

河口干潟における底質変動要因の検討

STUDY ON SEDIMENT VARIATION FACTOR AT TIDAL FLAT OF RIVER MOUTH

中野晋¹・宇野宏司²・古川忠司³・和田高宏⁴

Susumu NAKANO, Koji UNO, Tadashi FURUKAWA, Takahiro WADA

¹正会員 博(工) 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²正会員 博(工) 国土環境㈱ 大阪支店 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀3-2-23)

³学生会員 徳島大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

⁴八千代エンジニアリング㈱ 関東支店 (〒153-8639 東京都目黒区中目黒1-10-21)

Field observation was carried out to measure the amount of sediment transport due to tidal flow by using some sediment traps. Sediment traps contained for suspended load and for bed material one. When the ground level was the vicinity of the mean water level, the amount of deposition became the maximum. The wave data measured by hydraulic pressure wave gauge was transformed to the velocity data near tidal flat bed by using a linear filter theory and was examined that the effect of waves on turbulence properties. The amount of a sediment transport during a tide were calculated based on the suspended load theory of Ashida-Michiue and Itakura-Kishi, but the agreement level between the calculation and the observation was not so good.

Key Words : tidal flow, sediment transport, tidal flat, linear filter theory, suspended load

1. はじめに

河口干潟に生息する底生動物にとって、生活と密接に関係する餌資源が継続的に供給されることが重要である。特に干潟の表層底質に含まれる植物プランクトンを主食とするシオマネキなどの底生動物にとっては毎日の潮汐によって、表層底質が移動や攪拌され、餌や酸素が常に補給されることが重要である。そこで著者ら^{1)・2)}は、日々の潮汐が干潟の底質を攪拌または交換する機能に着目し、河口干潟における1冠水期間の底質移動特性について、現地観測ならびに数値シミュレーションを行っている。特に前報²⁾では潮流流速に見られる比較的周期の長い変動成分について平均流速を中心とする正規分布で表現できるものと仮定し、正規乱数を利用した数値シミュレーションにより、一冠水期間における粒径別掃流砂量を評価した。しかし波浪観測を行っていなかったため、潮汐流速から波浪などの影響を間接的に考慮するに留まっていた。この方法では波浪による影響がブラックボックスとして残されるため、実際の底質移動を再現することには限界があり、副振動成分や波浪等による乱れの程度を評価することが課題とされていた。また、底質移動量の解析にあたっては、従来の方法ではすべて「掃流砂」として

取り扱っていたために、微細粒子を対象とした場合には不十分な点があると思われる。

そこで、本研究では、これらの課題を解決するために、①河口干潟における流れ・波高・風場の計測、②浮遊砂堆積量の鉛直分布測定を目的とした現地観測を行った。得られた観測データをもとに、河口干潟の底質移動に及ぼす波浪の影響を把握するとともに浮遊砂を考慮した底質移動量の解析方法について検討する。

2. 現地観測

(1) 調査方法

図-1に示す吉野川河口の住吉干潟内の11点において、1冠水期間の底質移動量を計測した。(表-1)以下に調査方法を記す。まず、干潮時に干潟の11ヶ所の調査地点にセジメントトラップ(口径42mm, 全高119mm)を河床から0, 2.5, 5.0cmに粒度分析と重量測定のために2本ずつ設置した。また, St. 6では、浮遊砂濃度の鉛直分布を把握するために0, 2.5, 5.0, 20, 40, 60cmの高度にトラップを設置した。そして、1冠水期間放置した後、調査地点が干出したところでトラップを回収し、堆積した底質の重量測定及び粒度分析をおこなった。また、観測

