福島県沖海域を対象とした 海洋拡散予測システムの開発と検証

上平 雄基¹·川村 英之²·小林 卓也²·内山 雄介³

1学生会員 (国研)日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター環境動態研究グループ (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4) E-mail:kamidaira.yuki@jaea.go.jp

²非会員 (国研)日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 環境動態研究グループ

³正会員 神戸大学教授大学院工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

日本原子力研究開発機構で開発された海洋拡散予測システムの沿岸海域での高精度化を図るため、気象研 MOVEと多段ネストROMSを用いたダウンスケーリングに基づく高解像度海洋モデルを導入した。新シス テムを福島第一原発事故に適用することで、現行システムでは再現することが困難であったサブメソスケ ール渦の消長に伴う¹³⁷Csの3次元的な混合と海洋中移行過程の解析精度検証を行った。高解像度モデルに よる流速場・乱流強度等の再現性は良好であり、低解像度モデルと比較して¹³⁷Cs濃度分布の再現性の向上 が確認された。事故直後の福島県沖海域では、季節的な海面冷却などによって強いサブメソスケール渦が 発達し、それに伴う強い鉛直流によって¹³⁷Csが中深層へ活発に輸送されていた。

Key Words: ROMS, SEA-GEARN-FDM, ¹³⁷Cs, oceanic turbulent mixing, submesoscale eddies

1. はじめに

日本国内の原子力発電所や使用済燃料再処理施設の多 くは海岸に設置されており、それらの冷却水及び放射性 廃液は安全性を確保しながら計画的に沿岸海域へ放出さ れている.原子力事故等により、万が一不測の漏洩が起 こると大量の放射性核種が海洋へ放出される恐れがあり、 沿岸海域や生態系に深刻な影響を与える可能性がある. 実際に、2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴 う東京電力福島第一原子力発電所事故では大量の放射性 核種が大気・海洋環境に放出されたことは記憶に新しい. この事故を教訓として、緊急時に放射性核種の海洋拡散 を高精度に予測するシステムの必要性が高まっている.

日本原子力研究開発機構(JAEA)では,事故前から 海洋拡散予測システムの開発を目的として,海洋拡散モ デルの開発を行ってきた(例えば Kobayashi ら, 2007¹⁾).このシステムは,公表される海洋予報データ による流動場を用いて物質輸送を推定するため,その再 現性は使用するモデルの精度に依存する.しかしながら, 一般的に,これらの予報データの空間解像度は比較的粗 いため,迅速な緊急予報を行うといった目的には適切で あるものの,福島沖海域のように沿岸域に捕捉された形 で物質輸送が生じる場合²⁾の再現性確保や,瀬戸内海な どの狭領域を対象にする³⁾ことは原理的に困難であった. 一方,陸棚や沿岸域では,水平数 km~10 km 程度のサ ブメソスケール現象に伴う乱流混合が海洋での物質輸送 に大きな影響を与えることが明らかになりつつあり⁴, 事故によって放出された放射性核種の輸送過程にも当然 ながら強く影響すると考えられる.したがって,これら の影響を合理的に考慮できるように海洋循環モデルを高 精度化しておくことが重要な課題となっている.

そこで本研究では、JAEA の予測システムに対して領 域海洋モデル ROMS⁵を用いた多段ネストダウンスケー リング高解像度沿岸域モデルを導入することで、サブメ ソスケール力学や沿岸域特有の海洋構造を考慮できるよ うシステムの高度化を試みた. さらに、本システムを用 いて福島第一原発事故の海洋再解析を行い、これまで十 分に表現することが困難であったサブメソスケールの海 洋現象に伴う¹⁵⁷Cs の海洋中移行過程を解析し、システ ムの検証を行った.

