

向流移動層内温度分布に及ぼす粒子速度とガス流速の影響

進 藤 大 輔*・一 田 守 政

Influence of particle velocity and gas velocity on thermal distribution in counter current moving bed

Daisuke SHINDO* and Morimasa ICHIDA

(平成22年11月26日受理)

The improvement of thermal efficiency in the process of the blast furnace where it has the majority of the amount of the CO₂ exhaust in the iron and steel industry is an important problem. The experiment was conducted that used the current moving bed in order to improve the thermal efficiency of the blast furnace. Concretely, the experiment to which the gas velocity and the particle velocity were changed was done, and influence of particle velocity and gas velocity on thermal distribution was analyzed. The in-furnace temperature decreases along with the rise of the particle velocity. The in-furnace temperature increases along with the rise of the gas velocity. The in-furnace temperature is arranged by heat flow ratio.

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である^{1, 2)}。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って決められている。そこで本研究では、熱効率の改善を目的として向流移動層である高炉プロセスの二次元縮尺模型装置³⁾を用いた実験を行った。

高炉プロセスでは鉄鉱石の還元反応、その他種々の還元反応を伴うため、熱効率に及ぼす温度分布の影響は大きいと考えられる。そこで、温度分布の大きい影響因子である粒子速度とガス流速を変更した実験を行い、熱画像測定装置で温度分布を測定することにより、向流移動層内の温度分布に及ぼす粒子速度とガス流速の影響を解析した。

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。

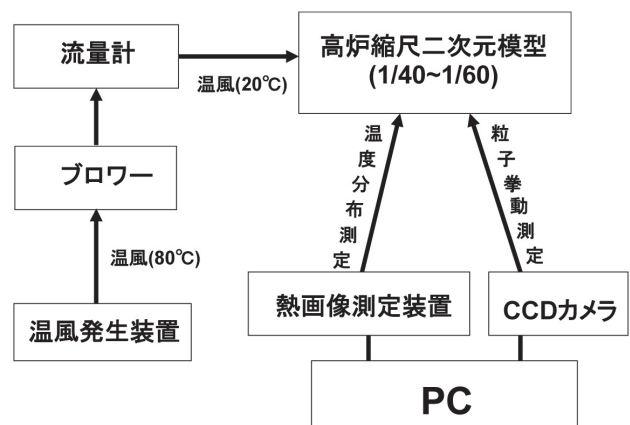


図1 実験装置の構成

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、装置の上部にある漏斗から手動で装入する。温風発

* 秋田高専専攻科学生

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。

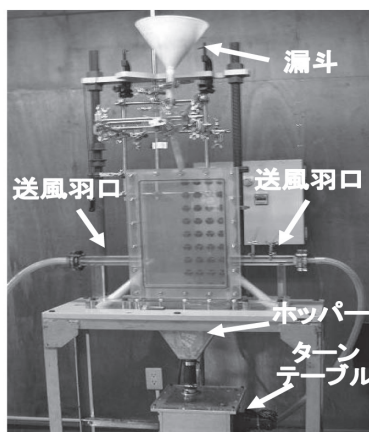


図2 高炉縮尺二次元模型概観

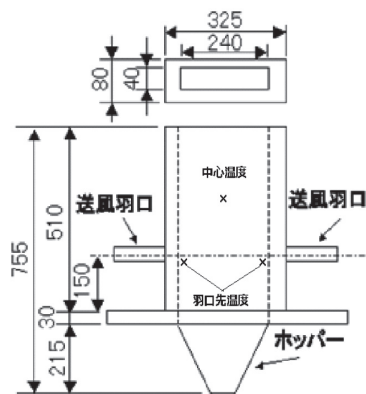


図3 高炉縮尺二次元模型寸法

3. 実験方法

3.1 アルミナ球排出速度検量線の作成

実験の基準となるアルミナ球排出速度の検量線を作成した。その際に、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二次元縮尺模型の下端から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0.40mの方がストックライン0.06m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影響によると推定される。これらの結果より、ストックラインレベルとして0.40mを採用し、実験時のターンテーブル回転数は図4のストックラインレベル0.40m時の実験式に基づき決定した。

