

弾性変形する難揺動型人工海藻帯近傍における流れ場の数値解析

小田 一紀*・東海 博司**・横山 真也***

1. はじめに

筆者らは海岸侵食防止工法の一つとして、比較的曲げ剛性の高い繊維材料を用いた難揺動型人工海藻を提案し、これまでに水槽実験を行うとともに、兵庫県淡路島の丸山海岸において現地実験を行ってきた。その結果、難揺動型人工海藻が高い侵食防止効果を有することが確認された(小田ら, 1991, 1992, 1994, 1995)。しかし、未だその漂砂制御機構が十分に解明されていないため、与えられた波浪条件と海浜条件に対して合理的な人工海藻の設置条件を明確に示せないのが実状である。

そこで本研究は、人工海藻を弾性変形する鉛直透過体列とみなして、周辺流れ場の数値解析を行い、漂砂制御機構解明の基礎となる人工海藻帯近傍の流れ場把握を行うことを目的としている。

本研究では、人工海藻周辺乱流場の解析には $k-\epsilon$ モデルを適用する。また、人工海藻繊維部の透過性は榊山ら(1992)が透過性防波堤周辺の波動解析に用いたポーラスボディモデルを採用して考慮する。さらに、人工海藻の変形は、人工海藻下端が固定された片持ち梁と考えて弾性モデルを用いて解析し、人工海藻周辺流れ場および人工海藻の運動を解明する。

2. 基礎方程式

人工海藻をモデル化した鉛直弾性透過体周辺および透過体空隙内の流体運動は以下の連続方程式と運動方程式で支配されるものとする：

連続方程式

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

運動方程式

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \lambda_x \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \lambda_z \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = & -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & -R_x + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial (\gamma_x \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma_z \tau_{xz})}{\partial z} \right\} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \lambda_x \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \lambda_z \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = & -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ & -\gamma_v g - R_z + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial (\gamma_x \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma_z \tau_{zz})}{\partial z} \right\} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{cases} \lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_v) C_M \dots\dots\dots (4) \\ \lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_v) C_M \end{cases}$$

ここで、 γ_v は計算セル内に占める流体の体積比率(透過体を含まない計算セル内では $\gamma_v = 1$ とする)、 γ_x, γ_z は同じく計算セル内に占める流体の面積比率(透過体を含まない計算セル内では $\gamma_x = \gamma_z = 1$ とする)、 C_M は慣性力係数であり、 C_M の流況に及ぼす影響は小さい(榊山, 1992)なので後の数値計算では $C_M = 1.5$ とする。

また、“ $\bar{}$ ” は各成分の時間平均量を表し、 u, w はそれぞれ x, z 方向の水粒子速度、 ρ は流体の密度、 p は圧力である。 $R_i (i = x, z)$ は抗力項を表し、以下の式で与える。

$$R_i = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{(1 - \gamma_i)}{Di} u_{si} \sqrt{u_{si}^2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 u_{si} は流体と人工海藻の相対速度、 C_D は抗力係数である。後の数値計算では、実験との整合性より透過性に関わらず $C_D = 1.0$ とする。

また、レイノルズ応力 τ_{ij} を以下の形で表す。

$$\tau_{ij} = -\overline{u_i u_j} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、“ $\overline{}$ ” は平均量からの偏差を表す。

レイノルズ応力 τ_{ij} に対して Boussinesq の乱流粘性モデルを用い以下のようなモデル化を行う。

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{N} k \delta_{ij} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 ν_t は渦動粘性係数、 N は次元数(ここでは $N = 2$)、 k は乱れエネルギー、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

次に乱れエネルギー k およびその散逸率 ϵ に対する輸送方程式は以下のように表される。

k の輸送方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C_\epsilon \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial k}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \\ & - \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon + C_{fk} R_j \bar{u}_j \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

* 正 会 員 工 博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
** 工 修 住宅・都市整備公団
*** 学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科

ε の輸送方程式

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C_s \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(\bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{fe} R_{ij} \bar{u}_j \right) + C_s \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \dots\dots\dots (9)$$

