高炉冷間モデル実験との比較に基づく 離散要素法パラメータの感度解析

夏井 俊悟*・植田 滋*・Fan Zhengyun*²・加納 純也*・井上 亮*・有山 達郎*

Sensitivity Analysis of Physical Parameters in Discrete Element Method Compared with
Blast Furnace Cold Model Experiments

Shungo NATSUI, Shigeru UEDA, Fan ZHENGYUN, Junya KANO, Ryo INOUE and Tatsuro ARIYAMA

Synopsis : Application of discrete element method (DEM) to blast furnace attracts special interest, because the accurate solid motion analysis in the blast furnace is feasible by DEM. In the previous studies in this area, although the descending velocity and physical parameters of particle in DEM were important factors for accurate solid motion analysis, a priori assumptions were frequently introduced to the calculations. In this study, the sensitivities of these parameters were cautiously examined on the basis of cold model experiments. The favorable combination of contact and rolling frictions was introduced to represent the shape of particles. A scale-down three-dimensional cold model of blast furnace was used for analyzing motion of polyethylene and coke particle to confirm the influence of these coefficients. Accordingly, the relationship between the descending behavior of particle and the rolling friction coefficient became clear by comparison of model experiments and DEM simulation. Basically, the rolling friction coefficient is dependent on diameter of particle. In these experimental results, the reduced descending velocity in the packed bed had little influence on the burden descending behavior. It was estimated that the calculated results by DEM in the reduced time scale could quantitatively show the burden behavior in the actual blast furnace. DEM calculation with the appropriate parameters is profitable for the macro flow and local particle behavior analyses in the blast furnace.

Key words: ironmaking; blast furnace; low reducing agent operation; simulation; DEM; discrete element method; solid motion; modeling.

1. 緒言

現在、わが国の高炉操業の大きな課題は大型高炉による低還元材比操業の追求である¹⁾。内容積5000 m³を超える大型高炉はわが国において10基を超え、地球環境問題を背景にした低還元材比操業の役割は重要性を増している。これらの大型高炉内においては径方向の拡大に伴って、炉下部における液やガス流れの偏流など不均一挙動の問題が顕在化しやすく、また低還元材比操業では従来以上にコークスなど装入物への荷重負荷は増加傾向にある^{2,3)}。以上を背景として安定した高炉操業を達成するために、高炉内現象を精緻に表現できる高炉モデルの開発がますます重要となっている。従来、高炉シミュレーションは、主に連続体モデルを用いたガス流動、反応及び伝熱解析が行われ、高炉トータルモデルとして実用化されている^{4,5)}。一般に連続体高炉モデルでは高炉内の固体流れに関しては疑似流体近似などの手法によって対処してきた。しかし、高炉のような充填層内粒子は本質的に粒子単位の独立した運動をとるため、格子内を平均化する連続体モデルを用いた場合、不均一、不連続な現象の表現が困難となる。特に、上述のよ

うな現在のニーズに対応するためには局所的な粒子の運動表現が非常に重要となる。そこで、個々の粒子挙動解析が可能である離散系モデル⁶⁾への要求は高い。

離散要素法 (DEM) は、粒子すべてに対して運動方程式を解くことで独立した粒子挙動を追跡するため、非連続固体流れである流動層やロータリーキルンなどの粒子運動解析に有効であるとされ⁷⁾、高炉への応用に関しては、計算機能力の向上と共に近年、精緻な研究事例も出ている^{8,9)}。一方で、DEMは計算負荷が非常に大きい手法であり解析可能粒子数には限界がある。実寸大での高炉内充填層解析は数億以上の粒子を扱う必要があるが、現在の計算機の能力では扱える粒子数は最大100万個程度であるため、DEMでの再現は不可能である。さらに、高炉における装入物滞留時間は約6時間であり、時定数もこれまでのDEM計算の対象と比較して著しく大きく、解析精度を損なわない計算の高速化が重要である。すでに粒径の拡大により粒子を一種のクラスターとして表現し、粒子数を減少させることで計算時間を短縮する方法が広く用いられているが¹⁰⁾、充填層内固体流れへの影響、精度については十分検討されていない。また、DEMでは一般的に粒子を真球として扱う

