

向流移動層での粒子挙動とガス流れの関係

古 谷 晃 司*・一 田 守 政

Relation between particle behavior and gas flow in counter-current moving bed

Koji FURUYA * and Morimasa ICHIDA **

(平成21年11月27日受理)

Thermal efficiency in the process of the blast furnace where it has the majority of the amount of the iron and steel industry of the CO₂ exhaust is from a viewpoint of the CO₂ reduction to an important problem. In the present study, the quantification of the particle flow line was tried by the technique of making to visible with two dimension of the process of the blast furnace reduced scale physical model. And the relation between the descent behavior of the particle and the gas flow was examined by measuring the temperature distribution. The distribution of the gas flow is a point of the heat transmission in the counter-current moving bed where the temperature distribution is decided by the heat transmission from the gas to the solid for. The technology of quantification and the control of the particle behavior that exerts a large influence on the gas flow is important in the thermal efficiency improvement.

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。

高炉プロセスは固体粒子とガスの向流移動層であり、高炉内の伝熱は固体粒子の降下挙動とガス流れにより決められている。そこで本研究では、過去の知見^{3,5)}に基づき高炉プロセスの二次元縮尺模型装置を作成し、流体工学の分野で用いられている可視化手法により、従来から定量化が困難であった粒子流線の定量化を試みた。同時に熱画像測定装置を用いて温度分布を測定し、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. 実験方法

2.1 実験装置の概要

実験装置は、高炉縮尺二次元模型、温風発生装置、

ブロワー、流量計、熱画像測定装置、CCDカメラ、ノートパソコンによって構成される(図1)。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1/40~1/60縮尺の二次元模型(長さ325mm×幅40mm×高さ510mm)(図2)である。

本実験装置には、送風量の自動調節機能がない。送風量の設定は流量計の直下にあるバルブにより行う。実験装置内に装入された試料の粒径、形状、空間率により装入試料の圧力損失が決まる。その圧力損失と装置に起因する圧力損失の合計がブロワーの最大静圧を越える場合には、両者が一致するレベルまでブロワーの送風量が低下することになる。

高炉縮尺二次元模型は、アクリル板製で装入物粒

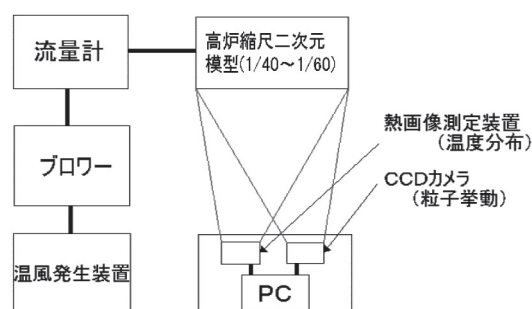


図1 実験装置の構成

* 秋田高専専攻科学生

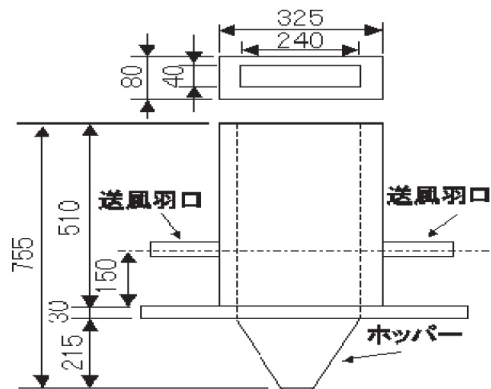


図2 高炉縮尺二次元模型の寸法

子の可視化を可能とした(図3)。装入試料として用いた $\phi 3\text{mm}$ のアルミナ球は、装置の上部にある漏斗から手動で装入する。温風発生装置で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。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し、温風発生装置出口の温度と羽口先端温度のバイアスを求めた。

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、送風量は所定の送風量に比べて1/100程度であった。原因は、温風発生装置自体に風を押し込む

力がないこと、温風発生装置の温風出口径に比べて流量計の入り口の径が小さく、そこでの圧力損失が大きかったことの2つである。この問題点を少しでも解消するため高炉縮尺二次元模型と温風発生装置の間にブロワーを設置した。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巻いて断熱措置を行った。

