

HB攪拌翼の所要動力特性と混合特性

加藤禎人^{††}・大谷祥太・古川陽輝

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

キーワード: 混合, 攪拌, 動力, 新型翼, 相関

筆者らは流脈の可視化に基づき, 3S(Simple, Speedy, Stable)の性能を持つ新規な攪拌翼(HB翼)を開発した(Kato *et al.*, 2015b). 本報では, 短時間で流脈が広がるHB翼の実用化を目指し, 動力特性と混合特性を評価した. 所要動力は, 層流域では大型翼の動力相関の考え方により, 乱流域ではパドル翼の取り付け位置による動力低下を考慮することにより, 既存の相関式で推算可能なことがわかった. 混合特性は脱色法により評価し, 広いレイノルズ数範囲でドーナツリング状の未混合領域も発生しないことがわかった.

緒 言

筆者らは前報(Kato *et al.* 2015b)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, 流脈が槽底部から槽壁部を一気に液自由表面まで駆け上がる攪拌翼を開発した. 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であり, その幾何形状は野球で使用するホームベースの形状に酷似しているためHB翼と名付けた.

Figure 1 にHB翼の代表的な幾何形状を示す. 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. この形状は以下の根拠に基づき考案された. まず, 前報(Kato *et al.* 2015a)において槽底部から液面までの比較的流脈の伸びる速度が大きかったMR205およびMB-R型を参考としている. 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. さらに, 前報(Kato *et al.* 2015a)で通常のマックスブレンダー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た. これらのことを勘案してホームベース型の翼が考案された. 流脈の可視化により, おおよその形状最適化がなされた. 単純なホームベース型でも攪拌レイノルズ数100以上では十分良好な性能を示すが, よりレイノルズ数が小さい領域ではFig.1に示すように, 翼径と槽径の比 d/D は0.6~0.7, 翼幅 b は液自由表面付近までが良いとされた(Kato *et al.* 2015b).

ただし, 本攪拌翼を実用化するためには所要動力特性を把握す

ることが必要である(Kato *et al.* 2009). また, 本攪拌翼の混合性能や邪魔板との相性はまた検討されていない. 本報では従来の実験方法に基づき, HB翼の動力特性と混合特性を評価したのでここに報告する.

1. 実験装置および方法

本実験に用いた攪拌槽は内径185mmの亚克力樹脂製平底円筒槽で, 攪拌液には種々の粘度に調製した水飴水溶液を用いた. すべての実験において液深は $H/D=1.0$ とした.

攪拌所要動力測定には軸トルク測定法が用いられた. 使用したトルクメーターはSATAKE ST-3000である. 攪拌所要動力はその平均トルクを用いて $P=2\pi nT$ で求めた. 動力測定法の詳細は筆者らの一連の方法(Kato *et al.*, 2009)と同じである.

流脈の可視化には前報(Kato *et al.* 2015a)と同じ方法を用いた. 攪拌翼の回転数は流脈の観察のしやすさを重視し, 経験的に25rpm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

