

向流移動層での粒子挙動と温度分布に及ぼす炉壁突起物の影響

金田 啓佑*・一田 守政

Influence of wall block on particle behavior and thermal distribution in counter-current moving bed

Keisuke KANEDA* and Morimasa ICHIDA

(平成23年11月26日受理)

The blast furnace has the majority of the amount of the CO₂ exhaust in the iron and steel industry. The influence of the wall profile on the particle descent behavior and thermal distribution in the counter-current moving bed was examined by using CCD camera and the PIV method aiming to improve the thermal efficiency of the blast furnace. The gas flow and the thermal distribution in the current moving bed are different according to the particle descent behavior. The influence of the furnace wall block on the particle descent behavior is large. The maintenance of the smoothness of the furnace wall is very important to obtain the particle descent behavior that forms an efficient gas flow.

1. 緒言

近年、CO₂排出量増加による地球温暖化が危惧されている。日本のCO₂排出量は世界の排出量の5%であり、その15%は鉄鋼業によるもの^{1,2)}である。そこで、鉄鋼業のCO₂排出量の大部分を占める高炉プロセスの熱効率の改善は重要課題である。

高炉プロセスは炉頂から装入された鉱石、コークスと高炉下部の羽口から吹き込まれた高温の熱風がレースウェイでコークスと反応して発生する2000℃前後のCOリッチな還元ガスとの向流移動層である。高炉の内面には耐火物が内張りされており、火入れ当初の内面は平滑面になっている。しかし、稼働年月の経過に伴い耐火物の摩耗が進行し、平滑面の維持が困難となる。本研究では、まず、高炉縮尺二次元模型^{3,5)}の壁面に形状の異なる突起物を設置し、炉壁突起物形状が粒子挙動に及ぼす影響を検討した。同時に熱画像測定装置を用いて温度分布を測定し、温度分布と粒子流線との関係を検討することにより粒子の降下挙動とガス流れの関係を考察した。

2. 実験装置の概要

実験装置の構成を図1に示す。実験装置は、高炉縮尺二次元模型、温風発生装置、ブロー、流量計、熱画像測定装置、ノートパソコンによって構成される。本実験で使用される高炉縮尺模型は、日本の平均的な高炉の1/40縮尺の二次元模型（長さ325mm×幅40mm×高さ510mm）である。

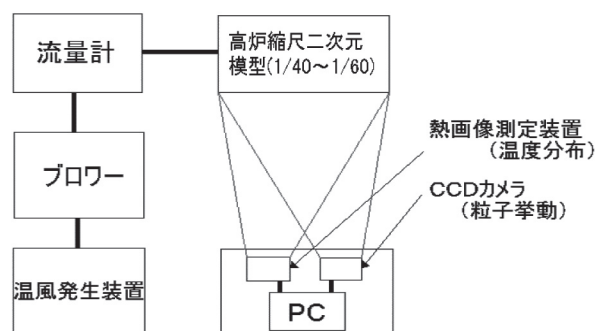


図1 実験装置の構成

図2に示すように高炉縮尺二次元模型は、アクリル板製で装入試料の可視化を可能とした。装入試料として実際の高炉で充填される鉄鉱石とコークスを模擬したφ3mmのアルミナ球を用い、高温ガスの代わりに80℃前後の温風を用いた。アルミナ球は、

* 秋田高専専攻科学生

装置の上部にある漏斗から手で装入する。温風発生装置で80℃に昇温された温風の空気は流量計を経由して、装置下部に設置された2ヶ所の送風羽口から実験装置に吹き込まれる。温風発生装置直後には80℃であった温風はブロワーや流量計配管への昇温に熱を奪われ、送風羽口近傍での送風温度は20℃前後になる。送風羽口前方に形成される空間（レースウェイ）に一番近い場所に背面から温度計を差し込んで、羽口先端の温度を測定できる（図3）。同時に実験装置前面の亚克力板表面の中心温度を測定した（図3）。実験装置に装入されたアルミナ球は羽口より180mm下に設置されたホッパーを介して、直下に設置されたターンテーブルにより装置外へ排出される。ターンテーブルの回転数は0～1500r.p.mの範囲で設定でき、その設定した回転数により排出量を制御できる。

当初温風発生装置だけで送風を行う予定であったが、ブロワーを追加した。これは、実験装置の通気抵抗が大きいことおよび温風発生装置の最大静圧の不足に起因している。なお、各装置をつなぐホース

