

新方式高性能攪拌機的设计開発

日大生産工(院) 大岡 忠人 日大生産工 山崎 博司
日大生産工 野村 浩司 日大生産工 氏家 康成

1. 結論

二つ以上の物質を混ぜる操作は化学工業をはじめ試薬分野，食料分野，その他あらゆる分野にわたりその製造過程の一部として広く適用されている．攪拌操作の目的には混合，分散，物質移動などがある．この操作を大別すると，粉末や固体粒子をかき混ぜる固体混合，粘性のあまり高くない液体どうしや液体に固体粉末や粒子をかき混ぜる攪拌，粘性が非常に高い物質や可塑性半固体の原料で練り混ぜるような操作になる捏和に分けられる．その中で本研究では攪拌に使用される攪拌機について考える．近年，攪拌機は機能性微粒子の製造や，重要な環境問題の一つである廃水処理過程において攪拌操作が重要なポイントとなっている．そのため，より高性能で高効率な攪拌機の開発が早急に求められている．特に設置面積の制約から，最近では攪拌槽直径に対して背の高い装置が増えており，このような条件では効率の良い攪拌が難しくなる．

そこで，本研究では新しい方式を採用した攪拌機的设计・製作を行い，流動特性，混合特性，攪拌効果などを解析し性能向上を図るとともに，工業化設計のスケールアップ相関式を得ることを目的とする．本報告では，実験条件設定の経緯および攪拌動力，混合時間の測定について報告する．

2. 実験装置

実験装置の概要を図 1 に示す．実験装置を大きく分類すると攪拌部と測定部に分けることができる．攪拌部は攪拌槽，ドラフトチューブ，天板，主軸，攪拌翼，可変速モータから構成されている．攪拌槽，ドラフトチューブ，天板は攪拌特性を評価しやすいよう，アクリル材を使用する．攪拌槽は攪拌軸が中心にくるように設置する．図 2 (a) に示されるように攪拌槽には内径 240 mm の円筒形，ドラフトチューブは内径 122 mm，長さは 368 mm の

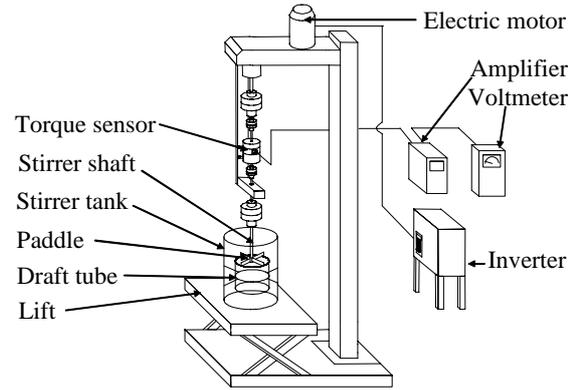


Fig.1 Experimental apparatus

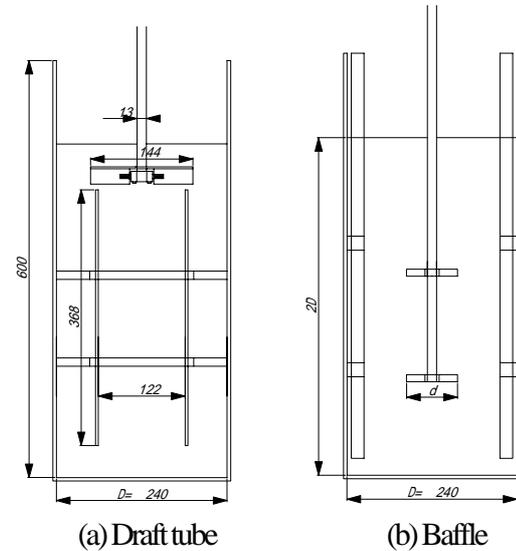


Fig.2 Stirrer type

円筒形のものを使用し，ドラフトチューブは黄銅製のバンドと金具で攪拌槽内に固定する．天板は直径 144 mm の円盤で攪拌翼上部に接するように固定する．主軸は，材質が SUS304 で直径 13 mm のものを使用する．攪拌翼は黄銅製で，攪拌翼直径 144 mm の 4 枚フラットパドルを用いる．従来より攪拌

