

多目的変形合体多段翼(AM翼)の新規開発

高橋理輝¹・松岡杏奈¹・古川陽輝¹・加藤禎人¹⁺⁺・朝山真輔²・森川議博²・高承台³

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

2 日本ソセー工業(株), 457-0068 名古屋市南区南野1-99

3 韓国東洋大学校 生命化学工学科, 750-711 韓国慶北榮州市豊基邑校村洞1

キーワード: 混合, 攪拌, 新型翼, 高粘度流体

高粘度流体の層流域の混合性能は、攪拌翼の幾何形状に大きく影響される。攪拌槽内に軸流を発生させることが、攪拌レイノルズ数が10以下の層流では最も重要である。軸流を発生させる最も一般的な攪拌翼はヘリカルリボン翼であるが、複雑な幾何形状のため生産コストが高い。そこで、筆者らはいくつかの単純な傾斜パドル翼を組み合わせることにより、生産コストが安価な新しいタイプの攪拌翼を開発した。新型翼はヘリカルリボン翼と同等の混合性能を持っていた。

緒 言

高粘度流体の混合は層流場になるので困難である。また、槽径に対し大型の攪拌翼が必要となるので、低粘度翼と比較して高トルクとなり、機械的強度も必要であり、必然的に高コストになる。さらに幾何形状が単純で壁面掻き取り効果のあるアンカー翼が用いられるケースが多いが、**Figure 1**に示すように多くの未混合領域が発生するため、混合はヘリカルリボン翼などに比して格段に劣っている(Furukawa *et al.*, 2013; Nagata *et al.*, 1957)。一方、大型2枚パドル翼は幅広いレイノルズ数 Re で使用可能であるが、 $Re < 50$ になるとヘリカルリボン翼より若干性能が低く(Furukawa *et al.*, 2013)、また、降伏応力を持つ流体では壁面近傍が混合不良となる。近年、佐竹マルチミクス株式会社のスーパーミックス LR500 はヘリカルリボン翼よりも混合性能が優れ、液面変化にも対応可能なことが見いだされた(Kato *et al.*, 2018)。さらに中心軸や指示棒の有無が、混合性能に影響することが判明した(Kato *et al.*, 2018)。

筆者らは攪拌翼開発の新たな着眼点として低コスト化に着目し、単純な幾何形状で製作が容易な高粘度用攪拌翼の開発を試みた。そこで、幾何形状として多くの高粘度用攪拌翼が有していた曲面をできるだけ排除すべく、単純なパーツの組み合わせを考え

た。ただし、パドル翼の単純な多段化は **Figure 2** に示すように多数のドーナツリング状未混合領域が発生するため得策ではない。そこで、**Figure 3** に示すような傾斜パドルのパーツ(傾斜角は可変)を考案し、これを組み合わせることを考えた。これにより、**Figure 4** に示すようなアンカー翼、ヘリカルリボン翼、スーパーミックス LR500、左右非対称翼など、パーツの変形(傾斜角の変化)および合体翼の多段化)させることにより、いろいろな攪拌翼に進化できる攪拌翼を考案した。ユーザーの任意の組み合わせで進化できる攪拌翼ということで Advanced Mixing impeller すなわち AM 翼と名付け、いろいろな形態(モード)での混合性能を評価



