

# パドル翼攪拌槽の翼位置による動力変化のレイノルズ数依存性

古川陽輝<sup>1</sup>・加藤禎人<sup>1††</sup>・多田豊<sup>1</sup>・高承台<sup>2</sup>・李泳世<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>韓国慶北大学校 NANO素材工学部化学工学専攻, 742-711 韓国慶北尚州市佳庄洞386

キーワード：攪拌，混合，所要動力，翼位置，邪魔板

邪魔板付き乱流攪拌槽では、パドル翼の取り付け位置によって動力数が増える。動力数は、翼の槽底からの距離  $C/H=0.25$  で極小値を示し、 $C/H=0.4-0.7$  で極大値をとる。本報では、極小値をとる  $C/H=0.25$  と極大値を取る  $C/H=0.5$  の翼取り付け位置による動力変化のレイノルズ数依存性を明らかにした。その結果、層流域から遷移域までは動力数に差異は発生しないが、レイノルズ数が 6000 を超える乱流域で動力数が増えることがわかり、その原因は流動状態が変化するためであった。

## 緒 言

攪拌槽に関する研究は非常に古くから行われており、単位操作の一つとしても非常に重要であることはいままでもない。攪拌槽の研究の中で最も重要なものの一つに、攪拌所要動力に関する研究があり、Rushton の動力線図 (Rushton *et al.*, 1950) および 2 枚羽根パドル翼に関する永田の動力相関式 (Nagata *et al.*, 1956) が有名である。また、永田の式以外の動力相関式としては Kamei *et al.* (1995a) が、永田の式が使えないような、羽根幅が広く羽根枚数が多い翼に対しては有効な相関式を提出した。

しかし、これらの相関式はいずれも翼を槽中央に設置したものであり、任意の取り付け高さには対応していない。その後の研究 (Kato *et al.*, 2010) で、動力数が増える翼取り付け位置に対して変化するのは、槽内にダブルループを発生させる放射流翼であり、その中でも翼を通過する流れが長周期で発生するパドル翼に限られることがわかった。翼中央部にディスクを持ち、安定した放射流を発生させるラシュトタービン翼、および、軸流成分の強い傾斜パドル翼やプロペラ翼などは槽内に安定した軸流のシングルループを発生させるため取り付け位置によって動力数は変化しないことがわかっている (Kamei *et al.*, 1995b)。また、旋回流が支配的になる邪魔板のない攪拌槽も動力数は変化しないことがわかっている。

そこで、本研究では、幅広い攪拌レイノルズ数において翼の取り付け位置を変化させた場合に生じる動力変化がどのレイノルズ数領域で発生するのかを明らかにする。さらに、動力変化の発生しやすいパドル翼を用いて、動力変化が生じる原因を明らかにした。

## 1. 実験方法

使用した攪拌槽はアクリル樹脂製の平底円筒槽であり、その内径  $D$  は 185mm とした。邪魔板条件は標準邪魔板条件 (槽径の 1/10 幅の邪魔板を 4 枚) とし、液面から槽底まで設置した。使用した翼はごく一般的な 4 枚パドル

翼であり、翼径  $d$  は 0.076m、翼幅  $b$  は 0.019m である。使用した流体は種々の粘度に調製した水飴水溶液と水道水であり、液高さ  $H$  は槽内径と等しくした。翼の取り付け位置は乱流域で動力数が極小値と極大値をとる  $C/H=0.25, 0.5$  とした。Figure 1 に使用した攪拌槽の幾何形状と記号を示した。

攪拌所要動力は、トルクメーター (SATAKE ST-3000) を用いて測定した。動力測定法はこれまでの筆者らの一連の方法 (Kato *et al.*, 2010) と同じなので、詳細は省略する。

流れの可視化は、前報 (Kato *et al.*, 2010) 同様、スリット光によるトレーサー法による。光の屈折による画像の乱れを軽減するために攪拌槽は水を満たした角槽内に設置した。

