

気泡噴流中における固-液間物質移動の コールドモデル実験

井口 学*・富田 祐志*²・中島 敬治*³・森田善一郎*

Cold Model Experiments on Mass Transfer from a Solid Body Immersed in Vertical Bubbling Jets

Manabu IGUCHI, Hiroshi TOMIDA, Keiji NAKAJIMA and Zen-ichiro MORITA

Synopsis :

As a fundamental study on the melting process of injected ore and coal powders in an inbath smelting reduction furnace, a cold model experiment was done to reveal the effects of gas flow rate and nozzle diameter on the mass transfer coefficient from a solid body immersed in a cylindrical bath with bottom gas blowing. The mass transfer coefficient was measured by means of an electro-chemical method. Spheres of three different diameters and a flat plate made of platinum were chosen as representative bodies. Since the turbulence intensity of liquid flow in the bath became very high due to gas blowing, a correlation for the mass transfer coefficient was proposed for each body as a function of turbulence intensity Tu in addition to usually used Reynolds and Schmidt numbers. The correlation can predict the heat transfer coefficient from solid bodies immersed in bubbling jet as well. Therefore, it can be said that an analogy between heat and mass transfer exists in bubbling jet, too. On the basis of the present experimental results, a correlation for the mass transfer from a circular cylinder was newly proposed. The present correlation was found to be useful for the prediction of the mass transfer from a circular cylinder.

Key words : steelmaking; injection; bubbling jet; mass transfer; electro-chemical method; inbath smelting reduction; water model experiment.

1. 緒 言

スクラップを用いる電気炉、転炉¹⁾、鉄鉱石や石炭の投入が行われる鉄浴式溶融還元炉^{2)~4)}などでは、ガス吹込み攪拌を伴う流れ場における固体の溶解挙動の把握が重要な研究課題となっている。この問題は気-液-固混相流の激しい乱流場における固-液間の熱伝達と物質移動を明らかにすることに帰着され、従来多くのモデル実験が行われている。熱伝達に関しては、Szekelyらが気泡噴流内に浸漬した水製の円柱の溶解挙動を調べ、平均ヌッセルト数 Nu に対する実験式をレイノルズ数と乱れ強さの関数として提案した⁵⁾。しかしレイノルズ数の評価に際し局所の平均速度を用いずに中心軸上の値を採用している点に問題があり、一般的でない。著者ら⁶⁾⁷⁾は水製の球と直方体を用いた熱伝達実験において平均速度と乱れ強さに局所の値を用いた Nu の推算式を提案し

た。ただし乱れ強さが約 50% 以下の場合に限られている。

物質移動に関しては、安息香酸製の円柱を用いた Mazumdar らの実験結果が報告されているが⁸⁾、推算式の精度に問題がある。なお Taniguchi ら⁹⁾はアルミニウム浴にアルミニウム球あるいは Al-Si 合金球を浸漬して気泡攪拌下の固-液間熱伝達と物質移動を測定したが、推算式を導くにあたり乱れの影響を考慮していない。また測定値と推算値の一致もあまりよくない。

本研究では気泡噴流内における固-液間の物質移動を、腐食防食工学の分野で広く用いられており精度的にも信頼性の高い電気化学的手法を用いてコールドモデルで測定した。乱れ強さが 100% を大きく超える場合についても物質移動係数を求め、推算式を提案するとともに、熱伝達の推算式と比較することにより物質移動との相似則を調べ、実操業に対する基礎資料を提供した。

平成 3 年 12 月 26 日受付 平成 4 年 9 月 4 日受理 (Received on Dec. 26, 1991; Accepted on Sep. 4, 1992)

* 大阪大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

*² 大阪大学大学院 (現: 日新製鋼(株))(Graduate School, Osaka University, Now Nisshin Steel Co., Ltd.)

*³ 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

2. 実 験

2.1 平板試験電極による物質移動係数の測定

2.1.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概要を示す。容器は内径が 200 mm, 高さが 400 mm のアクリル製パイプである。0.05 mol/l の H_2SO_4 水溶液に $FeSO_4$ を溶かし, 0.01 mol/l としたものを試験電解溶液とした。この溶液を浴深が 300 mm の高さまで満たした。なお容器は恒温槽によって囲まれており, 電解液は 298 ± 0.1 K の精度で温度制御されている。

本実験では吹込みガスに N_2 ガスを用いた。 N_2 ガスをマスフロー・コントローラーで流量制御したのち浴の底に取り付けた単孔ノズルより吹き込んだ。ノズル内径 d_n と吹込みガス流量 Q_g ならびに測定位置を Table 1 に示す。 z はノズル先端からの距離, Q_g は 298 K, 1 気圧における値である。

試験電極 (アノード) は $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ の白金平板で, 対極 (カソード) には直径 0.5 mm の白金線を用いた。なおフッ素樹脂テープで被覆したステン

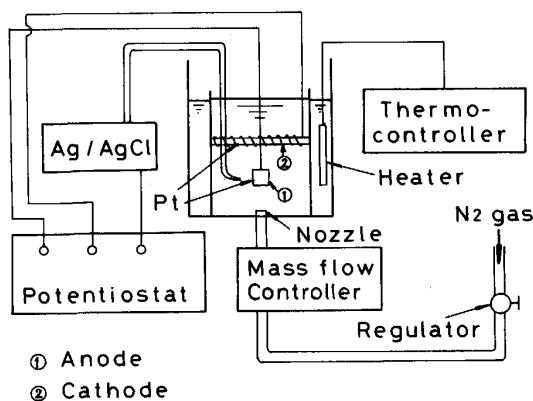


Fig. 1. Experimental apparatus for measuring mass transfer coefficient.

