

© 1992 ISIJ

## 論 文

# 溶融を伴う気液固体 3 相共存充填層における 流れと伝熱

王 家兵\*・高橋礼二郎\*<sup>2</sup>・八木順一郎\*<sup>2</sup>

## A Simulation Model on Fluid Flow and Heat Transfer in Packed Bed with Melting Phenomenon

Jiabing WANG, Reijiro TAKAHASHI and Jun-ichiro YAGI

## Synopsis :

In order to elucidate the mechanisms of flow and heat transfer in the cohesive zone in a blast furnace, model experiments at low temperature were carried out for the melting phenomenon, gas and liquid flow and heat transfer in the packed bed. Glass beads were packed and paraffin particles were charged on the top of the packed bed, which corresponded to the coke particle and ore respectively.

A mathematical formulation was proposed for the simulation on simultaneous flow, heat transfer and melting phenomenon in the packed bed. The vectorial form of Ergun's equation was used for the gas flow. For the liquid flow, a dispersion-probability model was applied to obtain the flowing region, in which flow vector was computed from the modified Darcy's equation. Equations of heat balance on gas, solid and liquid were composed of the terms for convection, conduction, heat exchange between three phases and phase transformation. The finite difference method was used to compute flow and heat transfer in the packed bed. The grids for the computation were generated by the use of body-fitted coordinate.

The experimental results showed good agreement with the values computed.

**Key words :** gas flow; packed bed; heat transfer; melting; body-fitted coordinate system; liquid flow; mathematical simulation; model experiment; paraffin.

### 1. 緒 言

高炉内には融着帯が存在し、その形状および位置は高炉操業上きわめて重要な役割を果たすことが明らかになっている。この融着帯における鉱石の軟化、溶融はその近傍のガス流れと伝熱によって強く影響されるが、固体の溶融、液体の滴下に関する研究は少なく、融着帯内の温度分布、溶融機構、液体(融体)の滴下挙動などについては従来あまり検討されていない。

また、高炉滴下帯を滴下する溶銑、スラグは炉内のガス通気性、伝熱、反応に強く影響を及ぼすので、液体およびガスの流動に関する相互作用を解明することはきわめて重要である。しかし、まだ不明な点が多く残されている。レースウェイ周りの液体の流下挙動に関して 2 次元コールドモデル実験<sup>1)</sup>が行われ、レースウェイ周りに融液の存在しない領域、いわゆるドライゾーンが形成さ

れ、液はそこを避けて流下することが明らかにされた。さらに、高炉を対象とした流動、伝熱および反応に関する研究はいくつか報告されている。杉山ら<sup>2)</sup>は種々の移動現象を考慮した高炉の 2 次元総合モデルを開発したが、羽口近傍のドライゾーンや液体温度については検討していない。羽田野ら<sup>3)</sup>はガス流れ・伝熱・反応を考慮した基礎方程式を特性曲線法により解析する高炉の 2 次元モデルを提出している。この解析においては 2 階の偏微分項を無視し、液体の流れにはピストン流れが仮定されている。同様な考えで澤ら<sup>4)</sup>は高炉の融着帯特有のガス流れ、伝熱挙動を 2 次元モデルに取り込み、装入物の降下速度分布から得られる炉内の層構造を用いて構造の変化をも考慮したネットワークを作成し、直接差分法による流動、伝熱、反応の解析を行った。これらの数学的モデルをさらに高精度化するには、取り込む現象、例えば、液体の流れ、気・液体の相互作用、溶融現象などの定量

平成 3 年 8 月 21 日受付 平成 4 年 4 月 10 日受理 (Received on Aug. 21, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)

\* 東北大学大学院 (Graduate School, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980)

\*<sup>2</sup> 東北大学素材工学研究所 工博 (Institute for Advanced Materials Processing, Tohoku University)

化が必要である。従来、充填層における流動と伝熱に関する研究は多く報告されているが、固体の溶融、液体の滴下現象を伴うケースについては研究例が少ないのが現状である。

前報<sup>5)</sup>では冷間 2 次元充填層実験装置を作製し液流れの実験を行うとともに、確率モデルと連続体モデルを組み合わせた気液向流流れのシミュレーションモデルを開発した。本研究では、鉱石の溶融、スラグの滴下現象を表せる数学的モデルを確立するため擬溶融物を用い 100°C 前後で溶融を伴う実験を行った。複雑な装置形状や流れ領域に対処するため、BFC (Body Fitted Coordinate)<sup>6)</sup>法を用い、充填層における固体の溶融、ガスと液体の流れおよび層内の温度分布を解析した。モデルの妥当性を検討するため、実験値と数学的モデルによる計算値の比較を行った。

### 2. 3 相充填層に関する実験

擬熱間 3 相模型実験装置を Fig. 1 に示した。コークス層に相当する粒子としてガラスビーズ、鉱石に相当する粒子としてはパラフィン樹脂 (溶融温度 60°C) を用いた。断熱材を使い、充填層周囲からの放熱を低減させた。また、前面から内部を観察できるようにするため前面の断熱性の扉は上下にスライドさせることができるようにした。層内現象はこの扉を開き正面から観察した。透明で百数十度に耐える容器材質としてポリカーボネートを用いた。製作した充填層は幅 0.2 m、高さ 0.4 m、厚さ 0.03 m で 4 本のガス導入口を有している。使用し

