

充填層における気液向流流れのシミュレーション

王 家兵*・高橋礼二郎*²・八木順一郎*²

Simulation Model of the Gas-Liquid Flows in the Packed Bed

Jiabing WANG, Reijiro TAKAHASHI and Jun-ichiro YAGI

Synopsis :

A mathematical model was presented to describe the countercurrent flows of gas and liquid through packed beds for analyzing flow phenomena in a blast furnace.

For the gas flow, the vectorial form of Ergun's equation was used as equation of motion. For the liquid flow in the packed bed, flowing region was obtained by a dispersion-probability model using a flow network system for the dispersed flow. Liquid flow vector in the flowing region was computed from the Darcy's equation that was derived for the continuous liquid flow.

A series of experiments was conducted by a two dimensional cold model for measuring the liquid flow region, liquid distribution at the receivers and gas pressure distribution in the packed beds. The experimental data were simulated well by the mathematical model presented in this paper. In addition, the model estimated the dry zone formed in front of gas inlet.

Key words : gas flow; liquid flow; packed bed; two dimension; probability; mathematical simulation; model experiment; Darcy's equation.

1. 緒 言

高炉は気液向流移動層からなる高温反応容器であり、滴下する融体（溶銑と熔融スラグ）は炉内のガス通気性、伝熱、反応に強く影響を及ぼすので、液体とガスの流動における相互作用を解明することはきわめて重要である。充填層内の液体流れは充填層構造、粒子の大きさと表面状態、液体とガスの流量、液体の物性値、液体の存在状態（膜、滴、条）、温度分布など多くの要因により影響されるので現段階では、理論的な解析が容易ではない。

ガス導入口付近では液体は横向きにガス流れの影響を受け、ドライゾーンが形成される。また、液体のホールドアップはガスの流れにも影響する。高炉内コークス充填層を流れる融体とガスは気液向流流れを形成している。従来、高炉内の液体流れについて、天辰ら¹⁾は液滴の流下を確率論により解析している。また、液相が連続である時に成り立つ Darcy 式を近似的に用いて SZEKELY ら²⁾、杉山ら³⁾は 2 次元充填層内の気液向流流れの理論解析とモデル実験を行った。大野ら⁴⁾は 2 次

元充填層について、ガスが水平方向にほぼ均一に流れている場に不連続な液体を滴下させた場合の液体の広がりや変位に関する数学的モデルを展開した。

しかし、上述の研究においては、炉内のドライゾーン、ガスとの相互作用のメカニズム、液流れの分布などが十分には検討されていない。本研究では高炉滴下帯における融体の流れを推算するため液流れの新しい解析方法を提出した。この解析法を検証するため、冷間 2 次元充填層実験装置を製作し気液向流流れの基礎実験を行った。実験値を 2 次元一般座標系を用いた数値解析の結果と比較することによってその妥当性を検討した。また、炉内に生成するドライゾーンを表現できるようにし、充填層内のガスと液体の流れをより精度よく推算できる数学的モデルを開発した。

2. 数学的モデル

2.1 ガス流れモデル

本研究においては、移流項を考慮した ERGUN の式を運動の方程式(1)として採用する。

$$\text{div}[\rho_g V_g V_g / (\epsilon - h_t)^2] = -\text{grad } P_g + S_v \dots\dots(1)$$

平成 3 年 2 月 7 日受付 (Received Feb. 7, 1991)

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

*² 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University)

ここに、 S_v はソース項である。充填層の場合、 $S_v = -(f_1 + f_2 |G_g|) G_g$ とおく。

液体の流れ領域においては液体の滞留量も考慮して S_v の式の中に現れる f_1, f_2 はつぎのように定義されている²⁾。

$$f_1 = 150(1 - \epsilon)^2 \mu_g / [\rho_g (\phi d_p)^2 (\epsilon - h_l)^3]$$

$$f_2 = 1.75(1 - \epsilon) / [\rho_g \phi d_p (\epsilon - h_l)]$$

一方、流体に湧出しや吸込みがない場合、連続の式は (2) 式で与えられる。

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

(1) と (2) 式を連立させて解くとガス流れを解析できる。

2.2 充填層における液体流れのモデル

充填層内液体流れについて、現在までに非連続体モデル (確率モデル)⁴⁾ と連続体モデル²⁾³⁾ という二つの異なったモデルが提案されている。確率モデル⁴⁾ には次の事項が考慮されている。すなわち、1) 液相の不連続性、2) 液体の流れ領域の存在、3) 液体流れの充填粒子による分散とガス流による偏移である。

確率モデル⁴⁾ においては、充填層を粒子とその間隙の格子点からなるネットワーク構造であると考え、2次元充填層における液の滴下の様子を Fig. 1 に示すように取り扱っている。ここで、液体はある大きさの液滴の集まりと考える。ガス流れがない場合、格子点 (i, j) にある液滴がネットワークの高さ Δy を降下するとき、隣接する2点 $(i+1, j+1), (i-1, j+1)$ に分配比 $p, 1-p$ で分配されるとする。移動確率 p は、ガス流れのない場合は $1/2$ であるが、ガス流が存在する場合に、分配比が1を超えることは不合理であるので、 $M+1 > p > M$ の場合 (M は p の整数)、2点 $(i+2M+1, j+1), (i+2M-1, j+1)$ に分配比 $(p-M), (M+1-p)$ で分配されるとする。すなわち、ガス流によって液体が分配される位置が $2M$ 移動し、左右の分配が均等でなくなる。しかし、2点分配の原則は守られている。この2点に分配された液の一部が、ガス流れの

