

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	エレメント積層型混合装置の開発とその混合特性の評価 (Development of New Mixing Devices with Multi Stacked Elements and their Evaluation of Mixing Characteristics)
氏 名	望月 昇
<p>「混合・攪拌」は様々な産業で広く利用されている単位操作の一つであり、攪拌翼をモーターで回す攪拌槽と配管内に挿入して使う静的混合器（スタティックミキサー）がよく知られている。従来より、攪拌翼については多くの報告があり、多くの商品があるが、様々な流体を短時間で均一混合できる装置の開発は現在でも続けられている。一方、スタティックミキサーは攪拌翼ほど研究のアクティビティは高くないが、同様の状況にあり、特に混合性能を評価する手法が確立されていない問題点が指摘される。本研究では、二種類のエレメントを積層し、複雑な流路を形成させたエレメント積層構造（MSE : Multi Stacked Elements）のアイデアを元に、新しい攪拌翼とスタティックミキサー（デバイス）を開発するとともに、混合特性の評価方法を提案することを目的とした。</p> <p>第1章では、まず混合・攪拌操作の重要性について解説し、代表的な要素技術である攪拌翼全般についてまとめた。特に翼内部に流体を取り込むタイプの攪拌翼の特徴、およびその問題点について述べた。次にスタティックミキサーについて概説し、その特徴をまとめた。さらに、スタティックミキサーの性能評価に関する従来の報告を紹介し、研究の課題を明らかにした。本研究では、エレメント積層構造を基本とする MSE 攪拌翼と MSE スタティックミキサーを考案し、両デバイスが有する、既存技術との構造的な差異により予測される混合性能向上の可能性について指摘し、これらを踏まえた混合性能の定量的な評価方法を決定する必要性を明らかにした。最後に、エレメント積層構造によりデバイス内部の流れを積極的に利用する意図と本研究の特徴を述べ、明らかにすべき項目と各章の構成を説明した。</p> <p>第2章では、エレメント積層型攪拌翼について、汎用の攪拌翼を比較対象として、攪拌翼の基本特性である攪拌動力と混合時間を測定し、多くのエレメントを積層することにより、混合特性が向上することを明らかにした。次いで、翼周りの流動状態を粒子画像流速法（PIV）により計測し、槽底部から翼中央の中空部に向かう上昇流と側面からの高流速の吐出流の存在を明らかにした。さらに、積層型攪拌翼の設計因子の影響を確認するために攪拌動力を測定し、主に分割・合流の回数が攪拌動力に影響を与えることを明らかにし、流動解析ソフトによる解析結果をも参照して、翼周辺と攪拌槽内の流動状態を検討した。以上の結果、積層型攪拌翼は、エレメント形状や積層枚数により翼内部の流体の流動特性を制御できることが明らかになった。</p> <p>第3章では、スタティックミキサー採用の重要な判断基準となる圧力損失を測定し、エレメント積層型スタティックミキサーと、比較対象の汎用スタティックミキサーとの差異を評価した。積層型ミキサーは圧力損失が大きいですが、エレメント形状や積層方法により圧力損失を低減できた。また、流動解析ソフトによる解析結果と圧力損失測定結果に基づき、ミキサー内部の流動状態について考察し、混合を促進するための積層構造についての知見を得た。</p> <p>第4章では、スタティックミキサーの混合性能について、本研究で新たに提案した混合度 M、中央濃度 R_{med}、最大濃度 R'_{max}、濃厚塊の大きさ L、偏在度 Dev の5つの評価指標の各々について解説した。そして、蛍光物質を混合した注入流体を主流体である水流中へ注入して混合された流体の管断面画像を解析し、スタティックミキサーの混合性能を定量的に評価した。評価の結果、積層構造は混合の促進に効果的であって、また、攪拌翼と同様にスタティックミキサーもエレメント形状や積層枚数により内部の流体の流動特性を変えることが可能であり、混合状態を制御できることを明らかにした。また、粘度や水との相溶性や異なる注入流体について、同様の可視化実験を行い、混合特性の違いを提案した評価指標によって定量的に評価できることを示した。</p> <p>第5章では、エレメント積層型混合装置の工学的応用について述べた。スタティックミキサーに</p>	

