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

Evaluation of Erosion and Deposition of Muddy Sediment during Passage of Typhoon based on Field Data Observed off the Haneda in Tokyo Bay

中川康之¹·有路隆一²·灘岡和夫³·八木 宏⁴·下迫健一郎⁵·白井一洋⁶

Yasuyuki NAKAGAWA, Ryuich ARIJI, Kazuo NADAOKA, Hiroshi YAGI Ken-ichiro SHIMOSAKO and Kazuhiro SHIRAI

A field observation, comprising bottom mounted instruments for near-bottom currents and suspended sediment concentrations, was carried out for one-month at Tama River mouth in Tokyo Bay. The measurements have captured sediment resuspension during the extreme wave conditions associated with the typhoon that passed over Kanto district in the early September of 2007. The sediment resuspension was caused primarily by the waves at the monitoring site and combined current-wave bottom shear stress reached 0.8Pa. Furthermore, the temporal variation of bed level was successfully estimated by using the back scatterance data of acoustic Doppler velocimeter (ADV) and the depth of observed erosion during the storm event and the succeeding deposition were 20 mm and 50 mm, respectively.

1. はじめに

閉鎖性内湾域では栄養物質をはじめとする環境負荷物 質の底泥中への蓄積が進行しやすい一方で,波浪や潮汐 などの外力の影響による底泥の再巻き上げも容易に生じ ているため,水質環境の変化を評価する際には底泥の巻 き上げなどの動的な挙動をふまえた底面境界での物質移 動機構のモデル化が重要と考えられる.

本研究の対象海域である東京湾多摩川河口沖では,羽 田空港の拡張工事が進められつつある。当該海域におい ても,有機物を豊富に含んだ高含水比底泥が広く分布し ており(中川ら,2007),水域環境の変化を評価するう えでは,底泥の移動特性を把握しておくことが重要とな る。このため,著者らは同海域の海底近傍における流 況・濁度の測定を中心とする連続観測を実施し,2007年 の夏期に実施された観測時には,台風0709号の接近に伴 う高波浪と河川出水の発生時におけるデータの取得に成 功し,海底近傍で顕著な濁りの発生や,それらの輸送特

1	正会員	工修	(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
2	正会員		(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部沿 岸環境研究領域沿岸土砂管理研究チーム
3	フェロー	工博	年來現前光廣域佔岸上吵冒至前光/ 東京工業大学大学院情報理工学研究科情 報環谙学車改 教授
4	正会員	博(工)	(独法)水産総合研究センター水産工学研 空町 水産土木工学部 水理研究室長
5	正会員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所海洋·水工部 海洋研究領域長(前·国土交通省関東地方
6			整備局横浜港湾空港技術調查事務所所長) 国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港 技術調查事務所 環境課長

性(水平輸送フラックス)について中川ら(2008)(以下「前報」とする)にて報告している.一方,底泥の移動に伴う水・底質変化の予測においては,底泥の巻き上 げ・拡散・堆積過程などの海底面での動的な現象を取り 込む必要があるものの,現時点では底泥の動態そのもの が十分に解明されていない.そこで本研究では,海底泥 移動の実態把握を目的として,前報で示した台風0907号 来襲時に底面直上で測定された3次元超音波式流速計 (ADV)の流速データおよび超音波反射記録の解析を通 じて,底泥の侵食・堆積量や底面せん断応力と巻き上げ フラックスの関係などについて検討し,底泥輸送過程の 定量的な評価を試みた.

2. 現地観測とデータ解析の内容

(1) 現地観測の概要

観測点は図-1に示す東京湾北西部の多摩川河口沖の水 深約23m(D.L.基準)の地点であり,当地点で採取され た底泥コアサンプルの粒度分析によると,表層付近では 泥分が98%以上を占め,含水比が300~400%の流動性 の高い状態となっていた.超音波式流速計ならびに光学 式濁度計等の各計測器を図-2に示すように,海底付近に 集中的に配置して連続観測を行った.前報では解析対象 になかった底面直近(B+0.0m)の光学式濁度計(旧ア レック社製・高濃度濁度計ATU3W-CMP)については, 図-2に示すように設置時の底泥界面より測定面が露出す るように測器本体を埋没させ上向きに設置した.全計測 器の設置期間は2007年8月24日から9月19日(以下,西 暦年は略記)までの約1ヶ月間であり,本研究では台風



0709号が対象海域に接近した9月7日前後のデータを解 析対象とした.なお、各計測器のサンプリング間隔等の 測定方法の詳細については前報を参照されたい.

