

大型高炉の変動要因解析と物流安定化技術の検討

研究代表者 東北大学多元物質科学研究所 教授 有山達郎
共同研究者 東北大学多元物質科学研究所 准教授 植田 滋
共同研究者 東北大学工学研究科 博士課程後期学生 夏井俊悟

1. 緒言

近年、我が国の製鉄所では内容積 5000m³ を超える大型高炉が半数近くを占め、生産の主流となっている。これは生産量確保のためには有利であるが、特定の高炉に生産が集中するためにその操業安定が必須条件である。高炉においては炉下部に起因する炉冷事故が生じることがあり、大型高炉の場合、生産への影響は極めて大きい。よって、その原因解明に基づくトラブルの回避は極めて重要である。しかしながら、長年の大型高炉の操業経験を持つ我が国においても、理論的アプローチの面から、その原因について答えを得るに至っていない。提案者らは高炉の固体とガス流れなどの物流をモデル的に精緻に再現できる離散要素法 (Discrete Element Method、以下 DEM とする) による高炉内のシミュレーションモデルの研究開発を続けている¹⁾²⁾。特に DEM と連続体モデルのハイブリッドモデルからなる高炉内の固体運動、ガス流れを精緻にコンピューター上に再現できるモデルの開発を進めており、その応用の段階に至っている。本研究はそれらのモデルを用いて、大型高炉特有の物流解析を行い、その変動をもたらす要因解析と安定化達成手段の提案を行うことを目的にしている。

2. 離散要素法の高炉適用

2.1. 離散要素法の特徴と構成

DEM とは個々の粒子の運動を追跡するシミュレーション手法である。粒子に働く外力として、重力と、その粒子に直接触れる他の粒子、および壁の影響を考慮する。ある粒子に働く外力がわかれば、ニュートンの運動の第 2 法則に基づく運動方程式を解くことで加速度が求められる。これを積分することにより粒子の変位が求まり、その運動軌跡を表現することが可能となる。従来の高炉モデルでは固体流れについて、疑似流体近似などの手法を用いており³⁾、壁との摩擦などの相互作用、特に高炉特有の炉芯の表現については課題が多い。またスリップなど不連続的な現象に対しては対応力を欠き、不安定現象の解析は本質的に不可能である。DEM は個々の粒子の力学的相互作用から全体系を表現するために、容器形状などの境界条件の設定、停滞域と流動域の識別などが容易である。また、非定常的な計算手法であるために、粒子の時間的変動についても追従性が高く、スリップなど非定常的な現象の再現も可能である。筆者等は、この優位性に着目し、DEM の高炉への適用研究を進めてきた。

2.2. DEM の基礎方程式

Fig.1 に DEM の要素モデルを示す。また同図に、粒子間に働く接触力の構成を示す。接触点の法線、せん断方向にはそれぞれ 2 粒子の相対変位によって弾性変形し反力を発生するバネと相対速度に比例した効力を発生する粘性ダッシュポットが並列に配置されたモデル(Voigt モデル)を仮定する。また、摩擦力による相互作用を考慮し、せん断方向には摩擦スライダを導入した。このとき、2 粒子間に働く力による接触粒子の並進粒子の変位 u_i は次式で表される。

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

また、回転変位 ϕ_i は次式で表される。

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

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, η はばね定数とダッシュポットの粘性係数である。一般の粉体では、1 個の粒子の周りに多数の粒子が接触しているので、それら個々の接触点に対して(1)式、(2)式が成立する。よって、着目粒子の運動を知るためには、接触点数と同じ数の方程式を連立して解かなければならない。この困難を避けるために、実際の計算では、時間増分で差分近似して計算する。つまり、新しい時刻 T における加速度は時刻 ΔT だけ前の変位と加速度から得られる。このように DEM では、計算開始状態からある時間進んだ条件を厳密に解く陽解法を採用し、収束計算を必要としない。したがって、この計算を時間刻み ΔT で繰り返すことによって粒子の運動軌跡が計算できる。粒子間接触力は、Voigt モデルにより決定されるが、ここで用いられる各係数は粒子の物性値に基づいて決定した。

ある時刻 T における法線方向 n の接触力 F_n 及びせん断方向 s の接触力 F_s は、ばねによる弾性力 e とダッシュポットによる粘性抵抗 d の和として、それぞれ(3)式、(4)式で表される。

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

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

(3)式中の $e_{n,T}, d_{n,T}$ は(5)式で表される。

$$e_{n,T} = e_{n,T+\Delta T} + K_n \Delta u_n, \quad d_{n,T} = \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t} \quad (5)$$

$$\text{ここで、} K_n = 2D_b \left(\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \right)^{-1}, \quad \eta_n = 2\sqrt{mK_n} \quad (6)$$

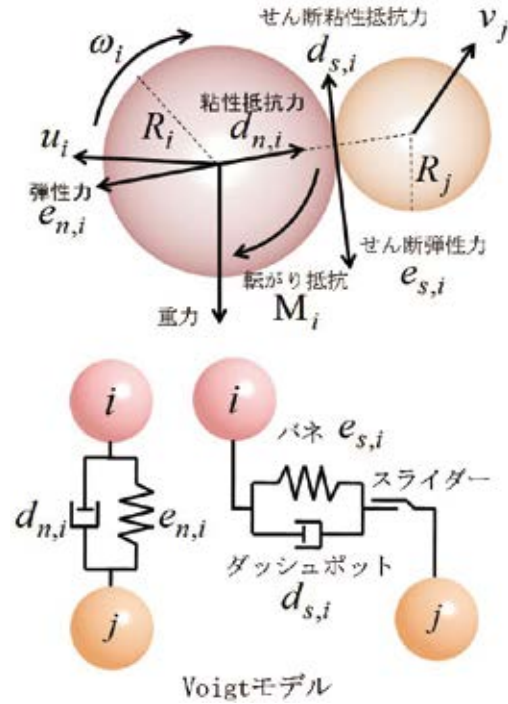


Fig.1. DEM の要素モデル

また、(4)式中の $e_{s,T}, d_{s,T}$ は(7)式で表される。

$$e_{s,T} = e_{s,T+\Delta T} + K_s \Delta u_s, \quad d_{s,T} = \eta_s \frac{\Delta u_s}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\text{ここで、} K_s = 8D_b \left\{ \frac{2(2-\nu_i)(1+\nu_i)}{E_i} + \frac{2(2-\nu_j)(1+\nu_j)}{E_j} \right\}^{-1}, \quad \eta_s = 2\sqrt{mK_s} \quad (8)$$

