

水滴衝突による砂粒子群侵食量の 3次元並列計算

柳生 大輔¹・牛島 省²・鳥生 大祐³・青木 一真⁴

¹学生員 京都大学大学院工学研究科修士課程 (〒 615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂町)

E-mail: yagyu.daisuke.42a@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 工博 京都大学 学術情報メディアセンター (〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail: ushijima@media.kyoto-u.ac.jp

³学生員 工修 京都大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒 615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

⁴正会員 工修 株式会社 IHI 土木・建築エンジニアリング部 (〒 135-8710 東京都江東区豊洲三丁目 1-1 豊洲 IHI ビル)

本研究では、3次元固気液多相場の解法 (MICS) を用いて、水滴落下により生ずる個々の砂粒子の運動の数値計算を行った。本計算手法では、流体と砂粒子間の力学相互作用と砂粒子間の接触力が考慮されている。水滴の落下速度を変化させて、約3万個の砂粒子から構成される砂粒子群の挙動を計算した結果、既往の実験結果と同様に、水滴の運動量が増加するにつれて砂粒子の再配置によるくぼみ領域の体積が増大することを確認した。さらに、水滴形状を実験条件に近い回転楕円体とした場合には、くぼみ領域の体積が減少して実験結果に近づくことを確認した。最後に、並列化効率を調べた結果、400 並列の計算速度は、25 並列の場合の約8倍となり、本計算手法は多数の砂粒子の運動を計算する大規模計算に対して有効であることを示した。

Key Words: sand particle transportation, water-drop impact, multiphase model, parallel computation

1. 緒言

降雨によって、運動量を持つ水滴が地表面に衝突すると、土砂粒子が飛散・再配置される。このように、水滴が衝突することにより、初期の平坦な砂粒子配置が変化し、くぼみ領域が生ずる過程を、本報では雨滴浸食と表記することにする。また、このくぼみ領域の体積を砂粒子群侵食量と表現する。砂粒子群侵食量の具体的な定義は、本文中で述べる。

上記の雨滴侵食に関しては、これまでに、Horton¹⁾およびDuleyら²⁾が、雨滴の衝撃力が雨滴侵食と関連することを示している。また、岩垣ら³⁾は、水滴衝突によって砂面に形成された砂粒子群侵食量を測定する実験を行った。福桜⁴⁾は、雨滴侵食の過程を水滴と砂面との衝突現象としてとらえ、その機構を明らかにする実験を試みている。一方、雨滴の衝突による砂粒子の離脱量の推定は、雨滴の運動エネルギーに関連づけて多くの研究が行われている^{5), 6)}。

以上のように、雨滴侵食に関する研究は多く行われてきたが、数値解析手法を用いて、水滴の衝突による個々の砂粒子の3次元的な挙動の再現を試みた研究例は少ない。水滴が砂粒子群に衝突した場合、水滴の形状は大きく変形し、その運動量が砂粒子に作用して、表面付近に存在する砂粒子が飛散する。一方、砂粒子は、初期の段階では他の砂粒子との接触・衝突を伴う運動

を示す。このような複雑な固気液混相流現象に対して、各相の力学的な相互作用を考慮した詳細な3次元解法を確立することは、現象の解明に役立つと考えられる。

上述した背景を考慮して、本報では、牛島ら⁷⁾が提案した、3次元固気液多相場の解法 MICS を利用して、水滴落下による乾燥状態の砂粒子群運動の数値計算を行い、既往の実験結果と比較検討する。この計算手法では、流体と任意形状の砂粒子間の力学相互作用、さらに砂粒子間の接触力を扱える⁷⁾。本研究の数値計算では、1つの砂粒子が複数の四面体要素で表され、その砂粒子が約30,000個含まれる大規模な演算が行われる。このような大規模計算を高速に実行するために、MPI⁸⁾を用いた領域分割法に基づく並列計算手法⁹⁾を利用する。本報では、この並列化効率についても検討を加える。

2. 数値解析手法の概要

本研究では、複雑形状物体を含む固気液混相流の計算が可能な3次元固気液多相場の解法 MICS⁷⁾を用いて計算を行う。図-1に計算手順の概略を示す。なお、この解法では、これまでに単一直方体の水中落下や波動流れによる物体輸送などについて、実験結果との比較がなされており⁷⁾、解法の妥当性が確認されている。

(1) 気液相の計算

図-1の気液相の計算では、以下の気液相に対する質量保存則、非圧縮条件、運動量保存則を用いる。

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = & f_i - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 t は時間、 x_i は直交座標成分、 u_i は気相と液相の質量平均速度であり、 p 、 ρ_f 、 μ はそれぞれ気相と液相の体積平均圧力、密度および粘性係数である。 f_i は外力加速度の x_i 成分である。表面張力は湿潤状態の砂粒子群の場合には影響が無視できないが³⁾、本研究のような乾燥状態では衝突により砂粒子が移動する段階では、ほとんど影響はないと推察される。このため、本計算では、表面張力は考慮しないこととした。なお、水滴衝突後に湿潤状態となった砂粒子の運動に対しては、表面張力の影響が生ずる可能性があるため、今後検討が必要であると考えている。

以上の基礎式を、有限体積法を用いてコロケート格子上で離散化し、既報⁷⁾と同様にして密度、流速および圧力の計算を行う。なお、本研究においては水滴の初期速度が9[m/s]であり、気液相の最大速度は音速と比べると十分小さい。また、本研究では空隙率が0.454、つまり砂粒子間には空隙があり気相が圧縮されることはないため気液相は非圧縮性流体と扱える。

(2) 物体に働く流体力の算出

図-1の気液相の演算結果を物体に反映する段階では、気液相の計算で得られた圧力項と粘性項を用いて物体に働く流体力を計算する。本研究では、各砂粒子形状を表現するために、T型モデル⁷⁾を用いる。T型モデルとは、複雑な形状の物体を四面体要素の集合として表し、物体間の衝突判定には物体表面付近に配置された接触判定球を利用する固体モデルである。この、四面体要素により表現された物体に作用する流体力を既報⁷⁾と同様に求める。