2. 海洋拡散予測システム

JAEA が開発した差分型の海洋拡散モデル SEA-GEARN-FDM (例えば Kawamura ら, 2014⁶) は、予め 海洋循環モデルにより計算された海況予報や再解析によ る海流場を入力値として移流拡散方程式を解く、offline Eulerian passive tracer モデルの一種である.既往の研究か



図-1 ROMS を用いた 2 段階ネスティングモデル領域. 破線枠: ROMS-L1(水平解像度約 3 km), 黒枠: ROMS-L2(同 1 km). 星印は福島第一原発.

ら,このような海洋拡散モデルの計算結果は入力値に用 いる海流場に強く影響されることが知られており (例 えば Periáñez ら, 2015⁷⁾),高精度な海流場を入力値と して選ぶことが必要である.気象庁気象研究所(気象研) が開発した海洋データ同化システム MOVE (The Multivariate Ocean Variational Estimation System⁸) は様々な観測 データを同化に用い、海洋循環モデルの力学的整合性を 保持しながら現実に近い海況の再現、予報を行うシステ ムであり、現業分野での実績もある.特に北太平洋の海 洋再解析・予報値の信頼度は高いが、その水平解像度は 約10kmであり、サブメソスケール現象による乱流混合 は直接的には考慮されていない.本研究では、MOVE による高精度な再解析データを初期・境界条件とし, ROMS によるダウンスケーリングを行うことで、サブメ ソスケール現象を再現することを試みた. さらに, ROMS により再現された海況場を SEA-GEARN-FDM の 入力値として,福島第一原発起源の¹³⁷Csの海洋拡散シ ミュレーションを実施した.以下に、各モデルの設定や 計算条件を示す.

(1) 海洋循環モデル

MOVE 再解析データ(水平解像度約10 km,1日平均 値)を時空間内挿して初期及び側方境界条件とし, ROMS を用いた1-way offline nesting によって中解像度モ デル ROMS-L1(水平解像度3 km,格子数 320 × 400) から高解像度モデル ROMS-L2(水平解像度1 km,格子 数 704 × 512) へと2段階のダウンスケーリングを行っ た(図-1). ROMS-L1, ROMS-L2 モデルはともに鉛直 解像度は 32 層(σ 座標)とし,海底地形には JEGG500 を SRTM30 で補完したデータを,各種海面フラックス には COADS 月平均気候値を,海表面水温・塩分には MOVE の 20 日平均値を,領域内の一級河川の流量は日 本河川協会の雨量・流量年表データベースから求めた

表-1 SEA-GEARN-FDM の計算条件

Input models	ROMS-L2	ROMS-L1	MOVE
Computational period	3/12/2011-6/30/2011, UTC		
Time step	120 s	180 s	360 s
Model domain	140.5°-145°E,	140°-148°E,	120°E-120°W,
	35.6°-39.2°N	33°-39°N	10°-60°N
Horizontal grid cells	451×361	267×201	1200×500
Horizontal resolution	0.01°	0.03°	0.1°
Vertical level (z-coordinate)	79 levels	79 levels	54 levels
Duration of the oceanic release	3/26/2011-6/30/2011, UTC		
Duration of the atmospheric deposition	3/12/2011-5/31/2011, UTC		

1994-2003 年の月平均気候値をそれぞれ用いた.海上風 については、ROMS-L1 では気象庁 GPV-GSM 再解析デ ータの日平均値を,ROMS-L2 では GPV-MSM 再解析デ ータの日平均値を与えた.さらに、黒潮等の水平 100km ~300 km 程度のメソスケールの海洋構造を大局的に MOVE と整合させるため、MOVE の水温・塩分の 10 日 平均値に対して簡易的な 4 次元同化 (TS-nudging, nudging strength=1/20 day⁻¹;内山ら、2012⁹参照)をL1領 域全体に適用した.ROMS-L2 では一切の同化は行わず、 4 次元同化などの制御を加えないシミュレーションを実 施することで、サブメソスケールの時空間変動を考慮し た.データセットの出典については著者ら¹⁰を参照さ れたい.

