

粒径を考慮した平面 2 次元地形変化モデルによる 河口テラス地形変化に関する研究

永井健二* ・ 芥川 哲** ・ 高木利光***
浅野 剛**** ・ 犬飼拓志****

富士川は、河口前面の水深約 20 m 以深が海底勾配 1/3 という急勾配の海底谷となっており、大規模な出水があった場合、河口部から流出した土砂は河口テラスに留まることなく海底谷へと流失してしまう。そこで、そのような土砂流出への対応策を検討する上において必要となる、河口から流出する土砂の移動・堆積状況について平面的な地形および粒度組成を考慮可能なシミュレーションモデルの開発を行った。平成 16 年 10 月の台風 22 号および 23 号来襲に伴う出水時に実施した現地調査結果を基に、浮遊砂を考慮した混合砂礫平面 2 次元地形変化モデルを構築し、これにより出水時の河口前面部における地形変化を再現し、モデルの妥当性を確認するとともに問題点・課題なども明らかにした。

1. はじめに

富士海岸の土砂供給源である富士川河口テラス地形は、水深 10 m 付近までは海底勾配 1/30 程度であるが、そこから沖は 1/3 という急勾配の海底谷となっている（図-1）。そのため大規模な出水があった場合、河口部から流出した土砂の大部分は河口テラスに留まることなく海底谷へと流失してしまうため、それらが海岸地形の形成に寄与することはない。一方、富士海岸昭和放水路以東では 1996 年から侵食対策として年間約 10 万 m^3 の礫養浜を実施してきたが、最近は漂砂下手側の侵食に配慮し、より現地粒径に近い養浜の実施を目指している。しかしながら、現地の粒度組成に近い養浜材を毎年 10 万 m^3 も入手することは環境面・経済面での負荷が大きく、その入手方法については課題が多い。このようなことから、富士川河口からの流出土砂を養浜資源として有効に河口テラスに残存させるような対応策を検討する必要がある。

本研究は、そのような対応策を検討する上において必要となる河口から流出する土砂の移動・堆積状況の平面分布および粒径分布を考慮可能とするシミュレーションモデルを構築することを目的とするものである。ここでは、1 次元河床変動モデルに使われている掃流砂をベースとした混合砂礫モデルに、浮遊砂を考慮しかつ平面 2 次元に拡張した河口部地形変化モデルを構築することを試みた。平成 16 年 10 月の台風 22 号、23 号来襲に伴う出水による河口前面部における地形変化および粒度組成を現地調査により把握し、それらを検証データとした。

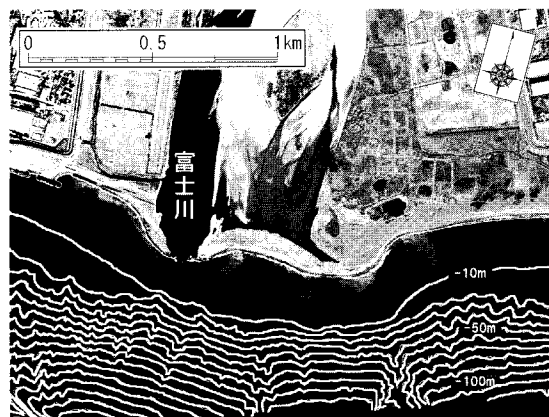


図-1 富士川河口部 (2003 年 2 月測量)

2. 調査概要

モデルの検証データを得るために、河口前面海域において現地調査を実施した。

(1) 調査項目

調査は、砂層厚調査と底質調査を実施した。砂層厚調査は、1 洪水による砂層厚変化量を把握するため、まず台風期の前の静穏時に 1 回実施し、その後洪水が発生するたびに実施した。底質調査は、流出土砂の粒度特性を把握するため、出水後の砂層厚調査にあわせて速やかに開口部前面の底質を採取し、その粒度組成を分析した。

