

浸漬円柱を用いた機械式攪拌における低密度粒子の浴内巻き込み条件

高橋 祐介*・井口 学*

Condition of Low-density Particle Entrainment into a Bath under Mechanical Agitation with an Immersion Cylinder

Yusuke TAKAHASHI and Manabu IGUCHI

Synopsis : Entrainment of small poorly-wetted particles into a bath agitated mechanically with an impeller is investigated based on water model experiments. The particles are found to be effectively entrained and then dispersed into the bath when a circular cylinder is immersed slightly from an offset radial position in the bath. The critical condition under which the particles are completely dispersed into the bath is clarified in this study. An empirical equation is derived for the critical condition as a function of the bath diameter, bath depth, impeller position, cylinder diameter, and so on. The applicable range of the equation is also presented.

Key words : refining; KR method; desulphurization; particle entrainment; agitation.

1. 緒言

現在、鉄鋼精錬を初めとする様々な製造プロセスにおいて攪拌は非常に重要な役割を担っている。攪拌効率の向上によって大きなコスト削減が可能になり、環境問題への配慮も期待できる。現在、鉄鋼精錬プロセスの脱硫工程には大きく2種類の方法が用いられている。ひとつは溶銑内に挿入したインジェクションランスから窒素などの不活性ガスと一緒に脱硫剤を投入するインジェクション法である。もうひとつは溶銑に直接脱硫剤を投入し、溶銑中で攪拌羽根を回転させて機械的に攪拌するKR法である。KR法は機械的な可動部を多く有するためメンテナンスが難しく、このため多く用いられてはいなかった。しかしその攪拌力の強さから再び注目を集めている。当研究室では機械式攪拌法に注目し、水モデル実験で中心攪拌、偏心攪拌など様々な研究を行ってきた¹⁾。

著者らはこれまでに、攪拌羽根を円筒容器の中心軸上に置いて攪拌を行う中心攪拌において、適切な半径位置の浴表面から円柱を浅く浸漬させることが、浴表面に浮遊する低密度粒子の浴内分散に非常に効果的であることを明らかにしている^{2,3)}。粒子の浴内分散に要する時間を過渡時間と定義したが、円柱を浸漬させることによって過渡時間を短縮できることがこれまでの研究でわかった。しかし攪拌羽根の回転数や浴の大きさ、粒子の量によっては、攪拌時に浴表面に浮遊したまま分散されずに残っている粒子の存在が確認されている。効率の良い攪拌を行うためには投入

したすべての低密度粒子が浴内へ巻き込まれ分散している条件が好ましい。今回は浸漬円柱を用いた中心攪拌で、投入したすべての粒子が浴内に巻き込まれて分散する条件を、攪拌羽根の回転数や浴深、容器径、攪拌羽根の形状などを変化させ、調査した。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に今回使用した実験装置の概要を示す。容器には高さ400 mmの透明なアクリル製の円筒容器を用いた。円筒容器の中心軸上に攪拌羽根を設置した。回転数は上部に取り付けられたスピードコントロールモーターで調節できる。円筒容器に所定の高さ H_w まで水を満たし、円柱偏心

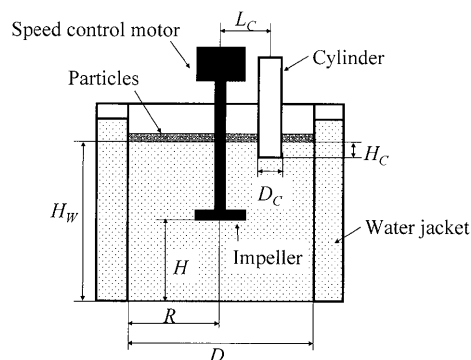


Fig. 1. Experimental apparatus.

