

2011年福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の 海中輸送シミュレーション

宮澤 泰正*・升本 順夫*

Oceanic dispersion simulation of radionuclides associated with the
accident of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in 2011

Yasumasa Miyazawa* and Yukio Masumoto*

Key words: Fukushima dai-ichi nuclear power plant, Caesium-137, Oceanic dispersion simulation, Oceanic observation, Ocean current forecast

1. はじめに

2011年3月11日に、関東東北沖で生じたマグニチュード9.0の巨大地震とそれに引き続く津波が東京電力福島第一原子力発電所(以下、発電所)の電源機能を破壊し、原子炉内部の冷却が困難となった。これに伴い原子炉及びその建屋が機能不全となり、その結果として大量の放射性物質が大気中に放出された。続く3月21日には発電所前面の海水中で1500Bq/Lに達する濃度のセシウム137等が検出された¹⁾。これは、原子炉関連規則で定められているセシウム137の水中濃度限度である90Bq/L、および事故前に観測された発電所周辺海域の濃度水準0.001Bq/Lのオーダー²⁾に比べてきわめて大きな値であり、海水中に放射性物質が直接漏洩していることを示唆するものであった。これに対応して、東京電力は発電所前面、南側の沿岸、及び15km沖合の海域で放射性物質の観測を開始した³⁾。海洋研究開発機構も、2011年3月から7月にかけて沖合30kmの海域での観測を集中的に実施した⁴⁾。このような海域モニタリング対応グループの活動の一環として、2011年4月から5月に筆者らは発電所周辺海域における放射性物質拡散の数値シミュレーションを実施した⁵⁾。その後も放射性物質拡散メカニズムの解明

を目的として、観測とシミュレーションの結果を解析してきた。本稿では、放射性物質の大量放出があったとみられる2011年3月から、大量放出が終息したと考えられ、海域での拡散に伴う濃度低下が確認された同6月までの期間を対象に、数値シミュレーションにより海洋における放射性物質拡散の様相を解明する試みについて紹介する。

2. 放射性物質の海中輸送シミュレーションモデル

2.1 輸送方程式

2011年3月～6月にかけての比較的初期の放射性物質(具体的には、セシウム137)の海洋中の挙動は、主として平均流による移流と乱流拡散に支配されていたと考え、以下の輸送方程式⁶⁾を格子点法によって離散化し、数値シミュレーションを行っている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{ADV}(U^p, C) + \text{DIF}(U^p, C) = -\lambda C + \delta(x_0, y_0, z_0)D_0(t) \quad (1)$$

$C(x, y, z, t)$ は、セシウム137の濃度である。左辺第二項、第三項はそれぞれ平均流 $C^p(x, y, z, t)$ による移流と、乱流拡散項を表わす。乱流拡散項には、水平方向にはSmagolinsky⁷⁾、鉛直方向にはMellor and Blumberg⁸⁾の乱流拡散モデルによるパラメタリゼーションから算出される拡散係数を与えており、平均流 $C^p(x, y, z, t)$ に依存する。右辺はセシウム137のソースシンク項を表わす。右辺第一項はセシウム137の減衰項であり、

* 海洋研究開発機構
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

$\lambda = \ln(2)/T_{half}$ である。セシウム 137 の半減期は $T_{half} = 30.1$ 年であり、初期の段階ではその効果はほとんど無視できる。右辺第二項の $\delta(x_0, y_0, z_0)$ は、発電所前面の表層 1 格子 (x_0, y_0, z_0) でのみ 1 となり、それ以外の格子では 0 となる関数であり、海水中への直接放出フラックス $D_0(t)$ を計算に導入する。大気経由の海表面沈着によるセシウム 137 の流入は、表面 $z = \eta$ での境界条件 $K_v \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=\eta} = D_a(x, y, t)$ で与える (K_v は鉛直拡散係数)。沈着フラックス $D_a(x, y, t)$ は、セシウム 137 の大気輸送を表現するシミュレーションモデル⁹⁾ の結果を用いる。

