

波流れ共存下での底泥質量輸送

柴 山 知 也*・Nguyen Ngoc An**

1. はじめに

波流れの作用下での底泥の層内質量輸送速度を推定する数値モデルを提案するのが本研究の目的である。近年の研究の進展により、波作用下での底泥運動のモデル化は、底泥の物性をより詳細に取り入れることによりしだいに正確な予測を行える段階に達しつつある。また、波流れのもとでの底泥運動については中野ら(1989)、柴山ら(1990)の検討がある。このうち中野らのものは波高減衰について検討しており、質量輸送速度についての検討は行われていない。また、柴山らのものは底泥輸送量を直接に取り扱っているが、実験結果との一致度が必ずしも良くなかった。

本研究では数値モデルを物性をより良く反映するように改良し、波流れの下での底泥移動問題に拡張した。さらに新たに室内実験を行って波流れ場における底泥輸送量および波高減衰量を測定し、モデルの検証を行うことを目指した。

2. 室内実験

二次元水路を用いた室内実験により、波流れが共存した場における底泥の質量輸送速度、波高の減衰変化を実験的に求めた。図-1に実験装置の概略を示す。二次元水路中に仮想の床を設け、その中に8 cmの深さにわたっ

て底泥試料を敷き詰めてある。実験を通じて、底泥上の水層厚は26.3 cmとし、底質素材としては含水比158%のカオリナイト粘土を用いている。また、定常流を発生するためのポンプを設置し、図中のinlet, outletから流れを発生させることにより、波の進行方向に対して逆流、順流の流れを発生させている。造波機は反射波吸収モードで使用している。

波高は容量式波高計、流速の鉛直分布はファイバーレーザー式流速計を用いて計測した。波高計測に当っては、入反射波の分離を行うために波高計は2本を対としてもちいている。また、底泥層内の質量輸送速度の計測についてはSakakiyama and Bijker (1989)にならって、実験前に着色した泥層を注入し、実験後に泥層を切り出して着色泥の断面内における変位からその移動速度を測定するという極めて精度のよい方法を用いている。この場合、実験の継続時間が問題となるが本研究では実験開始後、質量輸送によって徐々に斜面が形成され、勾配の影響で底泥輸送の様子が変化する過程を追跡し、その結果実験継続時間を65秒から75秒に設定している。測定断面は泥床の開始点から1 m, 2 m, 3 mの3箇所を設置したが、時間の経過とともに斜面は下手側から徐々に形成されるために、解析には斜面の効果が最も小さい上手側から1 mのものをを用いている。

表-1に実験条件を示す(波高減衰係数の値について

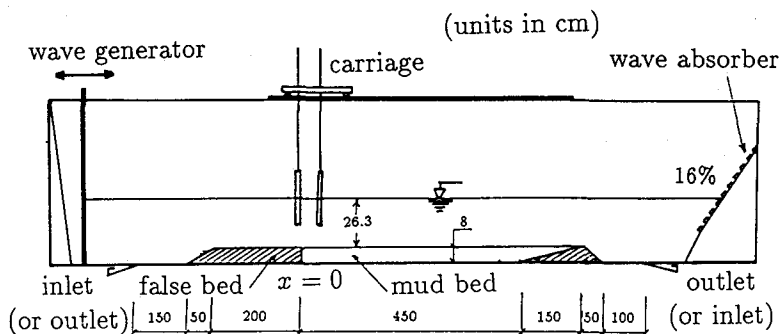


図-1 実験装置の概略

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 正会員 工博 ホーチミン市工科大学講師

表—1 実験条件と波高減衰率

Rum No.	T (s)	H_1 (cm)	U (cm/s)	d_1 (cm)	k_t (1/m)	Remarks
1	1.01	3.49	0.00	30.0	0.0036	fixed bed
2	1.01	2.98	-16.00	30.0	0.0085	fixed bed
3	1.01	2.98	-7.34	30.0	0.0044	fixed bed
4	1.01	2.98	0.00	30.0	0.0036	fixed bed
5	1.01	2.98	5.58	30.0	0.0039	fixed bed
6	1.01	2.98	16.65	30.0	0.0027	fixed bed
7	1.01	4.48	-19.11	26.3	0.1032	mud bed
8	1.01	4.48	-9.00	26.3	0.0840	mud bed
9	1.01	4.48	0.00	26.3	0.0718	mud bed
10	1.01	4.48	8.10	26.3	0.0624	mud bed
11	1.01	4.48	18.64	26.3	0.0543	mud bed

