

48. 陸域起源放射性核種の海域移行定量化を目的とした領域土砂輸送モデルの開発

山西 琢文^{1*}・内山 雄介¹・津旨 大輔²・宮澤 泰正³

¹神戸大学 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)

²電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³海洋研究開発機構 アプリケーションラボ (〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)

* E-mail: 144t144t@stu.kobe-u.ac.jp

福島第一原発から漏洩した放射性核種の陸域から海域への移行過程の定量化を目的として、波浪の影響を考慮した領域スケール混合粒径土砂輸送モデルを開発し、2011年3月から7月の福島・宮城沿岸における懸濁態物質輸送再解析を実施した。大気経由で陸域に到達した放射性セシウムは主に土壌表層の粘土画分の粒子に吸着し、降雨等に伴い懸濁態として河川から海洋へと流出するとともに、海中の溶存態セシウムは海底において土粒子に吸脱着する。このような懸濁態物質の海洋での再循環過程においては、特に浅海域での波浪による底面シアおよび再懸濁フラックスの強化が重要となる。本稿では、本モデルによる底面シアの出現特性およびその原因に関する解析を行い、土砂輸送に関する良好な再現性を定性的に示した。

Key Words : ROMS, radionuclide, ^{137}Cs , semident transport, oceanic dispersal

1. 緒言

東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F）は、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波によって被災し、炉心融解に伴い大量の放射性物質を大気・海洋へ放出した。海洋での放射性核種の分散パターンは、1Fからの直接漏洩以外にも様々な要因の影響を受ける。例えば、陸域では ^{137}Cs の多くは主に土壌表層の粘土粒子に吸着し、それらが降雨等によって懸濁態として河川から海洋へ流入することや、海底においても土粒子に吸脱着することなどが知られている。懸濁態 ^{137}Cs の挙動は直接漏洩した溶存態 ^{137}Cs とは大きく異なり、水文過程を経て海域へ至るためにタイムラグがあることや、一旦海洋へ流入したあとも再懸濁・沈降を繰り返すため長期間にわたって沿岸域に滞留することが懸念され、 ^{137}Cs インベントリを正確に把握するために、懸濁態粒子の分散評価は極めて重要な課題である。

本研究では、放射性核種の陸域から海域への移行過程の定量化を最終的な目的として、波浪の影響を考慮した浅海域用マルチクラス領域土砂輸送モデルを開発し、2011年3月から7月における福島・宮城・

