

1/3スケール試験や実炉測定を活用したDEMによる 装入物分布推定シミュレーションの開発

Development of Simulation Tool for Prediction of Burden Distribution by Using DEM and Its Comparing with Measurement Data of 1/3 Scale Experimental and Working Blast Furnaces

三尾 浩*	門脇 正 具	松崎 眞 六
Hiroshi MIO	Masatomo KADOWAKI	Shinroku MATSUZAKI
中内 利 樹	河口 祐 輝	江 中 崇
Toshiki NAKAUCHI	Yuuki KAWAGUCHI	Takashi ENAKA

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、実炉の 1/3 スケールに縮尺した装入物分布試験装置、および、名古屋 3 高炉で旋回シュートからの装入物の挙動を観察、計測し、シミュレーション結果との比較、検証を行った。まず、高速度カメラを用い、飛び出し時の挙動を撮影し、画像より PIV を用いて、速度解析を行った。次に、炉内に測定棒を突き出し、落下流を衝突させることで、通過位置を検出し、落下軌跡を調査した。その結果、シミュレーションで再現された旋回シュートからの飛び出し速度、および、落下軌跡は、1/3 スケール試験、名古屋 3 高炉の実測ともに、非常に良く一致していることが確認できた。したがって、本研究で開発した DEM による落下軌跡の推定シミュレーションは非常に精度の高いものであり、ベルレス高炉の操業設計に十分に活用できるレベルであることがわかった。

Abstract

The objective of this paper is the development of a prediction tool for burden distribution of a blast furnace by using Discrete Element Method (DEM). The particle charging behavior via rotating chute in a 1/3-scale experimental apparatus was recorded by a high speed video camera, and the particle velocity was measured from the recorded images by using Particle Imaging Velocimetry (PIV). The particle trajectory discharged from the rotating chute was also measured in the experiment by inserting the rod, and the flow position was detected from the particle impact on the rod. The particle behavior was simulated by DEM, and it was validated by comparing with the measurement results. The measurements of particle charging behavior were also conducted in Nagoya No.3 Blast Furnace (BF), and the simulation results were compared with them. It was found that the simulated particle behavior was correlated with both in 1/3-scale experiment and Nagoya No.3 BF very well. Therefore, it is concluded that this simulation tool developed by this research is highly reliable when used for the prediction of particle trajectory in the blast furnace operation.

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、ペレット、塊鉱等）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、炉内のガス通気性は非常に重要なファクターであり、ガス流れを安定的に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、高炉へ原料（コークス、焼結鉱等）を装入するプロセスを適切に制御すること、すなわち、装入物分布の制御が非常に重要となる。近年、高炉への原料装入は、旋回シュートを用いた方式（ベルレス高炉）が主流となっており、日本製鉄(株)でも多くの高炉がこの方式を採用している。旋回シュートを用いた装入では、シュートの傾動角を変更し、半径方向の所定位置を狙い、所定回数旋回させ装入する。このシュート傾動角と旋

* 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



図1 1/3スケールのベルレス装入物分布試験装置
Picture of 1/3 scale experimental apparatus for burden distribution

回数を任意に変更することにより、半径方向のO/C分布（コークスと鉬石の重量比）を制御している。よって、旋回シュートから飛び出した原料がどの位置に装入されるかを的確に予測することが、装入物分布制御の向上につながる。そのため、これまでに多くの予測モデルの研究開発が行われてきた¹⁷⁾。これらの多くは、原料の運動を数学的にモデル化したものが中心であり、現場での高炉操業に大いに役立てられてきた。しかしながら、昨今の原料事情の変化もあり、今後の装入物分布の多様化に向けて、装入原料個々の物性が及ぼす影響を考慮した装入物分布推定モデルが必要と考えられる。さらには、装入物分布を高度に制御するための設備スペックの検討もシミュレーションで行うべきであり、粒子物性や詳細な設備条件を考慮できる力学モデルのシミュレーションが切望されている。

そこで日本製鉄では、粉粒体挙動の解析手法の一つであるDEM[®] (Discrete Element Method, 離散要素法)を用いたシミュレーションによる高炉装入物分布推定モデルの開発を進めている。DEMは粒子挙動を離散体として扱い、個々の粒子に作用する力を計算し、粒子群全体の挙動を解析する手法であり、これまでに多くの粉粒体プロセス（例えば、混合、粉砕、粉体輸送、充填、流動層、電子写真等）に適用されている⁹⁻¹⁷⁾。高炉プロセスでも既に多くの研究¹⁸⁻²⁸⁾が進められている。一般的に、粉粒体の挙動は非常に複雑であり、時として特異的な挙動を示す。そのため、DEMを用いたシミュレーションにおいては、実現象と詳細に比較、検証しないと、実用レベルで活用するのは難しい。

