HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 機械式偏心攪拌による傾斜渦の形成条件 |
| Author(s) | 大参, 達也; 佐藤, 新吾; 井口, 学 |
| Citation | 実験力学, 5(3), 221-226<br>https://doi.org/10.11395/jjsem.5.221 |
| Issue Date | 2005 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/74656 |
| Rights | 著作権は日本実験力学会にある。利用は著作権の範囲内に限られる。 |
| Type | journal article |
| File Information | J.JSEM 5. 221.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

論文

# 機械式偏心攪拌による傾斜渦の形成条件

大参 達也*, 佐藤 新吾**, 井口 学***

# Process Parameters for Inclined-Vortex Formation by Mechanical Offset Agitation

Tatsuya OHMI, Shingo SATOH and Manabu IGUCHI

We investigated the shapes and dynamic behaviors of vortexes in a mechanically agitated water bath, focusing attention mainly on inclined-vortex formation by offset agitation that is effective for the mixing of a liquid and low density particles. The shapes of observed vortexes were classified into two groups, i.e., inclined vortexes and pseudo-vertical vortexes. The dynamic behaviors of the vortexes were classified into the following types: (1) stable, (2) intermittently developed, and (3) undeveloped vortexes. The relationship between the vortex type and geometrical conditions (i.e., the depth of the water, $H_W$, and the height of the impeller, $H$) was summarized as the vortex formation map ($H$-$H_W$ diagram) for given bath diameter, rotation speed of the stirrer and offset distance, $R_E$. The condition for the formation of each vortex-shape group was expressed by the corresponding equation containing geometrical parameters such as $H$, $H_W$, and $R_E$.

**Keywords**: vortex, mechanical agitation, offset stirring, impeller, water model

## 1. 緒言

攪拌操作は，精錬プロセスにおける反応の促進，温度や成分の均一化などの手段として重要であり，溶銑予備処理，真空脱ガス，取鍋精錬や連続鋳造に至るまで製鋼のあらゆる分野で用いられている[1,2]．一般に，浴槽内の攪拌は，ガス吹き込み攪拌と攪拌翼による機械式攪拌に大別される．現行の精錬プロセスではガス吹き込み攪拌が主流となっているが，ガス吹込み攪拌の場合，キャリアガスを用いて脱燐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，攪拌翼の溶損というデメリットはあるものの，機械式攪拌が見直されてきている[3,4]．

攪拌翼を用いた機械式攪拌に関しては，これまで多くの研究が行われ，攪拌効率と攪拌所要動力との関係，浴槽内のフローパターン，攪拌翼周辺から吐出す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[5]．

しかし，回転軸を浴中心に設置する中心攪拌を主体とする既存の機械式攪拌法による精錬プロセスでは，浴全体への低密度粒子の均一分散は困難であり，有効な均一分散法の開発が望まれている．これに対し，著者の一人は，回転軸を浴中心からずらして浴内の流動を非対称にした偏心攪拌の適用を検討し，ある条件下で傾斜渦が形成することによって攪拌効率が顕著に向上し，均一分散が可能になることを確認した[6]．ここで傾斜渦とは，渦の開口部が攪拌翼の中心軸から離れ，渦管が傾斜するような渦形状を言うが，その形成条件に関しては不明な点が多い．そこで本研究では，水モデル実験により，機械式偏心攪拌における傾斜渦の形成条件を明らかにする研究の一環として，渦の形成に及ぼす攪拌槽のサイズや攪拌翼の設置位置などプロセス変数の影響の調査を行った．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．

## 2. 実験方法

Fig.1 に水モデル実験装置の模式図を示す．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とから構成される．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．

本研究で検討したプロセス変数は，浴槽の内径($D$=150, 200, 300mm)，浴深($H_W$=100～350mm)，攪拌翼の浴底からの設置高さ($H$=50～200mm)である．また，円筒形浴槽の軸心と攪拌翼の回転軸との距離(偏心距離 $R_E$)としては，主として $R_E$=0(中心攪拌)と $R_E$=$D$/4 の 2 種類を調査した．なお，$D$=300mm の浴槽に関しては，偏心距離を，0, $D$/8, $D$/4, 3$D$/8 の 4 種類に変化させ，その影響を詳細に調べた．

