

人工海藻周辺の流れと漂砂

—LES と porous body model による解析—

伊 福 誠*・岩田充浩**・小田一紀***

1. ま え が き

近年、数種の材質を使った人工海藻による波浪や漂砂の制御に関する研究が室内実験で行われている(例えば、小田ら(1991))。こうした人工海藻に関する研究は、従来の剛な構造物による波浪や漂砂の制御から脱却し、柔な構造物にそれらの制御を期待するとともに、その敷設によって生ずる副次的な効果によって水環境の保全や整備を図ろうとするものではないかと考える。

浅野ら(1988)は、海藻が繁茂する場合の波高減衰特性を理論的・実験的に検討し、人工海藻による波高の減衰特性に関する基礎的資料を得ている。こうした人工海藻の実用化に向けては、海藻周辺の流れ場の構造を十分に把握し、それが漂砂制御に及ぼす影響を調べることが必要となる。ここ数年、鉛直2次元を対象とした波浪変形の計算手法が提案されている。著者ら(伊福ら, 1994)は、LES 方程式を用いて網地状の人工海藻周辺の流れを測定した小田らの実験結果に基づいた解析を行い、実験結果との比較からいくつかの新たな知見を得た。著者らが解析対象とした人工海藻は一種の透過性構造物である。こうした透過性構造物周辺の波の変形計算は、橈山ら(1990)が porous body model (以下, porous model と記す)を用いて行っている。

本研究では、著者らが用いた LES 方程式と porous model による解析を行い、海藻周辺の流れについて詳細に検討する。さらに、海藻周辺の漂砂現象についても調べ、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

2.1 流 れ

LES と porous model の2通りで人工海藻周辺の流れを解析するわけであるが、porous model については橈山らに詳しいのでここでは省略し、著者らが用いた LES について述べる。

人工海藻の揺動を考慮し、SGS のスマグ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。

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial G}{\partial x} + F_D \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial G}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u , w は水平、鉛直方向の水粒子速度、 ρ は流体の密度、 p は圧力、 F_D は抗力であり次式で評価する。

$$F_D = -\frac{1}{2} C_D b N u_r \sqrt{u_r^2 + w_r^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 b は単位長さ当たりの投影面積、 N は単位面積当たりの植生密度、 u_r , w_r は水粒子速度と人工海藻の揺動速度との相対速度 ($u_r = u - u_s$, $w_r = w - w_s$; u_s , w_s : 人工海藻の水平、鉛直方向の揺動速度) である。また、 τ_{xx} , τ_{xz} および τ_{zz} 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。

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

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、それぞれ水平および鉛直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。

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

* 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 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

ここに, $\partial A_z/\partial x$ 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。

2.2 濃 度

空隙率 γ 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。

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

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, 水平および鉛直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。

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

ここに, a 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。

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次元に拡張した次式で算出した。

$$C_0 = 2\rho_s g d V / 3 \int_0^{\delta_b} u dz \dots\dots\dots (9)$$

ここに, ρ_s は砂粒子の密度, d は砂粒子の粒径, V は砂粒子の移動速度, δ_b は掃流層の厚さ ($\delta_b = 2d$) である。砂粒子の移動速度は掃流層内の水粒子の断面平均流速で評価する。

P は砂粒子の pick-up rate であり次式で表せる。

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{B_* - \Psi - 1/\eta_0}^{\infty} \exp(-z^2/2) dz \dots\dots\dots (10)$$

ここに, $B_* = 4/(3C_L \eta_0)$ (C_L : 揚力係数, $1/\eta_0$: 経験定数), $\Psi = (\rho_s - \rho) g d / \rho V_0^2$ (V_0 : 砂粒子頂部における合成流速) である。

3. 解析方法

波による人工海藻の揺動は浅野ら(1991)のモデルを援用する。なお, 浅野らとの取り扱いの違いは, 浅野らは海藻に作用する抗力を評価する際, $u|u|$ に断面2乗平均流速を用いているが, 本研究では u に断面平均流速を用いている点である。なお, 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。

解析範囲は3mとし中央に長さ1mの人工海藻設置帯を設ける。また, 人工海藻の長さ h_s および敷設間隔 l_s は, それぞれ6cmおよび5cmと10cmである。人工海藻は直径が1mmの柱状体とし, 人工海藻の開口率 λ_s

は, 0.2, 0.5 および 0.8 の3通りとする。

抗力係数および仮想質量係数は, それぞれ1.0および2.0とする。また, 式(5)中の係数 C_s と C は, 0.1, 式(8)中の a_T は, $a_T = (\Delta x \Delta z)^{1/2}$ で与える。また, 式(10)中の揚力係数は0.2, 経験定数 $1/\eta_0$ は1.5とする。さらに, 砂の粒径は0.1mm, Δx は5mm, 鉛直方向は等比級数的に50に分割する。

