

傾斜泥層の波による輸送量モデルとその実験による検証

柴山知也*・Mohsen Soltanpour**・野間崇史***

1. 緒 論

波による底泥移動量を算定するモデルが現在までにいくつか提案され、水平な泥層については、移動量、波高減衰などの諸量を算定する事が可能となっている。しかし底層の傾斜の影響については Kessel・Kranenburg (1998) が、底泥輸送量の評価に波と傾斜の影響を考慮した以外にはこれまでほとんど検討されてこなかった。

ここで、傾斜泥層の移動を考える際には、層全体としての緩い傾斜を考える場合と、海底に掘った水路の縁や、移動の結果として局所的に形成される、比較的急な勾配を考える場合とがある。本研究では上記の両方の場合について既存の数値モデルを改良して、このような勾配の影響を取り入れた。また、新たに傾斜泥層の波による移動量に関する室内実験を行い、数値モデルの検証を行った。

次に、波による勾配を持つ泥浜海岸の変形については、波の底泥による減衰と砕波による減衰が同時に起こるなど、複雑な現象が共存するため、検討が始められたばかりである (例えば Lee・Mehta, 1997)。本研究では、波浪の浅水変形、砕波変形に底泥運動による減衰の効果を取り入れ、また、上記に述べたように、底泥質量輸送については、断面変化の算定に局所勾配の影響を取り入れるなどの改良を加え、二次元泥浜変形の予測を目指した。

水平な場における底泥移動については、移動量を算定するためのモデル化が現在までにいくつか行われている。中野ら (1987, 1989) による粘性流体多層モデル、柴山ら (1989, 1991, 1993) の粘弾塑性体モデル、Trienら (1990) のレオロジーモデルなどはその例であり、底泥移動の推定精度は大きく向上した。しかし本論文が問題にしているように、底面勾配の影響を直接には考慮していないために、二次元泥浜の変形を論ずるには、底泥移動現象の物理的性質の把握が不十分であったといえる。

2. 数値モデルの構成

(1) Fluid Mud 領域の推定

泥層に影響を与えるような大きな波が作用し始めた時化の初期段階における泥層を想定して、弾性体モデルを用いて泥層内の応力分布を算定する。これは、平常時の波が暴浪に変化した初期の状況に対応している。次にこの応力状態を底泥の降伏値 (主に含水比の関数となる) と比較する事により、泥層が降伏した領域については流動状態にある Fluid Mud になると仮定し、この領域に粘性流体多層モデルを適用する。

以上の底泥の流動化に関する物理モデルは、図-1 のように表すことができる。底泥は流動化する前には線形で等方的な挙動をし、以下のように弾性、非圧縮の方程式で表されるとする。

$$GV^2 u_s = \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots (1)$$

$$GV^2 w_s = \frac{\partial p}{\partial z} \dots\dots\dots (2)$$

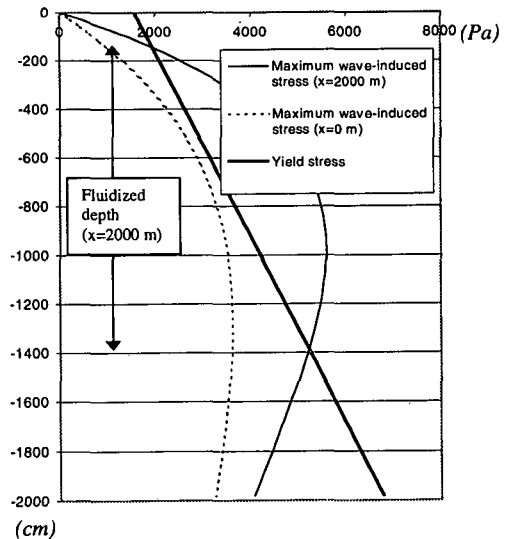


図-1 Fluid Mud 厚さ推定のための物理モデル (x は沖側観測点からの距離を表わす)