平成19年10月26日受付 平成20年3月10日受理 (Received on Oct. 26, 2007; Accepted on Mar. 10, 2008)

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

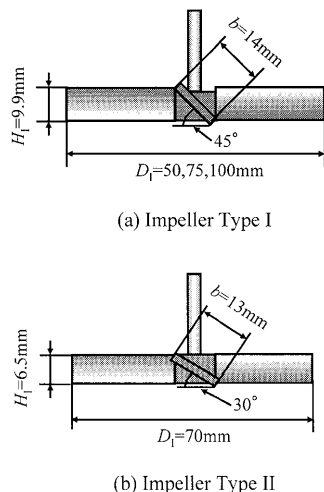


Fig. 2. Details of impeller.

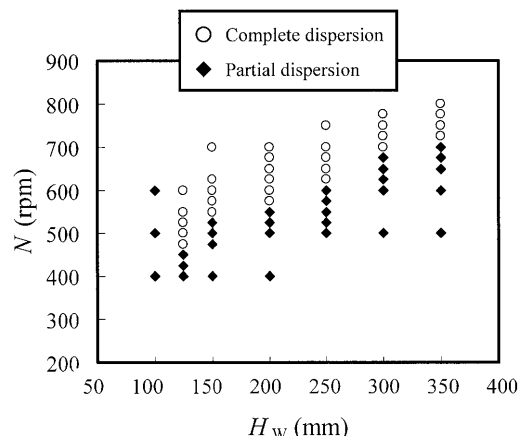
位置 ($L_C=R/2$, R は容器半径)に水面からの深さ $H_C=20$ mmとなるように円柱を浸漬させ固定した。容器径は $D=150, 200, 300$ mmの3種類、攪拌羽根は羽根の傾斜角が異なる2種類 (45, 30度でそれぞれ Type I, Type II とする) を用いた。さらに Type I については3種類の直径 $D_I=50, 75, 100$ mmのものを選んだ。攪拌羽根の形状および寸法を Fig. 2に示す。攪拌羽根の回転数 N は 0~1300 rpm の範囲で変化させることが出来る。また浸漬させた円柱は容器と同じアクリル製で、その外径 D_C は 25, 35, 50, 70 mm の4種類である。

今回攪拌の対象とした粒子は、密度が 20 kg/m^3 の発泡スチロール製低密度粒子で、直径が 2.78 mm の水に濡れにくい粒子である。散布する粒子の量は、粒子の液面上の堆積高さ H_p と容器内径 D の比が一定になるように各容器内径について調整した。例えば、 $D=200$ mmのときの粒子量は $M_p=1.0 \text{ g}$ である。このとき $H_p/D=8.0 \times 10^{-3}$ であり、粒子はほぼ一層となって浴表面を埋めている。

2.2 実験方法

容器径 D 、円柱外径 D_C 、攪拌羽根形状をそれぞれ決定し、各条件に対して浴深 H_W を 100~350 mm の範囲で変化させて実験を行った。浴深 H_W に対して攪拌羽根の設置高さ H は浴深の半分になるようにその都度設置した。各浴深について攪拌羽根の回転数を 25 rpm ずつ変化させて攪拌を行った。

攪拌操作は浴表面に低密度粒子が静止している状態から攪拌羽根の回転を開始し、浴内の流れが定常状態になった際に浴内に入りきらずに浴表面に残留している粒子の有無を目視にて観察した。また、浴表面の様子をデジタルビデオカメラで撮影した。

Fig. 3. Effects of bath depth and impeller rotation number on particle dispersion [$D=200$ mm, $D_C=35$ mm, $D_I=75$ mm, $L_C=50$ mm, Type I].

