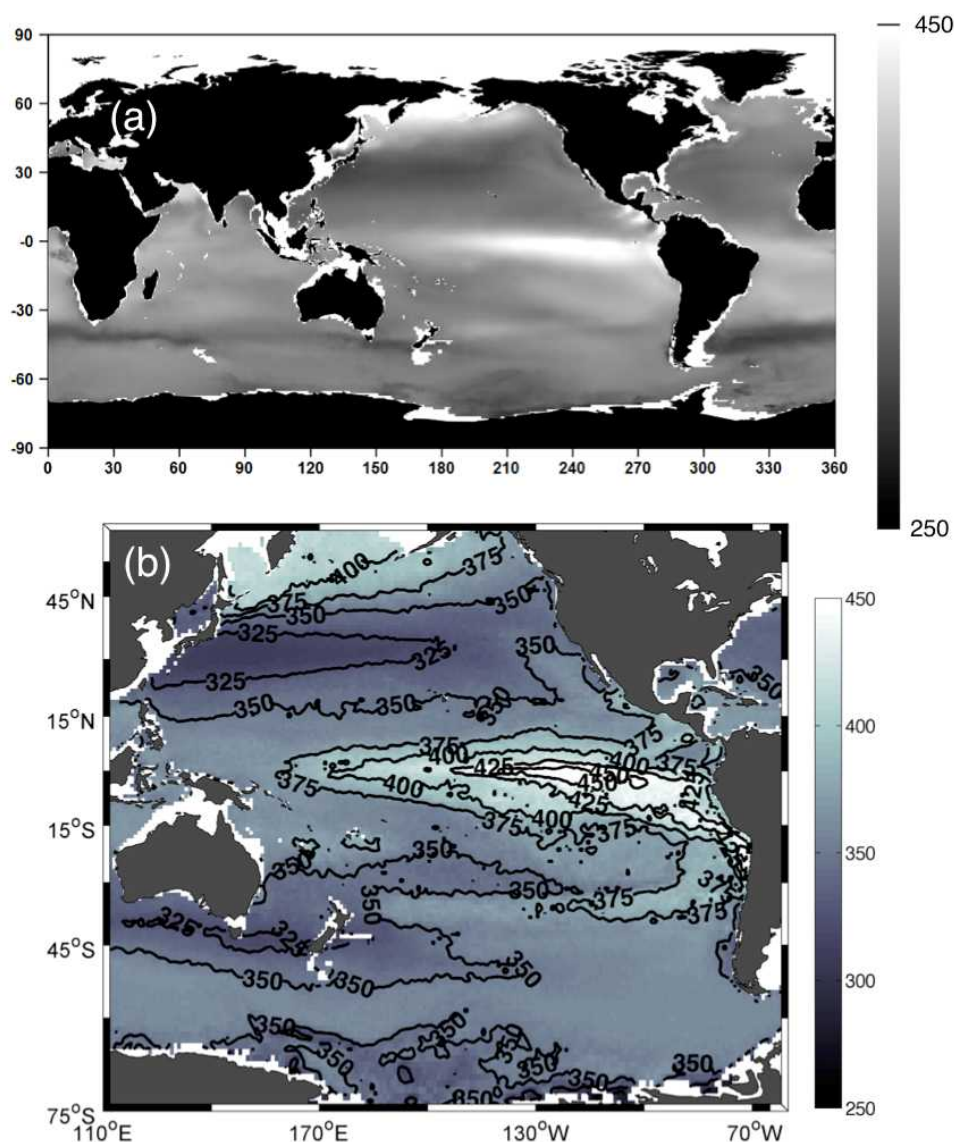


図19 (a) Back-Propagation法で推定した平均的な2月の全球pCO<sub>2</sub>分布と(b) SOM法で推定した同じく平均的な2月の北太平洋のpCO<sub>2</sub>分布(単位はいずれもμatm)

図19はそれぞれの手法で推定した平均的な2月の太平洋のpCO<sub>2</sub>分布を示す。この図から明らかなように両者のpCO<sub>2</sub>分布は非常に概ね良く一致している。例えばBack-Propagation手法による

結果(図19a)もSOM手法による結果(図19b)と同様に冬季のベーリング海から北海道沖にかけての高 $p\text{CO}_2$ 分布や日本沿岸から北太平洋中緯度帯中央部にかけての低 $p\text{CO}_2$ 分布を良く再現している。また太平洋赤道域から南大洋では、ペルー沖の高 $p\text{CO}_2$ 水塊が中央部に広がる様子や、タスマニア島南側の低 $p\text{CO}_2$ 水塊が東西に広がっている様子が再現できている。このことから、Back-PropagationもSOMと同様に $p\text{CO}_2$ 分布推定に有用な手法の一つであるといえる。今後は、これら二つの手法を発展させて、全球の海洋表層 $p\text{CO}_2$ 分布推定を可能とするとともに、大気海洋間 $\text{CO}_2$ 交換量の年々変動を明らかにするように、研究を展開してゆく予定である。

### 3. (3) ⑥ 北太平洋の海洋表層全炭酸分布の推定とその時空間変化特性

北太平洋で推定した $p\text{CO}_2$ 分布を全炭酸濃度に変換して更に解析を行った。本研究での推定値の妥当性を調べるために、船舶による現場採水観測が時系列的になされデータが公開されている海洋観測地点との比較を行い、図20に示した。その結果、今回の推定値は、全炭酸濃度ともに、定点観測値と非常によく一致し、RMSE(平均二乗誤差)は、季節変化より十分小さかった。先行研究であるLee et al. (2000)による推定に比べて、本研究のRMSEは約1/3となり、 $p\text{CO}_2$ の年々変化を考慮している本研究の手法でより精密な推定ができたものと考えられる。

