

向流移動層内の粒子挙動と温度分布に及ぼす 炉下部排出構造の影響

夏井 貴臣*・一田 守政

Influence of furnace lower exhaust structure on particle behavior and thermal distribution in counter-current moving bed

Takaomi NATSUI* and Morimasa ICHIDA

(平成25年10月25日受理)

The influence of the furnace lower exhaust structure on the particle behavior and the thermal distribution in the counter-current moving bed where the shaft reduction furnace was assumed for was examined with two dimensional reduced scale model, CCD camera, and infrared camera and the following findings were obtained. A peripheral exhaust and an increase in the outlet number reduce the stagnation layer, expand the descent area (expansion of the gas circulation area), and make the thermal distribution uniform consequentially.

Keywords: counter-current moving bed, exhaust structure, particle behavior, PIV, thermal distribution

1. 緒言

向流移動層は高炉などの製鉄還元炉や下水汚泥溶融炉、排煙処理システム等に広く用いられている¹⁾。還元炉プロセスは固体粒子と還元ガスの向流移動層であり、粒子降下挙動とそれに関連したガス流れによる温度分布の制御が安定稼動に不可欠とされている。そこで本研究では、還元炉プロセス内の粒子挙動と温度分布に及ぼす炉下部排出構造の影響を、シャフト還元炉の二次元縮尺模型、CCDカメラ、熱画像測定装置を用いて検討した。

2. 実験装置

2.1. 実験装置の構成

実験装置の構成を図1に示す。実験装置は還元炉縮尺二次元模型、温風発生装置、プロワー、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還元炉縮尺模型

* 秋田高専専攻科修了生

は、平均的な還元炉の1/25縮尺の二次元模型(長さ325mm×幅40mm×高さ510mm)である。

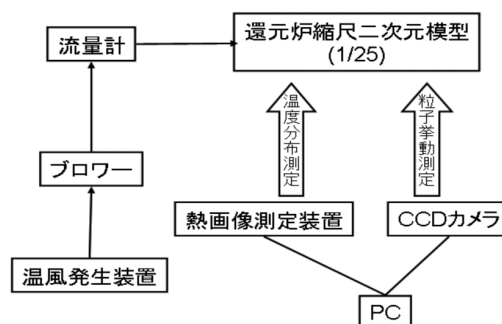


図1 実験装置の構成

2.2. 還元炉縮尺二次元模型

図2に還元炉縮尺二次元模型を示す。模型全面をアクリル板製にすること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還元炉で充填されるペレットを模擬したφ3mmのアルミナ球を用い、高温ガスの代わりに温風を用いた。アルミナ球は装置上部の漏

斗から手動で装入する。送風羽口からは約 20℃の温風が吹き込まれる。送風羽口近傍に背面から温度計を差し込むことにより、羽口先端の温度を測定する。また実験装置前面の亚克力板表面の中心温度を熱画像測定装置で測定する。実験装置に装入されたアルミナ球はホッパーを介し、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によりアルミナ球排出量を制御する。

2.3. 排出構造条件

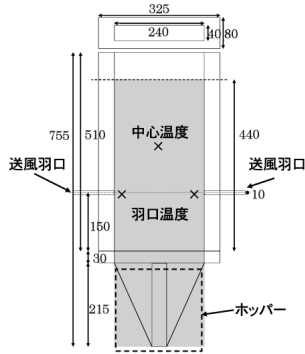


図 2 還元炉縮尺二次元模型概観

排出構造条件を図 3 に示す。障害物を配置しない (a) 全面排出，左右に排出口を設けた (b) 周辺排出，中央に 1 本の排出口を設けた (c) 中心排出，中央に 2 本の排出口を設けた (d) 中間排出，中心排出と中間排出にそれぞれ周辺排出を付加した (e) 周辺中心排出，(f) 周辺中間排出の 6 水準で実験を行った。(b)~(f) は排出口の断面積を一定とし，また (e)，(f) は炉壁近傍の排出口下部を塞がないように障害物の一角をホッパーの角度に合わせて加工した。

3. 基準実験条件の導出²⁾

還元炉内の装入物の降下挙動は重力とガスの慣性力に支配される。したがって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求めた³⁾ 基準実験条件を表 1 に示す。

これを参考にして今回の実験では送風量 0.180Nm³/min，アルミナ球排出量は 1.62kg/min と設定した。アルミナ球排出速度を基準実験条件 (0.303kg/min) と比較して約 5 倍にしたのは，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。