平成21年7月16日受付 平成21年9月1日受理 (Received on July 16, 2009; Accepted on Sep. 1, 2009)

* 東北大学多元物質科学研究所 (Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980-8577)

* 2 北京科技大学 (School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing (USTB))

ため、高炉装入物の焼結鉱やコークスなど不定形の粒子に対しては、接触摩擦と回転抵抗の組み合わせによる形状表現が試行的に提案されている¹¹⁻¹⁴⁾。しかし、従来の研究では、粒子形状と回転抵抗の関係検討に関して、高炉炉頂の装入物投入時の転がり、高炉下部に限定された局所的現象を対象にした事例が多く^{11,12)}、高炉全体を対象に粒子形状の影響検討、適切なDEMの粒子物性パラメータの選択について系統的に評価した研究は少ない。

DEMでは主に粒子個数など限られた条件で全体系を最大限、高精度に表現しなければならない。本研究は実用性も考慮しつつ、DEM計算による高炉内全体の固体流れの高精度な表現を目的に、DEM計算の構成パラメータの影響解析について検討を行った。また、計算加速の観点から粒子径、降下速度の影響についても調査を行った。すなわち、小型高炉冷間モデルを用いて固体流れ観察を行い、DEM計算との対比の中で粒子物性が充填層内固体流れに及ぼす影響を体系的に解析し、上記の検討を行った。

2. 離散要素法の構成式と粒子物性パラメータ

Fig. 1にDEMによる粒子間接触力の構成を示す。個々の粒子間および粒子-壁面間の接触点からの応力とモーメントにより並進運動および回転運動が変化する。接触力は法線方向成分と剪断方向成分に分け、バネとダッシュポットにより算出されるVoigtモデルにより決定した。

Fig. 1. Interactive forces between two particles in DEM.

摩擦力による相互作用を考慮するため、摩擦スライダーを挿入した。2粒子間に働く力による接触粒子の並進変位 u_i は、以下のように表される。

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} + \eta \frac{du_i}{dt} + K u_i = 0 \quad (1)$$

また、回転変位 φ_i は、

$$I_i \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} + \eta R_i^2 \frac{d\varphi_i}{dt} + K R_i^2 \varphi_i = 0 \quad (2)$$

m, R, I および ω はそれぞれ粒子質量、半径、慣性モーメント、回転角速度を表す。また、 K と η はばね定数とダッシュポットの粘性係数である。ある時刻 T における法線方向接触力 F_n およびせん断方向接触力 F_s は、弾性力 e と粘性抵抗 d の和で表わされる。

$$F_{n,T} = \sum_j (e_{n,T} + d_{n,T}) \quad (3)$$

$$F_{s,T} = \sum_j (e_{s,T} + d_{s,T}) \quad (4)$$

$$e_{n,T} = e_{n,T-\Delta T} + K_n \Delta u_n, \quad d_{n,T} = \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t}$$

ここで

$$K_n = 2D_b \left(\frac{1-v_i^2}{E_i} + \frac{1-v_j^2}{E_j} \right)^{-1}, \quad \eta_n = 2\sqrt{mK_n} \quad (5)$$

$$e_{s,T} = e_{s,T-\Delta T} + K_s \Delta u_s, \quad d_{s,T} = \eta_s \frac{\Delta u_s}{\Delta t}$$

ここで

$$K_s = 8D_b \left(\frac{2(2-v_i)(1+v_i)}{E_i} + \frac{2(2-v_j)(1+v_j)}{E_j} \right)^{-1},$$

$$\eta_s = 2\sqrt{mK_s} \quad (6)$$

n と s は法線方向とせん断方向、 E と ν は粒子のヤング率とポアソン比、 D_b は接触面半径を示す。ただし、せん断応力が粒子間摩擦力より大きい場合は、滑りが生じるため摩擦係数を μ とし、

$$F_{s,ij} = \mu |F_{n,ij}| \quad (7)$$

不定形粒子の表現のため、回転方向と逆向きの回転抵抗を計算に導入した。

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (T_{ij} - M_r) \quad (8)$$

$$M_r = \frac{3}{8} \alpha \cdot D_b |F_n| \quad (9)$$

ここで T_{ij} は粒子 i が受けるトルク、 M_r は接触面でのせん断応力。 α は回転抵抗係数であり、粒子表面物性に依

存する。

上記のようにDEMは比較的少数の基礎方程式、パラメーターから構成される。同時に、このことはその構成パラメーターの決定が計算精度確保のうえで極めて重要であることを意味する。

