

二次元充填層内における液の滴下流れにおよぼす水平ガス流れの影響

大野 陽太郎*・Michel SCHNEIDER*²

Effect of Horizontal Gas Flow on Liquid Dropping Flow in Two-dimensional Packed Bed

Yotaro OHNO and Michel SCHNEIDER

Synopsis:

The effect of horizontal gas flow on liquid dropping flow in the two-dimensional packed bed was studied through cold model experiments. Liquid flow region enlarged and moved in the direction of the gas flow during its descent. Both displacement and dispersion of the liquid flow augmented with increase of gas flow rate and liquid flow rate.

A mathematical model of the liquid dropping flow was developed, in which the packed bed is simulated with a flow network whose unit mesh size corresponds to a particle diameter. Relations of superficial velocity of gas and liquid to transit probability and turbulent diffusion ratio of liquid drops which predominate their transit paths were determined on the basis of the experimental results.

The results of the mathematical simulation were in good agreement with the experimental results.

Key words: liquid flow; packed bed; two-dimension; liquid drop; dispersion; displacement; mathematical model; model experiment; probability.

1. 緒 言

高炉下部の溶融帯下面を発生源とし、滴下帯を滴下する鉄鉄、スラグの流れはガスの通気性、伝熱、反応に大きな影響を与える。また羽口近傍のようにガス流速の大きい所では、液がガス流れの抗力によりおしのけられて流入しないドライゾーンが生成することが、モデル実験¹⁾²⁾、および、実炉における炉芯ゾンデによる測定³⁾により明らかにされている。

液とガスが断面内で均一に分布している場合については、液体のホールドアップ、ガス相の圧力損失、フラッキング現象等が詳細に研究されているが⁴⁾、液の発生源が分布したり、液の滴下過程で、ガス流れの影響を受けて滴下経路が水平方向に偏位するような場合については、ほとんど研究されていない^{5)~7)}。

二次元充填層内の滴下流れについて、液相が連続であるときに成り立つ Darcy 式を近似的に用い、ガス流れとの相互作用を考慮して解析している例⁸⁾⁹⁾がある。一方、JAMESON¹⁰⁾、天辰ら¹¹⁾は、滴下する液を不連続相ととらえ、離散的な手法により液流れを解析している。

本報告では、二次元の充填層を用い、ガスが水平方向

にほぼ均一に流れている場に、液を滴下させた場合の液の広がりや偏位について数学モデルを展開するとともに、数学モデル中の未定係数の決定とその妥当性の確認のために行った模型実験の結果と実験系以外への適用例について報告する。

2. 充填層内を滴下する液流れの数学モデル

充填層を滴下する液流れの特徴として次の3点が上げられる。

1) 液相の不連続性

充填層内のガス流れや、土中の水の浸透流の場合には、流体は連続であるが、滴下流れの場合には、液相は不連続である。充填層を流下する液の構造について、CHARPENTIERら¹²⁾は、膜、条、滴の3成分系からなるモデルで特徴づけた。液の充填粒子表面に対する濡れ性と液流量により、支配的な成分が変化するが、濡れにくい系、低流量の場合では、主に滴と条の状態にあるとしている。

2) 自由界面の存在

充填層内部に、液流れの境界が存在する。

3) 液流れの分散と偏位

液流れは、滴下の過程で、粒子の存在により広がり、

昭和54年10月本会講演大会にて一部発表 昭和62年11月4日受付 (Received Nov. 4, 1987)

* NKK 鉄鋼研究所 (Steel Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*² IRSID-Maizières

ガス流れの水平方向成分が大きいと、その方向に流れが偏位していく。

この数学モデルの目的は、このような液流れの定量的取扱いを可能とすることである。

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と考えると、二次元の充填層における液の滴下の様子は、模式的に Fig. 1 のように示される。

格子点に集中化された流量 U と空塔速度 u_i の間には、次式が成り立つ。

$$U = u_i \cdot \Delta x \cdot W \dots\dots\dots (1)$$

U : 格子点を通過する流量 [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{point}$]

u_i : 対応する空塔速度 [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$]

Δx : 格子点の水平方向の間隔 [m]

W : 二次元充填層の厚さ [m]

以下では、取扱いを簡単にするため液はある大きさの液滴の集まりと考える。格子点 (i, j) にある液滴が一段 Δy 降下するとき、近接する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。ガス流れから液滴への抗力によりきまる移動確率 P の値は、ガス流れの無い場合は $1/2$ であるが、ガス流速が増加すると増大する。分配比が1を超えることは不合理であるので、一般に、 $M+1 > P > M$ の場合 (M は、 P の整数部)、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。この2点に分配された液の一部が、ガス流速の局所的乱れにより、同時に、上下流の隣接する点に再分配されるとする。