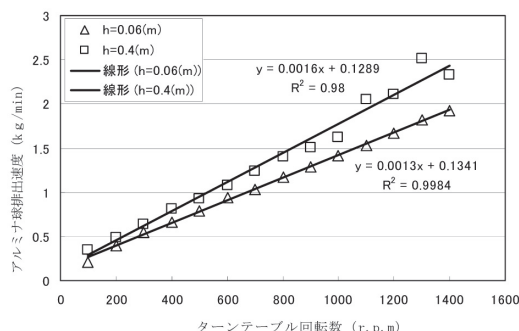


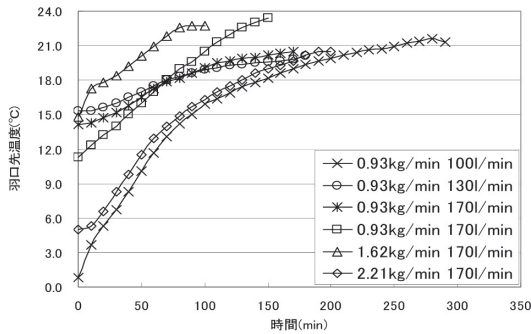
図4 アルミナ球排出速度検量線の比較

3.2 昇温予備実験

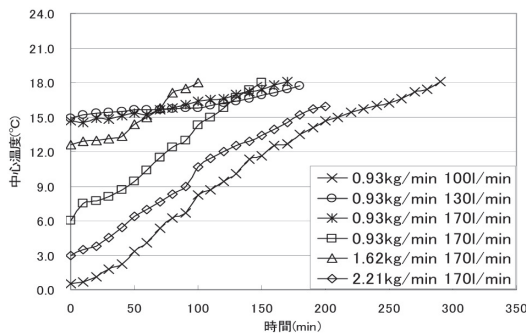
本実験の前に温風発生装置から発生する温風をブロワー、流量計を介して実験装置の左右2本の羽口から送風し、アルミナ球を充填した固定層と実験装置の昇温を行った。

昇温予備実験時には、羽口先温度と中心温度（図3）を測定した。羽口先温度は簡易温度計を実験装置の羽口近傍の背面から設置して測定し、中心温度は熱画像測定装置を用いて実験装置前面に設置されている亚克力板表面の温度を測定した。昇温予備実験時の羽口先温度および中心温度の測定結果を図5に示す。本実験では、時間経過による温度分布の変化を比較するので実験開始時の中心温度をすべての実験において同一にする必要がある。しか

し、図5に示すように中心温度、羽口先温度の初期温度は大気温度により大きくばらつきがある。したがって熱画像測定装置で実験装置前面の亚克力板表面の中心温度を常に測定し、その中心温度が18℃に到達するまで昇温を続けた(図5の(2))。



(1)羽口先温度



(2)中心温度

図5 高炉縮尺二次元模型の昇温データ

3.3 実験方法

まず実験装置上部までアルミナ球を充填する。つぎに温風発生装置により昇温された空気をブローヤから送風羽口を介して実験装置本体へと送風し、実験装置およびアルミナ球を昇温する。温風発生装置直後の温風の温度は80℃であるが、大部分の熱はブローヤや流量計配管の昇温に消費されるため、送風羽口近傍の送風温度は20℃前後になる。昇温開始後、実験装置亚克力板表面の中心温度が約18℃に到達してから向流移動層実験を開始した。熱画像測定装置は装置前面に固定して設置する。熱画像測定装置により亚克力板の前面を撮影し、測定する温度範囲を10~20℃と設定した。この温度範囲は、昇温実験で得られた結果を考慮し最もよく温度変化がわかる温度範囲である。中心部温度が18℃まで昇温した時点で直ちに、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。つぎに、アルミナ球の排出を開始し、同じく熱画像測定装置で排出開

