円柱を浸漬させた偏心攪拌での低密度粒子の分散挙動と浴内流動

佐藤 新吾*・大参 達也*²・井口 学*²

Dispersion Behavior of Low-density Particles and Water Flow in a Bath under Offset Agitation with an Immersion Cylinder

Shingo SATO, Tatsuya OHMI and Manabu IGUCHI

Synopsis : Particle image velocimetry measurements have been carried out to understand the characteristics of fluid flow containing low-density particles in a bath under mechanical offset agitation with an immersion cylinder. The particles disperse deeply and widely in the bath under this agitation method. The water flow pattern does not change drastically with the immersion cylinder. The tip of the vortex tube however shifts from the center of the rotation axis of the impeller to the tip of the impeller blade. The dispersion of low-density particles is highly enhanced by this vortex tip shift.

Key words: mechanical agitation; offset agitation; immersion cylinder; impeller; low-density particles.

1. 緒論

近年、鉄鋼業においては高品質な鋼の需要が増加しており、特に硫黄(S)の除去が非常に重要となっている。硫黄の処理には様々な方法があるが、一般的に転炉で行われていることは少なく、主に予備処理工程での除去が行われている。この溶銑予備処理では、KR法のようなインペラを用いた機械式攪拌やキャリアガスをを用いたガス吹込み攪拌が行われている^{1,2)}。現在のところ、実操業ではガス吹込み攪拌が主流となっているが、キャリアガスをを用いて脱磷剤や脱硫剤などの低密度粒子を添加する際に、均一分散ができず浴表面に粒子が浮上してしまうことや、定常状態になるまで時間がかかることなどの問題がある。このため、インペラの溶損というデメリットはあるものの、短時間で低硫化が可能な機械式攪拌が見直されてきている^{3,4)}。

現在行われている機械式攪拌プロセスは、インペラの回転軸を浴中心に設置する中心攪拌が主流となっている。更なる高効率化を達成するため、これまで当研究室では新規攪拌方式の検討を行ってきた。その結果、Fig. 1に示すような偏心攪拌、浸漬円柱攪拌において効果的な攪拌が達成できることを見出した^{5,6)}。偏心攪拌とは、インペラの回転軸を浴中心から偏心させる攪拌方式であり、浸漬円柱攪拌とは、浴表面にわずかに円柱を浸漬させる攪拌方式である。偏心攪拌や浸漬円柱攪拌を行うと、中心攪拌に比べ低密度粒子が非常によく分散することがわかった⁷⁾。そこで、偏心攪拌と浸漬円柱攪拌を同時に行う、つまり円柱を浸漬

させた場合にインペラを偏心させて攪拌を行うことにより、さらに効率の良い攪拌が期待できるのではと考え、本研究では円柱を浸漬させた偏心攪拌において、浴表面に散布した低密度粒子がどのように浴内へ分散するのかについて調査し、粒子画像流速計(Particle Image Velocimetry: PIV)を用いて浴内流動の調査を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置と実験条件

Fig. 2に今回用いた実験装置の概要図を示す。実験装置

Fig. 1. Offset agitation and centric agitation with an immersion cylinder.

平成21年6月17日受付 平成21年7月21日受理 (Received on Jun. 17, 2009; Accepted on Jul. 21, 2009)

* 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, Kita 13 Nishi 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

*2 北海道大学大学院工学研究科(Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

Fig. 2. Schematic of experimental apparatus.

