

大型翼を備えた気液攪拌槽における高粘度流体の通気動力と物質移動

灰塚真浩¹・亀井登¹・加藤禎人²⁺⁺・神谷昌孝²・古川陽輝²・南雲亮²

¹株式会社ダイセル, 671-1283 兵庫県姫路市網干区新在家1239

²名古屋工業大学 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, 気液攪拌, 大型翼, 所要動力, 物質移動

大型翼を備えた通気攪拌槽の所要動力特性を論じた論文は極めて少ない。物質移動特性もその翼独特の物質移動容量係数を測定した論文はあるものの相関式までには至っていない。本研究では大型翼を用いた場合の通気動力と物質移動容量係数を測定した。大型翼はキャビティがでにくいので通気による動力低下が少ないことがわかった。また、空気-水系の場合の物質移動容量係数は、単位体積当たりの動力を基準とした佐藤らの相関式(1989)で相関でき、粘度が高くなると、完全層流域ではない流動状態では平岡らの相関式(2003)で推算可能であることがわかった。

結 言

気液攪拌槽の操作特性に関する論文は極めて多い。とくに、Rushton タービン翼に関する無通気時の動力と通気時の動力に大きな差が生ずることは古くから知られている大きな問題である。また、物質移動容量係数の測定例もかなり多く、いろいろな場合の相関式も数多く提出されている。しかしながら、ほとんどの論文は気液攪拌の場合の標準翼として使用されてきた Rushton タービン翼に関するものがほとんどである。一方、日本のメーカーが開発した2枚大型パドル翼に関する報告例も多くなってきた。ただし、マックスブレンド(MB)やフルゾーン(FZ)など大型攪拌翼を用いた場合の気液攪拌の場合は自由表面からの表面吸収に関するもの(Yatomi *et al.*,2007)が多く、通気時に関するものは多くない(Dohi *et al.*,2006)。Aida and Shono(2014)が通気時の動力相関式を示しているが、式の形状から大型翼で動力低下が起きるかどうかの判断はしにくい。察するに、底面から通気する場合、これらの翼は板型の翼であり、気泡が翼で保持されることがなく、いわゆる素抜け状態になってしまうという杞憂からであろう。Rushton タービン翼が通気攪拌の標準翼とされる理由がこれだろうと思われる。

しかしながら、近年、Kamei *et al.*(2009,2012)は、翼径よりも大きなリング径のスパージャーを取付けることで、通気動力の低下を防いで良好なガス分散が得られることを示している。これは、通気動力の低下は、翼背面に気泡が保持されて動力低下につながるラージキャビティが原因であるので、それを発生させないようにするという発想で実行されたものである。その際得られる物質移動容量係数は、Sato *et al.*(1989)の示した空気-水系で測定された $K_L a$ の相関式 Eq.(1)で良好に相関され、必ずしも翼のディスク部で気泡を保持する必要は無いことを示したものである。

しかしながら、近年、Kamei *et al.*(2009,2012)は、翼径よりも大きなリング径のスパージャーを取付けることで、通気動力の低下を防いで良好なガス分散が得られることを示している。これは、通気動力の低下は、翼背面に気泡が保持されて動力低下につながるラージキャビティが原因であるので、それを発生させないようにするという発想で実行されたものである。その際得られる物質移動容量係数は、Sato *et al.*(1989)の示した空気-水系で測定された $K_L a$ の相関式 Eq.(1)で良好に相関され、必ずしも翼のディスク部で気泡を保持する必要は無いことを示したものである。

$$K_L a = 1.8 \times 10^{-4} \{P_{av} / (1/3 P_{av} + P_{gv})\}^{0.5} \quad (1)$$

