

# 波による底泥移動量の評価方法 —不規則波浪下と平面波浪場への適用—

柴山知也\*・榎谷有吾\*\*

底泥移動の定量的な評価方法である粘弾塑性体モデルを, 実用に供することを目指して, 不規則波浪下の底泥運動と平面波浪場での底泥運動へと拡張した。まず不規則波浪下への拡張については, 二次元水路での実験結果と波高周期結合分布を対照分析することにより, 質量輸送速度は不規則波を波高周期の結合分布に分類し, 粘弾塑性体モデルを適用することによって精度良く求められることが解った。次に, 新たに平面波浪場での質量輸送測定実験を行った。平面波浪場における底泥輸送量の計算方法は, 平面波浪場に Boussinesq 方程式を適用して波浪場の波高と波向を求め, 主波向方向に粘弾塑性体モデルを適用し, その沿岸方向成分を沿岸方向質量輸送速度とすることで求められることが解った。

## 1. はじめに

これまで, 底泥の輸送機構を解明するために, 底泥物性のモデルが開発され波作用下の泥挙動の解析等が行われてきた。移動量を算定するためのモデル化については, 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がその代表例であり, 底泥移動の機構解明と輸送量推定精度は大きく向上した。その後, 局所的な勾配の影響をモデルに取り込む (柴山ら, 1998) などの改良が加えられている。しかし, 従来行われてきた実験はほとんどが二次元水路を用いた規則波によるものであり, 不規則波あるいは平面波浪場での移動現象を対象とした研究は室内実験, 数値モデルいずれにおいても殆ど実施されていない。

本研究では移動現象を, より現実の条件下で検討するために平面波浪場での底泥移動実験 (規則波) を新たに実施するとともに, 断面二次元水路での不規則波浪下での実験結果 (柴山ら, 2003) を用いて, 不規則波浪下の検討を行い, これらを併せて不規則波浪下, 平面波浪場それぞれでの底泥移動量の評価方法を提案する。

## 2. 不規則波浪下での底泥移動の定量的評価方法

不規則波浪下での底泥移動の定量的評価方法を確立するために, 柴山ら (2003) による不規則波による底泥移動実験の実験結果を, Shibayama・An (1993) による粘弾塑性体モデルを不規則波浪下に拡張した計算結果と比較する。

### (1) 粘弾塑性体モデル

粘弾塑性体モデルでは, 構成則は以下の様に表される。

$$\sigma_{ij} = 2\mu_e \varepsilon_{ij} \dots\dots\dots (1)$$

粘性係数は粘弾性, 粘塑性の場合について, それぞれ以下のように表現する。

$$\mu_e = \begin{cases} \mu_1 + \frac{iG}{\omega} & \left( \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij} \leq \tau_y^2 \right) \\ \mu_2 + \frac{\tau_y}{4|\Pi_e|} & \left( \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij} > \tau_y^2 \right) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $\mu_e$  は見かけの粘性,  $\sigma_{ij}$  は応力テンソル,  $\mu_1$  は粘弾性体での粘性,  $\mu_2$  は粘塑性状態での粘性,  $\tau_y$  は降伏応力であり, また,  $4|\Pi_e|$  は以下のように表される。

$$4|\Pi_e| = 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

粘性係数, 弾性係数は, Shibayama・An (1993) により, それぞれを含水比と波の周期を変数として評価する方法が提案されている。

この粘性係数, 弾性係数を用いて Tsuruya ら (1987) に倣って泥層を鉛直方向に層別に分割し (多層モデル) 各層に線形化された Navier-Stokes の方程式と連続式を適用する。

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial x} + v_j \left( \frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial w_j}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial z} + v_j \left( \frac{\partial^2 w_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_j}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x} + \frac{\partial w_j}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここで  $x$  と  $z$  はそれぞれ水平あるいは鉛直方向,  $u$  と  $w$  は水平あるいは鉛直流速,  $j$  は何層目についての式であることを表し,  $t$ ,  $\rho$ ,  $v$  と  $p$  はそれぞれ時間, 密度, 動粘性係数, 圧力を表す。

