成分別粒子パスラインによる 不均一粒子流の数値可視化

牛島 省[○] 櫛津 家久 (京都大学大学院)

Numerical visualization of non-uniform particulate flows with component-based particle pathlines

Satoru USHIJIMA and Iehisa NEZU

ABSTRACT

A numerical visualization method has been proposed for the particle motions calculated with the three-dimensional distinct element method (DEM). In this method, component-based particle pathlines are drawn for particulate flows consisting of the non-uniform properties, such as particle diameters and densities. The present visualization method was applied to the predicted results for the granular mixture in horizontal and inclined rotating cylinders. As a result, it was confirmed that the component-based particle pathlines show the similar patterns when non-uniform particles are sufficiently mixed, while they become completely different patterns in case that the particles are segregated. Thus, the component-based particle pathlines allows us to obtain the characteristic particle flow patterns which are closely related to the mixing and segregation processes.

Keywords : component-based particle pathlines, parallel computation, DEM, numerical visualization

1. はじめに

粒径や比重の異なる多数の粒子が互いに接触しながら運動する多成分粒子流は、土砂を多量に含んだ流れなどに見られ、その混合あるいは分級・偏析過程を把握することは工学等の分野で重要な課題となっている。多成分粒子流においては、各成分の粒子は粒径や比重の相違により、様々な流動パターンを持ち、これが粒子の混合や偏析の発生に深く関係していると考えられる。一般に実験では粒子群内部の3次元流動パターンを把握することは容易ではないが、離散要素法 (DEM) による数値計算では、粒子の空間位置等のデータが得られるので、成分ごとに粒子の流動パターンを可視化することが可能である。

粒径や密度が一樣でない粒子流に対して、著者等は DEM を利用して、領域分割に基づく並列計算により粒子の3次元挙動を解析する手法を提案した [1]。この手法により、二成分の粒子から成る粒子混合物の分級現象が良好に再現されることが示されている [2]。本報では、この解析結果に対して、成分別の粒子パスラインを描画し、分級現象の発生と成分別の粒子のフローパターンについて考察を加える。

2. 粒子運動の解析手法

DEMに基づく粒子運動の3次元並列計算法は、前報 [1] と同様である。この手法では、計算対象となる領域を複数の subdomain に分割し、subdomain 内に含まれる粒子運動の計算を並列的に実行する。subdomain の共有境界面を介して接触する粒子に作用する外力の評価、また subdomain 間の粒子の移動を適切に扱うために、メッセージパッシングを利用した数値処理を適用している [3]。

周囲流体が液体である場合には、粒子と連続相の相互作用が無視し得ないものとなるので、two-way model を用いる [2]。この場合には、流体計算も並列的に実行され、二相間の相互作用力等がメッセージパッシングにより、非定常計算の過程で伝達される。一方、周囲流体が気体で、粒子運動に対する連続相の影響が無視できる場合には、one-way model により粒子運動の計算のみが行われる。本報では、気体中における回転円筒内の粒子運動を対象とするため、後者のモデルを利用して得られた計算結果に対して、数値可視化手法を適用する。

3. 回転円筒内の二成分粒子流の実験

回転円筒容器内において、粒径と比重が異なる2種類の粒子の混合状況を調べる実験を行った [4]。円筒は直径 D が 50mm、軸方向長さ L が 90mm であり、毎秒 0.93 回転の速度で回転する。軸方向に x 軸、水平方向に y 軸をとる。水平面からの中心軸の傾斜角度 (θ) を 0 度 (水平) および 6.1 度とし、Table 1 に示す3種類の粒子のうちの2種類を選択して用いる実験を行った。実験条件を Table 2 に示す。

Table 1 Particles used in Experiments

Particle	Material	d (mm)	$\rho_p(g/cm^3)$	e
N3	nylon	3.3	1.14	0.77
N6	nylon	6.4	1.14	0.78
A3	alumina	3.3	3.60	0.82

Table 2 Experimental Conditions
(Inclined Angle and Particle Number)

Case	θ (deg)	N3	N6	A3
H-N3A3	0.0	150	0	150
H-N6A3	0.0	0	50	150
I-N3A3	6.1	150	0	150
I-N6A3	6.1	0	50	150

