

# 攪拌翼表面粗さの所要動力に及ぼす影響

福澤研志<sup>1</sup>・高橋理輝<sup>1</sup>・古川陽輝<sup>1</sup>・加藤禎人<sup>1+</sup>・高承台<sup>2</sup>

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 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, 動力, 表面粗さ, 動力相関

攪拌所要動力に関する報告は非常に多く存在するが、攪拌翼表面粗さの攪拌所要動力に及ぼす影響を定量的に論じた報告は存在しない。本報では種々の攪拌翼の表面にさびや材質変化を模倣した加工を施し、攪拌所要動力に及ぼす影響を実験的に検証した。その結果、攪拌翼の表面粗さと翼径の比 $\epsilon/d < 0.0125$ では攪拌所要動力に影響を及ぼさなかった。

## 結 言

攪拌所要動力に関する研究論文は非常に多く存在するが、攪拌翼表面粗さの攪拌所要動力に及ぼす影響を定量的に論じた知見は存在しない。しかし、実際の攪拌操作では、攪拌槽の長年の使用により攪拌翼表面にスケールが付着したまま使用されていたり、コンタミなどの影響を考えないゴミ処理槽や排水処理槽などで翼が錆びたまま使用されたりすることがある。加えて、攪拌翼表面に固形物が衝突し翼表面が凸凹になったまま使用されることもある。さらに、最近ではアクリルや 3D プリンターの活用により攪拌翼を樹脂で試作し、その性能評価をすることも多々あり、その攪拌翼表面は金属製品より滑らかでないと感じられる。また、ガラスライニングした場合などは攪拌翼表面がなめらかである。このような場合、攪拌翼の表面粗さが攪拌所要動力に影響があるかどうかを知っておくことは意義あることである。

従って本報では攪拌翼の表面を加工し、その表面粗さが攪拌所要動力に及ぼす影響を検討したので報告する。

## 1 実験装置および方法

### 1.1 実験装置

本研究では、一般的な攪拌翼として代表的な Rushton タービン翼、4 羽羽根パドル翼、4 羽羽根ピッチドパドル翼、プロペラ翼、比較的羽根面積が大きいホームベース (HB) 翼、フルゾーン、マックスブレンド、Super-Mix MR205 を使用し、液高さは槽径と同じとした。また、攪拌翼は槽中央に設置した。Table 1 にそれぞれの攪拌翼の寸法を示す。攪拌槽には  $D = 182 \text{ mm}$  の槽径のアクリル樹脂製平底円筒槽を

Table 1 Geometry of impellers

	$d[\text{m}]$	$b[\text{m}]$
Rushton turbine (RT)	0.0715	0.0143
Paddle (P)	0.0801	0.0161
Pitched Paddle (PP)	0.0923	0.0177
Propeller (PR)	0.0729	0.0184
HomeBase (HB)	0.118	0.177
Fullzone (FZ)	0.113	0.160
Maxblend (MB)	0.109	0.180
Super-Mix MR205 (MR205)	0.134	0.140

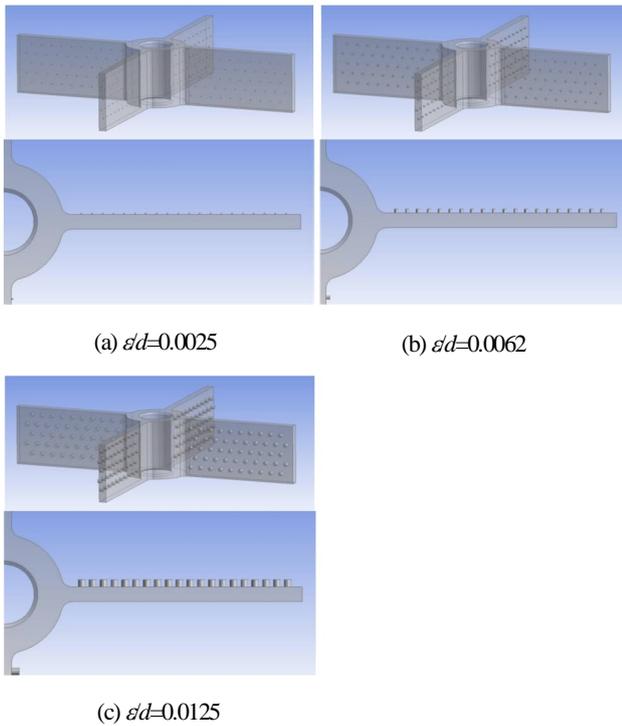
用いた。また、邪魔板無し条件と槽径の 1/10 幅の邪魔板を 4 枚設置する標準邪魔板条件で攪拌所要動力を測定した。