始後5分ごとに温度分布を測定し、これを移動層の温度分布とした。

また、熱画像測定装置は亚克力板の表面の温度分布を測定するため、亚克力板に他のものが反射しないように後ろにカーテンを設置した。

4. 実験条件

4.1 基準実験条件の導出⁴⁾

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に示す実炉の操業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0.629 kg/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、3749

hPa, 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。装入物の高密度は実炉での ρ_s を500kg/m³, 模型での ρ_s' を1990kg/m³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0.221Nm³/min, アルミナ球排出速度は0.155kg/minと導出された。実際の実験条件の送風量は0.100Nm³/min~0.200Nm³/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, 1.62, 2.21kg/minと基準実験条件のアルミナ球排出速度の6~14倍程度になっている。アルミナ球排出速度を基準実験条件(0.155kg/min)と比較して6~14倍(0.93kg/min~2.21kg/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

4.2 実験条件

実験条件を表2に示す。4.1で説明したように, 基準実験条件でのアルミナ球排出速度がターンテーブル式排出装置の排出速度下限値以下であったので, 実験条件では基準実験条件のアルミナ球排出速度の6~14倍(0.93kg/min~2.21kg/min)にした排出速度とした。具体的には, アルミナ球排出速度を3水準(0.93, 1.62, 2.21kg/min), 羽口2本分の送風量を3水準(100, 130, 170l/min)変更した。同一実験条件での再現性確認実験を含めた7実験を実施した。

表2 実験条件

羽口2本の送風量(l/min)	アルミナ球排出速度(kg/min)		
	0.93	1.62	2.21
100	●	—	—
130	●	—	—
170	●●	●●	●

5. 実験結果

5.1 時間経過に伴う温度分布の測定結果

温度分布測定結果の時系列変化の一例を図6に示す。図はアルミナ球排出速度2.21kg/min, 送風量170l/minの場合の1例であり, 最高温度を20℃, 最低温度を10℃としてそれぞれの色に対応して温度分布が示されている。時間経過に伴い中心部の高温域(白色~赤色)が縮小している。このように5分ごとに熱画像を測定して時間経過に伴う温度分布の変化を調べた。

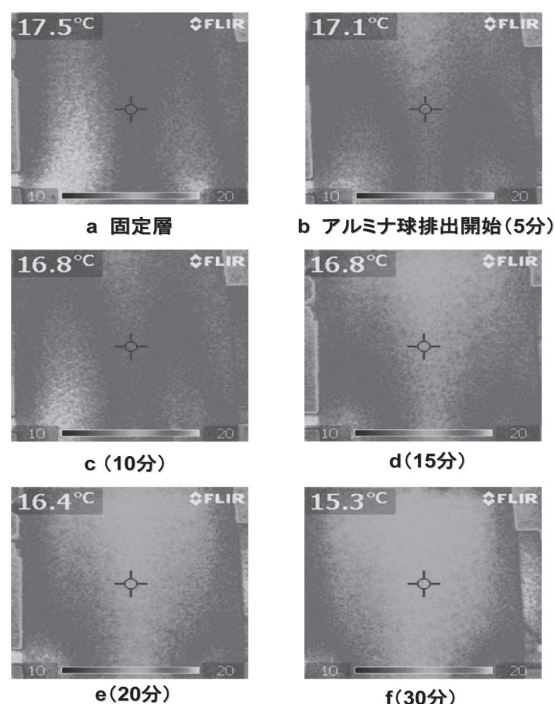


図6 温度分布の時系列変化の1例

5.2 解析対象とした中心部温度, 周辺部温度の定義と計算方法

実験によって得られた図6のようなデータを定量的に比較するために, 中心部温度および周辺部温度を定義した。中心部温度は, 図7(1)のようにaの長さ方向20点(中心線の左右20mm), bの長さ方向4点(羽口上, 50, 100, 150mm)をとり, 計80点の測定値の平均値とした。周辺部温度は, 図7(2)のようにaの長さ方向100点(左端, 右端から中心方向に100mm), bの長さ方向4点(羽口上, 50, 100, 150mm)をとり, 計400点の測定値の平均値とした。

