

海洋からみた地球規模環境問題

GLOBAL ENVIRONMENTAL PROBLEM VIEWED FROM AN OCEANOGRAPHIC STANDPOINT

和田 明*
Akira WADA

ABSTRACT ; In recent years, global warming caused by the increase of carbon dioxide, and marine pollution are attracting social attention as they exert a grave effect on the global environment and national life as well. Marine pollution caused by a petroleum tanker wreck in Alaska posed a major problem under such a background. To elucidate marine phenomena, about which little information is available as compared with atmospheric phenomena, the development of an ocean circulation model which indicates the movement of seawater throughout the ocean will make it possible to precisely grasp the movement of substances between the atmosphere and the ocean as well as in the ocean.

In this paper, the circulation model and its outlook are discussed, indicating that the modelling will become a useful means to elucidate the migration of CO₂ and the diffusion phenomena of oil, radioactive substances, etc.

KEY WORDS; Ocean Circulation Model, carbon dioxide, radioactive substances, the Pacific Ocean

1. はじめに

海洋環境問題、とくに海洋汚染としては油などによる汚染によって漁業・レクリエーション利用の阻害や油膜が拡散することにより地球の水・大気循環に影響が生じることも考えられる。これはタンカー等の船舶によるところが大きい、海底油田の開発に伴うものもある。また、重金属や化学物質による汚染の場合は海洋生物に影響が懸念され、その摂取により人体影響の恐れもあると考えられる。一方、化学物質などによる汚染の状況についての地球規模のモニタリングが不十分であるほか、海洋における物理、化学、生物のプロセスを総合的にとらえた地球規模の循環機構、海洋環境変化の予測に関する研究の遅れが目立ち、人工衛星などによるリモートセンシングについても不明な点が多い。地球環境問題は一旦問題が顕在化してからでは対策が手遅れとなることから、着実な取組みが要求される課題である。

とくに近年、二酸化炭素の増加による地球温暖化や海洋汚染が、地球環境ひいては国民生活に重大な影響を及ぼすものとして強い社会的関心を集めている。石油タンカー海難に伴う海洋汚染もこうした背景のもとで大きな問題とされた。大気現象にくらべて情報が少ない海洋現象を解明するためには、海水の海洋全体での移動を表わす海洋循環モデルの開発が、大気-海洋間、海洋での物質の移動を正しく把握することを可能とするものと考えられる。

本文では、循環モデルとその展望について述べるとともに、モデルがCO₂の移行、油や放射性物質などの拡散現象の解明に有用な手段となり得ることを述べる。

* 東海大学海洋学部, School of Marine Science and Technology, Tokai University

2. 海洋循環モデル化の現状

海洋循環の数値モデルは大気循環の場合よりかなり遅れていて1967年初めて発表された。当時の計算では海底地形は単純で海の深さを一定と仮定していた。その後、海底の起伏が水の動きを大きく変える可能性があることから、海底や海岸線の形状が海洋の循環におよぼす影響が検討されるようになった。

海洋循環モデルでは、海洋循環に関与する海水密度については熱および塩分の方程式から予測されるがこのような形式によらないで初めから観測した密度を用い、これを時間的に一定として扱うモデルが用いられてきた。一方、大気循環の数値モデルでも、海面水温の分布とその時間変化には観測値を使うのがふつうであった。しかし循環モデルの研究が進んで、大気と海洋を切り離して別々に扱うのではなく、一つの流体系として考慮できるようになっている。すなわち、風の力や海面での熱収支、大気循環に関与する海面水温などは太陽放射、大気・海洋間の相互作用のもとに決まってくるしくみになっている。

現在、海洋循環モデルとして二つの方法が用いられている。その一つはボックスモデルで、解析の対象となる海洋をその海水が一樣な特性を持つ多数のボックスに分割し、水温、塩分の現実の分布から各ボックス間に生ずる海水交換量を求めるものである。各ボックス間の交換流量は水量、塩分、熱の収支式を連立させて解くことにより求められるが、未知数の数が方程式の数より多くなるので、特殊な解析法による手法が用いられる。この手法は診断モデルともいわれているが、海水交換量を決定するために必要な流速の観測データおよびトレーサー実験結果を得ることは現在不可能である。また、既往の流速結果や海洋循環モデルによる流量解析結果を仮定して解析したとしても、実際の温度、塩分分布の見現体を求めることは不可能に近い。このことから上記の手法は現実性の高い結果を与えるものと考えられている。

