

# 上吹き浸漬ランスからのガス吹込みを伴う 円筒浴内の流動現象

井口 学\*・植村 知正\*<sup>2</sup>・山口 裕史\*<sup>3</sup>・倉永 知明\*<sup>4</sup>・森田 善一郎\*

Fluid Flow Phenomena in a Cylindrical Bath Agitated by Top Lance Gas Injection

Manabu IGUCHI, Tomomasa UEMURA, Hiroshi YAMAGUCHI, Tomoaki KURANAGA and Zen-ichiro MORITA

**Synopsis** : Fluid flow phenomena in a cylindrical bath agitated by gas injection from a submerged top lance were investigated on the basis of cold model experiments. A swirl motion of liquid, which was similar to rotary sloshing, was observed under a certain blowing condition. The condition was experimentally clarified and subsequently the following experiments were made for cases without swirl motion. The vertical migration distance of gas from the lance exit was measured using an electro-resistivity probe and an empirical correlation of the migration distance was proposed as a function of the modified Froude number. The axial and radial velocity components of liquid phase were measured for a water-air system using a two-dimensional Laser Doppler Velocimeter. Applicability of the previous correlations of axial mean velocity proposed for gas injection through a centric bottom nozzle to the present case was examined. An electro-chemical method was used to measure the mass transfer coefficient between a platinum flat plate and aqueous  $\text{FeSO}_4$  solution. In the axial region below the bubble plume, the so-called dead water region was observed.

**Key words** : injection metallurgy ; top lance ; swirl motion ; velocity measurement ; mass transfer ; gas holdup.

## 1. 緒言

溶銑や溶鋼の処理プロセスに関連して、上吹きランスから吹込まれた気泡と液との物質移動や均一混合時間などに関する研究は活発に行われているが<sup>1)~3)</sup>、浴内の流動現象に関する知見は比較的乏しい。本研究の目的は、浴中心軸上に浸漬させたランスからガスを下向きに吹込んだ場合の浴内の流動特性をモデル実験で明らかにすることにある。

浴表面近くに浸漬したランスの先端に取り付けたノズルからガスを吹込むと、底吹き気泡噴流に見られるような旋回現象の発生<sup>4)5)</sup>が認められた。実操業においてこのような旋回現象が起ると炉内の液体が激しく振動することになり、炉壁の溶損等に大きな影響を与える。そこでまず水浴及び水銀浴を選び、ノズル径、空気流量、ランスの浸漬深さを変えて旋回現象の発生する条件を調べた。

つぎに旋回現象の無い条件下で、液中に浸漬したノズルから下向きに吹込まれた気泡がどの程度の深さまで到達するのかを、水-空気系、グリセリン水溶液-空気系、水銀-空気系、ウッドメタル- $\text{N}_2$ ガス系の4種類のモデルについて電気探針法により測定し、従来の水平吹込みに対する研究成果を参考にして実験式を導いた。

つづいて、水-空気系のコールドモデルを対象として、気泡噴流中の軸方向ならびに半径方向の平均液流速の測定を二次元レーザードップラー流速計(LDV)を用いて行った。また浴内の攪拌状況を知るために、電気化学的方法により固液間の物質移動係数も測定し<sup>6)</sup>、LDVによる流速測定結果と合せて、ガス吹込みによって生じた液体の主たる流動が浴内のどの領域で起っているのかを明かにした。

## 2. 実験

### 2.1 旋回現象

浴表面に比較的近い所にランスを浸漬させ、下向きにガスを吹込むと、浴の振動が大きくなり、Fig. 1に模式的に示すような旋回現象が起るが、ランスの浸漬位置を深くしていくと、ある深さで旋回は止る。浴が静止していた時の表面から旋回の止る時のランス先端のノズル出口までの距離を、旋回の止む浸漬深さ $L_n$ と定義した。実験に用いた液体は水と水銀で、吹込んだガスは空気である。水-空気系モデル実験で使用した容器はアクリル製の円筒容器で内径Dは123, 200, 390mmの3種類、水銀-空気系では黄銅製の円筒容器で、内径は125, 155mmの2種類である。ただし黄銅製

平成5年4月26日受付 平成5年9月10日受理 (Received on Apr. 26, 1993; Accepted on Sep. 10, 1993)

