

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.52 No.3 September 2013

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 52 卷 第 3 号 (Vol. 52, No. 3) , 2013 年9月 (September 2013)

目 次 (CONTENTS)

1. 浅海域における炭素隔離機能の評価へ向けた元素比・安定同位体比による有機物動態の解析
.....渡辺謙太, 桑江朝比呂 3
(Dynamics of Organic Matter Measured by the Elemental and Isotopic Techniques:
Evaluation of the Carbon Sequestration in Shallow Coastal Ecosystems
.....Kenta WATANABE, Tomohiro KUWAE)
2. 高含水比底泥の挙動解明とモデル化
.....中川康之 35
(Modelling of Transport Processes of Muddy Sediment with High Water Content
.....Yasuyuki NAKAGAWA)
3. 乱れの生成・逸散過程を考慮した砕波モデルの汎用化に関する検討
.....平山克也, 宇野喜之 51
(Generalization of the Wave Breaking Model by Focusing on the Production and Dissipation Process of Turbulence
.....Katsuya HIRAYAMA, Yoshiyuki UNO)

高含水比底泥の挙動解明とモデル化

中川 康之*

要 旨

水中懸濁物が豊富な内湾域では、海底堆積物の表層に含水比が高く流動性に富んだ底泥（流動泥）が広範囲にみられることが多い。本研究では、海底付近の水質や底生生物の生息条件とも密接に関係する高含水比底泥の挙動に注目し、波浪や潮流による移動現象のモデル化を試みた。モデル化に先立ち、東京湾羽田沖周辺を対象とした底質分布に関するデータや、台風擾乱時にとらえられた底面境界近傍での流況およびSS濃度変動の現地データの解析を通じて、高含水比底泥の堆積分布と挙動特性の解明を試みた。堆積分布の特徴として、沖合深場（水深10m以深）の海底表層には、ほぼ恒常的に含水比400%以上の高含水比底泥が10cm程度の厚さで見られる。また水深約25mの観測点で計測された、高波浪および河川出水時における底泥の侵食・堆積現象は、巻き上げや水中からの沈降だけでなく底泥層内の輸送によって生じていることを底泥面近傍での土砂収支解析により明らかとした。これらの特徴を反映させた底泥移動のモデル化として、ひとつには高含水比底泥の巻き上げ現象を海水中への拡散現象としてとらえ、拡散フラックス・モデルによる巻き上げ量の算定を行い、観測結果との比較検証を通じて妥当性を示した。さらに、波や流れの底面せん断応力による泥層内の水平輸送について、泥層内の堆積構造を考慮したビンガム・モデルを導入し、3次元流動モデル等との結合により実海域での底泥輸送計算への応用が可能な泥層内の質量輸送フラックスの算定式を新たに導出した。

キーワード：東京湾羽田沖、底泥、高含水比、巻き上げフラックス、流動泥

* 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究チームリーダー
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5051 Fax：046-844-1274 E-mail：nakagawa@pari.go.jp

Modelling of Transport Processes of Muddy Sediment with High Water Content

Yasuyuki NAKAGAWA*

Synopsis

Muddy sediments with high water content are often observed at near surface of the sea bottom in enclosed bays and estuaries, where fine suspended sediments are abundant in the water. Since transport process of the muddy sediments is one of the crucial factors for near-bed water quality and habitat conditions of benthic organisms, the process was modeled under the consideration of the characteristics of muddy sediments in the field. The field monitoring of sediment qualities by core sampling have been conducted around the mouth of the Tama River mouth in Tokyo Bay and the data shows that very soft mud with high water content of over 400 % is prevailing in the deeper area. A monitoring campaign in the summer of 2007 with measurements of near bottom current and turbidities revealed dynamical sediment transport processes under the energetic wave and current condition due to a passage of typhoon. Through the sediment budget analysis during the typhoon event, it is shown that bed load transport is crucial for the bed level change in addition to the vertical transport including erosion and deposition fluxes. Key processes of the muddy sediment transport such as resuspension and horizontal movement of observed fluid mud layer was modeled. Resuspension flux is estimated as turbulent diffusion flux between the sea water and fluid mud layer and estimation results show fairly good agreement with observed data. For the horizontal flux estimation, the mass flux in the fluid mud layer was analytically calculated using the relationship between shear stress and deformation rate for Bingham fluids considering the vertical structure of sediments or yield stress profile in the observed fluid mud layer.

Key Words: Tokyo Bay, muddy sediment, high water content, resuspension flux, fluid mud

* Leader of Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Research Group, Coastal and Estuarine Environmental Research Division

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5051 Fax : +81-46-844-1274 E-mail : nakagawa@pari.go.jp

目 次

要 旨	35
1. まえがき	39
2. 羽田沖周辺海域の底泥の特性.....	39
2.1 底泥の堆積分布の特徴	39
2.2 台風イベント時における底泥移動の観測結果	40
3. 現地観測データを用いた土砂収支解析と底泥移動の特徴	42
3.1 土砂収支解析による侵食・堆積要因の分析	42
3.2 考慮すべき底泥の輸送過程	43
4. 高含水比底泥の巻き上げフラックス算定方法	43
4.1 巻き上げフラックスの定式化	43
4.2 既往の底泥モデルとの比較	44
5. 流動泥層内の水平輸送モデルの構築	45
5.1 ビンガム流体モデルによる水平輸送速度算定式の導出	45
5.2 底泥層内の水平輸送フラックス算定式	47
6. 結論	47
7. あとがき	48
謝辞	49
参考文献	49

1. まえがき

内湾域の沿岸部では、シルト・粘土の細粒分から砂・礫の粗粒分にいたる多様な粒径の堆積物が、河川等による土砂の供給特性と、潮流・波浪等の輸送外力の条件に応じて空間的に分布する(例えば、日本海洋学会(1985))。この中でも、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が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。このため、栄養物質の溶出等に関する底泥境界での物質フラックス算定について、精緻なモデルを取り入れた水質および生態系モデルの開発がみられる(例えば、Sohma et al. 2008)。

一方、河口域周辺は、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、それに対応して水質や生物生息環境も変化する。このため、流れや波浪等の外力による巻き上げなど、底泥の動的挙動に起因する水底質環境の変化の把握も重要と考えられる。特に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 (Vinson and Mehta, 2003, Traykovsky et al. 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空間分布特性(中川ら, 2007)や、2007年に生じた記録的な多摩川出水及び湾内高波浪による底泥の巻き上げの実態(中川・有路, 2010)が明らかとなっている。また、擾乱時の底泥移動をきっかけとした含水比の変化に連動して、底生生物量も変化することが確認されている(有路ら, 2011)。そこで本研究では、内湾域でみられる高含水比底泥の堆積や挙動に関する特性の把握をふまえて、底質環境の変動予測に資する底泥移動シミュレーション・モデルの構築を試みた。