他のものは、数値モデルに基づく数値シミュレーション手法である。近年の海洋学や計算機科学の進歩によってこのモデルの数値解析のアルゴリズムはある程度整備されており、海洋の表層の循環は一応近似できている。しかし、深層循環についての解析を試みた例は極めて少ない。一般に深層での海水の流れは主に海水の密度差に起因すると考えられる。このため深層での密度分布が準平衡に達するのには数十年～数百年かかると思われる。深層循環を対象とするとき、当然3次元非定常モデルを構築する必要がある。このようなモデルはGCM (General Circulation Model)と呼ばれ、運動方程式、熱量保存式、および塩素量保存式の各式系から成る。

通常、海洋を $2.5^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 分割し、太平洋の流動解析が実施されているが、今後は水平・鉛直の解像度の改良を行うことが必要となる。

3. 海洋循環モデルと炭素の挙動

3. 1 海洋における炭素の挙動

海洋は大気中の二酸化炭素分圧と平衡にある表層と太陽光の影響を受けない深層に分けられ、両層で物理的・化学的性質が異なる。一方、海洋は温度差、塩分濃度差、風の作用により表層のみならず深層においても循環が生じている。地球規模の大きな流れは、Broecker (1989) による循環の模式図(図-1)にみられるように、大西洋グリーンランド沖で沈降し、大西洋から南極付近を経てインド洋、オーストラリアの南を経て太平洋にいたる。

北太平洋で表層に移行し再びインド洋へ戻るといわれている。

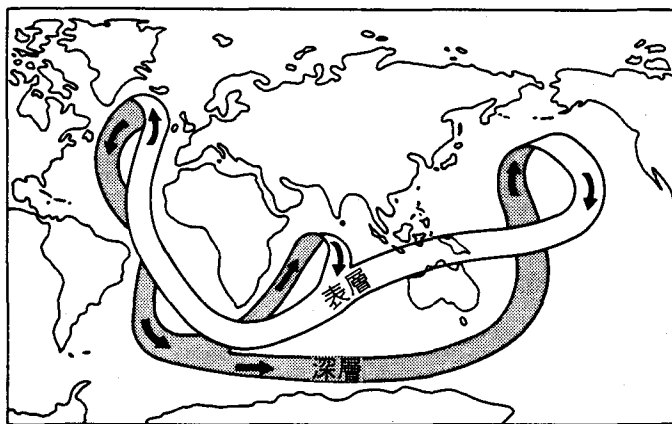


図-1 Broeckerによる循環の模式図

化石燃料の燃焼により大気中に放出される二酸化炭素は、一般には海洋がその過剰の二酸化炭素を吸収するものと考えられている。海水の沈降海域は大気から海洋へ CO_2 が移動することと逆に、湧昇域では海洋から大気へ移動することを意味している。大気-海洋間の CO_2 交換量を推定するためには、詳細な ^{222}Rn の交換係数や大気・海洋の CO_2 分圧の空間的、時間的観測データの積み重ねが望まれる。

海洋では湧昇・沈降流が発生している海域は限られている。沈降流海域としてはノルウェー海やインド洋の一部などにみられ湧昇領域はペルー沖、アラスカ湾、赤道海域、アフリカ西岸沖、ベンガル湾などである。

3. 2 炭素循環モデル

化石燃料から年間50億トにおよぶ二酸化炭素が放出されているが、大気中の二酸化炭素の増加は炭素換算で毎年27億トにしかない。大気残留率は53%となる。炭素循環モデルにおいてこの大気残留率が説明出来ないことが、いわゆるミッシングシンク問題 (problem of missing sink) となっている。

大気中における二酸化炭素濃度の予測に使われているモデルは基本的には大気、海洋、植物圏をそれぞれ一つのboxとみなし、各box間の炭素のやり取りを交換係数を用いたbox model としている。モデルの代表的な一例の構成図が図-2に示されている。