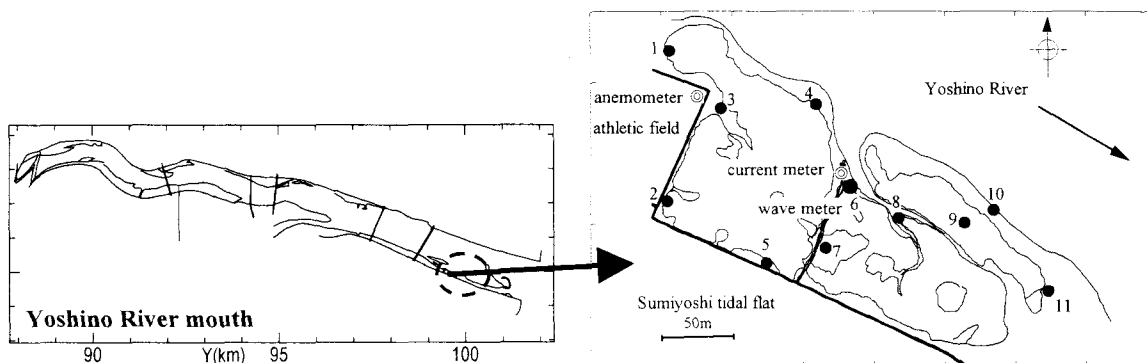


図-1 吉野川河口域と調査地点

表-1 調査日

調査日	潮 汐	満 潮	潮 差	最大風速	平均風速
H15.4.19	中潮	7:13	120cm	2.2m/s	0.58m/s

期間中は、干潟内に電磁流速計（アレック電子、COMPACT-EM）、河川敷に風速計（DAVIS社、WEATER WIZARD III）を設置し、河床上0.26mの流速と地上2mの風速 U_2 を測定した。さらに波浪等による乱れの程度を把握するためにSt.6に波高計（アレック電子、COMPACT-HW）を設置した。また、GPSにより観測地点の地盤高さを測量した。

（2）調査結果および考察

図-2は、観測期間中の風速、流速、水深ならびに波高の時系列変化を表わしたものである。調査期間中の風は、北西と西北西からの風の出現が卓越している。また、流速についてみると、流速計を設置した地点がみお筋になっているためみおに沿って満ち引きする様子が観測されている（図-2左）。次に、水深と波高についてみると、波高は満潮に近づくにつれて大きくなり、満潮を過ぎると小さくなる傾向がみられる。このことから、満潮前後のように流速値が小さい時間帯は、波の影響を受けて底質移動することが考えられる。

