

# 攪拌翼エッジ部粗さの所要動力に及ぼす影響

古川陽輝<sup>1++</sup>・小坂真那<sup>1</sup>・加藤禎人<sup>1</sup>・高賢起<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 Department of Biological Chemical Engineering, Hongik University,  
2639 Sejong, Jochiwon, Sejong, 30016, Republic of Korea

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非常に少ない。前報では攪拌翼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表面粗さの影響を実験的に検証し、攪拌翼表面での粗さ要素の高さ $\varepsilon$ と翼径 $d$ の比 $\varepsilon/d < 0.0125$ では攪拌所要動力に影響を及ぼさないことを示した。本報ではさらにエッジ部の粗さを検討した。その結果、攪拌翼エッジ部での粗さ要素の高さと翼径の比 $\varepsilon/d > 0.0125$ では攪拌所要動力を若干増大させることがわかった。

## 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、攪拌翼表面粗さが攪拌所要動力に及ぼす影響を定量的に論じた知見は筆者らの前報(Fukuzawa *et al.*, 2024a),があるのみである。さらに、腐食環境で使用される表面が極めて滑らかなガラスライニング(GL)翼の攪拌所要動力を測定し、代表的な GL 翼の動力相関式に関する報告も筆者らの前報(Fukuzawa *et al.*, 2024b),があるのみである。ここで、表面粗さに関する筆者らの前報では翼の表面に粗さ要素を取り付けてはいるが、翼のシルエットが変化するような翼のエッジ部には粗さ要素を設置していない。そこで、実際の攪拌操作では攪拌槽の長年の使用によりエッジ部にもスケールが付着したり、錆びが生じた場合、あるいは長年の使用による摩耗のために、翼のエッジ部がでこぼこになったりした場合も考慮し、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エッジ部を加工し、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

攪拌槽には $D=182\text{ mm}$ の槽径の亚克力樹脂製平底円筒槽を用い、液高さは槽径と同じとし、攪拌翼として一般的に使用される4枚羽根パドル翼( $d=80.1\text{ mm}$ ,  $b=16.1\text{ mm}$ )を使用し、翼は槽中央に設置した。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(粘度 $0.0100\sim 5.52\text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 密度 $1200\sim 1400\text{ kg/m}^3$ )を用いた。

### 1.2 実験方法

筆者らの前報(Fukuzawa *et al.*, 2024a)と同様に、Fig. 1に示すような4枚パドル翼のエッジ部に直径と高さを等しくした円柱状の粗さ要素(高さ $\varepsilon=0.2\text{ mm}$ ,  $0.5\text{ mm}$ ,  $1\text{ mm}$ )を等間隔で縦5行、横10列付けた攪拌翼を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( $\varepsilon/d=0.0025$ ,  $0.0062$ ,  $0.0125$ )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。測定装置の詳細は筆者らの前報と同様である(Fukuzawa *et al.*, 2024b, Furukawa *et al.*, 2024, Furukawa *et al.*, 2019)。

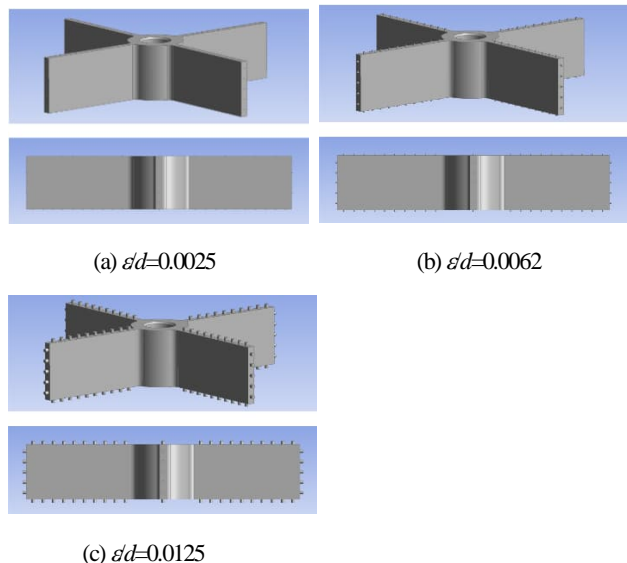
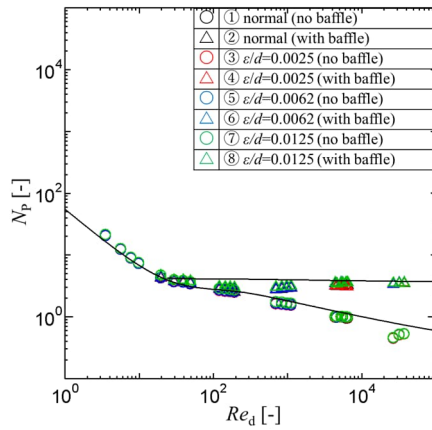


Fig. 1 Paddle impeller with element roughness made by 3D printer



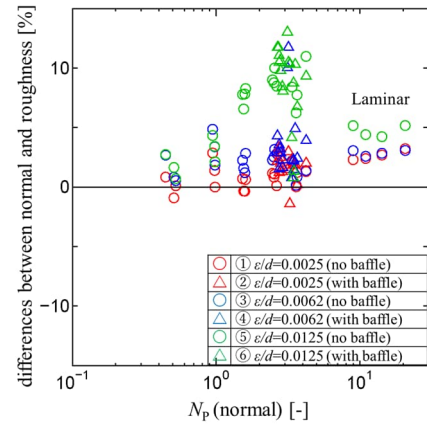
**Fig. 2** Relationship between power number and Reynolds number for paddle impeller

