

揺動する人工海藻周辺における流れと浮遊砂粒子の運動

Flow and Movement of Suspended Sediment around Swaying Artificial Seaweed

伊福 誠*・林 秀郎**

By Makoto IFUKU and Hidero HAYASHI

Numerical analysis was performed for the motion of sand particles in the distorted flow field. Flow around artificial seaweed was computed by LES. The effect of collision/passing of sand particles against artificial seaweed is considered in the basic equation.

In the case in which artificial seaweed is not swaying, the direction of sand particle is shoreward and with an increase in the opening rate of artificial seaweed, the distance the sand particle is moved increases.

The distance moved at the released height, $z/d \simeq 1,500$, is small compared to that at the upper or lower heights.

Key words: artificial seaweed, suspended sediment, collision

1. はじめに

近年、わが国の海岸において人工的に砂浜を造成する養浜工がなされ、養浜に用いた砂の流失防止を目的として離岸堤が築造されている。また、眺望の確保や景観の保全、小型船舶の航行に支障を来さないこと、あるいは良好な海水交換の保持などの理由から、潜堤や人工リーフも築造されている。しかしながら、潜堤は潮位差の大きい海域においては、天端水深の増減によって消波能力が大きく変化するという問題もある。さらに、離岸堤と同様、潜堤が海浜に複数基築造された場合には開口部から沖合いへの砂の流出といった海浜の保全という面からするとマイナスの影響もあるのが実状である。

そこで、景観をも含んだ水環境の保全や整備が唱えられ始め、生態系をも考慮した波浪・漂砂制御構造物への移行が急がれている。その新たな制御構造物の1つとして人工海藻が提案されている^{1),2)}。藻場は、生物生産力および浄化作用が大きく、それらを兼ね備えた自然の消波構造物でもある。したがって、藻場を保全・創造し生物の棲みやすい環境を整備すればそれらによる浄化機能が付加されることになる。これらの効果は人工的な海藻であっても、付着生物の生育・活動によって期待できると考えられる。

*正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科
(〒790 松山市文京町3番)

**正会員 工博 株式会社 大林組 技術研究所
(〒204 東京都清瀬市下清戸 4-640)

伊福ら³⁾は、人工海藻周辺の流れや地形変化について検討している。しかしながら、実験で得た人工海藻間の中央付近に形成されるコブ状の地形変化を再現し得ていない。伊福らの解析は、掃流漂砂のみを対象としたものである。人工海藻を敷設した場合の地形変化は、掃流漂砂だけでなく植生層内の浮遊漂砂も重要な役割を果たすのではないかと考える。さらに、植生層境界付近においては、流れの向きが逆転する位相付近で渦の発生が確認されることから、こうした渦に取り込まれる砂粒子の挙動を明らかにすることは、現象の解明にとって重要であると考えられる。

本論文では、任意の透過率を有する人工海藻と砂粒子との衝突・通過を確率論的にモデル化し、人工海藻周辺の砂粒子の挙動を数値解析により調べようとするものである。

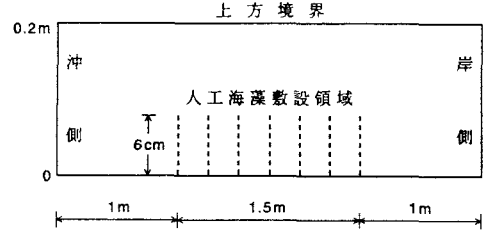


図-1 解析領域

2. 数値解析

2.1 流れ場の解析

底面に任意の透過率を有する人工海藻を敷設した場合の流れ場は、SGSのスマゴリンスキーモデルに基づくLESを用いて解析する。また、圧力に関するPoisson方程式はGEI法を用いて計算した。なお、人工海藻のヤング率は88.1 kgf/mm²とし、海藻の揺動は浅野らのモデル⁴⁾を援用した。対象とする波は、波高6.1 cmと7.6 cm、周期1.58 sと1.90 sの微小振幅波である。

