

3次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究

鳥取大学工学部 正会員 黒岩 正光

鳥取大学工学部 正会員 野田 英明

(株)建設技術研究所 正会員 ○芳地 康征

1.はじめに 底質の移動や物質の拡散の計算に用いられる海浜流の数値モデルの多くは、これまで鉛直方向に平均した流速を用いる平面2次元モデルである。しかし例えば、碎波帯内においては碎波による質量輸送や戻り流れの影響の考慮が重要で、底質移動や物質拡散等を厳密に取り扱おうとすれば、鉛直分布が扱える3次元海浜流モデルが必要となる。そこで本研究では準3次元海浜流場の計算手法を新たに提案し、検討、考察を行った。

2.基礎方程式 直交座標系 (x, y, z) における3次元のオイラーの運動方程式と連続式を基礎式とする。基礎式中の各流速および圧力を以下のように分離できるものと仮定する。

$$u = U + u_w + u', \quad v = V + v_w + v', \quad w = W + w_w + w', \quad p = \bar{p} + p_w + p' \quad (1)$$

ここに U, V, W および $\bar{p}$ は、波の一周期で時間平均して定義される定常流成分、 u_w, v_w, w_w および p_w は波動成分、 u', v', w' および p' は乱れ成分である。波動成分と乱れ成分の一周期平均は0、各成分における成分間干渉は存在しないと仮定する。式(1)を運動方程式および連続式に代入して、若干の計算を行うと次のような運動方程式および連続式が導かれる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} + M_x - R_x \quad (2)$$

$$\text{ここに, } M_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$R_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{u_x^2} - \overline{w_x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^0 \overline{u_w w_w} dz' + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^0 \overline{v_w w_w} dz' \right) + \frac{\partial \overline{u_w v_w}}{\partial y}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} + M_y - R_y \quad \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}(h + \bar{\zeta})}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}(h + \bar{\zeta})}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\text{ここに, } M_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial V}{\partial z} \right)$$

$$R_y = \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{v_y^2} - \overline{w_y^2} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^0 \overline{u_w w_w} dz' + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^0 \overline{v_w w_w} dz' \right) + \frac{\partial \overline{u_w v_w}}{\partial x}$$

$$W_{k+1} = W_k - \int_{z_k}^{z_{k+1}} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) dz \quad (6)$$

式(2)および(3)の ν_h および ν_v は、それぞれ水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数を表す。なお、静水深を基準とした水位変動量 $\bar{\zeta}$ および鉛直流速 W は式(4)を変形した式(5)および(6)によって求める。式(5)において $\bar{U}, \bar{V}$ は、それぞれ x, y 方向の断面平均流速成分、 h は静水深を表す。式(6)において k は鉛直方向に等分割した要素の節点番号である。

3.数値計算 基礎方程式を時間的に解く方法として、本研究ではChorin¹⁾によって提案されたFractional Step Finite Difference Methodを用いた。また空間的な離散化については、Koutitasら²⁾が提案した鉛直方向には有限要素法を、水平方向には差分法を用いて数値的に解く方法を採用した。また底面での境界条件には、波と流れの共存場における摩擦応力(本間)を用い、水面境界には岡安ら³⁾に基づいて、波のエネルギー逸散率の関数で波向き方向に与えた。水平渦動粘性係数は、Longuet-Higginsによる表示を用い、鉛直渦動粘性係数には、土屋ら⁴⁾が示した波高と波速の関数で与え、鉛直方向には一定と仮定した。なお、波浪場の計算には西村らの非定常緩勾配方程式を用い、その結果を用いて流れの場を計算した。

4.3 次元海浜流モデルの適用性 Visser⁵⁾の水利実験

(海底勾配1/20, $H_0=8.5\text{cm}$, $T=1.0\text{sec}$, 波向 17.0° deg, 滑らかな固定床)と比較することで沿岸流場に対して検討した。数値計算において, 計算格子間隔は $\Delta s=10.0\text{cm}$, 鉛直方向には10等分割, 時間間隔は $\Delta t=0.01\text{sec}$ とした。境界条件は, 沖側・側方とも開境界とし, 予備計算でほぼ定常状態と判断された12000stepの計算を行った。図-1(a)および(b)は, 沿岸方向中央における岸沖方向の平均水位分布および沿岸流速分布である。(a)から, 計算結果は実験結果に比してwave-setupが急勾配となり過大評価となっている。(b)において破線は摩擦係数として通常与えられる $C_f=0.01$ を用いた計算結果である。これを見ると明らかに全域で過小評価されているが $C_f=0.01$ として計算した場合の沿岸流場における流速の過小評価は, 清水らによっても報告されている。実線は実験値と一致するように摩擦係数 C_f を調整したものである。

