

# 角型偏芯攪拌槽に備えられたプロペラ翼の動力相関

古川陽輝・加藤禎人<sup>††</sup>・深津吉孝・多田豊

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: 偏芯攪拌, 動力数, 角槽, プロペラ翼, 相関式

偏芯攪拌槽に設置されたプロペラ翼の攪拌所要動力を測定した。これまで見積もることができなかった角型偏芯攪拌槽におけるプロペラ翼の動力数は、パドル翼や傾斜パドル翼の場合と傾向が大きく異なり、偏芯長さによらずほぼ一定値をとった。一方、円筒型偏芯攪拌槽の動力数はパドル翼同様、邪魔板枚数を1枚と仮定し、邪魔板幅を偏芯長さに置き換えることで相関できた。

## 結 言

これまで筆者らは、実際の工場に見られる攪拌槽のあらゆる攪拌翼や槽形状における所要動力を推算するために数々の動力相関式を提案してきた。パドル翼や傾斜パドル翼だけでなく、軸流の代表的な翼であるプロペラ翼やガラスライニング攪拌槽に多く見られる3枚後退翼、さらには多目的に使用可能なマックスブレンド、フルゾーンおよびスーパーミックスなどの大型パドル翼などあらゆる攪拌翼の動力数は、亀井らの動力相関式(Kamei *et al.*, 1995,1996)を元にしたそれぞれの動力相関式により推算が可能なることを示してきた(Hiraoka *et al.*, 1997, Kato *et al.*, 2009,2012)。さらに、最近では角型攪拌槽の動力や偏芯攪拌槽の動力も亀井らの相関式を元にする事で推算可能なことを示した(Furukawa *et al.*, to be published)。このとき、角型攪拌槽の動力数は、層流域から遷移域までは対角線の長さを槽径  $D$  とみなした邪魔板無し円筒槽の動力数と同じであることを見だし、乱流域の動力数は、邪魔板枚数  $n_B = 1$ 、邪魔板幅と断面の対角線の長さの比  $B_w/D = 0.1$  とすれば相関可能なことを見出した。また、工業的に使用される油剤の貯蔵ピットなどのような角型槽に攪拌軸を槽中心からずらし取り付けられる偏芯角型槽の動力推算方法も開発した。このときは、円筒槽も角槽もともに偏芯長さを邪魔板幅と見なすことにより推算が可能であった。ただし、この場合の動力数はいずれもパドル翼や傾斜パドル翼であり、いずれも放射流成分が強い傾向をもつ攪拌翼の場合であった。工業的にも実験室的にも偏芯攪拌としてはポータブルタイプのプロペラ翼が使用される場合が多いので本報では、プロペラ翼を角槽や偏芯攪拌に使用し、どのよ

うな動力特性を示すかを検討したのでここに報告する。

**Table 1** Correlation of Power number of propeller and pfaudler impeller (Kato *et al.*, 2009)

### Unbaffled condition

$$N_{P0} = \{[1.2\pi^4 \beta^2] [8d^3 D^2 H]\} f$$

$$f = C_L/Re_G + C_t \{[(C_w/Re_G) + Re_G]^{-1} + (f_{\infty}/C_t)^{1/m}\}^m$$

$$Re_d = nd^2 \rho / \mu$$

$$Re_G = \{[\pi \eta \ln(D/d)] / (4d/\beta D)\} Re_d$$

$$C_L = 0.215 \eta_p (d/H) [1 - (d/D)^2] + 1.83 (b \sin \theta H) (\eta_p / 2 \sin \theta)^{1/3}$$

$$C_t = [(3X^{1.5})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8}$$

$$m = [(0.8X^{0.373})^{-7.8} + (0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8}$$

$$C_w = 23.8 (d/D)^{-3.24} (b \sin \theta D)^{-1.18} X^{0.74}$$

$$f_{\infty} = 0.0151 (d/D) C_t^{0.308}$$

$$X = \eta_p^{0.7} b \sin^{1.6} \theta H$$

$$\beta = 2 \ln(D/d) / [(D/d) - (d/D)]$$

$$\eta = [\eta \ln(D/d) / (\beta D/d)^5]^{1/3}$$

$$\eta = 0.711 \{0.157 + [\eta_p \ln(D/d)]^{0.611}\} / \{\eta_p^{0.52} [1 - (d/D)^2]\}$$

### Baffled condition

$$N_p = [(1 + x^3)^{-1/3}] N_{Pmax}$$

$$x = 4.5 (B_w/D) n_B^{0.8} / \{(2\theta \pi)^{0.72} N_{Pmax}^{0.2}\} + N_{P0}/N_{Pmax}$$