茨城県沿岸域を対象とした土砂の陸域→海域移行に関する再解析を行ったので、その結果について報告する。

2. ダウンスケーリング領域土砂輸送モデル

内山ら（2012, 2013）によるROMS-JCOPE2ダウンスケーリング領域海洋モデルをベースにもう一段のネスティングを施した3段ネストモデルを開発し

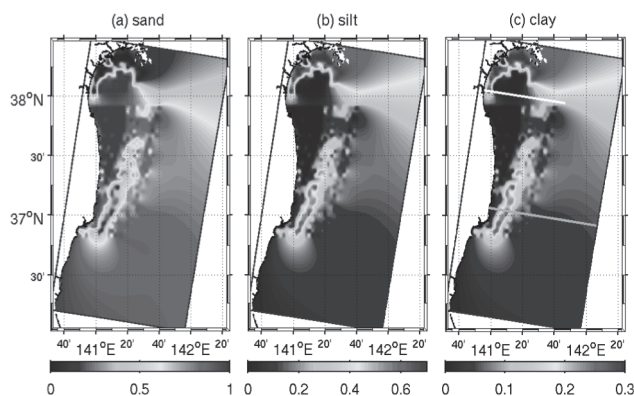


図-1 ROMS-L3 領域の海底土砂の初期粒径組成。(c)中の岸からESE方向に延びている白および緑実線は、図-4～7で用いる検査線を示す。

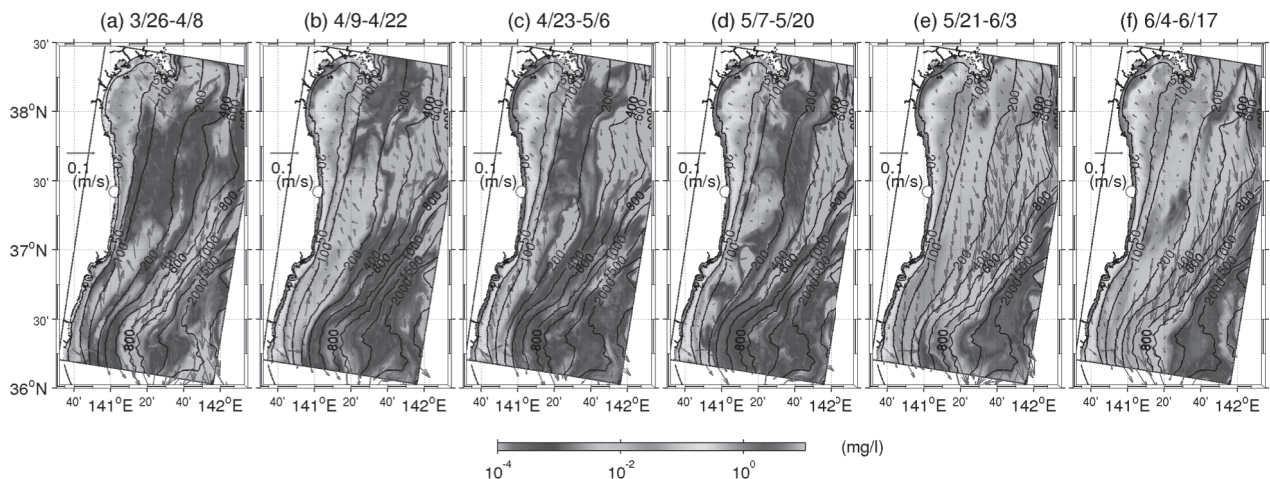


図-2 2011年3月26日から2週間ごとに時間平均した底層clay平均濃度（カラー，対数スケール）と底層平均流速（ベクトル）および水深（コンター）．白抜き丸印は福島第一原発（1F）の位置．

