

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：82707

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560617

研究課題名(和文) Fluid mud層を考慮した底泥再懸濁フラックスの評価手法の検討

研究課題名(英文) Estimation method for sediment flux of fine sediment with fluid mud layer

研究代表者

中川 康之 (NAKAGAWA, YASUYUKI)

独立行政法人港湾空港技術研究所・その他部局等・その他

研究者番号：30360762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：内湾域に堆積する泥質物の移動は、地形変化やにごりの発生等の水底質環境への影響に密接にかかわっている。底泥移動プロセスが泥の堆積状態に依存するため、統一的なモデル化には至っていないことから、特に高含水比底泥(Fluid mud)の存在を考慮した泥質物の移動量の評価方法の確立を目指した。現地観測データや底質試料分析データに基づき、含水の高い底泥挙動の検討をふまえ、その特徴を反映させたモデルを構築し、外力作用に伴う底泥の移動量を算定する予測手法を開発した。さらにモデル化において、底泥の輸送において重要な因子となる波浪外力の評価方法についても、確率モデルによる設定方法を新たに提案した。

研究成果の概要(英文)：This study propose models for the key processes of fluid mud dynamics, including vertical and horizontal fluxes of the muddy sediment. The diffusion flux model delivers quite reliable results for estimating erosion flux from the top of fluid mud layers under the comparison with the time series data measured by an acoustic Doppler velocimeter (ADV) system in the field. This study also derives analytical solutions, based on the Bingham fluid concept, of advection flux in the fluid mud layer on which external shear stress force is applied. Furthermore, estimation method of force condition that is crucial for simulation of sediment transport processes was also improved incorporating irregularity of wave effects on the bottom shear stress with a stochastic approach. The derived model is applied to estimate sediment transport rate combining with the fluid mud transport model showing reasonable results rather than a conventional methods with constant bottom shear stresses.

研究分野：海岸工学

キーワード：底泥 Fluid mud 底質輸送 含水比 巻き上げ ビンガムモデル 波浪外力

1. 研究開始当初の背景

陸域負荷の大きな内湾域では、底泥中に一次生産起源の有機物や栄養物質が高濃度で蓄積しており、水・底質環境の変化を予測する上では底泥-海水間の物質フラックスの適切な評価が必要となる。しかし、巻き上げ等の底泥の動的な過程は、物質フラックスの変動を支配する重要な要素でありながら、必ずしも巻き上げ現象に関する十分な知見を取り込んだ底泥-海水間での物質フラックスの評価手法の確立には至っていない。

特に環境アセスメントなど、沿岸域の利用に伴う将来的な内湾域環境の変化を予測するうえでは、このような泥質堆積物の挙動を考慮にいたした、水・底質環境の動態予測が重要とされているものの、そのような予測手法は本研究課題の申請時点では確立されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、内湾域の海底で広くみられる高含水比底泥 (Fluid mud) に注目し、その輸送に関する力学的モデルの構築を目的とする。有機泥の堆積が著しい海域における現地底泥を対象とした、堆積泥表層のレオロジー特性に関する鉛直分布構造を把握し、それらを考慮した輸送モデルの構築を行う。さらに、流れや振動流などの外力作用下における Fluid mud 層界面の動的挙動を調べるための現地観測等による観測データを活用した検証を通じて、構築したモデルの妥当性の評価を行った。

3. 研究の方法

(1) 堆積底泥の鉛直分布構造の把握と巻き上げフラックスのモデル化

東京湾羽田沖より現地の底泥コアサンプルを採取し、スライスサンプルの分析試験を行い、主に粒度、含水比の鉛直構造をしらべた。これら分析結果による鉛直分布構造を反映させて、底泥表層の高含水比底泥 (Fluid Mud) の巻き上げフラックスの評価方法を検討した。ここでは、本研究で対象とする表層付近が非圧密泥の巻き上げ現象は、海水中の乱れによる海水-高含水比泥 (高濁度水) の密度成層間における混合現象と考えることにより、鉛直輸送量のうち上方への輸送量は拡散フラックス (F_z) として次式により表現することができる (たとえば、Ross・Mehata, 1989)。

$$F_z = -K_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

ここで拡散係数 K_s は、中立時の拡散係数 K_0 とリチャードソン数 (Ri) の関数として次式で表される。

$$K_s = K_0 (1 + \beta Ri)^{-\alpha} \quad (2)$$

$$Ri = -\frac{g (\partial \rho / \partial z)}{\rho (\partial u / \partial z)^2} \quad (3)$$

