

B-9 太平洋域の人為起源二酸化炭素の海洋吸収量解明に関する研究

(2) 太平洋の海洋中深層データ解析による長期的二酸化炭素吸収量の解明に関する研究

独立行政法人産業技術総合研究所

環境管理技術研究部門 地球環境評価研究グループ	鶴島修夫・原田晃
国土交通省気象庁気象研究所 地球化学研究部	石井雅男
北海道大学大学院 地球環境科学研究科	渡辺豊

平成13～17年度合計予算額	78,691千円
(うち、平成17年度予算額	18,841千円
※上記の予算額には、間接経費18,168千円を含む)	

〔要旨〕海洋中深層までの二酸化炭素吸収速度とその変動要因を探るため、太平洋域における海水中二酸化炭素と関連する生物化学パラメータについて既存データの集積と時系列データ解析手法の開発・応用を行った。トレーサデータを利用した大気から海洋への人為起源二酸化炭素蓄積速度の解析法を用いて、太平洋スケールにおける人為起源二酸化炭素の蓄積速度の時空間分布マップを作成した。その結果、北太平洋全体としては1990年代平均で、 $0.54 \pm 0.01 \text{ Pg C / year}$ ($\text{Pg} = 10^{15} \text{ g}$)、また、南太平洋では $0.78 \pm 0.02 \text{ Pg C / year}$ の人為起源二酸化炭素を吸収しており、太平洋全体として全海洋の人為起源二酸化炭素の約6割を吸収していることが明らかになった。次に、1970年代以降の北太平洋の二酸化炭素統合データベースを作成した。西部北太平洋定点、東経165度の南北断面、北緯47度東西断面において、海洋中深層における二酸化炭素増加速度を見積もり、約1000m深までの二酸化炭素増加が実測データから検出された。二酸化炭素濃度の観測値そのものの変動は大気との平衡計算により予想される増加速度より3倍程度大きく、海洋の非定常状態が海洋炭素循環にも影響を及ぼしていることが示唆された。太平洋赤道域の海洋表層において、全炭酸濃度や CO_2 分圧がともに大気 CO_2 濃度の増加に応じて増加していることを2種類の方法で評価し、太平洋赤道域の表層にも人為起源 CO_2 が蓄積されていることを明らかにした。エルニーニョ南方振動にともなって、この海域から大気への CO_2 放出量が 0.1 Pg C / yr から 0.9 Pg C / yr の範囲で大きく変動したことを推定した。同期間に実施した赤道域の全炭酸濃度の各層観測結果に基づいて、中部赤道域の温度躍層付近でも、全炭酸濃度が同様に増加していることを明らかにした。これらのことから、北太平洋西部亜熱帯域¹²⁾やオーストラリア南方の南大洋¹³⁾だけでなく、太平洋赤道域でも、他の海域とほぼ同じ速度で全炭酸濃度が増加していることを明らかにし、亜熱帯循環における亜表層の南北循環が CO_2 の輸送に重要な役割を担っていると推定できた。

〔キーワード〕二酸化炭素、海洋、太平洋、人為起源、吸収速度

1. はじめに

海洋の二酸化炭素吸収・蓄積量は様々な方法によって見積もられているが、いずれの方法にし

ても時系列の観測データが不十分であったため、いくつかの仮定をおく必要があった。また多くの報告は産業革命以降に海洋に蓄積された二酸化炭素の総量の議論が中心であり、現在の吸収速度とその変動に関しては知見が不足している。80年代後半から精力的な海水中の二酸化炭素濃度の測定が始まり、ようやく時系列データ解析に利用できる十数年スケールのデータセットが揃いつつあるのが現状である。また、同じく80年代後半から外洋におけるフロンなどのトレーサデータの測定も行われ、太平洋をカバーするだけのデータが得られている。本研究ではこれら過去に行われた観測データの統合解析を行う。平成16年度より、気象研究所による赤道域における定期観測結果の解析を加え、太平洋域の広範囲にわたる解析を行った。

2. 研究目的

海洋中深層の炭素濃度を正確に測定し、経年的に比較すると、その蓄積速度から、長期間平均の海洋の二酸化炭素吸収量が見積もられる。本研究では、国内外の太平洋の炭酸系物質の時系列データおよび化学トレーサデータの統合解析を行うことにより、人為起源二酸化炭素の蓄積速度の時空間分布を解明する。太平洋赤道域については1990年代のはじめから2003年までの10年以上の期間にわたって、海洋表層と中層で観測された全炭酸濃度のデータに基づき、この海域における全炭酸濃度の空間分布と、その月変化・年々変化を推定、全炭酸濃度や海水CO₂分圧の増加傾向の有無を評価し、人為起源CO₂の蓄積状況を把握する。同時に、海洋二酸化炭素の動態に関わる生物化学パラメータの時系列解析を行い、海洋変動に伴う生物生産や温暖化関連物質の経年的な動態変化を明らかにする。

3. 研究方法

3（1）化学トレーサデータ解析による海洋二酸化炭素蓄積速度推定

国内外の北太平洋中深層のフロンなどの化学トレーサデータを太平洋スケールで収集した。フロンによる水塊の年齢推定値より、各年代における二酸化炭素の平衡濃度をあてはめ、時間経過による二酸化炭素の蓄積量変化を求めた。これより、太平洋スケールにおける人為起源二酸化炭素の蓄積速度の時空間分布マップを作成した。

3（2）北太平洋域海洋二酸化炭素観測データベースによる経年変化解析

北太平洋で過去行われてきた観測における、二酸化炭素および関連する化学物質データを収集、実測二酸化炭素データのデータベースを作成した。各種時系列観測データを用いた人為起源二酸化炭素吸収速度の評価法を検討、西部北太平洋における解析を行った。まず時系列データの豊富な西部北太平洋亜寒帯域定点の時系列解析を行い、推定した人為起源二酸化炭素の吸収(U_{anth})が鈍化し、人為起源二酸化炭素以外の海洋の二酸化炭素(Unon)が急激に増加していることを炭酸系物質で定量的に検証した。より広範囲な影響を明らかにするために、北太平洋域における過去10年の全炭酸量と酸素データの定線時系列解析を行った。

3（3）太平洋赤道域における海洋二酸化炭素データ時系列解析

気象研究所が1994年から2003年の9年間に気象庁、海洋科学技術センター（現在の(独)海洋研究開発機構）、東京大学海洋研究所などの各機関が運航する観測船の航海に参加し、太平洋赤道域

(5°N–10°S、120°E–160°Wの海域)で実施した全炭酸濃度の航走観測データや各層観測データ(25航海、約6,000データ)のデータセットを作成した。航走観測によって取得した観測線上の高い時間密度のデータについては、航海ごとに緯度1°×経度1°のピクセルに平均化した。さらに1990年代に実施されたWorld Ocean Circulation Experiment (WOCE)や Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS)などの国際共同研究において、海外の機関が赤道域(5°N–10°S、145°E–95°W)で観測した全炭酸濃度のデータ(10航海、256観測点)¹⁾をデータセットに追加した。これらすべての全炭酸濃度の測定には、1980年代にK.Johnsonらが開発した電量滴定法による測定法²⁾と、A.Dicksonらが開発した標準物質³⁾が使用されており、10年スケールの長期変動の解析に必要な $\pm 1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ほどの極めて高い精度のデータが取得されている。

次に、表面付近のデータについては、全炭酸濃度と塩分(S)に基づいて、赤道域の中部から東部に広がりエルニーニョ南方振動などに伴ってその分布が大きく変化する低温・高塩分の発散域のデータと、赤道域西部や発散域の南北に広がる高温・低塩分の暖水域・北赤道海流域・南半球亜熱帯水域(以下、暖水域と総称する)のデータに分別した。具体的には $S > 34.6$ の海域を発散域とみなし、 $S \leq 34.6$ の海域を暖水域とした。ただし、5°Sより南については、 $S > 35.4$ だった場合、南太平洋亜熱帯域の高塩分水の影響を受けているとみなして暖水域のデータに含めた。また、150°Eより西については、塩分によらず暖水域に含めた。

表層水のCO₂分圧についても、気象研究所と気象庁が1969年から2003年の期間に観測した洋上大気と海洋表層水のデータ書式を統一し、データセットを作成した。さらに、同じ方式の装置を使用して観測が行われた新エネルギー・産業技術総合開発機構のプロジェクトNorthwest Pacific Carbon Cycle Study (NOPACCS)の観測データ⁴⁾や、1996年に北大西洋上で行われた国際比較実験⁵⁾を通じてデータの整合性が検証されているフランス・パリ大学の太平洋赤道域における観測データも収集し、データセットに追加した。データを収集した航海の総数は79、赤道域におけるデータ総数はおよそ48,000にのぼった。

