

# Discrete Element Methodを用いた高炉装入プロセスにおける 粒子挙動のシミュレーション

## Simulation of Particle Behavior in Charging Process of Blast Furnace by Discrete Element Method

三尾 浩\*      成田 洋一  
Hiroshi MIO      Yoichi NARITA

### 抄 録

Discrete Element Method (DEM, 離散要素法)を用いた高炉の装入物分布推定モデルの開発を目指し、高炉の搬送過程における焼結鉱の粒子偏析についてシミュレートした。その結果、サージホッパー、並列ホッパー装入時には、堆積斜面を流動する際に粗粒が偏析し、ホッパー壁際に多く堆積することが確認された。また、ホッパーからの排出時には、壁側に堆積した粒子の排出が遅れるため、排出粒子の平均粒子径は時間の経過と共に増大することがわかった。

### Abstract

The objective of this paper is the development of a particle flow simulator for optimizing a charging process of a blast furnace by using Discrete Element Method (DEM). The particle behaviors during charging and discharging for a surge hopper or a parallel hopper were simulated. The large particles are stayed near the side wall of the hopper due to the particle size segregation during flowing on the heap. These particles tend to be discharged last when they are discharged from the hopper. Thus, it is found that the time changes in mean particle size of discharged particles increase with an increasing the time.

## 1. 緒 言

高炉は鉄鉱石を還元し、銑鉄を取り出すための向流型反応装置であり、炉頂部から鉱石(焼結鉱やペレット等)とコークスを層状に装入し、炉下部の羽口から高温のガスを吹き込むことが基本的な操作である。高炉操業において、炉内のガスの通気性は非常に重要な因子であり、安定したガス流れを保つことが高炉の安定操業や高効率操業には必要不可欠である。そのため、炉内に装入される鉱石やコークスの挙動や粒子偏析、堆積位置、量比を把握し、適切な装入物分布を造り込む必要がある。

しかしながら、高炉に装入される焼結鉱やコークスをはじめとした粒状体は特異的な挙動をし、流動時には各粒子の持つ性状(粒子径、密度、表面性状、形状等)の違いにより、特定のものが空間的、時間的に偏ってしまう“偏析”が生じる。そのため、高炉への搬送途中の貯槽(ホッパー等)や炉内装入において、一部の粒子径や銘柄が極端に偏る等の問題も生じてしまう。したがって、これら粒子挙動や偏

析を的確に予測し、制御する手法の開発が切望されており、DEM<sup>1)</sup>(Discrete Element Method, 離散要素法)を用いた粒子シミュレーションが着目されている。

DEMは1970年代にCundallらにより提案されたシミュレーション法であり、粒子に作用する全ての力(例えば接触力、クーロン力、付着力、磁気力、流体抵抗力等)をモデル化し、個々の粒子に対する運動方程式を逐次解くことにより、粒子群全体の挙動を解析する手法である。DEMは粒子を離散体として扱うため、粉粒体挙動を精度良く解析することができ、世界中で多くの研究<sup>2-10)</sup>(例えば混合、粉碎、粉体輸送、充填、流動層、電子写真等)が進められている。高炉プロセスにおいても既に幾つかの解析例<sup>11-17)</sup>が報告されており、今後のさらなる開発が期待されている。筆者らは、約10年前よりDEMを用いた高炉装入物分布推定シミュレーションの開発を行っている<sup>18-23)</sup>。本稿では、高炉への搬送プロセスにおける粒子偏析の影響について解析した事例<sup>21)</sup>を紹介する。

\* プロセス研究所 製鉄研究部 主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

## 2. Discrete Element Method

DEM は粒子に作用する全ての力をモデル化し、各粒子に対する並進と回転の運動方程式を微小時間毎に逐次解くことが基本アルゴリズムである。

$$\dot{\mathbf{v}} = \frac{\sum \mathbf{F}}{m} \quad (1)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \frac{\sum \mathbf{M}}{I} \quad (2)$$