再分配される比率 (乱流拡散率) を α とすると、以上の4点への分配比 $P_1 \sim P_4$ は次のように表される。

点 $(i+2M-3, j+1)$:

$$P_1 = \frac{1}{2} \alpha (M+1-P)$$

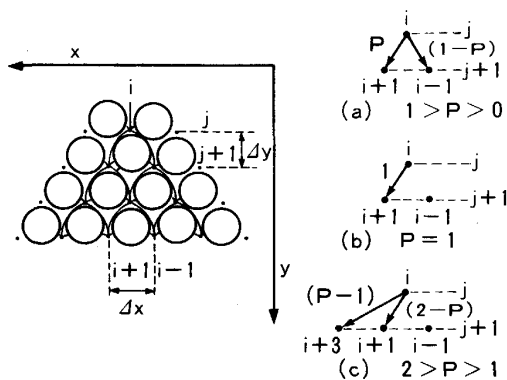


Fig. 1. Flow network and dispersion mechanism as a function of transit probability P for liquid dropping flow in packed bed.

点 $(i+2M-1, j+1)$:

$$P_2 = (1-\alpha)(M+1-P)$$

$$+ \frac{1}{2} \alpha (P-M)$$

点 $(i+2M+1, j+1)$:

$$P_3 = (1-\alpha)(P-M)$$

$$+ \frac{1}{2} \alpha (M+1-P)$$

点 $(i+2M+3, j+1)$:

$$P_4 = \frac{1}{2} \alpha (P-M)$$

..... (2)

この分配過程をくりかえして、高さ H を降下した位置における液流量分布の形は、パラメーター P, α の値が一定とすると二項分布となり、その平均値 X , 分散 V は、次式により計算される¹³⁾。

$$X = n\Delta X(P-1/2) \dots\dots\dots (3)$$

$$V = n\Delta X^2 \{1/4 - (P-M-1/2)^2 + \alpha\} \dots (4)$$

$$n: \text{段数 } n = H / \Delta y \dots\dots\dots (5)$$

次に、移動確率 P と、ガス、液流れの空塔速度 u_g, u_l の関係を導く。粒子間の間隙を滴下する液滴に働くガス流れからの抗力は、ガスの実流速 u_{gr} により変化すると考えられる。 u_{gr} は、 u_g と次式の関係にあるとする。

$$u_{gr} = u_g / (\epsilon - H_t - f) \dots\dots\dots (6)$$

ϵ : 乾燥状態の空隙率

全ホールドアップ H_t は、静的ホールドアップ H_s , 動的ホールドアップ H_d からなり、その推算には、福武ら⁴⁾の式を用いる。よども係数 f は、HUTTON ら¹⁴⁾が導入したもので、ガス流れに対してよどんでいる部分の体積比率を示しており、 $f=0.2$ が適当とされている。液の空塔速度 u_l は、動的ホールドアップ H_d を変化させることを通して、ガスの実流速に影響すると考える。

フローネットワークの単位メッシュの高さ Δy を液滴が降下する間の水平方向の偏位 x_0 とメッシュの大きさ Δx の相対偏位 $x_0/\Delta x$ が移動確率 P による偏位と等しいとする。

直径 d_g の液滴の二次元運動について、次の仮定をおくと、(7), (8)式が成り立つ。

(1) ガスの浮力は、液とガスの密度の比が大きいため無視できる。

(2) 液滴の運動速度は、ガス流れの実流速に比べ小さいので、ガス流れからの抗力項において、液滴の速度は、無視できる。

(3) 液滴は、初速はゼロで、運動を始め、高さ Δy を降下した時、下段の粒子表面に衝突して運動エネルギーを失う。

$$\rho_l \left(\frac{\pi}{6} d_g^3 \right) \frac{d^2 x}{dt^2} = C_D \left(\frac{\pi}{4} d_g^2 \right) \left(\frac{1}{2} \rho_g u_{gr}^2 \right) \cos \varphi \quad (7)$$

$$\rho_l \left(\frac{\pi}{6} d_g^3 \right) \frac{d^2 y}{dt^2} = \rho_l \left(\frac{\pi}{6} d_g^3 \right) g - C_D \left(\frac{\pi}{4} d_g^2 \right) \left(\frac{1}{2} \rho_g u_{gr}^2 \right) \sin \varphi \quad (8)$$

C_D : 液滴の抵抗係数, φ : x 軸とガス流れの方向の角度, ρ_g, ρ_l : ガス, 液の密度

(7), (8) 式を, 境界条件, $t=0$ で, $x=0, y=0, dx/dt=0, dy/dt=0$ で解き, $y=\Delta y$ における x の値 x_0 , その間の平均実降下速度 u_{lr} を求める.

$$x_0 = \Delta y F \cos \varphi / (1 - F \sin \varphi) \quad (9)$$

$$F = \frac{3}{4} C_D \frac{\Delta x}{d_g} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \left(\frac{u_{gr}^2}{g \Delta x} \right) \quad (10)$$

$$u_{lr} = \sqrt{(1 - F \sin \varphi) g \Delta y / 2} \quad (11)$$

ここで, (3) 式において, $n=1, X=x_0$ とすると

$$\frac{x_0}{\Delta x} = \left(P - \frac{1}{2} \right) \quad (12)$$

(9), (12) 式から移動確率 P を求める一般式が得られる.

