

攪乱・不攪乱底泥の巻き上げ特性に関する実験的研究

楠田 哲也*・山西 博幸**・吉見 博之**・二渡 了***

1. はじめに

粘土、シルトなどの微細な粒子により形成されている軟弱な底泥を有する沿岸域では、波や潮流などにより容易に底泥の巻き上げ、移動が起こり、深刻なシルテーションや水質汚濁の問題を引き起こしている。わが国におけるシルテーション問題では、有明海沿岸などが挙げられるが、全国的にはその数は少なく、そのため研究も余りなされていない。しかし、世界的にはその数は多く、例えば、東南アジア地域（インドの Calcutta 港やインドネシアの Belawan 港など）、北海沿岸、メキシコ湾北部、アメリカの San Francisco 港などが挙げられる。また、底泥が工場廃液や生活排水で汚染されている場合、巻き上げ等による栄養塩の溶出により赤潮の発生といった問題が生じる。これらの問題解決は日本国内においてはもちろん、国際化が進む現在、外国にとっても非常に重要なことである。

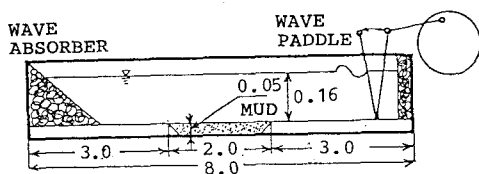
こういった状況の中で、海域における波動下での粘土—シルト系底泥の輸送現象を把握するための実験は、一方向流下でのものに比べると実施されている例が少なく、しかも、そのほとんどは、採取した試料を均一に攪拌して含水比を調整したもの（攪乱試料）で行われている。しかし、土の性質を決定する基本要素には土の構造があり実際の海域に存在する不攪乱状態の底泥は一般に種々の粒径粒子が混合した状態で組織を構成しており、一度練り返されると、これらの微粒子間の結びつきが破壊され、強さが減少する。この強さの前後の比である鋭敏比の問題は土質工学的観点からも無視できない。中野ら(1987)は水路内に設定した沈降塔を用い、高濃度の泥水を注入後、静置した状態で沈降させ自重圧密により自然沈降泥を作成し、実験を行っている。この場合、初期の泥水濃度が高いため、沈降したものの見かけ密度が低くなるといった問題があり、また、静置して試料を作成することは実際の底泥の状況ではほとんどありえず、波

や潮流などの何らかの影響を受けつつ形成されることにも反する。したがって、現地底泥の再現にも限界があり、今回著者らは、より簡単により実的な底泥として現地の底泥をそのまま不攪乱の状態で採取するという手法を用いた。

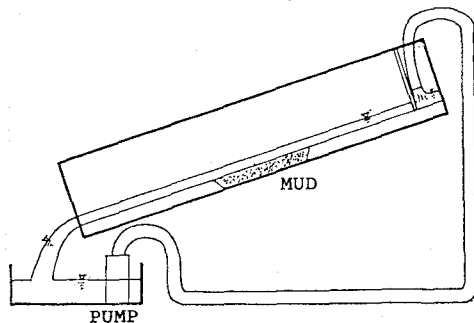
本報告では実際の海域における底泥の輸送の議論のために攪乱・不攪乱底泥による差異、波動下と一方向流下での巻き上げ特性の関連といった点に着目し、(1)波動下における攪乱・不攪乱底泥の巻き上げ実験結果に基づいた底泥の巻き上げへの量的影響についての検討、(2)波動下と一方向流下での剪断応力の作用形態の差異による巻き上げ特性への影響についての検討、(3)一方向流下と波動下での巻き上げ算定式間の関連の明確化と算定式中の係数や指数の換算方法の確立、を目的とする。

2. 実験方法と試料

本実験で用いた水路(図—1)は、波動下・一方向流下ともに全長 8m、幅 0.1m のアクリル製直線水路である。不攪乱底泥による実験では直接現地にて行わなければならないため、水路は分解可能にし、現地で容易に組み立



