

## 討 5 福山 2 高炉における装入物分布制御

日本鋼管㈱ 福山製鉄所 山本亮二 岸本純幸 牧 章  
 ○齋藤典生  
 中央研究所 齋藤 汎 西尾浩明 有山達郎

### 1. 緒 言

ベルレスはすでに多くの高炉で用いられているが、当社でも福山 2 高炉第 3 次改修（内容積 2828 m<sup>3</sup>、火入れ 1982 年 11 月 1 日）で初めて導入することとなった。ベルレスの装入物分布制御技術について多くの報告がなされているが、近年の高炉センサーの活用、融着帯形状の予測計算などに見られる著しく向上した高炉制御技術に対応した、さらに精度の高い分布制御技術が求められている。このような背景から、火入れに先立ち従来にもまして信頼性の高い装入物分布シミュレーションモデルを開発し、福山 2 高炉へ適用することとなった。本モデルは、火入れ時の装入モードの決定、その後の適切な分布制御技術確立に重要な役割りを果たし、同高炉は火入れ後、約 4 ヶ月という短期間で安定操業を見ることができた。以下、そのモデル開発、モデルの活用について報告する。

### 2. モデル開発の方法

ベルレスは装入物分布に対して非常に自由度が高い。しかしこの特徴を生かすには、その高い自由度に合った汎用性に富むモデルが必要である。また上述の要求に合ったモデルを開発するには、ベルレスの特性、装入物分布に影響する個々の要因を詳細に検討し、シミュレーションモデルの構成を考えなければならない。当社での従来の装入物分布に関する研究結果<sup>1)~3)</sup>およびベルレスの特性を総合的に考慮すると、Table 1 のような各項目を検討すべきと考えられる。この各項目を実験的に検討したが、その手段として、相似性の観点より①②⑤~⑧については、

Table 1 Experiment items and methods

Item	Method	1/10 Model	1/1 Model
① Falling curve from chute			○
② Burden profile			○
③ Influence of gas flow		○	
④ Influence of burden descent		○	
⑤ Influence of lower layer profile			○
⑥ Circumferential direction ununiformity			○
⑦ Particle segregation			○
⑧ Formation of mixed layer			○

Fig. 1 に示したような実物大模型を、③④については、送風可能で、装入物の連続降下の可能な 1/10 模型を使用し総合的に検討を実施した。

### 3. 模型実験とシミュレーションモデルの開発

分布の形成の上で基本となるシュートからの装入物の落下軌跡については 1/1 模型を用い、落下時の粒子をサンプリングして、まず結果を整理した。また同時にシュート上の粒子の運動と落下を質点系の力学によってシミュレーションした<sup>4)</sup>。Fig. 2 に両者の結果を示したが、傾動角の小さい範囲を除いて、シミュレーションの結果は測定値と良く一致し、質点系と見なしたモデルで装入物の落下に至るまでの過程を扱えることがわかった。この際、円周方向の不均一性についても調査したが、垂直シュート内の粒

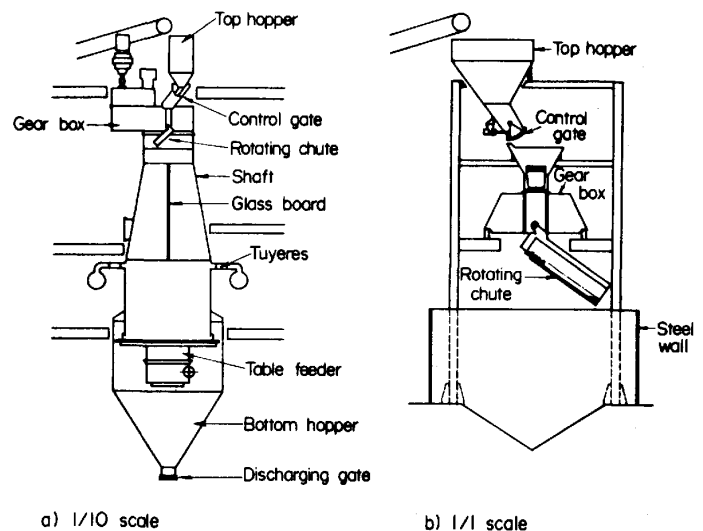


Fig. 1 Burden distribution test devices

子の偏流によって、シュートの回転と共に落下軌跡が変化し、生ずる装入物分布も完全に軸対称とはならないことが観察された。

次に表面形状を測定するため、傾動角、ストックライン(SL)を系統的に変更する実験を行った。この結果によれば、傾動角とSLにより、表面形状は5種類に分類され、形状も3次関数と直線の組み合わせによ

