

# 邪魔板無しおよび弱い邪魔板条件の気液攪拌槽における所要動力と物質移動

亀井登<sup>1</sup>・加藤禎人<sup>2++</sup>・南雲亮<sup>2</sup>・古川陽輝<sup>2</sup>・鈴木智也<sup>2</sup>・多田豊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>株式会社ダイセル, 944-8550 新潟県妙高市新工町1-1

<sup>2</sup>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, 気液攪拌, コンケーブタービン, 大型スパージャー, 通気動力

コンケーブタービンとRushtonタービンを組み合わせた邪魔板無しおよび弱い邪魔板条件の2段通気攪拌槽について、翼径より大きなリング径のスパージャーとシングルスパージャーを用いた場合の攪拌所要動力および物質移動容量係数を測定した。邪魔板無し2段通気攪拌槽にスパージャー径と翼径の比が1.3以上のスパージャーを組み合わせることで通気時攪拌動力の低下を抑えることができ、弱い邪魔板条件であっても物質移動容量係数は佐藤らの式(1989)で相関できることを示した。

## 緒言

通気攪拌槽設計のポイントはモーターのインシヤルコストを抑えるために、無通気時の動力と通気時の動力の差を小さくすることである。通気攪拌槽で一般的に使用される Rushton タービン翼は通気時の動力 $P_g$ と無通気時の動力 $P_0$ の比 $P_g/P_0$ が0.5付近まで低下することが知られている。つまり、設計時には安全のために無通気時の攪拌所要動力を基準にしてモーターを選定しなければならないため、無駄なコスト増大の一因になっている。

筆者らは前報(Kamei *et al.*, 2012, Furukawa *et al.*, 2012,2013)で通気時の動力低下を抑えることができるコンケーブタービンと大型リングスパージャー(Kamei *et al.*, 2009)を組み合わせて $P_g/P_0$ を1付近で操作できることを見いだした。さらに物質移動容量係数も、Sato *et al.*(1989)の $K_L a$ の相関式Eq.(1)で良好に相関できることを示した。

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

一般に、通気攪拌では槽径の1/10の幅の邪魔板が4枚設置されて運転される。こうした邪魔板は、槽内の旋回流を混合に有利な上下循環流に変換すると共に、攪拌所要動力も上昇するため、高い物質移動容量係数が必要な場合には好都合である。しかし、槽内に突起物をいくつも設置することになり、槽内の洗浄が困難になる上、通気を始める前を前提とすると必要以上に高出力のモーターを設置しなければならない。

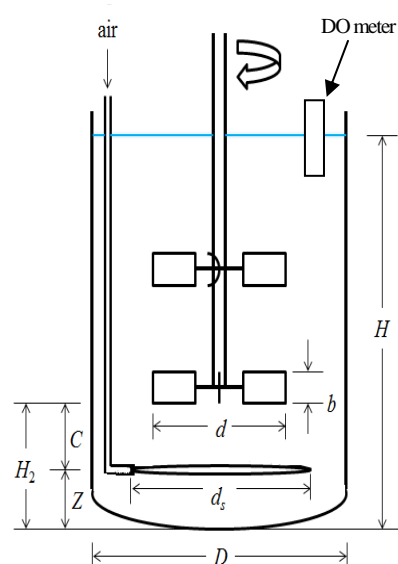


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

一方、工業的には邪魔板が設置されていないか弱い邪魔板条件の下で、通気させる操作を行う場合がある。しかしながら、このような条件でのガス分散や物質移動容量係数に関する知見は、これまで全く知られていない。また、前述のように筆者らは大型リングスパージャーを用いることによる効果を見出したことから、邪魔板のない攪拌槽に大型リングスパージャーとコンケーブタービンを使用したら通気攪拌動力特性がどうなるかを検討した。

大型リングスパージャーは攪拌翼より槽壁に近い場所から通気するため、通気量が大きいときは、通気に伴う上方に向かう同伴流が増加し、槽壁付近で邪魔板効果が得られると考えられるからである。さらに、邪魔板無しでは液混合が不十分になることも予想されるため、弱い邪魔板条件についてもその特性がどのよう

