

機械式攪拌時の渦の形成時間とインペラへの到達時間

佐藤 新吾*・大参 達也*²・井口 学*²

Initiation Time of Vortex and its Arrival Time to Impeller under Mechanical Agitation

Shingo SATO, Tatsuya OHMI and Manabu IGUCHI

Synopsis : Experimental investigations have been carried out on the initiation time of a vortex and its arrival time to the impeller in a mechanically agitated water bath. The vortex initiation time is defined as the period from the start of impeller rotation to the initiation of a vortex, and the vortex arrival time is defined as the period from the start of impeller rotation to the moment at which the vortex arrives at the impeller. Empirical equations are proposed for the two characteristic times as functions of the rotation frequency of impeller and the geometrical parameters such as the depth of the water bath and the height of the impeller position.

Key words : vortex; mechanical agitation; offset stirring; impeller; water model.

1. 緒言

鉄鋼業では多くの攪拌操作が用いられているが^{1,2)}、脱磷剤や脱硫剤などの低密度粒子の浴内均一分散を達成するには機械式攪拌が適しているようである^{3,4)}。インペラを用いた機械式攪拌では、インペラによって浴鋼に遠心力が働き、浴鋼が側壁のほうへ押しやられ、それと同時に浴中心部では下向きの流れが形成され、浴表面がインペラに向かって降下してくる。浴表面に散布されている微粒子は、浴表面とともに降下してインペラに衝突し、浴内に分散される。このような機械式攪拌に関しては、特に化学工学の分野で多くの研究が行われている^{5,6)}。

従来の機械式攪拌プロセスでは、回転軸を浴中心に設置する中心攪拌が主流であったが、この方法では低密度粒子の浴内への均一分散は困難であり、新たな攪拌方法が求められている。著者らは、回転軸を浴中心からずらした偏心攪拌において形成する傾斜渦が低密度粒子の浴内の均一分散に極めて有効であることを見出した⁷⁾。傾斜渦とは、渦の開口部が攪拌子の中心軸から離れ、渦管が傾斜するような渦を言う。そこでまず傾斜渦が形成する条件や傾斜渦の形状を明らかにしてきた⁸⁾。しかし、渦が形成し始めてから、インペラまで到達する時間についての研究は行われていない。本研究では、処理時間に密接な関係を有する渦の形成時間とインペラへの到達時間を水モデル実験により調査した。なお、鉄や鋼などの溶融金属の流動モデルとして水モデルがしばしば用いられるが、それは、溶融金属の動粘度が水の動粘度に近く、流動現象の解明に有効であるためである。さらに、相似則を用いることにより、異なるス

ケールでの現象の予測も可能になると考えられるが、次の段階としては低融点金属を用いたモデル実験を行い、この点を検討していく必要がある。また、溶銑予備処理に関する機械式攪拌法の論文については鉄と鋼誌の特集号を参照されたい⁹⁾。

2. 実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1に模式的に示した水モデル実験用の装置は、イオン交換水を満たした透明アクリル製の二重容器とトルク計測機能を有する攪拌装置で構成されている。アクリル製容器は、浴槽となる円筒形容器とそれを取り巻く直方体容器から成り、円筒容器と直方体容器との間にもイオン交換水を満たすことにより、浴槽内の観察における光の屈折の影響を少なくした。円筒形容器内の水面と同じ高さにビデオカメラを設置し、インペラが回転を始めてから水面付近に渦が形成し、インペラに到達するまでの様子を撮影した。

対象とした主な変数は、容器の内径 ($D=150, 200, 300$ mm)、浴深 ($H_W=100\sim 350$ mm)、浴底から測ったインペラ設置高さ ($H=50\sim 200$ mm)、インペラの回転数 ($N=300, 600, 900$ rpm)である。また、円筒形容器の軸心とインペラの回転軸との距離 (偏心距離 R_E) としては、 $R_E=0$ (中心攪拌) と $R_E=D/4$ の2種類について調査した。偏心攪拌で $R_E=D/4$ としたのは、このとき低密度粒子が最も効率よく浴内に分散するためである。使用したインペラの直径は70 mmである⁷⁾。水温は $20\pm 3^\circ\text{C}$ とした。

