

B-7 北太平洋の海洋表層過程による二酸化炭素の吸収と生物生産に関する研究

(2) 海洋表層CO₂分圧と海洋パラメータの定量化に関する研究

経済産業省 産業技術総合研究所資源環境技術総合研究所

環境影響予測部	海洋環境予測研究室	原田晃、渡辺豊、青木繁明、鈴木昌弘
環境影響予測部	広域域間環境研究室	鷺見栄一、田口彰一

平成8～12年度合計予算額 52,033千円
(うち、平成12年度予算額 9,043千円)

[要旨] 北太平洋北緯15度以北における平均的な大気から海洋への二酸化炭素のフラックスを海洋表層CO₂分圧と風速から求めると0.35PgC/yrとなった。大気のCO₂濃度と大気輸送モデルから解くと0.30PgC/yrとなった。これは高橋が求めた0.45PgC/yrよりやや小さい。この精度を上げるために必要なことは冬季北太平洋北緯40度から45度付近の分圧を精度良く求めることと、沿岸域での分圧差のデータセットを作成することと考えられる。

[キーワード] 二酸化炭素、大気海洋間物質交換過程、逆問題、全球大気輸送モデル、IPCC

1. はじめに

化石燃料の燃焼に伴って発生する二酸化炭素が地球大気の温暖化をもたらすことが社会問題として認識されるようになって久しい。しかしながら大気中二酸化炭素の収支に関する知識が乏しいことは、米国科学アカデミーの答申(2001年)によって示されたように、排出削減量を国際的に合意できないひとつの大きな要因となっている。大気は化石燃料の燃焼に伴って放出される二酸化炭素のすべてを蓄積しているわけではない。例えば1990年代には、化石燃料の燃焼に伴う排出が炭素換算年間で $6.3Pg$ ($P = 10^{15}$)、大気中に残存する量は $2.9Pg$ となっている。土地利用の変化に伴い土壤に含まれている有機物が二酸化炭素として放出される量は、 $1.6Pg$ と見積もられており、差し引き $5Pg$ が海洋および陸域生態系に吸収されたと考えられる。このような全球の収支はほぼ固まりつつあるが、海洋や陸域生態系の吸収の地理的な分布に関してはよくわからないことが多い。

2. 研究目的

海洋表面を通じた二酸化炭素の流量を推定する研究は、複数の研究グループが行っている。海洋が吸収した二酸化炭素がどのような変遷をたどるかを調べる分野、海洋に含まれる二酸化炭素の分圧を観測する分野、海洋の中で二酸化炭素が輸送される過程を調べる分野など研究手法は多岐にわたるが従来は海洋の側からのアプローチが多いと思われる。一方で大気取り扱いに含まれる問題が見過ごされてきた傾向が伺われる。高橋ら(1999)は海洋表層の二酸化炭素分圧と20年前に編集された海洋上の風速データを用いた流量計算を行った。この風速データは船舶による海洋の風速の観測に基づいているが、この観測は船舶の航行する地域に限定される。

一般に船舶の航行する地域は輸送船にしろ、漁船にしろそれぞれの目的に応じて季節的に変動することが考えられるが、そのような観測に基づく風速が二酸化炭素の吸収排出の推定に適しているかどうか疑問が持たれる。ここに、海洋上10mの風速として最近編集された再解析気象データを用いる意義がある。再解析気象データは大気モデルを用いて、観測の無い部分の風速を推定している。

また、大気の全域に渡る二酸化炭素の濃度の観測は人為的な排出量の推定、陸上生態系の放出吸収(光合成による吸収、土壌の有機物の分解による放出)の推定に用いられているが、海洋の放出吸収に関しても用いることができるはずである。国際輸送モデル相互比較実験として全球的な収支に関して実施された計算を行い、北太平洋域での結果を検討した。

3. 研究方法

北半球海洋の二酸化炭素の吸収量は高橋ら(1999)の計算した見積もりがある。ここでは既に公表された推定値や観測値を元に、2つの異なるアプローチによって吸収量の推定を比較した。第一は二酸化炭素分圧差と海上風から求めた大気海洋間流量を計算する方法、第2は逆問題解法相互比較実験の枠組みでの流量の計算である。

