

高粘度用攪拌翼LR500の混合性能

加藤好一¹・根本孝宏¹・吾郷健一¹・荒井拓也²・古川陽輝²・加藤禎人²⁺⁺

¹佐竹化学機械工業 (株), 335-0021 埼玉県戸田市新曽60

²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

キーワード: 混合, 攪拌, 高粘度, 新型翼, 液深

高粘度流体の混合に適した製造の容易な攪拌翼LR500を開発し, その性能を評価した. LR500は, 高粘度流体混合に標準的に使用されるヘリカルリボンと同等の無次元混合時間を示し, さらに, ヘリカルリボンよりあらゆる液深の変化に対応し, 安定な混合性能を示した. また, ヘリカルリボンについては, シャフトにリボン部を固定する支持棒のある箇所に液深を設定した場合, ドーナツリング状混合不良部を形成し, 短時間の混合完了は不可能であることを示した.

緒 言

高粘度流体の円筒槽でのバッチ式混合操作に最も一般的に使用されている攪拌翼はヘリカルリボンである. ヘリカルリボンの混合性能に関する研究は古くから行われている (Brito *et al.*, 1997, Carreau *et al.*, 1976, Saito and Kamiwano, 1989, Saito *et al.*, 1990, Takahashi *et al.*, 1988, 1994). アンカー翼も高粘度流体の攪拌翼として一般的に知られているが槽壁の掻き取り効果は高いもののニュートン流体の混合という点に関しては上下の循環流が弱いためにヘリカルリボンに遠く及ばない. 大型2枚パドル翼も攪拌レイノルズ数が10以下の完全層流域ではドーナツリングが発生し, 混合性能が良くない. その一方で, ヘリカルリボンは, 軸中心部に構造体を有しており, 流動作用面から改善の余地があり, また, らせん状のブレードを非連続とした多段翼とすることで流動作用の向上が期待できた. そこで, 佐竹化学機械工業株式会社はこれらの欠点をカバーする高粘度翼LR500を平成6年に開発

した. Figure 1にLR500の形状を示す. 槽壁の掻き取りおよび上下の循環流を生じさせることを目的とした傾斜板を4枚ずつ, 左右の支柱に設置し, 槽底部には皿底を掻き取るためにほぼ槽底全体をカバーする楕円状の板を設置した構造になっている. 左右4枚ずつの傾斜板は幅の広い漸続的なヘリカルリボンを連想させる構造となっている.

本報ではLR500の混合性能を, 実験的に従来のヘリカルリボンと比較検討し, 優れた特性を持つことを見出したのでここに報告する.

1. 実験装置および方法

攪拌槽は内径150mmの亚克力樹脂製10%皿底円筒槽である. LR500の最大翼径は145mm, 翼高さは200mmである. また, 片側に4枚設置されている傾斜板の長さは72mm, 最大幅は35mm, 傾斜角は45度で, 槽壁側でアップフローになるように操作した. ヘリカルリボンの翼径は145mm, 翼高さは165mmである. 高粘度のニュートン流体の模擬液として, 種々の粘度に調整した水飴水溶液を用いた. 液高さと槽径の比 H/D は0.3~1.3まで種々の高さに設定して細かく検討した. 物性および攪拌レイノルズ数などの諸条件をTable 1に示した.

攪拌翼の設計に欠かすことのできない攪拌所要動力はトルク

Table 1 Experimental conditions

	$Re[-]$	$\mu[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$M[\text{s}^{-1}]$
(a)	10	1.9	0.667
(b)	5	4.1	0.7
(c)	1	7.8	0.267
(d)	0.1	28	0.183

