海洋環境における放射性核種の動態
－東京電力福島第一原発事故から 10 年の海洋科学的総括－

マルチクラス 3 次元懸濁質輸送モデルを用いた福島沿岸域における陸域起源懸濁態放射性核種の動態解析

内　山　雄　介

Nearshore dispersal of land-derived suspended radionuclide in the Fukushima coast using a multi-class three-dimensional suspended matter transport model

Yusuke Uchiyama

神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

海底堆積調査結果と高解像度海洋モデルを用いて福島県新田川を起源とする懸濁態放射性核種の福島沿岸域での輸送堆積過程を評価した．台風 201326 号に伴う出水イベントに着目した解析を行い，堆積層上層における ^{137}Cs 分布の形成機構に対する合理的な説明を行った．

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって，東京電力福島第一原子力発電所（以下，原発と略称）が被災し，大量の放射性核種が大気および海洋環境中に放出された．大気中に流出した放射性核種は事故当時に卓越した南東風によって主に原発北西方向へ輸送され，その大部分が陸域に沈着した．原発周辺の河川流域に沈着した核種は土砂などの鉱物系粒子に強く吸着し，懸濁態放射性核種として台風などの出水イベントのたびに河川を通じて海洋へ流出して海底に堆積している．福島県沿岸域における底質中の放射性核種濃度は漸減傾向にあるが，今なお規制値を上回る底生生物や魚介類が捕獲されることがある．したがって，河川から供給される陸域起源核種の海洋環境中での輸送・堆積過程を定量的に把握し，移流分散経路の特定と堆積に至る詳細なメカニズムを理解することは，海洋学・海岸工学・防災科学・水産分野などにおいて極めて重要な課題である．

陸域空間線量分布調査結果から，特に原発北西部の流域にはセシウム 137（^{137}Cs）に代表される放射性物質が高濃度で沈着していることが分かっている．原発から約 24 km 北の福島県南相馬市原町に河口を有する新田川は，比較的流量の小さな二級河川ではあるが，その流域には特に高濃度の ^{137}Cs が吸着しており，大量の懸濁態 ^{137}Cs が河道内に堆積していた（Nagao ら [1]）．

これに対して内山ら [2] は，JCOPE2-ROMS 海洋再解析システムによる 4 段ネスト海洋流動モデル，混合粒径 3 次元懸濁質輸送モデル，iRIC-Nays 2DH 河川モデル，気象庁 GPV-CWM にネストさせた SWAN 波浪推算モデルを連成させた超高解像

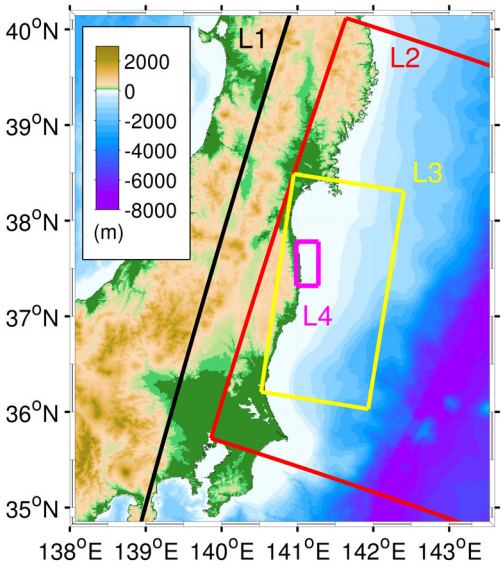


図 1　4 段ネストJCOPE2-ROMSモデルの計算領域. 黒枠 : ROMS-L1, 赤枠 : L2, 黄枠 : L3, マゼンダ枠 : L4 の計算領域を表す.

