

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

A CONCENTRATION PREDICTION IN CO₂ OCEAN ISOLATION IN THE
JAPANESE SEA NEAR THE SHORE AND INFLUENCE TO MARINE ANIMALS

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 (〒102-8251 東京都千代田区五番町12番5号)

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)

For the assessment of the long-term consequences of the carbon dioxide ocean sequestration, the CO₂ injection into the middle depth parts of the Pacific Ocean was simulated. The model consists of the essential processes, such as the ocean circulation developed by us, the solubility pump (CO₂ exchange flux across the atmosphere-ocean interface), the biological pump. The present major modifications from our previous model include the inclusion of the biological pump. This improvement enabled us to simulate the future CO₂ fate in the long-term using the more realistic model. Using this model, the CO₂ injection into the middle part of the ocean was simulated assuming the amount of CO₂ sequestered. Following results were obtained: (1) the present study could reveal the effectiveness of the direct ocean CO₂ sequestration, in relation to both selecting appropriate dumping depth, and evaluating the effect of CO₂ concentration to marine animals. (2) According to our model with a coarse grid mesh (2° × 2°), there would be less influence to the marine fish such as *Pagrus major* and *Sillago japonica*.

Key Words : CO₂ sequestration, air-sea CO₂ flux, biological pump, influence to marine fish

1. はじめに

経済発展と共に年々増加している化石燃料の大量消費は、地球温暖化問題の主要な原因と考えられ、それに伴うCO₂排出量の増加に懸念が集まっている。産業革命以前、約280ppmであった大気中のCO₂濃度は2000年には368ppmに達したが、産業部門での技術向上や個人の意識向上の成果により、日本では2004年度CO₂排出量が減少傾向を示した¹⁾。しかしながら、2005年には京都議定書が発効となり、それにより定められたCO₂削減目標達成期間(2008年～2012年)が切迫した現在でも削減達成は難しい状況である。そうした中で、化石燃料の消費に伴うCO₂の濃度上昇を抑制する対策、研究が各分野でなされている。特にCO₂を回収し隔離する技術開発は早くから考えられていた手法である²⁾。そこで本研究では、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事が出来ると考えられているCO₂海

洋隔離に着目した。現行のCO₂海洋隔離の研究では、大規模領域(地球規模)のものが多く、CO₂の投入地点を特定しているもの³⁾(粒子追跡)や、人為起源による大気のCO₂上昇が海洋のCO₂との交換によって生じると仮定したもの⁴⁾がある。本研究では、実際にCO₂海洋隔離を行うことを前提に、放出点を日本近海とし放出したCO₂の濃度分布を、数値シミュレーションを行うことによって予測した。

また、本研究では海洋隔離の可能性を評価する為に、生物影響を考慮することの出来るモデルの構築を目的とした。その先がけとして、太平洋の流れの算出、ハワイコナ市沖によるCO₂海洋隔離シミュレーションを現在までに行ってきたが⁵⁾、本研究では新たにCO₂濃度が上昇し続ける大気と、それに接する海洋との炭素交換、さらには植物プランクトン等の働きを考慮した生物による炭素の鉛直方向での循環(生物ポンプ)をモデルに取り込むことにより、モデル計算精度を向上させた。

