

32. 日本海における放射性降下物濃度の再現計算

Calculation of fallout concentration in the Japan Sea

津旨大輔*、青山道夫**、広瀬勝己**、尹 宗煥***、金 哲鎬****、丸山康樹*、仲敷憲和*、田口富貴子*****

Daisuke TSUMUNE, Michio AOYAMA, Katsumi HIROSE, Jong-Hwan YOON,
Cheol-Ho KIM, Koki MARUYAMA, Norikazu NAKASHIKI, Fukiko TAGUCHI

ABSTRACT; A method was developed to calculate radionuclides concentration in the Japan Sea. The concentration of radioactive fallout (^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$) due to atmospheric nuclear weapons tests was calculated to verify in the Japan Sea the method by comparison between calculated and observed values. The flow field was calculated by Japan Sea circulation model, which was improved in vertical resolution. We confirmed that influence of seasonal change of flow field was small on calculated results of fallout concentration. Therefore, annual mean flow field was adapted for this method. ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ concentrations were calculated by this method. Calculated ^{137}Cs concentration agrees well with observed value. However, calculated $^{239,240}\text{Pu}$ concentration was underestimated. This result suggests that $^{239,240}\text{Pu}$ concentration in the Japan Sea might be affected by not only global fallout but also another source.

KEYWORDS; Ocean pollution, Fallout, Japan Sea, Circulation model

1 はじめに

大気圏核実験などにより生成した人工放射性核種が成層圏を経由し、地表面および海表面に降下している。これは放射性降下物（フォールアウト）と呼ばれ、代表的なものとして ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ (^{239}Pu と ^{240}Pu は合計値とし、以下 $^{239,240}\text{Pu}$ と示す) などがある。海洋に供給されたこれらの核種は、その供給過程が比較的明らかであるので、海洋中の物質挙動を表すトレーサとして有効であると考えられている。また、汚染拡大防止の観点からも、現在の濃度分布を把握しておくことは重要であるが、観測値が十分に存在する訳ではない。数値モデルによる再現は、放射性降下物の海洋中の挙動を把握するために有効である。海洋大循環モデルを用いて全球海洋に対する再現計算（津旨ら、1999）は既に行われているが、日本海を再現するためには解像度が充分ではなかった。日本海を対象に、放射性降下物の降下量データ（気象研究所技術報告、1996）をもとに、日本海流動モデル（Kim, 1996, Kim and Yoon, 1999）を利用し、海洋中の放射性核種濃度の再現計算を実施し全体像を把握した。さらに、既往の観測データ（HAM database, Aoyama et al., 1999）との比較検討を行った。

2 日本海流動モデルの概要

日本海流動モデル（Kim, 1996, Kim and Yoon, 1999）は、米国の地球流体力学研究所（GFDL）が開発した全球海洋大循環モデル MOM1.1（Pacanowski et al., 1991, 1993）をベースとしている。MOM1.1 は球面座標系（ λ, ϕ, z ）を用いており、ブシネスク近似、静水圧近似、固定表面条件（rigid-lid surface）を特徴とする。また、計算ス

* (財)電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry

** 気象研究所 Meteorological Research Institute

*** 九州大学応用力学研究所 Research Institute for Applied Mechanics, Kyusyu University

**** 韓国海洋研究所 Korea Ocean Research & Development Institute

***** (株)電力計算センター Denryoku Calculation Center

テップを長くとるために、流速成分を水深方向の平均値である順圧（barotropic）成分と、平均値からの差である傾圧（baroclinic）成分に分けて計算するのが特徴である。また、このモデルは表層の流動場の再現に注目しているため、鉛直解像度は19層と比較的粗い。しかし、核種濃度計算では、海底付近の流速の影響が大きいことから、鉛直解像度を2倍の38層に向上することとした。鉛直解像度以外は、Kim(1996)および Kim and Yoon(1999)と同じであるので、詳細は論文を参照されたい。流動の再現結果の一例として、年平均の表層流速ベクトルを図1に示す。