4. 境界条件および初期条件

上方境界の底面からの高さは著者ら(1994)の解析と同様, 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。さらに, 上方境界および側方境界における圧力は微小振幅波理論から算出し, 底面においては $\partial p/\partial z = 0$ の境界条件を課す。

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。

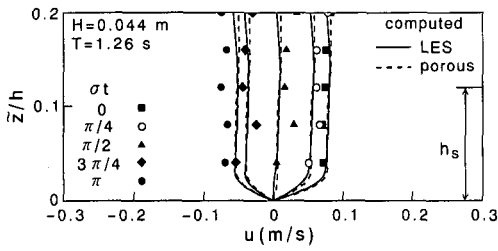
5. 解析結果

5.1 水平方向流速の鉛直分布

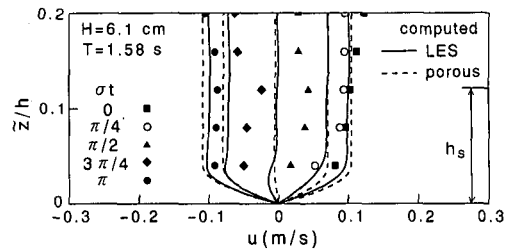
図-1は上方境界における x 方向の速度成分を微小振幅波理論で与えた場合の流速分布を示したものであり, 図中の実線および破線は, それぞれLESおよびporous modelによる計算値, ■, ○, ▲, ◆および●は実験値であり, それぞれ位相が $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ および π の場合を示す。なお, 流速は岸向きを正, 沖向きを負とする。計算値および実験値の位相は, 測定位置において波の峯が通過する位相を0とする。測定位置は人工海藻を敷設した領域の中央位置における人工海藻の岸側2cmの所であり, 水深方向の測定点は底面より2, 4, 6, 8および10cmの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

(a) は波高が4.4cm, 周期が1.26sの場合である。 π の位相においては, どの高さにおいても計算結果は実験値より小さい。他の位相においては, 底面から4cmと10cmの高さを除けば, 実験値と計算値はほぼ一致している。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。LESによる結果とporous modelによるそれは, 底面から10cm程度の高さにおいて差が生じていることを除けばほぼ同一である。

(b) は波高が6.1cm, 周期が1.58sの場合である。0の位相では, 底面より10cmの高さを除けば実験結果と計算結果はほぼ一致している。詳細にみると, 底面付近ではLESによる結果がporous modelによる結果より



(a) 波高 4.4 cm, 周期 1.26 s



(b) 波高 6.1 cm, 周期 1.58 s

図一 人工海藻近傍における流速の鉛直分布

も実験値に近い。また、 π の位相において、実験値は反った分布をしているが LES による結果は、流速の値は僅かに異なるもののよく似た分布をしている。他の位相においては、実験結果と計算結果との対応は良くない。とくに、 $3\pi/4$ rad の位相において、底面から 4 cm の高さでの流速の大きな歪は再現できていない。

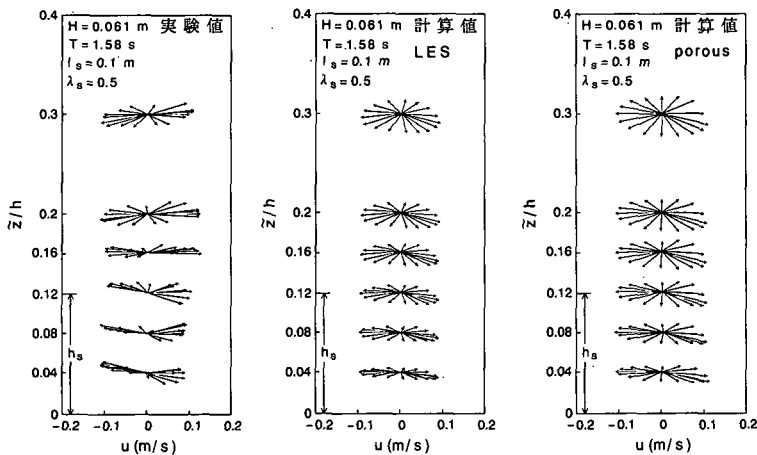
5.2 流速ベクトル

図-2 に人工海藻敷設位置の岸側 2 cm における流速ベクトルを示す。左図、中央図および右図は、それぞれ実験値、LES および porous model による結果である。波高は 6.1 cm, 周期は 1.58 s, 人工海藻の敷設間隔は 10 cm である。なお、流速は岸向きを正、沖向きを負とする。LES および porous model による結果をみると、底面近傍より人工海藻の先端の高さ(以下、植生層境界と記す)付近までは、各時刻における流速ベクトルの先端を連ねた楕円の長軸は前傾し、その傾きも実験結果とほぼ同一である。しかしながら、植生層境界より上方では、実験結果の長軸は後傾しているのに対し計算結果は前傾している。なお、porous model の結果は、水平および鉛直方