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

\* 2 関西大学工学部 (Faculty of Engineering, Kansai University)

\* 3 大阪大学工学部学生 (現:クボタ(株)) (Student, Faculty of Engineering, Osaka University, now KUBOTA Corporation)

\* 4 大阪大学工学部学生 (Student, Faculty of Engineering, Osaka University)

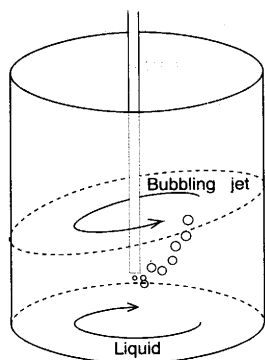


Fig. 1. Schematic illustration of swirl motion caused by gas injection through an immersed top lance.

の容器には水銀との反応を避けるためテフロン(フッ素樹脂)コーティングを施してある。ノズルは黄銅あるいはアクリル製で、内径は1, 2 mmとした。吹込み空気流量は0~300 cm<sup>3</sup>/sである。

また比較のために、水浴において底から浴中に突出した細長い円筒ノズルで空気を上向きに吹込んだ場合の旋回の止る時の浴表面までの距離を求めた。この実験に用いた浴は $D=200\text{mm}$ ,  $H_L=300\text{mm}$ である。

以下の実験は旋回の無い条件下で行った。

## 2・2 電気探針法による気泡の垂直到達距離

### 2・2・1 気泡の垂直到達距離の定義

ランスを液中に浸漬させ、先端の単孔ノズルからガスを真下に吹込んだ時、ガスの慣性力によってどの程度の深さまで気泡が到達できるのかを、水、グリセリン水溶液、水銀、ウッドメタルの物性の異なる4種類の液体を用いて電気探針法によって測定した(Fig. 2)。電気探針法は、探針先端部が液体中にあるときは導通して電圧がかかり、気泡が先端部を覆うと絶縁され電圧が降下することを利用した気泡特性の測定法である。

この電気探針を用いてノズル出口より垂直下向きにガスホールドアップ $\alpha$ を測定し、 $\alpha$ がゼロになる位置からノズル出口までの距離を気泡の垂直到達距離 $L_v$ と定義した。なお $\alpha$ は探針の出力信号をサンプリング周波数5 kHzでA/D変換

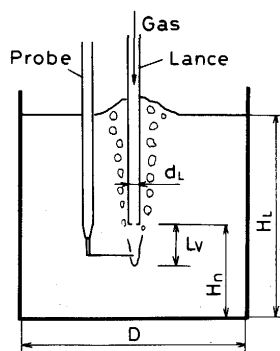


Fig. 2. Definition of the vertical migration distance,  $L_v$ , of bubbles from the lance exit.

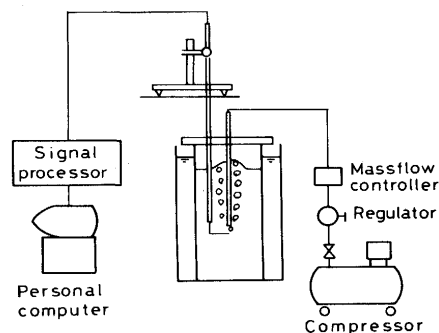


Fig. 3. Experimental apparatus for measuring  $L_v$  in water-air, aqueous glycerol solution-air and mercury-air systems.

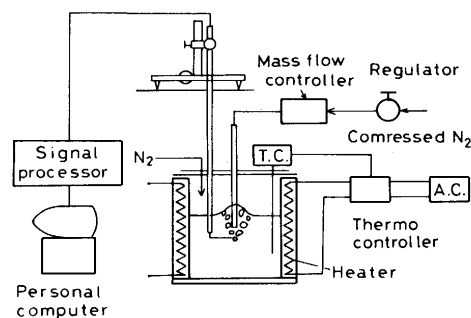


Fig. 4. Experimental apparatus for measuring  $L_v$  in Wood's metal-Nitrogen system.

