

硬質型人工海藻の漂砂制御効果に関する基礎的研究

小田 一紀*・天野 健次**・小林 憲一***・坂田 則彦****

1. 緒 言

海岸侵食の防止工法として従来から護岸、突堤、離岸堤など様々な構造物が採用されてきた。それらは一般にコンクリートや石材を用いた「硬い」構造物であるためしばしばその周辺の海底が波作用によって洗掘され、沈下や崩壊を受けてきた。さらに近年、海岸景観や水質保全の観点から、天端を水面下に下げた潜堤や人工リーフが採用されるようになってきた。しかし、これらの構造物は潮位変動によって波浪制御効果が大きく変動すること、船舶の航行安全上障害となること、またかなり幅広く海底を覆ってしまうので既存の生態系に及ぼす影響が大きいことなどの問題を有している。

このような構造物に対して、最近「柔らかい」構造物である繊維性の人工海藻が見直されてきており、これに関連してわが国では浅野ら（1988）が波高減衰特性の理論的研究を、間瀬ら（1989）が傾斜海底上での波浪変形解析を、さらに菅原・入江（1990）が底質移動の制御効果に関して実験的研究を行っている。

しかし、現在研究の対象となっている人工海藻は、実物の海藻と同様に波運動とともに揺動する形式のものであるため、(i) 相当幅広く設置しなければ十分な波浪・漂砂制御効果が得られない、また、(ii) 生物付着によって重量が増すと容易に倒れてしまい、所期の機能を失う恐れがある、などの問題点を有している。

本研究では、以上に鑑み、波作用に対して比較の変形しにくい硬質の繊維材料を用いた人工海藻を提案し、その漂砂制御の効果と機構を主として水理実験によって基礎的に究明する。

2. 予備的移動床模型実験

研究の第1段階として、ここで提案する硬質型人工海藻の波浪・漂砂制御効果がどの程度期待できるのかを縮尺 1/30 の予備的な移動床模型実験によって把握する。

2.1 硬質型人工海藻の模型

実物の人工海藻として、1辺が 1.5 m の正三角形形状 RC 基部とその各辺の頂部に植え付けられた比較的曲げ剛性の大きい人工繊維布からなるものを想定し、その縮尺 1/30 の模型として 図-1 に示すような形状と寸法のものを製作した。

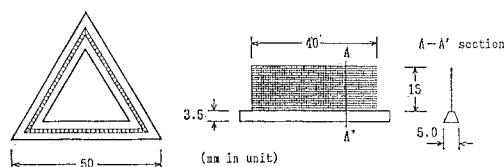


図-1 人工海藻の模型形状と寸法

基部は平均的な比重が実物 RC のそれにほぼ等しくなるように鉛の小球を混入したプラスチック材で作製、繊維布は、素繊維直径 0.730 mm、開口寸法 0.351 mm、遮蔽率 45% のポリエチレン繊維材を用いた。素繊維のヤング率は 300~850 kgf/mm² (2.94~8.33 kN/mm²) である。

2.2 実験装置および方法

実験は、長さ 20 m、幅 0.5 m、高さ 0.6 m の片面ガラス張り造波水槽で行った。この水槽内に耐水ベニヤを用いて勾配 1/20 の斜面を作り、その上に豊浦標準砂 ($\rho=2.5$, $d_{50}=0.27$ mm) を厚さ 10 cm に敷き、移動床を作成した。移動床材料の粒径は、漂砂の移動形態を相似させる条件 $w_{om}/w_{op}=u_m^*/u_p^*$ (ここに w_o : 底質の沈降速度, u^* : 摩擦速度, m, p : 模型および実物を表す) をほぼ満足している。

図-1 に示した人工海藻は単体では耐波性に劣るので、各頂点を互いに糸で連絡し、ネットワーク効果によって耐波性をもたせた。人工海藻の設置長さは取り敢えず対象波の 1 波長程度の 1.5 m とした。設置位置は、その岸側端部が人工海藻を設置しないときの実験開始時の碎波点にほぼ一致するようにした。水深は一様水深部で 40 cm とした。一様水深部における入射波特性は $(T, H)=(0.91$ s, 2.6 cm), $(0.91$ s, 5.2 cm) および $(1.28$ s, 10.2 cm) の 3 種に変えた。

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
 ** 工修 大成建設(株)
 *** 大阪市立大学大学院 土木工学専攻
 **** 工博 ヒロセ技研

