

球底乱流攪拌槽の攪拌所要動力

加藤禎人¹⁺⁺・塩原克己²・古川陽輝¹・多田豊¹・長津雄一郎¹・高承台³・李泳世⁴

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佐竹化学機械工業(株), 335-0021 戸田市新曽66

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, 球底, 邪魔板

これまで攪拌槽に関する研究は、平底円筒槽に関するものがほとんどであり、実機に採用されている皿底および球底槽に関するデータは少なく、スケールアップにおいて、実験室スケールの実験値と実機の実測値の差が問題点とされてきた。本報では、球底槽と皿底槽および平底槽との攪拌所要動力の差異を明らかにした。その結果、最も差が顕著に表れる攪拌槽の条件は、標準邪魔板条件の乱流状態では、パドル翼を用いたときであることがわかった。その際、球底槽の攪拌所要動力は平底槽のそれに比べて最大約27%低下した。傾斜翼およびプロペラ翼の動力数は槽底形状の影響はほとんど受けなかった。

緒 言

攪拌槽所要動力に関する研究において、大学側が提出する実験データは平底円筒槽に関するものが多く、現場で採取される皿底円筒槽のデータとの差異がしばしば問題とされてきた。これはスケールアップにおいて、大きな問題となり、実機を設計する際に文献のデータをそのまま使用できないということにつながる。Kato *et al.*(2010)は、この古くからの問題点を解決するべく、種々の翼取り付け位置で皿底円筒槽の攪拌所要動力を、動力数がレイノルズ数によらず一定値になる範囲で測定し、皿底と平底の差異がどの条件で最も大きくなるかを明らかにした。その結果、標準邪魔板条件の乱流状態で、放射流翼を用いた場合に大きな差異が生ずることがわかった。従って、皿底型の実機を使用する際、どのような攪拌翼に注意するべきかが明らかになった。

また、実装置においては、皿底だけでなく、球底形状が用いられる場合もある。この槽底形状に対する攪拌所要動力データは筆者の知る限り公表されていない。丸底フラスコに関する Kamei *et al.*(1995a)の式があるのみである。そこで、筆者らは前報(Kato *et al.*, 2010)で得られた動力データと比較するために、球底攪拌槽を作成し、種々の攪拌翼、取り付け位置に対し、非常に興味深い動力変化の結果を得たのでここに報告する。

1. 実験方法

使用した攪拌槽はアクリル樹脂製の球底円筒槽、平底円筒槽および10%皿底円筒槽であり、その内径 D は185mmとした。邪魔板条件は標準邪魔板条件(槽径の1/10幅の邪魔板を4枚)とした。また、邪魔板の挿入深さはそれぞれの槽に対して、槽壁の直線部分とした。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、低粘度液に一般的に使用されるパドル翼、ラシュトンタービン翼、ピッチドパドル翼およびプロペラ翼とした。本実験では、翼取り付け位置は $CH=0.1\sim 0.8$ とした。Figure 1に各幾何形状の記号とともに、使用した攪拌槽の概形を、Table 1に使用した攪拌翼の形状を示す。

攪拌所要動力は、トルクメーター:SATAKE ST-3000を用いて軸トルク測定法で求めた。軸トルクは、層流攪拌では変動が規則的であり、振幅も大きくはないが、乱流攪拌では、定常運転時でも非定常的に動力が大きく変動するので、約2分間測定し、波形データからその平均値に相当する値を求め、 $P=2\pi nT$ で計算した。