度広領域 3 次元海洋モデル（図 1）を用いて，2013 年 10 月 16 日に福島県沿岸に接近した台風 201326 号（Wipha）による出水イベント時の解析を行い，河川起源土砂の河口・沿岸域における堆積・侵食状況の時空間特性を評価した．しかしながら，内山ら [2] では現地データとの比較を通じたモデル再解析精度の確認や，海底堆積層中の懸濁態 ^{137}Cs 分布・インベントリなどの定量的な評価は十分になされていなかった．

そこで本研究では，Wipha による出水イベント直後に実施された海底堆積物コアサンプリング調査結果を用いて，新田川起源の懸濁態放射性核種の海底での堆積状況を実証的かつ定量的に評価することを主たる目的とする．さらに，疎らな観測データを補完するために，内山ら [2] で実施した数値解析結果を用いて，出水後の懸濁態核種や混合粒径土砂の分散堆積形成メカニズムや，台風 Wipha 以前の出水履歴に関する考察を行なったので，その結果を報告する．

2. 研究方法

(1) コアサンプリング調査

台風 Wipha 通過後の新田川河口海域において，合計 8 地点（Sta.1 ～ Sta.8）で潜水士による海底堆積物のコアサンプリングを行った（図 2）．底質採取は沿岸部浅海域において北から順に Sta.1 から Sta.5，沖合海域において Sta.6 から Sta.8 を定義して 1 回のみ行った．海象条件やロジスティクスの関係でコアサンプリングは 2 回に分けて行った．すなわち，沖合の Sta.6–8 の 3 地点では台風通過 2 日後の 2013 年 10 月 18 日に，沿岸部の Sta.1–5 の 5 地点では台風通過 15 日後の 10 月 31 日に実施した．なお，Sta.1 は新田川河口北部の原町火力発電所の防波堤内，Sta.2，3 は新田川河口直近に位置しており，Sta.1 ～ 6 はいずれも河口から 5 km 圏内に位置する．採取したコアサンプルは速やかに実験室に持ち帰り，底面からの距離に応じて分割し，それぞれを粒度分析，^{137}Cs 濃度分析等に供した．

(2) 数値モデル

使用した海洋モデルは，内山ら [2]，山西ら [3] によって開発された JCOPE2 再解析値を最外側方境界条件とする福島県沿岸域を対象とした 4 段ネスト JCOPE2-ROMS 海洋循環再解析システムである．本稿ではこのうち，新田川河口域，原発，現地観測位置を含む約 25 km × 50 km の領域を鉛直 32 層，水平解像度 50 m で表現した ROMS-L4 モデルの結果を使用する（図 1，表 1）．2013 年 10 月 16 日に海域に最接近した台風 201326 号に伴う出水イベントを解析対象とし，L4 モデルの計算期間は 2013 年 10 月 1 日から 11 月末までの 2 ヶ月間とした．海洋モデルの水平解像度は約 10 km（JCOPE2）→ 3 km（ROMS-L1）→ 1 km（L2）→ 250 m（L3）→ 50 m（L4）へ順次細密化されている．

L4 領域内に河口を有する 5 本の河川（いずれも二級河川）のうち，新田川を除く 4 河川に対しては電中研 HYDREEMS モデルによる日平均淡水フラックスの推算値（山西ら [3] 参照）を与えた．陸域からの土砂流入は新田川についてのみ考慮し，

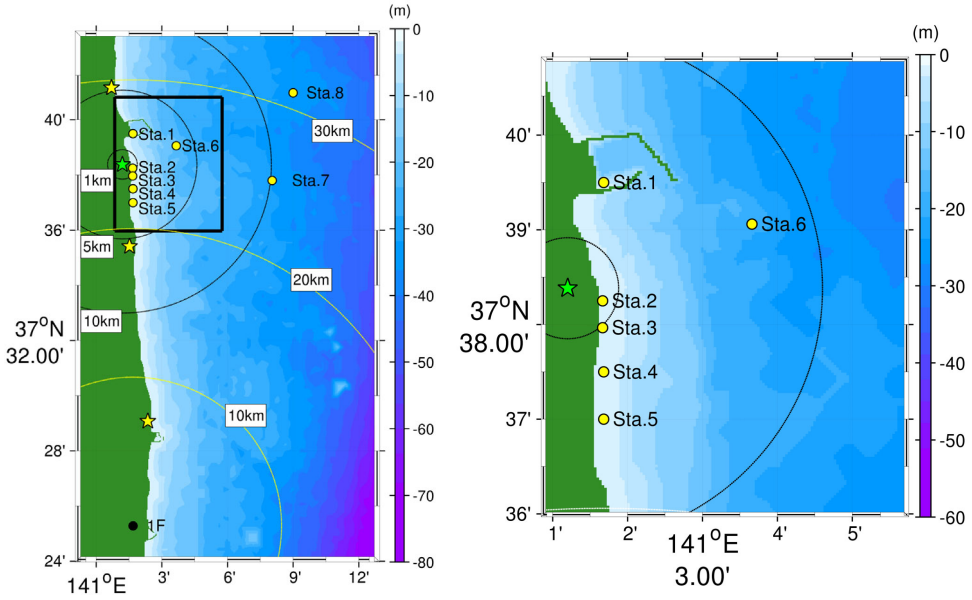


図2　観測領域 (新田川河口海域) . 黒円•白円：新田川および原発からの距離, 緑星：新田川河口, 黄色星：北から真野川, 太田川, 請戸川, 黒丸：原発, カラー：水深 (m) ・右：新田川河口拡大図.