Fig. 1 Unmixed region of anchor impeller at $Re = 6$

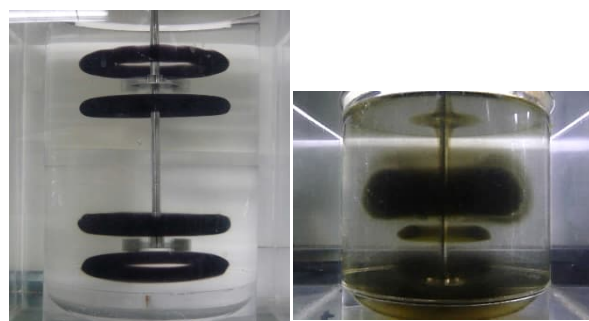


Fig. 2 Unmixed region of multistage turbine impeller at $Re = 25$

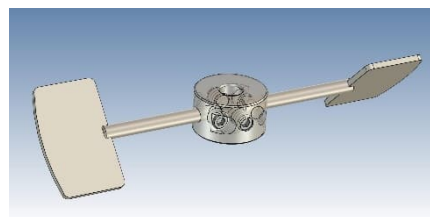


Fig. 3 A part of Advanced Mixing impeller

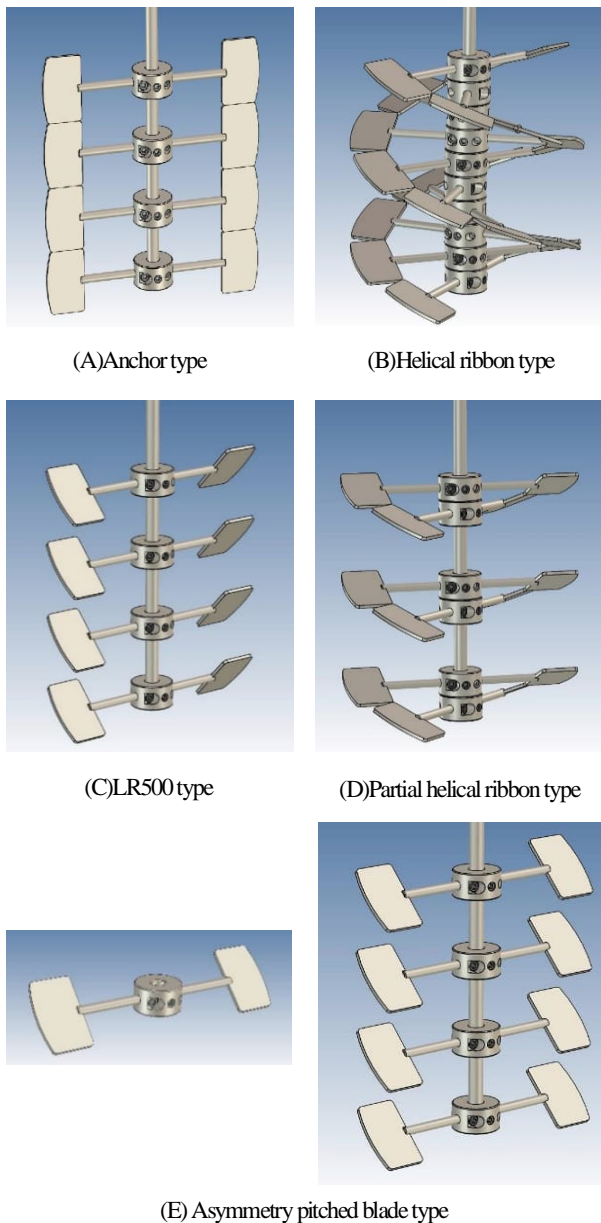


Fig. 4 Examples of Advanced Mixing impeller

したのでここに報告する。

1. 実験装置および方法

1.1 実験方法

Figure 5 に実験装置概略図を示す。攪拌槽には、槽径 $D=0.15\text{m}$ のアクリル樹脂製平底円筒槽を用い、液高さ H と槽径の比 H/D は 1.0 とした。 $Re=0.60, 10$ で実験を行い、水あめ水溶液の濃度を調整することで Re を調整した。各 Re で使用した水あめ水溶液の密度 ρ はそれぞれ 1400 および 1365kg/m^3 、粘度 μ は 8.3 および $14\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、回転数はそれぞれ 10rpm および 30rpm である。

