

乱流モデルによる砂漣上の浮遊砂濃度と浮遊砂輸送機構

辻本剛三* · 市山 誠** · 早川典生***
福嶋祐介**** · 中村由行*****

1. はじめに

波動場における砂漣上の岸沖漂砂量の算定に関する研究は Madsen・Grant (1976) の振動流を対象にした成果を用いた研究や砂漣上の砂粒子の挙動 (掃流砂, 浮遊砂, 渦の形成など特徴的な現象) を取り込んだ漂砂量の研究がある。これらの研究には、大きく3つの流れがあり、1) 掃流力 (シールス数) に基づく方法、2) 浮遊砂の質量輸送による方法、3) 砂粒子の挙動に着目する方法がある。

著者ら (1987) は従来より 3) の方による研究を進めてきたが、多くの仮定を含んでおり検討が必要な段階である。1) の方法では浮遊砂が卓越し砂漣が形成されている移動床において、せん断力つまり摩擦係数を解析的に評価することはきわめて難しく、Net の漂砂量を直接に算出できなく、また砂粒子と水粒子の位相差も考慮されない。一方、2) の方法による算定は浮遊砂濃度分布と流速分布がわかれば、理論的に Net の漂砂量を求めることができるが、Nielsen ら (1978) の研究があるだけできわめて少ないその原因としては、砂漣上の流速分布、浮遊砂濃度分布の理論的、数値的な検討が少ないためである。従来より浮遊砂濃度の算定には、場所的、時間的に変化しない渦動粘性係数や乱流拡散係数を用いていることが多いが、堀川・渡辺 (1968) は詳細な流速の測定結果より渦動粘性係数が時間的に変動することを示している。また砂漣のような波状底面上においては、場所的な変動の存在が予想される。さらに浮遊砂の存在が流れに及ぼす影響についても充分に考慮しなければならない。近年こうした流れについて、乱流モデルの適用例が見られる。著者ら (1989) は波動場を対象とした砂漣上の乱流構造について、乱流モデルを適用して解析を行い流速の場所による位相差を示している。

本研究では 2) の方法に関連して浮遊砂輸送方程式を組み込んだ $k-\varepsilon$ モデルを用いて、波動場の砂漣上の流速分布、浮遊砂濃度分布を求め、砂粒子の移動機構の再

現を試みた。

2. 乱流モデルによる解析

乱流モデルにはさまざまなタイプがあるが、定常流に対して適用性が確かめられている $k-\varepsilon$ モデルを用いた、非定常流への $k-\varepsilon$ モデルの適用例として、佐藤ら (1985) は渦度方程式を写像変換し砂漣上の振動流境界層流れの解析に用いて流速場や応力場の特性を調べ、さらに浮遊砂雲の移動・沈降過程のシミュレーションを試みている。田中 (1985) は渦動粘性係数の時間的変動を考慮するために乱流モデルを採用し、平坦床における波・流れ共存時の乱流境界層の解析を行った。イスミル・首藤 (1986) は低レイノルズ数効果と表面粗度効果とを取り入れ平坦床上の振動流の解析、Justesen (1988) の平坦床上の振動流の解析、著者ら (1989) の運動方程式を用いた波動場における砂漣上の解析がある。浮遊砂輸送方程式を組み込んで解析した例として、浅野・岩垣 (1986) は掃流力の大きな振動流場の平坦床において浮遊砂濃度の増加とともにカルマン定数が減少することを示している。また Hagatun ら (1986) は平坦床上の浮遊砂の影響考慮した振動流場の解析を行い、浮遊砂の影響を考慮した振動流場の解析を行い、浮遊流の方が清水流に比べてせん断力や乱れエネルギーが小さくなることを示し、さらに浮遊砂濃度の時間変動を実験値と比較している。

本論文では従来の振動流を対象とした解析とは異なり実際の波動場を対象にし、沖浜帯において存在している砂漣を考慮している。また時空間的に変動する渦動粘性係数を乱流モデルで算出し砂漣上の浮遊砂輸送機構、浮遊砂濃度を算定する。このように本論文では実際の現象を忠実に考慮して解析を行う。

