

# 多孔質ノズルからの吹込みを伴う 浴内の気泡と液の動的挙動

井口 学\*・大北 雄之\*<sup>2</sup>・笠井 宣文\*<sup>3</sup>・中谷 忠稔\*<sup>4</sup>・上田 洋\*<sup>5</sup>・森田 善一郎\*<sup>6</sup>

Bubble and Liquid Flow Behavior in a Bath Agitated by Porous Nozzle Bubbling

Manabu IGUCHI, Katsuhisa OKITA, Norifumi KASAI, Tadatoshi NAKATANI, Hiroshi UEDA and Zen-ichiro MORITA

**Synopsis :** Air was injected through a centric wooden porous nozzle into a water bath. More than 1000 bubbles in a mean diameter of approximately 3 mm were generated during one second. The radial dispersion of the bubbles in the course of rising in the bath, mean bubble diameter, and mean bubble rising velocity were determined using a camera and a high-speed video camera. The liquid motion was driven mainly by the buoyancy force of bubbles. The mean velocity components, root mean square values of turbulence components, Reynolds shear stress and so on were measured using a two-channel laser Doppler velocimeter.

These results were compared with those for a centric single-hole bottom nozzle to clarify the effects of bubble size on the above-mentioned bubble and liquid flow characteristics. In an axial region away from the nozzle where the buoyancy force of bubbles plays an important role, the radial dispersions of bubbles for the two kinds of nozzles were the same. The axial (vertical) mean velocity and turbulence production were significantly dependent on the size of bubbles. Larger bubbles promoted the turbulence production in the vertical bubbling jet.

**Key words :** two-phase flow ; steelmaking ; injection ; laser Doppler velocimeter ; Reynolds shear stress ; electroresistivity probe ; gas holdup ; porous nozzle.

## 1. 緒言

各種製鋼プロセスにおいて、ガス吹込み操作は精錬反応の促進、浴内の温度や成分の均一化、非金属介在物の浮上分離の促進など広範囲に適用されている<sup>1-3)</sup>。特に、多孔質ノズル(プラグ)を用いたバブリング技術は気泡の大きさを微細化し反応界面積を大きくし得るのではないかと、また非金属介在物の浮上分離に単孔ノズルの場合よりも有効であるのではないかと<sup>4)</sup>といった期待感から多用されており、気泡を微細化するための耐火物の改善も進められている<sup>5)</sup>。これに関連して、水モデルにおける多孔質ノズルから生成する気泡の頻度や均一混合時間などに関する基礎的研究がいくつか見られるが<sup>6-9)</sup>、上昇中の気泡の挙動と液体の流動特性に関する研究は少なく<sup>10,11)</sup>、特に気泡噴流部の流動特性の報告はない。

従来の気泡生成に関する研究によれば<sup>12)</sup>、溶鋼と多孔質ノズルとの濡れ性の悪い場合には、微小気泡の生成は難しいことが予想される。しかし、後で言及するように、ノズル

の溶損は別問題として、ノズルの濡れ性を良くすれば小さな気泡を発生させることも可能となる。その場合には濡れ性の良いノズルを用いて得られた水モデルの結果が適用できる。

Anagbo & Brimacombe<sup>10)</sup>は多孔質ノズルから生成する気泡の挙動に関して3つの形態(低ガス領域, 中間ガス領域, 高ガス領域)が存在することを明らかにした。本研究でも、まず水モデルに着目し低ガス領域、すなわち多孔質ノズルで生成した多数の小さな気泡が円筒浴内を合体、分裂することなく上昇していくガス領域を対象として、気泡特性と液体の流動特性の測定を行い、単孔ノズルの結果と比較して気泡噴流の流動特性に及ぼす気泡径の影響を調べた。

## 2. 実験装置と測定方法

Fig. 1 に実験装置の概要を示す。容器の内径Dは20cm, 高さHは39cmであり、水を浴深 $H_L=30$ cmまで満たした。空気流量 $Q_g$ を質量流量計で調整し、浴の底に設置した木製の多

平成7年7月24日受付 平成7年11月29日受理 (Received on July 24, 1995; Accepted on Nov. 29, 1995)

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

\* 2 大阪大学研究生 (Visiting Researcher, Osaka University)

\* 3 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

\* 4 大阪大学大学院生 (Graduate Student, Osaka University)

\* 5 大阪大学大学院生(現:石川島播磨重工業(株)) (Graduate Student, Osaka University, now Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.)

