

# ディスペー翼の攪拌所要動力の相関

加藤禎人<sup>1++</sup>・南雲亮<sup>1</sup>・古川陽輝<sup>1</sup>・伊藤晋太郎<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, 高剪断翼, 相関式

塗料や化粧品など微細粒子を液体に分散させる場合や、乳化のために使用される高剪断ディスペー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ディスペー翼の動力数は、亀井らの相関式のパラメータを修正することにより幅広いレイノルズ数領域で推算可能になった。

## 緒 言

ディスペー翼は主として塗料や化粧品などの分散処理、液液系の乳化に使用されることが多く、Figure 1 に示すような鋸の刃のようにディスクのエッジを交互に上下に折り曲げた円形の翼である(Kagakukogakukai, 2011, Ohshima and Hirata, 1997)。この翼は、高速回転(翼先端速度：10m/s～30m/s)させることにより粉体を分散、また、凝集物を局所的なせん断作用により粉碎・分散させる作用を持っている。工業的に使用されることが多い攪拌翼であるが、その性能は学術論文にほとんど記載されたことはなく、装置設計などは経験的に行われているに過ぎない。したがって、増能力やスケールアップを行う場合などは、技術的に参考となる公表された資料が皆無のため経験的にも困難になることが多い。そこで、筆者らは乱流攪拌槽の性能評価や設計に必須である攪拌所要動力のデータを採取することにした。ディスペー翼の幾何形状から攪拌所要動力が推算可能になれば、その剪断速度や物質移動特性などが予測可能になり、工業的な生産装置に対してかなり有用な知見になり得ると考えられる。

ディスペー翼の攪拌所要動力の推算式には従来から実績のある(パドル翼だけでなく、プロペラ翼やファウドラー翼、アンカー翼や各種の2枚大型攪拌翼、さらには球型槽や角槽など種々の形式の攪拌所要動力を幅広いレイノルズ数で相関することが可能(Funakawa et al., 2013a,2013b)である。)、Table 1 に示す亀井らの動力相関式(Kamei et al., 1995,1996)を適用することを考えた。その結果、その式中の乱流域と遷移域のパラメータを修正することにより、種々の形状のディスペー翼の動力推算が可能になったので

ここに報告する。

**Table 1** Correlation of Kamei et al. for paddle impeller (Kamei et al., 1995,1996)

### Unbaffled condition

$$N_{p0} = \{[1.2\pi^4\beta^2]/[8d^3/(D^2H)]\}f$$

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

$$Re_d = nd^2\rho/\mu, Re_G = \{[\pi\eta\ln(D/d)]/(4d/\beta D)\}Re_d$$

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

$$C_T = [1.96X^{1.19} - 7.8 + (0.25)^{-7.8} - 1.78, m = [(0.71X^{0.373} - 7.8 + (0.333)^{-7.8} - 1.78]$$

$$C_T = 23.8(d/D)^{-3.24}(b/D)^{-1.18}X^{0.74}$$

$$f_{\infty} = 0.0151(d/D)C_T^{0.308}, X = \eta_p^{0.7}b/H, \beta = 2\ln(D/d)/[(D/d)-(d/D)]$$

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

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

### Baffled condition

$$N_p = [(1+x^{-3})^{-1/3}]N_{pmax}, x = 4.5(B_w/D)n_B^{0.8}/N_{pmax}^{0.2} + N_{p0}/N_{pmax}$$

### Fully baffled condition

$$= 10(n_p^{0.7}b/d)^{1.3} \quad n_p^{0.7}b/d \leq 0.54$$

$$N_{pmax} \quad \{ = 8.3(n_p^{0.7}b/d) \quad 0.54 < n_p^{0.7}b/d \leq 1.6$$

$$= 10(n_p^{0.7}b/d)^{0.6} \quad 1.6 < n_p^{0.7}b/d$$



Type A

Type B

Fig.1 Photograph of typical disper impeller



Fig. 2 Dimension of disper impeller

Table 2 Experiment conditions

Run	Type	D[mm]	d[mm]	d/D[-]	b[mm]	$n_p$ [-]
(1)	A	120	70	0.58	11	6
(2)	A	120	60	0.50	8.2	4
(3)	B	120	70	0.58	21	4
(4)	B	120	60	0.50	20	4
(5)	A	185	70	0.38	11	6
(6)	A	185	60	0.32	8.2	4
(7)	B	185	70	0.38	21	4
(8)	B	185	60	0.32	20	4
(9)	A	240	70	0.29	11	6
(10)	A	240	60	0.25	8.2	4
(11)	B	240	70	0.29	21	4
(12)	B	240	60	0.25	20	4

