東京湾羽田沖における泥質物の堆積分布特性を考慮した 底泥輸送モデルの構築

Development of fine sediment transport model considering characteristics of deposited muddy sediments off Haneda in Tokyo Bay

中川康之¹・灘岡和夫²・八木 宏³・二瓶泰雄⁴・木村彰宏⁵・久保田踊児⁵・吉田行秀⁶

Yasuyuki NAKAGAWA, Kazuo NADAOKA, Hiroshi YAGI, Yasuo NIHEI, Akihiro KIMURA
Yoji KUBOTA and Yukihide YOSHIDA

Very soft mud with high water content of over 400 % is prevailing in the deeper area off Haneda in the Tokyo Bay and behavior of the mud is crucial for the water environment around the area. The fine sediment transport processes of such muddy sediments were modeled considering the sedimentary characteristics such as vertical profiles of mud concentration near the bottom surface. Assuming the near surface muddy sediment as Bingham fluid, analytical solution for horizontal mass flux of the mud layer was newly derived. The equation was also applied to estimate the sediment transport during the observed typhoon event in the Tokyo Bay with a 3-D circulation model (POM) and wind wave model (SWAN). The results showed applicability of the model to simulate the muddy sediment transport process during the storm event.

1. はじめに

内湾域におけるシルト・粘土のいわゆる泥分の堆積域には、栄養物質や有機物なども高濃度に蓄積されることが多く、水質や生物への影響を含めた水域環境の動態を予測するうえでは、底泥界面を通じた物質の輸送機構の把握が重要となる。特に河口域周辺では、出水イベント等の影響により底質環境が時空間的に大きく変化する場であり、それに応じて水質や生物生息条件などの水域環境の変化も生じているものと考えられる。河口沿岸部における底泥挙動については、河川出水に伴う懸濁物供給や高波浪の影響により、海底面近傍に形成される高濁度泥水の流動 (Fluid mud) が生じるなど、底泥特有の輸送過程が河口域の堆積物分布の形成を支配する場合がある (たとえば Traykovsky ら, 2007)。また、高波浪や河川出水等の間欠的なイベントに依存することの多い河口沿岸域の堆積物の移動や、それに伴う堆積環境の変化を把握するには、長期的かつ集中的な現地観測の実施による現象の解明が必要である。

これに対し、本研究では東京湾奥部の多摩川河口沖周辺における、水域環境の変動把握を目的としたモニタリング調査 (羽田周辺水域調査研究委員会, 2010) を通じて、同海域における底質環境の動態について解明を進めてきた。これまでの調査により、対象海域での底泥堆積に関する基本的な空間分布特性 (中川ら, 2007) をはじめ、東京湾へのSS負荷が通常時の6.6年分相当と推定される大規模な出水 (二瓶ら, 2008) と高波浪を伴った台風イベント時における、底泥移動の実態を観測データに基づき明らかとした (中川ら, 2010)。さらに、このような底泥移動に起因する台風前後の底質性状の変化と底生生物相の変化との関係も明らかとなった (有路ら, 2010, 2011)。

一方、水質・生態系モデルへの応用も見据えた底泥挙動の予測を可能とするシミュレーション・モデルの開発も進めつつある。本論文では、高含水比底泥の特徴を考慮して導出された泥の輸送量評価式 (中川ら, 2011; Nakagawa ら, 2012) を用いて、さらに3次元流動モデルならびに波浪推算モデルにより得られる外力場の時空間分布を考慮して、東京湾における台風擾乱時を想定した湾内の底泥輸送計算を試みた。

2. 対象海域の底泥堆積分布と挙動の特徴

本研究の観測対象海域である東京湾羽田 (多摩川河口) 周辺域の底質分布の特徴として、水深が10m以深の沖合では泥分が広範囲に分布する (中川ら, 2007)。また、羽田D滑走路建設以前の2006年5月から7月にかけて行われた、広域底質調査結果を基にして図化した堆積物表

1 正会員	工修	(独法) 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究チームリーダー
2 フェロー	工博	東京工業大学大学院 情報理工学研究科 情報環境学専攻 教授
3 正会員	博(工)	(独法) 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ長
4 正会員	博(工)	東京理科大学理工学部土木工学科准教授
5 正会員	工修	(株) ハイドロソフト技術研究所
6		国土交通省関東地方整備局東京湾口航路事務所 航路監視課長 (前 横浜港湾空港技術調査事務所 環境課長)

