

地球一括計上

課題名	海洋表層CO ₂ 分圧観測データ利用促進と太平洋域の変動解析		
担当研究機関	独立行政法人国立環境研究所		
研究期間	平成20-22年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	72,138千円 (うち22年度 28,301千円)
研究体制	海洋表層CO ₂ 分圧観測データ利用促進と太平洋域の変動解析 (独立行政法人国立環境研究所)		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>海洋は地球上で最大の自然CO₂吸収源であるが、その量は膨大であり、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ため、現代大気CO₂濃度に対し非平衡状態にある。そのため海洋表層pCO₂ (CO₂分圧) 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2Gt程度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、地球温暖化の自然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CO₂排出削減必要量を評価することにインプットを行う重要な地球観測課題である。</p> <p>海洋表層pCO₂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。国立環境研究所 (以下、国環研) では、1995年以来、北太平洋の海洋表層CO₂分圧(pCO₂)観測を継続実施し、これまでの成果で1995年から2006年の12年間にわたる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。わが国の海洋表層pCO₂観測では、気象庁と国環研において長期継続体制が確立され、国際的に高く評価されている。この太平洋域の海洋表層pCO₂観測のデータ処理法の開発とその観測データ発信は、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ある。</p> <p>一方、海洋による二酸化炭素の放出・吸収量変動の把握には、各国のデータを統合利用して、全海洋的な分布図作成を行うことが必要である。これまで、年間の海洋表層CO₂の放出・吸収の平均像 (気候値)の全海洋分布マップについては、1960年代から現在までの50年にわたる世界の観測値をできる限り多く利用して作成された、いわゆる「Takahashiマップ」(Takahashi et al., 2002および2009) が全球炭素循環モデルの検証に大きな役割を果たしてきた。ここで、国環研の北太平洋データセットは利用データセットのうちで重要な位置を占めている。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究課題では、国際的な海洋表層pCO₂観測データの統合の活動と協力しながら、国環研の観測データを含むデータセットの国内外での利用促進を図るとともに、データセットを活用して太平洋域の海洋表層pCO₂の変動解析を行うことが目的である。そこで、国環研の海洋pCO₂観測の精度・確度を保証するデータ処理のプロセスを定め、構築中の国際的海洋表層pCO₂統合データベースに登録して国際活動に貢献することを目的として、国環研観測データの公開とともに国際統合データベースへの登録から利用促進を図った。またこの関連活動として、初年度には海洋表層pCO₂観測機器の国際相互比較実験も実施した。もう一つは、海洋pCO₂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適用を行うことで、北太平洋の海洋表層環境研の観測データを用いた北太平洋の海洋表層pCO₂の変動推定を行うこととした。</p>		

3. 研究の内容・成果

(1) pCO₂測定に関する国際相互比較実験実施

pCO₂測定装置には測定手法が異なる複数のタイプが存在する。pCO₂データを統合し大気海洋間CO₂交換量を評価する際には、各研究機関が使用した装置の測定精度や測定装置間の差が大きな問題となりうる。国際データベースにおいても、測定の問題による偏差が存在すると、統合の際の誤差になるが、それを合理的に解決する方法はない。そこで、測定装置の相互比較実験が、データセットの誤差を補正するという目的ではなく、今後得られるデータセットの誤差・偏差を減らす目的で、従来から何回か実施されてきた。すなわち、得られた偏差（あるいは機差）で既に取り除かれたデータに補正を加えようということではなく、装置間の比較から偏差の存在を確認し、その偏差を減らす工夫を行おうという考え方である。国際的に流通している装置の測定値の正確さが保障されれば、国際データセットの正確さが高まる。研究代表者は大型の室内海水プール施設（水産工学研究所：水工研）で、多数のpCO₂装置を同時運転して正確な比較実験ができることを見出し、2003年に国際比較実験を行った。今回の国際比較実験は、2003年以降に技術開発が進んだブイによるpCO₂計測装置を多く集めた。

