

貫入噴流によって攪拌される浴内流動過渡時間の 粒子画像流速計による測定

清水 知之*・井口 学*²・津田 宜久*³

Particle Image Velocimetry (PIV) Measurement of Flow Establishment Time in a Bath Agitated by Plunging Jet

Tomoyuki SHIMIZU, Manabu IGUCHI and Norihisa TSUDA

Synopsis : The instantaneous velocity of flow in a water bath agitated by a plunging water jet was measured with particle image velocimetry (PIV). The water in the bath was initially at rest and then driven by the plunging water jet. The period from the start of plunging to the moment at which the flow in the bath becomes a steady state is defined as flow establishment time. The turbulence components were used to determine the flow establishment time in place of the commonly used mean velocity components. An empirical equation was proposed for the flow establishment time.

Key words: unsteady flow; plunging jet; flow establishment time; turbulence; PIV; mixing.

1. 緒言

鉄鋼精錬プロセスにおいて、固体粉末の脱硫、脱リン、脱珪剤を溶鋼中に分散することで成分を調整する手法が広く用いられている。これらのプロセスでは、溶鋼よりも密度の小さい低密度粒子を均一分散させ、さらに粒子の滞留時間を長くすることが課題となる。滞留時間は容器内の流動と密接な関係があり、攪拌によって生じる流動現象の解明が望まれている。

固体粉末の溶鋼中へのキャリア法として、上吹き、浸漬ノズル吹き、底吹き等のガス吹込み攪拌²⁾、インペラーによる機械式攪拌³⁾および落下流を利用した貫入噴流(plunging jet)による攪拌等が挙げられる。これまでに、ガス吹込み攪拌、機械式攪拌に関する研究は数多く見られるが、非常に強い攪拌効果を有する貫入噴流による攪拌を対象にした研究は少ない。

貫入噴流は液表面を貫く際に気泡を捕捉する性質をもつ液層への気体溶解に優れた攪拌法であり、化学工学や土木工学をはじめとしてさまざまな分野で活発な研究⁴⁻⁸⁾が行われ、噴流流速や気泡の巻き込みおよび分散挙動などの噴流特性が明らかにされている。

従来の研究によれば⁸⁾、Fig. 1に示したType 1は、貫入噴流が層流であって、噴流表面が滑らかなときに現れる。Type 2は貫入噴流が遷移流であって、噴流表面が滑らかな状態と粗い状態が交互に現れる場合に生じる。また、Type

3は貫入噴流が乱流であって、噴流表面が粗いときに現れる。なお、気泡の巻き込みのないType NBは貫入噴流が層流であって、Type 1よりも流速の小さいときに現れる。貫入噴流を層流から乱流に変化させるには、パイプ（本実験ではパイプ状のノズルを用いている）内の流速（流量/パイプ断面積）やパイプ内径を変えて、パイプ内のレイノルズ数が層流、遷移流、乱流の各領域に入るようにしてやればよいことになる。本研究ではレイノルズ数が臨界レイノルズ数（約2300）の前後の値をとるように配慮している。

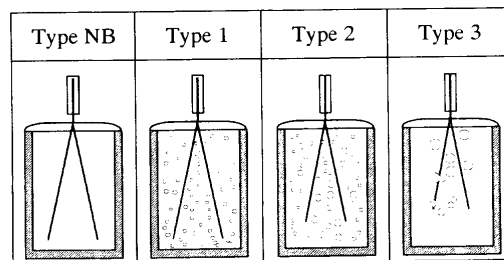
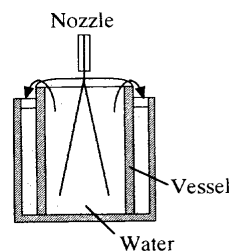


Fig. 1. Bubble dispersion patterns.

平成13年2月1日受付 平成13年5月23日受理 (Received on Feb. 1, 2001; Accepted on May 23, 2001)

* 北海道大学大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University)

* 2 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

* 3 (株) 日鐵テクノロジー (Nippon Steel Technoresearch Corp.)

ところが、貫入噴流がパイプの出口で層流であっても、パイプ出口から浴表面までの距離すなわちノズル高さ h が大きくなると、貫入噴流は遷移流を経て乱流になる。したがって、 h を調整することによっても貫入噴流のタイプを変えることができる。すなわち、貫入噴流のタイプは噴流流量、パイプ内径、ノズル高さに依存する。しかしながら、攪拌を開始してから容器内の流動が定常状態に至るまでの過渡時間については不明な点が多いのが現状である。過渡時間を評価することは、均一混合時間とも関連して実際にプロセスを構築する上で非常に重要である。

そこで本研究では、4タイプの貫入噴流において流速測定の容易なType NB, Type 1およびType 3を対象として、過渡時間を測定し実験式を導出した。Type 1で現れる微細気泡に関しては、過去の研究⁸⁾において水の速度と等しい速度で移動していることが明らかにされていることから⁸⁾、水の流速とみなして測定した。大小さまざまな気泡が存在するType 2では、気泡と流速測定に用いるトレーサー粒子とを識別することが難しいため対象外とした。粒子画像流速計の詳細は後述する。

2. 実験装置と測定方法

2.1 実験装置

実験装置をFig. 2に示す。光の屈折による撮影画面の歪みを軽減させるために、アクリル製正方形断面の浴および透明アクリル製円筒容器に水を満たした。静止した水浴内へ、水噴流を容器中心軸上方よりガラス製円筒パイプを通じて吹き込んだ。流量の制御は、浴上部に設置したオーバーフロータンクの高さを変えることにより行った。円筒容器から溢れ出た水はポンプを用いてオーバーフロータンク

