



地球規模の海洋環境における放射性物質移行モデル

中野 政尚 渡辺 均 圓尾 好宏

東海事業所 放射線安全部

Radioactivity Transfer Model in Global Ocean

Masanao NAKANO

Hitoshi WATANABE

Yoshihiro MARUO

Radiation Protection Division, Tokai Works

海洋に放出された液体放射性廃棄物の長期的環境影響を評価するため、広域海洋拡散モデルの構築とコード化を行った。本研究では、全球の海洋流速場の導出方法、粒子追跡手法による流動拡散評価、核実験降下物の拡散シミュレーションによるコードの検証等について検討した。

診断モデルによって得られた全球流速場とランダムウォーク法を組み合わせ、1960年代を中心に行われた大気圏核実験による放射性降下物の海洋拡散シミュレーションを行ったところ、 ^{137}Cs 及び ^{90}Sr では海水中濃度の水平及び鉛直分布の観測値と比較的よく合致した。 $^{239,240}\text{Pu}$ に関しては、現有の拡散モデルにスカベンジングプロセスを付加する必要性が示唆された。

また、本計算コードを用いて茨城県沖合からの仮想放出シミュレーションを行ったところ、放出後約10年で北太平洋を一周し、6 TBq の放出10年後における最大濃度地点の海水中濃度は $10^{-5}\text{Bq}/\ell$ 以下であることが分かった。

To evaluate the long-term environmental effect from the liquid radioactive effluent discharged into a sea, the radioactivity diffusion model in global ocean and its computer program have been developed. This study consists of the method for the calculation of the velocity field for global ocean, movement and diffusion by particle chasing method, and the model validation by the simulation for the radioactive fallout from the atmospheric nuclear tests.

Combined the current field obtained by the diagnosis model and random walk method, the simulation for the radioactive fallout from the atmospheric nuclear tests was carried out. The calculated value of ^{137}Cs and ^{90}Sr agreed with the observed value of horizontal and vertical distribution. But as for $^{239,240}\text{Pu}$, it was suggested that the scavenging process should be added to the present diffusion model.

A simulation for a hypothetical discharge from the offshore Ibaraki prefecture was also carried out. The result was that the discharged radioactivity circled over the north Pacific Ocean in 10 years after the discharge and that the maximum concentration in seawater at 10 years after the 6 TBq discharge was less than $10^{-5}\text{Bq}/\ell$.

キーワード

海洋拡散，液体放射性廃棄物，環境影響，粒子追跡，ランダムウォーク，放射性降下物，シミュレーション，放射性核種，スカベンジング

Marine diffusion, Liquid radioactive waste, Environmental effect, Particle chasing, Random walk, Radioactive fallout, Simulation, Radionuclide, Scavenging



中野 政尚

環境監視課環境管理チーム所属
副主任研究員
施設周辺環境モニタリング及び拡散評価手法の開発業務に従事



渡辺 均

環境監視課環境管理チーム所属
副主任研究員
施設周辺環境モニタリング業務に従事



圓尾 好宏

線量計測課所属
課長
放射線管理機器の維持校正及び個人被ばく管理業務に従事

1. はじめに

核燃料サイクル施設から海洋に放出される放射性廃棄物の長期的な広域海洋環境影響評価（海水中放射能濃度評価，被ばく線量評価）は原子力施設の定常運転に伴う長期的・世界的なリスクを評価するために重要である。また，予期せぬ放射性物質の海洋放出（核施設からの放出，原子力潜水艦事故，人工衛星の落下等）に対する長期的な環境影響評価を行う際にも有用である。

そのため，海水中放射能濃度評価を行うための「広域海洋放射性物質拡散モデル」の構築を目指し，物質の広域海洋における流動・拡散の評価手法の調査を行うとともに，海洋流動に伴う物質の移流拡散過程（非沈降物質）の評価方法として，粒子追跡手法を応用したランダムウォークモデルの検討を行った。

2 研究開発の方法

2.1 全球流速場の計算方法

水温と塩分の観測結果に基づき，現実海洋にお

いて放射性物質がどのように輸送されるかを検討する場合には，診断的手法（水温・塩分の観測値を逐次計算値に復元させる方法）を用いた海洋大循環モデルによる数値シミュレーションがよいとされている。この手法は Sarmiento and Bryan¹⁾によって提唱された。

