

新型テイラー渦攪拌装置の開発

(第1報, 自由端型装置の流動特性)

佐 藤 森*・松 館 夏 美**

Development of New Taylor Vortex Mixer

(1st Report, Characteristics of Flow in Asymmetric Condition)

Shin SATO, Natsumi MATSUDATE

Abstract

In this study, the new Taylor Vortex Mixer was developed, and the flow characteristic was investigated. In the new-model equipment, the 4-place protrusion is 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.

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填する。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。過去に同軸二重円筒構造内でテイラー渦を利用した攪拌

製造法が開発⁴⁾されているが, テイラー渦の安定整流性等の問題もあり, 攪拌効率が優れているとは言い難い。しかし, 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なり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填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, 内円筒に4箇所突起を設置した攪拌装置を作成した。トレーサー実験による渦内流動状態および渦内速度分布の算出, さらにレーザー光を使用した攪拌可視化実験を行い新型装置の攪拌流動状態の検討を行った。

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(r_0)が40mm, 内円筒は半径(r_i)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。新型内円筒は図に示すように幅10mm, 厚さ5mmのポリウレタン製の突起を90度間隔で4箇所に設置したものである。テストセクションはテイラー渦の模式図で表されている。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(h)は75mm, 内円筒

* 助 手 物質工学科

** 京都工芸繊維大学

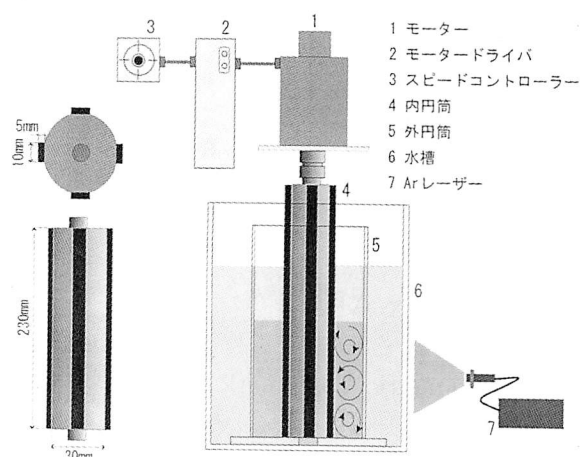


図1 実験装置概略図

と外円筒の半径差(d :ギャップ)は25mmであり, Γ 比は3で実験を行った。内円筒は手動で $Re=300$ までス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。

トレーサー実験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次元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)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を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渦流動状態を図2に示す。実験は $Re=300$ で行った。図中実線で示したのは代表的な流線であり, さらに0.13秒間隔で撮影した2枚の画像から算出した速度ベクトルも示した。図の渦断面は内円筒が向かって左側にある状態である。両者ともに定常となった状態であり, aは従来型攪拌装置の流動状態, bおよびcは新型攪拌装置の流動状態である。

従来型装置aでは3個の渦がほぼ等しい高さ(上から28mm, 22mm, 25mm)で整列し, 内円筒付近が最も速度が速く, 外円筒近傍では速度はほぼ0となっている。渦の中心位置はギャップ