図-1 羽田沖周辺での底質含水比の分布と連続観測点 (Stn.A) の位置 (黒点は底質調査点を表す)

図-2 底泥表層近傍における底泥濃度の鉛直分布と主要な輸送プロセスの模式図

層の含水比の空間分布 (図-1) に示すように、水深が深い沖合ほど泥中の含水比が高く、400%を超える極めて流動性の高い流動泥が存在する。また、底泥表層から10cm程度下層からは圧密泥へと遷移する場合が多く、底泥表層部から深さ方向に急激に濃度が変化する鉛直構造 (図-2) も重要な堆積特性のひとつとして注目すべき点である。

一方、前述の2007年9月における台風擾乱時にStn.A (図-1) にて観測された海底近傍での流速、濁度、底面高さ変動等のデータを用いた土砂収支解析の結果 (中川ら, 2010) によると、底泥の侵食・堆積を生じさせる底泥の移動プロセスとして、巻き上げフラックス (図-2中 F_z) や沈降フラックス (同 F_D) による局所的な鉛直輸送のみならず、底泥層内 (図-2中の灰色部分) の表層部で生じる水平輸送 (図-2中に示す底面せん断応力 (τ_b) により生じる速度 u_m での輸送) の重要性が示されている。図-3は台風通過時の土砂収支解析の結果から、底面高さ変動 (図-3 (b) 中の黒線: Z_{obs}) に対する鉛直輸送による変動成分 (同黒点線: Z') と残差成分 (同赤線: Z_{rsd} ($= Z_{obs} - Z'$)) について、波・流れによる外力のピーク期間を含む9月6日18時から24時間の変化をそれぞれ示したものである。同図 (a) の底面せん断応力については、底面上10cmで測定された流速データから求めた波浪によ

図-3 台風イベント時に観測された羽田沖での海底面への作用外力 (底面せん断応力) と底泥面高さの変化

る底面せん断応力 (τ_w)、平均流による底面せん断応力 (τ_c)、さらに両者の相互作用を考慮して求まる波と流れによる最大底面せん断応力 (τ_{cw}) (中川ら, 2011) を示している。このような擾乱時に観測された底面高さの変動において、鉛直輸送以外の要因で生じた残差分 (Z_{rsd}) は底面高さの上昇に寄与しており、すなわち観測点で生じた底泥の堆積は主に水平輸送により生じ、その寄与分は約6cmの厚さに相当することを図-3は示している。

3. 底泥輸送量の算定式の導出

著者ら (中川ら, 2011; Nakagawaら, 2012) は先に、流動泥の存在や底泥濃度の鉛直分布などの堆積特性を考慮したモデル化により、泥層内の流速分布や質量輸送フラックスの算定式を導出している。そこでは、泥層内の底泥流速 (u_m) は、泥層をビンガム流体と仮定することにより、ビンガム流体に対するせん断応力 (τ) と変形速度を関係づける抵抗則 (式 (1)) を鉛直積分することにより導出される。

$$\tau = \tau_y \operatorname{sgn} \frac{\partial u_m}{\partial z} + \mu \frac{\partial u_m}{\partial z}, \quad \text{if } |\tau| \geq \tau_y \quad \dots\dots (1)$$

ここに τ_y : 降伏応力, μ : 泥の粘性係数である。特に本研究では、底泥の質量濃度 ($C_m(z)$) の鉛直分布に対して式 (2) で表される近似関数 (Fodaら, 1993) と、濃度に依存した降伏応力 ($\tau_y(z)$) の推定式 (式 (3), van Kessel・Kranenburg, 1996) をそれぞれ導入することにより、現地で見られる底泥の鉛直分布特性を取り込んだモデルとなっている。

$$C_m(z) = C_0 + \Delta C (-z/D)^{0.25} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 C_0 は底泥表面の質量濃度、 ΔC は泥深 D における表面濃度からの増分である。また、 z は底泥面を基準と

して、上向きを正とする鉛直座標を意味する。

$$\tau_y(z) = c_1 \left[\frac{C_m(z)}{\rho_s} \right]^{c_2} \dots \dots \dots (3)$$