### Fully baffled condition

$$N_{Pmax} = 6.5 (\eta_p^{0.7} b \sin^{1.6} \theta d)^{1.7}$$

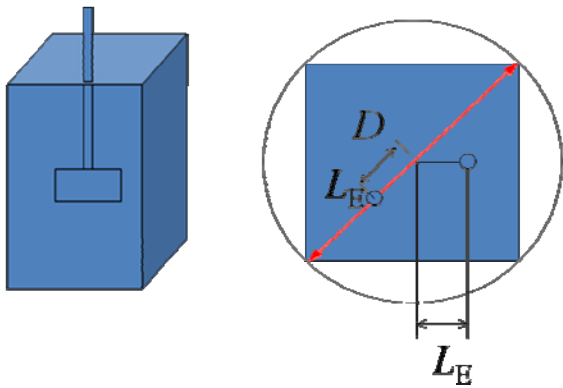


Fig.1 Dimension of rectangular mixing vessel

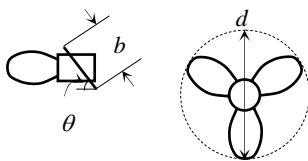


Fig.2 Schematic diagram of propeller impeller

## 1. 実験方法

使用した攪拌槽はアクリル樹脂製の断面が正方形の角型槽と複数の円筒槽である。角型槽内側の一边の長さは、Figure 1に示すように外接円の半径  $D$  が 367mm となるように設定した。いずれの場合も、液は水道水を使用し、液高さは槽径と等しくした。プロペラ翼には寸法を Figure 2 に示したような翼径  $d=73$  および 69 mm、翼幅  $b/d=0.25$  および 0.32、羽根角度  $\theta = \pi/4$  および  $\pi/6$  の 2 種類の 3 枚羽根翼を使用した。層流域では偏芯効果が無く動力数は中心攪拌と同じ値になるため、乱流域のみの測定とした。

攪拌所要動力は、最も一般的な軸トルク測定法を用いた。使用したトルクメーターは SATAKE ST-3000 である。攪拌所要動力はその平均トルクを用いて  $P=2\pi nT$  で求めた。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、そちらを参照されたい。

## 2. 結果と考察

### 2.1 偏芯角槽の動力相関

プロペラ翼に対して決定された Table 1 に示す相関式(Kato *et al.*, 2009)の邪魔板付き攪拌槽の式の中のパラメータのうち、整数値を取る邪魔板枚数  $n_B$  を 1 に固定し、邪魔板幅  $B_W$  にそのまま偏芯

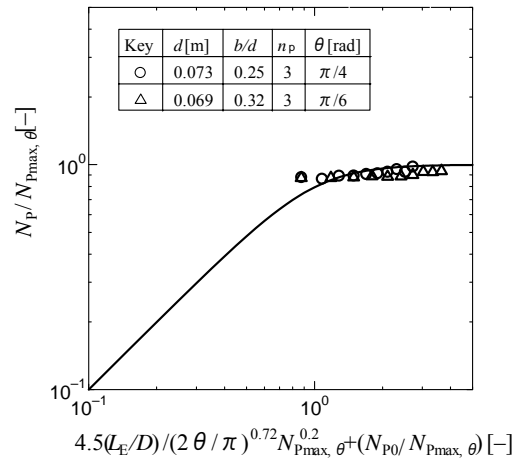


Fig.3 Correlation of power number of eccentric rectangular vessel off-centered in normal direction to wall with Eq.(1).

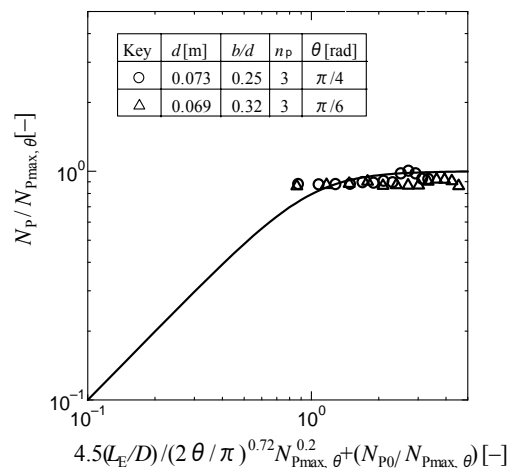


Fig.4 Correlation of power number of eccentric rectangular vessel off-centered in diagonal direction with Eq.(1).