\* 6 大阪大学工学部(現:住友金属工業(株)) (Faculty of Engineering, Osaka University, now Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

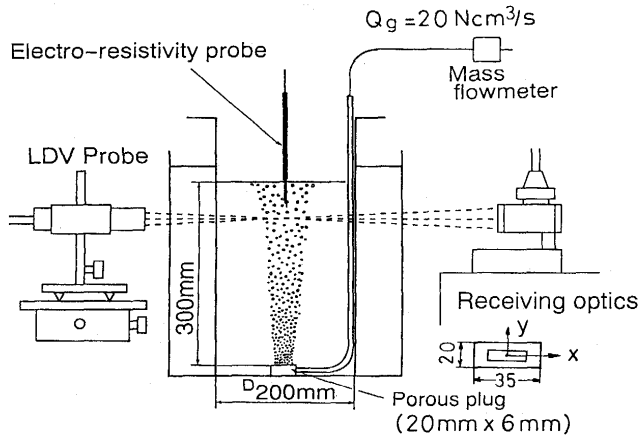


Fig. 1. Experimental apparatus.

孔質ノズルから標準状態でのガス流量が $20\text{cm}^3/\text{s}$  (以下 $20\text{Ncm}^3/\text{s}$ と表す)で吹込んだ。ただし、発生部は円形断面ではなく $20\text{mm}\times 6\text{mm}$ の長方形である。そこで軸方向と半径方向の座標 $z$ ,  $r$ の原点をノズル中心に置くとともに、ノズル上に $x$ ,  $y$ 座標もとっている。Anagbo & Brimacombeは、多孔質ノズルの単位面積あたりのガス流量 $Q_g'$ が $Q_g' \leq 14\text{cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$ の領域を低ガス流量域と定義している。彼らの実験における低ガス流量領域での平均気泡径 $\bar{d}_B$ は約 $5\text{mm}$ である。本実験の場合 $Q_g' = 16\text{cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$ であるが、彼らの定義した低ガス流量時の流動パターンが観察された。

従来の多孔質ノズルは、焼結合金やセラミックスで作られており、孔の出口の方向は一定ではなく、しかも各孔の大きさが異なるため、生成される気泡の大きさにはばらつきがある。ここで用いた木製ノズルは木目の直径がほぼ等しく、かつ等間隔で配列しており、出口は方向が全て水平面に対して $90^\circ$ の角度を有していることから、均一な直径を有する気泡を発生させることが可能である。なお、比較のために内径 $2\text{mm}$ の単孔ノズルを用いて、同じガス流量で実験を行った。多孔質ノズルで生成する平均気泡径は $\bar{d}_B = 2.6\text{mm}$ 、標準偏差は $\sigma_B = 0.8\text{mm}$ 、一方単孔ノズルの場合 $\bar{d}_B = 7.3\text{mm}$ 、 $\sigma_B = 3.6\text{mm}$ である。

ガスホールドアップ $\alpha$ 、気泡頻度 $f_B$ 、平均気泡上昇速度 $\bar{u}_B$ 、平均気泡弦長さ $\bar{L}_B$ などの気泡特性は2針の電気探針を用いて測定を試みた<sup>13)</sup>。電気探針の電極間距離 $L_p$ は $0.8\text{mm}$ とできるだけ短くなるように配慮したことにより、気泡直径が約 $2.6\text{mm}$ であっても、探針が気泡の中心近傍を貫通した場合にはその気泡を検知できるが、中心近傍以外では難しい。小さな気泡はその中心から端まで同じ速度で上昇するため、端でのデータがなくとも $\bar{u}_B$ は測定が可能であり、このことは写真撮影と高速度ビデオカメラによる観察結果との比較から分かった。しかし $\alpha$ と $f_B$ および $\bar{L}_B$ については、その気泡のあらゆる位置での測定値が必要なため、正しく求めることは困難である。よって気泡直径 $\bar{d}_B$ は写真撮影と高速度ビデオカメラを用いて求めた。

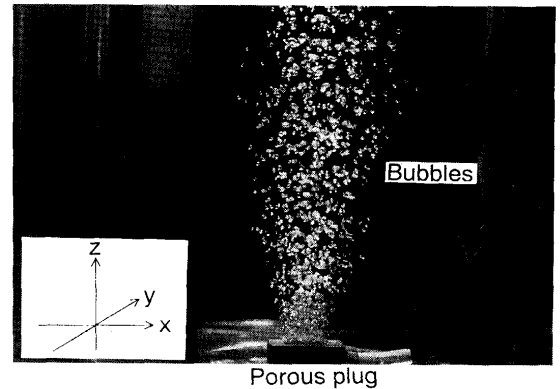


Fig. 2. Bubbles taken by a camera.