## 1. 実験方法

使用した攪拌槽はアクリル樹脂製平底円筒槽であり、その内径は 120, 185 および 240 mm であり、液高さは槽径と等しくした。ディスパー翼の幾何形状は Figures 1, 2 に示すようなもので、計 4 種類のものを使用した。これらの攪拌槽、攪拌翼を組み合わせ様々な条件で動力の測定をした。組み合わせは Table 2 に示した。また、Rushton タービン翼の動力相関において翼中央部のディスクの影響はきわめて小さいことから、ディスパー翼でも同様なことが考えられるため、Fig.1 の Type B に示すような製作の容易な特殊な形状のディスパー（本論文では Fig.1 の左側の通常のディスパー翼を A タイプ、右側の特殊な形状のディスパー翼を B タイプと呼ぶことにする。）を同時に検討した。

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-1000 である。現在は ST-3000 が主流であるが、ディスパー翼は消費動力がきわめて小さいために小さな動力に対しては ST-1000 の方が有効である。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)と同じである。

## 2. 結果と考察

### 2.1 邪魔板無しの動力相関

#### (1) 層流域のパラメータ

攪拌レイノルズ数が小さい層流域において、Table 1 に示す亀井らの式(Kamei *et al.*, 1996)を用いて相関した結果、とくにパラメータ  $C_L$  を修正する必要がなく問題なく相関できた。このとき羽根幅は上向きに折り曲げた羽根と下向きに折り曲げた羽根の両者の合計の長さとし、羽根枚数も両者を一組として換算した。このように換算することで層流域のデータはパラメータを修正することなく良好に相関できたためである。したがって、Fig.1 に示した Type A および Type B のような形状では羽根枚数  $n_p$  はそれぞれ 6 および 4 枚と換算する。

#### (2) 乱流域のパラメータ

$Re_d$  が 2000 以上の領域で攪拌所要動力を測定し、摩擦係数  $f$  と修正レイノルズ数  $Re_G$  を求めた。そして乱流域のパラメータ  $C_t$  および  $m$  を求め、相似パラメータ  $X$  による相関式を修正した。また  $f_\infty$  はパドル翼のものを使用すると実測値を上回ってしまうため修正した。その結果、乱流域のパラメータはそれぞれ次式のよう修正された。

$$C_t = [(0.79X^{1.36})^{7.8} + (0.25)^{7.8}]^{-1/7.8} \quad (1)$$

$$m = [(0.56X^{0.266})^{7.8} + (0.333)^{7.8}]^{-1/7.8} \quad (2)$$

$$f_\infty = 0.0076 (d/D) C_t^{0.308} \quad (3)$$

#### (3) 遷移域のパラメータ

新たな  $C_L$ 、 $C_t$  および  $m$  の相関を基にすべての領域のデータを用いて、実測値とのフィッティングにより、遷移域のパラメータ  $C_u$  を次式のように決定した。

$$C_u = 0.002 (d/D)^{-3.24} (b/D)^{-1.18} X^{0.74} \quad (4)$$

ディスパーはこのパラメータの値に特徴があり、一般的な攪拌翼であるパドル翼などは  $10^3 \sim 10^5$  の数値をとるのに対し、ディスパーは  $10^1$  程度の小さな数値をとった。修正方法は簡単のために  $C_t$  の各変数の指数は変更せず、定数項のみ修正することにした。その結果、定数項はパドル翼などの値である 23.8 に比較して非常に小さい 0.002 となった。

### 2.2 邪魔板有りの動力相関

#### (1) 完全邪魔板条件

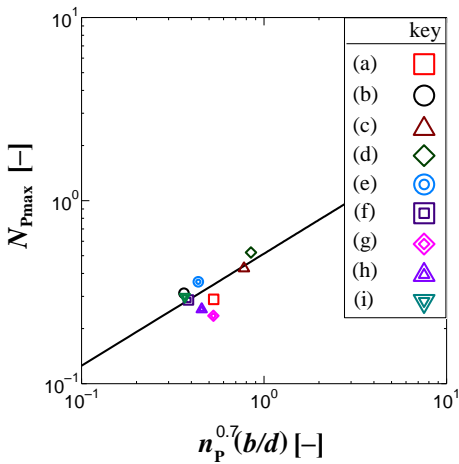
完全邪魔板条件の動力数は一つの翼に対してデータがただ一つしか得られないため、Table 1 の 4 種類のディスパー翼に加え、さらに 5 種類のディスパー翼も併せて完全邪魔板条件の動力を測定した。使用した 9 種類のディスパー翼の寸法を Table 3 に示す。(a)-(d) は前項までの検討で使用されたディスパー翼で、(e)-(i) のディスパー翼が本項で新たに追加したディスパー翼である。

