

浸漬円柱を用いた機械式攪拌時における浴内流動

高橋 祐介*・井口 学*²

Flow in a Bath with an Immersion Cylinder under Mechanical Agitation Condition

Yusuke TAKAHASHI and Manabu IGUCHI

Synopsis : Vortex flow measurements have been carried out with PIV (particle image velocimetry) to understand the flow in a bath with an immersion cylinder under mechanical agitation condition. An impeller is placed on the centerline of the bath and the cylinder is immersed slightly into the bath at an offset radial position. A horizontal rotational motion of water prevails in the absence of the immersion cylinder and the axis of the rotational motion overlaps the centerline of the bath. On the other hand, the axis of the rotational motion inclines in the presence of the immersion cylinder and a strong downward motion of liquid is induced in the bath. This downward motion enhances the entrainment of low-density particles initially placed on the bath surface. The inclination angle decreases with an increase in the rotation frequency of the impeller. Accordingly, the effect of the immersion cylinder becomes weak as the rotation frequency increases under the present experimental conditions.

Key words: refining; PIV; impeller; desulphurization; KR process.

1. 緒言

昨今、環境問題の深刻化から、鉄鋼業においても省エネルギーやコストの削減など、生産効率の向上が強く求められている。製造プロセスの改善は生産効率の向上につながるが、そのなかでも攪拌効率の向上は生産効率の向上に大きくつながると考えられる。

機械式攪拌法に関しては、鉄鋼精錬におけるKR脱硫に見られるように、攪拌羽根を用いた方法がガスインジェクション法とともに様々な製造プロセスで用いられており¹⁻⁵⁾、偏心攪拌法や邪魔板を設置する攪拌法など、攪拌効率を向上させるための様々な手法が提案されている⁶⁻¹⁰⁾。著者らもこれまでに、攪拌羽根を攪拌槽の中心に設置して攪拌を行う中心攪拌法において、浴表面から円柱を浅く浸漬させることで攪拌効率が向上することを明らかにしてきた¹¹⁻¹⁴⁾。特に低密度の固体粒子の攪拌混合について、浴内における粒子の均一分散に要する時間や、浴表面に浮遊している粒子の浴内への巻き込みに浸漬円柱が有用であることを示してきた。ただ円柱を浸漬させることによって攪拌時の浴内にどのような流れの変化が起こり、攪拌効率にどう影響しているのかは明らかではない。より効率的な攪拌を目指すためにも、浸漬円柱を用いた攪拌機構がどのようなものかを知ることが求められている。本研究ではPIV（粒子画像流速計）を用いて浴内流動を測定することで、浸漬円柱攪拌の機構を明らかにすることを目的とした。

PIV（粒子画像流速計）は流体中に混入させた微細なト

レーサー粒子を照射したレーザーシート上で可視化し、CCDカメラなどの撮影装置を用いて画像として記録する。このとき撮影は非常に短い時間間隔 Δt をもつ t_0 と t_1 ($=t_0+\Delta t$)のタイミングで2回行われ、2枚の瞬間的な画像として記録する。この微小な時間間隔 Δt と2枚の粒子画像から得られたトレーサー粒子の移動量から、その局所における流速を求めることができる¹²⁾。可視化されたトレーサー粒子は画像上に白く映り、その輝度値をもとに2時刻の画像からそれぞれの粒子を対応付け、速度ベクトルを求める。このとき得られるベクトルの中には大きな誤差を含む誤ベクトルが現れる。これは間違った粒子の対応付けが行われてしまうのが原因であり、周囲のベクトルとは大きく異なる流速を示す。そのため周囲の速度ベクトルと比較し、速度フィルターをかけて誤ベクトルを除去する必要がある¹⁵⁻¹⁷⁾。

PIVはレーザーシート上に可視化された粒子をもとに速度ベクトルを得るため、レーザーを横切るような3次元の流れに対しては正確な速度ベクトルは得られないことがある。しかしレーザーの照射位置を実験条件に合わせて調整することで、浴内の注目した場所における流動を知ることが可能である¹⁸⁻²¹⁾。

2. 実験装置と実験方法

2・1 実験装置

攪拌装置とPIV装置の概要をFig. 1に示す。PIV装置に

平成20年5月20日受付 平成20年7月16日受理 (Received on May 20, 2008; Accepted on July 16, 2008)

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

* 2 北海道大学大学院工学研究科材料科学専攻 (Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

は、コンピューターに接続されたレーザー発生装置と CCD カメラを合わせて用いる。攪拌装置は Fig. 1 に示すようなアクリル製の透明な円筒容器にスピードコントロールモーターを有する攪拌機を上部から取り付けたものである。使用する液体にはイオン交換水を用い、浴深 $H_W=300\text{ mm}$ になるように円筒容器内に満たした。このとき円筒容器外側にある正方形断面の外浴にも同様の液体を満たし、レーザーの屈折が起らないようにした。円筒容器の内径は $D=200\text{ mm}$ である。容器中心軸上に攪拌羽根を設置し、その高さは $H=150\text{ mm}$ に固定した。使用した攪拌羽根は直径 $D_f=75\text{ mm}$ 、高さ 9.9 mm 、羽根の傾斜角 $\theta=45^\circ$ である。攪拌羽根の回転数は $N=0\sim 1200\text{ rpm}$ の範囲で変化できる。浴の表面から円柱偏心位置 $L_C=R/2$ (R は容器半径: $R=D/2$) にアクリル製の円柱を $H_C=20\text{ mm}$ の深さに浸漬させた。その外径は $D_C=35\text{ mm}$ である。実験中 $D, H_W, H, H_C, L_C, D_f, D_C$ はそれぞれ固定し、変化させなかった。また浴内に投入する PIV のトレーサーには粒径 $20\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 、比重 1.05 の微粒子を用いた。

