

流脈観察に基づくHB翼の開発

加藤禎人^{1*}・平松将¹・大谷祥太¹・吉田愛実¹・塩原克己²

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佐竹化学機械工業(株), 335-0021 埼玉県戸田市新曽66

キーワード: 混合, 攪拌, 流脈, 新型翼, 層流

井上らの開発した流脈の可視化法は層流域における攪拌槽の混合性能評価に非常に有効である。前報ではその手法に基づき幅広い粘度範囲で使用可能な大型パドル翼の混合機構を明らかにした。そこで明らかになった大型翼の混合性能が良好なのは短時間に流脈が槽内を覆い尽くすことであることに着目し、短時間で流脈が広がる独特な攪拌翼を考案し、その幾何形状を流脈の可視化を用いることによって最適化した。これにより、簡単な幾何形状の翼で、迅速に混合が進行し、安定な操作特性で混合が可能になることを示した。

緒 言

筆者らは前報(Kato *et al.* 2014)において、井上らの開発した流脈の可視化法(Inoue *et al.* 1999, 2009a, 2009b, 2012)を用い、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各種の大型パドル翼の混合性能がなぜ優れているのかを明らかにした。その大型翼とは住友重機械プロセス機器(株)のマックスブレンド、(株)神鋼環境ソリューションのフルゾーン、佐竹化学機械工業(株)のスーパーミックス MR205 である。本報では、これらの攪拌翼の層流域から遷移域における流脈の可視化結果から、槽底部から槽壁部を一気に液自由表面まで駆け上がる流脈がどのようにして形成されるのかを検討した。そして、本報で筆者らは種々の検討結果から、そのような流脈が形成されるのは槽底部の圧力が高く、液自由表面部の圧力が低くなることその原因であることを突き止め、それに合う攪拌翼の幾何形状を考案した。また、槽底から槽上部に向かう流れの原因がこのような圧力差で生じることはTakahashi らがマックスブレンドによる検討でも言及している(Takahashi *et al.*, 2006)。

その結果、現在上市されている大型翼より幾何形状が単純(Simple)で、迅速(Speedy)な混合性能を持ち、流脈が安定(Stable)に攪拌槽内に広がる攪拌翼を開発したのでここに報告する。これにより、機能性物質の多品種少量生産に今以上に貢献できる(例えば、(1)液深が上下しても混合性能が安定している、(2)幾何形状が単純なので洗浄性に優れている、(3)単純形状故に低コストである、等の利点を持っている。)と考えられる。

ただし、本攪拌翼の乱流での混合性能や邪魔板との相性、動力

特性(動力相関式)、異相系の攪拌性能などに対しては今後の検討課題とする。

1. 実験装置および方法

本実験に用いた攪拌槽は内径 150mm 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 10~100)とし、したがって、攪拌液には粘度を 0.04~0.5Pa・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た。攪拌翼の回転数は流脈の観察のしやすさを重視し、前報同様、経験的に 25rpm を標準とした。着色液には流脈の切断面を観察する場合にトレーサーとして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。トレーサーは翼下部から染み出すように翼をアクリル板で自作した。可視化はレーザースリット光を利用した。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。

Figure 1 に今回考案した新型攪拌翼の代表的な幾何形状を示す。野球に使用するホームベースのような形状を基本としており、槽下部で翼径が大きく、液面に向かうに従って翼径が小さくなる形状になっている。この形状は前報において比較的流脈の槽底部から液面までの伸びる速度が大きかった MR205 および MB-R 型を参考にした。このように翼に傾斜を付けることで槽の下方では遠心力が高くなり、上方に向かうにつれて遠心力が小さくなるため、下方から上方へ流脈の伸びる速度が高くなったと考えられる。