T : 周期, H_1 : 初期波高 (流れが存在しない場合に対応する)

U : 定常流, d_1 : 水深, k_t : 波高減衰率

は後で説明する)。実験に際しては固定床あるいは波のみの条件の計測も比較のために行っている。移動床での実験は波のみ、および順流、逆流についてそれぞれ強い流れ、弱い流れの実験を行っている。

また、波高の計測に際しては合田・鈴木 (1976) の入反射波の分離法を波流れの場に拡張して用い (加藤・鶴谷, 1976, また具体的方法は Shibayama・An, 1993b に詳しく述べてある)、さらに周波数成分に分解することにより、倍周波数成分の実験値に及ぼす役割についても調べている。具体的には倍周波数成分の基本周波数成分に対する割合が大きいほど、次節で述べる数値モデルの推定の精度が低下する事が分かった。

3. 数値モデルの改良

本研究で用いたモデルは底泥の粘性や弾性などの物性の測定の結果を用いて数値モデル (粘弾塑性体多層モデル, 柴山ら, 1989) にさらに改良を加えた (柴山, An, 1992) ものである。このモデルでは底泥の運動特性を粘弾性領域と粘塑性領域に分けることより、底泥の物性をより忠実に反映できるようにしてある。また多層に分けて計算を行うため、深さ方向に含水比の分布がある自然状態の海底粘土の運動を予測するのにも適している。このモデルではまず粘弾性体モデルによって底泥層内の応力を計算し、この値が底泥降伏値を超えない場合を粘弾性体とし、超える場合を粘塑性体として計算をやり直し、全体として収束するまで計算を繰り返すものである。

本研究ではこのモデルを波流れの場に拡張した。拡張の際の基本的な仮定はまず底泥が運動しないものとして波と流れの相互干渉を考慮し、しかる後に波流れ場と底泥の場を計算するというものである。同様の仮定による拡張は中野ら (1989) によっても粘性流体多層モデルに対してなされている。

波流れの相互干渉の計算には非粘性、非回転、定常流

は鉛直方向に一様、等の仮定を用い、Thomas (1981) と同様の手法を用いた。結果として波高 H は次式

$$\frac{H^2}{\sigma}(U + C_g) = \text{const.} \quad (1)$$

で与えられる。ここで U は断面平均流速, C_g は群速度, σ は相対的な角周波数で $\sigma = \omega - kU$ (ω は絶対的な角周波数, k は波数) で与えられる。また、波長の変化は次式で与えられる。

$$(\omega - kU)^2 - gk \tanh kd_1 = 0 \quad (2)$$

ただし d_1 は水深である。

一方上記で計算した流れの下での波による底泥の運動に付いては柴山・An (1992) のモデルを用いている。ただし、波流れ系に拡張するために水層表面の振幅を

$$\eta(x, y) = a_1 \cdot \exp[i(kx - \sigma t)]$$

と置いて、 a_1 を流れによって変化した振幅とし、式 (1) より求めて与え、角周波数としては相対角周波数である σ を用いる。ここで波数 k は式 (2) から計算の初期値を与えることが出来る。

数値計算に当たっては底泥の降伏値、および粘塑性状態での粘性係数の値を与える必要がある。これに付いては、Sakakiyama・Bijker (1989)、鶴谷ら (1986)、Trien (1991) の数値をも参考にして降伏値 $\tau_v = 17 \text{ (N/m}^2\text{)}$ 、粘塑性状態の粘性係数 $\mu = 4.5 \text{ (Ns/m}^2\text{)}$ と与えて計算を行っている。

