

波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究

楠田 哲也*・山西 博幸**・川添 正寿***・二 渡 了****

1. ま え が き

シルトや粘土といった微細な粒子が厚く堆積し、底泥を形成している水域では、波作用によって、底泥は様々な挙動を示す。例えば、巻き上げられた底泥粒子が、移動、堆積を繰り返すことで、沿岸域の港湾構造物や航路の埋没といった現象を引き起こしている。これらの現象に関わるシルテーションの定量的評価は、流体運動条件（一方向流であるか、あるいは振動流であるか）により大きく異なる。一方向流でのシルテーションに関して、その機構や定量的評価は、底泥物性が既知である場合において、ほぼ説明可能なレベルに到達している^{1),2)}。しかしながら、波動（振動流）下での研究はそこまで至っていない。本研究では、このような観点から粒度分布の影響を無視し得るような均一に近い粒度分布を有するカオリンを用い、泥の挙動に関わる要因を減少させ、現象を簡略化しその上で泥の物理性状をマクロに表現しうるスランptestにより実海域での底泥の硬さとほぼ同じ硬さに調整して形成した泥を用い、(1) 巻き上げ時の底泥表面形状の特異性、(2) 限界巻き上げ剪断応力や巻き上げ速度と波高、周期、底泥含水比の関係、(3) 上層水層における巻き上げられた粒子の濃度分布、(4) 一方向流の場合と異なり、巻き上げと沈降が同時に生じるか否か、について実験的、解析的に検討を加えた。

2. 鉛直方向輸送の理論解析

(1) 基礎方程式

巻き上げ実験開始後数分で、底泥直上に高濃度な層が見れる。その後波の作用のもとで底泥からの巻き上げと沈降とが相互に関与しあって鉛直方向の濃度分布を形成していく。この拡散現象を、岸³⁾による拡散係数を用いて拡散方程式を解析的に解いた。

理論解析を行うに当たって、仮定として、①現象を鉛直方向のみの一次元とし、②波動下では水粒子の一周期

の運動を平均化させ、③沈降速度は濃度によらず一定である、とおく。以上の仮定に基づくと、次式を得る。

$$\frac{\partial C}{\partial t} - w_0 \frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\varepsilon_Z \frac{\partial C}{\partial Z} \right) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\varepsilon_Z = \kappa \hat{u}_b^* (Z + Z_0) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 C ；懸濁物質濃度、 w_0 ；粒子沈降速度、 Z ；座標（鉛直上向きが正）、 t ；時間、 κ ；Karman 定数、 $\hat{u}_b^*$ ；平均底面摩擦速度、 Z_0 ；粗度、である。

式(1)に式(2)を代入し、

$$Z_1 = Z + Z_0 \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\gamma = w_0 / (\kappa \hat{u}_b^*) \quad \cdots \cdots (4)$$

とおくと、

$$\frac{1}{\kappa \hat{u}_b^*} \frac{\partial C}{\partial t} - (1 + \gamma) \frac{\partial C}{\partial Z_1} = Z_1 \frac{\partial^2 C}{\partial Z_1^2} \quad \cdots \cdots (5)$$

(2) 解 法

a) 定常解 式(5)の定常解は、

$$C = C_1 + C_2 Z_1 - \gamma \quad \cdots \cdots (6)$$

となる。境界条件は、

$$-w_0 C - \varepsilon_Z (dC/dZ) = 0 \quad (\text{at } Z=0, h) \quad \cdots \cdots (7)$$

この条件では、 C_2 は不定となるので、 C_2 を定常状態下で水層に存在する単位面積当りの全懸濁物質量 W により定めることにする。

$$W = \int_0^h C dZ \quad \cdots \cdots (8)$$

とすると、最終的に定常状態の濃度分布は、

$$C = \frac{(1-\gamma)W}{(Z_0+h)^{1-\gamma} - Z_0^{1-\gamma}} (Z+Z_0)^{-\gamma} \quad \cdots \cdots (9)$$

b) 非定常解 式(5)において、定常解からの偏りを変数分離形で表現できるものとする、非定常解は、

$$C = \exp(-\kappa \hat{u}_b^* \alpha^2 t) \frac{1}{(\sqrt{Z_1})^\gamma} \{ C_1 J_\gamma(2\alpha \sqrt{Z_1}) + C_2 Y_\gamma(2\alpha \sqrt{Z_1}) \} \quad \cdots \cdots (10)$$

