

大型攪拌翼HRX300の性能評価

西田 亮太¹・小出千尋¹・古川 陽輝¹・加藤 禎人¹⁺⁺
加藤 好一²・根本 孝宏²・吾郷 健一²・高 承台³

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

2 佐竹化学機械工業(株), 〒335-0021 埼玉県戸田市新菅66

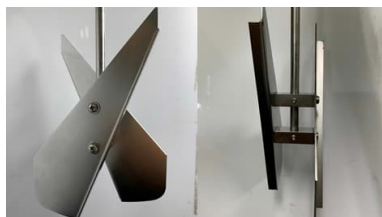
3 韓国東洋大学校 生命化学工学科, 〒750-711 韓国慶北榮州市豊基邑校村洞1

キーワード: 混合, 攪拌, 攪拌所要動力, 蒸発, 大型翼

HRX300は液自由表面から液跳ねによって蒸発を促進し, かつ高い混合性能を示す. これらの性能を混合時間, 攪拌所要動力, 液跳ね量を測定することによって評価した. 乱流条件下では, HRX300の無次元混合時間はSuper-Mix MR205と同等であった. また, HRX300の攪拌所要動力はSuper-Mix MR205の相関式によって相関できた. さらに, HRX300は液高さが変化しても, 高い液跳ね性能を持つことが分かった.

緒 言

蒸発と均一化を目的とした攪拌操作では, 蒸発性能の高い装置では粘度変化に対応できず, 均一化を達成できないことから, Super-Mix MR205 のような大型翼が用いられていた. しかし, 大型翼では液面低下による伝熱面積の減少に伴い, 蒸発効率が低下することが問題として挙げられていた. そこで佐竹化学機械工業(株)はこの問題を解決するため, 蒸発および濃縮用攪拌機HRX300を開発した. **Figure 1**にHRX300の形状を示す. 本翼は補助翼(折り返し部)によって遠心力で槽壁面へ液を跳ね飛ばし, 液に浸かっていない槽壁の伝熱面積を活用することで蒸発を促進し, かつ粘度変化に対して高い混合性能を目指して設計された.



(a)Front view (b)Side view

Fig.1 Photograph of HRX300

攪拌槽を設計する際に最も重要なことは攪拌所要動力を把握することである. 均相系だけでなく気液系や固液系攪拌, ニュートン流体だけでなく擬塑性流体やビンガム流体など, あらゆる攪拌に対して攪拌所要動力が把握できていないと, モーターの選定根拠が不明となるだけでなく, その流体が与えられた設計仕様で混合可能かどうかの判断根拠も不明となるからである(Kato *et al.*, 2009b, 2010). 亀井・平岡らによって開発された攪拌所要動力の相関式(Kamei *et al.*, 1995, 1996; Hiraoka *et al.*, 1997)が, あらゆる攪拌翼に対して広いレイノルズ数範囲で適用できることが筆者ら

の検討により明らかになってきた. この相関式は, 元々, パドル翼に対して開発されたものであるが, 低粘度流体に対して幅広く用いられるプロペラ翼や三枚後退翼(Kato *et al.*, 2009a), 比較的高粘度流体に用いられるアンカー翼(Kato *et al.*, 2011), 幅広い粘度領域および異相系に対しても使用されるマックスブレンド, フルゾーン, Super-Mix MR205 などの大型翼(Kato *et al.*, 2012), さらには微粒子の分散や乳化に用いられるディスパー翼(Kato *et al.*, 2014)といった特殊な形状の攪拌翼にまで応用ができることが分かった. したがって, HRX300に対しても, 筆者らの相関式が使用可能と考えられる.