3. 冷間モデル実験装置および使用粒子の検討

3.1 実験装置

DEMによる高炉シミュレーションの精度検証方法として、Fig. 2に示す縮尺約1/60の高炉半裁モデルを用い、DEM計算結果と本実験装置による粒子降下挙動を対比した。実験では炉頂にベル型を模した粒子装入口を取り付け、装入レベルが一定になるように粒子を装入した。前面の亚克力平面を通して粒子充填層構造の観察を行った。また、羽口前でのコークス燃焼消滅を模擬するために直径4.5 cmの粒子排出口を8カ所設け、チューブを介してスクリーフィーダーに接続した。粒子排出速度は、スクリーフィーダーの回転数により制御し、特定の粒子に対し表面着色を施してトレーサーとし、降下挙動を観察した。

3.2 使用粒子の検討

冷間実験では実高炉の焼結鉱、コークスなど不定形状を表現できる小粒の粒子使用が望ましい。しかし、高炉冷間実験では実験過程での摩耗や粉碎による粒子形状の変化がないなどの理由から樹脂性粒子などの模擬粒子が多用されている。本研究でも性状劣化が少なく、再現性に富むポリエチレン樹脂粒子(PE)を用いたが、その代表性に確認を要する。これらの観点から以下の検討を行った。

実験に用いた低密度ポリエチレン粒子、比較用の小粒径コークスと実高炉に用いられる焼結鉱、コークスの代表試

Fig. 2. Schematic diagram of three-dimensional cold model of blast furnace.

料の写真をFig. 3に示す。ポリエチレン粒子は密度0.92 g/cm³、直径約4 mmの不定形であり、小粒径コークスは密度約1.0 g/cm³の高炉用コークスを粉碎し、篩により粒子径を5 mm以下に調整した。Fig. 3から実炉用コークスと小粒コークスは、大きさが異なるが、近似的に表面の凹凸は相似形と観察される。次に粒子形状を定量化するために、粒子に外接する直方体の三軸径をHeywoodの定義により決定し、短径 b 、長径 l 、厚み t の比、 b/l 、 t/b によって表す方法により粒子の形状解析を行った¹⁵⁾。それぞれの粒子の形状解析結果をFig. 4に示す。本図からわかるように、実炉用焼結鉱、コークスと小粒コークス、ポリエチレン粒子は粒子径が異なるが、二つの形状因子は近い分布を示している。よって、マクロな形状因子に関して、ポリエチレン粒子の採用は実炉粒子との対応を満足できると思われる。

ポリエチレン粒子とコークス粒子の降下挙動の比較検討をFig. 2の冷間実験装置を用いて行った。Fig. 5にポリエチレン粒子およびコークスの降下挙動を示す。DEMの加速計算を考慮して炉口から装入した粒子が羽口で排出されるまでの時間を400秒程度で降下させ、トレーサー層の形状および位置を観察した。図中充填層内着色部分はトレー

Polyethylene

Grinding coke

Sinter

Coke

Fig. 3. Representative particles of polyethylene and coke used in present study and coke and ore used in actual process.

Fig. 4. Shape coefficient of particles of PE and coke used in present study and coke and ore used in actual blast furnace.

Fig. 5. Time lines of descending particles with change particle properties.

