

新型テイラー渦攪拌装置の開発

(第2報, 固定端型装置の数値解析)

佐藤 森*

Development of New Taylor Vortex Mixer (2nd Report, Numerical Analysis of Symmetric Condition)

Shin SATO

Abstract

In this study, the new Taylor Vortex Mixer was developed, and the flow condition was calculated. In the new-model equipment, the 4 and 2-place protrusion is installed on the inner cylinder. In the new-model stirring device, the result of the calculation showed that the mixing efficiency was higher than the conventional type.

Keywords: Taylor Vortex, Numerical Analysis, MAC Method, Symmetric Condition, Velocity Distribution

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 : 作動流体高さ/内円筒と外円筒の半径差), 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⁾により詳細な実験的研究が行われ, 東ら³⁾や大村ら⁴⁾により数値解析も行われている。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。しかし, テイラー

渦型攪拌装置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。筆者らは前報⁵⁾で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箇所の突起を設置した自由端型攪拌装置を開発し, その有用性を報告した。

そこで本研究は, 新型攪拌装置設計を目的として, その基礎となる固定端型装置の2次元数値解析を行った。まず, 従来型装置の解析コードを開発し妥当性を検討した。さらに新型装置の解析コードを開発し攪拌流動状態の検討を行った。

2. 数値計算法

2-1. 基礎方程式

テイラー渦の概略を図1に示す。本研究では上下固定端を有する Γ 比 = 3の条件で計算を行い, 流体は軸対称流れを仮定し, 基礎方程式には以下に示す円筒座標系の連続の式と非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用いた。

$$0 = \frac{\partial (ru)}{\partial r} + \frac{\partial (rv)}{\partial z} \quad \dots (1)$$

* 助教授 機械工学科

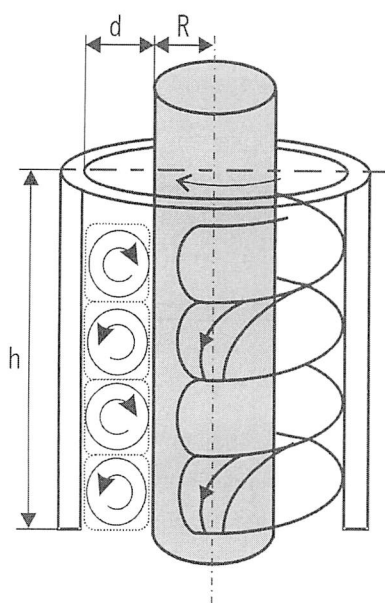


図1 テイラー渦概略図

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{w^2}{r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{uw}{r} + v \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{w}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots (4)$$

ここで、 p は無次元圧力、 Re はレイノルズ数、および半径方向(r)、周方向(θ)、軸方向(z)の無次元速度成分は u, v, w である。

2-1. 計算方法

計算方法には差分のMAC (Marker And Cell) 法を用いた。また圧力のPoisson方程式に関してはSOR (Success Over Relaxation) 法を使用した。離散化の方法は、時間には1次精度の前進差分、

空間には中心差分を用いた。格子は圧力と速度に関してスタガード格子を採用し、格子数は半径方向に20、軸方向に60とした。東ら³⁾によるとテイラー渦流の数値解析では、3次元解析を行った場合と2次元解析を行った場合では、両者の結果に大きな差は出ないとの報告があることから、本実験では2次元解析を行った。

解析対象 Re 数は $\text{Re}=400$ とし、境界条件は上下壁、および内外円筒壁面上で無次元速度成分 u, v は全て0であり、無次元周方向速度成分 w は内円筒壁面で $w=1.0$ 、他の壁面では0である。テイラー渦流では、所定 Re 数に到達するまでの内円筒加速履歴によって異なった安定状態が存在する場合がある。本実験では解析、および後述する解析結果の妥当性を検討するための実装置可視化実験において内円筒はステップ状に加速させた。解析対象装置は、従来型(内円筒が平滑)のテイラー渦攪拌装置、および新型(内円筒に突起を有する)のテイラー渦攪拌装置とした。新型装置に関しては、内円筒に周方向比0.11、半径方向比0.33の突起を等間隔に2ヶ所および4ヶ所設置した場合を想定して解析を行った。

また解析結果の妥当性を検討するため、実装置可視化実験も行った。解析条件と等しい条件下でテイラー渦を発生させ、粒子追跡法による渦の任意2次元断面の可視化を行い、デジタルカメラを用いて撮影を行った。得られた画像からテイラー渦の流線を算出し、解析結果の妥当性を検討した。