そこで本報では, HRX300の混合性能, 攪拌所要動力および液跳ね性能を同社のSuper-Mix MR205と実験的に比較検討し, 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

1.1 混合性能および攪拌所要動力

Figure 2に実験装置概略図を示す. 攪拌槽は内径 $D=150\text{mm}$ の亚克力樹脂製 10%皿底円筒槽である. HRX300の翼径 d は

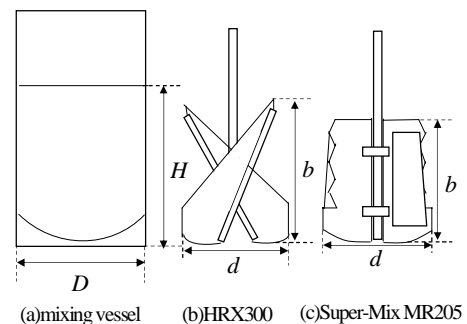


Fig.2 Schematic diagram of experimental set-up

112mm, 翼高さ b は 155mm である。Super-Mix MR205 の翼径 d は 108mm, 翼高さ b は 136mm である。溶液の濃縮過程を想定し、攪拌液は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 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 で検討した。また、邪魔板幅 $B_w=0.1D$ の邪魔板 2 枚条件と邪魔板無し条件を検討した。

混合性能は、混合完了時間と翼回転数の積である無次元混合時間 $n \cdot \tau_m$ 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-ヨウ化カリウム水溶液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。

攪拌翼の設計に欠かすことのできない攪拌所要動力 P はトルクメーター-SATAKE ST-3000 で軸トルクを測定して、その平均トルク T を用いて $P=2\pi nT$ で求めた。

1.2 液跳ね性能

攪拌槽は $D=150\text{mm}$ のアクリル樹脂製平底円筒槽を用いた。攪拌液には液が跳ねる様子を観察するため、粘性の低い水道水を用いた。液高さ H と内径 D の比 H/D は、HRX300 の翼下部にあたる 0.4 から翼先端部にあたる 1.0 まで種々の高さに設定して検討した。比較対象の攪拌翼には、混合性能が良い同社大型翼の Super-Mix MR205 を使用した。なお、Super-Mix MR205 に液を跳ね飛ばす性能はないが、液と邪魔板が衝突することで液が飛び散る現象を液跳ねとした。邪魔板無しでは両攪拌翼ともに液跳ねは観察できなかったことから、混合性能評価と同様に邪魔板幅 $B_w=0.1D$ の邪魔板 2 枚条件を検討した。回転数は両攪拌翼で液跳ねが見られ始めた 200, 225, 250rpm ($Re_d=38,000\sim53,000$) に設定した。なお、200rpm 以下では液跳ねは観察できず、250rpm 以上では振動で攪拌機が揺れてしまい、邪魔板と攪拌翼が接触する可能性があったため、安全性を考慮して測定を中止した。

実験装置概略図を Figure 3 に示す。液面が槽高さ近傍になるよう攪拌槽を 4 種類使用した。実験は翼回転によって槽外部に飛散した液量を外部容器で捕集し、メスシリンダーを用いて測定した液量を液跳ね量とした。運転時間が長くなることで槽内の液面が下がるため、液面の影響を考慮する必要があった。そこで、運転

時間を 15s と短くすることで、影響を小さくした。運転開始から 15s 経過後に運転を止めて液量の測定を繰り返し、合計 1 分間測定した。

2. 実験結果と考察

2.1 混合性能

蒸発工程では、低粘度から高粘度流体まで幅広く取り扱う。一般的に低粘度流体の混合、すなわち乱流条件下の混合では、攪拌翼と流体がともに回転する供回り現象が発生することを考慮し、本報では邪魔板無し条件と邪魔板 2 枚条件を検討した。

2.1.1 邪魔板無し条件

Figure 4 に液高さの違いによる様々な攪拌レイノルズ数 Re_d における無次元混合時間 $n \cdot \tau_m$ の測定結果を示す。 $n \cdot \tau_m$ を縦軸に、 Re_d を横軸に示す。Super-Mix MR205 では未混合領域は観察できず、液高さによらず常に良好な混合性能を示した。一方で、

