

序 文

産業革命以後、人類は化石燃料の消費や森林伐採などによって、大量の二酸化炭素(CO₂)を大気中に排出してきた。これによって引き起こされている大気中のCO₂濃度の著しい増加や地球温暖化に、今、大きな関心が社会から寄せられている。海洋は、産業革命以後に排出された人為起源CO₂のおよそ半分を吸収してきたと推定されており、大気中のCO₂増加を緩和して温暖化を抑制する重要な役割を担っている。しかしながら、近年、人為起源CO₂の排出量がますます増加しているにも関わらず、海洋がこれを吸収する割合は減少しているとの指摘もある。今後、地球温暖化の予測精度を向上させてゆくためには、海洋が大気中からCO₂を吸収する速度やメカニズムについて、より深く理解することが不可欠となっている。

近年、海洋でも、CO₂分布の観測が精力的に行われている。国際協力によって観測データのデータベース化も進められており、海水中のCO₂分圧や大気-海洋間のCO₂フラックスの分布も月ごとに評価されている。しかし、それらは気候値的な分布の評価にとどまっており、気象や海況変動の影響による様々な時間スケールの変動は、よく分かっていない。数値モデルなどを使った全球や海域ごとのCO₂フラックスの評価も行われているが、その結果は、用いたモデルやモデルを駆動する強制力などによって大きく異なっており、より多くの実測データに基づいた、より信頼性の高い評価が求められている。海水中のCO₂分圧の変動特性を実測し、これを利用して大気-海洋間のCO₂フラックスを経験的に見積もる手法も開発されてきた。しかしながら、こうした経験的な手法が適用できる海域も、これまではいくつかの海域に限られていた。

本技術報告では、統合された海洋CO₂分圧のデータベースを利用して、北太平洋と南太平洋の広域におけるCO₂分圧の面的分布を、長い期間にわたって月ごとに評価する新たな経験的手法について紹介する。これを衛星データや大気再解析データなどと組み合わせて活用することで、観測の空白時期・海域を含む広い領域についてCO₂フラックスを評価でき、今後も海洋が人為起源CO₂を多く吸収し続けるのかどうか、大気中のCO₂増加に対して海洋が果たす役割の変化を評価する上で、大いに役立つものと期待される。

気象研究所
地球化学研究部長
緑川 貴

Preface

Since the industrial revolution, the release of carbon dioxide (CO₂) from the activities of humankind, such as fossil-fuel combustion and land-use change, has dramatically increased atmospheric CO₂ concentrations leading to significant recent global warming. The ocean has absorbed about half of the anthropogenic carbon emissions over the industrial era. This absorption has benefited humankind by reducing the growth of CO₂ levels in the atmosphere and consequently decelerating global warming. Recent reports have indicated a decline in the efficiency of the ocean as a carbon sink for anthropogenic emissions under increasing atmospheric CO₂ levels in recent years. To precisely predict future global warming, it is essential to understand the ocean carbon sink.

Recent extensive observations of oceanic CO₂ and international synthesis of global data have resulted in the production of a map of the monthly climatological partial pressure of CO₂ (*p*CO₂) in surface waters and the estimation of the global ocean CO₂ uptake. These studies provided a climatological mean field of the ocean carbon sink, but the variability of this sink at various time-scales remains poorly understood. Estimates of global and regional ocean carbon sinks by using ocean models are generally controversial, depending on the model and method. Therefore, observational data are required for realistic evaluation of ocean carbon sinks. Empirical methods have been developed in several regions of the ocean to evaluate the regional CO₂ flux by using the characteristics of oceanic *p*CO₂ fluctuations. However to date the regions where such empirical methods can be applied are limited.

In this technical report, we describe a newly developed method for evaluating monthly fields of oceanic *p*CO₂ and the subsequent temporal variations of the sea-air CO₂ flux over extensive regions of the North and South Pacific by using synthesized observational data. The application of this method is expected to contribute to understanding of future changes in the ocean carbon sink and the ocean's role in controlling the rate of atmospheric CO₂ increase.

Takashi Midorikawa, PhD.
Director of Geochemical Research Department
Meteorological Research Institute

要 旨

表面海水中の二酸化炭素分圧 ($p\text{CO}_2\text{s}$) と海面水温 (SST) 等のパラメータとの関係を利用して、太平洋における $p\text{CO}_2\text{s}$ および大気-海洋間の二酸化炭素フラックスの月ごとの分布を推定する経験的手法を開発した。本手法では SST だけでなく、リモートセンシングやデータ同化によって得られた海面塩分 (SSS) と海面クロロフィル濃度 (Chl-a) も用いた。特に、高緯度域は、無機炭素の生物消費がブルーミングの時期に多くなる海域で、Chl-a を導入することによって $p\text{CO}_2\text{s}$ の推定バイアスが改善された。太平洋全体での $p\text{CO}_2\text{s}$ の推定バイアスは $-10\sim+10\ \mu\text{atm}$ である。