砂面形状は超音波式砂面計（正豊工業）を一定速度で動く架台に載せて、波作用前、波作用後 5, 10, 15, 18 および 20 hr にいったん造波をとめて測定した。入射波は一樣水深部において容量式波高計で測定した。

2.3 実験結果と考察

図-2 (a) および (b) は、 $T=0.91\text{ s}$, $H=2.6\text{ cm}$ の規則入射波を与えて $t=20\text{ hr}$ 後の砂面形状を、人工海藻を設置しない場合と設置した場合について比較したものである。堀川ら (1974) の縦断形状の区分条件式に基づけば、図-2 の実験条件では堆積型になると判断されるが、本実験では同図 (a) に見られるように、汀線付近はほとんど侵食されず、汀線よりやや沖側が洗掘され、その沖側に堆積が生じ、侵食型と堆積型の中間型を呈している。何れにしても、同図 (b) に見られるように、人工海藻を設置すると、この波条件では侵食はほとんど起こらず、汀線付近および人工海藻設置帯にやや堆積が発生している。なお、人工海藻沖側端部のすぐ沖に僅かな洗掘が見られる。

図-3 (a) および (b) は、図-2 の波条件に対して周期は同じにして波高を 5.2 cm と 2 倍にした場合の砂面形状を比較したものである。人工海藻を設置しない場合は、堀川らの区分条件式によれば、砂面形状は堆積型と侵食型の中間型になるはずであるが、同図 (a) はむしろ侵食型を示している。同図 (b) によると、この場合でも人工海藻を設置すると汀線沖側でやや侵食が見られるものの、人工海藻設置帯では逆にやや堆積が見られる。以上の 2 例でも明らかなように、短周期の波に対しては本人工海藻は高い漂砂制御効果を有することが認められる。

次に、比較的周期の長い波に対する漂砂制御効果を調べたものが図-4 (a) および (b) である。図-4 (a) および (b) は、 $T=1.28\text{ s}$, $H=10.2\text{ cm}$ の波を与えて $t=15\text{ hr}$ 後の砂面形状を表している。堀川らの区分

条件式によれば砂面形状は侵食を示すと予測される。同図 (a) によると、砂面形状は侵食型を示しており、本実験結果は、この場合は堀川らの区分条件式による予測結果と一致することがわかる。同図 (b) によると、周期が長い場合でも、人工海藻を設置することによって設置しない場合に見られた汀線からその沖側の侵食がほとんど見られなくなり、人工海藻設置帯ではむしろ顕著な堆積が見られ、本人工海藻の有効性が認められる。ただし、この場合も人工海藻設置帯のすぐ沖側で洗掘が発生している。

以上の実験の結果、相似性の問題はああるものの、今回の実験条件の範囲内では人工海藻の設置によって汀線から人工海藻設置帯の間の砂面の洗掘はかなり抑制され、人工海藻設置帯にはむしろ堆積が見られ、定性的ではあるが、本人工海藻が良好な漂砂制御効果を有することが確認された。

なお、図中の B.P. は砕波点を示しているが、人工海藻を設置した場合は何れの条件でも砕波点が岸側に移動しており、これらの図から人工海藻による良好な波浪制御効果も間接的に認められることがわかる。

3. 漂砂の制御機構解明のための水理実験

次に、図-1 に示したものと異った直線状人工海藻を用いた 2 次元実験で海藻近傍における水粒子速度の測定と、漂砂挙動の観測を行って硬質型人工海藻の基本的な漂砂制御機構の解明を試みた。

3.1 実験装置と方法

実験は、長さ 50 m 、幅 1.0 m 、高さ 1.5 m の造波水槽で行った。水槽中央部の底から 60 cm の位置に長さ 16 m の水平床を耐水ベニヤで作し、その沖側端および岸側端には同じベニヤ板で作ったそれぞれ勾配 $1/20$ および $1/10$ の斜面を設けた。