(2) 海洋拡散モデル

SEA-GEARN-FDM を使用し, MOVE 再解析データ及 び ROMS-L1, ROMS-L2 により計算された 3 次元海流デ ータを入力した3通りの拡散計算を行い、相互比較を行 う. 対象核種は¹³⁷Cs(半減期 30.1 y)とし、大気から海 表面に沈着した¹³⁷Cs と福島第一原発からの直接漏洩に よる¹³⁷Cs を放出源として与えた. 大気から海表面への ¹³⁷Cs 沈着量は Katata ら, 2015 による推定量¹¹⁾から WSPEEDI-II (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) を用いて大気拡散 シミュレーションで計算した海表面沈着量を3時間毎に 与えた、原発から海洋への直接放出量に関しては、東京 電力による海洋モニタリングデータをもとに見積もられ た放出量¹²⁾を1日毎に与えた.海水中の¹³⁷Csの大部分 は溶存相として存在し、残りの僅かな量が海水中の粒子 状物質に吸着された懸濁態として存在すると考え、海水 中の¹³⁷Cs は完全に溶存相として存在すると仮定した. 表-1 に SEA-GEARN-FDM の計算条件を示す.



図-4 2011 年 3 月 25 日の海表面無次元相対渦度(ζ/ƒ)の日平均値(左から ROMS-L2, L1, MOVE). 左図内の黒実線は**図-5, 図-8** に用いる観測線を表している.

3. 再現性の検証

(1) 海洋循環モデル

ROMS による流動場の再現性を検証するため、衛星海 面高度計データ AVISO(水平解像度約 1/4°)による黒潮 流路との比較を行った.2011 年 3 月から 6 月までの 4 ヶ 月間に対して時間平均された海表面流速の絶対値を見る と(図-2), ROMS は黒潮続流域の流軸位置(周囲より 流速の大きい暖色系領域)や蛇行パターン等を良好に再 現していることが確認できる.

また、同じ期間に対する平均海表面渦運動エネルギー (Eddy Kinetic Energy, EKE)の空間分布の比較結果を見 ると(図-3. ROMS と MOVE による結果を比較),全 体的なパターンの整合性は保持しつつ、解像度の向上に 伴って黒潮続流域で EKE が著しく増大する傾向がある. このとき、海表面での無次元相対渦度 ζ/f (ただし、 ζ : 相対渦度の鉛直成分,f:惑星渦度)の日平均値の分布 を比較すると(図-4),ROMS-L2モデル沿岸域などに 見られるように、高解像度化によって低解像度モデルで は再現することができなかったサブメソスケール渦が多 数出現し、しかも著しく強化されていることが分かる. このようなサブメソスケール渦は海面冷却と downfront 風が強化される冬から春にかけての寒冷期に発達するこ とが知られており(例えば内山ら¹³⁾),事故直後の ¹³⁷Cs輸送に対して強い影響を与えたと予想される.

以上の結果から, ROMS によるダウンスケーリングは, MOVE で再現されたメソスケールの海象に加えて,高 解像度化に伴うサブメソスケールの海象を再現すること が可能である.