Development of a High Performance Stirrer Introduced New Method

Tadahito OOKA, hiroshi YAMASAKI, hiroshi NOMURA and Yasushige UJIIE

機の基本構成として広く採用され、また他形式の攪拌機性能を評価するうえで基準となる完全邪魔板条件では、図 2.(b)に示されるように 4 枚ピッチパドル(迎え角 45°)を 2 段に設置し、攪拌槽内壁に邪魔板を 4 枚設置する。翼直径 d 、攪拌槽内径 D 、翼幅 b として、標準的な完全邪魔板条件でのピッチパドルの寸法は次式で与えられることが知られている。

$$d/D=0.3 \quad db=0.15 \quad (1)$$

ここでは式(1)より、翼直径 d :72mm、幅 b :10.5mm を採用した。上段と下段のピッチパドルは上下自由に移動することができる。完全邪魔板条件では、一般的に、邪魔板がない状態と比較して混合速度は向上するが、同時に攪拌動力も増大する。邪魔板の寸法は、邪魔板の幅 w 、攪拌槽との隙間 c 、攪拌槽の底との隙間 a とすると標準として次式によって定められる。

$$w=3D/40 \quad c=D/40 \quad a=D/10 \quad (2)$$

攪拌翼深さはリフトの上に攪拌槽を設置し、リフトを上下させることで変化させ、標準値を採用して底面から 72mm($=d$)とした。ドラフトチューブの位置は黄銅製のバンドを緩めることで変更できるようにした。モータは 3 相 4 極誘導モータで出力 1.5kW のものをインバータ制御により回転数を変化させる。攪拌流体には水を使用した。測定部は、ひずみゲージ式トルクセンサ、ひずみアンプ、電圧計、ライト、ビデオカメラで構成した。

3.実験方法

本研究ではドラフトチューブを導入した新方式攪拌機の性能を、標準的攪拌機である完全邪魔板条件(4枚の邪魔板、2段4枚ピッチパドル)と比較して評価した。

実験パラメータは種々考えられるが、本研究では手始めとして回転数、攪拌動力、攪拌翼とドラフトチューブの間隔を採用した。

本実験に先立ち、図 3 に示す方法でトルクセンサの検定を行った。攪拌翼の先に糸を結び、滑車を介してその先に 100g の重りを吊るす。攪拌翼の半径と重りを用いてトルクを算出し、同時にひずみアンプからの出力電圧を計測する。以上の操作から求めた出力電圧 E とトルク T の関係式を以下に示す。

$$T [\text{Nm}] = 0.09079 [\text{Nm/V}] \times E [\text{V}] \quad (3)$$

式(3)を用い、トルクと回転数から攪拌動力を算出した。

水のような低粘度流体を扱う場合、攪拌動力は、約 100 W/m^3 といわれている。本実験の攪拌水量は 20 l 強であり、おおよそ 2 W 程度が見積もられる。この場合、攪拌トルクは極めて小さく、軸受け等の摩擦抵抗が無視できない。そのため、攪拌装置を空転させ、装置の軸受抵抗トルクを予め測定し、攪拌実験時の実測トルクから差し引いた値を攪拌トルクとした。

実験手順は、攪拌槽に規定量の水を貯めて、ドラフトチューブと攪拌翼の位置、攪拌軸の回転数など、実験の各パラメータを設定した後、攪拌軸を回し流体を攪拌する。

本研究では攪拌動力が 1W、2W のときの混合速度をドラフトチューブ式と完全邪魔板条件で比較した。

混合速度は一般的に用いられているヨウ素ハイポ法を採用し、目視で評価した。目視試料にはでんぷんとヨウ素液とチオ硫酸ナトリウムを使用する。まず、攪拌槽にヨウ素を入れ着色し、ヨウ素と流体が均一に混合するまで攪拌する。その後、攪拌槽にでんぷんを入れ、色をより濃くする。完全にヨウ素が攪拌された後、チオ硫酸ナトリウムを入れ、色が完全に無色透明になるまでの時間を計る。完全に無色透明になるまでの判定時間には個人差があるため、攪拌現象をビデオカメラで撮影し、複数人数で判定した。また、チオ硫酸ナトリウムの入れ方により大きく混合時間が変わるために一定時間でチオ硫酸ナトリウムを投入できる装置を作製・使用した。