直線状人工海藻は、上底 0.5 cm 、下底 1.5 cm 、高さ

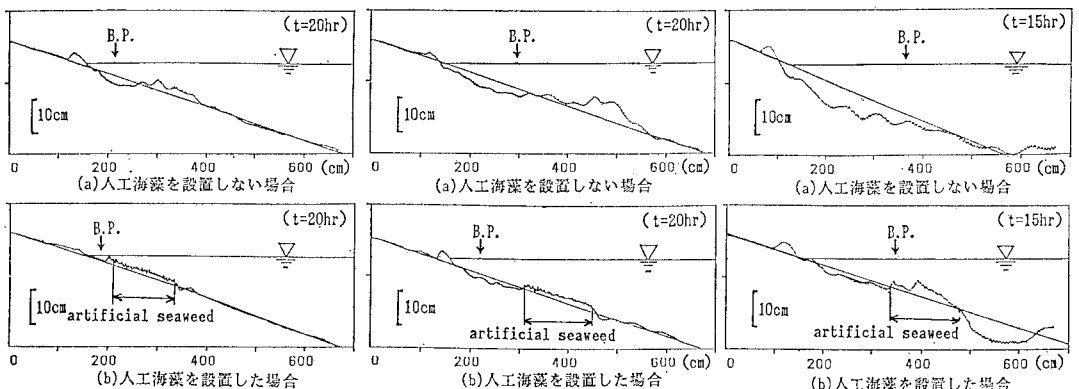


図-2 人工海藻の有無による砂面形状の比較 ($T=0.91\text{ s}$, $H=2.6\text{ cm}$)

図-3 人工海藻の有無による砂面形状の比較 ($T=0.91\text{ s}$, $H=5.2\text{ cm}$)

図-4 人工海藻の有無による砂面形状の比較 ($T=1.28\text{ s}$, $H=10.2\text{ cm}$)

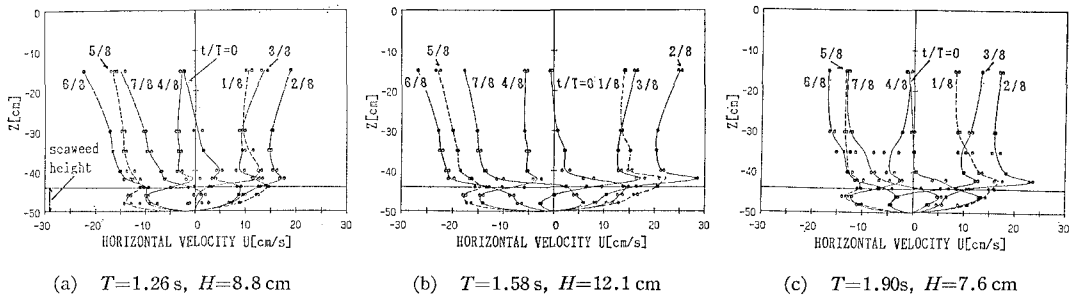


図-5 水平水粒子速度の鉛直分布の実験結果

1.0 cm の台形断面のアクリル製基部とその頂部に植えつけられた素繊維径 0.298 mm, 開口寸法 0.760 mm, 遮蔽率 48%, 高さ 5.0 cm のポリエチレン繊維布により成り立っている。

実験は、固定床と移動床の2つの場合について行った。

固定床実験では、水平床中央部の幅 4.0 m の区間に直線状人工海藻を 10 cm 間隔で固定し、この人工海藻設置帯のほぼ中央の相隣る人工海藻の中央で、2次元電磁流速計によって波動場での水粒子速度の時間的変化と鉛直分布を測定した。水面変動との位相関係を把握するため水粒子速度の測定位置における水面変動を容量式波高計で同時測定した。

移動床実験では、人工海藻設置帯全体に前述の予備実験で用いたものと同じ豊浦標準砂を厚さ約 2 cm に敷き、人工海藻設置端のほぼ中央における漂砂の挙動をビデオカメラで撮影し、その映像を低速で再生して詳細に観察した。

水平床上での水深は、 $h=50$ cm とし、人工海藻設置始点上における入射波の周期と波高は、 $(T, H)=(1.26$ s, 4.4 cm/8.8 cm), (1.58 s, 6.1 cm/12.1 cm), および (1.90 s, 7.6 cm) の5種類に変えた。

3.2 実験結果

1) 水平水粒子速度の鉛直分布

図-5 (a)~(c) は実験条件の中で比較的波高の大きい場合の水平水粒子速度の鉛直分布を、波面が静水面をゼロアップする瞬間を $t=0$ として、 $T/8$ ごとに描いたものである。これらの図から、何れの周期の場合でも次のような共通した特性が認められる。すなわち、(i) $t/T=1/8\sim 3/8$ の位相で、人工海藻上端より約 2 cm 上の位置 ($z=-42$ cm) を中心として岸向き (図-5 中正側) の水平水粒子速度がそれより上下の位置における速度よりかなり増大し、逆に $t/T=4/8\sim 5/8$ の位相で減少する。(ii) 人工海藻高さより下層領域 (以後内部領域と呼ぶ) における水平水粒子速度の位相は上層領域 (以後外部領域と呼ぶ) のそれより一般に僅かに進み、その位相差は水底に近づくほど大きく、また周期が長いほど

