

底泥の波に対する応答と巻き上げ・沈降フラックス

三村 信男*・田 口 智**・加藤 始***

1. はじめに

河口・沿岸域における底泥の輸送過程の中で、波と底泥層との相互作用は焦点のテーマの一つである。波の作用下での底泥の輸送現象は、凝集・沈降・堆積・圧密・底泥層の運動・泥層中での質量輸送・巻き上げ等の単位過程から成り立っており、その各々が底泥の種類や含水比といった泥層の特性と外力である波の特性とによって複雑に変化する。

大坪ら（1985）は、一方向流による巻き上げの形態や沈降形態の違いに基づいて、底泥が第一、第二グループの二つの種類に分けられることを示した。それ以降、波の作用下においても、この二種類の底泥グループで応答が異なることが指摘されている（五明ら，1986；柴山ら，1987）。本研究では、現地泥も含めて第一、第二グループの底泥を対象に広範な波浪条件の下で実験を行な

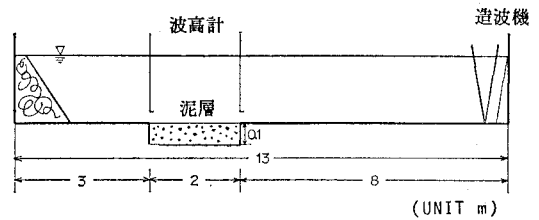


図-1 実験水槽

い、二種類の底泥の波に対する応答を体系的に整理することを試みた。

他方、波による底泥の巻き上げ・沈降に対して、著者らは、前報（三村ら，1989）において、各々のフラックスの正確な測定法を開発し、それを用いてペントナイト（第二底泥グループ）の巻き上げ・沈降フラックスを測定した結果を報告した。本論文では、対象を第一底泥グループ（カオリナイト、現地泥）に広げて巻き上げ・沈降フラックスを測定し、二種類の底泥の間での違い、更には、一方向流と波との作用下での現象の関連性と違いに検討を加えた。

2. 実験の概要

2.1 実験装置と底泥試料

実験には、図-1 に示すような長さ 13 m、幅 0.3 m のアクリル製の造波水槽を用いた。この水槽の中央部には 2 m の凹部があり、底泥を入れて泥層を作ることができる。本研究では、底泥として第一底泥グループに分類されるカオリナイトと現地泥とを用いた。現地泥は福島県富岡海岸で採取されたものである（今後、福島泥と呼ぶ）。この他に、ペントナイトを用いた追加実験も行ない、前報の結果と合わせて、第一、第二底泥グループの挙動を比較できるようにした。

表-1 実験条件

(a) 巻き上げ実験

	初期含水比 W_0 (%)	波 高 (cm)	周 期 (s)	水 深 (cm)	底面せん断応力の振幅* τ_m (N/m^2)
カオリナイト	104~280	1.3~6.8	0.87~1.3	20, 30	0.095~0.67
福島泥	125~143	1.8~5.2	0.9, 1.3	20	0.13 ~0.40
ペントナイト	274~505	1.3~5.5	0.77~0.96	20, 30	0.088~0.31

(b) 沈降実験

	初期濃度 C_0 (mg/l)	波 高 (cm)	周 期 (s)	水 深 (cm)	底面せん断応力の振幅* τ_m (N/m^2)
カオリナイト	3121~10886	1.2~13.4	0.9, 1.3	30	0.054~0.78
福島泥	2052~9533	1.3~13.7	0.9, 1.3	30	0.061~0.73
ペントナイト	230~2574	1.4~12.6	0.9, 1.3	30	0.065~0.73

*) 底面せん断応力の振幅は Jonsson (1966) の方法によって求めた。

* 正会員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科
** 正会員 工修 五洋建設(株) 中国支店土木設計部
*** 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科

2.2 実験の内容と条件

実験の内容は、底泥層の挙動を観察し、巻き上げフラックスを測定する巻き上げ実験と、沈降フラックスを測定する沈降実験との二つに大別できる。これらの具体的な方法は、前報（三村ら，1989）とほぼ同一である。