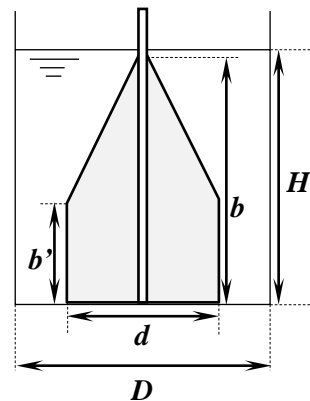


Fig.1 Schematic diagram of HB type impeller

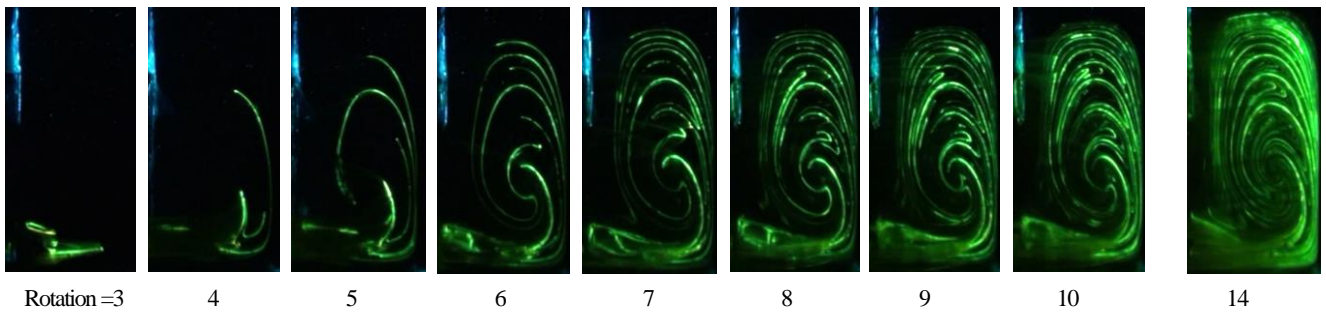


Fig.2 Streak line of HB type impeller $Re=100, n=25rpm$ (Kato *et al.* 2015b)

して蛍光性を持つウラン水溶液を使用した。トレーサーを翼下部から染み出すように翼をアクリル板で自作した。可視化にはレーザースリット光を利用し、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 2 に HB 翼の流脈の可視化結果を示すが、翼が 10 回転した時点でほぼ槽内全体に流脈が広がり、14 回転後にはかなり緻密に流脈が分布していることがわかる。

混合時間は、ヨウ素でんぷん反応を用いて着色したものをヨウ素-チオ硫酸イオンの酸化還元反応を利用した脱色法で、測定した。チオ硫酸ナトリウムの水溶液は液面シャフト近傍から投入した。

2. 実験結果と考察

2.1 HB 翼の攪拌所要動力相関の考え方

HB 翼はおおよそ最適化がなされているとはいえ、動力相関式を構築するためには想定しうるかぎり幅広い幾何形状を網羅した種々の翼寸法について動力を測定する必要がある。そこで、Figure 3 および Table 1 に示すような種々の幾何形状の HB 翼をアクリル板により作成し、邪魔板条件を含めた広い攪拌レイノルズ数における攪拌所要動力を測定した。

その結果、Figure 4 に示すように興味深い結果が得られた。

- (1) 乱流域の動力数を支配している幾何形状は最も幅の広い翼径 d と垂直部分の翼幅 b' である。つまり、翼径 d が同一であれば傾斜部(三角部分)の翼の動力数に対する影響は長方形部分の $1/6$ 以下となり、 b は動力数にほぼ影響しないといえる。(ただし、このような HB 状の形状で $b/D=0.4$ 近傍の場合)
- (2) 層流域の動力数は傾斜部の高さを含めた b に大きく影響を受ける。
- (3) 完全邪魔板条件における動力数は(1)と同じ考え方で d および b' に支配される。

すなわち、層流域における動力数はマックスブレンド、フルゾーンおよび MR205 のような大型翼の動力相関の考え方で対応できるが、乱流域における動力数はその考え方は成立せず、ホームベースというよりも Figure 3 に示す網掛部の単純なパドル翼として考えた方がよいということである。

そこで動力相関の考え方として以下の方針とした。つまり、これまで筆者らが展開してきた種々の攪拌翼の動力相関式は各翼個別の相関式とし、幅広い攪拌レイノルズ数において一つの相関式で対応できるように各係数や指数の最適化を試みてきたが、HB 翼に至っては、層流域および乱流域で基本となる相関式を使い分け、既存の相関式で対応させるというものにした。