(1) 海洋表層二酸化炭素分圧を用いた大気海洋間二酸化炭素流量の計算

① 流量の式

エチエト(Etcheto et al., 1991)によると海洋と大気の間での二酸化炭素の流量 ϕ は領域Aについては二酸化炭素の分圧の差(Δp μatm^{-1})と交換係数(K , $\text{mol m}^{-2}\text{yr}^{-1}$, μatm^{-1})を用いると

$$\phi = \int \int K \Delta p dA$$

とあらわされる。ここで交換係数 K は輸送速度 k (cm/hr)と次の関係にあるとされる

$$K = 2.89 \cdot 10^{-3} k \quad .$$

ワニンコフ(Wanninkhof, 1992)によると、海洋表面から10mの高さの長期平均した風速 u (m/sec)と輸送速度は Sc をシュミットナンバー(Sc , 運動粘性係数と分子拡散係数の比)を使うと次の関係にある

$$k = 0.39u^2 (Sc/660)^{-0.5} \quad .$$

ただし、 k の次元がcm/hrであるとはワニンコフ(92)の図6が示している。ここでは温度依存性が無視できることを使って $Sc=660$ (20C)に固定して全球分布を計算した。

② 二酸化炭素の分圧の差

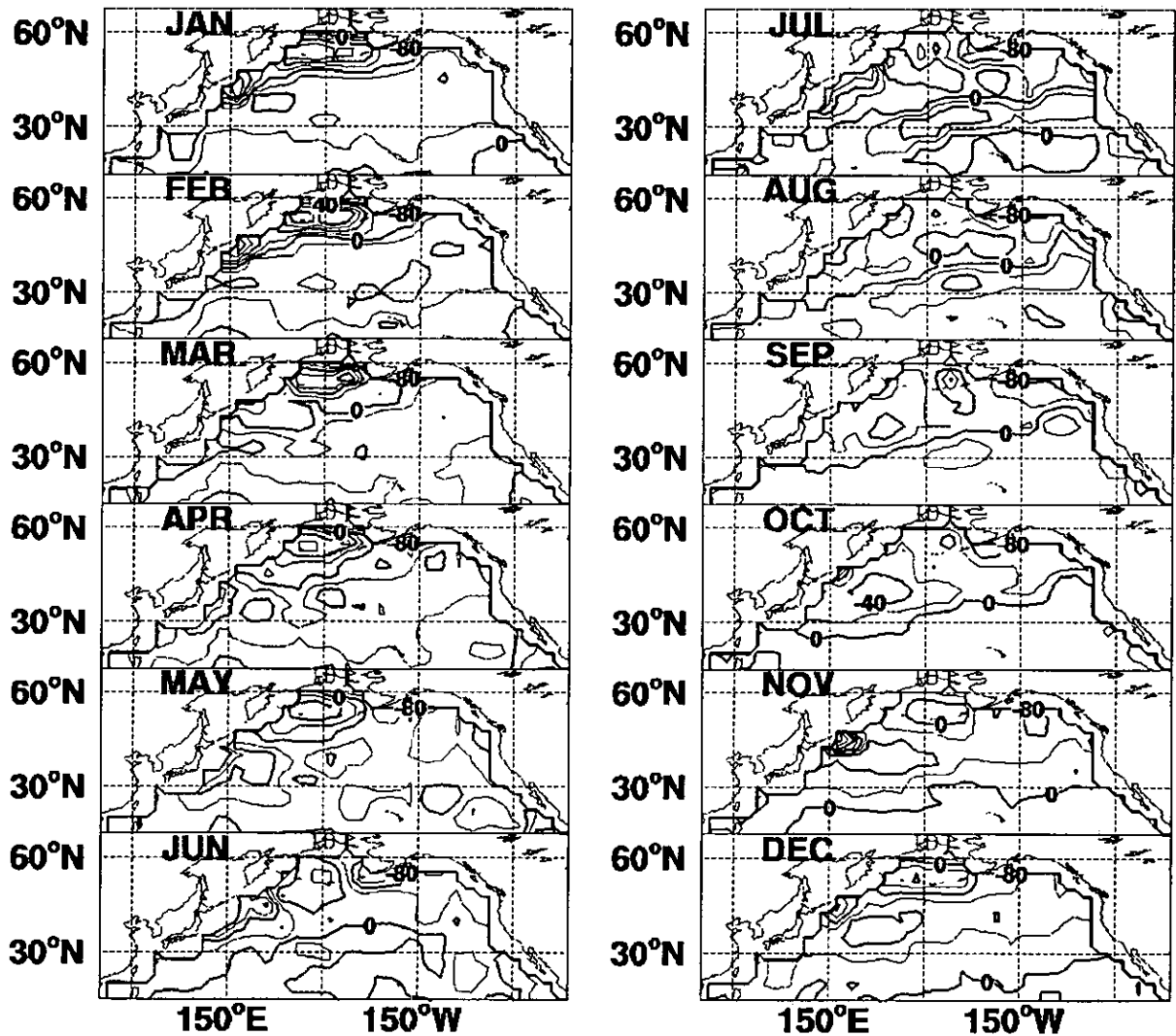
高橋ら(1999)は全世界の海洋における二酸化炭素分圧差の観測データを用いて海洋上の分圧差の全球マップを作成した。観測は限られた領域の短期間のものであるが、水平方向の輸送拡散方程式を用いることにより月平均の全球分布を作成している。