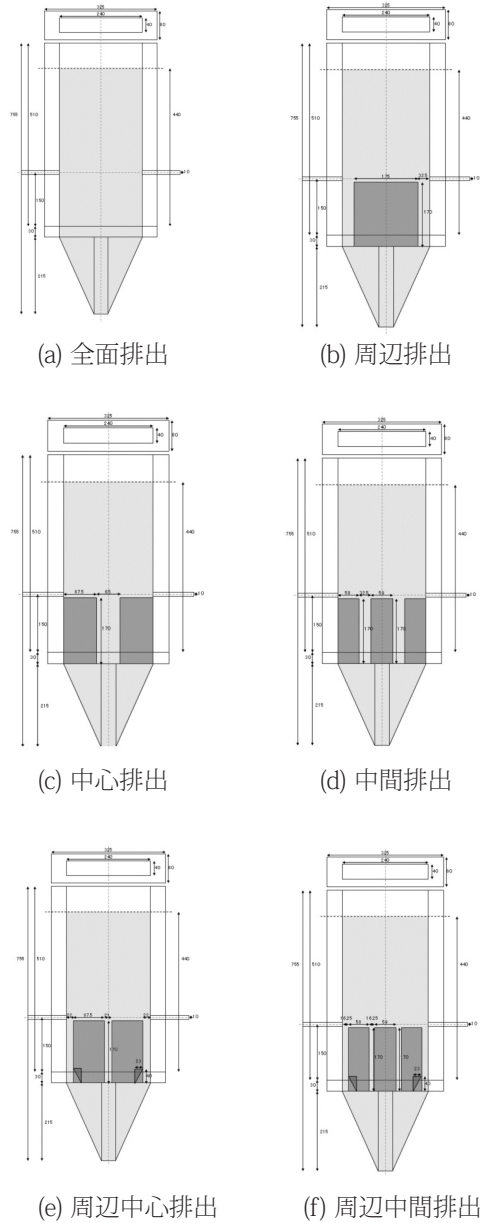


図 3 排出構造条件

	模型(縮尺 1/25)	実炉
送風量 VB'(Nm ³ /min)	0.316	
羽口風速 u _t '(m/s)	13.2	
ガス流速 v _t '(m/s)	0.549	2.7
アルミナ球排出速度 Ws'(kg/min)	0.303	5.67 × 10 ⁻⁴
アルミナ球降下速度 v _s '(m/min)	2.64 × 10 ⁻⁴	1.30 × 10 ⁻³
v _t '/v _s '(-)	2080	2080

表 1 基準実験条件

4. 実験方法

本実験では粒子挙動測定と温度分布測定という2種類の測定実験を行う。以下、4.1に粒子挙動の測定方法、4.2に温度分布の測定方法を示す。

4.1. 粒子挙動の測定方法

2.1で説明した様に、本実験装置は温風を送風する機能を備えているが、粒子挙動測定実験では無送風の条件下で実験を行った。粒子挙動測定はCCDカメラを用いる。二次元縮尺模型上部までアルミナ球を充填後、アルミナ球排出を開始する。排出開始後10秒時、10分時、20分時、30分時にCCDカメラでそれぞれ10秒間動画を撮影する。撮影した動画を1秒間に30枚の静止画像としてノートPCに保存する。適切な時間間隔(今回は2秒)の2枚の静止画像から、PIV法により粒子速度解析を実施する。実験は前述の図4に示す6水準で行った。

4.1.1 PIV法⁴⁾

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からベクトル解析を行う方法である。図4のように、ある時間 t_0 とその時間から Δt たった画像があるとき、 t_0 に任意の点Pをとり、Pの周辺にマトリクスをとる。点Pのマトリクス内の輝度分布と類似しているものを Δt 後の画像からとり点Qとし、数学的に注目しているマトリクスと相互相関係数が最も高いものを類似しているとする。そしてこのPQを移動量として速度を求める。

上記からわかるようにPIV法の特徴である静止画像二枚から解析可能である点、粒子の高分布密度時に適している点、粒子以外(気流等)の画像に対しても有効である点から本実験ではPIV法を解析に用いた。

今回の実験条件(アルミナ球排出速度1.62kg/min, 各種排出構造条件)では、PIV法による粒子の速度ベクトルの解析条件として、解析範囲全域に速度ベクトルが表示されている静止画像のインターバル60(2秒)の条件を採用した。

4.2. 温度分布の測定方法

二次元縮尺模型上部までアルミナ球を充填し、温風発生装置により昇温された空気をブローから送風羽口を介して実験装置本体へ送風し、実験装置およびアルミナ球を昇温する。この際の温風温度は20℃