ここで  $\mathbf{v}$  は粒子の速度、 $\boldsymbol{\omega}$  は粒子の回転速度である。また、 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{M}$  は粒子に作用する力、および、モーメント、 $m$ 、 $I$  はそれぞれ粒子質量、慣性モーメントを表す。高炉の装入プロセスにおける粒子挙動解析においては、作用力  $\mathbf{F}$  として考慮すべきものは、粒子接触時の反発力と重力のみであるが、他の粉粒体プロセスでは流体抗力、磁気力、静電気力、付着力等を考慮することにより、様々な現象が解析できる。

粒子間、あるいは粒子-構造物間の衝突においては、粒子の塑性変形や破損は考慮せずに、局所的なオーバーラップを許容している。すなわち、次式を満たすとき、2 粒子は衝突したと判定される。

$$d < r_i + r_j \quad (3)$$

ここで、 $d$  は着目 2 粒子の中心座標間距離、 $r$  は粒子半径、 $i$ 、 $j$  は粒子番号である。また、粒子の衝突モデルは完全弾性衝突ではなく、図 1 に示すようなばねとダッシュポットで構成される Voigt モデルが使用される。すなわち、粒子の持つ弾性的、および、非弾性的性質を接触点間に挿入した弾性スプリング (弾性定数:  $K$ ) と粘性ダッシュポット (粘性定数:  $\eta$ ) で表現する。

また、粒子接触に付随する摩擦相互作用を表すために、せん断方向には摩擦スライダ (摩擦係数:  $\mu$ ) が挿入されている。粒子接触面に作用する法線方向:  $\mathbf{F}_n$ 、および、せん断方向:  $\mathbf{F}_t$  の力は次式で求められる。

$$\mathbf{F}_{n,ij} = \left( K_n \Delta u_{n,ij} + \eta_n \frac{\Delta u_{n,ij}}{\Delta t} \right) \mathbf{n}_{ij} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{t,ij} = \min \left\{ \mu \left| \mathbf{F}_{n,ij} \right| \mathbf{t}_{ij}, \left[ K_t \left( \Delta u_{t,ij} + \Delta \phi_{ij} \right) + \eta_t \left( \frac{\Delta u_{t,ij} + \Delta \phi_{ij}}{\Delta t} \right) \right] \mathbf{t}_{ij} \right\} \quad (5)$$

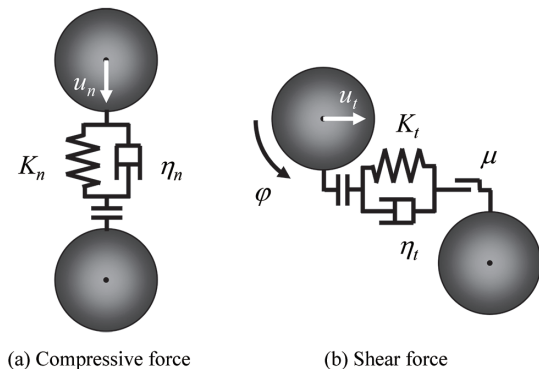


図 1 接触力のモデル  
Model for contact force

ここで、 $u$ 、 $\phi$  は着目 2 粒子の接触点における並進、および、回転による相対変位であり、 $\mathbf{n}$ 、 $\mathbf{t}$  はそれぞれ法線方向、せん断方向の単位ベクトルを意味する。

接触力、ならびに、モーメントを粒子  $i$  に接触するすべての粒子間に対して算出し、それらを総和し、並進、回転の速度を求め、時刻  $t$  から  $t + \Delta t$  までの粒子  $i$  の変位量を算出する。これらの演算を全粒子に対して行い、それを  $t = t_{\max}$  となるまで繰り返していくことにより、粒子群全体の挙動がシミュレートできる。