AM 翼の最適形状を検討するために、様々な形状の組み合わせを考え、傾斜パドルのパーツの個数、動力、混合時間の観点から

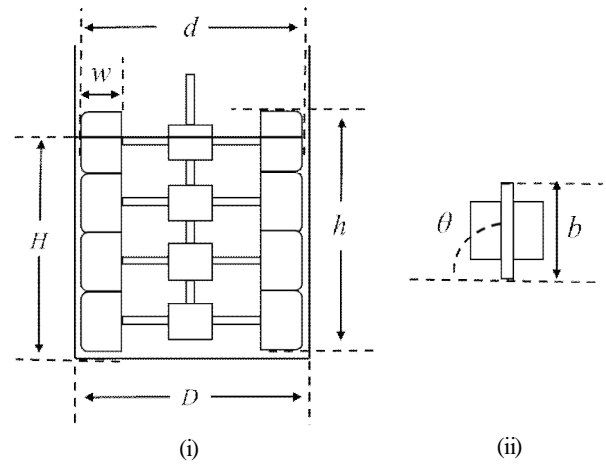


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

(i) Mixing vessel (ii) Side view of a part of AM impeller

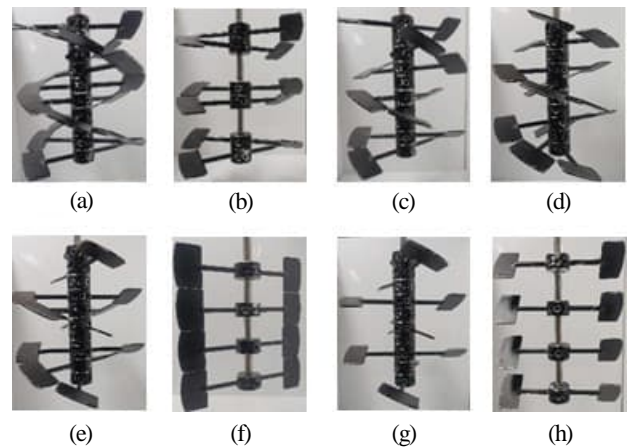


Fig. 6 Variations of Advanced Mixing impeller

AM 翼の混合性能を評価した。検討した AM 翼の形状については、後述する。

混合性能は、混合時間 t_m [s] と翼回転数 n [s^{-1}] の積である無次元混合時間 $n \cdot t_m$ [-] の測定と流脈パターンの観察により評価した。混合時間 t_m [s] の測定および混合過程の観察には、最も一般的なヨウ素 - ヨウ化カリウム水溶液とチオ硫酸ナトリウムを用いた脱色法 (Carreau *et al.*, 1976) を使用した(脱色剤は液面から投入)。層流攪拌の混合性能評価に非常に重要である流脈の可視化には、着色液としてヨウ素溶液を用い、ヨウ素でんぷん反応により着色する方法(Kato *et al.*, 2015b)を使用した。また、攪拌所要動力 P は SATAKE ST-3000 II でトルク T を測定してからその平均トルクを用いて、 $P=2\pi nT$ で求めた(Kato *et al.*, 2010)。

1.2 比較検討した AM 翼の形状

単純な傾斜パドルの変形・合体により、Figure 6 に示した(a)~(h) および(h)の形状において傾斜パドルの個数を 3~10 段まで変化させた計 15 種類の形状を考えた。それらの形状は、(a)~(e)のよう

なヘリカルリボン型, (f)のアンカー型, (g), (h)のような傾斜パドル翼を多段化した多段傾斜パドル型に分けることができる。

傾斜パドルのパーツ(Fig. 3)の詳しい幾何形状は最大翼径 $d = 0.145 \text{ m}$, 最大羽根幅 $w = 0.025 \text{ m}$, 羽根高さ $b = 0.04 \text{ m}$ である。従って, AM翼の翼径は全ての形状で $d = 0.145 \text{ m}$ である。また, 翼高さ h は, (a)~(d)は $h = 0.150 \text{ m}$, (e), (g)は $h = 0.135 \text{ m}$, (f)は $h = 0.160 \text{ m}$, (h)は $h = 0.165 \text{ m}$ である。以下に, 各AM翼の形状 (a)~(h) についての詳細を示す。

(a) ヘリカルリボン型

ヘリカルリボン翼に似せた形状である。AM翼の傾斜パドルのパーツを, 羽根の傾斜角 $\theta = 22^\circ$ とし, 螺旋状につながるように組み立て, 槽壁部でアップフローとなるようにした。傾斜パドルのパーツは10個使用した。

(b) ヘリカルリボン型から傾斜パドルのパーツを4個抜いた形状

(a) ヘリカルリボン型から, 2段ごとに傾斜パドルのパーツを2個取り除き, 断続的なヘリカルリボン翼を連想させる, 部分ヘリカルリボン型とした。傾斜パドルのパーツは6個使用した。