本研究では Fujio and Imasato²⁾によって改造された，移流拡散式を数値的に解くに当たり，観測値をどの程度まで反映させるかを指定できる方法を採用している。このモデルは北緯74度から南緯78度までの実際の海洋地形をカバーし，水平方向に2度，鉛直方向には15層に分割している。図1に示すように本モデルは運動方程式，連続の式，状態方程式及びポテンシャル水温，塩分の移流拡散式から構成されている。また，温度及び塩分の観測値には Levitus の年平均データ³⁾を，また，風応力の観測値には Hellerman and Rosenstein の年平均データ⁴⁾を与えて，年平均の流速場（鉛直15層分）を診断的方法によって決定した。

<p>運動方程式</p> $\frac{\partial U_H}{\partial t} + (U_H \cdot \nabla_H) U_H + W \frac{\partial U_H}{\partial Z} + \left(f + \frac{U \tan \phi}{R} \right) Z \times U_H = -\frac{1}{\rho_0} \nabla_H P$ $+ A_H \left\{ \nabla_H^2 U_H + \frac{1 - \tan^2 \phi}{R^2} U_H + \frac{2 \sin \phi}{R^2 \cos^2 \phi} Z \times \frac{\partial U_H}{\partial \lambda} \right\} + A_V \frac{\partial^2 U_H}{\partial Z^2}$ $\frac{\partial P}{\partial Z} = -\rho g$ <p>連続の式</p> $\nabla_H \cdot U_H + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0$ <p>海水の状態方程式</p> $\rho = F(\theta, S, P)$ <p>水温・塩分移流拡散式</p> $\frac{\partial \theta}{\partial t} + (U_H \cdot \nabla_H) \theta + W \frac{\partial \theta}{\partial Z} = K_H \nabla_H^2 \theta + K_V \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} + \gamma(\theta^* - \theta)$ $\frac{\partial S}{\partial t} + (U_H \cdot \nabla_H) S + W \frac{\partial S}{\partial Z} = K_H \nabla_H^2 S + K_V \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} + \gamma(S^* - S)$	<p>λ : 経度 ϕ : 緯度 Z : 高度 U_H : 水平流速ベクトル W : Z方向流速成分 θ : ポテンシャル水温 S : ポテンシャル塩分 t : 時間 P : 圧力 ρ : 海水密度 f : コリオリ係数 R : 地球半径 g : 重力加速度 ρ_0 : 平均海水密度 A_H : 水平渦混合係数 A_V : 鉛直渦混合係数 K_H : 水平渦拡散係数 K_V : 鉛直渦拡散係数 θ : Levitus の水温観測値 S : Levitus の塩分観測値 γ : 復元時間の逆数</p>
--	---

図1 海洋大循環モデルの支配方程式

2.2 粒子追跡及びランダムウォーク法

粒子追跡の方法は Fujio and Imasato²⁾によって報告されているものと同様の方法を用いた。Xp を時間 t における粒子の位置ベクトルとし，得られた3次元流速場を U(Xp) とすると，その追跡は(式

1) のような初期値問題として表現できる。ただし，U は三次元流速ベクトルで，X₀ は初期に配置した粒子の位置ベクトルである。

また，拡散項としてはランダムウォーク法による拡散表現を付加した。流速による移動ベクトル

X に乱れ（拡散）による三次元移動ベクトル ΔL を加算し、次地点座標を計算する（式7）。なお、Fujio and Imasato に従い、水平拡散係数は 2.0×10^7

cm^2/s 、鉛直拡散係数は $0.3 \text{cm}^2/\text{s}$ を全海域に対して用いた。

$$\frac{dX}{dt} = U(X_p) \quad (\text{式1})$$

$$X = X_0 \text{ at } t = 0 \quad (\text{式2})$$

$$\Delta L = L_x + L_y + L_z \quad (\text{式3})$$

$$|L_x| = \sqrt{(24 \times K_x \times dt)} \times R \quad (\text{式4})$$

$$|L_y| = \sqrt{(24 \times K_y \times dt)} \times R \quad (\text{式5})$$

$$|L_z| = \sqrt{(24 \times K_v \times dt)} \times R \quad (\text{式6})$$

$$X_m = X + \Delta L \quad (\text{式7})$$

- X : 移流による移動ベクトル
- X_p : 粒子の位置ベクトル
- X_0 : 初期粒子位置ベクトル
- $U(X)$: 3次元流速ベクトル
- ΔL : 拡散による移動ベクトル
- L_x, L_y, L_z : 拡散によるX,Y,Z方向への移動ベクトル
- K_x, K_y : 水平・鉛直拡散係数
- dt : 計算ステップ
- R : 一様乱数 (-0.5~0.5)
- X_m : 移流拡散による移動ベクトル