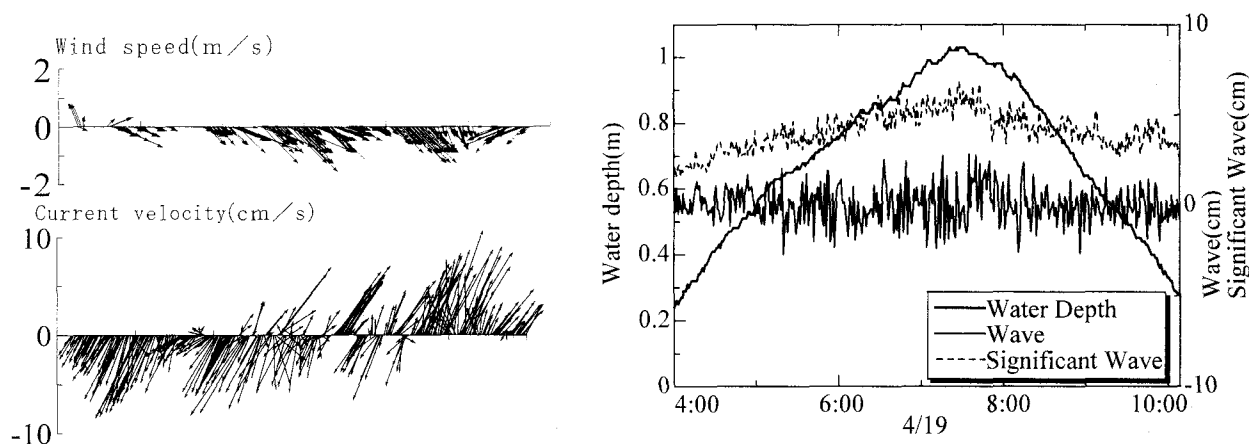


図-2 観測結果（風速・流速・水深・波高・有義波高）

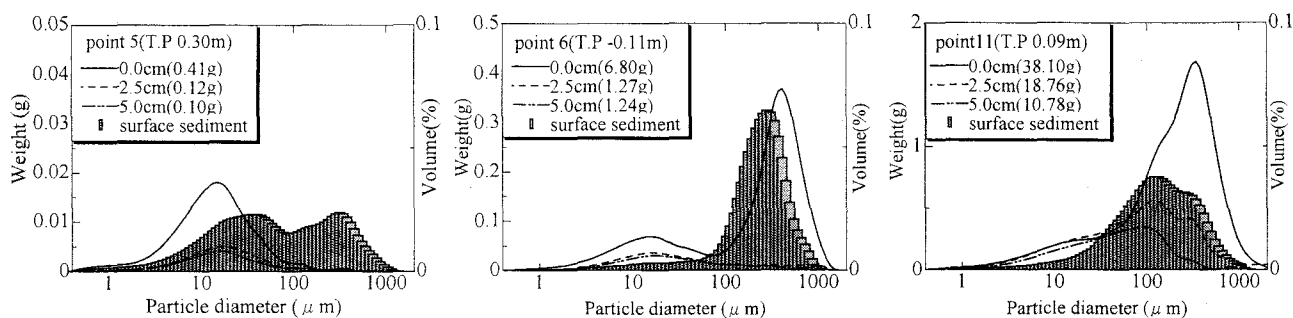


図-3 河床からの高さ別移動底質量

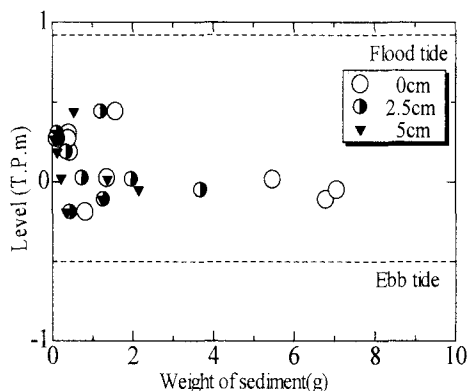


図-4 一冠水堆積量と地盤高の関係

図-3は、各調査地点における高さ別移動底質量を表わしている。調査ポイント横のカッコ内に、地盤高さを示し、凡例中のカッコ内の数値は、セジメントトラップに堆積した底質の総乾燥重量を表わしている。堆積量は、調査地点ごとに異なるが、5.0cmに設置したトラップの堆積量は、全堆積量のおよそ30%であり、浮遊状態で移動する割合が高いことがわかる。一方、St.6に設置したトラップへの堆積量をみると、20cm以上に設置したトラップへの堆積はほとんど見られなかったことから、浮遊砂濃度は5cmより上方で急減することがわかる。

前々回の報告²⁾では冬季に大潮と小潮の各一潮汐で同じ観測を実施し、平均水面付近で底質堆積量が最大になることを見出した。図-4に示すように今回も地盤高が平均水面付近の場所で堆積量は最大値を示しており、平均水面付近で潮汐流に伴う摩擦速度が最も大きくなるためであると考えられる。潮間帯の位置は、干出時間だけでなく、表層底質の移動特性に違いを生じさせる。その結果、表層底質の粒度や交換層厚などを通して生物の生息適性と密接な関係が生じるものと考えられる。

3. 流速変動に及ぼす水面変動の影響

河口干潟では冠水直後と干出直前の小さな水深時に潮汐流と水面変動に伴う乱れにより大きな掃流力が発生し、表層底質の輸送が生じる。前報では実測した流速変動記録を参考に、各時刻の流速変動の標準偏差を仮定し、乱れ成分を正規乱数で与えることにより、一冠水期間の掃流砂量の再現を行っている。しかし、水面変動量が流速変動や底質移動にどの程度寄与するかについてはほとんどわかっていない。今回の調査ではSt. 6において水面と流速の同時観測を実施している。この測定結果を用いて底面付近の乱れに及ぼす水面変動の影響について検討する。

