

CO₂ 排出ミニマムを目指した実高炉内の多相（固気粉） 流れの大規模シミュレーション

プロジェクト責任者

松崎 眞六 新日本製鐵株式会社

著者

湯 晋一 大岳 R & D コンサルタント事務所

梅景 俊彦 九州工業大学 工学部 機械知能工学科

松崎 眞六^{*1}、門脇 正具^{*1}、国友 和也^{*1}、内藤 誠章^{*1}、廣川 雄一^{*2}、上原 均^{*2}

*1 新日本製鐵株式会社 技術開発本部 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部

*2 独立行政法人海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 19 年 7 月 10 日～平成 20 年 3 月 31 日

アブストラクト

わが国の鉄鋼業からの CO₂ 発生量は日本における排出量の約 15% にもおよび、その削減は地球の温暖化防止にとって重要である。本プロジェクトでは、粒子の離散的な運動を記述する DEM（離散要素法、Distinct Element Method）とガス流れを記述する Navier-Stokes 式を連成して実高炉内現象を計算するシミュレーションモデルを開発し、CO₂ 増加の最大の原因である不安定現象を再現し、その防止法を提示する。最終的には四相の運動、反応、伝熱、物質移動を全て連成して計算し、それらの運動等を明らかにして、それに基づき CO₂ 削減のための高効率で安定な操業技術を明らかにする。本年度は DEM の運動方程式および Navier-Stokes 式を連成して用い、実高炉（新日鐵大分 No.1 高炉）の円周方向は 1/4（90 度分）、高さ方向は全てを含む領域においてコークスと鉄鉱石を層状に配置して、沈降開始とともに 10 本の羽口（熱風の吹込口）から速度約 250m/s で気流を吹き込み、初期のレースウェイ（羽口付近の旋回流を伴う空洞）が形成されるまでのシミュレーションをおこなった。本計算ではコークスと鉄鉱石の平均径はそれぞれ 57mm および 45mm であるが、それらは実高炉で用いられている 35mm および 25mm に比べてかなり大きいためレースウェイが形成されにくい。羽口前方のレースウェイが形成されると考えられる領域を含む直径約 1m の球状領域における燃焼コークスの抜き取り速度（単位時間に抜き取るコークスの個数）を大きくするとレースウェイが形成されやすくなることを見出し、抜き取り速度が実高炉内の粒子（コークスおよび鉄鉱石）と気流の流れにあたる影響をシミュレーションした。利用ノード数は 16 ノード（128AP）、実行時間は約 13000 ノード時間で、粒子数は 550 ～ 700 万個で気流の計算の格子点数は約 300 万であった。計算結果から抜き取り速度が大きくなると、安定なレースウェイを短時間で形成することがわかった。これは良好な燃焼がおこっていると、安定なレースウェイが形成されることを示している。逆にいえば、安定なレースウェイが形成されれば良好な燃焼がおこっているであろう。1400 度近傍で鉄鉱石は溶けてしまうが、それにより

高空隙率の領域が形成され、今後計算が進むと（平成 20 年度で進行中）、それがコークスと気流の不安定流れを誘引する可能性がある。また羽口間の流れの不均質な相互影響等、今後不安定現象の原因となるだろう結果もえられている。

キーワード： 実高炉、DEM、Navier Stokes 式、粒子、不安定流れ、CO₂ 削減

1. はじめに

CO₂ を削減するためにはより高効率で変動のない安定な高炉操業技術の開発が必要であるが、そのためには第一に実高炉全体の気流、コークス、鉄鉱石、鉄鉱石が溶けて形成する融着帯の運動を明らかにする必要がある。

高炉内部は千数百度という高温でかつ気流と高濃度の粒状体および鉄鉱石の熔融帯が複雑に運動し、堆積しているため、内部状態の正確な測定は現在でも不可能に近い。したがって、高炉の内部の状態は未知の部分が多く、それらを明らかにすれば高効率操業を阻害する不安定現象の原因を突きとめることが出来、その防止策を考えることにより格段に高い効率でかつ安定に操業できる技術の開発が可能となると考えられる。また京都議定書には大気中の CO₂ の増加による地球温暖化現象が進行し、地球環境の危機的状態の到来が示されており、その京都議定書における CO₂ 削減の約束期間が来年からスタートする。わが国の鉄鋼業における CO₂ 排出量は日本における排出量の約 15% にも及ぶ。高炉の高効率で安定な操業技術の開発は銑鉄の製造という観点だけでなく、地球の温暖化防止にも重要な役割を担っている。