これらの方程式から k と ε を求め、次の式に代入して渦動粘性係数を決定する。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(8)～式(10)における C_i はモデル定数であるが、ここでは Launder-Spalding (1974) が推奨する高レイノルズ数モデルに一般に適用される以下の値を用いる。

$$\begin{cases} C_1 = 0.09 & C_2 = 1.92 & C_3 = 0.075 \\ C_4 = 1.44 & C_5 = 1.90 \end{cases}$$

さらに、乱流モデル定数 C_{fk} , C_{fe} に関しては、清水ら(1991) にならってそれぞれ 0.07 と 0.16 を用いる。

3. 人工海藻の揺動モデル

人工海藻の動的応答を考えるに当たって、以下のような力学的モデルを考える。まず、図-1 に示すように人工海藻を下端固定の片持ち梁と考え、それを N 個の梁要素に分割する。そして、この要素の質量とこれに働く全ての力は、その要素の中央に仮想的に設けた質点に集中するものと仮定する。ここで、この梁においては曲げ変形のみを考慮し、たわみは比較的小さいものとして鉛直方向変位は無視する。次に、図-2 にこのモデルの質点 j 点に静的な単位水平外力 $P_j = 1$ が作用した場合の変位分布を示す。このときの i 点の変位を影響係数 f_{ij} で表すと、任意の大きさの P_j による i 点の変位 ξ_i は以下のように表される。

$$\xi_i = f_{ij} P_j \quad \dots\dots\dots (11)$$

よって、総ての質点に外力 $P_j (j=1, 2, \dots, N)$ が作用した場合の i 点の変位 ξ_i は以下のように表される。

$$\xi_i = \sum_{j=1}^N f_{ij} P_j \quad \dots\dots\dots (12)$$

次に、動的な外力 $P_j(t)$ が各質点に作用する場合を考

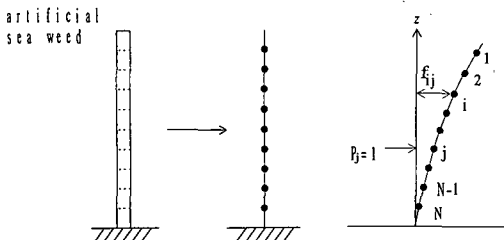


図-1 人工海藻のモデル化の概念図

える。d'Alembert の原理により慣性力 ($m_j \ddot{\xi}_j$) (ここで、 m_j は分割された人工海藻各要素の質量) を考慮すると、式(12) は以下のように書くことができる。

$$\xi_i = \sum_{j=1}^N f_{ij} (P_j(t) - m_j \ddot{\xi}_j) \quad \dots\dots\dots (13)$$

これが人工海藻の各質点における揺動を考慮した運動方程式である。

4. 数値計算法

4.1 計算領域

計算領域は図-3 に示すように、 x 方向に 500 cm, z 方向に 45 cm である。また、計算メッシュは x 方向に 140 分割, z 方向に 30 分割している。その大きさは領域 1 では x, z 方向に $\Delta x = \Delta z = 1$ cm であり、領域 2 では x 方向はすべて $\Delta x = 10$ cm, z 方向は水底より 0~20 cm では $\Delta z = 1$ cm, 20 cm~30 cm では $\Delta z = 2$ cm とし、30 cm~45 cm の領域については格子線の z 座標をそれぞれ、 $z = 33, 37, 41, 45$ (cm) と定めた。

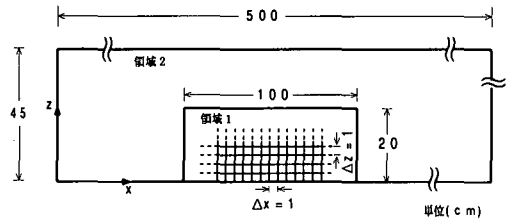


図-3 計算領域

4.2 境界条件

底面においては non-slip 条件、計算領域の両側端で位相差を考慮したストークス波の第 2 次近似解の水平および鉛直成分を与えた。また水面については本来自由水面として取り扱うべきであるが、底面付近の流況の把握を目的としていることや、人工海藻の高さ (10 cm) が水深 $h = 50$ cm に比べて小さいことから、水面下 5 cm の水平面において側端と同様にストークス波の第 2 次近似解を与えた。

