

# 機械式偏心攪拌による低密度粒子の 円筒浴内への分散効果

野村 卓也\*・井口 学\*<sup>2</sup>

Effects of Mechanical Offset Agitation on Dispersion of Low Density Particles in Cylindrical Bath

Takuya NOMURA and Manabu IGUCHI

**Synopsis :** A water bath in a cylindrical vessel was mechanically agitated by a stirrer in order to promote dispersion of low density particles in the bath. The motions of the particles were observed with a high-speed video camera. The velocity of liquid flow was measured with a laser Doppler velocimeter. Mixing time was also measured to evaluate the mixing intensity in the bath. Offset stirring was very efficient for uniform dispersion of the particles compared with centric stirring. An inclined vortex caused by the offset stirring was found to significantly shorten the mixing time, and, hence, to contribute to the uniform dispersion.

**Key words :** mixing; impeller; low density particle; LDV; mixing time.

## 1. 緒言

攪拌は、反応促進と温度、成分の均一化などの手段として精錬プロセスに不可欠な操作であり、溶銑予備処理、転炉、取鍋精錬、真空脱ガスから連続鑄造に至るまで製鋼のあらゆる分野で活用されている<sup>1,2)</sup>。このような浴攪拌は、ガス吹込み攪拌とインペラーによる機械式攪拌に大別される。現在は、ガス吹込み攪拌が主流となっているが、例えば溶銑予備処理に際し、キャリアー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、均一分散ができず粒子が表面に浮上してしまうなどの問題が生じており、状況によってはKR法などの機械式攪拌が見直されてきている<sup>3-12)</sup>。

インペラーを用いた機械式攪拌の歴史は極めて古く<sup>13)</sup>、攪拌効率と攪拌所要動力との関係、フローパターン、インペラーの周辺から吐出される液流量や浴内速度分布と羽根寸法、回転速度などの関係が研究されている<sup>14)</sup>。また、沈殿粒子の浮上や微粒子の溶解などに関する研究も数多くあるが、浮遊粒子あるいは低密度粒子の均一分散に関する研究報告は少なく、化学工学の分野でも十分解明されているとはいえない<sup>15,16)</sup>。

従来からの機械式攪拌の主たる様式は回転軸を浴中心に設置する中心攪拌である<sup>3)</sup>。しかし中心攪拌では、低密度粒子を降下させ、均一分散させることは困難である。本研究では、回転軸を浴中心からずらし、浴内の流動を非対称にすることによって、低密度粒子の均一分散を実現することが可能であるかどうかを調べた。

なお、化学工業で用いられている機械式攪拌においては、攪拌の促進のために邪魔板を設けるのが一般的であるが、鉄鋼精錬プロセスでは、装置は非常に高い温度環境下にあり、邪魔板を取り付けることによって溶損個所が多くなり、装置の寿命が低下するとともに溶鋼の汚染が進む懸念がある。そこで本研究では、現状の精錬装置を想定し、邪魔板を設置しなかった。邪魔板と偏心攪拌は、流れを非対称にするという点に関しては同じ効果を有している。邪魔板の詳細については、文献15)を参照されたい。

## 2. 実験装置と測定方法

### 2.1 粒子降下距離

Fig. 1に実験装置の概要を示す。攪拌槽には、すべての実験において内径 $D=200$  (mm)、高さ $H_t=400$  (mm)の透明アクリル製円筒容器を用いた。浴深が $H_w=300$  (mm)になるようにイオン交換水を満たし、光の屈折の影響を少なくするために、円筒容器を取り巻く正方形断面の浴にもイオン交換水を満たした。スピードコントロールモータを介し、攪拌羽根の回転速度を $N=300$  (rpm)~1000 (rpm)の範囲で制御した。流動特性は次の攪拌レイノルズ数により記述される<sup>15)</sup>。

$$Re=d^2n/\nu \dots \dots \dots (1)$$

ここで $d$ は羽根径(m)、 $n$ は回転数(1/s)、 $\nu$ は水の動粘度( $m^2/s$ )である。

本実験条件下のレイノルズ数は $10^4 \sim 10^5$ の範囲にあり、

平成13年7月3日受付 平成13年10月25日受理 (Received on July 3, 2001; Accepted on Oct. 25, 2001)

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

\*<sup>2</sup> 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)