局部的な乱れ (乱流効果) により隣接する2点に再分配される。したがって、4点分配を仮定したことになる。Fig. 1 に4点分配の模式図を示した。この4点への分配比 $p_1 \sim p_4$ は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} & \text{点}(i+2M-3, j+1); p_1 = 0.5\alpha(M+1-p) \\ & \text{点}(i+2M-1, j+1); \\ & \quad p_2 = (1-\alpha)(M+1-p) + 0.5\alpha(p-M) \\ & \text{点}(i+2M+1, j+1); \\ & \quad p_3 = (1-\alpha)(p-M) + 0.5\alpha(M+1-p) \\ & \text{点}(i+2M+3, j+1); p_4 = 0.5\alpha(p-M) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、再分配される比率 (乱流拡散率) α は、大野ら⁴⁾ が実験的に求めた次の式から計算した。

$$\alpha = 3.24(p-1/2)^3 \dots\dots\dots (4)$$

フローネットワークの単位メッシュの幅 Δx が、粒子径に等しいと仮定し、単位メッシュの高さ Δy の Δx に対する比は充填層の構造に対応し、0.9の値を採用した⁴⁾。

移動確率 p と、ガスおよび液体の流速の関係を導くためには、次の仮定をおき、直径 d_l の液滴の2次元運動を考察した。1) ガスの浮力は無視できる。2) 液滴の降下速度はガスの実流速に比べ小さいので、ガス流れとの抗力項における滴の速度は無視できる。3) 液滴は初速度ゼロで運動を始め、高さ Δy を降下したとき、下段の粒子表面に衝突して運動エネルギーを失う。これらの仮定のもとに、直径 d_l の液滴の2次元運動方程式を導出し、一定の境界条件のもとで解くことにより移動確率 p とガスおよび液体の流速との関係として (5), (6) 式を得た⁴⁾。

$$p = 0.5 + (\Delta y / \Delta x) \{ F \cos \psi / (1 - F \sin \psi) \} \dots (5)$$

$$F = 0.75 C_D \Delta x / d_l (\rho_g / \rho_l) (v_{rg}^2 / g \Delta x) \dots\dots\dots (6)$$

液滴の抵抗係数 C_D については以下の式⁵⁾ で求める。

$$C_D = 24 / Re (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad Re \leq 1000$$

$$C_D = 0.44 \quad Re > 1000$$

このモデルによるとガス流れを考慮した移動確率を計算することによって液体流れの分布を求めることができる。

この確率モデル⁴⁾ は、ガスの水平方向流れによる液体の同方向への偏移を表現しているので、ガス導入口付近のドライゾーンの形状を推算することができる。しかし、このモデルには次に示す欠点があり、使用に注意を要する。すなわち、このモデルからは、下向きに速度しか求められないので多次元速度ベクトルをもとめることはできない。そのほか、粒子径、空間率に分布がある場合、あるいは充填層形状が複雑な場合などには、ネットワー

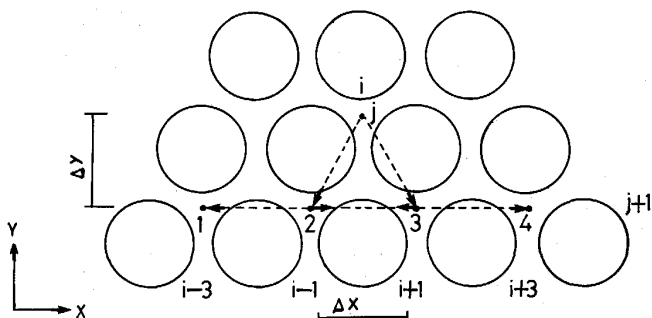


Fig. 1. Flow network and dispersion mechanism.

クメッシュ構造が複雑になり解析は必ずしも容易ではないという弱点がある。

一方、(7)、(8)式で表される連続体モデル²⁾³⁾はつぎの仮定のもとに導出される。(1)液体を連続体として取り扱う。(2)液体の流通抵抗 f_3 にはDarcy式タイプの粘性抵抗の式を適用する。(3)液滴と流通気体との摩擦力 S には流通抵抗の式を適用する。

$$\text{連続の式 } \text{div}(\rho_l V_l) = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

運動の方程式

$$\text{div}(\rho_l V_l V_l / h_l^2) = -\rho_l g - f_3 V_l + S V_g - \text{grad } P_l \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$f_3 = 180(1 - \epsilon)^2 \mu_l / d_p^2 / h_l^3 \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$S = 0.75 C_D \rho_g |V_g| / (\epsilon - h_l)^2 / d_l \quad \dots\dots\dots(10)$$

液体のホールドアップの評価については、福武ら⁶⁾が提案し杉山ら³⁾が係数修正して求めた静的および動的ホールドアップ推算式に基づき、全ホールドアップ h_t は両者の和であるとして(11)式から求めた。

$$h_t = h_s + h_d \quad \dots\dots\dots(11)$$

液滴径 d_l は、粒子径 d_p の球形充填物が最密充填されている充填層中に存在する最大液滴径として³⁾以下のように定義されている。

$$d_l = (2 \times \sqrt{3} - 3) d_p / 3 \quad \dots\dots\dots(12)$$

この連続体モデル²⁾³⁾にはつぎのような特徴がある。

①液体の流速ベクトルを求めることができ、伝熱との同時解析も比較的簡単である。②3次元系への拡張が容易である。しかし、液体の流れ領域とドライゾーンの境界を決めることはできないという欠点がある。