(3) 物体計算

本研究では、物体すなわち砂粒子は、剛体と仮定する。図-1に示された物体計算では物体間の接触力を計算し、物体の並進および回転運動を評価する。物体間

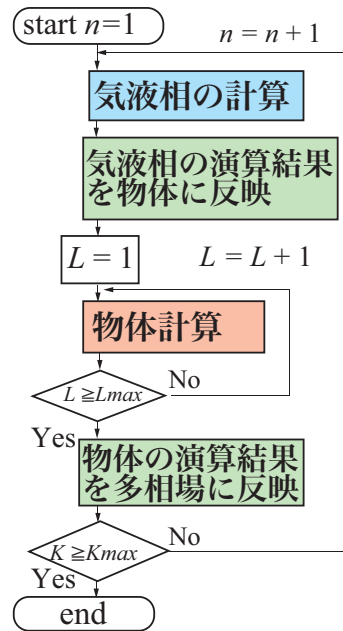


図-1 MICS⁷⁾の計算手順

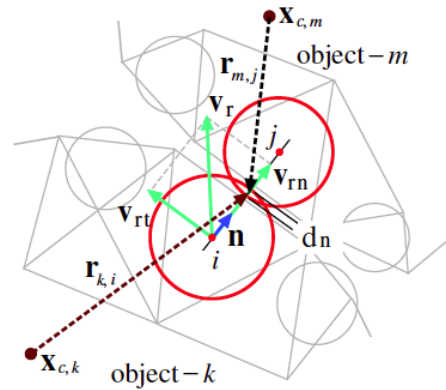


図-2 物体間の衝突判定と接触力⁷⁾

の接触力は図-2に示すように、物体表面付近に配置した接触判定球を利用して以下の式により評価する。

$$h_n = -K_n d_n \mathbf{n} + D_n \mathbf{v}_{rn} \quad (4)$$

$$\mathbf{h}_t = K_t \mathbf{d}_t - D_t \mathbf{v}_{rt} \quad (5)$$

ここで、 K_n 、 K_t 、 D_n 、 D_t はそれぞれ法線方向と接線方向のバネ定数、法線方向と接線方向の粘性減衰係数である。 $\mathbf{v}_{rn}$ 、 $\mathbf{v}_{rt}$ はそれぞれ法線方向、接線方向の相対速度ベクトルである。 $\mathbf{n}$ は接触する接触判定球の中心点を結ぶ方向に向かう法線方向の単位ベクトルであり、 d_n は、図-2に示す接触判定球の重なり深さで、球体の中心間距離と球体径から求められる。また、 $\mathbf{d}_t$ は接線方向変位ベクトルであり、接触中は前ステップの $\mathbf{d}_t$ に加算し、これを保存して必要であれば次の計算ステップで使用する。また2つの接触判定球が離れた場合はゼロクリアする¹⁰⁾。

静止摩擦係数を μ' とし、式(5)より計算した $\mathbf{h}_t$ の絶対

値 $|h_t|$ が静止摩擦力を超える場合、つまり $|h_t| > \mu' |h_n|$ が成り立つ場合には、 h_t は以下のように計算される。

$$h_t = \mu' |h_n| \frac{v_{rt}}{|v_{rt}|} \quad (6)$$

なお、本研究では、静止摩擦係数と動摩擦係数が同じ値であると仮定した。

以上の流体力と接触力の合力を F 、モーメントを N として、次式より物体の並進および回転運動を計算する。

$$M\dot{v} = F \quad (7)$$

$$\dot{L} = N \quad (8)$$

ここで、 M と L は、それぞれ物体の質量と角運動量ベクトルである。なお、流体計算の時間増分を大きくとった場合、物体間の接触判定が正しく行えないため、**図-1** に示すように、物体計算の時間増分を小さくして、複数ステップ (L_{max}) の物体計算を 1 ステップの流体計算中で行うこととした。

最後に、**図-1** に示した、物体の演算結果を多相場に反映する段階では、移動後の物体が流体セル内に占める体積割合を計算した後、物体の運動を考慮したセル内の質量平均流速に修正する⁷⁾。

(4) 計算手法の並列化

以上の気液相と物体運動の演算は、既報⁹⁾と同様に、MPI⁸⁾を用いた領域分割法に基づく計算手法⁹⁾により並列化されている。MPI は分散メモリシステムで用いられる並列計算の通信を行うインターフェイスである⁸⁾。なお、既報⁹⁾では、計算領域内で物体が偏在することによる計算負荷のばらつきを均一化するような動的負荷分散処理が行われているが、本研究ではこの負荷分散処理は行わないこととした。

3. 砂粒子群侵食量の評価方法と計算条件

岩垣ら³⁾は、水滴の運動量を変えて乾燥砂に衝突させる実験を行っており、その際に発生する砂粒子群侵食量を測定した。本章では、岩垣ら³⁾の実験に MICS⁷⁾を適用し、水滴の運動量と得られた砂粒子群侵食量の関係を比較するための砂粒子群侵食量の評価方法および計算条件について説明する。

(1) 砂粒子群侵食量の評価方法

本節では水滴落下による砂粒子群侵食量 V の評価方法を説明する。

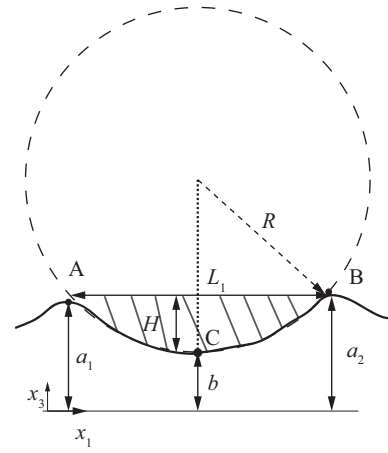


図-3 侵食砂面の鉛直断面¹¹⁾

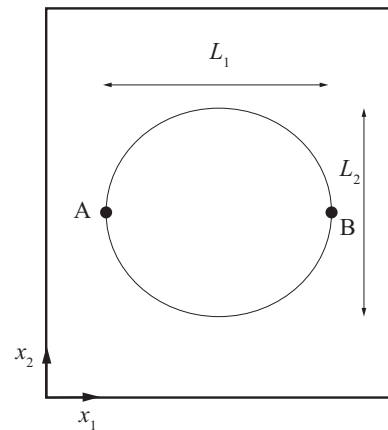


図-4 侵食砂面の水平断面形状¹¹⁾

a) 既往実験の侵食量の評価方法

水滴が砂面に落下すると、鉛直断面では**図-3**、また水平断面では**図-4**に示すような雨滴浸食が生ずる。ここで、**図-3**中の a_1 , a_2 はある水平な基準面から両端において極大となる点 A および点 B までの長さであり、 b は基準面から点 A と点 B の中間に位置する点 C までの長さである。 L_1 は点 A から点 B までの長さである。また、**図-4**中の L_2 は x_2 方向において L_1 と同様にして求められる長さである。