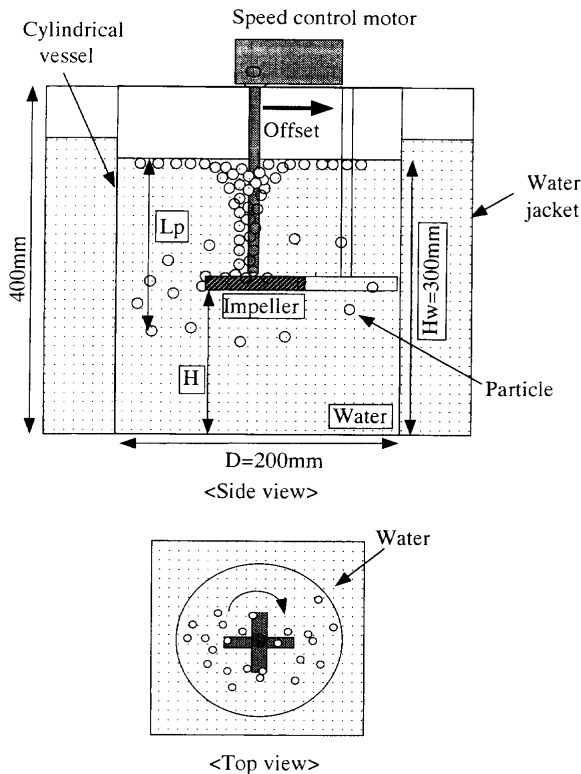


Fig. 1. Experimental apparatus for centric and offset agitation.

したがって羽根付近の流れは乱流である<sup>15)</sup>。低密度粒子として密度0.4 (g/cm<sup>3</sup>), 平均粒径6.5 (mm)の針金入り球状発泡スチロールと密度0.02 (g/cm<sup>3</sup>), 平均粒径7.0 (mm)の球状発泡スチロールを用いた。しかし、密度0.02 (g/cm<sup>3</sup>)の粒子は、いずれの条件下においても降下しなかった。針金入り球状発泡スチロールは水との密度比が0.4であり、実機での値にほぼ合致している。このような低密度粒子を、浴表面を一層となって覆うように添加し分散状況を観察した。

モデル粒子径と実機粒子径の関係について以下にもう少し詳しく述べる。針金入りの粒子は自由表面から浴中へ巻き込まれることはなく、渦表面に沿って降下してきて、回転羽根に衝突し、羽根と羽根の間を通過するときに巻き込まれた。この巻き込み機構は現在のところ明らかでないために厳密性に欠けるが、とりあえず2種類の巻き込み機構を想定して相似則を適用してみる。一つは、粒子が羽根と羽根の間を通過する際に液体との接触が多くなると、粒子に働く流体力が浮力に打ち勝って浴中へ巻き込まれる場合であり、相似則としてフルード数を適用することができる。他の一つは、粒子が羽根と羽根の間を通過する際に流体力が表面張力による力に打ち勝って巻き込まれる場合であり、ウェーバー数が適用できる。

(1) フルード数に基づくモデル粒子の径

上述のように、粒子が浴中に巻き込まれるためには、浴表面が回転にともなって降下し、回転羽根の場所に到達しなければならない。この距離 $H_i (=H_w - H)$ は浴内の代表的

な周方向速度 $w_c$ と次の関係を有している。

$$H_i = w_c^2 / (2g) \dots\dots\dots (2)$$

ここでモデルと実機を区別するために添字 $m$ と $r$ を用いることにすれば、幾何学的相似から次の関係が成り立つ。

$$H_{im} / H_{ir} = w_{cm}^2 / w_{cr}^2 \dots\dots\dots (3)$$

さらに、モデルが実機の1/10の大きさであると仮定すれば、式(3)から次式が得られる。

$$w_{cm}^2 / w_{cr}^2 = 1/10 \dots\dots\dots (4)$$

フルード数は次式で定義される。

$$Fr = \rho_L w_c^2 / [(\rho_L - \rho_p)gd_p] \dots\dots\dots (5)$$

ここで $\rho_L$ は液体密度、 $\rho_p$ は粒子密度、 $g$ は重力加速度、 $d_p$ は粒子径である。モデルと実機において式(5)の $Fr$ が等しいとおけば次式が得られる。

$$d_{pm} / d_{pr} = (\rho_{Lr} - \rho_{pr}) \rho_{Lm} w_{cm}^2 / [(\rho_{Lm} - \rho_{pm}) \rho_{Lr} w_{cr}^2] \dots\dots\dots (6)$$

この式に各物性値を代入し、式(4)を用いると

$$d_{pm} / d_{pr} \cong 1/10 \dots\dots\dots (7)$$

となる。

本実験では、 $d_{pm}$ は $d_{pr}$ よりもかなり大きく、フルード数に基づく相似則を満足していない。したがって、実際のプロセスにおける粉体の巻き込みを厳密にはモデル化したことにはならない。ただし、粒子径を大きくしたことによって、粒子に働く浮力が実機の場合よりも大きくなり、巻き込みにくい状況が設定されていることになる。

(2) ウェーバー数に基づくモデル粒子の径

ウェーバー数は次式で定義される。

$$We = \rho_L d_p w_c^2 / \sigma \dots\dots\dots (8)$$

ここで $\sigma$ は表面張力である。この式を用いると、直径比は次式で与えられる。

$$d_{pm} / d_{pr} = \sigma_m \rho_{Lr} w_{cr}^2 / (\sigma_r \rho_{Lm} w_{cm}^2) \dots\dots\dots (9)$$