一般的に DEM では粒子を球として扱うが、解析対象である粒子の形状は非球形がほとんどである。そのため、粒子の回転運動に対して抵抗を与えることにより、粒子形状を考慮する方法が採用されることが多い。本研究では、次式に示す転がり摩擦 (モーメント) を粒子に与えた。

$$\mathbf{M}_{r,i} = -\frac{3}{8} a_i b \left| \mathbf{F}_n \right| \frac{\boldsymbol{\omega}_i}{\left| \boldsymbol{\omega}_i \right|} \quad (6)$$

ここで、 $b$  は接触面の半径であり、 $a$  は転がり摩擦係数である。本研究で取り扱う焼結鉄やコークス粒子には同じ形状のものは、まず存在しない。したがって、DEM においても個々の粒子が異なる転がり挙動をするように、全ての粒子が異なる転がり摩擦係数  $a$  を持つように設定した。 $a$  の分布については、過去の研究<sup>18)</sup>において、1 粒子を傾斜平板に落下させ、転がり距離の分布を求め、その傾向と粒子のシュート内流動時の挙動を比較することにより決定したものである。

## 3. シミュレーション条件

本研究では、図 2 に示す高炉への装入プロセスにおけるサージホッパーへの装入および排出と、炉頂並列ホッパーへの装入、排出を DEM によりシミュレーションした。ホッパーは実炉の 1/3 スケールに縮尺した試験装置をモデル化しているので、焼結鉄粒子は直径 10.5~20mm とし、5.5 トンを搬送した。表 1 に各粒子径毎の粒子個数を示してお

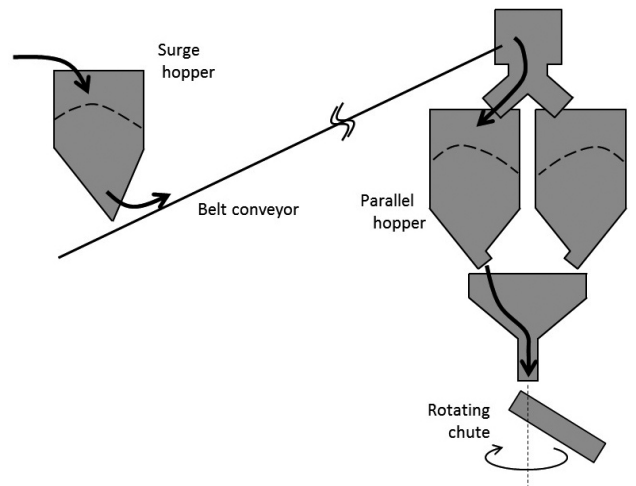


図 2 高炉装入プロセス  
Schematic illustration of charging process of blast furnace

表 1 計算に用いた粒子条件  
Particle condition for simulation

Diameter [mm]	Number of particles [-]
10.5	549936
12.5	325949
15	188628
17.5	118786
20	79577

り、全粒子数は 1262876 個である。サージホッパーは高さ：約 3m、幅：約 1.5m であり、ホッパー上方に設置されたベルトコンベアから 23.4kg/s の質量速度で焼結鉱を装入した。

コンベア上の焼結鉱は完全混合状態であり、時間的、空間的に偏析は生じていない条件とした。また、並列ホッパーは高さ：約 3m、直径：約 2m の円筒形状であり、炉頂コンベアから切り替えシュートを経由して一方のホッパーに装入される。 $\Delta t$  は  $1.75\mu\text{s}$  とし、サージホッパーへの装入は 250 秒間、並列ホッパーへの装入は 110 秒間のシミュレーションを行った。ホッパーへの装入後、全粒子が十分に静止した後に下部ホッパーゲートを開き、排出挙動をシミュレートし、装入、および、排出時の粒子偏析について検討した。全ての計算は OpenMP を用いた共有メモリ型の並列計算で実施した。

