

高炉シャフト下部近傍で発生した粉コークスの 炉芯への流入挙動

笠井 昭人*・岩切 治久*・上條 綱雄*・清水 正賢*

The Inflow to a Deadman of Fine Coke Generated near the Lower Part of the Shaft in a Blast Furnace

Akito KASAI, Haruhisa IWAKIRI, Tsunao KAMIJO and Masakata SHIMIZU

Synopsis : In order to clarify the descending behavior of fine coke generated near the lower part of the shaft in a blast furnace, the fundamental experiment using a two dimensional cold model simulating the blast furnace was carried out. The results are as follows.

Most of fine coke generated near the central part at the radial axis flows to the raceway and part of fine coke percolates at the slope of the deadman. The percolation to the deadman of fine coke was influenced by $D_{\text{fine}}/D_{\text{lump}}$, V_t/V_h and gas velocity in the deadman. Where D_{fine} and D_{lump} are an average size of fine coke and lump coke in the deadman respectively, V_t is a descending speed of coke at the throat and V_h is a renewal speed of deadman. In case of the low gas velocity, the smaller $D_{\text{fine}}/D_{\text{lump}}$ is and the larger V_t/V_h is, the higher ratio of fine coke in the deadman is. In case of the high gas velocity, the fine coke does not percolate to the deadman.

Key words : blast furnace ; deadman ; percolation ; fine coke ; lump coke ; flow line.

1. 緒言

近年、溶銑コストの大幅な低減を目指して、高炉への微粉炭吹き込みが指向されている¹⁾。微粉炭多量吹き込み時には、炉芯の不活性化あるいは炉下部現象の変化に起因すると思われる炉下部圧損の上昇や送風圧変動が増大する傾向にあり、微粉炭多量吹き込み時の課題の一つとして、炉芯充填構造を適正に維持することの重要性が指摘²⁻⁴⁾されている。

炉芯充填構造の制御法の一つとして「コークスの中心装入法^{5,6)}」が開発され、その実用化^{2,5,6)}によって高炉の安定操業技術が飛躍的に向上した。この方法の利点の一つは、中間部から周辺部の鉱石量とコークス量の比率を大きく変化させることなく中心部の鉱石量を減少させることにより中心部でのコークスのソリューション・ロス反応が抑制され、劣化の少ない健全なコークスが炉芯に供給されることである。しかしながら、休風時に炉芯サンプラーを用いて炉内容物を採取すると、炉芯部には多量のコークス粉が存在⁷⁾しており、コークス粉の炉芯への流入・蓄積機構についてはいまだ未解明な点が多い。

従来より、炉芯コークス粉の由来については、高炉解体調査や休風時に炉芯サンプラーを用いて採取したコークスの黒鉛化度等をもとに検討⁸⁻¹¹⁾されている。炉芯コークス粉の由来は、高炉の操業条件や原・燃料性状等によっても

異なり、諸説⁸⁻¹¹⁾が提案されている。一部の高炉においては、炉芯に蓄積している粉コークスは炉芯の塊コークスと黒鉛化度に差がないことから、大部分が高炉シャフト下部近傍でソリューション・ロス反応によって劣化したコークスが炉内降下過程で摩耗によって発生したもの^{8,9)}と考えられている。また、コークス粉の炉芯への流入挙動については、径方向の中心から中心近傍で発生した粉コークスが主体であることが明示されている^{5,6,12)}が、流入量を支配している炉芯塊コークスのサイズ¹³⁾、コークスの降下速度やガス流速等の影響については、従来ほとんど検討されていない。

そこで本研究では、コークス粉率低減による炉芯の活性化を目的として、高炉シャフト下部近傍の中心近傍で発生した粉コークスの降下挙動と炉芯への流入挙動について、通風可能な高炉二次元冷間模型を用いて基礎的に検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略図をFig. 1に示す。本装置は、加古川1高炉の縮尺1/25の二次元冷間模型と炉頂部に設置した試料供給ホッパーおよび試料排出装置から構成されている。高炉模型の前面と後面は透明アクリル板で形成されており、