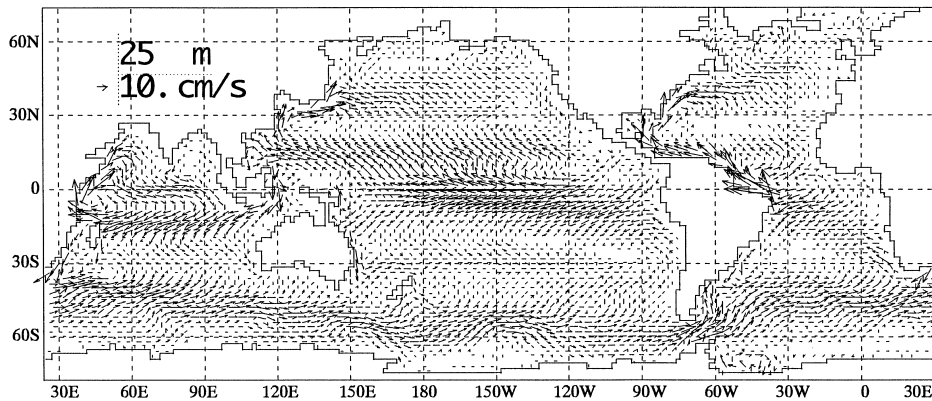


図2 診断モデルで得られた年平均流速場（水深25m）

3 計算結果

3.1 流速場の計算結果

図1の方程式に対して、約55年の時間積分を行った結果、年平均流速場が得られた（図2に水深25mでの結果を示す。）これは既に各研究者から報告されている結果とほぼ同等の流速場であり、Fujio and Imasato のモデルの妥当性を確認した。

3.2 大気圏核実験降下量データによる検証

作成した計算システムを検証するため、UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; 原子放射線の影響に関する国連科学委員会) 1977⁵⁾、1993⁶⁾に基づき、大気圏核実験による ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 $^{239,240}\text{Pu}$ の年別緯度別降下量データを入力して、海水中放射性核種濃度計算を行った。

図3に入力データの作成の概略を示す。UN-

SCEAR1977、1993には年別、緯度別データは ^{90}Sr のみが報告されている。このため、フォールアウト中の $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比と $^{239,240}\text{Pu}/^{90}\text{Sr}$ 比は一定であると

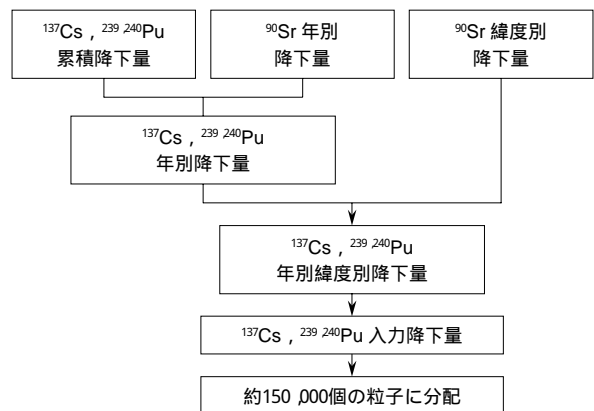


図3 粒子への放射能分配方法

いう仮定をした。そして年別緯度別の¹³⁷Csと^{239,240}Puの降下量を決定した。Bowen et al.⁷⁾によれば、海洋には陸地の20~40%増しの降下量がある。このため、UNSCEARからの値を20%増しとした。次に緯度別の降下量データを約15万個の粒子の分布に置き換えた。経度や局地的な分布はデータが十分に得られないことから、考慮していない。図4に一格子当たりの粒子数と、一粒子当たりの¹³⁷Cs放射能を示す。