日本製鉄では、高炉装入物分布の研究開発強化のため、2009年に図1に示す実炉の1/3スケールのベルレス装入物

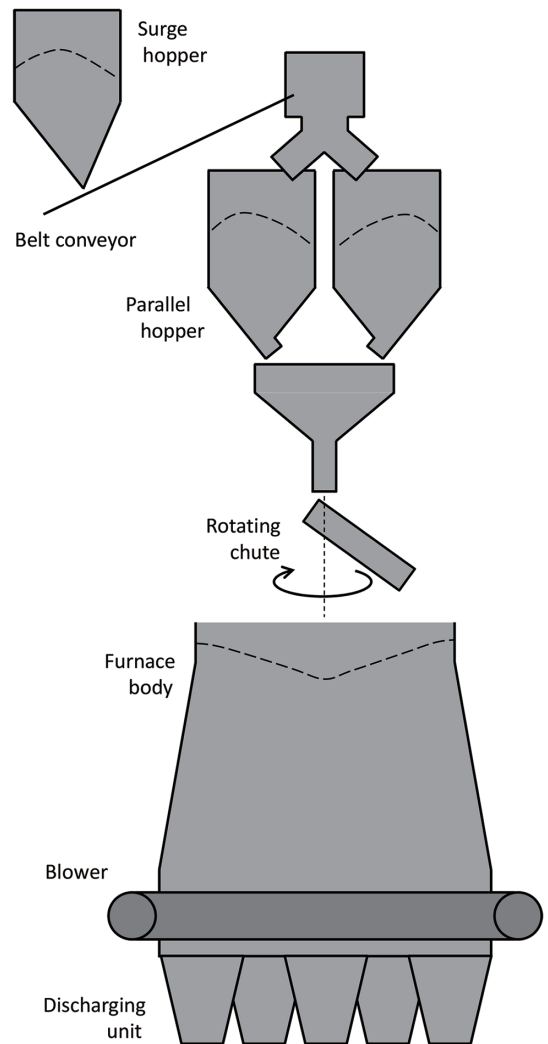


図2 1/3ベルレス試験装置の設備構成
Schematic illustration of 1/3 scale experimental apparatus

分布試験装置を立ち上げた。本装置は名古屋3高炉の炉頂部分を約1/3に縮尺したモデルであり、高さは約30mある。図2に示すように、サージホッパー、並列ホッパー、旋回シュート、炉体（上部のみ）から構成されており、実炉の原料搬送と装入プロセスが再現されている。炉体下部には送風配管が設置され、また、最下部には切り出し設備があり、炉内のガス流れや装入物の荷下がりも考慮されている。本装置を活用し、DEMによる高炉装入物分布推定モデルの高精度化を目指している。

本報告では、ベルレス高炉における旋回シュートからの装入挙動を1/3スケールの試験装置で比較した結果²⁶⁾、ならびに、名古屋3高炉での実現現象観察、および、測定結果との検証結果²⁷⁾について紹介する。

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が主である。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、様々な現象が解析されている。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、次式を満たす時、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 3 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: η) 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: μ) 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。

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

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

ここで、 u 、 φ 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 に接触する全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、粒子群全体の挙動をシミュレートする。

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。

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

ここで、 b は接触面の半径であり、 α は転がり摩擦係数である。本研究で取り扱う焼結鉍やコークス粒子には同じ形

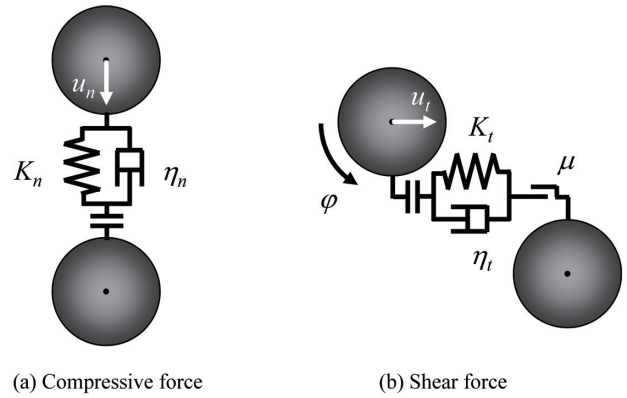


図 3 接触力のモデル (a) 圧縮力, (b) せん断力
Model for contact force

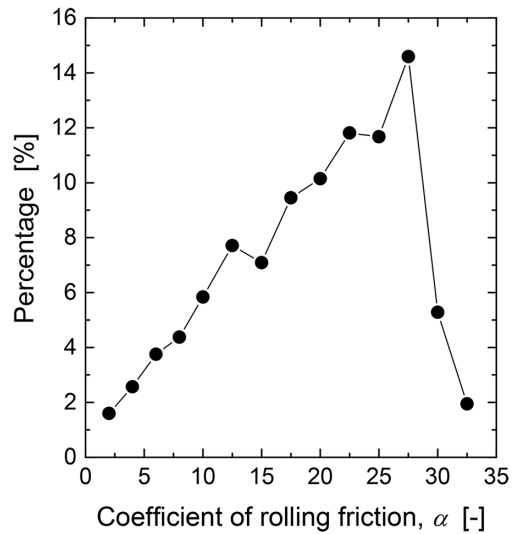


図 4 転がり摩擦係数の頻度分布²⁹⁾
Distribution of coefficient of rolling friction²⁹⁾

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 α を持つように設定した。 α の分布 (図 4) については、過去の研究²⁹⁾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. 試験条件