サー粒子の層を示す。トレーサー層は、降下に伴いV字、平型、逆U字型を示した。形状因子に近いポリエチレン粒子とコークス粒子、いずれの場合においてもトレーサー層の位置と形状はほぼ同じであり、充填層内降下に対する影響は見られない。

よって、以降の実験では実験の再現性、精度のために小粒のポリエチレン粒子を用いた。表面形状も含めた形状因子は実炉粒子に近く代表性に支障はなく、高炉を対象にしたDEM計算との対比に用いることに妥当性はあると判断される。

4. DEM粒子パラメーターの感度解析

4.1 DEM計算の冷間モデルへの適用

DEM計算では高炉冷間モデルと同一の容器内の固体流れを扱った。粒子装入口にベルとほぼ同形の壁を設け、炉口外周から粒子を装入した。また、粒子の排出孔位置に粒子が消える円を設置し、その領域に入った粒子を一定間隔で消去することで排出速度を変化可能である。粒子の消去速度は毎秒120個とした。

緒言で述べたようにDEMでは剛体真球を対象粒子としている。しかし、ポリエチレン粒子は不定形であるため、粒子の接触に関するパラメーターの調整が必要となる。接触に関与するパラメーターとしてヤング率、接触摩擦係数、回転抵抗係数がある。このうち、ヤング率、接触摩擦係数は粒子固有の物性値であり、計算対象粒子の値、この冷間実験ではポリエチレンの値として決定しなければならない。不定形粒子の形状を表現し、DEMによる降下挙動再現のためにはDEM計算における回転抵抗係数の決定が重要となる。この冷間実験を対象にしたDEM計算では粒子代表径は1.0cmを基準に、0.7cmも加えた。粒子径1.0cmの場合、粒子個数は約1.8万となり、18度扇形の実高炉対象時には粒子径約30cmに相当する。

4.2 摩擦係数と回転抵抗係数

実験に用いた低密度ポリエチレンと、冷間高炉モデルの本体の素材であるアクリルとの接触も考慮して、ポリエチレンとポリエチレン、ポリエチレンとアクリルの間の接触摩擦抵抗を求めた。低密度ポリエチレン平板とアクリル平板を水平に設置し、固定した平板の上にポリエチレン平板を載せ、金属製のおもりを載せ加重を変化させた。上部の平板に水平に引き、その力（静止摩擦）をバネばかりで測定した¹⁶⁾。ポリエチレン-ポリエチレン、ポリエチレン-アクリルの接触ともに直線で近似でき、その直線の傾きから接触摩擦係数をそれぞれ0.26および0.24を得た。粒子ヤング率は、ポリエチレン固有の値である0.05 GPaを採用した。

回転抵抗係数 α はDEMにおける仮想的なパラメーターであるが、合理的な方法で決定する必要がある。三尾らはベルレス装置シュート上における粒子運動シミュレーションで粒子の回転抵抗係数を粒子単位に約1から30の広い範囲で調整し、転動運動の分布を模擬している¹⁷⁾。現状の高炉充填層モデル計算では粒子毎に異なる回転抵抗係数を付与しても、充填層内のマクロ的粒子運動は転動とは異なるため、精度検証を行うことは不可能である。酒井らは円形ディスクに成型された粉体層の崩壊によって、DEMパラメーターの検討を行っている¹⁸⁾。本研究では充填層内のマクロ的運動に近く、実測可能で定量化しやすい静止安息角に着目し、DEM計算での回転抵抗係数 α の情報とした。すなわち、自由落下させた場合には粒子群の運動と粒子層間の静力学的均衡で安息角は決定され、回転抵抗係数が支配的な因子となると考え、実粒子の静止安息角測定値と同一物性を与えたDEM計算による安息角測定を比較し、回転抵抗係数 α の感度解析を行った。Fig. 6に示すように、多数のポリエチレン粒子を縁のある直径16.0cmの円盤上約50cmから自由落下させ、安定後の堆積角を安息角とした。DEMでは直径0.7cmおよび1.0cmに拡大した粒子を同様に堆積させて安息角を導出し、回転抵抗係数 α と安息角の関係を求めた。 α の増大により安息角は増加し、

Fig. 6. Change of repose angle for particle 0.7 cm and 1.0 cm in diameter with various rolling friction coefficients on the 16 cm disk.

Table 1. Calculation condition of DEM.

