



# 装入物分布制御の考え方

桜井 昭 二\*

## Control of Burden Distribution

Shoji SAKURAI

### 1. はじめに

高炉は、気体と固体充填層との向流による熱交換及び還元反応装置であり、装入された固体原料は、最終的には、溶銑及び熔融スラグとしての液体と CO ないし CO<sub>2</sub>としての気体に転換されるプロセスを一つの容器で行う機能をもっている。

固体充填層内を流れる気体は、これに固有の圧力損失特性、平たく言えば気体の流れやすいか否かによつて、流れやすい部分をより選択的に通過する。このことは、高炉の生産性、還元効率にとつて固体充填層のありようがいかに大切であることを示唆している。

高炉による銑鉄の製造技術は、経験工学的面が大きく、昔から、固体原料の炉内への装入のされ方により、その能率が大きく左右されることが経験的に知られていた。ここでいう能率とは、生産性、還元ガスの利用効率に留まらず、高炉設備の寿命をも指すものであり、炉体の損傷にも影響を与えること、更には炉況不調といった円滑な炉操業を不可能にしてしまうことをも意味する。

ところで、高炉操業成績を大きく左右する原料装入が、どのように生まれてきたかについて触れてみたい。

初期の高炉は、炉頂は開放であり、装入物分布制御の概念は見られず、せいぜい鉱石と還元剤である木炭あるいはコークスを交互に装入する程度で、装入は、まさしく言葉どおり放り込んでいるにすぎなかつた。

1850年、George PARRY によつて発明され、英国 Ebbw-Vale の高炉に採用された PARRY の炉頂閉塞装置(図1)は、その後百数十年も主流を占めてきたベル式装入装置の原形とみなされる。

PARRY の装置の目的とするところは、装入物分布ではなく、炉頂ガスを再利用するためのガス捕集装置であつたが、この単純なベルとカップからなる装置が高炉の装入装置として採用されたことは、高炉操業技術にとつて幸運だつたと言わなければならない。というのは、実際に高炉に使用されていたといわれる図2に示すような装入装置であれば、装入物分布制御の思想が生まれるには相当の歳月を要したであろうと推測されるからであ

る。1853年には、すでに、ベル付きのバケット装入車も考察されている。

ベル式装入法が採用されたことによつて、炉の円周方向及び半径方向の装入物の分布の重要性が、多くの高炉操業者によつて認識されたであろうことは想像に難くない。

これは、炉口径の増大と共に問題視されることでもあつた。

高炉に装入される固体原料としての鉱石及びコークスは、単一粒径でもなくまた同一形状でもない。また充填

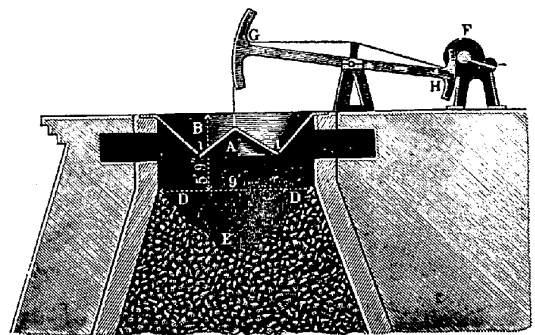


図1 ベル式装入装置<sup>1)</sup>

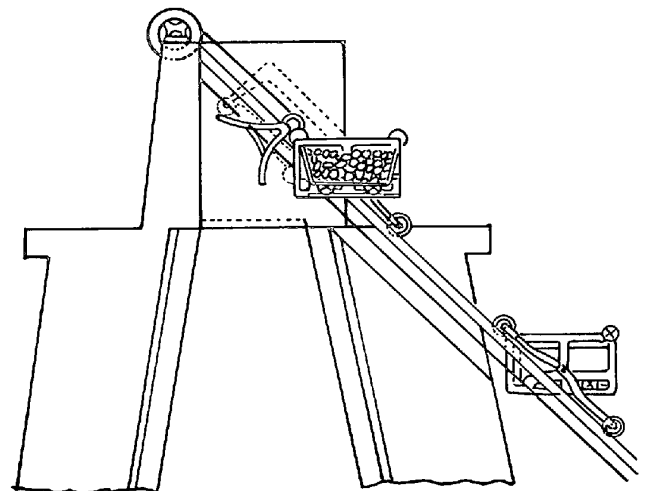


図2 Lowmoor の巻き揚げ装置<sup>2)</sup>

昭和 57 年 7 月 7 日 受付 (Received July 7, 1982) (依頼解説)

\* 川崎製鉄(株) (Kawasaki Steel Corp., 2-2-3 Uchisaiwai-cho Chiyodaku 100)

層としての高炉は、水平断面すなわち二次元的広がりをもっている。そのため、高炉へ装入される装入物が、どのように分配されるかによつて、炉操業が大きく左右されることは、想像に難くない。

装入物の炉内での分布とガスの流れの関係がどのようになっているか、またどのようにすることが理想的であるかについての研究は、そのレベルには差はあろうが、中断することなく続けられ進歩してきた。装入物及びガスの分布研究を要素別に分類すれば、大別して炉の周方向での均等性の問題と炉半径方向での効果的分布とに分けられる。また別の見方からすれば、装入原料の層厚、粒径、粒径分布、固体の堆積特性等の研究に分けられよう。

高炉操業の良否を決定する因子の 90% は装入物の分布であるといつても過言ではなく、いまだ完全に解明されたものとは言い難いが、これまでに得られてきた高炉装入物分布に関する知見の紹介と今後に残されている課題について以下に述べる。

## 2. 装入物分布制御の高炉操業における役割

### 2.1 装入物分布制御

炉頂での装入物の半径方向の分布は主に、鉱石/コークスの分布、混合層形成状況で表され、高炉炉内の上昇ガスの分配や装入物の降下速度分布ならびに融着帯形状に大きな影響を及ぼす。一方融着帯形状は高炉炉況を左右するので、高炉の成績を律する最も大きな操業要因で近年最も力が注がれた分野の一つである。したがつて適正な融着帯形状を導き、高炉の成績すなわち反応効率の改善による生産性向上、通気性改善による安定操業の確保、炉体熱負荷低減による炉体れんが、冷却設備のメンテナンス負荷の軽減および炉寿命延長などに大きく寄与する。

炉の円周方向で一ヶ所悪いところがあれば、それが律速となりそれに下限を合わせて操業せざるを得ず、成績

の低下はまぬがれないことから炉頂装入物分布の円周方向の均一化も大きな課題である。しかし、現在、円周方向の分布均一性はハードでかなり解決されてきており、単に均一性のみを追求すればよく、半径方向分布よりも単純である。したがつて以下に半径方向分布について述べることにする。

炉頂装入物の半径方向分布を制御する手段としては、従来のストックライン高さ、装入順序やコークス・ベースの変更などのほか、炉の大型化に伴つて発達してきたムーバブル・アーチャーや、ベル・レス装入装置の傾動角制御などがあり、図3にそれらをまとめている。これらの分布制御ではすべて鉱石なりコークスなりの落下地点をどこにするか、あるいはどのように落とすかを考えその基本に置いている。それを決定する基本的な原則は次の4つといえる。まず、粉は転がらず塊は転がりやすいということであり、従つて同一原料で山を作つた場合、粉は頂部に滞留し塊は裾野の方へ偏在する。次は、主要な装入物である焼結鉱やコークスなどにはそれぞれ特有の安息角があるということである(表1)<sup>9)</sup>。第3に落とし方により混合層のでき方が異なるということであり、特にコークスの上へ小粒径のものを落とせばそれがコークスに混り混合層を作りやすい。最後は上昇ガスの影響であり、上昇ガスの速度の大きい程安息角は小さくな

表 1 装入物のベル面との摩擦係数および傾斜角<sup>9)</sup>

装入物	粒径(mm)	ベル面との摩擦係数	傾斜角
塊 鉱 石	-5	0.49	29°30' ~ 30°27'
	5~10	0.47	
	10~25	0.46	
焼 結 鉱	-5	0.47	29°15' ~ 33°50'
	5~10	0.45	
	10~25	0.43	
	25~50	0.38	
ペレット		0.40	22°17' ~ 25°39'
コークス	25~50	0.31	32°36' ~ 34°13'
	50~75	0.31	