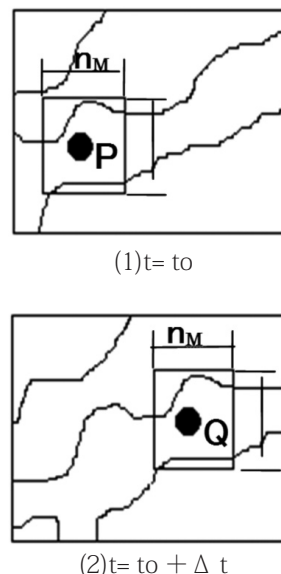


図4 PIV法による輝度分布によるパターン追跡

前後になる。この状態でアクリル板表面の中心温度(図3)が17℃になるまで昇温する。

実験装置アクリル板表面の中心温度が約17℃に到達したら、熱画像測定装置で温度分布を測定し、これを固定層の温度分布とした。その後アルミナ球を排出開始し、向流移動層温間実験を開始する。

アルミナ球排出後、5分後ごとに温度分布を測定して、これを30分間行う。この温度分布を向流移動層の温度分布とした。実験は図4に示す6水準の炉下部排出構造条件で行った。

5. 実験結果

5.1. 粒子挙動の時間的変化の比較

全面排出(図3の(a))における10秒時、30秒時、5分時、10分時、20分時、30分時の粒子速度分布を図5に示す。10秒時、30秒時には降下速度分布が径方向でばらつきがある。5分時、10分時には降下速度分布が高さ方向でばらつきがある。このため排出開始から10分時までは非定常状態であると判断できる。20分時、30分時には降下速度分布が径方向、高さ方向において共に一様となっているため、定常状態であると判断できる。よって今後の各実験条件における解析結果の比較には30分時の定常状態のデータを採用する。本二次元縮尺模型内の粒子は1回の入れ替わりに約6分かかり、アルミナ球が5~6回入れ替わることに相当している。

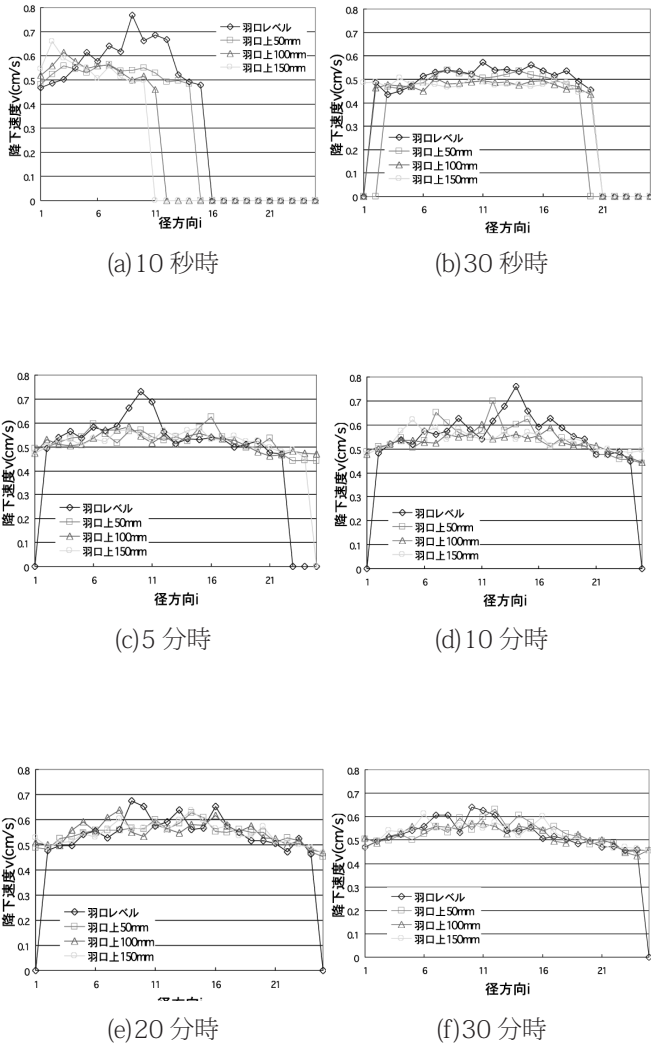


図5 全面排出時の粒子速度分布の時間変化

5.2. 粒子降下挙動に及ぼす排出構造の影響

5.2.1 全面排出

全面排出時 (図3の(a))の粒子速度ベクトル解析結果と粒子降下速度分布を図6に示す。粒子の降下速度が径方向にほぼ均一である(図6の(b))。また、速度ベクトルのほとんどが下向きである。炉壁近傍を除く粒子があたかも固定層の塊のように降下している(図6の(a))。

5.2.2 周辺排出

周辺排出時(図3の(b))の粒子速度ベクトル解析結果と粒子降下速度分布を図7に示す。粒子は断面積の縮小した周辺の排出口に向かって速度分布を持ちながら降下している(図7の(b))。また障害物直上に非常に大きな停滞層を形成している。