部分、流量計全体にはガラスウールと断熱テープをまいて断熱処理を行っている。

3. 実験方法

3.1 基準実験条件

高炉内の装入物の降下挙動を支配する力は重力とガスの慣性力である。したがって、高炉下部での支配的な物理法則はフルード数（以下Fr数とする）であるので、実炉と模型でFr数が一致するように基準実験条件を求めた。以下に具体的な導出手順を説明する。実炉と模型のFr数は(1)式と(2)式で示される。ここで、実炉でのFr数は(1)式で表される。

$$Fr = \frac{\rho_f \cdot v_f^2}{g \cdot \rho_s \cdot l} \quad (1)$$

模型でのFr'数は(2)式で表される。ここで'は模型での条件であることを示す。

$$Fr' = \frac{\rho_f' \cdot v_f'^2}{g \cdot \rho_s' \cdot l'} \quad (2)$$

(1)式と(2)式が等しいので、(3)式が成立する。

$$\frac{\rho_f \cdot v_f^2}{g \cdot \rho_s \cdot l} = \frac{\rho_f' \cdot v_f'^2}{g \cdot \rho_s' \cdot l'} \quad (3)$$

上記(3)式を変形して、ガス流速・装入物降下速度の相似比は(4)式で表される。

$$\frac{v_f'}{v_f} = \frac{v_s'}{v_s} = \sqrt{\frac{\rho_s' \cdot \rho_f \cdot l'}{\rho_s \cdot \rho_f' \cdot l}} \quad (4)$$

ここで、

ρ_f, ρ_f' : 実炉, 模型でのガス密度 (kg/m³)

ρ_s, ρ_s' : 実炉, 模型での装入物の嵩密度 (kg/m³)

l/l' : 縮尺比

v_s, v_s' : 実炉, 模型での装入物速度 (m/s)

v_f, v_f' : 実炉, 模型でのガス速度 (m/s)

上記の(4)式に表1に示す実炉の操作データを代入することにより求めた、実験装置の縮尺比を1/40縮尺と仮定した場合の基準実験条件を表1に示す。(1)式、(2)式の計算で、実炉でのガス密度 ρ_f を0.629kg/m³、および模型でのガス密度 ρ_f' を1.20kg/m³とした。それぞれ実炉での温度、圧力を2073K、3749hPa、模型での温度、圧力を293.15K、1013hPaとしてボイルシャルルの法則より求めた数値である。装入物の嵩密度は実炉での ρ_s を500kg/m³、模

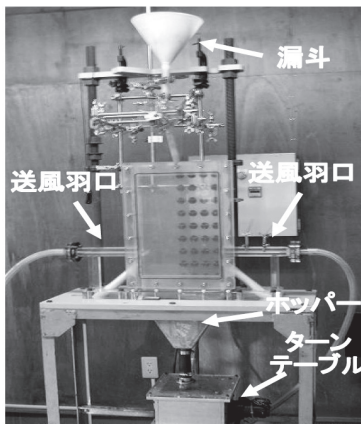


図2 高炉縮尺二次元模型概観

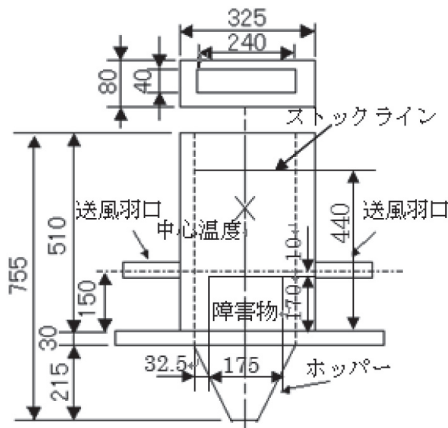


図3 高炉縮尺二次元模型寸法

型での ρ_s' を 1990kg/m^3 とした。上記の数値を(4)式に代入することにより実験の主要な操作因子である送風量は $0.221\text{Nm}^3/\text{min}$ 、アルミナ球排出速度は $0.155\text{kg}/\text{min}$ と導出された。実際の実験条件の送風量は $0.170\text{Nm}^3/\text{min}\sim 0.180\text{Nm}^3/\text{min}$ と基準実験条件の送風量とほぼ同じであるが、アルミナ球排出速度は $1.62\text{kg}/\text{min}$ と基準実験条件のアルミナ球排出速度の約10倍になっている。アルミナ球排出速度を基準実験条件($0.155\text{kg}/\text{min}$)と比較して約10倍($1.62\text{kg}/\text{min}$)にしたのは、ターンテーブル排出装置の排出速度下限値以下の値であり制御できないためであるが、この程度のアルミナ球排出速度の差異は許容範囲と考えた。

表 1 基準実験条件

	模型(縮尺1/40)	実炉
送風量 VB' (Nm^3/min)	0.221	
羽口風速 ut' (m/s)	9.19	
ガス流速 vf' (m/s)	0.368	1.61
アルミナ球排出速度 Ws' (kg/min)	0.155	
アルミナ球降下速度 vs' (m/s)	6.49×10^{-5}	5.67×10^{-4}
v_f'/v_s' (-)	2840	2840