3. 結果と考察

3.1 低密度粒子の浴内への巻き込み

Fig. 3 に容器内径 $D=200$ mm、円柱外径 $D_C=35$ mm、攪拌羽根直径 $D_I=75$ mm (Type I) の結果を示す。グラフの縦軸は攪拌羽根の回転数 N 、横軸が浴深 H_W である。グラフ中の白丸は全粒子が浴内に巻き込まれて分散したもの、黒四角は浴表面に粒子が残っているものを表している。なお、粒子の巻き込みには場所的な変動はなく、常に攪拌羽根の軸と円柱の間にできる傾斜渦から巻き込まれた。また浴内の流れが定常状態に達したときに浴表面に粒子が残っていないければ「巻き込まれた」と判断しているので、目視によって粒子巻き込みの明確な判定が可能である。浴深 H_W が大きくなるにつれて粒子の巻き込みに必要とされる攪拌羽根の回転数が上昇していくことがわかる。浴表面に浮遊する粒子は攪拌羽根の回転によって形成される渦に沿って降下してきて、回転する羽根に当たって浴全体へと分散する^{4,5)}。本実験では $H=H_W/2$ のため浴深 H_W が大きくなると、水面から攪拌羽根までの距離が長くなるので、大きな渦を形成するためにはそれだけ大きな回転数が必要となることを表している。

$H=H_W/2$ と固定しているために、Fig. 3 の H_W の影響は H の影響も合わせて含まれているように見えるが、著者らの以前の研究によって⁶⁾、粒子巻き込みには攪拌羽根の有効浸漬深さ $H_W-0.8H$ が重要な役割を演じることが分かっているため、本実験では $H=H_W/2$ の場合にのみ着目し、測定値の整理を行った次第である。

なお円柱を置かなかった場合では、攪拌羽根の軸に沿って液面から攪拌羽根に向かう釣鐘状の渦が形成される。散布した粒子は渦の上に停滞しやすくなり、円柱を置いた場合と比べて回転数を約 1.5 倍まで上げないと浴内への導入と分散は見られなかったため、ここでは言及しない。

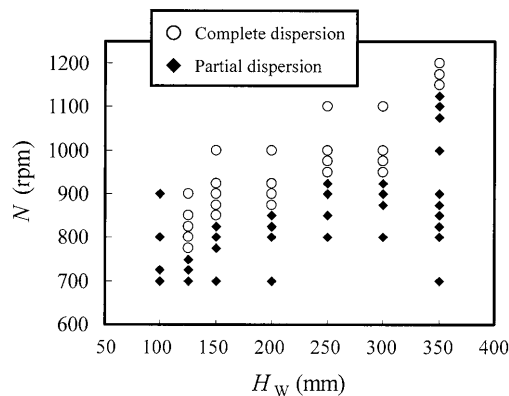


Fig. 4. Effect of impeller diameter on particle dispersion [$D=200$ mm, $D_C=35$ mm, $D_I=50$ mm, Type I].

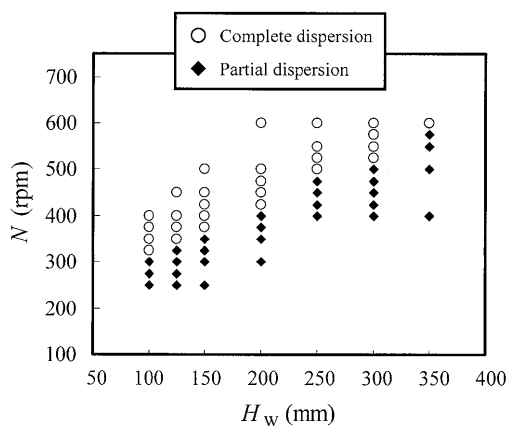


Fig. 5. Effect of impeller diameter on particle dispersion [$D=200$ mm, $D_C=35$ mm, $D_I=100$ mm, Type I].

3・2 各パラメーターの影響

3・2・1 攪拌羽根直径 D_I の影響

$D=200$ mm, $D_C=35$ mm について Type I の攪拌羽根直径を 50 mm, 100 mm と変えて同様の実験を行ったものをそれぞれ Fig. 4, 5 に示す。これらの攪拌羽根に関しても浴深と回転数の影響に関して Fig. 3 と同様の傾向を得ることが出来た。またすべての粒子を浴内に導入できる境界を比較するため、各条件について粒子を導入できる最小の回転数を抜き出しまとめたものが Fig. 6 である。攪拌羽根直径 D_I が大きくなるほど小さな回転数で粒子を浴内に巻き込むことができる。