Table 1. Experimental conditions.

Run	d_n (mm)	Q_g (cm^3/s)
1	1	10.0
2		20.3
3		41.4
4		82.6
5		160.0
6	2	10.0
7		20.3
8		41.4
9		82.6
10		160.0
11	5	82.6

Measurement position

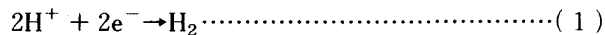
Axial : $z = 2, 10, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250 \text{ mm}$

Radial : $r = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 \text{ mm}$

レス製のリングに白金線をコイル状に密に巻き付けて試験電極における反応電気量と等しい電気量を発生させるに十分な表面積を得ている。

2.1.2 物質移動係数の測定原理と実験方法

上記電解溶液中には反応イオンとして Fe^{2+} , H^+ , OH^- が存在し, 次のような反応が起こる。



アノード分極曲線の測定例を Fig. 2 に示す。測定された電流値は, それぞれの反応に対する電流値の和として与えられる。この図において (I), (II) の範囲では電圧の増加と共に電流値が増加しており, (I) では主に式 (3) の, (II) では主に式 (2) の電気化学反応律速となっている。しかし (III) の範囲では電圧が増加しても電流はほぼ一定である。この電流値は限界電流と呼ばれ, 限界電流の現れる電位範囲では電極反応は式 (3) で表される Fe^{2+} イオンの拡散律速となり, アノード表面に到達した Fe^{2+} イオンの量によって限界電流の値が決まる。ただしどの範囲でも式 (1) の反応の寄与は小さい。したがって, 限界電流 I を測定すれば次式で物質移動係数 k_L を決定することができる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

$$I / (An_r F) = k_L c_b \dots \dots \dots (4)$$

ここで A は電極表面積, n_r は反応電子数, F はファラデー定数, c_b はバルク相における Fe^{2+} の濃度であ

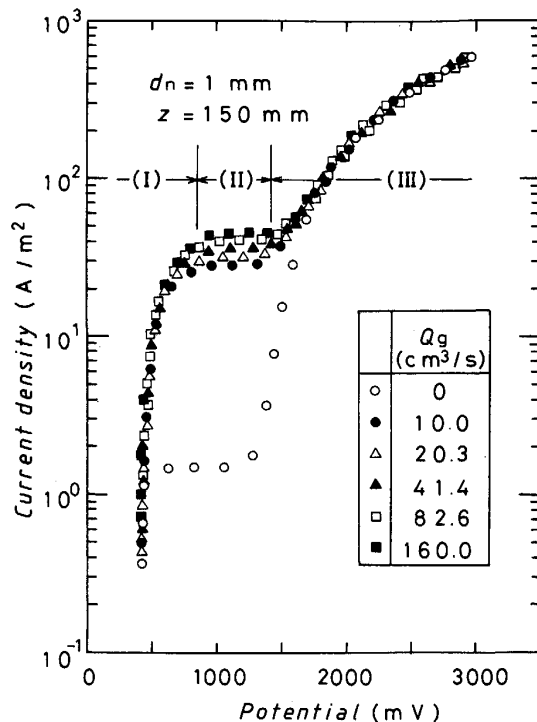


Fig. 2. Anodic polarization curve.

る。物質移動係数 k_L をシャーウッド数の形で無次元化するに際して必要となる拡散係数 D は Levich の式に基づいて回転電極法で求めた¹²⁾。

試験電極表面の付着物を除去し、実験結果の再現性をよくするために、実験の前に分極法による表面処理をほどこした。

表面処理をした試験電極を浴内の各測定位置に浸漬し、ポテンシオスタットを用いて 1200 mV の一定電位に保ち限界電流を測定した。長時間測定していると電極表面が汚れて、限界電流が時間とともに小さくなることわかったので、約 15 min ごとに先ほどの表面処理を繰り返した。得られた電流値をマイクロコンピュータにとりこみ、サンプリング周波数 $f_s = 100$ Hz で A/D 変換した。サンプリング時間は各測定位置につき 1 min とした。

2.2 球形試験電極による物質移動係数の測定

実験装置と実験手順は前節と同じである。アノードには直径 10, 20, 30 mm の白金球を用いた。ガス流量およびノズル径を Table 1 に示す。測定は中心軸上 $z = 125, 150, 200$ mm の軸位置で行った。

2.3 レーザードップラー流速計 (LDV) による平均速度と乱れの自乗平均の平方根値 (rms 値) の測定

物質移動係数 k_L をシャーウッド数の形で無次元化して整理するに際してレイノルズ数と乱れ強さの情報が必要になる。そこで平板あるいは球への近寄り流れを LDV を用いて測定した。Fig. 3 に実験装置の概要を示す¹³⁾。光散乱粒子には水性の修正液を用いた。得られた速度信号をマイクロコンピュータで A/D 変換することにより平均速度と乱れの rms 値を得た。 f_s は 100 Hz、測定時間は一測定位置につき 30 min 程度であった。なお、気泡が通過したときに現れるホールド信号は取り除いた。

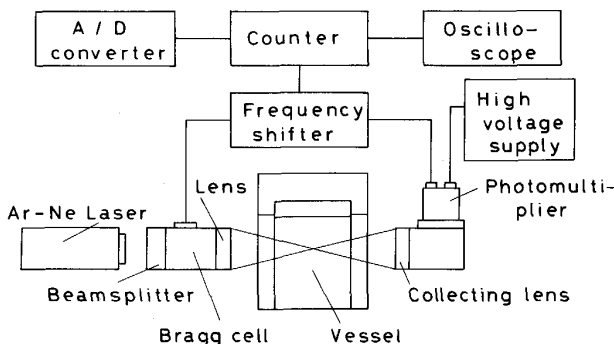


Fig. 3. Experimental apparatus for measuring liquid velocity.

