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, ¹³⁷Cs, 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¹³⁷Cs 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¹³⁷Csの挙動は直接漏 洩した溶存態¹³⁷Cs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, ¹³⁷Cs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).

class	d	$ ho_s$	w _s	E_u	$ au_{cr}$				
	(µm)	(kg/m^3)	(mm/s)	(kg/m^2s)	(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									
$\rho = 0.4$									

主_1	- 1	トレ	N	5	1	_	カ
77 - 1		レイアン	/ ``	/	ァ	_	~

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; \mathbf{z} -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.



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は発達しにくいが,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大きい.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/m² (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20km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





が帯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/m²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.

¹³⁷Cs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¹³⁷Cs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 ¹³⁷Cs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¹³⁷Cs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 m³/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clav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、本モデルは懸濁熊放射性核 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15~25 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¹³⁷Cs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15~20 km沖まで表層を輸送される. 今後は本 モデルに¹³⁷Csの土砂への吸脱着モデルを組み込み、 懸濁態¹³⁷Cs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 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・帰山秀樹・安倍大介(2013):海洋環境への 放射性物質の拡散状況. -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 ¹³⁷Cs 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