4. 実験結果と考察

(1) 波高減衰

まず波高減衰の計測結果について述べる。波高減衰の解析に当たっては先にも述べたように波流れ場で波高が変化する効果を取り込んだ入反射波の分離を厳密に行い、入射波成分について底泥床上での波高減衰率を求めている。図—2 は底泥床での波高変化の実験結果の例を示している。また、表—1 にも示したように固定床と底泥床を比較すると、流れが逆流の場合で波高減衰率に 20 倍程の違いがあり、波高減衰の主要な部分は波流れ場においても底泥の運動によって引き起こされていることが分かる。

また、固定床における波高減衰率を求めてみると、 0.004 m^{-1} 程度の値となり、Hunt (1952) の推定値に近く、Iwasaki・Sato (1972)、Brevik (1980) の実験結果に比べて 1 桁小さな値となっている。これは厳密に入反射波の分離を行い、入射波のみに付いて検討を行ったためであると思われる。

さて本モデルで算定した底泥床上での波高減衰率と実験結果を比較するためには固定床上での波高減衰率をまず見積る必要がある。図—3 に固定床における波高減衰率に対する順流、逆流の流れの効果を示す。図中の縦

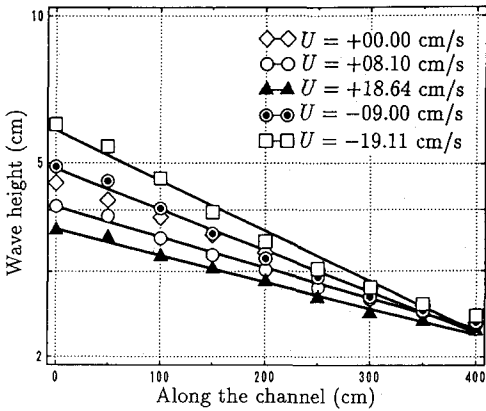


図-2 底泥床上での波高変化

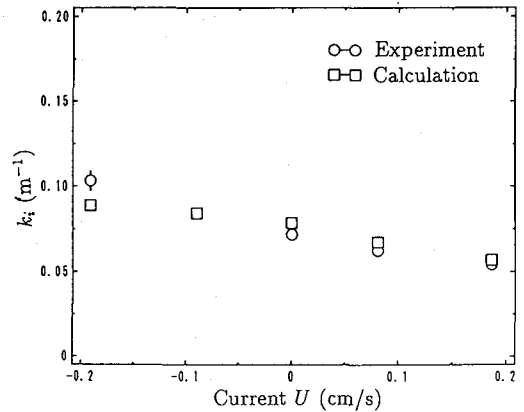


図-4 底泥床上での定常流の波高変化への効果

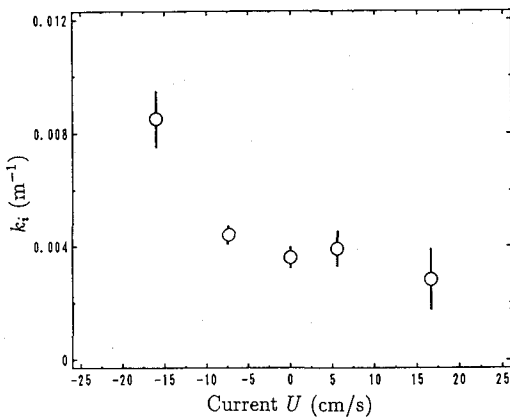


図-3 固定床上での定常流の波高変化への効果

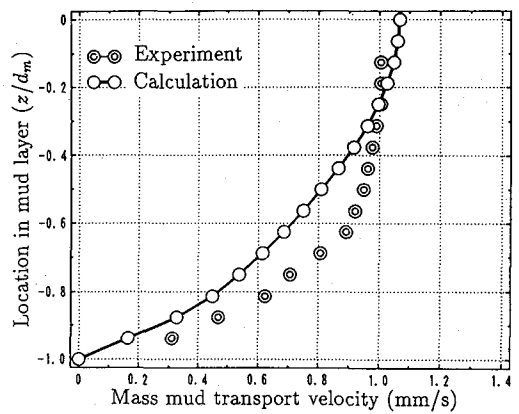


図-5 底泥質量輸送鉛直分布の実験値と計算値の比較(ケース7)