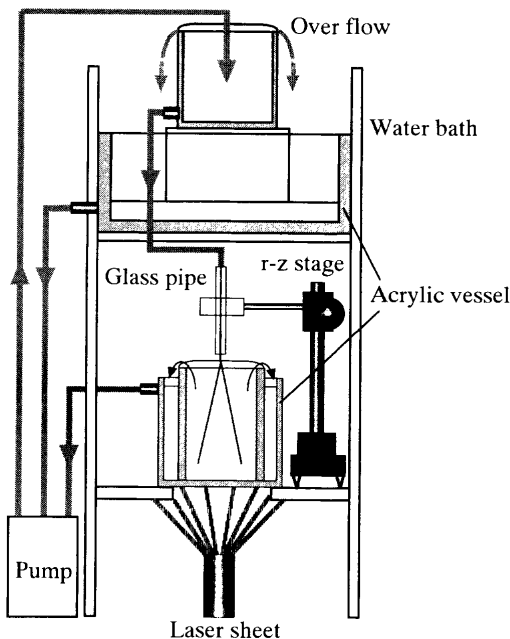


Fig. 2. Experimental apparatus for PIV measurement.

クに戻して循環させた。容器底部からレーザーシート光を照射することにより可視化された粒子を水平方向からCCDカメラ(30 frames/s)で撮影し、PIV画像処理を行い、速度を求めた。

円筒容器の詳細をFig. 3に示す。円筒容器の内径 D は64 mm、高さ H は110 mmであり、レーザーシート光は円筒容器の中心軸を含む鉛直断面に照射するように設置した。ガラス製円筒パイプの内径 d_{ni} は1.00, 1.55, 2.00 mmであり、対応する長さ L はそれぞれ125, 190, 250 mmである。円筒容器一杯に水を入れたときの水面を基準としてノズル高さ h 、水面からの深さ z 、半径位置 r をそれぞれ図中に示すように定義する。また鉛直および半径方向速度をそれぞれ u と v とする。トレーサー粒子は、平均粒径 \bar{d}_p が75~150 μm 、密度 ρ_p が1013 kg/m^3 のスチレンジビニル製共重合体を使用した。

噴流流量 Q_w は、パイプの内径 d_{ni} に応じて1.23, 3.15, 5.10 cm^3/s と変化させた。この際のガラス管内における平均速度 \bar{u}_0 は1570~1670 mm/s 、レイノルズ数 Re は1540~3190となった。なお、 \bar{u}_0 、 Re はそれぞれ次式で定義される。

$$\bar{u}_0 = 4Q_w / (\pi d_{ni}^2) \dots\dots\dots (1)$$

$$Re = d_{ni} \bar{u}_0 / \nu_w \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ν_w は水の動粘度である。

Fig. 4に本実験条件下における流動タイプを分類した。ノズル高さ h および噴流流量 Q_w の値に応じて、全く気泡を巻き込まないタイプ(Type NB)、微細気泡を巻き込むタ

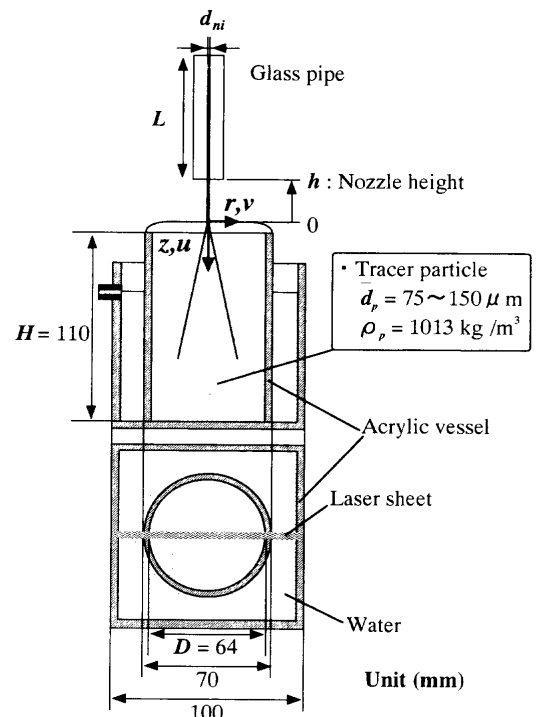


Fig. 3. Detail of vessel.

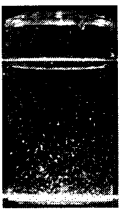
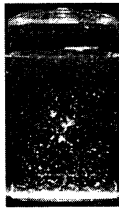

Type NB	Type 1	Type 3
		
$Q_w = 1.23(\text{cm}^3/\text{s})$ $h = 6, 11(\text{mm})$	$Q_w = 1.23(\text{cm}^3/\text{s})$ $h = 16(\text{mm})$	$Q_w = 1.23(\text{cm}^3/\text{s})$ $h = 45(\text{mm})$
$Q_w = 3.15(\text{cm}^3/\text{s})$ $h = 7(\text{mm})$	$Q_w = 3.15(\text{cm}^3/\text{s})$ $h = 10(\text{mm})$	$Q_w = 3.15(\text{cm}^3/\text{s})$ $h = 37(\text{mm})$
$Q_w = 5.10(\text{cm}^3/\text{s})$ $h = 8(\text{mm})$	$Q_w = 5.10(\text{cm}^3/\text{s})$ $h = 9(\text{mm})$	$Q_w = 5.10(\text{cm}^3/\text{s})$ $h = 38(\text{mm})$

