

海洋表層CO₂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

地球環境研究センター

野尻幸宏

地球環境研究センター

炭素循環研究室

中岡慎一郎

同

同

Maciej Telszewski

地球環境研究センター

大気・海洋モニタリング推進室

宮崎千尋

平成20～22年度合計予算額 72,138千円

(うち、平成22年度当初予算額 28,301千円)

[要旨] 大気CO₂の吸収源として、海洋のCO₂吸収量の時空間変動を明らかにすることが急務である。本課題では、高精度の海洋pCO₂ (CO₂分圧) 観測データセットの国際流通とその利用促進のために(1) 国立環境研究所(以下、国環研)の海洋pCO₂観測の精度・確度を保証するデータ処理プロセスを定め、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、(2) 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北太平洋海域への適用性の検討を行うこと、の2つについて研究を実施した。(1)については、研究実施期間中に国環研の観測データ処理プロセスを確立し観測データ処理の速度を高めた。北太平洋航路、南北太平洋航路とも可能な限り最新の観測データの処理を実施し、データを公開する作業を行った。国際データベースである米国オークリッジ国立研究所内のCDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center)に、南北太平洋航路観測を含むデータの新規提供を行った。構築中の国際統合データベースSOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas)を支援する太平洋域の海洋表層pCO₂観測データの品質管理を進める国際会合を行い、データの国際公開を促進する活動とした。また、観測の精度に関わるCO₂分圧の計測装置の国際相互比較実験を実施し、船上用装置の正確さを確認するとともに、最近開発が進んでいる自動ブイ装置の現状を知ることができた。(2)については、目的としている北太平洋の海洋表層pCO₂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進め、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を使って、2002-2008年の月毎の分布推定を行った。最終的に表面水温、表面塩分、混合層深度、クロロフィルaのデータセットを用いて確定版のCO₂分圧マップを作成し、年々変動の状況とその要因解析を行った。

[キーワード] 海洋表層CO₂分圧、データセット、貨物船観測、太平洋、分布推定

1. はじめに

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、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2 Gt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。

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。国環研では、1995年以来、北太平洋の海洋表層CO₂分圧観測を継続実施してきており、これまでの成果で、1995年から2010年の16年間にわたって、概ね途切れることなく観測を継続し、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CO₂観測の観測・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。

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., 2002¹⁾, 2009²⁾)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。

21世紀に入ってから観測データ充実を考えると、現在では海洋表層CO₂の放出・吸収の年から数年スケールの経年変動を求めることが可能な観測体制ができて来たと考えられる。CO₂放出・吸収の時間変動の把握ができる可能性がある海洋は、世界で3箇所に限られ、わが国が観測範囲としている北太平洋・西太平洋域、米国が観測範囲としている東部赤道太平洋域、欧州と米国が観測範囲としている北大西洋域である。現段階では、北大西洋高緯度域でのCO₂吸収鈍化、北太平洋中緯度域でのCO₂吸収促進(国環研観測の成果)が認められているが、そのようなシグナルを効果的に検知するには、世界の観測のデータ統合利用が必要である。

広域の海洋表層pCO₂を推定する方法として、衛星観測などで得られるSST(表面水温)、CHL(植物プランクトン量)あるいはその客観解析で得られるMLD(混合層深度)などに重回帰分析法(Multiple Linear Regression)を適用する試みが従来から行われてきた。最近のEast Anglia大学のA.Watson教授をリーダーとするEU数機関の合同研究によると、ニューラルネットワーク技術を応用した方法では非直線回帰が可能になるという結果が示され、Multi-Layer Perceptron法やSelf-Organizing Map法が、海域pCO₂推定により手法であることが示された。大西洋の観測データを利用して、欧州のグループは年々変動を含めた観測値解析をニューラルネットワーク手法で行う研究を最近になって実施した。国環研を中心にして相当な観測密度がある北太平洋域でも、同様な解析を行なうことが可能と考えられ、本課題において協同研究体制を組むこととした。

ただし、この方法では、既存データセットから海域のグリッド点ごとに自己学習することが必要なため、正確な長期間のデータの蓄積から一定の傾向が把握されている必要がある。太平洋域の海洋CO₂の分布の正確な推定のために必要な太平洋域のデータ品質管理は、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。そこで本課題では、海洋CO₂吸収量の時空間変動を明らかにするアプローチの一つとして世界で進められている海洋表層CO₂分圧観測のデータ統合国際活動への貢献を行うとともに、統合観測データから時空間変動する海

洋表層CO₂分圧を推定する最新の手法であるニューラルネットワーク法の太平洋データへの適用を行う。このことにより、海洋のCO₂吸収において重要な役割を果たしている太平洋海域の海洋表層CO₂分圧変動について科学的理解を進める。

2. pCO₂測定に関する国際相互比較実験

2. (1) 研究目的

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CO₂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CDIAC (<http://cdiac.ornl.gov/>)やSOOP (<http://soop.jp/>)を通じて各研究機関に配布・利用されている。Takahashi et al. (2009)²⁾は、国環研のデータセットを含む国際統合データセットを作成した上で全球の大気海洋間CO₂交換量を見積もり、大きな成果を挙げている。このデータセットの中における国環研のpCO₂観測データセットの占める量は大きく、全球の炭素循環を解明する上で大きな役割を果たしてきた。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。上記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、今のところそれを合理的に解決する方法はない。

そのため、測定装置の相互比較実験は、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・偏差を減らそうという目的で、従来から何回か実施されてきた。すなわち、相互比較実験で得られた偏差（あるいは機差）で既に取られたデータに補正を加えようということではなく、装置間の比較を行って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、主要な装置と比較して偏差の大きな装置については、実験後の改良で偏差の解消を行うべきである。相互比較実験で偏差をできるだけ小さくしてゆくことで、相互比較を経験した研究機関の装置や国際的に流通している装置の測定値が保障されれば、国際データセットの正確さが高まる。また、実験の経験で誤差原因が明らかになるので、それが装置の運用の工夫や改良に役立つ。

研究代表者は国内研究機関が保有する室内海水プールのうちで最も大きな水産工学研究所（水工研）の施設を利用することで、多数のpCO₂装置を同時運転して、正確な比較実験を行うことができることを見出し、2003年に国際比較実験を行った。水工研の大型プールは、水温の変化が小さく、安定な比較実験が行える。そこで今回は、世界の主要機関のpCO₂測定値の偏差を低減することを目的として、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、国際比較実験を実施した。

2. (2) 研究方法

国境研では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研究グループは、国環研(NIES)、米国大気海洋局(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)、モンタナ大学(Montana University)、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(PML: Plymouth Marine Laboratory)、インド海洋研究所(NIO: National Institute of Oceanography)、海洋開発研究機構

(JAMSTEC) である。

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（このうち国環研のシステム3台、他はそれぞれの機関が1台ずつ）、Buoy システムが7台（このうち国環研、Montana 大、JAMSTEC のシステムがそれぞれ2台ずつ、NOAA が1台）であった。

国環研の Underway システムは、タンデム型気液平衡器と呼ばれる、海水柱下からバブリングを行うバブル型と、上から海水をかけ流して器内の羽根に海水をあて海中の溶存空気と器内空気を効率よく交換させるミキサー型の結合型平衡器である。また、比較実験を行った装置の中で唯一 CO₂ Feedback 装置を持つシステムとして特徴づけられる。Feedback 装置とは、導入するバブリング空気の CO₂ 濃度を、直前に測定した平衡器内空気（平衡空気）の CO₂ 濃度になるよう調整して平衡器内に送り込む装置で、このため速やかに器内の空気を海水との平衡状態に到達させることができる利点がある。この設計によって国環研の Underway システムは、応答時間が短い特徴があるので10秒間隔でもデータサンプリングを行うことが可能であり、現実の船上利用においては局所的に生産の高い海域での観測に特に有用である。今回、国環研システムは実験での動作安定性も優れ、標準機として活用することができた。

相互比較実験は、体積約 170 m³ の魚群行動実験用水槽にあらかじめ海水を満たし、水槽に設置された濾過器で粒子状物質を濾過してから行なった。また実験期間中は水槽内の海水が均質になるように海水攪拌用ポンプ2台と汲み上げポンプを用いて常時海水を循環させた。実験期間中、

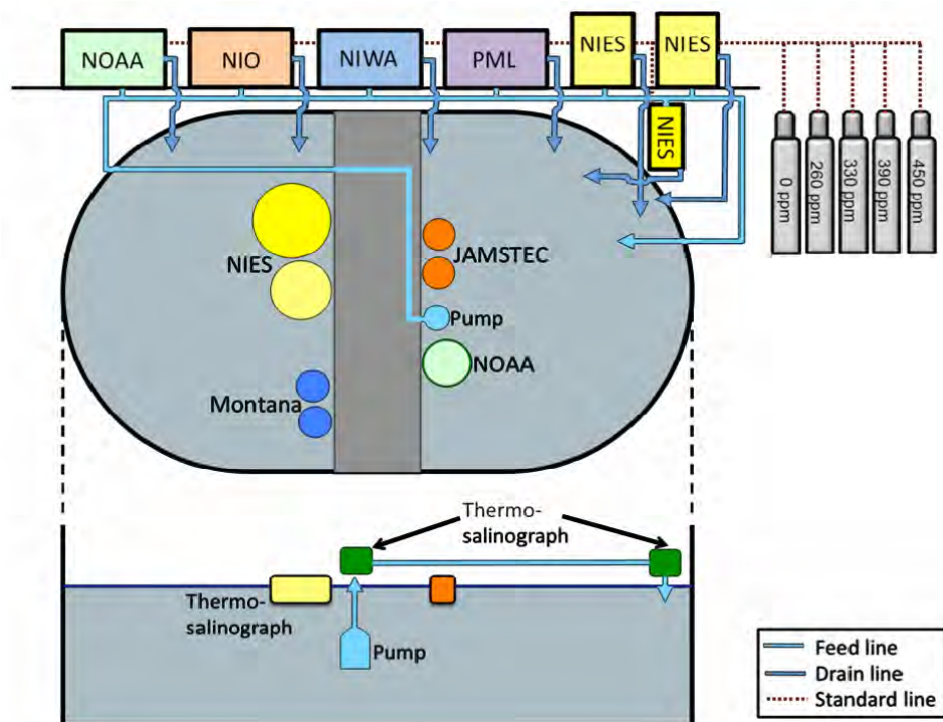


図1 大型水槽施設の投影図と各研究機関の装置配置図（それぞれ水平面と鉛直断面）

海水中の CO₂ 濃度は大型水槽に水酸化ナトリウム水溶液や塩酸を投入することで 270 ppm から 450 ppm の範囲で変化させた。図 1 に、実験を行った水槽と各研究機関の装置配置概略図を示す。各研究機関の Underway システムは、国環研が用意した濃度の異なる 5 本の CO₂ 標準ガス (0, 260, 330, 390, 450ppm) のすべて、あるいはいくつかのシリンダーに接続されており、実験期間中定期的に較正された。また Buoy システムについてもこれらの標準ガスを用いて適宜較正が行われた。Underway システムは海水を常時大量に使用するため、水槽中央に設置されたポンプで水槽中央の水深 1.5 m から毎分 300 L で海水を汲み上げ、各研究機関の平衡器に給水した。この時、汲み上げ海水はポンプによって加熱を受けるため、pCO₂ の測定に正のバイアスを生じさせる原因となる。そこで水温の上昇度を正確に見積もるために、実験期間中の現場海水温を国環研 Buoy システムに搭載されている正確さが保証された塩分水温計(SeaCat Thermosalinograph)を使用して測定し、またポンプ汲み上げ後と給水ライン末端の海水温も同じく正確さが保証された塩分水温計 (Seabird 19 型 Thermosalinograph) を用いて測定した。その結果、実験期間中のポンプによる海水温の加熱は 0.04～0.05°C であることを確認した。また、汲み上げ直後と給水ライン末端の水温は変化していないことが確認されたため、各 underway 装置の値の校正には同一の温度上昇値(0.04～0.05°C)を使用した。Buoy 装置の水温はプール中の設置場所による違いがないとして計算した。

国環研の Underway システムでは、はじめに平衡器水温下での CO₂ 濃度(xCO₂)が出力される。ここに、気圧データを入力することで平衡器水温での pCO₂ が計算される。前述したように、現場海水温(SST)は平衡器水温(EqT)よりも 0.04～0.05°C 低いため、現場海水温下での pCO₂ を計算するために Weiss et al., (1982)³⁾の式を用いて pCO₂ の補正を行った。最終的に今回の実験の結果の表記は、現場水温下で平衡にした空気の乾燥後の CO₂ モル分率すなわち xCO₂(SST)の値を比較している。xCO₂(SST)表記 (単位 ppm) は、IOCCP の議論で国際的な合意を得た pCO₂ 報告フォーマットとして最も推奨される形式である。ただし、ガス交換や化学平衡を論ずるためには、pCO₂ や fCO₂ に変換しなくてはならないことは、いうまでもない。

2. (3) 結果と考察

表 1 に、今回の実験の結果として、主要な underway 装置について示す。NIES として示したのは国環研の標準装置であるが、国環研から用意した 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 日目から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±0.07ppm および 0.37±0.07ppm (標準偏差は短期変動の平均)であり、正確さに優れた装置であることは間違いない。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、その理由は明らかでない。国環研の標準装置との比較の上で NOAA および NIWA の装置は十分に高い一致度であり、NIO ののものであっても海洋観測での利用において、十分許容できる一致度と考えられる。一方、前回 2003 年の相互比較実験では、運転状況の良かったシステム間で±1.5ppm 程度の一致度であったことから考えると、格段に進歩したと考えられる。

一方、Buoy システムについては、国環研の Buoy システムは Underway システムと期間を通じて±0.29ppm±0.10 および 0.24±0.09ppm という他の Underway と同じ程度の一致度で運転され、極めて正確さが高いということが明らかになった。同じく赤外分光計をセンサーとしている NOAA の buy システムも 0.81ppm±0.09ppm と許容できる偏差で運転された。これに対して、比色式の装

表1 相互比較実験における国環研標準機 (NIES700) と NOAA, NIO, NIWA 各装置の偏差 (ppm)

Underway		A1	C1		C2		D	
		NIES 700	NOAA		NIO		NIWA	
		Tandem	GO		GO			
		Ref.	Dif.	Dev.	Dif.	Dev.	Dif.	Dev.
Day1	2/27	282	-0.28	+0.09	-0.71	+0.05	-0.54	+0.22
Day2	2/28	437	-0.56	+0.11	-1.10	+0.15	-0.74	+0.15
Day3	3/1	357	-0.37	+0.08	-0.81	+0.06	-0.11	+0.13
Day4 low	3/2	279	-0.10	+0.07	-0.29	+0.18	0.69	+0.05
Day4 high	3/2	413	-0.16	+0.07	-0.68	+0.09	-0.18	+0.06
Day5 high	3/3	415	-0.04	+0.06	-0.65	+0.06	-0.45	+0.02
Day5 low	3/3	287	-0.06	+0.01	-0.42	+0.09	0.33	+0.04
5 day average			-0.22	0.07	-0.67	0.10	-0.14	0.10
inter-day dev.			+0.19		+0.26		0.50	

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、1ppm以内の一致度達成が難しかった。

これらのことから、実績を積んだ研究機関が運転している船上用の pCO₂ 測定装置の正確さはかなり向上してきており、1ppm 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。また buoy タイプの装置であっても、赤外分光計をセンサーとしているものの正確さは高いが、比色式による装置については、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。

3. 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

3. (1) 研究目的

本課題では、高精度の海洋pCO₂観測データセットが世界流通することを促進するために、海洋表層CO₂分圧観測に関して精度の高いデータ管理手法を確立し、データ処理プロセスを構築してデータ公開することを目的とした。構築の結果として、2009年に実質的にデータ収集活動が動き始めた国際統合データベース活動に協力して、データの世界利用に向けた提供を行うこととした。これは、データの国際利用に貢献するとともに、衛星CO₂観測ミッションにも活用されることを目的としている。

3. (2) 研究方法

3. (2) ① 海洋表層pCO₂観測データの処理プロセスの検討・確立

国環研では、これまでに北太平洋において Skaugran (1995.3-1999.9)、Alligator Hope (1999.11-2001.5)、Pyxis (2002.7から継続中) の3隻で海洋表層pCO₂を観測してきており、西部太平洋ではTrans Future 5 (2006.6から継続中) で同様な観測を行っている。

現在継続中のPyxisとTrans Future 5の観測システム概念図を図2に示す。ルーチン化された計測における観測項目は、非分散赤外分光光度計(NDIR)による海洋と大気のCO₂分圧のほか、気圧・気温・水温・塩分・植物色素蛍光光度などである。観測機器と測定方法の特徴として、タンデム

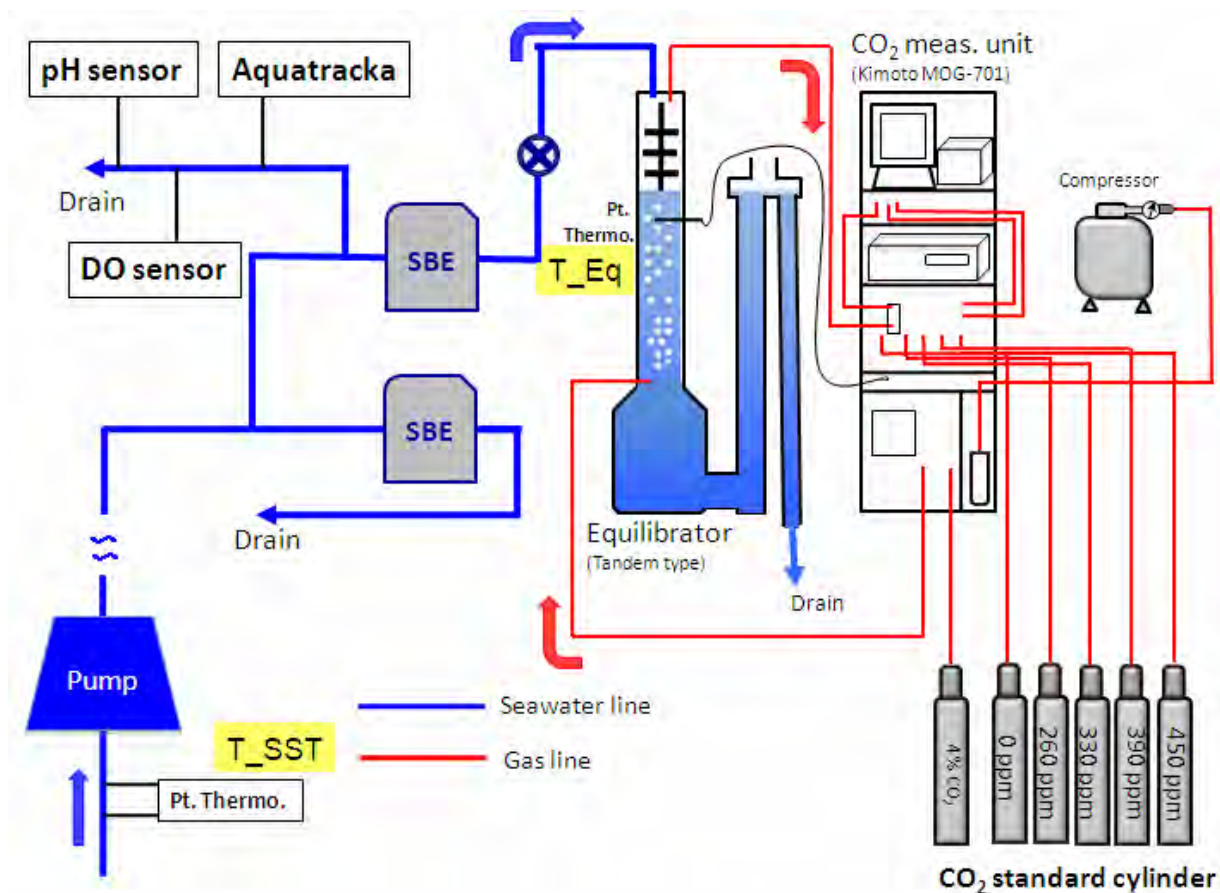


図2 国環研の船上海洋表層 $p\text{CO}_2$ 観測システムの概念図

型気液平衡器で高頻度（10秒間隔）に $p\text{CO}_2$ データを連続取得していることがあげられる。

10秒間隔で取得した各種観測データは、GPSで取得している時刻で全データの時刻を一致させる。気圧、塩分、水温に関しては、 CO_2 分圧の計算に必須の項目であるため、正確な較正を行う。気圧については、保守業務を依頼している船員による1日3回程度の船内気圧計読み取り値で連続観測データを較正する。水温塩分計（SBE: Seabird社、Thermosalinograph）による塩分の連続データは、保守業務を依頼している船員による1日1回の手動採取海水サンプルの持ち帰り測定塩分値で較正する。船底水温(SST)と平衡器水温(EqT)測定用の白金温度計に関しては、半年に一度程度の頻度で入港時に船内にて、精密に検定されているSBEの温度計を基準にして検定する。NDIRには1日2回5種の標準ガスをそれぞれ10分ずつ導入しているので、その測定値から較正式を作り、2回の較正の間の平衡空気の値を較正する作業を連続的に行う。その後、 $\{x,p,f\}\text{CO}_2$ （x: 平衡空気の乾燥空気中モル分率、p: 海水の CO_2 分圧、f: 海水の CO_2 フュガシティー）の計算を行い、その際にSSTとEqTの差による温度補正(Weiss et al.,1982)³⁾を施す。さらに正常な大洋航海時であって正しい水压で海水が供給されているかどうかを判定するため、水压40kPa以上、塩分20 psu以上、気圧840hPa以上という閾値を満たすデータを10秒値の1次データとした（図3）。

1次データのSST、EqT、塩分、大気と海洋の $p\text{CO}_2$ 、植物色素蛍光光度については時系列グラフを作成し、スパイク的に現れるエラーデータを除去して、10秒値の2次データとした。2次デ