$$\left(P - \frac{1}{2} \right) = \frac{\Delta y}{\Delta x} \frac{F \cos \varphi}{1 - F \sin \varphi} \quad (13)$$

3. 二次元平板模型実験

3.1 実験方法

実験装置の概念図を, Fig. 2 に示す. 測定部は透明プラスチック製で, 高さ 54 cm, 長さ 100 cm, 内側の幅が 5 cm であり, 傾動できるようになっている. 片側の壁面には, 162 (9×18) 個の圧力分布測定孔がある. 液供給部は, 20 個の箱に分割されており, 下面から均一に給水されるように, 箱の底部は, 多孔板 (2 mmφ の孔が 20 個 (4×5)) となつている. 受水部も, 20 個の箱に分割されており, 箱の上面には粒子が入らないように金網が設置されている.

充填粒子は, 10 mmφ のガラス球である. 水の供給量 L は, 5~50 l/h, 空気流量 G は, 0~100 Nm³/h である. 液の流れは, 粒子の初めの表面状態 (濡れているか, 乾いているか) によつて異なる. この影響を除くために, 液の拡がる可能性のある領域を, 複数個の給水箱から大流量で, 水を流下させ, (5~10 min), 十分濡らす. 所定の給水箱に供給する水流量と, 空気流量を, 所定の値に調節した後, 定常状態に達したら, 受水部に流入する水流量分布を測定する. 受水箱の水位をある範囲に保つため, スクリューコックで, 常に調節し, 排水量と時間から, 流量を計算する. 同時に圧力分布を測定する.

受水部における流量分布から, 平均値 X と, 分散 V を計算する. 本来の給水系とは別に, 着色水 (20 l の水に, 5 g のメチルバイオレットを溶かした.) を定量ポンプで, 給水箱に供給し, 流れを可視化し写真撮影した.

3.2 実験結果

3.2.1 粒子の存在による液流れの分散

Fig. 3 (a) は, ガス流れの無い条件で上部より供給した液が粒子層を流下するにしたがつて広がる様子を示

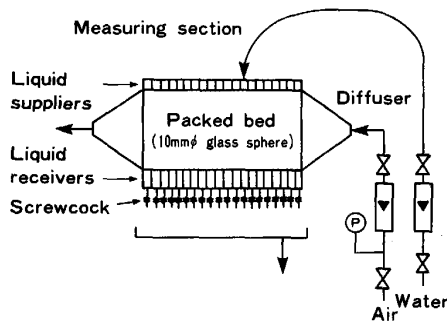


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

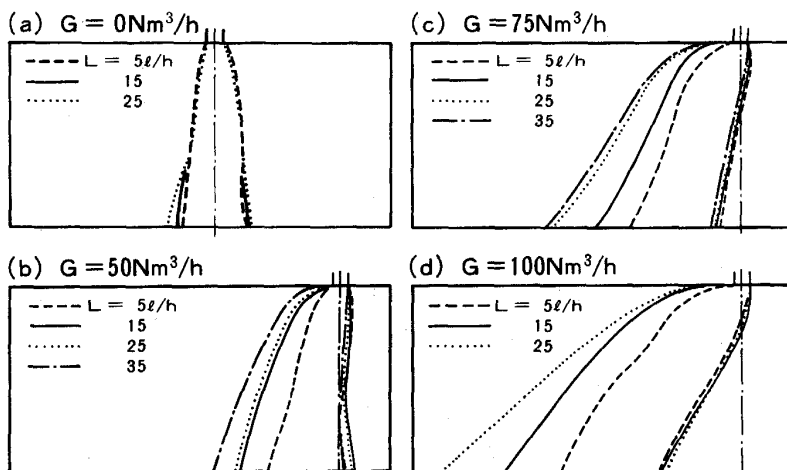


Fig. 3. Boundary line of liquid dropping flow region in packed bed.

している。流れの境界線は、給水部に近い上部では、幾分大きく拡がっているが、下部における拡がりには少ない。液流量を変えても、流れの境界は、ほとんど変化していない。

Fig. 10 に、下端の受水部における流量分布の一例を示す。分布は、ほぼ対称である。液流量分布から計算した平均値、分散をおのおの Fig. 4, Fig. 5 に示す。多少のばらつきはあるものの、平均値は予想されるようにゼロになっている。分散は、平均値よりばらつきが大きい。液流量によらず、ほぼ一定の傾向を示しており、全体の平均は、0.84 である。この分散の液流量に対する独立性は、ガス流れが存在しない場合には、分散のメ

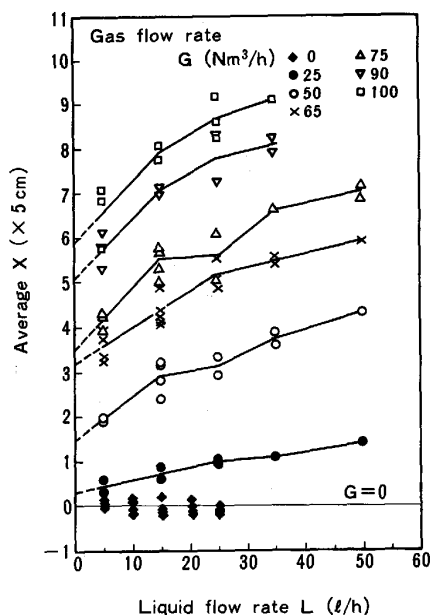


Fig. 4. Average as a function of liquid and gas flow rate.

