

太平洋3次元流動場モデルの構築と二酸化炭素海洋隔離の可能性の検討

和田 明 (土木工学科)

1. 研究目的

人間活動と地球環境の変化に着目し、地球規模の環境管理方策を検討する。具体的には、近年二酸化炭素(CO₂)の増加による地球温暖化が国民生活に重大な影響を及ぼすものと社会的関心を強く集めているが、このCO₂の大気への排出抑制効果の一つとして、海洋のCO₂の吸収能力を有効に活用する二酸化炭素(CO₂)の海洋処分/隔離という技術が注目されている。この二酸化炭素(CO₂)の海洋処分/隔離によって海洋がどの程度CO₂隔離能力を有するのかを評価することを目的とする。

2. はじめに

近年、大気中の二酸化炭素(CO₂)をはじめとする温室効果ガスの増加が起因とされる地球温暖化が懸念されている。地球温暖化は自然の営みに基づく変動よりも更に速い速度で気候変動を招く恐れがあり、人類にとって最も脅威となる問題の一つであると考えられている。そのため日本が議長国となった地球温暖化防止京都会議(COP3)では温暖化に寄与するとされるCO₂を含めた温室効果ガスを基準年(1990年)に対し6パーセント削減を日本は義務付けられた。このような状況下で二酸化炭素の海洋隔離技術が注目されている。大気中のCO₂は、海面を横切って表層中に溶け込んではいるものの、自然条件下では、安定な密度成層の存在などにより、CO₂が大気中から中深層水へと運ばれる速度は穏やかなものとなっている。そこでCO₂を直接海洋の中深層に注入し、海洋中に溶解・吸収させることを目的としたのがCO₂海洋隔離技術である。本研究ではCO₂の海洋隔離の可能性をCO₂挙動予測シミュレーション解析によって検討する。

しかし海洋中に放出されたCO₂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。

3. 研究方法

ここ数年来、計算機の性能の向上にはめざましいものがある。これに伴い数値シミュレーションによる数値予報や数値解析による様々な現象の評価が盛んに行われるようになってきた。そこで本研究においてもワークステーションやパソコンを使用した処分/隔離の可能性を検討する。具体的には、太平洋3次元循環流動モデルによる数値シミュレーション解析計算結果を、海洋拡散モデルに適用させる。その後、海洋中層部に放出されたCO₂濃度を予測し、海洋生物へのCO₂濃縮を検討する。そして最終的にはCO₂の海洋処分の可能性について検討する。

3. 1 太平洋循環モデルの特徴

- (1) 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が経緯度2度×2度(東経110度～西経70度、北緯60度～南緯74度)である。鉛直方向の層分割は表-1に示す。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。基礎方程式は3次元運動方程式、静水圧近似式、連続式、ポテンシャル水温の保存式、塩分の保存式、状態方程式から構成されている。

表-1 鉛直方向の層分割

層番号	深度 (m)	層厚さ (m)
1	10	0~20
2	35	20~50
3	75	50~100
4	150	100~200
5	300	200~400
6	600	400~800
7	1150	800~1500
8	2000	1500~2500
9	3000	2500~3500
10	4000	3500~4500
11	5000	4500~5500

- (2) 塩分の保存式、ポテンシャル水温の保存式に、Sarmiento and Bryan¹⁾ にならない計算値と観測値を同化させる項を導入した。
- (3) 本計算では対象領域を太平洋としているため、通常の計算では南米ドレーク海峡やマラッカ海峡、オーストラリア南岸で境界条件を設定して計算を行わなければならない。しかし、本計算では仮想外海を設けこれを連結した周期条件を採用した。これによって計算対象領域である太平洋が閉じた一つの系となるため海洋の境界は存在しない。

本研究では衛星風速観測値²⁾(Special Sensor Microwave / Imager: SSM/I)を基にバルク式から風応力値の算出³⁾を行った。衛星観測データは精度面での検証が不可欠であるものの、直接観測に比べ時空間的に均一なデータを測定できるといった利点がある。また、バルク係数の算出には微風時の取り扱いを細かく規定した Kondo の式⁴⁾を使用したことにより従来のモデルに比べ正確な海表面境界条件を与えている。

3. 2 二酸化炭素の海洋中の挙動モデル

- (1) CO₂の海洋隔離技術は本質的なCO₂の削減や処理にはならないものの、気候変動が起こるとか、海水が上昇するとか、温暖化の影響が顕在化したとき、即効性のある対策であることには間違いないであろう。また、実際にCO₂を隔離した場合周辺海域への環境影響評価も不可欠となる。図-1に海洋隔離技術の具体的な例を挙げる。CO₂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CO₂を放出する方法やパイプラインを低速で航行する船舶から出してCO₂を連続放流する方式、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を貯蔵する方式が現在考えられている⁵⁾。

