

人工海藻による波・流れの制御と漂砂

伊 福 誠*

1. ま え が き

侵食海岸の保全には、離岸堤や潜堤等の人工構造物が採用されているが、堤体前面の局所洗掘に伴う沈下や強制砕波に伴う平均水位の上昇等の問題が指摘されている。こうしたことから、新たな海岸保全工法の開発が望まれている。こうした工法の一つとして人工海藻が提唱され、人工海藻を用いた波浪・漂砂制御に関する研究が行われるようになり、次第にその波浪制御効果や漂砂制御効果が明らかになりつつある(浅野ら, 1988; 間瀬ら, 1989; 小田ら, 1991; 伊福ら, 1994)。

しかしながら、人工海藻を敷設した領域全体に及ぶ波高減衰、岸沖・鉛直方向流速の構造や底面地形の変化をも考慮した研究は著者の知り得るところない。

こうしたことから、本研究では上述した現象を記述できる数値モデルを構築することを目的とした。構築した数値モデルをもとに、傾斜海浜上における波浪変形を既存の実験結果に基づいて解析するとともに、水平床上に人工海藻を敷設した場合の波高減衰や人工海藻周辺における岸沖方向流速の鉛直分布や浮遊砂濃度の分布等を既存の実験結果に基づいて解析し、実験結果との比較を通して数値モデルの有用性を検証しようとするものである。

2. 数 値 解 析

2.1 基礎方程式

(1) 運動量および連続の方程式

x 軸を水平な基準面にとり z 軸を基準面より鉛直上向きにとると、人工海藻の揺動を考慮した x 方向および z 方向の運動量方程式は以下のように表される。

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

また、連続の式は以下のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここに、 t は時間、 u および w は水平および鉛直方向の流速成分、 ρ は流体の密度、 p は圧力、 F_D は抗力であり次式で与えられる。

$$F_D = -c_D b N u_r \sqrt{u_r^2 + w_r^2} / 2 \quad (4)$$

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 および 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 : 人工海藻の水平および鉛直方向の揺動速度) である。また、 τ_{xx} , τ_{xz} , τ_{zx} 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。

$$\tau_{ij} = \rho(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]^{1/2} \quad (6)$$

ここに、 ν は動粘性係数、 ν_t は渦動粘性係数、 C_s 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。

(2) 水面形の方程式

水面形の方程式は連続式を底面から水面まで積分して、次式のように与えられる。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{z_b}^{\xi} u dz \right) = 0 \quad (7)$$

ここに、 ξ は基準面から海面までの高さ、 z_b は基準面から海底までの高さである。

(3) 乱流拡散方程式

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。

$$\begin{aligned} & \gamma \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma K_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma K_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w_b \frac{\partial C}{\partial z} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 w_b 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。

$$\left. \begin{aligned} K_{xx} &= a(a_L u^2 + a_T w^2)/q \\ K_{zz} &= a(a_T u^2 + a_L w^2)/q \\ q &= (u^2 + w^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

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の方法 (1986) で算出する。

2.2 初期条件および境界条件

初期条件は、波のない状態とする。沖側、岸側、海底および海面においては、以下のような境界条件を課す。

(1) 沖側

水位変動、岸沖・鉛直方向流速および圧力は、波動理論を用いて算出する。

(2) 岸側

岸側境界においては、Sommerfeld の透過境界条件を課す。なお、濃度に対する境界条件は次式で与える。

$$\partial(uC)/\partial x = 0 \dots\dots\dots (10)$$

(3) 海底

$$\left. \begin{aligned} u &= w = 0 \\ \partial p / \partial z &= -\rho g + \partial \tau_{xz} / \partial x + \partial \tau_{zx} / \partial z \\ C &= C_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 C_0 は基準点濃度である。