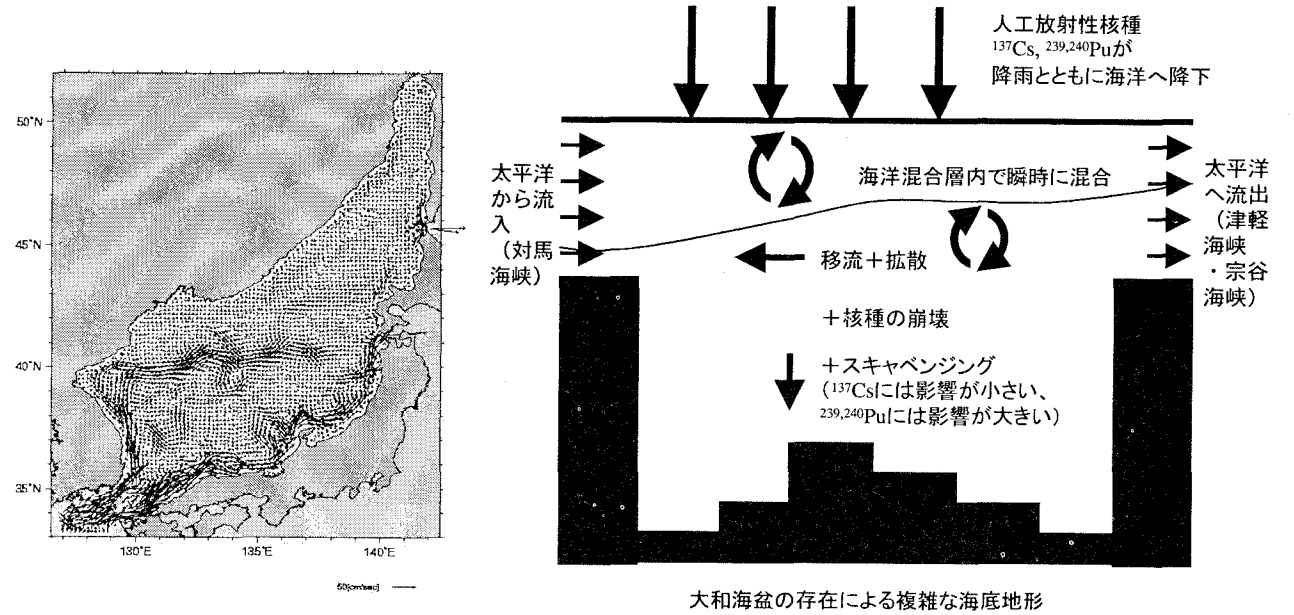


図1 年平均の表層流速ベクトル

図2 日本海における放射性降下物の挙動模式図

3 放射性降下物の海洋中濃度計算手法

放射性降下物の海洋中濃度計算手法の概念を図2に示す。日本海全域に、気象研究所所在地で観測された放射性降下物量と同じだけ、降下するものと想定した。また、流入部である対馬海峡で、太平洋に降下した放射性降下物が流入し、津軽海峡および宗谷海峡から流出する過程も想定した。海洋中の放射性降下物は、混合層内で瞬時に混合し、移流拡散に加え、核種の崩壊とスカベンジング（海洋中に溶存している核種等の物質が懸濁粒子等に吸着する作用により、海水中から除去される機構の総称。）の影響を受けるものとした。海洋中濃度計算の基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + L(C) = R(A_l, A_D, C) - \lambda_n C - K_d \rho_s(z) w_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

ここで、左辺の第1項は核種濃度の時間変化、第2項は移流項を表す。また、右辺第1項は拡散項、第2項は核種崩壊項、第3項はスカベンジング項で、各変数の定義は以下の通りである。

C: 放射性核種濃度 (Bq/m³), λ, φ, z: 経度(東方向+), 緯度(北向き+), 深度(下向き+), t: 時間 (s), A_l: 等密度面に沿った拡散係数 (m²/s), A_D: 等密度面と直交方向拡散係数 (m²/s), λ_n: 放射性核種の崩壊定数 = (ln 2/半減期) (1/s), K_d: 放射性核種の分配係数 (m³/g), ρ_s(z): 海洋中の懸濁物質の濃度 (g/m³), w_s: 懸濁物質の沈降速度 (m/s)