* フェロー 工博 横浜国立大学教授 工学研究科/留学生センター
 ** 学生会員 M.Eng 横浜国立大学大学院工学研究科
 *** 学生会員 横浜国立大学大学院工学研究科

$$\frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 u_s , w_s はそれぞれ泥粒子の変位を示している。また、 G は弾性係数、 p は圧力である。ここに、弾性泥層表面に、波による正弦的に変化する圧力を与え、変位 (u_s , w_s)、圧力 (p) に関して以下のように正弦的に変化する解を仮定する。

$$u_s = U(z) \exp[i(kx - \omega t)] \dots\dots\dots (4)$$

$$w_s = W(z) \exp[i(kx - \omega t)] \dots\dots\dots (5)$$

$$p = P(z) \exp[i(kx - \omega t)] \dots\dots\dots (6)$$

このような仮定を置くことにより、弾性泥層内のせん断応力の分布を算定する。

以上により、図-1 に示すように、弾性泥層内の局所的なせん断応力の分布が求まり、この分布と、局所的な降伏値を比較し、前者が後者を上回った時に、Fluid Mud の層が形成されると考えた。一般に降伏値の推定は、実験室では含水比を用いて推定し、現地においては泥のボーリングを行って推定する (例えば、Tubman・Suhayda, 1976)。

図-2 は、後述する室内実験条件に合わせて算定した Fluid Mud の領域の例示 (後述の実験条件 1 に相当する) である。水深が減少するにつれて、波の浅水変形との相乗効果により、泥層内のせん断応力が大きくなり、Fluid Mud が形成されるが、砕波後の波の減衰により、岸近くでは再び形成されない領域が現れている。本研究ではこの結果を考え合わせて、3. に示す室内実験における泥床の設置範囲を決定している。

(2) 勾配の影響を含む岸沖二次元移動量モデル

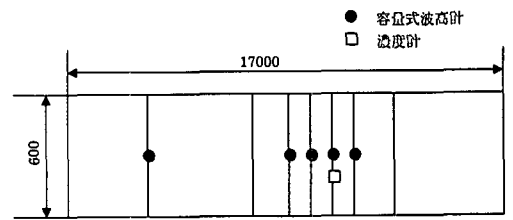
ここでは、Fluid Mud の運動について考察する。二次元泥浜の底泥の移動は、主に波による質量輸送と、勾配方向の重力による移動によって構成されている。本モデルでは、波を起動力とする多層粘性流体モデルと以下のように重力による移動を定式化したものを1周期ごとにそれぞれ適用し、重ね合わせる事により双方の効果を組み入れている。例えば j 層の運動量保存式は以下のように表す事ができる。

$$\mu_j \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = (\rho_j - \rho_w) g \sin \theta - g \cos \theta \left\{ \sum_{n=j+1}^N (\rho_n - \rho_w) \left(\frac{\partial z_n}{\partial x} - \frac{\partial z_{n-1}}{\partial x} \right) \right\} + (\rho_j - \rho_w) \frac{\partial z_j}{\partial x} \dots (7)$$

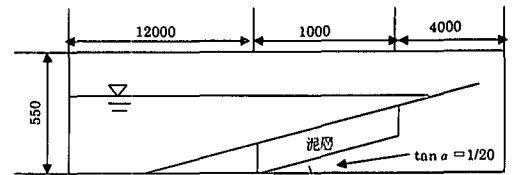
ここで、 μ は各層の粘性係数、 ρ は密度、 θ は傾き角、 g は重力加速度である。

ここで、波を起動力とする粘性流体多層モデルは、中野ら (1987) とほぼ同様の取り扱いをしている。

二次元泥浜の波高変化を考える際には、砕波による波の減衰、泥層による波の減衰を合わせて考える必要がある。本研究では、砕波による減衰については柴山ら (1995) による減衰率を用い、これと多層粘性流体モデルによる減衰率の和を局所的な減衰率として用いた。具体的には以下のエネルギー流束の保存式 (8) における減衰率 ϵ_D



(a) 平面図



単位: (mm)

(b) 側面図

図-3 実験装置の概略図 (単位は mm)

