

波と流れの共存場における底泥巻き上げ機構 の実験的考察

郡山 益実・瀬口 昌洋
(浅海干潟環境学研究室)
平成11年10月12日 受理

Experimental Studies on the Resuspension Mechanism of Bottom Sediment in the Combined Wave and Current Flows

Masumi KORIYAMA and Masahiro SEGUCHI
(Laboratory of Environment of Shallow Sea and Tidal Flat)
Received October 12, 1999

Summary

The mechanism to which resuspension of bottom sediment is related in the combined wave and current flows was experimentally investigated in order to clarify the phenomenon of sediment transport in the shallow sea areas. Therefore, experimental conditions were set up to simulate the field conditions using sediment material which is collected near the tidal flat surface in the interior shallow region of Ariake Sea.

The results show that water content near the bottom sediment surface decreases rapidly with the passage of time, and a shear strength of sediment surface layer becomes much greater than that of lower layer. From the observations, it is found that the horizontal movement of the bottom sediment surface in the combined flows is much larger than the vertical movement and finally grows in the range of 1 to 1.5cm. Failure and resuspension of bottom sediment occur after the bottom sediment surface fails with cracks across the channel width. The bottom sediments are resuspended when water-particle orbital velocities propagate in the opposing direction to waves, and they are transported and diffused by current flows and water-particle orbital velocities propagating in the same direction as waves. The phenomena of bottom sediment failure and resuspension occur when a maximum shear stress τ_{max} in mud is larger than a yield value τ_y . The time t_r it takes to resuspend bottom sediments decreases exponentially with increasing τ_{max}/τ_y . Moreover, the mean erosion rate \bar{E}_m increases with increasing τ_{max}/τ_y .

Key words: combined wave and current flows, bottom sediment, maximum shear stress, yield value, water content

緒 言

感潮河川域や浅海干潟域には、粘土やシルトなどの微細な土粒子が厚く海底に堆積しており、この底泥粒子は潮流や波浪により比較的容易に巻き上げ、輸送される。このような底泥の輸送

現象は、海域の水質環境や干潟の消長過程に多大な影響を及ぼしており、またシルテーション（航路や泊地の埋没）の予測や制御といった海岸工学分野においても極めて重要な現象である。

一般に粘着性を有する底泥は、底泥粒子間に作用する物理化学的結合が支配的であるため、重力や摩擦力が支配的な砂質土とは大きく異なる特性を持つ。そのために、底泥の巻き上げ現象は、同じ水理条件下でも底泥の性質や堆積条件などによって異なる形態を呈し、そのメカニズムは非常に複雑である。

これまでに、粘着性底泥を用いた巻き上げ実験は数多く行なわれてきた。例えば、Partheniades^{1),2)}や大坪³⁾は、現地泥を用いて流れによる巻き上げ実験を行ない、2種類の巻き上げに対する限界剪断応力を見出した。また、鶴谷ら⁴⁾は流れ及び波による限界剪断応力について検討し、波作用下では流のみの場合に比べてかなり小さい底面剪断応力で巻き上げが生じることを確認した。さらに、中野ら^{5),6)}は、相当粘度の概念に基づいた粘性流体多層モデルを用いて波と底泥の相互干渉について理論的に検討し、底泥床面上における波高減衰率や波作用下における底泥運動について数多くの知見を見出した。これらの研究は、種々の流れ場における底泥の巻き上げ特性を明らかにした興味深い研究である。しかし、流れと波の作用下における底泥の巻き上げ形態は、底泥の性質や共存場の状態などにより大きく異なるために、共存場の巻き上げフラックスに対して、従来の底面剪断応力と巻き上げ限界剪断応力を用いた関係式では十分な評価はできない。つまり、波あるいは波・流れ共存場における底泥巻き上げフラックスを正しく評価するためには、底泥表面に作用する底面剪断応力だけでなく、波動によって生じる底泥内部の応力の影響を考慮する必要がある。また、従来の研究の多くは、港湾や感潮河川部などの海底に堆積した柔らかい底泥の巻き上げ現象を対象としたものであり、海底が周期的に干出、水没する特異な浅海干潟域底泥の巻き上げ現象を対象としたものではない。

そこで本報では、干出期間により底泥の水分状態さらには流動性が大きく変化する浅海干潟域底泥の巻き上げ現象を明らかにするために、波と流れの共存場における底泥の巻き上げ実験を行なった。そして、その現象の実態を詳細に観測し、巻き上げ発生メカニズムについて検討、考察した。

