



粉粒体流動予測のための離散粒子モデルおよび シミュレーション法の開発

Development of Discrete Element Model and Simulation Method to Predict Granular Flows

田中 敏嗣

大阪大学大学院工学研究科 教授

Toshitsugu TANAKA

Professor, Graduate School of Engineering, Osaka University, JAPAN

抄 録

1979年に発表されたCundallとStrackによる離散要素法（Discrete Element Method, 以後DEM）は、しばらく時をおいて1980年代後半頃から徐々に粉体工学の分野に波及し始めた。1990年代になってDEMの粉体工学分野への応用が多数なされ、粉体挙動を予測するためのDEMの有効性が認識されるようになった。その後、2000年代から2010年代における計算機の発達と汎用ソフトの開発と普及により、産業分野においても粉体の数値シミュレーションが幅広く行われるようになって来た。著者は、1980年代から固気二相流の離散粒子モデリングと高濃度固気二相流の数値解析のためのDEM-CFDモデルの開発などに携わってきた。本稿では、著者等が行った離散粒子モデルおよびシミュレーションの開発について紹介する。

ABSTRACT

The Discrete Element Method (DEM), introduced by Cundall and Strack in 1979, gradually spread to the field of powder engineering in the late 1980s. In the 1990s, numerous applications of DEM to the field of powder technology were made, and its usefulness for predicting powder behavior was recognized. Subsequently, in the 2000s and 2010s, with the development of computers and the popularization of general-purpose software, numerical simulation of powder processes became widely adopted in the industrial sector as well. Since the 1980s, the author has been actively involved in discrete particle modeling of solid-gas two-phase flows and the development of DEM-CFD models for numerical analysis of dense gas-solid two-phase flows. This paper describes the development of discrete particle models and simulations conducted by the authors.

1 はじめに

著者は1980年代の半ば頃から、粒子間相互作用のある場合の固気二相流のモデリングと数値シミュ

レーションに取り組んできた。その当時、例えば空気輸送における低濃度高速輸送のような比較的希薄な固気二相流に対する離散粒子モデル、あるいはLagrange型モデルによる数値シミュレーション（以

後、離散粒子シミュレーション)において、粒子間衝突を考慮した研究は皆無であった。著者は、自身が実験で計測を行った粒子速度分布や濃度分布を産み出す管内の粒子運動を理解し、説明するため、数値計算における粒子間衝突の検出法と導入法を提案し、様々な流れへと展開した。また、粒子間衝突では粒子間相互作用をモデル化できない水平管内プラグ流の流れの数値シミュレーションに、当時、日本の粉体工学の分野にも波及してきた離散要素法 (Discrete Element Method, 以後 DEM) (Cundall and Strack, 1979) を適用し、水平管内プラグ流の数値シミュレーションに成功した (田中ら, 1991; Tsuji et al., 1992)。その後、さらに一般的な高濃度固気二相流の数値シミュレーション法として DEM-CFD 法を提案し、二次元噴流層内での気泡流動化 (川口ら, 1992; Tsuji et al., 1993), 一様流入条件下での二次元流層内での気泡形成 (Tanaka et al., 1993) などの数値シミュレーションへと展開した。

1979年に発表されたDEMは、しばらく時をおいて1980年代後半頃から徐々に粉体工学の分野に波及し始めた。1990年代になってDEMの粉体工学分野への応用が拡大し、粉体挙動を予測するためのDEMの有効性が認識されるようになった。その後、2000年代から2010年代における計算機の発達と汎用ソフトの開発と普及により、産業分野における機器開発にも粉体の数値シミュレーションが幅広く行われるようになった。DEMは、個々の粒子運動を追跡する離散粒子モデルに分類される数値モデルであり、その中でも粒子間相互作用を接触力で表現するモデルに分類される。このモデルは、粒子間相互作用が衝突から接触まで幅広い相互作用をカバーするため、万能モデルのように思われることが多い。しかし、対象とする粉粒体挙動により、その中での粒子間相互作用は衝突が支配的な場合と、持続的な接触が支配的な場合があり、それぞれDEMの接触力モデルに要求される条件は異なってくる。

本稿では、今後のDEMのモデル化とシミュレーション法の発展の参考となることを期待して、著者らが取り組んできた粉粒体流動予測のための離散粒子モデルおよびシミュレーション法の開発について概観する。