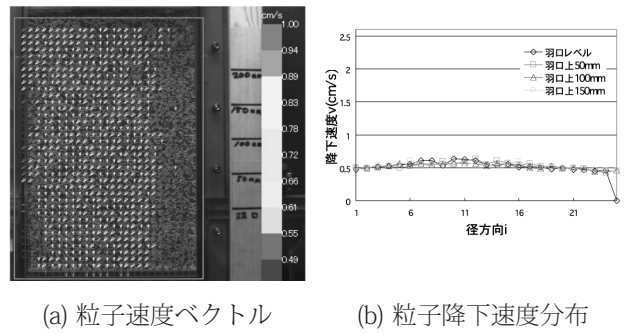


図6 全面排出における粒子降下挙動

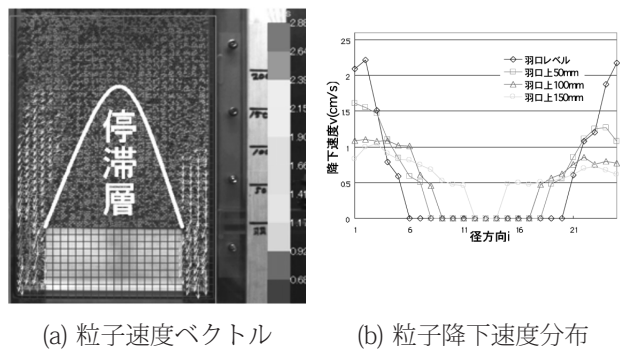


図7 周辺排出における粒子降下挙動

5.2.3 中心排出

中心排出時(図3の(c))の粒子速度ベクトル解析結果と粒子降下速度分布を図8に示す。粒子は断面積の縮小した中心部の排出口に向かって速度分布を持ちながら降下している(図8の(b))。また、周辺部(左右の炉壁近傍)に大きな停滞層を形成している(図8の(a))。

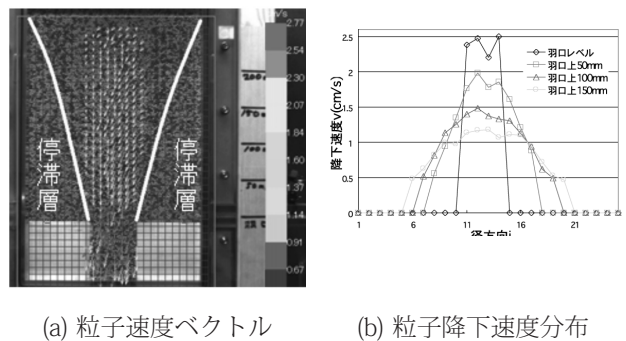


図8 中心排出における粒子降下挙動

5.2.4 中間排出

中間排出時 (図 3 の (d)) の粒子速度ベクトル解析結果と粒子降下速度分布を 図 9 に示す。粒子は断面積の縮小した中間部の排出口に向かって速度分布を持ちながら降下している (図 9 の (b))。また、中心に小さな停滞層、周辺に大きな停滞層を形成している (図 9 の (a))。

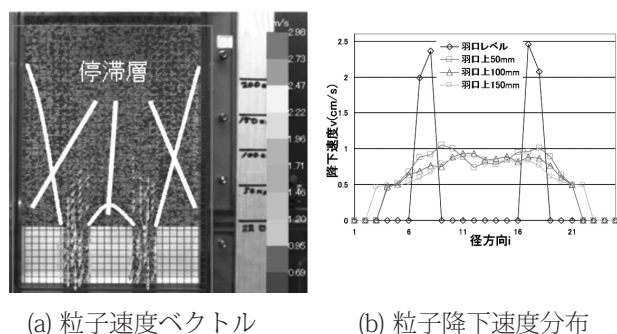


図 9 中間排出における粒子降下挙動

5.3. 停滞層の縮小対策

5.2 より周辺排出, 中心排出, 中間排出のいずれの場合も中心部または周辺部に大きい停滞層を形成することが示された。周辺部に大きい停滞層が形成される中心排出時・中間排出時には周辺排出を付加し, 周辺部停滞層の縮小効果を確認する実験を行った。そして中心部に大きい停滞層が形成される周辺排出時には中心排出・中間排出を付加し, 中心部停滞層の縮小効果を確認する実験を行った。