ノズル径およびガス流量は Table 1 に示す通りである。測定は各軸位置において $r = 0, 20, 40, 60, 80$ mm の半径位置で行った。

3. 実験結果と考察

3.1 平板試験電極による物質移動係数の測定

3.1.1 物質移動係数

Fig. 4 に $d_n = 1$ mm の場合における中心軸上の物質移動係数 $k_{L,cl}$ の軸方向分布を示す。どの軸位置においてもガス流量が増えるにつれて $k_{L,cl}$ は大きくなっている。また各々のガス流量についてノズル近傍や浴表面近傍の領域を除いては軸方向にあまり変化しないことがわかった。 $d_n = 2$ mm のノズルを用いた実験でも同様の結果が得られた。

Fig. 5 にガス流量を $Q_g = 82.6$ cm³/s 一定として、ノズル径を変化させた場合の $k_{L,cl}$ の軸方向分布を示す。運動量支配領域 ($z \leq 140$ mm) では¹³⁾、ノズル径が小さいほどガスの持つ運動エネルギーの寄与のため物質移動係数が大きくなる。しかし浮力領域 ($z > 140$ mm) になると¹³⁾、ノズル径の影響はほとんどみられなくなる。このことは著者らが前に報告した気泡特性や流動特

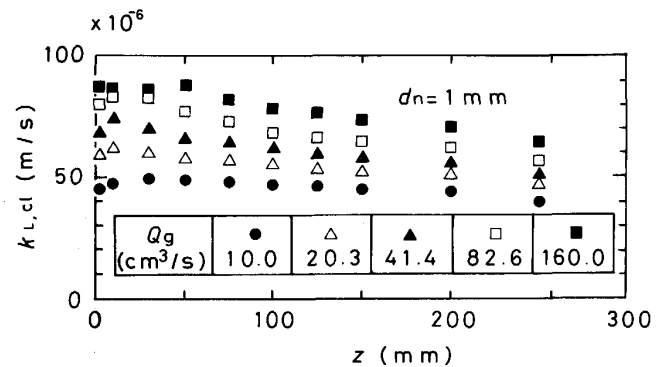


Fig. 4. Axial distributions of mass transfer coefficient $k_{L,cl}$ for different gas flow rates.

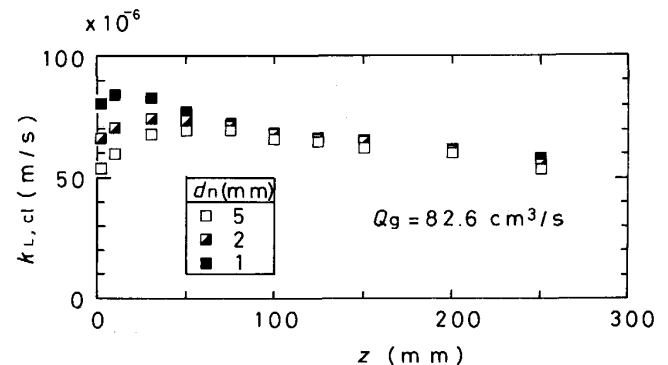


Fig. 5. Axial distributions of mass transfer coefficient $k_{L,cl}$ for different nozzle diameters.

性の実験結果と一致する¹³⁾⁻¹⁵⁾。

Fig. 6 に $d_n = 1 \text{ mm}$, $z = 75 \text{ mm}$ における物質移動係数 k_L の半径方向分布を示す。中心軸から離れるにつれて k_L は急に減少し、やがてほぼ一定値をとる。またガス流量の増加にともない k_L は大きくなる。

3.1.2 等物質移動係数線

物質移動係数が等しい点を結んでいくと Fig. 7~9 に示すような等物質移動係数線が得られる。この場合 $d_n = 1 \text{ mm}$, $Q_g = 10.0, 41.4, 160.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ である。ガス流量が増加するにつれて中心軸から遠く離れた半径位置まで攪拌の影響が及び、 k_L が大きくなっていく様子がわかる。なお、容器底部の隅では k_L が中心軸近傍のそれと比べてかなり小さくなっており、いわゆる死水領域の存在が伺える。

ここには示していないが、ガス流量を $Q_g = 82.6$

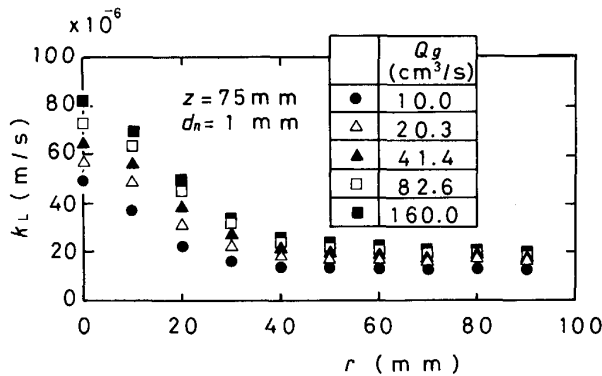


Fig. 6. Radial distributions of mass transfer coefficient k_L for different gas flow rates.