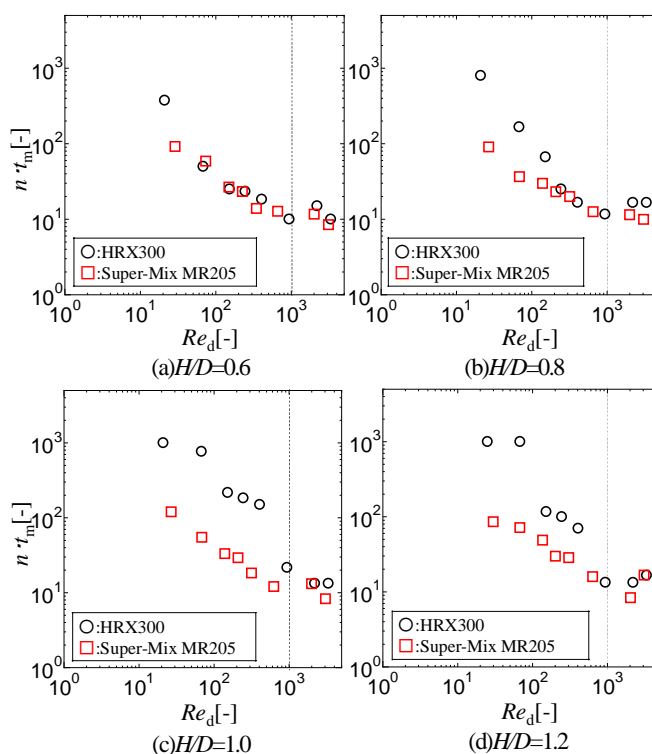


Fig.4 Non-dimensional mixing time without baffle

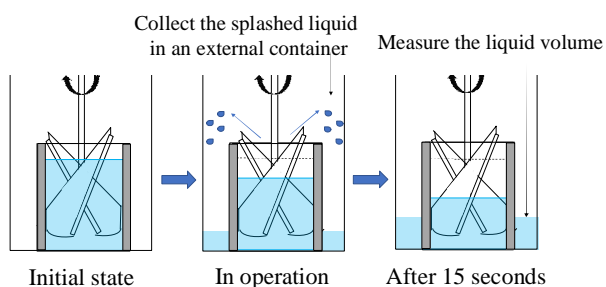


Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus

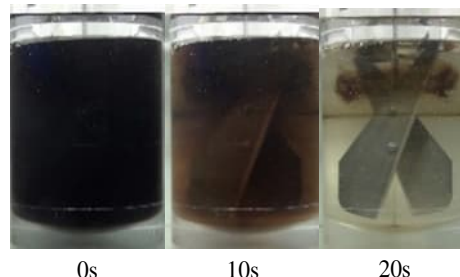


Fig.5 Isolated Mixing Region of HRX300 impeller at $H/D=1.0$. ($Re_d=68$)

HRX300 では $H/D=0.6$ のとき、常に良好な混合性能を示した。 $H/D=0.8$ のとき、 Re_d が 200 未満では後述する境界線の存在により混合が遅れたが、200 以上では境界線も速やかに消滅し、混合性能は良好になった。 $H/D=1.0, 1.2$ では Figure 5 に示すように混合過程で①翼の交差部に境界線、②翼上部にドーナツリング状の孤立混合領域が存在したため、層流域から遷移域後半まで混合時間が長くなった。①では、HRX300 の翼下部は翼径を大きくとった台形型であり、槽底から液自由表面に向かって大きな上昇流を生み出すが、翼上部の吐出流と衝突したことで境界線が発生したと考えられる。②では、翼上部のみに着目した際、パドル翼のような放射流型の流れが発生していたことが目視で確認できた。パドル翼は混合時に、翼上部と翼下部にドーナツリング状の孤立混合領域が発生することが知られている(Nagata *et al.*, 1957)。HRX300 の翼上部は 2 枚羽根パドル翼のような挙動が見られ、この流れによって孤立混合領域が生じたと考えられる。しかし、 Re_d が 1,000 を超えると HRX300 の無次元混合時間は Super-Mix MR205 と同等な $n \cdot \tau_m=20$ を下回り、良好な混合性能を示した。