(c) ヘリカルリボン型から羽根を2段ごとに1枚抜いた形状

(a) ヘリカルリボン型から, 2段ごとに傾斜パドルのパーツの羽根を1枚抜いた形状である。傾斜パドルのパーツは7個使用した。

(d) ヘリカルリボン型から羽根を2枚抜いた形状

(a) ヘリカルリボン型から, 槽底から4, 8段目の傾斜パドルのパーツの羽根を抜いた形状である。傾斜パドルのパーツは8個使用した。

(e) ヘリカルリボン型から羽根を3枚抜いた形状

(a) ヘリカルリボン型から, 槽底から4, 8, 10段目の傾斜パドルのパーツの羽根を抜いた形状である。傾斜パドルのパーツは7個使用した。

(f) アンカー型

アンカー翼に似せた形状である。AM翼の傾斜パドルのパーツを, 羽根の傾斜角 $\theta = 90^\circ$ とし, 羽根がつながるように組み立てた。傾斜パドルのパーツは4個使用した。

(g) ヘリカルリボン型から羽根を一枚おきに一枚抜いた形状

(a) ヘリカルリボン型から, 1段ごとに羽根を取り除き, 傾斜パドルのパーツを一定間隔ごとに多段化した形状である。傾斜パドルのパーツは5個使用した。

(h) 多段傾斜パドル型

LR500に似せた形状で, AM翼の傾斜パドルのパーツを, 羽根の傾斜角 $\theta = 45^\circ$ とし, 槽壁部でアップフローになるように組み

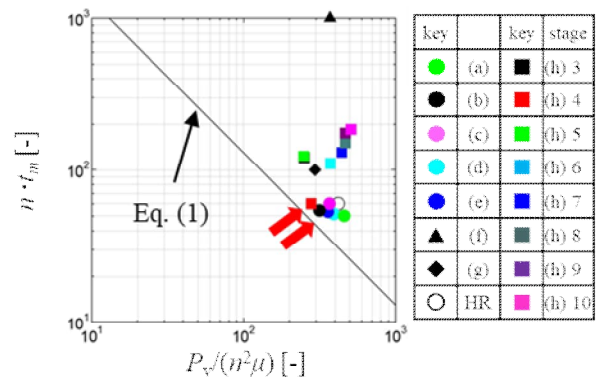


Fig. 7 Effect of $P_v/(n^2 \mu)$ on dimensionless mixing time at $Re = 0.60$

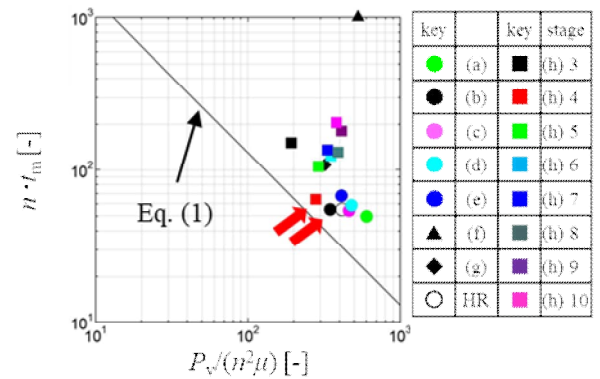


Fig. 8 Effect of $P_v/(n^2 \mu)$ on dimensionless mixing time at $Re = 10$

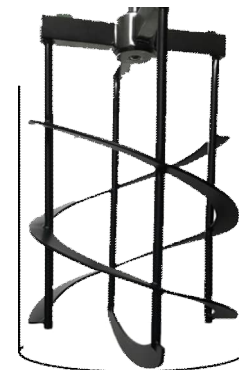


Fig. 9 Helical ribbon impeller without shaft and support rod

立てた。Fig. 6 (h)は, 4段の場合を示している。傾斜パドルのパーツを3~10個使用し, 3~10段に多段化した。翼高さ h が $h = 0.165 \text{ m}$ になるように, 等間隔に傾斜パドルのパーツを配置した。

2. 実験結果と考察

2.1 各翼の攪拌所要動力を考慮した混合性能の比較

AM翼(a)~(g)の形状とAM翼(h)を3~10段まで多段化した形状の計15種類に対して, 脱色実験により混合性能を評価した。混合性能の評価には, 単位体積当たりの攪拌所要動力と混合時間を考慮することが一般的である。そのため, 層流域で一般的に性能比較のために用いられる相関式 Eq. (1) (Mizushima *et al.*, 1970 ;