表 1　新田川河口域モデル (ROMS-L4) の計算条件.

計算期間	2013 年 10 月 1 日～2013 年 11 月 30 日
格子数	1,024 × 512 × 32 層，水平解像度：50 m
境界条件	ROMS-L3（2 時間平均値）を線形補間
海上風	気象庁 GPV-MSM（1 時間値）
海面フラックス	NOAA COADS（月平均気候値）
海表面温度	AVHRR Pathfinder（月平均気候値）
河川流量	HYDREEMS 推算値（日平均値），新田川のみ iRIC-Nays 2DH 推算値（1 時間値）
海底地形	内閣府中央防災会議・地形データ
波浪	CWM-SWAN 推算値（3 時間平均値）

表 2　マルチクラス土砂モデルパラメータ.

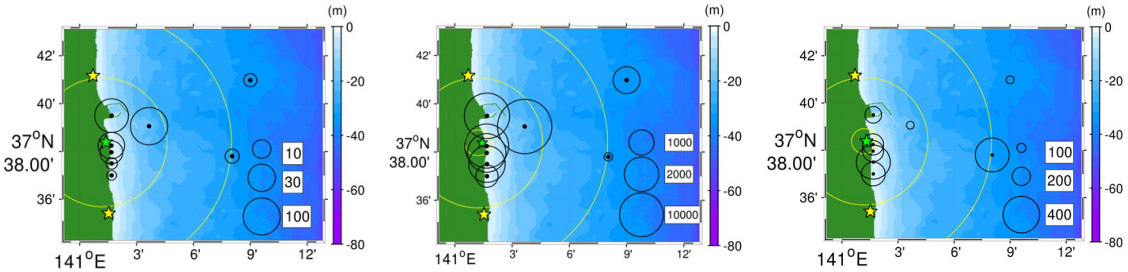
class	d µm	ρ_s kgm^{-3}	w_s mms^{-1}	E_u Kgm^{-2}s^{-1}	τ_{cr} Nm^{-2}
sand	125	2650	9.4	2.5×10^{-3}	0.15
silt	24	2650	0.4	1.0×10^{-4}	0.07
clay	4	2650	0.1	1.0×10^{-4}	0.02

ただし，d：中央粒径，ρ_s：土粒子密度，w_s：沈降速度，E_u：再懸濁率，τ_{cr}：限界せん断応力.

新田川の淡水流量および流入浮遊土砂量は河川モデル iRIC-Nays 2DH から得られる下流端での 1 時間毎の計算結果を与えた．L4 モデルでは混合粒径土砂およびそれに吸着した懸濁態 ^{137}Cs の 3 次元移流拡散，海底での再懸濁および堆積を考慮した．土砂特性は iRIC-Nays 2DH 計算条件と整合させ，active トレーサとして粒径 125 µm の細砂，24 µm のシルト，4 µm の泥の計 3 画分の混合粒径土砂を導入した（表 2）．再懸濁に関連する底面せん断応力は波－流れ共存場に対する Soulsby 式 [4] で評価した．海底堆積層は海底表面に厚さ 3 mm の交換層を定義し，その下に厚さ 10 m の海底基層を定義した．交換層から海水への侵食量に応じて，同画分・同量の土砂が基層から供給される．逆に土砂が海水中から交換層に堆積した際には，交換層から基層に堆積した土砂の同画分・同量の土砂

表 3　コアサンプリング調査結果一覧. D_{NR}：新田川河口からの距離, D_{1F}：福島第一原発からの距離.

