

河床礫付着藻類の剥離過程の数値予測への 数値移動床の貢献

NUMERICAL SIMULATION OF EXFOLIATION PROCESS OF SESSILE ALGAE BY MOVABLE BED SIMULATOR

原田英治¹・後藤仁志²

Eiji HARADA and Hitoshi GOTOH

¹正会員 工博 京都大学助手 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻 (同上)

Construction of a dam promotes the decrease of the sediment transport, and the resultant development of the stable armor bed in their downstream river. Under such condition, the river bed tends to be less disturbed and the eutrophication develops. This river bed situation allows the sessile algae growing thickly over the stable armor bed, which has a bad influence on the environment. One of the measures to remove the sessile algae is a sand sprinkling over the stable armor bed. The sprinkled sand, which moves in saltation mode over the stable armor bed with scratching the sessile algae, makes the sessile algae removed from the armor bed. In this paper, the numerical simulation for the exfoliation process of the sessile algae under saltation mode was simulated by the movable bed simulator based on the three dimensional distinct element method. Furthermore, the exfoliation process due to collapse of the armor coat under a high bottom shear due to a flood is simulated.

Key Words: sessile algae, exfoliation process, Distinct Element Method, saltation, armor bed

1. 緒言

ダム建設や砂利採取は、下流への土砂供給を減少させ、特にダムの下流域ではアーマコートの形成が進行して、河床は低撓乱状態へと向かう。三河湾に注ぐ矢作川がその好例である¹⁾。河床の撓乱が減少すると、付着性藻類の成長が促進され、河床の礫上に異常な藻類の繁茂が生じる。異常繁茂した藻類で被覆された石礫は、澱んで汚れた印象を人々に感じさせ、景観的に好ましくない。また、異常繁茂は鮎が主食としている珪藻や藍藻の育成を妨げ、流域の生態系を変質させるといったハビタートへの悪影響も与えることとなる。

ダム建設後の流況下で、河床礫付着性藻類の異常繁茂を抑制する対策としては、対象流域への砂利投入がある。この対策は、ダムコントロール下の出水規模で投入された砂利を付着性藻類が繁茂した河床礫と接触しつつ流下させて、付着性藻類の剥離を促すとともに、その後の付着性藻類の再出現抑止を期待しようというものである。これまでも北村ら

²⁾、山本ら³⁾によって付着性藻類の剥離過程を対象とした室内水路による実験が実施され、付着性藻類が掃流砂によって剥離する様子が確認され、その数値シミュレーションによる再現も試みられている。これら従来の数値シミュレーションの付着性藻類の剥離のモデル化については、ともに石橋⁴⁾の滑面上でのsaltation運動解析を援用し、砂粒子が礫面と衝突する際の摩擦力による仕事を剥離率と関連付けて評価している。北村ら²⁾は、流砂モデルを介在させて、流砂量に比例し、砂礫径および摩擦速度の増加関数で仕事量を評価し、一方、山本ら³⁾は、個別要素法を基礎としたシミュレーションから得られる接触力から仕事量を評価している。ところで、この種のシミュレーションは、剥離率を如何に適切に表現できるかが鍵となるため、滑面を対象とした石橋⁴⁾の解析結果を援用する際には、別途に実河床の凹凸を考慮した粗面上での摩擦力の評価が必要となる。河床の凹凸評価に対しては、北村ら²⁾と同一のコンセプトであるが、saltation運動している砂粒子が成す仕事が、遮蔽効果を考慮した有効摩擦速度に

よって評価された研究（例えば、辻本ら⁵⁾、田代ら⁶⁾）や、アーマー河床が崩壊し、全粒径階移動状態における河床凹凸レベルの増加に対して、辻本・中川⁷⁾の不規則継続跳躍モデルによるsaltation特性量を用いて仕事量を評価した田代ら⁶⁾の研究がある。掃流力レベルが小さく、投入された砂粒子のsaltation運動が支配的である静的粗粒化条件下に対しては、特に辻本・中川⁷⁾の確率過程論的解析による評価は有効な手法であり実験との対応も良好であるが、例えば礫河床の凹部では付着性藻類が剥離し難いといった礫河床の凹凸がもたらす剥離分布の非一様性の評価に対しては、この種の解析に限界があることも事実である。また、フラッシュ洪水によって河床の掃流力が増加し、アーマー河床を構成している礫自身も移動する動的粗粒化状態を河床が呈するならば、藻類が付着した礫同士の衝突による剥離効果も考慮した評価が必要であろう。