Fig. 4. Flow types investigated in this study. ($d_{ni}=1.00$ mm for $Q_w=1.23$ cm³/s, $d_{ni}=1.55$ mm for $Q_w=3.15$ cm³/s, and $d_{ni}=2.00$ mm for $Q_w=5.10$ cm³/s)

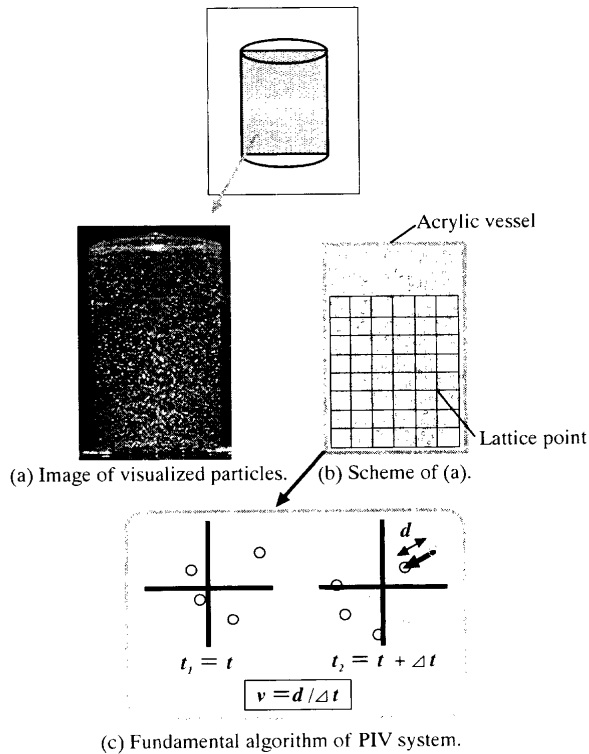
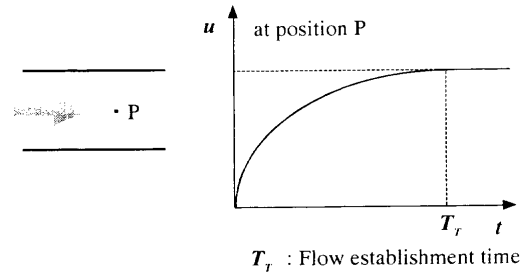


Fig. 5. Explanation of PIV system. (a) Image of visualized particles. (b) Scheme of (a). (c) Fundamental algorithm of PIV system.

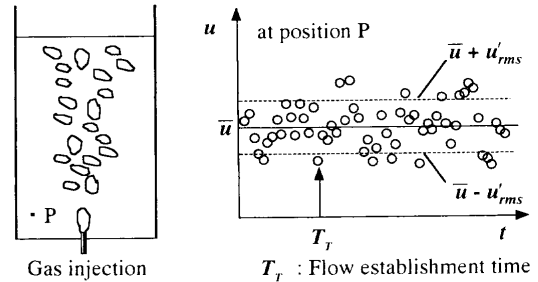
イブ(Type 1), 大きな気泡を巻き込むタイプ(Type 3)が現れるようにしてある。図中で小さな白い斑点は主にトレーサー粒子を, Type 3のみにおいてみられる大きな白い斑点は気泡を表している。

2.2 PIVによる流速測定法の概要

Fig. 5(a)に Type NBにおける可視化された粒子画像の一例を示す。白い斑点が可視化された粒子である。説明の簡略化のため Fig. 5(b)にその模式図を示す。この粒子画像を



(a) Laminar pipe flow



(b) Turbulent bubbling jet

Fig. 6. Method of determining flow establishment time T_T . (a) Laminar pipe flow. (b) Turbulent bubbling jet.

用いた流速測定の方法は次に示す通りである⁹⁾。まず、この粒子画像をコンピュータに取り込み、画面上に速度ベクトルの始点となる格子点を設定する。次に、時刻 t_1 と t_2 の二画面間において格子点の周りを移動する粒子分布について相互相関を計算しベクトルを算出する。なお、速度は粒子の移動距離 d を微小時間 Δt で除すことにより得られる。(Fig. 5(c))

2.3 過渡時間 T_T の評価方法

過渡時間の評価法には以下の2種類がある。管内層流の場合には、管内に流体を流し始めるとしだいにその流速は増し、ある測定点(P点)における値はある時間を過ぎると一定値を示すが、流速がその値の例えば99%に達するまでの時間を過渡時間 T_T と定義することが知られている⁹⁻¹¹⁾(Fig. 6(a))。管内流では乱流であっても乱れ成分が平均速度 \bar{u} の約15%以下のため、層流の場合と同様にして平均速度に着目して過渡時間が求められる。しかしながら、底吹き気泡噴流のような乱流においては乱れが非常に大きく、平均速度に着目して過渡時間を評価することは困難である。本研究でも乱れ成分が非常に大きいため、乱れ成分により評価する手法¹²⁾を用いて過渡時間の評価を行った。

Fig. 6(b)の測定点(P点)における鉛直および半径方向速度(u, v)の履歴から、各方向の平均速度と乱れ成分の2乗平均の平方根値 (root-mean-square 値, rms 値と略記) を求める。平均速度(\bar{u}, \bar{v}), 乱れ成分(u', v'), rms 値(u'_{rms}, v'_{rms}) はそれぞれ次式で定義される。

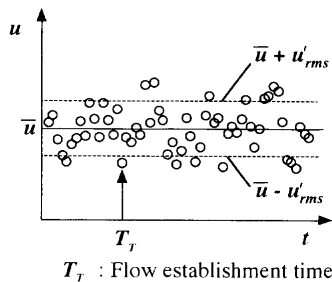
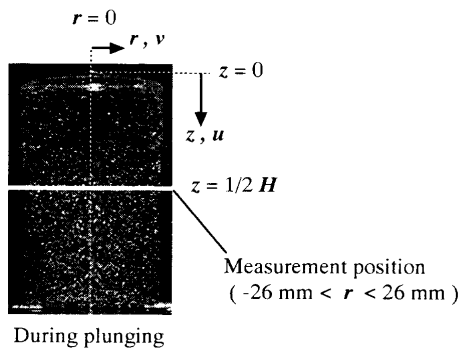


Fig. 7. Definition of flow establishment time T_T .