図21に、7年間で平均した2月と8月の全炭酸濃度の推定値を示す。全炭酸濃度は、湧昇流のある亜寒帯域で年間を通して高く、亜熱帯域で低い特徴がある。また、冬季に深い鉛直混合により、ほぼ全海域で極大値をとり、春の生物生産により、夏に多くの海域で極小値をとる。

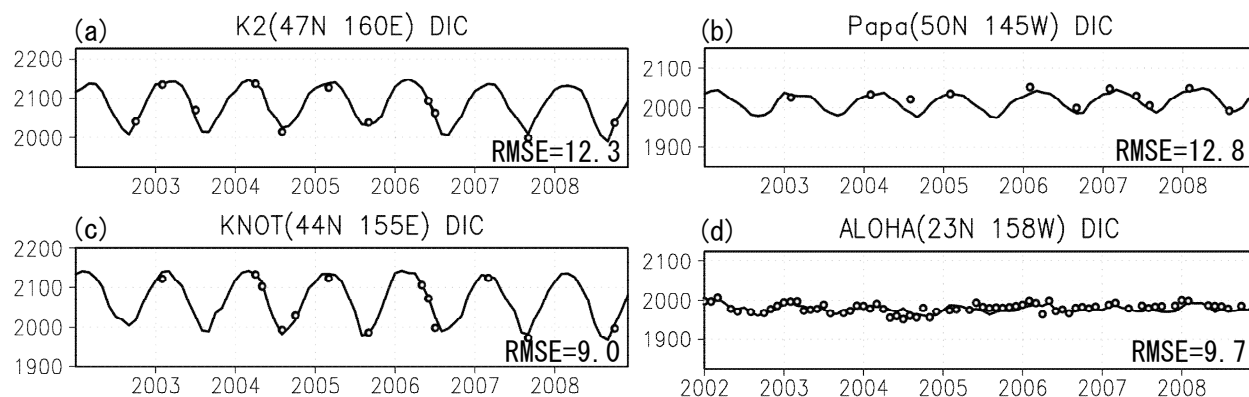


図20 本研究の全炭酸推定値(実線)と現場ボトル観測値(o)の月平均時系列 [ $\mu\text{mol/kg}$ ]。(a) station K2、(b) station Papa、(c) station KNOT、(d) station ALOHA。

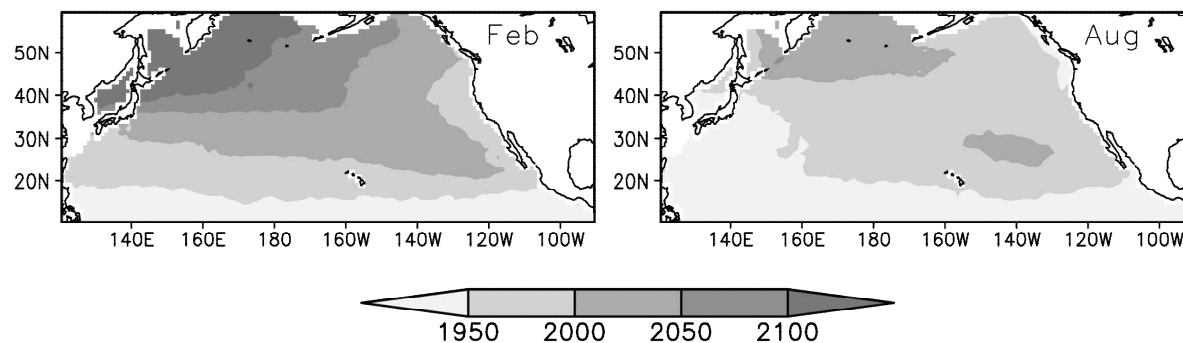


図21 2002~2008年の7年間で平均した月平均気候値。

次に、全炭酸の季節振幅に対する塩分変化や海面でのCO<sub>2</sub>交換、生物生産の役割を定量的に調べた。ここでは、下層からの高い全炭酸濃度の水の取り込みを無視できる3月から7月にかけての全炭酸濃度変化に着目した。この期間、全炭酸濃度は、北太平洋西部の40Nを中心とする亜熱帯亜寒帯境界域や、亜寒帯の沿岸域で、大きな低下を示す(図22a)。この変化の内、塩分変化の効果は、太平洋赤道域東部を除いて、小さい(図22b)。海面のCO<sub>2</sub>の吸収は、亜寒帯の沿岸域で約50%、北太平洋西部の亜熱帯亜寒帯境界域で30-40%程度全炭酸低下を抑える効果を持っていた。