2 モデルの分類

2.1 離散粒子モデル・連続体モデル

ここでは固体・流体混相流系を対象として数値モデルの分類を行う。まず、空間解像度の視点からの固相および流体相の数値モデルの分類を図1に示す。それぞれ、マクロ (巨視的) およびミクロ (微視的) の視点から大きく二つに分類されている。まず、粒子 (固相) については、ミクロな視点から個々の粒子の運動に着目し、追跡する離散粒子モデルがある。一方、個々の粒子スケールに比べてマクロな視点から、粒子群を一種の連続体としてモデル化するのが連続体モデルである。また、流体相に関しては、個々の粒子表面で粘着条件の境界条件を満たし、粒子間の流れを解像する、いわゆる直接数値計算を行うものが微視的流動モデルである。これに対して、粒径よりも大きなスケールで局所的に体積平均された流体の流れ場を取り扱うのが局所平均流モデルである。それぞれのモデルの特徴を図中に示す。

粒子モデルに関して、離散粒子モデルでは、粒径分布、粒子形状、付着力、液添加、潤滑力の影響など、粒子運動レベルでの様々な因子の影響が容易に導入できるほか、粒子の混合、拡散、偏析などの現象をモデルなしで直接求めることができるなど、利用価値が高い。一方で、取り扱う粒子数が大きくなると計算負荷が大きくなるという欠点もある。これに対して、連続体モデルは、計算負荷が粒子数に依存しないという利点があるが、上で述べた離散粒子モデルの利点が失われるという問題がある。

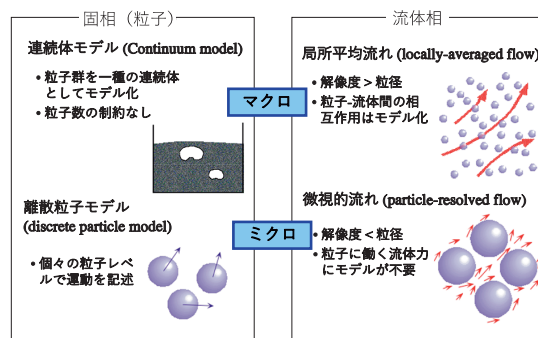


図1 空間解像度の視点によるモデルの分類

Fig. 1 Classification of numerical model for solid phase and fluid phase.

2.2 衝突モデル・接触モデル

離散粒子モデルは、図2に示すように、剛体粒子モデルと柔軟粒子モデルに分類される。剛体粒子モデルでは、粒子・粒子間あるいは粒子・固体壁面間の相互作用は衝突としてモデル化される。これに対して、柔軟粒子モデルではこれらの相互作用は接触力により表現される。剛体粒子モデルは衝突モデル、柔軟粒子モデルは接触モデルと呼ぶことができる。剛体粒子モデルでは衝突に要する時間を無視し、多体衝突を無視する。一方、柔軟粒子モデルでは、衝突を有限の時間の接触力による運動量交換により表現し、多体衝突および持続的接触の表現が可能となる。ここでは、モデルの分類として柔軟粒子モデルと述べているが、現状では実質的には、柔軟粒子モデルは離散要素法で用いられる粒子モデルと同じである。

3 粒子間衝突

3.1 決定論的方法・確率論的方法

ここでは、球形粒子を対象とする剛体球モデルに対して、粒子間衝突の取り扱いについて述べる。著者らは、離散粒子シミュレーションにおける粒子間衝突の導入法として、決定論的手法（田中ら，1990；Tanaka and Tsuji, 1991）と確率論的手法である DSMC（Direct Simulation Monte-Carlo）法（Bird, 1994；Nanbu, 1980）の粒子運動計算への応用を提案した。

まず、決定論的手法の計算方法について述べる。離散粒子モデルによる数値シミュレーションにおいては、個々の粒子の運動方程式を時間ステップごとに数値積分し、位置、速度、角速度を更新していく。多数の粒子が運動する中で、個々の粒子間衝突を決

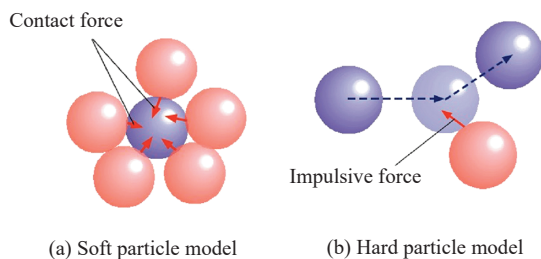


図2 粒子間相互作用による離散粒子モデルの分類

Fig. 2 Classification of discrete-particle model from the viewpoint of particle-particle interaction.