2.2 海流の推算

海洋の平均流 $U^0(x, y, z, t)$ は、近年になって実用化された海流予測モデルの結果を用いる。海洋研究開発機構では、日本近海を対象に海流予測モデル JCOPE-T⁶⁾ の運用を行っており、1 日 1 回、計算のための外力データや初期値を更新しながら、約 10 日先までの海流予測計算を日常的に行っている。海洋中の流動は、潮汐や海上風などの外力によって直接駆動されるほか、大洋スケールの海上風の変動によって生成する大規模かつ安定的な海洋大循環によって駆動されるもの(海流)があり、JCOPE-T はこれらの異なる種類の流動をまとめて同時に推算するシミュレーションモデルである。大洋スケールで見ると安定的に存在する海流も、その変動は本質的に非線形であり、雑音に対して極めて敏感である。したがって現実存在する蛇行や切離渦を正確に表現するためには、一定期間毎に観測データを同化して雑音による状態の変化を補正する必要がある。このため、格子はやや粗いが人工衛星や現場観測データを逐次同化して現実的な海流状態を表現する別の海流予測モデル JCOPE2¹⁰⁾ の水温・塩分データに、JCOPE-T の水温・塩分計算値を逐次緩和させることで、JCOPE-T においても現実的な海流状態を表現できるようにしている。輸送方程式(1)を JCOPE-T と同じ格子(水平 1/36 度間隔、鉛直 45 層)で離散化し、JCOPE-T の 1 時間毎の流速データを入力して逐次計算を行う。

2.3 ソース関数の推定

発電所前面で高濃度のセシウム 137 が検出されたのは、2011 年 3 月 21 日であるが、Tsumune et al.¹⁾ は、観測されたセシウム 137 とヨウ素 131 の濃度比の変動から、放射性物質が発電所から海洋に直接放出されたのは 3 月 26 日以降であるとした。そして発電所前面で観測されたセシウム 137 濃度の推移から、2012 年 4 月 6 日まで一定の大量放出が継続し、その後は指数関数的に放出量が減衰する直接放出フラックス $D_0(t)$ を提案した(総量 3.5×10^{15} Bq)。Miyazawa et al.¹¹⁾ は、直

接放出フラックスの時間変化を、Tsumune et al.¹⁾ の場合と、発電所前面のセシウム 137 濃度の時間変化に比例する場合⁶⁾ の双方を仮定し、2011 年 3 月 22 日～2011 年 5 月 6 日の期間を対象としてそれぞれ海中輸送シミュレーションを行った。その際、グリーン関数法¹²⁾ により観測データを用いてシミュレーション結果を診断し、総放出量を推定した。その結果、Tsumune et al.¹⁾ の時間変化のほうが、Miyazawa et al.⁶⁾ の時間変化よりも観測値への当てはまりにすぐれていた。これが意味することは、2011 年 3 月 26 日から 2011 年 4 月 6 日まで一定の放出を仮定したほうが観測値をよりよく再現できるということである。この期間の観測値におけるセシウム 137 濃度の時間変化は、沿岸に近い場合は放出量フラックスの時間変化ではなく、風による流動変化によってより良く説明できるのである¹¹⁾。推定された直接放出の総量は、前者(後者)の場合 $5.9(5.5) \times 10^{15}$ Bq となった。大気沈着の総量も直接放出フラックスと同時に推定し、前者(後者)の場合 $9.5(9.7) \times 10^{15}$ Bq となった。

3. 観測とシミュレーションからわかること

観測とシミュレーション結果の双方から見て、発電所から海洋へのセシウム 137 拡散は、(1)大気経由放出による海域濃度の上昇(2011 年 3 月)、(2)海洋への直接放出による海域濃度の上昇(2011 年 4 月)、(3)放出量の減少と海洋内での拡散に伴う海域濃度の低下(2011 年 5～6 月)、という三段階の過程をたどったと推定される。シミュレーションによる感度実験の結果、セシウム 137 の海域分布は、発電所周辺の陸棚域(おおむね水深が 200 m より浅い海域)では海上風が励起する陸棚波に伴う流動による移流、陸棚域より外の外洋では親潮、黒潮などの海流による移流によってそれぞれ支配的な影響を受けることがわかった⁶⁾。