物性値を代入し、式(4)を用いると次式が得られる。

$$d_{pm} / d_{pr} \cong 3 \dots\dots\dots (10)$$

本実験で用いたモデル粒子の径は、この式に基づいて得られる粒子径よりも大きい。このように、実際にモデル実験で用いられた粒子はフルード数とウェーバー数を基にして導かれたモデル粒子の径よりも大きい。本論文では、一連の研究の第1段階として粒子の識別が容易で、数えやすい粒子として大きな粒子を選び、まず偏心攪拌によって生じた傾斜軸を有する渦によって低密度粒子の均一分散が促進されるかどうかについて調べた。ただし、本実験の結果

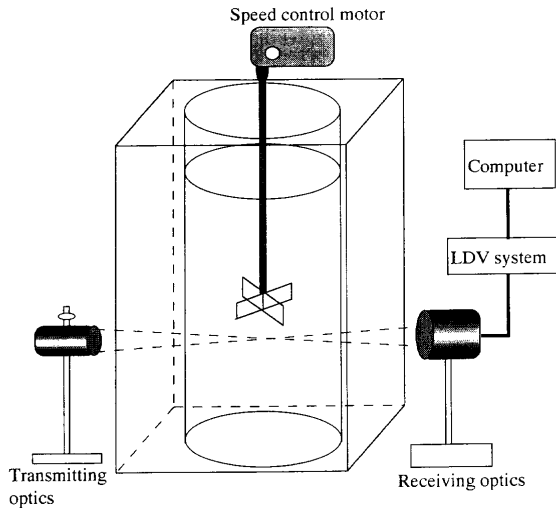


Fig. 2. Schematic of experimental apparatus for LDV system.

がそのまま実機に適用できるかどうかについては、現時点で明確な判断を下すことはできない。モデル粒子の径を小さくして、さらなる検討を要する。

インペラーの偏心攪拌は、回転軸を浴中心からずらし浴内の流動を非対称にする攪拌法である。本実験では、偏心距離を10 (mm), 20 (mm), 50 (mm)とした。なお、実験装置の都合上、偏心距離をこれ以上大きくしなかった。

粒子降下距離は、回転を始めて浴内の流れが定常状態となったときの粒子の液表面からの最大降下距離と定義した。粒子降下距離の測定は、円筒容器に直接目盛りを付し、攪拌羽根の高さと回転速度をさまざまに変化させ、目視で行い、再現性の確認のため5回ずつ繰り返した。浴内のフローパターンおよび粒子移動の調査にはデジタルカメラとビデオカメラを用い、浴後方にバックライトを置き、粒子画像を2値化して粒子の挙動を観察した。

## 2.2 レーザードップラー流速計 (LDV) による流速測定

イオン交換水の流動特性は、LDVにより測定した (Fig. 2)。散乱粒子には1ミクロンのアルミナ粒子を使用した。本実験では、半径方向速度が非常に小さいため、円周方向速度  $v$  と鉛直方向速度  $u$  のみの測定を1測定点につき10分間にわたって行い、平均速度を求めた。攪拌羽根高さ  $H$  を100 (mm)に固定し、回転速度  $N$  を300, 600, 900 (rpm)と変え、中心攪拌と偏心攪拌 (偏心距離: 50 mm) の比較を行った。なお、測定点は中心攪拌、偏心攪拌の場合ともに同一とし、主として羽根の下の領域を測定した。座標軸は Fig. 3のように設定した。半径方向座標  $r$  に符号をつけるのは正しくないが、本論文では測定位置を明示するために、便宜的にこのような措置を講じている。

## 2.3 均一混合時間

実験装置の概要を Fig. 4に示す。液体にはイオン交換水を用い、トレーサーとして1 (kmol/m<sup>3</sup>)のKCl水溶液をイオン交換水1000×10<sup>-6</sup> (m<sup>3</sup>)に対して1.0×10<sup>-6</sup> (m<sup>3</sup>)の割合で、

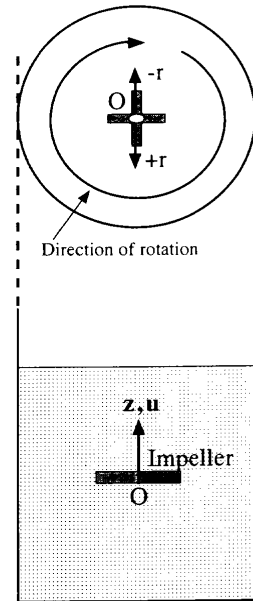


Fig. 3. Coordinate system and velocity components.

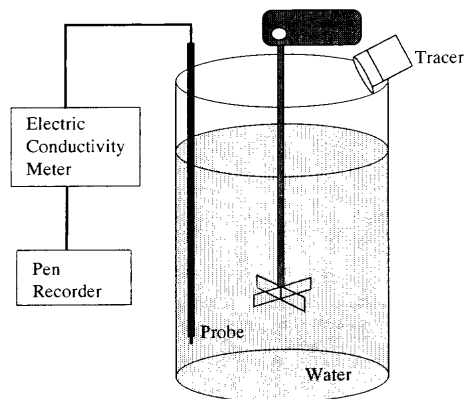


Fig. 4. Schematic of experimental apparatus for mixing time measurement.