実験の概要

1. 実験装置及び方法

Fig. 1 に示されるように、今回底泥の巻き上げ実験に用いた水路は、全長12m、高さ60cm、幅25cmで左右対称に貯水タンクが付帯した循環式水路である。この水路には、規則波発生装置が備え付けられており、この装置は水路の両端へ移動設置することが可能である。このことにより、種々の波と流れの共存流（順流：流下方向に波が伝播する共存流、逆流：流下方向とは逆に波が伝播する共存流）を設定することができる。このような水路の所定の位置に長さ1.2m、幅25cm、高さ5cmの底泥試料ケースをセットし、流れ場、波動場及び共存場での底泥の巻き上げ実験を行なった。流速は3次元の超音波ドップラー流速計で、波形は3chの容量式波高計を用いて所定の位置で計測した。また、濁度は底面直上と底から3, 8cmの3地点で測定した。さらに、SS濃度を計測するために、底面と底から2, 6, 8, 10cmの5地点で採水を行なった。一方、種々の共存場における底泥表面の水平及び鉛直方向の運動を把握するために、底泥表面にパウダーで10cm間隔にトレース (Fig. 2) して観察すると同時に、底泥試料中央部に超音波水底形状測定器を設置して、底泥表面の動きを計測した。なお、底泥の破壊、巻き上げに関する一連の現象の把握は、写真撮影や目視観察によって行なわれた。今回の主な実験条件は

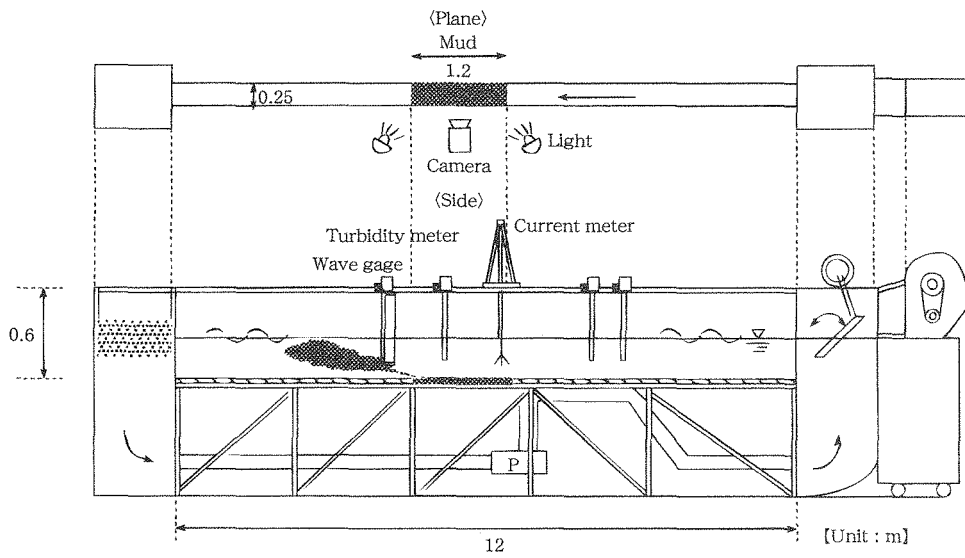


Fig. 1 Outline of the experimental apparatus.

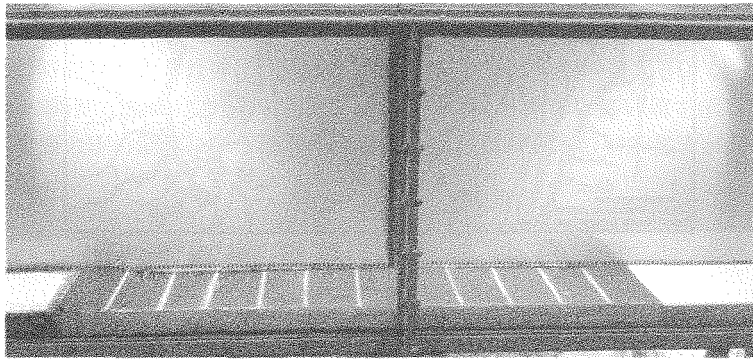


Fig. 2 Bottom sediment installed in the channel-bed

Table 1 Main experimental conditions.

		H (cm)	L (cm)	T (s)	\bar{u} (cm/s)	W (%)	τ_y (Pa)
Run 1	$C_1 + W_1$	4.07	138.0	0.9	18.24	364.3	0.53
Run 2	$C_1 + W_2$	5.79	74.5	0.6	18.96	220.0	3.62
Run 3	W_1	8.20	82.3	0.9	—	230.8	3.01
Run 4	W_1	9.23	92.5	0.9	—	224.0	3.37
Run 5	$C_1 + W_1$	7.10	129.4	0.9	11.62	449.1	0.23
Run 6	$C_1 + W_2$	4.96	79.1	0.6	16.91	228.0	3.18

H : Wave height, L : Wave length, T : Wave period, \bar{u} : Averaged velocity, W : Water content
 τ_y : Yield value, W and τ_y are values near the bottom sediment surface.

