

1. 序

港湾の整備拡張に関連し、漂砂問題は現在海岸工学において最も重要問題の一つとなっている。そのために、波による砂移動の発生機構解明のために多数の研究が行なわれてきた。特に、Lyne, 日野, 宇多らは振動流下での収束境界面上の層流流れを解析し、二次流の発生も理論的、実験的に証明した。本研究は、Navier-Stokes 方程式から出発して、砂漣周辺の流れを解析的に求め、その流況を実験的に可視化して比較検討したものである。

2. 流れの可視化の実験

長さ25 m、深さ1 m、幅0.5 mの造波断面水槽内に、中央粒径0.24 mm、比重2.65の細砂によって底勾配約1/100の海底地形を作成し、波高3.70 cm、周期0.8秒の波を作用させる。その後、底面に砂漣が発達し、渦の生成が顕著になった時点で、接写レンズをセットしたカメラによって砂漣周囲の流れの撮映を行なった。その時、中央粒径0.17 mm、比重1.07の白色の塩化ビニール粒子を混濁した水溶液を砂漣周囲に注入して、砂漣周囲の流れを可視化した。作用する波の各位相に対応する砂漣周囲の流況は、二台のカメラをセットして、その位相との対応づけを行なった。

その結果、波の山が対象の砂漣を通過するに従って、波によって発生する底層流は砂漣頂部ではなく離れて砂漣の谷で渦を形成する。この底層流は、ある程度上砂を金んで渦の形成時には多量の砂を砂漣谷部で洗掘し、含むようになる。この砂を金んだ渦は波の山が通過し終わるまで存在し、谷部を洗掘し続ける。底層流の向きが岸方向から沖方向に変化すると、この渦は谷から沖側にはじき出される。このとき、渦に含まれる多量の砂も同時に沖側に輸送される。この実験では、この影響が卓越しており、対象地点付近では砂は徐々に沖側に移動した。

波の谷が通過するにつれて、底層流の向きは沖側になり、流速も増加する。はじめ、砂漣周囲の流れはほぼ砂漣の凹凸に平行であったが、波の谷の通過後、対象とする砂漣の頂部の沖側に波の山の場合に形成される渦よりやや規模の小さい逆向きの渦が谷に発生する。この渦による谷部の洗掘量は、渦の規模が小さいことから類推できるように少量である。各波の位相における渦の写真を図-1, 2, 3で示す。また、各々位相と底層流の流速との対応は図-4で説明する。図-1は $t=\pi$ に相当し、新しく発生しつつある渦が、以前の渦を押し出しつつあるところである。さらに図-2は $t=1.2\pi$ であり、新しく発生した渦が、ほぼ砂漣谷部を占有している。図-3は $t=1.4\pi$ に対応し、新しい渦が最も発達し、谷部が洗掘されつつある。

3. 理論的解析

解析的モデルを砂漣周辺の流況に適用するためにつぎのような仮定を設定する。

i) 底面の境界は波状である。 ii) 底面では粘性の影響が強い。 iii) 底面からの粘性の影響距離は $\sqrt{\frac{2\eta\mu}{\rho\omega}}$ のオーダーで砂漣の波長より小さい。 iv) 波動運動は波状境界面付近の運動に影響を及ぼすが、波状境界面付近の水運動は波動運動に干渉しない。

はじめに、Navier-Stokesの方程式を流れ関数 ψ を用いて書くと、

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \right) \nabla^2 \psi = 2\nabla^2 \psi \quad (1)$$

となる。ただし、 $u = -\frac{\partial \psi}{\partial y}$, $v = \frac{\partial \psi}{\partial x}$, x と y は図-5で示す座標系であり、 η = 動粘性係数、 ω = 時間である。さらに、式(1)を砂漣の波長 λ , 粘性の影響域 δ , 底層流の流速 u_b でつぎのように無次元化する。

$$\xi = x/\lambda, \quad \eta = y/\delta, \quad \tau = \omega t/\lambda, \quad \psi = u_b \delta \phi$$

式(1)は、新変数 ξ, η, τ, ϕ を用いて書くと、

$$\delta^2 R_0 \frac{\partial^3 \phi}{\partial \xi^2 \partial \tau} + R_0 \delta \frac{\partial^3 \phi}{\partial \tau \partial \xi^2} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial \tau} - \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \frac{\partial}{\partial \xi} \right) \delta R_0 \left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + \delta^2 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \right) \phi = \left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + \delta^2 \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \right)^2 \phi \quad (2)$$