この経験的手法を用いて 1985~2009 年の月ごとの二酸化炭素フラックスを推定した。中緯度帯の冬季は、多量の二酸化炭素吸収が見られる。対照的に、赤道域では、大気への二酸化炭素の放出が一年中起きている。赤道域の二酸化炭素フラックスはエルニーニョ・南方振動(ENSO)とともに変動する。二酸化炭素の放出量はエルニーニョ現象の発生期間中(ENSO warm phase)に減少し、ラニーニャ現象の発生期間中(ENSO cold phase)に増加する。南緯 50 度以北の太平洋で、年積算した二酸化炭素フラックスの平均値は $-0.59 \pm 0.14\ \text{PgC yr}^{-1}$ (負値は海洋が吸収することを示す) と推定された。本手法で推定された平均吸収量は Takahashi *et al.*(2009) によって見積もられた気候値 ($-0.46\ \text{PgC yr}^{-1}$) と比べて多く、主にガス交換係数の違いによるものであった。

二酸化炭素フラックスは、その計算に用いたガス交換係数の計算式や高さ 10m の風速 (U_{10}) に大きな影響を受ける。そのため、3 種類のガス交換係数計算式と 3 種類の大気解析データを利用して二酸化炭素フラックスの違いを評価した。異なるガス交換係数計算式を使って計算した二酸化炭素フラックスは 15~20%の違いがあった。NCEP/NCAR Reanalysis I で計算した二酸化炭素フラックスは主に赤道域で有意に小さく、JRA25/JCDAS で計算した二酸化炭素フラックスとの違いはおよそ $-0.12\ \text{PgC yr}^{-1}$ (20%) であった。

Abstract

We developed an empirical method for estimating monthly fields of the carbon dioxide (CO_2) partial pressure in surface seawater ($p\text{CO}_{2s}$) and the sea-air CO_2 flux in the Pacific Ocean by using the relationships between $p\text{CO}_{2s}$ and other parameters. The method uses not only sea surface temperature (SST) but also sea surface salinity (SSS) and chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*) derived by remote sensing and data assimilation. The introduction of Chl-*a* data significantly reduces the estimation bias especially for the high latitudes where net biological uptake of inorganic carbon is very high during the bloom season. The bias in $p\text{CO}_{2s}$ estimates throughout the Pacific is between -10 and $+10 \mu\text{atm}$.

We used our empirical method to estimate the monthly CO_2 flux with a resolution of $1^\circ \times 1^\circ$ from 1985 through 2009. The uptake of CO_2 by the ocean is high in the mid-latitudes in winter. In contrast, CO_2 is released to the atmosphere throughout the year in the equatorial region. The CO_2 outflux in the equatorial region varies with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). The emission of CO_2 decreases during El Niño (ENSO warm phase) and increases during La Niña (ENSO cold phase). The mean annual CO_2 flux in the Pacific north of 50°S was estimated at $-0.59 \pm 0.14 \text{ PgC yr}^{-1}$ (a negative value indicates uptake by the ocean). This value is greater than the climatological value ($-0.46 \text{ PgC yr}^{-1}$) determined by Takahashi *et al.* (2009b) mainly due to the difference in gas transfer coefficients used in the studies.

The estimate of CO_2 flux largely depends on the gas transfer coefficient and wind speed at 10 m above sea level (U_{10}) used in the calculations. Therefore we also evaluated the differences in CO_2 flux estimates based on three gas transfer coefficient formulas and three data sets for U_{10} . The CO_2 fluxes calculated with different equations of gas transfer coefficients differed by 15–20%. The CO_2 flux calculated using data from National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) Reanalysis I is significantly lower in the equatorial region than that calculated with Japanese 25-year Reanalysis/JMA Climate Data Assimilation System (JRA25/JCDAS) data; the mean difference is about $-0.12 \text{ PgC yr}^{-1}$, or about 20%.

Contents

1. Introduction	1
2. Target region and data	3
3. Method for $p\text{CO}_2$ s estimation	5
3.1. Correction for long-term trend	5
3.2. The empirical method to estimate CO_2 concentration in the surface water	6
3.2.1. The subtropical region	6
a. The North Pacific (NP/T)	6
b. The South Pacific (SP/T)	7
3.2.2. The equatorial region (EQ)	10
3.2.3. The subarctic / subantarctic region	11
a. The North Pacific (NP/A)	11
b. The South Pacific (SP/A)	13
4. $p\text{CO}_2$ s estimation and its error	15
5. Net sea-air CO_2 flux estimation	17
5.1. Computational method of CO_2 flux	17
5.2. Seasonal average and variance of CO_2 flux	17
5.3. Time series of area-integrated CO_2 flux	19
5.4. Comparison with the climatological CO_2 flux	20
5.5. Effects of gas transfer coefficient formulas on the CO_2 flux	21
5.6. Effects of wind speed on the CO_2 flux	21
6. Summary and conclusion	23
Acknowledgment	24
References	25
Appendix	
Table A1 Abbreviations	28