Table 1 に一覧される。

2. 底泥試料及びその作成法

実験に用いた試料は Fig. 3 に示される地点 (佐賀郡東与賀町) の干潟表層付近の底泥であり, その主な物理特性を一覧すると Table 2 になる。表に示されるように, 底泥のほとんどは微細な粘土やシルトで占められている。まず, 現地干潟底泥の堆積状況を再現するために, 採取された底泥を一旦水道水で懸濁液化し, 十分攪拌する。次に, その懸濁液を試料ケースを設置してある容器内にフルイを通して入れ, 自然沈降・堆積させる。そして, ほぼ最終自然沈降堆積に達したと思われる24時間後, 容器内の水を排水する。さらに, 試料ケースはある所定の含水比まで自然乾燥させて, 水路の所定の位置 (Fig. 1) にセットする。また, もう一方の試料ケースは室内に移し含水比, 降伏値, 密度などの底泥の物理特性を測定する。

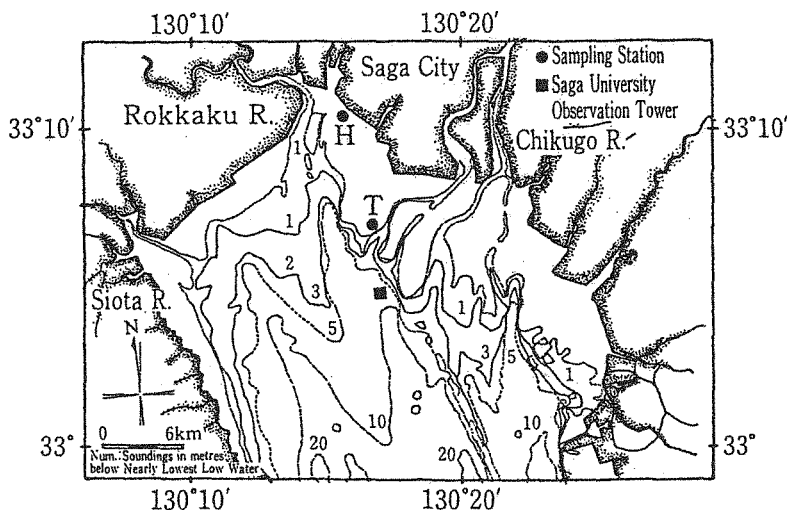


Fig. 3 Location of sampling positions in the interior shallow region of Ariake Sea.

Table 2 Physical characteristics of the bottom sediment.

G_s	L_L	P_L	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	D_m (μm)
2.63	110	51.1	0.2	69.5	30.3	41

G_s : Specific gravity, L_L : Liquid limit, P_L : Plastic limit,
 D_m : Mean grain size

結果及び考察

1. 底泥の含水比及び降伏値

Fig. 4 は, 含水比 W と降伏値 τ_y との関係を両対数紙上に表したものである。図示されるように, W の増加に伴い τ_y は急減する。また, 両者の関係は(1)式によって近似される。

$$\ln \tau_y = -3.82 \ln W + 21.90 \quad \dots(1)$$

Fig. 5 は、底泥試料各層における W の時間的変化を表したものである。図示されるように、排水直後の W は表層部で高く、下層に向かって急減する。これは、排水直後の底泥表層部には液状になった浮泥層が形成されていること、また底層部では、水圧と底泥の自重による圧密作用により泥中の間隙水が上層に押し出されるためによるものである。次に、自然乾燥48時間後の W は、排水直後のそれに比べて全体的に急減すると同時に、表層部と底層部で低く、中層部で高くなっている。これは、底泥表層からの蒸発により水分損失が発生していることと、底層部で自重圧密による間隙水の上層への移動が進行しているためによるものである。特に、深さ 5 mm 付近から表層にかけて W の減少が著しく、この層の板状化が伺われる。さらに、自然乾燥168時間後では、底泥の W は全体的に更に減少する。特に、深さ 7 mm 前後から表層にかけて W の減少が大きく、表層の W は底層部のそれより低くなっている。これは、表層からの水分蒸発が更に進行したためによるものである。

Fig. 6 は、底泥試料における τ_y の鉛直プロファイルの時間的変化を表したものである。なお、ここで τ_y は、 W の実測データを基に(1)式から算出された値である。図示されるように、 W の鉛直プロファイルの時間的変化とは逆に、時間の経過に伴い τ_y は全般的に大きくなっており、特に自然乾燥時間168時間後における試料表面の τ_y は約 6 Pa と非常に高い値を示している。これは、底泥試料表面の W の減少に伴う板状化により、底泥試料表層の剪断強度が増大したためによるものである。

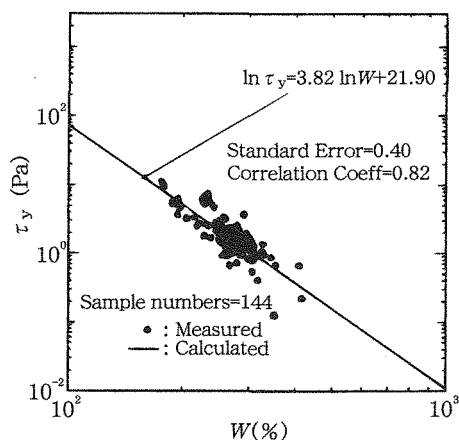


Fig. 4 Relationship between W and τ_y .