(4) 海面

$$\left. \begin{aligned} p &= 0 \\ \partial u / \partial z &= 0 \\ w_\xi &= \partial \xi / \partial t + u_\xi (\partial \xi / \partial x) \\ K_{zz} (\partial C / \partial z) + w_0 C &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 w_ξ および u_ξ は、それぞれ海面における z および x 方向の流速成分である。

2.3 座標変換

自由水面や底面が時空間的に変動する場合を解析対象とする際、解析領域は必ずしも矩形ではない。解析領域を矩形として取り扱うと、境界における取り扱いが容易になり、領域内の流れ場を記述するのに好都合であると考えられる。そこで、Jamet ら (1970) にならい、図-1(a) のような海浜断面において底面の変動をも取り扱えるような座標変換を行う。

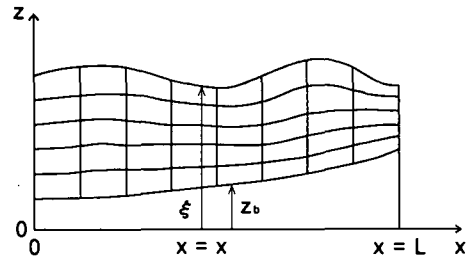
$$z' = (z - z_b) f_b(x, t), f_b(x, t) \equiv 1 / \{ \xi(x, t) - z_b(x, t) \} \dots\dots\dots (13)$$

式 (10) の座標変換は、変数 (x, z, t) を (x, z', t) に変換するものである。この座標変換を図-1(a) に対して行くと、次式を得る。

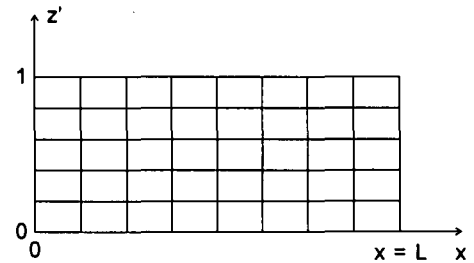
$$z' = 0 \text{ (海底)}, z' = 1 \text{ (海面)} \dots\dots\dots (14)$$

すなわち、図-1(a) のような海浜断面は、図-1(b) のような矩形領域に変換される。

座標変換によると従属変数が (x, z, t) から (x, z', t) に



(a) 変換前



(b) 変換後

図-1 座標変換

変わる。この場合、座標変換による微分は以下のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} + F_1 \frac{\partial}{\partial z'}, \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} + F_2 \frac{\partial}{\partial z'}, \frac{\partial}{\partial z} = F_3 \frac{\partial}{\partial z'} \dots\dots\dots (15)$$

なお、 F_1, F_2 および F_3 は、それぞれ次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} F_1 &\equiv z' / f_b (\partial f_b / \partial t) - f_b (\partial z_b / \partial t) \\ F_2 &\equiv z' / f_b (\partial f_b / \partial x) - f_b (\partial z_b / \partial x) \\ F_3 &\equiv f_b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

2.4 解析方法

移動床を対象とした解析では、底面の変動を流れの計算にフィードバックして時間発展を求める。その際、岸沖漂砂量は任意の時刻の濃度と x 方向の速度成分の積を底面から水面まで積分して算出し、漂砂の連続式を用いて各時間ステップ毎に地形変化を計算する。また、傾斜海浜上における波浪変形計算においては、水平方向の格子間隔は 0.1 m、鉛直方向は水深を 40 等分、時間間隔は一周期を 288 等分する。さらに、水平床上に人工海藻を敷設した場合の計算では、水平方向の格子間隔は 2 cm、鉛直方向は水深を 80 等分、時間間隔は一周期を 288 等分する。なお、底質の粒径は 0.05 mm とする。

