

新型テイラー渦攪拌装置の開発
(第3報, 内円筒最適形状の検討)

佐藤 森*・白田 大介**

Development of New Taylor Vortex Mixer
(3rd Report, Study on the optimum stirring device)

Shin SATO, Daisuke SHIRATA

Abstract

In this study, the new Taylor Vortex Mixer was developed, and the optimum stirring device was investigated. In the new-model equipment, various protrusions are installed on the inner cylinder. In the new-model stirring device, the result of the experiment showed that the mixing efficiency was higher than the conventional type.

Keywords : Taylor Vortex, Mixer, Asymmetric Condition, Visualization

1. 緒 言

現在、工業上の攪拌の主流はプロペラなどの攪拌翼を用いる方法である。この方法は低コスト、装置設計の簡便性等の理由から古くから利用されてきた。しかし、攪拌翼のみを用いて攪拌を行うと系内の一部に殆ど流動しない領域、いわゆる局所的な攪拌ムラが生じる。現在ではこの攪拌ムラを解消するよう邪魔板や攪拌翼の改良が盛んに行われている。しかしこれらは装置設計および系内の流動状態の複雑化を伴うことになる。

一方、テイラー渦と呼ばれる同軸二重円筒内で発生する渦が古くから知られており、研究も盛んに行われてきた。これは回転する内円筒と固定された外円筒間に、あるレイノルズ数 (Re 数) で発生する渦であり、軸方向に規則正しく複数個積み重なって発生し系内に充満する。テイラー渦の発生個数は、回転開始時の内円筒加速条件や、アスペクト比 (Γ 比 = H/d : 内円筒と外円筒の半径差/作動流体高さ)、および流体 Re 数に大きく依存し、最近では中村ら¹⁾ や戸谷ら²⁾、大村ら³⁾ により詳細な研究が行われている。しかし工学的

応用を目指した詳細な検討は極めて少なく、工業的実用化が行われていないのが現状である。

テイラー渦型攪拌装置では攪拌翼を用いることなく攪拌が可能となるため、翼によるせん断応力がなくソフトな攪拌が可能となる。また上述のように系内に渦が充満するため局所的な攪拌ムラも回避でき、テイラー渦型攪拌装置は工業上のメリットが大きい。

そこで本研究は、テイラー渦を利用した高効率の新型攪拌装置の開発を行うことを目的として、前報⁴⁾ で用いた4箇所の突起を内円筒に設置した攪拌装置を改良し、合計19種類の内円筒を作成して攪拌流動状態を比較検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置概略を図1に示す。外円筒は半径が40mm、内円筒は半径が15mmであり、作動流体にはグリセリン水溶液 (動粘度 $\nu = 5.14 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$) を用いた。改良型内円筒は表1に示すように19種類用意し高さ5mmのポリウレタン製の突起を様々な幅・間隔で設置した。外円筒の周囲には観察時の屈折を抑えるために透明アクリル樹脂製の水槽 (167×167×200mm) を設置した。作動流体高さは75mm、内円筒と外円筒の半径差 (ギャップ) は25mmであり、 Γ 比 = 3 で実験を

* 助教授 物質工学科
** 苫小牧工業高等専門学校環境システム工学専攻

行った。内円筒は手で $Re = 300$ もしくは 500 まですテップ状に加速させた。本実験で作成した装置は、作動流体上部を閉塞しない、自由界面を持つ自由端型テイラー渦攪拌装置である。