国環研ではpCO₂観測を行う世界各地の主要な研究機関に呼びかけ、2009年2月24日から3月5日にかけて茨城県神栖市の水工研でpCO₂測定の国際相互比較実験を実施した。装置を持ち込んで実験に参加したのは、国環研、米国大気海洋局(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)、モンタナ大学、ニュージーランド大気水圏研究所(NIWA: National Institute of Water and Atmosphere)、英国プリマス海洋研究所、インド海洋研究所(NIO: National Institute of Oceanography)、海洋開発研究機構であった。pCO₂装置には大きく分けて、船上に据え付け航行中連続測定を行うタイプ（以後Underwayシステムと呼ぶ）と、海面に浮かべ係留または漂流させるブイに組み込むタイプ（以後Buoyシステムと呼ぶ）の2種類のシステムが存在する。今回各研究機関が持ち込んだシステムはそれぞれUnderwayシステムが7台、Buoyシステムが7台であった。国環研のタンデム平衡器を用いる船上用装置は今回実験でも標準装置として安定に動作した。国環研が用意した3台のUnderway装置は良い一致度で運転されたが、1台の赤外分光計にトラブルがあって3日目以降は多少のずれを生じた。とはいえ、国環研の3台の間の偏差(標準機に対して)は 0.33 ± 0.07 ppmおよび 0.37 ± 0.07 ppmであり、正確さに優れた装置であることが確認された。NOAAとNIOは同一構成の装置であり、運転期間中にわずかな偏差があるものの、国環研の標準装置と極めて高い一致度を示し、実績を積んだ研究機関が運転している船上用UnderwayシステムのpCO₂測定装置の正確さはかなり向上してきており、1 ppm程度を一致度の目標とすると既に達成されていることがわかった。これは、前回2003年の相互比較実験で運転状況の良かったUnderwayシステム間でも ± 1.5 ppm程度の機差があったことから考え、格段に進歩したといえる。

一方、Buoyシステムについては、国環研のBuoyシステムの正確さが高いことが明らかになり、同じく赤外分光計をセンサーとしているNOAAのBuoyシステムも許容できる偏差で運転された。これに対して、比色式の装置については、そのずれの方向に一貫性がなく原因特定が難しかったものの、1 ppm以内の一致度達成は難しく、今後とも正確さ向上のための技術開発が必要であると考えられた。

(2) 海洋表層pCO₂観測データの処理プロセスの検討・確立と国際統合データベース活動の促進

表層海洋CO₂のデータ統合プロジェクトSOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas)は、全世界の表層海洋のCO₂データを統合して全球データセットを作成することを目指すプロジェクトであり、UNESCO/IOC (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(国際海洋炭素共同プロジェクト)の元で運営されている。2009年3月18-20日に北太平洋海域会合を国立環境研究所で開催したのに引き続き、2010年2月10-11日には赤道太平洋とインド洋の海域会合を海洋研究開発機構と共同で開催した。SOCATでは、米国大気海洋局(NOAA)の太平洋環境研究所(PMEL)が開発したLAS (Live Access Server)というオンラインソフトウェアがデータの登録と管理に利用されているので、その利用法の習得と改良に向けた議論がなされた。

SOCATへのデータ統合作業においては、品質管理が大きな問題になった。多くのデータファイルにおいてデータ提供機関が慎重に行うべきである1次精度管理が不十分であることが判明した。品質管理なしで世界の全海洋でグリッド化したデータセットを作っても無意味となるが、スパイク状のエラーデータの除去ならば、各要素の時系列グラフや水温とCO₂データとの散布図などを作成することにより、手間はかかるが容易に発見できることが判明した。そこでSOCATでは、世界の海洋を7つに区分し、その各海域グループを担当する機関を指定し、2010年6月までに領域内に収録されている船舶観測データファイルのエラーデータの検出と、それに基づく品質フラグ付けを行うことになった。国環研は、北太平洋のデータセットの精度管理担当機関として、30N以北の北太平洋観測データのチェックを行い、本課題の事業として実施した。2011年2月までにはSOCATに格納された2008年末までの全データの品質が良いものになり、今後のデータファイルの追加と精度管理・再提出の手順について