2.1 基礎方程式

基礎方程式は連続式、運動方程式、浮遊砂拡散方程式 乱れエネルギー k と粘性逸散 ε の保存則である。デカルト座標系 x_i ($i=1, 2$) において、 x_i 方向の流れの速度成分を u_i 、圧力を P 、流体の密度を ρ 、浮遊砂濃度を C 、粘性係数を μ 、動粘性係数を $\nu (= \mu/\rho)$ 、拡散係数を Γ 、砂粒子の沈降速度を w_0 、外力を $F_1 (= g)$ とする。基礎方程式を沢本の写像関数 (1978) を用いて統一的に表すと

* 正会員 工 修 神戸市立工業高等専門学校助教授土木工学科

** 正会員 工 修 パシフィックコンサルタンツ(株)

*** 正会員 Ph. D 長岡技術科学大学教授 建設工学課程

**** 正会員 工 博 長岡技術科学大学助教授 建設工学課程

***** 正会員 工 博 長岡技術科学大学助手 建設工学課程

次式のようになる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (u_i \Phi - \Gamma \nabla \Phi) = S_0(\Phi)$$

ここに、 Φ : 変数、 Γ : 拡散係数、 $S_0(\Phi)$: 生成項である。具体的な内容は次のようになる。

・連続式

$$\Phi=1 \quad \Gamma=0 \quad S_0(\phi)=0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

・運動量方程式

ξ 方向

$$\begin{aligned} \Phi &= u, \quad \Gamma = \nu + \nu_t \\ S_0(\phi) &= -\frac{1}{h} \frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{2}{h^2} \frac{\partial \nu_t}{\partial \xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{h^2} \frac{\partial \nu_t}{\partial \eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ &\quad + \frac{v}{h^2} \left(2 \frac{\partial \nu_t}{\partial \xi} \frac{\partial h}{\partial \eta} - \frac{\partial \nu_t}{\partial \eta} \frac{\partial h}{\partial \xi} \right) \\ &\quad + \frac{1}{h^2} \frac{\partial \nu_t}{\partial \eta} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} - \frac{1}{h^2} \frac{\partial h}{\partial \eta} \right) \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

η 方向

$$\begin{aligned} \Phi &= v, \quad \Gamma = \nu + \nu_t \\ S_0(\phi) &= -\frac{1}{h} \frac{\partial P}{\partial \eta} - \rho g(1+RC) + \frac{1}{h^2} \frac{\partial \nu_t}{\partial \xi} \frac{\partial v}{\partial \xi} \\ &\quad + \frac{2}{h^2} \frac{\partial \nu_t}{\partial \eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{u}{h^2} \left(2 \frac{\partial \nu_t}{\partial \eta} \frac{\partial h}{\partial \xi} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial \nu_t}{\partial \xi} \frac{\partial h}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{h^2} \frac{\partial \nu_t}{\partial \xi} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{v}{h} \frac{\partial h}{\partial \xi} \right) \\ &\quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

・拡散方程式

$$\phi=C, \quad \Gamma=\nu_t/\sigma_t, \quad S_0(\phi)=0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

・乱れエネルギー k 方程式

$$\begin{aligned} \phi &= k, \quad \Gamma = \nu + \nu_t / \sigma_k, \quad S_0(\phi) = S_0 + S_p \\ S_0 &= P_r + G - \varepsilon \\ P_r &= 2\nu_t \left[\left(\frac{1}{h} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{h^2} \frac{\partial h}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{1}{h} \frac{\partial v}{\partial \eta} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{u}{h} \frac{\partial h}{\partial \xi} \right)^2 \right] + \nu_t \left[\frac{1}{h} \frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{v}{h^2} \frac{\partial h}{\partial \xi} + \frac{1}{h} \frac{\partial v}{\partial \xi} \right. \\ &\quad \left. - \frac{u}{h^2} \frac{\partial h}{\partial \eta} \right]^2 \\ G &= R \cdot g \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{1}{h} \frac{\partial C}{\partial \eta}, \quad R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \\ \varepsilon &= C_\mu \frac{k^2}{\nu_t} = -S_p k, \quad S_p = -C_\mu \frac{h}{\nu_t} \quad \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

