

討 2 高炉下部のガス流速分布に及ぼすレースウェイ形成条件の影響

川崎製鉄 技術研究所 福武 剛 ○近藤 幹夫
岡部 俠児

1. 緒言 高炉内での装入物とガス流の半径方向分布が高炉操業に影響を及ぼすことはよく知られている。ガス流速分布を決定する要因として、シャフト部では ore/coke と鉱石粒径の分布が支配的である。炉下部では、送風量、羽口径、コークス粒径などのレースウェイ形成条件、温度分布と熔融帯の形状、コークスの粒度偏析、炉床の液面高さ、さらには炉上部の通気抵抗分布までが複雑な影響を及ぼす。

本報告では、レースウェイ形成条件を変えて、冷間模型により炉下部のガス流速分布を求め、既往の研究により推定されたガス流分布との対応関係について考察した。

2. 既往の研究にみられる炉下部ガス流分布に及ぼすレースウェイ形成条件の影響^{(1)~(5)} レースウェイの形状と大きさはガス流分布に影響を及ぼす。これを支配する要因として重要なものは、送風量、羽口径、コークス粒径などである。また最近では、コークス強度も注目されるようになった。以下に、この4つのレースウェイ形成条件が炉下部のガス流分布に及ぼす影響について、熱間模型、試験高炉、高炉下部実験炉および実高炉での各種の測定結果を概括した。ガス流速分布の測定例はなく、温度、ガス組成および圧力の分布からガス流分布を推定している。

2.1 羽口径 送風量が一定のとき羽口径を小さくすると、レースウェイの深さも容積も増すが、羽口線速度がある値以上になると、容積が一定のまま扁平な形状へと変化していく。

温度とガス組成分布によれば、羽口径を小さくするにつれ、高温域あるいは燃焼帯は下方および中心方向に移り、中心流が発達する傾向がある。しかし、コークス強度が低いときには、逆に炉壁近傍の温度が上昇し、周辺流が助長されるという報告がある。

2.2 送風量 羽口径一定のまま送風量を増す場合は、送風量一定のまま羽口径を小さくする場合より送風の運動量は大きくなり、レースウェイの容積は羽口線速度に対し、放物線的に増加する。コークス粒径が小さいほどレースウェイ深さの増加は著しく、レースウェイ内のガス圧力も高くなる。

羽口径が小さいか、コークス粒径が大きいとき、送風量を増すと高温域は比較的均一に拡大し、燃焼焦点および燃焼帯は下方および中心方向にのびて中心流が増す傾向にあるが、炉壁近傍の温度は若干上昇する。逆のときは、高温域は上方にのみ拡大し、周辺流を大きくする傾向にある。

2.3 コークス粒径 コークス粒径が低下すると、レースウェイ内のガス圧力はレースウェイ先端部でとくに高くなり、レースウェイの形状変化は、深さと巾の増加に比べ高さの増加が著しいという特徴がある。この傾向はコークスが均一粒径でも、粒度分布をもつ場合でも同様である。後者の場合には、送風圧の変動が激しく、炉壁部で吹き抜けが起こったことが実際に確認され、レースウェイ形状が不安定であることを示唆する。この原因としては、レースウェイ内で粉が多く発生し、これがレースウェイの底部から先端部に集積して通気抵抗を高めているためと考えられている。

羽口水準より上のレベルでは、コークス粒径が低下するにつれ、炉壁近傍が高い温度分布へと変化し、周辺流が発達する。

2.4 コークス強度 コークス強度が低下すると、コークス組織の劣化と粉の発生がレースウェイの直上部から内部にかけて著しくなり、発生した粉はレースウェイ近傍に集積する。レースウェイ形状、ガス圧力および温度分布はコークス粒径が小さい場合の傾向と酷似し、周辺流が発達する。この対策として、コークス粒径を増すことが効果的であるという報告がなされている。

3 冷間モデル実験

高炉下部でのガス流分布を定める要因の一つとして、レースウェイから流出するガスの流速分布が重要である。ここでは冷間モデル実験によりレースウェイ近傍のガス流速分布に及ぼすレースウェイ形成条件の影響を検討する。

3.1 充てん層内の流速分布の計算方法

充てん層内のガス流速ベクトル V と圧力 P の間には、(1)式の関係が成り立つ。

$$\text{grad } P = -(\alpha V + \beta) V P_0 / P \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 V はベクトル V の絶対値であり、流速は基準圧力 P_0 の条件で換算した値とする。 α 、 β は、充てん粒子径、空間率、ガス粘度、密度に依存し、等温で一様な充てん層内では一定である。