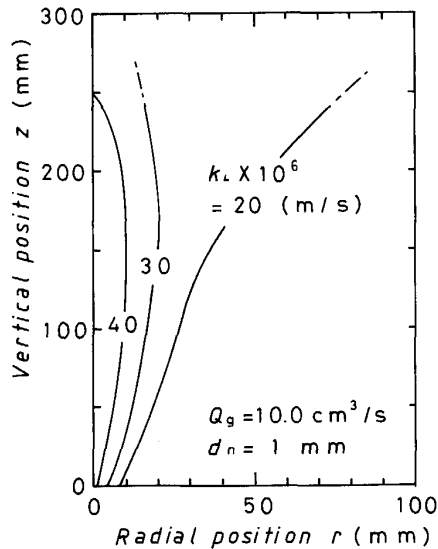


Fig. 7. Iso-mass transfer coefficient line for $Q_g = 10.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ and $d_n = 1 \text{ mm}$.

cm^3/s と一定にして、 $d_n = 1, 2, 5 \text{ mm}$ と変化させた場合の等物質移動係数線を比較すると、ノズル出口近傍の運動量支配領域ではノズル径が小さいほど中心軸上、半径方向ともに物質移動係数が大きくなるが、浮力領域では物質移動係数の分布はほぼ同じでノズル径の影響を受けないことがわかった。

3.2 球形試験電極による物質移動係数の測定

直径 10 mm の球に対して、浮力領域 ($z = 150 \text{ mm}$) におけるガス流量と中心軸上の物質移動係数の関係を平板電極の場合と合せて Fig. 10 に示す。平板試験電極の場合と同様、 $k_{L,cl}$ は、両対数グラフ上で Q_g と直線関係

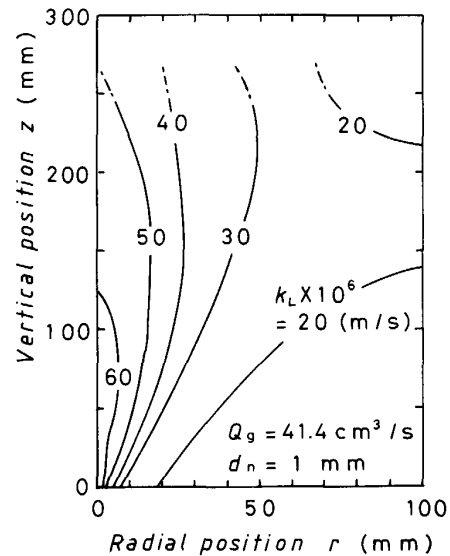


Fig. 8. Iso-mass transfer coefficient line for $Q_g = 41.4 \text{ cm}^3/\text{s}$ and $d_n = 1 \text{ mm}$.

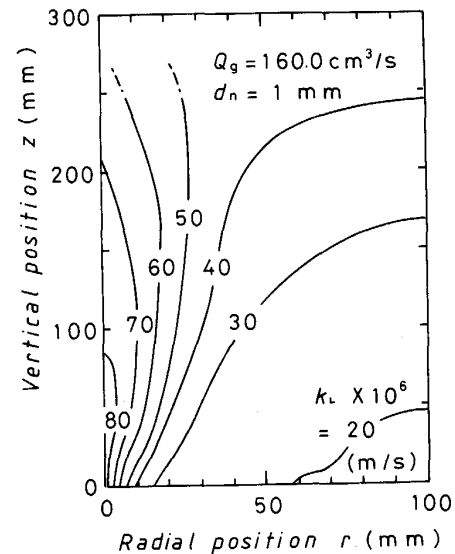


Fig. 9. Iso-mass transfer coefficient line for $Q_g = 160.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ and $d_n = 1 \text{ mm}$.

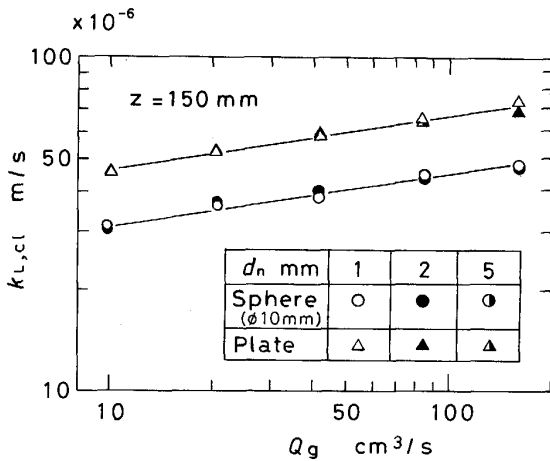


Fig. 10. Mass transfer coefficient $k_{L,cl}$ at $z = 150$ mm as a function of gas flow rate.