実験条件の一覧を表-1に示す。巻き上げ実験においては、各試料が充分“固い”状態から波によって激しく運動するような高含水比の状態まで、幅広い含水比の範囲を設定した。各含水比に対して波高、周期を数通りずつ変化させ、なるべく広い範囲の外力（底面せん断応力）を作用させることができるようにした。さらに、最近の研究（海田ら，1988；鶴谷ら，1989）にならい。巻き上げ実験で用いた底泥試料のスランプ値を測定した。

一方、沈降実験では、初期濃度 C_0 を各試料毎に3～4通り変え、各々の初期濃度に対して、波高、周期を数通り変化させた。沈降実験においては、水深は一定で30 cmとした。結局、第一、第二底泥グループを合わせて、巻き上げ実験では59ケース、沈降実験では40ケースの実験を行った。

3. 底泥の波に対する応答

3.1 カオリナイトと福島泥（第一底泥グループ）

含水比と外力の変化に伴って底泥層の挙動も変化していくが、この挙動の推移は底泥の種類によって異なっている。

第一底泥グループでは、含水比が小さい範囲では底泥はほとんど運動せず固定床的な状態にあるが、含水比が大きくなるにつれて泥層全体が波動運動をするようになる。この固定床状態から波動への遷移は連続的で限界の含水比等は決定できなかった。更に、固定床から波動の小さい範囲では底面せん断応力が大きくなるにつれて巻き上げが生じるようになる事が観察された。こうした、第一底泥グループの波に対する応答を、初期含水比 W_0 と底面せん断応力の振幅 τ_m とで作られる平面上でまとめれば図-2のようになる。図-2はカオリナイトに対して得られたものであるが、初期含水比が180%以下では、巻き上げの有無が τ_m によって判定できることがわかる。これを巻き上げ限界せん断応力 τ_{CE} と呼ぶことにする。図-2の中には、参考のために Dalrymple・Liu（1978）の二層粘性流体モデルによって計算された底面せん断応力の振幅も示されている。

第一グループの底泥では、巻き上げが生じた場合、泥層の表面には小さな亀裂や細かいしわが多数形成されていた。写真-1に実験終了後の泥層表面の状態を示すが、小さな亀裂が縦横に入って泥が団粒化していることがわかる。このことは、波による繰り返し応力を受ける結果泥層表面に小さな破壊が発生することを示してい

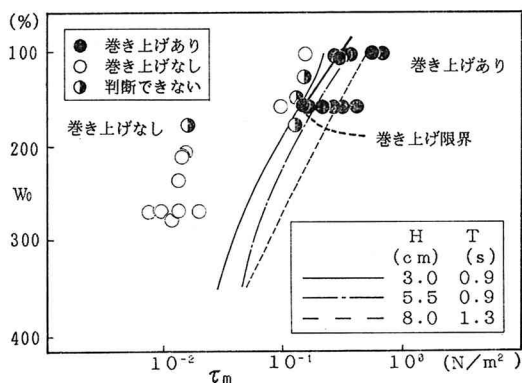


図-2 波に対する応答の区分(カオリナイト)

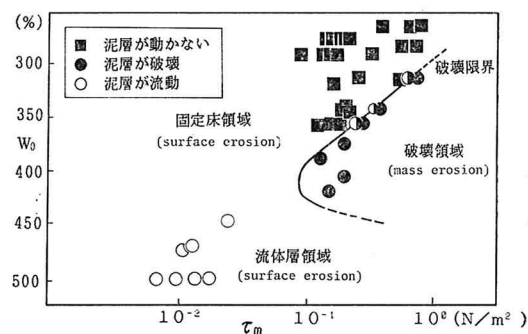


図-3 波に対する応答の区分(ベントナイト)

