

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.49 No.2 June 2010

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 49 卷 第 2 号 (Vol. 49, No. 2), 2010年6月 (June 2010)

目 次 (CONTENTS)

固結特性を有する粒状材を用いた SCP改良地盤の安定性に関する実験的検討 高橋英紀・森川嘉之 3	
(Experimental Study on Stability of Ground Improved by SCP Method Using Solidified Granular MaterialHidenori TAKAHASHI, Yoshiyuki MORIKAWA)	
高炉水砕スラグ硬化促進工法の現場適用性の検討 菊池喜昭・岡祥司・水谷崇亮 21	
(Examining Field Application of Solidification Acceleration method of Granulated Blast Furnace SlagYoshiaki KIKUCHI, Shoji OKA, Taka-aki MIZUTANI)	
One-Dimensional Model for Undertow and Longshore Current Velocities in the Surf ZoneYoshiaki KURIYAMA..... 47	
(戻り流れ速度・沿岸流速に関する数値モデル)栗山善昭	
Numerical Simulation of Cyclic Seaward Bar MigrationYoshiaki KURIYAMA..... 67	
(沿岸砂州の繰り返し沖向き移動に関する数値計算)栗山善昭	
Prediction of Cross-Shore Distribution of Longshore Sediment Transport Rate in and outside the Surf Zone Yoshiaki KURIYAMA..... 91	
(砕波帯内外における沿岸漂砂量の岸沖分布の推定)栗山善昭	
台風来襲時の東京湾羽田沖における底泥移動現象 中川康之・有路隆一.....107	
(Fine sediment transport process during a storm event induced by typhoon attack in Tokyo BayYasuyuki NAKAGAWA, Ry-ichi ARIJI)	
Hysteresis loop model for the estimation of the coastal water temperatures - by using the buoy monitoring data in Mikawa Bay, JAPAN - Hong Yeon CHO, Kojiro SUZUKI, Yoshiyuki NAKAMURA.....123	
(沿岸水温を推定するヒステリシスループモデルの開発 ー三河湾ブイモニタリングデータを活用してー) 趙烘輦(チヨホンヨン)・鈴木高二朗・中村由行	

台風来襲時の東京湾羽田沖における底泥移動現象

中川 康之*・有路 隆一**

要 旨

流れや波浪等の外力に対する底泥の巻き上げや、侵食・堆積等の移動機構の解明を目的として、東京湾多摩川河口沖（水深約 23m(D.L.))にて流況や濁度等の水質に関する連続観測を 2007 年 8 月中旬から同 9 月中旬にかけて約 1 ヶ月間実施した。観測では超音波式 3 次元流速計による底面直上の詳細な流速測定や、鉛直多点に設置した光学式濁度計による巻き上げ泥の濃度測定など、時空間的に高解像度な外力と浮遊懸濁物濃度の時系列データの取得を試みた。観測期間中には、台風 0709 号の通過に伴う高波浪や大規模な出水が東京湾内で発生し、本調査ではこれら擾乱時を含めた観測データの取得に成功した。本報告では、底泥に作用する外力（底面せん断応力）と底泥の巻き上げの関係について調べたほか、超音波式流速計により得られる音波反射強度のデータを活用し、台風擾乱時を通じた懸濁物の巻き上げフラックスや底泥表面高さの時系列変動についても検討した。その結果、通常時には大潮期の潮汐流が作用する程度では底泥の巻き上げはほとんど生じていないのに対し、台風時に発生した高波浪（有義波高 2.5m 以上、同周期 5 秒以上）および流れ（流速 20cm/s 以上）の作用により顕著な巻き上げが生じることを確認した。また、巻き上げに伴う堆積泥の侵食のみならず、河川出水等により供給されたと考えられる懸濁物の堆積も生じており、これら侵食・堆積時には底泥表面高が最大で 20mm(侵食)、50mm(堆積)の規模で、それぞれ変動していたことを示した。

キーワード：底泥，東京湾，現地観測，台風 0709 号，超音波式 3 次元流速計(ADV)，底面せん断応力，巻き上げフラックス

* 海洋・水工部 主任研究官

** 海洋・水工部 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究チーム 研究官
〒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：y_nakagawa@ipc.pari.go.jp

Fine sediment transport process during a storm event induced by typhoon attack in Tokyo Bay

Yasuyuki NAKAGAWA*

Ry-ichi ARIJI**

Synopsis

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. Based on the SS-flux analysis during the recording period, the net suspended sediment transport at the site was towards the SW or outer Tokyo Bay. 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.

Key Words: Fine sediment, Tokyo Bay, field observation, Typhoon Fitow, Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), Bottom shear stress, Erosion flux

* Senior researcher, Marine Environment and Engineering Department

** Researcher, Coastal Sediment and Processes Research Group, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 E-mail : y_nakagawa@ipc.pari.go.jp

目 次

要 旨	107
1. はじめに	111
2. 観測の概要	111
2.1 観測地点	111
2.2 観測方法	112
3. 観測データの解析方法	113
3.1 底面せん断応力の評価	113
3.2 SS鉛直フラックスおよび底泥面高さの評価	114
4. 観測結果と考察	116
4.1 観測期間中の気象・海象概況	116
4.2 台風通過時の底面せん断応力およびSS濃度の変化	116
4.3 SS輸送と底泥の巻き上げ	120
4.4 底泥面高さの変動	121
5. 結論	121
6. おわりに	121
謝辞	122
参考文献	122

1. はじめに

内湾域の河口部では、河川からの流下土砂が堆積物する一方で、波浪や潮汐など多様な外力の影響による底質の再移動が生じている。内湾域での底質の移動現象のうち、特にシルトや粘土分すなわち泥分の挙動は、巻き上げによる濁りの発生や化学物質等の海域内での動きにも関連するため、内湾域環境の管理上極めて重要なプロセスである。これまでも、日本国内の内湾域を対象とした現地での海底泥の巻き上げ現象に注目した調査はいくつかみられる（たとえば、瀬口ら，1989；近藤ら，1996；白石ら，2000）ものの、底泥そのものの移動量などの詳細な動態については未解明な点が多い。たとえば環境修復のための特別措置法が施行されている有明海・八代海においても、その環境動態把握のための重要な視点として、底泥ならびに懸濁物の輸送現象の解明を推進していくことの重要性が指摘されている（環境省，2007）。

これに対し本研究では、底面境界近傍での詳細な流れや濁度変動を捉える現地観測手法（中川，2002；中川・吉田ら，2007）を導入し、波浪や流れによる底泥の巻き上げ過程の把握を目的とした約1ヶ月間の連続観測を東京湾多摩川河口沖で実施した。観測期間中には、台風の通過に伴う記録的な高波浪、高出水が生じており、本報告では沿岸域での土砂輸送環境を支配するとされるこのような台風イベント時に注目し、底面での外力条件、浮遊懸濁物(SS)濃度、底泥の侵食・堆積傾向に関する観測データと解析結果についてとりまとめた。その結果、本観測地点においては、平常時には大潮期でも潮汐流による底泥の巻き上げはほとんど生じないのに対し、台風擾乱時には高波浪等の影響による顕著な底泥の巻き上げと侵食、あるいは出水に伴う懸濁物の沈降による堆積が生