ここに ρ_s : 泥粒子の密度、であり定数 c_1 および c_2 については van Kessel・Kranenburg (1996) を参考に、以下の計算ではそれぞれ $c_1 = 1,000\text{Pa}$, $c_2 = 3$ とした。これにより泥層内の流速分布式と、底泥濃度の鉛直分布を考慮することにより、最終的に底泥の水平方向の輸送フラックス (q_m) が以下のように定式化される。

$$q_m(x, y, t) = \int_{-h_b}^0 C_m(x, y, z, t) u_m(x, y, z, t) dz$$

$$= \frac{u_m}{|u_m|} \frac{D^2}{\mu} \left[\left(|\tau_b| - \alpha_0 \left(\frac{1}{2} C_0 h_y'^2 + \frac{16}{45} \Delta C h_y'^9 \right) - \alpha_0 \alpha_1 \left(\frac{4}{9} C_0 h_y'^2 + \frac{8}{25} \Delta C h_y'^5 \right) \right) \right.$$

$$\left. + \frac{u_m}{|u_m|} \frac{D^2}{\mu} \left[-\alpha_0 \alpha_2 \left(\frac{2}{5} C_0 h_y'^5 + \frac{16}{55} \Delta C h_y'^{11} \right) - \alpha_0 \alpha_3 \left(\frac{4}{11} C_0 h_y'^{11} + \frac{4}{15} \Delta C h_y'^3 \right) \right] \right] \dots \dots \dots (4)$$

ここに

$$\alpha_0 = c_1 \left(\frac{C_0}{\rho_s} \right)^3, \alpha_1 = 3 \frac{\Delta C}{C_0}, \alpha_2 = 3 \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^2, \alpha_3 = \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^3 \dots (5)$$

$$h_y' = \frac{h_y}{D} = \left(\frac{C_0}{\Delta C} \right)^4 \left\{ \left(\frac{\tau_b}{c_1} \right)^{1/3} \frac{\rho_s}{C_0} - 1 \right\} \dots \dots \dots (6)$$

である。また h_y は作用する底面せん断応力 ($|\tau_b|$) と泥の降伏応力 (τ_y) がつりあう位置の深さである。これにより、式 (2) で表される泥の質量濃度分布の近似関数中の係数を与えれば、泥表面に作用する底面せん断応力の関数として泥層内の水平輸送量が式 (4) により求められることになる。

4. 東京湾底泥輸送計算への応用

(1) 外力と底泥分布の条件

東京湾を対象とした流れ場および波浪場の計算結果を利用して、上記で示した算定式を用いた湾内の底泥輸送計算を試みた。POMモデルをベースとした3次元流動モデルにより、湾内主要9河川からの淡水流入と風場を考慮した潮流計算を行い、また東京湾周辺の気象局での風のデータから作成した1時間間隔の海上風のデータを用いて、SWANモデルによる波浪推算を行った。いずれの計算も、水平格子が約500mの空間解像度で東京湾全体を対象とし、ここでは2007年9月7日前後の台風通過時における1時間おきの計算結果を底泥輸送計算に用いた。

観測点 (Stn.A) に相当する計算格子点での、流れおよび波浪による底面せん断応力の計算結果について、図-2 (a) の観測結果と同様に流れによる底面せん断応力 (τ_c)、波浪による底面せん断応力 (τ_w)、および波と流れによる最大底面せん断応力 (τ_{cw}) を図-4に示す。図-2 (a) の観測結果と比較すると、計算精度に改善の余地は残される

図-4 数値計算による底面せん断応力の計算結果

ものの、台風通過時の底面せん断応力の増大傾向が、おおむね再現されていることがわかる。なお、底泥輸送量の計算においては、式 (7) により算定される波と流れの相互作用を考慮した平均底面せん断応力 (τ_m) (Soulsby, 1997) を用いており、この値も図-4には示してある。