本研究で使用した PIV システムは、QUANTEL 社製の出力 33 mJ/Pulse 、パルス幅 6.8 ns の Nd-YAG レーザー、RED LAKE MASD 社製の $30/15\text{ fps}$ (dual/single channel mode) の CCD カメラを装備している。また同期装置と解析システムには ILA (Intelligent Laser Applications GmbH) 社製のものを用いた。また粒子の対応付けは相互相関法 (cross-correlation method) のアルゴリズムによって行った。

2・2 PIV 測定条件と方法

レーザーの発光と CCD カメラによる撮影は、同期装置を用いて同期させ行った。レーザー発光とカメラ撮影の間隔 Δt は 2 ms に設定した。レーザーシートの厚さは 2 mm である。

攪拌装置に対して照射するレーザーの位置を変えることで、円筒容器内の流動を様々な断面に着目して測定した。本研究では主に容器の縦断面と横断面の 2 通りを測定した。また各測定位件について円柱を浸漬させた場合と浸漬させない場合の 2 通りを測定し、比較した。

縦断面測定では Fig. 1(a) に示すように、レーザー照射位置は容器中心を $x=0$ とし、浴壁に向かって $x=0, 40, 50, 60, 70\text{ mm}$ と移動させた 5 つの位置で測定を行った。 $x=10\sim 30\text{ mm}$ の測定を行わなかったのは、本実験で用いた攪拌羽根の直径が $D_f=75\text{ mm}$ (半径 $R_f=37.5\text{ mm}$) であり、攪拌羽根によってレーザーシートが遮断されるため、および浴の中心付近ではレーザーシートを垂直に横切ってしまう粒子が多くなり、正確な測定が難しいためである。円柱が無い場合では容器は軸対象になるが、円柱を浸漬させた場合では容器は非対称である。そのため Fig. 2 に示すように円柱設置位置に対して (a)~(d) の 4 通りのレーザー照射パターンを決めた。

横断面測定は Fig. 1(b) のようにレーザーシートを 90° 傾

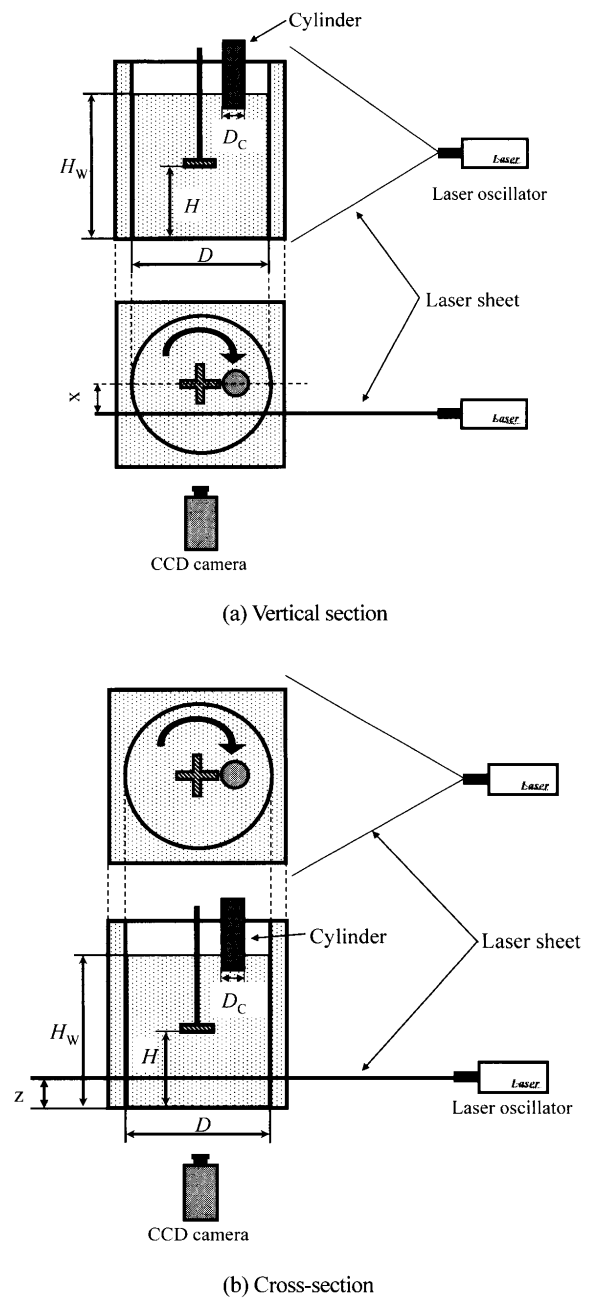


Fig. 1. Experimental apparatus.