定論的に検出するためには、まず、時間ステップ Δt を粒子間衝突に関する平均自由時間に比べて十分小さく設定し、図3に示すように Δt の時間進行における個々の粒子間の相対運動の軌跡が交わるかどうかに基づいて粒子間衝突の有無を判定する。粒子間衝突が発生する場合には衝撃運動方程式に基づいて衝突後の速度および角速度を求め、衝突による軌道変化を考慮して Δt 時間後の状態を与える。著者らが本手法を提案するまで、明確に定義された粒子間衝突の計算方法はなく、本手法は現在も広く用いられている。

決定論的方法により、鉛直管内固気二相流の粒子速度分布と濃度分布を計算した結果を図4に示す。

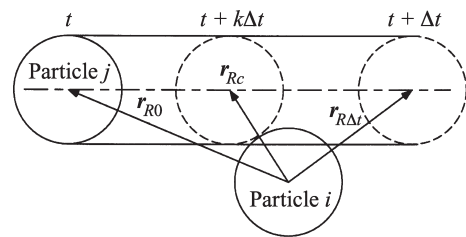


図3 粒子間衝突の判定方法（決定論的手法）

Fig. 3 Method for detecting inter-particle collisions (deterministic method).

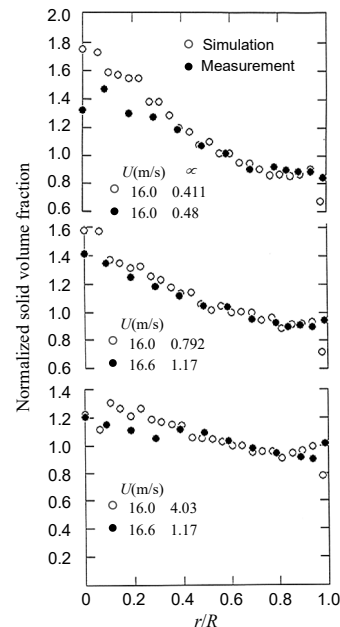


図4 決定論的手法で予測された鉛直管内固気二相流中の粒子濃度分布と実験結果の比較

Fig. 4 Particle concentration distribution predicted by deterministic method (comparison with experiment).

粒子濃度の増加に伴い、粒子間衝突による粒子拡散により、粒子濃度分布が均一化し、実験結果と一致する結果が得られている。決定論的方法による粒子間衝突の計算は、その後、鉛直チャンネル内固気二相乱流における粒子間衝突の影響の研究 (Yamamoto et al., 2001) (図 5)、循環流動層のライザー内で見られる中間濃度の固気二相流中でのクラスター形成 (Tsuji et al., 2008) (図 6) などに展開した。

粒子間衝突の計算方法として決定論的手法は正確ではあるが、各粒子に対して粒子間衝突の可能性のあるすべての近傍粒子との間で粒子間衝突の有無の判定を行う必要があり、これに大きな計算時間を要する。このような計算負荷を軽減する手法として確率論的方法がある。確率論的方法として、筆者らは、希薄気体の分子運動の計算に用いられる DSMC 法を

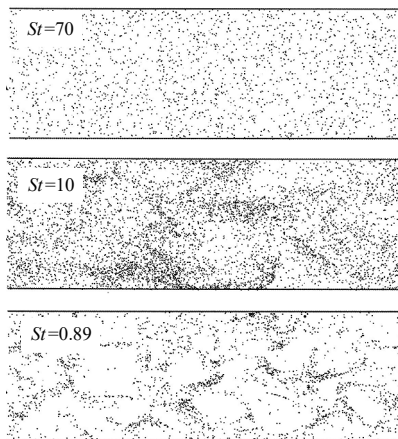
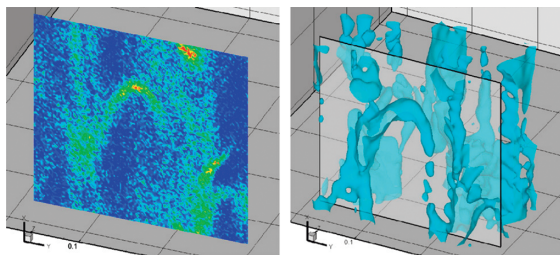


図 5 鉛直チャンネル内固気二相乱流中の粒子濃度分布に対するストークス数の影響

Fig. 5 Effect of Stokes number on the instantaneous particle distribution in the gas-solid turbulent flow in vertical channel.



(a) 鉛直断面内濃度分布

(b) 3次元フィルター像

図 6 3次元粒子クラスター構造

Fig. 6 Three-dimensional structures of clustering particles.