(2) データ解析方法

a)底面せん断応力の算定

海底面に作用する外力の評価として、ここでは観測点 の底面上10cmで測定されたADVの流速データを用いて 底面せん断応力を算定した.ADVによる流速測定は、サ ンプリング周波数8Hzにて約2分間(2048データ)のバ ースト測定を30分間隔で行った.流速値は各方向成分に ついてバースト毎の時間平均値(u, v, w)のほか、観 測地点の水深と表面波の深海条件を考慮して、周波数ス ペクトルにおける周期4秒を境に各成分を数値フィルタ ーにより再合成し、低周波側を波浪成分(u_w , v_w , w_w), 高周波側を乱れ成分(u', v', w')とした.水平方向の 流れ($U = (u^2 + v^2)^{1/2}$)による底面せん断応力(τ_c)は、 抵抗係数 C_c を用いた次式により評価した.

 $\tau_c = \rho C_f U^2$ (1) ここに、 ρ は海水密度であり、 C_f については底質条件 (粗度高さ z_0 =0.2mmを仮定)と流速測定高さ底面上10cm を考慮して、ここでは抵抗係数(C_f)を0.0041とした. 一方、波浪による底面せん断応力(τ_w)は、波による 抵抗係数 (*f_w*) および底面での代表軌道流速振幅 (*u_b*) を用いて次式により評価した.

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w u_b^2 \qquad (2)$$

抵抗係数 (f_w) は、下記のSoulsby (1997) による提案式 により求め、解析対象期間中の波浪条件の下では0.003 ~0.05の値となった.

 $f_w = 1.39 (A/z_0)^{-0.52}$ (3) ここに, $A = u_b T/2\pi$ (T:周期) である. なお,代表軌道 流速振幅 (u_b) については,波動流速成分の二乗平均 (*rms*) 値から次式により求めた (Traykovsky et al., 2007).

 $u_b = \sqrt{2(u_{w_rms}^2 + v_{w_rms}^2)}$ (4) さらに, 波浪および流れの共存場における底面せん断応 力の算定には, ここでは次式を用いた (Soulsby,1997).

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,式(6)は波と流れの相互作用を考慮した平均せ ん断応力である.

b)底面高さ及び巻き上げフラックスの推定

底泥の侵食・堆積過程を評価するには、底泥面高さの 時系列的な変動や底泥直上での鉛直方向の輸送フラック スを定量的に把握しておくことが重要である。そこで本 研究では、ADVの音波反射信号を活用することにより、 流速測定点直下の底泥面高さと流速測定高さにおける SS 濃度の推定を試みた.元来,流速測定を目的とする ADV には, 音波の発信部と海水中のプランクトンや懸濁物粒 子で反射した音波を受信する受信部により構成され、反 射時の懸濁物等の動きに伴うドップラーシフトを考慮す ることにより海水粒子の移動速度を推定している、この ときADVは、図-3(a) に示すように流速測定層以外の層 からも音波の反射信号を受信している(Nortek, 2004). 本観測期間中に得られた音波反射強度の鉛直分布測定例 を図-3(b) に示すように、受信部の焦点位置(発信部よ り約15cm)で反射強度が極大となり、また下方において も底泥面での反射による反射強度の増大が見られる.こ のような反射強度の鉛直分布は各バースト測定時(1時 間おき)に記録されており、それらを基にセンサー発信 部から底面までの距離が求められることを利用して、観 測期間中の底泥面高さの時系列変動を調べた.