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。時間刻み ΔT は、差分解の収束性と安定性から以下のように決定される。

$$\Delta T = 2\sqrt{\frac{m}{K_n}} \quad (9)$$

粒子間せん断方向について、クーロンの摩擦法則から得られるせん断力より大きな力は作用しない。せん断応力が粒子間摩擦係数より大きい場合はすべりが生じるため、摩擦係数を μ として(10)式が成り立つ。

$$F_s = \mu |F_{n,ij}| \quad (10)$$

DEM において個々の粒子は完全な真球として取り扱われる。しかし、実際の粉体は不定形状であり、真球に比べて転がりにくい、回転しにくいという性質をもつ。このような粒子形状を表現する為に、補正として回転方向のトルク T と逆向きの回転抵抗 M を導入する。

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (T_{ij} + M_r) \quad (11)$$

$$M_r = \frac{3}{8} \alpha \cdot D_b |F_n| \quad (12)$$

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を示す。 α は回転抵抗係数であり、粒子表面物性に基づいて決定される。

2.3. DEM の高炉適用

DEM は粒子運動に対し、精緻な解析が可能であるが、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、このことは構成パラメーターの決定が計算精度確保の上で極めて重要であることを意味する。著者らは、第 1 に DEM の精度に関わる粒子形状と回転抵抗の関係検討に関して、高炉特有の炉頂の装入物投入時の転がり、レースウェイ付近など局所的現象に加え、実用性も加味しながら、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

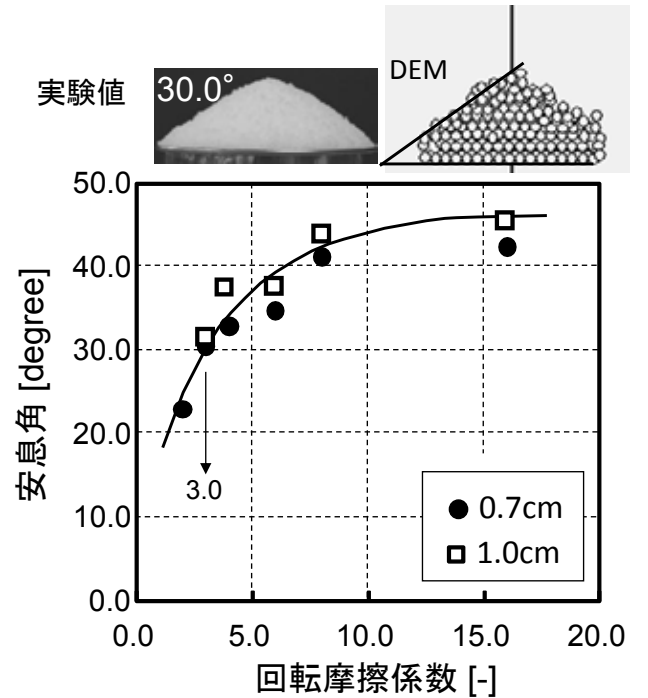


Fig.2. DEM による安息角と実測値との比較

的に、DEM 構成パラメーターの最適化、すなわち接触摩擦と回転抵抗などについて検討を行った⁴⁾。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。具体的には小型高炉冷間モデルを用いてポリエチレン粒子および小粒径コークスを降下させた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。特に、DEM では一般的に粒子を真球として扱うため、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、物理パラメーターを慎重に決定する必要がある。接触摩擦と回転抵抗の最適の組み合わせなど、冷間実験との対比によって形状表現を行った。最終的にこれらの知見をもとに高炉への適用検討を行った。

回転摩擦係数の決定に用いた冷間実験スケールでの安息角の実測と DEM 計算との関係を示す。DEM 計算において回転摩擦係数を変更すると、Fig.2 のように安息角は大きく変化する。実測値に合致するように回転摩擦係数を決定した。

また、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、現在の計算機的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。ここでは、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を用いた。

以上の検討による高炉を対象にした計算例を Fig.3 に示す⁵⁾。実際の高炉で用いられるコークスおよび鉱石粒子の物性を考慮し、高炉炉頂に鉱石とコークスを装入し実高炉の操業を模擬した計算を行った。粒子のレースウェイ位置での排出と炉頂からの装入を繰り返し、充填層が形成され、固体流れが定常的な変動になるまで固体流れの計算を行った。融着層形状は予め設定し、融着層下面で鉱石粒子を消去した。得られた堆積層形状と任意に選択した粒子の流線を Fig.3 (c) に示す。壁際の粒子は平面に接するように並ぶため、壁面の効果の関係から、平面壁から 0.4・2m の粒子を表示した。(a)の黒色および白色の粒子はそれぞれ、鉱石およびコークスを表す。炉口ではベル方式で粒子を装入しているため、中心に向かって傾斜した軸対象な層を形成している。炉口以下では、装入物は層構造および傾斜を保ったまま降下し、降下と共にその角度は緩くなるのが観察される。総合的に本モデル計算結果は実高炉の解体結果などと良く一致し、上記の手法によるシミュレーションは有効であると判断された。

