海洋中生物による炭素の鉛直移送に関する研究

日大生産工(院)○入江 覚 日本大学大学院(院)中村倫明 日大生産工 落合実 日本大学大学院 和田 明

1. まえがき

3-22

近年、地球温暖化問題が大きく取り扱われ、 その主要因と考えられている大量の CO₂に注 目が集まっている。人間は1年間に CO₂を化 石燃料の燃焼によって約 200 億 t 大気に放出 しているが、自然活動では火山や温泉を通じ て約1億 t/年であり、人為起源が大半である。 また、現在地球上の全人口は約 60 億人である が、将来的に現在の2倍にもなるとも言われ ている。その結果 100 年後には CO₂濃度は現 在の2倍ほどになると予想されている¹⁾。こ うした問題の解決策の一つとして、発電所な どの大規模排出源から排出された CO₂を海洋 に長期隔離することで、大気中への CO₂排出 を抑制することが可能とされている CO₂の海 洋隔離がある。

海洋における炭素循環には流れや大気-海 洋間の CO₂ 交換(溶解ポンプ)、生物活動によ る炭素の鉛直移送(生物ポンプ)がある。その 中でも溶解ポンプによって海洋に入り込んだ 炭素は生物ポンプによって鉛直下層へ運ばれ る。この機構は自然的に大気から海洋へ炭素 を取り込む上で重要な役割である。

そこで本研究では、この生物ポンプに着目 した。生物ポンプ過程は複雑で、観測によっ て鉛直移送を予測したものや、一次元生態系 モデルを用いて鉛直移送を再現したものがる が、3次元拡散モデル(炭素循環モデル)に考慮 した例は少ない。ここでは、簡易的に生物ポ ンプ過程を扱う事によって炭素循環モデルに 考慮し数値計算を行った。その結果、実測地 との比較から炭素の鉛直移送量、鉛直分布の 妥当性を検討した。

2.1 流動モデル概要

本研究で使用した流動モデルは、長谷川ら ²⁾らが再現してきたモデルのメッシュサイズ を細分化した。計算対象範囲(太平洋全域; 110°E~70°W、60°N~74°S、Cgrid)全てを細 分化させると計算負荷が大きいことから CO₂ 投入海域近傍(127°~139°E、17°~25°N)の解 像度の細分化(0.2°×0.2°)を行った。鉛直方向は 16 層の可変メッシュとした。図-1 に計算によ って求められた太平洋全域における表層 (10m)の流れ場を示す。



Study of vertical carbon cycle by marine animals Satoru IRIE, Tomoaki NAKAMURA, Minoru OCHIAI and Akira WADA

2.2 CO2の挙動予測モデル

流動モデルと同様に CO_2 放出点近傍の格子 を細分化させた。モデルでは海洋表面の境界 条件として、大気・海洋の CO_2 分圧差から交 換量を算出し Tans ら³⁾のガス交換係数を乗じ ることにより大気・海洋間の CO_2 収支を考慮 した。また Berger ら⁴⁾の基礎生産量から生物 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3次元移流拡散方程式 を示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = K_H \nabla^2 C + K_V \frac{\partial^2 C}{\partial Z}$$
$$-F_{OCEAN-AIR}(\lambda, \phi) + F_{inj}(\lambda, \phi, Z) + F_{bio}(\lambda, \phi, Z) \quad (1)$$

ここで、C:全炭酸濃度(μ mol/kg)、t:時間 (s)、 K_H :水平方向拡散係数($1 \times 10^3 \text{m}^2$ /s)、 K_r :鉛直方向拡散係数($1 \times 10^4 \text{ m}^2$ /s)、 $F_{ocean-air}$: 大気海洋間の CO₂収支(μ mol/kg)、 F_{ini} : CO₂ 投入量(μ mol/kg · s)、 F_{bio} :生物ポンプ(μ mol/kg · s)、 λ :球面座標の緯度、z:鉛直方向の 深さ、 φ :球面座標の経度である。

2.3 生物ポンプ

海洋表面では大気から溶け込んだ CO₂と栄 養塩をもとにして植物プランクトンが光合成 により無機炭素(CO₂)から有機炭素を生産 している。これを基礎生産(Primary producti on)と呼び、この生成された有機炭素は基礎 生産の行われる有光層(~200m)から中・深 層へと落下し、そこで分解・消費を受け再び 無機炭素へ戻る。これらの過程を生物ポンプ と称している(図-2)⁵⁾。武田らによると、この 生物ポンプは海洋全体で海洋表層から深層へ 年間 110 億 t 程度の炭素が運ばれていると言 われている。このことから太平洋では単純計 算で 48.4 億 t 程度の炭素の鉛直移送が想定さ れる⁹。

本研究では次に示す2つのモデルを扱った。 ① Case1:基礎生産に対する新生産の割合を 用いて算出し、この新生産量を生物ポンプに



図-2 生物ポンプによるサイクル⁵⁾

よる炭素の鉛直輸送量として、有光層におい て輸送量相当分を海洋中の炭素量から削減し、 中層において沈降量(輸送量)を海洋中の炭素 量に加算する手法を用いた(Casel)。以下に 式を示す。

$$f = pp/410 \tag{2}$$

$$f = pp/400 - pp/340000$$
 (3)

$$F_{bio} = pp \times f \tag{4}$$

ここで、f:基礎生産に対する新生産の割合、 F_{bio} :生物ポンプ(μ mol/kg · y)、 pp:基礎生産 量(gC/m² · year).

