

人工海藻周辺の流れと漂砂

伊 福 誠*・岩田 充浩**・米澤 泰雄***・坂田 則彦****

1. ま え が き

海岸工学の分野においては、これまで突堤や離岸堤等の剛な構造物が構築され砂浜海岸の侵食防止に対してかなりの成果を挙げってきた。しかしながら、景観をも含んだ水環境の保全や整備が唱えられ始め、剛な構造物に変わる波浪・漂砂制御システムの出現の可能性が問われていた。こうした流れに呼応し波浪・漂砂制御は言うまでもなく生態系に与える影響をも極力抑えるシステムとして、人工海藻を用いた柔な構造物が提案されている。

人工海藻を用いた波浪・漂砂制御工法の試みは、1960年代に始まった。Priceら(1968)は、現地観測によって人工海藻の波浪・漂砂制御効果を調べようとした。報告によると、漂砂制御に対する効果については、現地観測中に人工海藻あるいはその基礎が波浪によって破壊され、長期間に及ぶ観測が不可能だったため確かめられていない。Roger(1986)は人工海藻を敷設した場合の水粒子速度場を動粘性の異なる2層流でモデル化し、さらには水槽実験をも実施して、実験結果がモデル解析によって得られる結果と一致することを報告している。しかしながら、海藻が存在する水理学的な考察はなされていない。

近年、わが国においても人工海藻を用いた波浪・漂砂制御に関する研究が盛んに行われるようになった。浅野ら(1988)は葉状の軟質型の人工海藻を用いて波浪制御効果について調べている。しかし、現地海岸に軟質型の人工海藻を敷設した場合、生物の付着によって容易に海底に寝てしまうといった問題がある。こうしたことから、小田ら(1991)は化学繊維を用いた硬質型の人工海藻を提案し、室内実験によって波浪・漂砂制御機構の解明に努め、実用化に向けてのいくつかの知見を得ている。また、間瀬ら(1989)は傾斜海浜上に人工海藻を敷設した場合の波浪変形について検討し、実用化に向けての基礎的資料を得ている。しかしながら、その実用化に当たっては、人工海藻の素材の選定、素材の固定方法や敷設方

法、人工海藻敷設に伴う波浪や流況の変化の予測等検討されるべき問題も数多いことを指摘している。

本研究では、まず、水平床に人工海藻を敷設した場合の流れ、底面からの砂粒子の pick-up や地形変化に関する鉛直2次元の数値モデルを構築する。次に、小田ら(1991)が波浪・漂砂制御機構の解明を目的とした室内実験の結果に基づいた解析を行い、人工海藻周辺の流れ場や流体中に浮遊する底質の濃度について調べ、実用化に向けての基礎的資料を得ようとしたものである。

2. 基礎方程式

人工海藻に作用する抗力および慣性力を考慮し、SGSのスマゴリンスキーモデルに基づくLESの基礎方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_D + F_I \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 p は圧力、 F_D および F_I は、それぞれ抗力および慣性力であり、次式で評価する。

$$F_D = -\frac{1}{2} C_D A u \sqrt{u^2 + w^2}, \quad F_I = -C_M A d_s \frac{\partial u}{\partial t} \quad \dots (4)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 A は人工海藻単位幅当たりの射影面積密度 ($A = (1 - \lambda_s) / l_s$; l_s : 人工海藻の設置間隔、 λ_s : 人工海藻の空隙率)、 C_M は仮想質量係数、 d_s は人工海藻を構成する繊維の直径である。

また、 τ_{xx} 、 τ_{zz} および τ_{zx} はレイノルズ応力であり、テンソル表示すると次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_{ij}}{\rho} &= (\nu + \nu_i) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} G \\ \nu_i &= (C_s \Delta)^2 \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]^{1/2} \\ G &= \nu_i^2 / (C_s \Delta)^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

* 正 会 員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科
 ** 学生会員 愛媛大学大学院工学研究科
 *** 正 会 員 工修 国際航業(株)
 **** 正 会 員 工博 ヒロセ技研(株)技術開発部長

ここに、 ν は動粘性係数、 ν_t は渦動粘性係数、 G は微細渦の乱流エネルギー、 C_s および C' はモデル定数、 $\Delta = (\Delta x \Delta z)^{1/2}$ 、 Δx および Δz は、それぞれ x および z 方向の格子間隔である。

