

## 論 文

## 高炉炉床における溶銑の流れ解析

日月 應治\*・大野 二郎\*<sup>2</sup>・中村 正和\*・原 行明\*<sup>3</sup>

## Flow of Iron in Blast Furnace Hearth

Masaharu TACHIMORI, Jiro OHNO, Masakazu NAKAMURA and Yukiaki HARA

## Synopsis:

Fundamental aspects of the hot metal flow in the blast furnace hearth during tapping have been studied for the better control of the hot metal flow to prolong furnace life.

Blast furnace hearth is regarded as a packed bed of coke with considerably good permeability in terms of metal flow. Characteristics of metal flow in a hearth have been analysed by using the numerical calculation, as well as, model experiments.

Equal velocity lines in an uniformly packed hearth are formed on vertical cylindrical surfaces of which central axis coincides with the position of a tap hole. The flow velocity at a center of hearth is about 0.1 cm/s. If a coke free space is formed at the bottom of hearth, flow pattern varies remarkably. The flow velocity in a coke free space of 10 cm thickness is more than 10 times of the velocity for uniform bed, and more than 50% of hot metal is drained through it. The velocity in the space decreases remarkably with the increase of the depth of the space. The velocity in a space of 40 cm deep is reduced to the same level as that for the uniform flow.

## 1. ま え が き

高炉炉床における溶銑滓は出銑に伴って緩慢な流れを生じ、操業や設備にさまざまな影響を与えている。溶銑流については高炉炉容や出銑条件と出銑速度の関係、炉底耐火物への影響などが検討され<sup>1)2)</sup>、溶銑流については、残滓量や<sup>3)</sup>、ガス流れとの関係で湯面形状が検討されている<sup>4)</sup>。しかしながら貯銑量や流速分布などの溶銑流の挙動は、計測が極めて困難であり、さらには操業への影響が間接的である場合が多いなどの理由によつてあまり解明が進んでいない。最近の高炉技術の課題として、炉体に過度の負荷をかけることをせずに炉命の長寿命化をはかりつつ安定に生産を行うことがあげられる。炉床の通液性を良好に保ちつつ一様な銑滓流を形成させることは、炉底耐火物の異常侵食を抑制し、また炉床コークスの消耗に伴って起こる炉芯のスムーズな降下、置換をもたらすことになる。そこで溶銑流制御法の手がかりを得るために流れ計算を中心として基礎的な検討を行った。

溶銑流を支配している要因は、炉床コークスの通液抵抗分布である。高炉の解体調査によると<sup>5)</sup>、炉床コーク

スの粒度は 30~50 mm で概して大きく、空隙率は 47~50% に達しており、通液性の良い充填層とみなせる。またコークスは溶銑プール(湯だまり)の中に浮いており、湯だまりの最下部に溶銑だけの領域(以後空隙と呼ぶ)が見出されている。

以上のような高炉解体の知見に基づき、炉床を通液抵抗分布のある充填層とみなして溶銑の流出挙動を数値計算および水模型実験から解析した。

## 2. 流 れ 計 算

数値計算により、模型実験では測定が難しい炉床各部の流速分布や流線を求め、さらに実炉における溶銑流の特徴を整理した。計算上の問題点は、(i) 3次元流である、(ii) 充填層内と空隙内で通液抵抗係数が大きく異なる、などである。これに対し、計算式および解法をくふうして収束性の良い計算法を得た。なおここでは均一充填層と一様な空隙のある充填層の計算結果を示すが、本計算法は通液抵抗が分布していたり任意の空隙形状を有する場合にも適用できる。

## 2.1 基礎方程式

基礎方程式を得るにあたり巨視的な溶銑流の特徴を検

昭和 51 年 11 月・昭和 54 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 22 日受付  
(Received Nov. 22, 1983)

\* 新日本製鉄(株)第三技術研究所 (R & D Laboratories-III, Nippon Steel Corp.)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)第一技術研究所 工博 (R & D Laboratories-I, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

\*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)第三技術研究所 工博 (R & D Laboratories-III, Nippon Steel Corp.)

討することに主眼を置いて次の簡略化を行つた。

- (i) 溶銑は密度、粘度一定の非圧縮性流体とする。
- (ii) 流れは定常流とする。
- (iii) 溶銑の液面は水平とする。
- (iv) 溶滓は考慮しない。

3次元計算は変数が多くなり計算量が増え、収束計算が困難な場合がある。そこで要求精度を満たす範囲で基礎方程式を線型化し、さらに積分形式に変換して変数を減らした。

炉床の溶銑流は連続の式と運動方程式で表現される。後者については、コークス充填層内では粒子径基準のレイノルズ数が数10程度なので層流項のみを考慮したダーシー(DARCY)流とする<sup>6)</sup>。また空隙(coke free space)内では平均的な流れを取り扱うのでポテンシャル流とする。この近似は、例えば後に示す Photo. 1や Fig. 9に示すように、空隙流の特徴を良く表していることが確かめられている。したがつて次の諸式が得られる。

(i) 連続の式  

$$\text{div } \vec{u} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

(ii) 運動方程式  
 充填層内：
$$\frac{1}{\rho} \text{grad } P - \vec{g} + R \vec{u} = 0 \dots\dots (2)$$

