

ドラフトチューブを採用した攪拌機の研究

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化学・薬品分野，食料品分野，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．前報では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枚ピッチドパドル)に対し，ドラフトチューブを導入した場合は，低速回転でより高い攪拌動力となる，巡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，という結果を報告した．本報告では，混合時間の短縮を目的とし，攪拌槽内の流動状態を確認するために行った流速測定の結果，および流速測定に基づいた混合時間の改善結果について報告する．

2. 実験装置

図1に実験装置の概要を示す．実験装置を大きく分類すると攪拌部，測定部に分けることができ

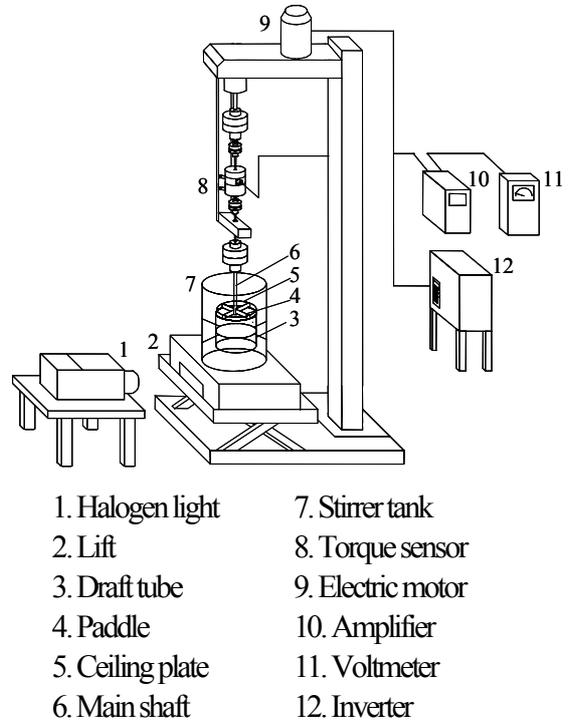


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

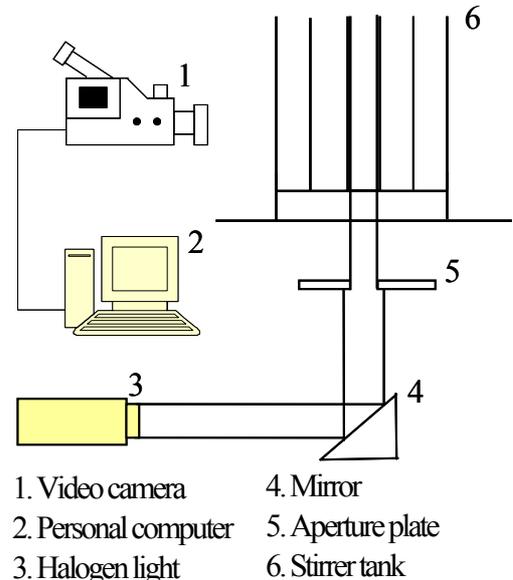


Fig.2 Schematic of flow velocity measurement device.

Study on stirrer adopted draft tube

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。攪拌槽は内径 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。天板はパドル径と同径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 130 mm、144 mm、168 mm の 4 枚フラットパドルを用いる。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る。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、ハロゲンライト、ビデオカメラ、PC で構成した。また、図 2 に流速測定手法の概要を示す。本実験では、現在排水処理に採用されている攪拌槽の構造を模擬して、攪拌槽内にドラフトチューブと同じ長さで、外径 18 mm、厚さ 1.5 mm のアクリルパイプ約 120 本を攪拌槽内に隙間なく設置し流速測定を行った。

3.実験方法

実験パラメータは種々考えられるが、本研究では回転数、攪拌動力、攪拌翼直径を採用した。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 100 g 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。

$$T [\text{Nm}] = 0.09079 [\text{Nm/V}] \times E [\text{V}] \quad (1)$$

式(1)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、攪拌翼の直径、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の基準を 0.5 W 、 1 W 、 2 W とし、混合速度を比較した。