既往の研究¹¹⁾では、雨滴浸食による砂面形状を半径 R の球体の一部と仮定して、**図-3**の斜線部で表される体積 V 、すなわち本研究の砂粒子群侵食量を以下の式により求めている。

$$l^2 = L_1 L_2 \quad (9)$$

$$H = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) - b \quad (10)$$

$$R = \frac{1}{8}(4H + \frac{l^2}{H}) \quad (11)$$

$$V = \frac{\pi H^2}{3}(3R - H) \quad (12)$$

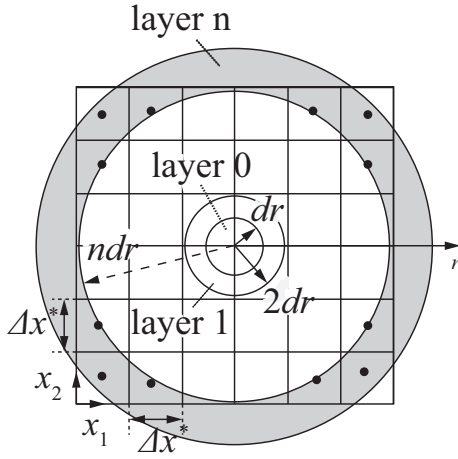


図-5 計算における砂面高さの平均化

ここで、 l は L_1 、 L_2 の平均値である。式(9)から式(12)により、砂粒子群浸食量 V は l 、 H を用いて以下の式のように表される。

$$V = \frac{\pi H}{6} \left(3 \frac{l^2}{4} + H^2 \right) \quad (13)$$

b) 本計算における砂粒子群侵食量の評価方法

一方、数値計算では、図-3および図-4に示される雨滴浸食の形状を把握するため、複数の砂粒子の最頂部の高さを平均して、平滑化された砂面形状を求め、その結果を使用して砂粒子群侵食量を計算することとした。

砂面の平滑化手順は、以下のとおりである。

- 図-5のように砂面平滑格子を定義する。
- 砂面平滑格子内に含まれる砂粒子に対して、砂粒子を構成する四面体要素の節点座標のうち、 x_3 方向成分の最大値を求める。砂面平滑格子内のすべての砂粒子に対して、その値を求め、これを平均して、格子内の砂粒子の高さ h_s を求める。
- 図-5に示されたlayer nすなわち、円形状の各層内における h_s の平均値 $\bar{h}_s$ を計算する。
- 得られた $\bar{h}_s$ から図-6に相当する平滑化された砂面形状が得られる。

なお、図-5の Δx^* は砂面平滑格子の格子幅であり、 dr は層厚である。図-6では、 b は $r = dr/2$ に位置する $\bar{h}_s$ の値とし、 L および a は $\bar{h}_s$ が最大値となる点 $(r, \bar{h}_s)$ における r および $\bar{h}_s$ とした。また、 $H = a - b$ とした。

以上のようにして得られた砂面形状から、本研究では式(13)と同様に、砂粒子群侵食量 V を以下のように計算する。

$$V = \frac{\pi H}{6} (3L^2 + H^2) \quad (14)$$

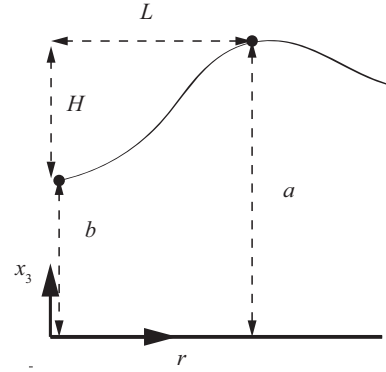


図-6 平滑化された砂面高さの概略図

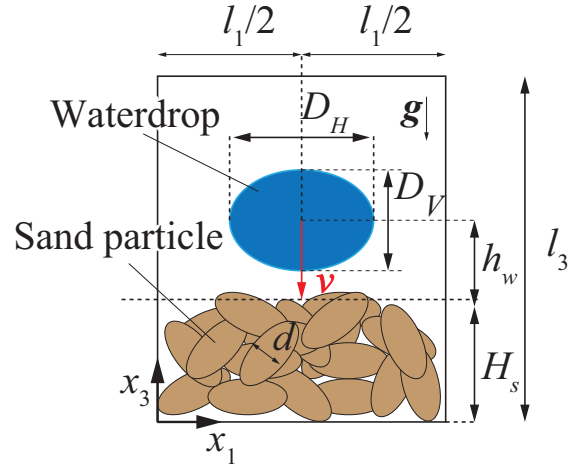


図-7 初期条件($x_1 - x_3$ 断面図)

(2) 計算条件の設定方法

本節では、水滴の運動量および水滴の形状を変化させて、砂粒子群侵食量に対する影響を数値計算により検討した。この計算条件の設定方法を以下に示す。

a) 共通の設定

計算の初期条件の概略を図-7に示す。 l_i は、 x_i 方向の計算領域の長さであり、 l_1 、 l_2 はそれぞれ 3.38×10^{-2} [m]、 l_3 は 2.5×10^{-2} [m]である。流体は空気と水であり、密度はそれぞれ 1.0 [kg/m³]、 1.0×10^3 [kg/m³]、動粘性係数はそれぞれ 1.0×10^{-5} [m²/s]、 1.0×10^{-6} [m²/s]である。重力加速度 g は 9.8 [m/s²]である。