基礎生産が 150gC・m⁻²・year⁻¹ 以下であれ ば式(2)を用いて、基礎生産が 150~500 gC・ m⁻²・year⁻¹ までは式(3)を用いる。この新生産 量を生物ポンプによる炭素の鉛直輸送量とし て、有光層(1~4 層の各層)において輸送量相 当分を海洋中の炭素量から削減し、中層(5~ 13 層の各層)において沈降量(輸送量)を海洋 中の炭素量に加算した。

②Case2:この手法では CO₂の鉛直輸送の際、 水深 200m~2500m の間の沈降量は全て同量 である。一般的には分解や溶解によって鉛直 深さが深いほど、沈降してくる CO₂ 量は少な く、生物ポンプによる炭素循環効果は小さい。

そこで、鉛直深さに依存する沈降量を式に 考慮することによって生物ポンプ過程の精度 向上化を図った(Case2)。 以下の(5)~(8)に沈降する量、沈降してくる 量の式を示す⁴⁾。

$J(z)_1 = 40 \times pp/z$	z < 100	(5)
$J(z)_1 = 0.409 \times pp^{1.41} / z^{0.628}$	<i>z</i> >100	(6)
$J(z)_2 = 9 \times pp/z + 0.7 \times pp/z$	0.5	(7)
$F_{bio} = -J(z_1) + J(z_2)$		(8)
ここで <i>J(z)</i> : 基礎生産に	対する沈	降量
(gC/m ³ ・year)、z:鉛直方向	句の深さ(m)。
(約古十百の辺を必100 円)	しょう (5)	のナ

鉛直方向の深さが 100m 以上なら(5)の式 を用いて、鉛直方向の深さが 100m 以下なら ば(6)の式を使う。

3. 使用したデータ

本研究で使用した水温・塩分データは、日 本海洋データセンター(JODC)所蔵の 1906~ 1988年にわたる約 80年間のデータを用いる。 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。

基礎生産量のデータは Berger⁴⁾による基礎 生産量分布図の対象海域の値を抜粋し使用し た(図-3)。

炭素の実測値のデータは CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER から提供された 1991年06月02日 ~1991年07月07日の期間における、太平洋 上のN: 36.0~S: 5.0、E: 135.0の地点の鉛直方 向0m~5383.4mのデータを使用した(図-4)。

4. 生物ポンプモデルの検討

生物ポンプによる影響を Case1、 Case2 の比 較から行うことため CO₂ 投入は行っていない。 計算期間は 10 年間とした。この間、大気 CO₂ 濃度は 1.8ppm/yr 増加させた。

図-5、図-6、図-7にCase1、Case2と実測値の (N:15~27,W:135)CO₂鉛直濃度分布を示す。

図-5、6、7から、CO₂濃度は Casel ほうが 表層では値が高く、中層から深層にかけて



図-3 Berger らによる基礎生産量



図-4 CO2鉛直濃度分布の観測地点

は Case2 ほうが値が高くなっていることが 確認された。しかし、数値的には 10µmol/kg の差であり大きな差が生じなかった。また、 図-4 から基礎生産量は海域によって大きく異 なり、図-5、6、7 においても海域による違い が見られる。

次に、実測値と計算値(Case1、Case2)を 比較すると、表層では計算値の方が高く、深 層では計算値の方が低くなっている。このこ とから、モデルでは鉛直下層への移送が小さ い可能性が考えられる。一方、本研究では、 太平洋全体における生物ポンプによる炭素の 鉛直方向の移送量は約19.8億tと計算され、武 田らの予測値より小さい。



図-5 Case1-2,実測値のCO2鉛直濃度分布(N:27,W:135)



図-6 Case1-2,実測値のCO2鉛直濃度分布(N:21,W:135)



図-7 Case1-2,実測値のCO2鉛直濃度分布(N:15,W:135)

5. まとめ

本研究では、CO₂濃度拡散モデルの中で、 生物ポンプによる炭素循環項の検討を行っ た。その結果、次の知見が得られた。 ①Case1、Case2の間に大きな差は見られな かった。この原因として式(2)、(3)、(5)、(6)、 (7)でおいて生物ポンプは深さ z(m)よりも 基礎生産 PP(gC/m²・year)が大きく寄与して いることが推察される。

②実測値との比較では、計算値は鉛直移送量が約半分以下しかなく、生物ポンプ過程が過小評価されていたことが分かった。①の結果から炭素の鉛直移送には基礎生産量の値が大きく寄与していることから、今後は基礎生産量の再評価をすること、また、より多くの観測データとの比較が必要であると考えられる。

「参考文献」

和田明:地球環境問題と技術開発,土木
学会誌 Vol.88.No2, (年号)

2) 長谷川一幸,和田明,西村玲輔,高野憲 治:NSCAT・SSM/I 衛星観測データを用いた 太平洋3次元流動場による二酸化炭素の海 洋隔離の可能性に関する研究,水工学論文 集,vol,pp.1063-1068, 2001.

3) Tans, P.P., I.Y. Fung and T.Takahashi: Observational constrains on the global Atmospheric CO_2 budget, Science, No.247, pp.1431-1438, (1990).

4) Berger. W.H.:Ocean Productivity and Paleoproductivity An Overview Productivity of the Ocean, pp.429-455, 1989.

5) 半田暢彦:海洋生物,大気水圏科学から みた地球温暖化, p.271-286, 1996.

6) 武田重信:海洋に鉄を撒く「植物プラン クトンを介した海洋のCO₂吸収は促進され るか」p42-p47,2006.9