大きい。

図-6 (a)~(c) は 図-5 (a)~(c) に対応させて描いた水面変動 η 、および各位置での水平水粒子速度 U_{-15} , U_{-40} , U_{-42} , U_{-44} , U_{-46} , U_{-48} の時間的変化を表したものである。これらの図からも前述の (i) および (ii) に記した人工海藻近傍における水平水粒子速度の特性が明確に読み取れる。特に、内部領域における水面変動に対する位相の進み時間が、最底層の $z=-48$ cm で、 $T=1.26$ s の場合は約 $T/8$, $T=1.58$ s の場合は約 $1.3T/8$, $T=1.90$ s の場合は約 $1.5T/8$ と周期が長くなるほど大きくなること、またほぼ $z=-40$ cm より上層では何れの周期の場合でもほとんど位相差が生じないことが確認できる。

以上のような、内部領域と外部領域における流体運動の位相差によって内部領域と外部領域の境界付近に絶えず速度勾配の大きな領域が形成され、大きな乱流せん断応力が発生しているものと考えられる。このせん断応力が波の進行とともに底層近傍の水平水粒子速度の低減をもたらし、ひいては漂砂量の低減をもたらすものと考えられる。

また、もう一つ重要なことは、ほぼ $z=-42$ cm より

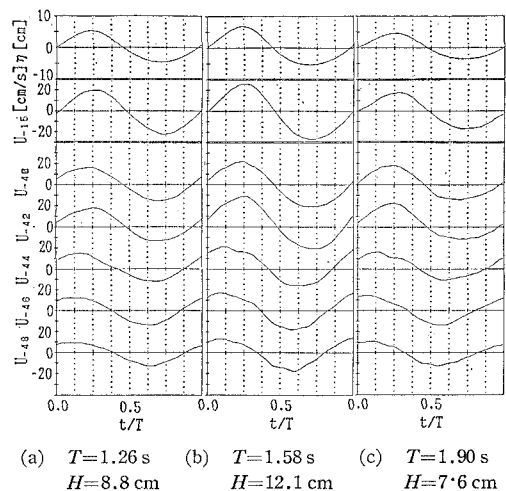


図-6 水平水粒子速度の時間的変化

下層における水粒子速度の時間波形の非対称性である。特に海藻上端のすぐ上層にあたる $z = -44 \text{ cm}$ と $z = -42 \text{ cm}$ においてはその傾向は強い。この近付の水粒子速度の非対称性は冲向きより岸向きへの浮遊砂量の増大をもたらし、その結果、1周期当りの正味の漂砂量を岸向きにする要因になるものと考えられる。

2) 流れと漂砂の挙動

図-7 (a)~(h) は、ビデオ撮影によって得られた人工海藻近傍における流れと漂砂の挙動の一例を、 $T = 1.58 \text{ s}$, $H = 6.1 \text{ cm}$ の場合について1周期間に亘ってほぼ $T/8$ 間隔で模式的に表したものである。なお、流れの挙動は微細な砂粒子の動きと補助的に投入した色素トレーサの動きによって観察した。これらの図中で、海藻 W_1 と W_2 の間の中央上方に記した矢印は、海藻の影響を受けない外部領域における水平水粒子速度の向きと大きさを相対的に表しており、 $\cdot$ 印は水平水粒子速度が0であることを表している。

まず流れを見ると、前述のように内部領域における流れは外部領域におけるそれより僅かに位相が進んでいることが認められる。すなわち、同図 (a) に示すように外部領域で水平水粒子速度が0のときに内部領域ではすでに僅かながら岸向きへの流れが始まっており、外部領域で岸向き最大速度になったとき (同図 (e)) には既に内部領域では岸向き流れは減速に向かっている。外部領域の流れが反転して冲向きに流れるときも内部領域の流れの方が位相が進んでいることが認められる。