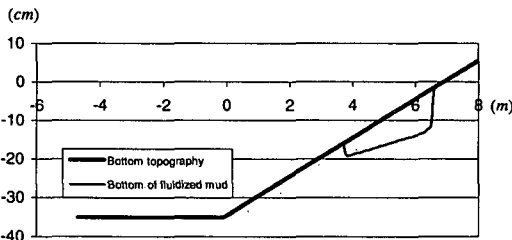


図-2 弾性モデルによる Fluid Mud 厚さの算定例

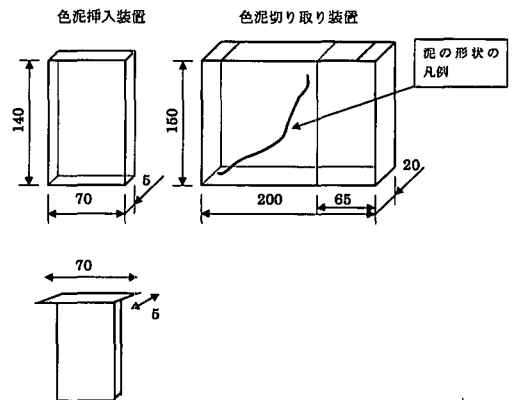


図-4 挿入、切り取り用サンプラーの諸元 (単位は mm)

を式(9)のように与える事になる。

$$\frac{d}{dx}(C_g \cdot E) = -\epsilon_D \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $E = \rho g H^2 / 8$, C_g は群速度である。

$$\epsilon_D = \epsilon_{Dm} + \epsilon_{Db} \dots\dots\dots (9)$$

ここで ϵ_{Dm} は泥層の運動によるエネルギー逸散を表し、 ϵ_{Db} は砕波によるエネルギー逸散を表す。

3. 室内実験

実験には二次元造波水路を使用した。勾配 1/20 の固定床を設置し、また斜面中央部に固定床の代わりに深さ 20 cm, 幅 60 cm, 長さ 100 cm の観測領域となる木箱を設置した(図-3参照)。この木箱の中にまず水平な状態でカオリナイトを主成分とする底泥層を作成しその後木箱を 1/20 に傾けて設置する事により傾斜泥層を作成した。木箱を 1/20 に傾けると、木箱内の泥は斜面下方向に移動し、1/50 程度の緩やかな勾配を形成するようになる。こ

の勾配を波作用前の勾配として表-1に記載してある。

底泥の移動量を計測するために、着色泥をトレーサーとして用いた、Sakakiyama・Bijker (1989) と類似の方法を用いた。すなわち緩やかな勾配を形成している状態の底泥に着色した泥を鉛直に挿入し、約 1 分間の波作用後に着色泥をサンプラーを用いて切り取り、岸沖方向の移動量を着色泥の移動状況から推算した。図-4 は挿入および切り取りに用いたサンプラーの諸元である。挿入時には図中左下に示すピストンの部分を操作して、周囲の泥層との間に空隙を生じさせないように工夫しながら泥中に着色泥を挿入している。

実験ではこの他に泥層上での波高変化、泥層上での浮遊泥濃度の測定を行った。また、波作用前後に泥層表面の位置の変化を測定し、全体の移動量を算定している。実験は表-1に示すように、含水比、波高、周期を変化させ、3 ケースについて行った。

表-1 実験条件

ケース	沖波波高 (cm)	周期 (s)	泥層含水比 (%)	波作用前の勾配
1	1.88	1.06	148.7	1/49
2	2.58	1.06	151.4	1/44
3	7.77	1.06	150.5	1/45

