

# 太平洋海域での二酸化炭素中層放出の検討

## VERIFICATION OF THE CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION IN THE INTERMEDIATE LAYER OF THE PACIFIC OCEAN

長谷川一幸<sup>1</sup>・和田明<sup>2</sup>・西村玲輔<sup>3</sup>・高野憲治<sup>4</sup>

Kazuyuki HASEGAWA, Akira WADA, Ryosuke NISHIMURA and Kenji TAKANO

<sup>1</sup>学生会員 工修 日本大学大学院 生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

<sup>3</sup>学生会員 日本大学大学院 生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

<sup>4</sup>理博 コロンビア大学準教授 Lamont-Doherty Earth Observatory (61 Route 9W Palisades, NY, USA)

One of the effective methods of green house phenomenon is the CO<sub>2</sub> sequestration in the ocean, to prevent the increase of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. Rather than the atmosphere, ocean has the possibility of great quantity of CO<sub>2</sub> absorption. Because the number of ocean's molecules is about 430 times as big as air. So we investigate the effectiveness of CO<sub>2</sub> sequestration to use the calculation results obtained by data assimilation method in the Pacific Ocean. It is shown that (1) CO<sub>2</sub> sequestration has to perform under the thermohaline; (2) to conduct the CO<sub>2</sub> sequestration in the North Pacific Subarctic region, increasing of CO<sub>2</sub> concentration at the surface is small (under the 0.1  $\mu$ mol/kg) in the south hemisphere.

**Key Words :** CO<sub>2</sub> sequestration, Pacific Ocean, Data assimilation

### 1. はじめに

人類の快適な生活や高度な産業活動を支えている基盤は膨大な量のエネルギーである。そのエネルギーの大部分は石炭、石油、天然ガス等の化石燃料の燃焼によって作り出されたものである。また、その消費量は年々増大し、それに伴って近年では地球環境の悪化をも引き起こしている。いわゆる地球温暖化である。特に二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) に関しては、地球温暖化に深く関りのある物質であるため、その処分を巡って様々な議論がなされている。1997 年には 京都において気候変動枠組条約第 3 回締約国会議が開催され、この中で日本は温暖化の原因とされる CO<sub>2</sub> を含めた温室効果ガスを 2010 年までに 1990 年の排出量に対して 6 パーセント削減することが義務付けられた。我が国は各国の CO<sub>2</sub> 排出基準を定めた京都議定書の議長国という立場からも、この議定書の批准に向けて速やかに削減計画を立案し、それを実行することが望まれている。しかしながら、このように地球温暖化への懸念が声高に叫ばれているにも関わらず、その対策は遅々として進んでいない。例えば日本の CO<sub>2</sub> 排出量は京都会議で削減の枠組みが定められたにも関わらず増加し続け、1999 年の日本の CO<sub>2</sub> 排出量は 12.25 億トン (CO<sub>2</sub>

換算) で、この値は COP3 で定められた削減目標に対して約 0.046Gt (炭素換算) の超過である<sup>1)</sup>。また、例え先進国が京都議定書を遵守したとしても、発展途上国の協力が得られない場合は、全世界の CO<sub>2</sub> 排出量は炭素換算で 2010 年に 75.6 億トン、2020 年には 89.0 億トンまで増加することが予想されている<sup>2)</sup>。このように、現在の生活水準を保ちつつこの削減目標を達成することには多くの困難が立ちはだかっている。

CO<sub>2</sub> 処分に関しては克服すべき課題は多いが、その一つとして処分すべき CO<sub>2</sub> の超大量性という問題が挙げられる。例えば、原油の構成物質である炭化水素を燃焼させた際に生じる CO<sub>2</sub> 重量は生成水を除いても、元の原油の 3 倍を超える大容量となる。一方で海洋は、大気の約 430 倍の分子数を有し、現在の地球で最も大きな CO<sub>2</sub> の吸収源となっていると考えられている。近年では、この海洋の持つ CO<sub>2</sub> 吸収源としての能力に着目した CO<sub>2</sub> 海洋処理技術が注目されている。しかしながら、CO<sub>2</sub> 海洋処理を行う場合、直接生物圏へ影響を及ぼす懸念から環境影響面での評価が重要となる。また、海洋に放出された CO<sub>2</sub> は海洋の鉛直循環流に乗ってやがて海面に達し、大気に環流してしまうため、その隔離期間の算出や隔離にふさわしい場所の特定が重要な要素となる。そこで、本研究ではデータ同化手法で求められた流動場の中に COP3 で