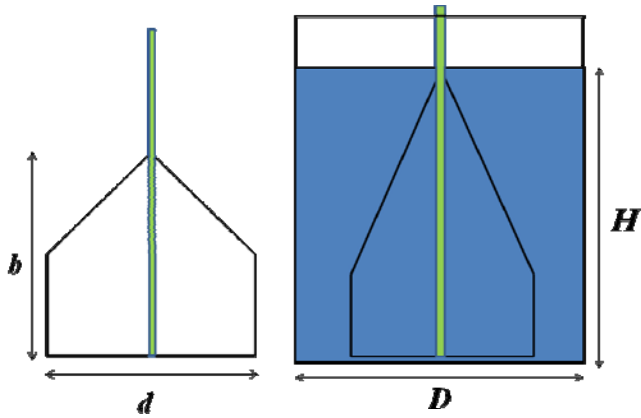


Fig.1 Schematic diagram of new type impeller

さらに、前報(Kato *et al.* 2014)で通常のマックスブレンドやフルゾーンは翼先端と液面の隙間を大きめ(すなわち液深を深くする)に設定することで、液面付近に遠心力の弱い部分が発生し、槽下部から液面までの上昇流を促進できることが明らかになっている。これらのことを勘案してホームベース型の翼は有効であろうことが推察される。

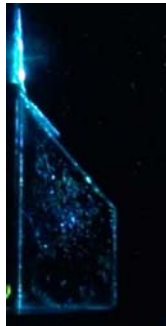
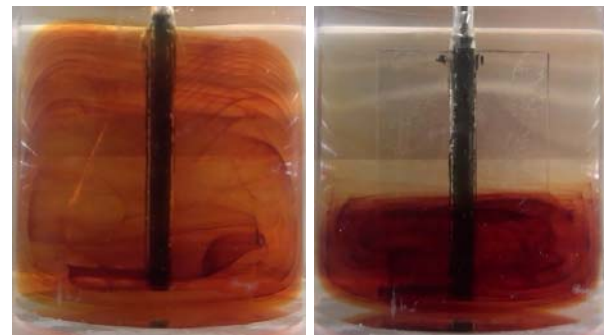


Fig.2 Impeller position

2. 実験結果と考察

2.1 新型攪拌翼 (HB 翼) の流脈

Figure 2 に示した幾何形状のホームベース型新型パドル翼 (HB 翼) の攪拌レイノルズ数 100 における翼の回転周期ごとの流脈の変化を Figure 3 に示す。このときの液粘度は $0.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ である。井上らが示したとおり、翼の回転周期ごとの流脈は普遍であり、あたかもその鋳型の上を緑色の液が進んでいるように見える。さらに 14 回転でほぼ槽内全域を流脈が覆い尽くしていることがわかる。前報で示した各社の大型翼の流脈は 10~20 周期後のものであることを考えると非常に速い速度で混合が進んでいることが推察される。また、3 周期までは翼の背面で楕円状の蛇のとぐろのような流脈を形成しているの、あたかも 3 周期目以降の翼



(a)HB type (b) large paddle
Fig.4 Comparison of streak line between HB type impeller and large paddle impeller at $Re=45$

先端から流脈が広がっているように観察される。また、他の大型翼は槽壁に接するように流脈が広がっていくが、HB 翼の場合は槽内部へも迅速に流脈が広がっており、通常のパドル翼のようなドーナツリング状の混合不良部を形成しにくい流脈の広がり方になっている。

参考に傾斜を持たない長方形型の大型パドル翼との流脈パターンの違いを Figure 4 に示す。このときは攪拌翼 15 回転後の流脈パターンであるが翼の三角部分の傾斜が非常に有効に働いている様子がわかる。

2.2 HB 翼の幾何形状の最適化

次にできるだけ幅広い粘度範囲で混合性能が発揮できるように液粘度を Fig.3 の実験の 2 倍とし、HB 翼の幾何形状の最適化を検討した。具体的には翼径と翼幅と翼高さの検討である。

翼のとがっている部分がどの程度混合に影響を及ぼしているかを着色法で検討した結果を Figure 5 に示す。基本的にマックスブレンドなどの大型翼で最適翼径とされている $d/D=0.6$ におけるパドル翼を基準にした。いずれも 7 周期後の流脈を示したが、 b/H が大きいほど流脈が迅速に上方に伸びる傾向があり、翼先端部分が液面まで達している方が流脈の広がりが大きいことが明らかになった。