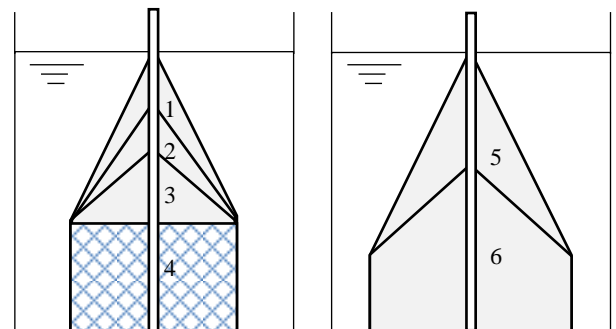


Fig.3 Geometry of HB impeller

Table 1 Geometry of HB impellers for power correlation

Impeller No.	d [m]	b [m]	b' [m]
1	0.111	0.175	0.068
2	0.111	0.141	0.068
3	0.111	0.105	0.068
4	0.111	0.068	0.068
5	0.130	0.175	0.055
6	0.130	0.115	0.055

2.2 層流域の動力相関

層流域は簡単である。HB 翼は既存の大型翼と同様翼最下部が

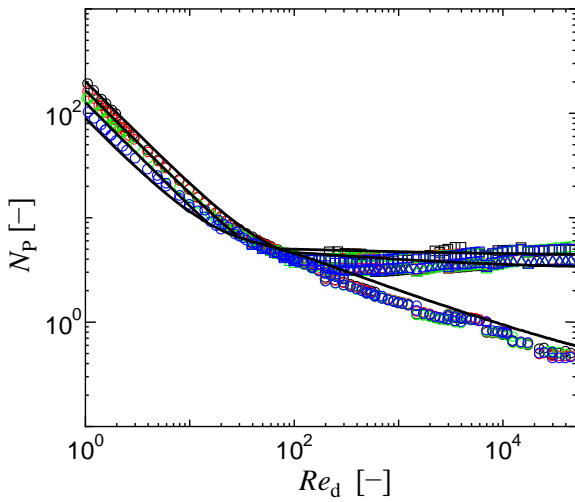


Fig.4 Correlation of power number for HB impellers

- 1, ○:without baffle, △:two baffle, □:four baffle
- 2, ○:without baffle, △:two baffle, □:four baffle
- 3, ○:without baffle, △:two baffle, □:four baffle
- 4, ○:without baffle, △:two baffle, □:four baffle

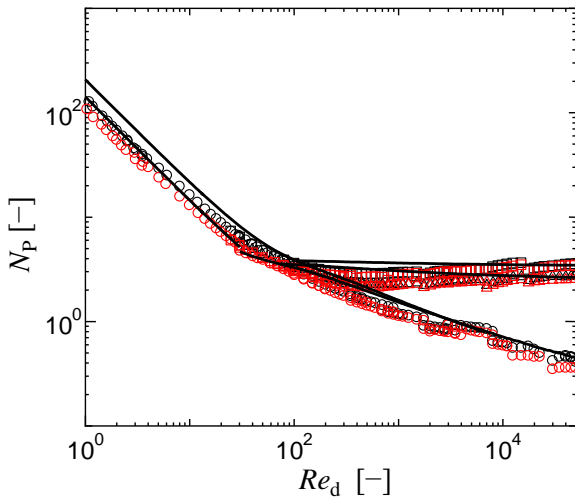


Fig.5 Correlation of power number for HB impellers

- 5, ○:without baffle, △:two baffle, □:four baffle
- 6, ○:without baffle, △:two baffle, □:four baffle

ら最後部までの翼幅 b を代表長さとして動力相関すれば良い。つまり、もともと層流域では邪魔板の有無に動力数は無関係であり、邪魔板は使用しない方が良かったため、翼の取り付け位置の影響も受けない。したがって、Fig.4 に示すように簡単に正確に動力相関が可能であった。図中の実線はそれぞれの条件で相関された計算値を示す。層流域では翼幅における代表長さの考え方のみで既存の相関式で推算できるため大型パドル翼も通常のパドル翼も同一の相関式である。ただし、Figure 5 に示すように翼径が大きく翼幅も大きい、Table 1 中の翼番号 5 の翼に関しては層流域において計算値の方が実測値よりかなり大きな値を示す（図中の黒い○と黒い直線）。したがって、遷移域の動力数を含めて、翼径の大きな HB 翼に対しては大型パドル翼の方が通常のパドル翼より低めの動力数を示すので、HB 翼は大型パドル翼の式を用いた方が相関値は実測値と良く一致する。ただし、HB 翼の望ましい翼径は

