

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

2017年 3月

望月 昇

山口大学大学院理工学研究科

学位論文の要旨

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ーは高くないが、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、二種類の混合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）のアイデアを基に、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。

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。本研究については、エレメント積層構造を基本とする MSE 攪拌翼（以下、「MSE 翼」）と MSE スタティックミキサーについて説明し、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。

第2章では、MSE 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、多くの混合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測定法（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、MSE 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、流動解析ソフトウェア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、MSE 翼は、混合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。

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、MSE 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。MSE スタティックミキサーは圧力損失が大きいのが、混合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、流動解析ソフトウェアによる解析結果と圧力損失測定結果に基づき、MSE スタティック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。

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 MSE 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が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。

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、BDF 製造装置への適用によるエステル化率向上の効果、および攪拌子への適用によるメリットを明らかにした。MSE スタティックミキサーについては、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。また、経済産業省の新市場創造型標準化制度による混合性能の評価方法の JIS 制定について述べた。

第6章では、第2章から第5章までを総括するとともに、MSE 翼および MSE スタティックミキサーの工学的応用、スタティックミキサーの混合性能測定方法の発展性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。

Abstract

Mixing and agitation are traditional operations which are widely used in various fields. A vessel with an agitation impeller rotated by an electric motor is popular equipment known as agitation vessel. Many researches have been conducted for developing effective agitation impellers; however, such studies are still continued. On the other hand, studies on static mixers have not been done widely compared to those of agitation impellers. It is pointed out that evaluation methods of mixing performance of static mixers are not fully established until now. The purpose of this study is to develop a new agitation impeller and static mixer based on **M**ulti-**S**tacked **E**lements (MSE). They might produce complex flow passes due to their stacking structure caused by two types of mixing elements. Also, the development of evaluation method for mixing characteristics of static mixers is necessary.

Chapter 1 provides an outline of agitation impellers including the importance of mixing operation, the feature of each agitation impeller, and problems for industrial uses. Then, an outline of static mixers is also described and features of commercialized mixers are summarized. The previous studies that have developed for the evaluation of mixing characteristics of static mixers are reviewed and the objective in this study was stated.

In Chapter 2, the power consumptions and mixing times of MSE impellers were evaluated with the comparison of a conventional agitation impeller. The mixing performances of the MSE impellers are improved by the increment of a number of stacking elements. From the results of particle image velocimetry(PIV), the upward flow from the bottom of the mixing vessel occurs to the hollow portion at the center of the impeller and the high-speed discharged flow from the edge of the MSE impeller were confirmed. The flow conditions in a mixing vessel with MSE impellers were studied according to both the results of power consumption measurements and numerical analysis. The result showed that the streamlines inside of MSE impellers can be controlled by changing the shape and a number of stacking mixing elements.

In Chapter 3, pressure losses of MSE static mixers were measured in comparison with a conventional static mixer. Although the pressure drops of the MSE static mixers were larger than that of the conventional static mixer, they can be decreased by the shape and a number of the mixing elements. The concept of suitable design for MSE static mixers were presented in consideration of the flow condition based on the results of pressure loss measurements and numerical analysis.

In Chapter 4, five indexes which can evaluate the mixing characteristics are newly defined in this study and their concepts are explained together with the calculation

methods. Those are mixing rate (M), medium brightness (R_{med}), maximum brightness (R'_{max}), size of bright lump (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 captured. Those are mixing rate (M), medium brightness (R_{med}), maximum brightness (R'_{max}), size of bright lump (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 captured. By analyzing thus obtained images and calculating the five indexes, the mixing characteristics of static mixers were successfully evaluated.

The results of evaluations for various injected fluids were also shown in order to express the validity of the proposed method.

In Chapter 5, industrial applications using MSE devices are described. The MSE static mixer is feasible from the economical viewpoint for dilution of liquid flocculants with water even though the amount of liquid flocculants is slightly increased. The improvement of esterification efficiency in a bio diesel fuel (BDF) production process was successfully performed with the MSE impeller instead of a paddle type stirring blade.

In Chapter 6, the results of each chapter are summarized and future prospects of the MSE devices in industrial application are stated. Also, the standardization of the evaluation method for static mixers developed in this study is indicated.

The academic significance of this study is to propose new mixing structure which utilizes fluid flow inside of the devices based on the MSE structure. 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.

目 次

第 1 章 序論

1. 1	はじめに	1
1. 2	攪拌操作の概要	1
1. 3	スタティックミキサーの概要と従来の研究	5
1. 4	スタティックミキサーの混合性能評価と従来の研究	9
1. 5	エレメント積層構造の攪拌・混合操作への応用	10
1. 6	本研究の目的と本論文の構成	14
1. 7	本研究の意義と工学的応用	18
1. 8	主要記号	19

第 2 章 MSE 翼の基本特性の測定および混合特性の評価

2. 1	緒言	21
2. 2	MSE 翼の基本特性および混合特性	22
2.2.1	攪拌所要動力	22
2.2.2	MSE 翼周辺の流れの可視化	28
2.2.3	MSE 翼の混合特性の評価	29
2.2.4	MSE 翼および翼周辺の流動解析	30
2. 3	実験結果および考察	31
2.3.1	FBDT 翼との比較	31
2.3.2	MSE 翼特有の形状が流動状態に及ぼす影響	39
2. 4	結言	53

第 3 章 MSE スタティックミキサーの圧力損失

3. 1	緒言	55
3. 2	圧力損失測定によるスタティックミキサーの評価	56
3.2.1	圧力損失測定装置および実験方法	56
3.2.2	測定結果および考察	58
3.2.3	まとめ	60
3. 3	MSE スタティックミキサー内部の流動解析	61
3.3.1	流動解析条件	61
3.3.2	解析結果および考察	62

3.3.3	まとめ	74
3.4	結言	75
第4章 スタティックミキサーの混合特性の評価方法の開発		
4.1	緒言	77
4.2	流れの可視化によるスタティックミキサーの混合特性の評価	77
4.2.1	可視化装置および実験方法	77
4.2.2	混合特性の評価指標	80
4.2.3	評価指標によるスタティックミキサーの混合特性の評価	83
4.3	異なる注入流体に対するスタティックミキサーの混合特性の評価	87
4.3.1	水との相溶性の高い流体の場合	89
4.3.2	水との相溶性の低い流体の場合	91
4.3.3	疎水性流体の場合	94
4.4	結言	97
第5章 MSE 翼および MSE スタティックミキサーの工学的応用		
5.1	MSE 翼の BDF 製造設備への適用	99
5.2	MSE 翼の攪拌子としての応用	101
5.3	排水処理用液体凝集剤の希釈工程への適用	105
5.3.1	概要	105
5.3.2	性能確認テストおよび結果	106
5.3.3	まとめ	108
5.4	経済産業省「新市場創造型標準化制度」事業への採択による JIS 制定	108
5.4.1	経緯	109
5.4.2	JIS 原案作成およびスケジュール	109
第6章 結論		
		111
参考文献		116
論文リスト		118
謝辞		121

第1章 序論

1. 1 はじめに

混合・攪拌操作は、混合や分散、溶解、拡散といった物質移動のみならず、熱移動や化学反応・発酵の促進、造粒や混錬など、化学プロセスの様々な局面で使用される。たとえば、複数の原料を混合して下流工程に送る装置では、不十分な混合が最終的に得られる生成物の品質に大きく影響する。また、ある反応槽において複数の流体や固体を混合して反応させる場合、混合物の濃度や温度に局所的な分布があると目的生成物の収率低下につながるばかりでなく、副生成物の分離に負荷がかかり、生産コストの低下を招く。このように、混合・攪拌は重要な単位操作の一つであり、これを有効的に機能させることが化学プラントの最適化につながるといっても過言ではない。

攪拌操作の代表的な装置として、攪拌槽がある。これは攪拌翼をモーターにより回転させることによって槽内の流体を混合するものであり、バッチ操作のみならず、連続操作でも使用され、さまざまな分野で固体と液体、液体と液体、液体と気体を混合するために用いられている。さらに、混合対象の物性（密度や粘度など）や混合によるせん断力の影響を考慮する局面が多々あり、攪拌条件はもとより、多種多様な攪拌翼が開発され、使用されている。

静的混合器（以下、「スタティックミキサー」と呼ぶ）は流体を輸送する配管の経路中に取り付けるもので、内部に複雑な形状の挿入物を設置することで、動力を使用せずに連続的に流体を混合することができる。一過性の混合装置であるため、一般に攪拌槽に比べると混合は十分ではないことが多いものの、設備コストや省スペース、省エネルギーという点で有利であり、化学プラントの効率化のためには、スタティックミキサーの果たす役割はますます大きくなることが予想される。

この他、高速の液体をタンク内に吹き込む噴流混合機やガス吹き込みによるエアリフト、また高粘性流体混合用のエクストルーダーといった混合装置がある。

本研究は、上述したような攪拌・混合操作において、重要な要素技術である攪拌翼およびスタティックミキサーを対象とするものである。

1. 2 攪拌操作の概要

一般に、攪拌は攪拌槽内の物質移動を促進し、短時間で均一濃度にすることが求められるが、実際には周期的、かつ定型的な流れパターンが発生し、容易には均一化できないことが

多い。攪拌槽の性能は槽内に発生する流動形態に大きく依存するといえる。

図 1-1 に、代表的な攪拌翼を示した。(a)平羽根ディスクタービン翼、および(b)パドル翼は放射流型の翼であり、羽根背面から吸い込んだ流体を攪拌軸に垂直に誘導した後、半径方向に吐出する。吐出された流体は攪拌槽内壁に衝突して上向き流れと下向き流れに別れ、各々の循環領域が形成される。循環領域内の混合が良くても、領域間の混合が悪い場合には混合に長時間を要する場合がある。この点において、羽根が傾斜した(c)プロペラ翼の使用は有効である。

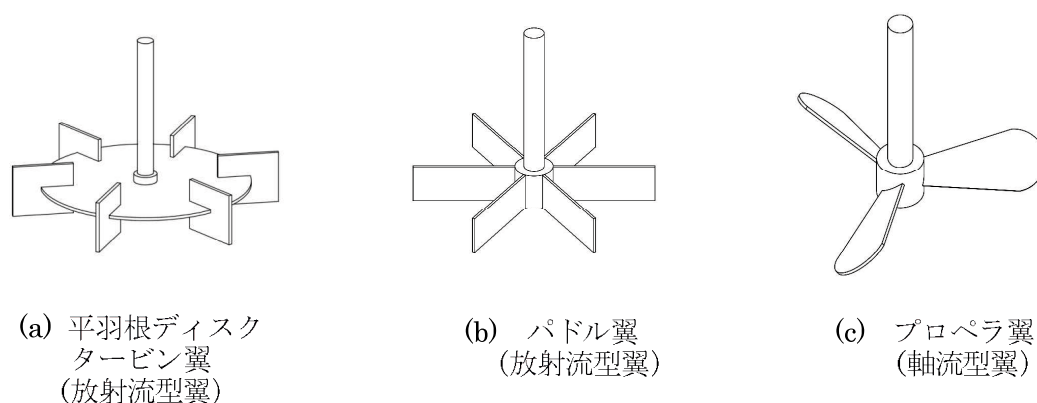


図 1-1 代表的な攪拌翼

攪拌翼を回転させることにより生じる流体の流動形態は、円筒座標に対応して以下の3つに分けられる。

- 1) 攪拌翼の回転と同一方向に槽内を回転する円周方向流れ
- 2) 攪拌軸に平行な深さ方向流れ
- 3) 攪拌軸に垂直な半径方向流れ

このうち、2)と3)が混合に有効な流動といえるが、これに1)が伴うと中央の渦流や固体的回転部が形成され、混合にはあまり寄与しない部分が形成される。すなわち、図 1-2 に示すように翼の回転によりパドル翼内部の流体 (図中の青色部分) は円周方向の位置を変えるのみで、濃度の低い翼外部には移動しない。このような領域は固体的回転部と呼ばれる。固体的回転部では機械的混合の効果は期待できず、均一化に長い攪拌時間を要することになる。また、攪拌によって比較的大きなスケールの循環流が発生することも均一化を妨げる要因になる。パドル翼やタービン翼では、その上部で図 1-3 に示すドーナツ型の渦が発生し、周囲よりも高濃度な流体が渦から逸脱することなく長時間存在する現象がみられる。固体的回転部や循環流の形成を防ぐために、実際の装置では槽壁に邪魔板を装着したり、攪拌翼と

円筒槽の中心を共軸にせず偏心させて設置するなどの対策が取られている。

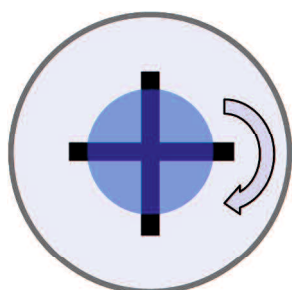


図 1-2 固体的回転部（円筒槽内の
4枚羽根のパドル翼を槽上部から見た図）

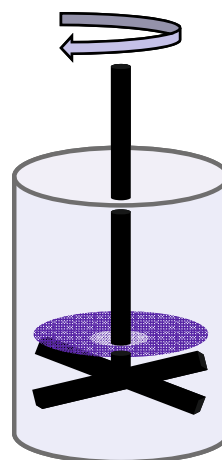
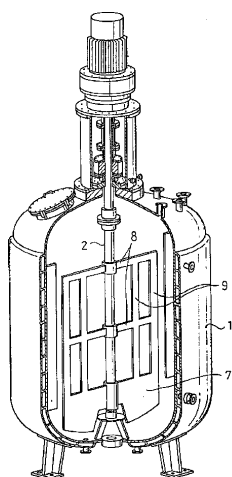
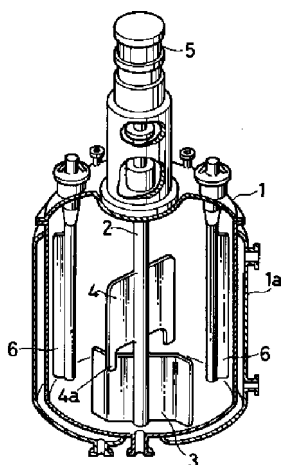


図 1-3 ドーナツ型の渦

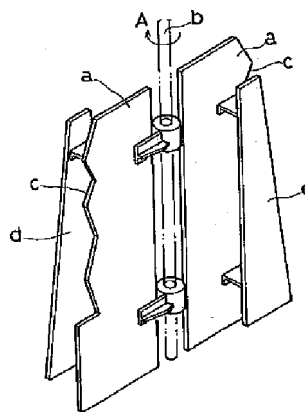
一方、わが国では 1980 年代から大型特殊翼の開発が始まり、粘度 $200\sim 300\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下の液体を対象に、図 1-4(a)に示す大型 2 枚パドル翼をベースとしたマックスブレンド翼（住友重機械工業株）、(b)に示す高効率多機能攪拌翼フルゾーン（株神鋼環境ソリューション）、(c)に示すスーパーミックス MR205（佐竹化学機械工業株）等が商品化されている（奥村ら，2003）。



(a) マックスブレンド翼
(特開平 08-252444 号
公報より)



(b) フルゾーン翼
(特開平 05-049890 号
公報より)

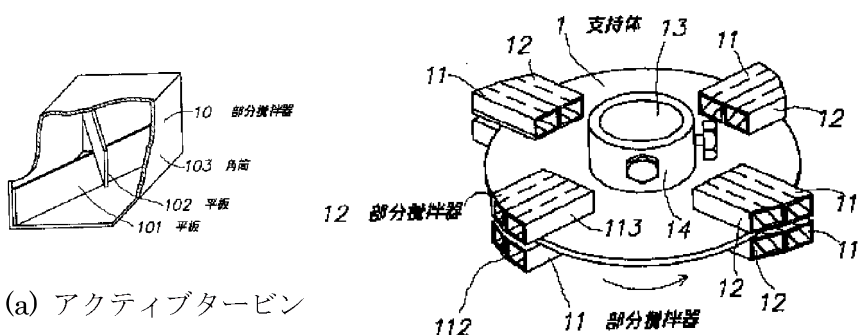


(c) スーパーミックス
MR205 翼
(特開平 10-128092 号
公報より)

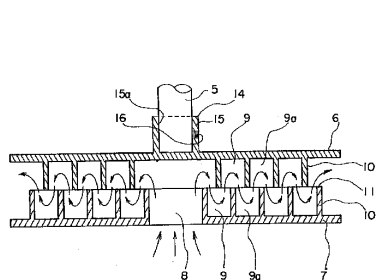
図 1-4 大型特殊翼

近年では、新たな設計思想に基づく攪拌翼として、図 1-5 に示すアクティブタービン（関西化学機械製作㈱）、およびラモンドスターラー（㈱ナノクス）のように、翼内部に流体を取り込む攪拌翼が考案されている。これらは、通常の攪拌翼が有する羽根を持たず、翼内部に混合機構を持たせて、ここを通過する混合流体に強いせん断力が加わる構造としたもので、翼内部の混合効果を狙ったものである。

図中(a)のアクティブタービンは、翼外周部にスタティックミキサーを備えたものであり、流体は翼中心部から外周部に吐出される際にスタティックミキサーにより細分化されるが、設置できるスタティックミキサーの数量は制限される。一方、図中(b)のラモンドスターラーは、開放された六角形状の小室を備える 2 枚の円板を同心的に対向して重ね合わせ、2 枚の円板の対向する小室が互いに位置を違って配列させられることにより連通路路を構成している。一方の円板の中央部に設けられた流体の吸入口から吸い込まれた流体は、翼内部に形成された多数の小室内での分割・合流に加えて、内側から外側への全体の流れに対して直角な上下方向の局部流れにより生ずる渦流、乱流、せん断、反転により混合される。ラモンドスターラーは、中央部の貫通孔から流体を吸い込む構造であるため、固体的回転部が発生しないが、流体が通過するのは対向する 2 枚の円板の間隙なので翼内の流量は制限される。



(a) アクティブタービン
(特開平 08-182924 号公報より)



(b) ラモンドスターラー
(特開平 11-114396 号公報より)

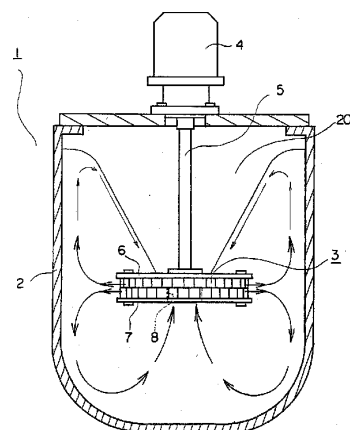


図 1-5 翼内部に流体を取り込む攪拌翼

1. 3 スタティックミキサーの概要と従来の研究

スタティックミキサーは配管内において、孔や溝を有する平板、湾曲板、傾斜板状の挿入物により、流体を流れ方向や円周方向への分割・合流、局所的な加速、引き伸ばしや折りたたみの効果によって混合するものである。この際、せん断、圧縮、置換、渦流、乱流等の作用によって、混合が促進される。通常、配管系の途中に取り付けて使用することから、ラインミキサーとも呼ばれている。

アメリカでは Kenics 社、Chaeless & Ross 社等が商品化しており、スイスの Sulzer 社は SMX-Sulzer Static Mixer を販売している (Thakur et al., 2003, Ghanem et al., 2014)。わが国でも(株)ノリタケカンパニーリミテドのケニックス型スタティックミキサー、(株)ナノクスのラモンドナノミキサー、(株)オーエイチ・アールの OHR ラインミキサー、(株)フジキンの分散君、東レ(株)のハイミキサーなどが商品化されている。これらスタティックミキサーは、層流においては、高粘性の食品、塗料、ポリマーや接着剤等の混合に使用され、乱流においては、液体混合、気体混合、気液分散等を主な対象として、化学、石油化学、化粧品、食品、医薬等の分野で長年に渡って使用されている。特にエマルジョン製造、重合、排水処理、液体や気体の希釈、液液抽出、樹脂成型、熱伝導の促進等が主な用途である。近年は化粧品、食品、医薬分野における付加価値の高い商品の製造のために、制御およびモニタリングが容易なスタティックミキサーの必要性が高まっている。

スタティックミキサーの形状による分類を表 1-1 に示し、代表的なスタティックミキサーを図 1-6 に示した。

表 1-1 スタティックミキサーの形状による分類 (Thakur et. al., 2003)

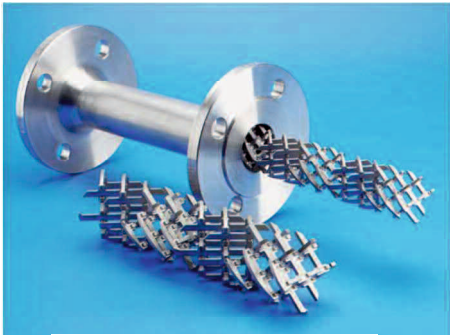
らせんタイプ	ケニックス (株)ノリタケカンパニーリミテド、Chemneer)
平板タイプ	Standard LPD (Ross Engineering) 、OHR ラインミキサー (株)オーエイチ・アール)
湾曲板タイプ	SMV (Sulzer) 、GV (Stamix)
多層タイプ	SMX, SML (Sulzer) 、KMX-V (Chemneer) 、分散君 (株)フジキン)
多孔板タイプ	ハイミキサー (東レ(株))、FRP Wafer (Komax Systems) 、ラモンドナノミキサー (ナノクス(株))
多孔体タイプ	SMR (Sulzer)



(a) ケニックス型スタティックミキサー
(株ノリタケカンパニーミテド HP より)



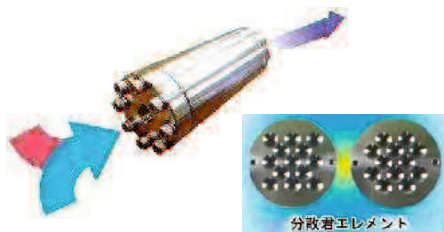
(b) LPD Static Mixer
(Charles Ross & Son Company HP より)



(c) SMX plus Static Mixer
(SULZER 社 HP より)



(d) ラモンドナノミキサー
およびハニカムユニット
(株ナノクス HP より)



(e) 分散君
(株フジキン HP より)



(f) OHR ラインミキサー
(株OHR 流体工学研究所 HP より)

図 1-6 スタティックミキサーの例

流体はポンプやコンプレッサーによりスタティックミキサーに圧送されるため、スタティックミキサー自身は駆動力を必要とせず、流体の取り扱いやミキサーの操作性において優れているといえる。また、攪拌槽のように、タンクや攪拌翼を必要としないので、省スペース、低コストであることも利点である。一方でバッチ式プロセスと異なり、流体はスタティックミキサーを1回通過するだけであって、ミキサー自身の体積が小さいので滞留時間が短く、流体の混合という目的に対しては不十分である場合が多い。そのため、一般にスタティックミキサーは攪拌槽の代替装置というよりは、既存の設備で混合が不十分な場合の能力増強のために、あるいは製造装置にスペース上の制約がある場合に用いられることが多い。そのため、適用されるプロセスに要求される混合性能とスタティックミキサーの混合特性を把握することが重要である。スタティックミキサーと攪拌操作による混合との比較について、Thakur et. al. (2003) は表 1-2 のようにまとめている。

表 1-2 スタティックミキサーと攪拌操作の比較

	スタティックミキサー	攪拌操作
必要スペース	小	大
装置価格	低コスト	高コスト
動力	小 (ポンプ動力のみ)	大
稼動部品	なし	有り
シール	フランジ部のみ	フランジおよび攪拌槽
滞留時間	小 (押し出し流れに近い)	大
せん断力	小	特に羽根周りが大
運転切り替え	短時間、廃液量が少ない	長時間、廃液量が多い
洗浄	自己洗浄性あり、 交換や使い捨ても可能	攪拌槽の洗浄が必要

元来、乱流域ではスタティックミキサーがなくても、ある程度の配管長さの確保により所定の混合効果が得られるため、スタティックミキサーの研究はもっぱら層流域でのものが主体であった。しかし、短距離での混合が可能になるという利点から、最近では乱流域での研究も見られる。

従来のスタティックミキサーの研究を概観すると、エマルション製造として、Legrand et al. (2001), Fradette et al. (2007), Lobry et al. (2011), Kiss et al. (2011), Theron and Sauze (2011), Das et al. (2013), Lemenand et al. (2003), Kubo et al. (2008), Suzuki et al. (2006, 2008) などがあり、気液分散では Etchells et al. (2004), Swapna et al. (2015)、また、抽出装置としても Abdolkarimi

and Ganji (2014) の研究が報告されている。

エマルジョン製造について、Kiss et al. (2011) は、製薬における第一段階の微粒子製造を想定して、Sulzer の SMX スタティックミキサーによる層流条件下での乳化剤を用いた O/W 型エマルジョンを製造した。そして、エマルジョン中の液滴サイズをザウター平均径とスタティックミキサー内径・エレメント数、および液物性の関係として無次元関係式で示した。Fradette et al. (2007) は、SMX スタティックミキサーについて、乳化剤を使用せずに高粘性ニュートン流体を、低粘性ニュートン流体および非ニュートン流体中に層流条件下で分散させ、粒径についてミキサー形状依存のパラメーターを組み入れた速度式を提案し、ケニックス型スタティックミキサーと比較している。SMX スタティックミキサーの液-液分散については、Das et al. (2013), Legrand et al. (2001) も報告し、Lobry et al. (2011) は SMV スタティックミキサーによる液-液分散について報告している。また Theron and Sauze (2001) は、Sulzer の SMX、SMX plus、SMV の 3 種類のスタティックミキサーを使用し、乱流下での圧力損失と乳化性能の関係について、スタティックミキサーの分散性能や滞留時間を考慮して検討した。その結果、スタティックミキサーの種類にかかわらず、流体単位重量当たりの平均エネルギー消失速度の関数としてのザウター平均径が、 Re 数と We 数の関数により表記できることを示した。

気液分散について、Etchells et al. (2004) は、ケニックス型スタティックミキサーと SMV スタティックミキサーの使用が有効であると報告している。Swapna et al. (2015) は、鉛直方向に設置したケニックス型スタティックミキサー内での乱流における気液混相流の並行流れについて、エレメントの数量を変えてミキサー内部の気泡分散の様子を超高速 X 線断層撮影技術を用いて可視化した。また、気相構造、気泡サイズ分布、ガスホールドアップ、気液界面の面積および圧力損失を測定した。この結果、気液流速比が低い場合におけるガス分散はエレメントの数量により大きく影響を受けること、ガスホールドアップおよび気液界面の面積はエレメントの数量および気液流速比の影響を受け、特に高液流速下ではエレメントの数量の影響が大きいこと、気液分散に消費されるエネルギー消失速度は、エレメント数やガス流速よりも液流速が最も影響することを報告している。

一方、Abdolkarimi and Ganji (2014) は、石油化学プラントの脱硫装置におけるプロセス凝縮液と苛性ソーダ溶液との効率的な混合について、Stamix の GV スタティックミキサーの長さ、直径、エレメントの配置を変数として、混合度および圧力損失に対する影響を 2 相オイラー-CFD モデルを用いた流動解析を行っている。彼らは、流動解析と実運転データがよく一致したことを述べたうえで、スタティックミキサー内部のエレメントの形状、管中心軸に対する配置、エレメント数が顕著に影響し、エレメントの後にスパーサーを入れることが混合を促進するのに有効であることを報告している。

1. 4 スタティックミキサーの混合性能評価と従来の研究

スタティックミキサーの性能は、圧力損失と混合特性によって評価されるのが一般的である。圧力損失はスタティックミキサーの使用に際して重要な設計情報であるが、エレメントの形状が多種多様であり (Pahl and Muschelknautz, 1982)、配管サイズも異なるため (Bayer et al., 2003)、ニュートン流体であっても相関関係を一般化するのは簡単ではない。Paglianti and Montante (2013) は、乱流において有効であると考えられる湾曲板タイプのエレメントを有する SMV スタティックミキサーについて、エレメント長さや2種類のエレメントの相対位置を変えて圧力損失を測定し、圧力損失にはエレメントの長さの影響が大きく、エレメント間の位置関係の影響は小さいことを述べている。

混合特性について、スタティックミキサーによる混合は短い距離で行われるため、巨視的混合過程の影響が大きく、注入した流体の流体塊サイズやその分布が混合特性に顕著に反映される。Abdolkarimi and Ganji (2014) は、数値計算によって混合特性を解析している。一方、実験について、例えば電気伝導率により流体中の特定成分の濃度を測定する場合は、センサーを設置した位置一点のみの情報しかないうえ、センサー自体が流れを乱すという問題がある。これに対し、非接触の可視化実験は有効である。本流配管にスタティックミキサーを設置し、その上流から着色した異流体を注入し、ミキサー出口の管断面を可視化することで、着色流体の存在分布を画像データとして得る。ここで重要なことは、この画像データを用いて如何に不均一性を定量化し、混合特性として評価するか、という点にある。

不均一性の定量化については、従来からの統計的手法を用いて、層流条件下におけるパッシブスカラー C_i の濃度分布により混合性能を評価した Etchells and Meyer (2004) や Kukukova et al. (2011) による報告がある。Etchells and Meyer (2004) は、局所の濃度データをもとに、その標準偏差を変動係数 (coefficient of variation; CoV) としてスタティックミキサーの混合特性を評価している。しかし、標準偏差はあくまでも正規分布に対して用いられる概念であって、もとよりスタティックミキサーによる混合前後で巨視的には濃度が同じ流体の不均一性を対象としているのであるから、混合性能の評価に対する標準偏差の適用は適切とはいえない。そのため得られた CoV の値と可視化画像から受ける不均一性の印象に乖離があることも多い。

一方、Kukukova et al. (2011) は、層流に注入された着色流体が管断面において縞模様を形成する実験系において、最大の面積を有する縞模様の幅によって混合特性を評価する方法を提案し、混合時間の最速評価であるとしたが、これだけで流体全体の混合特性を評価するには無理がある。また、明確な縞模様のみられるのはおそらく層流域に限定されるであろうから、複雑な様相を呈する乱流域でこの評価方法を適用するのは難しいといえる。古くは Spencer and Wiley (1951) による、最大縞模様幅の経時変化に伴う減少を混合の進行と仮定した報告があるが、流体の濃度や縞模様内での濃度分布を考慮していない。このように、ミキサー内でカオス状に変化するフローパターンを、 CoV や縞模様の面積や幅による簡単な

指標で評価することは容易ではない。

Alberini et al. (2014) は、ケニックス型スタティックミキサーを使用し、低粘度のポリアクリレートポリマーの本流に、染料を含んだ高粘度ポリマーを注入流体として管断面を可視化し、ピクセル毎に混合度を算出して筋状のイメージを得た。筋状イメージの解析の結果、 CoV や最大縞模様面積はピクセル毎の混合度を考慮していないため、混合特性を反映しない場合が見られるが、縞模様の長さや面積、その分布や混合割合を考慮し、これを完全混合状態と比較した指標（混合強度）を導入することで、評価の信頼性が向上したことを報告している。彼らの実験は層流下で行われているため、染料を含んだポリマーは管断面で縞状に変形しながら混合している。しかし、実際の化学プラントにおける混合操作は、乱流状態で流れる低粘度の本流に高粘性流体を混合することがしばしばある。この場合には、高粘性流体は管断面で縞状ではなく、塊となって存在することが多く、彼らの評価方法は適用できない。すなわち、乱流状態でも適用可能な混合特性の評価方法が必要になる。

1. 5 エレメント積層構造の攪拌・混合操作への応用

1. 2で述べたラモンドスターラーおよび類似形状を有するラモンドナノミキサーの旧タイプであるラモンドミキサーは、図 1-7 に示すように流体が多数の小室間を流通する際に分割・合流され、さらに主流と直角方向の局部流れによるせん断効果に起因するせん断、乱流、渦流、反転効果も加わる高い混合性能を有している。