平均流速、乱れのrms値、レイノルズ応力などの液体の流動特性は2チャンネルのLDVを用いて測定した<sup>14)</sup>。レーザービームが気泡に遮られるためにデータレートは小さくなるが、測定時間を長くしていずれの測定点においてもデータ数 $N$ が10万個を越えるように配慮しており、測定結果の信頼性に問題はない。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 中心軸上分布

##### 3.1.1 気泡特性

Fig. 2に図中の $y$ 方向から撮影した上昇中の気泡の写真を示す。本実験条件下では1秒間当たり1000個以上の気泡が発生した。すべての気泡は球形を保っており、直径も $2.6\text{mm}$ とほぼ一定である。ここには示していないが、 $x$ 方向から撮影した写真をみると、 $z \geq 5\text{cm}$ の領域における気泡噴流の $y$ 方向への広がりには図中の気泡噴流の $x$ 方向への広がりにほぼ等しくなった。したがって、ノズルの形状が長方形であるにもかかわらず、ノズル出口からたかだか $5\text{cm}$ 程度離れた軸位置近傍からほぼ軸対称な流れが形成される。高速度ビデオカメラによる観察結果からも同じ結論が導かれた。

Sahai & Guthrie<sup>15)</sup>は、ガス流量が等しければ浮力の支配的な領域での気泡噴流の半径方向への広がりにはノズルの影響を受けないと述べている。本実験で観察された単孔ノズルの場合の気泡噴流の半径方向への広がりも多孔質ノズルの場合とほぼ等しく、彼らの知見に合致することがわかった。

単孔ノズルの場合、浮力が支配的な軸位置における平均気泡上昇速度 $\bar{u}_B$ のノズル内径依存性はほとんどない<sup>13)</sup>。興味深いことに、Fig. 3に示した多孔質ノズルの $\bar{u}_B$ の測定値も $z \geq 5\text{cm}$ の領域で単孔ノズルの値にほぼ一致している。なお、ノズル出口近傍では多数の気泡が存在するために、高速度ビデオカメラによる気泡上昇速度の測定は難しく、したがって、図には測定値を記入していないが、ノズルから離れたところの測定値は電気探針の測定結果によく一致してお

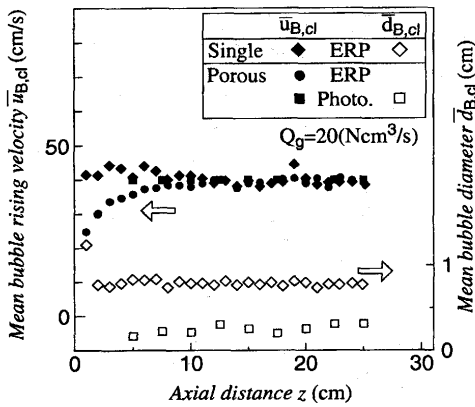


Fig. 3. Mean bubble rising velocity and mean bubble diameter on the centerline.

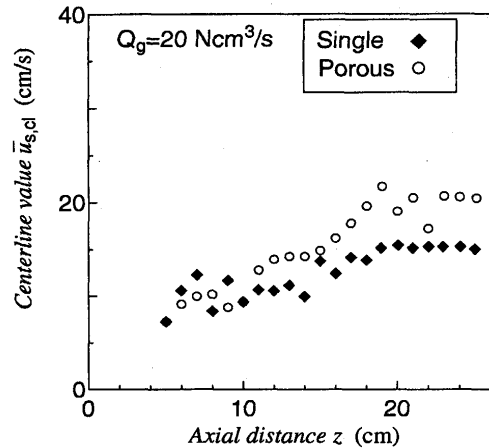


Fig. 5. Centerline value of axial slip velocity.

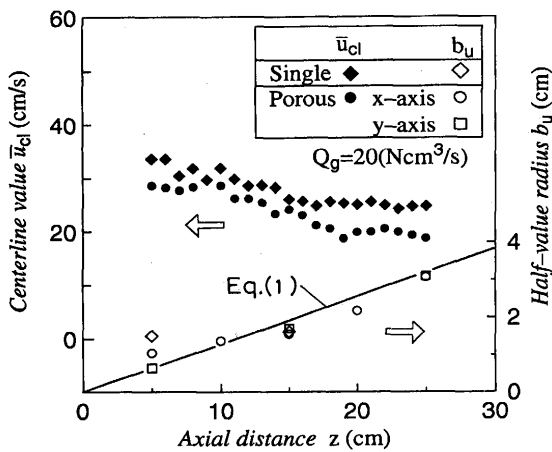


Fig. 4. Centerline value and half-value radius of axial mean velocity of liquid.