たガラスビーズは粒子径 0.002 m $\phi$ 、形状係数 0.94、充填高さ 0.225 m、空隙率 0.39 である。層底面には排出口があり、液体を排出するが、流出しやすくするためにゆるやかな傾斜をつけている。層下部ではガスの流速が小さく、低温ゾーンがでやすいので、液体が再凝固しないように 1 次ガス導入口 (上側) の下に 2 次ガス導入口も設置した。1 次ガス導入口および層底面にある液体の流出口は 2 次元のために正方形 (0.02  $\times$  0.02 m) にした。ガス導入口および液体排出口からビーズが流出しないように金網を取り付けた。層内の圧力および温度を測定するため装置裏面に高さ方向に 9 レベル、各レベルにおいて 6 点 (6  $\times$  9) の測定孔を設けた。外径 0.0016 m $\phi$  のシース型 CA 熱電対を用いてガス導入口および層内の 7 レベルにおける温度 (7  $\times$  2) を測定した。一方、圧力分布は差圧検出器を使いガス導入口および層内の 7 レベル (7  $\times$  6) で測定した。また、充填層壁面からの熱損失を評価するため、熱流計を用い 7 レベルの熱損失 (7  $\times$  2) を測定した。これらの測定値に基づき補間法によって熱流束の分布を評価した。易融性固体を連続的に充填層上部に投入し厚さ約 0.015 m の層を作った。この易融性固体の平均粒子径が約 0.004 m $\phi$  の不規則形状粒子で形状係数は一次元充填層実験から得られた 0.71 の値を用いた。易融性粒子層の空隙率 (0.37) は水置換法によって得られた。

流通ガスとして、 $5.67 \times 10^{-4} \text{ Nm}^3/\text{s} \sim 6.67 \times 10^{-4} \text{ Nm}^3/\text{s}$  の範囲で一定流量の  $\text{N}_2$  ガスを容量 4 kW の直接加熱式ガス加熱炉を通して、充填層の 2 次ガス導入口から導入した。入口ガス温度は 110°C  $\sim$  130°C の範囲で一定とした。ガス流量は左右ガス導入口からガス流入量が等しくなるようにガス導入口における圧力を一定に調節した。ガス流量はガスメーターで測定した。直接加熱式ヒーター (長さ 1 m) は鉄管内部をアルミナキャストで内張りし、石英管 (0.01 m $\phi$ ) 内にカンタル線のコイルを通したヒーターを 12 本並べて作られている。加熱温度は変圧器で調整された。

充填層内各点の温度が変わらなくなった状態を温度の定常状態と見なした。充填層は通電後定常状態に達するまで 2  $\sim$  3 時間かかった。温度が定常状態に達した後、充填層上部に易融性固体を連続的に投入し、充填層の底部から流出する融体の流出速度がほぼ一定になったとき定常状態と見なした。実験開始後、充填層内各レベルにおける温度および圧力、入口ガスの流量と温度、液体の排出量、液体の流れ領域などを測定した。

充填層内の液ホールドアップは以下のように測定した。静的ホールドアップ  $h_s$  については、内径 0.04 m $\phi$

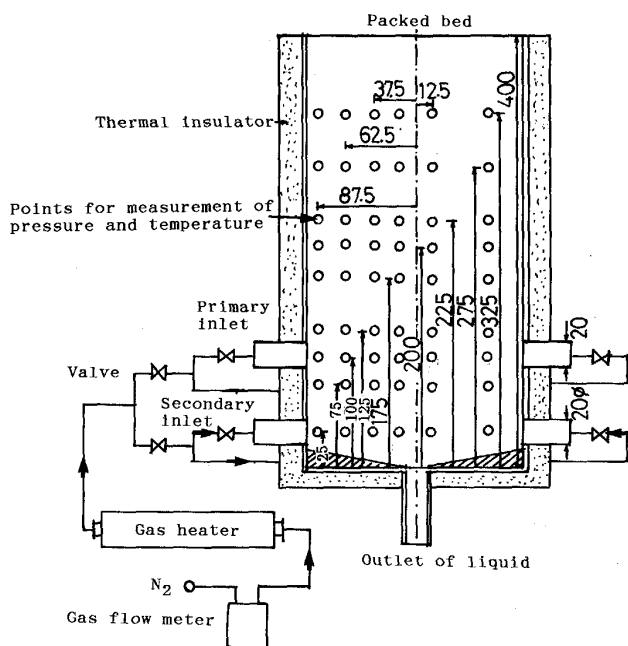


Fig. 1. Experimental apparatus of packed bed.

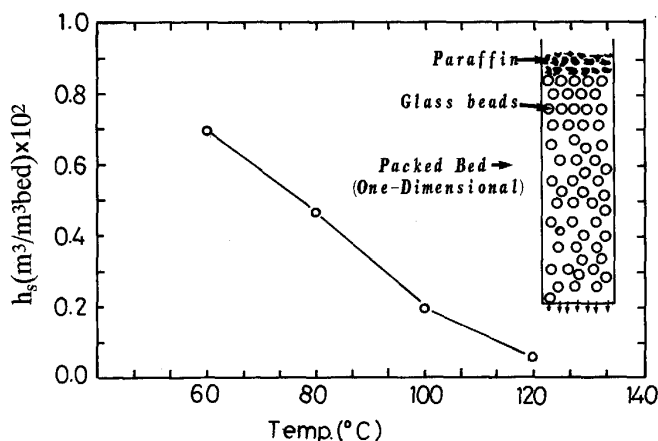


Fig. 2. Effect of temperature on the static hold-up of liquid.