ただし 
$$R = \frac{150(1-\epsilon)^2 \nu}{\epsilon^3 (\phi D_P)^2}$$
  
 空隙内：
$$\text{rot } \vec{u} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに $\vec{u}$ は充填層内の空塔基準速度ベクトル、あるいは空隙内の速度ベクトル、 $P$ は圧力、 $\rho$ は流体の密度、 $\vec{g}$ は重力ベクトル(= $-\text{grad}(gz)$ )、 $g$ は重力定数、 $z$ は炉床底面からの高さ、 $\nu$ は流体の動粘度、 $\epsilon$ は空隙率、 $\phi$ は充填粒子の形状係数、 $D_P$ は充填粒子径である。また境界条件は次の(4)、(5)式で示される。

(iii) 境界条件  
 炉壁面：
$$u_n = 0 \dots\dots\dots (4)$$

滴下溶銑面、出銑口：
$$u_n = u_0 \dots\dots\dots (5)$$

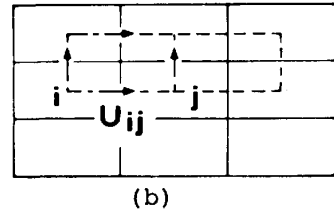
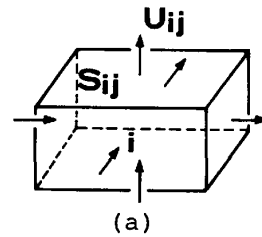
ここに $u_n$ は境界面に垂直な速度成分で、 $u_0$ は溶銑の滴下速度あるいは出銑速度である。

(1)~(3)式は付録に示すように次の発散および循環形式に変換できる。

$$\int_S \vec{u} \cdot \vec{n} dS = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\oint_C (R \vec{u}) \cdot \vec{t} ds = 0 \dots\dots\dots (7)$$

(6)式は閉曲面 $S$ 上の面積積分で、 $\vec{n}$ は面 $S$ の法線ベクトル、(7)式は閉曲線 $C$ に沿つた線積分で、 $\vec{t}$ は曲線 $C$ の接線ベクトルである。(6)、(7)式を基礎方程式として、この両式を次のように離散化する。



(a) Definition of flow velocity  $U_{ij}$  and surface element  $S_{ij}$  in Eq. (8). (b) Designation of integral path in Eq. (9).

Fig. 1. Discrete scheme for flow calculation.

炉床部を直方体要素に分割し、各要素に通し番号 $i$ をつける。流速の代表値を Fig. 1(a)に示すように各要素の面中央にとり、面の法線方向の流速成分のみを考える。したがつて要素 $i$ と、隣接する要素 $j$ の境界面について流速 $U_{ij}$ が定義できる。この $U_{ij}$ を用いて各要素ごとに(6)式を適用し、また隣接した四つの要素の中心を結んだ長方形の閉曲線に(7)式を適用する。これを Fig. 1(b)に示す。このようにして次の離散方程式(8)、(9)式を得る。

要素 $i$ に関して：
$$\sum_j S_{ij} U_{ij} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

ただし  $U_{ij} = u_0 =$  滴下量 (液面を含む要素)  
 = 出銑量 (出銑口を含む要素)

互いに隣接する四つの要素に関して：

$$\sum_{i,j} (R_{ij} L_{ij}) U_{ij} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

ただし 
$$R_{ij} = \frac{150}{2L_{ij}} \left\{ \frac{(1-\epsilon_i)^2 \nu_i L_i^3}{\epsilon_i^3 D_{Pi}} + \frac{(1-\epsilon_j)^2 \nu_j L_j^3}{\epsilon_j^3 D_{Pj}} \right\}$$
  
 = 1 (充填層を含む線路)  
 = 1 (空隙内の線路)

ここに、 $S_{ij}$ は要素 $i$ と $j$ の境界面の面積、 $U_{ij}$ は $S_{ij}$ 上の法線方向の空塔速度、 $R_{ij}$ は要素 $i$ と $j$ の通液抵抗の算術平均値、 $L_{ij}$ は要素 $i$ と $j$ の中心間距離、 $L_i^3$ は要素 $i$ の $j$ 方向 $X$ 辺の長さ、 $\epsilon_i$ は空隙率、 $\nu_i$ は動粘度、 $D_{Pi}$ は充填粒子径である。

ここに述べた解法は微分方程式に立脚して厳密な解を求めるというよりは、物理法則に矛盾しない巨視的な流れを表現するという考え方をとつており、3次元流の計算には特に効果的と思われる。同様な考え方の例として、コントロール・ボリューム法が知られている<sup>7)</sup>。

