邪魔板付き攪拌槽の所要動力に及ぼす翼寸法と取付位置の影響†

亀井 登*・平岡節郎・加藤禎人
多田 豊・石塚弘司・岩田克己
李 泳世**・山口隆生***・高 承台****

名古屋工業大学工学部 応用化学科††

邪魔板付き攪拌槽のパドル翼やタービン翼の動力数に対する既報の相関式の間に幾つかの相違点があるが、それらの報告の実験条件の中で翼の取付位置が相互に異なることに着目し、本研究ではパドル翼の寸法および取付位置による動力数の変化を実験的に調査した。その結果、既報の相関式の間の相違点は翼取付位置の違いが原因していることが明らかとなった。また、翼取付位置による動力数の変動がフローパターンの変化に対応していることを確認し、その変化に影響を及ぼしている主因子が翼取付高さと槽径の比であることを実験的に明らかにした。

緒 言

攪拌操作において、その動力特性を把握することは、単に機械的設計上重要であるだけでなく、攪拌性能を評価・検討する上でも重要な因子となる。特に、実験室レベルから実プラントへのスケールアップが動力基準で行われることが多く、装置形状の選定と所要動力の設定では攪拌効果を決定する主要因となる。一方、乱流攪拌では、邪魔板がよく用いられるため、いわゆる完全邪魔板条件での攪拌所要動力が各種攪拌装置の動力推算の基本となる。しかしながら、邪魔板条件での攪拌所要動力に関する研究は古くから行われてはいるものの、その数は意外に少なく、結果が一致していないことも多い。

邪魔板条件での動力数 N_p については Rushton ら¹⁾の著名な報告があるが、その後 Bates ら²⁾が N_p の値を修正し、以来その報告が標準的なものとして受け入れられている。しかし、それ以降の幾つかの報告を見ると、以下に述べるように、必ずしも Bates らの結果とは一致していないところが見受けられる。すなわち、

1) Bates らはパドル翼の N_p 値がタービン翼のそれより 25% 小さいとしているが、佐野-薄井³⁾はこれらが

ほぼ同じ値となると報告している。また、望月-佐藤⁴⁾のタービン翼と笹倉ら⁵⁾のパドル翼の N_p の測定値はよく一致している (Table 1)。

2) Bates らは N_p の相関式において、翼高さ b/d に対する指数が羽根枚数 n_p によって変わると報告しているが、佐野-薄井は n_p に関わりなく指数に一定値を与えている (Table 2)。

これらの報告内容における実験条件を比較すると、翼の取付位置が異なっている。すなわち、Bates らは翼下端と槽底との間隙幅 C を槽径 D の $1/3$ としたのに対し、佐野-薄井、笹倉ら、望月-佐藤はいずれも翼を槽中央に配置している。一方、パドル翼の場合、翼の取付位置によって N_p 値が変化することが竹田ら^{7,8)}、西川ら⁹⁾により報告されているが、翼の形状に関する定量的な報告は見られず、上記の矛盾点は未だ解明されていない。

本研究では、これら研究者が行った実験条件を再現することにより研究者間の実験結果の矛盾点を解明すると共に、翼の取付位置による N_p の変化に対する翼高さ b や羽根枚数 n_p の影響について詳細な検討を行った。

1. 実験装置および実験方法

攪拌槽には主に内径 $D = 17$ cm の平底円筒槽を使用し、槽壁には槽径 D の $1/10$ の幅をもつ邪魔板を4枚取り付けた。攪拌翼には、翼径 $d = 7$ cm で翼高さ $b = 0.9 \sim 5.6$ cm、羽根枚数 $n_p = 2 \sim 8$ の種々のパドル翼および翼径 7 cm の標準 Rushton 型タービン翼 ($b/d = 1/5$, $n_p = 6$) を用いた。また、一部で槽径 24 cm の平底円筒槽および翼径 8.5, 10 cm のパドル翼も使用した。翼の取付位置としては、Fig. 1 のように翼中央から液自由表面お

† 1994 年 11 月 24 日受理；化学工学会第 26 回秋季大会（京都，1993 年 9 月）および同第 59 年会（仙台，1994 年 3 月）にて発表

†† 〒466 名古屋市昭和区御器所町

* ダイセル化学工業(株)

** 韓国啓明大学校 化学工学科

*** 中部大学工学部 機械工学科

**** 東洋エンジニアリング(株)

Table 1 Reported data of N_p by various investigators

$n_p=6$	Turbine			Paddle		
	b/d			b/d		
	1/8	1/5		1/8	1/5	
Bates et al.	3.0	5.0		2.5	4.0	
Mochizuki-Sato	2.9	5.1		—	—	
$b/d=1/5$	n_p			n_p		
	2	4	8	2	4	8
Sasakura et al.	—	—	—	2.1	3.3	6.0
Mochizuki-Sato	2.1	3.6	5.9	—	—	—