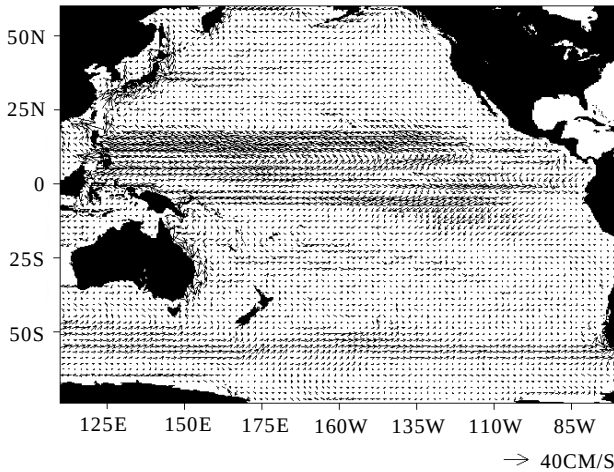


図-1 水平海流場(水深10m)³⁾

2. 解析モデルの概要

(1) 海洋大循環モデル

本研究で使用した海洋大循環モデルは、長谷川ら⁵⁾⁶⁾⁷⁾が再現してきたモデルを用いている。海洋の流速成分はPrimitiveな方程式系を使用している。計算海域は太平洋全域とし、水平方向の計算メッシュは経緯度 2×2 度(110E $\sim$ 70W, 60N $\sim$ 74S, C grid)である。鉛直方向の計算メッシュは、第1層: 0 $\sim$ 20m, 第2層: 20 $\sim$ 50m, 第3層: 50 $\sim$ 100m, 第4層: 100 $\sim$ 200m, 第5層: 200 $\sim$ 400m, 第6層: 400 $\sim$ 800m, 第7層: 800 $\sim$ 1500m, 第8層: 1500 $\sim$ 2500m, 第9層: 2500 $\sim$ 3500m, 第10層: 3500 $\sim$ 4500m, 第11層: 4500 $\sim$ 5500m, の11層に分割している。また、基礎方程式の座標系は水平方向に球面座標を用いている。また、ポテンシャル水温の保存式、塩分の保存式には、Sarmiento and Bryan⁸⁾にならい、計算値と観測値を同化させる項を導入するモデルを採用している。図-1に本研究で使用した表層水平流動場(水深10m)を示す。

(2) 大気・海洋間のCO₂交換

単位面積あたり海洋表面を通して交換されるCO₂の量(大気・海洋間のCO₂収支)は、大気と海洋表面のCO₂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CO₂は吸収され、海洋分圧が高ければ海洋から大気へCO₂が放出される。以下に大気・海洋間のCO₂収支の算定式を示す⁹⁾。

$$F_{\text{OCEAN-AIR}} = E \cdot (p\text{CO}_{2-\text{OCEAN}} - p\text{CO}_{2-\text{AIR}}) \quad (1)$$

ここで、 $F_{\text{OCEAN-AIR}}$: CO₂収支量(mol/m²・yr), E : ガス交換係数(mol/m²・yr・μatm), $p\text{CO}_{2-\text{OCEAN}}$: 海洋のCO₂分圧(μatm), $p\text{CO}_{2-\text{AIR}}$: 大気CO₂分圧(μatm)である。この分圧差による大気・海洋間におけるCO₂収支の算出は(1)式が広く用いられている。この中で、大気分圧に関しては化石燃料の燃焼の影響を直接受ける陸地の近くを除け

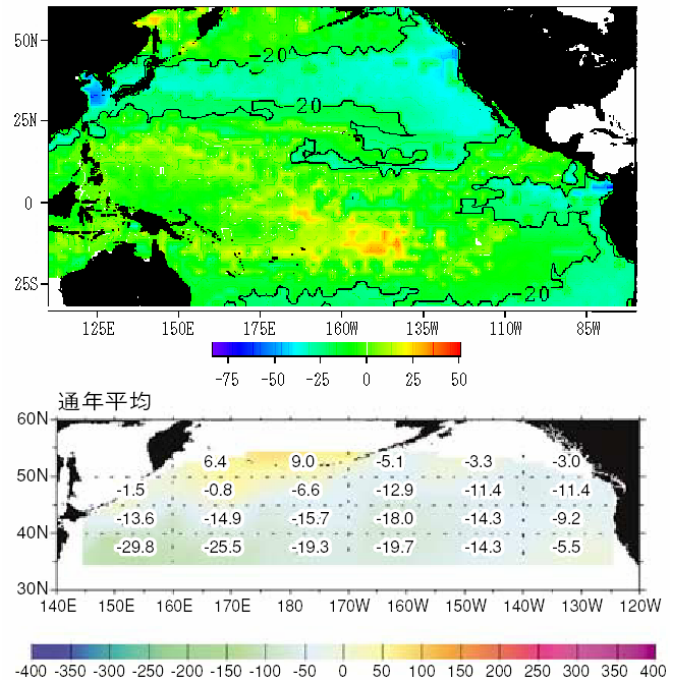


図-2 本研究結果と野尻¹⁰⁾との大気・海洋間CO₂分圧差比較(図内数値は分圧差、薄緑色は海洋のCO₂分圧の年平均値)(atm)