・乱れエネルギー ε 方程式

$$\begin{aligned} \phi &= \varepsilon, \quad \Gamma = \nu + \nu_t / \sigma_\varepsilon, \quad S_0(\phi) = S_0 + S_p \\ S_p &= -C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k}, \quad S_0 = \frac{\varepsilon}{k} C_{1\varepsilon} (P_r + G) (1 + C_{3\varepsilon} R_f) \\ R_f &= -\frac{G}{P_r + G} \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここに、 h : スケールファクター、 ν_t : 渦動粘性係数、 ξ, η : 直交曲線座標軸、 R : 水中比重である。式中に含まれる定数は、Rodi (1980) による値を用いるものとし次式のように与えた。拡散方程式中に含まれプラントル数

は $\sigma_t=1.0$ とした。

$$\left. \begin{array}{lll} C_\mu=0.09 & \sigma_k=1.00 & \sigma_\varepsilon=1.3 \\ C_{1\varepsilon}=1.44 & C_{2\varepsilon}=1.92 & C_{3\varepsilon}=1.00 \end{array} \right\} \dots\dots(7)$$

2.2 境界条件

上方境界では、流速はストークスの第2近似解を与え k, ε , 浮遊砂濃度は勾配が0とした。

底面上で流速は no slip の条件を課し、 k は0とした。 ε に関しては、佐藤ら(1985)は有限な値を用いてはいるが、ここでは0とした。浮遊砂濃度に関して、福岡、福田(1988)は非平衡の浮遊砂流においては、勾配型の条件式が濃度型の条件式に比べてより妥当な結果を与えることを示し、砂の連行係数を用いて境界条件を与えている。本研究においても底面を通じてフラックスを0とし、底面付近の濃度を掃流砂量公式を用いて求め、濃度勾配を境界条件とする方法を用いた。岸側と沖側の側方の境界において、流速は上方境界と同様にストークスの第2近似解を与え、これ以外の値には周期条件を課した。

2.3 計算方法

波動場には場所的に位相差が存在するので波一波長にわたって計算を行うのがよいが、計算時間が膨大となるので砂漣3波長を解き、中央の砂漣上の結果を用いることにした。水平方向に21分割、鉛直方向に17分割し中央砂漣と底面近傍は特に細かく分割した。座標変換された方程式を Patanker (1984) の方法により離散化しコントロールボリューム法により計算を行った。

初期値としては ξ 方向の流速には最大流速を与え、 η 方向の流速には0を与えた。流速を計算し、圧力補正により流速補正を行い浮遊砂濃度の拡散方程式、 k, ε の式を順に解き周期解が得られるまで6-8周期計算を繰り返した。計算誤差は各格子点における連続式の総和が1/1000、前周期の各流速の差が0.1cm/sec以下になるようにした。コントロールボリューム法は空間的、時間的メッシュに関係なく物理的に妥当な値が得られるので、計算時間の節約のため刻み幅を1/10周期とした。

3. 数値計算結果

計算条件は著者ら(1989)の造波水路での実験との比較

表-1 計算条件

ケース No.	波高 cm	水深 cm	周期 sec	波長 cm	砂粒子直径 cm	砂漣波高 cm	砂漣波長 cm
1	25.0	40	1.6	283	0.023	1.2	8.6
2	20.0	50	1.7	332	0.023	1.5	10.0
3	19.0	45	1.3	224	0.030	1.0	7.1
4	13.0	30	2.0	325	0.023	1.9	11.6
5	5.2	15	0.822	85	0.015	0.49	2.9

* ケース (5) Skafel(1984)