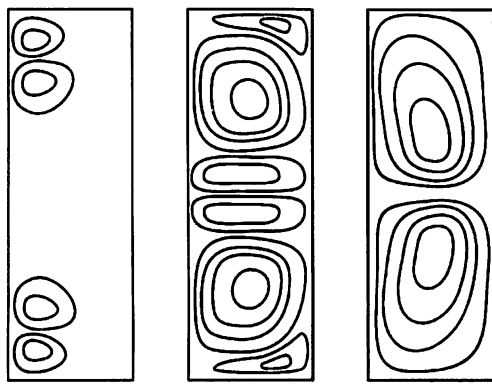
3. 解析結果および考察

3-1. 従来型装置の数値解析

従来型テイラー渦攪拌装置の解析結果を図2に示す。図の上段は装置可視化実験による2次元断面観察結果であり、図中の実線は渦の流線を表している。下段は同条件、同時刻の解析結果であり、矢印は各格子点での速度ベクトルを表している。

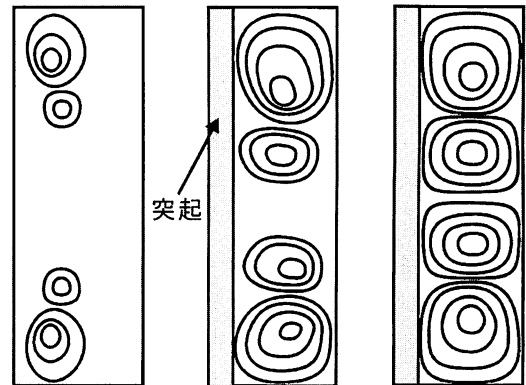
装置可視化実験の結果より、内円筒回転開始直後から内円筒上下端付近よりテイラー渦が発生し、0.3秒後(1-a図)には4個の小さな渦が形成された。その後、6個の渦が発生するが1.5秒後(1-b図)には上下端にある2個の渦は隣接する渦を押し潰す形で成長し4個渦となる。さらに中央の渦が上下端の渦に押し潰されて消滅し、最終的に渦が2個で定常(1-c図)となった。

次に解析結果であるが、装置実験結果と同じく解析開始直後に内円筒上下端よりテイラー渦が発



(1-a) 0.3秒後 (1-b) 1.5秒後 (1-c) 定常状態
(2-a) 0.3秒後 (2-b) 1.5秒後 (2-c) 定常状態

図2 実験結果と解析結果の比較（従来型装置）



(1-a) 0.8秒後 (1-b) 3.5秒後 (1-c) 定常状態
(2-a) 0.8秒後 (2-b) 3.5秒後 (2-c) 定常状態

図3 実験結果と解析結果の比較（新型装置）

生し、0.3秒後（2-a図）には4個の渦が形成する。その後、1.5秒後（2-b図）には6個の渦がほぼ等しい大きさで形成され、上下端の渦が隣接する渦を押し潰す形で成長し、最終的に渦が2個で定常（2-c図）となった。以上の事から解析結果は、渦の発生過程、渦の流動方向および定常状態の渦発生個数が装置実験結果とほぼ一致した。従来型攪拌装置の渦流動数値解析結果の妥当性が確認された。

3-2. 新型装置の数値解析

内円筒に突起を4ヶ所有する新型テイラー渦装置の解析結果を図3に示す。図の上段は装置可視化実験による2次元断面観察結果であり、図中の実線は渦の流線を表している。撮影する時間によっては突起が可視化断面を通過している時もあるため、その場合は図中に突起断面を示した。下段は同条件、同時刻の解析結果であり、矢印は各格子点での速度ベクトルを表している。

装置可視化実験の結果より、内円筒回転開始直

後から内円筒上下端付近よりテイラー渦が発生し0.8秒後（1-a図）には4個の渦が発生した。3.5秒後（1-b図）では渦個数が4個の状態でも渦が成長するが、その後一時的に6個の渦が発生し、最終的には4個の渦で定常（1-c図）となった。内円筒に突起を有する新型装置の場合、渦発生個数が4個となり、従来型装置の2倍の渦が発生する。これは突起を設置することによって見かけの Γ 比が3.8付近になることに起因するものと考えられる。また、新型装置では、従来型装置には見られない渦の振動が発生した。これは突起が連続的に通過するため、渦が圧縮・膨張を繰り返すためと考えられる。さらに、渦の軸方向の中心位置は従来型よりも外円筒側に存在し、突起通過の影響による中心位置の移動も見られなかった。

次に解析結果であるが、装置実験と同じく内円筒回転開始直後にテイラー渦が発生し、0.8秒後（2-a図）には4個の渦が形成した。解析結果では渦速度の不連続点が見られるが、これは突起通過直後のためである。3.5秒後（2-b図）には4