2.1.2 邪魔板 2 枚条件

Figure 6 に液高さの違いによる様々な Re_d における $n \cdot \tau_m$ の測定結果を示す。グラフ上では $Re_d=2,000$ を超えても $n \cdot \tau_m$ は減少しているが、乱流が発達し始めた状況であり、 $Re_d=20,000$ (溶液水) と $Re_d=2,000$ の $n \cdot \tau_m$ は同等であった。Super-Mix MR205 は邪魔板無し条件と同様に未混合領域は観察できず、液高さによらず常に良好な混合性能を示した。一方で、HRX300 では $H/D=0.6$ のとき、常に良好な混合性能を示した。 $H/D=0.8$ のときでは Figure 7 に示すように、翼交差部に薄膜状の混合が遅れる箇所が観察され、邪魔板無し条件のときよりも完全に混合が完了するまでの時間は長くなった。この混合が遅れる箇所は一般的なパドル翼でも観察される状況であり、ドーナツリングのような孤立混合領域とは異なるため大きな問題ではない。薄膜状の混合が遅れる箇所の発生原因として、翼交差部の翼径は小さく、吐出流量も小さくなるため、邪魔板を設置しても薄膜状の部分が残ってしまったと考えられる。 $H/D=1.0, 1.2$ も同様に、薄膜状の混合が遅れる箇所が発生したが、翼上部からの吐出流が十分に作用したことで速やかに消滅した。結果として、 $H/D=0.8, 1.0, 1.2$ では、 Re_d が 1,000 を超えると HRX300 の無次元混合時間は Super-Mix MR205 と同等な $n \cdot \tau_m=20$ 付近となり、良好な混合性能を示した。

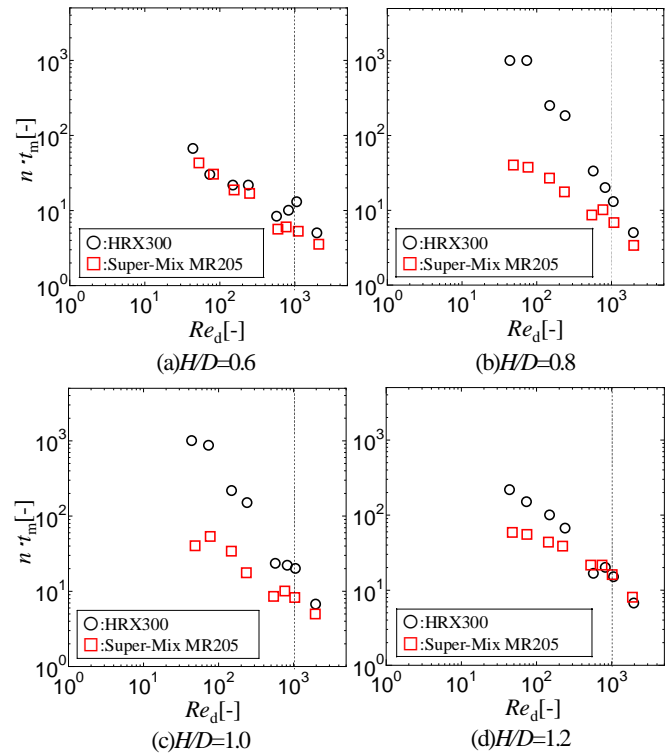


Fig.6 Non-dimensional mixing time with two baffles

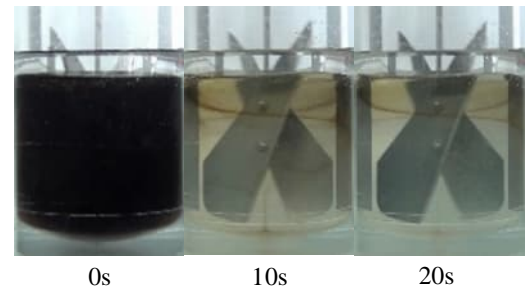


Fig.7 Isolated Mixing Region of HRX300 impeller at $H/D=0.8$ ($Re_d=74$)