2. 羽田沖周辺海域の底泥の特性

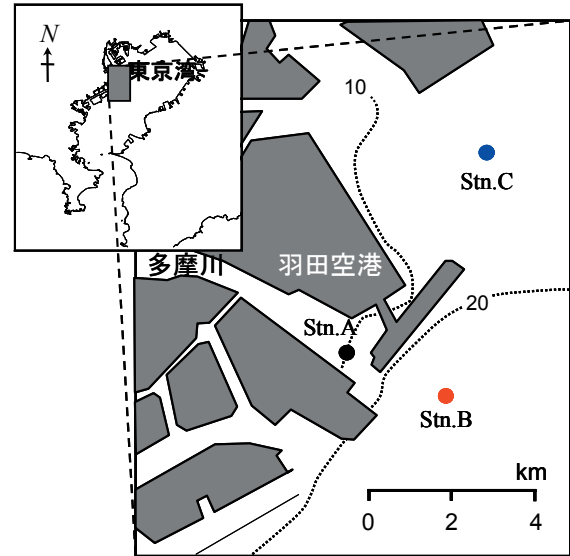


図-1.1 調査対象海域と調査地点

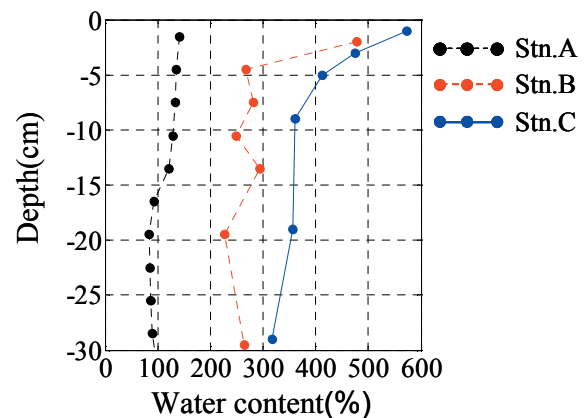


図-1.2 底泥含水比の鉛直分布

2.1 底泥の堆積分布の特徴

観測対象海域は、東京湾北西部に位置する多摩川河口周辺(図-1.1)であり、河道内では砂質分が主体であるのに対し、水深が10m以深の沖合では98%以上がシルト・粘土分のいわゆる泥分が主体となっている(中川ら, 2007)。図-1.1に示す各調査点(Stn.A~C)より採取したコアサンプルの分析による、堆積泥の含水比の鉛直分布を図-1.2に示す。これらの地点はいずれも含泥率は99%以上の泥質物の堆積域であるものの、含水比としては河口部(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%以上となり、外力が加われば容易に巻き上げや流動が生じやすい状態となっている。なお、含水比の分析に際しては、採取したコアサンプルの静置後にみられる海水との底泥界面を確認のうえ、コア底層からの押し上げにより堆積物表層から順次スライス

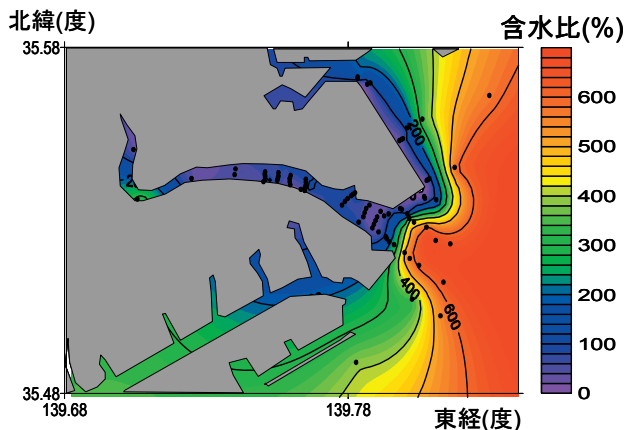


図-1.3 調査対象海域の底泥表層含水比の空間分布

し、特に表層部の高含水比泥の漏洩が無いように捕獲し分析を行っている。特に、コアサンプラーからの試料押し上げと同時に採泥容器外に流れ出す、高含水比底泥のことをここでは流動泥と呼ぶものとする。流動泥の層厚は、河口沖合いで水深が深くなるほど増大する傾向が確認されている(中川ら, 2007)。

羽田 D 滑走路建設以前の 2007 年に行われた、広域底質調査結果を基にして図化した羽田沖周辺での堆積物表層の含水比の空間分布を図-1.3 に示す。泥質物が主体となる河口沖合では、高含水比底泥が広く分布していることがわかる。このような空間分布の傾向は、平常時には経年的に大きな変化を示すことは無いものの、2007 年 9 月上旬に関東地方に上陸した台風 9 号の影響による高波浪および多摩川からの出水イベント直後には、Stn.B 周辺の河口沖合で顕著な含水比の低下(ただし、粒度組成に大きな変化はなし)が生じることが確認されている(有路ら, 2010)。さらに、含水比だけでなく底質中の有機物含量の低下や、底生生物の種類数、湿重量の増加も同時に確認されており(有路ら, 2011)、台風イベント時に生じた底泥の移動に伴う底泥組成の変化が、底生生物の生息条件など水底環境の変動と密接に関わっているものと考えられる。

2.2 台風イベント時における底泥移動の観測結果

本モニタリングプロジェクトの観測期間中に捉えられた大きな気象擾乱として、前節でもふれた2007年9月7日に関東地方に上陸・通過した台風0709号があげられる。本台風は、東京湾内での高波浪と湾内主要河川からの大規模な出水を生じさせ、特に戦後2番目の高水位を記録した多摩川では、東京湾へのSS負荷が通常時の6.6年分に相当したとの報告もある(二瓶ら, 2008)。このような擾乱時を含む、2007年8月24日～9月19日の期間に図-1.1中の

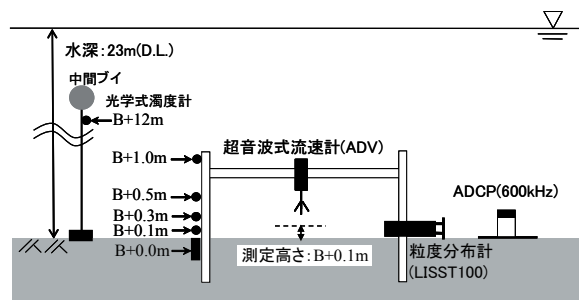


図-1.4 定点連続観測における計測器設置概要図(中川・有路, 2010)

Stn.Bにおいて、超音波式流速計ならびに光学式濁度計等の各計測器群を海底付近に配置(図-1.4)した連続観測により、海底境界面での流況や底泥挙動の様子が捉えられており、観測方法および観測結果の詳細は中川・有路(2010)にて報告している。ここでは、本研究の解析に用いた観測データおよび解析内容についての要点を以下に記す。

(1) 底面せん断応力の算定

底泥の移動に關与する主要な外力の一つである底面せん断応力を、底面上10cmを測定層とした3次元超音波式流速計(Nortek社製Vector, 以下ADV)の計測結果から算定した。ADVによる流速測定は、30分間隔でサンプリング周波数8Hz、約2分間(1024データ)のバースト計測であり、バースト毎の時間平均値(u, v, w)から平均流成分による底面せん断応力(τ_c)が求められる。

一方、観測地点の水深に対する深海波の条件を考慮して、周期4秒を境とした流速時系列波形の低周波および高周波成分を数値フィルターにより再合成し、低周波側の波浪成分(u_w, v_w, w_w)、高周波側の乱れ成分(u', v', w')をそれぞれ求めた。これにより、波動流速成分の二乗平均値として求まる代表軌道流速振幅(u_b)と波による抵抗係数(f_w)を考慮して、波浪による底面せん断応力(τ_w)が求められる。さらに、波浪および流れの共存場における底面せん断応力の最大値が、各成分(τ_c および τ_w)の関数として、次式により算定される(Soulsby(1997))。

$$\tau_{\max} = \left[(\tau_m + \tau_w \cos \phi)^2 + (\tau_w \sin \phi)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