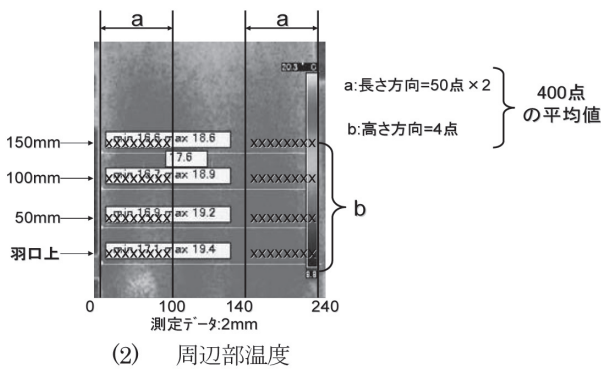
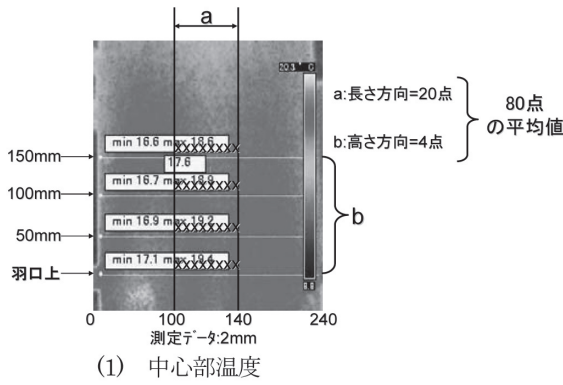


図7 中心部温度，周辺部温度の定義

5.3 排出速度変更条件での中心部温度の時間変化

5.3.1 中心部温度

送風量一定 (170l/min) でアルミナ球排出速度を3水準 (0.93, 1.62, 2.21kg/min) 変更した条件での5.2で定義した中心部温度の時間変化を図8に示す。アルミナ球排出速度が0.93kg/minの場合 (図8の◇印, *印) には, 0~60分のアルミナ球排出時間の範囲内では, 中心部温度が時間経過に伴い, ほぼ一定で低下していない。一方, アルミナ球排出速度が1.62kg/min (図8の□印, ○印) の場合には, アルミナ球排出開始後10分~20分の範囲で中心部温度が低下している。そして, 2.21kg/min (図8の△印) と大きい場合には, アルミナ球排出開始後5分~10分の早い時間範囲で中心部温度が低下し, 温度低下量も大きい。

5.3.2 周辺部温度

送風量一定 (170l/min) でアルミナ球排出速度を3水準 (0.93, 1.62, 2.21kg/min) 変更した条件での5.2で定義した周辺部温度の時間変化を図9に示す。中心部温度と同様に, アルミナ球排出速度が0.93kg/min (図9の◇印, *印) の場合には, 0~60分のアルミナ球排出時間の範囲内では, 中心部温度が時間経過に伴い, ほぼ一定で低下していない。一方, アルミナ球排出速度が1.62kg/min (図9の

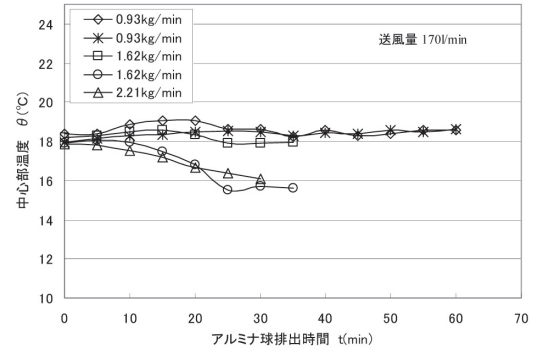


図8 アルミナ球排出速度を変更した条件での中心部温度の時間変化

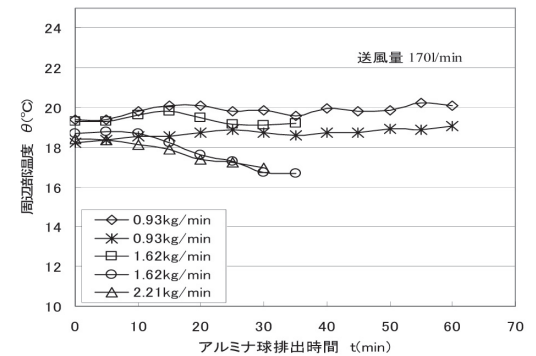


図9 アルミナ球排出速度を変更した条件での周辺部温度の時間変化

□印, ○印) の場合には, アルミナ球排出開始後10分~20分の範囲で中心部温度が低下している。そして, 2.21kg/min (図8の△印) と大きい場合には, アルミナ球排出開始後5分~10分の早い時間範囲で周辺部温度が低下し, 温度低下量も大きい。

