

太平洋 3 次元流動解析

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、地球規模の環境資源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わけだが、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. 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コンピューターシミュレーション解析によって海洋における二酸化炭素 (CO₂) の海洋処分/隔離の可能性を検討した。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。

平成 12 年では、以前から構築してきた準 3 次元太平洋循環モデルの改良を行った。

計算海域は太平洋全域を対象とし、水平方向の計算メッシュは経緯度 2° × 2° (110E~70W, 60N~74S, C grid) である。鉛直層分割層は、第 1 層 : 10m、第 2 層 : 35m、第 3 層 : 75m、第 4 層 : 150m、第 5 層 : 300m、第 6 層 : 600m、第 7 層 : 1150m、第 8 層 : 2000m、第 9 層 : 3000m、第 10 層 : 4000m、第 11 層 : 5000m、の 11 層とした。

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。

次に計算方法として、時間項は Runge-Kutta 法を用い、移流項の差分形式は 1 次風上差分を適用する。また、圧力に関して陰的に離散化し、連続の方程式を満足させ、Poisson 方程式を単純化するために、SMAC 法を用いた。また、計算は非定常計算であるが、時間項が 0 に限りなく近づくまで行い、計算時間間隔 (Δt) は CFL 条件を満たすような 14400sec を選定した。

今回計算を行ったモデルの特徴として、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、rigid lid (海面の水位変動なし) を仮定している。

3. 平成 12 年度に得られた成果

- (1) 太平洋循環モデルの改良
- (2) 二酸化炭素海洋投棄による海洋への隔離の予備的検討
- (3) 3 次元太平洋循環モデルによる流動計算

(1) 従来までの研究では Hellerman によって作成されたブイ・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 2 つの衛星風速観測値 (NASA Scatterometer : NSCAT, Special Sensor Microwave /Imager : SSM/I) を基にバルク式から風応力値の算出

を行い、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 の式を使用した。これによって、より正確な海表面境界条件を与えている。このような境界条件の下に計算を行った結果（図-1）と、道田が漂流ブイ軌跡から算出した表面海流平均結果（図-2）との比較を行った。この様なモデル計算結果と直接観測結果との整合性の検証は従来されていない。この結果、表層流動場では東西成分では相関係数 $r=0.74$ という非常に良好な計算結果が得られ、本モデルの表層付近での流動場の妥当性が証明された。この両者の相関関係を図-3 に示す。