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^N (u_i / N), \quad \bar{v} = \sum_{i=1}^N (v_i / N) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$u'_i = u_i - \bar{u}, \quad v'_i = v_i - \bar{v} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$u'_{rms} = \left[\sum_{i=1}^N (u'^2_i / N) \right]^{1/2}, \quad v'_{rms} = \left[\sum_{i=1}^N (v'^2_i / N) \right]^{1/2} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで添え字 i は i 番目のデータを表す。

攪拌を開始してから、各方向速度が平均速度と rms 値の和もしくは差の値 ($\bar{u} \pm u'_{rms}$, $\bar{v} \pm v'_{rms}$) を 2 度超えるまでの時間のうち最も遅い時間を過渡時間 T_T と定義する。この理由は前報¹²⁾に詳しく述べているが、静止状態から噴流を吹き込むことによって乱れが急激に大きくなり、この際に一度は上記しきい値のいずれかを超えることを考慮し、その次に超えた時間を乱流状態が定常状態に達したとみなしている。前報で対象とした底吹き気泡噴流の場合¹²⁾、浴内には比較的長い周期と短い周期の変動が存在し、両者の影響を厳密に見るには長時間平均に基づく乱れ成分と短時間平均に基づく乱れ成分のそれぞれに着目して過渡時間 T_T を評価する必要があることが分かっている。ただし、結果的にはそれぞれの基準による過渡時間にほとんど差が見られなかったことから、本論文ではデータ処理の容易な長時間平均に基づく乱れ成分に着目した。

測定位置であるが、円筒容器上部では実験装置の関係で視野面積が狭く PIV 測定に適した鮮明な粒子画像が得られない。また円筒容器底部付近では反転流による揺らぎの影響が大きい。これらを考慮して、測定点の位置を円筒容器

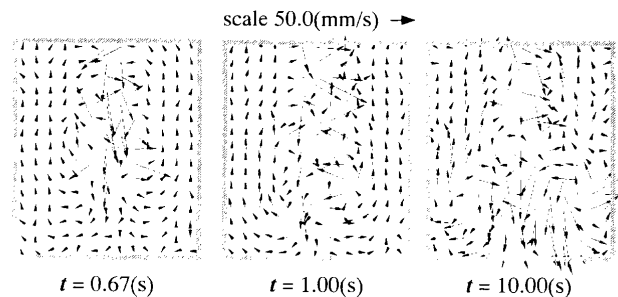
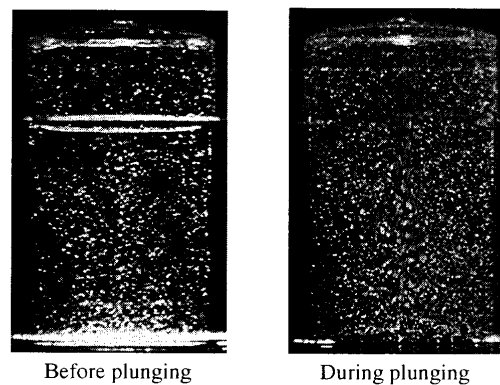


Fig. 8. History of flow development. (Type NB, $Q_w = 1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$, $h = 6 \text{ mm}$)

高さの半分 ($z = 1/2 H$) の軸上におけるいくつかの半径位置とした (Fig. 7)。各半径位置において、鉛直方向および半径方向の速度 (u, v) から、平均速度 (\bar{u}, \bar{v}) と乱れ成分 (u', v')、rms 値 (u'_{rms}, v'_{rms}) を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 速度ベクトルと攪拌過程

PIV 測定により得られた Type NB における速度ベクトルの一例を Fig. 8 に示す。上の写真は静止状態および噴流が貫入中の粒子画像を、下の図は噴流の貫入開始後のベクトルを表している。貫入噴流は周囲の液体を巻き込みながら浴底部に達し、容器全体へと徐々に広がっている様子が分かる。

Fig. 9 は Type NB, 1 における容器内の攪拌の様式図であり、写真上の白線は噴流の境界を示している。噴流は水面から浴底部に近づくにつれ広がり、その際に周囲の液体を巻き込んで比較的小さな渦を形成しながら浴底部へ到達する。そして浴底部において不安定に左右に分かれ、容器内壁に沿う反転流を形成する。この反転流は $Q_w = 1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$, $h = 6 \text{ mm}$ (Type NB) では、浴底部から容器高さの約 1/4 のところで容器側壁から剥離して浴底部付近に大きな渦を形成し、時々刻々三次元的に流れの方向を変えていた。

これに対して Type 3 における容器内の攪拌では、Fig. 10 に示すように噴流が水面を貫く際に捕捉された大きな気泡が水面下に存在している。この気泡によって噴流の進行が妨げられ、噴流の軌道は振り子のように左右に揺れて定常