浴内が定常状態に達してから投入した。均一混合時間は、円筒浴内のトレーサー濃度を電気伝導度測定により求めた<sup>17)</sup>。すなわち、トレーサー投入直後から電気伝導度の最終値の95%あるいは105%に至るまでの時間を均一混合時間と定義した。この定義は鉄鋼関連の研究においてよく用いられている<sup>18-20)</sup>。トレーサー投入位置と電気伝導度計の位置により均一混合時間が変化するのではないかと考え、あらかじめ均一混合時間に及ぼすこれらの影響を調べたが、±10%の偏差であり、無視してよいことがわかった。そこで、電気伝導度計は浴壁から10 (mm)、浴底から20 (mm)の一定位置に設置した。実験条件は流速測定と同様とした。いずれの実験も再現性の確認のため3回ずつ行った。

## 2.4 攪拌羽根

本実験で用いた攪拌羽根の概要を Fig. 5に示す。2種類の攪拌羽根を用いて粒子の降下についての調査を行った。両タイプとも化学工学などの分野で一般的に用いられてい

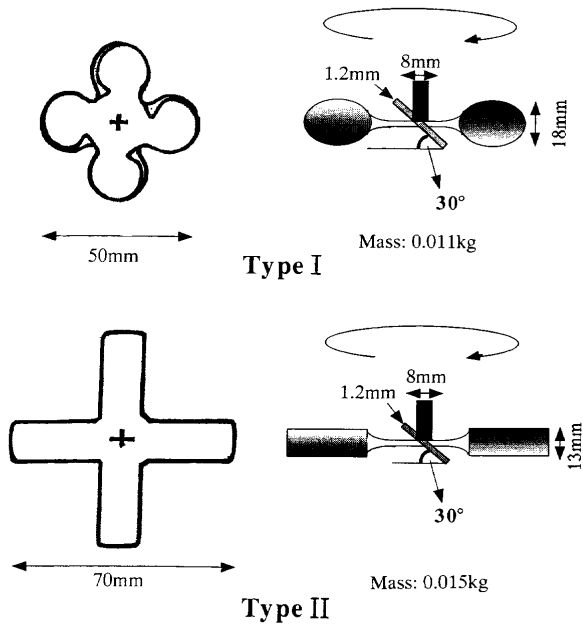


Fig. 5. Details of impeller.

るもので、タイプIをプロペラ型4枚羽根、タイプIIを十字型4枚羽根と呼ぶことにする<sup>21)</sup>。2種類の回転羽根を用いたのは、偏心攪拌のとき羽根の形状、寸法が変化しても傾斜渦が現れるのかどうか調べるためである。ここで用いた2つのタイプの羽根に限っていえば、傾斜渦は羽根の形状、寸法に依存せず、ほぼ同じ条件下で現れた。そこで流速および均一混合時間の測定には、偏心攪拌の効果が大きくみられたタイプIIのみを用いたが、この効果が羽根の形状、寸法のいずれに強く依存しているのかについては今後の課題としたい。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 攪拌様式にともなう回転渦の形状

中心攪拌と偏心攪拌では、羽根の回転にともない発生する渦の形状に大きな違いが見られた。Fig. 6に、粒子を添加していない水だけの中心攪拌と偏心攪拌の写真の一例を示す。浴深 $H_w=300$  (mm)、攪拌機高さ $H=100$  (mm)、回転速度 $N=900$  (rpm)であり、攪拌羽根にはタイプIIを用いた。偏心攪拌の場合の偏心距離は50mmである。Fig. 6(a)の中心攪拌では、攪拌機が浴中心にあり、回転にともない発生する渦は浴中心の回転軸上に形成された。渦の形状は回転速度にともない、釣り鐘状となっていった。一方、Fig. 6(b)の偏心攪拌では、渦の発生位置が中心攪拌と大きく異なった。中心攪拌では回転軸と渦中心が同一直線上にあるのに対し、偏心攪拌の場合、浴中心軸に対して回転軸とほぼ点対称の液表面から攪拌羽根中心に向かい傾斜のある渦が形成された。偏心距離を大きくすると傾斜角も増大し、本実験では偏心距離が50 (mm)のとき最大となった。攪拌羽根によって誘起された流れが容器の円周に沿って循環す

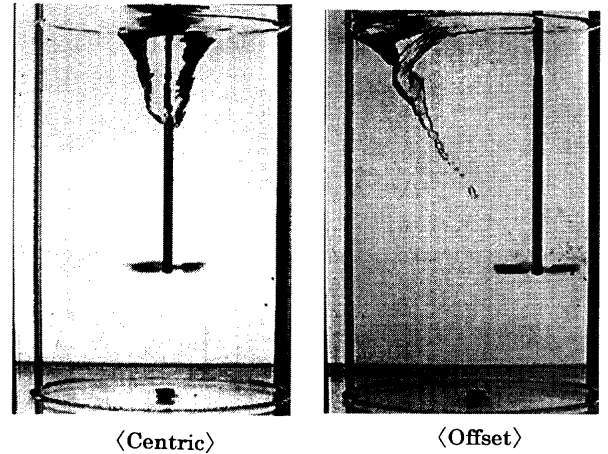


Fig. 6. Photographs of vortex at  $H=100$  (mm) and  $N=900$  (rpm).