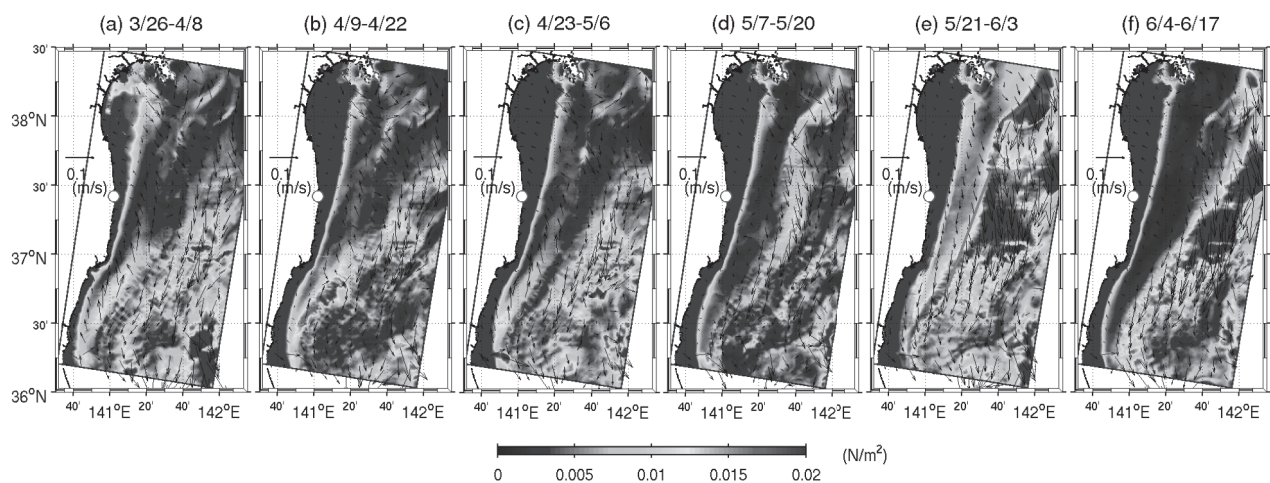


図-3 図-2と同じ．ただし，2週間平均底面せん断応力（カラー）と底層平均流速（ベクトル）．

表-1 土砂パラメータ

class	d (μm)	ρ_s (kg/m^3)	w_s (mm/s)	E_u ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	τ_{cr} (N/m^2)
sand	125	2650	9.4	2.5×10^{-3}	0.15
silt	24	2650	0.4	1.0×10^{-4}	0.07
clay	4	1100	0.1	1.0×10^{-4}	0.02

交換層の厚さ $\delta_a = 3 \text{ mm}$ ；初期基層の厚さ：10 m；空隙率 $\rho = 0.4$

た．すなわち，JCOPE2（水平解像度約10 km）→ROMS-L1（同3 km）→ROMS-L2（同1 km）→ROMS-L3（同250 m）領域を作成し，L3領域（以下，福島モデルと呼称する）に対する結果を解析に供した．本研究では，Blaas *et al.* (2007) を参考に，沈降速度を持つ active Eulerian トレーサとしての3クラスの非凝集性土砂（sand, silt, clay；表-1参照）の輸送モデルと，混合粒径用の海底層位モデルを構築し，L3領域モデルに適用した．底面での再懸濁量を決める底面せん断応力の評価には Soulsby (1995) による波-流れ共存場モデルを用いた．気象庁 GPV-MSM 海上風，COADS フラックス，GPV-CWM 再

解析値にネスティングさせたスペクトル波浪推算モデル SWAN による波浪推算結果（水平解像度約1 km）などを外力として用いた．海底土砂の初期粒径組成には，宮城県・福島県水産試験場（1991，2013）の観測値を最適内挿法で空間補間したものを使った（図-1）．また，L3 領域内に存在する6本の一級河川および14本の二級河川の河口における流量は，電中研 HYDREEMS（豊田ら，2009）による日平均推定値を与え，流入土砂フラックスは武川・二瓶（2013）の方法に準じて評価し，流砂組成比は JAEA (2013) による USLE 準拠モデルによる土砂輸送計算結果を考慮して与えた．

3. 福島モデルによる土砂分散再解析結果

まず，福島モデル領域内での土砂の分布パターンを把握するために，漏洩開始直後の2011/3/26から2011/6/17までの期間に対して2週間ごとに時間平均された底層clay濃度および底面流速分布の経時変化