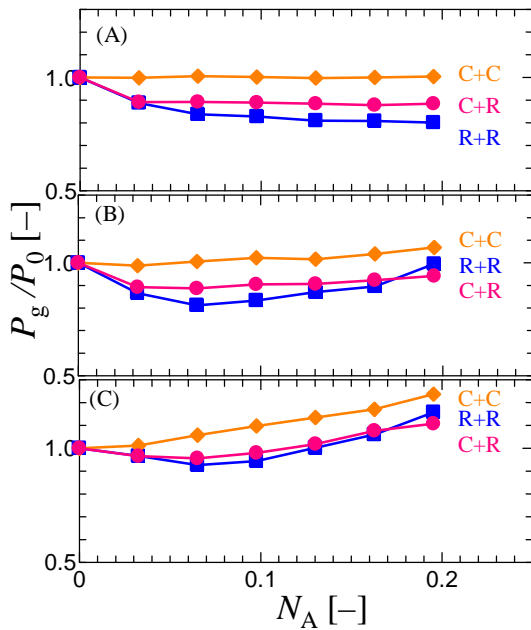


Fig.2 Effect of aeration on power consumption  
 (A) single sparger, without baffle,  $n=300\text{rpm}$   
 (B) ring sparger  $d_s/d=1.3$ , without baffle,  $n=300\text{rpm}$   
 (C) ring sparger  $d_s/d=1.5$ , without baffle,  $n=300\text{rpm}$

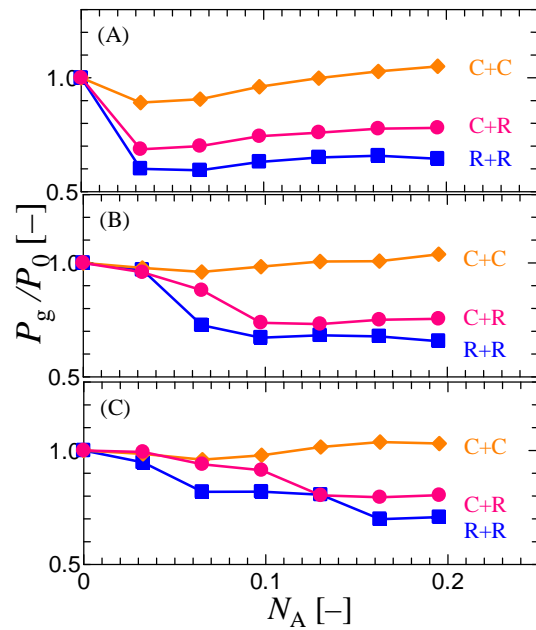


Fig.4 Effect of aeration on power consumption  
 (A) single sparger,  $n_b=2$ ,  $n=300\text{rpm}$   
 (B) ring sparger  $d_s/d=1.3$ ,  $n_b=2$ ,  $n=300\text{rpm}$   
 (C) ring sparger  $d_s/d=1.5$ ,  $n_b=2$ ,  $n=300\text{rpm}$

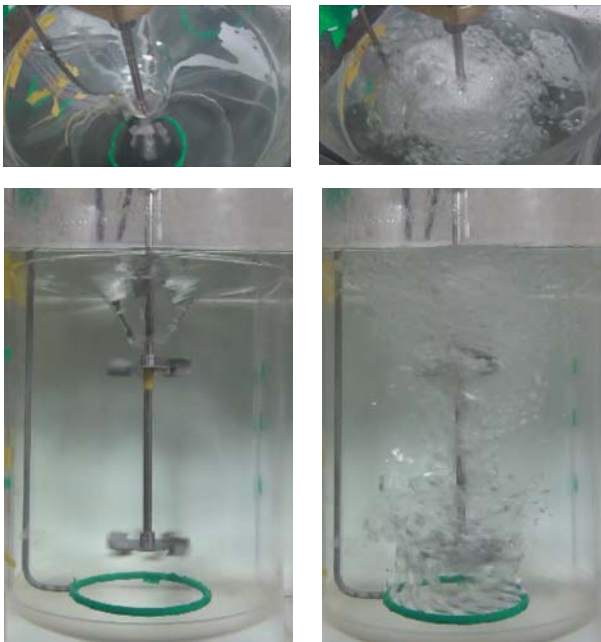


Fig.3 Comparison of free surface vortex and bubble dispersion between without and with aeration (1.77vvm)