本節では、2011 年 3 月から 5 月初めにかけての大放出期のセシウム 137 観測データをもとに大気経由の海洋表面沈着量と海洋への直接放出量の総量を補正して行ったシミュレーション結果を紹介する。放出量補正の結果、シミュレーション濃度の絶対値そのものの検討が可能となった。海洋への直接放出および大気沈着フラックスの関数形はそれぞれ Tsumune et al.¹⁾ と Honda et al.⁹⁾ に倣うこととした。また Miyazawa et al.¹¹⁾ に従い、2011 年 3 月 26 日から 5 月 6 日までの期間の総直接放出量は 5.9×10^{15} Bq、総沈着量は 9.5×10^{15} Bq とした。シミュレーション濃度の変化を示す図 1 には、

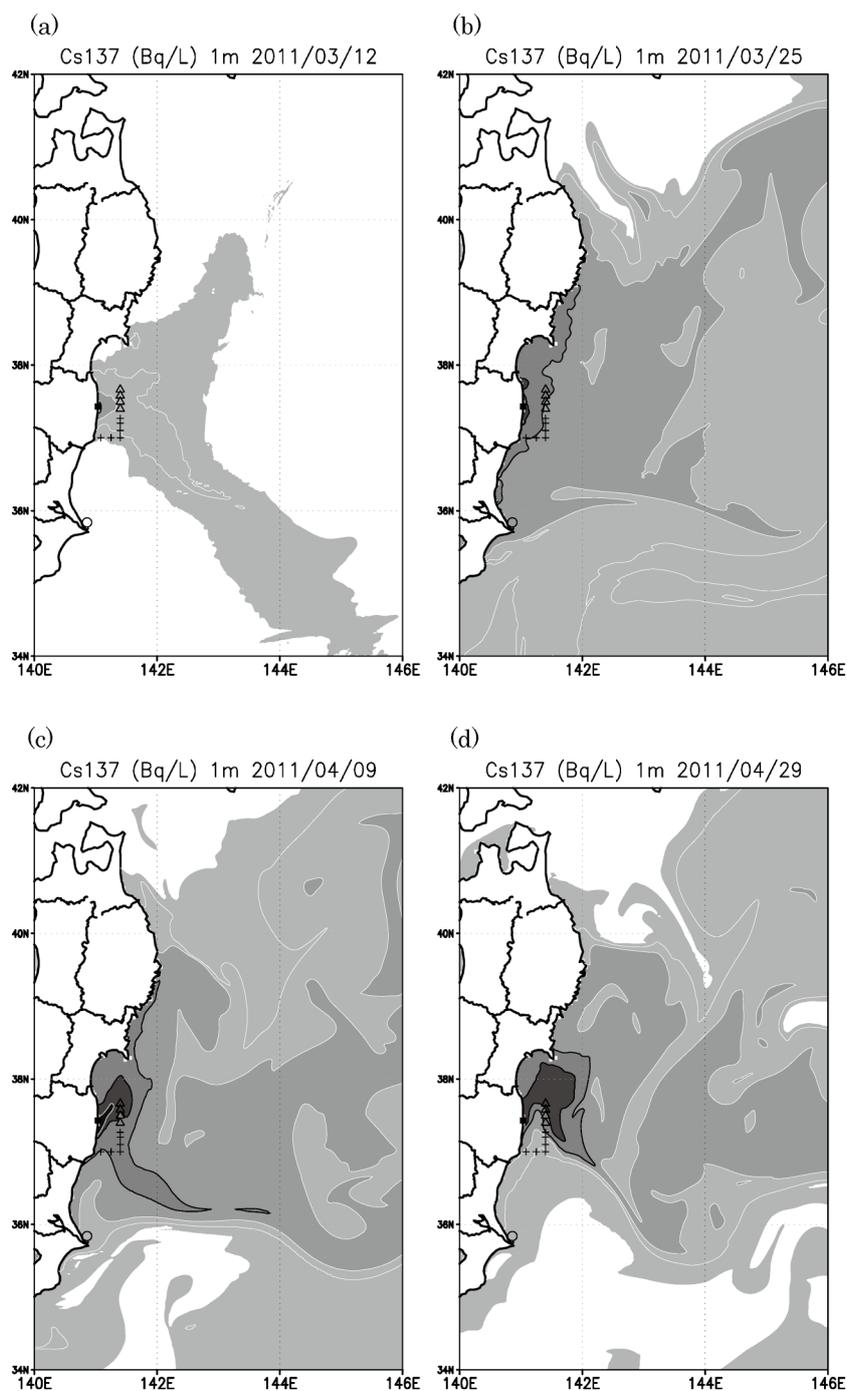
注目すべき濃度のしきい値として、10 Bq/L(当時の観測による検出限界約9 Bq/Lに対応)と、1 Bq/L(魚介類への濃縮係数を100とした場合、2012年4月以降の食品規制基準値100 Bq/kgに対応)を太線と色の濃い部分によって示している。