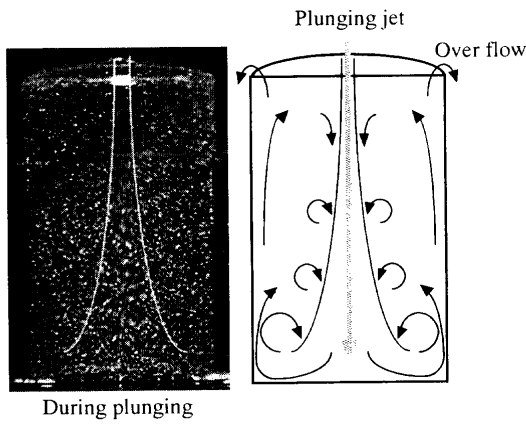


Fig. 9. Schematic of flow in the bath. (Type NB, 1)

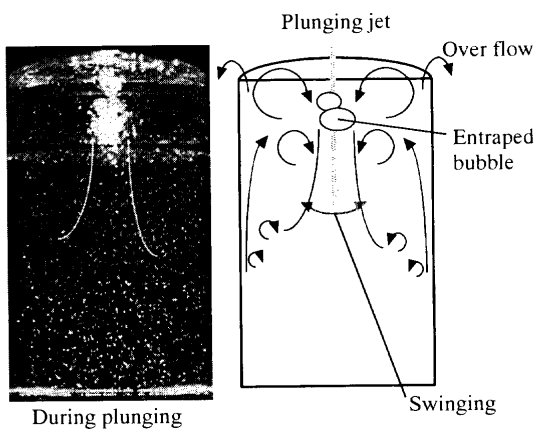


Fig. 10. Schematic of flow in the bath. (Type 3)

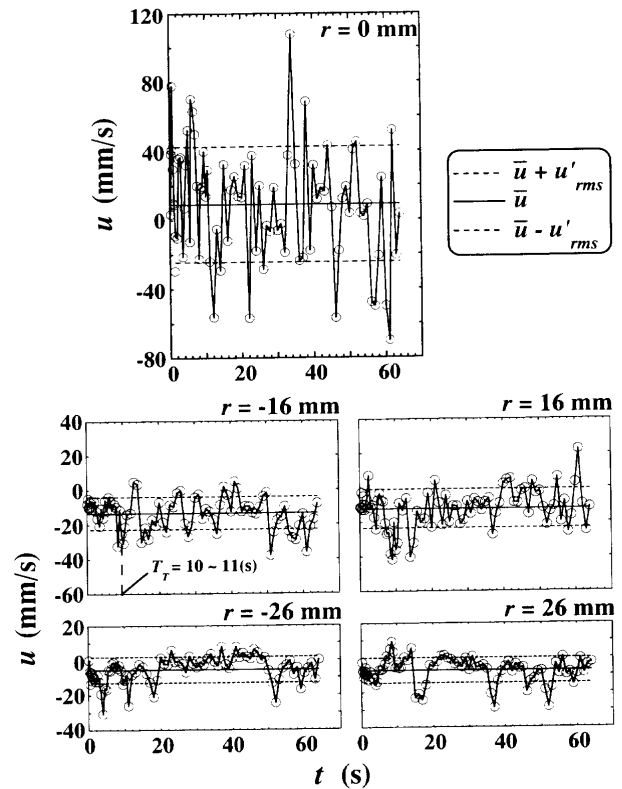
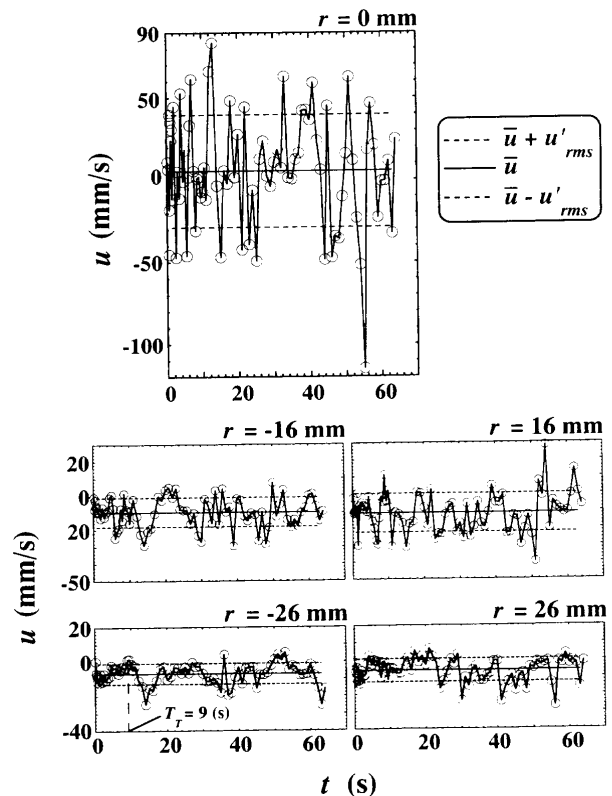
的な反転流は形成されなかった。

なお、容器内の液体が入れ替わるのに要する時間の目安は $T_{rp} (= \pi D^2 H / 4 Q_w)$ で与えられる。ちなみに $Q_w = 1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$ では $T_{rp} = 290 \text{ s}$ 、 $Q_w = 3.15 \text{ cm}^3/\text{s}$ では $T_{rp} = 112 \text{ s}$ 、 $Q_w = 5.10 \text{ cm}^3/\text{s}$ では $T_{rp} = 70 \text{ s}$ となる。

