

Title	流動層シミュレーションの大規模化と高分解能化
Author(s)	辻, 拓也; 田中, 敏嗣
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2011, 1, p. 33-37
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/70447
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

# 流動層シミュレーションの大規模化と高分解能化

辻 拓也、田中 敏嗣 大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

## 1. はじめに

粉粒体を気流により流動化させる気系流動層は、 粉粒体の乾燥、造粒、混合などの各種粉粒体操作の 他、化学反応装置、石炭ガス化炉、燃焼炉など様々 な工業的応用に関連して用いられる[1]。気系流動層 では、粉粒体の濃厚相中に粒子濃度の希薄な「気泡」 と呼ばれる特徴的な中間スケールの構造(メゾスケ ール構造)が形成されることが知られている。気泡 が粉粒体の濃厚相中を上昇することによって、粉粒 体層中に大規模な対流を誘起し、さらに気流や粉粒 体の混合を促進するなど、流動層中の各種輸送現象 に大きな影響を及ぼす。このように流動層内の流動 現象には、粒子まわりのミクロスケールの流れから、 気泡などのメゾスケール構造と、これが引き起こす 装置規模の対流といったマクロスケールの流れまで 幅広い空間スケールが存在し、マルチスケール構造 を持つものとなっている。

流動層のような気流と粒子が高濃度で混在して存 在する、いわゆる高濃度固気二相流に対しても、著 者等のグループが提案した離散要素法[2](Discrete Element Method、以後 DEM)と数値流体力学

(Computational Fluid Mechanics、以後 CFD)をカッ プリングしたモデルにより、個々の粒子運動の視点 に基づく数値シミュレーションが可能となり[3]、 様々な応用が行われるようになっている。

他の DEM を用いた数値シミュレーションと同様、 流動層の DEM-CFD カップリングシミュレーション に関しても粒子数の課題は大きな問題の一つであ る。現実の工学的な問題に対する数値シミュレーシ ョンを行う場合には、数百万から数千万あるいはそ のオーダーを超える膨大な粒子数が必要となる。

他方、例えば粉粒体の濃厚相中での熱・物質輸送 特性を知るためには、流動する粒子群の間隙におけ る微視的な気流の流れを調べることも重要な課題で



ある。本稿では、著者等のグループで行った粒子数 が数百万オーダーの大規模数値シミュレーションに よる3次元気泡の空間構造に関する研究[4-6]と、微 視的な視点での固気二相流の高解像度数値シミュレ ーション[7]について紹介する。

## 2. 計算モデル上での空間スケールの取扱い

ここでは、流体は気体に限らず液体でもよいので、 流体・固体混相流という表現を用いて説明を行う。 流体・固体混相流の DEM-CFD カップリングシミュ レーションにおいて、粒子モデルの運動を、流体の 流れ場と相互作用を考慮してカップリングするモデ ルには、流体相のモデリングの視点に関して図1に 示す2種類の視点がある。

その一つは、図1(a)に示すように個々の粒子スケ ールよりもミクロな流れ場を、瞬時、瞬時で粒子表 面での流体の境界条件(流体速度が粒子表面速度と 一致)を満足するように厳密に解くミクロスケール モデルである。この微視的視点での数値解析では、 流体の流れの基礎式は、質量保存則と Navier-Stokes 方程式である。粒子表面は流体にとって移動境界と なり、界面の各部分に働く圧力とせん断力を介して、 粒子と流体は相互作用し合い、粒子に働く流体抵抗



図 2: 気流流れのミクロスケールモデルとメゾスケールモデル

などの流体力は粒子表面での圧力とせん断力を積分 して求められる。したがって、粒子に働く流体力を 求めるための流体力モデルなどは不要となる。流体 に関わるこのミクロな視点に基づく流体・固体混相 流の解析例としては埋め込み境界法、Lattice Boltzmann法、fictitious domain法などに基づくもの がある[7-11]。

上に述べた、個々の粒子スケールより微視的な視 点で流れを解像するミクロスケールモデルによる直 接数値解析は、流れの予測の精度は高くなるが、同 時に計算負荷も大きくなるため、例えば流動層内で 形成される気泡の3次元構造を捉える計算を行うこ とは現在でも困難である。計算機の能力の制約によ り、計算で取り扱える空間スケールの範囲には限界 があり、サブ粒子スケールから容器スケールまでの すべてのスケールを解像することはできない。した がって、気泡の3次元構造のような、より大きな空 間スケールを捉えるためには、解像する流れの最小 スケールを大きくしなければならない。図1(b)に示 すメゾスケールモデルはそのような流動モデルであ り、個々の粒子スケールよりも大きなスケールで局 所的に平均化された流れを取り扱う。ただし、気泡 の構造を解像するには、この局所平均の空間スケー ルは、発生する気泡のスケールに比べて十分小さな 必要がある。また、この流動モデルでは、粒子・流 体間の相互作用力は、経験則などに基づくモデルで 与える必要がある。熱・物質輸送の扱いに関しても 同様である。