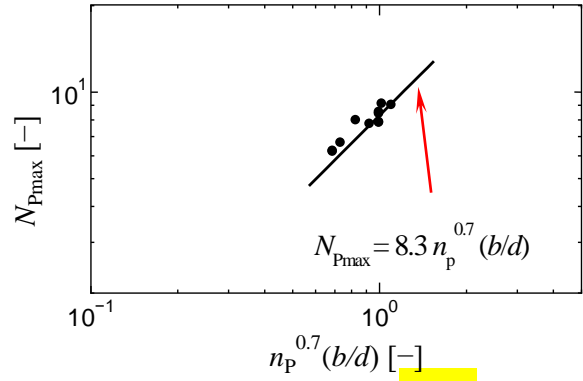


Fig.6 Power number at fully baffled condition

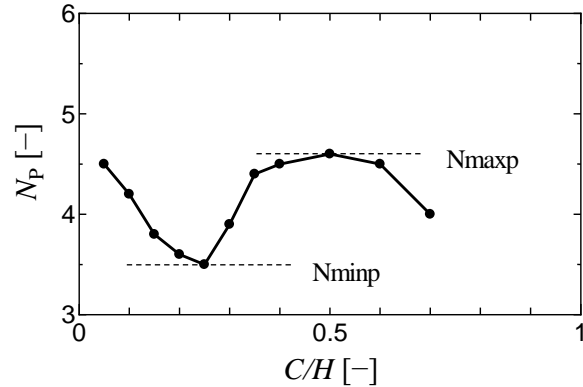


Fig.7 Effect of impeller position on power number (Kamei *et al.* (1995b))

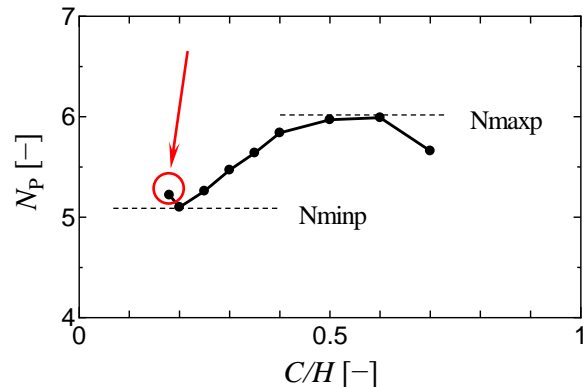


Fig.8 Effect of HB impeller position on power number

$d/D=0.6$ 近傍黄金比 0.618 を推奨なので 0.7 以上の翼に対して誤差が大きくても問題視はしないこととする。

2.3 乱流域の動力相関

乱流域では実験結果は単純であるが、相関の考え方は少々複雑である。まず、邪魔板無し動力数であるが、幾何形状が変化してもほぼ同じ動力数を示し、2.1 節の(1)に基づけばよいので、既存のパドル翼の相関式を使用するものとする。

次に邪魔板有りの動力数を考える。動力相関にはまずは完全邪魔板条件の動力数が必要であるので、種々の寸法の完全邪魔板条件の動力数 N_{pmax} を測定した。その結果を Figure 6 に示すが、従来のパドル翼の相関式上にプロットされ、他の大型翼のように新