3・2・2 円柱外径 D_C の影響

浸漬させる円柱の外径 D_C が粒子の巻き込みにどのような影響を与えるか検証した。円柱の半径方向設置位置 L_C は容器半径 R の半分の位置である。以前の研究から円柱の外径が粒子分散の過渡時間に影響を与えることが分かっている⁹⁾。円柱が大きくなるほど浴内に形成されるらせん状の渦が大きくなり、攪拌効果を高めるためであると考えられる。

$D=200$ mm, $D_I=75$ mm の条件で円柱外径 D_C を 25, 35, 50 mm と変化させた場合の結果を Fig. 7 に示す。図中のプ

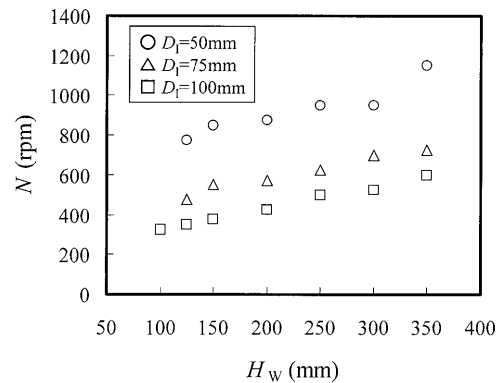


Fig. 6. Effect of impeller diameter on complete particle dispersion [$D=200$ mm, $D_C=35$ mm, Type I].

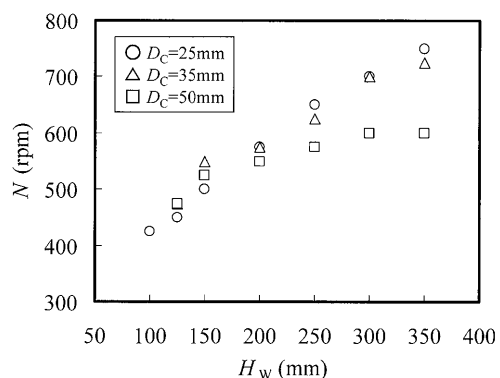


Fig. 7. Effect of immersion cylinder diameter on complete particle dispersion [$D=200$ mm, $D_I=75$ mm, Type I].

ロットは各条件ですべての粒子を巻き込むことが出来た最小の回転数を表している。円柱による巻き込みに大きな差は見られない。しかし $D_C=35, 50$ mm, $H_W=100$ mm のとき、つまり円柱外径が大きく浴深が小さい場合に粒子が巻き込まれない現象が見られた。羽根設置高さ H は $H_W/2$ で固定されているので浴深が小さくなるにつれ羽根から液面への距離は短くなる。よって粒子を巻き込む力はより大きく働くと考えられ、また円柱外径が大きくなるほど攪拌力が大きくなることが考えられるが、粒子の巻き込みは実際にはみられなかった。このとき浴表面に注目すると円柱近傍に多くの粒子が停滞していることが確認できた。円柱外径の小さいものではこのように粒子の停滞が起こることはなかったことから、円柱が大きくなるにつれ、粒子の流れを阻害してしまう影響がはたらくと考えられる。また浴深が小さいと浴内に巻き込まれて分散した粒子が浮力によって上昇してくる距離も短くなる。この二つの要因によってこのような現象が起きたと考えられる。

3・2・3 容器径 D の影響

容器径 $D=150, 300$ mm の容器についてもこれまでと同様の実験を行った。今回は各容器径について投入する粒子の量を変化させた。前述のように $D=200$ mm のとき粒子量 $M_p=1.0$ g とし、このときの粒子の密度、質量、容器径

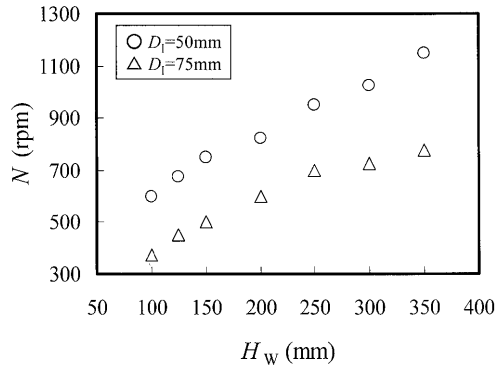


Fig. 8. Effect of vessel diameter on complete particle dispersion [$D=150$ mm, $D_C=25$ mm, $M_p=0.42$ g, Type I].