原稿受付 2005 年 3 月 28 日

*会員 北海道大学大学院工学研究科
(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
**非会員 北海道大学大学院工学研究科 大学院生
(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
***会員 北海道大学大学院工学研究科
(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

また，使用した攪拌翼は直径 70mm のプロペラ形状であり，攪拌翼の回転角速度($N$)はスピードコントロールモータを介して 900rpm に設定した．また，水温は 20±3℃とした．

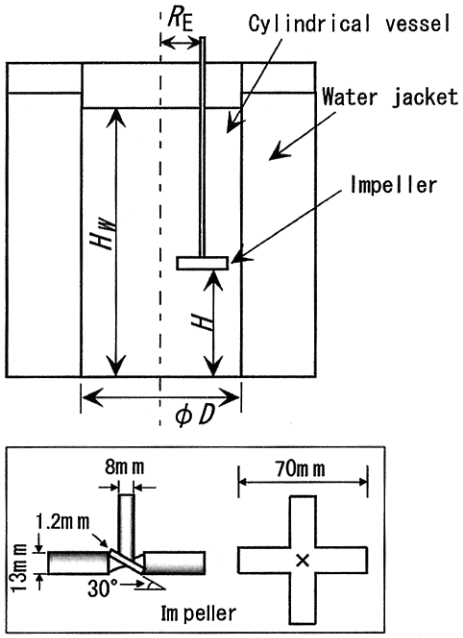



Fig.1 Experimental apparatus.

## 3. 結果および考察

### 3.1 渦の形状と動的挙動

Table 1 に偏心攪拌実験で観察された総計 10 種類の渦の形状と動的挙動を整理した結果を示す．また，Fig.2 に本実験で観察された渦形状の典型例を示す．Fig.2(a)および(b)は攪拌翼の軸に近接するように形成する渦である．Fig.2(a)は渦の開口部の直径が浴槽の直径に対して小さい場合であり，渦管は攪拌翼の軸に沿うように生じる．また，Fig.2(b)は浴面全域が渦の開口部となり，その結果として渦管が浴槽の中心軸に近接して形成する場合である．いずれの場合も，渦管と攪拌翼軸心との角度は小さい．以後，このような渦を擬垂直渦(pseudo-vertical vortex)と呼ぶことにする．一方，Fig.2(c)および(d)は，渦管が攪拌翼の軸から離れるように形成する渦であり，(c)は直線状の傾斜渦(inclined vortex with straight shape)，(d)は大きく湾曲した傾斜渦(inclined vortex with curved shape)である．なお，浴槽の軸心と攪拌翼の軸心が一致する中心攪拌においては，これらの軸心に対してほぼ回転対称形の渦管が形成する垂直渦(vertical vortex)のみが観察された．

また，渦の動的な挙動としては，①渦管の先端が攪拌翼まで到達した状態で安定的に推移する場合，②渦管が攪拌翼まで到達する状態と未到達の状態とのサイクルを繰り返す場合，③渦管の先端が常に攪拌翼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)と称することにする．なお，定常的発達と断続的発達とを特に区別しない場合は単に発達渦または傾斜渦，擬垂直渦等の名称で呼ぶことにする．

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 |
| Vertical vortex (intermittently developed) | VI |

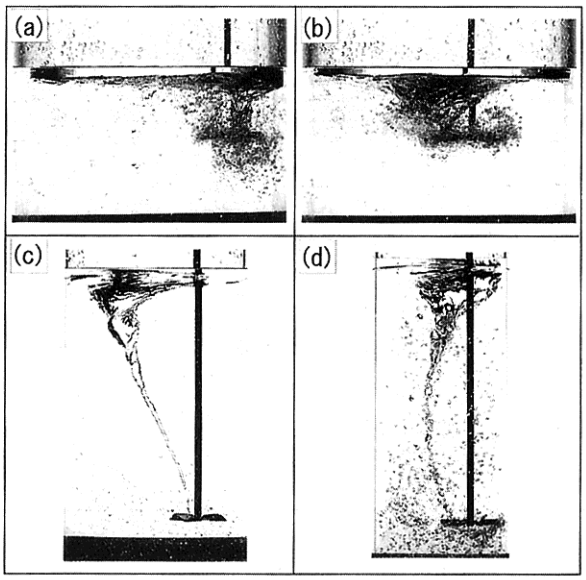



Fig.2 Photographs of vortex shapes.