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。

流速測定は光が導かれたアクリルパイプのみがビデオカメラに映るよう実験は暗室で行った。光源であるハロゲンライトの光を凸レンズにより平行光とし、鏡により反射させ、攪拌槽の下部からアクリルパイプへ導いた。流速はビデオカメラによりポリプロピレン粒子が移動した一定距離を時間で割って算出した。測定位置は、攪拌槽の外側から攪拌槽の中心に向かって直線上に並んだ 7 本のアクリルパイプとした。アクリルパイプにはそれぞれ攪拌槽の外側から中心に向かってアクリルパイプ番号 1 ~ 7 と設定した。以後、測定位置はアクリルパイプ番号で示す。

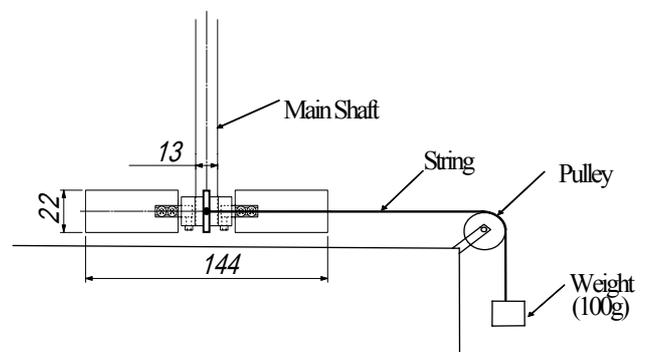


Fig.3 Calibration of torque sensor.

4 実験結果および考察

混合時間を比較するにあたり、全ての条件で一定の攪拌動力で比較するために回転数に対する攪拌動力を示す。攪拌動力はトルクと回転数から求めた。例としてドラフトチューブ式で、パドル直径を 130 mm, 144 mm, 168 mm と変えた場合の回転数に対する攪拌動力を図 4 に示す。この結果から、攪拌動力が 1 W になるときの回転数はそれぞれ、120 rpm, 105 rpm, 68 rpm, 2 W になるときの回転数はそれぞれ、156 rpm, 136 rpm, 116 rpm となり、攪拌動力が同じ場合、パドル径が大きいほど低回転となることからわかる。以後、他の条件においてもこのような方法で、同じ攪拌動力になる回転数で比較した。

図 5 に流速測定結果を示す。(a), (b), (c)はそれぞれ攪拌翼直径 130 mm, 144 mm, 168 mm とした場合の亚克力パイプ番号に対する流速を示す。副変数として攪拌動力を用いた。流速は鉛直上方向を正とし、鉛直下方向を負とした。この場合、ドラフトチューブは亚克力パイプ番号 3 と 4 の間に設置されている。図 5 より、攪拌流体はドラフトチューブ内側では、鉛直上方向に流れ、流速はほぼ一定であることがわかる。1 W, 2 W を比較しても大きな流速の変化はなかった。ドラフトチューブ外側では、亚克力パイプ番号 1, 2 は鉛直下方向に流れているが、亚克力パイプ番号 3 は鉛直上方向に流れている。そのため、ドラフトチューブ外側には鉛直上下方向の流れが混在しており、抵抗が大きくなる原因の一つであると考えられる。このドラフトチューブの外側に鉛直上方向の流れが存在することは、シミュレーションや着色法を撮影した動画から予想されていた。この亚克力パイプ番号 3 の流れを鉛直下向きにすることが出来れば抵抗は減り、混合時間の短縮が可能であると考えられる。そこで、特に流速が遅く、流れの向きを変えやすいと考えられるパドル径が 130 mm の場合で亚克力パイプ番号 3 の流れの向きを鉛直方向下向きにする試みとして、亚克力パイプ番号 3 に鉛直上方向から攪拌流体が流入しやすいよう黄銅の輪を設置した。黄銅の輪は厚さ 1.5 mm の黄銅で高さ 7 mm, 15 mm のものを製作、亚克力パイプ番号 2, 3 の間に設置して流動状態を確認した。高さ 7 mm の黄銅の輪の場合には特に大きな変化はみられなかった。高さ 15 mm の場合は亚克力パイプ番号 3 の流れがほぼ停滞し、この状態で着色法を行っても混合時間の短縮には有効な条件ではないと判断した。また、流速測定実験と同じ