Sta. #	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Date	Depth h (m)	D_{NR} (km)	D_{F1} (km)	Surface ^{137}Cs (Bq/kg)	Inventory I (Bq/m^2)	d_{50} (μm)
1	37.658	141.025	10/31/2013	5	2.39	26.7	67.04	11616	182
2	37.638	141.028	10/31/2013	5	1.76	24.5	94.42	9055	231
3	37.633	141.027	10/31/2013	7	1.42	23.4	17.73	3502	231
4	37.625	141.025	10/31/2013	5	1.41	23.4	4.21	2581	372
5	37.617	141.025	10/31/2013	5	2.39	22.3	8.5	955	260
6	37.651	141.061	10/18/2013	25	5.0	27.0	104.0	66155	86
7	37.630	141.134	10/18/2013	35	10.0	25.0	5.9	865	371
8	37.630	141.150	10/18/2013	30	12.0	31.0	5.2	1108	87



(左) 図 3　堆積層表層の懸濁態 ^{137}Cs濃度(Bq/kg. 円の大きさは値に対応. 黒丸：観測地点位置.
(中) 図 4　図 3 と同じ. ただし単位底面積あたりの ^{137}Cs インベントリ (Bq/m^2).
(右) 図 5　図 3 と同じ. ただし堆積層表層の中央粒径 (μm).

が混入するようにモデル化した．したがって，交換層の厚さは常に一定に保たれ，基層の厚さのみ変化する．流入土砂に吸着した懸濁態 ^{137}Cs 量は，解析期間における新田川流域の平均沈着量推定値 703 kBq/m^2 を用い，混合粒径粒子に拡張した He & Walling 式 [5] によって比表面積の冪関数として粒径クラス毎に評価した．なお，モデル内では掃流砂，溶存態 ^{137}Cs と懸濁態 ^{137}Cs 間での相変化，堆積層への動的な吸脱着等は考慮しない．モデリングのさらなる詳細については内山ら [2]，徳永ら [6]，Uchiyama ら [7] を参照されたい．

3. コアサンプリング結果

(1) 台風 Wipha 出水イベントの影響

コアサンプリング観測の主要な結果一覧を表 3 にまとめた．このうち，海底堆積層表層（海底面下 0 ～ 1 cm）の ^{137}Cs の観測結果をバブルチャートで示す（図 3）．底質表層の ^{137}Cs 濃度は直近の出水の影響を強く反映しているため，注目している Wipha による主に新田川から供給された懸濁態 ^{137}Cs 分布に対応すると考えられる．表層の ^{137}Cs 濃度は河口北側の原町火力発電所防波堤内の Sta.1，河口付近の Sta.2，3，そして沖合の Sta.6 で大きい値を示している．その一方で，河口南側の Sta.4，5 と沖合の Sta.7，8 では比較的小さい値を示している．したがって出水の影響は，おおよそ新田川河口 5 km 圏内に限定されていたと判断される．

(2) 過去の出水イベントの履歴

図 4 は単位海底面積あたりの堆積層内懸濁態 ^{137}Cs 存在量，すなわち次式で表されるインベントリ I（Bq/m^2）：

$$I = \int_{-h-z_v}^{-h} (1-\lambda)\rho_m C_r dz \tag{1}$$

の空間分布を示す．ここに，λ：堆積層の間隙率（無次元，$\lambda = 0.4$），ρ_m：底質中混合粒径土砂の重量密度（kg/m^3），C_r：堆積層中の懸濁態 ^{137}Cs 濃度（Bq/kg），h：水深（m），z_v：懸濁態 ^{137}Cs がゼロとなる堆積層深さ（m）である．ただし観測データの制約上，z_v は 10 cm と仮定した．^{137}Cs インベントリの分布傾向は河口や防波堤内で高いなど，表層 ^{137}Cs 濃度の分布傾向と定性的に一致していることが分かる．インベントリは原発事故から Wipha 通過までの約 2 年半に生じた出水の履歴効果を反映しているため，両者が類似した分布特性を有するということは，Wipha による出水と過去の出水時では概ね同様のプロセスで懸濁質の輸送と堆積が生じたことを示唆している．

(3) 懸濁質粒径の ^{137}Cs 空間分布への影響

懸濁態 ^{137}Cs の輸送機構を評価するためには，吸着している懸濁質（土粒子）の粒径別の輸送堆積過程を評価することが重要となる．化学的には，^{137}Cs は懸濁態粒子の表面張力や帯電量の影響を強く受けて吸着するため，吸着量は比表面積に比例することが知られている．例えば球状粒子を考えると，単位体積あたりの表面積である比表面積は $6/d$ であるので，粒径 d に反比例する．つまり，粒径の小さな懸濁態粒子ほど比表面積が大きく，^{137}Cs が付着しやすいことになる．