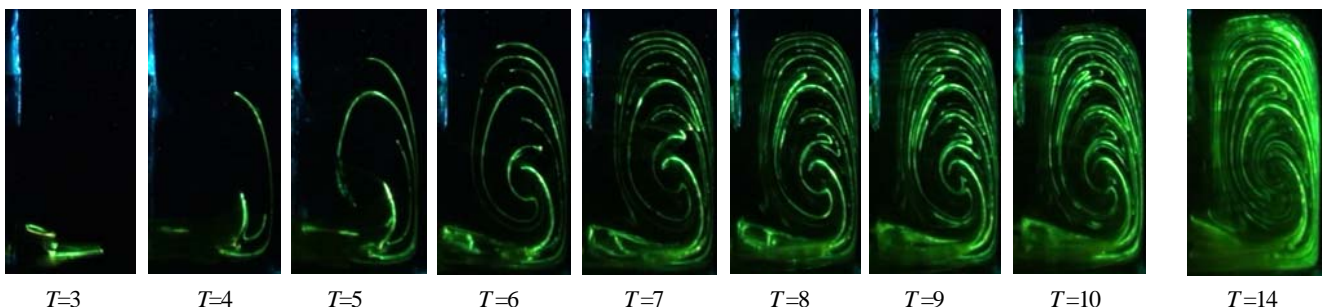


Fig.3 Streak line of new type paddle impeller $Re=100, n=25 \text{ rpm}$

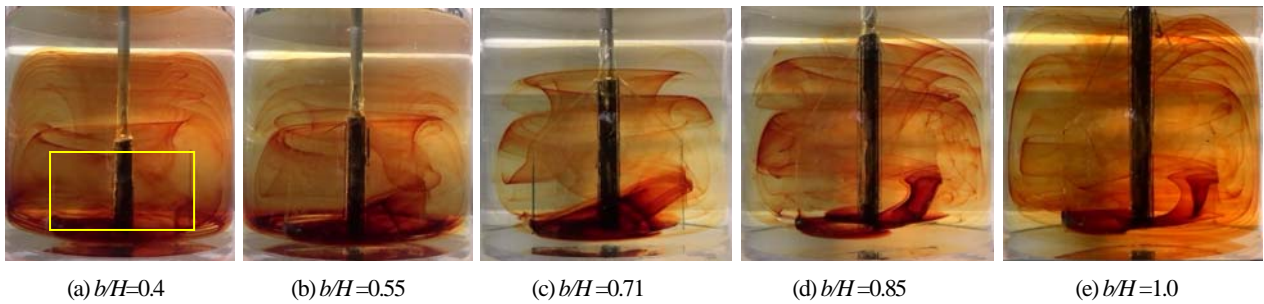


Fig.5 Effect of impeller blade height on streak line pattern at $Re=50$

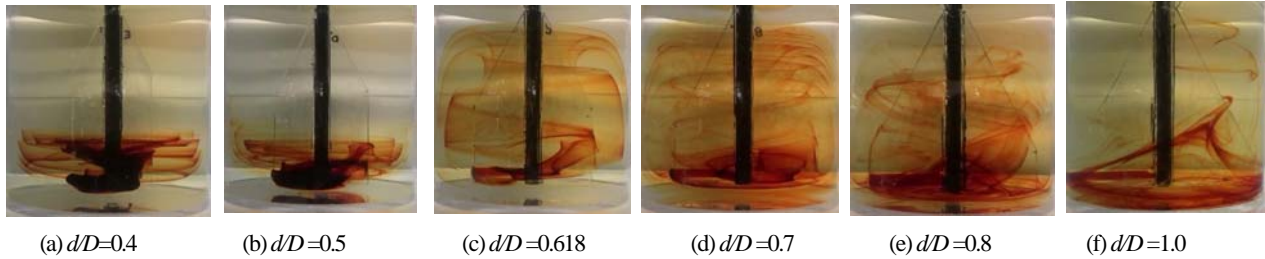


Fig.6 Effect of impeller diameter on streak line pattern at $\mu=0.087\text{Pa} \cdot \text{s}$