上述した二つのモデルの特徴を生かし欠点を補うために本解析では両モデルを併用した。すなわち、確率モデル⁴⁾によって液体の流れ領域を求め、その後、流れ領域に対して連続体モデル²⁾³⁾で液体の流速ベクトルを求めるという方法である。この時、ガス流れも同時に解析した。

3. 実験装置ならびに方法

液体流れを測定するため製作した2次元アクリル製充填層実験装置をFig. 2に示す。本体の寸法は高さ260 mm、長さ300 mm、内側の厚み28 mmである。確率モデル⁴⁾によると粒子径があまり小さすぎると数値解析におけるネットワークのメッシュ数が多くなるので5.2 mmφのガラス球を使用し、層高200 mmまで粒子を充填した。装置の背面には、25(5×5)個の圧力測定孔をもうけた。本実験は層頂中心部で1点に液体を供給するポイントソース法を採用し、層頂から直径1.5 mmφのパイプを通して供給流量を調整しながら水を流した。層

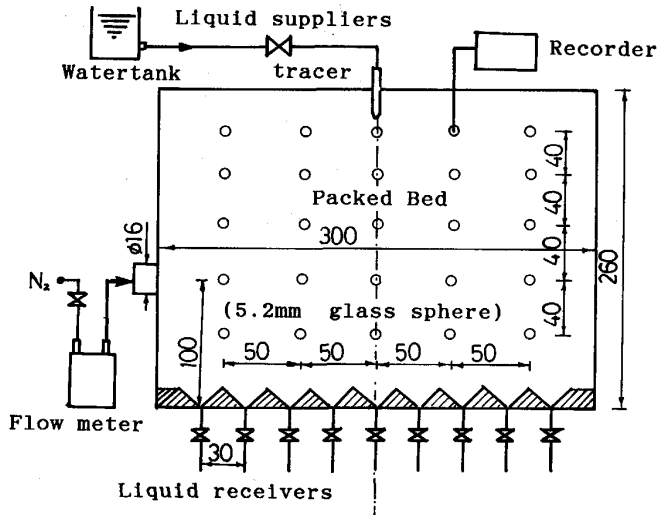


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

底面にはおのこの30 mmの幅に区分された多孔板(16 mmφの孔9こ)の受水部を取り付けた。一方、直径16 mmφのガス導入パイプからN₂ガスを吹き込んだ。

層底部からガラスビーズが流出しないように金網を取りつけてみたが、毛細管力により水の膜ができやすかったり、受水部パイプの内圧で液体が流下しにくくなるなどの問題点が生じた。この問題を解決するため、充填層の底面から受水パイプの底までガラスビーズを充填した。流出した液体の流量分布は一定時間でパイプ内に流入した液体の体積によって求めた。また、もし層底面が平であれば層底面におけるパイプ孔間に落ちた液体が両側のパイプに落ちる可能性があり正確に分配できないので、Fig. 2に示したように、層底面に三角形状の物体をとりつけている。

粒子の表面性質によっても液の流れはかなり変化する。液の流れ通路がいったんできてしまうと、液体はほとんどこの通路を通して流れてしまうので、液流れの再現性は必ずしもよくない。実験の前に充填層を一度全部使用する液体で濡らすことにより、特殊な流路形成を抑制し、再現性を改善した。所定の位置より給水し定常状態になった後、受水部における水の流量分布、層内圧力分布、液の流れ領域を測定した。流れを可視化するため、インキで着色した水を流した。この方法で液体の流れ領域を求めることができた。