汀線から120cmまでは $C_f=0.003$ とし, その後は汀線からの距離に比例して増加させた。

図-2および図-3(a)~(c)は, 計算領域全体における流速ベクトルの計算結果である。平均水位面ではベクトルがやや岸側に, 底面ではやや沖側に向いており, U が上層と下層では逆向きになっているのが分かる。鉛直方向を軸にわずかにねじれていることがわかる。

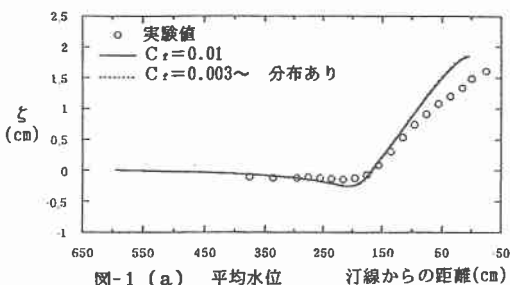


図-1 (a) 平均水位 汀線からの距離 (cm)

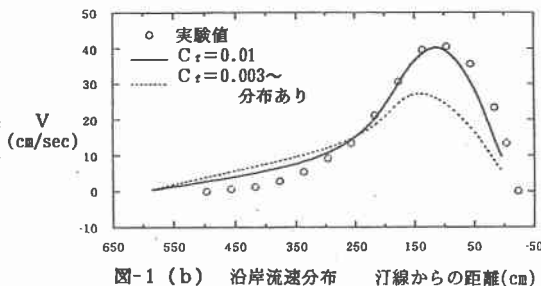


図-1 (b) 沿岸流速分布 汀線からの距離 (cm)

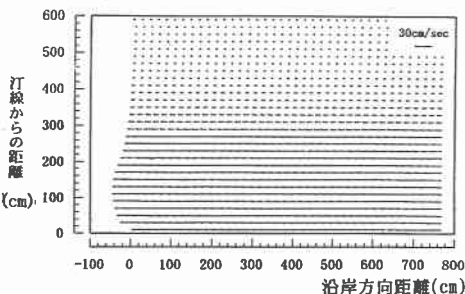


図-2 2次元モデルによる計算値

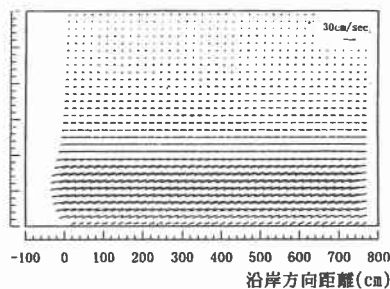


図-3 (b) 3次元モデル ~平均水位面~

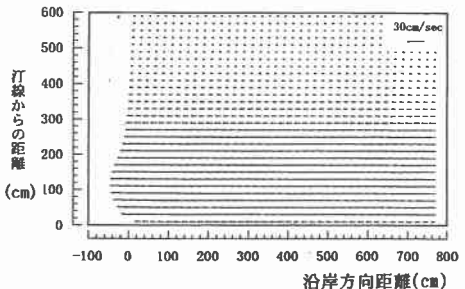


図-3 (a) 3次元モデル ~断面平均~

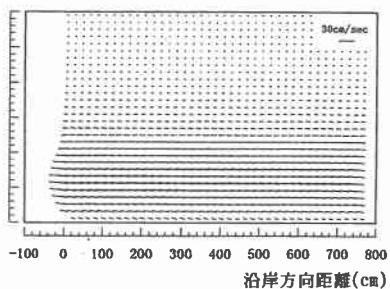


図-3 (c) 3次元モデル ~底面~

5. おわりに 水面および底面での境界条件によって, 鉛直方向にねじれの分布を持つ沿岸流が再現できた。鉛直分布も扱えるのが3次元モデルの特徴ではあるが, 岸沖方向の鉛直分布を与える戻り流れや質量輸送の評価および鉛直渦動粘性係数の評価が課題といえる。また実験結果との比較から, 通常の摩擦係数 $C_f=0.01$ では沿岸流速を過小評価するが, C_f を小さくすることによって実験結果とよく一致することがわかった。

【参考文献】1) Chorin, A. j.; Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations, Math. Comput. 22, 1968. 2) Koutitas, C. and O'Conner, B.; Modeling Three-dimensional wind-induced flows, Proc. ASCE, HY11. 3) 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃; 碎波帯におけるエネルギー収支と戻り流れのモデリング, 海岸工学論文集, 第36巻. 4) 土屋義人・山下隆男・植本 実; 碎波帯における戻り流れについて, 第33回海岸工学講演会論文集. 5) Visser, P. j.; Laboratory measurements of uniform longshore currents, Coastal Eng., Vol. 15.