境界条件は、水面においては式(7)で与えられるが、底泥面では単位面積当りの巻き上げフラックス $E(t)$ を考慮すると、

$$E(t) = -w_0 C - \varepsilon_Z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (\text{at } Z=h) \quad \cdots \cdots (11)$$

となる。しかし、式(7)と(11)では C_1 、 C_2 の決定に

* 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

** 学生員 九州大学大学院 工学研究科水土木学専攻

*** 正会員 工修 長崎県 土木部都市計画課

**** 正会員 工修 九州大学助手 工学部水土木学科

際し直交性を使用できないので、時刻 t における巻き上げフラックス $E(t)$ 分の SS を底面直上の薄い層 βZ_0 に与えることにする。このときのこの薄い層の濃度 $C_0(t)$

は、

$$C_0(t) = E(t) / (\beta Z_0) \quad \dots\dots\dots (12)$$

これらの条件下で解を求めると、

$$C = \frac{(1-\gamma) \int_0^t E(\tau) d\tau}{(Z_0+h)^{1-\gamma} - Z_0^{1-\gamma}} + \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \int_0^t E(\tau) \exp(-\kappa \alpha_i^2 (t-\tau)) d\tau \right\} d_i (Z_0+Z)^{-\gamma/2} \{ a_i J_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+Z}) - b_i Y_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+Z}) \} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ただし、

$$(1/a_i) = (\gamma/2) J_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) + Z_0 J'_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$(1/b_i) = (\gamma/2) Y_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) + Z_0 Y'_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

d_i は初期条件から定められる。上述の仮定に従えば、

$$d_i = A/B \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$A = \frac{E(\tau)}{\beta Z_0} \frac{1}{\alpha_i} [(\sqrt{(1+\beta)Z_0})^{\gamma+1} \{ a_i J_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{(1+\beta)Z_0}) - b_i Y_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{(1+\beta)Z_0}) \} - Z_0^{\gamma+1} \{ a_i J_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) - b_i Y_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) \}] - \frac{(1-\gamma) \int_0^t E(\tau) d\tau}{(Z_0+h)^{1-\gamma} - Z_0^{1-\gamma}} \frac{1}{\alpha_i} [-(\sqrt{Z_0+h})^{1-\gamma} \{ a_i J_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) - b_i Y_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) \} + (\sqrt{Z_0})^{1-\gamma} \{ a_i J_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) - b_i Y_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) \}] \quad \dots\dots\dots (16')$$

$$B = a^2 \{ (Z_0+h) \{ J_{\gamma}^2(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) - J_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) J_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) \} - Z_0 \{ J_{\gamma}^2(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) - J_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) J_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) \} \} - ab \{ (Z_0+h) \{ 2 J_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) Y_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) - J_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) Y_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) - J_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) Y_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) \} - Z_0 \{ 2 J_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) Y_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) - J_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) Y_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) - J_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) Y_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) \} \} + b^2 \{ (Z_0+h) \{ Y_{\gamma}^2(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) - Y_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) Y_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) \} - Z_0 \{ Y_{\gamma}^2(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) - Y_{\gamma-1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) Y_{\gamma+1}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) \} \}$$

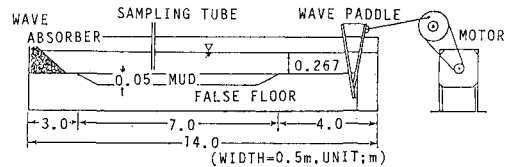
また、固有値 α_i は次式を満足する。

$$\{ (\gamma/2) J_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) + Z_0 J'_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) \} \{ (\gamma/2) Y_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) + (Z_0+h) Y'_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) \} - \{ (\gamma/2) J_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) + (Z_0+h) J'_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0+h}) \} \{ (\gamma/2) Y_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) + Z_0 Y'_{\gamma}(2\alpha_i \sqrt{Z_0}) \} = 0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