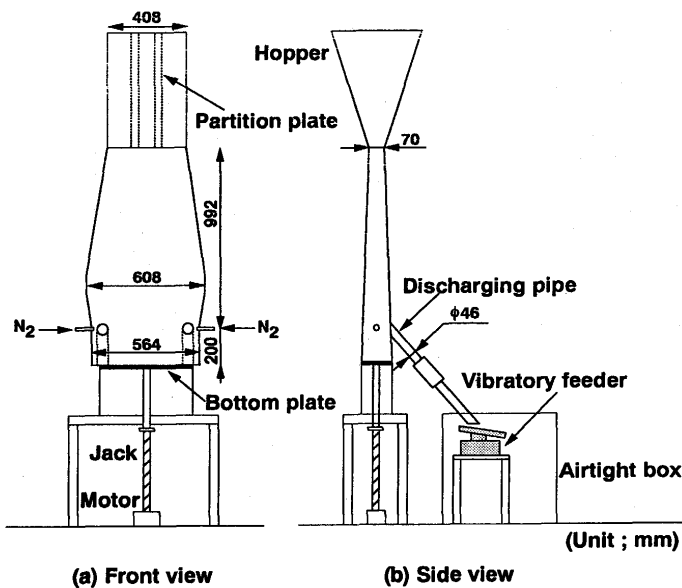


Fig. 1. Experimental apparatus.

内部の状況を観察することができる。試料とアクリル板との摩擦を小さくするため、高炉模型の側面は88度と末広がりである。ホッパーに仕切板を設置することにより、半径方向について異なる試料を装入できる。炉内の試料は、高炉模型後面のレースウェイ相当位置に45度の角度で設置した内径46mmの試料排出パイプを介して振動フィーダーによって排出される。炉芯の更新は、模型の底板をゆっくりと降下させることにより模擬できる。また、羽口は内径6mm、突出長さ10mmの水平羽口である。

2・2 実験条件

(1) 試料サイズ

試料は、0.3～1mmの粉コークスと、3～6mm、5～7mm、6～8mm、1～6mmとサイズの異なる塊コークスである。粉コークスの平均サイズは0.64mmである。試料サイズは、粉コークスと塊コークスのサイズ比が実炉下部のサイズ比と一致するように設定した。

(2) 試料の装入位置

試料の装入位置をFig. 2に示す。 R_t (m)は炉口半径、 R_h (m)は炉床半径、 r (m)は中心からの水平距離である。炉口相対半径 r/R_t が0.00～0.23の位置を炉口中心部、0.23～0.43の位置を炉口中心近傍、0.43～1.00の位置を炉口周辺部とする。

炉口中心部には塊コークスを装入して炉芯を形成させた。炉口中心部に装入する塊コークスのサイズは、3～6mm、5～7mm、6～8mm(基準条件)と変化させた。試料の流線を把握するためのトレーサーとして、炉口中心部に装入するコークスはペンキで着色した。炉口中心近傍には、1～6mmの塊コークスもしくは1～6mmの塊コークスに粉コークスを10%混合したものを装入した。また、炉口周辺部には1～6mmの塊コークスを装入した。

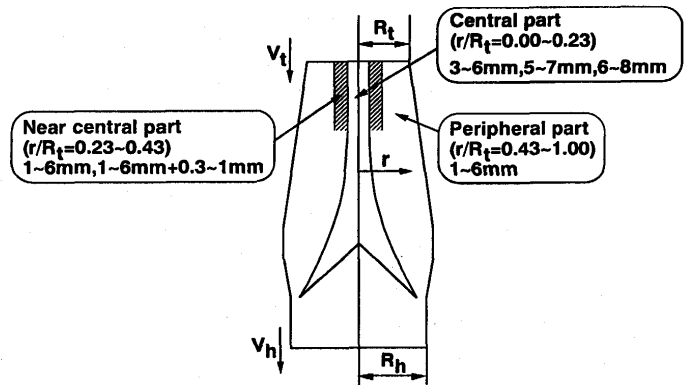


Fig. 2. Experimental conditions.