図-7において D_H は水平方向の水滴径で D_V は鉛直方向の水滴径である。 H_s は $(l_1/2, l_2/2)$ を中心とする半径 1.0×10^{-3} [m]の範囲内にある最大砂層厚であり、 H_s は 8.15×10^{-3} [m]である。 h_w は、平面 $x_3 = H_s$ から水滴の中心までの距離であり、 $h_w = 3.32 \times 10^{-3}$ [m]とした。全砂粒子数 n_b は30,900個であり、 $0 \leq x_3 < 5.0 \times 10^{-3}$ [m]における空隙率は $N = 0.45$ である。

壁面の境界条件として流速には non-slip 条件、圧力には勾配0のノイマン条件を課した。流体計算格子数は $176 \times 184 \times 132$ とし、並列数は $22 \times 23 \times 1$ とした。時間増分 Δt は 1.0×10^{-5} [s]とした。物体の反復回数は325回とし、物体計算の時間刻みは $\Delta t/325$ [s]であ

表-1 砂粒子の物性値と数値表現

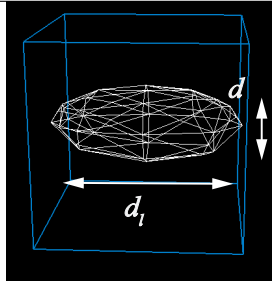
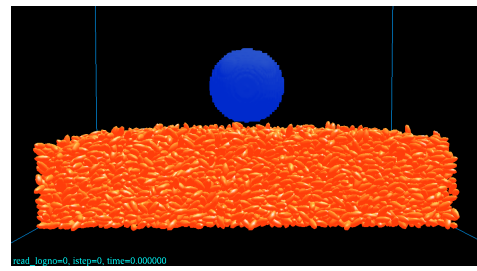
砂粒子形状	回転楕円体
砂粒子の長径 d_l [m]	1.27×10^{-3}
砂粒子の粒径 d [m]	0.52×10^{-3}
密度 [kg / m ³]	2.65×10^3
質量 [kg]	1.93×10^{-7}
構成節点数	49
構成四面体数	121
接触判定球数	75
	

表-2 水滴の初期条件

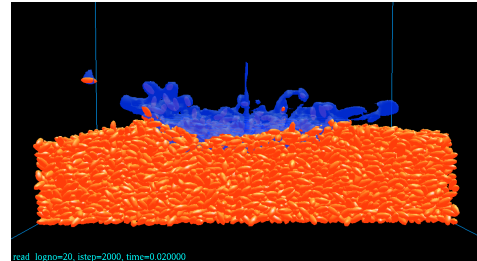
D_H [m]	3.24×10^{-3}	3.49×10^{-3}
D_V [m]	2.02×10^{-3}	1.74×10^{-3}
D_H/D_V	1.6	2.0
質量 m [kg]	8.89×10^{-5}	8.89×10^{-5}

る。これは、砂粒子を構成する四面体のうち最小の質量となる四面体の質量 m_{min} とすると、バネと質量振動系の振動の半周期 $\pi\sqrt{m_{min}/K_n}$ を 10 分割した値¹²⁾ 以下となるように設定された時間刻みに相当する。

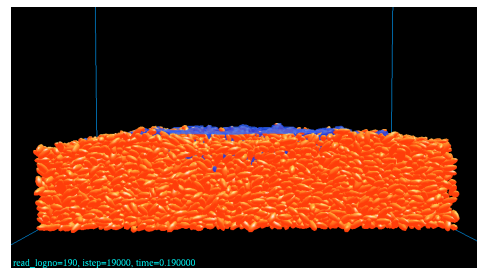
本研究で用いた砂粒子の情報を表-1 に示す。本研究では砂粒子の短径を粒径 d とし、静止摩擦係数 μ' は 0.6 とする。砂粒子の接触力の算定に用いられる法線および接線方向のバネ定数 K_n 、 K_t はそれぞれ 1.0×10^4 [N/m] と実際の砂粒子よりも小さいバネ定数を用いた。これらのバネ定数に関しては、既往の研究¹³⁾で $1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^6$ [N/m] において明瞭な相違がなかったこと示されており、それらの結果を考慮して定めた。また、ダッシュポット定数 D_n 、 D_t はそれぞれ 2.95×10^{-3} [N・s/m] とした。これらのダッシュポット定数は反発係数を 0.5 として定めた¹²⁾。なお、この反発係数は既往の研究¹⁴⁾において、移動床では 0.5 前後の値をとることが示されていることを考慮して定めた。なお、今後 DEM に関係する諸定数を変化させた場合に、砂粒子群浸食量にどのような影響が生ずるかを検討する必要があると考えている。



(a) $t = 0.00$ [s]



(b) $t = 0.02$ [s]



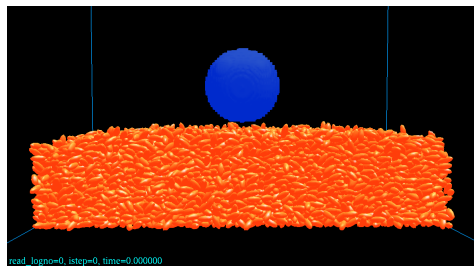
(c) $t = 0.19$ [s]

図-8 $mv \approx 20$ [g・cm/s] での球体水滴 ($D_H/D_V = 1.0$) と雨滴侵食 ($x_2 = l_2/2$ 断面)

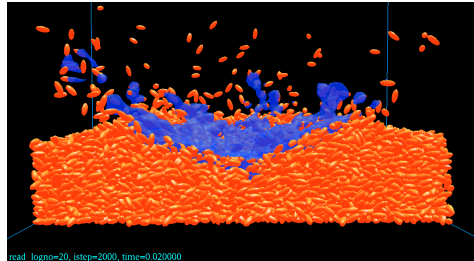
b) 水滴形状および水滴の運動量の設定

水滴の初期形状が球体 ($D_H/D_V = 1.0$) の場合は、その直径 D_H および D_V は 5.537×10^{-3} [m] とした。また、水滴の質量 m は 8.89×10^{-5} [kg] である。水滴落下速度 v を 2.25, 4.5, 6.75, 9.0 [m/s] と変化させて計算した。この時、水滴の運動量 mv はそれぞれ約 20, 40, 60, 80 [g・cm/s] となる。

