

2枚羽根大型パドル翼のMetzner-Otto定数の推算

古川陽輝・中村紀久・加藤禎人・南雲亮・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：搅拌，混合，動力数，擬塑性流体，Metzner-Otto定数

擬塑性流体で2枚羽根大型パドル翼の搅拌所要動力を測定した。擬塑性流体にはカルボキシメチセルロース(CMC)水溶液を用いた。本研究では、Metzner and Otto(1957)の手法を用いて、Metzner-Otto定数 k_s の推算を試みた。その結果、翼径が大きくなるほど、大型翼の k_s の値は大きくなり、亀井ら(1994)の式により相関できた。

緒 言

搅拌槽の設計において、搅拌所要動力は非常に有用である。そのため、これに関する研究は古くから行われており、有名なものにはRushtonの動力線図(Rushton et al., 1950)や永田の動力相関式(Nagata et al., 1957)がある。近年では、亀井ら(1995, 1996)により非常に広範囲な翼形状や操作条件に対して有効な相関式が考案されている。

いずれの動力相関式もニュートン流体を用いた場合にのみ適用できる。一方で、工業的には非ニュートン流体を扱う場合もある。この場合、動力相関式はそのままでは適用できない。そこでMetzner and Otto(1957)に倣い、翼形状から定まるMetzner-Otto定数 k_s と翼回転数 n から槽内平均剪断速度 $\dot{\gamma}_{av}$ を次式のように求める。

$$\dot{\gamma}_{av} = k_s n \quad (1)$$

次に、非ニュートン流体の流动曲線を用いて $\dot{\gamma}_{av}$ に対応する剪断応力 τ から見掛け粘度 μ_{app} を推算する。これにより、既往の相関式を用いて動力推算できる。

本報では、日本のメーカーによって開発された各種2枚羽根大型パドル翼の擬塑性流体における k_s について検討したので報告する。

1. 実験方法

使用した搅拌槽はアクリル樹脂製平底円筒槽であり、その内径 D は0.185 mとし、液高さ H は $H/D=1$ とした。**Figure 1**に各幾何形状の記号を示す。使用した搅拌翼は、マックスブレンド翼、フルゾーン翼、スーパーミックス MR203 翼、スーパーミックス MR205 翼である。各翼の概形を**Figure 2**に、寸法を**Table 1**にそれぞれ示す。使用した搅拌液は、3.5wt%, 4.0wt%, 4.5wt%に調製したカルボキシメチセルロース(CMC)水溶液である。これらの溶液の流动曲線をcone-plate型レオメータ(HAAKE HS600)で測定した。

搅拌所要動力 P は、最も一般的な軸トルク測定法を用いて測定された。使用したトルクメーターはSATAKE ST-3000である。軸トルクは、定常運転時でも一定値としては出力されないので、波形データとしてその平均値 T を求め、 $P=2\pi nT$ から搅拌所要動力を求めた。動力測定法は加藤ら(2010)と同様なので、そちらを参照されたい。

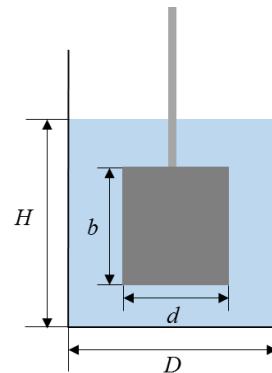


Fig. 1 Dimensions of mixing vessel

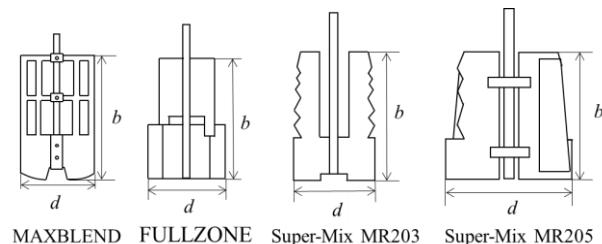


Fig. 2 Dimensions of impellers

Table 1 Geometry of impellers

No.	Impeller	d [m]	b [m]
1	MAXBLEND	0.097	0.180
2		0.109	0.180
3		0.119	0.180
4		0.129	0.180
5	FULLZONE	0.088	0.167
6		0.112	0.159
7	Super-Mix MR203	0.104	0.160
8	Super-Mix MR205	0.132	0.140