(3) コークスの降下速度

底板の降下速度を V_n (m/s)、炉口での試料の降下速度を V_t (m/s)とする。レースウェイでのコークスの消費速度が変化した場合について検討するため、振動フィーダーの切り出し速度を変化させた。 V_n は一定であり、 V_t は V_n の15倍、30倍(基準条件)、60倍、90倍である。 V_t の基準条件は実高炉(内容積：4500m³級、出鉄比：1.8～2.1、微粉炭比：100～200 kg/t)の降下速度(6.0～7.5m/h)に相似則¹⁴⁾(1)、(2)式を適用して設定した。ここで、 L_p (m)と L_m (m)はそれぞれ実機と模型の代表長さ、 V_p (m/s)と V_m (m/s)はそれぞれ実機と模型の降下速度である。

$$L_p/L_m = \lambda \dots\dots\dots (1)$$

$$V_m = V_p/\sqrt{\lambda} \dots\dots\dots (2)$$

(4) 送風量

羽口からの窒素ガスの送風量は、羽口1本当たり0 Nl/min(基準条件)と450Nl/minである。450Nl/minは、羽口前風速で265m/s、炉口ガス空塔速度で0.53m/sに相当する。この場合に形成されたレースウェイのサイズは、炉床相対半径 r/R_h で、高速旋回領域が0.81～1.00、穏やかな旋回領域が0.78～1.00であり、実炉にはほぼ一致する。

2・3 実験方法

まず、炉口中心部に装入する(炉芯を形成する)塊コークスと同じサイズの塊コークスを炉内全体に充填した。その後、振動フィーダーによって試料を排出するとともにホッパー内の各領域に所定サイズの試料を供給して、ホッパー内の試料表面の高さを一定に維持した。初期に充填した試料が排出されて炉芯形状が安定した後、底板を所定速度で降下させた。底板が約250mm降下した時点で実験を終了した。

実験終了後、吸引法で試料を採集し、サイズ分布と1mm以下のコークス粉の重量割合(以下、1mm以下のコークス粉率とする)を測定した。試料の採取場所をFig. 3に示す。試料の採取場所は、炉口中心部と羽口上110mmの炉下部4点である。炉下部4点の炉床相対半径 r/R_h は、それぞれ0.

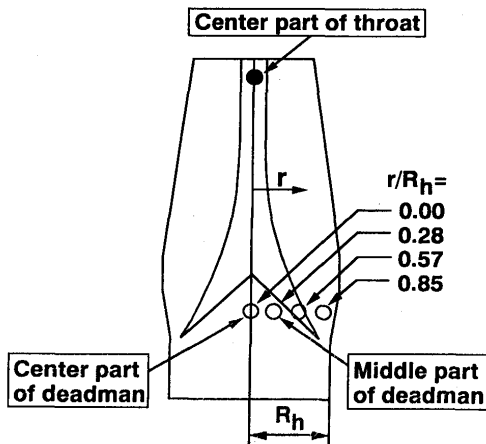


Fig. 3. Sampling positions.

0.0, 0.28, 0.57, 0.85で、 $r/R_h=0.00$ を炉芯中心部、 $r/R_h=0.28$ を炉芯中間部とする。

3. 実験結果と考察

3.1 粉コークスの降下挙動

6～8 mmの塊コークスで炉芯を形成し、炉口中心近傍に粉コークスを10%混合した場合と、粉コークスを混合しない場合の炉芯中間部でのコークスの累積サイズ分布をFig. 4に示す。Fig. 4には炉口中心部に装入したコークスの累積サイズ分布を併記した。粉コークスを混合しなかった場合の炉芯中間部での累積サイズ分布は炉口中心部に装入した累積サイズ分布とほぼ一致しており、5 mm以下のコークスはほとんど存在していない。従って、炉口中心近傍と周辺部に装入した1～6 mmのコークスは固体の流線^{5,6,12)}に沿ってレースウェイ部から排出されたと推察される。