にある。またノズル径の影響はほとんど見られない。

3.3 平均流速と乱れの rms 値

Fig. 11 に $d_n = 1$ mm の場合を例にとり中心軸上の平均速度 \bar{u}_{cl} と乱れの rms 値 $u'_{rms,cl}$ の軸方向分布を示す。ただし速度の正の向きは鉛直上方にとっている。ノズルから離れるにつれて \bar{u}_{cl} と $u'_{rms,cl}$ は共に緩やかに減少し浮力領域になるとほぼ一定値をとる。また $u'_{rms,cl}$ はどの軸位置においても \bar{u}_{cl} の約 45% 程度である。

Fig. 12 に $Q_g = 82.6$ cm³/s, $d_n = 2$ mm のときの平均速度 \bar{u} の半径方向分布を示す。ノズルに近い軸位置 ($z = 30$ mm) の \bar{u} は、中心軸を離れると急激に減少して負の値をとるが、ノズルから離れるにつれて上向き速度をもつ領域が半径方向に広がっていく。

3.4 物質移動係数の推算式の導出

3.4.1 平板の物質移動係数

物質移動係数 k_L をシャーウッド数 $Sh (= k_L L / D)$

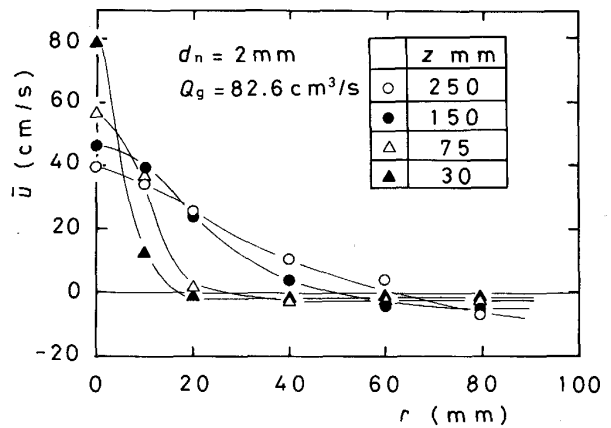


Fig. 12. Radial distributions of mean velocity \bar{u} .

の形で無次元化する。ここで D は拡散係数, L は代表長さであり、板の長さ 10 mm を採用した。一般に固-液間の熱伝達と物質移動の間には相似則の存在することが知られている¹⁶⁾。ここでは平板の熱伝達に対する相関式を基にして物質移動の式の導出を試みる。本実験ではアノード表面における Fe^{2+} イオンの濃度は零とみなせるので、等温板の熱伝達の式を用いる。

Pohlhausen¹⁷⁾ によれば等温板の層流熱伝達における平均ヌッセルト数は次式で与えられる。

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \dots\dots\dots (5)$$

ここで $Nu (= Lh_L / \alpha_L)$ はヌッセルト数, $Re (= \bar{u}L / \nu_L)$ はレイノルズ数, $Pr (= \nu_L / \alpha_L)$ はプラントル数である。また, h_L は熱伝達率, α_L は熱伝導率, \bar{u} は近寄り速度, ν_L は動粘度, α_L は温度伝導度である。この式の Pr の代わりにシュミット数 $Sc (= \nu_L / D)$ を代入すると次式が得られる。

$$Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \dots\dots\dots (6)$$

上式を測定値と比較すると Fig. 13 のようになる。測

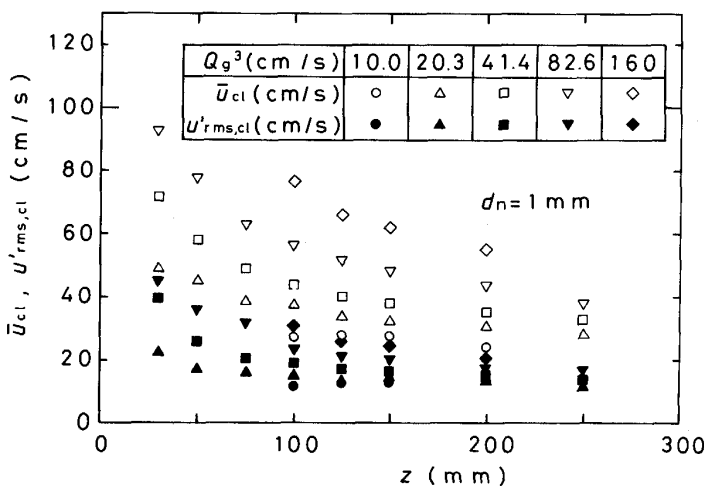


Fig. 11. Axial distributions of mean velocity \bar{u}_{cl} and root mean square value of turbulence $u'_{rms,cl}$ on the center line.

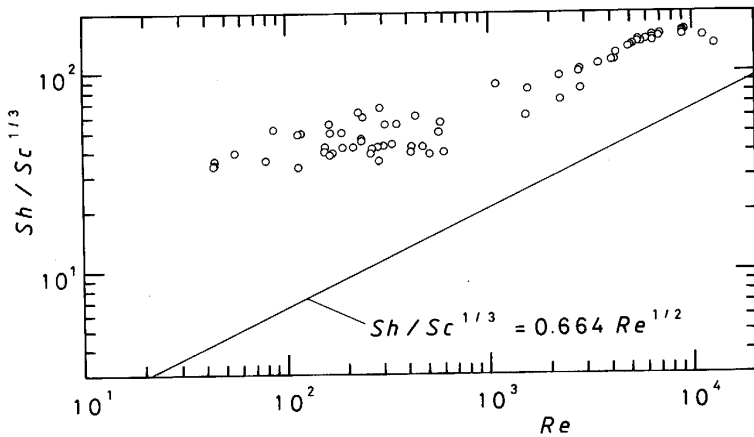


Fig. 13. Comparison of the present measured values of Sherwood number for plate with calculated values based on Pohlhausen's equation.