流れの可視化は、前報同様スリット光によるトレーサー法によった。光の屈折による画像の乱れを軽減するために攪拌槽は水を満たした角槽内に設置した。

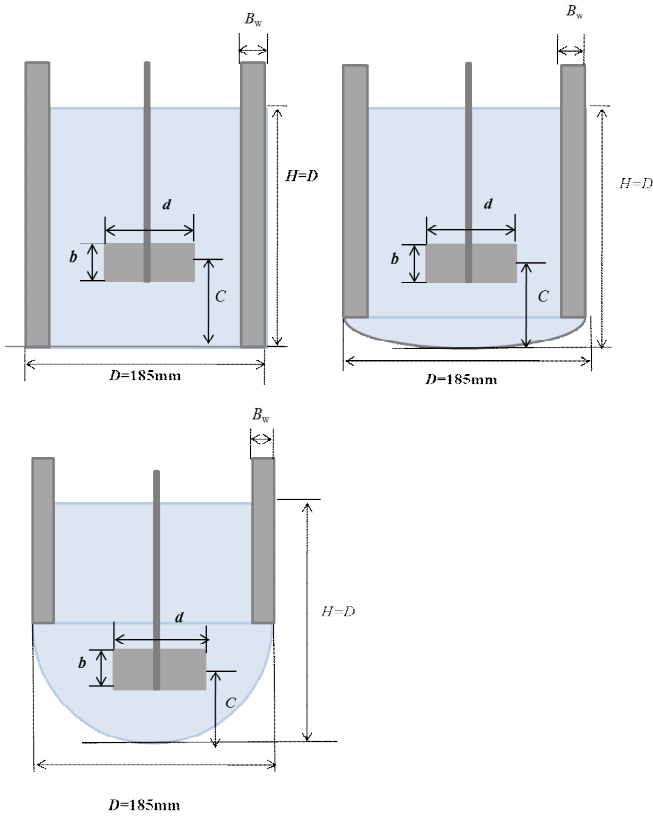






Fig.1 Geometry of mixing vessel

Table 1 Geometry of impellers used

| <u>Paddle</u> | <u>Rushton Turbine</u> |
|---|---|
| $d=0.076\text{ m}$ | $d=0.073\text{ m}$ |
| $b=0.019\text{ m}$ | $b=0.014\text{ m}$ |
| $n_p=4$ | $n_p=6$ |
|  |  |
| <u>Pitched Paddle</u> | <u>Propeller</u> |
| $d=0.069\text{ m}$ | $d=0.073\text{ m}$ |
| $b=0.015\text{ m}$ | $b=0.019\text{ m}$ |
| $n_p=4$ | $n_p=3$ |
| $\theta = \pi/3$ | $\theta = \pi/6$ |
|  |  |

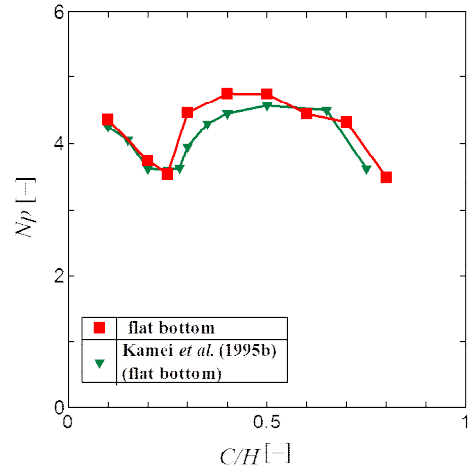


Fig.2 Dependence of power number on clearance between bottom and paddle impeller for flat bottom vessels

($n_p=6, n=300\text{rpm}, n_b=4, \mu=1\text{ mPa}\cdot\text{s}$)

2. 結果と考察

2.1 パドル翼を用いた場合

球底槽と平底槽の動力数の差異が最も大きな条件は、前報 (Kato *et al.*,2010) と同様、邪魔板付きの場合の乱流域 ($Re_d=20,000-30,000$)であった。Figure 2 に過去の文献データとの比較を示す。水道水を用いた場合の6枚パドル翼の動力数と取り付け位置との関係を示す。文献データ(Kamei *et al.*,1995b)である平底攪拌槽における動力数変化(▼)と本研究の動力数変化(■)はほぼ一致した。また、この平底槽における動力数変化は、Nishikawa *et al.*(1979)の結果とも定性的に一致しているため、再現性は十分であると判断した。

次に、Figure 3 に平底の動力数変化(■)と皿底の動力数変化(▲)、球底の動力数変化(●)を示す。球底槽の動力数変化を平底、皿底と比較すると、 CH が 0.3 未満では平底、皿底と同様の動力数変化を示し、 CH が 0.3 以上ではほかの二つの槽とは異なりほぼ一定値を示した。槽中央部に翼を取り付けた場合の平底と球底との差が最も大きく、約27%であった。これは、平底と皿底との差(20%)よりも大きく、パドル翼が使用される場合、最も一般的な取り付け位置 $0.3 < C/D < 0.5$ で、過去のデータあるいは種々の相関式による計算値が球底槽に適用できないことを示している。乱流攪拌槽の場合、気液間物質移動係数や固液間物質移動係数は直接単位体積当たりの攪拌所要動力に関係づけられるため、 $0.3 < C/D < 0.5$ の