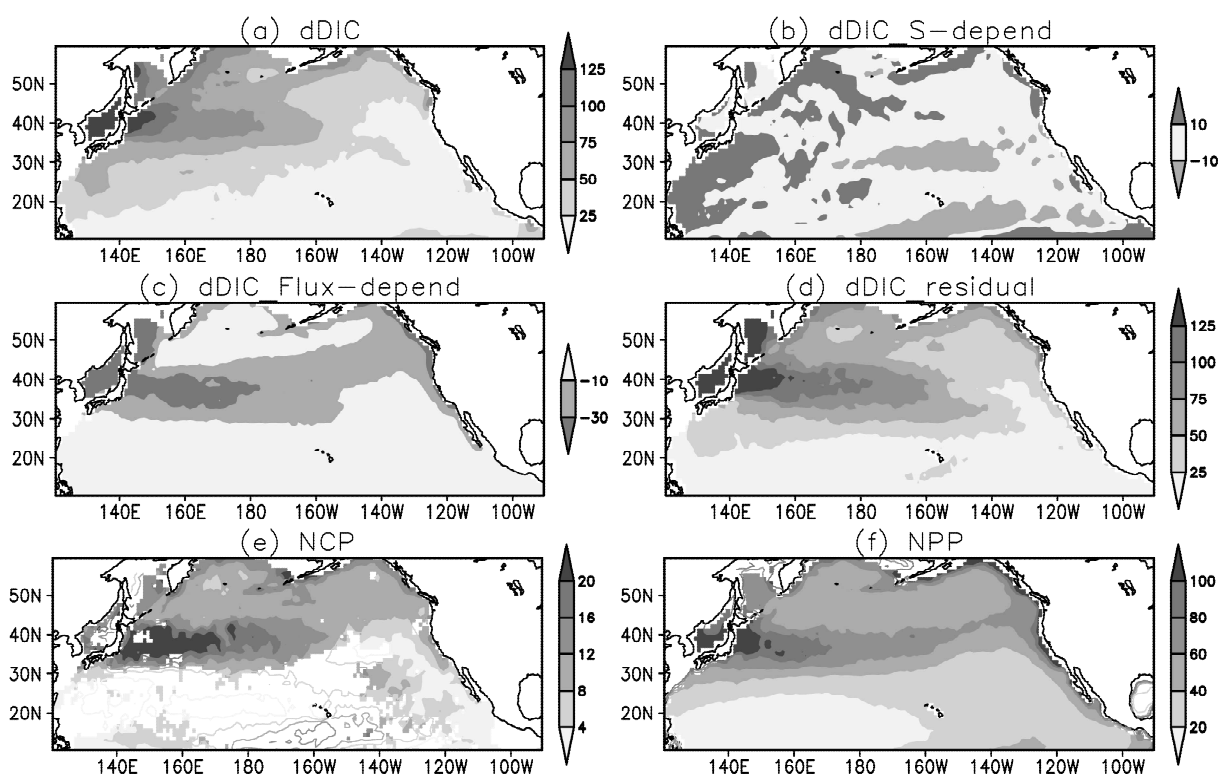


図22 3月から7月にかけての (a) 全炭酸濃度低下、(b) 全炭酸濃度低下のうち塩分低下寄与分、(c) 全炭酸濃度低下のうち海面CO<sub>2</sub>フラックス寄与分、(d) 全炭酸濃度低下の残差成分 (a-[b+c])、(e) 全炭酸推定値から見積もった正味群集生産、(f) 衛星海色データによる正味基礎生産。

全炭酸濃度の低下から、塩分変化の効果と、海面からの吸収・放出量を差し引くと(残差成分; 図22d)、衛星海色データに基づく正味基礎生産(NPP; Behrenfeld and Falkowski 1997; 図22e)と非常によく似た分布を示した。そこで、Lee (2001) に基づき、全炭酸濃度低下の残差成分を混合層深度積分することで、正味群集生産(NCP)を求めた。その結果、中緯度域や沿岸域での比較的高いNCPが示された(図22f)。この分布は、全炭酸濃度低下の残差と同様、衛星海色データに基づくNPP(図22e)と非常によく似た分布を示した。さらに、NCPはNPPの2~3割の大きさで、一般的に知られている全生産量に対する新生産の比(F-ratio)と同等であった。

全炭酸濃度の経年変化を調べるために、7年間で平均した季節変動成分を差し引いた偏差場を作成した。その偏差場に対して、主成分分析を施した結果、最も卓越する変動パターンとして、北太平洋の西部で正、東部と亜熱帯域で負を持つモードが得られた(図23b)。また、そのパター

ンの時係数は、2002年の後半から2005年の前半にかけて正、2007年後半から2008年にかけて負を示した（図23a ハッチ）。すなわち、北太平洋の全炭酸濃度は、2002年の後半から2005年の前半にかけて、西部で通常より高く、東部と亜熱帯域で通常より低い状態にあり、2007年後半から2008年にかけて、西部で通常より低く、東部と亜熱帯域で通常より高い状態となるような、東西反対称の変化が卓越していることが分かった。一方、このモードの時係数と、北太平洋の気候場に最も卓越する変動である北太平洋10年規模変動 (PDO) の指数（図23a 実線）との相関は、0.89であった（有意水準1%で有意）。すなわち、PDOは、北太平洋気候場の卓越変動モードであるだけでなく、全炭酸濃度の卓越変動をも引き起こしているといえる。