本研究では、確率過程論的には詳細な議論が困難である河床の凹凸による遮蔽効果および藻類が付着した礫同士の衝突による剥離が予想される動的な条件下の剥離過程をシミュレーションするため、個々の粒子の運動が陽に追跡可能である個別要素法を基礎とした三次元数値移動床によって、掃流砂および礫の運動を評価して、付着性藻類の剥離過程の計算力学的な検討を試みる。

2. シミュレーションの概要

(1) 砂礫粒子系のモデル

砂礫粒子の運動は、粒子間衝突を陽に取り扱える数値移動床（個別要素法型の粒状体モデル）⁸⁾によって記述した。粒子 i の三次元場での運動は、並進および回転の運動方程式

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d_k^3 \frac{d\mathbf{u}_{pi}}{dt} = \mathbf{F}_{pint} + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_{gr} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d_k^2 |\mathbf{U} - \mathbf{u}_{pi}| (\mathbf{U} - \mathbf{u}_{pi}) \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{gr} = -\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d_k^3 \mathbf{g} \quad (3)$$

$$\frac{\sigma \pi d_k^5}{60} \frac{d\boldsymbol{\omega}_{pi}}{dt} = \mathbf{T}_i \quad (4)$$

$$C_D = C_{D\infty} + \frac{24\nu}{d_k \cdot |\mathbf{U} - \mathbf{u}_{pi}|} \quad (5)$$

により記述される。ここに、 ρ ：水の密度、 σ ：粒子の密度、 C_M ：付加質量係数（ $C_M=0.5$ ）、 A_2, A_3 ：粒子

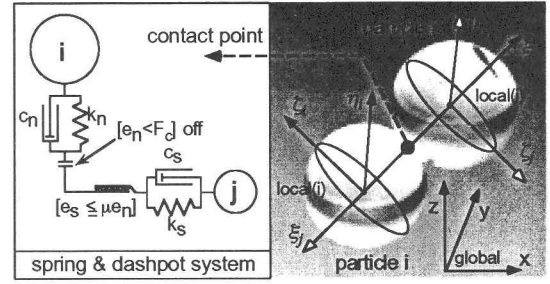


図-1 粒子間接触モデル

の二次元・三次元形状係数（球を想定し、 $A_2=\pi/4$ 、 $A_3=\pi/6$ ）、 d_k ：粒径階 k の粒子径、 $\mathbf{U}$ ：粒子の近傍流速ベクトル、 $\mathbf{u}_{pi}$ ：粒子 i の移動速度ベクトル、 t ：時間、 $\mathbf{F}_{pint}$ ：粒子間相互作用ベクトル、 $\mathbf{F}_D$ ：抗力ベクトル、 $\mathbf{F}_{gr}$ ：重力ベクトル、 $\mathbf{g}$ ：重力加速度ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}_{pi}$ ：粒子の回転速度ベクトル、 $\mathbf{T}_i$ ：粒子 i に作用するトルク、 C_D ：抗力係数（ $C_{D\infty}=0.4$ ）、 ν ：動粘性係数である。粒子間相互作用力は、図-1に示すローカル座標系（ ξ, η, ζ ）において接平面内二成分と法線方向一成分についてバネ-ダッシュポットモデルを導入して記述する。粒子 i, j の接平面には、法線（ ξ 軸）方向および接平面（ η 軸および ζ 軸）方向に弾性スプリング（バネ定数 k_n, k_s ）およびダッシュポット（粘性定数 c_n, c_s ）を配置して相互作用を表現する。なお、本シミュレーションでは、粒子間の接平面に生じる法線方向まわりの回転に対するねじりモーメントは考慮していない。法線方向力（ F_ξ ）と接線方向力（ F_η, F_ζ ）は、