たに相関する必要はなかった。2.1 節の(3)に基づく考え方で良かった。

つぎに任意の邪魔板条件の動力数の相関である。邪魔板有りのパドル翼は、円盤を持つ Rushton タービン翼とは異なり、Figure 7 に示すように、翼取り付け位置によって複雑に動力数が変動する。Fig.3 に示す網掛部の単純なパドル翼に対し、翼取り付け位置を変更して動力数を測定した結果を Figure 8 に示す。通常サイズのパドル翼よりも若干動力数の変動は小さいが、槽中央に取り付けた場合よりも小さな動力数となる。そもそも HB 翼は翼の最下部は槽底面のわずかに上方に取り付けるため(Fig.8 中の矢印で示した○のプロット)、最小の動力数をほぼ同じ値を示すと考えて良い。亀井ら(1995)は Fig. 7 の槽底付近に取り付けた最小の動力数 N_{minp} と槽中央に取り付けた最大の動力数 N_{maxp} の差の相関を試みた。その結果、次式の関係が成立するとした。

$$N_{maxp} - N_{minp} = 0.1 N_{maxp}^{1.6} \quad (1)$$

任意の邪魔板条件における HB 翼の動力数はこの関係を利用して相関してみた。すなわち HB 翼の動力数は N_{minp} に相当するとし、従来のパドル翼の相関値は N_{maxp} に相当するというものである。つまり、HB 翼の動力数を $N_p(\text{HB})$ とし、従来のパドル翼の相関値は N_p とすれば、次式で推算できるという考え方である。

$$N_p(\text{HB}) = N_p - 0.1 N_p^{1.6} \quad (2)$$

2.4 動力相関式のまとめ

以上のことから、HB 翼の動力相関式は既存の相関式が使用できるものとし、層流では大型翼の相関式を使用し、翼幅 b を全翼幅とし、乱流域では翼幅を b' とし、邪魔板有りの場合は Eq.(2) で調整可能である。それを Table 2 にまとめておく。層流と乱流の区別は大型翼の相関式の邪魔板なしの動力数がパドルの相関式の邪魔板なしの動力数を下回る領域で分ければ良い。

Table 2 Correlation of HB impeller

$$N_{P0} = \{[1.2\pi^4\beta^2]/[8d^3(D^2H)]\}f$$

$$f = C_L/Re_G + C_t\{[(C_w/Re_G) + Re_G]^{-1} + (f_{\infty}/C_t)^{1/m}\}^m$$

$$Re_d = nd^2\rho/\mu$$

$$Re_G = \{[\pi\eta\ln(D/d)]/(4d/\beta D)\}Re_d$$

$$C_L = 0.215\eta_p(d/H)[1-(d/D)^2] + 1.83(b/H)(\eta_p/2)^{1.3}$$

$$m = [(0.71X^{0.373})^{-7.8} + (0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8}$$

$$f_{\infty} = 0.0151(d/D) C_t^{0.308}$$

$$X = \eta_p^{0.7}b/H$$

$$\beta = 2\ln(D/d)[(D/d)-(d/D)]$$

$$\gamma = [\eta\ln(D/d)/(\beta D/d)^2]^{1/3}$$

$$\eta = 0.711\{0.157 + [\eta_p\ln(D/d)]^{0.611}\}/\{\eta_p^{0.52}[1-(d/D)^2]\}$$

