

II-368

底泥上を進行する波による水粒子質量輸送速度

横浜国立大学大学院 学生会員 青木 徹

横浜国立大学工学部 正 会 員 佐藤 慎司

横浜国立大学工学部 正 会 員 柴山 知也

1. はじめに 粘土質の底泥が堆積している海域で、海岸構造物を設計する場合、波や流れのもとでの底泥の挙動を知る必要がある。柴山ら¹⁾によれば、底泥の波動運動にともなって、底泥が輸送されることが報告されており、その輸送機構は、粘土層内質量輸送と水層に浮遊した粘土の輸送が主要な要因となっている。このうち粘土層内質量輸送に関しては、柴山ら¹⁾や中野ら²⁾によってその結果がまとめられているが、水層に浮遊した粘土の輸送に関しては、研究例がない。そこで、本研究では、粘性流体多層モデルを用いて水層内の質量輸送、とりわけ浮遊泥濃度の高い界面付近での質量輸送速度について検討する。

2. 粘性流体多層モデル Dalrymple and Liu³⁾は、水層と粘土層の粘性流体2層モデルを定式化し、各層内における流速場の数値解を得ている。さらに中野ら²⁾は水層を含め全体をn層分割した系を考え、各層における流速および圧力を求めている。この場合、図-1に示すような第i層における運動方程式および連続式は、

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial x} + \nu_i \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right) \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial z} + \nu_i \left(\frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_i}{\partial z^2} \right) \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial z} = 0 \quad \dots (3)$$

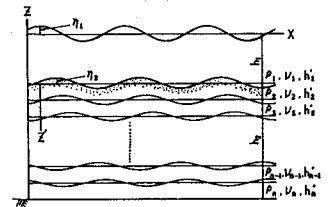


図-1 座標系の定義

である。ここに $u_i, w_i, p_i, \rho_i, \nu_i$ は第i層における水平流速、鉛直流速、圧力、密度、動粘性係数である。この運動方程式および連続式に、水面、界面、底面における境界条件式を用いれば、各層における流速と圧力が求められる。ここでは、動粘性係数の値は、中野ら²⁾の相当粘度法で与えた。

3. 質量輸送速度の計算 上記の方法で求めた流速を用いて質量輸送速度を計算する。計算式は、

$$\bar{U} = \bar{U}_E + \frac{\partial u}{\partial x} \int_0^t u dt + \frac{\partial u}{\partial z} \int_0^t w dt \quad \dots (4)$$

ここに、 $\bar{U}$ は質量輸送速度、 $\bar{U}_E$ はEuler流による質量輸送速度、 $\bar{\quad}$ は時間平均を表す。また式(4)の右辺の第2、3項は、Lagrange流の質量輸

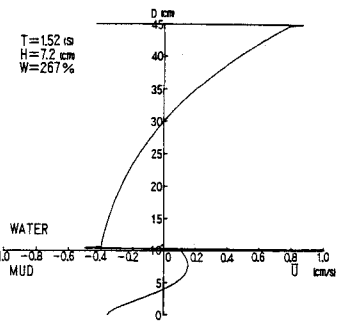


図-2 質量輸送速度の分布

送速度であり、 $\bar{U}_L$ で示される。図-2は、岸向きを正としたときのLagrange流質量輸送速度の水層および粘土層における計算例を断面平均の値が0となる様にして示したものである。この図では、界面付近の境界層に、質量輸送速度の大きく変化する部分がある。界面付近は、特に浮遊泥濃度が高くなることが報告されており(柴山ら⁴⁾)、以下ではこの部分について詳細に検討する。

まず Euler流の質量輸送速度について検討する。式(1)、式(2)はNavier-Stokes方程式において慣性項を無視したものであり、それによって計算された流速では、式(4)において $\bar{U}_E = 0$ になる。ところが、境界層内においては、Euler流の質量輸送速度は、無視できない。そこで、式(1)の左辺に慣性項を加えて

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + w_i \frac{\partial u_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial x} + \nu_i \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right) \quad \dots (5)$$

として解を求めればよい。ところが式(5)は非線形であり容易に解けないため、ここでは、式(1)より求めた u_i, w_i を式(5)に代入して $\bar{U}_E$ を求める。その際、流速のx方向の分布はz方向の分布に比べて十分小

さいので、 $\partial u_i / \partial x$ および $\partial^2 u_i / \partial x^2$ の項は無視でき、また圧力勾配項は、 u_i の1次のオーダーの式(1)においてつりあっていると考える。さらに、時間平均をほどこすと式(5)は

$$\overline{w_i} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial z} = \nu_i \frac{d^2 \overline{u_{Ei}}}{dz^2} \quad \dots (6)$$