Table 2 Reported correlations of N_p

Bates et al.	$N_p = 24.4 (b/d)^{1.25} : n_p = 4$	(T-1)
	$N_p = 21.0 (b/d) : n_p = 6$	(T-2)
Sano-Usui	$N_p = 7.3 n_p^{0.8} (b/d)^{1.15}$	
	$= 7.3 [n_p^{0.7} (b/d)]^{1.15}$	(T-3)

よび槽底までの距離をそれぞれ H_1 , H_2 とし, これを種々変えることによる所要動力の変化を測定した. 液高さも $H/D=0.75\sim 2$ と種々変化させて測定を行った. 攪拌液にはイオン交換水を用いた.

実験は, まず攪拌翼を所定の取付位置に設定した後, 攪拌槽に攪拌液を入れ, 液温を 30°C に保ち攪拌を開始する. 回転数を順次変化させ, その時々攪拌軸トルクをトルクメータ (MIXING TORQUE METER ST-1000 佐竹化学機械工業(株)製) によって測定し, 記録計にて記録する. これより各回転数に対する攪拌所要動力を決定する. 得られた所要動力は動力数 N_p として整理する. このとき N_p 値が Re 数に依存しないことを確認した.

2. 実験結果

2.1 液高さの影響

Fig. 2 に翼の取付位置を変えた場合の N_p の変化を示した. 竹田ら^{7,8)}や西川⁹⁾らの報告と同様の変動パターンがみられる. Fig. 2 (a) は翼中央から液自由表面までの距離 H_1/D を変えた場合の N_p の取付位置依存性を示しているが, 自由表面近くで N_p 値が急激に落ち込んでいく位置は $H_1/D \approx 0.27$ となり, 液高さ H/D に関わらず一定であることが判る. 一方, Fig. 2 (b) は翼中央から槽底までの距離 H_2/D を横軸に取り, N_p の取付位置依存性を示したものであるが, 槽底付近で N_p 値が急激に落ち込み最小値をとる位置も $H_2/D \approx 0.27$ となり, 液高さ H/D に関わらず一定であることが判る. なお, この図には示していないが, 液高さを $H/D=0.5$ と小さくして実験を行なったとき, 全体的に低い N_p 値を示した. このことは, 槽の中央に翼を配置しても $H_2/D=0.25$ と

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Dependence of power number profile on liquid depth for a paddle impeller ($d/D=0.41$, $b/d=0.2$, $n_p=6$)

なり, Fig. 2 より N_p 値がまだ H_1/D または H_2/D の影響を受ける範囲に入っているため, 全体的に低い N_p 値を示すものと理解される.

西川ら⁹⁾は, $H/D \geq 1$ で槽中央に翼を配置すると, N_p の最大値が得られると報告しているが, Fig. 2の結果によると $H/D=1$ ではまだ N_p 値が最大値に達していないことが判る. この違いは槽寸法 (西川らは $D=30$ cm) の差異によるものと思われる. 本研究では N_p の最大値が液高さに依存しなくなる $H/D=2$ の槽を主として用い, 測定された N_p 値は翼中央から槽底までの距離 H_2/D をパラメーターとして整理し, $H/D=1$ の槽に対する結果に対してもその整理法を用いて議論する.

Fig. 3 Dependence of power number profile on height of paddle impeller blade ($d/D=0.41$, $n_p=6$, $H/D=2$)

2.2 翼高さの影響

Fig. 3 に、翼高さ b を変えた場合の翼取付位置による N_p の変動パターンの比較を示した。図より翼高さ b/d が変化しても N_p の変動パターンは相似であることが判る。また、図のように横軸に翼中心から槽底までの距離 H_2/D をとると、 N_p が最小値をとる位置は各翼で一致する。もし、これを翼下端と槽底との間隙幅 C/D でプロットすれば、最小値をとる位置は b/d に依存することも理解される。換言すれば、この N_p の変動は液自由表面や槽底面と翼端との間隙幅に影響される現象ではなく、両面と翼中央までの距離に支配される現象と言える。

また、Fig. 3 より N_p の最大値と最小値の差は、 b/d の増大と共に増加していることが判る。

2.3 羽根枚数の影響

Fig. 4 には、羽根枚数 n_p を変えた場合の N_p の変動パターンを示した。 N_p の変動パターンは Fig. 3 と同様に n_p によらず相似パターンを示し、また、 N_p の最大値と最小値の差は n_p と共に増加することが判る。