以下、セシウム137の初期分散を特徴づける三段階

について述べる。

3.1 大気経由放出による海域濃度の上昇：2011年3月

事故翌日の2011年3月12日には大気経由での海洋への拡散が開始され(図1a)、直接放出開始直前の3月25日には、日本の東方海域に広く薄く拡散している



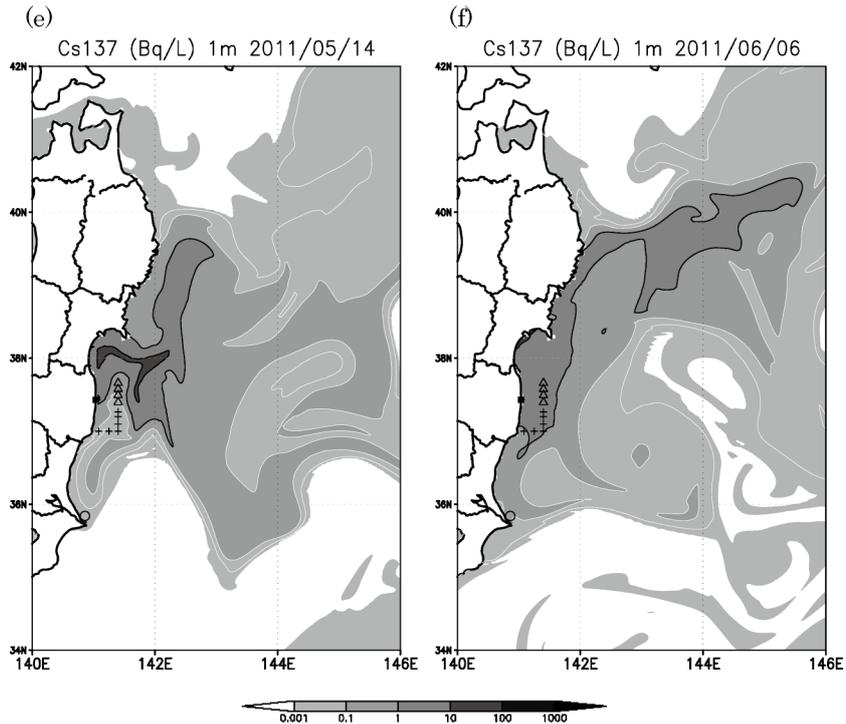


図1 シミュレーションによる表層セシウム 137 濃度 (Bq/L). 太線は、10 Bq/L, 1 Bq/L の等値線を表す. ■印：福島第一原子力発電所の位置. △印：沖合 30 km 測点 1-4. +印：沖合 30 km 測点 5-10. ○印：波崎観測点. (a)2011 年 3 月 12 日. (b)3 月 25 日. (c)4 月 9 日. (d)4 月 29 日. (e)5 月 14 日. (f)6 月 6 日.