ば地域による濃度の差が少ないことから、一定値として与えている。しかしながら、海洋分圧は海域によって大きく異なることや、大気と比べ観測値が不足しているため、鈴木¹⁰⁾の式を用いて算出した。海洋分圧は特に水温、塩分、全炭酸濃度、全アルカリ度のパラメータに寄与していることから以下の式を用いている。

$$p\text{CO}_{2-\text{OCEAN}} = \frac{[\text{CO}_2(\text{aq})]}{K'_H} \quad (2)$$

ここで、 $[\text{CO}_2(\text{aq})]$: 非解離のCO₂濃度, K'_H : CO₂の溶解度(mol/kg・atm)である。また大気CO₂分圧は現在でも上昇し続けていることから、年間1.8ppmずつ増加させて計算を行った。

分圧差により収支の方向性が決まるが、その交換速度は海面付近での風の影響が大きい。(1)式中、 E (ガス交換係数)は風に依存する係数で、いわば収支の度合いを決める値である。この係数に関しては、現在のところの係数が最も現実に近いかは明らかにされていない。本研究ではNASA提供の長期風速データを使用していることから、Tansら¹¹⁾の係数値を用いた。

$$E = 0.016(U - 3) \quad (3)$$

ここで、 E : ガス交換係数, U : 風速(m/s)である。この係数は風速が3m/s以上でなければ、大気・海洋間のCO₂収支は起きないという特徴がある。

また(1)～(3)の式を用いて算出した大気・海洋間CO₂分圧差と、野尻¹²⁾が算出した亜寒帯地域での大気・海洋間CO₂分圧差を図-2に示す。これより本計算結果では、この海域ではマイナスの数値が多い。このマイナスの値は

大気から海洋への吸収を意味するが、既往の知見¹³⁾や野尻の算出からも同様に亜寒帯地域が吸収域となっている。また分圧差も北アメリカ大陸付近では多少の差異はあるものの、亜寒帯海域中心部の約-20(atm)も概ね再現されていることが推察される。

(3) 生物ポンプ

海洋表層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(Primary production)と呼ぶ。この生成された有機炭素は消費者(大型プランクトン、魚類)に利用されるが、利用されなかっ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と戻る。こうした有光層から下層への炭素物質の移送のことは生物ポンプ¹⁴⁾と称されている。基礎生産(一次生産)は栄養素の供給の違いから、再生生産と新生産に区別される。再生生産とは有光層内で分解・再生された栄養素を用いた有機物生産であり有機炭素を表層から深層へ運ぶことには関与していない。一方、新生産は中・深層からの湧き上がりや河川および大気からもたらされた栄養素を使つての有機物生産であり、定常状態では表層から移動除去される有機炭素量に等しい。生産量比では再生生産の方が圧倒的に多いが、再生生産は炭素の移動には関与していないため、本研究では新生産のみを扱うこととした。系外からの移入栄養物質に依存した新生産は、基礎生産の大きさに関係している。基礎生産に占める新生産の割合は明らかにされていないが、一般的には10%前後であると推測されている¹⁴⁾。

しかしながら場所による変動があることから、基礎生産に対する新生産の割合を下記の式¹⁴⁾を用いて算出した。

$$f = pp/410 \quad (4)$$

$$f = pp/400 - pp/340000 \quad (5)$$

ここで、 f : 基礎生産に対する新生産の割合、 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(4)を用いて、基礎生産が $150 \sim 500 \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ までは式(5)を用いる。

本モデルでは、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(5~8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ている。また、基となる式(4)、(5)における基礎生産量(pp)にはBerger¹⁵⁾らによる年平均基礎生産量分布図を使用している。この生物による一連の過程(生物ポンプ)を図-3に示す。また、生物ポンプの再現は、生物生産によるCO₂輸送の観測が少なく、比較が出来ない為、この手法が妥当であると仮定しCO₂濃度予測を行うこととする。