3. 解析結果

3.1 一様斜面上における波浪変形

図-2 は、Hansen-Svendsen (1979) が実験に用いた水槽の諸元を示したものである。Hansen-Svendsen が実験

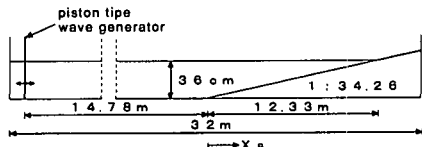


図-2 Hansen-Svendsen (1979) が実験に用いた水槽の諸元

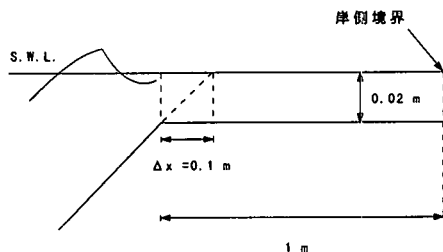


図-3 岸側境界における処理

に用いた波は、Shore Protection Manual (1977) によれば、Stokes 波およびクノイド波の領域に入る。そこで、沖側の境界に相当する図-2の波浪発生装置の位置で Stokes 波およびクノイド波による水面変動量、流速および圧力を与えた。一方、岸側においては、静水面の汀線位置の1つ沖側の点から一様勾配の緩斜面上での Sommerfeld の放射境界条件を用いて波を伝播させた (図-3)。

(1) 砕波の判定および砕波によるエネルギー損失の評価

砕波の判定は、自由水面における岸沖方向流速 u_c と波速 c との比がしきい値を超えると砕波が生ずると判定した。岩垣ら (1970) は、1/200 の一様勾配の緩斜面上での砕波では、 u_c/c がほぼ 0.93~1.0 であることを得ている。

本研究では、岩垣らが得た低界値 $u_c/c=0.93$ を用いて計算したが、その値を超えることはなかった。そこで、Hansen-Svendsen の実験結果と符合するような値を選びながら解析した。

砕波によるエネルギー損失は、式 (2) 中の渦動粘性係数を若干変形した次式を用いて評価した。

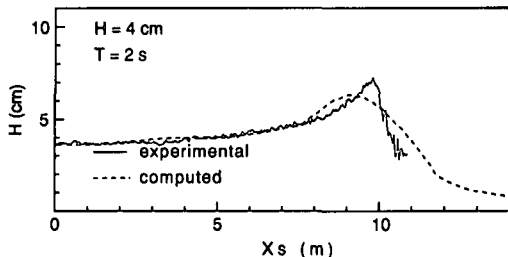
$$\nu_t = (1 + \alpha u_c/c) \nu_t \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 α は 1 より大きい係数である。

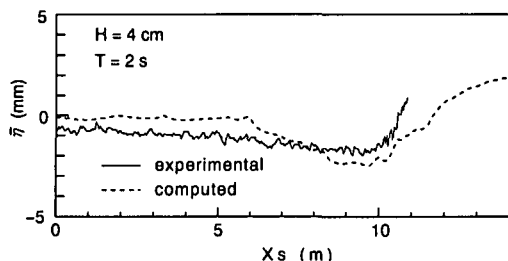
(2) 波高と平均水位の空間分布

図-4 は、図-2 に示す斜面が始まる $x_s=0$ より岸側における波高と平均水位の空間分布を示したもので、実線および破線は、それぞれ Hansen-Svendsen による実験結果および計算結果である。なお、波高は 4 cm、周期は 2 s の場合である。

(a) は波高の分布を示したものであり、実験値と計算値は、 $x_s=0$ から 7.5 m 付近まではほぼ一致している。実



(a) 波高



(b) 平均水位

図-4 波高および平均水位分布 (Test No. 051041)

験値は $x_s=9.5$ m 付近で波高は最大となるが、計算値は波高が最大となる位置は実験値より 0.3 m 程度沖側であり、波高も 1 cm 程度小さい。なお、波高が最大となる位置より岸側の波高分布をみると、実験値の減衰の割合が大きい。

(b) は平均水位の分布を示したものであり、砕波帯外における平均水位は計算値の方が大きい。また、砕波点においては、実験値よりも大きく、砕波点より岸側における平均水位の上昇量も小さい。