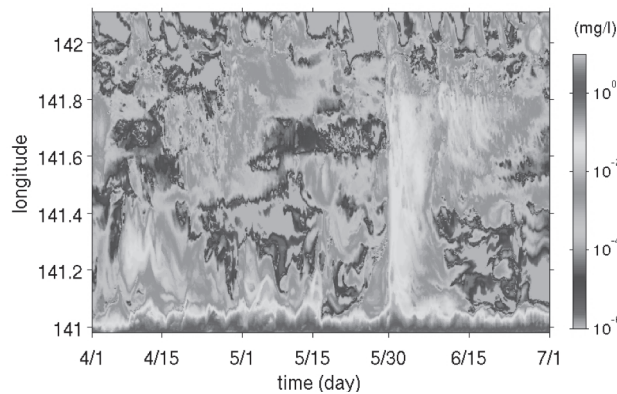


図-4 福島ライン（図-1c 緑色検査線）における clay 濃度の Hovmöller 図。横軸：時間，縦軸：岸からの距離。

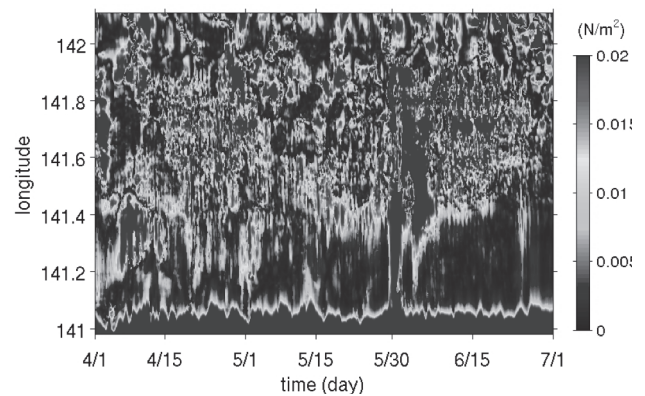


図-5 図-4 と同じ。ただし，底面せん断応力。

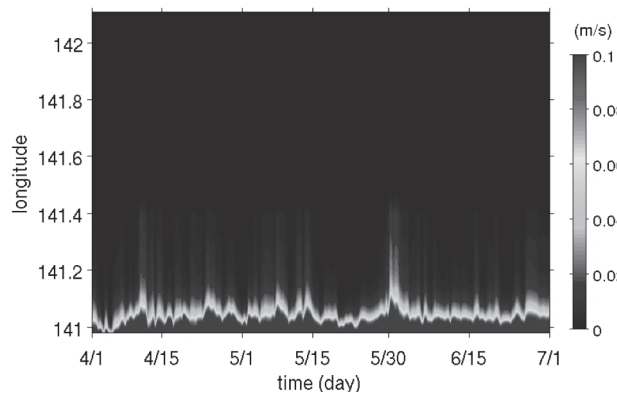


図-6 図-4 と同じ。ただし，波による底面軌道流速。

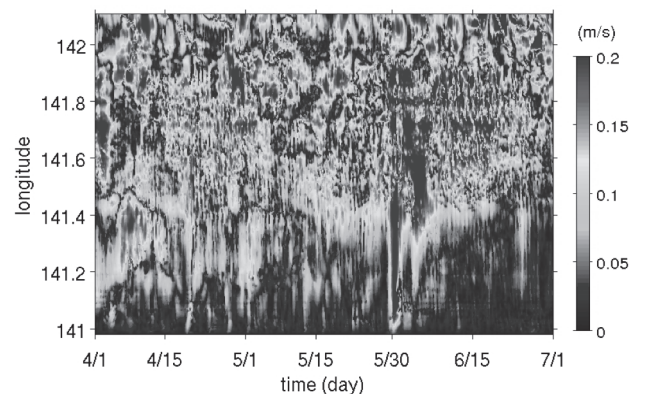


図-7 図-4 と同じ。ただし，底層流速。

を図-2に，底面せん断応力の時間経過を図-3に示す。図-2に示した全期間において，高濃度のclayはせん断応力の大きな岸近傍に集中して発生しているが，仙台湾内ではより沖合まで高濃度領域が広がっている。沖合海域では高濃度clayは発達しにくい，5月下旬以降（図-2(e)，2(f)）において陸棚斜面周辺に相当する沖合約60 km周辺（水深約600 m）に見られる強い南下流に沿う形でclay濃度の上昇域が出現している。底面せん断応力分布を見ると（図-3），高濃度clayに対応して全期間において岸近傍でせん断応力が高い値を示しているが，特に仙台湾では広範囲にわたってせん断応力が高い。5月下旬以降では沖合陸棚斜面周辺でclayの限界せん断応力である 0.02 N/m^2 （表-1）を超える値（赤）を示しており，この沖合海域で観測される高濃度のclayは，岸近傍で再懸濁して移流されたものというよりは，局所的な巻き上げによるものである可能性が高い。

