

流脈観察に基づく大型翼の混合機構

加藤禎人^{1*}・井上義朗²・平松将¹・大谷祥太¹

¹名古屋工業大学 工学部 生命・物質工学科, 466-8555 名古屋市昭和区御器所町

²元 大阪大学, 565-0871 吹田市山田丘1-1

キーワード: 混合, 攪拌, 流脈, 大型翼, 層流

日本で開発された広い粘度範囲で使用可能な各種の大型翼の混合機構を流脈観察に基づいて調査した。これらの大型翼の攪拌所要動力は同一の相関式で推算が可能であったが、層流域における混合機構は翼の種類によって大きく異なることが明らかになった。また、一般に用いられるパドル翼との混合機構との比較により、それらの大型翼は操作条件の違いにより独特の流脈を持つことがわかった。特に液深が流脈パターンに与える影響が大きかった。さらに攪拌レイノルズ数は流脈パターンを制御するパラメータであることが明らかになった。

緒 言

井上らは非線形動力学に基づく混合機構の研究から、層流の定常流れ場に対して時間的に周期変化する摂動が加えられたときの混合場において、流脈が不安定多様体に酷似していることを理論的および実験的に見だし、それが混合の鋳型となっていることを突き止めた(Inoue *et al.* 1999, 2009a)。また、2枚羽根パドル翼を備えた攪拌槽の流脈を観察するためには、攪拌翼先端から着色液を染み出させる方法が最も効率的に流脈を可視化できることも明らかにした(Inoue *et al.* 2009b)。本研究ではその井上らの開発した流脈の可視化手法を踏襲し、日本で開発された幅広い粘度範囲や多相系で使用可能な、いわゆる大型パドル翼と呼ばれる攪拌翼の混合性能がなぜ優れているのか明らかにすることを目的とした。その大型翼の代表例として各メーカーが開発したマックスブレンド、フルゾーン、スーパーミックス MR205 などを選択した。これらの翼は幅広い粘度範囲で使用されるため、高粘度の液から比較的低粘度の液まで、攪拌液の粘度を種々変更し、動力線図(Furukawa *et al.*, 2013)に基づいて混合実験の対象とする代表的な攪拌レイノルズ数を決定した。

一方、筆者らは、これらの攪拌翼は槽底形状が変化すると多少、動力特性は変化するものの、平底槽を用いた場合、ほぼ同一の動力線図になることを見だしている(Kato *et al.*, 2012)。しかしながら、本研究によってこれらの攪拌翼は高粘度流体の混合に対してそれぞれ独特の流脈パターンを持ち、混合機構が大きく異なることが明らかになった。また、通常のパドル翼は、翼を槽中央に取り付けた場合、層流域の広い範囲でドーナツリング状の混合不良

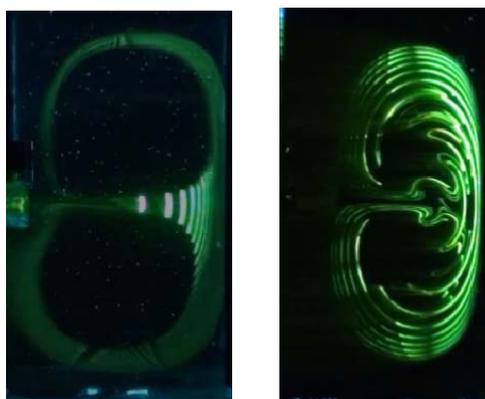
部を生成することが知られているが、これらの大型翼は、パドル翼とは流脈パターンが大きく異なり非常に複雑な流脈パターンとなった。また、それが攪拌レイノルズ数の変化に伴い、翼によっては複雑に変化することが明らかとなった。翼や操作条件の違いにより流脈のパターンは異なったが、十分な時間が経過した場合は、流脈が槽内を覆い尽くしていた。

1. 実験装置および方法

本実験に用いた攪拌槽は内径 15cm のアクリル樹脂製平底円筒槽で、主に流脈が明確に可視化できる層流～遷移域（攪拌レイノルズ数で 10～200）の検討となるため、基本的に邪魔板無しとした。また、攪拌液は種々の粘度(0.02～0.5Pa・s)に調製した水飴水溶液およびグリセリン水溶液を用い、基本的に液深は槽径と等しくした。攪拌翼の回転数は流脈の観察のしやすさを重視し、経験的に 25rpm を標準とした。攪拌翼は寸法を Table 1 に示した種々のものを用いた。これらの翼はそれぞれの攪拌翼のボトムパドルと呼ばれる下部のパドル翼から着色液を染み出させるようにアクリル板で自作したものを使用した。後述するが、大型翼は槽壁において槽下部から上部への上昇パターンとなるためである。

