

乱流攪拌槽の攪拌所要動力に及ぼす邪魔板挿入深さの影響

加藤禎人^{1††}・亀井登²・多田豊¹・中岡梓¹・伊吹竜彦¹・長津雄一郎¹・高承台²・李泳世³

¹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

²ダイセル化学工業(株), 944-8550 妙高市新工町1-1

³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

⁴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, 動力数, 邪魔板長さ, 乱流攪拌

種々の攪拌翼を備えた乱流攪拌槽の攪拌所要動力に与える邪魔板挿入深さの影響を実験的に検討した。種々の翼に対する邪魔板挿入深さ, 邪魔板枚数, 邪魔板幅を変数とした攪拌所要動力の相関式を提案した。本相関式は邪魔板枚数が1枚のとき測定値が相関値より若干小さくなったが, おおむね良好に動力を推算することができた。特に傾斜パドル翼の動力数は平岡らの相関式(1997)を用いて相関が可能であった。

緒 言

攪拌槽の研究の中で最も重要なもののうちの一つに, 攪拌所要動力に関する研究がある(Kato *et al.*, 2009)。実装置においては, パップルを常に標準条件(槽径の1/10の幅で, 液面から槽底面までの板を4枚)で設置できるわけではなく, 槽内の内装物によって邪魔板枚数が制限される場合が多い。さらに槽上部のマンホールから邪魔板が挿入される場合が多く, 槽底面までパップルが届いていることは希である。邪魔板挿入深さが攪拌所要動力にどのように影響するかは亀井の報告(Kamei, 2000)とKato *et al.*(2011)のラシュトタービンにおける報告があるのみで, パドル翼や傾斜パドル翼については明らかになっていない。したがって, 邪魔板付き実装置に対してまだまだ正確な攪拌所要動力を推算する手段はない。

本研究では, 亀井らが示した邪魔板挿入深さを考慮した邪魔板変数で動力数をまとめることにより, 種々の攪拌翼の任意の邪魔板挿入深さにおける動力数を推算する相関式を得たのでその結果を報告する。

1. 実験方法

使用した攪拌槽は前報と同様(Kato *et al.*, 2011), アクリル樹脂製の平底円筒槽と10%皿底円筒槽であり, その内径 D は185mmとした。Figure 1に各幾何形状の記号を示す。邪魔板条件は以下の通りとした。邪魔板幅 B_w/D は0.05, 0.1, 0.13, 0.14の4条件, 邪魔板枚数 n_b は1, 2, 3 および4枚の4条件, また, 邪魔板の挿入深さ h_b は静止液面から邪魔板先端までの距離とし, h_b/H は0.1~1.0まで0.1刻みで細かく測定した。使用した流体は水道水であり, 液高さ H は槽内径と等しくした。使用した攪拌翼は一般的な傾斜パドル翼($d=0.069$ m, $b=0.015$ m, $n_p=4$, $\theta=\pi/3$)とラシュトタービン翼($d=0.073$ m, $b=0.017$ m, $n_p=6$)と4枚パドル翼($d=0.076$ m, $b=0.019$ m, $n_p=4$)とした。本実験では, 極端な翼取り付け位置を除き $C/H=0.2, 0.4, 0.5, 0.7$ の4種類を検討した。槽底部のみに邪魔板を設置する場合, 槽の中間部のみに邪魔板を設置する場合等, 種々のケースが考えられるが, ここでは, 槽上部のマンホールからの邪魔板設置を考えているため, 上部からのみとした。