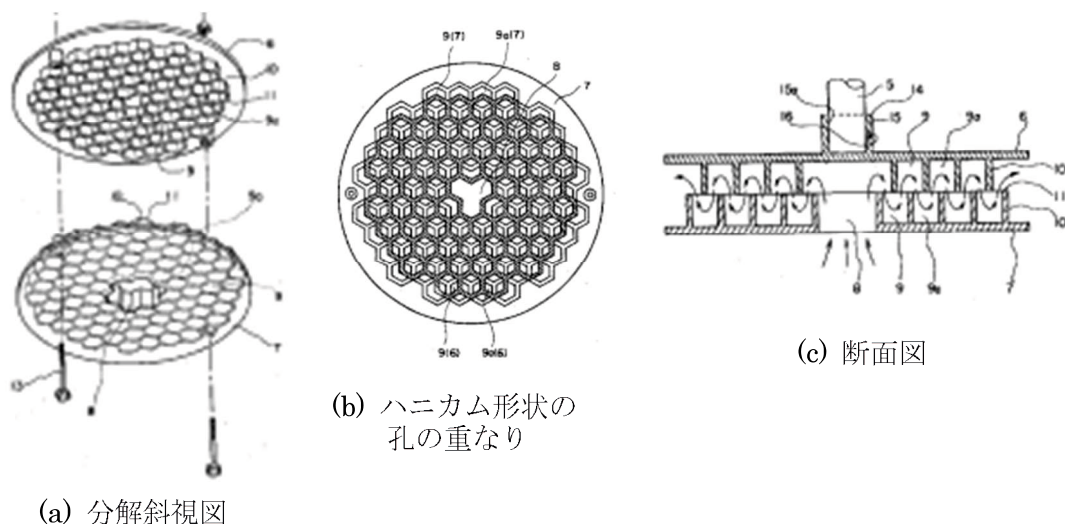


図 1-7 ラモンドミキサー／攪拌翼用途
(特開平 09-303692 号公報より)

しかし、片側にハニカム形状の開放された小室を有する円板が2枚一組で構成されるため、流体は2枚の板に設けられたハニカム形状の小室の間を流通することになり、半径方向に流通する際の流路面積が制限される。これはスタティックミキサーとして使用する場合も同様であり、図1-8のようにミキサーを直列にして混合度の向上を図ろうとすると、圧力損失の増大を招く。

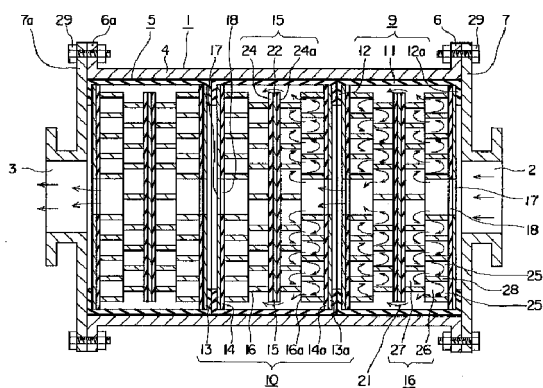


図1-8 ラモンドミキサー／スタティックミキサー用途
(特開平 11-9980 公報より)

これに対し、著者は図1-9に示す2種類の混合エレメントを積層した多段積層エレメント(MSE; **M**ulti **S**tacked **E**lements、以下、「MSE」とする。)構造を持つMSEミキサーを基本構成とする攪拌翼とスタティックミキサーを新たに考案した。2種類の混合エレメントの内の、一方の混合エレメントAは外周部の小貫通孔が開放され、内周部の小貫通孔は閉じている。他方、混合エレメントBは外周部の小貫通孔が閉じており、内周部の小貫通孔

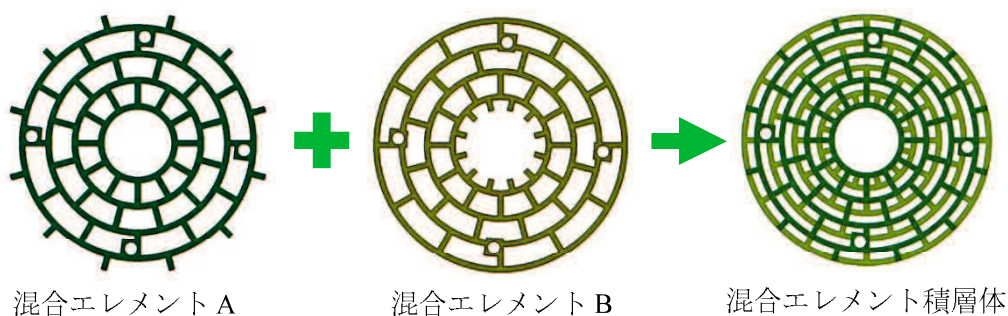
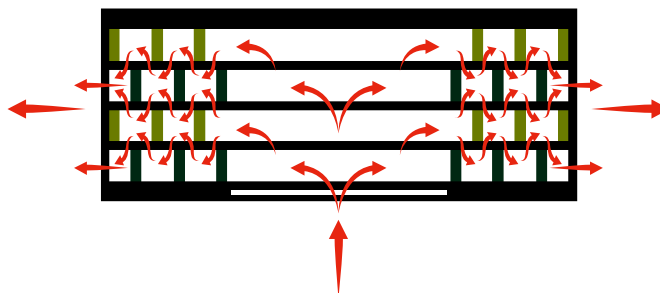


図1-9 混合エレメント

は開放されている。また、両混合エレメントはともに中央に大きな貫通孔を有する。小貫通孔の円周方向の仕切壁は互いに重ならないように配置されているために、図 1-10 に示すように、混合エレメント A および B を積層した混合エレメント積層体においては、流体は積層体内部を内周部から外周部へ、または、外周部から内周部へ流通する。一方、半径方向の仕切壁は、流体が内周部から外周部や外周部から内周部へ流通する際に、連通する小貫通孔間で分割・合流されるように配置されている。このように、混合エレメントが多重に積層され、流体が各混合エレメントの貫通孔により形成された複雑な流路を流通するため、図中(a) および(b)に示すように、流体は半径方向だけでなく積層方向に立体的・三次元的に分割・合流され、さらにせん断作用等により混合されるため、高い混合効果が期待される。

(a) 積層方向の流体流れ



(b) 半径方向の流体流れ

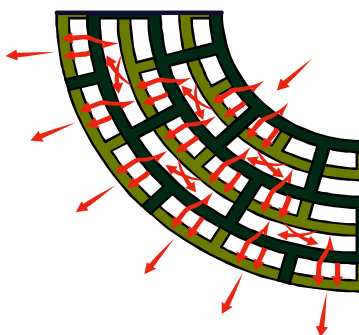


図 1-10 MSE ミキサー内部の流体流れ

MSE 翼を図 1-11 に示した。MSE 翼は多数の貫通孔を設けた 2 種類の混合エレメントと円形状の平板より構成されている。図は混合エレメントを 6 枚積層し、円形状の平板をリング板として混合エレメント積層体を挟持したものである。

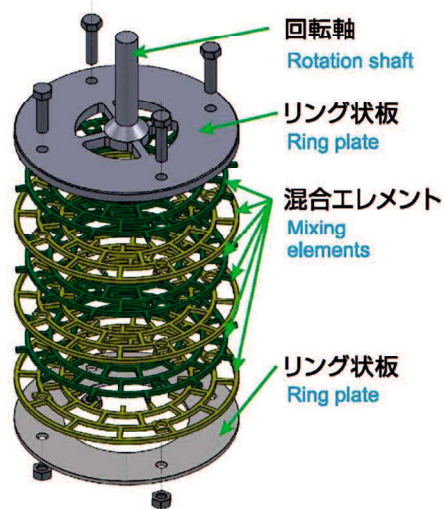


図 1-11 MSE 翼

混合エレメント積層体内部では、混合エレメントの貫通孔が連通して形成された複雑な流路内で流体の分割・合流が繰り返され、さらに、せん断等の作用により混合されるため、従来の攪拌翼と比較してせん断場における翼内混合という点で高い混合性能が期待できる。また、攪拌槽中央部の流体を中空部から吸い込むため、固体的回転部やドーナツ型の渦の発生を機構的に抑制することができ、あるいは混合エレメントの直径、貫通孔の形状、分割形態、積層枚数を変更することができる。さらに、通常の攪拌翼は回転方向に対して垂直に位置する板状の羽根を流体内で回転させるので、羽根に大きな力がランダムに作用して回転軸が振動しやすいが、MSE 翼は中空部を有する略円柱状の物体が回転しているだけであるため、回転軸は振動し難い。

流体は混合エレメント積層体内部に形成された複雑な流路を流通するので、流体同士の接触回数および接触面積が増加することにより、反応系や培養系の攪拌に適していることが考えられる。また、翼面積が羽根タイプのもものと比較して格段に大きいので、同じ動力を与えた場合に単位面積あたりに流体に与える動力が小さくなり、この点でマイルドな攪拌が要求されることが多い酵母や細胞の培養に適していると考えられる。

MSE 翼と同様に混合エレメント積層体を基本構造とする MSE スタティックミキサーを図 1-12 に示した。中央に貫通孔を有する中間板の左右に2種類の混合エレメントを積層し、その両端にブラインド板を配置している。流体は混合エレメント積層体内部を流通する際に、複雑に連通する流路を半径方向と積層方向に、分割・合流、およびせん断等を繰り返すことにより混合される。我が国で広く使用されているケニックス型スタティック

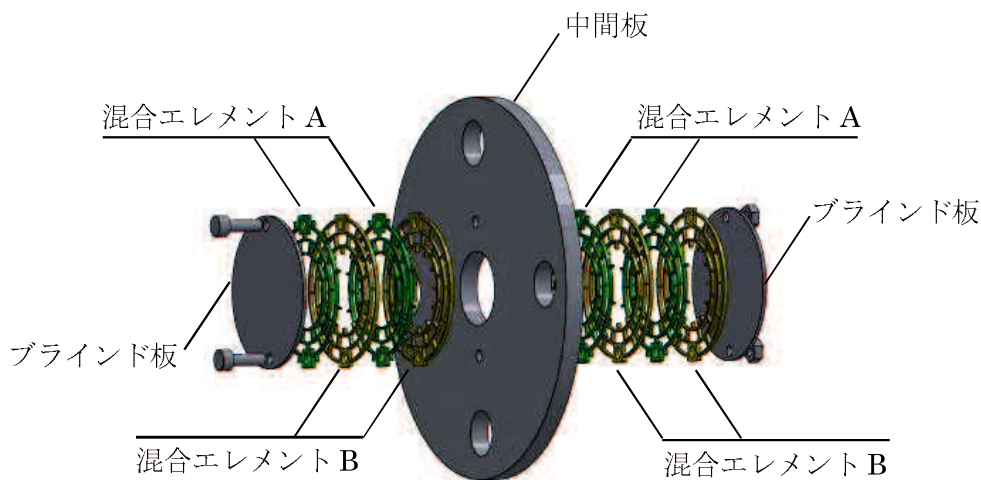


図 1-12 MSE スタティックミキサー

ミキサーが、配管断面視で流体を二分する混合エレメントにより平面的・二次元的に流体を分割・合流、反転、転換等させて混合するのに対して、MSE スタティックミキサーは半径方向と積層方向に立体的・三次元的に流体を分割・合流、せん断等により混合するので、ケニックス型スタティックミキサーと比較して混合性能が高いことが予想される。また、供給される流体の流量が増加した場合には、積層体内部の複雑な連通路路によるせん断力が大きくなって、さらに混合が促進されると考えられる。一方、混合エレメント積層枚数や貫通孔のサイズ、配置パターンを変更して、圧力損失や混合特性を変えることも可能である。材質面では、構成部品である混合エレメント、ブラインド板、中間板はいずれも製作容易な単純な形状であるため、金属、プラスチック、セラミックス等種々の材料で製作することが可能である。

1. 6 本研究の目的と本論文の構成

本研究は、様々な産業で広く利用されている単位操作の一つである「混合・攪拌」について、新しい混合・攪拌装置（デバイス）を開発してその基本的特性および混合特性を評価し、特にスタティックミキサーの混合特性については、新たな評価方法を提案し、標準化することを目的とした。新しいデバイスは、上述したように2種類の混合エレメントを複数枚積層することによって、複雑な流路を形成させた多重積層エレメント構造のアイデアを適用したもので、従来の攪拌翼やスタティックミキサーとは異なるデバイス内部の流れを積極的に利用したものである。

新しい攪拌翼やスタティックミキサーを開発するにあたっては、既存技術と比較して基本特性においてそれらがどのような差異を示すかを提示しなければならない。従って、本研究では、攪拌翼についての基本特性である攪拌所要動力を測定し、翼特有の形状が攪拌所要動力に与える影響を整理し、翼周りの流動状態を示すことを目的とする。スタティックミキサーについては、基本特性である圧力損失を測定し、ミキサー特有の形状が圧力損失に与える影響を整理する。さらに、これまで乱流域におけるスタティックミキサーの混合性能の評価方法が確立されていないという現状に鑑み、これを定量的に評価できる方法を提案することを目的とする。以上のように、本研究は、多重積層エレメント構造内部の流れを積極的に利用した新しい混合・攪拌装置の開発であり、その混合特性を明確にし、評価方法を提案して標準化することを意図する。そのために、具体的には以下に示す項目について検討する。

(1) MSE 翼について、攪拌所要動力を測定し、汎用の攪拌翼との差異を明確にする。次に同じ攪拌所要動力における混合時間を測定し、汎用攪拌翼に対する差異について評価する。また、MSE 翼の設計因子が攪拌所要動力に与える影響について検討し、MSE 翼周りの流動状態を攪拌所要動力および流動解析の両面から検討する。さらに、より直接的に MSE 翼周りの流動状態を確認するために、PIV により攪拌槽内の流動状態を可視化して明らかにする。

(2) MSE スタティックミキサーについて、混合エレメントの形状や積層方法が圧力損失に与える影響を測定し、比較対象の汎用スタティックミキサーとの差異を評価する。また、流動解析ソフトウェアにより内部の解析を行い、流動状態を明らかにする。

(3) スタティックミキサーの混合特性の評価について、従来は層流域を対象としたものに留まっていたものを、本研究では乱流域を対象とし、その実験手法と混合特性の評価方法を開発する。

(4) MSE スタティックミキサーと汎用スタティックミキサーを対象に、主流体である水流中へ蛍光物質を含む注入流体を注入して、混合された流体の管断面画像に対し、混合評価を特徴づける指標を定義することによってスタティックミキサーの混合特性を定量的に評価する。また、注入流体の物性を変えた場合について、提案する評価方法の妥当性を検証する。

本論文の構成を図 1-13 に示した。第 1 章を序論とし、混合・攪拌操作の重要性について解説し、攪拌翼とスタティックミキサーについて、その特徴やメリットおよび工学的な特徴を述べる。次に、多重積層エレメントを基本構造とする MSE 翼および MSE スタティックミキサーの構造について説明し、予想される混合性能の向上について述べる。さらに、従来

の研究報告の検討結果から、スタティックミキサーの定量的な評価方法の提案が必要であることを述べる。以上より、本研究の意図と特徴を述べ、明らかにすべき項目と各章の構成を説明する。第2章では、MSE 翼について、汎用の攪拌翼を比較対象として、基本特性における差異を示し、MSE 翼特有の設計因子の影響を整理する。さらに、流動解析ソフトウェアおよび粒子画像流速測定法 (PIV) により翼周りの流動状態を考察する。第3章では、MSE スタティックミキサーの圧力損失を測定し、汎用スタティックミキサーとの差異を評価する。さらに、流動解析ソフトウェアによる解析結果と圧力損失測定結果に基づき、MSE スタティックミキサー内部の流動状態を考察する。第4章では、スタティックミキサーの混合特性を評価する5つの指標を定義する。そして、混合流体の管断面画像を解析して、定義した指標によりスタティックミキサーの混合特性を定量的に評価する。さらに、物性の異なる注入流体についても評価する。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、BDF 製造装置への適用および攪拌子への応用、排水処理用液体凝集剤の希釈について第2章から第4章の内容と関連付けてそのメリットを明らかにし、また、経済産業省の新市場創造型標準化制度による混合性能の評価方法の JIS 制定について述べる。最後に、第6章において、本研究をまとめて結論とする。

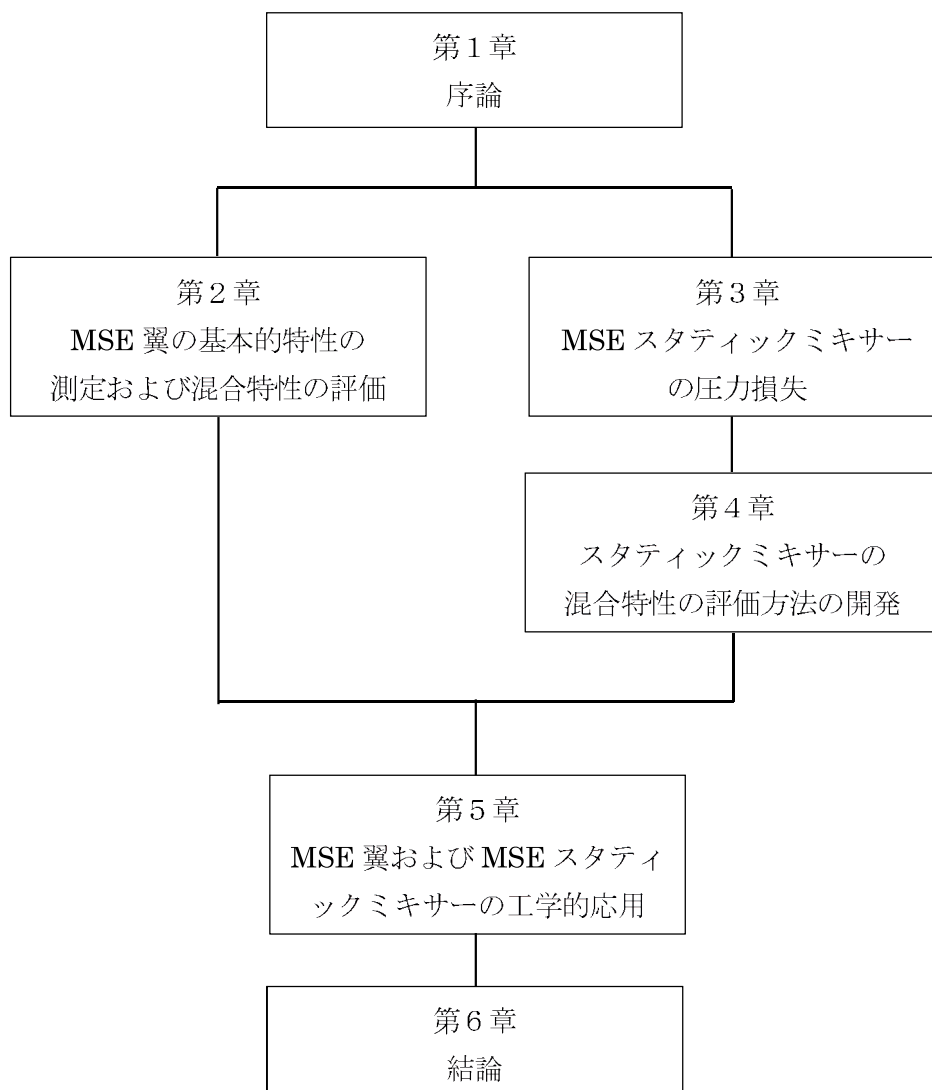


図 1-13 本論文の構成

1. 7 本研究の意義と工学的応用

本研究の学問的意義は2つあり、第1番目は、従来は存在しなかった多重積層エレメント構造により形成される複雑流路内部の流れを積極的に利用した攪拌翼およびスタティックミキサーを開発し、その混合特性を整理して明らかにした点にある。第2番目は、スタティックミキサーの混合特性の評価方法について、従来はエマルション生成における粒度分布や、層流域における混合流体の可視化断面画像から縞模様の幅や面積、標準偏差により評価していたものを、可視化断面画像を濃度情報を含むデジタルデータ化して複数の評価指標に数値化し、当該評価指標により物性の異なる流体を注入した場合の評価も検証して、評価方法を標準化した点にある。なお、本混合特性の測定方法は、平成27年度の経済産業省「新市場創造型標準化制度」に採択され、平成29年度のJIS制定を目標として事業が進められている。

工学的応用という点では、MSE翼について、BDF製造装置におけるメチルエステル化反応率の向上が確認されたことが、多重積層エレメント構造による複雑流路内部の流れを積極的に利用した翼内混合という新たな考えに基づく翼の可能性を示唆しており、反応系や培養系の攪拌に拓がることが期待される。また、MSE翼を応用したMSE攪拌子は、既に細胞培養の研究に使用され、従来の攪拌子では不可能な流動特性を与えることで新たな効果が期待されており、翼内混合の意義を工学的にアプローチするための事例を示したという点で価値がある。MSEスタティックミキサーについては、多重積層エレメント構造内部に形成された複雑流路による流体の静的混合の促進を、混合特性の評価指標により定量的に確認し、使用に際しての指標となる圧力損失とともに示した点で、今後の利用についての指針を示すものであり、この点で工学的価値がある。また、スタティックミキサーの混合特性の評価方法は、異なるスタティックミキサー間の混合特性の評価や、内部充填物の仕様の差異による混合特性の評価、流体の流速等の混合条件の差異による混合特性の評価等、様々な目的に適用できるという点で意義がある。

本研究は、多重積層エレメント構造により形成される複雑流路内部の流れを積極的に活用したデバイスを開発して、それらの混合特性を明らかにし、そして混合特性の評価方法を提案するものである。

1. 8 主要記号

B	8ビット符号なし正数(青)	[-]
CoV	変動係数	[-]
d	攪拌翼の外径	[mm]
D_{10}	10%粒子径	[m]
D_{50}	メジアン径	[m]
D_{90}	90%粒子径	[m]
Dev	偏在度	[-]
G'	動的弾性率	[Pa]
G''	損失弾性率	[Pa]
L	全画面に対する濃厚塊の大きさの割合	[%]
M	混合度	[%]
n	回転数	[rpm]
$n(R)$	R の画素数	[-]
$n'(R)$	R の画素数のべき乗の数	[-]
N_p	動力数	[-]
P	攪拌所要動力	[W]
R	赤の輝度値	[-]
Re	レイノルズ数	[-]
R_{max}	R の最大値	[-]
R_{med}	R の中央輝度	[-]
R_l	蛍光画素のしきい値	[-]
$R_{l,l}$	濃厚塊のしきい値	[-]
R'_{max}	R の最大輝度	[-]
T	攪拌トルク	[N·m]
u	流速	[m/s]
ΔP	圧力損失	[MPa]
x	蛍光画素のx座標	[-]
y	蛍光画素のy座標	[-]
$\dot{\gamma}$	せん断速度	[1/s]
η	見かけ粘度	[Pa·s]
μ	粘度	[Pa·s]
ρ	密度	[kg/m ³]
ω	角速度	[rad/s]

第2章 MSE 翼の基本特性の測定および混合特性の評価

2. 1 緒言

MSE 翼は2種類の多孔板状の混合エレメントにより構成される積層体をリング状の板で挟持したものである。MSE 翼を攪拌槽内で回転させると、遠心力により積層体内部に保持された流体が翼外周部へ吐出されるため、図 2-1 に示すように攪拌槽内の流体が翼中央の中空部へ流入し、翼内部、すなわち混合エレメント積層体内部へ流入する。そして、流体は混合エレメント積層体内部を内周部から外周部へ流通する際に、複雑に連通する混合エレメントの貫通孔間を半径方向および積層方向に三次元的に分割・合流を繰り返し、さらにはせん断、乱流、渦流、反転によって混合される。積層方向の分割・合流については図 1-10(a)に示した通りであるが、半径方向については回転により貫通孔同士の相対的な位置がずれるため、図 1-10(b)に示したものより複雑な流動状態になる。

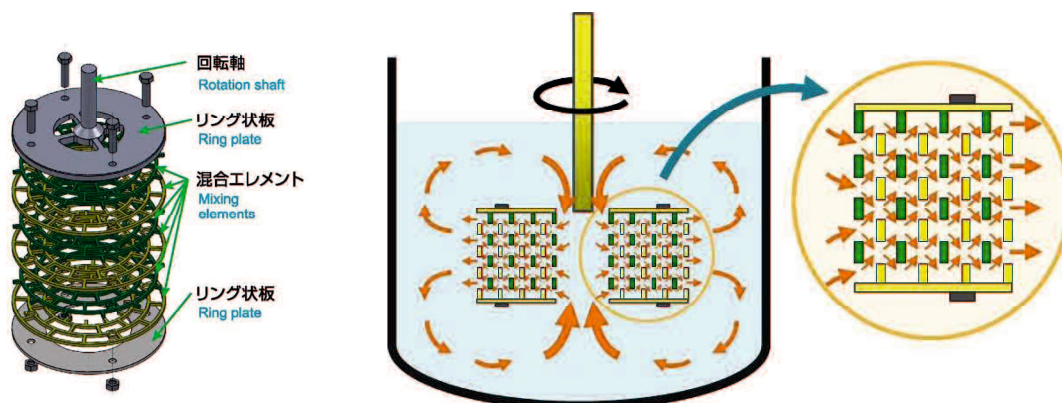


図 2-1 MSE 翼周りおよび内部の流動状態

本章では、MSE 翼について、基礎データの測定および流動解析によりその特性を明らかにすることを目的とした。最初に、MSE 翼と従来型攪拌翼について攪拌所要動力および混合時間を測定することにより、MSE 翼の混合特性を従来型攪拌翼との比較において明らかにすることを目的とした。次いで、内径や孔サイズ等の設計因子を変更した MSE 翼の攪拌所要動力の測定結果について、流動解析ソフトウェアによる攪拌翼内部や周辺部の解析結果、さらに PIV を使用した流動状況の観察結果もあわせて多面的に検討し、MSE 翼特有の

形状が流動状態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 2 MSE 翼の基本特性および混合特性

2.2.1 攪拌所要動力

流体を攪拌翼で攪拌するためには、翼が取り付けられている軸に負荷トルク T を与えることが必要である。トルク T は軸中心からの距離と接線方向の力の積で表され、攪拌所要動力 P は T と軸の回転速度 N から求められる。 P の単位は[W]であり、攪拌所要動力と呼ばれる。

攪拌所要動力は、所定の攪拌装置において攪拌翼が流体に与えることのできるエネルギーを表す指標であり、槽内の流れ状態をも反映した攪拌装置の特性値であるため、攪拌装置の基礎データとして重要である。そこで本研究では攪拌所要動力について、①平羽根ディスクタービン翼 (FBDT : Flat Blade Disk Turbine、以下、FBDT 翼と呼ぶ。) を比較対象とした MSE 翼と、②混合エレメントの積層枚数や形状を変えた MSE 翼についての 2 種類の測定を行った。

攪拌所要動力 P [W] は以下の式から求められる。

$$P = 2\pi nT / 60 \quad (1)$$

T は攪拌トルク [N・m]、 n は回転数 [rpm] である。攪拌所要動力の無次元数である動力数 N_p [-] は以下の式で表される。

$$N_p = P / \rho n^3 d^5 \quad (2)$$

ρ は流体の密度 [kg/m³] であり、 d は攪拌翼の外径 [m] である。また、攪拌レイノルズ数 Re [-] は以下の式で求められる。

$$Re = nd^2\rho / \mu \quad (3)$$

μ は攪拌流体の粘度 [Pa・s] である。

MSE 翼と FBDT 翼との攪拌所要動力の比較については、試験流体としてグリセリンを使用し、水で希釈して濃度を調整した。グリセリン水溶液の密度と粘度はピクノメータと共軸二重円筒型粘度計 (Rheologia A-300、エルクエスト社) でそれぞれ測定し、その結果を

表 2-1 に示した。

表 2-1 使用したグリセリン溶液の密度と粘度 (25°C)

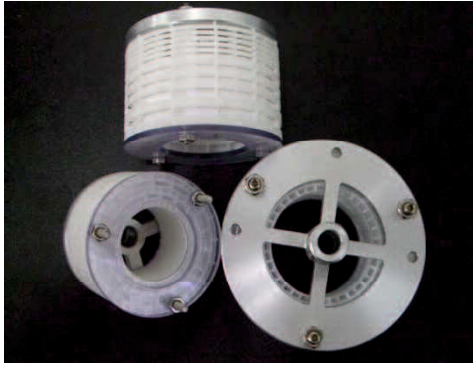
グリセリン濃度 [wt%]	密度 ρ [kg/m ³]	粘度 μ [mPa·s]
100	1259	909.1
95	1243	344.7
90	1227	156.8
80	1196	44.7

表 2-2 に実験に使用した攪拌槽、FBDT 翼および MSE 翼の仕様を示した。

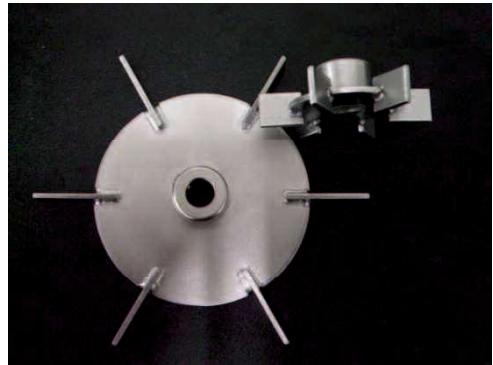
表 2-2 実験に使用した攪拌槽と攪拌翼

攪拌槽	FBDT 翼			MSE 翼		
	外径 d [mm]	翼高さ b [mm]	羽根枚数 n_p [-]	外径 d [mm]	高さ b [mm]	エレメント 積層枚数 [-]
100	50	10	6	50	36	12
150	75	10	6	75	33	6

攪拌槽は内径が 100 mm と 150 mm の平底円筒槽を用い、試験流体の液深は槽径と等しくし、攪拌軸は槽の中心と同じ位置に配置した。また、各攪拌翼の高さ方向中央が液深の 1/2 になるように設置した。図 2-2 にそれぞれの翼の外観写真を示し、図 2-3 に外径 50 mm の MSE 翼、図 2-4 に外径 75 mm の MSE 翼を構成する混合エレメントおよび積層状態の図面を示した。



MSE 翼



FBBDT 翼

図 2-2 実験に使用した MSE 翼および FBBDT 翼

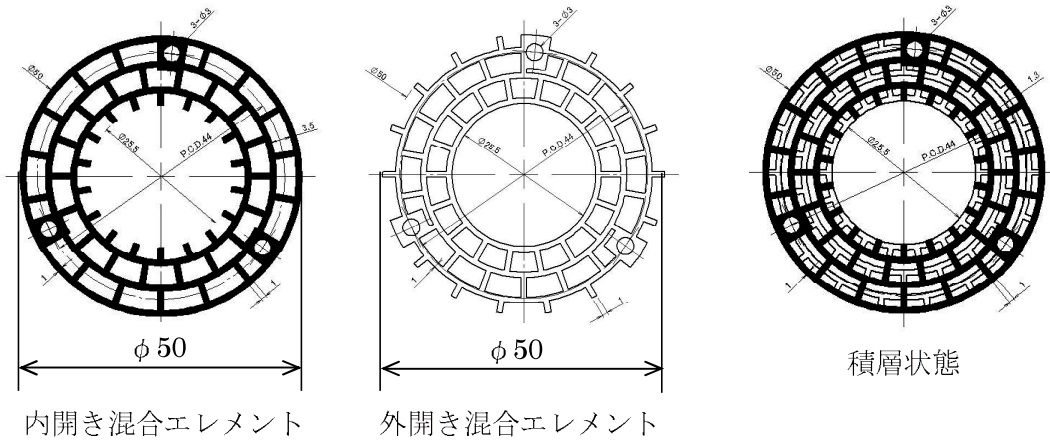


図 2-3 外径 50 mm の MSE 翼

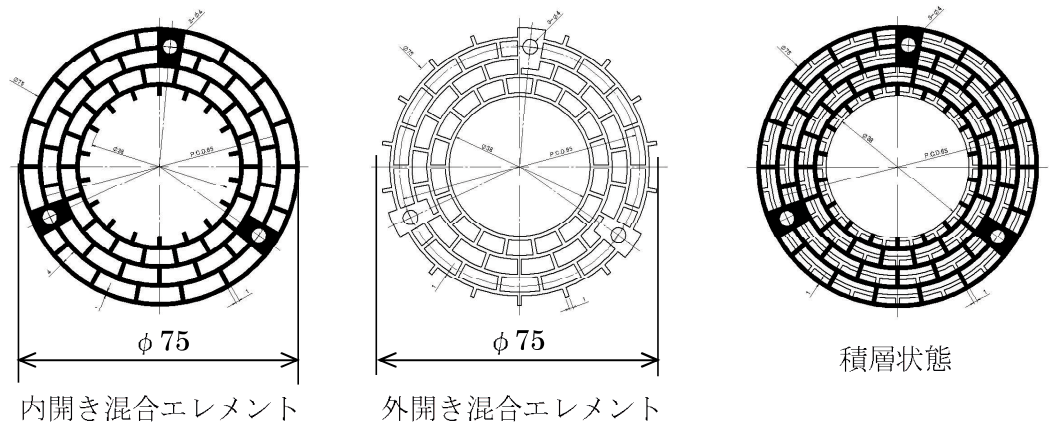


図 2-4 外径 75 mm の MSE 翼

図 2-5 は実験に使用した攪拌所要動力の測定装置の外観である。回転系はサーボシステムとモーター（富士サーボシステム：Digital ES；RYE.20P と ES Motor；GRK2200K、富士電気(株)）で構成されており、変速モーターを任意の回転数で定速回転させ、トルクを同システムからの出力信号（電圧）から得た。