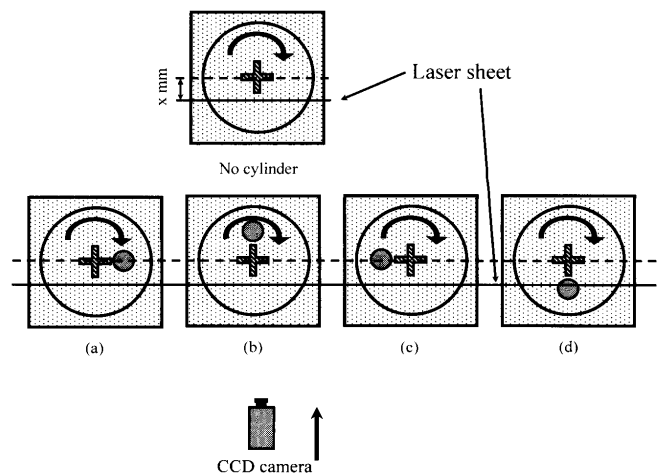


Fig. 2. Laser sheet position for PIV measurements.

け、容器下方向からカメラを真上に向けて撮影を行った。このときレーザーシートの高さは容器底部を $z=0$ mm とし、そこから真上に向かって $z=10, 50, 100, 140, 160, 200, 250$ mm の 7 通りに変化させた。攪拌羽根は容器中心 ($H=150$ mm) に設置してあるため、 $z=150$ mm の位置については攪拌羽根がレーザーシートをさえぎってしまう。そのため容器中心部ではレーザーが攪拌羽根に当たらないように $z=140, 160$ mm と上下にずらした 2 つの位置で撮影を行った。

各条件について 200 枚の画像を得た。連続する 2 枚の写真から 1 枚のベクトル図を作成するので、各条件につき 100 枚のベクトル図を作成し、平均をとった。

3. 結果と考察

3・1 縦断面の PIV ベクトル図

3・1・1 円柱の有無による浴内流動の差

レーザー照射位置 $x=40$ mm、測定位置 (d) (浸漬円柱の真下) における縦断面について、円柱が無い場合のベクトル図と円柱を浸漬させた場合のベクトル図を合わせて Fig. 3 に示す。実験条件は円柱外径 $D_c=0, 35$ mm、攪拌羽根の回転数 $N=500$ rpm、容器径 $D=200$ mm、攪拌羽根直径 $D_f=75$ mm、浴深 $H_w=300$ mm、円柱浸漬深さ $H_c=20$ mm、円柱設置位置 $L_c=50$ mm、攪拌羽根の容器底部からの設置高さ $H=150$ mm ($H=H_w/2$) である。円柱を置かない条件では容器上部から下部にかけて攪拌羽根の回転方向のベクトル、すなわち水平なベクトルが一樣に観察された。このとき図中の矢印の大きさは、その位置における流速の大きさを表している。攪拌羽根が設置してある容器中心部ではわずかに下向きのベクトルが観察できる。これは傾斜翼をもつ攪拌羽根が回転することで生じる、流体を下方に押し出す流れが $x=40$ mm の位置まで現れているものと考えられる。なお、攪拌羽根は直径 $D_f=75$ mm (半径が 37.5 mm) なので、 $x=40$ mm の位置にあるレーザーシートを攪拌羽根が横切ることにはない。中心攪拌において低密度粒子を浴表面から降下させ分散させることができるのは、このような下向きの流れが存在することによる。

一方、円柱を浸漬させた条件から得られたベクトル図については、円柱が無い場合と比べて下向きのベクトルが多く観察できた。円柱が無い場合と同様に攪拌羽根の周辺においても下向きのベクトルは観察できるが、浸漬させた円柱近傍から攪拌羽根にいたる広い範囲で下向きのベクトルが観察できる。

さらに下向きの流れに注目し、鉛直方向の速度ベクトルのみを抜き出し、白と黒の分布で表したものが Fig. 4 である。白い部分が鉛直下向きの流速が得られた範囲で、黒くなるにつれて鉛直上向きの流速へと変わっていく分布をとっている。鉛直方向の分布を見ると円柱の有無によって

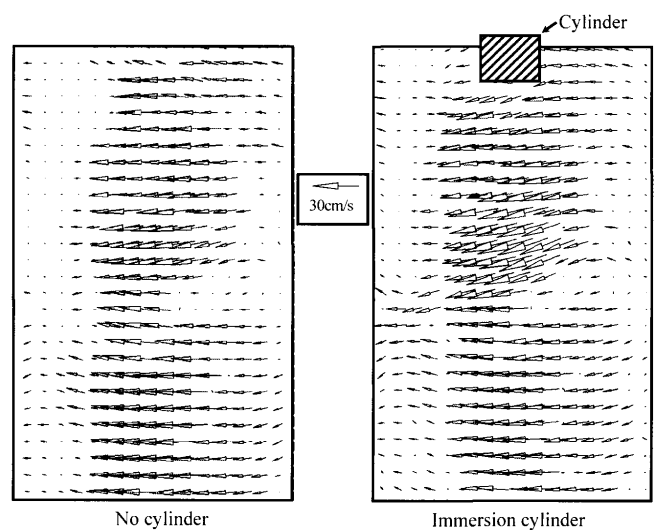


Fig. 3. Velocity vectors in the vertical section of the bath [$D=200$ mm, $D_f=75$ mm, $D_c=35$ mm, $N=500$ rpm, $x=40$ mm, Pattern (d)].