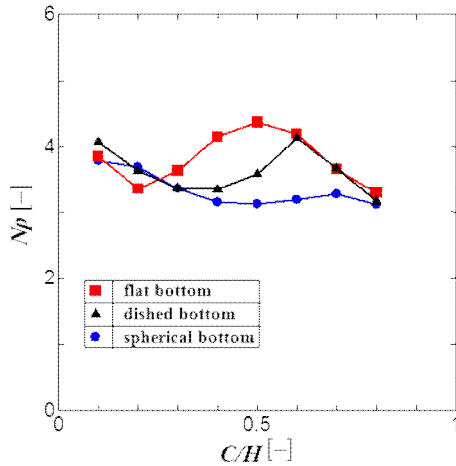


Fig.3 Dependence of power number on clearance between bottom and paddle impeller for flat, dished and spherical bottom vessels

($n_p=4, n=300\text{rpm}, n_b=4, \mu=1\text{ mPa}\cdot\text{s}$)

翼取り付け位置であると、実験装置(平底)で得られていた動力が実装置(球底)では得られないこととなり、これらの数値も低下し、実験で予想していた性能が発揮できないことを意味している。一般的に、平底槽を使用したとき、パドル翼を槽底に近づけていくと動力が低下する原因は、攪拌槽内のフローパターンが2ループの放射流タイプから、1ループの軸流タイプに変化するからであると考えられている。これに関しては2段階についても同様な考察がなされている(Takeda *et al.*, 1968, Mochizuki *et al.*, 1995, Nishikawa *et al.*, 1976)。Figure 4に示すように、パドル翼の場合はラシュトタービン翼と異なり、ディスクを持たないので翼を槽底あるいは液面に近づけたとき、翼の下部もしくは上部のどちらかのループが形成されにくくなり、翼を軸方向に突き抜ける流れが生じ、軸流型の1ループに変化している様子が観察される(Fig4左上の平底 $CH=0.2$ を参照)。一般に同寸法の放射流翼と軸流翼の動力数を比較した場合、軸流翼の動力数は小さな値をとる。したがって、放射流から軸流への遷移が動力数の低下の原因であると考えられた。球底槽の場合、翼を槽底近傍に取り付けたときだけでなく、中央に取り付けた場合や槽上部に取り付けた場合も、フローパターンが非定常的に放射流から軸流型の1ループに変化している現象が観察された。これは、球底の場合、槽底下部から槽壁を駆け上がることにより、1ループ型に近い軸流が発生したと

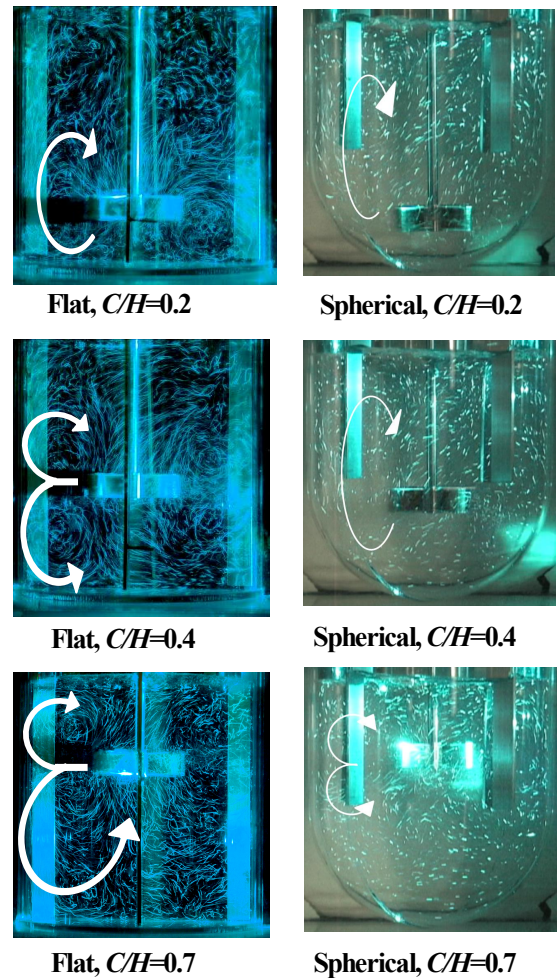


Fig.4 Visualization of flow pattern in mixing vessel with paddle impeller

考えられる。このため、球底槽において動力数の低下が発生したと考えられる。Fig4左下の球底 $CH=0.7$ の写真が示すように、翼を上部に設置すると2ループを形成しはじめ、平底槽や皿底槽と同様なフローパターンになり、動力変化が一致してくるものと考えられる。ただし、このとき、球底部では弱い旋回流が観察された。