炭素の循環モデル化では少なくとも以下の三つの観測事実を矛盾なく説明することが必要である。

- 1) 大気圏と海洋表層との二酸化炭素の交換速度を明確にすること。
- 2) 海洋表層と深海層の炭素の交換速度を正しく表現すること。
- 3) 化石燃料の使用により大気に排出された二酸化炭素が大気中に残っている割合（大気残留率）を説明できること。

図-2に示すモデルにおいて、大気残留率を満足するためには、約100mの海洋表層の厚さを約一桁大きく考えなければならない。この問題点を解消するため、深層海洋を混合されたBOXではなく、表層に引き続く連続層であると考え、その移動は乱流混合によって連続的に起こると考えるいわゆるbox diffusion model が提案されている。

このモデルはbox model の欠点がある程度緩和するが、混合層の厚さを大きくとるか、拡散係数を深さの関数とし、上部で大きな値を持つようにしなければ大気残留率は説明できない。約53%といわれる大気残留率を説明できるよう海洋に多量の CO_2 が吸収されるためには表層が十分厚いか、深海まで拡散させるしか方法はないことになる。

そこで、二酸化炭素を深海まで拡散させるために、表層から深海へ直接炭素が移動するadvective diffusive model や高緯度海洋における表層水と中深層水の直接的交換の効果を加えた、outcrop diffusion model が提案され、海洋での地域的な沈降流、湧昇流と結び付けて考えられている。直接吸収するモデルの概要は図-3に示すとおりである。

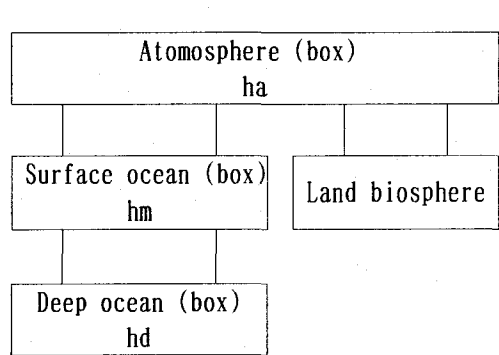
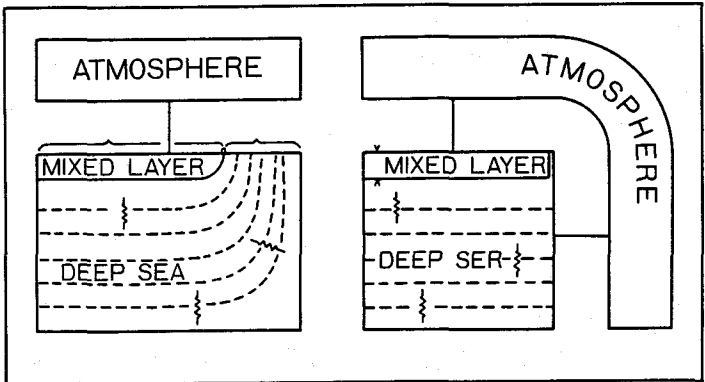


図-2 ボックスモデル



(a)は物理的な考え方、(b)は数学的表現を示す。

図-3 Outcrop-diffusion model

低緯度・中緯度の海洋は表層の混合層とその下の温度躍層を含む深層とに分けられている。海洋表層ではよく混合された状態であるが、深層海洋中の鉛直輸送は乱流拡散によるものとする。深層水の生成される高緯度では、表層水は等密度線（図の破線）に沿って深層水と連結しており、高緯度において深層水が直接的に大気に露出しているとみなしている。これは図-4に示すような観測事実を説明し得るモデルとなっている。このモデルは box diffusion modelの欠点を補うものとして提唱されたものである。このモデルによると海洋への吸収能力は box diffusion modelよりかなり大きくなるが、海洋に化石燃料からのCO₂放出量の半分を吸収さえ得るには至らない。

このような状況にあっては、大気中の二酸化炭素の濃度を予測することは難しい。それには海洋への吸収量の予測が不可欠だからである。海洋においては、観測の主体が船によるため、広域でのデータが入手しにくい。現在、海水の海洋全体での移動を表す海洋大循環の数値シミュレーションなどが超大型コンピュータの発達とともに急速に進みつつある。このモデル化によって大気-海洋間、海洋での炭素の循環が正しく把握することが可能になると考えられる。

