

底泥の巻き上げ現象とそのモデル化に関する実験的検討

村上 和男*・菅沼 史典**・佐々木 均***

1. ま え が き

軟弱な底泥場の流れによる地形変化予測や汚濁拡散シミュレーションで用いられる巻き上げフラックスの予測式は、通常、実際に現場から採取した泥を水路に敷き詰め、流れを与えて経験的に求めている。このことは、砂質土に比べて外力に対する力学的挙動の複雑な底泥の場合、これらの推定式中のパラメータと底泥の物性との関連が必ずしも明確ではなく、泥の種類や含水比が変化するとに実験を行なう必要があることによる。しかしここで、もし簡単な試験方法で巻き上げフラックスに関わるパラメータ群を測定することができれば、巻き上げ量の予測が非常に簡略化できる。近年、大坪(1983)は限界せん断応力と底泥の降伏値の関連をもとに限界掃流状態を物理的に明確に定義するとともに、限られた条件のもとではあるものの、巻き上げ現象を経験的なパラメータを導入することなく泥の流動パラメータからモデル化する方法を提案した。

本研究では、大坪の方法をもとに、これを若干修正拡張して巻き上げのモデル化を試みた結果(村上ら, 1989)について、その概要を報告する。

2. 実験方法と実験条件

本研究では Partheniades(1966)、楠田ら(1982) とほぼ同様な円形回転水路(図-1)を使用した。水路は内径1.25m 外径1.55m で、水深は16cm として実験を行なった。巻き上げ実験ではせん断リングと円形水路の相対速度を0から連続的に増加させた(図-2)。ここでは底質の巻き上げ特性を幅広い範囲で求めるためにやや大きな底面せん断力($\tau=1.0\text{ Pa}$)まで変化させ、一定時間ごとに測定したSSから巻き上げ速度を算定した。このように、連続的にせん断力を変化させる実験から巻き上げとせん断力の関連を検討するにはいくつかの問題がある。底泥にせん断力が作用し底質が巻き上げられるまでには若干のタイムラグが存在すると考えられることや、

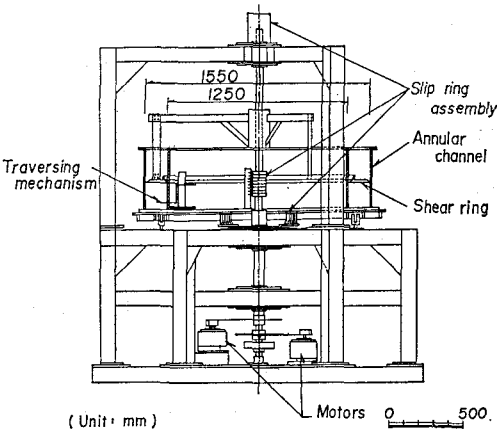


図-1 円形回転水路概観

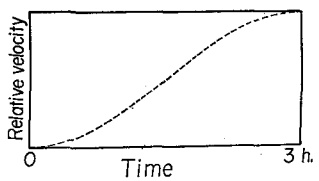


図-2 相対速度の与え方

表-1 底泥の土質試験結果

試料名		カオリナイト	ベントナイト	熊本港泥
土粒子の比重		2.67	2.61	2.64
強熱減量(%)		0	—	6.2
コンシシス特性	液性限界	70.5	183.9	83.1
	液性限界	32.3	24.8	34.8
	液性指数	38.2	159.1	38.3
粒度特性	$d_{50}(\mu\text{m})$	0.8	6.5	25.0
	レキ分(%)	0	0	0
	砂分(%)	0	5.3	5.4
	シルト分(%)	100.0	94.8	94.6
	粘土分(%)			

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海域環境研究室長
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海域環境研究室
*** 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室