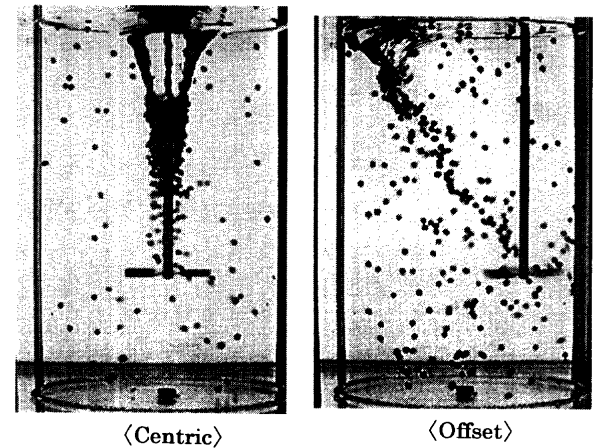


Fig. 7. Photographs of dispersion particles at  $H=100$  (mm) and  $N=900$  (rpm).

るが、この流れによって攪拌羽根の軸と点対称の浴表面位置近傍に誘起される渦が生成して、傾斜渦に発達する。ただし、生成メカニズムならびに傾斜渦が生成するに要する時間などの詳細については今後の検討が必要である。

Fig. 7に粒子を添加した同条件での写真を示す。バックライトにより粒子は黒点で示される。900 (rpm)の回転速度においては、偏心攪拌の方が粒子の移動が浴全体に行きわたり分散能が高いことがわかる。また粒子の分散個数を比較すると、中心攪拌の平均60個に対し、偏心攪拌の場合、平均150個と大幅に増加している。中心攪拌も一定程度分散は起こっているが、大多数の粒子は渦へ集積している。同様な現象が攪拌羽根を変えても見られた。すなわち、粒子の分散には浴内の傾斜渦の存在が大きく影響する。

そこで偏心距離が50 (mm)の偏心攪拌における傾斜渦の形成範囲をFig. 8に示す。浴深 $H_w$ と攪拌機高さ $H$ を変化させ、渦が形成するかどうかを調査した。その結果、容器径 $D$ が200 (mm)の円筒容器に限っていえば、攪拌羽根の上方に150 (mm)以上の液体が存在すれば傾斜渦が形成されることになる。

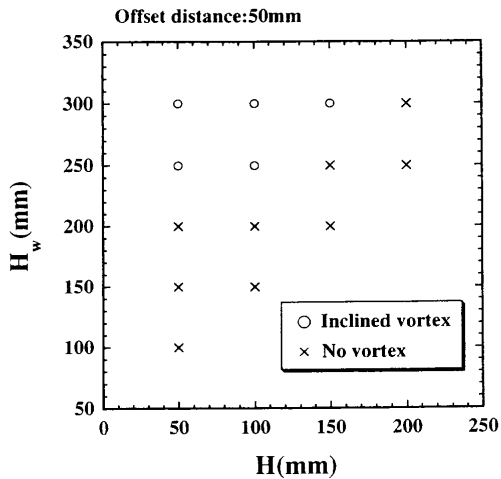


Fig. 8. Range of formation of inclined vortex for offset (50 mm) agitation at  $N=900$  (rpm).

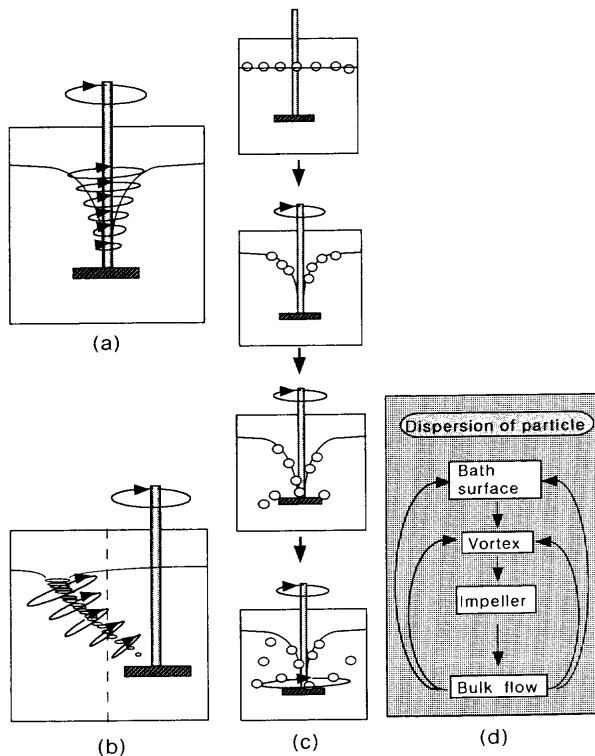


Fig. 9. Models for dispersion of moving particles.