長さ  $L_E$  を代入して、相関した結果を Figures 3 および 4 に示す。角槽の場合の偏芯の仕方は二通りあり、直角方向に偏芯させる方法と対角線方向に偏芯させる場合である。Fig.3 は直角方向にずらした場合、Fig.4 は対角線方向にずらした場合である。図中の記号は実測値であり、実線が相関線である。パドル翼や傾斜パドル翼の場合はこの相関線とよく一致したのと同様、プロペラ翼の場合も実測値は相関値とよく一致した。しかし、パドル翼のように偏芯長さが小さいときは動力数が小さくなるのではなく、プロペラ翼は偏芯長さによらず、すでに完全邪魔板条件に近い動力数を取るため、常に一定値を示す傾向にあった。このときの  $N_{p0}$  は円筒槽ではなく角槽の中心攪拌時の動力数を代入し、相関線は、パドル翼の場合と同様、邪魔板条件の動力相関式の中の邪魔板幅を偏芯長さに置き換えたもの(Furukawa *et al.*, to be published)である。

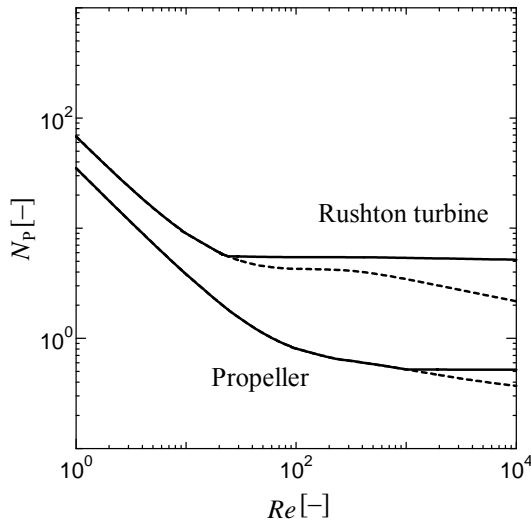


Fig.5 Power diagram of Rushton turbine and propeller impeller (solid line : with baffle, broken line: without baffle)

$$N_p = [(1+x^{-3})^{-1/3}] N_{pmax}$$

$$x = 4.5(L_E/D) \{ (2\theta/\pi)^{0.72} N_{pmax}^{0.2} \} + N_{p0}/N_{pmax} \quad (1)$$

この原因は以下のように考えられる。Figures 5 に Rushton タービン翼と本実験で用いたプロペラ翼の動力線図を示す。タービンの場合は邪魔板有り攪拌では攪拌レイノルズ数が 10 のオーダーで邪魔板無し攪拌槽の動力線図から分岐し始めるが、プロペラ翼の場合は  $10^3$  のオーダーからの分岐になる。したがって、邪魔板有り無しとの動力数の差が比較的小さく、緩い邪魔板条件でも完全邪魔板条件に近い数値になるためであると考えられる。これは、タービン翼が放射流主体の翼であるのに対し、プロペラ翼は軸流主体の翼であるためと考えられる。

もう一つの考え方として、偏心長さによらず一定の動力数を取るため、Figs.3,4 より  $N_p = 0.89N_{pmax}$  と解釈できることから、単純化された次式で相関することもできる。

$$N_p = 5.8(n_p^{0.7} b \sin^{16} \theta d)^{1.7} \quad (2)$$

## 2.2 偏心円筒槽の動力相関

円筒槽の場合の偏心攪拌の動力数も測定し、同様な方法で相関可能かどうかを検討した。その結果、Figures 6,7 に示すとおり、同様の考え方で Eq.(1) によって相関可能であることがわかった。Fig.6 は槽内径が 240mm、Fig.7 は 360mm の円筒槽のデータである。このときの式中の  $N_{p0}$  には円筒槽の中心攪拌時の動力数を代入した。偏心長さを邪魔板幅に置き換える形で動力相関が可能になったが、円筒槽の場合は旋回流が発生しやすいために、偏心長

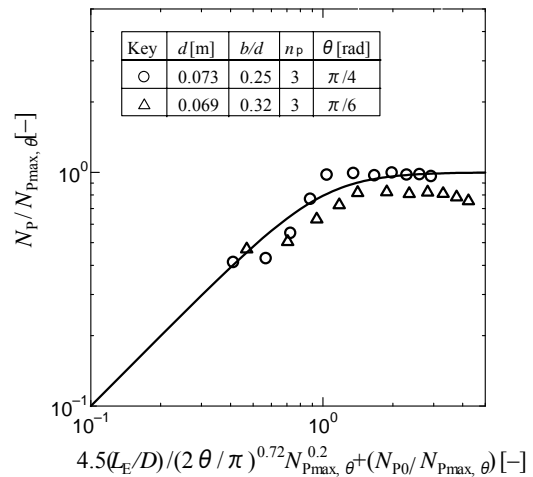


Fig.6 Correlation of power number of eccentric cylindrical vessel ( $D=240\text{mm}$ ) with Eq.(1).

