

流れ場における底泥の巻き上がり量に関する研究

瀧 和 夫*

1. 緒 言

底泥粒子径が比較的大きく非粘着性の場合には、粒子の自重と粒子間の摩擦抵抗が巻き上がりに抵抗する支配的な力となるのに対し、粒径が小さく粘着性を有する場合には、粒子の大きさを無視し高濃度・高粘度の液体として取り扱われるのが従来の研究での一般的な手法であったように考えられる。ここで、底泥粒子の径が小さくなるにしたがい、粒子表面の電荷量が底泥層の粘度の大小に強く関係していること、したがって、粒子径と粘度は実際の底泥では双方とも巻き上がり現象に大きく寄与していることは周知の事実である。しかし、底泥の巻き上がり機構を粒子径と粘度を同時に直接的に取り入れて説明しているものは少なかったと言える。

本研究は中・高含水比の底泥の巻き上がり現象を取り上げ、現象の水理学的特性について考察を行い、またさらに、粘着性底泥における巻き上がり量子測式を無次元掃流力、粒子レイノルズ数、底泥層表面に関するクーリガン数および無次元底泥粘度の4つの無次元量から成る新たな合成関数を用いて導くものである。

2. 巻き上がり現象の水理学的特性

(1) 現象に関与する諸物理量

中・高含水比の底泥の巻き上がり現象は掃流的現象と密度流的現象との双方の性質を持つ。いま、この現象に関係する力として、粒子表面の電荷等による粒子間粘着力、底泥が粒子の集合体であるとしての粒子の水中重量、泥層表面を流れる流水によるせん断応力が考えられ、関係諸物理量として、図-1に示すような量が、また、底泥の巻き上がり量 q_s の関係式として次式が上げられる。

$$f\{q_s, \rho_w, \rho_b, \rho_s, \eta_b, u_*, d_s, g\} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q_s : 巻き上がり量、 ρ_w : 水の密度、 ρ_b : 底泥層の密度、 ρ_s : 泥粒子の密度、 η_b : 底泥の粘度、 u_* : 摩擦速度、 d_s : 粒径、 g : 重力加速度。

ここで、見掛けの粘度は底泥の粒径 d_s 、含水比 W 、密度 ρ_b の値によって変化することが知られているが、

本質的には粒子表面電荷に基づく量であり、底泥の独立した物性値と考えることができる。このように、式(1)の基本次元は M, L, T であることから、したがって、底泥の巻き上がり量 q_{s*} は

$$q_{s*} = f(R_{egr}, \tau_*, \theta_*, \eta_*) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表わされる。ここに、

q_{s*} : 無次元巻き上がり量 ($= q_s / \{\rho_w (s-1) \cdot u_*\}$, ただし、 $\rho_s / \rho_w = s$)

R_{egr} : 粒子レイノルズ数 ($= u_* d_s / \nu_b$)

τ_* : 無次元せん断応力 ($= u_*^2 / \{(s-1) g d_s\}$)

θ_* : 摩擦速度と底泥粘度に関するクーリガン数

($= \{(\varepsilon-1) \cdot \nu_b g\}^{1/3} / u_*$, $\rho_b / \rho_w = \varepsilon$, $\eta_b / \rho_b = \nu_b$)

η_* : 無次元底泥粘度 ($= (s-1) d_s^3 / \nu_b^3$)

ここで、無次元底泥粘度 η_* は後述するように、粒子レイノルズ数と無次元せん断応力とから導かれ、摩擦速度 u_* を含まない無次元量であるのが特徴的である。そして、底泥粒子の水中重量と粘着力との比による底泥の物性を表わす唯一のパラメータであると言える。また、粒子レイノルズ数 R_{egr} 、無次元せん断応力 τ_* および摩擦速度と底泥粘度に関するクーリガン数 θ_* についても、底泥の巻き上がり現象が摩擦力、重力および粘着力に強く関係する現象であることから、無次元底泥粘度と同様に重要な無次元量であると考えられる。特に、流砂現象においては無次元せん断応力が、また、底泥の流動性の高い挙動に対しては摩擦速度と底泥粘度に関するクーリガン数（以降、単にクーリガン数と呼ぶことにする）が重要な変数となると考えられる。