ここに、 ϕ は流れおよび波浪伝搬方向の主軸のなす角であり、 τ_m は波と流れの相互作用を考慮した平均せん断応力であり、次式により表される。

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (2)$$

(2) 巻き上げフラックスおよび底面高さの計測

流れや波による外力の作用下における底泥挙動を評価するため、海底からの巻き上げフラックスと底泥面高さを現地観測結果から求めた。両者の測定には、いずれもADVセンサーに記録される超音波反射強度データを活用した。本センサーは元来、海水の動きと共に移動する懸濁物で反射する超音波のドップラー・シフトを考慮することにより、流速測定を行うものである。一方、反射強度とSS濃度の相関式を得ることよりSS濃度の推定が可能であり(Kawanishi and Yokoshi,1997, Fugate and Friedrichs, 2002), 本研究ではこの方法を利用することにより、底面上10cmでのSS濃度の変動をサンプリング周波数8Hzで捉えた。これにより、流速データの解析と同様に、乱れによるSS濃度の変動成分 (c') を抽出し、乱流成分による鉛直輸送フラックス、すなわちReynoldsフラックスとして、底泥の巻き上げフラックス(F_z)を見積もることが可能となる。

$$F_z = \overline{c'w'} \quad (3)$$

ここに、 w' は鉛直流速の乱流成分であり、 $'$ はバー

スト時間(約2分間)による時間平均を意味する。

一方、バースト測定毎に流速測定層以外の高さも含む、反射強度の鉛直分布もADVセンサーに記録されている。ここでは、反射強度の鉛直分布にみられる底泥濃度(密度)急変部での二次的ピーク (Nortek, 2004) を底面位置と定義することにより、その高さの変動に関する連続的なモニタリングが可能となる。

(3) 台風イベント時の底面境界測定結果

台風0709号の接近時を含む4日間における、測定バースト毎の平均流速および波浪軌道代表流速、底面せん断応力、SS濃度の観測結果と、上記の解析方法に基づくSS巻き上げフラックスおよび底面高さの時系列変動を図-2.1に示す。

同図最下段に示した底面高さの変動についてみると、台風の接近に伴う波浪の発達により、底面せん断応力が最大となる9月7日3時前後に底泥面の高さ(同図(c))が20mm弱の低下すなわち侵食が生じている(期間I)。その後、波浪および流れが減衰すると堆積に転じ、9月7日の14時までの間に、底面高さは約50mm上昇している(期間II)。

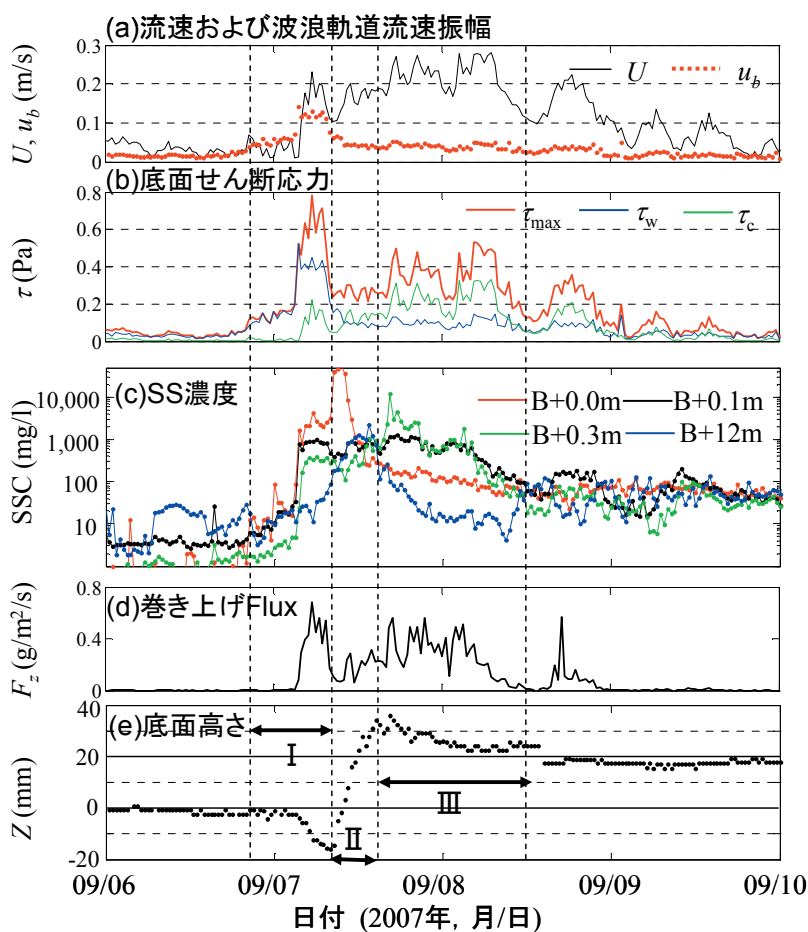


図-2.1 台風擾乱時の観測データに基づく底面境界における(a) 流況, (b) 底面せん断応力, (c) SS濃度, (d) 巻き上げフラックス, および(e) 底面高さ, の各時系列変動 (中川・有路(2010)を一部改良)

さらに9月8日の正午頃までの間には底面高さは緩やかに約20mm低下し、台風通過前後での正味の変化としては約20mmの堆積となっている（期間Ⅲ）。

一方、このような底面高さの変動に対して、底面近傍のSS濃度に関連する変動をみると、底泥の侵食と同時にSS濃度および巻き上げフラックスの顕著な増大がみられる。さらに、底泥の堆積過程においては、侵食前の底面直上を測定対象とした濁度センサー（図-2.1(c), B+0.0m）の記録によると、200,000~300,000mg/lのSS濃度が計測されており、流動泥の移流が底面高さの上昇に関与していたことを示唆している。

3. 現地観測データを用いた土砂収支解析と底泥移動の特徴

3.1 土砂収支解析による侵食・堆積要因の分析

台風擾乱時の観測結果を基に、図-3.1に示すような底面高さの変動と底面近傍で生じる底泥輸送過程、すなわち底面直上での巻き上げ量ならびに沈降量との関係について調べるため、ここでは底泥面高さ($Z(t)$)の単位時間あたりの変動量と巻き上げフラックス(F_z)および沈降フラックス(F_d)それぞれの間での収支関係を次式により評価した。

$$-\rho_d \frac{dZ(t)}{dt} = F_z + F_d + F_r \quad (4)$$

ここに ρ_d : 堆積底泥の乾燥密度 (kg/m^3), F_z : 巻き上げフラックス ($\text{kg/m}^2/\text{s}$), および F_d : 沈降フラックス ($\text{kg/m}^2/\text{s}$) である。右辺最終項の F_r は残差項であり、水平移流フラックスが空間的に分布を持つ場合に値を有する。