(1) Laminar region

$$b = b \text{ (in Fig.1)}$$

Unbaffled condition

$$C_t = [(1.1X^{2.5})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8}$$

$$C_{tr} = 1000(d/D)^{-3.24}(b/D)^{-1.18}X^{0.74}$$

(2) Turbulent region

$$b = b' \text{ (in Fig.1)}$$

Unbaffled condition

$$C_t = [(1.96X^{1.19})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8}$$

$$C_{tr} = 23.8(d/D)^{-3.24}(b/D)^{-1.18}X^{0.74}$$

Baffled condition

$$N_P = [(1+x^3)^{-1/3}]N_{Pmax}$$

$$x = 4.5(B_w/D)\eta_B^{0.8}(H/D)N_{Pmax}^{0.2} + N_{P0}/N_{Pmax}$$

$$N_p(\text{HB}) = N_p - 0.1 N_p^{1.6}$$

Fully Baffled condition

$$N_{Pmax} = 13.5(b/d)$$

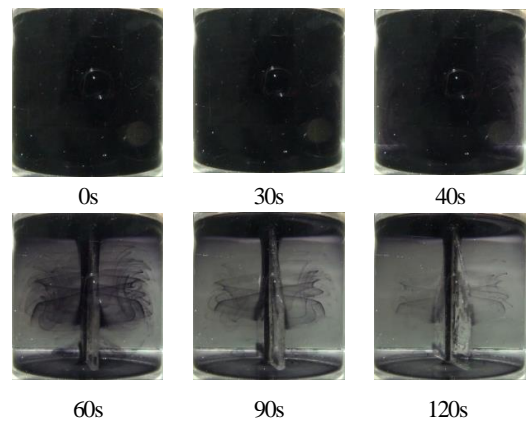


Fig.9 Mixing process at $Re = 50$

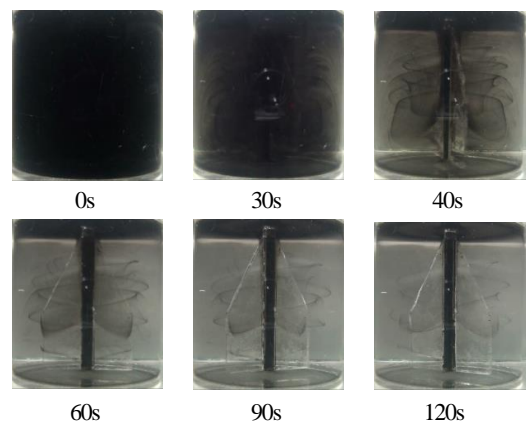


Fig.10 Mixing process at $Re = 100$

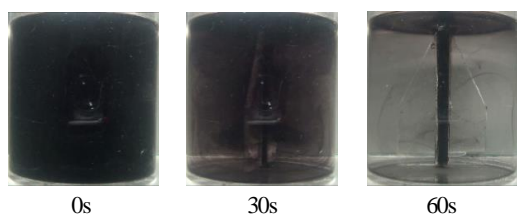


Fig.11 Mixing process at $Re = 200$

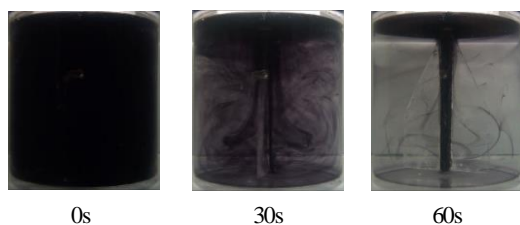


Fig.12 Mixing process at $Re = 300$

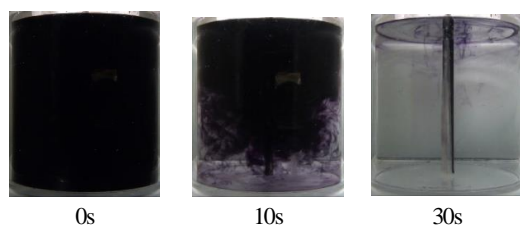


Fig.13 Mixing process at $Re = 3500$

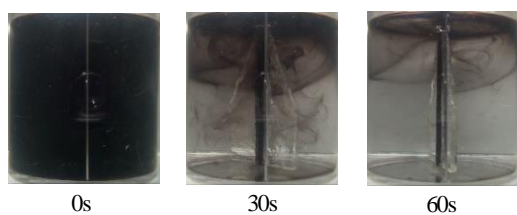


Fig.14 Mixing process at $Re = 200$ with baffle

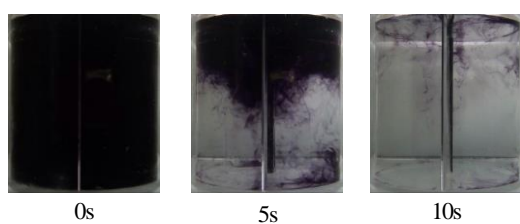


Fig.15 Mixing process at $Re = 3500$ with baffle

2.5 HB翼の混合特性

次に混合時間を脱色法で測定した。流脈が短時間で槽内に広がるといっても、従来の方法で混合過程を確認しておく必要がある。邪魔板なし条件での結果を Figures 9~13 に示す。幅広いレイノルズ数(50~3500)において槽全域において脱色反応が進行し、致命的な混合不良も観察されなかった。次に、 $B_w/D = 0.1$ の邪魔板を2枚設置した条件の脱色結果を Figures 14 and 15 に示す。Fig.14 に示すように遷移域の攪拌レイノルズ数 200 では、Fig.11 の邪魔板なしと比較すると槽上部に縞状の混合が遅れる箇所が