4. 数値解析法

Table 1に示す解析条件を用い、一般座標系による充填層中の気液向流流れのシミュレーションを行った。解析のフローチャートをFig. 3に示している。ガス流れ

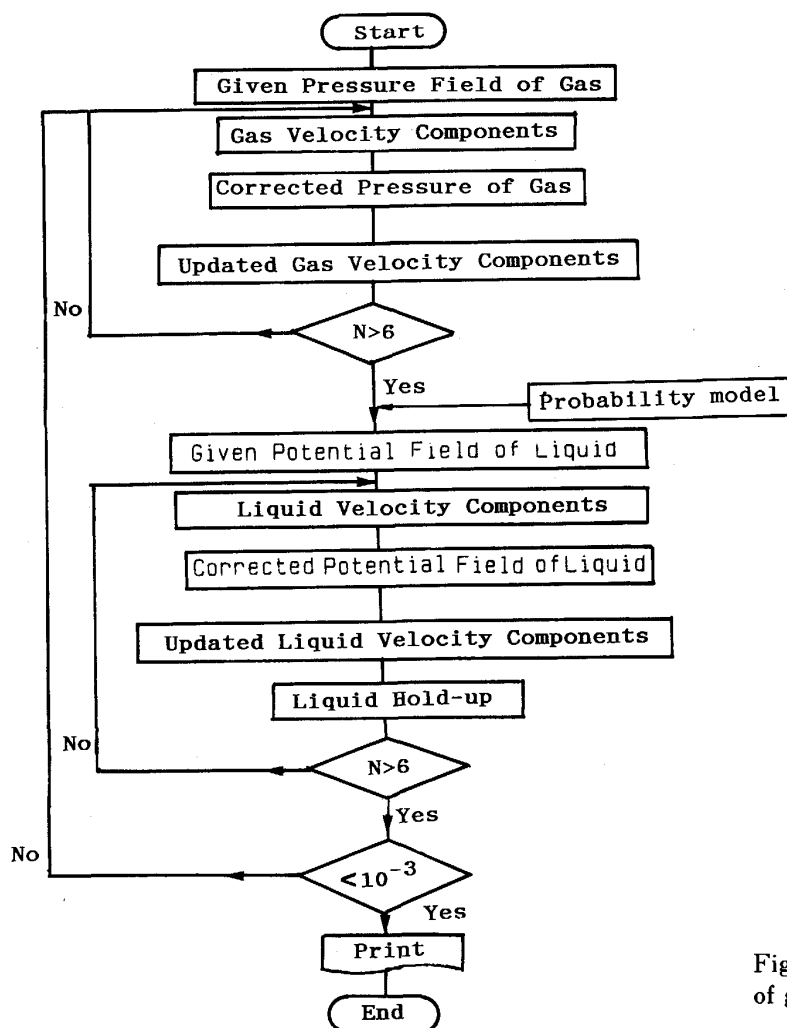


Fig. 3. Flowchart for the computation of gas and liquid flow.

Table 1. Conditions for the simulation.

Voidage (-)	0.37
Shape factor (-)	0.88
Viscosity of gas (kg/m·s)	1.66×10^{-5}
Surface tension (N/m)	0.0732
Contact angle (rad)	0.82
Viscosity of water (kg/m·s)	0.001
Density of water (kg/m ³)	1000

を解析した後、まず、確率モデル⁴⁾で液体の流れ領域を求め、その領域内で連続体モデル²⁾³⁾を適用し、液体の流速ベクトルを求めた。

確率モデル⁴⁾による液の流れ領域のシミュレーションにおいては、まず、最初に対象とする領域のすべての格子点にガスの空塔速度の仮定値を与える。この値を使ってガス流れを解析し、速度ベクトルを求める。次に、液の供給源となる格子点に与えられた液体流量からその格子点上の液体の空塔速度、ホールドアップを計算する。次に、ガスの実流速、移動確率 p 、乱流拡散率などを計算し、4点分配のメカニズムにより、一段下の格子点に液を分配する。各段のすべての格子点についてこれら

の計算を繰り返すことにより、全領域における液体流量分布を得ることができる。ガス流れの解析には差分SIMPLE法⁷⁾が用いられているが、差分メッシュの構造はフローネットワークの構造と異なっており、フローネットワーク上のメッシュにおけるガス流速などの変数は、差分メッシュ上の値を使って補間法で求めた。

ガスおよび液体、それぞれに対し各メッシュにおける質量流速 $\text{div}(\rho V)$ の残差の絶対値を合計した量の充填層に入ってくる量に対する比、および各方向における運動量保存式の残差値を合計した値の充填層に入ってくる運動量に対する比の大きいほうが $e (= 0.001)$ 以内になった時収束したと見なす。

数値解析の境界条件は Fig. 4 に示している。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。

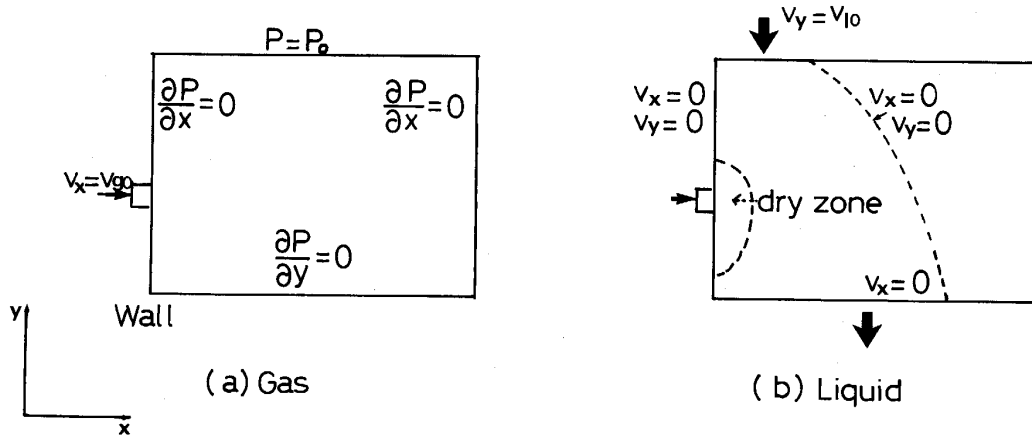


Fig. 4. Boundary conditions for the computation of gas and liquid flow.