2.2 攪拌所要動力

Table 1 に皿底円筒槽における Super-Mix MR205 の攪拌所要動力の相関式(Kato *et al.*, 2016)、Figure 8 に HRX300 の動力相関をそれぞれ示す。HRX300 の測定結果は、大型攪拌翼である Super-Mix MR205 の相関式によって乱流域では邪魔板無しありともによく相関された。しかし、層流域では相関値が実測値をかなり上回っており、相関式に代入するパラメータの修正が必要であると判断した。HRX300 の形状を観察し、翼下部に対して翼上部が小さな面をとっていることに着目した。そこで、 $H/D=0.8, 1.0, 1.2$ では翼上部を無視し、翼幅 b を翼交差部に当たる部分 $b'=103\text{mm}$ に修正し、 $H/D=0.6$ では翼交差部が液自由表面より上にあるため、液に接している地点から翼下までを翼幅 $b'=88\text{mm}$ に修正したことで良い相関が得られた。 $H/D=0.6$ では、乱流域で相関値が実測値をわずかに下回った結果が得られたが、これは翼下部の大きな面から吐出される流れによって、液自由表面が少なからず揺れ、液と槽壁や邪魔板との摩擦が大きくなり、結果として動力数が大きく

なったと考えられる。

Table 1 Power correlation equation of Super-Mix MR205(dished bottom)

Non-baffled condition	(b=b')
$N_{P0}=[1.2\pi^4\beta^2][8d^6/(D^2H)]\{f$	
$f=C_L/Re_G+C_i\{[(C_m/Re_G)+Re_G]^{-1}+(f_s/C_i)^{1/m}\}^m$	
$Re_d=nd^2\rho/\mu$	
$Re_G=[\pi\eta\ln(D/d)/(4d/\beta D)]Re_d$	
$C_L=0.215\eta n_p(d/H)[1-(d/D)^2]+1.83(b/H)(n_p/2)^{1/3}$	
$m=0.333$	
$C_i=[(0.27X^{0.4})^{-7.8}+(0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8}$	
$C_{ir}=1000(d/D)^{-3.24}(b/D)^{-1.18}X^{0.74}$	
$f_s=0.0151(d/D)C_i^{0.308}$	
$x=n_p^{0.7}b/H$	
$\beta=2\ln(D/d)/[(D/d)-(d/D)]$	
$\gamma=[\eta\ln(D/d)/(\beta D/d)^5]^{1/3}$	
$\eta=0.711\{0.157+[n_p\ln(D/d)]^{0.611}\}/\{n_p^{0.52}[1-(d/D)^2]\}$	
Baffled condition	(b=b)
$N_p=[(1+x^{-3})^{-1/3}]N_{pmax}$	
$x=3.8(B_w/D)n_B^{0.8}(H/D)/N_{pmax}^{0.2}$	
Fully baffled condition	(b=b)
$N_{pmax}=5.8(b/d)^{0.75}$	

2.3 液跳ね性能評価

Figure 9 に高さの違いによる HRX300 と Super-Mix MR205 の運転時間と液跳ね量の関係を示す。横軸に運転時間、縦軸にその運転時間に槽外へ飛散した液量である液跳ね量を示す。 $H/D=0.4, 0.8, 1.0$ では、HRX300 の方が Super-Mix MR205 よりも、ほとんどの回転数において液跳ね量が多くなった。時間が経過するとグラフの傾きが緩やかになるのは、液が跳ね飛ばされるにつれて、徐々に液自由表面が下がり、液自由表面から槽高さまでの距離が高くなることで、液が槽を超えることが困難になるためである。観察の結果では、翼の折り返し部分によって、液をすくいあげ飛散させている様子が確認できた。これは HRX300 が遠心力のみで液をすくいあげているためと考察したが、邪魔板無しではこの様子が顕著には見られなかったことから、他にも関係する因子があると考え、邪魔板に着目した。低粘度流体を高回転で攪拌すると、攪拌翼と流体が同時に回転する供回りが発生してしまい、上下方向の攪拌ができない。そのため邪魔板を設置することで流れを阻害し、上下方向の流れを発生させたことで液をすくいあげ性能を向上させたと考えられる。