じていたことを示し、巻き上げフラックスや底泥面高さの時系列変動について定量的に検討した。

2. 観測の概要

2.1 観測地点

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ヶ月間にわたり、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（図-2.1）において、各種計測器を海底設置して連続観測を行った。観測地点周辺を含む東京湾奥および湾奥部では、シルトおよび粘土を主体とした含水比の高い泥が堆積している（中川・有路ら，2007；五明，2001）。本調査点において、観測期間中に採取された底泥コアサンプルによる底質の分析結果（表-2.1）をみても、コアサンプル（全長30cm）の全層にお

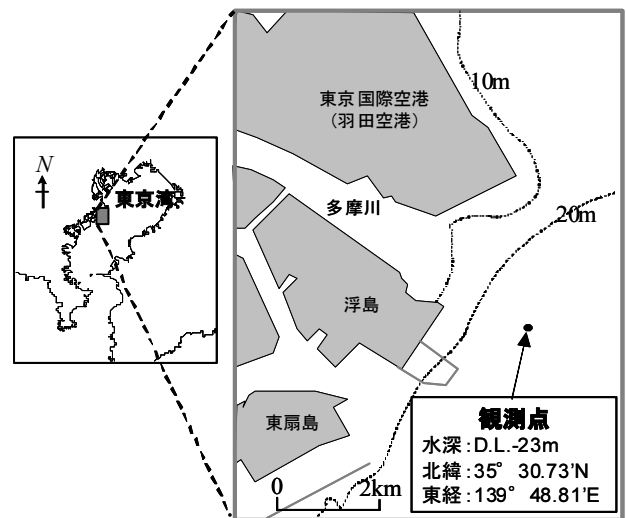


図-2.1 観測地点

表-2.1 観測地点の底質分析結果

泥深(cm)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	土粒子の 密度 (g/cm ³)	自然含水 比 (%)	強熱減量 (%)	粒度分析(%)			
						礫分 (2~75mm)	砂分 (0.075~ 2mm)	シルト分 (0.005~ 0.075mm)	粘土分 (0.005mm 未満)
0-3	1.121	0.194	2.600	477.9	12.8	0.0	1.5	40.9	57.6
3-6	1.199	0.326	2.586	268.0	12.3	0.0	0.5	47.0	52.5
6-9	1.193	0.313	2.610	280.9	11.1	0.0	1.4	45.8	52.8
9-12	1.215	0.348	2.603	249.3	10.2	0.0	0.7	35.0	64.3
12-15	1.184	0.301	2.568	293.9	10.3	0.0	0.6	27.8	71.6
18-21	1.233	0.378	2.600	226.4	10.9	0.0	0.6	35.5	63.9
27-30	1.203	0.331	2.588	263.6	10.6	0.0	1.1	24.0	74.9

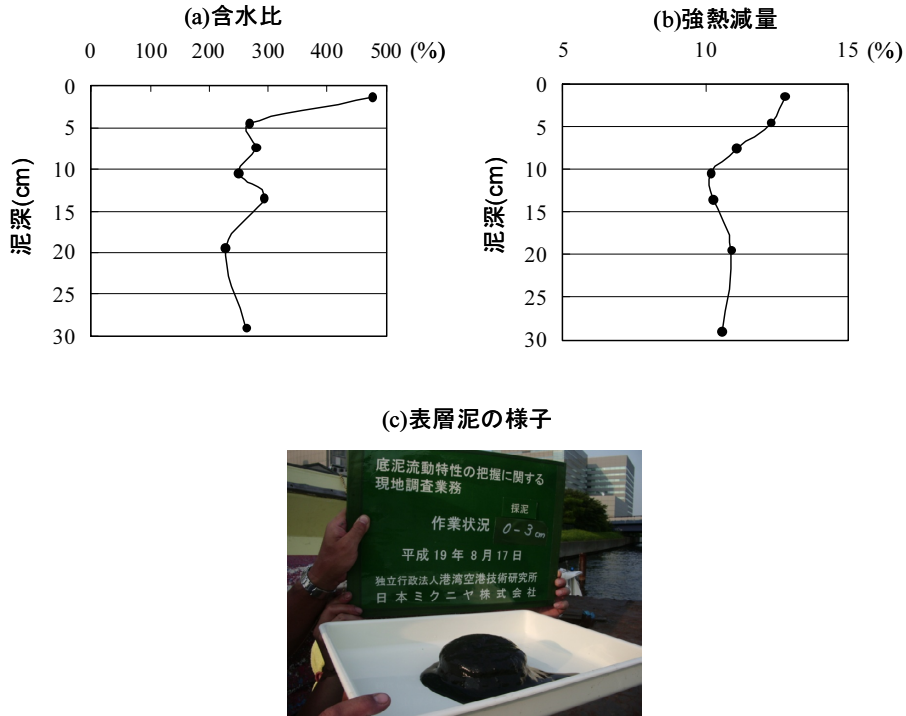


図-2.2 底泥の含水比および強熱減量の鉛直分布と表層泥の様子

いてシルトおよび粘土の泥分が98%以上を占め、特に表層で含水比および有機物含有量が高くなる傾向がみとれる(図-2.2)。

2.2 観測方法

本調査は、海底近傍の流況と底泥の巻き上げ等に伴う濁度変動の様子を把握することを目的とすることから、図-2.3に示すように超音波式流速計ならびに光学式濁度計等を海底上約1m以内に集中的に配置して観測を行った。

流動場の把握においては、海底面への流れ等による作用外力を正確に評価するため、底面上10cmにおける乱れを含めた詳細な流速変動を超音波式3次元流速計(ADV)により計測し、また全水深における流速場を超音波式流速分布計(ADCP)により測定した。一方、底泥の巻き上げ等に伴う浮遊懸濁物量の変化を評価するため、光学式濁度計群による鉛直方向に多点に配置した濁度計測を行った。これら使用機器の内容と測定方法の詳細を表-2.2に示す。なお、光学式の濁度計による計測結果については、機器

