

ドラフトチューブを備えた攪拌槽の攪拌所要動力

古川陽輝¹・加藤禎人^{1††}・多田豊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

³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, ドラフトチューブ

ドラフトチューブを備えた攪拌槽は工業的に用いられているが, この攪拌槽に関する所要動力のデータは公表されていない。本報では, ドラフトチューブ付き攪拌槽で, ドラフトチューブの幾何条件や攪拌翼の条件を変化させた際の動力特性を明らかにした。その結果, 所要動力はドラフトチューブの幾何形状の影響をほとんど受けず, 翼の幾何形状の影響の方が大きいことがわかった。また, その動力数は邪魔板無しの攪拌槽のものより大きくなるが, パドル翼では邪魔板幅と槽径の比 $B_w/D = 0.08$, ピッチドパドル翼では $B_w/D = 0.05$ の邪魔板をそれぞれ1枚用いた場合の数値に相当することがわかった。

緒言

通気攪拌槽には, ドラフトチューブと呼ばれる対流誘導円筒が設置される場合がある。ドラフトチューブを攪拌槽に設置することで, 液体の上下循環が促進され, 気泡の循環および液中への取り込みも促進され, 気泡の滞留時間が長くなるため, 通気量が通常の通気攪拌槽より少なくて済むと言われている。また, 気泡塔ではドラフトチューブを設置することにより液循環が良くなるため通気量を増加させることができ, 高い物質移動容量係数を得られるなど, その利点は多い。

攪拌槽の内装物には, バッフル, ドラフトチューブ, コイル等いろいろなものがあり, バッフルに対して動力数を計算する手法は数多く報告されているが, ドラフトチューブやコイルに関しては皆無である。

そこで, 本研究では, 種々の幾何形状のドラフトチューブ付き攪拌槽の所要動力を測定し, どのような動力特性を示すのかを明らかにした。さらに, 亀井ら (Kamei *et al.*, 1995,1996)および平岡ら(Hiraoka *et al.*, 1997) の式を適用することで動力推算する手法を検討した。

1. 実験方法

攪拌槽として内径 $D = 18.5\text{cm}$ アクリル樹脂製の平底円筒槽を用いた。流体は種々の粘度に調製した水飴水溶液と水道水であり, 液高さ H は槽内径と等しくした。使用した攪拌翼は, パドル翼とピッチドパドル翼(下方吐出)であり, その寸法をそれぞれ **Table 1**, **Table 2** に示し, ドラフトチューブには種々の大きさのものを用意し, その寸法を **Table 3** に示した。ドラフトチューブ取付位置は槽中央の $Z/H = 0.5$, 翼取付位置は基本的に槽中央の $C/H = 0.5$ とし, 一部の試験で翼取付位置を $C/H = 0.1\sim 0.8$ の範囲で変化させた。このとき, ドラフトチューブの高さが小さいとき, 翼取り

Table 1 Geometry of paddle impeller

n_p [-]	d [m]	b/d [-]
2	0.07	0.2
4	0.07	0.2
6	0.07	0.2
4	0.07	0.13
4	0.07	0.4
4	0.1	0.2
4	0.12	0.2

Table 2 Geometry of pitched paddle impeller

n_p [-]	d [m]	b/d [-]	θ [rad]
2	0.07	0.2	$\pi/3$
4	0.07	0.2	$\pi/3$
4	0.07	0.2	$5\pi/12$
4	0.1	0.2	$\pi/3$

Table 3 Geometry of draft tube

d_{DT} [m]	H_{DT} [m]	A_{DT} [-]
0.12	0.0463	0.162
0.12	0.0925	0.324
0.12	0.139	0.486
0.13	0.0231	0.0878
0.13	0.0463	0.176
0.13	0.0925	0.351
0.13	0.139	0.527
0.14	0.0463	0.189
0.14	0.0925	0.378
0.14	0.139	0.568

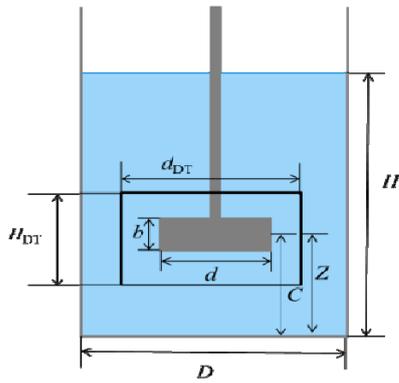


Fig.1 Geometry of mixing vessel with draft tube

付け位置が極端に高い位置や低い位置の時は、翼がドラフトチューブの外側に存在する場合もある。**Figure 1** に使用した攪拌槽の幾何形状と記号を示した。

攪拌所要動力はトルクメーター(SATAKE ST-3000)を用いて測定した。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. 実験結果と考察