高炉の内部の状態を明らかにするためには、高炉内部での測定、実験が困難であるため数値シミュレーションが最適である。しかし高炉は高さが約 30m と大規模大型装置であるため、通常のコンピュータでは実高炉の数百分の 1 の領域しか計算できない。そこで世界第一級の容量と演算スピードをもつ地球シミュレータを用いて実高炉内運動の計算を検討し、内部の状態を明らかにして、不安定現象の原因を突きとめ、上述の高効率で安定な操業方法を明らかにし、排出 CO₂ の削減に大きく寄与することを達成したい。

本年度は DEM の運動方程式および Navier-Stokes 式を連成して使い、実高炉（新日鐵大分 No.1 高炉）の円周方向は 1/4（90 度分）、高さ方向は全てを含む領域においてコークスと鉄鉱石を層状に配置して、沈降開始とともに 10 本の羽口から速度約 250m/s で気流を吹き込み、初期のレースウェイが形成されるまでのシミュレーションをおこなった。利用ノード数は 16 ノード、実行時間は約 13000 ノード時間で、気流計算の接点数は約 300 万、粒子数は 550 ～ 700 万個であった。

2. 実高炉内のコークス、鉄鉱石および気流の計算方法

コークス粒子の運動の基礎式は、直交座標系における並進および回転に関する Lagrangian 型運動方程式で、それぞれ次式で表される。

$$m_p \frac{d(U_{pi})}{dT} = \sum_j (F_j + D_j)_i + F_{Di} + F_{Li} + F_{gi} \quad (1)$$

$$I_p \frac{d(\Omega_{pi})}{dT} = \sum_j (M_j + M_{Dj})_i + M_{Fi} \quad (2)$$

Eqs. (1), (2) の右辺第1項は、それぞれ着目粒子と直接接触する全粒子から作用する接触力および接触力モーメントの総和で、DEM^{1,2)}を用いて計算した。Eq. (1) の F_{Di} , F_{Li} はそれぞれ粒子に作用する抗力と揚力で、その反作用力が気流に作用する St および St_L で下記の気流のところで示している Eqs. (7) - (9) で求まる。これらの項で粒子の運動と気流の運動がリンクされ、それらが連成された運動が求まる。Eq. (1) の F_{gi} は粒子に作用する重力、Eq. (2) の M_{Fi} は粒子が流体から受ける摩擦トルクである。なお本計算では流体による摩擦トルク M_{Fi} を Takagi³⁾ の式に基づいて計算した。

気流の運動の基礎式は、空隙率及び粒子との相互作用を考慮した無次元化された円柱座標系の Navier-Stokes 式と連続の式で、それぞれ次式で表される。

(r 方向)

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial u_r}{\partial t} + \varepsilon u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} + \varepsilon u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \varepsilon \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \varepsilon \frac{u_\theta^2}{r} \\ & = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \varepsilon \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right] - St_r - St_{Lr} \end{aligned} \quad (3)$$

(θ 方向)

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + \varepsilon u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \varepsilon u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \varepsilon \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \varepsilon \frac{u_r u_\theta}{r} \\ & = -\varepsilon \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{Re} \varepsilon \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] - St_\theta - St_{L\theta} \end{aligned}$$

(z 方向)

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial u_z}{\partial t} + \varepsilon u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + \varepsilon u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \varepsilon \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \\ & = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \varepsilon \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} \right] - St_z - St_{Lz} \end{aligned} \quad (4)$$

(連続の式)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \varepsilon \frac{u_r}{r} + \varepsilon \frac{\partial u_z}{\partial z} + \varepsilon \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \varepsilon \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (5)$$

式中の St および St_L はそれぞれ気流・粒子間で作用する抗力と揚力で気流と粒子の相互干渉項を表わす。前述したようにこれらが Eq. (1) の F_D と F_L に相当し、気流と粒子が連成された運動が求まる。

気流・粒子間で作用する抗力による相互干渉項には、粒子周りレイノルズ数が 1000 以下の場合には Shiller and Naumann の実験式⁴⁾ に基づく次式を用い、

$$St = \frac{3\pi\mu D_p ND(1 + 0.15Re_p^{0.687})}{U_0\rho} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \xi(\varepsilon) \quad (0 \leq Re_p \leq 1000) \quad (7)$$

粒子周りレイノルズ数が 1000 より大きい場合には Newton 域の抗力係数に基づく次式を用いた。

$$St = 0.055\pi D_p^2 ND(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)^2 \xi(\varepsilon) \quad (1000 < Re_p) \quad (8)$$