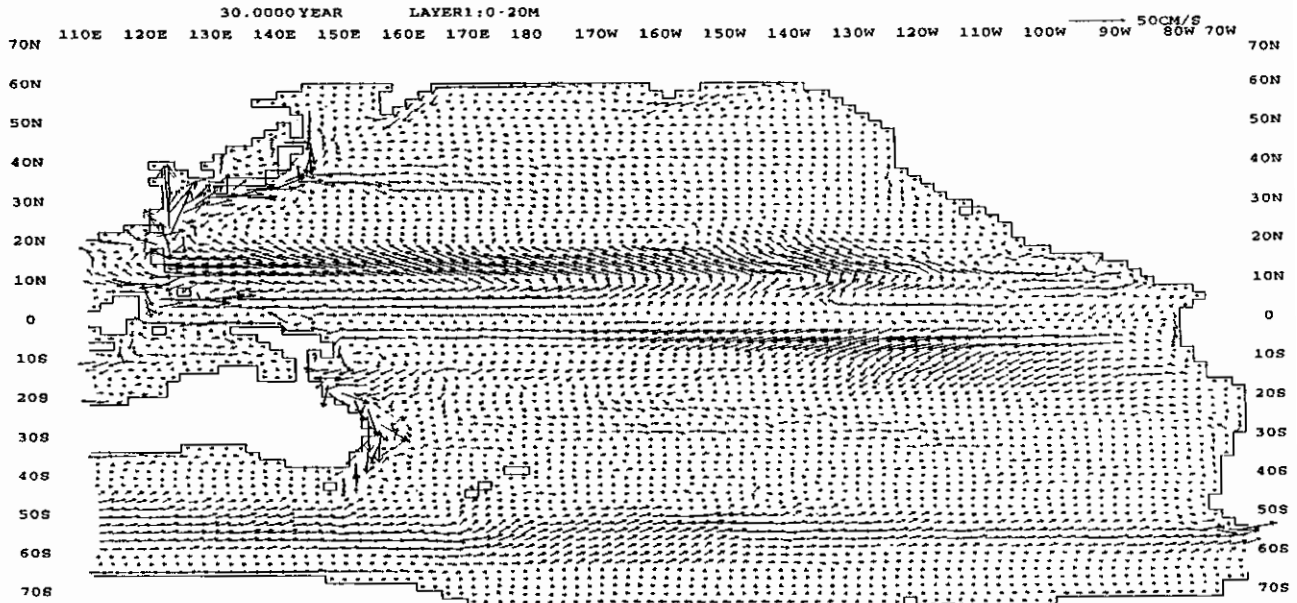


図-1 SSM/I データを使用した水平流動計算結果（第1層）

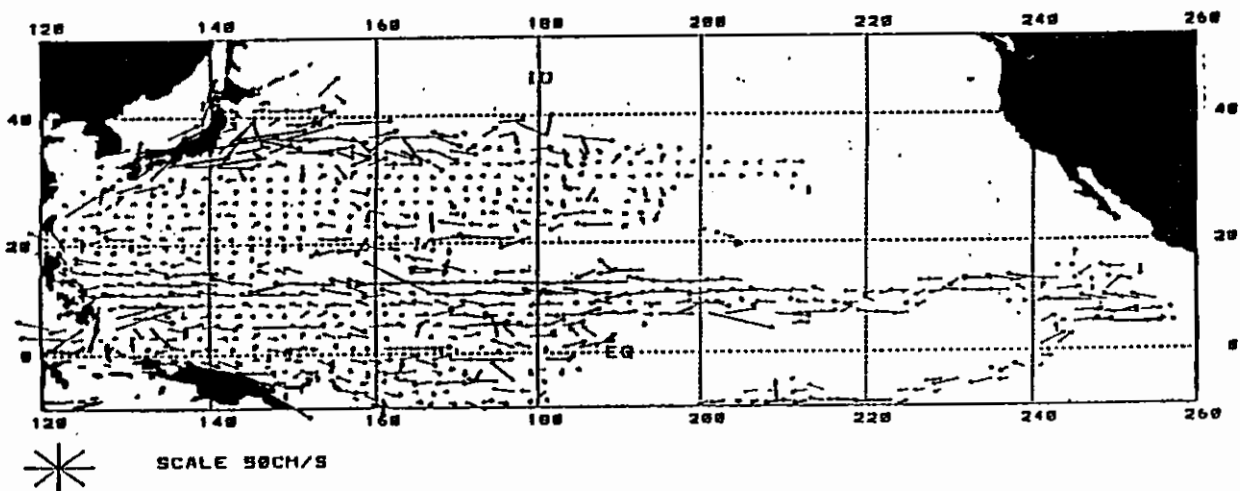


図-2 道田（1995）が算出した漂流ブイによる水平流動計算結果

(2) (1)で求められた流動場の中に液化二酸化炭素粒子に見立てた粒子（完全に海水に溶解しているものと仮定、大きさ等は無視し重力等の影響は受けないと仮定）を投入し、その挙動を把握することにより二酸化炭素（ CO_2 ）の海洋投棄の可能性について検証を行った。この粒子追跡は、与えられた流速場と与えられた初期位置から任意の時間経過後の粒子位置を求めることを意味している。また、粒子の追跡日数はモデル計算上で300年とした。