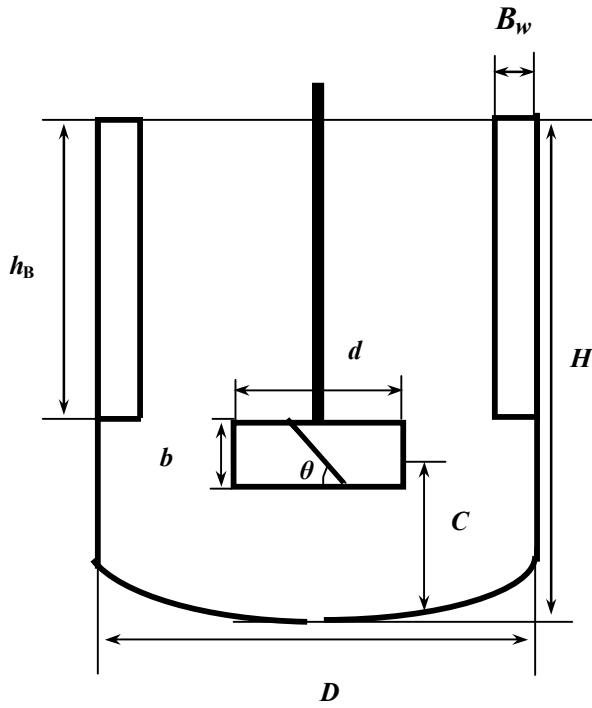


Fig.1 Geometry of mixing vessel

攪拌所要動力は、最も一般的な軸トルク測定法によって測定した。使用したトルクメーターはSATAKE ST-1000と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を求めた。層流では比較的規則
的な波形がえられ、平均値は求めやすいが、乱流では長周期の変
動も含め、不規則に大きく波形が変動するためである。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。

2. 結果と考察

2.1 邪魔板挿入深さと動力数の関係

Figure 2 に傾斜パドル翼, Figure 3 にラシュトタービン翼, Figure 4 にパドル翼の邪魔板挿入深さにより動力数がどのような変化をするのかを表すために、各翼位置において最も一般的な標準邪魔板条件 ($B_w/D = 0.1, n_B = 4$) で邪魔板挿入深さを変化させた場合の代表的な測定値を示した。傾斜パドル翼では皿底、平底ともに複雑な変動は少なく、挿入深さの増加とともにほぼ単調に増加しており、多くの条件でなめらかな指数関数的な曲線となった。一方、ラシュトタービン翼では、皿底、平底間の動力数の差は小さいが、邪魔板挿入深さの増加とともに急激に増加し、ほぼ一定値となった後、再び増加した(Kato *et al.*, 2011)。パドル翼では、邪魔板挿入深さが液深さの半分を超えると、急激にラシュトタービンよりさらに複雑な変動を示した。パドル翼は同一の邪

