

CO₂ 海洋放出による pH 値の低下と海洋生物への影響評価

日本大学大学院

学生会員 ○中村 倫明

日本大学大学院

正会員

和田 明

日本大学

正会員

落合 実

1. はじめに

2007 年に公開された IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)による第 4 次評価報告書(AR4)によれば、CO₂ 濃度が海洋表面に与える酸性化(pH の低下)などの直接影響について言及されている¹⁾。これに対し先に報告された特別報告書(SRCCS; Special Report Carbon Dioxide Capture and storage)では、この解決方法として CO₂ 回収・貯留技術(CCS)の有効性が言われている²⁾。その中でも CO₂ 海洋貯留技術は、海洋表面を通さず海洋中層へと CO₂ を送り込むことで海表面の酸性化を緩和させることが目的である。

海洋への溶解・貯留技術の基本構想の 1 つとして、中層希釈放流方式がある。著者らはこの中層希釈放流を対象として、数値モデルを用いた投入後の CO₂ の挙動及びそれに伴う pH の低下を予測し、海洋生物への影響評価を行うことを目的としている。本研究では観測値と計算による pH を比較しモデルの整合性を検討した後、CO₂ 暴露試験についての既往の知見^{3) 4) 5)}と比較し、投入した CO₂ が海洋生物へ与える影響について検討を行った。

2. 解析モデルの概要

2.1 流動モデル

本研究で使用した流動モデルの計算対象範囲は太平洋全域とし、水平方向解像度を 2° × 2° とした。この内 CO₂ 投入海域近傍の解像度は 0.2° × 0.2° に細分化した。細分化の範囲は投入地点(東経 133 度, 北緯 23 度)を中心に経度 127~139 度, 緯度 17~25 度とした。細分化の方法として、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た。また鉛直方向の計算メッシュは 16 層の可変メッシュ区切りとした。

2.2 CO₂ の挙動モデル

流動モデルと同じ格子系を元に CO₂ 放出点近傍を細分化させたモデルを構築した。モデルでは大気・海洋間の CO₂ 収支(溶解ポンプ)および生物活動による炭素の鉛直移送(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。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + L(C) = K_H D_H(C) + K_V D_V(C) - F_{OCEAN-AIR}(\lambda, \phi) + F_{inj}(\lambda, \phi, z) - F_{bio}(\lambda, \phi, z) \quad (1)$$

$$L(C) = \frac{1}{r \cos \phi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \lambda} uC + \frac{\partial}{\partial \phi} v \cos \phi C \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial w r^2 C}{\partial r} \quad (2)$$

$$D_H(C) = \frac{1}{r \cos \phi} \left\{ \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial^2 C}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial C}{\partial \phi} \right) \right\} \quad (3)$$

$$D_V(C) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right\} \quad (4)$$

ここで、 C : 全炭酸濃度 ($\mu\text{mol/kg}$)、 t : 時間(s)、 u, v, w : 流速の東向き、北向き、上向き成分、 K_H : 水平方向拡散係数 ($1.0 \times 10^3 \text{m}^2/\text{s}$)、 K_V : 鉛直方向拡散係数 ($1.0 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$)、 $F_{OCEAN-AIR}$: 大気・海洋間の CO₂ 交換、 F_{inj} : CO₂ の投入量 ($\mu\text{mol/kg} \cdot \text{s}$)、 F_{bio} : 生物ポンプ移送量 ($\mu\text{mol/kg} \cdot \text{s}$)、 r : 地球半径、 λ : 経度、 ϕ : 緯度、 z : 鉛直深さである。

2.3 pH の算出

pH は CO₂ 濃度、水温、塩分、アルカリ度に寄与し⁶⁾ CO₂ 濃度が上昇した場合、値は低下するとされている。そこで pH を算出することによって海洋生物への影響度合いを推定することとした。以下に pH の算出式を示す。

$$pH = -\log a_H \quad (5)$$

ここで、 a_H : 水素イオン濃度の活量である。これは、理想系と実存系に存在する誤差を修正するために導入された水素イオン濃度の一種である。

3. CO₂ が海洋生物へ与える影響

海洋生物への影響は Kikkawa³⁾ や Kurihara ら^{4) 5)} が実験水槽内に CO₂ を暴露することにより試験を行っている(表-1 参照)。それによれば、マダいの正常孵化率、プランクトンのカイアシ類(*Acartia steueri* and *Acartia erthraea*) のメスの生存率、産卵数と 2 種類のウニ(*Hemicentrotus pulcherrimus* and *Echinometra mathaei*) における正常孵化率を報告している。そこで、この報告と本計算結果(pH)を比較した。

キーワード 二酸化炭素、海洋隔離、海洋酸性化、数値シミュレーション

連絡先 〒102-8251 東京都千代田区五番町 12 番 5 号 日本大学大学院 総合科学研究科 TEL03-5275-7990

4. CO₂ 投入による pH 計算結果

CO₂ 投入量は COP3 で定められた基準値に対し、2003 年の年間超過量である 0.052Gt/yr とし、日本近海に 10 年間連続投入し CO₂ の挙動を把握しその結果を基に pH を算出した。投入方法として 1 地点から投入する固定点投入と投入地点を移動させる Moving-Ship による投入を想定した。