式(1)の左辺第2項の移流項は、球面座標系での日本海の流速成分を(u, v, w)とすると、次式で与えられる。ただし、aは地球の半径である。

$$L(C)=\frac{1}{a\cos\phi}\left[\frac{\partial}{\partial\lambda}(uC)+\frac{\partial}{\partial\phi}(v\cos\phi C)\right]+\frac{\partial}{\partial z}(wC)$$

(2)

式 (1) の右辺第 1 項は、Redi(1982)の等密度面拡散式を簡単化した式で与える(Nakashiki and Ohsumi, 1997 を参照)。式 (1) 中の各係数および物理量を一覧表として、表 1 に示す。

3.1 放射性降下物の入力条件

大気圏核実験は、1945 年 5 月に行われたロスアラモスでの世界最初の実験から 1980 年 10 月の中国における最後の実験まで、合計 423 回行われた (Hamilton et al., 1998)。気象研では、1958 年から現在に至るまで、その所在地において、3 種類の放射性核種 ¹³⁷Cs、⁹⁰Sr、^{239,240}Pu の放射性降下物量の観測を行っている (Hirose et al., 1987、気象研報告, 1996)。その 3 種類の核種について、放射性降下物観測データの経時変化 (1958 年～1994) を図 3 に示す。1961-1962 年に大規模大気圏核実験が行われた影響で、約 1 年の成層圏滞留時間を経て、1963 年に 3 種類の核種ともほぼ最大の放射性降下物量が観測された。その後は減少するが、1965 年以降の中国やフランスによる大気圏核実験により、一定の水準に推移した。大気圏核実験は、1980 年 10 月の中国の実験で最後となったため、放射性降下物量は 1981 年に比較的高い値を示したのち減少した。しかし、1986 年 4 月に起きたチェルノブイリ原子力発電所事故の影響により、1986 年には再び高い放射性降下物量が観測された。その後の放射性降下物量は、低い水準で推移している。

気象研究所所在地で観測された放射性降下物観測値 F(t) (Bq/m²)をそのまま日本海全域の表層境界条件として設定することとした。但し、海洋表層に F(t) (Bq/m²)で降下した核種は、瞬時に混合層内(50m と仮定)で一定の濃度になると仮定した。

また、日本海においては、上記の表層境界条件に加えて、流出入境界を考慮する必要がある。流動モデルでは、対馬海峡は流入境界、津軽海峡および宗谷海峡は流出境界となっている。流入境界の対馬海峡では、全球海洋大循環モデルで計算された年間平均核種濃度 (津旨ら、1999) を、境界値として与えた。また、津軽海峡、宗谷海峡からの流出は、濃度勾配がゼロの自由流出境界とした。

4 放射性降下物の海洋中濃度計算結果

放射性降下物が観測されている 1958 年から現在までの 1994 年を対象に、放射性降下物の海洋中濃度の再

表 1 係数および物理量

係数および物理量の意味		係数および物理量の値	
u, v, w : 移流速度 (m/s)		日本海流動モデル (Kim, 1996)	
A ₁ : 等密度面に沿った拡散係数 (m ² /s)		1.0 x 10 ⁻¹ m ² /s	
A _D : 等密度面に垂直な拡散係数 (m ² /s)		1.0 x 10 ⁻³ m ² /s	
放射性核種の半減期 (= ln 2/λ _p) (IAEA SS No. 78, 1986)		¹³⁷ Cs	30 年
		⁹⁰ Sr	28.8 年
		²³⁹ Pu	24,100 年
		²⁴⁰ Pu	6,540 年
K _d : 放射性核種の分配係数 (m ³ /g) (IAEA SS No. 78, 1986)		¹³⁷ Cs	2.0 x 10 ⁻³ m ³ /g
		⁹⁰ Sr	2.0 x 10 ⁻⁴ m ³ /g
		^{239, 240} Pu	1.0 x 10 ⁻¹ m ³ /g
ρ _s (z) : 懸濁物質の濃度 (g/m ³)		表層濃度: ρ _s (0)=0.25 (g/m ³) (日本海全域で一様と仮定)	
		深さ d (m) 方向の分布: ρ _s (d)=ρ _s (0) x 10 ^{-0.0005d}	
w _s : 懸濁物質の 沈降速度 (m/s)	大粒径 (50 μm 以上、4%) w ₁ =100 (m/day) 小粒径 (50 μm 以下、96%) w ₂ =100 (m/year) の合計	w _s =4.93 x 10 ⁻⁵ (m/s)	
核種濃度の境界条件		海表面	気象研究所所在地のフォールアウト量
		流入境界 (対馬海峡)	海洋大循環モデルによるフォールアウトの再現計算結果 (津旨ら、1999)