気流・粒子間で作用する揚力による相互干渉項には揚力係数に基づく次式を用いた。

$$St_L = \frac{\pi}{16} \left(\frac{C_L}{\Omega^*} \right) D_p^3 N(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \times \left(\frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{u} - \boldsymbol{\omega}_p \right) \xi_L(\varepsilon) \quad (9)$$

本計算では Kurose and Komoris⁵⁾ が数値計算によって求めた揚力係数のデータを著者らが数式化して用いた。

数値計算では Navier-Stokes 式のダイバージェンスを取って得られる圧力に関するポアソンの式を緩和法を用いて計算した。

DEM と Navier-Stokes 式の計算条件を表 1 に示す。

表 1 計算条件

計算領域 (炉体) 寸法	半径: $R_0 = 7,350$ mm (羽口部), $R_I = 8,379$ mm (ベリ一部) 円周方向: 90° , 高さ: $H = 27,840$ mm (炉頂まで)
計算時間ステップ	$\Delta t = 3.0 \times 10^{-5}$ s $\sim 2.5 \times 10^{-4}$ s
気流計算セル数 (内点)	57 (r 方向) \times 140 (θ 方向) \times 348 (z 方向)
気流計算セル幅 (有次元値)	$\Delta r = 147.0$ mm, $\Delta \theta = 1.122 \times 10^{-2}$ rad, $\Delta z = 80.0$ mm
羽口 (ノズル) 気流噴出速度	$U_0 = 250$ m/s ~ 340 m/s
計算粒子径	炉壁および羽口を構成する粒子: 50.0 mm (均一) コークス粒子: 平均径 57 mm (最小径 39.5 mm \sim 最大径 67.5 mm) 鉍石粒子: 平均径 45 mm (最小径 41.0 mm \sim 最大径 49.0 mm) コークス粒子と鉍石粒子は粒径分布と粒度偏析を考慮。
計算粒子数	炉壁および羽口を構成する固定粒子の数: 約 23.5 万個 重力沈降開始時の初期配置粒子数: コークス粒子: 約 257.8 万個 鉍石粒子: 約 207.8 万個 荷下り時に炉頂部から 1 チャージ毎に供給する粒子数: コークス粒子: 約 7.7 万個 鉍石粒子: 約 20.8 万個 最大計算粒子数: 合計 900 万個
計算粒子の見掛け密度	コークス粒子: 1050 kg/m ³ , 鉍石粒子: 3260 kg/m ³
計算粒子のその他の物性	縦弾性係数: $E = 1.0 \times 10^7$ N/m ² , ポアソン比: $\nu = 0.25$, 摩擦係数 $\mu = 0.45$

3. 実高炉内の計算

実高炉（新日鐵大分 No.1 高炉）の周方向 1/4（90 度分）の領域においてコークスと鉄鉱石を層状に配置して沈降させ、同時に羽口から速度 250 ～ 340m/s で気流を吹き込み、気流の運動を表わす Navier-Stokes 式と粒子の運動を表わす DEM 方程式を連成して計算した。以下に計算結果を示す。