3.1 1/3 スケール試験

1/3 スケールの装入物分布試験装置を用い、旋回シュートから飛び出し時の粒子挙動と落下軌跡を測定し、DEM によるシミュレーション結果と比較し、整合性を確認した。用いた原料は焼結鉍であり、5 ~ 10 mm (57.3 mass%), 10 ~ 20 mm (42.7 mass%) を混合させ、サージホッパーから並列ホッパーに装入し、質量流量 60.2 kg/s で並列ホッパーから排出させた。その後、焼結鉍は垂直シュート、旋回シュートを経て炉内に装入される。旋回シュートから飛び出し時

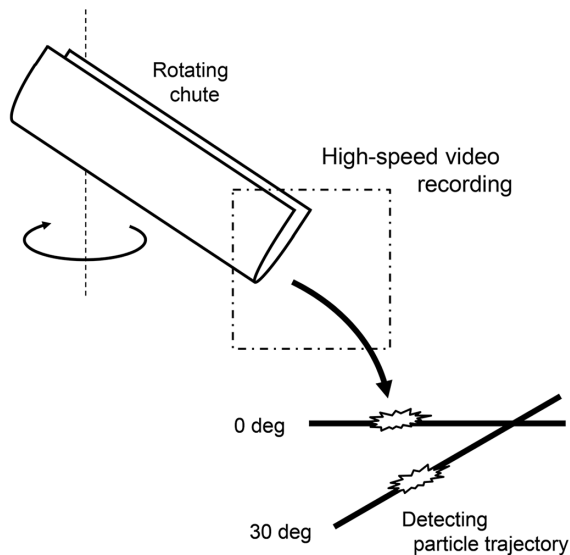


図5 1/3スケールの試験での落下軌跡の計測方法
Schematic illustration of the setup for 1/3 scale experiment

の挙動を高速ビデオカメラ (HiSpec, Fastec Imaging) を用いて撮影した。撮影は旋回シュートの真横から行い、カメラに向かって旋回してくる方向から 1000fps で実施し、撮影した画像から PIV (Particle Imaging Velocimetry) を用いて速度を計測した。使用したソフトウェアは、Flow-PIV ver. 2.2 ((株)ライブラリー) である。

また、旋回シュートから飛び出した後の軌跡 (落下軌跡と呼ぶ) を調査するため、図5に示すように、炉内に測定棒を突き出し、粒子を衝突させることで、通過位置を把握した。測定棒の角度は0度と30度とし、高さ方向に2点計測した。測定棒の表面には圧力測定フィルム (プレスケール, 富士フィルム(株)) を貼り付け、衝突強度を定量化した。本フィルムは力を受けると変色し、専用のスキャナとソフトウェア (FPD-9270, 富士フィルム(株)) を用いて、圧力値を解析した。シュートの旋回速度は 13.4rpm とし、シュート傾動角は 51.1 ~ 41.2 度とした。

3.2 実炉試験

1/3スケールの試験と同様に、名古屋3高炉において、旋回シュートからの飛び出し挙動、および、落下軌跡の調査を行った。図6に示すように休風時にマンホールを開放し、高速カメラで撮影した。使用したカメラは1/3スケール試験と同じであり、撮影方向も同様に、カメラ側に向かってくる様子を横から撮影した。撮影速度は 1500fps とし、撮影対象は焼結鉱であり、0.67t/s の質量流量で装入した。シュート傾動角は 51.1 度、旋回速度 8rpm で実施した。撮影後、PIV を用いて粒子速度の解析を行った。落下軌跡の調査においても、1/3スケール試験と同様に、図7に示すように、炉内に測定棒を突き出し、落下流を衝突させた。測定棒の挿入角度は 35 度であり、表面には圧力測定フィ



図6 名古屋3高炉での高速カメラ撮影のセットアップ²⁷⁾
Picture of setup of high-speed video camera in Nagoya No.3 BF²⁷⁾

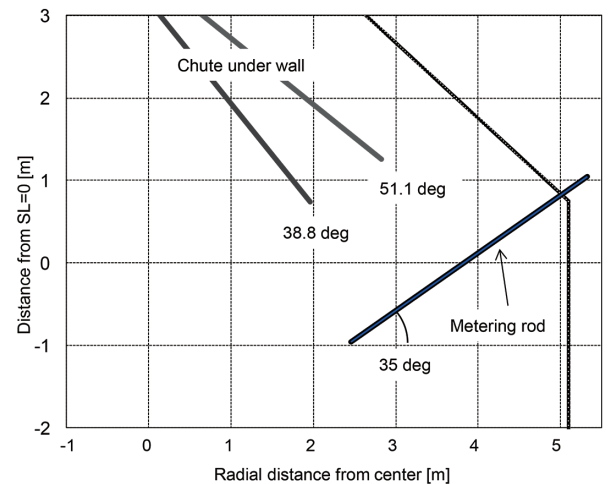


図7 名古屋3高炉での落下軌跡測定棒の位置関係²⁷⁾
Schematic illustration of position relation for the rod and chute under wall in Nagoya No.3 BF²⁷⁾