$$\left. \begin{aligned} F_\xi(t) &= e_n(t) + d_n(t) \\ e_n(t) &= e_n(t - \Delta t) + k_n \cdot \Delta \xi_i \\ d_n(t) &= c_n \cdot \Delta \dot{\xi}_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} F_\eta(t) &= e_{s\eta}(t) + d_{s\eta}(t) \\ e_{s\eta}(t) &= e_{s\eta}(t - \Delta t) + k_s \cdot \Delta \eta_i \\ d_{s\eta}(t) &= c_s \cdot \Delta \dot{\eta}_i \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} F_\zeta(t) &= e_{s\zeta}(t) + d_{s\zeta}(t) \\ e_{s\zeta}(t) &= e_{s\zeta}(t - \Delta t) + k_s \cdot \Delta \zeta_i \\ d_{s\zeta}(t) &= c_s \cdot \Delta \dot{\zeta}_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

と評価される。ここに、 e_n, e_s ：法線、接平面におけるバネによる抗力、 d_n, d_s ：法線、接平面におけるダッシュポットによる抗力である。なお、式中の「 $\cdot$ 」は時間微分を示す。これらの砂粒子間作用力の評価等のモデルの詳細については、後藤ら⁸⁾と同様

の設定としている。また、本研究で用いたモデル定数は、個別要素法型の粒状体モデルで用いる計算時間ステップ $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ s および最大粒径 $d_1 = 1.0$ cm の粒子に対して、後藤ら⁹⁾の設定法に準拠して、法線および接線方向のスプリングとダッシュポットについて、それぞれ $k_n = 187.90$ (N/m), $k_s = 72.27$ (N/m), $c_n = 0.84$ (Ns/m), $c_s = 0.52$ (Ns/m) に設定した。これらのモデル定数は、既往の実験結果から得られている均一粒子の場合の底面せん断力と流量の関係を良好に再現するように設定されている。以上の様にして算定された (ξ, η, ζ) 系における粒子間相互作用力ベクトルは座標変換によってグローバル座標系の各成分に変換され、式 (1) の F_{pint} に代入される。

(2) 藻類剥離過程のモデル

河床の礫表層に繁茂した付着性藻類の剥離の評価は、掃流砂粒子と付着性藻類が繁茂した礫構成粒子および礫間の衝突による礫構成粒子への接線方向への仕事量

$$W_{\text{tang}} = F_{\text{tang}} \cdot v \cdot \Delta t; F_{\text{tang}} = \sqrt{(F_\eta)^2 + (F_\zeta)^2} \quad (9)$$

と関連付けて、

$$W_{\text{tang}} > W_{\text{critical}} (= \alpha \cdot W_{\text{max}}) \quad (10)$$

の条件を満足するとき剥離が生じるとする。ここに、 F_{tang} : 接線方向合力, v : F_{tang} が作用する方向への衝突粒子間の相対速度, W_{critical} : 剥離限界, α : 剥離量を規定するパラメーター, W_{max} : 掃流砂粒子と礫構成粒子との間に生じた最大の仕事量 (ここでは, saltation 粒子を対象としたシミュレーションを通じて得られた仕事量の最大値を W_{max} とした) である。

(3) 流れ系のモデル

流れ場の詳細な評価には、空間的非一様性、乱流特性、粒子混入による流れ場の影響等、検討事項が少なくないが、ここでは、砂粒子の運動による剥離過程の記述に重点を置き、流れ場のモデル化は簡便な取扱いとした¹⁰⁾。粗面对数則で平均流速分布を与え、対数則の原点は、後述する計算条件 (ケース A およびケース B) によって異なり、礫移動が生じないケース A では、表層近傍砂粒子 (最高位置に存在する砂粒子の中心から河床を構成する最大粒径幅に存在する砂粒子) の平均中心座標で定義し、一方、礫を含む全粒径が移動するケース B は礫を構成する粒子の重心で定義した (図-2 参照)。なお、粗度係数は両ケースともに表層近傍砂粒子の平均粒径を用いることとした。また、乱れ強度は瀾瀬¹¹⁾ による普遍関数表示 (水深 $h = 50.0$ cm と仮定) で与え、Monte Carlo 法で乱れの時系列を模擬し、遮蔽係数