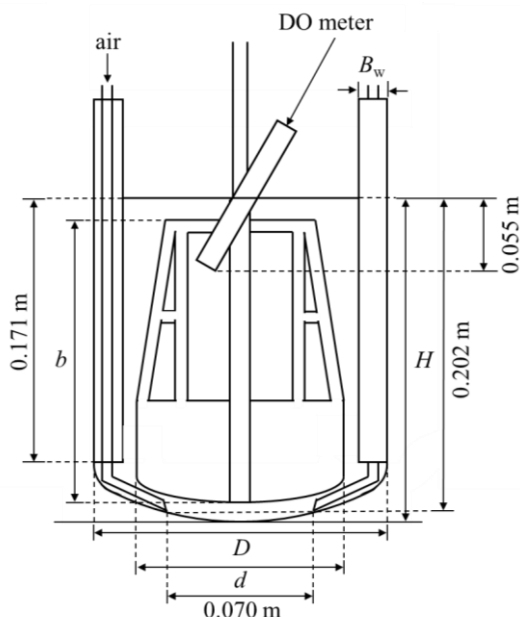


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

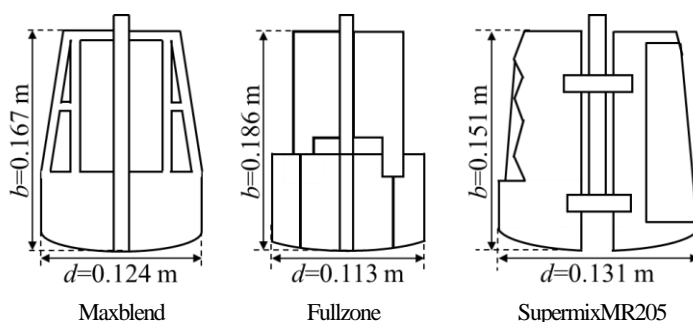


Fig.2 Large paddle impellers

そこで、本報では気泡を保持するディスクを持たない攪拌翼で、混合性能が良いとされる大型翼を通气攪拌槽に用いても一定の成果が得られるだろうと考え、大型翼の通气動力低下がどの程度であるか、また、大型翼が得意とする高粘度の流体を用いたときはどうか、さらにはフラッシングからローディングまで表現できる(1)式が大型翼でも成立するかどうか、さらに、(1)式がどの程度の高粘度流体まで使用可能かどうかを検討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の概要を Figure 1 に、実験に用いた大型パドル翼の概形を Figure 2 に示す。攪拌槽は内径 0.185m のアクリル樹脂製 10%皿底円筒槽で、槽径の 1/10 の幅を持つ邪魔板を数枚取り付けけた種々の邪魔板条件とした。液はイオン交換水、および高粘度流体として水と酸素の拡散係数がほぼ同等(Hiraoka et al., 2003)のカルボキシメチルセルロースナトリウム (CMC) 溶液を用い、液深は槽径の 1.1 倍とした。スパージャーは単孔ノズル (シングルスパージャー: 外径 8mm) を 2 箇所に取り付けた。攪拌所要動力の測定方法は Kamei et al.(2009)と同様であるが、物質移動容量係数は蛍光式酸素濃度計(VISIFERM DO 120, Hamilton 社製)により測定した。

2. 実験結果と考察

2.1 通气動力

Figure 3 に空気-水系のマックスブレンド翼の通气動力低下 (翼回転数は 250rpm)の結果を示す。通常、ラシュトタービンの通气動力は無通气時と比較して半分程度になってしまうのに対

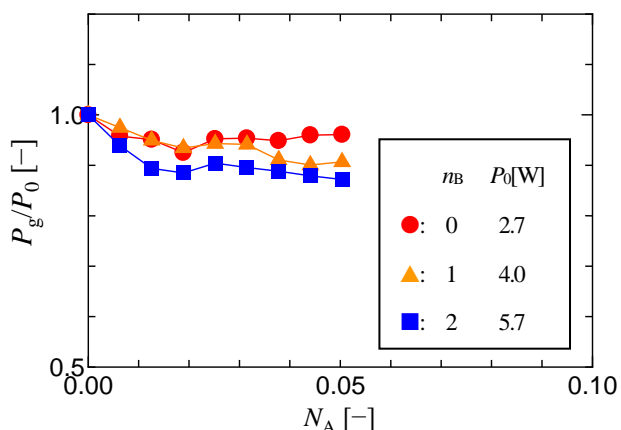


Fig.3 Effect of aeration on power consumption in air-water system with MB ($n=250$ rpm)