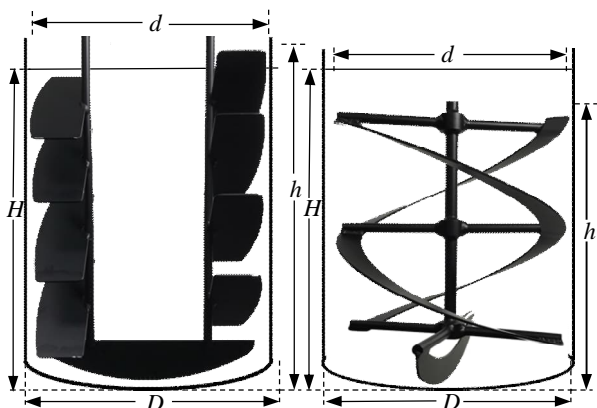


Fig.1 Photograph of LR500 impeller and helical ribbon impeller

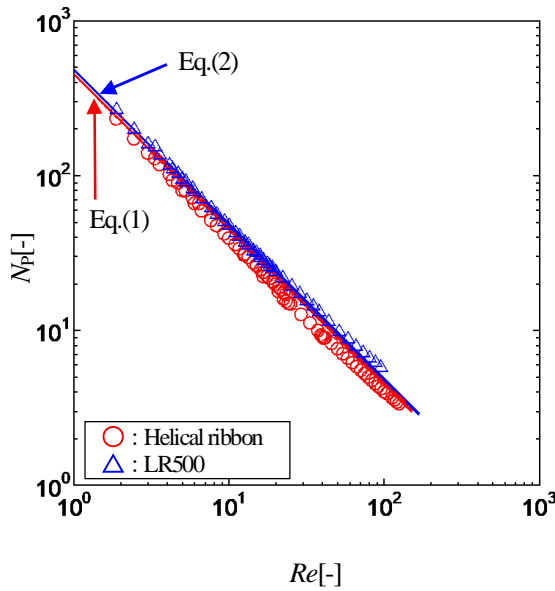


Fig.2 Power diagram of LR500 and helical ribbon

メーターSATAKE ST-3000でトルク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。

混合性能は、無次元混合時間と流脈パターンの観察により評価した。混合時間の測定および混合過程の観察には最も一般的なヨウ素とチオ硫酸ナトリウム水溶液を用いた脱色法を使用した。層流攪拌の性能評価に欠かせない流脈の可視化はウラニン蛍光法を使用した。

2. 実験結果と考察

2.1 攪拌所要動力

Figure 2にLR500の動力線図をヘリカルリボンと比較して示す。本翼は層流で使用されるべき攪拌翼なので層流部のみの動力線図を示した。若干のずれはあるもののヘリカルリボンのデータは過去に著者らが報告したEq.(1) (Kamei *et al.*,1994)に一致していることから、データの妥当性は担保され、また、LR500のデータはアンカー翼の式Eq.(2) (Kamei *et al.*,1994)にも一致していることから新たに相関式を構築する必要は無く、Eq.(2)が使用可能であると推察される。