式 (1)、(2) および (3) から得られる圧力に関するポアソン方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \rho \left[-2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \right] \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\partial A_x / \partial x$ および $\partial A_z / \partial z$ は、それぞれ式 (2) の右辺の第 2 項以下および式 (3) の第 3 項以下の空間微分である。

空隙率 λ_s を有する人工海藻を敷設した場合の拡散方程式は次式で与えられる。

$$\lambda_s \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s K_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s K_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 w_0 は底質の沈降速度、 K_{xx} 、 K_{zz} は乱流拡散係数であり、 x および z 方向の速度成分に依存すると仮定すると次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K_{xx} &= \gamma (a_L u^2 + a_T w^2) / q \\ K_{zz} &= \gamma (a_T u^2 + a_L w^2) / q \\ q &= (u^2 + w^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 γ は正の係数、 a_T 、 a_L は拡散係数に寄与する特性長であり、 $a_L = c_1 a_T$ (c_1 : 正の係数) である。

局所的底面高さの時間変化の計算には、底勾配の影響を考慮した渡辺ら (1984) の式を援用する。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \varepsilon |q_x| \frac{\partial z_B}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 z_B は基準面からの局所的底面高さ、 ε は正の係数、 q_x は空隙を含む有効堆積で表示した x 方向の漂砂量であり、任意の時刻の濃度と x 方向の速度成分の積を底面から任意の高さまで積分して算出する。

3. 解析範囲および人工海藻の諸元

解析範囲は 3 m とし中央に長さ 1 m の人工海藻設置帯を設ける。人工海藻の長さ、敷設間隔および空隙率は、それぞれ 6 cm、10 cm および 0.5 とする。抗力係数および仮想質量係数は、それぞれ 1.0 および 1.0 とする。また、式 (5) 中の係数 C_s および C' は、それぞれ 0.01 および 0.094、式 (8) 中の a_T は、 $a_T = (\Delta x \Delta z)^{1/2}$ で与える。さらに、砂の粒径は 0.1 mm、底面の空隙率は 0.5、式 (9) 中の係数 ε は 10 とし、漂砂量を算出する際の積分の上界は人工海藻の長さとする。なお、 Δx は 5 mm、鉛直方

向は等比級数的に 50 に分割する。圧力に関するポアソン方程式の解法には、SOR 法よりも高効率な反復法である GEI 法を用いる。

4. 境界条件および初期条件

小田ら (1991) は、2 次元造波水路内に 4 m の人工海藻設置帯を設け、波高が 4.4、6.1 および 7.6 cm、周期が 1.26、1.58 および 1.90 s の微小振幅波を対象とした実験を行い、波高の減衰や人工海藻による堆砂機能について調べている。その実験では 4 m の人工海藻設置帯の両端における波高の減衰は 5% 程度である。そこで、実験における波高減衰は極めて小さいと考え、上方境界における x 方向の速度成分は微小振幅波理論によって記述し得るとした。また、測定した流速の鉛直分布と微小振幅波理論の流速分布とは、底面から 10 cm 程度以上の高さにおいて両者は良く一致するとのことから、上方境界の底面からの高さは人工海藻の長さの 2.5 倍とする。側方境界における底面近傍の水平方向流速は、鉛直 1 次元の乱流境界層方程式から得られる結果を、また、境界層外縁から上方境界までは微小振幅波理論から得られる値を用いる。初期条件は波のない状態とする。

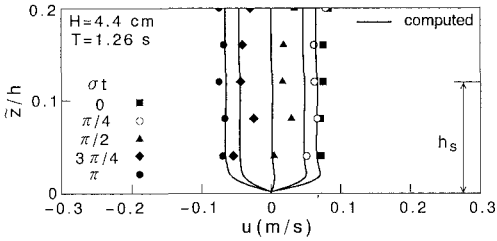
基準点濃度は、計算して得た流速からスプライン補間法を用いて砂粒子頂部の流速を求め、伊福 (1986) の方法を鉛直 2 次元に拡張して算出した。また、上方境界においては濃度は鉛直方向に線形に変化するとした。さらに、側方境界においては、鉛直 1 次元の拡散方程式によって得た濃度を与えた。