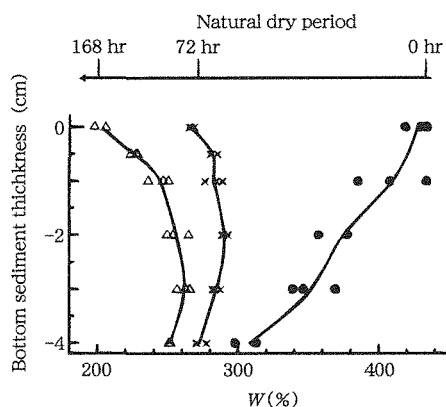


Fig. 5 Temporal variations of W profiles in a bottom sediment.

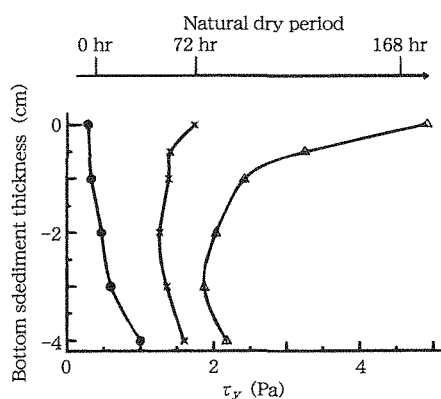


Fig. 6 Temporal variations of τ_y profiles in a bottom sediment.

2. 底泥の巻き上げ過程

Fig. 7 は Run 6 の 3 地点における濁度の時間的変化を表したものである。ここで、底面付近の濁度は試料中央付近の測定値であり、また 3, 8 cm のそれは試料より上流側の値である。図示

されるように、実験の初期段階において、3地点の濁度はほぼ0に近い値を示している。しかし、実験開始から10数分後に、底面付近の濁度は急増し、時間と共に激しく変動している。これは、この時点で板状化した底泥表層の破壊さらには底泥の激しい巻き上げ (Fig. 8) が発生したことを示している。一方、3, 8 cmの濁度は、底面付近のそれより約3分後に増加している。この時間のズレは、巻き上げられた底泥が試料より上流側の計測地点に流送されて到達するまでの時間である。また、3 cmと8 cmの濁度は共に等しく、それらの時間的変動も底面付近のそれと比べて非常に小さい。これは、巻き上げられた底泥が計測地点に達するまでの間に十分攪拌され、水路全断面にわたってほぼ一様に分布していることを示している。さらに、3, 8 cmの濁度の時間的変化には、数箇所の大なる変曲点が見られる。したがって、このことから、これらの変曲点において底泥の巻き上げ現象の特性が大きく変化したことが伺える。

そこで、Run 6の3, 8 cmの濁度の平均値 C より、次式から底泥巻き上げ率 E を算出し、その移動平均値 \bar{E} を図示すると、Fig. 9となる。

$$\bar{E} = -\frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 A : 試料の表面積、 V : 実験水路を循環している全水量、 t : 時間である。

図示されるように、 \bar{E} の時間的変化は大きく3区間、すなわち、最初の区間は実験開始から \bar{E} が立ち上がるまでの $\bar{E} \approx 0$ の区間、2番目の区間は \bar{E} が立ち上がってからそのピーク \bar{E}_p に達するまでの区間、3番目の区間は \bar{E}_p から急減し、再び $\bar{E} \approx 0$ になる迄の区間に分割される。これら3区間の長さや \bar{E}_p は、底泥の巻き上げ現象の特性を左右する重要なパラメータであり、底泥の物性や共存場の水理的条件と密接に関連するものと考えられる。

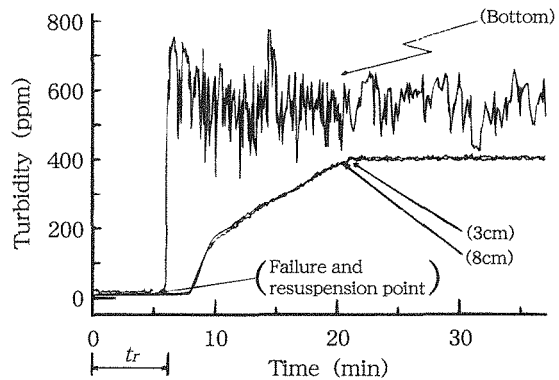


Fig. 7 Temporal variation of turbidity (Run 6).