これらのデータベースに基づき、

- ・発散域と暖水域それぞれについて、全炭酸濃度を水温・塩分・観測年代の関数として重回帰分析し、全炭酸濃度の長期的な増加傾向を評価した。また、
- ・重回帰分析の結果を、月ごとに作成された赤道域の表面水温・表面塩分の海洋同化データと組み合わせ、1992年から2001年の期間に、海洋表層の全炭酸濃度やCO₂分圧の分布が、季節やエルニーニョ南方振動の海況変化に応じてどう変化したか推定した。
- ・暖水域については、バリエーションの形成による成層化にともなって、窒素固定によると考えられる生物生産のために、表面付近の全炭酸濃度が顕著に減少する現象を発見したが、そうした生物生産による全炭酸濃度減少の影響を受けていないと考えられる $\sigma_t 21.5 \sim 21.8$ の表層水について、全炭酸濃度やCO₂分圧のデータを時系列的に解析し、1990年代初期以降に全炭酸濃度やCO₂分圧が増加しているのか、直接的な評価を試みた。さらに、
- ・全炭酸濃度の各層観測が比較的多く実施されてきた東経160度から西経160度の西部赤道域については、その海水の起源が南北両太平洋の亜熱帯域北部にあると考えられる温度躍層付近に着目し、各等密度面の全炭酸濃度と酸素濃度の時間変動などから、亜熱帯域における人為起源CO₂の吸収・蓄積と赤道域への輸送による全炭酸濃度の増加の有無を検討した。

3 (4) 海洋生物化学パラメータ時系列解析

人為起源二酸化炭素の吸収増加 (Uanth) の鈍化の詳細な原因を明らかにし、その海洋の炭素循環に与える影響を定量的に評価するために、北太平洋全域でのAOU変動解析、植物プランクトン・動物プランクトンの変動解析ならびに、北太平洋におけるDMSの時空間変動解析を実施した。太平洋域における過去観測データを収集し、時系列解析を行った。DMS、生物生産量などについては一般的な海洋パラメータによる推定計算アルゴリズムを開発し、各年代における濃度推定を行い、時系列解析を行った。

4. 結果・考察

4 (1) トレーサーデータを利用した人為起源二酸化炭素吸収速度の見積もり

海水中のフロンなどトレーサー濃度分布を利用した人為起源二酸化炭素の吸収見積法を開発し、太平洋全域における解析を行った。その結果、北太平洋では最も人為起源二酸化炭素が蓄積されている海域は日本沿岸の西部海域で $8 \text{ gC/m}^2/\text{year}$ であり、南太平洋では南極周辺部が $12 \text{ gC/m}^2/\text{year}$ 以上であることが分かった (図1)。さらに、太平洋全域積算での大気から海洋への人為起源二酸化炭素の吸収速度を求めた。1990年代平均でみると、北太平洋では $0.54 \pm 0.01 \text{ PgC/year}$ ($\text{Pg} = 10^{15} \text{ g}$)、南太平洋では $0.78 \pm 0.02 \text{ PgC/year}$ の人為起源二酸化炭素を吸収しており、太平洋全体と

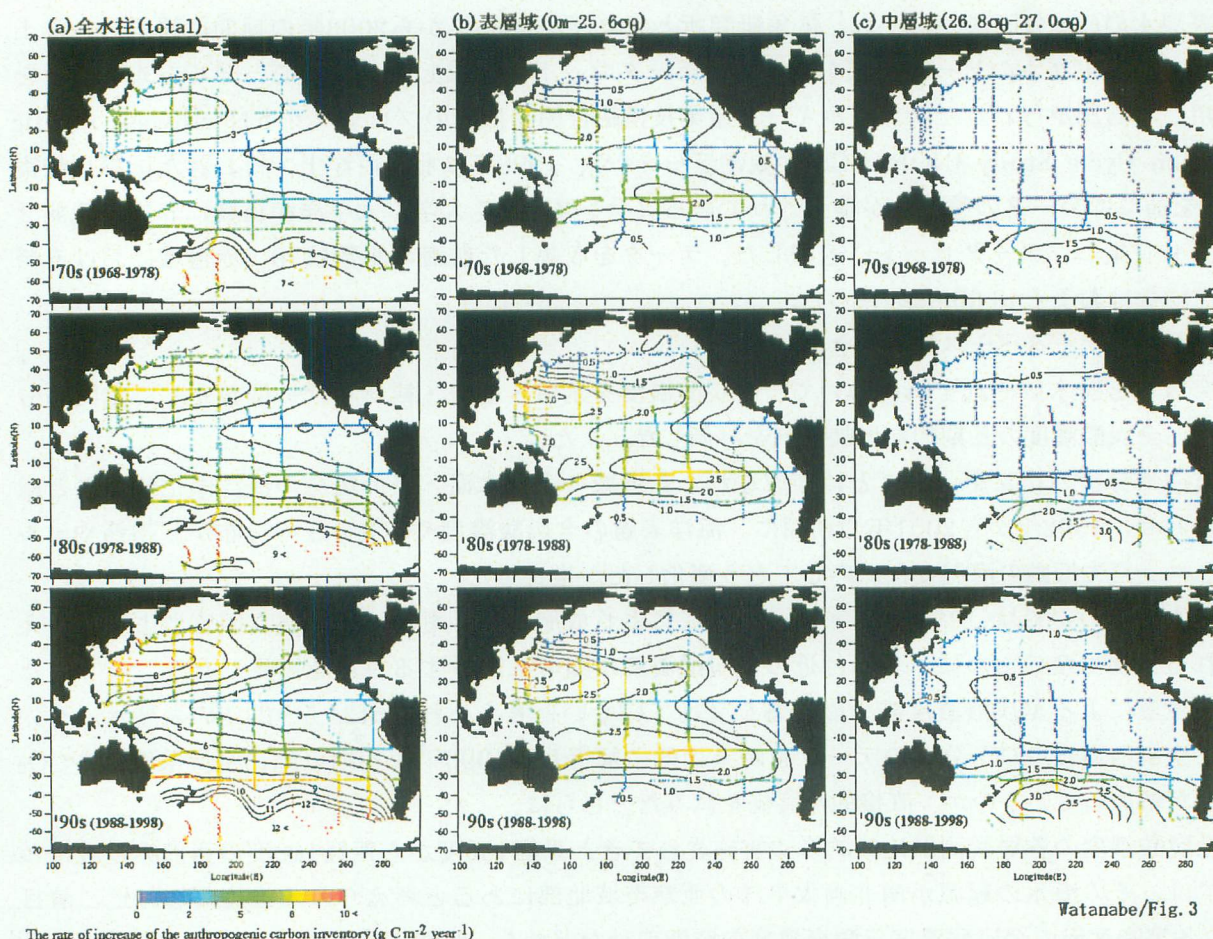


図1 太平洋における人為起源二酸化炭素蓄積速度の時空間分布 ($\text{gC/m}^2/\text{year}$) (海水の動態が時間的に定常状態にあると仮定)。(a)表層水 (b)中深層水

してはモデル計算から期待される全海洋の人為起源二酸化炭素の約6割を吸収していることを明らかにした(図2)。これらの結果は海水の動態が時間的に定常状態であることを仮定しており、実際の海洋でどのような変化が起こっているのか、実測データで検証する必要がある。

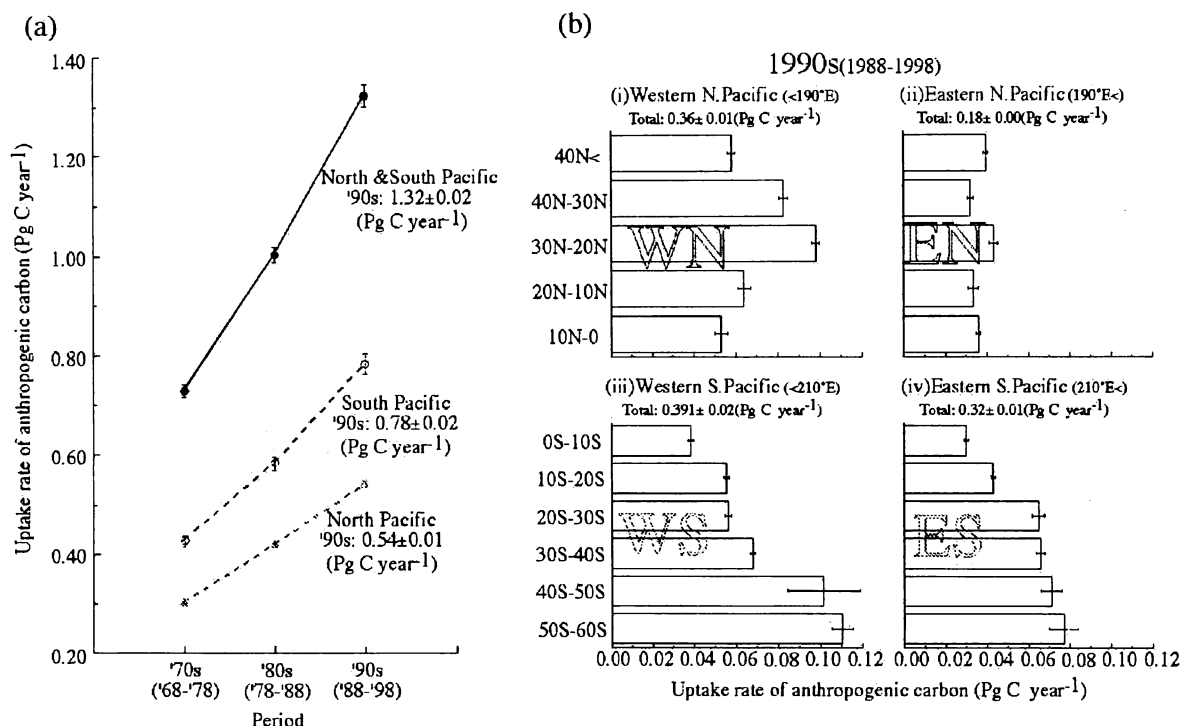


図2 太平洋における人為起源二酸化炭素蓄積速度の時空間分布(PgC/year)。(海水の動態が時間的に定常状態にあると仮定)。(a)太平洋全体、北太平洋、南太平洋の時間変化 (b)1990年代の平均の海域毎の値