4. 福島沖における細粒土砂の密集領域の形成

2011/4/19と5/30には低気圧の通過に伴い，極めて強い南下流が発生した（内山ら，2013）にも関わらず，1F沖合約20 kmの福島沖海域では，解析期間中を通じて底面せん断応力がほとんど発達しない領域

が带状に発達していることが分かる（図-3(e)のマゼンダ線岸側海域）。この領域の底質組成はsilt, clayの細粒分が卓越しており（図-1），周辺海域と比較して土砂輸送特性が大きく異なっていることが予想される。そこで，図-1(c)に示した1F沖合の検査線（緑線，福島ラインと呼称）における底層clay濃度，底面せん断応力，底面軌道流速，底層流速のHovmöller図を図-4～7に示す。せん断応力（図-5）は岸近傍で常にclayの限界せん断応力である 0.02 N/m^2 を超えており，絶え間なくclayを再懸濁させていたことが分かる（図-4）。波による底面軌道流速（図-6）は岸近傍でのみ高い値を示し，平均流による底層流速（図-7）は主に沖合で大きい。岸近傍における強いせん断応力の発生域の分布は底面軌道流速の発達範囲と一致しており，一方で沖の上昇域は底層流速が発達している範囲と一致している。底面せん断応力は軌道流速に起因する波の底面摩擦と，底層平均流に起因する流れの底面摩擦の関数として評価され，福島ラインでは岸近傍では波浪，沖では流速の影響を強く受けてせん断応力が発達していたことが分かる。反対に，沖合15～25 kmでは軌道流速と底層流速の両者が小さく，せん断応力が発達しないため（図-5），河川からの供給土砂や他の浅海域から移流分散された細粒土砂が堆積しやすい構造

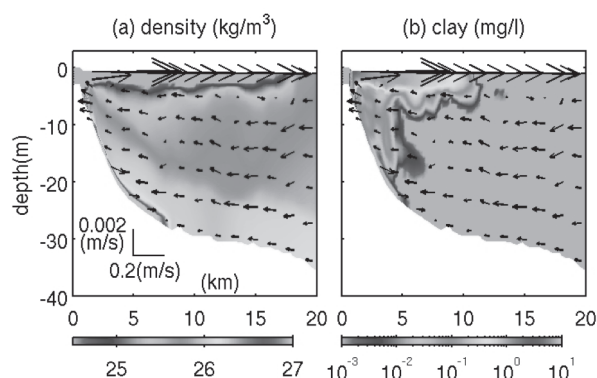


図-8 降雨出水時における阿武隈川前面における (a) 海水密度および (b) clay 濃度 (カラー), 岸沖・鉛直方向流速 (ベクトル)。

となっているものと解釈される。

^{137}Cs は比表面積の大きな細粒土砂 (特に粘土) によく吸着することが知られており, この帯状領域では懸濁態 ^{137}Cs 濃度が高くなっている可能性がある。実際, 水産総合研究センターによる観測結果 (小埜ら, 2013) からは, 帯状領域周辺の海底土砂中の ^{137}Cs 濃度は周囲と比較して高く, 本計算結果と矛盾しない傾向が示されている。

なお, 阿武隈川の前面に設定した白色検査線 (図-1(c), 阿武隈ラインと呼称) でも同様の比較を行ったところ, 仙台湾内広域でのせん断応力は波浪の影響を受けたものであり, 底質組成とせん断応力が対応して, せん断応力の小さな海域に細粒分が堆積しやすいことなどが確認された。