Table 1 Geometry of large paddle impellers

Impeller	d [cm]	b [cm]
Maxblend	9.6	14.6
Fullzone	9.1	15.0
Supermix MR205	10.7	12.1



(a) $Re=10$ (b) $Re=77$

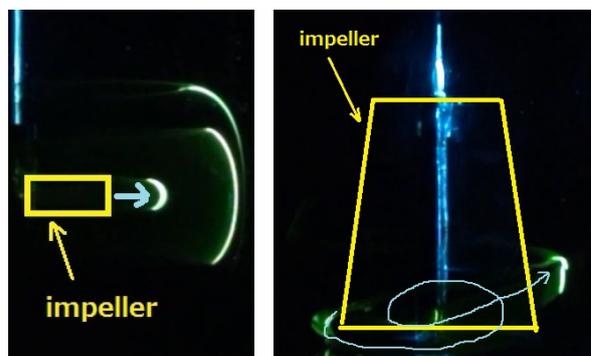
Fig.1 Examples of streak line of paddle impeller

また、着色液には流脈の切断面を観察する場合に蛍光性を持つウラン溶液を、三次元的に全体の流脈を観察する場合にヨウ素溶液を使用した。可視化はレーザースリット光およびプロジェクターの光を利用した。槽の中心の断面を観察するため、スリット光を槽中心に設置した攪拌シャフトに照射するようにした。このようにすることで攪拌槽の垂直断面の半分の流脈が可視化できることになる。流脈パターンの写真は断らない限り翼が観察面に対し垂直になったときとした。Figure 1に一般的な2枚パドル翼を用いた際の流脈の可視化例を示す。使用した翼の大きさはFigure 2(a)を参照されたい。左側が攪拌レイノルズ数 10 程度の層流域、右側が攪拌レイノルズ数 77 の層流的な遷移域の流脈例である。完全な層流域では翼回転数に対し流脈の循環周期が非常に長いので翼先端近傍ではおのおのの流脈が明確に区別できるが、槽壁近傍では多数の流脈が重なってしまう。しかし、流脈が届かないいわゆるドーナツリングと呼ばれる未混合領域は黒いままであり、着色液が全く混合していない様子がよくわかる。

2. 実験結果と考察

2.1 通常のパドル翼と大型翼の流脈の相違

Figure 2にごく一般的に使用されるサイズの2枚羽根パドル翼(左)と羽根幅の大きな大型翼の一例としてスーパーミックスMR205の攪拌翼3回転後の初期の流脈を示した。最大の相違は一般的なパドル翼の流脈は翼先端から染み出した着色液はすぐに翼から離れ槽壁方向に吐出されるのに対し、MR205の着色液はすぐに吐出されず、まず翼背面に引き込まれ、背面で小さな楕円を描いた後に吐出部とは反対の翼先端から流脈が広がる現象が観察された。これは液粘度が高いときのマックスブレンドおよびフルゾーンも同様であった。液粘度が低くなり、攪拌レイノルズ数が100前後になるとマックスブレンド翼のみは通常のパドル翼と



(a) Paddle (b) MR205

Fig.2 Comparison of streak line between paddle and large paddle impeller(MR205)

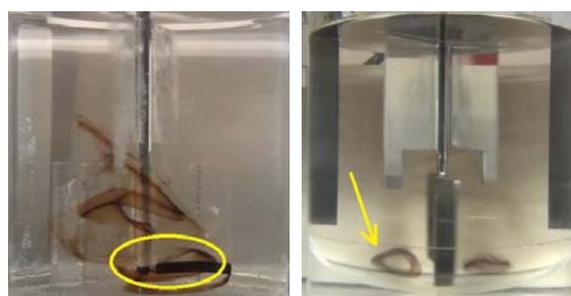
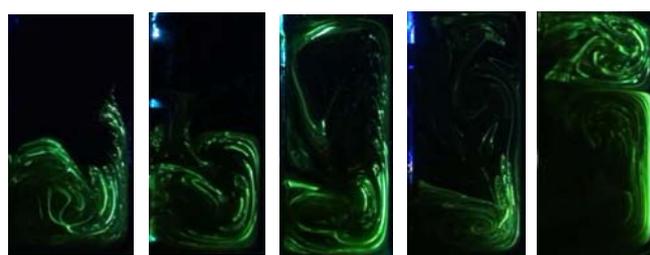