次に漂砂の動きを観察すると、海藻と海藻の間のほぼ中央に明確な砂漣が形成され、さらに海藻基部上にも比較的小さな砂漣が形成される。砂漣の表層には掃流砂が見られ、また砂漣の峯から掃流砂が掃き出され浮遊砂雲が発達する。 $t=0$ (同図 (a)) のときに海藻 W_1 と W_2 との間の砂漣の峯よりやや岸側寄り (図中の右側寄り) にあった浮遊砂雲 C_2 は、浮遊砂の一部を沈降させながら岸向き流れの発達とともに岸側に移動する。その中の大部分の浮遊砂は海藻 W_2 の繊維布開口部を通過する (同図 (b)) が、一部は海藻繊維に衝突して沈降する。海藻 W_1 と W_2 の間のセルにはその沖隣のセルから W_1 を通って浮遊砂雲 C_1 が進入し、その頭部は海藻 W_1 の上端から発生した右廻りの渦に巻き込まれながら海藻 W_2 に衝突し、その中の浮遊砂の一部分が繊維布に沿って沈降する (同図 (c))。その後、内部領域の岸向き流れの減速とともに浮遊砂雲 C_1 の移動は止まりその中の浮遊砂の一部は W_1 と W_2 の間のセル内で沈降する (同図 (d))。内部領域の流れが冲向きに反転を始めると、それに伴って浮遊砂雲 C_1 は沖側に移動を始めるが、内部領域の上層の流れの方が下層の流れより位相が遅れるので、浮遊砂雲の頭部は取り残され、下部が先に沖側に

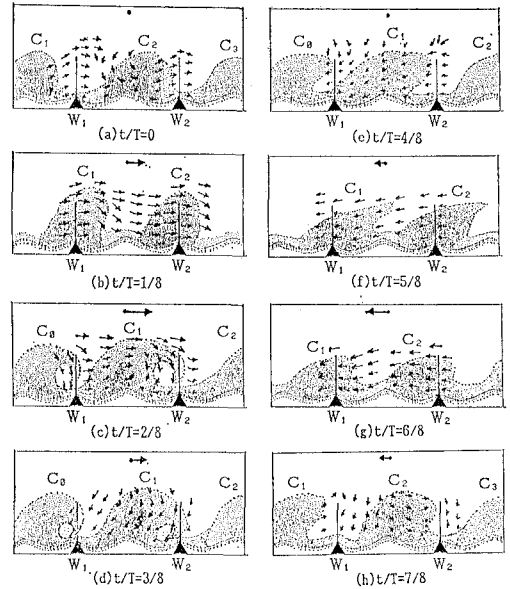


図-7 人工海藻近傍の流れおよび漂砂の挙動

移動する (同図 (e))。浮遊砂雲 C_1 は海藻 W_1 を沖に向かって通過中に (同図 (f)) 一部の浮遊砂を沈降させながら冲向きの流れの発達とともに沖側隣のセルに移動するが、海藻 W_1 と W_2 の間のセルにはその前に岸隣のセルに移動した浮遊砂雲 C_2 が再び戻ってくる (同図 (g))。セル内における冲向き流れの停止とともに浮遊砂雲 C_2 はその中の浮遊砂の一部を沈降させながら (同図 (h))、岸向き流れの発達とともに再び岸向きに移動方向を反転する (同図 (a))。

掃流砂の動きについてはビデオ撮影では明瞭に観察できなかったが、掃流砂、浮遊砂合わせて1周期当りの正味の漂砂量は岸向きであることが人工海藻設置帯より岸側に漂砂が移動・堆積している事実から概ね確認された。

波の条件が変わっても前述の流れと漂砂の挙動についてはほぼ類似した結果が得られた。

4. 理論的解析

4.1 解析モデル

一様水深流体場を設置された硬質型人工海藻近傍の流れの解析モデルとして、浅野ら (1988) が Darlymple・Liu (1978) の底泥上の波浪変形解析モデルを揺動型人工海藻による波浪変形解析モデルに適用したものと基本的に同じ解析モデルを採用したので、ここでは理論式の展開は省略し、その考え方のみを記すことにする。

一様水深流体場を水底から人工海藻先端までの内部領域と、その上部から水面までの外部領域に分け、両領域ともその流体運動を回転運動と非回転運動の重ね合わせで表す。回転運動の方程式として乱流せん断応力を考慮した Reynolds 方程式を適用する。乱流せん断応力は、