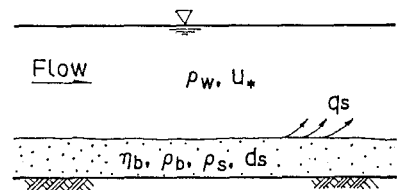


図-1 巻き上がり現象に関係する諸物理量

(2) 諸物理量の相互関係

底泥の巻き上がり量を知るには、多くの研究者の実験結果が示しているように、無次元せん断応力による現象

の整理では十分ではなく、むしろ大坪ら（1980, 1983）のデータでは実験データの規則性から粒子レイノルズ数による整理法が適切であるかのように見受けられる。これは底泥の巻き上がり現象において粘度の取り扱いが非常に重要であることを意味するもので、現象を掃流砂の現象とする従来からの考え方と異なることを示唆しているものと思われる。

次に、底泥材料の特性を示す無次元底泥粘度、流れの作用力を表わす無次元せん断応力、粒子レイノルズ数およびクーリガン数の関係について調べることにする。式（2）中の各変数 R_{egr} 、 τ_* 、 θ_* は若干の式の変形によって、

$$R_{egr} = \left\{ \frac{\varepsilon - 1}{s - 1} \right\}^{1/3} \eta_*^{1/3} \cdot \frac{1}{\theta} \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_* = \frac{1}{\eta_*} \cdot R_{egr}^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$\theta = \left\{ \frac{\varepsilon - 1}{s - 1} \right\}^{1/3} \frac{1}{\eta_*^{1/6}} \cdot \tau_*^{-1/2} \dots\dots\dots (5)$$

のように示すことができる。これらの式から η_* は R_{egr} 、 τ_* および θ_* を関係づける重要なパラメータとなっていることが認められる。また、 τ_* 、 R_{egr} および θ_* の関係は底面せん断速度の変化に関しては、

$$\ln \tau_* : \ln R_{egr} : \ln \theta_* = 2 : 1 : -1 \dots\dots\dots (6)$$

の関係の保たれているのがわかる。さらに、 τ_* 、 R_{egr} および θ_* をそれぞれの軸にとり、 η_* をパラメータとして実験値の代表的な値を図示すると、底面のせん断速度の変化に伴い 図-2 のように移動するのがわかる。図より、各無次元底泥粘度 (η_*) のもとの、データはせん

断速度の増減に従って、3次元空間の第1象限内に作られる平面上の各実線に沿って移動することを、また、それぞれの実線は底泥の無次元底泥粘度の大ききの順に平行線を成しているのがわかる。

以上のことより、流れの作用力に関する無次元せん断応力、粒子レイノルズ数およびクーリガン数のいずれか1つのみで巻き上がり現象を整理することは必ずしも十分ではなく、底泥材料の性質に関する無次元底泥粘度を含めた総合指標が必要であると考えられる。

3. 底泥の巻き上がり量の評価

（1）全せん断応力が作用する場合の巻き上がり量

底泥粒子の巻き上がりは水流から泥層表面に加えられたせん断応力がある値を上まわったとき生じる。この値を泥の流送限界あるいは破壊限界さらにまた降伏値を用いる場合など、今までまちまちである。そこで、いま、中・高含水比泥の限界せん断応力値は小さいとして、ここでは、限界せん断応力を含めた全せん断応力をもって底泥の巻き上がり量の予測式の評価を行なうこととする。式（6）では各無次元量の間の比率を明らかにすることができた。次に、実験データの主成分分析から巻き上がり現象の総合指標としての合成関数を求める。