ここで、 $\delta = \nu / R_0$ ， $R_0 = U_0 \nu / L$ である。式(2)は中に肉して非線形であり、近似解を求めるために ϕ を δ に依るべき級数に展開する。すなわち、

$$\phi = \phi_0 + \delta \phi_1 + \delta^2 \phi_2 + \dots \quad (3)$$

式(3)を(2)に代入し、 δ の各べき数について整理すると、

$$\begin{aligned} \text{第0次:} & \quad \frac{\partial^3 \phi_0}{\partial \tau^3} = 0 \\ \text{第1次:} & \quad \frac{\partial^3 \phi_0}{\partial \tau \partial \xi^2} + \left(\frac{\partial \phi_0}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial \tau} - \frac{\partial \phi_0}{\partial \tau} \frac{\partial}{\partial \xi} \right) \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial \tau^2} = \frac{\partial^4 \phi_1}{\partial \tau^4} \cdot \frac{1}{R_0} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。式(4)を解くために下記の境界条件を設定する。

$$\begin{aligned} \tau = 0: & \quad \phi = 0, \quad u = U_0 \cos \kappa \xi = U_0 \cos \kappa \tau \\ \tau = -\zeta = 1 + \epsilon \sin \omega \xi: & \quad \phi = 0, \quad \partial \phi / \partial \tau = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\kappa =$ 波の周波数、 $\tau =$ 波状境界面に垂直方向の単位ベクトルを示す。式(5)を用いて式(4)を解くと、

$$\begin{aligned} \phi \approx \cos \kappa \tau \left[\tau + \frac{2\tau^2}{5} - \frac{\tau^3}{5^2} \right] + \delta R_0 \left[-\kappa \sin \kappa \tau \left(\frac{\tau^5}{205^2} + \frac{\tau^6}{65} \right) - \epsilon \omega \cos \kappa \tau \cos \omega \xi \left(\frac{3\tau^7}{705^2} + \frac{\tau^6}{65^2} + \frac{2\tau^8}{195^2} \right) + \epsilon \omega \cos^2 \kappa \tau \cos \omega \xi \right. \\ \left. \left(\frac{\tau^7}{705^2} + \frac{\tau^8}{205^2} \right) + \left(-\frac{\tau^3}{25^2} - \frac{\tau^4}{25} \right) \left[\kappa \sin \kappa \tau \cdot \frac{5\tau^2}{12} + \epsilon \omega \cos^2 \kappa \tau \cos \omega \xi \cdot \frac{\tau}{5} - \frac{\tau}{10} \epsilon \omega \cos^2 \kappa \tau \cos \omega \xi \right] - \left(\frac{2\tau^2}{5^2} + \frac{3\tau^3}{5^2} \right) \left[-\kappa \sin \kappa \tau \cdot \frac{7\tau^3}{60} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{3\tau}{420} 5^2 \epsilon \omega \cos^2 \kappa \tau \cos \omega \xi + \epsilon \omega \cos^2 \kappa \tau \cos \omega \xi \cdot \frac{2}{105} 5^2 \right] \right] \quad (6) \end{aligned}$$

が得られ、 $R_0 = 10$ ， $\delta = 0.1$ として数値計算を行なうと、 $t = 0.6\pi$ 付近で最も発達した渦は、波の位相が変化し、流れの方向が変わるにつれて、衰弱し始め、 $t = \pi$ では砂溜の谷部に逆向きの新しい渦が発生し始めており、右の渦が追い出されつつある。また、 $t = 1.2\pi$ では右の渦が新しい渦によって谷部からほぼ追い出されてしまったことを示す。

〈参考文献〉 1) W.H. Lyne: "Unsteady Viscous Flow over Wavy Wall," J.F.M. 1971, Vol. 50, pp. 23~48

2) 中多・日野: "波状曲面上の層流振動流れの理論", 論文報告集, 1975, 237号, pp. 27~36

3) 日野富永: "河床波の発生機構の解析", 第20回水理講演集, 1976.

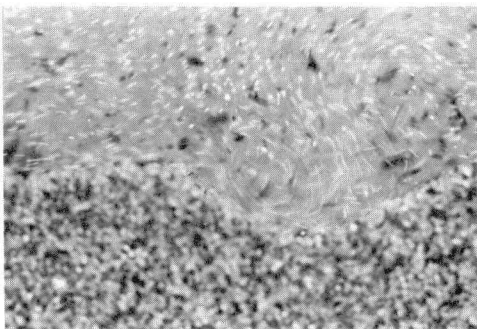


図-1 流況図

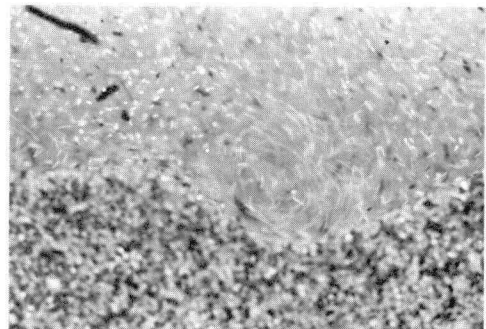


図-2 流況図



図-3 流況図

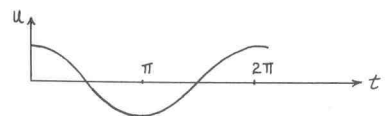


図-4 底層流の位相変化

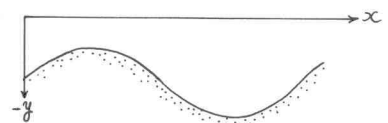


図-5 座標系の説明