

外洋域及び沿岸域での CO₂海洋隔離における濃度予測

A CONCENTRATION PREDICTION IN CO₂ OCEAN SEQUESTRATION IN THE OCEAN AREA AND COASTAL AREA

中村倫明¹・和田明²・長谷川一幸³・落合実⁴

Tomoaki NAKAMURA, Akira WADA, Kazuyuki HASEGAWA and Minoru OCHIAI

¹学生会員 日本大学大学院 総合科学研究科 (〒102-0073 東京都千代田区九段北4-2-1)

²正会員 工博 日本大学大学院 総合科学研究科 (〒102-0073 東京都千代田区九段北4-2-1)

³正会員 博士(工学) 財団法人海洋生物環境研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300)

⁴正会員 博士(工学) 日本大学 生産工学部 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

CO₂ oceanic sequestration is expected to enable industry-made CO₂ to be separated from the atmosphere for a considerably long period of time. On the other hand, it is also feared that the CO₂ injected in the oceans may adversely affect marine organisms due to acidification around the sequestration site. For evaluating the biological influences, we have studied to precisely predict the CO₂ distribution around the CO₂ injection site by a numerical simulation method. We could obtain detailed CO₂ distribution in waters within several hundred kilometers of the injection site, and clarified that the Moving-ship procedure may have less effects of lowered pH on marine organisms than the fixed-point release procedure of CO₂ sequestration. We also analyzed the effects of the land based discharge method, in which CO₂ generated in a coastal power plant is continuously discharge into sea through a pipeline system constructed on seabed in the continental shelf area. It was confirmed that CO₂ concentration distributions in coastal areas can be predicted by means of nesting from the whole Pacific Ocean model.

Key Words : CO₂ sequestration, Moving-Ship, Land based discharge, influence to marine animals

1. はじめに

地球温暖化問題は年々その重大さが指摘され、今や世界的に注目を集める問題となっている。この対策として、エネルギー利用の効率の向上をはかることは勿論であるが、CO₂の発生抑制対策や回収・隔離技術(CCS; Carbon Dioxide Capture and Storage)についても研究開発を進めなければならない¹⁾。CCSは地球温暖化対策として期待される技術の一つで、CO₂地中隔離・海洋隔離が主に研究されている。日本に限れば、地中隔離が持つキャパシティは大気への漏洩を考えると21.4Gtとなり、5~60年分の排出量と同等と考えられている²⁾。これに対し、CO₂海洋隔離は、現在も大量に排出され続けるCO₂量にも対応が可能であり、長期的な隔離を行うことが出来ると考えられている。

海洋隔離は大別して、液状のCO₂を海洋の中層域に薄く、広く拡散させる方法(溶解型)と、深層の海盆などに

貯留する方法(貯留)が想定されている³⁾。溶解型には、陸上プラントからパイプラインを敷設して所定の深度の海底固定点からCO₂を放流する方式(固定点放流)や、回収されたCO₂を専用船舶により海上輸送し、所定の外洋海域で船からパイプを吊り下げ低速で曳航しながら海洋中にCO₂を連続放流する方式(移動点放流)が考えられている⁴⁾(図-1参照)。

CO₂海洋隔離の既往の研究として、地球規模では、Nakashiki et al.⁵⁾がCO₂の投入地点を日本近海と想定し、CO₂に見立てた粒子を日本近海に投入し、その粒子が表層に到達する量から投入深度を評価している。また、Masuda et al.^{6,7)}はCO₂の投入深度及び投入海域を中規模渦の特性から検討している。CO₂投入点近傍については、手島ら⁸⁾が、船舶から下ろされたパイプ孔の後方における流れや渦の様子を数理モデルを用い、安定的にCO₂を輸送・投入できるパイプの特性を検討している。佐藤ら⁹⁾は、深海域での投入直後の海洋生物への影響を、数理モデルを用いて検討している。既往の研究⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾の多く