渦による低密度粒子の分散挙動を調査した野村・井口の報告[6]によると，密度 0.4(Mg/m$^3$)，平均粒径 6.5mm の低密度粒子(針金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，渦表面に沿って降下して，攪拌翼に衝突し，攪拌翼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，渦管が攪拌翼まで達していることが望ましい．

次に，上記①から③の例について，攪拌中のトルクの経時変化を比較した結果をFig.3に示す．この結果によると，定常的発達渦が形成する場合より断続的発達渦の場合の方がトルクの変動幅が大きいことがわかる．また，渦の動的挙動とトルクの変動との関係を調査した結果，トルク変動の周期は，渦の発達と減衰のサイクル，あるいは，渦の開口部の位置の周期的移動に関係していた．プロセスの安定操業の観点からは，攪拌トルクが大きく変動するのは好ましくないため，低密度粒子の均一分散には，安定した定常的発達渦が形成する条件が最も適していると考えられる．

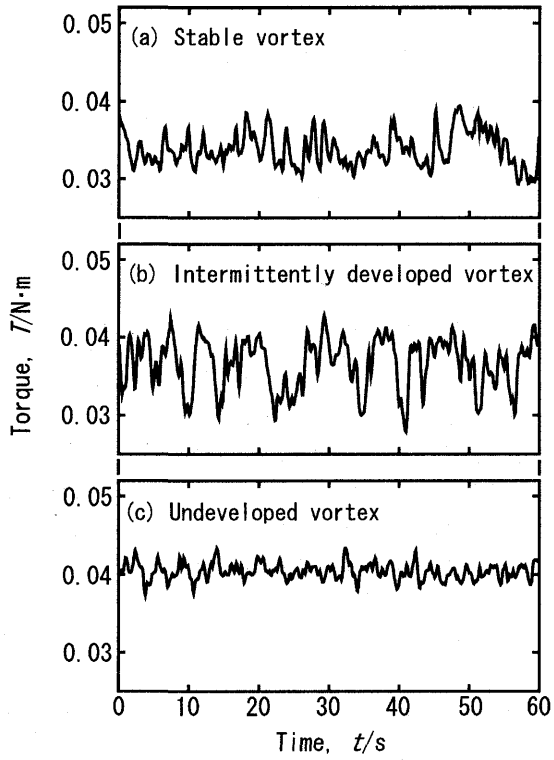



Fig.3 Time-torque curves.

### 3.2 渦の形成条件

まず，参照実験として行った中心攪拌実験の結果を示す．Fig.4～Fig.7は，中心攪拌下における渦の形成状況を浴深($H_W$)と攪拌翼の高さ($H$)によって整理した結果である．図中において，$H_W=H$ で示される直線は攪拌翼が浴面に接する状態に対応している．

Fig.4は $D=300$ mm の浴槽の結果であり，定常的発達渦領域と未発達領域との境界は，概略，式(1)の直線により表すことができる．

$$H_w = 0.8H + 220 \qquad (1)$$

すなわち，定常的発達渦領域は，式(1)の直線と直線 $H_W=H$ とに挟まれた領域である．なお，定常的発達渦領域と未発達領域との境界近傍をより詳細に調査したところ，Fig.5に示すように，両領域の間のごく狭い範囲内に断続的発達渦が形成する条件が存在することが確認された．

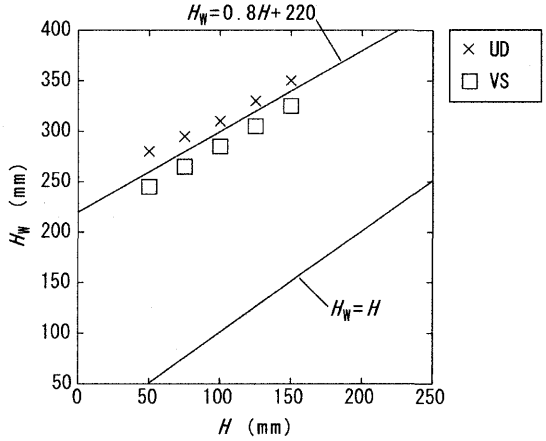



Fig.4 Vortex shapes map.
($D$=300mm, centric agitation)