実験値と計算値の波高や平均水位の分布の差は、砕波によるエネルギー逸散や岸側の境界条件の設定法に起因するのではないかと考える。

3.2 水平床上に人工海藻を敷設した場合の波浪変形

岸沖方向の 7 m の解析領域中に沖側境界から 2 m の地点から 4 m 人工海藻を敷設した場合の波浪変形を天野 (1991) の実験結果に基づいて解析した。

(1) 波高分布

図-5 は、人工海藻敷設帯に人工海藻を 10 cm および 20 cm 間隔で敷設した場合の波高変化を示したものであり、波高は 6.1 cm、周期は 1.58 s である。図中の H/H_i は、人工海藻敷設帯の沖側端での波高 H_i で各測点における波高 H を無次元化したものである。なお、■、▲は天野の実験値、実線および破線は計算値であり、それぞれ人工海藻の敷設間隔が 10 cm および 20 cm の場合である。人工海藻の敷設間隔が 10 および 20 cm の場合とも計算結果は実験結果とよく符合する。人工海藻の敷設間隔が 10 cm の場合、敷設帯の岸側端における波高の減

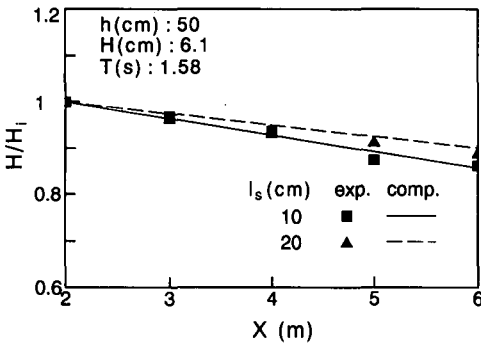


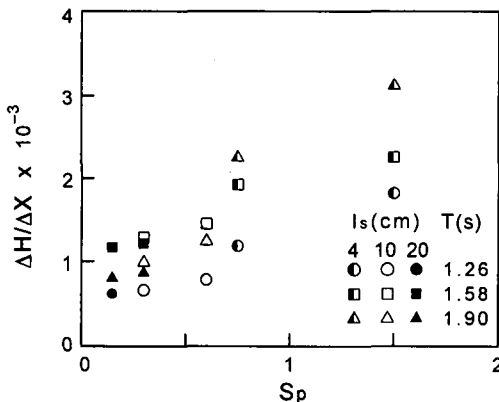
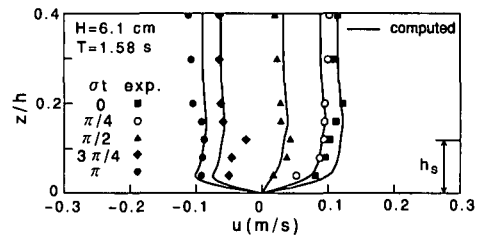
図-5 波高分布

衰率は15%程度である。また、敷設間隔が20 cmの場合、敷設帯の岸側端における波高の減衰率は10%程度であり、敷設間隔が10 cmの場合より僅かに小さい。なお、周期が1.26 sの場合、敷設間隔が10 および20 cmの場合とも敷設帯の岸側端における波高の減衰率は9%程度である。比較的周期が長い1.90 sの場合、敷設間隔が10 および20 cmの場合の敷設帯の岸側端における波高の減衰率は、それぞれ10%および5%程度であり、1.58 sの場合より減衰の割合は小さくなる。

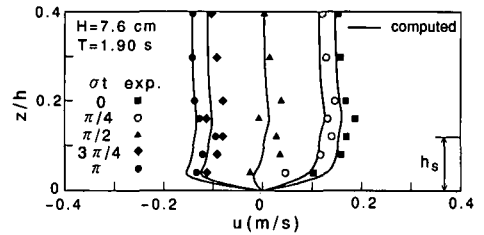
(2) 人工海藻パラメータと波高減衰

図-6 は人工海藻の敷設間隔が4 cm, 10 cm および20 cm, 人工海藻の長さが6 cm および12 cm とした場合の波高減衰率と人工海藻の植生パラメータ S_p ($S_p = (1 - \lambda_s)h_s/l_s$; λ_s : 人工海藻の開口率, h_s : 人工海藻の長さ, l_s : 人工海藻の敷設間隔) との関係を示したものである。