4.3 乱れエネルギー k とその散逸率 ε

標準型 k - ε モデルで用いられている壁関数法 (瀧津, 1987) を底面で適用した。また、側方および上方の境界については、 k および ε の水平および鉛直勾配が 0 であるとした。

5. 数値計算の検証

5.1 検証実験概要

実験は長さ 50 m, 高さ 1.5 m, 幅 1 m の片面ガラス張り水槽の中央部に、両端に勾配 1/15 の斜面を設けた長さ 20 m の水平床を作り、その中央に高さ 10 cm の直立型人工海藻模型 1 枚を設置して行った。人工海藻の模型は、

開口率 50 % で、単位幅の $EI=0.17 \times 10^4 \text{ gf} \cdot \text{cm}^2$ の、いわゆる不織布製のもの (厚み 4 mm) と、不透過で、単位幅の $EI=1.24 \times 10^4 \text{ gf} \cdot \text{cm}^2$ の厚さ 4 mm のプラスチック板のもの 2 種類のものを用いた。また、人工海藻模型は小さなアルミアングルで、部分的に水平床に固定した。人工海藻模型の設置点から波の進行方向に 5 cm 離れた位置で水粒子速度の水平・鉛直成分を電磁流速計で測定し、10 波のアンサンブル平均として鉛直分布を求めた。水平床上での水深は $h=50 \text{ cm}$ 、波浪条件は周期 $T=1.79 \text{ s}$ 、波高 $H=8.9 \text{ cm}$ と一定にした。

5.2 計算結果と実験結果の比較

実験と同一の波浪条件、人工海藻条件を与えて前述の数値計算法によって得られた人工海藻の 5 cm 後方における水粒子速度の計算結果と実験結果を図-4 および図-5 に比較して示す。図-4 は開口率 50 % の人工海藻模型の場合、図-5 は不透過の人工海藻模型の場合の鉛直分布を示している。図において、人工海藻模型の位置を波の峰が通過するときの位相を $t=0$ とし、流速の符号は、水平水粒子速度については波の進行方向を正、鉛直水粒子速度については上向きを正としている。なお、計算では計算式中の諸定数として、透過性の人工海藻の場合は $\gamma_v=0.8$ 、 $\gamma_x=0.5$ 、 $\gamma_z=0.8$ 、また、不透過の場合は $\gamma_v=0.6$ 、 $\gamma_x=0.01$ 、 $\gamma_z=0.6$ を採用した。なお、抗力

係数と慣性力係数の値は何れも、 $C_D=1.0$ 、 $C_M=1.5$ とした。図-4 によると、開口率 50 % の場合は水平、鉛直水粒子速度ともに各位相毎の分布形状と値に関して計算値と実験値は良く一致しているといえる。図-5 に示す不透過の場合は、水平水粒子速度に関しては人工海藻模型先端位置より下方部で、また、鉛直水粒子速度に関しては同先端位置より上方部で計算値は実験値を十分には再現できていないいきりがある。これは、不透過の場合にも $C_D=1.0$ 、 $C_M=1.5$ と透過の場合と同じ値を用いたことが原因の一つであると考えられる。このことを考慮すれば、全般的には計算値は実験値と良く一致しており、本数値計算法の妥当性が検証できたといえる。