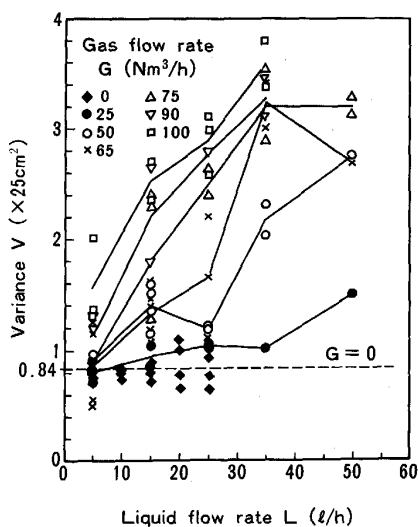


Fig. 5. Variance as a function of liquid and gas flow rate.

カニズムが充填層の層構造にあるので、その間隙を滴下する液流れの構造も、ある限界流量に達するまでは変化しないことを意味している。しかし、供給液流量が過大となり、ホールドアップが増大し、液相が連続となるような場合には、適合しないと考えられる。

3.2.2 ガスの水平方向の流れにより引き起こされる液流れの偏位と分散

Fig. 3 (b), (c), (d) は、液流れの境界線が、ガス及び液流量とともに、変化する様子を示している。ガス、液流量ともに、大きい方が、流れの偏位、分散が大きいことがわかる。また、ガス流の上流側では、液流の境界は、供給液流量によらず、ほぼ一定となっている。これは、局所的に液流量が大きく液のホールドアップの大きい所では、ガスの実流速が大きく、液流れの偏位も大きいので、液流量分布が、ガス流れの下流側にゆがみ、上流側の境界付近では、なだらかに、すそを引く形になり液のホールドアップが、ほぼ一定になるためと考えられる。

このことは、Fig. 11 に示すように、下部の受水部における液の分布にも現れている。

Fig. 4, 5 に、受水部における分布の平均値、分散の値のガス、液流量による変化を示す。平均値、分散ともに、ガス、液流量が大きいほど、大きくなっている。

ガスの空塔速度の高さ方向の均一性を確かめるために、高ガス、液流量 ($G=100 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $L=25 \text{ l/h}$) の条件について、2章で述べた数学モデルと充填層ガス流れモデル¹⁵⁾ を組み合わせて、ガス流れ、滴下流れ分布を計算した。圧力分布は、測定と同様にほぼ高さ方向均一であり、流速ベクトルもほぼ水平である。液の滴下領域における水平方向のガス流速は、液の供給源に近く、滴下領域の幅のせまい上部でやや大きく、下部で小さいが、その差は、約 +5% ~ -4% であり、かつ、後述するように、数学モデルのパラメーター決定に使用するのは、 $L \rightarrow 0$ の極限であるので、ガス流速の差は無視できると考えられる。

4. 数学モデルのパラメーターの決定と適用

4.1 フローネットワークの単位メッシュの高さ Δy

ガス流れの無い条件であつても、降下にしたがつて流れが拡がっていくので、高さ H を降下した後の液流量分布の分散から、段数 n , Δy を求めることができる。模型実験の液の供給源は、ある幅を持ち点源でないので、(4)式をそのまま使うことはできない。そこで、2章で述べた数学モデルにより、ガス流れの無い条件 ($P=1/2$, $\alpha=0$) で、液流れのシミュレーションを行った。

滴下過程の各段ごとに、実験で得られる受水部の分布に対応する分布を求め、その分散を計算すると、Fig. 6が得られる。V=0.84に対応するnの値を求めると、n=68である。充填層の高さHは、54cmであるから、単位メッシュの高さΔyは、Δy=H/n=0.794cmとなる。単位メッシュの幅Δxが、粒子径(この場合、1cm)に等しいとすると、Δy/Δx=0.794となる。この比率は、充填層の構造に対応していると考えられる。球径粒子の最も密な充填構造である菱面格子配列について、Δy/Δxの値を求めると、0.816となり、本実験条件の値より大きい。粒径に対し、測定部の厚みは、5倍であり、壁の効果により、水平方向には粗に、垂直方向に密に充填されていることを示すと考えられる。