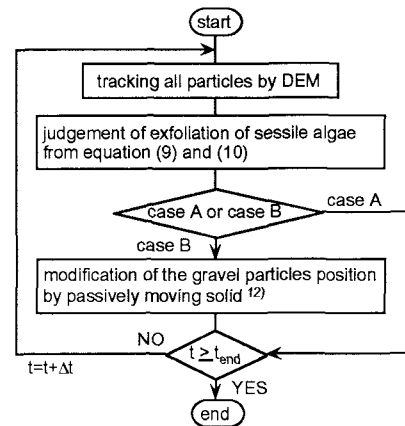
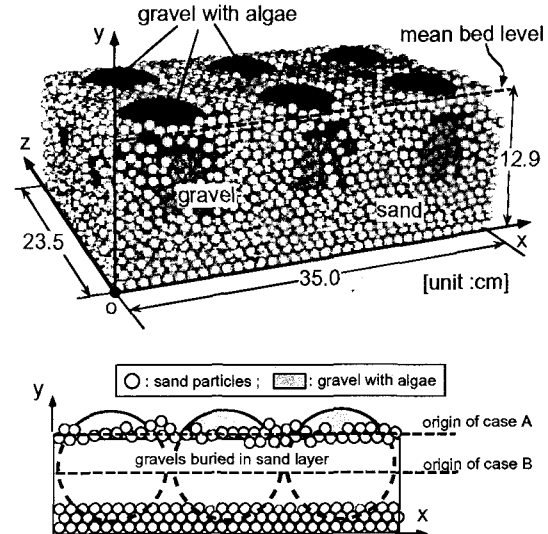


図-2 計算領域および計算プロセス

を導入して近傍の砂粒子配列による遮蔽効果を考慮した¹⁰⁾。なお、奥行き方向 (z 軸方向) には、一様流速分布を与えた。

(4) 計算条件

シミュレーションは、河床構成砂礫の輸送形態の違いによってケース A およびケース B の 2 ケースについて実施した。ケース A は、礫間に存在する砂粒子および投入砂粒子がアーマー化した礫河床上を掃流運動しながら河床の礫表層に付着した藻類を剥離させる過程、ケース B は、大出水時にアーマー礫河床が崩壊し、礫同士の衝突運動による付着性藻類の剥離が支配的な過程を想定した。

図-2 に対象計算領域および計算プロセスを示す。双方のケースのシミュレーションに用いた粒子は、直径 $d_1 = 1.0$ cm および $d_2 = 0.8$ cm であり、比重 $\sigma = 2.65$ である。ケース A では、直径 d_1 程度の粗度を有する固定粒子で構成した床上に直径 $D = 10.0$ cm の球殻によって模擬した 6 個の礫を固定配置し、それらの球殻の間隙に移動可能な砂粒子を配置して移動床