攪拌液として水あめ水溶液を (粘度  $0.0100 \sim 3.00 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、密度  $1200 \sim 1400 \text{ kg/m}^3$ ) 用いた。

### 2.2 実験方法

#### (1) サンドペーパーによる実験

基本的な攪拌翼はステンレス製であり、表面粗さを表現するために攪拌翼面にサンドペーパー(トラスコ中山株式会社, P80(粒子径  $0.2 \text{ mm}$ ))を張り付けた。攪拌翼の板厚が大きく変化すると、層流域では動力数が増加し、乱流域では動力数が低下する傾向があるので (Kato *et al.*, 2015a), できるだけ攪拌翼の板厚の影響を避けるため板全面にサンドペーパーを張り付けるのではなく、板よりわずかに小さな面積(板の先端から  $0.5 \text{ mm}$  程度小さく)でサンドペーパーを張り付けた。さらに、攪拌翼の前面にサンドペーパーを張り付けた場合、攪拌翼の裏面にサンドペーパーを張り付けた場合と 2 種類検証した。また、サンドペーパーを張り付けることにより平均  $0.8 \text{ mm}$  ほ



**Fig.1** Paddle impeller with element roughness made by 3D printer  
 ど板厚が増加するので、0.8mm の表面が滑らかなマグネットシートを張り付けた対照実験も実施した。

(2) 粗さ要素による実験

加えて、翼表面にサンドペーパーを張り付けた場合より平均粗さが大きい条件も検証するために、Table1 中の4枚パドル翼を用いて攪拌翼表面に直径と高さを等しくした円柱状の粗さ要素(高さ  $\varepsilon=0.2\text{ mm}, 0.5\text{ mm}, 1\text{ mm}$ )を千鳥配置で縦5行、横10列付けた攪拌翼(Fig.1に示す)も3Dプリンターで製作した。このとき粗さ要素の高さ  $\varepsilon$  をパドル翼の代表長さ  $d$  を用いて規格化( $sd=0.0025, 0.0062, 0.0125$ )した。

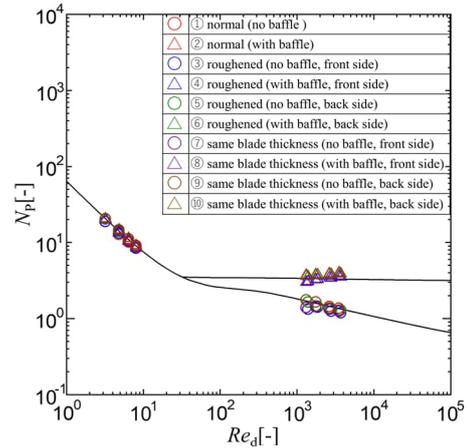
攪拌所要動力  $P$  は、トルクメーター-SATAKE ST-3000 で軸トルクを測定し、その平均トルク  $T$  を用いて  $P=2\pi nT$  で求めた。