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

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

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

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

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

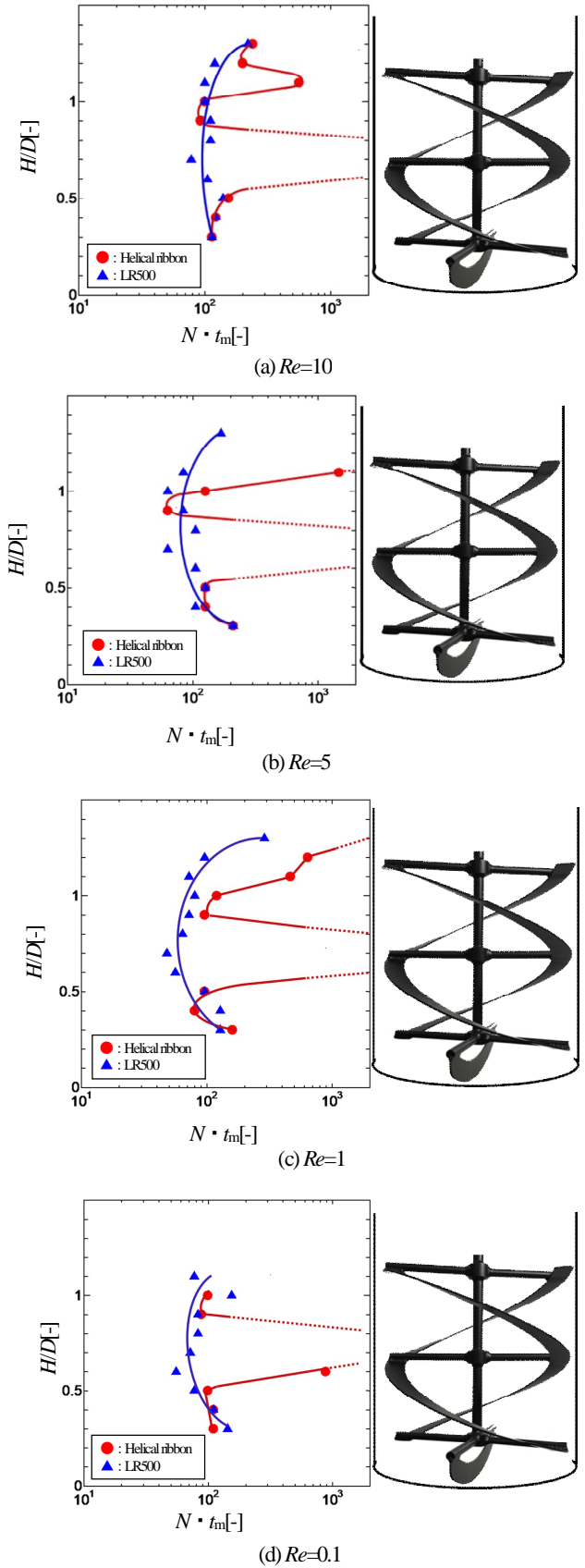


Fig.3 Effect of non-dimensional mixing time on liquid depth

2.2 混合性能

Figure 3に液架の違いによる層流域の様々な攪拌レイノルズ数における無次元混合時間の比較を示す。従来のデータのまとめ方

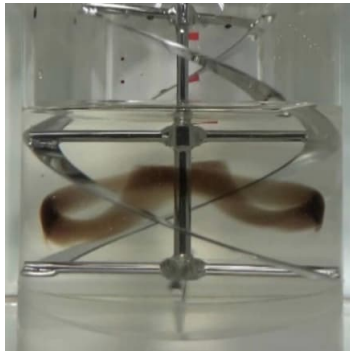


Fig.4 IMR of helical ribbon impeller

とは異なり、 $N \cdot t_m$ の測定結果を横軸に、 H/D を縦軸に示し、それぞれの翼の位置関係と一致するような図を示した。LR500 は層流域であれば攪拌レイノルズ数および液深を変化させても $N \cdot t_m$ が 100 近傍となり安定した性能を示し、ヘリカルリボンで完全混合が不可能な領域でも良好な混合性能が得られた。Figure 4 に示すように、ヘリカルリボンの混合時間が長くなるのは $H/D=0.7$ 近傍の条件では未混合領域が発生したからである。液深が中央付近で未混合領域が生成し完全混合が不可能($N \cdot t_m > 2000$)になる傾向は Takahashi *et al.* (1994) のデータと一致する。また、 $H/D=1.2$ 近傍でも無次元混合時間が増大する傾向があり、図をよく観察するとヘリカルリボンの支持棒が存在する領域でこの傾向があると考えられる。これはヘリカルリボンを使用する際は液深に大いに注意する必要があるということを示唆している。

次に、LR500 がこのように液深の変化に対し、柔軟に対応

可能かを検討するために流脈の可視化を試みた。Figures 5 and 6 に LR500 とヘリカルリボンの流脈パターンを示す。LR500



Fig.7 Top view of streak line of LR500

は循環流のでき方がまったく異なっていた。このパターンは他の Re 数でも同様の傾向だった。LR500 では Figure 7 に示すように液面から槽底にかけて 2 つの縦渦が発生し、それに沿って上下循環流が発生しているため槽中央部にドーナツリングができにくい。これはアンカー翼のそれに類似している (Jo *et al.*, 2018)。それに対してヘリカルリボンでは支持棒と支持棒の中間部に渦が発生するために特定の液深ではドーナツリングが出来やすい循環流となっていることが判明した。

結 論

LR500 は液深の変化に柔軟に対応でき、高粘度流体の混合に対し、ヘリカルリボンより優れた性能を持つことが判明した。LR500 を使用することにより、高粘度流体の混合をより低コストで達成でき、混合不良部のない安定な操作が可能になり、生産性のさらなる向上の手助けになると考えられる。

【謝辞】

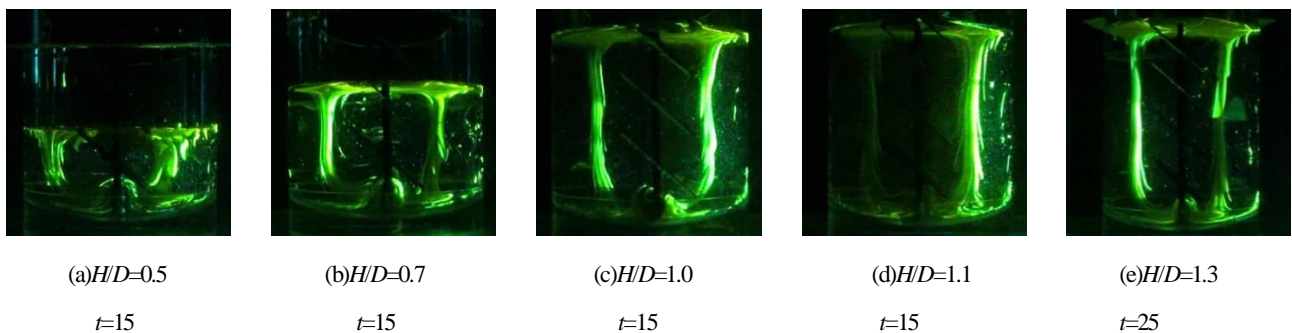


Fig.5 Streak line of LR500 ($Re=10$)