海底堆積層（表層）を構成する懸濁態粒子の粒度分布から求めた中央粒径 d_{50} の空間分布を見ると（図 5），全体的に海岸沿いの粒径は大きく，沖合では小さいことが分かる．海岸沿いにおいては概ね細砂が卓越しているが，防波堤内の Sta.1 ではシルト・粘土分が多く，粒径がかなり小さい．放射性核種の供給源となる新田川河口近くに位置する Sta.2，3 は，河口南側の Sta.4，Sta.5 と比較して中央粒径が小さく，高濃度の表層 ^{137}Cs が存在している（図 3）．このことから，中央粒径と ^{137}Cs 付着量には良好な負の相関があると判断される．なお，河口から約 10 km 地点の Sta.7 では，沖合であるにも関わらず例外的に中央粒径が大きく，懸濁態 ^{137}Cs 濃度もインベントリも小さい．

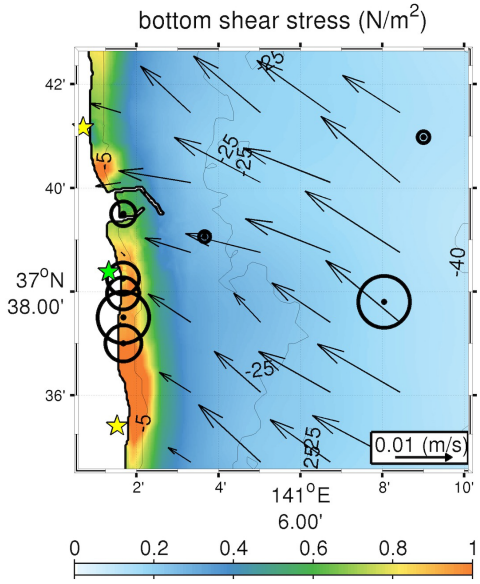


図 6　4 段ネストモデルによる計算期間 (10/1–11/30) の時間平均底面せん断応力 (カラー), 底層残差流速ベクトル, 円は中央粒径の観測値 (図 5 と同じ).

4. 考察

(1) 数値モデル再解析値を用いたメカニズムの検討

コアサンプリングの結果から，底質中の懸濁態 ^{137}Cs 濃度・インベントリはそれを吸着させている懸濁質の粒径別堆積量と密接な関係があることが示された．^{137}Cs 分布に強く影響する懸濁質の中央粒径分布は，当然ながら河川や海域堆積層を供給源とした混合粒径土砂の輸送・堆積過程の結果として形成されたものである．以下では，数値モデルの結果を用いて，海底面での再懸濁と沈降を支配する底面せん断応力，局所的な堆積侵食を決定づける土砂収支，海域の残差流による土砂供給源からの移流効果の 3 つの要素の寄与を検討することで，観測された ^{137}Cs 分布の形成機構を考察する．