(2) 調査時期および期間

図-2 に調査期間前後の河川水位時系列（松岡観測所、河口から約 4.5 km 地点）と調査実施時期を示す。第一回目は、台風 6 号来襲から約 1 ヶ月後となる 7/14～7/17 に実施し、第二回目は台風 16 号通過後の 9/1～9/5、第三回目は台風 18 号通過後の 9/23～9/26、第四回目は台風 23 号通過後の 11/9～11/12 に実施した。

(3) 調査箇所

砂層厚調査は、富士川河口前面の東西方向約 1,500 m、

* 国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所
調査第一課長

** 国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所
調査第一課係長

*** 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・エー海岸部 部長

**** (株)アイ・エヌ・エー海岸部

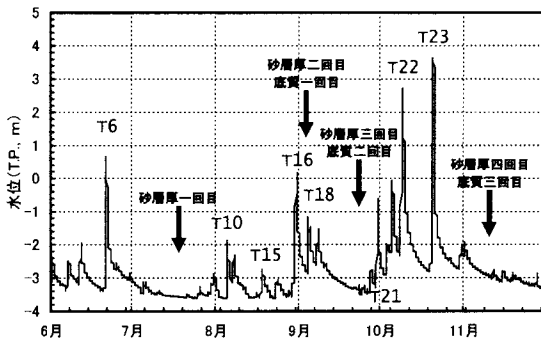


図-2 富士川下流部水位と調査時期

南北方向約500 mの範囲（水深50～70 m付近まで）とした。また、底質調査は、河口からの流出土砂が堆積するみお筋前面の5地点とした（図-3）。

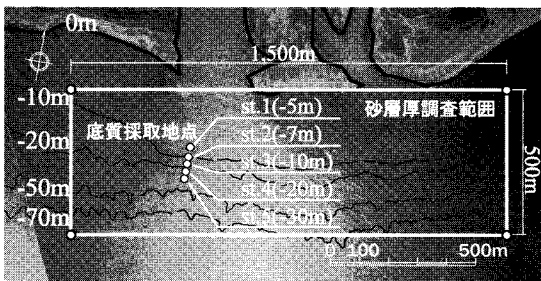


図-3 調査位置図

(4) 調査方法

砂層厚調査には音波探査機を用いるが、今回は砂礫の多い河口部の調査であることから、一般的な音波探査機よりも周波数帯の広いジオパルス地層探査機を採用した。作業船の舷側に同探査機を取り付けて、移動しながら砂層厚観測を実施した。作業船の誘導にはD-GPSを使用し、観測データと共に作業船に搭載したパソコンに記録した。底質調査は、船上から採泥器により海底表層の土砂を採取した。

3. 調査結果

(1) 砂層厚調査結果

図-4 および表-1に、調査結果より得られた河口部前面海域の砂層厚平面分布とその変化土量のうち、特に砂層厚変化の顕著であった台風21号～23号来襲前後の第三回目から第四回目の結果を、また図-5に断面地形比較を示す。これらより、第三回目から第四回目の調査期間中に、約25万 m^3 の土砂が開口部前面（300 m～700 m区間）に堆積していたことが判明した。一方、河口みお筋前面の海底は、T.P. -10 m付近に勾配変曲点が存在し、それ以深は海底勾配約1：3という海底谷となっている

ことから、これより先に堆積した土砂はそのほとんどが海岸に戻ることなく海底谷へと流失するものと考えられる。当海岸の波による漂砂の移動限界水深がT.P. -14 mであることを考慮し、T.P. -20 m以深の土砂が完全に流出すると仮定すると、今回の大規模出水（松岡観測所ピーク流量：約8,300 m^3/s ）による河川からの供給土砂のうち、富士海岸としては20万 m^3 以上の土砂を漂砂系から失ったことになる。