$U_{ij}$ は(8)、(9)式を連立させて収束計算で求める。

数値解法は付録に述べてある。2次元計算では特に問題は無いが、3次元計算では緩和法にくふうを要する。

2.2 計算項目

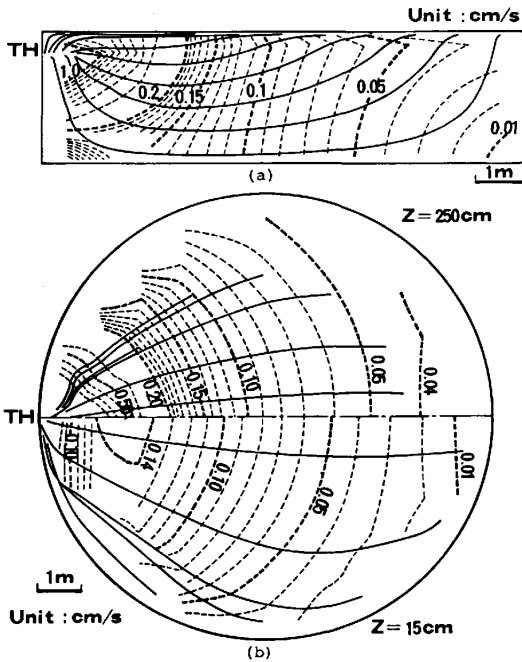
計算により次の諸項を検討した。

- (i) 炉床にコークスが均一に充填している場合の流れ、及び湯溜り深さの影響。
  - (ii) 炉床コークスが浮上し、一様な厚みの空隙がある場合の流れ、及び空隙の厚さの影響。
  - (iii) 湯面への滴下溶鉄量に分布がある場合の影響。
- なお、滴下溶鉄量と出鉄量は等しいとする。また計算式が線型なので出鉄速度と流速は比例する。したがって出鉄量は一定とした。計算に用いた諸元を Table 1 に示す。

Table 1. Parameters for numerical calculation.

Parameters	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6
Hearth diameter $D$ (m)	11	11	11	11	11	11
Depth of iron pool $l_0$ (m)	3.0	1.7	1.0	3.0	3.0	3.0
Position of tap hole $d$ (m)	2.5	1.2	0.5	2.5	2.5	2.5
Void ratio $\epsilon$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Thickness of coke free space $\delta$ (m)	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0
Draining rate $Q$ (t/h)	400	400	400	400	400	400
Density of iron $\rho$ (g/cc)	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
Viscosity of iron $\nu$ (cp)	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
Distribution of dropping	H	H	H	H	H	SW

H : homogeneous, SW : dropping zone within 2 m from side wall  
 Number of rectangular mesh :  $N_x \times N_y \times N_z = 20 \times 20 \times 10$



(a) Vertical cross section intersecting a tap hole.  
 (b) Two horizontal cross sections at different heights.

Fig. 2. Flow lines (solid) and equal velocity lines (broken) in a uniformly packed hearth of which diameter is 10 m with a depth of 3 m.

2.3 計算結果

2.3.1 均一充填炉床

(1) 流線、流速および滞留時間

Fig. 2 は湯溜りの深さが 3 m の場合 (Run 1) の出鉄口を含む垂直断面、および二つの異なる高さの水平断面における流線 (実線) と等流速線 (点線) の分布を示す。流線は、始点が出鉄口から遠くなるにしたがい湯溜りの深い部分を通るようになる。また流線の間隔がほぼ一樣なので、炉床全体に偏りのない流れが形成されている。流速は出鉄口直前で最も速く  $10^3$  cm/s に達し、炉床中央部では 0.1 cm/s、出鉄口と反対の炉底隅では  $10^{-2}$  cm/s のオーダーになる。粒子径基準のレイノルズ数  $Re_p$  は  $1 \sim 10^5$  にわたって分布しているが、 $Re_p > 100$  となる範囲は出鉄口近傍の 1 ~ 2 m である。平均流速は 0.1 m/s、平均  $Re_p$  は 40 程度である。等流速面の分布は出鉄口から約 3 m までは出鉄口を中心にもつ球殻面状を呈し、中央部では円筒面状になる。

ここで溶鉄の滞留時間を溶鉄が湯溜りに滴下してから出鉄されるまでの時間と定義する。Fig. 3 は Run 1 での等滞留時間線で、等流速線と似た分布を示す。出鉄速度は 400 t/h であるが、出鉄口から最も遠い点を通る溶鉄の滞留時間は 300 min 以上である。貯鉄量は 800 t であり、最初の 1 h の出鉄で炉内に溜っていた溶鉄の 40% が流出し、2 h では 60% 強が流出する。

(2) 湯溜りの深さ

湯溜りの深さが変わっても、流線、流速の分布はあまり変わらないが、浅くなると流速が速くなる。深さが 1 m での流速は、深さが 3 m での 2.5 倍になる。

2.3.2 空隙のある炉床

Fig. 4 はコークス層が炉底面から 40 cm 浮いている場合 (Run 4) の流線 (実線) と等流速線 (点線) の分布である。出鉄口から 6 m 以内に始点を持つ流線は充填層のみを経て排出され、6 m 以遠に始点を持つ流線は空隙を通る。出鉄口の近傍は Fig. 2 と類似であるが、空隙との境界で流線間隙の広がり著しく特異な分布を示す。空隙を通る流線はコークス層をほぼ鉛直に降下して空隙に入り、ここを層状に流れて出鉄口近くで再びコー

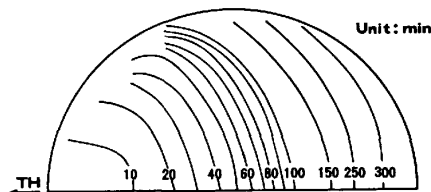


Fig. 3. Equal traveling time distribution in a uniformly packed hearth.