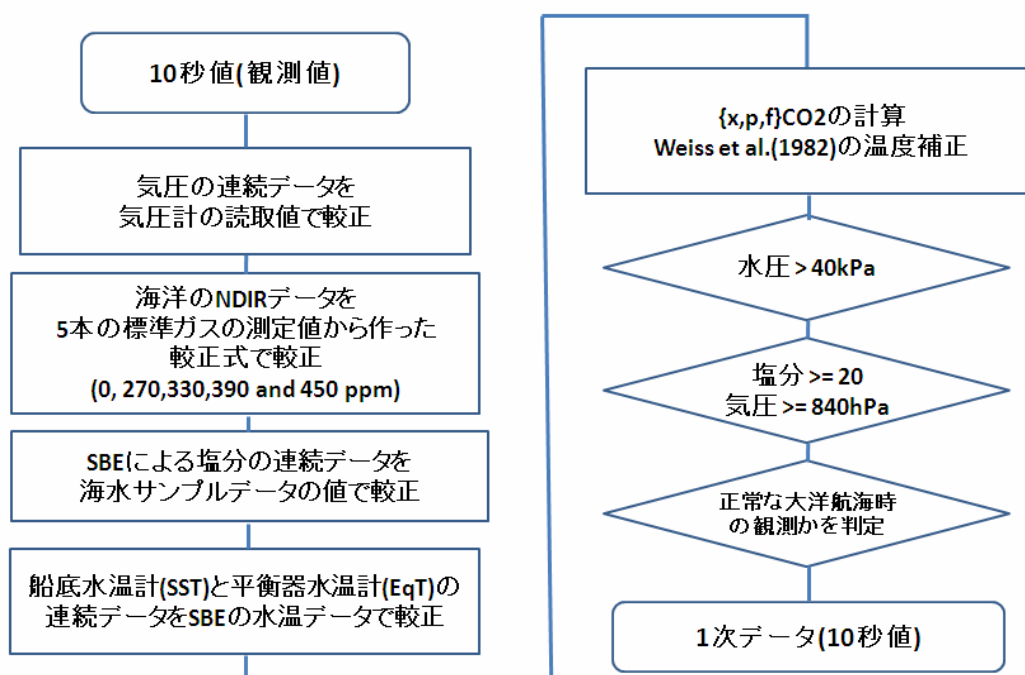


図3 pCO₂の1次データ(校正済み10秒値)作成スキーム

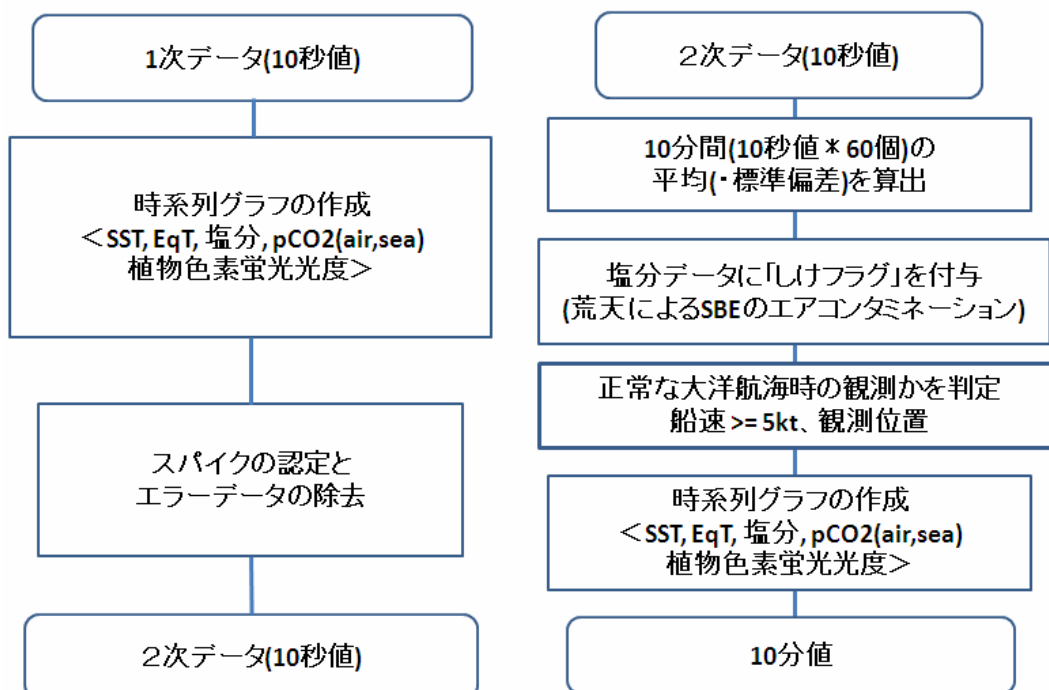


図4 pCO₂の最終データ(標準偏差付10分平均値)作成スキーム

ータから項目毎に、10分間（10秒値×60個）の平均から10分値を作成し、水温・塩分・{x,p,f}CO₂については標準偏差も算出する。大気の{x,p,f}CO₂については、10分間の標準偏差が0.3ppmを超えた場合（多くの場合、船舶の排煙を原因とする汚染大気の計測値で、バックグラウンド大気濃度を反映していない）をエラーデータとみなし、前後3分（計6分）の平均値で内挿値に代えた。さらに塩分データには、10分間の標準偏差の値を用いて、荒天によるSBEのエアコンタミネーションを示す「しけフラグ」を付与した。荒天の時に船がピッチングすると採水口部分が水面上に時々出るので、給水に気泡が入ることにより、気泡が海水の電導度を下げて塩分計で検出される。気泡が大量に混入した場合には、目的の海洋pCO₂計測値が保証されないので、データの利用に注意喚起するフラグを付与する。また、大洋航海時の観測に公開データ範囲を限るために、船速5kt以上で定義して港湾付近のデータを削除し、時系列グラフによるチェックを経て、最終プロダクトの10分値データとした（図4）。

さらに、2006年6月から定常化したオセアニア航路観測データを処理する過程で、より高精度な観測データを得るためのデータ処理プロセスの検討・確立を試みた。これまで行ってきた処理プロセスで時間を要していたのは、スパイク的に現れるエラーデータの削除である。10分間（10秒値×60個）のデータのうち、平均から3標準偏差以上離れたデータを自動的に判定・削除する過程を検討した。また、本課題以前にデータ処理をしていた北米航路と比べ、オセアニア航路では低気圧通過時の荒天の影響が少なく「しけフラグ」を付与することがなかった。よって、海域によって必要となる処理プロセスも変わりうるようになった。

3. (2) ② 国環研の貨物船CO₂観測データの処理の推進と世界への公開作業

1年度目までに確立したデータ処理プロセスを用いて、2年度目・3年度目は実際の観測データ処理の速度を速めることができた。現行の協力貨物船である北太平洋観測（Pyxis号）データ・西部太平洋観測（Trans Future 5号: TF5）データともに、2ヶ月で1年分を処理することができるようになった。現在までに、Trans Future 5データについては2010年11月中旬までのデータの処理を終了している。Pyxisデータについては、平衡器温度データにトラブルが生じたため処理が遅れているが、2010年12月までの処理を近々終える。これと並行して、2年度目・3年度目はこれらのデータを世界に公開するための作業も数多く実施した。

米国オークリッジ国立研究所内のCarbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC)は、世界のCO₂に関わるデータの収集・公開・提供を行っており、国環研で観測した海洋のCO₂データをCDIACを通じて提供することは、データ利用者の利便性を考えると非常に重要なことである。日本-北米航路のPyxis号の観測データは、すでにCDIACへのデータ提供が行われてきたが、この3年度内に処理したデータを追加提供した。特に2年度目からは、Trans Future 5号(TF5)データの新規提供を開始した。このTF5号の航海は、日本を出発してオーストラリア東海岸へ入港する南向き(S)航路、オーストラリア東海岸からニュージーランドに至るタスマニア海(T)航路、ニュージーランドから日本へ至る北向き(N)航路の3航路からなる。現在CDIACから公開されている海洋表層CO₂の観測を実施している船の航路図によると、これまで西太平洋の南北を航行観測する船がなかったことがわかる。また貨物船による観測であるため、6週間で日本-オーストラリア-ニュージーランド-日本という航路の定期的なデータが世界に提供されることになった。

このようなCDIACを通じた世界へのデータ提供と並行して、国環研では独自のデータ提供プラ

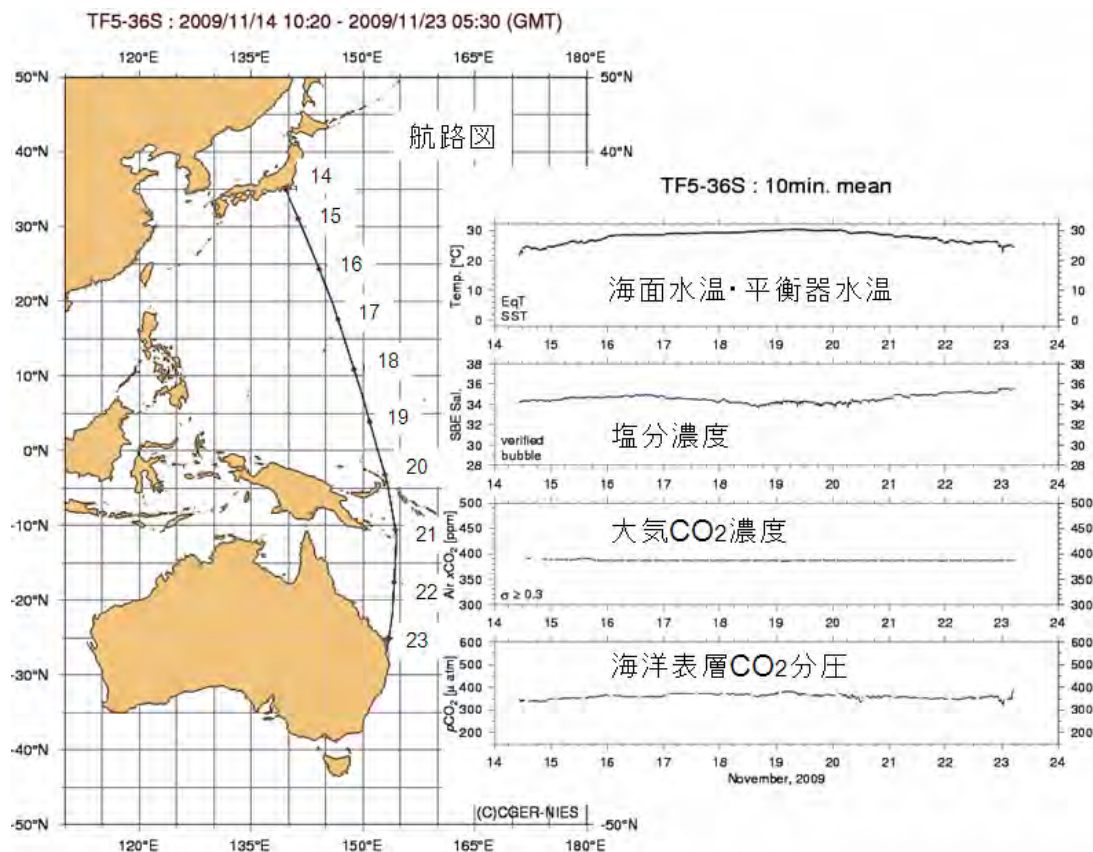


図5 SOOPにおける航路図とデータグラフのページの例 (TF5-36S)

ットフォームのSOOP (Ship of Opportunity, <http://www.soop.jp/>)を作成し公開してきた。詳細な船の観測状況や個々のデータの品質情報に関しては、CDIACの決まったフォーマットやメタデータを通じてだけでは全てを提供しきれないため、各データ提供機関が独自に用意したデータ公開プラットフォームがあると、データ利用者はその必要に応じてデータの正確な特性情報を入手することができる。特に国環研では、全ての測器の設置状況をカメラで撮影し、その画像をSOOPページから公開している。このような情報は、これから観測を始める国や機関にとっては非常に有用な情報であり、このような公開を積極的に行っている機関は少なく、国環研はその世界的先駆者ともいえる。また国環研の観測は10秒間隔で行われているが、測器の応答特性などを考慮すると、1分～10分の平均値がその時間の安定で代表性のある値といえる。国環研では観測値の公開用データを10分平均値としており、さらにその10分間の標準偏差(1σ)も算出し公開している。これは、その10分の観測値の時間変動を示し、自然変動幅あるいは測定のスIGNAL/ノイズ比の指標になる。SOOPでは、北太平洋のデータを中心に、過去に観測していた貨物船のSkaugran号とAlligator Hope号のデータを公開し、現在も航行するPyxis号のデータを随時追加更新している。このプラットフォームに、2年度目からは新たにオセアニア航路の西太平洋データも追加して提供を始めた。それと並行して、2年度目にはSOOPページをよりユーザに使いやすいインターフェイスに改良した。利用者の自然なデータ探索の流れにあわせて、トップページでの2つの海域(“North Pacific”と”Western Pacific”)の選択を行い、その下の“North Pacific”では観測期間と観測項目の異なる3

つの観測船を選択できるようにした。”Western Pacific”の下には、過去に西部太平洋で観測を行っていたGolden Wattle号のデータとともに、今回新たにデータ公開を開始したオセアニア航路のTrans Future 5号のページを新規に作成し、追加した。3年度目には、SOOP上で貨物船観測データを一覧できる折れ線グラフについて、大幅な改良を加えた。海洋表層pCO₂データと特に同時に用いられる大気pCO₂・海面水温・平衡器温度・塩分のデータを、1航海ごとに一覧できる折れ線グラフを作成し、観測船毎のページの下に格納した(図5)。このように、データをユーザに使いやすいように提供することと、データの観測状況を詳細に示すことは、本課題がSOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas)の太平洋地域のデータ統合の中心機関となって全世界のデータの精度管理・統合作業を行っていく中で、非常に重要なことであると認識している。

3. (2) ③ SOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas)プロジェクト

・SOCATの背景・内容と、国環研の貢献

海洋表層pCO₂観測データの分布推定と経年変化を明らかにするためには、pCO₂観測値からエラーを除いて、最も適切な気候値の分布を求め、その気候値とのずれを求めなくてはならない。そのためには世界全体の正確な海洋CO₂分圧データの時間的・空間的統合が求められる。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)は、GCP (Global Carbon Project)の海洋研究をカバーするサブプロジェクトであるが、IOCCPによる海洋表層CO₂分圧データ国際統合に関する第1回国際研究集会(2007年4月パリ)において、世界の多くの機関が協力して海洋表層CO₂分圧を始めとするCO₂関連パラメータの国際データベースを作成するSOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas)プロジェクトが立ち上げられた。第2回国際研究集会(2008年6月パリ)では、今後は海域ごとに主要な観測機関の責任研究者 (PI: Principle Investigator) が集まり、その品質を議論する方針に決まった。

本課題は、このSOCATプロジェクトに参画し、特に北太平洋のデータセットを増加させ、精度管理を行う役割を担った。それを実現するために、1年度目にはSOCATの太平洋域会合を2009年3月18-20日に国環研で開催し、2年度目にはSOCATの赤道太平洋・北太平洋・インド洋の海域会合を2010年2月10-11日にJAMSTEC (海洋研究開発機構) 東京事務所で開催 (JAMSTECと共同) した。そこでは、太平洋やインド洋におけるSOCAT収録データや、SOCAT全体の精度管理システムについて、日・米・独・韓・印・加・豪・ニュージーランド・インドネシアなどの大学・研究機関とともに、議論・調整を行った。

・SOCAT収録データの飛躍的増加: データマイニングと国環研データの提供

特に1年度目・2年度目で重要だったのは、SOCATに未提出になっているデータの掘り起こしであった。図6は、LASで表示したSOCATデータセットの全データ分布で、上が1年度目終了時点、下が3年度目終了時点の図である。収録観測数は19,914から92,279へと飛躍的に増加した。図6右上のクルーズ(航行)数は、2,138から2,118に減っているが、これは初期には同一観測データの重複登録が多かったためである。

現在のSOCATデータベースは、2009年半ばまでに提出された2008年末までの観測データを、精度管理して収録しているが、ここで示されるデータのうち、太平洋の観測データに占める国環研

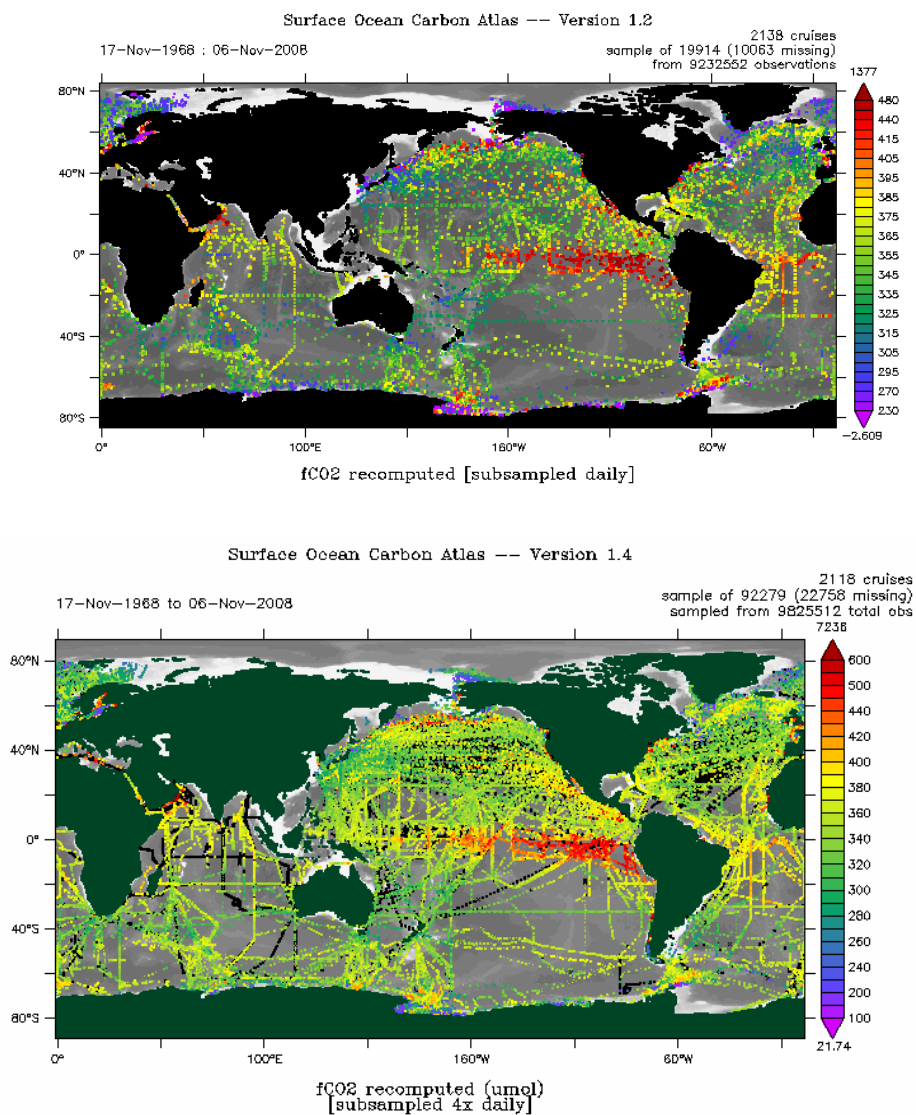


図6 SOCATデータセットに含まれるfCO₂データ（上：2009年3月時点、下：2011年3月時点）

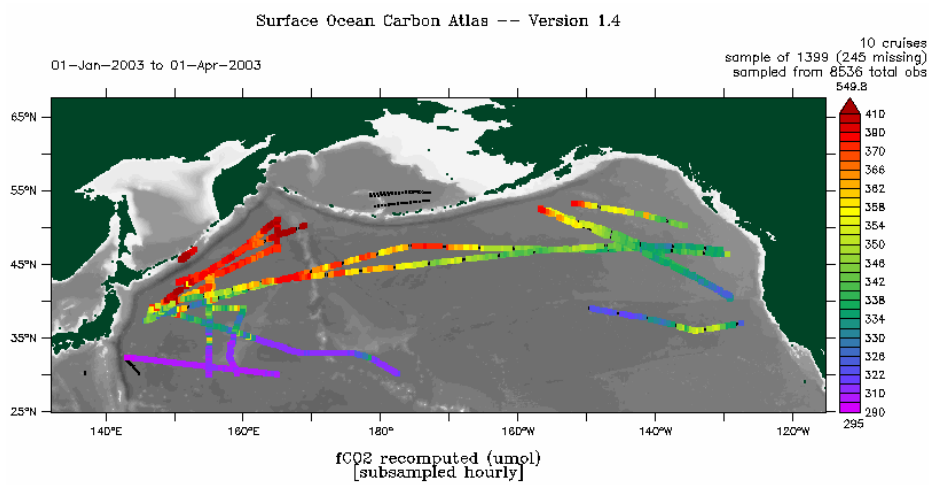


図7 SOCATデータセット (Ver.1.4) に含まれる2003年1~3月の太平洋上のfCO₂データ

の割合は非常に大きい。一例として、図7にSOCATデータセットに含まれる2003年冬季（1-3月）の太平洋域のデータを示す。全10航海のデータが抽出されたが、このうち6航海（Pyxisによる3往復航海）が北太平洋のデータで、その全てが国環研の観測によるものであった。国環研では現在、北太平洋を2ヶ月弱で往復する貨物船Pyxis号と西部太平洋を6週間で往復する貨物船Trans Future 5号によって海洋表層CO₂分圧観測を継続実施しているため、今後のSOCATデータベースに対しても、毎年Pyxis号で約14航行、Trans Future 5号で約16航行を提供できる体制を維持している。

・北太平洋におけるSOCATデータの1次精度管理の実施

SOCATデータベースに含まれる観測データについては、その精度管理が非常に重要となる。各観測機関のPIは、1次精度管理（1st level Quality Check）と呼ばれる統一基準のメタデータ作成やエラーチェックを各自実施し、SOCATにデータを格納する。しかし、SOCATデータベースに含まれるデータは、当然ながら観測方法も時間間隔も異なり、さらにその精度管理・データ処理方法は各観測者に委ねられている。本課題の1年目の会合では、各データ提供機関がSOCATへのデータ格納前の精度管理の方法を互いに報告した。日本からは国環研、気象研究所、海洋研究開発機構、水産総合研究センター北海道区水産研究所、国立極地研究所が報告し、海外機関ではNOAA(米国大気海洋局)、CDIAC、カナダ海洋研究所、ソウル国立大学、CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia) から発表があった。この会合が、お互いの作業内容を理解し意見交換する場を提供した意義は大きかった。