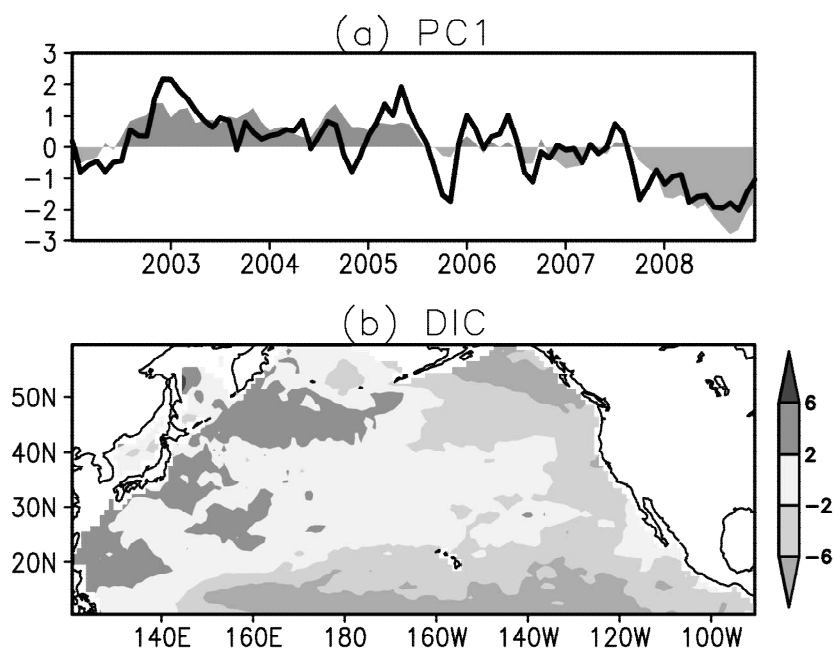


図23 DIC偏差場におけるEOF第1モードの (a) 時係数（ハッチ）と (b) EOF第1モードの空間パターン。(a) の実線はPDO指数。

そこで、PDOに伴う全炭酸濃度変化が起こる機構を調べるために、全炭酸濃度（図24a）の他に海面水温（図24b）等のさまざまな物理化学場のPDO指数に対する回帰図を示す。PDOに伴う降水の変化は、海面塩分の変化をもたらし、海面塩分の変化は全域で、同符号の全炭酸濃度の変化に結びついている（図24c）。また、PDOに伴う風系の変化は、海洋混合層深度の変化をもたらし、混合層深度の変化は、海面より高い全炭酸濃度の海洋亜表層からの水の取り込み量を変えることで、同符号の全炭酸濃度の変化に結びついている（図24d）。一方、海面でのCO<sub>2</sub>交換は、亜寒帯亜熱帯境界域では、PDOに伴う水温の変化によるフラックスが、全炭酸濃度の変化に結びつく一方、亜寒帯域では、全炭酸濃度の変化がフラックスの変化を引き起こし、PDOに伴う全炭酸濃度の変化を緩和していた（図24e）。また、亜寒帯域で、PDOに伴う混合層深度変化が、下層からの栄養塩供給量を増やすことで、生物生産が活発になり、全炭酸濃度の変化を引き起こしていると

考えられる（図24f）。すなわち、PDOに伴う全炭酸濃度の変化は、PDOに伴う気候場の変化と整合的であった。

高精度高頻度 $p\text{CO}_2$ 観測を用いた $p\text{CO}_2$ マッピングの結果を用いることで、これまでにない精度で全炭酸濃度のマッピングを行うことができた。それゆえ、季節変化から見積もった生物生産量は、観測に基づく生物生産量としては初めて、衛星観測による生物生産量と定量的に比較することができた。また、これまで、数少ない定点で議論されてきたに過ぎない全炭酸の経年変化を広域的に示すことができた。