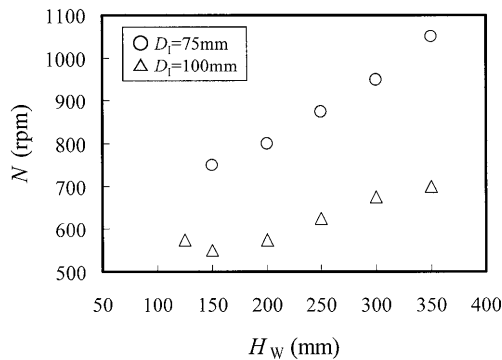


Fig. 9. Effect of vessel diameter on complete particle dispersion [$D=300$ mm, $D_C=50$ mm, $M_p=3.4$ g, Type I].

から粒子の浴表面における堆積高さ H_p を計算によって求めた。この H_p と容器径 D の比が一定 ($H_p/D=8.0 \times 10^{-3}$) になるように粒子量を調整した。 $D=150$ mm では $M_p=0.42$ g, $D=300$ mm では $M_p=3.4$ g である。

$D=150$ mm, $D_C=25$ mm, $D_I=50, 75$ mm の結果を Fig. 8 に, $D=300$ mm, $D_C=50$ mm, $D_I=75, 100$ mm の結果を Fig. 9 に示す。それぞれの容器径についても $D=200$ mm の場合と同様の傾向が得られた。攪拌羽根直径が大きいほど小さな回転数で粒子を巻き込むことが可能である。また $D=150$ mm については容器径と攪拌羽根直径との兼ね合いから $D_I=100$ mm の攪拌羽根は用いなかった。 $D=300$ mm について $D_I=50$ mm の攪拌羽根では容器径に対して羽根が小さすぎたために粒子の巻き込みは見られなかった。

3・3 粒子巻き込みの境界を表す実験式

3・3・1 有効浸漬深さ h_E と修正フルード数 Fr_m

浴表面から攪拌羽根までの距離、すなわち攪拌羽根の浸漬深さは H_W-H であるが、粒子の巻き込みはこの H_W-H ではなく、 $H_W-0.8H$ と修正することによってよりよく説明できることを前に明らかにし、 $H_W-0.8H$ を有効浸漬深さと名付けた。有効浸漬深さ h_E は浴深 H_W と攪拌羽根設置高さ H を用いて以下のように表される⁹⁾。

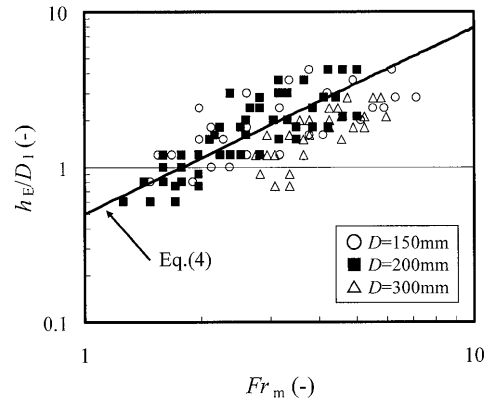


Fig. 10. Relationship between modified Froude number and effective immersion depth [Type I].

$$h_E = H_W - 0.8H \quad (1)$$

有効浸漬深さ h_E は攪拌羽根の回転によって渦が形成されるとき、攪拌羽根から水面までの距離 H_W-H (mm) の間にある流体だけでなく、水面から攪拌羽根下部まで含めた距離 $H_W-0.8H$ (mm) の流体が渦の形成に影響を及ぼしていることを考慮に入れたものである。