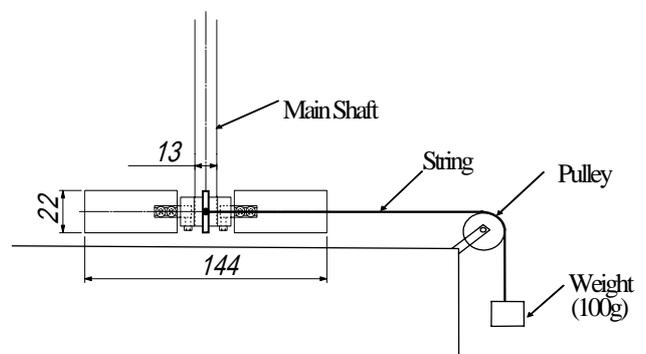


Fig.3 Calibration of torque sensor

4実験結果および考察

図4に攪拌装置を空転させたときの回転数と式(3)から得られたトルクの関係を示す。このグラフから回転数に対して軸受抵抗トルクが、起動トルク成分を除けば比例して増加していることがわかる。ここで示された各回転数の軸受抵抗と実測値の差を測定値とした。

図5(a)はドラフトチューブを使用したときの攪拌動力と回転数の関係を攪拌翼とドラフトチューブ間のクリアランスごとに示している。このグラフを見ると、攪拌翼とドラフトチューブ間のクリアランスを10mm~50mmに変えても攪拌動力と回転数の関係には大きな違いがないことがわかる。また、回転数が0~50rpmのときには攪拌動力がほぼ0に近い値となった。攪拌動力は回転数の増加に伴い二次曲線で増加していることがわかる。また、攪拌動力が1Wになるときの回転数は136rpmのとき、攪拌動力が2Wになるときの回転数は173rpmであることが確認できる。図5(b)はドラフトチューブ式の場合と完全邪魔板条件で回転数と攪拌動力の関係を比較したものである。この図から、ドラフトチューブ式は100rpm~200rpm程度の低速回転で0.5W~2.5Wの攪拌動力となった。しかし、完全邪魔板条件では同じ攪拌動力となるには300rpm~500rpm程度まで回転数をあげる必要がある。完全邪魔板条件で攪拌動力が1Wになるときの回転数は355rpmのとき、攪拌動力が2Wになるときの回転数は473rpmである。このことから、ドラフトチューブ式と比較すると、完全邪魔板条件では、同一攪拌動力とするためには約2.5倍程度の回転数が必要であることがわかる。以上の結果から、以後、ヨウ素ハイポ法による実験条件として、ドラフトチューブ使用時では136rpm, 173rpmを、完全邪魔板条件では355rpm, 473rpmを基準とすることとした。これらの条件でヨウ素ハイポ法を行うことにより、攪拌動力を等しくした場合の混合時間が評価できる。

表1はドラフトチューブ式の場合、表2は完全邪魔板条件で混合時間を比較したものである。攪拌動力は1Wおよび2Wである。この表から、どちらの条件でも動力の大きいほうが短い混合時間であるのは明らかである。表1で回転数136rpmと173rpmの場合に混合時間が長くなっているのは、ドラフトチューブの中でコアとなる旋回流が発生し、周囲の流体と短時間で混合されなかったのが原因であった。図6(a)に旋回コアが発生している様子を示す。この図から見ても明らかのように、ドラフトチューブの外周は混合されており、コア部