**Table 3** Geometry of disper impellers

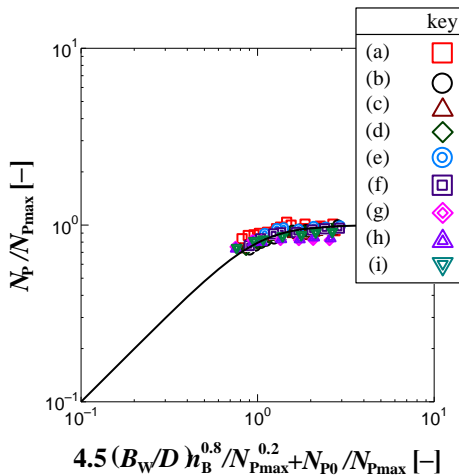
	Type	$d$ [mm]	$b$ [mm]	$n_p$ [-]
(a)	A	70	11	6
(b)	A	60	8.2	4
(c)	B	70	21	4
(d)	B	60	20	4
(e)	A	50	8.2	4
(f)	A	60	8.7	4
(g)	A	147	18	8
(h)	A	147	19	6
(i)	A	147	21	4

完全邪魔板条件における動力の翼相似パラメータに対する相関結果を **Figure 3** に示す。最も羽根枚数の多い(g)の翼が若干外れているが、次式のように相関できた。

$$N_{P_{\max}} = 0.51(n_p^{0.7} b/d)^{0.61} \quad (5)$$



**Fig. 3** Correlation of  $N_{P_{\max}}$  for disper impeller



**Fig. 4** Correlation of power number with baffled condition for disper impeller.

## (2) 緩い邪魔板条件の相関式

前項と同様に 9 種類のディスパー翼で緩い邪魔板条件の動力数を測定した。使用した邪魔板条件は  $n_B=1, 2, 4$ ,  $B_w/D=0.04, 0.05, 0.07, 0.08, 0.1, 0.13$  とした。後述するが、ディスパーの動力数は邪魔板無しと邪魔板有りの動力数の差が現れるのが極めて高いレイノルズ数からなので、液には水道水を用いた。結果を **Figure 4** に示す。また図中の実線は次式に示す緩い邪魔板条件での相関式である。

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

$$x = 4.5(B_w/D) n_B^{0.8} / N_{P_{\max}}^{0.2} + N_{P0} / N_{P_{\max}} \quad (6)$$

修正した相関値はよく実測値と一致した。また、この図からわかるように、縦軸の値がほぼ 1 となっているため、緩い邪魔板条件でも完全邪魔板条件に近い動力をとっており、動力数は邪魔板条件に左右されにくいことがわかった。この傾向はプロペラ翼の動力相関の場合とよく似ているが、邪魔板無しから邪魔板有りへ分岐する点が極めて高いレイノルズ数であることと、完全邪魔板条件の動力数が極めて低い値になるため差が生じにくいものと考えられる。

## 2.3 幅広いレイノルズ数における相関式

広い攪拌レイノルズ数領域の動力数の実測値と相関値の比較を **Figures 5,6** に示す。実験は **Table 2** に示した 12 通りすべての条件で行ったが、代表して **Table 2** の条件(5), (7), の結果を示した。記号は実測値、実線は相関式 ( $n_B=0$ ,  $\circ$ ,  $-$ ;  $n_B=2$ ,  $\triangle$ ,  $-$ ;  $n_B=4$ ,  $\square$ ,  $-$ ) を示している。使用された邪魔板は  $B_w/D=0.1$  である。本論文で提案するディスパー翼の相関式をまとめて **Table 4** に示す。いずれの条件においても、翼の形式や槽径の幾何形状が変化しても良好におおむね 5% の誤差で相関できたと考えられる。このことから、亀井らによって提案された動力相関式の有用性がさらに高まったと考えられる。

**Table 4** Correlation for disper impeller

### Unbaffled condition

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

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

$$Re_d = nd^2 \rho / \mu, \quad Re_G = \{[\pi n] \ln(D/d) / (4d/\beta D)\} Re_d$$

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

$$C_t = [(0.79X^{1.36})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8}$$

$$m = [(0.56X^{0.266})^{-7.8} + (0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8}$$

$$C_{tr} = 0.002 (d/D)^{-3.24} (b/D)^{-1.18} X^{0.74}$$

$$f_{\infty} = 0.0076 (d/D) C_1^{0.308}$$

$$X = n_p^{0.7} b/H$$

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

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

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

#### Baffled condition

$$N_{P0} = [(1+x^{-3})^{-1/3}] N_{Pmax}, \quad x = 4.5 (B_w/D) n_B^{0.8} / N_{Pmax}^{0.2} + N_{P0} / N_{Pmax}$$