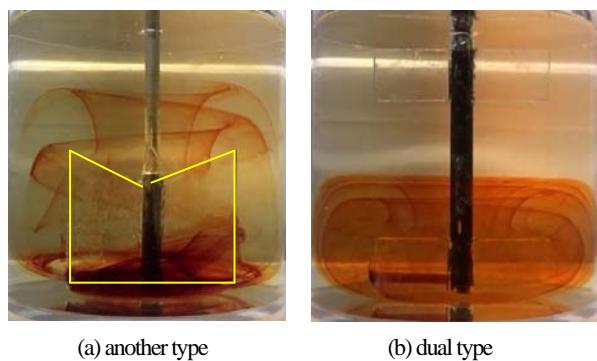


Fig.7 Streak line pattern of other type impeller at $Re=50$

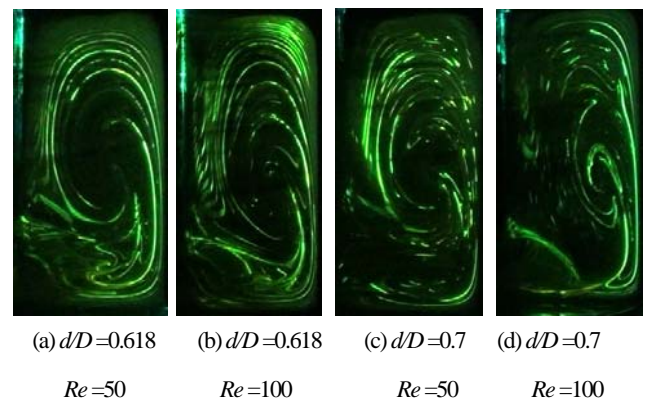


Fig.8 Streak line of HB impeller

次に翼径の最適化を検討した。基本形は液面における槽中心から槽底部の角の部分をつなぐ対角線の傾斜を持つ三角翼を考え、翼径を種々変更したものの流脈を観察した。Figure 6 に示すように、 d/D が 0.5 以下の時は吐出流が弱い流れが上方に伸びる傾向が弱い。また、 d/D が 0.8 以上であり翼径が大きくても槽壁に沿って上昇する傾向が弱い。 $d/D=0.6\sim0.7$ が最適翼径であると考えられる。ちなみに 0.618 は黄金比である。

2.3 他の翼形状との比較

Figure 7 に他の幾何形状の翼の流脈パターンを参考までに示す。(a)はHB翼とは反対にシャフト部分でへこむタイプの攪拌翼である。翼先端部の翼幅が広いことにより吐出流が大きくなり混合が早いと考えがちであるが、Fig.5(a)と比較するとむしろ通常のパドルより流脈の広がりが遅くなっている。(b)はFig.5(a)の翼と同じ面積の翼を2分割し、上下2段に設置したものである。こ

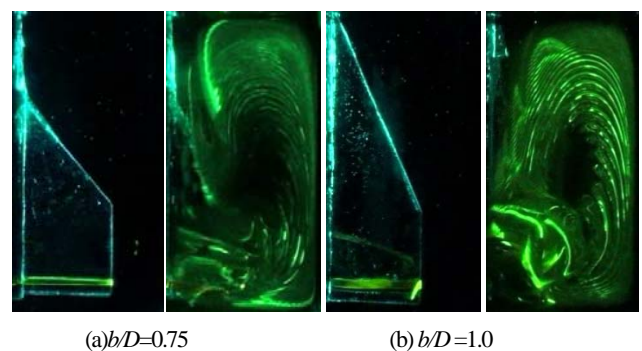


Fig.9 Streak line pattern of HB impeller at $Re=25, n=50\text{rpm}$

の場合の混合状況はより悪化しており、あたかも2つの攪拌槽が上下に積まれたパターンになっている。この現象はよく知られていることではあるが、このように明確に界面が示されている例は少ない。(ただし、フルゾーンは2段翼と考えることができるが上下の翼は全く異なる形状である。) 同じ翼を2段で使用する場合、このような配置は避けた方が無難であることがわかる。

