

氏名	MD. TAUHEDUL AZAM
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工甲第 1144 号
学位授与年月日	令和元年 9 月 20 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Experimental and Computational Investigations of Fluid Mixing Process in Rotating Jet Flow (回転噴流における流体混合過程の実験的および数値的研究)
論文審査委員	委員長 教授 平原 裕行 委員 教授 小原 哲郎 委員 准教授 前田 慎市 委員 准教授 本間 俊司 委員 准教授 姜 東赫

## 論文の内容の要旨

Fluid mixing is a unit operation that reduces the degree of non-uniformities of fluid properties such as viscosity, concentration, temperature, and so on. Mixing is a key factor of many operations in the chemical, pharmaceutical, food, paint, and many other process industries. Thus, the success of these process industries depends on the effective mixing system. Furthermore, with the rapid development of the process industries, the scopes of mixing are also increasing. Therefore, there is an ongoing demand for improving the design of the mixing equipment.

For this purpose, this research investigated the fluid mixing process in a stirred tank with a newly designed conduit-type mixer. The conduit-type mixer is a blade-free mixer and constructed with L-shaped channel. The rotation of the conduit-type mixer generates a rotating jet flow from its channel due to the centrifugal force. The mixing process of the rotating jet is identically different from the conventional blade-type mixer. The fluid mixing process in the rotating jet flow produced by the conduit-type mixer has been compared with the fluid mixing process by the conventional fin-type mixer (flat-blade mixer).

The investigation has been carried out based on the results of three different experiments and numerical simulation. In this process, the fluid mixing process of the conduit-type mixer has been visualized by the flow visualization with particle tracer technique. In order to measure the local concentration behavior and to calculate the mixing time, a concentration measurement was carried out by using image intensity of dyed water. Particle image velocimetry (PIV) and large eddy simulation (LES) were performed to measure the velocity profile on the flow field.

Flow visualization experiment showed that the fin-type mixer generates a pair of closed circulation loop around the mixer and the mixing at the bottom corner is poor, consequently, large sedimentation was observed at the bottom corner of the tank. In case of the conduit-type mixer, a wider circulatory flow pattern stirs the fluid over a vast area of the tank. This is because of the rotating jet flow which can stir the fluid from the long distance of the tank. For this reason, the sedimentation at the bottom corner was small. Therefore, the flow visualization results suggest that the conduit-

type mixer has the advantage to mix the fluid uniformly in space. The mixing time of the conduit-type mixer is slightly longer than that of the fin-type mixer because it requires a longer initial time to produce the wider circulatory flow pattern, which was confirmed by concentration measurement and flow visualization.

Large eddy simulation (LES) presents a similar flow pattern of the flow pattern obtained from the visualization experiment. The particle image velocimetry (PIV) and large eddy simulation (LES) results were validated by comparison with phase-averaged velocities for each other.

The trailing vortices issued by the blade tip of the fin-type mixer has moved outward from the mixer by inducing radial velocity between them. In a short distance, they form a circular vortical structure by reconnecting with the co-rotating vortices from the different blades. This circular vortex becomes unstable and breakdown, in a short time. The radial flow degenerates due to this quick dissipation of the vortices, resulting in a closed circulation loop around the mixer and a circular flow near the tank wall was observed. The closed circulation loop and the circular flow are the reasons for poor mixing, which was observed in the flow visualization experiment (large sedimentation in the bottom corner of the tank). Furthermore, the quick dissipation of the circular vortical structure provides a high turbulent kinetic energy (tke) near the fin-type mixer, however, in the far field the tke is low for the fin-type mixer. In other words, for the fin-type mixer, the mixing or exchange rate of fluid is high near the mixer, but mixing is poor in the far field.

On the other hand, the rotating jet of conduit-type mixer produces a counter-rotating vortices pair at the vicinity of each nozzle outlet. The generated co-rotating vortices from the different nozzles have been continuously merging together and forming one spiral-shaped vortex tube. In a meridional section of the spiral-shaped vortex tubes, the reverse von Kármán vortex street has observed. The counter-rotating vortices of reverse von Kármán vortex street migrate in the outward direction with self-induced velocity and induces outward velocity between them. In this process, the spiral-shaped vortex tube migrates the jet flow in the outward direction for which the jet flow travels in a long distance and generates a wider circulation. Compared with the fin-type mixer, the conduit-type mixer generates larger mean kinetic energy (mke) and smaller turbulent kinetic energy (tke) near the mixer. The merging of the co-rotating vortices produced by the different rotating jet of the conduit-type mixer continuously provides the tke to the long distance. As a result, the decreasing rate of the tke is very low for the conduit-type mixer. Moreover, the convection of the tke is high because of the high mke of the conduit-type mixer. For this reason, in the far field, the tke generated by the conduit-type mixer is larger than by the fin-type mixer. This means that mixing in the far field is effective by the conduit-type mixer. Therefore, the mixing by the conduit-type mixer is favorable for the uniform mixing process.