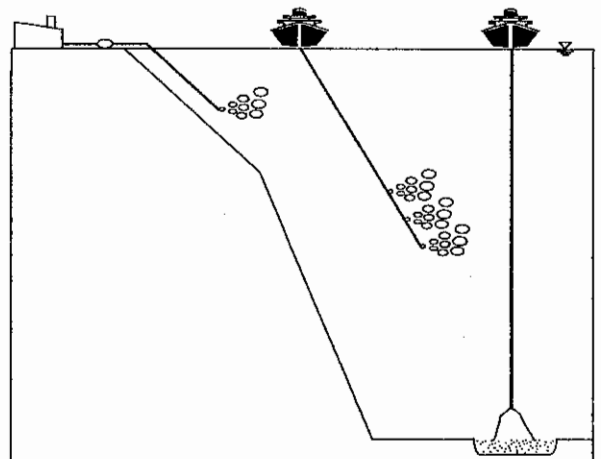


図-1 CO₂海洋隔離の技術例

そこで本研究では、4.1で算出された流動場を使用して太平洋での二酸化炭素の海洋隔離技術の

可能性を CO₂の挙動予測数値シミュレーションによって検討する。また、今回の解析では発電所等から排出される CO₂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。

- (2) 海洋中に投入された CO₂の挙動については、3次元の拡散方程式を用い、拡散係数値は水平、鉛直共海洋中核種濃度解析した値を設定している。年間投入濃度は 1.26×10^2 ($\mu\text{mol/kgyr}$) とした。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分(0.046Gt)から算出した値である。

4. 平成 12、13 年度に得られた成果

4. 1 太平洋 3 次元循環モデルの構築

- (1) 従来までの研究ではブイ・船舶データを基にした風応力値を使用して流動計算を行うのが一般的であった。これに対し本研究では、NASA から提供を受けた海上風データを用いた海洋データ同化手法を実行し、太平洋の 3 次元の流動場を求めた (図-2)。その計算結果は、表層の流動については既存の文献や水路部による観測 (ブイ軌跡から求めた表面海流の平均場) の結果とほぼ一致している (図-3)。特に親潮、インドネシア通過流、亜熱帯反流などの比較的流量が少ないとされる海流の再現性が良好である。また、本モデルを計算させる上で、塩分・水温の保存方程式にデータ同化の効果を入れているが、これが海流場を再現するのに有効な手段であることが示された。

本研究では海面の境界条件を設定する際に SSM/I 衛星観測データを使用して風応力を算定したが、この算定が現実の場を再現できているためだと考えられる。特に表層の流れ場では風による影響を強く受けていることが知られているため、今後海洋循環モデルを運用する上で風応力の設定は重要な要素となることが示唆される。

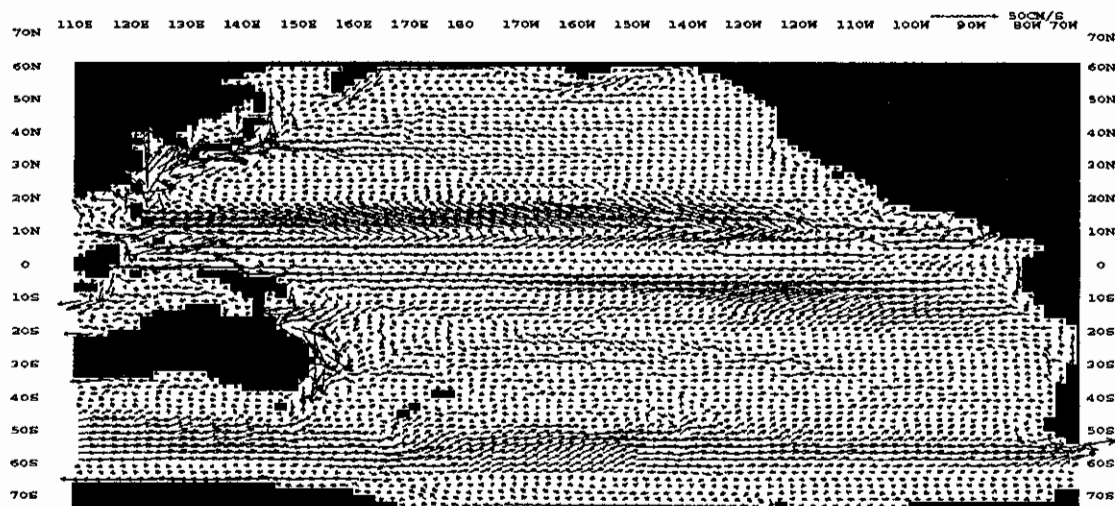


図-2 水平流動場 (水深 10m)

