

# 生物ポンプを考慮した CO<sub>2</sub> 海洋隔離における濃度予測の検討

中村 倫明<sup>1</sup>、和田 明<sup>1</sup>、長谷川一幸<sup>2</sup>

<sup>1</sup>日本大学大学院総合科学研究科, <sup>2</sup>(財)海洋生物環境研究所

キーワード: 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、生物ポンプ、基礎生産、数値シミュレーション

## 1. はじめに

気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)が定めるところの CO<sub>2</sub> 削減約束期間(2008~2012)を再来年に控えた現在も、その削減達成は困難な状況にある。日本においては、1990年 CO<sub>2</sub> 排出量を基準に6%の削減が義務づけられたが、2003年度の CO<sub>2</sub> 放出量は12.3%増加している。また、世界においても100年後には CO<sub>2</sub> 濃度は現在の2倍にもなりうると予測されている。そこで、大気中の CO<sub>2</sub> 又は化石燃料の消費によって発生する CO<sub>2</sub> の処理方法が各国の様々な分野で検討されている。その一つに、海洋のもつ CO<sub>2</sub> 吸収能力に注目した CO<sub>2</sub> 海洋隔離が提案されている。海洋隔離の基本構想の一つとして、中層希釈放流方式がある。本研究では、大気・海洋間の CO<sub>2</sub> 収支、生物ポンプを考慮したモデルを用い、中層希釈放流方式を行う際の数値シミュレーションを行うことにより CO<sub>2</sub> の影響範囲の検討することを目的とする。

## 2. 解析モデルの概要

### 2.1 海洋大循環モデル

本研究で使用した海洋大循環モデルは、長谷川ら<sup>1)</sup>が再現してきたモデルを用いている。海洋の流速成分は Primitive な方程式系を使用して求めている。計算海域は太平洋全域とし、水平方向の計算メッシュは経緯度 2 × 2 度(110E~70W, 60N~74S, C grid)である。鉛直方向の計算メッシュは、第1層:0-20m, 第2層:20-50m, 第3層:50-100m, 第4層:100-200m, 第5層:200-400m, 第6層:400-800m, 第7層:800-1500m, 第8層:1500-2500m, 第9層:2500-3500m, 第10層:3500-4500m, 第11層:4500-5500m, の11層に分割している。また、基礎方程式の座標系は水平方向に球面座標を用いている。ポテンシャル水温の保存式、塩分の保存式には、Sarmiento and Bryan<sup>2)</sup>にならい、計算値と観測値を同化させる項を導入するモデルを採用している。

### 2.2 大気・海洋間の CO<sub>2</sub> 収支

大気・海洋間の CO<sub>2</sub> 交換は大気と海洋の CO<sub>2</sub> 分圧差により収支方向を決め、風速に依存する気体交換係数を分圧

差に乗じることにより、算出することができる<sup>3)</sup>。算出式を(1)に示す。

$$F = E(pCO_{2-OCEAN} - pCO_{2-AIR}) \quad (1)$$

ここで、F:CO<sub>2</sub> 交換量(mol/m<sup>2</sup>・yr), E: 気体交換係数(mol/m<sup>2</sup>・yr・μatm), pCO<sub>2-OCEAN</sub>: 海洋の分圧(μatm), pCO<sub>2-AIR</sub>: 大気分圧(μatm)である。また気体交換係数は、本研究では長期的な平均風速を用いる場合に適するとされる、Tansら<sup>4)</sup>の式(2)を使用した。

$$E = 0.016(U - 3) \quad U > 3 \text{ m/s} \\ E = 0 \quad U < 3 \text{ m/s} \quad (2)$$