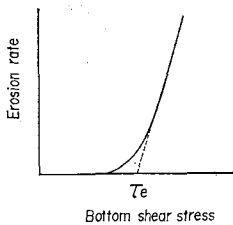
海田ら(1988)が述べているように、底泥表面の応力による硬化が生じるとすると、こうした非定常かつ連続的な実験方法では十分な精度で巻き上げ特性を把握するのが困難となる。しかしながら、実験の便宜上ここではこの方法で巻き上げ速度を求めた。底泥として使用した泥の土質試験結果を表一に表す。これらの材料に、水道水または塩水を加えて所定の含水比の底泥を調製する。塩水としては海水を用いた。実験期間中の海水の塩分濃度は、およそ27~30‰の範囲であった。実験はまず含水比を調整した底泥を厚さ 2 cm で均一になるよう円形水路内に敷き詰めたのち、底泥の表面がはがれないよう水路に注水する。実験は、初期の急速な圧密沈降時を避けるため、一昼夜静置した後開始することとした。含水比は別容器に取り分けた試料から実験と並行して測定を行なった。

3. 巻き上げ速度と侵食限界せん断応力

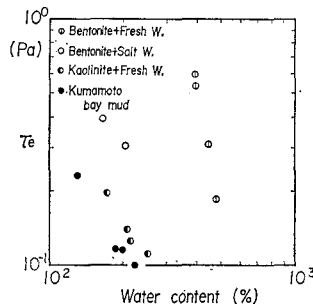
巻き上げ現象のモデル化に当たって、研究者によって若干の相違はあるが、一定のせん断応力を超えると急速に巻き上げ量が増加する特性を表現するため、侵食の限界せん断応力 τ_e を用いたものが一般的である。例えば楠田らは次式を提案している。

$$E = M \cdot \{(\tau - \tau_e) / \tau_e\}^n \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 M は比例定数で、底泥の含水比、泥の種類などにより変化する値である。 $\tau - \tau_e$ は侵食の限界応力からの超過応力で、侵食に関わる有効せん断応力と考えることができ、これを τ_e で無次元化している。 τ_e の定義方法は研究者により様々である。実験的に τ_e を求める場合、目視により底泥表層の粒子が移動し始めるときのせん断応力とする方法がある。しかしながら、円形回転水路の実験からこの方法で限界値を求めるのは水路が動いているため非常に困難で、ばらつきも大きくなることが懸念される。そこで今回の実験では、Arulanandan ら(1980)に従い、図一3 のように、巻き上げ速度が急増する領域の外挿として限界せん断応力を求めた。このよう



図一3 τ_e の求め方



図一4 τ_e と含水比

にして求めた τ_e と含水比の関係を示したのが図一4 である。いずれの泥の場合も、含水比の増加にともない τ_e は急速に低下し、泥の粘着力には水分の影響が非常に大きいことがわかる。しかし τ_e と含水比の定量的な関係は泥の種類により傾向が変わるのがわかる。

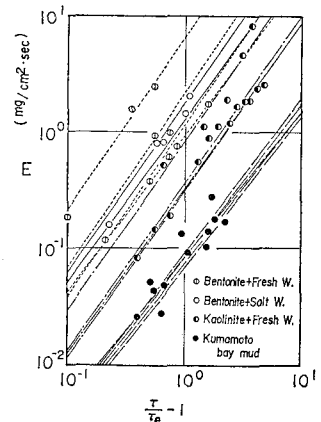
今回の実験について、 $\tau / \tau_e - 1$ に対して巻き上げ速度 E をプロットすると図一5 のようになる。これを式 (1) を基に検討すると、カオリナイト泥、海水で作製したベントナイト泥および熊本泥については、含水比により τ_e が変化しても、泥の種類ごとには一定の関係が見いだされる。これに対して、水道水で作製したベントナイト泥の場合ばらつきが大きいようである。また、対数座標上の傾きは泥の種類によらずほぼ一定とみなすことができる。図一5 中の直線群で示されるように、式 (1) の指数 n は泥の種類によらずほぼ 1.2~1.5 の範囲にあり、係数 M は泥の種類ごとには一定とみなすことができるが、泥の種類が変わると大きく変化することになる。