2.2 実験方法

高炉縮尺二次元模型の実験条件については、フルード数が高炉と模型で一致するように求めた⁴⁾。今1/40縮尺と仮定した場合の基準実験条件を表1に示す。実際の実験条件の送風量は $0.100\text{Nm}^3/\text{min} \sim 0.200\text{Nm}^3/\text{min}$ 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0.93, 1.62kg/minと基準実験条件のアルミナ球排出速度の5~10倍になっている。アルミナ球排出速度を基準実験条件に比較して5~10倍にしたのは、排出装置の排出速度下限値の制約とPIV法(3.2.1節で詳細に説明)による速度ベクトル解析上の粒子速度下限値の制約に起因している。

表1 基準実験条件

	模型(縮尺1/40)	実炉
送風量 V_B' (Nm^3/min)	0.221	
羽口風速 u_t' (m/s)	9.19	
ガス流速 v_f' (m/s)	0.368	1.61
アルミナ球排出速度 W_s' (kg/min)	0.155	
アルミナ球降下速度 v_s' (m/s)	1.29×10^{-4}	$5.67 \times 10^{-4*}$
v_f'/v_s (-)	2840	2840

*: 装入物(コークス、焼結鉱)の降下速度

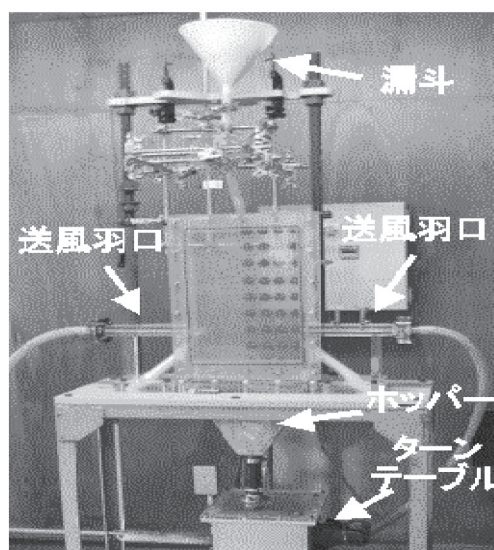


図3 高炉縮尺二次元模型概観

高炉縮尺二次元模型内にアルミナ球を充填した後、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一時間経過した後に実験を開始した。始めにアルミナ球排出前の固定層条件の温度分布を熱画像測定装置により測定した。次に、実験装置下部よりアルミナ球を排出し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まで装入して補充する。粒子挙動がほぼ定常と思われるアルミナ球排出開始後5~6分経過した時点に移動層条件での温度分布と粒子の降下状態をそれぞれ熱画像測定装置とCCDカメラにて測定した。そのCCDカメラでの測定データをノートパソコンに保存した後にPIV法

により粒子の速度ベクトル解析を行った。

移動層条件時の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障害物を設置しない条件(図9の(a))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障害物を設置した条件(図9の(b))である。

2.3 予備実験

2.3.1 アルミナ球排出速度の検量線作成

今後の実験の基準となるアルミナ球排出速度を決定するアルミナ球排出速度の検量線を作成した。同時に、高炉縮尺二次元模型に充填されたアルミナ球を装入するストックレベルがアルミナ球排出速度に及ぼす影響を検討した。

今回の実験では、ストックラインのレベルを高炉縮尺二次元模型の下端から0.06mと0.40mとして、ターンテーブル回転数とアルミナ球排出速度の関係を求めた。その結果を図4に示す。アルミナ球排出速度はターンテーブル回転数に比例して増加しているが、両者の関係は設定したストックラインレベルにより異なっている。同一回転数でのアルミナ球排出速度は、ストックライン0.4mの方がストックライン0.06mの場合に比べて大きい。このアルミナ球排出速度の差異は、ストックラインレベルに起因した装入物重量の差の影響によると推定される。今後の実験では、ストックライン0.4mを基準にした。