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \dots \dots \dots (7)$$

一方、式 (4) による底泥輸送量の計算においては、底泥濃度の鉛直分布構造を特徴づける式 (2) 中の係数 (C_0 : 底泥表面の質量濃度, ΔC : 泥深 D における濃度増分) を計算点毎に与える必要がある。今回の計算では、まず底泥表面部での濃度 (C_0) は、既往の現地観測結果を基に作成した湾内の含水比分布から与えるものとした。すなわち、本調査プロジェクトにより羽田沖周辺を対象に得られている底泥表層の含水比データ (図-1) に加え、東京湾内広域での観測データ (岡田・古川, 2005) を参考に、計算格子に対応した表層泥含水比マップを作成し (図-5)、各計算格子の値を質量濃度に換算して用いた。また、深さ方向の底泥濃度の増分に関するパラメータ (ΔC および D) の決定に際しては、羽田沖底泥モニタリングで得られた各調査点での泥深0-1cm層と5-15cm層の含水比を比較すると、図-6に示すような両者間の相関関係が得られることを考慮した。この関係から、各計算格子点での表層泥の含水比 (図-5) に対する深部 ($D = 15\text{cm}$) での含水比を求め、質量濃度の増分 (ΔC) の値を設定した。なお、今回の計算ではこれらの底泥含水比の空間分布は計算期間中一定とした。

(2) 計算結果と考察

底面せん断応力が最大となった9月7日午前4時における、底面せん断応力の平面分布を図-7に、その時の泥輸送フラックスの平面分布を図-8に示す。これによると、羽田沖にみられる高含水比泥の堆積域において南西方向への泥輸送が顕著であり、輸送方向については当時の海底面直上での流れの観測結果 (中川ら, 2008) と一致した結果となっている。このような輸送量の空間分布を基に、土砂の収支関係から計算メッシュ点毎の底面高さの

図-5 底泥輸送計算に用いた底泥表層含水比の分布

図-6 コアサンプル分析結果に基づく底泥表層 (0-1cm) と泥深5-15cm層における含水比の比較

変動量を計算し、台風通過時の9月6日午後8時から9月7日午前8時までの12時間で生じた底面高さ変動量の空間分布を示したものが図-9である。泥輸送の卓越方向と直交する帯状の侵食・堆積域が交互にみられ、水平輸送に伴う泥の発散および収束域が示されていることがわかる。また連続観測点 (Stn.A) に該当する計算格子点における、同期間での泥輸送フラックスと輸送量収支に基づく底面高さの時系列変動を図-10に示す。南方方向への輸送が顕著となる際に底面高さの上昇が生じ、また擾乱時を通じて堆積となる傾向は図-3 (b) で示した観測結果に基づく水平輸送分の寄与の推定結果と一致している。ただし、その変動量について、観測結果では 10^{-2} mのオーダーであるのに対して、計算結果では 10^{-3} mのオーダーとなり、1桁の乖離が認められる。この点については、本計算では水平メッシュが約500mの解像度であるのに対し、底泥輸送の速度が数cm/sのオーダーであるため、計算格子ごとの土砂収支を計算するには、空間分解能が不十分であることが原因のひとつとして考えられる。そ

図-7 流れと波による平均底面せん断応力 (τ_m) の分布

図-8 泥層内の底泥輸送フラックス計算結果

の他にも、底面せん断応力のピーク時間帯と堆積がみられる時間帯が観測値と異なるなど、他にも改善すべき点が見受けられる。これらの点については、より詳細な格子間隔での計算や、ここでは考慮していない河川供給土砂の河口斜面部での重力流輸送の導入など、計算条件の改良がさらに必要と考えられる。

5. おわりに

内湾域の環境変動に密接に関与する底泥挙動を予測可能なシミュレーション・モデルの開発に向けて、東京湾羽田沖で実施してきた現地観測結果をふまえ、現地底泥の堆積分布や挙動の特徴を反映させたモデル化を行った。底面せん断応力の作用に対する底泥表層部の水平輸送量の評価式を導入し、東京湾での台風通過に伴う擾乱時の流れと波の数値計算結果を用いた底泥の輸送計算を試みた。底面せん断応力場に対応した水平輸送フラックスの空間分布が計算され、水平輸送の寄与による底泥侵

図-9 泥層内の底泥輸送による底泥面移動量の計算結果（暖色：堆積，寒色：侵食）

食・堆積域の空間分布が推定できることを示した。ただし、現地観測で確認されている底泥面高さの変動量と比較する限り、ここでの計算結果との間には1オーダーの差異（計算では堆積量が過小評価）がみられるなどの問題点が示された。対象とする現象の時空間スケールに応じた計算分解能の改善や、今回の計算では考慮していない他の輸送プロセス（例えば河川出水に伴う懸濁物供給と河口沖斜面での重力流的輸送など）の取り込みなど、本モデルの改良をさらにすすめる予定である。