し、約150000個の信号より求めた。

### 2・2・2 実験装置および実験方法

水-空気系、グリセリン水溶液-空気系、水銀-空気系モデルの実験装置の概要をFig. 3に示す。最初の二つのモデルによる実験では、透明なアクリル製円筒容器を使用した。内径は $D=123, 200, 390\text{mm}$ の3種類である。水銀-空気系モデルでは内壁をテフロンコーティングした黄銅製の円筒容器を用い、内径は $D=125, 155\text{mm}$ の2種類とした。

これらの容器に上記液体を満たし、外径8 mmあるいは20 mmのステンレス製のランスの先に取り付けたノズルを浴中心軸上に浸漬させた。ノズルは黄銅製の単孔ノズルで内径 $d_n=1, 2\text{mm}$ の2種類である。

空気流量 $Q_g$ は10~300 cm<sup>3</sup>/sの範囲で変化させた。電気探針はノズル出口よりトラバース装置によって下方に移動させ、1 mm間隔でガスホールドアップ $\alpha$ を測定した。

ウッドメタル-N<sub>2</sub>ガス系モデルによる実験装置の概要をFig. 4に示す。ステンレス製円筒容器は内径が125 mm、高さが200 mmである。浴温はサーモスタットにより $100 \pm 1^\circ\text{C}$ に保持した。他の条件は水-空気系モデルと同じである。

## 2・3 レーザードップラー流速計による浴内液流速の測定

浸漬ランスから吹込まれた気泡によって誘起される液体の運動を知るために、水-空気系モデルを用いて、液体の軸方向および半径方向の速度を求めた。

実験装置の概要をFig. 5に示す。容器は内径200 mmの透明なアクリル製円筒容器で、水道水を300 mmの高さまで満たし、容器の屈折率の影響を少なくするため、浴のまわり

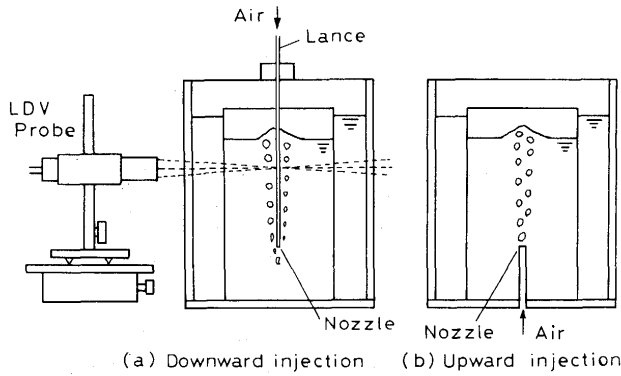


Fig. 5. Experimental apparatus for measuring liquid velocity in water-air system.

を囲った正方形断面の水槽との間にも水を満たした。空気はコンプレッサーによって質量流量計を介して外径 8 mm のステンレス製のランスの先に取り付けられた黄銅製の内径 2 mm のノズル (Fig. 5 (a)) より容器内に吹込まれる。この場合を Submerged nozzle (浸漬ノズル) と称す。

空気流量  $Q_g$  は 82.6, 160  $\text{cm}^3/\text{s}$  で、ノズル出口の位置は容器の底から  $H_n = 150, 200 \text{mm}$  すなわち浸漬深さ 150, 100 mm である。また比較のために Fig. 5 (b) のような外径 10 mm, 長さ 100 mm の黄銅製のパイプの先に取り付けた内径 2 mm のノズルからの吹込みも行った。この場合を Extrusion nozzle (突出しノズル) と呼ぶ、また通常の浴底に設けたノズルは Bottom nozzle (底吹きノズル) と呼んで区別する。容器内の軸方向および半径方向の液流速を LDV で測定した。

2.4 物質移動係数の測定

装置の概略図を Fig. 6 に示す。容器には内径  $D = 200 \text{mm}$ , 高さ  $H = 400 \text{mm}$  のアクリル製のものを用い、0.1N の  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液に  $\text{FeSO}_4$  を溶かし 0.1 mol/l にした試験溶液を浴深  $H_L = 300 \text{mm}$  まで満たした。一方、 $\text{N}_2$  ガスを質量流量計を介して、内径  $d_n = 2 \text{mm}$  のノズルより吹込んだ、ガス流量  $Q_g$  は 82.6, 160, 240  $\text{cm}^3/\text{s}$  の 3 種類である。浴温については、投入式パイプヒーター、デジタル式温度計、また攪拌のために空気ポンプを用い、浴の周辺の水槽内の水を温度制御して、浴内温度を  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$  に保持している。