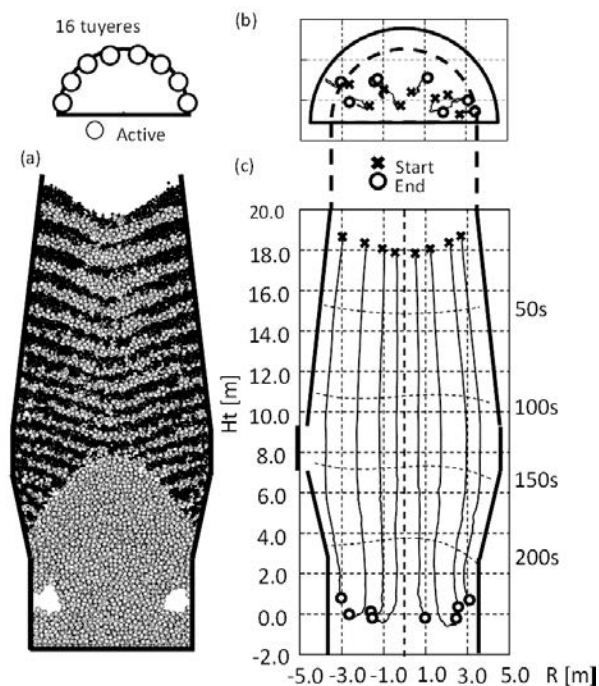


Fig.3. DEM 計算による高炉内装入物降下挙動のシミュレーション

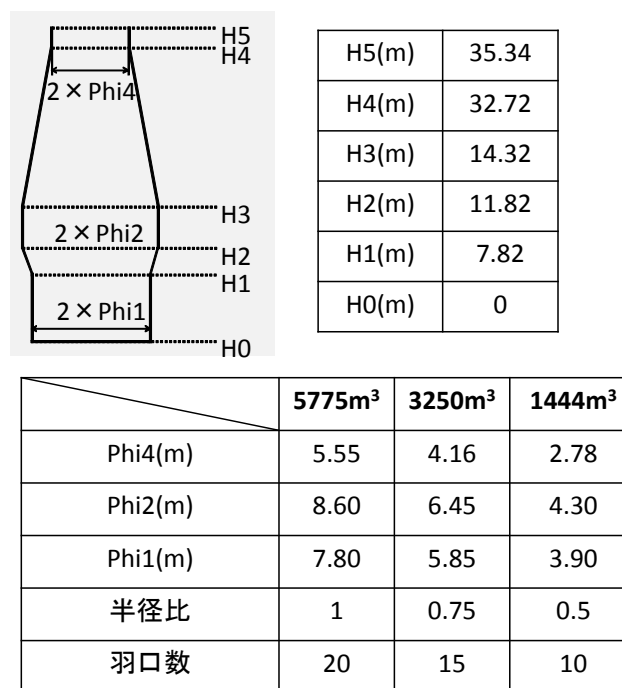


Fig.4. 高炉内容積変更時の高炉寸法

3. 高炉内容積の影響検討

3.1. 計算条件

本研究では高炉内容積の影響について注目している。実在する内容積 5775m³ の大型高炉をベースに、この高炉を半径方向に縮小した仮想的な二つの高炉プロフィールを考え、内容積の影響について検討した。計算条件を Fig.4 に示す。一般に内容積変化と共に高さも変化するが、ここでは高さの影響を排除するために高さは一定とし、径方向の寸法のみを変えた。羽口数も本図で示すように変更した。本計算では伝熱計算を行っていないため、融着帯は逆 V 字型に設定し、融着帯下部で鉱石層を消去した。融着帯高さは炉径の縮小と共に、小さくなる。DEM 計算で用いる種々のパラメーターを Table 1 に示す。

Table1 内容積変更時のパラメーター

内容積	5775m³	3250m³	1444m³
粒子数	3.5 × 10 ⁵	2.0 × 10 ⁵	1.5 × 10 ⁵ [-]
	coke		ore
ヤング率	5.0	5.0	[GPa]
ポアソン比	0.21	0.24	[-]
摩擦係数 (粒子間)	1.0	1.0	[-]
摩擦係数 (粒子-壁)	0.7	0.7	[-]
回転摩擦係数	2.5	1.25	[-]
DEM計算上の粒子直径	0.30	0.15	[m]
粒子密度	1100	4000	[kg/m³]
時間ステップ	1.0 × 10 ⁻⁴		[s]
計算時間(装入面-レースウェイ)	180		[s]

3.2. 計算結果

3.2.1. 縦断面の比較

DEMによる装入物分布の計算結果を Fig.5 に示す。装入条件は高炉の標準的なものに設定した。ベースとした大型の 5775m^3 の高炉では、鉱石層は中心にまで入っていない。炉径の縮小によって均一的な分布構造に変化している。この計算の場合、分布制御を施していないため、安息角で分布は決定される。Fig.6 に DEM 計算で求めた炉内の粒子降下速度の分布を示す。DEM では加速計算を行っているために、降下速度の絶対値は実高炉とは異なる。この結果では、シャフト部の降下速度の分布は大型高炉、中型、小型と大きな差はないが、炉下部に注目すると、大型高炉では動きが停滞している炉芯に相当する領域が最も上方に拡大している。小型高炉では、その領域は小さい。Fig.7 に粒子の流線（ストリームライン）とタイムラインを示す。上部では流線は壁の境界線に平行し、下部に移るに従って停滞域が現れてくる。その停滞域は大型高炉ほど成長している様子が明確に観察される。従来から報告されているように、大型高炉では炉芯が肥大化しやすいことが DEM 計算からもわかる。

Fig.8 に粒子間の法線応力の分布を示す。粒子にかかるトータルの力を接触面積で割って求めた値である。赤色粒子が高い応力を受けていることを示す。3 つのケースを比較すると、大型高炉では融着帯以下の炉下部に応力が集中しているのがわかる。また、高い応力を受ける粒子がネットワークを形成している様子も見られる。小型高炉では、このような応力の集中は観察されない。炉内径の縮小と共に、鉛直に近くなる壁が上方からの応力を受け、粒子には荷重はかかりにくい。応力の集中が大型高炉では炉下部に見られることから、この部位ではコークスなどの圧壊などが生じやすいと推測される。