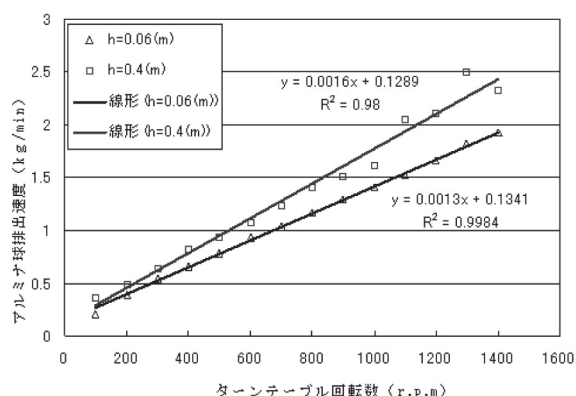


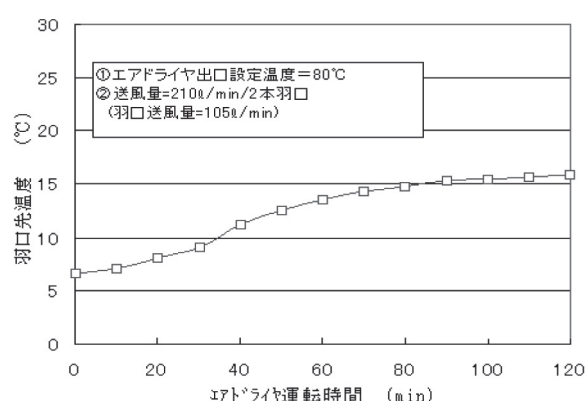
図4 ターンテーブルの回転数とアルミナ球の排出速度の関係

2.3.2 実験装置昇温予備実験

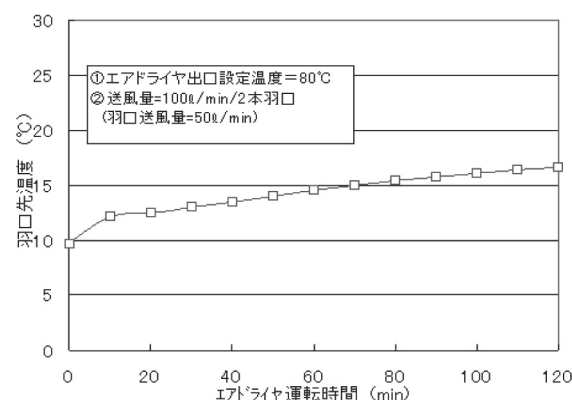
実験時の温度データ測定開始時間を決めるために、温風発生装置とブロワーにより所定温度80度に昇温された空気を実験装置の左右二本の羽口から送風し、実験装置を昇温する過程での羽口先の温度を

測定した。測定結果を図5に示す。ここで(a)はアルミナ球未充填時の温度測定結果、(b)はアルミナ球充填時の温度測定結果である。

図5より、いずれの条件でも一時間以降の温度変化は小さくなっている。この結果に基づき、実験における温度測定開始時間を送風開始一時間以降に決定した。上記の二つの実験では送風量に差異がある。これは、アルミナ球未充填時には二本の羽口で210ℓ/minであるが、アルミナ球充填時には二本の羽口で100ℓ/minに減少している。これは、アルミナ球が充填されることにより圧力損失が生じて送風量が減少したものと推定される。



(a) アルミナ球未充填時



(b) アルミナ球充填時

図5 温風発生装置の運転時間と高炉縮尺に次元模型羽口先温度の関係

3 粒子定量化方法

3.1 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6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

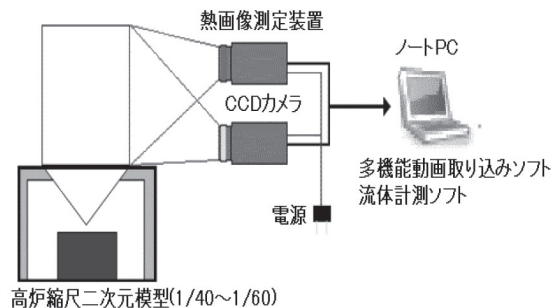


図6 粒子挙動定量化システム構成

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。

3.2 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。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法を採用したが、両者を以下に簡単に説明する。

3.2.1 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7）からベクトル解析を行う手法である。輝度分布によるパターン追跡とは、図7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。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。計算時間は、逐次棄却法⁶⁾により大幅に短縮している。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。

図7 可視化画像のパターン追跡⁶⁾

3.2.2 PTV法

PCに取り込んだ流体の可視化画像データを利用して、トレーサーの移動の追跡からベクトル解析を行う手法である。この解析の特徴は、粒子の運動が時間的連続であることを利用しているため粒子の対応付けの論理が簡単、粒子の分布密度が低い場合に適していることである。計算時間は二値画像相関法により大幅に短縮している。

しかし、粒子の高分布密度時など、追跡する目標の他に粒子が多数ある場合には、目標を見失いやすい。そして粒子の対応付けを誤ると、解析してベクトル表示した際に、現実には存在しない測定値が混ざって、想定した移動方向とは違う方向を示してしまい、測定結果の信頼性を著しく損じてしまう。

4. 実験結果

4.1 本実験条件における粒子ベクトル解析の適正化

今回解析の手法として使うPIV法の適用には、静止画像のインターバル、測定範囲のマトリクスの大きさやトレーサーの輝度差、比率などの適正範囲をあらかじめ求める必要がある。今回はインターバルについてのみ検討した。