し(Kamei et al., 2009), マックスブレンド翼の通气動力はほとんど低下しなかった。これは、ラシュトタービンなどの小型翼と異なり、大型翼は比較的低回転数で操作されるため、ラージキャビティができていくことが要因であると考えられる。Figure 4 に空気-CMC 溶液系のマックスブレンド翼の通气動力を示す。この場合も空気-水系と同様、通气動力はほとんど低下しなかった。

Figure 5 にフルゾーン翼の空気-水系, Figure 6 に空気-CMC 溶液系の通气動力を示す。Fig.6 では通气動力が若干上昇しているが、通常の通气攪拌槽の 5%程度の変化は問題視せず、また、わずかな上昇分に関してはガス吸収に対し、悪い傾向ではなく良い傾向なので、問題視する必要はない。同様に Figure 7 にスーパーミックス MR205 の空気-水系, Figure 8 に空気-CMC 溶液系の通气動力を示す。いずれも、マックスブレンド翼同様の傾向を示し、 P_g/P_0 の低下が最大で 0.9 程度までに抑えられた。特にフルゾーン翼の動力低下がないことは特筆に値する。ここで、注目すべきことはただか 10%程度の動力低下で押さえられていることであり、これもガス吸収に対し良い傾向を示すものであるので問題視する必要はない。通气攪拌槽で問題となるのはラシュトタービンなどを使用すると 50%以上の通气動力の低下が見られ、これはガス吸収能力の低下を招き、また、モーター選定も無通气時の動力で選定しなければならないため設備コストが倍増するという問題を引き起す。したがって、10%程度の変動であればモーター選定時の安全係数に含まれてしまう程度の差なのでまったく問題視する必要は無いと考えられる。

2.2 物質移動容量係数

Figure 9 に空気-水系のマックスブレンド翼の物質移動容量係数 K_{La} と、佐藤らが示した動力パラメータとの関係(a)邪魔板無し、(b)邪魔板あり)を示す。ただし、邪魔板無しといっても、Fig.1 に示されるようにスパージャー配管(外径 8mm)が 2 本設置さ

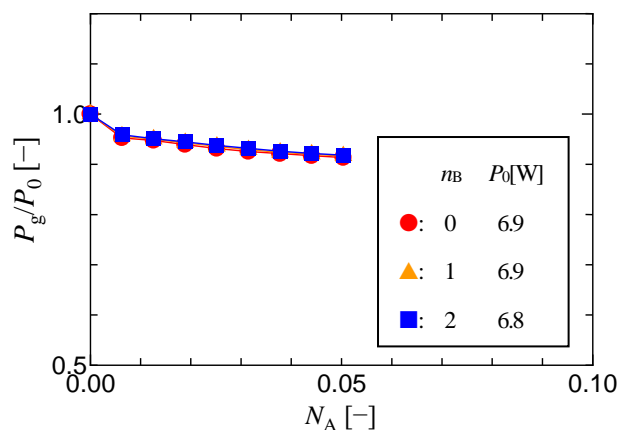


Fig.4 Effect of aeration on power consumption in air-CMC 2.4wt% aqueous solution system with MB ($n=250$ rpm, $\mu_{app}=0.46$ Pa·s)

れているため、弱い邪魔板条件と解釈した方が良い。こちらもラシュトタービン同様良好に相関でき、翼形式によらず攪拌所要動力が同じであれば同一の K_{La} が得られることがわかった。

Figure 10 に空気-水系のフルゾーン及びスーパーミックス

MR205 の物質移動容量係数 K_{La} と、佐藤らが示した動力パラメータとの関係を同時に示す。やはり、翼形式によらず攪拌所要動力が同じであれば同一の K_{La} が得られることが示された。