定められた削減目標に対する超過分のCO<sub>2</sub>排出量を太平洋上に放出した場合、どのような挙動を示すのかCO<sub>2</sub>挙動予測数値シミュレーションによって検討する。ただし、低温・高圧条件下で放出されたCO<sub>2</sub>と海水との界面にはクラスレート物質が形成され、海水と混ざりにくくなるということが報告<sup>3)</sup>されているが、地上の水温・圧力条件下では存在しない物質であるため、海水中の挙動は未解明な部分も多い。そこで、物理的な変化のみを考慮したモデルを本研究の解析では用いた。ただし、流れ場の算定<sup>4)</sup>や化学トレーサー計算<sup>5)</sup>に関しては長谷川らの成果に基づいている。

## 2. 太平洋上の流れ場

### (1) 海洋循環モデルによる流れ場の算定

本研究では、地球温暖化対策の一つであるCO<sub>2</sub>海洋隔離を特に太平洋海域で実施した際に、隔離されたCO<sub>2</sub>がどのような挙動を示し、濃度場にどのような影響を与えるのかを予測し、隔離にはどの程度の深度が必要で、どの海域で行うことが有利であるかを検討することを目的とする。しかし、海洋中に放出されたCO<sub>2</sub>は移流・拡散して海域全体に広がっていくため、対象とする海域の正確な流動場の把握が必要となる。これまでも係留流速計やフロートなどを使用して直接海の流れを観測することは行われてきた。しかしながら、こういった直接観測は局所的で時間スケールの短い現象に対しては非常に有効な手段であるが、本研究のような広大な海域の流れを把握する場合には技術的にも経済的にも多くの困難を伴う。そこで、近年コンピュータの高速化・大容量化に伴い飛躍的に精度が向上したと考えられる海洋循環モデリングによって海洋の流れをシミュレーション解析した。

本モデルの計算海域は太平洋全域を対象とし、モデルの解像度は水平方向の計算メッシュは経緯度2度×2度(110E~70W, 60N~74S, C grid)、鉛直方向には11層に分割(表-1参照)した。また、基礎方程式の座標系は水平方向に球面座標を用いた。また、モデルの特徴として、塩分の保存式、ポテンシャル水温の保存式にSarmiento and Bryan<sup>6)</sup>にならない、計算値と観測値を同化させる項を導入した。このことにより、観測データは同化項を通じて連続的にモデルに同化され、計算値が観測値から大きく離れるのを防止するようになっている。

以下に計算に使用した基礎方程式を示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} + w \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} + f \vec{k} \times \vec{u} = \\ - \frac{1}{\rho_0} \vec{\nabla} p + A_H \vec{\nabla}^2 \vec{u} + A_V \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \theta + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \\ K_H \vec{\nabla}^2 \theta + K_V \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \gamma(\theta^* - \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) S + w \frac{\partial S}{\partial z} = \\ K_H \vec{\nabla}^2 S + K_V \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + \gamma(S^* - S) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\rho = F(\theta, S, p) \quad (6)$$

$$\gamma = \gamma_D + (\gamma_S - \gamma_D) e^{-z/h} \quad (7)$$

ここに、 $\vec{u}$ ：水平流速ベクトル、 $\vec{\nabla}$ ：球面座標の水平ナブラ演算子、 $\vec{\nabla}^2$ ：球面座標の水平ラプラスアン、 $w$ ：鉛直流速、 $p$ ：圧力、 $\rho$ ：密度、 $\theta$ 、 $\theta^*$ ：それぞれポテンシャル水温の計算値、ポテンシャル水温の観測値、 $S$ 、 $S^*$ ：それぞれ塩分の計算値、塩分の観測値、 $f$ ：コリオリパラメータ、 $\vec{k}$ ：各軸方向の単位ベクトル、 $g$ ：重力加速度、 $\gamma$ ：データ同化項、 $\gamma_S$ ：海表面係数(1/50day=2.31×10<sup>-7</sup>sec<sup>-1</sup>)、 $\gamma_D$ ：深水深係数(1/250day=4.6×10<sup>-8</sup>sec<sup>-1</sup>)、 $z$ ：計算深度、 $h$ ： $\gamma$ 項の影響が及ぶ深度、 $A_H$ ：水平渦動粘性係数(1.0×10<sup>7</sup>cm<sup>2</sup>/s)、 $A_V$ ：鉛直渦動粘性係数(1.0×10<sup>2</sup>cm<sup>2</sup>/s)、 $K_H$ ：水平渦動拡散係数(1.0×10<sup>6</sup>cm<sup>2</sup>/s)、 $K_V$ ：鉛直渦動拡散係数(1.0×10cm<sup>2</sup>/s)である。また、 $\gamma_S$ 、 $\gamma_D$ はSarmiento and Bryan<sup>6)</sup>によって定められた定数とし、 $A_H$ 、 $A_V$ 、 $K_H$ 、 $K_V$ の値はWada and Nagoya<sup>7)</sup>が計算で用いた値に基づいて設定している。