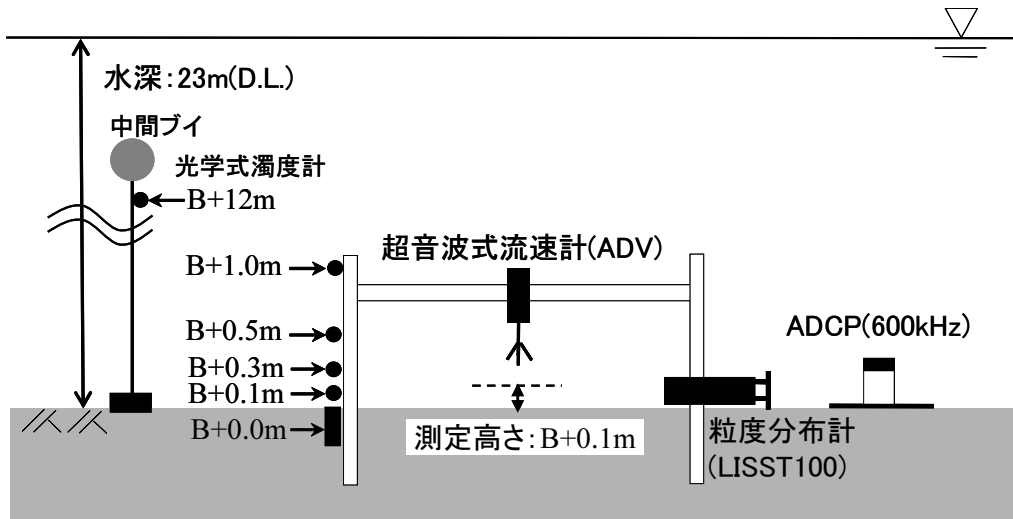


図-2.3 計測器の設置概要図

表-2.2 使用した主な計測機器と測定内容

測定項目	使用機器	測定位置 (底面からの高さ)	記録間隔
流速	超音波式3次元流速計 ADV (Nortek 社製 Vector)	0.1 m	30 分おき 約 2 分間 8 Hz
	超音波式流速分布計(RDI 社 製 ADCP・600 kHz)	1.62 m～水面下約 0.3 m, 50 cm 間隔	10 分おき 2 分間(1 Hz)の平均
濁度	後方散乱型光学式濁度計(アレック社製 COMPACT-CLW)	0.1 m, 0.3 m, 0.5 m, 1.0 m, 12m	10 分おき 30 秒間 1Hz
水温 塩分	メモリー式小型水温・塩分計 (アレック社製 COMPACT-CT)	0.5 m 6.0 m 12 m 水面下 0.3 m	1 分おき 連続測定
粒度	現地式粒度分布計 (Sequoia 社製 LISST100)	0.1 m	10 分おき 30 秒間 1Hz

に対して観測地点で採取された底泥試料を用いた検定を行い、出力結果をSS濃度(単位: mg/l)に換算した。また、観測期間中は3~4日に1回の頻度で、ダイバー作業によるすべての設置機器の作動点検ならびにセンサー部の清掃を行い、特に生物付着による測定精度の劣化対策を施した。

3. 観測データの解析方法

3.1 底面せん断応力の評価

底泥の挙動に関与する外力の指標として、海底付近の水塊の動きに伴い海底面に作用する底面せん断応力を算定した。ここで用いたデータは、海底面上約 10cm の測定点を対象として、超音波式流速計により測定した3方向成分の流速値である。表-2.2 に示したように、本測器による計測では、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 分間隔で行っており、高波浪時に記録された流速波形の一例を図-3.1(a)に示す。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、流速変動の周波数スペクトル(図-3.1(b))の周期 4 秒を境にした低周波側と高周波側の成分を再合成することにより、波浪成分(u_w, v_w, w_w)および乱れ成分(u', v', w')にそれぞれ分離した。まず平均的な水平方向成分の流れによる底面せん断応力(τ_c)は、底面近傍では流速の鉛直分布が対数則に従うと仮定し、抵抗係数

C_f を用いた次式により評価した。

$$\tau_c = \rho C_f \sqrt{U^2 + V^2} \quad (1)$$

ここに、 ρ は海水密度であり、 C_f については流速の測定点の底面からの高さ z を考慮して次式により求めた(たとえば、Dyer, 1986)。

$$C_f = \left(\frac{\kappa}{\ln z/z_0} \right)^2 \quad (2)$$

ここに、 z_0 : 粗度高さ、 κ : カルマン定数(=0.4)である。なお粗度高さについては、ここでの底質条件を考慮して $z_0=0.2\text{mm}$ と仮定したことから、底面上 10cm の流速値を用いる場合には抵抗係数(C_f)は 0.0041 となる。

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。

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w u_b^2 \quad (3)$$

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。

$$f_w = 1.39(A/z_0)^{-0.52} \quad (4)$$

ここに、 $A=u_b T/2\pi$ (T : 周期) である。

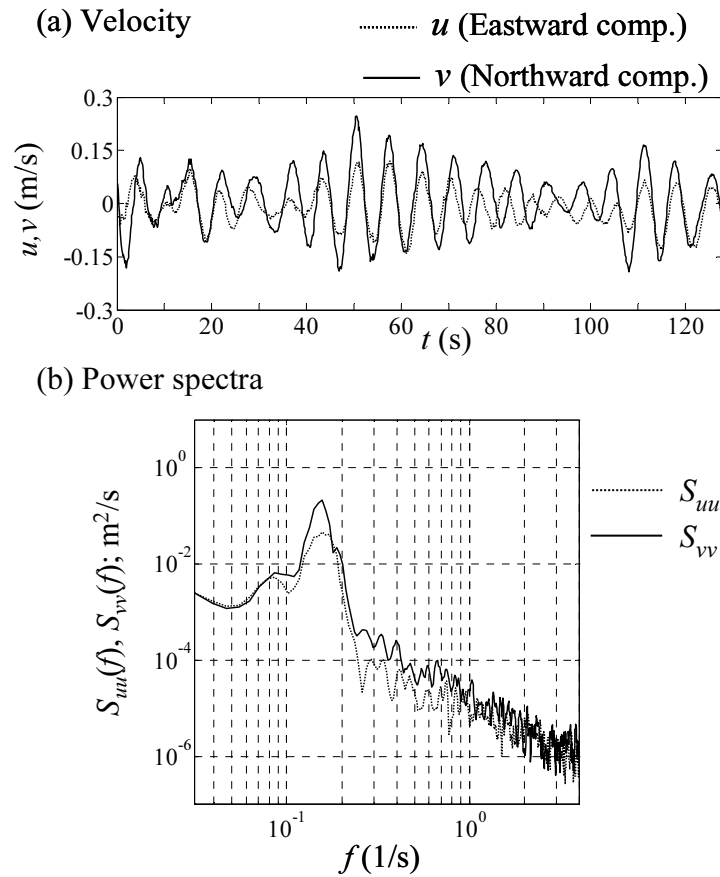


図-3.1 底面上 10cm で測定された流速波形と周波数スペクトル

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).

$$u_b = \sqrt{2(u_w_rms^2 + v_w_rms^2)} \quad (5)$$

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、両者の非線形相互作用を考慮した次式により算定した(Soulsby,1997).

$$\tau_{max} = \left[(\tau_m + \tau_w \cos \phi)^2 + (\tau_w \sin \phi)^2 \right]^{0.5} \quad (6)$$

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{1.5} \right] \quad (7)$$

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(7)は波と流れの相互作用を考慮した平均せん断応力とである(図-3.2).