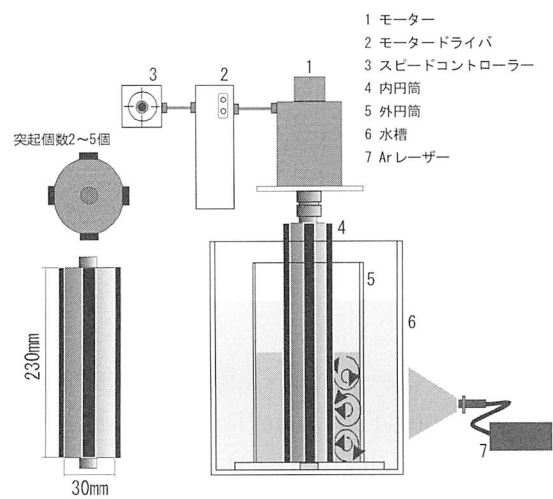


図1 実験装置概略図

表1 各内円筒の突起個数と突起の幅

No.	突起個数	突起高 [mm]	突起幅 [mm]
1	2	5	3
2	2	5	4
3	2	5	5
4	2	5	6
5	2	5	7
6	2	5	8
7	2	5	9
8	2	5	10
9	3	5	3
10	3	5	4
11	3	5	5
12	3	5	10
13	4	5	3
14	4	5	4
15	4	5	5
16	4	5	10
17	5	5	3
18	5	5	4
19	5	5	5

装置内の流動状態を観察したトレーサー実験 ($Re = 300$) では、流体に影響を及ぼさない範囲で平均径 0.5mm のポリスチレン樹脂を流体中に添加し、アルゴンレーザー光を任意断面に照射して2次的に流体断面を観察する粒子追跡法を用いた。また攪拌可視化実験 ($Re = 500$) では、蛍

光塗料で着色した同密度のグリセリン水溶液（以下、着色剤） $0.5\text{vol}\%$ を作動流体中に添加し、着色剤が攪拌される様子をアルゴンレーザー光で任意断面に照射して観察を行った。これらの記録は全てデジタルカメラを用いて撮影し、この画像をコンピュータに取り込み画像処理を行って解析した。

3. 実験結果および考察

3-1. 攪拌装置内の流動状態

粒子追跡法で撮影した画像から解析を行って算出した攪拌装置内の二次元断面渦流動の流線を図2に示す。実験は $Re = 300$ で行い、図中実線で示したのは発生したテイラー渦の代表的な流線であり、内円筒が向かって左側にある状態である。図中、各内円筒 No. は表1と対応している。

突起個数が2個の場合（図中 a, b），発生した渦は大きさが不均一であり流動状態も不安定であった。特に最上段の渦は極端に小さく形状も安定しなかった。これは突起個数が2個の場合，他の内円筒形状に比べ突起間距離が大きく，突起が流動状態に多大な影響を与えるためであると考え

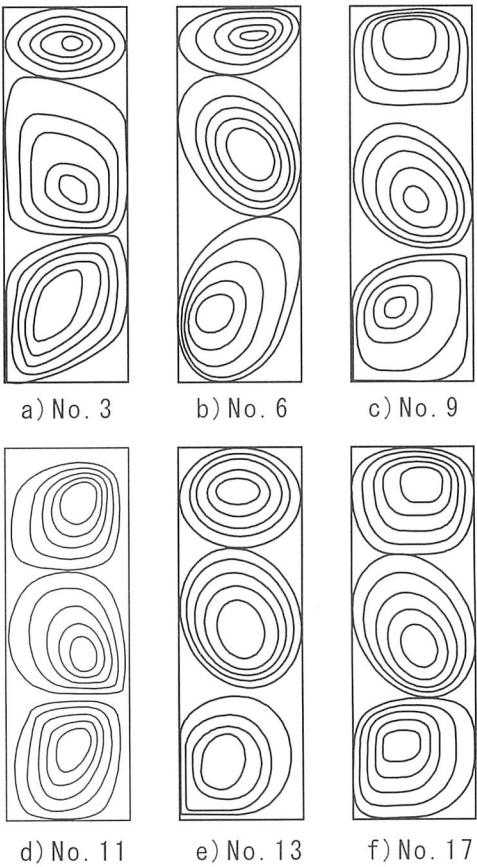


図2 攪拌装置内の渦流線

られる。次に突起個数が3個の場合(図中c, d), 渦に若干の振動が見られたが流動状態は安定していた。これは突起個数2個の場合に比べ突起間距離が小さくなるため、内円筒の回転により突起が連続的に通過するためと考えられる。突起個数が4個および5個の場合(図中e, f)は、さらに突起間距離が小さくなるため流動状態は非常に安定していた。突起個数が増加するに伴い、渦の大きさはほぼ均一になる傾向も見られた。また、突起が連続的に通過すると Γ 比は見かけ上3.75となるため、突起個数が増加すると一時的に渦が4個発生する場合も見られた。