試験溶液を入れない状態で攪拌翼を回転させ、軸受けの摩擦によるトルク損失を求め、試験流体を使用した実験で得られたトルクからこの値を差し引いた。なお、攪拌翼を回転させていない状態でも指示値が 0 にならない（オフセット値がある）ことがあり、これを差し引いた。回転数とトルクは定速回転においても変動したため、最小値と最大値を読み取り、この平均値を測定値として記録した。

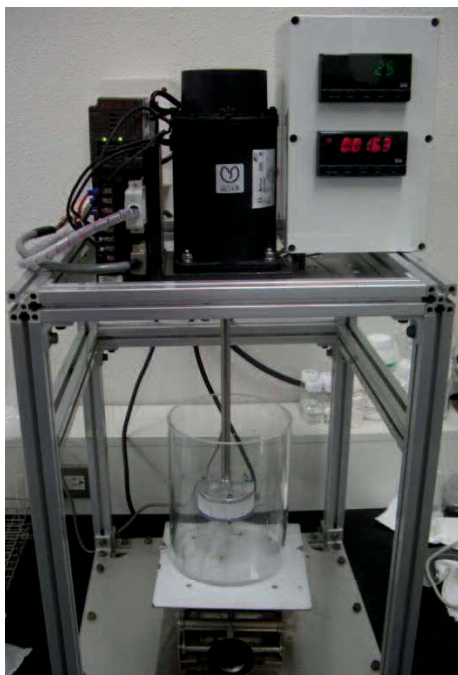


図 2-5 攪拌所要動力の測定装置（翼外径 50 mm、75 mm 用）

MSE 翼の形状を変えたものの攪拌所要動力の測定については、試験流体として水を使用し、図 2-6 に示す実験装置を使用した。アルミフレーム製筐体にモーターおよびトルクメーター（UTM-3Nm、ユニパルス(株)）を取り付け、トルクメーターの先端に攪拌翼を取り付けた。モーターとトルクメーターはフレキシブルのカップリングで、トルクメーターと攪拌翼はリジッドの摩擦締結具により締結している。攪拌槽は透明アクリル製の平底タイプで、昇降台により昇降が可能な構造とした。

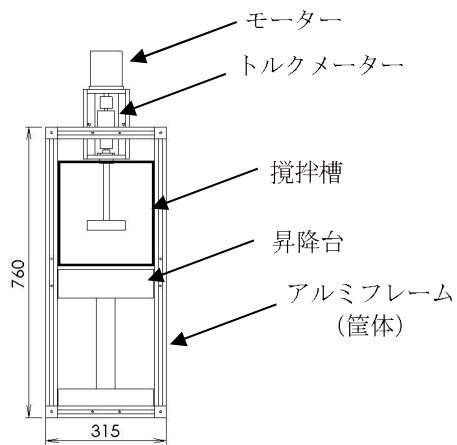


図 2-6 攪拌所要動力の測定装置（翼外径 100 mm 用）

表 2-3 に測定に使用した攪拌槽の詳細について示した。

表 2-3 攪拌槽緒元

材質	透明アクリル
攪拌槽内径	200 mm
攪拌槽高さ	250 mm
測定対象液	水 @ 常温
液深	200 mm
邪魔板	20 mm 幅×4 枚
底板形状	平底

攪拌開始後に、トルクメーターからの出力信号をデジタル記録計（TR-V500、榊キーエンス）に取り込み、これらの平均値をトルクの測定値とした。

表 2-4 は、形状を変えた MSE 翼と比較対象として使用した FBDT 翼についてまとめたものである。

表 2-4 実験に使用した攪拌翼

混合エレメント 形状	外径	内径	枚数	周方向 分割数	半径方 向孔長 さ	厚さ	段数 (*1)	半径方向 孔重なり	積層 パターン
	mm	mm	—	—	mm	mm	—	mm	—
MS1-1	100	49	12	18	6	2	3.5	2.5	6*(A+B)
MS1-2	100	49	18	18	6	2	3.5	2.5	9*(A+B)
MS1-3	100	49	20	18	6	2	3.5	2.5	10*(A+B)
MS1-4	100	49	24	18	6	2	3.5	2.5	12*(A+B)
MS2-1	100	49	6(6)	18	6	2	3.5	2.5	3*(A+B)
MS2-2	100	49	12(6)	18	6	2*2	3.5	2.5	3*(2A+2B)
MS2-3	100	49	18(6)	18	6	2*3	3.5	2.5	3*(3A+3B)
MS2-4	100	49	24(6)	18	6	2*4	3.5	2.5	3*(4A+4B)
MS3-1	100	48	20	18	9	2	2.5	4	10*(A+B)
MS3-2	100	50	20	18	15	2	1.5	7	10*(A+B)
MS4-1	100	56	20	18	5	2	3.5	2.0	10*(A+B)
MS4-2	100	63	20	18	4	2	3.5	1.5	10*(A+B)
MS5-1	100	63	20	18	6	2	2.5	2.5	10*(A+B)
MS5-2	100	77	20	18	6	2	1.5	2.5	10*(A+B)
MS6-1	100	49	20	12	6	2	3.5	2.5	10*(A+B)
MS6-2	100	49	20	24	6	2	3.5	2.5	10*(A+B)
MS6-3	100	49	20	32	6	2	3.5	2.5	10*(A+B)
DL	100	—	6(*2)	—	—	20(*3)	—	—	FBDT 翼
DS	100	—	6(*2)	—	—	10(*3)	—	—	

* 1 : 段数とは MSE 翼内での分割および合流の回数をいい、1 段は 1 回の分割および 1 回の合流で構成される。

* 2 : 羽根枚数を意味する。

* 3 : 羽根幅を意味する。

図 2-7 に、MS1-1~1-4 および MS2-1~2-4 に使用した MSE 翼を構成する混合エレメントおよびその積層状態の平面図を示した。MS1-1~1-4 および MS2-1~2-4 については、外径、内径、周方向分割数、半径方向孔長さ、段数がすべて同じ混合エレメントを積層した MSE 翼であり、各々においては混合エレメントの積層枚数または積層パターンが異なる。図に示した混合エレメントを「基準混合エレメント」とし、これから内径等を変更して各因子がどのように MSE 翼の混合特性に影響するかについて検討した。

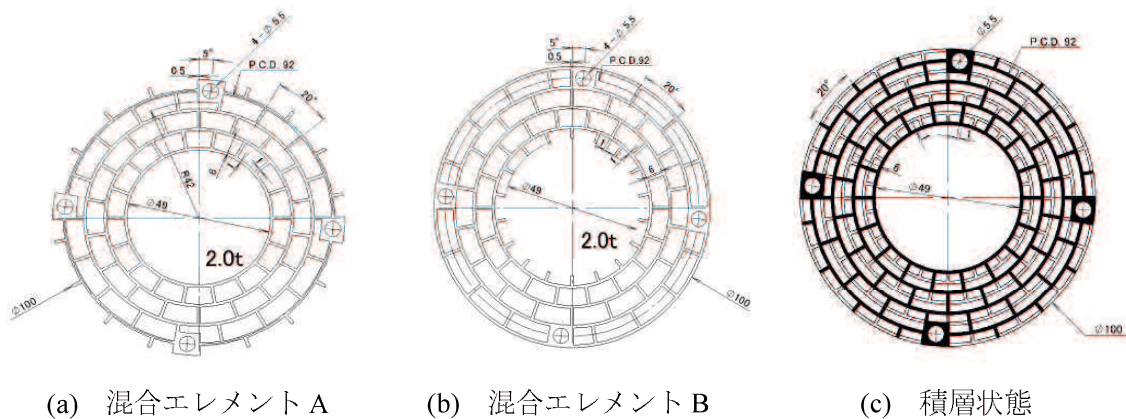


図 2-7 MS1-1~1-4、MS2-1~2-4 混合エレメント（基準混合エレメント）平面図

2.2.2 MSE翼周辺の流れの可視化

MSE翼では翼の回転による遠心力により内部の流体は翼の外周へと移動し、それにともない翼中心部に上昇流や下降流が発生していると考えられる。このような攪拌による流動状況を明らかにすることは、翼の特性評価には重要であり、さらに翼の使用条件の最適化にも有用である。

測定手法は、シート状の光源を流れ場に照射し、二次元の観察断面のイメージを取得する粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry ; PIV）を用いた。この方法では、トレーサーの輝度から注入流体の濃度を捉え、一定時間間隔でイメージを採取して、トレーサーの軌跡を追尾することによって、その時間間隔における粒子の移動距離が求められる。時間間隔は流動特性を捉えるに十分であり、かつ可視化可能な程度に設定する必要がある。この状況を満たす測定によって、複雑な流路における流れの速度ベクトルを得ることができる。

図2-8に、攪拌槽内の可視化装置を示した。100 mm角の透明アクリル製攪拌槽を用い、直径50 mmのMSE翼を使用した。試験流体は100 wt%グリセリンとし、回転数は400 rpmとした。グリセリン中に含まれる微細な気泡の存在により、トレーサーとして粒子を加えることなくPIV解析を行うことができた。攪拌槽の底部よりグリーンレーザー（波長：532 nm，出力：5 mW，カトウ光研㈱）のシート光を照射し、流動状態を水平方向から取り付けた高速度カメラ（MEMRECAM fx-K3, nac）で撮影した。撮影条件は1秒間に1000フレームとした。取得したイメージを流動解析ソフトウェア（FlowExpert, カトウ光研㈱）で画像処理し、速度ベクトルを得た。

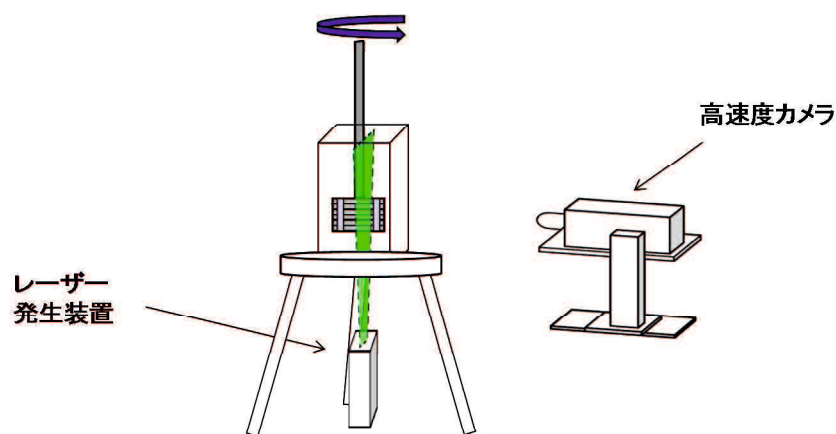


図2-8 攪拌槽内の可視化装置

2.2.3 MSE 翼の混合特性の評価

2種類の攪拌翼を比較する場合、同一回転数で攪拌所要動力が大きいことは、攪拌効果という面で攪拌翼のメリットとなる。しかし、流体に加えられたエネルギー全てが有効に流体の混合に消費されるわけではないので、翼による流体の混合特性を評価する指標が必要となり、一般に混合時間が用いられる。これは攪拌槽内の試験流体の温度や濃度が不均一な状態を作り出し、これが攪拌によって均一になる時間を流体の物性や可視化によって測定する。これには流体に塩化ナトリウムを添加することにより溶解とともに電気伝導度が上昇し、やがて一定値を示すことを利用する方法がある。また、ヨウ素とチオ硫酸ナトリウムを不均一に添加し、褐色が透明に脱色していく時間を計測する方法もしばしば適用される。本研究では、電気伝導度による方法を採用し、MSE翼の混合特性をFBDT翼と比較して評価した。

図2-9に実験装置の概要を示した。電気伝導度計 (ES-51, HORIBA) のセンサー部を電極が浸析する深さで固定した。実験は塩化ナトリウムを添加した時間をゼロとし、1秒間隔ごとに測定した電気伝導度をパソコンに記録した。試験流体としては80 wt%と90 wt%のグリセリン水溶液を用いた。攪拌槽は内径100 mmのものを用い、液深は槽径と同じ100 mmとした。20°Cにおける塩化ナトリウムの溶解度は26.39 g/100 g-水であり、攪拌槽内の水容積785.4 mLの90 wt%グリセリン溶液中に含まれる水の量78.54 mLに対して飽和溶液になる20.72 gより少なく、かつ電気伝導度計で精度良く均一混合を測定できる量を検討し、塩化ナトリウムを0.5~1 g添加した。なお、異なる攪拌翼の混合時間を比較する場合は、翼

から液体へ伝達されるエネルギーを等しくする必要があるので、比較する両翼の攪拌所要動力が等しくなる条件での測定が必要である。表2-5にMSE翼とFBDT翼の攪拌所要動力を同程度としたときの回転数を示した。

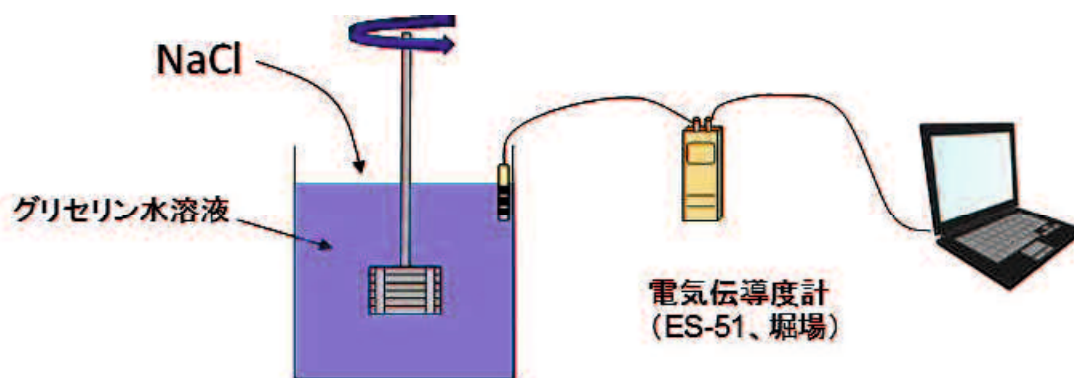


図2-9 電気伝導度による混合時間の測定装置

表 2-5 混合時間測定における MSE 翼と FBDT 翼の攪拌条件 (18°C)

グリセリン溶液	MSE 翼	FBDT 翼
80 wt%	300 rpm (0.043 W)	300 rpm (0.043 W)
90 wt%	400 rpm (0.274 W)	500 rpm (0.258 W)

2.2.4 MSE 翼および翼周辺の流動解析

MSE 翼内部では、流体は分割・合流およびせん断等を繰り返すため、翼内部を通過する流量が多いほど混合効率が高くなると考えられる。一方、MSE 翼には、翼内径・外径、孔サイズ、混合エレメントの厚さ等、設計因子が多数あり、それらの影響は攪拌所要動力の測定により評価することができるが、翼から吐出される流量の測定は容易ではない。そこで、攪拌所要動力の測定実験と同様の条件の下で、熱流体・粉体解析ソフトウェア R-FLOW (株アールフロー) により流動解析を行った。R-FLOW は、基礎方程式としてナビエーストークス方程式、乱流モデルとして標準 $k-\epsilon$ モデルを使用しており、これにより MSE 翼内部の速度ベクトル分布、渦径分布、せん断応力分布および攪拌槽内の循環流量を得た。流動解析の条件を表 2-6 にまとめた。解析対象の翼仕様は、攪拌所要動力の測定対象についての表 2-4 と同じである。

表 2-6 流動解析条件

攪拌槽内径	200 mm
液深	200 mm
邪魔板	20 mm 幅×4 枚
底板形状	平底
測定対象液	水 @ 25°C
翼回転数	400 rpm

2. 3 実験結果および考察

2.3.1 FBDT 翼との比較

内径 100 mm の攪拌槽の内部に外径 50 mm の MSE 翼を設置して異なる濃度のグリセリン溶液を攪拌したときの攪拌所要動力と回転数との関係を図 2-10 に示した。攪拌所要動力は回転数の増加とともに指数関数的に増加した。また、グリセリン濃度（粘度）が高くなるほど動力の絶対値のみならず、回転数に対する動力の増加割合も顕著になっている。

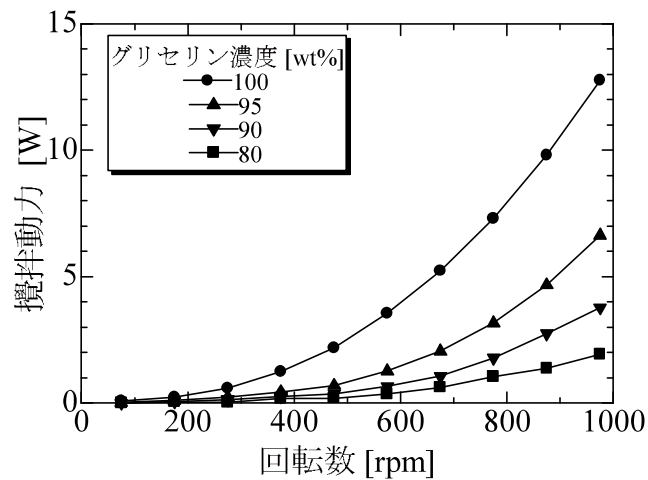


図 2-10 MSE 翼の攪拌所要動力と回転数の関係
(翼外径: 50 mm、槽内径: 100 mm)

グリセリン水溶液中のグリセリン濃度を 100、95、90、80 wt% と変えた場合の MSE 翼と FBDT 翼の回転数と攪拌所要動力の関係をそれぞれ図 2-11～図 2-14 に示した。

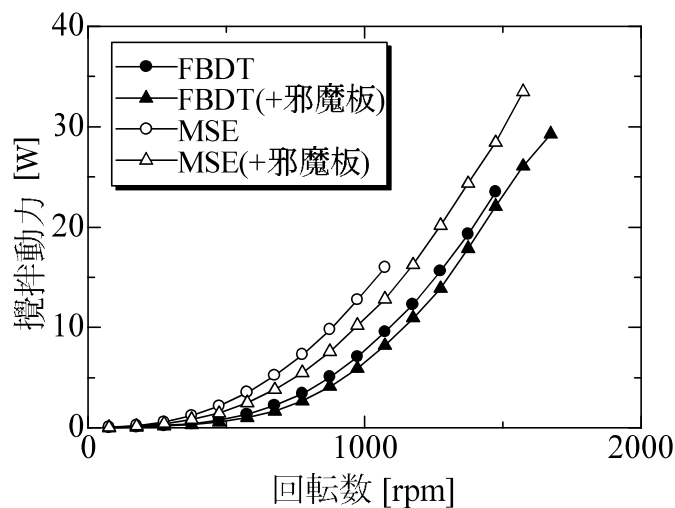


図2-11 グリセリン100 wt%の攪拌所要動力と回転数の関係
(翼外径: 50 mm、槽内径: 100 mm)

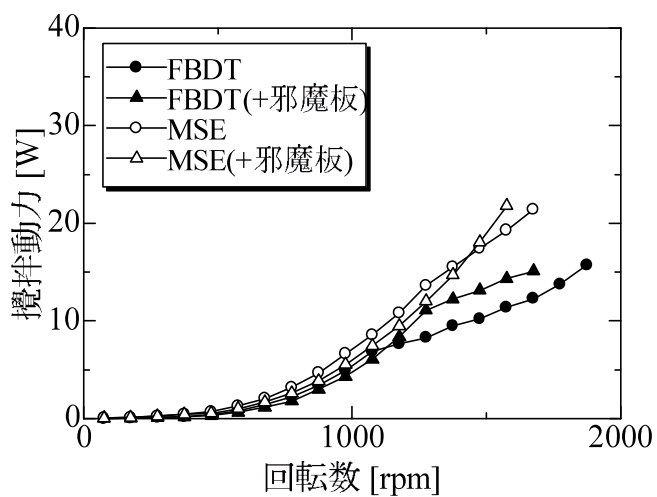


図2-12 グリセリン95 wt%の攪拌所要動力と回転数の関係
(翼外径: 50 mm、槽内径: 100 mm)

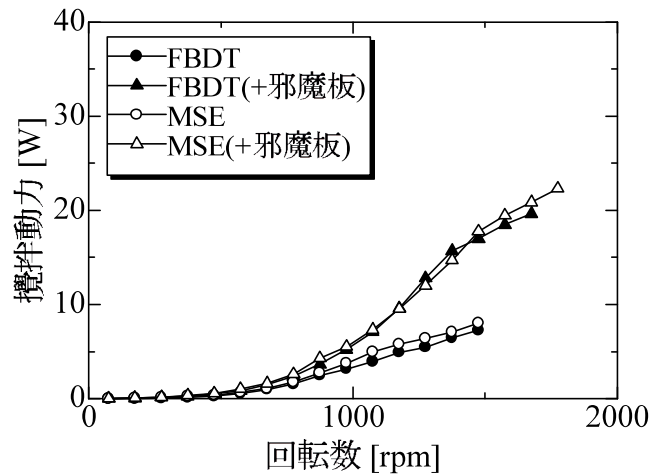


図2-13 グリセリン90 wt%の攪拌所要動力と回転数の関係
(翼外径: 50 mm、槽内径: 100 mm)

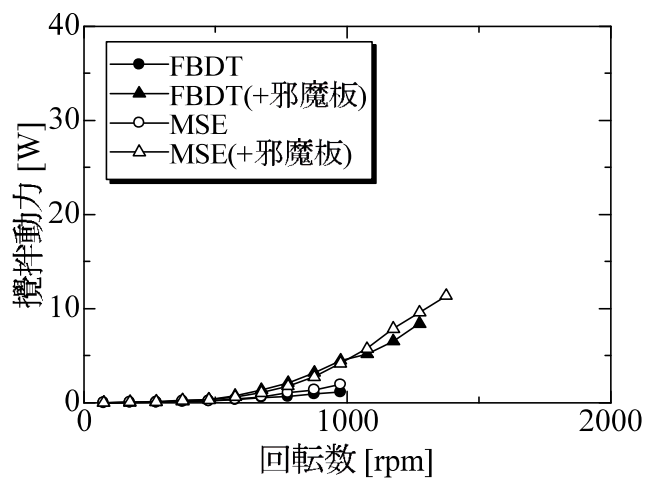


図2-14 グリセリン80 wt%の攪拌所要動力と回転数の関係
(翼外径: 50 mm、槽内径: 100 mm)

これらの図より、MSE翼はFBDT翼より大きな動力を与えていることが分かる。これはMSE翼が同一の回転数で流体に加えることができるエネルギーが大きいことを示している。混合エレメント積層構造内部に形成された複雑流路の流動抵抗により攪拌所要動力が大きくなったものと推定される。

グリセリン濃度が低くなるに従い、MSE翼、FBDT翼共に低回転数における邪魔板の有無による攪拌所要動力の差は小さくなっている。槽内の流れ状況が攪拌所要動力に影響す

るため、単純に邪魔板の有無が所要動力を単調に増加（もしくは減少）させるものではないといえるが、流体の粘性が低くなることにより翼と邪魔板間の摩擦が小さくなって、攪拌所要動力に及ぼす邪魔板の影響が小さくなったものと考えられる。

次に、内径 150 mm の攪拌槽の内部に外径 75 mm の MSE 翼と FBDT 翼を設置して、グリセリン濃度を変えたときの結果を図 2-15～図 2-18 に示した。

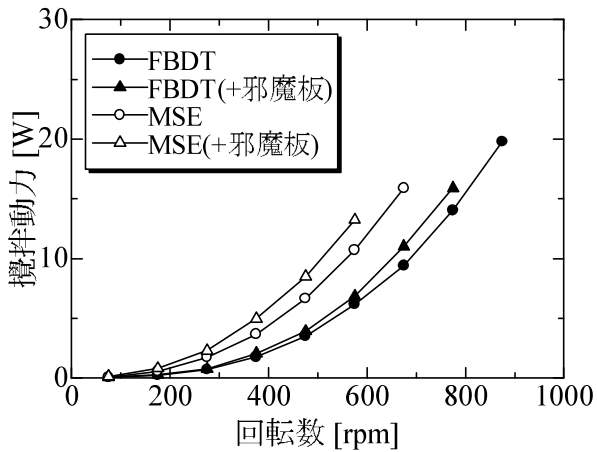


図2-15 グリセリン100 wt%の
攪拌所要動力と回転数の関係
(翼外径: 75 mm、槽内径: 150 mm)

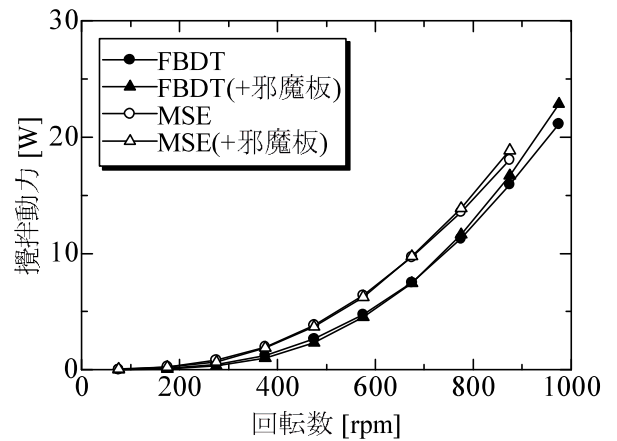


図2-16 グリセリン95 wt%の
攪拌所要動力と回転数の関係
(翼外径: 75 mm、槽内径: 150 mm)

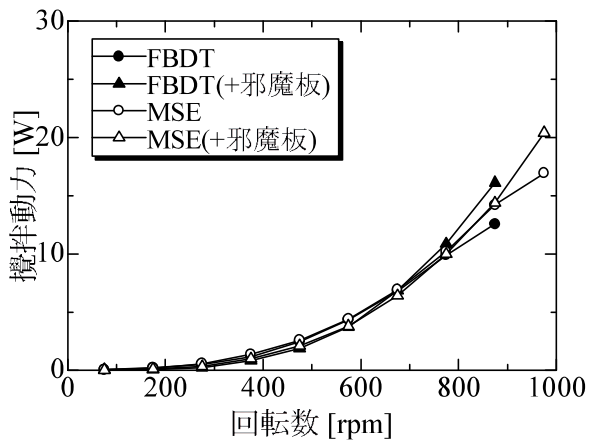


図2-17 グリセリン90 wt%の
攪拌所要動力と回転数の関係
(翼外径: 75 mm、槽内径: 150 mm)

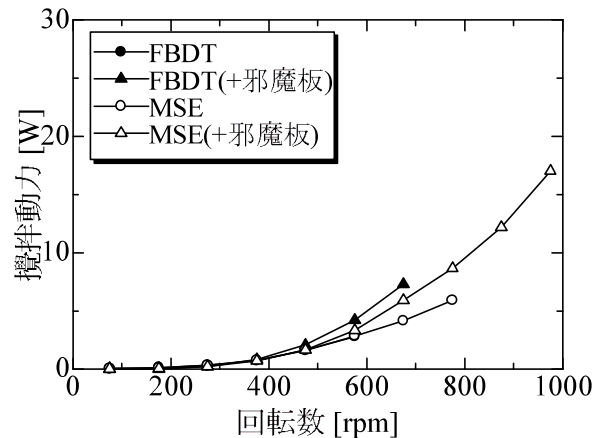


図2-18 グリセリン80 wt%の
攪拌所要動力と回転数の関係
(翼外径: 75 mm、槽内径: 150 mm)

以上の槽内径 100 mm および 150 mm の回転数と攪拌所要動力の関係について、以下の事項が指摘される。

- 1) MSE 翼は混合エレメントの積層枚数を増やすことにより、FBDT 翼より大きな動力を与えることができる。
- 2) 邪魔板の装着によって、MSE 翼、FBDT 翼共に動力は大きくなる。
- 3) グリセリン濃度が低くなるほど攪拌所要動力に及ぼす邪魔板の影響は小さくなり、濃度が低くなるほど、その傾向が高回転数領域まで広がる。
- 4) グリセリン濃度を 90 wt%以下にすると、MSE 翼と FBBDT 翼間の攪拌所要動力の差異も少なくなる。

上に示した攪拌所要動力と回転数の関係を、動力数と攪拌レイノルズ数の関係として図 2-19～図 2-26 に示した。図中の実線はパドル翼の動力数とレイノルズ数の関係を永田の式を用いて推算したものである。

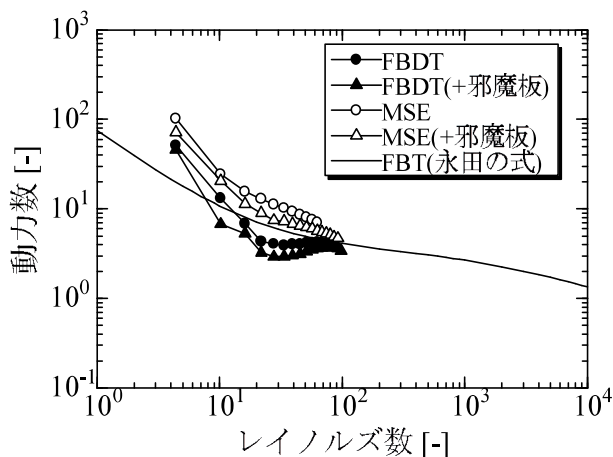


図2-19 N_p vs Re (100 wt%、100 mm)

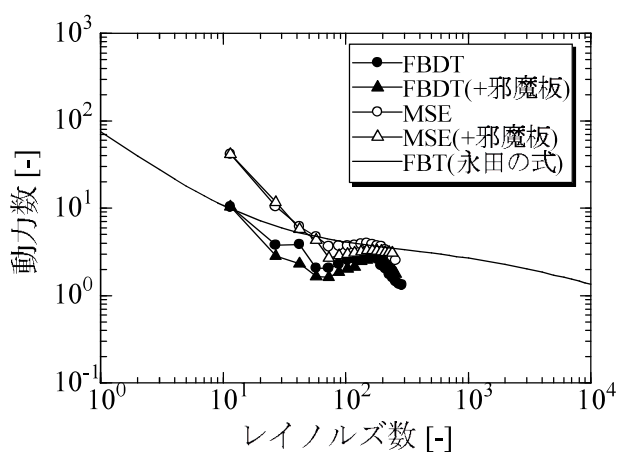


図2-20 N_p vs Re (95 wt%、100 mm)

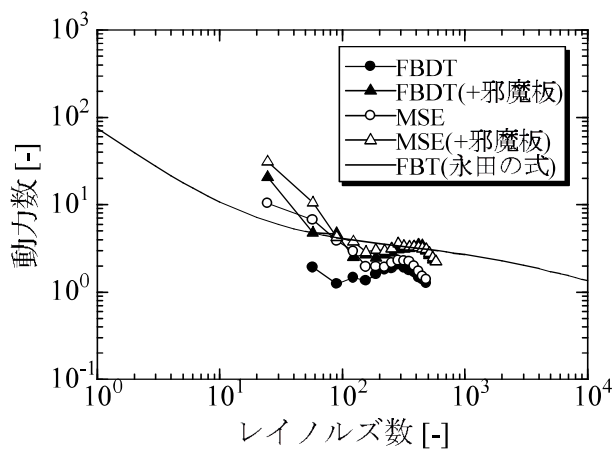


図2-21 N_p vs Re (90 wt%、100 mm)