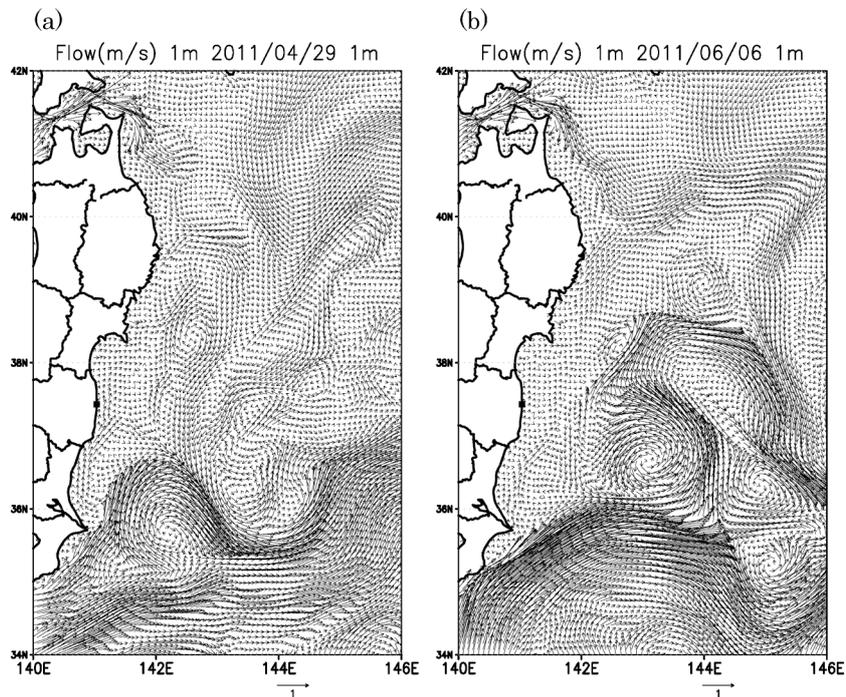


図2 シミュレーションによる流動分布. (a)2011 年 4 月 29 日. (b)6 月 6 日.

(図 1b). 3 月 25 日時点で、1 Bq/L 以上の濃度域が、北は宮城沖から南は茨城沖までの東北太平洋沿岸に沿って広がっている。4 月 1 日に北茨城沖で採取され

たコウナゴから 197 Bq/Kg のセシウム 137 が検出された¹³⁾。魚介類の濃縮係数が 100 程度(海水中濃度 1 Bq/L の時に魚介類中の濃度が 100Bq/kg 程度となる)である

ことを考慮すると、4月初め時点での北茨城沖では大気経由でのセシウム 137 拡散が魚介に影響を与えていたと考えられる。この結果は、ヨウ素 131 について同様のシミュレーションを示した Kawamura et al. による結果¹⁴⁾とも整合的である。海洋研究開発機構が実施した沖合 30 km の観測結果を見ると、観測線北側(図 3a; 位置は図 1 の△印)でも南側(図 3b; 位置は図 1 の+印)でも3月末までに 10 Bq/L オーダーの濃度が観測されている。シミュレーション結果(図 3a,b の*印)は観測結果に比べれば低濃度ではあるものの、類似の傾向を示している。直接放出のみの結果(図 3a,b の□ないしは△印)では南北ともに4月以降に濃度上昇が生じており、シミュレーションにおいても 30 km 測線に直接放出起源のセシウム 137 が達するのは4月以降であることが示されている。

3.2 海洋直接放出による海域濃度の上昇：2011年4月

シミュレーションにおいて 1 Bq/L 以上の濃度域が 30 km 測線に達するのは、4月9日頃(図 1c)である。観測でも南北ともに 10 Bq/L 以上の濃度が検出されている。シミュレーションは、測線南側への拡散を過小評価している。4月末には、比較的高濃度の分布は発電所からみて北東方向に広がり、30 km 以遠の沖合で南下している(図 1d)。北東方向への分布の拡がり、4月半ば以降の複数の低気圧通過に伴い、発電所周辺で南西風が卓越したこと、及び茨城沖にあった時計回りの渦による流れが存在したこと(図 2a)によると考えられる⁶⁾。したがってこの時期、茨城沿岸に沿った分布の南下が妨げられていた可能性が高い。海域全体としてみれば、南から来る低濃度の黒潮とその続流(銚子沖から東へと向かう流れ)が、表層での分布の南下の障壁になっていたといえよう(図 1d と 2a を参照)。