のパイプの中に直径 0.02 mφ のガラスビーズを充填し、パイプの上部に厚さ約 0.02 m のパラフィン粒子層をつくった。これを加熱炉内におきパラフィンを溶融させ、充填層底面から流出させた。流出が停止するまでの流出量を求め、充填したパラフィン量からこの流出量を差し引いた残りの量を静的ホールドアップと定義した。また、充填層底面に取り付けた金網の影響を除くため、ガラスビーズの充填高さを変化させて静的ホールドアップを測定した。測定した静的ホールドアップへの温度の影響を Fig. 2 に示した。温度の増加とともにパラフィンの粘性が少なくなり流動性が良くなるので静的ホールドアップが減少していると考えられる動的ホールドアップ  $h_d$  については、Fig. 1 に示した充填層の上部に液体状のパラフィンを均一にいれ、層底から流出する液体量を連続的に記録した。給液停止後の滴下量を測定して動的ホールドアップとした。1次元の充填層を使った実験から得られた静的ホールドアップと2次元充填層で求めた動的ホールドアップからトータルホールドアップを求めた。ここで、充填層内の動的ホールドアップ分布は均一であると仮定した。

### 3. 数学的モデル

高炉下部には気・液・固体3相が共存しており、流動・伝熱・物質移動などの諸現象が複雑に生じている。本研究では流動・伝熱・溶融現象に注目した数学的モデルを開発した。充填層上部で投入された固体パラフィンが溶融するためパラフィン粒子は降下するが、溶融が生じる領域がかなり狭く、溶融速度もさほど大きくないので上部における固体パラフィン粒子の降下は考慮せず固定層と考えた。数学的モデルはガスと液体流れ、3相間の熱交換、および溶融に関する基礎式から構成されている。

#### 3.1 ガス流れ

ここで、移流項を考慮した Ergun の式<sup>7)</sup>を運動の方程式(1)として採用する。

$$\text{div}\{\rho_g V_g V_g / (\varepsilon - h_t)^2\} = -\text{grad } P_g - (f_1 + f_2 |G_g|) G_g \dots\dots\dots (1)$$

液体の流れ領域においては液体の滞留量を考慮し  $f_1$ ,  $f_2$  はつぎのように定義されている<sup>1)</sup>。

$$f_1 = 150(1 - \varepsilon)^2 \mu_g / \{\rho_g (\phi d_p)^2 (\varepsilon - h_t)^3\}$$

$$f_2 = 1.75(1 - \varepsilon) / \{\rho_g \phi d_p (\varepsilon - h_t)^3\}$$

一方、流体に湧き出しや吸い込みがない場合、連続の式は(2)式で与えられる。

$$\text{div}(\rho_g V_g) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

(1)式と(2)式を連立させて解くと充填層内ガス流れを解析することができる。

#### 3.2 液体流れ

本研究では、前報<sup>5)</sup>で報告した確率モデルおよび連続体モデルを併用した解析法を使用した。すなわち、液体の流れ領域を推定するため、確率モデル<sup>8)</sup>を用い、得られた流れ領域に対して連続体モデル<sup>1)9)</sup>を適用し、液体の流速ベクトルを求めた。

#### 3.3 熱移動

充填層内のガスは充填層の空隙を通過しながら、充填粒子および滴下している液体との間で熱交換を行う。また、滴下している液体は粒子表面を流下しながら粒子あるいは気体との間で熱交換を行う。充填層における気、液、固体の温度分布を求めるため、定常状態における各相の熱収支をとり、基礎式として以下の式を得た。

$$\text{div}(\rho_g V_g C p_g T_g) = \text{div}(k_{eg} \text{grad } T_g) + (a_p - a_{l,s}) h_{g,s} (T_s - T_g) + a_{g,l} h_{g,l} (T_l - T_g) + Q_g \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{div}(k_{es} \text{grad } T_s) + (a_p - a_{l,s}) h_{g,s} (T_g - T_s) + a_{l,s} h_{l,s} (T_l - T_s) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{div}(\rho_l V_l C p_l T_l) = \text{div}(k_{el} \text{grad } T_l) + a_{g,l} h_{g,l} (T_g - T_l) + a_{l,s} h_{l,s} (T_s - T_l) + Q_l \dots\dots\dots (5)$$

充填層上部にパラフィン粒子を充填したところを溶融ゾーンと定義した。そこでは、(5)式中の  $Q_l$  は溶融に伴う液体の顕熱の変化である。(4)式中の固体の有効熱伝導率や粒子径などの値として易融性固体の値を使った。

ガスと充填層壁の接触面積は固体、液体のそれより大きいので壁からの熱損失はすべてガスからであると考えた。溶融ゾーンではガスから固体への伝熱量はすべて溶融に使われたと考えた。