(2) 海洋拡散モデル

SEA-GEARN-FDM による¹³⁷Cs 拡散シミュレーション の再現性を確認するため、2011年6月に観測された溶 存相¹³⁷Cs 濃度データ(Buesseler ら, 2012¹⁴⁾)との比較を 行う.海表面¹³⁷Cs濃度の水平分布(図-5上)を見ると, 高解像度モデル ROMS-L2 を用いた結果は沿岸域での高 濃度域や黒潮続流域での濃度分布の再現性が高いことが 確認できる.また、観測点での濃度の比較(図-6)では、 低解像度モデルであるほど過小評価する傾向が見られる. 計算値が観測値に対してファクター10 以内となる観測 点数の割合は, MOVE では 5.7%, ROMS-L1 では 34.3%, ROMS-L2 では 60.0%となった. 特に, MOVE を用いた 計算結果(図-5,右上)では、北緯 36.5 度付近で観測さ れた濃度を大幅に過小評価しているが、ROMS-L2 モデ ルを用いた計算結果では、観測された濃度を良く再現し ている(図-5, 左上).事故後,茨城県沖合では高気圧 性(時計回り)のメソスケール渦が卓越していた可能性 が高く, 渦に伴う沿岸域での北上流によって¹³⁷Cs の南 下が5月末まで抑制されていたと考えられる¹⁵.5月末 には低気圧接近によってこのメソスケール渦が解消され、 同時に強い南向き風とそれに伴う岸向き Ekman 輸送に よって沿岸域に張り付いた形で強い南下流が生じた結果, ¹³⁷Cs が千葉県銚子市付近まで輸送されていた可能性が 示唆された(図-7).



図-5 2011 年 6 月における溶存態¹³⁷Cs 濃度の観測値と計算値の比較. (上)海表面水平分布, (下) 観測線(図4 参照)における鉛直断面分布. いずれも左から, ROMS-L2, ROMS-L1, MOVE 流動場を用いた SEA-GEARN-FDM 推定値. ○は観測値.





さらに、観測線(図4 左,黒太線)での¹³⁷Cs 濃度の 鉛直断面分布(図-5 下)から、低解像度モデルでは中 深層の観測値を過小評価しているのに対して、高解像度 モデルでは表層から深層までの¹³⁷Cs 濃度分布を比較的 良く再現していることが確認できる.

4. 鉛直流が¹³⁷Cs 濃度分布に与える影響

観測線での¹³⁷Cs 濃度の鉛直断面分布(図-5,下)から, ROMS-L2 モデルの計算結果を用いた場合,¹³⁷Cs が 活発に中深層へ輸送される結果となったが,本章ではこの¹³⁷Cs 鉛直輸送メカニズムについて考察する. ROMS-L2 による観測線(図-4 左)での鉛直流速の鉛直断面分 布を図-8 に示す.春期(図-8 左)には海面冷却などの 影響によって混合層が深くなり、サブメソスケール渦と それに伴う強い鉛直流(非地衡二次流;Ageostrophic Secondary Circulations, ASCs)の発達が混合層内で促進さ れていることが確認され、事故発生直後には ASCs が ¹³⁷Cs 鉛直輸送に対して強く影響していたことが示唆さ れる. ASCs の発達は特にサブメソスケール渦が発達し やすい沿岸域や黒潮続流フロントから 1°程度離れた海 域(図4左参照)で4月の下旬まで続くが、それ以降 は混合層が浅くなって ASCs は低減する(図-8 右). こ の温暖な時期(6月)には、サブメソスケール現象より も、黒潮続流フロント周辺におけるシアや鉛直流、剥離 渦, 切離渦などのメソスケール現象が¹³⁷Cs 鉛直循環を 支配していると考えられる. ROMS-L2 による水深ごと に空間平均された¹³⁷Cs 平均濃度の時系列(図-9)を見る と,表層の平均濃度は4月下旬頃まで高く,反対に水深 480 mの中深層では5月中旬以降に高くなる傾向がある. また, ROMS-L2 による¹³⁷Cs の平均鉛直フラックス $(\overline{w \cdot c} [Bq m s^{-1}], c t c t c), w t 鉛直流速 [m s^{-1}], c t t b c t c)$ 射能 [Bq], 上付きバーはアンサンブル平均操作を表す. 図-10)から,水深20m(図-10左)では北緯37°以南の 黒潮続流域付近で¹³⁷Cs 沈降が卓越していることが確認 できる.また、サブメソスケール渦が発達し、しかも表 層の¹³⁷Cs濃度が高い3月,4月では、仙台湾沖合や、北 緯 37°以北の外洋等,黒潮続流域から離れた海域でも活 発で細かな¹³⁷Cs 鉛直循環構造が見られる.しかし、5







 図-8 ROMS-L2 による観測線(図-4 参照)における日平均鉛 直流速の断面分布. 黄色線は混合層深さ. (左) 2011 年 3月19日, (右)6月16日.