試験電極は  $10 \text{mm} \times 10 \text{mm} \times 0.4 \text{mm}$  の白金平板であり、電圧は分極測定により限界電流の存在が確認された 1200 mV を一定に保ち、電極を半径方向、軸方向にトラバースさせて

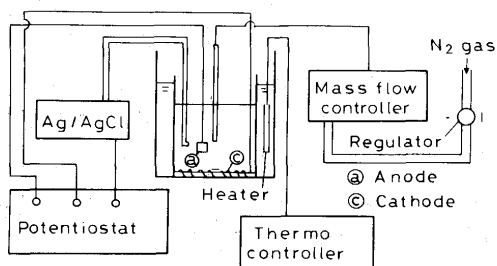


Fig. 6. Experimental apparatus for measuring mass transfer between a platinum flat plate and liquid.

限界電流測定した。なお、電極表面の汚れによる限界電流の低下を避けるため約 15 min ごとに表面処理を行った。

物質移動係数  $k_L$  は次式より求めた。

$$I / (A n_r F) = k_L c_b \dots \dots \dots (1)$$

ここで  $I$ : 限界電流,  $A$ : 試験電極の表面積,  $n_r$ : 反応電子数,  $F$ : Faraday 定数,  $c_b$ : バルク層の  $\text{Fe}^{2+}$  の濃度である。詳細については文献<sup>6)</sup>を参照されたい。

3. 実験結果および考察

3.1 気泡噴流の旋回現象

3 種類の吹込み方式について旋回が止む時のノズル出口から静止時の浴表面までの距離を測定し、ガスの吹込み方式が旋回に及ぼす影響を調べた。Fig. 7 にガス流量  $Q_g$  との関係を示す。ノズルの種類の説明については 2.3 節を参照されたい。いずれの場合も容器径は  $D = 200 \text{mm}$ , 液体は水で、吹込んだガスは空気である。底吹き時の距離 ( $H_w - H_n$ ) と浴中から上向きに吹込んだ場合の距離  $H_{L,1,f}$  はほぼ同じ値を取っていることがわかる。両者の条件の差はノズル出口より下の部分が液体であるか壁であるかの違いであるが、この結果は旋回現象が浴表面近傍の液体のみの運動であり、波動が深水波に属することを裏付けるものである。

Fig. 8 にランスによる水と水銀への吹込みの実験結果を比

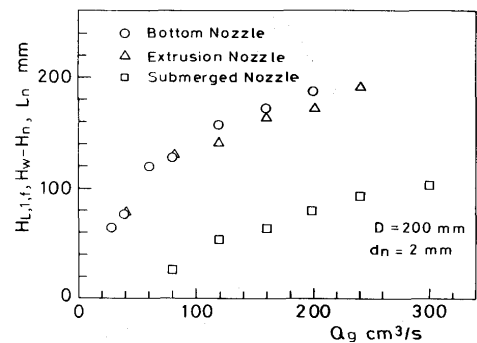


Fig. 7. Critical lance depth or nozzle depth for the cessation of swirl motion in water-air system.

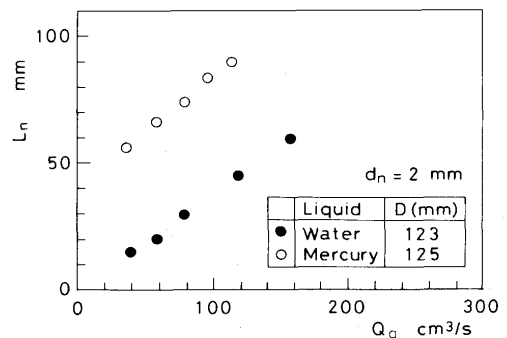


Fig. 8. Critical lance depth for the cessation of swirl motion in water-air and mercury-air systems.

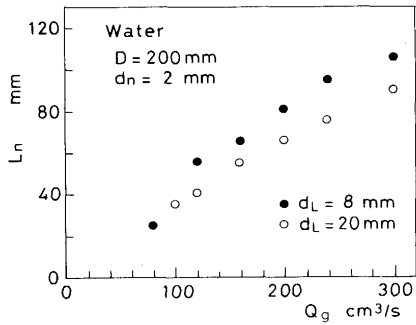


Fig. 9. Effect of lance diameter on the critical lance depth in water-air system.