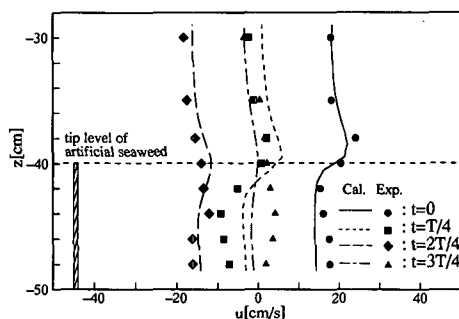
6. 数値計算結果

6.1 人工海藻条件

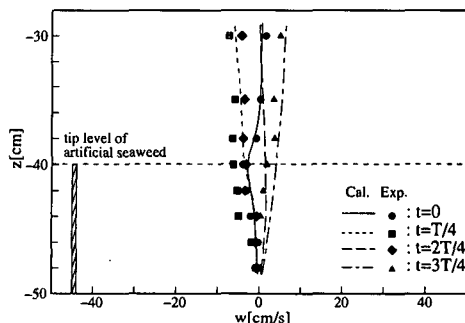
人工海藻に関する条件のうち、開口率は $\gamma_v=0.8$ 、 $\gamma_x=0.5$ 、 $\gamma_z=0.8$ と一定にし、剛性 (EI)、設置本数 (N_s) を変化させて計算を行った。表-1 に計算を行ったケースの人工海藻条件をまとめて示す。なお、人工海藻の高さ (h_s) はすべて 10 cm、隣り合う人工海藻の間隔は 5 cm である。他の計算条件は 4.1 に述べたとおりである。

6.2 人工海藻設置帯周辺の流速場

計算結果の一例として、 $N_s=10$ 、 $EI=50 \text{ gf} \cdot \text{cm}^2$ の弾性

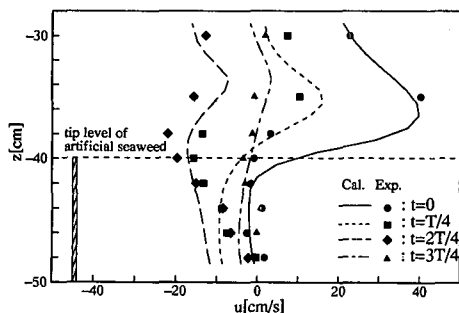


(a) 水平水粒子速度

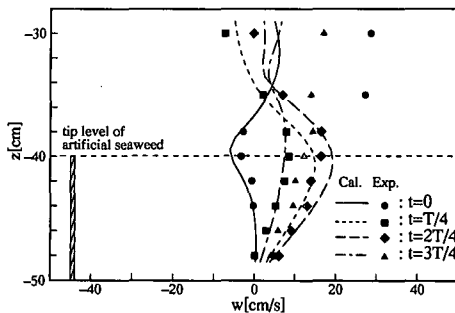


(b) 鉛直水粒子速度

図-4 開口率 50 % の人工海藻模型の場合



(a) 水平水粒子速度



(b) 鉛直水粒子速度

図-5 不透過の人工海藻模型の場合

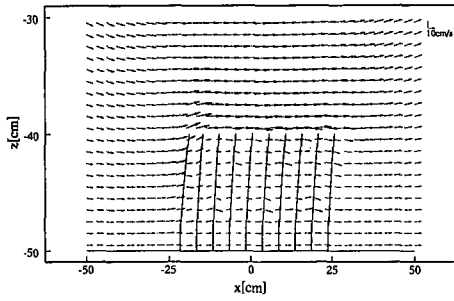
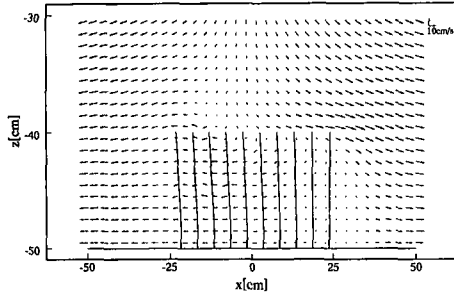
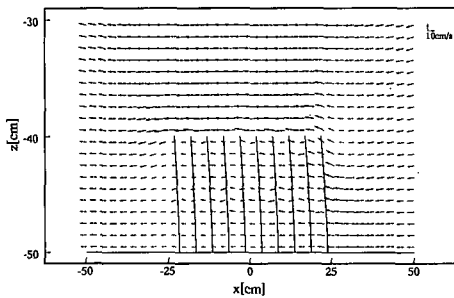
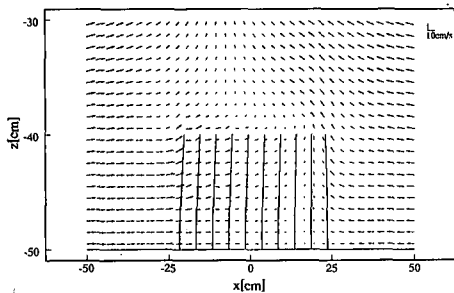
(a) $t=0$ (b) $t=T/4$ (c) $t=2T/4$ (d) $t=3T/4$