3.3 放出量の減少と拡散に伴う海域濃度の低下：2011年5月～6月

5月から6月にかけて茨城沖にあった時計回りの渦が消滅し、茨城沿岸に沿った分布の南下が生じる(図 1e,f)。この傾向は、茨城沿岸の南端にある波崎の観測点(図 1 の○印)で6月以降に 1 Bq/L 以上のセシウム 137 濃度が検出されたこと¹⁵⁾と定性的には一致している(図 3c 参照)。ただし、シミュレーション結果は波崎での濃度を過小評価している(図 3c)。5月以降、大気経由での放出はほとんどみられず、海洋中への直接放出量も指数関数的に減少したと考えられる¹¹⁾。その結果、この時期は全海域で濃度の低下がみられるようになる。5月14日(図 1e)では、当時の観測で検出

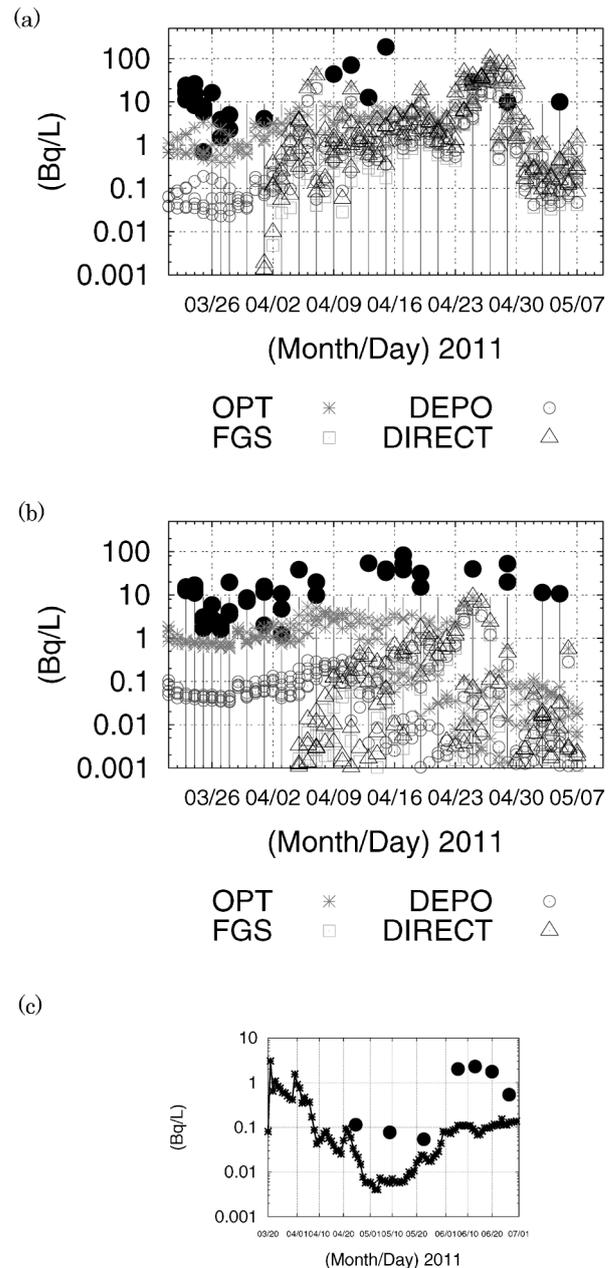


図 3 表層セシウム 137 濃度の時間変化。●印：観測。*印：放出量補正シミュレーション。□印：放出量補正前の直接放出のみ(総量 3.5×10^{15} Bq)のシミュレーション。○印：大気経由沈着のみの感度実験シミュレーション。△印：放出量補正前の直接放出を総量 2 倍にした感度実験シミュレーション。棒線は観測における不検出の場合、検出限界約 9 Bq/L を示したもの。(a)沖合 30 km 測線 1-4。(b)沖合 30km 測線 5-10。(c)波崎観測点。