定値は式(6)で計算される推算値よりもかなり大きくなっている。これは乱れの存在によって物質移動が促進されたためであると考えられる⁶⁾⁷⁾。森らも層流噴流中に単一気泡を吹込むことにより平板からの物質移動が気泡のない場合に比べて約60%ほど促進され、速度変動と強い相関があると報告している¹⁸⁾。

乱れを特徴づけるパラメータには乱れの相対的特性長 λ/L (λ は乱れの特性長, L は代表長さ) と乱れ強さ $Tu (= u'_{rms}/\bar{u})$ の二つがある。ここでの乱れの平均特性長は気泡径のオーダーと考えられ、 λ/L は約1のオーダーになる。従来の研究⁶⁾¹⁹⁾によれば $\lambda/L \leq 1$ のとき、熱伝達に及ぼす乱れの相対的特性長の影響は乱れ強さに比べて非常に小さいことが知られているので、ここでも Tu の影響のみを考える。

式(6)に基づいて次式

$$Sh = 0.664 Re^n Sc^{1/3} \dots\dots\dots(7)$$

を仮定し、指数 n を Tu の関数として評価する。 Sh , Re , Sc などの測定値を式(7)に代入して n を求め、これと Tu の関係をプロットすると Fig. 14 が得られる。指数 n の測定値を Tu の一次関数として最小二乗近似すると次式を得る。

$$n = 0.5 + 0.10 Tu \dots\dots\dots(8)$$

式(7), (8)より Sh は次式となる。

$$Sh = 0.664 Re^{(0.5+0.10Tu)} Sc^{1/3} \dots\dots\dots(9)$$

ただし、式(9)の適用範囲は $10^2 \leq Re \leq 10^4$, $0.4 \leq Tu \leq 5$ である。式(9)に基づく Sh (Sh_{cal} と表す) と実験より求められた Sh (Sh_{exp} と表す) を比較すると Fig. 15 のようになり、両者の一致は良好である。

3.4.2 球の物質移動係数

Clift らは球の物質移動係数に対して次式を提唱している²⁰⁾。

$$(Sh - 2)Q = (0.44 Re^{1/2} + 0.034 Re^{0.71}) Sc^{1/3} \dots\dots\dots(10)$$

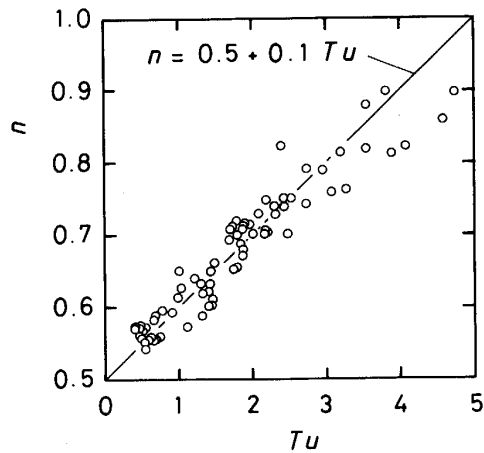


Fig. 14. Relation between index n and turbulence intensity Tu .

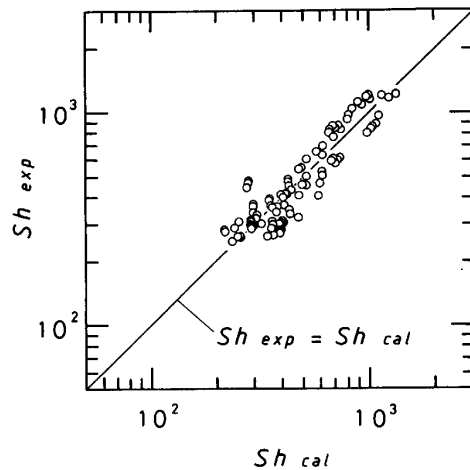


Fig. 15. Comparison of the present measured values of Sherwood number for plate with calculated values.

$$2 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^5$$

ただし

$$Q = (1 + 1/ReSc)^{-1/3}$$

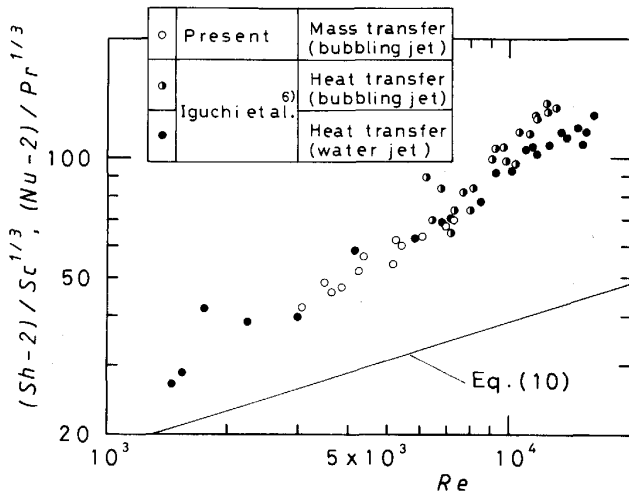


Fig. 16. Comparison of the measured values of Sherwood and Nusselt numbers for sphere with calculated values based on the equation of Clift et al.