平成17年11月15日受付 平成18年4月21日受理 (Received on Nov. 15, 2005; Accepted on Apr. 21, 2006)

* 北海道大学大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University, 13-8 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)

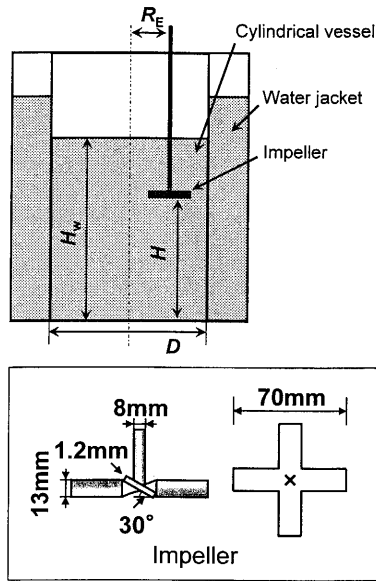


Fig. 1. Experimental apparatus.

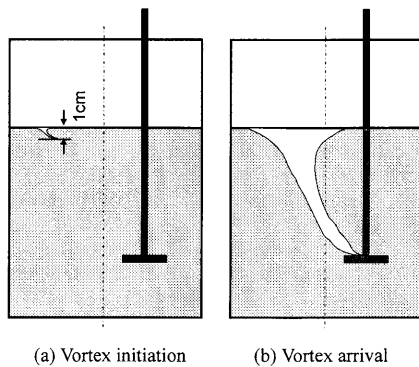


Fig. 2. Situations of vortex initiation and vortex arrival.

2.2 渦形成時間と渦到達時間の定義

Fig. 2に渦の形成とインペラへの到達時の様子を模式的に示す。インペラが回転を始めてから渦が生成し始め、Fig. 2(a)のように水面より1cmの深さに渦が到達するまでの時間を渦形成時間と定義した。また、Fig. 2(b)のように、インペラが回転を始めてからインペラまで渦が到達するまでの時間を渦到達時間と定義した。

2.3 渦の分類

著者らは過去の研究において、インペラの中心攪拌時と偏心攪拌時に観察される渦の形状やその状態について分類した⁸⁾。観察された計10種類の渦の形状とその状態を分類した結果をTable 1に示す。最初の8種類の渦は偏心攪拌時のものであり、残りの2種類が中心攪拌時のものである。

Fig. 3に偏心攪拌時の渦形状の典型例を示す。Fig. 3(a)および(b)はインペラの回転軸に近接するように形成する渦であり、渦管はほぼ鉛直、すなわち初期水面に対してほぼ垂直になっている。Fig. 3(a)は軸心渦といい、インペラの回転軸に沿って形成する。また、Fig. 3(b)は中心渦といい、渦の中心が容器中心軸と一致している場合の渦を表している。一方、Fig. 3(c)および(d)はインペラの回転軸から離れ

Table 1. Classification of vortex types.

Vortex Type	Symbol
Undeveloped vortex	UD
Inclined vortex (straight shape, stable)	ISS
Inclined vortex (straight shape, intermittently developed)	ISI
Inclined vortex (curved shape, stable)	ICS
Inclined vortex (curved shape, intermittently developed)	ICI
Pseudo-vertical vortex (along the stirrer axis, stable)	PSS
Pseudo-vertical vortex (along the stirrer axis, intermittently developed)	PSI
Pseudo-vertical vortex (along the center of the bath, stable)	PBS
Pseudo-vertical vortex (along the center of the bath, intermittently developed)	PBI
Vertical vortex (stable)	VS