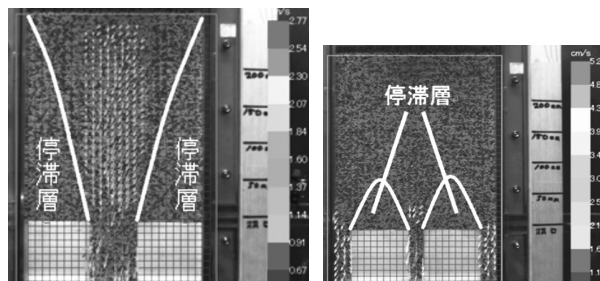
5.3.1 周辺排出付加効果の比較 1

中心排出 (図 3 の (c)) と中心排出に周辺排出を付加した周辺中心排出 (図 3 の (e)) の粒子速度ベクトル解析結果と粒子降下速度分布を 図 10 に示す。周辺部に大きい停滞層が形成されている中心排出時 (図 10 の (a)) に比べて, 周辺中心排出時 (図 10 の (b)) は炉壁近傍で粒子が降下しているため, 周辺部の停滞層が大幅に縮小している。

5.3.2 周辺排出付加効果の比較 2

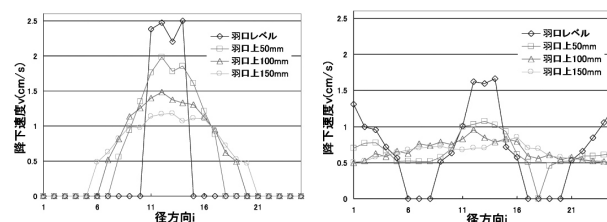
中間排出 (図 3 の (d)) と中間排出に周辺排出を付加した周辺中間排出 (図 3 の (f)) の粒子速度ベクトル解析結果と粒子降下速度分布を 図 11 に示す。周辺部に大きい停滞層が形成されている中間排出 (図 11 の (a)) に比べ周辺中間排出 (図 11 の (b)) は炉壁近傍で粒子

が降下している為, 周辺の停滞層が大幅に縮小している。また, 粒子の流れが周辺部に分散されるため, 中心部の停滞層も若干縮小している。



(a) 中心排出 (b) 周辺中心排出

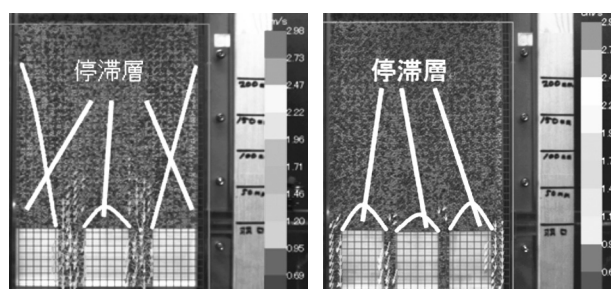
(1) 粒子速度ベクトル



(c) 中心排出 (d) 周辺中心排出

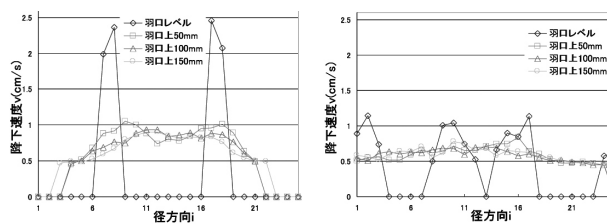
(2) 粒子降下速度分布

図 10 中心排出, 周辺中心排出時の粒子降下挙動



(a) 中間排出 (b) 周辺中間排出

(1) 粒子速度ベクトル



(c) 中間排出 (d) 周辺中間排出

(2) 粒子降下速度分布

図 11 中間排出, 周辺中間排出時の粒子降下挙動

5.3.3 中心・中間排出付加効果

周辺排出（図3の(b)）周辺排出（図3の(b)）に中心排出を付加した周辺中心排出（図3の(e)）、中間排出を付加した周辺中間排出（図3の(f)）の粒子速度ベクトル解析結果と粒子降下速度分布結果を図12に示す。排出口本数の増加に伴い、停滞層が縮小している。これは個々の障害物の幅が縮小しているためと推定される。

