

水滴衝突により発生する砂粒子群運動の3次元並列計算

3D Parallel Computations for Movements of Sand Particles Resulting from Impact of a Water-drop

柳生大輔・牛島省・鳥生大祐・青木一真

Daisuke YAGYU, Satoru USHJIMA, Daisuke TORIU and Kazuma AOKI

京都大学工学部地球工学科 (〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

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)

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)

工学士 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)

Key Words: parallel computation, sand surface deformation, water-drop impact, multiphase model

1. 緒言

降雨が原因となって引き起こされる砂面浸食の1つの形態として、雨滴が直接砂面に衝突することにより発生する雨滴浸食がある。この雨滴浸食に関して、岩垣ら¹⁾は、水滴衝突によって砂面に形成された穿孔の体積の測定する実験を行った。また、福桜²⁾は、雨滴浸食を水滴と砂面との衝突現象としてとらえ、その過程を明らかにする実験を試みている。上記の他にも、雨滴浸食に関する多くの実験的研究がなされている。

一方、数値解析により雨滴の衝突による個々の砂粒子の挙動を3次元的に再現しようとする研究例は見られない。そこで、本研究では牛島ら³⁾が提案した、3次元固気液多相場の解法(MICS)を用いて、水滴落下による乾燥状態の砂粒子群運動を再現し、衝突する水滴の運動量と砂面浸食量の関係について考察した。

2. 数値解析手法の概要

MICS³⁾では、気液相に対して、以下の質量保存則、非圧縮条件、運動量保存則を用いる。

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

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

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

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 、 f 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。ま

た、 f_i は外力加速度の x_i 成分である。これらの基礎式を、有限体積法を用いてコロケート格子上で離散化し、既報³⁾と同様の解法により、密度、流速および圧力の計算を行う。

次に、T型モデル³⁾を利用して、複雑形状物体(砂粒子)の並進および回転運動の計算を行う。すなわち、気液相の計算で得られた流速と圧力などを用いて、四面体要素により表現された複雑形状物体に作用する流体力を求める。さらに、物体表面付近に配置した接触判定球を利用して、物体間の衝突力を評価する。以上の流体力と接触力の合力を $\mathbf{F}$ 、モーメントを $\mathbf{N}$ として、次式より物体の並進および回転運動を計算する。

$$M \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{F} \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{N} \quad (5)$$

ここで、 M と $\mathbf{L}$ は、それぞれ物体の質量と角運動量ベクトルである。なお、以上の気液相と物体運動の演算は、at MPIを用いて並列化されている⁴⁾。ただし、本研究では動的な負荷分散は行っていない。

3. 水滴の運動量と浸食量の関係

既往の実験¹⁾では、乾燥砂に対して、水滴の運動量と砂面浸食量の関係が検討されている。これと同様に、本研究では、多数の砂粒子から構成される乾燥砂に対して、直径が一定の球体で表される水滴の落下速度を変化させた数値計算を行い、衝突する水滴の運動量と砂面浸食量の関係を考察する。

3.1 計算条件

初期の砂粒子の配置を表す概略図を図-1に示す。また、 $t = 0.01$ [s]における計算結果を図-2に示す。 l_i は、 x_i 方向の計算領域の長さであり、 $l_1 = l_2 = 3.3788 \times 10^{-2}$