は、外洋域での隔離を想定したものであり、陸上から敷設された、パイプラインによる沿岸域でのCO₂の拡散予測を行ったものは少ない。著者ら¹⁰⁾はこれまでに、水平解像度2°×2°のモデルを用いて太平洋全域のCO₂濃度拡散を検討してきた。

そこで本研究では、発電所等で回収されたCO₂を陸域から大陸棚海底に敷設したパイプラインから連続投入する固定点投入(Land based discharge)と、外洋で船を停止して投入する定点投入、船を移動しながら投入する移動点投入を想定し解析を行った。著者らがこれまで展開してきた大気・海洋表面間のCO₂交換(溶解ポンプ)と生物ポンプを考慮した太平洋循環モデル¹⁰⁾¹¹⁾を基に、水平解像度を外洋域では0.2°×0.2°に、沿岸域ではさらに0.02°×0.02°にメッシュを細分化し投入したCO₂によるpHの低下が海洋生物へ与える影響度合いを検討した。

2. モデル概要

(1) 流れ場のモデル

本研究では、Wada et al.¹²⁾や、Hasegawa et al.¹³⁾が展開してきた海洋大循環モデルを改良したものを使用した。計算対象範囲は太平洋全域(110°E~70°W, 60°N~74°S C-grid)とし水平解像度を2°×2°、鉛直方向の計算メッシュは第1層: 0~20m, 第2層: 20~50m, 第3層: 50~100m, 第4層: 100~200m, 第5層: 200~400m, 第6層: 400~600m, 第7層: 600~800m, 第8層: 800~1000m, 第9層: 1000~1250m, 第10層: 1250~1500m, 第11層: 1500~1750m, 第12層: 1750~2000m, 第13層: 2000~2500m, 第14層: 2500~3500m, 第15層: 3500~4500m, 第16層: 4500~5500mの可変メッシュ区切りとした。メッシュの細分化は粗メッシュ系(2°×2°)に密メッシュ系を導入するネスティング手法を適用させて行った。

外洋域の計算結果は中村ら¹¹⁾のモデルによる計算結果(図-2)を利用した。

沿岸域では140°~148°E, 34°~40°Nの範囲の水平解像度を0.2°×0.2°とし、さらに140.6°~141.6°E, 35.4°~36.2°Nを0.02°×0.02°とした。

図-3, 図-4に、水平解像度0.02°における水平及び鉛直の流れ速ベクトル図を示す。図-3から、海岸近くでは地形に沿った流れとなり、流速が小さい傾向になった。また、図-4から、この海域では黒潮の影響を受け、鉛直上向きの流れがあることが分かった。