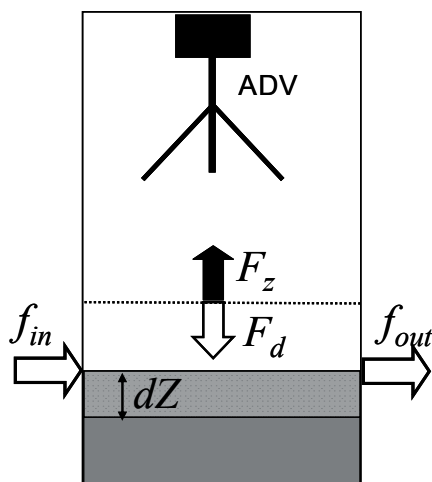


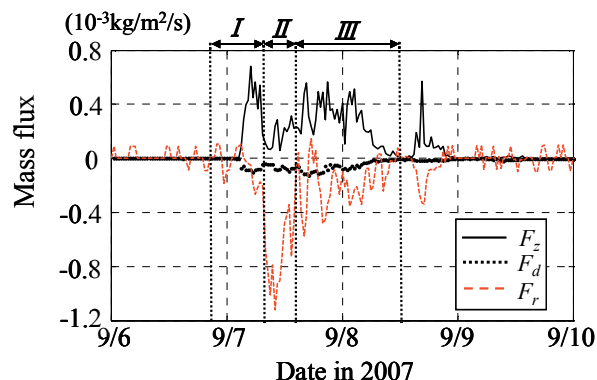
図-3.1 底面高さの変化と底面境界近傍での泥輸送の関係

ρ_d の値については、ここでは現地底泥試料の分析結果を考慮して 300kg/m^3 とした。巻き上げフラックス(F_z)は、底面上10cmを対象とした超音波式流速計(ADV)の観測データから、レイノルズ・フラックスとして直接求めた値を用い、沈降フラックスは、SS濃度(C_b)に懸濁粒子の沈降速度(W_s)を考慮することにより次式で評価した。

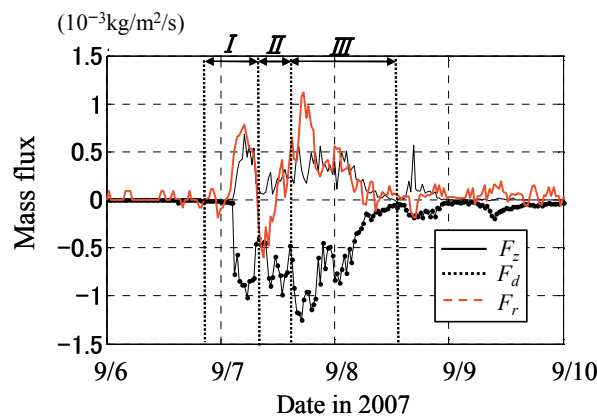
$$F_d = C_b W_s \quad (5)$$

沈降フラックスについても、巻き上げフラックスと同様に底面上10cmでの値を用いるため、ADVの反射強度から推定した底面上10cmでのSS濃度(C_b)を計算に用いた。一方、泥粒子の沈降速度(W_s)については、現場での連続的な測定手法は未確立のため、ここでは既往の実験データ等の情報を参考に、沈降速度を 0.1mm/s と仮定して計算を行った。

上記の条件で計算した場合の各項の関係を図-3.2(a)に示す。同図中に示す期間Ⅰ～Ⅲは、先の観測結果(図-2.1)における、底泥面の下降期(Ⅰ)、続く堆積期(Ⅱ)、さらに再下降期(Ⅲ)に対応している。巻き上げフラックスが卓越する期間Ⅰでは、底泥面の低下量が巻き上げ量にほぼ相当しており、この期間の侵食が巻き上げによ



(a) $W_s=0.1\text{mm/s}$ とした場合



(b) $W_s=1\text{mm/s}$ とした場合

図-3.2 台風擾乱時の侵食・堆積時の底面近傍での土砂収支解析の結果

って生じたものであることを示している。これに対し、期間Ⅱの堆積期においては巻き上げと沈降のフラックス以外に、負の残差成分フラックスが顕著となっている。これは底面上昇量が巻き上げと沈降の鉛直成分の収支だけでは説明できず、水平方向の移流分による堆積への寄与を考慮する必要があることを意味する。特にこの堆積期間Ⅱにおいては、底面直上で10,000mg/lを超える高濃度な状態が底面にて観測されている(図-2.1(c))ことを考慮すると、流動泥の移流が底面高さの上昇に関与していたものと考えられる。

なお、沈降速度についてはフロック形成の程度やそれに関与する泥粒子の濃度などに依存して $10^{-2} \sim 10^0$ mm/sのオーダーの範囲で大きく変動することが知られている(例えばWinterwerp and van Kesteren(2004))。そこで、上記の値に対し1オーダー大きな沈降速度を仮定した場合の収支解析の結果を図-3.2(b)に示す。この場合には、沈降量が增大するため、侵食時期においても残差成分が生じることになるが、いずれにせよ先の結果と同様に、底泥面の変動量が鉛直方向のフラックス(巻き上げおよび沈降)の収支だけでは説明できず、水平移流分の評価が必要であることを示している。

3.2 考慮すべき底泥の輸送過程

上記の観測データならびに土砂収支解析の結果をふまえて、本研究の観測対象海域での主要な底泥の堆積と輸送プロセスの特徴を模式的に示したものが図-3.3である。すなわち、河口沖の深場には平常時においても、底面表層は高含水比の流動泥が存在し、これらは台風等の比較的大きな擾乱時に、巻き上げおよび波や流れの外力による水平移流が生じているものと考えられる。また、底面表層付近に見られる高含水比底泥の層厚は10cm程度のオーダーであり、その層厚の中で泥表面から下層の圧密泥に向けて、泥濃度は増大していく鉛直分布構造を有していることが、底泥輸送のモデル化において配慮すべき重要な特徴であると考えられる(図-3.4)。

一方、河口部の斜面(前置斜面)部では、比較的大きな出水時に河川から供給される大量の懸濁物沈降により、底面付近で流動泥層が形成され重力流的に沖合の深場に向けて輸送されることも考えられる。このような、出水時における流動泥輸送については、河口沖合での底泥の堆積分布の形成を支配要因として、海外の観測事例でも注目されている(たとえば, Fan et al. 2004)。

以下では、沖合部で広範囲にみられる高含水比底泥の挙動に注目し、巻き上げならびに水平移流の輸送量を算定するためのモデルの構築を行う。

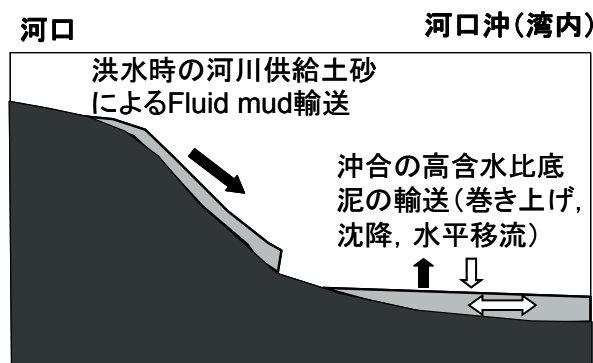


図-3.3 羽田沖での主要な底泥輸送過程に関する模式図

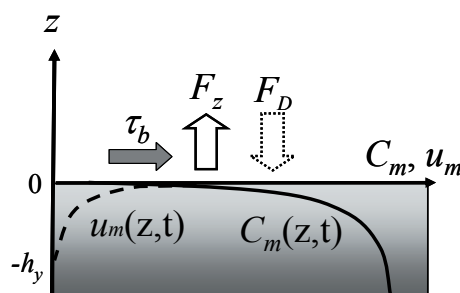


図-3.4 高含水比底泥が存在する場合の界面近傍における底泥濃度分布と底泥輸送のイメージ図

4. 高含水比底泥の巻き上げフラックス算定方法

4.1 巻き上げフラックスの定式化

本研究で対象とする高含水比底泥の巻き上げ現象について、海水と底泥の間における密度成層間での混合現象として考えると、乱れによる底泥の巻き上げ量(F_z)は拡散フラックスとして次式により表現することができる(たとえば, Ross and Mehata (1989)).