ここに g : 重力加速度, ρ : 上層水あるいは泥層の密度であり、定数 α, β はそれぞれ 1.5, 3.33 として、ここでは計算を行った。SS 濃度や流速に関する時系列データを参照して上式により得られる鉛直フラックスを算定し、巻き上げフラックスの観測値との比較を通じて、その再現性の程度について検証を行った。

(2) Fluid mud 層の水平フラックスのモデル化
一方、泥層内の水平輸送量の評価するため、ここでは媒体をビンガム流体と考えると、せん断応力と変形速度を関係づける抵抗則が次式により表される。

$$\tau = \tau_y \operatorname{sgn} \frac{\partial u_m}{\partial z} + \mu \frac{\partial u_m}{\partial z}, \text{ if } |\tau| \geq \tau_y \quad (5a)$$

$$\mu \frac{\partial u_m}{\partial z} = 0, \text{ if } |\tau| < \tau_y \quad (5b)$$

ここに τ_y : 降伏応力, μ : 泥の粘性係数である。泥層内の流動の評価として、ニュートン流体を仮定した多層モデルによる泥層内の質量輸送を検討したものがいくつかみられる (たとえば、柴山ら (1985), 中野ら (1987))。これに対し本研究では、底泥の極表層に Fluid mud 層を有するという堆積特性を反映させつつも、将来的な 3 次元モデルとの結合時における計算負荷の軽減を考慮して、できる限りシンプルな形で底泥層の流動を表現することを目指す。そこで、ここでは底泥表層から連続的に増大する泥の濃度分布と、泥層内のビンガム特性を考慮した場合の、基本的な外力場に対する泥層内流速の評価方法について検討を行った。

(3) 台風時における東京湾内の底泥輸送シミュレーションへの応用

本研究により導出された底泥輸送フラックスの算定方法を活用し、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することによる、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。ここでは、本研究で新たに開発した、波の不規則変動を考慮した底面せん断応力の確率的評価手法も取り込んだ底泥移動計算も試みた。

4. 研究成果

(1) 現地堆積底泥の鉛直分布構造の特徴

東京湾羽田沖周辺で採取された底泥コアサンプルによる含水比の鉛直分布に関する測定結果を図-1 に示す。これらの採取地点の堆積物表層の底質は、いずれも 98% 以上がシルトおよび粘土分により構成されている。含水比は河口部 (Stn. A) よりも沖合で高く、特に Stn. B および C の表層近傍 5cm 程度では 400% を超え、いわゆる Fluid mud 層がみられる。泥表層の含水比が極めて高い状態であるものの、海水の動きによる巻き上げ等が生じていない条件下では、海水と泥層間には明確な濃度界面が存在している。

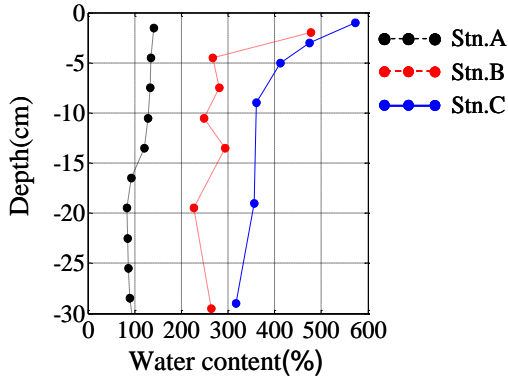


図-1 現地底泥中の含水比の鉛直分布

(2) 巻き上げフラックスの計算精度の検証

ここでは台風擾乱時における底泥巻き上げフラックスの観測値(中川ら, 2010)を用いて, 巻き上げフラックスの評価手法の精度検証を行った. 巻き上げフラックスの観測値とは, 底面上 10cm を対象とした超音波式 3 次元流速計(ADV)の計測により, 超音波の反射強度から推定した SS 濃度と流速の乱流成分から Reynolds フラックスとして求めたものである. 式(1)によるフラックスの算定においては, 上記観測で得られた計測諸量から次式より Ri 数を評価した.

$$Ri' = -\frac{g\Delta h(\rho_{10} - \rho_b)}{\tau_{b_max}} \quad (4)$$

ここに, ρ_{10} : 底面上 10cm の SS 濃度(測定値)を考慮した海水密度, ρ_b : 底泥表層の密度であり, 底泥表層密度については連続的な時系列データの取得は困難であることから, ここではコアサンプルの底質分析で得られた底泥密度を参照して一定値を与えた. また, 本来の Ri 数(式(3))においては速度勾配により表される乱れの大きさに対して, ここでは底面上 10cm での ADV 測定から算定された波と流れによる底面せん断応力(τ_{b_max})を用いることにより, 平均流だけでなく波動流速による乱れの影響も考慮した. なお, 中立時の拡散係数 K_0 については, 観測値との比較を通じて求めた値を全期間一定値として与えた. 巻き上げフラックスの計算結果と観測値を比較したものが図-2 であり, 本手法により精度良く再現できることが示された.