図-6 剛体海藻の場合 (CASE A) の流速ベクトル分布

体海藻の場合 (CASE C) の人工海藻帯周辺の流速ベクトル分布を各位相毎に図-6(a)~(d) に示す。なお、波浪条件は $T=1.79$ s, $H=8.9$ cm とし、波の位相は海藻設置帯中央 ($x=0$) を波峰が通過する時を $t=0$ とした。

これらの図によると、海藻の透過性によって海藻設置

表-1 人工海藻条件

CASE	開口率 γ_x, γ_y [%]	本数 N_s	剛性 EI [$\text{gf}\cdot\text{cm}^2$]
A	50	10	∞
B			100
C			50
D			∞
E	50	20	100
F			50

帯内部領域にも流れが生じているが、海藻帯の流体抵抗により外部領域の流速、流向とは異なった様相を呈していることが分かる。また、弾性体海藻がそれぞれの位置における波の位相とほぼ同位相で左右に揺動していることが再現されている。なお、紙数の関係でここでは示していないが、剛体海藻の場合と弾性体海藻の場合の流速ベクトル分布には大きな差は見られず、海藻体周辺の流れ場に及ぼす海藻剛性の影響は計算の範囲内ではあまり大きくないようであり、むしろ透過性の影響の方が大きいといえる。

6.3 一周期平均流速場と人工海藻の漂砂制御機構

図-6 に示したような流速ベクトル分布だけでは周辺流れ場の特徴が明確に分かりにくいので、人工海藻の設置帯沖側端 (沖側から2枚目の海藻を通る鉛直面上)、設置帯中央部、および設置帯岸側端 (岸側から2枚目の海藻を通る鉛直面上) において水平水粒子速度および鉛直水粒子速度の一周期間の平均値を求め、その鉛直分布図を描いて、一周期平均流速場の様相を調べた。

その一例として、図-7(a)~(c) に $EI=50$ $\text{gf}\cdot\text{cm}^2$, $N_s=10$ (CASE C) と $N_s=20$ (CASE F) の場合の一周期平均水平流速の鉛直分布を、また図-8(a)~(c) は一周期平均鉛直流速の鉛直分布を示す。これらの図から以下のことがいえる。

まず、水平流速の鉛直分布を見ると、人工海藻の先端のやや上層部に岸向きの比較的強い流速帯が形成されていることが分かる。その大きさは人工海藻設置帯の岸側に行くほど増大していく傾向が明確に見出せる。

また、鉛直流速の鉛直分布を見ると、人工海藻設置帯沖側端では人工海藻先端付近に鉛直上向き、設置帯中央部では鉛直下向きの、そして設置帯岸側端では再び鉛直上向きの平均流が生じていることが分かる。

さらに、CASE C と CASE F の計算結果を比較すると、人工海藻設置帯中央部では設置枚数の多い CASE F の方が僅かに大きな平均流速を示しているが、岸側端ではほとんど同じ平均流速を示している。このことから、設置枚数がある程度以上多くなれば人工海藻直上層部に形成される平均流速場は一定な状態になるのではないかと考えられる。