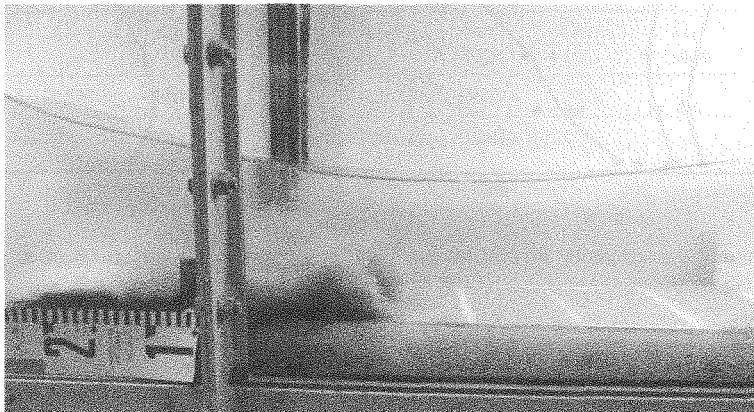


Fig. 8 Resuspension of bottom sediment in combined wave and current flows.

Fig.10は Run 6 において底泥表層が破壊し、巻き上げられるまでの区間における底泥表面の水平及び鉛直方向の変位ベクトルを経時的に表示したものである。図示されるように、実験開始直後底泥表面は両方向に小刻みな運動をしていたが、時間の経過に伴い、その運動は次第に増大した。特に試料の両端部を除いた中央部付近では、水平方向の運動は鉛直方向のそれに比較して大きく成長し、最大1~1.5cmに達した。そして、試料中央部付近で板状化した底泥表面に水路横断方向の亀裂 (Fig.11) が生じた。一方、このような

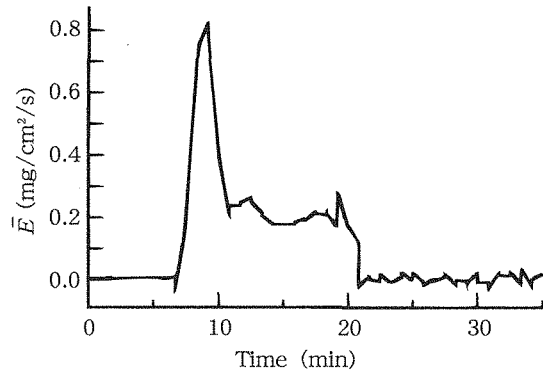


Fig. 9 Temporal variation of resuspension rate \bar{E} (Run 6).

底泥表面での卓越する水平方向の運動は、底泥内部においても観察された。その状況を示すと、Fig.12のように表わされる。図示されるように、波動に伴う底泥の水平方向の運動は、表層から下層に向かって大きく減衰し、底泥の下層部では静止状態にあった。

以下の測定及び観察結果を基に、共存場における主要な底泥の巻き上げ過程を概念的に示すと、Fig.13のようになる。すなわち、

- ①まず共存場の波動流成分により、底泥の表層及び中央部付近で水平方向の運動が時間と共に増大する。そして、その運動がある程度大きくなった時点で、板状化した底泥表層の中央付近に水路横断方向の亀裂が1~2本発生する。
- ②この比較的小さな亀裂は時間の経過に伴い底泥の下層へと深化すると同時に、大きくなる。そして、波動による亀裂口の開閉に伴い、中層付近の比較的柔らかい底泥が水中に少しづつ噴出する。また、底泥の水平運動も更に増大し、亀裂の数も多くなる。
- ③更に時間が経過すると、多くの亀裂の入った板状の底泥表層は波動と流れによって剥がれるように破壊され、流下する。そして、表層下の底泥の巻き上げが発生する。
- ④底泥表層の破壊と流下、さらに中、下層の底泥の巻き上げは本格化し、底泥中央部から上、下流方向へと拡大する。

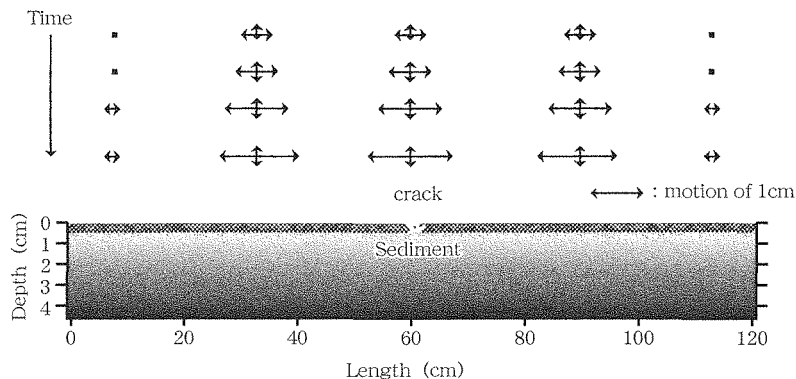


Fig. 10 Temporal variations of horizontal and vertical motion of bottom sediment surface (Run 6).