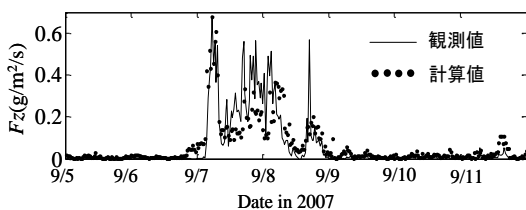


図-2 底泥巻き上げフラックスの計算結果

(3) 水平フラックス算定式の導出

現地泥の底質分析から得た濃度分布をある分布関数(式(5), Foda ら, 1993)により近似し, さらに濃度と降伏値の間での経験的な相関式(たとえば van Kessel・Kranenburg, 1996)を用いると, 降伏応力(τ_y)の鉛直分布関数は式(6)のように表される. これらを式(7)に代入することにより, 泥層内の流速分布が解析的に得られる. なお, 粘性係数(μ)も泥濃度に依存すべきパラメータであるが, まずは降伏値の鉛直変化に依存した流速分布への影響を評価するため, ここでは一定値(0.5Pa·s)として計算を行った.

$$C_m(z) = C_0 + \Delta C(-z/D)^{0.25} \quad (5)$$

$$\tau_y(z) = c_1 \left[\frac{C_m(z)}{\rho_s} \right]^{c_2} \quad (6)$$

$$u(z) = \frac{1}{\mu} \int_{-h_y}^z [\tau_b - \tau_y(z)] dz \quad (7)$$

これにより, 泥層内の水平輸送量が上層に作用する底面せん断応力(τ_b)の関数として以下のように導出される.

$$u(z) = \frac{1}{\mu} [(\tau_b - \alpha_0)(z + h_y) + \alpha_0 \alpha_1 \frac{4}{5} D \left(\frac{(-z)^{5/4} - h_y^{5/4}}{D^{5/4}} \right) + \alpha_0 \alpha_2 \frac{2}{3} D \left(\frac{(-z)^{3/2} - h_y^{3/2}}{D^{3/2}} \right) + \alpha_0 \alpha_3 \frac{4}{7} D \left(\frac{(-z)^{7/4} - h_y^{7/4}}{D^{7/4}} \right)] \quad (8)$$

$$\alpha_0 = c_1 \left(\frac{C_0}{\rho_s} \right)^3, \alpha_1 = 3 \frac{\Delta C}{C_0}, \alpha_2 = 3 \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^2, \alpha_3 = \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^3 \quad (9)$$

(4) 現地海域を対象とする底泥輸送シミュレーションへの応用

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 SWAN モデルにより, 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波浪推算を行った. いずれも水平格子が約 500m の空間解像度で東京湾全体を対象として行い, 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.

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, 泥輸送フラックスの平面分布を図-3 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変動量を計

算し、台風通過時の9月6日20時から9月7日08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-4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。さらに波浪が卓越する際には、底面せん断応力の評価に際して、軌道流速の変動分布を確率モデルで取り込んだ外力評価手法を導出し、その妥当性も確認した(中川ら、投稿中)。

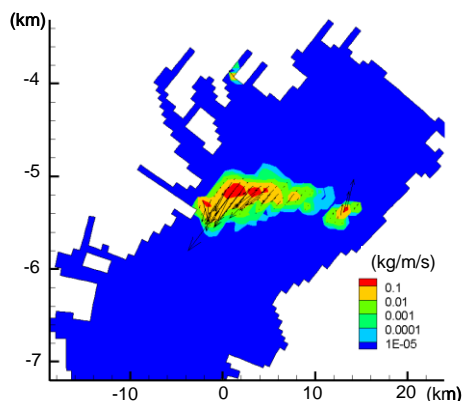


図-3 泥層内の底泥輸送フラックス計算

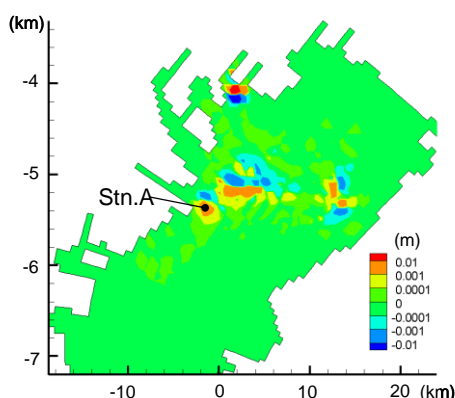


図-4 泥層内の底泥輸送による底泥面移動量の計算結果(暖色：堆積，寒色：侵食)