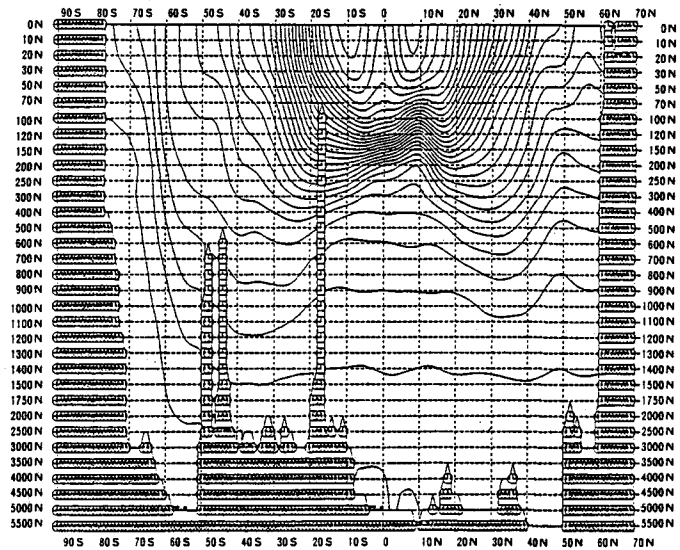


図-4 太平洋180°E水温鉛直分布図

4. ボックスモデルによる循環解析

4. 1 ボックス区分の検討

(A) 水平区分

- (1) 短半減期の核種の詳細分布を把握するため、放出点近海を細分した。
- (2) 東西方向の分割はT, S, σ_T の分布（図-5）と海水循環系を参考に、次の6分割とした。40°N以北（亜熱帯循環系）、40°N～20°N（亜熱帯循環系）、20°～0°（北赤道循環系）、0°～20°S（南赤道循環系）、20°S～50°S（亜熱帯循環系）、50°S以南（南極同極循環系）。

この結果、太平洋を水平面で24のボックスに区分した。

(B) 鉛直区分

- (1) 鉛直方向の区分は、等深度を幾何学的に区分するものと、海水の動きや混合に影響する密度面に注目した等密度分割の2通りを行った。
- (2) 幾何学的分割は水深100 m, 500 m, 1000m, 2000mを境界として5層に分割した。

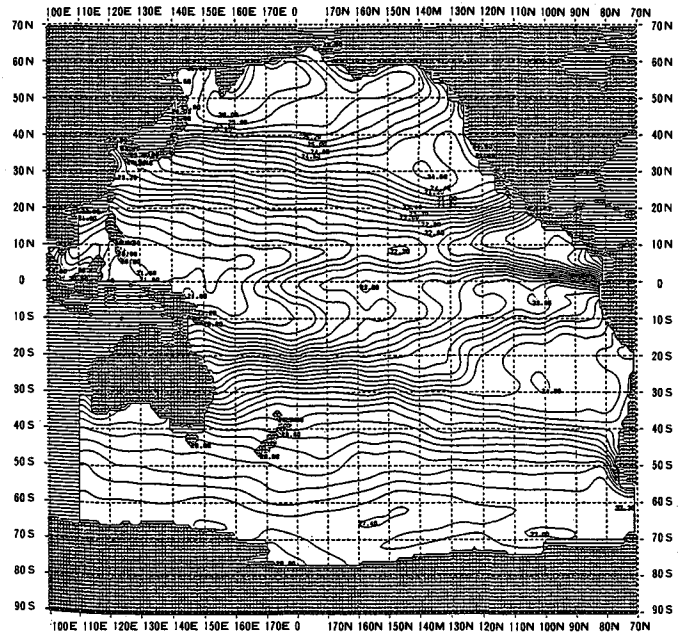


図-5 表層での σ_T 分布

(3) 等密度面分割は $\sigma_t=24.2$ 面, および $\sigma_t=26.6\sim 27.6$ の間の値0.2ごと等密度面と水深2000m面を境に9層に分割した。

4. 2 モデルによる交換流量の解析

ボックス間の交換流量はボックスごとに次の3つの方程式から求められる。

海水の質量の保存方程式

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} + Q_p + Q_r + Q_e = 0 \quad (1)$$