4 (2) 二酸化炭素関連データの時系列解析による検証

1970年代以降の北太平洋の二酸化炭素データを収集し、統合データベースを作成した。主にホームページで公開されているデータをダウンロードし、データの抽出を行った。またテキストベースの報告書からもデータを抽出し、デジタルデータとした。データのソースはCDIAC, GLODAP, GEOSECCS, 北星丸, NOAA-PMEL, KNOT, SAGE, WEST-COSMIC, NOPACCSなどの各種プロジェクトおよびデータベースである。約3000ステーション、約10万点のデータを収集した(図3)。抽出したのは水温、塩分、溶存酸素、全炭酸、アルカリ度、リン酸塩、硝酸塩、ケイ酸塩の各種データである。収集したデータについて

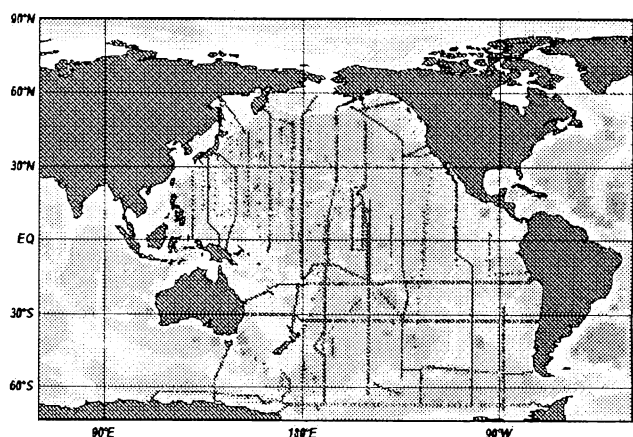


図3 全データ収集測点図

て、それぞれインベントリーデータも作成した。各データにはデータ提出者のつけたフラグも付けている。

まず、比較的密度の高いデータセットが存在する定点時系列データについて、解析を行った。北太平洋亜寒帯海域定点 (KNOT: 北緯44度、東経155度) における過去10年の全炭酸量と酸素の定点時系列データを等密度面上に並べて人為起源二酸化炭素の吸収速度 (U_{anth}) と非人為起源二酸化炭素吸収速度 (U_{non}) の変化を評価した (図4)。その結果、 U_{anth} は $0.6 \pm 0.1 \mu\text{mol/kg/y}$ の増加傾向を、 U_{non} は $1.4 \pm 0.7 \mu\text{mol/kg/y}$ の増加傾向を示し、現在、約1:2であることを明らかにした。このことは、海洋表層と深層との混合弱化に伴う U_{anth} および U_{non} の変化による二酸化炭素の吸収の見かけ上の総量としては、少なくとも北太平洋においては増加しており、温暖化に対する負のフィードバック効果が示唆された。

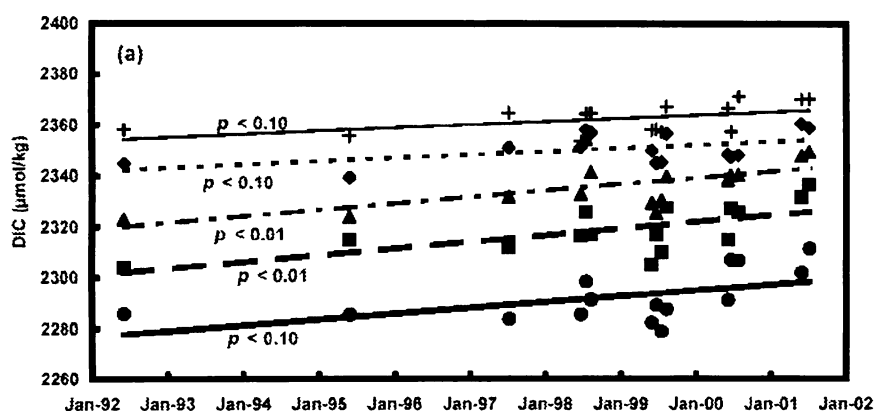


図4 北太平洋亜寒帯海域(44N, 155E)における全炭酸量の時間変化。下の線から密度面、26.9, 27.0, 27.1, 27.2, 27.3 の変化

次に、比較的時系列データの多い西部北太平洋の東経165度断面における実測データの比較により、二酸化炭素増加速度を見積もった。等密度面における全炭酸濃度を線形内挿により求め、1987年、1992年、2000年のデータを比較、検討を行った (図5)。3000m以深の深層水では栄養塩や溶存酸素の時系列変化が小さく、また現時点では人為期限の二酸化炭素の溶入が物理的にほとんど起こらないと考えられる。すなわち、密度面27.8 (4000–5000m相当) ではほとんど全炭酸濃度の変化が無いはずである。1992年と2000年のデータは密度面27.8で良く一致しているのに対し、1987年のデータについては大きくずれていることがわかる。クーロメータを用いた電量滴定による高精度な測定と参照物質の配布は主に90年代以降に行われてきており、それ以前のデータは本課題のような時系列解析に用いるにはクオリティチェックが十分ではない。そのため、上記のような大きなずれが生じたと考えられる。数 $10 \mu\text{mol/kg}$ におよぶ大きな系統誤差は補正が難しいため、本課題では1990年代以降の参照物質による検定を経たデータを利用することとした。

生データによる系統誤差を補正するため、密度に対する濃度分布の回帰式を、データ量が多い1992年のデータについて作成し、2000年のデータと比較、2500m以深の差異を平均して補正值とした。この結果、最大で $10 \mu\text{mol/kg}$ 程度の系統誤差が発生していることが分かった。そこで、深層水中ではこれほど大きく全炭酸濃度が増加することは無く、またスタンダード測定は通常一測点毎に行っていることを鑑み、一測点毎の補正を行った。上記補正を行い、全炭酸濃度の増加速度を計算すると、緯度的な分布は補正前とそれほど変わらず、深度500m前後では $-1 \sim 7 \mu\text{mol/kg/yr}$

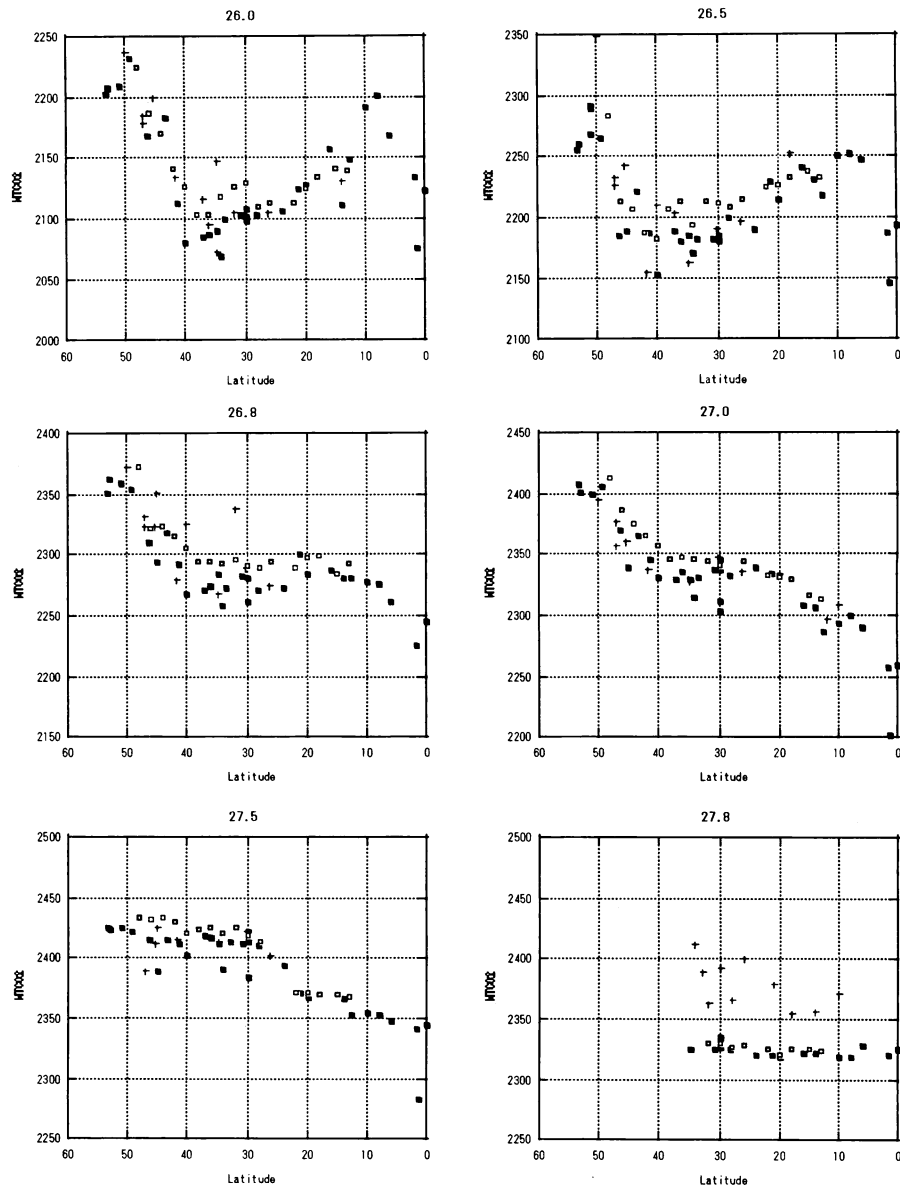


図5 東経165度線の各密度面上における二酸化炭素分布の時系列変化。横軸は北緯。縦軸が二酸化炭素濃度（塩分35規格化）。グラフ上の数字が密度(σ_θ)、(+ 1980年代、■ 1990年代、□ 2000年代)。