は、浴深 $H_w=300$ mmとなるように水を満たした透明アクリル製の円筒容器とインペラを有する攪拌装置から構成されている。円筒容器の内径 D は200 mmであり、直方体形状容器で囲まれている。この円筒容器と直方体形状容器との間にも水を満たすことにより、浴内の粒子を観察する際の障害となる光の屈折の影響を少なくした。低密度粒子として、直径 $d_p=3$ mm、密度 $\rho_p=20$ kg/m³の球形の発泡スチロール製粒子100個を浴表面に散布した。インペラの回転を開始し、十分な時間が経過した後に浴内への分散の様子を観察した。インペラは羽根の傾斜角 θ が45度、直径 $D_i=50, 75$ mmの傾斜パドル型4枚羽根を使用し、容器底からの高さ H が50~200 mmとなるように設置した。インペラの回転数 N を低密度粒子の分散挙動測定では300~900 rpm、PIV測定では200, 500, 700 rpmと変化させ測定を行った。

本研究では、円柱を浸漬させた偏心攪拌に加え、これまで測定してきた中心攪拌、偏心攪拌、浸漬円柱攪拌を行い、粒子分散挙動や浴内流動の比較を行った。偏心攪拌では、円筒容器中心軸とインペラの回転軸との距離を $R_E=D/4$ とした。浸漬円柱攪拌では、外径 $D_c=35$ mmの円柱を中心から $L_c=D/4$ の位置に浴面からの深さが $H_c=20$ mmとなるように浸漬させた。円柱を浸漬させた偏心攪拌に関して、Fig. 3に浴の上方から見たインペラ、円柱の設置位置を示す。インペラは、偏心攪拌時と同様に容器中心軸から $R_E=D/4$ ずらして設置した。円柱は、浸漬円柱攪拌での使用したのと同様のものを設置した。浴中心に円柱を設置するType A、インペラから時計回りに90度ずらした位置に円柱を設置するType B、インペラから時計回りに180度ずらした位置に円柱を設置するType C、インペラから時計回りに270度ずらした位置に円柱を設置するType Dと4通りの設置位置について調査を行った。また、Type B, C, Dについてはインペラと同様に容器中心軸との距離を $L_c=D/4$ とした。

2.2 粒子分散の指標

粒子の分散状態を示す指標として、本実験では低密度粒子の到達距離 L_{P2} 、分散率 DR 、分散率の和 DR_T を採用した。

Fig. 3. Positions of impeller and cylinder under offset agitation with an immersion cylinder (top view).

Fig. 4. Dividing areas in the bath.

粒子到達距離 L_{P2} とは、Fig. 4に示すようにインペラ下端から最も深くまで進入した粒子までの鉛直方向距離と定義した。攪拌開始後、十分な時間が経過した後、浴正面から浴内をデジタルカメラで撮影し、その画像から粒子到達距離 L_{P2} を測定した。また、これまで我々は上記 L_{P2} を含めて3種類の粒子到達距離 L_{P1} , L_{P2} , L_{P3} を定義してきた⁷⁾。 L_{P1} は浴表面から最も深くまで進入した粒子までの鉛直方向距離、 L_{P3} は容器中心軸から最も深くまで進入した粒子までの半径方向距離を表す。本研究では、特にインペラに衝突した後の粒子の進入挙動に着目しているので、インペラ下端からの距離 L_{P2} に関して整理を行った。

粒子分散率 DR は、浴内のある領域における低密度粒子の割合と定義した。撮影した写真から、Fig. 4に示すように浴内を50 mm×50 mmの24個の正方形に分割し、各領域の粒子数を測定した。この測定値を全粒子数(100個)で除すことにより、浴内の各領域における低密度粒子の分散率が求まる。

低密度粒子の分散率の和 DR_T とは、各領域における粒子分散率 DR の浴全体での和と定義した。その際、低密度粒子が効果的に容器下部まで分散したかを表すために、粒子分散率を補正した。その詳細をFig. 5に示す。浴表面の4

Fig. 5. Modified dispersion ratio.