人工海藻の敷設間隔が狭い4 cm の場合が10 cm および20 cm の場合より波高減衰率は大きく、その中でも人工海藻の長さが12 cm の場合が波高減衰率は大きい。周期別にみると、 S_p が0.6 までとは異なり、 S_p が0.75 より大きい場合、すなわち人工海藻の敷設間隔が4 cm の

図-6 波高減衰率と S_p との関係

(a) 波高6.1 cm, 周期1.58 s



(b) 波高7.6 cm, 周期1.90 s

図-7 人工海藻周辺の流速分布

場合、周期が長いものほど波高減衰率は大きい。

3.3 人工海藻周辺の流速分布

図-7 は、人工海藻敷設帯中央位置より2 cm 岸側の点における流速の鉛直分布を示したものである。また、図中の実線は計算値、■, ○, ▲, ◆ および ● は天野の実験値であり、それぞれ位相が0, $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$ および π rad の場合を示す。なお、流速は岸向きを正、沖向きを負とする。

(a) は、波高6.1 cm, 周期1.58 s の場合である。計算結果をみると、0 rad の位相では、実験値と計算値とはよく符合している。 $\pi/4$ および $\pi/2$ rad の位相では実験値と計算値はよく一致している。なお、 $3\pi/4$ rad の位相では、人工海藻上端より下方では、実験値と計算値との差は他の位相と比較して大きいものの、人工海藻上端より上方では両者はよく一致している。伊福ら (1995) の結果と比較すると、人工海藻上端付近での岸方向への流速のシフトや底面近傍での流速の歪をよく再現している。

(b) は、波高7.6 cm, 周期1.90 s の場合である。計算結果をみると、0 および $\pi/4$ rad の位相では実験値と計算値の一致の度合いはよい。また、 $\pi/2$ rad の位相では伊福ら (1995) の結果とほぼ似た傾向を示すが、実験値と計算値の差は小さくなっている。さらに、 $3\pi/4$ および π rad の位相では、 π rad の位相での人工海藻先端部において実験値と計算値の一致の度合いが悪いことを除けば、両者の一致の度合いは良好である。なお、 $\pi/2$ rad の位相では底面近傍における実験結果の先走り現象を計算結果はうまく再現している。

3.4 平均濃度の鉛直分布

図-8 は、人工海藻敷設点における一周周期平均した濃

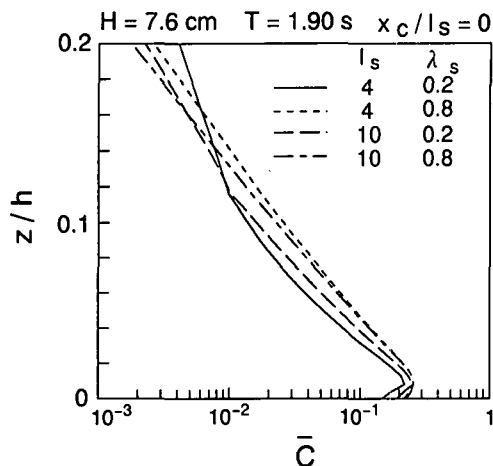


図-8 平均濃度の鉛直分布：波高 7.6 cm，周期 1.90 s

度の鉛直分布を示したものである。また、図中の実線および密な破線は、人工海藻の敷設間隔 4 cm，開口率 0.2 および 0.8，疎な破線および一点鎖線は人工海藻の敷設間隔 10 cm，開口率 0.2 および 0.8 である。

