

相似則による DEM 流動層解析の高速化

Acceleration of DEM Simulation of Fluidized Bed by Similarity Laws

劉 志 宏 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 主査 工学博士
須 田 俊 之 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 主査 博士(工学)
田 中 敏 嗣 大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 教授
辻 拓 也 大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 准教授

流動層内の複雑な現象を解析するのに DEM (Discrete Element Method) が用いられている。DEM は粒子一つ一つを追跡するため解析精度は高い反面、解析時間が膨大になり、実規模の流動層解析への適用は困難であった。そこで本稿では相似則によって粒子径を大きくする方法で、粒子数を大幅に低減させることで解析の高速化を図った。この結果、解析精度を許容範囲内に維持したまま、解析時間は従来に比べて約 10 万分の 1 に短縮され、DEM の実規模流動層解析への適用が可能になった。

DEM (Discrete Element Method) can easily model the complex phenomena of fluidization, because it traces each particle in the bed. It is of high accuracy, but because of large computation time, the applications to bed of industrial size are impossible. In this paper, similarity laws are applied to decrease computation time. The calculations are accelerated 100 000 times. The results are validated against experimental results.

1. 緒 言

流動層技術はガス化、焼却、乾燥、触媒反応プロセスなどに幅広く利用されている。流動層技術を工業的に適用するには流動層内で起きている複雑な固気二相流現象を把握しなければならず、数値シミュレーションが有効な設計ツールになっている。辻⁽¹⁾は流動層シミュレーションに初めて DEM (Discrete Element Method : 離散要素法) を用いた。しかし、DEM は粒子一つ一つを追跡するため膨大な計算時間が必要となり、大規模流動層解析に適用することは困難であった。計算負荷を減らす方法の一つとして、小さな実粒子を大きな仮想粒子に置き換えることで粒子数を大幅に減らす方法がある^{(2)~(5)}。この場合、大きな仮想粒子の挙動は小さな実粒子の挙動と同じでなければならない。

そこで本稿では計算負荷を大幅に減らすため、従来の DEM による流動層解析に相似則を用いることで、粒子挙動は維持したまま小さな実粒子を大きな仮想粒子に置き換えた解析を行った。そして流動層実験から粒子の挙動を明らかにし、相似則を用いた解析結果と比較することで相似則の妥当性を検証した。

2. 流動層 DEM 解析の相似則

2.1 D E M

DEM は、各粒子にニュートン力学の方程式を適用し、

粒子の運動を計算する。流動層内の粒子に作用する力は重力、抵抗力および接触力 (1) 式となる。接触力は、ばね・ダッシュポットでモデル化している。第 1 図に DEM の接触力モデルを示す。

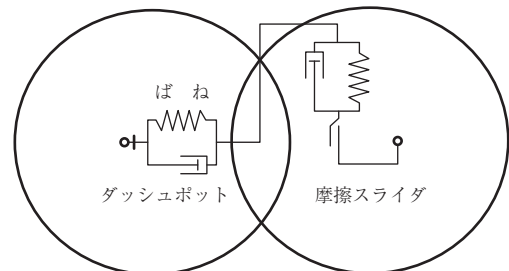
$$m\ddot{\vec{X}} = m\vec{g} + \vec{F}_D + \vec{F}_C \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

- m : 粒子の質量
- \vec{X} : 粒子中心の位置ベクトル
- \vec{g} : 重力加速度
- \vec{F}_D : 粒子が受けている抵抗力
- \vec{F}_C : 粒子と粒子の接触力

2.2 相似則の導出

ここでは、仮想粒子と仮想流体を導入して、相似則を導出する。実粒子を K 倍大きくし ((2) 式)、一つの仮想粒子で実粒子群を表すようにする。群内の実粒子の数は



第 1 図 DEM の接触力モデル
Fig. 1 Model for contact force in DEM

K^3 個である。第 2 図に実流動層と仮想流動層を示す。仮想粒子の密度は実粒子の密度 ((3) 式) と同じにする。

$$K \equiv D_{P,L} / D_{P,O} \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_{P,L} = \rho_{P,O} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