領域の粒子分散率を1倍, 2番目の4領域の粒子分散率を2倍, 以下同様に粒子分散率を3倍~6倍と補正する。このように補正を行うことで, 浴底部まで多くの粒子が分散した場合には, 粒子分散率の和 DR_T の値は大きくなる。つまり, 浴底部まで効果的に粒子が分散したか明らかとなる。粒子到達距離 L_{p2} , 粒子分散率 DR , 粒子分散率の和 DR_T のいずれも各条件につき, 10枚の写真を撮影し, その平均値を採用した。

2・3 PIV測定条件と方法

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 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)社製のものを利用した。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。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を行った。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。トレーサ粒子として, 粒径20~30 μm , 比重1.05の微粒子を用いた。

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, 縦断面について測定を行った。Fig. 6に示すように, レーザー照射位置は容器手前を $x=0\text{ mm}$ とし, 容器奥に向かって $x=20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180\text{ mm}$ と移動させた9つの位置で測定を行った。本論文では, 特に $x=60, 100, 140\text{ mm}$ での結果について示した。

各条件について100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50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 傾斜渦の挙動の変化

円柱を浸漬させることにより, 偏心攪拌時に形成していた傾斜渦の挙動に変化が生じた。Fig. 7にインペラ回転数

Fig. 6. PIV measurement method.

Fig. 7. Differences of shape and tip position of inclined-vortex ($H=50\text{ mm}$, $N=500\text{ rpm}$).

$N=500\text{ rpm}$ での浴正面と上面から見た傾斜渦の様子を模式図で示す。円柱を浸漬させない場合には, 傾斜渦の開口部が浴中心軸に対してインペラ回転軸と対称の位置にあった。また, 傾斜渦の先端はインペラまで到達していなかった。それに対し, 円柱を浸漬させると傾斜渦の挙動に関して異なる傾向を示した。インペラ回転数 $N=500\text{ rpm}$ においても渦管の先端がインペラまで到達し, またインペラ回転軸の中心から羽根先端に向かってずれているのが確認された。これは, Type A, B, Cにて観察された現象である。しかし, 開口部の位置に変化はなかった。また, 参考までに円柱をType CとDの中間で容器中心軸からの距離が $L_C=D/4$ の位置, Type BとDの中間で容器中心軸からの距離が $L_C=D/4$ の位置に設置し, 渦管の先端位置を観察したが, この条件でも渦管の先端はインペラ羽根先端に向かってずれていることを確認した。つまり, 円柱を浸漬させることにより, 渦管がインペラまで到達しやすくなり, 先端の位置が羽根先端へずれることがわかった。しかし, その

Fig. 8. Photographs of inclined-vortex in the bath ($D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $H=50$ mm, Type D).

他の回転数ではこの現象が観察されなかった。インペラ回転数 $N=200$ rpm では渦管がインペラまで到達することはないため、渦管のずれは確認できず、また、 $N=700$ rpm ではインペラ回転力が非常に大きいため、円柱浸漬による浴内流動変化の効果が弱くなり、渦管は羽根先端へずれることなくインペラ回転軸の中心に接した。つまり、この現象はある特定の回転数範囲でのみ観察される現象であるといえる。

また、Type Dにて観察された現象について説明する。Type Dでは、ある一定以上の回転数で円柱下端が傾斜渦の開開口と重なり、Fig. 8に示すように円柱の水中への浸漬が見られなかった。すなわち、凹んだ水面が浸漬円柱の底部より下側に位置し、この場合、円柱を浸漬させた効果はなく、偏心攪拌と同様の浴内の状態となる。これ以降のType Dでの結果に関しては、水面の降下量が少なく、円柱の浸漬が見られた低回転数の結果のみを示す。

3.2 粒子到達距離 L_{P2}

低密度粒子の分散挙動について、前述の3つの指標を用いて評価する。Fig. 9に各浸漬円柱位置での粒子到達距離 L_{P2} を示す。なお、 Fr は次式で示されるフルード数である。

$$Fr = \frac{(N/60)^2 D_I}{g} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N はインペラ回転数 (rpm)、 D_I はインペラ直径、 g は重力加速度である。この条件では、渦がインペラまで到達し、低密度粒子が浴内へ分散する。いずれの条件でも浴深くまで低密度粒子の降下が確認された。しかし、測定値のばらつきは大きい、均等にばらついており、円柱設置

Fig. 9. Relationship between Fr and L_{P2}/D_I under offset agitation with an immersion cylinder ($D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $H=50\sim 200$ mm, $H_W=300$ mm, $N=300\sim 900$ rpm).