4. 巻き上げの無次元表示の検討

式 (1) で示される巻き上げ速度の表示では、巻き上げ現象を物理的に表わしたものでないために、この表示をもとにパラメータとなる、 M 、 τ_e 、 n などと底泥の物性との関連を見いだすのは困難である。そこでここでは底泥を連続体と考え、その流体としての流動特性を示すパラメータを用いて巻き上げ現象を説明しようとする大坪の方法をもとに、巻き上げの無次元表示を試みた。

4.1 大坪の無次元飛び出し率

大坪はまず底泥が基本的には粒状体であるものの、本来連続体としての流動パラメータである降伏値や粘度が粒子間の複雑な結合力を包括的に表わし、粒子間の粘着性を代表するものであると考えた。そして掃流限界状態として、現象的に規定される(表面からの粒子の巻き上



図一5 巻き上げ速度と τ

げ量が無視できなくなる限界) 流送限界と、底泥のせん断抵抗力として降伏値と直接関係づけることのできる破壊限界の二つを規定した。その上で以下の仮定のもとに式(2)の飛び出し率の無次元表示を得た。

i) 巻き上げは底泥表面直下の粒子が粒径分だけ「ずれ」と生じる。

ii) 巻き上げは表層粒子から一層ずつ生じる。すなわち、一層目が巻き上がる時それ以下の粒子は動かない。

iii) せん断応力は時間的に変動する。

$$p_m = P_m \mu_B / (\rho_0 d_0 \tau) \dots\dots\dots (2)$$

ここに P_m は単位面積・単位時間当りの底泥粒子の飛び出し量で、式(1)の巻き上げ速度 E に相当する。また、 μ_B は底泥の塑性粘度、 ρ_0 、 d_0 はそれぞれ飛び出し粒子の代表密度、代表粒径を表わす。

i) から iii) の仮定条件が成立する状況は、大坪によれば次のようである。平均のせん断応力が流送限界付近から破壊限界までに至る、巻き上げのごく初期を対象とするものである。すなわち、底泥が全体として流動せず、時間的に変動するせん断力のうち破壊限界以上のせん断応力により表層粒子が一つずつ浮上する状況と考えられる。一方、平均せん断応力が破壊限界値を超えるような場合は底泥全体が流動し、粒子が必ずしも独立に舞い上がらなくなる。また、底泥表面、凸凹の状態、表層付近の流れが表面に平行でなくなり渦が発生する状況になると、底面せん断応力が局所的に大きく変化するため、以上に示したような考え方はそのまま適用が難しくなるとした。

4.2 実験結果への大坪モデルの適用上の問題点

以上、大坪の考え方を紹介したが、今回の巻き上げ実験結果にこの手法を適用する場合のいくつかの問題点について次に述べる。

a) 限界掃流力と底泥の降伏値の関係に関する問題点

i) 限界掃流力の定義について：本実験では侵食限界せん断応力 τ_c を濃度変化から推定した。従って、現象面から定めた大坪の流送限界や破壊限界と直接対応づけるのが難しい。しかし、状況から判断してほぼ破壊限界に近いと考えてよいと思われる。

ii) 底泥の流動パラメータと限界掃流力について：本実験では用いた底泥のそれぞれについて直接の流動試験は行っていない。そこで当所海洋水理部水理研究室で鶴谷ら(1986)が実施した流動試験結果から、各含水比における降伏値、塑性粘度を推定して用いた。図-5で示したデータについて降伏値を求め、 τ_c に対してプロットしたものが図-6である。このように底泥ごとにかなりばらつきがある上に、降伏値 τ_y が τ_c の十倍以上の値となっている。このように、降伏値によって破壊限界が規定されるとした大坪の結果 ($\tau_y \approx \tau_c$) と異なる結果

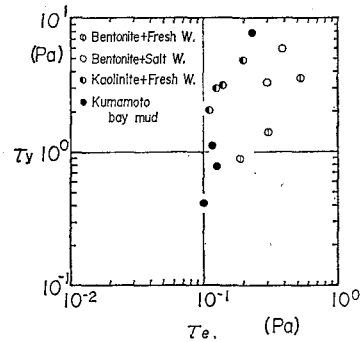


図-6 τ_c と τ_y の関係

が得られた理由としては、

①含水比の測定精度：底泥が水中にある状態ではごく表層が水の浸潤により含水比が上昇していると考えられるが、本実験で用いたように、ビーカの別試料から含水比を測定する方法では、十分な精度で表層の含水比を求めたことになっていなかったのではないかと考えられる。