D_p : 粒径

ρ_p : 粒子密度

L (下付き添字) : 仮想粒子, 仮想流体

O (下付き添字) : 実粒子, 実流体

次に、仮想粒子と実粒子が同様に動く条件を導出する。流動層内の粒子の動きが類似している場合は、仮想粒子と実粒子のレイノルズ数 Re ((4) 式) とアルキメデス数 Ar ((5) 式) は等しい。

$$Re = \frac{|V_L - U_L| \rho_{f,L} \varepsilon_L D_{P,L}}{\mu_{f,L}} = \frac{|V_O - U_O| \rho_{f,O} \varepsilon_O D_{P,O}}{\mu_{f,O}} \dots\dots\dots (4)$$

$$Ar = \frac{D_{P,L}^3 \rho_{f,L} (\rho_{P,L} - \rho_{f,L}) g}{\mu_{f,L}^2} = \frac{D_{P,O}^3 \rho_{f,O} (\rho_{P,O} - \rho_{f,O}) g}{\mu_{f,O}^2} \dots\dots\dots (5)$$

仮想流動層が実流動層と相似する場合、以下を満足する。

$$\vec{V}_L = \vec{V}_O, \vec{U}_L = \vec{U}_O, \varepsilon_L = \varepsilon_O, p_L = p_O \dots\dots (6)$$

ここで

V : 流体速度

U : 粒子速度

ε : void 率

p : 圧力

ρ_f : 流体密度

μ_f : 流体粘性

(3), (4), (5) 式および (6) 式から、次の (7), (8) 式が導出される。

$$\mu_{f,L} / \mu_{f,O} = K^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\rho_{f,L} / \rho_{f,O} = K \dots\dots\dots (8)$$

(3), (7) 式および (8) 式を満足した場合、仮想粒子の挙動が実粒子の挙動と相似する。相似則の物理的意味について、以下に述べる。

2.3 相似則の物理的意味

流動層内の粒子は、3 種類の力を受けている。重力、抵抗力と接触力 ((1) 式) である。もし、仮想粒子に作用する力が実粒子群に作用する力の総和に等しければ、仮想流動層内の仮想粒子の動きは実粒子群の動きに相似するはずである。ここから、仮想流動層における仮想粒子が受ける力と実粒子が受ける力が等しいかどうかをチェックする。

また、最小流動化速度 V_{mf} は流動層にとって重要なパラメタである。仮想流動層の最小流動化速度と実流動層の最小流動化速度が等しいかどうかを確認する。

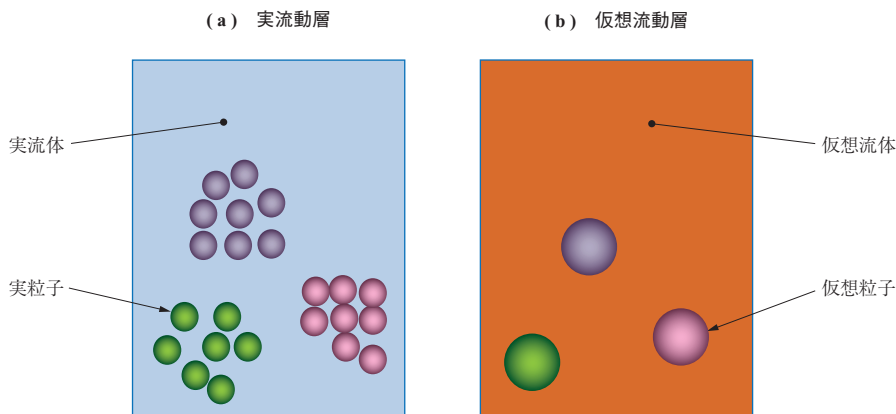
(1) 重力: $Gravity_force|_L$

$$Gravity_force|_L = \rho_{P,L} \frac{\pi}{6} D_{P,L}^3 g = K^3 (\rho_{P,O} \frac{\pi}{6} D_{P,O}^3 g) = K^3 Gravity_force|_O \dots\dots (9)$$