ここで、U: 風速(m/s)である。この式は風速が3m以上で交換が行われるとし、風速が大きいほど交換量も大きいという特徴がある。

## 2.3 生物ポンプ

炭素循環を考える上で海洋にすむ生物群集は、炭素の形を変化し移動させる役割で大きな意味を持っていると言われている<sup>5)</sup>。海洋へと溶け込んだ CO<sub>2</sub> が、一次生産者である植物プランクトンや、捕食者である動物プランクトン、大型動物などを介し、有光層から下層へ移送されることを生物ポンプと呼ぶ<sup>6)</sup>。一次生産者は太陽からの光を受け、CO<sub>2</sub> を体内へ吸収し光合成することにより、有機物を取り込み基礎生産を行う。この基礎生産は栄養塩の供給方法により新生産・再生産に分類され、新生産量は下層への CO<sub>2</sub> 移送量とほぼ同量とされており、下記の式(3)より算出できる<sup>6)</sup>。そこで本研究では、Berger<sup>7)</sup>が報告した基礎生産分布の値を用い新生産量を算出し、算出した移送量を有光層(200m以浅)から CO<sub>2</sub> を吸収し中層(200~2500m)で放出することで、生物ポンプにおける炭素の鉛直循環過程を再現した。

$$f = pp/410 \quad pp < 150 \quad (3)$$

$$f = pp/a - pp^2/b \quad 150 < pp < 500 \quad (4)$$

ここで、f: 新生産量比(%), pp: 一次生産量(gC/m<sup>2</sup>・yr), a=400, b=340000 である。一次生産量が 150gC・m<sup>2</sup>・year<sup>-1</sup> 以下であれば式(3)を用い、一次生産量が 150~500gC・m<sup>2</sup>・year<sup>-1</sup> の範囲内では式(4)を用いる。

### 3. CO<sub>2</sub>海洋隔離の検討

#### 3.1 使用データ

使用した水温・塩分データは JODC 所蔵の 1906～1988 年にわたる約 80 年間のデータを用いた。風速のデータは、NASA の Goddard Space Flight Center (GSFC) から提供された太平洋全域の 1988 年～1998 年までの 6 時間毎のデータを使用した。全炭酸濃度、全アルカリ度は Chen ら<sup>7)</sup>の式(5)を、変動範囲内で各温度別に式を算出し、その式より求めた値を用いた。

$$\begin{aligned} \text{TCO}_2 &= 2,242 - 12.08 \theta (\pm 18) \\ \text{TA} &= 2,384 - 3.36 \theta (\pm 11) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、TCO<sub>2</sub>:全炭酸濃度(μmol/kg), TA:全アルカリ度(μequiv/kg), θ:温度(°C)である。

#### 3.2 CO<sub>2</sub>の挙動予測の計算モデル

本研究では、大気・海洋間の CO<sub>2</sub> 収支、生物ポンプを考慮した数値モデルを構築した。以下に解析に使用した計算式を示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \overline{u} \nabla C &= K_H \nabla^2 C + K_V \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \\ &- F_{\text{OCEAN-AIR}}(\lambda, \phi) + F_{\text{inj}}(\lambda, \phi, z) - F_{\text{bio}}(\lambda, \phi, z) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、C:全炭酸濃度(μmol/kg)、t:時間(s)、K<sub>H</sub>:水平方向拡散係数(1×10<sup>3</sup>m<sup>2</sup>/s)、K<sub>V</sub>:鉛直方向拡散係数(1×10<sup>-4</sup>m<sup>2</sup>/s)、F<sub>OCEAN-AIR</sub>:大気・海洋間の CO<sub>2</sub> 収支である。投入地点は北緯 22° 東経 132° の日本南方とし、また生物への影響を回避するため、投入層は中層希釈放流で考えられている、水深 1500m 付近の第 7 層とした。投入期間は 50 年とした。