2.2 ラシュトタービン翼を用いた場合

安定した放射流型の代表翼として、ラシュトタービンについて検討した。前述のパドル翼とは大きく傾向が異なり、Figure 5に示すようにすべての槽形状において、パドルほどの動力数変化は生じず、ほぼ一定値を示すパターンとなった。ただし、槽中央付近に翼を取り付けた場合、平底および皿底とは異なり、球底では若干の動力数低下が生じた。 $CH=0.5$ で平底との動力差が最も大きくなり、それは20%程度であった。これは、翼下側でできるループが槽底形状の影響を受けるためだと考えられる。Figure 6

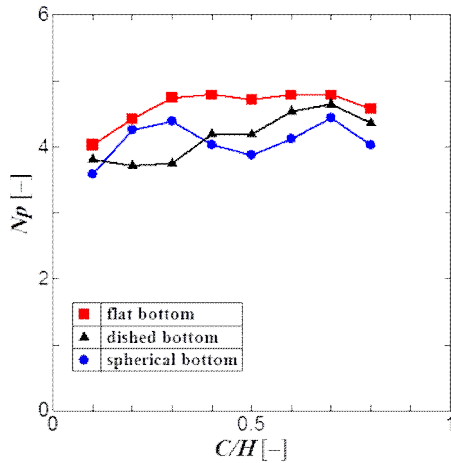


Fig 5 Dependence of power number on clearance between bottom and Rushton turbine impeller for flat, dished and spherical bottom vessels

($n_p=6, n=300\text{rpm}, n_b=4, \mu=1\text{mPa}\cdot\text{s}$)

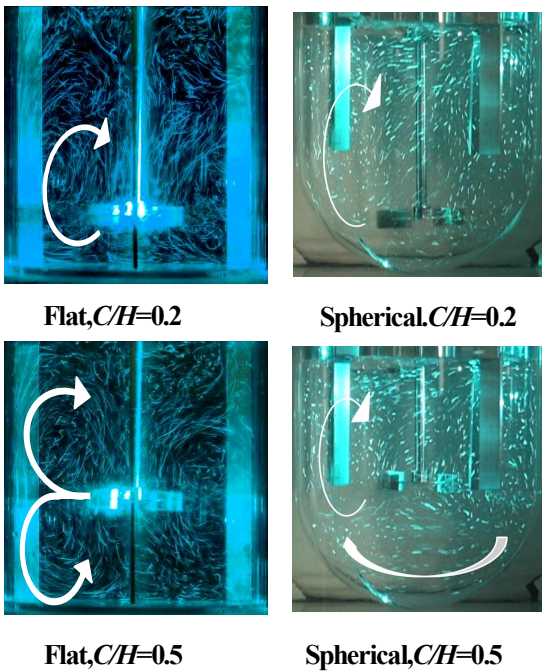


Fig 6 Visualization of flow pattern in mixing vessel with Rushton turbine impeller

のフローパターンの可視化写真に示すように、翼の位置を槽の中央付近に取り付けた場合、平底では2ループが観測されるのに対して、球底では翼の上部に1ループの軸流が生じ、翼の下部は上下のループではなく、水平方向の旋回流が主体となっていた。このことが、動力数の差異が生じた最も大きな原因と考えられる。この旋回流が発生が、球底の特徴であり、平底や皿底と最も大き

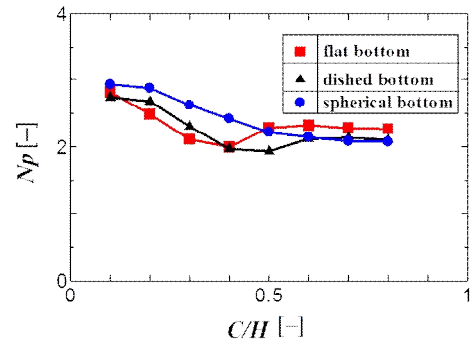


Fig. 7 Dependence of power number of on clearance between bottom and pitched paddle impeller for flat, dished and spherical bottom vessels

($n_p=4, n=300\text{rpm}, n_b=4, \mu=1\text{mPa}\cdot\text{s}$)

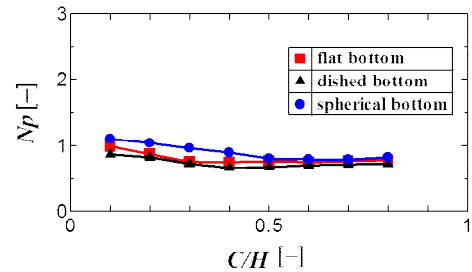


Fig. 8 Dependence of power number of on clearance between bottom and propeller impeller for flat, dished and spherical bottom vessels