のために同じ条件とし表-1に示す。本論文では波の進行方向は図中左から右方向とし、位相の原点を沖向きから岸向きの変化時とした。

図-1は、各位相に於ける水平流速の鉛直分布である。測定点と計算点が異なるために計算点を補間した。実験値との一致もきわめて良く、渦の形成など特徴的な現象をよく再現している。

図-2に重力加速度と水の密度で無次元化した砂漣上の等圧分布を示す。Patankerの方法で流速を計算するには、正確な圧力場が必要である。正確な圧力場を運動方程式に代入することにより、結果的に連続式を満たす流速場が作られるので、きわめて重要な値である。底面より上方での圧力は直線的に変化していることがわかる。一方底面近傍では圧力の場所的な変動が著しい。圧力勾配は沖側斜面では岸向きの最大流速の位相において負の勾配から正の勾配に変化するが、岸側斜面の圧力勾配は流速が反転するまで変化しないことがわかる。

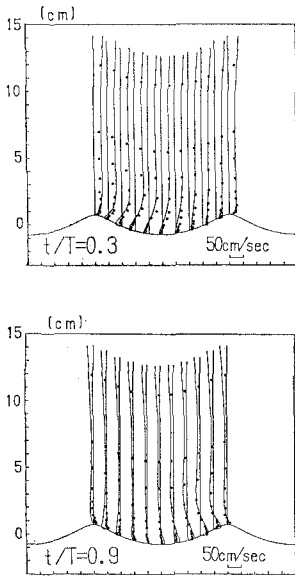


図-1 水平流速の比較 (ケース 2)

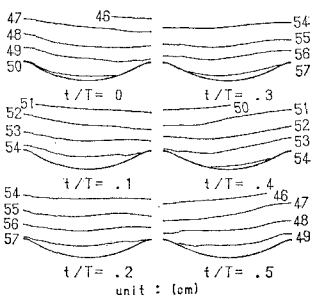


図-2 圧力分布 (ケース 2)

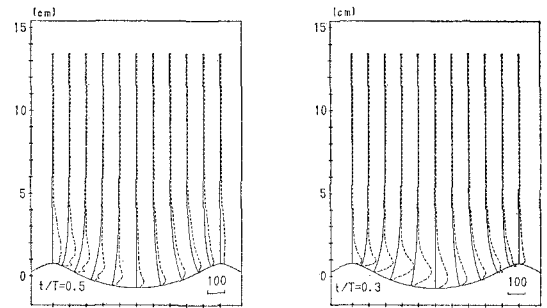


図-3 渦動粘性係数の分布 (ケース 2)

図-3は、渦動粘性係数を水の動粘性係数 ($\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$) で無次元化した値の時空間分布である。流れが剝離し渦の形成により渦動粘性係数が増大し、砂漣の斜面において最も大きくなり、渦の移動に伴い渦動粘性係数が砂漣に沿って増大していくことがよくわかる。

従来より砂漣上の砂粒子の移動機構について砂村ら (1978)、著者ら (1984) の実験的な検討があるが、計算により浮遊砂の挙動を再現した例は殆どない。ケース 4 の浮遊砂の等濃度の時空間分布を図-4に示す。岸向きの流れの位相 (1)-(5) においては砂漣 (R_1) 頂、沖向きの流れの位相 (6)-(10) においては砂漣 (R_2) 頂付近の砂粒子の移動に着目すると、流れが沖向きから岸向きに変わると砂漣 (R_1) 上では浮遊砂 (S_{n1}) が沖から運ばれ、砂漣 (R_2) 上では位相差があるために浮遊砂 (S_{n1}) が遅れて運ばれてくる (図-4 (1)). 波の峰が通過する位相付近において砂漣 (R_1) の岸側で渦が形成され、岸向きの掃流砂 (B_{n1})、浮遊砂 (S_{n1}) が取り込まれ渦 (V_{n1}) が発達していく様子がわかる (図-4 (2, 3)). 流れが岸向きから沖向きに反転するところに浮遊砂 (S_{f1}) が砂漣 (R_1) 頂から斜め上方に放出され沖向きに移動していく。この時砂漣岸側斜面においては掃流砂 (B_{f1}, B_{f2}) の移動がみられる (図-4 (4, 5)). 沖向きの流速の増加に伴い砂漣 (R_2) 上を沖向きに浮遊砂 (S_{f2}) が移動していくことがわかる。さらに位相が進むと砂漣 (R_2) の沖側斜面においては渦 (V_{f2}) の形成が見られるがきわめて小さいために沖向きの掃流砂 (B_{f1}) が浮遊砂 (S_{n2}) となる量はきわめて少ない。そのために波の峰の通過時に形成される浮遊砂雲 (S_{f1}) に比べてきわめて小さいことがわかる (図-4 (6, 7, 8)). 沖向きから岸向きへの反転近くになると砂漣 (R_2) では浮遊砂 (S_{n2}) が岸向きに移動し始めるが、その浮遊砂は、半周期前に砂漣 (R_2) の岸側で形成された浮遊砂 (S_{f2}) の一部によって形成されていることがわかる (図-4 (9, 10)). これらの現象は従来の実験結果とよく類似している。