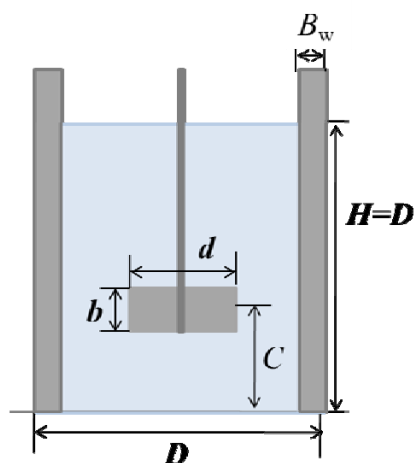


Fig.1 Geometry of mixing vessel

## 2. 結果と考察

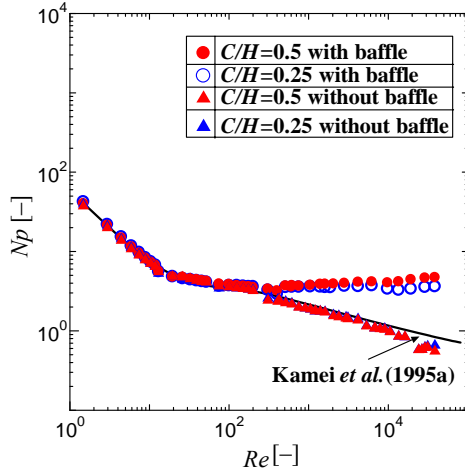


Fig.2 Dependence of power number on Reynolds number

まず、動力数の測定結果の妥当性を検討するために邪魔板無し攪拌槽に対して、2つの翼取り付け位置で、攪拌レイノルズ数を層流域から乱流域まで変化させて動力を測定した。その結果を Figure 2 に示した。邪魔板無し攪拌槽における動力数(▲)を  $C/H=0.5$  と  $C/H=0.25$  に対してプロットした。いずれも層流域から乱流域まで翼の取り付け位置に関わらず同じ動力数を示し、また動力相関式(Kamei et al., 1995a)とほぼ同じ数値を示し、測定値には問題ないことを確認した。

次に、幅広い攪拌レイノルズ数に対して邪魔板付きの動力数(●)を同様に Figure 2 に示した。邪魔板付き攪拌槽に対しては、層流域では動力数は同じ値をとるが、遷移域から完全乱流域の範囲で攪拌レイノルズ数が上昇するにつれ、翼取り付け位置による動力数の差異が徐々に大きくなり、最大で21%の差が生じた。

Figure 3 は動力数に差異が生じた邪魔板付攪拌槽の遷移域から乱流域の拡大図であり、より細かいレイノルズ数間隔で動力数を測定したものである。ただし、縦軸の動力数の軸は差異がわかりやすいように対数で

これまでよく知られているパドル翼の翼取り付け位置による動力変化を示したものである(Kamei et al., 1995b)。これによると攪拌レイノルズ数が1,000を超えると翼位置による動力数の変化が現れ始め、5,000を超えるくらいから差が広がり、6,000を超えると有意な差が観察された。ちょうどこのレイノルズ数から動力数も約20%の差が生じた。

Figure 4 は, Figure 3 に示した矢印の攪拌レイノルズ数でのフローパターンを可視化したものである。それほど動力数に変化の見られない①~②では翼の取り付け位置が変化してもフローパターンはダブルループを形成し、翼取り付け位置による流動状態の変化は観察されない

これに対して、攪拌レイノルズ数が6,000以上の③~⑤の完全乱流域において、槽底クリアランスの小さな  $C/H=0.25$  では完全にシングルループに変化しており、軸流翼とほぼ同じ様相を呈している。一般的に、パドル翼を槽底に近づけていくと動力が低下する原因は、攪拌槽内のフローパターンがダブルループの放射流タイプからシングルループの軸流タイプに変化するからであると考えられている。本実験でもこれと全く同じ現象が観察されたので、やはり、動力数が低下する理由は槽内のフローパターンが変化するためであると結論づけられる。これに関しては2段翼についても同様な考察がなされている(Takeda et al., 1968, Mochizuki et al., 1995, Nishikawa et al., 1979)。ただし、パドル翼のようなディスクを持たない翼のフローパターンは、 $C/H=0.5$  のときでも、乱流域では常にダブルループであるのではなく、長周期大規模変動の影響で、ある瞬間シングルループになることは古くから知られている(Winard et al., 1988)。従って、翼取り付け位置を槽底に近づけることによるシングルループへの変化はもともと持っていたそのような要素が顕在化したのものであると考えることもできる。このことはプロペラ翼のような軸流翼がなぜ動力数が比較的小さくなるのかを考える上でのヒントにもなるのではないだろうかと考えられる。