り、電気探針による測定法の妥当性を物語っている。

単孔ノズルと多孔質ノズルのいずれの場合にも、 $\bar{d}_B$ の測定値は軸方向にほぼ一定値を保っており、したがって気泡の合体、分裂はほとんど生じていない。

### 3.1.2 液体の流動特性

Fig.4に示した軸方向平均速度 $\bar{u}$ の中心軸上値 $\bar{u}_{cl}$ はいずれのノズルに関してもzの増加につれて徐々に減少し、半値半幅 $b_u$ の測定値が互いによく一致しているにもかかわらず、 $\bar{u}_{cl}$ は単孔ノズルのほうが大きい。気泡が大きいほど後流に取込まれる液体の量が多くなり、このような結果が得られたものと考えられる。

半値半幅 $b_u$ の測定値は図中に実線で示した

$$b_u = 0.13z \dots\dots\dots (1)$$

で近似できる。単相の乱流自由噴流については

$$b_u = 0.10z \dots\dots\dots (2)$$

の関係が成立するので<sup>16)</sup>、半径方向への運動量輸送は気泡噴流のほうがかなり大きい。これは半径方向に広がった気泡

によって自由噴流の場合よりも広い範囲に渡って強い周囲流体の巻き込みが起こるためである。ただし本実験の気泡径の範囲(約2mm~20mm)では、気泡の半径方向への広がりには気泡径の影響をほとんど受けず、したがって気泡噴流内を上昇する液体の半径方向への広がりを表す半値半幅 $b_u$ も気泡径にほとんど依存しない。

平均気泡上昇速度 $\bar{u}_B$ と液体の軸方向平均速度 $\bar{u}$ の差として定義されるすべり速度 $\bar{u}_s$ の中心軸上値 $\bar{u}_{s,cl}$ をFig.5に示す。ノズル出口近傍での $\bar{u}_{s,cl}$ はノズルの種類に関係なく約10cm/sとなるが、ノズルから離れるにつれて多孔質ノズルの方がやや大きくなり、 $z=18$ cmをすぎるといずれのノズルの場合もほぼ一定値をとる。

この結果は、直径の小さい気泡のほうがすべり速度の大きいことを意味している。単一気泡の場合には気泡径の増加と共にすべり速度は増加し、2mmあたりで極大値約35cm/sをとったのち、約25cm/sまで減少し、再びゆっくりと増加する傾向を示すことが知られている。この傾向が乱れの影響を受ける気泡群のすべり速度にそのまま適用できるわけではもちろんないが、ここで同じような結果が得られたことは興味深い。

Fig.6において、軸方向と半径方向の乱れ成分 $u', v'$ のrms値 $u'_{rms}, v'_{rms}$ の中心軸上値 $u'_{rms,cl}, v'_{rms,cl}$ はともに単孔ノズルのほうが多孔質ノズルよりも大きい。気泡の後流における乱れの生成は気泡が大きいほど大きいことがその原因である。 $v'_{rms,cl}$ はいずれのノズルの場合とも軸方向にあまり変化しないが、 $u'_{rms,cl}$ の軸方向変化はノズルによって異なる。前述のように、単孔ノズルのすべり速度 $\bar{u}_{s,cl}$ が小さいのは、中心軸近傍の乱流混合が多孔質ノズルよりも大きく、気泡の上昇に伴う流動抵抗が大きいことによる。

Fig.7に示した中心軸上の乱れ強さ $Tu_{cl}(=u'_{rms,cl}/\bar{u}_{cl})$ の分布はノズルによって顕著に異なる。単孔ノズルの測定値は軸方向に約0.5と一定値をとるが、多孔質ノズルの場合には約0.3から増加しはじめ、 $z=18$ cmでピーク値約0.6をとったのち減少に転じる。この理由は明らかでない。

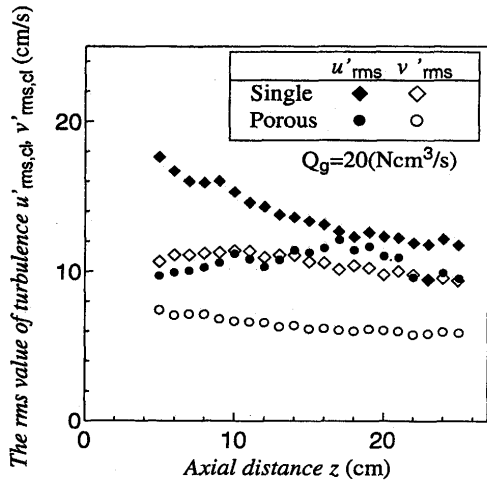


Fig. 6. The rms values of axial and radial turbulence components on the centerline.