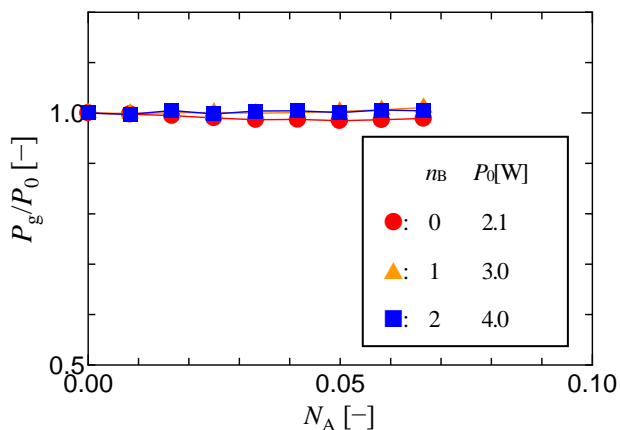


Fig.5 Effect of aeration on power consumption in air-water system with FZ ($n=250\text{rpm}$)

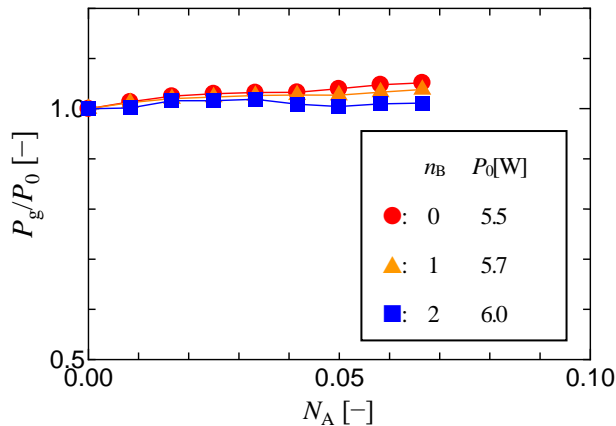


Fig.6 Effect of aeration on power consumption in air-CMC 2.4wt% aqueous solution system with FZ ($n=250\text{rpm}$, $\mu_{app}=0.77\text{Pa}\cdot\text{s}$)