実際にデータ統合作業に入ろうとした2年目の段階で、個々のデータファイルに対し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。SOCATに提出されたデータは、スパイク状のエラーデータの除去などの最も基本的な精度管理が完全なものとは不完全なものとの玉石混交状態であり、例えば赤道太平洋のデータファイルでは約18%がエラーデータを含んでいた。このままのデータでは、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、これらのエラーの除去は、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見ることが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は2010年6月半ばまでに、その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い、エラーを頻繁に含むファイルがあった場合はデータ提供者に再チェックを求めることとした。これにより国環研は、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450ファイルのチェックを、締切の2010年6月半ばまでに終えることを確約し、本課題の3年目の事業として取り組んだ。その際の、SOCATでのデータファイルの精度管理の統一基準は以下のようなものであった。データを精査する項目は、pCO₂だけでなく、この値を正しく算出するための海面水温・平衡器水温・大気圧・平衡器気圧・塩分濃度であり、全450ファイルに関してこれら6項目の時系列グラフを作成し、目視によるチェックを行った。pCO₂データに突発的で明らかなエラーが10個以上現れるデータファイルは保留とし、SOCATデータ管理グループ（ベルゲン大学）を通じてデータ提供者に改訂が依頼された。エラーデータが10未満のデータファイルについては、除去する日時を精度管理担当者がピックアップしてSOCATデータ管理グループに通知した。さらに、そのデータファイルについては、内容を示すメタデータファイルの中で基本的な測定項目に関する情報が充足しているかを精査し、個々のデ

ータファイルにAからDまでのフラグ付けを行った。正確なpCO₂観測のためには、①海面水温・平衡器水温・平衡器気圧のデータが存在し、②pCO₂データの校正を行うために用いる標準ガスが0 ppm（ゼロガス）以外に2種類以上用いられておりそれがメタデータに記載されている、という2つの最低条件があり、2つともそろっていればフラグBとされ、データ統合作業にふさわしいレベルとされた。①は満たさないが②だけが満たされていればフラグC、②が満たされていなければフラグDとされ、データ提供者に不足しているデータとメタデータ内の情報の補足を依頼した。ちなみにフラグAは、同時期に近い場所で観測された（精度管理済みの）データ同士でpCO₂値の相互比較が行えてデータの妥当さが確認されたデータファイルに付与された。

締切の2010年6月半ばまでに、上記の精度管理とフラグ付けを終了できたのは、国環研が担当した北太平洋グループとオーストラリアCSIROが担当した南大洋グループだけで、他の海洋グループでは精度管理とフラグ付けの煩雑さから完了までにさらに数カ月を要した。

データやメタデータの異常・不足のためにデータ提供者に差戻されたデータは、各機関で修正されて、SOCATデータを管理しているベルゲン大学に再提供されたが、その際に、改訂データのファイル名の混乱が生じ、さらに1か月の確認作業の時間を費やすことになった。しかしこれにより、再提出の際のファイル名の統一基準が定められることになった。加えて、それらの再提出されたファイルにも再びメタデータチェックとフラグ付けが行われたため、さらに時間を要した。

2011年2月下旬でようやく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、海洋表層pCO₂のデータ統合やニューラルネットワークによるマッピングの足場が完成した。

・SOCATデータベースの再計算手順の確立

SOCATデータベースへのデータの格納・管理・整形に関しては、ベルゲン大学をコアにして、ヨーロッパのグループが過去のCARINAプロジェクトや現行のCarboOceanプログラムの経験をもとに実施している。SOCATは、厳密に言うと、世界の海洋表層fCO₂（二酸化炭素のフュガシティ：逸散度）のデータセットを構築するものであり、その値の算出には、観測値の平衡器での値、すなわち平衡器内の海水と平衡に達した空気中のxCO₂（乾燥空気中のCO₂のモル分率として）の値に、水蒸気圧補正・水温補正などを施す必要がある。それらの補正項の計算法の違いによる値の変化を避けるために、ベルゲン大学では、各データのxCO₂値を初期値とし、共通のデータ処理プロセスを経てfCO₂の再計算を行っている。その際に、非常に重要になるのがCO₂項目である{x, p, f}CO₂のデータだけでなく、平衡器を置いた部屋の気圧、平衡器水温、海面水温、塩分などのデータの正確な報告と、観測状況を正確に説明したメタデータである。SOCATデータベースではこれらのデータとメタデータの報告を徹底することが要請された。国環研の観測においても、今後のさらなる精度向上のために、平衡器室気圧の精密な観測を2010年3月から開始しデータ提供している。

・データ閲覧/精度管理ツールLAS (Live Access Server)の改良への貢献

世界のSOCAT参画研究者が、SOCATデータベースに収録されているデータを相互比較して2次精度管理(2nd level Quality Check)を行うため、NOAAの太平洋環境研究所(PMEL)はデータ閲覧ソフトウェア LAS(Live Access Server)を開発した。これにより、現在は世界各地からSOCAT参画研究者が、SOCATデータベースに収録されているデータを相互比較して2次精度管理(2nd

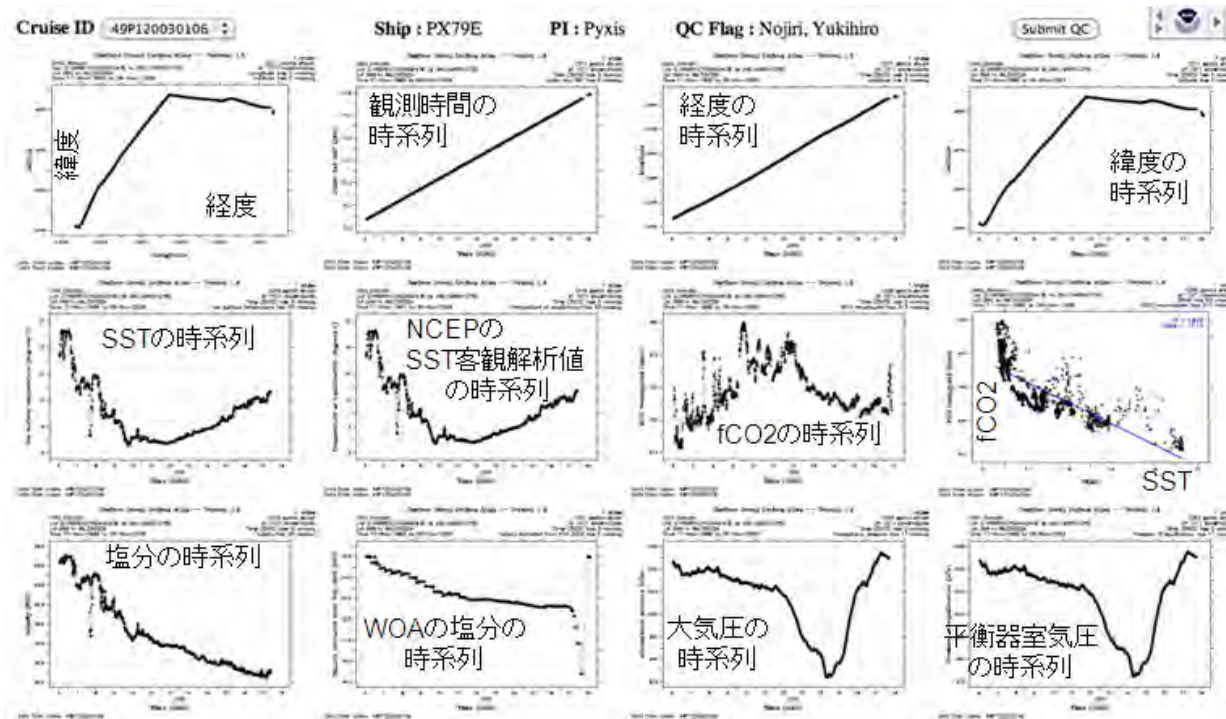


図8 現在のLASによる1次精度管理のためのプロット図一括作成 (Pyxis79の東向き航路の例)、LASサーバーが自動作成するサムネール図である。グラフ内容の日本語説明を加えた。各サムネール図をクリックすると拡大され、データ品質管理作業が容易に行える。

level Quality Check)を行うため、NOAAの太平洋環境研究所(PMEL)はデータ閲覧ソフトウェアLAS (Live Access Server) を開発した。これにより、現在は世界各地からSOCAT参画研究者がインターネット経由でLASを利用したSOCATデータセットの精度管理を行っている。本課題の1年度目の会合では、LASをネットワーク経由で用いてSOCATデータベースの2次精度管理を行う初めてのトレーニングを実施した。この会合で最初に明らかになったのは、LASにはインターネットブラウザの対応やJAVAのバージョンの問題など、遠隔利用の際の基本的な問題点が多数存在する点で、NOAA/PMELによって改良が迅速に行われた。実際のLASの利用では、1年度目の会合の時点では、期間や海域を区切った観測値のプロットや、観測要素間の散布図(プロパティ間プロット)が、個別に作成可能となった。このツールにより、複数データの基本的な精度保証作業や比較検討が行えた。しかしこの1年度目の会合では、精度管理以前に、SOCATデータベースへの船舶データの重複登録が多数見付き、SOCATへのデータ格納以前にPIが慎重な1次精度管理を実施する必要があることが示唆された。本課題の2年目の会合では、前述のとおり、1次精度管理の徹底実施が決まったが、作図の煩雑により、多くの精度管理担当機関が締切までに終わることができなかった。これを受けて、3年度目のLASは1次精度管理も行うことのできるツールに改良された。メタデータを直接閲覧・記入できるようにした点、 $p\text{CO}_2$ ・海面水温・平衡器水温・大気圧・平衡器気圧・塩分濃度などの時系列グラフや要素間散布図を一括で複数自動生成できるようにした点(図8)、データセットの品質チェックフラグをつける際にコメントを書き込む欄を設

けた点、全てのデータをダウンロード可能にしてLAS以外のツールでも作図などができるようにした点などが改良点である。これにより、1次精度管理がネット経由で簡単・迅速に行えるようになった。

・今後のSOCATに対する国環研の貢献とSOCATの世界的役割

SOCATの目指す世界全体の正確な海洋CO₂分圧データの時間的・空間的統合については、国環研のニューラルネットワークを用いた推定で実現できる可能性があり、国環研のTelszewskiは北大西洋で実行した結果と北太平洋で実行した初期結果、さらに全球海洋で実行できる可能性を報告している。SOCAT参画機関はこのSOCATデータベースを用いて、IPCC第5次評価報告書向けの統合解析などを現在進めているところである。

3. (3) 結果と考察

国環研が西部太平洋で海洋表層pCO₂観測を行っている貨物船TransFuture5 (TF5)号に関して、その航路（観測域）はこれまでの観測の空白域を埋めるものである。この貨物船による本格的な海洋観測は2006年6月から現在まで継続され、そのデータは処理プロセスの検討・確立を経ながら迅速に処理され、2010年10月までの4年以上のデータが解析可能となったことから、この海域の海洋表層pCO₂変動とその要因が本研究で明らかになった。

はじめに、この海域のCO₂の放出・吸収の傾向を知るため、大気と海洋表層のpCO₂をそれぞれ算出し、その差(pCO₂sea-pCO₂air)である

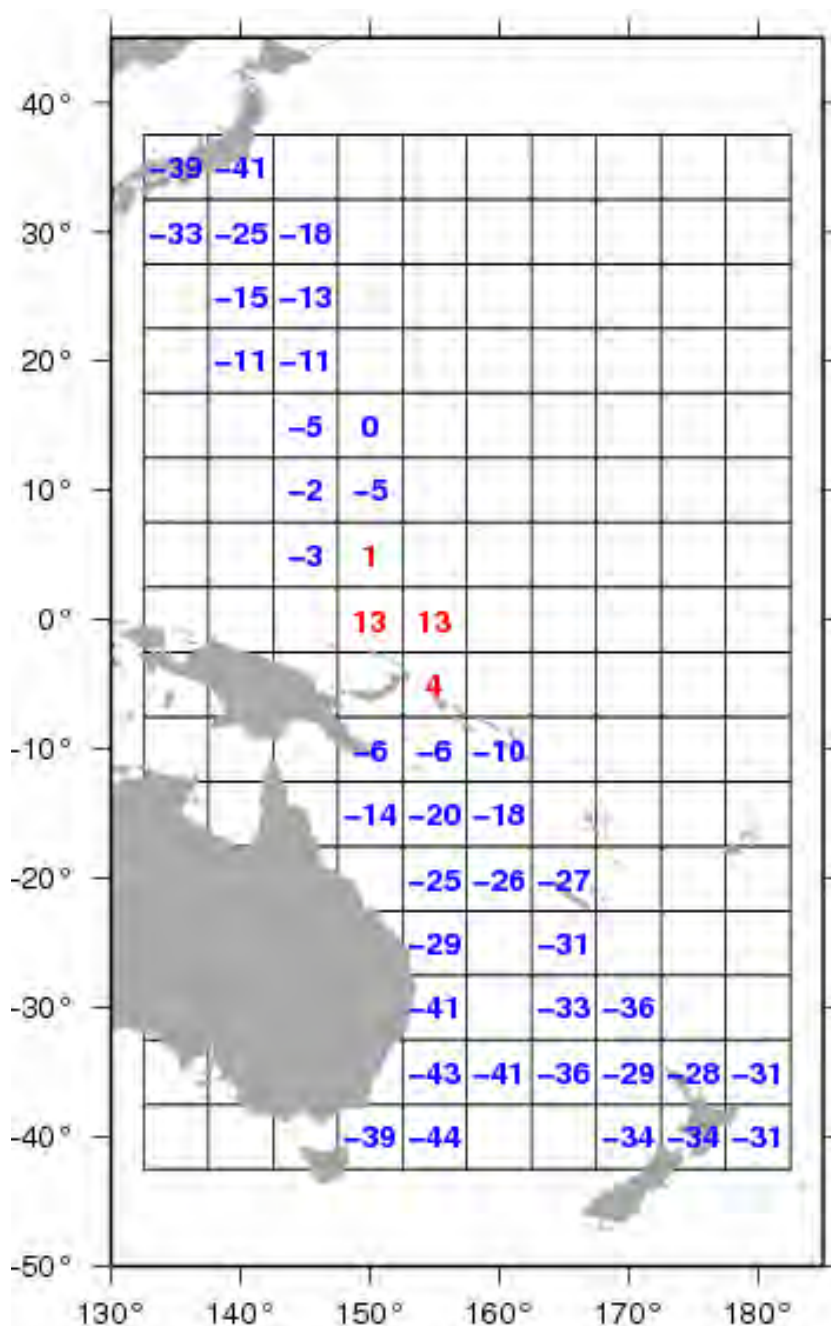


図9 西部太平洋における ΔpCO_2 の年平均図 (μatm : $5^\circ \times 5^\circ$ のグリッド内の平均値)

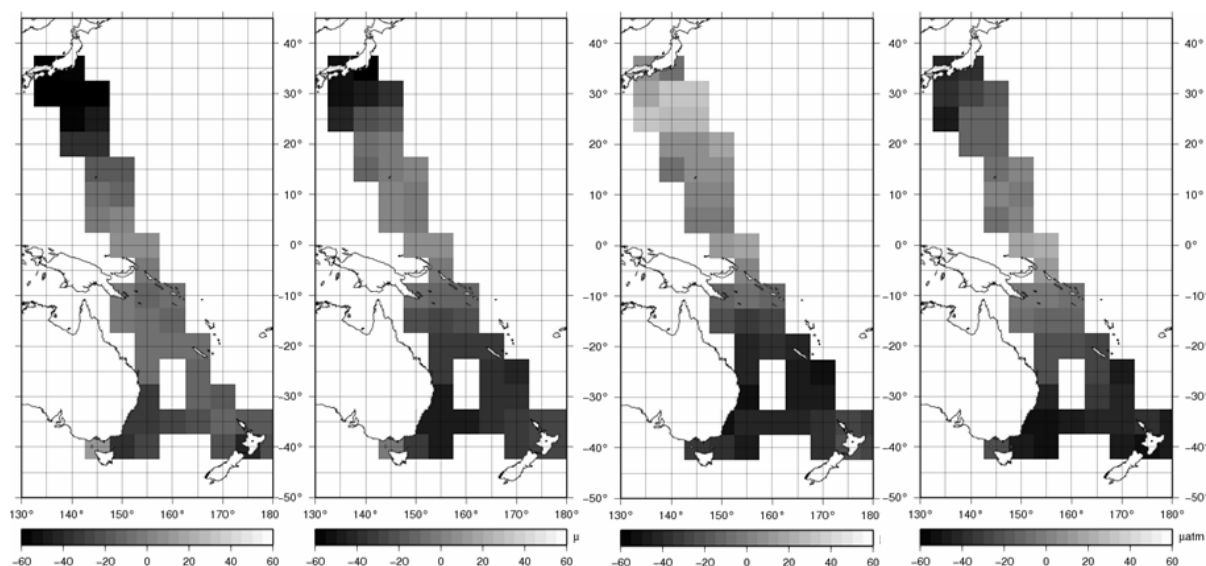


図10 西部太平洋における $\Delta p\text{CO}_2$ の季節平均図 (μatm : $5^\circ \times 5^\circ$ のグリッド内の平均値)

$\Delta p\text{CO}_2$ の分布を調べた。この値は大気と海洋の CO_2 交換を示し、負の値のときは海洋に大気の CO_2 が吸収され、正の値のときは海洋から大気へ CO_2 が放出され手いることを示す。2010年10月までのデータを用いて作成した $\Delta p\text{CO}_2$ の年平均図が図9である。これによると年間では、 10°N 以北の黒潮域が CO_2 の吸収域、赤道西部太平洋の海域が CO_2 の弱い放出域、 10°S 以南のタスマン海が CO_2 の強い吸収域となっていることがわかる。

さらに大気と海洋の CO_2 交換の季節変化を知るため、 $\Delta p\text{CO}_2$ の季節平均図を作成した(図10)。これによると、 $20^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$ の黒潮域では、夏のみ $\Delta p\text{CO}_2$ が正で CO_2 を放出しているが、その他の季節は負で CO_2 の吸収域となっている。 $5^\circ\text{N} \sim 5^\circ\text{S}$ の西部熱帯太平洋では、通年やや放出の傾向で、季節変化の傾向はみられなかった。 10°S 以南のタスマン海では、通年海洋が CO_2 を吸収しているが、その極小値が出現する季節は海域ごとに異なっている。

これらの $\Delta p\text{CO}_2$ の年平均・季節平均の図から、いくつかの海域に特徴的な変動が明らかになったので、それを代表する地点の詳細な $\Delta p\text{CO}_2$ 季節サイクルを図11に示す。これらの図は、ある地点の ± 2.5 度の範囲に入った各種観測要素の平均値(点)と標準偏差(誤差棒)を示すもので、季節推移を示すフィッティングカーブも示している。(a) $\Delta p\text{CO}_2$ だけでなく、(b)表面水温(SST)、(c)海面塩分、(d)海洋表層 $p\text{CO}_2$ 、(e)年平均SSTに対して温度変化効果を除いた海洋表層 $p\text{CO}_2$ の値も示した。図11(1)は、黒潮域を代表する 30°N , 140°E の例である。これによると、海洋表層 $p\text{CO}_2$ (d)や $\Delta p\text{CO}_2$ (a)の変動はSST (b)と同期している。SSTが1度上昇すると $p\text{CO}_2$ は約4%上昇するので、その効果を海洋表層 $p\text{CO}_2$ (d)から除いたものが(e)である。これを見ると、春に $p\text{CO}_2$ が上昇しており、これは海面塩分(c)とも同期しており、この海域の春のブルーム(植物プランクトンの増殖期)を示していると考えられる。この黒潮域における海面塩分(c)の4年間のデータからは、夏から秋にかけて年々変動が非常に大きいことがわかり、冬から春にかけての変動幅の小ささと対照的である。南半球のタスマン海亜熱帯域(図11(2))は、 $\Delta p\text{CO}_2$ (a)の値が通年マイナスで、一年中 CO_2

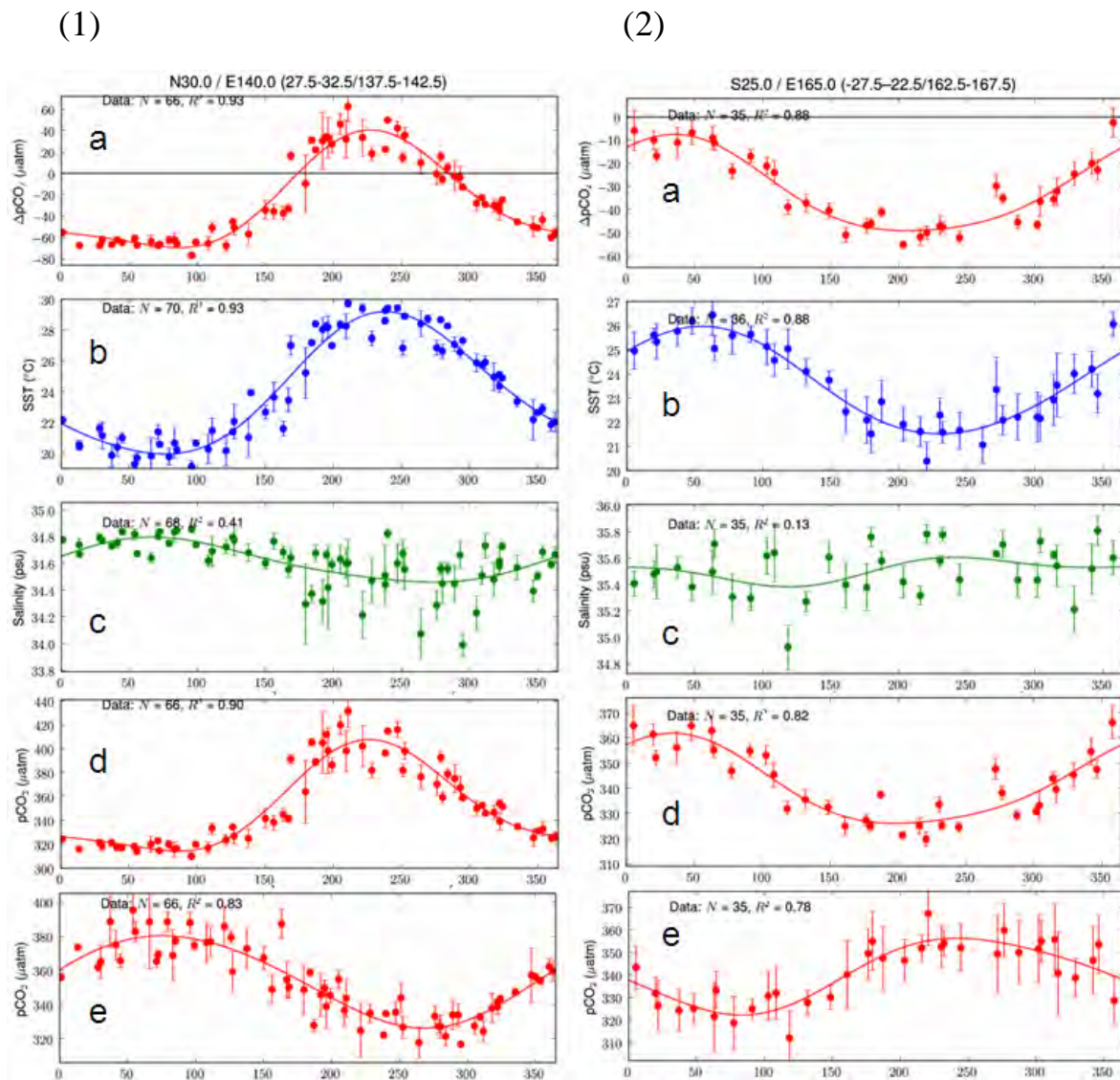


図11 (1), (2) 西部赤道太平洋域で観測された(a) ΔpCO_2 , (b) 表面水温 (SST), (c) 表面塩分, (d) 海洋表層 pCO_2 , (e) 年平均SSTに対して温度変化効果を除いた海洋表層 pCO_2
 (1) 30°N,140°E、(2) 25°S,165°E