気・固・液体3相間の熱交換はすべて対流伝熱であるとして取り扱った。各相間の伝熱面積については次のように考えた。ガスと流下する液体の気液相間の有効表面積

$a_{g,l}$  は馬田ら<sup>10)</sup>の実験式から推定した。液体・固体粒子間の濡れ面積  $a_{l,s}$  は恩田ら<sup>11)</sup>の式を適用して求めた。気固間の伝熱面積は粒子の比表面積から液体の濡れ面積を差し引いて求めた。

3相間の伝熱係数は以下のように求めた。気固間熱伝達係数  $h_{g,s}$  は秋山ら<sup>12)</sup>の式から求めた。

$$Nu_{g,s} = 2.0 + 0.39 Re_{p,g}^{1/2} Pr_g^{1/3} \dots\dots\dots (6)$$

固液間熱伝達係数  $h_{l,s}$  の推定には強制対流熱伝達の式<sup>13)</sup>を用いた。

$$Nu_{l,s} = 0.664 Re_{p,l}^{1/2} Pr^{1/3} \dots\dots\dots (7)$$

気液間熱伝達係数  $h_{g,l}$  は液体を固体と同様に考え(6)式を適用して推算した。

ガス、液体および固体の有効熱伝導率は静止充填層の有効熱伝導率<sup>14)</sup>に基づき液滴の存在率を考慮して求めた。

$$k_{eg} = (\epsilon - h_l)(k_g + h_{rv}d_p) \dots\dots\dots (8)$$

$$k_{es} = (1 - \epsilon)(h_{rs}d_p) \dots\dots\dots (9)$$

$$k_{el} = h_l(h_{rl}d_l) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $h_{rs} = 0.227(e_s/(2 - e_s)) \times (T_s/100)^3$ ,  $h_{rl} = 0.227(e_l/(2 - e_l)) \times (T_l/100)^3$ ,  $N_2$  ガスを用いたためガス放射の影響を無視し  $h_{rv}$  を 0 とした。

### 3.4 パラフィンの溶融

固体パラフィン粒子の溶融速度はガスから固体への伝熱速度によって律速され、固体温度は溶融が進行している間一定である。その速度は以下のように定義した。

$$R_m = (a_p - a_{l,s})h_{g,s}(T_g - T_s)/H_l \dots\dots\dots (11)$$

## 4. 数値解析法

### 4.1 流れと伝熱の同時解析

上述した運動量方程式、熱収支式はそれぞれの保存則に従って導出されている。速度や温度など物理量を  $\phi'$  で表すと一般的な保存則は2次元の場合以下のように書くことができる。

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi') + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi') \right\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi'}{\partial y} \right) \right\} + S(x,y) \dots\dots\dots (12)$$

しかし、本充填層実験装置の底面は傾斜しており、直交座標では対処できないので一般曲線座標系を適用した。

この方法は、楕円型方程式を解くことによって境界形状に沿った座標格子を生成させ、任意形状の実領域を直交格子を有する計算領域に座標変換し、変換された領域で基礎方程式を解く手法である<sup>6)</sup>。この方法は複雑な形

Table 1. Relaxation factors used in the computation.

Dependent variables	$P_g$	$U_{gi}$	$T_g$	$T_s$	$P_l$	$U_{lj}$	$T_l$
$\omega$	0.85	0.85	0.8	0.8	0.5	0.5	0.8

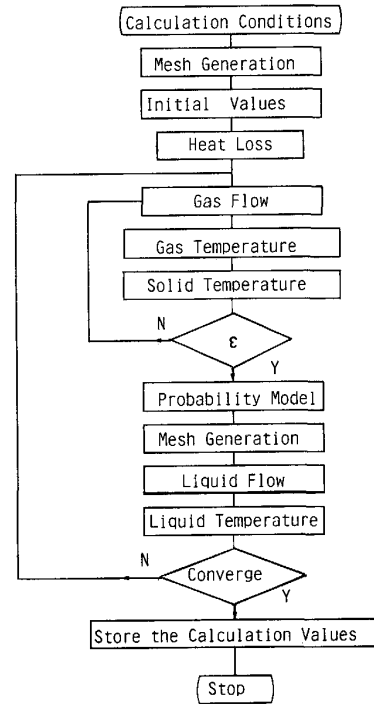


Fig. 3. Flow chart for numerical computation.

状の領域を取り扱う場合の困難さを取り除くことができ、差分法の欠点を補う有力な方法である。一般曲線座標系における数値解析法については文献<sup>15)</sup>に示したので、ここでは、記述を省略する。

基礎式の離散化はスタッガード・グリッド配列のコントロール・ボリューム法を用いた。なお、解の発散を避けるために不足緩和法を採用した。使用した緩和係数を Table 1 に示した。この数値計算法を要約すると、BFC法によって生成したスタッガード・グリッドを用い、SIMPLE有限差分スキーム<sup>16)</sup>を一般曲線座標系に適用し、複雑な形状を持つ充填層内の流動および伝熱現象の解析を行った。解析のフローチャートを Fig. 3 に示した。計算の流れは BFC 法によって生成したメッシュのデータファイルから始まり、実験から得られた熱損失を求めた後、ガス流れの計算を行う。ガスおよび固体の温度をある程度まで収束させた後、液体流れの計算にはいる。確率モデル<sup>8)</sup>で液体の流れ領域を求め、液体の流れ領域内で連続体モデル<sup>19)</sup>を適用し、液体の流速ベクトルと温度を解析する。

計算に用いたガスと固体の境界条件を Fig. 4 (a), (b) に示した. ガス導入口におけるガス流速および温度は一定とし, 層頂面上における圧力は等圧, 壁と中心軸ではガスは通過できない. 壁側からの熱損失はガスから生じると仮定した. 中心軸では軸対称の条件を設定した. ガスの出口である層頂においては軸方向に温度勾配がない.