4.1.1 静止画像インターバルの影響

実験の前段階として、本実験条件での静止画像インターバルの影響について検討した。ここで言う、「インターバル」とは、解析する静止画像の画像間隔を示している。本測定では、CCDカメラのフレームレート（単位時間当たりのコマ（フレーム）数）を30fps（1秒間当たりのコマ（フレーム）数）にして、10秒間撮影している。したがって、インターバル1とは1/30秒を意味している。まず排出口直上に障害物を設置しない排出条件で検討した。

アルミナ球排出速度が0.93kg/minの時（図8）、解析した静止画像のインターバルが1, 10の場合にはほとんどのマトリクスに速度ベクトル表示が出ていない。これは、静止画像のインターバルが小さい場合には注目する輝度分布の粒子が同じマトリクス内に存在するため、類似性の高いマトリクスを他に見いだすことができず、速度ベクトル未表示のマトリクスが多いものと考えられる。インターバルが30, 50, 70の場合には速度ベクトル表示が出ているが、解析したマトリクス全域には出ていない。インターバルが90の場合には解析したマトリクス全域で速度ベクトルが表示されている。インターバルが110, 130, 145の場合にはインターバルが90の時とほぼ同じ速度ベクトルであった。以上の知見より、

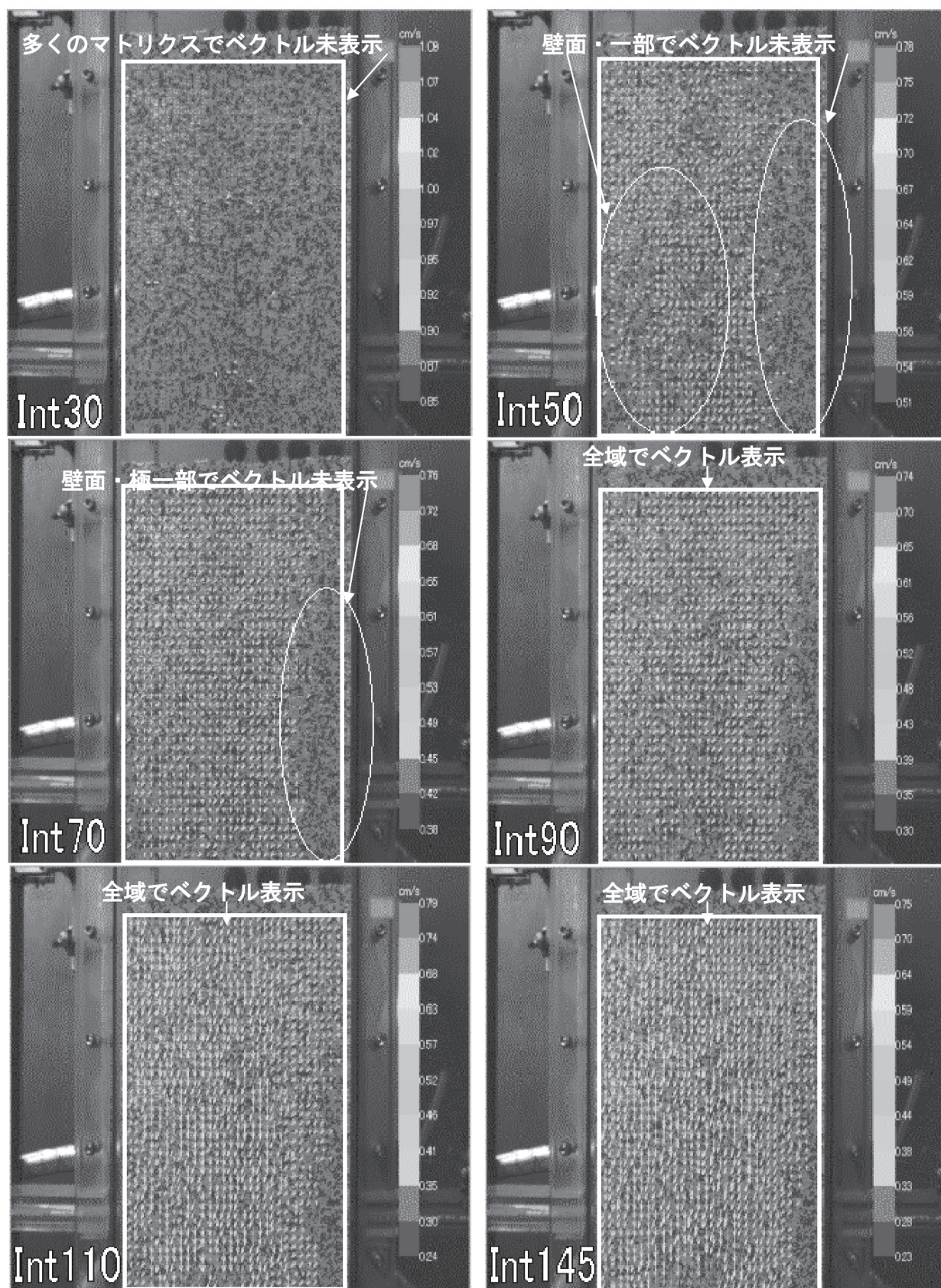


図 8 粒子ベクトル測定結果に及ぼす静止画像インターバルの影響 (アルミナ球排出量0.93kg/min, 障害物なし (白い枠は解析範囲を明示))

本実験条件では解析する静止画像のインターバルの適正範囲は90（3秒）以上である。