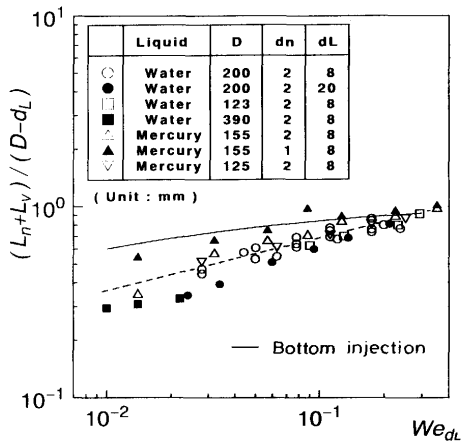


Fig. 10. Correlation of the critical lance depth for the cessation of swirl motion as a function of Weber number.

較して示した。水銀は水と比べて $L_n$ がかなり大きい。ノズル内径 $d_n$ を変えて $L_n$ を水銀浴で調べたが、違いはみられず、ノズル径の影響はほとんどないことがわかった。また水浴でガス流量を一定にし、浴深を変えて $L_n$ の測定を行ったところ、気泡噴流の先端が容器底に届かないところでは、浴深の影響はなかった。さらにランスの直径が $L_n$ に及ぼす影響を調べるため、外径 $d_L=20\text{mm}$ のランスを用いて $d_L=8\text{mm}$ での結果と比較した(Fig. 9)。 $d_L=20\text{mm}$ の方が旋回は起こりにくくなっており、ランス自体が障害物になって $L_n$ に少なからず影響を与えていることがわかった。

底吹きの場合の整理法を参考にして、Fig.10に示す整理法を提案した。ただし $L_v$ は次節で示される気泡の垂直到達距離である。測定値は図中の破線によって $\pm 30\%$ のばらつき範囲内で整理できる。また実線で示した底吹きの場合に比べて臨界深さはやや小さな値をとっている。なおウェーバー数 $We_{dL}$ は次式で表される。

$$We_{dL} = \rho_L Q_g^2 / \sigma (D - d_L)^3 \quad \dots \quad (2)$$

ここで $\rho_L$ は液体密度、 $\sigma$ は表面張力、 $(D - d_L)$ は水力直径である。

### 3・2 気泡の垂直到達距離 $L_v$

気泡の到達距離 $L_v$ と修正フルード数 $Fr_m$ との関係をFig.11に示す。修正フルード数 $Fr_m$ はノズル出口でガスの持っている

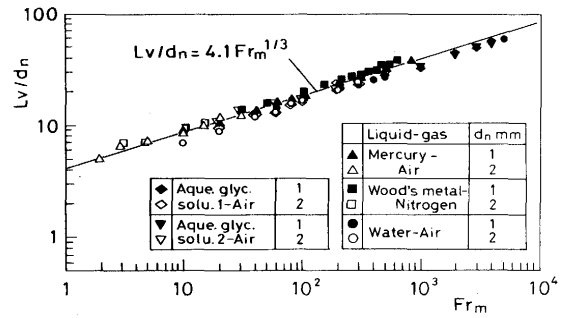


Fig. 11. Relation between vertical migration distance of bubbles  $L_v$  and modified Froude number  $Fr_m$ .

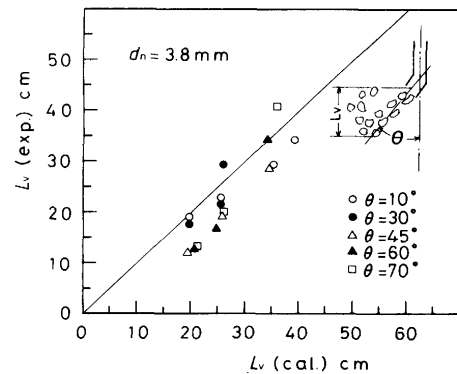


Fig. 12. Comparison of  $L_v$  between the present estimated value and experimental data by Igwe *et al.*