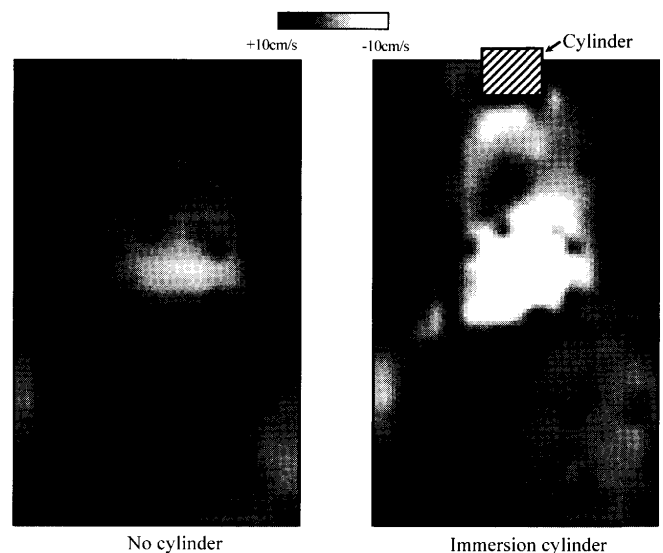


Fig. 4. Velocity vectors in the vertical section of the bath [$D=200$ mm, $D_f=75$ mm, $D_c=35$ mm, $N=500$ rpm, $x=40$ mm, Pattern (d)].

生じる下向きの流れの違いが明らかである。攪拌羽根近傍では両者とも下向きの流速は確認できるが、円柱を浸漬させたほうがより強い下向きの流速が観察できる。さらに液面の円柱近傍から発生する強い下向きの流れの存在が明らかである。円柱を浸漬させることで、低密度粒子の浴表面からの巻き込みが起りやすくなるのは、この円柱から発生する下向きの流れが強く影響していると考えられる。

なお、PIVは浴内全体の流れ場の様相を短時間で把握することには適しているが、乱れ成分を精度よく求めることには適していない。本実験では1条件につき100枚のベクトル図を得ているが、この程度の N 数では浴内の乱れ成分を精度よく求めることはできない。乱れ成分の測定は、今後、文献⁶⁾に示した偏心攪拌の場合と同様にレーザードッ

プラー流速計(LDV)を用いて行い、検討を加えたく考えている。

3・1・2 円柱浸漬時のPIV測定断面による浴内流動の差

円柱を浴表面から浸漬させた場合、実験装置は軸対象ではなくなるので容器縦断面の流れが浸漬しない場合のように容器のどの断面でも同じであるとは考えにくい。そこで、円柱浸漬時の浴内流動を、Fig. 2の4つの測定断面について比較した。Fig. 5にPIV測定位置(a)~(d)の4断面で得られたベクトル図を示す。実験条件は $D_c=35$ mm, $N=500$ rpm, $H_c=20$ mm, $L_c=50$ mmである。3・1・1項で述べたように(d)位置では下向きの強いベクトルが確認できたが、他の測定位置では同様のベクトル分布は見られなかった。浴の回転方向、つまり攪拌羽根の回転方向に沿って4枚のベクトル図を並べると、(d)→(a)→(b)→(c)のように見ることができる。

前述のように(d)位置では円柱近傍の広い範囲において下向きのベクトルが見られたが、(b)位置では下向きのベクトルはほとんど見られず、上向きの強いベクトルが見られる。そして(a)位置では下降から上昇へと変化する流れ、(c)位置では上昇から下降へと変化する流れが見られる。つまり縦断面における浴内の流動は(d)→(a)→(b)→(c)→(d)

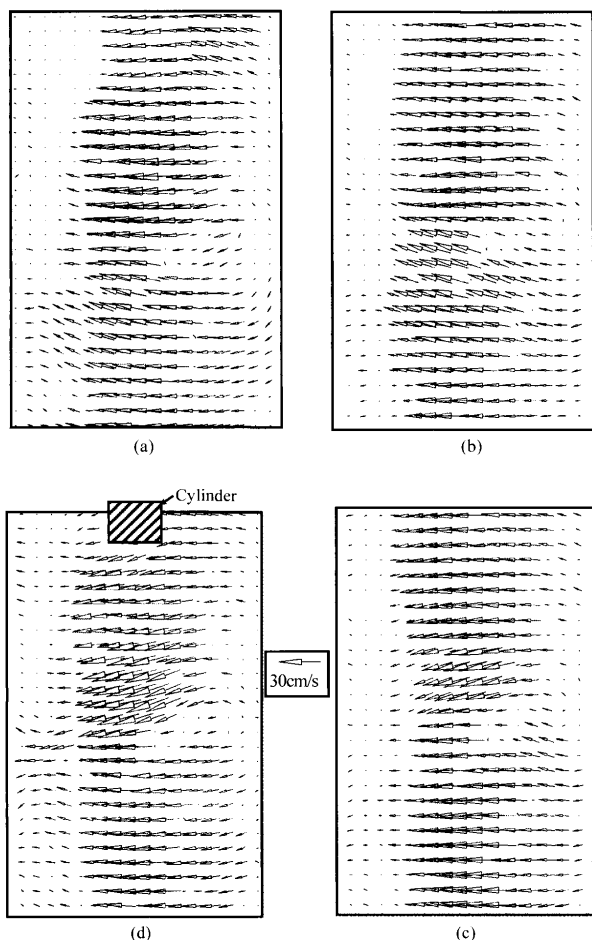


Fig. 5. Velocity vectors in the vertical section of the bath [$D=200$ mm, $D_f=75$ mm, $D_c=35$ mm, $N=500$ rpm, $x=40$ mm].