一方、炉口中心近傍に粉コークスを10%混合した場合の炉芯中間部での累積サイズ分布は、炉口中心部に装入した累積サイズ分布と大きく変化している。炉芯中間部に1.7～5 mmのコークスはほとんど存在していないが、1.7 mm以下の粉コークス量が増大している。これは、炉口中心近傍に装入した塊コークスと粉コークスでは炉内降下挙動が異なることを示唆している。すなわち、炉口中心近傍に装入した粉コークスは、固体の流線^{5,6,12)}に沿って塊コークスとともにレースウェイ部から排出される以外に、炉内降下過程で塊コークスによって形成されている炉芯斜面の空隙に浸透していると推察される。以下では、炉口中心近傍に装入した粉コークスの炉芯斜面での浸透効果に及ぼす諸要因の影響について検討する。

3.2 粉コークスの炉芯斜面での浸透効果

3.2.1 炉芯コークスサイズの影響

粉コークスが炉芯へ流入するかどうかは、炉芯コークス充填層の空隙径に大きく依存すると考えられる。そこで、

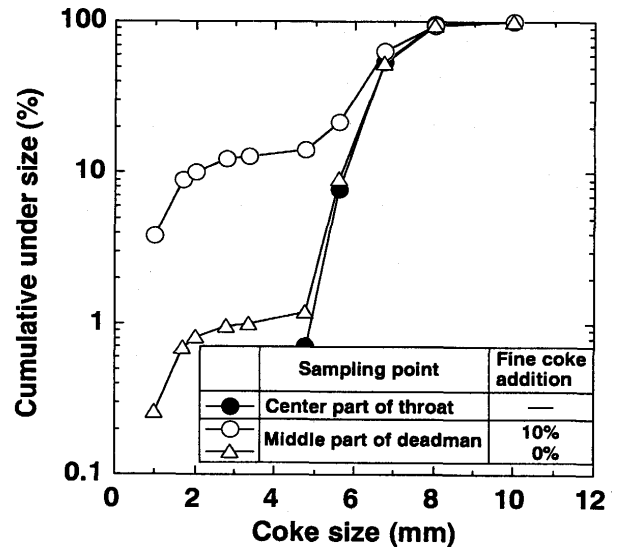


Fig. 4. Size distributions of coke.

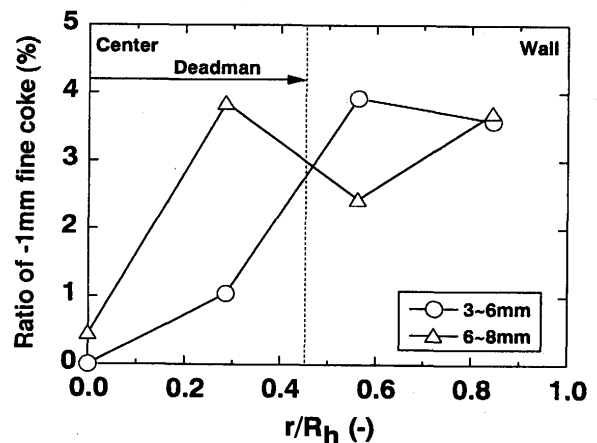


Fig. 5. Radial distributions of fine coke.

空隙径を増大させる方法として炉口中心部に装入する塊コークスのサイズを変化させ、中心近傍に装入した粉コークスの降下挙動について検討した。

炉芯がそれぞれ3～6 mmと6～8 mmの塊コークスで形成された場合の、半径方向での1 mm以下のコークス粉率分布をFig. 5に示す。炉芯のコークスサイズが変化すると炉口中心近傍に装入した粉コークスの炉芯内での堆積状態が変化している。3～6 mmのコークスで炉芯を形成した場合、炉芯内のコークス粉率は低く、炉芯中間部でも1%程度である。粉コークスのピークの位置が炉芯の外側にあることから、粉コークスは炉芯にはほとんど流入せず、大部分が塊コークスとともに固体の流線^{5,6,12)}に沿ってレースウェイ部へ移動していると推察される。一方、6～8 mmのコークスで炉芯を形成した場合、粉コークスは炉芯中間部にも大量に流入している。

次に、炉芯を3～6 mm、5～7 mm、6～8 mmとサイズの異なる塊コークスで形成させた場合の炉芯中間部での1 mm以下のコークス粉率と炉口中心部に装入した塊コークス