(WIDTH: 0.1m, UNIT: m)



図—1 実験装置

* 正 会 員 工博 九州大学教授
工学部環境システム工学研究センター
** 学生会員
九州大学大学院 工学研究科
*** 正 会 員 工修 九州大学助手 工学部水工土木学科

表-1 実験条件

	波動下					一方向流下		
	熊本港内底泥					牛津川底泥		
	RUN NO.	含水比 (%)	周期 (s)	波高 (cm)	初期最大底面剪断応力 (N/m^2)	RUN NO.	含水比 (%)	底面剪断応力 (N/m^2)
不攪乱試料	1-1	※		2.7	0.20	3-1	※	0.65
	1-2	110	0.85	4.5	0.34	3-2	250	3.68
	1-3			6.6	0.50	3-3		5.15
攪乱試料	2-1			2.9	0.22	4-1		0.52
	2-2	110	0.85	4.5	0.34	4-2	240	1.12
	2-3			6.6	0.50	4-3		2.08
※表層 (0~1cm) 平均含水比						4-4		4.08
	牛津川底泥							
	RUN NO.	含水比 (%)	周期 (s)	波高 (cm)	初期最大底面剪断応力 (N/m^2)	RUN NO.	含水比 (%)	底面剪断応力 (N/m^2)
	RUN NO.	含水比 (%)	周期 (s)	波高 (cm)	初期最大底面剪断応力 (N/m^2)	RUN NO.	含水比 (%)	底面剪断応力 (N/m^2)
不攪乱試料	5-1	※		3.2	0.24	7-1	※	0.48
	5-2	260	0.85	4.9	0.37	7-2	260	3.53
	5-3			6.1	0.47	7-3		5.37
攪乱試料	6-1			2.8	0.21	8-1		0.42
	6-2	230	0.85	4.0	0.31	8-2	230	1.79
	6-3			5.1	0.39	8-3		2.32

てられるようにしてある。試料は水路中央区間 2m にわたって層厚 5cm で設置できるようになっている。なお、実験の条件を表-1 にまとめた。

波動下での巻き上げ実験では、実海域の水深を 4m と想定し、1/25 縮尺で幾何学的相似のもと水路水深が 16cm になるように海水を満たし、周期を一定 ($T=0.85$ sec) に保ち、波高 H を変化させて行った。採水は所定時間毎 (周期の数倍の時間経過後) に、サイフォンを用いて鉛直方向 7 点で測定し、濁度計を用いて懸濁物質濃度の測定を行った。一方向流下での巻き上げ実験では、勾配をつけた水路内に下流端に貯水した現地河川水をポンプにより循環させ、所定時間毎に底泥設置区間に上流側と下流側で採水を行い、波動下同様に濁度計で濃度を測定し、その差をもとに巻き上げ量を算定した。

試料の底泥は、波動下のみ、一方向流下の場合、それぞれ熊本港内底泥 (以下、熊本泥と言う)、佐賀県牛津川底泥 (以下、牛津泥と言う) を用い、また同一試料による実験では牛津川底泥を試料として用いた。不攪乱試料の採取にあたっては、巻き上げに直接関わる現地底泥の表層部をできるだけ乱すことなく採取し、また攪乱試料は、これとは別に採取した表層部の底泥を十分に攪拌した。図-2, 3 は今回の実験で用いた不攪乱試料の鉛直方向含水比分布である。攪乱試料の底泥含水比は、海水と試料の十分な混合により、鉛直方向に一樣となっている。なお、熊本泥、牛津泥ともに大潮の干潮時に採取したものである。