Fig. 10. Dispersion behavior of particles in the bath ($D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $H=50$ mm, $N=800$ rpm).

位置の影響はほとんど変化見られなかった。また、偏心攪拌、浸漬円柱攪拌においても同様の結果が得られ、粒子降下に関しては4種類の攪拌方式の影響は見られなかった。

3.3 粒子分散率 DR

Fig.10にインペラ設置高さ $H=50$ mmでの中心攪拌、偏心攪拌、浸漬円柱攪拌の結果とともに円柱を浸漬させた偏心攪拌の各円柱位置での粒子分散率 DR を示す。この条件では、Type Dにおいて円柱の浸漬が見られなかった。中心攪拌、浸漬円柱攪拌ではほとんど粒子が分散しておらず、偏心攪拌では浴全体に少量の粒子が分散している程度であった。これに対して、円柱を浸漬させた偏心攪拌 (Type A, B, C) では、特にインペラ下部領域に粒子が分散してい

Fig. 11. Dispersion behavior of particles in the bath ($D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $H=200$ mm, $N=800$ rpm).

るなど浴底部まで低密度粒子の効果的な分散が見られた。

Fig.11にインペラ設置高さ $H=200$ mmでの各搅拌条件下での粒子分散率 DR を示す。インペラを浴表面に近い位置に設置した場合、中心搅拌、偏心搅拌、浸漬円柱搅拌では多くの低密度粒子が浴内へ分散しているが、インペラ周辺に分散する程度であり、浴全体への分散が見られなかった。これに対して、円柱を浸漬させた偏心搅拌(Type A, B, C)では、インペラが深い位置にある場合と同様に、特にインペラ下部領域に粒子が分散しているなど浴全体にわたって低密度粒子が分散している様子が観察された。

3.4 粒子分散率の和 DR_T

Fig.12にインペラ設置高さ $H=50$ mmでの各搅拌条件下での粒子分散率の和 DR_T を示す。低回転数($N \leq 500$ rpm)では、どの搅拌条件下でも低密度粒子が浴内へ分散しなかったが、回転数が大きくなるにつれ低密度粒子がより浴内へ分散することがわかった。また、偏心搅拌、浸漬円柱搅拌では、回転数 $N \geq 700$ rpmにおいて低密度粒子が分散したが、円柱を浸漬させた偏心搅拌では $N \geq 500$ rpmとより低回転数でも粒子が浴内へ分散することがわかった。これは、偏心搅拌時に円柱を浸漬させることにより低回転数でも低密度粒子を巻き込むことが可能となることを示している。しかし、前述のように、Type Dでは、回転数 $N \geq 600$ rpmにおいて形成した傾斜渦によって円柱が浸漬せず、円柱を設置しない偏心搅拌と同様の結果が得られたため、グラフから除いている。また、Type A, B, Cにおいて、円柱設置位置の影響が見られ、特にType Cにおいて最も多くの粒子を分散させることができた。

Fig.13にインペラ設置高さ $H=200$ mmでの各搅拌条件下

Fig. 12. Relationship between rotation frequency, N , and total dispersion ratio, DR_T ($D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $H=50$ mm, $H_W=300$ mm).

Fig. 13. Relationship between rotation frequency, N , and total dispersion ratio, DR_T ($D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $H=200$ mm, $H_W=300$ mm).