#### Fully baffled condition

$$N_{Pmax} = 0.51 (n_p^{0.7} b/d)^{0.61}$$

## 結 言

ディスパー翼の動力数は、亀井らによって提案された相関式のパラメータを修正することにより、相関可能であることがわかった。また、ディスパー翼の邪魔板あり攪拌槽の動力数は邪魔板無し攪拌槽のそれよりも大きくなるが、邪魔板条件が変化しても（邪魔板幅や邪魔板の枚数によらず）動力数の変化が小さいことがわかった。これにより、攪拌槽設計のための亀井らの動力相関式はあらゆる形状の攪拌翼に対応できる可能性がさらに高まったと考えられる。

## 謝 辞

本研究に用いた5種類のディスパー翼は佐竹化学機械工業(株)の塩原克己氏、佐藤誠氏にご提供いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

## Nomenclature

$b$	= height of impeller blade	[m]
$B_w$	= baffle width	[m]
$D$	= characteristic length., diagonal for rectangular	[m]
$d$	= impeller diameter	[m]
$H$	= liquid depth	[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]

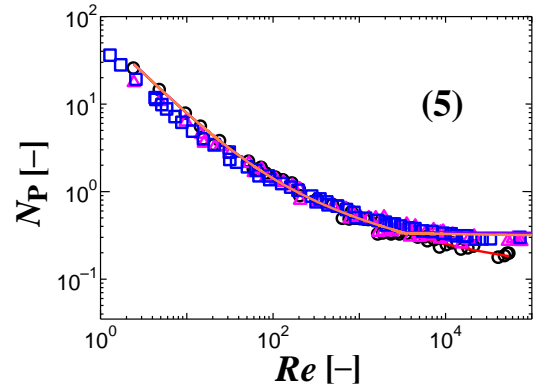


Fig.5 Correlation of power number for Run (5)

(Type A,  $D=185$  mm,  $d=70$  mm,  $b=11$  mm,  $n_p=6$ )

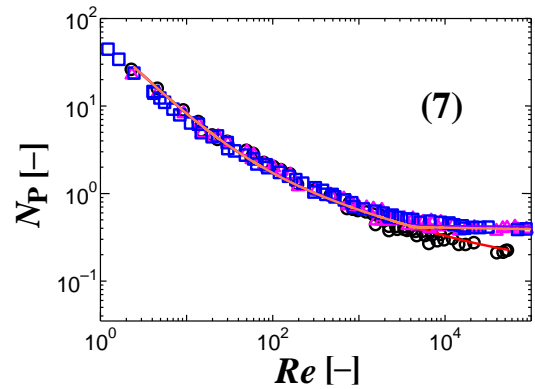


Fig.6 Correlation of power number for Run (7)

(Type B,  $D=185$  mm,  $d=70$  mm,  $b=21$  mm,  $n_p=4$ )

$$Re_d = \text{impeller Reynolds number } (nd^2\rho/\mu) \quad [ - ]$$

$$Re_G = \text{modified Reynolds number } ( \{ [\pi\eta \ln(D/d)] / (4d/\beta D) \} Re_d ) \quad [ - ]$$

$$T = \text{shaft torque} \quad [N \cdot m]$$

$$\theta = \text{angle of impeller blade} \quad [ - ]$$

$$\mu = \text{liquid viscosity} \quad [Pa \cdot s]$$

$$\rho = \text{liquid density} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

## Literature Cited

- Furukawa H., Y. Kato, F. Kato, Y. Fukatsu and Y. Tada ; "Correlation of Power Consumption for Rectangular Mixing Vessel," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, , **39**, 94—97(2013a)
- Furukawa H., Y. Kato, Y. Fukatsu and Y. Tada ; "Correlation of Power Consumption for Eccentric Rectangular Mixing Vessel with Propeller Impeller," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, , **39**, 175—177(2013b)
- Kagakukogakukai ; *Kagakukogaku Binran*, 7th ed., p.375, Maruzen, Japan (2011)
- 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., 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)

Ohshima, E. and Y. Hirata; *Theory and Applications of Emulsification and Dispersion*, Jitsuyohen, pp.30-35, Tokusyukika, Japan (1997)

## Correlation of Power Consumption for Dispersing Impellers

Yoshihito KATO<sup>1</sup>, Ryo NAGUMO<sup>1</sup>, Haruki FURUKAWA<sup>1</sup>, Shintaro ITO<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, I 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, High Share Impeller, Correlation

The power consumption was measured for high-shear dispersing impellers used for dispersing paint, cosmetic materials and emulsification. The power number of the impellers could be correlated with the modified equations of Kamei *et al.* over a wide range Reynolds number.