## 2. 実験結果と考察

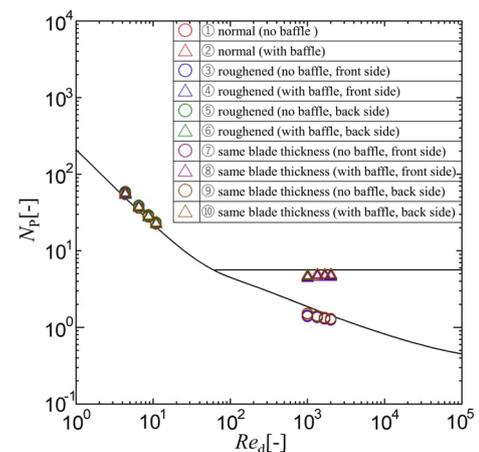
(1) サンドペーパーによる実験

まずは3Dプリンターを使用して攪拌翼を制作した場合に表面にできる筋状の溝(マイクロスコープによる測定で溝深さ0.06mm)より、若干粗いサンドペーパー(粒子径0.2mm)を用いた種々の翼の動力数の差異を検討する。

Fig. 2にRushtonタービン翼、Fig. 3にマックスブレンドの動力数の測定結果と相関線(Kamei et al., 1995, 1996, Kato et al., 2015b)を示す。図中のキー①は攪拌翼に加工を施さず、邪魔板無しの場合、②は①を邪魔板4枚にした場合、③は攪拌翼の表面にサンドペーパーを張



**Fig. 2** Relationship between power number and Reynolds number for Rushton turbine



**Fig. 3** Relationship between power number and Reynolds number for Maxblend

り付け、邪魔板無しの場合、④は③を邪魔板4枚にした場合、⑤は攪拌翼の裏面にサンドペーパーを張り付け、邪魔板無しの場合、⑥は⑤を邪魔板4枚にした場合、⑦は攪拌翼の表面にマグネットシートを張り付け、邪魔板無しの場合、⑧は⑦を邪魔板4枚にした場合、⑨は攪拌翼の裏面にマグネットシートを張り付け、邪魔板無しの場合、⑩は⑨を邪魔板4枚にした場合である。他の攪拌翼の結果は割愛する。MR205については補助翼面にもサンドペーパーを張り付けた。

いずれの攪拌翼も翼面粗さの影響は観察されなかった。層流ではもともと邪魔板の有無ですら動力数が変化しない領域であり(Rushton et al., 1950) (パイプの摩擦係数でもパイプの粗度に摩擦係数は影響されない(Moody, 1944)), 乱流でもこの程度の粗度であれば攪拌翼背面に生ずる trailing vortex (Van't Riet and Smith, 1975, Saito et al., 1992)に影響を及ぼすほどではなかった。乱流状態において攪拌翼背面に生じる trailing vortex が攪拌所要動力に影響を及ぼすことは翼裏面で trailing vortex を発生させにくい Scaba翼や Concave翼が無通気時は翼板に局面を持たない通常のRushton翼の1/2の動力しか消費

しないこと(Furukawa *et al.*, 2015)から導くことができる。つまり、気液系を扱う多くの論文に記載されている事実として、通気時と無通気時の動力の比が Rushton 翼では約 0.5 まで低下し、Scaba 翼では約 1.0、Concave 翼では約 0.8 まで低下する。これらの論文には動力の絶対値ではなく通気時と無通気時の動力比しか記載されていないため、この事実はあまり知られていない。また、論文として公表されていないがよく知られた事実で、攪拌翼のエッジを丸めたガラスライニング(GL)翼は同じ寸法でも攪拌所要動力はかなり減少し、通常動力相関式は GL 翼には適用できない。翼のエッジが攪拌所要動力に与える影響は非常に大きく、ステンレス翼でもわずかな面取りにより動力の実測値は相関式に合わなくなる。したがって、本研究でも翼板の角部分には粗さ要素は設置せず、サンドペーパーも翼板のシルエットが変化するように張り付けていない。これらの事実から、乱流域で攪拌翼の上下の角部分で発生する trailing vortex が動力消費を決めると考えても問題はない。気液攪拌の物質移動、液液攪拌の物質移動および液滴径などは単位体積当たりの動力の関数であり、気泡や液滴の分裂は多くの可視化写真などで trailing vortex で生じていることはよく知られた事実である。また、過去の研究(Kato *et al.*, 2015b)では、パドル翼の翼板の厚さを増加させると乱流域で所要動力は低下し、それは流れの可視化の結果、翼背面の trailing vortex が生成されにくくなったことが原因だと判明している。よって、本研究の実験範囲内の表面粗さで動力に差がないということは trailing vortex に影響を及ぼしていないと考えられる。