ここで突起間距離(ℓ)と突起高さを考慮した内円筒平均外径(D_{Av})の比をとった以下の無次元数を考える。

$$\frac{\ell}{D_{Av}} \dots\dots\dots(1)$$

ただし $D_{Av} = \frac{\pi D^2 + 2nwh}{\pi D} \dots\dots\dots(2)$

である。ここで、 D は内円筒外径[m], w は突起幅[m], h は突起高さ[m]および n は突起設置個数である。流線算出結果から本実験範囲では

$$\frac{\ell}{D_{Av}} < 0.918$$

においてテイラー渦は均一な攪拌に適する安定した流動状態となることが分かった。この範囲では流動状態は安定しているにもかかわらず突起が連続的に通過する。よって渦に微小な振動が生じ、渦内で物質移動が促進されるため高効率の攪拌が行われると考えられる。

3-2. 攪拌流動

攪拌状態を撮影した画像から解析を行って算出した攪拌装置内の二次元断面濃度分布の一例を図3に示す。実験は $Re = 500$ で行った。図中、黒い領域は着色剤濃度が0.2vol%以下、もしくは1.0vol%以上であり、攪拌が進行していないことを意味している。また他の領域は濃度差によりグレースケール表示してあり、色が薄いほど濃度が高いことを表している。図はa, bともに攪拌開始10秒後, 60秒後および攪拌終了時の分布を示しており、内円筒が向かって左側にある状態である。図中、各内円筒 No.は表1と対応している。

図中aに示した突起個数が2個, 突起高さ5 mm, 突起幅5 mmの場合、攪拌開始10秒後には全段の渦中心部まで着色剤が概ね取り込まれているが、2段目の渦中心部は他の段よりも着色剤が

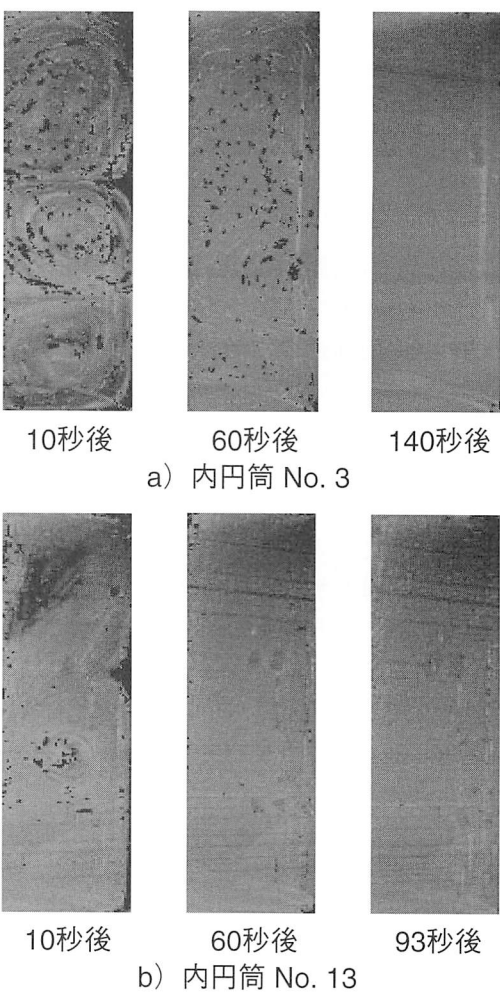


図3 攪拌時の濃度分布

高濃度であること、および外円筒付近で着色剤が取り込まれていないことが分かる。攪拌開始60秒後においても局所的な攪拌ムラは残り、140秒後に攪拌終了となった。渦流線算出結果より、突起個数が2個の場合はテイラー渦流動が不安定になることが判明しているが、濃度分布算出結果においても長時間攪拌ムラが生じる不均一な攪拌であることが分かった。図中bに示した突起個数4個, 突起高さ5 mm, 突起幅3 mmの場合、攪拌開始10秒後において全段の渦内着色剤濃度がほぼ等しかったが、外円筒付近で着色剤が取り込まれていないことが確認できた。攪拌開始60秒後には若干の攪拌ムラが確認されたが、ほぼ均一な濃度分布となり、攪拌終了時間は93秒であった。全ての内円筒形状を比較すると、突起設置個数が2個および3個の場合は突起幅が4 mm以下および10mmで攪拌終了時間が増加傾向にあり、突起設置個数4個および5個の場合は突起幅の増加に伴い攪拌終了時間も増加する傾向が見られた。19種類の内円筒で攪拌終了時間が最も短かったのは突