(2) 底面せん断応力と再懸濁・沈降特性

底面せん断応力 τ_b は波－流れ共存場に対する Soulsby 式 [4] を用いて評価しており，底層位相平

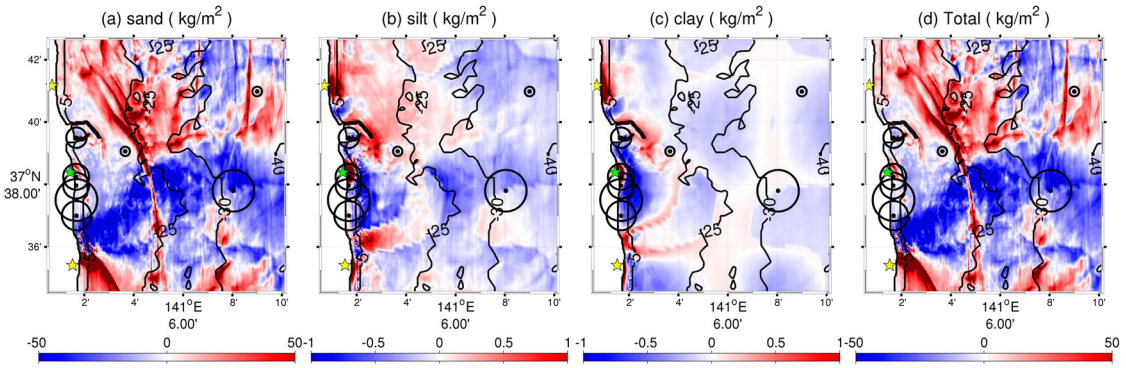


図 7　数値モデルによる 2013 年 10 月 1 日を基準とした 11 月 30 日の土砂堆積量空間分布 (kgm^{-2}). 左から, 細砂, シルト, 泥, および三画分合計値であり, 青は侵食, 赤は堆積を表す. 円の大きさは中央粒径観測値に対応 (図 5 と同じ).

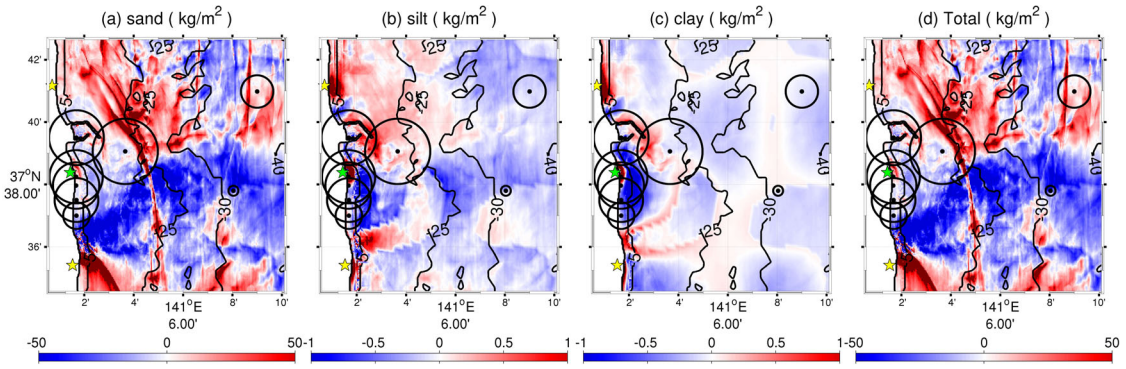


図 8　図 7 と同じ. ただし円の大きさは ^{137}Cs インベントリ観測値に対応 (図 4 と同じ).

均流による底面摩擦と，海底面に作用する波の軌道流速による底面摩擦の 2 つの効果により変化する． τ_b が限界せん断応力 τ_{cr} 以下の場合は，海水中の粒子はその沈降速度によって海底面に堆積するが，τ_{cr} を超えると堆積層表層の土砂が再懸濁し，海底面上の流れによって輸送される．粒径が小さいほど τ_{cr} も沈降速度も小さいので（表 2），粒径の小さな土砂ほど小さい τ_b（弱い外力）でも再懸濁し得る．

図 6 は，解析期間である 10/1 から 11/30 まで時間平均された底面せん断応力と底層残差流速の空間分布に，堆積層表層の中央粒径の観測値を重ねて表示したものである．底層では沖から岸に向かう残差流が卓越しており，解析期間を通じて平均的には岸向き底層土砂輸送が生じていたことが示唆される．平均底面せん断応力 τ_b は，波浪の作用が卓越する海岸沿いで大きく，沖合では小さい．全体的には τ_b が大きい場所ほど中央粒径が大きいことが分かる．また，防波堤内の遮蔽域や，河口前面海域では τ_b は相対的に弱く，粒径は小さくなる傾向にある．特に後者の河口前面海域は，河口テラス地形による波向の発散と，河口からの沖向き流れによる波高増幅という τ_b 変化に対する相反する 2 つのプロセスが想定される．モデルの

結果は，前者の機構による波浪減衰効果の優位性と，それに伴って τ_b 減少が卓越することを示している．以上のように，海底面に作用する τ_b と底質粒径には良好な相関関係があることが確認される．

(3) 局所的な土砂収支と懸濁質輸送特性

侵食•堆積は，3 次元的に海域を輸送された懸濁質フラックスの発散収束に対応している．つまり，

$$\rho_m(1-\lambda)\frac{\partial h_b}{\partial t} = \int_{-h}^{\eta} \nabla_H \cdot \left(\sum_{n=1}^{3} C_n \mathbf{u}_H\right) dz$$