も確定し、まもなく公開される段階になった。

また、国環研データの公開においては、本事業で確立したデータ処理プロセスを用いて、観測データ処理の速度を速め、現行の協力貨物船観測である北太平洋観測（Pyxis号）データと、南北太平洋観測（Trans Future 5号）データについて、最新のデータまでを広く研究向けに公開する作業を実施した。一つは、世界の二酸化炭素データを収集し航海している米国オークリッジ国立研究所内のCarbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC)へ送付してCDIACのホームページから公開することである。もう一つは自身のデータ提供プラットフォームSOOP（Ship of Opportunityホームページ、<http://www.soop.jp/>）での公開であり、SOOPではより詳細なメタデータ情報まで得られるようにした。

本研究課題で、西太平洋の定期航路観測のpCO₂データの処理プロセスが進み、4年を越えるデータが利用可能となって、海域の海洋表層pCO₂の年々変動に関して新たな知見を得た。Trans Future 5号

は、日本-オーストラリア東海岸-ニュージーランド-日本の航路の定期貨物船である。大気と海洋のpCO₂の計測からその差(pCO₂^{sea} - pCO₂^{air})であるΔpCO₂の分布を経年的観測データから算出した。これによると年間では、北緯10度以北の黒潮域がCO₂の吸収域、赤道西部太平洋の海域がCO₂の弱い放出域、南緯10度以南のタスマン海がCO₂の強い吸収域となっている。またΔpCO₂の季節変化のマッピングを行ったが、赤道海域では季節変化成分より、年々変動成分が卓越することが明らかになった。

図1に西部赤道海域東経150度周辺の大気pCO₂、海洋表層pCO₂、塩分、表面水温(SST)の観測値を示す。この海域で海洋表層pCO₂と熱帯太平洋中西部でのENSOの指標である南方振動指数(SOI)の相関は強く、pCO₂の変動がENSOの影響を受けていることがわかった。ここでは、ΔpCO₂の値の平均と標準偏差を求め、標準偏差1を超えた場合を1σ以上のイベントとし、標準偏差-1を下回る場合を-1σ以下のイベントとして◆と◇で表現した。ΔpCO₂の極大値はラニーニャのピークに3ヶ月ほど遅れて出現し、ΔpCO₂の極小値はエルニーニョのピーク前後に分かれて出現した

ことがわかった。ΔpCO₂変動は塩分変動と密接に関係しており、塩分の極大・極小はΔpCO₂の極大・極小とほぼ一致する。一方、SSTの変動がΔpCO₂極大・極小と一致しているとはいえない。これは東部太平洋で良く知られるSSTとΔpCO₂の関係と異なるものである。国環研のTF5号による観測では、海水サンプリングも行っており、クロロフィルaや栄養塩の測定値が得られている。2008年春のラニーニャ時と2010年夏から秋のラニーニャ時には硝酸態窒素とクロロフィルaがともに高まったが、2008年から2009年にかけての弱いラニーニャ時には硝酸態窒素とクロロフィルaの変動は小さかった。これらの現象がエルニーニョ、ラニーニャが強く現れる東部赤道海域からの水塊移動状況を表わすのか、あるいは西部赤道海域周辺の現象なのか解析を行っている。本観測と解析からは、東部赤道太平洋のみならず西部赤道太平洋もpCO₂変動が大きいことが明らかになり、その観測と要因解析に貨物船による観測は貢献することができる。