(4)式を利用するために、仮想的点源を求める。Fig. 6の直線部分を、分散の値がゼロになるまで延長すると、段数n'=84となる。(4)式において、段数nをn'でおきかえた次式により分散を計算することができる。

$$V = n' \Delta x^2 \{ 1/4 - (P - M - 1/2)^2 + \alpha \} \dots (14)$$

仮想的点源からn'段降下後の平均値をX'とすると、X=(n/n')X'となるので、平均値については、(3)式を使うことができる。

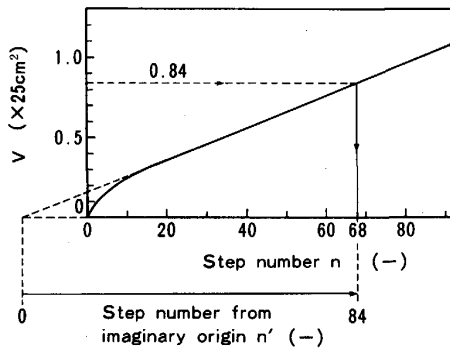


Fig. 6. Change of variance as a function of step number.

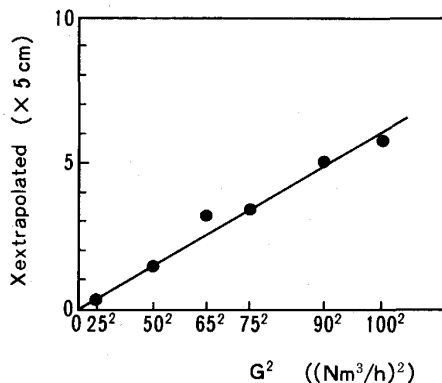


Fig. 7. Relation between extrapolated value (L=0) of X and G².

4.2 移動確率推算式中のパラメーター C_D · (d_g/Δx)

Fig. 3に示したような液の滴下領域においては、局部的に、液流量が変化し、液のホールドアップもそれに応じて変化していると考えられる。その結果、ガスの空塔速度が一定であつても、実流速は変化し、移動確率Pも一定ではない。そこで、滴下領域内でホールドアップが一定とみなされる液流量L→0の極限における平均値を求める。

Fig. 4上で、液流量L→0に外挿した値を求め、ガス流量の2乗G²に対してプロットすると、Fig. 7となり、原点を通る直線で回帰できることが分かる。Fig. 7から、

$$X = C_0 G^2 \quad (C_0 = 3.05 \times 10^{-5} \text{ m} / (\text{Nm}^3 / \text{h})^2) \dots (15)$$

L→0では、H_i→H_sなので、H_sを福武ら⁴⁾の式により計算する。ガラス粒子と水の接触角θ=60°、ε=0.4とすると、H_s=0.037となる。f=0.2とし、(6)式を利用し、Gを実ガス流速u_{gr}に換算すると(15)式は、

$$X = C u_{gr}^2 \dots (16)$$

$$(C = C_0 (0.54 \times 0.05 \times 3600)^2 (\epsilon - H_s - f)^2 = 7.66 \times 10^{-3} \text{ m} / (\text{Nm} / \text{s})^2)$$

ホールドアップ一定で、移動確率Pも一定と考えられるので、(3)式を使うことができる。また、この実験においては、ガスの流れ方向は水平なので、(13)式において、φ=0となる。(3)、(13)式から、

$$X = n \Delta x \left(P - \frac{1}{2} \right)$$

$$= n \Delta x \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot F = n \Delta y F \dots (17)$$

(10)、(16)、(17)式からρ_g=1.29 kg/m³とすると、

$$C_D \cdot (\Delta x / d_g) = 1.44$$

液滴の抵抗係数C_Dについては、気体中では、固体球と同等とされており、乱流域では、ほぼ0.44である¹⁶⁾。この値を使うと、単位メッシュと水滴の大きさの比は、d_g/Δx=0.31となり妥当な値となつている。

4.3 乱流拡散率αの推算式

まず第1近似として、移動確率Pが、流れ領域で一定であるとして求められた(3)式によりXをPに換算し、このPに対応する分散をプロットする(Fig. 8)。この近似による誤差は液流量が小さくなるにしたがい、減少するので、L→0の外挿値を求めるためには、許されると考えられる。Fig. 8には、(14)式(n'=84)において、α=0として計算した分散V₀も示してあるが、実験値より低くなつている。このV₀と実験値Vの差V_i(=V-V₀)と(P-1/2)を両対数紙上にプロットした

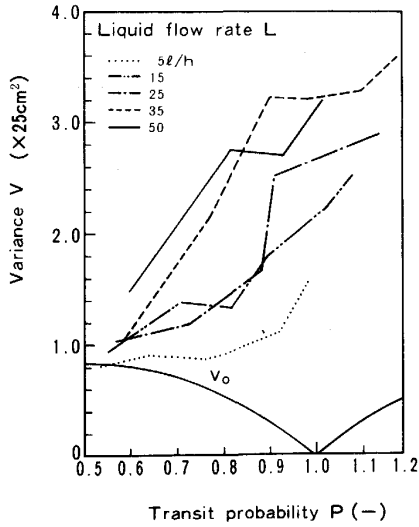


Fig. 8. Variance as a function of transit probability.