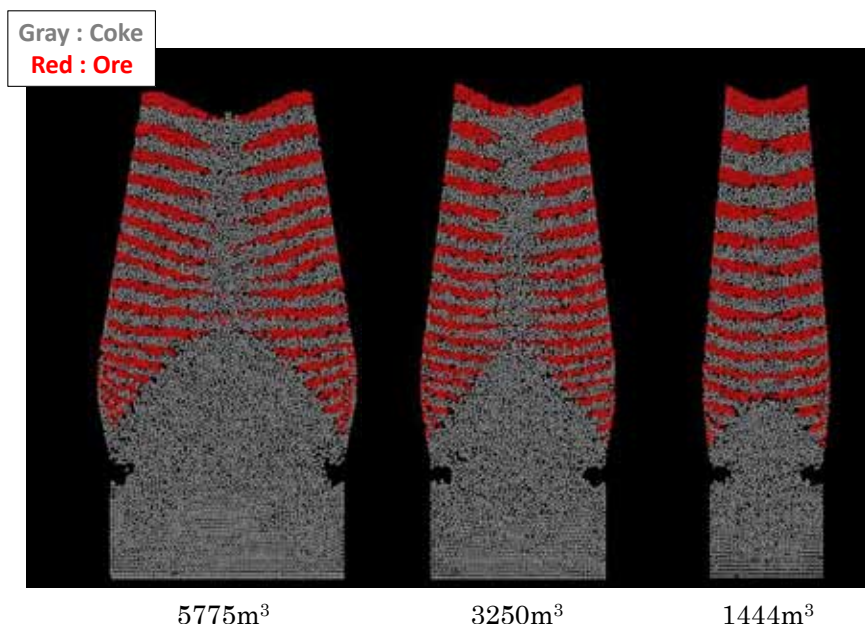


Fig.5. DEM による高炉内容積変更時の炉内装入物分布

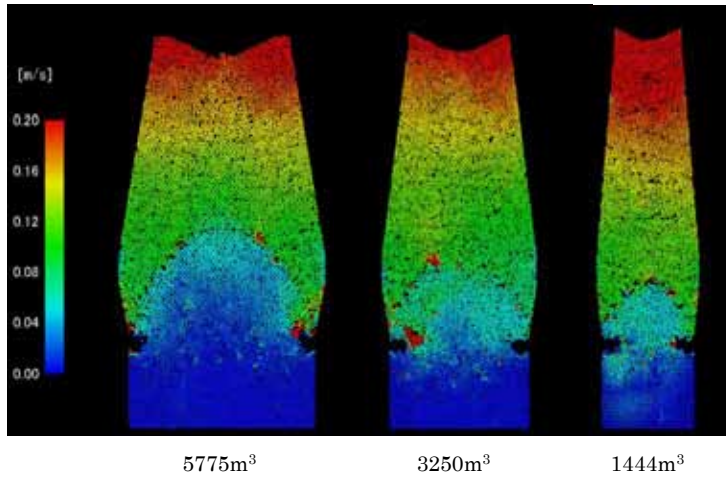


Fig.6. DEM による高炉内粒子降下速度の分布

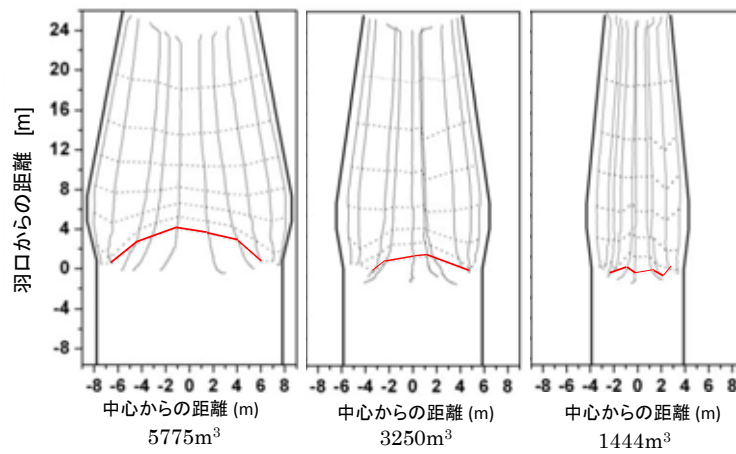


Fig.7. DEM による降下粒子の流線とタイムライン

$$\sigma_{n,i} = \frac{\sum_j (e_{n,i} + d_{n,i})}{4\pi R_i^2}$$

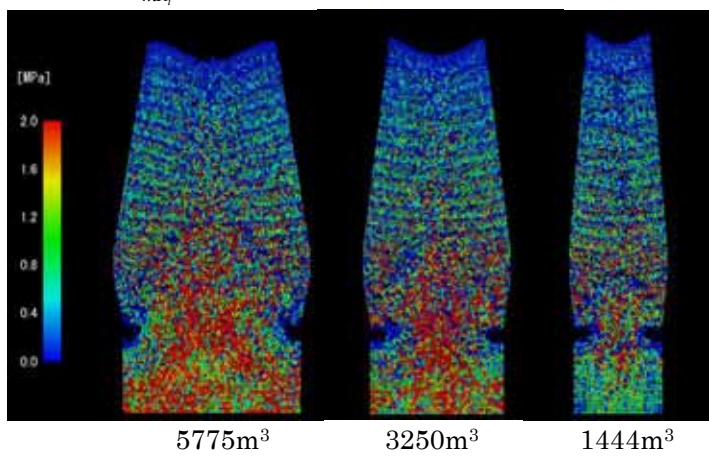


Fig.8. 高炉内粒子の法線応力分布

3.2.2. 水平断面方向の解析

Fig.9 に大型高炉と小型高炉のボッシュ部断面における粒子降下速度分布、応力分布、またスリップの指数とした SLI 分布を示す。 SLI は図中に示すようにせん断応力と法線応力に摩擦係数をかけた数値との比であり、スリップ、すなわち滑りの生じやすさを示す指数である。

Fig.9 の DEM 計算結果では、ボッシュ部では大型高炉の場合、壁側の粒子降下速度が中心付近に比べて大きい。中心には炉芯が形成されるために、その領域を避けるように周辺部の降下が大きくなる。一方、応力の高い粒子は周辺部に少なく、中心に集中している。小型高炉では両者共に、断面で平均化しているのがわかる。降下速度が高い領域では粒子間の拘束力が弱く、比較的にフリーに粒子が運動を行う。充填層内粒子の再配列が行われる前に絶えず移動が生じると考えられ、応力ネットワークは生じにくい。同図には、 SLI で定義したスリップ指数の分布も示す。大型高炉では周辺部にスリップ指数の高い粒子が多数、存在しているのがわかる。小型高炉では周辺部に多いが、その傾向は大型高炉ほど顕著ではない。

大型高炉では炉芯が形成されることによって流動域が狭められる。レースウェイに向かう粒子が下部にいくにしたがって、早く、緩い充填状態で移動し、粒子間の拘束力が小さいためにスリップなどの不安定現象を招きやすいと推測される。また、大きな炉心形成によって、中心部の粒子には上方からの荷重が集中し、圧潰などの現象も生じやすいと思われる。Fig.10 にはボッシュ部の水平方向の応力分布を示すが、上述の傾向が明瞭に把握できる。

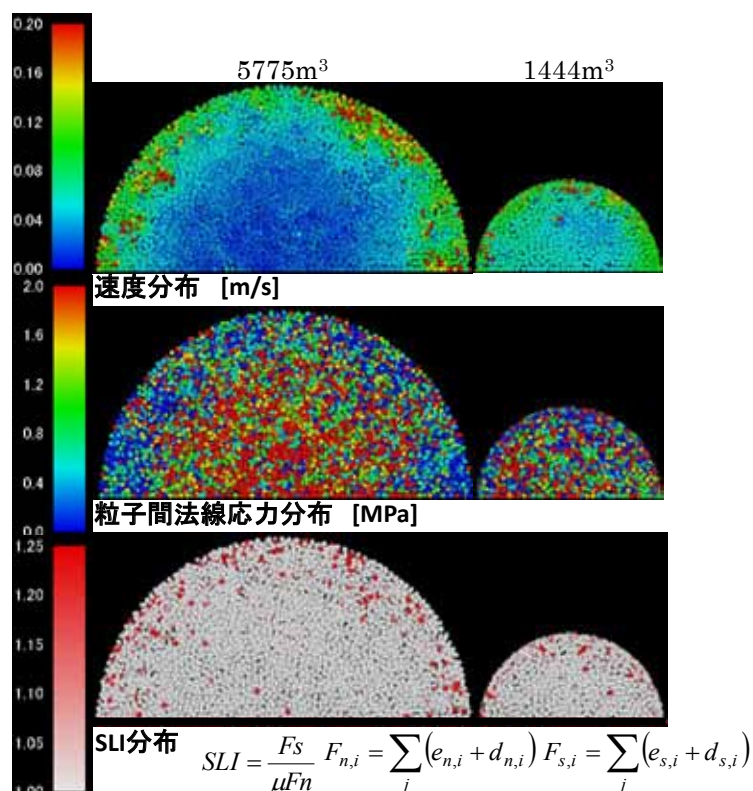
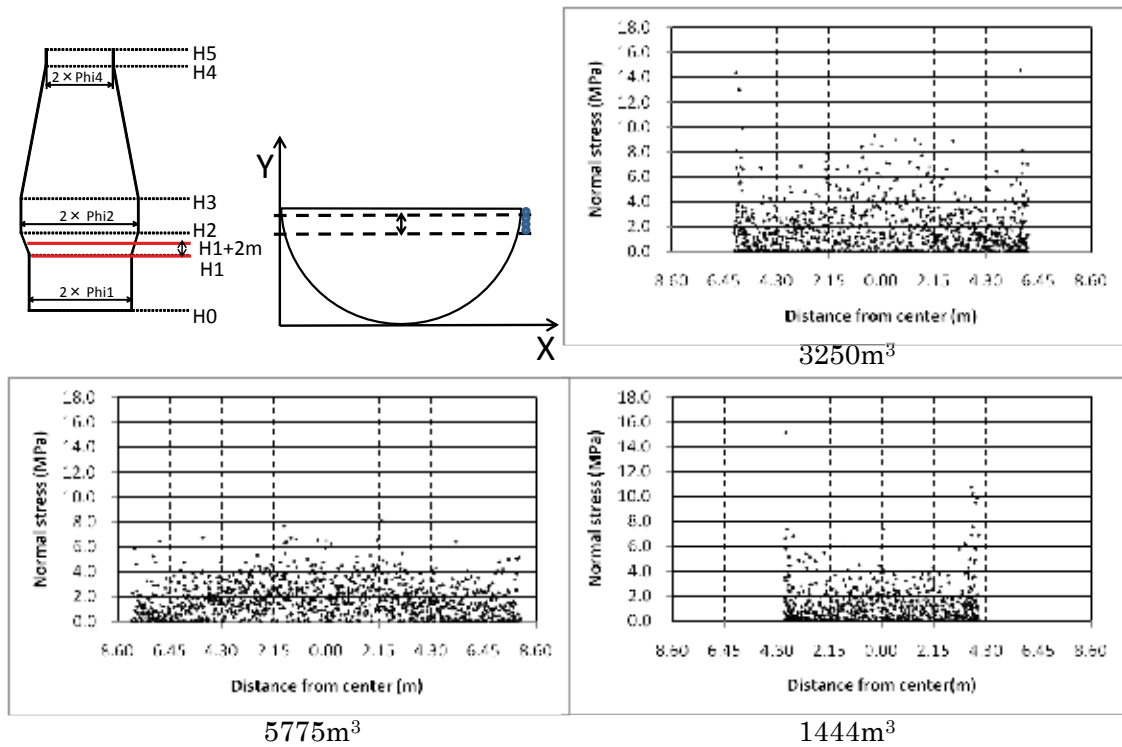