とばらつき、中高緯度に大きな増加がみられる事が分かった（図6）。これは見かけの酸素消費量(AOU)の分布ともよく一致しており、少なくともここ数十年のスケールで海洋環境が定常状態ではないことが、AOUのみならず、二酸化炭素の分布にも大きく影響を与えていることが改めて示唆された。さらに、これらのデータを元に、AOUの変動分を差し引いた全炭酸濃度の変化を求めた。AOUの変動は大きくは有機物の分解で起こるので、海洋の平均的なAOU/全炭酸の比として170/117

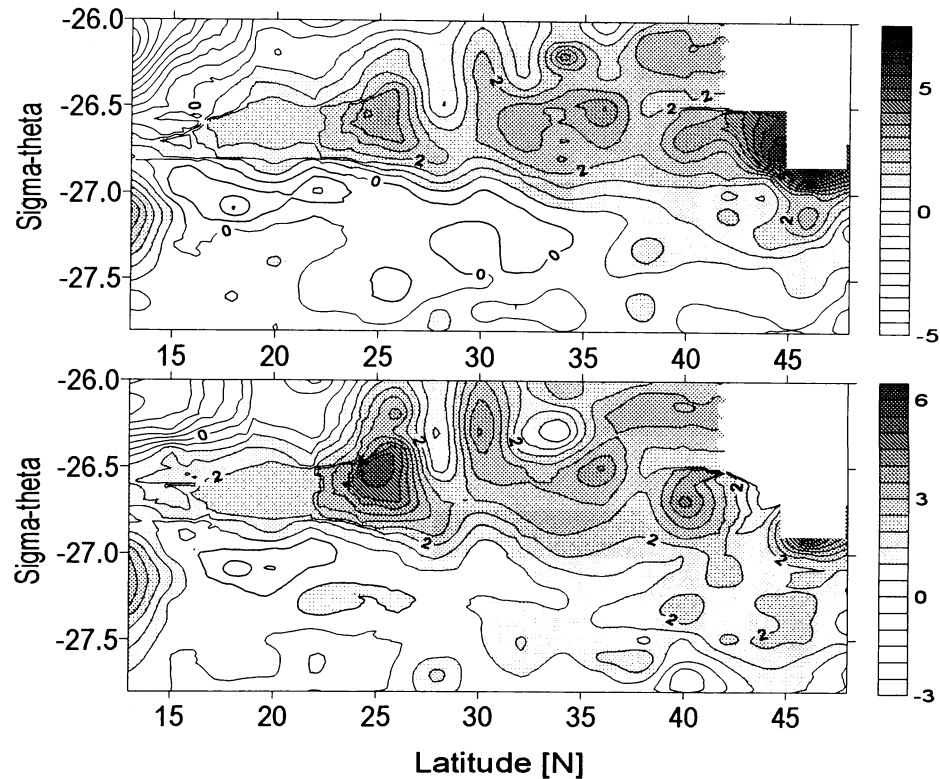


図6 東経165度の南北断面におけるAOU（酸素消費量、上図）と二酸化炭素（全炭酸、下図）の増加速度($\mu\text{mol/kg/yr}$)。縦軸は海水の密度の指標で約5000 mまでの深度に相当する。色は1992年から2000年までの間に増加があったことを示す。

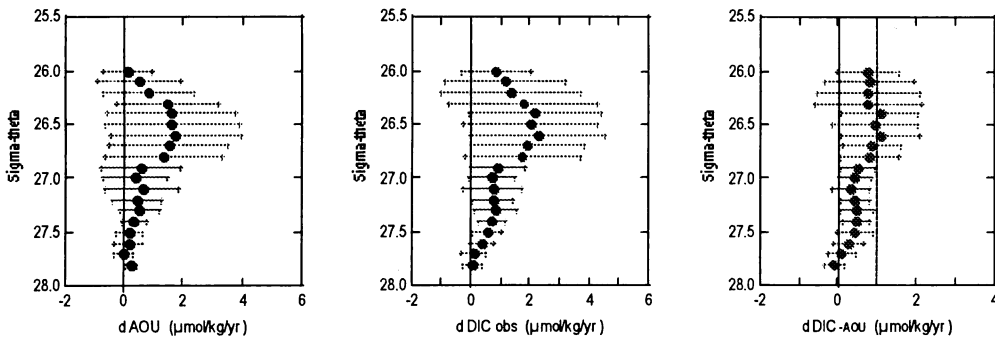


図7 各密度面上で平均した東経165度の南北断面におけるAOU（酸素消費量、左図）と二酸化炭素（全炭酸、中図）の増加速度($\mu\text{mol/kg/yr}$)。右図はAOUの変動に伴う全炭酸増加を差し引いた値。縦軸は海水の密度の指標で約5000 mまでの深度に相当する。

を用い、AOUの変動分に係数として掛け、全炭酸変動分から差し引いた。これを北緯13度から50度まで等密度面上で全て平均して、東経165度線上における平均的な密度分布を求めた。その結果、AOU、全炭酸濃度の変化はそれぞれ密度面26.7付近を中心に増加のピークを示し、深層に向かって減少した。これは、前述の通り、海洋の非定常状態の反映で、これが強く現れているのが密度面26.7付近ということである。そして、AOUの変動分を差し引いた全炭酸濃度の変化は、密度面26.5付近まで約 $1.0 \mu\text{mol/kg/yr}$ 、以下深層に向かっての減少が見られた。これは人為起源の二

酸化炭素の溶入を示している。東経165度については2003年のデータを新たに入手し、同様の解析を行った。また東西比較として北緯47度線についても同様の解析を行った結果、やはり二酸化炭素とAOUの増加傾向がみられ、太平洋域全域での海洋循環の鈍化に伴い、二酸化炭素吸収能が変化している可能性があることが示唆された。

4 (3) 太平洋赤道域における海洋二酸化炭素データ時系列解析

4 (3) ①赤道域表層における全炭酸濃度・CO₂分圧と水温・塩分・観測年代の関係

赤道発散域における全炭酸濃度(NDIC; 降水・蒸発による希釈・濃縮の効果を補正するため、塩分35に規格化してある)は、観測年(Date)、表面水温(SST)、表面塩分 (SSS) の関数として、式(1)で表わすことができた。

$$\begin{aligned} \text{ndic}(\text{divergence}) = & 0.448 + 0.014y - 0.790t + 0.164s - 0.136t^2 + 0.305ts - 0.457s^2 + 0.016t^3 \\ & - 0.190t^2s + 0.319ts^2 - 0.007s^3 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、それぞれの項は次の各式で表される。

$$\text{ndic} = (\text{NDIC} - 2000) / 50, \quad y = \text{Date} - 1995.000, \quad t = (\text{SST} - 25) / 3, \quad s = (\text{SSS} - 35) / 0.5$$

暖水域についても同様に式(2)で表わすことができた。

$$\text{ndic}(\text{warm pool}) = -0.178 + 0.012y - 0.776t + 0.021s + 0.107t^2 - 0.003ts - 0.008s^2 \quad (2)$$

一方、塩分35に規格化した全アルカリ度(NTA)は、赤道域の全域においてほぼ一様な時空間分布を示し、顕著な塩分依存性も見られないことから、全域に対して水温の二次関数で近似することができ、式(3)で表すことができた。

$$\text{Nta} = 6.396 - 0.053t + 0.015t^2 \quad (\text{nta} = (\text{NTA} - 2000) / 50) \quad (3)$$

これらの重回帰式からの各データの残差の標準偏差は、NDICが発散域で6.8 μmol/kg、暖水域で6.6 μmol kg⁻¹、NTAが4.0 μmol kg⁻¹あり、NDICが1950μmol/kgから2070μmol/kgの範囲で大きく変動する発散域では、相対誤差5.7%でその濃度を推定することができた。また(1)式と(2)式から、発散域と暖水域では、1990年から2003年までの期間に、全炭酸濃度がそれぞれ毎年+0.7±0.1 μmol/kgと+0.6±0.1 μmol/kgの平均速度で増加していると推定できた。

4 (3) ②赤道域表層における全炭酸濃度とCO₂分圧の分布・変動の推定

4 (3) ①に記した赤道域における全炭酸濃度や全アルカリ度と水温・塩分・観測年の関係を、気象研究所海洋研究部が開発している月ごとの水温・塩分分布の海洋同化データ⁶⁾と組み合わせることによって、太平洋赤道域全域の海洋表層において、1992年初めから2001年末までの10年間に全炭酸濃度や全アルカリ度分布がどう変動したか評価した(図8)。その結果、1997-98年に発生

し20世紀最大とされるエルニーニョ期には、全炭酸濃度の高い海域が赤道域からほぼ消失したのに対し、その後に発生したラニーニャ期には、全炭酸濃度の高い海域が160°E付近の西部赤道域にまで広がっていた様子など、スナップショットの観測ではある程度明らかになっていた状況を、時空間的に連続して評価することができた。