図-9 ROMS-L2 による水深ごとに空間平均された¹³⁷Cs 平均濃度の時系列.青:水深 lm,赤:480m. 横軸は日付.

月,6月には黒潮続流域以外での¹³⁷Cs 鉛直循環,特に 沈降は抑制されている.一方,水深 900 m での¹³⁷Cs の 平均鉛直フラックス(図-10 右)の分布より,黒潮続流 フロント周辺における¹³⁷Cs 鉛直循環は3月から4月の 沈降フラックスは比較的弱いが,中深層の¹³⁷Cs 濃度が 高くなる5月から6月にかけて沈降フラックスが高くな っていることが分かる.以上より,表層に高濃度の ¹³⁷Cs が存在した事故直後の時期にはサブメソスケール 渦が発達し,それに伴うASCsによって,¹³⁷Cs が混合層 以深に輸送されたのち,5月頃からは黒潮続流フロント 部で発達する鉛直流などのメソスケール現象によって, 中深層へと輸送されていたことが示唆される.

5. おわりに

MOVE の再解析データを初期・境界条件として, ROMSを用いたダウンスケーリングシステムを導入し, 得られた海況データを SEA-GEARN-FDM の入力データ とすることで、福島県沖海域を対象とした海洋拡散予測 システムを開発するとともに、その妥当性を検証した. また、サブメソスケール現象に伴う鉛直循環に着目し、 事故直後の寒冷期に発達していた ASCs が¹³⁷Cs 鉛直循環 に強く関与していた可能性を指摘した.本研究結果は、 放射性核種を対象とした沿岸域の海洋拡散予測システム を構築する上で、ダウンスケーリングによる高解像度化 が有効な手段であることを示している.

謝辞:本研究の一部は科研費補助金(15H00977, 15H04049)の援助を受けた.大気から海表面への¹³⁷Cs沈 着量データ提供に関してJAEAの古野朗子氏に, MOVE のデータ提供に関して気象研の碓氷典久氏にご助力いた だいた.ここに記して深遠なる謝意を表す.

参考文献

- Kobayashi, T., Otosaka, S., Togawa, O. and Hayashi, K.: Development of a non-conservative radionuclides dispersion model in the ocean and its application to surface cesium-137 dispersion in the Irish Sea, *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 44, pp. 238-247, 2007.
- 内山雄介,山西琢文,津旨大輔,宮澤泰正,石井倫 生:福島第一原発からの放射性核種の初期分散に及 ぼす沿岸ジェットとメソスケール渦の影響,土木学 会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp. I_1051-I 1055, 2013.
- 内山雄介,鈴江洋太,小硲大地:瀬戸内海および遠 州灘沿岸域における陸域起源物質分散の季節変動特 性について,土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, pp. I 949-I 954, 2016.
- 4) 上平雄基・内山雄介・御手洗哲司・仲田翔平:琉球 諸島周辺海域における eddy heat flux を用いたサブメ ソスケール乱流混合強化メカニズムの解析,土木学 会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_1219-I 1224, 2015.
- Shchepetkin, A.F. and McWilliams, J.C. : The regional ocean modeling system (ROMS): a split-explicit, freesurface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Modell.*, 9, pp.347–404, 2005.
- 6) Kawamura, H., Kobayashi, T., Furuno, A., Usui, N. and



図-10 ROMS-L2 による平均鉛直¹³⁷Cs フラックス(正が湧昇,負が沈降を表す). (a), (b):水深 20 m, (c), (d):水深 900m, (a), (c): 2011 年 3 月 12 日から 4 月 30 日までの平均値, (b), (d):2011 年 5 月 1 日から 6 月 30 日までの平均値.