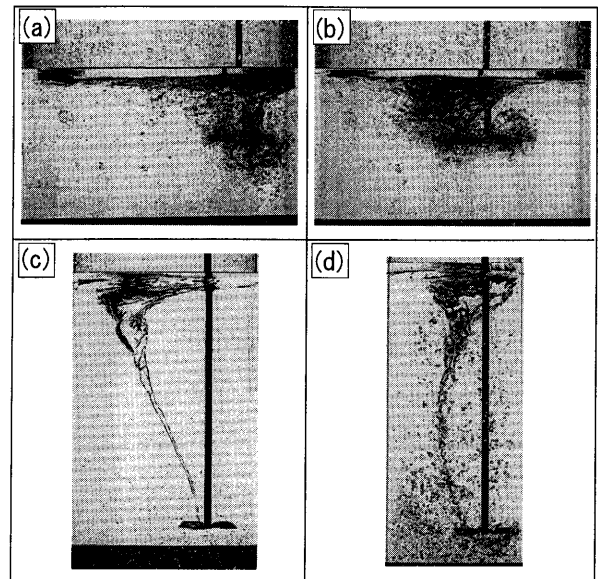


Fig. 3. Photographs of vortex. (a) Pseudo-vertical vortex (along the stirrer axis), (b) pseudo-vertical vortex (along the center of the bath), (c) inclined vortex (straight shape), (d) inclined vortex (curved shape).

て形成する渦である。Fig. 3(c)は直線状傾斜渦といい、容器中心軸に対しインペラの回転軸と渦の開口部が対称の位置に形成する。Fig. 3(d)は湾曲型傾斜渦といい、浴内で渦が大きく湾曲している場合の渦を表している。以上のことから、Fig. 3(a), (b)を擬似垂直型の渦、Fig. 3(c), (d)を傾斜型の渦と呼ぶ。なお、中心攪拌時にはインペラの回転軸、すなわち容器中心軸に沿った垂直渦のみが観察された。

渦の状態としては、①渦管の先端がインペラまで到達した状態で安定的に推移する場合、②渦管がインペラまで到

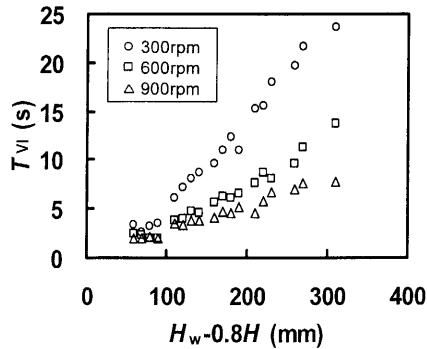


Fig. 4. Vortex initiation time. (Centric agitation, $D=150$ mm)

達する状態と未到達の状態とを周期的に繰り返す場合、③渦管の先端が常にインペラまで到達しない場合、の3種類が観察された。以後、①、②、および③の各ケースをそれぞれ、定常的発達(stable)、断続的発達(intermittently developed)、および未発達(undeveloped)と呼ぶことにする。結局、Fig. 3(a), (b), (c), (d)の渦はTable 1の分類に従えばそれぞれPSS, PBS, ISS, ICSとなる。

渦による低密度粒子の分散挙動を調査した以前の報告⁷⁾によると、密度 0.4 mg/m^3 、平均粒径 6.5 mm の低密度粒子(針入り球状発泡スチロール)を用いた実験では、最初に浴面を覆っていた粒子は、自由表面から直に浴内に巻き込まれることはなく、渦管の表面に沿って降下して、インペラに衝突し、インペラの羽根と羽根の間を通過する時に巻き込まれる。したがって、このような場合、効率よく低密度粒子を分散させるためには、渦管がインペラまで達している必要がある。

3. 実験結果および考察

3.1 渦形成時間

Fig. 4に容器内径 $D=150$ mmでの中心攪拌時における渦形成時間 T_{VI} の測定結果を示す。まず、横軸が「 $H_w - 0.8H$ 」となっていることについて説明する。著者らは前に⁸⁾、容器内径 D 、インペラ設置高さ H 、浴深 H_w などを変化させた場合の渦形成条件を明らかにした。Fig. 5に中心攪拌時、Fig. 6に偏心攪拌時における代表的な渦形成条件の実験結果を示す。Fig. 5は、中心攪拌時に渦が形成する場合としない場合との境界を示す浴深 H_w が $(0.8H+238)$ mmで整理できることを示している。すなわち、渦の状態は浴表面からインペラまでの実際の距離($H_w - H$)ではなく、見かけの($H_w - 0.8H$)で整理できる。つまり、 H は容器底からインペラまでの距離を表しているので、インペラの下 $0.2H$ に相当する液体部分も渦の形成に大きく関与することをこの結果は示している。また、Fig. 6の偏心攪拌時にも同様に($H_w - 0.8H$)で整理できることになる。このような理由によってFig. 5, 6の横軸に($H_w - 0.8H$)を用いた。しかし、こ