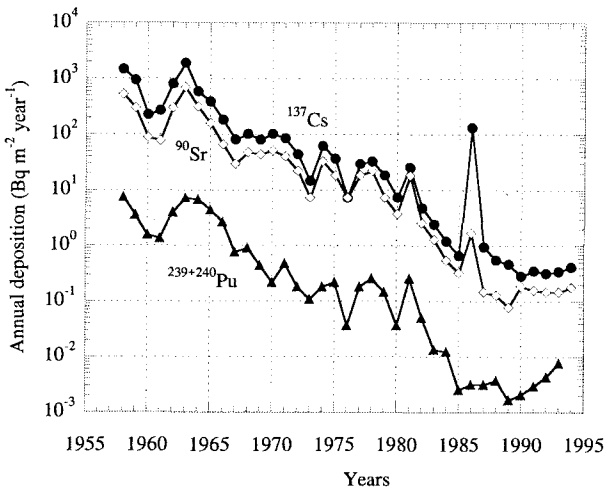


図 3 気象研所在地における降下量

現計算を実施し、観測値と比較した。観測値は過去の放射性降下物の海洋中濃度の観測値のデータベース (HAM database, Aoyama, 1999) を用いた。ただし、 ^{90}Sr は海洋中で ^{137}Cs とほぼ同じ挙動を示すこと、 ^{90}Sr は ^{137}Cs よりも観測データが少ないことから、 ^{90}Sr を割愛し、 ^{137}Cs と $^{239,240}\text{Pu}$ を計算対象とすることとした。

4.1 流動の季節変動の影響

日本海においては、対馬暖流等の流動の季節変化が大きい。ため、核種濃度の再現にあたって、年間平均流速を用いる妥当性について検討する必要がある。そこでまず、流速に季節変化を考慮した再現計算を行い、観測値と比較検討することとした。

季節変動を考慮した計算結果は、年間平均値による計算結果と比較して、鉛直下方への輸送が大きくなっていた。図4に流動の季節変化を考慮した計算値（細線）、年間平均値による計算値（太線）および観測値の鉛直分布の一例（ 38.68°N , 132.80°E ）を示す。季節変動を考慮した計算値は1968年における各月15日の値、年間平均値における計算結果と観測値は1969年8月の値である。両者の違いは若干見られるが、観測値からのばらつきと比較してそれほど大きくないことが分かった。これらの結果から、本報告では長期間の濃度変化を検討対象とするため、年間平均流速を用いて計算すればよいと判断した。

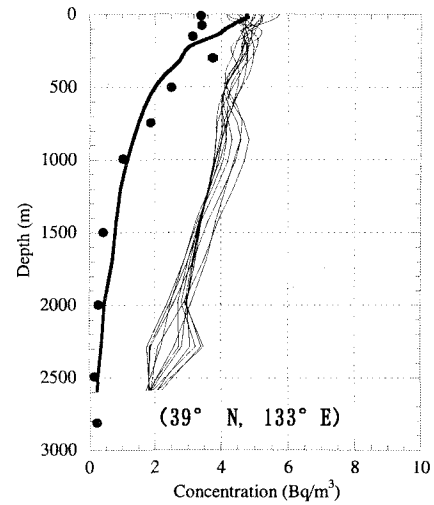


図4 月毎流速により季節変動を考慮した ^{137}Cs の鉛直分布の計算例。点は1968年8月の観測結果、太線は年間平均流速による1968年8月の計算結果、細線は季節変動を考慮した1968年の1ヶ月毎の計算結果。