さらに、上で評価した全炭酸濃度・全アルカリ度や、海洋同化データの水温・塩分の時空間変化の推定値から、海洋表層のCO₂分圧の時空間変化を計算し、さらに赤道域における大気CO₂濃度のデータ⁷⁾や、米国 National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Researchの再解析による風速データ⁸⁾とCO₂交換係数⁹⁾を利用して、大気・海洋間のCO₂交換速度の時空間分布を評価した。その結果、発散域は大気への極めて強いCO₂放出域、暖水域は弱い放出域であり、太平洋赤道域全域からの総放出量は、1992年から2001年までの10年間に、0.1PgC/yr~0.9PgC/yrの範囲で大きく変動し、大気CO₂濃度の増加速度の年々変化にも影響を及ぼしていたと推定できた。

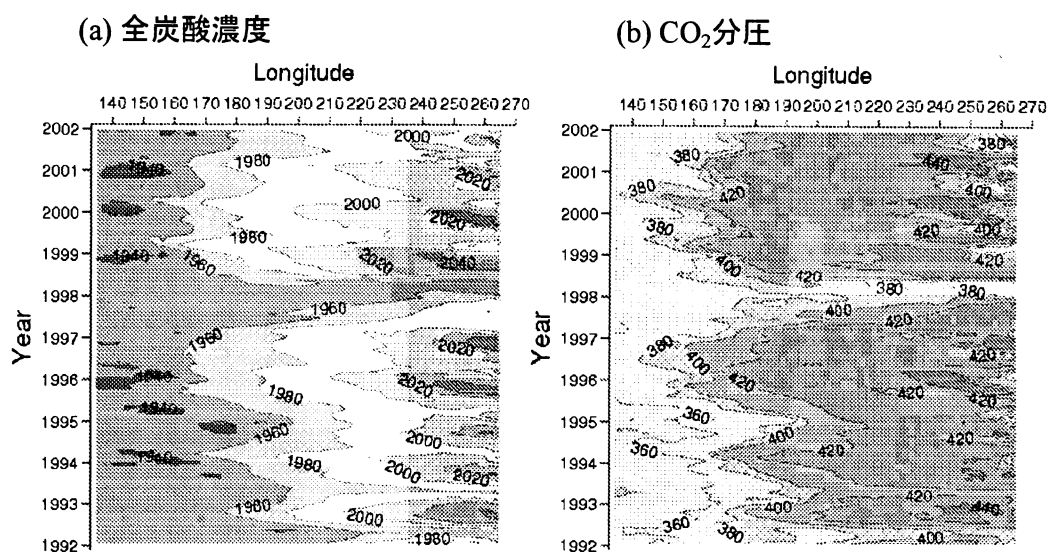


図8 太平洋の赤道域における(a)全炭酸濃度と(b)海水CO₂分圧の時間-経度図

4 (3) ③暖水域における全炭酸濃度とCO₂分圧の増加傾向の直接的評価

全炭酸濃度とCO₂分圧のデータセットのうち、暖水域のデータに注目し、まずはこの海域における全炭酸濃度や海水CO₂分圧の水平分布の特徴を考察した。全炭酸濃度の分布と海洋物理構造の關係に着目して比較した結果、バリエイヤー（表層の等温層内にあって、塩分だけが鉛直的に増加しているため、密度成層している層¹⁰⁾）が混合層下で発達すると、表層では水温が上昇して海水密度が低下し、同時に、全炭酸濃度も低下する傾向のあることが分かった。さらに、そうした海域では、硝酸塩は完全に枯渇していたが、全炭酸濃度の低下とリン酸塩濃度の低下の比は、レッドフィールド比（生物生産に伴う主要な生元素の利用比率）にほぼひと等しかった。これらの

ことから、バリエイヤー上における全炭酸濃度低下の原因は、著しく成層化が進んだ海洋表層内で、窒素固定による生物生産（二酸化炭素固定）が顕在化するためと推定できた。

次に、バリエイヤー上の低密度水内で顕在化する局所的な生物生産の影響や、比較的低温・高塩分で高密度の赤道発散水の影響を排除し、暖水域内の平均的な長期変動を評価するために、海水密度 $21.5\sigma_t \sim 21.8\sigma_t$ の中間的な密度の表層水だけに注目し、全炭酸濃度と CO_2 分圧の長期変動傾向を評価した。その結果、西部赤道域の暖水域では、1992年から2003年までに、全炭酸濃度が $+1.0 \pm 0.4 \mu\text{mol/kg/yr}$ 、 CO_2 分圧が $+1.2 \pm 0.7 \mu\text{atm/yr}$ の平均速度で増加したことが分かった（図9）。全炭酸濃度の増加速度は(1)で重回帰分析によって評価した結果に比べて速いものの、両者の間に統計的に有意な差はなかった。また、海水 CO_2 分圧の増加速度は、同期間の大気 CO_2 分圧の増加速度（ $+1.6 \mu\text{atm/yr}$ ）に比べてやや低いが、やはり統計的に有意な差は検出されなかった。

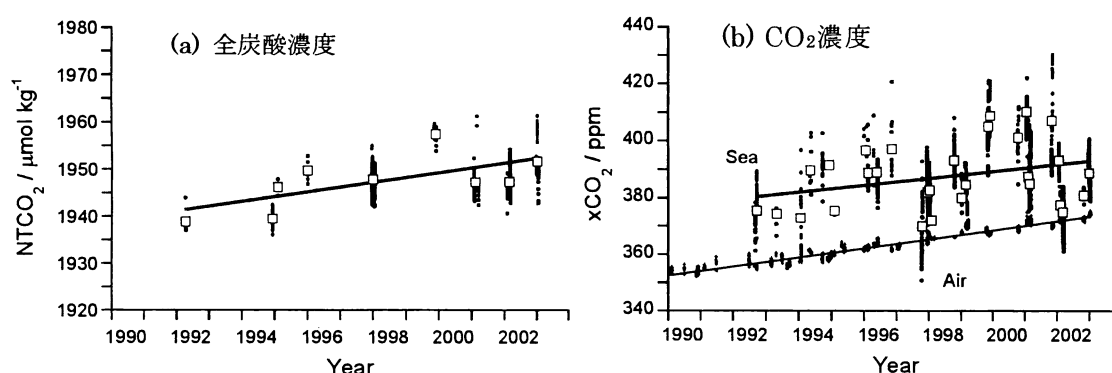


図9 赤道域の西部暖水域表層の $21.5\sigma_t \sim 21.8\sigma_t$ における(a)全炭酸濃度と(b) CO_2 濃度（ここでは分圧ではなく、表面海水と気液平衡状態にある空気中の CO_2 濃度を示してある）の増加傾向

4 (3) ④温度躍層における全炭酸濃度の増加傾向

1990年以降に全炭酸濃度の測定が行われた赤道域の各層観測点の経度－時間分布を図10に示す。1990年代前半には、WOCEやJGOFSなどの国際共同研究によって、東西方向の空間密度は決して高くないものの赤道域のほぼ全域で全炭酸濃度の各層観測が行われている。また、1994年以降には、気象研と海洋科学技術センターの共同研究によって、おもに東経145度から西経160度の西部赤道域で、東西方向に比較的密度の高い観測が行われており、1997年末からはほぼ年に一回の観測が行われてきた。その結果、東経160度から西経160度の海域では、全炭酸濃度の各層観測のデータが比較的多く収集されている。したがって、ここでは、東経160度から西経160度の海域を対象として、温度躍層付近における全炭酸濃度の経年変化の解析を試みた。

図11には、対象海域における塩分35に規格化した全炭酸濃度・全アルカリ度とポテンシャル密度の関係を示した。温度躍層（水深100m～200m付近、水温 $16^\circ\text{C} \sim 22^\circ\text{C}$ 付近で、ポテンシャル密度 $24.5 \sim 25.8$ 付近）では、塩分35に規格化した全アルカリ度が表面付近と等しく、ほぼ一定の値となっている。赤道域から亜熱帯域にかけての広い海域では、塩分35に規格化した表面水の全アルカリ度が一定で、図4に示した値（ $2300 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ）と等しい¹¹⁾ことから、対象海域の温度躍層の海水は、亜熱帯域北部の表層に起源を發し、亜熱帯循環とその南北輸送を通じて、赤道域に輸送