## 3. 3 次元大規模並列計算

## 3.1 DEM シミュレーションと粒子数

個々の粒子を追跡する DEM 用いた数値シミュレ ーションでは、取り扱える粒子数は計算機の能力に 依存しており、計算機の発達とともに大きくなって きた。DEM を提案した Cundall & Strack[2]以後の、 著者等が DEM シミュレーションを行った粒子数の 推移を次に示す。

197 個(2D) : Cundall & Strack (1979) [2]

1000 個(3D) : 田中・石田・辻(1991) [12]

2400 個(3D) : 川口・田中・辻(1992) [3]

25000 個(3D) :川口・坂本・田中・辻(1998) [13]

900 万個(3D) : 藪本・辻・川口・田中(2007) [5]

括弧内の2Dおよび3Dはそれぞれ2次元計算および 3次元計算を示す。上記の著者等のグループによる 計算は、すべて気流の局所相平均流[13]に対するメ ゾスケールモデルと DEM のカップリング計算[3]に より行われたものである。このような粒子数の大規 模化は計算機環境の発展によるものであり、とくに 最近の約1千万個にせまる大規模化はクラスター型 コンピュータによる並列計算により達成されたもの である。並列計算を用いることにより、現在では1 億個レベルの計算も可能となっている。

### 3.2 3次元気泡構造

クラスター型コンピュータによる並列計算を用い て求められた流動層 3 次元流動化挙動の数値シミ ュレーションの結果を図2に示す[6]。ここでは局所 相平均流[14]に基づく DEM-CFD カップリングモデ ル[6]が用いられており、一片が1.2mの正方形断面





(a) 孤立した気泡の形成

(b) 大規模構造からの気泡形成

図 3:3 次元流動層中での気泡構造

形状をもつ流動層内での、粒径4mmの球形粒子450 万個の流動化が求められている。容器底部からは一 様な気流の流入が与えられている。その初期粒子層 高は約0.2mという浅い流動層である。その初期状 態において粒子層は鉛直方向に層状に色分けされて おり、流動化の様子を観察しやすくなっている。並 列計算を用いることにより、このように大規模な3 次元の気泡流動化挙動の数値シミュレーションが可 能となった。流動化挙動の時間発展に着目すると、 まず、正方形断面の四隅から大きな気泡が吹き抜け、 その後、壁面に沿って活発な気泡の発生が見られる とともに流路中央においても大きな気泡が発生して いる。

実験において、流動層内部での気泡の3次元構造 を観察することは困難であるが、数値シミュレーシ ョンではその内部を容易に可視化することができ る。図3に空隙率の等値面で可視化された流動層内 部で形成されている気泡の3次元構造を示す。図3 (a)および(b)のそれぞれの白い楕円内での気泡形成 に着目すると、(a)では単一の気泡が成長する過程が 捉えられている。これに対して、(b)では粒子層の底 部付近に大規模な紐状の空隙構造が形成され、そこ から複数の気泡が発生する過程が捉えられている。 (b)の結果における単一の気泡スケールよりもさら に大規模な構造の存在は、このように大規模な計算 を行って初めて確認できることであり、本大規模計 算の大きな成果である。

## 4. 微視的流動解析による高精度計算

### 4.1 微視的流動解析

3 章で結果を述べたように、メゾスケールモデル を用いることにより気泡などのメゾスケール構造の 挙動の表現が可能である。しかしながら、この種の モデル計算では、粒子・流体間に作用する流体力は、 Ergun式[15]やWen & Yuの式[16]などの経験式に基 づいて与えられ、これらの経験式が十分に整備され ていない、例えば、粒径の異なる2成分系の場合や、 粒径分布がある場合、メゾスケールモデルによる計 算は途端に困難となる。また流動層は、熱・物質輸 送に関係するプロセスでよく用いられるが、各種モ デルの改良なども検討を要する課題である。このよ うに、流れのメゾスケールモデルに対する各種モデ リングに関して、ミクロスケールモデルによる数値 シミュレーションへの期待は大きい。