Kamachi, M.: Numerical simulation on the long-term variation of radioactive cesium concentration in the North Pacific due to the Fukushima disaster, *J. Environ. Radioact.*, Vol. 136, pp. 64–75, 2014.

- 7) Periáñez, R., Brovchenko, I., Duffa, C., Jung, K.-T., Kobayashi, T., Lamego, F., Maderich, V., Min, B.-I., Nies, H., Osvath, I., Psaltaki, M. and Suh, K.-S.: A new comparison of marine dispersion model performances for Fukushima Dai-ichi releases in the frame of IAEA MODARIA program. J. Environ. Radioact., Vol. 150, pp. 247-269, 2015.
- Usui, N., Ishizaki, S., Fujii, Y., Tsujino, H., Yasuda, T. and Kamachi, M. : Meteorological Research Institute Multivariate Ocean Variational Estimation (MOVE) system: Some early results, Advances in Space Research, 37, pp.806–822, 2006.
- 内山雄介・石井翔大・宮澤泰正: JCOPE2-ROMS 多 段ネスティングによる黒潮続流域でのダウンスケー リング効果の検証,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No. 2, pp. I 436-I 440, 2012.
- 10) Kamidaira, Y., Uchiyama, Y. and Mitarai, S. : Eddyinduced transport of the Kuroshio warm water around the Ryukyu Islands in the East China Sea, *Cont. Shelf Res.*, 2016. (in revision)
- Katata, G., Chino, M., Kobayashi, T., Terada, H., Ota, M., Nagai, H., *et al.*: Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear

Power Station accident by coupling simulations of atmospheric dispersion model with improved deposition scheme and oceanic dispersion model, *Atmos. Chem. Phys.*, Vo. 15, pp. 1029–1070, 2015.

- 12) Kawamura, H., Kobayashi, T., Furuno, A., In, T., Ishikawa, Y., Nakayama, T., Shima, S. and Awaji, T.: 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, pp. 1349-1356, 2011.
- 13)内山雄介,石井翔大,宮澤泰正:黒潮続流フロント 域におけるサブメソスケール乱流の発生機構と混合 効果,海岸工学論文集,Vol.69, No.2, pp. I_456-I_460, 2013.
- 14) Buesseler, K.O., Jayne, S.R., Fisher, N.S., Rypina, I.I., Baumann, H., Baumann, Z., Breier, C.F., Douglass, E.M., George, J., Macdonald, A.M., Miyamoto, H., Nishikawa, J., Pike, S.M. and Yoshida, S.: Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. *P. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol. 109, pp. 5984-5988, 2012.
- 15) Aoyama, M., Tsumune, D., Uematsu, M., Kondo, F., and Hamajima, Y.: 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.*, Vol. 46, pp. 321–325, 2012.

(2016.3.16 受付)

DEVELOPMENT OF A PREDICTION SYSTEM FOR RADIONUCLIDE DISPERSION IN FUKUSHIMA COAST

Yuki KAMIDAIRA, Hideyuki KAWAMURA, Takuya KOBAYASHI and Yusuke UCHIYAMA

A downscaling oceanic dispersal modeling system has been developed. The system consists of double nested ROMS embedded in the MOVE assimilative reanalysis product and oceanic radionuclides dispersion model SEA-GEARN-FDM. The developed submesoscale eddy-resolving model is applied to reanalyses of the Fukushima accident occurred in March 2011. Model validations with satellite and in-situ data agreed well. The finest resolution model performed well between three models with different grid resolutions, suggesting that submesoscale eddies and associated vertical flows in the upper layer are substantial to three-dimensional behavior of the radionuclide. A diagnostic vertical ¹³⁷Cs flux analysis demonstrates that ageostrophic secondary circulations induced by submesoscale eddies promote seasonaly-varying subduction of the ¹³⁷Cs enhanced in spring, namely, immediately after the accident.