図1は高橋らの示した分圧差(単位は 10^{-6} atm)で月ごとに示している。観測は数年の期間にわたるので大気中二酸化炭素濃度が上昇した影響を除くために1995年の値に換算している。

高橋らは 4×5 度のデータを公表した。Gurenyらはこれを 1×1 度に展開した。ここではさらに 2.5×2.5 に編集したものを示す。北緯45度以北では1月から5月にかけて海洋のCO₂分圧の方が高い。日本の東方海上では4月から6月にかけて海洋の分圧が低い。7-9月は他の月に較べて分圧差が小さい。

日本海およびオホーツク海のデータは無いが周囲の分圧差から推定するとかなりの放出があるのではないと思われる。今後のデータの整備が望まれる部分である。

Fig.1 $\Delta p\text{CO}_2(\text{seawater-air}) \mu\text{atm Cl}=20$



/128/p1871/fco2/197_2.5.1

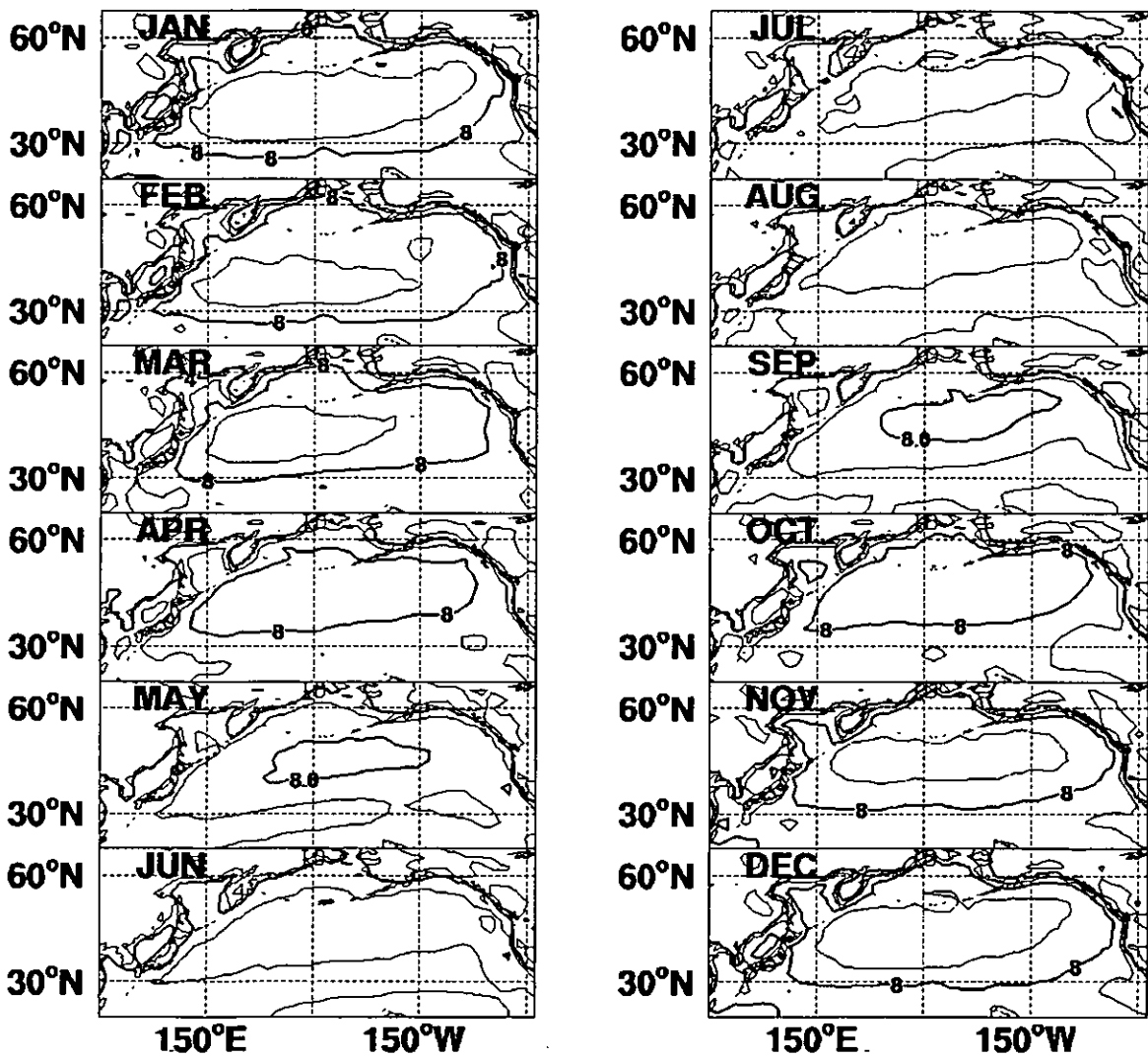
③ 海面上10mの風速

ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)はこれまで蓄積された気象データを用いて再解析気象データを編集出版している(<http://wms.ecmwf/int/research/era/Era-15.html>)。この中には

地上高10mの風速が含まれており、今回の計算では1979年から1991年の6時間おきのデータを用いた。