粒子間衝突に応用することを提案した。分子の衝突確率は、その分子近傍での速度分布関数から与えることができる。また、すべての分子の運動を計算する必要はなく、母集団の統計を表現できる小数のサンプル分子の運動だけを計算し、母集団の分子の数密度を仮定してサンプル分子の速度分布関数に基づいて衝突確率を与え、この確率に基づいて乱数のサイコロを振る Monte-Carlo 法により衝突の有無と衝突ペアの判定を行うのが DSMC 法である。

DSMC 法により、図 4 に示した鉛直管内の流れが表現できた (Tanaka et al., 1991) ほか、循環流動層のライザー内で見られる中間濃度の固気二相流中でのクラスター形成の予測にも有効であることを示している (田中ら, 1993; Tanaka et al., 1996)。

4 離散要素法

4.1 離散要素法の接触力モデル

代表的な柔軟粒子モデルである DEM の接触力モデルを図 7 に示す。この接触力モデルでは、法線方向および接線方向の弾性反発力および粘性減衰力を表現し、接線方向には摩擦力も表現している。DEM で用いられる接触力モデルは大別して、線形のばねおよびダッシュポットを用いる線型モデルと、等方弾性体の接触理論に基づく理論解を用いる Hertz-Mindlin モデル (Hertz, 1881), (Mindlin, 1949) がある。Hertz の接触理論 (Hertz, 1881) では、二つの球形粒子の法線方向弾性反発力 f_{cn} は次式で与えられる。

$$f_{cn} = \kappa_n \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$\kappa_n = \frac{\sqrt{2aE}}{3(1-\sigma^2)} \quad (2)$$

ここで、 a は粒子半径、 δ_n は法線方向の変形量、 E はヤング率、 σ はポアソン比であり、同じ材質、粒径からなる球形粒子間の接触を考えている。式 (1) で示されるように、球形粒子の弾性反発力 f_{cn} と変形量 δ_n の関係は線形ではない。

著者らが初めて DEM を用いた研究は、水平管内プラグ流の数値シミュレーション (田中ら, 1991; Tsuji et al., 1992) である。Cundall と Struck による DEM の論文では、接触力モデルとして線型モデル

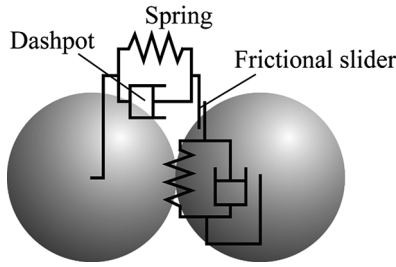


図7 離散要素法の接触力モデル

Fig. 7 Contact force model of Discrete Element Method.

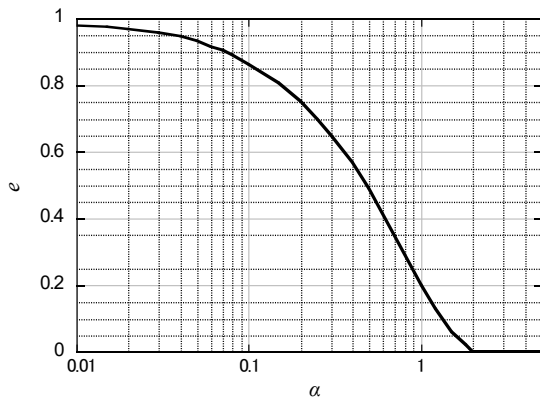


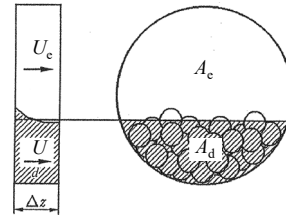
図8 モデルパラメータ α と反発係数 e の関係

Fig. 8 Relation between parameter α and restitution coefficient e .

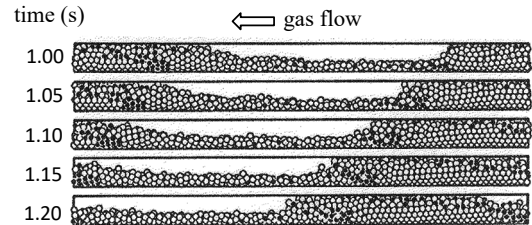
が用いられていた。しかし、現象の接触力モデル依存性が明確でなかったため、物理的により厳密である Hertz-Mindlin モデルを用いることにした。粒子の物性としてのヤング率やポアソン比などから弾性反発力は決定できる。ここで問題となるのはダッシュポットによる粘性減衰力の与え方である。ここでは、理論的な検討から、完全にオリジナルなモデルとなる次の粘性減衰力モデルを構築した。

$$f_{Vn} = \alpha \sqrt{m\kappa_n} \delta_n^{\frac{1}{2}} \dot{\delta}_n \quad (3)$$

ここで、 α はモデルパラメータであり、反発係数 e との間に図8に示す関係がある。つまり、このモデルを用いると、粒子の反発係数を任意に設定できる。式(3)の粘性減衰力モデルは接触の物理から求められたものではなく、粒子の反発特性の制御が容易であるという観点から開発したものであるが、現在でも、世界中で広範に利用されている。この接触力



(a) DEM-流体流れカップリングモデル



(b) 計算結果

図9 水平管内プラグ流動の DEM- 流体カップリングシミュレーション

Fig. 9 DEM-Fluid coupling simulation of horizontal plug flow.