3.2 SS鉛直フラックスおよび底泥面高さの評価

底泥の輸送現象を定量的に評価するためには、観測地点でのSS濃度や輸送フラックスの変動傾向のほか、底泥の侵食・堆積量を定量的に把握しておくことが重要と

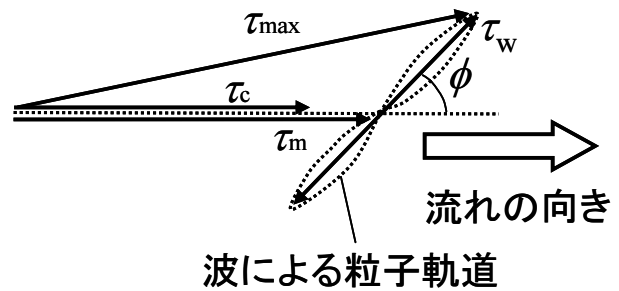


図-3.2 波と流れの共存場における底面せん断応力

なる。海水中のSS濃度測定に際しては光学式濁度計を用いた計測が一般的であり、本調査においても複数台の光学式濁度計を活用している。さらに本調査では、ADVの音波反射信号を活用したSS濃度と底泥面高さの推定を試みることにより、光学式濁度計では捉えきれないSSの鉛直フラックスの推定や、微少な底泥境界面高さの変動量を測定した。

元来、流速測定を目的とした測器であるADVは、センサーから発信した音波が海水中のプランクトンや懸濁

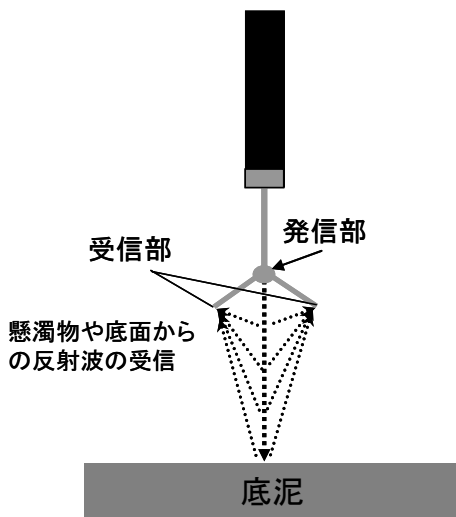
物粒子により反射する信号を受信し、これらのドップラーシフトを考慮することにより海水粒子の移動速度を推定している。このとき ADV は、流速測定層以外の層からも反射信号を受信しており (図-3.3(a)), 音響反射強度の信号は図-3.3(b) に示すような流速測定層およびその周辺部を含む鉛直分布として記録される。ADV の反射強度と同時に測定された SS 濃度と比較することにより、この反射強度のデータから SS 濃度の推定が可能となる (たとえば, Fugate et al., 2002 ; 川西ら, 2006)。図-3.4 は本調査で得られた ADV の流速測定層での反射強度と、同じ測定高さで同時刻に濁度計で測定された SS 濃度とを比較したもので、この相関関係を基に反射強度のデー

タから SS 濃度への換算を行った。特に、ADV の反射強度信号を用いた SS 濃度推定の利点は、反射強度のデータは流速と同期計測 (サンプリング速度: 8 Hz) されているため、次式で表される Reynolds フラックス (F_z) として SS の鉛直方向の輸送量を評価できることである。

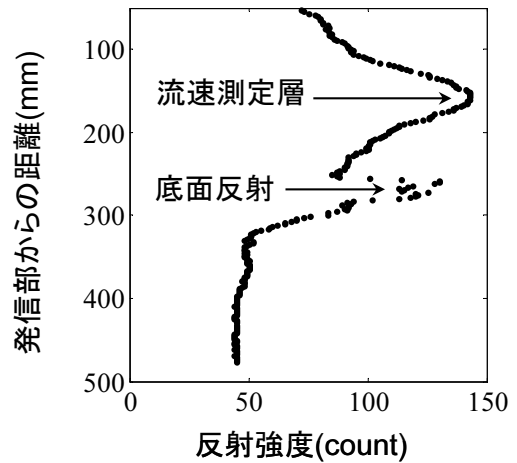
$$F_z = \overline{c'w'} \quad (8)$$

なお、 c' については流速データ同様に周期 4 秒以下の高周波変動成分のみを数値フィルターにより分離し、また平均操作 ' $\bar{\quad}$ ' については各バースト測定時間 (約 2 分) による平均値をとるものとした。

一方、ADV の反射強度データを活用したもう一つの試



(a) ADV による音波反射強度の測定イメージ



(b) 音波反射強度 (鉛直分布) の測定例

図-3.3 超音波式流速計による反射強度の測定

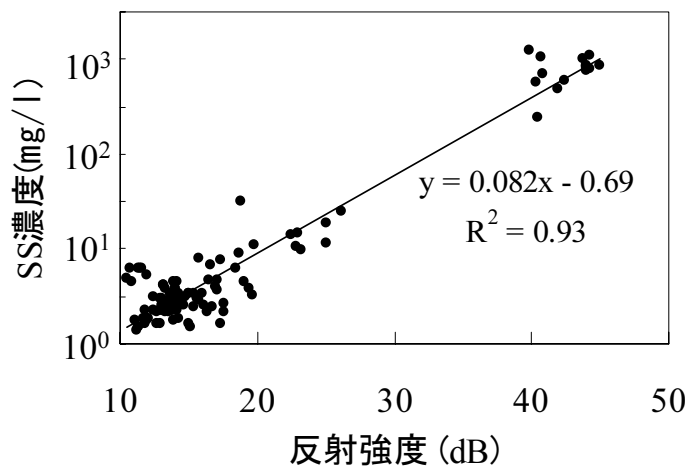


図-3.4 ADV 反射強度と SS 濃度の関係

みは、底泥面高さの変動量の把握である。反射強度データの鉛直分布(図-3.2(b))の特徴として、流速測定層に一次ピークが現れるほかに、底面等の媒体密度の急激な変化がある層に明瞭な二次的なピークが現れる (Nortek, 2004)。今回の観測結果においても、図-3.3(b)に示すようにセンサーと底泥面間の距離に相当する部分に明瞭な二次ピークがみられていることから、ここではこの二次ピーク位置の時間的な変化を追うことにより、侵食や堆積によって生じる底泥面高さの変動量の把握を試みた。

4. 観測結果と考察

4.1 観測期間中の気象・海象概況

9月6日から9月7日未明にかけて、台風9号が関東地方に接近し、東京湾内では高波浪の発生や多摩川をはじめとする主要河川からの出水が生じた。図-4.1は台風接近時を含む9月5日から同12日までの7日間における風況と波浪等の時系列変動を示したものである。風については

気象庁アメダス(羽田)のデータを、波浪については観測点より約5km北方に位置する東京灯標(東京都港湾局)での波浪観測データを、水位については観測点にて超音波式の水位計により測定されたデータをそれぞれ示している。台風接近時には平均風速が最大20m/sを超え、風向きは東から南に変化している。風況に対応して波高・周期も増大し、有義波高が2.5m、同周期が5sを超える高波浪が発生している。