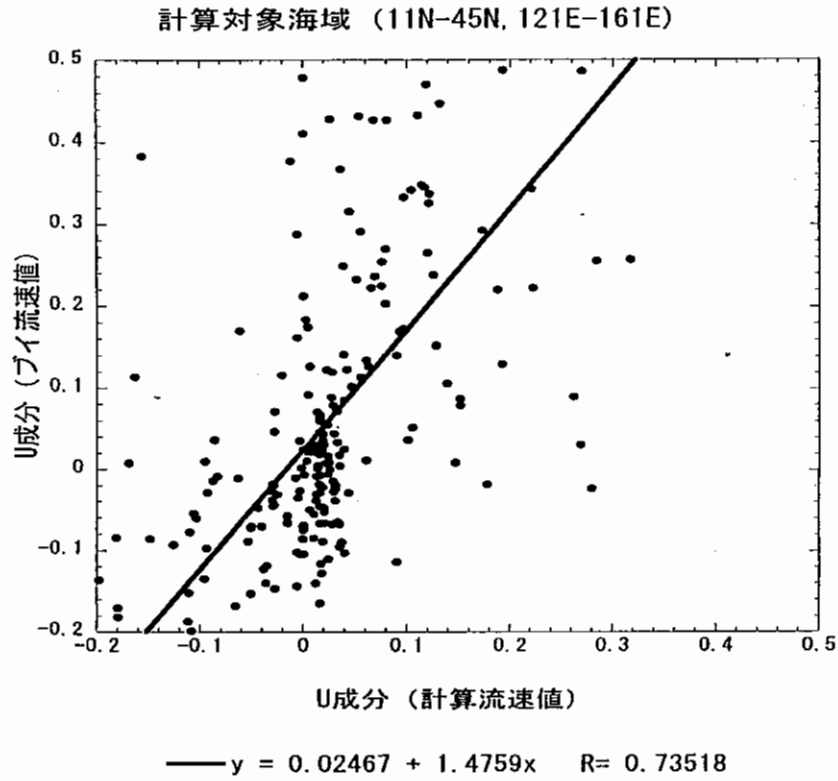


図-3 ブイ流速値と計算流速値との相関 (東西成分)

液化二酸化炭素海洋隔離が計画されているハワイ・コナ市沖で粒子を投入した場合の粒子追跡結果を図-4に示す。水深 2000m 以深ならば投入した粒子は表層には達せず海洋投棄の目的が達せられることが確認された。また、表層 600m 以浅に投入した粒子は海面フラックスの影響を敏感に受けやすく、温度躍層内でもあることから循環が激しくこの水深での海洋隔離は現実的ではない。また、深層 (4000m 以深) で投入した粒子は海底地形の影響を受け海底地形に沿って進むことが確認され、あまり深い層での海洋投棄も海底付

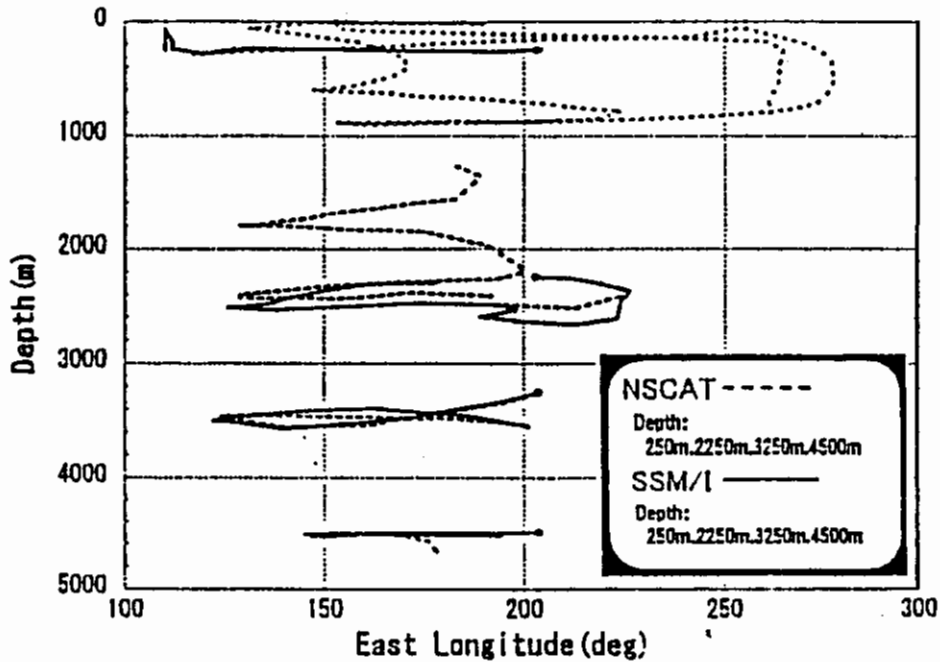


図-4 粒子 (液化二酸化炭素) 追跡結果

近に存在する希少な生物の生態系を考慮すると好ましくないと推察された。液化二酸化炭素の海洋投棄を考える上で経済的に実現性の高い水深は1000m~1500m程度と考えられているが、この水深での粒子の挙動は複雑であり、算定された流れ場に大きく依存しているように推察された。