モデルは、図9に結果を示す水平管内プラグ流のシミュレーションで用いられている。

5 DEM-CFD カップリングモデル

5.1 水平管内プラグ流動のモデル化

DEMと流体の流れをカップリングする数値シミュレーションは、著者らの行った水平管内プラグ流の研究が世界で最初のものである。水平管内プラグ流では、図9に計算結果を示すように、水平管の下部の粒子堆積層と上部の空筒部分に分かれる領域と、プラグ部の管の全域が粒子充填層となる領域からなっている。これに対して、図9(a)のように管を小領域に分割し、粒子堆積層部分にエルガン式を適用し、空筒部分に管摩擦抵抗を仮定する並列流路モデルにより流体の流れと粒子に働く流体力を求め、水平管内プラグ流の運動を表現することに成功した。ここで得られた流動パターンは、粒子堆積層の厚さや、プラグ流の移動速度について実験とよく一致した。

5.2 流動層内流動の DEM-CFD カップリングモデル

5.1節で述べた流体の流れとDEMのカップリングモデルは水平管内プラグ流に特化したものである。著者らのグループでは、一般的な高濃度の粒子

群と流体流れの連成流動を計算するために、以下に述べる DEM-CFD カップリングモデルを開発し、流動層内の流動化挙動の数値予測を可能とした（川口ら, 1992; Tsuji et al., 1993; Tanaka et al., 1993）。

流体の流れの基礎式として、Anderson と Jackson (Anderson and Jackson, 1967) により求められた、粒径に比べて大きな空間スケールで局所体積平均を施すことにより導出された二流体モデルの基礎式の内、流体に対する基礎式を用いた。また、粒子-流体間の流体力による運動量交換モデルとしては、流動層の二流体モデルの計算に用いていたモデル (Bouillard et al., 1989) である高濃度域に対する Ergun の式 (Ergun, 1952) と中濃度域に対する Wen-Yu の式 (Wen and Yu, 1966) を組み合わせたモデルを用いた。

その結果、計算で得られた気泡流動化パターンと検証実験の比較を図 10 に示す。図に示すように、形成される気泡流動化パターンは実験結果とよく一致しており、気泡の発生周期や上昇速度なども実験とよく一致する結果を得た。

ここで紹介した、DEM-CFD カップリングモデルによる流動化挙動の数値シミュレーションでは、粒子間接触力モデルとして線形モデルが用いられており、さらに計算負荷軽減のためにばね定数の低減が行われている。これは、川口 (川口, 2003) による検討の結果、流動層内の流動化挙動に関して、計算結果の接触力モデル依存性はほとんど認められず、ばね定数依存性も小さいことが明らかにされている。この結果から、計算負荷軽減のためにばね定数

を低減した線形モデルが用いられた。6章で述べるように、流動化状態にある非付着性粒子は、ほとんどの粒子が衝突による相互作用を行う衝突支配流動となっている。つまり、剛体粒子モデルで表現できる運動状態にあるため、反発係数などの衝突特性が同じであれば計算結果は接触力モデルによらないことになる。

6 付着力のモデリング

6.1 動的付着力モデル

5.2 節において、流動化状態にある粒子は衝突支配流動の状態にあり、接触力モデルやばね定数依存性が小さいと述べた。しかし、van der Waals 力による付着力の影響が現れる小粒径 (Geldart A 粒子) の粒子からなる流動層に対する DEM-CFD シミュレーションを行った結果 (Kobayashi et al., 2013), 図 11 に示すように、計算結果はばね定数に大きく依存し、ばね定数が小さくなるほど付着の効果が強調されることが明らかとなった。

この付着性粒子に対するばね定数依存性の原因を解明するため、粒子衝突挙動の力学に関する理論的検討を行った結果、ばね定数の低減により粒子衝突時の付着性が増すことを明らかにした。付着性粒子の衝突速度がある付着限界速度 v_c 以下では反発することなく付着し、それを超えると反発挙動を示す。この付着限界速度 v_c と、粒子質量 m 、法線方向ばね定数 k 、付着力 F_{AD} の間に次式の関係があることを明らかにした。

$$v_c \propto \frac{F_{AD}}{\sqrt{mk}} \tag{4}$$

この関係に基づいて、法線方向ばね定数 k の値を低減させたとき、 v_c を一定に保つように F_{AD} の値を低減して与える動的付着力モデルを提案した。付着性