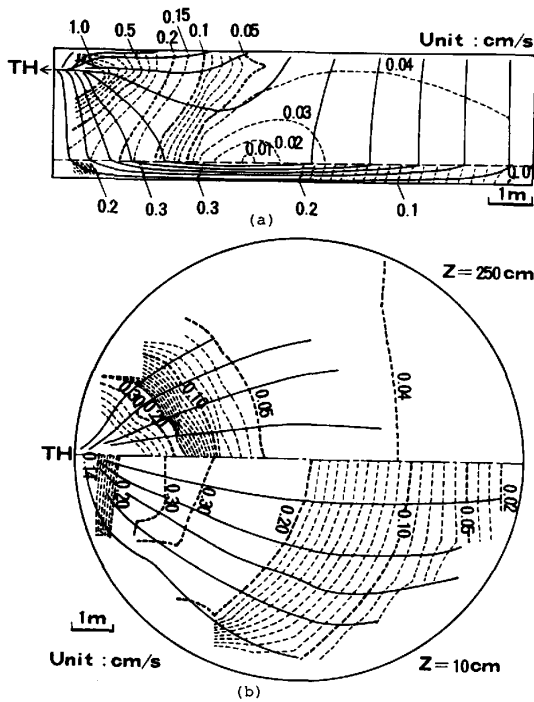


Fig. 4. Flow lines (solid) and equal velocity lines (broken) in a hearth having a coke free layer.

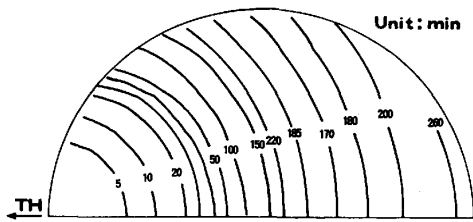
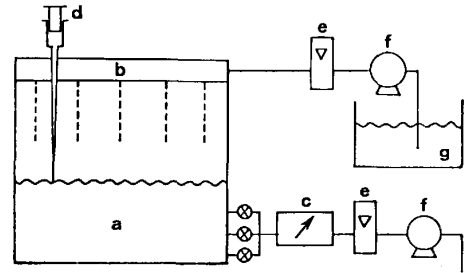


Fig. 5. Equal traveling time distribution in a hearth having a coke free layer.

クス層内に吸い上げられる。

流速は  $10^{-2} \sim 10^3$  cm/s の範囲であるが、その分布は均一充填の場合とは異なっている。第1に出銑口から4~5 m離れた充填層内下部に0.01 cm/sの低流速成分を生じ、流線間隔の広がりに対応している。第2に出銑口から6 m以遠では流線がほぼ鉛直となり、流速は単位面積あたりの滴下流量を充填層の空隙率で割った値 (= 0.04 cm/s) にほぼ等しい。第3に空隙内の等流速面は出銑口を中心とする扇状面になり、層厚が40 cmの場合に流速は均一充填の場合の2~3倍 (0.2~0.3 cm/s) となっている。

Fig. 5 は等滞留時間線で、同心円状に分布する。出銑口から6 mの位置に極大値があり、220 minになる。さらに以遠ではいつたん減少して7.5 m付近で170 minになり、再び漸増する。この極大値の生ずる位置はFig.



(a) Cylindrical plastic container (62 cm in diameter) packed with alumina balls, (b) distributor, (c) Colorimeter, (d) Tracer (dye) injector, (e) Flow meter, (f) Pump, (g) Tank.

Fig. 6. Experimental apparatus.

4 に示した停滞部分を通る流線の端部で、ここより以遠を滴下した溶銑は流速の速い空隙を通るので滞留時間が短くなる。

(2) 空隙の厚さ

空隙の厚さは流速に影響するが、分布や流線はあまり変化しない。例えば滞留時間の極大値を生ずる位置  $X_p$  は、空隙の厚さが40 cmで6 mとなり、これが10 cmに減じてもわずかに0.5 m遠くなるだけである。

3. 模型実験

3次元水模型実験で滞留時間を測定し、前節で求めた数値計算の精度を検討した。

3.1 実験方法

Fig. 6 に実験装置の概要を示す。湯だまり部は直径62 cm、高さ40 cmの円筒プラスチック容器である。溶銑の代わりに水を、コークスの代わりに中空磁製球 (かさ密度0.7、粒子径3.8~5.0 mm) を使用した。所定の流量を湯だまり上方の分散器から流下させ、湯だまり側壁の流出口から同量をポンプで排出した。流体の滞留時間は、比重調節した色素トレーサを液面の所定位置にパルス状に注入し、その排出時間を排出口に接続した比色計で検出して求めた。Photo. 1 は2次元模型を用いて流線を色素で可視化した例で、充填層流と空隙流の特徴が良くわかる。実験条件の代表例をTable 2 に示す。模型実験における充填磁製球の粒径は、充填層と空隙の通液抵抗比が実炉の値とほぼ等しくなるように選んだ。やや粗い議論であるが空隙内の流れを平行平板内の2次元ポアズイユ流とすると、その圧損は平均流速を  $\bar{u}$  として、 $12\nu\bar{u}/\delta^2$  である。充填層内の圧損はErgun式の層流項、 $150(1-\epsilon)^2\nu u/D_p^2\epsilon^3$  で表せるとして空隙と充填層の通液抵抗比は  $\{12\epsilon^3/150(1-\epsilon)^2\}\{D_p/\delta\}^2$  となる。したがって、 $\epsilon$ 、 $(D_p/\delta)$  が等しければ、模型実験と実炉の通液抵抗比は等しくなる。模型実験で  $D_p$ 、 $\delta$  とも