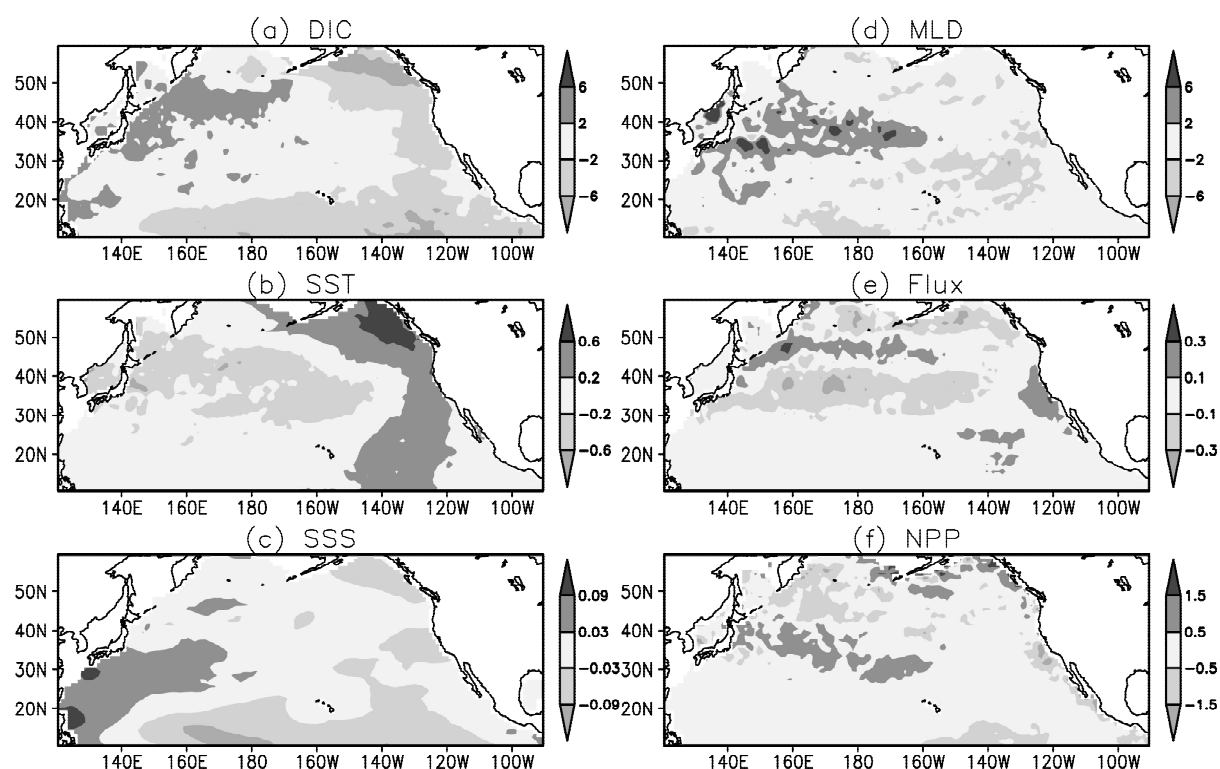


図24 PDO指数に回帰した (a) 全炭酸濃度、(b) 海面水温、(c) 海面塩分、(d) 混合層深度、(e) 大気海洋間 $\text{CO}_2$ フラックス、(f) 生物生産量 (NPP)。

#### 4. 本研究により得られた成果

国環研の貨物船を利用する海洋表層 $p\text{CO}_2$ 観測データセットは、国環研からWebで公開 (<http://soop.jp/>)するとともに、海洋 $\text{CO}_2$ の国際データベースである米国オークリッジ研究所CDIAC (Carbon Dioxide Information and Analysis Centre) の海洋表層 $p\text{CO}_2$ データベースから世界の研究者に提供してきた。これにより、コロンビア大学のTakahashiらとの共同研究による長期間平均の気候値マップ作成がなされ (Takahashi et al., 2009)、広く研究利用されつつある。しかしながら、CDIACのデータベースはあくまでデータ公開サイトを提供しているもので、組織的に全球データセットを収集する目的のものではない。公開を目的とする客観的データベースSOCAT (Surface Ocean Carbon Atlas)をIOCCPのもとで作成する合意がまとまり、本研究代表者が北太平洋の責任者を務めることになった。先行課題では、海域会合の開催、観測値そのものの信頼性を高



めるための測定装置の相互比較実験などを実施してその活動に積極的に協力するとともに、2006年までのデータ登録を行ってその第1版の作成に貢献した。合わせて先行課題で、国環研のデータ処理・確定作業の迅速化を進めることができ国際統合データベースSOCAT第2版作成の要求である2010年までの観測データの品質保証と登録を行った。SOCAT第2版においても、世界データにおける国環研のデータの寄与度は大きく、世界最大のデータ提供者の一つとして貢献度を維持した。国際データベース作成活動はおおむね順調に進み、当初目標からわずかに遅れたもののSOCAT第2版は2013年6月に一般公開された。SOCAT第2版の作成過程においても、国環研は北太平洋の責任機関として国際的なデータの品質管理活動に本課題のもとで参画した。引き続き作成が進められているSOCAT第3版についても、各研究機関で取り組みが進んでおり、国環研では2013年12月までにデータ提出が完了した。また本課題の実施により、国環研の海洋pCO<sub>2</sub>観測データの処理・確定作業では一段の迅速化がなされ、データ回収後、約半年以内という世界の海洋pCO<sub>2</sub>観測機関の中でデータ提供が最も迅速となり、この分野の世界の研究に大きな貢献をしている。

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、先行課題において国環研の貨物船による観測が貢献してデータ密度の高い北太平洋域への適用検討を実施し、本課題開始でその確定解析値を得た。最終年度には、北太平洋から南大洋太平洋セクターまでの広範囲な海域について本手法を用いてpCO<sub>2</sub>を推定し、先行研究である Takahashi et al. (2009) の気候学的分布とも整合的な結果を得ることができた。また、エルニーニョ期やラニーニャ期のpCO<sub>2</sub>分布を再現し、20世紀最大と言われる1998年のエルニーニョ期には赤道域東部海域の湧昇が抑えられ、400 μatmを超える高いpCO<sub>2</sub>水塊がほとんど見られなくなることを明らかにした。さらに太平洋全域の大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量の時空間分布を明らかにし、エルニーニョ・ラニーニャの気候変動に伴って大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量に変化する様子を捉えた。さらに、ニューラルネットワーク手法による北太平洋の高解像度の年々変化を含むpCO<sub>2</sub>マッピングの利用研究として、アルカリ度、全炭酸マッピングを行うことで全球海洋の生物生産（生態系純生産：net community production）を推定した。さらに本研究で得られた全炭酸濃度の時空間変動は、太平洋10年規模変動（Pacific Decadal Oscillation）によって駆動されていることが始めて明らかとなった。

## 5. 引用文献

- 1) Takahashi, T., Sutherland, S.C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R.A. 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., M. Telszewski, Y. Nojiri, S. Yasunaka, C. Miyazaki, H. Mukai and N. Usui.: Estimating temporal and spatial variation of ocean 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, 2013.
- 3) Behrenfeld, M. J., and P. G. Falkowski, (1997), Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnology and Oceanography*, 42, 1-20.
- 4) Garcia, H. E., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, J. I. Antonov, M. M. Zweng, O. K. Baranova, and D. R. Johnson, (2010), *World Ocean Atlas 2009, Volume 4: Nutrients (phosphate, nitrate, silicate)*. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 71, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 398 pp.