4.2 ^{137}Cs の再現結果

図5に主な観測点の観測結果と計算結果の比較を示す。全体的な傾向として、鉛直分布の時間変化を、よく再現することができた。表層濃度が時間変化にともない小さくなり、かつ鉛直分布の勾配がゆるやかとなっている。また、同時期の太平洋における鉛直分布の再現計算結果（津旨ら、1999）と比較すると、今回の日本海における再現計算結果の濃度勾配のほうが小さい。これは、日本海においては中層の混合が太平洋に比べて大きいことを反映したものであり、観測から得られた傾向（Hirose et al., 1999）と一致する。

このように、開発した手法による再現計算により、概ねよい結果を得ることができた。一方で、いくつか

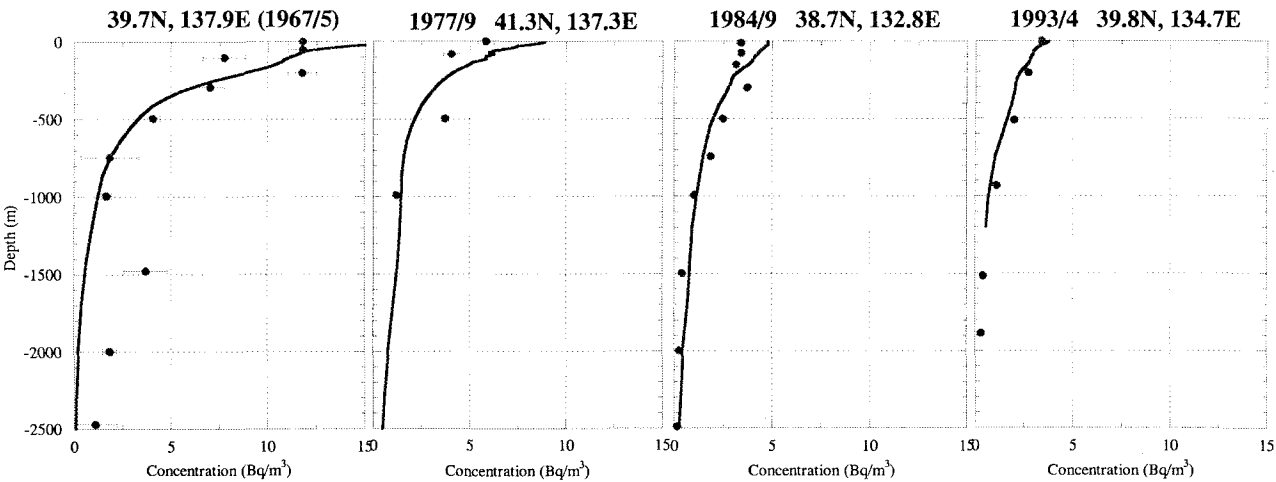


図5 ^{137}Cs の鉛直分布。点が観測結果、実線が計算結果。観測された時期（年／月）と地点を示す。

の相違点も見られたので、その点についての考察を行った。

まず、1960年代には、深層において、計算結果が過小評価となっている。これは、過去の分析精度が悪かったため、低濃度の値を過大評価してしまった可能性（Aoyama et al., 2000）、もしくは粒子態による鉛直輸送が大きかったため下層にも ^{137}Cs が運ばれた可能性（Uematsu and Duce, 1986）、などが考えられるが、結論はでていない。太平洋における再現結果でも同様の傾向が得られている（津旨ら、1999）。

また1990年代には、上記の結果とは逆に、深層において計算結果が過大評価となっている点がいくつか見られる。再現性のよい点を●、よくない点を○で、海底地形コンター上を示したものを図6に示す。この図から、大和海盆および対馬海盆の地形凹部の斜面部分での再現性に問題があることが分かる。海盆の縁部では、その地形変化が激しいために計算上の不具合が生じている可能性がある。日本海に特徴的な地形変化の激しい点での再現性の向上のためには、地形による流動の変化をより詳細に再現する必要がある。