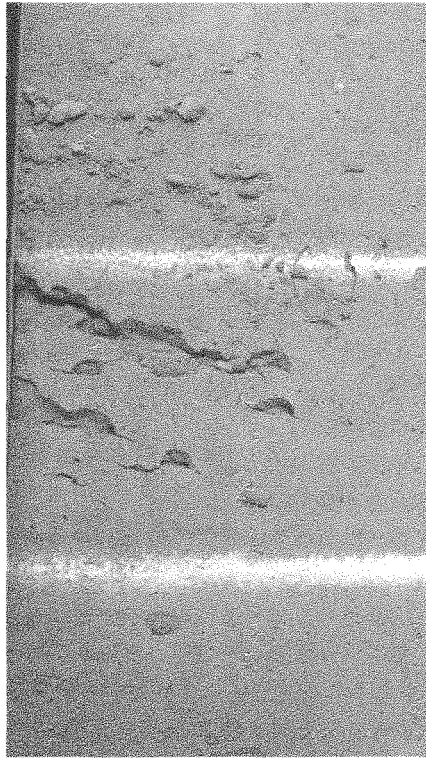


Fig. 11 Cracks generated across the channel width.

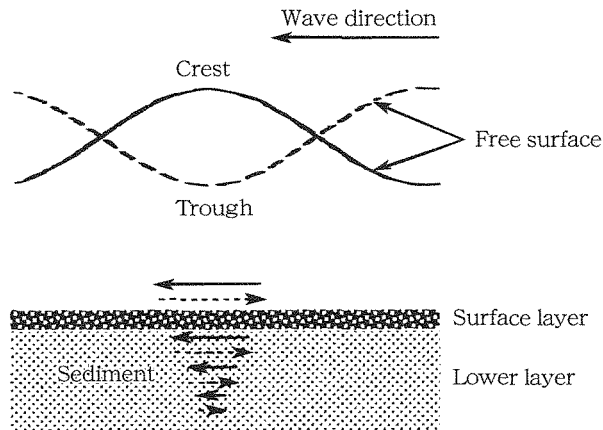


Fig. 12 Movement of bottom sediment during wave motion.

Fig.14は、実験終了後、底泥試料下流部の水路底を撮影したものである。図示されるように、水路底には微細な土粒子に混じって大小の土塊が多数見られる。このような土塊は、板状化した底泥表面が破壊され、流下したものである。また、Fig.15は巻き上げ終了後の試料の中心線に沿った底泥表面形状の測定結果である。図示されるように、試料中央部を中心に、底泥はほぼ左右対称に大きく侵食されている。しかし、壁面や底面に接する試料両端と下層部には底泥が多く残留している。

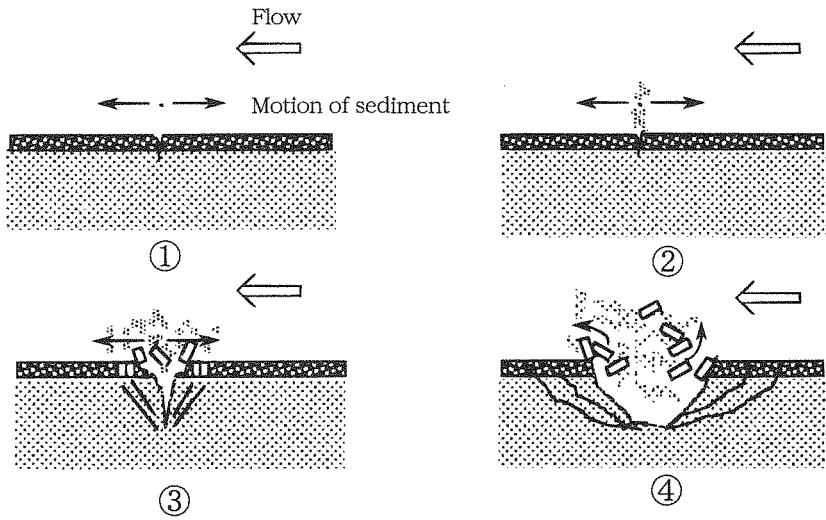


Fig. 13 Process of bottom sediment failure and resuspension.

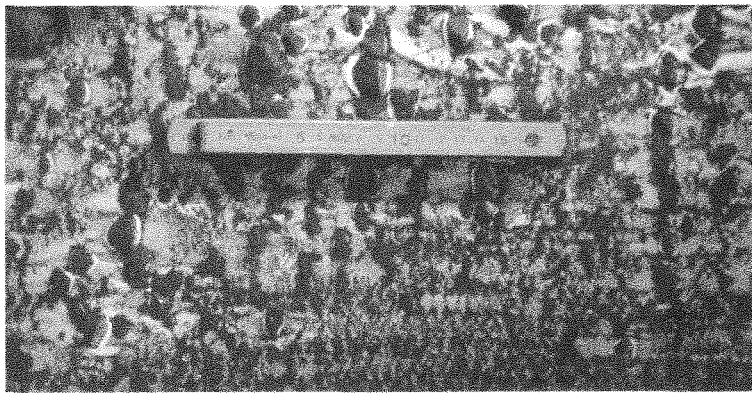


Fig. 14 Resuspended fine bottom sediments and masses of clay particle on the channel-bed.