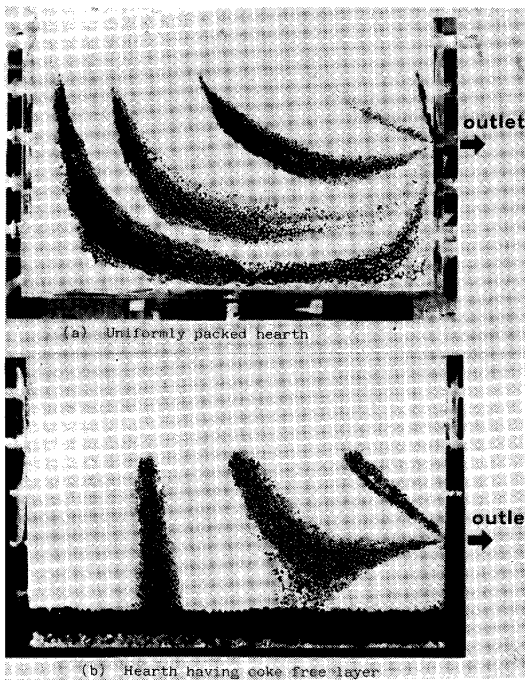


Photo. 1. Visualized flow lines in a 2-dimensional model hearth.

Table 2. Experimental conditions for flow analysis by water model simulation.

Parameters	No.1	No.2	No.4	No.7	No.11	No.19
Draining rate $Q$ (l/min)	4.4	2.7	4.0	4.0	4.0	4.0
Depth of pool $l_0$ (cm)	25.0	7.5	8.0	13.0	8.0	13.5
Position of drain $d$ (cm)	15.0	5.0	5.0	10.0	5.0	10.0
Void ratio $\epsilon$	0.4	0.4	0.42	0.42	0.42	0.42
Diameter of packed ball $D_p$ (mm)	5.0	5.0	3.8	3.8	3.8	3.8
Thickness of coke free space $\delta$ (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	20.0

に実炉の 1/10 程度に選んである。

3.2 実験結果

3.2.1 均一充填炉床の滞留時間

液面上の異なる場所からの滞留時間を求め、数値計算の結果と比較した。滞留時間には、流出口の高さ、充填粒子径の影響は認められず、流出速度に反比例し、湯だまりの深さに比例する。そこで次の平均滞留時間  $T_m$  を定義し、これを用いて滞留時間を無次元化した。

$$\text{平均滞留時間}(T_m) = \frac{\text{湯だまり内貯鉄量}(V_0)}{\text{出鉄速度}(Q)} \dots\dots\dots (10)$$

均一充填炉床では次式が成り立つ。

$$T_m = \frac{V_0}{Q} = \frac{\epsilon d S_0}{Q} \dots\dots\dots (11)$$

ここで  $\epsilon$  は空隙率、 $d$  は湯だまり深さ、 $S_0$  は炉床面積である。滞留時間  $T$  を  $T_m$  を用いて無次元化し、また流出口直上の壁面からトレーサ注入位置までの距離  $X$ 、出鉄口を中心とした円で切り取られた部分の断面積  $S$  を

次のように無次元化する。

$$T^* = \frac{T}{T_m}, X^* = \frac{X}{D}, S^* = \frac{S}{S_0} \dots\dots\dots (12)$$

ここで  $D$  は炉床径である。

注入位置をさまざまに変えて滞留時間を測定してみると、Fig. 7 に示すように注入位置が排出口を中心とした同心円弧上であれば滞留時間は等しくなり、Fig. 3 で得た等滞留時間線の分布と同様になる。

Fig. 8 は  $T^*$  と  $X^*$  の関係で、実験条件によらず同一曲線上にプロットされる。数値計算の結果も記入してあるがこれも同一曲線上に並ぶ。

3.2.2 空隙のある炉床の滞留時間

充填層の最下部に均一な厚みの空隙を作り、さまざまな位置  $X^*$  からトレーサを注入して滞留時間  $T$  を求めた。 $X^*$  と  $T$  の間には Fig. 9 のように  $X^*$  点で鋭いピークを有する分布曲線が得られる。この分布曲線は数値計算の結果と良く一致しており、空隙流を(3)式のポテンシャル流で近似したことの妥当性が確かめられた。