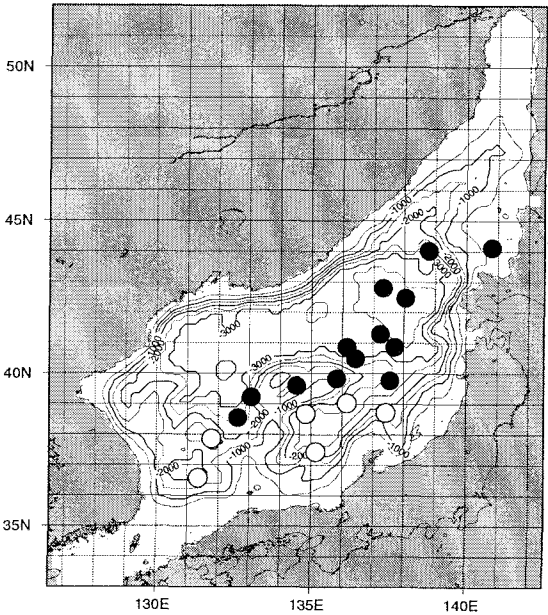


図 6 手法の再現性の特徴。1993-1994 年の ^{137}Cs の観測値と比べて、再現性のよい点を●よくない点を○で示した。

4.3 $^{239,240}\text{Pu}$ の再現性

図7に主な観測点の観測結果と計算結果の比較を示す。1980年代では深層への輸送を過大評価している傾向にあるが、1990年代ではスキャベンジング効果による中層の極大層が見られる鉛直分布形を概ね再現できた。しかし、再現計算結果は観測値に対して過小評価となった。全球海洋を対象とした放射性降下物の計算においても、同様の傾向が見られた（津旨ら、1999b）。この要因としては、北太平洋における他のソースの存在（例えば、ピキニ環礁におけるローカルな降下の影響）が考えられている（Nagaya and Nakamura, 1987）。日本海には、北太平洋の海水が流入しているため、このような過小評価の要因とともに検討していく必要がある。