での粒子分散率の和 DR_T を示す。インペラが浴表面に近い場合には、どの搅拌方式においても一定の低密度粒子を浴内へ分散させることができ、搅拌方式の違いによる影響はあまり見られなかった。

これは以下のように考えることができる。インペラを浴表面付近に設置した場合($H=200$ mm)、浴表面付近では円柱による循環流を崩す効果よりもインペラの回転力が大きくなり、搅拌方式の違いによる影響が見られなかったといえる。そのため、インペラを浴底部付近に設置した条件($H=50$ mm)では、搅拌方式の違いの影響が見られ、特に円柱を浸漬させた偏心搅拌を行うことで多くの粒子を浴内へ導入することが可能となる。

3.5 PIVによる流動測定

Fig.14~16にレーザー照射位置 $x=60, 100, 140$ mmでのType Aの円柱位置でのPIVベクトル図を偏心搅拌での結果と併せて示す。レーザー照射位置 $x=60, 140$ mmでは、円柱を設置したType Aにおいて浴全体に渡ってやや流速が大きくなる傾向が見られたが、どちらも渦管に沿った流れが観察され、円柱を設置することによる大きな変化は見られなかった。また、この傾向はレーザー照射位置

Fig. 14. Effect of an immersion cylinder on velocity vectors in the bath (Type A) ($H=50$ mm, $N=200$ rpm, $x=60$ mm).

Fig. 15. Effect of an immersion cylinder on velocity vectors in the bath (Type A) ($H=50$ mm, $N=200$ rpm, $x=100$ mm).

$x=100$ mm 以外の面でも同様であった。レーザー照射位置 $x=100$ mm についても、浴内の大部分では円柱を設置することによる影響はあまり見られなかったが、図中①で示した浴内部において水平方向ベクトルが現れた。これは円柱を浸漬させることにより、渦管の位置がずれたことによるものだと考えられる。つまり、円柱を浸漬させても浴内の大部分で円柱を浸漬させない場合と同様の流動となった。

Fig.17にレーザー照射位置 $x=140$ mm での各円柱位置における偏心攪拌時のPIVベクトル図を示す。実験条件は、インペラ設置高さ $H=50$ mm、インペラ回転数 $N=700$ rpm である。この条件でも Type D では円柱の浸漬が見られなかったため記載していない。なお、インペラは直径 $D_I=75$ mm (半径が 37.5 mm) なので、 $x=140$ mm の位置に

Fig. 16. Effect of an immersion cylinder on velocity vectors in the bath (Type A) ($H=50$ mm, $N=200$ rpm, $x=140$ mm).

Fig. 17. Effect of position of an immersion cylinder on velocity vectors in the bath ($H=50$ mm, $N=700$ rpm, $x=140$ mm).

あるレーザーシートをインペラが横切ることではない。どの円柱位置でも斜め下に向かう流れ、すなわち渦管に沿った流れが観察された。しかし、粒子分散に関しては浸漬円柱の設置位置の影響は見られたが、円柱の設置位置による大きな違いは見られなかった。浴内流動の変化がほとんど見られなくても粒子分散が大きく異なることから、低密度粒子の分散はインペラ周りの流れの影響を受けやすいといえる。

3.6 浸漬円柱の効果

上述のように、偏心攪拌時に円柱を浸漬させることで浴内流動に変化が現れ、低密度粒子の分散挙動にも影響を与えることがわかる。ここでその理由について考察する。

以前高橋らは、中心攪拌時に円柱をわずかに浸漬させることによって低密度粒子の分散挙動に影響を及ぼすことを明らかにしている⁸⁾。これは、円柱を浸漬させることで浴内に形成する渦の回転軸が傾斜することによるものであった。本研究での偏心攪拌でも、同様の現象が起こっていると思われる。しかし、Fig.14~16のPIVベクトル図からわかるように円柱を浸漬させることによる大きな変化は見られなかった。つまり、始めから渦管が傾斜している偏心攪拌では、円柱による回転軸傾斜の効果は小さいといえる。