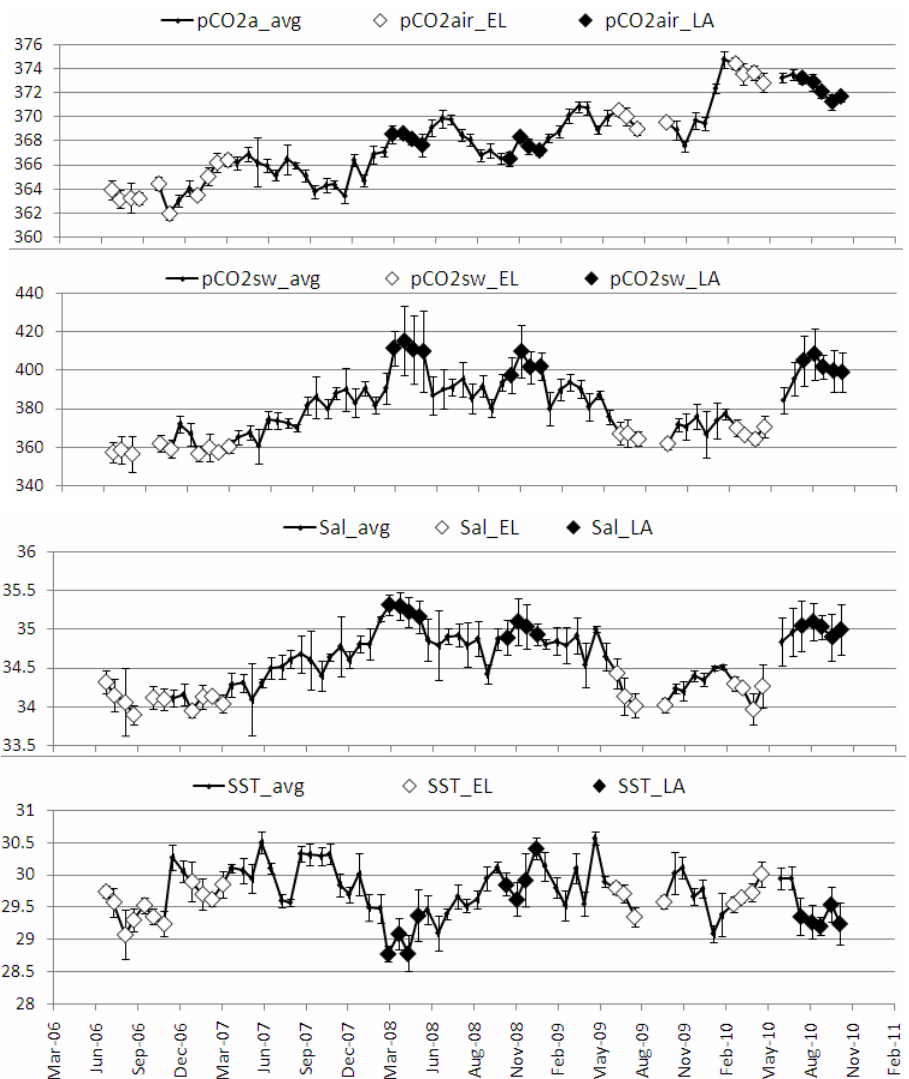


図1 西部赤道海域（東経150°）で観測された各要素の時系列（上から）大気pCO₂ (μatm)、海洋表層pCO₂ (μatm)、海面塩分(psu)、海面水温(°C)、ΔpCO₂で+1σ以上のイベント時の値、◇: ΔpCO₂で-1σ以下のイベント時の値

(3) ニューラルネットワークを用いた北太平洋域の海洋CO₂分圧マッピング手法の確立

本研究に参画しているTelszewskiとその共同研究者らは、最も普通に空間的な内挿に用いられる重回帰分析法が海盆スケールのpCO₂を推定することに必ずしも適していないことを指摘し、新たな手法であるニューラルネットワークが非線形性の顕著なpCO₂の時空間分布再現により適しているという可能性を指摘した。ニューラルネットワークとは、脳機能に見られるいくつかの特性を計算機上のシミュレーションによって表現することを目指した数学モデルであり、北大西洋全域のpCO₂の推定に有効であった。そこで本研究課題では、北大西洋と並んで学習データセットが豊富に得られる北太平洋のpCO₂時空間変動推定にニューラルネットワークの適用を図る研究を実施した。