(1)式の両辺の絶対値をとり、 V について解いて(2)式を得る。

$$V = (-\beta + \sqrt{\beta^2 + 4\alpha P |\text{grad } P| / P_0}) / 2\alpha \dots\dots\dots(2)$$

したがって、充てん層内の圧力分布を測定し、圧力勾配を求めれば(2)式により流速の絶対値が、(3)式により流速の成分が計算できる。

$$V = -V \text{ grad } P / |\text{grad } P| \dots\dots\dots(3)$$

圧力勾配を2点の圧力の差で求める方法は、測定誤差の影響を受けやすいので、測定した圧力分布の r および z 方向の近似式⁽⁶⁾を微分して圧力勾配を求めた。定数 α と β は、実験に用いた粒子の通気抵抗の実測値により決定した。

3.2 レースウェイ周辺でのガス流速の分布

図1にレースウェイ周辺でのガス流速のベクトルを羽口中心軸を通る垂直断面上で示す。装置は箱型(巾300、高さ750、奥行150mm)で羽口径21.6mm、空気流量31.2ℓ/S、充てん粒子は2～2.83mmのガラス玉である⁽⁶⁾。この実験のように均一な粒径の粒子を用いた場合には、ガスはレースウェイ外表面から比較的一様に装置内に分配されることがわかる。ガス流は羽口水準から9cm上方ですでに平行流に近くなっている。

3.3 レースウェイ上部での半径方向のガス流速分布

3.3.1 実験装置と実験方法

図2に用いた実験装置を示す。レースウェイの形状を観察するために、装置は羽口中心軸で垂直に切断したモデルとし、前面を透明ガラス板とした。装置の横断面は頂角10°の扇形であり、羽口18本の高炉に相当する。装入物は図に示す流出口を通じて定量切り出し用の振動フィーダーを用いて下部の密閉容器に取り出した。

装置の裏面から外径1.2mmφの管を前面まで挿入して圧力を測定した。測定点の位置は前面から監視し、5cm

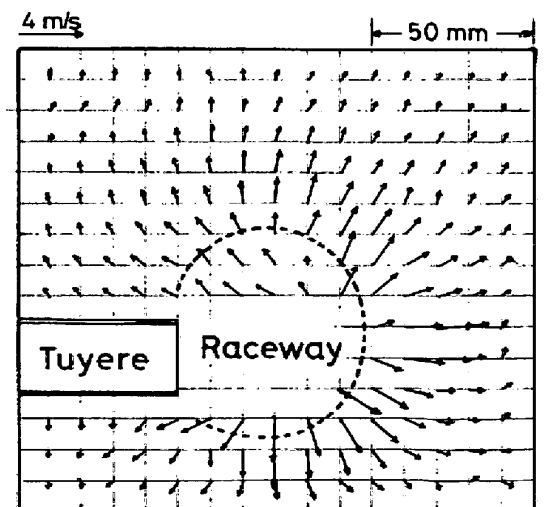


図1 羽口中心軸を通る垂直断面上のガスの流速ベクトル分布

間隔で高さ方向に7水準、半径方向に10点計70点の圧力を測定した。測定位置を羽口中心軸を通る垂直面（前面のガラス板面）としたため、測定圧は壁効果の影響を受けていると推定される。しかし全測定点は同じ条件にあるので、流速分布の相対的評価を行なう場合の誤差は小さいと考えられる。

実験は、羽口径 D 、粒子径 d 、 N_2 ガス流量 Q を変えて行ないレースウェイ形成時に装入物をぬき出し、圧力分布の測定中は粒子のぬき出しを止めた。均一な粒径

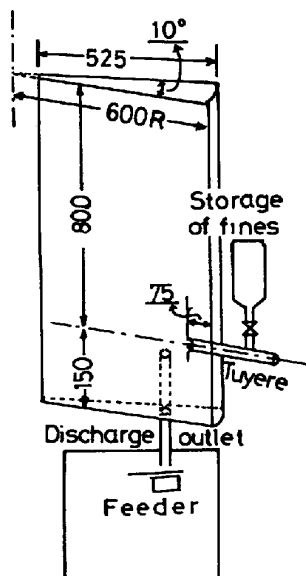


図2 実験装置

の粒子を用いて行なう実験のほか、レースウェイ内で発生する粉の影響を調べるため、羽口を通じて強度の低い中空アルミナ球（1～1.4mm ϕ ）をレースウェイに添加する実験も行なった。中空アルミナ球の添加は、前述の流出口から粒子をぬき出しながら、全容量3ℓ添加した。圧力分布の測定は、その後粒子のぬき出しを止めて行なった。