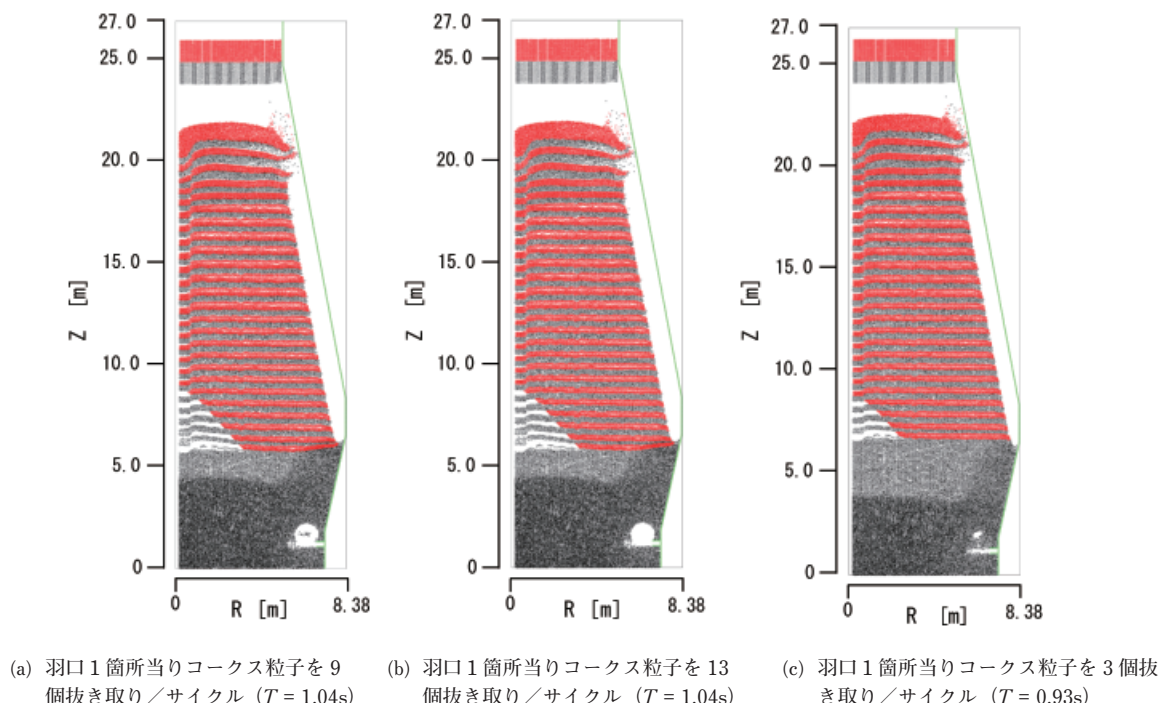


図 1 実高炉と同一寸法の高炉における $T = 1.04\text{s}$ または $T = 0.93\text{s}$ の粒子位置図
(右側鉛直断面図)

図 1 にコークスと鉄鉱石を交互に層状に堆積させ、沈降と同時に羽口から高速気流を吹き出した時の、1.04s 後の粒子位置図をしめす。底部近くの羽口から噴出した気流によって、コークスの抜き取り流量が大きい場合、すなわち速やかな燃焼がおこっている時、図 1 の (a) と (b)、顕著なレースウェイ（炉底近くに設置された羽口の前方上方に形成される球状の空間）が形成されているのがわかる。一方、抜き取り流量が大きい場合、図 1 の (c)、顕著なレースウェイは形成されていない。図 1 において、粒子の沈降が終了して、充填層が形成されているのは、底部近くの黒く見える領域で、それより上部ではまだ自由沈降が支配的である。あと 1.5s ほど経過すれば高炉の全領域に充填層が形成される見込みである。抜き取り流量が大きくなると、レースウェイに向かうコークスの下向き速度が大きくなるので、充填層の形成が早い。高炉の中心領域で、中ほどから少し下部に層状の粒子の存在しない領域が何本か存在するが、これは 1400 度ラインを越えて下降した鉄鉱石が溶けた層で、もう少し時間が経過すると、この領域にコークスが入り込み、不均質な領域を形成すると考えられる。1400 度ラインの斜め上には 1200 度ラインがあり、その間に存在する鉄鉱石は溶けて付着力を有するので、充填が進めば、それにより融着帯を形成し不均質な流れを誘起する可能性がある。高炉の外周壁近くの空間は自由沈降だと埋まらないが、充填が進むにしたがい埋まっていく。炉頂部の粒子の飛散は上から層状に粒子を落下供給したときに生ずる粒子の飛散である。

図 2、図 3 にレースウェイ近傍の R-Z（鉛直）断面におけるコークス粒子の瞬時速度ベクトル図を

示す。コークスの抜き取り流量が大きい場合（図2）、コークスは上部よりレースウェイに向かって流れ、レースウェイで回転するが、コークスの抜き取り流量が小さい場合（図3）、コークスが炉の底部中心に向かう流れも起っている。このように顕著なレースウェイが形成されないと大規模な不均質な流れが起る可能性がある。