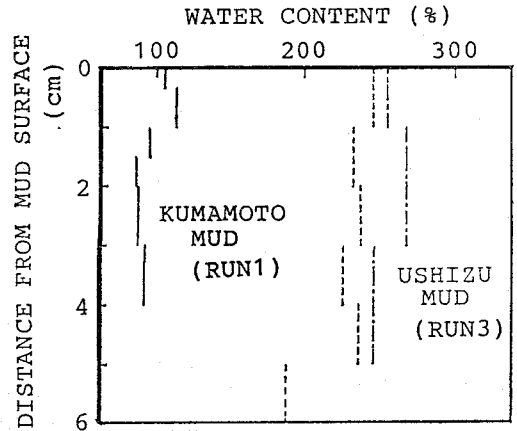


図-2 不攪乱試料の鉛直方向含水比分布 (Run 1, Run 3)

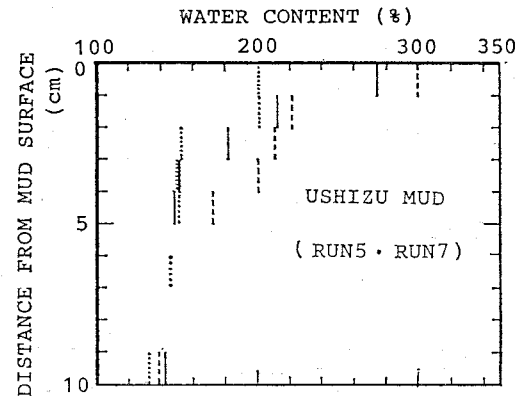


図-3 不攪乱試料の鉛直方向含水比分布 (Run 5, Run 7)

3. 実験結果

(1) 攪乱・不攪乱底泥の巻き上げへの量的影響

a) 波動下における巻き上げ

図-4, 5 は熊本泥を用いた時の巻き上げ量の経時変化である (図-4 は不攪乱試料, 図-5 は攪乱試料)。どちらの試料においても実験開始初期において急激に巻き上げ量が増加し、その後、巻き上げ速度の減少とともに巻き上げ量がある一定値に近づいている。これは、円形回転水路を用いて同様な実験を行った海田ら (1988) の結果とも一致する。また、剪断応力が大きいほど、巻き上げ量は大きくなることも既報 (楠田ら, 1988) の結果と同様である。さらに最終的な巻き上げ量を比較した場合、不攪乱試料の方が攪乱試料の最終的な巻き上げ量よりもオーダーが 1 桁小さくなっている。これは巻き上げが生じる底泥表層が波等の剪断応力を受け、鉛直方向に圧縮力を受けて圧密され、巻き上げられにくい粒子間構造が形成されているためである。すなわち、攪乱試料の場合、

巻き上げ初期の段階ではこれらの粒子間構造が形成されていないため、底泥の性状に伴う影響を受けず、巻き上げられる。しかし、時間の経過と共に徐々に底泥表層硬化が進み、巻き上げ速度は停止する。さらに、底泥が柔らかい場合には上層水との連成振動による界面での剪断応力の低下も考慮しなくてはならない。また、巻き上げ速度が0になるまでの時間は、不攪乱試料の方が攪乱試料よりも短いことがわかる。これも底泥表層部における粒子間構造の変化に伴うものであり、巻き上げ実験を開始する直前の底泥性状によってその時間が決定される。一方、攪乱試料では実験開始時には上述のような底泥表層部の粒子間構造の変化がないため、実験開始数分では、巻き上げ量が一定値にはならず、この実験の範囲内では少なくとも60分程度経過しなくてはならなかった。最終巻き上げ量への到達時間は、即ち、底泥から上層水中への巻き上げの供給源である底泥表層部の硬化をもたらす経過時間と考えられる。

b) 一方向流下における巻き上げ

図-6, 7は一方向流下における巻き上げ量の経時変化である(図-6は不攪乱試料, 図-7は攪乱試料)。波動下と同様に、剪断応力が大きいほど、また、不攪乱試料よりも攪乱試料の方が最終巻き上げ量は大きくなっている。しかし波動下と比べ、一方向流下の場合、最終巻き上げ量に到達するのに要する時間が短い。海田ら(1988)