の吸収域であるとわかるが、海洋表層 CO_2 (d)や ΔpCO_2 (a)がSST (b)と同期している点や、SST変動を除いた pCO_2 変動(e)が(南半球の)春に極大を持ち同時に塩分も極大を迎えるという点は、黒潮域と同様に春のブルームを示す季節推移といえる。一方、南半球中緯度のタスマン海では、 ΔpCO_2 (a)の変動が年に2回のピーク(周期)を持つことが特徴的である(図11(3), (4))。しかしタスマン海の東部(図11(4))では、 ΔpCO_2 (a)が初秋にほとんど0 μatm になり、タスマン海の東西で季節サイクルの違いがみられた。特にSST変動を除いた pCO_2 (e)の変動からわかるように、南半球初春の極大が顕著で、これはタスマン海の非常に強い春のブルームを反映した結果と考えられる。タスマン海における海面塩分(c)の変動は、黒潮域やタスマニア海亜熱帯域の変動と比べて非常に小

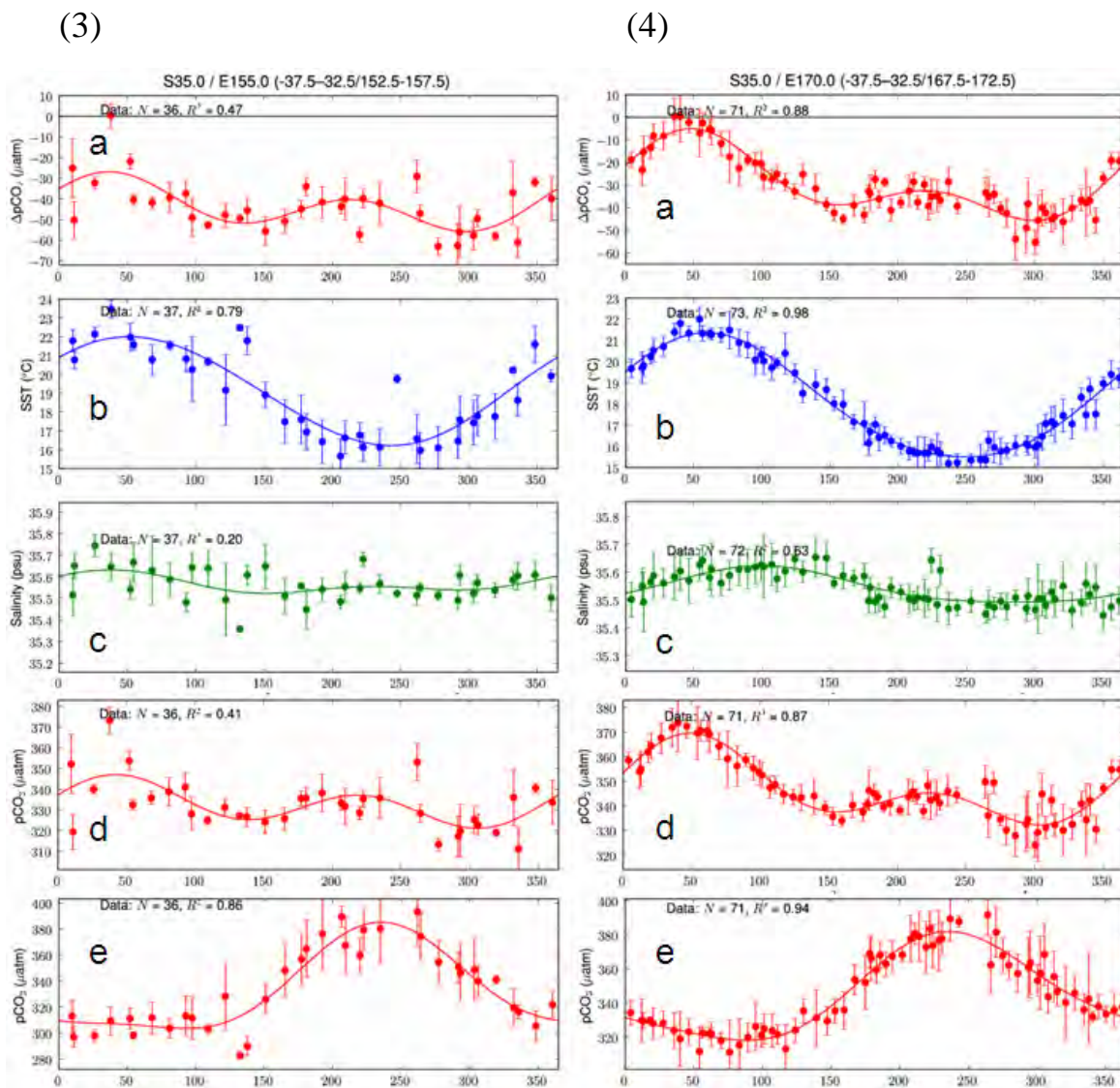


図11 (3), (4) 西部赤道太平洋域で観測された(a) ΔpCO_2 , (b) 表面水温 (SST), (c) 表面塩分, (d) 海洋表層 pCO_2 , (e) 年平均SSTに対して温度変化効果を除いた海洋表層 pCO_2
 (3) $35^{\circ}S, 155^{\circ}E$, (4) $35^{\circ}S, 170^{\circ}E$

さく、また春に最大を持たずにむしろ最低となり、海氷の融解などの影響が考えられ、非常に興味深いデータとなっている。

西部熱帯太平洋に関しては、図11のような図を作成しても季節サイクルを示さず、この海域では年々変動が卓越している。図12に示したのは、赤道の $150^{\circ}E$ における ΔpCO_2 (太実線)の時系列グラフである。4年強の観測期間において、極小が2006年6月-2007年3月と2009年6月-2010年4月のあたりに現れ、極大が2008年2月-5月と2008年10月-12月と2010年7月-10月のあたりに現れている。このような赤道付近の約3年周期の変動としては、エルニーニョ・ラニーニャ現象(ENSO)との関連が考えられ、ENSOの状況を示す二つの指標を図12に重ねた。破線はNino3.4

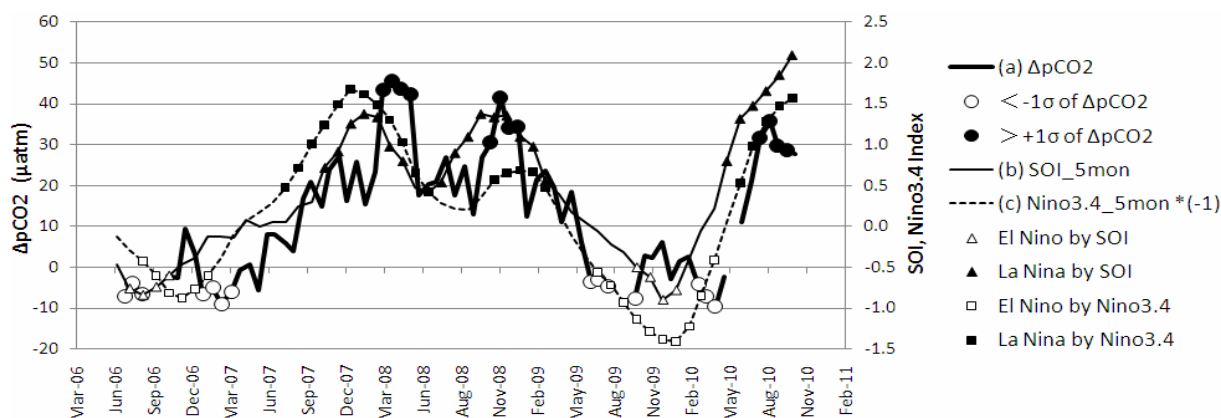


図12 0°, 150°Eにおける $\Delta p\text{CO}_2$ (a:太実線) と、南方振動指数SOI (b:細実線)、東部熱帯太平洋SST指数 $\langle \text{Nino}3.4 \text{ Index} \rangle \times -1$ (c:破線) の時系列。

黒記号は (a) では連続した 1σ 以上の値、(b) (c) ではラニーニャを示し、白記号は (a) では連続した -1σ 以下の値、(b) (c) ではエルニーニョを示す。

Indexといわれる値で、120°W-170°W, 5°S-5°Nの海域の海面水温(SST)の平均値を経年的に規準化した指標であり、特に赤道太平洋中東部でのENSOの概況を示す指標である。細実線は南方振動指数 (SOI) で、これはタヒチとダーウィン (豪) の間の海面気圧の差の値を経年的に規準化した指標であり、特に熱帯太平洋中西部でのENSOの概況を示す指標である。これらの指標と0°, 150°Eにおける $\Delta p\text{CO}_2$ の変動を比べると、 $\Delta p\text{CO}_2$ の変動がENSOの影響を強く受けていることがわかる。 $\Delta p\text{CO}_2$ の値の平均と標準偏差を求め、連続で標準偏差1を超えた値 (1σ 以上のイベントと記す) を●、標準偏差-1を下回る値 (-1σ 以下のイベントと記す) を○で示してみると、 $\Delta p\text{CO}_2$ 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ており、 $\Delta p\text{CO}_2$ の極小値はエルニーニョのピークの前後に分かれて出現しており、その間は一度 $\Delta p\text{CO}_2$ の値が弱い正の値を示していることが分かった。

この $\Delta p\text{CO}_2$ の極大値・極小値が出現したときに、他の要素はどのような変動をしていたのかを調べた (図13)。この図には大気 $p\text{CO}_2$ 、海洋表層 $p\text{CO}_2$ 、海面塩分、海面水温(SST)を示し、 $\Delta p\text{CO}_2$ の $+1\sigma$ 以上のイベント時の値は◆、 -1σ 以下のイベント時の値は◇で表現した。まず、大気 $p\text{CO}_2$ に関しては、極大も極小も $\Delta p\text{CO}_2$ とは一致せず、顕著なのは上昇トレンド(2.3 ppm/yr)と、他の指標にはみられない季節サイクル (10月あたりに極小、3月と7月あたりの極大2つ) が卓越していた。海洋表層 $p\text{CO}_2$ は $\Delta p\text{CO}_2$ の変動とほぼ一致する。これは $\Delta p\text{CO}_2$ の変動が、変動の小さい大気 $p\text{CO}_2$ より、変動の大きい海洋表層 $p\text{CO}_2$ の影響を強く受けるために当然ではあるが、海洋表層 $p\text{CO}_2$ の2006/2007年の極小より2009/2010年の極小の方が若干上昇しており、 $\Delta p\text{CO}_2$ の値を用いれば、全球における大気と海洋の CO_2 の増加トレンドを除くことが可能で、ENSOの影響を確認できる可能性が高いと考えられる。

海面塩分の極大・極小に関しては、 $\Delta p\text{CO}_2$ の極大・極小とほぼ一致しており、2回に分かれる極小の間で一時値が高くなる場所も、特に2009/2010年の事例では確認できる。よって $\Delta p\text{CO}_2$ の

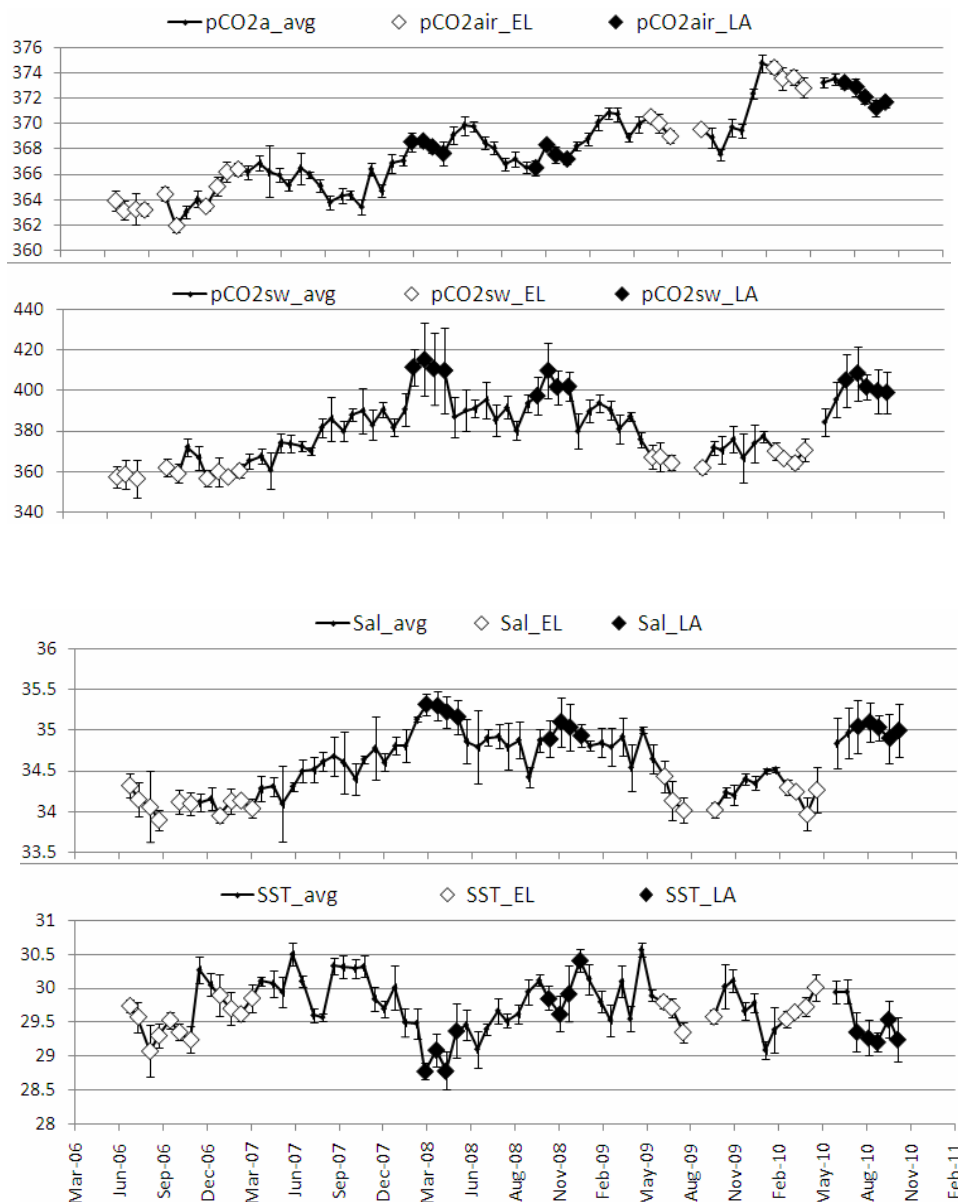


図13 0°, 150°Eで観測された各要素の時系列、(上から)大気pCO₂ (μatm)、海洋表層pCO₂ (μatm)、海面塩分 (psu)、海面水温 (°C)

◆ : 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

変動は海面塩分の変動と密接に関係しているといえる。一方、SSTの変動は、ΔpCO₂極大・極小と一致しているとはいえない。2008年春のラニーニャの時は、低温/高塩分/高pCO₂の海水が東部赤道太平洋から東経150°に至ったため、データにはっきりとそれが現れている。2010年夏-秋のラニーニャでも、若干SSTは高めだが、低温/高塩分/高pCO₂の海水の影響が表れている。しかし2008/2009年の弱いラニーニャでは、SSTは弱い極小を示すが低温は顕著ではない。このラニーニャ

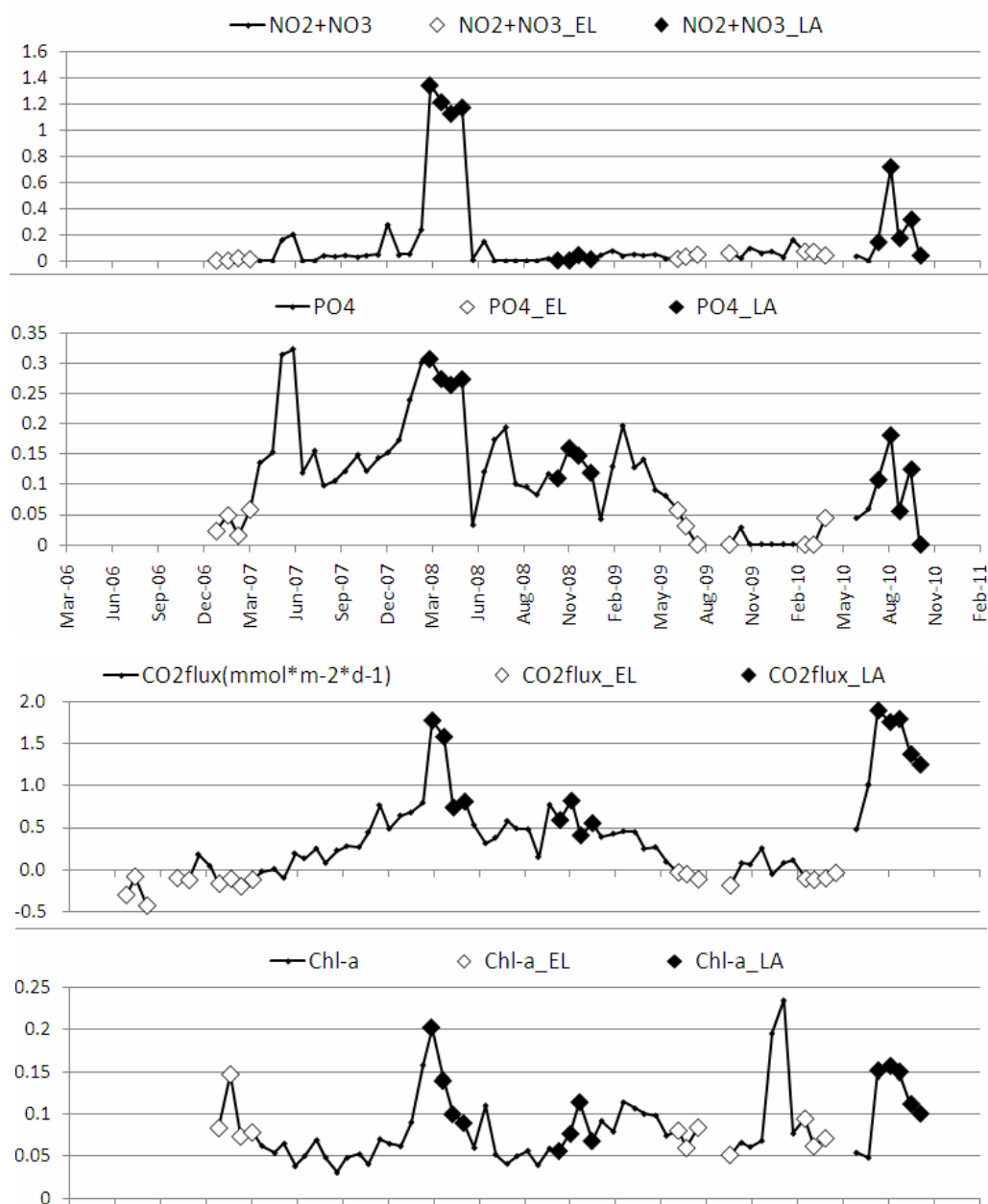


図14 0°,150°Eで観測された各要素の時系列、（上から）大気-海洋CO₂フラックス (mmol · m⁻² · day⁻¹)、クロロフィルa (μg/L)、NO₂+NO₃-N (μmol/L)、PO₄-P (μmol/L)
 ◆ : ΔpCO₂で+1σ以上のイベント時の値 ◇ : ΔpCO₂で-1σ以下のイベント時の値

これは、2008年春のラニーニャの後、中部赤道太平洋に残っていた低温偏差が再び西進した事例だったため、高塩分/高pCO₂の値だけが目立った事例と考えられる。エルニーニョの前後でΔpCO₂は2つの極小を示すが、その前半ではSSTが極小傾向、その後半では上昇傾向を示していた。このことから推測できるのは、エルニーニョのピークの前に東経150°を東から西へ通過する海水と、エルニーニョのピークの後に東経150°を東から西へ通過する海水の起源が異なるのではないか

ということである。特にピーク後の海水は暖水プールに蓄積していた高温／低塩分／低 $p\text{CO}_2$ の海水が東進したと考えられるが、ピーク前の海水はニューギニア沿岸底流の上昇してきた海水などが関係しているかもしれない。これについては現在、海水温の鉛直分布や下層大気の客観解析値等を用いて解析を行っている。

$\Delta p\text{CO}_2$ とSST、海面塩分に加え、NCEP/NCAR客観解析値の海上10mのデータを用いると、大気-海洋間の CO_2 フラックスが求められる。それを算出した結果が図14の一番上の時系列グラフである。これをみると、東経 150° に低温/高塩分/高 $p\text{CO}_2$ の海水をもたらした2008年春と2010年夏-秋のラニーニャの際には、ピークに $1.5\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ を超える高い CO_2 フラックスが出現している。エルニーニョの時の値は、 $0 \sim 0.2\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ の値を示した。これまでの先行研究では、エルニーニョの時に暖水プールから東へ広がる海水は、周辺の島々の影響で高 $p\text{CO}_2$ となるという説(Feely et al., 2002)⁴⁾もあった。しかし、 CO_2 フラックスは、エルニーニョのピークに若干のプラスを示すが、ラニーニャ後期に東経 150° に現れる値とは比較にならないほど低い。2008/2009年の弱いラニーニャ後の事例でも、強い2つのラニーニャ後の CO_2 フラックスの半分程度の値(約 $0.7\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$)を示した。