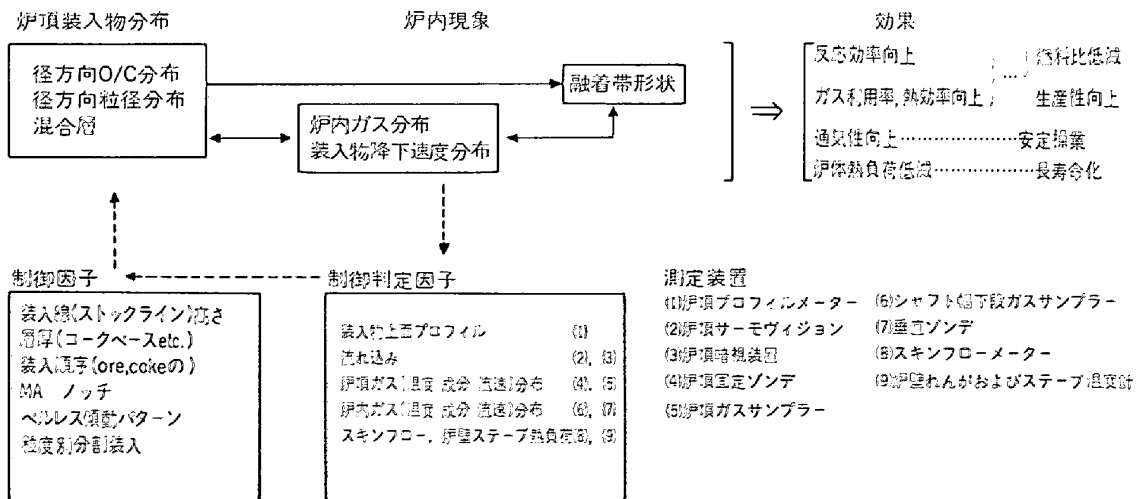


図 3 炉頂装入物分布の思考フロー

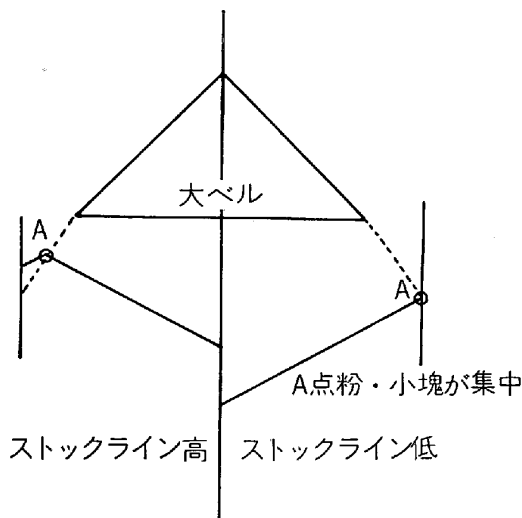


図4 ストックラインの分布に及ぼす影響

る。

炉頂での装入物の分配が直接的に分布と一致しないことも注目すべきことであり、装入物分布制御の難しさを示している。分配の変更をすればガス分布、融着帯形状、従つて装入物降下速度分布が変わり、またそれらが炉頂分布を変えるからである。従つてしかるべきセンサーで分配と炉況を正確に関連づけることが必要である。

(1) ストックラインの変更

ベルまたは分配シュートから放物線で装入物が落下することに基づくもので概念的に示せば、図4のようになる。左がストックラインが高いときでありM型分布を呈する。このとき炉壁部に塊が集まりそこでのガスの流れは強くなる。すなわち外部操業となる。右は逆に低い場合で炉壁部に粉や小塊が集中し炉壁のガス流が抑制され内部操業となる。極端な外部操業はガス利用効率の悪化、装入物降下不安定、炉壁熱負荷増大などをもたらし、また極端な内部操業は中心部ガス流過大となり、ガス利用効率悪化、装入物降下不安定、炉壁付着物生成などがあり避けるべきである。

(2) コークス・ベースの変更

コークス・ベースの変更は、全体の鉱石/コークスの比はほぼ一定であるので1回当たりの鉱石およびコークスの層厚が変わる。層厚が変わるとそれぞれの安息角の相違から、鉱石/コークスの分布が変化し炉内のガス流分布が変化することとなる。

(3) 装入順序

高炉炉内にはコークスと鉱石が別々に装入されるが、その装入順序も微妙に炉頂装入物分布に変化を与える。最も単純な例として、CO装入とOC装入例を比較する。CO装入とは前の装入物が定められたストックラインに達したとき、まずコークスを装入し、続けて鉱石を装入する。以後装入待ちとなり荷の降下を待つ。OC装入はコークスと鉱石の装入順序が逆な場合である。一般

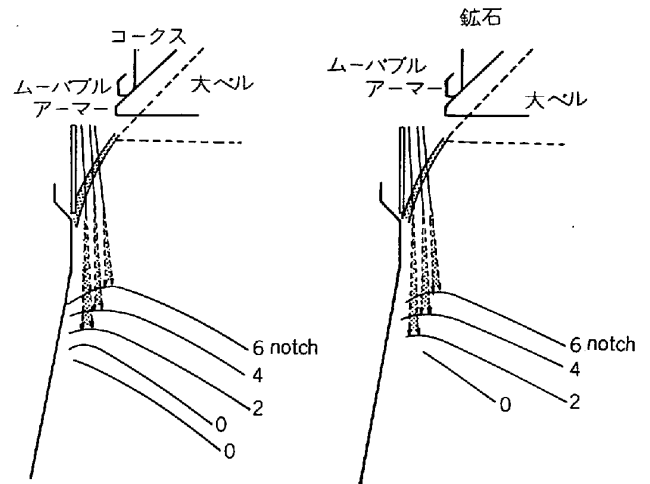


図5 ムーバブルアーマー位置と装入物表面形状<sup>4)</sup>

に中心部より周辺部の方が降下速度が早いので、CO装入のときは装入待ちで周辺部が中心部より下がったときにCを装入するので周辺部のO/Cは低くなり外側がガス流大となる。OC装入のときは全く逆の現象が起こり内部操業傾向となる。装入順序の選択としては、今述べたOC、CO装入の他、OCを単独に待ちをかける方法や、更にOを焼結鉱とペレットに分割する方法などがある。

(4) ムーバブルアーマー (以下MAと略す)

ベルとウェアリングプレートに間に任意に直径を設定できるMAを設置し、鉱石、コークスをそれにあて、積極的に装入物分布を変える方法である。MAは10~20ノッチ程度に分割し動かす。ノッチの間隔は任意に設定でき、周辺部では25mm、中心部では50~100mmの場合もある。

図5にノッチを変更したときの落下位置の変化を示す。

(5) ベルレス装入装置 (ベルレストップ)

ベルレス装入装置の分配シュートは旋回すると同時に

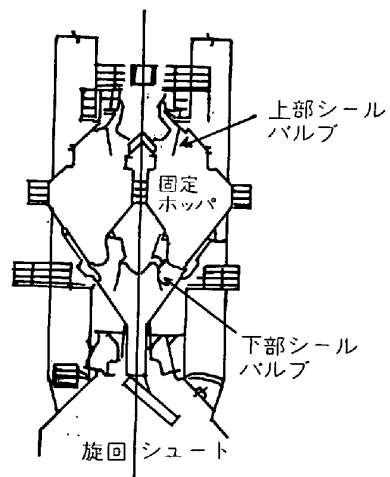


図6 ベルレス式 (Paul-Würth)