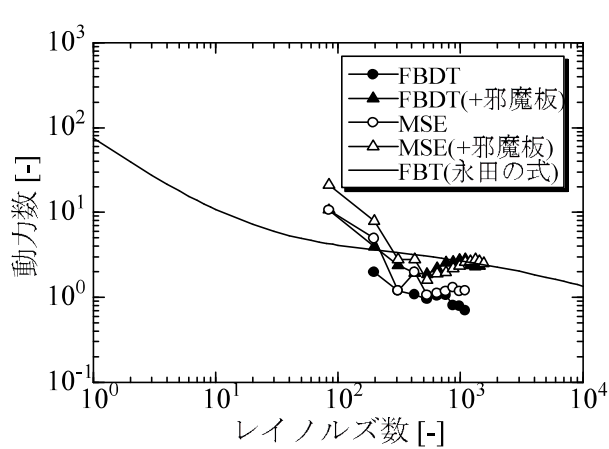


図2-22 N_p vs Re (80 wt%、100 mm)

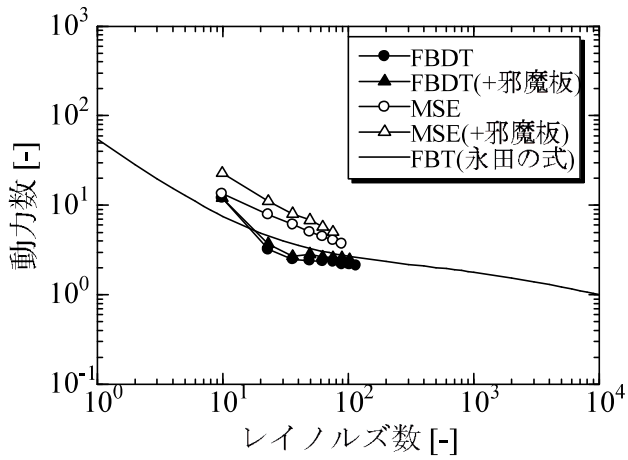


図2-23 N_p vs Re (100 wt%, 150 mm)

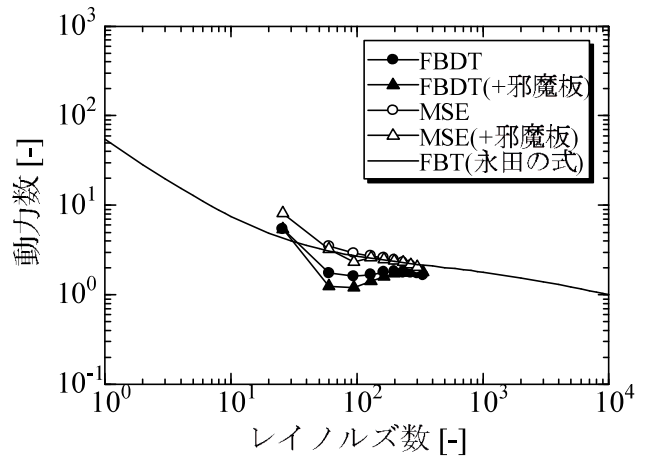


図2-24 N_p vs Re (95 wt%, 150 mm)

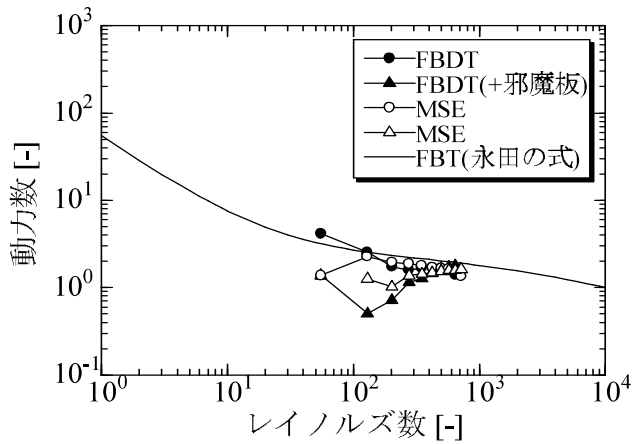


図2-25 N_p vs Re (90 wt%, 150 mm)

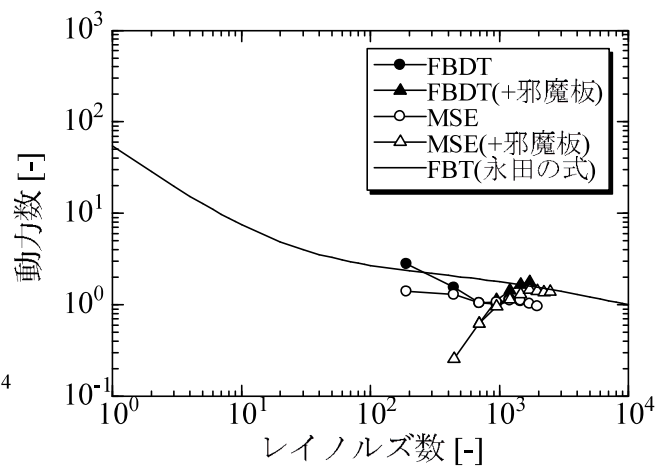


図2-26 N_p vs Re (80 wt%, 150 mm)

これらの図は、グリセリン濃度の低い場合や、回転数の上昇による装置の共振が原因と考えられるトルク値の変動が顕著に見られるもので、FBDT翼や永田の式で推算したパドル翼(FBT翼)とMSE翼を比較しにくい。そこで、回転数 600 rpm における異なるグリセリン濃度による結果について、装置の共振現象が見られなかった領域で比較したものが図 2-27 である。図より、MSE翼は攪拌レイノルズ数が低下(グリセリン濃度が増加=溶液粘度が上昇)すると、他の2つの攪拌翼よりも動力数の増加が大きくなることから分かる。動力数の増加、すなわちトルクの増加は、翼の側面とその周辺の流体とのせん断摩擦が増加することを意味している。これはMSE翼内部の混合エレメントの貫通孔により形成される複雑流路から翼外に排出される流れと、側面の周辺の流れの相互作用によるものと考えられ、MSE翼は高粘性流体に対してFBDT翼と異なる動力特性を示すことが示唆された。

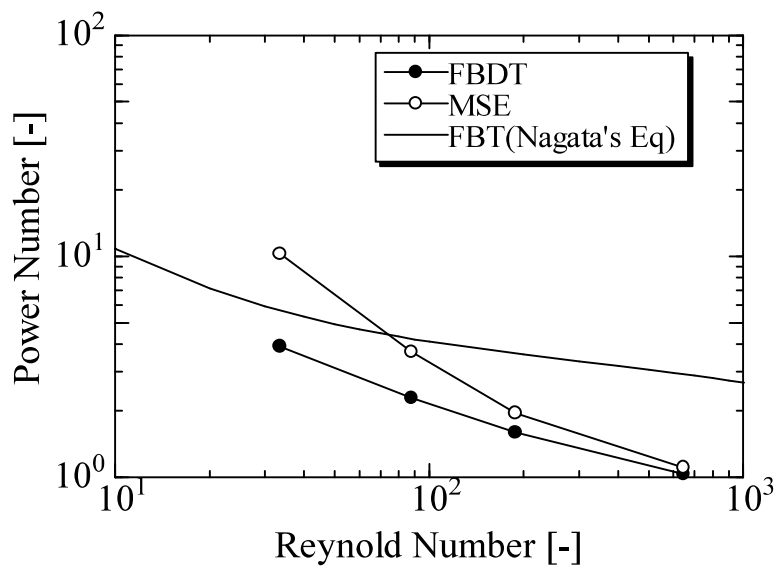


図2-27 同一回転数（600 rpm）におけるFBDT翼、MSE翼、FBT翼の動力数と攪拌レイノルズ数の関係

図2-28に80 wt%のグリセリンに塩化ナトリウムを添加したときの電気伝導度の経時変化を示す。攪拌時間の増加とともに電気伝導度は増加し、MSE翼は1700秒で完全に塩化ナトリウムが溶解したときの電気伝導度と一致した。一方、FBDT翼は2300秒を要したことから、MSE翼はFBDT翼に比べ溶解時間を約25%短縮できたことになる。

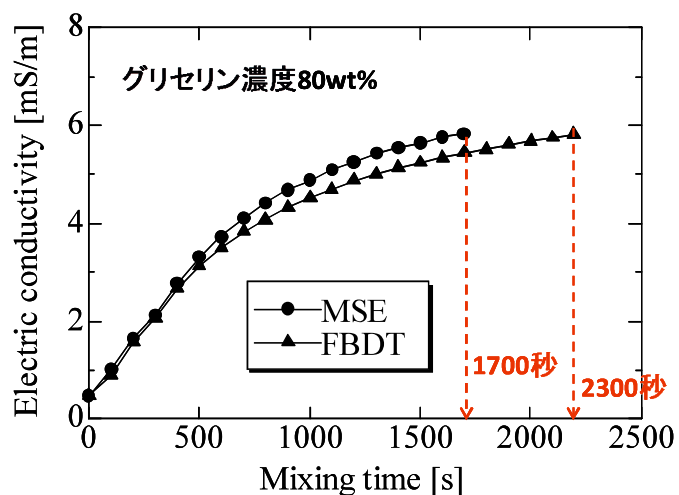


図2-28 電気伝導度によるMSE翼とFBDT翼の混合特性評価（80 wt%グリセリン）

図 2-29 は 90 wt%のグリセリンに対する電気伝導度の経時変化を示したものである。MSE 翼は 3102 秒で完全に塩化ナトリウムが溶解したときの電気伝導度と一致し、FBDT 翼は 4000 秒を要した。このことから、MSE 翼は FBDT 翼に比べ溶解時間を約 25%短縮できたことになる。

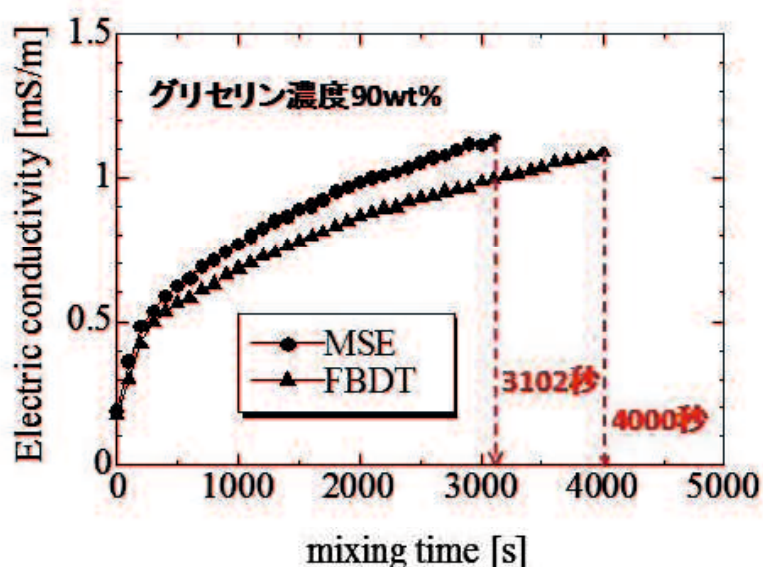


図 2-29 電気伝導度による MSE 翼と FBDT 翼の混合特性評価
(90 wt%グリセリン)

以上の結果は、MSE 翼と FBDT 翼の攪拌所要動力が等しくなるように回転速度を変えたものであるが、回転数が遅くても混合時間が短い場合は攪拌効率が高いことを示す。そこで、この影響を考察するために、混合性能の指標としてよく使用される混合時間に回転数を乗じた無次元化混合時間を用いて図 2-30 に再プロットした。無次元化混合時間は混合を達成するのに必要な翼の総回転数であって、回転数の影響を受けない。

図より、MSE 翼は無次元時間 20680 で完全に塩化ナトリウムが溶解し、FBDT 翼は無次元時間 33333 を要した。このことから、MSE 翼は FBDT 翼に比べ溶解時間を 38%短縮できたことになる。一方、80 wt%グリセリンの場合は、MSE 翼と FBDT 翼の回転数が同一であるため、無時限混合時間と直接計測した混合時間は同じ 25%短縮であった。すなわちグリセリン濃度が高く、流体の粘度が高いほど混合時間が短縮されることを示している。このことは、図 2-27 で示された、MSE 翼は攪拌レイノルズ数が低いほど、すなわち溶液の粘度が高くなるほど、翼の側面とその周辺の流体とのせん断摩擦が増加することに対応しているものである。

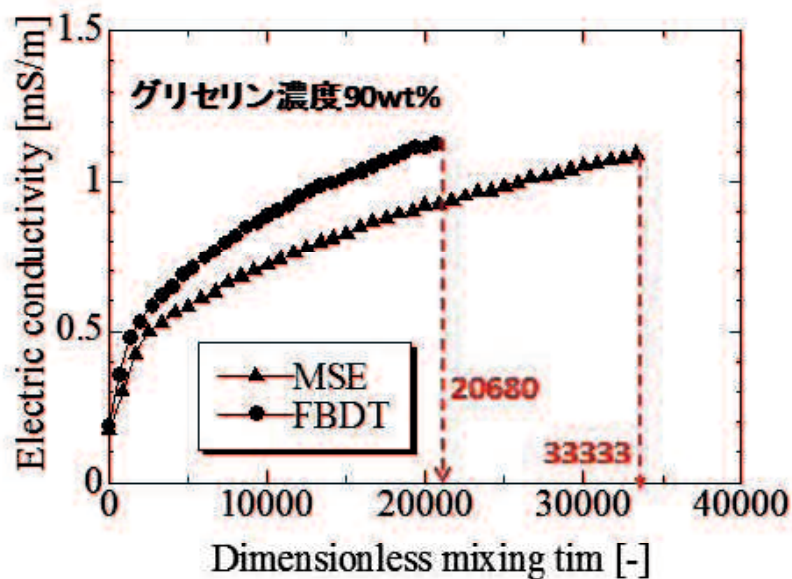


図 2-30 電気伝導度による MSE 翼と FBDT 翼の混合特性評価
無次元混合時間によるプロット
(90 wt%グリセリン)

実験において添加された塩化ナトリウムの状態を観察すると、FBDT 翼の場合は時間の経過に伴い、塩化ナトリウムの固体が槽底部の中央に集まる傾向が見られた。これに対し、MSE 翼は底部に固体が見られず、後述する可視化実験で観察された槽底部からの上昇流が早期の均一攪拌に寄与していることが考えられる。

2.3.2 MSE 翼特有の形状が流動状態に及ぼす影響

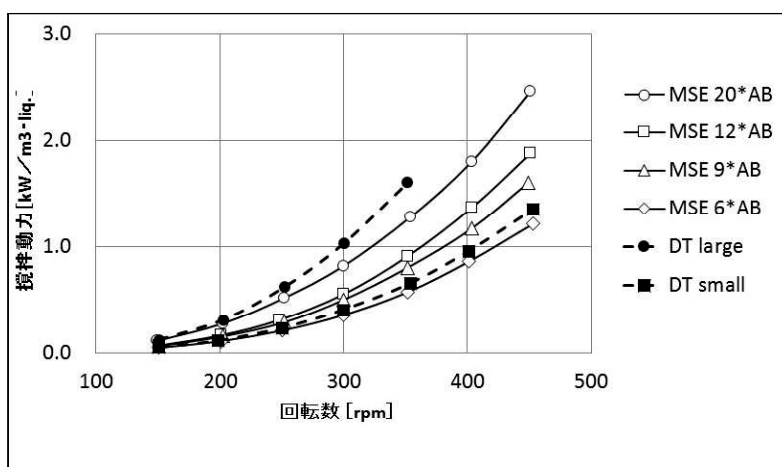
MSE 翼特有の形状が流動状態に及ぼす影響について、MSE 翼の形状を変更した場合の攪拌所要動力の測定結果、および流動解析ソフトウェアによる解析結果を元にして検討する。

(1) 混合エレメントの積層枚数の影響

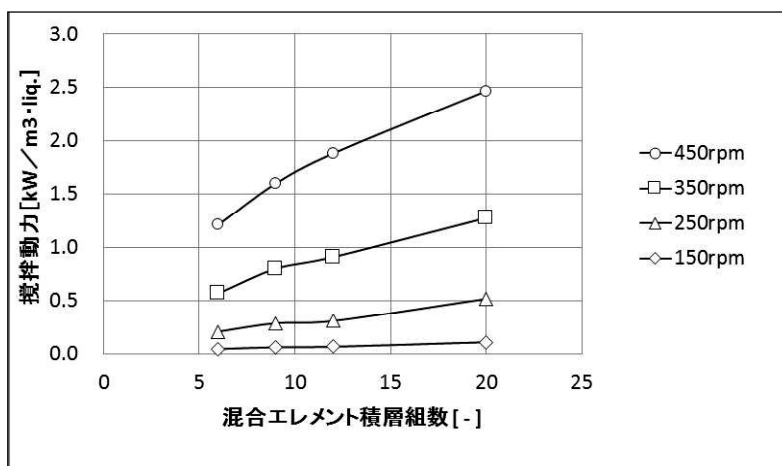
図 2-31 は、基準混合エレメントの積層枚数を変えた MS1-1~1-4 の攪拌所要動力の測定結果について示したものである。図中(a)は回転数を横軸にして積層組数を変数として攪拌所要動力を示したもので、混合エレメントの積層枚数が多いほど攪拌所要動力が大きくなることわかる。これは、積層枚数が多くなるほど、中空部の流体が流入する面積および外周部の流体が流出する面積が大きくなるためであると考えられる。350 rpm において、羽根高さ 10 mm の FBDT 翼に対して、12 枚 (6 組) の MSE 翼の攪拌所要動力は約 88%である

が、18枚(9組)では約123%になった。同様に350rpmにおいて、羽根高さ20mmのFBDT翼と比較すると、24枚(12組)のMSE翼の攪拌所要動力は約53%であり、40枚(20組)では約79%の攪拌所要動力であった。

図中(b)は、積層組数を横軸にして回転数を変数とした攪拌所要動力を示したものである。積層組数が多くなるほど攪拌所要動力の増加の割合が小さくなる傾向を示しているが、これは翼高さ方向中央部からの流体の吸い込み流量が小さくなることが原因であると考えられる。



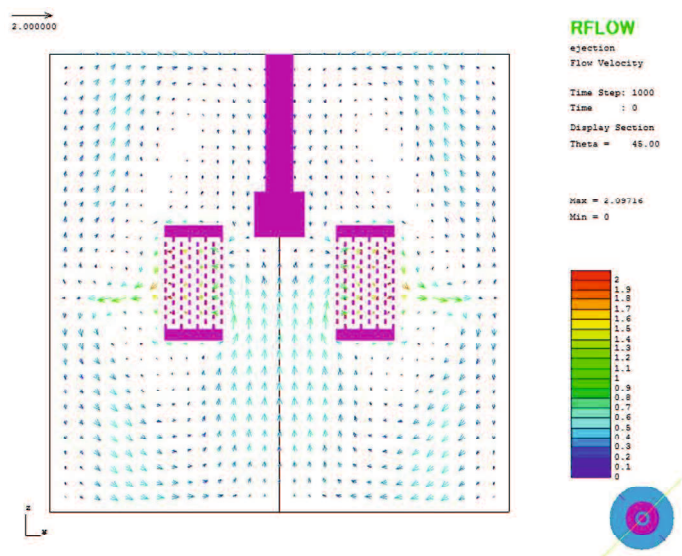
(a) 回転数基準



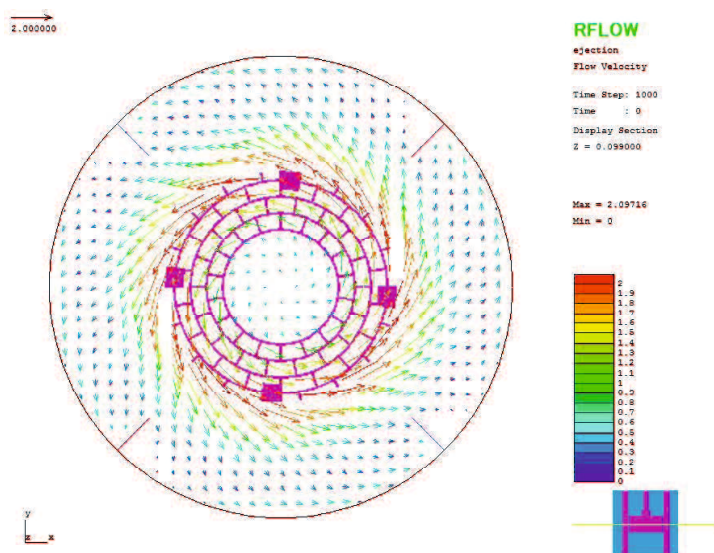
(b) 積層組数基準

図 2-31 混合エレメント積層組数と攪拌所要動力の関係

図 2-32 に、基準混合エレメントを 10 組 (20 枚) の MSE 翼 (表 2-4 中 MS1-3 に対応) について、流動解析による 400 rpm における攪拌槽内の深さ方向断面と半径方向断面の速度ベクトル分布を示した。また、図 2-33 に比較対象として羽根幅 20 mm の 6 枚平羽根ディスクタービン翼 (表 2-4 中の DL に対応) について、深さ方向断面と半径方向断面の速度ベクトル分布を示した。FBDT 翼の回転数は、攪拌所要動力の測定により 10 組 (20 枚) の MSE 翼の 400 rpm と同じ動力を示した 320 rpm とした。

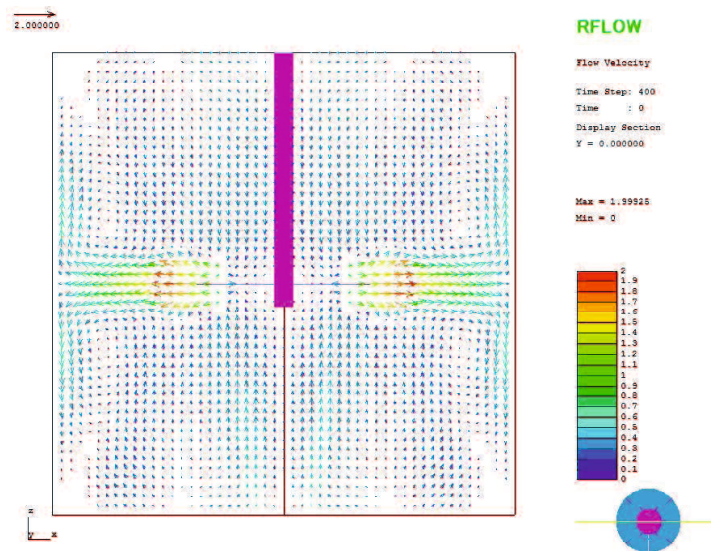


(a) 深さ方向断面の速度ベクトル分布

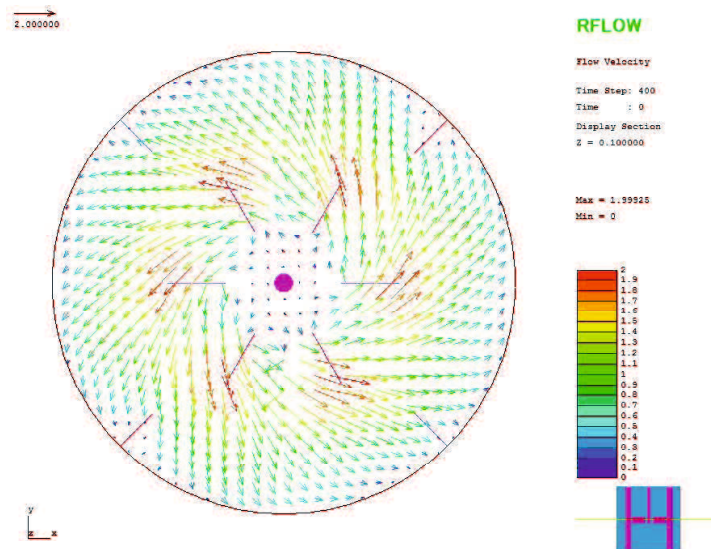


(b) 半径方向断面の速度ベクトル分布

図 2-32 MS1-3 の流動解析による速度分布



(a) 深さ方向断面の速度ベクトル分布



(b) 半径方向断面の速度ベクトル分布

図 2-33 DL の流動解析による速度分布

表 2-7 に MSE 翼の積層枚数を変えた場合と FBDT 翼の流動解析の結果をまとめた。

表 2-7 MSE 翼の積層枚数を変えた場合および FBDT 翼の流動解析結果

攪拌翼	MSE 翼			FBDT 翼
	10(5)	20(10)	40(20)	6 枚平羽根
混合エレメント積層枚数 (組数)	10(5)	20(10)	40(20)	6 枚平羽根
外径／内径 [mm]	100／49	100／49	100／49	100／－
段数／半径方向孔長さ [mm]	3.5／6	3.5／6	3.5／6	－
円周方向分割数	18	18	18	－
回転数 [rpm]	400	400	400	320
循環流量 [m ³ /sec.]	0.00324	0.00366	0.00616	0.00591
攪拌動力(流動解析、5 組) [kW/m ³ .liq.]	0.409	0.462	1.020	1.12
攪拌動力(実測値、10 組) [kW/m ³ .liq.]	－	<u>1.268</u>	<u>1.801</u>	<u>1.29</u>
最大速度ベクトル [m/sec.]	2.15	2.10	2.35	1.999
最小渦径 [mm]	0.0169	0.0124	0.0128	0.0136
最大せん断応力 [Pa]	72.3	89.7	344.0	498.1

表から、混合エレメントの積層枚数を増加させるほど、攪拌所要動力および循環流量が大きくなる傾向にあることがわかる。積層枚数の増加に伴い、翼内部から外周部への半径方向の流路面積が大きくなり、循環流量が増加して攪拌所要動力も大きくなったためと考えられる。なお、解析において、MSE 翼は FBDT 翼と比較して翼表面積がかなり大きいことにより計算に長時間を要するため、便宜的に 5 組での流動解析とした。

(2) 混合エレメントの厚さの影響

次に、基準混合エレメントについて積層枚数を 12 枚 (6 組) とし、一組当たりの積層枚数を 1 枚～4 枚ずつと変え、実質的に混合エレメントの厚さを変更した MS2-1～2-4 についての攪拌所要動力の測定結果を図 2-34 に示した。これより、攪拌所要動力は混合エレメントが厚くなるほど大きくなるが、厚さが 6 mm と 8 mm ではほとんど同じである。これは、混合エレメント内に流体が流入する部分の面積と、混合エレメント内での流体が流れる面積の関係に依存する。すなわち、図 2-35 に示すように、基準混合エレメントでは半径方向孔長さが 6 mm、仕切壁厚さが 1 mm なので、孔同士の半径方向孔間隙は 2.5 mm ($= (6-1)/2$) である。一方、流体が流入する部分は混合エレメント厚さに相当する。流体は側壁から流入し、混合エレメント厚さの部分を経て混合エレメント内に流入し上下に分割されるが、分割される部分は半径方向孔間隙が上下 2 つ分であるので 2.5 mm × 2 である。

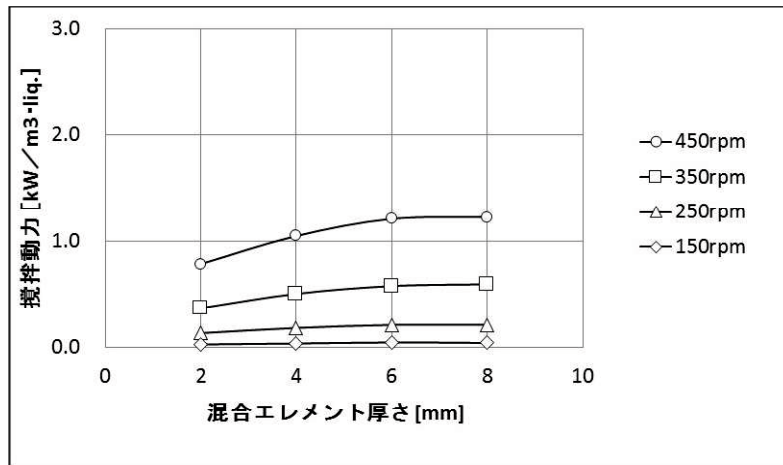


図 2-34 混合エレメント厚さと攪拌所要動力の関係

従って、混合エレメント厚さが半径方向孔間隙の2倍以上であれば、半径方向孔間隙の制限により、混合エレメントを厚くしても攪拌所要動力は大きくなる。逆に、混合エレメント厚さが半径方向孔間隙の2倍以下であれば、混合エレメント厚さの制限により、混合エレメントを厚くするほど流体の循環量は増えて攪拌所要動力は大きくなる。

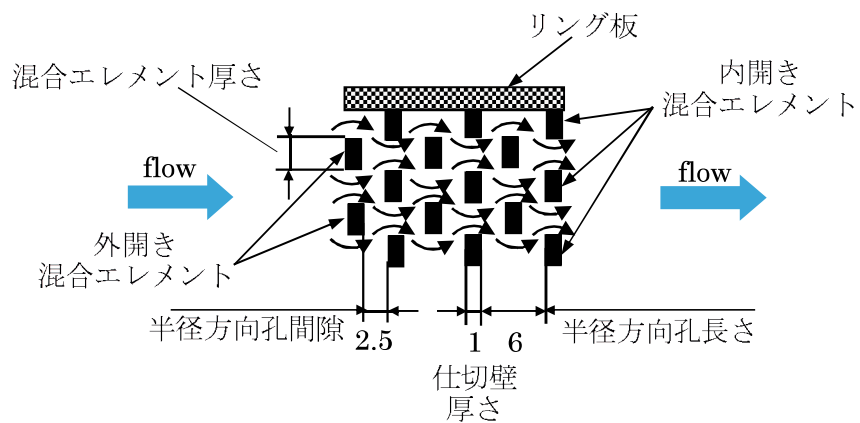


図 2-35 MSE 翼周辺の流体の流れ

(3) 混合エレメントの段数の影響

次に基準混合エレメントの内径 49 mm、半径方向段数 3.5 段に対し、内径を 48~50 mm とし、半径方向孔長さを変えることにより段数を 2.5 段 (図 2-36)、1.5 段 (図 2-37) のように変えた MSE 翼の攪拌所要動力の測定結果を図 2-38 に示した。積層枚数 20 枚 (10 組)、混合エレメント厚さ 2 mm、周方向分割数 18 は共通である。図より、段数が多いほど攪拌所要動力は小さくなっている。段数が多い混合エレメントは円周方向の壁が多く、流体が翼内部を通過する際の分割・合流の回数が多いため流動抵抗が大きく、翼内部を通過する流量が少なくなるためと考えられる。