<引用文献>

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.
 Ross, M. A. and A. J. Mehata (1989): On the mechanics of lutoclines and fluid mud, *Journal of Coastal Research*, SI No.5, pp.51-61.
 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.
 柴山知也・滝川浩・堀川清司(1985)：波による軟らかい底質粘土の質量輸送，第32回海岸工学講演会論文集，pp.258-262。
 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.

中野晋・鶴谷広一・鷹濱潤(1987)：波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について，*港湾技術研究所報告*，第26巻，第2号，pp.171-212.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

中川康之・灘岡和夫・八木宏・二瓶泰雄・鈴木高二朗 (2014)：長期モニタリングに基づく内湾河口域における地形変化特性の把握，*土木学会論文集 B2(海岸工学)*，Vol. 70, No. 2 .pp.I_621-I_625.，査読あり

中川康之・灘岡和夫・八木宏・二瓶泰雄・木村彰宏・久保田踊児・吉田行秀 (2013)：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，*土木学会論文集 B2 (海岸工学)*，Vol. 69, No. 2 .pp.I_571-I_575.，査読あり

中川康之・灘岡和夫・八木宏・吉田行秀 (2013)：東京湾における底泥挙動の実態とモデル化，*沿岸海洋研究*，第51巻，第1号，pp.45-52.，査読あり

Nakagawa, Y., K. Nadaoka, H. Yagi, R. Ariji, H. Yoneyama & K. Shirai(2012): Field measurement and modeling of near-bed sediment transport processes with fluid mud layer in Tokyo Bay, *Ocean Dynamics*, Volume 62, Issue 10-12, pp 1535-1544, DOI 10.1007/s10236-012-0570-4.，査読あり

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. I_461-I_465.，査読あり

Nakagawa, Y., R. Ariji, K. Nadaoka, H. Yagi, K. Shimosako and K. Shirai (2011)：Field measurement of erosion and deposition processes of muddy sediment during storm event in Tokyo Bay, *Proc. of Coastal Sediments'11*, ASCE, pp.2403-2414.，査読あり

[学会発表] (計6件)

Nakagawa, Y., T. Shinozawa, Y. Matsumoto and M. Watanabe: Field measurement of fluid mud layer in dredged navigation channel at river mouth, *International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes (INTERCOH 2015)*, 7-14 Sep., 2015, Leuven, Belgium

Nakagawa, Y., K. Nadaoka, H. Yagi, Y. Nihei and H. Uchikawa (2015): Stochastic Model of Fluid

Mud Transport under Wave and Current, Proc of Coastal Sediments'15, 11-15 May, 2015, San Diego, USA

Nakagawa, Y., K. Nadaoka, H. Yagi, Y. Nihei, and Y. Yoshida (2014): FINE SEDIMENT TRANSPORT MODELING IN TOKYO BAY, Proc. Ocean Science Meeting, , 24-28 Feb., 2014, Honolulu, USA.

Nakagawa, Y., K. Nadaoka, H. Yagi, Y. Nihei, A. Kimura, Y. Kubota and Y. Yoshida (2013): Application of a fluid mud transport model to simulation of sediment dynamics during storm event in Tokyo Bay, Proc. of International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes (INTERCOH2013), pp.91-92, 21-14 Oct., 2013, Gainesville, FL., USA

中川康之：東京湾における底泥挙動の実態とモデル化，日本海洋学会秋季大会沿岸海洋研究会シンポジウム，2012年9月，静岡市。

Nakagawa, Y., K. Nadaoka, H. Yagi, R. Ariji, H. Yoneyama and K. Shirai (2011): Fundamental study of fluid mud transport modeling, Proc. of 11th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes (INTERCOH2011), pp.25-27. Oct.18, 2011, Shanghai, China.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 康之 (Nakagawa Yasuyuki)

独立行政法人港湾空港技術研究所・その他
部局等・その他

研究者番号：30360762

(2) 研究分担者

なし ()

(3) 連携研究者

なし ()