この風速の作成方法は概略以下の通りである。全世界の気象観測データを6時間ごとに解析する。このとき全球大気の前報モデルを走らせる。このモデルはT106L31の分解能を持つ。T106は全球を球面調和関数で展開し、三角切断で波の数106までのものを用いる。鉛直は31層である。入力として観測されたデータの他に、前報モデルの前報値を観測データと同様に取り扱う。このことによって観測の無い遠隔地の海洋上でも物理的な整合性のある気象データが作成され、高度10mにおける風速の信頼性も20年前から見れば格段に向上していると考えられる。ただし、現在の気象解析では衛星観測による海洋上の風速の推定値も用いられているが、ここで用いたERAでは使っていない。

Fig.2 Wind speed (m/sec) at 10m ECMWF/ERA



l128/p1871/uts/m10_7991.d

図2は月ごとに平均した79-91年の平均風速で10m/sec以上のところに陰影をつけた。11-3月

の風速に10m/sec以上の地域がみられ、6-8月は8m/secの範囲が消滅することが特徴である。交換係数は風速に強く依存するため風速が強い冬季の中部北太平洋の分圧差が制度良く計算できることが重要と考えられる。

(2) 逆問題解法による大気海洋間流量の計算

年平均濃度の全球分布に一致させるような発生・吸収の分布を逆問題解法により推定した。この逆問題は誤差関数 S 、

$$S=1/2\{(g(m)-dobs)t_{CD-1}(g(m)-dobs)+(m-mprior)t_{CM-1}(m-mprior)\}$$

を最小とするような最小二乗近似により行った。ここで、 $g(m)$ は輸送モデルがある発生分布 m に対して算出する観測点での濃度、 $dobs$ は観測濃度、 $mprior$ は初期推定値として用いる発生・吸収分布。