3.2 実験方法

高炉縮尺二次元模型内にアルミナ球を充填した後、実験装置下部よりアルミナ球を排出することによって温風とアルミナ球の向流移動層を実現した。アルミナ球は、常に決められたストックライン(図3)まで装入して補充する。粒子挙動変更によるガス流れへの影響を検討するため、粒子排出条件として2つの条件を設定した。ひとつは、高炉縮尺二次元模型の羽口下の排出口直上に高炉の炉芯を模擬した障害物を設置しない向流移動層条件である。もうひとつは、高炉縮尺二次元模型の羽口下の排出口直上に高炉の炉芯を模擬した障害物(図3)を設置した高炉向流移動層条件である。これら2つの向流移動層条件にて実験を行い、粒子挙動と温度分布を測定した。粒子挙動の測定にはCCDカメラを用い、温度分布の測定には熱画像測定装置を用いた。実験装置内炉壁に突起物長さ及び突起物間隔の異なる3水準(90mm, 45mm, 20mm)の炉壁突起物(図4)を設置し、炉壁突起物未設置を含め4水準の炉壁形状の実験を行った。なお、検量線については古谷らの知見⁷⁾を参考にした。粒子挙動測定実験では、粒子挙動の定常あるいは非定常を判定するために、2回のタイミングで測定を行った。なお、本実験条件では粒子挙動に及ぼす送風量の影響は小さかったため、

無送風で実験を行った。まずアルミナ球排出開始後10秒に10秒間測定した。その後、粒子挙動が定常と推定されるアルミナ球排出開始後30分の時点で、再度10秒間の測定を行った。粒子の速度ベクトルについてはCCDカメラでの測定データを用いて、PIV法により解析した。

温度分布測定実験では、温風発生装置により暖められた空気をブロワーから送風羽口を介して実験装置本体へと送風する。温風発生装置から 80°C の温風を送風し、装置内温度がほぼ定常と思われる2時間経過した後にアルミナ球の排出を開始し、向流移動層とする。熱画像測定装置での測定データから温度分布の解析を行った。

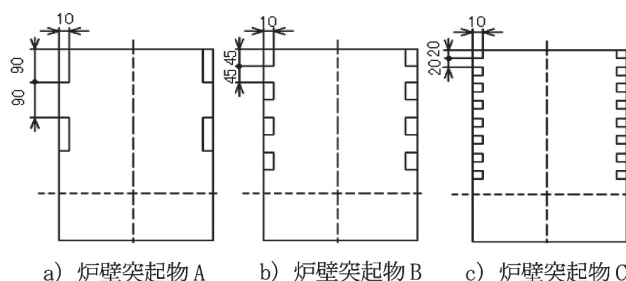


図 4 高炉縮尺二次元模型概観

4. 粒子挙動定量化方法

4.1 粒子挙動定量化システムの概要

粒子挙動定量化システム構成を図5に示す。粒子挙動定量化システムは、CCDカメラ本体、メガピクセル対応焦点レンズ、熱画像測定装置、ノートPC、多機能動画取り込みソフト、粒子ベクトル解析ソフト(PIV)から構成されている。CCDカメラで粒子の動きを撮影して、多機能動画取り込みソフトにてPCに動画および静止画として取り込む。PC内に取り込まれた静止画像を流体計測ソフトで解析し、粒子の速度ベクトルを求めることができる。

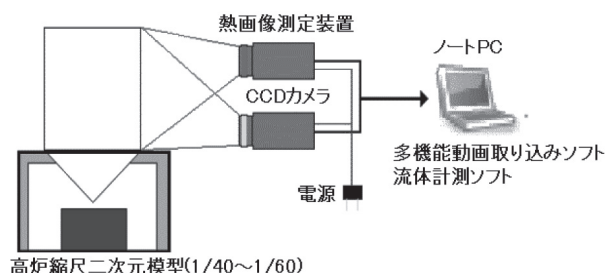


図 5 粒子挙動定量化システム構成

4.2 粒子ベクトル解析方法の概要

粒子ベクトル解析ソフトには、大きく分けてPIV法とPTV法の2種類の解析手法があるが、本研究では、着目粒子の分布密度が高い時に有効な解析手法であるPIV法を採用した。PIV法を以下に簡単に説明する。

4.2.1 PIV法

PIV法は、PCに取り込んだ流体の可視化画像データを利用して輝度分布によるパターン追跡(図6)からベクトル解析を行う手法である⁶⁾。輝度分布によるパターン追跡とは、図6の画像中にとった二点P、Q周辺の画像小領域(マトリクス)の輝度分布の類似性から、P点に対応するQ点を見いだして(パターン追跡)、PQを移動量として速度を求める。後処理として誤追跡ベクトルの削除、欠落ベクトルの内挿によって平均的な速度分布を得ることができる。この解析の特徴は、静止画像二枚から解析可能であること、また粒子の高分布密度の時に適していること、粒子以外(気流など)の画像に対しても有効なところである。