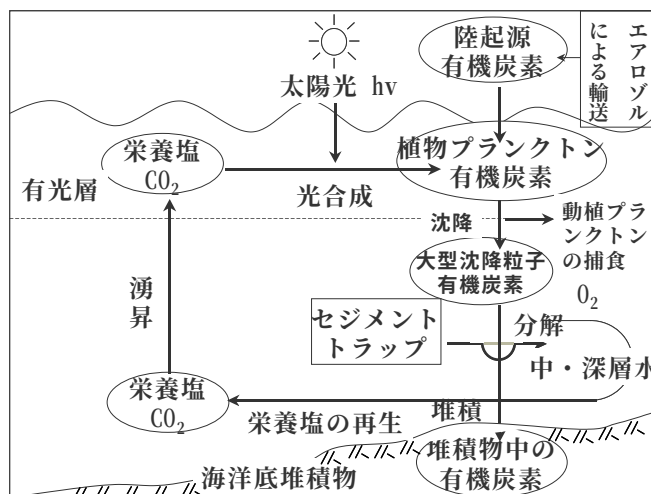


図-3 生物ポンプフローチャート¹²⁾

3. CO₂海洋隔離の濃度予測

海洋は自然のプロセスにおいても大気中に存在するCO₂を吸収しているが、その吸収速度は人類が大気中に排出するCO₂の量に比べて緩やかであるため、排出されたCO₂のすべてを吸収することができない。そこで、吸収速度を抑えている海洋表層を通らずに直接海洋にCO₂を注入してしまうという考えがCO₂の海洋隔離である。

CO₂海洋隔離は化石燃料を燃焼して発生するCO₂を排ガスの中から分離・回収して海洋へ送り込んで、大気から長期間隔離する構想である。海洋隔離は海洋環境への影響をできるだけ小さくするために、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を投入する方式(固定点放流)や、回収されたCO₂を液化して海上輸送し、所定の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を連続投入する方式(移動点放流)、水深が深く海水の流れや乱れがほとんど無いと考えられる海底にCO₂を貯留する方式(深海底貯留)が考えられている¹⁵⁾。

本研究ではこの内、移動点放流を想定し解析を行った。

(1) 投入するCO₂の量と投入海域の設定

地球温暖化に対する関心や国民の省エネに対する意識は次第に高まりつつあり、平成18年に環境省が発表した報告書¹⁾によれば2004年日本でのCO₂排出量は前年比で減少をみせたものの、2003年の日本のCO₂排出量(現段階での最高値)は12.59億トン(CO₂換算)である。この値はCOP3で定められた1990年の排出量(0.307Gt)に対して約0.052Gt(炭素換算)超過している値である。この超過分のCO₂を50年間連続で同一地点に投入し続けた時の50年後の濃度上昇を予測した。

CO₂の投入海域は、日本の排他的経済水域内(Exclusive Economic Zone: EEZ)とした。これは公海であると一般国際法や条約上の義務により、CO₂を海洋に

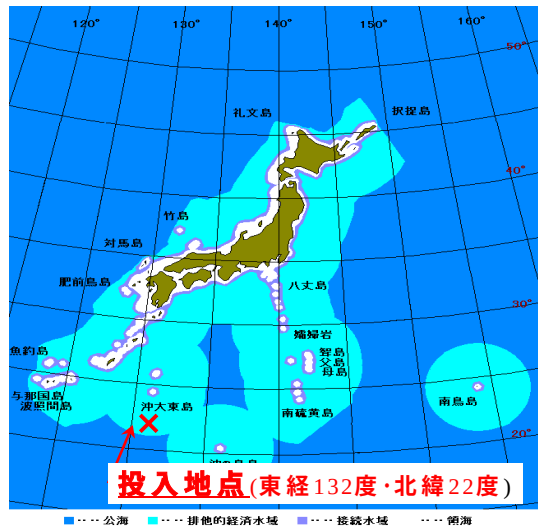


図-4 日本近海CO₂投入地点

隔離するうえで制限を受ける可能性があるためである。またこの海域(図-4)はTakahashiら¹³⁾によればCO₂の吸収域であるため、投入したCO₂が表層に達しにくいと考えられる。