液体の流れおよび伝熱の境界条件を Fig. 4 (c) に示した. 壁面で断熱, 中心軸で軸対称条件を設定した. 充填層上部において固体パラフィンが室温の状態で投入されるが, すでに述べたように固体パラフィンの溶融ゾーンが薄く, 実験においても, この領域で固体パラフィンがほとんど溶融しているのが観察された. したがって,

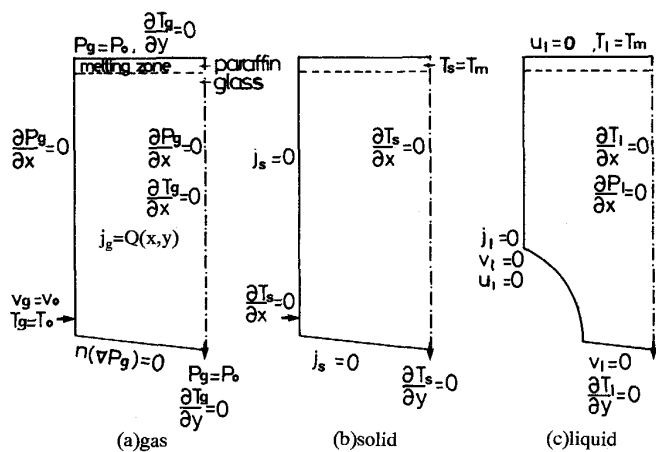


Fig. 4. Boundary conditions for numerical computation.

充填層上部の固体温度を溶融温度に設定した.

実験装置のガス導入口は円筒形で内側に金網が取り付けられているので, 2次元の数値解析においては金網開口率の補正および円筒形ガス導入口の形状を2次元スリットへの変換を行った. 充填層の計算メッシュには横方向20, 縦方向30のメッシュを採用した.

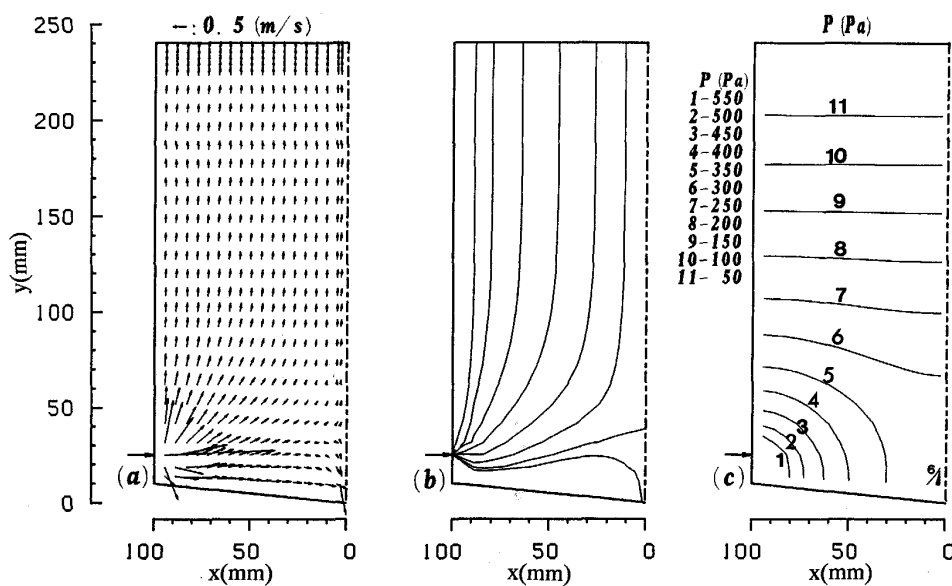
4.2 液流れ解析用メッシュの作成

液体流れ領域は充填層の計算領域と異なっているので, 別の格子構造を作成した. まず, 充填層の底面の傾斜を考慮した充填層のメッシュを作成しておく. 充填層上部においては易融性固体が溶融温度以上になると滴下するので, まず確率モデルによって液体の流れ領域を求め, ドライゾーンの形状を推定する. 流れ領域の境界の座標を用い, BFC法により領域内の格子点の座標を求める. ガス流れとのカップリングを考慮したので液流れ解析用メッシュは繰り返し計算ごとに変わる. 計算時間を考慮し液流れ解析用メッシュ数も充填層のメッシュ数と同じ横方向20, 縦方向30とした.

充填層の差分メッシュの構造と液体の流れ領域のメ

Table 2. Physical properties of glass and paraffin.