一方、台風通過前後における海況の変化を示すため、9月4日と同11日に観測点において多項目水質計(アレック社製AAQ1183)により測定した、水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)およびSS濃度の鉛直分布を図-4.2に示す。台風擾乱を経験する以前の9月4日の結果(破線)をみると、水温・塩分において水深7m付近に躍層が発達し、DOにおいても水深方向に大きく減少し、水深約15m以深では3mg/l以下の貧酸素状態にあることがわかる。SS濃度については、水深約12m付近と底層付近にわずかな濃度の増大がみられる。これに対し、台風通過から約2日後の9月9日にお

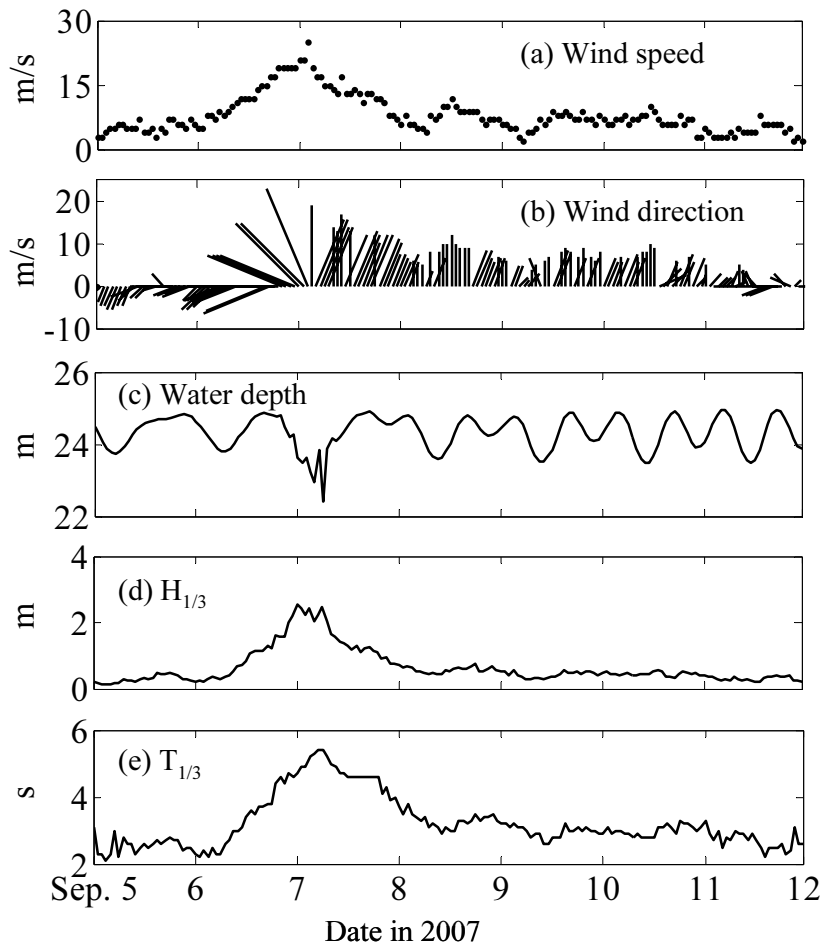


図-4.1 台風接近時の風，潮位および波浪

ける各項目の測定結果(実線)を比較してみると、塩分では河川出水に伴う表層付近での著しい低化がみられ、水温およびDOについては、いずれも鉛直方向に一様化し混

合している様子がわかる。SS濃度については、表層近傍および海底付近で濃度が高い。河川出水や海底泥の巻き上げなどにより生じた浮遊懸濁物が、外力の静穏化に伴

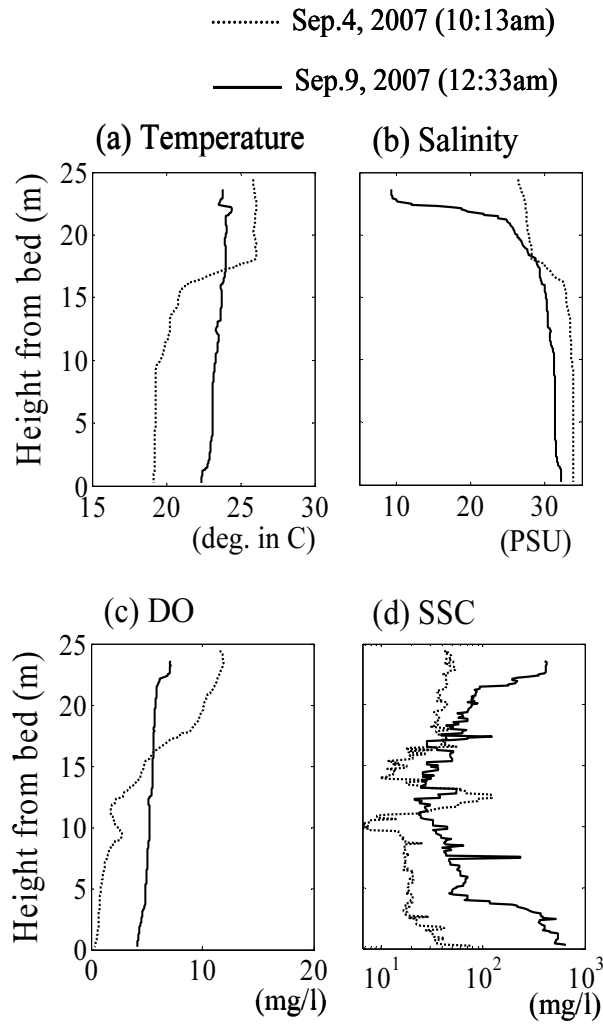


図-4.2 観測地点における台風前後での水温、塩分、DO、SSの鉛直分布の変化



図-4.3 台風通過7日後における観測点で見られた河口域濁水の潮目(左)と海表面の濁りの様子(右)

い沈降して海底付近のSS濃度が上昇したものと考えられる。一方、表層付近でみられる高濃度水塊については、洪水発生後から約1週間に及び、多摩川河口付近に停滞しており(図-4.3)、これらは河川起源懸濁物のうち沈降速度の小さな微細粒子が表層にとどまっていたものと思われる。

4.2 台風通過時の底面せん断応力およびSS濃度の変化

台風来襲時の底面上10cmにおける平均流速と、波による軌道流速振幅の時系列変化を図-4.4(a)に示す。当観測地点では平均水深が約25mであり、通常風波(周期3~4s)では波浪の影響は海底に到達することはない。し