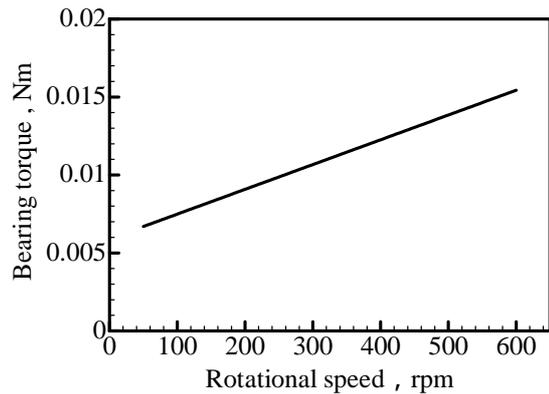
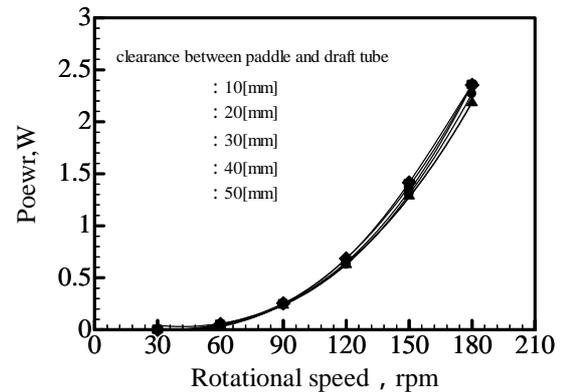
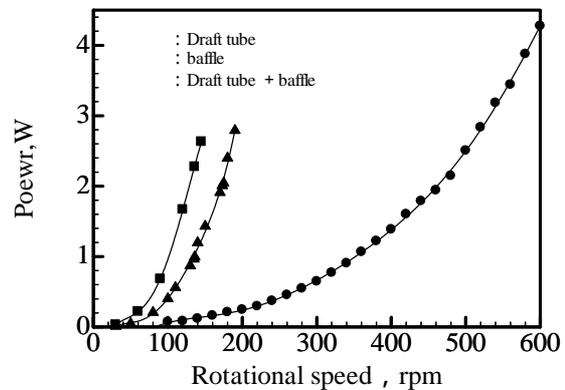


Fig.4 The relation between rotational speed and bearing torque



(a) Draft tube



(b) Draft tube and baffle

Fig.5 The relation between rotational speed and power

Table.1 Mixing time of Draft tube condition

		second baffle condition	mixing time,s
Rotational speed rpm	136	non-baffle	35.1
	173	non-baffle	31.7
	120	with second baffle	16.7
	151	with second baffle	10.8

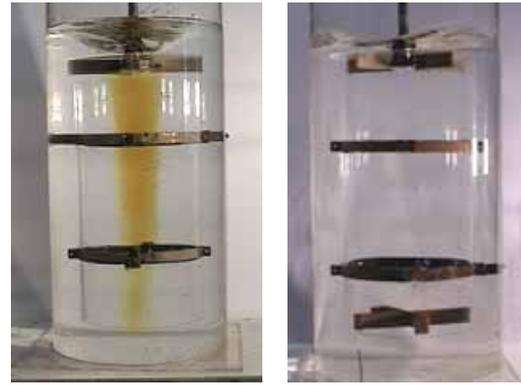
Table.2 Mixing time of baffle condition

		paddle space,mm	mixing time,s
Rotational speed rpm	355	204	31.4
		288	23.1
	473	204	19.4
		288	16.0

をなくすことで大幅に混合時間を短縮できると考えられる。そこで、ドラフトチューブの中に旋回コアを破碎するために第二の邪魔板を設置した。この邪魔板は黄銅製で幅 22mm の十字型をしている。図 6(b)に第二邪魔板を設置して運転した同時刻の様子を示す。この結果、約 1/2 から 1/3 と大幅に混合時間を短縮することができた。第二邪魔板をドラフトチューブの上下に設置した場合と下だけに設置した場合で大きな変化は見られなかった。よってドラフトチューブの上部に邪魔板を設置しても、あまり効果のないことが確認された。