計算方法として、時間項は4次精度のRunge-Kutta法を用い、移流項の差分形式は1次風上差分を適用し、その他の項は2次中心差分を用いた。圧力に関しては陰的に離散化し、連続の方程式を満足させ、Poisson方程式を簡単化するためにSMAC法を用いた。計算は、非定常計算であるが、各計算値流速 $X(u, v, w)$ の時間変化率 $e_x$ が10<sup>-6</sup>以下でおおむね定常と評価した。その判定式は、差のベクトルのノルムの2乗和として以下のように示す<sup>4)</sup>。

$$e_x = \frac{\|X^{n+1} - X^n\|_2}{\|X^{n+1}\|_2}, \quad \|X\|_2 = \sqrt{\sum_{ijk} X_{ijk}^2} \quad (8)$$

計算時間間隔( $\Delta t$ )は数値計算の安定条件(CFL条件)を満たすように14400secを選定した。また、rigid lid(水面

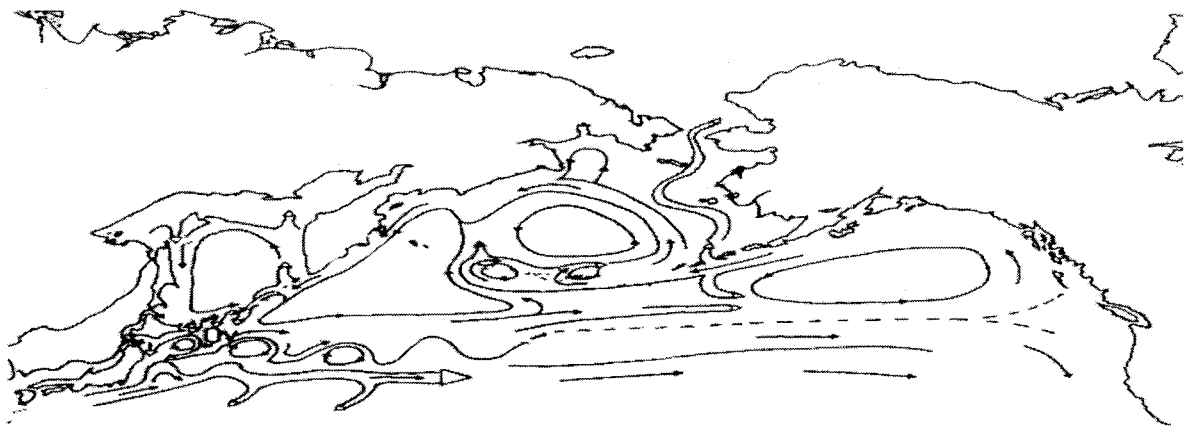


図-1 大谷<sup>8)</sup>がDodimead et al. (1963)およびFavorite et al. (1976)の結果をとりまとめて作成した海流の模式図

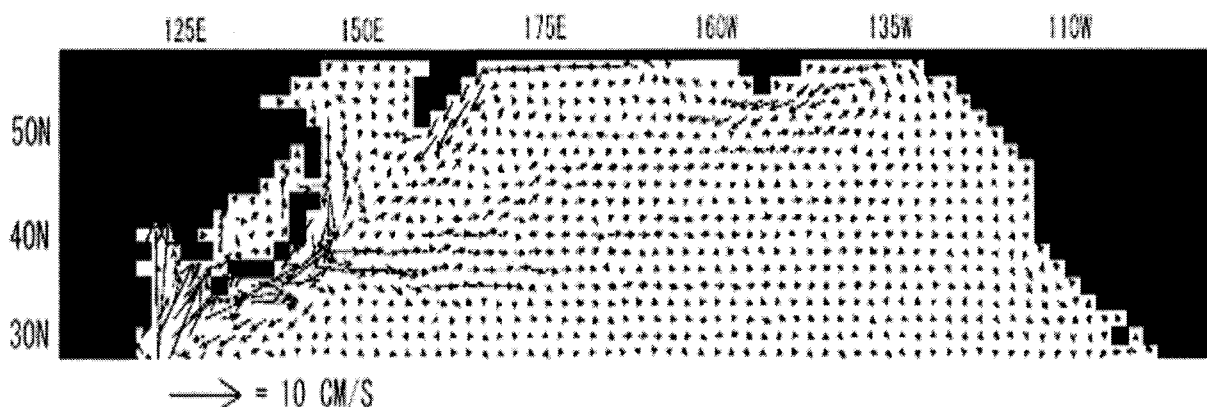


図-2 水深75mにおける北太平洋亜寒帯海域の水平流動場

昇降なし)を仮定し、鉛直方向には初期で静水圧近似を仮定するものの、次のタイムステップ以降ではSMAC法の補正項により鉛直流速 $w$ を求めるとした準3次元とした。