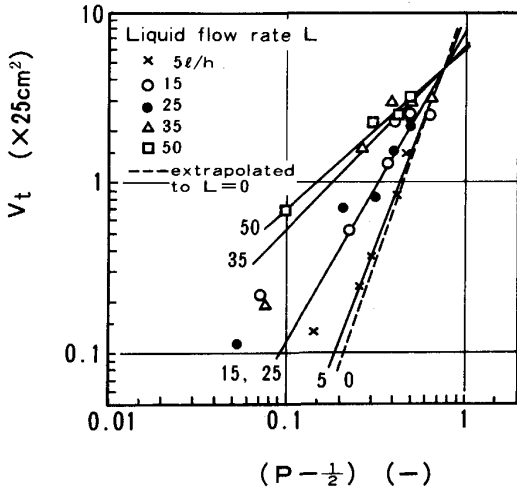


Fig. 9. Relation between V_t and $(P-1/2)$.

(Fig. 9). この Fig. 9 上で、ある液流量 L に対して、プロットした点は、ほぼ直線と見なせるので、次式で表現することができる。

$$V_t = K_d (P - 1/2)^h \dots\dots\dots (18)$$

各液流量に対して、係数 K_d , h を求め、 L に対してプロットし、 $L \rightarrow 0$ の外挿値を求めると、 $K_d = 2.73 \times 10^{-2}$, $h = 3$ が得られた。

(14), (18)式から、

$$\alpha = \frac{K_d}{n' \Delta x^2} \left(P - \frac{1}{2} \right)^h = 3.24 \left(P - \frac{1}{2} \right)^h \dots (19)$$

(19)式により、 P の値から α の値を計算することができるが、 P が過大であると、 α が 1 を超えることとなり、(2)式に示した分配メカニズムが不合理になる。

後述するシミュレーションの過程で、 $\alpha > 1$ となる場合は、 $\alpha = 1$ としたが、給水部に近いごく一部のみであり、

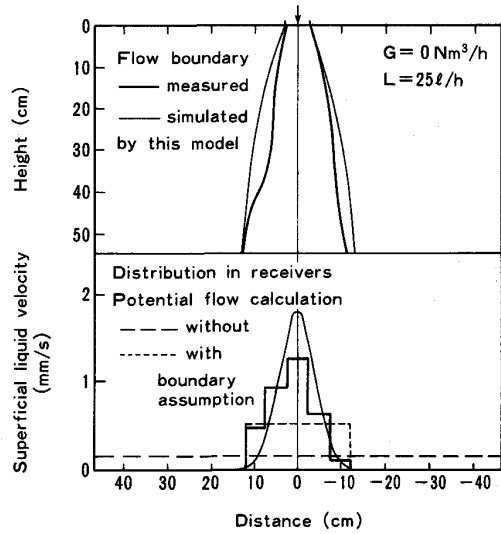


Fig. 10. A comparison of liquid distributions measured, calculated by this model, and calculated as potential flow with an application of DARCY's law.

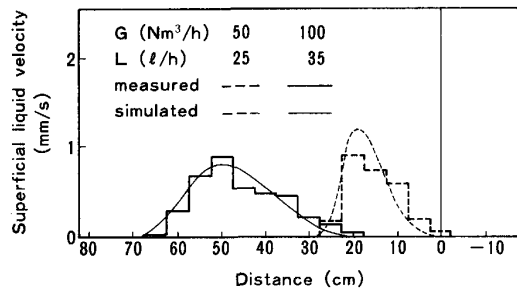


Fig. 11. Comparison of liquid flow distributions in the receivers measured and simulated.

ほとんどの領域では、 $\alpha < 1$ であつた。

4.4 滴下流れのシミュレーション

対象とする領域のすべての格子点にガスの空塔速度 u_g を与える。液の供給源となる格子点に与えられた液流量 U から液の空塔速度 u_l 、ホールドアップ H_i を計算する。つぎに、(6), (13), (19)式により、ガスの実流速 u_{gr} 、移動確率 P 、乱流拡散率 α を計算し、(2)式に示した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、これらの計算をくりかえすことにより、全領域における液流量分布を得ることができる。Fig. 10 は、ガス流れの無い条件における液流れ領域の境界線と受水部における液流速分布である。また、Fig. 11 は、ガス、液流量を変化させた場合の受水部における液流速分布であり、いずれも、実測値とかなりよく一致しているのがわかる。

実験を行つたすべての条件について、シミュレーションを行い、受水部における液流量分布を実験値と比較したところ、その平均値は、 $\pm 15\%$ 、分散は、 $\pm 30\%$ の

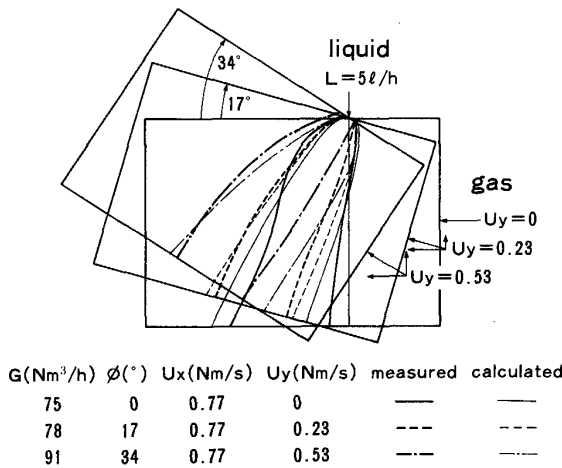


Fig. 12. Comparison of boundary line of liquid dropping flow in packed bed measured and simulated with regard to influence of vertical component of gas velocity.