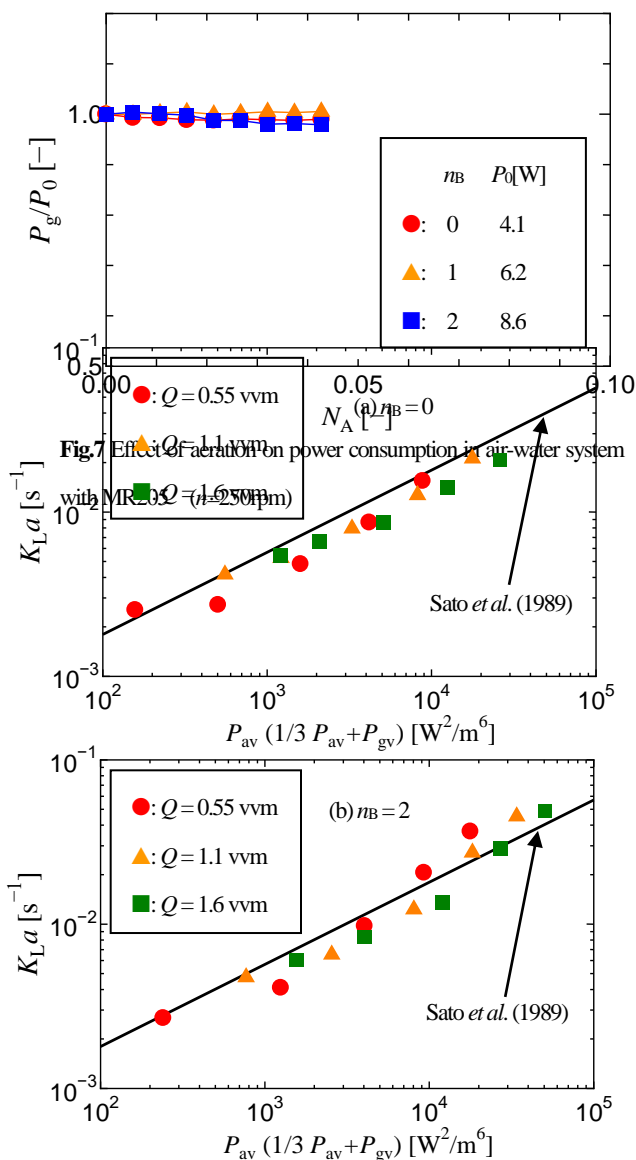


Fig.7 Effect of aeration on power consumption in air-water system with MR205 ($n=250\text{rpm}$)

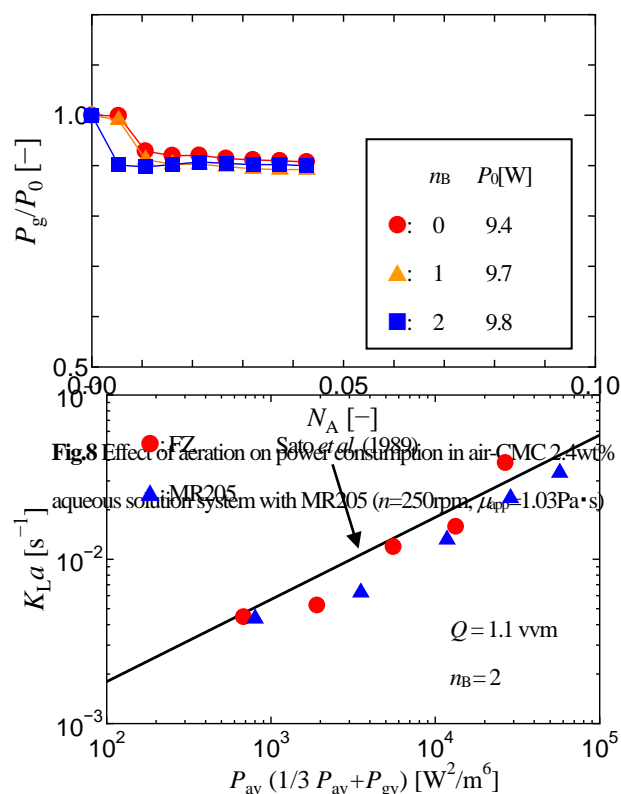


Fig.8 Effect of aeration on power consumption in air-CMC 2.4wt% aqueous solution system with MR205 ($n=250\text{rpm}$, $\mu_{app}=1.03\text{Pa}\cdot\text{s}$)

Fig.10 Correlations of mass transfer volumetric coefficient in air-water system with FZ and MR205

Fig.9 Correlations of mass transfer volumetric coefficient in air-water system with MB (a) without baffle, (b) with baffle

空気-水系の場合は佐藤らの式が成立することが実験的に確認されたが、どの程度の粘度までその式が成立するかはまだ確認されていない。そこで、0.24wt% CMC 溶液を用いて $K_L a$ を測定し、佐藤らの相関式を適用してみた。その結果を **Figure 11** に示すが、少しでも粘度が増加した場合は、実測値が相関値より低くなり相関することはできなかった。したがって、粘度の補正