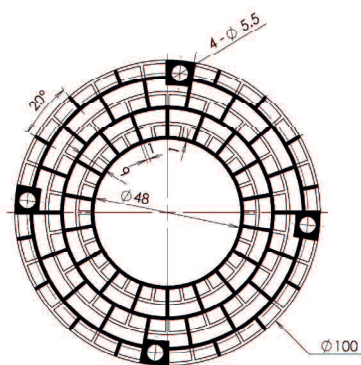


図 2-36 2.5 段

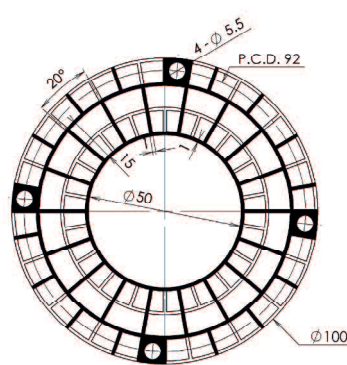


図 2-37 1.5 段

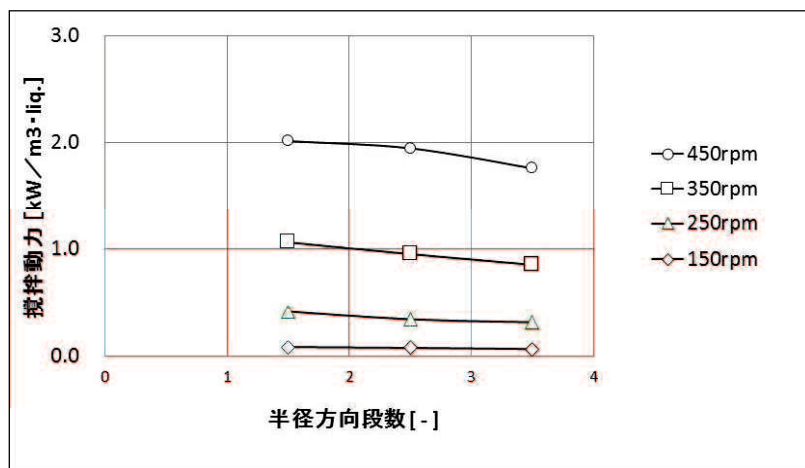


図 2-38 半径方向段数と攪拌所要動力の関係

表 2-8 に、以上の測定結果に対応する流動解析の結果を示したが、流動解析の結果も段数が多くなると測定値と同様に、攪拌所要動力および循環流量が小さくなることを示してい

る。一方、混合には「(段数) × (循環流量)」で寄与すると考えられるが、これについては 3.5 段が最も大きく、1.5 段になると 3.5 段の約 50%に減少しており、段数の多いほど効果的に混合できることを示唆している。これらについては、後述する BDF 製造におけるメチルエステル化反応のような反応系の攪拌についての検討が必要である。

表 2-8 MSE 翼の段数を変えた場合の流動解析結果

枚数 (組数)		10(5)	10(5)	10(5)
外径/内径	[mm]	100/49	100/48	100/50
段数/半径方向孔長さ	[mm]	3.5/6	2.5/9	1.5/15
円周方向分割数		18	18	18
回転数	[rpm]	400	400	400
循環流量	[m ³ /sec.]	0.00324	0.00353	0.00387
段数 × 循環流量	[m ³ /sec.]	0.01134	0.00883	0.00581
攪拌動力(流動解析、5組)	[kW/m ³ .liq.]	0.409	0.457	0.759
攪拌動力(実測値、10組)	[kW/m ³ .liq.]	<u>1.290</u>	<u>1.397</u>	<u>1.468</u>
最大速度ベクトル	[m/sec.]	2.15	2.23	2.34
最小渦径	[mm]	0.0169	0.0109	0.0109
最大せん断応力	[Pa]	72.3	211.2	411.7

(4) 混合エレメントの内径の影響

次に、基準混合エレメントの半径方向孔長さ 6 mm に対し、半径方向孔長さを 5 mm (図 2-39)、4 mm (図 2-40) のように変えた MSE 翼の攪拌所要動力の測定結果について、

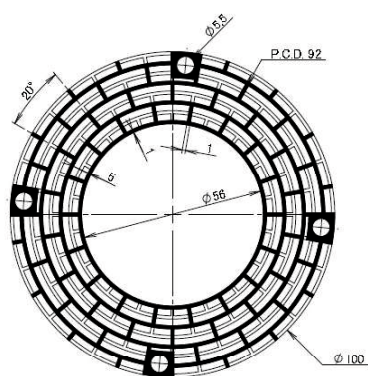


図 2-39 半径方向孔長さ 5 mm

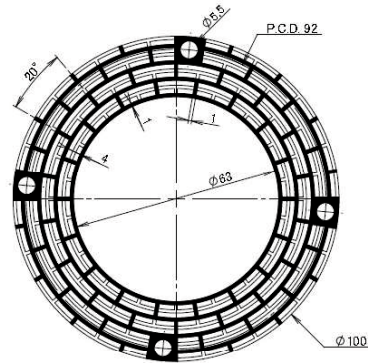


図 2-40 半径方向孔長さ 4 mm

段数 3.5 段・内径 49 mm の測定結果と共に図 2-41 に示した。

混合エレメントの外径は共に 100 mm であるため、半径方向孔長さを 5 mm、4 mm とした場合には内径は大きくなり、半径方向孔間隙は各々 2 mm、1.5 mm となる。積層枚数 20 枚 (10 組)、混合エレメント厚さ 2 mm、周方向分割数 18、段数 3.5 段は共通である。半径方向孔長さが長くなるほど攪拌所要動力は小さくなっているが、その影響は小さい。

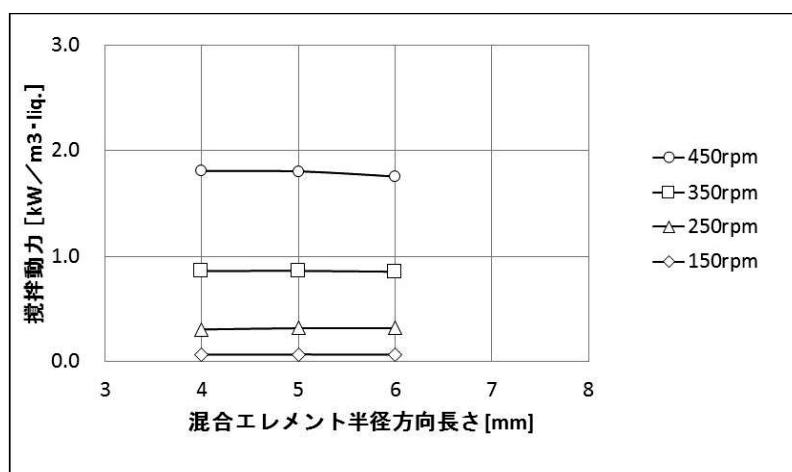


図 2-41 半径方向孔長さ・内径と攪拌所要動力の関係

先に示した実質的に混合エレメントの厚さを変えた MS2-1~2-4 の結果により、混合エレメント厚さが 2 mm、仕切壁の厚さが 1 mm の場合に、半径方向孔長さが 5 mm では半径方向孔間隙が 2 mm × 2 となり、半径方向孔長さが 4 mm では半径方向孔間隙が 1.5 mm × 2 となる。いずれの場合も半径方向孔間隙が混合エレメント厚さよりも大きいため、半径方向孔間隙によって混合エレメント積層体内部に流入する流体の流量が制限されることはない。従って、本実験における動力の差は、混合エレメント内径の差によるものと考えられ、外径および段数が同じであれば、内径が攪拌所要動力に与える効果は小さいといえる。これらに対応する結果を表 2-9 に示した。攪拌所要動力の実測値では、半径方向孔長さ 4 mm は 6 mm に対して約 98%であるが、循環流量については半径方向孔長さ 4 mm は 6 mm に対して約 87%となっており、攪拌所要動力の実測値よりも循環流量の差異が大きくなっている。

表 2-9 MSE 翼の半径方向孔長さ・内径を変えた場合の流動解析結果

組数 (枚数)		5(10)	5(10)	5(10)
外径/内径	[mm]	100/49	100/56	100/63
段数/半径方向孔長さ	[mm]	3.5/6	3.5/5	3.5/4
円周方向分割数		18	18	18
回転数	[rpm]	400	400	400
循環流量	[m ³ /sec.]	0.00324	0.00291	0.00283
段数 × 循環流量	[m ³ /sec.]	0.0113	0.0102	0.0099
攪拌動力 (流動解析)	[kW/m ³ .liq.]	0.409	0.350	0.302
攪拌動力 (実測値、10 組)	[kW/m ³ .liq.]	<u>1.290</u>	<u>1.289</u>	<u>1.268</u>
最大速度ベクトル	[m/sec.]	2.15	2.31	2.22
最小渦径	[mm]	0.0169	0.0101	0.0106
最大せん断応力	[Pa]	72.3	153.9	148.5

(5) 混合エレメントの段数および内径の影響

次に、基準混合エレメントの段数 3.5 段・内径 49 mm に対し、内周部からの周方向の孔を順次削除して段数・内径を変え、2.5 段・内径 63 mm (図 2-42)、1.5 段・内径 77 mm (図 2-43) と変更した場合の攪拌所要動力について、段数 3.5 段・内径 49 mm の測定結果と共に図 2-44 に示した。積層枚数 20 枚 (10 組)、混合エレメント厚さ 2 mm、周方向分割数 18、半径方向孔長さ 6 mm は共通である。

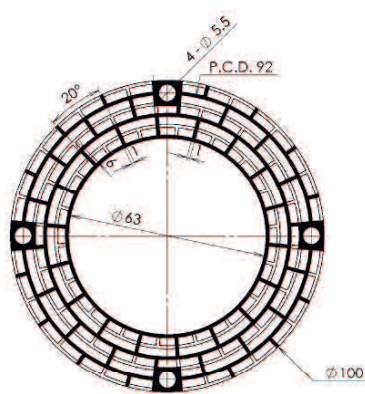


図 2-42 2.5 段・内径 63 mm

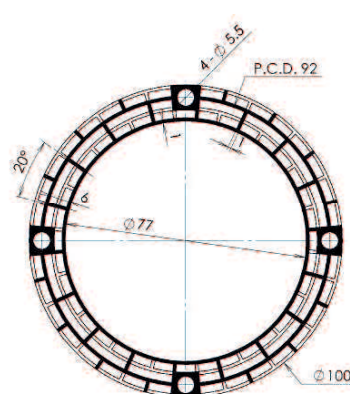


図 2-43 1.5 段・内径 77 mm

図から、段数が少なく内径が大きくなるほど攪拌所要動力は大きくなっているが、図 2-38 に示した段数の増加による攪拌所要動力の増加、および図 2-41 に示した内径の増加による攪拌所要動力の差を考慮すると、MSE 翼では攪拌所要動力の差は、内径よりも段数の効果が大きいといえる。これらの測定結果について、流動解析の結果と共に表 2-10 に示した。

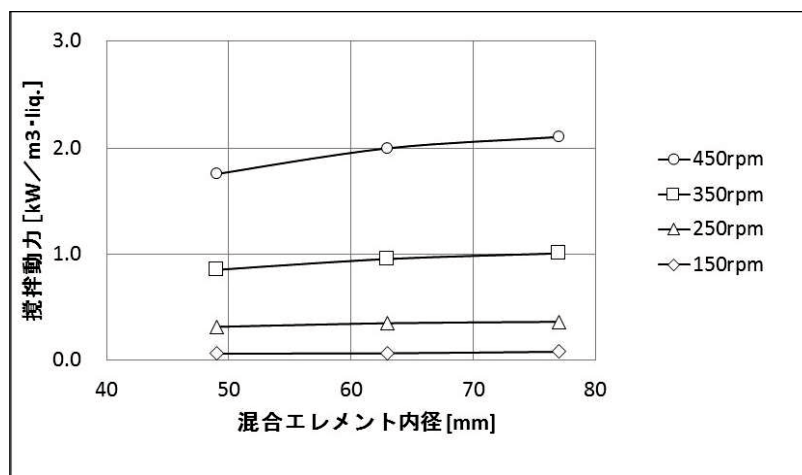


図 2-44 段数・内径 vs. 攪拌所要動力

表 2-10 MSE 翼の段数・内径を変えた場合の流動解析結果

組数 (枚数)	5(10)	5(10)	5(10)
外径/内径 [mm]	100/49	100/63	100/77
段数/半径方向孔長さ [mm]	3.5/6	2.5/6	1.5/6
円周方向分割数	18	18	18
回転数 [rpm]	400	400	400
循環流量 [m³/sec.]	0.00324	0.00310	0.00308
段数 × 循環流量 [m³/sec.]	0.01134	0.00775	0.00462
攪拌動力 (流動解析) [kW/m³.liq.]	0.409	0.397	0.366
攪拌動力 (実測値、10 組) [kW/m³.liq.]	<u>1.290</u>	<u>1.405</u>	<u>1.505</u>
最大速度ベクトル [m/sec.]	2.15	2.30	2.22
最小渦径 [mm]	0.0169	0.0110	0.0111
最大せん断応力 [Pa]	72.3	190.4	244.8

(6) 混合エレメントの周方向分割数の影響

次に、基準混合エレメントの周方向分割数 18 に対し、周方向分割数を 12 (図 2-45)、24 (図 2-46)、32 (図 2-47) と変えた場合の攪拌所要動力について図 2-48 に示した。積層枚数 20 枚 (10 組)、混合エレメント厚さ 2 mm、段数 3.5 段、半径方向孔長さ 6 mm は共通である。

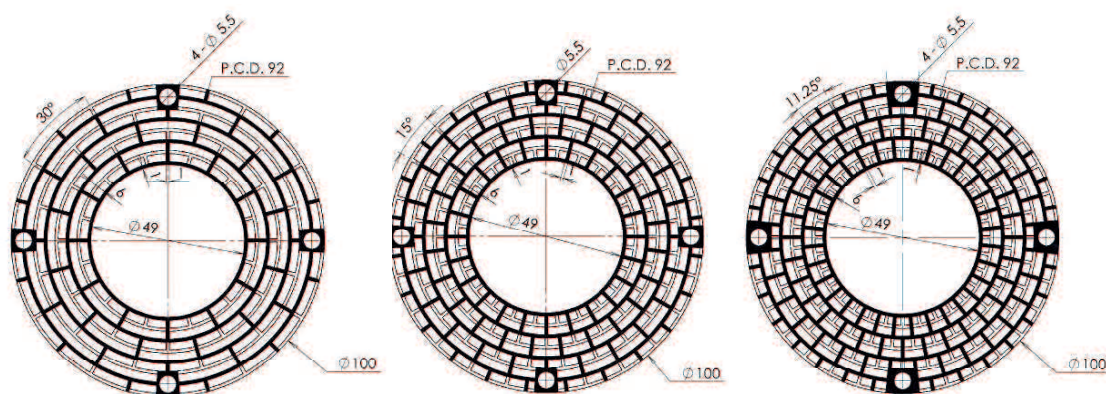


図 2-45 周方向 12 分割

図 2-46 周方向 24 分割

図 2-47 周方向 32 分割

図から、周方向分割数 24 がピークとなっており、回転数が高いほどその傾向が強くなって、例えば、24 分割に対して 32 分割の動力は 450 rpm において約 9% 小さくなっている。周方向分割数が多いほど隣接する半径方向仕切壁の間隔が短くなって、隣接する貫通孔からの流れの影響を受けやすくなるが、回転数が高いほどその影響が大きいことを意味し

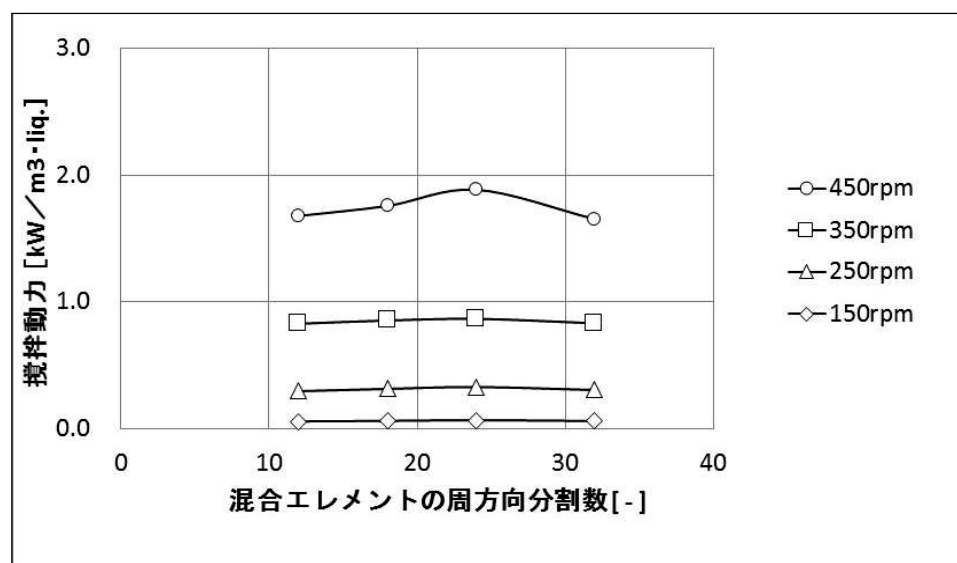


図 2-48 周方向分割数と攪拌所要動力の関係

ている。隣接する貫通孔からの流れの影響が、半径方向仕切壁の間隔により変化するためと考えられる。これらに対応する流動解析の結果を表 2-11 に示した。周方向分割数が多くなるほど循環流量は減少しており、半径方向分割数が多くなると隣接する仕切壁の影響を受けやすくなることを示唆している。

表 2-11 MSE 翼の周方向分割数を変えた場合の流動解析結果

組数 (枚数)		5(10)	5(10)	5(10)	5(10)
外径/内径 [mm]		100/49	100/49	100/49	100/49
段数/半径方向孔長さ [mm]		3.5/6	3.5/6	3.5/6	3.5/6
円周方向分割数		12	18	24	32
回転数 [rpm]		400	400	400	400
循環流量 [m ³ /sec.]		—	0.00324	0.00280	0.00266
攪拌動力 (流動解析) [kW/m ³ .liq.]		—	0.409	0.377	0.315
攪拌動力 (実測値、10 組) [kW/m ³ .liq.]		<u>1.230</u>	<u>1.268</u>	<u>1.317</u>	<u>1.195</u>
最大速度ベクトル [m/sec.]		—	2.15	2.23	2.23
最小渦径 [mm]		—	0.0169	0.0120	0.0122
最大せん断応力 [Pa]		—	72.3	123.8	125.6

以上、邪魔板有りの条件下で、水に対する MSE 翼の種々の設計因子を変更した場合について、攪拌所要動力の測定と流動解析について検討した結果をまとめた。

- (1) 積層枚数、半径方向段数、および周方向分割数が攪拌所要動力に与える効果は大きい。ただし、半径方向段数は小さくなるほど動力が大きくなるのに対し、周方向分割数はピークが見られた。
- (2) 混合エレメント厚さは、半径方向孔間隙との関係により攪拌所要動力に与える効果が異なる。混合エレメント厚さが半径方向孔間隙の 2 倍以上になると、MSE 翼内の流動は半径方向孔間隙が律速になり、動力は混合エレメント厚さに依存しない。
- (3) 混合エレメント内径が大きくなると中空部が大きくなるが、動力に与える効果は小さい。
- (4) 流動解析からは、混合に影響すると考えられる (循環流量) × (半径方向段数) は、3.5 段が最も大きくなった。今後、反応系の攪拌を利用した検討が必要である。

図 2-49 に MSE 翼特有の形状が流動状態に及ぼす影響について、PIV 解析による検討結果を示す。図は PIV 解析で得られた MSE 翼の底部の速度ベクトル分布を示している。槽底部

から MSE 翼の中心に向かう上昇流の存在が明らかである。MSE 翼の下端中心部の流速は平均で 0.1m/s であった。攪拌槽が 0.1 m × 0.1 m であって、槽壁から槽壁へは 1 秒で到達することを考えると、かなり速い上昇流が発生していることが分かる。

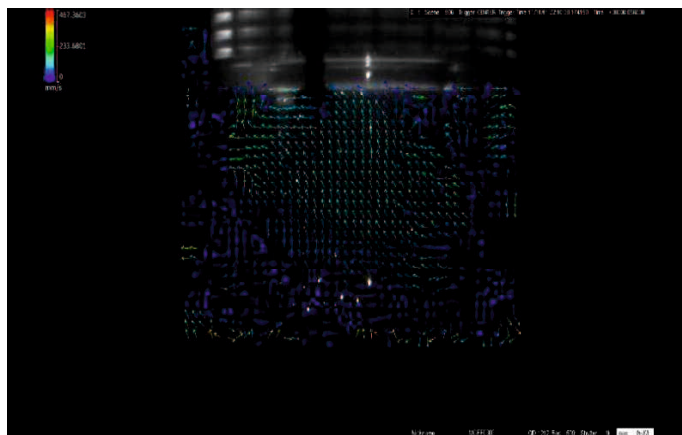


図2-49 MSE翼底部の流動状況

図2-50に攪拌翼の内部からの吐出流の速度ベクトルを示す。MSE翼の側面から円周方向への流速は平均で0.29 m/sと求められた。これはMSE翼内部の小貫通孔による流路からジェット流として流体が吐出されることによるものであり、混合特性への寄与が高いと考えられる。

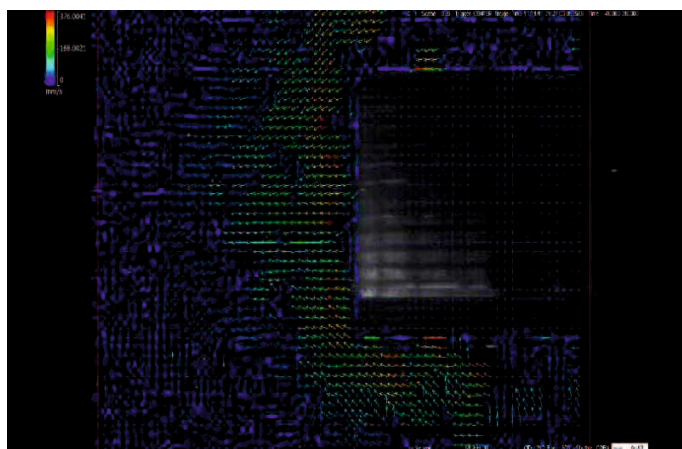


図2-50 MSE翼側部の流動状況

2. 4 結言

本章では、新規に開発された MSE 翼について、基礎データの測定によりその特性を明らかにすることを目的とし、攪拌所要動力の測定、MSE 周辺の流動状況の観察、および MSE 翼の混合特性の評価を行った。得られた結果は以下の通りである。

(1) MSE 翼でグリセリン水溶液を攪拌したときの攪拌所要動力を実験より求めた。本実験で使用した MSE 翼と FBDT 翼では、MSE 翼の方が同じ回転数で流体に加えることができるエネルギーが大きく、その傾向は液の粘度が大きくなるほど顕著であった。

(2) グリセリン溶液の攪拌では、MSE 翼は他の攪拌翼に比べ低レイノルズ数で動力数が急激に増加する傾向が見られた。

(3) 邪魔板有りの条件で、水を攪拌したときの攪拌所要動力測定および流動解析の結果から、積層枚数、半径方向段数、周方向分割数が攪拌所要動力に与える影響が大きく、翼内径の影響は小さいことがわかった。混合性能に影響すると考えられる(循環流量) × (半径方向段数) は、3.5 段が最も大きくなり、翼形状の分割・合流の有効性が期待できる。

(4) MSE 翼の回転により、槽底から MSE 翼中心部に向かう上昇流が発生し、さらに、MSE 翼側面から高速の吐出流が見られた。PIV によりこれらの流速を定量的に計測した。

(5) MSE 翼の混合特性を電気伝導度の経時変化より、同一攪拌所要動力条件の下で測定した結果、FBDT 翼と比べ高粘性の試験流体を攪拌したときに短時間で混合できることがわかり、その優位性を定量的に評価した。

今後は実用面で扱うことが想定される複雑流体を用いた攪拌実験が必要であり、併せてこのときの混合状態の評価方法を開発していく必要がある。

第3章 MSE スタティックミキサーの圧力損失

3.1 緒言

本章では、MSE スタティックミキサーについての圧力損失の特性を汎用のスタティックミキサーとの比較により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は、図3-1に示すように中間板部分をフランジ間に挟持して設置することにより、配管内部を流れる流体を混合することができる。

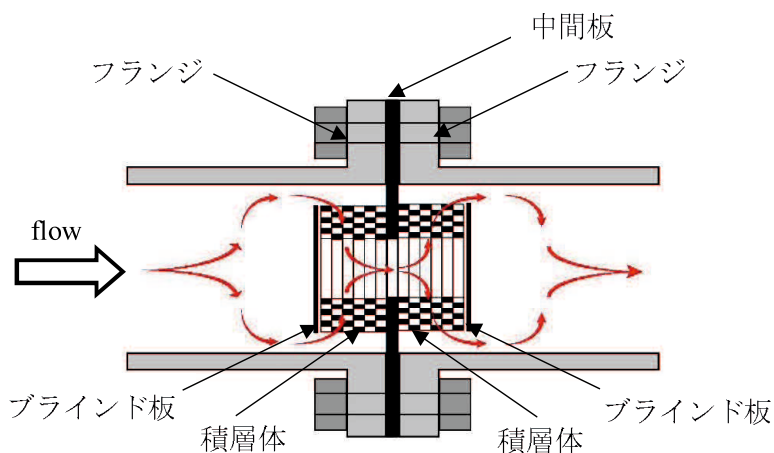


図3-1 フランジ間に設置された MSE スタティックミキサー

MSE スタティックミキサー内部の流れのイメージを図3-2に示した。MSE スタティックミキサーに到達した流体は、上流のブラインド板により直進を妨げられ、ブラインド板と管内壁とにより形成される円環状の間隙を経て、上流側の混合エレメント積層体の外周

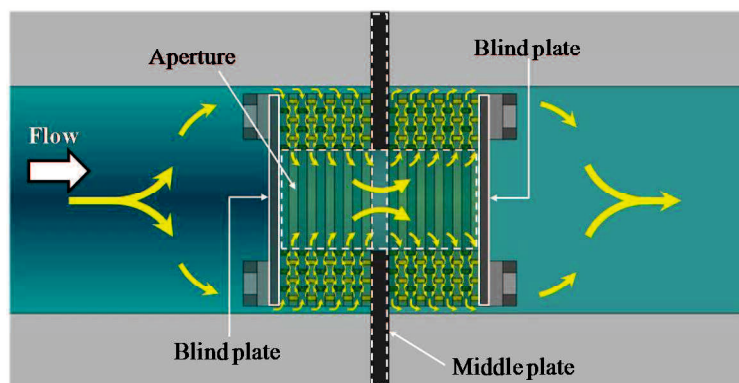


図3-2 MSE スタティックミキサー内部の流れのイメージ

から積層体内部へ流入する。流入した流体は、積層体内部を流通する際に複雑な連通流路を通過する際に、分割・合流、せん断等により混合される。上流側の積層体を通過した流体は、各混合エレメントの中央の大貫通孔により形成される中空部へ流出し、中間板の貫通孔を通過して、下流側の積層体の内周部へ到達し、下流側の積層体内部に流入する。下流側の積層体内部では、流体は再び複雑な連通流路を通過する際に分割・合流、せん断等により混合された後に、積層体の外周部から流出する。その後、流体は管内壁と下流側ブラインド板により形成される円環状の間隙から流出して配管内に戻る。

一般的に、配管経路へのスタティックミキサーの設置にあたっては、混合性能はもとより、圧力損失が重要な判断基準となる。配管系にスタティックミキサーを設置すると、スタティックミキサーによる抵抗のために圧力損失が大きくなり、圧力損失を補うためのポンプ動力増加により、電力使用量が増加して生産コストが高くなるからである。特に、MSE スタティックミキサーの場合はケニックス型スタティックミキサーと比較してコンパクトではあるが、ブラインド板および中間板により流体が流れる配管断面積が小さくなるため、使用にあたって圧力損失は重要である。

そこで、本章ではまず、スタティックミキサーの使用に際して重要な圧力損失について検討することを目的とした。さらに、流動解析プログラムによる MSE スタティックミキサー内部および周辺部についての数値計算の結果について検討し、圧力損失測定および流動解析結果を考慮して、MSE スタティックミキサーの流動状態について総括する。

3. 2 圧力損失測定によるスタティックミキサーの評価

3.2.1 圧力損失測定装置および実験方法

圧力損失測定に用いた配管系を図 3-3 に示した。塩化ビニル製の平滑管（内径 25 mm）の配管系内に、タンク内に貯めた水道水（以後、単に「水」とする）をポンプにより循環させた。流量はポンプのモータに取り付けたインバータによって調節し、電磁流量計

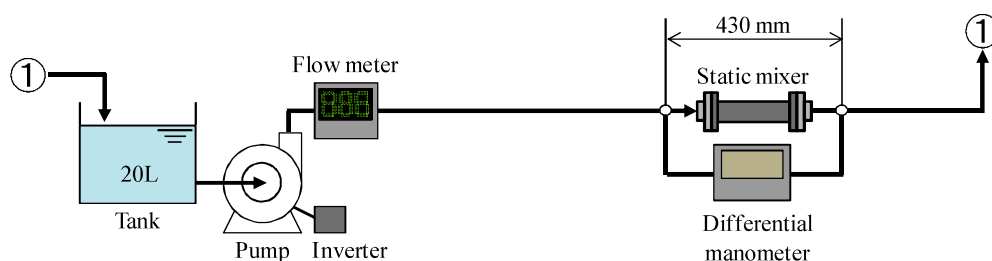
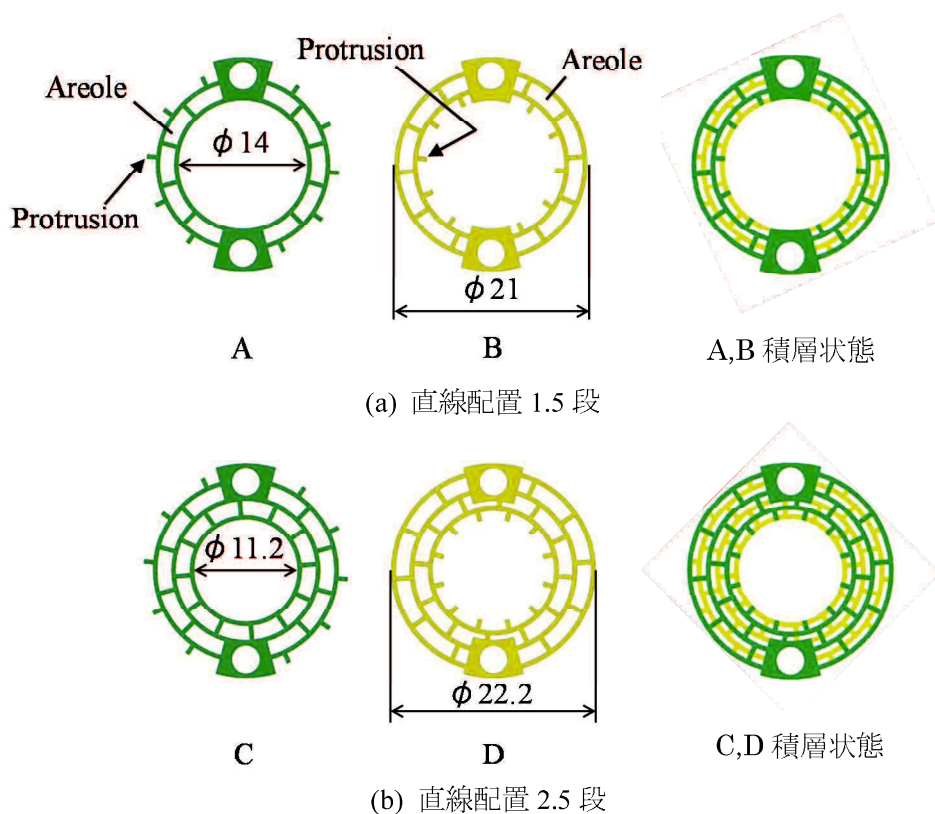


図 3-3 配管系

(櫛キーエンス、FD-83) により測定した。また、スタティックミキサーの上流と下流の圧力差（測定区間 430 mm）を差圧計（横河電機㈱、MT-210）により測定した。

圧力損失測定に使用した MSE スタティックミキサー（いずれも 1B 配管用）を構成する混合エレメント、および混合エレメントの積層状態の平面図を図 3-4 に示した。図中(a)の混合エレメントは内径 14 mm、外径 21 mm で、2つの混合エレメントは共に貫通孔が中心から半径方向に向かって直線状に 1 層形成されており、積層状態では半径方向に向かって分割が 2 回、合流が 1 回の構造になっている（直線配置 1.5 段）。これに対して図中(b)の混合エレメントは、内径 11.2 mm、外径 22.2 mm で、2つの混合エレメントでは共に貫通孔は半径方向に向かって 2 層形成されているため、積層状態では半径方向に向かって分割が 3 回、合流が 2 回の構造になっている（直線配置 2.5 段）。図中(c)のものは貫通孔をインボリュート状に配置したものであり（インボリュート配置 1.5 段）、図中(d)のものは貫通孔を両方向にインボリュート状に配置したものである（二重インボリュート配置 1.5 段）。いずれも、貫通孔の配置により流れが所定方向に導入されつつ、分割・合流、せん断等を繰り返す。なお、図中(a)、(b)の混合エレメント積層状態での貫通孔の重なりは、図 1-10(b)における積層状態の平面図と異なり、より流動状態を複雑にして混合性能を高くするために、積層状態において貫通孔を千鳥状に配置したものである。