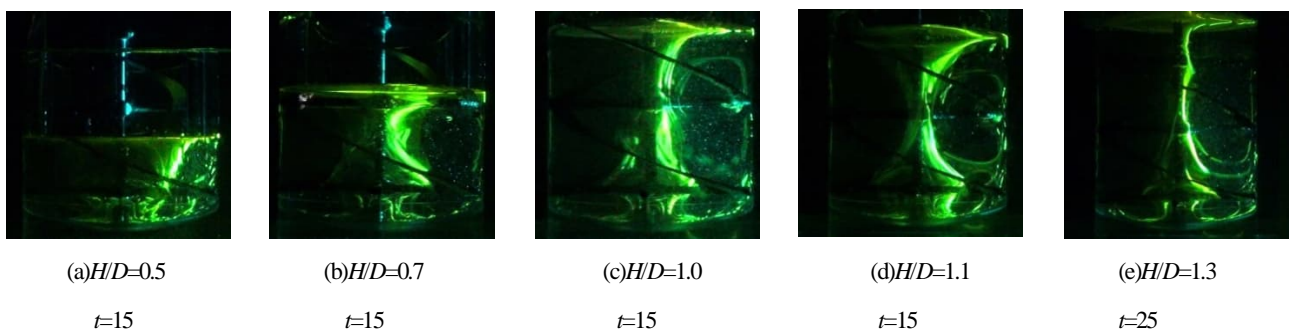


Fig.6 Streak line of helical ribbon ($Re=10$)

実験に際しては、大西明子氏、武山晴美氏の協力を得ました。
ここに謝意を表します。

Nomenclature

D	= vessel diameter	[m]
d	= impeller diameter	[m]
H	= liquid depth	[m]
h	= height of impeller blade	[m]
N	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]
N_p	= power number ($=P/\rho n^3 d^5$)	[—]
n_p	= number of impeller blade	[—]
P	= power consumption	[W]
Re	= impeller Reynolds number ($nd^2\rho/\mu$)	[—]
T	= shaft torque	[N · m]
t	= impeller rotational period	[—]
t_m	= mixing time	[s]
μ	= liquid viscosity	[Pa · s]
ρ	= liquid density	[kg · m ⁻³]

Literature Cited

Brito-De La Fuente, E., L. Choplin, and P. A. Tanguy; "Mixing with helical ribbon impellers: effect of highly shear thinning behaviour and impeller geometry," *Chem. Eng. Research and Design*, **75**, 45-52(1997)

Jo, H.J., H.K. Jang, Y.J. Kim and W.R. Hwang; "Analyses of Dynamical Systems Structures and Mixing Patterns in an Anchor Agitator," *J. Chem. Eng. Japan*, **51**,136-142(2018)

Carreau,P.J.,I.Peterson and C.Y.Yap;"Mixing of Viscoelastic Fluids with Helical-Ribbon Agitators I –Mixing Time and Flow Patters," *Can.J.Chem.Eng.*, **54**, 135- 142(1976)

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)

Saito,F. and M.Kamiwano;"An Extended Technique for Predicting the Mixing Times of High-Viscosity liquid in a Mixer – Mixing Systems with Molecular Diffusion of Solute –,” *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 491- 496(1989)

Saito,F. K.Arai and M.Kamiwano;"An Extended Technique for Predicting the Mixing Times of High-Viscosity liquid in a Mixer – Mixing Systems with Molecular Diffusion and Reaction of Solutes –,” *J. Chem. Eng. Japan*, **23**, 222- 227 (1990)

Takahashi,K., T.Yokota and H.Konno;"Mixing of Pseudoplastic Liquid in a Vessel Equipped with a Variety of Helical Ribbon Impellers," *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 63- 68(1988)

Takahashi,K., T.Yokota T.Furukawa and K.Harada;"Mixing of Highly Vixcous Newtonian Liquid in a Helical Ribbon Agitated Vessel at Various Liquid Depths," *J. Chem. Eng. Japan*, **27**, 244-247 (1994)

Mixing Performance of LR500 Impeller for Highly Viscous Fluid

Yoshikazu KATO¹, Takahiro NEMOTO², Ken-ichi AGO²,
Takuya ARAI², Haruki FURUKAWA² and Yoshihito KATO²⁺⁺

¹ Satake Chemical Equipment Mfg., Ltd., 60 Niizo, Toda-shi, Saitama, 335-0021, Japan

² Department of Life and Applied Chemistry, 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, High Viscosity, New Type Impeller, Liquid Depth

LR500, an easily constructed new type of impeller, was developed for mixing highly viscous liquid, and its mixing performance was evaluated. LR500 showed stable operating characteristics with the same non-dimensional mixing time as a helical ribbon impeller and was able to mix highly viscous liquid of various liquid depths. In contrast, the helical ribbon impeller was not able to mix highly viscous liquid when the liquid depth was set at the position of the support bar, because an isolated, doughnut-shaped mixing region was generated in the vessel.