向流速とも LES の結果より大きい。また、実験結果と比較すると、鉛直方向流速の振幅がかなり大きいようである。

5.3 平均流速ベクトルと平均レイノルズ応力

図-3 に LES を用いて解析した人工海藻周辺における平均流速と平均レイノルズ応力 $\bar{\tau}_{zx}$ の空間分布を示す。波高は 7.6 cm, 周期は 1.90 s, 人工海藻の敷設間隔は 10 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。人工海藻敷設位置と敷設位置の直背後においては、植生層境界で岸向きの流れは最大となるが、それ以外の位置においては 1 つ上方の高さにおいて最大となる。また、人工海藻敷設位置、敷設位置の直背後と直前面の位置においては、鉛直上向きの流れが生じているが、それ以外の位置においては、鉛直下向きの流れである。なお、人工海藻敷設位置の岸側には時計回りの循環流が生じている。一方、レイノルズ応力の分布をみると、人工海藻の敷設位置付近の植生層境界付近において最大となり、水面や底面に向かうにつれて減少する。平均流速および平均レイノルズ応力とも植生境界付近で最



(a) 実験値; 小田ら (1991)

(b) 計算値: LES

(c) 計算値: porous model

図二 人工海藻近傍の流速ベクトル

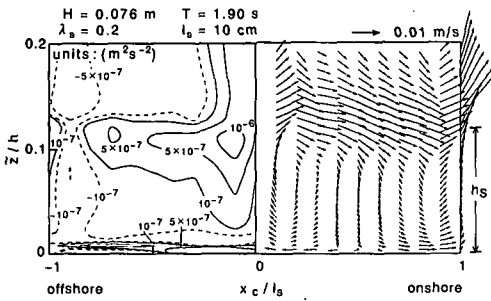


図-3 平均流速ベクトルと平均レイノルズ応力 $\bar{\tau}_{xz}$

大となることから、この領域で大きな混合、乱れが存在する。このことは、一方向流を対象とし、可撓性を有する沈水性植生内外の流れについて測定した池田・金沢 (1994) の結果と同一である。

5.4 回転ベクトル成分と人工海藻パラメータ

図-4はLESを用いて解析した平均流速をもとに算出した人工海藻敷設位置の植生境界における回転ベクトル成分と人工海藻の植生に関するパラメータ S_p ($S_p = (1 - \lambda_s) h_s / l_s$) との関係を示す。図中の黒塗りおよび白抜きの記号は、それぞれ人工海藻の敷設間隔が5 cmおよび10 cmである。人工海藻の敷設間隔が10 cmの場合、いずれの周波数においても、人工海藻の開口率の減少とともに回転ベクトル成分は増大し、植生境界における流れの歪が大きくなる。一方、人工海藻の敷設間隔が5 cmの場合、周波数が0.79 Hzのものは、人工海藻の開口率の減少とともに回転ベクトル成分は増大し、敷設間隔が10 cmの場合と似た傾向を示す。しかしながら、周波数が0.53 Hzと0.63 Hzのものは、 S_p が0.6で回転ベクトル成分は最大値を取る。なお、 S_p が0.6と0.96の間での回転ベクトル成分の勾配は、0.63 Hzのほうが大きい。

人工海藻の敷設によって鉛直上向きの流れが誘起さ

れ、植生境界付近においては比較的大きな岸向きの流れが存在することを確認した。こうした流れ場の変形が砂粒子の輸送機構に多少なりとも関連するという事を考えるならば、漂砂制御に対する人工海藻の最適な植生基準が存在するに思える。

5.5 人工海藻の揺動変位

図-5は、ビデオ撮影した小田ら (1991) の実験結果をもとに測定した人工海藻頂部の変位と実験に基づいた解析結果を酒井ら (1989) の解析結果とともに示したものである。図中の黒塗りおよび白抜きの記号は、それぞれ小田らの実験結果に基づいた解析結果および酒井らによる結果である。酒井らの結果は、周波数が0.5 Hzの場合を除けば実験結果と解析結果はよく符合している。一方、著者らの結果は、3通りの中で高周波数の波によるものは実験結果と解析結果は、ほぼ一致しているが、0.53 Hzの波に対しては解析結果は実験結果より過大な変位を与える。この理由としては、1) 小田らの実験では網状の海藻を対象としているが、解析は柱状体として取り扱い隣接する柱状体間の連結を考慮しなかったこと、2) 浅野らのモデルでは抗力は水平抗力のみを考慮していること、2) に関連して、3) 抗力係数の評価法、などが考えられる。