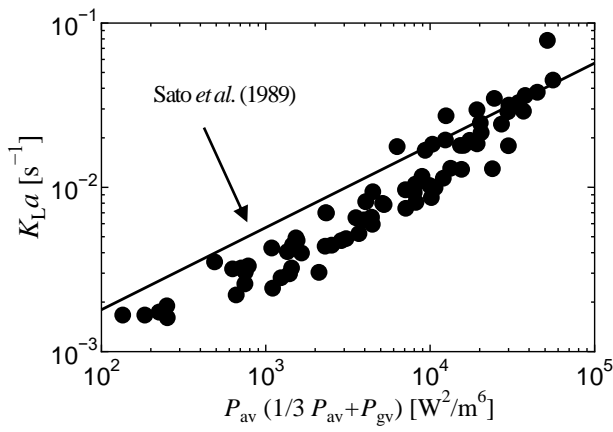


Fig.11 Correlations of mass transfer volumetric coefficient in

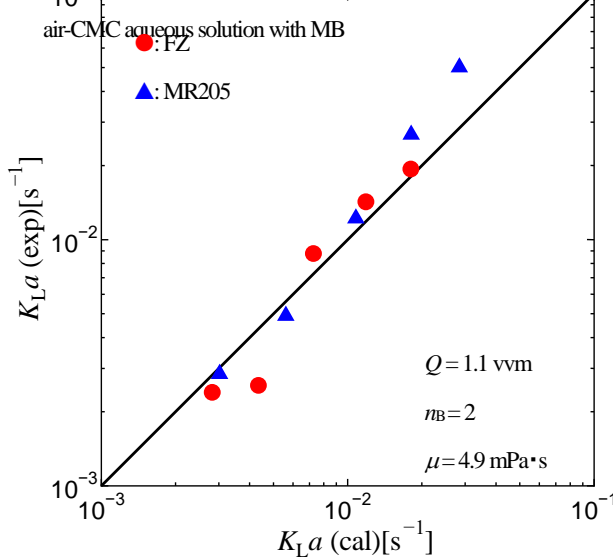


Fig.13 Correlation of mass transfer volumetric coefficient with Eq.(2) for FZ and MR205 in air-CMC 0.24wt% aqueous solution system

がある平岡らの次式を用いて相関を試みた。

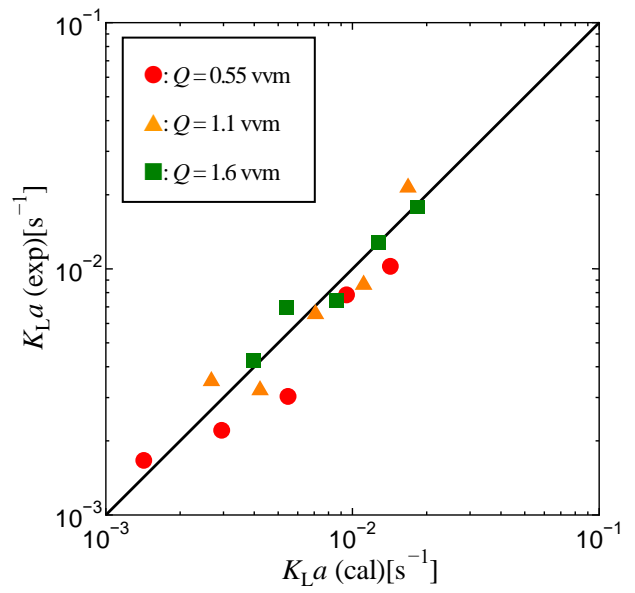
$$K_{La} = (K_{La})_a + (K_{La})_g \quad (2)$$

$$(K_{La})_a = 0.039 P_{av} \mu^{-1/3} \sigma^{-2/3} D_L^{1/2}$$

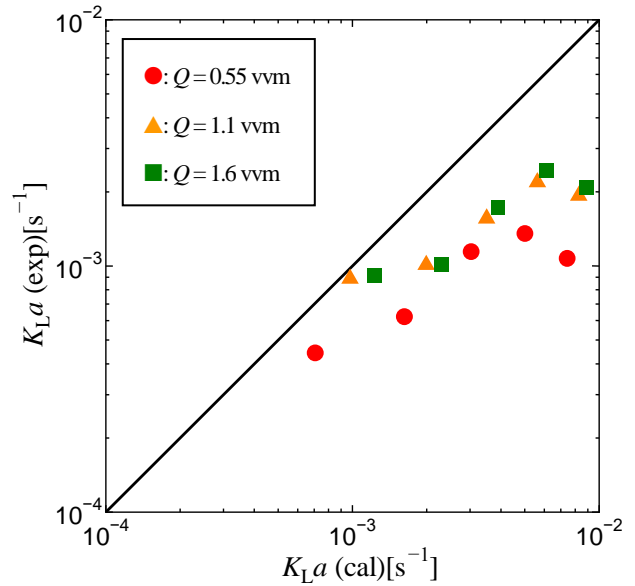
$$(K_{La})_g = 0.12 P_{av}^{0.12} P_{gv}^{0.70} \mu^{-0.25} \sigma^{-0.6} D_L^{1/2}$$