Fig. 10 は実験結果 (No. 19) と計算結果 (Run 4) を比較した図である。Run 4 は実炉の流れを計算した結果で、No. 19 の結果と同様な分布である。同図の縦軸は規格化された  $T^*$  であるが、規格化に際しては(10)式の  $V_0$  の代わりに次式を用いる。

$$V_0 = \epsilon(d - \delta)S_0 + \delta S_0 \dots\dots\dots (13)$$

ここで  $\delta$  は空隙の厚さである。

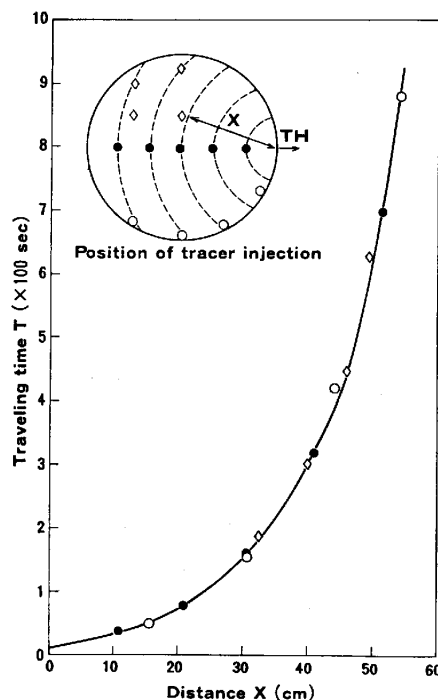


Fig. 7. Regularity of traveling time in a uniformly packed hearth (experiment).

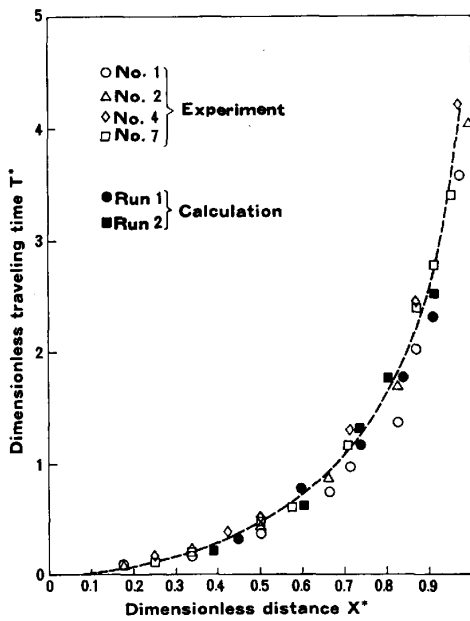


Fig. 8. Relationship between dimensionless traveling time,  $T^*$ , and position of tracer injection,  $X^*$  for the cases of uniformly packed hearth.

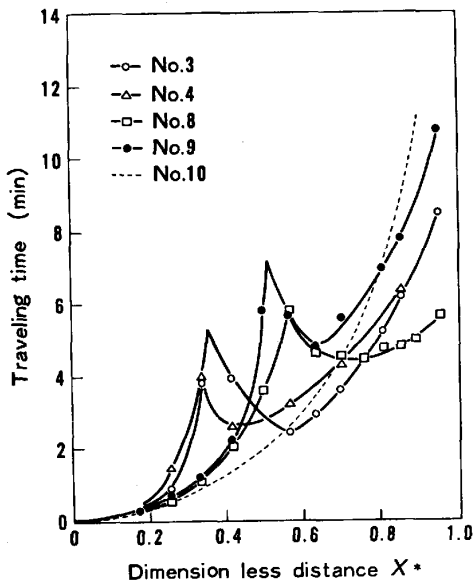


Fig. 9. Traveling time distribution in a hearth having a coke free space (No. 3, No. 4, No. 8, No. 9) and in an uniformly packed hearth (No. 10).

#### 4. 溶銑流の特徴

これまでに炉床溶銑流の基本的な性質を考察してきたが、高炉設備にとって問題となる溶銑の排出経路と炉壁近傍の流速について検討を行った。

##### 4.1 排出経路

一様滴下の場合に均一充填炉床では滴下溶銑量の約40%が溶銑プールの下半分を經由して排出される。ま

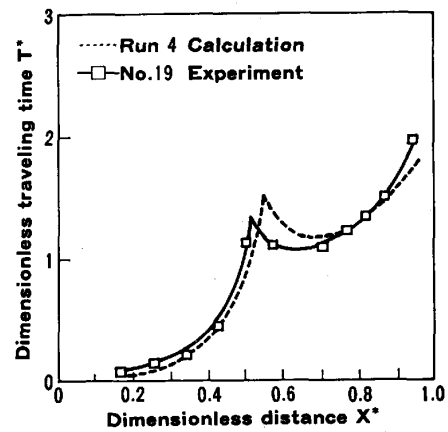


Fig. 10. Relationship between  $X^*$  and  $T^*$  in a hearth having a coke free space.

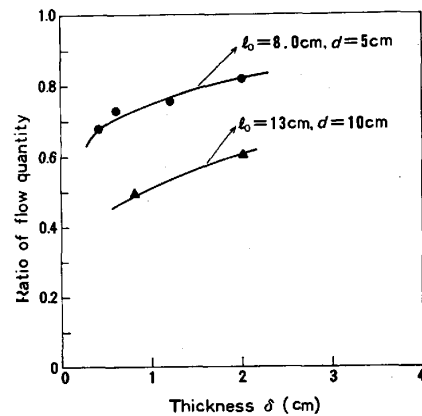


Fig. 11. Ratio of flow quantity which is drained through coke free space to total one (water model experiment) in function of coke free space thickness  $\delta$ .  $l_0$  is depth of pool and  $d$  is position of drain.

