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

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 CO_2 に注目が集まっている。人間は1年間に CO_2 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 CO_2 濃度は現在の 2 倍ほどになると予想されている 10 。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 CO_2 を海洋に長期隔離することで、大気中への CO_2 排出を抑制することが可能とされている CO_2 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 CO_2 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; $^{110^\circ\text{E}}\sim70^\circ\text{W}$ 、 $^{60^\circ\text{N}}\sim74^\circ\text{S}$ 、 $^{\circ}$ Cgrid)全てを細分化させると計算負荷が大きいことから $^{\circ}$ CQ2 投入海域近傍($^{127^\circ}\sim139^\circ\text{E}$ 、 $^{17^\circ}\sim25^\circ\text{N}$)の解像度の細分化($^{0.2^\circ}\times0.2^\circ$)を行った。鉛直方向は $^{\circ}$ 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 ($^{10\text{m}}$)の流れ場を示す。

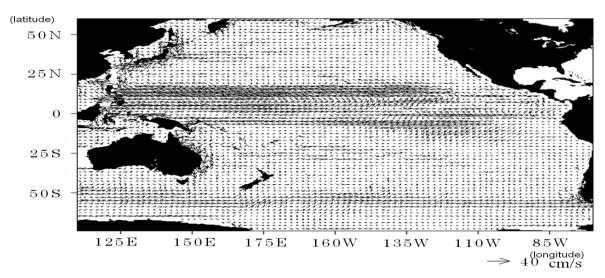


図-1 太平洋全域(110°E~70°W、60°N~74°S) における表層の流れ場

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = K_H \nabla^2 C + K_V \frac{\partial^2 C}{\partial Z}$$

$$-F_{OCEAN-AIR}(\lambda,\phi) + F_{inj}(\lambda,\phi,Z) + F_{bio}(\lambda,\phi,Z)$$
(1)

ここで、C:全炭酸濃度($\mu mol/kg$)、t:時間(s)、 K_H :水平方向拡散係数($1 \times 10^3 m^2/s$)、 K_T :鉛直方向拡散係数($1 \times 10^4 m^2/s$)、 $F_{ocean-air}$:大気海洋間の CO_2 収支($\mu mol/kg$)、 F_{ini} : CO_2 投入量($\mu mol/kg \cdot s$)、 F_{bio} :生物ポンプ($\mu mol/kg \cdot s$)、 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 CO_2 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(CO_2)から有機炭素を生産している。これを基礎生産(Primary production)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(~200 m)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) 50 。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 60 。

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

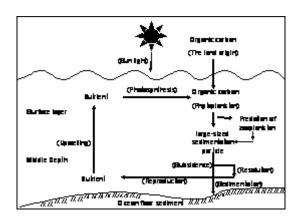


図-2 生物ポンプによるサイクル 5)

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。

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

$$f = pp/400 - pp/340000 \tag{3}$$

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

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/m 2 ・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 CO_2 の鉛直輸送の際、水深 $200m\sim2500m$ 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 CO_2 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 $^{4)}$ 。

$$J(z)_1 = 40 \times pp/z \qquad z < 100 \quad (5)$$

$$J(z)_1 = 0.409 \times pp^{1.41} / z^{0.628}$$
 $z > 100$ (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J(z): 基礎生産に対する沈降量 $(gC/m^3 \cdot year)$ 、z: 鉛直方向の深さ(m)。

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 \sim 1991年 07月 07日の期間における、太平洋上の N: 36.0 \sim S: 5.0、E: 135.0 の地点の鉛直方向 0m \sim 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 CO_2 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 CO_2 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、 CO_2 濃度は Case1 ほうが表層では値が高く、中層から深層にかけて

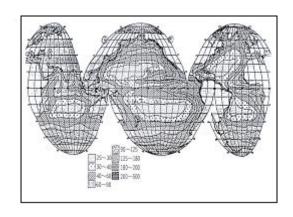


図-3 Berger らによる基礎生産量



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憶tと計算され、武 田らの予測値より小さい。

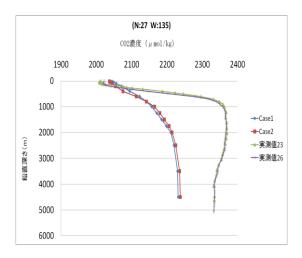


図-5 Case1-2,実測値のCO₂鉛直濃度分布(N:27,W:135)

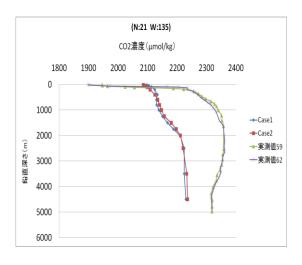


図-6 Case1-2,実測値のCO₂鉛直濃度分布(N:21,W:135)

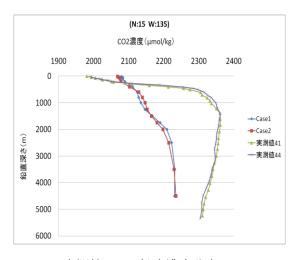


図-7 Case1-2,実測値のCO₂鉛直濃度分布(N:15,W:135)

5. まとめ

本研究では、 CO_2 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 $PP(gC/m^2 \cdot year)$ 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」

- 1) 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 CO₂ 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 CO_2 吸収は促進されるか」p42-p47,2006.9