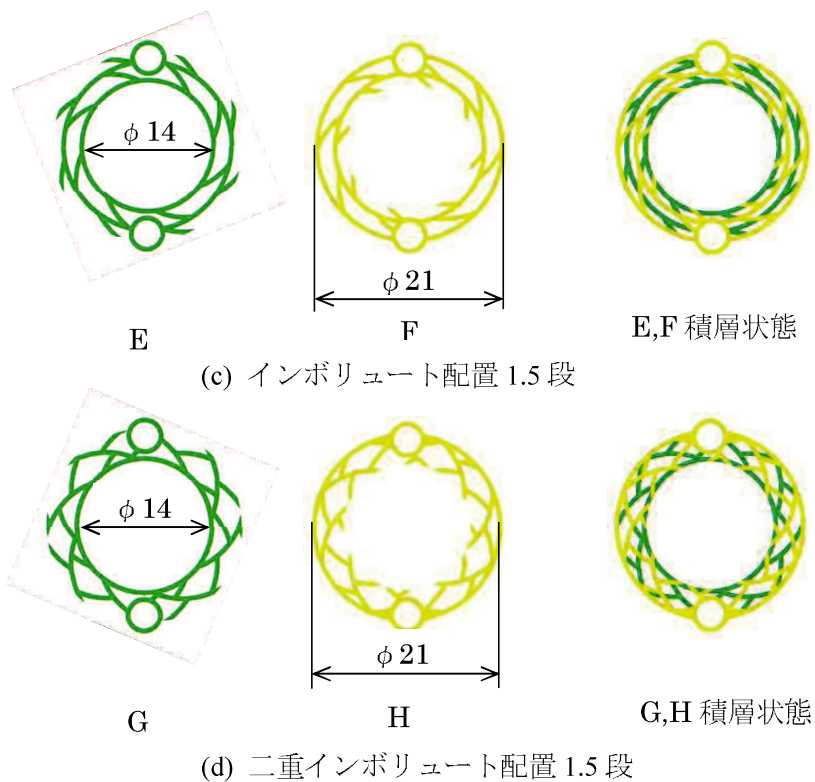


図 3-4 混合エレメント

図 3-5 には、圧力損失および混合性能の比較対象として、楯ノリタケカンパニーリミテド製の 1B 配管用ケニックス型スタティックミキサー、1-N60-331-N (以後、「NS」) を示した。

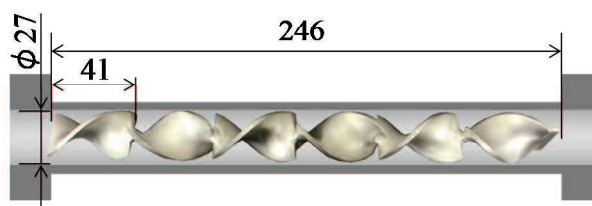
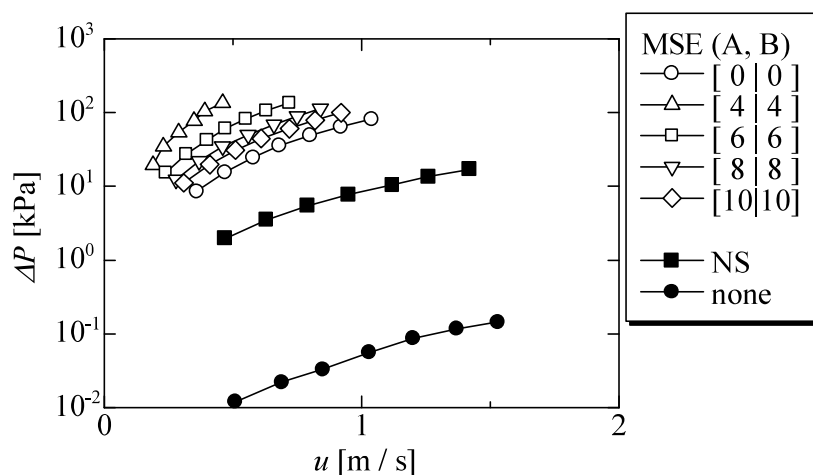


図 3-5 1B 配管用ケニックス型スタティックミキサー

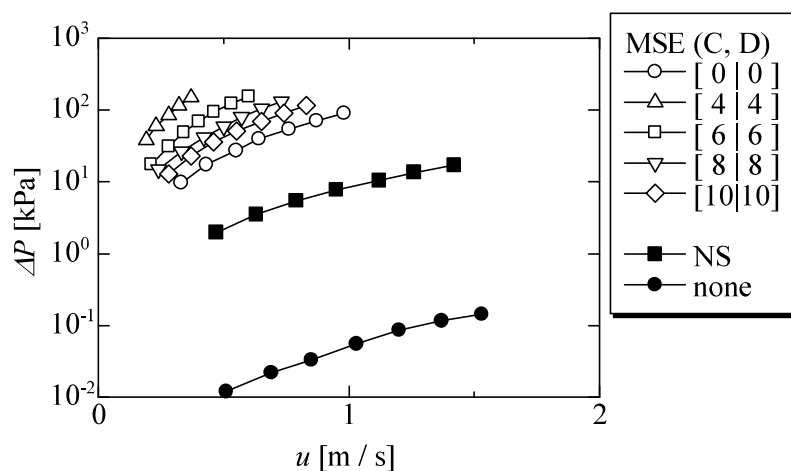
3.2.2 測定結果および考察

図 3-6(a), (b)、図 3-7 に圧力損失 ΔP の測定結果を示した。図中の凡例において、ブラケットはブラインド板、パーティカルバーは中間板を示す。平滑管における管内流速 0.5 m/s (レイノルズ数 = 11,700) において、ミキサー無しの場合の ΔP は 12 Pa であり、NS ではその約 200 倍であった。一方、MSE スタティックミキサーは、図 3-4(a)の開口部の直径が 14 mm の

混合エレメント A,B を両側に 4 枚 (2 組) ずつ配置した場合に、 ΔP はミキサー無しの場合に対して約 11,000 倍、NS に対して約 55 倍となった。しかし、混合エレメントの積層枚数を増やすことにより ΔP は低下し、混合エレメント A,B を両側に 10 枚 (5 組) ずつ配置した場合に、ミキサー無しの場合に対して約 930 倍となった (図 3-6(a))。混合エレメントの積層枚数の増加に伴って、混合エレメント積層体内部の半径方向流路の断面積が大きくなるからである。なお、混合エレメントを設置せずにブラインド板と中間板のみを 10 mm 間隔で設置した場合の ΔP は、NS に対して約 710 倍であった。



(a) 内径 14 mm の MSE スタティックミキサーの圧力損失



(b) 内径 11.2 mm の MSE スタティックミキサーの圧力損失

図 3-6 圧力損失に及ぼす混合エレメントの積層枚数の影響

先に示した(b)~(d)の混合エレメントとした場合には ΔP が増加したため、MSE スタティックミキサーによる圧力損失を小さくするという点においては、(a)の混合エレメント A,Bの方が有利である。小室をインボリュート状の混合エレメントとした場合に圧力損失が大きくなるのは、混合エレメントを流れる際の流路が長くなることによるものと考えられる。また、混合エレメントを上流側のみ([20|0]、または下流側のみ(0|20])に積層した場合は、半径方向流路の増大により ΔP がさらに低下した(図3-7)。

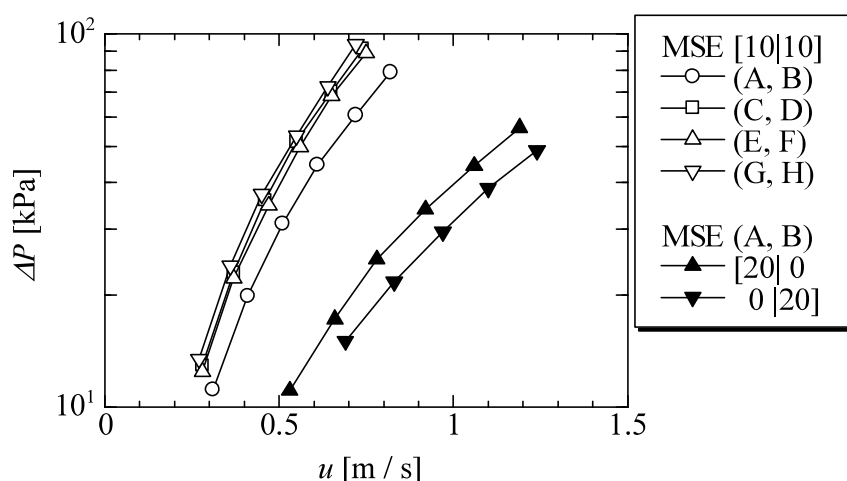


図3-7 混合エレメントおよび混合エレメント積層状態が異なる MSE スタティックミキサーの圧力損失の比較

3.2.3 まとめ

4組8種のMSEスタティックミキサー用混合エレメントのうち、開口部直径14mm、小貫通孔を直接に配置した図3-4(a)の混合エレメントA,Bを使用したものが最も圧力損失が低い、それでもMSEスタティックミキサーはケニックス型スタティックミキサーと比較して圧力損失が50倍超に達した。しかし、MSEスタティックミキサーは混合エレメントの積層枚数の増加により圧力損失を小さくできることを明らかにした。

3. 3 MSE スタティックミキサー内部の流動解析

MSE スタティックミキサー内部では、流体が複雑に連通する貫通孔により形成される流路を流れることによって混合されるため、混合エレメント積層体内部の流動状態は重要であるが、構造上、内部の流動状態を計測したり、可視化することができない。そこで数値シミュレーションにより MSE スタティックミキサー内部の流動状態について検討した。

3.3.1 流動解析条件

熱流体・粉体解析ソフトウェア R-FLOW (㈱アールフロー) を使用して、MSE スタティックミキサー内部の流動解析を行った。内径 25 mm の平滑管の中の本流 (25°Cの水) の平均流速を圧力損失測定と同じ 0.5 m/s (レイノルズ数 = 11,700) とし、着色した水を MSE スタティックミキサーの入口 30 mm 上流から本流に対して 0.2 wt%となるように管中心から注入した。R-FLOW は基礎方程式としてナビエーストークス方程式、乱流モデルとして標準 $k-\epsilon$ モデルを使用しており、流動解析により MSE スタティックミキサー内部の速度ベクトル、圧力損失、および MSE スタティックミキサー内部と出口の着色水の濃度分布を得た。MSE スタティックミキサーを構成する混合エレメントは図 3-4(a)に示した A,B とし、中間板の両側に混合エレメントを 10 枚 (5 組) ずつ積層した場合、下流側に 20 枚 (10 組) 積層した場合、および混合エレメントを使用せずにブラインド板および中間板のみとした場合の 3 つについて解析を行った。表 3-1 に MSE スタティックミキサーの解析条件について、表 3-2 に解析に際して与えた共通条件についてまとめた。

表 3-1 MSE スタティックミキサーの解析条件

ケース	上流積層体	下流積層体
MSE (A, B) [10 10]	10 枚 (5 組)	10 枚 (5 組)
MSE (A, B) 0 20]	なし	20 枚 (10 組)
MSE (A, B) [0 0]	なし	なし

表 3-2 共通解析条件

流体	水 @ 25°C
流速	0.5 m/s (Re = 11,700)
配管内径	25 mm
着色水濃度	0.2 wt%

3.3.2 解析結果および考察

(1) MSE (A, B) [10|10]

i) 速度ベクトル

図 3-8 に MSE スタティックミキサー入口、および出口の流体の流れ方向の断面（以後、「流れ断面」とする）の速度ベクトル分布を示し、図 3-9 に上流から 3 枚目の混合エレメントにおける流れ断面に対して垂直な混合エレメント半径方向の断面（以後、「上流断面」とする。図中(a。)、および下流から 2 枚目の混合エレメントにおける半径方向の断面（以後、「下流断面」とする。図中(b。))の速度ベクトル分布を示した。図中(a)は混合エレ

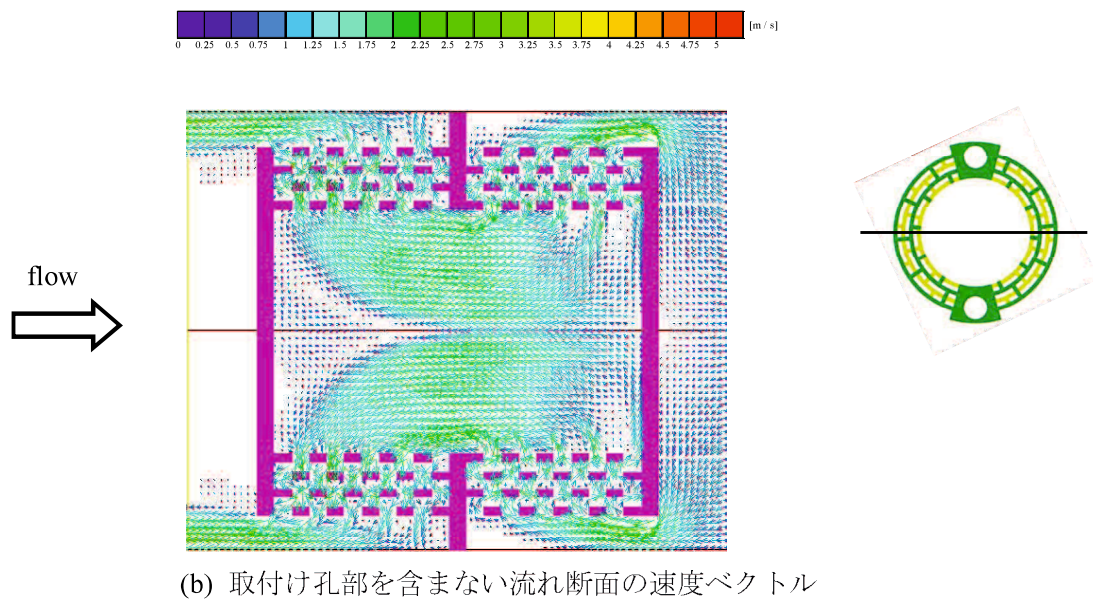
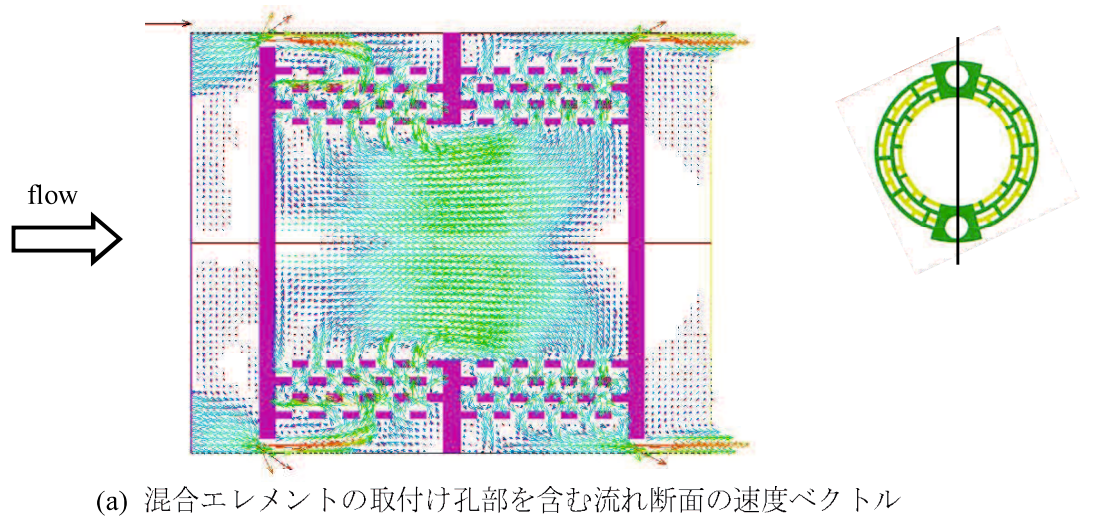


図 3-8 MSE (A, B,[10|10]) における内部の流れ断面の速度ベクトル

メントの取付け孔部により流路が狭くなっている部分の流れ断面の速度ベクトル分布で、
 図中(b)は取付け孔部の無い部分の流れ断面の速度ベクトル分布である。

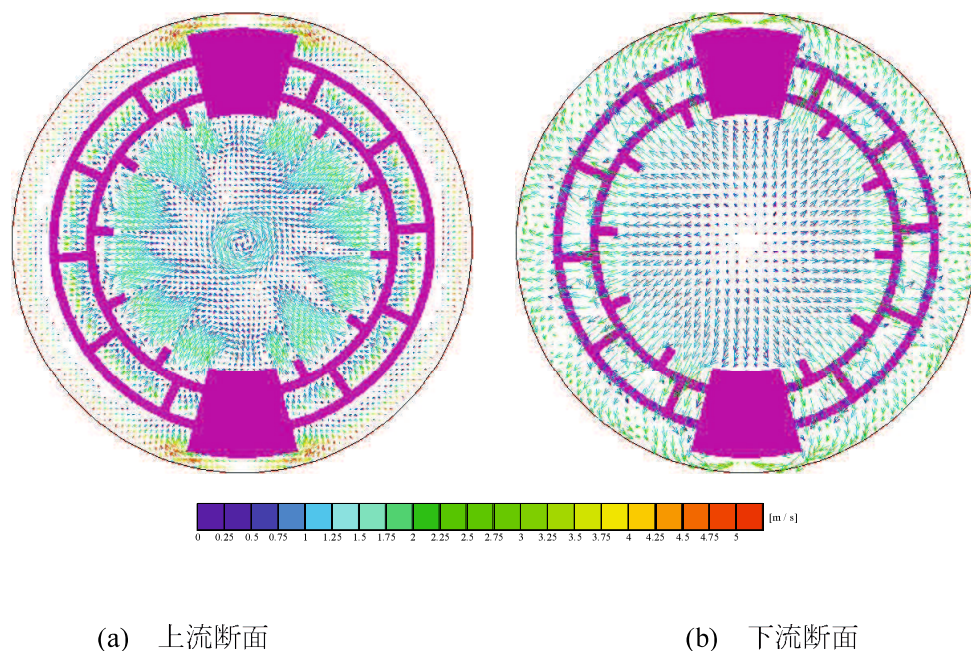


図 3-9 MSE (A, B,[10|10]) における内部の半径方向断面の速度ベクトル

表 3-3 に MSE スタティックミキサー周りの各部の流路面積についてまとめた。流速が大きいのは、流路面積が小さいブラインド板と管内壁の間隙により形成される環状部および中間板の貫通孔である。各々の流路面積は、管断面積に対して共に約 30%である。図より、流体はブラインド板と管内壁の間隙により形成される環状部から高速流となって、積層体外周部から積層方向にほぼ均等に上流の積層体内部に流入し、積層体内周部から積層方向にほぼ均等に下流の積層体外周部を経て高速流となって流出する。上流断面および下流断面では、積層体内部の連通する貫通孔で流体の流れ方向が複雑に乱れており、また、積層体内部以外は円周方向にほぼ均等に流れが分布している。以上により、流体は、ブラインド板と管内壁の環状部で絞り効果により発生した高速流が、流れ方向にほぼ均等に積層体内部に流入し、積層体内部では複雑に連通する貫通孔により形成された流路により分割・合流、およびせん断作用等により混合が促進されているものと考えられる。

表 3-3 MSE スタティックミキサー周りの各部の流路面積

場所	流路面積 [mm ²]
管断面	491
環状部	145
混合エレメント積層体 (外周部)	273
混合エレメント積層体 (内周部)	171
中間板貫通孔	154

ii) 圧力分布

図 3-10 に平行断面、図 3-11 に上流断面および下流断面の圧力分布を示した。MSE スタティックミキサー入口および出口のブラインド板前後で圧力が大幅に低下しているが、ブラインド板と管壁との間の環状部で流路面積が約 30%に絞られ、圧力エネルギーが速度エネルギーに変換されたことが原因である。また、積層体の前後、特に上流側の積層体内部においてかなりの圧力低下がみられるが、積層体内部の連通する貫通孔間で分割・合流の繰り返により流れが乱され、せん断作用が働いたことが原因であると考えられ、それだけ混合促進に寄与しているといえる。一方、同様に流路面積が約 30%に絞られる中間板の貫通孔の前後で圧力低下が小さいのは、流路面積は環状部と同程度であるが、流路が環状部ほど狭くないため、流れの乱れが小さいことが原因であると考えられる。下流側の積層体内部の圧力低下が小さいのは、流体が円周方向に流れるにしたがい流路面積が拡大していくからであると考えられる。

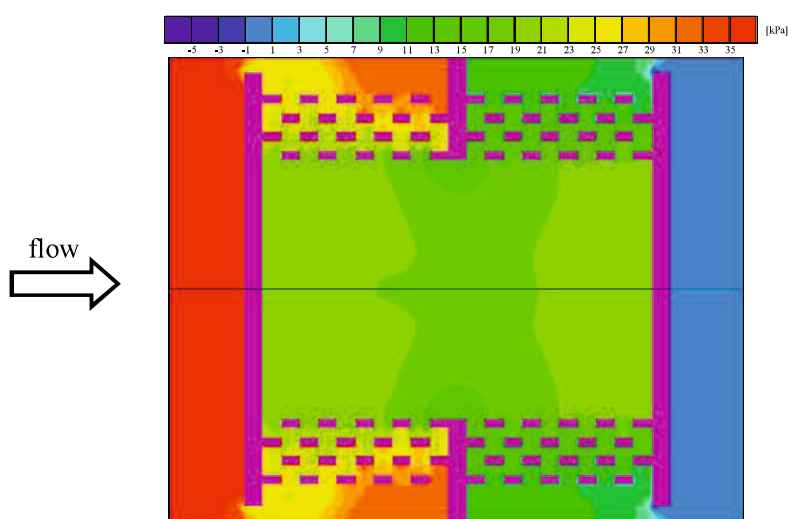


図 3-10 MSE (A, B,[10][10]) における内部の平行断面の圧力分布

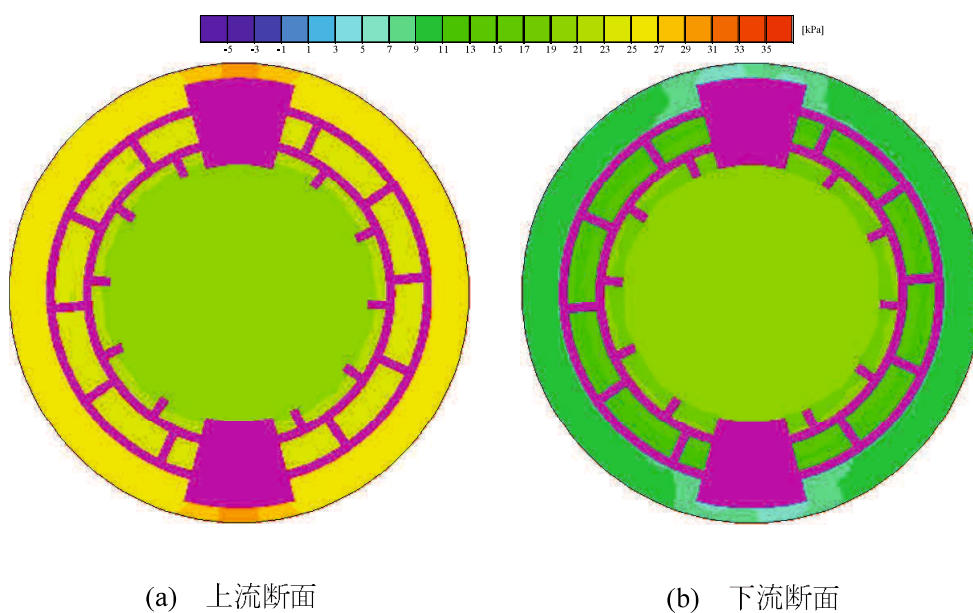


図 3-11 MSE (A, B,[10|10]) における内部の垂直断面の圧力分布図

iii) 濃度分布

図 3-12 に平行断面、図 3-13 に上流断面および下流断面の着色水の濃度分布を示した。平行断面では、着色水は MSE スタティックミキサー内部に流入して、上流側の積層体を通じたところでかなり混合されており、下流側の積層体の入口では、混合エレメントを通過する前に濃度はほぼ均一となっている。

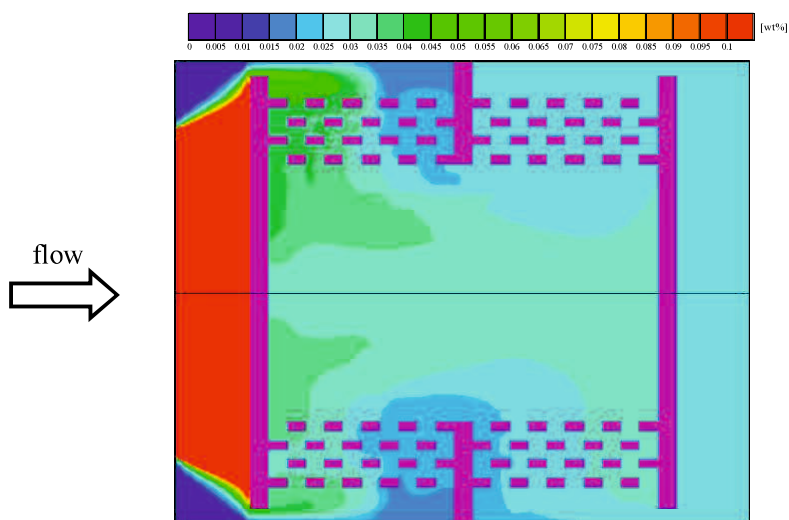


図 3-12 MSE (A, B,[10|10]) における内部の平行断面の濃度分布図

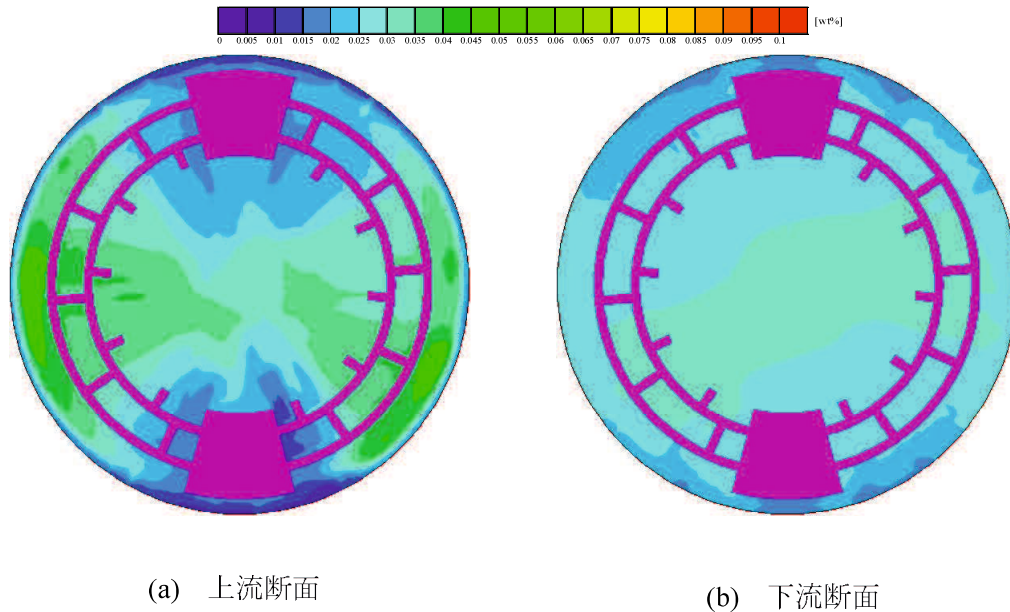


図 3-13 MSE (A, B, [10]10) における内部の垂直断面の濃度分布図

一方、上流断面では積層体を通過したところで濃度分布は小さくなっているが、まだ円周方向に分布がある。下流断面では積層体入口で円周方向の濃度分布は小さくなり、積層体出口ではほぼ均一になっている。これらから、MSE スタティックミキサーは管内壁とブラインド板の間隙、混合エレメントの積層体、中間板の貫通孔の各々の効果により全体的に混合が促進していると考えられる。また、平行断面の濃度分布と圧力分布が類似していることから、流体が分割・合流、せん断力の作用による乱流や渦流等の発生のために、圧力が下がりながら混合が進んでいるものと推定される。

(2) MSE (A, B) 0[20]

i) 速度ベクトル

図 3-14 に平行断面、図 3-15 に上流断面および下流断面の速度ベクトルを示した。上流側にブラインド板がないため流体は環状部で縮流することなく、中間板の開口部を通過する際に縮流して流速が増加している。縮流直後の中間板の貫通孔出口の流体は、流れ方向の速度成分が大きく、また、混合エレメントの積層枚数が多いため半径方向の流路面積が中空部や環状部の 2 倍以上あるので、積層体上流部分を通過する流体は少なく、流体の大部分は積層体下流の混合エレメントを通過している。このことは上流断面の速度ベクトルが小さく、下流断面の速度ベクトルが大きいことから分かる。流体は積層体内部を中空部上流から環状部下流へ斜めに横切るように流れており、積層体の積層方向にほぼ均等に

流れている MSE(A, B) [10|10]とは異なる流れとなっている。表 3-4 に本ケースにおける MSE スタティックミキサー周りの各部の流路面積についてまとめた。

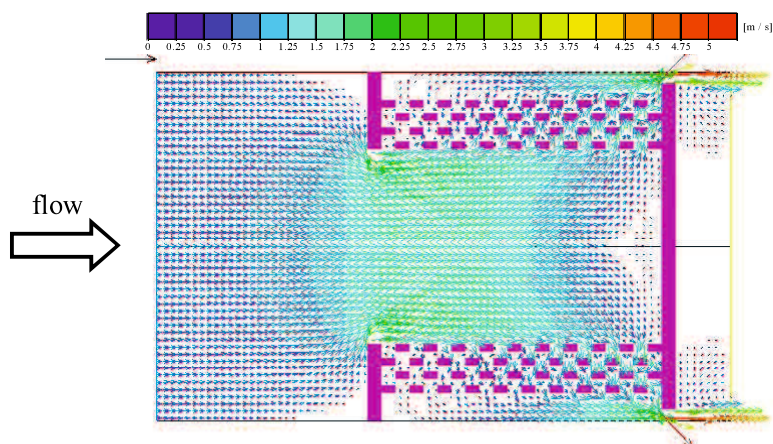


図 3-14 MSE (A, B, 0 [20]) における内部の平行断面の速度ベクトル

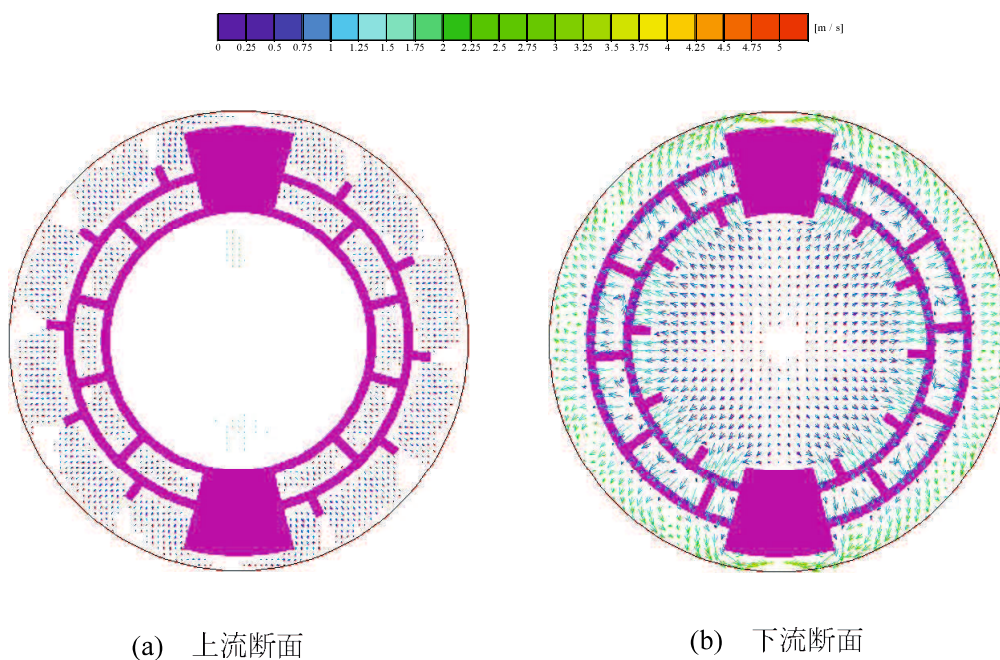


図 3-15 MSE (A, B, 0 [20]) における内部の垂直断面の速度ベクトル

表 3-4 MSE スタティックミキサー周りの各部の流路面積

場所	面積 [mm ²]
管断面	491
環状部	145
混合エレメント積層体 (外周部)	546
混合エレメント積層体 (内周部)	342
中間板貫通孔	154

ii) 圧力分布

図 3-16 に平行断面、図 3-17 に上流断面および下流断面の圧力分布を示した。MSE スタティックミキサー出口のブラインド板と管壁との環状部による絞り効果により、出口のブラインド板を境界としてその前後で圧力が大きく低下している。MSE (A, B) [10|10]における流れ方向の圧力分布と比較すると中空部での圧力分布は小さく、流れが緩やかであることに対応している。