3.3.2 実験結果

図3に羽口水準から30cm（ $\frac{1}{2}R$ ）上の水準のガス流速の垂直成分の分布を示す。比較に便利なようにガス流速は、断面積により加重平均した平均流速により基準化して示す。

粒子径が均一な場合、流速の半径方向の変化は±6%以内であった。レースウェイの形成条件は、とくに炉壁近傍のガス流速分布に影響し、羽口径の増加（図3a）、送風量の低下、装入物粒子径の増加（図3b）により炉壁近傍のガス流速が増すことがわかる。

羽口から中空アルミナ球を送った場合、アルミナ球は大部分レースウェイ内で破碎され、一部は写真1に示すようにレースウェイ周辺に残り、他は層内の空間を通して

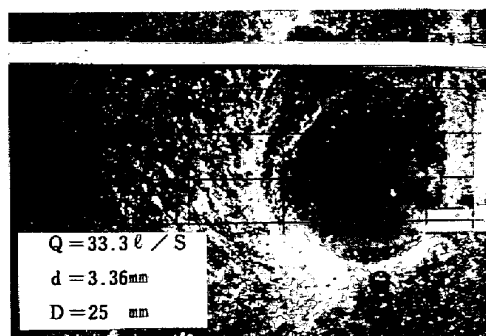


写真1 羽口を通して細粒を吹き込んだときのレースウェイ周辺の粉の偏析

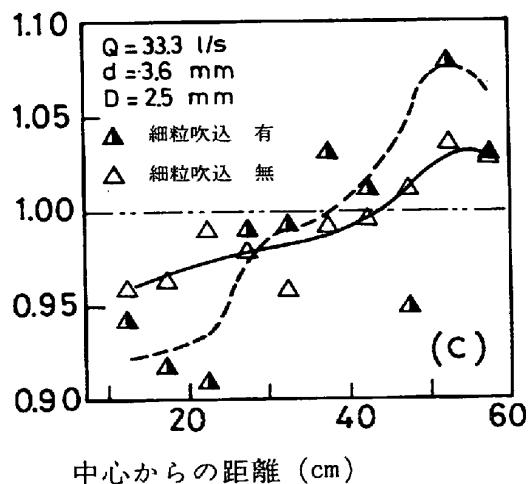
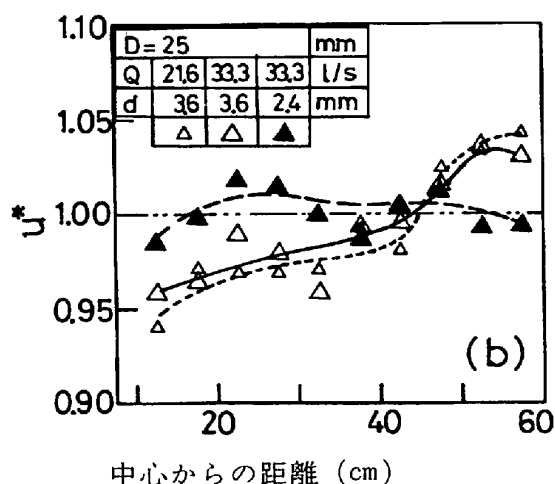
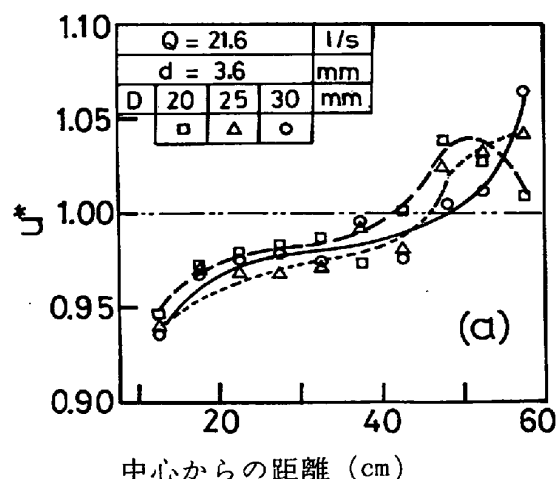