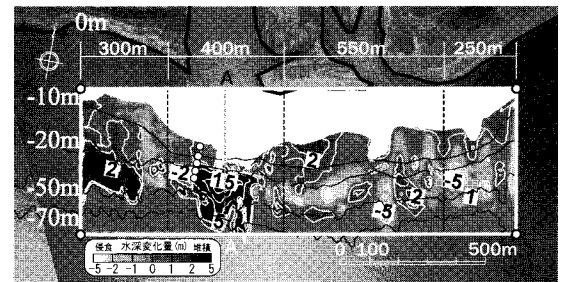


図-4 砂層厚分布（第三～第四回目）

表-1 変化土量（第三～第四回目）

	0-300 m	300-700 m	700-1250 m	1250-1500 m
～T.P.-10 m	0.1万 m^3	1.3万 m^3	3.4万 m^3	1.5万 m^3
T.P.-10～20 m	2.6万 m^3	1.7万 m^3	0.1万 m^3	-0.7万 m^3
T.P.-20～50 m	6.3万 m^3	15.8万 m^3	-1.2万 m^3	-2.9万 m^3
T.P.-50 m～	0.5万 m^3	6.6万 m^3	-0.6万 m^3	-0.9万 m^3
合計	9.5万 m^3	25.4万 m^3	1.7万 m^3	-3.0万 m^3

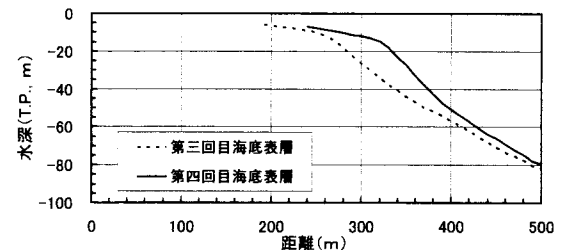


図-5 断面地形比較(A-A'断面)

(2) 底質調査結果

台風21号～23号来襲後である第三回目底質調査時の結果によると、各地点ともほとんどが礫～砂で構成されているが、水深20 m付近より深いSt.4およびSt.5ではシルトが6～8%程度確認された（図-6）。

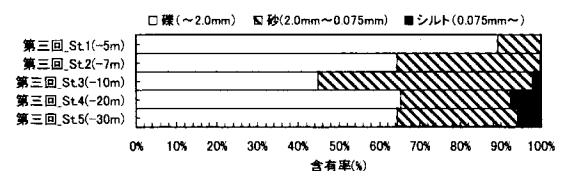


図-6 底質粒度分析結果第(第三回目底質調査)

4. 河口地形変化モデルの構築

(1) モデルの概要

河川流の計算は1次元の不等流計算が一般的であるが、平面的に形状が複雑な砂州を含めた河口部の地形の影響を検討するには平面的な地形条件が考慮可能な、平面2次元の流況および地形変化を計算する方法が必要となる。平面2次元の河川流の挙動を数値的に計算する手法には差分法と有限要素法とがあるが、ここでは、地形境界に適合した領域分割が可能であり、また地形の複雑さに応じて分割を局所的に細かくすることで計算精度の向上が可能な後者により河川流と地形変化の計算を行った。

(2) 基礎方程式

a) 流れの連続式, 運動方程式

以下の浅水長波方程式を用いる。

・運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x + L_x = 0 \quad \cdots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y + L_y = 0 \quad \cdots (2)$$

$$F_x = -\frac{g \cdot n^2}{(\eta + h)^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} \cdot u \quad L_x = A_1 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \cdots (3)$$

$$F_y = -\frac{g \cdot n^2}{(\eta + h)^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} \cdot v \quad L_y = A_1 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad \cdots (4)$$

・連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{u(\eta + h)\} + \frac{\partial}{\partial y} \{v(\eta + h)\} = 0 \quad \cdots (5)$$

ここで、 u , v は x , y 方向の流速成分 (m/s), η は平均水面からの水位 (m), h は水深 (m), n はマニングの粗度係数, A_1 は水平渦動粘性係数 (m^2/s) を表す。

b) 地形変化方程式

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \sum_l q_{bxl} + \frac{\partial}{\partial y} \sum_l q_{byl} + \sum_l (q_{sul} - w_{fl} c_{bl}) \right\} = 0 \quad \cdots (6)$$