いま、流れの作用力および底泥材料の性質を共に兼ね

表-1 主成分分析による係数の値

RUN No.	Principal Component Analysis			
	a	b	c	$\ln(M)$
BENT300	0.816	0.408	-0.408	5.702
BENT350	0.816	0.408	-0.408	4.968
BENT397	0.816	0.408	-0.408	4.730
BENT442	0.816	0.408	-0.408	4.256
BENT500	0.816	0.408	-0.408	4.229
BENT550	0.816	0.408	-0.408	4.251
KAOL150	0.816	0.408	-0.408	2.487
KAOL200	0.816	0.408	-0.408	2.933
KAOL250	0.816	0.408	-0.408	2.964
KAOL300	0.816	0.408	-0.408	2.872
KAOL350	0.816	0.408	-0.408	3.045
KASU790	0.816	0.408	-0.408	3.717
KASU980	0.816	0.408	-0.408	3.559
KASU1080	0.816	0.408	-0.408	3.834
KASU1200	0.816	0.408	-0.408	3.830
KASU1450	0.816	0.408	-0.408	3.986
HINU380	0.816	0.408	-0.408	3.219
HINU500	0.816	0.408	-0.408	2.971
HINU575	0.816	0.408	-0.408	2.969
HINU625	0.816	0.408	-0.408	3.135
HINU675	0.816	0.408	-0.408	3.171
HINU750	0.816	0.408	-0.408	3.757
IMBA350	0.816	0.408	-0.408	3.835
IMBA424	0.816	0.408	-0.408	3.390
IMBA425	0.816	0.408	-0.408	3.713
IMBA475	0.816	0.408	-0.408	3.629
IMBA575	0.816	0.408	-0.408	3.901

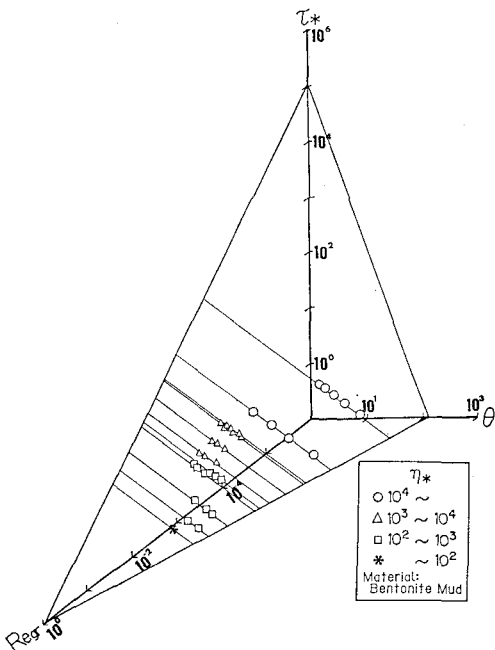


図-2 各無次元量の関係

備えている大坪ら (1980, 1983) および筆者ら (1982, 1984, 1985) のデータを用い, 各実験条件ごとのデータに対して解析を進めることとする。ここで, 解析に用いた物理量は無次元せん断応力, 粒子レイノルズ数およびクーリガン数の3変数である。また, 大坪らの実験にはベントナイト泥 ($d_s=0.0144$ mm, $W=303\sim550\%$), カオリナイト泥 ($d_s=0.0065$ mm, $W=150\sim350\%$), 霞ヶ浦泥 ($d_s=0.0207$ mm, $W=389\sim675\%$), 濁沼泥 ($d_s=0.0118$ mm, $W=380\sim750\%$), 印旛沼泥 ($d_s=0.0154$ mm, $W=350\sim475\%$) が, 筆者らの実験にはベントナイト泥 ($d_s=0.0067$ mm, $W=650\sim1052\%$) が用いられている。

解析の結果は図-2 および式 (3)~(6) からも予知されるように, 第1主成分軸が累積寄与率 100% を示している。さらに, この第1主成分軸を, 変数軸 ξ とし, 各物理量との関係を表わしたのが, 表-1 である。ここで, 表中の計算結果の表示には小数点以下3ないし4桁まで表示されているが, 実験値に対する統計解析であることから, 以下の解析には少数1桁までの表示とし, 現象の本質的な記述に努めることとする。