図-5は、一周期平均された浮遊砂濃度の鉛直分布の計算結果である。砂漣頂から砂漣波高と同程度の高さ以

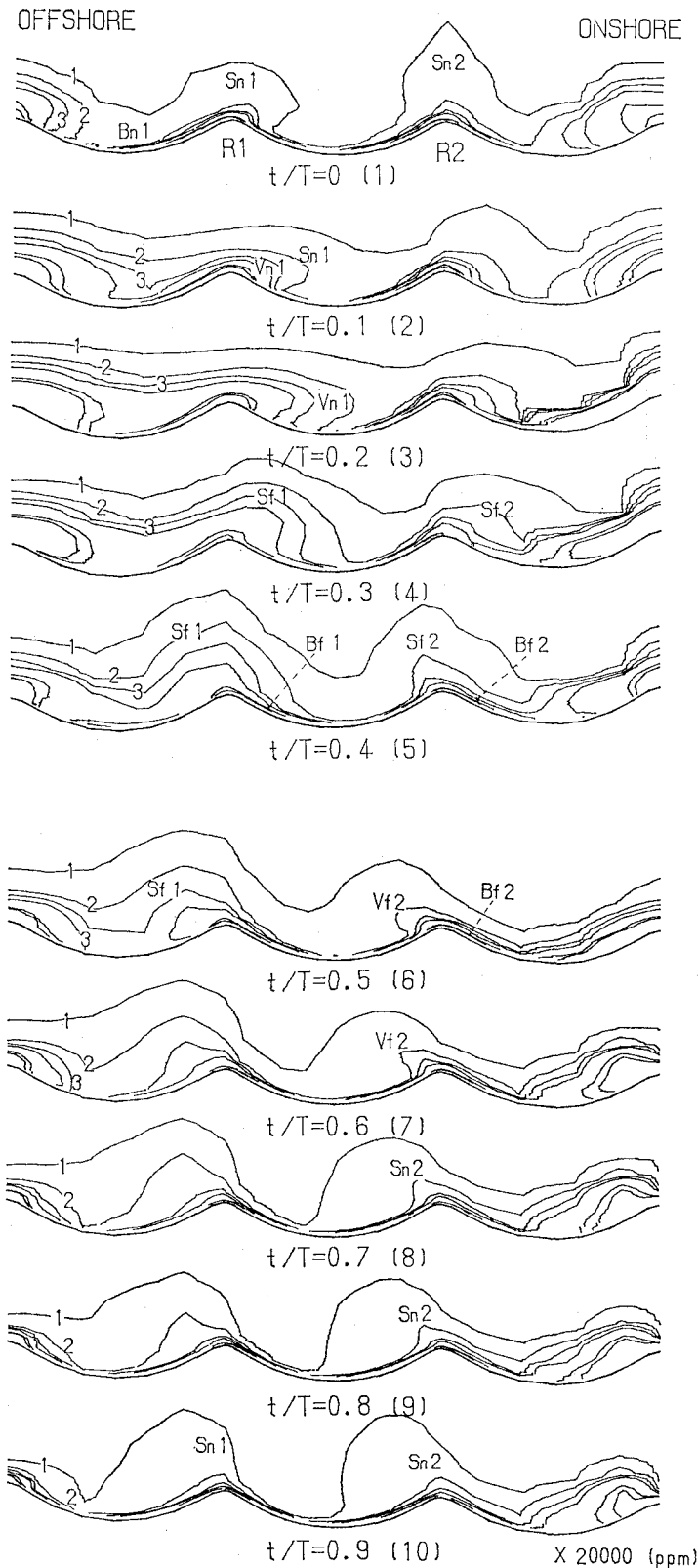


図-4 浮遊砂濃度の時空間分布

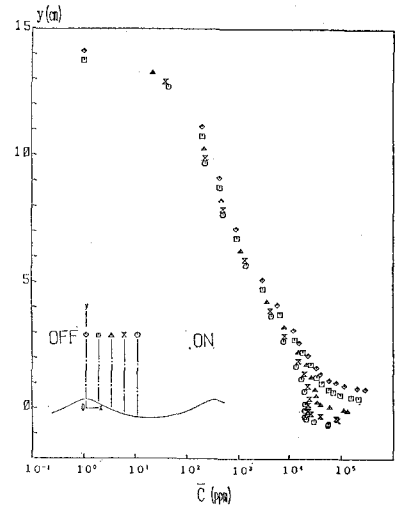


図-5 浮遊砂濃度の鉛直分布(ケース2)

上では、一周期平均された浮遊砂濃度がほぼ等しくなっている。これらの領域では、拡散係数が等しく拡散係数を適切に定めれば解析的に浮遊砂濃度を算出することができるものと思われる。一方その領域より下方では濃度勾配の変化が大きく、場所的な変動が著しいことがわかる。これらのことは、沢本・山口(1978)の砂漣上の流速測定結果からも指摘されているように、砂漣上の流れには渦層と拡散層が存在していることを計算により示したものと見える。また砂漣頂においては渦による浮遊砂の移動に伴い高濃度の領域となっている。