図3 羽口上30cm水準での断面積による加重平均流速で規準化した垂直方向の相対流速 U^* の半径方向の分布a) 羽口径 D の影響、b) ガス流量 Q と粒子径 d の影響、c) レースウェイ内で生成する粉の影響

上部に流出する。写真から明らかなようにレースウェイ周辺への微粒子の堆積は不均一なので、レースウェイからのガス流の流出がさらに不均一となり、レースウェイの大きさは、粉がない場合と比べて大きいにもかかわらず炉壁部の流速の増加と炉芯部の流速の低下を起こす(図3C)。

高炉内でレースウェイの形成条件がガス流分布に及ぼす影響を本実験から定量的に判断することは困難であるが、以上の実験結果から実高炉の炉下部のガス流分布は、レースウェイ内に流入し、あるいはレースウェイ内で発生した粉コークスのレースウェイ周辺への偏析状態に大きく影響されることがわかる。粉の偏析部では液体の通過が困難なため、液のホールドアップが増し、ガス流の通過を妨げるためレースウェイからのガス流の流出はさらに不均一になると考えられる。

4. 考察 本実験で得た炉下部のガス流速分布に及ぼすレースウェイ形成条件の影響は、従来、熱間模型や実炉から得られている結果とよく一致する。以上の結果は次のように総括できる。

(1) 送風量の減少あるいは羽口径の増大により送風の運動量が減少すると、周辺流が増す。

(2) コークス粒径が小さくなると中心流が増す。

これは従来の結果と逆になっているが、一つには実験条件の範囲が次のように異なるためである。粒子径が低下するとき、レースウェイは通常の形状を保ちながら拡大する粒子径の範囲があり、それよりもさらに粒子径が低下すると、レースウェイの深さよりも高さが増加する。本実験の条件は前者に属しており、レースウェイ深さの拡大とともに炉壁近傍のガス流速が低下することは送風条件の場合と同様である。この点、ガス流速分布に与える要因の効果を統一的に表現することが必要と思われる。もう一つには、コークスを用いた熱間での測定では粉率と粉の偏析の影響までが含まれているためである。

(3) コークス強度が低下すると粉がレースウェイ周辺に集積し、レースウェイは縦長の不安定な形状となり、周辺流が助長される。他の要因に比し、粉がガス流速分布に及ぼす影響はかなり優勢である。

以上の結果は、本実験を含めてシャフト部のない装置での測定結果が主体なので、炉下部ガス流速分布に及ぼす炉上部の通気抵抗分布の寄与は明らかでない。

実際の高炉操業では、水平ゾンデを用いて炉頂でのガスの温度およびガス組成分布を測定し、ガス流分布を判断するのに用いている。図4は炉頂各部の温度とコークス強度との関係を示す。コークス強度が低下すると、中心部の温度は低下し、逆に中間部、周辺部の温度は若干上昇しており、上記の傾向と符合している。また、炉下部では、鉄皮の赤熱、スチーフ蒸発水量の増加および羽口破損など周辺流が発達していると判断される現象がしばしば起きているので、炉下部のガス流分布が炉上部のそれに影響を与えていると思われるが、高炉全体のガス流を定量的に理解できるようになるまでには、まだ多くの問題が残されている。

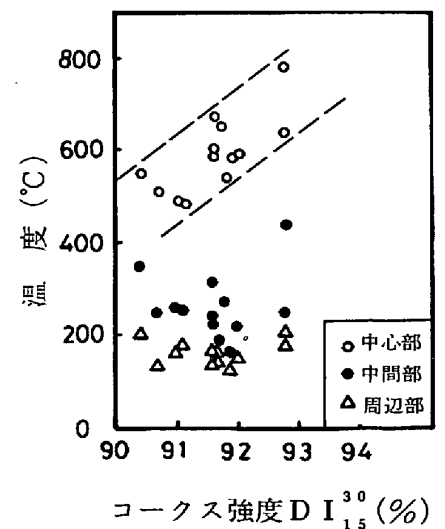


図4 コークス強度と炉頂各部の温度との関係(千葉第5高炉)

(文献) (1)近藤ら:学振54委-1316(1974), (2)近藤ら:鉄と鋼, 61(1975), A5, (3)児玉ら:鉄と鋼, 48(1962) 12, P.1552, (4)羽田野ら:学振54委-1332(1974), (5)Gotlib:高炉製鉄法の理論(館訳), (1965), P.287~327〔日本鉄鋼協会〕, (6)福武ら:鉄と鋼, 61(1975)4, S19