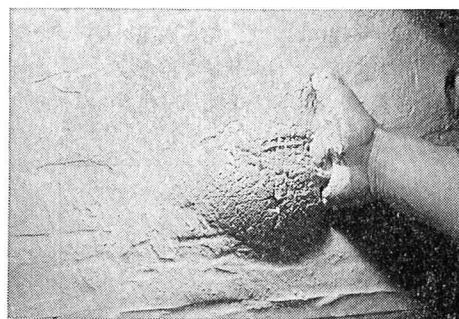


写真-1 波作用後の泥層表面の状態
(カオリナイト、波作用40分後)

る。したがって、カオリナイトの巻き上げ形態は、単純な surface erosion ではなくこうした表面の小さな破壊の結果生じるものと考えられる。これと同様な巻き上げ形態の概念的理解は、楠田ら(1988)にも述べられている。

一方、含水比180%以上では底泥層は激しい波動運動を示し、明瞭な巻き上げが生じているとは観察されなかった。この領域では底泥の輸送には質量輸送の寄与が大きいと考えられる。

3.2 ベントナイト（第二底泥グループ）

ベントナイトの底泥層は、前報で示した通り、固定

床、破壊、流体層領域という三つの異なる応答を示す。これを、図-2 と同じく初期含水比と底面せん断応力とによって区別したのが 図-3 である。

ベンナイトにおいても、含水比が 420% を越えると泥層全体が波動運動をするようになり、巻き上げフラックスは小さくなる。それ以下の含水比では、底面せん断応力が大きくなると、泥層の表層が破壊されて大小の塊となつてぶつかり、激しい巻き上げが生じる。こうした状況から、巻き上げの形態としては、固定床的と流体層的な領域では、表面から粘土粒子がはがされていく surface erosion、破壊領域では粘土塊がぶつかり合つて巻き上げられる mass erosion が生じていると考えられる。

4. 巻き上げ・沈降フラックス

4.1 グロスの巻き上げフラックス

図-4 に、第一底泥グループに対して得られたグロスの巻き上げフラックス F_E と Jonsson (1966) の方法によって求められた底面せん断応力の振幅 τ_m との関係を示す。端部以外の泥床からの巻き上げがきわめて小さいと観察されたケース(初期含水比がカオリナイトで180%程度以上、福島泥で140%程度以上)のデータは図中に示さなかった。図-5 には比較のため前報(三村ら, 1989)で得られたベントナイトの巻き上げフラックスを示す。

図-4, 5 を比べて直ちにわかることは、第一グループでは巻き上げ限界せん断応力 τ_{CE} が存在するのに対して、第二グループでは τ_{CE} が現れないことである。これはレオロジー特性において、第一底泥グループは降伏値をもち、第二グループは降伏値を持たないことに対応していると考えられる。すなわち、降伏値の存在は、外力

に抵抗して剛体的に形状を保とうとする底泥粒子間の結合があること、せん断応力がこの結合力を上回ると粒子間の構造が破壊され変形が始まること、を示している。第一グループでは、この結合力が巻き上げにおいても粒子を強く底泥層にとどめる役割を果たしていると考えられる。

第二の特徴は、第一底泥グループでは、底面せん断応力が τ_{CE} を越えると巻き上げフラックスが急激に大きくなることである。3.1 で述べたとおり、第一底泥グループでは波の作用を受けた後の泥層表層に、繰り返し応力を受けた結果小さな破壊が発生していた。この破壊によって巻き上げフラックスの急激な増加が生じると考えられる。

第一底泥グループでは、降伏値をもたらず粒子間の結合力が巻き上げへの抵抗力となっていることから、巻き上げフラックスが、底泥の種類によらず降伏値を介して統一的に表現できる可能性がある。本研究では降伏値の指標としてスランプ値をとり、カオリナイトと福島泥とで、同じスランプ値(降伏値)を示す含水比がどのように対応するかを調べた。その結果が図-6 であるが、カオリナイトの初期含水比 $W_0=160\%$ は、福島泥の $W_0=130\%$ と同じスランプ値(降伏値)をもつことがわかる。図-4 において、 $W_0=160\%$ のカオリナイトと $W_0=128\%$ の福島泥との巻き上げフラックスは近い値となっており、降伏値あるいはスランプ値が第一底泥グループの巻き上げフラックスを整理する上で良いパラメータになることを示している。