2. 結果と考察

2.1 CMC 溶液の流動曲線

Figure 3に各濃度のCMC水溶液の測定結果を示した。本研究で使用したCMC水溶液は剪断速度 $\dot{\gamma}$ の上昇に連れ、 τ の増加率が減少する擬塑性を示した。それらは次式で表される指数法則モデルで精度よく近似できた。

$$\tau = \alpha \dot{\gamma}^\chi \quad (2)$$

各溶液の α, χ をTable 2に示す。

2.2 搪拌所要動力と Metzner-Otto 定数

Figure 4に各濃度のCMC水溶液でマックスブレンド翼(No. 1)を用いて得られた動力数を示す。いずれの濃度においても翼回転数が大きくなるにつれ動力数 N_p は減少した。これらの動力数とTable 3に示した2枚羽根大型パドル翼の動力相関式(Kato et al., 2012)から μ_{app} を求めた。得られた μ_{app} と各濃度の水溶液における流動曲線から $\dot{\gamma}_{av}$ を算出した。その結果の一例をFigure 5に示す。いずれの濃度および翼についてもEq.(1)に倣って k_s を求めた。得られた k_s をFigure 6に示す。一部の翼を除いたほとんどの翼において k_s は、各濃度で得られた k_s で平均をとり、その平均値から10%範囲内の値を示し、 k_s の濃度への依存性はなかった。さらに、スーパーミックス翼を除き、マックスブレンド翼とフルゾーン翼では、翼径が大きくなるほど k_s が大きくなかった。これは、既往の研究(Kuriyama et al., 1983, Metzner et al., 1961, Nagata et al., 1971, Takahashi et al., 1984)で、小型のパドル翼やタービン翼よりも大型のアンカー翼やヘリカルリボン翼の k_s が大きくなっていることから、翼径の増大に伴い k_s が大きくなることは妥当である。

2.3 推算値との比較

亀井ら(1994)は、 k_s の簡便な推算式を次式のように提案している。

$$k_s = 1/\pi^2 (N_p \cdot Re_d)(d/b) \quad (3)$$

Table 2 Rheological parameter of fluids

	α [Pa · s $^{1/2}$]	χ [-]
CMC _{aq} 3.5wt%	9.24	0.61
CMC _{aq} 4.0wt%	13.6	0.60
CMC _{aq} 4.5wt%	22.4	0.57

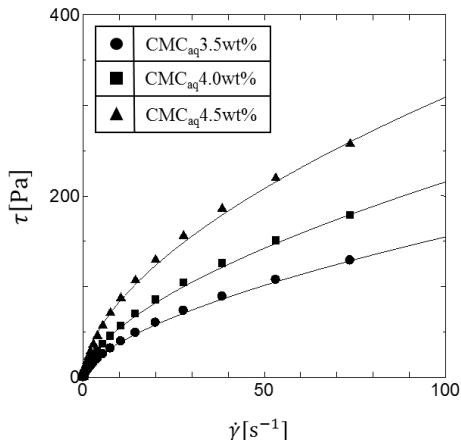


Fig. 3 Rheological characteristics of CMC solutions

Table 3 Correlation of large two-blade paddle impellers
(Kato et al., 2012)

Unbaffled condition

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

$$f = C_1/Re_G + C_2\{[(C_3/Re_G) + Re_G]^{-1} + (f_\infty/C_3)^{1/m}\}^m$$

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

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

$$C_1 = 0.215\eta p_b(d/H)[1-(d/D)^2] + 1.83(b/H)(n_p/2)^{1/3}$$

$$C_2 = [(1.1X^{25})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{1/7.8}$$

$$m = [(0.71X^{0.373})^{-7.8} + (0.333)^{-7.8}]^{1/7.8}$$

$$C_{\text{fr}} = 1000(d/D)^{3.24}(b/D)^{-1.18}X^{-0.74}$$

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

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

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

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

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

Baffled condition

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

$$x = 3.0(B_w/D)n_B^{0.8}/N_{pmax}^{0.2} + N_{p0}/N_{pmax}$$

Fully baffled condition

$$N_{pmax} = 5.0(b/d)^{0.75}$$

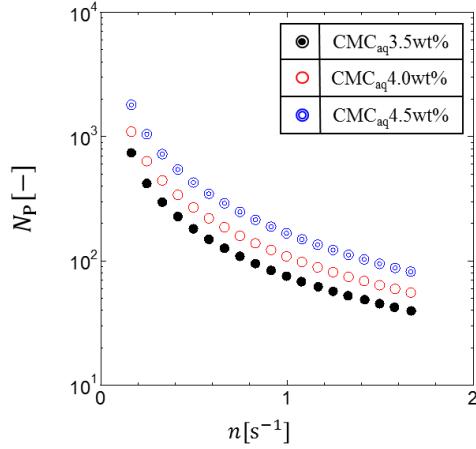


Fig. 4 Effect of impeller rotational speed on power number of MAXBLEND(No.1)