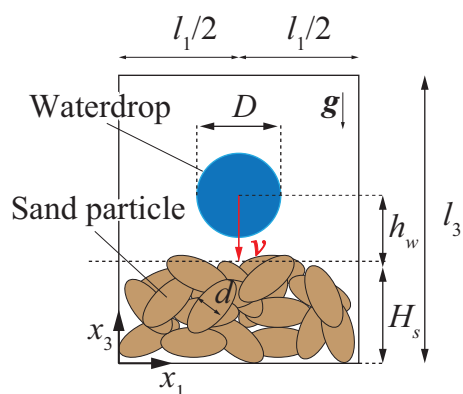


図-1 $x_1 - x_3$ 断面図

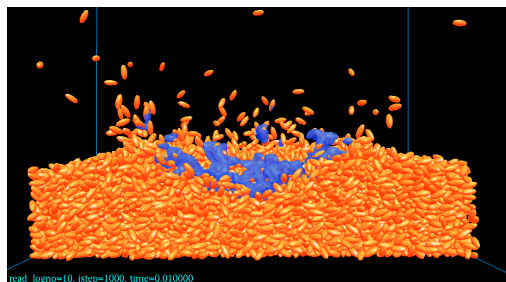


図-2 $t = 0.01$ [s] における計算結果

[m] および $l_3 = 2.5 \cdot 10^{-2}$ [m] である。 H_s は $(l_1/2, l_2/2)$ を中心とする半径 $1.0 \cdot 10^{-3}$ [m] の範囲内にある最大砂層厚であり、 $H_s = 8.15 \cdot 10^{-3}$ [m] である。また、 D は水滴の直径で、 $D = 5.537 \cdot 10^{-3}$ [m] とした。 h_w は、平面 $x_3 = H_s$ から水滴の中心までの距離であり、 $h_w = 0.6D$ とした。水滴落下速度 v を 2.25, 4.50, 6.75 および 9.00 [m/s] と変化させて計算を行った。なお、 $0 \leq x_3 < 5.0 \cdot 10^{-3}$ [m] における砂粒子数 n_b は 30,900 個であり、その空隙率は $N = 0.454$ である。砂粒子は、図-1 および図-2 に示すように、回転楕円体として表現し、その短径を粒径 $d = 0.52$ [mm] とする。

3.2 計算結果

計算で得られた砂面形状を図-3 に示す。また、岩垣ら¹⁾によって行われた砂面浸食量と水滴の運動量の関係と、本研究の計算結果を図-4 に合わせて示す。図-3 の縦軸 $\bar{h}_s$ は平滑化された砂面高さ、 r は計算領域中心を原点とする水平な半径方向の座標である。また、砂粒子がほぼ静止した状態の時刻を $T_0 = 0.19$ [s] とした。図-4 に示す n は、岩垣らが行った実験における空隙率であり、 V は浸食面を球面の一部と仮定して算出された浸食量¹⁾である。

図-4 に示されるように、水滴の運動量が大きくなるほど、浸食量が大きくなる傾向が得られた。この傾向は、岩垣ら¹⁾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、浸食量 V が実験と同様の値を示しているが、水滴の運動量が大きくなるほど岩垣らの結果より高い浸食量を示す傾向となった。これは、岩垣らの実験において、砂粒子の形状や粒径

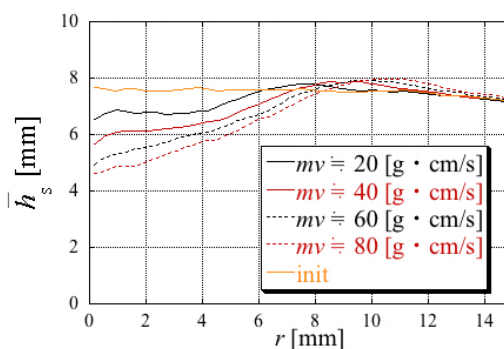


図-3 計算で得られた砂面形状 ($t = T_0$)

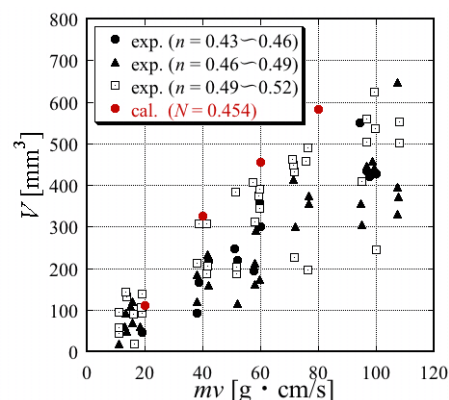


図-4 岩垣ら¹⁾により行われた乾燥砂での浸食量と水滴の運動量と本研究の計算結果との比較 ($d = 0.52$ [mm])

が一樣ではないことと、落下中の水滴の形状が完全な球体ではない⁵⁾ ことなどが原因であると推察される。

4. 結言

本研究では、3次元の固気液多相場の数値解析手法 MICS³⁾を利用して、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¹⁾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、浸食量の計算値は実験値より高くなる傾向となった。今後は、砂粒子形状や水滴形状などを、より実際の条件に近づけた計算を行うことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 岩垣雄一, 土屋義人: 水滴による地面侵食に関する二、三の実験, 土木学会論文集, No. 35, pp. 55-63, 1956.
- 2) 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.
- 3) 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, 土木学会論文集 B, Vol. 64 No.2, pp. 128-138, 2008.
- 4) 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, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 70, No. 4, I-835-I-840, 2014.
- 5) 高野保英, 竹原幸生, 江藤剛治: 雨滴の超高速動画撮影による落下速度・形状の計測, 土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 4, pp. 332-340, 2009.