ここで、 z_b は地形の標高 (m), q_{bxl} , q_{byl} は粒径成分 l の x , y 方向の掃流砂量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$), q_{sul} は砂の河床からの浮上量, w_{fl} は沈降速度, c_{bl} は各粒径の河床付近の浮遊砂濃度, λ は空隙率を表す。

掃流砂量の算定には芦田・道上式を、また浮遊砂の算定は、板倉・岸の式を用いて浮上・沈降を計算した浮遊砂濃度の連続式を解いた。

・掃流砂式: 芦田・道上の式

$$q_{bxi} = \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd_i^3} \cdot 17 \cdot \alpha \cdot \tau_{*i}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*cl}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*cl}}{\tau_{*i}}} \right) P_i \cdot \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad \cdots (7)$$

$$q_{byi} = \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd_i^3} \cdot 17 \cdot \alpha \cdot \tau_{*i}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*cl}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*cl}}{\tau_{*i}}} \right) P_i \cdot \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad \cdots (8)$$

ここに、

$$\tau_{*i} = \frac{u_*^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd_i} \quad \cdots (9)$$

$$\tau_{*cl} = c_l \cdot \tau_{*cm} \quad \cdots (10)$$

$$c_l = \begin{cases} \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19d_i/d_M)}, & d_i/d_M \geq 0.4 \\ 0.85 \frac{d_M}{d_i}, & d_i/d_M < 0.4 \end{cases} \quad \cdots (11)$$

$$\tau_{*cm} = \begin{cases} 0.05, & R_* \geq 671.0 \\ 0.00849R_*^{3/11}, & 671.0 > R_* \geq 162.7 \\ 0.034, & 162.7 > R_* \geq 54.2 \\ 0.195R_*^{-7/16}, & 54.2 > R_* \geq 2.14 \\ 0.14, & R_* < 2.14 \end{cases} \quad (12)$$

$$R_* = \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd_M^3}/v, \quad d_M = \sum_i d_i P_i \quad \cdots (13)$$

であり、さらに ρ は水の比重, ρ_s は砂の比重, g は重力加速度, d_i は各粒径, P_i は各粒径の構成比率 u_* は底面摩擦速度, ($v = 1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), α は掃流砂量補正係数を表す。

浮遊砂については、以下の浮遊砂濃度の連続式を解く。

$$\frac{\partial \bar{c}_l}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{c}_l u)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{c}_l v)}{\partial y} = (q_{sul} - w_{fl} c_{bl})/h \quad \cdots (14)$$

ここに、浮上量は、

$$q_{sul} = \beta \cdot P_i K \left(\alpha_* \frac{1}{\tau_{*i}} \frac{\rho}{\rho_s} u_* \Omega_i^* - w_{fl} \right) \quad \cdots (15)$$

$$\Omega_i^* = 14 \tau_{*i}^* - 0.9 \quad \cdots (16)$$

沈降速度は、

$$w_{fl} = \sqrt{\frac{2}{3} (\rho_s/\rho - 1)gd_i} + \frac{36v^2}{d_i^2} - \frac{6v}{d_i} \quad \cdots (17)$$

各粒径の河床付近の浮遊砂濃度は、

$$c_{bl} = \frac{\phi_l \bar{c}_l}{1 - \exp(-\phi_l)}, \quad \phi_l = \frac{6w_{fl}}{\kappa u_*} \quad \cdots (18)$$

で求める。

ここに、 $\bar{c}_l$ は各粒径の水深平均濃度, $K = 0.008$, $\alpha_* = 0.14$, $k = 0.4$ は係数, β は浮上量補正係数を表す。

上流端境界条件は、

$$\bar{c}_l = B \frac{q_{sul}}{w_{fl} \phi_l} [1 - \exp(-\phi_l)] \quad \cdots (19)$$