## (2) 海洋循環モデルで得られた流れ場の検証

前節のような方程式系を使用して太平洋上の流れ場の算定を行ったが、このようにして得られた流れ場が実際の海流の空間分布を十分満たしているとは限らない。特に $\text{CO}_2$ 海洋処理を行う場合、放出された $\text{CO}_2$ は海の流れに乗って海洋全体に広がっていくことは容易に想像されるため、数値解析で得られた流動場の整合性を検証する必要がある。そこで、本研究では既往の文献から得られた海流場との比較と、放射性核種の濃度計算によって検証を行った。

### a) 表層流動場

図-1に大谷<sup>8)</sup>がDodimead et al. およびFavorite et al. の結果をとりまとめた海流の模式図を示す。北太平洋亜寒帯海域には様々な環流が存在していることが分かる。一方、図-2にデータ同化手法で得られた水深75mでの北太平洋亜寒帯海域の流動解析結果を示す。計算結果では、既往の文献で求められているオホーツク海内を反時計回りに流れる流れや、およそ東経160度、北緯50度以北に位置するカムチャッカ半島東岸を沿うように南下

する流れ、さらに約西経160度、北緯60度に位置するアラスカ半島の東岸にある反時計回りの循環等が計算されている。このように北太平洋亜寒帯海域での流れ場の再現性は比較的良好であったことが推察される。また、日本近海(北緯10度～50度、東経120度～160度)に限られるが、道田<sup>9)</sup>によって観測された表層のブイ観測データが存在する。これらのデータは1987年～1994年にかけて、約100個のブイ観測によって得られたものである。これらのブイデータと計算結果を比較したところ流速の大きい東西成分では相関係数 $r=0.71$ という比較的高い相関が得られた。ただし、計算流速値は水平方向に経緯度2度×2度という非常に大きなメッシュサイズの流速平均場を求めてしまうため、ブイ観測のようなラグランジュ的に測定される瞬間流速値に対して小さな値を取ってしまう。そのため、流速が50cm/s以上のデータは取り除いて比較検討したものである。

### b) 中深層流動場

$\text{CO}_2$ の海洋隔離を検討する際には表層における流れも $\text{CO}_2$ の挙動に大きな影響を与えることは疑うまでもないが、放出点近傍の流れ、すなわちパイプラインを通して1000m以深で $\text{CO}_2$ を放出することを想定した場合では、海洋の中深層部での流れが $\text{CO}_2$ の挙動の支配的な要素<sup>1)</sup>となることは容易に推察される。

核実験・原子力発電所事故等によって大気から海洋に遷移した放射性核種(Cs-137, Sr-90, Pu-239/240等)は上層中よりもはるかに低い濃度ではあっても、下層の全深度域にわたってある濃度値がおおよそ観測<sup>9)</sup>されている。また、放射性核種の外洋海中における物理的形状についての観測例は少なくその挙動には未だ不明な点も多いものの、沿岸表面海水中で粒子状となる(約80%)とされる放射性稀土元素(Ce-144)の沈降速度は日本海で400m/month<sup>10)</sup>といった値が報告されている。仮にこれらの値が放射性物質にも適用できるなら、数十年規模の時間スケールでも十分に放射性核種は海洋の中深層に達することが可能となり、放射性核種が海洋の内部構造を理解する上で有益なトレーサーになりうることを示唆している<sup>5)</sup>。