については、排水処理用液体凝集剤の希釈工程への適用に対し、凝集剤の使用量は増加するが経済的なメリットにより十分に実用可能であることを明らかにした。攪拌翼については、BDF 製造装置への適用によるエステル化率向上の効果、及び攪拌子への応用によるメリットを明らかにした。

第6章では、第2章から第5章までを総括するとともに、スタティックミキサーの混合性能測定方法の発展性、エレメント積層型混合装置の工学的応用についての将来展望について述べた。

本研究の学問的意義は、デバイス内部の流れを積極的に利用したエレメント積層構造を基本とする混合装置の開発とその評価によって、新たな混合形態を提案したことにより、加えて、混合性能の評価方法、および標準化を通じて「混合・攪拌」の分野の実験手法の発展に寄与できるものである。さらに工学的意義として、本研究で開発した攪拌翼とスタティックミキサーは様々な工業分野の実液の混合に応用可能なものであるとともに、他のデバイス開発にも利用できるものであることにある。

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	Development of New Mixing Devices with Multi Stacked Elements and their Evaluation of Mixing Characteristics
氏 名	MOCHIZUKI Noboru

Mixing and agitation are the unit operations those are widely used in various fields. An agitation vessel in which an agitation impeller is rotated by an electric motor and a static mixer are known as for typical devices. Agitation impellers are continuously developed for mixing various fluids in a short time, though many types of impellers have been used and many researches have been reported. On the other hand, requirement of static mixers are increased though they are not widely used as agitation impellers. In particular, it is pointed out that evaluation methods of mixing performance of static mixers are not established until now. The purpose of this study is to develop a new agitation impeller and a new static mixer based on the MSE (Multi-Stacked Elements) structure with complex fluid passes by stacking two types of mixing elements and propose an evaluation method for mixing characteristics of static mixers.

In chapter 1, importance of mixing operation is described and an outline of agitation impellers as a typical technology is summarized at first. In particular, features and problems of an agitation impeller which takes fluids into inside are described. Then, an outline of static mixers is described and features of mixers are summarized. Further, previous reports on evaluation of performance of static mixers are described and the subjects of this study are clarified. Furthermore, expected performance of a newly developed agitation impeller and static mixer based on the MSE structure is predicted on the basis of differences in constructional feature to conventional technologies. Needs of development of the evaluation method for a mixing performance of static mixers is also clarified. Finally, the purpose of utilization of a fluid flow inside of the device based on the MSE structure and features of this study are described and clarification items of this study and construction of this report are explained.

In Chapter 2, a power consumption and a mixing time of the MSE impeller were measured and compared to a conventional agitation impeller. Mixing performance of the MSE impeller is improved by increment of a number of stacking elements. The upward flow from the bottom of mixing vessel to the hollow portion at the center of the impeller and the high-speed discharged flow from side of the MSE impeller were confirmed by measurements of the flow condition around the impeller by PIV (Particle Image Velocimetry). Further, a number of dividing and combining mainly affects to the power consumption of the MSE impeller by measurements of power consumption for the various shape of mixing elements with different design parameters. The fluid condition around the MSE impeller and in the mixing vessel was studied in consideration with results of power consumption measurements and by numerical flow analysis. The result shows that the MSE impeller can control flow characteristics inside of the impeller by changing such as a shape and a number of stacking mixing elements.

In Chapter 3, a pressure loss of the MSE static mixer that is a major parameter for an application to an actual equipment is measured and studied in comparison with a conventional static mixer. The pressure drop of the MSE static mixer can be decreased by the shape and a number of the mixing elements, though it was larger than that of the conventional static mixer. The suitable construction of the mixer for promotion of mixing performance becomes clear in consideration of the fluid condition in the MSE static mixer based on the results of pressure loss

measurements and numerical flow analysis.