で与える。ここに B は補正係数である。

c) 粒度変化の方程式

河床変動量と交換層を考慮した平野の式を用いて、以下の粒度構成比率の連続式を解いた。

$$\delta \frac{\partial P_l}{\partial t} + P_l^* \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial q_{bxi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{byl}}{\partial y} + q_{sul} - w_{f1} C_{bl} \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$P_l^* = \begin{cases} P_l & (\partial z_b / \partial t > 0) \\ P_{l0} & (\partial z_b / \partial t < 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 δ は交換厚層、 p_l は l 番目の粒径の粒度構成、 p_{l0} は原河床の粒度構成を表す。

(3) 境界条件

流れについては、上流端境界に所定の流量ハイドロを、海域境界には潮位を与えた。また、河岸および海岸線では境界法線流速を0とした。

(4) 空間および時間積分

空間方向に対しては1次の三角形要素を用いた重み付

表-2 計算条件一覧

項 目	条 件															
計算領域	河川：河口部から上流約4.0 km+ 仮想河道区間2.0 km 海域：河口から半径約4.0 km															
地形	河道部：平成16年8月測量地形（横断測量成果） 海域部：平成16年8月測量地形（マルチビーム測量成果） 砂州部：〃															
流量	平成16年10月20日洪水時の流量ハイドロ															
潮位	上記洪水時の田子の浦港検潮所の潮位															
粗度係数	河道部，海域部：マンニングの粗度係数 $n=0.035$															
底質	比重2.65，空隙率0.4 粒径分布（既往調査結果より決定） <table><tr><th>粒径(mm)</th><th>含有率(%)</th><th>質量通過百分率(%)</th></tr><tr><td>0.1</td><td>70.0</td><td>70.0</td></tr><tr><td>1.0</td><td>20.0</td><td>90.0</td></tr><tr><td>10.0</td><td>9.0</td><td>99.0</td></tr><tr><td>100.0</td><td>1.0</td><td>100.0</td></tr></table>	粒径(mm)	含有率(%)	質量通過百分率(%)	0.1	70.0	70.0	1.0	20.0	90.0	10.0	9.0	99.0	100.0	1.0	100.0
粒径(mm)	含有率(%)	質量通過百分率(%)														
0.1	70.0	70.0														
1.0	20.0	90.0														
10.0	9.0	99.0														
100.0	1.0	100.0														
流砂量式	掃流砂：芦田道上式（掃流砂量補正係数 $\alpha=0.5$ ） 浮遊砂：浮遊砂濃度の連続式（浮上量補正係数 $\beta=0.5$ ）															
要素分割状況	節点数 $NX=6636$ ，要素数 $MX=12999$															
時間差分間隔	$\Delta t=0.1$ s															

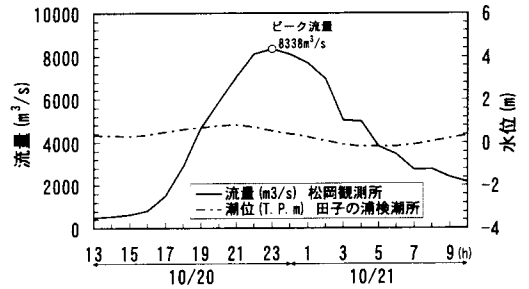


図-8 流量ハイドロと潮位

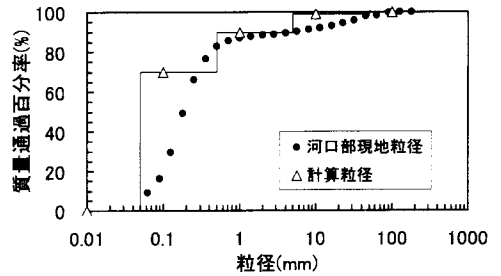


図-9 底質粒度組成

き残差法により離散化を行った。また、時間方向の積分には陽的手法の1つの川原(例えば1985)が提案している selective lumping 法を適用した

(5) 計算条件

表-2に計算条件を、また、図-7に計算領域、図-8に流量ハイドロと潮位、図-9に底質粒度組成を示す。

(6) 計算結果

a) 地形変化

図-10および表-3に洪水前後の河口地形変化を示す。計算結果と砂層厚調査結果の地形変化の比較より、両者とも河口開口部前面の T.P.-10 m 以深において顕著な