ここで、 σ [N・m]は表面張力であり、 D_L [m²・s⁻¹]は対象とする物質の拡散係数である。Eq.(2)は、CMC濃度は0.2wt%から1.5wt%であり、その粘度は $\mu = 5.9 \sim 119 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の範囲で適用可能である。

Figure 12(a)にマックスブレンドの相関、Figure 13にフルゾーンおよびMR205の(2)式による相関を示す。CMC濃度が(a)0.24wt%の約5mPa・sまでは相関ができたが、その10倍の濃度 Fig.12(b)に示した濃度2.4wt%以上(この粘度になると非ニュートン性を帯び、0.46–0.73Pa・sの見かけ粘度になる)になるとさらに K_{La} は低下し、平岡らの相関式も成立しなくなった。この原因は次のように考えられる。そもそも単位体積当りの動力を使用する相関方法は槽内の流動状態が乱流であることが基本である(Kato *et al.*, 2009)。そこで、このときの攪拌レイノルズ数を算出してみた。このときの攪拌レイノルズ数はおおよそ40~70の範囲にあり、例えばマックスブレンド翼の動力相関図を Figure 14 に示すが、攪拌レイノルズ



(a) CMC 0.24wt%, $\mu = 4.9 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $n_B = 0$



(b) CMC 2.4wt%, $\mu_{app} = 0.46 - 0.73 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $n_B = 0$

Fig.12 Correlations of mass transfer volumetric coefficient with Eq.

(2) in air-CMC aqueous solution system with MB

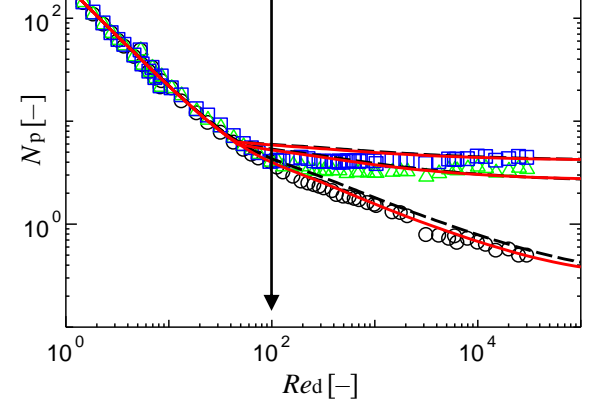


Fig. 14 Power correlation of MB, ○: observed without baffle,

△: observed with two baffles, □: observed with four baffles

数が約100未満のこの領域は邪魔板有りや邪魔板無しの場合の動力相関線の交点よりもレイノルズ数が低い領域であるので、層流域であると考えられる。したがって、層流域では攪拌所要動力を基準とした相関式が成立しなかったと考えられる。

結 論

大型翼を備えた通気攪拌槽の通気動力と物質移動容量係数を実験的に測定した。その結果、いずれの大型翼もラージキャビティができにくいいため通気動力はほとんど低下しなかった。また、空気-水系の物質移動容量係数は翼形式によらず佐藤らの式で相関できたが、粘度が上昇すると成立しないことがわかった。また、 Re_d =約2,000~15,000の範囲での物質移動容量係数は平岡らの式で相関できることがわかった。