### (2) 不規則波の取り扱い

不規則波は, 水表面変位の時間変化からゼロダウンクロス法を用いて個々の波を定義し, 波高周期の結合分布

\* フェロー 工博 横浜国立大学教授 大学院工学研究院システムの創生部門

\*\* 正 会 員 修(工) (独法) 土木研究所研究官

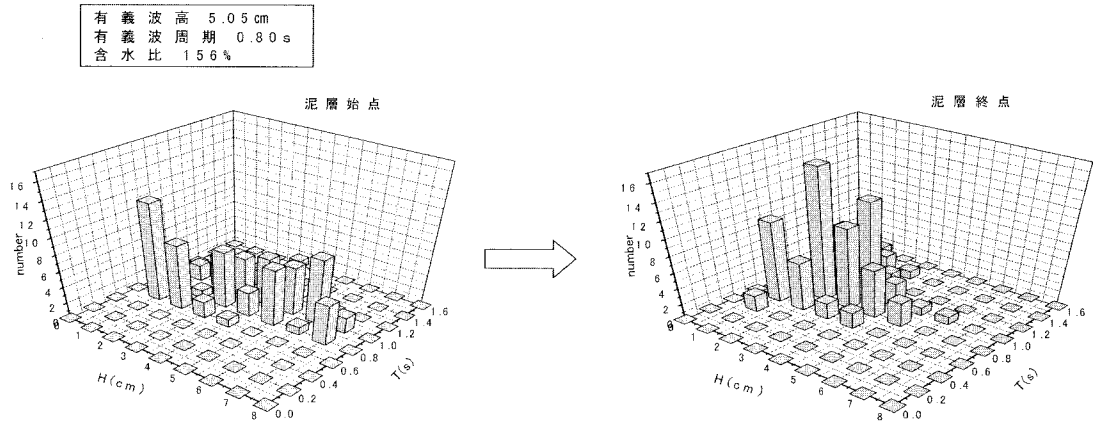


図-1 周期と波高の結合分布の例

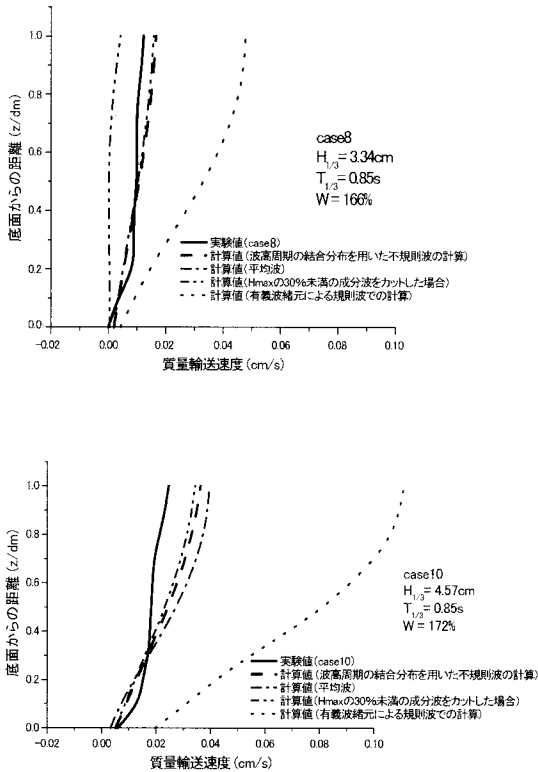


図-2 不規則波浪下の算定結果と実験値の比較

を用いて整理した。図-1に今回の解析に用いた柴山ら(2003)の実験結果の一つを例示する。泥層による波高減衰効果により、特に波高の大きな波が減衰の影響を大きく受けるために、泥層の始点と終点ではその分布が大きく異なることが解る。従って、今回の解析における質量輸送速度の算定には、質量輸送速度測定断面での水位変動を解析に用いている。

