

海底下地中貯留による海洋へのCO<sub>2</sub>漏洩時の拡散予測

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

人口の増加と膨大なエネルギー利用によって近年の報告(IPCC, 2007)の通り地球温暖化が深刻化している。温暖化の主要因と考えられているCO<sub>2</sub>排出量は、産業部門とエネルギー転換部門で全体の半数以上を占めており、両部門から大量に削減することが期待される。

そこで注目されているのがCCS(Carbon Dioxide Capture and Storage)技術である。CCSは排出されるCO<sub>2</sub>を分離・回収し、地中または海洋に貯留することを構想としたものである。そのうち海底下帯水槽への貯留技術は、実証試験段階にある。一方、海底下貯留層から海洋への漏洩という課題が懸念されている。

地中隔離の既往の研究では、地震の発生などにより沿岸の海底土から海洋へ漏洩したCO<sub>2</sub>の濃度予測を、広範囲に長期的に予測したものは少ない。ここでは、地中隔離を行った際大陸棚地中から海低へ漏洩した場合を想定し、数理モデルを用いて10年後のCO<sub>2</sub>濃度予測を行い、得られた濃度分布から海洋生物への影響をpHを算出することによって検討することを目的とする。

## 2. 解析モデルの概要

## 2.1 流動モデル

RITE<sup>1)</sup>によれば、日本近海の海底下における地質の調査結果から、鹿島・相馬沖はかなり有望な貯留サイトであることが分かっている。一方で過去の観測データ<sup>2)</sup>から、この海域では頻繁にプレート型の地震が起こっており、漏洩の可能性が考えられる。

そこで本研究では、中村ら<sup>3)</sup>が展開した、太平洋全域(水平解像度:2°×2°)に鹿島沖のみネスティングによって細分化(水平解像度:0.2°×0.2°, 0.02°×0.02°)したモデルを使用した。その結果、太平洋の流れ場を算出し、黒潮の影響を受け陸から離れる流れや鉛直上向きの流れを確認した。

2.2 CO<sub>2</sub>の挙動モデル

流動モデルと同じ格子系を基にCO<sub>2</sub>放出点近傍を細分化したモデルを構築した。モデルでは大気・海洋間のCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>交換,  $F_{inj}$ : CO<sub>2</sub>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(m),  $\lambda$ : 経度(rad),  $\phi$ : 緯度(rad),  $Z$ : 鉛直深さ(m)である。

## 2.3 計算条件

地中隔離の地中から海底面までの漏洩はRITE<sup>4)</sup>によって既に検討されている。それによれば、CO<sub>2</sub>の浸透率が10mdとした場合の漏洩量は $2.8 \times 10^{-4} \text{kg/m}^2/\text{s}$ である。これに漏洩幅(1~1000m)を仮定して計算を行った。計算ケースについては表-1に示す。漏洩幅40mはスマトラ沖地震時に実際に観測された海底崩落幅であり、崩落は約45kmに亘って地層が断続的に繋がっていることが報告されている<sup>5)</sup>。漏洩深度は200mとした。

## 2.4 pHの算出

pHはCO<sub>2</sub>濃度, 水温, 塩分, アルカリ度に寄与し<sup>6)</sup>CO<sub>2</sub>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。

キーワード 二酸化炭素, CO<sub>2</sub>回収・貯留技術, CO<sub>2</sub>海洋隔離, CO<sub>2</sub>漏洩

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

3. CO<sub>2</sub> 投入による pH 計算結果

表-1 に地中隔離における漏洩幅別の最大濃度上昇値と高濃度(125μmol/kg)までの最大距離を表す。これによれば、スマトラ級の地震に対しての漏洩幅(Case3)では、漏洩地点において 1.2μmol/kg の濃度上昇があるが、海洋生物へ影響が生じるほどではないと考えられる。一方で、500m 以上の崩落が続いた場合(漏洩幅 500m 以上)、濃度上昇は大きく、海洋生物へ影響が考えられる距離も数 km にわたる。最大漏洩幅(1000m)における漏洩地点(最大値)での濃度は約 765μmol/kg となった。仮定した漏洩海域は流れが弱いと、拡散が大きく寄与している。そのため、希釈効果が小さく 125μmol/kg の高濃度の範囲は経度方向に約 140.9° E~141.0E° (10km)、緯度方向に約 35.9° N~36.1° N(20km)となった。

本研究は日本沿岸域の浅い深さを仮定したことから、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇に伴う海洋酸性化を想定した暴露試験と比較を行った。ここでは Kurihara<sup>7)</sup>がまとめた海洋生物影響の中から CO<sub>2</sub> を 1 日以上暴露した pH 低下試験による石灰化生物への影響を対象に評価を行った(表-2)。