解析領域は、図-1に示す通りであり、人工海藻の長さおよび敷設間隔は、それぞれ6 cmおよび10 cmである。

2.2 砂粒子の運動に関する基礎方程式⁵⁾

球状の砂粒子を対象とすると、Basset-Boussinesq-Oseenの方程式にSaffman⁶⁾による揚力の効果を考慮した砂粒子の運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt_p} = & \frac{1}{2} \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} \frac{1}{d} C_{Dx}(u_f - u_p)V_r + \frac{2\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} \left(\frac{du_f}{dt} + \frac{1}{2} \frac{du_f}{dt_p} \right) \\ & - \frac{2\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} \nu \nabla^2 u_f + \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} \frac{1}{d} \sqrt{\frac{36\nu}{\pi}} \int_{t_0}^{t_p} \frac{d}{d\tau} (u_f - u_p) \frac{d\tau}{\sqrt{(t_p - \tau)}} d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dw_p}{dt_p} = & \frac{1}{2} \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} \frac{1}{d} C_{Dz}(w_f - w_p)V_r + \frac{2\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} \left(\frac{dw_f}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dw_f}{dt_p} \right) \\ & - \frac{2\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} \nu \nabla^2 w_f - \frac{2(\rho_p - \rho_f)}{2\rho_p + \rho_f} g + \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} \frac{1}{d} \sqrt{\frac{36\nu}{\pi}} \int_{t_0}^{t_p} \frac{d}{d\tau} (w_f - w_p) \frac{d\tau}{\sqrt{(t_p - \tau)}} d\tau \\ & + \text{sign} \left(\frac{\partial u_f}{\partial z} \right) \frac{3\rho_f}{\rho_p + \rho_f} \frac{1}{\pi d} K \nu^{1/2} \left| \frac{\partial u_f}{\partial z} \right|^{1/2} (u_f - u_p) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 u_f, w_f および u_p, w_p は、それぞれ x 方向および z 方向の水粒子および砂粒子の速度成分、 ρ_p は粒子の密度、 C_{Dx}, C_{Dz} は x 方向および z 方向の抗力係数、 K は正の係数 ($K=6.46$)、 ν は動粘性係数、 d は砂粒子の粒径である。なお、式(2)の右辺第6項はせん断流れにおいて流体と粒子に x 方向の相対速度がある場合に働く揚力である。また、 V_r は次式で表される。

$$V_r = \sqrt{(u_f - u_p)^2 + (w_f - w_p)^2} \quad (3)$$

なお、球状粒子の抗力係数 C_{Dx} 、 C_{Dz} は次式で算出する。

$$C_{Dx} = \frac{24}{R_{ex}} + 4.5, \quad R_{ex} = \frac{|u_f - u_p|d}{\nu} \quad (4)$$

$$C_{Dz} = \frac{24}{R_{ez}} + 4.5, \quad R_{ez} = \frac{|w_f - w_p|d}{\nu} \quad (5)$$

2.3 砂粒子と揺動物体との衝突

図-2のような砂粒子と人工海藻との衝突状況を考える。砂粒子と人工海藻はC点で衝突する。いま、 $u_p > 0$ 、 $w_p < 0$ および $\alpha \leq \pi/2$ の場合を考える。

線分ONとSNを表す式は以下になる。

$$z = \frac{w_p}{u_p}x + (z_0 - \frac{w_p}{u_p}x_0), \quad z = \tan \alpha (x - x_s) \quad (6)$$

若干の幾何学的な処理を行うと、衝突する砂粒子の重心Aの座標は以下のように表される。

$$x_a = x_n - \frac{\alpha}{2 \sin(\alpha + \beta)} \cos \beta, \quad z_a = z_n + \frac{\alpha}{2 \sin(\alpha + \beta)} \sin \beta \quad (7)$$

ここに、 x_n および z_n は式(6)の第1式と第2式の交点Nの座標である。

時間 $t=t$ における砂粒子の重心の x 座標が x_a より大きく、 z 座標が z_a ($z_a \leq h_s$ 、 h_s は人工海藻の長さ)より小さければ、砂粒子と人工海藻は衝突する可能性がある。

2.4 砂粒子と揺動物体との衝突・通過の判定 (図-3)

平板における放射線の透過問題⁷⁾を参考にして、砂粒子と揺動物体との衝突あるいは通過の判定を確率的に調べる。

揺動物体は、開口率 λ_s を有するnet状のものを考える。砂粒子が図-2のように、揺動物体とまさに衝突せんとする場合の衝突と通過を考える。単位幅当たりの衝突面積および通過面積は、それぞれ $1 - \lambda_s$ および λ_s である。したがって、砂粒子が揺動物体を通過する確率 P は次式で与えられる。