修正フルード数 Fr_m は慣性力と重力による力の比を表した無次元式であり、以下の式で表される。なお、もともとのフルード数は式 (2) の右辺を $1/2$ 乗したものである。

$$Fr_m = v_l^2 / (Dg) \quad (2)$$

ここで g は重力加速度である。 v_l は攪拌羽根の周速度を表し、攪拌羽根の回転数 N と攪拌羽根直径 D_I によって以下の式で表される。

$$v_l = 2\pi(N/60)D_I/2 = \pi ND_I/60 \quad (3)$$

3・3・2 修正フルード数と有効浸漬深さの関係

Fig. 10 に実験結果を修正フルード数 Fr_m と有効浸漬深さ h_E を用いてまとめたものを示す。このとき有効浸漬深さ h_E は攪拌羽根直径 D_I で除して無次元化した。修正フルード数 Fr_m は攪拌羽根の回転数 N と容器径 D を含んでいる。Fig. 10 中の3種類のプロットはそれぞれ3種類の容器径で各 D_C, D_I についてすべての粒子が浴内に巻き込まれた最小の回転数 N を表している。 h_E/D_I に対して Fr_m を $5/4$ 乗することで各容器径、各条件での粒子巻き込みに要する最小の回転数を実験式として Fig. 10 中に実線で示すように次式で一応まとめることができた。

$$h_E/D_I = 0.5Fr_m^{5/4} \quad (4)$$

しかしながら、測定値のばらつきは非常に大きく、しかも $D=300$ mm の場合の測定値は式 (4) よりも系統的に下方に位置しているように見える。この点については次項で攪拌羽根の形状も考慮して検討を加え、式 (4) の補正を行う。なお実験式 (4) には円柱外径 D_C の項は含まれていな

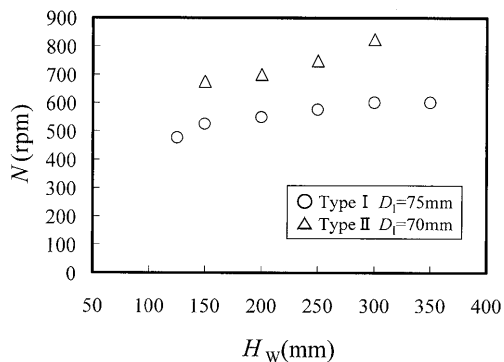


Fig. 11. Effect of shape of impeller on complete particle dispersion [$D=200$ mm, $D_C=50$ mm, $M_p=1.0$ g].

いが, Fig. 7 から見て分かるように D_C は粒子の浴内への完全巻き込みの回転数にはほとんど影響を及ぼさない。ただし, 巻き込みの起こる浴深は D_C に依存する。

3・3・3 攪拌羽根の形状による影響

本実験で用いた攪拌羽根は十字型で4枚の傾斜した羽根を持つ攪拌羽根である。Fig. 2 に攪拌羽根の模式図は示したが, 今回用いた Type I, Type II の二種類の攪拌羽根はそれぞれ羽根の角度, 羽根の長さ, 幅が異なっている。攪拌羽根を用いた攪拌方法では, 羽根の回転によって形成される下向きの流れを持つ渦によって粒子が浴内を降下し, 回転する羽根に衝突して浴全体へと分散する。このとき羽根の大きさや角度によって形成される渦や下向きの流れは変化すると考えられる。そのため羽根の角度や羽根の大きさが異なる Type II の攪拌羽根を用いて同様の実験を行った。Type I, Type II による粒子巻き込みの結果を Fig.11 に示す。Type I の方が, 巻き込みに必要な回転数は小さい。