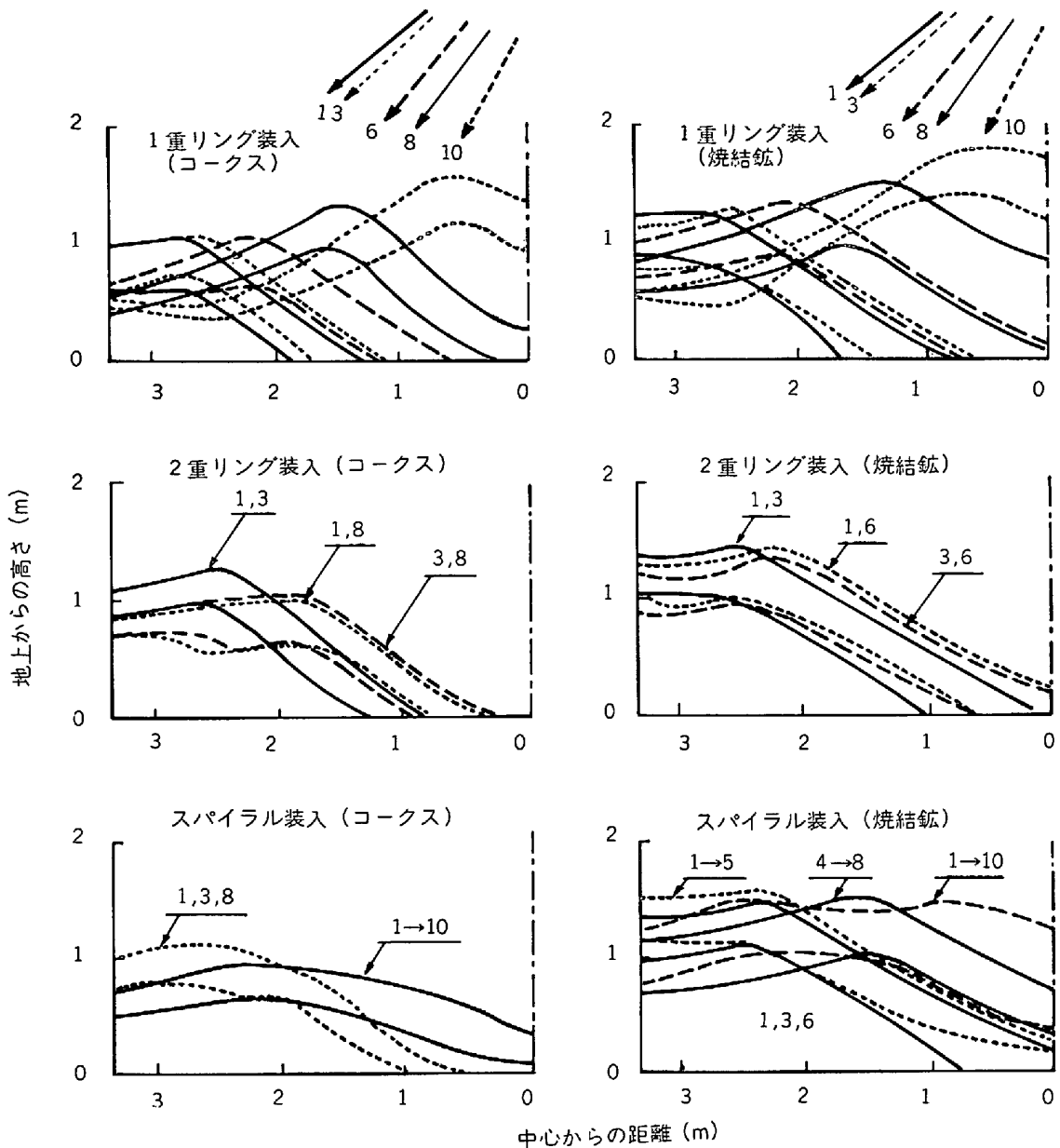


図 7 ベルレス装入装置の実機大テストによる装入物分布形状<sup>5)</sup>

傾動し半径方向の分布を制御する。川鉄千葉 6BF の場合、傾動角は 52° から 25.5° まで 10 分割され 1~10 のポジションを持ち、1 回装入を 13 旋回に保っている。非常に大きな自由度で分布制御可能となっている。コークス、鉱石それぞれ特定のパターンで装入するが、特に炉壁部の微妙な調整が容易である。図 6 にベルレス装入装置の概略を示し、図 7 に各ポジションでの落下軌跡の一例を示す。

(6) 粒度別分割装入

装入物を粒度別に分割し(従つて粒度範囲を小さくし)、それぞれの落下位置を変更させ適正な粒径分布を得る方法である。炉芯は小径のものを少なくし、かつ O/C を上げてガス流の確保とガス利用効率の向上を併

せて可能とするなど今後利用価値の大きな技術となり得よう。

以上述べた各手段の組み合わせで炉頂装入物分布が制御されるわけであるが、装入物の形状や性状(粒度構成、水分など)によつても分布が変わるので、小まめな分布調整が必要となる。大きさにもよるが1つのアクションの分布変更の効果が確定されるのに数時間ないし1~2 日間程度必要とされている。

2.2 適正な装入物分布を得るためのセンサー

操業中、炉頂の装入物の(鉱石/コークス)分布、粒径分布を直接計測する手段はいまだ開発されていない。従つて間接測定によらざるを得ない。

炉頂での装入物分配を変更したとき、炉頂ガスゾンデ

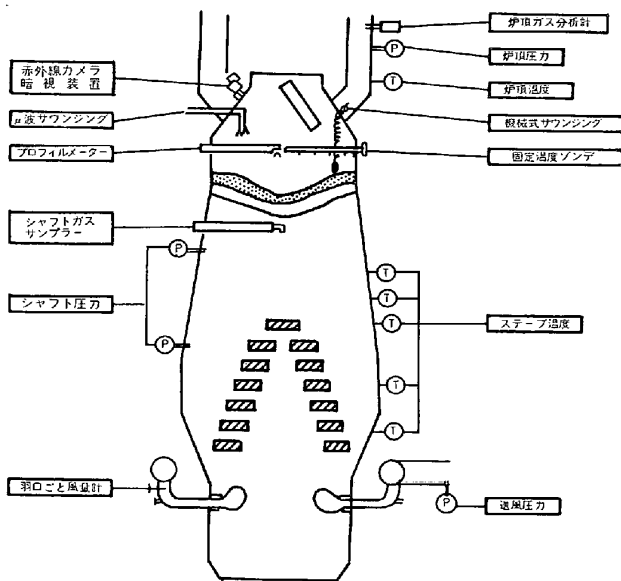


図 8 高炉センサー設置例

またはシャフトゾンデによる炉内ガスの径方向の温度および成分分布を測定し、それを指標として適正分布を得てきていた。また炉壁部重視の観点から炉壁部ガス温度を測定するスキンフローメーターや、コークスと鉱石の電気伝導度の相違を利用する炉壁部層厚計<sup>7)</sup>が開発されてきている。さらに赤外線を利用したサーモビューアーやシリコンビジコンを利用した炉頂暗視装置なども出現

表 2 ベルレス装入装置の高炉の操業例 (川鉄千葉第 2 高炉)<sup>6)</sup>

期 間	1	2	3	4
出 銑 量 t/day	2957	2457	2805	3055
送 風 量 Nm <sup>3</sup> /min	2295	2234	2260	2302
送 風 温度 °D	1069	1062	1064	1032
送 風 圧力 kg/cm <sup>2</sup>	2113	2295	2156	2166
酸素吹込量 Nm <sup>3</sup> /h	2000	2000	3000	4000
送 風 湿分 g/Nm <sup>3</sup>	17.3	18.2	11.0	11.8
炉 頂 圧力 kg/cm <sup>2</sup>	0.92	1.00	0.80	0.90
4P/V	0.52	0.58	0.60	0.55
炉 頂 温度 °C	131	163	151	148
ガス利用率 %	46.5	44.5	48.2	49.0
コークス比 kg/t iron	443	445	439	441
重 油 比 kg/t iron	75	77	52	37
燃 料 比 kg/t iron	518	522	491	478
溶 銑 温度 °C	1495	1510	1510	1515
%Si	0.42	0.53	0.44	0.51
%S	0.036	0.038	0.029	0.031
スラグ比 kg/t iron	372	361	351	341
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.6	14.4	15.8	14.5
CaO/SiO <sub>2</sub>	1.20	1.23	1.25	1.19
処理銑比 %	80.2	83.4	80.3	76.4
コークス灰分 %	11.0	10.9	11.0	10.0