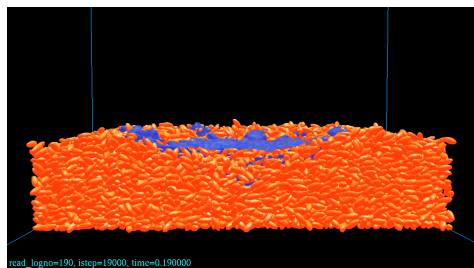
一方、既往の実験結果では、落下中の水滴の形状が完全な球体ではなく回転楕円体に近いことが示されている。Beard ら¹⁵⁾が行った実験では、水滴のアスペクト比 D_H/D_V は、1.5 から 1.7 程度と推察される。本研究では、これを参考にして D_H/D_V を 1.6 および 2.0 とする計算条件を設定した。 D_H 、 D_V 、 D_H/D_V 、 m は表-2 に示す通りである。また、水滴の落下速度 v は 2.25 および 9.0 [m/s] とした。この条件における水滴の運動量 mv は、約 20 および 80 [g・cm/s] である。



(a) $t = 0.00$ [s]

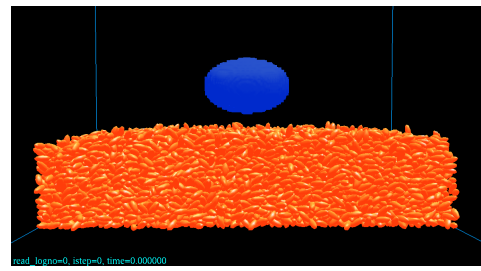


(b) $t = 0.02$ [s]

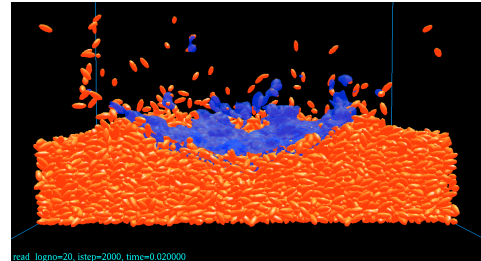


(c) $t = 0.19$ [s]

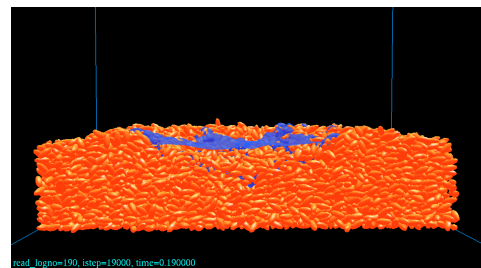
図-9 $mv \approx 80$ [g・cm/s] での球体水滴 ($D_H/D_V = 1.0$) と雨滴侵食 ($x_2 = l_2/2$ 断面)



(a) $t = 0.00$ [s]



(b) $t = 0.02$ [s]



(c) $t = 0.19$ [s]

図-10 $mv \approx 80$ [g・cm/s] での回転楕円体水滴 ($D_H/D_V = 1.6$) と雨滴侵食 ($x_2 = l_2/2$ 断面)

(3) 初期配置の設定方法

a) 砂粒子の初期配置

砂粒子の初期配置は、以下のようにして設定した。まず、計算領域中に重心点を中心にしてランダムに回転させた姿勢の砂粒子を規則的に配置する。次に、計算時間の短縮のため重力加速度を $4g$ [m/s²] として自由落下させた。ただし、この計算中では、気液相の計算は行わない。その後、最上部にある砂粒子が他の砂粒子に衝突した後に重力加速度を g [m/s²] とし、この状態から 5.0×10^{-3} [s] 経過したものを初期配置とした。なお、このようにして設定した初期配置における砂粒子群の平均速度の絶対値 (1.13×10^{-3} [m/s]) は、落下中の砂粒子群の平均速度の絶対値の最大値 (0.60 [m/s]) に対して 0.2 % 以下であり、砂粒子群はほぼ静止状態に近い状態となっている。

b) 水滴の初期設定

水滴を含む流体計算セル内に占める水の体積割合を β_w とすると、このセル内の初期の代表流速は $u_1 = u_2 = 0.0$ [m/s], $u_3 = \beta_w v$ で与えられる。ここで、水の体積

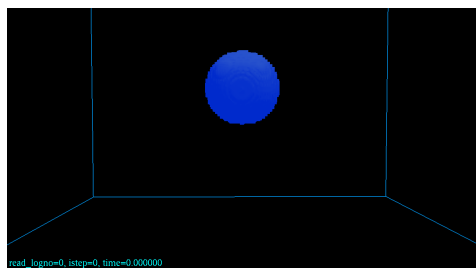
割合 β_w は流体計算格子を更に細かくしたサブセルを用いて求めた。

4. 計算結果と考察

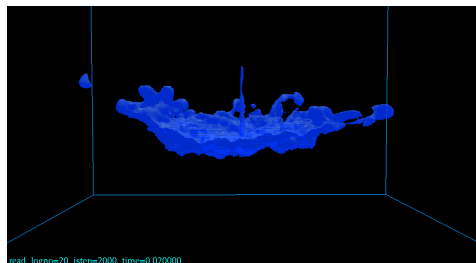
(1) 計算結果の3次元表示

本研究での水滴の初期形状が球体 ($D_H/D_V = 1.0$) の場合における $x_2 = l_2/2$ 断面での計算結果をそれぞれ図-8と図-9に示す。なお、それぞれの運動量 mv は約 20 および 80 [g・cm/s] であり、水の体積割合 β_w が 0.01 以上の値で水の描画を行っている。これらの図に示すように、(a) の初期状態から (b) のように水滴が砂面にあたり砂粒子が飛散する。そして、(c) のように砂粒子がほぼ静止し、雨滴侵食によるくぼみ領域が形成されていることが確認できる。