と移行する過程で、浴を回転方向に一周する間に上昇と下降を繰り返していると考えられる。円柱が無い場合は、ほぼ水平なベクトルであったことから、円柱を浸漬させることで水平であった回転運動が傾斜したと考えられる。この現象が生じる理由は、円柱を浸漬させることによって(d)位置の円柱近傍から下向きの流れが生じ、それに伴って浴内の大きな渦が傾斜していったためであると考えられる。この傾斜角度は水平から約 22.5° である。

3・1・3 円柱浸漬時のPIV測定位置 x による浴内流動の差

$x=40$ mmの測定位置では円柱を浸漬することで、浴内に上下方向の流れが形成されることがわかったが、今までに示した図では、これらの流動が容器の浴壁付近でも同様にみられるかどうかは判断できない。そこで容器中心から浴壁にかけての距離 $x=40$ mmよりも外側の縦断面における流動を見るため、レーザーシート位置を $x=0, 50, 60, 70$ mmと壁側に動かして同様の測定を行った。Fig. 6は測定位置(d)のレーザーシート位置 $x=40, 50, 60, 70$ mmにおけるPIVベクトルとを比較したものである。実験条件は $D_c=35$ mm, $N=500$ rpm, $H_c=20$ mm, $L_c=50$ mmである。(d)位置においては $x=40\sim 70$ mmのいずれの部分においても、下向きの流れが確認できる。その他の測定位置(a), (b), (c)

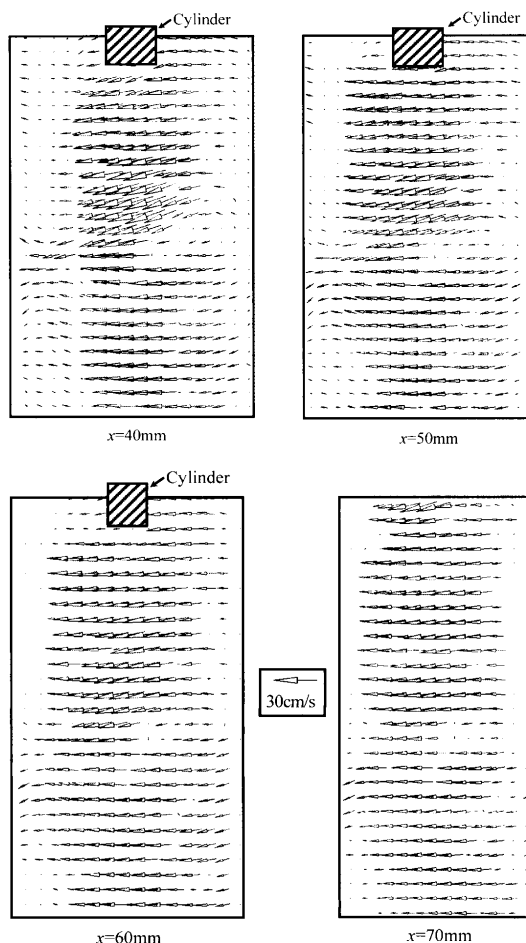


Fig. 6. Velocity vectors in the vertical section of the bath [$D=200$ mm, $D_f=75$ mm, $D_c=35$ mm, $N=500$ rpm, Pattern (d)].

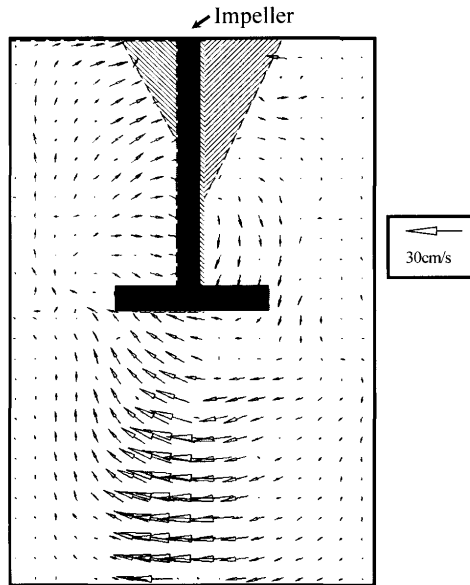


Fig. 7. Velocity vectors in the vertical section of the bath [$D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $D_C=35$ mm, $N=500$ rpm, $x=0$ mm, Pattern (a)].

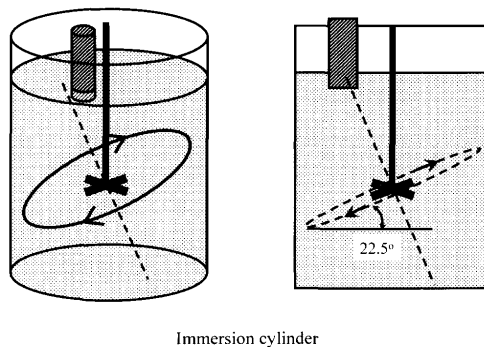


Fig. 8. Schematic of rotating flow in the bath.