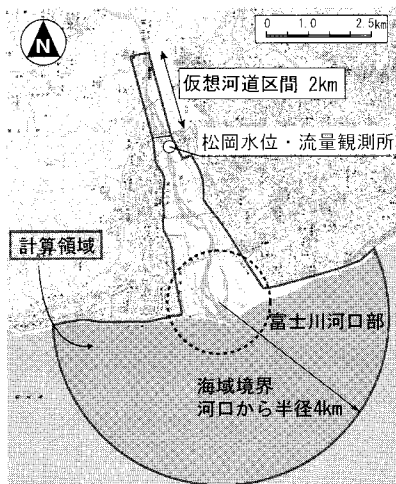


図-7 計算領域

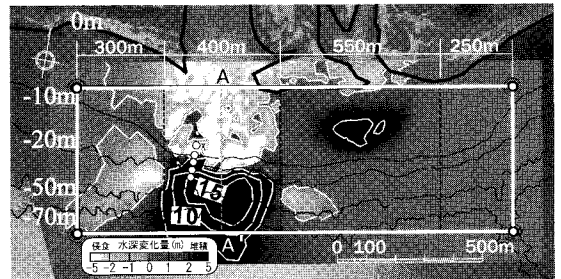


図-10 計算結果による地形変化平面分布と変化土量

表-3 変化土量(計算結果)

	0-300 m	300-700 m	700-1250 m	1250-1500 m
~T.P.-10 m	0.1万 m³	1.3万 m³	3.4万 m³	1.5万 m³
T.P.-10~20 m	2.6万 m³	1.7万 m³	0.1万 m³	-0.7万 m³
T.P.-20~50 m	6.3万 m³	15.8万 m³	-1.2万 m³	-2.9万 m³
T.P.-50m ~	0.5万 m³	6.6万 m³	-0.6万 m³	-0.9万 m³

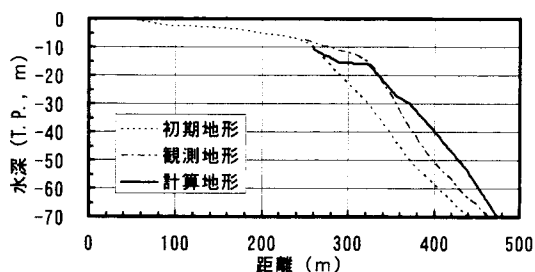


図-11 観測結果と計算結果の断面地形比較(A-A'断面)

表-4 観測結果と計算結果の土量比較(T.P.-10~-20 m, 万 m^3)

	0~300 m	300~700 m	700~1250 m	合 計
観測結果	3.2	1.9	1.7	6.8
計算結果	0.0	4.5	1.0	5.5

表-5 観測結果と計算結果の土量比較(T.P.-20~-50 m, 万 m^3)