- 5) Lee, K., R. Wanninkhof, R. A. Feely, F. J. Millero, and T.-H. Peng, (2000), Global relationships of total inorganic carbon with temperature and nitrate in surface seawater, *Global Biogeochem. Cycles*, 14, 979–994, doi:10.1029/1998GB001087.
- 6) Lee, K., (2001), Global net community production estimated from the annual cycle of surface water total dissolved inorganic carbon, *Limnol. Oceanogr.*, 46, 1287–1297.
- 7) Lee, K., L. T. Tong, F. J. Millero, C. L. Sabine, A. G. Dickson, C. Goyet, G.-H. Park, R. Wanninkhof, R. A. Feely, and R. M. Key, (2006), Global relationships of total alkalinity with salinity and temperature in surface waters of the world's oceans, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19605, doi:10.1029/2006GL027207.
- 8) Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda and M. Kamachi, (2006), Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation MOVE system: Some early results. *Adv. Space Res.*, 37, 806-822.
- 9) van Heuven, S., D. Pierrot, E. Lewis, and D. W. R. Wallace, 2009: MATLAB program developed for CO<sub>2</sub> system calculations, U.S. Dep. of Energy, Carbon Dioxide Inf. Anal. Cent., Oak Ridge Natl. Lab., Oak Ridge, Tenn.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- 1) Valsala V., Maksyutov S., Telszewski M., Nakaoka S., Nojiri Y., Ikeda M. Murtugudde R.: *Biogeosciences*, 9, 477-492, doi:10.5194/bg-9-477-2012 (2012).  
“Climate impacts on the structures of the North Pacific air-sea CO<sub>2</sub> flux variability”
- 2) Pfeil, B., A. Olsen, D.C.E. Bakker, S. Hankin, H. Koyuk, A. Kozyr, J. Malczyk, A. Manke, N. Metzl, C.L. Sabine, J. Akl, S.R. Alin, R.G.J. Bellerby, A. Borges, J. Boutin, P.J. Brown, W.-J. Cai, F.P. Chavez, A. Chen, C. Cosca, A.J. Fassbender, R.A. Feely, M. González-Dávila, C. Goyet, N. Hardman-Mountford, C. Heinze, M. Hood, M. Hoppema, C.W. Hunt, D. Hydes, M. Ishii, T. Johannessen, S.D. Jones, R.M. Key, A. Körtzinger, P. Landschützer, S.K. Lauvset, N. Lefèvre, A. Lenton, A. Lourantou, L. Merlivat, T. Midorikawa, L. Mintrop, C. Miyazaki, A. Murata, A. Nakadate, Y. Nakano, S. Nakaoka, Y. Nojiri, A.M. Omar, X.A. Padin, G.-H. Park, K. Paterson, F.F. Perez, D. Pierrot, A. Poisson, A.F. Ríos, J. Salisbury, J.M. Santana-Casiano, V.V.S.S. Sarma, R. Schlitzer, B. Schneider, U. Schuster, R. Sieger, I. Skjelvan, T. Steinhoff, T. Suzuki, T. Takahashi, K. Tedesco, M. Telszewski, H. Thomas, B. Tilbrook, J. Tjiputra, D. Vandemark, T. Veness, R. Wanninkhof, A.J. Watson, R. Weiss, C.S. Wong and H. Yoshikawa-Inoue: *Earth Syst. Sci. Data*, 5, 125-143, doi:10.5194/essd-5-125-2013 (2013).  
“A uniform, quality controlled Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT)”
- 3) Sabine, C.L., S. Hankin, H. Koyuk, D.C.E. Bakker, B. Pfeil, A. Olsen, N. Metzl, A. Kozyr, A. Fassbender, A. Manke, J. Malczyk, J. Akl, S.R. Alin, R.G.J. Bellerby, A. Borges, J. Boutin, P.J. Brown, W.-J. Cai, F.P. Chavez, A. Chen, C. Cosca, R.A. Feely, M. González-Dávila, C. Goyet, N. Hardman-Mountford, C. Heinze, M. Hoppema, C.W. Hunt, D. Hydes, M. Ishii, T. Johannessen, R.M. Key, A. Körtzinger, P. Landschützer, S.K. Lauvset, N. Lefèvre, A. Lenton, A. Lourantou, L. Merlivat,

T. Midorikawa, L. Mintrop, C. Miyazaki, A. Murata, A. Nakadate, Y. Nakano, S. Nakaoka, Y. Nojiri, A.M. Omar, X.A. Padin, G.-H. Park, K. Paterson, F.F. Perez, D. Pierrot, A. Poisson, A.F. Rios, J. Salisbury, J.M. Santana-Casiano, V.V.S.S. Sarma, R. Schlitzer, B. Schneider, U. Schuster, R. Sieger, I. Skjelvan, T. Steinhoff, T. Suzuki, T. Takahashi, K. Tedesco, M. Telszewski, H. Thomas, B. Tilbrook, D. Vandemark, T. Veness, A.J. Watson, R. Weiss, C.S. Wong and H. Yoshikawa-Inoue.: *Earth Syst. Sci. Data*, 5, 145-153, doi:10.5194/essd-5-145-2013 (2013)

“Gridding of the Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT) Gridded data products”

- 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. Le Quéré, C. Heinze, J. Schwinger, H. Graven, and S. Khatiwala: *Biogeosciences*, 10, 1983-2000, doi:10.5194/bg-10-1983-2013 (2013)

“Global ocean carbon uptake: magnitude, variability and trends”