(1) 河道内での風波の発達

図-2で示したように観測期間中、北西または西北西の風が卓越している。吉野川河口部は西北西から東南東方向にほぼ一直線上の河道となっているた

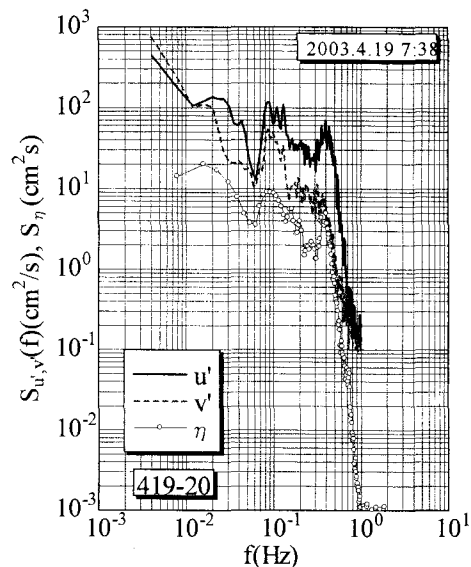


図-5 波と流速の周波数スペクトル

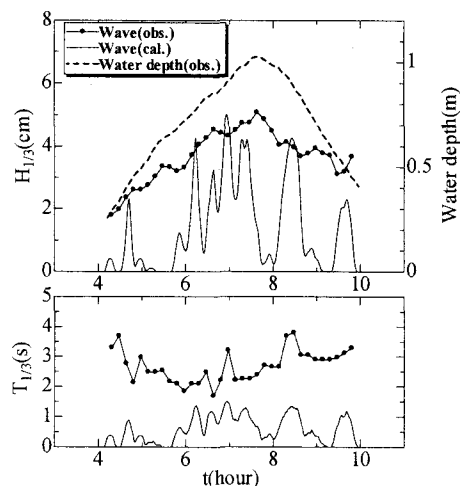


図-6 $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ の時系列変化

め、川筋に沿って西北西風が長時間吹くと河道内でも風波の発達が見られる。浅海域での風波の発達を次に示す井島ら³⁾の方法で評価した。井島らの方法では有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ はそれぞれ

$$H_{1/3}^* = 0.26 \tanh \left[0.578 h_*^{3/4} \right] \cdot \tanh \left[\frac{0.01 F_*^{1/2}}{\tanh \{ 0.578 h_*^{3/4} \}} \right] \quad (1)$$

$$T_{1/3}^* = 1.40 \tanh \left[0.520 h_*^{3/8} \right] \cdot \tanh \left[\frac{4.36 F_*^{1/3}}{\tanh \{ 0.520 h_*^{3/8} \}} \right] \quad (2)$$

ここで、 $H_{1/3}^* = g H_{1/3} / U_{10}^2$, $T_{1/3}^* = g T_{1/3} / 2\pi U_{10}^2$, $h_* = gh / U_{10}^2$, $F_* = gF / U_{10}^2$ である。フェッチ F は風向により変化させ、水深は干潟前面の滞筋の平均

水深4mを用いた。また10m風速は2mで測定した風速から対数則を用いて換算した。

一方、水圧式波高計データは潮汐成分を除去した後に波浪スペクトルを求め、 $f > 0.05$ Hzの短周期成分のスペクトルエネルギーから有義波高 $H_{1/3}$ 、 $f > 0.1$ Hzのピーク周波数 f_p から有義波周期 $T_{1/3}$ を求めた。代表的な波浪スペクトルを流速変動のスペクトルと併せて図-5に示す。なお、流速変動スペクトルで u' は東西方向、 v' は南北方向の流速変動である。波のスペクトルでは $f = 0.4$ Hzと0.1 Hz付近で極大となっている。前者は風波に対応し、後者は地形性の副振動に対応していると思われる。流速スペクトル、特に u の流速変動にも同一周波数で極大値を示し、水面変動の影響が現れていることがわかる。