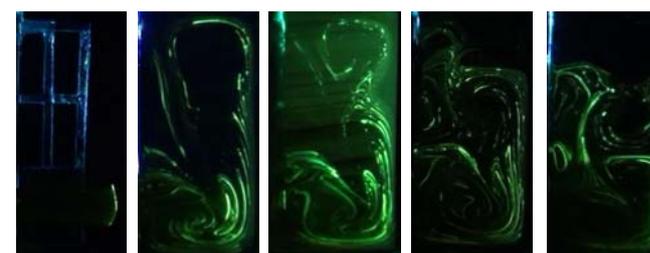
Fig.3 Comparison of streak line with isolated mixing zone of Fullzone impeller ($Re=40-80$)

同様翼先端から染み出した着色液はすぐに翼から離れ槽壁方向に吐出された。Figure 3に例としてフルゾーンの初期の流脈(左:楕円に囲まれた流脈)と過去に筆者らが観察した(Furukawa *et al.*,2013)すべての大型翼下部に発生する小さな未混合領域(右:矢印で示した小さな円形の領域)を比較して示すが、当時、なぜこのような未混合領域が発生するのか原因は不明であったが、今回の



(a) $Re=80$ (b) $Re=90$ (c) $Re=108$ (d) $Re=150$ (e) $Re=200$

Fig.4 Streak line of Maxblend impeller



Impeller position (a) (b) (c) (d)

Fig.5 Streak line of Maxblend impeller at $Re=100$

攪拌レイノルズ数 40 前後の流脈の観察結果より、大型翼特有の翼背面に発生する円を描くような流脈が混合の罫型として存在することがわかり、原因が明らかとなった。

2.2 マックスブレンダー

大型翼として草分け的な存在であるマックスブレンダーの流脈を検討した。いわゆるボトムパドルという概念を創出した攪拌翼である。Figure 4 にマックスブレンダーの種々の攪拌レイノルズ数における流脈を示す。いずれも翼が 20 回転した後の流脈である。マックスブレンダーは攪拌レイノルズ数によって複雑に流脈のパターンが変動することがわかった。特に Figure 5 に示す攪拌レイノルズ数 100 付近はパターンが不安定で同一の実験条件であっても種々のパターンを示した。なぜ、同条件であってもこのようにパターンが変化するのは現状では不明である。(a)槽底部から液面まで流脈が湧き上がるタイプ、(b)槽中間部で流脈が湾曲するタイプ、(c),(d)流脈が液面に達する前に槽中間部で循環をはじめ多段の渦を形成するタイプなど様々な流脈パターンを示した。ただし、通常のパドル翼と異なる部分は、十分時間が経過した後は流脈が槽内を覆い尽くし致命的な混合不良部となるような色が黒いまの箇所は観察されなかった点である。

参考に Figure 6 に(a)マックスブレンダー、(b)マックスブレンダーと同じ大きさでグリッドのないパドル翼を用いた場合の攪拌レイノルズ数 35 のときの着色法による 20 回転後の流脈を示した。

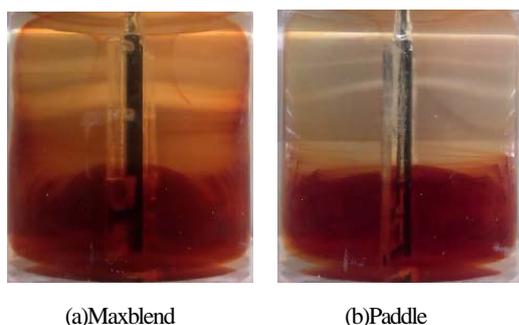
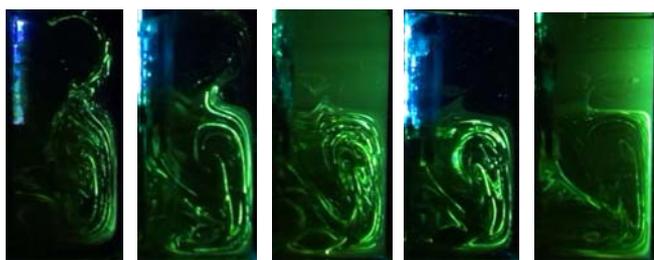
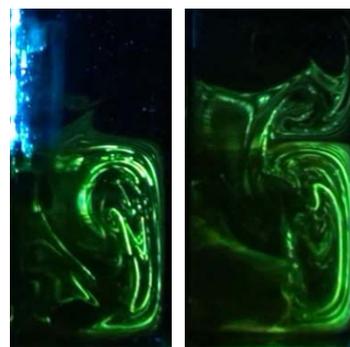