加賀ら⁶⁾は、パターン追跡アルゴリズムとして相関係数計算法、総和計算法、累積回数計算法、逐次棄却法を比較、検討した。その結果、演算時間が短い方法でも精度に大きな影響はないと考えられ、多少精度が犠牲にはなるが効率的な方法である逐次棄却法が推奨されている。逐次棄却法とは、輝度差絶対値の累積値がその最小値に比べて有意に大きいものを逐次棄却する方法である。この結果に基づき、本研究の粒子ベクトル解析は逐次棄却法により行った。逐次棄却法により、計算時間が大幅に短縮している。

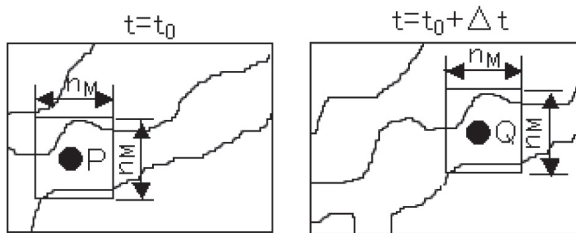


図6 可視化画像のパターン追跡⁶⁾

5. 実験結果

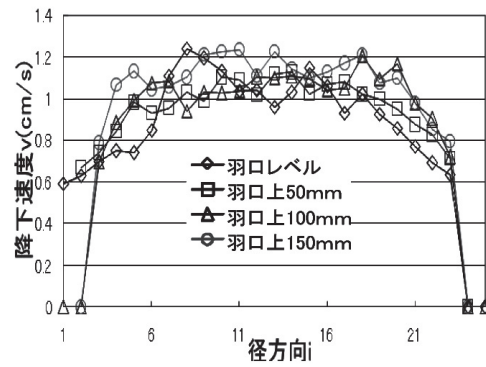
5.1 粒子挙動測定実験

本測定では、CCDカメラのフレームレートを30fpsにして、10秒間撮影している。したがって、解析する画像間隔を示す静止画像インターバル1とは1/30秒を意味している。古谷らの研究⁷⁾では粒子

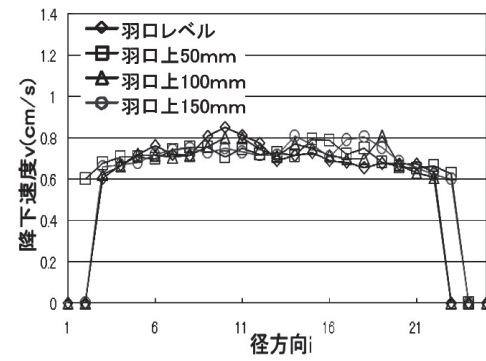
排出速度を0.93kg/minとしていたため静止画像インターバルを90(3分)としていたが、本実験では粒子排出速度を1.62kg/minとして行ったため、静止画像インターバルを45(1.5分)とした。

5.1.1 粒子挙動の時間的変化の比較

炉壁突起物B、向流移動層条件における計測時期の差異による比較を行った。粒子速度分布を図7に示す。アルミナ球排出開始後10秒において、高さレベルでの降下速度分布にばらつきがあり(図7-a)、非定常状態であると判断できる。アルミナ球排出開始後30分では高さレベルでの降下速度分布が同じであり(図7-b)、定常状態と判断できる。よって、今後の実験では定常状態と見られる開始後30分の測定結果を採用した。



a) 開始後 10 秒



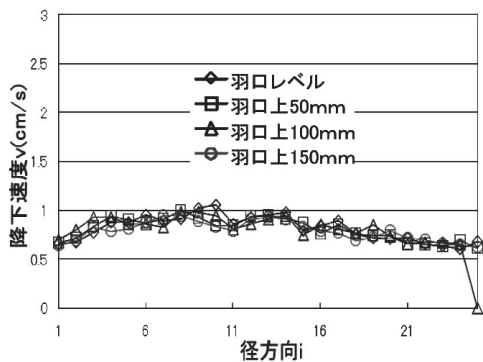
b) 開始後 30 分

図7 炉壁突起物B、向流移動層条件における粒子速度分布

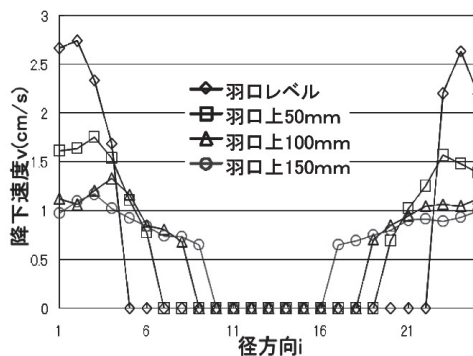
5.1.2 炉芯の有無による粒子挙動の比較

炉壁突起物未設置条件において、炉芯が粒子挙動に及ぼす影響を検討した。粒子速度分布を図8に示す。向流移動層条件では、径方向の速度分布がほぼ同じである(図8-a)。高炉向流移動層条件では、排出口直上の炉壁近傍の降下速度が極めて大きく(図8-bの◇印)、高さレベルの増大に伴い低下した。炉壁近傍を除いた羽口レベルの降下速度は0である