(3) (2)の結果より、中深層の流れ場により隔離された二酸化炭素が大きく影響を受けることが推察された。そこで流れ場の算定において、モデルそのものの改良を検討した。従来のモデルでは、鉛直方向には静水圧近似モデルで計算を行ってきた。これは水平方向のメッシュサイズに対して鉛直方向の層厚が非常に薄いために妥当な近似式であると言えるが、鉛直流速が過小評価となる傾向にある。そこで、鉛直流速の算定を運動方程式から求める正三次元の流動計算を行った。表層第1層での計算結果を図-5に示す。静水圧モデルによる計算結果に比べ流れの大きさ・向き等が一定ではないが大まかな流れの分布傾向は同じである。

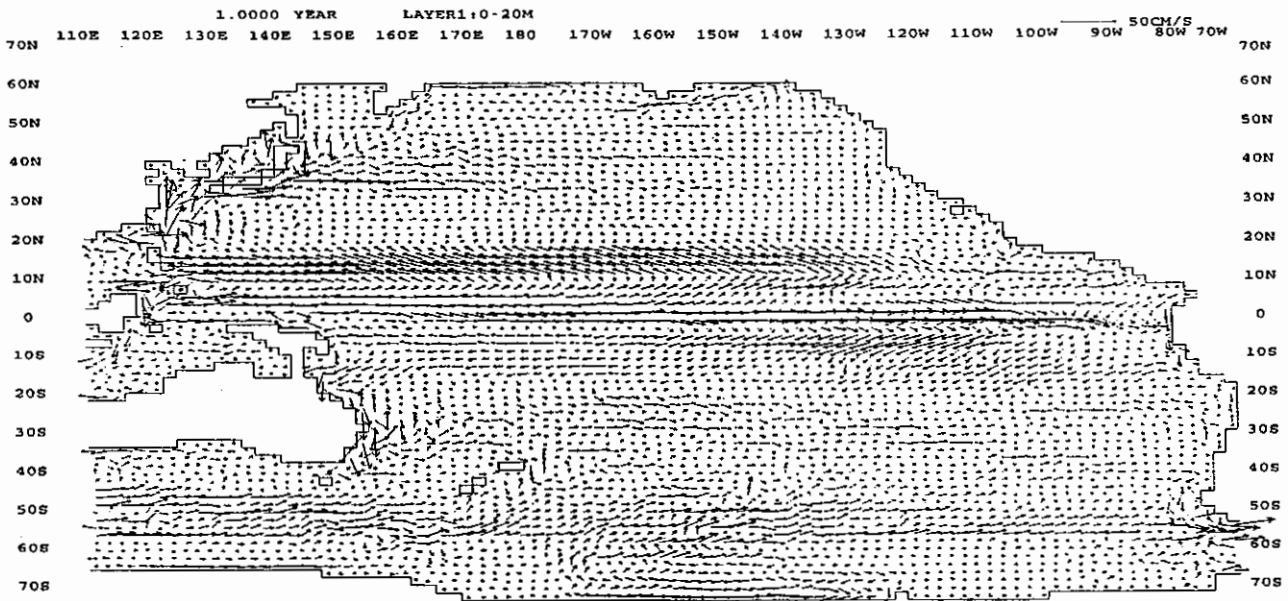


図-5 正3次元流動計算結果（第1層）

4. まとめ

本研究では、NSCAT および SSM/I による海上風データを用いた海洋データ同化手法を実行し、太平洋の流動場を求めた。その計算結果は、既存の文献や道田（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。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。しかし、赤道付近の表層の流れについては、文献のような境界の区別が明確に再現されていない。今後、計算グリッドの細分化を進めていく必要があると考えられる。また、本モデルを計算させる上で、塩分・水温の保存式方程式に γ 項を付加させることで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法であることが示された。

このように十分定常状態である海洋の流れ場の中では海表面での風による作用よりも海洋内部の様々な物理機構によって支配されているものと推察される。

粒子追跡結果についてみると水深2000m以下であれば、追跡期間を300年間程度とした場合、いずれの投入水深でも到達水深は1000mよりも深い水深となり、本研究の目的である液化二酸化炭素海洋隔離が十分可能であると示唆される。しかし、2000m以浅ではいずれの投入水深(250m, 500m, 750m, 1000m, 1250m, 1500m, 1750m)でも海洋の表層部に到達してしまうことが確認された。