クスの調和平均径との関係をFig. 6に示す。調和平均径が大きく(空隙径が大きくなる)になると、炉芯斜面での浸透効果によりコークス粉率が增加している。ここで、単一サイズ・球形の大粒子で形成された充填層に小粒子が浸透可能なサイズ比(小粒子/大粒子: D_{fine}/D_{lump})は0.15(=1/6.46)¹⁵⁾である。粉コークスの炉芯斜面での浸透効果はサイズ比が0.15より大きな場合でもわずかに生じており、サイズ比が約0.13より小さくなると顕著になっている。これは、炉芯の更新にともなってコークスの充填構造が緩み、空隙径が大きくなるためと推察される。今後はさらに、コークスのサイズ分布や形状が充填層の空隙径を介して浸透効果に及ぼす影響についても検討する必要がある。

以上より、炉口中心部に装入するコークスのサイズを大きくして、炉芯コークス充填層の空隙径が過剰に大きくなると、炉芯斜面での粉コークスの浸透効果が顕著になることが明らかとなった。そこで、炉芯の通気性と浸透効果の関係を把握するため、炉芯コークス充填層の空隙率に及ぼす炉口中心部に装入したコークスサイズの影響を検討した。コークス充填層の空隙率はコークスのサイズ分布から計算¹⁶⁾した。

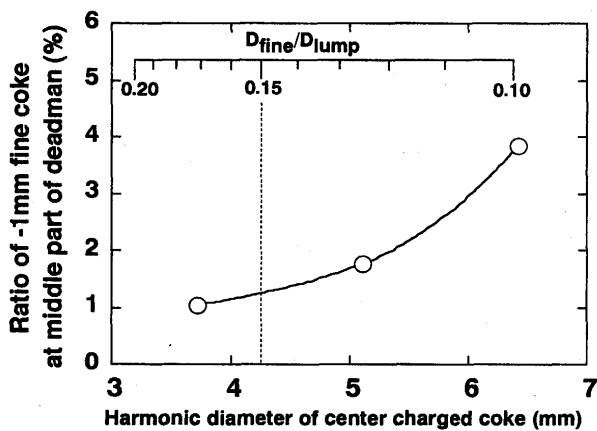


Fig. 6. Effect of coke size on percolation.

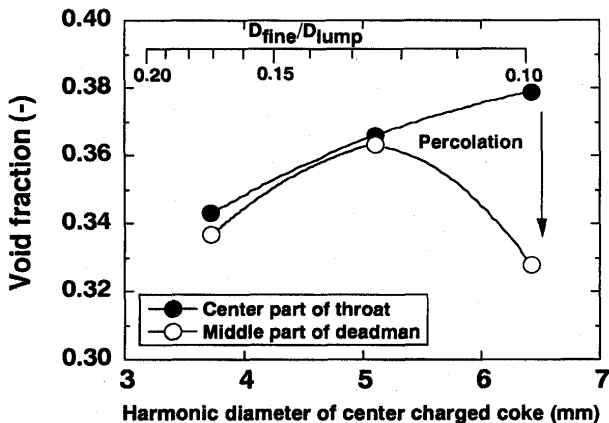


Fig. 7. Effect of percolation on void fraction of deadman.

炉芯中間部および炉口中心部でのコークス充填層の空隙率と炉口中心部に装入したコークスの調和平均径の関係をFig. 7に示す。炉口中心部に装入するコークスの調和平均径が大きくなると、炉口中心部での空隙率は大きくなっている。一方、炉芯中間部での空隙率は、調和平均径が約5 mm以下(サイズ比が約0.125以上)の時は粉コークスの炉芯斜面での浸透効果が比較的小さい(コークス粉率が小さい)ため、炉口中心部に比してわずかに低下するだけで、調和平均径の上昇にともない大きくなっている。しかし、調和平均径が約5 mm以上の範囲では浸透効果が顕著な(コークス粉率が大きい)ため、調和平均径の上昇にともない空隙率は小さくなっている。従って、炉口中心部に装入するコークスのサイズを大きくして炉芯空隙率の向上を図る場合には、最適な装入コークスのサイズ比が存在することが明らかとなった。