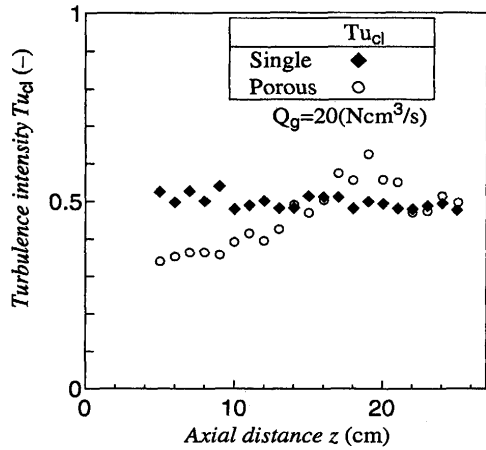


Fig. 7. Turbulence intensity on the centerline.

### 3・2 液体の流動特性を記述する諸量の半径方向分布

軸方向平均速度 $\bar{u}$ の半径方向分布をFig. 8に示す。 $r/b_u \leq 1.5$ の半径位置で、多孔質ノズルの測定値は単孔ノズルの場合と同様に正規分布によく一致しており、自己相似な分布となっている。なお中心から離れた半径位置で $\bar{u}$ が負の値をとるのは逆流循環流の存在による。

Fig. 9に軸方向と半径方向の乱れのrms値を軸方向平均速度の中心軸上値 $\bar{u}_{cl}$ で無次元化したものを示す。図中の実線と破線はWynanski & Fiedlerによる単相自由噴流の値である<sup>17)</sup>。この図とFig. 6を合せて考えれば、 $r/b_u \leq 1.5$ において、 $u'_{rms}/\bar{u}_{cl}$ と $v'_{rms}/\bar{u}_{cl}$ の分布はノズルにより異なり、軸方向に複雑な挙動を示すが、 $r/b_u \geq 1.5$ ではノズルによる差はあまりない。ただし両者とも実線と破線で示した単相の自由噴流<sup>17)</sup>の値よりは大きい。

レイノルズ応力 $\overline{u'v'}$ を $\bar{u}_{cl}^2$ で無次元化した半径方向分布は、Fig. 10に示すようにノズルの種類にほとんど依存しない。なお実線と破線は空気単相の自由噴流の値であり<sup>17,18)</sup>、本

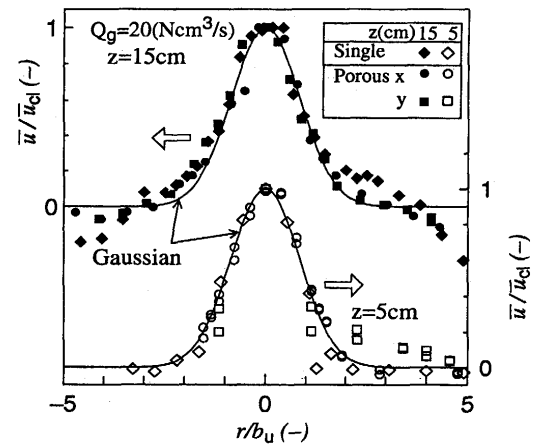


Fig. 8. Dimensionless radial distributions of axial mean velocity at  $z=5$  and  $15$ cm.

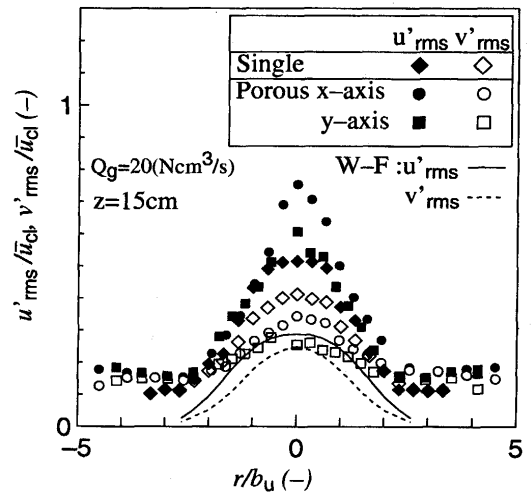


Fig. 9. Dimensionless radial distributions of axial and radial turbulence components at  $z=15$ cm. (W-F: Wynanski and Fiedler<sup>17)</sup>)