し、装入物上面の温度分布の平面的な把握や流れ込み状況の情報<sup>8)</sup>が得られるようになった。また装入物上面形状を直接測定するプロフィールメーター<sup>9)</sup>も最近開発されてきている。垂直ゾンデおよびシャフト下段ゾンデも融着帯形状を把握する上で有力な武器である。図 8 にセンサーの設置例を示す。これらの情報を総合的に活用し、炉頂分布と融着帯との関連を立体的にとらえ、制御して

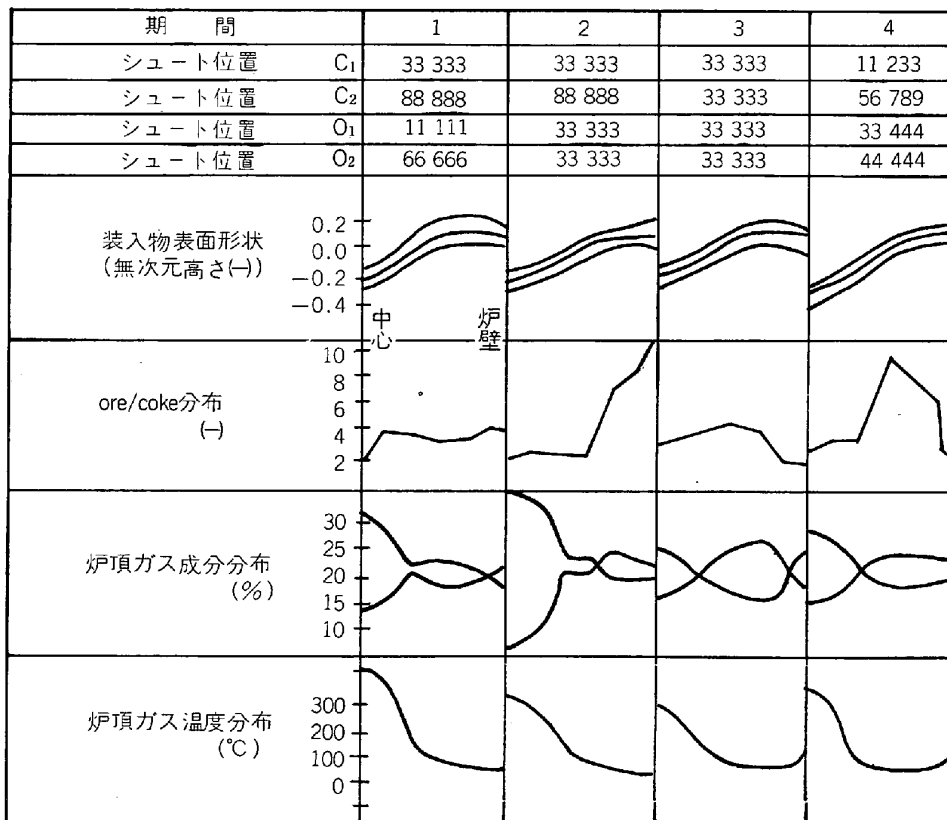


図 9 ベル・レス装入装置の高炉の操業例 (川鉄千葉第 2 高炉)<sup>6)</sup>

いくことにより高炉操業技術が今後更に向上していくものと考えられる。

### 2.3 最適な装入物分布

炉内ガス分布は炉内円周方向では均一が好ましいが、半径方向では適正な分布が必要である。炉内の反応効率から見ると可能な限り反応の進んだガスをフラットに全面に亘ってカバーするのが好ましいが、高炉操業の安定性からは炉内中心部に強いガス流と炉壁近傍にやや強いガス流を持つ分布が良い。O/Cの低い部分は通気性が良くガス流れが強くなる。従って炉内中心部はO/Cを低目に、そして炉壁部はO/Cを上げすぎないようにしなければならない。

具体例として、千葉第2高炉の分布制御の実績を示す(表2, 図9)。第1期は火入れ直後であり、ヤードの実機テスト結果から落下位置でベル装入近似の装入パターンである。ΔP/Vは低いが変動が大きく、またガス利用率(η<sub>co</sub>)は低く燃料比(FR)が高かった。第2期および第3期は一重リング装入での鉱石・コークス装入とした。前者では中心流が強すぎ、後者ではΔP/Vの変動が大きく炉況が不安定であった。第4期では多重リング装入を試み、積極的なO/Cの分布制御を行った。その結果ガス利用率の向上ΔP/Vの安定に表される炉況安定が得られた。

### 3. 装入物分布形成の機構

炉口部における装入物分布については古くより数多くの研究がなされてきた。また、最近では高炉の低燃料比安定操業において装入物分布制御技術の占める比重が一段と高まり、研究面でもいくつかの特記されるべき成果が得られて、それらはすでに成書<sup>9)~11)</sup>にまとめられている。本稿ではそれらとの重複はできるだけ避けて、近年、その普及の度を増しているベルレストップによる分布制御機能を加えつつ、装入物分布形成機構について述べる。

#### 3.1 炉頂バンカー内の粒度偏析現象

粉粒体プロセス操作において、貯槽内での粒度、密度、形状、成分などの偏析現象は頭痛の種で、大型の貯槽になるほど問題が多い<sup>13)</sup>。ベルレストップの炉頂バンカーも例外ではなく、I. F. CARMICHAELら<sup>14)</sup>が詳細に報告している。

炉頂バンカーに原料を装入する際、原料落下軌跡の部位に細粒が、そして壁近傍に粗粒が偏析する。排出時には排出口上部の原料がまず排出され、ついで上層から下層へと排出が進む。排出順による粒度変化は図10のように、平均的な粒度構成から始まって、排出前期に細粒が後期に粗粒が多く、終了直前に、ほぼ最初の粒度構成にもどる<sup>7)</sup>。したがって、炉内の堆積層内には、後述する炉半径方向の粒度偏析だけでなく、下層ほど粒度が小さくなるという層厚方向の粒度偏析が同時に生じる<sup>15)</sup>。

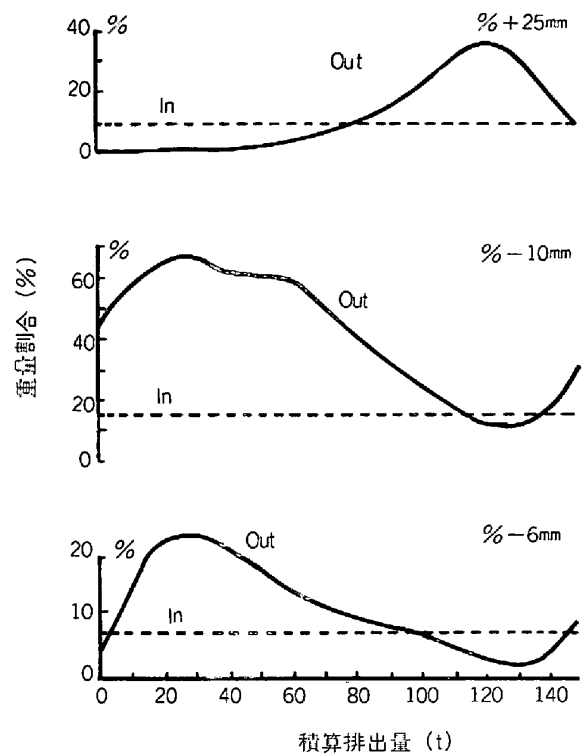


図10 ベルレストップ炉頂バンカーから焼結鉱が排出される際の粒度構成経時変化

ベルレス高炉では、その装入物分布制御上の自由度を駆逐することによつて、バンカー内粒度偏析に起因する問題点を、逆にプラスにすることもできる。千葉第6高炉の低燃料比操業における装入パターン変更の考え方は、その好例である<sup>16)</sup>。