国環研のTF5の観測では、2007年の初めから海水サンプリングも行っており、クロロフィルaや栄養塩についても測定値が得られている。図14のクロロフィルa (Chl-a)のグラフからは、2008年春と2010年夏-秋のラニーニャでの高い値は確認できるが、それ以外のはっきりしない。2009/2010年のエルニーニョのピークのところにクロロフィルaのピークも現れているが、ニューギニア沿岸流の可能性が高い。クロロフィルaについては、衛星データも存在するため、比較を行う予定である。

栄養塩の $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ 態窒素のデータは興味深い結果を示した。2008年春のラニーニャの時の値は非常に高く、2010年夏-秋のラニーニャの時も高まった。しかし、エルニーニョ前後のときには低い濃度であった。2008/2009年の弱いラニーニャの時も低い濃度であり、これは2008年のラニーニャの後に中部太平洋から低温域が広がった事例なので、 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ 態窒素が高い高栄養塩の東部熱帯太平洋の湧昇水があったとしても、東経 150° に至る以前に $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ 態窒素は枯渇してしまった可能性が考えられる。 PO_4 態リンに関しては、ラニーニャ後の高 $\Delta p\text{CO}_2$ イベントで高い値、エルニーニョ前後の低 $\Delta p\text{CO}_2$ イベントで低い値という傾向はみられたが、それ以外にも極大が見られた。

以上のような、興味深い発見がTF5のデータからいくつか見つかってきている。西部赤道太平洋の海洋表層 CO_2 データに関して、貨物船観測のように3週間ごとのデータを取得するようなことは、これまでの観測船による観測では不可能だったため、西部赤道太平洋の CO_2 フラックスの経年変動を扱うこれまでの先行研究(Feely et al., 2006⁵⁾, Ishii et al., 2004⁶⁾など)ではその詳細が明らかにされてこなかった。世界の多くの海域が CO_2 については吸収域である中で、太平洋赤道域は CO_2 の放出域になっており、東部赤道太平洋のみならず西部赤道太平洋の高 CO_2 分圧水塊の消長がもたらす CO_2 フラックスの変動は世界の海洋 CO_2 フラックスの変動に大きな影響を与える可能性もある。貨物船による観測は高頻度なうえ継続的であり、赤道域のように季節サイクルを示さない海洋変動をモニターするには非常に有力な手段である。このような意味合いから、国環研の海洋 CO_2 モニタリングの長期継続は、世界の海洋 CO_2 研究者達から求められているものである。

4 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

4. (1) 研究目的

国環研では、1995年から日本-北米航路での海洋表層CO₂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いる。これらのデータセットは、CDIAC (<http://cdiac.ornl.gov>)、SOOP (<http://soop.jp>)、SOCATを通して配布され、世界の各研究機関で広く利用されている。例えば、Takahashi et al.,(2009)²⁾はこれらのデータセットを用いて全球の海洋表層pCO₂の気候学的マップを作成し、全球の大気海洋間CO₂交換量が年間およそ2.0 PgCであることを示した。しかし、観測に基づいた年々のpCO₂分布推定と大気海洋間CO₂交換量の推定が試みられた報告例は少ない。これは、国環研のように定期貨物船を用いた高頻度かつ広範囲なpCO₂観測を行ったとしても海盆スケールの変動を観測のみで網羅することが難しいためである。それゆえ、強力で信頼できる海洋pCO₂の時空間内挿手法がこれまで求められてきた (e.g. Dandonneau, 1995; Takahashi et al.: 1997, 2002¹⁾, 2009²⁾; Inoue et al., 2003; Ono et al., 2004; Sarma et al., 2006など)。例えば、重回帰分析 (Multiple Linear Regression: MLR) は、pCO₂と海面水温 (SST)、海面塩分 (SSS)、クロロフィルa濃度 (CHL)などの物理・生物パラメータを線形的に関連付け、これらのデータセットを駆使してpCO₂を再現する方法として広く使われている手法である。しかし、本研究課題に参画したTelszewskiとその共同研究者らは、MLR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た。彼らは、MLR手法を北大西洋全域に適用した場合、325 μatm以下の観測値を再現できないことや、観測値と推定値の相関係数が低いことを指摘し、ニューラルネットワークと呼ばれる新しい推定方法がpCO₂の時空間分布をよりよく再現できる可能性があることを見出した。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コンピューター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る。本研究ではこの手法を用いて北太平洋のpCO₂分布を明らかにする。この手法は、これまでに北大西洋全域のpCO₂の推定に用いられ、MLR手法よりも優れた手法であることが示された。そのため、本手法は海盆スケールの時空間pCO₂変動を再現するのみならず、全球pCO₂分布の時空間変動を推定する強力な手法となる可能性を持ち、ひいては大気から海洋へ吸収されるCO₂量の不確実性を減少させることにつながると考えられる。

4. (2) 研究方法

4. (2) ① 自己組織化マップ (Self Organizing Map) 概要

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。ニューラルネットワーク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 (SOM) と呼ばれるアルゴリズムを用いた。SOM は与えられた入力情報同士の類似度をマップ上の距離で表現するモデルであり、事前に入出力の関係を経験的あるいは理論的に記述する必要がない手法を用いている。つまりSOMの手法は、単に観測結果から経験的に学習された知識に基づいており、そのため空間補完手法として広く利用されており、方程式で物理化学生物学的な現象を記述するような知識に基づくシミュレーションモデルとは対照的である。そのためSOMは、地球科学分野において経験的な関係を学習するために最も適した手法として注目されている。本研究では、SOMを用いて北太平洋の海盆スケールのpCO₂分布を作成することを目的とした。

本研究で用いるSOMの基本構造は、入力層と呼ばれる入力データセットと、競合層と呼ばれる

2次元格子にニューロンと呼ばれる重みベクトルが配置されたニューラルネットワークである。すなわち、2次元格子に配置されたニューロンに海面水温や海面塩分などの入力データ（入力層）をインプットする事で、競合層のニューロンは実際の海洋を表現出来るように最適化される。その後、観測された $p\text{CO}_2$ を他の現場観測データを用いてニューロンを関連づける。入力層には分析対象となる n 個の変数ベクトル成分 x_i ($i=1,2,\dots,n$)、競合層には入力層のパラメータを含んだ k 個のユニットベクトル成分 m_j ($j=1,2,\dots,k$) が存在する。競合層のニューロンに与えられる初期値は乱数により重みベクトル \mathbf{m}_i ($m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{in}$) が割り当てられ、以下で説明する手法を用いてニューロンの重みベクトルを最適化する。(1) 入力ベクトル \mathbf{x}_j と競合層のすべてのユニットを比べ、最も類似しているユニットベクトルを探し出して、そのユニットを勝者ベクトル \mathbf{w}_j と呼ぶ。(2) 次に探し出したユニットベクトルおよび区域関数によってあらかじめ“近傍”と指定されたユニットの重みベクトル \mathbf{m}_i を更新する。(3) さらにすべての入力ベクトル \mathbf{x}_j ($j=1,2,3,\dots,n$) に対して上記を繰り返し、さらに近傍ユニットベクトルの範囲を狭めていきながら上記をさらに繰り返す。

本研究による $p\text{CO}_2$ の時空間分布再現手法には、それぞれトレーニング、ラベリング、マッピングとよばれる3つの段階がある。まず最初は、 $p\text{CO}_2$ の変動に関連があると思われる変数を選び出し（これらの変数をトレーニングパラメータと呼ぶ）、SOMを用いてパラメータ同士をニューロンに対応させるトレーニング過程である。次に、トレーニングされたSOMと $p\text{CO}_2$ をSOM上で関連づけるラベリング過程がある。最後に、トレーニングデータセットから各グリッド上の $p\text{CO}_2$ を推定するマッピング過程続く。これら3つの過程について、後の節でそれぞれ詳述する。

・ SOM parameterの選択と設定

SOMの基本プログラムは、ヘルシンキ工科大学の情報計算科学研究室によって開発がなされ、Toolboxと呼ばれる計算環境が汎用ソフトウェアであるMatlabのもとに構築され (Vesanto et al., 2000)⁷⁾、<http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox>から無料で利用できる。北太平洋における $p\text{CO}_2$ 時空間分布の構築にはこのToolboxを独自に拡張したものをを用いた。

SOMを理解する上で重要なパラメータは、マップサイズ、格子、型である。ここで述べているマップとは、現実の世界を表した地図を表すのではなく計算で用いるニューロンの配置図のことである。まず始めにマップサイズであるが、本研究では6095個のニューロンを x に広げたマップを設定している。最適化されたマップサイズでは、SOMのマッピングに対して最も効率的な計算がなされる。しかし、マップサイズが大きい、すなわちニューロン数が過剰だと特徴的なパターンを抽出するためにデータを減らすことができず、計算に膨大なリソースを必要とする。一方、それとは逆にマップサイズが小さい、すなわちニューロン数が少ない場合は観測データに内在する十分な表現パターンを揃える事ができず、時空間補間されたマップの再現性は悪くなる。マップサイズと十分な表現パターン数の関係はデータセットに強く依存する。しかし、マップサイズの最適解を計算するアルゴリズムは存在しないため、ニューロン数の調整は逐次手動で行う必要がある。そこで、マップサイズの品質指標として、量子化誤差 (QE) とトポロジー誤差 (TE) と呼ばれるマップの品質指標が導入されており、これらを用いてマップサイズの最適化がなされている (Park et al., 2004⁸⁾, Liu et al., 2006⁹⁾)。

まず、量子化誤差 (QE) について述べる。QEは各入力ベクトルと勝者ベクトル間の距離の平均を計算する。

$$QE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \|x_j - w_j\| \quad (1)$$

QEがよりゼロに近ければ、SOMによるマッピングがより良い事を意味している。多くの場合、ニューロンの数が多くなればQEの値は小さくなる。トポロジー誤差 (TE) は、入力データの接続形態をどれくらい維持しているかを計算する。TEの値もよりゼロに近いほど良い。

$$TE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u(x_j) \quad (2)$$

ここで、 $u(x_j)$ は、 x_j に対する勝者ニューロンと2番目の勝者がマップ上で近傍でない場合は1を、そうでない場合はゼロをとる。TEは、QEとは異なり、マップ構造を評価しているので、不自然にねじれたマップに対してはQEが小さい値であったとしてもTEの値が大きくなる。

次に格子と型のパラメータについて述べる。マップの型式には、6095個のニューロンが115 x 53の格子間隔で配置された六角形型の2次元シートを選択した (図15)。マップの型は、入力ベクトルによって更新されたニューロンと近傍のニューロンの関わり方を規定している。たとえば、四角形型では近接するニューロンの個数が4つであるのに対し、六角形の近接ニューロン数は6つとなる。あるニューロンに対する近接ニューロン数と計算時間、およびニューラルネットワークの学習効率には相関がある。Liu et al., (2006)⁹⁾ によると、六角形型は四角形型と比べて多くの計算時間を要するものの、高度なトレーニングデータ分類を実行する事ができ、感度実験において感度の高い結果をもたらすことができる。

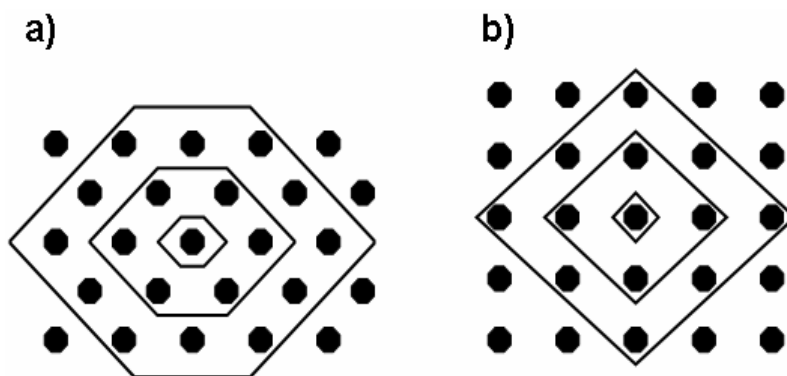


図15 SOMにおける (a) 六角形型と (b) 四角形型の格子。例として近隣区間がゼロから2ニューロンの場合を示している。

Matlab toolboxで利用可能なSOMの区域関数の型式は、"bubble"型、"gaussian"型、"cutgauss"型、"ep"型など複数存在する。型やアルゴリズムについての詳細はVesanto et al. (2000)⁷⁾で述べられている。本研究においては、区域関数として"gaussian"関数を選んだ。これは、“gaussian”関数が区域関数としてガウス分布を与えるため、広い範囲に影響を持ちつつも近傍から離れるにつれてそ

の影響を低下させ、他のどの区域関数よりもTEを最も小さくする事ができるからである(Liu et al. 2006⁹⁾)。

入力ベクトルのすべてのパラメータは、下記の(3)式を用いて標準偏差が1で平均値がゼロになるように用いて正規化される。

$$x' = (x - \bar{x}) / \sigma(x) \quad (3)$$

ここで、 \bar{x} はパラメータ x の平均値であり、 $\sigma(x)$ は標準偏差である。正規化は、トレーニング段階でSOMのアルゴリズムがユークリッド距離を用いるのに非常に重要なプロセスである。例えば海面塩分や海面水温のように変動レンジの異なる複数のパラメータを採用した場合に正規化を行わないと、変動が大きいパラメータがSOMに対してより大きな影響を与えてしまう。すなわち正規化は各パラメータの影響を均質化するために行うべきである。また、クロロフィルa濃度(CHL)や混合層深度(MLD)のような変動幅が大きいパラメータは、log10スケールを用いて正規化する。これら2つの変数は、値の変動が数桁に及ぶ。例えば、CHLは0.01から10 mg/m³のオーダーまで変化し、MLDは1から1000 mのオーダーで変化する。過去の研究例からは、どちらのパラメータも観測値では小さい値が多数であり、大きな値はめったに観測されない。本解析では、(3)式で示した正規化手法の他に、CHLとMLDに対しては一旦log10スケールに変換した上で(3)式を適用する手法を用いた。いずれの手法に対しても、元のスケールに戻すことが可能である。

個々のニューロンの初期値ベクトルはトレーニング過程の前にランダムに配置され、トレーニングデータセットの入力によって実際の海洋変動を記述出来るように最適化される。その詳細なトレーニングプロセスについては後で記述する。

4. (2) ② データセット

本研究では、海洋のpCO₂分布が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)の変動によって駆動されていると仮定し、SOMを用いてpCO₂分布を再現する。すなわち、pCO₂はSOMのラベリング過程を経て、概念的に以下の式のように記述される。

$$pCO_2 = f_{som}(SST, MLD, CHL, SSS) \quad (4)$$

同一水塊内において、SSTやSSSの変動がpCO₂の変動に直接的に関与していることは多くの研究によって知られている(Weiss et al., 1984; Takahashi et al., 1993)。またこれらのパラメータは水塊の起源を特定するのに良い指標ともなっている。またCHLは海洋中植物プランクトン濃度の指標であり、CHL値が高いほど光合成による海洋中CO₂の減少が期待出来る。さらに、MLDは値が高いほど混合層が深いことを意味しており、亜表層や中深層のCO₂濃度が高い海水が表層へと輸送されpCO₂を高めることを意味している。このように4つのパラメータは直接的あるいは間接的にpCO₂の変動に関与していると考えられ、SOMのトレーニングデータセットとして最適なパラメータ一群であると考えられる。

・トレーニングデータセット

今回基本とする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)から構

成されている。SSTデータセットには、気象庁地球環境・海洋部海洋気象情報室（以下海洋気象情報室）のデータを用いた。このデータセットは、衛星データと観測データの統合データセットであり、海洋気象情報室によって $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ} \times 1$ 日の時間空間分解能で準リアルタイムに同化される。

MLDデータは、英国気象庁のForecasting Ocean Assimilation Model (FOAM) による $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ の解像度を持つ日データを用いた。FOAMモデルは、Bryan-Coxモデルを基にしており (Bryan, 1969; Cox, 1984)、このモデルでは海洋と海氷のモデルを物理的に再現しており (Storkey, 2004)、現場観測の水温塩分データと、アルゴフロートやPIRATA 漂流ブイを用いた遠隔観測による準リアルタイムの水温塩分鉛直データだけでなく、定期航路を往来するボランティア観測船やブイ、人工衛星AVHRRで観測している表面水温データを用いて同化している。

CHLは、1週間毎の $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ 格子の解像度でNASA/GFSC/DAACから提供されるAqua-MODIS衛星のSeaWiFS Level3データを用いた (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)。CHLデータを利用する際に注意すべきことは、北半球の北緯45度以北では、冬季のデータが利用できない点である。これは、可視域を用いるSeaWiFSセンサーでは冬季に大気的光学的厚さが増すことで海面からの放射が吸収・散乱され、CHLの信号に非常に大きな不確実性を生じさせるためである。そのため、北部北太平洋の冬季の数ヶ月間は、SST, SSS, MLDデータのみで構成されたSOMを用いて $p\text{CO}_2$ を推定している。

SSSデータセットは、10日間毎の $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ の解像度であり、気象研究所から提供を受けた。これらのデータは気象研の同化モデルによって導出されている。データ同化にはブイや、観測船による観測、アルゴフロートからのデータが利用されている。MRIのSSSデータセットの検証は、同化モデルの出力結果と国環研の協力貨物船観測によるSSSデータの比較で行うことができる。

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、本研究でトレーニングデータセットとして1日毎の $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ の解像度に再格子化される。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に及ぶ。

・ラベリングデータセット

定期船による観測を行って得られる $p\text{CO}_2$ データは、北太平洋全域を時空間的に網羅できておらず、観測がされていない海域も未だに存在する。そのようなデータの不均質性がある中で、重回帰分析など伝統的な統計解析手法を海域全体に適用することは難しい。それとは対照的に、SSTやCHLなどのトレーニングデータセットは、人工衛星や客観解析モデルによって時空間的に網羅されているため、これらのデータセットとラベリングデータセットである $p\text{CO}_2$ データを関連付け、入力データセットを用いて $p\text{CO}_2$ 時空間分布を再現するSOM手法は他の時空間内挿手法よりも優れた見積もり結果を与えることができる。

北太平洋の $p\text{CO}_2$ 分布を推定するために、トレーニングされたSOMのニューロンと $p\text{CO}_2$ データは、ラベリングプロセスによって関連付けられる。ラベリングプロセスにおいては、 $p\text{CO}_2$ データと同一時空間内のすべてのトレーニングデータセット (SST, MLD, CHL, SSS) が関連付けられる。本解析の目的のために、国環研が実施している定期貨物船による $p\text{CO}_2$ 観測の1998年から2008年までのデータセットを用いた。10秒毎に取得される $p\text{CO}_2$ 観測データは、 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ のグリッド上

に集められ1日平均の処理がなされる。さらに、水深500 m以浅の海域データは本研究ではpCO₂分布再現の対象としないためラベリングデータとして用いない。このため、実際に採用されたラベリングデータ数は、北緯10°から60°、東経120°から西経90°の対象領域内で48352個であった。

4. (2) ③ SOMによるpCO₂再現過程

・SOMのトレーニング

それぞれのニューロンは、重みベクトルの \mathbf{y}_i で構成されており、ベクトルの次元はトレーニングデータセットのパラメータ (SST, SSS, MLD, CHL) の数と同じであるので、ここでは4次元となる。当初の計画では、SOMのトレーニングに対象とする時空間格子点数に対応する215,000,000個のトレーニングベクトルを用いる予定であったが、膨大なデータセットの中には同一データベクトルが数多く存在するためSOMを作成するのに計算効率が悪い。そのため、5日毎にデータを間引いたものをトレーニングデータセットとした。トレーニングは、SOM内のニューロンが最適化されるまで同一のトレーニングデータセットを用いて複数回実行される。まずはじめに、トレーニングベクトル \mathbf{x}_i がSOMのシート上に配置されたすべてのニューロン(重みベクトル) \mathbf{y}_i ($i=1:n$) と比較される。各トレーニングベクトルに対して、ユークリッド距離 $D(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j)$ 上で計算されたトレーニングベクトルに最も近い重みベクトル \mathbf{w}_j が最も高いアクティベーションを持った勝者ニューロンと呼ばれる。 $D(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j)$ は次のように定義される。

$$D(x_i, w_j) = \left[(x_{i_SST} - w_{j_SST})^2 + (x_{i_SSS} - w_{j_SSS})^2 + (x_{i_MLD} - w_{j_MLD})^2 + (x_{i_CHL} - w_{j_CHL})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

この時、勝者ニューロンの重みベクトル \mathbf{w}_j は \mathbf{x}_i に置き換わり、 \mathbf{w}_j の近傍のニューロンの重みベクトルも、置き換えられた \mathbf{w}_j に近づくように区域関数 H_{ci} に従って調整される。

$$H_{ci}(t) = \alpha(t) \times \exp(-d_{ci}^2 / 2(\sigma(t))^2) \quad (6)$$

ここで $\sigma(t)$ はトレーニング回数 t における区域半径であり、 d_{ci} は勝者ニューロンとその近隣ニューロン i との距離である。区域半径はトレーニング回数や学習率 $\alpha(t)$ とともに減少する。

複数回実施されるトレーニングでは2種類のニューロントレーニングが実行される。はじめに、荒粗なトレーニングによってSOM上のニューロンの配置を大まかに決定していき、次に微調整のためのトレーニングがなされる。それぞれのトレーニング回数は、ニューロン数とトレーニングベクトルの数の比に依存するが、本解析では繰り返し回数としてそれぞれ25回、20回と設定した。微調整トレーニングでは、比較的小さな α と H の値が始めから設定されている。近傍範囲を決定する区域半径は荒粗なトレーニングの間に8から2ニューロンへと減少し、微調整フェーズの際には最終的に0になる。これはすなわち、トレーニングが繰り返されるにつれて、勝者ニューロンがまわりに及ぼす影響の範囲が次第に狭くなることを意味している。また、区域関数としてどのような関数を用いるかによって、勝者ニューロンがアップデートされる範囲と、その範囲のニューロンがどのように変化するかを左右され、多くの種類の関数系が提案されている。その中でもガウス関数は、提案されている他のシャープな近隣関数とは対照的に、勝者ニューロンの近隣の範囲を大きくとりながらその影響を距離とともに徐々に減少させることが可能であるため、