2.4 N_p の最大値と最小値の差

Fig. 5 には、Figs. 3, 4 での N_p の最大値と最小値の差を翼を槽中心 ($H_2/H=0.5$) に設置したときの N_p 値に対してプロットした。図中には、西川らの文献の Figs. 2, 3 より N_{pmin}/N_{pmax} の値を読みとり、一方、Sano-Usui の実験式より $N_{p(H_2/H=0.5)}$ を求め、且つこの値を N_{pmax} に等しいとして求めた結果を同時に示してあるが、両者はよい一致を示し、さらに、最大値と最小値の差は $N_{p(H_2/H=0.5)}$ のほぼ 1.6 乗に比例することが判る。

Fig. 4 Dependence of power number profile on number of paddle impeller blades ($d/D=0.41$, $b/d=0.2$, $H/D=2$)

Fig. 5 Dependence of power number difference between maximum and minimum values in the profile on the power number observed as a paddle impeller is set in the middle of liquid depth

2.5 翼径の影響

翼径と槽径の比 d/D が動力数に及ぼす影響を調べるために翼径を変え、 $d/D=0.41, 0.50, 0.59$ についても実験を行った。その結果を Fig. 6 に示す。これより、3条件とも同様な N_p の変動パターンを示し、横軸に翼から槽底までの距離 H_2 を槽径 D で無次元化した値をとると、 $d/D=0.59$ の翼は少し小さい H_2/D の位置で最小値を示すが、ほぼ相似な N_p の変動パターンが得られる。一方、横軸に翼径 d で無次元化した翼取付位置 H_2/d を

Fig. 6 Dependence of power number on impeller diameter for a paddle impeller ($b/d=0.2$, $n_p=6$, $H/D=2$)

Fig. 7 Comparison of power number of turbine impeller with that of paddle one ($b/d=0.2$, $n_p=6$, $H/D=1$)

とれば N_p が最小値をとる位置は d/D によって大きく変り、パターンの相似性がくずれることになる。これより、こうした N_p の変動パターンは翼径ではなく槽径に強く依存していると言える。

2.6 パドル翼とタービン翼の比較

タービン翼に対する Bates ら¹⁾の実験結果と本実験結果を比較するため、 $H/D=1$ の条件で翼の取付位置による N_p の変化をタービン翼に対して測定し、パドル翼の結果と共に Fig. 7 に比較プロットした。パドル翼の N_p 値は翼の取付位置によって大きく変化するのに対し、タービン翼の N_p 値は取付位置によらず比較的一様な値

Fig. 8 Effect of height of paddle impeller blade on power number in the vessel of $H/D=1$, where the impeller is set (a) at $C/D=1/3$ and (b) at $H_2/D=1/2$ (in the middle of liquid depth)

を示している。この図より、 $H_2/D=0.5$ (すなわち、 $H/D=1$ で翼を槽中央に配置した場合) ではパドル翼とタービン翼の N_p 値はほぼ一致しているが、槽底付近に翼が配置された場合には相対的にタービン翼の方が大きな N_p 値をとることを示しており、Bates らの翼配置 (翼下端と槽底との間隙幅 $C=D/3$) では、彼らの報告通りタービン翼の方が約 25% 大きいことが再確認された。また、翼を槽中央に取付けたとき Table 2 に示されるタービン翼に対する望月-佐藤²⁾の N_p 値とパドル翼に対する笹倉³⁾の N_p 値がよく一致することも確認された。

3. 考 察

3.1 既報の相関式との比較

Fig. 8 (a) に Bates ら¹⁾の翼配置における彼らの N_p の実験値と本研究で用いた実験装置による再現実験データを比較プロットした。なお、ここでは本実験で使用した翼に対する翼径と槽径の比を Bates らの実験条件に近づけるため、 $D=24$ cm の槽を用いて測定した。本実

験は傾向的には Bates らの結果を十分再現していることが判る。一方、Fig. 8 (b) には翼を槽中央に配置したときの実験結果を望月-佐藤²⁾、笹倉⁶⁾のデータおよび佐野-薄井⁹⁾らの相関式と共に示したが、研究者間に差異はなく、ある b/d の範囲に於ては羽根枚数 n_p に関わらず一定の傾きを示していることが判る。このように、Bates¹⁾ らと佐野-薄井⁹⁾の報告における b/d の指数に対する相違は、翼の取付位置の違いに基づくものであることが示された。