海水の塩分濃度の保存方程式

$$\sum Q_{in} \cdot S_j - \sum Q_{out} \cdot S_i = 0 \quad (2)$$

海水の熱量の保存方程式

$$\sum Q_{in} \cdot T_j - \sum Q_{out} \cdot T_i \pm H_a \pm H_r \pm H_b \pm H_e = 0 \quad (3)$$

ここに, Q_{in} , Q_{out} : それぞれボックス流出・流入量, S_i , S_j : ボックス i , j での塩分濃度, T_i , T_j : ボックス i , j での水温, Q_p : 降雨量, Q_e : 蒸発量, H_a : 短波輻射量, Q_r : 河川流入量, H_r : 有効逆輻射量, H_b : 顕熱量, H_e : 潜熱量。

全てのボックスについて式(1)～式(3)の連立1次方程式を立て, 交換流量が非負である制約条件付きの非線形計画法を適用した。

各ボックス間の交換流量係数の分布を図-6, 7に示す。

第1層(0~100 m)における全体の流れのパターンは, 北半球では時計回りの環流, 南半球では反時計回りの環流を示しており, 過去の知見による太平洋の表層循環の傾向と一致している。第3層(500~1000m)では全体的に南向きの流れがあり, その強さは第2層に比べても弱くなっている。

全体的にみると高緯度地域での下降流, 低緯度地域で上昇流というおよそのパターンが認められる。下降流の大きな海域は北西太平洋でみられ, 第2層以深の水平方向の南向きの流れに対応している。上昇流は赤道付近の西太平洋や南米沖の海域で強くみられる。

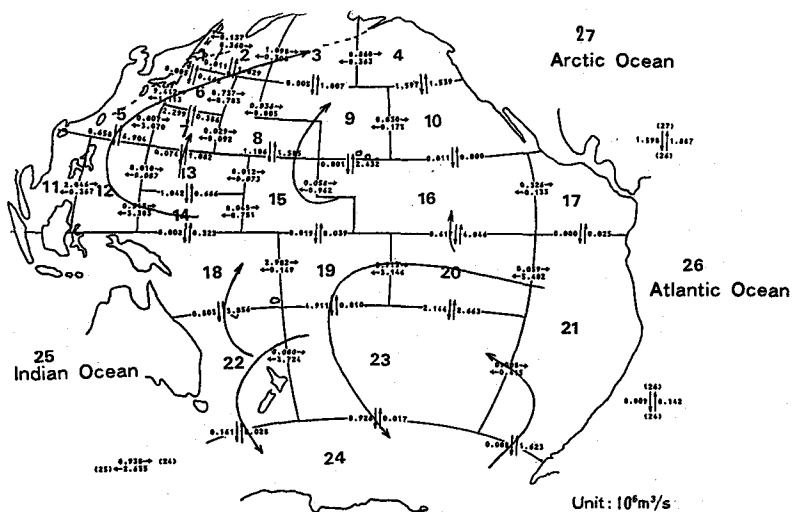


図-6 交換流量 (No.1層: 0~100m)

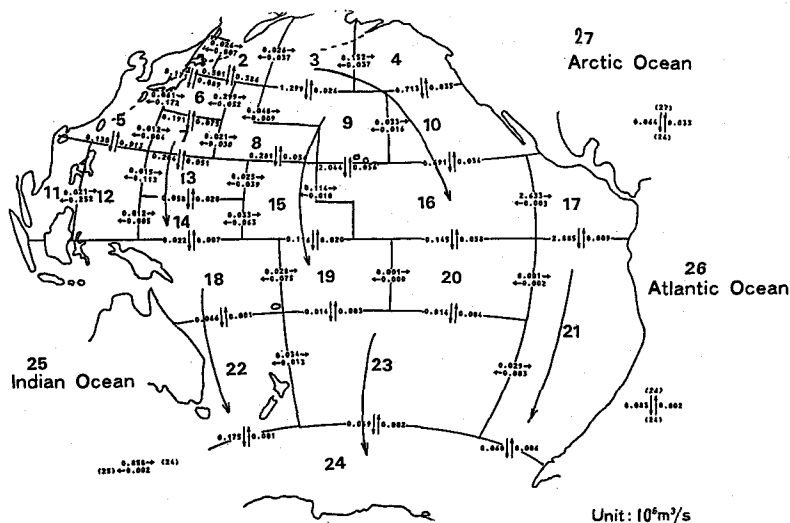


図-7 交換流量 (No.3層: 500~1000m)