5. 解析結果

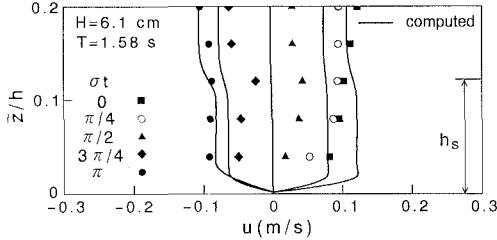
5.1 水平方向流速の鉛直分布

図-1 は上方境界における x 方向の速度成分を微小振幅波理論で与えた場合の流速分布を示したものであり、図中の実線は計算値、■、○、▲、◆ および ● は実験値であり、それぞれ位相が 0、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$ および π の場合を示す。なお、流速は岸向きを正、沖向きを負とする。計算値および実験値の位相は、波の峰が通過する時の位相を 0 とする。 x 方向の測定点は人工海藻を敷設した領域の中央位置における人工海藻の岸側 2 cm の所であり、 z 方向の測定点は底面より 2、4、6、8 および 10 cm の高さである。なお、実験および計算とも底面に 1 cm の高さの基部が存在する場合を対象とした。

(a) は波高が 4.4 cm、周期が 1.26 s の場合である。 $\pi/4$ および $\pi/2$ の位相では、 $z=2$ cm の高さを除けば、どの高さにおいても実験値と計算値の差は大きいようである。前述した位相を除く位相においては、実験値と計算値の対応は良いようである。しかしながら、 $3\pi/4$ の位相において底面から 4 cm の高さにおける流速振幅が小さくな

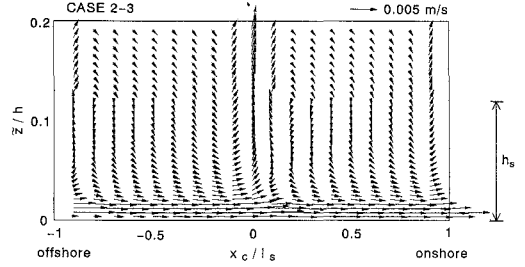


(a) 波高 4.4 cm, 周期 1.26 s

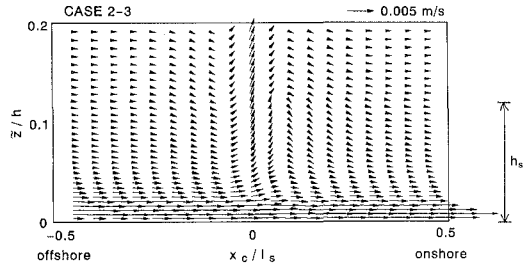


(b) 波高 6.1 cm, 周期 1.58 s

図 1 人工海藻周辺の流速分布



(a) $l_s = 10$ cm



(b) $l_s = 20$ cm

図-2 平均流速ベクトル

るといった結果は再現できていない。

(b)は波高が6.1 cm, 周期が1.58 sの場合である。0の位相では, 人工海藻の上端より上方では実験値と計算値はほぼ一致しているが, 人工海藻の上端より下方では両者の一致の度合いは悪い。(a)と同様, $\pi/4$ および $\pi/2$ の位相では, どの高さにおいても実験値と計算値の差は大きいようである。また, $3\pi/4$ の位相において底面から4 cmの高さにおける流速振幅が小さくなるといった結果は再現できていないものの, その他の高さにおいては, 実験値と計算値はほぼ一致している。さらに, π の位相における人工海藻上端付近の流速振幅の減少はうまく再現できている。(a)と(b)から, 上方境界における流速振幅が増大するにつれて実験値と計算値の一致の度合いが悪くなるという理由としては, 人工海藻の揺動を考慮していないということが考えられる。

5.2 平均流速ベクトル

図-2に人工海藻周辺における平均流速の空間分布を示す。

(a)および(b)は, 波高6.6 cm, 周期1.58 sの場合であり, 人工海藻の敷設間隔が10 cmと20 cmである。なお, 図中の x_c/l_s が0の位置は解析領域の中央である。(a)をみると, z/h が0から0.03付近の高さまでは岸向きの流れが卓越する。人工海藻敷設位置では鉛直上向きの流れが生じている。また, 人工海藻の直背後では人工海藻の上端より下方と上方では水平方向の流れの向きが逆である。なお, 人工海藻の岸側では循環流らしきものが見て取れる。