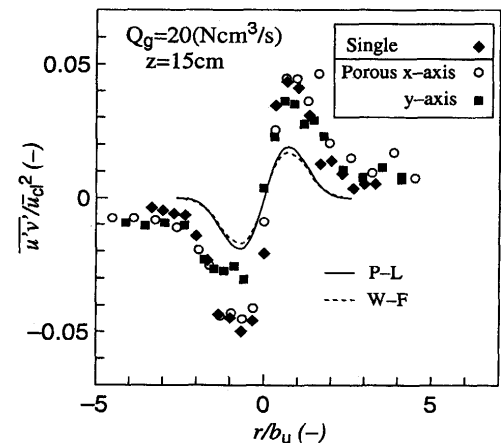


Fig. 10. Dimensionless radial distributions of Reynolds shear stress at  $z=15$ cm. (W-F: Wynanski and Fiedler<sup>17)</sup>, P-L: Panchapakesan and Lumley<sup>18)</sup>)

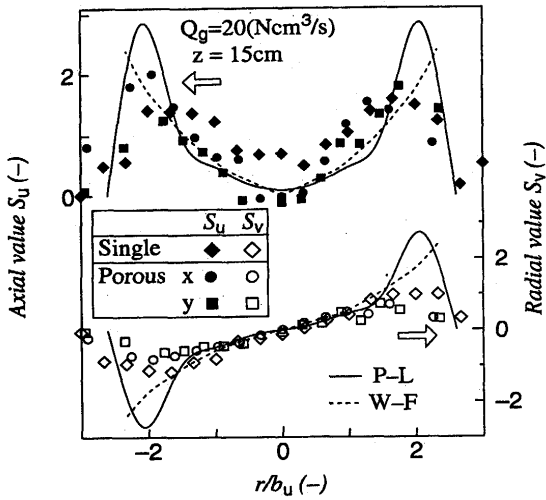


Fig. 11. Skewness factor for axial and radial turbulence components at z=15cm.

測定値との比較は $r/b_u \leq 1.5$ の半径位置で有効である。本測定値は単相自由噴流の値<sup>17,18)</sup>とは顕著に異なる。 $\bar{u}_{c1}$ は単孔ノズルのほうが多孔質ノズルよりも大きいので、 $\bar{u}'\bar{v}'$ も大きく、したがって乱れの生成は単孔ノズルのほうが大きくなる。

乱れ成分 $u'$ ,  $v'$ の確率密度分布の対称性に対する情報を与える歪み度 $S_u$ と $S_v$ は次式で定義される<sup>19)</sup>。

$$S_u = [\sum u_i'^3 / N] / u'_{rms}{}^3 \dots\dots\dots (3)$$

$$S_v = [\sum v_i'^3 / N] / v'_{rms}{}^3 \dots\dots\dots (4)$$

ここで添字 $i$ は $i$ 番目のデジタルデータを表す。歪み度は確立密度分布のピークが平均値よりも小さい所にあれば正、逆に大きい所にあれば負の値をとる。つまり、この歪み度と後で述べる偏平度は、気泡の乱れの特性に及ぼす影響がどの程度あるかについての指標となり、一般に歪み度や偏平度が単相流に比べて異なるほど気泡が液体を激しく乱しながら上昇していることを表している。詳細については文献<sup>19)</sup>を参照されたい。

歪み度 $S_u$ と $S_v$ の測定値をFig. 11に示す。実線と破線は単相の自由噴流の値であり<sup>17,18)</sup>、本測定値との比較は $r/b_u \leq 1.5$ の半径位置で有効である。 $r/b_u \leq 1.5$ において、単孔ノズルの $S_u$ は単相の自由噴流の値よりもかなり大きくなり、 $S_v$ は単相噴流の値と非常によく一致する。一方、多孔質ノズルの歪み度 $S_u$ と $S_v$ はともに単相噴流の値によく一致している。

この傾向はFig. 12に示す軸方向と半径方向の偏平度 $F_u$ ,  $F_v$ についても同様である。確率密度分布の広がりを表す偏平度 $F_u$ ,  $F_v$ は次式で定義される<sup>19)</sup>。

$$F_u = [\sum u_i'^4 / N] / u'_{rms}{}^4 \dots\dots\dots (5)$$

$$F_v = [\sum v_i'^4 / N] / v'_{rms}{}^4 \dots\dots\dots (6)$$

偏平度は確立密度分布が正規分布よりも尖っていれば3より大きく、平坦であれば3より小さくなる。正規分布の歪

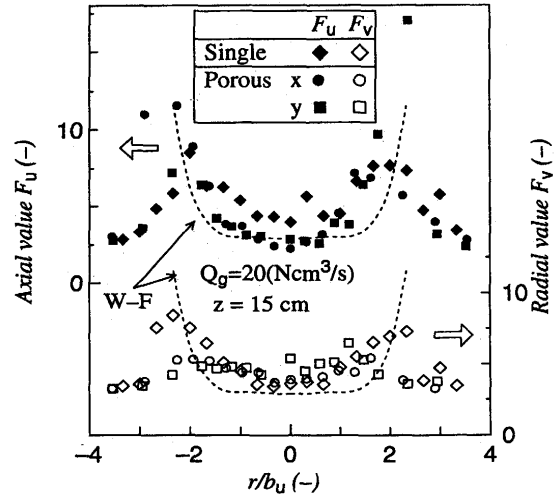


Fig. 12. Flatness factor for axial and radial turbulence components at z=15cm.