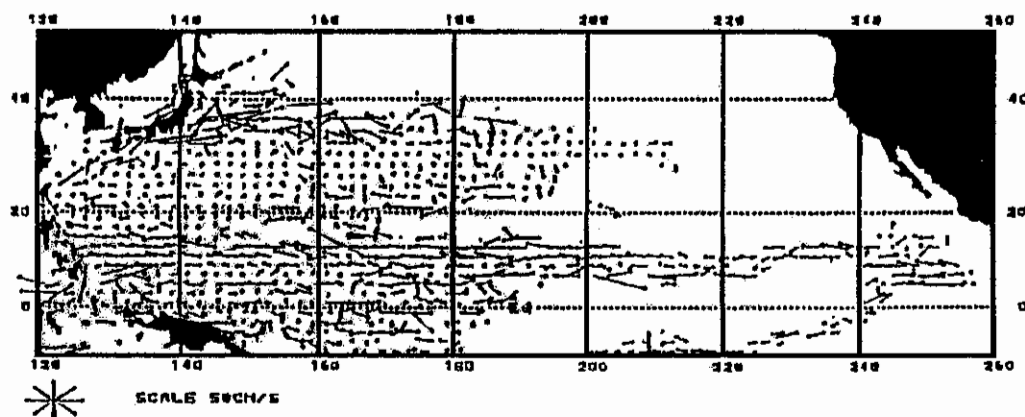


図-3 ブイ軌跡より求められた日本近海の表面海流平均場 (北緯 10 度から 50 度、東経 120 度~160 度)

(2) 一方、中深層での流れ場の精度の検討を放射性核種の濃度再現計算を行うことで検証した。ここで放射性核種を選定して計算を行った理由としては、放射性核種は人工的に放出されたものが大半で計算における初期条件・環境条件の設定が容易であること、観測が他の物質と比較して広範囲で行われてきたこと等があげられる。この計算結果を基に、海洋流動モデルの妥当性を検討し、二酸化炭素 (CO₂) の海洋拡散モデルを運用することとした。

中深層の流れは表層の流速とは異なり風応力の影響はさほど受けず海洋内部の水温、塩分によって支配される熱塩循環によって定まることが知られている。本モデルではポテンシャル水温の保存式、塩分の保存式に同化項を付加することにより水温、塩分計算値は観測値に対して余り大きな差を生じないモデルとなっている。その結果、海洋内部の熱塩循環を効果的に表現できたため中深層の流れ場の精度が高かったと考えられる。また、海洋中核種濃度の計算により求められた各人工放射性核種の濃度分布は図-4、図-5、図-6に示すように観測結果と比較して良好であった。これは、中深層の流動計算結果の精度が高かった事に加え、海洋中核種濃度の計算に特有の核種が海洋中の懸濁物質に吸着し沈澱除去されるスキヤベンジングの効果や核種の崩壊の効果モデルに正確に反映することができたためだと考えられる。

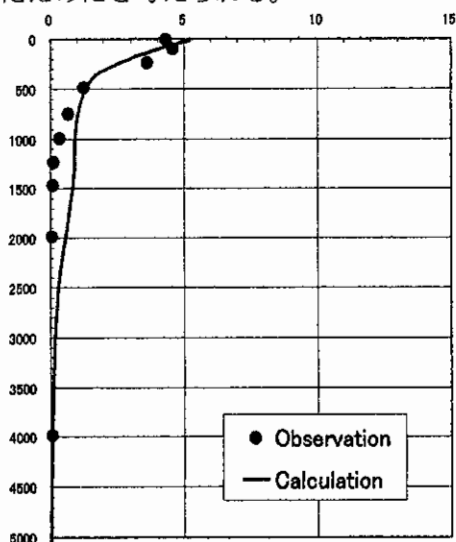


図-4 1986年におけるCs-137の濃度鉛直
(東経146度・北緯30度)