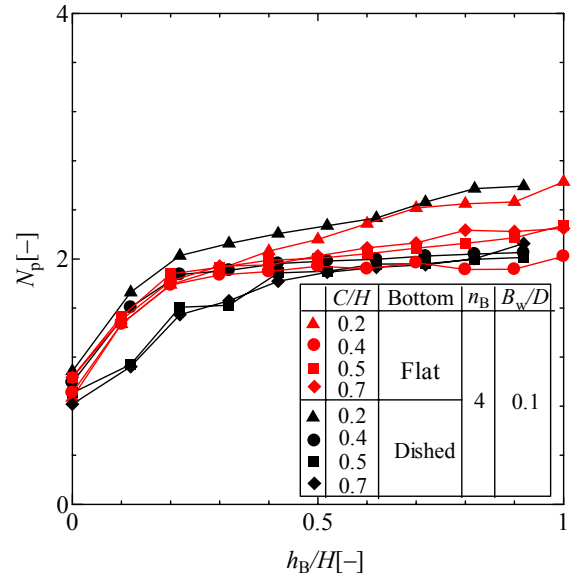


Fig.2 Effect of baffle length on power number for pitched paddle

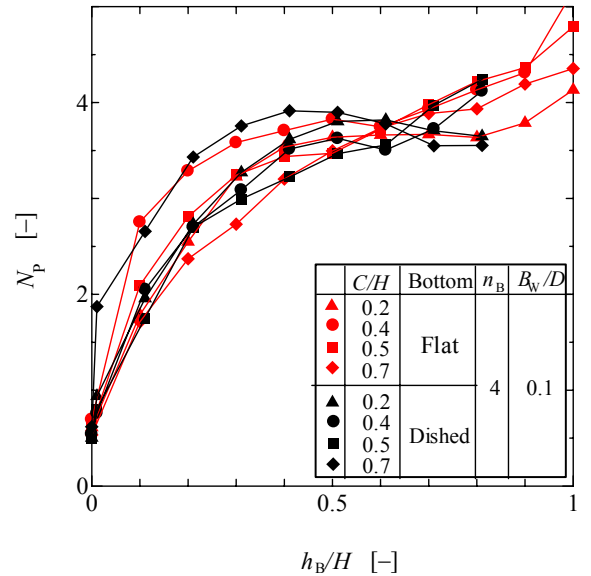


Fig.3 Effect of baffle length on power number for Rushton turbine

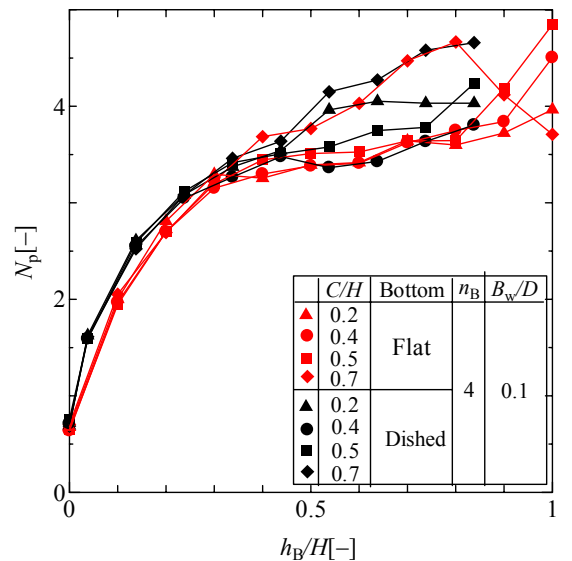


Fig.4 Effect of baffle length on power number for paddle

魔板条件であっても翼の取り付け位置によっても急激な動力数の変化を示すため、この複雑な変化を示す理由については別途研究することとした。

2.2 挿入深さを考慮した動力数の相関

(1) 傾斜パドル翼

Figure 5 に平底と皿底の傾斜パドル翼に対する測定データを平岡らの相関(Hiraoka *et al.*,1997) の第一項 $4.5(B_w/D)n_B^{0.8}/\{(2\theta\pi)^{0.72} N_{p_{max,\theta}}^{0.2}\}$ に邪魔板挿入深 h_B/H を乗じ $4.5(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)/\{(2\theta\pi)^{0.72} N_{p_{max,\theta}}^{0.2}\}$ と修正したパラメータを用いた相関を示す。 $(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)$ はおおむね邪魔板の有効総面積に比例するものと考えることができる。非常に良い相関が得られた。図中の曲線は次式で表される相関値である。

$$N_p/N_{p_{max,\theta}} = (x^{-3} + 1)^{-1/3} \quad (1)$$

$$x = 4.5(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)/\{(2\theta\pi)^{0.72} N_{p_{max,\theta}}^{0.2}\} + N_{p0}/N_{p_{max,\theta}} \quad (2)$$

$$N_{p_{max,\theta}} = 8.3(2\theta\pi)^{0.9} (n_p^{0.7} b \sin^{1.6} \theta / d) \quad (3)$$

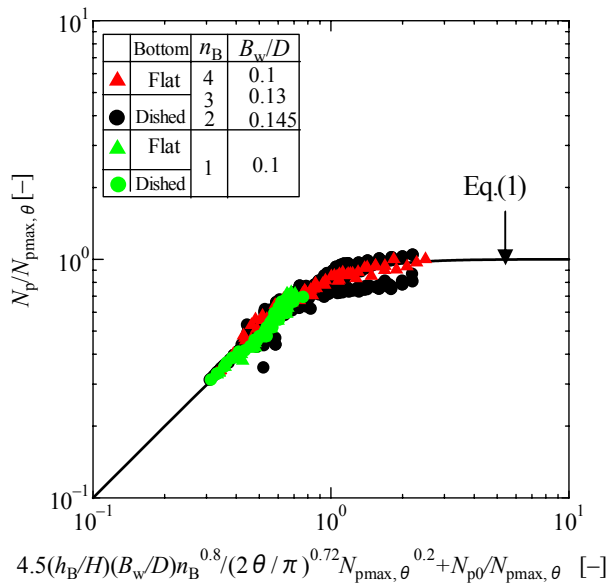


Fig5 Correlation of power number for pitched paddle

Figure 5 からわかるように平底、皿底の両方で動力は翼位置の高さに関係なく、 C/H を含まない Eq.(1) で相関できた。Figure 6 に相関値と実験値を比較したが、約 10% の誤差で相関できている。