In Chapter 4, newly defined five indexes in this study are explained. Those are Mixing rate (M), Medium concentration (R_{med}), Maximum concentration (R_{max}), Largeness of dense mass (L), and Deviation rate (Dev). An injected fluid with fluorescent pigment was supplied to a main water flow at the upstream of the static mixer and cross-sectional images at the downstream of the mixer were analyzed and evaluated quantitatively using above indexes. The result shows that the MSE structure is effective for promotion of mixing performance. Besides, the MSE static mixer also can control flow characteristics inside of the mixer and mixing performance by changing such as a shape and a number of the mixing elements as same with the MSE impeller. It was also shown that the indexes can evaluate quantitatively by the same method to various injected fluids with various viscosity or solubility to water.

In Chapter 5, industrial applications of the MSE devices are described. The MSE static mixer is feasible from the economical viewpoint for dilution of liquid flocculants with water though the amount of liquid flocculants is slightly increased. Improvement of esterification efficiency in BDF production and the advantages of application to a stirring rotator are described for the MSE impeller.

In Chapter 6, Chapters 2 to 5 are summarized and needs of evaluation method for static mixers and future prospects of the MSE devices in industrial application are described.

The academic significance of this study is to propose new mixing structure which utilizes a fluid flow inside of the device based on the MSE structure through development and evaluation of the devices. In addition, this study contributes to development of experimental methods in the field of mixing and agitation by the evaluation method of mixing performance and its standardization. The industrial significance of this study is that the MSE impeller and the MSE static mixer can be applied to fluids mixing in various industrial fields and adapted to development of other devices.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 703 号	氏名	望月 昇
最終試験担当者		主査	佐伯 隆
		審査委員	望月 信介
		審査委員	今井 剛
		審査委員	通阪 栄一
		審査委員	貝出 絢
【論文題目】			
エレメント積層型混合装置の開発とその混合特性の評価 (Development of New Mixing Devices with Multi Stacked Elements and their Evaluation of Mixing Characteristics)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>本研究は二種類のエレメントを積層し、複雑な流路を形成させたエレメント積層構造 (MSE : Multi Stacked Elements) のアイデアを元に、新しい攪拌翼とスタティックミキサー (デバイス) を開発するとともに、混合特性の評価方法を提案することを目的とした。エレメント積層型攪拌翼について、汎用の攪拌翼を比較対象として、攪拌翼の基本特性である攪拌動力と混合時間の関係を明らかにし、翼周りの流動状態を粒子画像流速法により明らかにした。エレメント積層型スタティックミキサーについては、その基本特性である圧力損失の計測を行った。また、主流体に蛍光顔料を注入した流体を供給する可視化実験を行い、混合状態を評価できる指標を提案することで、スタティックミキサーの混合特性を定量的に評価できる手法を開発した。</p> <p>第1章では、攪拌・混合操作における攪拌翼とスタティックミキサーについて概観し、その問題点について整理した。次に本研究で対象としたエレメント積層構造 (MSE) を基本とした攪拌翼とスタティックミキサーについて述べ、これらの基本特性を明らかにすることの必要性を述べた。特にスタティックミキサーについては乱流状態における混合性能について、適当な評価方法が存在しないことを指摘し、この手法を開発する必要性を述べた。</p> <p>第2章では、混合エレメントの積層体を基本構造とする MSE 翼について、汎用の攪拌翼である FBDT 翼を比較対象とし、攪拌翼の基本的特性である攪拌動力特性について評価した。さらに、PIV や流動解析によって、翼内部や翼周辺の流動状態を明らかにし、混合時間についての検討を加えた。</p> <p>第3章では、スタティックミキサーの圧力損失について実験的に評価するとともに、数値解析によって MSE スタティックミキサーの内部の流動状態を明らかにすることを目的とした。MSE スタティックミキサーの圧力損失は汎用のミキサー (NS 型) よりもかなり大きいことがわかった。また、流動解析の結果、MSE スタティックミキサーは流速が最大になる管内壁とブラインド板の間隙により形成される環状部高速流が発生し、これが上流側の積層体内部の連通流路を通過しながら分割・合流、せん断作用等を受けることにより、混合が促進されることがわかった。</p> <p>第4章では、スタティックミキサーの混合性能を評価するため、本流を水とし、ここに水との相溶性が異なる流体を蛍光顔料とともに供給し、その混合状態を可視化する実験を行った。可視化した画像データをもとに本研究で5つの評価指標を定義して混合特性を定量化することを考えた。5つの指標は、混合度 M、中央輝度 R_{med}、最大濃度 R_{max}、濃厚塊の大きさ L、偏在度 Dev である。3種類の注入流体を用いた評価実験の結果、提案した指標で混合特性がうまく評価できることが明らかになった。また、注入流体とし</p>			