(2) CO₂濃度解析の基礎式

CO₂濃度解析に使用した計算式を次に示す。

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

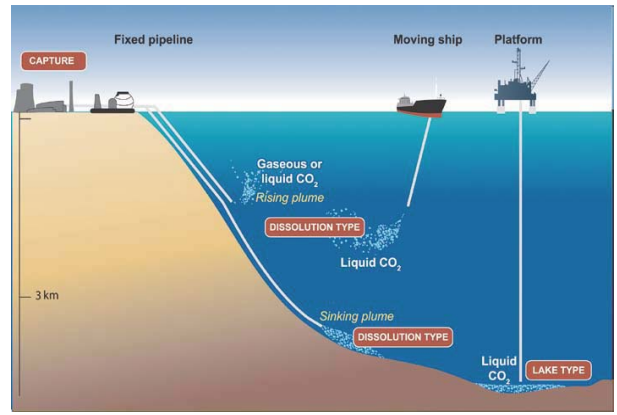


図-1 CO₂海洋隔離の構想²⁷⁾

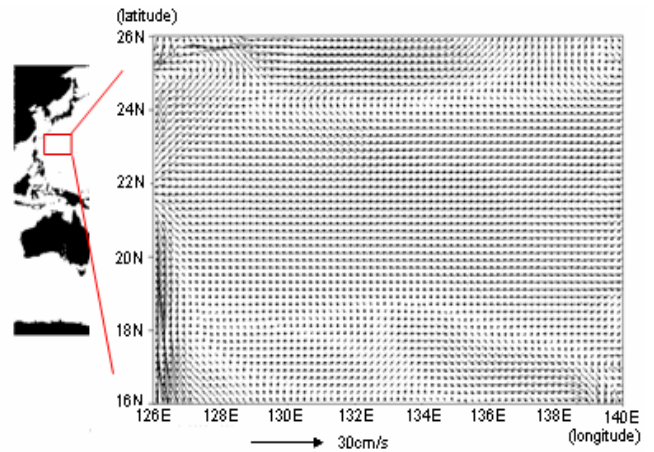


図-2 外洋域(126°~140°E, 16°~26°N)における10層の流れ場

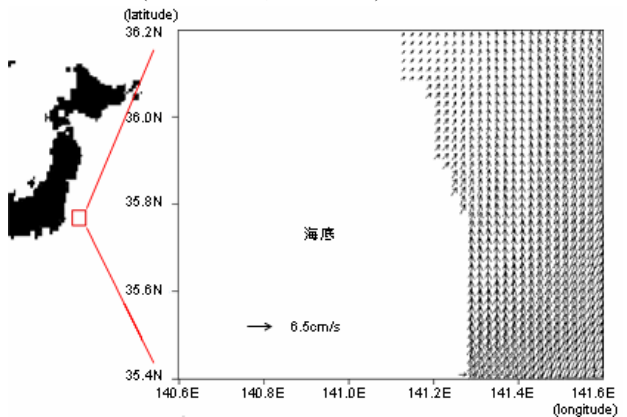


図-3 沿岸域(140.6°~141.6°E, 35.4°~36.2°N)における6層の流れ場

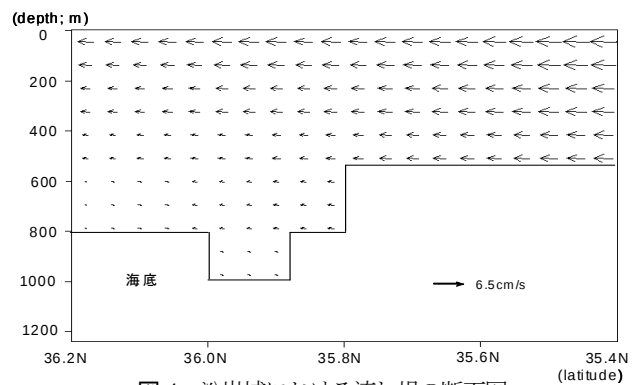


図-4 沿岸域における流れ場の断面図

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

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

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

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(m/s)、 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($1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)、 $F_{OCEAN-AIR}$ ：後述する大気・海洋間の CO_2 交換($\mu\text{mol/kg} \cdot \text{s}$)、 F_{inj} ： CO_2 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 ：地球中心からの距離(m)、 λ ：経度(rad)、 φ ：緯度(rad)である。

(3) 大気・海洋間の CO_2 交換

自然状態において海洋表面を通して交換される CO_2 の量(大気・海洋間の CO_2 収支)は、大気と海洋表面の CO_2 分圧差によって変化する。すなわち、大気分圧が高ければ大気から海洋に CO_2 は吸収され、海洋分圧が高ければ海洋から大気へ CO_2 が放出される。以下(5)に大気・海洋間の CO_2 収支の算定式¹⁴⁾を、(6)にTansら¹⁵⁾の係数値を示す。

$$F = E \cdot (p\text{CO}_{2-OCEAN} - p\text{CO}_{2-AIR}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E &= 0.016(U - 3) & : U > 3 \text{ m/s} \\ E &= 0 & : U \leq 3 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 F ： CO_2 収支量($\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$)、 E ：ガス交換係数($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$)、 $p\text{CO}_{2-OCEAN}$ ：海洋の CO_2 分圧(μatm)、 $p\text{CO}_{2-AIR}$ ：大気中の CO_2 分圧(μatm)、 U ：風速(m/s)である。また大気中の CO_2 分圧は現在でも上昇し続けていることから、365ppmから年間1.8ppmずつ増加させて計算を行った。