同様に、アルミナ球排出速度が $1.62\text{kg}/\text{min}$ の時には静止画像のインターバルの適正範囲は70（2.33秒）以上である。この二つの結果の比較より、排出速度の増加によりインターバルの適正範囲の下限値が小さくなることが判明した。これは排出速度の増加によって早い段階で注目する輝度分布と類似性の高いマトリクスを見つけられたためである。

つぎに、排出口直上に障害物を設置した条件で検討した。アルミナ球排出速度が $0.93\text{kg}/\text{min}$ の時には静止画像のインターバルの適正範囲は90～145（3～4.83秒）である。

同様に、アルミナ球排出速度が $1.62\text{kg}/\text{min}$ の時には静止画像のインターバルの適正範囲は50～90（1.67～3秒）である。この二つの結果の比較より、排出速度の増加によりインターバルの適正範囲の下限値が小さくなることが本条件でも判明した。理由は上記の説明と同じである。

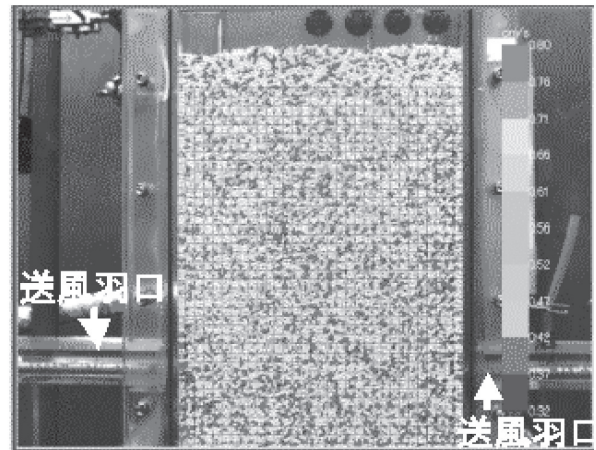
粒子ベクトル挙動に及ぼす粒子排出方法の影響を比較検討した4.2節では、解析範囲全域に速度ベクトルが表示されているアルミナ球排出速度 $0.93\text{ kg}/\text{min}$ 、解析する2枚の静止画像のインターバル90（3秒）の条件を採用した。

4.2 粒子の速度ベクトル挙動に及ぼす粒子排出方法の影響

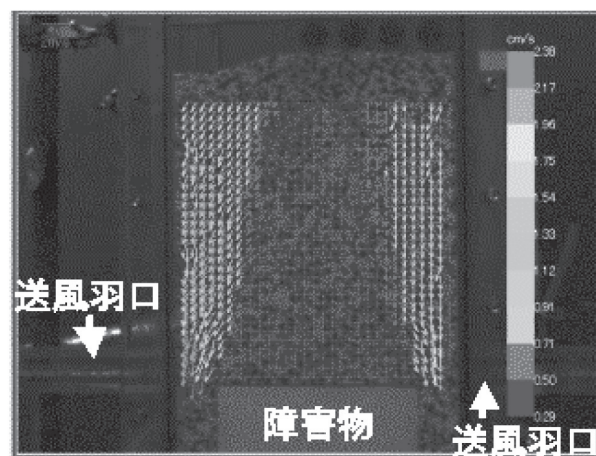
粒子排出方法の違いによって粒子の速度ベクトルにどのように影響するかを検討した。向流移動層での装入物粒子の速度ベクトル解析結果、その結果をデジタルデータで表示したものをそれぞれ図9、図10に示す。図10では羽口レベル、羽口上50mm、100mm、150mm、200mmの高さレベルでの粒子速度を示した。