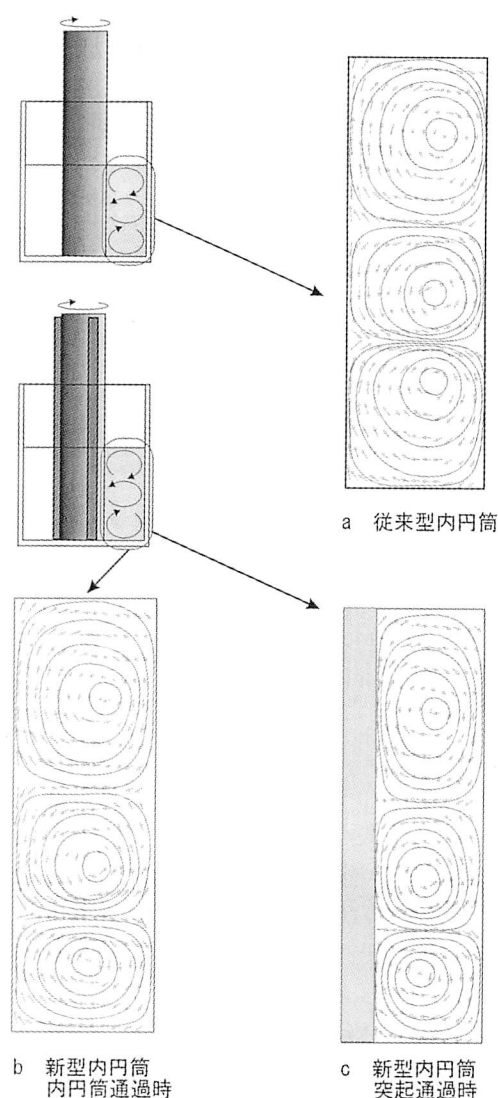


図2 攪拌装置内の流動状態

中心線よりやや右寄りとなっているが, これは内円筒付近が最も速度が速いことによるForth Balanceによる影響と考えられる。また, 添加されたトレーサーは一度渦に入ると, 同一の軌道を周回する傾向があった。渦最外部を周回するトレーサーは, 他の渦との境界を移動するときに選択的に渦間の移動が見られたが, それ以外の渦間移動は見られなかった。次に新型攪拌装置であるが, bは内円筒が通過しているときのものであり, 従来型と等しい流動断面積である。cは突起が通過しているときのものであり, このとき Γ 比は3.8となる。任意断面で見ると, bとcの状態が連続的に変化するのが新型攪拌装置である。bでは従来型装置とほぼ同様の渦流動となり, 中心の位置もほぼ等しい位置にある。突起が通過するcでは, 中心の半径方向位置は移動せずに, そのまま突起によって押しつぶされた形状となる。また, 流体

中のトレーサーは渦内でランダムに移動し一定の軌道を周回しない。さらに渦間でのトレーサー移動も発生した。これは突起が通過したときに渦は圧縮され、突起通過後に渦が膨張する過程を繰り返すために発生する現象と考えられる。この結果は、新型装置では従来型装置より流体移動が多く発生する事を示し、攪拌効率向上を示唆するものである。

3-2. 渦内の速度分布

トレーサー実験により測定した新型攪拌装置のテイラー渦内速度分布と、理論的に導かれた同軸二重円筒内（従来型装置）で発生するテイラー渦内速度分布を比較したものが図3である。ここで理論速度分布式は以下に示すように導かれる。

同軸二重円筒内において、非圧縮性流体の円筒座標系 (r, θ, z) における連続の式は、速度成分をそれぞれ V, U, W とすると以下の式で表される。

$$\therefore P_a = P_{a1} + P_{a2} = \dots(1)$$

また、ナビエ・ストークスの運動方程式は(2)～(4)式で表される。

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{U}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} + W \frac{\partial V}{\partial z} - \frac{U^2}{r} = \rho \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right\} \dots(2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + V \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} + W \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{UV}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right\} \dots(3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + V \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{U}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right\} \dots(4)$$

ρ は密度、 P は圧力、 ν は動粘度である。ここで、流れは定常であり、軸対称な2次元流れとすると次式が成立する。

$$\frac{dP}{dr} = \rho \frac{V^2}{r}, \quad \frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} - \frac{U}{r^2} = 0, \quad 0 = \frac{dP}{dz} \dots(5) \quad \dots(6) \quad \dots(7)$$

これらを(2)～(4)式に代入し一般解を求め、さらに以下の境界条件

$$U = r_o \omega_o \quad (r = r_o), \quad U = r_i \omega_i \quad (r = r_i) \dots(8)$$

ただし r_o = 外円筒半径

を代入すると次式に示す速度分布算出式を得る。

$$U = \frac{r_o^2 \omega_o - r_i^2 \omega_i}{r_o^2 - r_i^2} r - \frac{r_o^2 r_i^2 (\omega_o - \omega_i)}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r} \dots(9)$$

ここで本実験装置では内円筒のみが回転し $\omega_o = 0$ なので

$$U = -\frac{r_i^2 \omega_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(r - \frac{r_o^2}{r} \right) \dots(10)$$

となる。

この式を用いて従来型装置の $Re=300$ における理論速度分布の算出を行った。図3では内円筒との界面が左側で、外円筒との界面が右側である。図中実線で示されている曲線が従来型装置渦内の理論速度分布である。また上述のように、 Γ 比が3.0の新型装置内では突起通過時に瞬間的に Γ 比が3.8となり、これが連続して通過すると仮定すると新型装置の見かけ Γ 比は3.8であると言える。そこで、 Γ 比が3.8の従来型装置の速度分布を点線で示した。また内円筒からの距離0.005mのところにある点線で突起高さの位置を示した。実験により測定した $Re=300$ における Γ 比が3.0の新型テイラー渦攪拌装置の渦内速度は黒丸の点である。 Γ 比が3.0の新型装置では Γ 比が3.0の従来型装置よりも全体的に速度が大きい傾向にあることが分かった。また、内円筒からの距離0.015mを境に新型装置では渦内速度が急激に増加することが分かる。この0.015mは渦の中心がある位置であり、このことから新型装置では渦中心を境に内円筒側と外円筒側では速度分布が異なることが分かった。これは渦内部の構造が変化していることを示して