一方,SS濃度の変化に応じたADVの反射強度の変化 を利用して,ADVの音波反射強度の測定結果からSS濃 度を推定する試みがいくつか見られる(たとえば, Fugate et al., 2002;川西ら,2006).図-4は,本観測期 間において,ADVの流速測定層と同じ高さでほぼ同時に 光学式濁度計により測定されたSS濃度とADVの反射強



(a)ADVによる音波反射強度の測定イメージ



図-4 ADV反射強度とSS濃度の相関 度との関係を示したものであり、同図で得られた相関関 係を基にADVの反射強度をSS濃度に換算した。ADVの 反射強度のデータは流速測定と同期計測されており、こ こでは次式で表されるReynoldsフラックス(F_z)として

 $F_z = \overline{c'w'}$ (7) ここに、c'およびw'はSS 濃度および鉛直流速の乱流成分をそれぞれ意味し、<math>c'についても流速の乱流成分と同様 に数値フィルターにより分離した周期4秒以下の高周波 変動成分を乱流成分として抽出した.また時間平均操作

乱流成分によるSSの鉛直方向の輸送量を評価した.

'-' についてはバースト時間(約2分)による平均をとることによりバースト測定期間毎の値を求めた。

3. 観測結果と考察

(1) 台風通過に伴う擾乱時の底泥面高さの変化

台風0709号が観測海域に最接近した9月7日を含む4日 間における,底面上10cmを対象にADVで計測された平 均流況(U),代表軌道流速振幅(u_b),底面せん断応力 および底面高さの変動の様子を図-5(a)~(c)に示す. 台風の接近に伴う波浪の発達により底面直上での軌道流 速の増大が顕著となった,9月6日午後9時~9月7日午 前8時(Phase I)の期間には,波動軌道流速が最大で 15cm/s程度となり,また平均流も最大で20cm/sを超え, 両者の影響による底面せん断応力の最大値は0.8Pa(図-5 (b))となっている.この間,底泥面の高さは徐々に降 下し,最大で20mm弱の侵食(図-5(c))となっている.

その後,波浪の減衰と共に底面せん断応力も0.3Pa以下にまで減少した際に,底面高さは上昇に転じて9月7日の午後2時までの間(Phase II)に約50mmの堆積が生じている.さらに,波浪減衰後も3日間連吹した南風の影響や河川出水の影響により,観測地点においても南西方向への流れが卓越し(Pokavanichら,2008),9月8日の正午頃まで(Phase III)の間に底層でも20cm/s以上の速い流れが断続的に生じている.この間,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の堆積となった.

(2) 底面直上SS濃度と底泥の巻き上げフラックス

上記に示した底面高度の変動が生じていた際の,底面 近傍での浮遊懸濁物 (SS) 濃度の変化と式 (7) により 算定されたSSの巻き上げフラックスを図-5(d) および (e) にそれぞれ示す. 図-5(d) には前報で示した底面上 10cmおよび30cmでのSS濃度に加え、台風来襲前の底泥 面高さを測定層とする底面直上(B+0cm)での測定結 果も示してある. 底泥の侵食が生じた Phase Iの期間に おいては、底面近傍のSS濃度の急激な上昇がみられ、一 方SSの巻き上げフラックスの上昇も同時にみられること から,波浪および流れによる作用外力の増大による底泥 の巻き上げが生じていたことを示している. その後, 外 力の減少に伴って底泥面高さが上昇に転じたPhase Ⅱで は、

侵食前の

底泥面高さ(B + 0cm)において

10,000mg/l を超える極めて高濃度な状況が生じており、底泥表面が いわゆるfluid mud (たとえば, Winterwerp and van Kesteren, 2004)の存在を示唆する結果となっている. ただしB+0cmにおけるSS濃度は、底泥面高さがさらに 上昇する際に減少に転じており、これについてはセンサ - 設置高さと底泥面の上昇量の関係を考慮すると、 セン サー面が堆積物中に埋没し測定濃度の上限を超えたこと



図-5 台風来襲時の (a) 底面上10cmでの平均流速 (U) および代表波動流速振幅 (u_b), (b) 底面せん断応力 (τ_c:流れ成分, τ_w: 波浪成分, τ_{max}:波流れの合成), (c) 底泥面高さ (台風来襲前を基準とする), (d) 底面付近のSS 濃度, および (e) SS 巻き 上げフラックス (F_z)

による出力低下が生じた可能性が高い.その後,再び侵 食傾向となるPhase Ⅲの期間においては,SS濃度は緩や かに低下していくものの,台風来襲前と比較すると1オ ーダー高い濃度で推移している.