仮想粒子に作用する重力と実粒子群に作用する重力の和とは等しい。

(2) 抵抗力: $\vec{F}_{D,L}$

$$\vec{F}_{D,L} = \left(\frac{\beta}{1 - \varepsilon_L} (\vec{V}_L - \vec{U}_L) - \nabla p_L \right) \frac{\pi D_{P,L}^3}{6} \dots\dots (10)$$



第 2 図 実流動層と仮想流動層
Fig. 2 Real and imaginary fluidized bed

ここで

$$\beta = \frac{\mu_{f,L}}{D_{P,L}^2} f(\epsilon_L, Re_L) \dots\dots\dots (11)$$

(3), (4), (6), (7) 式および (8) 式を (10), (11) 式に代入すると, (12) 式が得られる.

$$\vec{F}_{D,L} = K^3 \vec{F}_{D,O} \dots\dots\dots (12)$$

仮想粒子に作用する抵抗力は実粒子群に作用する抵抗力の和に等しい.

(3) 最小流動化速度: V_{mf}

(5), (7) 式および (8) 式から

$$\begin{aligned} V_{mf,L} &= \frac{\mu_{f,L}}{\rho_{f,L} D_{P,L}} f(Ar_L) \\ &= \frac{\mu_{f,O}}{\rho_{f,O} D_{P,O}} f(Ar_O) = V_{mf,O} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

仮想粒子と実粒子が同じ最小流動化速度 V_{mf} をもつ.

(4) 接触力

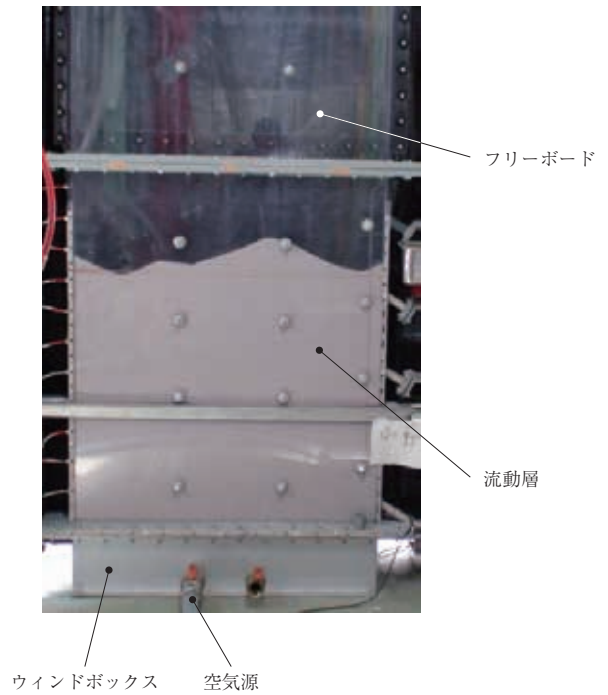
同じ群内の実粒子は異なる方向に移動しているため, 実粒子に作用する接触力と仮想粒子に作用する接触力を等しくすることは困難である. DEM のばね・ダッシュポットモデル (第 1 図参照) では, 接触力をばね定数, 摩擦定数で表す. ばね定数の大きさは粒子の挙動に大きな影響を与えない⁽¹⁾ ことから, 仮想粒子のばね定数と同じにした. また, 仮想粒子の摩擦定数と実粒子とは同じと仮定した.

仮想流動層における力と実流動層における力が等しいことは, 仮想流動層における粒子の動きと実流動層における粒子の動きが相似であることを意味する.

3. 実験による検証

第 3 図で流動層実験装置を示す. 本装置の大型流動層を使って検証実験を行った. 流動層のサイズおよび実験条件を第 1 表に示す. 定量的にシミュレーションを評価するため, ① 気泡径 ② 気泡上昇速度 ③ 気泡生成頻度, を評価指標としている. 上記の指標は層高さ 0.8 m で測定したものである. 気泡の形は不規則で, 気泡の境界はぼやけているため, 小さい気泡を評価しにくい. このため, 気泡径 0.13 m 以上のデータで評価する.