Fig.9 ボッシュ部における降下速度、応力、スリップ指数 SLI の分布



Fi.10. ボッシュ部における水平方向の粒子間応力分布

以上の高炉内容積変化に伴う粒子の降下挙動、応力の変化について Fig.11 のように図式化される。炉芯形成、ならびに粒子の消費位置を決定するレースウェイなどの因子が、流れの不安定性に大きく影響していると総合的に推察される。

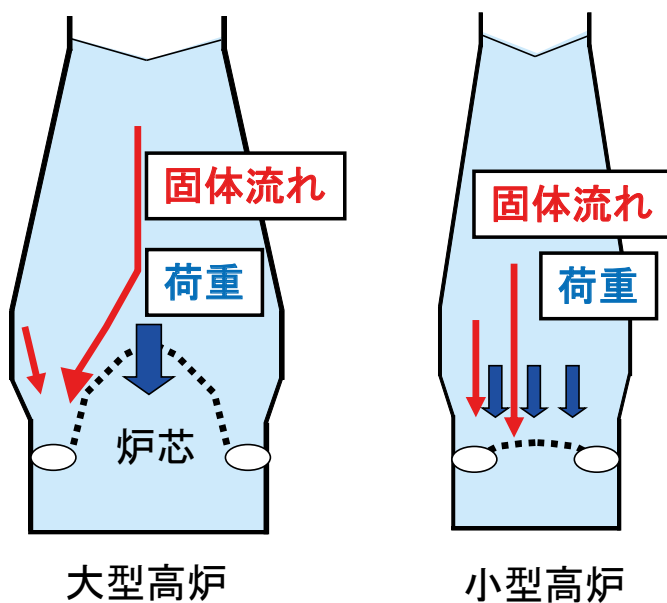


Fig.11. 高炉内容積変化に伴う固体流れと荷重の変化

4. 高炉プロフィール、レースウェイ深度の影響

4.1. 計算条件

次に大型化に伴って変化するシャフト部の壁傾斜の影響、また炉芯の大きさ制御を考える上で重要となるレースウェイ深度の影響について検討を行った。Table2、Fig.12 にプロフィール、レースウェイ深度の変更条件を示す。上述の小型高炉のプロフィールを維持させ、横方向に拡大し、内容積を 5000m³ 級の高炉に調整した仮想的な高炉を設定した。また、レースウェイ深度に関しては、ベースの 1.6m の 2 倍を計算条件に設定した。

Table 2 高炉プロフィールの検討条件

	ボッシュ角度	シャフト角度
5000m ³ 級オリジナルモデル	78.7°	80.6°
1000m ³ 級オリジナルモデル 5000m ³ 級プロフィール調整モデル	84.3°	85.3°

4.2. 計算結果

Fig.13 に DEM による炉内装入物分布の計算結果を示す。大型高炉で小型高炉と同様なプロフィールに設定した場合には、炉内径の拡大によって、中心の鉱石層は当然ながら薄くなる。レースウェイ深度変更の影響は分布に対しては認められない。