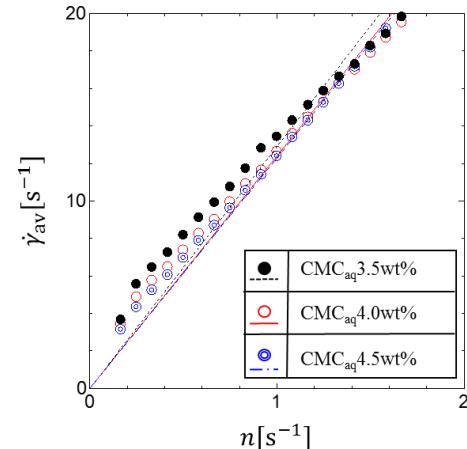


Fig. 5 Average shear rate of MAXBLEND (No.1)
Solid circles are experimental values and solid lines are calculated values.

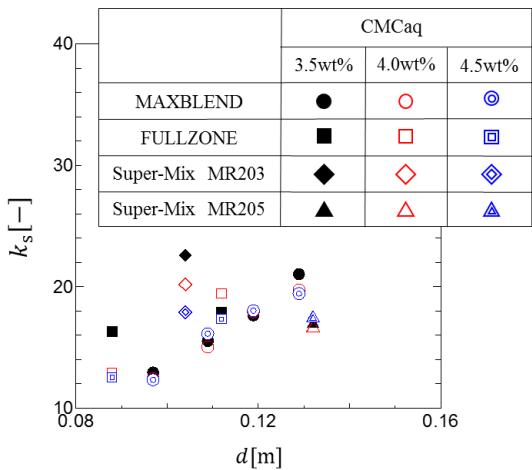


Fig. 6 Effect of diameter and concentration on k_s of paddle impellers with two large blades

Eq.(3) 中の $N_p \cdot Re_d$ にはニュートン流体の推算値を用いる。Figure 7 に彼ら(1994)が報告した結果および本研究で得られた各濃度における k_s の平均値と Eq.(3) から得られる k_s の推算値を示した。本図のとおり、多くの文献で得られた k_s が Eq.(3) で良好に相関できると報告されている。また、本研究で得られた k_s についても Eq.(3) と良好な一致を示している。このことから、2枚羽根大型パドル翼の k_s は Eq.(3) から十分に推算できる。

結 言

本研究では、2枚羽根大型パドル翼の擬塑性流体における攪拌所要動力を測定し、Metzner-Otto 定数 k_s を求めた。その結果、亀井ら(1994)によって示された k_s の推算式が 2枚羽根大型パドル翼に對しても有用であることが分かった。

Nomenclature

b	= height of impeller blade	[m]
C_L	= parameter in laminar region defined by Table 3	[—]
C_t	= parameter in turbulent region defined by Table 3	[—]
C_{tr}	= parameter in transition region defined by Table 3	[—]
D	= vessel diameter	[m]
d	= impeller diameter	[m]
f	= friction factor	[—]
f_∞	= asymptotic value of f when $Re_G \rightarrow \infty$	[—]
H	= liquid depth	[m]
k_s	= Metzner-Otto constant	[—]
m	= exponent defined by Table 3	[—]
N_p	= power number ($= P/\rho r^3 d^5$)	[—]
N_{p0}	= power number at non-baffle condition	[—]
N_{pmax}	= power number at fully baffled condition	[—]
n	= impeller rotational speed	[s^{-1}]
n_B	= number of baffle plate	[—]
P	= power consumption	[W]

Investigators	H	A	P, T
Takahashi <i>et al.</i>	●		
Rieger and Novak	▲	▲	
Hall and Godfrey	◀		
Kuriyama <i>et al.</i>	■		
Shamloo and Edwards	▶		
Taniyama and Sato		○	
Godleski and Smith		●	
Metzner <i>et al.</i>		◇	
Calderbank and Moo Young		△	
Nagata <i>et al.</i>	▼	▼	▽
Bechner and Smith	◆		
Carreau <i>et al.</i>	◆		