って精度良く近似することができた。また、この時、非常に問題になったのは、下層の表面形状の影響である。ベルレスでは、その特徴である多重リング装入により分布を細かく制御できるが、その際、1リング当りの層厚が小さいことによって、下層形状の影響が上層にも及ぶ。この現象は重要であるが、従来のモデルでは考慮されていない。1/1 模型実験で詳細に下層の影響を解析したが、シュート回転数から成る実験式によって表面形状を補正すると上層の表面形状の近似が著しく向上することが判明した。Fig. 3にその例を示す。粒度偏析についても同時に調査し、Fig. 4にベル装入と対比させたが、ベルレスの方が粒度偏析が顕著であり、落下位置によって偏析の程度が異なることがわかった。また混合層の形成はベルと比較して小さい。本現象も重要であるが、無風、層降下のない1/1 模型では、厳密な解析はできない。そこで、コークス層の崩れについては、実験での定量的把握の困難さもあり、当面は考慮せず、将来的に実炉との対比で精度上、問題が生ずる場合に付加することとした。

筆者らの研究によれば、ガス流は装入物分布に影響する大きな要素

であり、その影響の度合いも定式化されている。このガス流の効果を送風可能な1/10 模型で検討したが、既

報<sup>1)</sup>で導出された式によって送風下の傾斜角を計算できる。本シミュレーションでも、この式を用い実炉のガス流の影響を定量的に扱えるようにした。また装入物の降下も表面形状に微妙に影響するが、均一降下モデルによって降下時の表面形状を計算できることを確認

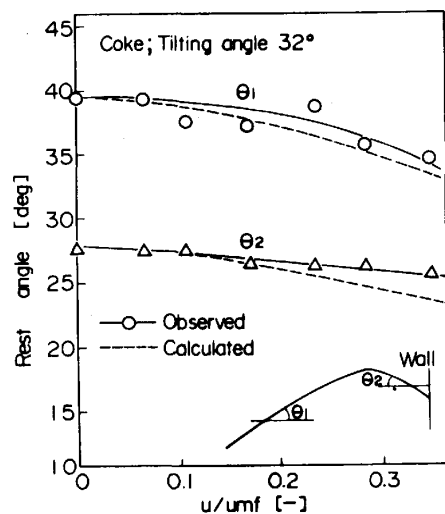


Fig.5 Influence of gas flow on the burden profile (1/10 Scale test device)

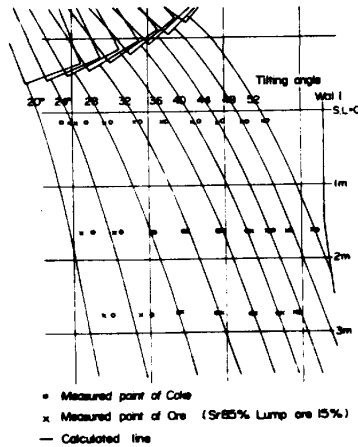


Fig.2 Measured (in 1/1 scale device) and calculated results of falling curves

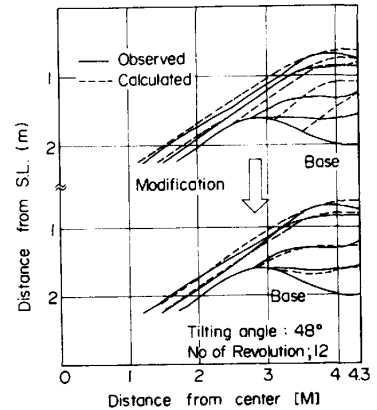


Fig.3 Influence of previously charged burden

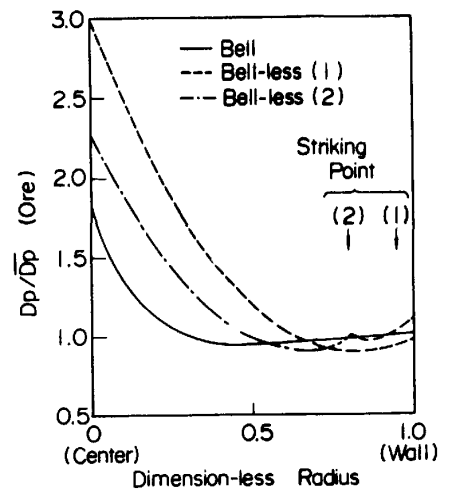


Fig.4 Ore particle size distribution (1/1 Scale test device)