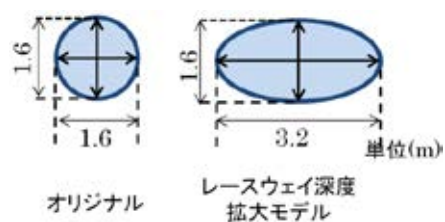


Fig.12. レースウェイ深度の変更

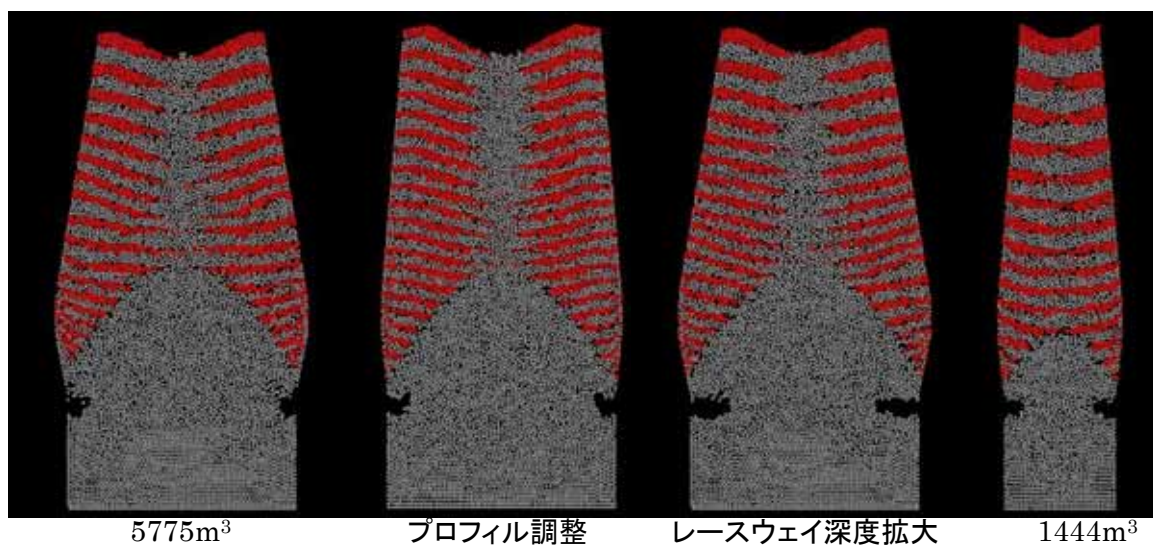


Fig.13. 高炉プロフィール及びレースウェイ深度変更時の炉内の装入物分布計算結果

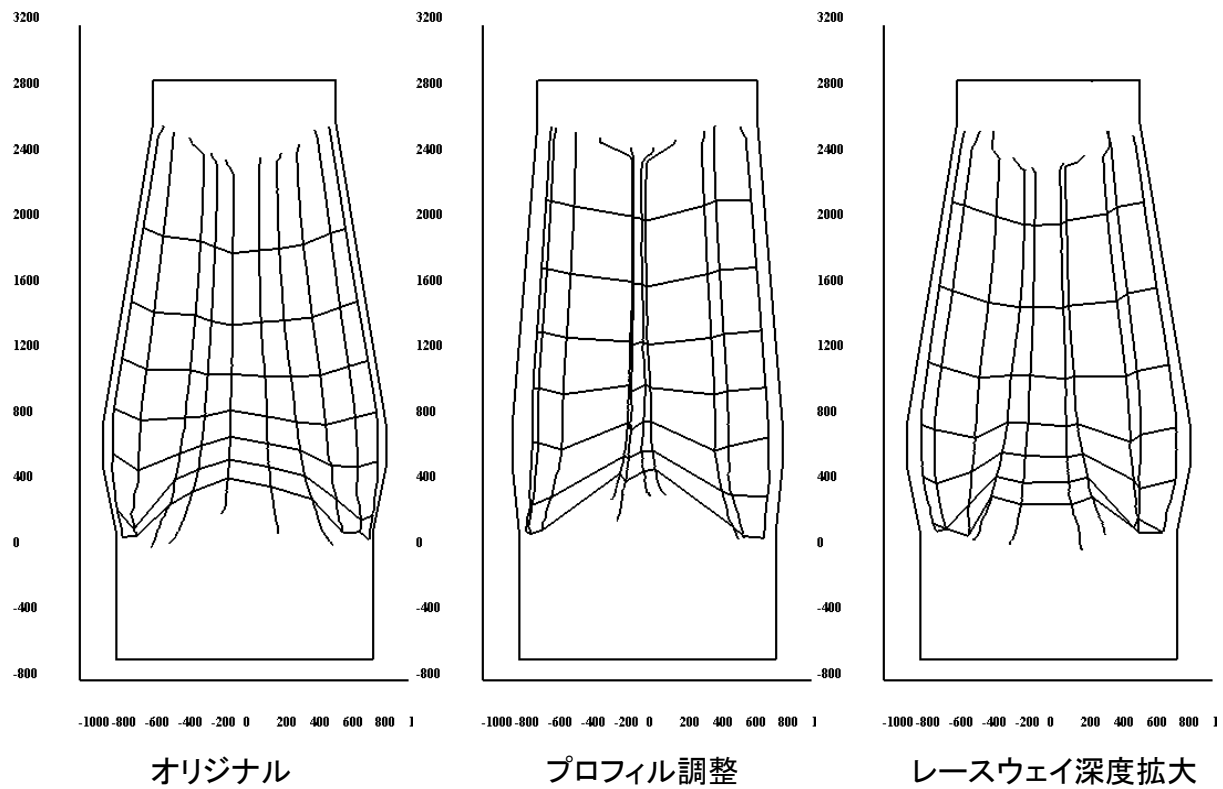


Fig.14. プロフィール及びレースウェイ深度の流線、タイムラインへの影響

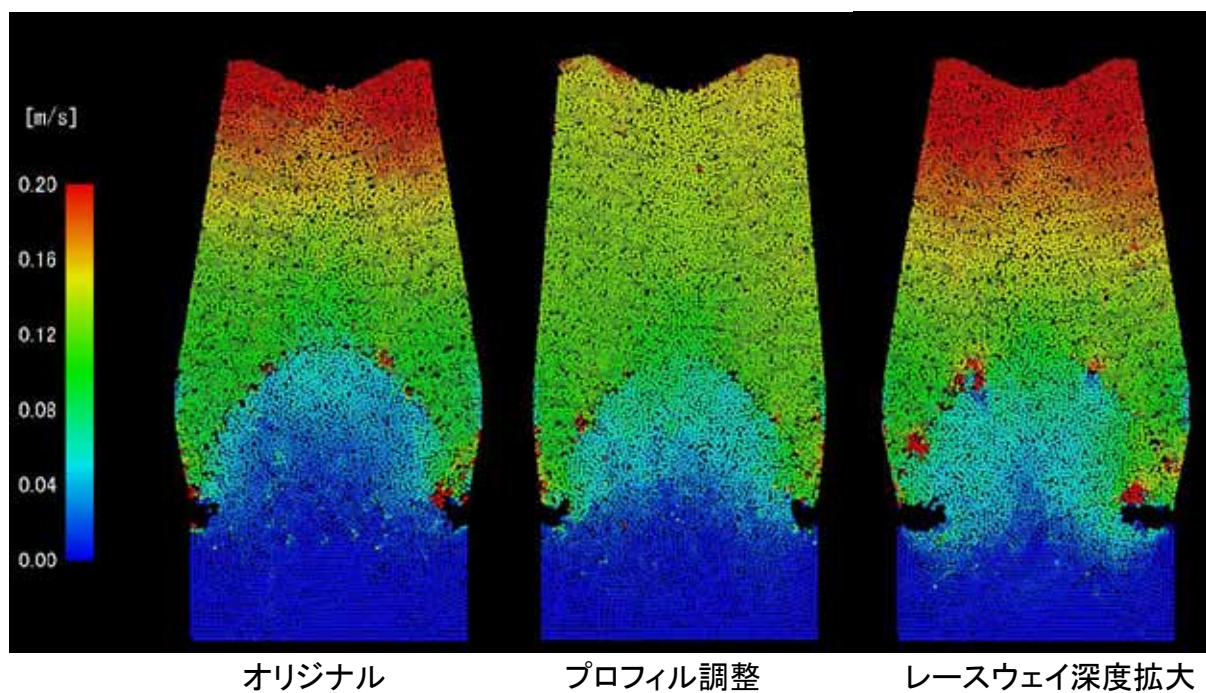


Fig.15. プロフィール及びレースウェイの降下速度分布への影響

Fig.14 に流線、タイムラインの計算結果を示す。いずれもシャフト部では壁に平行した流線を示すが、炉下部においては壁角度を緩くしたプロフィール調整の場合に炉芯がやや小さく、またレースウェイ深度を大きくした場合には炉芯表面形状がフラット化する傾向が観察される。Fig.15 には粒子降下速度分布を示す。シャフト部ではプロフィール変更では、断面積が拡大しているためにシャフト上部でも降下速度は小さくなる。炉下部に注目すると、炉芯の大きさ変化が明瞭にわかる。すなわち、プロフィール変更によって炉芯高さは小さくなり、レースウェイ深度拡大によって確実に炉芯の大きさが縮小している。