となる。これを式(3)を用いて変形し、両辺を z で積分すると

$$(\overline{uw})_i - (\overline{uw})_\infty = \nu_i \frac{\partial \overline{u_{Ei}}}{\partial z} \quad \dots (7)$$

となる。ここに $(\overline{uw})_\infty$ は境界層外縁での $(\overline{uw})$ を示す。この式(7)に底面での境界条件 ($z=0$ つまり粘土層底面で $\overline{u_E}=0$) を用いれば、底面からそれぞれの水深に対する $\overline{u_E}$ が数値的に求められる。

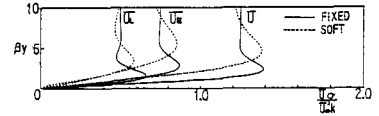


図-3 固定床との比較

4. 計算結果 上記の方法の妥当性を確かめるために、粘土層を低含水比とし固定床に近い条件で計算し Longuet-Higgins⁵⁾ による固定床に対する質量輸送速度の鉛直分布と比較を行った。その結果を図-3に示す。図の k は波数、 σ は角振動数、 y は界面からの距離、 u_∞ は境界層外縁における水平流速振幅、 ν は水の動粘性係数であり、 $\beta = (\sigma/2\nu)^{1/2}$ は境界層の厚さを表す尺度である。この図によれば、粘土床の方が境界層が多少厚めとなっているが、質量輸送速度の値はほぼ一致しており、本計算法の妥当性が確認された。

図-4(a)~(d)は4種類の含水比について計算した例である。この図では、 $\overline{u_L}$ は固定床に対するものと分布形状が大きく異なっている。また $\overline{u_L}, \overline{u_E}, \overline{u}$ とも固定床の5~10倍程度になっている。またこの4ケースを比較すると、含水比が高くなるに連れて、質量輸送速度が小さくなっていくこともみられる。

こうした現象を検証するために、2次元造波水路を用いて実験を行った。今回の実験では、染料をいれそれをビデオカメラで撮影する方法を用いたが、界面付近で染料が拡散してしまい計測結果を定量化するには至らなかった。しかしながら、界面付近で岸方向に大きく輸送されることは、定性的に確認できた。

5. 結論 粘土床上を進行する波による水層内の質量輸送について検討し、以下の結論を得た。

- (a) Lagrange的な質量輸送は、固定床と粘土床では界面付近で、その分布形状が著しく異なる。
- (b) 界面付近では、Lagrange的な質量輸送と共に、Euler的な質量輸送を考える必要がある。
- (c) 粘土床上では、水-粘土界面付近で大きく岸方向に輸送される。

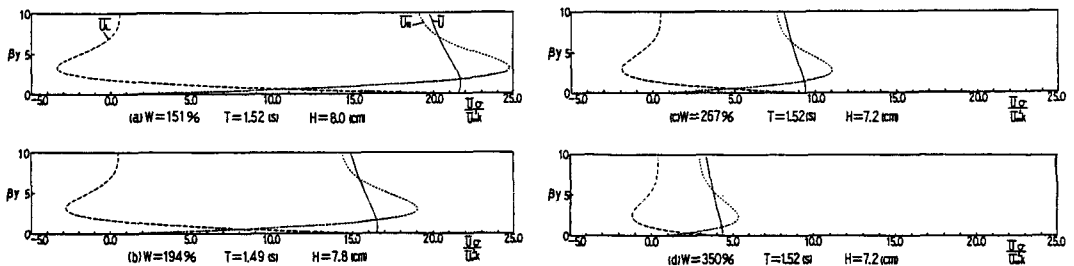


図-4 境界層内質量輸送速度の分布

参考文献 1) 柴山知也・滝川浩・堀川清司：波による軟らかい底質粘土の質量輸送，第32回海岸工学講演会論文集，pp.258~262，1985．2) 中野晋・鶴谷広一・鷹濱潤：波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について，港湾技術研究所報告，第26巻，第2号，pp.171~212，1987．3) Dalrymple, A.R. and P.L.F. Liu: Waves over soft muds: a two-layer fluid model, Jour. of Physical Oceanography, Vol.8 pp.1121~1131, 1978. 4) 柴山知也・中西雅明・石原肇・佐藤慎司：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.271~275，1987．5) Longuet-Higgins, M.S.: Mass transport in water waves, Phil. Trans. R.S. London, Vol. 345, 1952.