さらに、Bates ら¹⁾の N_p の相関式における b/d の指数が n_p によって異なる理由は以下のように説明できる。Fig. 3 より、 b/d がいずれの場合でも、 $H_2/D \approx 0.27$ の位置で N_p 値は最小値を示しているが、Bates らのように $C/D = 1/3$ の位置に翼を配置した場合には、翼高さ b が大きくなるに従って N_p 値が最小値付近から最大値へと変化してゆくことが判る (Fig. 3 中の点線)。つまり、Fig. 8 (a) 中の N_p 値は、 b/d の影響と共に、翼の取付位置の影響も大きく受けていることになる。そして Fig. 4 のように N_p の最大値と最小値の差が n_p の影響を受けるために、 n_p の異なる翼では b/d に対する見掛けの指数 (翼の取付位置の影響を含む) が異なった値となったものと考えられる。

3.2 翼を槽中央に配置した場合の動力相関

上記の考察から、翼を槽中央に取付けた場合の動力数 $N_p (H_2/H=0.5)$ の相関を試みたのが Fig. 9 である。これより、横軸の $n_p^{0.7}(b/d)$ の値の比較的小さい領域では、液高さによらず $N_p (H_2/H=0.5)$ は良好に相関されているが、 $n_p^{0.7}(b/d)$ の大きな領域で液高さの影響が現れることが判る。また、同図には佐野-薄井⁹⁾の N_p の相関式 (Eq. (T-3)) が実線で示してあるが、この相関式は翼高さの小さな翼に対して実験結果を良好に相関できることが判る。

3.3 フローパターンと動力変化

翼取付位置による N_p の変化について、竹田^{7,8)}らはフローパターンの変化によるものと予測している。すなわち、動力が低下したところでは軸方向流となっており、翼がさらに槽底に近づくとき再び半径方向流となるために動力が上昇するとしている。本研究でも、槽内のフローパターンを粒子追跡法で観察したところ、竹田らの報告と同様のフローパターンの変化を確認した。

ここで、このようなフローパターンの変化がなぜ起きるのかが問題の焦点となるが、このことに関しては未だ明確な見解は得られていない。しかしながら、前章の結果から興味深い次の4つの事実が得られた。

(1) まず、 N_p が極小値をとる位置は、翼下端と槽底との間隙幅 C/D ではなく、翼中央から槽底までの距離 H_2/D によって支配されている (Fig. 3) と云うことで

Fig. 9 Correlation of power number at $H_2/H=0.5$ with impeller and vessel geometries for paddle impellers

ある。もし、パドル翼を槽底に近づけた場合に動力が上昇する原因がその間隙の摩擦抵抗等によるものとすれば、 N_p の変化は C/D に支配されることになり実験事実と反する。このことは、動力変動がフローパターンの変化によるものであることを裏付けているものと理解される。また、タービン翼はディスクが存在するため、翼の取付位置に関わらず常に安定した2次循環流が生成し、安定した動力特性が得られることも以上の考察から説明できる。但し、タービン翼を槽底に近づけた場合に動力が若干低下するのは、Bates らが考察しているように、ディスクと槽底が近づくとき、翼への液の吸入量が不足し、ディスク下部の2次循環流が低下するためであると考えられる。

(2) 次に、 N_p 値が大きく変動する位置は、液深 H/D が変わっても変化しない (Fig. 2) ことである。これは、パドル翼の場合、上下双方の2次循環流が発達するのに最低 H_1/D (又は H_2/D) = $1/3$ の距離が必要であり、これ以下では片方の2次循環流が不足するために、見掛け上、軸方向流になると解釈出来る。もし、単に上下の2次循環流のアンバランスによるものであれば、液深が変わると N_p が最小値をとる位置 H_1/D (又は H_2/D) は変化しなければならず本実験結果と矛盾する。

(3) さらに、 N_p 値が大きく変動する位置は、翼条件が変わっても変化しないことである。このことは、翼高さ b/d を変えた場合 (Fig. 3)、羽根枚数を変えた場合 (Fig. 4)、そして翼径 d/D を変えた場合 (Fig. 6) い

づれにも当てはまる。これは、翼条件が変化しても2次循環流のフローパターンはほぼ同じであることから、上下双方の2次循環流が発達するのに必要な距離 H_1/D (または H_2/D) = 1/3 は翼条件によらないものと解釈できる。特に翼径 d/D を変えた場合の N_p の変動位置に対する支配因子が H_1/d (または H_2/d) ではなく H_1/D (または H_2/D) であることは、以上の考えを支持する結果である。