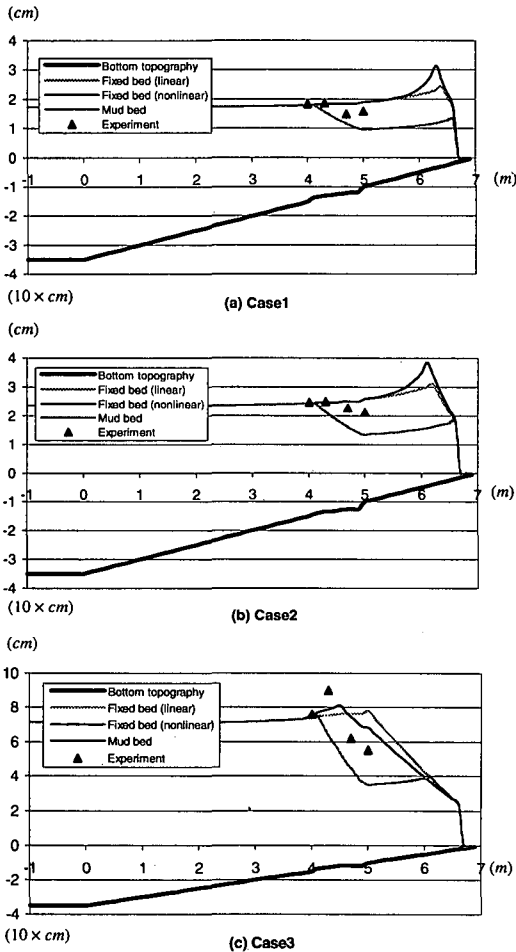


図-5 波高変化の実験値と予測値の比較

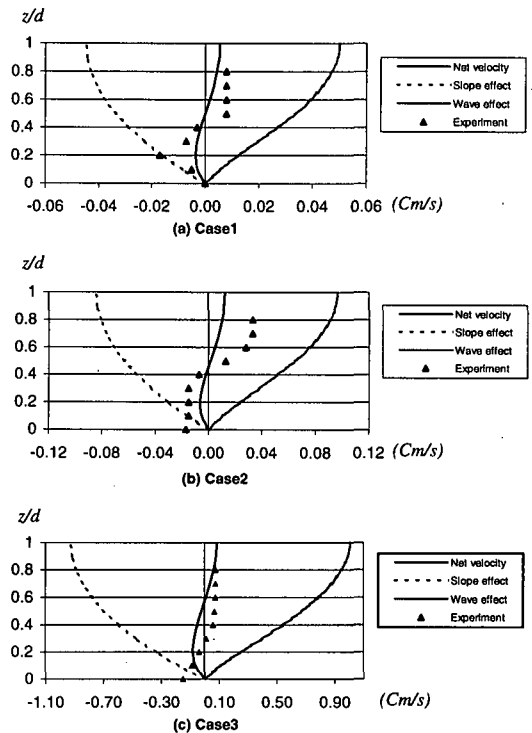


図-6 底泥輸送速度の比較

4. 算定結果と実験結果の比較検討

実験結果を数値モデルの結果と比較検討した。図-5は、実験水路内の波高変化を各ケースについて、比較したものである。図には比較のために、泥層を含めた初期の海浜断面および、底面が固定床で泥層の効果が無い場合の算定値を併せて描いてある。海浜上のある地点から突然に泥の層が始まるために、底泥による波高減衰の効果には泥層の沖側部分で空間的な遅れが生じている。また、実験結果は概ね固定床に対する算定値と泥床に対する算定値の間に分布しており、泥床が部分的に存在する場合にはその効果が泥床延長に比べて小さくなるようである。これらの現象は、泥層の沖側、岸側の境界付近の泥は水平方向の移動が境界面によって拘束されており、そのためにエネルギーの逸散が小さくなっているためと考えられる。

図-6は、着色泥の移動から推定した速度分布の比較で、波による移動速度、勾配による移動速度、およびその和と実験結果を比べている。ここで、波及び勾配による速度は実験終了時のものを使用している。これは、波作用のごく初期に、初期勾配による沖向きの、鉛直分布の小さい輸送が短時間発生しているためである。実験値

についてはその分の移動を差し引いて表示してある。このような操作を行うと、算定値による総輸送量は、下方で沖向き、上方で岸向きとなる実験値をよく予測しているといえる。正味の輸送量は、岸向きの波による輸送と、沖向きの勾配による輸送の微妙な差に起因して発生しており、正味の移動量を精度良く予測する事の困難さがうかがえる。

図-7は泥層表面の位置の変化を比較したものである。実験全体の傾向として、波作用開始時に存在した勾配が次第に小さくなっていく現象が再現されている。ケース3は、波による移動量が他のケースに比べて大きいため、泥の輸送量が大きく、泥層全体の循環する流動が引き起こされている可能性がある。