Number of particle	17701, 56108	[-]
Diameter of particle	1.0, 0.7	[cm]
Time step	1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-5}	[s]
Density of particle	0.92	[g/cm ³]
Friction coefficient		
Particle-particle	0.3	[-]
Particle-wall	0.3	[-]
Young's modulus		
particle	0.05	[GPa]
wall	0.022	[GPa]
Poisson's ratio		
particle	0.21	[-]
wall	0.30	[-]
Rolling friction coefficient	3.0 ~ 8.0	[-]

DEM計算で代表径とした直径1.0 cmおよび0.7 cmいずれの場合も、ポリエチレン粒子で実測された安息角約30度に一致するのは $\alpha=3.0$ となる。

4・3 充填層降下挙動の解析結果

4・3・1 DEM計算による粒子降下挙動への回転抵抗係数 α の影響検討

以上より決定した計算条件をTable 1に示す。基準の粒子直径は1.0 cmとし、回転抵抗係数 α は充填層内の粒子流動特性に関し重要なパラメータであり、安息角測定による3.0を基準に8.0まで変更し、その感度解析を行った。

回転抵抗係数 α を変化させた場合のDEM計算によるトレーサー層降下に伴う形状変化をFig. 7に示す。降下するに従いトレーサー層形状は、冷間実験と同様にV字型、平型、逆U字型と変化した。回転抵抗係数 α は炉芯角度に影響すると予測されたが、3.0~4.0では有意な差が見られない一方、6.0以上になると、70秒、90秒後の炉下部におけるトレーサー形状は非対称化する傾向が見られる。このことから、炉下部における固体流れは α の影響を大きく受け、流動域と停滞域の界面は不安定状態にあると考えられる。

Fig. 7. Change of layer structure of during descending with various rolling friction by DEM (1.0 cm diameter).

次に、 α を変化させた場合の充填層内粒子速度分布をFig. 8に示す。この速度分布は経時変動を伴うが、時間平均した値を示す。Fig. 8の赤色ほど速度が大きい粒子を示している。この結果によれば、 α を増加させても、充填層全体の速度分布への影響は少ない。炉下部に注目すると炉芯に相当する青色部の緩慢な粒子速度領域が拡大し、レースウェイ近傍の赤色部がやや拡大傾向にあるなど、やはり炉下部では変化が見られる。

次に炉底から炉頂間に存在する全ての粒子の平均速度の時間変動をFig. 9に示す。粒子の平均速度は0.02秒ごとの全粒子の移動距離を粒子数で除したものとした。間欠的なピークと短周期の微小振動が観察され、前者は装入による粒子の速度変動、後者は羽口からの抜き出しに伴う流れ込みの小スリップ変動に対応している。Fig. 9より、 $\alpha=3.0 \sim 8.0$ の範囲ではどれも同じ傾向を示し、速度変動の時間変化は小さい。

Fig. 6の安息角再現実験との対比から、回転抵抗係数 $\alpha=3$ が指標になると予測され、充填層の降下実験もそれに対応するが、粒子径1.0 cmの場合、炉下部を除くとマクロ的な粒子降下運動には回転抵抗係数 α の影響は比較的少ない。ただし、炉芯付近など粒子降下速度に分布が現れやすい部位になると、粒子間の滑りによって粒子降下が不安定化し、Fig. 7のように α が過大になると炉下部では固体流れが非対称的になるなどの結果をもたらすと考えられ、その意味でさまざまな運動挙動の合体となる充填層では炉

Fig. 8. Calculated particle velocity with various rolling friction coefficients by DEM (Particle diameter: 1.0 cm).

Fig. 14. Calculated particle velocity with various descending velocity by DEM.