表より, 各物理量の ξ に対する指数の値は実験条件によって変るものではなく, 定数 d の値のみが変化していることがわかる。したがって, データの固有値ベクトルからその関数形を

$$\ln \xi = a \cdot \ln \tau_* + b \cdot \ln R_{egr} + c \cdot \ln \theta_* + \ln M \quad (7)$$

とすると, a, b, c の各係数の間には表から

$$a : b : c = 0.8 : 0.4 : -0.4 \quad (8)$$

の一定な比率がえられる。

また, 底泥の種類, 含水比などの底泥の特性と係数 M との関係は図-3 のように表わすことができる。この図より,

$$M = 500 \cdot \eta_*^{-0.4} \quad (9)$$

が得られる。したがって, 式 (7) は

$$\xi = 500 \left\{ \left(\frac{R_{egr}}{\eta_* \theta_*} \right)^2 \tau_*^4 \right\}^{0.2} \quad (10)$$

また一方, この合成関数 ξ で無次元巻き上がり量 q_{s*}

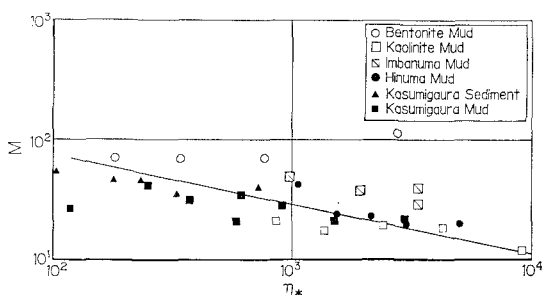


図-3 係数 M とパラメータ η_* との関係

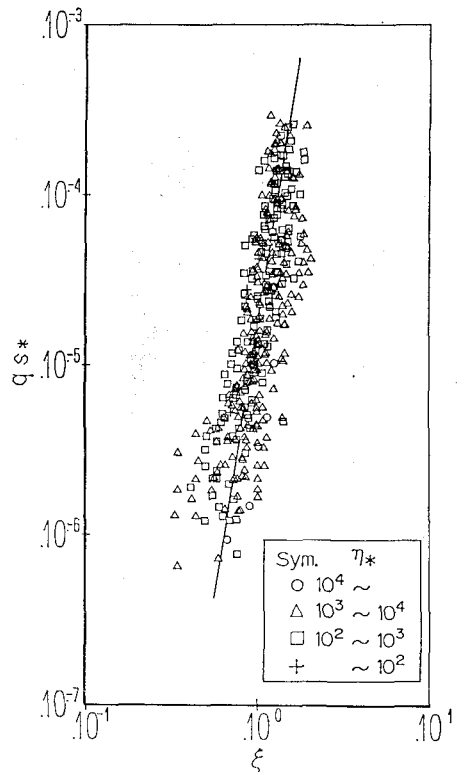


図-4 無次元巻き上がり量 q_{s*} と合成関数 ξ との関係

を整理すると, 図-4 のように表わされ, その関係式は次式で, 図中の実線のように示される。

$$q_{s*} = 1.7 \times 10^{-5} \xi^{6.5} \quad (11)$$

また, 合成関数 ξ は無次元せん断応力などの関数であるから式 (10) を式 (11) へ代入すると,

$$q_{s*} = 5.9 \times 10^{12} \left\{ \left(\frac{R_{egr}}{\eta_* \theta_*} \right)^2 \tau_*^4 \right\}^{1.3} \quad (12)$$

さらに, 底泥の巻き上がり量を流れによる底面せん断応力の関数として表示されることが多いことから, いま, 式 (12) の R_{egr} および θ_* を式 (3)~(5) を用いて τ_* で書き換えると,

$$q_{s*} = 5.9 \times 10^{12} \left\{ \left(\frac{s-1}{\varepsilon-1} \right)^{2/3} \frac{\tau_*^6}{\eta_*^{14/3}} \right\}^{1.3} \quad (13)$$