2.1 幅広い Re 数での攪拌所要動力

翼径 $d = 7$ cm, 翼幅 $b/d = 0.2$ の4枚羽根パドル翼あるいは翼径 $d = 7$ cm, 翼幅 $b/d = 0.2$, 羽根角度 $\theta = \pi/3$ の4枚羽根ピッチドパドル翼を槽中央に取り付け、幅広い Re 数で攪拌所要動力を測定した。ドラフトチューブには内径 $d_{DT} = 13$ cm, 高さ $H_{DT} = 2.31, 9.25, 13.9$ cm と3種類のを槽中央に取り付けた。

Figure 2 および **Figure 3** はそれぞれパドル翼およびピッチドパドル翼で測定された動力線図である。パドル翼、ピッチドパドル翼ともに層流域から遷移域ではドラフトチューブの有無に関わらず邪魔板無し攪拌槽の動力数と差異は生じていない。

しかし、 Re 数が1000を超える乱流域ではどちらの翼を用いてもドラフトチューブの使用によって動力数は、バッフル無し攪拌槽より大きくなった。ただし、動力数はドラフトチューブの高さには依存していないことが分かる。このことから、ドラフトチューブ付き攪拌槽の動力を検討する場合は乱流域の攪拌所要動力について注意すればよいということがわかる。

幅広い Re 数でドラフトチューブ付き攪拌槽の攪拌所要動力をパドル翼に対して亀井らの式(Kamei *et al.*, 1995, 1996), ピッチドパドル翼に対して平岡らの式(Hiraoka *et al.*, 1997)を用いて推算してみた。Figs. 2,3 に示した曲線がその相関線である。パドル翼では、式中のパラメータである邪魔板枚数 n_B を1に固定したところ、邪魔板幅 B_w を、 $B_w/D = 0.08$ とすれば、また、ピッチドパドル翼では、 $B_w/D = 0.05$ とすれば相関値と実測値がほぼ一致した。ただし、パドル翼の乱流域の相関値が実験値より高い値となっているが、今回の実験条件で邪魔板無しの動力数も含めて高めへの平行移動させられ方なので安全側であるということ、また実験装置の精度上有効数字が少なくなっている

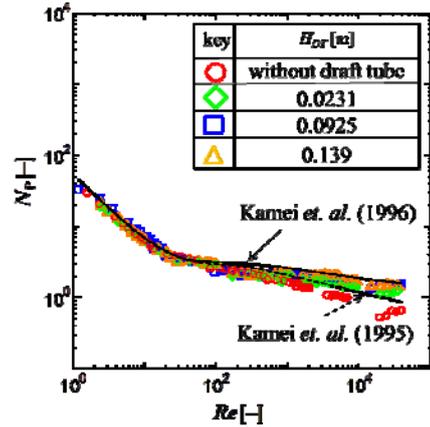


Fig.2 Power number of paddle impeller

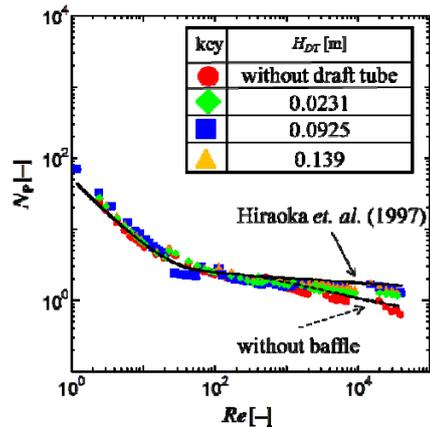


Fig.3 Power number of pitched paddle impeller

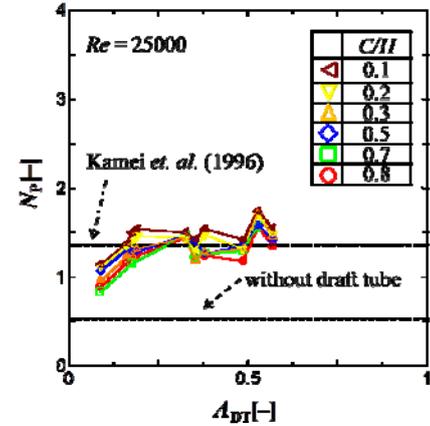


Fig.4 Effect of draft tube geometry and impeller position on power number for paddle impeller