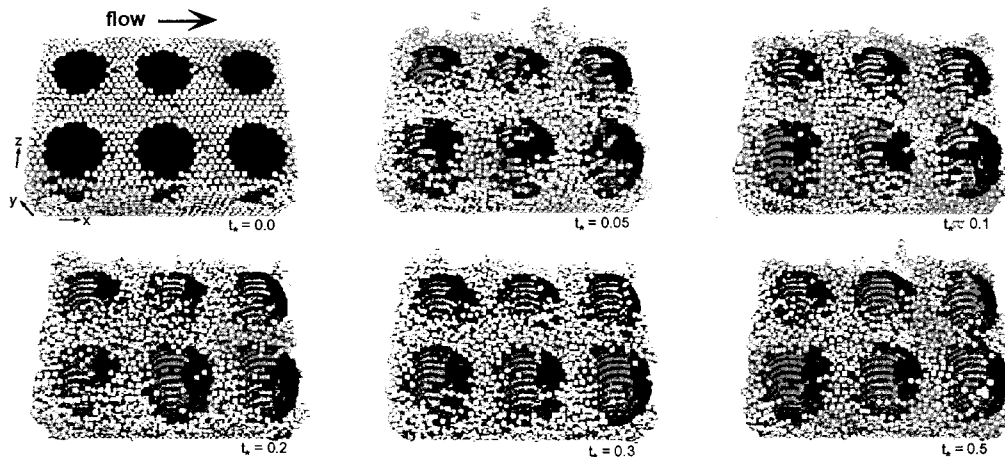


図-3 附着性藻類の剥離過程（ケースA）

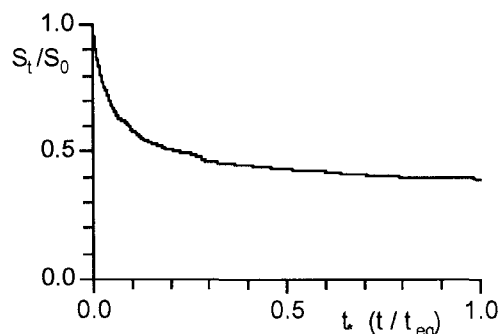


図-4 附着率の時系列（ケースA）

を形成した。球殻は直径 d_1 の粒子を用いて構成し、移動床を構成する砂粒子は、直径 d_1 および直径 d_2 の粒子が十分に均質に混合するようにランダムに配置した。なお、対象計算領域の総粒子数は13,850個である。一方、ケースBは、基本的な配置はケースAと同様であるが、礫を模擬した球殻を移動可能な条件に変更した。個々の球殻を構成する粒子群を剛体連結して、Koshizukaら¹²⁾のPassively Moving Solid Modelを準用して礫の重心回りの角運動量および粒子間の相対位置が保存されるように追跡した。なお、直径 $D=10.0$ cm（比重 $\sigma=2.65$ ）の礫とほぼ同重量になる粒子数を逆算し、それに見合った数の粒子をオーバーラップさせて球殻を構成した。しかしながら、粒子を重ねて形成した球殻の慣性モーメントは、球体の70%程度であり、均質な球体と比較して回転し易い特性を示す物体となっていることを付記しておく。また、ケースAおよびケースBともに計算領域の上・下流境界および側方境界においては、砂および礫構成粒子の運動に周期境界条件を課し、無次元掃流力 $\tau_e=0.1$ の条件下でシミュレーションを実施した。なお、剥離量を規定するパラメータ α は両ケースともに0.9とした。

3. 礫附着性藻類の剥離過程

(1) 掃流砂運動による剥離過程（ケースA）

ケースAのシミュレーションで得られた剥離過程のスナップショットを図-3に示す。図中で黒色に着色された箇所が附着性藻類によって被覆された礫を示す。掃流砂粒子と礫構成粒子との衝突による接線方向の仕事量が予め設定した剥離限界を越えると、黒色表示を藻が付着していない礫構成粒子を示すグレーに変更して、剥離の発生を表示した。なお、主流方向は紙面に向かって左から右に向かう方向である。また、初期配列の形成後、一定の掃流力を作用させて、掃流力に対する流砂量がほぼ一定になったことを確認した時点で、剥離モデルを有効にしており、無次元時刻 $t_e(=t/t_{eq})=0.0$ はその時刻を示す。横軸の規格化に用いた t_{eq} は剥離が十分に進行した静的平衡状態に達するまでの時間であり、ここではシミュレーションの終了時での全時間を t_{eq} としている。無次元時刻 $t_e=0.0-0.2$ における初期の剥離過程では、掃流砂が附着性藻類に被覆された礫部分に衝突する確率が高く、顕著な剥離が確認されるが、無次元時刻 $t_e=0.3$ 以降では、剥離された部分の増加に伴って未剥離の部分への衝突確率が減少し、剥離率が漸減傾向に転じる様子が伺える。また、掃流砂との衝突が生じ難い礫の下流側背面では、附着性藻類の剥離が進行し難い結果が得られ、saltationモデルを基礎とした確率過程理論的な手法によるこの種の問題へのアプローチでは、詳細な再現が困難であった礫背後の遮蔽空間を含めた剥離域の分布の数値的予測が示された。このことは、本シミュレーションが剥離過程の詳細な議論に対する有効性を示す事実の1つであると考えている。