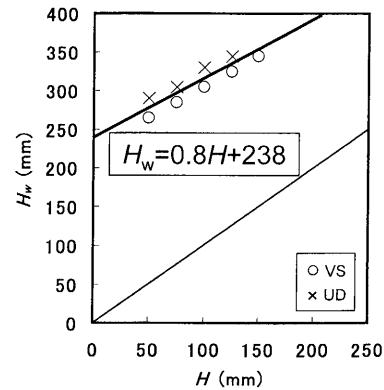


Fig. 5. Vortex shape map. (Centric agitation, $D=150$ mm)

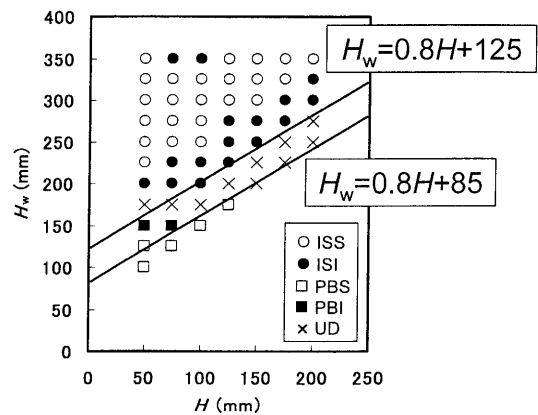


Fig. 6. Vortex shape map. (Offset agitation, $D=200$ mm)

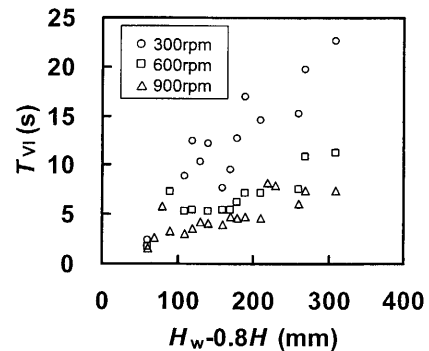


Fig. 7. Vortex initiation time. (Offset agitation, $D=150$ mm)

の0.8という係数が、普遍的なものなのか、インペラの形状・寸法に依存するものなのかについてはよく分かっていない。

Fig. 4に示した容器内径 $D=150$ mmの結果より、インペラ回転数が増加すると渦形成時間は短くなる。また、インペラと浴面とのみかけの距離、すなわち($H_w - 0.8H$)が大きくなるにつれ渦形成時間は長くなることがわかる。本論文では示していないが、容器内径 $200, 300$ mmでも同様の傾向が見られた。

Fig. 7に容器内径 $D=150$ mmでの偏心攪拌時における渦

形成時間 T_{VI} の測定結果を示す。Fig. 4の中心攪拌時と同様に、インペラ回転数が増加すると渦形成時間は短くなる、また、 $(H_w-0.8H)$ の値が大きくなるにつれ渦形成時間 T_{VI} は長くなった。しかし、中心攪拌時の結果に比べ、横軸の $(H_w-0.8H)$ に対する増加率は小さくなっている。容器内径 $D=200$ mm, 300 mmでも容器内径 $D=150$ mmと同様の結果が得られた。

これらの結果を整理するため、次式で定義される循環時間 T_C を導入する。

$$T_C = \frac{V_w}{Q_w} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V_w は容器内の水の体積、 Q_w は単位時間にインペラを通過する水の量を表しており、それぞれ以下のように表される。

$$V_w = \frac{\pi}{4} D^2 H_w \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_w = \frac{\pi}{4} D_i^2 v \dots\dots\dots (3)$$

$$v = 2\pi f_i \frac{D_i}{2} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 D は容器内径、 H_w は水深、 D_i はインペラ直径、 v は流体がインペラを通過するときの代表速度、 $f_i (=N/60)$ はインペラの回転数(Hz)である。この T_C を用いて先ほどの実験結果を整理する。