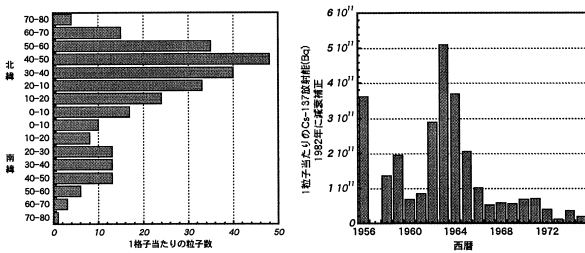


図4 各格子への粒子の配分と一粒子当たりの放射能

全体の流動拡散計算手順の概要を図5に示す。各粒子の位置は1年ごとに保存して、26年間(1956-1982)の計算を行った。関心海域について、26年間の各年について、その関心海域内に含まれている粒子の個数を深さ100mごとに数えた。数えたそれぞれの個数を当該年の一粒子当たりの放射能で重みづけして、26年間の合計を算出した。そしてNagaya et al.⁸⁾の観測結果と比較した。

(1) 水平分布

水平分布に関する結果は定性的にはこれまでの知見と一致した。これまでの研究によると、北緯

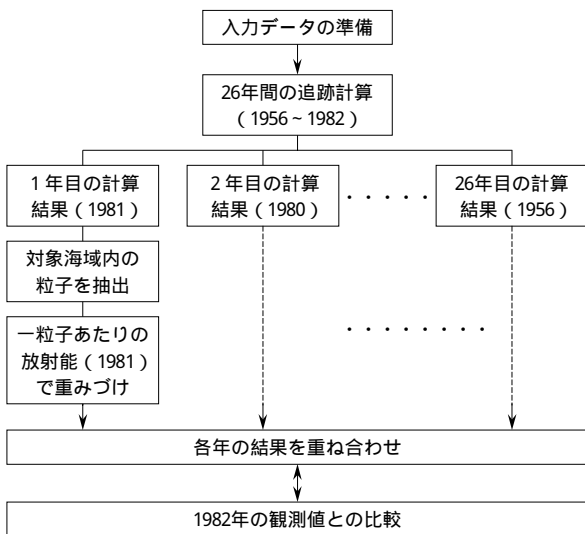


図5 計算結果と観測値の比較方法

40~50度の降下量は地球上で最高であるが⁸⁾、東経150度から西経170度の中央北太平洋において、北緯40~50度の海水中存在量は北緯40度以南より小さくなる⁹⁾。また、inventory/input比は、緯度の低下に従い増加する傾向がある。

表1に本計算での¹³⁷Csの降下量(input量)と海水柱内の平均濃度(inventory量)、及びinventory/input比を示す。inventory/input比は、これまでの知見と同様に、緯度の低下に従い増加する傾向があった。長屋らもまた、UNSCEARから降下量を見積もりinventory/input比を算出した。その範囲は北緯10~40度において1.0~2.1⁸⁾であり、おおむね実測値を再現できている。

表1 北太平洋中央部における降下量と海水中存在量(東経150度~西経170度)

	¹³⁷ Cs 降下量 (MBq/km ²)	海水中 ¹³⁷ Cs 存在量 (MBq/km ² column)	海水(inventory) / 降下量(input)
	input	inventory	
北緯0~10度	947	1,653	1.74
北緯10~20度	1,379	2,196	1.59
北緯20~30度	2,021	2,502	1.24
北緯30~40度	2,710	2,322	0.86
北緯40~50度	3,767	594	0.16

注) 降下量は1982年に減衰補正。

この計算で獲得した複雑な鉛直流と水平流は、現実の流れを正しく表現できており、かつ使用した拡散係数も適切であったためと思われる。

水平分布では全体的に海水中濃度が過小評価気味であった。これは降下量データにUNSCEARのデータを使用しているため、北緯30~50度付近の降下量が実際よりも過小評価になっていることも原因の一つとして考えられる。

(2) 鉛直分布

鉛直分布に関しては、表2に示す2地点にて、計算結果を整理した。図6に鉛直分布を示す。両地点とも、表層付近から深くなるにつれて濃度が上昇し、300~500mでピークとなり、急激に減少して、400~800mでほぼ0となった。濃度としては、ピークで¹³⁷Csで7mBq/l、⁹⁰Srで5mBq/l、^{239,240}Puで0.1mBq/lであった。この濃度の違いはinput量に比例しており、核種挙動の違いではな

表2 観測値と計算値の比較地点

地点名	採取日	緯度	経度	海底深度(m)
82 5	1982年2月1日	北緯25°02'	東経169°59'	6013
82 8	1982年2月7日	北緯12°46'	東経173°18'	5933