図-6は井島の方法で干潟前面水域での風波を推算し、さらに浅水変形を考慮して観測点(St.6)の有義波高と周期を計算した結果である。実測では満潮時の7時半頃に最も波高が大きく、約5cmであり、周期は冠水期間を通して2~3s程度である。一方、井島による推算値はいずれも観測値より小さく、波浪が河道内で発生したものだけでなく、外洋から進入した成分も含まれているためであると推測される。しかし、元々静穏な場である干潟の底質移動をなお、考える上では河道内で発達した波も無視できないと考えられる。なお、図-2は全周波数領域のエネルギーから有義波高を計算しており、図-6に比べると数%大きくなっている。

(2) 線形フィルター法による波動流速成分の評価

線形フィルター法⁴⁾により、水面変動に起因した流速変動を推定する。これと流速変動の実測値とを比較することにより、底面付近の乱れ成分に及ぼす水面変動の影響を考察する。

微小振幅波理論によれば水面変動から水平流速変動への伝達関数は

$$H_s(\sigma) = \sigma \cosh(h+z) / \sinh kh \quad (3)$$

である。ここで、 σ は角周波数である。この式は波高水深比が大きい場合には有限振幅性のため、補正が必要となるが、波高が小さい今回のケースでは十分適用できる。

水面と流速変動について有効なデータが得られた4月19日の4:10から10:00までの350分間のデータについて線形フィルター法により、水面変動から流速計が設置されている河床から25cmの位置の流速変動を計算した。式(3)では水深 h を一定として与える必要がある。しかし、潮位変動により水深が変化するため、10分間2400個ごとに区分してこの間の平均水深を使用して、10分間を単位として解析した。

図-7に水面変動 η から計算した流速波形 $\tilde{u}$ と乱れ成分 u' 、 v' の実測波形を示す。水面変動から計算された計算波形は一次元で方向性を持たないため、