表-1 不規則波の実験条件(柴山ら, 2003)

| Case | 一様水深<br>部水深<br>(cm) | 一様水深部<br>有義波高<br>(cm) | 一様水深部<br>有義波周期<br>(s) | 泥層厚<br>(cm) | 泥層の<br>含水比<br>(%) |
|------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------------|
| 1    | 35.0                | 4.14                  | 0.78                  | 10.0        | 143               |
| 2    | 35.0                | 4.10                  | 0.77                  | 10.0        | 155               |
| 3    | 35.0                | 5.05                  | 0.80                  | 10.0        | 156               |
| 4    | 35.0                | 5.37                  | 0.81                  | 10.0        | 157               |
| 5    | 35.0                | 5.38                  | 0.82                  | 10.0        | 157               |
| 6    | 35.0                | 5.51                  | 0.82                  | 10.0        | 159               |
| 7    | 35.0                | 3.53                  | 0.74                  | 10.0        | 164               |
| 8    | 35.0                | 3.98                  | 0.79                  | 10.0        | 166               |
| 9    | 35.0                | 5.31                  | 0.86                  | 10.0        | 167               |
| 10   | 35.0                | 5.67                  | 0.81                  | 10.0        | 172               |

計算方法は、

- 1) 波高と周期の結合分布条件(波高, 周期, 水深, 底泥条件)に粘弾塑性体モデルを適用して質量輸送速度を算定し, それぞれの結合条件に対する確率をかけてたしあわせた計算,
  - 2) 粘弾塑性体モデルの計算時間を節約するために, 最大波高の30%未満の波高の波を除いた1)の計算,
  - 3) 有義波諸元を用いた換算規則波諸元による計算,
  - 4) 平均波諸元を用いた換算規則波諸元による計算,
- の4通りを用い, 算定値を実測値と比較した。表-1に実験条件を示し, 結果の一部を図-2に示す。

実験結果との比較から, 不規則波浪下での底泥輸送量は, 不規則波を波高周期の結合分布に分類し, 粘弾塑性体モデルを適用すること(上記の算定法1))によって精度良く求められることが解った。また, 最大波高の30%未満の成分波を除いた場合でも, 全ての成分波を計算した場合との誤差は10%未満であることがわかった。すなわち底泥移動を引き起こさないような小さな波は算

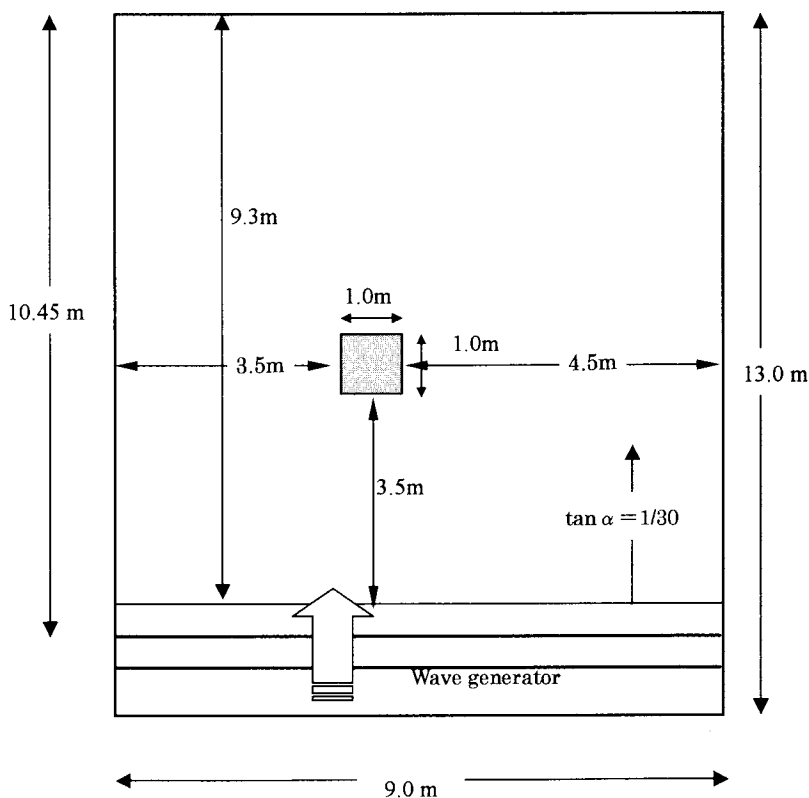


図-3 平面実験の平面図 (下が沖側)



図-4 平面実験の断面図 (左が沖側)