同高炉では、順序排出と混合という2種類の貯鉱槽での原料切り出し方式により、単味の細粒焼結鉱のバンカー内堆積位置を変える試み<sup>17)</sup>や、バンカー内ストーンボックス位置変更による粒度偏析状態の改善が行われている<sup>18)</sup>。

バンカー内での偏析現象と関連した興味深い現象は、同一バンカー内に焼結鉱とペレットのように、流動特性や粒度の異なる2種以上の原料を積み付けると、その方式に従つて、排出順による両者の混合度は著しく変わることである。奥村らによれば<sup>18)</sup>、焼結鉱77%とペレット22%を層状に装入した場合、①ペレットが下なら、その大半は排出前期に排出され、②逆のときは混合度がより平均化されるが、③混合装入には及ばない<sup>14)</sup>。このように、積み付け方によつて排出順が異なることは、積み付け方式が装入物分布制御手段にもなることを意味する。ベル高炉では、大ベルカップ上での原料堆積順が対応することになるが、原料排出速度がベルレスの約10倍であることから、排出順は堆積順により依存する<sup>19)20)</sup>ように思われ、装入物分布の均一性の点では、ペレットと焼結鉱の完全混合装入がよいとの報告がある<sup>21)</sup>。

3.2 原料落下軌跡

装入装置からの装入物落下軌跡は装入物分布を決める最も基本的な要因の一つであり、ベルの場合、古くは、A. D. GOTLIB<sup>22)</sup> から、西尾ら<sup>30)</sup>に至るまで、数多くの研究<sup>22)~30)</sup>があり、ベルレスでは近藤ら<sup>31)</sup>、B. KRCEKら<sup>32)</sup>の理論的研究のほか、実機大模型での実測が数例ある<sup>14)33)~35)</sup>。落下軌跡の定式化は原料が装入装置から排出されて、炉内の装入物面に達するまでに経過する3つの過程；

- ①動的アーチの形成崩壊によるベルーベルカップ間隙あるいは流量調節ゲートからの排出
- ②大ベル表面あるいは分配シュート上での運動
- ③落下放物運動

を力学的に表現することにより行われている。しかし、過程②、③に関しては、mass flow としての解析はまだまだなく、質点の力学が適用されている。

3.2.1 ベルの場合

(2)式は G. S. ZOZULYA ら<sup>25)</sup>の式に、ベルの降下を考慮した<sup>28)</sup>第3項を加えたもので、一般式といえる。

$$V_0 = \sqrt{2gl_b(\sin\alpha - \mu\cos\alpha) + (V_0')^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$y = gx^2/2V_0^2 \cos^2\alpha + x \tan\alpha + V_b(t + \tau_b) \dots\dots (2)$$

G. HEYNERT ら<sup>23)</sup>及び城本ら<sup>27)28)</sup>は  $V_0' = 0$  として  $l_b$  をパラメータとし、成田ら<sup>21)</sup>は逆に  $V_0'$  をパラメータとして扱い、 $\mu$ の不確定さも含めて実測値と計算値の一致を図つていて実用性を重視しているのに対し、G. I. FEDORENKO をはじめとするソ連の研究者<sup>24)~26)</sup>や西尾ら<sup>11)</sup>は過程①に、動的アーチの理論<sup>36)37)</sup>を適用して得られる原料排出速度から  $V_0'$  を決めていて、正確な物性値を必要とする。

MA による装入物分布制御が一般化している現在、MA ノッチと、衝突割合や原料落下位置との関係を正確に求める必要がある。山田ら<sup>4)</sup>は、MA への原料衝突位置と、山の位置とから、装入物は MA に当たつた後、反発せずに単に面上を滑り、MA 下端を通る鉛直線と MA 面の延長線間に落ちると結論している。

3.2.2 ベルレス装入装置の場合

ベルレストップでの特徴は分配シュート上での装入物流の運動(過程②)にある。分配シュートは断面が半円形の樋形をなし、旋回運動と傾動運動がそれぞれ単独にか、あるいは同時に可能である。同時運動の場合でも、傾動速度は旋回速度の 3/100 にしかならないので、回転場における装入物流の相対運動が主体となる。

物体が回転場を運動するとき、回転体に固定された観測者の目から見ると、重力のほかに2つの見かけの力—遠心力とコリオリの力—が加わり、シュートに固定した座標系に基づいて質点の運動方程式を求めると(3)式となる。この式はベルの場合の(1)式に対応する。

$$\begin{aligned} \mathbf{a} = & \mathbf{g} - (\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})) - 2(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) \\ & - (\mu/m) \cdot \mathbf{F}_n \cdot (\mathbf{v}/|\mathbf{v}|) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

遠心力の寄与は小さいが、コリオリ力は無視できないこと、そして、装入物はシュート内面に沿つて、シュート旋回方向とは逆方向にしたいに振り上げられ、装入物流がシュート上でねじれることを証明した。しかし、 $V_0'$  と  $\mu$  に関しては、ベルの場合と同様、不明な点が多い。

過程③では、原料が大ベル表面に沿つて放出され、飛び出し角が大ベル角に等しいベルの場合に対し、ベルレスでは、シュート先端でシュート長手方向だけでなく、シュート面の接線方向にも速度成分をもち、ここで回転場から出るため、シュート旋回速度と同じ大きさと同方向の成分も付与される。1個の粒子に着目すると、放出点を含み、かつ、シュート回転軸と放出点を含む鉛直面に対し、回転方向へある角度をなす鉛直面内を放物運動する。ある瞬間に落下流をながめると、シュート先端から後方へ尾をひくように目に映るので、写真撮影などでは正確な落下軌跡を求めにくい。

近藤ら<sup>16)38)</sup>は実機大模型実験において、箱などの容器を炉径方向に配して落下流を受け、各容器ごとの採取重量から、累積重量割合別 ( $F[-]$ ) に落下軌跡を求めた(図11)。リップつきシュートの場合、落下流の幅はベルの場合の2倍と広いのが特徴で、シュート上を運動している間に装入物流中に速度分布が形成されるためである。

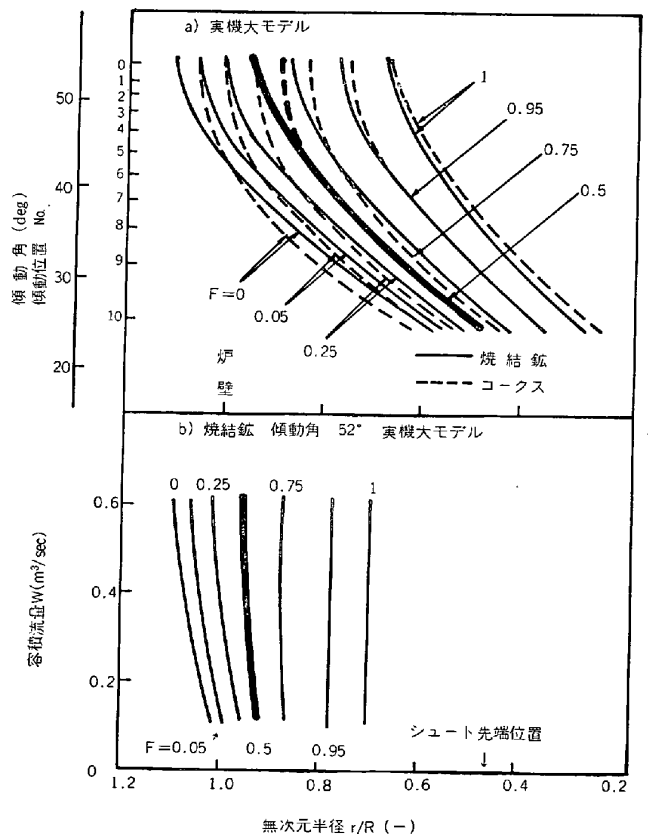


図11 落下軌跡の装入物表面上への衝突位置

### 3.3 装入面上での装入物の運動と装入物分布

装入物の静止傾斜面上を次のチャージの装入物がすべりところがり混えて、massとして運動する現象の解明が装入物分布制御の原点である。実物大模型や縮尺模型で部分的ではあるが直接観察でき、また、その結果としての装入物分布に関する数多くの研究により定性的な情報は豊富に得られているが、次のような未解明の本質的問題があることと、一時に多くの現象が複合して起こるといふ現象自体の複雑さのために、一部を除いて、系統立つた理論化ができていない。