(2) ラシュトタービン翼

傾斜パドル翼に施した手法と同様にまず Figure 7 に亀井らの相関式(Kamei *et al.*,1996) を用いてラシュトタービン翼のデータを示した。しかし、実験値と相関値の間には傾向が大きく異なったために本相関式をそのまま用いることは出来なかった。その

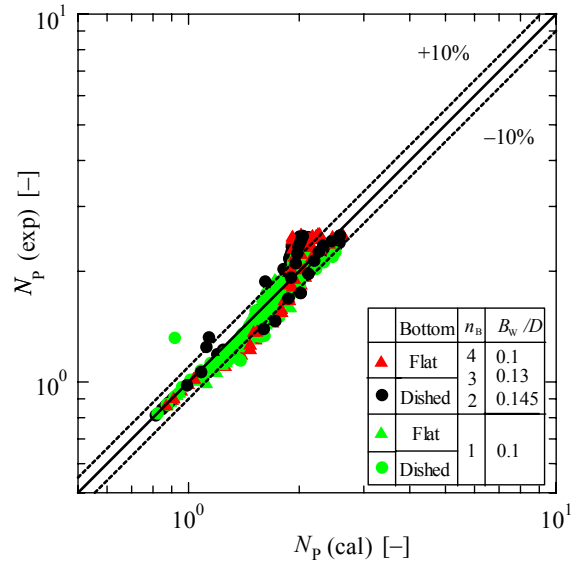


Fig.6 Comparison of experimental value to correlation value

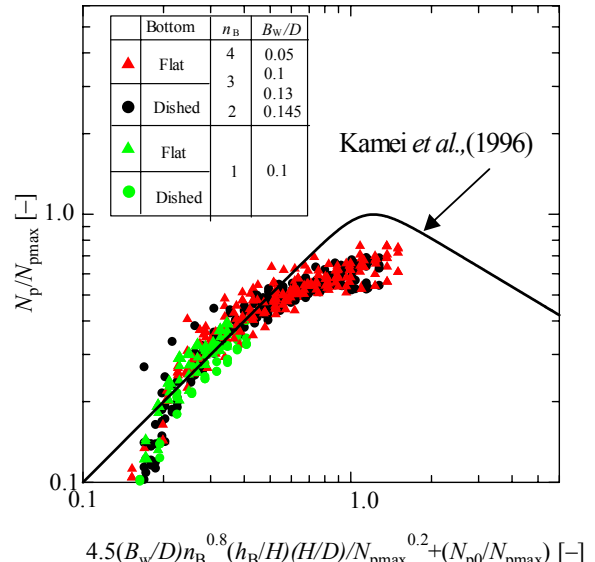


Fig7 Correlation of power number for Rushton turbine

ため、前報(Kato *et al.*,2011)では、以下のような相関式を新たに提案した。詳細は前報を参照されたい。

$$N_p - N_{p0} = 6.0 \{ (B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H) \}^{0.4} \quad (4)$$

ただし、この相関式を用いたとしても、以下の2つのケースでは実測値と推算値の間には大きな差があった。

- ① 邪魔板枚数が1枚のとき、邪魔板変数 $(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)$ が小さな領域で実測値が相関値より小さな値をとる。
- ② $(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)$ が 0.23 以上で、翼位置が槽底に近い場合 ($C/H=0.2$)、 $(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)$ が大きな領域で実測値が相関値より小さな値をとる。

①のケースでは、Fig.7 に示されているように、亀井ら(Kamei *et*

al.,1996)が提案した相関式を使用し, $(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)$ の値を利用して動力数を計算した方が, 良好な数値が得られる場合がある. この場合, いずれもモーターの選定上は, 推算値の方が大きな値となるため問題にならないが, 混合性能上は, 望まれる N_p 値が得られない場合があるので, 注意が必要である.