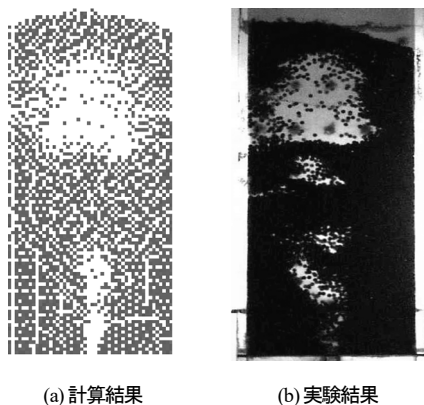


図 10 DEM-CFD モデルによる気泡流動化の計算結果
Fig. 10 Bubbling fluidized pattern simulated by DEM-CFD coupling model.

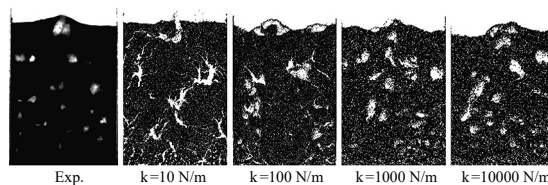


図 11 付着性粒子の流動化挙動に対するばね定数の影響
Fig. 11 Effect of spring constant on the fluidized pattern of cohesive particles.

粒子の衝突挙動に対して、オリジナル条件からばね定数を低減し、動的付着力モデルを用いた場合と用いない場合の比較を図 12 に示す。

図から、動的付着力モデルを用いた場合には、オリジナル条件での付着反発挙動を正確に表現しているが、ばね定数だけを 1/100 に低減した場合には付着限界速度は 10 倍となっており、式 (4) の予測と一致している。

図 11 の条件に対して、動的付着力モデルを用いた計算結果を図 13 に示す。図では粒子ごとに配位数で色分けされている。この結果から、動的付着力モデルを用いることで、低減されたばね定数によっても実験結果と一致する流動化挙動が得られること

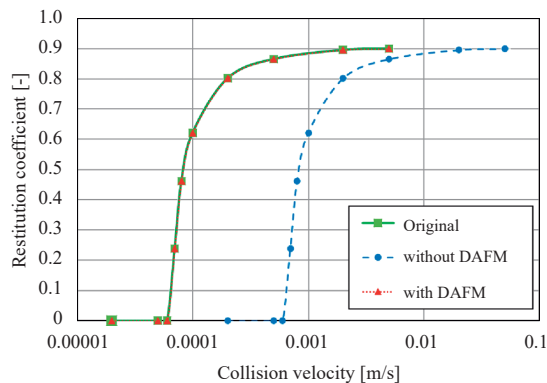


図 12 付着性粒子の反発係数の衝突速度依存性 (without DAFM: ばね定数を 1/100 に低減, with DAFM: ばね定数を 1/100 に低減して動的付着力モデルを使用)

Fig. 12 Dependence of restitution coefficient on collision velocity of adherent particles (without DAFM: spring constant reduced to 1/100, with DAFM: spring constant reduced to 1/100 and dynamic adhesion model applied).

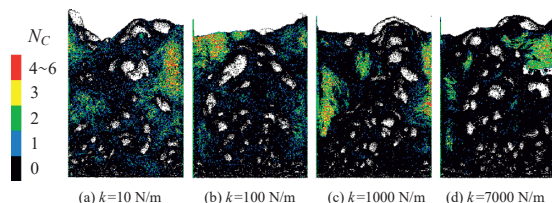


図 13 動的付着力モデルを用いた場合の流動化パターンと配位数分布 (Kobayashi et al., 2013)

Fig. 13 Fluidized pattern and distribution of coordination number predicted by dynamic adhesion force model).

が分かる。また、高い配位数を示す領域では付着力により粒子が凝集体を形成しているが、この凝集体の形成についても動的付着力モデルにより、良好に表現されている。また、この図より、凝集体を形成せずに良好な流動化状態にある領域では粒子の配位数は 0 となっており、衝突支配流動となっていることが分かる。つまり、流動化状態における接触力のモデル化は、衝突運動が表現できれば十分である。

6.2 動的付着力モデルの接触支配流動での有効性

6.1 節での説明および図 11 および 12 に示した結果から、動的付着力モデルが付着限界速度付近での粒子の衝突挙動を良好に表現できることは明らかである。ただし、粒子の凝集が発達した状態、つまり接触力支配流動での力学を正確に表現できるかどうかについては明らかではない。そこで、接触力支配流動での動的付着力モデルの有効性を調べるために、付着性粒子の単純せん断流の数値シミュレーションを行った (Tanaka et al., 2022)。