可能(約 9 Bq/L 以上)な分布域(図では 10 Bq/L 以上)は沖合のごく一部のみになり、6月6日の時点ではほとんど消滅している。このことは、5月9～14日、5月21日～22日、6月2～5日の海域観測ですべて表層不検出であったこと⁴⁾と矛盾していない。2011年4～5月にかけて実施した一連の予測⁵⁾は、こうした推移とおおよそ一致した結果を示しており、一定の役割を

果たすことができたと考えている。

4. おわりに

大規模放出が終息した2011年6月以降少なくとも数か月は、発電所起源放射性物質の直接ないし間接的な放出が、弱いながらも持続していたと考えられる¹⁵⁾。2011年8月23~27日の段階で日本東方海域で最大0.11 Bq/L、11月1~4日には30 km 測線で最大0.29 Bq/Lのセシウム137濃度が観測されている⁴⁾。震災後1年がたった2012年3月4日には30 km 測線で0.026 Bq/Lとなる一方、3月12日には発電所前面で1.4 Bq/Lが観測されていること⁴⁾から、1年後には、海洋中の濃度で考える限り発電所前面を除いて十分に希釈されたものと考えられる。ただし、セシウム137の半減期が30.1年と長いので、今後数十年は何らかの手段で観測を継続し、発電所起源放射性物質の海洋拡散過程を追跡していくべきである。数値シミュレーションも、そのために有効な手段として活用されるべきである。

外洋において発電所起源の放射性物質は活発な海流変動によって希釈されていくと考えられるが、発電所周辺の沿岸域では沈降して海底に沈着した比較的高濃度の放射性物質が存在し、海流変動の影響を受けながら海洋中に再溶出している可能性もある。このような過程に着目した観測及びシミュレーション研究も行われている¹⁶⁾。また、発電所からの直接放出以外にも、地下水や河川水の流出を通じて地上に沈着した放射性物質が海洋中に流入したとみられる。総放出量としては、本稿で取り扱った初期の大気経由及び直接放出によるものに比べて少ないと思われるが、今後、時間差を持って現れる可能性の高いこれらの過程に着目した研究の展開が待たれる。

本稿で述べたシミュレーションは、観測に比べて放射性物質の分布を北寄りに表現している(図3)。総放出量の評価と海流変動の表現において、共に不確実性が残されているというべきである。2011年4月末に実施された30 km 測線周辺での表層流動観測は、週平均で南向きの海流が存在していたことを示している。この観測結果と比較すると、シミュレーションで再現された海流も平均して南向きではあるものの弱めであり⁶⁾、海流シミュレーションに改善の余地があることを示唆している。複数の発電所起源セシウム137海洋分散シミュレーション比較についての報告¹⁷⁾によれば、異なるシミュレーションの間にみられる最も顕著な違いは、シミュレーションに用いられている海流の蛇行や渦の位置や強さの違いによるものである。現在、

海流や渦を観測する最も有効な観測手段は人工衛星による海水位観測であるが、観測の空間間隔は100 km程度となっている。渦や蛇行の空間スケールが100 kmオーダーであることを考えると、これらの現象を捉えるためにはまだ不十分であり、改善の余地がある。現在、日本や米国で開発が進められている新型の海水位観測人工衛星は計測間隔数 km を目標としており、その活用が大いに期待される。一方で、海洋シミュレーションモデルやデータ同化技術の改良を続けていく必要があることはいうまでもない。

今回の原発事故に象徴されるように、現在、人類の活動は何かあれば地球環境全体に無視できない影響を与えるまでに拡大している。こうした影響を緊急時に正確に把握するためには、日常的に地球環境変動を観測し、その将来を予測し、検証し続け、その結果を後世の人間が参照可能な記録に残していく努力が絶対に必要である。本稿で述べたシミュレーションを実施する際にも、30年以上前に発電所周辺で実施された集中観測の知見¹⁸⁾や、過去50年以上にわたって継続的に実施されてきた放射能観測の知見¹⁹⁾が大変参考になった。筆者も、このような不可欠の営みに対して何らかの形で貢献できるように、今後努力していきたい。