図-1 に東経 133 度、北緯 23 度における pH の観測値 (JODC 所蔵⁷⁾; 1908~2008 年におけるデータ) 及び計算結果の鉛直分布を、図-2 に固定点投入における 10 層 (1375m) の pH 平面分布を示す。まず、CO₂ 濃度計算結果から pH を算出した際、その値が妥当であるかを観測値と比較することで検討した。図-1 より、観測値は表層から深さ 1000m まで pH は低下し、1000m 以深では 7.8 前後で安定している。一方、計算結果は、概ね観測値のプロット上にあるが、表層付近で値が小さい傾向にある。これは、表層付近では大気から海洋へと CO₂ 交換が行われているためと考えられる。しかしながら、本計算期間である 10 年間で表層付近の pH が 0.2~0.3 低下することは考え難い。この原因として、本研究では大気 CO₂ 濃度上昇を抑制するため膨大な CO₂ 量を海洋へ投入することを構想としているにも関わらず、モデル上では海洋へ CO₂ を投入すると同時に大気 CO₂ を年々増加させて計算を行ったためと考えられる。

図-2 から pH が低下する範囲は投入地点から近傍域であることが分かる。ここで、既往の知見²⁾³⁾⁴⁾と比較すると、*H. pulcherrimus* と *E. mathaei* では pH7.6 から影響の可能性があることから、影響が考えられるエリアは投入地点から北西 200km 以内であることが示唆された。また、投入地点での pH は約 7.20 まで低下した。一方 Moving-Ship では、影響の可能性がある範囲は狭まり pH の最低値は 7.64 で、低下を抑制することができた。

参考文献

- 1) IPCC WG1 : Fourth Assessment Report, 2007.
- 2) IPCC : Special Report CCS, 2005.
- 3) Kikkawa, T., A. Ishimatsu, J. Kita: Acute CO₂ tolerance during the early developmental stage of four marine teleosts, Environmental Toxicology, 18, p.375-382, 2003.
- 4) Kurihara, H., S. Shimode, Y. Shirayama: Effects of raised CO₂ concentration on the egg production rate and early development of two marine copepods, Marine Pollution Bulletin, 49, p.721-727, 2004.

表-1 CO₂ 暴露試験による pH と影響²⁾³⁾⁴⁾

類	種	pH	影響
マダイ		6.862	正常孵化率の低下, マダイ稚魚の死亡
シロギス		7.32	126日後にTL, SL, BWに影響
		6.641	2時間後に死亡が確認される
カイアシ類	<i>Acartia steueri</i>	7.55	6日後に生存率40%
		7.55	6日後に産卵率80%
	<i>Acartia erthraea</i>	7.08	8日後に生存率50%
		7.08	8日後に産卵率83%
ウニ類	<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>	7.6	正常孵化に影響
		6.83	正常孵化率が約50%に低下
	<i>Echinometra mathaei</i>	7.6	正常孵化に影響
		6.79	正常孵化率が約10%に低下

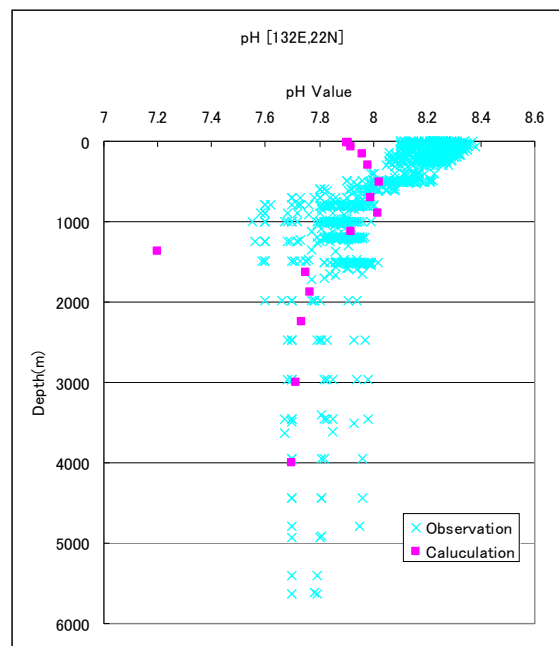
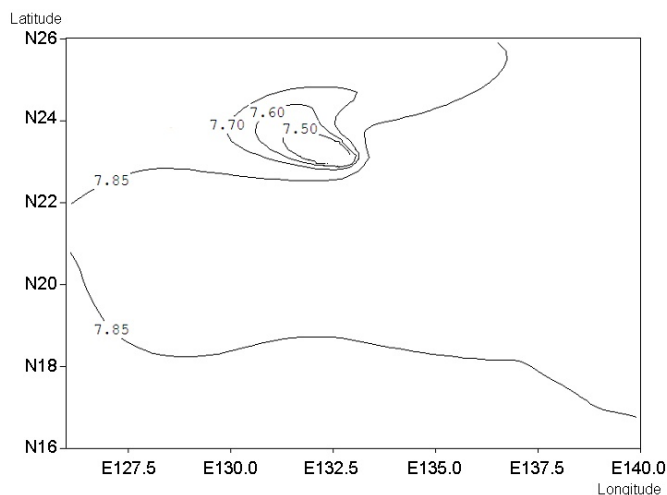
図-1 pH の観測値⁷⁾と計算値の鉛直分布 (E133, N23)

図-2 投入地点近傍の第 10 層における pH(固定点投入)

- 5) Kurihara H, Y Shirayama: Effects of increased atmospheric CO₂ on sea urchin early development, MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, 274, p.161-169, 2004.
- 6) 鈴木淳: 海水の炭酸系とサンゴ礁の光合成・石灰化によるその変化, 地質調査所月報, 45, 10, p. 573-623, 1994.
- 7) 日本海洋データセンター; http://www.jodc.go.jp/index_j.html