(2) CO₂濃度予測の計算モデル

本研究ではCO₂を海洋に投入した際のCO₂濃度予測を行うために、前章の海洋大循環モデル、大気・海洋間のCO₂収支、生物ポンプを考慮した数値モデルを構築した。既存の知見では、流動、生態系等の個々のモデル構築は行われているものの、それらを組み合わせた、特に生物ポンプを考慮したモデルは少ない¹⁷⁾。以下に計算式を示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \nabla C = K_H \nabla^2 C + K_V \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - F_{OCEAN-AIR}(\lambda, \phi) + F_{inj}(\lambda, \phi, z) - F_{bio}(\lambda, \phi, z) \quad (6)$$

ここで、 C ：全炭酸濃度($\mu\text{mol/kg}$)、 t ：時間(s)、 K_H ：水平方向拡散係数($1.0 \times 10^7 \text{cm}^2/\text{s}$)、 K_V ：鉛直方向拡散係数($1.0 \text{cm}^2/\text{s}$)、 $F_{OCEAN-AIR}$ ：大気・海洋間のCO₂収支、 F_{inj} ：CO₂の投入濃度($\mu\text{mol/kg} \cdot \text{yr}$)、 F_{bio} ：生物ポンプ移送量($\mu\text{mol/kg} \cdot \text{yr}$)(2.(3)から算出)、 λ ：球面座標の緯度、 ϕ ：球面座標の経度である。

(3) CO₂濃度予測に使用したデータ

使用した水温・塩分データは、日本海洋データセンター(Japan Oceanographic Data Center: JODC)所蔵の1906年～1988年にわたる約80年間の東経100度～西経60度区間に存在するBT類(XBT・MBT・DBT・AXBT：船上から計測器を用いて計測するもの)、SD類(STD,CTD：各層観測)を整理して使用した。風速のデータは、SSM/I衛星風速観測値を使用した。SSM/I海上風データはNASAのGoddard Space Flight Center (GSFC)から提供されたもので、太平洋全域の1988年～1998年までの6時間毎のデータを整理して使用した。また、初期値としての全炭酸濃度と全

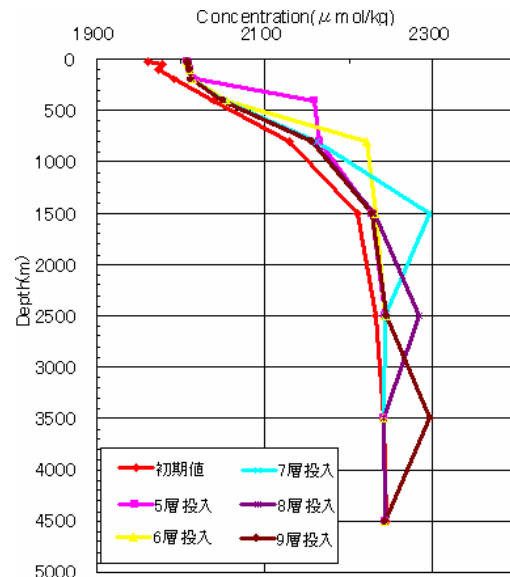


図-5 初期値と計算結果後の鉛直分布(132E,22N)

アルカリ度はChenら¹⁸⁾が報告した次式(7)、(8)より水温ごとに算出し使用した。

$$\Sigma \text{CO}_2 = 2236 - 9.4\theta (\pm 21) \quad \theta \leq 25^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$\Sigma \text{CO}_2 = 2500 - 20\theta (\pm 23) \quad \theta > 25^\circ\text{C}$$

$$\text{TA} = 2383 - 3.1\theta (\pm 10) \quad \theta \leq 25^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$\text{TA} = 2306 (\pm 10) \quad \theta > 25^\circ\text{C}$$