の一方向流の実験結果では最終巻き上げ量へ到達する時間が20~30分で、上述の波動下では、少なくとも60分は経過しなくてはならない。これは、波動下では、底面剪断応力が周期的に変動し、底泥表層が乱されやすいのに対して、一方向流下では、一定方向にのみ同じ剪断応力が作用するため、底泥表層部が、波動下と比べて乱されにくく、短時間で底泥表層が硬化し、巻き上げ速度の低下をもたらすためである。また、波動下の場合、底泥直上に高濃度層が存在すると上層水との連成振動が生じるため界面での最大剪断応力の低下をもたらすことも上述の現象に影響を及ぼしている。

(2) 波動下・一方向流下の巻き上げ(同一試料)

(1)では波動下の実験を熊本底泥で、一方向流下の実験を牛津泥で行い、試料性状の差異による検討を行ったが、波動下と一方向流下との巻き上げ特性についての相関性については異種の試料であったために十分に行えなかった。したがって、ここでは剪断応力が周期的に変動する波動下と一定方向にのみ作用する一方向流下での底泥の巻き上げへの影響を比較検討するため、牛津泥を試料として実験を行った。実験で用いた牛津泥の鉛直方向含水比分布を図-3に示す。図-8, 9はそれぞれ不攪乱試料, 攪乱試料についての、波動下・一方向流下の巻き上げ量の経時変化である。波動下・一方向流下での巻き上げ量の直接比較は、巻き上げ限界底面剪断応力がそれぞれで異なるためにできない。このため、無次元剪断応力($\tau/\tau_{0.01}$)をパラメータとして用いた。ただし、図上

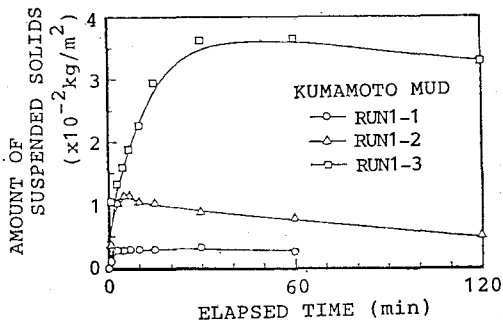


図-4 巻き上げ量の経時変化(不攪乱試料)

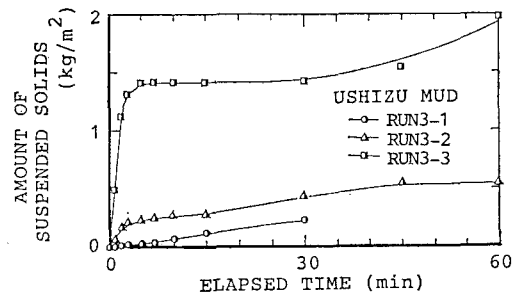


図-6 巻き上げ量の経時変化(不攪乱試料)

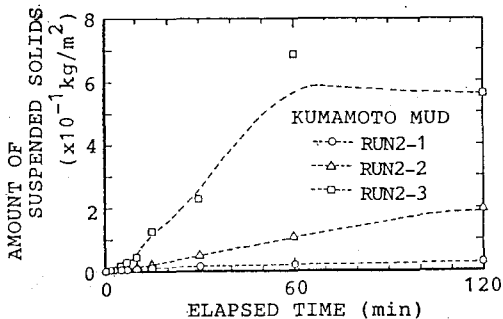


図-5 巻き上げ量の経時変化(攪乱試料)