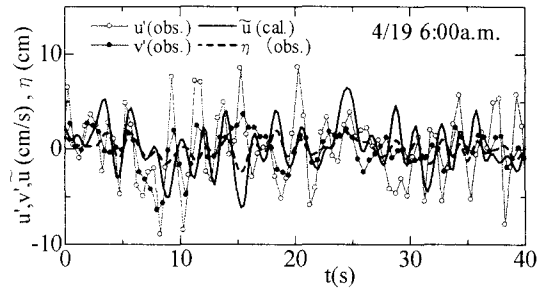


図-7 線形フィルター法により計算された水平流速と実測値との比較

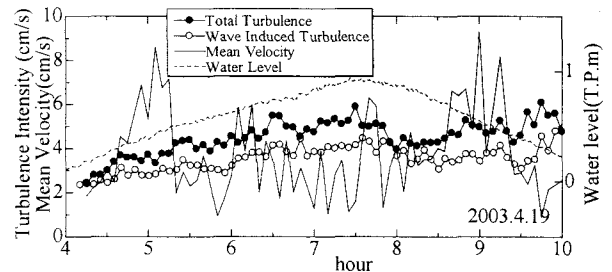


図-8 乱れ強度の時系列変化

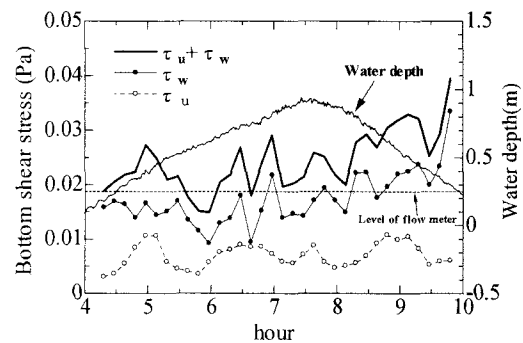


図-9 底面せん断応力の時系列変化

実測波形のもつ平面的な乱れ成分とは直接比較できないが、実測値に含まれる周期10秒程度の副振動成分などに対応していることも見てとれる。

(3) 乱れ強度と底面せん断応力の時系列変化

乱れ成分に関する実測波形と水面変動からの計算波形について5分間の乱れ強度を流速計データの

$\sqrt{u'^2 + v'^2}$ と波浪成分の $\sqrt{\tilde{u}^2}$ について表示したのが図-8である。なお、流速計データから乱れ強度を計算する際には図-5で示した流速変動スペクトルの $f > 0.05$ Hzの高周波成分のみを積分して求めている。図から流速変動の80%程度は水面変動に起因するものであることがわかる。波高は高々5cmと静穏な条件であったが、干潟などの浅い水域の流速変動や物質輸送には波浪の影響は無視できないと考えられる。

波浪の底質移動に及ぼす影響を見るため、波と潮

汐流によって生じる底面せん断応力 τ_w , τ_u について評価する. τ_u は平均流速 $\sqrt{U^2 + V^2}$ に対数則を適用して摩擦速度 u_{*u} を求め, $\tau_u = \rho u_{*u}^2$ として評価できる. τ_w は $\tau_w = (1/2) \rho f_w \hat{u}_b^2$ として求められる. ここで, f_w は粗面乱流に対する次式から求められる.

$$(4\sqrt{f_w})^{-1} - \log(4\sqrt{f_w}) = -0.35 + (4/3) \log(\hat{u}_b / \sigma k_s) \quad (4)$$

ここで, $\hat{u}_b$ は底面での水粒子軌道振幅, k_s は粗度高さで 0.5mm として計算した. 図-9 は 10 分ごとに解析された潮流の平均流速, 波浪データから計算した τ_w , τ_u の時系列を示した. また波と流れ共存場の底面せん断応力は τ_w と τ_u のベクトル和で表す方が望ましいが, τ_w の方向を計算できていないため, ここでは単純な線形和で表して示した. 図からわかるように平均流によるせん断応力は観測期間を通して大きな変化は見出せない. これは流速計の設置高さの制約からせん断応力が最も大きくなる干出直前および冠水直後の計測ができなかったことによると考えられる. 一方, 波によるせん断応力は波高に加えて水深の影響が大きく, 低水深時には大きなせん断応力を示している. そのことから干出直前と冠水直後には大きな表面底質輸送が生じるものと考えられる.

4. 粒径別浮遊砂量計算

混合砂の粒径別浮遊砂量を次のように求めた. 各粒径段階の浮遊砂濃度分布式には次の板倉・岸⁵⁾の式を用いた.

$$\frac{C_i}{C_{ai}} = \left\{ \left(\frac{h-z}{h-a} \right)^{1+\phi_2} \left(\frac{a}{z} \right) \right\}^{w_0 / K u_*} \quad (5)$$

ここで, C_a は基準点濃度, z は河床からの距離, a は基準点濃度を与える高さ ($a = 0.05h$ と仮定), w_0 は沈降速度, ϕ_2 は Monin-Obukov Length に関係する量で 2.23 とする. 基準点濃度 C_a は芦田・道上⁶⁾ が提案している次式を採用し, 沈降速度は Rubey の式を用いた.

$$C_{ai} = A \left[g(\xi_0) / \xi_0 - G(\xi_0) \right] p(d_i) \quad (6)$$

ここで, $A = 0.025$, $\xi_0 = (4/3)(w_0 / u_*)$,

$$g(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\xi_0^2)$$

$$G(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_0}^{\infty} \exp(-\xi^2 / 2) d\xi.$$