(i) Bulk solids の運動に関して、運動方程式などの理論体系が確立されていない。

(ii) 装入物はそれぞれ特有の形状と粒度範囲を有するので、bulk flowに加えて、粒度別及び種類別の分級現象が同時に起こる。(粒度偏析、形状偏析など)

(iii) さらに、装入原料の運動エネルギーやガス流の抗力に起因する下層の変形と混合現象も同時に起こる。(コークス層流動化、混合層)

浜田ら<sup>35)39)</sup>は質点の力学を基本にして、この困難な問題に対して(上記(i),(ii))大胆な挑戦を試みている。シミュレーション結果をみる限りでは装入面の局所的傾斜角が現実的でない部分があり、完全な成功を見るには至っていないが、研究の進展が望まれる分野だけに、今後の発展が期待される。

従来は装入物の運動そのものではなく、その結果としての堆積状態の特徴を実験的に解明するといった経緯をたどってきた。以下本節では3節に分けて重要な項目について述べる。

#### 3.3.1 堆積傾斜角

炉頂での装入物面形状は、装入面への原料落下位置が炉壁より炉中心に向かうにつれ、V型分布からM型分布へと変わる。中心部の逆円錐部が水平面となす角を堆積傾斜角と呼ぶと、これはV型かM型かによらず、装入物種類に特有の値をとり<sup>4)6)40)</sup>、その値はペレット、塊鉱石、焼結鉱、コークスの順に大きくなる。この堆積傾斜角 $\theta$ によつて、炉口部での ore/coke 分布が主として決まる。この堆積傾斜角は操業上極めて重要な役割を占めるにもかかわらず従来、高炉装入物のような粗粒に対する統一的な測定方法はなく、測定例はかなりあるが<sup>19)22)27)28)</sup>測定者によつて実験条件が異なるので値はまちまちである。

近年、操業技術の進歩につれ、装入物分布制御の重要性が増し、火入れ 填充時調査 や実物大模型実験が盛んに行われるようになって、堆積傾斜角のデータも豊富になり、中でも無風条件では成田ら<sup>29)</sup>、通風条件では西尾ら<sup>41)</sup>の研究が多く、貴重な成果をもたらした。

##### (i) 無風時の場合

図12のようにコークス層上に装入された鉱石層の傾斜角はO↓の場合、装入量の増加により低下し、ある装

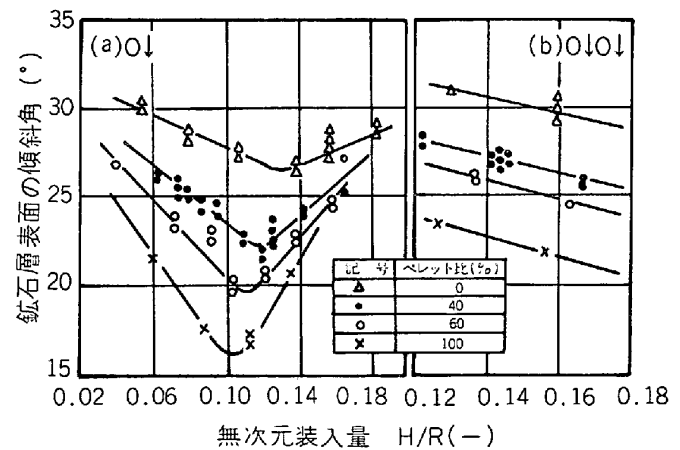


図12 鉱石層表面の傾斜角におよぼすペレット配合率と鉱石装入量の影響

入量で最小値を示した後、反対に増加するが、O<sub>1</sub>↓O<sub>2</sub>↓の場合には、O↓の場合に $\theta$ を最小にする装入量を越えても $\theta$ は低下傾向を示す。成田ら<sup>29)</sup>はその理由をひずみ速度効果に求めている。一方、コークスの場合、C↓装入では鉱石層傾斜角や装入量に関係なく、約32°となるのに対し、C<sub>1</sub>↓C<sub>2</sub>↓装入ではO<sub>1</sub>↓O<sub>2</sub>↓装入と同じ傾向を示す。無風時及び操業中のペルレス高炉でも分配シュート旋回につれ堆積量が増すと、類似した現象が認められる<sup>16)42)</sup>。

鉱石層の $\theta$ が最も影響を受けるのは流動特性のよいペレットの配合比によつてである。ore/coke=3.0~4.0の範囲で、ペレット配合比10%当たりC↓O↓装入で1°<sup>19)21)29)</sup>、C↓C↓O↓O↓装入で0.5°だけ $\theta$ が低下するが<sup>29)</sup>、これは大ペル上でペレットを上積んだか、混合状態で積んだ場合で、逆にペレットを下に、塊鉱石が焼結鉱を上にした場合の $\theta$ はそれぞれ塊鉱石か焼結鉱単味の値と大差なく、ペレット配合比が同じでもペレットの装入順により鉱石層の $\theta$ が極端に変化することになるので、装入物制御上留意が必要である。

ペルレス高炉の場合は装入速度がペルよりはるかに小さいので $\theta$ が大きくなり、さらに表面形状を詳しく定義した表面形状指数(=中心部の $\theta$ /中間部の $\theta$ )によるとペルレスからペルまでの装入速度の範囲で統一的に説明できるという報告もある<sup>43)</sup>。

##### (ii) 通風時の場合

装入面プロフィール計の実用化により、操業中の堆積傾斜角は無風時のそれよりかなり低い値となることが明らかにされて以来<sup>29)40)44)45)</sup>、ガス流の影響を定量化するための研究が進んだ。杉山ら<sup>46)</sup>は細粒の高炉装入物を用いた2次元縮尺模型実験により、R. H. WILHELMら<sup>47)</sup>と同様に、通風時と無風時の傾斜角の比が、装入物粒度や種類によらず $u/u_{mf}$ と一つの関係で表されることを示した。これをさらに発展させたのが西尾らの研究で<sup>37)</sup>、



ガス流速の影響を粉体層の静力学により解析した。その結果は実験結果をよく説明し、本邦の高炉操業条件では、無風時に対し傾斜角低下が2~7°と推定される。

これまでに述べたのは装入物面のうちでも中心のV型部を対象として、粒子層がまさに流動を開始する直前の応力状態すなわち不安定な堆積状態にある場合である。一方周辺部では、傾斜角がかなり低いのが一般的である。このような場合は極限応力状態ではないので、傾斜角の支配条件は静力学ではなく動力学によるはずである。炉断面に占める割合からして周辺部の装入物分布制御は重要であり、今後の研究が待たれる。

3.3.2 下層の変形と混合層

傾斜角は鉱石よりコークスの方が大きいので、見掛け上炉中心部に鉱石が多く、炉壁部にコークスが堆積するように思いがちであるが、コークス層の上に鉱石を装入する場合は鉱石の運動エネルギーのため、周辺部のコークス層が中心部に押し流されて、傾斜角は2~3°低下するので、鉱石装入後に両者の傾斜角の差は小さくなる<sup>16)28)</sup>。これはコークスと鉱石層の電気伝導度の差を利用した電極法<sup>4)</sup>や磁気センサー<sup>48)</sup>による鉱石とコークス層境界の同定などにより確認されている。

また、傾斜角低下と同時に、コークスが鉱石の流れに巻き込まれて、鉱石とコークスからなる混合層が炉中心部に形成される。

コークス層の崩れと混合層は装入速度の小さいベルレス高炉でもみられる<sup>34)49)</sup>。

通風状態におけるコークス層の崩れは無風時と様相を異にする。鉱石装入時の装入物形成過程を示す図13によれば、鉱石層が周辺部に装入されると周辺部の通気抵抗が増加し、ガス流が通気抵抗の小さい中心部へ一時的に偏流し、コークス層が流動化する結果、コークス層の傾斜角は無風時以上に低下するとともに鉱石の中心への進入を妨げ、中心部にコークス単味層が形成され、中心部の ore/coke は著しく低下する<sup>41)50)</sup>。この実験結果から、ペレットを多量使用した鶴見第1高炉でも中心ガス流が維持され、その解体調査で中心部にペレットが認められなかったこと<sup>51)</sup>が説明できる。