Viscosity of paraffin	(kg/m <sup>2</sup> s)	3.02 × 10 <sup>-3</sup>	
Melting heat of paraffin	(J/kg)	1.47 × 10 <sup>5</sup>	
Specific heat of	Glass beads	(J/kg·°C)	960.0
	paraffin		2884.5
Thermal conductivity of	Glass beads	(W/m·°C)	1.10
	paraffin		0.23
Density of	Glass beads	(kg/m <sup>3</sup> )	2500
	paraffin		775



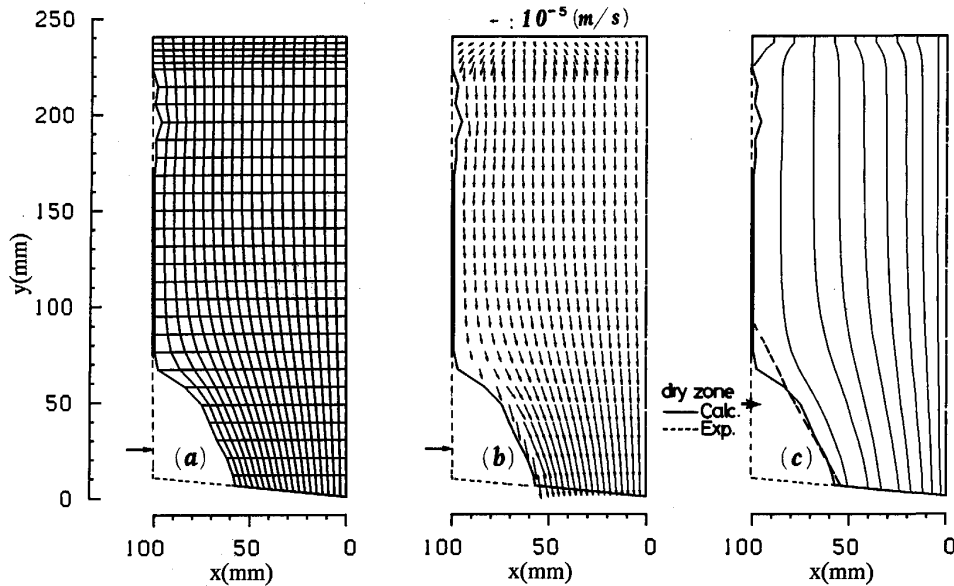
(a) Flow vector (b) Streamline (c) Isobars  
Fig. 5. Computed results of gas flow.

シュ構造の違いで両領域における変数の変換を行う必要がある。

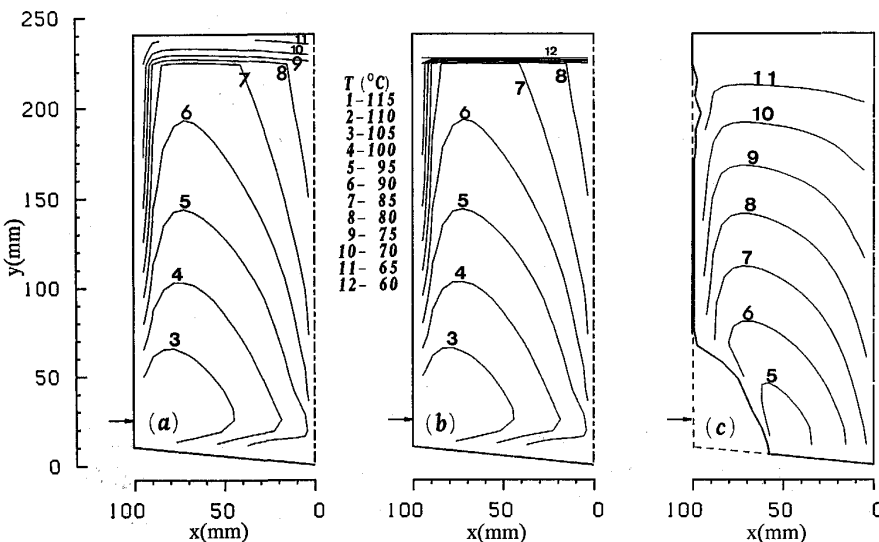
### 5. 実験および数値解析結果

Table 2 に示した固体の物性値を用い解析を行った。ガス導入口から  $110^{\circ}\text{C}$  のガスを  $6.67 \times 10^{-4} \text{ Nm}^3/\text{s}$  で吹き込む場合の解析結果を Fig. 5~Fig. 8 に示した。Fig. 5 に示した層内のガス流速ベクトル、流線図、等圧力線図からガス導入口付近ではガス流れの2次元分布が生じ、壁付近では上向きにガス流速は中心軸の値よりかなり大きい。層底面には液体排出口があるため、ガスが一部そこから流出した。また、充填層上部では横方向に

おける圧力はほぼ均一である。充填層内の液体流れの解析結果を Fig. 6 に示した。溶融ゾーンにおける固体の溶融速度を用い、BFC 法により液体流れ領域のメッシュを作成した。得られたメッシュ構造を Fig. 6 (a) に示した。この流れ領域における液体流れのベクトルを Fig. 6 (b) に示している。充填層上部から滴下した液体は液体排出口に向かって流れるにつれて滴下速度は大きくなっていく。充填層上部から滴下した液体がガス導入口付近でガス流れの影響を受けドライゾーンが形成されたことが観察された。溶融ゾーンにおける高温域ではパラフィンが速く溶け、横方向において溶融速度の分布が生じた。確率モデルによって求められた液体の流れ領域



(a) Grid generation (b) Flow vector (c) Streamline  
Fig. 6. Computed results of liquid flow.