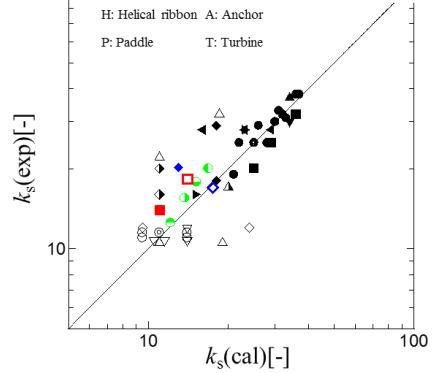


Fig. 7 Comparison of experimental Metzner-Otto constants with calculated ones by Eq. (3)
(Kamei *et al.*, 1994 and this work)

Re_d	= impeller Reynolds number ($= nd^2 \rho / \mu$)	[—]
Re_G	= modified Reynolds number defined by Table 3	[—]
T	= shaft torque	[N · m]
X	= analogy parameter defined by Table 3	[—]
x	= baffled condition parameter defined by Table 3	[—]
α	= power law consistency index	[Pa · s $^\lambda$]
β	= correction coefficient defined by Table 3	[—]
γ	= impeller dimension parameter defined by Table 3	[—]
$\dot{\gamma}$	= shear rate	[s^{-1}]
$\dot{\gamma}_{av}$	= average shear rate	[s^{-1}]
η	= correction coefficient defined by Table 3	[—]
μ_{app}	= apparent liquid viscosity	[Pa · s]
ρ	= liquid density	[kg · m $^{-3}$]
τ	= shear stress	[Pa]
χ	= power law exponent	[—]

Literature Cited

- 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)
- Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, S. Kuwabara, Y. S. Lee, T.

- Yamaguchi and S. T. Koh; "Development of Power Correlations for Various Impellers in an Agitated Vessel in Laminar Region Based on a Numerical Analysis of 2-D flow," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **20**, 595-603(1994)
- 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)
- 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 in Mixing Power Consumption between Dished-Bottom and Flat-Bottom Vessels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **36**, 25-29 (2010)
- Kuriyama, M., K. Arai and S. Saito; "Mechanism of Heat Transfer to Pseudoplastic Fluids in an Agitated Tank with Helical Ribbon Impeller," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **16**, 489-494(1983)
- Metzner, A. B. and R. E. Otto; "Agitation of Non-Newtonian Fluids," *A. I. Ch. E. Journal*, **3**, 3-10(1957)
- Metzner, A.B., R. H. Feehs, H. L. Ramos, R. E. Otto and J. D. Tuthill; "Agitation of Viscous Newtonian and Non-Newtonian Fluids," *A.I.Ch.E.J.*, **7**, 3-9(1961)
- Nagata, S., K. Yamamoto, T. Yokoyama and S. Shiga; "Empirical Equations for the Power Requirement of Mixing Impellers, Having a Wide Range of Applicability," *Kagaku Kogaku*, **21**, 708-715(1957)
- Nagata, S., M. Nishikawa, H. Tada and S. Gotoh; "Power Consumption of Mixing Impellers in Pseudoplastic Liquids," *J. Chem. Eng. Japan*, **4**, 72-76(1971)
- Rushton, J. H., E. W. Costich and H. J. Everett; "Power Characteristics of Mixing Impellers part 1," *Chem. Eng. Prog.*, **46**, 395-404 (1950)
- Takahashi, K., T. Yokota and H. Konno; "Power Consumption of Helical Ribbon Agitators in Highly Viscous Pseudoplastic Liquids," *J. Chem. Eng. Japan*, **17**, 657-659(1984)

Metzner-Otto Constant of Paddle Impeller with Two Large Blades in Shear Thinning Fluid

Haruki FURUKAWA , Norihisa NAKAMURA, Yoshihito KATO, Ryo NAGUMO and Yutaka TADA

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

Keyword : Agitation, Metzner-Otto constant, Mixing, Power Number, Shear thinning fluid

Power consumption for paddle impeller with two large blades was measured in shear thinning fluid. The test fluid was carboxymethylcellulose (CMC) solution. Metzner-Otto constant k_s was estimated by using Metzner-Otto method (1957). The constant k_s increased with increasing the impeller diameter. The estimated k_s showed a good agreement with the values correlated by equation of Kamei *et al* (1994).