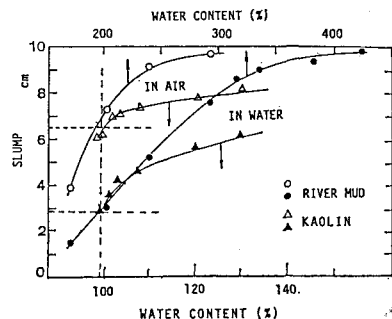
3. 実験装置及び方法

実験には、図—1 に示すような全長 14m、高さ 1m、壁 0.5m のアクリル製直線造波水路を用い、試料として市販のカオリン (ASP-600、比重 2.66、平均粒径 0.64 μm) を実海域でみられる流動性 (スランプ値) を示す程度に含水比を設定した後に、水路中央区間 7m にわたって、層厚 5cm で敷き詰めた。水深が、26.7cm になるように海水を入れ、所定の波動条件にて実験を行った。図—2 に、本実験で用いたカオリンのスランプ値と含水比との関係を示す。採水は、実験中に所定の時刻に水路中央部で、20 秒間程度サイフォンにより行い、SS 濃度を濁度計により測定した。実水深は 4m と想定し 1/15 縮尺で幾何学的相似を保って実験を行った。

実験条件は、表—1 に示す通りである。①限界巻き上げ剪断応力と初期巻き上げ速度に及ぼす底面剪断応力の影響を求めるために、底泥の含水比を 100%、波の周期を 1.1 秒に固定し、波高のみを変化させる実験 (Series 1)、②初期巻き上げ速度に及ぼす波の周期の影響を明らかにするために、層流境界層理論によって求められる底



図—1 実験装置



図—2 スランプ値と含水比の関係

面剪断応力を 0.4 N/m^2 に、底泥の含水比を 100% に保ち、周期を 1.0~1.4 秒まで変化 (波高もそれにとまない変化) させる実験 (Series 2)、③初期巻き上げ速度

表—1 実験条件

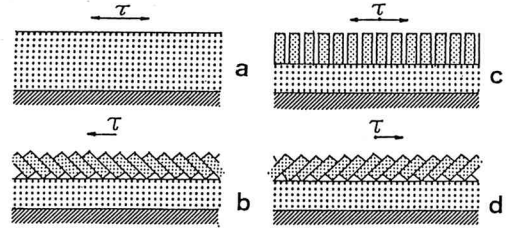
RUN	含水比(%)	周期(sec)	波高(cm)	底面剪断応力(N/m ²)
1-1	98.0	1.1	7.3	0.379
1-2	94.8	1.1	8.6	0.447
1-3	99.0	1.1	10.4	0.540
1-4	98.4	1.1	12.4	0.644
2-1	99.7	1.0	8.0	0.397
2-2	99.4	1.0	8.5	0.422
2-3	100.0	1.1	8.3	0.431
2-4	98.3	1.2	8.0	0.425
2-5	98.5	1.3	7.5	0.402
2-6	100.1	1.4	7.0	0.375
3-1	105	1.1	9.6	0.498
3-2	139	1.1	9.9	0.514
3-3	169	1.1	10.5	0.545
3-4	175	1.1	10.0	0.519
3-5	206	1.1	10.1	0.524
4-1	104	1.1	10.0	0.519
4-2	100	1.1	10.0	0.519
4-3	97	1.1	10.1	0.524

に及ぼす底泥の流動性の影響を明らかにするために、底面剪断応力を 0.5 N/m² に、周期を 1.1 秒に保ち、底泥含水比のみを 105%~206% まで変化させる実験 (Series 3)、④一方向流下においては通常存在しないとされている巻き上げ平衡濃度の存在の有無を確認するために、実験途中で上層水中の懸濁物質濃度を希釈により低下させ、あるいは添加により上昇させる実験 (Series 4) を行った。さらに、上層水の懸濁物質鉛直分布の測定、底泥表面形状の時間的変化の観測、底泥の含水比の鉛直分布の時間変化の測定を随時行った。

4. 結果と考察

(1) 底泥表面形状の特異性

写真 1~3 は、RUN 4-1 での実験開始前 (写真 1) と 30 分経過後 (写真 2) 及び 8 時間経過後 (写真 3) の底泥表面である。実験初期の段階で、底泥の表層は形状変化を起こしており、微細な縦筋が 1~2 mm 間隔で刻まれている。さらに、時間の経過と共にリップルの形成も見られ、実験開始から 8 時間後には、底泥からの巻き上げが見かけ上ほとんどなくなった。巻き上げ速度が徐々に減少するのは、主応力の回転により底泥が圧密されてクラックが入り、その結果として粒子間構造が底面剪断応力に耐えうる強度を有したためである。以上のことを