(a) Gas (b) Solid (c) Liquid  
Fig. 7. Computed isotherms of gas, solid and liquid.

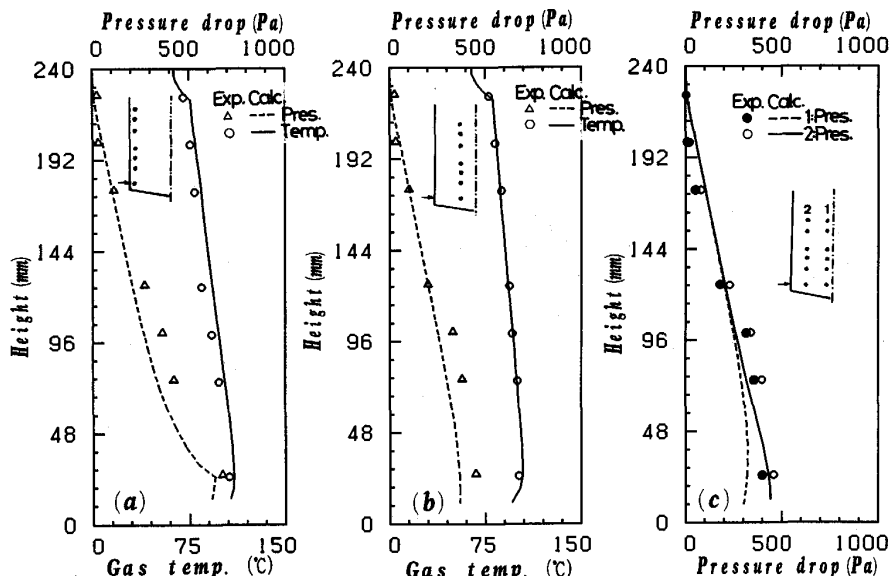


Fig. 8. Comparison between observed and computed longitudinal distributions of temperature and pressure in the packed bed.

と実験から得られた結果を Fig. 6 (c) に示した. 両者にはよい一致がみられたので確率モデルの妥当性が検証された.

充填層内の温度分布を Fig. 7 に示している. 実測から層内温度の違いにより壁面から熱損失の分布が顕著に現れた. 壁における熱損失を考慮したため, 壁近傍では温度が低くなっている. 大きな壁正面と背面からの熱損失を考慮したため, 中心軸付近の温度が低くなっている. 結局壁に近いところで横方向の温度ピークが生じている. 溶融ゾーンでは, 固体の溶融に熱が多く消費されたためガス温度が急に低下した. 固体は静止しているので溶融ゾーン以外では固体はガスとほぼ等しい温度分布を示している. 溶融ゾーンでは固体パラフィンが液化したため溶融ゾーン内の液体パラフィンの温度は溶融温度とほぼ等しくなっている. 上部から滴下した液体は気体および固体と接触しながら加熱される状態にあり, その温度は気体・固体の温度と若干異なっている. したがって, ガスおよび固体と同じように横方向の温度分布が生じた.

Fig. 8 に層内圧力, 温度の測定値と実験結果との比較を示した. 両者には入口付近において少しずれが生じたが, 全体的にはよい一致が見られた.

ガス導入口から温度 130°C のガスを  $5.67 \times 10^{-4} \text{ Nm}^3/\text{s}$  で吹き込む場合の解析結果を Fig. 9 に示した. ガス流量を減少させたので液体のドライゾーンがやや小さくなっている. 液体パラフィンの生成量はさほど変化しないことがわかる. また, 実験から以下の知見を得た. (1) 固体の溶融はガスからの伝熱によって左右される. パラフィン粒子をあまり小さくすると伝熱面積が増え,

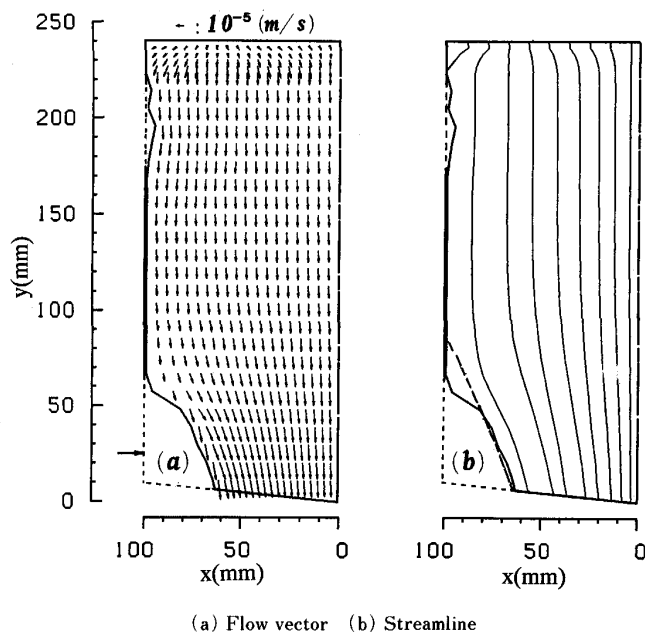


Fig. 9. Computed results of liquid flow.