3.2 測定結果

Fig.11は、 $Q_w = 1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $h = 6 \text{ mm}$ (Type NB)における半径位置と鉛直方向速度 u の履歴の関係を比較したもので、グラフ中の実線は鉛直方向平均速度 \bar{u} を、破線は平均速度 \bar{u} と rms 値 u'_{rms} の和および差の値 ($\bar{u} \pm u'_{rms}$) をそれぞれ表している。半径位置にマイナス符号を付けてあるのは奇異に感じられるかもしれないが、中心軸よりも左側の位置を示すものである。 r がプラスの値は右側を表す。同じ半径位置 ($|r| = \text{const.}$) における平均速度 \bar{u} および rms 値 u'_{rms} はほぼ等しく、噴流は円筒容器中心軸に対して軸対称であると言える。噴流の中心 ($r=0$) が最も乱れが大きく、容器側壁に近づくにつれ小さくなっており、過渡時間 T_T は $10 \sim 11 \text{ s}$ となった。容器内の液体が入れ替わるのに要する時間 $T_{rp} (= 290 \text{ s})$ と比較すると、貫入噴流の攪拌効果は非常に大きいことが伺える。

$Q_w = 1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $h = 16 \text{ mm}$ (Type 1) では過渡時間 $T_T = 9 \text{ s}$ となっていた (Fig.12)。 $Q_w = 1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $h = 45 \text{ mm}$ (Type 3) では、

Fig. 11. Axial velocity history. (Type NB, $Q_w = 1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$, $h = 6 \text{ mm}$)Fig. 12. Axial velocity history. (Type 1, $Q_w = 1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$, $h = 16 \text{ mm}$)

$T_T = 8 \text{ s}$ となり、ノズル高さ h が大きくなるにつれ、わずかに短くなっている (Fig.13)。なお、壁近傍 ($r = 26 \text{ mm}$) における平均速度 \bar{u} および rms 値 u'_{rms} は $r = -26 \text{ mm}$ とほぼ等しい

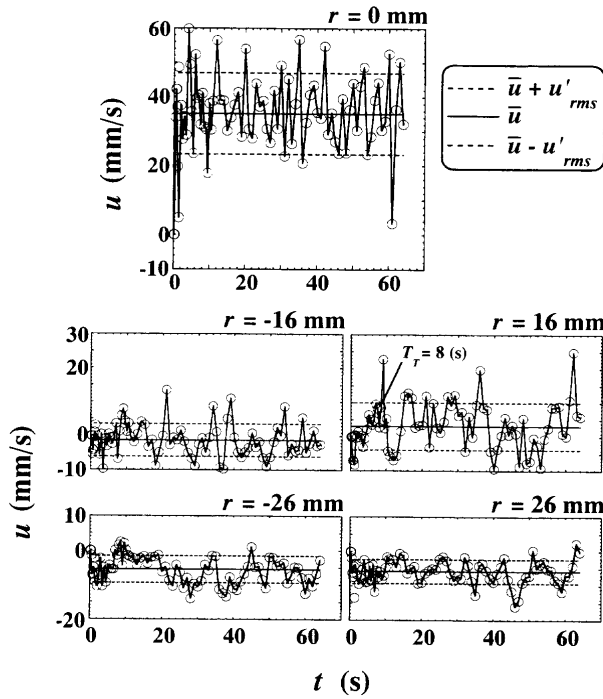


Fig. 13. Axial velocity history. (Type 3, $Q_w=1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$, $h=45 \text{ mm}$)

が、 $r=16 \text{ mm}$ では噴流の偏りによる差が見られた。この偏りは時間的に変動している。

Fig.14は $Q_w=1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$ における半径位置とrms値 u'_{rms} の関係を示している。プロットは流動タイプによって区別している。rms値 u'_{rms} はType NB, 1ではほぼ等しいのに対してType 3では非常に小さくなった。この理由として以下のことが挙げられる。気泡の巻き込みのないType NBに比べて、Type 1では気泡を巻き込むが気泡は微細であるために貫入する水とともに移動し、浴内に分散する。これに対してノズル高さ h が大きいType 3では、巻き込まれる気泡径が大きいため、その気泡に働く浮力によって噴流の進行が妨げられ、噴流の運動エネルギーが消費されるためrms値 u'_{rms} が小さくなる。

緒言で述べたように、本研究の最終目的は溶鋼中に溶鋼との濡れ性が一般的に悪い低密度粒子を均一に分散させることにある。本論文ではその前段階として、気泡のような低密度粒子が浴内に均一に分散可能かどうかを調べたわけである。Fig.11~13において、過渡時間 T_r はType 3が最も短くなっているが、液相に比べ気相の密度は非常に小さいことから巻き込み気泡を低密度粒子とみなして考えると、低密度粒子の浴全体への分散にはType 1の攪拌効果が最も高いと言える。

なお、 $1 \mu\text{m}$ 程度の直径を持つ低密度粒子を実際に溶鋼中へ巻き込むことが可能かどうかといった点については、まず直径 $1 \mu\text{m}$ の粉体を水浴の表面に浮かべて予備実験を行った。表面張力によって水面に浮かんでいた粒子はType 1の条件下では空気と同じように容易に水浴中へ巻き