	0~300 m	300~700 m	700~1250 m	合 計
観測結果	7.2	23.0	3.2	33.4
計算結果	3.8	95.3	2.1	101.2

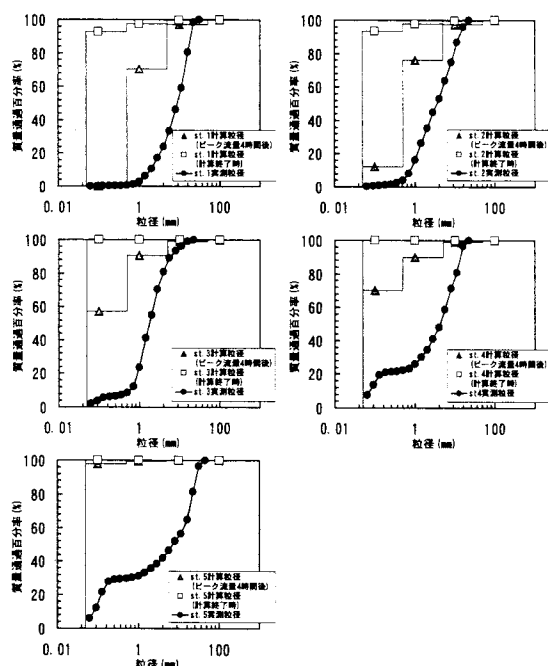


図-12 観測結果と計算結果の粒径分布比較

堆積域が確認できる(図-11)。また、河口砂州前面においても砂州フラッシュに伴う堆砂が両者に見られる。一方、堆積量については、表-4、表-5に示すように、開口部前面における水深 T.P.-10 m ~ T.P.-20 m 間の堆積量は調査結果 6.8 万 m^3 に対して計算結果 5.5 万 m^3 とほぼ同等であるが、海底谷流失土砂量と考えられる水深 T.P.-20 m 以深は、調査結果 33.4 万 m^3 に対して計算結

果 101.2 万 m^3 と、調査結果の約 3 倍となった。

b) 粒径分布

図-12 に観測結果と計算結果の粒径分布比較を示す。計算結果としては、計算終了時およびピーク流量 4 時間後の粒径分布を示した。計算終了時の粒径分布は全ての地点で粒径が極めて細くなっており、実測値とあまり一致していないものの、細粒分が沈降する前であるピーク流量 4 時間後の計算結果は、St. 5 を除いて実測に比較的近い粒径分布となった。

5. 考 察

表-6 に、T.P.-20 m 以深における粒径別土砂変化量計算結果を示す。計算終了時の結果では、現地調査結果よりも多量の細粒分が海底谷へと流出し堆積する結果となった。この要因として、実際の海域では河川の流れだけではなく波浪や沿岸流の影響を常に受けており、特に平成 16 年の台風 22 号および 23 号来襲時は高波浪が出現していたことから、河口から流出した細粒分の多くは開口部前面に沈降するのではなく、波や流れなど海域の外力により河口前面以外の場所へ移動していた事が推察される。一方、本計算では河川の流れのみしか取り扱っていないため、海域に出た土砂は急激な流速の低下により沈降し、このような違いが観測結果と計算結果の相違を生じさせていると考えられる。

表-6 水深 T.P.-20 m 以深における粒径別土砂変化量計算結果

粒 径	0.1 mm	1 mm	10 mm	100 mm	全粒径
土量(万 m^3)	78.1	1.6	0.8	0.1	80.6
割合(%)	69.9	1.5	0.7	0.1	72.2

6. ま と め

今回、底質の粒度構成を考慮した平面 2 次元河床変動モデルを構築し、河口テラスへの堆砂については比較的良好な結果が得られた。しかし、流砂量式の非平衡状態における適用性、ウォッシュロードの取り扱い、アーミングの考慮、深さ方向の粒度組成の考慮、交換層厚の設定など、問題点・課題もいくつか確認された。今後これらの問題について検討し、より精度を高めるとともに、本モデルの適用範囲内において、本来の目的である河口テラス部に土砂を留まらせる対策等の検討を本モデルにより実施する予定である。

参 考 文 献

- 川原睦人(1985): 有限要素法流体解析, 日科技連, pp. 225-227.
- (社) 砂防学会編(2000): 山地河川における河床変動の数値計算法, 山海堂, 143 p.
- 土木学会(1999): 水理公式集 [平成 11 年版], pp. 156-171.
- 土木学会(2002): 水理公式集例題プログラム集, 第 2 編河川編例題 2-4.