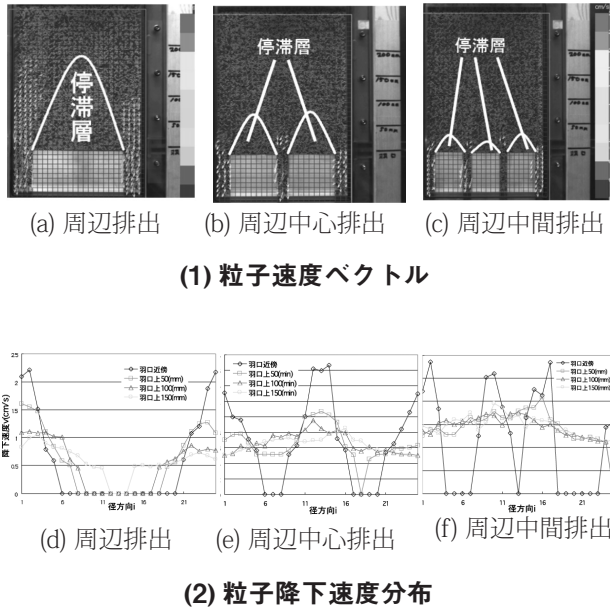


図12 周辺排出，周辺中心排出，周辺中間排出の粒子降下挙動

5.4. 温度分布に及ぼす排出構造の影響

5.4.1 温度分布に及ぼす排出構造の影響

全面排出時（図3の(a)）、周辺排出時（図3の(b)）、中心排出時（図3の(c)）、中間排出時（図3の(d)）の温度分布を図13に示す。全面排出時には周辺部の温度は高く中心部の温度は低い（図13の(a)）。周辺排出時には大きな停滞層を形成している中心部の温度が高い（図13の(b)）。中心排出時（図13の(c)）、中間排出時（図13の(d)）ともに大きな停滞層が形成されている周辺部の温度が高く中心部の温度が低い、不均一な温度分布である（図13の(c)と(d)）。

5.5. 温度分布の均一化対策

5.5.1 中心排出時及び中間排出時に周辺排出を付加した場合の温度分布

図13の(c)、(d)で見られたような周辺部の高温化

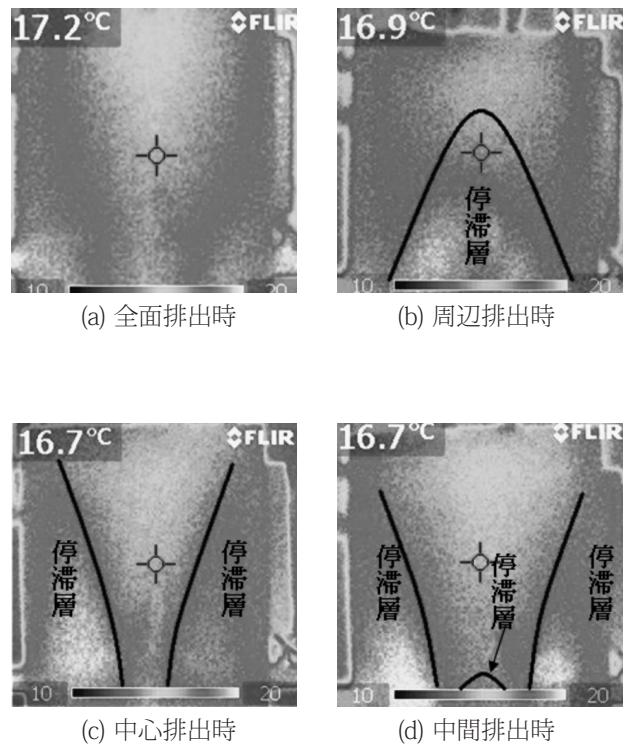
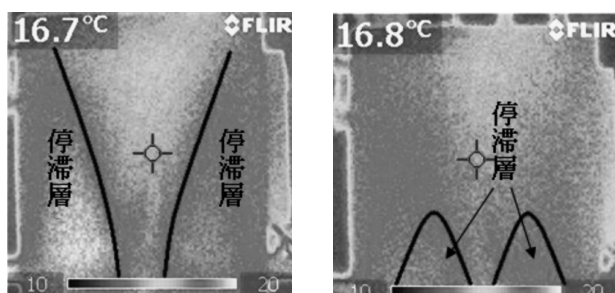


図13 全面排出時，周辺排出時，中心排出時，中間排出時の温度分布

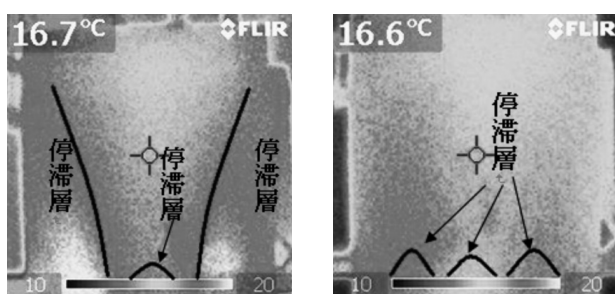
は還元炉内壁の付着物への進展が予想され望ましくない。そこで温度分布を均一化させることを目的として、周辺部に排出口を付加した周辺中心排出時（図3の(e)）、周辺中間排出時（図3の(f)）の温度実験を行い、それぞれ中心排出時（図3の(c)）、中間排出時（図3の(d)）と温度分布を比較した。