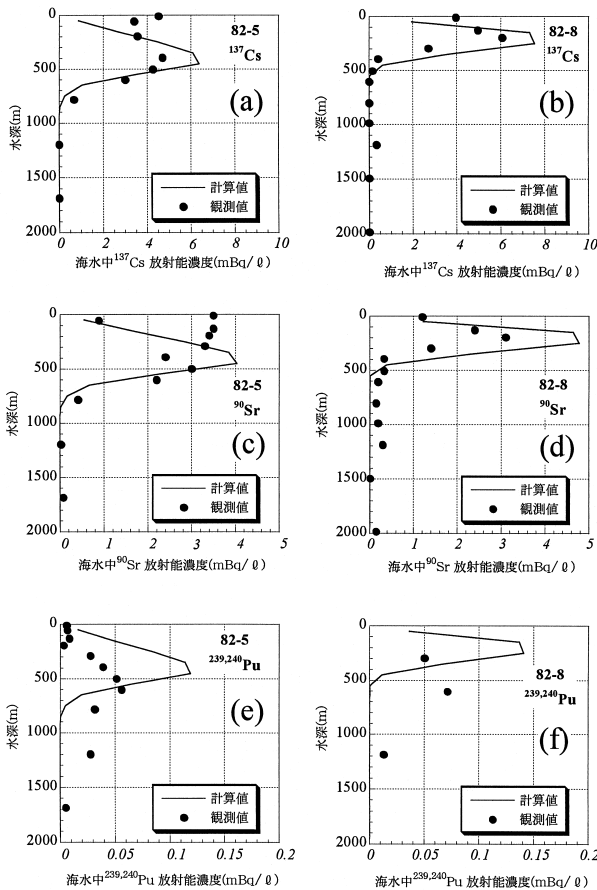


図6 海水中放射性物質濃度の鉛直分布

(a) ^{137}Cs (82.5), (b) ^{137}Cs (82.8), (c) ^{90}Sr (82.5),
 (d) ^{90}Sr (82.8), (e) $^{239,240}\text{Pu}$ (82.5), (f) $^{239,240}\text{Pu}$ (82.8)

い。

長屋らによる北太平洋での1982年の実測値⁸⁾との比較を行った。 ^{137}Cs と ^{90}Sr については、本モデルでは混合層を考慮していないため、表層付近が過小評価になったものの、それより中層・深層での鉛直分布については、表現することができた。

特に、地点82.5(北緯25度)では、800m付近まで分布しているのに対して、地点82.8(北緯12度)では400m付近までしか分布していない。計算値はこの実測値の傾向をよく表現できている。

$^{239,240}\text{Pu}$ の実測値のピークは、計算値のピークと比較してより深層に分布している。本モデルはスキャベンジングによるPuの鉛直移行を考慮していないため、観測値の鉛直分布を再現できていない。海水中のある種の元素は海水中の懸濁粒子にスキャベンジ(海水中で懸濁・沈降している様々な粒子への吸着除去)されるため、海底に沈降する可能性がある。CsやSrに比べPuはスキャベンジされ、海底に沈降しやすいことはよく知られている。

このことから、Puでは海水からのスキャベンジング過程をモデルに組込むことが重要であること

が再確認された。

3.3 粒子起源の考察

本モデルはランダムウォーク法を応用した粒子拡散モデルであるため、着目した範囲の粒子がどこからやって来たのかを逆追跡して調べることができる。この特徴を活かして、この北緯0~10度及び北緯40~50度の着目範囲に26年間で到達した粒子のinput点を逆追跡した。図7にそれぞれの着目範囲に到達した粒子のinput濃度を示す。北緯0~10度には幅広い範囲、特に北半球の高緯度帯から(放射能を持った)粒子が到達しているのに対して、北緯40~50度ではそれが比較的少ないことが分かる。これは北緯40~50度には、表層水ではなく、中層以深の水が移動してきたことを意味している。