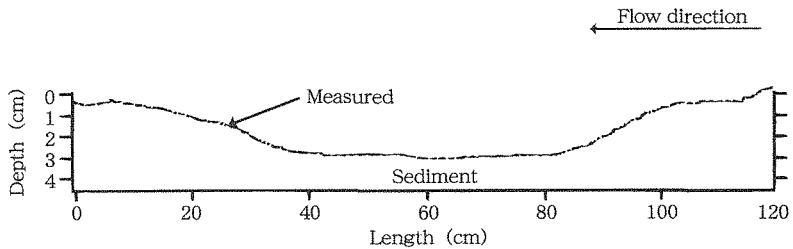


Fig. 15 Profile of bottom sediment in the channel-bed after experiment (Run 6).

3. 底泥の流動限界

底泥層厚が無限で層内部が完全に圧縮性流体によって飽和されている場合、Yanamoto ら⁷⁾ や Madsen ら⁸⁾ にならい、共存場における底泥内の有効応力をそれぞれ次式のように近似する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_v &= P_0 k z e^{-kz} \cos(kx - \omega t) \\ \sigma'_h &= -P_0 k z e^{-kz} \cos(kx - \omega t) \\ \tau_{vh} &= P_0 k z e^{-kz} \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

ここで、 σ'_v , σ'_h , τ_{vh} はそれぞれ鉛直及び水平方向の有効応力と剪断応力、 P_0 は底泥表面における水圧振幅、 z は底泥表面からの深さである。また、 P_0 は微小振幅波理論より、次式で表される。

$$P_0 = \frac{H}{2} \cdot \frac{\rho g}{\cosh kh_1} \dots\dots(4)$$

ここで、 H は波高、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 h_1 は水深 (=16cm) である。

(3)式より底泥内の最大剪断応力 τ_m は次式で与えられる⁹⁾。

$$\tau_m = \sqrt{\left(\frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}\right)^2 + \tau_{vh}^2} = P_0 k z e^{-kz} \dots\dots(5)$$

(5)式より τ_m は $z=1/k$ で最大となり、底泥内での最大剪断応力値 τ_{max} は次式のようになる。

$$\tau_{max} = e^{-1} P_0 \approx 0.368 P_0 \dots\dots(6)$$

ここで、底泥層厚が有限の場合にも近似的にこれらの関係が成り立つと仮定すると、底泥層厚 h_2 が $1/k$ より薄い場合には τ_{max} は次式で表される。

$$\tau_{max} \approx P_0 k h_2 e^{-k h_2} \dots\dots(7)$$

Fig.16は底泥層内の最大応力 τ_{max} と底泥の降伏値 τ_y との相対比と kh_2 との関係のプロットしたものである。なお、 τ_{max} は今回の実験範囲が $h_2 \leq 1/k$ であるため(7)式から、また τ_y は(1)式から算出した値である。図示されるように、 $\tau_{max} > \tau_y$ の範囲で底泥の巻き上げが発生するのに対して、 $\tau_{max} < \tau_y$ においては底泥の巻き上げは見られない。このことは、底泥内部の最大剪断応力が降伏値を超えてはじめて底泥の流動化、さらには底泥の破壊及び巻き上げが起こることを示唆している。

Fig.17は τ_{max}/τ_y と底泥の巻き上げに要する時間 t_r との関係を表したものである。図示されるように、 τ_{max}/τ_y の増加に伴い、 t_r は指数関数的に減少する傾向が見られる。特に τ_{max}/τ_y が大きい場合 (Run 1, 5)、実験開始直後から底泥の流動化が見られ、比較的短時間で底泥は巻き上げられるが、 τ_{max}/τ_y が小さい場合 (Run 3, 4, 6)、容易に底泥の流動化は起こらず、上述したような底泥の運動形態を経て徐々に流動化が進行し、ある時点で急激な底泥の巻き上げが発

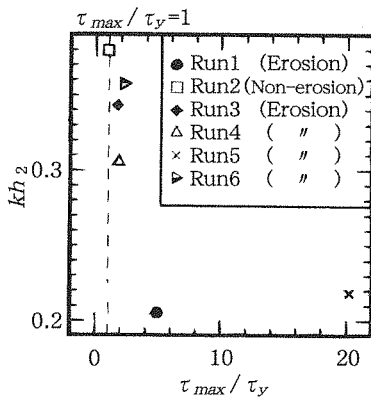


Fig. 16 Relationship between τ_{max}/τ_y and kh_2 .

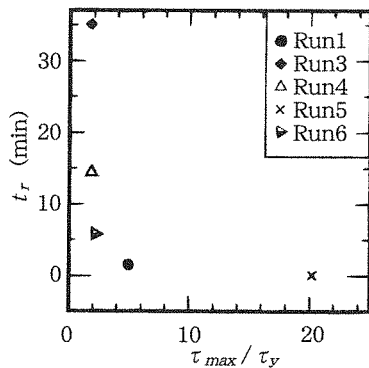


Fig. 17 Relationship between τ_{max}/τ_y and t_r .