参 考 文 献

- 1) D. Tsumune, T. Tsubono, M. Aoyama, and K. Hirose: Distribution of oceanic ¹³⁷Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, *J. Environ. Radioactiv.*, **111**, 100/108 (2012)
- 2) M. Aoyama, D. Tsumune, and Y. Hamajima: Distribution of ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs in the North Pacific Ocean: impacts of the TEPCO Fukushima-daiichi NPP accident, *J. Radioanal. Nucl.*, doi:10.1007/s10967-012-2033-2 (2012a)
- 3) 東京電力プレスリリース, 2011年3月22日, <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11032201-j.html>
- 4) 文部科学省ウェブサイト, 「海域モニタリング」, <http://radioactivity.mext.go.jp/ja/list/115/list-1.html>
- 5) 文部科学省ウェブサイト, 「海域における放射能濃度のシミュレーション」, <http://radioactivity.mext.go.jp/ja/list/202/list-1.html>
- 6) Y. Miyazawa, Y. Masumoto, S. M. Varlamov, and T. Miyama: Transport simulation of the radionuclide from the shelf to open ocean around Fukushima, *Cont. Shelf Res.*, doi:10.1016/j.csr.2012.09.002 (2012a)
- 7) J. Smagorinsky: General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment, *Mon. Wea. Rev.*, **91**, 99/164 (1963)
- 8) G. Mellor and A. F. Blumberg: Wave breaking and ocean surface layer thermal response. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 693/698 (2004)
- 9) M. Honda, T. Aono, M. Aoyama, Y. Hamajima, H. Kawakami,

- M. Kitamura, Y. Masumoto, Y. Miyazawa, M. Takigawa, and T. Saino : Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the Western North Pacific one month after the Fukushima accident, *Geochem. J.*, **46**, 1/9 (2012)
- 10) Y. Miyazawa, R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu : Water mass variability in the Western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, **65**, 737/756 (2009)
- 11) Y. Miyazawa, Y. Masumoto, S. M. Varlamov, T. Miyama, M. Takigawa, M. Honda, and T. Saino: Inverse estimation of source parameters of oceanic radioactivity dispersion models associated with the Fukushima accident, *Biogeosciences Discuss.*, **9**, 13783/13816 (2012b)
- 12) D. Menemenlis, I. Fukumori, and T. Lee: Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model, *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1224/1240 (2005)
- 13) 共同通信報道, 2011年4月4日
- 14) H. Kawamura, T. Kobayashi, A. Furuno, T. In, Y. Ishikawa, T. Nakayama, S. Shima, and T. Awaji: Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of 131I and 137Cs discharged into the ocean because of the Fukushima daiichi nuclear power plant disaster, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, 1349/1356 (2011)
- 15) M. Aoyama, D. Tsumune, M. Uematsu, F. Kondo, and Y. Hamajima: Temporal variation of 134Cs and 137Cs activities in surface water at stations along the coastline near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident site, Japan, *Geochem. J.*, **46**, 321/325 (2012b)
- 16) S. Otsuka and T. Kobayashi: Sedimentation and remobilization of radiocesium in the coastal area of Ibaraki, 70 km south of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, *Environ. Monit. Assess.*, doi 10.1007/s10661-012-2956-7 (2012)
- 17) Y. Masumoto, Y. Miyazawa, D. Tsumune, T. Kobayashi, C. Estournel, P. Marsaleix, L. Lanerolle, A. Mehra, and Z. D. Garraffo: Oceanic dispersion simulation of Cesium 137 from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Elements*, **8**, 207/212 (2012)
- 18) M. Kubota, K. Nakata, and Y. Nakamura: Continental shelf waves off the Fukushima coast Part I: observations, *J. Oceanographical Soc. Japan*, **37**, 267/278 (1981)
- 19) 青山: 月間降下物測定 660ヶ月が教えること -90Sr, 137CS および Pu 降下量 1957年4月~2012年3月, *科学*, **82**, 442/457 (2012)