中心排出時（図3の(c)）と周辺中心排出時（図3の(e)）の温度分布測定結果を図14に示す。中心排出時に周辺排出を付加した周辺中心排出時には、周辺部（停滞層）の高温領域が縮小した結果、温度分布は均一化される（図14の(b)）。

中間排出時（図3の(d)）と周辺中間排出時（図3の(f)）の温度分布測定結果を図15に示す。図14と同様に中間排出時に周辺排出を付加した周辺中間排出時には周辺部の高温領域が縮小し、中心部温度が上昇した結果、温度分布が均一化される（図15の(b)）。



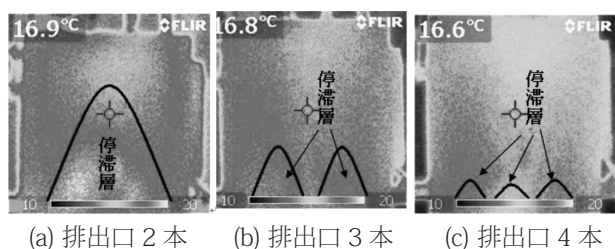
(a) 中心排出時 (b) 周辺中心排出時
 図 14 中心排出時と周辺中心排出時の温度分布



(a) 中間排出時 (b) 周辺中間排出時
 図 15 中間排出時と周辺中間排出時の温度分布

5.5.2 周辺排出時における排出口本数を増加した場合の温度分布

周辺排出時 (図 3 の (b)), 周辺中心排出時 (図 3 の (e)), 周辺中間排出時 (図 3 の (f)) の温度分布測定結果を図 16 に示す。周辺排出時には大きな停滞層が形成されている中心部が高温領域となっているが (図 16 の (a)), 周辺中心排出時, 周辺中間排出時には高温領域は縮小している (図 16 の (b) と (c))。排出口本数が増加するにしたがって, 高温領域の停滞層が縮小し, 温度分布が均一化される。



(a) 排出口 2 本 (b) 排出口 3 本 (c) 排出口 4 本
 図 16 周辺排出時と周辺中心排出時と周辺中間排出時の温度分布

5.6. 各実験条件による温度分布結果差異のメカニズム

5.6.1 渦度から見た排出構造と粒子挙動の関係

5.2, 5.3 で評価した各排出構造条件時の粒子の動きを, 粒子流線の渦度解析により検討した。

一般的に渦度ベクトル Ω は流速ベクトル $V=(V_x, V_y, V_z)$ により (1) 式のように表される。

$$\Omega = \text{rot}\vec{V} = \nabla \times \vec{V} = \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z}, \frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x}, \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \quad (1)$$

本実験は2次元であるので(2)式になる。

$$\Omega = \text{rot}\vec{V} = \nabla \times \vec{V} = \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

各排出構造条件における渦度分布解析結果を図 17 に示す。周辺排出時 (図 3 の (b)) には羽口レベルから羽口上 150mm の範囲で周辺部の粒子流線の渦度の絶対値が増加し, 停滞層を形成している中心部の渦度は 0 である (図 17 の (b))。中心排出時 (図 4 の (c)) には羽口レベルから羽口上 150mm の範囲で中心部の粒子流線の渦度の絶対値が増加し, 停滞層を形成している周辺部の渦度は 0 である (図 17 の (c))。中間排出時 (図 3 の (d)) には羽口レベルから羽口上 150mm の範囲で中間部の粒子流線の渦度の絶対値が増加し, 停滞層を形成している周辺部の渦度は 0 である (図 17 の (d))。渦度の絶対値の増加は, 粒子が高さ方向だけでなく, 断面積の小さい排出口へ向かって径方向に移動しながら降下している。

排出口を増加させた周辺中心排出時 (図 3 の (e)) と周辺中間排出時 (図 3 の (f)) には, 粒子流線が複雑になり高さ方向と径方向の全体にわたり渦度の絶対値が増加している (図 17 の (e) と (f))。

一方, 全面排出時には渦度の絶対値が径方向においてきわめて小さい (図 17 の (a))。これは, 炉壁近傍を除いた粒子があたかも固定層のように降下しており, プラグフローに近いことを示している。

5.6.2 周辺への排出口付加 (排出口本数増加) による温度分布均一化のメカニズム

周辺部に排出口を付加 (排出口本数増加) したことによる温度分布均一化のメカニズムを, 中心排出と周辺中心排出を例として図 18 に示す。中心排出時には 5.6.1 の渦度解析 (図 17 の (c)) で説明したように左右の障害物上の周辺部に非常に大きな停滞層が形成される (図 18 の (a))。一方中心排出に周辺排出を