Nomenclature

b	= height of impeller blade	[m]
B_w	= baffle width	[m]
D	= vessel diameter	[m]
D_L	= diffusion coefficient	[m ² · s ⁻¹]
d	= impeller diameter	[m]
H	= liquid depth	[m]
K_{La}	= volumetric gas-liquid mass transfer coefficient	[s ⁻¹]
n	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]
N_A	= aeration number (= Q/nd^3)	[-]
n_B	= baffle number	[-]
P_0	= power consumption under no aeration	[W]
P_g	= power consumption under aeration	[W]
P_{av}	= aeration power consumption per unit volume (= $\rho g H Q / V$)	[W · m ⁻³]
P_{gv}	= agitation power consumption per unit volume under aeration	[W · m ⁻³]
Q	= gas flow rate	[m ³ · s ⁻¹]
Re_d	= impeller Reynolds number ($nd^2\rho/\mu$)	[-]
V	= liquid volume	[m ³]
μ	= liquid viscosity	[Pa · s]
μ_{app}	= apparent liquid viscosity	[Pa · s]
ρ	= liquid density	[kg · m ⁻³]
σ	= surface tension	[N · m ⁻¹]

Literature Cited

- Aida, M. and A. Shono; "Estimation of Power Consumption in Gas-Liquid Stirred Vessels with Various Types of Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **40**,366-371(2014)
- Dohi, N., T. Takahashi, K. Minekawa and Y. Kawase; "Gas-liquid mass transfer characteristics of large-scale impellers: Empirical correlations of gas holdups and volumetric mass transfer coefficients in stirred tanks," *Chem. Eng. Comm.*, **193**, 689-701 (2006)
- Kamei, N., Y. Kato, Y. Tada, J. Ando and Y. Nagatsu; "Effects of Sparger Geometry on Power Consumption and Mass Transfer in Gas-Liquid Agitated Vessels with Disk Turbine," *J. Chem. Eng. Japan*, **42**,664-668(2009)
- Kamei, N., K. Mitsuhashi, E. Oda, H. Furukawa, Y. Kato and Y. Tada; "Scale up and Effect of Sparger Position on Power Consumption and Mass Transfer in Mixing Vessel with Disk Turbine," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **38**,203-208(2012)
- Kato, Y., S. Hiraoka, N. Kamei and Y. Tada; "Importance of Power Consumption in Design and Operation of Mixing Vessel," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **35**, 211-215(2009)
- Hiraoka, S., Y. Tada, Y. Kato, Y. Ukai, J. Sasaki T. Yamaguchi and A. Matsuura; "Power Consumption and Gas-Liquid Mass Transfer Volumetric Coefficient in an Agitated Vessel with Pitched Wire-Gauze Blade Impeller under Aeration," *J. Chem. Eng. Japan*, **36**, 333-338 (2003)
- Sato, K., H. Shimada and Z. Yoshino; "Gas Absorption Efficiency of Gas-Liquid Contactors with Mechanical Agitation," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **15**, 733-739 (1989)
- Yatomi, R., K. Takenaka, K. Takahashi and P.A. Tanguy; "Mass Transfer Characteristics by Surface Aeration of Large Paddle Impeller: Application to a Polymerization Reactor with Liquid Level Change," *J. Chem. Eng. Japan*, **40**,393-397(2009)

Power Consumption and Mass Transfer of High Viscosity Liquid in Gas-Liquid Mixing Vessel with Large Paddle Impeller

Masahiro HAITSUKA¹, Noboru KAMEI¹, Yoshihito KATO²⁺⁺, Masataka KAMIYA²,
Haruki FURUKAWA² and Ryo NAGUMO²

1 Daicel Corporation, 1239, Shinzaike, Aboshi-ku, Himeji, Hyogo 671-1283, Japan

2 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, Gas-Liquid Mixing, Large Paddle Impeller, Power Consumption, Mass Transfer

Few papers have reported the power consumption and mass transfer volumetric coefficient measured in mixing vessels equipped with wide-paddle impellers under aeration. In this paper, the power consumption and mass transfer volumetric coefficient were measured in mixing vessels equipped with various wide-paddle impellers under aeration. It was found that the large paddle impeller did not decrease the aerated power consumption, because no large cavity was generated. The mass transfer volumetric coefficients were correlated with the equation of Sato *et al.* (1989) in an air-water system, and those in an air-CMC solution system were correlated with the equation of Hiraoka *et al.* (2003) under turbulent conditions.