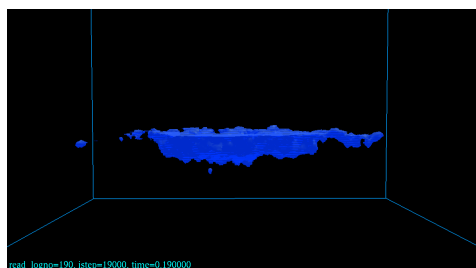
次に、水滴の初期形状が回転楕円体 ($D_H/D_V = 1.6$) で水滴の運動量が約 80 [g・cm/s] における計算結果を図-10に示す。この図に示されるように水滴の形状が回転楕円体の場合にも、球体の場合と同様に、雨滴侵食によるくぼみ領域が形成されている。



(a) $t = 0.00$ [s]

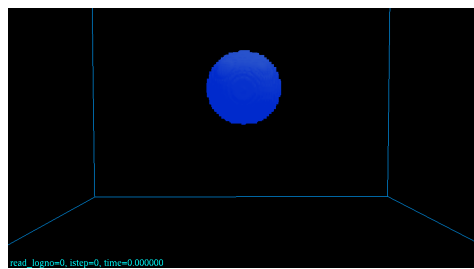


(b) $t = 0.02$ [s]

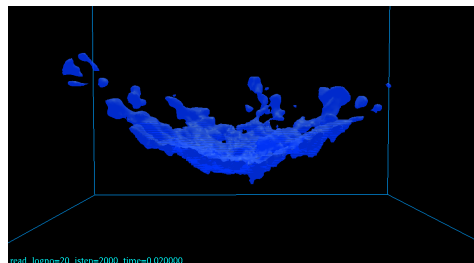


(c) $t = 0.19$ [s]

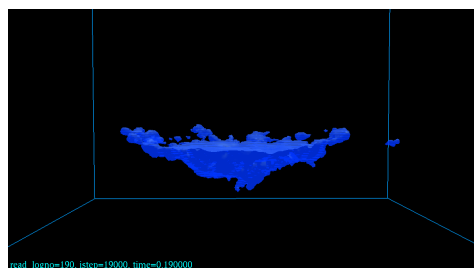
図-11 水のみを描画した際の $mv \approx 20$ [g・cm/s] での球体水滴 ($D_H/D_V = 1.0$) と雨滴侵食 ($x_2 = l_2/2$ 断面)



(a) $t = 0.00$ [s]



(b) $t = 0.02$ [s]



(c) $t = 0.19$ [s]

図-12 水のみを描画した際の $mv \approx 80$ [g・cm/s] での球体水滴 ($D_H/D_V = 1.0$) と雨滴侵食 ($x_2 = l_2/2$ 断面)

(2) 水のみを描画して得られた計算結果

次に前節と同様の計算条件において、水のみを描画した結果を図-11と図-12に示す。これらは、水滴の初期形状が球体 ($D_H/D_V = 1.0$) の場合における $x_2 = l_2/2$ 断面で描画したものであり、前節と同様に水の体積割合 β_w が 0.01 以上の値の領域を描画をしている。図-11と図-12は、それぞれの運動量 mv は約 20 および 80 [g・cm/s] である。各図に示すように、水滴は、(a) の初期状態から、(b) に示すように水滴が砂面に衝突し飛散する。そして、(c) に示すように水の分布が中央付近に集積している。特に、運動量の大きい図-12では、上記の(b)の段階で、水滴が比較的広範囲に飛散しており、後述する砂粒子群浸食量に関係していると考えられる。なお、各図(c)において、水が砂粒子間へ十分浸透していないのは、計算時間が 0.19 [s] と短いためであると思われる。

(3) 平滑化された砂面形状から得られた結果

(1) 節で得られた計算結果に対して、3. (1) b) の処理を行うことによって、図-13および図-14のような砂面

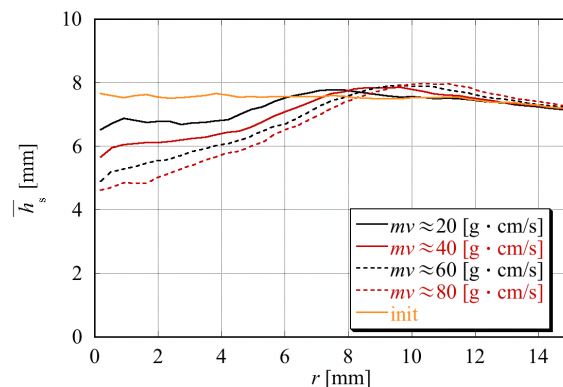


図-13 $t = 0.19$ [s] における平滑化により得られた砂面形状 (球体水滴の場合)

形状が得られた。水滴の運動量が多いほどより深くぼみ領域が形成されていることがこれらの図から確認できる。

(4) 既往実験との比較

岩垣ら³⁾によって行われた砂粒子群浸食量と水滴の運動量の関係と、前節で得られた砂面形状から式 (14)

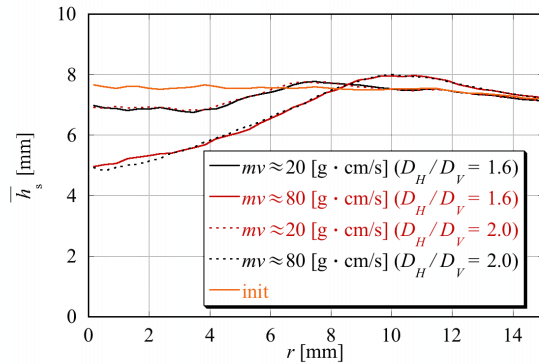


図-14 $t = 0.19$ [s] における平滑化により得られた砂面形状 (回転楕円体水滴の場合)