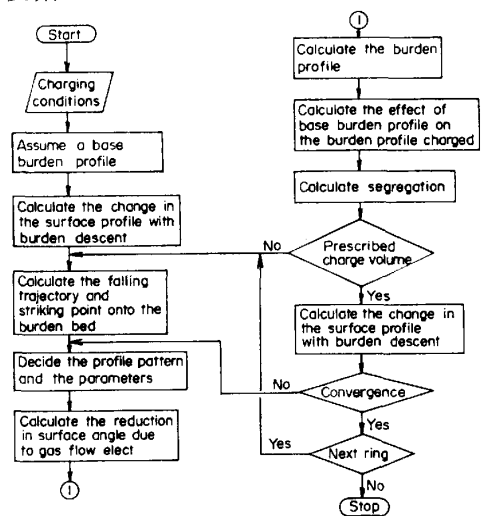


Fig.6 Outline of simulation model for Bell-less top.

した。以上のような実験にもとづく解析をまとめ、シミュレーションモデルを構成した。その計算フローを Fig. 6 に示す。ガス流、装入物降下、下層表面形状などの装入物分布に影響をおよぼす基本的因子を総合的に考慮することにより、精度の高いモデルとなった。このモデルにより装入物分布プロフィール、粒度偏析、ガス流分布を求めることができる。

4. 福山 2 高炉の操業

福山 2 高炉の操業計画に際して上記のシミュレーションモデルを活用したが、回転数およびリング数は火入れ当初より 1 2 旋回、3 重リングで構成することとした。これは径方向の粒度偏析を緩和してベルに近づけるためと、分布の微調整を考慮したためである。

次に火入れ時の装入物分布の目標として、これまでに実績のある当社のベル高炉のアーマーを使用しない分布を選んだ。既開発のベルアーマー装入物分布シミュレーション<sup>5)</sup>と今回開発のベルレスシミュレーションの結果を対比すると、Fig. 7 に示すように両者の粒度偏析の差に起因して層厚比 (LO/LC) と相対ガス流速 (U/Uo) の分布パターンを一致させることは困難である。そこで、後者を重視して、特に炉体レンガの火入れ時のヒートショック緩和のため、周辺流抑制型の分布を指向した。火入れ操業は順調で、約 2 週間で出鉄比 1.8 T/Dmt となる計画ベース通り推移した。

シミュレーションの精度については、Fig. 8 に示すようにシャフト水平ゾンデのガス成分および温度のデータから水平ゾンデモデル<sup>6)</sup>によって逆に装入物分布を計算し、ベルレスシミュレーション結果と比較する方法で検証した。その結果、コークス層崩れ現象による中心部の分布の不一致は見られず、堆積後の外面形状についてもプロフィールメーターによる実測値とよく一致した。

火入れ後 1 ヶ月頃よりベルレス装入による適正な分布形成を目指して、幾種類かの分布テストを系統的に実施した。Fig. 9 にその経緯を示す。モード選択の考え方から、この間を I, II, III 期に分けることができる。I 期は火入れ時のモードの継続であり、シャフトでの 2 段の水平ゾンデの測定結果から、かなり周辺流が抑制されており、かつシャフトレンガ温度の推移などから判断して炉下部不活性化が懸念された。このため II 期では、コークスより鉍石を炉中心側