パラフィンが急速に溶けるので, フラッディング現象を招きやすい. (2) Fig. 1 に示した層上側の入口からガスを吹きこむ場合, 層下部にガスが流れにくくなり温度が低下する. したがって, 液体パラフィンの粘性が上昇し, 上部から滴下した液体は再度固化した.

## 6. 結 言

高炉融着帯における鉱石の溶融, 滴下を伴う流れと伝熱現象を解明するため, 擬熱間充填層実験装置を製作し基礎研究を行った. 易融性固体の溶融, 滴下挙動, 3相間の伝熱などの現象をモデルに取り込み, 充填層における複雑な溶融, 流動, 伝熱現象を表せる数学的モデルを

開発した。任意形状を取り扱える一般曲線座標を充填層および液体流れ領域という二つの計算領域に適用した。得られた解析結果は実験結果とよい一致を示したので数学的モデルの妥当性が検証された。また、ガス導入口周りの液体のドライゾーンが数学的モデルによって記述された。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費（平成元年度および2年度一般研究（B）01470058）によって行われたものであることを記して謝意を表す。

記号

- $a_{g,l}$ : 気体と液体間の有効比表面積 ( $m^{-1}$ )
- $a_p$ : 粒子の比表面積 ( $m^{-1}$ )
- $a_{l,s}$ : 固体と液体の濡れ比表面積 ( $m^{-1}$ )
- $C_p$ : 比熱 ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )
- $d_l$ : 液滴径 ( $m$ )
- $d_p$ : 粒子径 ( $m$ )
- $e$ : 放射率 (—)
- $h_{g,l}, h_{l,s}, h_{g,s}$ : 異相（ガス-液、液-固、気-固）間の伝熱係数 ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
- $h_d$ : 動的ホールドアップ ( $m^3/m^3$  (bed))
- $H_l$ : 固液の変態点 ( $J/kg$ )
- $h_s$ : 静的ホールドアップ ( $m^3/m^3$  (bed))
- $h_t$ : トータルホールドアップ ( $m^3/m^3$  (bed))
- $k$ : 熱伝導率 ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
- $j$ : 壁からの熱流束 ( $W/m^2$ )
- $k_e$ : 有効熱伝導率 ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
- $Nu$ : ヌッセルト数 ( $hd_p/k$ )
- $P$ : 圧力 (Pa)
- $Pr_k$ :  $k$ 相のプラントル数 ( $\mu_k C_{p,k}/k_k$ )
- $Q$ : 熱収支式中のソース項 ( $W/m^3$ )
- $Q(x, y)$ : 壁からの熱流束 ( $W/m^2$ )
- $Re_{p,k}$ :  $k$ 相の粒子レイノルズ数 ( $d_p \rho_k U_k / \mu_k$ )
- $R_m$ : 溶融速度 ( $kg/m^3$  (bed)  $\cdot s$ )
- $T$ : 温度 ( $^\circ C$ )
- $T_m$ : 固体の溶融温度 ( $^\circ C$ )
- $u, v$ :  $x, y$ 軸方向の速度 ( $m/s$ )

- $U$ : 空塔速度 ( $m/s$ )
- $V$ : 速度ベクトル ( $m/s$ )
- $x$ : 横軸 ( $m$ )
- $y$ : 縦軸 ( $m$ )
- $\Gamma$ : 拡散係数
- $\varepsilon$ : 充填層の空間率 (—)
- $\mu$ : 粘度 ( $kg/m \cdot s$ )
- $\rho$ : 密度 ( $kg/m^3$ )
- $\phi$ : 粒子の形状係数 (—)
- $\phi'$ : 従属変数
- $\omega$ : 緩和係数 (—)
- 下付き
- $g$ : ガス,  $l$ : 液体,  $s$ : 固体

文献

- 1) J. Szekely and Y. Kajiwara: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **19** (1979), p. 76
- 2) 杉山 喬, 須賀田正泰: 製鉄研究 (1987) 325, p. 34
- 3) 羽田野道春, 栗田興一: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1898
- 4) 澤 義孝, 武田幹治, 田口整司: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1045
- 5) 王 家兵, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 1585
- 6) J. F. Thompson, Z. U. A. Warsi and C. W. Mastin: Numerical Grid Generation (1985) [Elsevier Science Publishing Co., Inc.]
- 7) S. Ergun: Chem. Eng. Prog., **48** (1952), p. 89
- 8) 大野陽太郎, M. Schneider: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 1923
- 9) 杉山 喬, 中川朝之, 芝池秀治, 小田 豊: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2044
- 10) 馬田次郎, 篠原 久, 椿原 元: 化学工学, **27** (1963), p. 978
- 11) 恩田格三郎, 竹内 覚, 小山恭章: 化学工学, **31** (1967), p. 126
- 12) 秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 848
- 13) W. H. Giedt: 基礎伝熱工学 (1957), p. 146 [丸善]
- 14) D. Kunii and S. Yagi: AIChE J., **6** (1960), p. 71
- 15) 王 家兵, 八木順一郎: 東北大学選鉱製錬研究所彙報, **45** (1989), p. 117
- 16) S. V. Patankar: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (1980), p. 126 [Hemisphere]