一方で、 $H/D=0.6$ では Super-Mix MR205 の方が HRX300 よりも各回転数において液跳ね量が多くなった。ここでは遠心力に影響を及ぼす回転半径に着目し、この結果を考察した。 **Figure 10** に

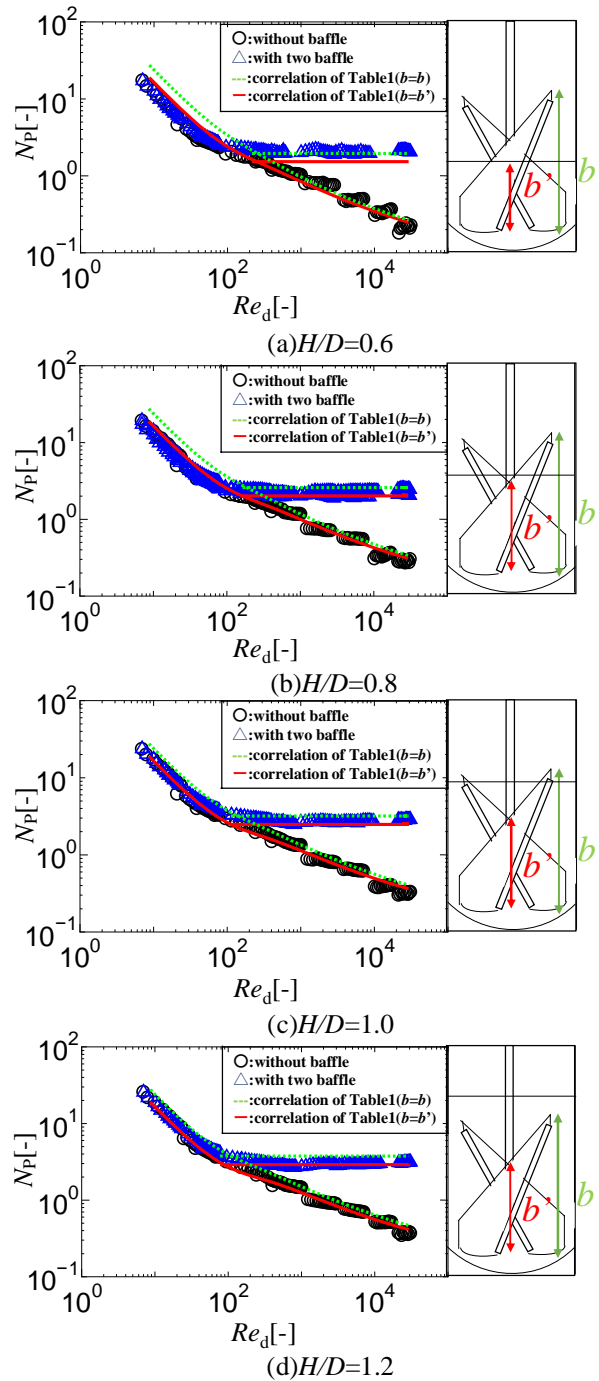


Fig.8 Power correlation of HRX300(dished bottom)