て疎水性流体（油類）を用いる場合は、油滴径の粒度分布によって混合特性が良好に評価できることを示した。

第5章では、MSE 翼および MSE スタティックミキサーの工学的応用について述べた。MSE 翼については、廃食油のメチルエステル化反応によって得られる BDF 燃料の製造設備に適用し、既存の4枚傾斜パドル翼を MSE 翼に交換することより、メチルエステル化率が上昇したことを示した。また、MSE 翼の構造を応用した MSE 攪拌子を考案し、従来の棒状攪拌子に対する優位性を脱色試験と流動解析の結果から示した。MSE スタティックミキサーについては、排水処理用の液体凝集剤の希釈工程への適用について述べ、凝集剤の使用量は1~2割多くなるものの、設備コスト、設置スペース等を考慮すれば、導入が可能であることを示した。

さらに、第4章で述べた5つの評価指標によるスタティックミキサーの混合性能の評価方法が、経済産業省の「新市場創造型標準化制度」に採択され、一般財団法人 日本規格協会の下、標準化委員会が設置され、平成29年12月に日本工業規格（JIS）への公示に向けて取り組んでいる旨の説明をした。

本研究の学術的意義は、デバイス内部の流れを積極的に利用したエレメント積層構造を基本とする混合装置の開発とその評価によって、新たな混合形態を提案したことにあり、加えて、混合性能の評価方法、および標準化を通じて「混合・攪拌」の分野の実験手法の発展に寄与できるものである。さらに工学的意義として、本研究で開発した攪拌翼とスタティックミキサーは様々な工業分野の実液の混合に応用可能なものであるとともに、他のデバイス開発にも利用できることにある。

本審査会、公聴会におけるコメントと主要な質問は、以下の通りである。

- ・可視化で使用した蛍光物質は顔料なのか、それとも染料か、また粒子径はどれくらいか。注入液としてどのように調製したのか。
- ・開発した MSE 攪拌翼やスタティックミキサーはエマルジョンの製造に使えないか。
- ・MSE 攪拌翼は動力が高いが攪拌効率という面での評価について、どのように考えるか。
- ・スタティックミキサーの圧力損失は実験によって測定したが、流れの解析を数値計算でしたのはなぜか。
- ・スタティックミキサーの混合性能を特定の流体を使用して評価した結果は、実用面でどのように生かせるのか。
- ・MSE スタティックミキサーについて、エレメントの積層方法以外に圧力損失を下げる方法はないか。
- ・今回の実験は液-液の混合に限定されているが、気体の混合は可能か。
- ・エレメントを積層した構造体を考案したもとの発想はなにか。

この他にも多数の質問があり、発表者から適切で明確な回答がなされた。

以上より、本研究は独創的であり、信頼性、有効性ともに優れており、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容、審査会、および公聴会での発表と質疑に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、査読付き論文と国際会議プロシーディングス（計3編）の発表状況は下記のとおりである。

1. 望月 昇, 来栖孝明, 森口優吾, 貝出 絢, 佐伯 隆, エレメント積層型スタティックミキサーの開発とその混合特性評価, Kagaku kougaku ronbunshu, Vol. 43, No. 2, 2017 年（印刷中）
2. Takashi Saeki, Noboru Mochizuki, Quantitative Evaluations for a Newly Developed Mixer with Stacked Elements, Proc. of 5th Asian Particle Tech. Symp. (APT2012), P190, pp. 1-2, 2012 年
3. Noboru Mochizuki, Takashi Saeki, Aya Kaide, Development of a Quantitative Evaluation Method of Mixing for Static Mixers, Proc. of XVIIth International Congress on Rheology, P027, pp. 1-2, 2016 年