そこで、データ同化手法によって求められた流動場を基に海洋中核種濃度の再現計算を行った。図-3は北太平洋亜寒帯海域での1980年代のPu-239/240の平均濃度鉛直分布である。Pu-239/240の観測値は値が小さく、観測年によるばらつきも多いため各層毎の平均値(プロット点)と最小・最大値の幅で表現した。Pu-239/240の平均濃度鉛直分布の概形は観測値と比べて概ね良好といえる。しかしながら、水深2500m以深ではやや再現性が低くなっている。Pu-239/240は海洋中の核種が懸濁物質に吸着し沈殿除去されるスキャベンジングの影響を受けやすく濃度の極大値が表層ではなく中層付近にくる傾向がある。これはPu-239/240が他の放射性核種に比べ吸着される程度が大きい(Cs-137の約200倍程度)ためである。本計算では、このスキャベンジング効果は比較的良好に表現できているものの、濃度極大のピークが観測値では400m付近で現れるのに対し、計算値ではそれより上層の200mで計算されている。これは鉛直方向のメッシュの粗さや、Pu-239/240の濃度値が比較的薄いこと、観測データそのものに含まれる誤差等が影響していると考えられる。また、海底付近でPu-239/240濃度が観測値ではわずかながら上昇しているが、計算ではこれらを再現できていない。しかしながら、全体的には各海洋中核種の再現計算は良好である。このことは、モデル計算による太平洋上の中層流動場に関してもその再現性が概ね良好であったことを示している。

### 3. CO<sub>2</sub>の海洋隔離の検討

CO<sub>2</sub>の海洋隔離は即効性のある地球温暖化対策であることは疑いがないものの、実際にCO<sub>2</sub>を隔離した場合、周辺海域への環境影響評価が不可欠となる。海洋隔離技術の具体的な例をあげれば、1) CO<sub>2</sub>の海洋隔離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から放出する方式、2) パイプラインを低速で航行する船舶から出して連続放流する方式、3) 水深が深く海水の流れ

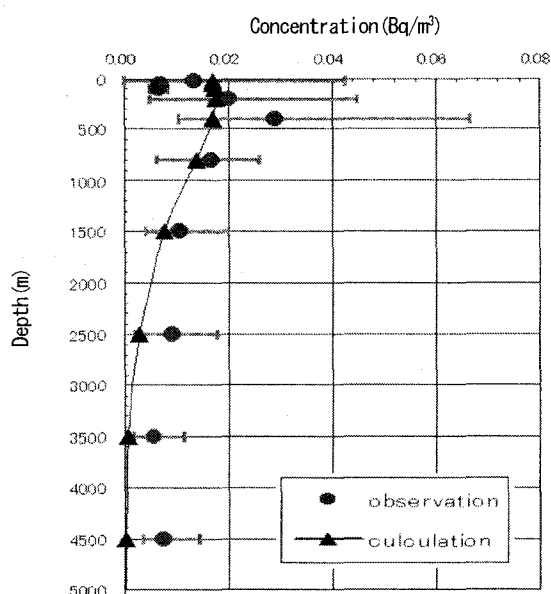


図-3 北太平洋亜寒帯海域における1980年代の Pu-239/240の平均濃度鉛直分布

や乱れがほとんど無いと考えられる海底に貯留する方式が現在考えられている<sup>11)</sup>。

そこで、前節までにある程度の整合性が確認された流動場を用いてCO<sub>2</sub>の挙動を予測した。特に今回の解析では、発電所等から排出されるCO<sub>2</sub>を集積しパイプラインを通して固定点から放出する場合を想定し解析を行った。

#### (1) 隔離する二酸化炭素量の設定

国民の省エネに対する意識や地球温暖化に対する関心は次第に高まりつつあるものの、平成13年に環境省が発表した報告書<sup>1)</sup>によれば1999年の日本のCO<sub>2</sub>排出量は12.25億トン(CO<sub>2</sub>換算)である。この値はCOP3で定められた削減目標(1990年を基準年として6パーセントの削減)に対して約0.046Gt(炭素換算)の超過である。この超過分のCO<sub>2</sub>を50年間連続で同一セルに投入し続け海洋隔離した時の挙動を予測する。投入海域は日本・米国・カナダ・ノルウェー・オーストラリアが協力して液化CO<sub>2</sub>を海洋隔離する実地実験が計画されていたハワイ・コナ市沖(北緯19度、西経157度)と前節までに検証を行ってきた北太平洋亜寒帯海域(北緯50度～54度、東経160度～西経140度)とした。

#### (2) 隔離されたCO<sub>2</sub>の挙動予測の計算

Teng et al.<sup>3)</sup>の報告によれば、深層でのCO<sub>2</sub>海洋隔離を考える場合、水温と圧力が支配的な水深では隔離されたCO<sub>2</sub>と周辺海水の密度差は小さく、CO<sub>2</sub>の挙動は周辺海域の流れに大きく依存し古典的な拡散解析でも十分その挙動把握ができるとしている。

また、低温・高圧条件下(10℃以下、4.5Mpa以上)で放出されたCO<sub>2</sub>と海水との界面にはクラスレート物質が形成され、周辺海水と混ざりにくくなるが、地上の水温・