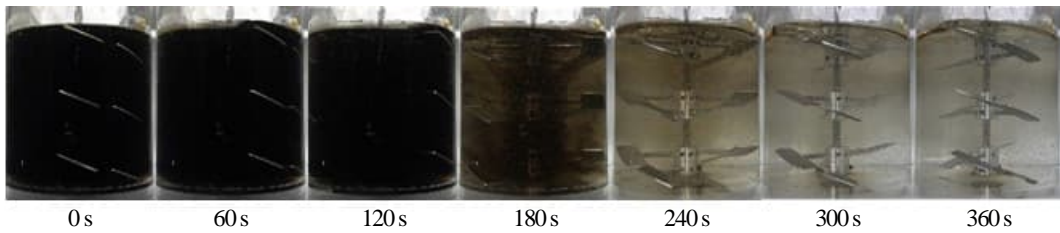


Fig. 10 Mixing process and mixing time of partial helical ribbon type at $Re = 0.60$

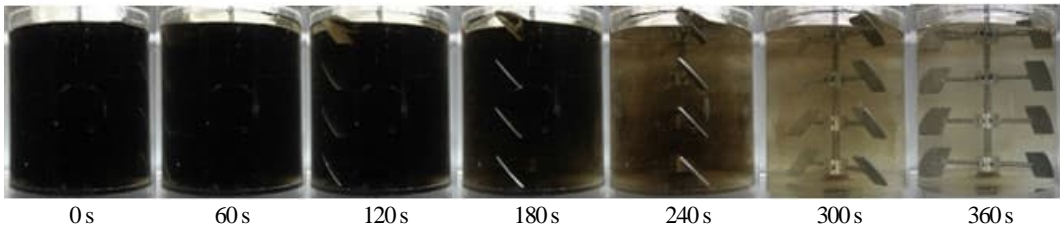


Fig. 11 Mixing process and mixing time of multiple pitched blade impellers type (4 stages) at $Re = 0.60$

Kagaku Kougakukyokai, 1984)に基づいて、混合性能を評価する。**Figures 7 and 8** に AM 翼の各形状について、 $Re = 0.60$, 10 での $P_v / (n^2 \mu)$ に対する $n \cdot t_m$ を示した。比較対象として、Fig. 9 に示す軸なし指示棒なしヘリカルリボン翼の結果を示した。ここで、横軸は、 $(d^3 / D^2 H) N_p Re$ を整理して、より直感的に理解できる単位体積当たりの動力を用いた $(4/\pi) P_v / (n^2 \mu)$ に変換している。

$$1/(n \cdot t_m) = (9.8 \times 10^5) (d^3 / D^2 H) N_p Re \quad (1)$$

なお、Eq. (1) 中の (9.8×10^5) は $1/13000 \cdot (4/\pi)$ から算出される。

Figs. 7 and 8 より、部分ヘリカルリボン型 (b) ● と多段傾斜パドル型 (h) 4 段 ■ が、Eq. (1) の直線に最も近く (図中に赤い矢印で明示)、混合性能が良いことがわかる。

Eq. (1) は高粘度流体においてあくまでも混合性能が安定している翼について平均的に目安として成立する式である。つまり、 $n \cdot t_m = \text{一定}$ が成立する性能を持つ翼に対してのものである。したがって、混合性能の安定しないアンカー型 (f) や多段傾斜パドル型 (g)、多段傾斜パドル型 (h) 3 段および 5~10 段の翼に対しては Figs. 7 and 8 でデータのばらつきが大きい。ある程度性能が安定している部分ヘリカルリボン型 (b) や多段傾斜パドル型 (h) 4 段のデータは Re によらず安定した混合時間を示している。このことも鑑みてヘリカルリボン翼や Eq. (1) に近いところにデータが存在する部分ヘリカルリボン型 (b) や多段傾斜パドル型 (h) 4 段は比較的混合性能が良い翼と判断した。