示すように、 $H/D=0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ では液自由表面における HRX300 の翼径はそれぞれ $d_1=111, d_2=72, d_3=80, d_4=101\text{mm}$ であった。遠心力は回転半径に比例するため、HRX300 の翼径が最も小さくなる翼交差部($H/D=0.6$)では液跳ね性能が小さくなったと考えられる。また、 $H/D=0.8$ の 250rpm が $H/D=0.4, 1.0$ の 250rpm よりも傾きが緩やかな原因は、液が跳ね飛ばされ、液自由表面が徐々に $H/D=0.6$ に近づいてしまい、遠心力が低下したためと考えられる。しかし、結果として $H/D=0.4, 1.0$ および 0.8 の 200, 225rpm の条件では HRX300 の方が液跳ね量は多いということが分かった。

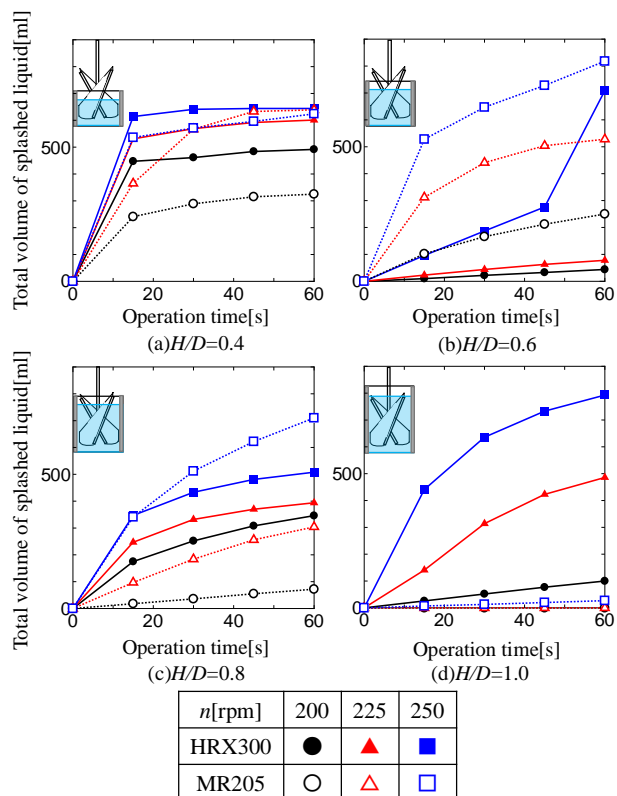


Fig.9 Relationship between the amount of a splashed liquid and operation time.

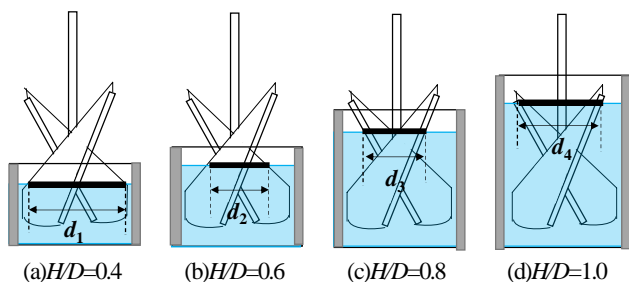


Fig.10 Consideration of radius affecting centrifugal force

結 論

蒸発および濃縮用に開発された大型攪拌翼 HRX300 の混合性能、攪拌所要動力、液跳ね性能を評価した。従来、濃縮を目的とした攪拌操作に用いられていた Super-Mix MR205 と比較した結果、HRX300 の混合性能は Re_d が 1,000 を超えると Super-Mix MR205 並みに良好になることが分かった。また、本翼の動力数は、層流での相関は翼幅を修正する必要があるが、Super-Mix MR205 の相関式に代入することによりおおむね推算可能であることを示した。さらに、本翼は翼交差部では液跳ね量の低下が見られたが、その他あらゆる液高さにおいて高い液跳ね性能を持つことが分かった。以上より、蒸発を目的とした攪拌操作では、乱流条件下であれば HRX300 を適用することで生産性のさらなる向上につながると考えられる。