定から除外することができる。

なお、平均波諸元の規則波の計算では、周期が広く分布している場合（例示したケース8はこれに該当する）には粘弾塑性体モデルの算定結果が周期に大きく依存するために、入力諸元として適さないが、周期が一樣で、周期の分布の幅が小さい場合（ケース10に該当）には底泥の輸送をかなりの精度で評価できることもわかった。

以上により、もともとは規則波条件の下で開発された粘弾塑性体数値モデルの適用に当たっては、波高周期区分ごとに波を分類し、個々の波高周期別に粘弾塑性体モデルを適用し、波高周期の結合確率分布を用いて重み付けして時間平均を取り、質量輸送量を評価する方法の妥当性が示された。

### 3. 平面波浪場の検討

次に平面波浪場での底泥移動の定量的評価方法について述べる。

図-3に示すように、実験は長さ13 m、幅9 m、高さ0.6 mで1/30の一樣勾配斜面を設置した平面水槽を使用し、規則波を発生させ、底泥の沿岸方向の質量輸送量を測定した。水槽中央部に斜面から下に掘り込むように長さ1 m、幅1 m、高さ0.12 mの泥層を設置して（図-4）、表-2に示すような条件で、4ケースの実験を行った。

底泥層内の質量輸送量の計測については、Sakakima・Bijker (1989) にならい実験前に着色泥を泥

表-2 平面実験の条件

| Case No. | 入射波高    | 入射波周期  | 含水比  | 泥層上での水深 | 入射角度 |
|----------|---------|--------|------|---------|------|
| Case1    | 6.61 cm | 1.00 s | 165% | 7 cm    | 10°  |
| Case2    | 3.80 cm | 1.00 s | 130% | 7 cm    | 0°   |
| Case3    | 3.78 cm | 1.00 s | 130% | 7 cm    | 0°   |
| Case4    | 4.47 cm | 1.00 s | 130% | 7 cm    | 0°   |

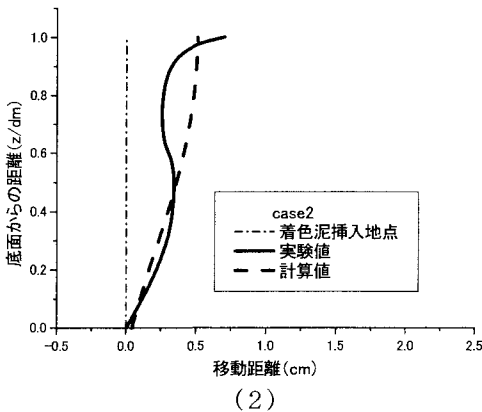
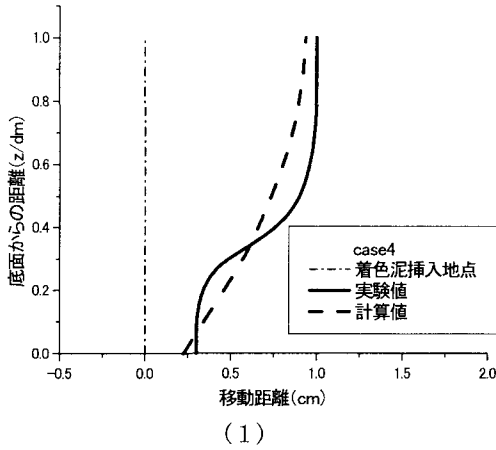


図-5 沿岸方向移動量の比較 (1) Case 2, (2) Case 4

層の始点から岸側に0.3 mの地点に挿入し、実験後に泥層を切り出して着色泥の変位からその移動量を計測した。計測に用いたサンプラーの諸元は柴山ら(2003)と同様である。挿入時には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。トレーサーの移動距離を波作用時間で除することにより、移動速度を算定した。

平面波浪場における底泥輸送量の計算方法について述べる。平面波浪場の計算には Boussinesq 方程式を適用して波浪場の波高と波向を求め、各地点における主波向方向に粘弾塑性体モデルを適用し、その沿岸方向成分を沿岸方向質量輸送速度とした。