本解析に最適と判断し採用した。

トレーニングによって、ほぼすべてのニューロンの重みベクトルが最適化される。このニューロンのマップ上では、勝者ニューロンの近傍に似たようなパターンが描かれる一方で、非類似パターンは離れたところに配置される。すべてのニューロンの重みベクトルは、異なる値の組み合わせを持つため、SOMはニューロンの数だけパラメータ間の関係を記述できるようになる。そのため、現実の海洋におけるSST, SSS, CHL, MLDの非線形関係をよりよく説明するためには、入力データであるそれぞれのパラメータが頻度分布に応じてニューロンによってよく表現されていることが必要である。つまり出現頻度が高い現象に対してはほぼ連続な関係が与えられる一方、出現頻度が低い現象に対しては非常に離散的な関係しか与えることができない。

・トレーニングされたSOMによるpCO₂ラベリングプロセス

次に北太平洋のpCO₂分布を再現するために、トレーニングされたSOMニューロンにpCO₂の値を割り当てる必要がある。この作業をここではラベリングプロセスと呼ぶ。ここでもトレーニングプロセスと同様の行程が行われ、勝者ニューロンが(5)式によって決定される。トレーニングプロセスでは、勝者ニューロンとその近傍のニューロンがチューニングされるが、ラベリングプロセスにおいては、ニューロンがチューニングされる代わりにpCO₂値を有する入力ベクトルとニューロンの重みベクトルの距離が比較され、勝者ニューロンが決定される。その結果、それぞれのpCO₂データが、ある一つのニューロンに割り当てられる。ほとんどすべてのニューロンは一度以上pCO₂に割り当てられるため、ある一つのニューロンが持つpCO₂値は対応した複数のpCO₂の平均値となる。しかし、いくつかのニューロンはpCO₂の値が割り当てられない可能性がある。これは、ラベリングデータセットが現実のシステムを表すのにデータ量が充分でない事を意味している。pCO₂値が割り当てられなかったニューロンは、pCO₂のマッピングプロセス時には使用されない。

・SOMによる時空間pCO₂マッピングプロセス

このプロセスを通して、トレーニングデータとpCO₂データを割り当てられたニューロンを持つSOMを用いてpCO₂の時空間分布を推定する。本研究では、2002年1月から2008年12月(2557日間)の日毎の海盆スケールの北太平洋のpCO₂分布を再現する。これらは、月毎に平均化されて84ヶ月分の月平均pCO₂マップとして出力される。最後にpCO₂の月ごとの気候値が計算され、平均場の特徴について吟味する。

4. (3) 結果と考察

4. (3) ① pCO₂分布再現結果—気候値マップ

前述の通り、本研究ではSST, SSS, MLD, CHLのトレーニングデータセットを用いてSOMを実行し、北太平洋のpCO₂分布再現を行った。まず始めに、結果の妥当性を評価するために、再現された2002年から2008年のpCO₂分布を月毎に平均化して得られたpCO₂気候値マップとTakahashi et al. (2009)²⁾によって示された月毎の全球pCO₂気候値から北太平洋域を抽出して比較した。Takahashi et al. (2009)²⁾は過去数十年間に及ぶpCO₂観測データを輸送モデルに入力して内外挿する事によって緯度4° x 経度5°格子上のpCO₂時空間分布を再現しており、海洋が吸収する

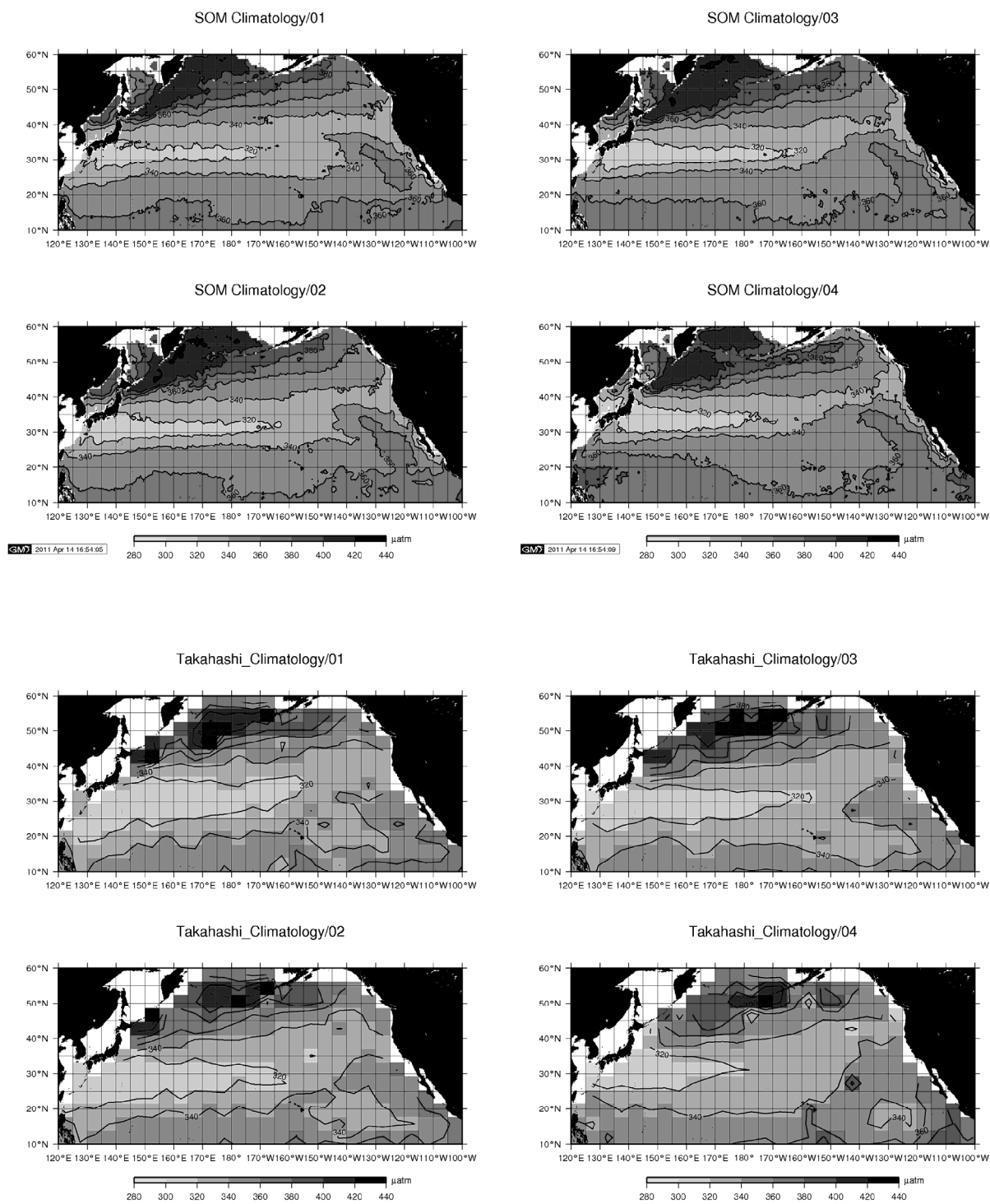


図 16 (1) 本研究で得られた気候学的な 1 - 4 月毎の pCO₂ (μatm) 分布 (上)
Takahashi et al. (2009)²⁾による同じ月の気候値分布 (下)

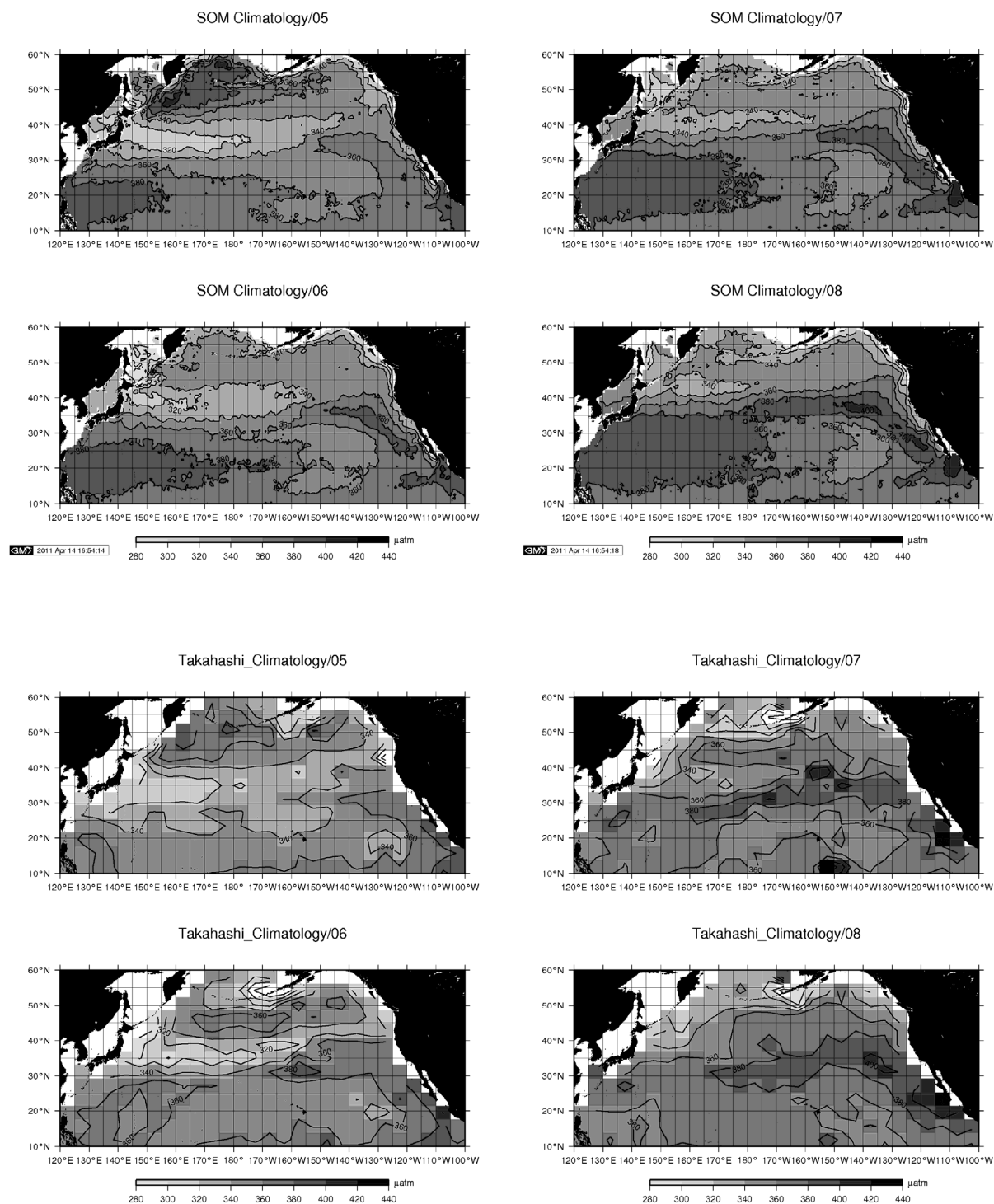


図 16 (2) 本研究で得られた気候学的な 5-8 月毎の $p\text{CO}_2$ (μatm) 分布 (上)
Takahashi et al. (2009)²⁾による同じ月の気候値分布 (下)

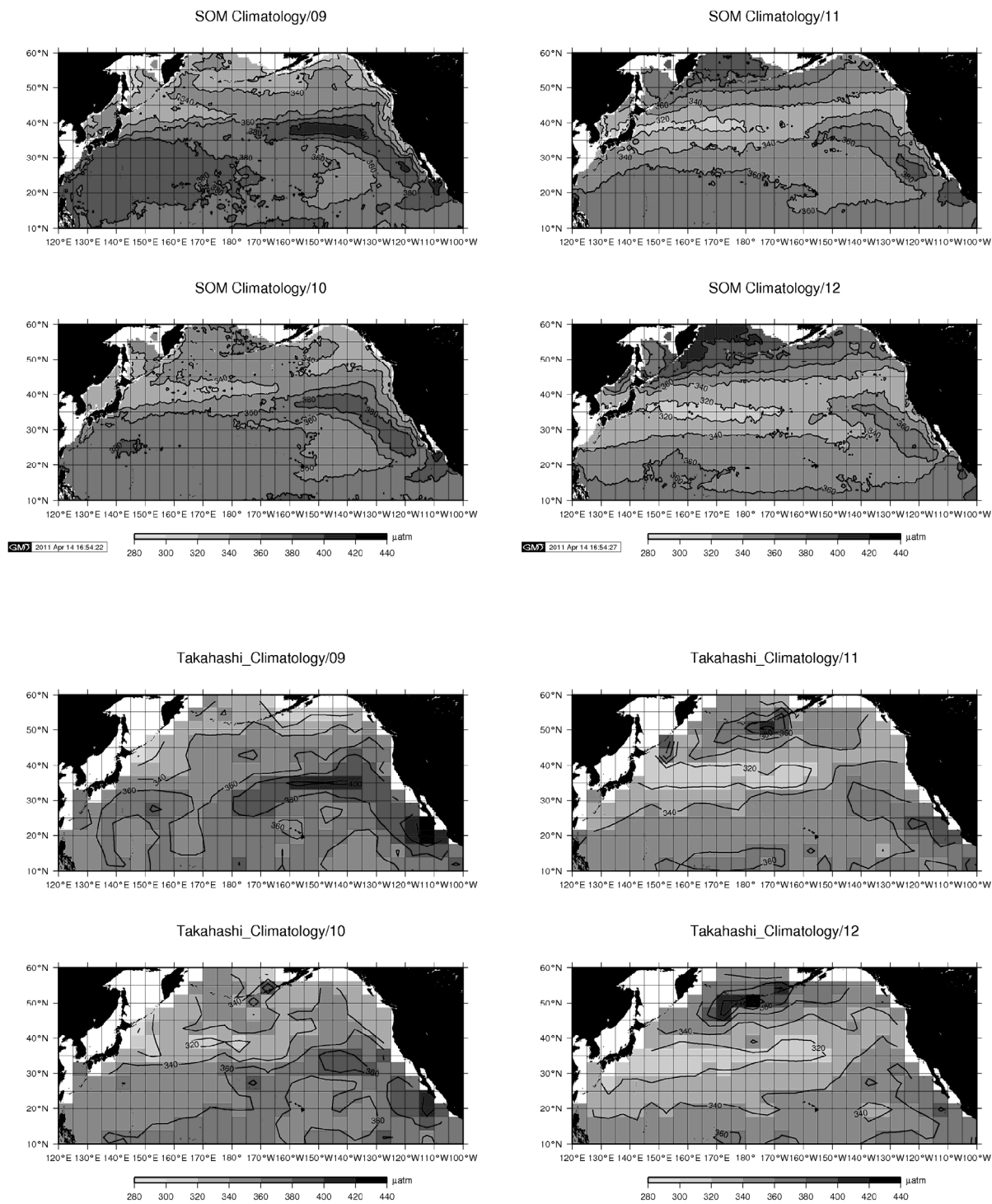


図 16 (3) 本研究で得られた気候学的な 9-12 月毎の pCO₂ (µatm) 分布 (上)
Takahashi et al. (2009)²⁾による同じ月の気候値分布 (下)

CO₂量を議論する際などに広く用いられている。図 16 (1)-(3) はそれぞれ本研究と Takahashi らによる月毎の pCO₂ 分布を表している。まず本研究で得られた結果を見てみると、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強く示唆している。また本研究で得られた分布と Takahashi et al. (2009)²⁾ の分布を比較すると、両者の分布はいずれの季節でも日本近海で極小値をとるなどの特徴が一致している一方で、細かく見ると単なる解像度の違いでは説明が出来ない違いが見られる。たとえば、1月において Takahashi et al. (2009)²⁾ 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 380~420 μatm の値が得られている。これらの違いが何に起因するのかについては詳細な解析を待つ必要があるが、Takahashi et al. (2009)²⁾ の手法が pCO₂ データの単なる内外挿である一方で、本研究では実際の海洋で起こっている海洋物理生物場の変動を考慮しており、より実際に即した分布を再現出来ているのではないかと考えられる。今後は pCO₂ の時空間分布の変化をより詳細に調べるとともに、再現された pCO₂ 分布から大気海洋間 CO₂ フラックス分布を算出し、海洋 CO₂ 吸収量の変動について解析を進めていく方針である。

4. (3) ② pCO₂ 分布再現結果—pCO₂ 分布の年々変動

前節で明らかになったように、本研究で得られた気候学的な pCO₂ 分布は Takahashi et al. (2009)²⁾ の分布と比較して多くの点で良い一致が見られた。そこで次に年々の pCO₂ 分布について見ていく。年々の pCO₂ 分布を推定する事は Takahashi et al. (2009)²⁾ の手法では不可能であり、本研究で用いた手法の大きな利点の一つである。図 17 は、本研究で得られた 2002 年から 2008 年までとその平均場である気候学的な月毎の pCO₂ 分布を示している。分量の都合で、季節を代表する 2 月、5 月、8 月、11 月の 4 ヶ月に限って示した。図において、年次の入った図は、2002 年から 2008 年までの 7 年間で、衛星観測や客観解析で時系列的に得られる海洋パラメータセットに従ってニューラルネットワークを用いて推定したものであり、各月の右下の Climatology と付された図は、この 7 年間平均 pCO₂ を示したものである。

これらの図から、同じ月であっても年によって pCO₂ 分布が大きく異なることが示唆された。例えば 2 月においては、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° まで伸びている様子が見られる一方、2006 年以降は最大でも東経 175° までしか分布していない。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様子が分かる一方で 2006 年以降は高 pCO₂ の水塊はそれほど広範囲には分布していない。このように 2005 年を境にして冬季と夏季の pCO₂ 分布に大きな違いが見られることはこれまでに報告例がない。北太平洋はエルニーニョ南方振動 (ENSO) や太平洋十年振動 (PDO) で代表される数年から数十年スケールの気候変動の影響を受けて SST、SSS、