- 5) Bakker, D. C. E., B. Pfeil, K. Smith, S. Hankin, A. Olsen, S. R. Alin, C. Cosca, S. Harasawa, A. Kozyr, Y. Nojiri, K. M. O'Brien, U. Schuster, M. Telszewski, B. Tilbrook, C. Wada, J. Akl, L. Barbero, N. Bates, J. Boutin, W.-J. Cai, R. D. Castle, F. P. Chavez, L. Chen, M. Chierici, K. Currie, H. J. W. de Baar, W. Evans, R. A. Feely, A. Fransson, Z. Gao, B. Hales, N. Hardman-Mountford, M. Hoppema, W.-J. Huang, C. W. Hunt, B. Huss, T. Ichikawa, T. Johannessen, E. M. Jones, S. D. Jones, S. Jutterström, V. Kitidis, A. Körtzinger, P. Landschutzer, S. K. Lauvset, N. Lefèvre, A. B. Manke, J. T. Mathis, L. Merlivat, N. Metzl, A. Murata, T. Newberger, T. Ono, G.-H. Park, K. Paterson, D. Pierrot, A. F. Ríos, C. L. Sabine, S. Saito, J. Salisbury, V. V. S. S. Sarma, R. Schlitzer, R. Sieger, I. Skjelvan, T. Steinhoff, K. Sullivan, H. Sun, A. J. Sutton, T. Suzuki, C. Sweeney, T. Takahashi, J. Tjiputra, N. Tsurushima, S. M. A. C. van Heuven, D. Vandemark, P. Vlahos, D. W. R. Wallace, R. Wanninkhof, and A. J. Watson: *Earth Syst. Sci. Data*, 6, 69-90, doi:10.5194/essd-6-69-2014 (2014)

“An update to the Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT version 2)”

- 6) Nakaoka, S., M. Telszewski, Y. Nojiri, S. Yasunaka, C. Miyazaki, H. Mukai and N. Usui: *Biogeosciences*, 10, 6093-6106, doi:10.5194/bg-10-6093-2013 (2013)

“Estimating temporal and spatial variation of ocean surface pCO<sub>2</sub> in the North Pacific using a self-organizing map neural network technique”

- 7) Yasunaka, S., Y. Nojiri, S. Nakaoka, T. Ono, H. Mukai and N. Usui: *J. Geophys. Res.*, 118, 3843-3850, doi:10.1002/jgrc.20279 (2013)

“Monthly maps of sea surface dissolved inorganic carbon in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal variation”

- 8) Ishii, M , R. A. Feely, K. B. Rodgers, G.-H. Park, R. Wanninkhof, D. Sasano, H. Sugimoto, C. E. Cosca, S. Nakaoka, M. Telszewski, Y. Nojiri, S. E. Mikaloff Fletcher, Y. Niwa, P. K. Patra, V. Valsala, H. Nakano, I. Lima, S. C. Doney, E. T. Buitenhuis, O. Aumont, J. P. Dunne, A. Lenton, and T. Takahashi: *Biogeosciences*, 11, 709-734 (2014)

“Air–sea CO<sub>2</sub> flux in the Pacific Ocean for the period 1990–2009”

- 9) Yasunaka, S., Y. Nojiri, S. Nakaoka, T. Ono, H. Mukai, and N. Usui: *Geophys. Res. Lett.*, 41,

1005–1011, doi:10.1002/2013GL058987 (2014)

“North Pacific dissolved inorganic carbon variations related to the Pacific Decadal Oscillation”

(2) 口頭発表

- 1) Nojiri, Y., M. Telszewski, S. Nakaoka, C. Miyazaki: 8th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, Taipei Taiwan, 2011.  
“Ocean Surface pCO<sub>2</sub> Observation by Volunteer Observation Ships and Basin Wide Estimation of pCO<sub>2</sub> Variability in the Pacific” (invited)
- 2) 宮崎千尋、野尻幸宏、中岡慎一郎: 2011年度日本海洋学会秋季大会、福岡 (2011)  
「西部赤道太平洋における大気-海洋CO<sub>2</sub>交換量の時系列変動とその要因」
- 3) Miyazaki, C., Y. Nojiri, S. Nakaoka, S. Yasunaka: Joint SOLAS/IMBER/IOCCP Carbon (SIC) Synthesis Meeting, Paris France, 2011  
“Long-term variability of CO<sub>2</sub> in surface water around 150°E of the western equatorial Pacific using NIES VOS and SOCAT data sets”
- 4) 中岡 慎一郎、Maciej Telszewski、野尻 幸宏、宮崎 千尋、安中 さやか、向井 人史、碓井 典久: 2011年度日本海洋学会秋季大会、福岡 (2011)  
「Self Organizing Map解析で得られた北太平洋の海洋表層CO<sub>2</sub>分圧と大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量の時空間分布」
- 5) 安中さやか、野尻幸宏、中岡慎一郎、宮崎千尋、向井人史、碓氷典久: 2011年度日本海洋学会春季大会、つくば (2012)  
「北太平洋における全炭酸マッピング」
- 6) Nojiri, Y.: SOLAS Open Science Conference 2012, Cle Elum, WA, USA, May 7-10, 2012.  
“Basin scale analysis of oceanic pCO<sub>2</sub> variability and results of atmospheric tracers for ocean CO<sub>2</sub> sink variability” (invited)
- 7) Yukihiro Nojiri, Sayaka Yasunaka, Shinichiro Nakaoka, Tsuneo Ono, Hitoshi Mukai, and Norihisa Usui: PICES-2012, Hiroshima, Oct. 12-21, 2012.  
“Variability of carbon cycle and biological production in the North Pacific estimated from mapping of pCO<sub>2</sub>, alkalinity, and dissolved inorganic carbon”
- 8) Nakaoka, S., M. Telszewski, Y. Nojiri, S. Yasunaka, C. Miyazaki, H. Mukai, and N. Usui: SOLAS Open Science Conference, Cle Elum, WA, USA, May 7-10, 2012.  
“Reconstructing the monthly pCO<sub>2</sub><sup>sea</sup> distribution in the North Pacific using Self Organizing Map”
- 9) Sayaka Yasunaka, Yukihiro Nojiri, Shin-ichiro Nakaoka, Hitoshi Mukai, Norihisa Usui: SOLAS Open Science Conference, Cle Elum, WA, USA, May 7-10, 2012.  
“Estimation of sea surface dissolved inorganic carbon (DIC) in the North Pacific using pCO<sub>2</sub> mapping”
- 10) 中岡慎一郎・Maciej Telszewski・野尻幸宏・安中さやか・宮崎千尋・碓氷典久・向井人史・小埜恒夫: 地球惑星連合大会、幕張 (2012)  
「ニューラルネットワークを用いた北太平洋のpCO<sub>2</sub>分布再現による大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量推