($n_p=3, n=300\text{rpm}, n_b=4, \mu=1\text{mPa}\cdot\text{s}$)

な相違点である。

2.3 傾斜パドル翼を用いた場合

軸流型と放射流型の混合的なフローパターンを持つ翼として、下方吐出のピッチドパドル翼について検討した。傾斜角は 60° で、比較的放射流の強い翼を用いたにも関わらず、Figure 7に示すように平底槽、皿底槽と球底槽に大きな動力数の差異がみられなかった。これは翼の取り付け位置を変化させても1ループで安定していたためである。いずれの槽底形状においても翼を槽底近傍に設置した場合に最大の動力数を示した。

2.4 プロペラ翼を用いた場合

軸流型の代表翼として、下方吐出のプロペラ翼について検討した。Figure 8に示すように平底槽、皿底槽と球底槽に大きな動力数の差異は見られなかった。ピッチドパドル翼も含めた軸流型の

翼はフローパターンが槽底形状によらず変化しないため、動力数に差異が現れないものと考えられる。

平底槽と球底槽を比較した場合、 $H=D$ で液深さを定義したとき、容積の差が問題となる場合も考えられるが、今回の検討では、攪拌翼の取り付け位置が動力数に及ぼす影響が大きいということとを重視したことと、球底部分の邪魔板形状の定義が複雑なることを避けるために直線部分の邪魔板設置と限定している。

結 言

圧力容器等の実機に多く採用されている球底槽の邪魔板付き乱流域の攪拌所要動力を測定した。放射流翼を使用した場合、平底や皿底の動力より低い動力数であったが、翼の取り付け位置によって他の槽底形状の影響を大きく受け、平底や皿底とも大きく異なることがわかった。特にパドル翼を用いる場合、皿底槽とも異なる結果が得られ、翼取り付け位置の影響はあまり大きくないことがわかった。また、翼取り付け位置を槽底付近や液面付近にした場合は、いかなる翼を用いても槽底形状による動力数の差異は存在しなかった。これにより、ラボスケールの実験装置と実機の場合で、どのような幾何形状のときに注意すべきかが明らかになった。

Nomenclature

| | | |
|-------|---|--------------------|
| b | = height of impeller blade | [m] |
| C | = clearance between bottom and impeller | [m] |
| d | = impeller diameter | [m] |
| H | = liquid depth | [m] |
| N_p | = power number ($=P/\rho n^3 d^5$) | [-] |
| n | = impeller rotational speed | [s ⁻¹] |
| n_b | = number of baffle plate | [-] |
| n_p | = number of impeller blade | [-] |
| P | = power consumption | [W] |
| T | = shaft torque | [N · m] |

μ = liquid viscosity [Pa · s]

ρ = liquid density [kg · m⁻³]

Literature Cited

- 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 Spherical Agitated Vessels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 41–48 (1995a)
- 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 in a Baffled Agitated Vessel," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 696–702 (1995b)
- 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)
- Mochizuki, M., N. Takei, T. Satoh, K. Satoh and T. Akehata; "Power Required for Upper and Lower Impellers in Turbulent Mixing Vessels with Dual Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 628–632 (1995)
- Nishikawa, M., K. Asiwake, N. Hashimoto and S. Nagata; "Effect of Impeller Clearance on Power Consumption by Multi Stage Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 426–426 (1976)
- Nishikawa, M., N. Hashimoto, S. Fujieda and K. Hashimoto; "Effect of Impeller Level on Power Consumption Mixing Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **5**, 59–64 (1979)
- Takeda, K., T. Hoshino, H. Taguchi, and T. Fujii; "Characteristics of the Multiple Impeller in Turbulent Mixing Operation a Deep Vessel," *Kagaku Kogaku*, **32**, 376–381 (1968)

Power Consumption in Turbulent Mixing Vessel with Spherical Bottom

Yoshihito KATO¹, Katsumi SHIOBARA², Haruki HURUKAWA¹, Yutaka TADA¹,
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 *Tokyo Office, Satake Chemical Equipment Mfg. Ltd., 66 Niizo, Toda-shi, Saitama 335-0021, 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 Consumption, Spherical Bottom, Baffle

The difference in power consumption of a spherical-bottom mixing vessel from dished- and flat-bottom ones was investigated. In the turbulent mixing vessels with standard baffle conditions and a radial-flow type paddle impeller, power consumption in the spherical-bottom vessel was reduced by up to 27% in comparison with the flat-bottom vessel. The vessels with pitched-blade paddle and propeller type impellers showed the same power consumption regardless of the bottom geometry.