排出口直上に障害物を設置しない排出条件では、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る（図9の(a)）。さらにデジタルデータで見ると、いずれの高さレベルでも径方向ではほぼ一様な降下速度になっている（図10の(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として降下し、粒子の速度ベクトルを見るとプラグフローに近い降下挙動である。

排出口直上に障害物を設置する排出条件では、中心の粒子は障害物直上には降下せず、羽口付近に向けて降下している（図9の(b)）。さらにデジタルデータで見ると、羽口レベルでは排出口直上の粒子降下速度は大きく、排出口以外の領域（障害物直上）



(a) 障害物未設置条件



(b) 障害物設置条件

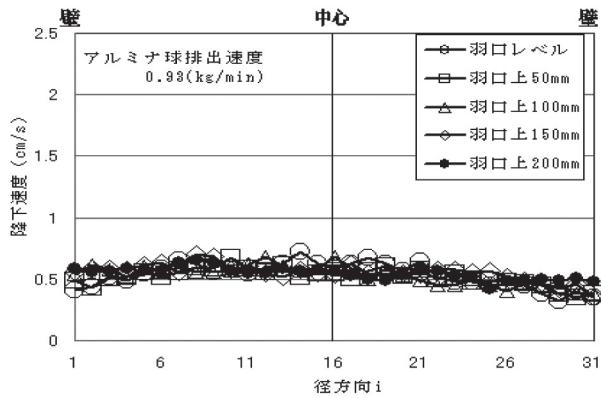
図9 向流移動層での装入物粒子の速度ベクトル解析結果

の降下速度はゼロである。羽口上50mm、100mm、150mm、200mmと高さレベルの上昇に伴い、粒子の降下する範囲が広がっている。羽口上200mmの高さレベルでは、中心部の粒子も降下している（図10の(b)）。このように排出口直上の粒子降下速度が速く、ファンネルフローに近い粒子挙動である。

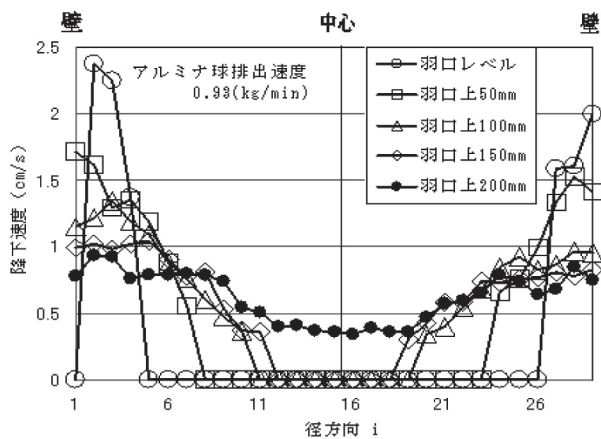
4.3 温度分布に及ぼす粒子排出方法の影響

粒子排出方法の違いによって、温度分布にどのように影響するかを検討した。各条件での温度分布測定結果、それをデジタルデータで表示したものをそれぞれ図11、図12に示す。

固定層条件（図11の(a)）と排出口直上に障害物を設置しない移動層条件（図11の(b)）の温度分布を比較する。障害物を設置しない移動層条件では、固定層条件に比べて羽口先から始まる高温領域の面積が大きい。固定層条件（図12の(a)）と排出口直上に障害物を設置しない移動層条件（図15の(b)）



(a) 障害物未設置条件



(b) 障害物設置条件

図 10 向流移動層での装入物粒子の速度ベクトルの径方向分布

のデジタルデータを比較すると、障害物を設置しない移動層条件では、固定層条件に比べてどの高さレベルにおいても径方向全体にわたり約0.6~0.8℃温度が上昇している。これは固定層から移動層への変化により、アルミナ球充填層の通気抵抗が減少し、送風量が100ℓ/minから170ℓ/minに増加した結果で