$$F_z = -K_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad (6)$$

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(R_i)の関数として次式で表される。

$$K_s = K_0(1 + \beta R_i)^{-\alpha} \quad (7)$$

$$R_i = -\frac{g}{\rho} \frac{(\partial \rho / \partial z)}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (8)$$

ここに g :重力加速度, ρ :上層水から泥層にいたる媒体密度である。物質の拡散現象に対しては、定数 α, β の値はMunk & Anderson(1948)によれば、それぞれ1.5, 3.33とされる。

このような拡散フラックス・モデルによる高含水比底泥の巻き上げ量の算定精度を検討するため、前章で示し

た底面せん断応力やSS濃度の時系列データを式(6)に代入して求められる計算値と、2章で示したADVの観測データから直接求めた巻き上げフラックスの時系列変動と比較して示した(図-4.1)。同図の解析においては、観測で得られた計測値から Ri 数を算定する際に、式(9)に示すように密度勾配は底面上10cmのSS濃度(測定値)を考慮した海水密度(ρ_{10})と底泥表層の密度(ρ_b)から求め、また乱れ強度を示す分母の項には、底面上10cmでのADV測定から算定された波と流れによる最大底面せん断応力(τ_{b_max})で評価することにより、平均流だけでなく波動流速による乱れの影響を取り込んでいる。

$$Ri = - \frac{g\Delta h(\rho_{10} - \rho_b)}{\tau_{b_max}} \quad (9)$$

なお底泥表層密度(ρ_b)については、観測で得られた含水比の鉛直分布を考慮して換算した湿潤密度とした。また、中立時の拡散係数 K_0 については、巻き上げフラックスの観測データに対する推定値の再現性を考慮した係数の調整により、ここでは定数値(0.0044 m²/s)を与えている。

図-4.1の結果をみると、密度の安定度に対する乱れ強度の比を示す指標である Ri 数が外力の増大とともに減少し、それに対応し底泥の巻き上げが顕著となっている。さらに、式(6)による算定方法により、計算対象とする全期間を通じて巻き上げフラックスの時系列変動の特徴が良好に再現できていることがわかる。

4.2 既往の底泥モデルとの比較

現地での底泥輸送をモデル化する場合、海底面からの底泥の巻き上げ量の算定には、圧密泥を対象とした式(10)が用いられることが多い。

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_c} - 1 \right) \quad (10)$$

ここに、 M :巻き上げ速度係数、 τ_c :巻き上げに関する限界せん断応力である。これらは堆積泥の圧密状態や物性等に依存するものであるものの、現地海域を対象とした場合には、それらの時空間分布に関する情報を得るのは困難であり、全体的な計算結果の妥当性を得るための係数調整に用いられる場合が多い。参考までに、ここでの観測結果に対して、式(10)を用いて係数調整した巻き上げフラックスの算定結果も図-4.1(c)に示す。本手法に比べて、わずかにフラックスが小さな値となっているものの、基本的にせん断応力の時系列変動が支配的な現象であるため、時系列変動の特徴は本手法と比べても同程度に表現できている。ただし、上述のように本来底質の物性等の違いに起因する侵食速度や侵食限界を反映した係数であるため、底質条件が異なる海域で同様な結果を得る保証は無く、これら二つのパラメータをその都度、調整する必要が生じる。

これに対し、本手法で提案したフラックス・モデルでは、高含水比底泥の巻き上げを上層水との混合現象として捉え、より現象の物理性に即した定式化を行ったものである。中立時の拡散係数 K_0 のみ、係数調整の対象となるものの、その他の係数は堆積物の含水比分布や、底面

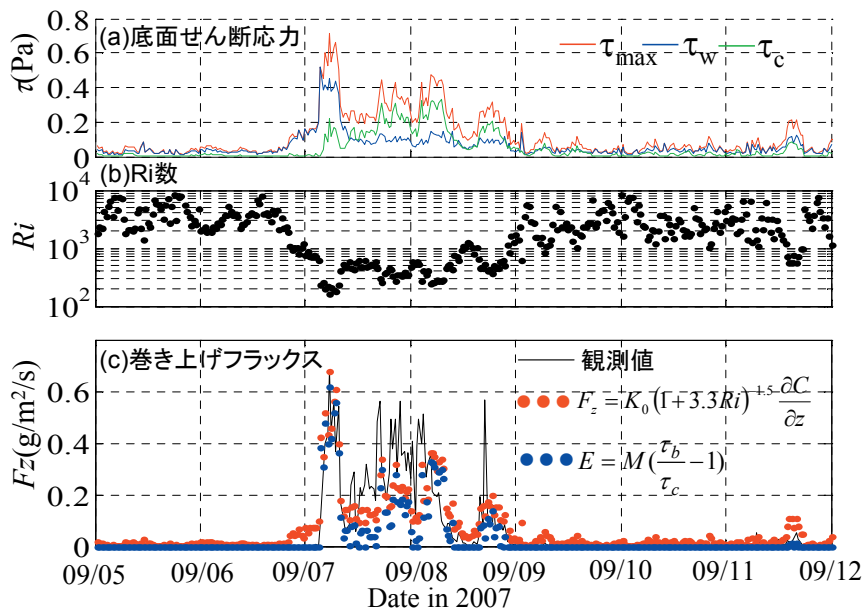


図-4.1 台風イベント時に観測された底泥巻き上げフラックスの計算結果

直上でのSS濃度などの物理量から決定することが可能である。また、高含水比底泥の堆積域の特徴である、底泥表層付近の急激な濃度変化は底泥の侵食強度の変化と関係しており、本手法では含水比分布として堆積分布の情報を取り込むことにより、侵食強度の鉛直方向の変化も考慮したモデルとなっている。

5. 流動泥層内の水平輸送モデルの構築

5.1 ビンガム流体モデルによる水平輸送速度算定式の導出

(1) 基礎式

出水時の懸濁物供給に伴い河口沖斜面の底面近傍に形成される流動泥(Fluid mud)については、重力流的な輸送を想定したモデル化の例がいくつかみられる(たとえば、Scully et al. 2003, Harris et al. 2005)。これに対し本研究では、平常時から存在する河口沖合部でみられる底泥表層の高含水比泥の存在を反映させた、泥層内の水平輸送のモデル化を試みた。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。泥層内の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。

$$\tau = \tau_y \operatorname{sgn} \frac{\partial u_m}{\partial z} + \mu \frac{\partial u_m}{\partial z}, \text{ if } |\tau| \geq \tau_y \quad (11a)$$

$$\mu \frac{\partial u_m}{\partial z} = 0, \text{ if } |\tau| < \tau_y \quad (11b)$$

ここに u_m : 泥層内の流速, τ : 底面せん断応力, τ_y : 降伏応力, μ : 泥の粘性係数, sgn は後に続く項の符号を意味する。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), 山西(1998))。これに対し本研究では、底泥の極表層に流動泥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標とする。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を検討した。