範囲で一致した。

5. 考 察

5.1 連続体アプローチとの対比

Fig. 10 に示した例について、液を連続相と仮定し、DARCY の法則を応用する方法⁸⁾にしたがい計算を行った。

液流れの境界を与えないと、流れは液の流入口から充填層全体に拡がり、下端の受水部における分布は平坦なものになっている。そこで、本数学モデルにより得られた境界を、液流れの境界として与えて計算を行ったが、この場合も、流れは、やや中心部が速いものの実測の分布とは異なつた結果となつている。液のホールドアップの実測値をデータとして与えれば、実測値に近い計算結果を得ることは可能であるが⁹⁾、液流れの結果として定まるホールドアップを与えることは、数学モデルとしての予測性を持ちえないことになり不完全なものといわざるを得ない。液が不連続相として滴下する現象を連続体として近似することには無理があると考えられる。

5.2 垂直方向ガス流れの影響

移動確率 P を求める(13)式において、水平方向のガス流速成分が等しくても、垂直方向の成分があると、($\phi \neq 0$)、 P の値が変化し、液流れの水平方向の偏位も影響を受けると考えられる。そこで、実験装置本体を傾け、水平方向のガス流速成分が一定の条件で、上向きの流速成分を変化させる実験を行った。

Fig. 12 は、その結果の一例である。上向きの流速成分が大きくなると、液流れの偏位が大きくなつている。同図には、本数学モデルによる計算結果も示してあるが、

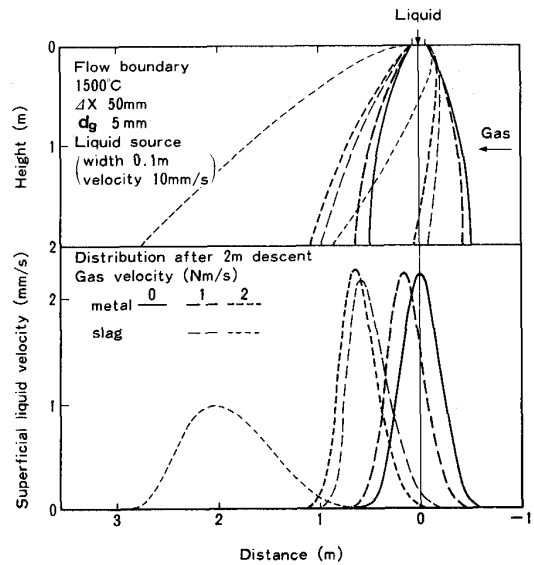


Fig. 13. Effect of lateral gas flow on metal and slag dropping flow in packed bed.

ほぼ合っている。なお、この計算では、ガス流速のホールドアップに対する影響は、無視できると仮定した。

この例から、液の滴下流れについて、ガス流れの水平方向成分だけでなく、垂直方向成分の影響も考慮する必要があることがわかる。

5.3 他の系への応用

本数学モデルを他の系へ応用するためには、4章で求めたパラメーターについて検討する必要がある。単位メッシュの形状に関して、 $\Delta y/\Delta x$ の値 0.794 は、壁効果を強く受けた二次元充填層の構造を反映しているので、適当ではない。均一球粒子の充填構造の例として、立方格子配列 (空隙率 $\epsilon=0.476$, $\Delta y/\Delta x=1.0$)、斜方格子配列 ($\epsilon=0.395$, $\Delta y/\Delta x=0.866$) がある。空隙率の値をめやすに、これらの中間の値 (例えば、 $\Delta y/\Delta x=0.9$) が使用できよう。

液滴径 d_g は、液の表面張力 σ と重力の影響を受けていると考えられる。4章で求めた滴径 3.1 mm から滴径基準のキャピラリー数 C_p を計算すると、 $C_p = \rho_l g d_g^2 / \sigma = 1.3$ となる。福武ら¹⁷⁾ は、多様な系についての実験結果から C_p の値を算出しているが、その値のほとんどは、0.4~2.6 の間に入っており、ここで求めた値 1.3 は、ほぼその中間にきている。

乱流拡散率 α の推算式については、今後の検証を必要とするが、他の系へも適用可能と仮定する。

応用例として、コークス充填層におけるメタルとスラグの滴下流れについて計算を行った。計算条件は、コークス粒径 $D_p=50$ mm, $\Delta x=D_p$, $\Delta y/\Delta x=0.9$, $\epsilon=0.4$, $f=0.2$, 温度 1500°C, コークスとメタル, スラグの接触