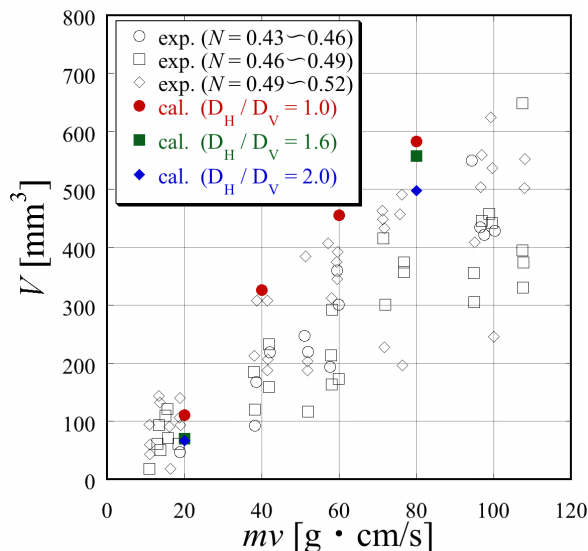


図-15 岩垣ら³⁾により行われた乾燥砂での侵食量と水滴の運動量と本研究の計算結果 ($N = 0.454$) との比較 ($d = 0.52$ [mm])

によって得られた本研究の計算結果 ($N = 0.454$) を図-15に示す。図-15において N は空隙率であり、岩垣らは空隙率 N が $0.43 \sim 0.46$, $0.46 \sim 0.49$, $0.49 \sim 0.52$ の場合において実験を行っている。 V は前述の方法により算出された砂粒子群侵食量³⁾である。

a) 水滴の運動量と砂粒子群侵食量についての考察

図-15に示されるように、水滴の運動量が大きくなるほど、砂粒子群侵食量が大きくなる傾向が得られた。この傾向は、岩垣ら³⁾の実験結果と同様である。なお、水滴の運動量が約 20 [g · cm/s] のときは、砂粒子群侵食量 V が実験とよく一致しているが、水滴の運動量が

表-3 初期設定に要する時間を除く 100 ステップまでに要した計算時間

並列数	$5 \times 5 \times 1$	$10 \times 10 \times 1$
全体の計算時間 [min]	418	133
流体計算時間 [min]	66	21
物体計算時間 [min]	352	112
並列数	$15 \times 15 \times 1$	$20 \times 20 \times 1$
全体の計算時間 [min]	81	52
流体計算時間 [min]	10	7
物体計算時間 [min]	71	45

きくなるほど岩垣らの結果より高い砂粒子群侵食量を示す傾向となった。

b) 水滴形状と砂粒子群侵食量についての考察

図-15に示されるように、水滴の運動量が同じ場合、 D_H/D_V が大きくなるほど砂粒子群侵食量が減少し、岩垣らの結果に近づいていく傾向が確認できた。このことから、水滴の形状が砂粒子群侵食量に影響することを確認した。これらの計算によって得られた砂粒子群侵食量は、 $D_H/D_V = 1.0$ の計算結果よりも低減したが、岩垣らの実験結果よりもやや大きい値となっている。この原因の一つとして岩垣らの実験において、砂粒子の形状や粒径は一樣でないことや初期における水滴の流速分布が一樣ではないことなどが挙げられる。

5. 並列化効率の検討

(1) 計算条件

本研究の計算手法の並列化の有効性を評価する。利用した計算機は、京都大学学術情報メディアセンターの Cray XE6 である。計算領域は図-7と同様であり、 l_1 , l_2 はそれぞれ 3.0×10^{-2} [m], l_3 は 2.5×10^{-2} [m] である。 H_s は 7.0×10^{-3} [m] であり、 D_H および D_V は 5.619×10^{-3} [m], h_w は 3.5×10^{-3} [m] である。

砂粒子の粒径 d は 0.461×10^{-3} [m] とし、水滴の落下速度 v を 9.5 [m/s] とした。また、全砂粒子数 n_b は $30,900$ 個であり、 $0.0 \leq x_3 < 5.0 \times 10^{-3}$ [m] における空隙率 N は 0.454 である。時間増分 Δt は 1.00×10^{-5} [s] とした。物体計算の反復回数は 500 回とし、物体計算の時間刻みは $\Delta t/500$ [s] である。流体計算格子数を $180 \times 180 \times 150$ とした。また、並列数を $5 \times 5 \times 1$, $10 \times 10 \times 1$, $15 \times 15 \times 1$, $20 \times 20 \times 1$ と変化させる。

(2) 検討結果

並列数を $5 \times 5 \times 1$, $10 \times 10 \times 1$, $15 \times 15 \times 1$, $20 \times 20 \times 1$ と変化させて、流体計算 100 ステップまでに要した計算時間を表-3に示す。ただし、初期設定に要する計算

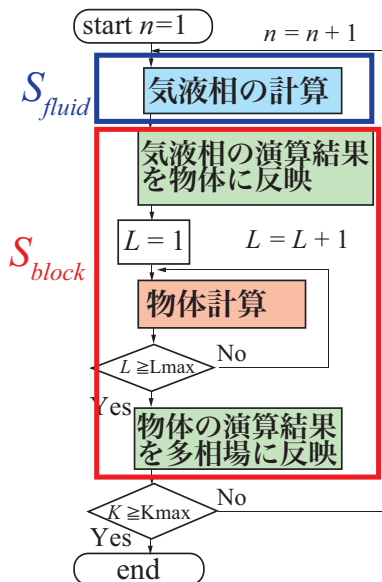


図-16 MICS⁷⁾の計算手順と計算時間計測部分

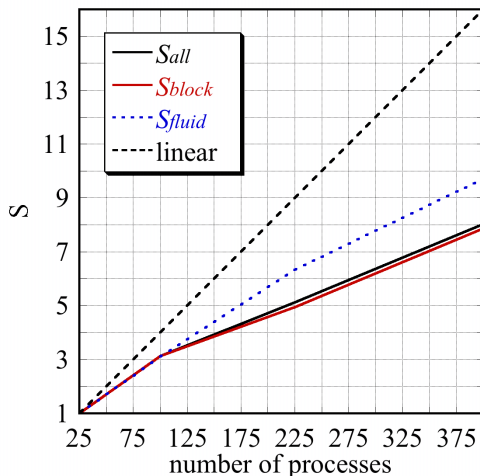


図-17 25 並列を基準とするスピードアップ

時間は除いている。ここで、流体計算時間とは、図-16に示した気液相の計算の計算時間である。一方、物体計算時間とは、図-16に示す物体計算に該当する箇所の計算時間である。以下では、流体および物体計算時間から求められるスピードアップをそれぞれ S_{fluid} および S_{block} と表す。