流動層内の粒子の数は約 12 億個であるため, 直接 DEM 解析することは現段階では不可能である. 相似則を用いて, 流動層内の粒子数約 12 億個から仮想粒子数を



第 3 図 流動層実験装置
Fig. 3 Experimental apparatus of fluidized bed

第 1 表 実験条件

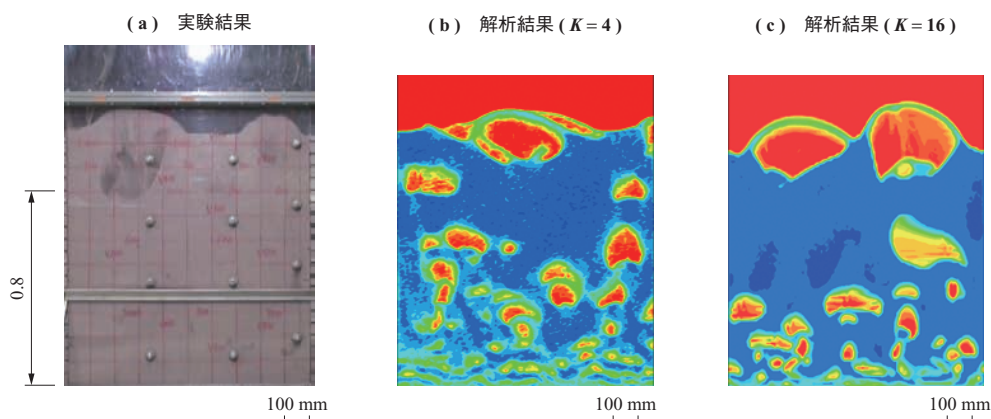
| Table 1 Experimental conditions | | |
|---------------------------------|-------------------|-------|
| 項目 | 単位 | 数値 |
| 層総高さ | m | 2 |
| 静止層高さ | m | 1 |
| 層長さ | m | 1 |
| 層の奥行き | m | 0.037 |
| 平均粒径 | mm | 0.29 |
| 粒子密度 | kg/m ³ | 2 610 |
| 空塔速度 | m/s | 0.322 |

約 2 千万個 ($K=4$) に, あるいは 30 万個 ($K=16$) に減らし, 仮想粒子の動きをシミュレートした. DEM 解析は非定常解析で, タイムステップは $K^{1.5}$ に比例し, 計算量は $K^{-4.5}$ に比例する. 実際の計算負荷を第 2 表に示す. $K=16$ の場合, 計算負荷は 15 万分の 1 になり, 同じ計算リソースを使えば, 計算速度は 15 万倍速くなる.

実験結果と解析結果の気泡のスナップショットを第 4 図に示す. 第 4 図 - (a) は実験結果の気泡のスナップショット, - (b), - (c) は解析結果の気泡のスナップショットである. 赤い色は流体を表し, 青い色は粒子を表

第 2 表 計算負荷
Table 2 The calculation load

| 拡大倍数 | 粒子数 | 計算負荷 |
|-----------------|---------------|-----------|
| 実粒子 ($K=1$) | 1 228 800 000 | 1 |
| 仮想粒子 ($K=4$) | 19 200 000 | 1/388 |
| 仮想粒子 ($K=16$) | 300 000 | 1/150 000 |



第 4 図 気泡のスナップショット (単位 : m)
Fig. 4 Snapshot of bubble (unit : m)

す。実験結果と解析結果の比較を第 3 表に示す。実験結果と解析結果の差は 8%以下 ($K=4$)、あるいは 15%以下 ($K=16$) で、相似則を使った DEM 解析と実験と良く一致することを確認できた。

第 5 図に流動層におけるフローパターンを示す。第 5 図 - (a) は実験の流れパターン、- (b)、- (c) は解析の流れパターンである。一定の時刻 ($T = T_0$) で、黒い色でマークされていた粒子は層の上部にあり、黒粒子

は気泡の動きによって第 5 図の白矢印で示した方向へ、壁や流動層の中心線に沿って下方に行く。第 5 図は $T = T_0 + 6$ 秒のスナップショットを示している。これによって実験と解析の流れのパターンはほぼ同じであることが明らかになった。したがって、相似則を用いると DEM の解析が実験の流れパターンを正しく再現できることが示された。