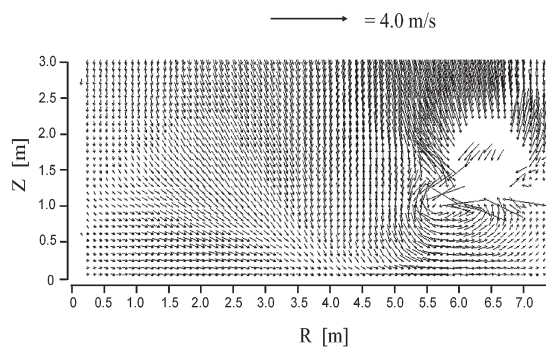


図2 実高炉と同一寸法の高炉における粒子速度ベクトル図（羽口近傍の鉛直断面図、9個抜き取り／サイクル、 $T=1.04s$ ）

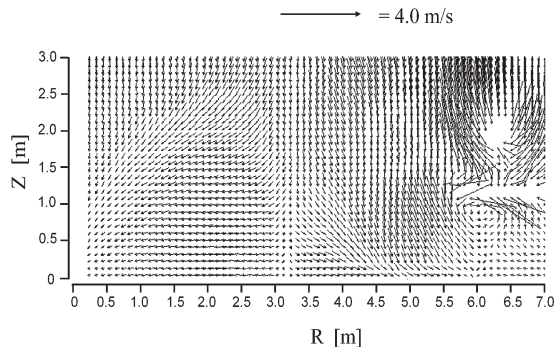


図3 実高炉と同一寸法の高炉における粒子速度ベクトル図（羽口近傍の鉛直断面図、3個抜き取り／サイクル、 $T=0.93s$ ）

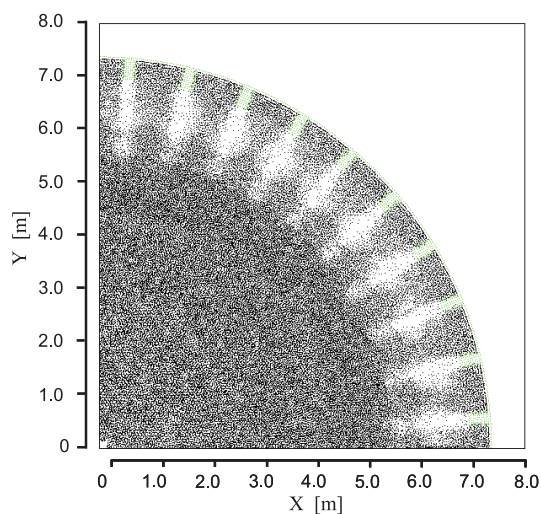


図4 実高炉と同一寸法の高炉における粒子位置図（羽口を含む水平断面図、9個抜き取り／サイクル、 $T=1.04s$ ）

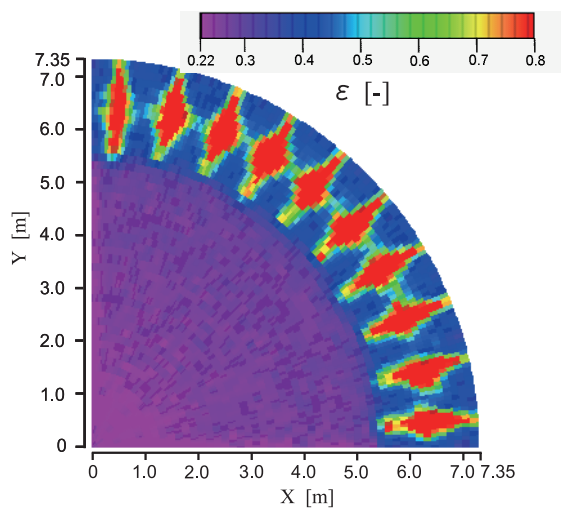


図5 実高炉と同一寸法の高炉における空隙率コンタ（羽口を含む水平断面図、9個抜き取り／サイクル、 $T=1.04s$ ）

図4に羽口中心を含む $R-\theta$ （水平）断面（炉頂から見下ろした断面）の瞬時の粒子位置図を示す。気流を吹き込んだ初期の段階なので、まだかく乱の少ないきれいな流れであるが、それでも個々の羽口間の干渉は同一ではなく、差異が出始めている。時間の経過とともに羽口間の不均質な干渉が顕在化するものと考えられる。図5に図4と同一断面、同一時刻の空隙率分布のカラーコンタを示す。羽口間の空隙率分布が必ずしも同一でなく、不均質になっていることがカラーコンタからわかる。また高炉の中心領域に空隙率の低い、すなわち粒子が密に詰まった領域が形成されてきている。コークス