#### 4. 結果および考察

図 3 にサージホッパーへの装入時の挙動を示す。図中の粒子色は粒子毎に色分けしており、水色：10.5mm、桃色：12.5mm、黄色：15mm、緑色：17.5mm、赤色：20mm である。装入が進行するに従って、ホッパー内の堆積層が高くなっていく様子が確認でき、堆積斜面やホッパー壁際には粗粒（赤色）が多く存在することがわかる。これは、斜面流動時の粒子偏析により、粗粒が斜面下に流れ込んだためである。図 4 にホッパー充填後の堆積層内部における平均粒子径のコンター分布を示す。図はそれぞれホッパーの断面であり、(a) 中央の鉛直断面（相対位置 0.5）、(b) 壁際の鉛直断面（相対位置 0.9）、(c) 水平断面である。中央断面を見ると、装入位置では比較的平均粒子径に近い分布になっているが、壁側に流れる途中で粒子径が小さくなり、壁に近づくに従って大きくなることわかる。

この傾向は、水平断面図を見ても明確であり、ホッパーの壁近傍の平均粒子径は非常に大きくなっていることが確認できる。これらは、粒子が流動する際の一般的な粒子径偏析である。また、図 4 (b) には、堆積斜面の傾斜に沿った縞状の模様が少し確認できる。これは粒子が堆積する際、粒子の持つ安息角まで斜面が成長し、それを超えると斜面が一気に崩落するということが定期的に生じる。この定期的な崩落により、粒子の流れ込みや偏析が影響を受けるので、こういった縞状の模様が現れる。これは、粉粒体特有

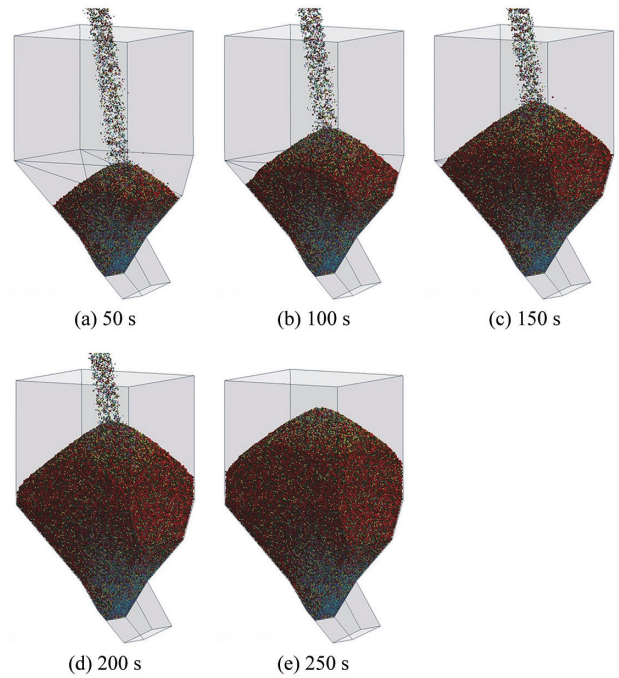


図 3 サージホッパー装入時の粒子挙動  
Snapshots of particle behavior during charging into the surge hopper

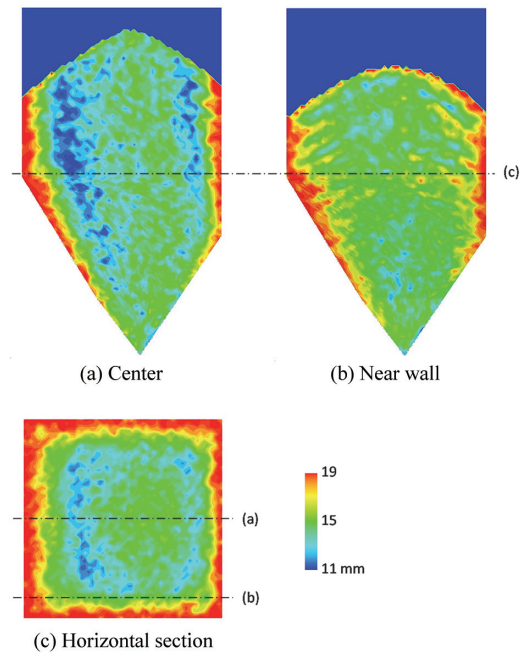


図 4 サージホッパー内の平均粒子径の分布  
Contour mapping of mean particle size of charged particle in the surge hopper