### 4.2 2次元噴流層内の微視的流動解析

梶島らにより提案された体積力型埋め込み境界法 [9]により流体計算を行い、これを DEM とカップリ ングすることにより、2 次元噴流層内の流動シミュ レーションを行った[7]。サブ粒子スケールの流動構 造を解像するため、流体の計算格子は粒径に比べて 小さく取られる。体積力型埋め込み境界法では、固 定された直交格子を用いて、粒子の占めている空間 も含めて流体の流れ場として計算を行う。その際、 付加的な外力を加えることにより粒子表面での境界 条件を満足させる。

2次元流動層内の流動の計算結果を図4に示す[7]。 噴流層容器の寸法は幅 70.4 mm、奥行きが 20 mm、 粒子は直径 3.2 mm、密度 910 kg/m<sup>3</sup>の球形粒子であ



(a) 流路中央断面
(b) 壁面近傍
(c) 図 4: 微視的数値シミュレーションにより求められた気流の流れ

り、2472 個の粒子が充填されている。その流動化前 の初期層高は55 mm である。このように2次元噴流 層といっても、完全な2次元ではなく、粒子も流体 も3次元の計算を行っている。容器底部では中央の 幅8.8 mmの気流流入口から4.8 m/sの一様流速で、 空気を仮定した気流が流入する。採用されている流 体計算の格子幅は0.4 mm であり、粒径の1/8 の空間 分解能をもつ。

図 4(a)および(b)は、それぞれ、流路中央断面およ び奥行き方向の壁面から 0.2mm(粒径の 1/16)の断 面における粒子断面分布と流体速度場を示している [7]。流体の速度場は細かく分かりにくいが、流速の 大きな部分は白く表示されている。まず、噴流層中 央の噴流部で大きな気流速度を取っており、噴流層 の流動パターンが現れていることが分かる。粒子間 隙の細かい流れ場に着目すると、とくに(b)の壁面近 傍の流れにおいて、中央の噴流部から斜め上方に向 かう高流速の筋状の流れのパーンが形成されている ことが分かる。このような粒子スケールのパターン はメゾスケールモデルでは解像されないものであ り、壁面付近での粒子挙動にどのように影響するの か興味深い。

なお、このような高濃度場では、粒子間隙に粒径

と比べても非常に小さな流れの空間スケールが存在 するため、本計算で採用されている粒径の 1/8 の空 間分解能では、まだ解像度は十分ではなく、今後、 さらに精度を上げることが望まれる。

## 5. おわりに

DEM-CFD カップリングモデルによる流動層内流 動シミュレーションについて、流体流れ場のメゾス ケールモデルと並列計算を用いた大規模計算、およ びミクロスケールモデルによる2次元噴流層内流動 に対する計算結果について著者らの研究結果を用い て現状を紹介した。今後はミクロスケールモデルに よる計算により、ミクロスケールにおける粒子・流 体混相系の物理の理解の深化とメゾスケールモデル における各種モデルの改善への寄与が期待できる。 本稿で示した結果は、大規模計算が可能となって初 めて得られるものである。今後の並列計算機のさら なる発展により、より現実的な課題への展開が可能 となるものと大きく期待する。

### 参考文献

- (1) 例えば, 流動層ハンドブック, 培風館, (1999).
- (2) P. A. Cundall and O. D. L. Strack, *Géotechnique*, 29, 47-65, (1979).
- (3) 川口寿裕ら, *日本機械学会論文集*, 58-551B, 2119-2125, (1992).

- (4) 辻拓也ら, 粉体工学会誌, 44-3, 173-179, (2007).
- (5) 藪本恵三ら, Proc. 13 SCEJ Symp. on Fluidization & Particle Processing, 253-258, (2007).
- (6) T. Tsuji, et al., Powder Tech., 184, 132-140, (2008).
- (7) T. Tsuji, et al., Proc. of International Conference on Multiphase Flow, CD-ROM No. 13.1.2, (2010).
- (8) T. -W. Pan, et al., J. Fluid Mech., **451**, 169-191, (2002).
- (9) T. Kajishima, et al., JSME Int. B, 244, 526-535, (2001).
- (10) M. A. van der Hoef, et al., Annu. Rev. Fluid Mech., 40, 47-70, (2008).
- (11)桑木賢也ら, 化学工学会第41 回秋季大会研究発 表講演要旨集, CD-ROM No.C218, (2009).
- (12)田中敏嗣ら、日本機械学会論文集,75-534B, 60-67,(1991).
- (13)川口寿裕ら、日本機械学会論文集、64-619B、 717-723、(1998).
- (14) T. B. Anderson and R. A. Jackson, *I & EC Fundamentals*, **6**, 527-539, (1967).
- (15) S. Ergun, Chem. Eng. Prog., 48-2, 89-94, (1952).
- (16) C. Y. Wen and Y. H. Yu, Chem. Eng. Prog. Symposium Series, 62-62, 100-111, (1966).