

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06885

研究課題名（和文）コーティング円筒を用いたテイラー渦流の連続型反応装置への応用に関する研究

研究課題名（英文）Application of the Taylor Vortex Flow Reactor with a coated inner cylinder

研究代表者

吉川 史郎（Yoshikawa, Shiro）

東京工業大学・物質理工学院・准教授

研究者番号：40220602

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：同心二重円筒間のテイラー渦群を完全混合槽列とみなすことにより、低せん断で高効率の流通型反応器として応用するために安定した渦流を形成する方法を提案することを目的として研究を行った。内円筒をエポキシ樹脂でコーティングした装置を用いるとともに、流体に微量の高分子を添加することによって渦群の流れの乱れを抑制し、広い操作条件範囲で安定した渦群を形成することが可能であることを見出した。さらにステップ応答実験を実施し、異なる流体、操作条件における滞留時間分布を求め、装置内を完全混合流れ、バイパス流れ、停滞部からなるものとする組み合わせモデルによる評価を試み、高分子添加流体の渦安定性への影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでテイラー渦反応器についての研究がなされてきたが、渦を安定化する方法の検討は十分に行われてこなかった。本研究の結果により装置固体表面のコーティングあるいは流体への微量の高分子添加により生じる粘弾性が渦の安定性にある程度の効果をもたらすことが確認された点に学術的意義がある。同心二重円筒装置を軸流を伴う流通型反応器として利用した場合の渦の安定性も確認し、ステップ応答によって滞留時間分布をよりシャープにする可能性があることを示すと同時に最適な添加高分子に関する知見、操作条件を明らかにすることによって実際の晶析、菌体培養を目的としたより高効率の反応装置設計の指針を示した点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：By regarding the Taylor vortices generated between concentric double cylinders as a Complete Stirred Tank Reactor (CSTR), the study was conducted with the aim of applying it to a low-shear, high-efficiency flow reactor. The disturbance in the vortex flow was suppressed by using a device with an inner cylinder coated with epoxy resin and by adding a small amount of polymer to the fluid, thereby suppressing the disturbance in the vortex flow and stabilizing the vortex flow over a wide range of operating conditions. We found that it is possible to stabilize the vortices flow. Furthermore, step response experiments were conducted to determine the residence time distribution under different fluids and operating conditions. The effect on stability was clarified.

研究分野：移動現象論

キーワード：テイラー渦の安定性 同心二重円筒型反応装置 粘弾性流体

1. 研究開始当初の背景

ドーナツ状の渦列が生じる同心二重円筒の内円筒外円筒間のテイラークウェット流れの完全混合槽列反応器としての応用については従来高分子合成、晶析、菌体培養などを対象とした多くの研究例がある。同心二重円筒型反応装置はシャープな滞留時間分布で操作できること、攪拌翼による強いせん断力を生じることがないなどがその利点とされているが、安定した渦を生成できる内筒回転数、原料の供給流量の範囲が非常に狭いことが実用上の問題点として挙げられていた。この問題を装置条件、流体の条件の点から改善する方法を提案することが、同心二重円筒型反応装置がより効果的に利用されるために重要であると考えられた。

海水など腐食性のある液体輸送に使用されるポンプなどの内壁をコーティングする樹脂のうち、一部のエポキシ樹脂で摩擦低減効果があることが経験的に知られている。応募者はこのことを定量的に裏付けるために同心二重円筒の内筒と外筒の間にニュートン流体を満たして内筒を回転させたときのトルク計測実験を行い、コーティングした内筒を用いた場合に摩擦が低減されること、またその効果はテイラー渦が生じるレイノルズ数範囲においてより顕著となることを確認している。また流体に微量の高分子を添加することにより流体の効力を低減させる効果があることが広く知られている。

そこで、応募者はコーティング、あるいは流体への微量高分子添加が上記問題を解決するカギになると考え、申請した研究を着想した。

2. 研究の目的

応募者は研究の背景で述べたように過去に円筒の表面をエポキシ系防食剤でコーティングすることにより摩擦が低減されることを見出しているが、摩擦低減によりテイラー渦列の流れが安定すれば上述の問題点は解消できる可能性があると考えられる。また、微量の高分子添加とコーティングによる摩擦低減効果と渦流の安定性の関係を明らかにし、テイラークウェット流れを反応装置、晶析装置等として広い条件範囲で操作するための指針を確立することを本申請研究の目的とした。

3. 研究の方法

安定した渦列の形成により反応装置、晶析装置として有効に機能することを明らかにするために以下の方法により研究を実施した。水、グリセリン水溶液と、それらに効力低減効果のある高分子物質を微量溶解したものを試験流体として用い、テイラー渦列の流動状態を可視化し、粒子画像流速測定法(PIV)により局所流速分布を求め、流速の値、流線の本数、渦度から渦内の流量、渦間の流体の移動量および渦の安定性などを定量的に評価する。さらにそれらの結果から完全混合槽列モデルの適用可能性を明確にする。その後連続反応装置として性能を確認するために二重円筒装置下部から液体を供給し、同流量の液を上部から流出させることにより渦流と軸流を組み合わせた場合の渦の安定性を上述と同じく PIV 法による測定結果をもとに評価を行った。さらに軸流存在下でも安定した渦を形成すると考えられる条件において過渡応答実験、具体的にはステップ応答実験を行い、滞留時間分布を求め、流体への添加高分子の種類、装置条件および流動状態と完全混合槽列装置として利用できる条件の間の関係について反応工学分野で用いられる組み合わせモデルにより評価検討を行った。