5. 海洋循環モデルの適用例

5. 1 放射性物質の拡散計算例

ここで用いるモデルの拡散計算は、交換流量の解析結果を用いて、沿岸に放出された放射性核種の移動・拡散を計算し、各ボックスにおける濃度の時間変化を求めるものである。放射性核種の海水中における挙動の要因は、①核種の崩壊、②鉛直混合（拡散、湧昇流、沈降流による）、③水平混合（拡散、移流による）、④海水中の粒子および海底堆積物との相互作用による吸着、沈降となる。

海洋内部では、海洋表面に供給された物質を表層から深層へさらに深層から海底堆積物へ輸送する機構（スキャベンジング）が働いている。本モデルでは、従来の拡散モデルに比し、この点を重視している。海洋の微量元素のスキャベンジングにおける最も主要な個体は、有機性沈降粒子であり、その挙動の正確な解明が重要である。

海水濃度を計算するモデル式は次のとおりである。

$$\begin{aligned}
 V_i \frac{dC_i}{dt} = & - \sum_{j=1}^n (Q_{ij} \cdot C_i + Q_{ji} \cdot S_j + K_d \cdot C_i) \\
 & + \sum_{j=1}^n (Q_{ij} \cdot C_i + Q_{ji} \cdot S_j + K_d \cdot C_i) \\
 & + \sum_{j=1}^n (A_{ij} \cdot K \cdot \frac{C_i - C_j}{L_{ij}} - (B \cdot C_i \cdot V_i) \\
 & + (K_d \cdot C_j \cdot S_j + A_{ij} \cdot V_{down})
 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 C_i ：ボックス*i*の放射性物質濃度、
 V_i ：ボックス*i*の容量、 Q_{ij} ：ボックス*i*から
*j*への交換係数、 A_{ij} ：ボックス*i*と*j*との接触
面積、 L_{ij} ：ボックス*i*と*j*との平均距離、 S_i
: S 濃度 (g/m^3)、 K ：拡散係数 (cm^2/s)、
 K_d ：放射性物質の分配係数 (cm^3/g)、 V_{down} ：
 S 沈降速度 (cm/s)、 B ：崩壊定数 ($1/s$)。

一方、スキャベンジングされた核種の海底における挙動は図-8に示す底質を3層に区分したモデルによって計算される。計算の条件は以下のとおりである。

① 浮遊物質の沈降速度は大粒子で100m/日、小粒子で100m/年とした。表層における濃度分布は高緯度海域で濃度が高く、赤道付近で濃度が低いように設定し、鉛直方向には深度とともに指数的に減少するものとした。

② 施設から海洋へ放出された核種は、すべてその前面のブロックへ負荷されるものと仮定した。計算は各ボックスにおける核種濃度が定常に達するまで行った。

集団被曝線量の計算については以下の手法を適用した。

集団線量当量は海産生物の摂取によるもののみを考え、太平洋をはじめとして世界中の海洋で漁獲された海産生物は、すべて食用に供されるものと仮定して、日本国民および全世界住民の集団線量当量を計算した。今回は臓器別の計算は行わず、実効線量当量のみを計算の対象にした。また、年令構成は考慮せず、成人のみを考えた。