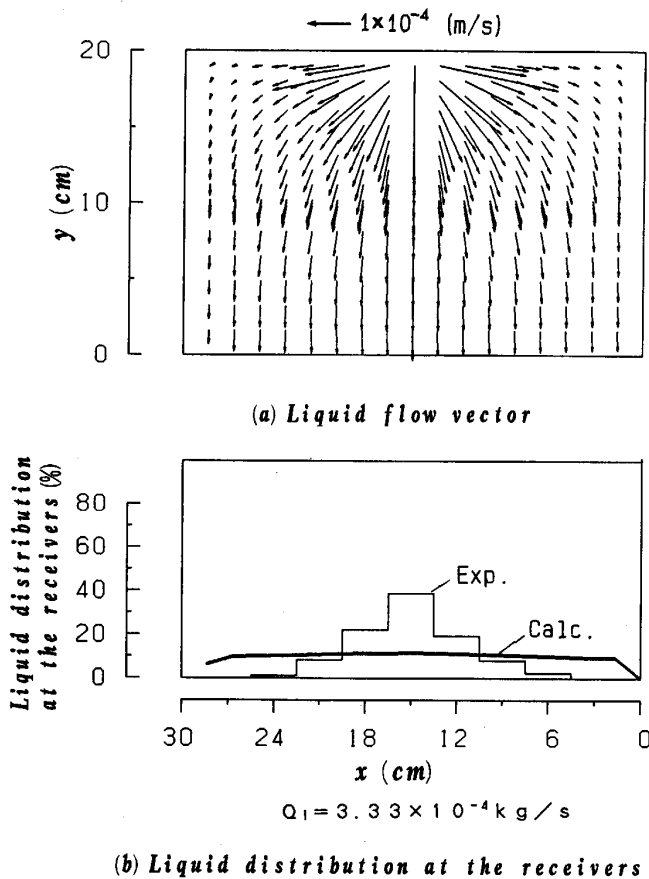


Fig. 5. Computed liquid flow vector by the continuous model and liquid distribution at receivers.

5. 実験ならびに数値解析の結果

5.1 連続体モデルとの比較

Fig. 5 にガスを流さず層頂中心部から流量 $3.33 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ の水を流した場合の数値解析および実験の結果を示した。液体の流れ領域を指定しない従来の連続体モデル²⁾³⁾による計算結果は、流体が充填層全体に広が

りながら流下していることを示している。しかし、実験結果によると水の流れ領域が存在している。また、受水部における水流量分布の計算値も実験値とは異なる分布を示している。連続体モデル²⁾³⁾による計算結果は、受水部の水流量がほぼ均一に分布しているのに対し、同じ条件下で確率モデル⁴⁾によって求めた結果は、Fig. 6 (a) からわかるように頂部から供給された液が充填層を流下するにしたがって流れ領域の幅が広がる様子を示した。液体の流れ領域および受水部の水流量分布の計算値は実験値とよく一致している。したがって、液流量が少なく不連続相として流下する場合には完全に連続体であると仮定することに無理があると考えられる。

5.2 液体流量の影響

Fig. 6 (a) と Fig. 6 (b) は、ガスを流さず層頂中心部から流量がそれぞれ $3.33 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, $8.33 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ の水を流した場合における流体の流れ領域および受水部における流量分布の実験値と確率モデル⁴⁾による解析結果を示している。供給した液体が充填層を流下するにしたがって流れ領域が広がる様子を示している。Fig. 6 (b) に示すように水の流量が多くなると液相が連続体に近くなり、確率モデル⁴⁾による液の流れ領域の計算結果は実験値との差が大きくなっている。一般に高炉内の融体の量はそれほど多くないので確率モデル⁴⁾が十分適用できると考えられる。また、二つの計算結果の比較から液体流量の変化は、流れ領域の広がり空間には影響しないことがわかる。

5.3 充填層内の気液向流流れ

N_2 ガスを流量 $G_g = 3 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{s}$ で導入し、壁から 20 mm 離れた層頂から流量 $G_l = 3.33 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ の水を供給した場合について、連続体モデル²⁾³⁾による解析結果を Fig. 7 に示した。液体が全充填層に広がり流下していることがわかる。受水部における水の流れに