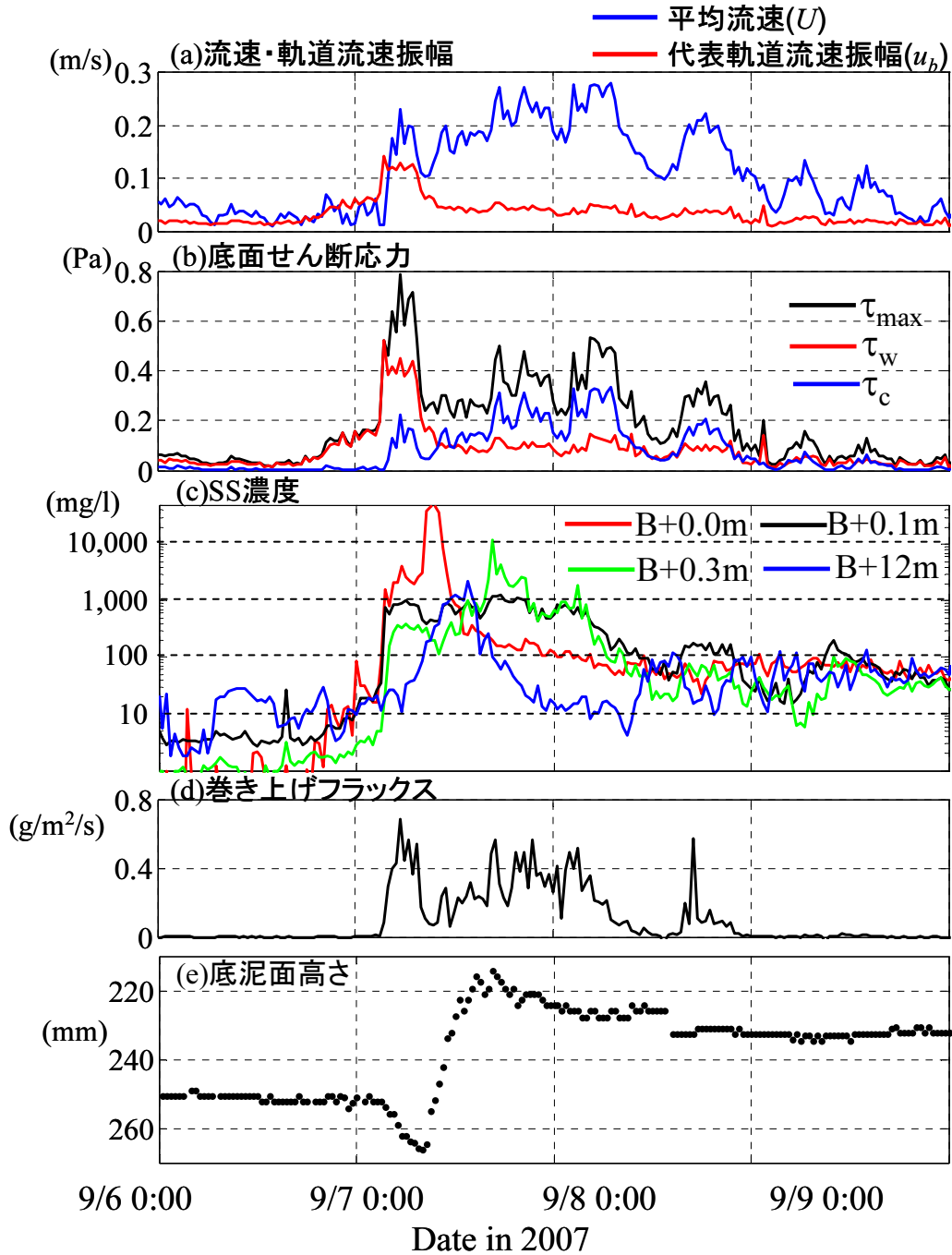


図-4.4 台風接近時の底面直上での(a)流速および軌道流速, (b)底面せん断応力, (c)SS濃度, (d)巻き上げフラックス, および(e)底面高度の各時系列変動

かし、台風接近時の9月6日から7日にかけては、周期5sを超える高波浪の影響により、海底直上での軌道流速振幅は最大で10cmを超えている。前章で例示した底面上10cmにおける流速波形と、それに対するパワースペクトルの計算結果(図-3.1)は、上記の波高増大が顕著であった9月7日午前3時におけるものである。波浪による底面近傍での周期的な流速変動の様子が捉えられており、その卓越周波数は波浪観測の結果と一致して、5~6sにピークが見られる。また、周期10sを超える周波数帯にも2次的なピークがみられ、より長周期な変動成分も実際には作用していたことが伺える。これら波と流れの作用下における底面せん断応力の時系列変化を図-4.4(b)に示す。台風接近時(9月7日0:00~4:00)には、海底での波動軌道流速振幅が15cm/s程度まで増大し、波による底面せん断応力が流れによるものよりも相対的に大きくなり、両者を考慮した底面せん断応力は最大0.8Pa程度にまで達している。その後、波浪の影響は減衰し底面せん断応力も一旦減少(9月7日10:00頃)するものの、

20cm/s前後の流れが9月8日の午後まで断続的に生じ、その間には最大約0.4Paの底面せん断応力が作用している。

これに対し、底面近傍で測定されたSS濃度(底面上0cm, 10cmおよび30cm)と全水深の約1/2に相当する底面上12mでのSS濃度の時系列変化を図-4.4(c)に示す。台風来襲以前は底面近傍よりも底面上12mでのSS濃度の方がわずかに高い値を示しているが、波浪による底面せん断応力が増大した9月7日の午前0時~3時頃にかけて、底層でのSS濃度が一気に上昇し $\sim 10^3$ mg/lのオーダーにまで達しており、平常時に比べ100倍以上の高濃度な状態となっている。水深20m前後の海域での波浪による底泥の巻き上げ現象は、たとえば大阪湾での観測事例がある(白石ら, 2000)けれども、そこではSS濃度上昇量は数10mg/lにとどまっており、本観測結果ではより高濃度な状況になっていることがわかる。