5.4 炉内温度に及ぼすアルミナ球排出速度の影響

5.4.1 中心部温度

高炉プロセスの中心部温度に及ぼすアルミナ球排出速度の影響を明確にする手法には, いくつかの考え方があり。具体的には, 定常状態の温度条件での比較, 非定常な温度条件での比較である。一般的な物性値の測定時には定常状態での値を求めることが多い。しかし, 高温プロセスの場合には, ある操作因子を変更した際の時間応答や非定常な状態でのデータの比較を重視することが多い。上記の考えに基づいて, 本研究では, 定常状態まで待つことをせず, 非定常状態での温度の比較を行うことにした。ちなみに模型実験と実炉の時間比は, 縮尺比を1/40とすると, 4.1の(4)式を変形した下記の(5)式より求められる。

$$\frac{t'}{t} = \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_s'} \cdot \frac{\rho_f'}{\rho_f} \cdot \frac{l'}{l}} \quad (5)$$

上記(5)式に縮尺比 $l'/l=1/40$, $\rho_s/\rho_s'=500/1990$, $\rho_f'/\rho_f=1.20/0.629$ の数値を代入すると $t'/t \approx 1/10$ となる。すなわち実験での10分は実炉では100分に相当する。

図8, 図9からわかるように, アルミナ球排出速度が0.93kg/min, 1.62kg/min, 2.21kg/minのいずれの場合にも定常状態に到達していると断定することはできない。とくにアルミナ球排出速度を基準実験条件より6~14倍大きい値としているので, アルミナ球排出速度が0.93kg/minの場合では, アルミナ球排出時間をさらに長くすると温度が低下するはずである。しかし, 上記の考え方にに基づき, 非常状態である30分時のデータで比較することにした。アルミナ球排出開始後30分時の中心部温度に及ぼすアルミナ球排出速度の影響を図10に示す。

アルミナ球排出速度が0.93kg/minの場合には中心部温度は約18.5℃, 1.62kg/minの場合にはばらつきはあるが約17℃, 2.21kg/minの場合には16.1℃と, アルミナ球排出速度の増大に伴い中心部温度は低下している。

アルミナ球の降下速度が上昇し, 昇温すべきアルミナ球の量が増加したが, ガス量(ガス流速)は一定のため, ガスからアルミナ球への伝熱量は若干増大するもののほぼ一定であることからアルミナ球の温度上昇量が低下したものと考えられる。

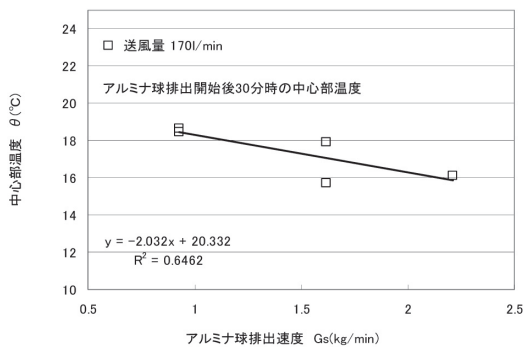


図10 中心部温度に及ぼすアルミナ球排出速度の影響

5.4.2 周辺部温度

アルミナ球排出時間30分時の周辺部温度に及ぼすアルミナ球排出速度の影響を図11に示す。

アルミナ球排出速度が0.93kg/minの場合には周辺部温度は約19℃, 1.62kg/minの場合にはばらつきはあるが約18℃, 2.21kg/minの場合には16.9℃と, アルミナ球排出速度の増大に伴い周辺部温度は低下

している。

これは, 中心部温度の結果と同じ結果となった。アルミナ球の降下速度が上昇し, 昇温すべきアルミナ球の量が増加したが, ガス量(ガス流速)は一定のため, ガスからアルミナ球への伝熱量は若干増大するもののほぼ一定であることから, アルミナ球の温度上昇量が低下したものと考えられる。