圧力条件では存在しない物質であるため、海水中の挙動は未解明な部分も多い。そこで、海水中の化学平衡や生物による取り込み、海面でのフラックス交換等を無視し物理的な変化のみを考慮した。また、全炭酸濃度分布は表層約1000m付近までは濃度変化は大きい、それより水深が深いところでの濃度そのものは濃いものの、その変化量はわずかである。そのため、本研究では初期分布を全海洋で $0\text{ }\mu\text{mol/kg}$ と仮定した。また、クラスレートは水深2000m以下ではおおよそ周辺海水密度と等しくなるので密度差による影響も無視した。以下に解析に使用した計算式を示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} C = K_H \nabla^2 C + K_V \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \beta(\lambda, \phi, Z) \quad (9)$$

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( $1.0 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{s}$ )、 $K_V$ : 鉛直方向拡散係数( $1.0 \times 10 \text{cm}^2/\text{s}$ )、 $\beta(\lambda, \phi, t)$ :  $\text{CO}_2$ の年間投入濃度 $1.26 \times 10^2 (\mu\text{mol/kg} \cdot \text{yr})$ である。この年間投入濃度はCOP3で定められた削減目標に対する超過量分( $0.046 \text{Gt}$ )から計算メッシュサイズや海水の平均密度( $1025 \text{kg/m}^3$ )を考慮して算出した値である。

### (3) $\text{CO}_2$ の挙動予測計算の結果

表-1にハワイ・コナ市沖の各層毎に50年間 $\text{CO}_2$ を投入し続けた場合の表層に到達した $\text{CO}_2$ 総量、最大濃度および年間投入量に対する表層到達量の結果を示す。この表から第1層～第6層までは温度躍層内であるために鉛直方向の対流も大きく、一年間の投入量のおよそ50%以上が表層まで到達してしまっていることがわかる。また、投入水深は深ければ深いほど表層にまで達する総量は少なくなるが、その分海底層に到達した総量も大きくなることが確認された。今回の計算の見積もりだと放出水深が8層よりも下の層になると海底層に到達した $\text{CO}_2$ 総量が急激に増加する結果となった。海底に生息する希少な生態系を考慮すると $\text{CO}_2$ 海洋隔離には第7層、第8層が有力であることがわかる。しかしながら、経済的な面を考慮すれば温度躍層以下の第7層が適しているものと思われる。

次にこの結果を踏まえ、北太平洋亜寒帯海域の第7層に同様に50年間 $\text{CO}_2$ を投入した際の結果を表-2に示す。同じ深さの7層で $\text{CO}_2$ を放流した場合でも、表層に到達した $\text{CO}_2$ 総量、最大濃度に差があることが確認された。特に北太平洋亜寒帯海域では、 $\text{CO}_2$ の放流場所が緯度方向に変化した場合はさほど大きな変化は認められなかったが、経度方向ではより東側で $\text{CO}_2$ を放流した場合の方が表層到達 $\text{CO}_2$ 総量、最大濃度を抑制することができることが確認された。

図-4に抑制効果が最も確認できた亜寒帯東部(北緯52度西経160度)の第7層で $\text{CO}_2$ を放出したときの表層での

表-1 投入層毎に $\text{CO}_2$ が表層に到達した総量及び海底に到達した総量の見積もり(ハワイ・コナ市沖)

| 投入層<br>(平均水深) | 表層へ達した $\text{CO}_2$<br>総量( $\times 10^{-3} \text{Gt}$ ) | 最下層へ達した $\text{CO}_2$<br>総量( $\times 10^{-3} \text{Gt}$ ) | 年間投入量に対する<br>表層到達量比(%) |
|---------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| 1層(10m)       | 34.00                                                    | 0.295                                                     | 73.91                  |
| 2層(35m)       | 34.00                                                    | 0.296                                                     | 73.91                  |
| 3層(75m)       | 32.40                                                    | 0.296                                                     | 70.43                  |
| 4層(150m)      | 30.80                                                    | 0.297                                                     | 66.96                  |
| 5層(300m)      | 28.10                                                    | 0.297                                                     | 61.09                  |
| 6層(600m)      | 22.80                                                    | 0.312                                                     | 49.57                  |
| 7層(1150m)     | 10.60                                                    | 0.383                                                     | 23.04                  |
| 8層(2000m)     | 8.03                                                     | 0.631                                                     | 17.46                  |
| 9層(3000m)     | 3.01                                                     | 1.862                                                     | 6.54                   |
| 10層(4000m)    | 1.32                                                     | 2.934                                                     | 2.87                   |