Fig. 8に容器内径 $D=150$ mmでの中心攪拌時における渦形成時間 T_{VI} を無次元化した結果を示す。測定値はこの方法で比較的よく整理できる。インペラと浴面とのみかけの無次元距離 $(H_w-0.8H)/D$ が小さいとき、渦形成時間にはばらつきが見られるが、この理由として、 $(H_w-0.8H)$ の値が小さいときには渦形成時間は非常に短い値となって渦形成の判断が難しくなることによる誤差が考えられる。ここで (T_{VI}/T_C) と $(H_w-0.8H)/D$ との間には以下の実験式が導かれる。

$$\left(\frac{T_{VI}}{T_C}\right) = 10 \left(\frac{H_w-0.8H}{D}\right)^{9/10} \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 9に容器内径 $D=200$ mm, 300 mmでの結果と合わせて示す。測定値は同じ実験式(5)で近似できた。

Fig.10に容器内径 $D=150$ mmの偏心攪拌時における渦形成時間を無次元化した結果を示す。 (T_{VI}/T_C) と $(H_w-0.8H)/D$ との間には以下の関係がある。

$$\left(\frac{T_{VI}}{T_C}\right) = 13 \left(\frac{H_w-0.8H}{D}\right)^{1/4} \dots\dots\dots (6)$$

Fig.11に示した容器内径 $D=200$ mm, 300 mmの測定結果も式(6)で整理できる。

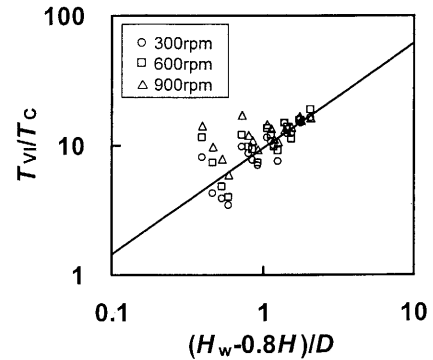


Fig. 8. Dimensionless vortex initiation time. (Centric agitation, $D=150$ mm)

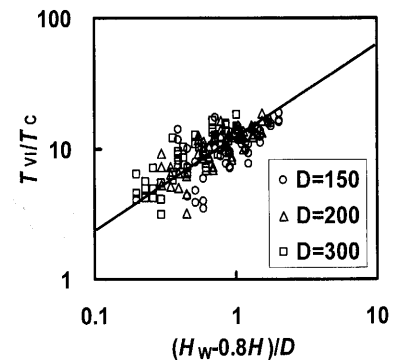


Fig. 9. Dimensionless vortex initiation time. (Centric agitation, $N=300, 600, 900$ rpm)

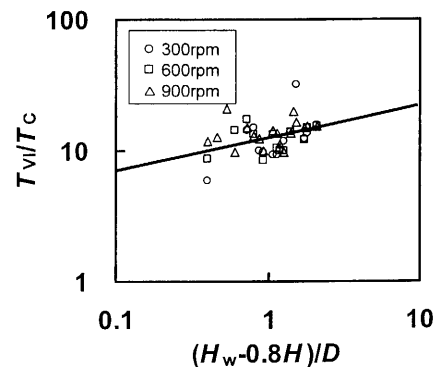


Fig. 10. Dimensionless vortex initiation time. (Offset agitation, $D=150$ mm)

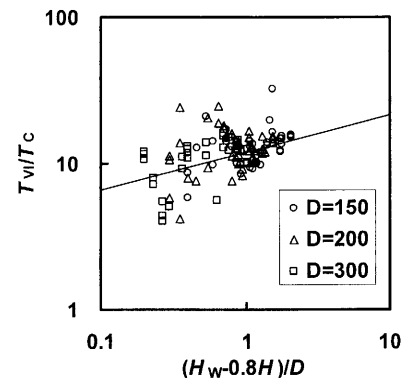


Fig. 11. Dimensionless vortex initiation time. (Offset agitation, $N=300, 600, 900$ rpm)

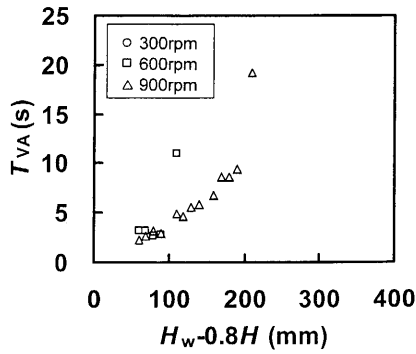


Fig. 12. Vortex arrival time. (Centric agitation, $D=150$ mm)