②流動試験方法の違い：底泥の降伏値や粘度を求めるために行なった回転粘度計による流動試験の方法が大坪と鶴谷らとで若干異なっている。鶴谷らが実施した流動試験は水面波による底泥の流動特性の把握を目的とし、きわめてひずみ速度の小さな領域 ($0 \sim 10 \text{ sec}^{-1}$) を測定しているのに対して、大坪の実験では流れによる巻き上げ現象を対象とするため、かなり大きなひずみ速度まで ($0 \sim 100, 300 \text{ sec}^{-1}$ 程度) 短時間で変化させて調べている。このことが τ_y の測定値に影響している可能性がある。

b) モデルの適用範囲に関する問題点

以上のように、モデルの前提となる限界掃流力と底泥の降伏値の関係が大坪の得た結論と異なる結果となった。こうした点に加えて、大坪のモデルを今回の実験結果に適用するに当たっては、4.1で示したモデルの成立する状況にも注意しなければならない。すなわち、大坪モデルでは平均せん断応力が破壊限界応力を超えない領域での巻き上げを対象としているのに対して、本研究で行なった実験の範囲は破壊限界を超える領域を対象としている。従って次のような問題が生じる。

i) 流体の粘度は、ずり速度が比較的小さい領域では塑性粘度で評価できるが、ずり速度の大きな領域では粘度を塑性粘度 μ_B では評価できなくなる。従って、降伏値をはるかに超えるような大きなせん断力に対して塑性粘度を用いると、粘度を過大に見積る可能性がある。

ii) 破壊限界以上の大きなせん断力で、大坪が指摘するように、底泥全体が流動し、かつ底泥表面の強い乱れにとまなう局所的な付加せん断応力を考慮しなければなら

らない場合はこのモデルでは表現できない。

c) そのほかの問題点

大坪のモデルでは十分考慮されていない点として次のような問題がある。

i) 底泥がかなり圧密され含水比が低い場合、表層から粒子がかたまりとしてはがれる (massive erosion) ことが実験的に観察されている。大坪のモデルでも粒子が集合体としてはがれることを一応考慮して飛び出し粒径を評価しているが、粒子間に働く結合力を直接考慮したものではない。

ii) はがれる粒子塊の大きさが増大しても、粒子が降伏してから飛び出すまでの「ずれ」距離は必ずしも増加するとは考えられない。「ずれ」距離は、むしろ粒子間の結合の単位である底泥粒子の個々の粒径に依存すると考える方が自然である。

4.3 大坪モデルの修正方法と修正したモデルの実験結果への適用

本研究における実験結果への大坪モデルの適用には、以上のようにいくつかの問題点があるが、4.2 で示した問題点のうち、a) および b) については本研究の範囲では十分な検討は困難である。そこでここでは c) の点に関してモデルの修正を試みた。

a) 底泥の飛び出し粒径の評価

底泥の飛び出し粒径の実測は非常に困難で、実験例も少ない。青木・首藤(1982)が行なった実験では、底泥表面に残された痕跡の大きさから浮上粒子の大きさを求めているが、いくつかの粒子が同時にはがれている可能性もあり、測定法としては問題が多い。

大坪のモデルでは、粒子集合体としての飛び出し粒径 d_0 の評価にあたり、底泥の含水比と土粒子実質部分の平均粒径の効果を考慮した次式を用いている。

$$d_0 = \{[\rho + \sigma(w/100)]/\rho\}^{1/3} A_s^{1/3} d_m \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ は水の密度、 w が含水比、 A_s は堆積に関する形状係数、 σ は土粒子の比重、 d_m が平均粒径を示す。