() t は転置行列、 $CD-1$ は観測データ相互の関係を表す共分散行列の逆行列、 $CM-1$ は発生源分布相互の関係を表す共分散行列の逆行列である。

さらに観測データに対する信頼性、発生源推定値に対する信頼性をも加えたベジアン解法を用いた。

① 二酸化炭素濃度の観測

大気中二酸化炭素の濃度の観測は米国海洋大気庁(NOAA/CMDL)のGlobal View

(<http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/globalview/index.html>)

が解析した50地点を用いた。

② 大気輸送モデル

世界の15個のモデルが計算に参加した。米国 コロラド大学、カリフォルニア大学アーバイン(x3)、マサチューセッツ工科大学、海洋大気庁、プリンストン大学、ドイツ マックスプランク生物地球化学研究所、フランス 放射線研究所、日本 気象庁、地球フロンティア、産総研、豪州連邦産業科学研究機構大気研究所(x3)、カナダ ビクトリア大学である。

③ 逆問題解法の設定

化石燃料の燃焼にともなう排出、陸域植生モデルの計算した月別二酸化炭素流量推定値、高橋らの推定した二酸化炭素流量の推定値を背景濃度として計算し、観測された年平均濃度との差を陸域および海洋それぞれ11の補正值として推定した。

背景濃度として用いた化石燃料の燃焼に伴う排出は1990年のもの

(<http://cdia.esd.ornl.gov/ndps/ndp058.html>)

および、1995年のもの

(<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp058a.html>)