図—3 底泥の巻き上げモデル

考えあわせると、底泥の構造としては図—3 に示すモデルが考えられる。まず a のように棒状の粒子が多数詰まった状態を考える。波の作用によって底泥表層が b のように矢印の向きに力が加えられたとすれば、次の過程では a から c のように隙間が生じ、その隙間に海水が容易に進入することができ、底泥表層部の含水比の上昇を説明できる。さらにこの繰り返しを何度も行うことで、粒子間の整然とした並びが崩れ、多数の凸凹を持つ表面が形成される。この部分が削られることで底泥粒子が巻き上げられる。b→c→d→c→b を一つのパターンとして繰り返し、棒状の底泥が巻き上げられてしまうと、次の新しい棒状表層が生まれることになる。

(2) 巻き上げ実験結果

a) 波高 波作用下の底面剪断応力は、層流境界層を仮定すると、底面に働く剪断応力 τ_b は、

$$\tau_b = -(\sqrt{2} \mu \beta \sigma H / 2 \sinh kh) \cos(\pi x - \sigma t - \pi/4),$$
$$\beta = (\sigma/2\nu)^{1/2} \dots\dots\dots (18)$$

限界巻き上げ剪断応力と初期巻き上げ速度 (以下巻き上げ速度と言う。) に及ぼす底面剪断応力の影響を求めするために、波の周期と底泥含水比を各々 1.1 秒、100% とし、波高のみを変化させて実験を行った。SS 濃度の測定より算出した単位面積当りの巻き上げ量を求めたのが図—4 である。波高の増加にともなって、底面での剪断応力が増加し、巻き上げ速度も増加する。

また、巻き上げフラックス E と巻き上げ剪断応力 τ との関係は、次式の関係が与えられている。

$$E = \alpha(\tau/\tau_0 - 1)^n \text{ (kg/m}^2\text{s)} \dots\dots\dots (19)$$

τ_0 は限界巻き上げ剪断応力、 n ; 指数、 α ; 巻き上げフラックスを示す関数、である。 α は波高、周期、水深、底泥含水比の関係より表され、ある周期とある含水比 (本底泥では含水比 150% のとき 1.1 秒) で極大値をとる。式 (19) より、未知数 τ_0 、 n 、 α を実験結果より求める

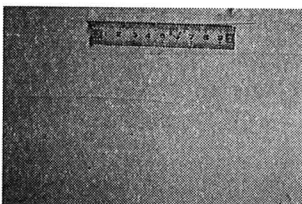


写真 1 (実験開始前)

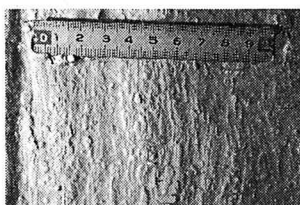


写真 2 (実験開始 30 分後)

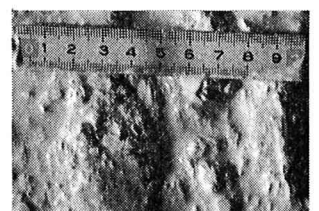


写真 3 (実験開始 8 時間後)