表-2 北太平洋亜寒帯域の第7層に放出した $\text{CO}_2$ の挙動

| 投入地点               | 表層に到達した $\text{CO}_2$ 総量<br>( $\times 10^{-3} \text{Gt}$ ) | 表層での $\text{CO}_2$ 最大濃度<br>( $\mu\text{mol/kg}$ ) | 年間投入量に対する<br>表層到達量の比(%) |
|--------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------|
| 50 North, 160 East | 14.20                                                      | 3.50                                              | 30.87                   |
| 170 East           | 10.90                                                      | 3.87                                              | 23.70                   |
| 180                | 9.84                                                       | 3.67                                              | 21.39                   |
| 170 West           | 10.40                                                      | 3.79                                              | 22.61                   |
| 160 West           | 8.11                                                       | 3.26                                              | 19.22                   |
| 150 West           | 7.51                                                       | 3.02                                              | 17.63                   |
| 140 West           | 6.68                                                       | 2.66                                              | 16.33                   |
| 52 North, 160 East | 13.90                                                      | 3.37                                              | 30.22                   |
| 170 East           | 11.60                                                      | 3.58                                              | 25.22                   |
| 180                | 11.30                                                      | 3.67                                              | 24.57                   |
| 170 West           | 10.90                                                      | 3.68                                              | 23.70                   |
| 160 West           | 9.78                                                       | 3.46                                              | 21.26                   |
| 150 West           | 8.71                                                       | 3.21                                              | 18.93                   |
| 140 West           | 7.21                                                       | 2.65                                              | 15.67                   |
| 54 North, 160 East | 14.50                                                      | 3.74                                              | 31.52                   |
| 170 East           | 12.10                                                      | 3.74                                              | 26.30                   |
| 180                | 11.80                                                      | 3.83                                              | 25.65                   |
| 170 West           | 11.40                                                      | 3.59                                              | 24.78                   |
| 160 West           | 9.17                                                       | 3.22                                              | 19.93                   |
| 150 West           | 9.19                                                       | 3.31                                              | 19.98                   |
| 140 West           | 6.82                                                       | 2.50                                              | 14.83                   |

$\text{CO}_2$ 濃度分布を示す。表層に到達した $\text{CO}_2$ は北太平洋亜寒帯循環系の中で広がってゆき、投入地点よりもやや西側に強く移流・拡散してゆくが、この循環系の外の濃度上昇はわずかであり、特に南半球側の濃度上昇は50年間連続放出した場合ではほとんど認められなかった。この傾向は、東部海域で放出した場合も、西部海域で放出した場合も傾向は同じであった。

このように、北太平洋亜寒帯海域の温度躍層以下で $\text{CO}_2$ を放出した場合、西部海域に比べ東部海域の方が $\text{CO}_2$ の表層到達量を抑制できることが確認された。