本手法により、核実験による放射性降下物の水平輸送について明らかにすることができた。

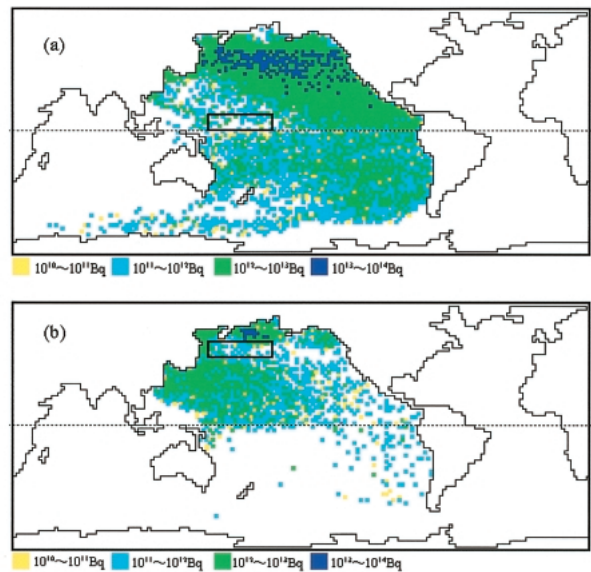


図7 長方形枠内の着目領域に到達した ^{137}Cs の起源
 (a)北緯0~10度, (b)北緯40~50度

4 茨城県沖合からの仮想放出による影響

サイクル機構東海再処理施設のある茨城県東海村の沖合から、 ^{137}Cs の仮想海洋放出を想定し、その放出に伴う海水中濃度を計算50年間に渡って計算した。 ^{137}Cs の放出量は6TBqとし、瞬間投入で与えた。これを30000個の粒子に割り振り50年間の流動拡散計算を行った。なお、本モデルでは地形格子の大きさが2度(約200km)と大きく、沿岸地形は表現されないため、沖合約100kmからの放出となっている。