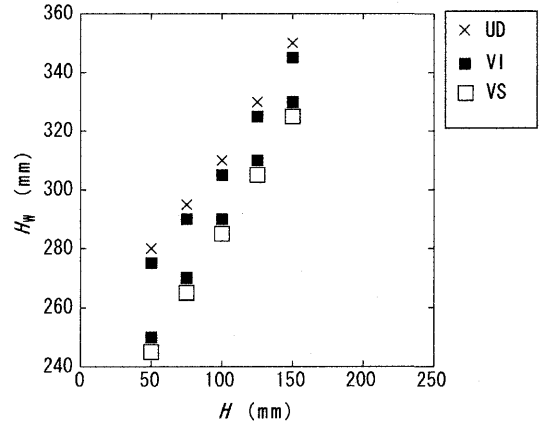



Fig.5 Detailed vortex shape map.
($D$=300mm, centric agitation)

Fig.6 および Fig.7 は，それぞれ $D=200$ mm および $D=150$ mm の場合の結果を示している．いずれの場合も，Fig.4 の場合と同様の結果が得られた．定常的発達渦領域と未発達領域との境界は，$D=200$ mm の場合は式(2)，$D=150$ mm の場合は式(3)で表すことができる．

$$H_w = 0.8H + 223 \qquad (2)$$

$$H_w = 0.8H + 238 \qquad (3)$$

式(1)～(3)を比較すると，直線の切片のみが異なり，浴の直径が小さいほど発達渦領域が拡がる傾向がみられる．すなわち，直径の小さい浴ほど渦が発達しやすい．しかしながら，式(1)と式(3)のように浴直径が 2 倍異なる場合を比較しても，切片の差はたかだか 18mm に過ぎないことは注目に値する．

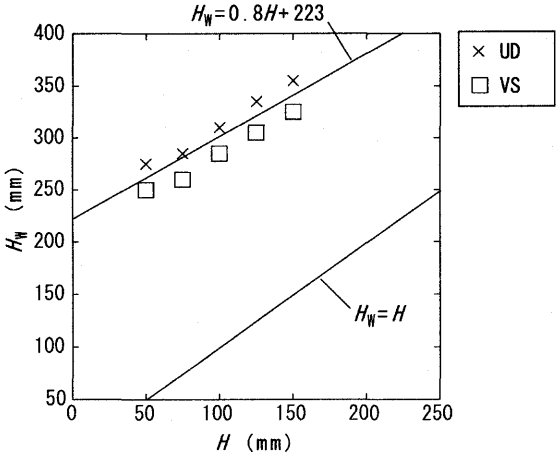



Fig.6 Vortex shape map.

($D$=200mm, centric agitation)

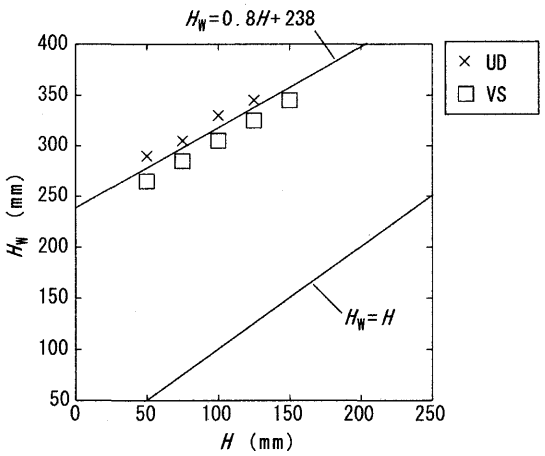



Fig.7 Vortex shape map.

