

太平洋における CO₂ 海洋隔離の拡散解析について

日本大学大学院生産工学研究科 学生会員 ○渡邊道人
日本大学生産工学部 正会員 落合 実

1. はじめに

地球温暖化の主な原因として、現在、大気中の CO₂ 量が増加し続けていることが考えられており、CO₂ 削減はこれからの世界各国の共通課題となっている。

その解決案として、大規模排出源より排出した CO₂ を海洋中に長期隔離し、大気中 CO₂ 濃度を抑制する方法(海洋隔離)がある。海洋は自然条件下でも、移流・拡散や溶解ポンプ、生物ポンプ(鉛直方向への CO₂ 移送)の効果によって炭素循環が行われている。著者らはこれまでに、海洋の炭素循環モデルを考慮し、CO₂ 拡散モデルの精度向上化を図ってきた。その結果、生物ポンプ項の取り扱いが重要であることを示した¹⁾。

そこで、本研究は太平洋全域にて、生物ポンプに大きく影響する基礎生産量の感度解析を行い、生物ポンプ項への寄与を検討するものである。そして、CO₂ を投入をした数値解析を行い、投入近傍海域を対象に濃度比較をする。それらのことから CO₂ 拡散モデルの有効性を検討する。

2. 数値解析モデル

2.1 流動モデル概要

使用した流動モデルは、中村ら²⁾が展開してきた太平洋の一部を細分化したモデルを使用する。

投入地点は東経 132 度、北緯 22 度で黒潮海流がある日本近傍であり、計算精度を向上するため、投入地点を中心に経度 127~139 度、緯度 17~25 度の海域を 10 分割に細分化する。すなわち、元の 2 度メッシュ(粗メッシュ)に 0.2 度メッシュ(密メッシュ)を導入するネスティング手法を用いる。また鉛直方向の計算メッシュは 16 層で可変メッシュ区切りとした。

2.2 CO₂ の挙動予測モデル

(1) 基本式

CO₂ 濃度の解析は、次式を用いる。

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

ここで、 C : 全炭酸濃度 ($\mu\text{mol/kg}$), t : 時間 (s), $\vec{u}$: 流速 (m/s), ∇ : 水平ナブラ演算子, K_H : 水平方向拡散係数 ($1 \times 10^3 \text{m}^2/\text{s}$), K_V : 鉛直方向拡散係数 ($1 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$), $F_{OCEAN-AIR}$: 大気・海洋間の CO₂ 収支 ($\mu\text{mol/kg}$), F_{inj} : CO₂ 投入量 ($\mu\text{mol/kg} \cdot \text{yr}$), F_{bio} : 生物ポンプ ($\mu\text{mol/kg} \cdot \text{yr}$), Z : 鉛直方向深さ, λ : 球面座標の緯度, ϕ : 球面座標の経度である。

(2) 大気・海洋間の CO₂ 交換

式 (1) の右辺 3 項は、単位面積当たり海洋表面を通して交換される CO₂ 量(大気・海洋間の CO₂ 収支)であり、大気と海洋表面の CO₂ 分圧差によって変化する。即ち、CO₂ は大気分圧が高ければ大気から海洋に吸収され、海洋分圧が高ければ海洋から大気へ放出される。

以下に大気・海洋間の CO₂ 収支の算定式を示す。

$$F_{OCEAN-AIR} = E \cdot (pCO_{2-OCEAN} - pCO_{2-AIR}) \quad (2)$$

ここで、 $F_{OCEAN-AIR}$: 収支量: CO₂ 収支 ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{yr}$), E : ガス交換係数 ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{yr} \cdot \mu\text{atm}$), $pCO_{2-OCEAN}$: 海洋の CO₂ 分圧 (μatm), pCO_{2-AIR} : 大気の CO₂ 分圧 (μatm) である。また大気の CO₂ 分圧は現在でも上昇し続けていることから、大気 CO₂ 濃度は 1.8ppm/yr ずつ増加させて計算を行う。

(3) 生物ポンプ

海洋表面では大気から溶け込んだ CO₂ と栄養塩を材料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。これを基礎生産と呼ぶ。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) からやがて中・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。こうした有光層から下層への炭素物質による移送過程のことを生物ポンプと称されている。

本研究における、基礎生産に対する新生産の割合および生物ポンプは、式 (3), (4), (5) に示す中村ら²⁾による手法を用いる。

キーワード 二酸化炭素, 海洋隔離, 生物ポンプ, 数値モデル

連絡先 〒274-8575 千葉県習志野市和泉町 1-2-1 日本大学生産工学部土木工学科 TEL 047-474-2452

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

$$f = pp / 400 - pp / 340000 \quad (4)$$

$$F_{bio} = pp \times f \quad (5)$$

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 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$)、 pp ：基礎生産量 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$)。基礎生産が $150 \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ 以下であれば式 (3) を用い、基礎生産が $150 \sim 500 \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ までは式 (4) を用いる。