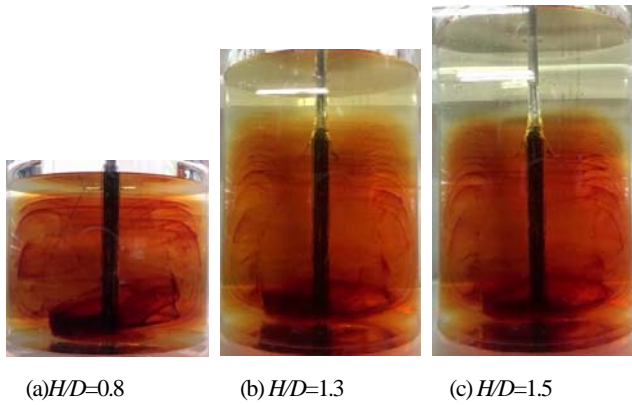


Fig.11 Effect of liquid height on streak line of HB impeller at $Re = 50$

2.4 攪拌レイノルズ数の限界

マックスブレンド、フルゾーンなど大型翼は実機レベルでの推奨攪拌レイノルズ数は約 100 までである。本攪拌翼は比較的高粘度の攪拌を目指して検討をしてきたが、どの程度の攪拌レイノルズ数まで可能かを検討した。Figure 8 は Fig.6 において性能が良かった $d/D=0.618$ および 0.7 の翼で攪拌レイノルズ数 50 および 100 における 90 秒後の流脈パターンを示したものである。いずれも流脈は攪拌槽内全体にむら無く広がっており、混合不良部は存在していないと判断することができる。Figure 9 に攪拌レイノルズ数 25 における着色液が翼から染み出したパターンを示す。たった 90 秒でここまで流脈が広がるのは他の大型翼よりも早かったが、2 種の HB 翼ともに写真中央部に流脈が届いていない黒色の部分が残っている。この付近の攪拌レイノルズ数が本攪拌翼の適用限界と考えることができる。

2.5 液深の影響

前報(Kato et al. 2014)において、マックスブレンドやフルゾーンには操作する際に適正な液深が存在した。本 HB 翼においてもそのような条件が存在するのか液深を種々変化させたときの(a)は 15 回転後、(b),(c)は 25 回転後の流脈パターンを Figure 11 に示す。 $H/D=0.8$ のように液面が低く翼が液面からつきだしていても十分均一な混合は可能であるが、液深が大きくなると槽上方には流脈が届きにくいことがわかる。これは Fig.5 の傾向と同じであり、攪拌レイノルズ数が比較的小さい場合は翼を液面まで伸ばす必要があることがわかる。Figure 12 には攪拌レイノルズ数 100 における 90 秒後の流脈を示すが、この程度の攪拌レイノルズ数ならばある程度の液面変化に対する適応能力があると考えられる。(a)の $H/D=0.43$ という液高さはちょうど翼の幾何形状が槽底に対し