の現象であり、DEM で適切に現象を再現できていると言える。

図 5 にサージホッパーからの排出時の挙動を示す。図は、中央でカットした画像である（図 4 (a) と同じ断面）。図より、時間の経過と共に中央が窪んでいく様子が確認でき、壁際の粒子の排出が遅れることがわかる。また、排出初期には断面中央付近には細粒（水色）が多く存在しているが、次第に少なくなり、排出末期では、ほとんどが粗粒であるこ



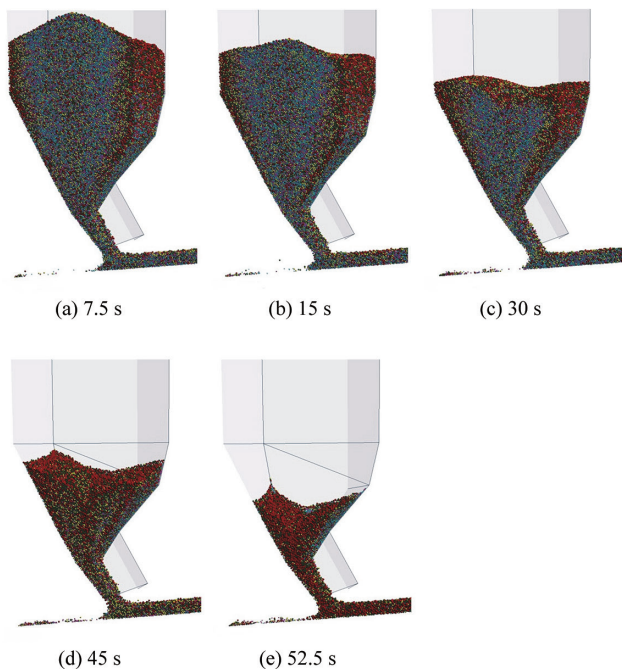


図5 サージホッパー排出時の粒子挙動  
Snapshots of particle behavior during discharging from the surge hopper