(4) 生物ポンプ

海洋では、海洋表層で植物プランクトンによって生産された有機炭素(基礎生産)は、やがて中・深層へと沈降し、そこで分解・消費を受け再び無機炭素へと戻る。こうした有光層から下層への炭素の移送は生物ポンプ¹⁶⁾と称されている。

本研究では、基礎生産に対する沈降量を式(7)から算出した。この沈降量を有光層において海洋中の炭素量から削減し、中層において海洋中の炭素量に加算する手法を用いた¹¹⁾。

$$\begin{aligned} F_{bio} &= \text{pp}^2 / 410 & \text{pp} < 150 \\ F_{bio} &= \text{pp}^2 / a - \text{pp}^3 / b & 150 < \text{pp} < 500 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 pp ：一次生産量($\mu\text{mol/kg} \cdot \text{s}$)、 $a=400$ 、 $b=340000$ である¹⁶⁾。

(5) 外洋域での計算条件

2009年に環境省が発表した報告書¹⁷⁾によれば2007年の日本の温室効果ガス排出量は0.374G ton-C/yearである。この値はCOP3で定められた1990年の排出量(0.344G ton-

C)に対して約0.03G ton-C/year超過している。この超過分の CO_2 を負荷量として、10年間連続的に定点放流方式およびMoving-Ship方式で投入した場合の濃度上昇を予測する。投入海域、投入深度は中村ほか¹¹⁾から123°E、23°N、10層(1375m)とした。

定点放流方式では、投入地点を1点に定め CO_2 投入を仮定した。一方、Moving-Ship方式に対して、尾崎¹⁸⁾は、時速約9kmで船を走行させながら1隻あたり0.1(ton/s)で CO_2 を投入することが可能としている。本研究では時間刻み幅が3600秒(1ステップ)、1メッシュの水平距離が $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ (約20km×20km)であるので、船の移動を2ステップで1回としてMoving-Ship方式を仮定した。

(6) 沿岸域での計算条件

四方を海に囲まれた日本にとって、沿岸域は有意義に利用すべきところであり、 CO_2 が海洋生物へ影響を与えないように投入すれば、Land based dischargeは輸送時間や輸送コスト、技術面から大いに有効であると考えられる。そこでここでは、投入した CO_2 が沿岸域でどのように移流・拡散していくかを検討した。

CO_2 回収は発電所からを想定する。火力発電の中でも石油・石炭を燃料とし、最大発電時の CO_2 排出が最も多い鹿島火力発電所と同規模の発電所を回収地と想定した。投入量は最大出力(4400KW)に、使用燃料別に報告されている¹⁹⁾ CO_2 排出係数を掛け合わせ0.0074G ton-C/yearとした。陸地からパイプラインを敷き、投入装置の設置を考え海底面に接する深さ500mで投入すると仮定する。

3. CO_2 濃度予測結果

(1) 外洋域での CO_2 濃度予測

第10層に CO_2 を10年間投入し続けたケースと CO_2 を投入しないケースを計算した(両ケース共に大気・海洋間 CO_2 交換を考慮)。図-5に定点投入による第10層における両ケースの差(CO_2 濃度増加量)を示す。図-5より、投入地点での濃度が約400 $\mu\text{mol/kg}$ となった。投入地点近傍では CO_2 濃度勾配が大きく、高濃度の範囲(125 $\mu\text{mol/kg}$)は水平方向に約70km、緯度方向に約40kmと考えられる。また、太平洋全域では、投入した CO_2 は日本近海から東側へ拡散し濃度が低くなった。このとき、10層における流れを確認すると、 CO_2 の広がりには流れ場の影響を受け、南太平洋側への CO_2 の移流は殆んどなく、濃度上昇は10年間連続投入した場合ほぼ皆無に等しいことがわかった。