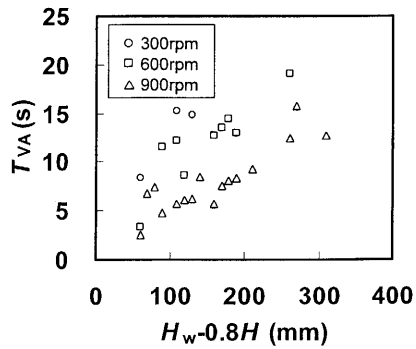


Fig. 13. Vortex arrival time. (Offset agitation, $D=150$ mm)

3.2 渦到達時間

Fig.12に容器内径 $D=150$ mmでの中心攪拌時における渦到達時間 T_{VA} を示す。まず目に付くのは、プロットの数の少なさである。これは、中心攪拌では低回転数、またはインペラと浴面とのみかけの距離が大きくなると渦がインペラまで届かないということに起因している。特に、300rpmでは全く渦がインペラまで届かなかった。すなわち、中心攪拌時に形成する渦をインペラまで到達させるには、高回転数にするか、または浴表面からインペラまでの距離を短くする必要がある。容器内径 $D=200$ mm, 300 mmでも $D=150$ mmと同様の結果が得られた。

Fig.13に容器内径 $D=150$ mmでの偏心攪拌時における渦到達時間を示す。Fig.12の中心攪拌での結果に比べ、プロットの数が多いのがわかる。これは、インペラを偏心させることによりインペラまで渦がより到達しやすくなったことに起因している。したがって、渦をインペラまで到達させるには中心攪拌ではなく偏心攪拌を用いるほうがよい。また、Fig. 4, 7で示した渦形成時間と同様に、右上がりの傾向が見られた。容器内径 $D=200$ mm, 300 mmの結果も $D=150$ mmと同様であった。

渦形成時間 T_{VF} と同様に、循環時間 T_C で渦到達時間 T_{VA} を無次元化し、整理した。Fig.14に容器内径 $D=150$ mmでの中心攪拌時における結果を示す。以下の実験式が導かれた。

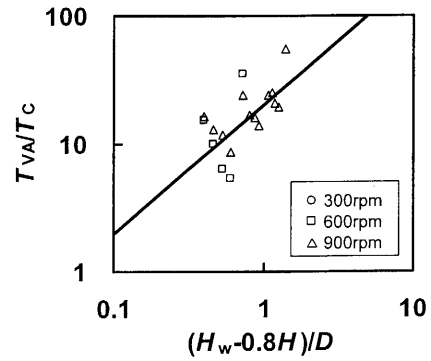


Fig. 14. Dimensionless vortex arrival time. (Centric agitation, $D=150$ mm)

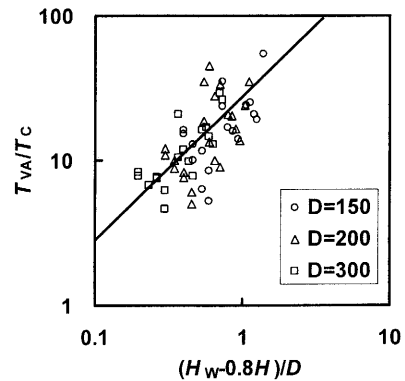


Fig. 15. Dimensionless vortex arrival time. (Centric agitation, $N=300, 600, 900$ rpm)

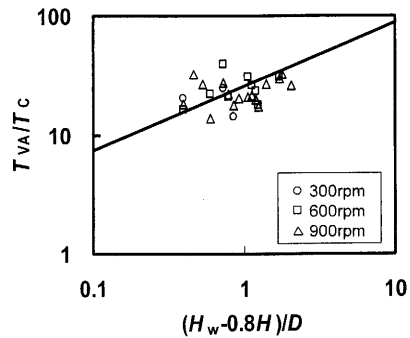


Fig. 16. Dimensionless vortex arrival time. (Offset agitation, $D=150$ mm)

$$\left(\frac{T_{VA}}{T_C}\right) = 25 \left(\frac{H_w - 0.8H}{D}\right) \dots\dots\dots (7)$$