(b)をみると, (a)と同様, z/h が0から0.03付近の高さまでは岸向きの流れが卓越する。人工海藻敷設位置では鉛直上向きの流れが生じているが, (a)と比較するとその大きさは1/2程度である。また, 人工海藻の直背後においては, (a)に見られた水平方向の流れの向きの逆転は見られず, 流れはすべて岸向きである。いずれにしても, 水平方向の流れの向きはすべて岸向きであり, とくに, 底面近傍においては流速も大きいことから, 漂砂制御に対しては人工海藻の敷設は有効なのではないかと考える。なお, 波高と周期が異なる他のケースにおいても底面近傍では, (a)および(b)と似た傾向を示すが流れは小さい。このことから, 波の波長に対する人工海藻の敷設間隔が底面近傍における流れの状況と密接に関連しているようである。

5.3 人工海藻周辺の等濃度線

図-3(a), (b)および(c)は, 人工海藻周辺の等濃度線を示したものである。なお, 図中の横軸の $x_c/l_s=0$ の点は人工海藻敷設領域の中央位置である。また, 位相の0は $x_c/l_s=0$ の点を波の峰が通過する時間であり, 上方境界における最大流速振幅(図中の破線)に対する相対的な流速振幅を実線で示している。

減速時の(a)をみると, $x_c/l_s=0.4\sim 1$ までは濃度が低く, $x_c/l_s=-1\sim -0.3$ では底面近傍に比較的高濃度の等値線が広がる。これは流速振幅の増大にともなって, 底面から砂のpick-up量が增大するためである。また, $z/h=0.02$ 付近の $x_c/l_s=-0.5\sim -1$ の範囲に 10^{-1} の等