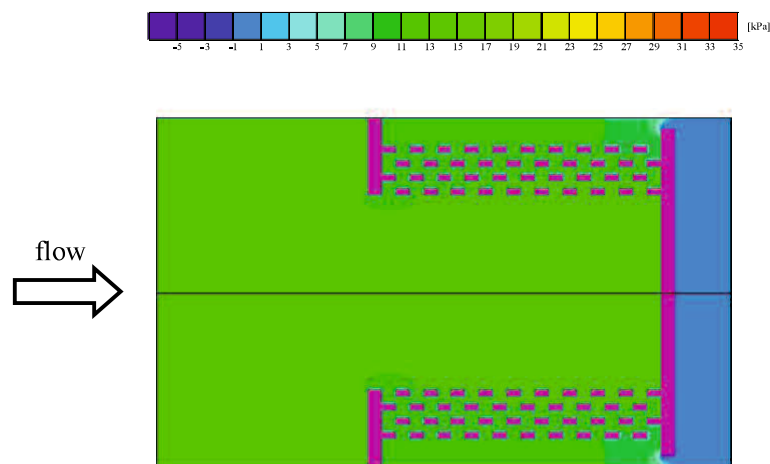


図 3-16 MSE (A, B, 0 |20) における内部の平行断面の圧力分布図

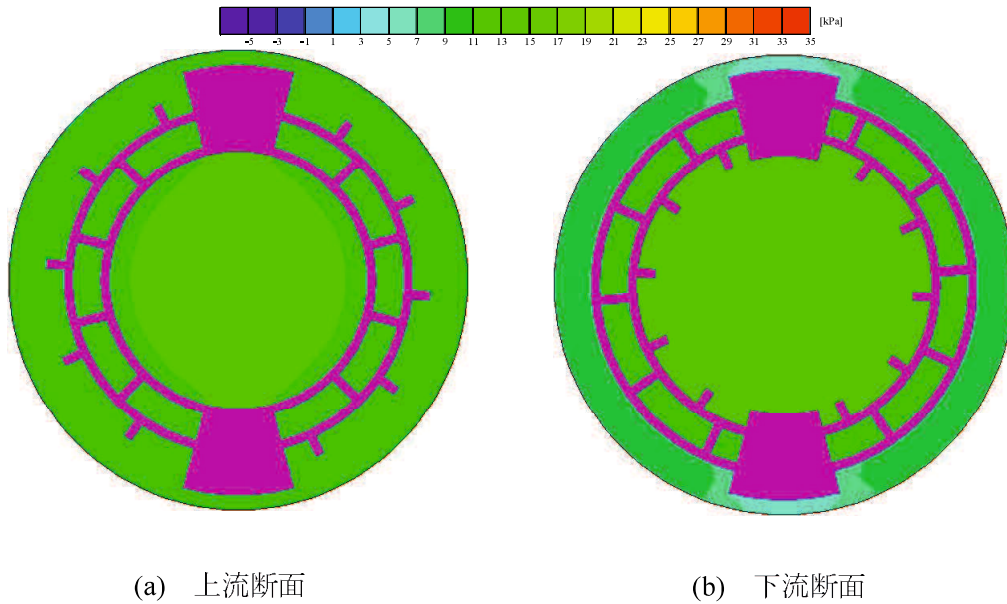


図 3-17 MSE (A, B, 0 [20]) における内部の垂直断面の圧力分布図

iii) 濃度分布

図 3-18 に平行断面、図 3-19 に上流断面および下流断面の着色水の濃度分布を示した。平行断面では、着色水は下流側のブラインド板に衝突するまで自然対流により拡散しながら管中心部を直進し、その後ブラインド板の上流 3 層の混合エレメントを通過するだけであるため、積層体内部の連通路路による混合促進効果は小さい。さらに流体は、管内壁とブラインド板の間隙から MSE スタティックミキサー外部に流出するが、下流断面からも分かるように、このときに生じる高速流によって混合されている。

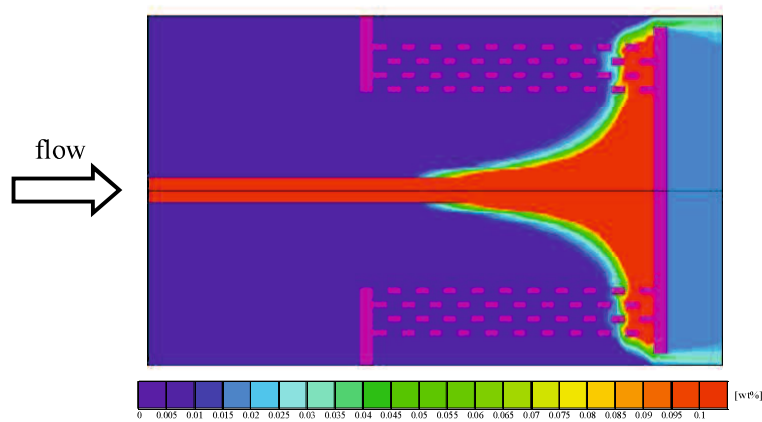


図 3-18 MSE (A, B, 0 [20]) における内部の平行断面の濃度分布図

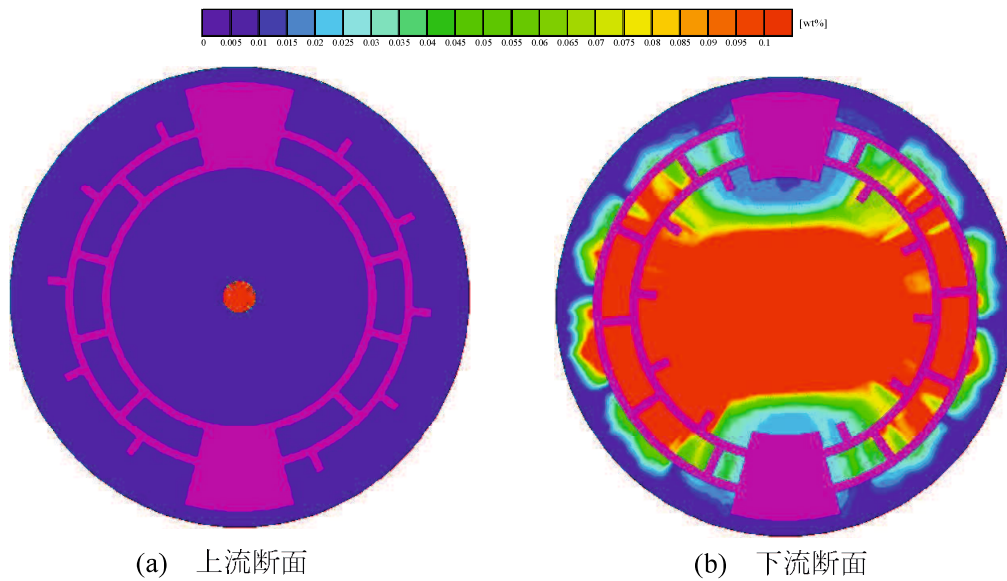


図 3-19 MSE (A, B, 0 [20]) における内部の垂直断面の濃度分布図

(3) MSE (A, B) [0 | 0]

i) 速度ベクトル

図 3-20 に平行断面、図 3-21 に上流断面および下流断面の速度ベクトル図を示した。上流のブラインド板と管壁との環状部下流や、下流のブラインド板と管壁との環状部上流、

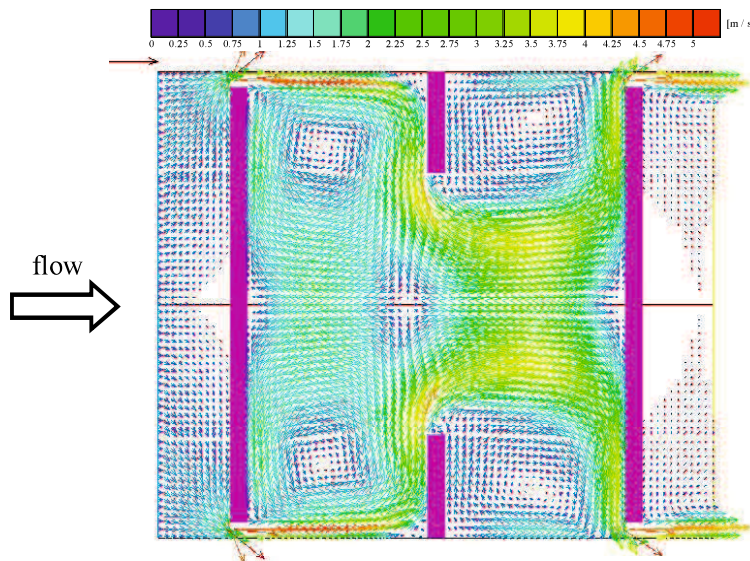


図 3-20 MSE (A, B, [0 | 0]) における内部の平行断面の速度ベクトル

および中間板の貫通孔入口の流速が大きい部分の近傍に、流速が小さい渦流状の流れがみられる。これは、積層体が存在しないため、流路の狭い部分で生じた高速流が、流動抵抗の小さい部分を乱されずに通過するので、その周辺でデッドスペースが発生しているためと考えられる。

上流断面では中央部に向かって速度ベクトルが小さく、中央部ではほぼゼロである。下流断面では中央部で速度ベクトルがほぼゼロで、放射状に速度ベクトルが大きくなりながら広がっている。いずれもデッドスペースの存在を示している。

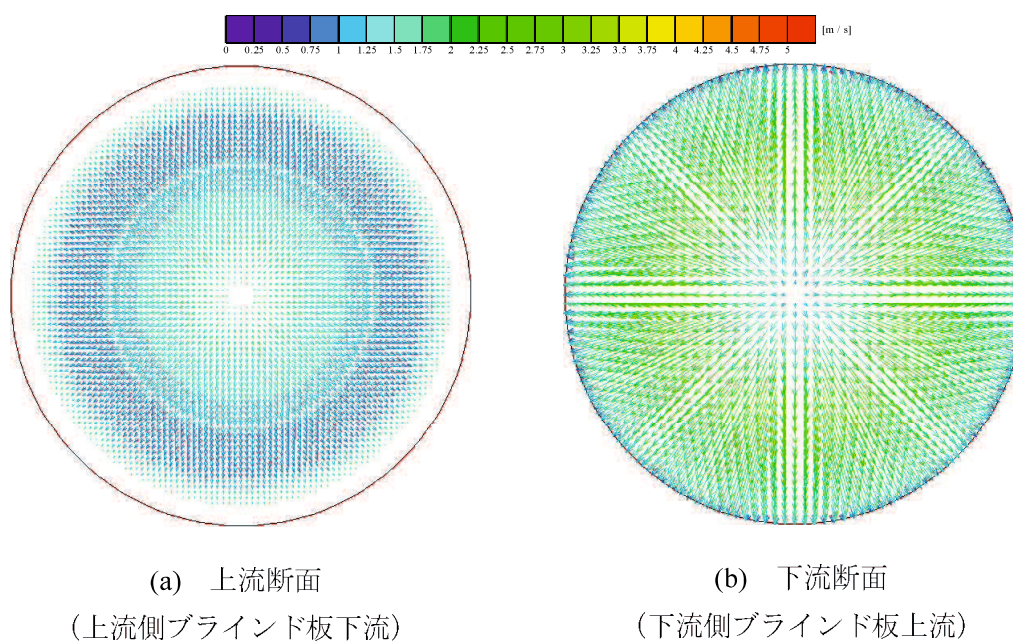


図 3-21 MSE (A, B, [0|0]) における内部の垂直断面の速度ベクトル

ii) 圧力分布

図 3-22 に平行断面、図 3-23 に上流断面および下流断面の圧力分布を示した。絞り効果により MSE スタティックミキサー入口および出口のブラインド板を境界として、その前後で圧力が大幅に低下しているが、積層体がないために MSE (A, B) [10|10] のように内部の圧力分布は小さく、デッドスペース部分の圧力が周辺の圧力と比較して小さくなっている。上流断面および下流断面においては、圧力分布はかなり小さい。

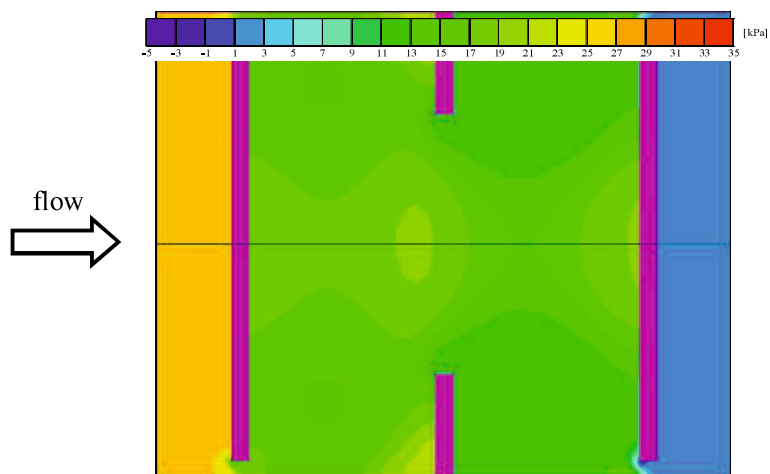


図 3-22 MSE (A, B, [0|0]) における内部の平行断面の圧力分布図

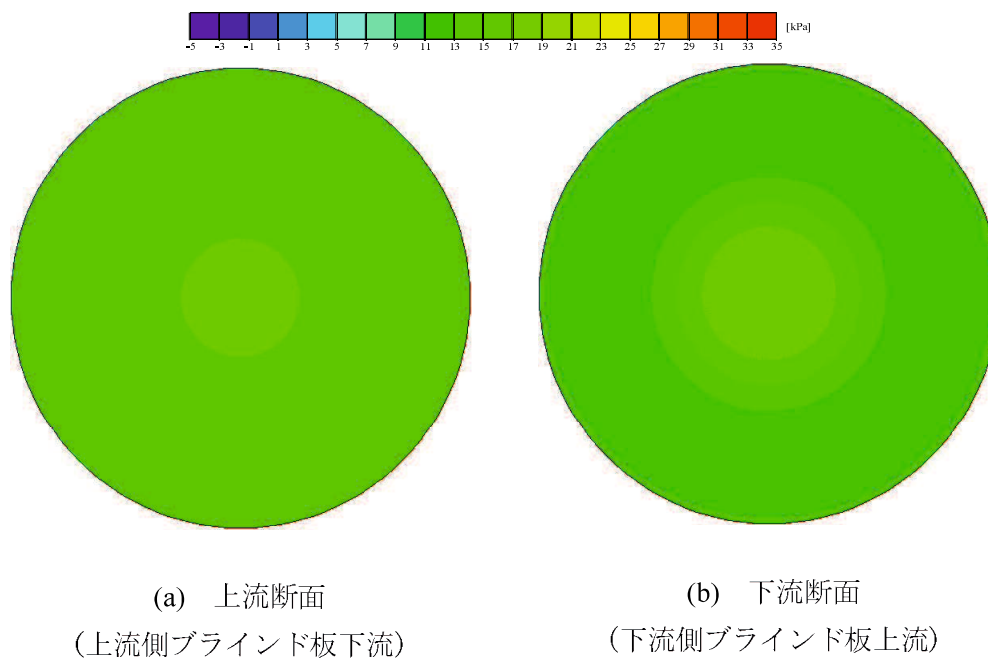


図 3-23 MSE (A, B, [0|0]) における内部の垂直断面の圧力分布図

iii) 濃度分布

図 3-24 に平行断面、図 3-25 に上流断面および下流断面の着色水の濃度分布を示した。平行断面では、着色水は上流側のブラインド板通過後に、管内壁とブラインド板の環状部の絞

り効果による流れの乱れにより濃度の均一化が進むが、積層体がないためそれ以上混合が進むことはなく、下流側の環状部から流出している。下流断面には同等の濃度を有する大きな流体塊がみられ、流体が乱されずに流れている様子が分かる。

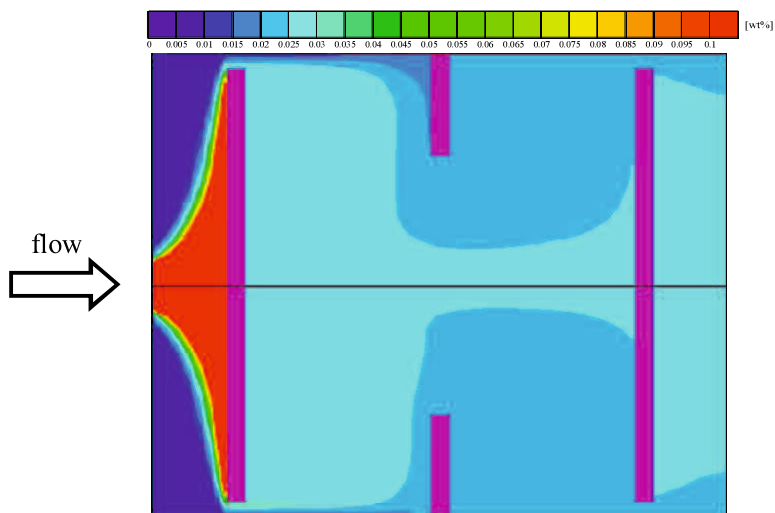


図 3-24 MSE (A, B, [0|0]) における内部の平行断面の濃度分布図

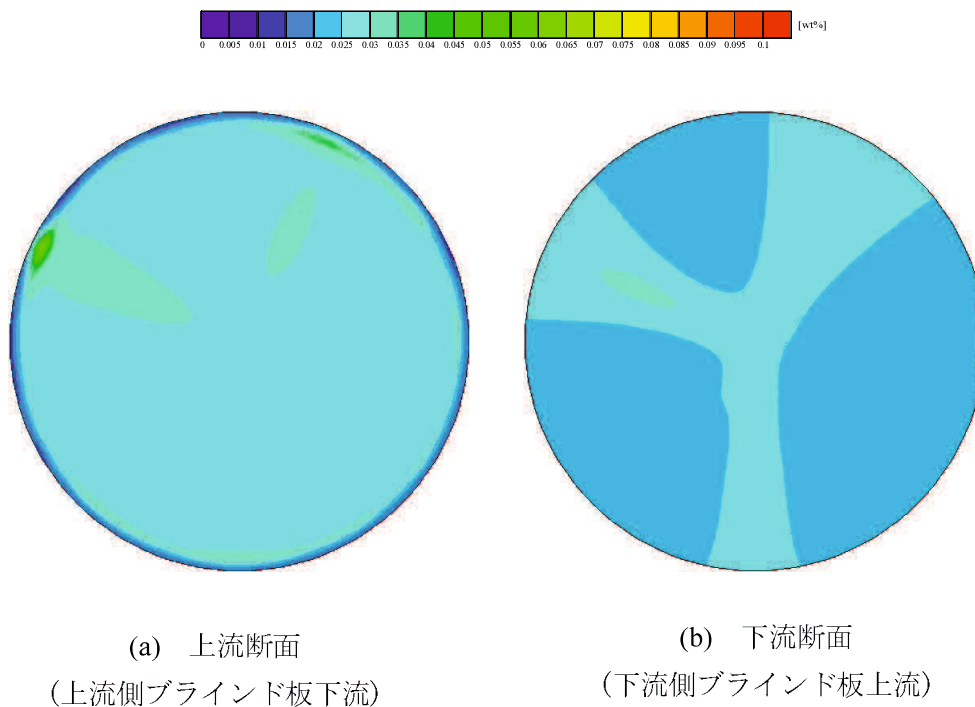


図 3-25 MSE (A, B, [0|0]) における内部の垂直断面の濃度分布図

3.3.3 まとめ

混合エレメントの積層パターンが異なる2種類のMSEスタティックミキサーおよび混合エレメントのない場合について、流動解析により速度ベクトル分布、圧力分布および濃度分布について検討した。以下に結果についてまとめた。

- (1) 速度ベクトル分布より流速が最大となるのは、流路面積が管断面積に対して約30%であ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、および中間板の貫通孔部である。
- (2) 混合エレメントを上流側および下流側に10枚（5組）ずつ配置したMSE (A, B) [10|10]の結果では、流体は環状部から高速流となって積層体外周部から積層方向にほぼ均等に積層体内部に流入し、積層体内部では連通する貫通孔により流れが複雑に乱されている。高速流が積層体内部に流入し、分割・合流、およびせん断作用等により、混合されていると考えられる。
- (3) 混合効果に対する上流側のブラインド板の寄与は大きく、そのため混合エレメントを配置しないMSE (A, B) [0|0]でもある程度の混合効果がみられる。
- (4) 下流側のみ20枚（10組）配置したMSE (A, B) [0|20]では、積層体の下流側のわずかな混合エレメントのみが混合促進に寄与しており、中間板の両側に積層体を設置することが混合促進のために必要である。

3. 4 結言

本章では、新規に開発された MSE スタティックミキサーについて、スタティックミキサーの採用に際しての基準となる圧力損失を、汎用のケニックス型スタティックミキサーとの比較により明らかにした。さらに、流動解析の結果とともに検討することにより、MSE スタティックミキサー周りの流動特性について検討を行い、以下の結果を得た。

(1) MSE スタティックミキサーは、汎用のケニックス型スタティックミキサーと比較して圧力損失が約 50 倍程度であり、MSE スタティックミキサーの圧力損失は、ミキサー無しに対して混合エレメント A,B を両側に 4 枚 (2 組) ずつ配置した場合で約 11,000 倍、10 枚 (5 組) ずつ配置した場合に約 930 倍となった。実験より混合エレメントの積層枚数を増やすことで圧力損失が低下したが、これは混合エレメント積層枚数の増加に伴い半径方向の流路面積が増加するためである。

(2) 中間板の下流側に混合エレメントを 20 枚 (10 組) 積層した MSE スタティックミキサーが最も低い圧力損失を示したが、流動解析より混合性能が低いことが明らかになった。流動解析によれば積層体の一部に流体が集中して流れており、これにより混合性能が低下することが原因である。

(3) 4 種類の混合エレメントについて圧力損失を測定した結果、直線配列 1.5 段の混合エレメント A,B を積層したものが最も圧力損失が小さかった。分割・合流の回数が多いほど圧力損失が大きくなり、また、貫通孔をインボリュート状に配置したような流路の長い混合エレメントほど圧力損失が大きくなることを明らかにした。

(4) MSE スタティックミキサーでは、混合エレメントを両側に 10 枚 (5 組) ずつ配置した場合に、上流側・下流側のブラインド板と管内壁による環状部、ならびに中間板の貫通孔で流速が大きくなって圧力が大幅に低下していることが流動解析により分かった。

第4章 スタティックミキサーの混合特性の評価方法の開発

4.1 緒言

第3章では、スタティックミキサーの圧力損失特性を汎用のケニックス型スタティックミキサーと比較しながら示し、ミキサー内部の流動状態を解析結果に基づき検討した。本章では、スタティックミキサーの混合性能を明らかにすることを目的とする。このため、乱流域において水流中に親和性の異なる流体をスタティックミキサーによって混合し、ミキサー出口で可視化することによって得た管断面画像による混合特性の定量的な評価方法について述べる。

4.2 流れの可視化によるスタティックミキサーの混合特性の評価

4.2.1 可視化装置および実験方法

管断面画像の可視化実験の流れ系を図4-1に示した。

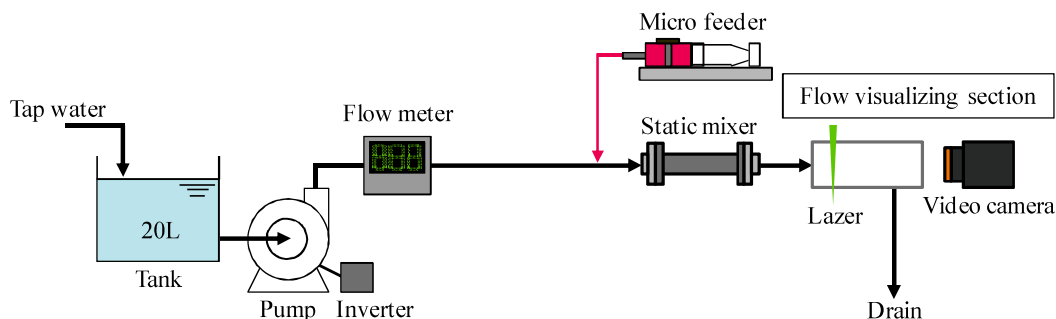
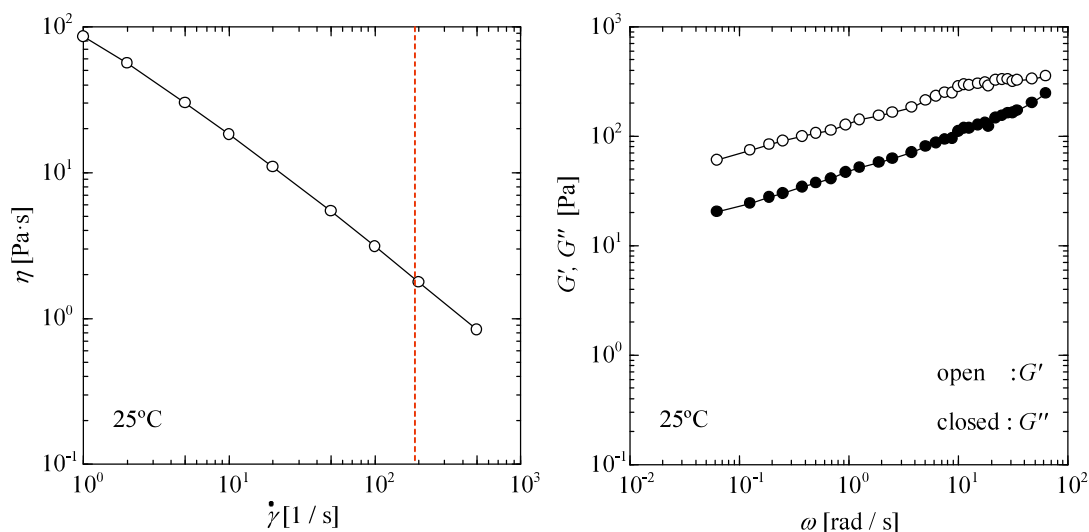


図4-1 流れ系

本流（水）の平均流速を 0.5 m/s （レイノルズ数 = 11,700）とし、スタティックミキサーの出口より 360 mm 上流のノズルから、塩ビ製平滑管（内径 25 mm ）の中心に可視化する流体を注入した。注入流体としてカルボキシメチルセルローズ（CMC2280、㈱ダイセル）の水溶液（ 1.5 wt\% ）を使用し、これに蛍光顔料ローダミン B（和光純薬工業㈱）を 0.0003 wt\% 添加し、この流体を本流の 0.2 wt\% となるようにマイクロフィーダー（JP-V、古江サイエンス㈱）により注入した。スタティックミキサーとして、MSE スタティックミキサーは図3-4で

示した A~H の混合エレメントの積層枚数を適宜変更したもの、および図 3-5 で示した 1B 配管用のケニックス型スタティックミキサー1-N60-331-N を使用した。

注入流体の平衡流動特性および動的粘弾性特性について、レオメータ (NRM-2000 改, エルクエスト製) により測定した結果を図 4-2(a), (b)に示した。平衡流動特性より注入流体は擬塑性流体であり、ノズル出口のせん断速度 (図中の破線) における粘度は $1.9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ であった。弾性的性質が支配的であり、弱いゲルに類似したレオロジー特性を示した。



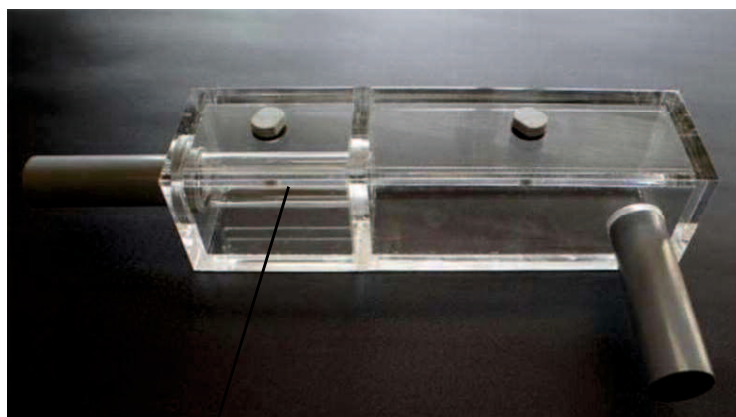
(a) CMC2280 1.5 wt%水溶液の
平衡流動特性

(b) CMC2280 1.5 wt%水溶液の
動的粘弾性特性

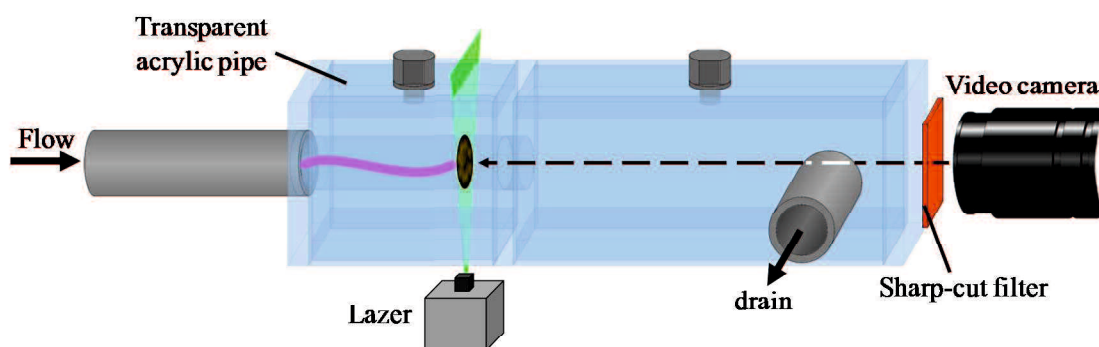
図 4-2 CMC2280 1.5 wt%水溶液のレオロジー特性

図 4-3 に装置の可視化部の詳細を示した。スタティックミキサー出口配管に透明アクリル製平滑管を接続し、スタティックミキサー出口より 180 mm 下流においてレーザーシート光 (波長 532 nm, 50 mW) を流れ方向と直交するように照射した。透明アクリル製平滑管の肉厚は 0.2 mm と薄くし、これを矩形のボックスで覆いボックス内に水を満たすことで可能な限り光の屈折の影響を小さくした。レーザーシート光により励起された蛍光顔料中の蛍光物質が励起光を発する管断面画像を、シャープカットフィルター (O56, Hoya Candeo Optronics, 透過限界波長 = $560 \pm 5 \text{ nm}$) を通し、流れ方向の対面側から高速ビデオカメラ (VW-6000, ㈱キーエンス) で撮影した。シャープカットフィルターは、水流中に含まれる気泡が撮影画像中にノイズとして検出されるのを防ぐために設置したものである。撮影時のシャッタースピードは 60 分の 1 秒とし、蛍光部分が黄、橙色を呈する画像を得た。画像の円管部は 85,636 画素で表現され、全画素に対して R, G, B の輝度を画像処理ソフトウェア