ここで、 ΣCO_2 ：全炭酸濃度($\mu\text{mol/kg}$)、 TA ：全アルカリ度($\mu\text{equiv/kg}$)、 θ ：水温($^\circ\text{C}$)である。基礎生産量はBerger¹⁵⁾が報告した1次生産分布から、対象海域の値を抜粋し使用した。

(4) CO₂の濃度予測計算の結果

はじめに、どの水深にCO₂を投入するのが妥当であるかを検証するために、投入地点において各層にCO₂を投入し、計算開始から50年後の有光層に到達したCO₂総量と4000m以深(海底層)に到達したCO₂総量を算出した。ただし、多種多様な生物が生息している有光層である第1～4層と海底生物が生息しているとされる深度4000m以深である第10～11層はCO₂投入による直接的な影響が大きいと考えられるため投入水深から外した。図-5に50年後の各投入層別CO₂濃度と初期値の濃度鉛直分布図を示す(投入地点)。図-5より、各投入層付近で濃度上昇がみられるが、その他の層では濃度上昇が低いことがわかる。また計算結果より投入が第7層以深であれば有光層へのCO₂到達量が総投入量の約5%以下であることがわかった。さらに、第8層以浅であれば4000m以深にはCO₂の到達量はほぼ皆無に等しいということから、CO₂の投入深度は第7層および第8層が有力であることがわかる。しかし、経済面の考慮や、海水との密度差から3000m以深ではCO₂は浮上せず沈降していくと考えられる¹⁹⁾ことから、第7層の方が適していると考えられる。

次にこの結果を踏まえ、第7層にCO₂を50年間投入し続

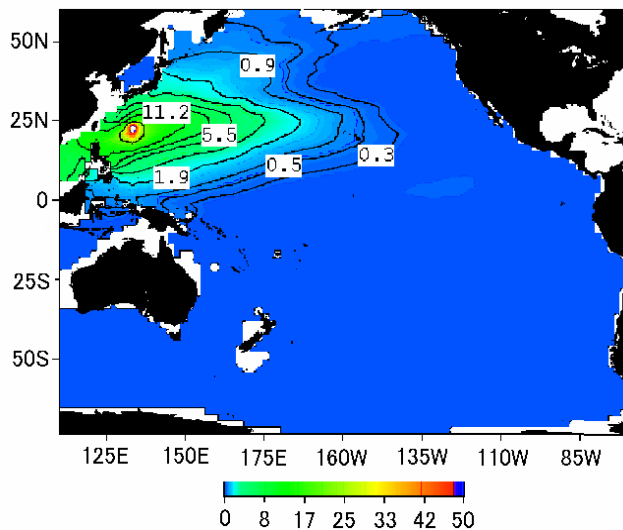


図-6 50年後7層のCO₂濃度上昇分布(μmol/kg)

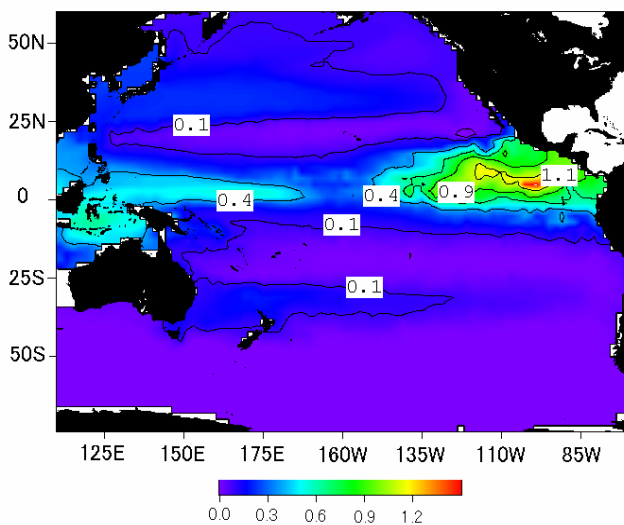


図-7 50年後1層のCO₂濃度上昇分布(μmol/kg)