しかし、粒子分散率 DR や粒子分散率の和 DR_T のように粒子を分散させることに関しては、円柱を浸漬させる効果が見られた。これは、前述のように円柱を浸漬させることにより渦管の先端がインペラの回転中心からずれることと、渦管がインペラまで到達しやすくなることに起因している。Fig.18に円柱を浸漬させない場合とさせた場合の偏心攪拌での浴内写真を示す。円柱を浸漬させない場合には、インペラまで到達していなかった渦管の先端が、円柱を浸漬させることによりインペラまで到達することが確認できる。また、渦管の先端がインペラの回転軸の中心から羽根先端方向へずれていることが確認できる。

以上のことから、低密度粒子分散に関して以下のように考えることができる。低密度粒子は形成する渦に沿って降下し、インペラに衝突すると浴内へ分散する。ここで、インペラ回転軸中心より羽根先端のほうが回転速度が大きいため、羽根先端付近に衝突した粒子は、羽根の力で浴内広くに渡って分散する。このため、円柱を浸漬させた偏心攪拌では、円柱を浸漬させない場合に比べて粒子が浴全体に渡って効果的に分散するといえる。しかし、渦管先端の位

Fig. 18. Difference of tip position of vortex tube ($D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $H=50$ mm, $N=700$ rpm).

置は円柱設置位置によらずほぼ同位置にあったことから、円柱設置位置が粒子分散挙動に顕著な影響を及ぼさないと考えることができる。円柱設置位置による影響に関しては、今後異なる方法で調査をする必要がある。

4. 結論

浴表面に円柱を浸漬させた偏心攪拌を行うことで、中心攪拌、偏心攪拌、浸漬円柱攪拌に比べ浴表面に散布した低密度粒子を浴内へ均一に分散させることが可能となった。特にType Cが最も効果的である。円柱を浸漬させても浴内の液体の流動状態はあまり変化しないが、渦管の先端がインペラまで到達し、インペラの回転中心からずれてインペラの羽根先端近傍に衝突した。このような渦管の到達と渦管先端の移動が低密度粒子を浴内全体に渡って均一に分散させる最も大きな理由であることがわかった。ただし、円柱設置位置の影響は顕著であるというわけではない。すなわち、Type Cが飛び抜けて優れているというのではなく、設備の配置状況によってはType A, Bを採用してもType Cと遜色のない結果が期待できる。

本研究を進めるに当り資金的な援助を賜りましたホソカワ粉体工学振興財団様に厚く御礼を申し上げます。

記号

- D : 容器内径(mm)
- D_C : 浸漬円柱直径(mm)
- D_I : インペラ直径(mm)
- DR : 粒子分散率(-)
- DR_T : 粒子分散率の和(-)
- d_p : 低密度粒子の直径(mm)
- Fr : フルード数 $\left(= \frac{(N/60)^2 D_I}{g} \right)$
- H : 容器底からのインペラ設置高さ(mm)
- H_C : 浴面からの円柱浸漬深さ(mm)
- H_W : 浴深(mm)
- L_C : 浸漬円柱の半径方向設置位置(mm)
- L_{P2} : 粒子到達距離(mm)
- N : インペラ回転数(rpm)
- R_E : インペラの半径方向設置位置(mm)
- x : レーザー照射位置(mm)
- θ : インペラの羽根傾斜角(deg)
- ρ_p : 低密度粒子の密度(kg/m^3)

文 献

- 1) ISIJ: 100th and 101st Nishiyama Memorial Lecture, ISIJ, Tokyo, (1984).
- 2) N.Kikuchi, S.Nabeshima, S.Takeuchi, T.Yamauchi, Y.Kitano and S.Ogura: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), No. 6, 322.
- 3) Y.Nakai, I.Sumii and Y.Kikuchi: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 216.
- 4) S.Shimasaki, T.Wada and S.Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), No. 6, 637.
- 5) T.Nomura and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), No. 1, 1.
- 6) T.Sukawa and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), No. 6, 334.
- 7) S.Sato, T.Ohmi and M.Iguchi: *J. JSEM Special Issue*, **9** (2009), 119.
- 8) Y.Takahashi and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **94** (2008), No. 11, 461.