さらに, 筆者のベントナイト泥に関する実験および大坪ら (1980, 1983) の実験結果から, 底泥の含水比 W を無次元底泥粘度 η_* の関数 ($W/W_L = 32\eta_*^{-2/5}$, W_L は液性限界値) として表わされたとすると, 式 (13) 右辺の $\{(s-1)/(\varepsilon-1)\}$ を底泥の含水比 ($W = (\rho_s - \rho_b)/(\rho_{b,s} - \rho_s)$) および無次元底泥粘度 η_* で書き直して,

$$q_{s*} = 5.9 \times 10^{12} \left\{ \left(1 + \frac{32sW_L}{\eta_*^{2/5}} \right)^{2/3} \frac{\tau_*^6}{\eta_*^{14/3}} \right\}^{1.3} \quad (13')$$

となる。ここに, 無次元巻き上がり量が無次元せん断応

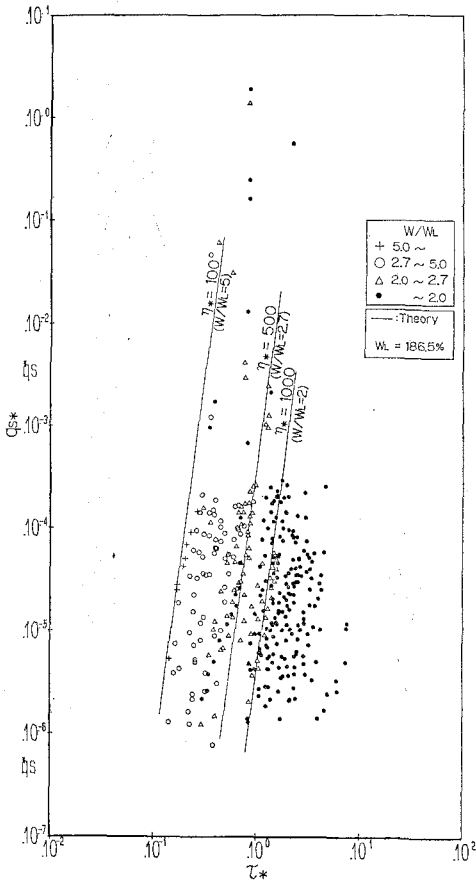


図-5 無次元全せん断応力 (τ_*) と無次元巻き上がり量に関する全データと算定式との関係

力のほぼ8乗 ($\div 6 \times 1.3$) に比例する結果となっているのがわかる。

また一方、底泥の巻き上がり量と全せん断応力との関係について各データと式 (13') の結果を示したのが 図-5 である。馬場ら (1974)、村端ら (1968)、Partheniades ら (1971)、Kusauds ら (1984)、海田 (1989) および Metha ら (1974, 1975) 等のデータの多くは底泥の粘度あるいは粒径の値が欠測している等、無次元底泥粘度を求めることは困難である。したがって、ここでは相対含水比 (W/W_L) をパラメータとして、データの表示を行うこととする。図より、各パラメータごとのデータは無次元せん断応力の増加と共に底泥の急激な巻き上りを示しているのが認められる。この結果は筆者の理論曲線と良い一致が得られていると考えられる。

(2) 余剰せん断応力が作用する場合の巻き上がり量
いま、底泥層に働くせん断応力を全せん断応力 τ_* から限界せん断応力 τ_{*c} を除いた無次元余剰せん断応力 $\tau_{*exc} (= \tau_* - \tau_{*c})$ と考える。

式 (13') を書き直して、

$$q_{s*} = 5.9 \times 10^{12} \left\{ \left(1 + \frac{32sW_L}{\tau_{*c}^{2/5}} \right)^{2/3} \frac{\tau_{*F}^2}{\tau_{*c}^{14/3}} \right\}^{1.3} \quad (14)$$

(ただし、 $\tau_{*F} = \tau_{*exc} + \tau_{*c}$)