けたケースとCO₂を投入しなかったケースを計算し、CO₂海洋隔離による濃度上昇を比較した。図-6に第7層における両ケースの差(CO₂濃度増加量)を、図-7に表層(第1層)における両ケースの差(CO₂濃度増加量)を示す。図-6より投入地点の海域では高いCO₂濃度上昇があるが、投入地点から東側の海域ではCO₂濃度は薄くなり広く拡散している。東太平洋の赤道域では50年後の濃度上昇が0.1(μmol/kg)と低い値となるが、投入点近傍での濃度上昇値は68.2(μmol/kg)で投入地点から400km四方の範囲では濃度上昇は30(μmol/kg)程度であった。また、南太平洋側への濃度上昇は50年間連続投入した場合でもほぼ皆無に等しいことがわかった。

また、図-7よりメキシコ沿岸海域でのCO₂濃度上昇が顕著であった。その原因として考えられるのは、放出点から放出したCO₂が移流拡散、特に北赤道反流に代表される赤道付近の流れによって運ばれたためだと推察される。さらにメキシコ沿岸では大規模な湧昇流が観測されていることから、移送されたCO₂が表層付近に浮上したためと考えられる。また、この海域では基礎生産が多い地域

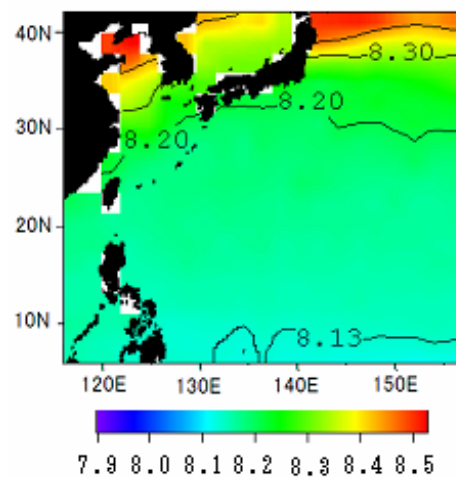


図-8 50年後表層のpH分布

であるので¹⁵⁾、一時的に表層付近のCO₂濃度は低下することで放出点から輸送されたCO₂が浮上したと考えられる。

4. 投入したCO₂が生物に与える影響

CO₂の海洋隔離による生物への影響評価は、CO₂が生物に与える影響について既往の知見を整理し、本計算結果(図-8)と照らし合わせるによって行った。海洋にCO₂を投入すると海水のpHが下がる等の影響によって生物に影響が生じると考えられる。本研究では、第7層(1150m)にCO₂を投入することが有効であると予測されたが、中深層生物に対するCO₂曝露影響や曝露実験例に関する知見は現在のところ非常に少ない²¹⁾。そのため、本研究ではCO₂曝露実験例のある浅海魚に対するKikkawaら²¹⁾の知見を引用して評価を行った。

Kikkawaら²¹⁾は数種類の魚類を対象として、それぞれの魚類に対して卵、仔魚、稚魚等を用いたCO₂耐性実験を行っている²¹⁾。この中でマダイを用いた24時間の曝露実験では、pHが6.55に低下した状態では正常孵化率は0%となり、さらにpHが6.16に低下した状態では生存率が0%になると報告している。ここで、正常孵化率とは奇形や未孵化等を含まない状態の個体数割合を指し、生存率とはどんな形であれ生きている状態の個体数割合を指すものである。

本計算結果では投入地点付近でCO₂の濃度上昇がみられるが、表層付近に生息する生物に対する生物影響を検討するため、投入点近傍の日本近海の第1層pH分布から海洋生物に対するCO₂影響を検討した(図-8)。pHは1気圧上の算出方法に基づき以下の式を用いて算出した。

$$pH = -\log a_H \quad (9)$$

ここで、 a_H :水素イオン活量である。

表層における本計算結果から、投入地点ではpH=8.17であった。そこでKikkawaら²¹⁾の報告と本計算結果の比

較を行った。その結果、マダイ卵の正常孵化率および稚魚の生残率は、24時間暴露の場合、その影響は20%以下程度と推察された。

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CO₂を抑制する技術の1つであるCO₂の海洋隔離に着目し、海洋大循環、大気・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使用し、CO₂濃度予測およびCO₂濃度上昇に伴う生物影響の評価を行なった。