## 4. おわりに

本研究で明らかになった事項を以下に示す。

- (1) 水温と塩分の観測値とモデル計算値を比較し、その差をタイムステップ毎に修正するデータ同化手法を

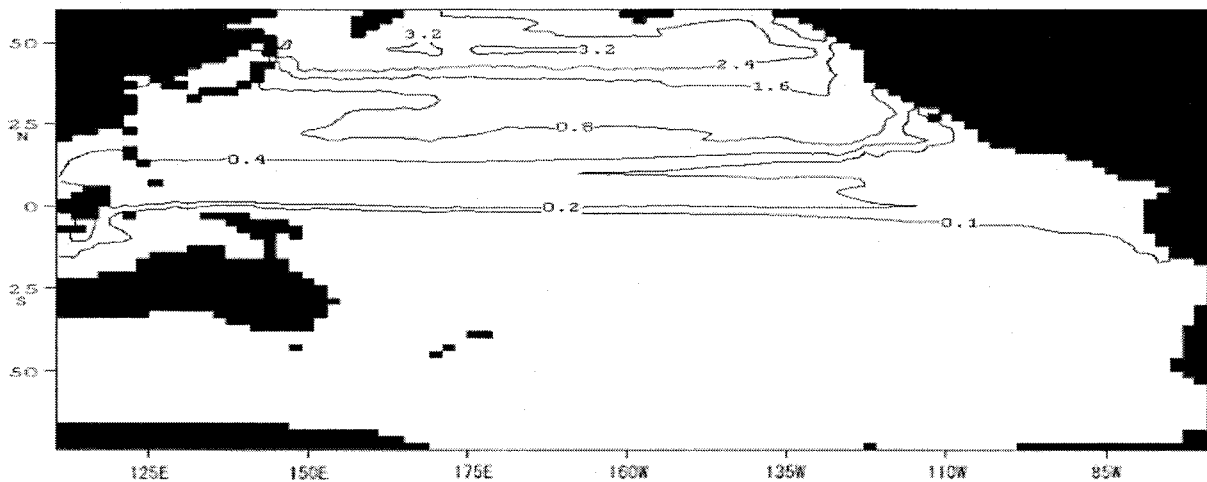


図-4 亜寒帯東部(北緯52度西経160度)の第7層でCO<sub>2</sub>を放出したときの表層でのCO<sub>2</sub>濃度分布

用いて太平洋上の海流場を再現し、一般的に言われている海流の分布や漂流ブイデータから得られた流速の直接観測データとの比較をすることで流動計算の精度検証を行った。表層の流れ場に関しては、既往の循環系(図-1, 図-2)が再現されていた。特に北太平洋亜寒帯海域の比較的小規模な循環系についても再現されていた。また、中深層の流れは放射性核種の濃度計算を行うことで検証したが、Pu-239/240の鉛直方向の濃度分布(図-3)は観測値に対して濃度極大のピークのずれや海底付近の濃度上昇に対しての再現性が低いことも確認されたが、概ね良好な結果が得られた。このようにデータ同手法で得られた流動場はある程度の再現性を持ち、CO<sub>2</sub>海洋放流による環境影響を評価するのに満足できるものであることが示された。

- (2) ハワイ・コナ市沖でCO<sub>2</sub>放流による濃度影響を検討した結果、CO<sub>2</sub>の海洋処理は温度躍層以深で行う必要があることが示された(表-1)。温度躍層以浅では鉛直対流が大きく、放出されたCO<sub>2</sub>が表層まで比較的速い時間に到達してしまうからである。次に、北太平洋亜寒帯海域にCO<sub>2</sub>を放流した場合の影響を評価した。この海域は、北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国際共同研究の報告書でもCO<sub>2</sub>を吸収する可能性のある海域と位置づけているが、特に東部海域でのCO<sub>2</sub>隔離が有効であることが示された(表-2)。また、CO<sub>2</sub>の海洋隔離によって表層まで上昇してきたCO<sub>2</sub>は北太平洋亜寒帯循環系の中で広がってゆき、投入地点よりも西側に強く移流・拡散してゆく結果となった。しかしながら、この循環系の外の濃度上昇は50年間CO<sub>2</sub>を連続投入したのにも関わらずわずか、特に南半球側の濃度上昇はほとんど認められなかった。このことは、50年間の連続放流ではCO<sub>2</sub>の表層での濃度上昇は隔離された循環系内にとどまることを示唆している。これを図-4に示した。

今後、実際にCO<sub>2</sub>の海洋隔離を実施する際にクラス

レート物質の特性や植物プランクトンの光合成・呼吸やサンゴ礁によるCO<sub>2</sub>の固定などを考慮したモデルを構築する必要があるであろう。

#### 参考文献

- 1) 環境白書：環境省平成12年度版，2000。
- 2) 厨川道雄：地球温暖化問題と対策のための研究展開，資源と環境，Vol. 9, No. 5, pp. 274-277, 2001。
- 3) Teng, H., Masutani, S. M. and Kinoshita, C. M. : Dispersion of CO<sub>2</sub> droplets in the deep ocean, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 38, pp. S319-S324, 1997。
- 4) 長谷川一幸, 和田明, 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基礎的研究，水工学論文集第45巻，pp. 1063-1068, 2001。
- 5) 長谷川一幸, 和田明, 西村玲輔, 高野憲治：太平洋海水中的の放射性核種(Cs-137, Sr-90, Pu-239/240)の濃度計算，水工学論文集第46巻，pp. 983-988, 2002。
- 6) Sarmiento, J. L., and Bryan, K. : An ocean transport model for the North Atlantic, *J. Geophys. Res.*, No. 87, pp. 394-408, 1982。
- 7) Wada, A. and Nagoya, S. : Pacific ocean flow simulation using the data assimilation system, *Flow Modeling and Turbulence Measurements VI*, pp. 631-637, 1996。
- 8) 大谷清隆：親潮の再確認，*Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst.*, No. 55, pp. 1-24, 1991。
- 9) 道田豊：漂流ブイによる亜寒帯反流の観測、Report of hydrographic researches, No. 33, 1997。
- 10) 佐伯誠道：環境放射能-挙動・生物濃縮・人体被曝線量評価-，ソフトサイエンス社，pp. 231-237, 1984。
- 11) 尾崎雅彦：CO<sub>2</sub>海洋隔離における希釈放流技術，月刊海洋，Vol. 33, No. 11, pp. 767-774, 2001。

(2002. 9. 30受付)