図 14 に、計算の結果得られたせん断速度とせん断応力の関係を示す。この計算は、Lees-Edwards のせん断周期境界を用いて、粒子 1 層の 2 次元計算で得られたものである。図で、動的付着力モデルを用いた条件を「with DAFM」用いない条件を「without DAFM」と表示しており、括弧の中にオリジナル条件からのばね定数の低減率を示している。せん断速度の大きな領域では粒子間相互作用は衝突支配であり、この領域ではせん断応力はせん断速度に比例し

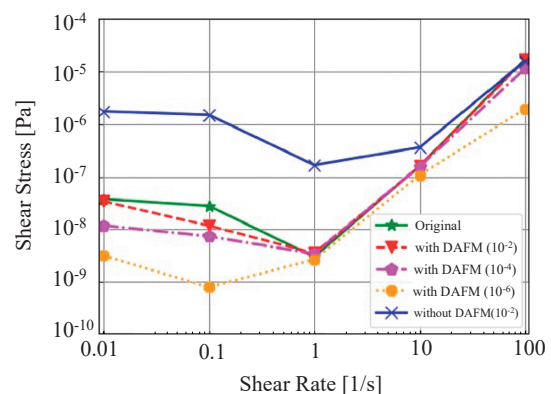


図 14 付着性粒子の単純せん断流におけるせん断応力とせん断速度の関係

Fig. 14 Flow curve of shear flow of cohesive particles predicted by dynamic adhesion force model.

ている。せん断速度の小さな領域ではすべての粒子が凝集して一つの大規模な凝集体を形成しており、粒子間相互作用は接触力支配である。動的付着力モデルを用いずにはばね定数だけを低減した場合、低せん断速度域でのせん断応力はほぼばね定数の低減率の逆数分増大しているが、ばね定数の低減率が最大の場合を除いて、動的付着力モデルはせん断速度の全領域を通じてオリジナル条件を良好に表現している。

なお、付着性粒子に対する粒子剛性低減モデルの詳細については著者らによる解説（田中、鷺野、2020）が参考になる。

7 おわりに

本稿では、著者らが開発を行ってきた粒子間相互作用を伴う粒子・流体混相流の離散粒子シミュレーションモデルおよび手法について概略を述べた。各種粉粒体挙動における粒子間相互作用に関して、衝突支配流動と接触支配流動の区別と認識は極めて重要であり、DEMの接触力モデルに求められる条件とも関係している。本稿が今後の離散粒子モデルの発展に寄与すれば望外の喜びである。

References

- Anderson T.B., Jackson R., Fluid mechanical description of fluidized beds. equations of motion, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 6 (1967) 527–539.
<https://doi.org/10.1021/i160024a007>
- Bird G.A., *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Oxford University Press, New York, 1994, ISBN: 978-0198561958.
- Cundall P.A., Strack O.D.L., A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29 (1979) 47–65.
<https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- Ergun S., Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, 48 (1952) 89–94.
- Hertz H., Über die Berührung fester elastischer Körper, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 92 (1881) 156–171. <https://doi.org/10.1515/crll.1882.92.156>
- Kobayashi T., Tanaka T., Shimada N., Kawaguchi T., DEM-CFD analysis of fluidization behavior of Geldart Group A particles using a dynamic adhesion force model, *Powder Technology*, 248 (2013) 143–152.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.02.028>
- Mindlin R.D., Compliance of elastic bodies in contact, *Journal of Applied Mechanics*, 16 (2021) 259–268.
<https://doi.org/10.1115/1.4009973>
- Nanbu K., Direct simulation scheme derived from the Boltzmann equation. I. monocomponent gases, *Journal of the Physical Society of Japan*, 49 (1980) 2042–2049.
<https://doi.org/10.1143/JPSJ.49.2042>
- Tanaka T., Kiribayashi K., Tsuji Y., Monte Carlo simulation of gas-solid flow in vertical pipe or channel, *Proc. Int. Conf. on Multiphase Flows*, 2 (1991) 439–442.
- Tanaka T., Tsuji Y., Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a vertical pipe: on the effect of inter-particle collision, *Gas-Solid Flows*, 121 (1991) 123–128.
- Tanaka T., Kawaguchi T., Tsuji Y., Discrete particle simulation of flow patterns in two-dimensional gas fluidized beds, *International Journal of Modern Physics B*, 7-9&10 (1993) 1889–1898. <https://doi.org/10.1142/S0217979293002663>
- Tanaka T., Yonemura S., Kiribayashi K., Tsuji Y., Cluster formation and particle-induced instability in gas-solid flows predicted by the DSMC method, *JSME International Journal Series B*, 39 (1996) 239–245.
<https://doi.org/10.1299/jsmeb.39.239>
- Tanaka T., Tanaka S., Washino K., Tsuji T., DEM simulation of solidification of cohesive particles in simple shear flow by using dynamic adhesion force model, *The 9th World Congress on Particle Technology (WCPT9)*, Madrid, Spain, Sept. 18–22, (2022).
- Tsuji Y., Tanaka T., Ishida T., Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe, *Powder Technology*, 71 (1992) 239–250.
[https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)88030-L](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)88030-L)
- Tsuji T., Ito A., Tanaka T., Multi-scale structure of clustering particles, *Powder Technology*, 179 (2008) 115–125.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.07.003>
- Tsuji Y., Kawaguchi T., Tanaka T., Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed, *Powder Technology*, 77 (1993) 79–87.
[https://doi.org/10.1016/0032-5910\(93\)85010-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(93)85010-7)
- Washino K., Chan E.L., Tanaka T., DEM with attraction forces using reduced particle stiffness, *Powder Technology*, 325 (2018) 202–208.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.024>
- Wen C.Y., Yu Y.H., *Mechanics of fluidization*, Chemical Engineering Progress Symposium Series, 62 (1966) 100–111.
- Yamamoto Y., Potthoff M., Tanaka T., Kajishima T., Tsuji Y., Large-eddy simulation of turbulent gas-particle flow in a vertical channel: effect of considering inter-particle collisions, *Journal of Fluid Mechanics*, 442 (2001) 303–334.
<https://doi.org/10.1017/S0022112001005092>
- 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, *日本機械学会論文集 B*, 58 (1992) 2119–2125. Kawaguchi T., Tanaka T., Tsuji Y., Numerical simulation of fluidized bed using the Discrete Element Method: the case of spouting bed, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 58