図より、いずれの場合にも波と勾配の効果が重なった場における泥移動の推定に成功している。以上により、本モデルの有効性を確かめることができた。

5. 結 論

本論文では、まず弾性モデルを用いて、底泥の Fluid Mud 化の領域を求める方法を提案した。また、Fluid Mud の領域について、粘性流体多層モデルを、局所的な勾配の効果を含めて、二次元泥浜の底泥運動に適用した。その結果泥層上での波高減衰、底泥層内輸送速度、局地的な底面地形などを本モデルで予測できることを確認した。以上により、勾配の効果을直接的に導入し、底泥輸送推定の精度を上げることができた。

本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究 B (No. 11450187, 代表者柴山知也) および五洋建設株式会社よりの研究費を用いて行った事を付記する。

参 考 文 献

柴山知也・脊木 徹・佐藤慎司 (1989): 粘弾塑性体モデルによる底泥移動量の評価法, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 334-338.
 柴山知也・R. Winyu・岡安章夫 (1995): 浮遊泥砂量予測を取り入れた二次元海浜変形モデル, 海岸工学論文集, 第35巻, pp. 446-450.
 鶴谷広一・中野 晋・鷹浜 潤 (1986): 回転粘度計による底泥の流動特性の検討, 港研資料, No. 566, 29 p.
 中野 晋・伊東信幸・藤平依彦 (1989): 流れの中での波と底泥の相互干渉, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 339-343.
 中野 晋・鶴谷広一・鷹浜 潤 (1987): 相当粘度を用いた波と底泥の相互干渉に付いての計算, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 266-270.
 Nguyen Ngoc An・柴山知也・佐藤慎司・岡安章夫 (1991): 底泥の粘弾性特性の計測と数値モデルへの応用, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 471-475.
 Huynh Ngoc Trien・磯部雅彦・小林智尚・渡辺 晃 (1990): 底泥のレオロジー特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 225-229.
 Kessel, T. and C. Kranenburg (1996): Gravity current of fluid mud on sloping bed, Jour. of Hydraulic Res., ASCE, Vol.

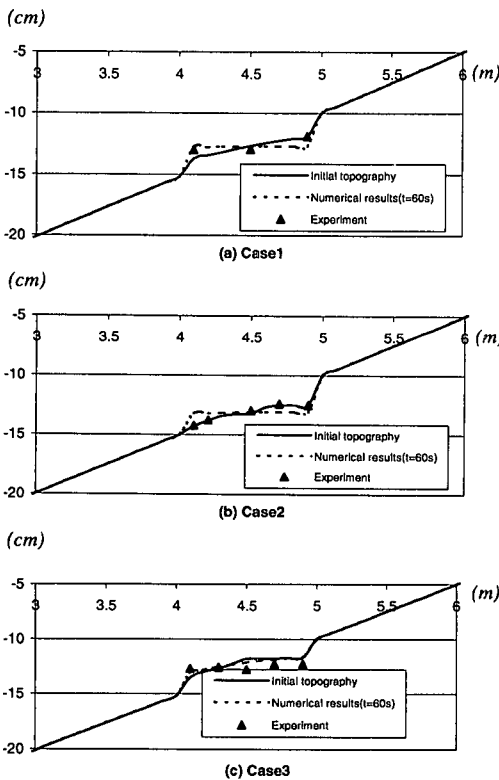


図-7 泥層地形の変化の比較

122, No. 12, pp. 710-717.

Lee, S. C. and A. J. Mehta (1997): Problems of characterizing dynamics of mud shore profile, *Jour. of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No. 4, ASCE, pp. 351-361.

Sakakiyama, T. and E. W. Bijker (1989): Mass transport velocity in mud layer due to progressive waves, *Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 115,

No. 5, pp. 614-633.

Shibayama, T. and Nguyen Ngoc An (1993): A visco-elastic-plastic model for wave-mud interaction, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 36, No. 1, pp. 67-89.

Tubman, M. W. and J. M. Suhayda (1976): Wave action and bottom movements in fine sediments, *Proc. of 15th Coastal Engineering Conf. ASCE*, pp. 1168-1183.