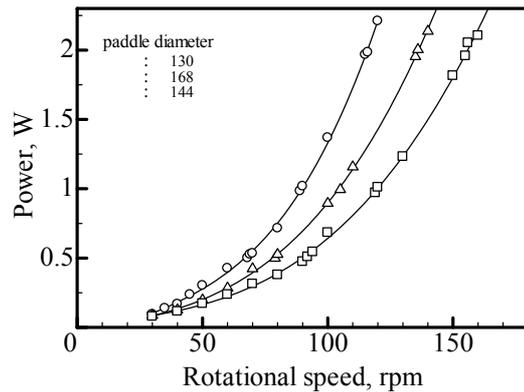
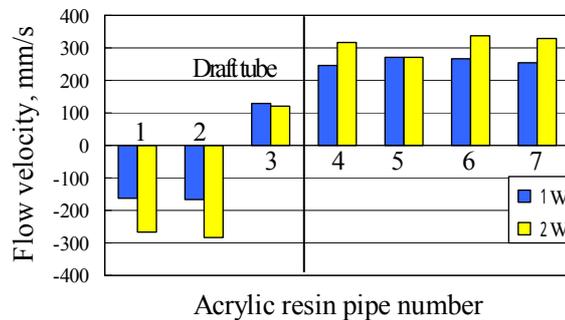
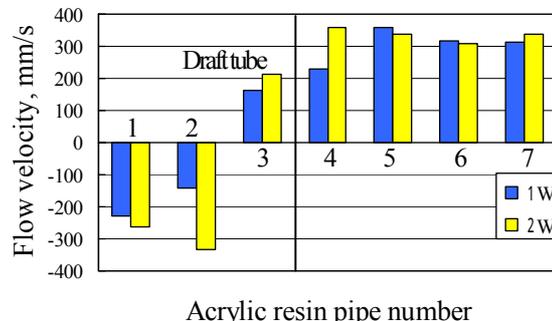


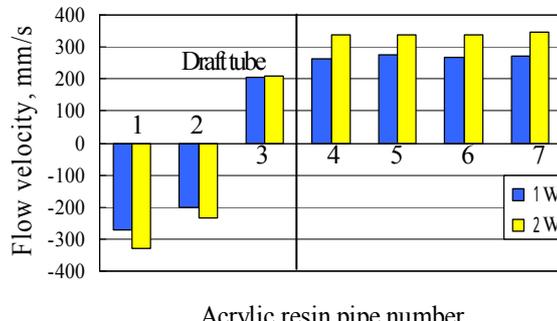
Fig.4 The relation between rotational speed and power.



(a) Paddle diameter 130 mm



(b) Paddle diameter 144 mm



(c) Paddle diameter 168 mm

Fig.5 Relations between flow velocity and an acrylic resin pipe number.

条件において着色法によって混合時間の測定を行ったが、全ての条件で混合時間は長くなった。これは攪拌槽内に設置したアクリルパイプの摩擦によって抵抗が生じたためと考えられる。

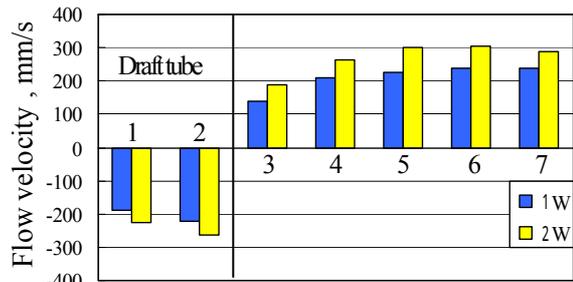
今までの条件ではドラフトチューブの外側に鉛直上下方向に流れが混在していることが確認された。そこで、ドラフトチューブを設置したとき、ドラフトチューブの内側と外側の面積がほぼ同じになるようドラフトチューブを外径 165 mm、内径 159 mm に変更した。図 6 にドラフトチューブ径を変更した場合の流速測定結果を示す。図 5 と同様に(a), (b), (c)はそれぞれ攪拌翼直径 130 mm, 144 mm, 168 mm とした場合のアクリルパイプ番号に対する流速を示す。副変数として攪拌動力を用いた。この場合ドラフトチューブはアクリルパイプ番号 2 と 3 の間に設置されている。この図から、アクリルパイプ番号 3~7 では大きな変化は見られなかったが、パドル径 168 mm の場合、アクリルパイプ番号 2 において大幅な減速が確認された。