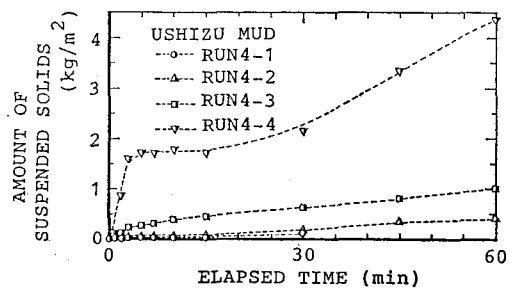
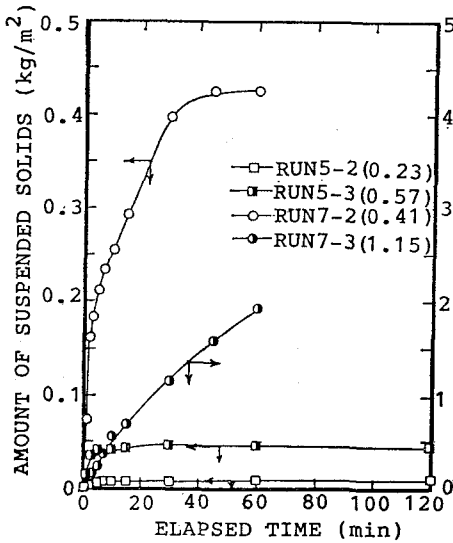
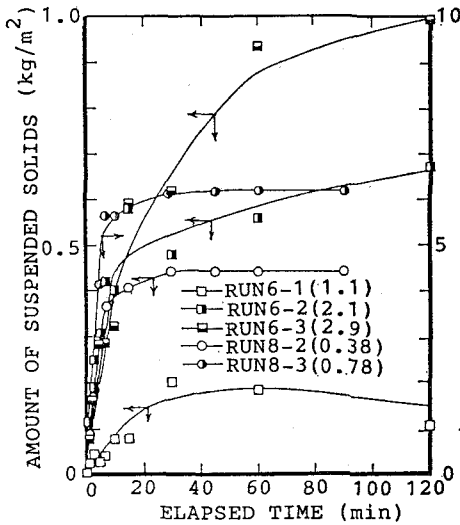


図-7 巻き上げ量の経時変化(攪乱試料)



図—8 巻き上げ量の経時変化 (不攪乱試料)



図—9 巻き上げ量の経時変化 (攪乱試料)

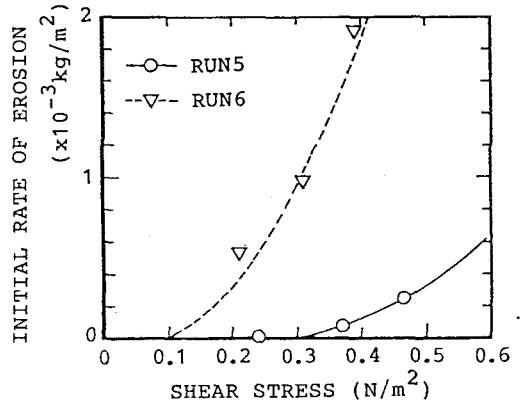
には $\tau > \tau_{ce}$ のみについて表示している。図—8 から、波動下と一方向流下で最終巻き上げ量を剪断応力のみで比較すると、(1)の結果と同様に剪断応力の値が大きければそのときの巻き上げ量も大きい傾向が変わらない。また、無次元剪断応力で比較すると、波動下のみ、一方向流下のみでの比較は可能だが、両者を同時に検討するにはさらにこれらと比較するためのスケールとなるものが必要である。すなわち、底泥が丁度巻き上げられ始まる点での剪断応力に依存する現象については τ_{ce} のみで可能であるが、巻き上げに伴う流動が生じるような場合には、この流動を考慮した指標が、両者を比較する際に必要となってくる。また、巻き上げ限界剪断応力 τ_{ce} については、4. で詳しく検討することとして、ここでは

その値のみに注目すると、波動 (攪) < 波動 (不攪) < 一方向 (攪) < 一方向 (不攪) の関係があり、それぞれ、0.1, 0.3, 1.3, 2.5 N/m² であった。