た Fig. 11 は空隙が形成された場合に、層厚  $\delta$  とここを經由して排出される溶銑の割合との関係を実験によつて求めた結果である。  $X > X_P$  に滴下する溶銑は空隙を通過することがわかっているの、実験から  $X_P$  点を求め、  $(1 - S_P/S_0)$  を計算してこれを空隙通過溶銑量の割合とすることができる。同図によると水模型実験において、  $l_0 = 8 \text{ cm}$ 、  $d = 5 \text{ cm}$  とした場合、わずか  $4 \text{ mm}$  の空隙が形成されると  $70\%$  の流体がここを通過する。同図の結果を実高炉にあてはめると  $15 \text{ cm}$  程度の空隙ができると  $50\%$  以上の溶銑がここを通過することになる。空隙通過溶銑量は  $\delta$  が増してもあまり顕著には増えない。この理由は  $\delta \approx 2D_P$  では空隙内の通液抵抗比が  $1/200$  程度になる。したがつて  $\delta$  が  $2D_P$  程度で空隙の通液抵抗はほぼ無視できるようになり、  $\delta$  がこれ以上増えても全体の流れにあまり影響を与えない。

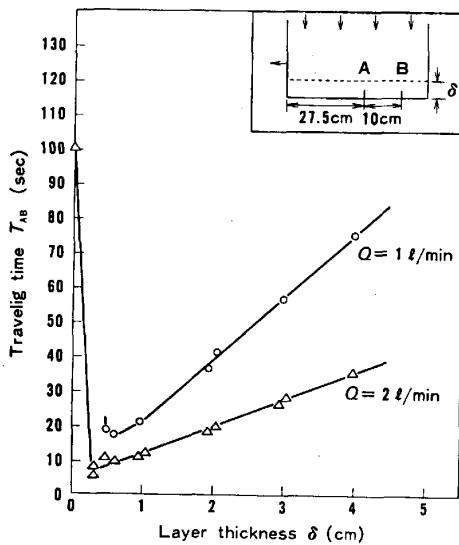


Fig. 12. Traveling time between A and B within a coke free layer in function of the space thickness (experiments).

#### 4.2 空隙内の流速

Fig. 11 からわかるように  $\delta$  が減少するとこの流速が増加する。この様子を 2 次元水模型実験で調べてみた。Fig. 12 は  $\delta$  と流れの移動時間との関係を示した図である。図中の略図に示す空隙中央部 AB 間の流れ時間をトレーサの移動時間から求めた。移動時間は空隙が形成されると急激に減少し、 $\delta$  が増加すると移動時間は漸増する。空隙内の平均流速は流入する流量を空隙の厚さで除した値にほぼ等しく、

$$u(X^*) = \frac{qD}{\delta} (1 - X^*) \quad (X^* \geq X_p^*) \quad \dots (14)$$

で表される簡単な関係が成り立っている。この理由は、空隙内の通液抵抗が小さいので  $X_p$  点以遠に滴下する流体はほぼ垂直に落下して空隙内に流れ込み、空隙を經由して炉外に排出されることを示している。

3 次元での空隙内流速を数値計算から求め、その結果を Fig. 13 に示した。水模型と同様に  $\delta$  が充填コークスの 2 倍程度 (約 10 cm) になった場合には、流速は中央部で均一充填層の約 20 倍の 1 cm/s、側壁部で 10 倍の 0.5 cm/s に達する。しかし  $\delta$  が 40 cm 程度になると側壁部の空隙流は充填層流と大差なくなる。

実際の炉床はこれまでに検討したような単純な充填構造とは異なつた構造も推定され、これに対応して溶銑流も複雑になりうる。しかし炉床に一樣な溶銑流が形成されている限り、炉床でコークスは溶銑中に加炭溶解するものと推定される。解体調査によると、炉底温度が高いままで吹き止めた高炉の炉床下部には比較的大きいコークスのみが見出され、通液性が良好に保たれていたこと

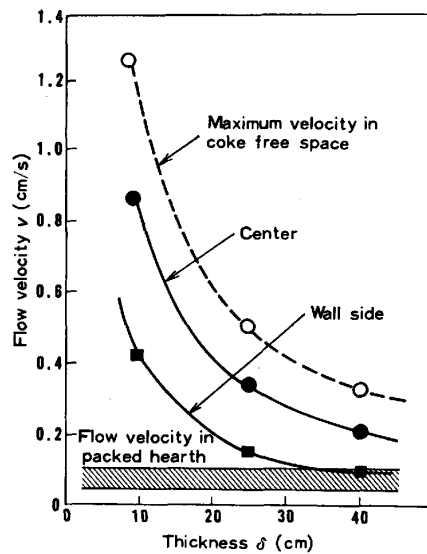


Fig. 13. Velocity of hot metal flow in the coke free space in function of thickness  $\delta$  (calculated).