図-6は、涌井(1986)、Skafelら(1984)の実験結果との比較である。前者は濁度計、後者はアイオワ型の測定器を用いている。測定装置の制約のため底面近傍は、測定できないため計算値との比較はできないが、測定範囲内においては両者の一致はきわめてよいことがわかる。

4. 主要な結論

本研究では乱流モデルを用いることにより波動場における砂漣上の浮遊砂を考慮して数値計算する手法を示し次のような知見を得た。

1) 波動場と振動流との相違である流速の場所的な位相差を表す計算方法を示した。

2) 波動場に於ける砂漣上の流速分布

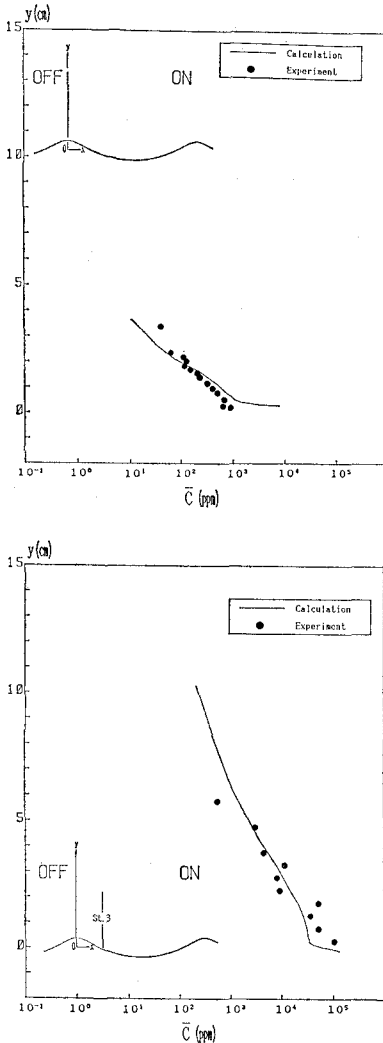


図-6 実験値との比較 (上図: 涌井, 下図: Skafel)