前報と今回の実験結果をまとめれば、第一、第二底泥グループに対するグロスの巻き上げフラックス F_E は底面せん断応力の振幅 τ_m によって次のように表現できる。(第一底泥グループ)

$$F_E = A \left(\frac{\tau_m}{\tau_{CE}} - 1 \right)^\alpha \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 τ_{CE} 、 A 、 α は底泥の特性によってきまる量で、

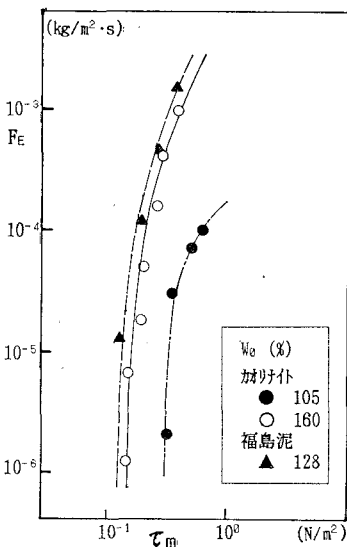


図-4 グロスの巻き上げフラックス (第一底泥グループ)

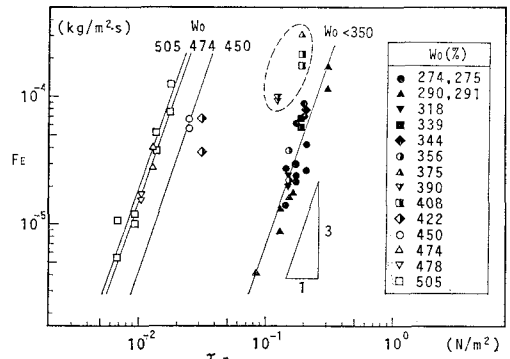


図-5 グロスの巻き上げフラックス (第二底泥グループ)

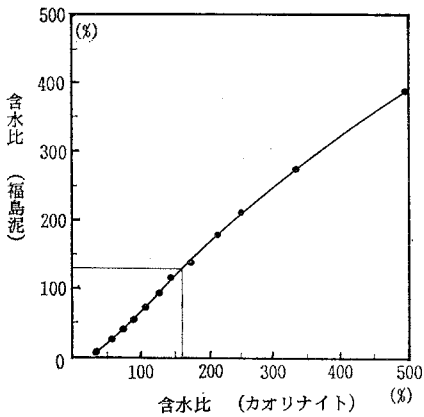


図-6 同一のスランプ値を与える含水比の対応

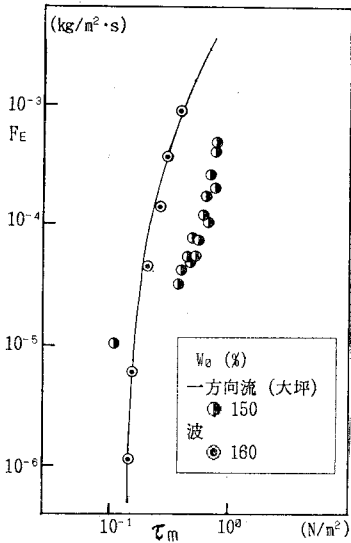


図-7 波と一方向流との作用下における巻き上げフラックスの比較

例えば $W_0=160\%$ のカオリナイトでは $\tau_{CE}=0.145 \text{ N/m}^2$, $A=2.66 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $\alpha=1.82$ であった.

(第二底泥グループ)

$$F_E = B \left(\frac{\tau_m}{\tau_{c1}} \right)^\beta \dots \dots \dots (2)$$

ここで, τ_{c1} は大坪 (1985) の一方向流下における巻き上げ限界であり, B , β は底泥によってきまる係数である. ベントナイトの場合含水比によらず $\beta=3$ であった.