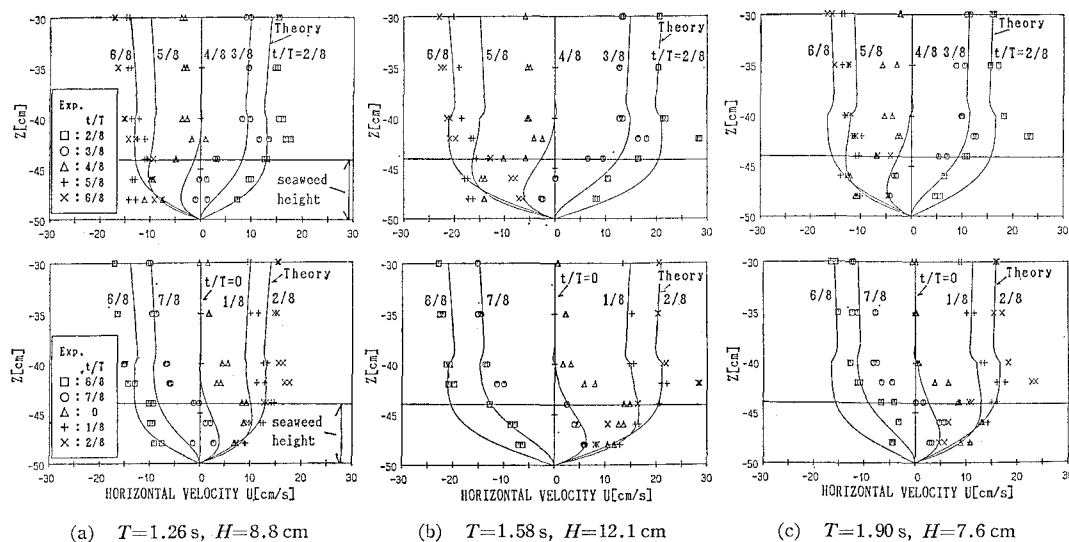


図-8 水平水粒子速度の鉛直分布に関する理論値と実験値の比較

水底から上方へ、および海藻先端から上方と下方に発達する回転運動によって生じると考える。それ以外に内部領域では海藻に働く抗力の反力を考慮する。

4.2 計算値と実験値の比較

以上の解析モデルによって人工海藻設置始点 $x=0$ から 2.0 m の位置における水平水粒子速度の鉛直分布を時間間隔 $T/8$ 毎に計算し、実験結果と比較して表したものが図-8 (a)~(c)である。 $x=0$ における入射波の条件は、それぞれ $(T, H)=(1.26\text{ s}, 8.8\text{ cm})$, $(1.58\text{ s}, 12.1\text{ cm})$ および $(1.90\text{ s}, 7.6\text{ cm})$ である。

これらの図から、 $t=0$ あるいは $4T/8$ における内部領域での位相の進み状態については計算値は実験値とよく似た傾向を示している。しかし、 $z=-42\text{ cm}$ あたりでの局所的流速増大や、内部領域における流速波形の非対称性など基本的に重要な内部領域の流れの特性が表し得ていない点でここで採用した解析モデルはさらに修正が必要であると判断される。

5. 結 論

本研究は硬質型人工海藻を「柔らかい」漂砂制御機構造物として提案し、その制御効果と制御機構について調べた。その結果以下のことが明らかになった。

(1) 今回の実験条件の範囲内では、汀線から人工海藻設置帯の間の砂面の洗掘はかなり抑制され、人工海藻設置帯には堆積が生じ、本人工海藻は良好な漂砂制御効果を有する。

(2) 人工海藻が設置されている内部領域では、水粒

子速度の位相は、それより外側の外部領域の位相より一般に僅かに進む。その位相差は周期が長いほど、また水底に近いほど大きい。

(3) 内部領域と外部領域の流体運動における前述の位相差は大きなせん断力を誘発し、海藻近傍における流体の運動エネルギーの逸散をもたらす。

(4) 前述の理由によって波が本人工海藻上を進行するとともに底層の流速が低減すること、および海藻近傍における水平水粒子速度の時間波形の非対称性によって正味の漂砂量が岸向きになることが、本人工海藻の漂砂制御機構であると考えられる。

(5) 浅野らの用いた解析モデルは、人工海藻上端付近の流速増大現象、および内部領域における流速波形の非対称性などの基本的に重要な内部領域の流れの特徴を表し得ない点で今後さらに検討を要する。

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.
- 菅原一晃・入江 功 (1990): 人工海藻による底質移動の制御効果について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 434-438.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右 (1974): 波による2次元海波変形に関する実験的研究, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 193-200.
- 間瀬 肇・吉田幸也・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.
- Darlymple, R. A. and P. L.-F. Liu (1978): Waves over soft muds; A two-layer fluid model, J. Phys. Oceano., Vol. 8, pp. 1121-1131.