($D$=150mm, centric agitation)

つづいて，式(1)～(3)の直線の傾き 0.8 について考察する．ここで，仮想的に攪拌動力が攪拌翼より上部の浴の流動と渦形成にのみ使われる場合を考えると，発達渦領域と未発達領域の境界は，攪拌翼浸漬深さ($H_W$ -$H$)が一定の条件，すなわち傾き 1 の直線になるはずである．しかし，Fig.4～Fig.7 の結果では，$H$ が大きくなるにしたがって発達渦領域と未発達領域との境界の攪拌翼浸漬深さが小さくなっている．このことは，攪拌動力の一部が攪拌翼より下部の液体流動により消費されていることを反映していると考えられる．しかし，式(1)～(3)の各直線の傾きが一定となる要因についての定量的検討は今後の課題である．

次に，偏心距離を $D$/4 とした場合の偏心攪拌実験の結果を Fig.8～Fig.10 に示す．Fig.8 は $D$＝300 mm の浴槽の結果である．この結果を中心攪拌実験の結果(Fig.4)と比較すると，渦の形成条件が著しく異なっている．Fig.8 においては，以下に示す式(4)と式(5)の境界線に挟まれた領域に未発達領域(×)が存在する．また，式(4)の直線より $H_W$ が小さい領域では断続的な攪拌翼軸心型の擬垂直渦(◆)が形成し，式(5)より $H_W$ が大きい領域では定常的または断続的に発達した傾斜渦(○，●)が形成する．

$$H_w = 0.8H + 85 \quad (4)$$

$$H_w = 0.8H + 200 \quad (5)$$

すなわち，容器中心に攪拌翼がある場合には，攪拌翼の浸漬深さの増加に伴って，安定かつ発達した渦から未発達状態に変化する比較的単調な挙動を示すのに対し，攪拌翼の回転軸を偏心させた Fig.8 の場合には，攪拌翼の深さの増加に伴い，擬垂直渦からいったん未発達状態を経て傾斜渦に変化することがわかる．

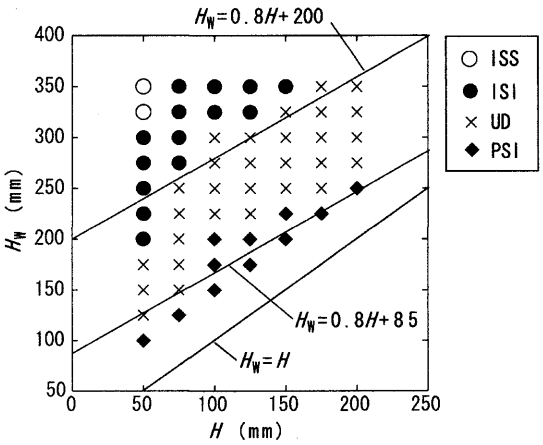



Fig.8 Vortex shape map.

($D$=300mm, offset agitation: $R_E$=D/4)

Fig.9 および Fig.10 は，それぞれ $D$＝200 mm および $D$＝150 mm の結果である．Fig.8～Fig.10 の各結果を比較すると，浴直径 $D$ の影響は中心攪拌実験の場合と比較して著しく大きい．すなわち，Fig.9 の場合($D$＝200 mm)では，未発達領域は上記の式(4)と以下に示す式(6)の境界線に挟まれた領域に存在するが，その領域は Fig.8 の場合に較べて狭くなっている．

$$H_w = 0.8H + 125 \quad (6)$$

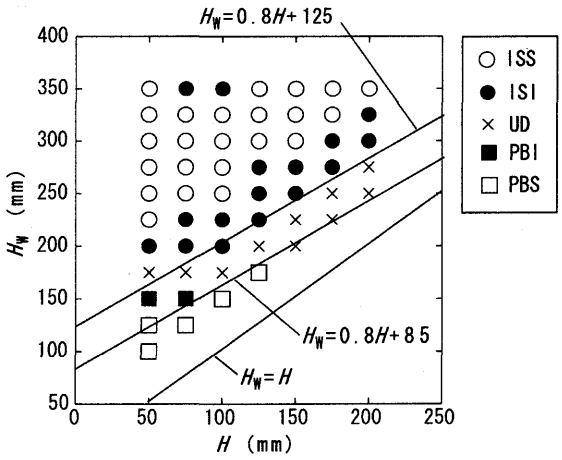



Fig.9 Vortex shape map.