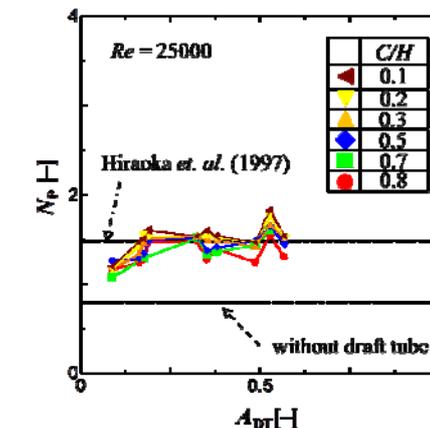


Fig.5 Effect of draft tube geometry and impeller position on power number for pitched paddle impeller

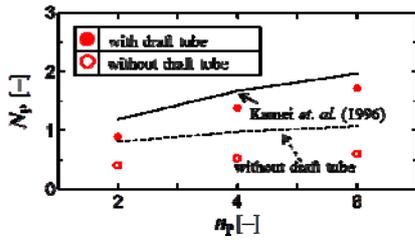


Fig.6 Effect of impeller blade number on power number for paddle impeller

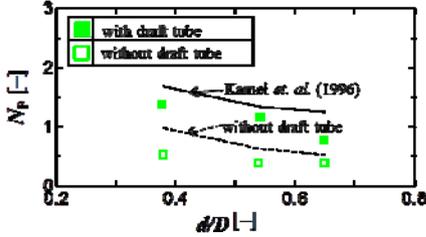


Fig.7 Effect of impeller diameter on power number for paddle impeller

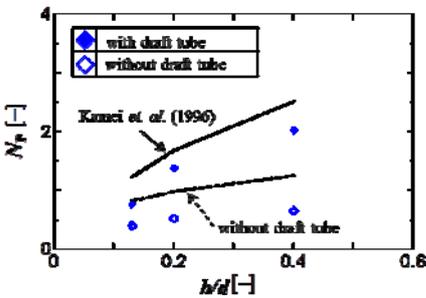


Fig.8 Effect of height of impeller blade on power number for paddle impeller

領域ということをも勘案して相関式の精度は問題ないとした。

2.2 ドラフトチューブ幾何形状及び翼取付位置の影響

Table 3 に示したドラフトチューブを用いて翼取付位置を $C/H = 0.1 \sim 0.8$ まで変化させて攪拌所要動力を測定した。使用した攪拌翼は前述の4枚羽根パドル翼あるいは4枚羽根ピッチドパドル翼である。Figure 4 と Figure 5 にそれぞれの攪拌翼で得られた動力数を示した。記号の色で翼取付位置を示した。二つの翼ともに動力数に若干の変動はあるが、その変動に d_{DT} , H_{DT} の傾向は得られず、翼取付位置によらずほぼ一定の動力数であると解釈できる。ここで、ドラフトチューブの高さと直径は種々のものを用いたのでその両者を一つにまとめた表面積比 $A_{DT} (= d_{DT}H_{DT}/DH)$ というパラメータで一本化した。翼取り付け位置の影響を受けないのは槽内の一次流れが旋回流主体であるからと考えられる(Kato et al., 2010)。ドラフトチューブの幾何形状を種々に変化させた場合、 A_{DT} が 0.53 でバラツキの範囲ではない動力数の増加が見られるが、それを除くと傾向は見られず動力数は一定の値を示していると解釈できる。これは二次流れがドラフトチューブと槽壁の間を上昇し、ドラフトチューブ内で下降するフローパターンがいずれの条件においても同様であるためと考えられる。

さらに、パドル翼とピッチドパドル翼で得られたデータに対して、亀井らおよび平岡らの式でそれぞれ相関した

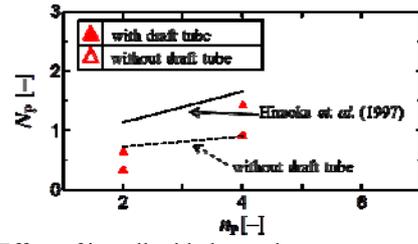


Fig.9 Effect of impeller blade number on power number for pitched paddle impeller

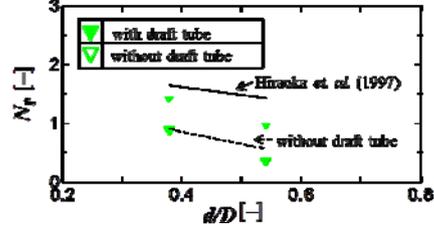


Fig.10 Effect of impeller diameter on power number for pitched paddle impeller

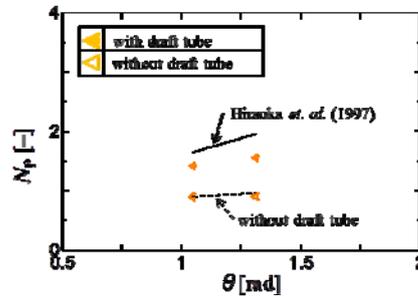


Fig.11 Effect of angle of impeller blade on power number for pitched paddle impeller