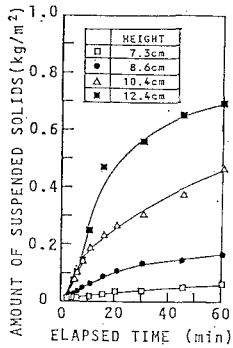


図-4 波高と巻き上げ量の関係

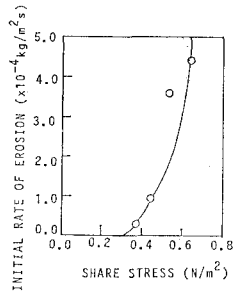


図-5 剪断応力と巻き上げ速度

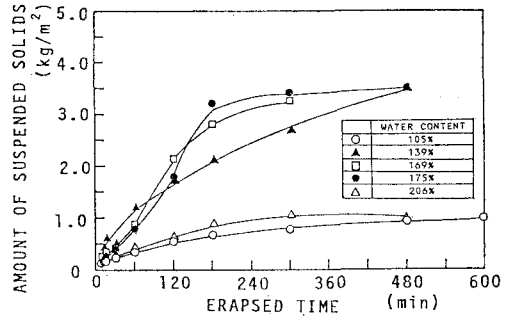


図-8 含水比と巻き上げ量の関係

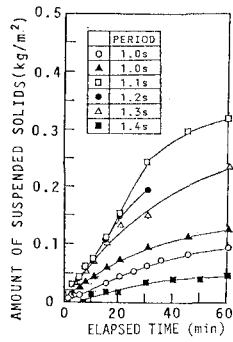


図-6 周期と巻き上げ量の関係

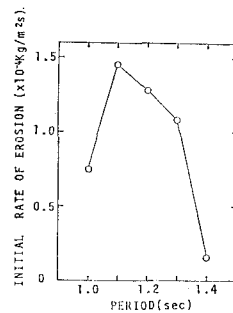


図-7 周期と巻き上げ速度

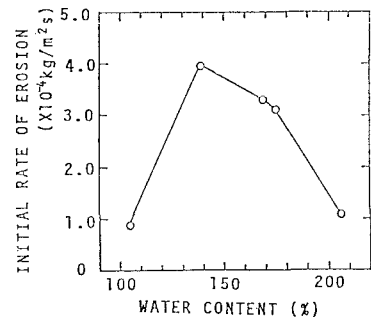


図-9 含水比と巻き上げ速度

と、 $\tau_e = 0.3 \text{ N/m}^2$, $n = 1.8$, $\alpha = 0.0034 \text{ kg/m}^2\text{s}$ となった。実験結果を図-5 に示す。

b) 周期 a) で求めた理論底面剪断応力をもとに、剪断応力及び底泥含水比一定のもとで、波の周期を1.0から1.4秒まで変化させ巻き上げ速度を求めた。巻き上げ量の経時変化を図-6 に示す。巻き上げ速度と周期との関係を示すと図-7 となる。巻き上げは周期 $T = 1.1$ 秒で極大値を持ち、それ以下でもそれ以上でも巻き上げ速度は大きくなっていない。したがって、巻き上げ速度は、周期によって異なる値を持ち、また、ある値で極大値を持つこともわかった。このことは、底泥表層のモデル構造の妥当性を裏づけるものと思われる。しかしながら、この極大値については、それぞれの底泥物性によって異なると予測される。

c) 底泥含水比 底面剪断応力 ($\approx 0.5 \text{ N/m}^2$) 及び周期 (≈ 1.1 秒) 一定のもとで、含水比が105, 139, 169, 175, 206%とした底泥に対して実験を行った。図-8 は単位面積当りの巻き上げ量の経時変化であり、図-9 は、巻き上げ速度と底泥含水比との関係を表したものである。周期変化の実験の場合と同様に、底泥含水比が巻き上げに対して、極大値を持つ。本実験の場合には、およそ150%付近であった。この極大値を持つ理由として次のようなことが考えられる。すなわち、①底泥含水比が

小さいときは、底泥層はある程度の硬さを持つために、表層部にクラックが生じるものの、巻き上げられにくい。② ①よりも含水比が大きいものは、前記の場合よりも柔らかい状態となるためクラックから進入した水粒子の動きによって大きく作用され、かなり巻き上がりやすくなる。③しかし、含水比があまりに大きくなりすぎると、底泥自体、流体としての挙動を示し、上層水との連成振動が生じる。したがって、底泥に働く底面剪断応力が低下し、逆に巻き上げられにくくなることがわかる。

(3) 巻き上げ平衡濃度について

a) 鉛直方向の濃度分布 実験開始数分で底泥より数 cm のところに高濃度層が形成される。通常、一方向流でこのような層は形成されず、鉛直方向の SS 濃度分布はほぼ一定であることが確認されている¹⁾。またこの高濃度層厚と濃度は時間的にも、含水比によっても変化を起し、含水比 100% では 3 cm で 2 g/l、含水比 206% では 2 cm 程度で 15 g/l であった。また、巻き上げ量の経時変化は、ある時間までは一様に増加することから巻き上げ速度と物質の鉛直輸送とのバランスによって、高濃度層の厚さや濃度分布が決められる。このことは、この層にある時間までは濃度が増加し続け、しだいに上層への拡散が増加し、底面から水面まで一様な濃度分布に近づく。しかし、その後も巻き上げは少なからず生じるために、全体的には濃度が増加する。すなわち、この高濃度層は底泥からの巻き上げ、沈降及び高濃