攪拌羽根の形状を表すパラメーターとして, 羽根の角度 θ , 羽根の幅 b を用いて攪拌羽根の鉛直方向の高さ H_I を表した^{7,8)}。

$$H_I = b \sin \theta \dots \dots \dots (5)$$

攪拌羽根形状の影響を考慮に入れるため攪拌羽根の高さと直径の比 $(b \sin \theta / D_I)^{5/4}$ を式 (4) の右辺に乘じ, まとめたものを Fig.12 に示す。各プロットはそれぞれ形状の異なる攪拌羽根で粒子を巻き込める最小の回転数を表している。Fig.12 中の直線は次式を表している。

$$h_E / D_I = 5.5 \{ Fr_m (b \sin \theta) / D_I \}^{5/4} \dots \dots \dots (6)$$

攪拌羽根の形状を考慮に入れることにより, 粒子巻き込みの境界を式 (6) によって $\pm 50\%$ の偏差で表すことができた。Type I の測定値が式 (6) によって式 (4) よりも精度よく整理できたのは, 式 (6) において D_I の相違が適切に考慮されたためである。

3・3・4 実験式の適用範囲

Fig.13 に縦軸を攪拌羽根の回転数 N , 横軸を有効浸漬深さ h_E としたときの実験結果を示す。実験条件は $D=300$

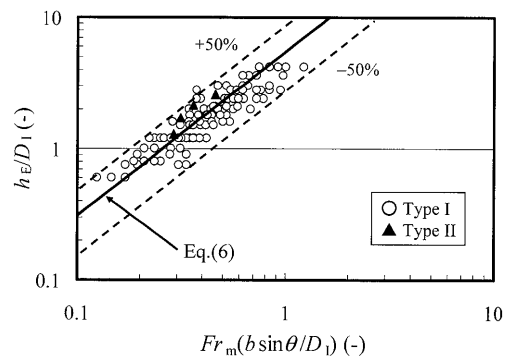


Fig. 12. Effect of shape of impeller on complete particle dispersion.

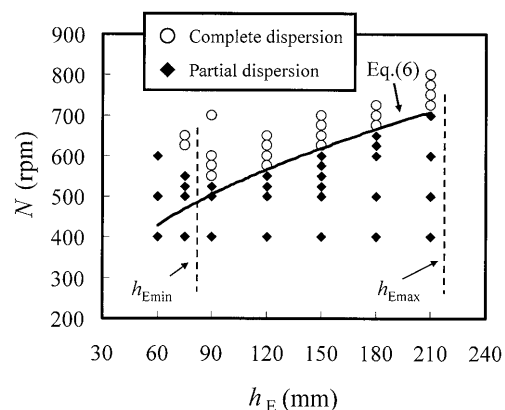


Fig. 13. Maximum and minimum values of h_E between which Eq. (6) is valid [$D=300$ mm, $D_C=35$ mm, $D_I=100$ mm, Type I].

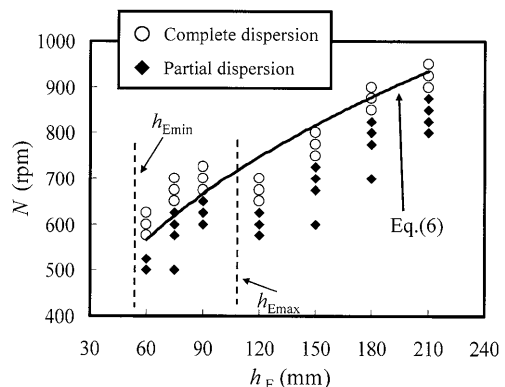


Fig. 14. Maximum and minimum values of h_E between which Eq. (6) is valid [$D=150$ mm, $D_C=35$ mm, $D_I=50$ mm, Type I].

mm, $D_C=35$ mm, $D_I=100$ mm, Type I である。Fig.13 中の実線は式 (6) を表している。このように h_E の小さい部分では粒子の巻き込みが起こらない部分, 実験式 (6) と大きくずれてしまう部分が存在する。同様に Fig.14 は $D=150$ mm, $D_C=35$ mm, $D_I=50$ mm, Type I の条件での結果を示しているが, この場合 h_E が大きくなったときに実験式 (6) とずれてしまう部分が確認できる。また 3・2・2 で述べたように円柱外径によっても粒子の巻き込まれない部分が存在

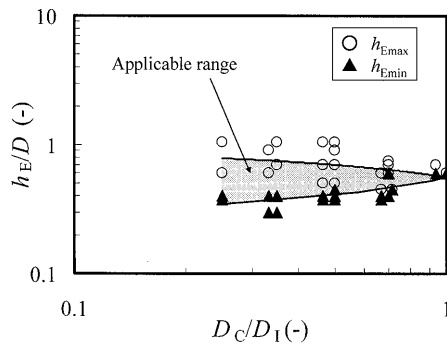


Fig. 15. Applicable range of empirical Eq. (6).