$$P = \lambda_s \quad (8)$$

ここに、一様乱数 ξ を選び、一様乱数が次式を満足する場合、砂粒子は揺動物体を通過すると判定する。

$$\xi \leq P \quad (9)$$

2.5 数値解析法

x 方向の空間きざみ Δx は0.01 m、鉛直方向は底面から上方境界まで等比級数的に50に分割した。

粒子の運動方程式の解は2次のRunge-Kuttaの方法で求める。砂粒子の運動経路を、式(1)および式(2)を基礎式として数値計算するには、砂粒子の遭遇

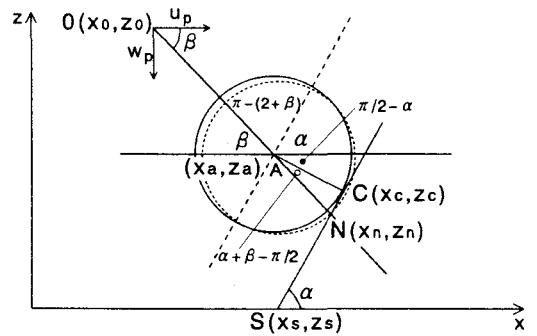


図-2 砂粒子と揺動物体との衝突

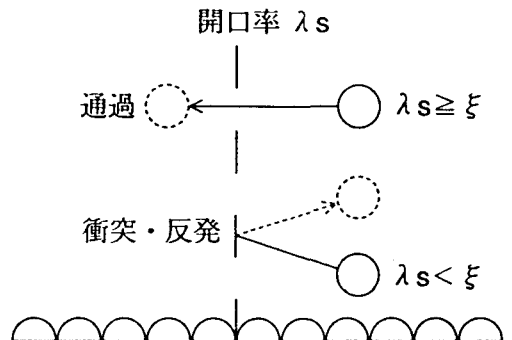


図-3 砂粒子の衝突・通過の判定

する流体塊のLagrange的运动特性量を入力する必要がある。しかしながら、流体塊のLagrange的特性量を求めることは困難であるため、ここではEuler的特性量を用いる。すなわち、流体塊の速度成分は隣接する4つの格子点上の速度成分に重みをかけた次式で算出する(図-4)。

$$u_f = \frac{1}{A}(A_1 u_{i,j} + A_2 u_{i+1,j} + A_3 u_{i+1,j+1} + A_4 u_{i,j+1}) \quad (10)$$

$$w_f = \frac{1}{A}(A_1 w_{i,j} + A_2 w_{i+1,j} + A_3 w_{i+1,j+1} + A_4 w_{i,j+1}) \quad (11)$$

反発係数の値が衝突後の砂粒子の速度に及ぼす影響は大きいと思われる。辻本・中川⁸⁾は、一様流中における掃流砂粒子のsaltationのシミュレーションに

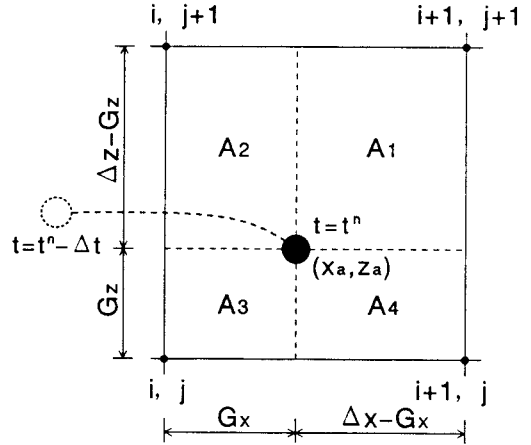


図-4 砂粒子位置における流速の評価

において、砂面における衝突時の反発係数を0.5あるいは0.8として解析している。また、土屋ら⁹⁾は、掃流砂礫のsaltationにおいて、跳躍する砂礫が底面の砂礫と衝突する際の反発係数は、無次元掃流力に無関係に0.55程度の値であることを得ている。砂粒子と比較的柔な物体との反発係数について議論した研究は、著者の知り得る限りないので、前述した2つの研究を参考にし0.6として解析する。なお、砂粒子の密度は 2.65 g/cm^3 、粒径は 0.02 mm とする。

3. 解析結果

3.1 平均流速ベクトルと平均レイノルズ応力

図-5に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 τ_{xz}/ρ_f 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

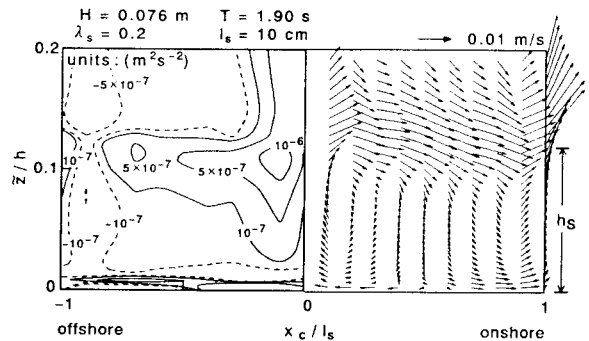


図-5 平均流速と平均レイノルズ応力 τ_{xz}/ρ_f

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。平均流速も平均レイノルズ応力とも植生境界付近で最大となることから、この領域で大きな混合、乱れが存在する。