次にMoving-Ship方式による CO_2 濃度上昇分布を図-5に示す。これより濃度上昇の最高地点は船の航行範囲のほぼ中央に位置し、その濃度は約40 $\mu\text{mol/kg}$ であった。図-5と図-6から、 CO_2 は図-2に示す流れと同様に、一度西へと広がり、そこから北東に広がった。Moving-Ship方式は定点放流方式と比べ100倍の投入面積を持つが、最高濃度は定点放流方式の場合の約1/10である。また水平シ

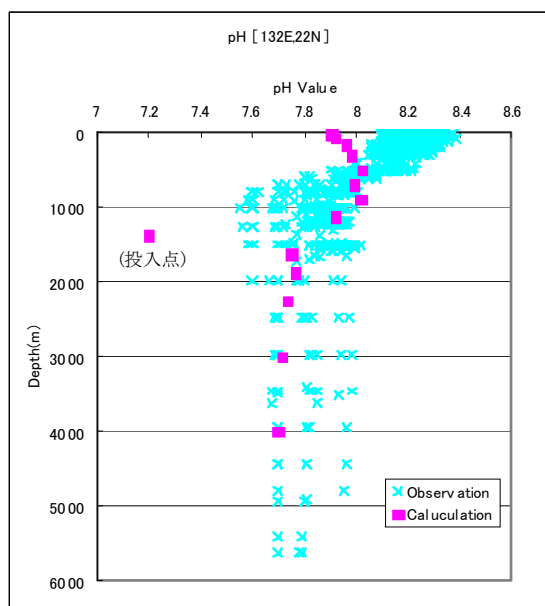


図-8 pHの観測値と計算値の比較

表-1 CO₂暴露試験によるpHと影響

類	種	pH	影響
マダイ	<i>Pagrus major</i>	6.862	正常孵化率の低下, マダイ稚魚の死亡
シロギス	<i>Sillago japonica</i>	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
	<i>Echinometra mathaei</i>	6.83	正常孵化率が約50%に低下
		7.6	正常孵化に影響
		6.79	正常孵化率が約10%に低下

次に、図-9に外洋域での定点投入によるCO₂濃度から算出したpH分布を、同様に、図-10にMoving-Ship、図-11に沿岸域のpH分布を示す。図-9から、投入地点でpHが7.20と一番低くなった。pH=7.6以下の範囲は投入地点から約150km以内であることも推察された。また、図-10からpHが最も低い値は7.64で、CO₂投入によるpHの低下範囲は定点投入に比べ狭くなることが分かった。一方、図-11では投入地点でのpHは7.22で、pH=7.6以下の範囲は投入地点から約10kmとなった。

このことから表-1と比較すると、マダイ・シロギスでは外洋域及び沿岸域ともに、投入したCO₂による急性毒性(死亡・正常孵化の低減)が生じる範囲は投入地点でのメッシュ以内(20km四方, 2km四方)と推定される。また、沿岸域でのウニ類への急性毒性(正常孵化の低減)が生じる範囲は10km四方程度であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、地球温暖化の主要因と考えられている大気への膨大なCO₂排出を抑制するためにCO₂の海洋隔離に着目し、その評価を行うために海洋大循環モデル、大

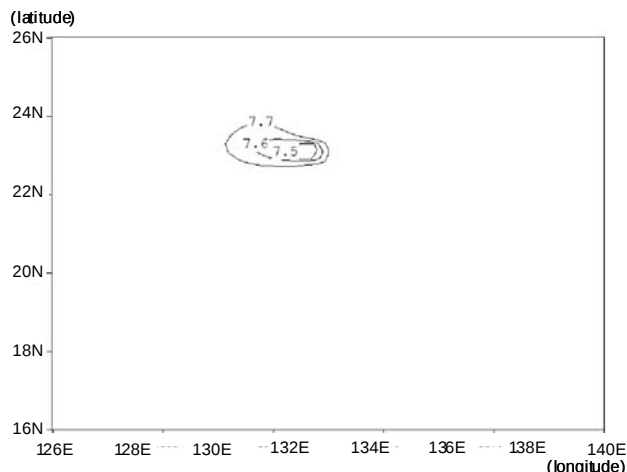


図-9 外洋域での定点投入によるpH分布(10層 ; μmol/kg)