ルムを貼り付けた。シュート傾動角は 51.1, 38.8 度とした。

4. シミュレーション条件

DEM を用いて、旋回シュートからの装入挙動をシミュレートし、1/3スケールの試験結果や名古屋3高炉での実測結果と比較、検証を行った。シミュレーションでは、旋回シュート長さ等の設備スペックや質量流量速度、旋回速度等の装入条件は、1/3スケール試験、および、実炉と同じ条件で設定した。粒子は焼結鉱とし、密度 3300kg/m³、ヤング率 3.5GPa、ポアソン比 0.25 とした。1/3スケールでは、粒子径 5 ~ 20mm、実炉では 10 ~ 35mm とし、設定した粒子径分布、および、粒子個数はそれぞれ表 1, 2 に示す。転がり摩擦係数は式 (6) で述べたように、個々の粒子に対して別々の値を設定し、個々の粒子形状の違いを考慮した。なお、転がり摩擦係数は、計算スタート時に乱数を発生させ、図4の頻度分布となるように設定した。シミュレーション

表1 1/3 スケールのシミュレーションでの粒子条件
Particle conditions in DEM for 1/3 scale experimental apparatus

Particle size [mm]	Number of particles [-]	Mass fraction [-]
5	196079	0.142
7.5	58097	0.142
9.5	28587	0.142
10.5	17087	0.115
12.5	10127	0.115
15	5860	0.115
17.5	3690	0.115
20	2472	0.115

表2 名古屋3高炉のシミュレーションでの粒子条件²⁷⁾
Particle conditions in DEM for Nagoya No.3 BF²⁷⁾

Particle size [mm]	Number of particles [-]	Mass fraction [-]
10	1017574	0.352
15	254393	0.297
25	50878	0.275
35	5191	0.077

の実行は、OpenMP を用いた共有メモリ型並列計算で行い、1 回転分の粒子挙動を解析した。

5. 結果および考察

5.1 1/3 スケール試験との比較

図8に傾動角 51.1 度の条件で高速度カメラにより撮影された回転シュートからの飛び出し挙動を示す。シュートの回転運動による遠心力で、粒子が片側の壁面にせり上がった状態で飛び出している様子が確認できる。図9には DEM でシミュレートした粒子挙動を示す。高速度カメラで撮影した画像と同様に、粒子がせり上がって飛び出していることが確認でき、両者は良く対応している。飛び出し時の流れ幅(せり上がり高さ)は、191mm(実験)、187mm(DEM)となっており、ほぼ同じである。DEMの方がやや小さくなっているが、これは粒子を球で計算しているため、粒子間の空隙が実際よりも少し小さくなるため、せり上がり時の嵩がやや減ったためと考えられる。

図10に高速度カメラで撮影した画像を用いて PIV 解析をした結果の一例を示す。図中 A-A 断面の速度を複数の画像で平均し、その傾動角での飛び出し速度とした。なお、解析対象は回転シュートがカメラに対して真横付近に来た時のみとした。また、PIV 解析では、基本的に流れ表面の速度しか計測できない。したがって、シミュレーションでの飛び出し速度は、流れ表面(カメラ側)にある粒子を解析対象とした。表3に平均飛び出し速度を示す。飛び出し速度は、傾動角が小さくなるに従って大きくなることを確認できる。これは、シュートが鉛直に近づくため、シュートへの落下時の減速が小さくなることと、シュート内流動

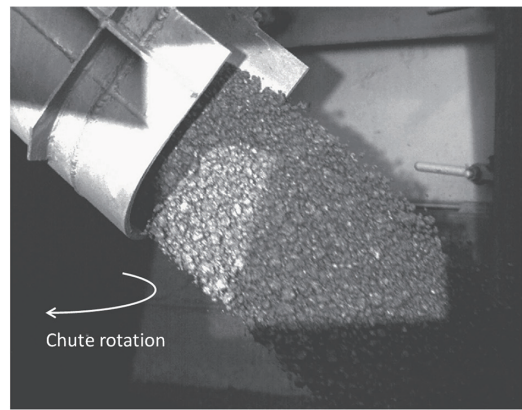


図8 1/3 ベルレス装置で撮影した回転シュートからの飛び出す様子

Recorded image of particle discharging behavior from the rotating chute in 1/3 scale experiment