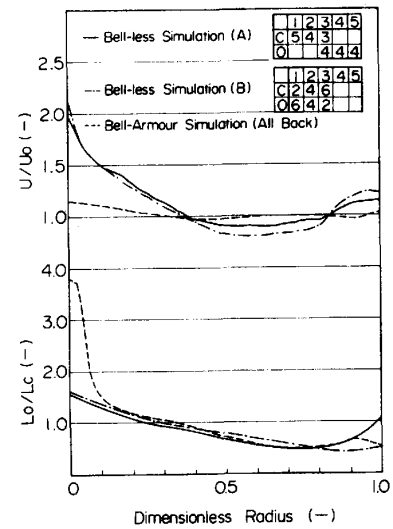


Fig.7 Charging mode of Fukuyama No 2 BF initial state

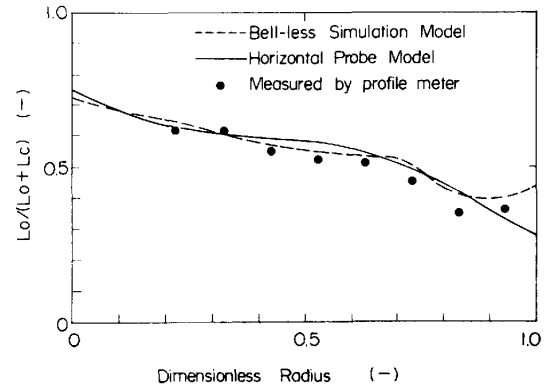


Fig.8 Comparison of calculated burden distributions with measured one

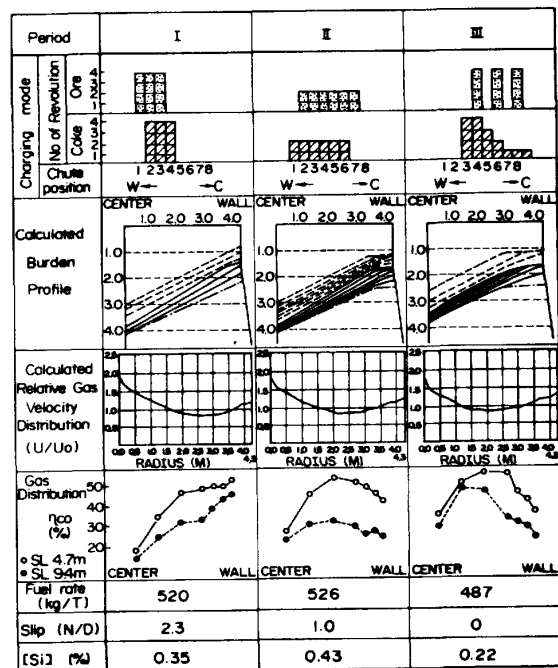


Fig. 9 Test results of burden distribution control

へ装入して周辺流の増加を試みた。また、分布制御性の向上を目的としてリング数を6重リングと増加した。Ⅲ期はコークス、鉱石共に炉中心側へ装入し、コークス層の表面形状を炉壁部でフラット化させる(コークス棚の形成)と共に、鉱石装入位置の調整によって中心流、周辺流を共に増加させ中間流を抑制する分布とした。Fig.10にI~Ⅲ期に試みた各モードにおける周辺と中心の $U/U_0$ のバランスの推移を示す。I, Ⅱ期では周辺流の増加によって中心流は減少し、Ⅲ期では中心、周辺共に増加した経緯が判る。またⅢ期ではコークス棚の形成によってFig.11に示すように、周辺部のコークスと鉱石の層厚比の変動が減少した。さらに、このテスト期間に垂直シュートにおける偏流に起因する円周方向の分布の不均一性が見られたため、垂直シュート径を絞ると共に鉱石、コークス各々に対して回転数を適正化して是正を試みた。

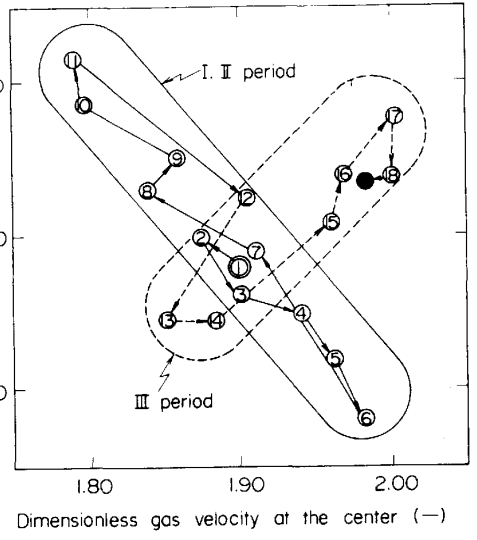


Fig.10 Transition of gas distribution at each test period in Fukuyama 2BF

Fig.12に火入れ以来の2高炉の操業推移を示す。シミュレーションモデルを活用した一連の分布制御テスト操業によって炉況の安定を見たため、その後生産要請に応じて出鉄比 $2.3 T/D_m$ 前後の高出鉄比、低Si, 安定操業を継続中である。