3.2.2 レースウェイでのコークスの切り出し速度の影響

微粉炭比や出鉄比が変化すると、レースウェイでのコークスの消費速度とガス発生量が変化する。その場合の炉口中心近傍に装入した粉コークスの降下挙動を検討するため、底板の降下速度(炉芯の更新速度)を一定に保ち、レースウェイ部でのコークスの切り出し速度を変化させた。

6~8 mmの塊コークスで炉芯を形成した場合の、半径方向での1 mm以下のコークス粉率分布をFig. 8に示す。いずれの場合も、炉口中心近傍に装入した粉コークスは炉芯中間部へも浸透しているが、その蓄積量は V_t/V_h により変化している。

次に、6~8 mmの塊コークスで炉芯を形成した場合の、炉芯中間部での1 mm以下のコークス粉率と V_t/V_h の関係をFig. 9に示す。 V_t/V_h が増加すると、炉芯中間部でのコークス粉率が增加している。これは炉芯の更新速度に対し、炉芯斜面上での粉コークスの流下量が増大するためと推察される。また、 V_t が増加すると炉芯の安息角が低下¹⁷⁾し、固体の流線^{5,6,12)}の曲がりが大きくなる(粉コークスが固体の流線^{5,6,12)}に沿って流れにくくなる)ことも浸透効果の増加に影響していると推察される。さらに、 V_t/V_h が40以上の範囲ではコークス粉率の上昇率が比較的小さくなっている。これは、炉芯斜面の空隙径が粉コークスの蓄積にともなって小さくなるためと推察される。

以上より、粉コークスの炉芯斜面での浸透効果は、(1)炉芯コークス充填層の空隙径が粉コークスのサイズに比して大きくなるほど、(2)レースウェイでのコークスの切り出し速度が増加するほど大きくなることが明らかとなった。

3.2.3 炉内ガス流れの影響

以上は炉内でのガス流れを考慮しない場合の実験結果である。しかし、実炉を想定した場合は炉芯内にもガス流れが生じており、粉コークスの炉芯斜面での浸透効果に影響を及ぼすと推察される。そこで、炉芯コークス粉率に及ぼ

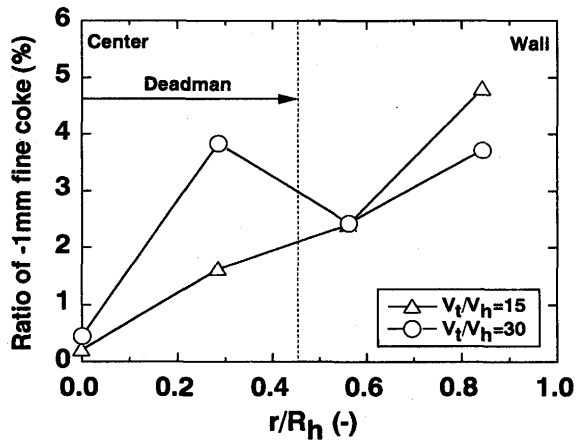


Fig. 8. Radial distributions of fine coke.

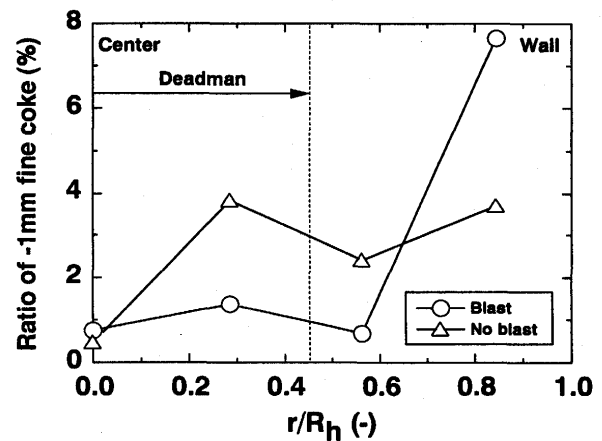


Fig. 10. Radial distributions of fine coke.