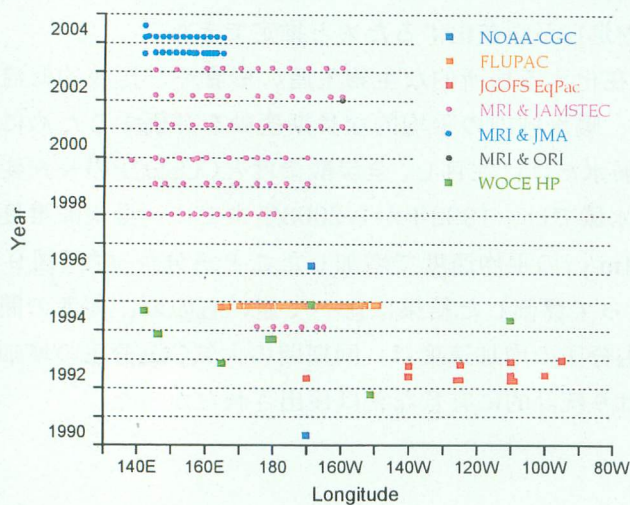


図10 赤道域における全炭酸濃度の
各層観測点の経度-時間分布

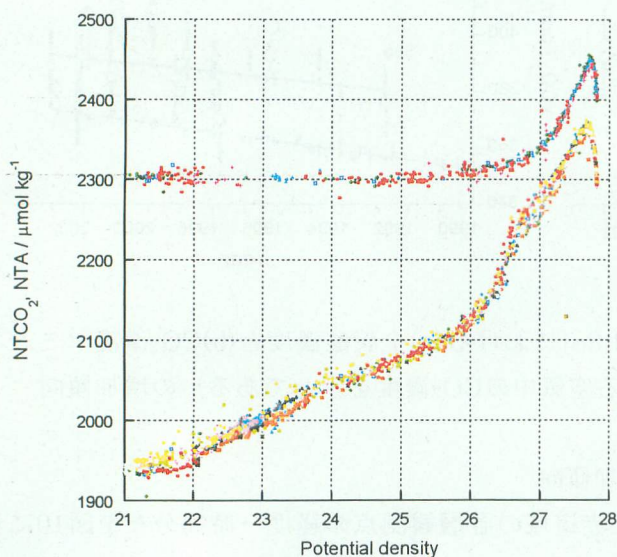


図11 赤道域における塩分35に規格
化した全炭酸濃度・全アルカリ度と
ポテンシャル密度の関係

されてきたと考えられる。

図12には、密度24.5～25.8における、塩分35に規格化した全炭酸濃度(NTCO_2)、見かけの酸素消費濃度（その海水の水温・塩分における飽和酸素濃度－観測された酸素濃度; AOU ）、これらから評価した水塊形成時の塩分35に規格化した全炭酸濃度($\text{prefNTCO}_2 = \text{NTCO}_2 - \text{AOU} \times 117/170$)それぞれの、1992年のデータ（JGOFSのデータ）からの偏差の平均値を示した。図に示した各データのエラーバーは、同一時期における密度や領域内の場所によるデータのばらつき（標準偏差）を示している。

図12に見られるとおり、 NTCO_2 については、1994年から1999年の値が低く見えるが、有意ではなかった。 AOU は、1990年の値が低い傾向にあったが、それ以外の年については、やはり有意な長期変化の傾向は見られなかった。これらに対して、 NTCO_2 の空間変動と AOU の空間変動がある程度相関しているために、 prefNTCO_2 の空間変動は NTCO_2 の空間変動より小さくなっていた。そして、 prefNTCO_2 では、1992年から2004年にかけて顕著な増加が検出された。 prefNTCO_2 の増加

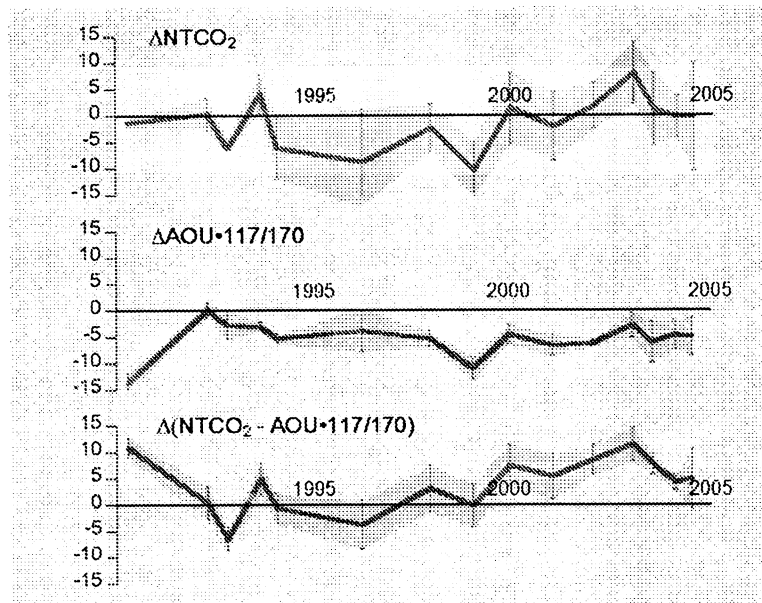


図12 密度24.5~25.8における NTCO_2 、 AOU 、 prefNTCO_2 の、1992年のデータ（JGOFSのデータ）からの偏差の平均値

は、海洋における人為起源 CO_2 蓄積に対応すると考えられるが、東経160度から西経160度の温度躍層付近におけるその平均増加速度は $+1.0 \pm 0.3 \mu\text{mol/kg/yr}$ で、往々にしてその上層に広がる暖水域の表面水における NTCO_2 の増加速度とよく一致していた。

②で評価したように、暖水域は一般に風が弱く、海面の擾乱が小さいため、大気・海洋間の CO_2 交換速度は極めて低い。むしろ、①③で評価した赤道域の湧昇域・暖水域の表面付近や、④で評価した西部赤道域の温度躍層付近における CO_2 の増加傾向から、この海域における全炭酸濃度や CO_2 分圧の増加は、主に移流によって他の海域から輸送されてきた人為起源 CO_2 に起因する可能性が高いと考えられる。具体的には、南北太平洋それぞれの亜熱帯域の高緯度域で吸収された CO_2 が、混合層下の南北循環流によって赤道域の温度躍層付近に輸送され、それが、赤道湧昇や赤道域表層の水平移流・拡散によって表面へともたらされたと推定されるのである。また、このように人為起源 CO_2 を蓄積した海水は、西部赤道域からインドネシア通過流を経由して、インド洋へも輸送されていると考えられる。

4（4）海洋生物化学パラメータ時系列解析

2003年・2004年度に明らかにした人為起源二酸化炭素の吸収増加(U_{anth})の鈍化の詳細な原因を明らかにし、その海洋の炭素循環に与える影響を定量的に評価するために、北太平洋全域での AOU 変動解析、植物プランクトン・動物プランクトンの変動解析、ならびに、北太平洋における DMS の時空間変動解析を実施した。

4（4）①北太平洋全域での AOU 変動解析

太平洋における過去20年の AOU を等密度面上に並べてその変化を評価した(図13)。その結果、北太平洋の気候を決定する北太平洋中層水が占める等密度面 $26.8\text{--}27.2\sigma_\theta$ を中心に、北太平洋全域で

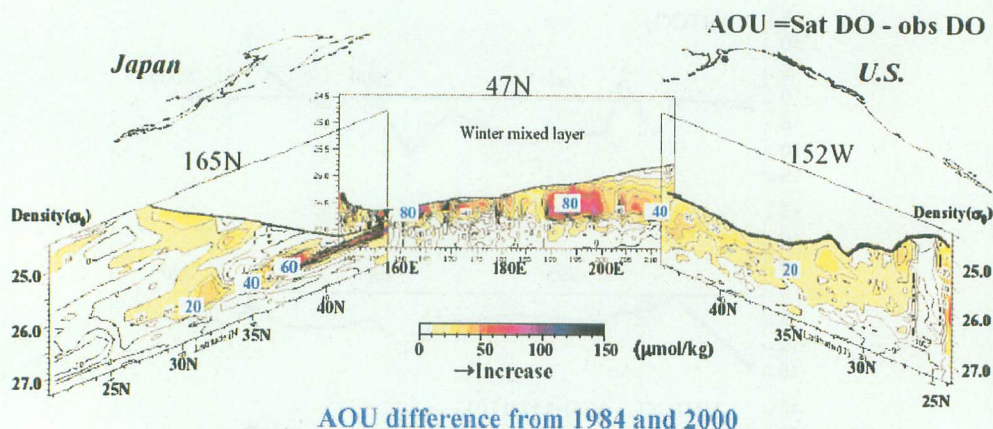


図 13 北太平洋における 1980s と 2000s の AOU 変動

20–80 $\mu\text{mol/kg}$ の AOU の増加が見られた。特に北太平洋中層水の起源といわれる西部高緯度海域においてその増加は顕著で 80 $\mu\text{mol/kg}$ あり、北太平洋中層水を中心とする海洋循環の弱体化が北太平洋全域で起こっていることを明らかにした。この AOU 変動程度は 20 年間で海洋循環が約 10% 弱まったことに匹敵することも明らかにした。

4 (4) ②植物プランクトン・動物プランクトンの変動解析

この北太平洋海洋循環の弱化を受けて、北太平洋全域での植物プランクトン・動物プランクトンの変動解析を行った。植物プランクトンの解析には、その指標となるクロロフィルデータを用いて、(a) 全クロロフィル水柱存在量に占める水深 0–75m の表層混合層でのクロロフィルの割合、ならびに (a) 全クロロフィルに占める 3μ 以上のクロロフィル量の割合を解析した。また、動物プランクトンについては、全存在量を解析に用いた。その結果、全クロロフィル水柱存在量に占める水深 0–75m の表層混合層でのクロロフィルの割合は、過去 30 年の間に年間 0.3% 減少し (図 14a)、また、全クロロフィルに占める 3μ 以上のクロロフィル量の割合は最大 1.9% の減少を示した (図 14b)。上記の結果は、植物プランクトン生産量が減少するとともに、大きなサイズから小さなサイズの植物プランクトンに種が変化していることを示していた。また、動物プランクトンについても、同様に、年間 0.04% 減少していることも明らかにした。