定」

- 11) 安中さやか・野尻幸宏・中岡慎一郎：2012年日本海洋学会秋季大会、清水（2012）  
「北太平洋における栄養塩の時空間分布特性」
- 12) 安中さやか・野尻幸宏・中岡慎一郎・小埜恒夫・稲垣明・Frank A. Whitney：2013年日本海洋学会春季大会、東京（2013）  
「北太平洋における表層栄養塩の時空間マッピング」
- 13) Nakaoka, S., Y. Nojiri, S. Yasunaka, M. Telszewski, C. Miyazaki: 9th International Carbon Dioxide Conference, Beijing, China, June, 2013.  
“Ocean surface CO<sub>2</sub> mapping and air-sea CO<sub>2</sub> flux estimate in the Pacific Ocean based on in-situ observations and neural statistics”
- 14) Yasunaka, S., Y. Nojiri, S. Nakaoka, T. Ono, H. Mukai, N. Usui: 9th International Carbon Dioxide Conference, Beijing, China, 2013  
“Basin-scale distribution and seasonal to inter-annual variation of Dissolved Inorganic Carbon over the North Pacific”
- 15) Harasawa, S.: 9th International Carbon Dioxide Conference, Beijing, China, 2013.  
“Surface atmosphere and ocean CO<sub>2</sub> dataset obtained by NIES volunteer observation ship program in the Pacific”
- 16) U. Schuster, A. Watson, S. Nakaoka, Y. Nojiri: 9th International Carbon Dioxide Conference, Beijing, China, June, 2013.  
“Variability of the northern hemisphere air-sea CO<sub>2</sub> flux over the last decade”
- 17) 安中さやか・野尻幸宏・中岡慎一郎・小埜恒夫・Frank Whitney: 2013年日本海洋学会秋季大会、札幌（2013）  
「北太平洋表層栄養塩の季節・経年変動」
- 18) 中岡慎一郎・野尻幸宏・安中さやか: 2013年日本海洋学会秋季大会、札幌（2013）  
「太平洋域の海洋表層CO<sub>2</sub>分圧と大気海洋間CO<sub>2</sub>交換量の分布推定」
- 19) Zeng, J., Nojiri, Y., Nakaoka, S., Nakajima, H.: Ocean Science Meeting 2014, Honolulu, U.S., February, 2014.  
“Mapping Global Surface Ocean Fugacity of Carbon Dioxide Using Feed Forward Neural Network: 1990-2011”
- 20) Nakaoka, S., Nojiri, Y., Yasunaka, S., Mukai, H., Telszewski, M.: Ocean Science Meeting 2014, Honolulu, U.S., February, 2014.  
“Ocean Surface pCO<sub>2</sub> Mapping and Air-Sea CO<sub>2</sub> Flux Estimate over the Globe Based on in-situ Measurements and Neural Statistics”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

野尻幸宏、日本地球化学会賞『大気水圏の炭素循環と地球温暖化に関する地球化学的研究』



(5)一般への公表・報道等

- 1) 国立環境研究所公開シンポジウム2013～国境のない地球環境～ 2013/6/14 メルパルクホール（東京） 2013/6/21 シルクホール（京都）：太平洋における大気中および海洋中の二酸化炭素濃度の観測（発表者：中岡慎一郎）
- 2) 成果の記者発表（2013/10/10）：地球温暖化のメカニズム解明に重要な北太平洋表層の二酸化炭素の分布を解明（協力貨物船による海洋表層観測の成果）  
<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2013/20131010-2/20131010-2.html>

(6)その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

太平洋域の海洋CO<sub>2</sub>観測とデータ発信を、太平洋域の先進国であるわが国の役割と考えた時、本課題等でSOCATの太平洋地域活動を継続的に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。

国内では、国環研の他、JAMSTEC、気象庁/気象研などに海洋CO<sub>2</sub>データを扱う専門家がおり、国際データベースに着実にデータ提供を行っているものの、他機関や大学等では専門家が不足し、国際データ流通にのらずに利用度の低いデータが残っている。定常的観測を実施することが本務ではない大学等の組織で安定にデータマネージャーを確保することは困難であり、そのようなデータの国際流通を助けることは、海洋CO<sub>2</sub>の専門家を有する公的機関の果たすべき役割である。