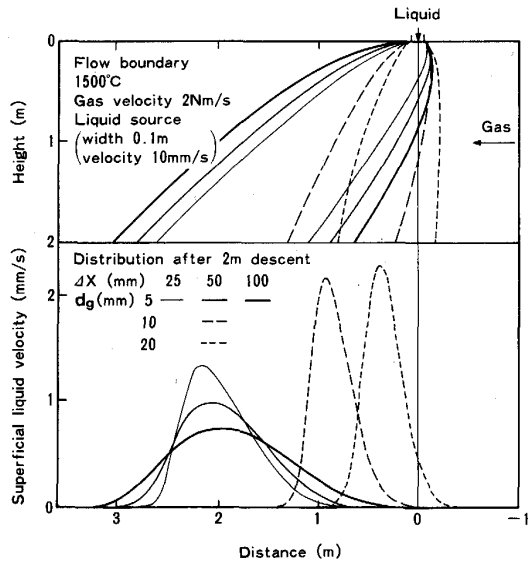


Fig. 14. Effect of ΔX and d_g on slag dropping flow in packed bed.

角 θ は、どちらも 90° 、液滴径については、 $C_p=1.3$ とすると、メタル、スラグのどちらも、 5 mm となる。計算結果を Fig. 13 に示すが、メタルに比べ、スラグがガス流れの影響を強く受けることがわかる。Fig. 14 に、 Δx , d_g のスラグ滴下流れにおよぼす影響を示す。液流れの偏位に、 Δx は影響しないが、 d_g の影響が大きいことがわかる。液滴径 d_g の的確な推定法は、今後の課題である。

6. 結 論

模型実験により、充填層内を滴下する液が、水平方向のガス流れにより影響される現象について、定量化を行った。液流れの偏位と拡がりはガス、液流量とともに増大した。これは、ガスの空塔速度が一定であっても、液流量とともに、液のホールドアップが増大し、ガスの実流速が大きくなるためである。

また、液流れをシミュレートできる離散的な滴下流れ数学モデルを展開した。

Fig. 1 に示すように、充填層を粒子の大きさに対応する単位メッシュからなるフローネットワークで表現す

る。

液は、1段降下する間に、層構造からくる分散、ガス流れからの抗力による偏位、ガス流れの乱れによる分散の作用を受けて、隣接する4点に、(2)式に示した分配比 $P_1 \sim P_4$ で分配される。移動確率 P と、液とガスの空塔速度、 u_l , u_g の関係は、(13)式で表される。乱流拡散率 α は、 P の関数(19)式で与えられる。(13), (19)式に含まれる係数の値は、模型実験の結果を基に決められた。数学モデルによるシミュレーションは、実験結果と、良い一致を示した。一般的な系に適用可能なように係数の値の簡単な吟味を行い、応用例を示したが、その妥当性については、今後、さらに検討することが必要と考える。

文 献

- 1) 鴨志田友男, 福島 勤, 安藤 達: 第87回日本鉄鋼協会討論会, 高炉燃焼帯の挙動 小講演論文集(1974), p. 12
- 2) 中込倫路, 桑野芳一, 館 充: 鉄と鋼, 61 (1975), S385
- 3) 望月志郎, 芦村敏克, 井上義弘: 鉄と鋼, 71 (1985), S63
- 4) 福武 剛, V. RAJAKUMAR: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1937
- 5) E. DUTKAI and E. RUCHKENSTEIN: Chem. Eng. Sci., 25 (1970), p. 483
- 6) J. SZEKELY and Y. KAJIWARA: Metall. Trans. B, 10 (1979), p. 447
- 7) 成田貴一, 前川昌大, 出口幹郎, 齊藤武文: 鉄と鋼, 61 (1975), S384
- 8) J. SZEKELY and Y. KAJIWARA: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 19 (1979), p. 76
- 9) 杉山 喬, 中川朝之, 芝池秀治, 小田 豊: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 2044
- 10) G. J. JAMESON: Trans. Instn. Chem. Engrs., 44 (1966), T. 198
- 11) 天辰正義, 村上敬司, 相馬胤和: 鉄と鋼, 70 (1984), S772
- 12) J. C. CHARPENTIER: Chimie et Industrie, 99 (1968), p. 803
- 13) 近藤次郎: 応用確率論 (1970), p. 347 [日科技連]
- 14) B. E. T. HUTTON, L. S. LEUNG, P. C. BROOKS and D. J. NICKLIN: Chem. Eng. Sci., 29 (1974), p. 493
- 15) 大野陽太郎, 田島 治: 化学工学協会第34年会前刷集(1974), p. 199
- 16) R. H. PERRY and C. H. CHILTON: Chemical Engineer's Handbook (1974), p. 5-61 [McGraw-Hill]
- 17) 福武 剛, 岡部俠児: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1947