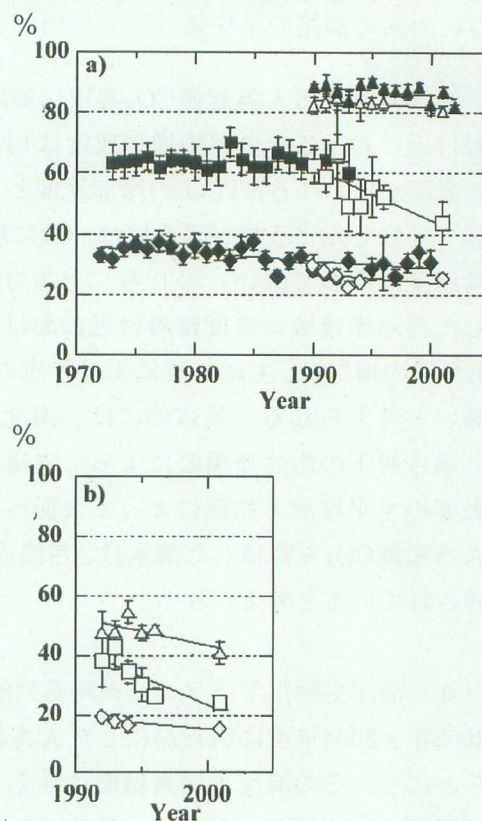


図 14 北太平洋におけるクロロフィルの時系列変動 (a) 全水柱存在量に占める 0–75m の割合 (b) 全水柱存在量に占める 3μ 以上の割合

4 (4) ③北太平洋におけるDMSの時空間変動解析

上記のこの植物プランクトンの種のシフトが、海洋表層のジメチルサルファイド(DMS)を生成する小さなサイズの植物プランクトン増加へ向かい、その結果DMS増加および大気への放出量増加を引き起こし、これが雲核となって温暖化に対して負のフィードバック効果を起こす可能性がある。しかしながら、現在、DMSデータの蓄積が不十分であるため、水温・栄養塩等で表現出来る表層DMSのアルゴリズムを開発を行った。このアルゴリズムを用いて、北太平洋における海洋表層のDMS濃度の季節的な空間変動を把握し、今後どのような変動になるのかを推定した。その結果、大型植物プランクトンのケイ藻が増殖する春の後、成層化が進む夏にDMS濃度は上昇し、また、空間的には高緯度海域においてその濃度が高くなることを明らかにした(図15)。このことは、今後温暖化が進むと北太平洋ではDMSを生成しやすい環境となることを示唆している。現在、少なくとも西部北太平洋では、年間、0.03 nMづつの濃度上昇がみられ、海洋から大気への放出量としては、1~5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{year}$ の増加があることも明らかにした。

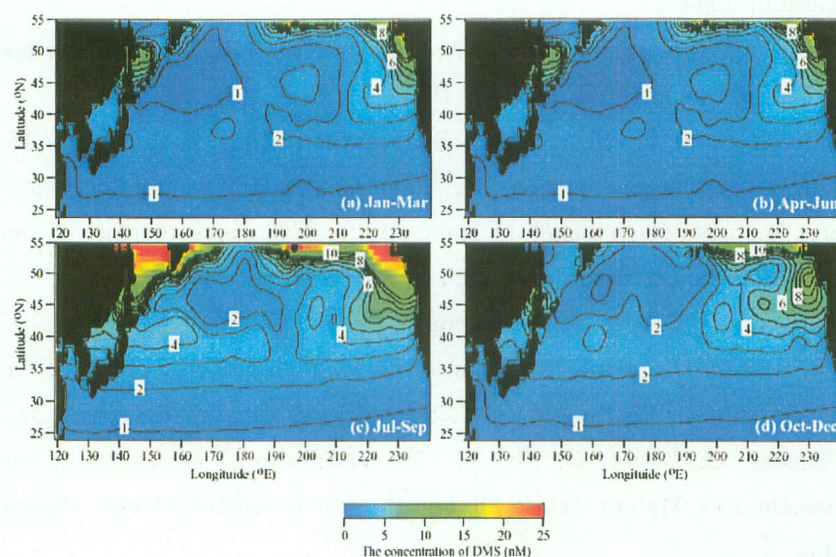


図 15 北太平洋の表層 DMS 濃度の季節変化

5. 本研究により得られた成果

海洋水塊の動態について定常状態を仮定し、トレーサー分布から人為起源の二酸化炭素吸収速度を見積もったところ、太平洋全体としてはモデル計算から期待される全海洋の人為起源二酸化炭素の約6割を吸収していることが明らかになった。これを実データで検証するため、北太平洋における中深層まで二酸化炭素の濃度および生物化学パラメータの経年変動が検出された。二酸化炭素濃度の観測値そのものの変動は大気との平衡計算により予想される増加速度より遙かに大きく、海洋循環が定常状態ではない事による影響である可能性が改めて示唆された。一方酸素消費(有機物分解)の効果を差し引いた全炭酸の増加は表層で約 $1.0 \mu\text{mol}/\text{kg}$ 程度で、1000m深まで増加が検出された。物理的な循環の変動のみならず、生物生産や生物組成の変化が起こっており、生物起源気体の生成量についても変化があることが示唆された。

太平洋赤道域の海洋表層において、全炭酸濃度やCO₂分圧がともに大気CO₂濃度の増加速度に応じた速度で増加していることを、2種類の方法で評価し、太平洋赤道域の表層にも人為起源CO₂が蓄積されていることを明らかにできた。また、エルニーニョ南方振動にともなって、1992年から2003年初めまでの間に、この海域から大気へのCO₂放出量が0.1PgC/yrから0.9PgC/yrの範囲で大きく変動したことを推定できた。同期間に実施した赤道域の全炭酸濃度の各層観測結果に基づいて、東経160度から西経160度の中部赤道域の温度躍層付近でも、全炭酸濃度が同様に増加していることを明らかにできた。これらのことから、すでに研究を行った北太平洋西部亜熱帯域¹²⁾やオーストラリア南方の南大洋¹³⁾だけでなく、太平洋赤道域でも、他の海域とほぼ同じ速度で全炭酸濃度が増加していることを明らかにでき、その増加によって、亜熱帯循環における亜表層の南北循環がCO₂の輸送に重要な役割を担っていると推定できた。

6. 引用文献

- 1) <http://cdiac.esd.ornl.gov/>
- 2) Johnson, K.M., King, A.E., Sieburth, J.McN.: Coulometric TCO₂ analyses for marine studies: an introduction. *Marine Chemistry*, 16, 61-82, 1987.
- 3) Dickson, A.G.: Work in progress at the Scripps Institution of Oceanography, USA. *Unesco technical papers in Marine Science* 60, Reference materials for oceanic carbon dioxide measurements. Reports of sub-panel on standards for CO₂ measurements of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards. Unesco Press, Paris, pp. 34-38, 1991.
- 4) <http://www.aist.go.jp/RIODB/nopaccs/welcomej.html>
- 5) Kortzinger, A., L. Mintrop, D.W. R. Wallance, K. M. Johnson, C. Neill, B. Tilbrook, B. Towler, H. Y. Inoue, M. Ishii, G. Shaffer, R. F. T. Saavedra, E. Ohtaki, E. Yamashita, A. Poisson, C. Brunet, B. Shauer, C. Goyet, G. Eisheid: The international at-sea intercomparison of fCO₂ systems during the R/V Meteor Cruise 36/1 in the North Atlantic Ocean. *Marine Chemistry*, 72, 171-192, 2000.
- 6) 気象研究所海洋研究部, 気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)解説, 気象研究所技術報告, 47, 印刷中.
- 7) <http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg.html>
- 8) <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis>
- 9) Wanninkhof, R.: Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97, 7373-7382, 1992.
- 10) Ando, K., McPhaden, M. J.: Variability of surface layer hydrography in the tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 102, 23063-23078, 1997.
- 11) Millero F. J., K. Lee, M. Roche: Distribution of alkalinity in the surface waters of the major oceans. *Marine Chemistry*, 60, 111-130, 1998.
- 12) Midorikawa, T., K. Nemoto, H. Kamiya, M. Ishii, H. Y. Inoue: Persistently strong oceanic CO₂ sink in the western subtropical North Pacific, *Geophys. Res. Letters*, 32, L05612, doi:10.1029/2004GL021952, 2005.
- 13) Inoue, H. Y., M. Ishii: Variations and trends of CO₂ in the surface seawater in the Southern