ある。

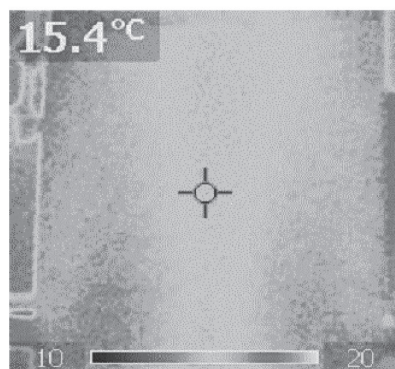
排出口直上に障害物を設置しない移動層条件（図11の(b)）と障害物を設置する移動層条件（図11の(c)）の温度分布を比較すると、障害物を設置する移動層条件では、障害物を設置しない移動層条件に比べて中心部の高温領域の面積が大きい。排出口直上に障害物を設置しない移動層条件（図12の(b)）と障害物を設置する移動層条件（図12の(c)）のデジタルデータを比較すると、障害物を設置する移動層条件では、障害物を設置しない移動層条件に比べて、周辺部の温度はほぼ同じであるが中心部の温度はさらに約1℃上昇している。障害物を設置しない移動層条件と障害物を設置する移動層条件での温度分布に大きい差異が見られた。この温度分布の差異のメカニズムの違いについては、4.4節で説明する。

4.4 温度分布の差異から推定される粒子ベクトル挙動とガス流れの関係

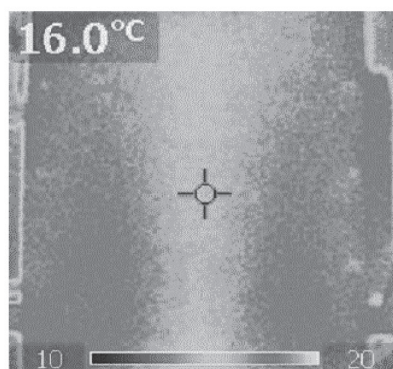
4.3節で説明した2つの移動層条件時（排出口直上に障害物を設置しないで粒子挙動がプラグフローに近い場合と、障害物を設置して粒子挙動がファンネルフローに近い場合）の温度分布差異のメカニズムについて検討した。

障害物を設置する移動層条件（図13の(b)）では、ファンネルフローに近い粒子挙動のため隣接する粒子と空隙が常に位置関係を変えながら降下する。したがって、移動層への変化に伴う通気抵抗の減少により増加した送風量の一定量が中心部に分配されたと推定される。

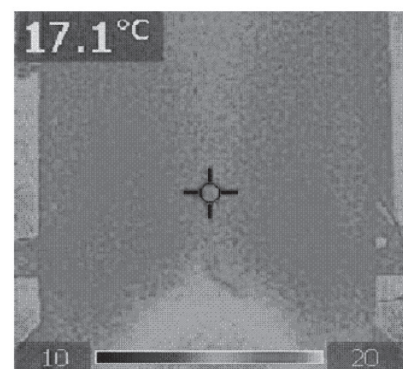
障害物を設置しない移動層条件（図13の(a)）の場合には、4.2節で説明したように、移動層にもかかわらず粒子が位置関係を変えずに固定層の固まりとして降下している。したがって、移動層への変化に伴う通気抵抗の減少により増加した送風量の大部



(a) 固定層条件



(b) 移動層条件(障害物未設置)



(c) 移動層条件(障害物設置)