4. 研究成果

同心二重円筒間に液体を満たし、内円筒のみを回転させた時に生じるテイラー渦列を完全混合槽型反応器列とみなして流通系反応器として応用することを目的として安定した渦流の形成と流体の粘弾性の関係を検討した。具体的には渦の安定化に効果があることが確認されているエポキシ系の防食コーティングを施した内円筒を用い、効力減少効果のある高分子を添加した粘弾性流体が渦の安定にどの程度寄与するかを流れの可視化結果に基づいて検討した。添加する高分子としてポリエチレンオキッド(PEO)、ポリエチレングリコール(PEG)、キサントガム(XAN)を用いた。それらを PEO、PEG については濃度 1000PPM、XAN については 1000PPM と 100PPM となるように添加したグリセリン水溶液の流動特性、動的粘弾性をレオメータにより測定し、いずれも擬塑性の粘弾性流体であり、流体によって損失正接の値がどの程度異なるかを確認した。次に、コーティングを施した内円筒を設置した同心二重円筒装置に高分子添加溶液を満たしてテイラー渦を発生させ、渦列断面を横切る角度でレーザーシート光を照射し、USB 高速度カメラを用いて流れの可視化撮影を実施し、撮影画像をパーソナルコンピュータに取り込み、流体解析ソフトウェアにより解析した。その解析により、流線および渦度を求め、渦安定性について検討した結果、上記 3 種類の高分子のうち、損失正接の値が測定された周波数条件でほぼ同じ範囲にある PEO 溶液と 100PPM の XAN 溶液で広い回転数条件の範囲で安定な渦が観察された。弾性が最も低い PEG でも回転数条件範囲は狭いものの安定な渦が生成することが確認された。しかしながら、損失正接が最も小さく弾性の強い 1000PPM の XAN 溶液では明確な渦列が観察されなかった。以上により粘弾性と渦の安定性の相関を確認することができた。ここまでは外径 60mm、長さ 80mm の円筒を用いて実験を行ってきたが、次に円筒の長さを 2 倍の 160mm とした同心二重円筒間流れにおけるテイラー渦の形成と粘弾性の相関関係について明らかにすることを目標として研究を行った。試験流体として粘度調整のためにグリセリンを水に添加して濃度を 20wt%としたニュートン流体である溶液と、その溶液にポリエチレンオキッド(PEO)、ポリエチレングリコール(PEG)をそれぞれ 1000PPM 添加した粘弾性流体である溶液を用いた。内円筒高さを 2 倍として各試験流体を用いた際に生成した渦列断面を横切る角度でレーザーシート光を照射し、上述と同様の方法により PIV による流体解析を行った。その結果、ニュートン、粘弾性、いずれの流体についても円筒軸方向に 16-18 個の渦列が観察され、2 倍のスケールアップでは個々の渦の大きさはほぼ内外円筒間のクリアランスで決定され、渦数は単純にほぼ 2 倍となることが確認された。また、粘弾性流体の方がより安定した渦が生じるということも確認できた。

以上により粘弾性を示す高分子を添加した流体が同心二重円筒間のテイラークウェット流れにおいてニュートン流体と比較して広いレイノルズ数範囲で安定したテイラー渦群を形跡することが確認された。また、テイラー渦が生じている場に軸流を生じさせる場合、軸方向流量と内円筒回転数の組み合わせによっては渦を乱し、安定性を失わせてしまう場合がある。また、可視化により見かけ上安定した渦を維持しながら軸流を生じさせているような場合でも渦間の混合に伴うバイパス流が生じ、理想的な滞留時間分布とならない場合があることが確認されている。これらを踏まえて研究の最終段階として反応器としてのテイラークウェット流れの性質を定量的に評価するために塩化カリウム水溶液をトレーサとしてステップ応答実験を実施し、異なる流体、操作条件における滞留時間分布を求め、装置内を完全混合流れ、バイパス流れ、停滞部からなるものとする組み合わせモデルによる評価を試みた。また、一次反応を仮定した場合の反応率による評価も併せて行った。その結果回転レイノルズ数が大きい条件では高分子添加によって反応率が高くなり、粘弾性が反応器の性能向上に効果を有することが確認された。一方回転レイノルズ数は低い条件では逆に高分子添加流体の場合の反応率が低くなった。これは組み合わせモデルによる評価により相対的に停滞部の体積が大きくなり、見かけ上の反応器としての体積が小さくなることによるものと確認され

た．

以上より実プラントでの操作条件として有効な比較的回転レイノルズ数の大きい操作条件において反応原料を含む流体に微量の高分子を添加して粘弾性流体とすることが同心二重円筒型反応装置の性能向上に寄与することが確認された．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉川史郎
2. 発表標題 [展望講演]テイラー渦の安定性に関する研究
3. 学会等名 化学工学会第52回秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉川史郎, 宮崎隆太郎, 松本秀行, 大川原真一
2. 発表標題 ポリマー添加流体がテイラー渦の安定性に及ぼす影響
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮崎隆太郎, 吉川史郎, 大川原真一
2. 発表標題 テイラークウェット流れにおけるポリマー添加の影響
3. 学会等名 化学工学会第49回秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉川史郎, 松本秀行, 大川原真一
2. 発表標題 流通系テイラー渦反応装置における軸方向流の影響
3. 学会等名 化学工学会新潟大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------