ニューラルネットワークのトレーニングデータセットは4つのサブセット(SST, MLD, CHL, SSS)、すなわち、(表面水温、混合層深度、植物色素量、表面塩分)で構成されている。SSTデータセットは、気象庁地球環境・海洋部海洋気象情報室のデータを用いた。衛星データと現場観測データが0.25° x 0.25° x 1日の時間空間分解能で準リアルタイムに同化処理されている。MLDデータは、英国気象庁のForecasting Ocean Assimilation Model (FOAM)による1°x1°x1日の解像度を持つデータを用いた。CHLはAqua-MODIS衛星のSeaWiFS Level3データを用いた。SSSデータセットは、10日間毎の0.5° x 0.5°の解像度であり、気象研究所から提供を受けた。これら4つの基本プロダクト(SST, MLD, CHL, SSS)データは、2002年から2008年の北太平洋海域をほぼ網羅している。すべてのパラメータは、本研究課題で1日毎の0.25° x 0.25°の解像度に再格子化を行い、計算に利用した。本研究の対象領域は、北緯10度から北緯60度、東経120度から西経90度であるため、格子の数は215,000,000にも及ぶ。

このSST, SSS, MLD, CHLからなるトレーニングデータセットを用いてニューラルネットワークのアルゴリズムの一つである自己組織化マップ(SOM)を実行し、国環研の観測値でラベリングを行い、トレーニングと呼ばれるプロセスを経て、北太平洋のpCO₂分布時系列の推定を行った。結果を2002年から2008年の平均的月