一方、1/2水深(底面上12m)層のSS濃度は、底面付近での増大時よりもタイミングが少し遅れて上昇し、波浪

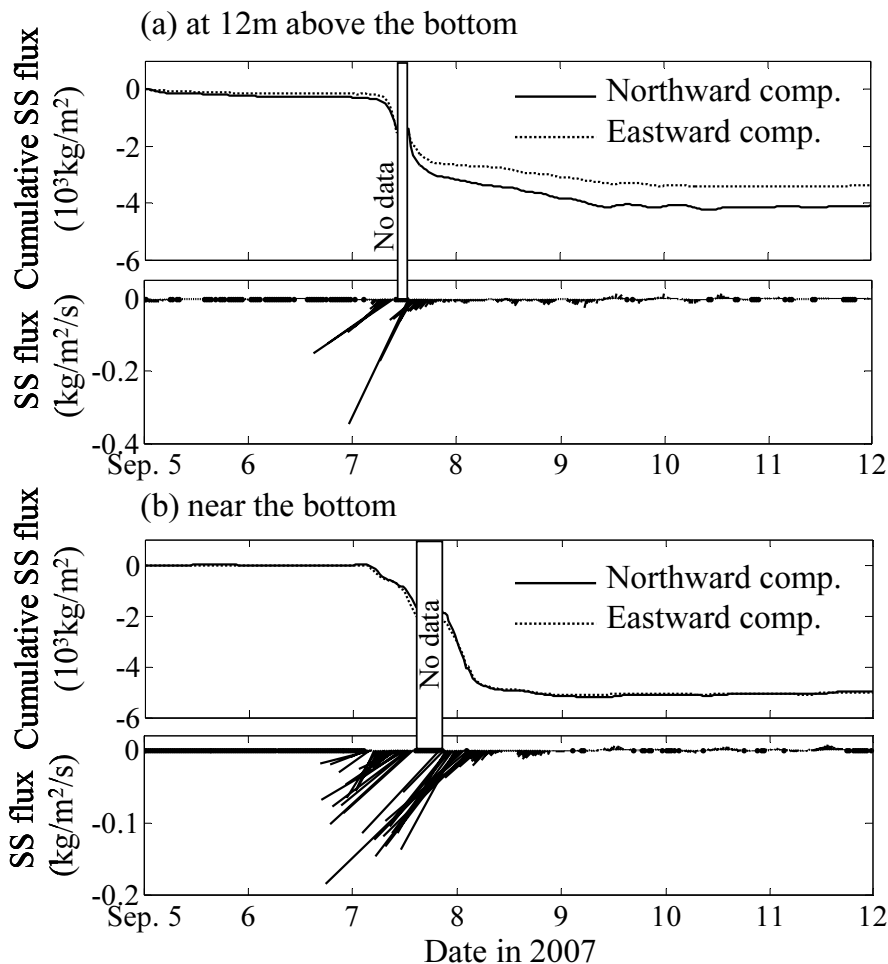


図-4.5 水平方向のSSフラックスの時系列変化

の影響がやや収まった頃にピークが見られる。このような1/2水深層のSS濃度の時間変動は、多摩川での洪水に伴う水位上昇の時間変動（二瓶ら，2008）に類似していることから、1/2水深層のSS濃度の上昇は河川からの出水の影響によるものと考えられる。底面上30cmと1/2水深層でのSS濃度が同程度（鉛直方向に一様な分布）となった後、1/2水深層でのSS濃度は減少する一方で、底面上30cmではその後約1日間にわたり、 $\sim 10^2 \text{mg/l}$ のオーダーの高濃度な状態が維持されており、河川から供給された懸濁物の沈降が生じていたものと考えられる。

4.3 SS輸送と底泥の巻き上げ

これら底泥の巻き上げや河川から供給された懸濁物の水平方向の輸送量を評価したものが図-4.5である。同図には、底面上30cmおよび底面上12mにおける流速とSS濃度から求めたSSフラックスについて、その輸送ベクトルと方向別の輸送量積算値が示してある。底面上12mでは、9月7日正午頃をピークに比較的短時間のうちにSS輸送が生じているのに対し、海底付近では7日午前3時頃の底泥の巻き上げによるSS濃度の上昇に始まり、その後も8日の午前中まで顕著なSS輸送が生じていることがわかる。輸送の方向はいずれも南西方向に卓越しており、東京湾の湾奥から湾口に向かって懸濁物の輸送が継続的に生じていたことを示している。なお、これらSSの輸送方向を支配する多摩川河口沖での流況場の詳細については、Pokavanichら（2008）により別途検討が

なされており、台風発生後の約2日間は南西方向への残差流が全水深にわたって卓越していたことが確認されている。また、図-4.4の表示期間における最後部の9月11日は大潮期にあたるものの、潮汐流のみによるSSの輸送は台風擾乱時の状況と比較すると極めて小さく、ここでの台風擾乱時の底泥輸送のインパクトの大きさが明瞭に示されている。

一方、観測点での底泥の巻き上げを評価するため、ADVの反射強度から推定したSS濃度により算定したSSの巻き上げフラックスの時系列変動を図-4.4(d)に示す。前節で述べた台風接近時の高波浪期(9月7日0:00~4:00)には、底面せん断応力の増大に伴い巻き上げフラックスの増大も顕著となっている。さらに波浪および流れの外力の低下と共に巻き上げフラックスも一旦減少(9月7日10:00頃)するものの、その後に断続的に生じた流れを主要因とするせん断応力の作用により、巻き上げが生じていることがわかる。

これら底泥の巻き上げフラックスと底面せん断応力との関係を示したものが図-4.6である。同図には、上述の台風擾乱初期(高波浪期)に生じた巻き上げ時のデータを黒丸で、また波浪減衰後の主に流れにより生じた巻き上げ時のデータを白丸で示している。いずれの期間においても、巻き上げフラックスは底面せん断応力が 0.2Pa 以上になると増大している。しかし、台風擾乱初期においては、底面せん断応力と巻き上げフラックスの間に比較的明瞭な対応関係がみられるのに対し、それ以降の流れ卓

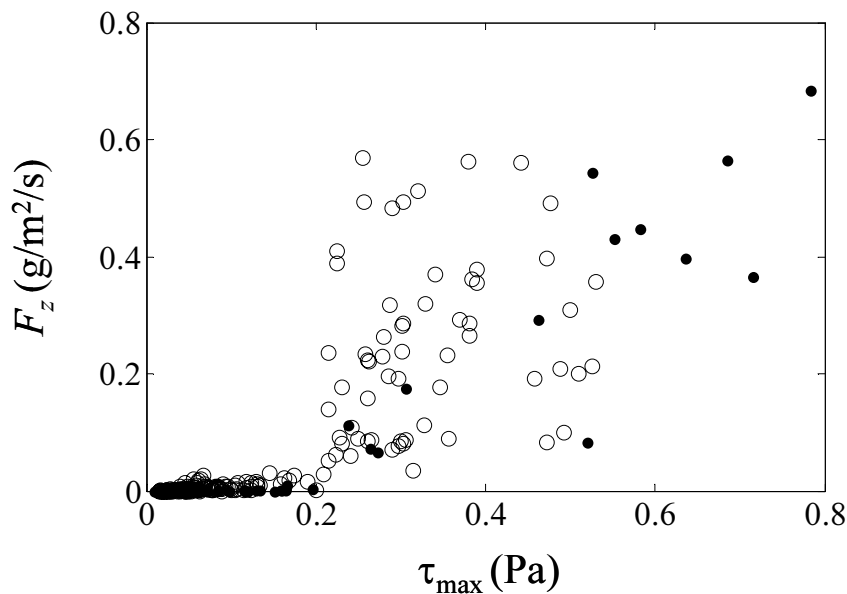


図-4.6 底泥の巻き上げフラックスと底面せん断応力との関係

越時のデータにおいてはばらつきが大きくなる。次節で詳述するように、台風擾乱初期の巻き上げを生じさせた外力が減少した際に、底泥面高さの上昇すなわち底泥の堆積が生じている。したがって、波浪減衰後の巻き上げ時には、これら新しく堆積した（ゆるく不均質な状態にある）底泥の巻き上げ生じていたであろうことが、この期間における外力と巻き上げフラックスの関係に、ばらつきが大きくなったことの原因の一つとして考えられる。

4.4 底泥面高さの変動

台風通過時における、底泥面高さの時系列変動を図-4.4(e)に示す。台風擾乱初期の高波浪期に見られた巻き上げフラックスや底面直上のSS濃度の増大時には、底泥面高さの顕著な低下が生じており、その侵食量は約20mmとなっている。その後、波浪の減衰と共に底面せん断応力が0.2Pa程度にまで低下した際、底泥面高さは約8時間のうちに60mm程度の上昇、すなわち堆積が生じている。その後、流れが断続的に生じた9月9日までの1.5日の間に15mm程度の侵食が生じており、台風通過前後では約25mmの上昇となっている。