よって、検討した計 15 種類の AM 翼の形状の中で、部分ヘリカルリボン型 (b) と多段傾斜パドル型 (h) 4 段が、攪拌所要動力を考慮した混合性能、および使用している AM 翼の傾斜パドルのパーツの個数 (コストに反映) から、AM 翼の最適形状であると考



Fig. 12 Streak line of partial helical ribbon type at $Re = 0.60$



Fig. 13 Streak line of multiple pitched blade impellers type (4 stages) at $Re = 0.60$



Fig. 14 Streak line of helical ribbon impeller with axis at $Re = 0.60$

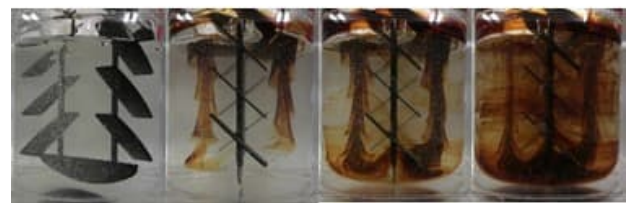


Fig. 15 Streak line of LR500 at $Re = 0.60$

える。

2.2 混合状態の可視化

前項で部分ヘリカルリボン型 (b) および多段傾斜パドル型 (h) 4 段 が今回検討した AM 翼のうち最適形状であることが見出された。Figures 10 and 11 に $Re=0.60$ における部分ヘリカルリボン型 (b) と多段傾斜パドル型 (h) 4 段 の混合過程を示す。部分ヘリカルリボン型 (b)、多段傾斜パドル型 (h) 4 段 は、どちらも槽全域において脱色反応が進行し、問題となるような混合不良部も観察されなかった。

次に、他の形状と比較して、なぜ、部分ヘリカルリボン型 (b) と多段傾斜パドル型 (h) 4 段 の混合性能が高いかについて検討するために、流脈の可視化をヨウ素着色法で試みた。通常、流脈の可視化には翼先端からトレーサーを吐出し続けるが、本翼は金属製であるためトレーサーを吐出することができない。そのため、層流攪拌における流脈はどの位置からトレーサーを吐出しても同じ形になることに着目し、液面の槽壁からトレーサーであるヨウ素溶液を投入した(Kato, 2015a)。Figures 12 and 13 に $Re = 0.60$ における部分ヘリカルリボン型 (b) と多段傾斜パドル型 (h) 4 段 の流脈パターンの経時変化を示す。部分ヘリカルリボン型 (b) では、液面から槽底にかけて軸にまとわりつくような下降流が発生しており、槽壁付近で上昇流が発生している。これは Figure 14 に示した軸ありヘリカルリボン翼の流脈パターンに類似している。しかし、部分ヘリカルリボン型の下降流は、軸ありヘリカルリボン翼に比べて軸から広がりを持っており、軸方向だけでなく、半径方向へも同時に広がっていることがわかる。このため、部分ヘリカルリボン型 (b) は、ヘリカルリボン翼では混合に不利とされてきた中心軸があるにも関わらず、高い混合性能が得られたと考えられる。また、多段傾斜パドル型 (h) 4 段 では、液面から槽底にかけて2つの円柱状の下降流が形成され、槽壁付近で上昇流が発生している。これにより、上下循環流が発生している。多段傾斜パドル型 (h) 4 段は、Figure 15 に示した LR500 と類似した流脈パターンを持つため、混合性能が高かったと考えられる。

2.3 攪拌所要動力

動力相関は、攪拌翼の設計において非常に重要である。高粘度流体の混合に主に適応されるヘリカルリボン翼とアンカー翼の動力相関式は亀井ら(Kamei *et al.*, 1994)によって提案された。部分ヘリカルリボン型 (b) や多段傾斜パドル型 (h) 4 段において、既存の相関式を用いて相関可能であるかを検証した。