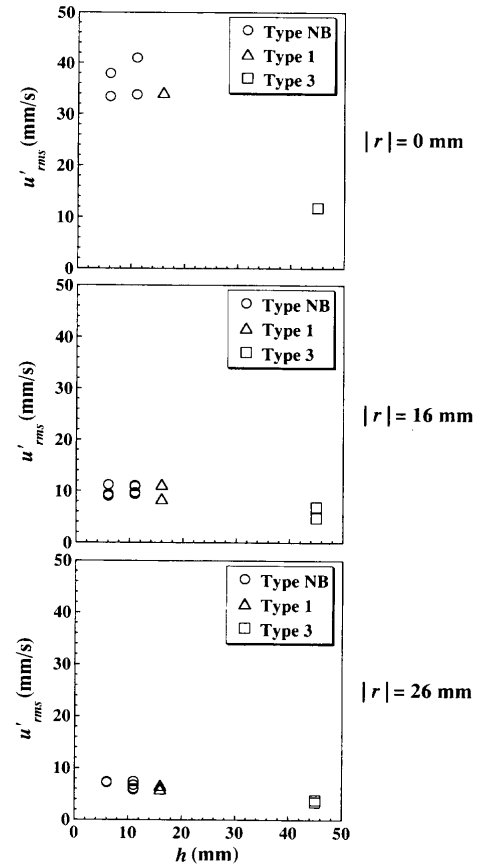


Fig. 14. Root-mean-square values. ($Q_w=1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$)

込まれ、短時間で水浴中に分散した。また、水銀を用いた予備実験でも巻き込みが見られた。ただし、水銀は不透明であるため巻き込みの機構と分散状況が水モデルの場合と同じであるのかどうかについては確認していない。今後の課題としたい。

3.3 過渡時間 T_r と特性時間 T_c の比較

今回著者らが定義した過渡時間 T_r を特性時間 T_c と比較した。特性時間 T_c とは、貫入噴流によって誘起される液流量で浴内部の液体が入れ替わる時間を意味しており、噴流が浴底部に達するまでの間に噴流によって誘起される液体の総流量 Q_{wb} と浴内の液体体積 V_w で表し、以下のように定義される¹²⁾。

$$T_c = V_w / Q_{wb} = \pi D^2 H_L / (4 Q_{wb}) \dots \dots \dots (6)$$

ここで、噴流によって誘起される液体の総流量 Q_{wb} は、噴流流量 Q_w 、浴深 H_L 、パイプ内径 d_{ni} を用いて次式で表される¹³⁾。

$$Q_{wb} = 0.32 Q_w H_L / d_{ni} \dots \dots \dots (7)$$

これより特性時間 T_c は、式(8)となる。

$$T_c = 2.45 D^2 d_{ni} / Q_w \dots \dots \dots (8)$$

式(7)、(8)は落下部のない自由噴流の場合に導かれた式である。したがって厳密にはここでの流れ場に適用でき

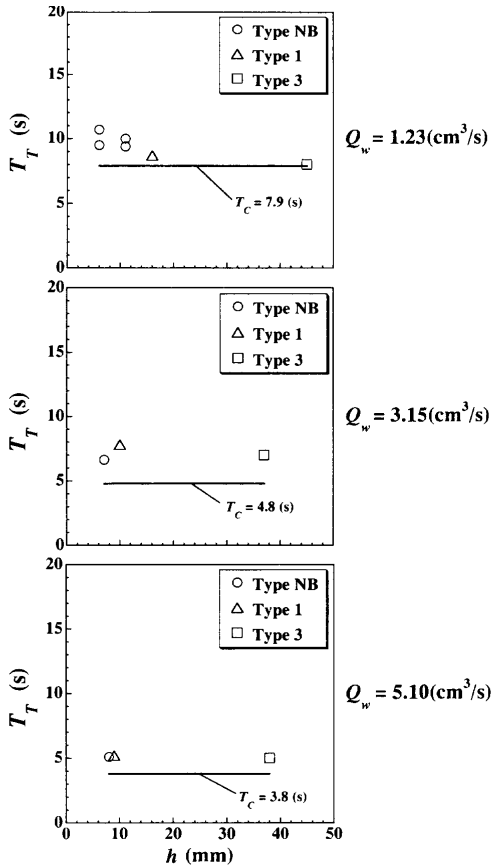


Fig. 15. Relationship between T_T and h .

ないが、式中のパイプ内径 d_{ni} を貫入噴流の浴表面における噴流直径 d で置き換えれば近似的に適用可能である。本実験条件下の d は d_{ni} と顕著に異なることはなかったため、 d_{ni} をそのままにした過渡時間の式(7)、(8)を採用した。

Fig.15は各噴流流量 Q_w における過渡時間 T_T とノズル高さ h の関係を表している。プロットは流動タイプによって区別している。また、グラフ中に特性時間 T_c を実線で示してある。 $Q_w = 1.23 \text{ cm}^3/\text{s}$ では、Type NBからType 1, 3と遷移するにつれて過渡時間 T_T はやや短くなり、特性時間 T_c に漸近する傾向が見られた。しかし、噴流流量 Q_w が増加するにつれて浴内部の乱れが非常に大きくなり、流動タイプに関わらず過渡時間 T_T はほぼ一定値となっている。

本実験条件下では、過渡時間は気泡巻き込みのタイプにあまり依存せず、噴流流量とパイプ内径に依存するという結果が得られた。なお、容器の直径 D については上述のように1種類しか用いていないので言及できない。ノズル高さ h は気泡巻き込みのタイプを決定するパラメーターであるので、過渡時間は h にほとんど依存しなかったものと考えられる。

Fig.16は過渡時間 T_T と噴流流量 Q_w の関係をまとめて表している。噴流流量 Q_w が大きくなると過渡時間 T_T は短くなる。全体として、特性時間 T_c に比べて約37%大きくなっていった。なお T_c は浴内の液体が貫入噴流によって入

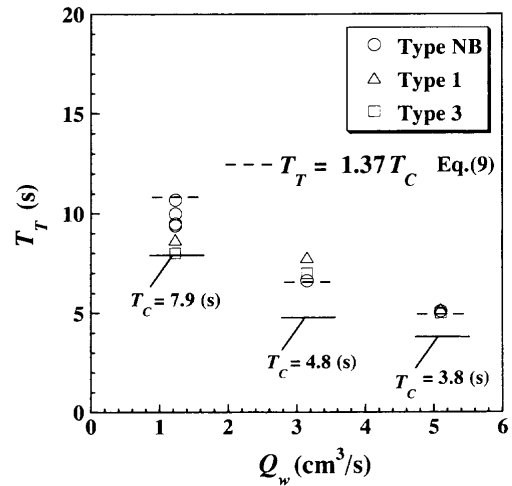


Fig. 16. Relationship between T_T and Q_w .