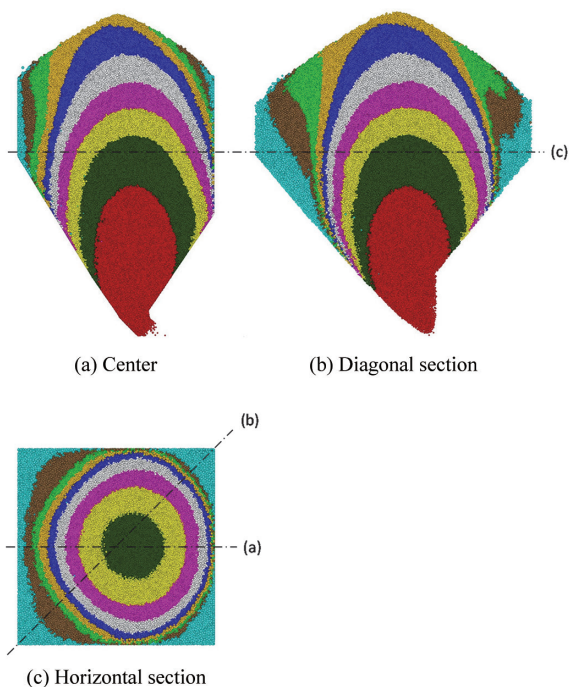


図7 サージホッパーからの排出順序マップ  
Mapping of discharged timing from the surge hopper

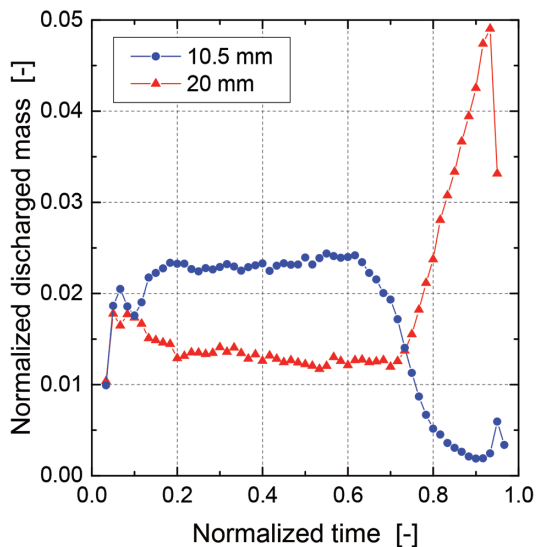


図6 相対排出量の時間変化  
Relation between the normalized discharge mass and the normalized time

とが確認できる。図6に細粒(10.5mm)と粗粒(20mm)の相対排出量の時間変化を示す。図を見ても、細粒はほとんどが中盤までに排出されており、逆に、粗粒は排出後期になるに従って、急激に増加していることがわかる。これは、図4に示したホッパー内堆積位置における粒子径と、ホッパーからの排出順序の関係、および、排出流動時の粒子径偏析が影響していると言える。

図7にホッパーからの排出順序マップを示す。ホッパー内の全粒子は、排出タイミング(相対時間0.1毎)で色分けをされており、赤→緑→黄→桃→灰→青→橙→黄

緑→茶→水色の順で排出されていく。ホッパーからの排出は、排出口から同心楕円体状に広がっていることが確認でき、壁側の排出は非常に遅いことがわかる。特に、図7(b)および(c)で示すように、ホッパーのコーナー部の排出が非常に遅れる。これらの領域は、図4に示したように、装入時の偏析により、粗粒が多く堆積しているところであるため、ホッパーからの排出後期には、粗粒が多くなるということが容易にわかる。

サージホッパーから排出された焼結鉱は、装入コンベアにより炉頂の並列ホッパーに装入される。図8にDEMでシミュレートした装入挙動(80秒後)を示す。並列ホッパーにおいても、サージホッパーへの装入と同様に、堆積時に偏析が生じ、ホッパー壁際には粗粒が多くなっていることが視覚的に確認できる。図9に堆積層内の平均粒子径のコンター分布を示す。図9(a)は中央の鉛直断面であるが、この図を見ると図4に示したものと少し傾向が異なる。すなわち、左右の斜面で平均粒子径が大きくなっている。これは、並列ホッパー装入前の切り替えシュート流動時の影響が原因であり、図10に示すように、シュート内流動時に細粒が流れの下層に偏析をし、その偏析状態のままシュートを飛び出すため、右斜面に細粒が多くなってしまう。一方、粗粒の堆積位置はサージホッパーと同様に壁際に集中していることが図9(b)で確認できる。

図11に各時間における排出された粒子の平均粒子径の変化を示す。縦軸はホッパーに装入した全粒子の平均粒子径で規格化を行っている。図より、排出粒子の平均粒子径は、時間の経過とともに増大することがわかる。すなわち、炉内装入の初期は平均よりも小さい粒子の構成となり、無

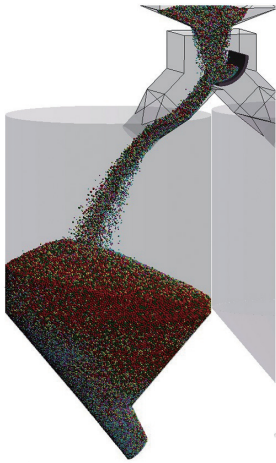


図8 並列ホッパー装入時の粒子挙動 (80秒)  
Snapshot of particle behavior during charging into the parallel hopper (80s)