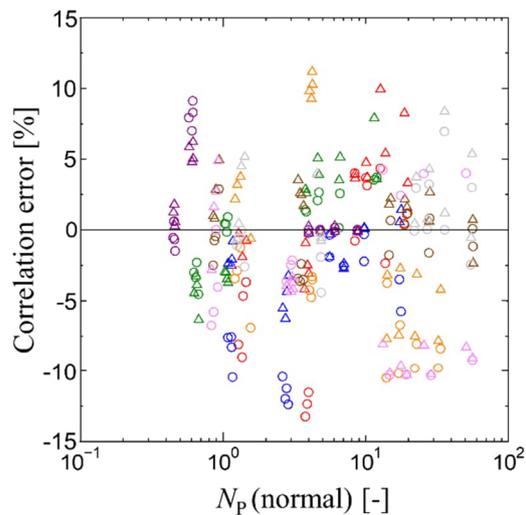
今回実験に用いたすべての攪拌翼について、攪拌翼表面にサンドペーパーを付けた場合と付けていない場合の動力数の比較を Fig. 4 に示す。層流・乱流一括して示すが、ほとんどのデータは $\pm 5\%$ 以内であり、(サンドペーパーの有無による分散分析の結果、95%の確率で有意差なし)動力数に表面粗さの差はなかった。

## (2) 粗さ要素による実験

3種類の粗さ要素を取り付けた4枚パドル翼の結果を Fig. 5 に示す。乱流域のみの結果であるが、 $\epsilon/d < 0.0125$  では動力数に影響を及ぼさないことが示された。

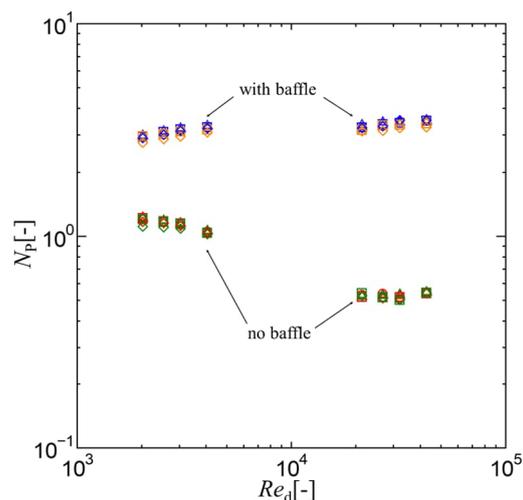
## 結 言

攪拌翼の表面粗さは本研究の実験範囲内では、攪拌所要動力に差は生じないことが分かった。それにより、新規攪拌翼の試作や性能評価に 3D プリンターで試作したような剛性が高い樹脂製の攪拌翼を使用しても問題ないことがわかった。



○ RT (front side)	○ HB (front side)
△ RT (back side)	△ HB (back side)
○ P (front side)	○ FZ (front side)
△ P (back side)	△ FZ (back side)
○ PP (front side)	○ MB (front side)
△ PP (back side)	△ MB (back side)
○ PR (front side)	○ MR205 (front side)
△ PR (back side)	△ MR205 (back side)