部分ヘリカルリボン型 (b) は、ヘリカルリボン型 (a)から部分的に傾斜パドルのパーツを取り除き断続的なヘリカルリボン翼

$NpRe$

$$= 8n_p + 75.9z(n_p/\sin \alpha)^{0.85}(h/d)[0.157 + \{(n_p/\sin \alpha)\ln(D/d)\}^{0.611}] \quad (2)$$

$$z = 0.759[(n_p/\sin \alpha)\ln\{d/(d-2w)\}]^{0.139} + \{(n_p/\sin \alpha)\ln(D/d)\}^{0.182}n_p^{0.17}$$

$$\sin \alpha = \{1 + (\pi d/s)^2\}^{-0.5}$$

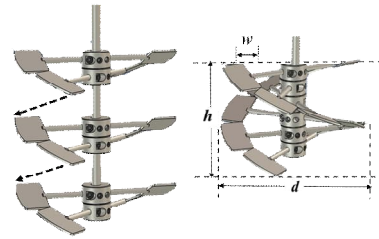


Fig. 16 AM impeller (type b)

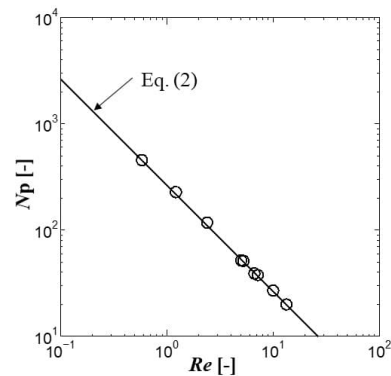


Fig. 17 Power diagram of AM impeller (type b)

$$NpRe = 8n_p + 75.9z n_p^{0.85}(h/d)[0.157 + \{(n_p/\sin \alpha)\ln(D/d)\}^{0.611}] \quad (3)$$

$$z = w/h + 0.684[n_p \ln\{d/(d-2w)\}]^{0.139}$$

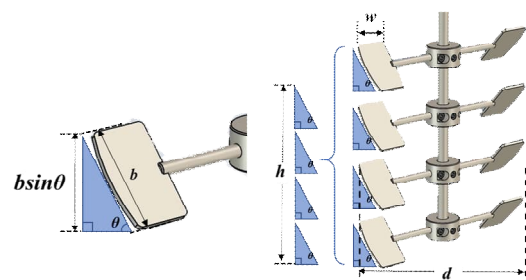


Fig. 18 AM impeller (type h) 4 stages

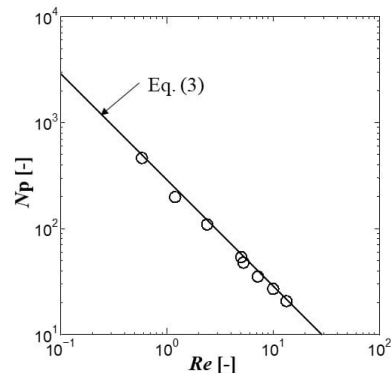


Fig. 19 Power diagram of AM impeller (Pitched paddle type)

とした翼であるため、ヘリカルリボン翼の動力相関式 Eq. (2) を用いて相関可能であるかを検証した。Eq. (2) の各パラメータを **Figure 16** に示す。部分ヘリカルリボン型 (b) は、翼高さ h に対して、断続的に配置されている翼を Fig. 15 の右図のようにヘリカルリボン状に接続した場合の翼高さを h とすることで相関可能であることがわかった。**Figure 17** に部分ヘリカルリボン型 (b) の動力線図を示す。実線 Eq. (2) と実測値のプロットが一致していることからこの方法で相関可能であると判断した。

多段傾斜パドル型 (h) 4 段は、LR500 に似せた形状であり、LR500 はアンカー翼の相関式を用いて相関可能であること (Kato et al., 2018) から、アンカー翼の動力相関式 Eq. (3) を用いて相関可能であるかを検証した。Eq. (3) の各パラメータを **Figure 18** に示す。多段傾斜パドル型 (h) 4 段は、翼高さ h を傾斜パドルのパーツの投影面積の高さを段数分足し合わせた $b \sin \theta \times$ 段数とすることで相関可能であることがわかった。**Figure 19** に多段傾斜パドル型 (h) 4 段の動力線図を示す。実線 Eq. (3) と実測値のプロットが一致していることからこの方法で相関可能であると判断した。

結 言

ヘリカルリボン翼に代表される幾何形状が複雑で生産コストが高い高粘度流体用攪拌翼の低コスト化を狙い、単純な幾何形状の 2 枚羽根傾斜パドル翼の組み合わせで同程度の混合性能を持つ AM 翼を開発した。動力と混合時間を基準にした最適形状と考えられる AM 翼は、不連続なヘリカルリボン翼に似た形状と LR500 に似た形状の翼であることが分かった。