4. 生物ポンプモデルの感度解析

本研究では、まず生物ポンプにおける基礎生産量の影響を検討することから、人為的な CO_2 投入量をゼロとして太平洋全域の計算を行う。現在使用している基礎生産量を基本として、10 倍、100 倍、20 倍の基礎生産量に対する濃度変化を比較することで、生物ポンプ項の感度をみた。Fig. 1 は基礎生産量の各倍率における CO_2 鉛直分布及び実測値³⁾の鉛直分布を示す。

これらの計測結果より、基礎生産が 10 倍、もしくは 20 倍にした場合に観測値に近くなる傾向が見られた。したがって、この研究では基礎生産量の倍率を 20 倍として定め、以後計算を行っていくものとする。

5. CO_2 投入に伴う濃度比較の検討

生物ポンプモデルの検討を踏まえ、 CO_2 の挙動を予測する。Fig.2 は、 CO_2 投入がない場合および投入した場合の CO_2 濃度の差分を示している。

この図から、計算海域の中層域に投入を行うことによって高濃度 ($5000 \mu\text{mol/kg}$ 以上) での影響がおおよそ範囲は投入海域近傍のみであり、範囲としては北方向に約 4 度 (400km 程度) であることが示されている。

Table 1 は鉛直方向の CO_2 移動を検討するために各計算メッシュ毎の CO_2 総量をまとめたものである。表より、投入層から表層域および深層域にかけて CO_2 量が減少していることから、その間では移流・拡散が行われているものと考えられる。しかし、表層近くや深層域ではあまり変化がないことから、投入した CO_2 の影響が小さいことが示唆される。

6. まとめ

本研究では地球温暖化の原因とされる CO_2 の海洋隔離技術に着目して、 CO_2 の海洋拡散モデル、特に生物ポンプモデルの効果について検討した。

その結果、計算に用いる妥当な基礎生産量を見積ることができた。そして CO_2 投入近傍域の CO_2 特性を数値解析によって表わすことができた。また、 CO_2 濃度

の高い領域の推定ができたことから、今後はそれら領域における生物の影響について検討する必要がある。これらのことから本研究に用いた CO_2 拡散モデルの有効性が確認された。

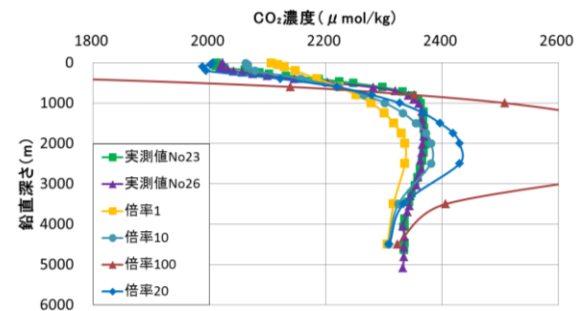


Fig.1 CO_2 鉛直濃度分布(10 年後)(N:27.W:135)

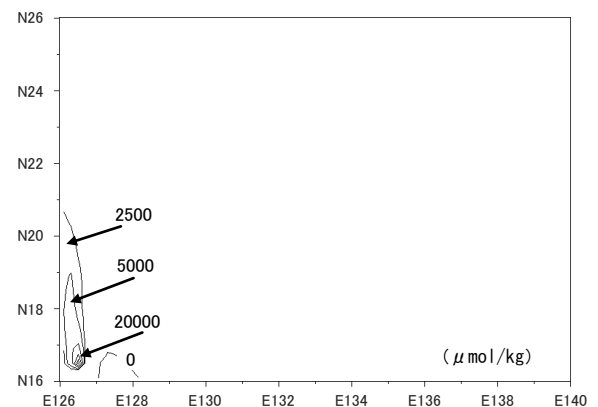


Fig.2 投入地点近傍の第 10 層 CO_2 濃度差分平面図

Table 1 CO_2 投入地点近傍における CO_2 総量比較
単位 (Gt)

層	水深(m)	投入前	投入後	差
1	20	0.88	0.87	0.01
2	50	1.33	1.31	0.02
3	100	2.22	2.19	0.03
4	200	4.47	4.40	0.07
5	400	9.11	8.93	0.17
6	600	9.33	9.10	0.22
7	800	9.57	9.28	0.29
8	100	9.84	9.44	0.40
9	1250	12.66	11.99	0.67
10	1500	13.43	12.15	1.28
11	1750	12.83	12.21	0.62
12	2000	12.67	12.27	0.40
13	2500	25.03	24.55	0.48
14	3500	49.00	48.52	0.48
15	4500	47.43	47.13	0.30
16	5500	22.33	22.24	0.09
計		242.13	236.60	5.53

参考文献

- 1) 渡邊道人ほか： CO_2 海洋隔離における拡散解析手法に関する研究—海洋中炭素循環パラメータによるモデル精度の検討—,第 65 回年次学術講演会講演概要集,II -295,2010
- 2) 中村倫明ほか：数値モデルを用いた日本近海における CO_2 海洋隔離による CO_2 濃度影響評価, 海洋調査技術学会誌,Vol.42, pp.1-13,2009
- 3) CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER,
URL : <http://gcmd.nasa.gov/>