についても同様に容器半径位置 x の違いによる浴内流動の変化はほとんど見られなかった。

Fig. 7に円柱を浸漬させた測定パターン(a)についてレーザー距離 $x=0$ mm, つまり容器中心を通る縦断面におけるPIVベクトル図を示す。実験条件は $D_C=35$ mm, $N=500$ rpmである。中心攪拌における浴内流動は、容器中心軸上にある攪拌軸を中心とした浴全体の回転運動である。よって容器の中心断面ではほとんどの流動はレーザーシートを垂直に横切ってしまうため、2次元のPIVでは速度ベクトルを得ることは難しいと考えられる。実際、円柱を浸漬させない条件では $x=0$ mmにおいてベクトル図を得ることが出来なかった。しかし円柱を浸漬させた条件ではFig. 7のように鮮明なベクトル図が得られた。攪拌羽根下部では左向き、上部では右向きの逆方向の流れが見られる。このことから浴内の液体の回転運動の軸が攪拌羽根のシャフトからずれていることが考えられる。3・1・2項で得られた測定パターン(a)~(d)の結果と合わせ、この結果からも円柱を浸漬させることによってFig. 8のように浴の回転軸が傾斜し

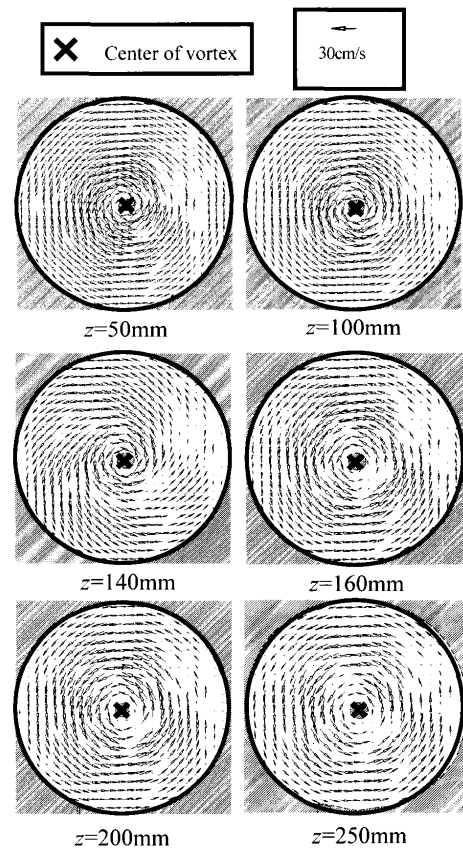


Fig. 9. Velocity vectors in the cross section of the bath [$D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $N=300$ rpm, No cylinder].

たとえることができる。

3・2 横断面のPIVベクトル図

3・2・1 低回転数($N=300$ rpm)における浴内流動

レーザーが容器を水平に横切るように照射し、容器の真下からカメラで撮影することで、容器の横断面における浴内流動を得ることができた。Fig. 9に円柱が無い場合、Fig.10に円柱を浸漬させた場合の容器横断面のPIVベクトル図を示す。レーザーの浴底部からの高さは各条件について $z=50, 100, 140, 160, 200, 250$ mmの6通り測定し、そのすべての結果をまとめた。その他の実験条件は攪拌羽根の回転数 $N=300$ rpm, 容器径 $D=200$ mm, 浸漬円柱外径 $D_C=35$ mm, 円柱浸漬深さ $H_C=20$ mm, 円柱設置位置 $L_C=50$ mm, 浴深 $H_W=300$ mm, 攪拌羽根設置高さ $H=150$ mmである。

Fig. 9の円柱を置かない場合、Fig.10の浸漬させた場合の両方において、浴全体が攪拌羽根の回転方向と同じ方向をもった回転運動をしていることがわかる。円柱が無い場合はどのレーザー高さ z においても容器の中心軸を中心とした回転運動が見られる。一方、円柱を浸漬させた場合では $z=50$ mmでは回転運動の中心が容器中心軸ではなく中心軸に対して円柱設置位置の反対側に回転運動の中心がずれている。さらにレーザー高さ z が大きくなる順に見ていくと、容器中心軸に対して円柱の反対側にあった回転運

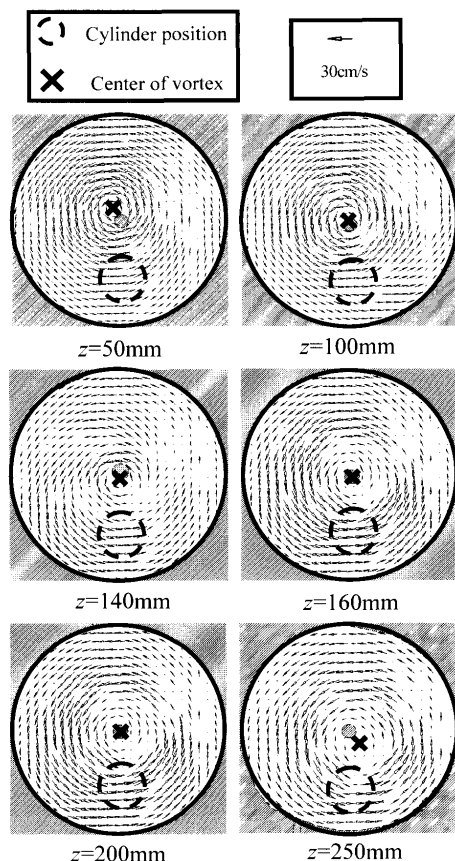


Fig. 10. Velocity vectors in the cross section of the bath [$D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $D_C=35$ mm, $N=300$ rpm].