図 11 向流移動層での温度分布

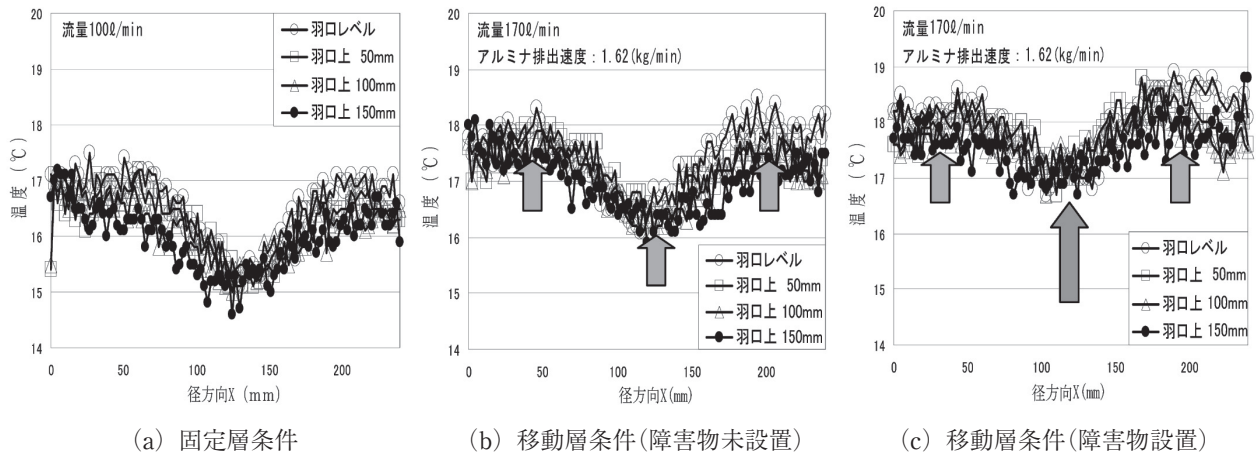


図 12 向流移動層での温度の径方向分布

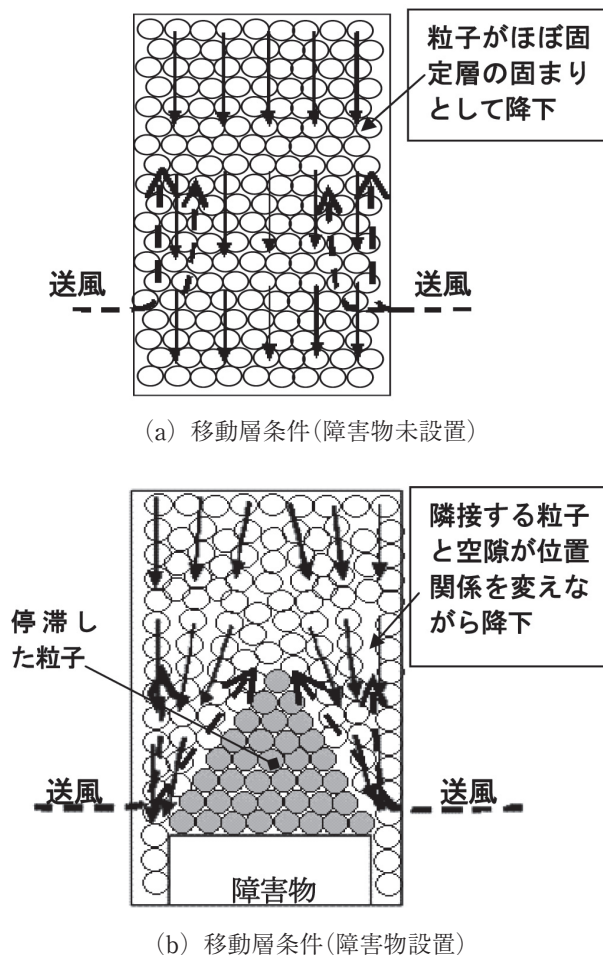


図 13 移動層条件時の温度分布差異のメカニズム

分は中間部～周辺部に分配されたと推定される。その結果、障害物を設置する移動層条件に比べて中心部の温度上昇量が小さかったと推定される。本メカニズムを検証するためには、固体流れ、ガス流れ、伝熱を統合した数式モデルによる検討が必要である。

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、ガス流れに大きい影響を及ぼす粒子挙動の定量化と制御が重要であることが判明した。

5. 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、CCDカメラによる動画撮影とPIV法（相関法）を用いて、高炉に代表される向流移動層プロセスでの粒子降下挙動の定量化を試み、以下の知見を得た。

- (1) 粒子の速度ベクトルを計測できる静止画像のインターバルの適正範囲は実験条件により異なる。具体的には、羽口下の排出口直上に障害物を設置しない条件では、排出速度0.93kg/minで90（3秒）以上、排出速度1.62kg/minで70（2.33秒）以上である。羽口下の排出口直上に障害物を設置する条件では、排出速度0.93kg/minで90～145（3～4.83秒）、排出速度1.62kg/minで50～90（1.67～2.33秒）である。
- (2) 羽口下の排出口直上に障害物を設置しない移動層条件と障害物を設置する移動層条件での比較により、移動層でも粒子降下挙動の差異により温度分布が異なっていることが判明した。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。
- (3) 上記（2）の知見より、ガスから固体への熱伝達により温度分布が決まる向流移動層ではガスの流れの分布が伝熱のポイントであり、ガス流れに大きい影響を及ぼす粒子挙動の定

量化と制御技術が熱効率改善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.html>
- 3) 入田俊幸，磯山 正，原 義明，奥野嘉雄，金山有治：鉄と鉄鋼，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：鉄と鉄鋼，77（1991）10, 1617.
- 5) Morimasa Ichida, Masayoshi Takao, Kazuya Kunitomo, Shinroku Matsuzaki, Tadashi Deno and Kazuhiro Nishihara: ISIJ Int., 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.