3.2 砂粒子の動き

(a) 人工海藻周辺の砂粒子の軌跡

図-6は、任意の高さから放出した砂粒子の8周期間の軌跡を示したものであり、(a)および(b)は、それぞれ人工海藻が揺動しない場合および揺動する場合の結果である。また、人工海藻の開口率が0.5、波

高および周期は、それぞれ7.6 cmおよび1.9 sである。なお、砂粒子の放出位置は人工海藻敷設点の間である。(a)では底面近傍で放出された砂粒子は、底面近傍の鉛直方向の速度成分が比較的小さいことから、放出された高さとはほぼ同一の高さを岸沖方向に移動し、8周期後には放出された位置より岸側にある。また、人工海藻の1/2程度の高さで放出された砂粒子は、鉛直方向の速度成分が底面近傍より大きいことから鉛直方向の移動距離が長くなっている。しかしながら、岸沖方向の移動距離は底面近傍で放出された砂粒子のそれより小さい。これは、底面近傍では1周期平均の流れがこの高さのそれより大きいためであると考えられる。一方、人工海藻の先端の高さで放出された砂粒子は、人工海藻と衝突を繰り返しながら徐々に岸側に移動している。人工海藻の先端付近では、流速波形の歪みが最も大きく岸向きの流速振幅が沖向きのそれより大きいため砂粒子の移動距離が最も長い。なお、鉛直方向の移動距離は人工海藻の1/2の高さで放出された場合より短いようである。(b)では、底面近傍で放出された砂粒子は、人工海藻間において往復運動を繰り返しているようである。また、人工海藻の1/2程度の高さで放出された砂粒子は、人工海藻との衝突・通過を繰り返しながら徐々に沖側に移動している。一方、人工海藻の先端の高さで放出された砂粒子は、人工海藻との衝突・通過を繰り返しながら鉛直方向に移動している。なお、岸沖方向の移動幅はほぼ人工海藻の敷設間隔と同一である。

(b) 砂粒子の平均移動距離

図-7は、 $t/T=0$ の位相から8周期目までの砂粒子の平均水平移動距離を示したものである。(a)および(b)は、それぞれ人工海藻が揺動しない場合および揺動する場合の結果である。また、砂粒子の放出位置は人工海藻敷設点の2 cm 岸側である。なお、各開口率について20ケースの計算を行い、その平均値を平均移動距離とした。