しかしこの式では、土粒子の集合を形成するものとなる粒子間の粘着性を直接評価したわけではなく、 d_0 の決定方法には問題が残されている。そこで、本研究では含水比の低下にともなう底泥粒子間の結合力の増大により飛び出し粒径が増加するものと考え、粒子間の結合力を評価するパラメータのひとつとして底泥の降伏値を用いた。一方、底面に作用するせん断力が増大すれば底泥層内のせん断力も大きくなり、粒子を破壊する効果も大きくなるものと考えられる。従って底面せん断力の増加はむしろ飛び出し粒径を小さくする作用があるものと予想される。以上の考察から飛び出し粒径 d_2 を次式で表わすこととした。

$$d_2 \propto (\tau_0/\tau)^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 n は経験的なパラメータである。なお、(4) 式において、今回の実験では図-6 のように降伏値と限界掃流力の関係に検討すべき点が残されているため、ここでは降伏値の代わりに結合力の代表量として限界せん断応力を用いた。

b) 飛び出しに至る移動距離 (「ずれ」距離) の評価
さらに、粒子の塊がはがれるまでに「ずれ」距離 d_1 は、4.2 c) の ii) で述べた点を参考にして、次式で表わすこととした。

$$d_1 \propto d_{50} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで d_{50} は底質の中央粒径を示す。

以上の点については、飛び出し粒径の実測手法を確立し、実験的な検討が必要であるが、ここでは以上の考察のもとに次のような無次元化を試みた。

無次元飛び出し率は大坪の方法と同様に、

$$p_{m*} = (A_2/A_3) (P_m/\rho_0 d_2) \cdot t_1 = p_m \cdot t_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 A_2 、 A_3 はそれぞれ面積および体積に関する形状係数、また、 t_1 は基準時間、 p_m は単位時間に粒子の飛び出す確率を表わす。ここで t_1 は次のように表わすものとする。

$$t_1 = d_1/v_0 \propto (d_1/u_d) (\mu_B/\mu) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 u_d は表層直下の粒子の代表位置における局所流速、 v_0 は飛び出しにいたる粒子の移動速度である。

以上から式 (2) に対応する修正した無次元飛び出し率が、次のように与えられる。

$$p_{m*} = P_m \mu_B d_1 / (\rho_0 d_2) \tau d_2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

なお、ここでは τ に関して、

$$\tau \propto \mu (u_d/d_2) \quad \dots\dots\dots (9)$$

を仮定している。

また、代表密度 ρ_0 は、大坪の方法にならい底泥の見かけの密度 ρ_t 、水の密度 ρ を用いて次式から求めた。

$$\rho_0 = (\rho_t - \rho)/A_s + \rho \quad \dots\dots\dots (10)$$

今回の実験で用いた底泥の中央粒径は表-1 に示すとおりであるが、実際に底泥表層に存在する粒子の粒径はこれよりさらに小さいことが予想される。熊本港泥の同様の巻き上げ実験で最大せん断力を 0.4 Pa とした時の、0.4 Pa におけるサンプルからコールターカウンターで測定した浮遊粒子の粒度分布を図-7 に示す。このように、実際に巻き上げられる粒子の中央粒径は表-1 よりやや小さくなる。そこで、カオリナイトとベントナイトについては表層の粒度組成に関するデータがないため、中央粒径として表-1 の値をそのまま用いることとし、熊本港泥は図-7 の巻き上げ粒径を参考にして中央粒径を 10 μm として計算した。また、(4) 式における指数 n を今回の検討では 1 とおいている。しかし、この場合には、(9) 式からわかるように、 u_d が τ_0 と μ によって定