底面において人工海藻の敷設間隔が 4 cm，開口率が 0.2 の場合に平均濃度は 4 ケース中最も低い。底面より 5 mm の高さにおける平均濃度は 0.2 程度であり，ほぼ等しい。開口率が 0.8 の場合，平均濃度は直線的に減少するが，その濃度は人工海藻の敷設間隔が 4 cm の場合が僅かに高い。開口率が 0.2 の場合，人工海藻の敷設間隔が 4 cm と 10 cm の両者とも人工海藻上端 ($z/h=0.2$) 付近まで反った分布形状となるが，その反り方は人工海藻の敷設間隔が 4 cm の方が顕著である。また，人工海藻上端付近では両者の濃度はほぼ同一となり，それより上方では勾配は急になり，その度合いは人工海藻の敷設間隔が 4 cm の場合が大きい。開口率が 0.2 の場合，人工海藻上端より上方で平均濃度の鉛直分布はその勾配が急になり，平均濃度の減少が開口率が 0.8 の場合と比較して緩やかである。これは開口率が 0.2 と小さいために人工海藻敷設点付近での鉛直流が増大することおよび流速がゼロ・ダウン・クロスする $\pi/2$ とゼロ・アップ・クロスする $3\pi/2$ の位相付近での渦の発生などにより浮遊砂が渦に取り込まれ浮遊砂雲として人工海藻先端付近に輸送されることに起因すると考える。

3.5 底面の変動に伴う波高分布

図-9 は，計算開始後 50 周期目における波高分布と底面の変動量とを示したものである。図中の波高分布のうち実線および破線は，それぞれ固定床および移動床を対象としたものである。移動床の場合，人工海藻の敷設開始点である $x=2$ m 付近では局所洗掘が生じているが，人工海藻敷設帯では砂の堆積がみられる。固定床および

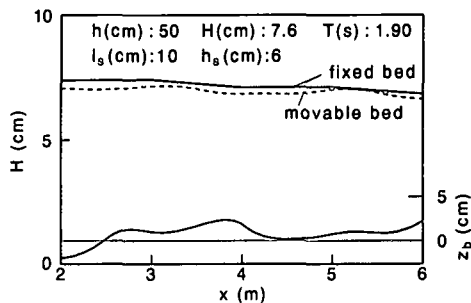


図-9 固定床および移動床上の波高分布

移動床の場合とも人工海藻敷設点の両端における波高減衰率は 10% 程度であるが，移動床の場合が波高は小さめである。

4. あとがき

流速の鉛直分布と底面の時空間的変動をも記述可能な数値モデルを構築し，既存の実験結果との比較を通してその有用性を検証した。水平床における波浪変形や人工海藻周辺の流速分布についてはほぼ満足行く結果が得られたが，一様斜面上における波浪変形計算では必ずしも実験結果と符合するような結果は得られなかった。このことは，砕波によるエネルギーの減衰や砕波後の波の遡上・流下をうまくモデル化する必要があると考える。

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.
- 天野健次 (1991): 硬質型人工海藻による波浪・漂砂制御に関する基礎的研究，大阪市立大学大学院工学研究科修士論文，pp. 1-133.
- 伊福 誠 (1986): 砕波帯における浮遊砂の濃度分布，ながれ，Vol. 5, pp. 326-339.
- 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.
- 岩垣雄一・酒井哲郎・開昭淳一・川島 毅 (1970): 砕波付近の表面水粒子速度に関する実験，第 17 回海岸工学講演会論文集，pp. 67-72.
- 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 (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.
- Hansen, J. B. and I. A. Svendsen (1979): Regular waves in shoaling water experimental data, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Technical University of Denmark, Series paper No. 21.
- Jamet, P., Lascaux, P. and Raviart, D. A. (1970): Une méthode de résolution numérique des équations de Navier-Stokes, Num. Math. 16, Springer-Verlag.
- U. S. Army Coastal Engineering Research Center (1977): Shore Protection Manual Vol. 1, p. 2-35.