る慣性力と浮力との比を表す無次元数である。

$$Fr_m = \rho_g Q_g^2 / \rho_L g d_n^5 \quad \dots \quad (3)$$

ここで $\rho_g$ はガス密度、 $g$ は重力加速度である。

図中の実線はここで提案した次の実験式である。

$$L_v = 4.1 d_n Fr_m^{1/3}, \quad 2 < Fr_m < 6 \times 10^3 \quad \dots \quad (4)$$

この式によりすべての測定値は $\pm 15\%$ の偏差で整理できる。石橋らは水を満たした容器の真横から空気を吹込んだ場合の水平到達距離 $L_H$ に対して次の実験式を提案した<sup>7)8)</sup>。

$$L_H = 3.7 d_n Fr_m^{1/3} \quad \dots \quad (5)$$

この式は式(2)と係数が約10%異なるだけであり、到達距離は吹込み方向にほとんど依存しない。

Igweら<sup>9)</sup>は水-空気系のモデルを用いて、浸漬ノズルの角度を変化させて気泡の到達距離を測定している。垂直方向の到達距離を本実験式と比較してFig.12に示した。 $\theta = 10^\circ, 30^\circ$ の場合のIgweらの測定値も式(4)で比較的よく近似できる。なお佐野らは水浴あるいは水銀浴中へのガス横吹き実験を行い、ノズル近傍におけるガスの挙動について興味深い現象を観察しているが、水平到達距離の値が示されていないので本実験との比較はできない<sup>10)11)</sup>。

### 3・3 浴内の液体の平均速度の分布

Fig.13に電気探針で測定したガスホールドアップの分布を

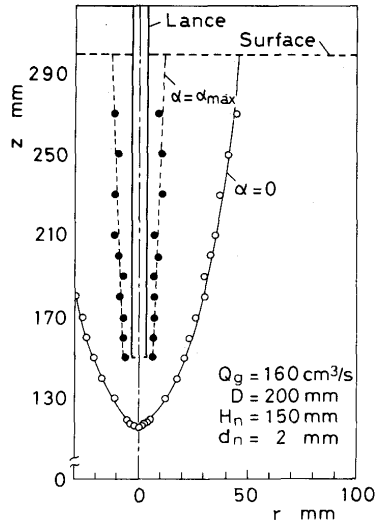


Fig. 13. Gas holdup distributions in the bath.

浸漬ランスの場合について示す。図中の実線 ( $\alpha = 0$ ) の外側では気泡は存在しない。また  $\alpha$  の最大値がランス近傍にあることから気泡の多くはランスにそって上昇している。

軸方向平均速度の半径方向分布の一例をFig.14に示す。容器中心軸近傍の軸方向平均速度は上向きに吹込んだ場合の方が大きい。半径方向への広がりも小さくなっている。そこで速度分布を積分して液体の上昇流量を求めたところ、 $z=150$ と $200$ mmの両軸位置とも下向きに吹込んだ方が約25%大きい値になった。

上向きに吹込んだ場合、ガスの慣性力の影響が及んでいるところでは、気泡の広がりが小さく、巻き込まれる液体の量は少ない<sup>12)</sup>。これに対して下向きに吹込んだ場合、ガスのもつ慣性力は液体との摩擦と浮力によって打ち消され、ノズルから垂直到達距離 $L_v$ だけ下がった地点では零になり、ここから浮力のみによって気泡が上昇していくため、気泡噴流の広がりは大きくなり、したがって上昇液速度も大きくなると考えられる。そこで下向きのガス吹込みによる液体の流れが、ノズル出口より $L_v$ だけ下方から発生する気泡の浮力のみによって駆動されると仮定し、著者ら<sup>13)</sup>が前に報告した単孔ノズルによる底吹き気泡噴流の浮力領域における軸方向平均速度 $\bar{u}$ の実験式を適用し、速度分布を計算した。

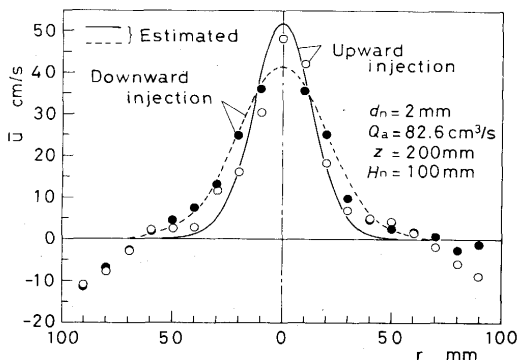


Fig. 14. Distributions of axial mean velocity of water in the bath.