($D$=200mm, offset agitation: $R_E$=$D$/4)

さらに，Fig.10 の場合($D$=150 mm)では，未発達領域(×)は擬垂直渦領域(□)と傾斜渦領域(○，●)との間には存在しない．また，本条件では，撹拌翼の浸漬深さの増加に伴って，擬垂直渦(□)から直線形傾斜渦(○，●)へと変化し，さらに浸漬深さが増大すると，湾曲形傾斜渦(▲)が出現する．そして，直線形傾斜渦領域と湾曲形傾斜渦領域との境界に未発達領域が現れるようになる．

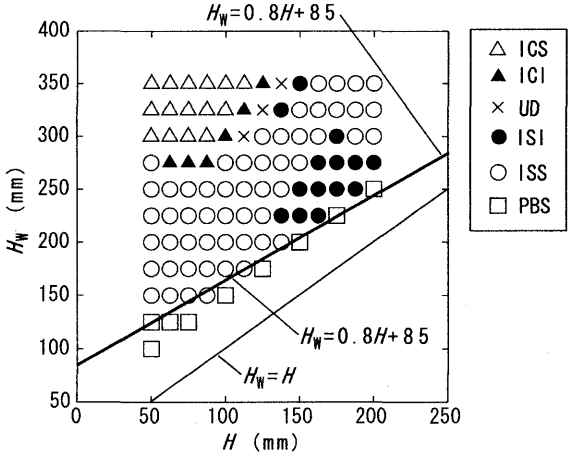



Fig.10 Vortex shape map.

($D$=150mm, offset agitation: $R_E$=$D$/4)

さらに，$D$=300 mm とし，偏心距離の影響を調査した結果を示す．Fig.11 および Fig.12 はそれぞれ偏心距離 $D$/8 および 3$D$/8 の場合の結果である．Fig.11，Fig.8，および Fig.12 の比較から，擬垂直渦領域(◆)と未発達領域(×)との境界は変わらないが，偏心距離が大きくなるにつれて，傾斜渦領域(●)と未発達領域(×)との境界の $H_W$ が大きくなる傾向が見られる．

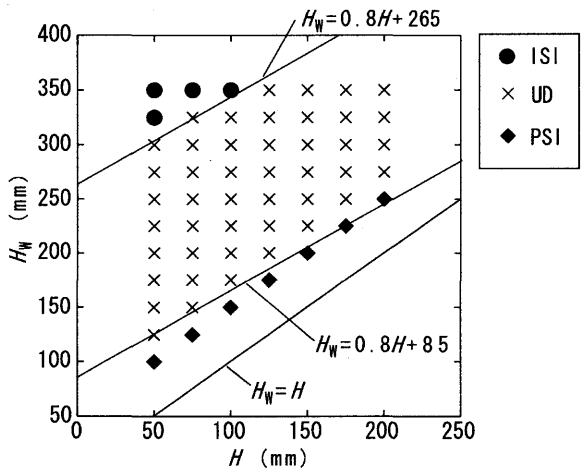



Fig.11 Vortex shape map.

($D$=300mm, offset agitation: $R_E$=3$D$/8)

以上のように，偏心撹拌における渦の形成挙動は中心撹拌の場合と比較して極めて複雑であり，浴の深さや直径，撹拌翼の偏心距離や浸漬深さなどの幾何学的関係によって，種々の渦形状や動的挙動が出現する．現時点では，これらの結果を定量的に説明することは困難だが，ここでは，より一般的な実験式により表すことを試みる．

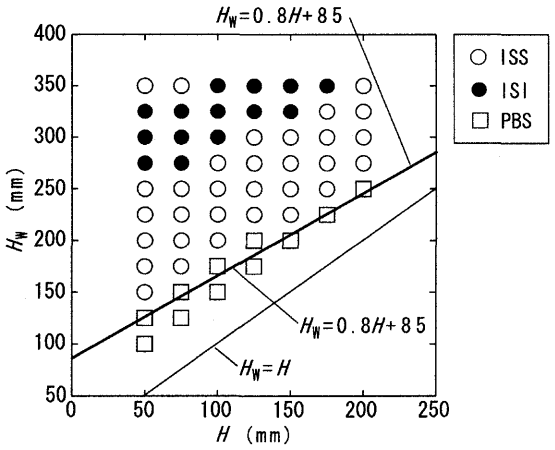



Fig.12 Vortex shape map.