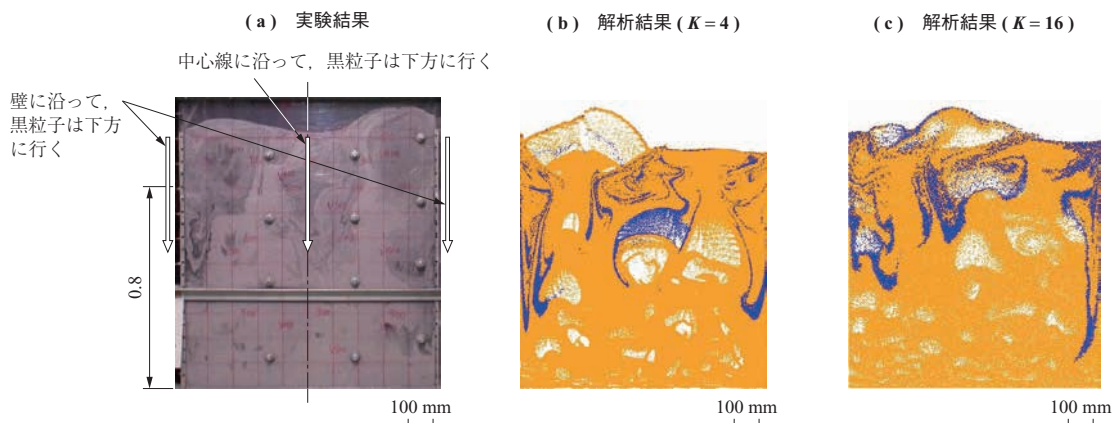
4. 結 言

(3)、(7) 式および (8) 式を満足する場合、仮想粒子の挙動は実粒子と同様となる。相似則を用いた DEM シミュレーションの妥当性は実験で検証された。相似則を用いた DEM 解析により、計算負荷が大幅に低減され、実規模流動層における粒子の挙動が短時間で詳細に把握できるようになった。今後は本技術を各種流動層の設計および評価に利用していく予定である。

第 3 表 実験結果と解析結果の比較
Table 3 Comparison of experimental and numerical results

| 項 目 | 単 位 | 実験結果 | 解析結果 | |
|----------------|---------|-------|--------------|--------------|
| | | | $K=4$ | $K=16$ |
| 平均気泡径 | m | 0.163 | 0.152 (-6.7) | 0.148 (-9.2) |
| 平均気泡径 上昇速度 | m/s | 1.09 | 1.15 (5.5) | 1.24 (13.8) |
| 気 泡 生 成 頻 度 | -/(s·m) | 2.5 | 2.62 (4.8) | 2.75 (10.0) |

- (注) 1. 計測条件
 ・層高さ 0.8 m での測定値
 ・気泡径は 0.13 m 以上に限定
 2. () は実験結果に対する解析結果の誤差 (%) を示す。



第 5 図 流動層におけるフローパターン (単位 : m)
Fig. 5 Flow pattern in the fluidized bed (unit : m)

参 考 文 献

- (1) Y. Tsuji, T. Kawaguchi and T. Tanaka : Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed Powder Technology Vol. 77 Issue 1 (1993. 10) pp. 79 - 87
- (2) M. Sakai, H. Takahashi, C. C. Pain, J-P Latham and J. Xiang : Study on a Large-Scale Discrete Element Model for Fine Particles in a Fluidized Bed Advanced Powder Technology Vol. 23 Issue 5 (2012. 9) pp. 673 - 681
- (3) K. Washino, C. Hsu, T. Kawaguchi and Y. Tsuji : Similarity Model for DEM Simulation of Fluidized Bed Journal of the Society of Powder Technology Vol. 44 No. 3 (2007) pp. 198 - 205
- (4) Z. Liu, T. Hirata, T. Kawaguchi, T. Tanaka and Y. Tsuji : The Similarity for Simulation of Fluidized Bed Proceeding of the 5th International Conference on Multiphase Flow (ICMF'2004) Paper No. 430 (2004)
- (5) Z. Liu, T. Suda, T. Tsuji and T. Tanaka : Use of Similarities in CFD-DEM Simulation of Fluidized Bed Fluidization XIV (2013) pp. 387 - 394