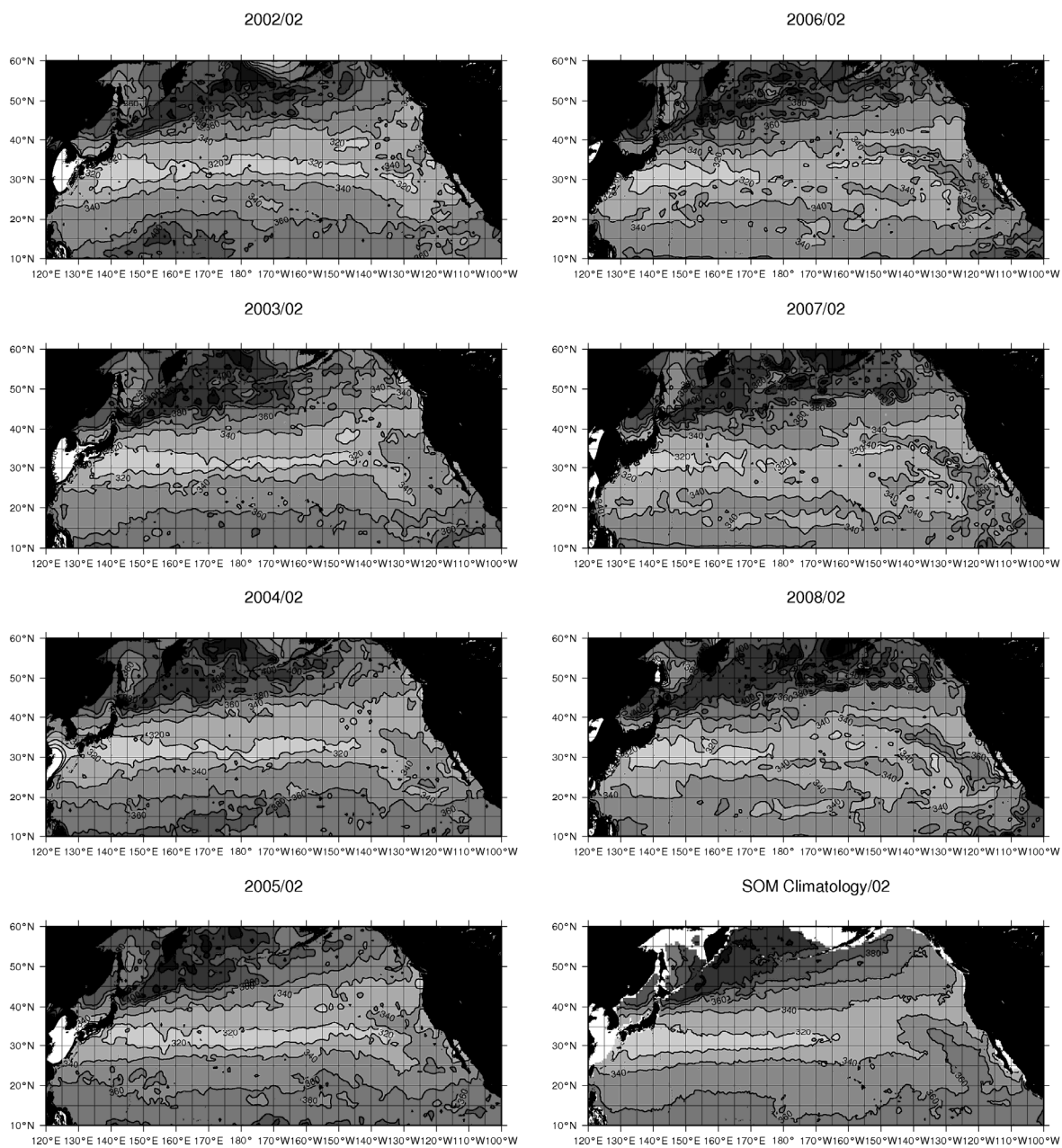


図 17 (1) 本研究によって再現された 2002 年から 2008 年までの年毎と平均的な 2 月の $p\text{CO}_2$ (μatm) 分布

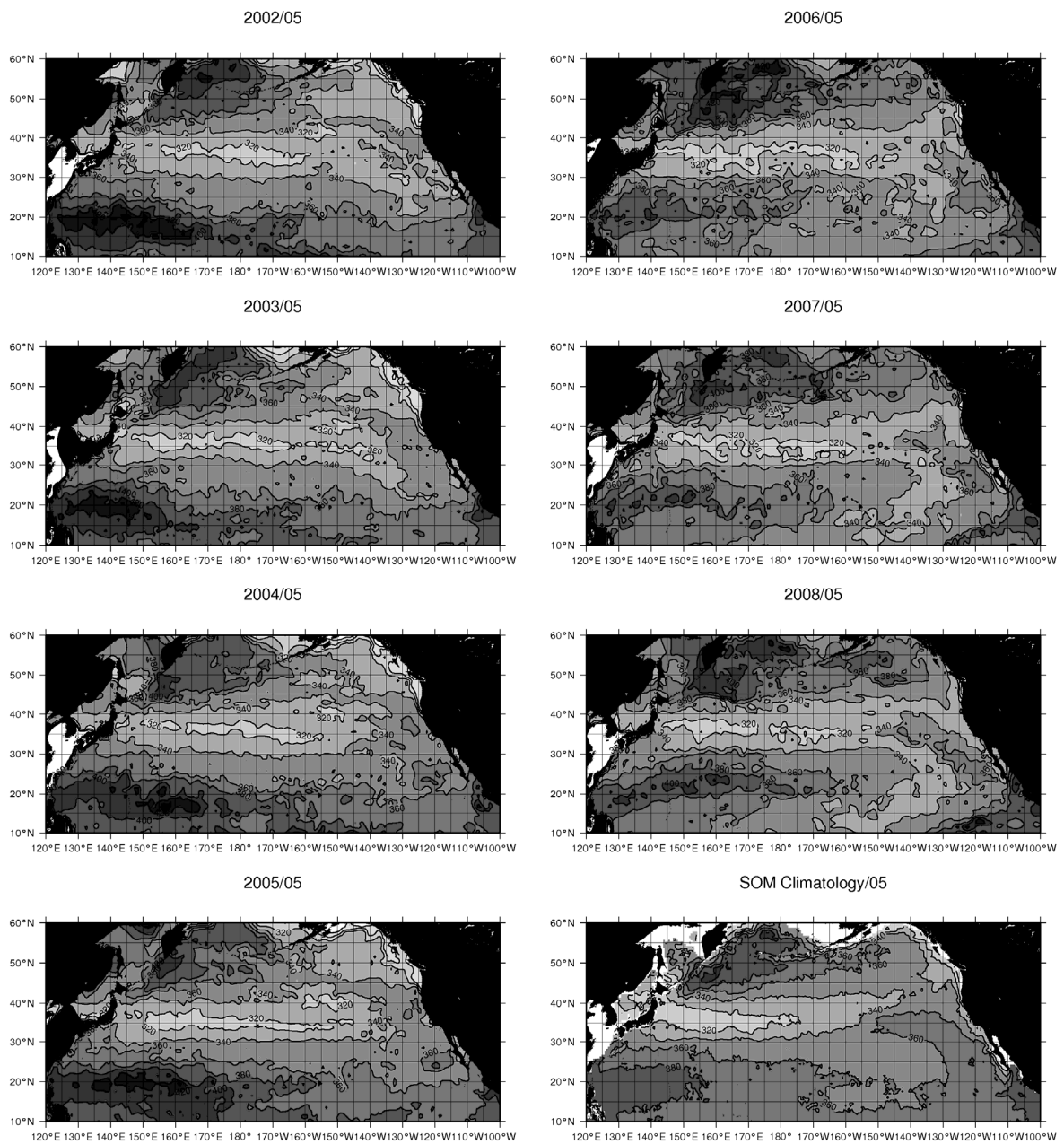


図 17 (2) 本研究によって再現された 2002 年から 2008 年までの年毎と平均的な 5 月の pCO_2 (μatm) 分布

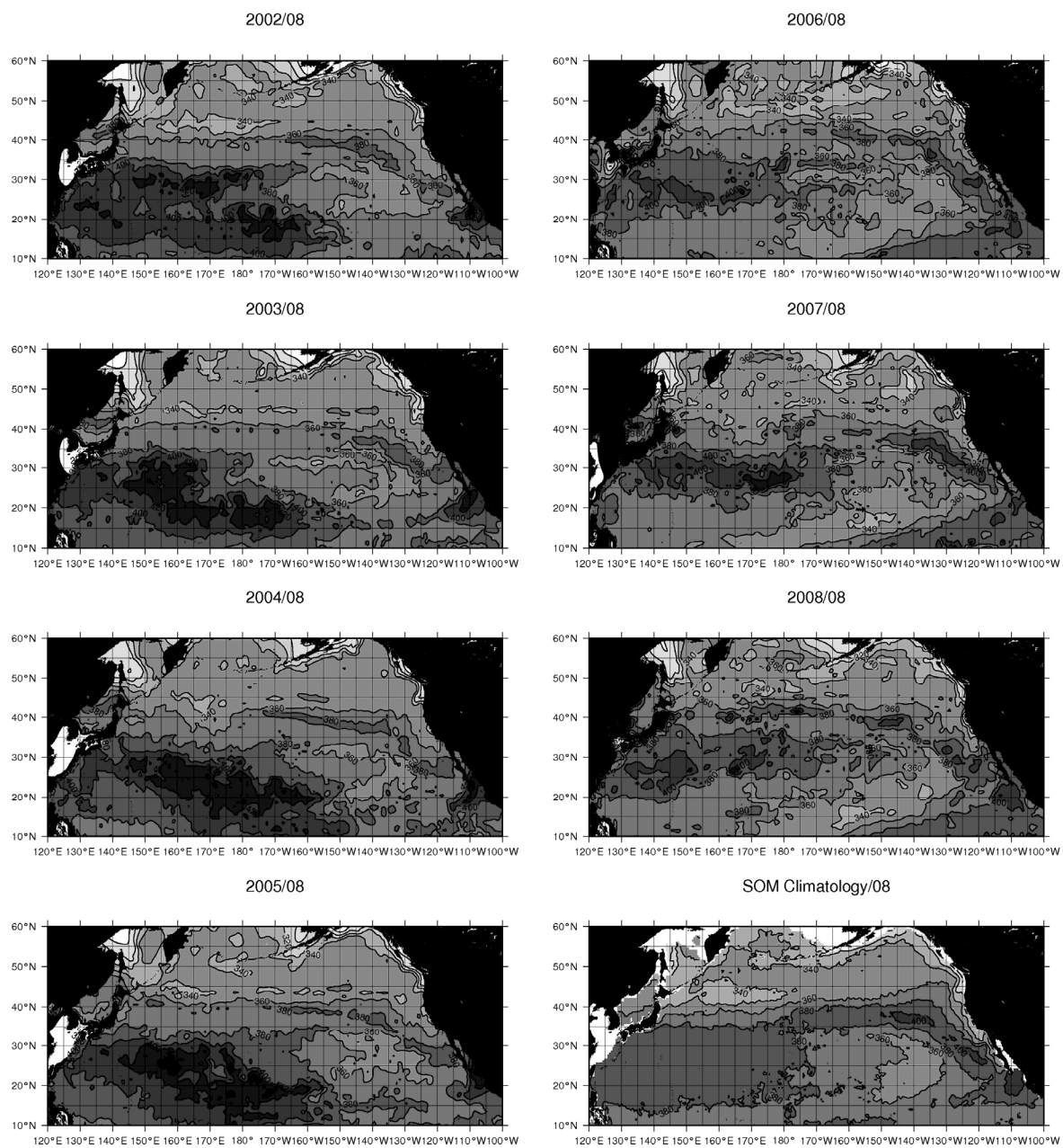


図 17 (3) 本研究によって再現された 2002 年から 2008 年までの年毎と平均的な 8 月の $p\text{CO}_2$ (μatm) 分布

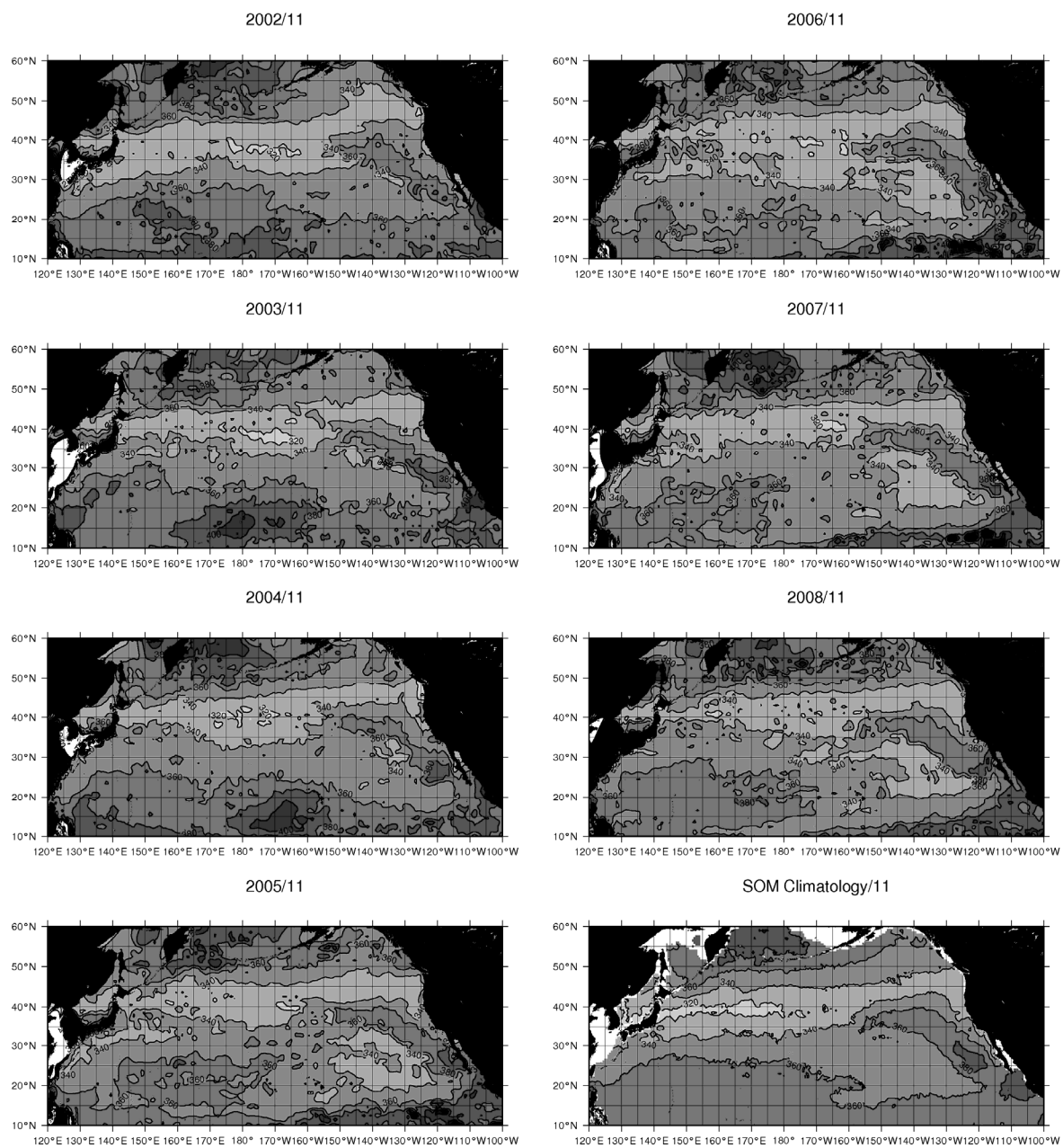


図 17 (4) 本研究によって再現された 2002 年から 2008 年までの年毎と平均的な 11 月の pCO₂ (µatm) 分布

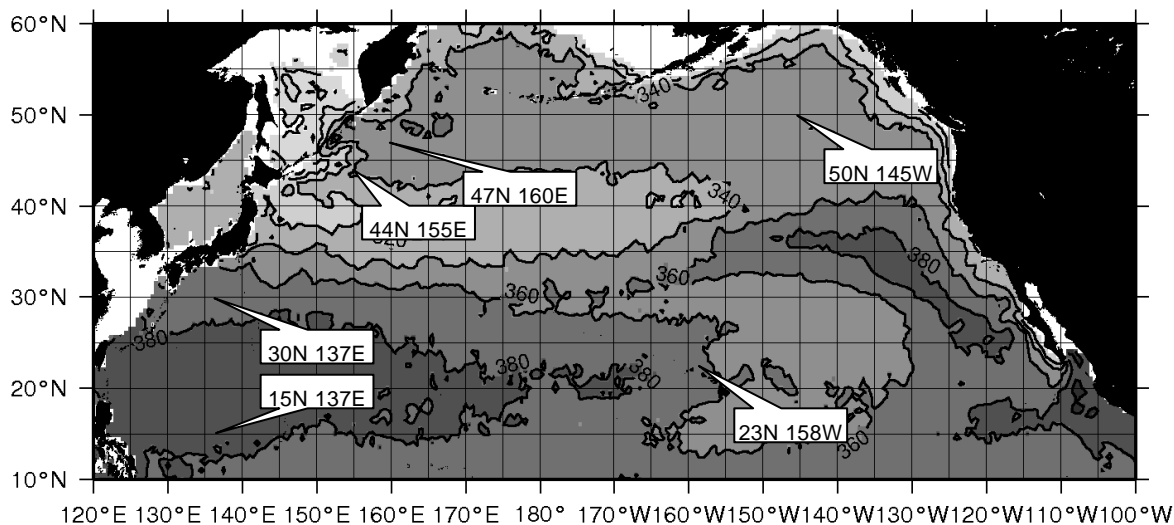


図 18 pCO₂ 時系列変化を検討した北太平洋の代表的時系列観測点周辺海域

MLD、CHL が年々変動しており、それに伴って pCO₂ 分布も年々変化していると考えられる。

そこで、海域のうち特徴的な点での年々変動を、用いた海洋パラメータの時系列変化と合わせて検討してみた。北太平洋には pCO₂ をデータセットに含む代表的観測定点がいくつか存在する（図 18）ので、ほぼその点と近い範囲を解析結果から抽出した。図 19 (1)は日本の南方の熱帯海域であり、高い水温と水温の小さい年周変動、低いクロロフィル濃度で特徴付けられる海域である。この海域では、2005/2006 年を境にする混合層深度 (MLD) の変動が大きく現れたが、2005 年以前の夏冬とも MLD が小さい期間は比較的高い pCO₂、2006 年以降の夏冬とも MLD が大きな期間は比較的低い pCO₂ と推定された。特に夏の pCO₂ 上昇には MLD の違いが大きく影響を及ぼしているようであり、混合層が厚い場合に夏の水温上昇を原因とする pCO₂ 上昇効果が小さいものと考えられる。この海域では、2006 年以降 TF5 号による実観測がある期間についてニューラルネットワーク推定と観測 pCO₂ 値との一致度が高い。一方、同じ経度の亜熱帯海域である北緯 30°、東経 137°（図 19 (2)）では、熱帯海域より水温変動が大きくなり、クロロフィル a 濃度が春に高まるような変動で特徴付けられる海域である。ここでもニューラルネットワークによる推定と実観測 pCO₂ の一致度は高い。北緯 15° 海域と同様に 2005/2006 年で大きな MLD の変動が現れたものの、その他の海域パラメータの季節変化の経年変動は大きくない。ここでの pCO₂ 経年変動がそれほど大きくない原因として、海域の pCO₂ を支配する最大の要因が大きな水温変動であり、その季節変化が比較的安定しているためであろうと推測される。この東経 137° 線では、気象庁による夏と冬の定期観測が実施されており、年 2 回であるために季節変化を抽出するのは難しいが、1980 年代から継続されているために長期変動傾向を把握するには適している。北緯 25° 以南は国環研データセットが 2006 年以降に限られるので、今後双方を合わせた解析をすることが有効である。わが国東方の亜寒帯太平洋海域では、1998-2000 年に集中観測された定点 KNOT（北緯

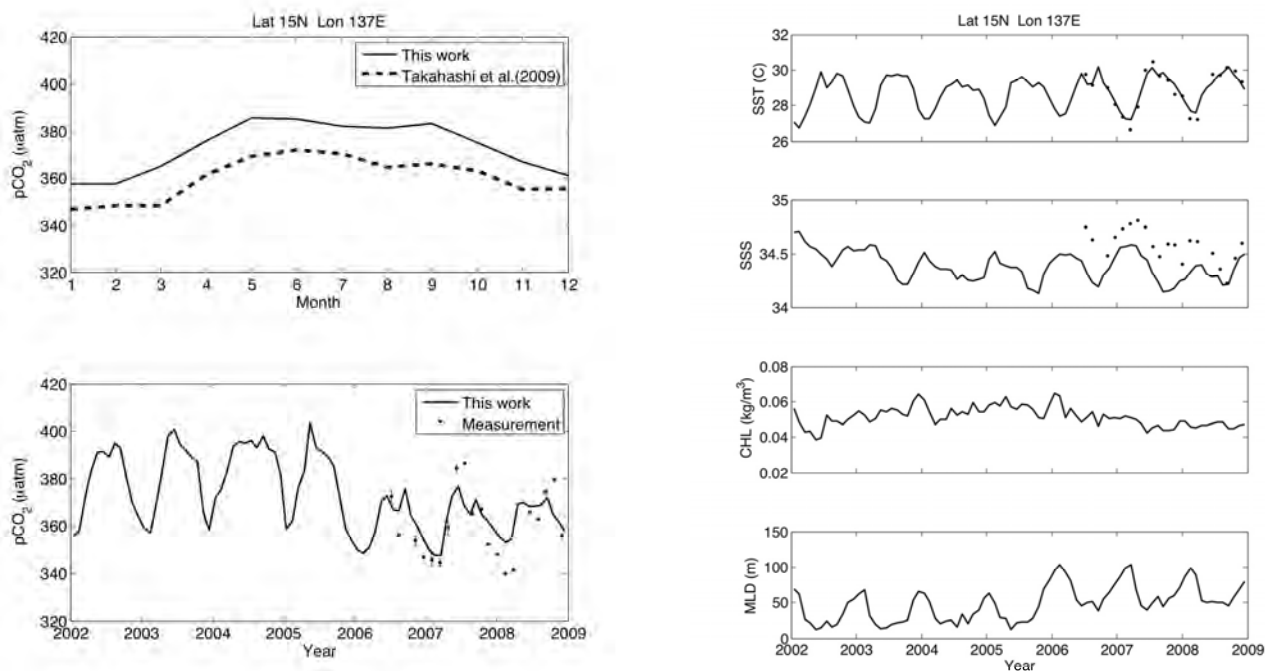


図 19 (1) 北緯 15°、東経 137° 周辺海域の pCO₂ と海洋パラメータの時系列、左上図は本研究による気候値（2002-2008 年の平均）と Takahashi et al. (2009)²⁾ の気候値を比較、右下図は本研究で推定された時系列変化と国環研貨物船観測による実観測値（誤差棒は空間変動を示す）を比較。

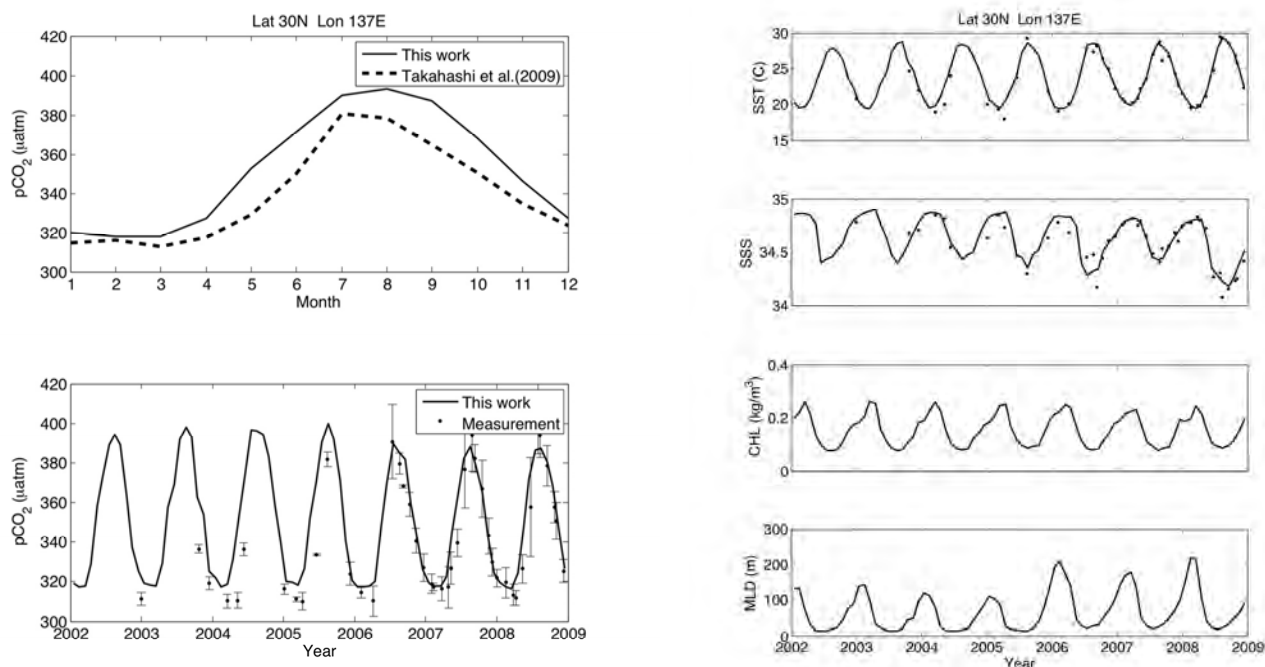


図 19 (2) 北緯 30°、東経 137° 周辺海域の pCO₂ と海洋パラメータの時系列、左上図は本研究による気候値（2002-2008 年の平均）と Takahashi et al. (2009)²⁾ の気候値を比較、右下図は本研究で推定された時系列変化と国環研貨物船観測による実観測値（誤差棒は空間変動を示す）を比較。