である。

同じく背景濃度として用いた陸域植生の放出吸収はCarnegie-Ames-Stanford-Approach

(<http://geo.arc.nada.gov/sge/casa/>)モデルの出力である。

海洋の吸収・排出はコロンビア大学の高橋らが作成した(<http://www.ldeo.columbia.edu>)ものをもちいた。

図3に北太平洋域でのフラックスの分布を示した。

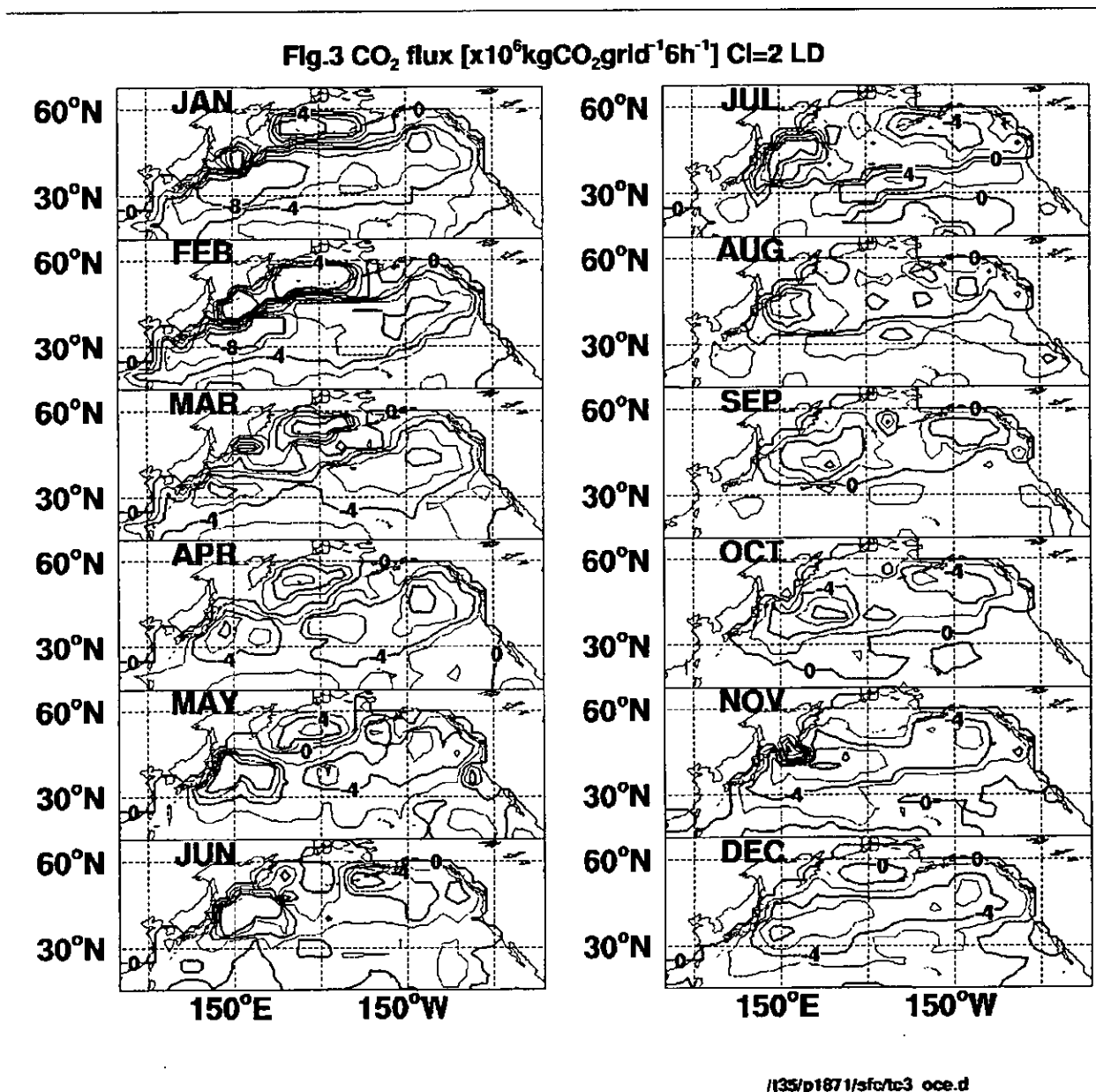
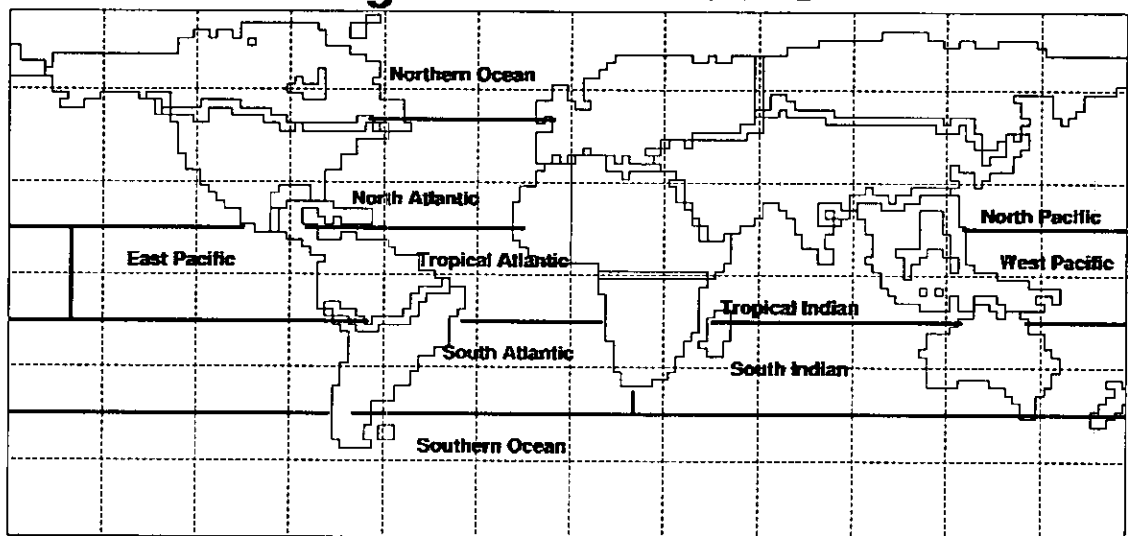