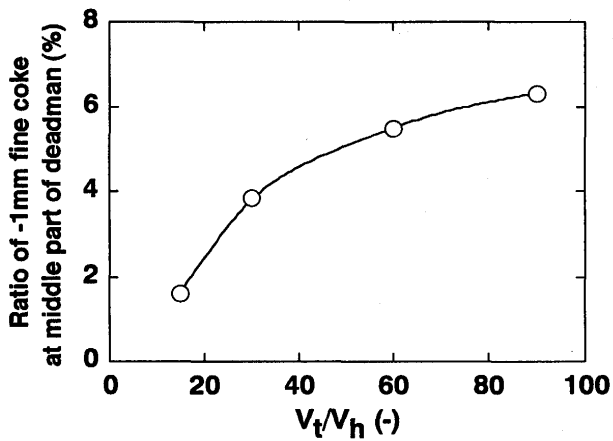
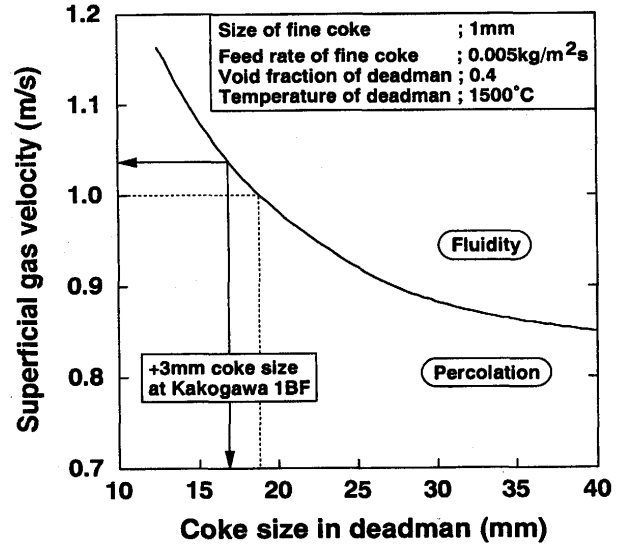
Fig. 9. Effect of V_t/V_h on percolation.

Fig. 11. Relationship among superficial gas velocity, coke size and fine coke behavior.

すガス流れの影響について検討した。

Fig.10 に、6～8 mmの塊コークスで炉芯を形成した場合の半径方向での1 mm以下のコークス粉率分布を、羽口から窒素ガスを送風した場合と送風しない場合について示す。ガス流れの有無により粉コークスの降下挙動は大きく変化し、ガス流れがある場合、粉コークスは炉芯にはあまり流入せず、壁側に大量に蓄積している。これは炉口中心部に周辺部よりサイズの大きい塊コークスを装入することによって炉芯内に周辺部より強いガス流れが確保され、下方からのガスの浮力によって粉コークスの炉芯への浸透が抑制されるためと推察される。また、ガス流速の増加にともない炉芯の安息角が上昇する¹⁷⁾ことも固体の流線^{5,6,12)}の変化を介して浸透効果の低下をもたらしたと推測される。

次に、粉コークスの炉芯への浸透効果に及ぼすガス流速の影響について、充填層内の固・気二相流が解析可能な一次元数学モデル¹⁸⁾を用いて検討した。炉芯内のガス空塔速度と炉芯コークスサイズの関係を図.11に示す。計算条件は、粉コークスのサイズが1 mm、粉コークスの供給量が0.005 kg/m²s、炉芯の空隙率が0.4、炉芯の温度が1500°Cである。炉芯コークスのサイズが大きくなると粉コークスが

炉芯に浸透せずに流動化するガス空塔速度は小さくなっている。すなわち、所定のガス空塔速度に対して、粉コークスが流動化する炉芯コークスサイズの臨界値が存在し、その臨界値より炉芯コークスサイズが大きければ粉コークスは流動化して炉芯には浸透しない。一方、臨界値より炉芯コークスサイズが小さければ、粉コークスは炉芯に浸透する。また、その範囲内で炉口中心部に装入するコークスサイズを大きくすると、粉コークスの炉芯への浸透量が増加し、炉芯の空隙率は低下する。