完全邪魔板条件では上下二段の攪拌翼の位置により大幅に混合時間が変わる。二段の攪拌翼の下段翼を攪拌槽の底から 72mm に設置して攪拌し、二段翼の間隔を 208mm, 288mm として比較した。二段翼の間隔を 208mm にしたところ、攪拌槽の上部では混合が遅れ、そのため全体の混合時間は長くなり、355rpm のときには 31.4 秒、473rpm のときには 19.4 秒であった。二段翼の間隔を 288mm にしたところ、攪拌槽の全体で混合は、混合時間が 355rpm のときに 23.1 秒、473rpm のときには 16.0 秒であった。

これらの結果から、同じ動力になる回転数のとき、混合時間は旋回コア対策前の条件と比較すると、完全邪魔板条件の方が短い。が対策後はドラフトチューブ方式のほうが短時間で混合できることが確認できた。しかし、旋回コア対策の邪魔板を設置することで攪拌動力が増大することが図 7 により確認されている。そのため、第二邪魔板を設置した状態では攪拌動力が 1W, 2W になる回転数が変わり、同一攪拌動力での混合時間が比較できない。そこでドラフトチューブ式に第二邪魔板を設置したときに攪拌動力が 1W, 2W になる回転数を測定したところ、120rpm, 151rpm となった。この条件での混合時間を測定したところ、16.7 秒、10.8 秒であった。さらに混合時間短縮をねらってドラフトチューブ式に第二邪魔板と、攪拌槽内壁に第一邪魔板 2 枚を設置したときに攪拌動力が 1W, 2W になる回転数を測定したところ、99rpm, 126rpm となった。表 3 にその混合時間を示す。99rpm のときは 14.6 秒、126rpm のときは 11.7 秒で混合した。第一邪魔板なしのドラフトチューブ式と比較すると、1W では邪魔板を 2 枚設置した方がわずかに短時間で混合した。しかし、2W では逆の結果となった。このことから、邪魔板を 2 枚設置してもドラフトチューブ式の場合、大きな攪拌速度向上効果は期待できないと考えられる。攪拌槽内壁に邪魔板を 2 枚設置すると低速回転で若干の攪拌速度向上



(a) Non-baffle (b) With second baffle
Fig.6 Second baffle condition

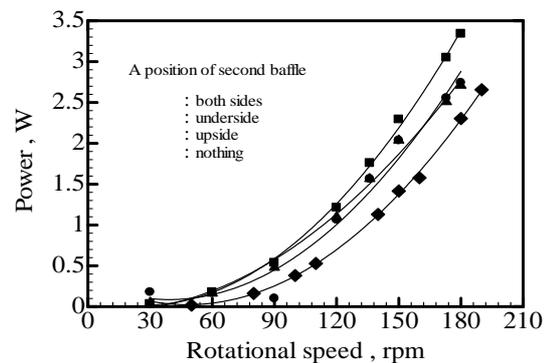


Fig.7 The relation between rotational speed and power

Table.3 Mixing time of Draft tube and baffle condition

		mixing time, s	
Rotatinal speed rpm	99	14.6	
	126	11.7	

が得られるものの、特に低速における攪拌を必要としない場合はドラフトチューブ内部にだけ邪魔板を取り付けるタイプが推奨される。

5. 結論

ドラフトチューブを用いた新方式攪拌機を設計・製作して動作特性を調べた結果、以下の知見を得た。

- 1) ドラフトチューブ式の場合は完全邪魔板条件より低速回転でより高い攪拌動力となる。
- 2) 旋回コアをなくすことでドラフトチューブ式の方が完全邪魔板条件のときより混合時間は短くなる。
- 3) ドラフトチューブ式の場合、攪拌槽内壁に邪魔板を設置しても、混合時間に及ぼす影響は小さい。

参考文献

- (1) 佐竹化学機械工業株式会社 1992 攪拌技術
- (2) 山本 一夫 他著 1984 改訂 攪拌装置