3つのケースに対する高炉内の応力分布を Fig.16 に示す。赤色粒子が応力の高い粒子を示す。オリジナルでは炉芯部に応力の高い粒子が集中しているが、プロフィール調整した高炉、レースウェイを拡大した高炉では壁方向に分散する傾向にある。上述の炉芯の大きさ変化に対応している。

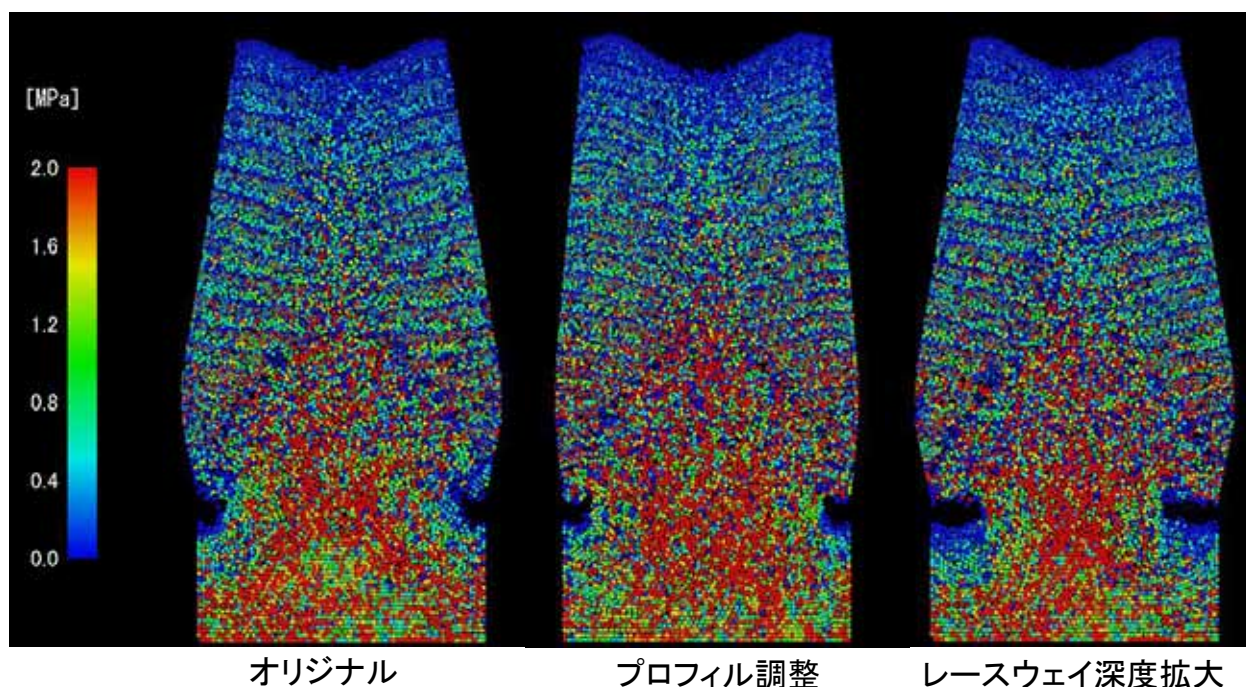


Fig.16. 高炉内の応力分布

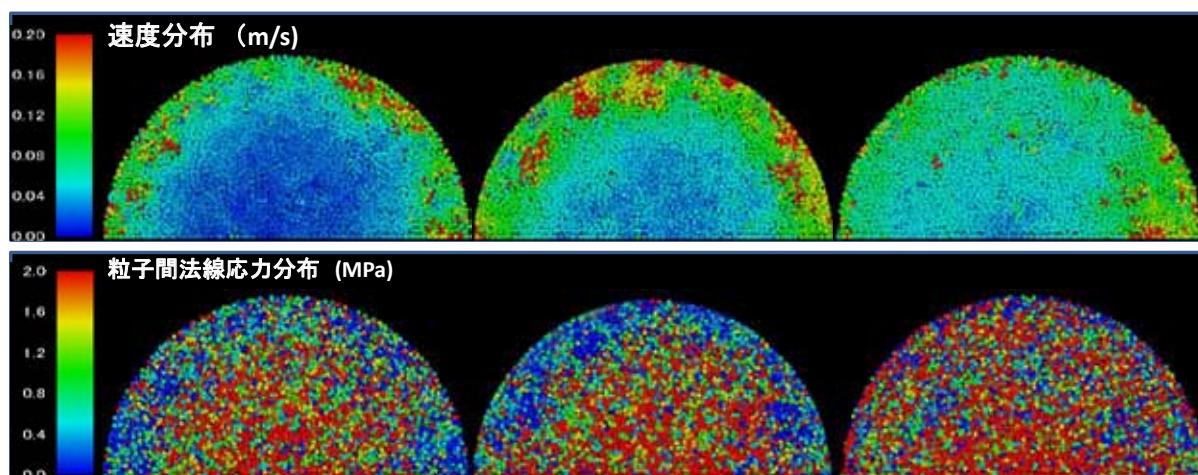


Fig.17. 断面方向の速度分布及び応力分布

ボッシュ部の断面方向の粒子降下速度分布、応力分布を Fig.17 に示す。速度分布に関しては、プロフィール調整した高炉、レースウェイ深度を拡大した高炉では降下速度分布が均一化している。中心部の緩い降下速度分布域に相当する炉芯領域が縮小しているのが明瞭にわかる。応力分布は、高い応力を受ける粒子が炉芯のみではなく、壁近傍にも分散する傾向が観察される。

注目されるのはスリップ指数の変化であるが、その計算結果を Fig.18 に示す。速度分布ほど明瞭ではないが、オリジナルの条件に比べてプロフィール調整、レースウェイ深度拡大高炉ではスリップを生じやすい個所が壁側に集中するのではなく、断面全体に分散してのがわかる。