起設置個数3個，突起高さ5 mm，突起幅5 mm (No.11)であり，攪拌終了時間は85秒であった。

次に攪拌終了時間を用いて以下の無次元数（以下，Pa数）を定義した。

$$Pa = \frac{TRn}{60} \dots\dots\dots(3)$$

ここで， T は攪拌終了時間[s]および R は内円筒回転数[rpm]である。Pa数は攪拌終了時間までに突起が何回通過したかを意味する無次元数であり，値が小さいほど攪拌効率が良いことを示している。各内円筒に対して横軸に L/D_{Av} ，縦軸にPa数を取りプロットしたものを図4に示す。図より L/D_{Av} が1.0付近でPa数が最小値を得る傾向が見られた。しかし， $L/D_{Av} > 1.0$ の範囲における内円筒は全て突起設置個数が2個であり，前述のようにテイラー渦は不安定な流動であり，さらに長時間にわたり攪拌ムラが確認された。よって流動状態が安定し，さらに均一な攪拌を効率よく期待できるのは $L/D_{Av} = 0.836$ ，Pa数=293である内円筒であることが分かった。これは突起設置個数3個，突起高さ5 mm，突起幅5 mmのNo.11の内円筒であり濃度分布算出実験結果と一致した。

今後は，突起高さを変化させたときの最適な内円筒形状の検討，および三次元数値解析による攪拌挙動の検討を試みる。

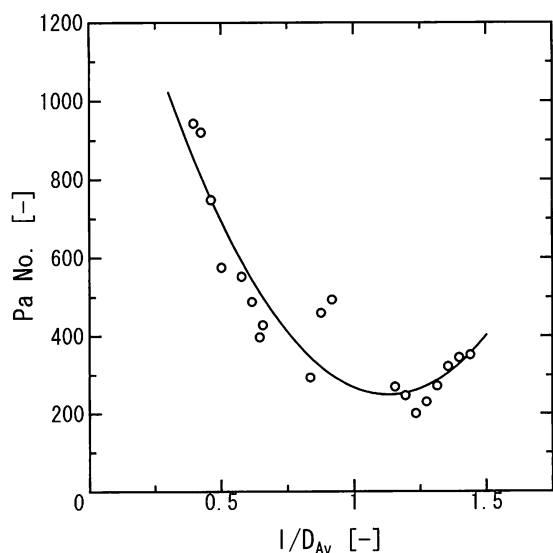


図4 L/D_{Av} とPa数の関係

4. 結 論

本研究は新型攪拌装置を開発しその詳細な流動挙動および高効率化を検討することを目的として，流動状態の観察および攪拌状態の可視化実験を行い，突起設置個数と突起幅を変化させたときのテイラー渦攪拌装置の流動状態の検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- ・突起設置個数を2個にするとテイラー渦流動は不安定な状態となった。
- ・突起設置個数を増加すると安定した流動状態となり均一な攪拌が可能となる。
- ・本実験範囲では内円筒の最適形状は $L/D_{Av} = 0.836$ であることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 中村・戸谷，多重解テイラー渦におけるモードの形成条件，日本機械学会論文集，60-571，B (1994)，723-729
- 2) 戸谷・中村・山下・植木，アスペクト比が小さいテイラー渦の実験（第4報自由端の場合の流れの分岐），日本機械学会論文集，59-532，B (1990)，3617-3624
- 3) 大村・片岡・片岡・内藤，アスペクト比の小さいテイラー・クエット流の渦発生機構と乱流遷移特性，化学工学論文集，23-6，1997，741-747
- 4) 佐藤・松館，新型テイラー渦攪拌装置の開発（第1報，自由端装置の流動特性），苫小牧工業高等専門学校紀要，第36号，2001，81-84
(平成15年11月25日受理)