上向きに吹込んだ時は運動量支配領域の実験式を用いた。軸方向平均速度の実験式は次式で与えられる。

$$\bar{u} = \bar{u}_{c1} \cdot \exp[-\ln 2 \cdot r^2 / b_u^2] \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで $\bar{u}_{c1}$ は中心軸上の値、 $b_u$ は半値半幅であり、運動量支配領域に対しては<sup>14)</sup>

$$\bar{u}_{c1} = 2.3 u_r Fr_m^{0.036} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$u_r = (g Q_g / z)^{1/3} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$b_u = b_\alpha \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$b_\alpha = b_\alpha(z_{50}) \cdot (z/z_{50})^n \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$b_\alpha(z_{50}) = 0.42 (Q_g^2 / g)^{1/5} \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$z_{50} = 5.0 d_n Fr_m^{1/3} \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$n = 0.0338 \log(Fr_m) + 0.505 \quad \dots \dots \dots (13)$$

浮力領域に対しては<sup>15)</sup>

$$\bar{u}_{c1} = 1.24 u_r P^{-0.28} \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$P = (Q_g^2 / g z^5)^{1/5} \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$b_u = b_\alpha / 0.65 \quad \dots \dots \dots (16)$$

$$b_\alpha = 0.47 b_\alpha(z_5) \cdot \exp(0.75 z / z_5) \quad \dots \dots \dots (17)$$

$$b_\alpha(z_5) = 1.6 (Q_g^2 / g)^{1/5} \quad \dots \dots \dots (18)$$

$$z_5 = 17 (Q_g^2 / g)^{1/5} \quad \dots \dots \dots (19)$$

となる。 $u_r$ は液体の上昇速度の目安となるパラメーター、 $P$ はフルード数の一種である。

Fig.14に見られるように、実験式と測定値の一致は良好である。ここには示していないが、空気流量 $Q_g$ が $160 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合の下向きガス吹込みに関しても、測定値と推算値との間に上と同じ程度の一致が見られた。

つぎにランスから下向きにガスを吹込んだ場合の流動パターンを見るため、空気流量 $Q_g = 160 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、ノズル出口の高さ $H_n = 150 \text{ mm}$ 、浴深 $H_w = 300$ の条件下で軸方向及び半径方向の平均流速を測定した。合成した速度ベクトルをFig.15に示す。測定点は半径方向に $10 \text{ mm}$ 間隔、軸方向に $20 \text{ mm}$ 間隔である。ノズルより上の領域では、気泡の上昇に伴う液体の巻き込みに起因する循環流が形成されている。ノズル下方の気泡の到達している場所近傍では液体の巻き込みがあるが、それより下の領域ではほとんど流動が見られず、死水領域が形成されている。

### 3・4 固液間物質移動係数

浸漬ランスからの下向きのガス吹込みによる液体の攪拌がどの範囲まで及んでいるかを調べるために、ガス流量を変えて固液間の物質移動係数の測定を行った。測定結果の1例をFig.16に示す。

浴中心軸上 $r = 0 \text{ mm}$ での気泡の垂直到達距離 $L_v$ を式(4)を用いて計算すると、 $Q_g = 82.6 \text{ cm}^3/\text{s}$ では $L_v = 23.8 \text{ mm}$ となり、気泡の到達点はノズル出口よりも $23.8 \text{ mm}$ 下方にある。この点より下の軸位置においては、物質移動係数 $k_L$ は $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 以下となっており、ノズルよりも上方の軸位置の値

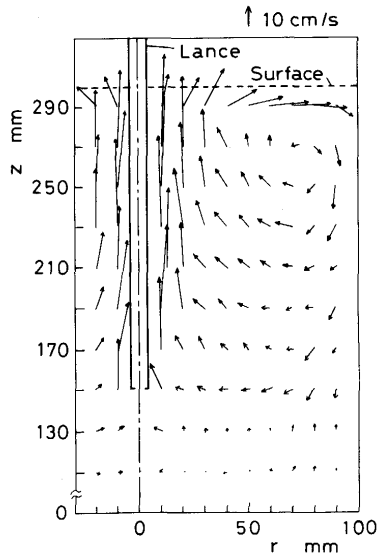


Fig. 15. Mean velocity vectors of water in the bath ( $Q_g = 82.6 \text{ cm}^3/\text{s}$ ).