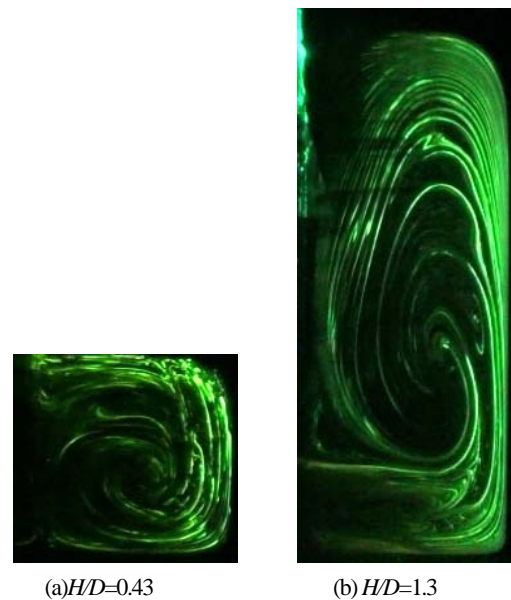


Fig.12 Effect of liquid height on streak line of HB impeller at $Re = 100$

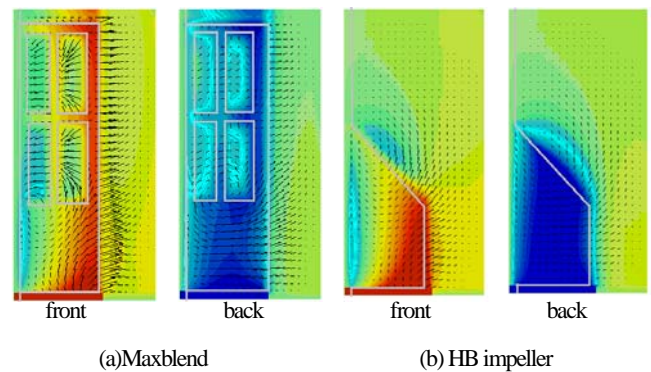


Fig.13 Numerical analysis of velocity and pressure profile $Re = 40$

て垂直に伸びている部分の上限の液高さである。

ここまでの検討で、本 HB 翼は攪拌レイノルズ数が変化しても、液深が変化しても流脈パターンが比較的安定していることが明らかになった。

2.6 数値解析による速度分布と圧力分布

HB 翼がなぜこのように槽内を一周する安定な流脈になるかを検討するために数値解析により圧力分布と速度分布を可視化した。使用したプログラムは FORTRAN で自作したものであり、層流場の解析なのでモデルは使用していない。計算した系は $D = H = 15\text{cm}$, $d = 9\text{cm}$, $n = 25\text{rpm}$, $\rho = 1250\text{kg/m}^3$, $\mu = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$, $Re = 40$ で、 $20 \times 20 \times 40$ メッシュである。比較対象としてマックスブレンドも解析し、定性的であるが翼前面と背面の結果を Figure 13 に示した。矢印が速度ベクトル、色の変化(赤が圧力が高く、青くなるほど低い)で圧力分布を示した。マックスブレンドとは異なり、HB 翼は図中心付近(翼の角部分)から圧力分布が放射状に分布していることがわかる。さらに翼前面の図を見ると槽底部で圧力が高く

なっており、液表面部分で圧力が低くなっている様子も観察され、槽下部の翼先端部から反時計回りに流体が動く傾向になっていることが推察される。

結 論

流脈の可視化をツールにして今までにない攪拌翼の開発を試みた。流脈の広がる速度や、十分時間が経過した後の流脈パターンの観察結果から迅速に混合可能なホームベース型の攪拌翼(HB翼)を考案することができた。本攪拌翼は他の大型翼の適応限界を超えて、攪拌レイノルズ数 25 付近までは対応可能であることがわかった。また、翼径と槽径の比は0.6~0.7 が最適であり、翼先端は液面付近まで伸ばしておくことが有効であることも明らかになった。

これにより幾何形状が単純(Simple)で、迅速(Speedy)な混合性能を持ち、流脈が安定(Stable)に攪拌槽内に広がる攪拌翼を開発できた。

【謝辞】

論文執筆にあたり、大阪大学名誉教授の井上義朗先生に多大なるアドバイスをいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

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

- 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., Y. Inoue, M. Hiramatsu and S. Ohtani; "Mixing Mechanism of Large Paddle Impeller Based on Streak Line Observation," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **to be published**
- Takahashi, K., H. Horiguchi, M. Mishima, and Y. Yatomi; " Mixing Characteristics in a Vessel Agitated by Large Paddle Impeller MAXBLEND," 12th European Conference on Mixing, Bologna, Italy, 695—701 (2006)

Development of New Large Paddle (HB Type) Impeller Based on Streak Line Observation

Yoshihito KATO¹⁺⁺, Masashi HIRAMATSU¹, Shota OHTANI¹, Manami YOSHIDA¹
and Katsumi SHIOBARA²

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

² Tokyo Office, Satake Chemical Equipment Mfg., Ltd., 66 Niizo, Toda-shi, Saitama, 335-0021, Japan

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

Keyword: Mixing, Agitation, Streak Line, New Type Impeller, Laminar

The streak line visualization method developed by Inoue *et al.* (2009) is effective for evaluation of mixing performance in the laminar flow region. In the previous work, the mixing mechanism of large paddle impellers that can be used over a wide range of viscosity was clarified based on this method. In the present work, the geometry of a new impeller that has good mixing performance was optimized based on streak line observation. The new impeller has (1) simple geometry, (2) speedy mixing performance, and (3) stable operating characteristics.