個の渦が成長する過程と、新たな渦を誘発する過程を観察することができる。最終的には実装置実験の結果と同じく4個の渦で定常(2-c図)となった。解析結果においても渦の軸方向の中心は外円筒側に位置し、 Γ 比が3.8で発生するテイラー渦の中心位置とはほぼ等しくなった。定常状態の結果は両者共に突起通過時のものであるが、内円筒通過時の結果においても装置実験結果と解析結果は一致した。以上のことから、両者の結果を比較すると、発生過程に時間的な食い違いが若干見られるが初期段階での渦発生過程、定常状態での流動状態がほぼ一致し、解析結果は妥当であるといえる。

3-3. 新型装置の流動状態

解析コードの妥当性が確認されたため、従来型装置と新型装置で発生するテイラー渦内速度分布の比較を行った。解析結果より得られた、半径方向と軸方向で切った平面(r - z 平面)での半径方向の渦内速度分布を図4に示す。図中の実線で結ばれた曲線は従来型装置の速度分布である。従来型装置ではテイラー渦が2個発生するが、この速度は上方側の渦中心を通る線上の分布である。また、破線で結ばれた曲線は突起を2ヶ所設置した新型装置の速度分布である。突起を2ヶ所設置するとテイラー渦は4個発生するが、この速度は上から2番目に発生した渦の中心を通る線上の分布である。さらに点線で結ばれた曲線は突起を4ヶ所設置した新型装置の速度分布である。突起を4ヶ所設置すると前述のとおりテイラー渦は4個発

生するが、この速度は下から2番目に発生した渦の中心を通る線上の分布である。図の縦軸は r - z 断面の無次元速度 V^* 、横軸はギャップと半径方向の距離の比 R^* であり図の左側が内円筒、右側が外円筒である。従来型装置ではギャップの中心 $R^* = 0.5$ に渦中心が存在し、速度分布も中心を境に内円筒側、外円筒側で左右対称となっている。一方、新型装置では突起の設置個数に関係せずに渦の中心が $R^* = 0.6$ 付近に発生し、速度分布の結果からも渦の中心が外円筒側に存在することが明らかとなった。 $R^* = 0.2$ 付近までは突起の存在による特異的な速度分布を示すが、それ以降は渦の中心を境にほぼ左右対称の分布となった。しかし、渦の中心より外円筒側の速度は、対称位置での内円筒側の速度よりも平均で6%程度高かった。解析結果からも渦の軸方向の中心位置は移動せず、中心より外円筒側では Γ 比が3.8のときに発生するテイラー渦に近い速度分布を持つことが確認できた。これは前述の装置可視化実験から得られた結果と一致し新型装置の特徴的な攪拌状態を明らかにするものであり、新型装置の攪拌効率向上を示唆するものである。

今後は、数値解析による自由端型装置の攪拌挙動の検討および装置可視化実験による内円筒形状の最適条件の検討を試みる。

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数値解析を行い、新型固定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。

- ・新型攪拌装置の数値解析コードを開発した。
- ・新型攪拌装置内では、渦中心を境に内円筒側と外円筒側で渦内の速度分布が変化することが分かった。

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, 56-532, B(1990), 3617-3624
- 3) 東・小河原・飯田, テイラー渦流れの変異モ

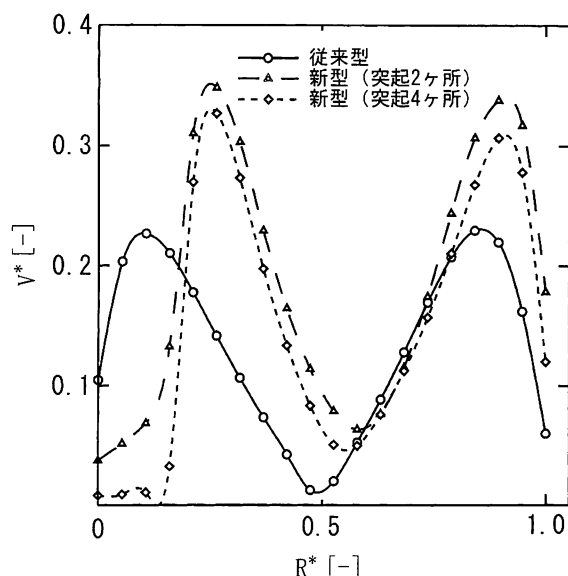


図4 r - z 断面の渦内速度分布

ード発生機構に関する研究, 日本機械学会論文
文集, 58-555, B(1992), 3245-3250

- 4) 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
- 5) 佐藤・松館, 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), 苫小牧高専紀要, 36, 2001, 81-84

(平成13年11月28日受理)