人工海藻が揺動しない(a)では、いずれの放出高さとも岸側に移動しているが人工海藻

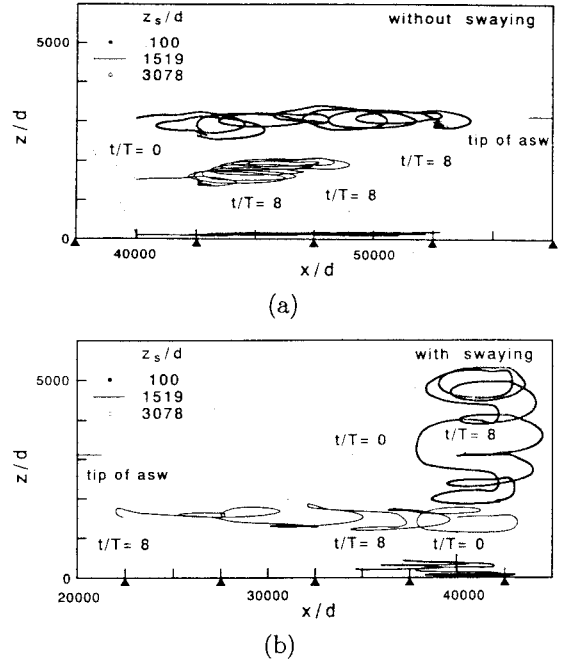


図-6 砂粒子の軌跡

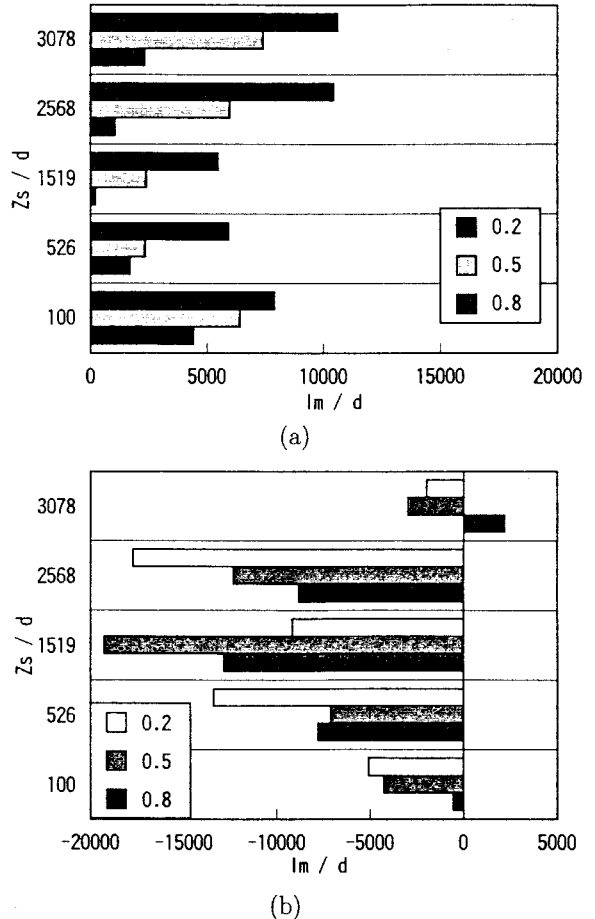


図-7 砂粒子の平均移動距離

の長さの1/2の高さの平均移動距離は他の高さと比較して小さい。このことは、人工海藻敷設点の沖側では平均流の鉛直成分が水平成分より大きいことや人工海藻の敷設点の岸側2 cmのこの高さ付近を中心とした循環流が形成され、この高さでは平均流の鉛直成分が水平成分より大きいこととも関連しているのではないかと考える。また、開口率が大きい場合ほど平均移動距離は小さい。このことは、開口率が大きいほど砂粒子と人工海藻が衝突する確率が低く、砂粒子が描く軌跡も構造物がない場合の楕円形状と似ているためであると考えられる。さらに、植生層境界付近では植生層内に比べて岸向き流速が卓越するため平均移動距離も大きい。一方、人工海藻が揺動する(b)では、1例を除けばいずれの高さとも沖側に移動している。砂粒子の放出高さが人工海藻の先端付近の場合、図-6で明らかなように砂粒子は鉛直方向の移動が他の高さで放出された場合より大きいため異なった傾向を示す。人工海藻の長さの1/2の高さの平均移動距離は、植生層境界を除く他の高さが開口率が大きいほど平均に同距離は短いという傾向とは若干異なる。砂粒子の放出位置が異なる場合でも(a)および(b)とほぼ似た傾向を示す。

以上の結果から判断すると、流速を低減させ砂礫を捕捉するといった人工海藻の所期の目的からすると人工海藻の材質はある程度の剛性を有するものが好ましいようである。

4. おわりに

透過性構造物周辺における浮遊砂粒子の運動について数値解析的に検討し、人工海藻の開口率が砂粒子の軌跡や移動距離に及ぼす影響についていくつかの新たな知見を得た。しかしながら、人工海藻の効果を発揮させようとするには、その敷設位置は砂礫の移動が最も激しい砕波点付近になる。そこでは本論文で解析対象としたような一様水深ではないと同時に砕波による鉛直方向の流速の増大や戻り流れの存在もある。今後は、自由水面や底面の変動をも考慮した流れ場の変化とそれに伴う砂礫の運動を捉えることが可能なモデルの構築が重要となると考える。

参考文献

- 1) 小田一紀・天野健次・小林憲一・坂田則彦：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, 1991.
- 2) 間瀬 肇・古田幸也・酒井哲郎・浅野敏之：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, 1989.
- 3) 伊福 誠・岩田 充浩・米澤 泰雄・坂田 則彦：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, 1994.
- 4) 浅野敏之・出口 浩・間瀬 肇・小林信久：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, 1991.
- 5) Corrsin, S. and J. Lumley: On the equation of motion for a particle in turbulent fluid, Appl. Sci. Res. Section A, Vol. 6, pp. 114-116, 1956.
- 6) Saffman, P. G.: The lift on a small sphere in a slow shear flow, Journal of fluid mechanics, Vol. 22, part 2, pp. 385-400, 1965.
- 7) 磯田和男・大野 豊 監修：新版 数値計算ハンドブック，pp. 1134-1137, 1993.
- 8) 辻本哲郎・中川博次：掃流粒子のSaltationの確率過程論的解析，土木学会論文集，第345号/II-1，pp. 83-90, 1984.
- 9) 土屋義人・青山俊樹：水流による砂れきSaltationの機構(2)-Successive Saltationの理論について-，京都大学防災研究所年報，第13号B，pp. 199-216, 1970.