み度は0、偏平度は3である。図の $r/b_u \leq 1.5$ において、多孔質ノズルの $F_u$ と $F_v$ はともに実線と破線で示される単相自由噴流の値<sup>17)</sup>にほぼ一致しており、したがって小さな多数の気泡に誘起される乱れ成分の確率密度分布は単孔ノズルとは異なり、気泡噴流の中心近傍では正規分布に従うことになる。単孔ノズルの場合には、大きな気泡の後流での乱れの生成に伴う大きな $u'$ の存在によって、 $u'$ の頻度分布が正規分布から偏り、その結果 $S_u$ は正の値をとり、 $F_u$ は3よりも大きくなる。

### 3.3 溶鉄中に設置した多孔質ノズルからの微細気泡生成の可能性

各種精錬プロセスにおいては、ノズルの溶損や化学反応を防ぐために、一般に濡れ性の悪いノズルが用いられる。多孔質ノズルの各孔から出るガス流量は通常非常に小さく、慣性力が無視できることにより、濡れ性が悪ければ個々の気泡は周囲へ広がり、合体して一つの大きな気泡になると考えられる<sup>12)</sup>。またガス流量を大きくして各孔から出るガス流量を大きくしても孔の出口の方向は同じでないから、気泡は合体してやはり大きな気泡が生成するであろう<sup>12)</sup>。したがって、多孔質ノズルで小さな気泡を生成させるには、ノズルの濡れ性を良くすることが一つの方策である。ただし、この場合には消耗型のノズルとならざるを得ない。溶鉄の成分に応じて濡れの程度は異なるので<sup>20,21)</sup>、ここで具体的な材質を挙げることはできないが、気泡径と濡れ性に関する推測の妥当性については今後の課題としたい。

なお、ノズルの保護策としてノズルにマッシュルームと呼ばれる凝固附着物を生成させることがよく行われている<sup>22-25)</sup>。一般に凝固附着物と融体との濡れ性は良いので、水モデル実験から判断して<sup>25)</sup>、凝固附着物からは小さな気泡が生成していると考えられる。この現象を積極的に利用すれば、溶鉄中における多孔質ノズルからの多数の微小気泡の生成も可能となるであろう。

熔融金属中における微小気泡生成についてはさらに詳細な実験的検討が必要である。

## 4. 結言

### 4・1 気泡特性

(1) 写真観察に基づいて求めた気泡の生成頻度は1000Hz以上、直径は約2.6mmである。多孔質ノズルにおける気泡の水平方向への広がりにはノズル形状が20mm×6mmの長方形であるにも拘らず、 $z \geq 5\text{cm}$ の区間でほぼ軸対称となり、しかも単孔ノズルから同じ流量のガスを吹込んだ場合の水平方向への広がりとはほぼ一致した。

(2) ノズルのごく近傍( $z \leq 5\text{cm}$ )を除けば、平均気泡上昇速度 $\bar{u}_B$ はノズルの種類に依存しない。また写真観察によれば、多孔質ノズルの平均気泡径 $\bar{d}_B$ は浴内のいたるところでほぼ一定であり、浴内で気泡の合体、分裂はない。

### 4・2 液体の流動特性

流動特性については $z \geq 5\text{cm}$ の区間に限定する。

(1) 軸方向平均速度 $\bar{u}$ の中心軸上値 $\bar{u}_{cl}$ は単孔ノズルの方が大きい。 $\bar{u}_B$ はノズルの種類にほとんど依存しないことから、気泡と液の間の相対速度すなわちすべり速度 $\bar{u}_s$ は多孔質ノズルのほうが大きい。

(2) 軸方向平均速度 $\bar{u}$ の半径方向分布は単孔ノズルの場合と同じく正規分布に従う。またx, y方向の半値半幅 $b_u$ の値に有意差はなく、単孔ノズルの値とも一致する。

(3)  $r/b_u \leq 1.5$ における軸方向と半径方向の乱れ成分 $u'$ ,  $v'$ のrms値 $u'_{rms}$ と $v'_{rms}$ はともに単孔ノズルのほうが多孔質ノズルの場合よりも大きい。これは、気泡径の増加につれて後流での乱れの生成が増加することによる。