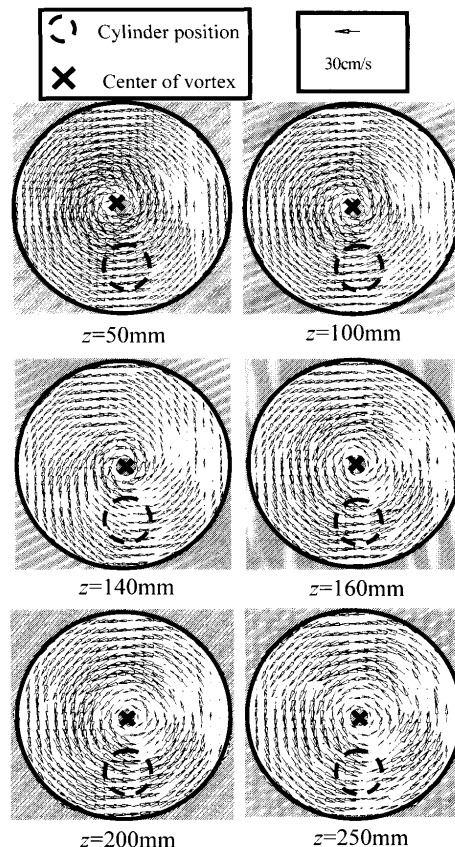


Fig. 11. Velocity vectors in the cross section of the bath [$D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $D_C=35$ mm, $N=500$ rpm].

動の中心が、次第に円柱側へと移動してきているのがわかる。これらの事から円柱を浸漬させることによって、浴内の回転運動の軸が傾斜するということが言える。

浴内の流速に注目すると、円柱が無い場合に比べ、円柱を浸漬させた場合の方が得られた流速がやや小さくなっている。回転運動の中心付近の特に流速が大きい部分では、円柱が無い場合で約30 cm/s、円柱を浸漬させた場合で約22 cm/sである。この原因は円柱によって傾斜した回転運動によって、水平断面における速度が小さくなったためであると考えられる。

3・2・2 高回転数($N=500$ rpm)における浴内流動

攪拌羽根の回転数を $N=500$ rpm にし、円柱を浸漬した条件で得られた $z=50, 100, 140, 160, 200, 250$ mm における横断面 PIV 測定の結果を Fig.11 に示す。円柱を置かない場合では $N=300$ rpm のときと同様に容器中心を軸とする浴全体の回転運動が見られたのでここでは言及しない。円柱を浸漬させた場合でも $N=300$ rpm のときと同様に回転軸のずれが容器底部から上部にかけて見られるが、 $N=300$ rpm のときに比べて軸のずれは小さかった。

以前の過渡時間、すなわち攪拌羽根の回転を開始してから浴内の流れが定常状態に達するまでの時間の調査では¹³⁾、円柱の有無に関わらず回転数の上昇に伴って攪拌力

は増し、浴内における粒子分散の過渡時間は短くなった。ただし回転数の増加に伴って円柱の有無による過渡時間の差は小さくなっていった。これは円柱の影響よりも攪拌羽根の回転数の増加による影響が大きくなったためだと考えられる。円柱を浸漬させる攪拌方法では、低回転数で攪拌を行ったほうが円柱の無い場合と比較したときの攪拌効率は向上するということがいえる。

3・2・3 回転軸の傾斜

$N=300$ rpm の横断面ベクトル図について、各レーザー高さ z のベクトル図から回転運動の中心位置を抜き出して Fig.12 のようにまとめた。これにより回転軸の傾斜の様子がより明確になった。回転軸は容器上部では円柱から回転方向にわずかにずれた位置にある。容器底部に向かうにつれて回転軸は容器中心を通過して、軸対称の位置まで傾斜している。上部から底部にかけて、回転軸はほぼまっすぐに傾斜していることが分かる。このときの傾斜角度は約 20° であった。この角度は、浴中心軸から浸漬円柱の中心軸までの距離 50 mm と浸漬円柱の底部から攪拌羽根中心までの鉛直距離 130 mm からなる直角三角形の角度 $\tan^{-1}(50/130) \approx 21^\circ$ にほぼ一致している。したがって、傾斜渦の中心は、浸漬円柱の中心軸を含む円周上の浴表面位置から攪拌羽根の中心へ向かっていることになる。ただし容器中心部では回転軸のずれが確認できる。すなわち、攪拌羽根の近傍に

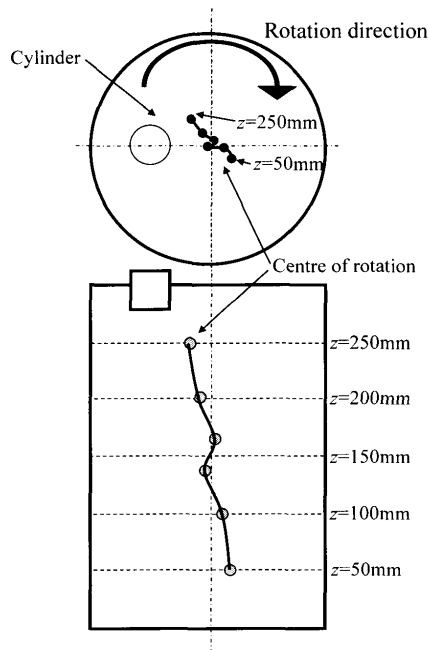


Fig. 12. Axis of rotation in the bath [$D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $D_C=35$ mm, $N=300$ rpm].