(2) 泥層内での作用外力

泥層内の流速分布の計算に先立ち、泥層表層部の流動をもたらす作用外力を評価するため、まずは以下の検討を行った。底泥表層部(図-5.1中の斜線部分)に注目する

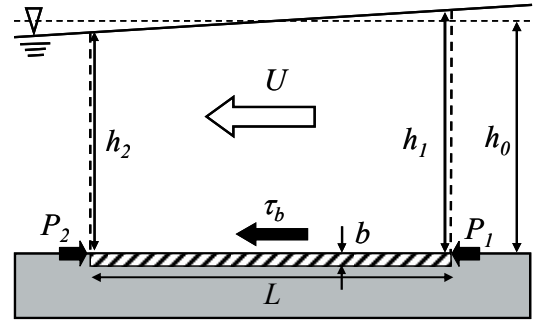


図-5.1 一様流により底泥層内に作用する外力

と、力学的なバランスは次式により表される。

$$\Delta\tau \times L = \Delta P \times b \quad (12)$$

ここに、 $\Delta\tau$: 底泥表層と泥厚(b)の間でのせん断応力の差, ΔP : 底泥層の水平長さ(L)の区間での圧力差($|P_1 - P_2|$), であり圧力差は静水圧近似によれば次式により表される。

$$\Delta P = \rho g \Delta h = \rho g |h_1 - h_2| \quad (13)$$

一方、等流状態を仮定すると、上層水の流れによる底面せん断応力(τ_b)は水面勾配($\Delta h/L$)との間に次式の関係有する。

$$\frac{|\tau_b|}{\rho g h_0} = \frac{\Delta h}{L} \quad (14)$$

したがって、式(12)は次式のように変形できる。

$$\frac{\Delta\tau}{|\tau_b|} = \frac{\rho g \Delta h}{L} \times \frac{b}{|\tau_b|} = \frac{b}{h_0} \quad (15)$$

ここで、本研究が対象としている海域の水深($h_0=20\text{m}$ 程度)と、流動泥層の厚さ($b<20\text{cm}$ 程度)のオーダーを考慮すると、泥表層部におけるせん断応力の鉛直変化は、泥層表面に作用する底面せん断応力(τ_b)の1%程度($\Delta\tau/|\tau_b| \ll 1$)と見積もられる。したがって、上層水の流れによる底面せん断応力(τ_b)が、泥層表層部では鉛直方向に一様な大きさで作用するものと仮定できる。

(3) 泥層内の流速分布算定式の導出

前節の検討結果をふまえ、泥層内に作用する底面せん断応力が鉛直方向に一様とすると、泥層内で流動が生じる際の流速は式(11a)を鉛直方向に積分することにより次式で求められる。

$$u_m(z) = \frac{1}{\mu} \int_{-h_y}^z [\tau_b - \tau_y(z)] dz \quad (16)$$

ここに、 $-h_y$ は作用する底面せん断応力(τ_b)と泥の降伏応力(τ_y)がつりあう深さ(降伏深)である。上式は泥層内の降伏応力の鉛直分布形がわかれば、泥の流速分布が求められることを意味する。

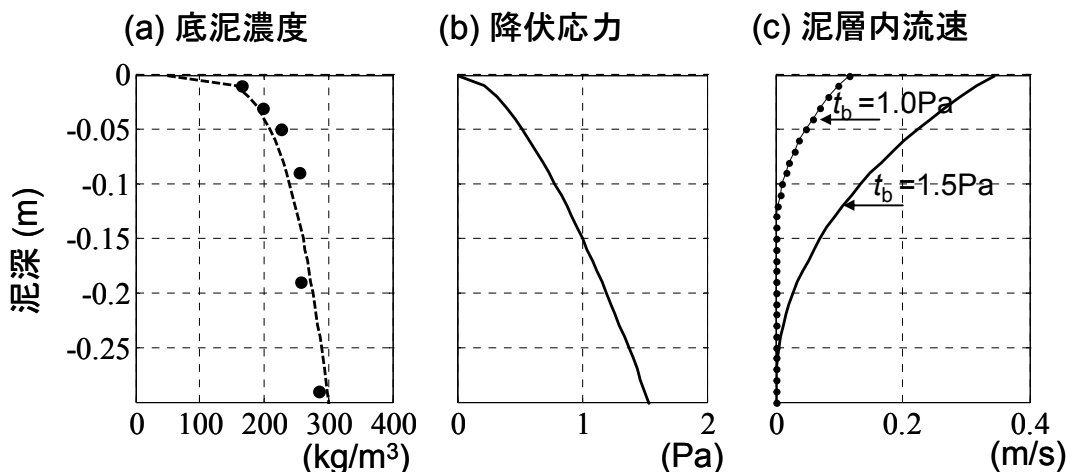


図-5.2 底泥層内の(a)底泥濃度(黒丸：観測値，破線：式(18))，(b)降伏応力(式(19))および(c)流速分布の解析結果(式(20))

そこで，van Kessel and Kranenburg,(1996)による底泥濃度と降伏値の関係(式(17))を考慮することにより，泥層内流速の解析解の導出を試みた。

$$\tau_y(z) = c_1 \left[\frac{C_m(z)}{\rho_s} \right]^{c_2} \quad (17)$$

ここに， ρ_s は泥の粒子密度， c_1 および c_2 は泥の物性に依存する係数である．以下の解析ではvan Kessel and Kranenburg(1996)を参考に $c_1=1,000(\text{Pa})$ および $c_2=3$ とし，また式(16)における泥層内の粘性係数(μ)は一定値($0.47\text{Pa}\cdot\text{s}$)とした。

なお式(17)の鉛直積分を行うには，同式中の底泥濃度の鉛直分布の情報が必要となる．ここでは，実測された底泥の濃度分布(図-5.2(a)中の黒丸)に対して，Fodaら(1993)が底質濃度分布の近似に用いた関数形(式(18))を導入した。

$$C_m(z) = C_0 + \Delta C(-z/D)^{0.25} \quad (18)$$

ここに， C_0 は表層濃度を， ΔC は任意の泥深さ(D)における，表層濃度からの増分であり，図-5.3に示すように濃度の分布形状を定める定数である．図-5.2(a)における破線が式(18)を用いた観測値に対する近似結果を示している．ところで，羽田沖周辺の約80地点で採取された底質コアサンプルの分析データを対象として，各地点における底泥表層(泥深0-5cm)と泥深5-15cmの層における平均含水比を比較すると図-5.4に示すような関係が得られる．したがって，底泥表層の含水比の空間分布を計算条件として与えれば，同図中の相関式から泥層内($D=15\text{cm}$)での濃度増加量(ΔC)が推定可能となり，式(18)の導入によ