5.6 濃度の経時変化

図-6に人工海藻敷設位置における濃度の経時変化を示す。波高は6.1 cm、周期は1.58 s、人工海藻の敷設間隔は10 cmである。また、底面からの高さは4 mmである。なお、図中の実線、一点鎖線および破線は、人工海藻の開口率が、それぞれ0.2、0.5および0.8の場合である。人工海藻敷設領域の中央位置 $x_c / l_s = 0$ を波の峯が通過する時の位相を0とする。

人工海藻の開口率に関わらず、波の峯が通過する位相より $\pi/25$ 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

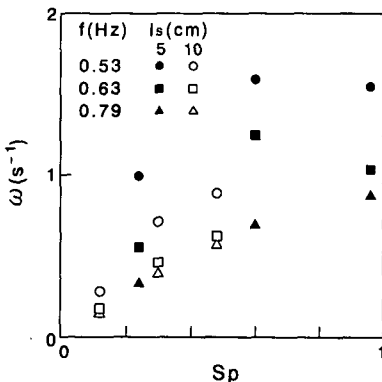


図-4 回転ベクトル成分と人工海藻パラメータ

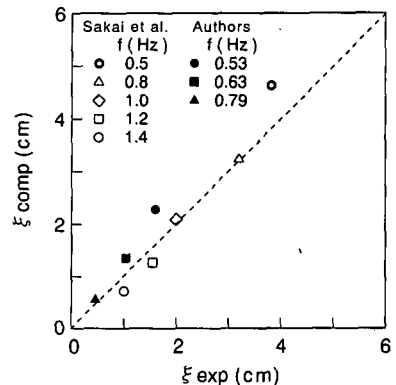


図-5 人工海藻の揺動変位

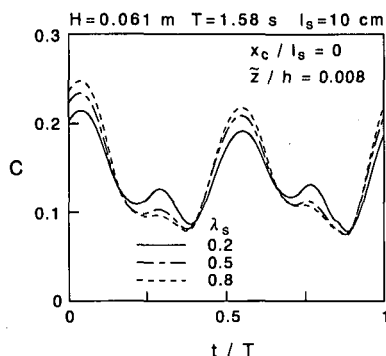


図-6 人工海藻敷設位置における濃度の位相変化

す沢であるが、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ピークの4/5程度の濃度を有する第2ピークは、第1ピークより π rad程度の位相が遅れて生ずる。また、第1ピークおよび第2ピークより $\pi/2$ rad程度遅れて小さなコブ状のピークが生じている。なお、2つのコブ状のピークのうち、第2ピークより $\pi/2$ rad程度位相が遅れたピークの濃度が高く、人工海藻の開口率が小さいほど濃度は高い。この小さなコブ状のピークが生じる位相では、岸沖方向の流速は極めて小さく、移流・拡散への寄与は小さい。すなわち、開口率の減少に起因する鉛直方向流速の増大によって、鉛直方向の移流・拡散が大きくなるためである。

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) LESとporous modelによる解析では、低周波数の波の場合は両者の解析結果に差はほとんどないが、比較的周波数が高い場合にはLESによる結果のほうが実験で得られた流速の歪を説明できる。

(2) 植生層境界付近においては、時間平均した岸沖

方向流速およびレイノルズ応力とも植生層境界付近において最大となり、この領域付近で大きな混合、乱れが存在する。

(3) 人工海藻の揺動変位は、低周波数の波の場合、解析結果は実験結果より過大になることを除けば、解析結果と計算結果はほぼ一致する。

(4) 人工海藻敷設点における底面近傍の濃度には、大小4つのピークが生じ、2つのコブ状のピークは、人工海藻の開口率の減少に起因する鉛直方向流速の影響が強い。

謝辞：本研究の一部は、人工海藻による漂砂制御を目的として発足したHOKD臨海実験研究会の援助を受けた。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 (1988): 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.
- 浅野敏之・出口 浩・間瀬 肇・小林信久 (1991): 揺動する海藻群落上を伝播する波の特性, 海岸工学論文集, 第38巻(1), pp. 26-30.
- 池田駿介・金沢 稔 (1994): 可撓性を有する沈水性植生内外の流れ及び植生境界で発生する組織渦の3次元構造について, 水工学論文集, 第38巻, pp. 345-350.
- 伊福 誠: 砕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, 1986.
- 伊福 誠・岩田充浩・米澤泰雄・坂田則彦 (1994): 人工海藻周辺の流れと漂砂, 海岸工学論文集, 第41巻(1), pp. 566-570.
- 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.
- 酒井哲郎・浅野敏之・上田康浩 (1989): 波浪による人工海藻の揺動特性, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集 第2部, pp. 692-693.
- 榊山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 554-558.