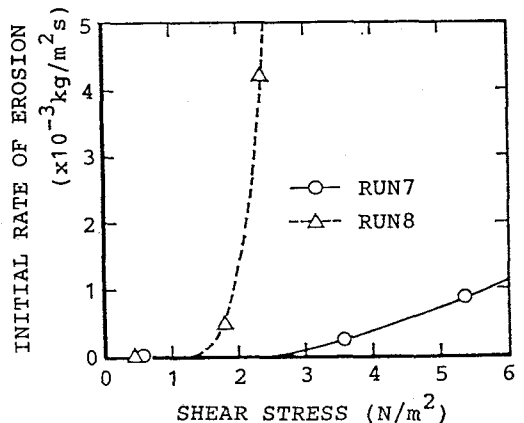
4. 巻き上げ算定式

(1) 巻き上げ限界底面剪断応力

図—10, 11 は同一試料による初期巻き上げ速度と剪断応力との関係を示したものである。この場合、巻き上げ限界底面剪断応力 τ_{ce} は波動下よりも一方向流下、攪乱試料よりも不攪乱試料の方が値は大きく、不攪乱試料の場合、波動下の τ_{ce} は一方向流下の τ_{ce} の 1/8 で、攪乱試料の τ_{ce} は不攪乱試料の τ_{ce} の 1/3 になっている。また、攪乱試料ではそれぞれ 1/13, 1/2 であった。さらに、波動下の不攪乱試料の τ_{ce} は一方向流下の攪乱試料での τ_{ce} の 1/4 であった。海田ら(1988)は、 τ_{ce} と固体分率を関連づけ、平均粒径 8 μ m の筑後泥については $\tau_{ce} = 4.3(1 - \epsilon)^{1.5}$ (ここで、 ϵ は間隙率である) なる関係の導いている。ここで今回用いた熊本泥 (RUN 1, 2) は有明粘土で、



図—10 剪断応力と初期巻き上げ速度との関係 (波動下)



図—11 剪断応力と初期巻き上げ速度との関係 (一方向流下)

しかもほぼ粒径が等しいことより、上式に代入すると、 $\tau_{ce}=0.57\text{N/m}^2$ となる。この値は一方向流下での値のため、波動下に変換する必要がある。上述の結果を用いれば、波動下における攪乱試料の τ_{ce} は 0.14N/m^2 となり、実験結果の 0.1N/m^2 とほぼ一致する。したがって、波動下における τ_{ce} を算出する際に、同一試料での一方向流下における τ_{ce} の関係式があれば、その値の $1/10 \sim 1/5$ 程度が波動下（不攪乱）における値とほぼ等しいと考えられる。さらにこれらのことから、波動下における τ_{ce} が固体分率や含水比の関数として表現できる。

(2) 初期巻き上げ速度の評価

著者らは、一連の波動下における巻き上げ実験より、底泥表層から巻き上げられる総量が時間の経過とともに減少することを得た。これは、底泥が柔らかいほど巻き上げられ易いことと、底泥が柔らかいと上層水との連成振動を起し、界面での最大剪断応力が小さくなることとが同時に生じることや、底泥の表層部における粒子間構造の変化に伴う底泥の硬化現象に原因があるものと考えられる。また、この硬化現象が進行していく期間における巻き上げ速度が、その条件下における巻き上げ総量をほぼ支配していると考えられる。流れによる巻き上げ量の予測式としては、剪断応力 τ のみの関数としたもの（例えば、Mehta, 1981）や時間の関数として表現したもの（例えば、Fukuda, 1980）などがある。ここでは、初期巻き上げ速度を無次元剪断応力 $(\tau/\tau_{ce}-1)$ （有効剪断応力と巻き上げ限界剪断応力との比）を用いて、 $E_{t=0}=\alpha(\tau/\tau_{ce}-1)^n$ [$\text{kg/m}^2\text{s}$] で表した。今回の実験結果からそれぞれの $E_{t=0}$ をまとめたものが表-2である。初期巻き上げ速度に及ぼす影響因子として、剪断応力のほかに底泥含水比、周期、底泥の性状、水温、塩分濃度等が挙げられる。この場合、底泥性状の影響が最も大きいと、不攪乱試料では剪断応力の作用に対して、常にある程度の巻き上げられにくさが働き、攪乱試料のように作用する剪断応力がそのまま巻き上げに関わってくるのとは異なる。したがって、図-10, 11 及び $E_{t=0}$ の式より τ の増大とともに、攪乱試料と不攪乱試料の $E_{t=0}$ の値の差が広がる傾向を示し、指数 n の値も攪乱試料の方が大きくなる。