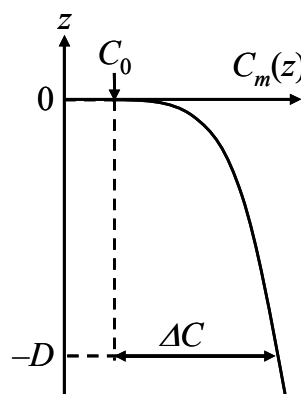


図-5.3 底泥層内の底泥濃度鉛直分布の近似

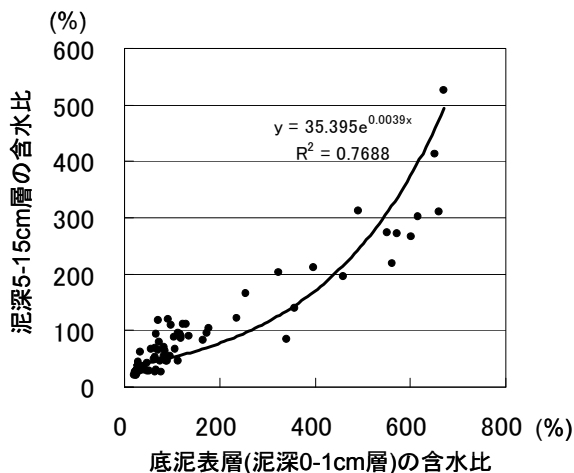


図-5.4 コアサンプルの分析データによる底泥表層(0-5cm)と泥深 5-15cm における平均含水比の比較

り現地底泥の堆積分布を反映させたモデル化が可能となる。

底泥濃度分布が定まると、式(17)により降伏値の分布を求めることができ、図-5.2(b)には計算例として示した図-5.1(a)の濃度分布に対する降伏値の分布が示されている。深さ方向の濃度増大に対応して降伏値も大きくなることわかる。さらに降伏値の鉛直分布関数を用いて式(16)の鉛直積分を行うと、最終的に泥層内の流速分布の解析解(式(19))を得ることができる。

$$u_m(z) = \frac{1}{\mu} [(\tau_b - \alpha_0)(z + h_y) + \alpha_0 \alpha_1 \frac{4}{5} D \left(\frac{(-z)^{5/4} - h_y^{5/4}}{D^{5/4}} \right) + \alpha_0 \alpha_2 \frac{2}{3} D \left(\frac{(-z)^{3/2} - h_y^{3/2}}{D^{3/2}} \right) + \alpha_0 \alpha_3 \frac{4}{7} D \left(\frac{(-z)^{7/4} - h_y^{7/4}}{D^{7/4}} \right)] \quad (19)$$

ここに、

$$\alpha_0 = c_1 \left(\frac{C_0}{\rho_s} \right)^3, \alpha_1 = 3 \frac{\Delta C}{C_0}, \alpha_2 = 3 \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^2, \alpha_3 = \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^3 \quad (20)$$

$$h_y = \left(\frac{C_0}{\Delta C} \right)^4 \left\{ \left(\frac{\tau_b}{c_1} \right)^{1/3} \frac{\rho_s}{C_0} - 1 \right\} D \quad (21)$$

である。

上式を用いた計算例として、1.0Paおよび1.5Paの底面せん断応力(τ_b)がそれぞれ作用した場合の泥層内の流速分布を図-5.2(c)に示す。作用する底面せん断応力と泥層内の降伏応力がつりあう深さ(yield surface)よりも泥深の浅い層で、底泥の水平方向の流動が生じることがわかる。

このように本モデルの特徴は、底泥濃度分布に対応する降伏値の鉛直分布を考慮することにより、作用外力との大小関係に応じて流動範囲が定まることにある。一般的には、ある固定面を設けてその上層での流動層の動きをモデル化するものが多い(たとえば、Huang and Garcia, 1997)。しかしながら、現地底泥の特徴として、底泥濃度の鉛直分布が高含水比底泥から圧密泥に緩やかに遷移していることを考慮すると、明確な固定層の存在を前提としたモデルよりも、連続的な鉛直分布を用いた方が、より現地での底泥特性を反映できているものと考えられる。

5.2 底泥層内の水平輸送フラックス算定式

流動層における底泥濃度の鉛直分布を同時に考慮することにより、前節で導出した泥層内の水平流速分布式を底泥輸送フラックスの算定式に展開できる(式(22))、

Nakagawa et al. 2012)。同式によれば、式(18)における底泥表層の含水比(C_0)と泥層内の密度分布を定める係数 D および ΔC を定数とすると、外力(τ_b)が与えられれば、泥層中の輸送量が求められることになる。

$$\mathbf{q}_m(x, y, t) = \int_{-h_y}^0 C_m(x, y, z, t) \mathbf{u}_m(x, y, z, t) dz = \frac{D^2}{\mu} \left[(\tau_b - \alpha_0) \left(\frac{1}{2} C_0 h_y^2 + \frac{16}{45} \Delta C h_y^9 \right) - \alpha_0 \alpha_1 \left(\frac{4}{9} C_0 h_y^9 + \frac{8}{25} \Delta C h_y^5 \right) \right] + \frac{D^2}{\mu} \left[-\alpha_0 \alpha_2 \left(\frac{2}{5} C_0 h_y^5 + \frac{16}{55} \Delta C h_y^{11} \right) - \alpha_0 \alpha_3 \left(\frac{4}{11} C_0 h_y^{11} + \frac{4}{15} \Delta C h_y^3 \right) \right] \quad (22)$$

$$h_y' = \frac{h_y}{D} \quad (23)$$

式(22)を用いて、表層含水比が500, 600, 700%の3ケースに対し、せん断応力の増大に伴う水平フラックスの変化を計算したものが図-5.5(a)である。底泥濃度の分布関数における係数(ΔC , D)は、図-5.4の関係から求めた。図-5.5では底面せん断応力と底泥輸送量の対応関係が示され、外力の増大にともなう輸送量の増大が確認できる。また表層含水比が高くなると、輸送量も増大していくことがわかる。また図-5.5(b)には各ケースの流動層厚(yield depth)の関係も示してあり、水平輸送が生じる層厚が底面せん断応力に対応して変化していることがわかる。

6. 結論

本研究では、水域環境変動を支配する重要な要素のひとつである泥質堆積物の挙動に注目し、東京湾羽田沖で台風擾乱時にとらえられた底面境界近傍での流況および底泥輸送量の現地データの解析とモデル化を試みた。高波浪や河川出水が生じる中、観測点で計測された海底の侵食あるいは堆積は、その場での巻き上げや沈降などの鉛直フラックスの収支だけでは説明できず、海底面極近傍における底泥の水平輸送量の空間勾配に起因する土砂の収束あるいは発散が生じていることを、土砂の収支解析を通じて明らかとした。

また、堆積泥の試料分析の結果や上述の解析により明らかとなった移動現象の実態をふまえ、対象海域における底泥特性を十分に考慮して、底泥輸送モデルの構築を行った。ひとつには、羽田沖合深場の海底にほぼ恒常的に観測される含水比400%以上の高含水比底泥の巻き上げ現象を対象として、海水との混合現象として現象プロセスに即した巻き上げフラックスの算定式を提案した。さらに、観測結果との比較を通じた検証により、台風イベ

ント時の巻き上げフラックスの時系列変動を良好に再現できることを示した。

一方、高含水比底泥が底泥表層に存在する場を想定し、波や流れの底面せん断応力による泥層内の水平輸送についても質量輸送量の評価式を新たに導出した。そこではビンガム流体に対する構成方程式を基礎式として、底泥層内の濃度鉛直分布の近似式を導入することにより、底面せん断応力の作用下における泥層内の流速分布の解析解を求めた。これにより、3次元流動モデル等による外力（底面せん断応力）場の算定ツールとの結合による現地海域での底泥輸送計算への応用が可能な、泥層内の質量輸送量の評価式を確立した。

7. あとがき

東京湾羽田沖で実施された現地観測結果によると、平常時には波や流れによる底質移動への影響はほとんど無視できる水深20m以深の海底においても、台風等の気象擾乱時には底泥の移動が顕著に生じること、それに伴う底