Fig. 4 Error in correlation of power number



○ normal (no baffle)	○ normal (with baffle)
△ $\epsilon/d=0.0025$ (front side)	△ $\epsilon/d=0.0025$ (front side)
△ $\epsilon/d=0.0025$ (back side)	△ $\epsilon/d=0.0025$ (back side)
□ $\epsilon/d=0.0062$ (front side)	□ $\epsilon/d=0.0062$ (front side)
□ $\epsilon/d=0.0062$ (back side)	□ $\epsilon/d=0.0062$ (back side)
◇ $\epsilon/d=0.0125$ (front side)	◇ $\epsilon/d=0.0125$ (front side)
◇ $\epsilon/d=0.0125$ (back side)	◇ $\epsilon/d=0.0125$ (back side)

Fig. 5 Effect of element of roughness on power number for paddle impeller

## 謝 辞

動力測定に関しましては高倉逸仁氏の協力を得ました。また、3D プリンター翼表面粗さの測定および翼の製作には佐竹マルチミクス(株)の協力を得ました。ここに厚く謝意を表します。

## Nomenclature

$b$	= height of impeller blade	[m]
$B_w$	= baffle width	[m]
$D$	= vessel diameter	[m]
$d$	= impeller diameter	[m]
$H$	= liquid depth	[m]
$N_P$	= power number ( $=P/\rho n^3 d^5$ )	[-]
$N_{P0}$	= power number under non-baffled condition	[-]
$n_B$	= number of baffle	[-]
$n_p$	= number of impeller blade	[-]
$P$	= power consumption	[W]
$Re_d$	= impeller Reynolds number ( $=d^2 n_p \rho / \mu$ )	[-]
$T$	= shaft torque	[N · m]
$\varepsilon$	= element of roughness	[m]
$\mu$	= liquid viscosity	[Pa · s]
$\rho$	= liquid density	[kg/m <sup>3</sup> ]

## Literature Cited

Furukawa, H., Y. Kato, R. Nagumo and Y. Tada; "Correlation of Power Consumption of Concave Turbine Impeller," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 91-94 (2015)

- Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, H. Shida, Y. S. Lee, T. Yamaguchi and S. T. Koh; "Power Correlation 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., H. Furukawa, K. Fujii, R. Nagumo, Y. Tada, S.T. Koh and Y.S. Lee; "Effect of Thickness of Mixing Impeller Blade on Power Consumption," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 215-219 (2015a)
- Kato, Y., S. Ohtani, M. and H. Furukawa; "Characteristics of Power Consumption and Mixing Time of New Large Paddle (HB Type) Impeller," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 276-280 (2015b)
- Moody, L. F.; "Friction factors for pipe flow," *Transactions of the ASME*, **66**, 671-684 (1944)
- Rushton, E. W. Costich, and H. J. Everett, "Power Characteristics of Mixing Impellers part 1," *Chem. Eng. Progress*, **46**, 395-404 (1950)
- Saito, F, A. W. Nienow, S. Chatwin and I. P. T. Moore; "Power, Gas Dispersion and Homogenisation Characteristics of Scaba SRGT and Rushton Turbine Impellers," *J. Chem. Eng. Japan*, **25**, 281-287 (1992)
- Van't Riet, K. and J. M. Smith; "The trailing vortex system produced by Rushton turbine agitators," *Chem. Eng. Sci.*, **30**, 1093-1105 (1975)

## Effect of Surface Roughness of Mixing Impeller on Power Consumption

Kenshi FUKUZAWA<sup>1</sup>, Riki TAKAHASHI<sup>1</sup>, Haruki FURUKAWA<sup>1</sup>, Yoshihito KATO<sup>1++</sup>  
and Seung-Tae KOH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Life Science and Applied Chemistry, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan

<sup>2</sup> 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, Power consumption, Surface roughness, Power correlation

Although there are many papers of the mixing power consumption, there is no paper that quantitatively discusses an effect of surface roughness of impeller blades on power consumption. In this paper, authors experimentally verified the effect of surface roughness of mixing impeller on the power consumption by machining the surfaces of various impellers to mimic rust and material changes. As a result, the ratio of surface roughness and diameter of the impellers had no effect on the power consumption when  $\varepsilon/d < 0.0125$ .