Fig.6 Comparison of streak line between Maxblend and paddle impeller at $Re=35$



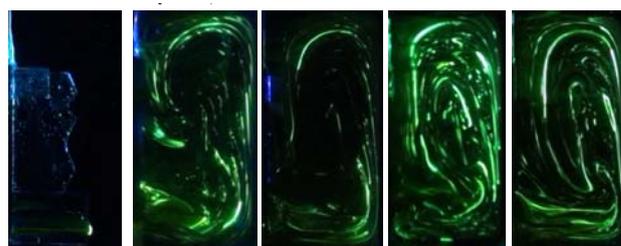
(a) $Re=80$ (b) $Re=100$ (c) $Re=106$ (d) $Re=120$ (e) $Re=135$

Fig.7 Streak line of Fullzone impeller



(a) without baffle (b) with baffle

Fig.8 Streak line of Fullzone impeller at $Re=120$



Impeller position (a) $Re=40$ (b) $Re=80$ (c) $Re=100$ (d) $Re=135$

Fig.9 Streak line of Supermix MR205 impeller

やはり、上下の循環流を生成する意味でグリッドは有効であることがわかる。

2.3 フルゾーン

次にフルゾーンの流脈パターンを紹介する。フルゾーンは 2 枚板のマックスブレンダーとは異なり、上下の翼で位相差があり、立体的な形状となっている翼であり、上段翼が先行する形になっており、上段翼裏側の負圧部分に下段後退翼の吐出流を送り込むという意図を持って設計された翼である。その流脈はマックスブレンダーとよく似ていたが、Figure 7 にいずれも 20 回転後の流脈を示すが、マックスブレンダーとの最大の相違点は、フルゾーンは攪拌レイノルズ数が異なっても流脈パターンがそれほど大きく変化せず安定していたことであった。これも、十分時間が経過した後は流脈が槽内を覆い尽くし致命的な混合不良部となるような色が黒いまの箇所は観察されなかった。

次に邪魔板の有無により流脈パターンが変化するかを検討した。邪魔板は槽径の 1/10 幅のものを 2 枚、槽の手前と奥に設置した。攪拌レイノルズ数 120 のときの邪魔板の有無による 20 回転後の流脈パターンの差を Figure 8 に示す。パドル翼とは大きく異なり、フルゾーンの場合は流脈のへこみ(Inoue et al. 2012)は見られず、邪魔板無しより少ない通算翼回転数で流脈が広がることが観察された。