結果、 Re 数を変化させた場合と同様、パドル翼では $n_B = 1$, $B_W/D = 0.08$, ピッチドパドル翼では $n_B = 1$, $B_W/D = 0.05$ とすれば十分に相関可能であることがわかった。

2.3 種々の翼条件での攪拌所要動力への影響

Table 2 および Table 3 に示した種々の幾何形状の翼の攪拌所要動力を測定した。ドラフトチューブには内径 $d_{DT} = 13.0$ cm, $H_{DT} = 9.25$ cm を使用し、攪拌翼の取付位置は $C/H = 0.5$ とした。Figures 6 ~ 8 にパドル翼の幾何形状を変えて得られた動力数、Figures 9 ~ 11 にピッチドパドル翼の幾何形状を変えたものについてそれぞれ示した。Table 2 に示したように Fig.8 以外の翼は $b/d = 0.2$ である。

Figs.6 ~ 8 からパドル翼の羽根枚数を増やした場合および翼幅を大きくした場合、動力数は増加し、翼径を大きくした場合、動力数は減少している。いずれのパドル翼の幾何形状に対しても、亀井らの式の相関値と傾向は一致しており、 $n_B = 1$, $B_W/D = 0.08$ とすれば十分に相関可能であった。図中の曲線が相関線である。Figs.9 ~ 11 のピッチドパドル翼でもパドル翼と同様の傾向を示しており、 $n_B = 1$, $B_W/D = 0.05$ とすれば、平岡らの式で相関可能であった。

結 言

種々の寸法のドラフトチューブ付き攪拌槽の所要動力をパドル翼とピッチドパドル翼を用いて測定した。いずれ

の翼でも層流域から遷移域まではドラフトチューブの有無に関わらず攪拌所要動力に差異はないが、乱流域ではドラフトチューブ付の方が動力数は大きくなった。また、その動力数はドラフトチューブの幾何形状及び翼取付位置に影響を受けなかった。これらのデータを既往の相関式を用いて邪魔板付攪拌槽相当として推算できるか検討したところ、バドル翼では $n_B = 1, B_W/D = 0.08$, ピッチドバドル翼では $n_B = 1, B_W/D = 0.05$ とすれば十分に相関が可能であった。これにより、ドラフトチューブ付き攪拌槽設計のための大きな指針が得られたと考えられる。

Nomenclature

A_{DT}	= surface area ratio between draft tube and vessel ($= d_{DT}H_{DT} / DH$)	[-]
b	= height of impeller blade	[m]
B_W	= baffle width	[m]
C	= clearance between bottom and impeller	[m]
d	= impeller diameter	[m]
d_{DT}	= draft tube diameter	[m]
D	= vessel diameter	[-]
H	= liquid depth	[m]
H_{DT}	= height of draft tube	[m]
n	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]
n_B	= number of baffle plate	[-]
n_p	= number of impeller blade	[-]
N_p	= power number ($= P/\rho n^3 d^5$)	[-]
P	= power consumption	[W]
Re	= Reynolds number ($= d^2 n \rho / \mu$)	[-]

Z	= clearance between bottom and draft tube	[m]
μ	= liquid viscosity	[Pa · s]
ρ	= liquid density	[kg · m]
θ	= angle of impeller blade	[rad]

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., 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)

Power Consumption of Mixing Vessel with Draft Tube

Haruki FURUKAWA¹, Yoshihito KATO¹, Yutaka TADA¹,
Song-Tae KOH² and Young-Sei LEE³

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

² Department of Bio-Chemical Engineering, Dongyang University, 1 Kyochon, Punggi, Yeongju, Kyungbuk, 750-711, Korea

³ School of NANO&Material Engineering, Kyungpook National University, 386 Gajangdong, Sangju, Kyungpook, 742-711, Korea

Keyword : Mixing, Agitation, Power Consumption, Draft Tube

Mixing vessels with draft tubes are used in industrial processes, but power number data have not been published for this type of vessel. In this study, the power characteristics of a mixing vessel with draft tube were measured for various conditions of draft tube and mixing impeller geometry. The power number was found not to be affected by the geometry of the draft tube, but greatly affected by the impeller geometry. The power number of the mixing vessel with a draft tube was larger than that without a draft tube. It was also found that the power number of a vessel with draft tube and a paddle impeller or pitched paddle impeller corresponded to those of a vessel without draft tube and with a ratio of baffle width to vessel diameter of $B_W/D = 0.08$ and 0.05 , respectively.