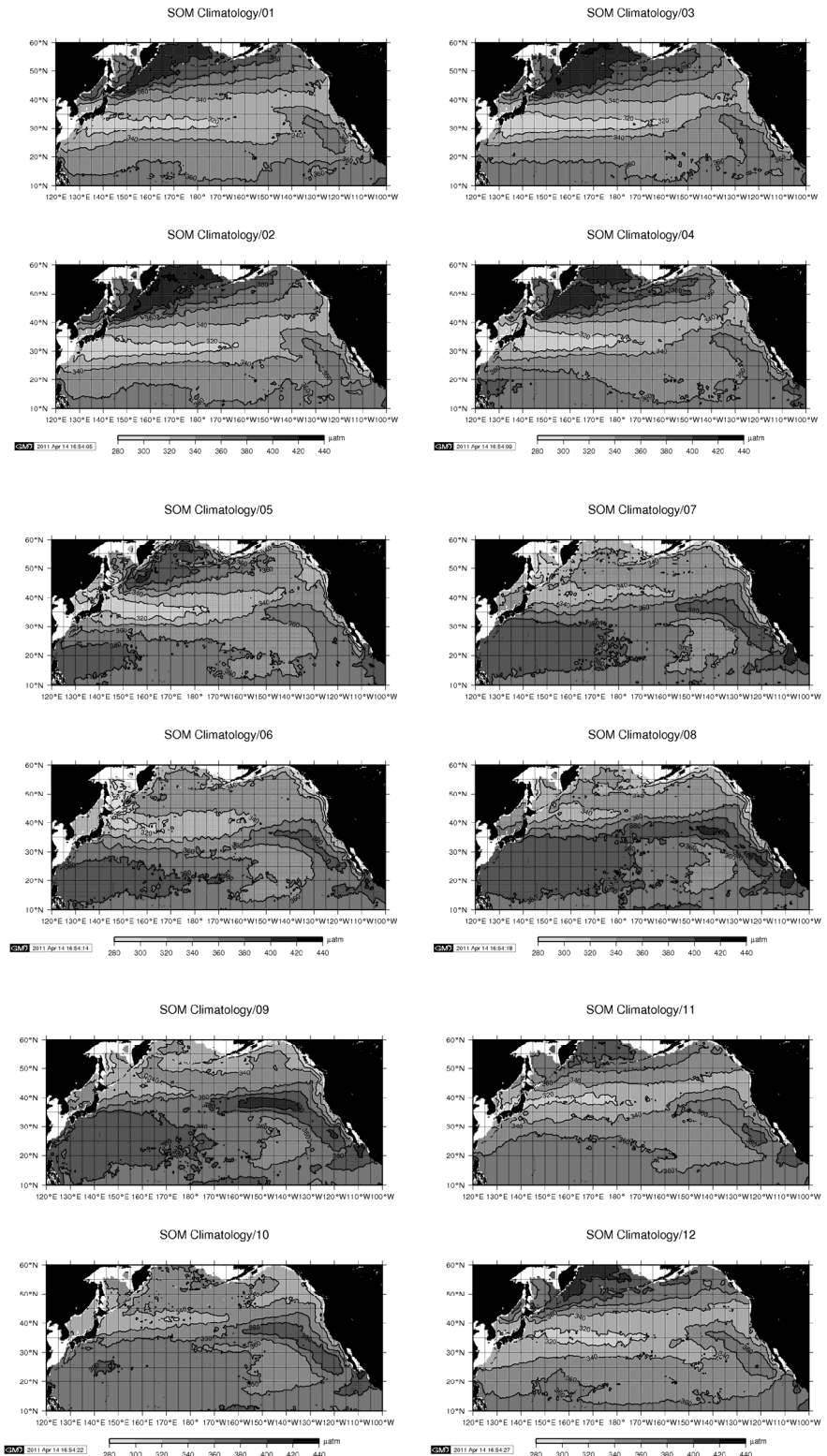


図2 ニューラルネットワークによる推定で得られた1月から12月の月毎の気候学的なpCO₂分布(μatm)、番号が月を表わす。

毎 pCO₂ 分布（気候値）として図 2 に示す。結果の妥当性評価は、Takahashi et al. (2009) による月毎の全球 pCO₂ 気候値から北太平洋域を抽出して比較した。Takahashi et al. (2009) は過去数十年間に及ぶ pCO₂ 観測データを内外挿することによって緯度 4° x 経度 5° 格子上の pCO₂ 時空間分布を再現しており、その気候値マップは海洋が吸収する CO₂ 量を議論する際などに広く用いられている。本研究で得られた結果では、黒潮と親潮がぶつかる関東から東北の沖合で春季から初夏にかけて、海洋生物による光合成活動が活発化（ブルーミング）し、低 pCO₂ の海域が拡大していく様子が見られる。また冬季の高緯度海域では中深層からの湧昇によるものと考えられる高 pCO₂ が分布しており、これらは SOM のトレーニングパラメータとして採用した CHL や MLD が pCO₂ マッピングに有用であることを示唆している。多くの海域、季節で Takahashi et al. (2009) の気候値とよい一致を示すが、細かく見ると単なる解像度の違いでは説明できない違いが見られる。たとえば、1 月において Takahashi et al. (2009) の結果は 320 μatm 以下の低 pCO₂ 水塊が北緯 25 度から 35 度の緯度帯で日本近海から西経 160° 付近まで広がっていることを示しているが、本研究で得られた 1 月の pCO₂ 分布は 320 μatm 以下の水塊は北緯 30° から 35° 帯で日本近海から西経 170° 程度までしか広がっていない。また、冬季の北太平洋高緯度海域において本研究で再現された pCO₂ 分布は 420 μatm 程度の高い値が広範囲に分布している一方で Takahashi et al. (2009) の分布では同海域でより低い値となっている。

Takahashi et al. (2009) による気候値マップでは年々の pCO₂ 分布変動の情報が得られないのに対し、ニューラルネットワークによると客観解析データを元に、年々変動を含むマッピングが行える。本研究では 2002 年から 2008 年までの毎月のマップとその平均場である気候学的な月毎の pCO₂ 分布を比較検討した。同じ月であっても年によって pCO₂ 分布が大きく異なる場合があり、例えば 2 月の分布では、2002 年から 2005 年にかけて 320 μatm の低 pCO₂ 水塊が日本沿岸から最大で西経 130° まで伸びている一方、2006 年以降は最大でも東経 175° までしか分布していないと推定された。また 8 月には 2002 年から 2005 年においては 400 μatm 前後の高 pCO₂ の水塊が日本の近海から南東に分布している一方で 2006 年以降は高 pCO₂ の水塊の分布がそれほど広範囲でない。このように北太平洋では 2005 年を境にして冬季と夏季の pCO₂ 分布に大きな違いがあると推定された。