(4) 最後に、 N_p の変動量、すなわち、 N_p の最大値と最小値の差は、Figs. 3, 4 のように翼条件によって変化しており、さらに、 N_{pmax} 値が大きい程その差が大きくなるという関係 (Fig. 5) が得られることである。この事実は、邪魔板条件下での攪拌所要動力の大部分が2次循環流生成のために消費され、大きな N_p 値を示す翼程その2次循環流の強度が高くなり、フローパターンの変化も大きくなり、大きな N_p の変動量が生じるものと理解出来る。しかし、Fig. 5 における勾配が1.6を示す根拠については今後の詳細な研究が必要である。

結 論

邪魔板付き攪拌槽の所要動力に関する既報の報文の整理から、タービン翼とパドル翼の動力数の相違や、パドル翼の動力相関式における翼高さと翼径の比に対する指数の相違を指摘した。さらに、これらの報告の実験条件の詳細な調査・検討から、このような相違を生じた原因が、翼取付位置による動力数の変化に基づくものであることを明らかにした。また、翼取付位置によって動力数が大きく変動する原因がフローパターンの変化に対応していることを、その観察により確認した。

次に、種々の翼取付位置に対する動力数の変動および変動量を比較した結果、動力数の変動は、液高さや翼形状によらず、翼中心から槽底や自由表面までの距離を槽径で除した無次元変数によって支配されていること、また、動力数の変動量は翼を槽中央に取付けた場合の動力数と関係づけられることを明らかにした。

〔謝 辞〕 本実験を進めるに当り資金的な御援助を賜りましたダイセル化学工業(株)新井工場殿に厚く御礼申し上げます。

Nomenclature

B_w	= width of baffle plate	[m]
b	= height of impeller blade	[m]
C	= clearance between vessel bottom and underside of impeller	[m]
D	= vessel diameter	[m]
d	= impeller diameter	[m]
H	= liquid height in vessel	[m]
H_1	= clearance between liquid surface and center of impeller blade	[m]
H_2	= clearance between vessel bottom and center of impeller blade	[m]
N	= rotational speed	[s ⁻¹]
N_p	= power number (= $P/\rho N^3 d^5$)	[-]
$N_{p(H_2/H=0.5)}$	= power number as impeller is set in the middle of liquid depth	[-]
n_p	= number of impeller blade	[-]
P	= power consumption	[W]
ρ	= density	[kg/m ³]

Literature cited

- 1) Bates, R. L., P. L. Fondy and R. R. Corpstein: *Ind. Eng. Chem. Process Design and Develop.*, **2**, 310-314 (1963)
- 2) Mochizuki, M. and K. Sato: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **10**, 49-55 (1984)
- 3) Nishikawa, M., Hashimoto, S., Fujieda and K. Hashimoto: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **5**, 59-64 (1979)
- 4) Rushton, J. H., E. W. Costich and H. J. Everett: *Chem. Eng. Prog.*, **46**, 395-402; **46**, 467-476 (1950)
- 5) Sano, Y., and H. Usui: *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 47-52 (1985)
- 6) Sasakura, H., E. Kato, S. Yamamura and S. Ooi: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **4**, 595-601 (1978)
- 7) Takeda, K., T. Hoshino, K. Shimizu and T. Nishihata: *Kagaku Kogaku*, **32**, 369-375 (1968)
- 8) Takeda, K., T. Hoshino, H. Taguchi and T. Fujii: *ibid*, **32**, 376-381 (1968)

Effects of Impeller Dimensions and Position on Power Consumption in a Baffled Agitated Vessel

Noboru Kamei*, Setsuro Hiraoka, Yoshihito Kato, Yutaka Tada,
Hiroshi Ishizuka, Katsuki Iwata, Young-Sei Lee**,
Takao Yamaguchi*** and Seung-Tae Koh****

Department of Applied Chemistry, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466

Key Words: Power Consumption, Paddle Impeller, Turbine Impeller, Impeller Dimensions, Impeller Position

The previously proposed correlations of power consumption in baffled agitated vessels with paddle and turbine impellers showed some contradictions. The difference of impeller level among the given experimental conditions was believed to cause them. In the present work, the change of power number with the impeller level and the impeller dimensions was investigated experimentally. Then, it was confirmed that the contradictions among the power correlations depended strongly on the impeller level, and that the change of power number with the impeller level was closely related to the change of flow pattern in a vessel. A major factor which influenced this change was experimentally confirmed to be the ratio of impeller level to vessel diameter.

* Daicel Chemical Industries, Ltd.

** Keimyung Univ., Korea

*** Chubu Univ.

**** Toyo Engineering Co.