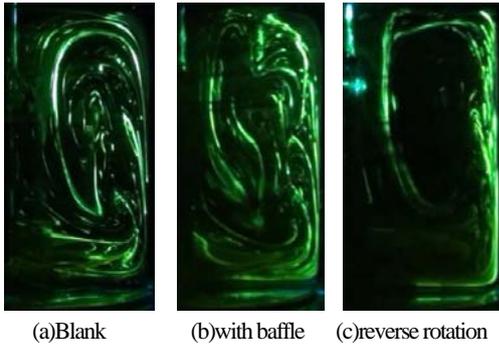


Fig.10 Streak line of Supermix MR205 impeller at $Re = 135$

2.4 スーパーミックス MR205

次にスーパーミックス MR205 の流脈パターンを紹介する。この翼は航空機の翼からヒントを得た翼で流れを整える意図でメインとなる大型翼の前面に補助翼を備えた翼である。この翼は他の翼と異なり、流脈パターンが極めて安定しており、撹拌レイノルズ数によらず一定の流脈パターンを示した。槽底から液面まで槽壁部を一気に駆け上がる流脈が観察された。Figure 9 には種々の撹拌レイノルズ数における 15 回転後の流脈パターンを示すが、他の翼と異なり、槽上層部まで流脈が広がっていることがわかる。さらに、フルゾーンよりも流脈のパターンが安定していることがわかる。Figure 10 には撹拌レイノルズ数 135、15 回転後における (a) 通常運転、(b) 邪魔板付き、(c) 逆回転させた場合(補助翼が背面で回転する方向)の流脈パターンを示す。邪魔板付きの場合はパドル翼同様、独特の流脈のへこみが観察され、逆回転をさせた場合は流脈パターンが偏りドーナツリングの原型となる黒い領域が観察された。やはり、補助翼の効果は非常に大きいことがわかる。

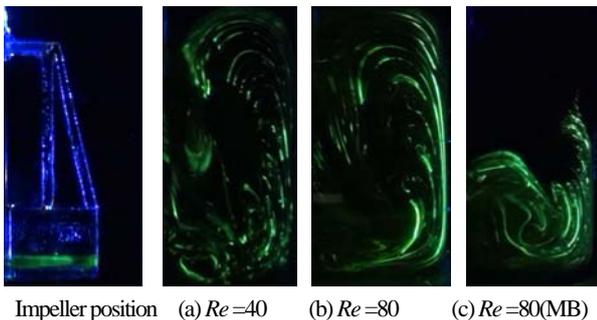


Fig.11 Comparison of streak line between MB and MB-R type impeller

2.5 マックスブレンド R 型(MB-R 型)

最近、より高粘度の液を混合する目的で台形型の MB-R 型というマックスブレンドが開発された。Figure 11 (a)および(b) に 2 種類の撹拌レイノルズ数における流脈を示すが MR205 と同様、槽