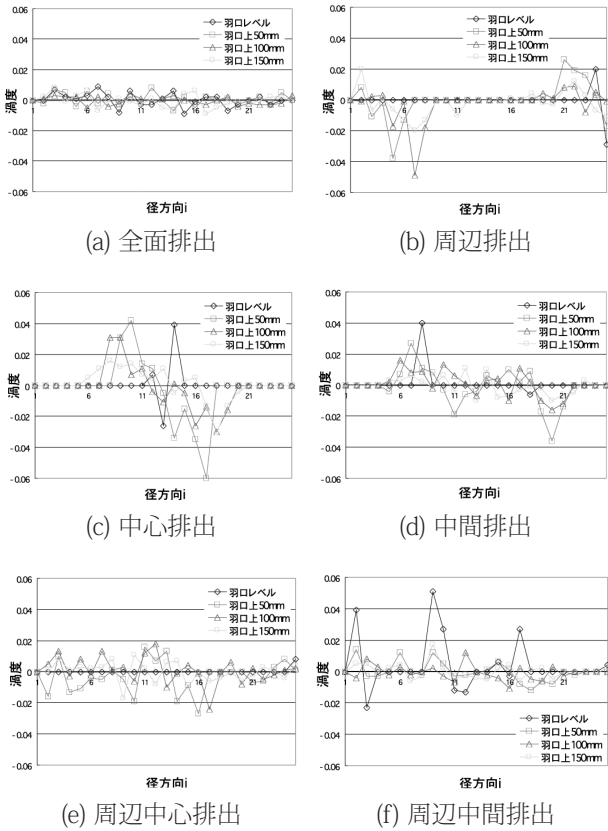


図 17 各実験条件における温度分布

付加した周辺中心排出時には、5.6.1 の渦度解析 (図 17 の (e)) で説明したように、左右の障害物上の周辺部に形成される停滞層が大幅に縮小される (図 18 の (b))。

周辺部の排出口付加は、総排出口断面積が同じであっても、停滞層縮小と粒子降下領域の拡大に効果的である。実用化を想定した三次元のシャフト還元炉 (円形) では、周辺部の面積比率が大きいので、上記の周辺排出口付加効果はより大きいと考えられる。停滞層の縮小と粒子降下領域の拡大により、高温の停滞層が縮小され、拡大した降下領域のガス流通量が増加することから、結果的に装置内の温度分布が均一化されると考えられる。

6. 結言

シャフト還元炉を想定した向流移動層における粒子挙動と温度分布に及ぼす炉下部排出構造の影響を二次元縮尺模型、CCD カメラ、熱画像測定装置を用いて検討し、以下の知見を得た。

- (1) 周辺排出付加, 排出口本数増加は周辺部, 中心部の停滞層縮小対策として有効である。

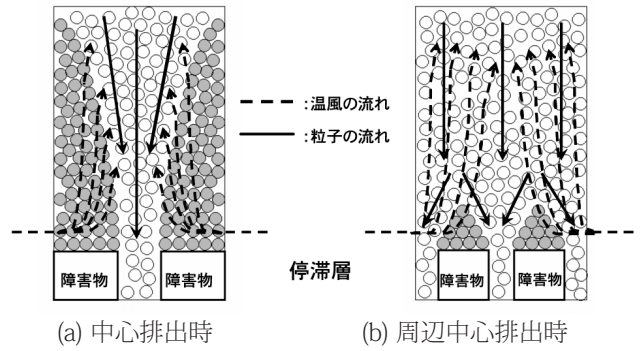


図 18 周辺に排出口を付加 (排出口本数増加) による温度分布均一化のメカニズム

- ① 周辺排出付加により炉壁近傍で粒子が降下し、周辺の停滞層が大幅に縮小する。
 - ② 排出口本数増加により個々の障害物の幅が縮小し、停滞層が縮小する。
- (2) 温度分布は粒子の降下挙動と密接に関連し、停滞層は高温領域となる。
 - (3) 周辺排出付加と排出口本数増加は、停滞層を縮小、かつ降下領域を拡大 (ガス流通領域の拡大) させるため、温度分布を均一化する。
 - (4) 渦度解析により粒子の動きを定量的に評価できることを確認した。

7. 参考文献

- 1) 篠原邦夫, 高橋洋志, 中村正秋: 移動層工学, 北海道大学図書刊行会, 札幌, (2000), 11.
- 2) 江守一郎: 模型実験の理論と応用, 技報堂出版, 東京, (1985), 85.
- 3) 金田啓佑, 一田守政: 秋田工業高等専門学校, 47(2012), 1.
- 4) 加賀昭和, 井上義雄, 山口克人: 可視化情報, 14(1994), 53.