計算条件は以下のとおりである。

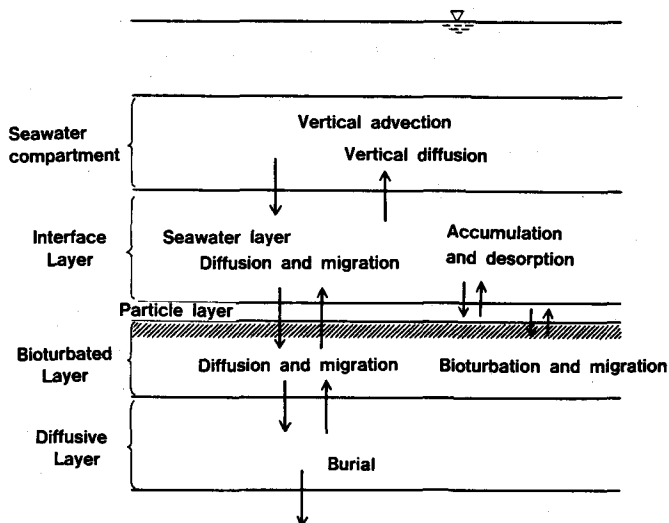


図-8 海底堆積層モデル

① 各海域で漁獲される魚の体内核種濃度は、当該海域の海水濃度と濃縮係数によって算定する。鉛直方向の濃度については、等深度コンパートメントでは第1層（0～100m）の濃度、等密度コンパートメントでは第1層と第2層の平均濃度を使用する。

② 核種の放出条件として、16核種を想定し、それぞれ1TBq/年の放出率で100年間の計算を行うこととした。

結果の概要は次のとおりである。

合計では日本人が、61 man・Sv/年、全世界が84 man・Sv/年となっている。核種的には長半減期核種による被曝が全被曝線量に大きく影響している。生物種類別にみると、海藻の摂取によるものが最も多く、日本人の場合には全体に約70%を占めている。世界をみると、海藻52%、魚類36%、貝類5%の順になっている。

また、他の魚種も海水中濃度が日本近海を除くと極めて低くなるため、他海域の漁獲による被曝線量は小さい。このため合計の集団被曝線量も世界全体が日本人だけの場合と比較して約1.35倍にしかならない。

わが国の再処理施設や原子力発電施設では運転に伴って殆んど皆無か極低レベルの微量物質が法令基準値をはるかに下まわる状態で放出されている。これらの物質は直接人体には何らの影響を及ぼさないと考えられるが、たとえ無視できる位の物質質量であっても前もって濃度予測を行い、国民の線量評価を通じて安全性を確認しておくことが必要と考えられる。

5. 2 海水粒子の移行・集積・発散

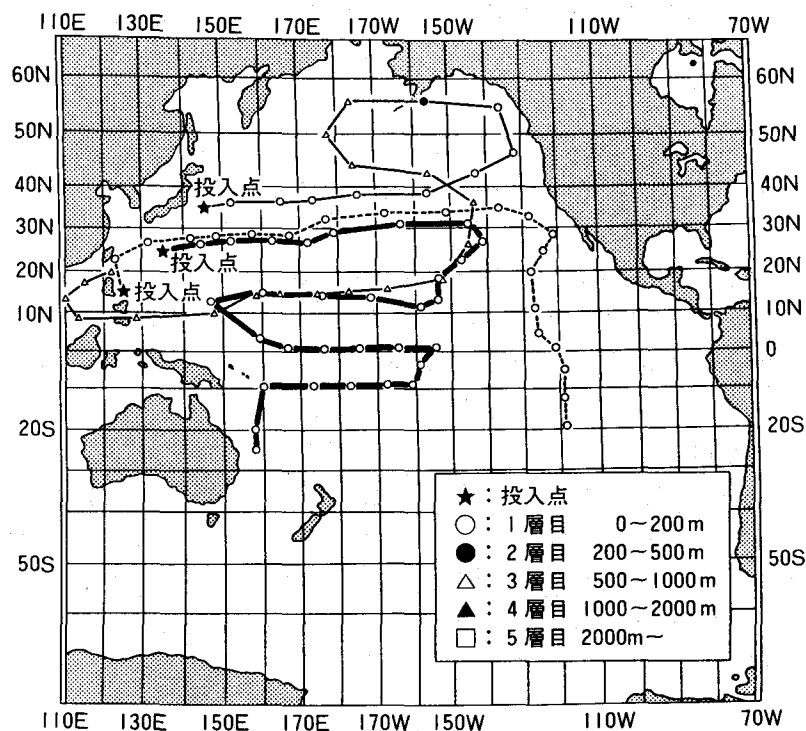
4. のモデル展開に引き続いて、ボックス数を408個に細分化したときの流動パターンが求められた。水平、鉛直方向の格子の解像度の改良を行うことによって、太平洋のきめ細かい海流系が再現可能となった。ここでは、海洋表層に存在する数種類の海流に粒子を投入し、その粒子が水平方向及び鉛直方向にどのような移動をするかについて追跡シミュレーションを行った結果を紹介する。このうち、亜熱帯環流系について着目してみる。（図－9）

