機械式中心攪拌での渦深さに関する一考察

佐藤 新吾*・大参 達也*²・井口 学*²

Discussion on the Vortex Depth in Mechanical Centric Agitation

Shingo SATO, Tatsuya OHMI and Manabu IGUCHI

1. 緒言

インペラを用いた機械式攪拌は、化学工業、製薬産業、食品産業や鉄鋼業など様々な分野においてよく用いられている単位操作の一つである^{1,2)}。特に鉄鋼業の分野では脱磷剤や脱硫剤などの低密度粒子を浴内へ分散させる場合に用いられており^{3,4)}、いかに効率よく低密度粒子を浴内へ分散させるかがプロセスの高効率化の面から非常に重要となっている。これまでに筆者らは、低密度粒子を効果的に分散させる方法に関して様々な調査を行ってきた⁵⁻⁷⁾。その結果、低密度粒子を浴内へ分散させるためには、容器中央に形成する渦がインペラまで到達することが必要であることがわかった。低密度粒子はFig. 1に示すように容器中央に生じる渦に沿って降下し、渦がインペラまで到達すると、同時に粒子もインペラに到達・衝突し浴内へ分散する。つまり、低密度粒子を浴全体に効果的に分散させるためには渦深さを正確に把握する必要がある。

これまでに粒子がない場合での容器中央における自由表面からの渦深さに関する実験式が数多く提案されており⁸⁻¹¹⁾、本実験で用いた傾斜パドル型インペラに関しては、亀井らによって実験式(1)が提案されている¹²⁾。

$$\frac{h_{v1}}{D_I} = 5.7 Fr \left\{ \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^{0.9} \left(\frac{n_p b \sin^{1.6} \theta}{D_I} \right) \left(\frac{D_I}{D} \right) \right\}^{0.2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 h_{v1} は渦深さ、 D_I はインペラ直径、 θ はインペラ羽根傾斜角、 n_p はインペラ羽根枚数、 b はインペラ羽根高さ、 D は容器内径を示す。また、 Fr はフルード数であり、以下の式(2)のように示される。

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

ここで、 N は回転数(rpm)、 g は重力加速度である。ただし

この実験式では筆者らの実験結果を近似することはできず、更なる検討が必要とされているのが現状である。本稿では、浴深 H_w に着目し考察を行う。

浴深の影響についてZlokarnikは、浴深が渦深さに影響を及ぼすことを明らかにし、無次元数 $(H_w - H)/D_I$ で考慮している⁸⁾。また筆者らは、渦がインペラに到達する条件を示す渦形成条件に対して浴深が影響を及ぼしていることを明らかにした⁵⁾。しかしながら、亀井らによる実験式(1)には浴深の影響が考慮されていない。本稿では、傾斜パドル型インペラを備えた容器中央に生じる渦深さを様々な浴深について測定し、実験式(1)の修正を試みる。

2. 実験装置と方法

前掲のFig. 1に本実験で用いた実験装置の概要図を示す。実験装置は、水道水を満たした透明アクリル製の二重容器と傾斜パドル型インペラを有する攪拌装置から構成されている。円筒形容器は直方体形状容器で囲まれており、円筒形容器と直方体形状容器との間にも水道水を満たすことにより、浴槽内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。インペラは羽根の傾斜角 θ が 45° ($\pi/4$)、直径 D_I が75 mmの傾斜パドル型4枚羽根のものを使用した。

調査した変数は、容器内径($D=150, 200$ mm)、浴深($H_w=100\sim 300$ mm)、インペラの浴底からの設置高さ($H=50\sim 200$ mm)、インペラ回転数($N=200\sim 700$ rpm)である。浴正面からデジタルカメラで浴内を撮影し、その画像から渦深さの測定を行った。

3. 実験結果と考察

Fig. 2に本実験で得られた渦深さの測定値を亀井らの実験式(1)と比較して示す。縦軸は本実験で得られた渦深さの測定値であり、横軸は亀井らの実験式(1)による計算値である。実験式(1)は渦深さを大きく見積もることが分か

平成20年10月22日受付 平成20年11月25日受理 (Received on Oct. 22, 2008; Accepted on Nov. 25, 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 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

Fig. 1. Schematics of experimental apparatus.

Fig. 2. Comparison of the presently measured vortex depth with Eq. (1).

る。また、同じ横軸の値に対して、渦深さ h_{v1} の本測定値は大きく変化しているが、これは浴深 H_W の変化に対応しており、 h_{v1} は H_W が大きくなるほど小さくなる。

粒子がない場合の渦深さ h_{v1} が浴深に依存することは、以前我々が行った渦形成条件に関する測定結果⁵⁾からも明らかである。Fig. 3に渦形成図の一例を示す。渦形成図とは、容器内径や回転数などを変化させた場合に、渦がインペラまで到達する時の浴深 H_W とインペラ設置高さ H との関係を図示したものである。Fig. 3に示した実験条件の場合、渦がインペラまで定常的に到達する条件は、以下の式(3)で表される⁵⁾。

$$H_W = 0.8H + 172 \text{ (mm)} \cdots \cdots (3)$$

ここで切片の172 mmは容器内径 D やインペラ直径 D_I 、回転数 N などに依存する。式(3)を書き換えると次式

Fig. 3. Vortex shape map ($D=200$ mm, $D_I=50$ mm, $N=900$ rpm). Fig. 4. Effect of bath depth on vortex depth ($D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $N=200$ rpm).