において、攪拌羽根の回転の影響を受けて傾斜渦の回転軸はわずかにらせん状になっていると考えられる。

なお、Fig.11に示すように、回転数が大きくなると回転運動の軸の傾斜角は小さくなった。回転数が大きくなると攪拌羽根によって誘起される水平断面内の速度が大きくなることにより、浴表面は浸漬円柱の中心軸を含む円周上の位置から攪拌羽根の中心に向かって降下することができず、浴中心軸と浸漬円柱の中心軸の中間の半径位置から降下するようになるためである。この傾向は回転数が大きくなるにつれて顕著になり、降下位置は浴中心軸へ向かって移動する。したがって、回転数が大きくなるにつれて円柱を浸漬する効果は小さくなる。

4. 結言

PIV（粒子画像流速計）を用いて、円筒容器内における機械式中心攪拌条件での浴内流動を調査した。その結果以下結論を得るに至った。

(1) 円柱を設置しない中心攪拌では、浴内の流動は主として攪拌羽根のシャフトを軸とする水平な回転運動である。ただし攪拌羽根の周辺では、羽根によって下方へ押し出された流体が、下向きの流れを作る。

(2) 円柱を設置した中心攪拌では、円柱周辺から下向

きの流れが生じる。それに伴って攪拌羽根のシャフトを軸としていた回転運動の軸が傾斜し、上下方向の流れを伴った傾斜した回転運動へと変化する。

(3) 攪拌羽根の回転数が大きくなると、回転運動の軸の傾斜は小さくなった。回転数の増加に伴って攪拌力は大きくなるが、円柱の効果は回転数が小さいほうが顕著に現れる。

(4) 回転運動の軸はほぼまっすぐに傾斜しているが、攪拌羽根周辺ではらせん状になっていると考えられる。

記号

- D : 容器径 (mm)
- D_C : 円柱外径 (mm)
- D_I : 攪拌羽根直径 (mm)
- H : 攪拌羽根設置高さ (mm)
- H_C : 円柱浸漬深さ (mm)
- H_I : 攪拌羽根高さ (mm)
- H_W : 浴深 (mm)
- L_C : 円柱偏心位置 (mm)
- N : 攪拌羽根の回転数 (rpm)
- R : 容器半径 (mm)
- x : 容器中心からレーザーシートまでの距離 (mm)
- z : 容器底部からレーザーシートまでの高さ (mm)

文献

- 1) N.Kikuchi, S.Nabeshima, S.Takeuchi, T.Yamauchi, Y.Kitano and S.Ogura: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 322.
- 2) S.Kuroyanagi, N.Yamamoto, A.Iba, H.Horii, K.Ito and N.Kikuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 329.
- 3) T.A.Engh, H.Sandberg, A.Hultkvist and L.G.Norber: *Sand. J. Metall.*, **1** (1972), 103.
- 4) T.A.Engh, K.Larsen and K.Venas: *Ironmaking Steelmaking*, **6** (1979), 268.
- 5) L.R.Farias and G.A.Irons: *Metall. Trans. B*, **17B** (1986), 77.
- 6) T.Nomura and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 1.
- 7) T.Ohmi, S.Sato and M.Iguchi: *J. JSEM*, **5** (2005), No. 3, 221.
- 8) K.Suzukawa, K.Kato, S.Mochizuki and H.Osaka: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **71** (2005), 707.
- 9) N.Kamei, S.Hiraoka, Y.Kato, Y.Tada and K.Yamazaki: *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, **30** (2004), 105.
- 10) N.Kamei, S.Hiraoka, Y.Kato and K.Yamazaki: *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, **28** (2002), 9.
- 11) T.Sukawa and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 334.
- 12) T.Sukawa and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **45** (2004), 1145.
- 13) Y.Takahashi and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **46** (2006), 1143.
- 14) Y.Takahashi and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **94** (2008), 7, 238.
- 15) Handbook of Particle Imaging Velocimetry, The Visualization Society of Japan, (2002).
- 16) K.Ohmi, H.Li and D.H.Lam: *Trans. Vis. Soc. Jpn.*, **20** (2000), 79.
- 17) K.Hojo and M.Kashihara: *Trans. Vis. Soc. Jpn.*, **20** (2000), 77.
- 18) T.Shimizu, J.Yoshida, N.Tsuda, T.Koseki, S.Yokoya and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 7.
- 19) S.Yamashita and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1326.
- 20) K.Toshimitsu, K.Nishikawa and Y.Ohya: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **72** (2006), 717.
- 21) K.Toshimitsu, W.Haruki, M.Takao and Y.Ohya: *Trans. Vis. Soc. Jpn.*, **27** (2007), 10.