れ替わる目安を与えるに過ぎない。したがって、 T_T が T_c よりも大きくなったこととくに意味はなく、むしろ T_T と T_c の間に強い相関が見られたことが興味深い。

上記の結果に基づいて、特性時間 T_c および過渡時間 T_T において次式の関係が得られた。

$$T_T = 1.37 T_c \dots \dots \dots (9)$$

式(9)の特性時間 T_c に式(8)を代入し、過渡時間 T_T を容器径 D 、噴流流量 Q_w 、パイプ内径 d_{ni} で表すと以下のようなる。

$$T_T = 3.36 D^2 d_{ni} / Q_w \dots \dots \dots (10)$$

式(10)には円筒容器の内径 D が含まれているが、本実験では1種類の容器しか用いていない。この式が他の直径の容器に適用可能かどうかについては今後の研究に譲りたい。

4. 結論

(1) 静止状態にある円筒浴内へ液体噴流を貫入させ、それにより生ずる容器内部の流れ場をPIV測定し、平均速度 (\bar{u}, \bar{v}) 、乱れ成分 (u', v') 、rms値 (u'_{rms}, v'_{rms}) に着目して過渡時間 T_T を定義した。過渡時間 T_T を特性時間 T_c と比較したところ、特性時間 T_c よりも約37%大きくなっていった。浴内の液体は噴流によってひと回り循環し、その直後に定常状態になるものと考えられる。そこで、過渡時間 T_T に対して以下の実験式を導いた。

$$T_T = 3.36 D^2 d_{ni} / Q_w \dots \dots \dots (10)$$

(2) 低密度粒子の浴全体への分散には Type 1 の攪拌効果が最も高いと言える。

本研究は日本鉄鋼協会、戦略的研究の補助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表す。

記 号

D	: 円筒容器内径 [mm]
H	: 円筒容器高さ [mm]
H_L	: 浴深 [mm]
L	: パイプ長さ [mm]
Q_w	: 噴流流量 [cm^3/s]
Q_{wb}	: 噴流によって誘起される液体の総流量 [cm^3/s]
Re	: レイノルズ数 [-]
T_C	: 特性時間 [s]
T_{rp}	: 容器内の液体が入れ替わるのに要する時間 [s]
T_T	: 過渡時間 [s]
V_w	: 液体体積 [cm^3]
d	: 噴流の直径 [mm]
d_{pi}	: パイプ内径 [mm]
\bar{d}_p	: トレーサー粒子の平均粒径 [μm]
h	: ノズル高さ [mm]
r	: 半径位置 [mm]
t	: 時間 [s]
u	: 鉛直方向速度 [mm/s]
\bar{u}_0	: ガラス管内平均速度 [mm/s]
\bar{u}	: 鉛直方向速度の平均値 [mm/s]
u'	: 鉛直方向速度の乱れ成分 [mm/s]
u'_{rms}	: 鉛直方向速度のrms値 [mm/s]
v	: 半径方向速度 [mm/s]
\bar{v}	: 半径方向速度の平均値 [mm/s]
v'	: 半径方向速度の乱れ成分 [mm/s]
v'_{rms}	: 半径方向速度のrms値 [mm/s]
z	: 水面からの深さ [mm]

ν_w	: 水の動粘度 [mm^2/s]
ρ_p	: トレーサー粒子の密度 [kg/m^3]

文 献

- 1) 梅沢一誠: 第100・101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1984), 101.
- 2) S.Taniguchi, S.Kawaguchi and A.Kikuchi: *ISIJ Int.*, **36** (1996), S46.
- 3) R.W.Thring and M.F.Edwards: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29** (1990), 676.
- 4) R.M.Detsch and R.N.Sharma: *Chem. Eng. J.*, **44** (1990), 157.
- 5) D.Kusabiraki, H.Niki, K.Yamagiwa and A.Ohkawa: *Can. J. Chem. Eng.*, **68** (1990), 893.
- 6) M.Kumagai, H.Ishizaki and K.Endo: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **26** (1993), 217.
- 7) T.Brattberg and H.Chanson: *Chem. Eng. Sci.*, **53** (1998), 4113.
- 8) M.Iguchi, K.Okita and F.Yamamoto: *Int. J. Multiphase Flow*, **24** (1998), 523.
- 9) T.Shimizu, J.Yoshida, N.Tsuda, T.Koseki, S.Yokoya and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 7.
- 10) S.Yokoya, M.Iguchi, S.Takagi and M.Sakamoto: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 421.
- 11) M.Iguchi, M.Sakamoto, H.Kawabata and S.Yokoya: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1180.
- 12) M.Iguchi, T.Kondoh and K.Nakajima: *Metall. Mater. Trans. B*, **28B** (1997), 605.
- 13) N.Rajaratnam 著, 野村安正訳: *Turbulent Jets*, 森北出版, 東京, (1976), 26.