($D$=300mm, offset agitation: $R_E$=$D$/8)

野村・井口[6]は，典型的な傾斜渦が，浴の中心軸に対して撹拌翼の回転軸とほぼ点対称の浴表面から，撹拌翼の中心に向かって形成することを報告している．Fig.2(c)の渦形状はこの報告とよく一致している．ここで，Fig.2(c)の様な典型的な傾斜渦が撹拌翼の軸心に対してなす角度を $\theta_0$ とおくと，以下の式(7)の関係から，式(8)が得られる．

$$\tan\theta_0 = 2R_E/(H_w - H) \quad (7)$$

$$H_w = H + 2R_E/\tan\theta_0 \quad (8)$$

ここで式(8)を参考にして，次式を満たすような修正角度 $\theta$ を考える．

$$H_w = 0.8H + 2R_E/\tan\theta \quad (9)$$

Fig.13 は，式(9)で表される浴および撹拌翼との間の幾何学的関係を模式化した図である．図中の灰色の部分は傾斜渦の渦管を模式的に表している．Table 2 は，式(9)を用いて定常的または断続的に発達した傾斜渦の現れる $\theta$ の範囲を整理した結果である．この結果によると，$D$ または $R_E$ の異なるいずれの条件においても，ほぼ $\theta \leqq 40°$ の時に傾斜渦が現れることになる．また，Fig.10 において直線的な傾斜渦から湾曲した傾斜渦に遷移する境界の条件を同様にして求めたところ，$\theta$=20°となった．

Table 2 Geometrical condition for inclined-vortex formation.

| $D$ (mm) | $R_E$ | $H_W$ (mm) | $\theta$ |
|---|---|---|---|
| 300 | $D$/4 | ≧0.8$H$+200 | ≦37° |
| 200 | $D$/4 | ≧0.8$H$+125 | ≦39° |
| 150 | $D$/4 | ≧0.8$H$+85 | ≦41° |
| 300 | $D$/8 | ≧0.8$H$+85 | ≦41° |
| 300 | 3$D$/8 | ≧0.8$H$+265 | ≦40° |

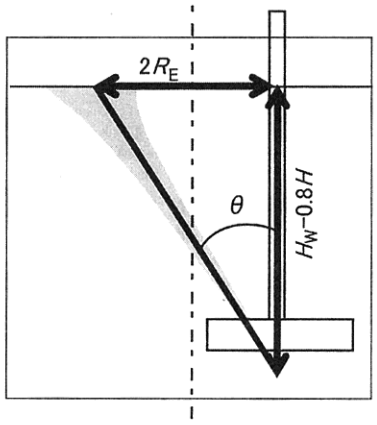



Fig.13 Geometry of inclined-vortex.

擬垂直渦が形成する条件はFig.8～Fig.12の結果から，式(4)により統一的に表すことができる．この要因に関する検討は今後の課題としたい．

## 4. 結言

(1) 機械式偏心攪拌下で形成する渦の形状は，①傾斜渦(直線形，湾曲形)と②擬垂直渦とに大別される．

(2) 渦の動的挙動は，①渦が持続的に攪拌翼に到達する場合(定常的発達)，②周期的に渦の発達と減衰が交替する場合(断続的発達)，③渦が攪拌翼まで到達しない場合(未発達)に分類される．

(3) 定常的または断続的に発達する擬垂直渦の形成条件は次式で，

$$H_w \leqq 0.8H + 85$$

一方，傾斜渦の場合は

$$H_w \geqq 0.8H + 2R_E/\tan\theta\ ,\ (\theta = 40^\circ)$$

で与えられる．

## 参考文献

(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. Besso, S. Takada, A. Eshima, M. Kuga, J. Katsuki and M. Kawana: Testu-to-Hagane, 64(1978), 1528-1537

(4) N. Kurokawa, S. Matsuo, H. Jouguchi, K. Yamada and Y. Watanabe: Sumitomo Met., 45, 3(1993), 52-58.

(5) S. Aiba: Kagakukougaku, 20(1956), 615-622.

(6) T. Nomura and M. Iguchi: Testu-to-Hagane, 88(2002), 1-7.