#### 4. CO<sub>2</sub>の挙動予測の計算結果と考察

まず第 7 層に CO<sub>2</sub> を 50 年間投入し続けたケースと CO<sub>2</sub> を投入しなかったケースを計算した。第 7 層における両ケースの差(CO<sub>2</sub>濃度増加量)を図-1 に示す。図-1 より投入地点の海域に濃度が集中しているが、投入地点から東西南北方向へと万遍なく広がっていくことが確認された。海流は赤道付近では流れが大きい、この投入点付近では地域的にさほど流れは大きくない。さらに、第 7 層は図-2 に示す様に深度が深く、風の影響も少ないので流れ全体が大きい。また、南太平洋側への濃度上昇は 50 年間 CO<sub>2</sub> を連続投入した場合でもほぼ皆無に等しいことがわかった。これにより、太平洋全体への影響は少ない事が示され、CO<sub>2</sub>濃度の上昇は放出点近傍であることを確認した。したがって今後は、放出点近傍のより詳細なモデルを用いた CO<sub>2</sub>濃度予測が必要であり、それを基にした

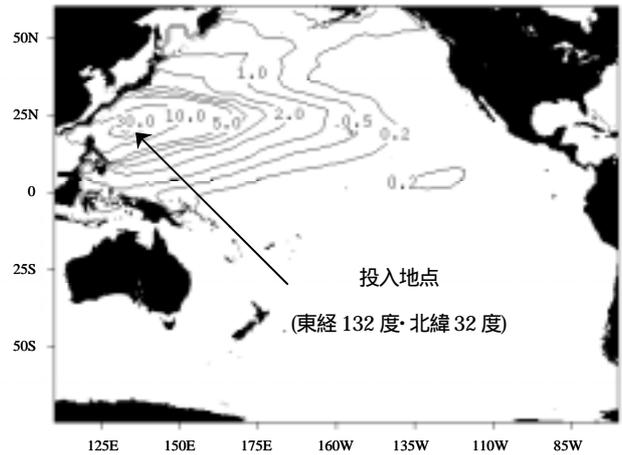


図-1 第7層における50年後のCO<sub>2</sub>濃度増加(μmol/kg)

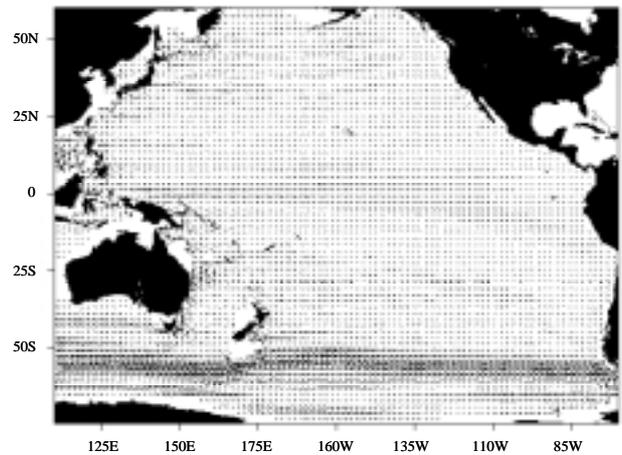


図-2 太平洋の海流場(第7層) 12.5CM/S

生物への影響を行う必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 長谷川一幸, 和田明, 西村玲輔, 高野憲治: 水工学論文集, 47(2003), 1297-1302.
- 2) Sarmiento, J. L., and Bryan, K.: An ocean transport model for the North Atlantic, J. Geophys. Res., No.87, pp.394-408, 1982.
- 3) 山本, 村山, 後藤: 大気・海洋間の CO<sub>2</sub> 交換, 月間海洋, Vol.26, No.6, pp.335-341, 1994
- 4) Tans, P.P., I.Y. Fung and T. Takahashi: Observational constraints on the global Atmospheric CO<sub>2</sub> budget, Science, Vol.247, pp.1431-1438, 1990.
- 5) 石坂, 清沢, 石田, 渡辺, 高橋: 有光層における生物過程と炭素循環, 月刊海洋, Vol.26, No.6, pp.342-348, 1994
- 6) 半田暢彦: 大気水圏科学からみた地球温暖化, 海洋生物, pp.271-286, 1996.
- 7) Chen-Tung A. Chen, Ricardo and M. Pytkowicz: On the total-CO<sub>2</sub>-titration alkalinity- oxygen system in the Pacific Ocean, Nature, Vol281, pp362-365, 1979.