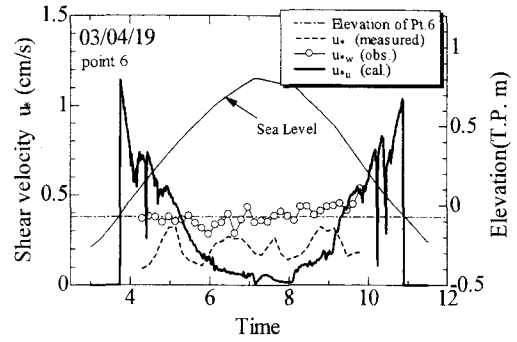


図-10 摩擦速度の時間変化

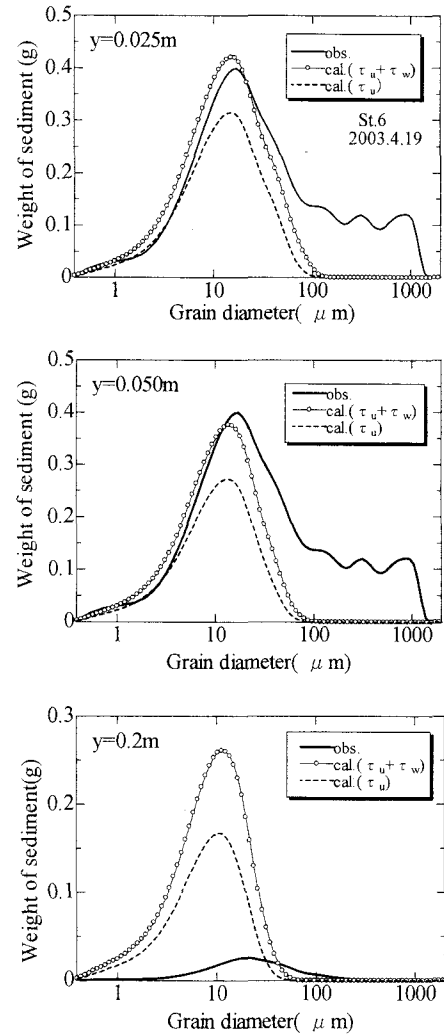


図-11 浮遊砂堆積量の比較

また, 式(6)の $p(d_i)$ はある階級の粒径の全粒径に占める割合を表す. ある一定時間 Δt にセジメントトラップに堆積する量は $C_i w_{0i} \Delta t$ で計算できると考えて, 観測期間内の浮遊砂による堆積量を計算した.

前報と同様に, 吉野川河口部を対象にして2次元潮流計算を行い, St. 6での潮流による摩擦速度変化を求めた. 図-10は数値計算で得られた摩擦速度変化で, 図には図-9のせん断応力の計算値から計算

した波に起因する摩擦速度 u_{*w} ，流速計データから得られた流れの摩擦速度 u_{*u} を併示する．数値計算では冠水直後，干出直前に大きな摩擦速度が表現されているが，すでに述べたように水深の小さい時間帯の流速が欠落していることもあり，計算と実測との整合性は良くない．また満潮時には流速が0に近づくため，摩擦速度は小さくなるはずであるが，流速スペクトルからわかったように周期10s程度の副振動成分なども含まれており，満潮時にもある程度の摩擦速度が発生している．そこで，実測の摩擦速度が得られるところは実測値を用い，実測値がない時間帯は数値計算結果で補うようにして流れだけの摩擦速度を用いて計算したケース，波と流れの摩擦速度を $\sqrt{u_{*u}^2 + u_{*w}^2}$ として与える場合の2ケースについて実測の堆積底質の粒度分布と計算結果を比較する．

図-11にはSt. 6で測定された浮遊砂堆積量について高さ2.5cm, 5cm, 20cmの3高度について計算と実測結果を比較したものである．図には流れの摩擦速度のみを考慮した場合と波と流れのせん断応力の線形和として波についても考慮した場合を並べている．計算では100 μm 以上の粒子は移動していないのに対して実際には相当量の底質が移動している．また底面から離れた所では微細粒子の移動量を過大に評価する傾向がある．このように浮遊砂の移動堆積量を再現するには至っていない．図-8や図-9でも水面変動の流速変動や底面せん断応力に及ぼす影響は当初予想していたものより大きかった．