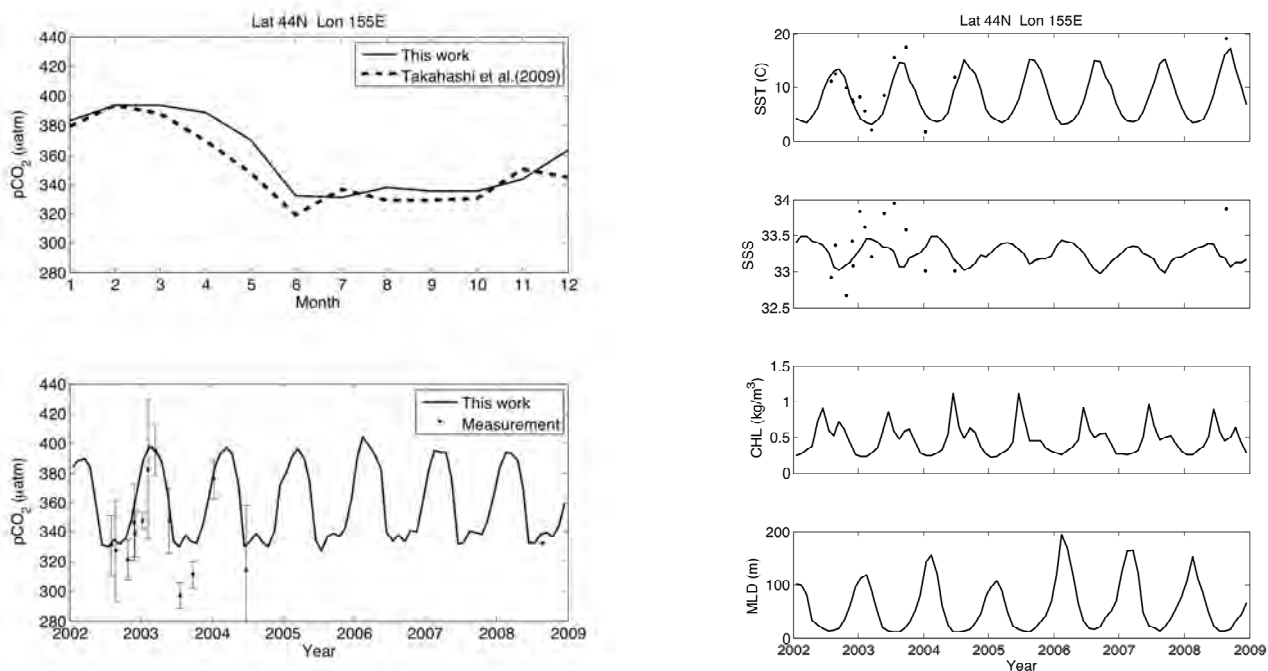


図 19 (3) 北緯 44°、東経 155° 周辺海域の $p\text{CO}_2$ と海洋パラメータの時系列、左上図は本研究による気候値 (2002-2008 年の平均) と Takahashi et al. (2009)²⁾ の気候値を比較、右下図は本研究で推定された時系列変化と国環研貨物船観測による実観測値 (誤差棒は空間変動を示す) を比較。

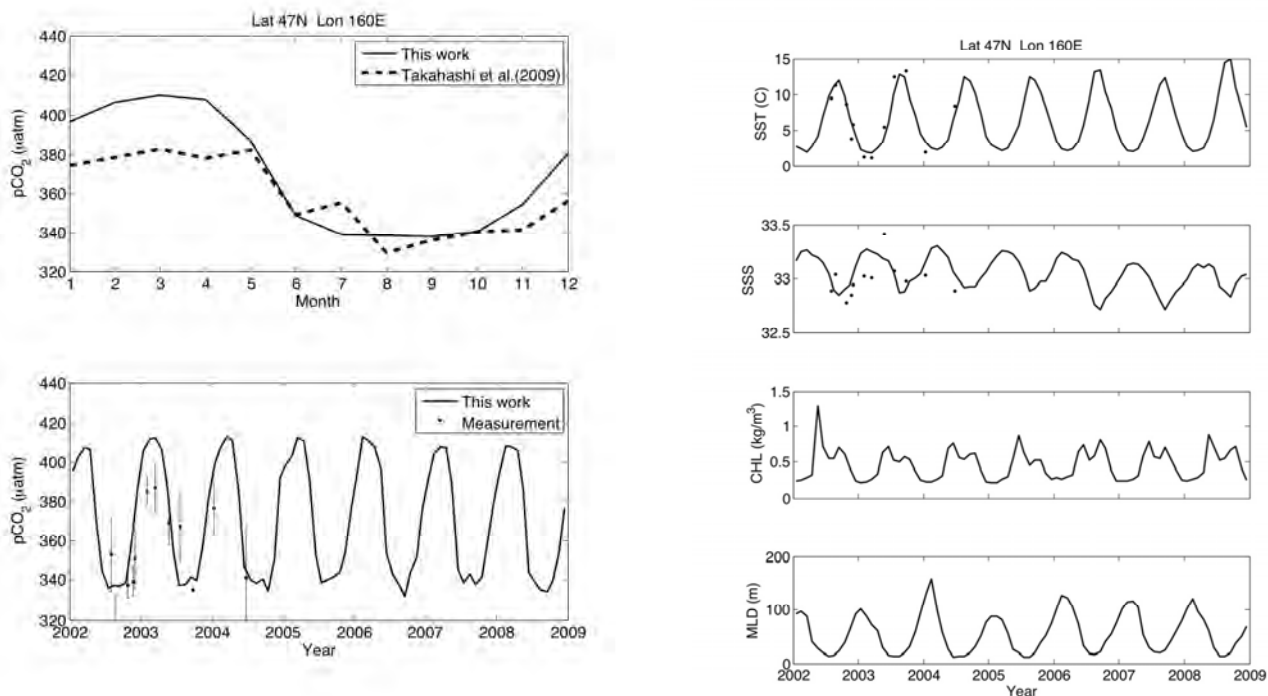


図 19 (4) 北緯 47°、東経 160° 周辺海域の $p\text{CO}_2$ と海洋パラメータの時系列、左上図は本研究による気候値 (2002-2008 年の平均) と Takahashi et al. (2009)²⁾ の気候値を比較、右下図は本研究で推定された時系列変化と国環研貨物船観測による実観測値 (誤差棒は空間変動を示す) を比較。

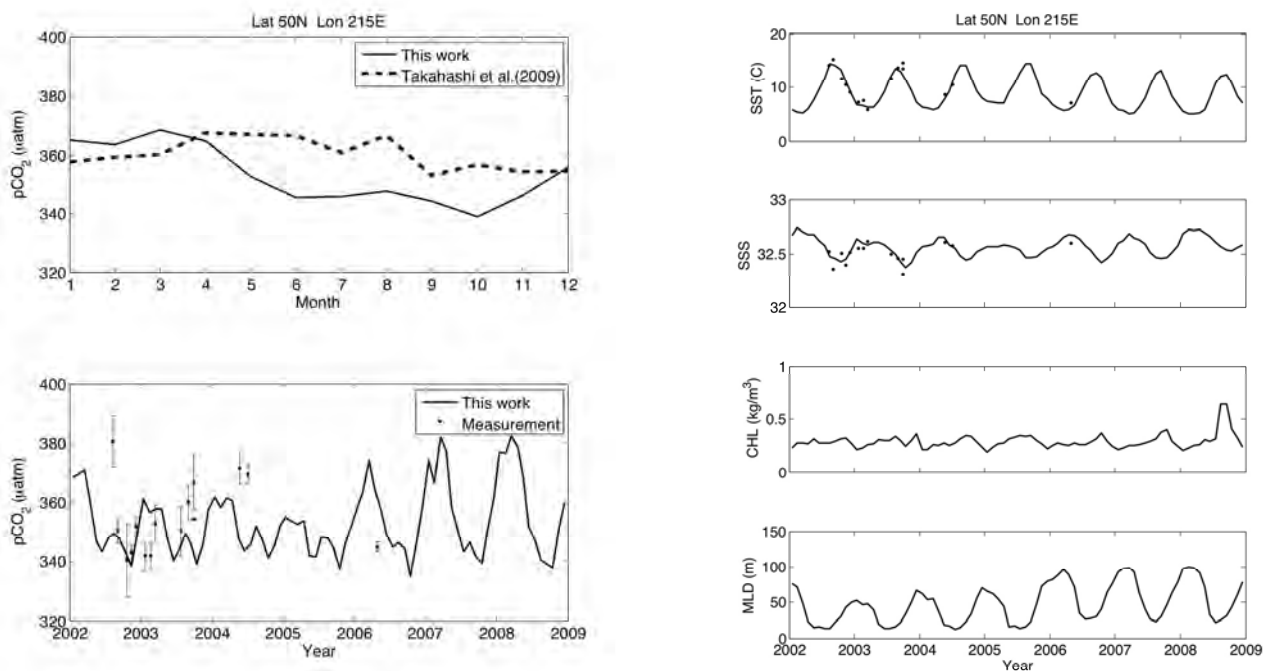


図 19 (5) 北緯 50°、西経 145° 周辺海域の pCO₂ と海洋パラメータの時系列、左上図は本研究による気候値 (2002-2008 年の平均) と Takahashi et al. (2009)²⁾ の気候値、右下図は本研究で推定された時系列変化と国環研貨物船観測による実観測値 (誤差棒は空間変動を示す)。

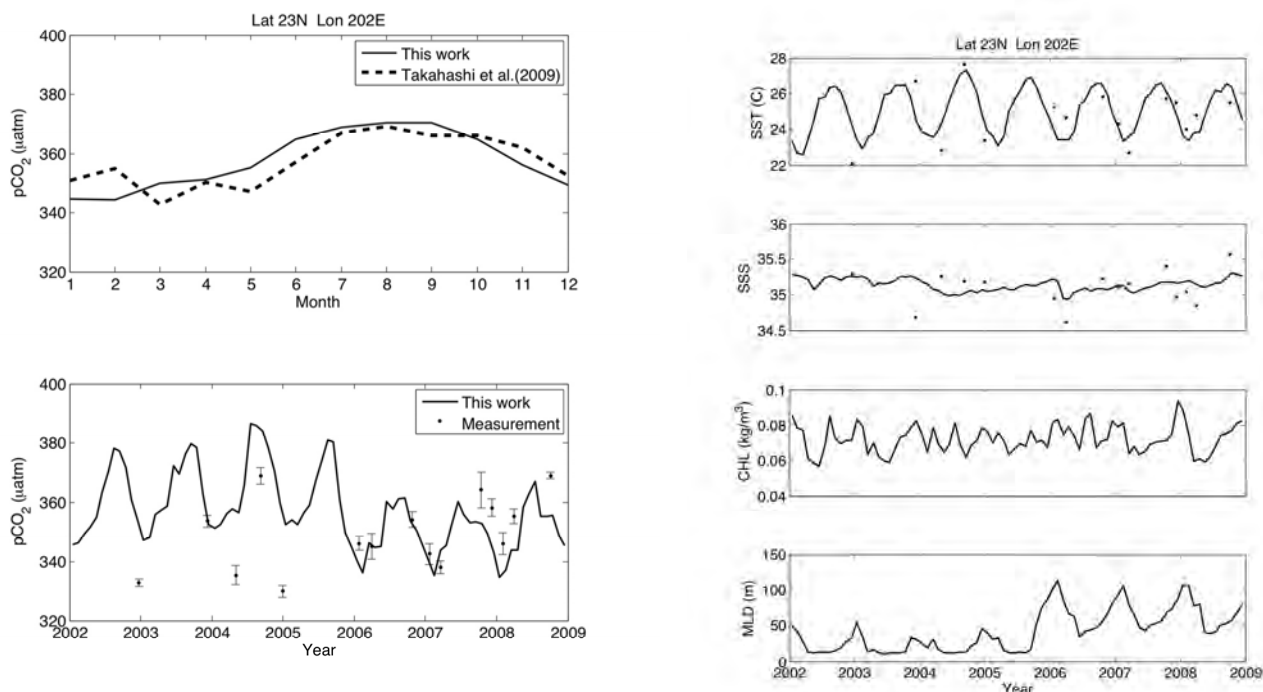


図 19 (6) 北緯 23°、西経 158° 周辺海域の pCO₂ と海洋パラメータの時系列、左上図は本研究による気候値 (2002-2008 年の平均) と Takahashi et al. (2009)²⁾ の気候値、右下図は本研究で推定された時系列変化と国環研貨物船観測による実観測値 (誤差棒は空間変動を示す)。

44°、東経 155°)と、その後長期に係留系を含む観測が継続されている定点 K2 (北緯 50°、東経 160°) の点があり、それぞれ長期観測データが蓄積されている。図 19 (3)が定点 KNOT 周辺海域の推定 pCO₂ と海洋パラメータであるが、Pyxis 号による観測は 2003 年までは多かったものの、その後は北太平洋高緯度航路を取らなくなり、実観測がなくなった。グラフの pCO₂ の誤差棒は誤差ではなく海域の空間変動性を示すもので、この海域では生物生産のパッチネスに伴う pCO₂ 空間変動が大きいことで特徴付けられるものの、ニューラルネットワークによる推定は観測値を良く再現している。北西部北太平洋亜寒帯海域では、夏の成層が強い (MLD が小さい) ことや低塩分が特徴的である。pCO₂ 季節変化は亜熱帯海域とは全く異なり、夏の生物生産により大きな低下を見せる。2005/2006 年の MLD 変動はある程度みられるものの、pCO₂ 時系列にはあまり大きな変動がみられない。同様に、KNOT の北東に位置する K2 (図 19 (4)) でも、7 年間の pCO₂ 推定でそれほど大きな変動がないが、やはり実観測は 2004 年以降ほとんど無くなった。ここでは MLD の 2005/2006 年の変動が顕著でないことも経年変動の小ささと関係しているものと思われる。

東部北太平洋高緯度海域には、カナダの海洋観測定点ステーション P があり、1980 年代から pCO₂ 観測データがある海洋定点観測のパイオニアである (図 19 (5))。ここではこれまでの観測により、pCO₂ 季節変動が北太平洋の中でも最も小さいことが知られており、夏の水温上昇による pCO₂ 上昇と生物生産による pCO₂ 低下がほとんどバランスしているためであると解析されてきた。今回のニューラルネットワークによる推定でもそのことは良く表現されていて、気候値で 20 μatm 程度の季節振幅しか示さないことは妥当である。ここでも西部海域と同様に、MLD の変動の時系列変化が 2005/2006 年を境に大きく現れた。pCO₂ はそれと良く対応して 2006 年以降季節振幅が大きくなるように変化すると推定されたが、ここでも西部北太平洋亜寒帯と同様に、2005 年以降は Pyxis 号による観測がほぼなくなってしまったので実観測値による検証は難しい。この MLD の時系列変動は、水温の変動も伴っており、2006 年以降は夏の低水温でそれまでの夏より成層が弱くなり、冬の低水温で混合が強くなっているものと考えられる。冬の pCO₂ 推定値が高まるのは混合と対応するものと考えられるが、夏の pCO₂ 推定値に経年変動が少ないことは、季節変化と同様に水温と生産の効果の打ち消しあいと考えることができるかもしれない。

最後に太平洋中央部の亜熱帯時系列観測点である HOT 点周辺 (北緯 23 度、西経 158 度) の時系列推定を図 19 (6)に示した。HOT 周辺海域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。ここでは、2005/2006 年の MLD 変化が最も強く現れている。しかしながら、クロロフィル値は 2006 年以降の大きな MLD 値とあまり対応せず、生物生産を顕著に高めるような混合現象ではないことを示しているようである。しかしながら、pCO₂ 推定は MLD に対応して季節変動性を変化させ、2006 年以降は pCO₂ 平均値が 20 μatm 程度も低下している。HOT 観測点は 1988 年以降月々観測が継続しており、pCO₂ も含む観測であるのでこの推定の検証が可能である。

5. 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 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、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、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、本研究課題として積極的にその活動に協力することができた。SOCATデータベースは、現在データ協力者間の公開がなされ研究論文への活用がなされている段階であるが、まもなく一般ユーザへの公開も行われる。SOCATデータベース作成を進めるにあたり、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行われたが、本課題のおかげで国環研データセットの品質保証作業を着実に進めることができた。

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 $p\text{CO}_2$ 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 $p\text{CO}_2$ 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(Telszewski et al., 2009¹⁰)。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 $p\text{CO}_2$ 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、 $p\text{CO}_2$ 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、北大西洋に次いで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と考えられたので、本研究課題を進めた。目的としていた海面水温、混合層深度、クロロフィルa、海面塩分の衛星観測ないし客観解析データに基づき、観測 $p\text{CO}_2$ 値によるラベル付けと学習を行ったニューラルネットワークによる、海洋表層の中規模渦の再現を含む $p\text{CO}_2$ マッピングができ、北太平洋全域に対しかなり現実的な推定ができた。他の海域にこの手法を適用すれば、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 $p\text{CO}_2$ マッピングも、数年の期間の観測値と海洋パラメータ間の学習を根拠として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。このために今後進めるべき課題は、ニューラルネットワークの学習が、どの程度の広域海洋に適応可能か、と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大量の観測データが必要であるが、検証は比較的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。

5. 引用文献

- 1) Takahashi, T., Stewart, C.S., Sweeney, C., Poisson, A., Metzl, N. et al., (2002), Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects, *Deep-Sea Res. II*, 49 1601-1622.
- 2) Takahashi, T., Sutherland, S.C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R.A. et al., (2009), Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans, *Deep-Sea Res. II*, 56 554-577 doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.009 .
- 3) Weiss, R. F., R. A. Jahnke, C. D. Keeling (1982), Seasonal effects of temperature and salinity on the partial pressure of CO₂ in seawater. *Nature*, 300, 511-513.
- 4) Feely, R. A., J. Boutin, C. E. Cosca et al. (2002), Seasonal and interannual variability of CO₂ in the equatorial Pacific. *Deep-Sea Research II*, 49, 2443-2469.
- 5) Feely, R. A., T. Takahashi, R. Wanninkhof et al. (2006), Decadal variability of the air-sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 111, doi:10.1029/2005JC003129, 2006.
- 6) Ishii, M., H. Y. Inoue, T. Midorikawa et al. (2009), Spatial variability and decadal trend of the oceanic CO₂ in the western equatorial Pacific warm/fresh water. *Deep-Sea Research II*, 56, doi:10.1016/j.dsr2.2009.01.002.
- 7) Vesanto, J., Himberg, J., Alhoniemi, E., et al. (2000) SOM Toolbox for Matlab 5., Libella Oy, Espoo, 59 pp.
- 8) Park, Y., Chon, T., Kwak, I. and Lek, S. (2004), Hierarchical community classification and assessment of aquatic ecosystems using artificial neural networks, *Sci. Total Environ.*, 327 105-122 doi:10.1016/j.scitotenv.2004.01.014.
- 9) Liu, Y., Weisberg, R. H., and Mooers, C. N. K. (2006) Performance evaluation of the self-organizing map for feature extraction, *J. Geophys. Res.*, 111, C05018, doi:10.1029/2005JC003117.
- 10) Telszewski, M., Chazottes, A., Schuster, U. et al. (2009), Estimating the monthly pCO₂ distribution in the North Atlantic using a self-organizing neural network, *Biogeosciences*, 6, 1405-1421.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表(学術誌)

- 1) Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R. A., Chipman, D. W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Sabine, C., Watson, A., Bakker, D. C. E., Schuster, U., Metzl, N., Yoshikawa-Inoue, H., Ishii, M., Midorikawa, T., Nojiri, Y., Kortzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., Olafsson, J., Arnarson, T. S., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Wong, C. S., Delille, Bates. B., N. R., and de Baar, H. J. W., Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans, *Deep-Sea Res. II*, 56, 554-577, 2009.
- 2) Takamura, T. R., Inoue, H. Y., Ishii, M., and Nojiri, Y., Seasonal and inter-annual variations in pCO₂^{sea} and air-sea CO₂ fluxes in mid-latitudes of the Western and Eastern North Pacific during 1996-2006: Recent results utilizing voluntary observation ships, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 88, 883-898, 2010.

(2) 口頭発表

- 1) A. Lenton, N. Metzl, L. Bopp, D. C. E. Bakker, A. Olsen, B. Pfeil, C. L. Sabine, R. A. Feely, R. M. Key, N. Lefèvre, Y. Nojiri, U. Schuster, V. V. S. S. Sarma, T. Takahashi, B. Tilbrook, and R. Wanninkhof, Trends in the global evolution of the ocean carbon system since 1991, 8th Int. Carbon Dioxide Conf., T1-087, Jena, Germany, Sept. 2009.
- 2) S. Nakaoka, Y. Nojiri, C. Miyazaki, H. Tsumori, and H. Mukai, Variations of oceanic pCO₂ and air-sea CO₂ flux in the North Pacific Ocean since 1995, 8th Int. Carbon Dioxide Conf., T2-059, Jena, Germany, Sept. 2009.
- 3) B. Pfeil, A. Olsen, A. Kozyr, C. Sabine, R. Feely, S. Hankin, J. Malczyk, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Lefèvre, Y. Nojiri, A. Chen, V. V. S. Sarma, D. Bakker, U. Schuster, A. Borges, R. Wanninkhof, K. Tedesco, M. Hood, and T. Johannessen, Surface Ocean CO₂ Atlas, 8th Int. Carbon Dioxide Conf., T2-069, Jena, Germany, Sept. 2009.
- 4) Y. Nojiri, S. Nakaoka, C. Miyazaki, A. G. Dickson and Inter-comparison Participants, Indoor seawater pool inter-comparison of ocean surface pCO₂ systems developed for underway and buoy operation, PICES-2009, S8-5912, Jeju, Korea, Oct. 2009.
- 5) C. Miyazaki, S. Nakaoka, and Y. Nojiri, NIES ocean pCO₂ measurement of VOS over the Western Pacific, PICES-2009, W10-5733, Jeju, Korea, Oct. 2009.
- 6) M. Telszewski, Y. Nojiri, D. C. E. Bakker, U. Schuster, A. J. Watson, S. Nakaoka, C. Miyazaki, A. Olsen, T. Johannessen, A. Rios, A. Körtzinger, T. Steinhoff, D. Wallace, M. González-Dávila, M. Santana-Casiano, and R. Wanninkhof, Air-sea CO₂ flux in the North Atlantic and the North Pacific estimated by a neural network, 2010 Ocean Sciences Meeting, Portland, USA, Feb. 22-26, 2010.
- 7) 宮崎千尋、野尻幸宏、中岡慎一郎：2010年度日本海洋学会秋季大会（2010）「西部太平洋における海洋表層CO₂分圧の変動特性」
- 8) M. Telszewski, Y. Nojiri, M. Kamachi, S. Nakaoka, C. Miyazaki：2010年度日本海洋学会秋季大会（2010）“Will the ocean keep soaking up our carbon?”
- 9) 中岡慎一郎、野尻幸宏、津守博通、宮崎千尋、向井人史：2010年度日本海洋学会秋季大会（2010）「北太平洋における大気海洋間CO₂交換量の年々変動とその要因西部太平洋における海洋表層CO₂分圧の変動特性」
- 10) Y. Nojiri, Good on board practice for ocean carbon measurement and efforts toward international collaboration, PICES-2010, S3-6768 (invited), Portland, USA, Oct. 2010.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(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CO₂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、本課題で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。国内では、国環研の他、JAMSTEC、気象庁/気象研などに海洋CO₂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CO₂の専門家を有する公的機関の果たすべき役割であろう。