5. ま と め

(1) 波動下における攪乱・不攪乱試料の最終巻き上げ量 W_f を同一剪断応力下で比較した場合、不攪乱試料の場合は攪乱試料の場合よりも、オーダーが1桁小さくなっている。これは、不攪乱試料が攪乱試料に比べて海域の波作用等により底泥表層部の粒子間構造が変化し、その結果、同一含水比においても巻き上げられにくくなっていることによる。また、不攪乱試料の場合、底泥表層の硬

表-2 初期巻き上げ速度式

<RUN1, 2>

<RUN3, 4>

$E_{t=0}$	食糧本底泥 <波動下> ($G_s=2.66$, $d_{50}=9.3\mu\text{m}$)	牛津底泥 <一方向流下> ($G_s=2.59$, $d_{50}=1.7\mu\text{m}$)
不攪乱	$1.9 \times 10^{-4} (\tau/0.20-1)^{1.9}$	$5.6 \times 10^{-4} (\tau/2.5-1)^{2.8}$
攪乱	$6.0 \times 10^{-4} (\tau/0.10-1)^{2.8}$	$1.0 \times 10^{-3} (\tau/1.0-1)^{2.8}$

<RUN5, 6, 7, 8>

$E_{t=0}$	牛津底泥 ($G_s=2.51$, $d_{50}=3.4\mu\text{m}$)	
	<波動下>	<一方向流下>
不攪乱	$6.2 \times 10^{-4} (\tau/0.30-1)^{1.6}$	$7.3 \times 10^{-4} (\tau/2.5-1)^{1.6}$
攪乱	$3.6 \times 10^{-4} (\tau/0.10-1)^{1.6}$	$8.0 \times 10^{-3} (\tau/1.3-1)^{2.7}$

化により τ_{ce} が経時変化とともに、攪乱試料の場合よりも増してくるために最終巻き上げ量に到達するまでの時間は短くなっている。さらに、無次元剪断応力 $(\tau/\tau_{ce}-1)$ を用いれば、いずれの場合も $E_{t=0}=\alpha(\tau/\tau_{ce}-1)^n$ の形式で表せる。

(2) 一方向流下における W_f は、不攪乱試料の場合よりも攪乱試料の場合の方が大きく、その量は波動下での巻き上げ量と比較して1桁大きくなっていく。また、波動下の場合と同様に、 τ_{ce} は不攪乱試料の場合の方が大きな値を示し、 $E_{t=0}$ 、 W_f ともに $(\tau/\tau_{ce}-1)$ の関数として表せる。

(3) 同一試料による巻き上げ実験により τ_{ce} 、 $E_{t=0}$ を求めた。 τ_{ce} については、波動（攪）<波動（不攪）<一方向（攪）<一方向（不攪）の関係があり、それぞれ 0.1 , 0.3 , 1.3 , 2.5N/m^2 であった。

謝辞：本研究は財団法人鹿島学術振興財団研究助成金による援助を受けて行われたものであり、ここに記して謝意を表します。また、現地実験に際し、種々便宜を図って下さった運輸省第四港湾建設局熊本港工事事務所の方々にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 海田輝之・楠田哲也・二渡 了・栗谷陽一 (1988): 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, 393号, II-9, pp. 33~42.
- 楠田哲也・山西博幸・川添正寿・二渡 了 (1988): 波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 352~356.
- 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について, 港研報告, 26巻, 2号, pp. 171~212.
- Fukuda, M. K. and W. Lick (1980): The Entrainment of Cohesive Sediments in Fresh Water, J. Geophys. Res., Vol. 83 (C5), pp. 2813~2824.
- Mehta, A. J (1981): Review of Function for Cohesive Sediment Beds, Proc. First Indian Conf. on Engrg., Indian Inst of Technology, Madras, India, I, pp. 122~130.