頂での装入など転動現象とは異なる。

4・3・2 DEM計算における粒子径の影響

DEMで用いる粒子径の縮小は現実の粒子径に接近し精度向上が期待できるが、粒子径0.7cmでは1.0cmの場合に比較して、粒子個数は約3倍、さらに離散時間短縮により

計算時間は約10倍に急増する。粒子直径0.7cm, $\alpha=3.0$ とした場合のトレーサー層の降下挙動をFig.10に示す。Fig. 7の1.0cmと比較して充填層内トレーサー層形状の大きな差異は認められない。次に、回転抵抗係数 α を大きくした場合のFig. 9に相当する粒子速度変動に着目し、その変動

の周波数解析結果を粒子径 1.0 cm の場合と比較して Fig.11 に示す。粒子径 1.0 cm のときは α の大小に大きく影響されないが、0.7 cm の時は回転抵抗係数が大きくなるほど、振動の強度は減衰し、周波数分布は平坦化傾向にある。

2章(6)式より、回転抵抗によるせん断応力は α および接触面半径に比例するため、粒子径の変化によりその絶対値が変化する。粒子に同一の物性値を与え、粒子径のみ変化させた場合、粒子間の滑りを伴う微視的挙動に影響が生じることが推察される。充填層全体のマクロ的な降下挙動

Fig. 9. Average velocity of particle with various rolling friction coefficients in DEM (Particle diameter: 1.0 cm).

に関しては、回転抵抗係数 α は粒子径変化の影響を受けにくいと推測されるが、滑りなどせん断が関係するミクロ的挙動に着目する場合には粒子径の影響を考慮する必要があると考えられる。よって、粒子径が小さくなると式(6)の接触面半径が小さくなる一方、粒子数と粒子間接触回数が急増するため、粒子径を小さくする場合には全体系の精度が増すが、後者の効果によって局所的な滑りの感度が鋭敏になり回転抵抗係数の値は狭い範囲に設定する必要がある。

5. DEM パラメーターと降下速度との関連検討

5.1 冷間実験による降下速度の影響

DEM の計算負荷低減のために、実高炉を対象にした DEM 計算では粒子の給排出を意図的に高速化し、その結果数百倍程度に降下速度が加速された仮想的な時間で計算処理する手法がとられている^{8,10,13}。上述の冷間モデルを対象にした DEM 計算においても装入から排出まで 90 秒程

Fig. 10. Change of layer structure of tracer during descending with various rolling friction by DEM (Particle diameter: 0.7 cm, $\alpha=3.0$).

Fig. 11. Frequency analysis of particle velocity with various rolling friction coefficients and particle diameter in DEM (Particle diameter Dp: 1.0 cm, 0.7 cm).

度で降下するように速度を設定し、それを前提に1/60の冷間モデルとの対比でDEMパラメーターの決定検討を行った。連続系モデルでは運動量収支に基づく力学的相似則から無次元数が誘導され、スケールと速度に一定の関係を導出できるが、離散化モデルのDEMでは任意性がある。よって、計算加速が降下挙動に及ぼす影響についてはその実験的検証が必要であり、基準となる冷間実験により降下速度を変化させた場合の充填層内固体流れに及ぼす影響を調査した。装入粒子は上記のポリエチレン粒子を適用した。実高炉の装入粒子が羽口に達するまでの降下時間、約6時間は1/60スケールの冷間モデルの場合、通常、用いられる粒子フルード数基準の換算で約3000秒程度に相当する。その値を勘案して装入粒子が排出口に達するまでの時間をその前後の400秒および6000秒に変化させ、トレーサー層の形状および位置を観察した。

Fig.12に粒子の降下挙動を示す。いずれの移動速度の場合も、充填層内トレーサー層の形状はほぼ同じで、上部からV型、平型、炉芯の形状による逆U型を示した。それぞれの速度条件のトレーサー層の位置と形状を比較すると、排出速度の充填層流れに対する影響は見られない。本冷間モデルのような充填層においては降下速度を基準となる値を中心に約15倍変化させても、実現象としての層構造変化は見られず影響が小さいことがわかった。

5・2 DEM計算における時間調整の検討

すでに述べたようにDEM計算では実時間とは異なる加速された時間スケールの中でのパラメーターを用い、計算を実行する。計算速度調整の観点から降下速度など時間調整に対するDEMパラメーターの有効性確認は重要であると思われる、その検討のために以下の計算を行った。すなわち、DEM計算において回転抵抗係数 α は3.0と一定に設定し、羽口での粒子消去時間を毎秒10~100個の範囲で調整を行った。これにより炉口から羽口までの粒子の降下時間を130秒から1200秒まで変化させ、降下に伴うトレーサー層の形状変化を求め、Fig.13に示す。