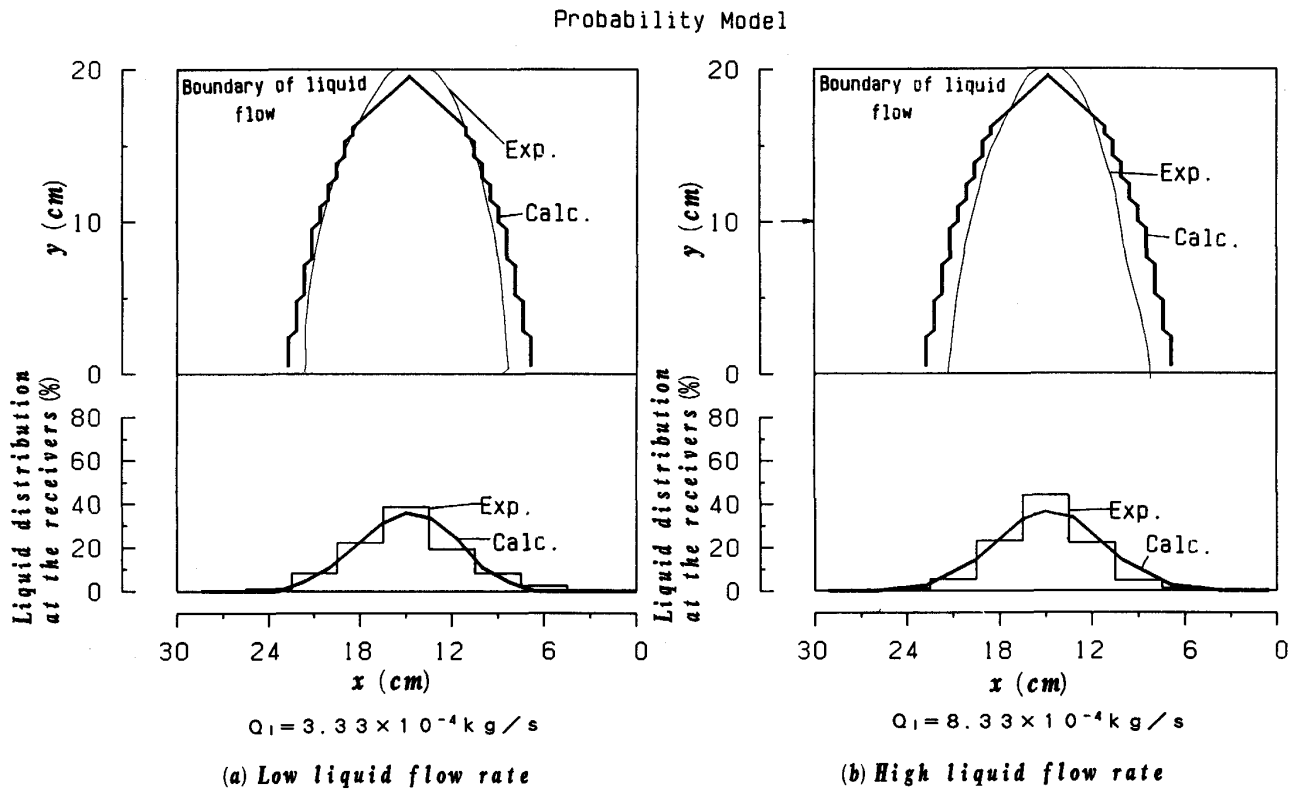


Fig. 6. Comparison of measured liquid flow distribution with computed one by the probability model.

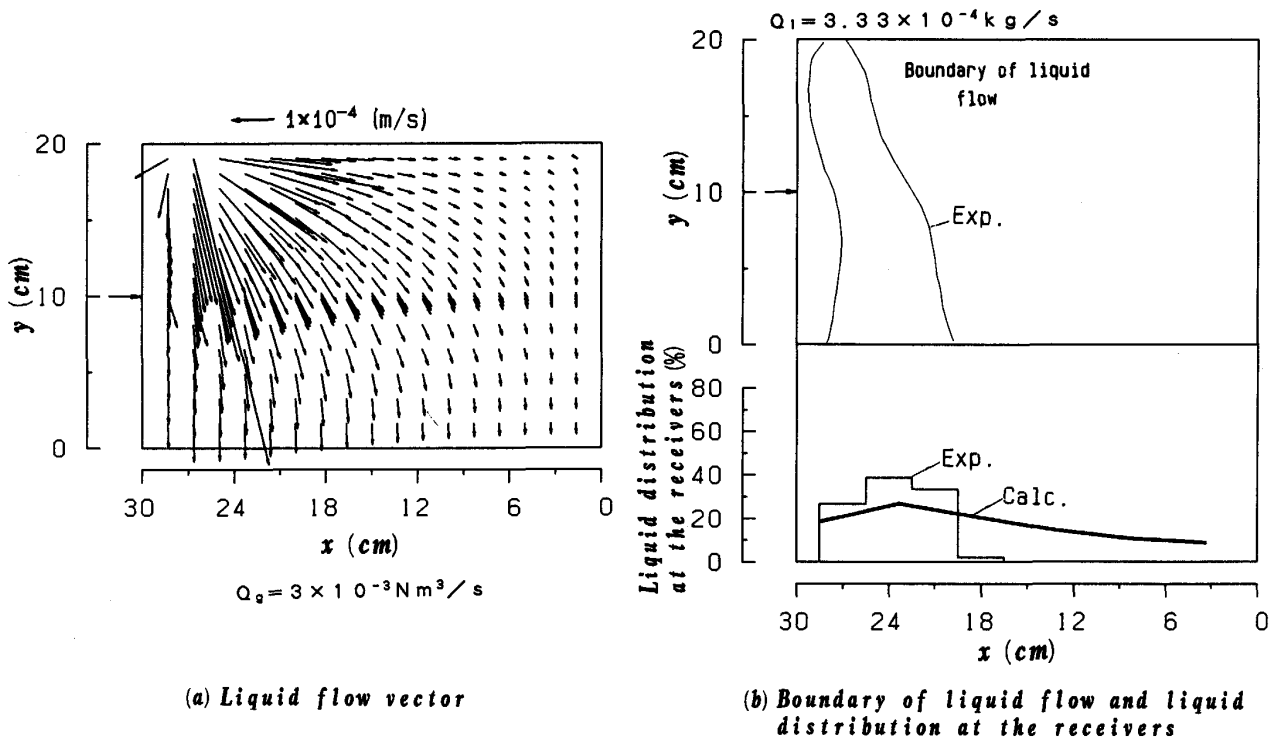


Fig. 7. Comparison of measured liquid flow distribution with computed one by the continuous model.

については計算値は実験値とくらべ分布の幅が広がっている。したがって、連続体モデル²⁾³⁾のみによる計算結果は実測値を十分に説明できるとはいえない。一方、連

続体モデル²⁾³⁾と確率モデル⁴⁾を併用し、液体流れの領域を確率モデル⁴⁾によって定め、ガス、液体の流れを解析した結果をそれぞれ Fig. 8~Fig. 10 に示した。Fig.