図4は海洋の分割を示している。それぞれの海洋では領域で一様な補正値を考えた。

Fig.4 Ocean sections

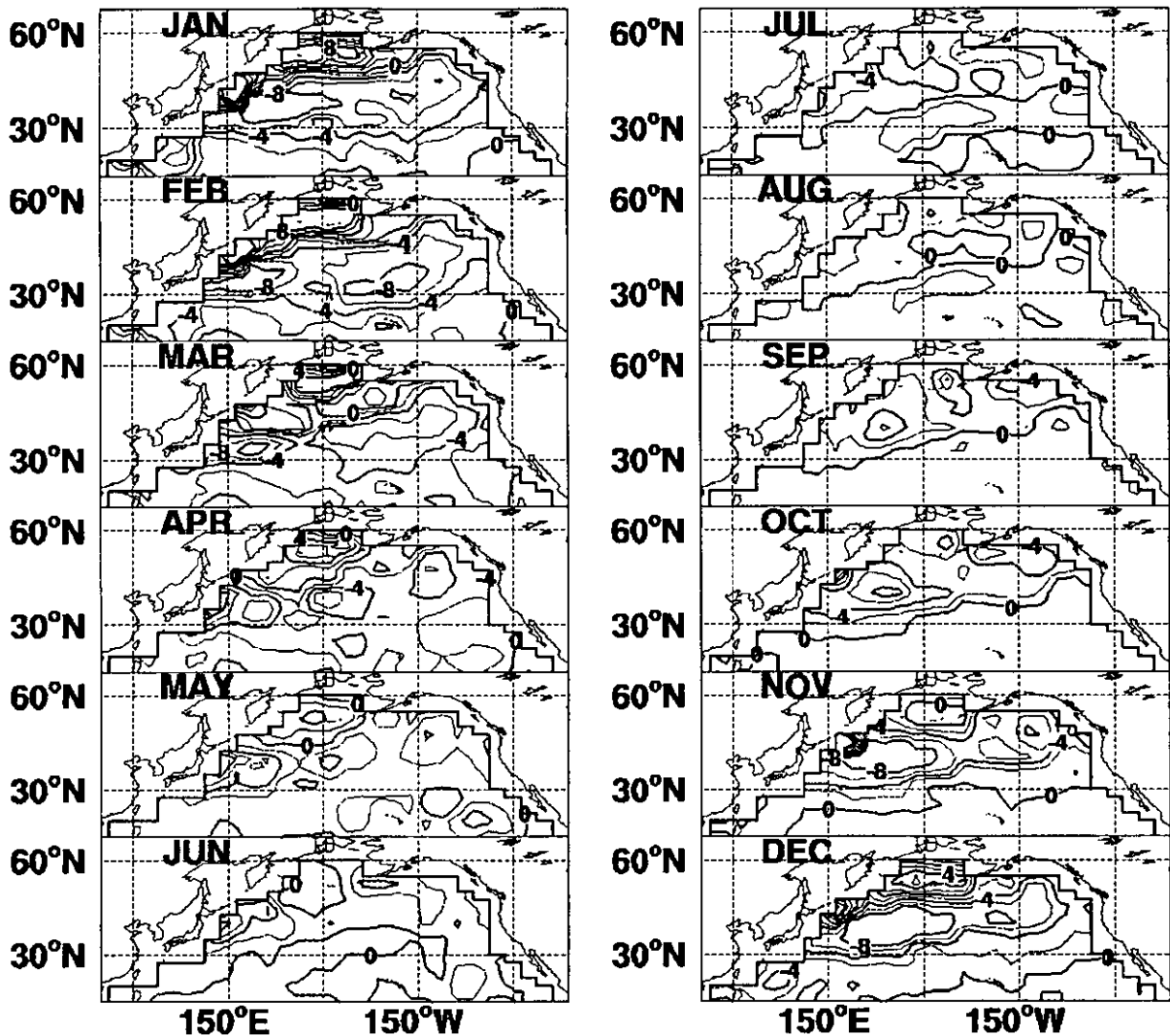


4. 結果・考察

(1) 高橋の分圧差データとECMWFの再解析風速値を用いた計算の結果

図5は本研究で得られた流量である。

Fig.5 CO₂ flux [$\times 10^6 \text{kgCO}_2 \text{grid}^{-1} \text{6h}^{-1}$] CL=2 ER



lt28/p1871/fco2/wk7991.d

エスペンセンの風速を用いた高橋の解析では年間吸収量は約2Pgであったが、ECMWFの風速を用いWanninkovの式で計算すると1Pgしか吸収しなかった。最近の大気中酸素の観測に基づく海洋による吸収は約2Pgとして収束しつつあり、かつECMWFの再解析風速は現時点で得られる最も精度の高いデータであることを考えると、高橋の作成した二酸化炭素分圧の全球分布には何らかの問題があることが結論される。