5. 再懸濁を考慮しない河川流出土砂の分散

懸濁態 ^{137}Cs のうち, 陸域起源のものだけを取り出し, その沿岸域での分散を解析することで河川供給土砂の挙動を評価する。ここでは, 海域中での再懸濁を考慮せずに, 河川からの土砂流入と沈降・分散過程のみを考慮した数値実験を実施し, 河川から供給された土砂の輸送範囲の定量化を行った。結果の一例として, 阿武隈川日平均流量が $620 \text{ m}^3/\text{s}$ であった出水時 (2011/5/14) の阿武隈ライン (図-1(c), 白線) における海水密度およびclay濃度分布を図-8に示す。河口域海洋表層に強い沖方向の流れが生じ, それに伴い, 表層付近でclayが沖方向へ輸送され, 沖合 15 km 程度まで広がっている。また計算最終時点 (2011/7/19) における累積堆積量は, 河川からの流入土砂量の多い阿武隈川河口で特に大きな堆積量が確認され, 仙台湾内や久慈川近傍では沖合約 15 km 程度まで堆積が見られるが, 1F近傍では 5 km 程

度までしか堆積が見られなかった。ただし, これらは海域での再懸濁を無視した結果であり, 実際には一旦沈降して堆積した土砂は次のイベント時に再懸濁して移流分散される可能性があるため, 沖合海域を含むより広域へと分布するものと考えられる。

6. 結論

懸濁態放射性核種の陸域から海域への移行過程および海洋中での再循環過程を解析するツールの中核として, 波浪の影響を考慮したマルチクラス領域土砂輸送モデルを開発し, 3段ネスト福島モデルに適用した。本モデルによる計算結果と海底土砂の粒径組成の観測値は整合しており, モデルによる土砂輸送は大局的には良好な再現性を有すると判断される。したがって, 本モデルは懸濁態放射性核種の陸域から海域への移行過程に対する強力な解析ツールとなり得ると考えられる。土砂の海中濃度分布は岸近傍では波浪の効果による再懸濁と, 河川からの流入に影響を受けて形成され, 陸棚斜面周辺における沖合域では強い底層水平流速を受けて再懸濁が生じる。1F前面沖合約 $15 \sim 25 \text{ km}$ の海域では, 波浪と底層流速の影響が小さく底面せん断が小さい領域が存在する。そこでは, 底質は細粒土砂が卓越し, 土砂に吸着した ^{137}Cs 濃度が高い領域が形成されている。河川から流出したclayは, 阿武隈川河口では最大約 $15 \sim 20 \text{ km}$ 沖まで表層を輸送される。今後は本モデルに ^{137}Cs の土砂への吸脱着モデルを組み込み, 懸濁態 ^{137}Cs のインベントリ評価や分布特性解析を行う予定である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金・新学術領域研究 (公募研究・課題番号 25110508) の援助を受けた。

参考文献

- 内山雄介・石井倫生・津旨大輔・宮澤泰正 (2012) : 福島第一原力発電所を放出源とする放射性セシウム ^{137}Cs の沿岸域での分散特性, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No. 2, p. I_931-I_935.
- 内山雄介・山西琢文・津旨大輔・宮澤泰正・石井倫生 (2013) : 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, I_1051-I_1055.
- 小埜 恒夫・埴山秀樹・安倍大介 (2013) : 海洋環境への放射性物質の拡散状況。一水と海底土にどう拡がったか
—
www.fra.affrc.go.jp/topics/250220/10thProgram_2.pdf
- 北村哲浩・町田昌彦・飯島和毅・佐藤治夫 (2013) : 環境動態将来予測システムの開発・解析評価の現状

<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/search/servlet/search?5042309>

- 武川一樹・二瓶泰雄 (2013) : 日本の河川における浮遊土砂輸送量と流量の相関関係, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No. 2, p. I_1221-I_1225.
- Blaas, M., Dong, C., Marchesiello, P., McWilliams, J., Stolzenbach, K., 2007. Sediment transport modeling on Southern Californian shelves: a ROMS case study. *Contin.Shelf Res.*, Vol. 27, pp. 832–853.
- Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama and K. Hirose (2012): Distribution of oceanic ^{137}Cs from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, *J. Environ. Radioactivity*, Vol. 111, pp. 100-108.
- Wang, X. H., (2002): Tide-Induced Sediment Resuspension and the Bottom Boundary Layer in an Idealized Estuary with a Muddy Bed. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 32, pp. 3113–3131