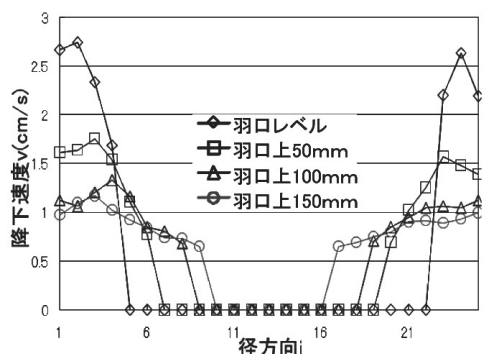
向流移動層での粒子挙動と温度分布に及ぼす炉壁形状の影響



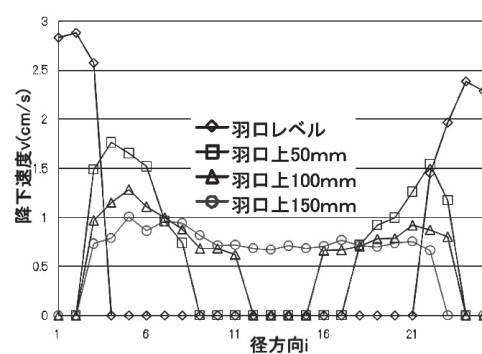
a) 向流移動層条件



a) 炉壁突起物未設置



b) 高炉向流移動層条件



b) 炉壁突起物 C

図8 炉壁突起物B, 向流移動層条件における粒子速度分布

図9 高炉向流移動層条件における粒子速度分布

が、高さレベルの増大に伴い中心部近傍の粒子が降下しており、中心部から中間部での降下領域が拡大した(図8-bの□印, △印, ○印)。

5.1.3 炉壁突起物の有無による粒子挙動の比較

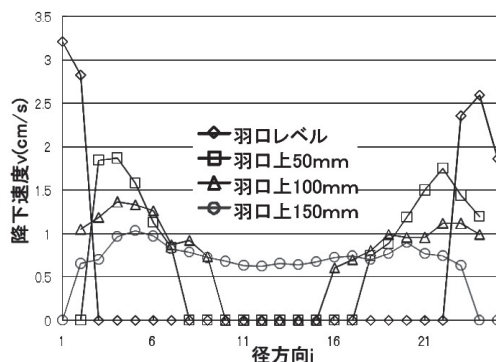
高炉向流移動層条件において、炉壁突起物が粒子挙動に及ぼす影響を検討した。粒子速度分布を図9に示す。炉壁突起物を設置した場合、炉壁近傍の降下速度が低下し、中心部から中間部の降下領域が拡大した(図9-bの□印, △印, ○印)。このように、炉壁突起物が炉壁近傍の降下速度だけでなく中心部から中間部の降下速度に影響を与えることが判明した。

5.1.4 炉壁突起物形状による粒子挙動の比較

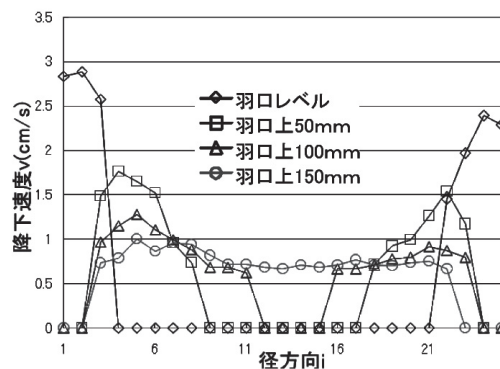
高炉向流移動層条件において、炉壁突起物形状が粒子挙動に及ぼす影響を検討した。粒子速度分布を図10に示す。炉壁突起物間隔が狭くなると、炉壁近傍の降下速度が低下し、中心部近傍での降下領域が拡大した(図10-bの□印, △印, ○印)。

5.2 温度分布測定実験

本測定では、5分毎に30分まで熱画像測定装置により実験装置全面の亚克力板表面の温度分布を測定している。なお温度分布の比較には、5分, 10分, 15分時の測定データを用いた。