加古川1高炉の炉芯中間部(羽口先: 3.65～4.45 m)での3 mm以上の塊コークスのサイズは約17mmで、この場合に1 mmの粉コークスが炉芯に浸透せずに流動化するガス空塔速度は1.04m/sである。炉芯でのガス空塔速度は1.0m/s以下¹²⁾であるため、塊コークスのサイズが19mm以下の場合、1 mmの粉コークスは炉芯へ浸透する。従って、炉芯コークス粉率低減のためには、炉芯内のガス流速を確保するとともに、中心から中心近傍でのコークスの粉化を

抑制することが重要である。

4. 結言

炉芯の活性化を目的に、高炉シャフト下部近傍の中心近傍で発生した粉コークスの降下挙動と炉芯への流入挙動について高炉二次元冷間模型を用いて基礎的に検討し、以下の知見を得た。

(1) 炉芯でのガス空塔速度が小さい場合、中心近傍で発生した粉コークスはレースウェイへ移動する以外に、炉芯斜面での浸透効果により炉芯中間部にも流入する。

(2) 炉芯でのガス空塔速度が小さい場合、粉コークスの炉芯斜面での浸透効果は、①炉芯コークス充填層の空隙径が粉コークスのサイズに比して大きくなるほど、②レースウェイでのコークスの切り出し速度が増加するほど大きくなる。

(3) 炉芯でのガス空塔速度が大きくなると、ガスの浮力によって粉コークスは炉芯には浸透しない。

(4) 炉芯コークス粉率低減のためには、①炉芯内のガス流速を確保するとともに、②中心から中心近傍でのコークスの粉化を抑制することが重要である。

文 献

- 1) 稲葉晋一, 八木順一郎: 鉄と鋼, **78** (1992), 1187.
- 2) 門口維人, 後藤哲也, 伊藤良二, 矢場田武, 清水正賢: R&D 神戸製鋼技報, **46** (1996)1, 2.
- 3) 上條綱雄, 高橋 昇, 星野剛一, 吉田康夫, 伊藤良二, 柴田耕一郎, 宮川 裕: 材料とプロセス, **6** (1993), 848.
- 4) 大鈴克二, 北山修二, 矢場田武, 清水正賢, 野間文雄: 材料とプロセス, **4** (1991), 100.
- 5) 清水正賢, 木村吉雄, 稲葉晋一, 堀 隆一, 桑野恵二, 野間文雄: R&D 神戸製鋼技報, **41** (1991)4, 11.
- 6) T.Uenaka, H.Miyatani, R.Hori, F.Noma, M.Shimizu, Y.Kimura and S.Inaba: I&SM, **15** (1988)11, 34.
- 7) 笠井昭人, 岩切治久, 厚 雅憲: 材料とプロセス, **7** (1994), 962.
- 8) 上條綱雄, 岩切治久, 木口淳平, 矢場田武, 田中英年, 北村雅司: 鉄と鋼, **73** (1987), 2012.
- 9) 高橋 昇, 磯部光利, 上條綱雄, 吉田康夫: 材料とプロセス, **6** (1993), 92.
- 10) 岸本純幸, 石井邦彦, 炭竈隆志, 桜井雅昭, 板垣省三: 材料とプロセス, **3** (1990), 6.
- 11) 原口 博, 西 徹, 三浦義明, 牛窪美義, 野田多美夫: 鉄と鋼, **70** (1984), 2216.
- 12) M.Shimizu, Y.Kimura, K.Shibata, N.Takahashi and S.Inaba: Proc. of 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Nagoya, (1990), 422.
- 13) 笠井昭人, 岩切治久, 上條綱雄: 材料とプロセス, **7** (1994), 91.
- 14) 長尾高明: 粉体工学会誌, **21** (1984), 398.
- 15) 粉体工学便覧, 粉体工学会編, 日刊工業新聞社, 東京, (1986), 374.
- 16) 山田孝雄, 佐藤政明, 宮崎伸吉, 鳴村秀郎, 田口整司: 川崎製鉄技報, **6** (1974)1, 16.
- 17) H.Takahashi and N.Komatsu: ISIJ Int., **33** (1993), 655.
- 18) 柴田耕一郎, 清水正賢, 稲葉晋一, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **77** (1991), 236.