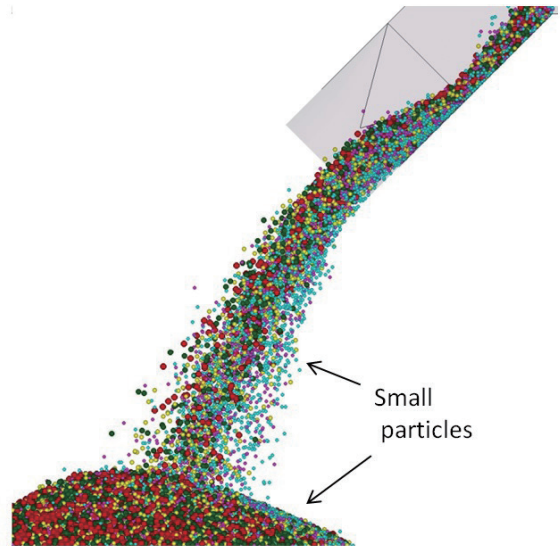


図10 切り替えシュートから飛び出し時の粒子挙動  
Snapshot of particle discharging behavior at the outlet of transfer chute

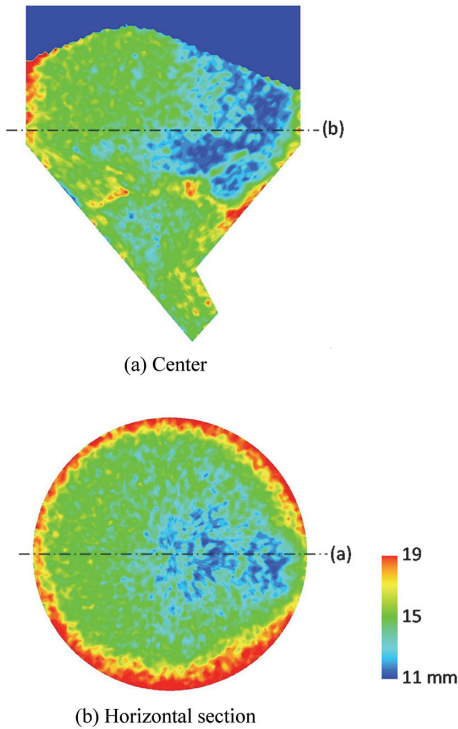


図9 並列ホッパー内の平均粒子径の分布  
Contour mapping of mean particle size of charged particle in the parallel hopper

次元時間 0.7 以降になると、平均よりも大きい粒子が装入されることがわかる。この傾向はサージホッパーからの排出と類似しており、ホッパー中央部分が初期段階で排出され、壁側に堆積している粗粒の排出が遅れるためであり、図12に示す排出順序マップからも理解できる。

以上のように、高炉への搬送時、ホッパーへの装入、排出を繰り返す際に焼結鉱は偏析をし、炉内装入後期には粗粒が集まることがDEMによるシミュレーションで再現された。DEMではこのような時系列の変化が生じる原因を、実験では観察が困難である堆積層内部の状態を詳細に解析することができるのが大きな特徴であり、偏析を制御する

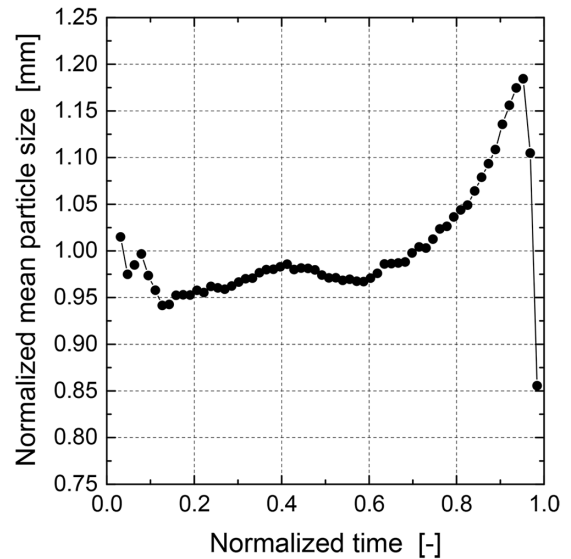


図11 排出粒子の平均粒子径の時間変化  
Relation between the normalized mean particle size and the normalized time