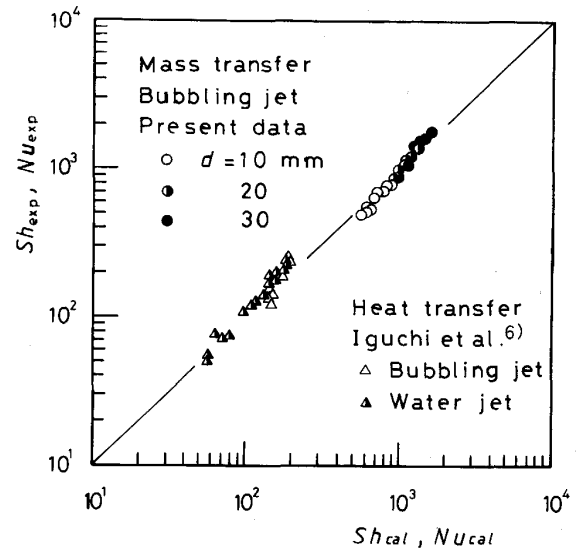


Fig. 17. Comparison of the measured values of Sherwood and Nusselt numbers for sphere with calculated values based on Eq.(12).

であり、 $Re \rightarrow 0$ のとき $Sh = 2$ が理論的に導かれることより²¹⁾左辺の小括弧内の定数 1 を 2 に修正している。

式(10)と測定値を比較すると Fig. 16 のようになる。なお同図には著者らが以前に求めた球の周りの熱伝達の測定値⁶⁾もプロットしてある。この図を見ると式(10)に比べて測定値はかなり大きくなる。そこで乱れ強さ Tu の影響を考慮して、次式を仮定する。

$$(Sh - 2)Q = (0.44 Re^{1/2} + 0.034 Re^{0.71}) Sc^{1/3} \times (1 + Tu)^m \dots\dots\dots(11)$$

著者らは熱伝達の場合について上式によく似た式を仮定し、指数 m に対して 1.36 を求めているが⁶⁾、ここでは熱伝達と物質移動の双方の測定値を最もよく近似できる指数 m の値を求めると 1.0 となった。また本実験範囲では十分な精度で $Q = 1$ と近似でき、次式を得る。

$$(Sh - 2) = (0.44 Re^{1/2} + 0.034 Re^{0.71}) Sc^{1/3} \times (1 + Tu) \dots\dots\dots(12)$$

$$10^3 \leq Re \leq 10^4, 0.3 \leq Tu \leq 0.5$$

上式を熱伝達の推算に用いるときは Sh を Nu に、 Sc を Pr にそれぞれ置き換えればよい。Fig. 17 に示すように測定値 Sh_{exp}, Nu_{exp} と推算値 Sh_{cal}, Nu_{cal} は $\pm 20\%$ の偏差で一致している。

なお、式(12)では Re の Sh への依在性がやや複雑であるため、Ranz-Marshall の式²²⁾

$$Sh = 2 + 0.60 Re^{1/2} Sc^{1/3} \dots\dots\dots(13)$$

を基にして、球の物質移動係数に及ぼす乱れの影響を平板の場合と同じであると仮定すれば次式を得る。

$$Sh = 2 + 0.60 Re^{(0.5+0.10Tu)} Sc^{1/3} \dots\dots\dots(14)$$

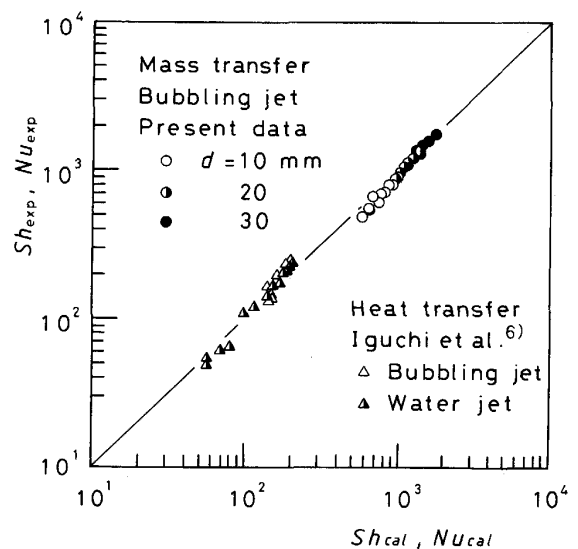


Fig. 18. Comparison of the measured values of Sherwood and Nusselt numbers for sphere with calculated values based on Eq.(14).

$$10^3 \leq Re \leq 10^4, 0.3 \leq Tu \leq 0.5$$

Fig. 18 に示すように測定値 Sh_{exp}, Nu_{exp} と式(14)に基づく推算値 Sh_{cal}, Nu_{cal} との一致は良好であり、式(14)を用いても気泡噴流中における球と液体間の熱伝達と物質移動を $\pm 20\%$ の偏差で予測することが可能である。

3.5 Mazumdar らの円柱に対する物質移動係数の測定値と推算値との比較

平板と球の物質移動に関して、 Re の指数に及ぼす乱れ強さの影響は式(9)、(14)にみられるように同じである。したがって平板と球以外の形状の物体についても同

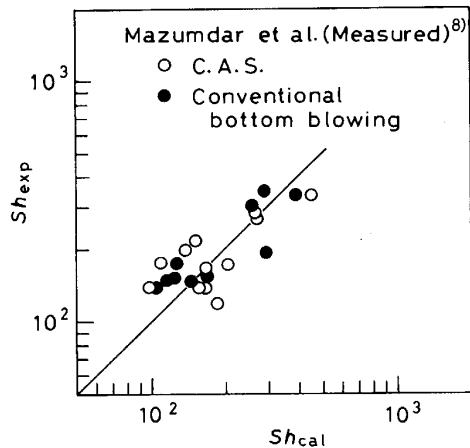


Fig. 19. Comparison of the measured values of Sherwood number for cylinder with calculated values based on Eq.(15).