Boussinesq 方程式の基礎式は水面変動  $\eta$  と線流量  $Q_x$ ,  $Q_y$  について、以下で表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_D Q_x$$

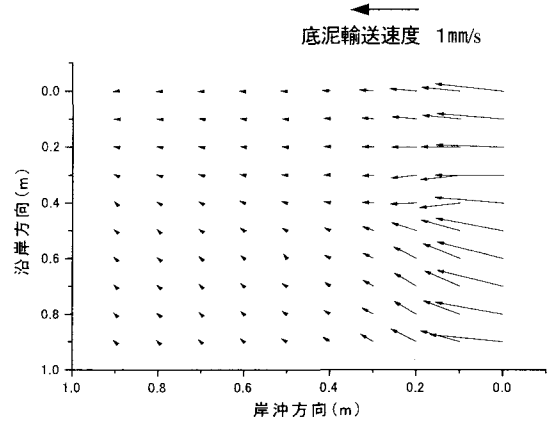


図-6 平面波浪場における底泥輸送速度の算定値

$$= \frac{1}{3} h^2 \left( \frac{\partial^3 Q_x}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial x \partial y \partial t} \right) - \frac{f_w}{2D^2} Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} + v_e \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_D Q_y = \frac{1}{3} h^2 \left( \frac{\partial^3 Q_x}{\partial x \partial y \partial t} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial y^2 \partial t} \right) - \frac{f_w}{2D^2} Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} + v_e \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

ここで、 $h$  は静水深、 $D(=h+\eta)$  は全水深、 $f_w$  は底面摩擦係数、 $g$  は重力加速度である。 $v_e$  は碎波によって生じる乱れによる運動量の混合を表す渦動粘性係数である。ここで、エネルギー減衰係数  $f_D$  を碎波によるものと底泥の減衰効果によるもの ( $f_{D1}$ ) に分類し、底泥による減衰を、粘弾塑性体モデルから求められる波高減衰率  $k_i$  から以下のように換算して減衰項に加える。

$$f_{D1} = \frac{\varepsilon_D}{nE} = \frac{2C_g k_i E}{nE} = 2C k_i \quad (10)$$

結果の一部を図-5に示す。図より、沿岸方向成分について、算定値と実測値は鉛直方向の分布までを正確に表現しているわけではないものの、全体として良好に一致していることが解った。

以上の結果から波向き方向に粘弾塑性体モデルを適用し、沿岸方向成分を抽出することにより、底泥の沿岸方向移動量を精度良く計測できることがわかった。

底泥設置部では波のエネルギー減衰率から式(10)を経て、波高の変化を求め、底泥による減衰効果分を減じている。この減衰効果を含めた、平面波浪場での底泥輸送速度の平面分布の計算結果を図-6に示す。

一般に、底泥設置部では、底泥による波高減衰により、

波高が著しく低下する。このため、回折現象により周囲から波のエネルギーが流入し、波向きが変化する。波向きの変化は、このような回折現象に起因しており、結果として図-6に示すように質量輸送速度が分布することになる。

#### 4. 主要な結論

二次元水路、不規則波浪下と平面水槽、規則波浪下における底泥移動実験の結果をそれぞれ粘弾塑性体モデルの算定結果と比較した。不規則波浪下での底泥移動量は、不規則波を波高周期の結合分布で分類し、各成分に粘弾塑性体モデルを適用することによって評価できる。また、平面波浪場での底泥移動量は、Boussinesq方程式から波高と波向を求め、波向方向に粘弾塑性体モデルを適用することによって求めることができる。

本研究は五洋建設株式会社からの研究費および日本学術振興会科学研究費（基盤B No. 015404016代表者柴山知也）により行ったことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 柴山知也, 榎谷有吾, 島谷学(2003): 不規則波による底泥移動と波高減衰に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 466-470.
- 柴山知也, Mohsen Soltanpour, 野間崇(1998): 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, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 581-585.
- 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.
- An Ngoc Nguyen・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38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.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, p. 351-361.
- Sakakiyama, T. and E.W.Bijker(1989): Mass transport velocity in mud layer due to progressive wave, Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol.115, No.5, pp. 614-633.
- Shibayama, T. and An Ngoc Nguyen(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.