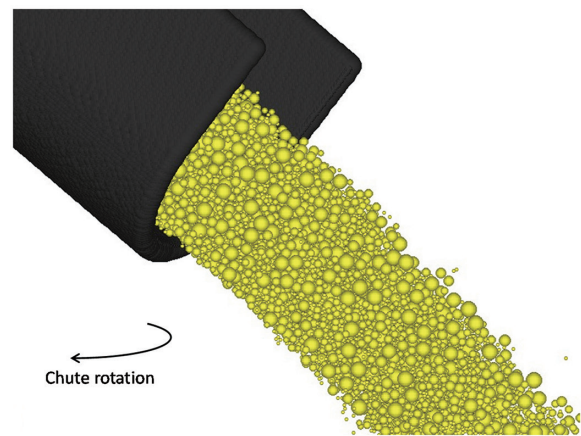


図9 DEM でシミュレートした粒子挙動
Snapshot of particle discharging behavior simulated by DEM

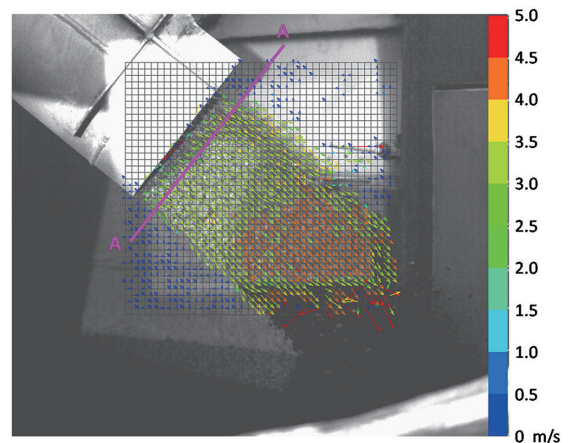


図10 PIV による粒子飛び出し速度の解析結果
Particle discharging velocity field by PIV

表3 粒子飛び出し速度の比較
Comparison of particle discharging velocity

Chute inclination angle [deg]	51.1	49.3	47.4
Particle velocity Measured (1/3 scale)	3.11	3.13	3.21
Particle velocity Simulated (DEM)	3.02	3.15	3.26

時の重力の影響が増加することが原因である。表を見ると DEM でシミュレートした結果は、実測の値とはほぼ一致し、挙動を良く再現できていると言える。

図 11 に落下軌跡測定の様子を示す。写真では、測定棒を右から突き出し(角度 0 度)、旋回シュートから飛び出した焼結鉱の流れが測定棒に衝突している様子が確認できる。衝突後、測定棒を取り出し、圧力測定フィルムを剥がし、専用スキャナで解析した。図 12 に結果の一例を示す。得られた圧力値から測定棒の長手方向に対する作用力の分布を求め、半径方向の落下流分布として評価した。図 13 にシュート傾動角 47.4 度、測定棒 0 度で評価した結果を示す。壁からの距離が約 300 ~ 600mm の範囲を落下流が通過していることが確認できる。また、図中にはシミュレーションの結果も併せて載せている。シミュレーションでは、落下軌跡測定棒位置を通過した粒子の重量分布を測定棒長手方向に整理したものである。図より、両者の分布は非常に良く対応していることがわかる。

図 14 にシュート傾動角 47.4 度、および、41.2 度の条件下において、シミュレーションで得られた粒子軌跡のスナップショットと、1/3 スケール試験で得られた落下流の衝突位置を重ねた画像を示す。実験での衝突位置の範囲は、積算作用力が 2.275% ~ 97.725% となる範囲とした。また、積算 50% 位置を流れの主流位置と見なし、図中にプロットしている。図より、実験での衝突位置(測定棒 0 度、30 度)はシミュレーションでの軌跡と非常に良く一致していることがわかる。

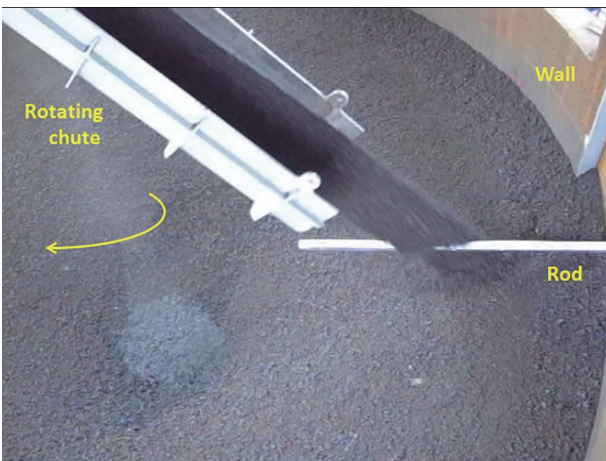


図 11 1/3 スケール試験での落下軌跡測定の様子
Picture of measuring the particle trajectory in 1/3 scale experiment