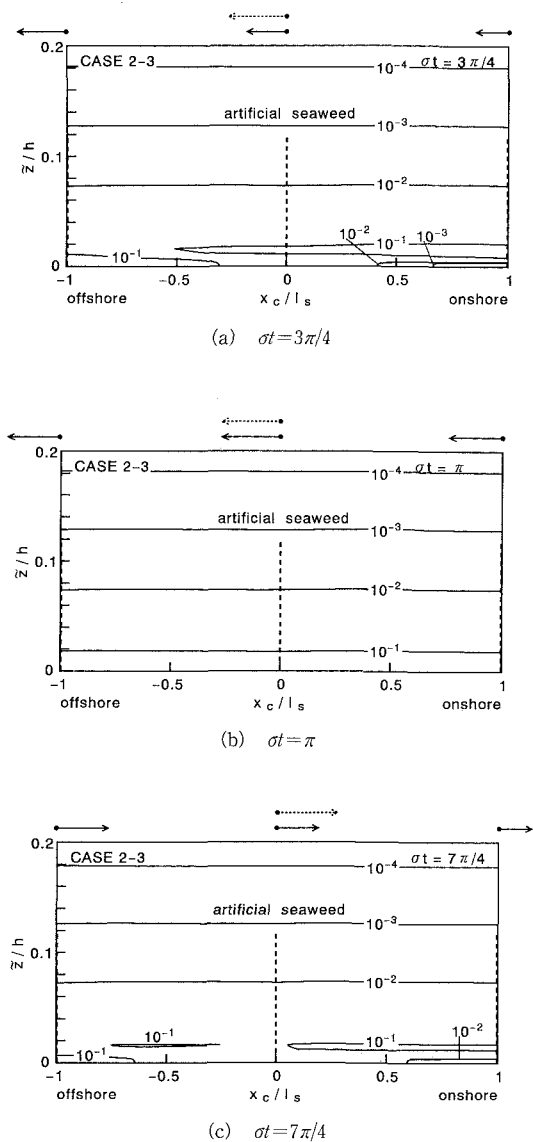


図-3 人工海藻周辺の濃度分布

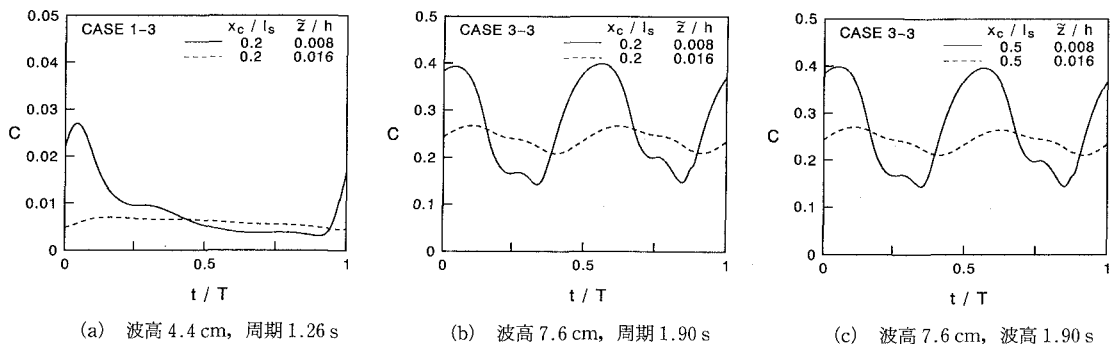
濃度線が舌状に伸び、鉛直方向の濃度勾配は負となっている。上方境界における沖向き流速が最大である (b) では、底面からの砂の pick-up 量の増大に伴って、底面近傍には比較的高濃度の領域が $x_c/l_s = -1 \sim 1$ の範囲に存在する。(a) より位相が $\pi/2$ rad 遅れる (c) は、上方境界における流速振幅は (a) と同一で向きが逆であるが、 $x_c/l_s = -1$ 付近の 10^{-1} の等濃度線の面積は狭い。また、 $\bar{z}/h = 0.02$ 付近の $x_c/l_s = 0 \sim 1$ の範囲に 10^{-1} の等濃度線が舌状に伸びているが、(a) と比較するとその面積も狭い。こうしたことは、底面近傍における流速の非対称性によって移流や拡散の状態が異なるためであると考えられる。

5.4 濃度の経時変化

図-4 に固定点における濃度の経時変化を示す。(a) は波高 4.4 cm, 周期 1.26 s の場合であり、人工海藻敷設位置の岸側 2 cm の位置におけるもの、(b) および (c) は波高 7.6 cm, 周期 1.90 s の場合であり、人工海藻敷設位置の岸側 2 cm および 5 cm の位置におけるものである。なお、図中の実線および破線は、それぞれ底面から 4 および 8 mm の高さにおけるものである。また、人工海藻敷設領域の中央位置 $x_c/l_s = 0$ を波の峰が通過する時の位相を 0 とする。

(a) をみると、 $\bar{z}/h = 0.008$ では波の峰が通過する位相より、 $3\pi/50$ rad 程度遅れて濃度が最大となる。掃流層内の濃度は x 方向の速度成分が最大となる位相でピークを示す訳であるが、前述した位相のズレは移流・拡散によるものである。また、第 1 ピークに比較して $1/3$ 程度の濃度を有する第 2 ピークは、第 1 ピークより $\pi/2$ rad 程度の位相が遅れて生ずる。なお、沖向きの流速が最大となる $t/T = 0.5$ の位相付近での濃度は低い。 $\bar{z}/h = 0.008$ では、1 周期間の濃度変化は小さいが、 $x_c/l_s = 0$ において流速が最大となる位相より $\pi/4$ rad 程度遅れた位相 $t/T = 0.125$ で濃度は最大となる。

(b) をみると、 $\bar{z}/h = 0.008$ では、波の峰が通過する位相より $2\pi/25$ rad および $3\pi/5$ rad 程度遅れた位相で第 1

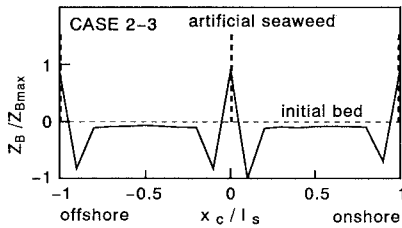


(a) 波高 4.4 cm, 周期 1.26 s

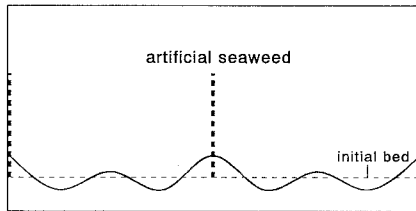
(b) 波高 7.6 cm, 周期 1.90 s

(c) 波高 7.6 cm, 波高 1.90 s

図-4 濃度の位相変化



(a) 計算結果 (波高 6.1 cm, 周期 1.58 s)



