Ⅱ. 数値解析手法

Advanced DEM-CFD法において、固相粒子はDEM、気相は局所体積平均を施したCFDによってモデル化される。また、固相と気相の壁面モデルとして、それぞれ、SDFとIBMが用いられる。

A. 固相

　固相を構成する固体粒子はDEMでモデル化される。DEMにおいて並進方向および回転方向における運動方程式で記述され、それぞれ

で表される。ここで、*m*、***v***、***F****c*、***F****d*、*Vs*、 *p*、 *g*、 *I*、***ω***および***T***は、それぞれ、粒子質量、粒子速度、接触力、流体抗力、粒子体積、圧力、重力加速度、慣性モーメント、角加速度およびトルクを表す。接触力はその法線方向成分および接線方向成分の和であり、

で表される。ここで、添え字の*n*および*t*は、それぞれ、法線方向成分および接線方向成分を表す。接触力の法線方向成分は、ばねおよびダッシュポットによりモデル化され、

で表される。ここで、*k*、 ***δ****n*、 *η*および***v****n*は、それぞれ、ばね定数、変位、粘性減衰定数および相対速度を表す。粘性減衰定数*η*は、

で表される。ここで、*e*は反発係数を表す。接触力の接線方向成分は、固体粒子においてすべりも考慮する必要あるため、ばねおよびダッシュポットにスライダーを加えてモデル化される。接触力の接線方向成分は

で表される。ここで、*μ*は摩擦係数を表す。次に、流体抗力は

で表される。ここで、*β*および***u****f*は、それぞれ、運動量交換係数および流体格子の速度を表す。本研究では、運動量交換係数*β*はErgunの式とWen-Yu の式を組み合わせてモデル化した。*β*は、対象となる流体格子の空隙率によって切り替えることによって表され、

のように与えられる。ここで、*μf*、 *ρf*、 *ds*および*Cd*は、それぞれ、流体の粘性係数、流体の密度、固相粒子の粒子直径および抗力係数を表す。抗力係数*Cd*はレイノルズ数に依存する値であり、以下の式で表される。

ここで*Res*は粒子レイノルズ数であり、

のように与えられる。

B. 気相 (CFD)

　気相の支配方程式は局所体積平均を施したNavier – Stokes 方程式と連続の式であり、

で表される。ここで、***f***および*τ*は、それぞれ、固相粒子との相互作用力および粘性応力を表す。***f***は固相粒子に作用する流体効力の反作用であり、エネルギーの保存性を満たすように、

で表される。ここで*Ngrid*および*Vgrid*は、それぞれ、流体セルに含まれる粒子数および流体セル体積を表す。

C. 壁面モデル

　Advanced DEM-CFD法では、固相に対してSDFが、気相に対してIBMがそれぞれに対する壁面モデルとして用いられ、固気混相流内における移動壁面の影響が計算される。SDFおよびIBMについて、それぞれ以下で説明する。

C-1. SDF

SDFは壁面を符号付距離関数でモデル化する手法である。計算領域の任意の点***x***について、符号付き距離関数は、

で表される。ここで、*d(****x****)*および*s(****x****)*は、それぞれ、点***x***から最も近い壁面までの距離および壁面の内外を表す符号である。*s(****x****)*は壁面内で正、壁面外で負となる。固相粒子と壁面間の接触力は、符号付距離関数を用いて、

で表される。ここで、***δ****SDM*は固相粒子と壁面のオーバーラップ距離を表す。さらに上式では、法線方向の接触力に対して、*|∇Φ|*がばねを表す項にかけられている。これにより、法線方向の接触力は、運動エネルギーの勾配と等しくなり、エネルギーの保存性を満たす。また、符号付き距離関数を用いることにより、壁面の法線ベクトルは計算でき、

で表される。

C-2. IBM

　IBMは、流体格子内におけるオブジェクトと流体の相互作用を計算する手法である。相互作用は、速度をオブジェクトと流体の体積平均をとることにより計算される。つまり、流体速度は、

と表される。ここで*α*および***U****B*は、それぞれ、流体格子中におけるオブジェクトの割合およびオブジェクトの速度を表す。なお、流体格子中のオブジェクトの割合*α*は、オブジェクトを表現しているSDFのポイントをカウントすることにより高速に計算される。また、補正された流体速度を支配方程式に組み込むため、それに対応する外力***f****IB*をNavier – Stokes方程式に付加する必要がる。したがってIBMにより流体速度の補正されたNavier – Stokes方程式は

で表される。ここで、***f****IB*は、

で表される。ここで、***û***は空隙率1を仮定して更新を行った流体速度である。

Ⅲ. 数値解析条件

本研究では、下杵の降下を伴う粉末金型充填の数値解析を実行した。図1に数値解析体系を示す。固体粒子は、計算領域上部に設けられた直径40 mmの半円柱容器内に、ランダムに初期充填されている。計算領域の下側に、金型領域がある。金型領域の幅、奥行きおよび高さは、それぞれ、10 mm、 10 mmおよび40 mmである。下杵は直方体形状であり、下杵の上面が半円柱容器と金型領域の接続部と同じ高さになるように設置されている。下杵の幅、奥行きおよび高さは、それぞれ、10 mm、 10 mmおよび20 mmである。表1に数値解析に用いた粉末粒子の物性値を示す。粒子数は500,000、粒子径250 μm、密度1,500 kg/m3、バネ定数50 N/m 反発係数0.9そして摩擦係数0.3である。数値解析体系の壁面はSDFおよびIBMによりモデル化される。図2にSDFおよびIBMによりモデル化された壁面から水平および垂直方向の断面を抜き出したものを示す。図2において、青色で示された負の値をもつ領域は壁面内部を表し、赤色で示された正の値をもつ領域は壁面外部を表す。下杵は計算開始とともに降下を開始し、20 mm降下したところで停止する。つまり、下杵の移動終了時、粉末が充填される金型領域の幅、奥行きおよび高さは、それぞれ、10 mm、 10 mmおよび20 mmである。

　表2に計算条件を示す。Case1-1, 1-2, 1-3および1-4において、それぞれ、下杵が降下速度は0 mm/s, 300 mm/s, 500 mm/sおよび700 mm/sとした。Case1-1において、下杵は降下終了位置に設置されている。