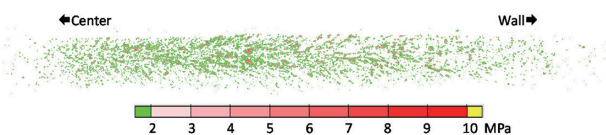


図 12 衝突痕の例
Typical example of the impact stress distribution

傾動角 41.2 度では、流れの上層が多少合わないようにも見えるが、これは流れの上層粒子が分散しているためである。

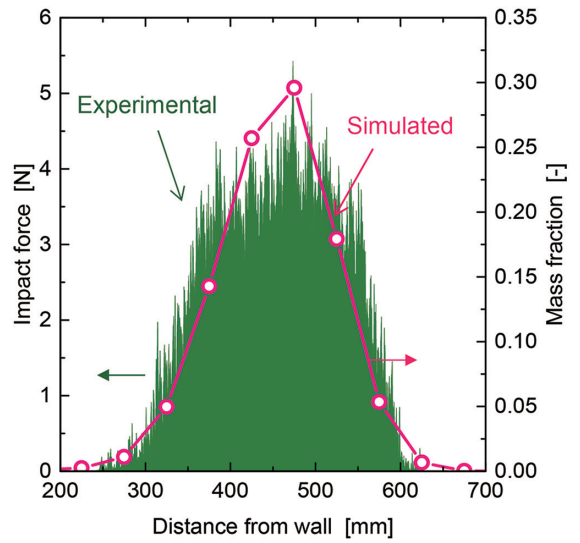
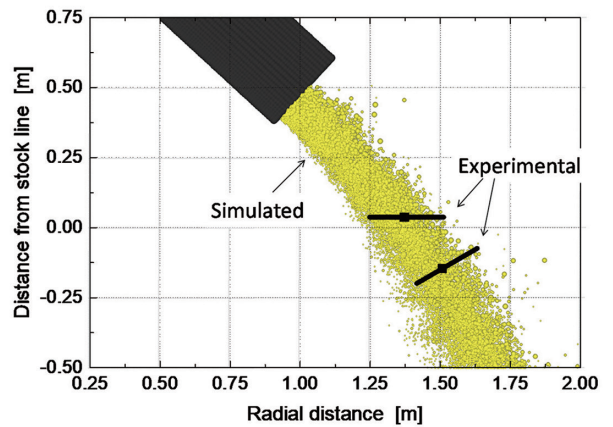
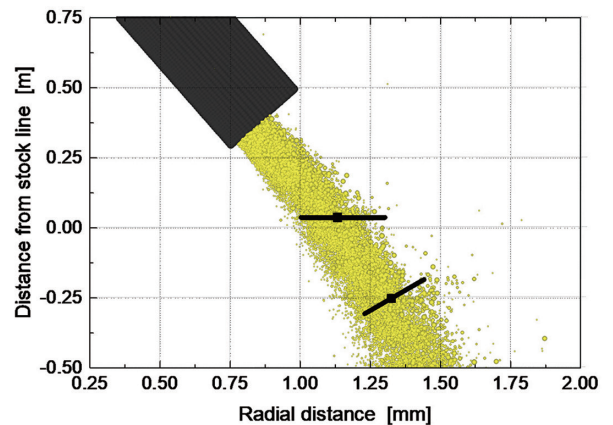


図 13 傾動角 47.4 度、測定棒 0 度での衝突痕の分布と DEM での粒子通過量分布の比較
Comparison of the impact stress distribution and the particle mass distribution under 47.4 deg in the chute angle and 0 deg in the rod insert angle



(a) 47.4 deg



(b) 41.2 deg

図 14 DEM での落下軌跡と衝突痕検知位置の比較
Comparison of particle trajectory

り、実験ではそれらが衝突痕として検知されているが、シミュレーションのスナップショットでは瞬間の画像であるため、多少確認し難くなっている。しかしながら、シミュレーション画像でも、上層は分散していることが確認でき、良く合致していると言える。したがって、1/3 スケールの試験において、旋回シュートからの飛び出し速度、および、落下軌跡は DEM を用いたシミュレーションで精度良く再現できていると言える。

5.2 名古屋 3 高炉との比較

図 15 に名古屋 3 高炉にて、高速度カメラで撮影した旋回シュートからの焼結鉱の飛び出し挙動を示す。撮影は粉塵の影響が比較的少ない 1 旋回目で行われ、個々の粒子まで確認できるほど、鮮明に撮影できていることがわかる。飛び出し時の粒子は、1/3 スケールの試験でも確認されたとおり、シュートの旋回運動により、片側にせり上がった状態で飛び出していることが確認でき、縮尺モデルでの試験は実炉と良く対応していると言える。図 16 にシミュレーションで得られた粒子挙動を示すが、図 15 の撮影画像と非常に良く対応している。図 17 に高速度カメラで撮影し



図 15 名古屋 3 高炉で高速カメラを用いて撮影した焼結鉱装入の様子²⁷⁾

Recorded images of charging sinter particles by high-speed video camera in Nagoya No.3 BF²⁷⁾

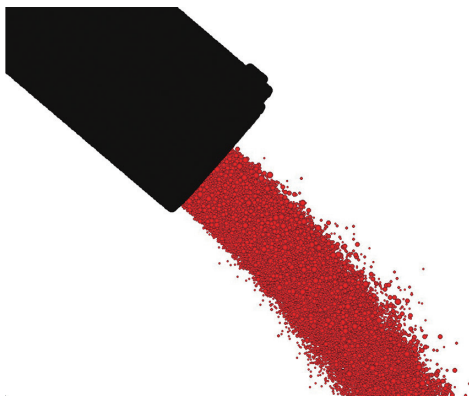


図 16 DEM でシミュレートした粒子挙動²⁷⁾

Snapshot of particle charging behavior simulated by DEM²⁷⁾

た画像を PIV 解析した結果、および、シミュレーションでの飛び出し時の粒子速度分布を示す。PIV では一部分がハレーションにより解析できていないが、両者はほぼ同じ傾向と言える。シュート飛び出し直後の位置における粒子の平均速度は、PIV : 4.75 m/s, DEM : 4.69 m/s であり、非常に近いことがわかる。よって、実炉の条件においてもシミュレーションは良く再現できていると言える。