4.2 波と一方向流による底泥の巻き上げ

従来, 波による巻き上げフラックスは, 一方向流に比べて1オーダー程度大きいと指摘されてきた (例えば, 鶴谷ら, 1988). そこで, 波と一方向流との作用下における巻き上げ現象を限界せん断応力と巻き上げフラックスに注目して比較する.

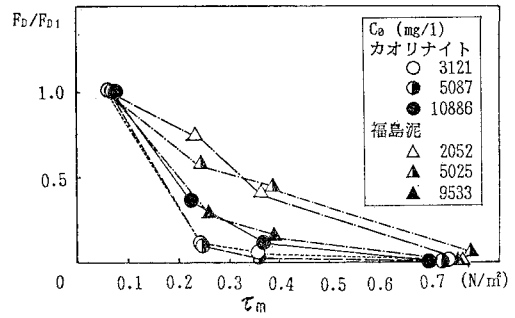


図-8 グロスの沈降フラックス (第一底泥グループ)

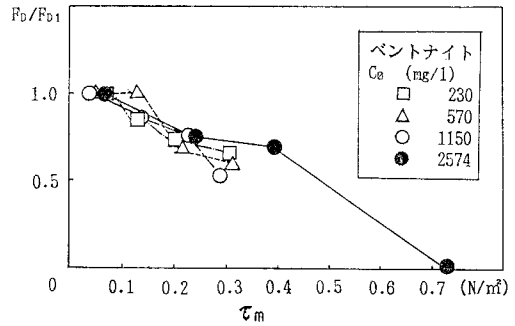


図-9 グロスの沈降フラックス (第二底泥グループ)

図-7 は, 大坪ら (1986) が求めた一方向流によるカオリナイトの巻き上げフラックスと, 今回の実験によって求められた波によるそれとを重ねたものである. 含水比は同一の条件のものがなかった, なるべく近い二つのケースをとった. 図-7 をみると, 両者の巻き上げ限界せん断応力 τ_{CE} には大きな差がないことがわかる. 巻き上げの発生の有無を正確に確認することは難しいので, 大坪らに従いがい, τ_{CE} を $3 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ の巻き上げが生じるときの底面せん断応力とすると, 波と一方向流とで τ_{CE} には二倍程度の差しかなくなる.

それよりも, 波と一方向流の作用下で異なっている点は, τ_{CE} を越えて底面せん断応力が大きくなったときの巻き上げフラックス F_E の増加の傾向である. 一方向流では F_E は下に凸の関数形であるのに対して, 波の作用下では, F_E の関数形は上に凸で, 底面せん断応力が τ_{CE} を越えると急激に巻き上げが生じている. このことから, 改めて波の下では泥層表層に発生する破壊の効果が大きいことがわかる.

4.3 グロスの沈降フラックス

図-8, 9 に初期沈降フラックス F_D と Jonsson の方法による底面せん断応力の振幅との関係を示す. 図-8 は第一底泥グループに対するもので, 図-9 は第二底泥

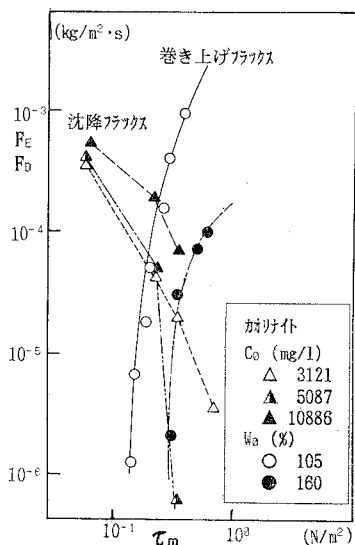


図-10 巻き上げ・沈降フラックス
(カオリナイト)