一方，図-12は掃流堆積量について前報と同様に芦田・道上式を用いて計算したものと比較したものである．今回の計算では前報のようにモンテカルロ手法を用いた摩擦速度の変動操作は行っていない．浮遊砂と同様に波によるせん断応力を線形和で与えて計算している．浮遊砂と同様に粒径100 μm 付近が移動限界粒径に当たるため，これより大きな粒子は移動しないなど，再現性は不十分である．

浮遊砂の計算では摩擦速度に波の影響を考慮したものの流砂量式は河川流にものを準用している．芦田・道上が提案した基準点濃度は開水路定常流での乱流特性が基本になっているなど，水面変動が流れと同程度以上に影響する場合には基礎式の見直しも含め，再検討する必要がある．また干潟では汀線通過時に小さな碎波による侵食などが起こっており，こうした機構も考えるべきであろう．

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである．

(1) 線形フィルター法により，水面変動から底層付近の流速変動を推定し，流速計から得られた乱れ成分と比較した結果，波高が5cmと小さな水面変動でも波による影響は底層付近の流速変動の80%程度

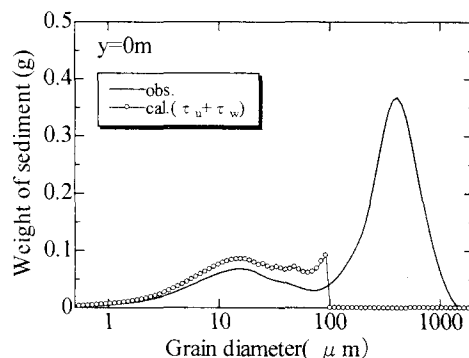


図-12 掃流堆積量の比較

となる．干潟での底質輸送には水面変動の影響が大きいと考えられる．

(2) 一冠水期間の浮遊砂による堆積量を板倉・岸の浮遊砂濃度分布式と芦田・道上の基準点濃度式を用いて計算した．粒径の大きな粒子の移動堆積量が評価できなかったことや河床から離れた位置でも浮遊砂量を過大評価するなど，再現精度は十分とは言えなかった．

(3) 一冠水期間堆積量は掃流砂，浮遊砂ともに高さが平均水面付近の地点で最大となる．

特に波浪を考慮した浮遊砂濃度分布則の検討など精度の高い浮遊砂量の評価方法について検討する必要がある．

謝辞

本研究は科学研究費補助金（基盤研究C-2，#13650569，代表：中野晋）の補助を受けて実施された．風速計は本学の鎌田磨人助教授に貸与していただいた．また計算に用いた地形データは国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所から提供いただいた．ここに記して感謝の意を表する．

参考文献

- 1) 宇野宏司・中野晋・古川忠司：河川干潟と砂州の底質移動に及ぼす影響，河川技術論文集，Vol.9，pp.281-286，2003．
- 2) 宇野宏司・中野晋：干潟底生生物を対象とした物理応答モデルの構築とその試行，海岸工学論文集，Vol.50，pp.1066-1070，2003．
- 3) たとえば，首藤伸夫：海の波の水理，技法堂出版，217p.，1981．
- 4) Reid R.O.: Correlation of water level variations with wave forces on a vertical variations with wave forces on a vertical pile for nonperiodic waves, Proc. 6th. Conf. Coastal Eng., pp.749-786, 1957
- 5) Itakura, T. and Kishi, T.: Open Channel Flow with Suspended Sediments, Proc. ASCE, Vol.106, No.HY8, pp.1325-1343., 1980.
- 6) 芦田和男・道上正規：浮遊砂に関する研究（1），京都大学防災研究所年報，第13号B，pp.233-242，1970．