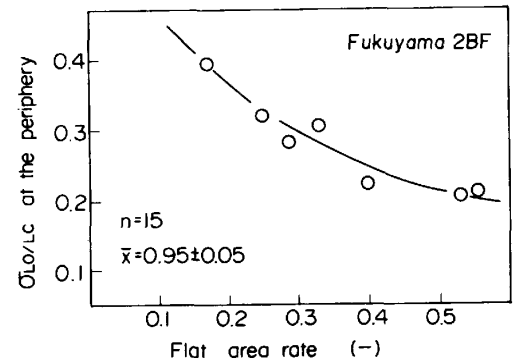


Fig.11 Relation between periphery flat burden surface area and measured periphery  $L_0/L_c$  fluctuation

5. 結 言

福山2高炉の3次改修においてベルレスを導入したが、火入れに先立ち、ベルレスの分布特性および装入物分布に影響する基本的因子を総合的に考慮し、現在の分布制御に必要とされる精度を備えたシミュレーションモデルを開発した。火入れ後のプロフィールメータによる分布測定、あるいは水平ゾンデモデルによる結果とよく一致し、本モデルは要求される精度を有していることが確認された。このモデルは、火入れ時のモード選択、その後の操業に際して有効に活用され、ベルレスの細かな分布制御にも十分に対応でき、火入れ後4ヶ月間という短期間の安定操業確立に貢献した。

( 参考文献 )

- 1) 西尾、他；鉄と鋼 66 (1980) P1878
- 2) 西尾、他；鉄と鋼 68 (1982) P1523
- 3) 西尾、他；鉄と鋼 68 (1982) P2330
- 4) 梶川、他；鉄と鋼 69 (1983) s52
- 5) 西尾、他；鉄と鋼 70 (1984) s46
- 6) 福島、他；鋼管技報 99 (1983) P1

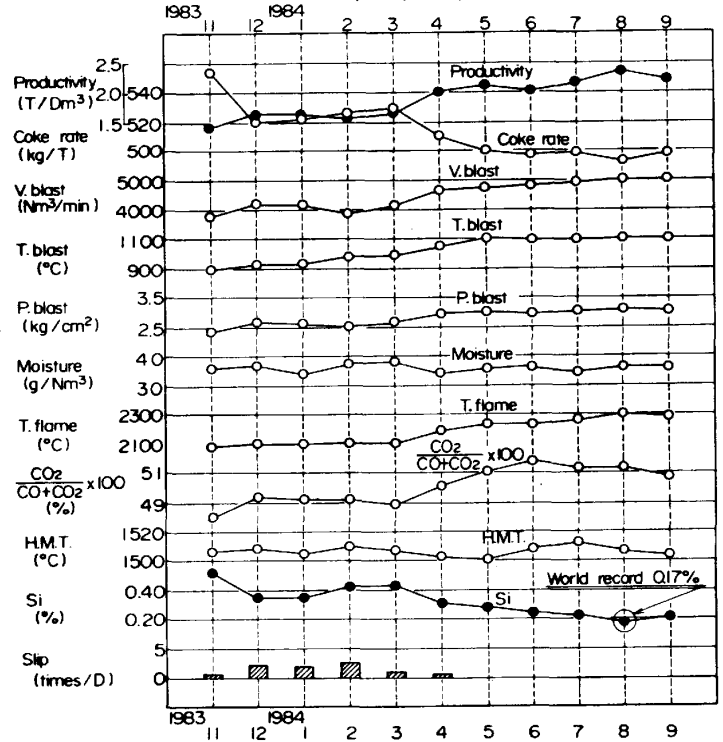


Fig.12 Operational Results of Fukuyama No.2 BF