(b) 実験結果 (目視観測)

図-5 人工海藻近傍の地形変化

ピークおよび第2ピークが生ずるが、両ピークの濃度差は極めて僅かである。また、前述した2つのピークより $\pi/2$ rad 程度遅れて小さなピークが生じる。 $z/h=0.016$ では岸向きあるいは沖向きの流速が最大となる位相より $\pi/4$ rad 程度遅れて、2つのピークが生じる。(c)をみると、(b)と似た傾向を示すが、ピークが生ずる位相は、(b)より遅れる。(a)と(b)、(c)の波形勾配はほぼ同一であるが、底面近傍における流速振幅が異なるため底面からの pick-up 量および移流・拡散の大小が前述した結果をもたらす。

5.5 地形変化

図-5(a)は、式(9)によって計算した40周期目の地形変化を示したものである。また、(b)は小田らが実験で目視観測した地形変化を模式化したものである。 z 軸は地形の変化量を $x_c/l_s = -1 \sim 1$ 間の最大侵食量 z_{Bmax} で無次元化している。小田らの実験では地形変化を量的に把握していないので、ここでは実験結果と計算結果の定性的な比較に留める。

(a)をみると、人工海藻の敷設位置では砂が堆積しているが、その沖側および岸側においては局所洗掘が生じている。 $x_c/l_s = 0$ 付近では岸側の洗掘量が沖側のそれより大きい。また、局所洗掘が生じている2箇所間の侵食量は局所洗掘が生じている個所の侵食量と比較すると僅かである。

計算においては実験で得られた地形変化を人工海藻敷設位置付近においては定性的に再現し得たものの、人工海藻間の中央付近における砂の堆積については再現できなかった。このことは、計算格子のサイズを小さくして

流速の計算精度を上げれば解決するの否か現在の所、定かではない。

6. あとがき

人工海藻の敷設が流れや漂砂に及ぼす影響を調べた。得た結果を要約すると以下の通りである。

(1) 計算に用いた3ケースのうち、底面近傍において岸向きの流れが生じ、漂砂制御にとって最も有効であると考えられるケースは、人工海藻の設置間隔が10 cmで波高6.1 cm, 周期1.58 sの場合であった。

(2) 掃流層内の濃度は、 x 方向の速度成分が最大となる位相でピークとなるが、掃流層より上方においては移流・拡散によりピークが生ずる位相は遅れる。人工海藻の岸側における位置での濃度の経時変化で第1ピークおよび第2ピークより $\pi/2$ rad 程度遅れて生ずるコブ状のピークは、この位相においては底面からの砂の pick-up はほとんどないことから移流・拡散が原因であると思われる。

(3) 地形変化の数値計算では人工海藻の敷設位置で堆積し、その沖側および岸側において局所洗掘が生じた。これは実験結果を定性的に再現し得たものの、人工海藻間の中央付近における砂の堆積については再現できなかった。

今後、人工海藻による波の減衰や人工海藻の揺動をモデルに組み込み、数値モデルの精度向上に努力するつもりである。

謝辞: 本研究を行うにあたり、大阪市立大学工学部小田一紀教授には貴重な実験資料を提供して頂いた。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎 (1989): 海藻が繁茂する場の波高減衰の特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 138-142.
- 伊福 誠 (1986): 碎波帯における浮遊砂の濃度分布, 日本流体力学会誌, 第5巻, 第4号, pp. 326-339.
- 小田一紀・天野健次・小林憲一・坂田則彦 (1991): 硬質型人工海藻の漂砂制御効果に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第38巻 (1), pp. 331-335.
- 間瀬 肇・古田幸也・酒井哲郎・浅野敏之・柳生忠彦 (1989): 傾斜海浜に設置した人工海藻による波浪変形解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 90-94.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Price, W. A., K. W. Tomlinson and J. N. Hunt (1968): The effect of artificial seaweed in promoting the build-up of beaches, Proc. 11th Conf. Coastal Eng., pp. 570-578.
- Roger, S. (1986): Artificial seaweed for shoreline erosion control, UNC Sea Grant Pub., UNC-SG-WP-8-6-4, 18 p.