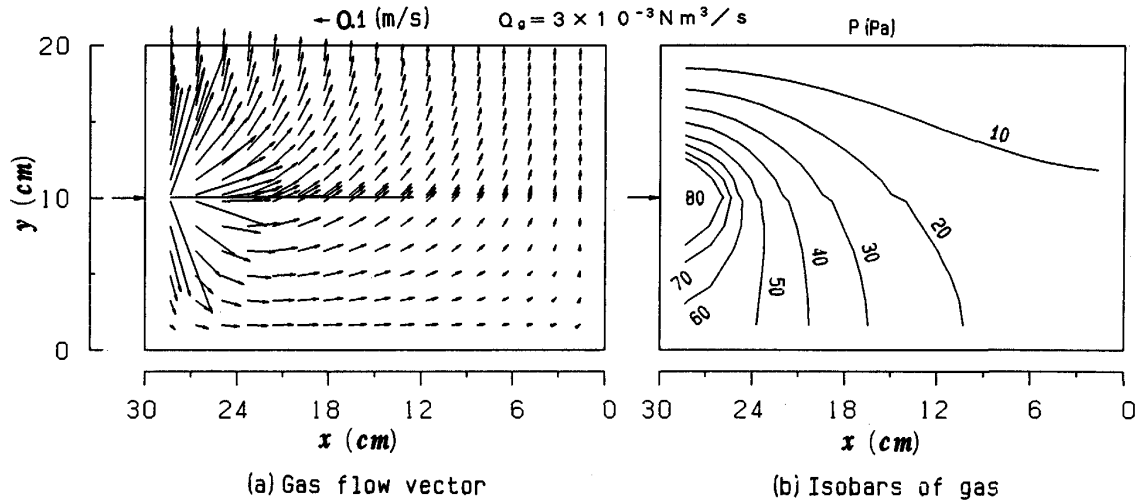


Fig. 8. Computed results of the gas flow.

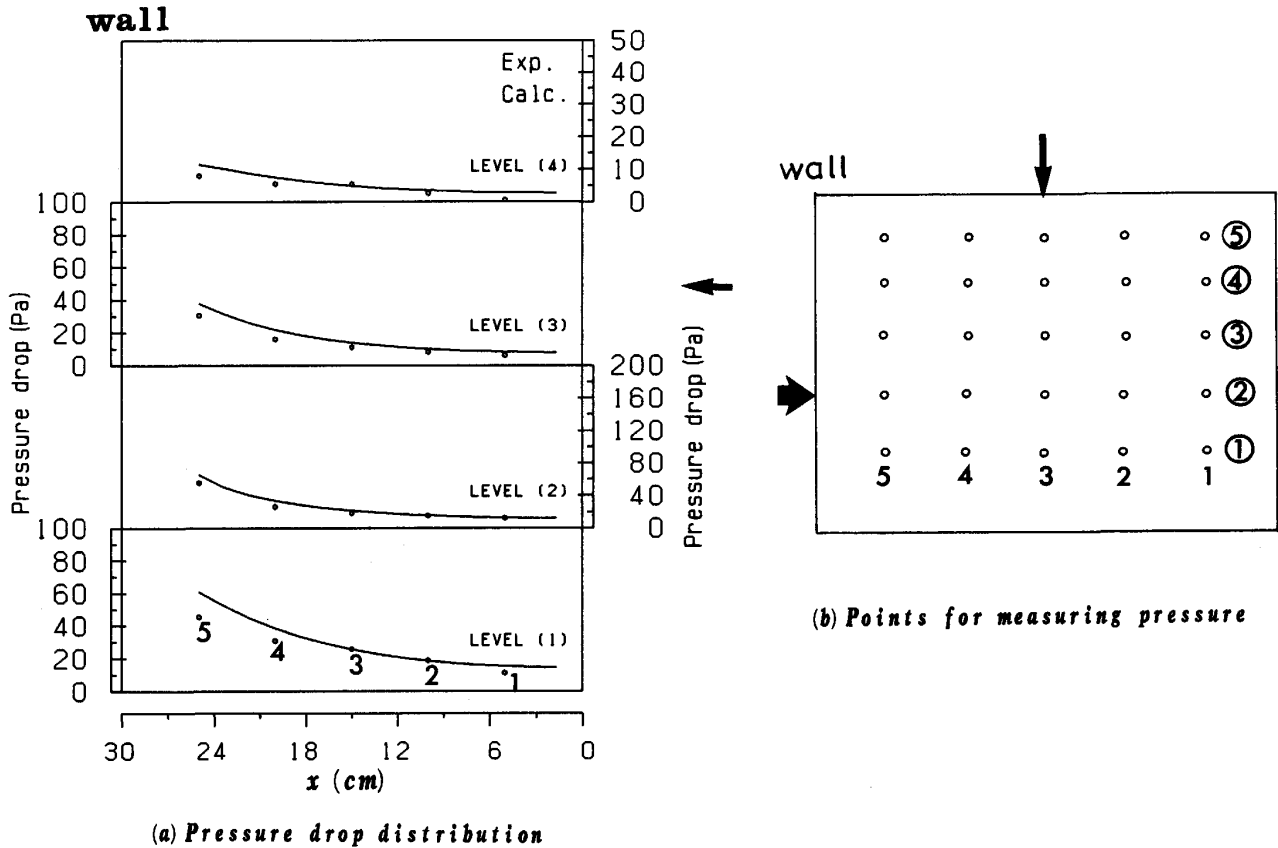


Fig. 9. Comparison of computed results with observed ones for pressure drop distribution.

8 からガスが横から吹き込まれる場合には、ガスは充填層壁近傍で多く流れていることがわかる。また、Fig. 9 に示すように圧力分布の計算値は実験値とよく一致している。Fig. 10 に液流れの実験とモデルによる計算結果の比較を示したが、インクで着色した水を使って求めた流れ領域、受水部における流量分布とともに、実測値は計算値とよく一致していることがわかる。液体の流速ベク