炉口から羽口上部までのトレーサー層の形状は降下速度によらずほぼ同じ形状を示し、いずれもFig. 5, Fig.12の冷間実験にほぼ近いことがわかる。装入物の降下速度の増減は層構造の全体変化について影響が少なく、回転抵抗係数 α 調整の必要性は少ない。次にFig.14に高炉内全体の粒子速度分布の変化を示す。Fig.14中のa)~d)はそれぞれFig.13の各ケースに相当する。カラスケールはそれぞれの降下時間に比例し相対速度が同一になるように示した。本図からd)のように降下時間が長くなると赤で示される高速粒子が分散し、全体的に異なる速度を持つ粒子が混在する傾向がうかがえる。特に羽口付近の粒子挙動が平均化される。Fig.15にFig. 9と同様に求めた粒子平均速度の時間変化を示す。本図の横軸は時間加速による効果を補正して表示した。a)からd)に移行するにつれて、明らかな変化が観察さ

Fig. 12. Time lines of descending particles with changing descending velocity by cold model.

Fig. 13. Change of layer structure of tracer during descending with various descending velocity in DEM (Particle diameter: 1.0 cm, $\alpha = 3.0$).

れる。a)では装入による間欠的なピーク発生とその間の短周期変動が目立つが、d)、すなわち降下時間を増加させるに従って短周期の変動は見かけ上、微小な周期の変動に変化する。Nakanoらも冷間実験、DEMの両者においてレースウェイ近傍の周期的なガス圧力変動を考察し、要因としてレースウェイ安定性と不連続な固体運動に言及しているが⁶⁾、本計算でも同様に粒子間の拘束の中で、スリップが

Fig. 15. Average velocity with various descending velocity in DEM calculation.

生じることで間欠的降下運動が表れているものと推測される。

以上より、DEM計算において計算の加減速を意図して降下時間を調整した場合、充填層内全体のマクロ的降下挙動はその影響を受けにくい。精度向上を期待し、基準となる時間より降下速度を遅くするにつれて、レースウェイ付近など不均一性が顕著になる部位ではレースウェイ内消費に伴う短周期的な降下速度変動は実現象に接近していくと思われる。この間、計算時間は急増していくが、粒子の運動表現などは精緻な形になると思われ、時間加速の条件は計算目的に応じて考えていくべきであろう。

6. 実高炉全体およびレースウェイ付近の降下挙動への適用

実高炉への応用として、羽口を40本有する5000 m³級高炉を想定したDEM数値解析の例をFig.16に示す。コークスと焼結鉱の粒径はそれぞれ24 cmと12 cmに設定した。密度など粒子物性値は実高炉内粒子の値を適用し、回転抵抗係数 α は今までの検討方法をもとに、実粒子の安息角¹⁹⁾との比較から決定し、3.0とした。炉口から羽口までの粒子の降下時間は約100秒に設定した。図中灰色粒子はコークス、黒色の粒子は焼結鉱を示す。焼結鉱粒子は、任意に設定した融着帯位置で消去している。また、高炉を周方向

Fig. 16. Calculation example of macroscopic burden layer in blast furnace by DEM simulation.

Fig. 17. Calculation example of particle velocity nearby raceway by DEM simulation.

に均一として周期境界条件を適用し、計算領域を18度限定することで、計算時間を大幅短縮した。得られた層状分布と実高炉解体結果²⁰⁾を比較すると、装入後の傾斜角と降下に伴う傾斜角の低下に非常に近い傾向が見られた。DEMを実高炉に適用した場合において、本研究で示した構成パラメーターの決定法に基づき、粒子径拡大条件でもマクロ的な固体流れを再現可能であることが示された。

また、微視的な挙動解析の例としてFig.17に羽口周辺の粒子速度を示す。粒子径は20 cmとした。不均一性が顕著となる計算対象であることから、回転抵抗係数 α は上記の値より小さく2.5とした。降下時間は前節の結果からFig.16の2倍とし、局所的な精度向上を図った。白色粒子ほど大きい速度を示し、粒子がレースウェイへ流入する様子が見られる。実用性も勘案しながら、DEM計算によってレースウェイ付近の微視的な挙動解析も可能である。