に変化するかもあわせて検討した。

前報までの結果を基に(Kamei et al., 2012, Funikawa et al., 2012, 2013), 多段で操作されることの多い通気攪拌槽にコンケーブタービンと大型リングスパージャーの組み合わせを適用し, Rushtonタービンとの組み合わせと比較検討した結果, 興味深い知見を得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 に示す。攪拌槽は内径 240mm のアクリル樹脂製 10%皿底円筒槽で、邪魔板無し条件から比較的弱い邪魔板条件である 10mm 幅を持つ邪魔板を 1~4 枚取り付け付けた種々の邪魔板条件とした。液はイオン交換水を用い、液深は 312mm とした。攪拌翼は翼径 80mm の Rushton タービンとコンケーブタービンである。翼間距離はお互いの翼が独立して作動する翼径の 2 倍の 160mm とした。多段の組み合わせ方は次の 3 種類を検討した。Rushton タービン 2 段(R+R), 上段コンケーブタービンに下段 Rushton タービン(C+R), そしてコンケーブタービン 2 段(C+C)である。上段 Rushton タービンに下段コンケーブタービン(R+C)の組み合わせは、前報の結果から省略した。スパージャーは単孔ノズル (シングルスパージャー) と大型リングスパージャーを用いた。スパージャーのリング径と翼径の比  $d_s/d$  は、これまでの検討で通気時と無通気時の動力低下を小さく保てる 1.3 および 1.5 の 2 種類を用いた。下段翼の取り付け位置は槽底からの距離を 72mm とし、スパージャー(上方吐出)の取り付け位置は槽底から 36mm とした。その他の装置条件や攪拌所要動力や酸素濃度計を用いた物質移動容量係数の測定方法は Kamei et al.(2009,2012)と同様であるので省略する。

## 2. 実験結果と考察

### 2.1 通気攪拌動力特性

#### (1) 邪魔板無し通気攪拌動力特性

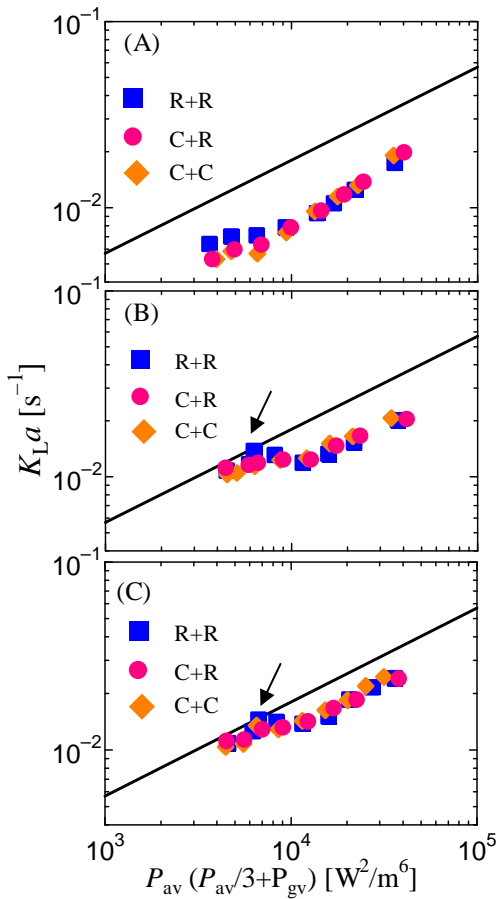


Fig.5 Correlation of volumetric mass transfer coefficient  
 (A) single sparger, without baffle,  $Q=1.77$ vvm  
 (B) ring sparger  $d_s/d=1.3$ , without baffle,  $Q=1.77$ vvm  
 (C) ring sparger  $d_s/d=1.5$ , without baffle,  $Q=1.77$ vvm  
 Solid line : Correlation by Sato et al.(1989)

Figure 2 に横軸に通気流量数  $N_A$ 、縦軸に通気時の動力  $P_g$  と無通気時の動力  $P_0$  の比  $P_g/P_0$  をとった典型的な通気攪拌動力特性図を示す。(A)はシングルスパージャー、(B)はスパージャーのリング径と翼径の比  $d_s/d$  が 1.3、(C)は  $d_s/d=1.5$  の図である。参考までに無通気時の動力  $P_0$  を Table 1 に示した。

二段翼の場合、いずれの場合でもコンケーブタービンを二段使用した C+C の場合が最も動力低下が小さく、R+R の動力低下が最も大きいという前報と同様な結果(Furukawa et al., 2012,2013)が得られた。

Table 1 Power consumption under no aeration  $P_0$

Figure	C+C [W]	C+R [W]	R+R [W]
2(A)	0.61	0.76	0.75
2(B)	0.55	0.67	0.63
2(C)	0.51	0.63	0.60
4(A)	1.5	2.2	2.3
4(B)	1.5	2.2	2.2
4(C)	1.5	2.0	2.1