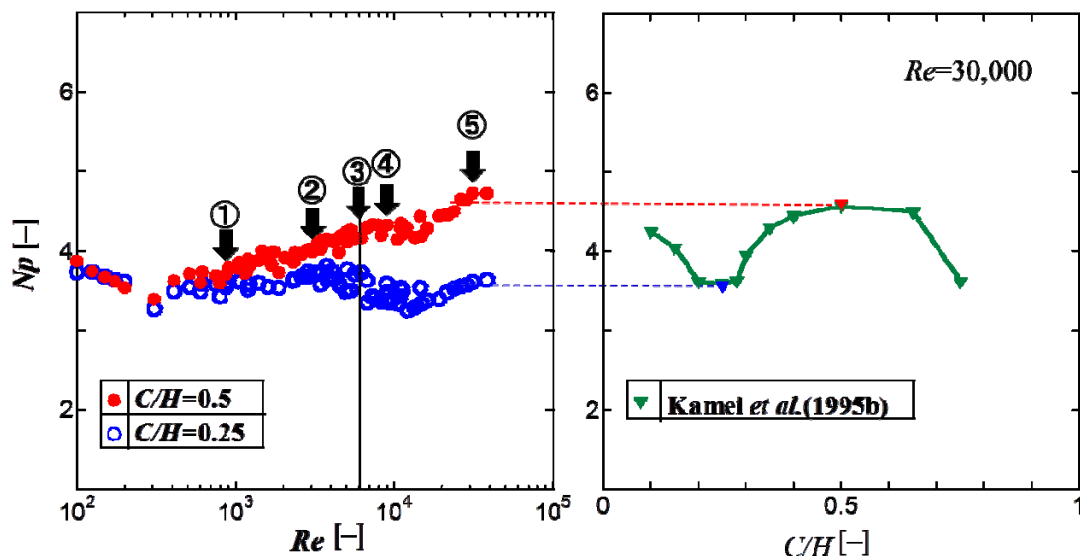


Fig.3 Effect of impeller position on power number

はなく通常プロットに変更している。Figure 3 の右には、

## 結 言

邪魔板付き乱流攪拌槽において翼の取り付け位置を変化させたとき、どのような流動状態で動力数に変化するのかを明らかにした。層流域から遷移域までは翼の取り付け位置に関わらず動力数に差異は見られなかったが、完全乱流域になると、槽底付近に翼を取り付けた場合は、レイノルズ数が 6000 を超える乱流域で動力数に変化することが明らかになった。

### Nomenclature

$b$	= height of impeller blade	[m]
$B_w$	= baffle width	[m]
$C$	= clearance between bottom and impeller	[m]
$d$	= impeller diameter	[m]
$H$	= liquid depth	[m]
$N_p$	= power number (= $P/\rho n^3 d^5$ )	[-]
$n$	= impeller rotational speed	[s <sup>-1</sup> ]
$n_b$	= number of baffle plate	[-]
$n_p$	= number of impeller blade	[-]
$P$	= power consumption	[W]
$Re$	= Reynolds number ( $nd^2\rho/\mu$ )	[-]
$\mu$	= liquid viscosity	[Pa · s]
$\rho$	= liquid density	[kg · m]

### Literature Cited

- 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 (1995a)
- Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, H. Ishizuka, K. Iwata, Y.S. Lee, T. Yamaguchi and S.T. Koh; "Effects of Impeller Dimensions and Position in a Baffled Agitated Vessel," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 696 – 702 (1995b)
- Kato, Y., Y. Tada, K. Urano, A. Nakaoka and Y. Nagatsu; "Differences of Mixing Power Consumption between Dished Bottom Vessel and Flat Bottom Vessel," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **36**, 25 – 29 (2010)
- Mochizuki, M., N. Takei, T. Satoh, K. Satoh and T. Akehata; "Power Required for Upper and Lower Impellers in Turbulent Mixing Vessels with Dual Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 628 – 632 (1995)
- Nagata, S., T. Yokoyama and H. Maeda; "Studies on the Power Requirement of Paddle Agitators in Cylindrical Vessels," *Kagaku Kogaku*, **20**, 582-592 (1956)
- Nishikawa, M., K. Asiwake, N. Hashimoto and S. Nagata; "Effect of Impeller Clearance on Power Consumption by Multi Stage Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 426 – 426 (1976)
- Nishikawa, M., N. Hashimoto, S. Fujieda and K. Hashimoto; "Effect of Impeller Level on Power Consumption Mixing Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **5**, 59 – 64 (1979)
- Rushton, J.H., E.W. Costich and H.J. Everett; "Power Characteristics of Mixing Impellers part 1," *Chem. Eng. Prog.*, **46**, 395-404 (1950)
- Takeda, K., T. Hoshino, H. Taguchi, and T. Fujii; "Characteristics