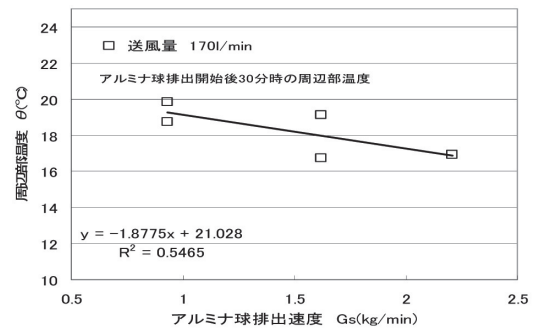


図11 周辺部温度に及ぼすアルミナ球排出速度の影響

5.5 送風量変更条件での中心部温度の時間変化

5.5.1 中心部温度

アルミナ球排出速度一定(0.93kg/min)で送風量を3水準(100, 130, 170l/min)変更した条件での中心部温度の時間変化を図12に示す。

送風量170l/min(図12の◇印, △印)の場合には, 0~60分のアルミナ球排出時間の範囲では5.2で定義した中心部温度が時間経過に伴い, ほぼ一定で低下していない。一方, 送風量130l/min(図12の○印)の場合には, 中心部温度はアルミナ球排出開始後20分頃から低下している。100l/min(図12の□印)の場合には, 中心部温度はアルミナ球排出開始後10分と早い時間で低下し, 温度低下量も大きい。

5.5.2 周辺部温度

アルミナ球排出速度一定(0.93kg/min)で送風量を3水準(100, 130, 170l/min)変更した条件での

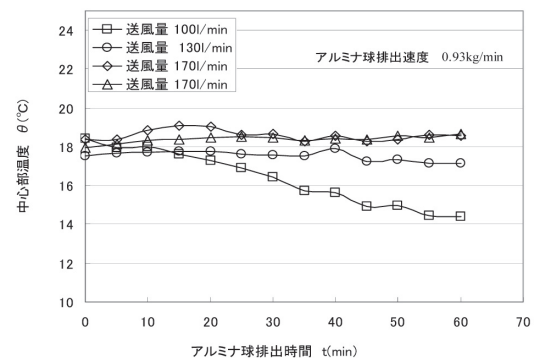


図12 送風量を変更した条件での中心部温度の時間変化

周辺部温度の時間変化を図13に示す。

中心部温度と同様に、送風量170l/min（図13の◇印、△印）の場合には、0～60分のアルミナ球排出時間の範囲では、5.2で定義した周辺部温度が時間経過に伴い、ほぼ一定で低下していない。一方、送風量130l/min（図13の○印）の場合には周辺部温度はアルミナ球排出開始後20分頃から低下している。100l/min（図13の□印）の場合には、周辺部温度はアルミナ球排出開始後10分と早い時間で低下し、温度低下量も大きい。

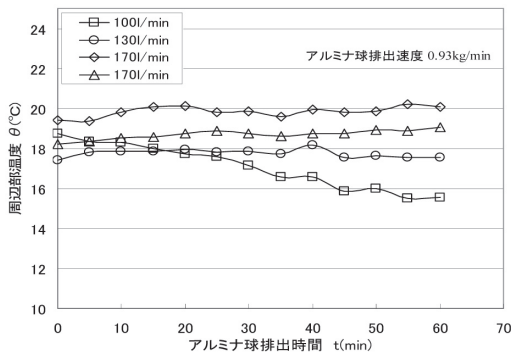


図13 送風量を変更した条件での周辺部温度の時間変化

5.6 炉内温度に及ぼす送風量の影響

5.6.1 中心部温度

アルミナ球排出時間30分時の中心部温度に及ぼす送風量の影響を図14に示す。

送風量が100l/minの場合には中心部温度は16.5℃、130l/minの場合には17.6℃、170l/minの場合には約18.5℃と、送風量の増加に伴い中心部温度は上昇している。これは、送風量の増加に伴い送風からアルミナ球への伝熱量が増大したためと考えられる。