図-4にケースAにおける、礫表層の附着率の時系列

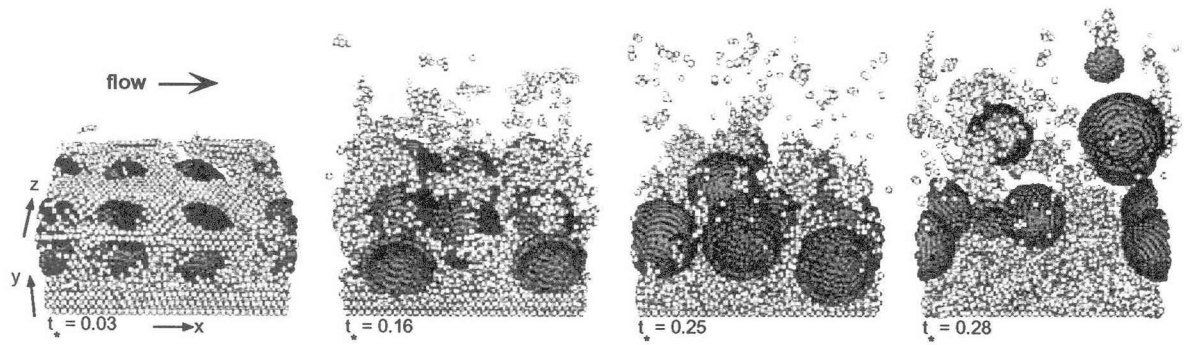


図-5 付着性藻類の剥離過程（ケースB）

を示す。図中の S_t および S_0 はそれぞれ時刻 t および初期（時刻 $t_s=0.0$ ）における礫表層に付着した藻類の面積を表している。無次元時刻 $t_s=0.0-0.3$ の間に剥離が進行し、付着率は活発に減少するが、付着率の減少傾向は、付着性藻類に被覆された礫構成粒子との衝突確率の減少に伴って次第に鈍化し、無次元時刻 $t_s=0.8$ 以降では、付着率は横這い状態を呈する。この横這い状態は、図-3で示されたように礫の背後に掃流砂粒子との衝突頻度が低い遮蔽された空間が存在し、遮蔽域内に藻類が残存することを裏付けている。また、時間の経過に伴う付着率の減少過程は、指数分布に類似した概形を示すが、これは、砂利や球形粒子の投入による付着性藻類の剥離除去に関する実験結果^{2), 3)}と対象とした時間スケールは異なるものの、同様の变化傾向である。このことから、シミュレーションに必要な剥離量を支配するパラメーター α を室内実験や観測結果を考慮して適切に設定すれば、この種の個別要素法型の粒状体モデルによるシミュレーションが、付着性藻類の剥離過程の検討に対して有効なツールとなると期待できる。

(2) 礫運動による剥離過程（ケースB）

フラッシュ洪水によって礫を含む河床を構成する全粒径が輸送される状況を想定したケースBのシミュレーションのスナップショットを図-5に示す。ケースAと比較して水流による砂粒子が駆動される領域が表層付近に限定されず、砂粒子層の内部にまで及ぶため、徐々に移動層厚が増加し礫の運動が促進される様子が確認できる。なお、藻類が付着した礫表層箇所はケースAと同様であり、掃流砂粒子および他の礫構成粒子との衝突による藻類の剥離に関してもケースAと同様に、礫構成粒子の色の変更によって表現した。

礫運動およびそれによる剥離過程を浮き彫りにするため、砂粒子を非表示とした礫のみのスナップショットを図-6に示す。掃流力作用後、礫群の移動が掃流力の作用方向に開始される（無次元時刻