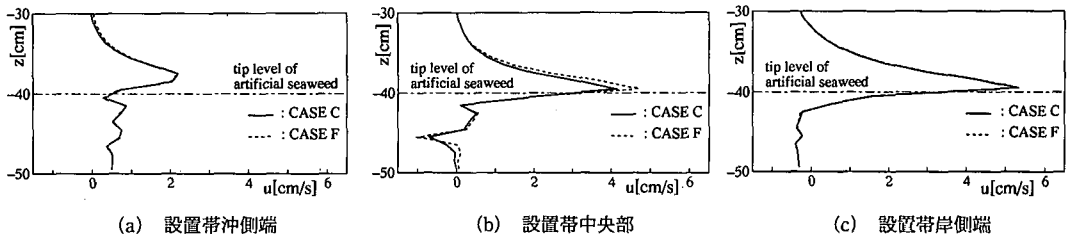


図-7 一周期平均水平流速の鉛直分布

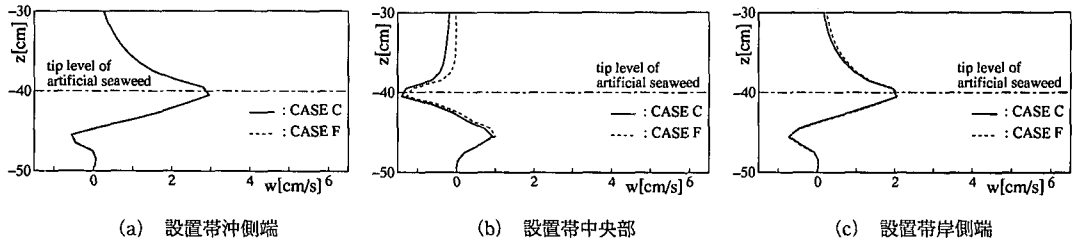


図-8 一周期平均鉛直流速の鉛直分布

以上の数値計算から得られた人工海藻設置帯周辺の平均流れ場の様相から判断して、人工海藻設置帯沖側端付近で波作用によって舞上がった底質は海藻上層部に発生する岸向きの水平平均流に乗って岸側に運ばれる。その底質の一部は設置帯中央部の鉛直下降流によって設置帯内部に堆積し、他はさらに設置帯岸側端付近まで強い水平流によって岸側に運ばれ、人工海藻設置帯外部流域に堆積するものといえる。これが人工海藻設置帯とその岸側領域に漂砂を堆積させる人工海藻の優れた漂砂制御機構の主要部を構成すると考えられる。

7. 結 論

本論文の結果をまとめると以下のごとくである。

(1) 透過性人工海藻体の動的応答とポラスボディモデルによる海藻体内外の流体運動を考慮した本数値解析法は、まだ若干の改良すべき点は残されているが、計算結果と実験結果の比較によって、人工海藻設置帯周辺の流れ場をかなり良好に再現できることが確認された。

(2) 本数値解析法を用いた計算結果によれば、人工海藻設置帯の直上層部には強い水平平均流速場が形成され、その流速は人工海藻設置帯の岸側に行くほど大きくなること、また、設置帯沖側端付近の人工海藻先端部には鉛直上向き平均流速場が、設置帯中央部には鉛直下向き平均流速場が、設置帯岸側端付近には再び鉛直上向き平均流速場が形成されることが見出された。

(3) 人工海藻設置帯沖側端付近の鉛直上向き流によって舞上がった底質が前述の人工海藻直上層部の速い水平平均流によって岸側に運ばれ、その過程で一部は人

工海藻設置帯内部領域に堆積し、他は設置帯より岸側の外部領域に堆積すると考えられ、前述の人工海藻設置帯周辺に生じられる比較的速い水平、鉛直平均流が人工海藻の漂砂制御機構の形成に重要な働きをしている。

(4) 計算の結果、人工海藻設置帯周辺の流れ場には人工海藻の剛性の影響は顕著には見られず、むしろ透過性や設置間隔などが支配的な影響を与えと考えられる。

参 考 文 献

- 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(2), pp. 331-335.
- 小田一紀・小林憲一・山中隆史・坂田則彦 (1992): 大縮尺模型実験による硬質型人工海藻の漂砂制御効果に関する研究, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, 第II部門, pp. 1146-1147.
- 小田一紀・横山真也・坂田則彦 (1994): 大縮尺模型実験による人工海藻の最適設置密度の検討, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, 第II部門, pp. 730-731.
- 小田一紀・横山真也・坂田則彦 (1995): 人工海藻設置条件が漂砂制御効果に及ぼす影響の検討, 平成7年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 第II部門, pp. 102.
- 神山 勉・鹿島達一 (1992): ポラスボディモデルによる透過性防波堤周辺の波動解析手法の開発, 電力中央研究所報告, U91048.
- 清水義彦・辻本哲朗・北村忠紀 (1991): 植生に覆われた砂床上流の浮遊砂濃度, 水工学論文集, 第35巻, pp. 447-482.
- 彌津家久 (1987): 環境水理解析における乱流の数値モデルの応用, 土木工学における数値解析最前線, 土木学会関西支部, pp. 111-127.
- B. E. Launder and D. B. Spalding (1974): The numerical computation of turbulent flow. Comp. Meth. in Appl. Mech. Eng., 3, 269-289.