質性状の変化が底生生物の生息環境に影響をおよぼしていることが確認されている。そこでの海底地形の変化量は数cmの程度にとどまることから、大きな地形変化が無くとも表層堆積物の性状の変化が海底環境の変化に密接に関係していることを意味する。本研究では、底質性状の変化をもたらす要因の一つとなる、底泥移動現象のシミュレーション・モデルの確立に向けて、特に沖合域で広範囲に分布する高含水比底泥の挙動についてモデル化を行った。

ここで提案した底泥の巻き上げや泥層内の流動現象による質量輸送フラックスの算定手法は、3次元流動場および波浪場モデルと結合することにより、実海域での底泥輸送現象のシミュレーションに応用可能である。このため、東京湾を対象とした台風擾乱時の底泥輸送シミュレーションに本モデルの導入をすでに試みており、観測結果との比較を通じた再現性の検証をすすめている。また、本研究では東京湾羽田沖をケーススタディとしてモデル化を行ったが、同様な堆積環境を有する国内外の沿岸域へも応用できることから、他海域での底泥輸送シミュレ

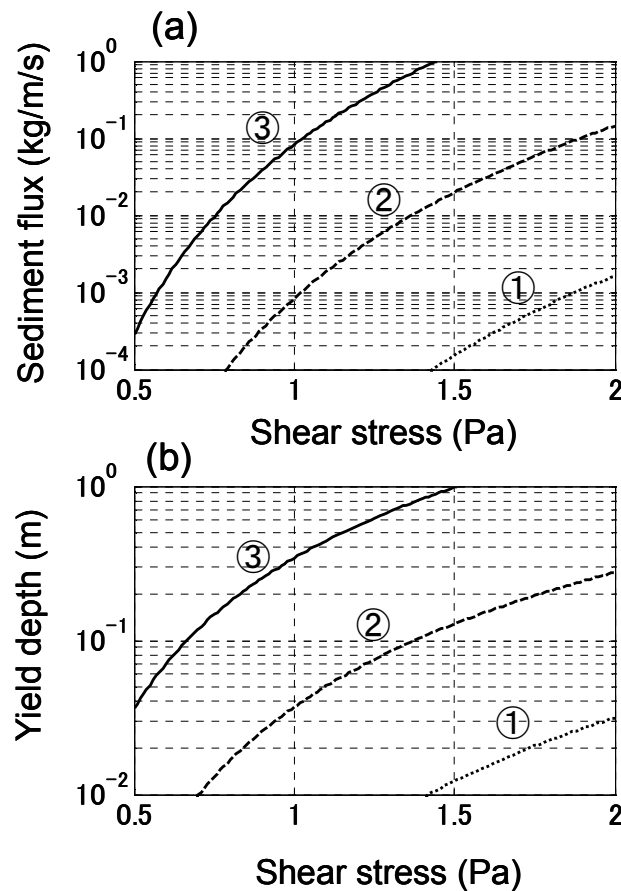


図-5.5 底面せん断応力と(a)底泥輸送フラックスおよび(b)流動層厚の関係

(表層含水比が①500%, ②600%, ③700%を仮定)

ーションへの導入についても検討をすすめる予定である。
(2013年4月26日受付)

謝辞

本調査は国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所主催による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)の活動の一部として実施されたものである。本調査の実施およびデータの蓄積にあたり、同事務所環境課をはじめとする関係者からは甚大なる協力を得た。また灘岡和夫東京工業大学大学院教授をはじめ上記委員会の諸先生方からは、データ解析・とりまとめにおいて多くの有益な助言を頂いた。現地調査の実施に際しては、採泥および分析、機器の設置・撤去およびメンテナンス等、多数のコンサルタント会社の現場担当者に協力を得たことを付記し、心より謝意を表する次第である。論文のとりまとめにあたり、当所の部内討議会を通じて栗山善昭特別研究官(海洋・水工担当)をはじめ、沿岸土砂管理研究チーム、沿岸環境研究チームほかの多くの研究員から、また公表審査委員会では座長・中村由行研究主監および菅野高弘特別研究官より貴重なコメントを頂いた。

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-I_855.

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(2010) 台風来襲時の東京湾羽田沖における底泥移動現象,港空研報告,第49巻,第2号, pp.107-122.

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・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.

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.

日本海洋学会沿岸海洋研究部会編(1985),日本全国沿岸海洋誌,東海大学出版会,1106p.

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～,国土交通省,161p.

山西博幸(1998):波動下での底泥輸送に関する基礎的研究,学位論文(九州大学),174p.

Fan, S., D. J. P. Swift, P. Traykovsky, S. Bentley, J. C. Borgeld, C. W. Reed and W. Niedoroda (2004): River flooding, storm resuspension, and event stratigraphy on the northern California shelf: observations compared with simulations, *Marine Geology*, Vol.210, pp.17-41.

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.

Fugate, D.C. and C. T. Friedrichs (2002): Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST. *Continental Shelf Research*, Vol. 22, pp.1867-1886.

Harris, C. K., P. Traykovski and W. R. Geyer (2005): Flood dispersal and deposition by near-bed gravitational sediment flows and oceanographic transport: A numerical modeling study of the Eel River shelf, northern California, *Journal of Geophysical Research*, Vol.110, C09025, doi:10.1029/2004JC002727

Huang, X. and M.H. Garcia (1997): A perturbation solution for Bingham-plastic mudflow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No. 2, pp.986-994.

Kawanishi, K. and S. Yokoshi (1997): Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer. *Continental Shelf Research* Vol. 17, No. 8, 859-875.

Munk, W. and E. R. Andersen (1948): Notes on a theory of the thermocline. *Journal of Marine Research* Vol. 7, No. 3, pp 276-295.

- Nakagawa, Y., K. Nadaoka, H. Yagi, R. Ariji, 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*, Volume 62, Issue 10-12, pp 1535-1544, DOI 10.1007/s10236-012-0570-4
- Nortek (2004): Vector current meter user manual, 84p.
- Ross, M. A. and A. J. Mehta (1989): On the mechanics of lutoclines and fluid mud, *Journal of Coastal Research*, SI No.5, pp.51-61.
- Scully, M. E., C. T. Friedrichs and L. D. Wright (2003): Numerical modeling of gravity-driven sediment transport and deposition on an energetic continental shelf: Eel River, northern California, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. C4, 3120, doi:10.1029/2002JC001467.
- Sohma, A., Y. Sekiguchi, T. Kuwae and Y. Nakamura (2008): A benthic-pelagic coupled ecosystem model to estimate the hypoxic estuary including tidal flat – Model description and validation of seasonal/daily dynamics. *Ecological Modeling* Vol. 215, pp 10–39.
- 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.
- Vinzon, S., and A. Mehta (2003): Lutocline in high concentration estuaries: Some observations at the mouth of the Amazon, *Journal of Coastal Research*, Vol.19, No.2, pp.243-253.
- Winterwerp, J. C. and W. van Kesteren (2004): *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*, Elsevier, 466 p.

港湾空港技術研究所報告 第52巻第3号

2013.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2013) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Dynamics of Organic Matter Measured by the Elemental and Isotopic Techniques: Evaluation of the Carbon Sequestration in Shallow Coastal Ecosystems Kenta WATANABE, Tomohiro KUWAE	3
2. Modelling of Transport Processes of Muddy Sediment with High Water Content Yasuyuki NAKAGAWA	35
3. Generalization of the Wave Breaking Model by Focusing on the Production and Dissipation Process of Turbulence Katsuya HIRAYAMA, Yoshiyuki UNO	51