(4) 単孔ノズルの中心軸上乱れ強さ $Tu_{cl}$ ( $=u'_{rms,cl}/\bar{u}_{cl}$ )は軸方向にほぼ一定値をとるが、多孔質ノズルの値は途中でピーク値をとり、単調ではない。この理由はまだ明らかでない。

(5) 無次元レイノルズ応力 $\overline{u'v'}/\bar{u}_{cl}^2$ の半径方向分布はノズルの種類にほとんど依存しない。しかし $\bar{u}_{cl}$ は単孔ノズルのほうが大きいので、 $\overline{u'v'}$ も大きくなる。したがって、乱れの生成は単孔ノズルのほうが大きい。

(6) 気泡噴流部の $r/b_u \leq 1.5$ における $v'$ の歪み度 $S_v$ と偏平度 $F_v$ はノズルの種類にほとんど依存せず、互いにほぼ等し

く、しかも単相の自由噴流の値に一致する。一方、 $u'$ の歪み度 $S_u$ と偏平度 $F_u$ はノズルの種類に強く依存する。すなわち多孔質ノズルの場合の $S_u$ と $F_u$ は $S_v$ ,  $F_v$ と同様に単相流の値に一致するが、単孔ノズルの $S_u$ と $F_u$ は自由噴流の値よりも大きくなる。このような結果は気泡の後流で生成される乱れの特性の相違に帰着される。

(7) 長方形断面の多孔質ノズルで生成した気泡の半径方向分散状態ならびに液体の流れは、ノズルから5cm程度離れるだけでともにほぼ軸対称になる。

## 文 献

- 1) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **67** (1981), 672.
- 2) N.J.Themelis and P.Goyal: Canad. Metall. Quarterly, **22** (1983), 313.
- 3) 攪拌を利用した最近の鉄鋼技術の動向, 日本鉄鋼協会編, (1984)
- 4) 中島敬治, 川崎守夫: 鉄と鋼, **80** (1994), 611.
- 5) 林 安茂, 杉野太加夫, 速水邦夫, 丹羽茂樹, 岩澤 力: 第72回 鑄造用耐火物専門委員会資料, (1990)
- 6) R.T.Baxter and A. E.Wraith: Chem. Eng. Sci., (1970), 1244.
- 7) P.Goyal, S.V.Joshi and J. Wang: J.Metals, **35** (1983), 52.
- 8) C.W.Booth and A. J.Clegg: British Foundryman, **77** (1984), 96.
- 9) T.Stapurewicz and N.J.Themelis: Canad. Metall. Quarterly, **26** (1989), 123.
- 10) P.E.Anagbo and J.K.Brimacombe: Metal. Trans. B, **21B** (1990), 637.
- 11) S.T.Johansen, P.G.C.Robertson, K.Woje and T.A.Engh: Metal. Trans. B, **19B** (1988), 745.
- 12) 佐野正道, 井口 学, 高梨智裕, 小川雄二, 徳光直樹, 森田善一郎: 鉄と鋼, 誌上討論, **81** (1995), 243.
- 13) 井口 学, 野沢健太郎, 富田裕志, 森田善一郎: 鉄と鋼, **77** (1991), 1426.
- 14) M.Iguchi, T.Kondoh and T.Uemura: Int. J.Multiphase Flow, **20** (1993), 753.
- 15) Y.Sahai and R.I.L.Guthrie: Metal. Trans. B, **13B** (1982), 193.
- 16) 石垣 博: 日本機械学会論文集B編, **48** (1982), 1692.
- 17) I.Wygnanski and H.Fiedler: J.Fluid Mech., **38** (1969), 577.
- 18) N.R.Panchapakesan and J.L.Lumley: J.Fluid Mech., **246** (1993), 197.
- 19) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, (1977), 107.
- 20) 溶鋼, 溶滓の物性値便覧, 日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会 溶鋼溶滓部会編, (1972)
- 21) 荻野和巳: 電気製鋼, **52** (1981), 262.
- 22) 片桐 衆, 小沢泰久, 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **73** (1987), 2206.
- 23) S.Ohguchi and D.G.C.Robertson: Ironmaking Steelmaking, **10** (1983), 15.
- 24) C.Xu, Y.Sahai and R.I.L.Guthrie: Ironmaking Steelmaking, **11** (1984), 101.
- 25) M.Iguchi, H.Tokunaga, H.Tatemichi and Z.Morita: Int. J. Multiphase Flow, **19** (1993), 173.