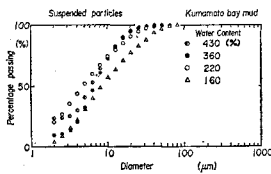


図-7 巻き上げ粒子の粒度分布例

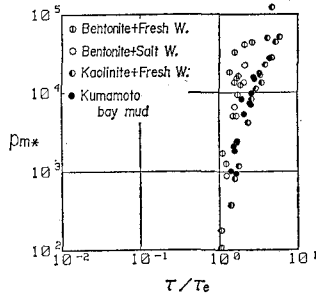


図-8 修正した無次元飛び出し率

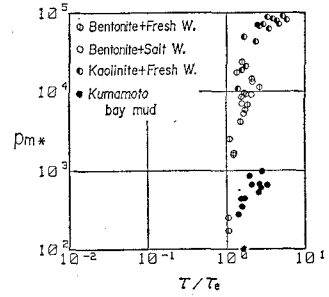


図-9 大坪による無次元飛び出し率

まることになり物理的に不合理な結果を与える。従って指数 n の値については今後さらに検討を要するものと考えられる。

以上から、式 (8) を用いて整理を行なうと図-8 のようになる。このように、式 (8) の表現を用いると今回の実験結果も泥の種類によらず一意的に整理できようである。但し、水道水で作製したベントナイト泥についてはばらつきがかなり大きい。詳細は不明であるが、図-5 におけるばらつきを反映した結果であると予想される。参考のために、同じデータに大坪のモデルをそのまま適用した結果を図-9 にしめす。大坪のモデルをそのまま用いるとデータのばらつきが大きく、十分な無次元表示が得られないことがわかる。

以上、無次元化の修正方法と修正した無次元化の実験結果への適用について示した。修正の根拠となる飛び出し粒径や移動距離の評価についてはさらに実験データの積み重ねが必要であるが、一方ではモデルの前提条件に関して、4.2 a), d) で述べた問題が未解決として残されている。しかしながら、このように底泥の物性を表わすパラメータと巻き上げ速度との関係に物理的なモデルを考えることにより、より合理的な巻き上げ速度の評価が可能になるものと期待される。

5. ま と め

本研究で得られた成果を要約すると以下の通りである。

①巻き上げフラックスに式 (1) を用いると、本実験の範囲では、泥の種類にかかわらず指数 n はおよそ 1.2 から 1.5 の範囲であるが、係数 M は泥の種類で大きく変化し、式 (1) から、 M の変化と底泥の物理量との関連を見いだすのは困難である。

②巻き上げ過程を泥の流動パラメータをもとに評価する

大坪のモデルの適用性を検討した。適用条件にいくつかの検討すべき点が残されており、また、今回の実験データの範囲では、巻き上げの限界掃流力と流動パラメータとの直接的関連は明らかにできなかったが、モデルを若干修正・拡張すれば、泥の種類によらず少ない試料で簡単な試験から求めることのできる降伏値や粘度などのパラメータのみで、一意的に底面せん断応力から巻き上げフラックスを推定できる可能性が示された。

本研究に当たり、熱心な御討議を頂いた当所シルテーション研究グループのメンバーの方々、ならびに本研究で使用した熊本港泥の御提供を頂いた、第四港湾建設局八代港工事事務所(当時)の関係者各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 青木美樹・首藤伸夫 (1982): 粘性土堆積層の洗掘現象に関する実験的研究, 第26回水講演文集, pp. 87~92.
- 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, 第393号, II-9, pp. 33~42.
- 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, 国立公害研究所研究報告, 第42号.
- 楠田哲也・海田輝之・栗谷陽一・石原達弘 (1982): 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究(II), 第18回衛生工学研究討論会講演論文集, pp. 160~165.
- 鶴谷広一・中野 晋・廣沢 潤 (1986): 回転粘度計による底泥の流動特性の検討, 港湾技研資料, No. 566, 29 p.
- 村上和男・菅沼史典・佐々木均 (1989): 円形回転水路による底泥の巻き上げりと沈降に関する実験的研究, 港研報告, 第28巻, 第1号, pp. 43~79.
- Arulanandan, K., E. Gillogley and R. Tully (1980): Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils, Tech. Rept. GL-80-5, University of California, Davis, 41 p.
- Partheniades, E., J. F. Kennedy, R. J. Etter and R. P. Hoyer (1966): Investigations of the depositional behavior of fine cohesive sediments in an annular rotating channel, Rept. No. 96, Hydro. Lab., M. I. T., 81 p.