図 7 にドラフトチューブを変更する前後のパドル径に対する混合時間を示す。副変数として攪拌動力を用いた。図 7 より、ドラフトチューブ径を 130 mm から 165 mm に変更することで、特に攪拌動力が 0.5 W の場合、混合時間が短縮されたが、パドル径による大幅な混合時間の差は確認されなかった。攪拌動力が 1 W の場合、ドラフトチューブ径による大きな混合時間の変化は確認されなかった。攪拌動力が 2 W の場合、ドラフトチューブ径 130 mm, 165 mm の場合、どちらもパドル径が 130 mm, 144 mm に対し、168 mm では混合時間が長くなった。パドル径 168 mm では攪拌槽との間隔が狭いためと考えられる。また、図 6(c)で確認できるようにアクリルパイプ番号 2 においての流速が大幅に遅くなっているが、ドラフトチューブ径を変更する前の条件でもこの傾向は変わらない。そのため、この流速の変化は混合時間に対する影響は小さいと考えられる。

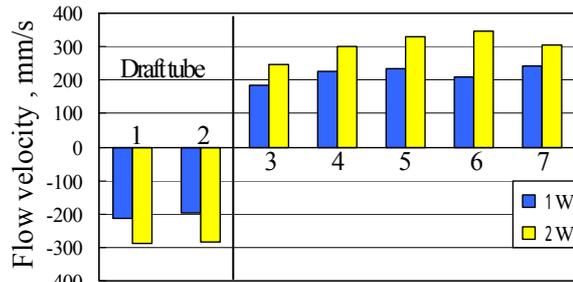
5 結論

ドラフトチューブ採用した攪拌の流速測定、混合時間測定を行った結果、以下の知見を得た。

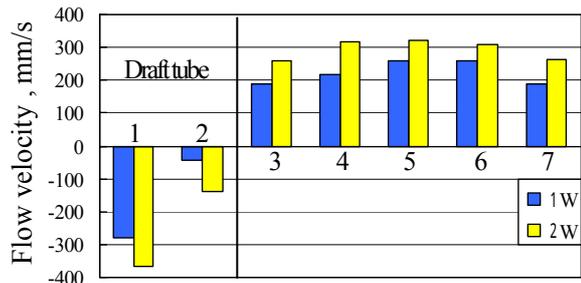
- 1) 攪拌動力が 0.5 W のとき、ドラフトチューブを外径 130 mm を 165 mm に変更することで混合時間は約半分となる。
- 2) 攪拌動力が 1 W のとき、混合時間に対するドラフトチューブ径、パドル径の影響は小さい。
- 3) 攪拌動力が 2 W のとき、パドル径が一定の大きさを超えると混合時間は長くなる。



Acrylic resin pipe number
(a) Paddle diameter 130 mm



Acrylic resin pipe number
(b) Paddle diameter 144 mm



Acrylic resin pipe number
(c) Paddle diameter 168 mm

Fig. 6 Relations between flow velocity and an acrylic resin pipe number.

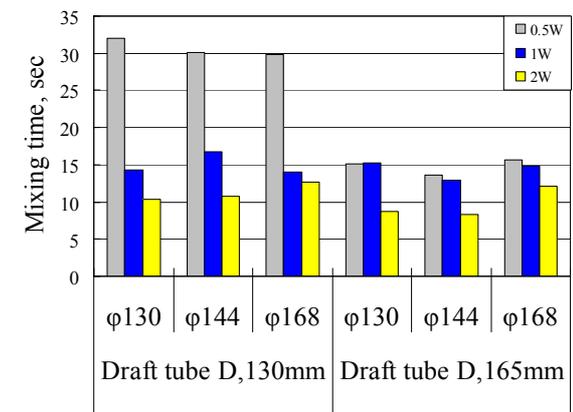


Fig. 7 Mixing time to outside diameter and paddle diameter of draft tube condition.

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