様な整理法が適用可能と思われる。そこで円柱からの物質移動に対する推算式を導き Mazumdar らの測定値と比較してみる。

円柱に対する熱伝達の式²³⁾を基に式(8)を考慮して次式を導いた。

$$Sh = 0.63 Re^{(0.5+0.10Tu)} Sc^{1/3} \dots\dots\dots (15)$$

式(15)を Mazumdar らの測定値⁸⁾と比較して Fig. 19 に示す。図中の吹込み形式については文献を参照された。推算値と測定値は ±50% の偏差で一致している。Mazumdar らの速度と乱れは数値計算によって求められており、数値計算に伴う誤差がここでの大きな偏差の一因と考えられる。なお、Mazumdar ら自身も推算式を提案しているが、その偏差は ±80% もあり、式(15)のほうが優れている。

本論文で提案した推算式の溶鉄、溶鋼中における適用性の検討については流動現象の計測法あるいは数値計算法の発展をまたねばならない。

4. 結 言

電気化学的手法を用いて気泡噴流中における固-液間の物質移動を調べ、以下の成果を得た。

(1) 平板の物質移動係数は Pohlhausen の式をもとに乱れ強さの影響を考慮した次式でよく整理できる。

$$Sh = 0.664 Re^{(0.5+0.10Tu)} Sc^{1/3} \dots\dots\dots (9)$$

$$10^2 \leq Re \leq 10^4, 0.4 \leq Tu \leq 5$$

(2) 球の物質移動と熱伝達率は Clift の式をもとに乱れ強さの影響を考慮した次式

$$(Sh - 2) = (0.44 Re^{1/2} + 0.034 Re^{0.71}) Sc^{1/3} \times (1 + Tu) \dots\dots\dots (12)$$

$$10^3 \leq Re \leq 10^4, 0.3 \leq Tu \leq 0.5$$

または Ranz-Marshall の式をもとにした次式

$$Sh = 2 + 0.60 Re^{(0.5+0.10Tu)} Sc^{1/3} \dots\dots\dots (14)$$

$$10^3 \leq Re \leq 10^4, 0.3 \leq Tu \leq 0.5$$

のどちらでもほぼ同じ ±20% の偏差で整理できる。

(3) 上記実験結果より、気泡噴流中においても熱伝達と物質移動との間の相似則の成立が確認された。

(4) 円柱の物質移動係数に対する推算式(15)を導き、Mazumdar らの測定値と比較したところかなり良好な一致がみられた。

文 献

- 1) 山田統明, 岡田 剛, 松村禎祐, 永幡 勉, 山崎 勲: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 57
- 2) 成田貴一: 溶融還元製鉄法(神戸製鋼所技術開発本部) (1989)
- 3) 片山裕之: 日本学術会議公開講演会, 新材料創製のためのプロセッシング講演概要 (1991), p. 1
- 4) 金属製錬プロセスにおける高温界面移動現象(鉄鋼基礎共同研究会界面移動現象部会編) (1991) [日本鉄鋼協会]
- 5) J. Szekely, H. H. Grevet and N. El-Kaddah: Int. J. Heat Mass Transfer, **27** (1984), p. 1116
- 6) 井口 学, 谷 潤一, 植村知正: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 2106
- 7) 井口 学, 竹内博明, 川端弘俊, 植村知正, 森田善一郎: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 2031
- 8) D. Mazumdar, S. K. Kajani and A. Ghosh: Steel Res., **61** (1990), p. 339
- 9) S. Taniguchi, M. Ohmi and S. Ishiura: Trans. ISIJ, **23** (1983), p. 571
- 10) C. R. Wilke, M. Eisenberg and C. W. Tobias: J. Electrochem. Soc., **100** (1953), p. 512
- 11) T. Mizushima: Advances in Heat Transfer, **7** (1971), p. 89
- 12) V. G. Levich: Physicochemical Hydrodynamics (1962), [Prentice-Hall]
- 13) 井口 学, 竹内博明, 森田善一郎: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 699
- 14) 井口 学, 川端弘俊, 岩崎敏勝, 野沢健太郎, 森田善一郎: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 840
- 15) 井口 学, 野沢健太郎, 富田祐志, 森田善一郎: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 1426
- 16) 伝熱工学資料第 6 版(日本機械学会編) (1986) [日本機械学会]
- 17) E. Pohlhausen: Z. AMM, **1** (1921), p. 115
- 18) 森 康夫, 土方邦夫, 吉田英夫: 第 17 回伝熱シンポジウム講演論文集 (1980), p. 259
- 19) 井口 学, 森田善一郎, 植村知正, 谷 潤一: 第 5 回流れの計測大阪シンポジウム講演要旨集 (1989-10), p. 162
- 20) R. Clift, J. R. Grace, M. E. Weber: Bubbles, Drops and Particles (1978), p. 123 [Academic Press]
- 21) R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot: Transport Phenomena (1960) [Toppan], p. 303
- 22) W. E. Ranz and W. R. Marshall, Jr.: Chem. Engng. Prog., **48** (1952), p. 141, 173
- 23) J. P. Holemann: Heat Transfer, 3rd ed. (1972), p. 186 [McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.]