(3)パドル翼

ラシュトタービン翼と同様に **Figure 8** に従来の相関式を用いた場合のパドル翼の結果を示した. タービン翼と異なり, バラツキは少ないが, 実験値と相関値に大きな誤差が生じた. **Figure 9** には Eq(4)を用いた場合の相関を示した. タービン同様, 相関式からはずれている場合は, 以下の2つのケースであった.

- ① 邪魔板枚数が1枚のとき, 邪魔板変数 $(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)$ が小さな領域で実測値が相関値より小さな値をとる.
- ② $(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)$ が0.18以上のとき, $(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)$ が大きな領域で実測値が相関値より小さな値をとる.

この2ケースのデータを除き, この場合もおおよそ10%の誤差で相関できた. この邪魔板に関するパラメータがラシュトタービンでは0.23以上でバラツキが大きくなったのに対し, パドル翼ではその数値がより小さくなり, 適用条件が狭くなってしまった. これは, パドル翼はディスクを持たないために, 翼の取り付け位置によって動力数が変化しやすいことや(Kamei et al.,1995), フローパターンの長周期変動が起こりやすくなること(Winardi, et al.,1988, Matsuda et al.,2001)原因と考えられるが, その理由は明確ではない.

結 言

邪魔板の挿入深さはどのくらいが適当で, 攪拌所要動力はどのようにして見積もるのかという問題に対して, 汎用翼に対する動力数を実験的に検討した. 傾斜パドル翼に対しては平岡らが示した相関式の中の邪魔板変数 $(B_w/D)n_B^{0.8}$ に邪魔板挿入深さ h_B/H を乗じたのみで, 非常に良好に動力数を推算することが出来た. パドル翼に対しては前報で示したラシュトタービン翼の相関式を用いることで, 以下の条件を除いて動力数を相関できた. つまり, 邪魔板枚数が1枚のとき, あるいは邪魔板変数 $(B_w/D)n_B^{0.8}(h_B/H)$ が0.18以上のとき, 相関式より実測値の方が小さな数値となるの

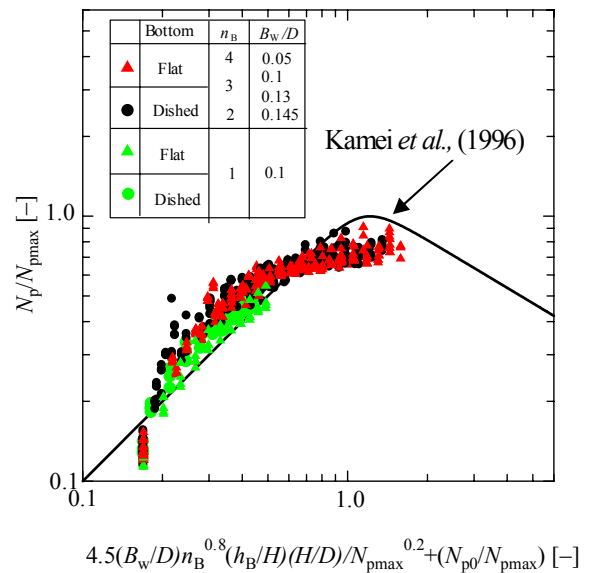


Fig.8 Correlation of power number for paddle

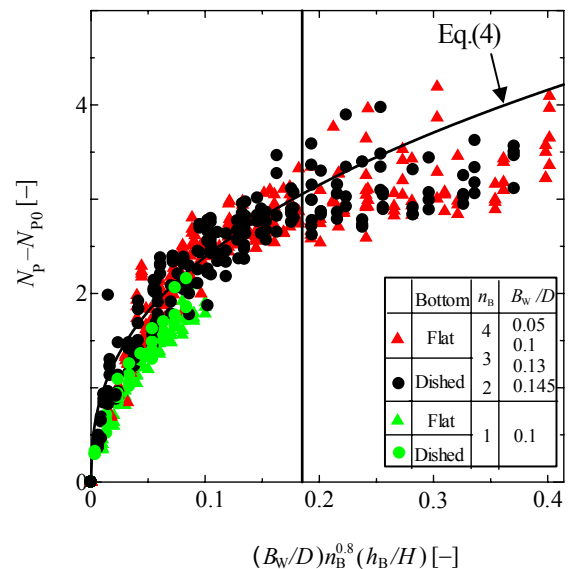


Fig.9 Correlation of power number for paddle

で注意が必要である.