### 3.2 粒子の分散挙動

粒子の分散挙動をFig. 9の模式図を用いて説明する。この図はビデオカメラで撮影した画像をもとに描写したものであり、(a)と(b)は粒子を添加しないときの渦を模式的に表している。Fig. 9(c)に中心攪拌の場合を例として示したが、粒子は比重差のため最初、液表面に停滞している。攪拌羽根を回転することにより回転渦が発生し、粒子も渦へと移動していく。その渦が攪拌羽根に衝突することにより渦とともに降下してきた粒子もそこで渦から離脱する。液体中に分散した粒子は液体の流れに従い、浴内を移動し再び液表面や渦に接触し、これが繰り返されて定常的な分散状態に至る。この一連の様子をFig. 9(d)に示す。

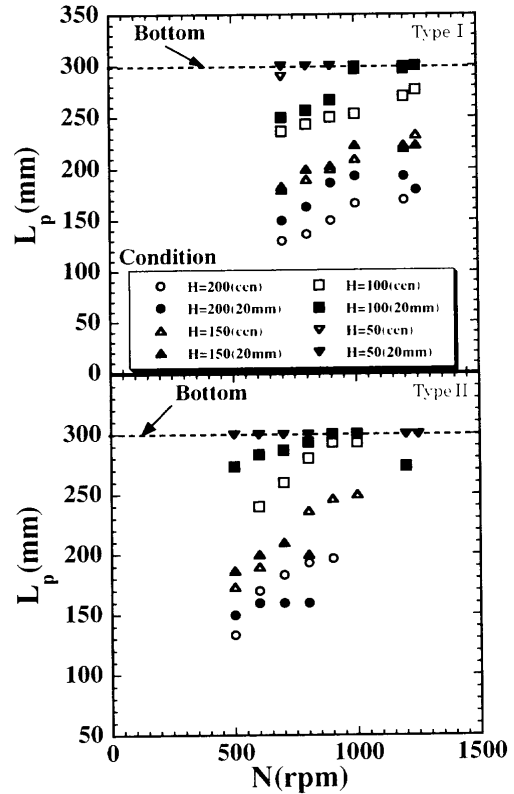


Fig. 10. Comparison of  $L_p$  (mm) between centric and offset (20 mm) agitation for Type I and Type II.

### 3.3 粒子降下距離

低密度粒子の均一分散が本研究の主たる目的であるため、浮力が大きく働く低密度粒子の浴内への降下は重要な因子となる。なお、浴内に分散した粒子数の定量的評価も非常に重要な課題である。前掲のFig. 7に示したように、カメラを用いて撮影した画像を利用すればよいが、渦近傍で多数の粒子が重なり合っているため、正確な値を求めることは容易でない。そこで今回は粒子の最大降下距離のみに着目した。

Fig.10にタイプIとタイプIIにおける偏心攪拌（偏心距離：20 mm）と中心攪拌（cenと記す）の粒子降下距離の比較を示す。偏心攪拌のデータは黒塗り記号で、中心攪拌のデータは白抜き記号で表している。中心攪拌と偏心攪拌を比較すると、粒子降下距離はともに同じような値をとっている。これは、偏心距離が20 (mm)の攪拌では傾斜渦の傾斜角が非常に小さく、ほぼ回転軸に沿った渦が形成され、渦の形状が中心攪拌と類似し、偏心による流れに対する影響力が小さいためである。

Fig.11には偏心攪拌（偏心距離：50 mm）と中心攪拌との比較を示す。偏心攪拌では、粒子降下距離に大きな効果がみられた。中心攪拌では羽根下までの降下が限界であるのに対し、ほぼすべての条件下において粒子の降下が浴底 ( $L_p=300$  mm)まで至った。これは、大きな傾斜角をもった傾斜渦が発生することにより、斜め下向きの流れが誘起さ

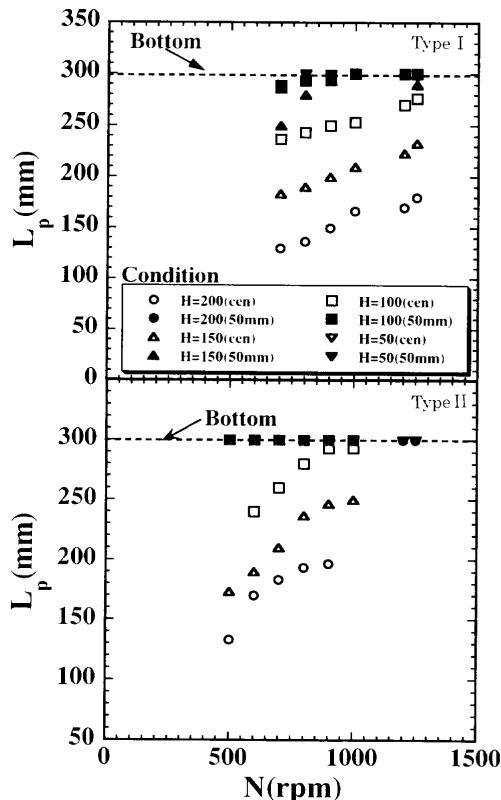


Fig. 11. Comparison of  $L_p$  (mm) between centric and offset (50 mm) agitation for Type I and Type II.