太平洋ではいくつかの定点海洋観測点があり、そこでの pCO₂ 変動を抽出してみた。太平洋中央部の亜熱帯時系列観測点である HOT 点（北緯 23 度、西経 158 度）では、水温の季節振幅が小さく、何年かに一度起こる低水温期に鉛直混合が支配され、それが海域の生物生産に大きな影響を及ぼすことが知られている。結果によると 2005 年から 2006 年の MLD 変化が強く現れ、2006 年以降の pCO₂ 平均値が 20 μatm 程度低下したことが推定された。HOT 観測点は現在も月々の観測が継続されているので、この推定の検証が可能である。

4. 考察

国環研の貨物船を利用する海洋表層 pCO₂ 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 CO₂ 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 pCO₂ 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、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、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つとめている。この活動に対し海域会合の開催 (2009 年 3 月および 2010 年 2 月) と、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 (2009 年 2 月) の実施から、本研究課題として活動に協力することができた。現在、観測データ提供機関の責任者による品質保証プロセスが完了し公開目前となった。本課題の成果で、国環研データセットの品質保証作業が着実に進められ、SOCAT データベースに組み込まれた。

欧州各国は連携体制を組んで主として貨物船観測を含む北大西洋の pCO₂ 高密度観測を実現させつつある。この観測連携体制は、国環研の貨物船利用 pCO₂ 観測が長期継続していることに習って開始されたものである。欧州のグループでは、大西洋観測のデータが高密度になったことを利用して、年々変動を含めた解析をニューラルネットワーク手法で行うことを試み、極めて現実的な推定マッピングができるようになった。ニューラルネットワーク手法は、非線形的な現象を扱うのが得意であり、人の頭脳が行うような柔軟な経験判断で現実的な推定を行える可能性がある。ただし、「脳」を学習させる観測値がある程度十分に得られることが必要であり、海洋 pCO₂ の大きな支配要因である水温、生物生産、鉛直混合についてそれらが組み合わさって変化する海洋の条件をおおむねカバーするような観測データセット (例えば寒冷な海域から温暖な海域をカバーする観測、生物生産の大きい海域から小さい海域をカバーする観測) が必要である。海域内のいくつかのルートの横断航路観測を使って一定期間に対する自己学習が完了すれば、その期間の海洋変化を全域に反映させ、pCO₂ のマッピングが行えるという考え方である。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は、世界でも最も観測値が豊富な海域の一つで、北大西洋についてニューラルネットワークを適用するのに適

切な海域である。

本課題の3年間の最終段階になり、水温・客観解析モデルで得られる混合層深度・塩分・クロロフィルaの衛星観測データ、という当初推定していた学習パラメータで、ニューラルネットワークによる北太平洋の $p\text{CO}_2$ 推定が可能となり、海洋表層の中規模渦程度のスケールが再現できる $p\text{CO}_2$ マッピング推定ができる用になった。これまでのデータ補間を手法とする面的推定では困難だった近傍に観測値がない海域の $p\text{CO}_2$ 推定も、比較的低密度の $p\text{CO}_2$ 観測値があれば合理的に推定されるものと思われる。衛星観測と客観解析は年々、月毎のデータセットを形成することができるので、結果として $p\text{CO}_2$ の詳細な年々変動の推定が可能となるのである。今後進めるべき課題は、ニューラルネットワークがどの程度の広域海洋に適応可能かを明らかにすることである。例えば、北大西洋と北太平洋の学習の相違と類似性、北太平洋の学習が赤道太平洋や南太平洋に適応可能かというような検証である。すなわち、ニューラルネットワークの学習にはかなり大量の観測データが必要であるが、検証は少ない航海観測の海域でも可能である。検証の結果、学習が広域に適用できることがわかると、世界の海洋の CO_2 分圧分布推定が一気に進むであろう。観測データと客観解析データセットの得やすさを考慮し、赤道太平洋、南太平洋、南極海という順に適用検証を進めてゆくのが現在の方針である。