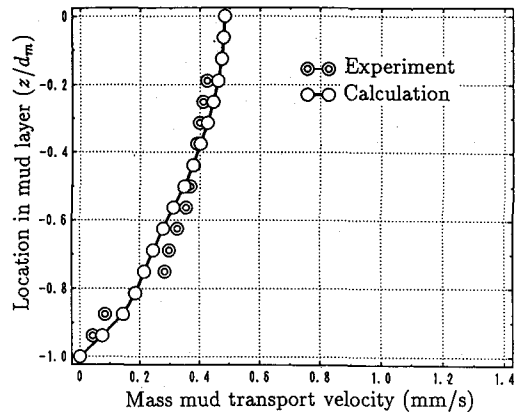


図-6 底泥質量輸送速度の鉛直分布の実験値と計算値の比較(ケース8)

線は計測値の変動の標準偏差を表している。図にみられるように強い逆流が順流に比べて2倍程度の大きな波高減衰を引き起こしていることが分かる。

次に底泥床上での実験結果と本モデルの計算結果を比較したのが図-4である。数値モデルは -0.2 m/s (逆流)から $+0.2\text{ m/s}$ (順流)の実験の全範囲にわたってきわめて良好な結果を与えている。また、ここでも逆流が強くなるほど波高減衰率が上昇している事がわかる。

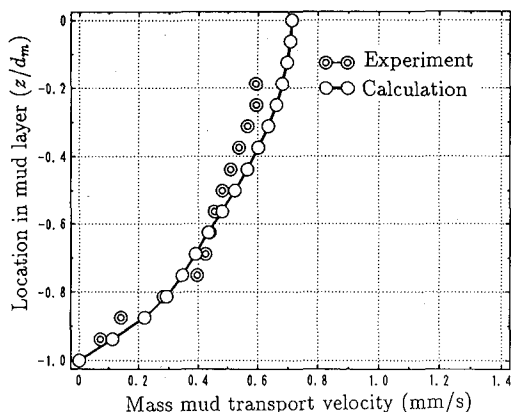
(2) 質量輸送速度

次に粘弾塑性体モデルを波流れ場に拡張したモデルと実験値を比較したのが図-5から図-9である。図-5は強い逆流(-0.191 m/s)の例であり、図-9は強い順流($+0.186\text{ m/s}$)の例である。

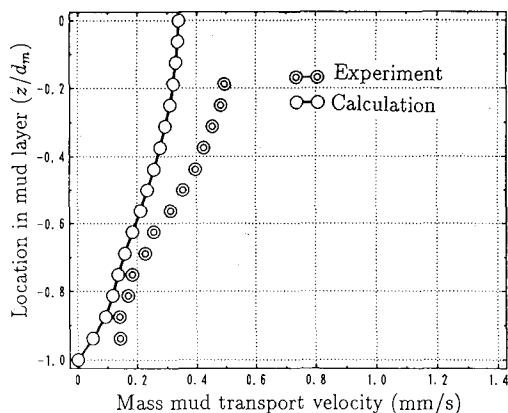
以上の比較の結果、本モデルによる数値解は質量輸送速度の鉛直分布を含めて、今回の実験値をきわめてよく予測することが解った。この場合にも特に底泥輸送速度の鉛直分布を精度良く予測できていることが重要である。さらに詳細に分布系を比較してみると、実験値では質量輸送速度が小さい場合、底面の極く近傍に移動が極

めて小さく、粘弾性領域に属すると考えられる層がある。一方数値モデルでは底面近傍で速度勾配が大きく、粘塑性領域になることが多く、この点がこの数値モデルに残された問題である。

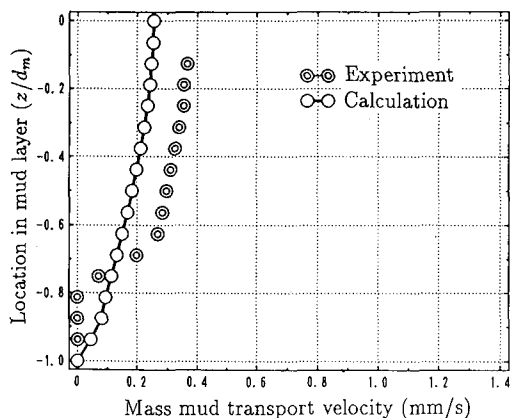
質量輸送量の実験結果で特徴的なものは、順方向の流



図—7 底泥質量輸送速度の鉛直分布の実験値と計算値の比較 (ケース 9)