図 18 に測定棒を炉内に突き出し、落下軌跡測定を行った結果を示す。1/3 スケール試験と同様に、測定棒表面に圧力測定フィルムを貼り付け、衝突位置を把握した。図は測定棒先端からの距離に対して、衝撃力の分布を示している。図には、シミュレーションで求められた、測定棒位置を通過する粒子重量分布も併せて記載している。実炉測定結果の方が分布幅はやや広がっているが、両者の分布位置は非常に良く対応していることが確認できる。実測の方が幅が広い原因は、シュート内面のライナー摩耗等、流れを乱す要因が多いため、粒子がやや分散した状態で流動しているためと考えられる。図 19 には、シミュレーションで得られた落下軌跡に対して、実測の衝突位置を重ねた図を示すが、両者は非常に良く一致していることが改めてわかる。

以上のことより、本研究で開発してきた DEM による落下軌跡のシミュレーションは非常に精度の高いものである

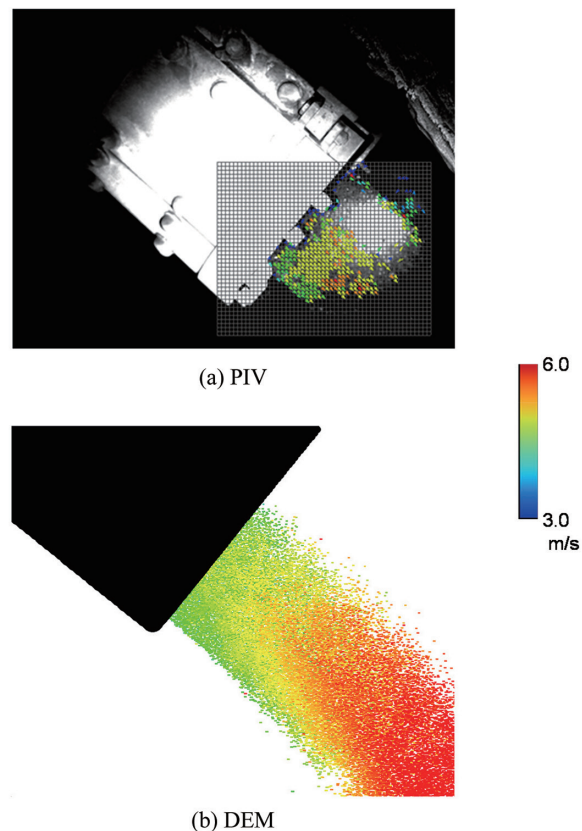
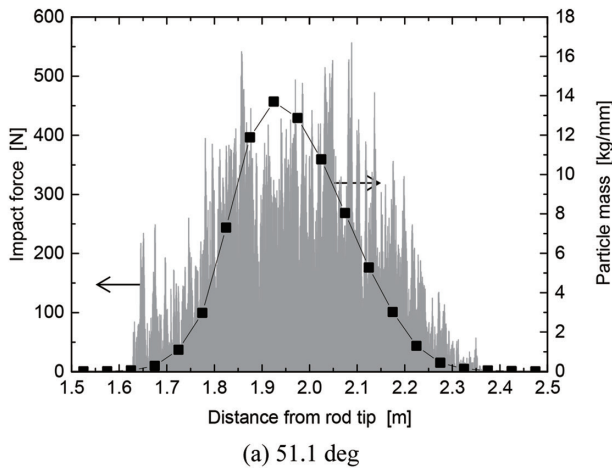
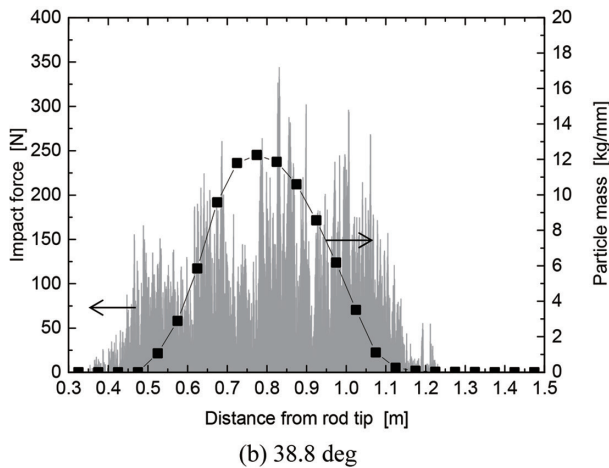


図 17 名古屋 3 高炉での旋回シュートからの飛び出し速度分布²⁷⁾

Particle velocity field around the rotating chute in Nagoya No.3 BF²⁷⁾



(a) 51.1 deg



(b) 38.8 deg

図 18 名古屋 3 高炉での衝突痕分布と DEM での粒子通過量分布の比較²⁷⁾
Comparison of the impact stress distribution and the particle mass distribution in Nagoya No.3 BF²⁷⁾