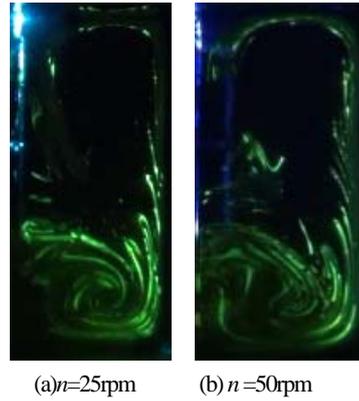


Fig.12 Comparison of streak line of Maxblend at $Re = 100$



Fig.13 Comparison of streak line of Fullzone at $Re = 100$

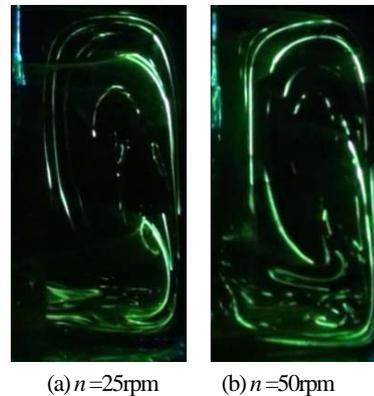


Fig.14 Comparison of streak line of MR205 at $Re = 135$

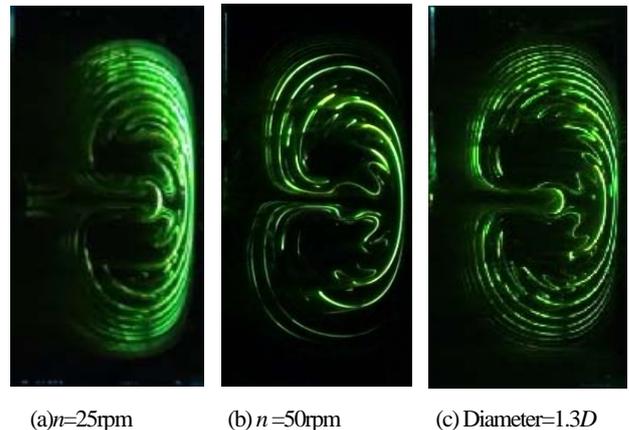


Fig.15 Comparison of streak line of paddle at $Re = 77$

上部まで流脈が広がる様子が観察された。(c)に通常タイプのマックスブレンドの流脈を示すが(a)と比較すると高粘度液に対する混合の改善効果を読み取られる。

2.6 攪拌レイノルズ数の意味するもの

種々の条件でMR205の流脈を観察しているとき、流脈パターンがよく似ていることから、昔から常識として考えられてきた、レイノルズ数が一定ならば流れ場は相似であるということこの流脈パターンでも確認できるかどうか検討した。その結果の一例をFigures 12~15に示す。Fig.12にマックスブレンド、Fig.13がフルゾーン、Fig.14がMR205そしてFig.15が通常のパドル翼のものである。Fig.12~14の大型翼のものは(a)の条件に対して回転数と液の粘度をそれぞれ2倍とし、攪拌レイノルズ数は同一という条件を(b)として作り出した。ただし、マックスブレンドのみ再現性のあった流脈パターンを示した。マックスブレンドおよびフルゾーンでは20回転後、MR205では10回転後の流脈を示したものである。(a),(b)ともに翼の同一回転数後の流脈パターンであるが、全く同様なパターンが観察された。したがって、攪拌レイノルズ数一定という条件は層流において混合パターンが一定である条件ということが確認されたことになる。さらに通常のパドル翼の

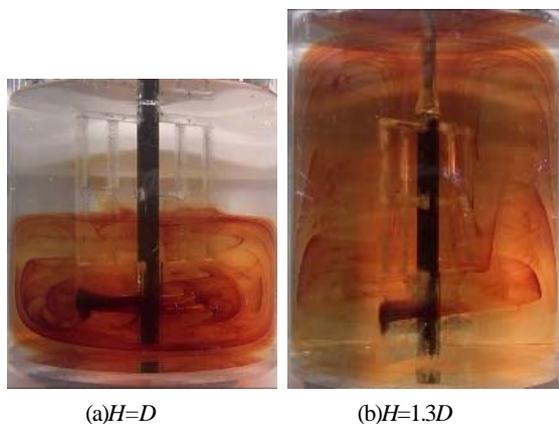


Fig.16 Streak line of Maxblend impeller

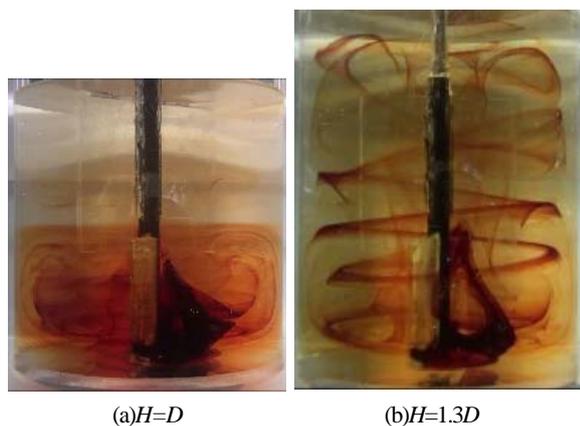


Fig.17 Streak line of Fullzone impeller

相似性も検討した。その結果をFig.15に示す。(a)が基準となる条件、(b)回転数および粘度2倍、(c)幾何形状および粘度1.33倍を示した。同様のことが観察され、さらに、実験装置の都合上、ほんのわずかなスケールアップであるが、同様な流脈パターンを示した。ここで、パドル翼の場合は同一回転数後ではなく、ある程度回転数を多くし、パターンに変化がなくなった場合を示した。やはりこの場合も流脈パターンは相似であることが確認された。

2.7 大型翼操作における液深の影響

ここまでの議論では、マックスブレンドとフルゾーンは短時間で流脈が槽上部まで伸びないため、若干混合性能に不安が残る結果になっている。しかし、この結果は、これらの翼の今までの工業生産の実績とは異なる結果であるので、何か原因があると考えた。その際、これまでの実験はすべての翼で液深を槽径と同じ一定の条件($H=D$)として操作していたが、例えば、Fig.5とFig.9の左端の翼位置を示す写真を見比べれば、翼上端と液面との距離が異なることに気づく。また、フルゾーンは、カタログなどではもう少し翼上端と液面との間に距離がある状態で運転されていることに注目した。そこで、液深を $H=1.3D$ として、マックスブレンドとフルゾーンの流脈パターンを観察した。その結果、Figures 16 and 17に示すように液深を深くした場合、マックスブレンド、フルゾーンともに短時間で槽底部から槽上部へ向かう流脈パターンを得ることができた。よって、大型翼を操作する場合は液深に注意すべきであることが明らかになった。この液深は槽径の1.5倍でも短時間に流脈が液面まで広がり、実験装置の限界の1.8倍まで混合が可能であることがわかった。その一方で、液面から翼が露出する槽径の1倍より低い液面では流脈が上下2分割されるような界面を形成する傾向が観察された。