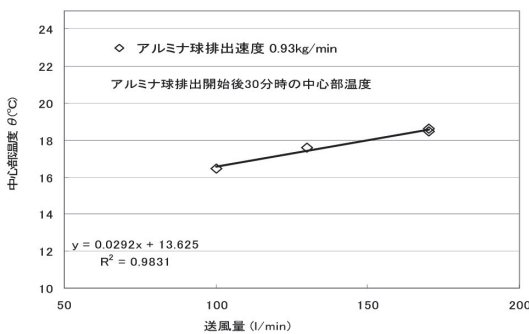


図14 中心部温度に及ぼす送風量の影響

5.6.2 周辺部温度

アルミナ球排出時間30分時の周辺部温度に及ぼす送風量の影響を図15に示す。

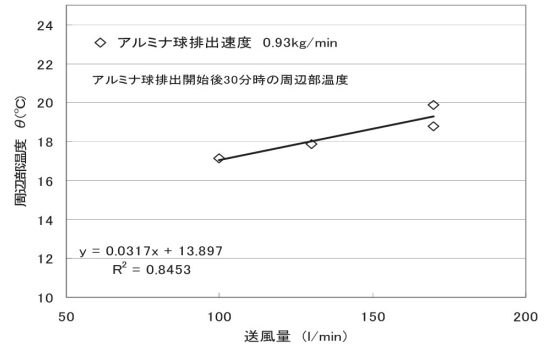


図15 周辺部温度に及ぼす送風量の影響

送風量が100l/minの場合には周辺部温度は17.1℃、130l/minの場合には17.9℃、170l/minの場合には約19.3℃と送風量の増加に伴い周辺部温度は上昇している。これは、中心部温度と同様に送風からアルミナ球への伝熱量が増大したためと考えられる。

上記の図14と図15で説明した送風量と炉内温度（中心部温度、周辺部温度）の関係式での決定係数 R^2 はそれぞれ0.84～0.99の範囲にある。一方5.4で説明したアルミナ球排出速度と炉内温度（中心部温度、周辺部温度）の関係式での決定係数 R^2 はそれぞれ0.54～0.65の範囲にある。このように、アルミナ球排出速度と炉内温度の関係式での決定係数は、送風量と炉内温度の関係式での決定係数に比べて明らかに小さい。上記の原因は、連続体である流体と不連続体である粒体の挙動の差異に基づくものと推定される。

5.7 炉内温度に及ぼす熱流比の影響

5.7.1 熱流比の定義

これまで中心部温度および周辺部温度に及ぼすアルミナ球排出速度、送風量の影響を明らかにした。ここで、これまでに得られたデータを、アルミナ球排出速度および送風量の両方の影響を考慮した指標である(6)式の熱容量比あるいは熱流比⁵⁾(Heat Flow Ratio: HFR)を用いて整理した。

$$HFR = \frac{Cs \cdot Gs}{Cg \cdot Gg} \quad (6)$$

ここで、

Cs, Cg : 固体, ガスの比熱 (kJ/kg・K)

Gs, Gg : 固体, ガスの質量速度 (kg/s)

5.7.2 中心部温度

フルード数(Fr数)近似で求めた基準実験条件でのアルミナ球排出開始後30分時の中心部温度に及ぼす熱流比の影響を図16に示す。

アルミナ球排出開始後30分時の中心部温度は熱流

比の増大に伴い低下している。中心部温度がアルミナ球排出速度と送風量を考慮した熱流比という指標により一義的に整理されることが判明した。

(6)式に代入して求めた熱流比 (HFR) は3~8の間の値になっている。本来装入物を十分に昇温する向流移動層では、HFRは1以下 (0.6~0.9) の値をとる。

今回の実験では、4.1で説明したように、基準実験条件のアルミナ球排出量が高炉二次元縮尺模型のターンテーブル式排出装置の下限値以下と小さかった。そこで実際の実験ではアルミナ球排出速度を基準実験条件の6~14倍としたため、HFRが大きくなったものである。HFRを一致させる観点から送風量の増加も考えられるが、今回使用している温風発生装置、ブLOWERでは性能上不可能であった。この様に、実際の高炉での熱流比 (0.6~0.9) に比べて1桁大きい熱流比での解析結果であるが、定性的には技術的意味があると考えられる。