黒潮、黒潮続流、北太平洋海流は北太平洋を横断している海流である。

それぞれの海流の明確な区切りがないので一続きの海流とし、黒潮に粒子を投入して追跡シミュレーションを行った。黒潮に投入した粒子の動きは、既往の研究によって知られている動きをよく再現している。

今回の粒子追跡では、その動きを次の2パターンに分けることができる。投入点の緯度が30°Nより北であるものと投入点の緯度が30°Nより南であるものとである。以下にこの2パターンについて述べる。

30°Nより北に投入された粒子は、太平洋東部に達し、アラスカ海流に乗って、沈降しながら太平洋北東部を周り、太平洋東部を南下し、水深1000m付近を東から西への流れに乗り、太平洋西部に達する。



図－9 粒子追跡状況図

30° Nより南に投入したものは、太平洋東部に達してからそのまま東部を南下するものと、15° N付近まで南下して北赤道海流に乗って西へ向かい、更に赤道反流に乗って東へ向かい、南赤道海流に乗って西へ流れ、オーストラリア東海岸沖に達するものである。東部に達してからの動きに違いが出るのは、東部に達した時の緯度が約32° Nより北にあるものがそのままカリフォルニア海流に乗って南下し、南にあるものは145° W付近で北太平洋海流から離れて南下流に乗るようである。北太平洋海流に乗っている時の動きは両者ともほぼ同じである。

全体的に鉛直方向の動きは、水深100 mに投入した粒子の動きはあまり無く、太平洋東部に達した時点で数10m上昇しているのみである。

この粒子追跡の結果をふまえ、海水循環について既往の知見と比較検討した結果は以下のとおりである。

表層の循環は、主に北半球の中～高緯度帯および東岸海域で沈降する。高緯度帯で沈降した水は、南下、東進を繰返ししながら徐々に大規模になって、第2層の赤道付近を西進する。

一方、底層を南極海から北上する流れが東岸海域で湧昇し、赤道付近では第3層を境に、北赤道海域の東岸と中央海域間の第2層～第4層で鉛直循環する。

第2層の循環の一部はさらに西進して、前述の北半球を南下しながら西進してきた流れと合流する。また、高緯度帯で湧昇した流れは、北太平洋全体を水平循環するながれとなって北赤道海域の中央北部海域で湧昇し、西に向かう。これら西に向かう流れは、大半が第2層からインド洋へ抜ける。

両者の結合様式による結果を比較すると多少差があり、どちらかと言えば、等深度結合がストンメル的模式に、等密度結合がブロッカーの模式に似ていると言える。

6. おわりに

海洋における海難および海洋汚染の防止ならびに地球温暖化に伴う海流変化等の解明を行うためには、太平洋全体を対象とした海流等の海洋変動をより精密に把握するシステムの開発が求められている。

海洋の数値モデルは、基礎方程式や境界条件などいろいろな未確定要素を含んでいるため、海洋循環の解析を十分な精度でもって行うことは難しい。このように、数値モデル自身が不完全である以上、より現実に結果を得るためには、予測値を観測値で修正しながら整合をとることが考えられる。このように観測値を数値モデルに同化して、数値モデルをより現実に近づける方法を検討中である。

参考文献

- 1) 田中正之 (1987) : 二酸化炭素循環のモデリング 気象研究ノート, 99-120
- 2) Broecker (1980) : Modeling of the carbon system, Radiocarbon, 22.
- 3) W.S. ブロッカー (新妻信明 訳) (1981) : 『海洋化学入門』, 東京大学出版会
- 4) Akira Wada (1991) : Flow Analysis in Open Sea by Compartment Model, Proc. of 24th IAHR Congress, Madrid.
- 5) Akira Wada (1991) : Collective Dose Assessment Models for Evaluating the Impact of Radio Nuclides from Nuclear Reprocessing Facilities, Proc. of 3rd Int. Conf. on Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management, RECOD '91, Vol.1, Sendai.