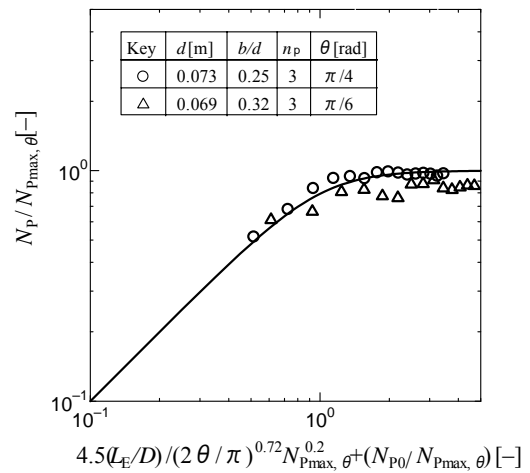


Fig.7 Correlation of power number of eccentric large cylindrical vessel ( $D=360\text{mm}$ ) with Eq.(1).

さが小さいときは動力数も小さい値をとり、偏心長さが増加するにつれて動力数も増加し、やがて飽和するというパドル翼や傾斜パドル翼と同様の傾向を示した。

## 結 言

プロペラ翼を持つ角型偏心および円筒型偏心攪拌槽の動力数を測定した。このとき、角槽のプロペラ翼の動力特性はパドル翼のそれと大きく異なり、偏心長さによらず、一定の動力数を取ることがわかった。これにより、ポータブルタイプのプロペラ翼のモーター動力をどのようにして決定すれば良いかの大きな指針が得られたと考えられる。

## Nomenclature

$b$	= height of impeller blade	[m]
$B_W$	= baffle width	[m]
$D$	= characteristic length., diagonal for rectangular or diameter for cylindrical vessel	[m]
$d$	= impeller diameter	[m]
$H$	= liquid depth	[m]
$L_E$	= eccentric length	[m]
$N_P$	= power number ( $=P/\rho n^3 d^5$ )	[—]
$N_{P0}$	= power number at non-baffled condition	[—]
$N_{Pmax}$	= power number at fully baffled condition	[—]
$n$	= impeller rotational speed	[s <sup>-1</sup> ]
$n_B$	= number of baffle plate	[—]
$n_p$	= number of impeller blade	[—]
$P$	= power consumption	[W]
$Re_d$	= impeller Reynolds number ( $nd^2\rho/\mu$ )	[—]
$T$	= shaft torque	[N · m]
$\theta$	= angle of impeller blade	[—]
$\mu$	= liquid viscosity	[Pa · s]
$\rho$	= liquid density	[kg · m <sup>-3</sup> ]

## Literature Cited

- Furukawa H., Y. Kato, F. Kato, Y. Fukatsu and Y. Tada ; “Correlation of Power Consumption for Rectangular Mixing Vessel,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, (to be published)
- Hiraoka, S., N. Kamei, Y. Kato, Y. Tada, H.G. Chun and T. Yamaguchi; “Power Correlation for Pitched Blade Paddle Impeller in Agitated Vessels with and without Baffles,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **23**, 969–975 (1997)
- 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 Syindrical 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., A. Obata, T. Kato, H. Furukawa and Y. Tada; “Power Consumption of Two-Blade Wide Paddle Impellers,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **38**, 139–143 (2012)
- 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)
- Kato, Y., Y. Tada, Y. Takeda, Y. Hirai and Y. Nagatsu; “Correlation of Power Consumption for Propeller and Pfaudler Type Impeller;” *J. Chem. Eng. Japan*, **42**, 6–9 (2009)

## Correlation of Power Consumption for Eccentric Rectangular Mixing Vessel with Propeller Impeller

Haruki FURUKAWA, Yoshihito KATO<sup>††</sup>, Yoshitaka FUKATSU and Yutaka TADA

*Department of Life and Materials Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan*

**Keyword** : Eccentric Mixing, Power Number, Rectangular Vessel, Propeller, Correlation

Power consumption was measured for a rectangular eccentric mixing vessel with a propeller impeller. The power number of rectangular eccentric mixing vessels was constant regardless of the eccentric length, unlike the case of paddle and pitched paddle impellers. The power number for a cylindrical eccentric mixing vessel was correlated with the equations of propeller impeller by taking the number of baffles as unity and the baffle width as the eccentric length of the mixing shaft.