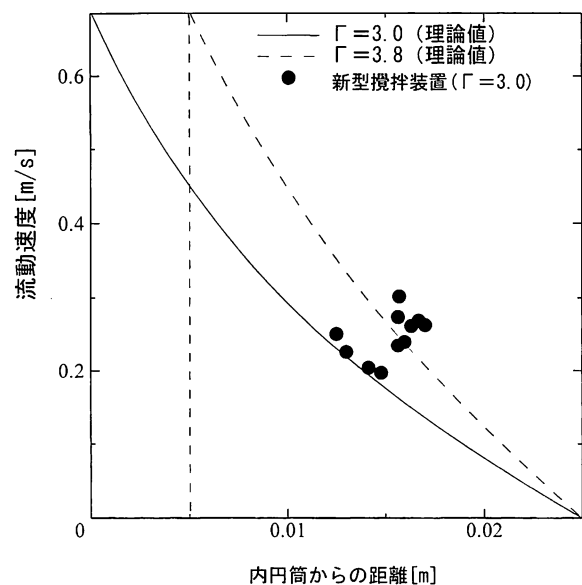


図3 新型攪拌装置の渦内速度分布 ($Re=300$)

おり、渦の圧縮と膨張を繰り返すことに起因するものと考えられる。新型装置では Γ 比が3.0にもかかわらず、突起を4ヶ所設置する事により、部分的に速度が Γ 比3.8付近の速度になる事が分かった。

3-3. 攪拌流動の可視化

攪拌可視化実験で撮影された、従来型装置および新型装置の攪拌過程の画像を図4に示す。実験は、流動している攪拌装置に同条件で着色剤を投入し攪拌過程を観察した。図中の画像は着色剤がある部分を白色に処理し、レーザー光が反射しない暗い部分、すなわち作動流体のみの部分を黒色に処理したものである。従来型装置(a)、および新型装置(b)ともに着色剤投入直後、回転開始4秒後、および定常となった時間の攪拌状態の図である。

従来型装置（3個の渦が形成）では投入から4秒後に着色剤が上段2個の渦の境界および最下部まで達するが、着色剤は渦の境界付近を移動し、渦内部までは達しない。その後、128秒経過後も着色剤は各渦の最外部のみを移動し定常に達した。図に示されるように従来型装置では攪拌ムラが生

じている。次に新型装置（3個の渦が形成）では着色剤投入直後に最上段の渦内に着色剤が取り込まれた。投入から4秒後には系内全域に着色剤が分散し、30秒後には系内全域がほぼ均一に攪拌された。この結果は粒子追跡法によって行われた流動状態観察実験の結果と一致し、渦内および渦間での流体移動が行われている事を示している。新型攪拌装置の有効性が確認された。

今後は、可視化実験による詳細な攪拌挙動の検討および数値解析による攪拌挙動の検討を試みる。

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、新型自由端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。

- ・新型攪拌装置では、従来型攪拌装置には見られない渦内および渦間の流体移動が見られた。
- ・新型攪拌装置内では、渦は連続的に圧縮・膨張運動を行う。
- ・攪拌可視化実験を行ったところ新型装置の有効性が確認された。

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) 萩原隆他, 超微粒子の製造方法, 特許公開平-6287005, 1994

(平成12年11月27日受理)

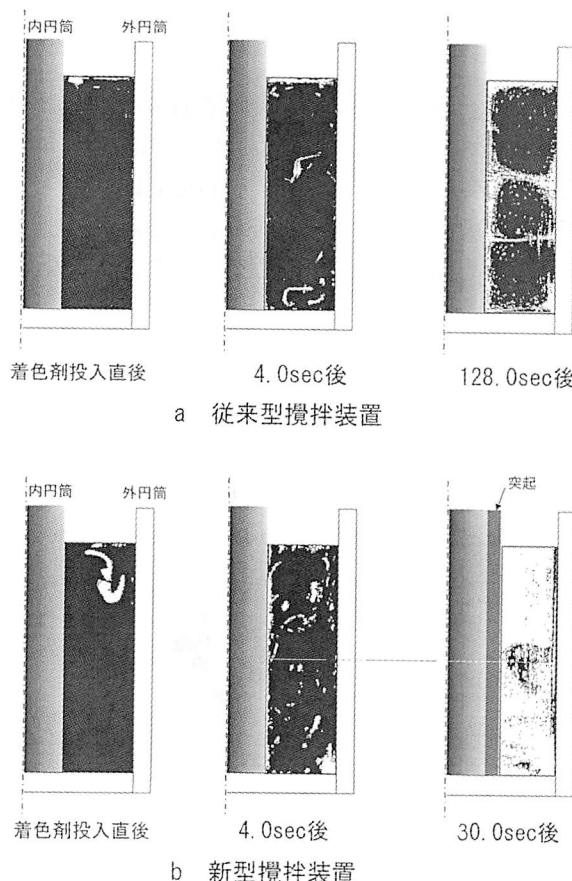


図4 攪拌過程の可視化画像