- (1992) 2119–2125. <https://doi.org/10.1299/kikaib.58.2119>
川口 寿裕, 高濃度固気二相流の離散粒子型数値シミュレーション, 大阪大学学位論文, 2003, pp. 65–89.
- 田中 敏嗣, 門野 啓一郎, 辻 裕, 鉛直管内固気二相流の数値シミュレーション: 粒子間衝突の影響について, 日本機械学会論文集 B, 56 (1990) 3210–3216. Tanaka T., Kadono K., Tsuji Y., Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a vertical pipe: on the effect of particle-to-particle collision, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 56 (1990) 3210–3216.
<https://doi.org/10.1299/kikaib.56.3210>
- 田中 敏嗣, 石田 俊哉, 辻 裕, 水平管内粒状体プラグ流の直接数値シミュレーション: 付着力がない場合, 日本機械学会論文集 B, 56 (1991) 456–463. Tanaka T., Ishida T., Tsuji Y., Direct numerical simulation of granular plug flow in a horizontal pipe: the case of cohesionless particles, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 57 (1991) 456–463.
- 田中 敏嗣, 米村 茂, 霧林 謙, 辻 裕, 固気二相流のクラスター形成と流動の不安定化: DSMC 法による鉛直チャンネル内流れの数値シミュレーション, 日本機械学会論文集 B, 59 (1993) 2982–2989. Tanaka T., Yonemura S., Kiribayashi K., Tuji Y., Cluster formation and particle-induced instability of gas-solid flows: numerical simulation of flow in vertical channel using the DSMC method, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 59 (1993) 2982–2989. <https://doi.org/10.1299/kikaib.59.2982>
- 田中 敏嗣, 川口 寿裕, 計算機粉体工学の課題と展望: 7. 粒子流動化挙動の DEM-CFD カップリングシミュレーション, 粉体工学会誌, 49–11 (2012) 837–845.
- 田中 敏嗣, 鷺野 公彰, 付着性粒子に対する粒子剛性低減 DEM モデリング, 粉砕, 63 (2020) 13–19. Tanaka T., Washino K., Reduced-stiffness DEM modeling for cohesive particles, The Micromeritics, 63 (2020) 13–19.
<https://doi.org/10.24611/micromeritics.2020006>

著者紹介



田中 敏嗣 Toshitsugu TANAKA

〔経歴〕 1984年3月 大阪大学大学院工学研究科産業機械工学専攻 博士前期課程修了。同年4月より助手。1996年6月より 同准教授, 2003年4月より現職。

〔専門〕 固気二相流動および粉粒体流動に関する研究。
最近では, 付着力の DEM モデリングの研究に取り組んでいる。

〔連絡先〕 tanaka@mech.eng.osaka-u.ac.jp