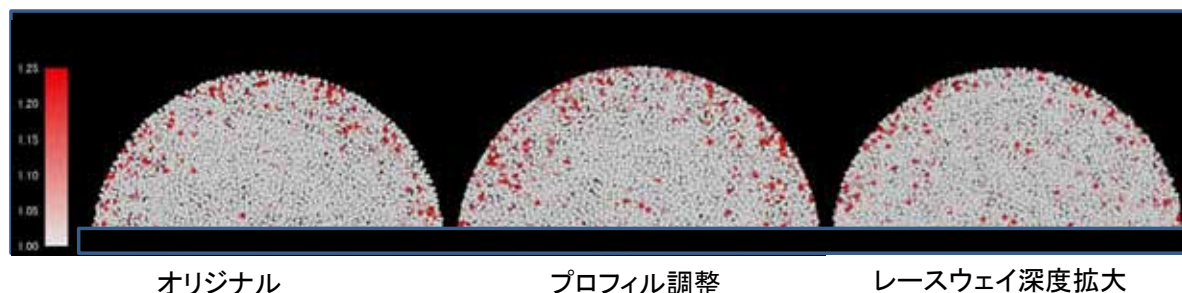


Fig.18. 断面方向のスリップ指数の分布

4.3. プロフィール及びレースウェイ深度影響の考察

前節で高炉内容積の拡大と共に炉芯が肥大化し、粒子の降下速度分布、応力分布に影響し、結果的にスリップなどの不安定現象が炉下部の壁近傍で生じやすいことを述べた。本節ではプロフィールの変更によって、壁が粒子荷重を支えるような現象の確認のためにプロフィール変更、また炉芯を縮小させるため、意図的にレースウェイ深度拡大の条件を設定した。その計算結果を総括すると、プロフィール変更、すなわち壁の角度を小型高炉程度に変えると、炉芯は縮小する傾向にある。断面積変化が小さくなり、流れが均一化する傾向と同時に、シャフト壁が粒子の下方への荷重を受け、下部の粒子が逆に動くやすくなり、粒子間の拘束力の大きい炉芯容積は減少すると思

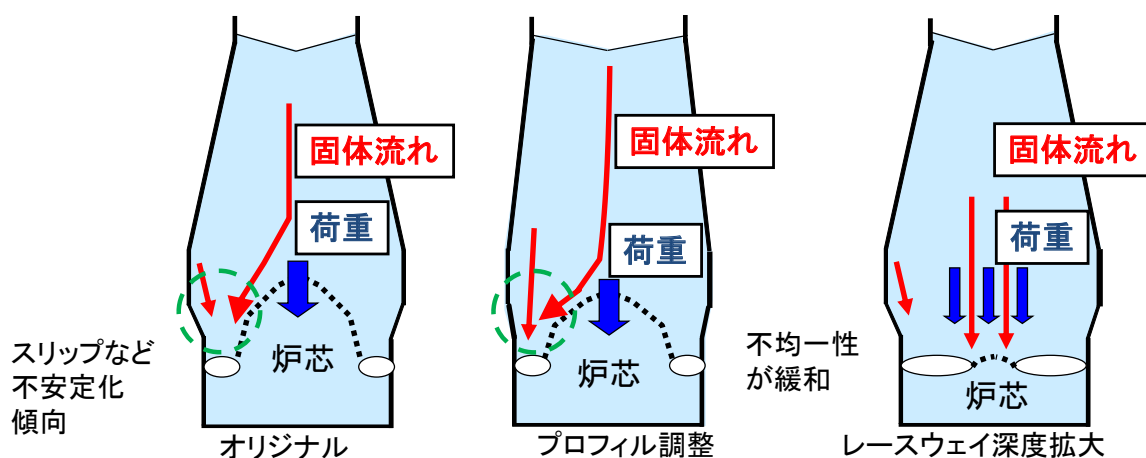


Fig.19. 高炉プロフィール及びレースウェイ深度の影響と炉内現象

われる。また、レースウェイ深度拡大によってコークス消費位置を中心側に移行させると、確実に炉芯は縮小し、炉芯肥大に伴うスリップのような不安定現象が緩和される。

以上の現象を図式化すると Fig.19 のように表される。大型化に伴って、炉芯容積の相対的な増大により炉壁近傍粒子の粒子降下速度が大きくなり、同時に下方への荷重は炉壁近傍で緩和される。結果的に粒子への拘束が緩くなり、この周辺部分でスリップなど不安定化を招きやすい。シャフト角度を拡大するとボッシュによる粒子を支える効果の減少により炉壁近傍粒子が均一的に動くため、特定域への応力集中が緩和される。また、レースウェイ深度拡大による炉芯容積縮小によって、ボッシュ部における粒子降下速度、粒子間法線応力分布は均一的な傾向を示す。全体に荷下がりは安定化傾向になり、スリップの頻度も減少すると思われる。

5. 結言

高炉内の装入物粒子の運動挙動を精緻に再現できる DEM によって高炉大型時に懸念されるスリップなどの不安定現象について解析を行った。以下、その結果を記す。

- 1) 高炉内容積の拡大と共に、炉芯は肥大化し、下方に降下する粒子は壁近傍に集中して流れる傾向にある。その結果、壁近傍の粒子は粒子間の拘束力が緩くなり、流れが不安定化傾向にある。
- 2) 炉芯の拡大と共に大型高炉では炉芯に大きな応力の集中が見られ、応力のネットワーク的な現象も観察される。また、その結果、この部位では圧潰などの粒子崩壊も懸念される。
- 3) 大型高炉のシャフト壁角度の影響を検討するために、意図的にシャフト角度を大きくした仮想的な高炉を設定すると、粒子速度の均一化、壁の影響が緩和され炉芯は小さくなる。さらにレースウェイを深くすると、炉芯は確実に縮小し、粒子流動領域が拡大する結果、安定的な降下運動を示す。
- 4) 現状の大型高炉ではそのプロフィルの影響から、周辺部において粒子間の拘束力が緩くなり、スリップなどの不安定現象が発生しやすい。それを回避するためには炉芯の形状、大きさ制御が重要な手段になると思われる。

謝辞

本研究は JFE21 世紀財団の支援の元に行われたことを記すと共に、謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) S.Natsui, S.Ueda, Z.Fan, N.Andersson, J.Kano, R.Inoue and T.Ariyama: *ISIJ Int.*, **50**(2010),207.
- 2) S.Ueda, S.Natsui, H.Nogami, J.Yagi and T.Ariyama: *ISIJ Int.*, **50**(2010),914.
- 3) P. R. Austin, H. Nogami and J. Yagi: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 458.
- 4) 夏井俊悟, 植田滋, Fan Zhengyun, 加納純也, 井上亮, 有山達郎: 鉄と鋼, **96** (2010), 1.
- 5) S.Natsui, H.Nogami, S.Ueda, J.Kano, R.Inoue and T.Ariyama: *ISIJ Int.*, **51**(2011),41.