がえられる。ここに、無次元限界せん断応力 τ_{*c} には底泥層表面の粒子と鎖状あるいは団塊状に接触している数多くの周囲の粒子からの電荷による斥力と隣接粒子間に働く引力との差から求められる引力がその粒子に対する定着力として作用するとの考えに基づいた筆者 (1991) の次式、すなわち、

$$\tau_{*c} = \frac{6\beta}{\pi(\rho_s - \rho_w)gd_s^3} \left[\frac{1}{\{(\pi/6) \cdot (1+sW)\}^{1/3} - 1} \right]^2 + 0.05 \quad (15)$$

を使用する。ここに、 β は底泥粒子の表面電位、Debye の長さ等の粒子の特性から導かれる粒子定着力に係わる係数で、底泥粒子がフロッグ状に堆積するなど均等に泥層内に分散していないことによる補正係数等、多くの未

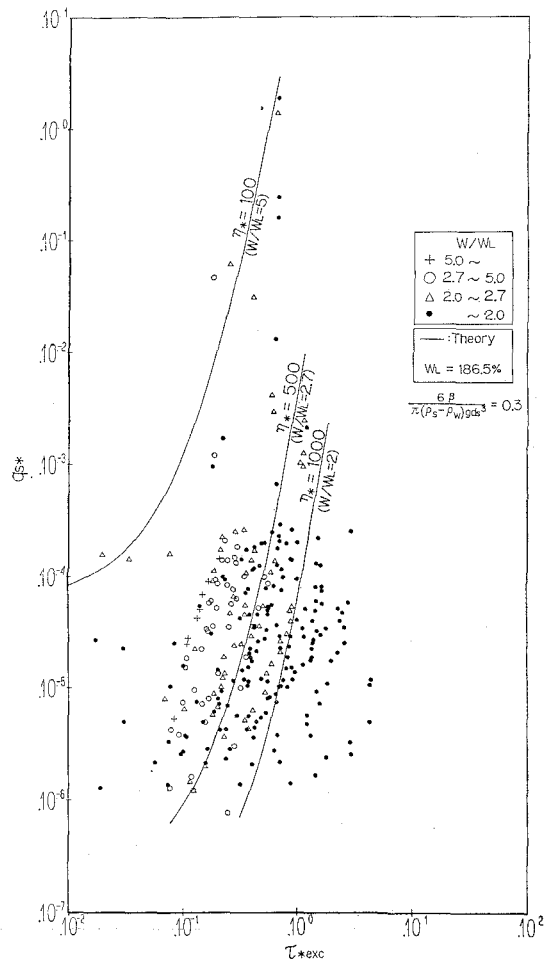


図-6 無次元余剰せん断応力 τ_{*exc} と無次元巻き上がり量 q_{s*} に関する全データと算定式との関係 ($6\beta/\{\pi(\rho_s - \rho_w)gd_s^3\} = 0.3$ の場合)

知のパラメータが含まれている。そのため、 β は実験によって求まる値である。また、式 (15) の右辺第2項は非粘着性粒子の限界せん断応力に関して一般に用いられる実験値である。

式 (15) より、底泥の巻き上がり量はせん断応力が小さく、かつ、巻き上がりの初期においては限界せん断応力 τ_{*c} の影響が強く現れ、せん断応力が増加するにしたがい、限界せん断応力の影響は減少し、無次元せん断応力の8乗に比例した巻き上がり量を生じることがわかる。

また一方、底泥の巻き上がり量と各データに対する余剰せん断応力との関係を示したのが図-6である。ここに、図中のデータの記号は相対含水比 (W/W_L) をパラメータとして表示している。また、図中の実線は式 (15) の係数 ($6\beta/[\pi(\rho_s - \rho_w)gd_s^3]$) が0.3の場合について、無次元底泥粘度 η_* をパラメータとして表示している。図より、データのばらつきが顕著であるが、無次元余剰せん断応力の増加と共に底泥の急激な巻き上がりの生じる傾向を示していると見ることができる。そして、無次元底泥粘度の小さな底泥では、余剰せん断応力が小さな時でも巻き上がり量は大きく、余剰せん断応力の増大と共に8乗に比例して巻き上がり量の増大するのがわかる。