7. 結言

DEM計算は高炉内の精緻な固体運動の計算が可能であるが、高炉特有の不定形粒子の表現、DEM構成パラメータの決定などその適用には課題も有する。また限られた粒子数、計算速度で最大限、粒子運動表現の精度向上を図らねばならない。本研究ではDEM計算の高炉全体系モデル展開に必須なDEM構成パラメータの決定に関して体系的検討を行い、さらに粒子径変更及び時間加速計算の近似妥当性を検討した。以下にその結果を記す。

(1) 安息角との対比など粒子径に応じて静力学的に決定した回転抵抗係数を用いて、冷間モデルとDEMシミュレーションによる比較を行い、充填層内の降下挙動においても対応可能である $\alpha=3.0$ を得た。

(2) マクロ的な運動挙動には回転抵抗係数の感度は鈍いが、粒子径の縮小など精度向上を図る際には、回転抵抗係数の適用範囲は狭まる。

(3) 冷間モデルの降下実験により、降下速度を変化させても降下に伴う層構造変化への影響は小さいことが判明した。同様に降下速度を変化させたDEMシミュレーションにより、降下速度を変化させても層構造は大きく変化しない。DEMの標準的な時間加速条件でマクロ的な粒子運動は表現できる。ただし、レースウェイ近傍の速度分布が顕著になる部位に注目する場合には、計算条件の許容範囲で降下速度を緩めることも必要と推察される。

文 献

- 1) T.Ariyama, R.Murai, J.Ishii and M.Sato: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1371.
- 2) K.Fukada, S.Itagaki, I.Shimomura and M.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 267.
- 3) H.Takahashi, H.Kawai, T.Fukui, Y.Matsumoto and Y.Matsui: *Tetsu-to-Hagané*, **93** (2007), 615.
- 4) H.Nogami, S. Pintowantoro and J.Yagi: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 948.
- 5) J.A.Castro, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **42** (2002), 44.
- 6) P.A.Cundall and O.D.L.Strack: *Geotechnique*, **29** (1979), 47.
- 7) J.Kano, E.Kasai, F.Saito and T.Kawaguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 742.
- 8) H.Mio, K.Yamamoto, A.Shimosaka, Y.Shirakawa and J.Hidaka: *ISIJ Int.*, **47** (2007), 1745.
- 9) T.Umekage, S.Yuu and M.Kadowaki: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1416.
- 10) T.Nouchi, T.Sato, M.Sato and K.Takeda: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 955.
- 11) K.Nakano and H.Yamaoka: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 939.
- 12) H.Mio, S.Komatsuki, J.Hidaka, M.Kadowaki, S.Matsuzaki and K.Kunitomo: *CAMP-ISIJ*, **21** (2008), 901.
- 13) Z.Zhou, H.Zhu, A.Yu, B.Wright, D.Pinon and P.Zulli: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1828.
- 14) S.Ueda, H.Nogami, J.Kano and T.Ariyama: Proc. of Recent Progress on Mathematical Modeling in Ironmaking 2008, ISIJ, Tokyo, (2008), 146.
- 15) 三輪茂雄：粉粒体工学，朝倉書店，東京，(1972)，68.
- 16) S.Natsui, S.Ueda, M.Oikawa, Z.Y.Fan, J.Kano, R.Inoue and T.Ariyama: *ISIJ Int.*, **49** (2009), 1308.
- 17) H.Mio, S.Komatsuki, M.Akashi, A.Shimosaka, Y.Shirakawa, J.Hidaka, M.Kadowaki, S.Matsuzaki and K.Kunitomo: *ISIJ Int.*, **48** (2008), 1696.
- 18) M.Sakai, S.Koshizuka and H.Takeda: *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **43** (2006), 4.
- 19) H.Nishio and T.Ariyama: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2330.
- 20) T.Izawa, M.Miura, K.Satomi, M.Saito, T.Miyamoto, T.Fukushima and T.Furukawa: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), S446.