## 2. 実験結果と考察

**Fig. 2** に種々のパドル翼の動力測定結果を動力線図にして示した **Fig. 1** に示した粗さ要素を取り付けた翼のほかにも粗さ要素を取り付けない翼のデータと既存のパドル翼の相関線(Kamei *et al.*, 1995, 1996, Kato *et al.*, 2015b) も示した。層流域、乱流域、さらに邪魔板の有無にかかわらず、粗さ要素は図上では動力数にほとんど影響を及ぼさないように見える。

ただし、**Fig. 3** に動力数の差異  $(N_p(\text{粗さ要素あり}) - N_p(\text{粗さ要素なし})) / N_p(\text{粗さ要素なし})$  を縦軸に取り、横軸に  $N_p(\text{粗さ要素なし})$  をプロットしたものを示すが、前報で報告したような表面粗さを検討した時の差異の分布(Fukuzawa *et al.*, 2024a)とは異なり、粗さ要素の高さによって動力は若干増加する傾向にあるといえる。ただし、 $\varepsilon/d < 0.01$  では差異は 5% 未満であり、実用上は差なしと考えても問題ないと考えられる。

**Fig. 3** の左側は乱流域、右側に移るにしたがって層流域のデータとなる。図から層流域および完全乱流域の動力数は粗さ要素の高さが大きくなっても本実験の範囲内では 5% 以下で攪拌槽の実用操作上は問題となる差ではないと考えられる。前報(Fukuzawa *et al.*, 2024a)で示したように、乱流域では、①乱流の動力が攪拌翼背面に生ずる負圧部である trailing vortex の状況で決まること、②Trailing vortex の状況には翼のエッジ部の形状(鋭いか滑らかか)が影響するが、それ以外の部分の表面粗さは影響しない。よって、本研究で示したサイズの粗さ要素では trailing vortex に影響が出なかったと推測されるため、粗さ要素が動力へ影響をおよぼさなかった。これ以上の粗さ要素を大きくすることは、操作性に支障を及ぼし、翼に付着したスケールやさびなどは除去対象となる。そのため、本研究



**Fig. 3** Relationship between difference of power number with and without roughness element

の範囲外とする。一方で、筆者らの前報(Fukuzawa *et al.*, 2024b)で報告したように、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、通常の動力相関式は GL 翼には適用できない。本研究で用いたパドル翼では粗さ要素をつけた翼のエッジは元の攪拌翼と同様の加工であるため、攪拌所要動力に与える影響は小さかったと考えられる。

## 結 言

攪拌翼のエッジ部粗さは、 $\varepsilon/d < 0.01$  では差異は 5% 未満であり、攪拌所要動力にほとんど影響を及ぼさないが、 $\varepsilon/d$  が大きくなるにつれ動力数は若干増大することが分かった。

## 謝辞

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]
$D$	= vessel diameter	[m]
$d$	= impeller diameter	[m]
$H$	= liquid depth	[m]
$N_p$	= power number $(=P/\rho n^3 d^5)$	[-]
$P$	= power consumption	[W]
$Re_d$	= impeller Reynolds number $(=d^2 n \rho / \mu)$	[-]
$T$	= shaft torque	[N · m]
$\varepsilon$	= element of roughness	[m]
$\mu$	= liquid viscosity	[Pa · s]
$\rho$	= liquid density	[kg · m <sup>-3</sup> ]

## Literature Cited

- Fukuzawa, K., R. Takahashi, H. Furukawa, Y. Kato, and S.T. Koh; "Effect of Surface Roughness of Mixing Impeller on Power Consumption," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **50**, 78-81(2024a)
- Fukuzawa, K., R. Takahashi, H. Furukawa, Y. Kato, Y. Kato, T. Nemoto, K. Ago and S.T. Koh; "Power Correlation of Several Kinds of Glass-Lined Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **50**, 83-87(2024b)
- Furukawa, H., T. Kamiya and Y. Kato; "Correlation of Power Consumption of Double Impeller Based on Impeller Spacing in Laminar Region," Article ID: 4564589(2019)
- Furukawa, H., T. Ota and Y. Kato; "Effect of Inside Surface Baffle Conditions on Just Drawdown Impeller Rotational Speed," *Int. J. Chem. Eng.*, Article ID: 9254051(2024)
- 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)

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

Haruki FURUKAWA<sup>1++</sup>, Mana KOSAKA<sup>1</sup>, Yoshihito KATO<sup>1</sup> and Hyun-Gi 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 Biological Chemical Engineering, Hongik University, 2639 Sejong, Jochiwon, Sejong, 30016, Republic of Korea

E-mail address of corresponding author: furukawa.haruki@nitech.ac.jp

**Keyword:** Mixing, Agitation, Power consumption, Surface roughness, Power correlation

Although there are many reports on the mixing power consumption, there are very few reports that quantitatively discuss the effect of impeller surface roughness on the power consumption. In the previous paper, the effect of surface roughness on the power consumption was experimentally verified by applying a process that simulated rust and material changes to the surface of impeller blades, and it was shown that the power consumption was not affected when the ratio of the height of the impeller surface roughness element to the impeller diameter was  $\varepsilon/d < 0.0125$ . In this paper, the roughness of impeller edge was further investigated. It was found that the roughness of impeller edge slightly increased the power consumption.