これらの底泥面高さの変動と、先に示した底面せん断応力、SS濃度や巻き上げフラックスの時間変動との対応関係についてみると、まず底泥面の初期の低下（侵食）は高波浪期にみられた顕著な巻き上げ時に対応している。続く底泥面高さの上昇（堆積）が、波浪減衰時の底面せん断応力が低下時に生じており、このとき河川出水に伴い供給された懸濁物が観測海域に到達したことが水深12m層でのSS濃度の測定結果により示唆されており、これら河川起源の懸濁物の海底への堆積が生じたものと考えられる。ふたたび、底泥面高度が低下（侵食）については、波浪の減衰後に見られた主に流れによる底面せん断応力の増大時期に対応するものであり、流れによる底泥表層の侵食が生じていたものと考えられる。なお、9月8日の午後1時頃に見られる急激な底泥面の低下については、必ずしも巻き上げフラックスとの対応は見られず、ここでの計測期間(1時間あたり約2分間の計測)以外の時間帯に巻き上げが生じたことも考えられるが、その原因については不明である。

一方、底泥面高さの上昇（堆積）要因については、他の理由もいくつか考えられる。たとえば、底泥面が上昇した時期には、堆積物表層(B+0.0m)の底泥濃度は10,000mg/l程度であることから、いわゆるfluid mudの移流が底泥面高度の上昇に影響していることも考えられる。また、底泥面が上昇した後に見られる緩やかな低下につ

いては、底泥面表層に形成された高濁度層界面の沈降（たとえばWinterwerpら、2004）が生じた可能性もある。これらの影響については、ここでの観測データだけでは評価できないため、水槽実験や数値実験等による検討も含めて、さらに検討を加えていく必要がある。

5. 結論

観測期間中に生じた台風通過に伴う高波浪、高出水時における、底面での外力条件、浮遊懸濁物(SS)濃度、底泥の侵食・堆積傾向について整理し、特に底泥面上10cmを測定対象とした超音波式流速計のデータを活用し、底面せん断応力のほか巻き上げフラックスや底泥面高さの時系列変動量の定量化を行った。その結果、波および流れによる底面せん断応力が0.2Pa以上になると顕著な巻き上げが生じること、また台風通過時には侵食・堆積が交互に生じており、その際の底泥表面高さの変動量はそれぞれ20mm、50mmであった。一方、底泥表層から数cmの範囲では、有機物濃度や間隙水中の溶存酸素濃度が急激に変化することから、このような空間スケールでの物質濃度の再現と海水中との交換量の評価が水質モデルの構築上きわめて重要な要素となっており（たとえばSohma et al. 2008）、本研究により示された程度の移動量であっても、その移動量が予測できる底泥境界モデルの構築は、水質予測においても非常に大きな意味を持つことになる。

6. おわりに

海底地形の変化のみならず懸濁物の巻き上げに伴う水質の変化に関する予測シミュレーションなどにおいて、海底境界における底泥の挙動の把握ならびにそのモデル化は重要な課題である。本研究では、現地観測を通じて海底泥の巻き上げや底泥侵食現象の時間的変動過程を定量的に把握することができた。今後は、本研究で得られた観測データを活用し、外力に対する底泥の巻き上げやSSの沈降による堆積過程を再現する底泥の移動モデルの構築とその検証を進める予定である。その際には、本文中でも指摘したように、底泥面高さの変動に対して、ここでの観測データでは必ずしもその影響の程度が把握し切れていない要因（fluid mudの移流および界面沈降の過程など）も考えられることから、それらの効果については水槽実験や数値実験を通じて検討を加えていく予定である。

(2010年3月3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）の活動の一部として、同事務所からの受託調査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解析にあたり、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より多くの有益な助言を頂いた。なお、東京灯標における波浪データは東京都港湾局より提供頂いた。現地調査の実施に際しては、機器の設置・撤去およびメンテナンス等の現場作業において日本ミクニヤ(株)の協力を得たことを付記する。また当研究所における部内討議にて平石哲也海洋・水工部長をはじめ当部諸氏より、論文審査編集委員会（委員長：永井紀彦理事）を通じて北詰昌樹研究主監、菊池喜昭土質・構造部長ほか委員諸氏より貴重なコメントを頂いたことを付記して、謝意を表する次第である。

参考文献

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.

環境省(2006) ; 有明海・八代海総合調査評価委員会報告書, 80p.

五明美智男(2001) : 衝撃現象を考慮した覆砂工法の体系化に関する研究, 東亜建設工業株技術研究所, 水理環境研究室論文集別冊, 第 1 集, 162 p.

近藤雅秋・戸原義男・平松和昭・四カ所四男美・森健 (1996): 潮流による底泥の巻き上げ特性に関する研究, 農業土木学会論文集, No.182, pp.109-115.

白石修章・飯島眞治・長野国松・中辻啓二 (2000) : 関西国際空港沖における潮流と波による底泥の巻き上げ現象, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1076-1080.

瀬口昌洋・渡辺潔・加藤治 (1989) : 有明海奥部浅海域における底層の流れと濁りについて, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 819-823.

中川康之 (2002) : 東京湾奥部での底泥の巻き上げとその粒度分布特性について, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1046-1050.

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・吉田秀樹・田中克己・大波多昌志(2007) : 底泥の巻き上げと底面境界層内の乱れの現地観測, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.446-450.

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・峰浩二 (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.1-5.

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.

Dyer, K. 1986. Coastal and estuarine sediment dynamics. John Wiley & Sons Ltd., Chicester, 342p.

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 currentmeter user manual, 84p.

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.

Winterwerp, J. C. and van Kesteren, W. G. M. 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment, Developments in sedimentology, Elsevier, 466p.

港湾空港技術研究所報告 第49巻第2号

2010.6

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 大 應

Copyright © (2010) 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

Experimental Study on Stability of Ground Improved by SCP Method Using Solidified Granular Material	Hidenori TAKAHASHI, Yoshiyuki MORIKAWA 3
Examining Field Application of Solidification Acceleration method of Granulated Blast Furnace Slag	Yoshiaki KIKUCHI, Shoji OKA, Taka-aki MIZUTANI 21
One-Dimensional Model for Undertow and Longshore Current Velocities in the Surf Zone	Yoshiaki KURIYAMA 47
Numerical Simulation of Cyclic Seaward Bar Migration	Yoshiaki KURIYAMA 67
Prediction of Cross-Shore Distribution of Longshore Sediment Transport Rate in and outside the Surf Zone	Yoshiaki KURIYAMA 91
Fine sediment transport process during a storm event induced by typhoon attack in Tokyo Bay	Yasuyuki NAKAGAWA, Ry-ichi ARIJI 107
Hysteresis loop model for the estimation of the coastal water temperatures - by using the buoy monitoring data in Mikawa Bay, JAPAN -	Hong Yeon CHO, Kojiro SUZUKI, Yoshiyuki NAKAMURA 123