図-1 に CO<sub>2</sub> 濃度計算結果から算出した漏洩層の水平 pH 分布を示す。この結果と表-2 を比較すると、pH 値が 7.2 以下の範囲 (約 140.88° E~141.40° E (52km)、緯度方向に約 35.58° N~36.18° N (40km)) では、18 種類中 12 種類に影響が生じる可能性が示唆された。また漏洩地点(pH=6.48)においては、石灰化生物に対して多くの種類への産卵の低下や成長の悪化、生存率に影響の可能性が考えられる。

生物影響評価の検討は、漏洩幅 1000m という比較的大きな漏洩幅について検討した。スマトラ島沖地震で観測された漏洩幅(40m)幅では、pH 低下が数 km に満たないことが確認されたためである。今後は漏洩地点から数十 m における長期的(1000 年程度)な濃度予測が必要となる。

参考文献

- 1) 地球環境産業技術研究機構：平成 16 年度二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書，2004.
- 2) 総理府地震調査研究推進本部：「全国を概観した地震動予測地図」2008 年版，2008.
- 3) 中村倫明，和田明，長谷川一幸，落合実：外洋域及び沿岸域での CO<sub>2</sub> 海洋隔離における濃度予測，水工学論文集，Vol.54，pp. 1591-1596，2010.
- 4) 地球環境産業技術研究機構：平成 18 年度二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書，2006.

表-1 地中隔離における最大濃度と高濃度距離

Case No.	漏洩幅(m)	漏洩量(kg/s)	最大濃度(μmol/kg)	高濃度距離(m)
Case1	1	2.8 × 10 <sup>-4</sup>	0.0028	0
Case2	15	0.063	0.1722	0
Case3	40	0.448	1.2242	0
Case4	100	2.8	7.6512	0
Case5	500	70	191.2808	4000
Case6	1000	280	765.1231	40000

表-2 石灰化生物への CO<sub>2</sub> 暴露試験による pH と影響

種	pH	期間	影響
<i>Acropora tenuis</i>	7.6	14day	Reduced growth of polyp size
<i>Mytilus galloprovincialis</i> (larva)	7.4	6day	Shell malformation, reduced larval size
<i>Mytilus galloprovincialis</i> (adult)	7.3	3month	Reduced growth, metabolism rate
<i>Mercenaria mercenaria</i> (juvenile)	7.1	21day	Shell dissolution
<i>Acartia tsuensis</i> (egg,larva)	7.4	9day	No effect
<i>Acartia tsuensis</i> (adult)	7.4	27day	No effect
<i>Calanus finmarchius</i> (egg)	6.95	72hour	Decreased hatching success
<i>Acartia steueri</i> (adult)	7.4-6.8	8day	pH<6.8, decreased egg production
<i>Acartia steueri</i> (egg,larva)	7.4-6.8	2day	Increased nauplius mortality
<i>Acartia erthraea</i> (adult)	7.0-6.8	8day	pH<7.0, decreased egg production
<i>Calanus finmarchius</i> (adult)	6.95	5day	Decreased egg production
<i>Palaemon pacificus</i> (egg,juvenile)	7.6	23~36day	Decreased settling size
<i>Palaemon pacificus</i> (adult)	7.9,7.6	30,15week	Decreased survival, growth, egg production
Antarctic krill (egg,larva)	7.7,7.4	26day	Decreased hatching success
<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i> (egg,larva)	7.8-6.8	3day	pH<7.8, skeletal malformation, reduced larval size,fertilization decrease
<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i> (adult)	7.9	6month	Decreased survival, growth rate
<i>Echinoetra mathaei</i> (egg,larva)	7.8-6.8	3day	pH<7.8, skeletal malformation, reduced larval size,fertilization decrease
<i>Echinoetra mathaei</i> (adult)			

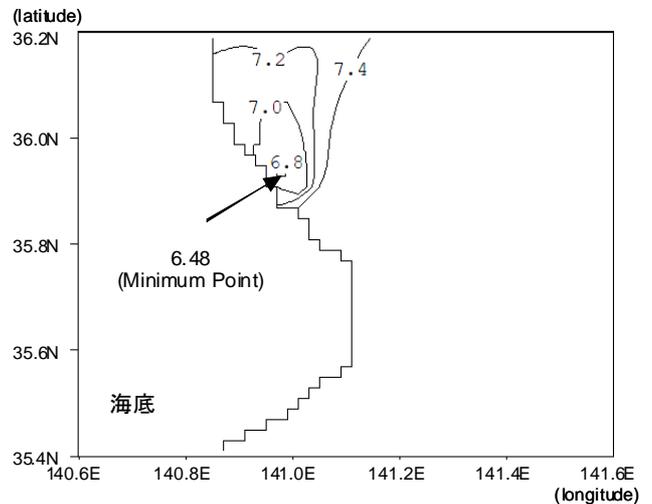


図-1 第 4 層(150m)における漏洩地点近傍の pH

- 5) 海洋開発研究機構： <http://www.jamstec.go.jp/>
- 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) Kurihara, H: Effects of CO<sub>2</sub>-driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates, MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, 373, p.275-284, 2008