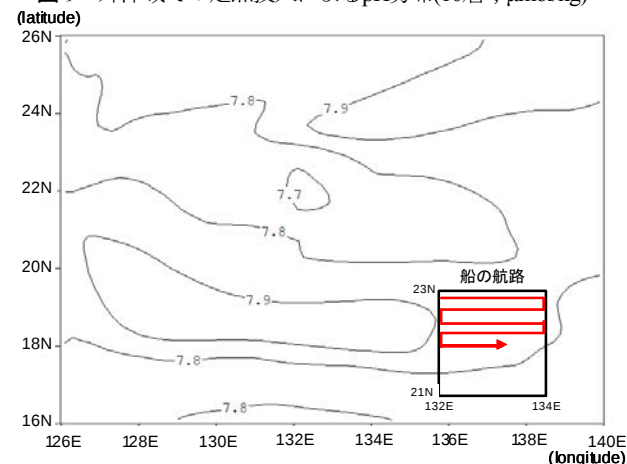


図-10 外洋域でのMoving-ShipによるpH分布(10層 ; μmol/kg)

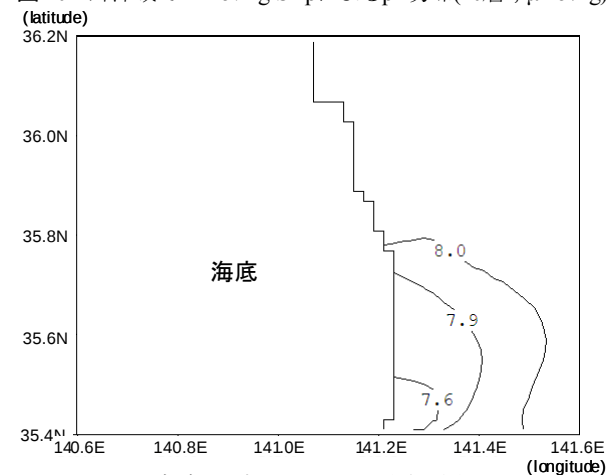


図-11 沿岸域での投入によるpH分布(6層 ; μmol/kg)

気・海洋間のCO₂収支、生物ポンプという海洋の炭素循環を支配する過程を考慮したモデルを構築し数値シミュレーションにより検討を行なった。外洋域での定点投入方式、Moving-Ship方式の場合と沿岸域での固定点投入方式における10年後のCO₂濃度予測を行った。外洋域での定点放流方式は投入地点での濃度上昇が著しく高く、Moving-Ship方式は投入地点での値は低いが低濃度の上昇海域が広いという違いが見られた。一方、沿岸域では陸沿いにCO₂が広がること確認され、鉛直方向への浮上もみられた。

次に上昇したCO₂濃度によるpHを算出し、pH低下によるマダイ・シロギス・カイアシ類・ウニ類への影響範囲を、本計算結果から評価した。その結果、Moving-Ship方式ではpHの低下範囲は定点放流方式に比べ狭いことが分かり、pH低下による生物への悪影響が少なくなる可能性があることが示唆された。一方、沿岸域のpHは外洋域と同程度まで低下した。