稲葉らはガスの偏流度、コークス層の流動化の可能性

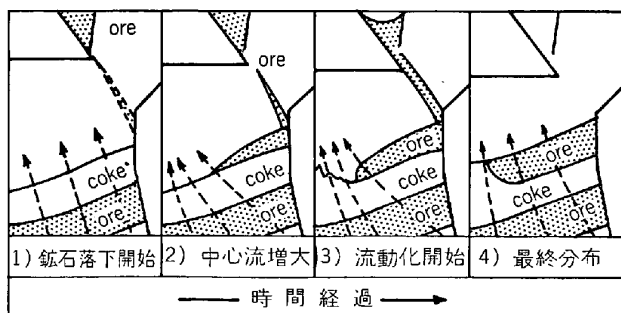


図13 装入物分布形成過程の模式図

及び中心部コークス単味層の大きさについて、詳しい検討を行っている<sup>50)</sup>。

3.3.3 粒度偏析

装入物が粒子傾斜面上を中心に向かって流れるとき、ペレット以外は広い粒度範囲を有しているため、その間に層内で粒度差による分級作用を受けて、流れ方向に粒度偏析を起こし、中心部に粗粒が、炉壁より中間部にかけて細粒が多く堆積することは、ベルカベルレスかによらず充填時の調査や実機大模型実験により広く知られている。

城本ら<sup>28)</sup>は粒度偏析に及ぼす ore/coke とストックラインの影響について、次のように述べている。ore/coke の増加に伴って、炉中心部での粗粒偏析は押さえられ、かつ、炉壁と中間部に集積する微粉も比較的分散されるため、半径方向の粒径分布は均一化する(図14)。ore/coke が低いときは中心部に粗粒が著しく集まり、かつ前述のように、傾斜角が増して鉱石層厚も小さくなるので、中心流が極端に発達する。すなわち ore/coke の増加により、中心流から周辺流へと変化するのに対し、層厚分布に加えて粒度偏析も寄与する。

ストックライン(SL)を浅くすると、中心部の粗粒偏析が押さえられ、細粒部分も比較的炉壁より離れた位置に分布する。落下軌跡の炉壁衝突レベル以下にSLを下げると微粉が炉壁付近に著しく堆積するようになる。

MAによる粒度偏析制御の観点からみると、C↓O<sub>A</sub>↓

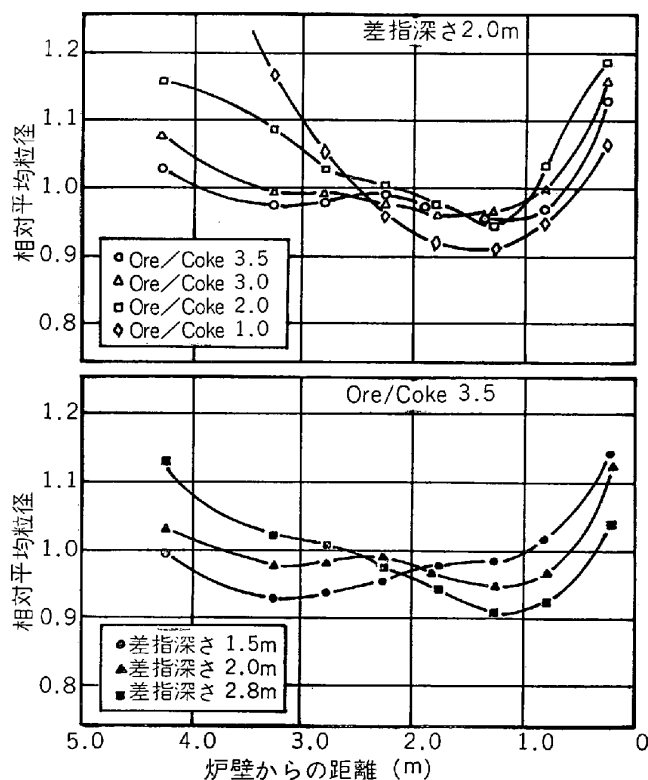


図14 Ore/coke, ストックレベルの変更による平均粒径分布変化

(ore 装入で MA 使用) より  $C_A \downarrow O \downarrow$  の方が中間及び中心部で粒度偏析が緩和できるという報告は<sup>12)</sup>あるものの、別の報告<sup>4)</sup>では逆の結果を得ており今一つ明らかでないが、このような通常の  $C \downarrow O \downarrow$  装入 (チャージ装入) と比較して  $\frac{1}{2}C \downarrow \frac{1}{2}C \downarrow \frac{1}{2}O \downarrow \frac{1}{2}O \downarrow$  のようなバッチ装入では、MA ノッチの変更で周辺部での粒度偏析状態の微調整が可能で、かつ粒度偏析度がかなり大きくなる<sup>12)</sup>。バッチ装入により層厚分布の均一化を図り、燃料比低下を達成したという報告<sup>21)</sup>もあるので、ベルレス高炉に比べて分布制御性において劣るペル高炉において、バッチ装入は有力な手段であろう。

ベルレス装入装置の出現により、粒度偏析に対する考え方は一変した。大型のペル高炉では装入物分布制御が周辺部のわずかな部分にしか及ばず、かなり大きな粒度偏析を招くのにに対し、ベルレストップでは任意の半径位置に原料が装入できる<sup>23)</sup>ので、粒度偏析をも制御でき<sup>6)</sup>、全くなくすことすら可能だからである。しかし、粒度偏析のない装入物分布が高炉操業に適しているかどうかは別問題であつて、ベルレス高炉の普及とともに、ベルとの優劣比較やベルレス高炉での最適装入物分布追求の必要から粒度偏析度の定量的表現が求められるようになった。

粗細粒子の混合物が粉粒体の静止傾斜面を流動する際大きい粒子間の空隙が篩網の作用をして小さい粒子が速やかに下方にパーコレートし、静止層に達する。近藤らは<sup>15)16)</sup>パーコレーション速度  $dX_n/dt$  が細粒部の重量分率だけでなく、篩網の作用をする粗粒部の重量分率にも比例するというを明らかにして(4)式を提示している。

$$dX_n/dl = -\alpha \cdot X_n(1-X_n) \dots\dots\dots (4)$$

$\alpha[1/m]$ は粒度偏析係数である。

図 15 には炉口径がともに 10.5 m の千葉第 6 高炉 (ベルレス) と水島第 4 高炉での鉱石層内粒度偏析状態を解析した例である。ペル高炉ではベルレスより粒度偏析度ははるかに小さい。この原因はペルの方が実質的な装入速度が大きいことによる。(4)式は粒度偏析に対して定量的解釈の根拠を与える式であり、粒度偏析制御への手がかりとなる<sup>52)</sup>が、 $\alpha$  と各種要因との関係を明らかにすることが今後の課題である。

#### 4. お わ り に

ムーバブルアーマー、ベルレス装入装置の出現、炉内各種センサーの開発により、最近加速度的に発展した炉頂装入物分布制御について概括した。分布を知れば知る程、高炉操業への影響の大きさを痛感せざるを得ないが、現在既に制御を完全にマスターされたとは言えない。しかし今後更に既存センサーの活用技術の拡大、新センサーの開発がなされ、それに基づいた新しい制御方法が開発されるであろうと筆者は思いまた期待するもの