Nomenclature

b	= height of impeller blade	[m]
D	= vessel diameter	[m]
d	= impeller diameter	[m]
H	= liquid depth	[m]
h	= height of impeller	[m]
n	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]
n_p	= number of impeller blade	[-]
N_p	= power number ($= P / \rho n^3 d^5$)	[-]
$n \cdot t_m$	= dimensionless mixing time	[-]
P	= power consumption	[W]
P_v	= power consumption per unit volume	[W·m ⁻³]
Re	= impeller Reynolds number ($= nd^2 \rho / \mu$)	[-]
T	= shaft torque	[N·m]

s	= pitch of helical ribbon blade	[-]
t_m	= mixing time	[s]
w	= width of impeller blade	[m]
θ	= impeller angle	[-]
μ	= liquid viscosity	[Pa·s]
ρ	= liquid density	[kg·m ⁻³]

Literature Cited

- Carreau, P. J., I. Patterson and C. Y. Yap; "Mixing of Viscoelastic Fluids with Helical - Ribbon Agitators I - Mixing Time and Flow Patterns," *Can. J. Chem. Eng.*, **54**, 135-142 (1976)
- Furukawa, H., Y. 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)
- Kagaku Kougakukyokai ed.; Chemical Engineering - explanation and examination - (in Japanese), p.238, Makisyoten, Tokyo, Japan (1984)
- Kato, Y.; Computational and experimental methods for the operation and design of Mixing Vessels, revised and enlarged edition (in Japanese), p.188, Johokiko Co., Ltd., Tokyo, Japan (2015a)
- 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 (2015b)
- Kato, Y., T. Nemoto, K. Ago, T. Arai, H. Furukawa and Y. Kato; "Mixing Performance of LR500 Impeller for Highly Viscous Fluid," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **44**, 346-349 (2018)
- Kato, Y., Y. Tada, K. Urano, A., Nakaoka and Y. Nagatu; "Differences in Mixing Power Consumption between Dished-Bottom and Flat-Bottom Vessels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **36**, 25-29 (2010)
- Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, S. Kuwabara, Y. S. Lee, T. Yamaguchi and S. T. Koh; "Development of Power Correlations for Various Impellers in an Agitated Vessel in Laminar Region Based on a Numerical Analysis of 2-D flow," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **20**, 595-603 (1994)
- Mizushima, T., R. Ito, S. Hiraoka and J. Watanabe; "Uniformalization of Temperature Field in Agitated Reactor," *Kagaku Kogaku*, **34**, 1205-1212 (1970)
- Nagata, S., M. Yanagimoto and Y. Yokoyama; "A Study on the Mixing of High-viscosity Liquid," *Kagaku Kogaku*, **21**, 278-286 (1957)

Development of New Multipurpose Transformable Multiple Impeller (Advanced Mixing Impeller) for Highly Viscous Fluids

Riki TAKAHASHI¹, Anna MATSTOKA¹, Haruki FURUKAWA¹, Yoshihito KATO¹⁺⁺,
Shinsuke ASAYAMA², Norihiro MORIKAWA² and Seung-Tae KOH³

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

2 Nippon Sosey Kogyo Co., Ltd., 1-99 Minamino, Minami-ku, Nagoya-shi, Aichi, 457-0068, Japan

3 Department of Bio-Chemical Engineering, Dongyang University, 1 Kyochon, Punggi, Yeongju, Kyungbuk 750-711, Korea

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

Keyword: Mixing, Agitation, New Impeller, Highly Viscous Fluid

Laminar mixing performance of high viscous fluid is influenced by the shape of the mixing impeller. The axial flow in the mixing vessel was the most important flow under the laminar that Reynolds number was less than 10. The most popular impeller which generates the axial flow is a helical ribbon impeller, but the production cost is high because of the complicated shape. By combining of some simple pitched blade impellers, authors developed a new type impeller that the production cost is lower than that of the helical ribbon impeller. As a result, the new impeller had the same mixing performance as a helical ribbon impeller.