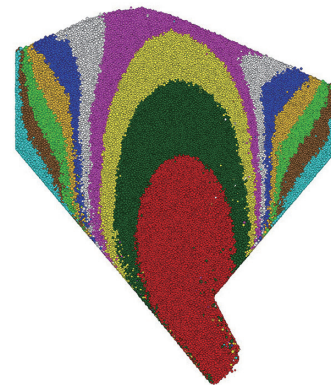


図12 並列ホッパーからの排出順序マップ  
Mapping of discharged timing in the parallel hopper

ための搬送方法や装置デザイン等の検討，さらには炉内装入物分布の最適化に対して非常に有用なシミュレーションであると言える。

## 5. 結 言

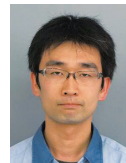
本稿では，DEMを用いた粒子シミュレーションにより，高炉装入プロセスにおける搬送時の粒子偏析を解析した結果を紹介した。個々の粒子挙動を詳細に解析することが可能なDEMでは，堆積層内部の情報や時間的な変化など，実験では観察困難である多くの情報を得ることができる。それらの情報を活かし，現象を支配するメカニズムの解明や，操業設計，プロセスデザインに役立てることが可能であり，今後のさらなる発展が期待できる技術である。しかし，粉粒体挙動は多くの因子（粒子形状，表面性状，水分等）に影響を受けるため，シミュレーションが実現象を適切に捉えられているかについては，実プロセスとの詳細な検証が必要になってくる。また，計算速度に関しても大きな課題であり，今後は，実炉現象との検証や大型計算機を用いた大規模計算アルゴリズムの開発等が必要である。

### 参考文献

- 1) Cundall, P.A., Strack, O.D.L.: Geotechnique. 29, 47 (1979)
- 2) Bertrand, F. et al.: Chem. Eng. Sci. 60, 2517 (2005)
- 3) Moreno, R. et al.: Powder Technol. 130, 132 (2003)
- 4) Rajamani, R.K. et al.: Powder Technol. 109, 105 (2000)
- 5) Cleary, P.W., Sawley, M.L.: Appl. Math. Model. 26, 89 (2002)
- 6) Ketterhagen, W.R. et al.: Powder Technol. 179, 126 (2008)
- 7) Taberlet, N. et al.: Phys. Rev. E. 73, 050301 (2006)
- 8) Kaneko, Y. et al.: Chem. Eng. Sci. 54, 5809 (1999)
- 9) Kawaguchi, T. et al.: Powder Technol. 109, 3 (2000)
- 10) Severens, I.E.M. et al.: Granul. Matter. 8, 137 (2006)
- 11) Yuu, S. et al.: ISIJ Int. 45, 1406 (2005)
- 12) Zhou, Z. et al.: ISIJ Int. 45, 1828 (2005)
- 13) 野内泰平 ほか：鉄と鋼. 92, 955 (2006)
- 14) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 47, 1745 (2007)
- 15) Natsui, S. et al.: ISIJ Int. 51, 41 (2011)
- 16) Yu, Y., Saxén, H.: ISIJ Int. 52, 788 (2012)
- 17) Kim, S. Y., Sasaki, Y.: ISIJ Int. 53, 2028 (2013)
- 18) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 48, 1696 (2008)
- 19) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 49, 479 (2009)
- 20) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 50, 1000 (2010)
- 21) Mio, H. et al.: Miner. Eng. 33, 27 (2012)
- 22) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 57, 272 (2017)
- 23) Narita, Y. et al.: ISIJ Int. 57, 429 (2017)



三尾 浩 Hiroshi MIO  
プロセス研究所 製銑研究部  
主幹研究員 博士(工学)  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



成田洋一 Yoichi NARITA  
プロセス研究所 製銑研究部  
主任研究員