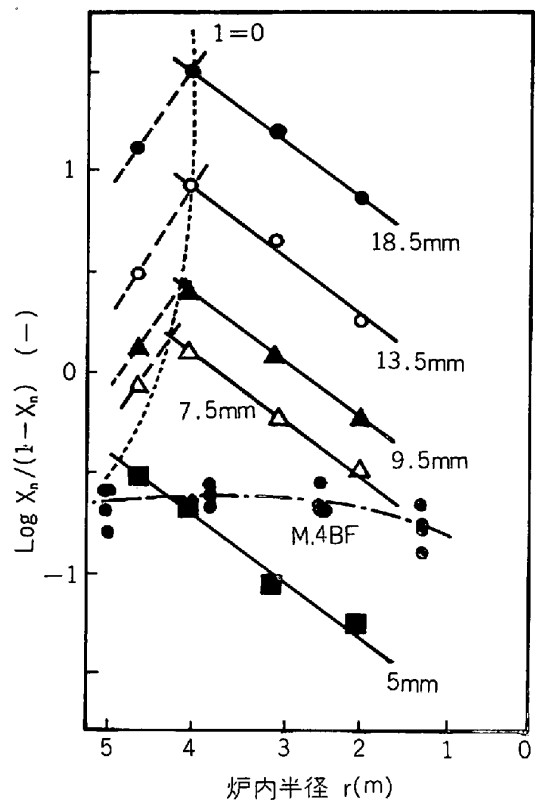


図 15 粒度偏析に関する一般式の適用結果

である。

#### 文 献

- 1) ルードウィッヒ・ベック, 中沢護人訳: 鉄の歴史, IV(2), p. 139 [たたら書房]
- 2) ルードウィッヒ・ベック, 中沢護人訳: 鉄の歴史 IV(2), p. 141 [たたら書房]
- 3) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 39 回製鉄部会 (1971. 7) 新日本製鉄(株) (私信)
- 4) 山田孝男, 佐藤政明, 宮崎伸吉, 嶋村鏝郎, 田口整司: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 1, p. 16
- 5) 守 圭介: 第 3 版鉄鋼便覧, II 製鉄・製鋼 (日本鉄鋼協会編), p. 294 [丸善]
- 6) T. NAGAI, J. KURIHARA, H. TAKAHASHI, K. OKUMURA, K. OKABE, and M. KONDO: MacMaster Symposium May 1978, 13-1
- 7) 山本崇夫, 彼島秀雄, 高橋敏夫, 緒方 勲, 林 洋一: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 29
- 8) 可見 明, 西村博文, 瀬川佑二郎, 小幡昊志, 才野光男, 山田孝雄: 鉄と鋼, 67 (1981) 12, S 710
- 9) 秋本圭一, 中路 茂, 法領田宏, 西村 治, 岡 芳雄: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 29
- 10) 里見弘次: 第 3 版鉄鋼便覧, II 製鉄・製鋼 (日本鉄鋼協会編) (1979), p. 259 [丸善]
- 11) 稲葉晋一, 西尾浩明: 高炉内現象とその解析 (日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会高炉内反応部会編) (1979), p. 44
- 12) 下村泰人, 須賀田正泰: 同上 (1979), p. 60
- 13) 三輪茂雄: 粉粒体工学 (1972), p. 221 [朝倉書店]
- 14) I. F. CARMICHAEL and C. NOTMAN: Internatio-

- nal Conference on Operation of the Blast Furnace, Arles, France June 1980, vol. 1. p. I. 1. 1
- 15) 近藤幹夫, 小板橋寿光, 岡部俠児, 丸島弘也, 高橋博保, 栗原淳作: 鉄と鋼, 65 (1979), S 593
  - 16) M. KONDOH, Y. KONISHI, K. OKABE, S. TOMITA, S. HASHIZUME, and J. KURIHARA: International Conference on Operation of the Blast Furnace—Theory and Practice, Arles, France, June 1980, vol. 1. p. I. 3. 1
  - 17) 早瀬敏一, 奥村和男, 阪口泰彦, 安野元造, 藤田勉, 福武剛: 鉄と鋼, 67 (1981), S 712
  - 18) 奥村和男, 河合隆成, 丸島弘也, 高橋洋光, 栗原淳作: 鉄と鋼, 66 (1980) 13, p. 1956
  - 19) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 40 回製鉄部会 (1972. 4) (私信)
  - 20) W. KOEN, G. A. FLIERMAN, and C. H. van TOOR: Aus. I. M. M. Illawarra Branch—B. F. A. Symposium, Wollongong, Australia (1975), p. 122
  - 21) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 57 回製鉄部会 (1980. 11) (私信)
  - 22) A. D. GOTLIB (館充訳): 高炉製鉄法の理論 (1966), p. 17 [日本鉄鋼協会]
  - 23) G. HEYNERT, F. TOUSSAINT, J. WILLEMS, and G. QUADE: Stahl u. Eisen, 80 (1960) 8, p. 473
  - 24) G. I. FEDORENKO: Stal in Eng., (1967) 7, p. 555
  - 25) G. S. ZOZULYA and D. A. STOROZHNIK: Stal in Eng., (1969) 1, p. 15
  - 26) L. S. TOKAREV and V. B. IVANAV: Stal in Eng., (1970) 6, p. 427
  - 27) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 39 回製鉄部会 (1971. 9) (私信)
  - 28) 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山正: 製鉄研究, (1971) 272, p. 23
  - 29) 成田貴一, 稲葉晋一, 小林勲, 沖本憲市, 清水正賢, 矢場田武, 玉田慎一: 鉄と鋼, 65 (1979) 3, p. 358
  - 30) 西尾浩明, 有山達郎, 丹羽康夫, 山口篤, 脇元一政: 65 (1979), S 601
  - 31) 近藤幹夫, 岡部俠児, 栗原淳作, 奥村和男, 富田貞雄: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S 441
  - 32) B. KRCEK: Hutn. listy, 32 (1977) 7, p. 466
  - 33) G. HEYNERT, K. H. PETERS, and G. RINGKLOFF: Stahl u. Eisen, 93 (1973) 12, p. 505
  - 34) 下村泰人, 九島行正, 芦村敏克: 鉄と鋼, 65 (1979), S 589
  - 35) 浜田尚夫, 小板橋寿光, 岡部俠児: 鉄と鋼, 66 (1980), S 363
  - 36) R. L. ZENKOV: Mechanics of granular loads (1952), p. 44 [Mashgiz]
  - 37) R. L. BROWN: Nature, 191 (1961), p. 458
  - 38) 近藤幹夫, 小西行雄, 岡部俠児, 富田貞雄, 橋爪繁幸, 栗原淳作: 鉄と鋼, 65 (1979), S 592
  - 39) 小板橋寿光, 浜田尚夫, 岡部俠児: 鉄と鋼, 67 (1981), S 21
  - 40) 飯塚元彦, 大槻満, 脇元一政, 伊藤春男: 鉄と鋼, 63 (1977), S 439
  - 41) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, 66 (1980) 13, p. 1878
  - 42) 岩村忠明, 河合隆成, 浅野有一郎: 鉄と鋼, 67 (1981), A 121
  - 43) 成田貴一, 稲葉晋一, 沖本憲市, 入谷晋, 佐藤健一: 鉄と鋼, 67 (1981), S 19
  - 44) 長井保, 才野光男, 田村栄, 奥村和男: 鉄と鋼, 60 (1974), S 356
  - 45) 長井保, 高橋洋光, 田村栄, 奥村和男, 中村勝: 鉄と鋼, 63 (1977), S 438
  - 46) 杉山喬, 中村正和, 鶴野建夫, 原行明: 62 (1976), S 39
  - 47) R. H. WILHELM and M. KWAWK: Chem. Eng. Prog., 44 (1948), p. 201
  - 48) 宮崎富夫, 梶原義雄, 酒井俊彦, 神保高生, 射場毅, 山田逸生: 鉄と鋼, 67 (1981), S 18
  - 49) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 54 回製鉄部会 (1979. 5) (私信)
  - 50) 成田貴一, 稲葉晋一, 清水正賢, 小林勲, 沖本憲一, 山口荒太: 鉄と鋼, 66 (1980) 5, p. 459
  - 51) 伊沢哲夫, 三浦光敏, 里見弘次, 斎藤正紀, 宮本健彦, 福島勤, 古川武: 鉄と鋼, 63 (1977), S 446
  - 52) 近藤幹夫, 岡部俠児, 栗原淳作: 鉄と鋼, 67 (1981), S 709