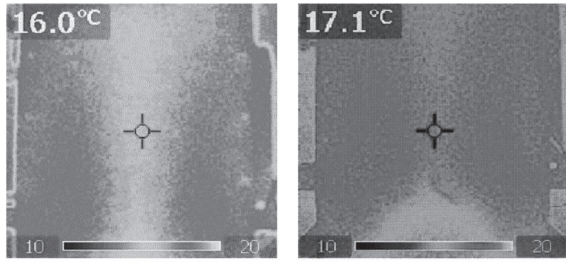


a) 炉壁突起物 A

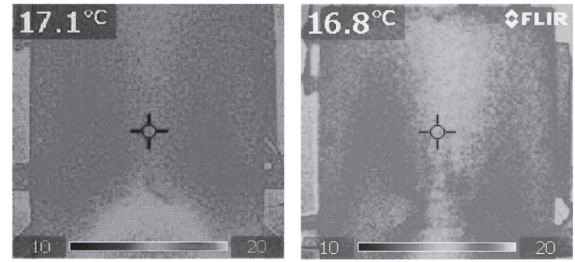


b) 炉壁突起物 C

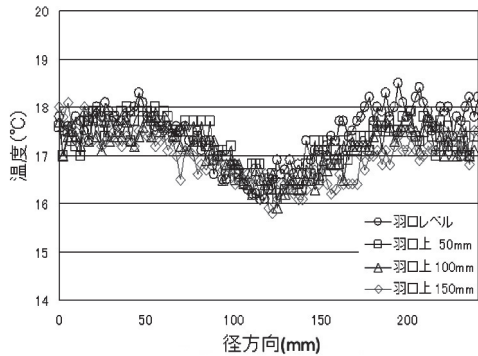
図10 高炉向流移動層条件における粒子速度分布



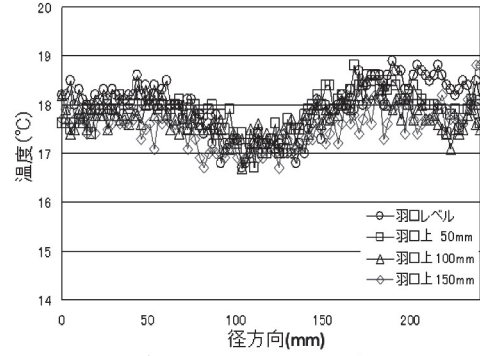
a) 向流移動層条件 b) 高炉向流移動層条件
図11 炉壁突起物未設置条件における温度分布



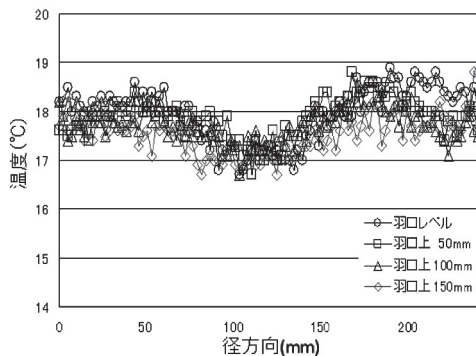
a) 炉壁突起物未設置条件 b) 炉壁突起物C設置条件
図13 高炉向流移動層条件における温度分布



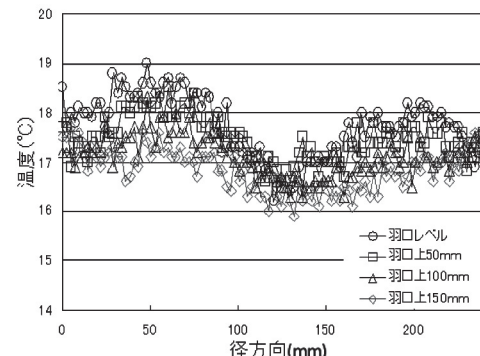
a) 向流移動層条件



a) 炉壁突起物未設置条件



b) 高炉向流移動層条件



b) 炉壁突起物C設置条件

図12 炉壁突起物未設置条件における温度分布デジタルデータ

図14 高炉向流移動層条件における温度分布デジタルデータ

5.2.1 炉芯の有無による温度分布の比較

炉壁突起物未設置条件において、炉芯が温度分布に及ぼす影響を検討した。温度分布測定結果を図11、温度分布デジタルデータを図12に示す。

向流移動層条件と高炉向流移動層条件の温度分布を比較すると、高炉向流移動層条件では、向流移動層条件に比べて中心部の高温領域の面積が大きい(図11-b)。高炉向流移動層条件と向流移動層条件のデジタルデータを比較すると、高炉向流移動層条件では、向流移動層条件に比べて、全体的に温度上昇が見られるが、中心部近傍の温度上昇は約1℃と周辺部近傍の温度上昇(約0.5℃)に比べて大きい(図12-b)。