本研究の第一段階としてCO₂海洋隔離シミュレーションを実施し、CO₂の投入深度について検討を行った。その結果、投入したCO₂が表層にも海底層にも到達量が少なく、またコスト面からも第7層(800m~1500m)が投入深度として適していると考えられた。次にCO₂濃度増加分布の結果からpHを算出し、CO₂が生物に与える影響について既往の知見と本計算結果を比較検討することにより生物への影響評価を行った。その結果、本計算結果(pH)では魚類(マダイ)への影響は、投入点近傍域が最も大きく、特に投入地点から200km四方以内では生物影響を詳細に検討する必要があると推測された。本計算モデルではメッシュサイズが粗く、広範囲での評価は行えるものの、近傍域のCO₂濃度は平均化されてしまうため、生物影響を正確に評価するためにはさらなる投入地点近傍域の計算の細分化、パイプからの密度噴流によるごく近傍域でのCO₂濃度評価を行う必要があると考えられる。

6. 今後の課題

本研究で使用した数値モデルのメッシュ格子幅は経緯度2×2度であるため太平洋全体と広域で見た場合での評価はできるものの、CO₂の放出口近傍のような局所的な範囲での評価ができていないと考えられるため、今後はその評価が必要である。また、生物評価(pH)においても、放出点近傍に存在が確認されている種での生物評価や長期の慢性毒性影響に対する影響評価が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 環境白書：環境省平成18年度版，2006。
- 2) 野崎義行：地球温暖化と海，東京大学出版会，1994。
- 3) N. Nakashiki, T. Hikita: OCEAN INTERMEDIATE DEPTH INJECTION, Energy Convers. Mgmt, Vol.36, No.6-9, pp.453-456, 1995.
- 4) M. Sorai, T. Osumi: Ocean uptake potential for carbon dioxide sequestration, Geochemical Journal, Vol.39, pp.26-45, 2005.
- 5) 長谷川一幸, 和田明, 西村玲輔, 高野憲治：太平洋海域での二酸化炭素中層放流の検討，水工学論文集，Vol.47, pp.1297-1302, 2003.
- 6) 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.45, pp.1063-1068, 2001.
- 7) K. Hasegawa, 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, Vol.20, No.2, pp.277-237, November, 2002.
- 8) Sarmiento, J.L., and Bryan, K.: An ocean transport model for the Atlantic, J. Geophys. Res., No.87, pp.394-408, 1982.
- 9) 井上久幸：海洋における二酸化炭素，月刊海洋，号外No.8, pp.66-71, 1995.
- 10) 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.
- 11) Tans, P.P., I.Y.Fung and T. Takahashi: Observational constraints on the global Atmospheric CO₂ budget, Science, No.247, pp.1431-1438, 1990.
- 12) 野尻幸宏：環境儀，国立環境研究所研究情報誌，No.6, pp.4-14, 2002.
- 13) T. Takahashi, S. C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R.A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson, Y. Nojiri: Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects, Deep-Sea Research, Vol.II, No.49, pp.1601-1622, 2002.
- 14) 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.
- 15) Berger, W.H.: Ocean Productivity and Paleoproductivity -An Overview Productivity of the Ocean, pp.429-455, 1989.
- 16) 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.
- 17) 青木繁明：炭素循環モニタリングのための海洋大循環モデル，資源と環境，Vol.4, No.1, pp.13-23, 1995.
- 18) Chen, Chen-Tung, A. and Pytkowicz, R.M.: On the total CO₂-titration alkalinity, Nature, No.281, pp.362-365, 1979.
- 19) 尾崎雅彦：深海への溶解希釈によるCO₂海洋隔離の可能性，日本深海技術協会会報，Vol.42, pp.4-9, 2004.
- 20) 服部明彦：海洋生化学，東京大学出版会，pp.339-366, 1973.
- 21) T. Kikkawa, A. Ishimatsu, J. Kita: Acute CO₂ tolerance during the early developmental stage of four marine teleosts, Environmental Toxicology Vol.18, pp.375-382, 2003.

(2006.9.30受付)