Fig.15に容器内径 $D=200$ mm, 300 mmでの結果を合わせて示す。式(7)の妥当性がわかる。

Fig.16に容器内径 $D=150$ mmでの偏心攪拌時における渦到達時間を無次元化した結果を示すが、測定値は以下の実験式で近似できる。

$$\left(\frac{T_{VA}}{T_C}\right) = 28 \left(\frac{H_w - 0.8H}{D}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

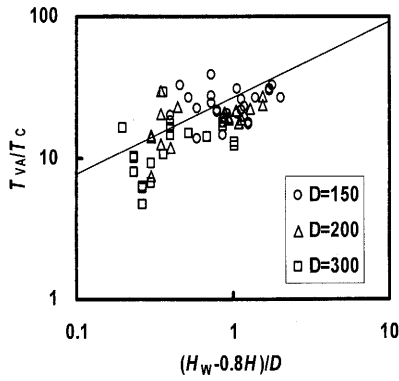


Fig. 17. Dimensionless vortex arrival time. (Offset agitation, $N=300, 600, 900$ rpm)

Fig.17に示した容器内径 $D=200$ mm, 300 mmでの結果も式(8)で整理できる。

4. 結言

浴径 D , 浴深 H_W ならびにインペラと浴面とのみかけの距離 $(H_W - 0.8H)$ が増加するにつれ, またインペラ回転数の減少に従い, 渦形成時間 T_{VI} と渦到達時間 T_{VA} は長くなった。そこで以下の実験式を提案した。

(1) 渦形成時間 T_{VI}

$$\left(\frac{T_{VI}}{T_C}\right) = 10 \left(\frac{H_W - 0.8H}{D}\right)^{9/10} \quad (\text{Centric agitation})$$

$$\left(\frac{T_{VI}}{T_C}\right) = 13 \left(\frac{H_W - 0.8H}{D}\right)^{1/4} \quad (\text{Offset agitation})$$

(2) 渦到達時間 T_{VA}

$$\left(\frac{T_{VA}}{T_C}\right) = 25 \left(\frac{H_W - 0.8H}{D}\right) \quad (\text{Centric agitation})$$

$$\left(\frac{T_{VA}}{T_C}\right) = 28 \left(\frac{H_W - 0.8H}{D}\right)^{1/2} \quad (\text{Offset agitation})$$

記号

- D : 容器内径 (mm)
- D_I : インペラ直径 (mm)
- f_I : インペラ回転数 (Hz)
- H : 浴底から測ったインペラ設置高さ (mm)
- H_W : 浴深 (mm)
- N : インペラ回転数 (rpm)
- Q_W : 単位時間にインペラを通過する水の量 (mm^3/s)
- R_E : 円筒形容器の軸心とインペラの回転軸との距離 (mm)
- T_C : 循環時間 (s)
- T_{VA} : 渦到達時間 (s)
- T_{VI} : 渦形成時間 (s)
- v : 流体がインペラを通過する時の代表速度 (mm/s)
- V_W : 容器内の水の体積 (mm^3)

文 献

- 1) ISIJ: 100th and 101st Nishiyama Memorial Lecture, ISIJ, Tokyo, (1984).
- 2) ISIJ: Modeling Theory and Scaling up, ISIJ, Tokyo, (1986).
- 3) K.Nakanishi, N.Bessho, S.Takada, A.Eshima, M.Kuga, J.Katsuki and M.Kawana: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), 1528.
- 4) N.Kurokawa, S.Matsuo, H.Jouguchi, K.Yamada and Y.Watanabe: *Sumitomo Met.*, **45** (1993), 52.
- 5) S.Aiba: *Kagakukougaku*, **20** (1956), 615.
- 6) R.Mezaki, M.Mochizuki and K.Ogawa: *Engineering Data on Mixing*, Elsevier, Amsterdam, (2000).
- 7) T.Nomura and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), No. 1, 1.
- 8) T.Ohmi, S.Sato and M.Iguchi: *J.JSEM*, **5** (2005), No. 3, 221.
- 9) ISIJ: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), No. 6.