れたためである。タイプIとタイプIIを比較すると、タイプIIではすべての条件で粒子の降下が浴底まで見られた。羽根径 $d$ に依存する攪拌レイノルズ数が大きくなることにより、タイプIIの方が、乱れが大きくなるためであると考えられるが、詳細については今後の課題としたい。

実際のKRプロセスでは溶損対策としてもっとずんぐりした形状の羽根が用いられているようであるが、実機への適用に関して本実験結果からいえることは以下の2点に要約される。(1)下向きの流れを効率よく誘起できる回転羽根であること。(2)羽根と羽根との間を粒子が通過しやすいこと。

### 3.4 攪拌様式と流動特性

中心攪拌と偏心攪拌において、羽根の下の領域で円周方向速度と鉛直方向速度をLDVにより測定したが、円周方向速度の均一分散への寄与は小さいため、ここでは鉛直方向速度の結果についてのみ記述する。低密度粒子の均一分散には、粒子に働く水の浮力に対抗する下向きの流れが必要不可欠なものとなる。流速測定においては攪拌羽根高さを $H=100$  (mm)とし、影響の最も大きい偏心距離が50 (mm)の結果のみを示す。

Fig.12に羽根下における中心攪拌と偏心攪拌との比較を示す。縦軸に鉛直方向平均速度 $\bar{u}$ を、横軸には測定点の半径方向成分 $r$ を円筒容器半径 $R$ で除した無次元数 $r/R$ をとっている。また、 $z$ は測定点の高さを示しており、攪拌羽根

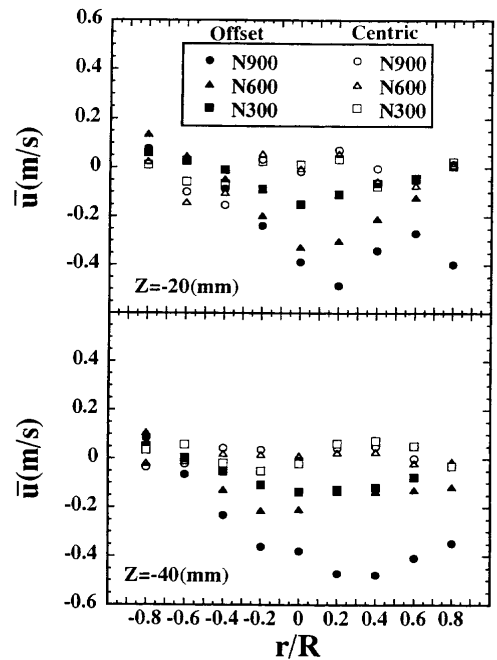


Fig. 12. Comparison of axial mean velocity between centric and offset (50 mm) agitation below impeller.

の高さを基準位置 $z=0$  (mm)としている。中心攪拌の鉛直方向平均速度 $\bar{u}$ は円周方向平均速度に比べ非常に小さいことが確認された。それに対し、偏心攪拌では下向き平均速度 $\bar{u} (<0)$ が大きくなることがわかった。測定位置 $z=-20, -40$  (mm)において、中心攪拌の最大下向き平均速度が0.1 (m/s)に対し、偏心攪拌の値は0.5 (m/s)となり、粒子の降下に必要な下向き平均速度が約5倍に増加した。この平均速度の増加にともない粒子の浴底までの到達が可能になったと推測できる。

### 3.5 均一混合時間への影響

画像計測や流速測定により、中心攪拌や偏心攪拌の局所的な流れが解明された。しかし、それだけでは浴内全体の攪拌効率にはわからない。そこで浴内全体における攪拌効果を把握するために、攪拌効率と深い関係にある均一混合時間を測定することにより、中心攪拌と偏心攪拌との浴全体での攪拌効率を比較した。なお、均一混合時間の評価に関しては、攪拌動力密度を知ることが重要であるが、本実験では測定を行っていない。これについても今後の課題としたい。

Fig.13に回転速度に対する中心攪拌と偏心攪拌の均一混合時間の一例を示す。中心攪拌、偏心攪拌ともに均一混合時間は回転速度の増加につれて短くなった。いずれの回転速度においても偏心攪拌の方が中心攪拌よりも短く、偏心攪拌の効果は回転速度が小さいほど顕著に現れた。 $N=300$  (rpm)においては、均一混合時間が中心攪拌に比べ約1/2まで短くなった。

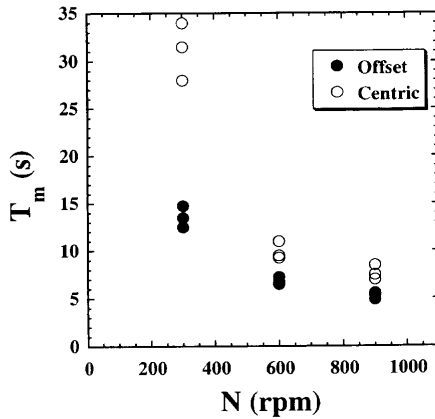


Fig. 13. Comparison of mixing time between centric and offset (50 mm) agitation.