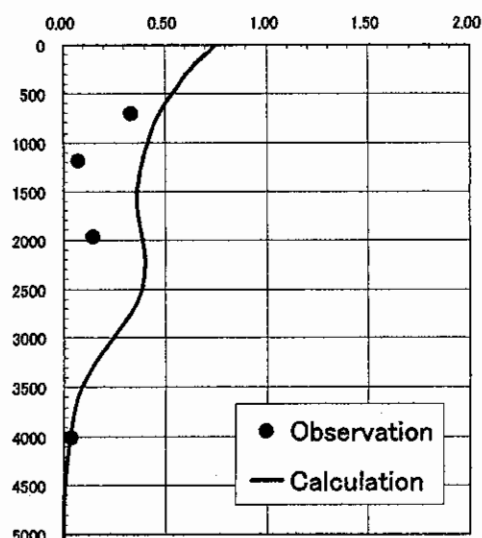


図-5 1979年におけるSr-90の濃度鉛直
(東経137度・北緯32度)

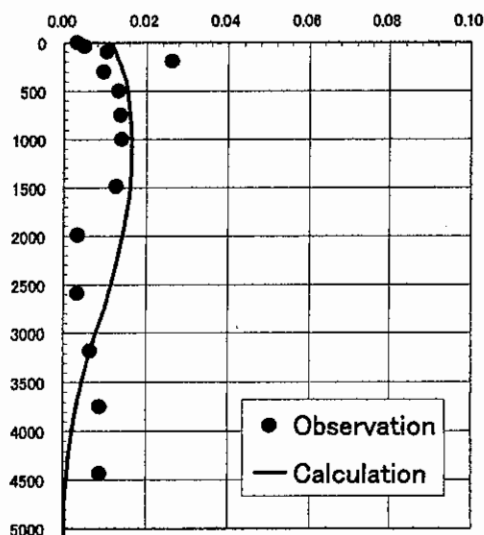


図-6 1985年におけるPu-239/240の濃度鉛直分布
(西経177度・北緯44度)

- (3) このように、漂流ブイ軌跡から得られた表面海流の平均場との比較検証と中層での放射性物質の濃度計算結果からデータ同化手法によって得られた太平洋上の流れ場は現実的な流れ場を再現していることが示された。

4. 2 二酸化炭素の海洋隔離

現実的な流れ場であることが立証された流動場を使用して地球温暖化の防止対策の一つと考えられるCO₂海洋隔離の可能性の検討を行った。海洋隔離を検討した海域は実際に実証実験が予定されていたハワイ・コナ市沖（北緯 19 度、西経 157 度）である。CO₂海洋隔離は大気側の濃度の上昇を抑制する事を第一目的とし、更に本研究では低層に棲息するベントス類への影響も評価した。隔離されたCO₂は流れ場の影響を強く受け、表層第1層で放出した場合も放出点での濃度は178.9 μmol/kg と高濃度になるのに対して南半球側の濃度上昇はほぼ1.0 μmol/kg 未満であった。これは放出点が亜寒帯循環系の中にあるため、一部が北赤道反流によって広がっていくものの、ほぼこの循環系の中でCO₂が留まっていることが図-7によって確認された。隔離を行った第1層～第6層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%以上が表層にまで到達してしまい海洋隔離には適さないことが分かった。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。そこで、温度躍層以下の第7層～第10層に放出した際は最下層に達する総量を見積もる（表-2）ことにより海底生物の影響を考慮した。この結果、第1層～第6層では表層に達する量が多量になり、第9層～第10層では海底層に達する量が多すぎるため、CO₂海洋隔離には第7層、第8層が有力であることが分かった。

今後、実際にCO₂の海洋隔離を実施する際にはCO₂の大気側への回帰のみを考えるだけでなく海底に棲む貴重な生物相への影響も考慮した検討が必要であろう。

表-2 投入層毎のCO₂が表層に到達した総量及び海底層に到達した総量の見積もり

投入層	表層へ達したCO ₂ 総量(×10 ⁻³ Gt)	最下層へ達したCO ₂ 総量(×10 ⁻³ Gt)	年間投入量に対する表層到達量比(%)
1層	34.00	0.295	73.91
2層	34.00	0.296	73.91
3層	32.40	0.296	70.43
4層	30.80	0.297	66.96
5層	28.10	0.297	61.09
6層	22.80	0.312	49.57
7層	10.60	0.383	23.04
8層	8.03	0.631	17.46
9層	3.01	1.862	6.54
10層	1.32	2.934	2.87