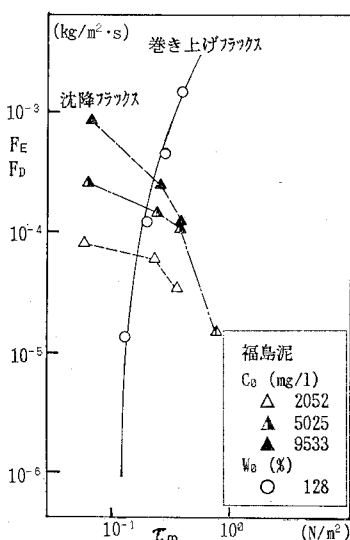


図-11 巻き上げ・沈降フラックス
(福島泥)

グループ (ペントナイト) に対するものである。

前報では、 F_D を初期濃度 C_0 と粘土粒子の単粒子沈降速度との積で無次元化した。今回のデータはこのような形ではうまく整理できなかった。そこで、本研究では 0.06 N/m^2 前後の弱い底面せん断応力が発生するような波作用下での沈降フラックス F_D を基準にして、 F_D を無次元化した。これによると、図-8, 9にみられるようにまとまりのある曲線群が得られる。

図-8, 9をみると、両方の底泥グループで底面せん断応力がある値を越えると沈降フラックスが0になることがわかる。すなわち沈降の限界せん断応力 τ_{CD} が存在する。底泥毎に τ_{CD} の値は異なるようにみえるが、少なくとも 0.7 N/m^2 では、どの底泥も沈降・堆積することはいえないといえる。

4.4 ネットの巻き上げ・沈降フラックス

以上のように、巻き上げと沈降のグロスのフラックスが求められた。第一グループの底泥に対してその二つを重ねたのが図-10, 11である。これらの図では、巻き上げと沈降のフラックスがある底面せん断応力で交差しており、底面せん断応力の大小に対応して巻き上げ・沈降どちらが卓越するかが判定される。

5. 結 論

本研究と前報 (三村ら, 1989) の結果を合わせれば、第一、第二底泥グループの波の下での巻き上げ・沈降を

中心にした挙動の全般的な姿が把握できる。特に、第一底泥グループに対しては、巻き上げ限界せん断応力が存在すること、それを越えた底面せん断応力が作用すると泥層表層に小さな破壊が生じ、急激な巻き上げフラックスの増加がもたられること、などの特徴が把握された。これらは、第一、第二底泥グループの波浪応答を区別する特徴、あるいは、波と一方向流との作用下での挙動を区別する特徴である。

本研究をすすめるにあたり、荒井良枝さん、島村明君 (当時茨城大学学生) には熱心に実験に協力していただいた。ここに、心からの感謝の意を表する。

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, 土木学会論文報告集, 第393号/II-9, pp. 33~42.
- 大坪国順・村岡浩嗣 (1985): 底泥の物性及び限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第363号/II-4, pp. 225~234.
- 大坪国順・村岡浩嗣 (1986): 流れによる底泥の飛び出し率, 土木学会論文報告集, 第375号/II-6, pp. 43~52.
- 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.
- 五明美智男・矢内栄二・堺 和彦・大槻 忠・糸列長敬 (1986): 波と底泥の相互干渉に及ぼす物性の影響について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 322~326.
- 柴山知也・中西雅明・石原 肇・佐藤慎司 (1987): 波による底泥の浮遊機構に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 271~275.
- 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤 (1988): 流れと波による底泥の巻き上げに関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 357~361.
- 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤 (1989): ベーン試験とスランブ試験による底泥の流動限界値の検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 329~333.
- 三村信男・田口 智・加藤 始 (1989): 波による底泥の巻き上げ・沈降フラックス, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 309~313.
- Dalrymple, A. R. and P. L. F. Liu (1978): Waves over soft muds: a two-layer fluid model, Jour. of Physical Oceanography, Vol. 8, pp. 1121~1131.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Coastal Eng. Conf, ASCE, pp. 127~148.