4. 結 言

堆積定泥の粒子径が小さく含水比が高いために粒子がほとんど非接触に近い状態の底泥でも、底泥には粘着性に基づく抵抗力を有するなど、この巻き上がり現象は流砂現象とは基本的に異なっているように考えられる。したがって、底泥の巻き上がり量の評価は無次元せん断力の関数のみで表わすことはできず、粒子の粘着力を直接的に取り扱い、粒子レイノルズ数およびクーリガン数をも含めた関数形として定めることが重要である。

本報は、粒子粘着力の巻き上がり機構への関わりについて、そして、現象を総括的に律する新しいパラメータの導入とその妥当性について検討を試みた。以下に得られた主な結果を示す。

1) 底泥粒子の粘着力を効果的に見積る変数として、無次元底泥粘度を導入し、無次元せん断応力、レイノルズ数およびクーリガン数を加えた4つの無次元量から、現象の機構を包括する合成関数を見出した。ここで、無次元底泥粘度は粒子の巻き上がり抵抗が自重によるのか、または粘着力によるのかを判断する量であ

るのみならず、無次元せん断応力、粒子レイノルズ数およびクーリガン数を結び付ける重要なパラメータでもある。また、底面せん断応力の増大は無次元せん断応力、粒子レイノルズ数、クーリガン数を軸とする3次元空間内の平面上を直線的に移動することに他ならず、無次元底泥粘度が平面上の一点を定めるパラメータとなっていることを実験データより明らかにした。

2) 無次元巻き上がり量は合成関数 ξ と一対一対応の関係にあり、多くの実験データから、合成関数の6.5乗に比例することを明らかにした。この合成関数の値は無次元せん断応力の $6 \times 1.3 = 7.8$ ($\div 8$) 乗に相当するもので、相対含水比が2以上の底泥における巻き上がり現象を良く説明している。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、中央大学理工学部林泰造名誉教授および服部昌太郎教授より終始多くの御指導ご意見を賜った。ここに記して謹んで感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 海田輝之 (1989)：底泥の巻き上げと懸濁物質の沈降に関する研究，九州大学学位論文，pp. 105-111.
- 大坪国順・村岡浩爾・高野恒雄 (1980)：底泥の限界掃流力と巻き上げ量について，第16回衛生論文集，pp. 140-145.
- 大坪国順 (1983)：底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究，国公研研究報告，第12号，pp. 1-177.
- 村端克巳・大石 功・小川芳昭 (1968)：粘性土の洗掘機構について，北海道開発局土木試験所月報，第176号，pp. 1-5.
- 滝 和夫・岡 正義 (1982)：粘性を有する河川底泥の巻き上がり現象，第10回環境問題論文集，pp. 1-6.
- 滝 和夫・岡 正義 (1984)：河川底泥の巻き上がり現象に関する基礎的研究，第20回衛生論文集，pp. 1-10.
- 滝 和夫 (1985)：底泥の流動特性に関する研究，第13回環境問題論文集，pp. 1-6.
- 滝 和夫 (1991)：水流による底泥の巻き上がり量に関する水理学的研究，中央大学学位論文，pp. 125-143.
- 馬場洋二・佐々木重義・伊藤雄二 (1974)：ヘドロ河床の流れによる洗掘特性，土木技術資料，Vol. 16, No. 10, pp. 28-33.
- Kusuda T., T. Umita, K. Koga, T. Futawatari & Y. Awaya (1984)：Erosional process of cohesive sediments, Water Science Tech., Vol. 17, pp. 891-901.
- Mehta, A. J. & E. Partheniades (1974)：On the depositional properties of estuarine sediments, Proc. Int. Coastal Eng., 14th, pp. 1232-1251.
- Mehta, A. J. (1975)：An Investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments, Jour. of Hydraulic Research, Vol. 13, No. 4, pp. 361-381.
- Partheniades, E. (1971)：Erosion and deposition of cohesive materials, In: Shen, H. W. (ed.), River Mechanics, Vol. II, McGraw Hill, pp. 25-1~25-91.