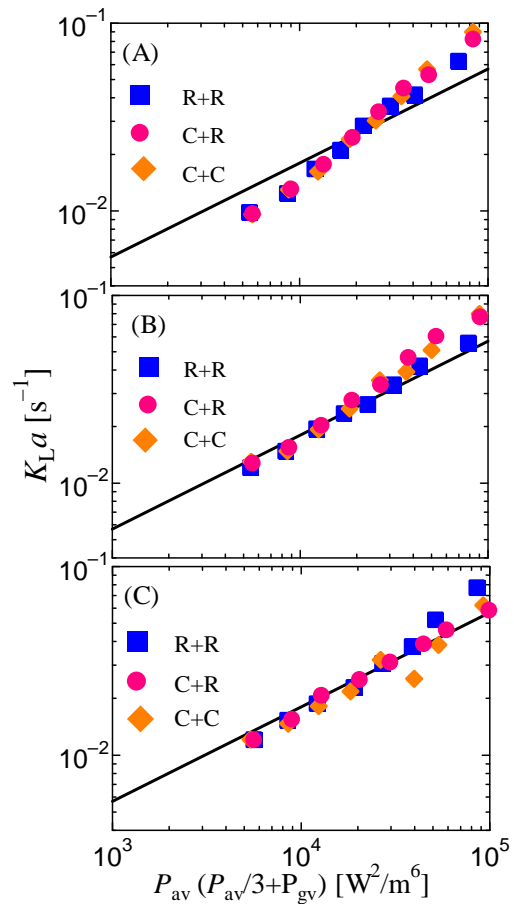


Fig.6 Correlation of volumetric mass transfer coefficient  
 (A) single sparger,  $n_B=2$ ,  $Q=1.77$ vvm  
 (B) ring sparger  $d_s/d=1.3$ ,  $n_B=2$ ,  $Q=1.77$ vvm  
 (C) ring sparger  $d_s/d=1.5$ ,  $n_B=2$ ,  $Q=1.77$ vvm  
 Solid line : Correlation by Sato et al.(1989)

しかし、大型リングスパージャーを用いた場合、Fig.2(B),(C)に示すように通気流量数が大きい領域で  $P_g/P_0$  が 1 より大きくなった。この原因は通気による同伴流があたかも邪魔板のように振る舞っているからであると考えられる。Figure 3 は邪魔板無し気液攪拌槽にコンケーブタービン二段を用い、大型リングスパージャーを適用した場合の液表面および槽内の気泡の分散状況を示した写真である。無通気時と通気流量数が小さい場合、邪魔板無しなので、槽内の流れは旋回流が主体であり、気泡もそれに伴う運動をし、液自由表面に大きな渦が生成した。しかし、通気流量数が大きくなると、旋回流が消失し、液自由表面の渦も消失した。それにより、通気による上昇流があたかも邪魔板があるかのように振る舞われ動力が上昇したと考えられる。シングルスパージャーの場合は翼に気泡がとらえられ、キャビティがしやすい状況になり、通気攪拌動力が低下しやすくなる。また、通気流量数が大きくなると Rushton タービンは大型リングスパージャーの場合でもキャビティがしやすいようになるため、Fig.2(B),(C)に見られるように Rushton タービンはコンケーブタービンよりも通気攪拌動力の上昇幅が小さいと考えられる。

## (2)弱い邪魔板条件における通気攪拌動力特性

Figure 4に邪魔板枚数が2枚の時の通気攪拌動力特性図を示す。(A)はシングルスパージャー, (B)はスパージャーのリング径と翼径の比  $d_s/d$  が 1.3, (C)は  $d_s/d=1.5$  の通気攪拌動力特性である。参考までに Fig.2 の場合と同様に, 無通気時の動力  $P_0$  を Table 1 に示した。

この実験においても, コンケーブタービンを2段使用した C+C の場合が最も動力低下が小さく, R+R の動力低下が最も大きいという前報と同様な結果(Furukawa *et al.*, 2012,2013)が得られた。データは省略するが, この傾向は邪魔板枚数を 1,3,4 枚にして実験した場合も同様だった。

## 2.2 物質移動特性

### (1)邪魔板無し物質移動特性

通気がガス吸収に対しても十分邪魔板の役目をしているかを検証するために物質移動容量係数を測定した。Figure 5 に邪魔板無し気液攪拌槽で二段翼を用いた場合の物質移動容量係数と, 佐藤らが示した相関式を示す。シングルスパージャーを用いた場合, 佐藤らの式よりも低い値をとった。これは, それほど強い邪魔板効果ではなく, 固体的回転部が発生し液混合が不十分になり, 正確な槽内の平均的な  $K_{La}$  の値を測定できなかったためだと考えられる。つまり,  $K_{La}$  の測定には槽内は完全混合の仮定をおいているがそのモデルが成立しないことを意味する。従って相関線より大幅なずれを生じる場合には測定点での見かけの  $K_{La}$  値をとると考えるべきである。