## 論文の審査結果の要旨

本学位論文を審査した結果、本論文のオリジナリティが認められ、工学的な有用性があると判断された。以下にその内容について概略する。

一般に、混合プロセスは、プロセス産業における重要性のため、学術研究のかなりの分野として受け入れられている。化学、医薬品、食品、塗料などを含む多くのプロセス産業の成功は、効果的な混合操作に依存しているが、その結果、これらの多面的な混合の問題を解決するために、さまざまな種類のミキサーが開発されてきたことがわかる。さて、この研究では、新しく設計された導管型ミキサーを備えた攪拌タンク内の流体混合プロセスが調査がなされている。本研究が対象としているのはブレードのないミキサーで、L字型のチャンネルで構成されているものである。回転導管型ミキサーは、遠心力により、そのチャンネルから回転ジェット流を生成することにより、流体を攪拌します。このミキサーの混合プロセスは、従来のブレードタイプのミキサーとまったく同じであるが、導管型ミキサーによって生成された回転噴流内の流体混合プロセスは、非常に異なった様相を呈しており、従来のフィン型ミキサー（フラットブレードミキサー）による流体混合プロセスと比較されて検討されている。この論文では、調査結果は3つの部分で分析されている。第一に、導管型ミキサーの流体混合プロセスは、粒子トレーサー法による流れの可視化手法によって明示されている。第二部では、濃度測定法により、攪拌タンク内の局所的な濃度挙動と混合時間に関して行った分析結果が記述されている。最後のセクションでは、粒子の流速測定（PIV）とラージエディシミュレーション（LES）を使用して、流れ場に対する渦の影響と混合プロセスに対する平均および乱流運動エネルギーの影響を調査がなされた。流れの可視化実験によると、フィン型ミキサーはミキサーの周りに一對の閉じた循環ループを生成し、底部コーナーでの混合が不十分であるため、タンクの底部コーナーで大きな沈降が観察されたことが述べられている。一方、導管型ミキサーは、より広い循環流パターンを生成し、タンクの広大な領域で流体を攪拌するという結果が得られた。これは、タンクの長距離から流体を攪拌することができる回転噴流によって引き起こされることが判明した。その結果、底隅の堆積物は少なくなるという好ましい結果が得られたと結論付けている。従って、流れの視覚化の結果は、導管型ミキサーが空間内で流体を均一に混合するのに有利であることが示唆されている。

次に、濃度測定では、導管型ミキサーの混合時間がフィン型ミキサーの混合時間よりもわずかに長いことが示されている。これは、より広い循環流パターンを生成するために、より長い初期時間が必要であることを意味していると述べている。同様の流れパターンがラージエディシミュレーション（LES）で示された。回転するジェット（またはブレード）によって生成された渦が、ミキサーからの半径方向の流れ場を支配していることが示された。粒子画像速度測定（PIV）およびラージエディシミュレーション（LES）の結果は、相互の位相平均速度との比較により検証されました。フィン型ミキサーは、ブレードの先端の後ろで逆回転する後流の渦のペアを生成するが、ブレードの先端によって発生する後流渦は、それらの間に半径方向の速度を誘導することにより、ミキサーから外側に移動することを示した。短い距離で、それらは異なるブレードからの共回転渦と再結合することにより、円形の渦構造を形成している。そして、この循環渦は短時間で不安定になり、崩壊すると結論付けている。この渦の急速な消散により放射状の流れが縮退し、ミキサーの周りの閉じた循環ループが生じ、タンクの壁の近くで円形の流れが観察され、閉じた循環ループと循環流が混合不良の原因であると述べている。これは流れの可視化実験でも確認されている事実である。さらに、円形渦構造の急速な散逸により、フィン型ミキサーの近

くで高い乱流運動エネルギーが得られるが、遠方場ではフィン型ミキサーの乱流運動エネルギーは低くなる  
ことが判明している。言い換えれば、フィン型ミキサーの場合、ミキサーの近くでは流体の混合または交換  
速度は高くなり、遠距離場では混合はあまり効果的ではないと言える。ブレードレス型の場合、回転ジェッ  
トは、各ノズル出口の近くで逆回転渦のペアを生成する。異なるノズルから生成された同方向の渦は連続的  
に合流し、1つのらせん状の渦管を形成することが分かった。らせん状の渦管の子午線断面では、逆フォン  
カルマン渦列が観察されていて、逆 vonKármán 渦列の逆回転渦は、自己誘導速度で外向きに移動し、それ  
らの間で外向き速度を誘導すると推測できる。このプロセスでは、渦巻き状の渦管がジェット流を外向きに  
移動させ、ジェット流が長距離を移動し、より広い循環を生成するという論理を提案している。フィン型ミ  
キサーと比較して、導管型ミキサーは、ミキサーの近くでより大きな平均運動エネルギーとより小さな乱流  
運動エネルギーを生成することが示された。導管型ミキサーの異なる回転ジェットによって生成された同方  
向回転渦の融合により、 $tke$  が長距離に連続的に提供され、その結果、乱流運動エネルギーの減少率は導  
ブレードレス型ミキサーでは非常に低くなることが示された。さらに、ブレードレス型ミキサーの平均運動エ  
ネルギーが高いため、乱流運動エネルギーの対流が高くなる。そのため、遠距離場では、導管型ミキサーに  
よって生成される  $tke$  はフィン型ミキサーよりも大きくなり、これは、遠方場での混合が導管型ミキサーに  
よって効果的であることを意味する。従って、ブレードレス型ミキサーによる混合は、均一な混合プロセス  
に非常に有利であると言える結論付けている。

以上のように、ブレードレス型の攪拌機に対して、その混合プロセスに新しい流れのメカニズムが創生さ  
れていることを発見しそれを論理的に説明した新規性のある研究であると判断できる。