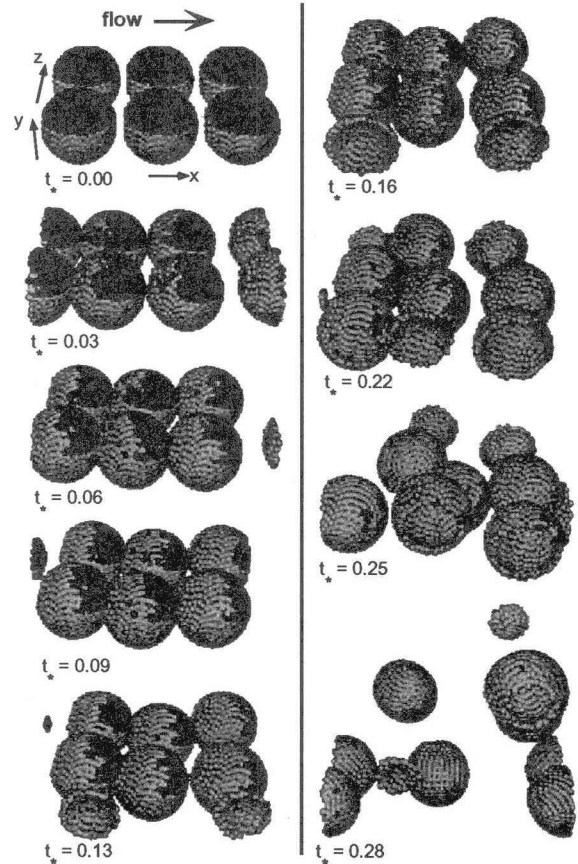


図-6 ケースBの剥離過程（礫のみ表示）

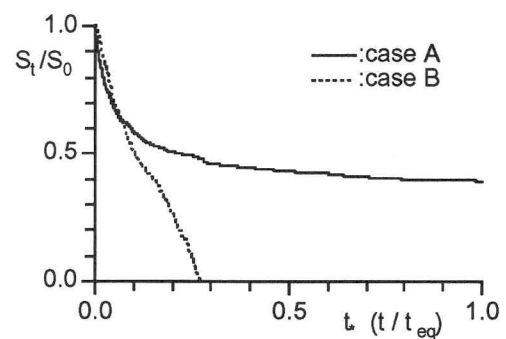


図-7 付着率の時系列（ケースA vs ケースB）

$t_s=0.00-0.03$)。この段階では、掃流砂によって流れの作用方向の上手側の礫表層に付着した藻が剥離され、下手側の藻類が付着した部分は、ケースAと同様に剥離されず残存している。その後もしばらくは、間隙砂の抜け出しに伴って礫群が次第に近接し、礫群の渋滞が発生して、個々の礫の並進・回転運動が抑制されるため、藻類の剥離が発生する部分も上手側の礫表層に制限されているが（無次元時刻 $t_s=0.06-0.09$ ）、無次元時刻 $t_s=0.13$ 以降では、 z 軸方向への礫運動の顕在化に伴い、礫の並進・回転運動が活発化し、初期段階で下手側に付着していた藻類の剥離が確認されるようになる。

図-7にケースBの付着率の時系列をケースAと併示した。なお、このケースでは初期配列の形成後、直ちに掃流力を作用させており、図中の無次元時刻 $t_s=0.0$ は、掃流力を作用させた時点とした。礫運動を伴う場合、剥離率の時系列はケースAのような指数分布に類似した概形を示さず、 $t^*=0.1$ 付近に変局点を有し、初期に下に凸、終盤に上に凸の形状を示した。 $t^*<0.1$ の領域については指数型にあてはめることもできそうだが、変局点をはさんで後半の特性は明らかに指数型と異なっている。このことはスナップショットでも見られたように、saltation 粒子の衝突が支配的な前半の剥離過程から、礫間衝突が支配的な後半の剥離過程へとモードの変化が生じることを裏付けている。また、無次元時刻 $t_s=0.1$ 付近までは、ケースAの付着率がケースBと比較して小さいが、この区間では礫が滑動し、ケースBの礫構成粒子と掃流砂粒子の相対速度がケースAのそれと比較して小さくなるため、仕事量が小さく剥離限界を越え難いためと推察される。