7. 国際共同研究等の状況

本研究の成果は、現在実施されている大気海洋の相互作用と気候変動予測に関する国際プロジェクト、JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study), SOLAS(Surface Ocean-Lower Atmosphere Study), CLIVAR(Climatic Variability and Predictability)などに資する知見を提供し、IPCC等の政策提言に反映されるものである。2004年6月に米国大気海洋庁のPacific Marine Environmental Laboratoryが主催して米国シアトルで開催された”Understanding North Pacific Carbon-cycle Changes: A Data Synthesis and Modeling Workshop”に参加し、赤道域における海洋CO₂データの交換を促進した。さらに、このワークショップへの参加を契機として、観測値に基づいて評価した赤道域のCO₂分圧の時空間変動の推定図をOcean Carbon-Cycle Model Intercomparison Projectの国際比較実験に提供し、赤道域における数値シミュレーション結果と比較している。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- ① Tsurushima, N., Y. Nojiri, K. Imai, and S. Watanabe: Seasonal variations of carbon dioxide system and nutrients in the surface mixed layer at station KNOT (44° N, 155° E) in subarctic western North Pacific. Deep-Sea Research II, 49, 5377-5394, 2002.
- ② Yutaka W. Watanabe, Akifumi Shimamoto and Tsuneo Ono: Comparison of Time-Dependent Tracer Ages in the Western North Pacific: Oceanic Background Levels of SF₆, CFC-11, CFC-12 and CFC-113. Journal of Oceanography, 59, 719-729, 2003.
- ③ Y. W. Watanabe, T. Ono, M. Wakita, N. Maeda and T. Gamo: Synchronous bi-decadal periodic changes of oxygen, phosphate and temperature between the Japan Sea deep water and the North Pacific intermediate water. Geophysical Research Letters, 30, 2273, doi:10.1029/2003/GL018338, 2003.
- ④ Takayuki Tanaka, Yutaka W. Watanabe, Shuichi Watanabe, and Shinichiro Noriki, Nobuo Tsurushima, Yukihiko Nojiri: Oceanic Suess effect of $\delta^{13}\text{C}$ in subpolar region: The North Pacific. Geophysical Research Letter, 30, 2159, doi:10.1029/2003GL018503, 2003.
- ⑤ M. Wakita, S. Watanabe, Y. W. Watanabe, T. Ono, N. Tsurushima and S. Tsunogai: Temporal change at Station KNOT in the Western North Pacific subpolar region. Journal of Oceanography, 61, 129-139, 2005.
- ⑥ T. Midorikawa, K. Nemoto, H. Kamiya, M. Ishii, and H. Y. Inoue: Persistently strong oceanic CO₂ sink in the western subtropical North Pacific. Geophysical Research Letter, 32, GL05612, 2005.
- ⑦ Watanabe, Y. W., H. Ishida, T. Nakano and N. Nagai: Spatiotemporal decreases of nutrients and chlorophyll-a in the western North Pacific surface mixed layer from 1971 to 2000. Journal of Oceanography, 61, 1011-1016, 2005.
- ⑧ Nakano, Y., and Y. W. Watanabe: Reconstruction of pH in the surface seawater over the North Pacific basin for all seasons using temperature and chlorophyll-a. Journal of Oceanography, 61,

673-680, 2005.

- ⑨ Nakano, Y., H. Kimoto, S. Watanabe, K. Harada and Y. W. Watanabe: Simultaneous vertical measurements of in situ pH and CO₂ in the sea using spectrophotometric profilers. *Journal of Oceanography*, 62, 71-82, 2006.

<その他誌上発表(査読なし)>

- ① Tsurushima, N., K. Imai, Y. Nojiri and P.P. Murphy (2002): KNOT: Ocean time-series program in western North Pacific completes first phase. *U.S. JGOFS News*, 11(4), 11-13, 2002.
- ② 渡辺 W. 豊、石田洋、小埜恒夫、中野俊也、永井直樹、西堀文康: 化学データからみた北太平洋における水塊形成量の減少の可能性とその影響. *月刊海洋*, 35, 13-18, 2003.
- ③ 渡辺 W. 豊: 化学トレーサーによる北太平洋亜寒帯循環変動研究. *月刊海洋号外*, 32, 62-68, 2003.
- ④ 鶴島修夫: 定点観測による海洋二酸化炭素の動態解明. *AIST Today*, 4(5), 12, 産業技術総合研究所, 2004.
- ⑤ 小池勲夫編: 地球温暖化はどこまで解明されたか—日本の科学者の貢献と今後の展望 2006—地球温暖化研究イニシャティブ第2次報告書, 地球温暖化にかかわる地球観測 2.4 海洋への吸収と放出(執筆担当: 石井雅男). 丸善, 27-36, 2006.
- ⑥ 井上元、石井雅男、中澤高清、三枝信子、山本哲: 炭素循環および温室効果ガス観測ワークショップ. *天気*, 53, 31-37, 2006.
- ⑦ 中澤高清、遠嶋康徳、石井雅男、伊藤昭彦、青木周司、井上元: 第7回二酸化炭素国際会議. *天気*, 53, 145-150, 2006.

(2) 口頭発表(学会)

- ① Y. W. Watanabe: Probability of a reduction in oceanic biological activity with decadal oscillation over the North Pacific: an influence of the weakening of the water formation from the sea surface into the ocean interior. 2002 SCOR-JOS Joint Assembly in Sapporo: JOS 2002 Fall Meeting, SCOR-JOS International Symposium and 26th SCOR General Meeting, Recent Progress in Chemical Oceanography in Japan. A1-6, Hokkaido University, Sapporo, 2002.
- ② Y. W. Watanabe: Estimate of anthropogenic CO₂ invasion to the Northern North Pacific. 2002 SCOR-JOS Joint Assembly in Sapporo: JOS 2002 Fall Meeting, SCOR-JOS International Symposium and 26th SCOR General Meeting, Recent Progress in Chemical Oceanography in Japan. B1/B2, Hokkaido University, Sapporo, 2002.
- ③ Tsurushima, N., K. Imai, Y. Nojiri, KNOT: Ocean time-series program in western North Pacific., Sapporo Workshop on North Pacific JGOFS, 2002/10/01.
- ④ Tsurushima, N., K. Imai, Y. Nojiri: Seasonal carbon cycle at station KNOT in the subarctic western North Pacific, JGOFS final open science conference, Washington, D.C., 2003/05/06.
- ⑤ Y. W. Watanabe and H. Ishida. Temporal change of water formation and biological activities during the last several decades in the western North Pacific. 2004 international symposium for Global Carbon Mapping project: Human impact and future prospect, Tsukuba, 2004/1/20.

- ⑥ 鶴島修夫、原田晃：海洋環境の変化および海洋隔離による影響評価の研究，産業技術総合研究所講演会「地球温暖化に対応する環境・エネルギー技術の研究開発」，東京，科学技術館，2004/01/23.
- ⑦ 中野善之、渡辺豊：北太平洋における水温とクロロフィルaを用いた表面海水pHの復元，日本海洋学会春季大会，つくば，2004/3/27.
- ⑧ M. Ishii, S. Saito, K. Nemoto, T. Midorikawa, H.Y. Inoue: Decadal variability of the oceanic CO₂ in the western equatorial Pacific warm pool, understanding North Pacific Carbon-cycle Changes: A Data Synthesis and Modeling Workshop, Seattle, USA, 2004.
- ⑨ M. Ishii, S. Saito, T. Kawano, K. Matsumoto, K. Nemoto, H. Kamiya, T. Midorikawa, H. Y. Inoue: Decadal trend of the oceanic CO₂ in the western equatorial Pacific warm pool, North Pacific Marine Science Organization 13th annual meeting, Honolulu, USA, 2004.
- ⑩ 鶴島 修夫，海洋観測による温暖化物質の動態解明，第2回環境研究機関連絡会成果発表会，つくば国際会議場、2004.09.22
- ⑪ N. Tsurushima, Y.W. Watanabe, Y. Nojiri, K. Harada: Temporal and spatial variation of dissolved inorganic carbon in the western North Pacific in recent years, PICES, Honolulu, USA, 2004.10.20
- ⑫ 渡辺豊、中野善之、吉成浩志、坂本愛、笠松伸江、緑川貴、小埜恒夫：北太平洋のDMS表層濃度の復元とその時系列解析の試み。2005年春日本海洋学会春期大会、東京。
- ⑬ 渡辺豊、前田亘宏、嶋本晶文、乗木新一郎：日本地球化学会2005年度年会。北太平洋亜寒帯域における生物起源粒子フラックスの長期変動。
- ⑭ 渡辺豊、前田亘宏、嶋本晶文、乗木新一郎：日本地球化学会2005年度年会。北太平洋亜寒帯域における生物起源粒子フラックスの長期変動
- ⑮ M. Ishii: 3rd Japan-EU Workshop on Climate Change Research, Yokohama, Japan, 2005. "Long-term trend of the oceanic CO₂ in the western North Pacific, in the equatorial Pacific, and in the Southern Ocean".
- ⑯ M. Ishii, S. Saito, T. Tokieda, and H.Y. Inoue: Ocean Science Meeting 2006, Honolulu, USA, 2005. "Trend of the oceanic CO₂ in the western equatorial Pacific".
- ⑰ 石井雅男、斉藤秀、緑川貴、吉川久幸：2004年度 日本海洋学会秋季大会，2004.「熱帯太平洋西部暖水域における海洋CO₂の長期変化」
- ⑱ 緑川貴、石井雅男、中野俊也、根本和宏、神谷ひとみ、中舘明、増田真次、吉川久幸：2006年度 日本海洋学会春季大会，2006.「太平洋西部赤道域におけるCO₂分圧の年々変動」
- ⑲ N. Tsurushima: Temporal variation of dissolved inorganic carbon in the western North Pacific, VERTIGO workshop, Yokohama, 2005/7/20.

(3)出願特許

なし

(4)シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

気象庁が平成17年9月に発行する「異常気象レポート」に、本研究成果である太平洋赤道域の大気・海洋CO₂フラックス変動の推定結果や、西部赤道域の暖水域におけるCO₂分圧と全炭酸濃度の増加傾向を提示し、成果の普及に努めた。IPCCレポート最新版などの政策提言に寄与するべく、成果の発信に努めた。