の燃焼残渣等からなる微粉とともにこの領域にデッドマンを形成していくものと考えられる。

4. 今後の方針および計画

平成 18 年度で実高炉の円周方向 1/4 の領域の粒子（高炉内に層状に堆積しているコークスと鉄鉱石を DEM で計算）と気流の連成計算プログラムの地球シミュレータへの最適化はほぼ達成された。本年度（平成 19 年度）は 10 本の羽口から高速気流（250～340m/s）を噴出させ、沈降してくるコークス粒子と鉄鉱石との連成計算を行った。その結果、レースウェイが形成される初期の段階における粒子と気流の流れを提示することができた。今後、この計算を進めると沈降による充填が炉頂まで到達し、そこを気流が流れて相互干渉するので不均質な流れが発生し、鉄鉱石が溶けた空隙や今後形成される融着帯との相互影響によって不安定な流れが発生するものと考えられる。これを用いて実高炉内の不安定なガス流れ、固体粒子の運動、形成融着体の役割を明らかにする。これらが原因して起こると考えられる高炉内部の不安定現象、それが高じて引き起こされる異常現象のシミュレーションをおこない、発生原因を明らかにする。計算結果に基づき、高炉の最適な安定で高効率操業の手法を明らかにする。またコークスの燃焼等によって発生する粉がコークスや気流にあたる影響を、粉の運動等を Smoothed Particle Method (SPH) によって表現し、シミュレーションする。これらの結果を踏まえて、将来は実高炉内の反応と伝熱をモデル化し、反応と伝熱を考慮した全ての固気液粉を SPH 法によって連成し計算することを予定している。得られた結果は現在最も現実の高炉に近いデータと考えられるが、それらを基にして高効率操業による CO₂ の低減のシーズを提言する。このようにして得られた成果は新日鐵だけでなく、世界の全ての高炉に適用できる技術であり、日本だけでも 2～3% の CO₂ 発生量の削減が期待できる。また上記シミュレーション法は広く混相流に適用でき、他分野、他技術への展開の可能性が高い。

謝 辞

本研究に関して、独立行政法人海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部の平野 哲 部長、北脇 重宗 調査役、新宮 哲 産業利用推進グループ グループリーダーから貴重なご指導、ご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) P.A.Cundall and O.D.L.Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies", Geotechnique, Vol.29, pp.47-65, 1979.
- 2) S. Yuu, T.Umekage and Y.Johnno, "Numerical simulation of air and particle motions in bubbling fluidized bed", Powder Technol., Vol.110, pp.158-168, 2000.
- 3) H.Takagi, "Viscous flow induced by rotation of a sphere", J.Phys.Soc.Jpn., Vol.42, 319-325, 1977.
- 4) L.Schiller and A.Naumann, "Ber die Grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung", Z.Ver.Dtsch.Ing., Vol.77, 318-321, 1933.
- 5) R. Kurose and S. Komori, "Drag and lift forces on a rotating sphere in a linear shear flow", J.Fluid Mech., Vol.384, 183-206, 1999.

記号表

C_L	: 揚力係数 [-]
D	: 羽口部分の高炉半径 [m]
D_j	: 接触点 j での減衰力 [N]
D_p	: 粒子径 [mm]
F_D	: 粒子に作用する気流からの抗力 [N]
F_g	: 粒子に作用する重力 [N]
F_j	: 接触点 j での接触力 [N]
F_L	: 粒子に作用する気流からの揚力 [N]
I_p	: 粒子の慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
M_{D_j}	: 接触点 j での減衰力によるモーメント [$\text{N} \cdot \text{m}$]
M_{F_i}	: 粒子 i に作用する気流からの摩擦トルク [$\text{N} \cdot \text{m}$]
M_j	: 接触点 j での接触力によるモーメント [$\text{N} \cdot \text{m}$]
m_p	: 粒子質量 [kg]
N	: 単位体積あたりの粒子数 [m^{-3}]
p	: 無次元静圧 [-]
Re	: レイノルズ数 [-]
Re_p	: 粒子レイノルズ数 [-]
St	: 気流からの抗力による無次元相互干渉項 [-]
St_L	: 気流からの揚力による無次元相互干渉項 [-]
T	: 時間 [s]
t	: 無次元時間 [-]
U_p	: 粒子速度 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
U_0	: 羽口気流噴出流速 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
\mathbf{u}	: 無次元気流速度ベクトル [-]
\mathbf{u}_p	: 無次元粒子速度ベクトル [-]
u_r, u_θ, u_z	: 無次元流速 [-]
ε	: 空隙率 [-]
μ	: 気流の粘性係数 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
$\xi(\varepsilon), \xi_L(\varepsilon)$: 粒子集団系における抗力、揚力の補正関数 [-]
ρ	: 気流密度 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
Ω_p	: 粒子の角速度 [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]
Ω^*	: 粒子の表面回転速度／並進速度の比 [-]
$\boldsymbol{\omega}_p$: 粒子の無次元回転角速度ベクトル [-] (添字)
i, j	: 粒子番号
p	: 粒子
r, θ, z	: 円柱座標系の各方向成分