謝辞：本調査は国土交通省主催の羽田周辺水域環境調査研究委員会（委員長：風呂田利夫東邦大学理学部名誉教授）での活動の一部をとりまとめたものである。当委員会における委員諸氏との議論において、有益な助言等を頂いた。底泥含水比マップの作成に際しては、国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋・防災研究部海洋環境研究室（岡田知也室長）より湾内広域での底質分析データを提供頂いた。本研究の一部は科研費・基盤研究C（研究代表者：中川康之）により実施した。

参 考 文 献

- 有路隆一・八木 宏・灘岡和夫・中川康之・小川浩史・下迫健一郎・木村俊介（2010）：東京湾多摩川河口周辺域における底質環境の時空間変動特性，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.446-450。
- 有路隆一・八木 宏・灘岡和夫・風呂田利夫・中川康之・鈴木紀慶（2011）：多摩川河口前置斜面における出水前後の底質環境と底生生物群集の変動，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，pp.1_851-1_855。
- 岡田知也・古川恵太（2005）：東京湾沿岸域における音響装置を用いた詳細な底質分布図の作成とベントス生息状況，海岸工学論文集，第52巻，pp.1431-1435。

図-10 Stn.Aにおける泥輸送フラックスと底泥面高さの時系列変化（計算結果）

- 中川康之・有路隆一・松坂省一・諸星一信・八木 宏・灘岡和夫・古殿太郎・大野幸正・島崎哲也（2007）：多摩川河口沿岸域における底泥の堆積分布特性の把握に関する現地調査，海岸工学論文集，第54巻，pp.1031-1035。
- 中川康之・有路隆一・松坂省一・諸星一信・八木 宏・灘岡和夫・古殿太郎・大野幸正・田中 晋（2008）：東京湾多摩川河口沖における底泥の巻き上げに関する現地観測，海岸工学論文集，第55巻，pp.516-520。
- 中川康之・有路隆一・灘岡和夫・八木 宏・下迫健一郎・白井一洋（2010）：東京湾羽田沖での現地観測に基づく台風来襲時における底泥の侵食・堆積量の評価，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 66，No. 1，pp.441-445。
- 中川康之・灘岡和夫・八木 宏・有路隆一・米山治男・白井一洋（2011）：Fluid mud層の存在を考慮した底泥の巻き上げと水平移流のモデル化に関する基礎的検討，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，pp.1_461-1_465。
- 二瓶泰雄・坂井文子・重田京助・灘岡和夫・八木 宏・諸星一信・鈴木信昭・松坂省一・有路隆一・峯 浩二（2008）：2007年台風9号出水時における多摩川の土砂・栄養塩・有機物負荷特性，河川技術論文集，第14巻，pp.473-478。
- 羽田周辺水域調査研究委員会（2010）：羽田周辺水域環境調査研究の取り組み～調査研究の中間成果報告～，161 p。
- Foda, M. A., J. R. Hunt and H.-T. Chou (1993): A nonlinear model for the fluidization of marine mud by waves, Journal of Geographical Research, Vol. 98, No. C4, pp.7039-7047.
- Nakagawa, Y., K. Nadaoka, H. Yagi, R. Arijii, H. Yoneyama and K. Shirai (2012): Field measurement and modeling of near-bed sediment transport processes with fluid mud layer in Tokyo Bay, Ocean Dynamics, Vol. 62, pp. 1535-1544, DOI 10.1007/s10236-012-0570-4.
- Soulsby, R. L. (1997): Dynamics of marine sands, Thomas Telford Publications, 249 p.
- Traykovski, P., P. L. Wiberg, and W. R. Geyer (2007): Observations and modeling of wave-supported sediment gravity flows on the Po prodelta and comparison to prior observations from the Eel shelf, Continental Shelf Research, Vol. 27, pp.375-399.
- van Kessel, T. and C. Kranenburg (1996): Gravity current of fluid mud on sloping bed, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 12, pp.710-717.