という関係にある．ここで，h_b：（時間変動する）海底面高さの偏差，C_n：粒径クラス n 土砂（懸濁質）粒子の重量濃度（kg/m^3），n = 1, 2, 3：細砂・シルト・泥，$\mathbf{u}_H$：水平流速ベクトル（m/s），∇_H：水平空間偏微分演算子，η：海面水位（m），である．したがって，懸濁質の堆積・侵食量（すなわち h_b の時間積分値）は，土砂輸送水平発散の局所的な時間積分効果を表すことになる．

図 7 は計算期間全体で時間積分された粒径クラス別の土砂の堆積侵食量分布（重量換算値）と，観測による堆積層表層の中央粒径分布を示している．新田川河口域では沖合 10 km 程度まで全体的に侵食が卓越しており，沿岸域，原町火力発電所の北および東側海域，新田川河口域，その南方に位置する太田川河口周辺で堆積傾向にある．このとき，全体的に堆積域では粒径が小さく，侵食域では粒径が大きい．つまり，外力の強い沿岸域や，土砂輸送パターンの影響を受けて侵食される Sta.7 などの海域では粒径の大きな懸濁粒子が出現しやすく，懸濁物供給源である河口などの周辺の堆積傾向が強い場所では，粒径が小さくなることが分かる．

次に，同じ侵食堆積量分布に堆積層中の ^{137}Cs のインベントリ観測値を重ねてみると，今度は逆に堆積域で ^{137}Cs インベントリが大きく，侵食域では小さい（図 8）．特に原町発電所沖合海域に位置する Sta.6 は，新田川河口から離れているにも関わらず堆積傾向にあり，堆積域が領域北側から発電所防波堤に沿って南東方向へ伸びていることが分かる．この堆積域では底質粒径が小さいことから，シルト・泥の細粒分輸送・堆積が重要な役割を果たしていると考えられる．それを確認するために，細粒子が最も影響を受ける表層流のパターンを見る．図 9 は計算期間の 2 ヶ月間全体に対する時間平均表層流速（表層残差流）を表している．全体的に南南東方向への平均流が卓越しており，海岸線の湾曲部，大型海岸構造物（新田川河口から約 2 km 北に位置する原町火力発電所防波堤等），河口地形（太田川）などの影響を受けた強い沖向き流れが数か所で発現している．新田川周辺域では，その北側（真野川），南側（太田川）での出水の影響を含んだ沖向き流れ，防波堤を迂回するように発達する東寄りの表層流が見られ，構造物や河口地形，河川流出などが平均流構造を改変することが明確に示されている．防波堤沖側の Sta.6 は表層流が強い場所に位置していることから，北側海域からの細粒土砂輸送の影響を受け，弱い底面せん断応力によって細粒分の集積域が形成されたものと考察される．

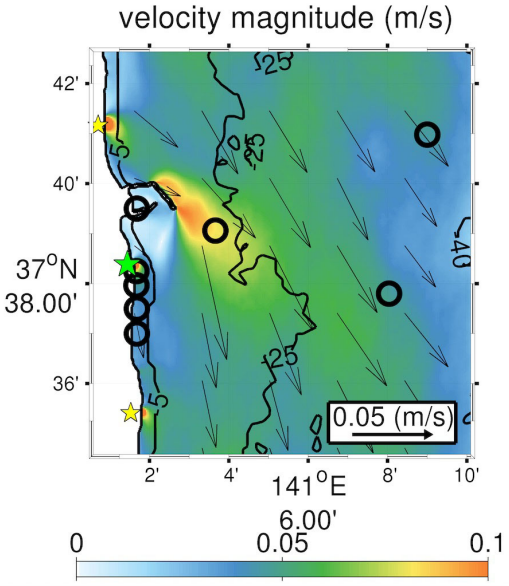


図 9　4 段ネストモデルによる計算期間 (10/1–11/30) の時間平均値として求めた表層残差流速の絶対値 (カラー , m/s) とベクトル．

5. おわりに

本研究では，2011 年 3 月に発生した福島第一原発事故を発端とした，新田川からの出水に伴う福島県沿岸域における懸濁態 ^{137}Cs 輸送•堆積特性に着目した解析を行った．特に 2013 年 10 月の台風 Wipha 通過に伴う出水イベント直後に実施された海底堆積物調査結果と，それを再現する高精度海洋モデルを用いた解析を行い，以下のような結論を得た．