がわかる。このような状況で溶銑流を大きく変化させる要因は空隙であることが明らかになった。しかもこの空隙は局部的に形成されても流れにはあまり影響を与えず、炉床最下部に一樣に形成されたり、側壁コーナ部に沿つて円周方向に一樣に形成されるなど連続して形成されなければならない。また速い溶銑流が形成されるには  $\delta$  が 10 cm 程度の場合であり、これが 40 cm 以上になれば流速は充填層流とあまり変わらなくなる。したがつて炉壁損傷の恐れがある空隙は  $\delta$  が小さくかつ充填層流の流線に沿うような形で連続して形成される場合に限られる。

## 5. 結 言

解体結果に基づき高炉炉床部を均一充填層、あるいは炉床最下部に一樣な空隙のある充填層とみなし、溶銑が流出する際に生ずる流れの挙動を検討し、以下の諸点を明らかにした。

(1) 通液抵抗が大きく分布する充填層 (空隙の存在を含む) 内の 3 次元流れを積分形式 (発散と循環) で表し、炉床を直方体に分割して流速を求める計算方法を考案し、その妥当性を水模型実験で確かめた。

(2) 数値計算及び水模型実験の結果、溶銑流について次の点を明らかにした。

- ・均一充填の場合に、炉床中央部の流速は 0.2 cm/s、 $Re_p$  は 40 程度である。

- ・炉床最下部にコークスの無い空隙ができると速い流れが形成され、それにつれて充填層下部にきわめて遅い流れを示す部分が形成される。

。均一充填でも空隙のある場合でも、溶銑の等滞留時間曲線は出銑口を中心とした同心円状になる。滞留時間は、均一充填炉床では出銑口から遠ざかるにつれて指数的に増加するが、空隙ができると中間部に極大値が現れる。

。厚みが薄く連続した空隙ができると速い空隙流が形成される。炉床最下部に一樣に厚みが 10 cm 程度の空隙ができると炉床中央部の流速は充填層流の 10 倍以上の 1.2 m/s となり、この空隙を生成溶銑の約 50% が通過する。厚みが 40 cm 程度になると空隙内流速は急激に低下し充填層流とあまり変わらなくなる。また空隙を通過する溶銑量は層厚が増えてもあまり増えない。

以上の知見は高炉操業、炉底構造設計に適用してゆく考えである。

本研究を進めるにあたって御指導いただいた前基礎研究所計測研究室長草鹿履一郎氏（現豊橋技術科学大学教授）および中央研究本部岡田秀弥副本部長に謝意を表す。

付 録

(6), (7)式の導出と解法

A.1 積分形式

炉床流体の運動方程式は充填層内はダーシーの式 ((2)式) 空隙層流はポテンシャル流 ((3)式) で表す。両式を積分形式に直すために(2)式の回転をとると次式を得る。

$$\text{rot}(\vec{R}\vec{u})=0 \dots\dots\dots (A-1)$$

空隙内では  $R=1$  とおくと、(3)式は(A-1)式と同じ形式になる。

したがって(A-1)式を炉床全体で成り立つ式とみなせる。

次に(1)式を体積積分してガウスの定理により表面積分に置き換え、また(A-1)式を面積積分してストークスの定理により循環形式に置き換えることができる。

$$\int_V \text{div } \vec{u} dV = \int_S \vec{u} \cdot \vec{n} dS = 0 \dots\dots\dots (A-2)$$

$$\int_S \vec{n} \cdot \text{rot}(\vec{R}\vec{u}) dS = \oint_C (\vec{R}\vec{u}) \cdot \vec{t} ds \dots\dots\dots (A-3)$$

A.2 数値解法

$U_{i,j}$  は(8), (9)式を連立させて緩和計算から求める。解法は非対称係数行列を有する場合にも収束が比較的良いとされている射影法のうち、田辺の提唱する加速法<sup>8)</sup>を用いた。また収束の判定は次式によつた。

$$\max_{i,j} \left| \frac{U_{i,j}^{(k)} - U_{i,j}^{(k-1)}}{U_{i,j}^{(k)}} \right| < 10^{-5} \dots\dots\dots (A-4)$$

ここに  $U_{i,j}^{(k)}$  は  $k$  回目の計算値である。

さて空隙のある場合に(9)式をそのまま(8)式と連立して解くと緩和計算の収束が悪くなる。特に3次元では著しい。その原因は、充填層と空隙内では通液抵抗が2桁程異なるので、その境界付近では(A-4)式の収束条件が実際には2桁程度に厳しくなるためである。そこでこれを解決するために、充填層と空隙にまたがる閉線路では、 $(R_{ij}L_{ij}u_{ij})_p \gg (R_{ij}L_{ij}u_{ij})_{cfs}$  であるから  $(R_{ij}L_{ij}u_{ij})_{cfs} = 0$  として(9)式を解く。3次元の場合、通常全閉線路間に一次従属関係が成立しているのので、任意の独立な閉線路を選ぶことができるが、上の近似によつて一次従属関係が成立しなくなるので正解を得るためには適切な閉線路を選ぶ。

文 献

- 1) J. F. ELLIOTT and J. POPPER: Blast Furnace Technology, Science and Practice (1972), p. 171 [Marcel Dekker Inc.]
- 2) 岡部俠児, 吉川文明, J. S. SZEKELY: 学振 54 委-No. 1538 (昭和 55 年 11 月)
- 3) 福武 剛, 岡部俠児: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 607
- 4) 日本鉄鋼協会共同研究会第 42 回製銑部会 (1973 年 4 月) 住友金属工業(株) (私信)
- 5) 神原健二郎, 荻原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 535
- 6) Handbook of Fluid Dynamics, ed. by V. L. STREETER (1961), 16-1 [McGraw-Hill]
- 7) P. J. ローチェ, 高橋亮一訳: コンピュータによる流体力学 (1976), p. 38 [構造計画研究所]
- 8) 田辺国土: 京大数理解析研究所講究録, 129 (1971), p. 100