生ずる。このことは、底泥の巻き上げが単に $\tau_{max} > \tau_y$ で直ぐに発生するのではなく、 $\tau_{max} > \tau_y$ の大小に応じて底泥が流動化し、破壊されるまでに要する時間が大きく異なることを示している。したがって、巻き上げ機構を考察する上で、 t_r は重要な物理的パラメータの1つであると考えられる。なお、 $\tau_{max}/\tau_y < 1$ (Run 2) では、長時間の実験にもかかわらず、部分的な底泥の微小運動にとどまり、最終的な底泥の破壊及び巻き上げには至らなかった。

Fig.18は τ_{max}/τ_y と平均巻き上げ率 \bar{E}_m との関係を表したものである。図示されるように、 τ_{max}/τ_y の増加に伴い \bar{E}_m も増大する傾向が見られ、 \bar{E}_m と τ_{max}/τ_y との密接な関連性が伺える。

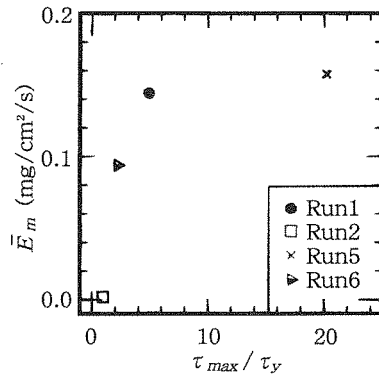


Fig. 18 Relationship between τ_{max}/τ_y and \bar{E}_m .

摘 要

本報では浅海干潟域底泥の輸送機構の解明を前提に、共存場における底泥の巻き上げ過程について現象を中心に実験的な検討、考察を行なった。ここで得られた知見を要約すると以下のようになる。

- 1) 底泥試料を自然乾燥させた結果、時間に伴い表層付近の水分蒸発が大きくなるため含水比 W は急減した。また、 W の減少に伴い試料表面は板状化するため、底泥表層の強度は下層のそれと比べて卓越した。
- 2) 平均濁度 C より算出した巻き上げ率 \bar{E} は、①実験開始から \bar{E} が急増するまでの区間、② \bar{E} が急増しピーク \bar{E}_p に達するまでの区間、③ \bar{E}_p から急減して再び $\bar{E} \approx 0$ となる区間の3区間に分割された。
- 3) 共存場における底泥の巻き上げ過程は以下のように要約される。
 - ①まずはじめに、波動流成分によって底泥は水平運動し、ある時点で板状化した底泥表面に小さな水路横断方向の亀裂が発生する。
 - ②次いで、発生した小さな亀裂は時間と共に底泥下層へ深化すると同時に大きくなり、更に時間が経過すると、流れや波動により亀裂部周辺の底泥表面が塊状になって破壊、流下される。
 - ③底泥表層の破壊に次いで中、下層部における底泥の巻き上げが発生し、侵食は底泥中央部から上、下流方向へ拡大する。
- 4) 底泥の破壊及び巻き上げ現象は、降伏値 τ_y より大きい底泥内の最大剪断応力 τ_{max} が生じた時に発生した。
- 5) 底泥の巻き上げに要する時間 t_r は、 τ_{max}/τ_y の増加に伴い指数関数的に減少する傾向を示した。このことから、共存場における底泥の巻き上げ現象を評価する上で、底泥の物性や水理条件の他に t_r も重要な物理的パラメータであることが認識された。
- 6) 平均巻き上げ率 \bar{E}_m は、 τ_{max}/τ_y の増加に伴い増大する傾向が見られた。

引用文献

1. Partheniades, E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils. *Proc. A.S.C.E.*, **91**, NY1, 105-139.
2. Partheniades, E. and R. E. Paaswell. (1970). Erodibility of channels with cohesive boundary. *Proc. A.S.C.E.*, **96**, HY3, 755-771.
3. 大坪国順・村岡浩爾 (1986). 流れによる底泥の飛び出し率. 土木学会論文報告集 **375**, 43-52
4. 鶴谷広一・江口秀二・佐々木豊喜 (1990). 流れおよび波による底泥の巻き上げ限界. 港湾技研資料 **674**, 8-12
5. 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. 港湾技研報告資料 **26**, 171-212
6. 中野晋・伊東信幸・藤平依彦 (1989). 流れの中での波と底泥の相互干渉. 海岸工学論文集 **36**, 339-343
7. Yamamoto, T., H.L.K.H. Sellmeijer and E. V. Hijum (1978). On the response of a Pore-elastic bed to water waves. *J. Fluid Mech.*, **87**, part1, 193-203.
8. Madsen, O. S. (1978). Wave induced porepressures and effective stresses in a porous beds. *Geotechnique*, **28**, 377-393.
9. 中野晋・伊東信幸・井上洋 (1991). 波による底泥の流動限界と巻き上げ限界. 海岸工学論文集, **38**, 461-465