4. 数値可視化

4.1 計算により得られた粒子分布

実験および数値計算により得られた粒子の分布状況を Fig.1 と Fig.2 に示す。H-N3A3 では、2種類の粒子群はほぼ良好に混合した。一方、粒径と比重が異なる H-N6A3 では、粒子の偏析が明瞭に発生した。回転軸が傾斜した I-N3A3 では、Fig.1 (c) に示すように、比重の高い A3 粒子は傾斜軸の上方側へ集合し、傾斜下方側に N3 粒子が分布するものとなった。I-N6A3 でも傾斜下方側に低比重の N6 粒子が集合し、明瞭な偏析が生じた。計算結果はこれらの粒子分布の傾向を良好に再現している。

4.2 成分別粒子パスラインによる可視化

時刻 t 、位置 $\mathbf{x}$ における γ 成分の粒子の x_i 方向速度成分を $v_i^\gamma(t, \mathbf{x})$ とするとき、3次元セル m 内で各時刻ごとに空間平均した後、時間平均をとる。

$$u_{im}^\gamma = \frac{1}{N_T} \sum_{n=0}^{N_T-1} \left[\frac{1}{N_m} \sum_{\mathbf{x} \in m} v_i^\gamma(t_0 + n\Delta t, \mathbf{x}) \right] \quad (1)$$

ここに、 N_m は、セル m 内に含まれる粒子数である。ただし、 $N_m = 0$ の場合には、(1) 式右辺の $[\]$ 内の値

は 0 とする。これより、セルスケールの空間平均がなされた粒子速度の時間平均値が得られるので、この速度場に数値的なトレーサを投入してその軌跡を描かせると、成分ごとの流動パターンを可視化表示できる。この成分別粒子パスラインにより、各成分の粒子が平均的に空間中のどの領域を、どのような軌跡を描いて移動するかを把握できる。

Fig.3 および Fig.4 は、4 ケースの計算結果から求めた粒子パスラインを示すものである。Fig.3 (a) に示された H-N3A3 では、粒子がほぼ均一に混合したが、各成分の粒子パスラインはほぼ重なり合う同様のパターンを示している。すなわち、このケースでは2成分の粒子は同じ領域を通過し、しかもその流動パターンはほぼ同一であって、両粒子の間には偏析を促すような作用がないことを意味している。一方、Fig.3 (b) の H-N6A3 では、N6 粒子の粒子パスラインが両端近傍まで展開していること、また循環運動の回転軸方向が A3 粒子と異なることなどが示されており、これらは両成分粒子の偏析状況に対応している。Fig.3 (c) および (d) に示された傾斜円筒の場合では、I-N3A3 および I-N6A3 では各成分の粒子が並行する2本の曲線を中心として、独立に回転運動している様子などが可視化されている。二成分の粒子パスラインが接する領域では、粒径や密度差に起因する粒子間接触力が両粒子を分離する方向に作用し、偏析が生ずることが示唆される。

5. おわりに

DEM による3次元の粒子運動の計算結果に対して、成分別粒子パスラインを描画することにより、多成分粒子流に内在する成分ごとの3次元流動パターンが可視化された。各成分の粒子パスラインが同様のパターンとなる場合は均一な混合が期待でき、逆に偏析が生ずる場合には粒子パスラインにより各成分の粒子が分布する位置関係や運動状態などを把握できることが示された。

参考文献

- [1] 牛島省, 瀬津家久. 不均一粒子流の混合・分級現象に関する3次元並列数値解析法の提案. 水工学論文集, Vol. 45, pp. 715-720, 2001.
- [2] 牛島省, 瀬津家久. 流体-粒子間相互作用を考慮した振動流中の不均一粒子群の3次元並列計算. 海岸工学論文集, Vol. 48, No. (1), pp. 471-475, 2001.
- [3] S. Ushijima and I. Nezu. Numerical visualization of granular mixture in a rotating cylinder. 9th Int. Symp. on Flow Visualization, 2000, pp. 400-1-10, 2000.
- [4] 牛島省, 瀬津家久. 回転円筒内における二成分粒子混合物の並列計算. 日本混相流学会 講演論文集, Vol. 1, pp. 129-130, 2000.

Fig. 1 Experimental Results (● = A3, ○ = N6 or N3)

Fig. 2 Computed Results (black = A3, gray = N3 or N6)

(a) H-N3A3

(b) H-N6A3

(c) I-N3A3

(d) I-N6A3

Fig. 3 Particle Flow Patterns Visualized by Particle Trace Lines (black = A3, gray = N3 or N6)

(a) H-N3A3

(b) H-N6A3

(c) I-N3A3

(d) I-N6A3

Fig. 4 Particle Flow Patterns Visualized by Particle Trace Lines (black = A3, gray = N3 or N6)