これらの大型翼の流動機構をまとめると、いずれも槽底近傍で槽壁に向かって吐出された流れが槽壁を駆け上がるという共通な流れになっており、いわゆる軸流と呼ばれる流れになっている。軸流の代表的な翼はプロペラ翼であるが、プロペラ翼はもっと低い液粘度でかつ邪魔板を付けた場合に軸流の傾向を示す(Kato et al.2010)。このような層流の邪魔板無し条件で槽内の上下循環流が大きいということは大型翼特有の流れであるということが判明した。この事実は今までの研究手法では明らかになっていなかった事実である。

結 論

層流攪拌に対して流脈を可視化することが攪拌槽の混合性能評価に非常に重要であるということが明らかになった。大型翼の混合性能が優れていることも明らかになったが、その性能を十分発揮するためには液深が重要なポイントであることも明らかになった。

さらに層流攪拌において攪拌レイノルズ数というものは確かに流れ(混合パターン)の相似性を示すパラメータであることが再認識された。

Nomenclature

D	= vessel diameter	[m]
b	= height of impeller blade	[m]
d	= impeller diameter	[m]
H	= liquid depth	[m]
n	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]
Re	= impeller Reynolds number ($=nd^2\rho/\mu$)	[-]
μ	= liquid viscosity	[Pa · s]
ρ	= liquid density	[kg · m ⁻³]

Literature Cited

Furukawa, H., Y. Kato, T. Kato and Y. Tada; "Power Correlations and Mixing Patterns of Several Large Paddle Impellers with Dished Bottom," *J. Chem. Eng. Japan*, **46**, 255–261 (2013)

Inoue, Y. and Y. Hirata, "Numerical Analysis of Chaotic Mixing in Plane Cellular Flow I – Formation Mechanism of Initial Mixing Pattern and Fine Mixing Pattern," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **25**, 294–302 (1999)

Inoue, Y., B.Okada and S.Hashimoto, "Simplified Model of 3D Velocity Field in a Stirred Tank," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **35**, 201–210 (2009a)

Inoue, Y., D.Takaoka, B.Okada, K.Natami, S.Hashimoto and Y. Hirata, "Analysis of Fluid Mixing in an Agitated Vessel Based on a Streakline," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **35**, 265–273 (2009b)

Inoue, Y., Y. Kato, R. Osaka, K. Natami, O. L. Onyanfo, M. Kawamata and S. Hashimoto " Enhancement of Fluid Mixing by Deformations of Streak Surface," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **38**, 191–202 (2012)

Kato, Y., A. Obata, T. Kato, H. Furukawa and Y. Tada; "Power Consumption of Two-Blade Wide Paddle Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **38**, 139–143 (2012)

Kato Y., Y. Tada, Y. Takeda, N. Atsumi and Y. Nagatsui; "Prediction of Mixing Pattern from Power Number Diagram in Baffled and Unbaffled Mixing Vessels," *J. Chem. Eng. Japan*, **43**, 46–51 (2010)

Mixing Mechanism of Large Paddle Impeller Based on Streak Line Observation

Yoshihito KATO¹⁺⁺, Yoshiro INOUE², Masashi HIRAMATSU¹ and Shota OHTANI¹,

¹Department of Life and Materials Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan

²Osaka University, 1-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan

E-mail address of corresponding author: kato.yoshihito@nitech.ac.jp

Keyword: Mixing, Agitation, Streak Line, Large Paddle Impeller, Laminar

Streak line patterns of several wide-paddle impellers developed by mixer companies in Japan were observed from laminar to turbulent flow regions. The power consumption of all wide-paddle impellers examined was correlated by using the same correlations as in our previous work, but the mixing mechanism of these impellers in the laminar flow region changed greatly with the kind of impeller. It was found that these wide-paddle impellers had distinctive patterns of streak lines depending on the operation conditions. In particular, liquid height greatly affected the streak line pattern. Furthermore, it was found that the impeller Reynolds number was a parameter that controlled the streak line pattern.