Nomenclature

b	= height of impeller blade	[m]
b'	= modified height of impeller blade	[m]
B_w	= baffle width	[m]
D	= vessel diameter	[m]
d	= impeller diameter	[m]
d_1	= impeller diameter at $H/D=0.4$	[m]
d_2	= impeller diameter at $H/D=0.6$	[m]
d_3	= impeller diameter at $H/D=0.8$	[m]
d_4	= impeller diameter at $H/D=1.0$	[m]
H	= liquid depth	[m]
n	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]
N_p	= power number ($=P/\rho n^3 d^5$)	[-]
N_{p0}	= power number under non-baffled condition	[-]
N_{pmax}	= power number under fully baffled condition	[-]
$n \cdot t_m$	= dimensionless mixing time	[-]
P	= power consumption	[W]
Re_d	= impeller reynolds number ($=nd^2\rho/\mu$)	[-]
T	= shaft torque	[N · m]
t_m	= mixing time	[s]
μ	= liquid viscosity	[Pa · s]
ρ	= liquid density	[kg · m ⁻³]

Literature Cited

- Hiraoka, S., N. Kamei, Y. Kato, Y. Tada, H. G. Cheon and T. Yamaguchi; "Power Correlation for Pitched Blade Paddle Impeller in Agitated Vessels with and without Baffles," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **23**, 969-975 (1997)
- Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, H. Shida, Y. S. Lee, T. Yamaguchi and S. T. Koh; "Power Consumption for Paddle Impellers in Spherical and Cylindrical Agitated Vessels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 41-48 (1995)
- Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, K. Iwata, K. Murai, Y. S. Lee, T. Yamaguchi and S. T. Koh; "Effects of Impeller and Baffle Dimensions on Power Consumption under Turbulent Flow in an Agitated Vessel with Paddle Impeller," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **22**, 249-256 (1996)
- Kato, Y., Y. Tada, T. Takeda, Y. Hirai and Y. Nagatsu; "Correlation of Power Consumption for Propeller and Pfaudler Type Impellers," *J. Chem. Eng. Japan*, **42**, 6-9 (2009a)
- 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 (2009b)
- Kato, Y., Y. Tada, K. Urano, A. Nakaoka and Y. Nagatsu; "Differences in Mixing Power Consumption between Dished-Bottom and Flat-Bottom Vessels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **36**, 25-29 (2010)
- Kato, Y., N. Kamei, Y. Tada, N. Kato, T. Kato, T. Ibuki, H. Furukawa and Y. Nagatsu; "Power consumption of Anchor Impeller over Wide Range of Reynolds Number," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **37**, 19-21 (2011)

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., R. Nagumo, H. Furukawa, S. Ito , Y. T. Koh and Y. S. Lee; "Correlation of Power Consumption for Dispersing Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **40**, 1-4 (2014)

Kato, Y., N. Yasui, H. Furukawa and R. Nagumo; "Effect of Liquid Height on Power Consumption of Two-Blade Wide Paddle Impeller," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **42**, 187-191 (2016)

Nagata, S., M. Yanagimoto and T. Yokoyama; "A study on the Mixing of High-viscosity Liquid," *Kagaku Kogaku*, **21**, 278-286 (1957)

Evaluation of Mixing Performance of large paddle impeller HRX300

Ryota NISHIDA¹, Chihiro KOIDE¹, Haruki FURUKAWA¹, Yoshihito KATO¹⁺⁺, Ken-ichi AGO², Takahiro NEMOTO², Yoshikazu KATO² 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 Satake Chemical Equipment Mfg., Ltd., 60 Niizo, Toda-shi, Saitama, 335-0021, 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

Keywords: Mixing, Agitation, Power number, Evaporation, Large Paddle Impeller

HRX300 has high mixing performances and promotes the evaporation by splashing liquid from the free surface. The mixing performance was evaluated by measuring mixing time, power consumption and volume of splashed liquid. The dimensionless mixing time of HRX300 was equivalent to that of Super-Mix MR205 under turbulent flow conditions. The power number of HRX300 was correlated by the same equations as Super-Mix MR205. Furthermore, HRX300 was found to have a high splashing performance at most liquid depths.