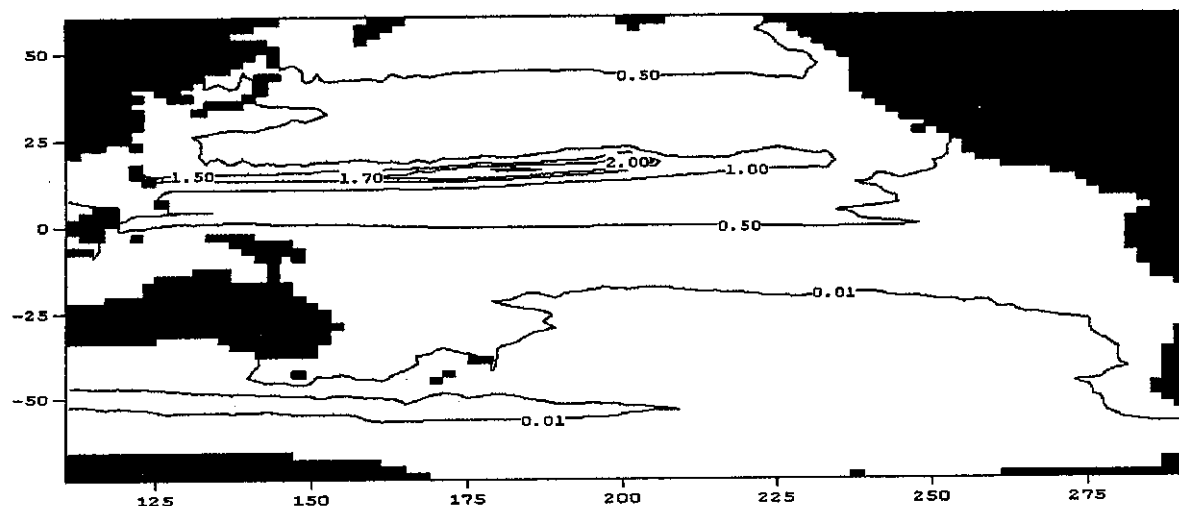


図-7 第7層にCO₂を放出したときの表層CO₂濃度分布(水深10m)

5. 今後の課題

二酸化炭素 (CO₂) の海洋処分の可能性を検討するために、太平洋全域を対象とし、ハワイ沖と日本列島近海の各水深別に CO₂ 負荷量を与え、海洋拡散モデルを運用して放出された CO₂ の濃度を解析し、その分布状況から投棄水深の検討を行った。

- (1) 平成9年12月に我が国で京都議定書が調印され、地球温暖化防止に向けて国際的な協力を結ぶことが決議されており、その中では二酸化炭素の海洋隔離技術に関してもふれられている。

温暖化問題の論点としては、クリーン技術の進歩や発展途上国への技術移転により、将来にわたって大気中の CO₂ 濃度を安定化できる可能性が期待できる考え方がある。また一方では、国連環境計画 (UNEP) の報告書によると、京都議定書の達成すらできそうになく、地球温暖化の防止はおそらく手遅れとの極めて悲観的な考え方を示している。

このような楽観的な考え方、あるいは悲観的な考え方があるが、地球温暖化問題の解決には信頼性の高い予測を行うと共に、それに対応する適応策を検討することが不可欠である。

- (2) 大気中の二酸化炭素濃度の上昇による地球温暖化に関しては、地球温暖化の影響が将来的なものであり、また対策を行った場合の経済的な影響が大きいと考えられるために、具体的な対策は遅れているのが現状である。現状の社会システムを変化させずに多量の二酸化炭素の放出を削減させることは難しく、エネルギー利用の効率の向上を図ることは勿論であるが、CO₂ の固定・隔離技術についても研究開発を進めなければならない。

この中で、CO₂ の海洋隔離への期待が高まっているが、人為的な活動によって形成された廃棄物を海洋に投棄するという考え方には異論がないわけではない。

現実に二酸化炭素の海洋隔離を行うべきなのかどうかは多くの政治的な判断が必要である。その判断の根拠に利用できるためにも、今後一層の海洋隔離の可能性に関する研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) Sarmiento, J. L., and K. Bryan, : An Ocean Transport Model for the North Atlantic; J. Geophys. Res., 87, pp. 394-408, 1982.
- 2) Atlas, R., R. Hoffman, S. Bloom, J. Jusem and J. Ardizzone, : A Multi-year Global Surface Wind Velocity Data Set Using SSM/I Wind Observations, Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 77, No. 5, pp. 869-882, 1996.
- 3) Wada, A. and S. Nagoya, : Pacific ocean flow simulation using the data assimilation system, Flow Modeling and Turbulence Measurements VI, pp.631-637, 1996.
- 4) Kondo, J. : Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, Bound. -Layer Meteor., 9, pp. 91-112, 1975.
- 5) 尾崎雅彦 : CO₂ 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.