4. 結 語

本研究では、三次元数値移動床（個別要素法型粒状体モデル）を用いて礫付着性藻類の剥離過程の数値シミュレーションを実施した。その結果、掃流砂粒子のみの運動（ケースA）による剥離過程において、藻の付着率の時系列の概形が、既往の研究で確認されていた傾向と一致することが示され、本手法による予測が有効であることの一端が確認された。また、従来の単一粒子追跡に基づく確率過程論では詳細な議論が困難であった礫河床の凹凸面を扱ったシミュレーションを通じて、掃流砂によって剥離され難い礫背後の遮蔽空間の存在をスナップショットを用いて明瞭に示すとともに、そのプロセスの予測における数値移動床の有効性を示した。さらにフラッシュ洪水時に支配的な礫運動による付着藻類の剥離過程（ケースB）では、礫背後の遮蔽空間に残存付着した藻類の剥離が、礫の並進・回転運動によっ

て急速に生じることを示し、掃流力が大きい場合には、礫自体の運動による剥離が剥離過程の議論にとって重要であることを明らかにした。

今回は河床構成砂礫の運動に注目し、流れ場のモデルは簡便な取扱いになっているが、今後、乱流場や混相流場を導入した流れ場の詳細な記述および付着性藻類の剥離モデルの詳細化についても検討を進めつつ、剥離過程のシミュレーションモデルの精度向上に努めたい。

謝辞：本研究の遂行に際しては、名古屋大学大学院工学研究科・辻本哲郎教授、同大学院博士課程・田代 喬氏より文献および現地調査資料の提供を頂いた。さらにシミュレーションの結果に関して京都大学大学院工学研究科・細田 尚教授から有益なコメントを頂いたことを記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 田代 喬・辻本哲郎：河床攪乱頻度を指標とした生息場評価による瀬・淵構造の変質に関する考察, 水工学論文集, 第46巻, pp.1151-1156, 2002.
- 2) 北村忠紀・加藤万貴・田代 喬・辻本哲郎：砂石投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.125-130, 2001.
- 3) 山本亮介・松梨史郎・下垣 久：移動粒子を伴う流れの付着藻類剥離効果, 水工学論文集, 第47巻, pp.1069-1074, 2003.
- 4) 石橋 毅：ダム排砂設備の流下砂礫による磨耗・損傷に関する水理学的研究, 土木学会論文報告集, 第334, pp. 103-112, 1983.
- 5) 辻本哲郎・北村忠紀・加藤万貴・田代 喬：低攪乱礫床での大型糸状藻類の異常繁茂のシナリオ, 河川技術論文集, 第8巻, pp.67-72, 2002.
- 6) 田代 喬・渡邊慎多郎・辻本哲郎：掃流砂礫による付着藻類の剥離効果算定に基づいた河床攪乱作用の評価について, 水工学論文集, 第47巻, pp.1063-1068, 2003.
- 7) 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, No.345/II-1, pp. 83-90, 1984.
- 8) 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎：三次元個別要素法による数値移動床の一般化, 水工学論文集, 第46巻, pp.613-618, 2002.
- 9) 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎：個別要素法に基づく移動床シミュレーターのモデル定数の最適化, 土木学会論文集, No.691/II-57, pp. 159-164, 2001.
- 10) 後藤仁志・酒井哲郎：河床構成粒子群との相互作用を考慮した流砂の流動過程の数値解析, 水工学論文集, 第41巻, pp.819-824, 1997.
- 11) 瀬津家久：開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第261号, pp. 67-76, 1977.
- 12) Koshizuka, S., Nobe, A. and Oka, Y.: Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, *Int.J.Numer.Meth.Fluids*, Vol.26, pp. 751-769, 1988.

(2003.9.30受付)