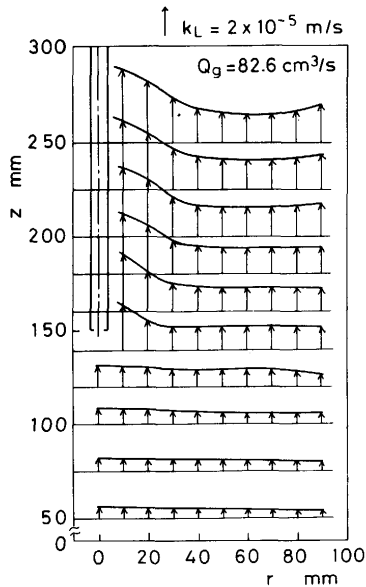


Fig. 16. Distributions of mass transfer coefficient in the bath.

に比べて非常に小さい値であり、 $k_L$ の浴内における分布はFig.15に示した液流速の分布によく対応している。

#### 4. 結言

本研究で得られた成果をまとめると以下ようになる。

(1)浴表面近くで浸漬ランスにより下向きにガスを吹込

むと、底吹き気泡噴流に見られるような旋回現象が起こる。旋回の止むランス浸漬深さ $L_n$ は一種のウェーバー数の関数としてFig.10で与えられる。

(2)浸漬ノズルから下向きにガスを吹き込んだ場合の気泡の垂直到達距離 $L_v$ は水-空気系、グリセリン水溶液-空気系、水銀-空気系、ウッドメタル- $N_2$ ガス系モデルに対して次式で表される。

$$L_v = 4.1 d_n Fr_m^{1/3}$$

$$Fr_m = \rho_g Q_g^2 / \rho_L g d_n^5$$

水-空気系モデルでは、垂直到達距離 $L_v$ と水平到達距離 $L_H$ はほぼ同じ値をとる。

(3)浸漬ランスから下向きにガスを吹込んだ場合、気泡によって誘起される浴内の液体の流動は主にノズルから $L_v$ だけ下方より発生する気泡の浮力によって生じるとみなしてよい。この場合、軸方向平均速度 $\bar{u}$ の半径方向分布は底吹き気泡噴流の浮力領域における実験式により近似できる。

(4)流速測定と固液間物質移動係数の測定結果から判断して、気泡の到達していない軸方向の領域、すなわちノズル出口から $L_v$ よりも下方の領域では液体の流動はほとんど見られず、いわゆる死水領域となっている。

#### 文 献

- 1) 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), p.301
- 2) Y.Fukunaka, M-F. Jiang, T.Yamamoto, Z.Asaki and Y. Kondo: Metall. Trans., **20B**(1989), p.5
- 3) 第101・102回西山記念技術講座, 攪拌を利用した最近の製鋼技術の動向(日本鉄鋼協会編), (1984)
- 4) M.P.Schwarz: Chem. Eng. Sci., **45**(1990), p.1765
- 5) 井口 学, 細原聖司, 古賀敏之, 山口竜介, 森田善一郎: 鉄と鋼, **78**(1992), p.1778
- 6) T.Mizushima: Advances in Heat Transfer, **7**(1971), p.89
- 7) 石橋政衛, 白石惟光, 山本里見, 島田道彦: 鉄と鋼, **62**(1975), p.111
- 8) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **67**(1981), p.672
- 9) B.U.N.Igwe, S.Ramachandran and J.C.Fulton: Metall. Trans., **4**(1973), p.1887
- 10) 田村岳治, 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, **72**(1986), S952
- 11) 佐野正道, 森 一美, 田村岳治, 梁 雲, 蔡 志鵬: 材料とプロセス, **2**(1989), p.132
- 12) 井口 学, 竹内博明, 森田善一郎: 鉄と鋼, **76**(1990), p.5
- 13) M.Iguchi, T.Kondoh, Z.Morita, K.Nakajima, K.Hanazaki, T.Uemura and F.Yamamoto: Scaninject VI, Lurea, Sweden, (1992), p.145
- 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