並列数を 25 から 400 まで変化させた計算により算出されたスピードアップ S を図-17に示す。なお、 S は以下のようにして算出した。

$$S = \frac{T_{25}}{T_n} \quad (15)$$

ここで、 T_n は n プロセスで流体計算 100 ステップまでに要した計算時間であり、図-17中における S_{all} は全体の計算時間についてのスピードアップである。

全体の計算時間についての計算速度は 400 並列では 25 並列に対して約 8 倍となった。表-3に示すように、

全体の計算時間に対して物体計算時間が占めている割合が大きいのことがわかる。この原因として、プロセス数が増加すると、隣接プロセス間での粒子の通信が増加することが原因であると推察される。

6. 結言

本研究では、3次元の固気液多相場の数値解析手法 MICS⁷⁾を用いて、最初に水滴の形状を球形と仮定して、複数の水滴落下条件における乾燥砂の砂粒子群運動の計算を行った。その結果、岩垣ら³⁾の実験結果と同様の計算結果が得られたが、水滴の運動量が大きい条件では、砂粒子群侵食量の計算値は実験値よりやや高くなる傾向が見られた。

次に、Beard ら¹⁵⁾が行った実験を参考にして水滴の形状を実際の条件に近い回転楕円体と仮定して計算を行った。その結果、水滴のアスペクト比 D_H/D_V が大きくなるほど岩垣らの実験結果に近づくことが確認でき、水滴の形状が砂粒子群侵食量に影響することを確認した。

最後に、本計算では MPI による並列計算手法を利用しているため、並列化効率について検討したところ、計算速度は 400 並列で 25 並列の約 8 倍となった。このことから、本計算手法の並列処理が多数の砂粒子の運動を計算する大規模計算に対して有効であることが示された。

今後は、表面張力を考慮した計算や、DEM に関する諸定数を変化させた計算を行うことによって、それらの影響を検討する必要があると考えている。また、本計算では、砂粒子形状はすべて同一としているが、砂粒子の形状をいくつか変化させた計算や、粒径が均一でない場合の計算、さらに実際の落下中の水滴の流速分布を用いた計算などについても今後検討していく必要があると思われる。

参考文献

- 1) Horton, R. E.: The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle, *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 14, pp.446-460, 1933.
- 2) Duley, F.L. and Kelly, L.L.: *Surface Condition of Soil and Time of Application as Related to Intake of Water*, U.S. Department of Agriculture, 1941.
- 3) 岩垣雄一, 土屋義人: 水滴による地面浸食に関する二、三の実験, *土木学会論文集*, No. 35, pp.55-63, 1956.
- 4) 福桜盛一: 水滴の衝撃に対する破碎の影響について, *農業土木学会論文集*, No. 101, pp.26-32, 1982.
- 5) 村上正吾, 辻本哲郎, 中川博次, S.Makhanu: 降雨による裸地斜面の土壌侵食に関する基礎的研究, *水工学論文集*, Vol. 40, pp.855-862, 1996.
- 6) 深田三夫, 藤原輝男, 日下達郎: 雨滴衝撃を伴う流れによる土粒子の剥離および輸送に関する考察, *農業土木学会論文集*, No. 165, pp.9-22, 1993.
- 7) 牛島省, 福谷彰, 牧野統師: 3次元自由水面流中の接触

- を伴う任意形状物体運動に対する数値解法, 土木学会論文誌 B, Vol. 64, No. 2, pp.128-138, 2008.
- 8) Gropp, W., Lusk, E. and Thakur, R.: *Using MPI-2*, The MIT Press, 1999.
 - 9) 丸山紀尚, 牛島省: 動的負荷分散を考慮した流体中の任意形状物体運動群の並列計算法, 土木学会論文誌 B1(水工学), Vol. 70, No. 4, pp.L835-L840, 2014.
 - 10) 牛島 省, 田中 伸和, 米山 望: 3次元複雑形状領域内における固気混相流中の固体粒子のラグランジュ的解析法, 水工学論文誌, Vol. 43, pp.917-922, 1999.
 - 11) 藤原 輝男, 金山 和雄: 雨滴の終末速度による地面浸食に関する研究 (3), 山口大学工学部研究報告, Vol. 28, No. 1, pp.9-18, 1977.
 - 12) 川口 寿裕, 田中 敏嗣, 辻 裕: 離散要素法による流動層の数値シミュレーション: 噴流層の場合, 日本機械学会論文誌 B 編, Vol. 58, No. 551, pp.2119-2125, 1992.
 - 13) 別府 万寿博, 井上 隆太, 石川 信隆, 長谷川 祐治, 水山 高久: 修正 MPS 法による土石流段波モデルのシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 6, pp.32-42, 2011.
 - 14) 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, Vol. 13B, pp.199-216, 1970.
 - 15) Beard, K. V., Bringi, V. and Thurai, M.: A new understanding of raindrop shape, *Atmospheric Research*, Vol. 97, No. 4, pp.396-415, 2010.

(2015. 6. 23 受付)

3D PARALLEL COMPUTATIONS FOR TRANSPORTATION OF SAND PARTICLES DUE TO IMPACT OF A WATER-DROP

Daisuke YAGYU, Satoru USHIJIMA, Daisuke TORIU and Kazuma AOKI

This paper discusses the movements and rearrangements of about 30,000 sand particles due to the impact of a water-drop using a multiphase computational method (MICS) parallelized with MPI. The computational method can deal with the movements and collisions of individual sand particles as well as the mechanical interaction between fluids and sand particles. The amounts of the removed volumes, which had been occupied by sand particles, due to the impact were calculated by varying the momentums and shapes of the water-drop. As a result, it was shown that the calculated results are in good agreement with the experiments and that the computation time is shortened by the parallel computations.