沿岸域ではウニ類をはじめ、多くの海洋生物の生存が考えられることから、発電所の最大出力時におけるCO₂を全て海洋へ投入することは、投入地点から数十kmにおいて海洋生物に対し何らかの影響を与える可能性が考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、ご指導頂いた株式会社アーク情報システム名古屋靖一郎様、高橋麻耶様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 和田明：海洋環境水理学，丸善株式会社，2007。
- 2) 佐藤徹：CO₂の海洋隔離技術の現状と展望，CO₂の分離・回収と貯留・隔離技術，pp.229-248，エヌ・ディー・エス，2009。
- 3) 石坂丞二，CO₂海洋隔離・隔離技術と生物影響について，月刊海洋，Vol.33，No.11，2001。
- 4) 尾崎雅彦：CO₂海洋隔離における希釈放流技術，月刊海洋，Vol.11,33，pp.767-770，2001。
- 5) Nakashiki, N., T. Hikita: OCEAN INTERMEDIATE DEPTH INJECTION, Energy Convers. Mgmt, 36, 6-9, p.453-456, 1995。
- 6) Masuda, Y., Y. Yamanaka, Y. Sasai, M. Magi, T. Ohsumi: A numerical study with an eddy-resolving model to evaluate chronic impacts in CO₂ ocean sequestration, Journal of Greenhouse Gas Control, pp.89-94, 2008。
- 7) Masuda, Y., Y. Yamanaka, Y. Sasai, M. Magi, T. Ohsumi: Site selection in CO₂ ocean sequestration: Dependence of CO₂ injection rate on eddy activity distribution, Journal of Greenhouse Gas Control, p.67-76, 2009。
- 8) 手島智博，亀井拓也，佐藤徹：斜め円柱後流の渦構造について，第17回流体力学シンポジウム，2003。
- 9) Sato, T.: Numerical Simulation of Biological Impact Caused by Direction Injection of Carbon Dioxide in the Ocean, Journal of Oceanography, Vol. 60, pp. 807-816, 2004。
- 10) 中村倫明，和田明，長谷川一幸，落合実：日本近海でのCO₂海洋隔離における濃度予測及び生物影響，水工学論文集，Vol.51，pp.1475-1480，2007。
- 11) 中村倫明，和田明，長谷川一幸，落合実：数値モデルを用いた日本近海におけるCO₂海洋隔離によるCO₂濃度影響評価，海洋調査技術学会誌，pp.1-13，Vol.42，2009。
- 12) Wada, A., S. Nagoya: Pacific Ocean flow simulation using the data assimilation system, Flow Modeling and Turbulence Measurements VI, pp.631-637, 1996。
- 13) Hasegawa, K., A. Wada, R. Nishimura, K. Takano: Calculations of the concentration of radionuclides (Cs-137, Sr-90, Pu-239/240) in The Pacific Ocean, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 20, 2, p.277-237, November, 2002。
- 14) 山本晋，村山昌平，後藤浩一：大気-海洋間のCO₂交換，月刊海洋，26，6，1994。
- 15) Tans, P.P., I.Y. Fung and T. Takahashi: Observational constraints on the global Atmospheric CO₂ budget, Science, No.247, pp.1431-1438, 1990。
- 16) 半田暢彦：海洋生物、大気水圏科学からみた地球温暖化，pp.271-286, 1996。
- 17) 環境白書：環境省平成21年度版，2009。
- 18) 尾崎雅彦：CO₂海洋貯留と海洋への隔離技術，月刊海洋，Vol.39, No.6, 2007。
- 19) 本藤祐樹，内山洋司，森泉由恵：ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価-最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響-，電力中央研究所研究報告Y99009，2000。
- 20) 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。
- 21) Kikkawa, T., T. Sato, J. Kita, A. Ishimatsu: Acute toxicity of temporally varying seawater CO₂ conditions on juveniles Japanese sillage, Marine Pollution Bulletin, 52, p.621-625, 2006。
- 22) 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, 2004a。
- 23) Kurihara, H., Y. Shirayama: Effects of increased atmospheric CO₂ on sea urchin early development, MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, 274, p.161-169, 2004b。
- 24) 国際環境用語集，日刊工業新聞社，1995。
- 25) 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，第10号，第45巻，pp.573-623，1994。
- 26) 日本海洋データセンター，http://www.jodc.go.jp/index_j.html
- 27) IPCC: Special Report CCS, 2005。

(2009. 9. 30受付)