また, 二段翼と大型リングスパージャーを組み合わせた(b)と(c)の場合, 通気支配から攪拌支配に変異した点 (図中の矢印部分) で佐藤らの式よりも  $K_{La}$  は低くなった。一方, 回転数が低く通気支配の領域では, 旋回流が消失し, 通気攪拌動力が低下しないため佐藤らの式に良好に一致する。しかし, 回転数を上げて動力が大きくなると, 攪拌支配となり旋回流が発生し液混合が不十分になるため  $K_{La}$  も低くなったと考えられる。

### (2)弱い邪魔板条件における物質移動特性

Figure 6に邪魔板枚数2枚気液攪拌槽での二段翼の物質移動容量係数と, 佐藤らの相関式を示す。いずれのスパージャーにおいても, 良好に相関できた。これは邪魔板が存在するために槽内の液混合が十分であることを意味する。したがって, 邪魔板条件が弱い条件であっても, 液混合が十分であれば佐藤らの相関式で  $K_{La}$  が十分推算できる。

## 結 論

コンケーブタービンと大型リングスパージャーを組み合わせることにより, 邪魔板無し通気攪拌槽においても通気攪拌動力の低下を抑制することは可能であり, 大型リングスパージャーの槽壁付近の気泡の同伴流により, 若干の邪魔板効果が観察され, 旋回流による液自由表面の渦の消失が観察された。しかし, 攪拌支配の領域では液混合不良を引き起こすため, 槽全体の平均  $K_{La}$  値が得られない可能性がある。しかし, 弱い邪魔板条件であれば通気攪拌動力の低下も少なく, 十分な物質移動容量係数が得られることが明らかになり, 佐藤らの相関式で推算が可能であった。

## Nomenclature

$C$	= clearance between sparger and impeller	[m]
$D$	= vessel diameter	[m]
$d$	= impeller diameter	[m]
$d_s$	= sparger diameter	[m]
$H$	= liquid depth	[m]
$H_2$	= clearance between vessel bottom and center of impeller blade	[m]
$K_{La}$	= volumetric gas-liquid mass transfer coefficient	[s <sup>-1</sup> ]
$n$	= impeller rotational speed	[s <sup>-1</sup> ]
$N_A$	= aeration number ( $=Q/nd^3$ )	[-]
$P_0$	= power consumption under no aeration	[W]
$P_g$	= power consumption under aeration	[W]
$P_{av}$	= aeration power consumption per unit volume ( $=\rho gHQ/V$ )	[W·m <sup>-3</sup> ]
$P_{gv}$	= agitation power consumption per unit volume under aeration	[W·m <sup>-3</sup> ]
$Q$	= gas flow rate	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$V$	= liquid volume	[m <sup>3</sup> ]
$Z$	= clearance between vessel bottom and sparger	[m]

## Literature Cited

- Furukawa, H., E. Oda, C.L. He, Kamei, N., Y. Kato and Y. Tada; "Power Consumption and Mass Transfer in Gas-Liquid Mixing Vessel with Concave Turbine and Large Ring Sparger," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **38**,209-211(2012)
- Furukawa, H., N. Kamei, Y. Kato, C.L. He, T. Suzuki and Y. Tada; "Power Consumption in Gas-Liquid Mixing Vessel with Dual Impellers including Concave Turbine and Large Ring Sparger,"

*Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **39**,287-289(2013)  
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)  
Sato, K., H. Shimada and Z. Yoshino; " Gas Absorption Efficiency of  
Gas-Liquid Constructors with Mechanical Agitation," *Kagaku  
Kogaku Ronbunshu*, **15**, 733-739 (1989)

## Power Consumption and Mass Transfer in Gas-Liquid Mixing Vessel without Baffle and with Weak Baffle Condition

Noboru KAMEI<sup>1</sup>, Yoshihito KATO<sup>2++</sup>, Ryo NAGUMO<sup>2</sup>, Haruki FURUKAWA<sup>2</sup>,  
Tomoya SUZUKI<sup>2</sup> and Yutaka TADA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Daicel Chemical Industries, Ltd., Shinkocho 1, Myoko-shi, Niigata, 944-8550, Japan

<sup>2</sup>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, Concave Turbine, Large Sparger, Power Consumption

The aerated power consumption and the volumetric mass transfer coefficient were measured in a mixing vessel without baffles and with weak baffle conditions, equipped with dual impellers that combined a concave turbine and a Rushton turbine with a large ring sparger. When the ratio of sparger diameter to impeller diameter was  $\geq 1.3$ , no decrease was observed in aerated mixing power consumption. It was shown that the volumetric mass transfer coefficient for a vessel without baffles and even with weak baffle conditions can be calculated by the correlation of Sato et al. (1989).