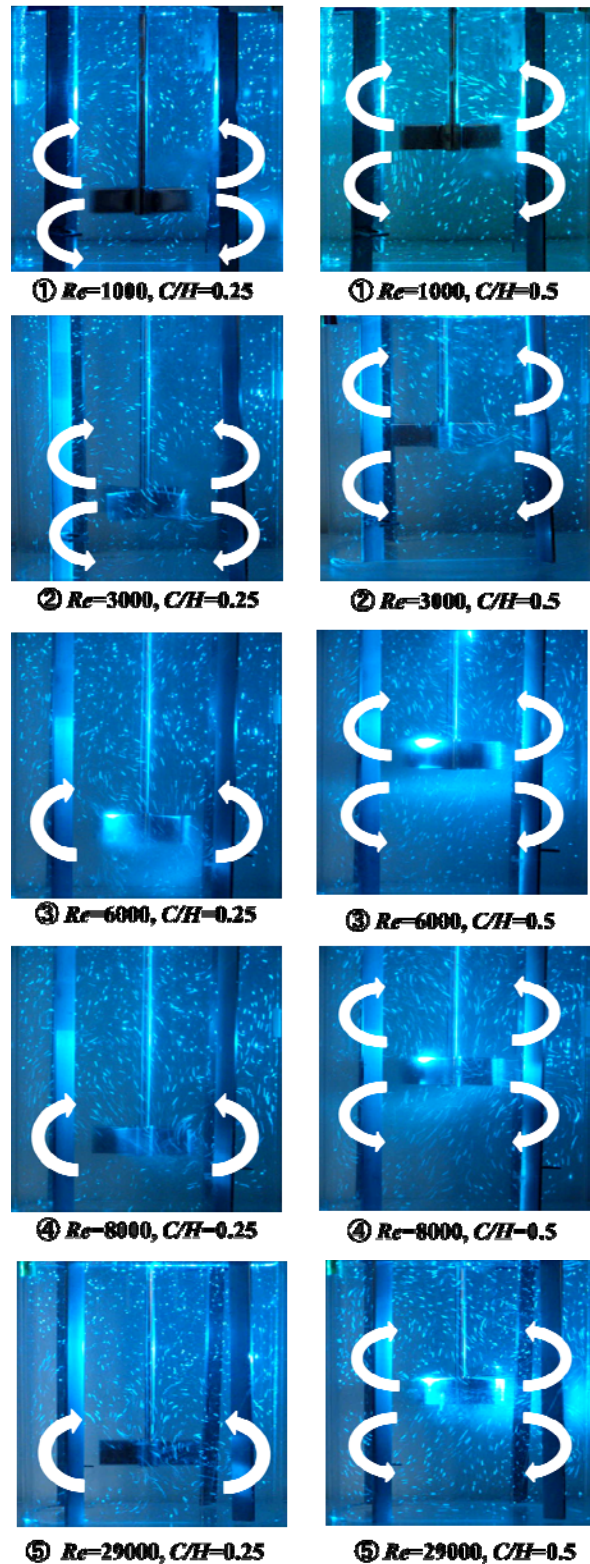


Fig.4 Visualization of flow pattern in mixing vessel with paddle impeller

- of the Multiple Impeller in Turbulent Mixing Operation a Deep Vessel," *Kagaku Kogaku*, **32**, 376 – 381 (1968)
- Winardi, S., S. Nakao and Y. Nagase; "Pattern Recognition in Flow Visualization around a Paddle Impeller," *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 503 – 508 (1988)

# Dependence of Reynolds Number for Power Consumption Change on Paddle Impeller Position

Haruki FURUKAWA<sup>1</sup>, Yoshihito KATO<sup>1</sup>, Yutaka TADA<sup>1</sup>,  
Song-Tae KOH<sup>2</sup> and Young-Sei LEE<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Life and Materials Engineering, 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

<sup>3</sup> School of NANO&Material Engineering, Kyungpook National University, 386 Gajangdong, Sangju, Kyungpook, 742-711, Korea

**Keyword** : Mixing, Agitation, Power Number, Impeller Position, Baffle

Power number of turbulent mixing vessels with a paddle impeller changes with the impeller position. The power number took the minimum at the impeller position  $C/H=0.25$ , took the maxima at  $C/H=0.4-0.7$ . In the present work, the dependence of the change in power number on the mixing Reynolds number was found. The deference in the power number from laminar to transition region was not found, however, the power number changed in the turbulent region larger than 6,000 of the mixing Reynolds number, because the flow pattern changed.