一方,侵食傾向にあったPhase I とPhase IIの期間にお ける,底面せん断応力と巻き上げフラックスの関係につ いてそれぞれ示したものが図-6である.同図によると, Phase I においては両者の間に比較的明瞭な相関関係が 成り立つのに対し,堆積が生じた直後の侵食過程 (Phase II)おいてはばらつきが大きい.静穏期に時間をかけて 懸濁物が沈降・堆積した底泥の侵食 (Phase I)に対し, 洪水等の影響により短期間で堆積した底泥の侵食となる Phase IIにおいては,底泥表層の性状に何らかの違いが あったことが巻き上げ特性の差異に関係するものと考え られるが,詳細については現時点では不明である.一方, 同観測点では台風0709号来襲前後で,含水比等の底質性 状に大きな変化が生じていることが確認されており(有 路ら,2010),台風イベントを通じた底泥表層状態の変 動過程について今後さらに検討する必要がある.



図-6 侵食時における底面せん断応力と巻き上げフラックス の関係

(3) 底面高さの変動と鉛直フラックスの収支

底泥面の高さの変動と、底面直上での巻き上げ量なら びに沈降量との対応関係を調べるため、底泥面高さ(Z(t)) の単位時間あたりの変動量に対する、鉛直方向の巻き上 げフラックス(F_z)および沈降フラックス(F_d)の間で の収支関係を次式により評価した.

$$-\rho_d \frac{dZ(t)}{dt} = F_z + F_d + F_r \qquad (8)$$

 $F_d = C_b W_s \qquad (9)$ ここに p_dは堆積底泥の乾燥密度(現地底泥試料の分析結 果を考慮して約300kg/m3を仮定)とし、巻き上げフラッ クスは式(7)より得られた観測値を用い、沈降速度の 推定(式 (9))においては、C_b(底面直上のSS濃度)に は底面上10cmでの測定結果を用い、W。(懸濁粒子の沈 降速)は底質粒径を考慮して0.1mm/sと仮定した.SSの 水平移流による堆積への影響は、底面直上のSS濃度の変 化を介して評価していることになる.鉛直方向の各フラ ックス成分と、図-5(c) に示した底面高さの時系列変動 に対する収支解析により求まる残差成分(F_r)の変動に ついて示したものが図-7である.同図によると特に底泥 面の上昇が顕著にみられた Phase Ⅱの期間おいて下向き の残差成分が大きくなっており、ここで推定した沈降フ ラックスだけでは底泥面の上昇が説明できていないこと を示している.この要因の一つとして、図-5(d)で示さ れた底面直上での10,000mg/1を超える高濃度流動泥 (fluid mud) が底面直近にのみ分布する (図-8中t₃) こと をふまえると、ここでの沈降フラックス評価点である底 面上10cmよりも下層において, fluid mudの移流による 底面高さの上昇が生じた可能性が考えられる.



図-7 底面高さの変化に対する巻き上げフラックス (F₂) と沈 降フラックス (F_d) および残差成分 (F_r) の時間変化



4. おわりに

台風0709号通過時における東京湾羽田沖での底泥輸送 現象について,連続観測データの解析を通じて検討を行 った.台風通過時に生じた高波浪,流れおよび河川出水 の影響により,観測点においては擾乱期間を通じて侵食 および堆積が交互に生じ,正味約20mmの堆積が生じた. また海底泥の収支解析の結果などから,堆積時にはfluid mudによる底泥輸送が生じていた可能性が示唆された. 水質予測等における海底面を通じた物質移動量の評価に おいては,底泥極表層の性状の時系列的な変化の把握が 重要となることから,ここでの観測結果をふまえて当該 海域での底泥輸送特性を適切に反映させた底泥モデルの 開発に発展させていく予定である.

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 たことを付記し謝意を表する.

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(投稿中)
- 川西 澄・稲田 景(2006):超音波流速計による浮遊粒子の 粒径を考慮した浮遊砂濃度の測定法,海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1401-1405.
- 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.
- Pokavanich, T.・八木 宏・出口朋子・灘岡和夫・中川康之・ 有路隆一・松坂省一・鈴木信昭・諸星一信・小田遼子・ 二瓶泰雄(2008):成層期東京湾・多摩川河口沖の流動特 性について,海岸工学論文集,第55巻,pp.1091-1095.
- 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.
- Nortek (2004): Vector current meter user manual, 84p.
- 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.
- Winterwerp, J. C. and W. van Kesteren (2004): Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment, Elsevier, 466 p.