

砂漣海底面上の乱流境界層の特性と数値計算モデル

熊本大学 工学部 正会員 滝川 清

熊本大学 工学部 学生員 ○米村 浩介、前田 孝久、柳田 努

1. まえがき 砂漣の様な複雑な形状を有する海底面近傍では、波の運動と共に流れの剥離、渦の発生、放出、乱れが生じこれらが時間的、空間的に変動する複雑な乱流場が形成されている。この乱流境界層の特性を明らかにすることは乱流場におけるエネルギー逸散や底質の移動機構を正しく評価する為に重要である。本研究では固定砂漣上での実験により実測された流速の時間的、空間的変動の結果を基に数値計算モデルの考察とそのF. E. M解析を行い、乱流境界層内の変動特性に関して検討を加えるものである。

2. 基礎方程式による有限要素法解析 粘性流体に対する平均流速場における連続式と、レイノルズ応力を考慮したN-S方程式は、次式で表現される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = F_x + \nu \nabla^2 u + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = F_y + \nu \nabla^2 v + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \quad (3)$$

ただし、 ν は動粘性係数 ν_t は渦動粘性係数

(2)式をy方向、(3)式をx方向に微分して差をとり渦度 ω と流れ関数 ϕ で表すと(4)式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = \nu \nabla^2 \frac{\partial v}{\partial x} - \nu \nabla^2 \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで ν_t の空間微分を微小要素内で一定であると仮定すると、渦度方程式(5)式を得る。これに

(1)式を渦度と流れ関数で表した(6)式が解析の対象の基礎方程式となる。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = (\nu + \nu_t) \nabla^2 \omega \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\omega \quad (6)$$

乱れにより生ずるレイノルズ応力の評価にはいわゆるk-εモデル、L. E. Sモデル等多くの高次方程式モデルがあるが、ここでは計算の簡単のため0次方程式モデルすなわち渦動粘性係数 ν_t を(7)式のように混合距離理論を用いて与える。

$$\nu_t = Q^2 \left[\frac{\partial u}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

なお、基礎方程式のGalerkin法による定式化は文献(1)に詳しい。

3. 実験及び計算の結果

(7)式で与えられる渦動粘性係数 ν_t の混合長 Q は様々なモデルが提案されており、その代表的なものに壁面乱流モデル $Q = k y^*$ がある。本研究では実験により混合長 Q に関する数値モデルを検討する。実験は長さ30m、幅50cm、深さ70cmの2次元造波水路において行った。水路底に表面滑面仕上げのモルタル製固定砂漣を設置し流速測定には2次元電磁流速計を用いた。砂漣形状は図1に示し、実験ケースは表1に示す。

表1 実験ケース

ケース	波高 (cm)	周期 (s)	水深 (cm)	砂漣形状
CASE 1-1	12.0	2.084	25.0	モデル 1
CASE 1-2	12.0	1.502		
CASE 2-1	11.0	2.054	25.0	モデル 2
CASE 2-2	12.5	1.503		

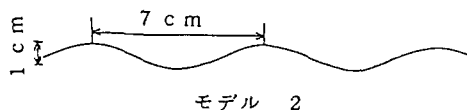
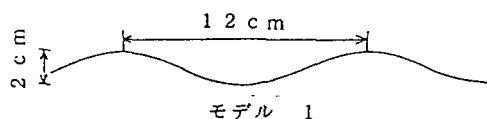


図1 固定砂漣形状

流速の測定は図2のように砂漣2波長区間を1cm間隔で27点、水深方向には8点で、底面近傍は細かくして測定した。データサンプリング間隔は0.05秒とし、各測点において10周期分測定した。位相は同時に記録した波高計の値で合わせ、位相原点は波のゼロアップ点とした。また平均流速は各位相平均して求める。以下に示す図3図4は、数値解析と実験で得られた流速図、渦度図、流線図ではほぼ同位相の結果を示したものである。

数値モデルは、 $\Omega = \Delta\omega / V$ (Δ :要素の面積、 ω :渦度、 V :流速)としており、表1のCase 1-2を対象とした結果である。実験に用いた電磁流速形の計測部は直径5mmで、砂漣スケールに比べかなり大で、乱流場の正確な計測は困難ものであるが、実測結果による流況、流線、渦度等は比較的その傾向を表しているものと思われる。また数値計算による結果もその流況をよく再現しているものと思われるが、実験結果を基に更に進んだ数値モデルにつき検討を加え、その詳細は他の結果と共に講演時に発表する。

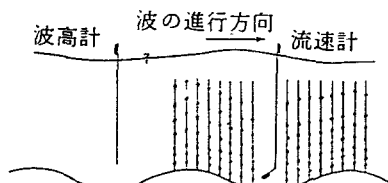


図2 流速測点

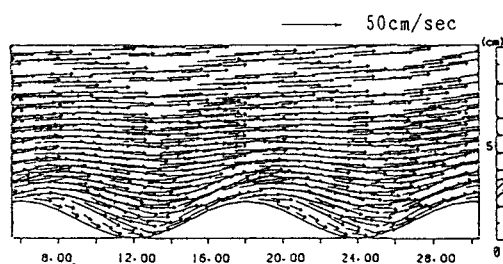


図3 - (a) 流速図

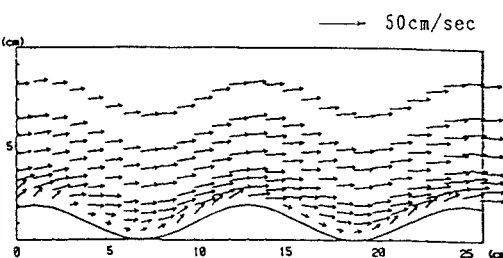


図4 - (a) 流速図

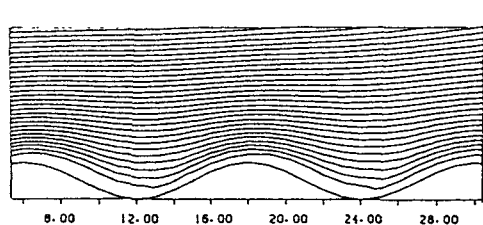


図3 - (b) 流線図

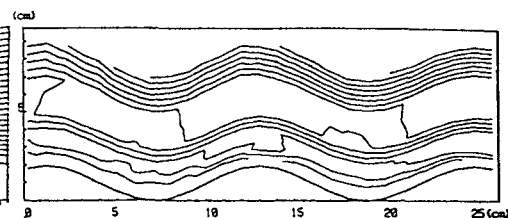


図4 - (b) 流線図

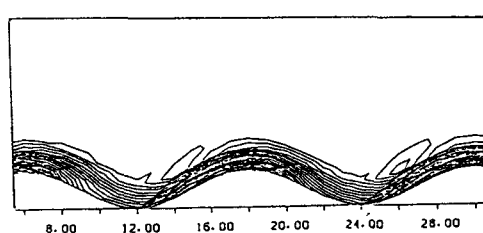


図3 - (c) 渦度図

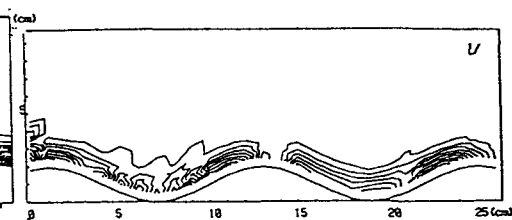


図4 - (c) 渦度図

図3 砂漣上の流況(数値計算)

図4 砂漣上の流況(実験結果)

<参考文献>

- (1) 第36回海岸工学論文集:波動場における任意海底面上の境界層の解析 p 11~15. 1989