する。これより実験式 (6) が適用できる範囲を知ることが重要である。以上の結果から、この範囲は円柱外径 D_C と有効浸漬深さ h_E によって決まると考えた。

Fig.15 に実験式が適用できる h_E の最大値 $h_{E\max}$ と最小値 $h_{E\min}$ を各条件の実験結果から抽出し、縦軸を有効浸漬深さ h_E と容器径 D の比、横軸には円柱外径 D_C と攪拌羽根直径 D_I の比をとってまとめた。このように h_E , D , D_C , D_I によって実験式 (6) の適用範囲を示すことが出来たが、その範囲は限定されていることがわかった。

3・3・5 式 (6) の実プロセスへの適用性

溶鋼の表面張力は水の 20 倍ほど大きいので、この相違が粒子の巻き込みに影響を及ぼす可能性が考えられる。また粒子と溶鋼との濡れ性も問題になる。したがって、式 (6) がそのまま実プロセスに適用できるかどうか現時点では判断できない。今後ウッドメタルなどの低融点金属を用いてさらなる検討を行い、表面張力や濡れ性などの影響を式 (6) に加味したい。

4. 結言

浴表面から浸漬円柱を設置した機械式中心攪拌法につい

て容器径 D 、円柱外径 D_C 、攪拌羽根形状を変化させ、浴表面に浮遊しているすべての低密度粒子を浴内に巻き込み分散できる条件を調査した。粒子の浴内への巻き込みは有効浸漬深さ h_E と D 、攪拌羽根直径 D_I 、攪拌羽根の回転数 N をパラメーターとして含む実験式 (6) で表すことができた。またこの実験式 (6) の適用範囲は (h_E/D) と (D_C/D_I) によって Fig.14 のように示すことができた。

記 号

- b : 攪拌羽根の幅 (mm)
- D : 容器径 (mm)
- D_C : 円柱外径 (mm)
- D_I : 攪拌羽根直径 (mm)
- Fr_m : 修正フルード数 (-)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- H : 攪拌羽根設置高さ (mm)
- H_C : 円柱浸漬深さ (mm)
- h_E : 有効浸漬深さ (mm)
- H_I : 攪拌羽根高さ (mm)
- H_p : 粒子堆積高さ (mm)
- H_W : 浴深 (mm)
- L_C : 円柱偏心位置 (mm)
- M_p : 粒子量 (g)
- N : 攪拌羽根の回転数 (rpm)
- R : 容器半径 (mm)
- R_C : 円柱設置位置 (mm)
- v_I : 攪拌羽根周速度 (m/s)

文 献

- 1) T.Nomura and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 1.
- 2) T.Sukawa and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), No. 8, 334.
- 3) T.Sukawa and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **45** (2004), No. 8, 1145.
- 4) S.Shimazaki, T.Wada and S.Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), No. 6, 637.
- 5) Y.Takahashi and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **46** (2006), No. 8, 1143.
- 6) T.Ohmi, S.Sato and M.Iguchi: *J. JSEM*, **5** (2005), No. 3, 221.
- 7) N.Kamei, S.Hiraoka, Y.Kato, Y.Tada and K.Yamazaki: *Kagaku-kougaku Ronbunshu*, **30** (2004), No. 1, 105.
- 8) S.Hiraoka, N.Kamei, Y.Kato, Y.Tada, H.Cheon and T.Yamaguchi: *Kagaku-kougaku Ronbunshu*, **23** (1997), No. 6, 969.