5.2.2 炉壁突起物の有無による温度分布の比較

高炉向流移動層条件において、炉壁突起物が温度分布に及ぼす影響を検討した。温度分布測定結果を図13、温度分布デジタルデータを図14に示す。

炉壁突起物未設置条件と炉壁突起物C設置条件の温度分布を比較すると、炉壁突起物C設置条件では、炉壁突起物未設置条件に比べて中心部近傍の高温領域の面積は小さいのに対し、羽口近傍の温度が高い(図13-b)。炉壁突起物C設置条件と炉壁突起物未設置条件のデジタルデータを比較すると、炉壁突起物C設置条件では、炉壁突起物未設置条件に比べて、高さレベルにおける温度分布のばらつきが大きくなった。炉壁突起物C設置条件では、炉壁突起物未

設置条件に比べて、中心部温度が低下した(図14b)。

6. 考察

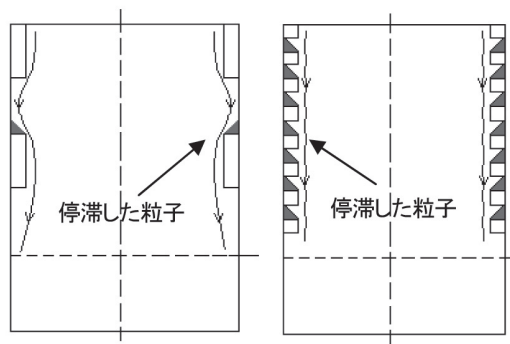
6.1 炉芯の有無による温度分布差異のメカニズム

5.2.1項で得られた向流移動層条件と高炉向流移動層条件における温度分布差異(図11, 図12)のメカニズムについて検討した。向流移動層条件では、いずれの高さレベルでも粒子の速度ベクトルはほぼ下向きであり、デジタルデータにおいても、いずれの高さレベルでも径方向でほぼ一様な降下速度分布となっている(図8-a)。そのため、移動層にもかかわらず粒子が、位置関係を変えずに固定層の固まりのように降下している(図15-a)。したがって、内部への通気抵抗が大きく、ガスが中心部まで流れなかったと推定される。一方、高炉向流移動層条件では、炉芯模擬障害物の存在により、中心の粒子は障害物直上には降下せず、断面積の縮小した羽口付近に向けて降下する。そのため、隣接する粒子と空隙が位置関係を変えながら降下する(図15-b)。その結果、ガスが中心部まで流れ、向流移動層条件と比べて中心部の温度上昇が大きかったと推定される。また、炉芯模擬障害物上部には粒子が停滞する層ができる。この停滞層は常に高温ガスに触れているため、流動粒子を昇温及び保温する効果を担っており、停滞層の存在も中心部温度を上昇させる要因である。温度分布デジタルデータを見ると、送風羽口付近での温度上昇が非常に大きい(図12-b)。炉内上部でガス、停滞層によって十分に昇温された粒子が降下し、さらに羽口付近で高温ガスが粒子に集中的に当たる結果、大きな昇温が得られた。羽口付近の高温部分は実炉ではレースウェイと呼ばれ、コー

クスが酸素と反応して消滅する部分である。このように、高炉向流移動層の実炉でのガス流れの状態が定性的に再現されている。

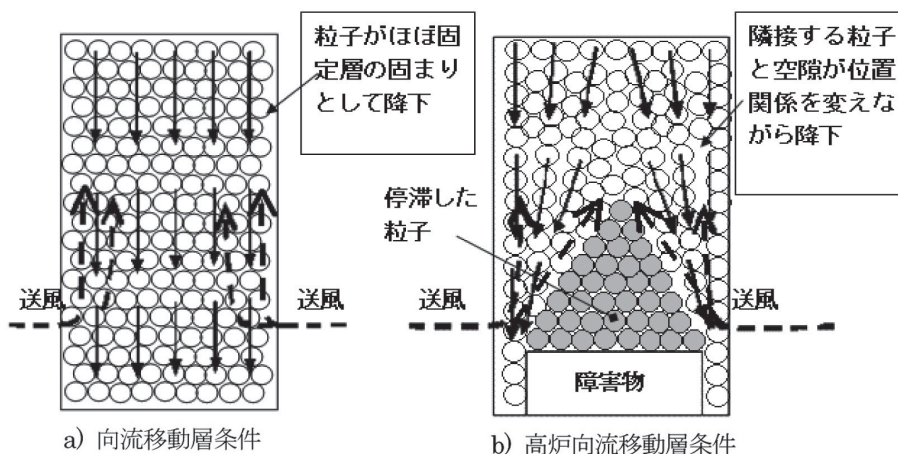
6.2 炉壁突起物形状による粒子挙動のメカニズム

5.2.4項の結果より、炉壁突起物間隔が狭くなると炉壁近傍における降下速度が低下し、中心部近傍における降下領域が拡大した(図10-b)。これは侵食部位長さ(すなわち突起物設置間隔)の影響が大きいと推定される。炉壁突起物A設置条件(設置間隔90mm)、炉壁突起物C(設置間隔20mm)のいずれにおいても、侵食部位下端の炉壁空間にアルミナ球がある傾斜角で堆積する。突起物設置間隔の小さい炉壁突起物C設置条件では、侵食部位にアルミナ球がほぼ充填され、アルミナ球の炉壁が形成される(図16-b)。アルミナ球の炉壁は従来の炉壁に比べ接地面積が大きいため、見掛けの炉壁摩擦角が増大し、炉壁近傍のアルミナ球降下速度が低下したと推定される。そして炉壁近傍の粒子擬停滞領域の増加に伴い、中心部近傍の降下領域が拡大したと推定される。