観察された。これは一般的なパドル翼でも観察される状況でドーナツリングのような孤立混合領域とは異なるので大きな問題ではない。しかし、Fig.4 の動力線図を見ると、邪魔板の有り無しの動力線図が邪魔板無しの動力と比較して差が付き始める交点に近い部分であるので、攪拌レイノルズ数 1000 未満領域では邪魔板は使用しない方が良いと考えられる。一方、攪拌レイノルズ数 3500 の乱流域ではFig.15 に示すように邪魔板なし条件よりも早く混合が完了した。この条件では動力数にも差が明確に現れているので邪魔板の設置は混合に有効であると考えられる。

結 論

ホームベース型の攪拌翼(HB翼)の動力特性と混合特性を実験的に検討した。動力相関は翼幅の代表長さを層流域と乱流域で使い分けることにより動力相関が可能になった。混合時間も従来の大型翼と同等のレベルであった。

これにより3Sの性能、つまり、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、をもつHB翼の実用化に向けて有効なデータがそろったと考えられる。

Nomenclature

b	= height of impeller blade	[m]
B_w	= baffle width	[m]
C	= clearance between bottom and impeller	[m]
D	= vessel diameter	[m]
d	= impeller diameter	[m]
H	= liquid depth	[m]
N_p	= power number ($=P/\rho n^3 d^5$)	[-]
N_{p0}	= power number at unbaffled condition	[-]
N_{pmax}	= power number at fully baffled condition	[-]
N_{pmaxp}	= maximum power number at $CH=0.5$	[-]
N_{pminp}	= minimum power number at $CH \approx 0.25$	[-]
n	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]
n_B	= number of baffle plate	[-]
n_p	= number of impeller blade	[-]
P	= power consumption	[W]
Re_d	= impeller Reynolds number ($=nd^2\rho/\mu$)	[-]
T	= shaft torque	[N · m]
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)
- Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, H. Ishizuka, K. Iwata, Y. S. Lee, T. Yamaguchi and S. T. Koh; "Effects of Impeller Dimensions and Position on Power Consumption in a Baffled Agitated Vessel," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 696—702 (1995)
- Kato, Y., S. Hiraoka, N. Kamei and Y. Tada; "Importance of Power Consumption in Design and Operation of Mixing Vessels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **35**, 211-215(2009)
- Kato, Y., Y. Inoue, M. Hiramatsu and S. Ohtani; "Mixing Mechanism of Large Paddle Impeller Based on Streak Line Observation," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 11-15(2015a)
- Kato, Y., M. Hiramatsu, S. Ohtani, M. Yoshida and K. Shiobara; "Development of New Large Paddle (HB Type) Impeller Based on Streak Line Observation," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 16-20(2015b)

Characteristics of Power Consumption and Mixing Time of New Large Paddle (HB Type) Impeller

Yoshihito KATO⁺⁺, Shota OHTANI and Haruki FURUKAWA

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

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

Keyword: Mixing, Agitation, Power Consumption, New Type Impeller, Correlation

A new home base (HB) type impeller with 3S performance (simple, speedy and stable) was developed based on the streak line visualization method (Kato *et al.*, 2015b). The characteristics of mixing performance and power consumption were evaluated with a view to practical use in industrial processes. It was found that the power number could be estimated by the correlation formula for a paddle impeller by taking into consideration the impeller position. No isolated mixing region of doughnut-ring form was observed in the mixing vessel with HB impeller over a wide range of Reynolds number by using decolorization method.