トルも推算した。ガスの半径方向流速の影響で、ガス導入口近傍にドライゾーンが存在することが数学的モデルによって表現されている。

6. 結 言

高炉内の融体流れの数学的モデルを開発するため、2次元充填層内気液向流流れに関する新しい解析方法を提

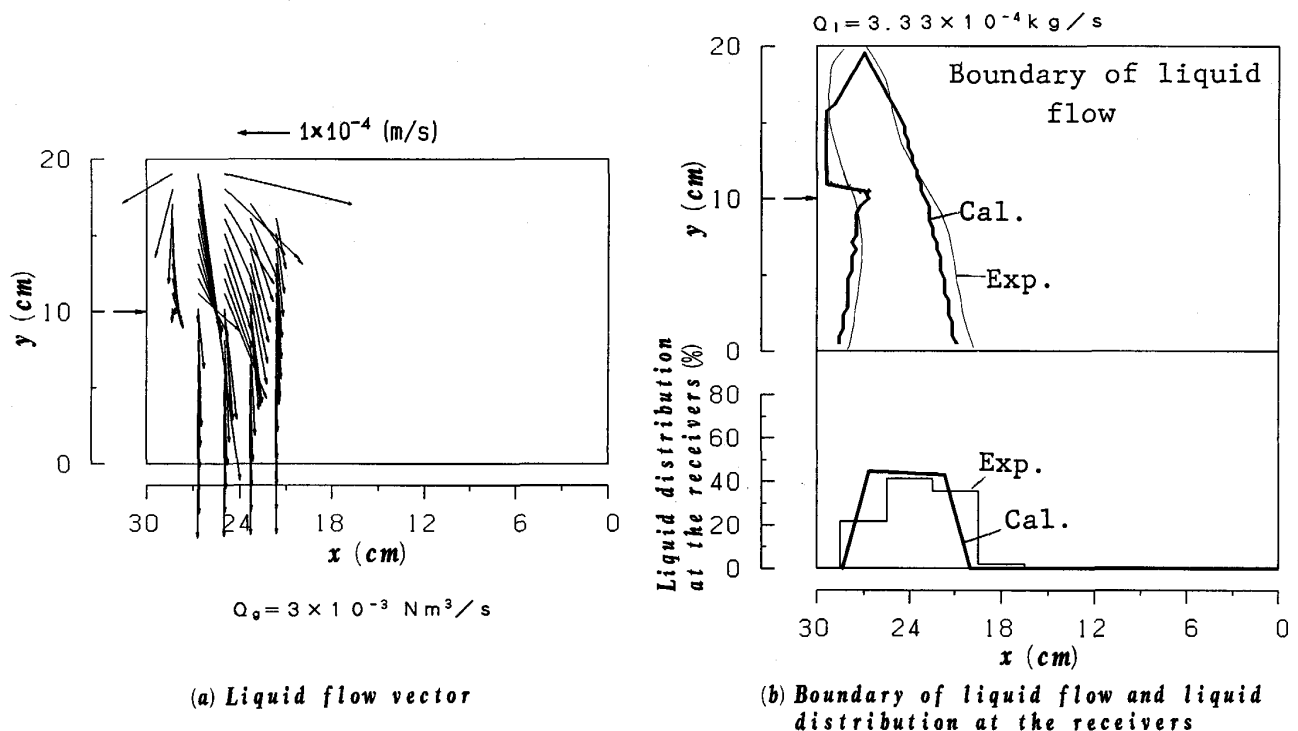


Fig. 10. Comparison of measured liquid flow distribution with computed one by the probability-continuous model.

出した。本研究結果によると液体流量が小さい場合、従来よく行われた不連続に分布している液体を連続体と仮定することには問題があることがわかった。本報で示した方法は、確率モデル⁴⁾によって液体の流れ領域を定め、この領域内で連続体モデル²⁾³⁾を使い液体の流れ場を解析するものである。この方法を用い、2次元一般座標系による充填層内気液向流流れのシミュレーションを行った。計算値は実験結果とよく一致し、この数値解法の妥当性が証明された。また、従来では得られなかった液体のドライゾーンも求めることができた。今後、この方法を高炉内融体流れの解析に適用する予定である。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費(平成元年度一般研究(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

d_l : 液滴径 (m)
 d_p : 粒子径 (m)
 f_3 : Darcy 式の粘性係数 ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 G : 質量流速 ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
 h_d : 動的ホールドアップ ($\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ bed}$)
 h_s : 静的ホールドアップ ($\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ bed}$)
 h_t : トータルホールドアップ ($\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ bed}$)
 p : 確率 (-)
 P : 圧力 (Pa)

r : 半径方向距離 (m)
 S : ガスと液の摩擦抵抗 (1/s)
 v, v_r : 空塔と実速度 (m/s)
 V : 速度ベクトル (m/s)
 z : 縦方向距離 (m)
 α : 乱流拡散係数 (-)
 ϵ : 充填層の空間率 (-)
 θ : 固液の接触角 (rad)
 μ : 粘度 ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)
 ρ : 密度 (kg/m^3)
 σ : 表面張力 (N/m)
 ϕ : 粒子の形状係数 (-)
 ψ : 横方向とガス流れ方向の角度 (rad)
 下付き
 g : ガス
 l : 液体

文 献

- 1) 天辰正義, 村上敬司, 相馬胤和: 鉄と鋼, **70** (1984), S772
- 2) J. SZEKELY and Y. KAJIWARA: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **19** (1979), p. 76
- 3) 杉山 喬, 中川朝之, 芝池秀治, 小田 豊: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2044
- 4) 大野陽太郎, M. SCHNEIDER: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 1923
- 5) L. SCHILLER and N. NAUMANN: VDIZ, **77** (1933), p. 318
- 6) 福武 剛, V. RAJAKUMAR: 鉄と鋼, **66** (1937), p. 1937
- 7) S. V. PATANKAR: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (1980), p. 126 [Hemisphere]