北太平洋(15N-60N)について調べると、0.35PgCの吸収となった。

(2) 逆問題解法の結果

逆問題解法相互比較実験をとりまとめる米国コロラド州立大学が行った初期的な解析の結果一つの共通した傾向が得られた。それは高橋の提出した大気と海洋の二酸化炭素流量は南半球での吸収が強すぎるという事である。すなわち、南半球の吸収を半分にしなれば大気中の

観測と一致しない。

北太平洋(15N-60N)について調べてみると、0.3PgCの吸収となった。背景の計算に用いた高橋の推定値は0.45PgC/yrであった。この差を図3の単位で示すと、60Nで 0.1×10^{-6} kgC/grid/6h、15Nで0.2kgC/grid/6hrとなり図上での変化は認められないほど小さい。ただしここではこの領域の面積として 4.4×10^{13} m²を用いた。また、これらの結果は計算に用いる海岸部の分解能に依存することが図1からも伺われる。

5. 本研究により得られた成果

本研究により、北太平洋における二酸化炭素の吸収には、計算する方法により、0.5Pg/yrから0.3Pg/yrの開きがあることが分かった。また精度を向上させるためには沿岸部の二酸化炭素分圧差のデータを作成すること、交換係数の大きくなる冬季の中部太平洋北緯40-45度付近の分圧差を正確に求めることが重要であることが分かる。

6. 参考文献

(1) Takahashi, T., R. H. Wanninkhof, R. A. Feely, R. F. Weiss, D. W. Chipman, N. Bates, J. Olafsson, C. Sabine, and S. C. Sutherland: Net sea-air CO₂ flux over the global oceans: An improved estimate based on the sea-air pCO₂ difference, In Proceedings of the 2nd international Symposium CO₂ in the Oceans, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, 9-15, 1999.

(2) Esbensen, S. K., and Y. Kushnir, The heat budget of the global ocean: An atlas based on estimated from the surface marine observations, Climate Research Institute Report #29, Oregon State University, Corvallis, OR, 1981.

(3) Wanninkhof, R., Relationship between wind speed and gas exchange, J. Geophys. Res., 97, 7373-7382, 1992.

[国際共同研究等の状況]

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第3次報告書、の炭素循環の章の執筆者であるドイツ・マックスプランク研究所、ハイマン氏に本研究の結果を提出。

米国コロンビア大学地球観測所・高橋太郎氏より二酸化炭素分圧差データの提供を受けた。

国際地球圏・生物圏研究事業/全球解析解釈モデル化(IGBP/GAIM)の中の逆問題解法相互比較実験(TransCom-3)に参加した。

スクリップス海洋研究所(SIO)の提案したポテンシャル大気酸素濃度(APO: Atmospheric Potential Oxygen)の計算を準備した。

カリフォルニア工科大学(CALTEC)がBASIN(Biosphere-Atmosphere Stable Isotope Network)に提案した大気中炭素同位体濃度の計算の準備をした。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表(学術雑誌)

① Denning, Holzer, Gurney, Heimann, Law, Rayner, Fung, Fan, Taguchi他: Tellus, 51B,

266-297, 1999, 「6 フッ化硫黄の三次元輸送と濃度、モデル相互比較 (モデル相互比較実験その2)

② 田口彰一、米国地球物理学会モノグラフ、114, p 239-253, 2000, 「資源環境技術総合研究所化学輸送モデルを用いた大気二酸化炭素逆問題の解」

③ Gueney, Law, Denning, Rayner, Baker, Bousquet, Bruwiler, Chen, Ciais, Fan, Fung, Gloor, Heimann, Higuchi, John, Maki, Maksyutov, Masarie, Peylin, Prather, Pak Randerson, Sarmiento, Taguchi, Takahashi, Yuen, Toward more robust estimated of CO2 fluxes: control results from the TransCom3 inversion intercomparison, Nature (投稿中)

(2) 口頭発表

① S. Taguchi, Inter-annual variations of CO2 seasonal amplitudes at Mauna Loa, Trans Com workshop, IGBP/GAIM, Melbourne, March 2001.

(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