図—8 底泥質量輸送速度の鉛直分布の実験値と計算値の比較 (ケース 10)



図—9 底泥質量輸送速度の鉛直分布の実験値と計算値の比較 (ケース 11)

れ (波と流れが同じ方向に進行する) に対しては流れが無い場合に比して質量輸送速度が小さくなり、逆方向の流れに対しては大きくなるということである。この結果は流れによる効果は界面での摩擦による寄与ではなく、

むしろ波を変形させる点にあるということ解釈することが出来る。すなわち質量輸送速度の変化は、逆流の場合この流れによって引き起こされる波と逆方向の界面摩擦により減少するよりもむしろ波高増加、波長減少によって引き起こされる圧力勾配の増加により増大する事となる。一方順流の場合には順流による界面摩擦よりもむしろ波高減少、波長増大による圧力勾配の減少により質量輸送速度も減少する。

この実験結果は波流れによる運動において底泥の移動は波進行方向の圧力の変化によって主として引き起こされ、界面での摩擦による効果は小さいという数値モデルの解析結果とも符合している。この効果はすでに柴山ら (1990) によっても指摘されており、今回はより精密な水理実験と数値計算により彼らの結果を確認することが出来たということになる。

5. 結 論

粘弾塑性体モデルを波流れ下の底泥運動に適用し、室内実験結果と比較した。その結果波高減衰、底泥層内質量輸送速ともに本モデルでかなりの精度で予測できることを確認した。また底泥の運動は水泥界面での摩擦応力よりもむしろ波進行方向の圧力の変化によって支配されていることを波流れ場での数値モデル、水理実験結果を用いて確認した。波流れ共存下での底泥層内の質量輸送速度は波に対して定常流が逆流で増加、順流で減少となる。

本研究は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

- 加藤 始, 鶴谷広一 (1976): 流れの中での反射波について, 第 23 回海講論文集, pp. 390-394.
- 柴山知也, 奥野雅量, An-N. Nguyen, 佐藤慎司 (1990): 底泥移動に関する粘弾塑性体モデルの波流れ場への適用, 海岸工学論文集, Vol. 37, pp. 240-243.
- 柴山知也, An N. Nguyen (1992): 底泥特性の周期依存性に着目したモデルとその検証, 海岸工学論文集, Vol. 39, pp. 511-515.
- 鶴谷広一, 中野 晋, 廣浜 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, Vol. 36, pp. 339-343.
- Brevik, I. and Aas, B. (1980): Flume experiment on waves and currents I. rippled bed, Coastal Engineering, 3, 1980, pp. 149-177.
- Brevik, I. (1980): Flume experiment on waves and currents II, smooth bed, Coastal Engineering, 4, 1980, pp. 89-110.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976): Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., ASCE, 1976, pp. 828-845.
- Iwasaki, T. and Sato, M. (1972): Dissipation of wave energy

- due to opposing current, Proc. 13th Conf. on Coastal Eng., ASCE, 1972, Vol. 1, pp. 605-622.
- Sakakiyama, T. and Bijker, E. W. (1989): Mass transport velocity in mud layer due to progressive wave, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 614-633.
- Shibayama, T. and An, N. N. (1993a): A visco-elastic-plastic model for wave-mud interaction. Jour. of Coastal Engineering in Japan, Vol. 36, No. 1 (印刷中).
- Shibayama, T. and An, N. N. (1993b): Wave-current interaction with mud bed, Coastal Engineering in Japan (under review).
- Thomas, G. P. (1981): Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 1. Linear waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 110, pp. 457-474.
- Trien, H. N. (1991): Study on mud transport in coastal waters, D. Eng. dissertation to Univ. of Tokyo, 150 p.
-