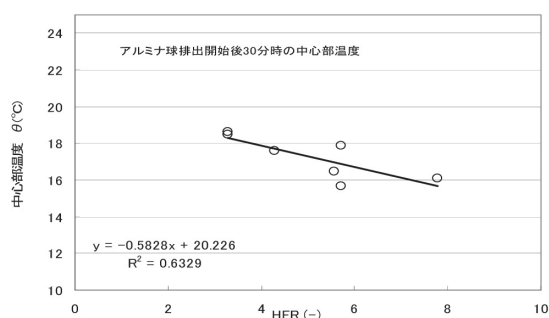


図16 中心部温度に及ぼす熱流比の影響

5.7.3 周辺部温度

アルミナ球排出開始後30分時の周辺部温度に及ぼす熱流比の影響を図17に示す。

アルミナ球排出開始後30分時の周辺部温度は中心部温度と同様に、熱流比の増大に伴い低下している。周辺部温度がアルミナ球排出速度と送風量を考慮した熱流比という指標により一義的に整理されることが判明した。

5.7.4 炉内温度に及ぼす熱流比の影響

今回の実験では中心部温度、周辺部温度に及ぼす熱流比の影響係数 ($\Delta\theta/\Delta\text{HFR}$) が0.5台とほぼ同じ値になった。これは、高炉下部での羽口コークス燃焼を模擬したアルミナ球の排出をしなかったためと推定される。すなわち、炉芯を形成するための障害物を羽口直下に設置せず、径方向に均一にアルミナ球を排出したからである。その結果アルミナ球の降下速度が径方向でほぼ同じ³⁾になり、中心部の熱流比と周辺部の熱流比がほぼ同じであったことに

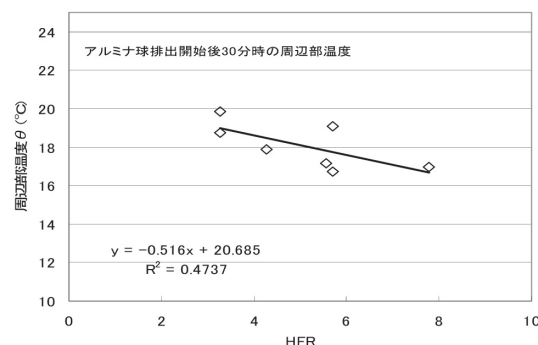


図17 周辺部温度に及ぼす熱流比の影響

起因すると推定される。

今後の課題は、高炉下部での羽口コークス燃焼を模擬した排出条件 (炉芯形成条件) での炉内温度に及ぼす熱流比 (アルミナ球排出速度, 送風量) の影響 ($\Delta\theta/\Delta\text{HFR}$) の明確化である。

6. 結 言

高炉の熱効率改善を目的として、1/40縮尺の模型装置を用いたアルミナ球排出速度と送風量の変更実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 中心部温度および周辺部温度はアルミナ球排出速度の上昇に伴い低下すると同時に温度が低下する時間が早くなる。
- (2) 中心部温度および周辺部温度はガス流速の増加に伴い上昇すると同時に温度が低下する時間が遅くなる。
- (3) アルミナ球排出速度と送風量の両方の影響を考慮した指標である熱容量比あるいは熱流比によって一義的に整理され、熱流比の上昇に伴い中心部温度および周辺部温度は低下する。
- (4) アルミナ球排出速度と炉内温度の関係式での決定係数は、送風量と炉内温度での決定係数に比べて明らかに小さい。上記の原因は、連続体である流体と不連続体である粒体の挙動の差異に基づくものと推定される。
- (5) 今後の課題は、高炉下部での羽口コークス燃焼を模擬した排出条件 (炉芯形成条件) での炉内温度に及ぼす熱流比 (アルミナ球排出速度, 送風量) の影響 ($\Delta\theta/\Delta\text{HFR}$) の明確化である。

参考文献

- 1) 環境省：
<http://www.env.jp/doc/toukei/contents/index.html>

- 2) 鉄鋼連盟：
<http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/kenkai/index.ht> (2010), 27.
- 3) 古谷晃司, 一田守政：秋田高専研究紀要, 45
- 4) 江守一郎：模型実験の理論と応用, 技報堂出版, 東京, (1985), 85.
- 5) 重見彰利：製鉄ハンドブック, 地人書館, 191.