を時空間的に求めることができ実験値との一致もきわめて良い事がわかった。

3) 砂漣上の浮遊砂の移動機構を浮遊砂濃度の時空間分布より再現することができ、従来の実験的観測結果に類似していることがわかった。

4) 浮遊砂濃度を砂漣上の各場所において計算することができ、砂漣頂から砂漣波高と同程度の高さ以上では、一周期平均の濃度が等しくなっていることがわかった。

5) 浮遊砂の一周期平均された鉛直濃度分布を砂漣各測線で比較すると計算値と実験値がきわめて良く一致した。

謝 辞: 本研究を行うにあたり助力を載いた、長岡

技術科学大学建設系吉原健技官に感謝の意を表する。また本研究が文部省科学研究費 (奨励研究 (A)) による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 浅野敏之・岩垣雄一 (1987): 浮遊砂を含む振動流れに対する乱流モデルの適用, 第 42 回年次学術講演会集, pp. 652-653.
- イスマイル・アイデン・首藤伸夫 (1986): 振動流境界層への $k-\epsilon$ モデルの適用, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 41-45.
- 佐藤慎司・上原啓史・渡辺 晃 (1985): 乱流モデルによる砂漣上の振動境界層の数値シミュレーション, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 26-30.
- 沢本正樹 (1978): 波形底面上の半無限領域の写像関数, 土木学会論文報告集, 第 216 号, pp. 29-35.
- 沢本正樹・山口清一 (1978): 進行波による砂漣上の境界層内の流速および乱れ分布, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 46-50.
- 砂村継夫・板東浩造・堀川清司 (1978): 非対称砂漣上での砂移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 250-254.
- 田中 仁 (1985): 波, 流れ共存場における乱れと壁面摩擦に関する研究, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 31-35.
- 辻本剛三・市山 誠・早川典生・福嶋祐介・中村由行 (1989): 波動場における砂漣上の乱流構造に関する研究, 第 32 回水理講演会論文集, pp. 613-618.
- 早川典生・辻本剛三・涌井正樹・福嶋祐介・中村由行 (1987): 砂漣を形成する海底上の岸沖漂砂量の理論的検討, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 237-241.
- 早川典生・辻本剛三・森下憲治 (1984): 砂漣上の渦運動による浮遊砂輸送機構, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 291-295.
- 福嶋祐介・福田雅晴 (1988): 乱流モデルによる非平衡浮遊砂流の解析, 第 32 回水理講演会論文集, pp. 413-418.
- 堀川清司・渡辺 晃 (1968): 表面波による振動流境界層に関する実験的研究, 第 15 回海岸工学講演会論文集, pp. 17-23.
- 水谷幸夫・香月正司・Patankar, S. V. 原著 (1985): コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, 198 p.
- 涌井正樹 (1986): 海底砂漣上の岸沖漂砂量公式に関する研究, 長岡技術科学大学修士論文, 133 p.
- Hagatun, K. and K. J. Eidsvik (1986): Oscillating turbulent boundary layer with suspended sediments, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. C11, pp. 13045-13055.
- Justesen, P. (1988): Prediction of turbulent oscillatory flow over rough beds, Coastal Engineering, Vol. 12, pp. 257-284.
- Madsen, O. S. and W. D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1093-1112.
- Nielsen, P., I. A. Svendsen and C. Staub (1978): Onshore-offshore sediment movement on a beach, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1475-1492.
- Rodi, W. (1980): Turbulence Models and their Application in Hydraulics, State of the Arts paper, IAHR.
- Skafel, M. G. and B. G. Krishappan (1984): Suspended Sediment Distribution in Wave Field, ASCE, Vol. 110, WW. 2, pp. 215-230.