a) 炉壁突起物A設置条件 b) 炉壁突起物C設置条件

図16 炉壁突起物形状による粒子挙動変化のメカニズム



a) 向流移動層条件

b) 高炉向流移動層条件

図15 粒子挙動とガス流れの関係

6.3 粒子挙動と温度分布の関係

5.2.2項の実験結果を用いて高炉向流移動層条件下における炉壁突起物の有無による温度分布の差異（図13, 図14）のメカニズムを検討した。炉壁C設置条件では、炉壁突起物未設置条件と比較して温度分布が全体に均一でない（図13-b）。とくに中心部近傍の温度が非常に低い。また、高さレベルにおいて、羽口レベルでは高温なのに対し、羽口上150mmでは温度が非常に低い（図14-b）。これは炉壁突起物の設置による炉壁近傍における粒子降下速度の低下が原因であると推定される。炉壁近傍の粒子が停滞すると、粒子降下領域が変化し、中心部近傍の降下領域が拡大する。炉壁近傍では、擬停滞領域の形成と粒子のスリップ現象によりガス流量が増加し、熱流比⁸⁾が低下する。中心部近傍では、粒子降下速度上昇により熱流比が上昇する。上記の結果より、中心部の温度が相対的に低下したものと推定される。十分昇温されない粒子が中心部近傍の停滞層に降下して、中心部停滞層の温度低下を促進する可能性がある。一方スリップにより昇温された粒子は、付着物形成等の悪影響を及ぼすと推定される。

以上の知見より、向流移動層内の温度分布が、粒子挙動と密接に関連したガス流れの変化の結果として決まることがわかった。高炉を含む向流移動層のプロセスにおける熱効率の改善には、径方向に均一なガス流れと温度分布が必要である。そのためには、理想的なガス流れを形成する正常な粒子挙動の確保が必要であり、炉壁平滑度の維持が非常に重要であることが判明した。

7. 結言

鉄鋼業のCO₂排出量の大部分を占める高炉プロセスの熱効率の改善を目的として、1/40高炉縮尺二次元模型装置を用いて炉壁面形状が粒子挙動と温度分布に及ぼす影響を検討し、以下の知見を得た。

(1) 向流移動層条件と高炉向流移動層条件の比較により、炉芯形成による粒子降下挙動の差異が温

度分布に影響を及ぼすことが判明した。この温度分布の差異は粒子降下挙動の差異によりガス流れが異なるためである。

- (2) 炉壁に突起物を設置すると、炉壁近傍の降下速度が低下し、中心部近傍の降下領域が拡大した。炉壁突起物設置間隔を狭くすると、炉壁近傍の降下速度低下幅が増加し、中心部近傍の降下領域がさらに拡大した。
- (3) 炉壁に突起物を設置すると、中心部近傍の温度が低下した。これは中心部近傍の降下速度の上昇と炉壁近傍のガス流れの増大により、中心部近傍の熱流比が上昇し、粒子の昇温が不十分になった結果である。高熱効率を実現する粒子挙動およびガス流れを得るためには、炉壁平滑度の維持が非常に重要であることが判明した。

参考文献

- 1) 環境省：
<http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/index.html>
- 2) 鉄鋼連盟：
<http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/kenkai/index.ht>
- 3) 入田俊幸, 磯山 正, 原 義明, 奥野嘉雄, 金山有治：鉄と鋼, 68 (1982) 10, 2295.
- 4) 一田守政, 西原一浩, 田村健二, 須賀田正泰, 小野 創：鉄と鋼, 77 (1991) 10, 1617.
- 5) Morimasa Ichida, Masayoshi Takao, Kazuya Kunitomo, Shinroku Matsuzaki, Tadashi Deno and Kazuhiro Nishihara : ISIJInt., 36 (1996) 5, 493.
- 6) 加賀昭和, 井上義雄, 山口克人：可視化情報, 14 (1994) 53, 38.
- 7) 古谷晃司, 一田守政：秋田高専研究紀要, 45 (2010), 27.
- 8) 進藤大輔, 一田守政：秋田高専研究紀要, 46 (2011), 16.