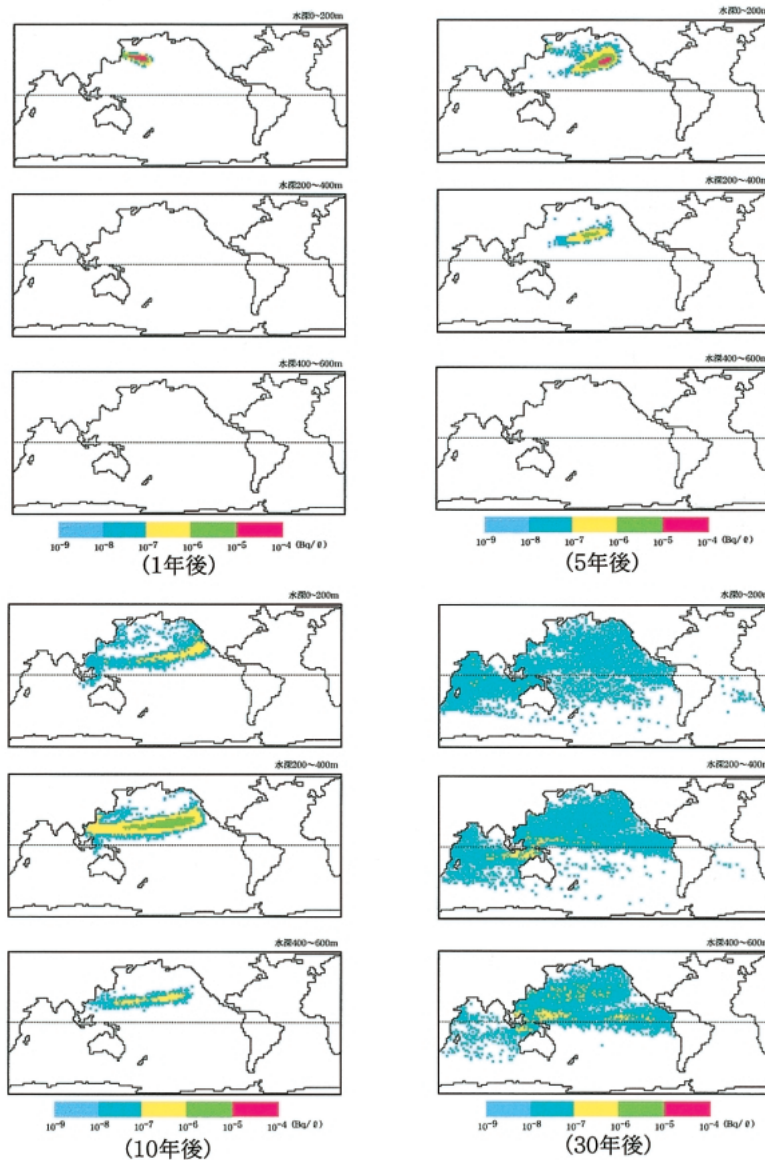


図8 東海再処理施設からの仮想放出シミュレーション

計算結果を図8に示す。図は上から水深0～200m, 200～400m, 400～600mの1格子(2×2度)中の平均海水中¹³⁷Cs濃度である。

1年後には最も高い場所で 10^{-5} Bq/lオーダーである。現在の海水中¹³⁷Cs濃度は 10^{-3} Bq/lオーダーであることを考えれば、一年間で十分拡散される。なお、参考までに、放出1ヵ月後の濃度を計算したところ、0～100mの平均濃度で 10^{-3} Bq/l未満であった。5～7年後には北米大陸に達する。また同時に水深200m以深に¹³⁷Csは達する。10年後にはアジア東部に達するが、濃度的には水深0～200mではそれほど小さくなく、水深200～400mの北太平洋中央部が 10^{-6} Bq/lオーダーで最も高い。また、水深400～600mにまで¹³⁷Csが達する。15年後においては、濃度の高い地域は北太平洋西部に移る。水深0～200mにおいて日本南岸に 10^{-6} Bq/lオーダ

ーである黄色が初めて現れる。20年後位から南太平洋に移っていくが、主に表層部のみである。水深200m以深では、40年後位までは¹³⁷Csは現れない。また、大西洋には50年後においてもわずしか現れない。

5 結論

スキヤベンジグなしの放射性物質流動拡散モデルを用いて大気圏核実験降下物からの¹³⁷Cs, ⁹⁰Srに対して、数十年後の拡散をシミュレートし、鉛直・水平分布を計算することができた。

^{239,240}Puに関しては流動拡散モデルにスキヤベンジグプロセスを付加する必要性が示唆された。

最後に、これまでの検討結果を踏まえて、茨城県沖合からの仮想放出シミュレーションを行うことができた。

6 おわりに

本研究では、全球の海洋流速場の算出方法に始まり、粒子追跡手法による流動拡散評価、核実験降下物の拡散シミュレーション等について検討してきた。

この結果、診断モデルによって得られた全球流速場は現実海洋を十分に再現できており、それによって得られた流速場とランダムウォーク法による移流拡散評価は20年間以上に及ぶ現実海洋での移流拡散をある程度は再現できることが確認された。

しかし、スキャベンジングの重要性が示唆されたため、現在本モデルにサブモデルとして付加する鉛直スキャベンジングモデルを開発中である。このモデルを用いて、スキャベンジングを考慮した大気圏核実験からのフォールアウトによる粒子拡散をシミュレートする予定である。

また、日本沿岸からの放出に対応できるよう、沿岸域については2度よりももっと細かい格子によって沿岸地形を表現し、東海村や六ヶ所村等の日本沿岸からの放出による環境影響を計算できるシステムを作成する予定である。

参考文献

- 1) Sarmiento, J. L., and K. Bryan: "An Ocean Transport Model for the North Atlantic", *J. Geophys. Res.* 87, p. 394-408 (1982)
- 2) Fujio, S., and N. Imasato: "Diagnostic Calculation for Circulation and Water Mass Movement in the Deep Pacific", *J. Geophys. Res.*, 96, p. 759-774 (1991)
- 3) Levitus, S.: "Climatological Atlas of the World Ocean", NOAA Prof. Pap. 13, 173, U. S. Gov. Print. Office, Washington, D. C., (1982)
- 4) Hellerman, S., and M. Rosenstein: "Normal Monthly Wind Stress over the World Ocean with Error Estimates", *J. Phys. Oceanogr.*, 13, p. 1093-1104 (1983)
- 5) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: "Radioactive contamination due to nuclear explosions. In: Sources and Effects of Ionizing Radiation", United Nations, New York (1977)
- 6) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: "Exposures from Man-made Sources of Radiation. In: Sources and Effects of Ionizing Radiation", United Nations, New York (1993)
- 7) Bowen, V. T., Noshin, V. E. et al: "Fallout radionuclides in the Pacific Ocean: Vertical horizontal distributions, largely from GEOSECS Stations.", *Earth Planet. Sci. Lett.* 48, p. 411 (1980)
- 8) Y. Nagaya and K. Nakamura: "^{239,240}Pu, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the Central North Pacific", *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 40, p. 416-424 (1984)
- 9) 長屋裕, 中村清: "外洋の解析調査", 第31回環境放射能調査研究成果論文抄録集, 9-12 (1989)