Nomenclature

- b = height of impeller blade [m]
- B_w = baffle width [m]
- C = clearance between bottom and impeller [m]
- D = vessel diameter [m]
- d = impeller diameter [m]
- H = liquid depth [m]
- h_B = length of baffle plate [m]
- N_p = power number ($=P/\rho n^3 d^5$) [-]

N_{P0}	= power number at non-baffled condition	[—]	Agitated Vessel with Paddle Impeller,” <i>Kagaku Kogaku Ronbunshu</i> , 22 , 249—256 (1996)
N_{Pmax0}	= power number at fully baffled condition	[—]	
n	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]	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 on Power Consumption in a Baffled Agitated Vessel,” <i>Kagaku Kogaku Ronbunshu</i> , 21 , 696-702 (1995)
n_B	= number of baffle plate	[—]	
n_p	= number of impeller blade	[—]	
P	= power consumption	[W]	
T	= shaft torque	[N · m]	Kato, Y., S.Hiraoka, N.Kamei and Y. Tada; “Importance of Power Consumption in Design and Operation of Mixing Vessels,” <i>Kagaku Kogaku Ronbunshu</i> , 35 , 211—215 (2009)
μ	= liquid viscosity	[Pa · s]	
ρ	= liquid density	[kg · m ⁻³]	
θ	= angle of impeller blade	[—]	Kato, Y., N.Kamei, Y. Tada, A. Nakaoka Y. Nagatsu, S.T. Koh and Y.S. Lee, ; “Effect of Baffle Length on Power Consumption in Turbulent Mixing Vessel with Rushton Turbine Impeller,” <i>Kagaku Kogaku Ronbunshu</i> , 37 , 147—149 (2011)

Literature Cited

- 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.; “Effects of Baffle on Mixing (in Japanese),” *Mixing Technology (Kagaku Kogaku no Shinpo No.34)*, p.40, Makishoten, Tokyo, Japan (2000)
- 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
- Matsuda, N., Y. Tada, S. Hiraoka Y. Mori and Y.S. Lee, ; “Investigation of Low Frequency Fluctuations in Flow Field in Agitated Vessel from Visualization and LDV measurement,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **27**, 259—264 (2001)
- Winardi, S., S.Nakao and Y.Nagase, ; “Pattern Recognition in Flow Visualization around a Paddle Impeller,” *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 503—508 (1988)

Effect of Baffle Length on Power Consumption in Turbulent Mixing Vessel

Yoshihito KATO¹, Noboru KAMEI², Yutaka TADA¹, Azusa NAKAOKA¹, Tatsuhiko IBUKI¹,
Yuichiro NAGATSU¹, Song-Tae KOH³ and Young-Sei LEE⁴

¹ Department of Life and Materials Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan

² Daicel Chemical Industries, Ltd., Shinkocho 1, Myoko-shi, Niigata, 944-8550, Japan

³ Department of Bio-Chemical Engineering, Dongyang University, 1 Kyochon, Punggi, Yeongju, Kyungbuk, 750-711, Korea

⁴ School of NANO&Material Engineering, Kyungpook National University, 386 Gajangdong, Sangju, Kyungpook, 742-711, Korea

Keyword : Mixing, Agitation, Power Number, Baffle length, Turbulent Mixing

The effects of the baffle length on the power consumption of a mixing vessel with several impellers were studied. The power number was generally correlated with the baffle length, the number of baffles and the baffle width. When the number of baffles was unity, experimental values were slightly lower than the calculated ones. The power number of the pitched paddle impeller was correlated with the correlation of Hiraoka *et al.* (1997).