また、日本海においては、スキャベンジング効果により中層に運ばれる前に、宗谷海峡と津軽海峡の流出

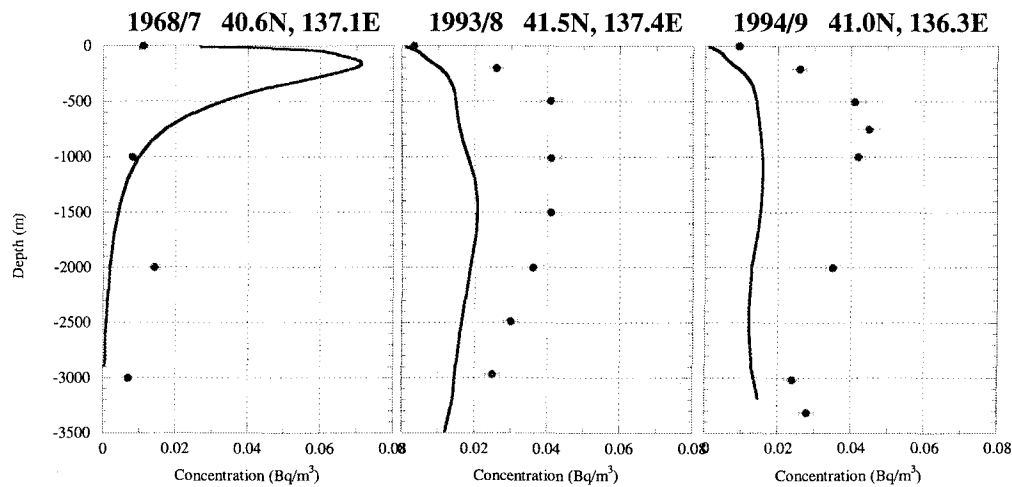


図 7 $^{239,240}\text{Pu}$ の鉛直分布。点が観測結果、実線が計算結果。観測された時期（年／月）と地点を示す。

部から流出する傾向にある。このため、中層の極大層が太平洋の結果ほどは明確に現れないと推察される。

5 まとめ

放射性降下物の降下量データをもとに、海洋中の放射性降下物濃度の再現計算を実施し、既往の観測データとの比較検討を行い、以下の結果を得た。

- ・ 核種濃度計算においては海底周辺の流速が影響するため、既存の日本海流動モデルに対して鉛直解像度を2倍に向上した流動場を得た。
- ・ 流動の季節変化が核種濃度分布に及ぼす影響は僅かであり、本研究では長期間の濃度変化を検討対象とすることから、年間平均流動データを用いることの妥当性を確認した。
- ・ 海洋の流動に支配される ^{137}Cs の再現計算結果と観測値は概ねよい一致を示した。
- ・ スキャベンジング効果が大きい $^{239,240}\text{Pu}$ に関しては、中層に極大層が現れる鉛直分布形を概ね再現できた。このように、開発した手法により、海洋中の放射性降下物濃度を再現することが可能となった。しかし、以下のような問題点も残された。
- ・ 海盆の縁部では、急激な海底地形変化によって流速の計算上の不具合が生じている可能性があり、再現性がよくなかった。
- ・ $^{239,240}\text{Pu}$ に関して、再現計算結果は観測値に対して過小評価となった。これは、グローバルフォールアウト以外の $^{239,240}\text{Pu}$ の供給源が存在することなどにより、海表面や海峡部における入力境界条件が過小評価となっていることが原因として考えられる。

参考文献

- 気象研究所技術報告、1996：降水・落下塵中の人工放射性核種の分析法及びその地球化学的研究、第36号、34pp.
- 津旨大輔ら、1999：海洋大循環モデルを用いた海洋中核種濃度評価手法の開発、電力中央研究所 研究報告、U99007、29pp.
- Aoyama, M. et al., 1999：<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ge/ge.html>, Historical Artificial Radionuclides in the Pacific Ocean and Marginal Seas database, HAM database, Artificial Radionuclide Databases.
- Aoyama, M., et al., 2000：Low level ^{137}Cs measurement in deep seawater samples, Appl. Radiat. Isot., 53, 159-162.
- Hamilton, T.F. et al., 1996：Cs-137(Sr-90) and Pu isotopes in the Pacific ocean：Sources and Trends, Coordinators: Gurgueniat, et al., Radionuclides in the oceans inputs and inventories, IPSN, 75-93.
- Hirose, K. et al., 1987：Annual deposition of Sr-90, Cs-137 and Pu-239, 240 from the 1961-1980 nuclear explosions：A simple model, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.65, 259-277.
- Hirose et al., 1999：Anthropogenic radionuclides in seawater in the East Sea/Japan Sea：Results of the first-stage Japanese- Korean-Russian expedition, J. of Environmental Radioactivity, 43, 1-13.
- Kim, C.-H., 1996：A numerical experiment study on the circulation of the Japan Sea(East Sea), Doctoral Dissertation, Kyushu Univ., 151pp.
- Kim, C-H and J.H. Yoon, 1999：A numerical modeling of the upper and the intermediate layer circulation in the East Sea, Journal of Oceanography, Vol.55, 327-345.
- Nagaya, Y. and K. Nakamura, 1987：Artificial radionuclides in the western Northwest Pacific (II) ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ inventories in water and sediment columns observed from 1980 to 1986., 1599-1604.
- Nakashiki, N and T. Ohsumi, 1997：Dispersion of CO_2 injected into the ocean at the intermediate depth, Carbon dioxide removal, Proceedings of the third international conference on carbon dioxide removal, Editor Herzog, H.J., Pergamon Press, 355-360.
- Pacanowski, R. C., K. Dixon and A. Rosaki, 1991, 1993：The GFDL Modular Ocean Model Users Guide, version 1.0,1.1, GFDL Ocean Group Tech. Report No.2.
- Redi, M.H., 1982：Oceanic Isopycnal mixing by coordinate rotation, Journal of Physical Oceanography, 12, 1154-1158.
- Uematsu, M. and R. Duce, 1986：Tracking Chernobyl plume across the Pacific, Maritimes, 30, 1-4.