$$h_{v1} = H_W - H = 215 - 0.25H_W \text{ (mm)} \cdots \cdots (4)$$

が得られるが、 h_{v1} は H_W が大きくなるほど小さくなっている。ただし、渦がインペラに到達しないときの渦深さ h_{v1} はこの式(4)では記述できない。

そこで、Fig. 4にインペラ設置高さ H 一定での渦深さ h_{v1} に対する浴深 H_W の影響を示す。インペラ設置高さ一定の条件では、浴深 H_W と容器内径 D との比であるアスペクト比 H_W/D と無次元渦深さ h_{v1}/D_I との間には以下の式(5)の関係が見られる。

$$\frac{h_{v1}}{D_I} \propto \left(\frac{H_W}{D} \right)^{-0.5} \cdots \cdots (5)$$

なお、Fig. 5に浴深 H_W 一定での渦深さ h_{v1} に対するインペラ設置高さ H の影響を示す。浴深 H_W 一定の条件では、インペラ設置高さ H は渦深さ h_{v1} に影響を及ぼさないことがわかる。

式(5)の関係を考慮して、粒子がない場合に対し亀井らの実験式(1)を次のように修正した。

Fig. 5. Effect of impeller height on vortex depth ($D=200$ mm, $D_I=75$ mm, $N=200$ rpm).

Fig. 6. Comparison of the presently measured vortex depth with Eq. (6).

$$\frac{h_{v1}}{D_I} = 4.56 Fr \left\{ \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^{0.9} \left(\frac{n_p b \sin^{1.6} \theta}{D_I} \right) \left(\frac{D_I}{D} \right) \right\}^{0.2} \left(\frac{H_W}{D} \right)^{-0.5} \quad (6)$$

Fig. 6に今回調査したすべての実験条件での渦深さの測定値，ならびに亀井らの実験結果を併せて示す。実験式(6)を用いることにより，測定値を±25%の偏差で予測することが可能となる。なお，亀井らの実験値が h_{v1}/D_I 値の低いところで誤差の上限値(+25%)近傍に集中しているが，参考までにこれらの値を用いず整理を行ってみたものの，

相関係数の大幅な改善が見られなかったことから，本稿では式(6)を用いて渦深さを整理した。

4. 結言

インペラを浴中心に設置した粒子がない場合での中心攪拌において，浴中心に形成する渦深さに関して以下の実験式を提案した。浴深と容器内径との比であるアスペクト比を用いることにより，渦深さを±25%の偏差で予測することが可能である。

$$\frac{h_{v1}}{D_I} = 4.56 Fr \left\{ \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^{0.9} \left(\frac{n_p b \sin^{1.6} \theta}{D_I} \right) \left(\frac{D_I}{D} \right) \right\}^{0.2} \left(\frac{H_W}{D} \right)^{-0.5}$$

記号

- b : インペラ羽根高さ (mm)
- D : 容器内径 (mm)
- D_I : インペラ直径 (mm)
- Fr : フルード数 ($= (N/60)^2 D_I / g$)
- g : 重力加速度 (mm/s^2)
- H : インペラ設置高さ (mm)
- H_W : 浴深 (mm)
- h_{v1} : 渦深さ (mm)
- N : インペラ回転数 (rpm)
- n_p : インペラ羽根枚数 (-)
- θ : インペラ羽根傾斜角 (rad)

文 献

- 1) K.Takahashi and S.Sasaki: *J. Chem. Eng. Japan*, **32** (1999), No. 1, 40.
- 2) T.Nishio, K.Takahashi, J.Shibuya and S.Matoba: *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, **30** (2004), No. 5, 721.
- 3) S.Shimasaki, T.Wada and S.Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), No. 6, 637.
- 4) N.Kikuchi, S.Nabeshima, S.Takeuchi, T.Yamauchi, Y.Kitano and S.Ogura: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), No. 6, 322.
- 5) T.Ohmi, S.Sato and M.Iguchi: *J. JSEM*, **5** (2005), No. 3, 221.
- 6) T.Nomura and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), No. 1, 1.
- 7) T.Sukawa and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), No. 6, 334.
- 8) M.Zlokarnik: *Chem. Ing. Tech.*, **43** (1971), 1028.
- 9) A.Le Lan and H.Angelino: *Chem. Eng. Sci.*, **27** (1972), 1969.
- 10) F.Rieger, P.Ditl and V.Novak: *Chem. Eng. Sci.*, **34** (1979), 397.
- 11) D.J.Brennan: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **54** (1976), 209.
- 12) N.Kamei, S.Hiraoka, Y.Kato, Y.Tada and K.Yamazaki: *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, **30** (2004), No. 1, 105.