#### 4. 結論

低密度粒子を浴内に均一分散させることを目的として、中心攪拌と偏心攪拌を行い、粒子の降下、流速、均一混合時間の面から比較、検討したところ、次のような相違点を確認された。

##### (1) 渦形状

中心攪拌における渦は攪拌機の回転軸周りに形成されるが、偏心攪拌の場合、回転軸と点对称の液表面から攪拌羽根中心に向かう傾斜渦が形成された。本実験では偏心距離が50 (mm)のとき、傾斜角が最大となった。

##### (2) 粒子の降下

中心攪拌では、羽根下までの降下が限界であるのに対し、偏心攪拌では多くの条件下において浴底まで粒子の降下が確認された。すなわち低密度粒子の浴内分散効率は著しく高くなった。

##### (3) 流動特性

中心攪拌では円周方向速度成分に比べて鉛直方向速度成分は非常に小さい。偏心攪拌では、羽根の下における下向き速度は中心攪拌の下向き速度の最大約5倍に増加した。これは傾斜のある渦の発生に起因し、この下向きの流れにより粒子の降下が効率よく起こると考えられる。

##### (4) 攪拌効率

偏心攪拌の方が中心攪拌よりも均一混合時間が短くなった。この差は低回転速度において顕著に現れ、 $N=300$

(rpm)においては中心攪拌の約1/2となった。

#### 記号

- $d$ : 羽根径 (mm)
- $D$ : 円筒容器径 (mm)
- $H_w$ : 円筒容器内液体高さ (mm)
- $H$ : 攪拌機高さ (mm)
- $H_r$ : 円筒容器高さ (mm)
- $n$ : 回転数 (1/s)
- $N$ : 回転速度 (rpm)
- $L_p$ : 粒子降下距離 (mm)
- $R$ : 円筒容器半径 (mm)
- $r$ : 半径位置 (mm)
- $Re$ : 攪拌レイノルズ数( $=d^2n/\nu$ ) (-)
- $T_m$ : 均一混合時間 (s)
- $u$ : 平均鉛直方向速度 (m/s)
- $z$ : レーザードップラー流速計を用いたときの測定高さ (mm)
- $\nu$ : 水の動粘度 ( $m^2/s$ )

#### 文献

- 1) 第100・101回西山記念技術講座、日本鉄鋼協会編、東京、(1984)。
- 2) 鉄鋼製造における模型理論とスケールアップ、日本鉄鋼協会熱経済技術部会編、日本鉄鋼協会、東京、(1986)。
- 3) K.Nakanishi, N.Bessyo, S.Takada, A.Eshima, M.Kuga, J.Katsuki and M.Kawana: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), 1528
- 4) N.Kurokawa, H.Jouguchi, H.Sugimoto and M.Kataoka: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1149.
- 5) N.Kurokawa, S.Matsuo, H.Jouguchi, K.Yamada and Y.Watanabe: *Sumitomo Met.*, **45** (1993), 52.
- 6) S.Kawaguchi, S.Taniguchi and A.Kikuchi: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 230.
- 7) K.Sakai, H.Yamahaba and M.Furusawa: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 787.
- 8) T.Takaoka, Y.Kikuchi and K.Yamada: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 765.
- 9) T.Wada, S.Taniguchi and A.Kikuchi: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 198.
- 10) T.Takaoka, Y.Kikuchi and K.Yamada: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 141.
- 11) Y.Kawai, T.Takaoka, Y.Kikuchi and K.Yamada: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 132.
- 12) S.Wakamatsu, S.Akai, H.Tanaka, S.Satoshi, A.Watanabe and K.Kawashima: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 735.
- 13) S.Aiba: *Kagakukogaku*, **20** (1956), 615.
- 14) S.Nagata: *Kagakukogaku*, **26** (1962), 939.
- 15) 化学工学便覧、第6版、化学工学会編、東京、(1999), 421.
- 16) R.Mezaki, M.Mochizuki and K.Ogawa: *Engineering Data on Mixing*, Elsevier Science, Amsterdam, (2000).
- 17) 浅井滋生: 第100・101回西山記念技術講座、日本鉄鋼協会編、東京、(1984), 65.
- 18) K.Nakanishi, Y.Kato, T.Nozaiki and T.Emi: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1307.
- 19) J.Miets and F.Oeters: *Can. Metall. Q.*, **28** (1989), 19.
- 20) M.Iguchi, K.Nakamura and R.Tsujino: *Metall. Mater. Trans. B*, **29B** (1998), 569.
- 21) T.Yoshida, Y.Nagase, R.Kakumoto, T.Hasegawa and T.Matoba: *Kagakukogaku*, **37** (1973), 1038.