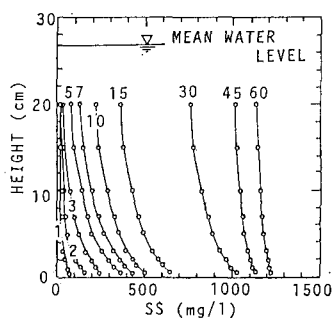


図-10 解析結果

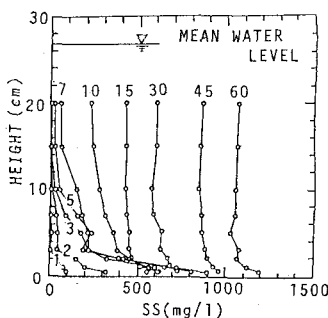


図-11 実験結果

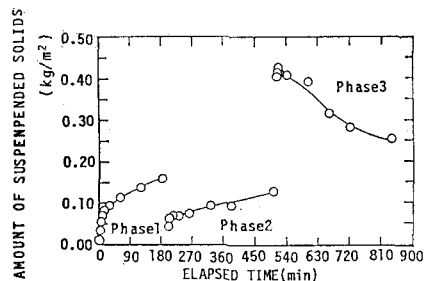


図-12 巻き上げ量の経時変化

度層界面からの上層水への輸送の量的バランスによって、準定常的に保持されているものと考えられる。

また、ここで先ほど求めた解析解の結果(図-10)と比較対象とした実験結果(図-11)を示す。両者は実験開始初期を除いて、よく一致している。

b) 巻き上げ速度の経時変化 SS 濃度の鉛直分布より算出した、単位面積当りの経時変化を図-12に示す。一般に、一方向流下において 10 g/l のオーダーでは存在しないとされている、巻き上げ平衡濃度の存在が確認された¹⁾。Phase 1 と Phase 2 の大きな差異は、実験開始後数分間でみられる巻き上げ量の直線的立ち上がりの有無である。Phase 2 の場合、Phase 1 の仮定で底泥が形状変化を起こし、圧密などの影響により、この急激な巻き上げ過程が観測されなかった。また、Phase 3 では、Phase 2 の終了時に新たに高濃度の懸濁物質を注入し、実験を継続させたものだが、この場合浮遊した懸濁物質の沈降量が巻き上げ量よりも大きくなっているために、見かけ上、巻き上げ速度が減少し平衡濃度に近づいている。すなわち、上層水の SS 濃度は、一方向流とことなり、波作用下では沈降と巻き上げフラックスの平衡により、低濃度で定常状態となる。この原因として、波作用下における底面剪断応力が瞬間的に 0 となることが考えられる。

5. まとめ

波による底泥の浮遊機構についてまとめると以下のようになる。

(1) 巻き上げフラックスは $E = \alpha (\tau/\tau_c - 1)^n$ により表され、 α は本底泥の場合、含水比150%、周期1.1秒で極大値をとった。ある含水比で極大値をとるのは、低含水比では底泥が固体に近くなり、また高含水比では流体に近くなるために連成振動を起こし、底面剪断応力の低下を招くことによる。

(2) 底泥表層は、実験開始後数分で、波進行方向に対して直角に形状変化を起こし、これが巻き上げに影響を及ぼしている。

(3) 一方向流下とは異なり、振動流下では沈降と巻き上げフラックスの平衡により、上層水中の SS 濃度が時間的に定常となりうる。

(4) 上層水中の SS 濃度の鉛直分布を解析解として示した。密度差の影響が顕著なとき、実測値と解析解に違いが生じるが、全体としてはよく一致する。

参考文献

- 1) Kusuda, T. et al.: Erosional Process of Cohesive Sediments, Wat. Sci. Tech., Vol. 17, pp. 891~901, 1984.
- 2) Kusuda, T. et al.: Depositional Process of Fine Sediments, Wat. Sci. Tech., Vol. 14, pp. 175~184, 1982.
- 3) Itakura, T. and T. Kishi: Open Channel Flow with Suspended Sediments, Proc. ASCE, Vol. 106, No. NY8, pp. 1325~1343, 1980.