- 現地観測結果から，河口や防波堤近傍を中心に高濃度の懸濁態 ^{137}Cs 堆積が生じていること，その分布は堆積層表層の中央粒径とよい相関があることが示された．
- 懸濁態 ^{137}Cs は，堆積層表層分布，コアデータを鉛直積分したインベントリ分布ともに同様な空間分布パターンを示していた．このことから，着目した 201326 号台風イベントだけではなく，過去の出水の履歴効果も今回の解析結果と同様のメカニズムで発生していたことが示された．
- 数値モデルによる底面せん断応力，残差流による懸濁質輸送，局所的土砂収支に対応する侵食・堆積パターンは，現地観測結果を定性的によく説明しており，モデルの妥当性を示すとともに観測による懸濁態 ^{137}Cs 分布パターンの形成機構について明確な解釈を与えた．
- 河口や海岸構造物近傍海域では細粒土砂が堆積し，吸着した ^{137}Cs は高濃度化する．一方で，波浪などの外力や土砂輸送パターンの影響を受けて侵食傾向にある海域では粗粒化が進展し，懸濁態 ^{137}Cs 濃度およびインベントリは逆に低くなる．

なお，本モデルの解説および解析結果は徳永ら [6]，Uchiyama ら [7] に詳しい．興味のある向きはそれらも併せて参照いただきたい．

謝辞：本研究の遂行にあたり，科研費補助金（15H04049，18H03798），科研費基金（15KK0207）および弘前大学被ばく医療総合研究所・重点共同研究 D（2017•2018 年度）の援助を受けた．また，モデル開発・データ取得・解析・解釈・論文作成などの様々な局面において，津旨大輔，恩田祐一，山田正俊，東晃平，上平雄基，徳永夏樹，山西琢文，小谷瑳千花，立田穣，岩崎理樹，池原研，石丸隆，伊藤友加里，渡邉豊，福田美保，三角和弘，清水康行の各氏に多大なるご助力をいただいた．ここに記して深甚なる謝意を申し上げる次第である．

参考文献

[1] Nagao, S., Kanamori, M., Ochiai, S., Inoue, M., and Yamamoto, M.: Migration behavior of ^{134}Cs and ^{137}Cs in the Niida River water in Fukushima Prefecture, Japan during 2011-2012. J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 303 (2), pp. 1617-1621, 2015.

[2] 内山雄介, 東晃平, 小谷瑳千花, 岩崎理樹, 津旨大輔, 上平雄基, 清水康行, 恩田裕一：台風 201326 号出水に伴う新田川起源懸濁態放射性核種の沿岸域でのインベントリ解析, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I_685-I_690, 2017.

[3] 山西琢文, 内山雄介, 岩崎理樹, 清水康行, 津旨大輔, 三角和弘, 恩田祐一：出水イベントに伴う福島新田川河口周辺海域における懸濁態放射性核種の海洋分散について, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I_757-I_762, 2016.

[4] Soulsby, R. L.: Bed shear-stresses due to combined waves and currents, In: Advance in Coastal Morphodynamics, Eds.: M. Stive *et al*., pp. 4-20-4-23, Delft Hydraul., Delft, Netherlands, 1995.

[5] He, Q. and Walling, D. E.: Rates of overbank sedimentation on the floodplains of British lowland rivers documented using fallout ^{137}Cs, Geografiska Annaler., Ser. A, Vol. 78, No. 4, pp. 223-234, 1996.

[6] 徳永夏樹・内山雄介・津旨大輔・山田正俊・立田穣・石丸隆・伊藤友加里・渡邉豊・池原研・福田美保：福島沿岸域における台風通過時の出水イベントに伴う懸濁態放射性核種の輸送堆積過程に関する解析, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 75, No. 2, pp. I_667-I_672, 2019.

[7] Uchiyama, Y., Tokunaga, N., Aduma, K., Kamidaira, Y., Tsumune, D., Iwasaki, T., Yamada, M., Tateda, Y., Ishimaru, T., Ito, Y., Watanabe, Y.W., Ikehara, K., Fukuda, M. and Onda, Y., A storm-induced flood and associated near-shore dispersal of the river-derived suspended 137-Cs, Sci. Total Environ., Vol. 816, 151573, 2022.