と言え、バルレス高炉操業における装入位置の推定や傾動角の設計に対して、十分に活用できるレベルにあると言える。

6. 結 言

本報告では、高炉装入物分布推定モデルを開発するため、DEM を用いた粒子シミュレーションで、バルレス高炉における巡回シュートからの装入挙動のシミュレーションを行った結果について紹介した。シミュレーションの精度を確認するため、実炉の 1/3 スケールに縮尺した装入物分布試験装置を用い、巡回シュートからの飛び出し挙動を高速カメラで撮影し、粒子速度を計測した。また、巡回シュートからの軌跡を比較するため、測定棒を炉内に突き出し、測定棒への衝突位置を把握し、DEM の結果と比較したところ、速度も落下軌跡も非常に良く一致することが確認できた。さらに、名古屋 3 高炉において、同様に飛び出し挙動や落下軌跡を測定し、シミュレーションと比較したが、良好に対応することが示された。以上のことより、本研究で開発した DEM による落下軌跡推定シミュレーションは、

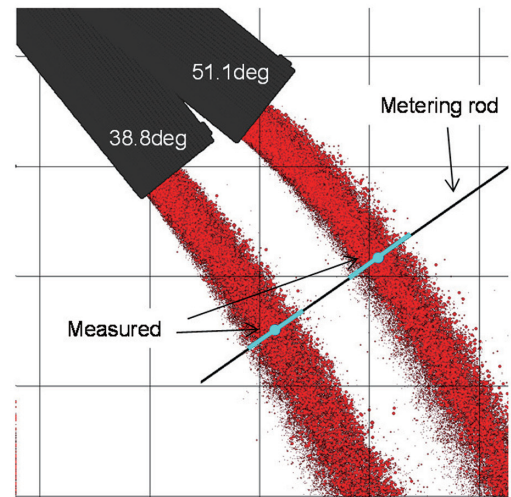


図 19 名古屋 3 高炉での DEM の落下軌跡と衝突痕検知位置の比較²⁷⁾
Comparison of particle trajectory for Nagoya No.3 BF²⁷⁾

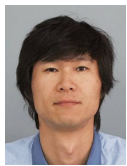
非常に精度の高いものであると言え、バルレス高炉の操業設計に十分活用できるものであると言える。

参考文献

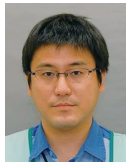
- 1) Kajiwara, Y. et al.: Trans. ISIJ. 24, 799 (1984)
- 2) 奥野嘉雄 ほか：鉄と鋼. 73, 91 (1987)
- 3) 服部道紀 ほか：鉄と鋼. 78, 1345 (1992)
- 4) Radhakrishnan, V.R., Ram, K. M.: J. Process Contr. 11, 565 (2001)
- 5) Nag, S. et al.: Ironmak. Steelmak. 36, 509 (2009)
- 6) Mitra, T., Saxén, H.: Metall. Mater. Trans. B. 45, 2382 (2014)
- 7) Fu, D. et al.: Appl. Math. Model. 39, 7554 (2015)
- 8) Cundall, P.A., Strack, O.D.L.: Geotechnique. 29, 47 (1979)
- 9) Bertrand, F. et al.: Chem. Eng. Sci. 60, 2517 (2005)
- 10) Moreno, R. et al.: Powder Technol. 130, 132 (2003)
- 11) Rajamani, R. K. et al.: Powder Technol. 109, 105 (2000)
- 12) Cleary, P. W., Sawley, M. L.: Appl. Math. Model. 26, 89 (2002)
- 13) Ketterhagen, W. R. et al.: Powder Technol. 179, 126 (2008)
- 14) Taberlet, N. et al.: Phys. Rev. E. 73, 050301 (2006)
- 15) Kaneko, Y. et al.: Chem. Eng. Sci. 54, 5809 (1999)
- 16) Kawaguchi, T. et al.: Powder Technol. 109, 3 (2000)
- 17) Severens, I.E.M. et al.: Granul. Matter. 8, 137 (2006)
- 18) Yuu, S. et al.: ISIJ Int. 45, 1406 (2005)
- 19) Zhou, Z. et al.: ISIJ Int. 45, 1828 (2005)
- 20) 野内泰平 ほか：鉄と鋼. 92, 955 (2006)
- 21) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 47, 1745 (2007)
- 22) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 49, 479 (2009)
- 23) Natsui, S. et al.: ISIJ Int. 51, 41 (2011)
- 24) Yu, Y., Saxén, H.: ISIJ Int. 52, 788 (2012)
- 25) Mio, H. et al.: Miner. Eng. 33, 27 (2012)
- 26) Kim, S. Y., Sasaki, Y.: ISIJ Int. 53, 2028 (2013)
- 27) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 57, 272 (2017)

28) Mio, H. et al.: Powder Technol. 344, 797 (2019)

29) Mio, H. et al.: ISIJ Int. 48, 1696 (2008)



三尾 浩 Hiroshi MIO
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



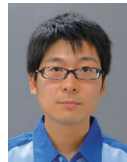
門脇正具 Masatomo KADOWAKI
製鉄技術部 主幹



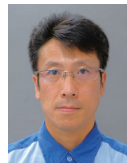
松崎真六 Shinroku MATSUZAKI
プロセス研究所 製鉄研究部
主幹研究員 博士(工学)



中内利樹 Toshiki NAKAUCHI
室蘭製鉄所 製鉄部 製鉄技術室 主査



河口祐輝 Yuuki KAWAGUCHI
名古屋製鉄所 製鉄部 製鉄技術室 主幹



江中 崇 Takashi ENAKA
名古屋製鉄所 製鉄部 高炉工場長