ア (ImageJ, National Institutes of Health) によって求めた。



(a) 透明アクリル製の平滑管



(b) 可視化部の模式図

図 4-3 装置の可視化部詳細

図 4-4 に輝度 R , G , B と蛍光顔料の濃度との相関を示す。輝度 R , G が蛍光顔料の濃度と 0.9 を超える相関性を示した。しかし、流体中に気泡が存在する場合、これが光源の色である緑色に発光して輝度 G に影響するため、気泡の影響を受けない輝度 R を解析に使用した。またビデオカメラの特性により、蛍光顔料が存在しない部分でも輝度 R は必ずしも 0 にはならなかった。そこで実際の断面画像を観察し、蛍光していないと判断できるがその輝度が 0~30 であったことから、しきい値 $R_t=30$ を設け、輝度 R が R_t 以上の画素を蛍光画素とすることとした。

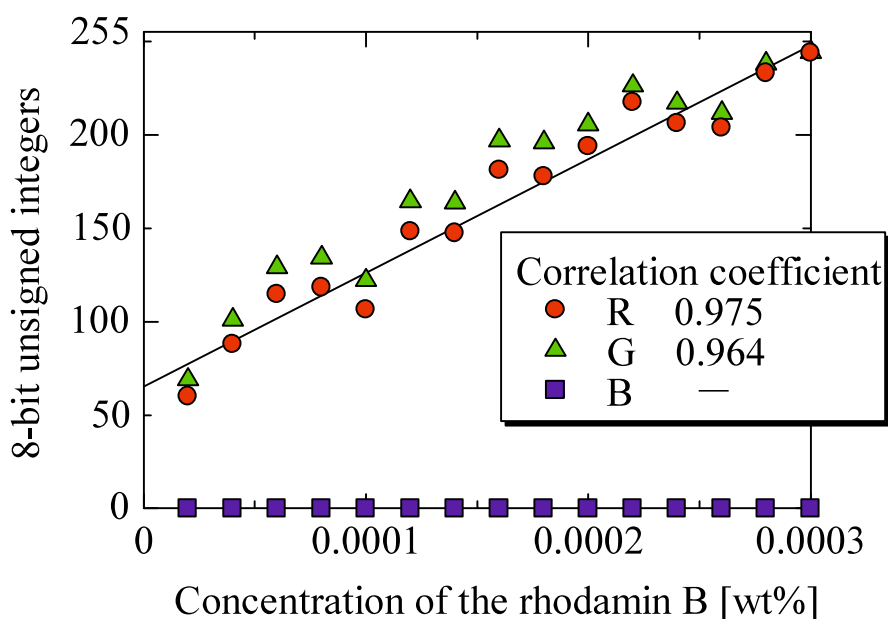


図 4-4 輝度 R , G , B と蛍光顔料の濃度の相関 (ローダミン B)

4.2.2 混合特性の評価指標

これまでスタティックミキサーの混合特性は、 CoV (Etchels and Meyer, 2004) や最大縞模様面積 (Alberini *et al.*, 2014) を用いて評価されてきた。 CoV は標準偏差を平均値で除した値であり、混合が不十分な場合には管断面の輝度の偏差の増大に伴って CoV も増大する。しかし、標準偏差や平均値といった統計量は、正規分布のような平均値を基準にした単峰性で対称な分布に対して有効であるが、そうでない場合には統計量そのものの意味が曖昧になる。また、Alberini らが用いた最大縞模様面積による評価は、層流域における混合流体を可視化した画像における縞模様をもとに解析を行うが、乱流域における本実験ではこのような縞模様は見られない。そこで、乱流域での流体混合に対して新たな評価指標を導入する必要があると考え、本実験では新たに以下に示す 5 つの指標を提案し、混合特性を評価した。

混合度 : M

本流中に供給した注入流体は混合によって配管内に広がり、管断面における面積が増大する。面積が増大すると蛍光画素領域が増加するので、そこで、注入流体の広がりを示す指標として、蛍光画素数を管断面の全画素数に対する百分率として表した混合度 M を定義した。 M が高いほど管断面内に蛍光画素領域が広がっているので、混合性能が高いことを示す。混合度 M は各画素の輝度を考慮しないため、全画素がしきい値以上であれば $M=100\%$

となる。図 4-5 に撮影画像と、しきい値を適用して処理した処理画像を示した。処理画像で蛍光している画素数を求め、全画素数からその割合を求めると、左から 3.21、17.69、73.40% となり、右の画像は混合度が高いと評価される。

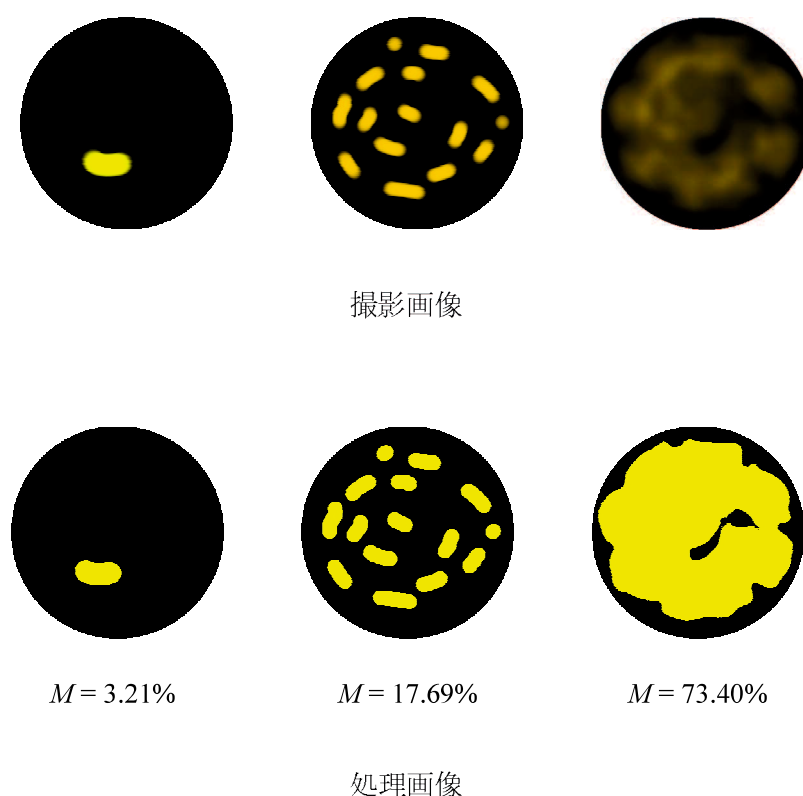


図 4-5 混合度 M の解析 (図の画像はイメージ)

中央輝度 : R_{med}

蛍光している画素について、その輝度の平均値を指標にすることを考えた。しかし、管断面の撮影画像における蛍光画素の輝度 R は正規分布とはならず、かつ外れ値が発生しやすい。そこで蛍光画素の R の平均値ではなく中央値を中央輝度 R_{med} と定義した。中央値は平均値に比べて外れ値の影響を受けにくい。図 4-6 に、横軸に R 、縦軸に蛍光画素数 n とした場合の R_{med} を示した。

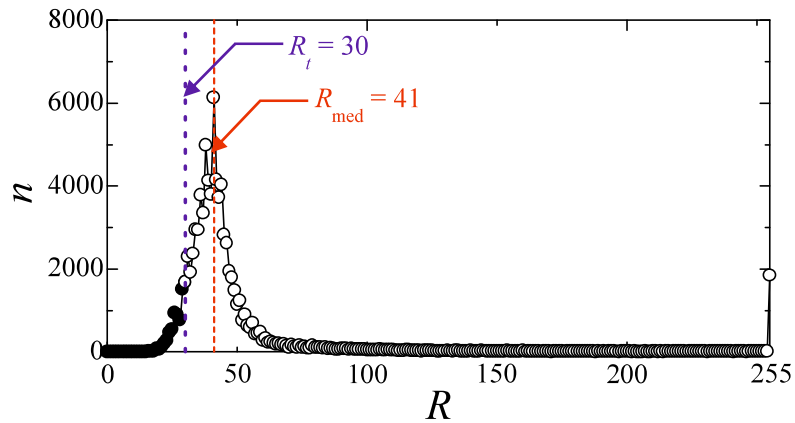


図 4-6 中央輝度 R_{med}

最大輝度 : R'_{max}

スタティックミキサーによる混合が不十分な場合には、注入流体は管断面に均等には広がらず、濃厚な塊として残存する。そこで、輝度 R が高く濃厚な部分の存在を抽出するために、 R の画素数 $n(R)$ に対し指数関数的に重み付けした $n'(R)$ を以下の式(1)のように定義した。そして $n'(R)$ が最大となるときの R を最大輝度 R'_{max} とした。

$$n'(R) = n(R)^{R/255} \tag{1}$$

図 4-7 に、横軸に輝度 R 、縦軸に n' とした場合の最大輝度 R'_{max} を示した。

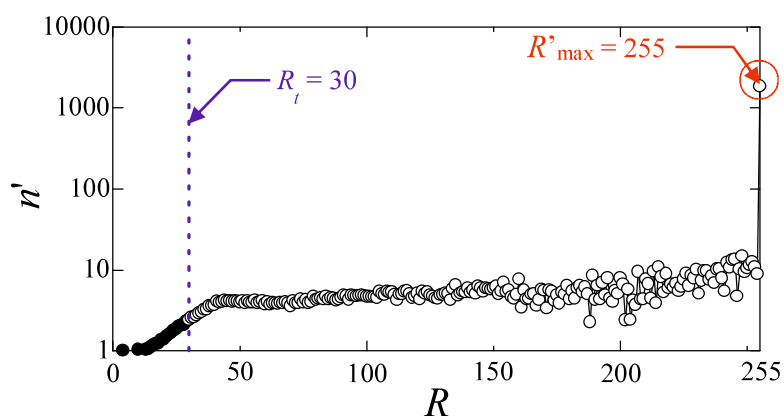


図 4-7 最大輝度 R'_{max}

濃厚塊の大きさ : L

R'_{\max} を定義する際に用いた $n'(R)$ は、輝度が高く濃厚な塊の部分の抽出できるが、塊の存在の有無やその大きさはわからない。そこで、 R_{med} に経験的に求めた 30 を加えたしきい値 $R_{t,l}$ を以下の式のように定義した。

$$R_{t,l} = R_{\text{med}} + 30 \quad (2)$$

次に $R_{t,l}$ 未満の輝度をゼロとすることで、画面上で特に輝度が高い領域を抽出した。抽出した領域の面積を画素数で求め、全画素数に対する占有面積の割合 L とした。ここでは、 L は大きい塊から順番に 5 つまで求めた。 L が小さいほど流体は小さな塊に分解されていることになる。

偏在度 : Dev

本流に対して比重の異なる流体を注入した場合、比重差に応じて注入流体が管断面の上部または下部に偏在し、ある程度の大きさの塊になって存在する。そこで、管断面中心からの蛍光領域の偏りを表す指標として偏在度 Dev を定義した。 Dev の算出方法は、まず各画素の輝度 R_i とその座標 (x_i, y_i) を次式に代入することで輝度重心の座標 (x, y) を求める。

$$\text{輝度重心の座標 } (x, y) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i \times R_i)}{\sum_{i=1}^n R_i}, \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \times R_i)}{\sum_{i=1}^n R_i} \right] \quad (3)$$

そして、輝度重心の座標のうち y の値を使用し、管断面の上部を 1、中心を 0、底部を -1 とした座標に変換して Dev とした。ゆえに、 Dev は -1 から 1 の値であり、絶対値が 1 に近いほど蛍光体が偏在しており、均一化が進むほど 0 に近づくことになる。

4.2.3 評価指標によるスタティックミキサーの混合特性の評価

可視化実験より得られた画像を図 4-8 に示した。なお、以降の実験結果の表記において、スタティックミキサーが無い場合を「none」、ケニックス型スタティックミキサーを「NS」、MSE スタティックミキサーを「MSE」と表記する。図より none では明瞭な蛍光領域が見られ、NS では蛍光領域が希薄になっている。MSE では NS よりさらに希薄な蛍光領域が管断面により広範囲に均一に分布しており、3 つの画像の中で着色流体が本流中に最も均一に混合されていることがわかる。

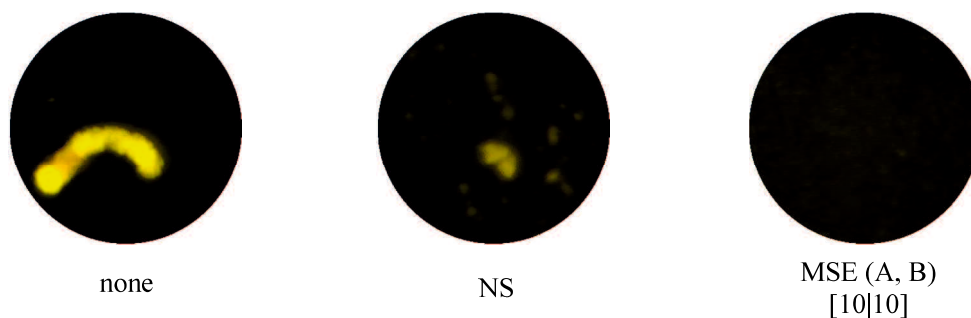


図 4-8 可視化画像（注入流体：CMC2280 の 1.5 wt%水溶液）

各々のケースにおいて蛍光領域が多く現れた 10 枚の画像について、先に定義した M 、 R_{med} 、 R'_{max} を求め、その平均値を表 4-1 に示した。 M について、none は 27.51% であるが、2 つのスタティックミキサーの M は none より大きく、MSE は 88.46% であった。 R_{med} については、NS、MSE は none と同程度であったが、 R'_{max} は MSE は none と NS に対してかなり小さくなっている。これは、蛍光領域における着色流体の濃度が低いことを示している。

表 4-1 スタティックミキサーの混合特性
（注入流体：CMC2280 の 1.5 wt%水溶液）

	none	NS	MSE (A, B) [10 10]
M [%]	27.51	39.45	88.46
R_{med}	31	24	26
R'_{max}	255	176	31

MSE スタティックミキサーの混合エレメントの積層枚数や形状を変えて撮影した画像を図 4-9 に示した。図 3-4(a)の直線配置 1.5 段について、混合エレメントを両側に 10 枚 (5 組) ずつ配置した MSE (A, B) [10 | 10] から、(A, B) [8 | 8]、(A, B) [6 | 6]、(A, B) [4 | 4] というように、両側に 8 枚 (4 組)、6 枚 (3 組)、4 枚 (2 組) と積層枚数を少なくしたが、全ての画像において明瞭な蛍光領域は観察されず、流体は良好に混合していると考えられる。

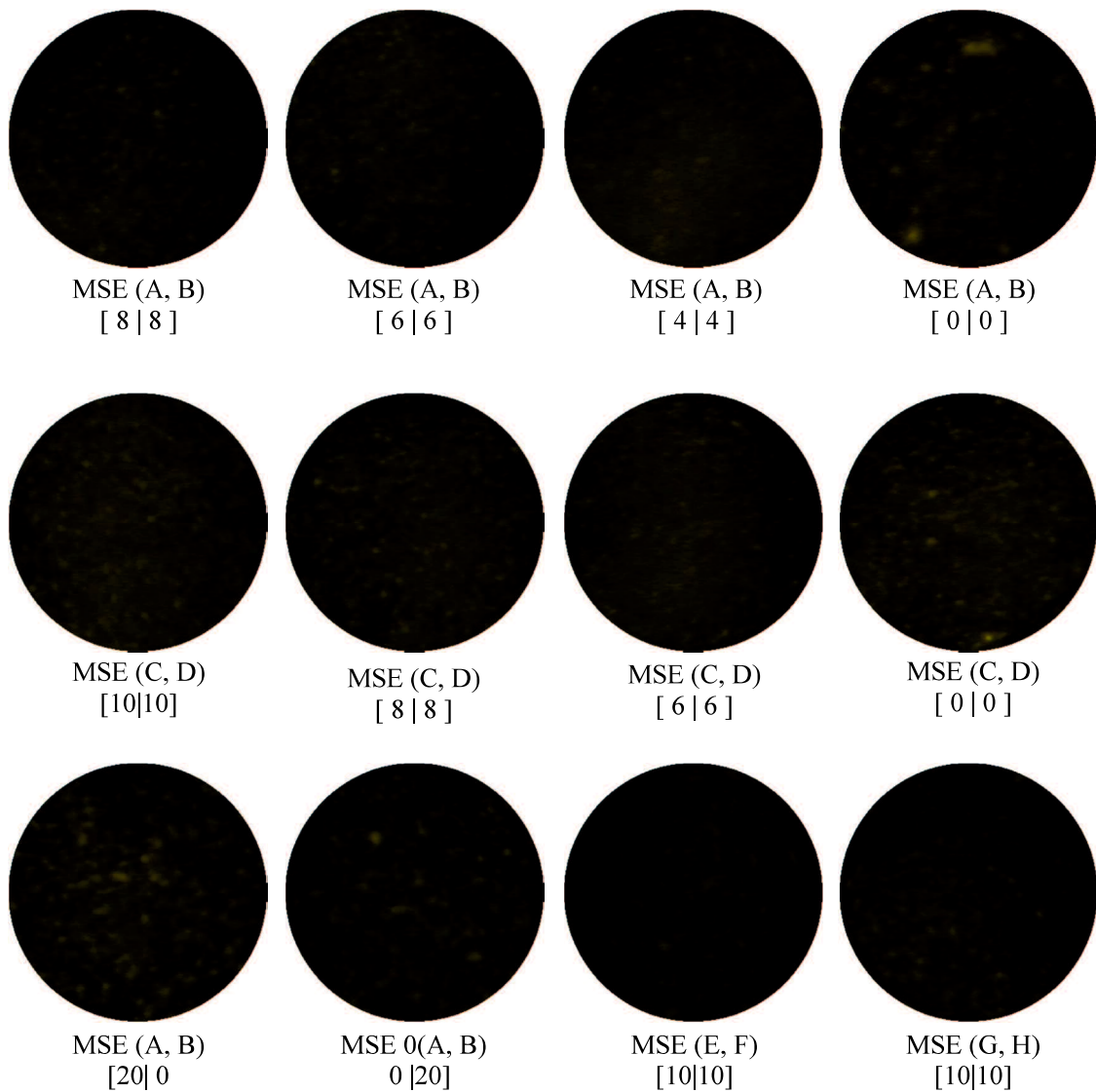


図 4-9 MSE の可視化画像（注入流体：CMC2280 の 1.5 wt%水溶液）

さらに、直線配置 1.5 段より分割・合流の回数が多い図 3-4(b)の直線配置 2.5 段について、混合エレメントを両側に積層枚数を 10 枚（5 組）ずつ配置した(C, D) [10|10]から、(C, D) [8|8]、(C, D) [6|6]と積層枚数を少なくしたが、全ての画像において明瞭な蛍光領域は観察されず、流体は良好に混合していると考えられる。混合エレメントを図 3-4(c)のインポリユート配置、および図 3-4(d)の二重インポリユート配置とした場合について、混合エレメントを両側に 10 枚（5 組）ずつ配置した(E, F) [10|10]、(G, H) [10|10]でも、(A, B) [10|10]や (C, D) [10|10]と同様に明瞭な蛍光領域は観察ず、流体は良好に混合していると考えられる。

一方、ブラインド板および中間板の間に混合エレメントを設置しない A, B, [0|0] や、直線配置 1.5 段について、片側のみに 20 枚 (10 組) を積層した A, B, [20|0], A, B, 0|20] では、不鮮明ではあるが、注入流体の濃厚な部分を示す蛍光領域が管断面全体に見られた。

図 4-9 の MSE の各断面画像について、 M 、 R_{med} 、 R'_{max} を算出し、その平均値を表 4-2 に示した。混合エレメント A, B では、(A, B) [10|10] から (A, B) [8|8] を除き積層枚数が少なくなるほど M が大きくなり、 R_{med} は 26~28 の範囲でほぼ同程度であるが、 R'_{max} は (A, B) [0|0] が最大となっており、 M のばらつきを考慮すると混合エレメントの積層枚数によっては、ほとんど影響を受けないといえる。画像の蛍光領域の濃度が低いことにより、蛍光領域の各画素の輝度を考慮しない M は大きくなるが、蛍光領域の濃厚な部分の存在を抽出する R'_{max} が (A, B) [0|0] の濃厚塊を有効に示す指標として機能しているからである。表中(b)に示す混合エレメント C, D についても同様である。

表中(c)に示すように混合エレメントを両側に 10 枚 (5 組) ずつ配置した場合には、 M は直線配置の (A, B) [10|10] および (C, D) [10|10] が約 90% であるのに対し、インボリュート配置 (E, F) [10|10] および二重インボリュート配置 (G, H) [10|10] は 80% 以下である。 R_{med} および R'_{max} はそれほど大きく変わらないが、混合エレメントの貫通孔は直線配列の方が MSE スタティックミキサーとしての混合性能は高いと考えられる。また、表中(c)において、混合エレメントを片側のみに配置した A, B, 0 [20] および A, B, 0 |20] について、混合エレメント両側配置の A, B, [10|10] と比較すると、A, B, 0 [20] は R'_{max} が 38 であって両側配置の 31 より大きいことから蛍光領域の濃厚な部分の存在を示し、A, B, 0 |20] は M が 69.70% と両側配置の 88.46% より小さく、蛍光領域が管断面に広がっていないことを示している。従って、いずれも A, B, [10|10] より混合度が低いことを示している。これは 3.3 節の流動解析でも示したように、混合エレメントを両側に配置した方が流体が効率的に積層体を通過するからである。

表 4-2 混合エレメントや積層枚数の異なる MSE スタティックミキサーの混合特性
(注入流体 : CMC2280, 1.5 wt% 水溶液)

(a) 混合エレメント(A, B)の積層枚数の影響

	(A, B) [10 10]	(A, B) [8 8]	(A, B) [6 6]	(A, B) [4 4]	(A, B) [0 0]
M [%]	88.46	85.75	90.65	94.76	95.37
R_{med}	26	26	27	28	27
R'_{max}	31	31	32	33	40

(b) 混合エレメント(C, D)の積層枚数の影響

	(C, D) [10 10]	(C, D) [8 8]	(C, D) [6 6]	(C, D) [0 0]
M [%]	94.95	94.71	93.92	97.32
R_{med}	28	28	28	30
R'_{max}	34	32	32	37

(c) 混合エレメント(A, B)、(C, D)、(E, F)、(G, H)の積層パターンの影響

	(A, B) [10 10]	(C, D) [10 10]	(E, F) [10 10]	(G, H) [10 10]	(A, B) [20 0]	(A, B) [0 20]
M [%]	88.46	94.95	66.29	79.98	84.89	69.70
R_{med}	26	28	24	25	28	25
R'_{max}	31	34	27	30	38	30

4. 3 異なる注入流体に対するスタティックミキサーの混合特性の評価

前節ではスタティックミキサーの混合特性について、CMC2280の1.5 wt%水溶液を本流に注入して撮影した管断面画像に基づき算出した指標を示した。本節では水との相溶性が異なる3種類の注入流体を本流中に供給し、それぞれのスタティックミキサーによる混合性能を評価した。ここで、前節の実験において蛍光顔料として使用したローダミン B の水に対する溶解性が高いために、注入流体と同じ拡散挙動を示さないことが懸念された。特に、 R'_{max} は注入流体の濃厚な部分が小さいときにその存在を抽出できない場合があった。そのため、以降の実験では疎水性の蛍光顔料を使用した。

実験は、前節と同様に本流（水）の平均流速を0.5 m/s（レイノルズ数 = 11,700）とし、注入流体を本流に対して流量比で0.01 wt%となるように注入した。スタティックミキサーとして、MSE スタティックミキサーは図 3-4(a)の混合エレメント A, B を中間板の両側に10枚（5組）ずつ積層したもの(A, B[10|10])を、ケニックス型スタティックミキサーは前節と同じ1B配管用の1-N60-331-Nを用いた。実験方法、実験条件、画像処理方法は4.2.2節と同様である。

水との相溶性の高い流体としてグリセリン（キシダ化学㈱）、相溶性の低い流体としてカルボキシメチルセルロース（CMC2260, ㈱ダイセル）の水溶液（0.75 wt%, 1.5 wt%）を選択し、これらの水溶液に疎水性の蛍光顔料 NEOLAN PINK B（Intracolor Co.）を1.0 wt%添加したものを注入流体とした。蛍光顔料は疎水性粒子（平均粒子径 = 3.1 μm ）であるが、CMC

水溶液中では分散することから、CMC に吸着して流体中を移動するものと考えられる。図 4-10 に NEOLAN PINK B についての輝度 R , G , B と蛍光顔料の濃度との相関を示した。ローダミン B についての図 4-4 と同様に輝度 R および G は蛍光顔料の濃度と良好な相関性を示し、 R を用いて濃度を求め、混合状態を評価することとした。

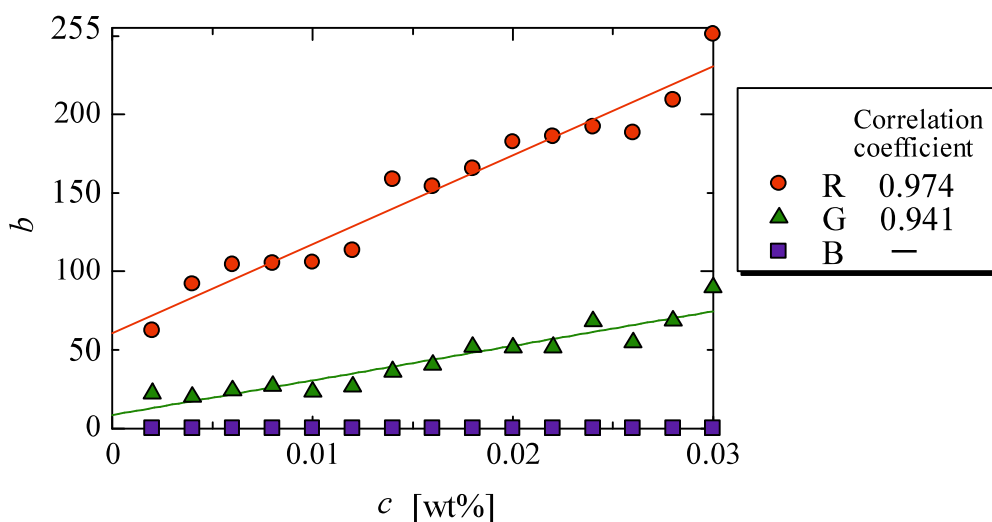
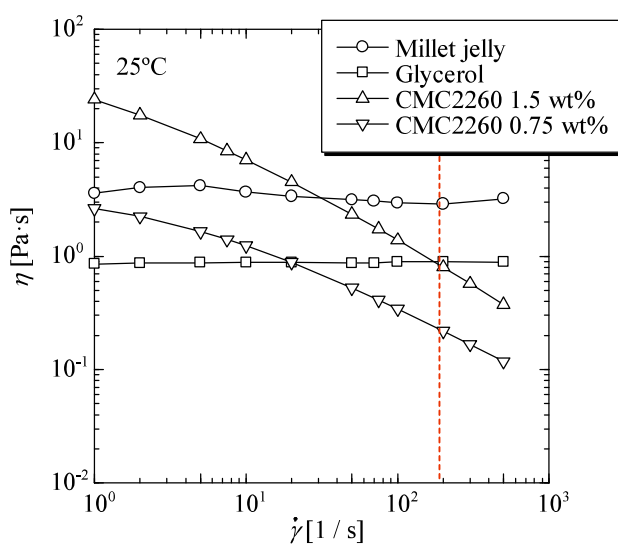
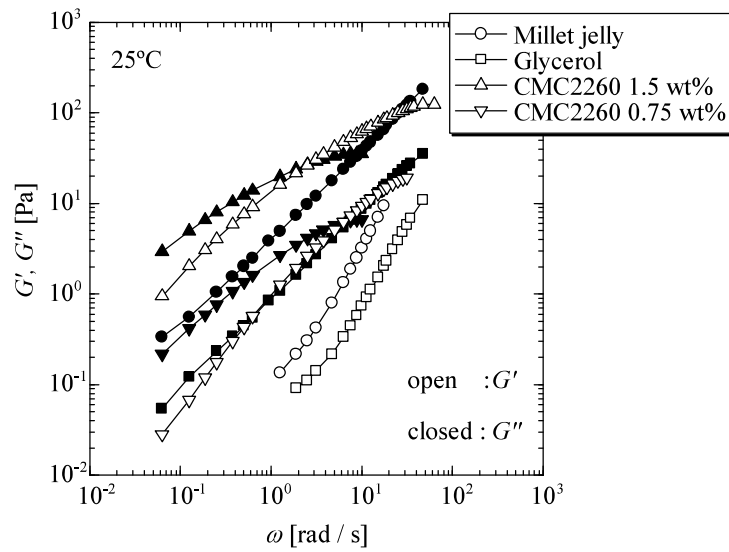


図 4-10 輝度 R , G , B と蛍光顔料の濃度の相関 (NEOLAN PINK B)

各々の注入流体の(a)平衡流動特性と(b)動的粘弾性特性を図 4-11 に示した。グリセリンはニュートン流体であり、粘度は $0.88 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ であった。CMC2260 水溶液は擬塑性流体であり、



(a) 注入流体の平衡流動特性



(b) 注入流体の動的粘弾性特性

図 4-11 注入流体のレオロジー特性

ノズル出口のせん断速度（図中の破線）における粘度は CMC2260 の濃度が 0.75 wt%、1.5 wt% に対し、それぞれ 0.23 Pa·s、0.87 Pa·s であった。また、同水溶液は高分子溶液が示す顕著な粘弾性を示した。グリセリンや CMC 水溶液は親水性の流体であるが、これらとは別に疎水性の流体として食用油（日清オイリオ、日清オイリオグループ(株)）も注入流体として使用した。

4.3.1 水との相溶性の高い流体の場合

水との相溶性が高いグリセリンを注入流体とした場合の画像を図 4-12 に示した。スタティックミキサーの設置により混合が促進されるため、NS や MSE では蛍光領域が管断面全体に拡がっており濃厚塊が見られない。



図 4-12 可視化画像（注入流体：グリセリン）

指標による評価を表 4-3、図 4-13 に示した。グリセリンは水との相溶性が高いので none の場合でも M が 70% 強である。スタティックミキサーの設置によりさらに混合が促進されるため NS や MSE では M は 90% を超えており、両者の差は小さかった。 R_{med} については none、NS、MSE のいずれも蛍光領域が管断面全体に広がっているため 40 程度と低くなった。一方、 R'_{max} は NS と MSE が 50 以下であるのに対し、none ではスタティックミキサーが無く、混合が促進されずに濃厚塊が明瞭に確認できるため 255 と高くなっている。 Dev は none の場合では管断面下方に濃厚塊が固まって存在していることにより -0.69 と絶対値が大きい負の値となっている。NS や MSE はスタティックミキサーの混合促進効果によりほぼ 0 となっており、蛍光領域が偏在していないことを示している。 L は none では最大で 9.85% の濃厚塊が残存したが、NS や MSE では検出されなかった。

表 4-3 MSE スタティックミキサーの混合特性 (注入流体：グリセリン)

	none	NS	MSE
M [%]	73.41	94.28	90.52
R_{med}	40	42	39
R'_{max}	255	47	42
Dev	-0.69	0.00	0.02

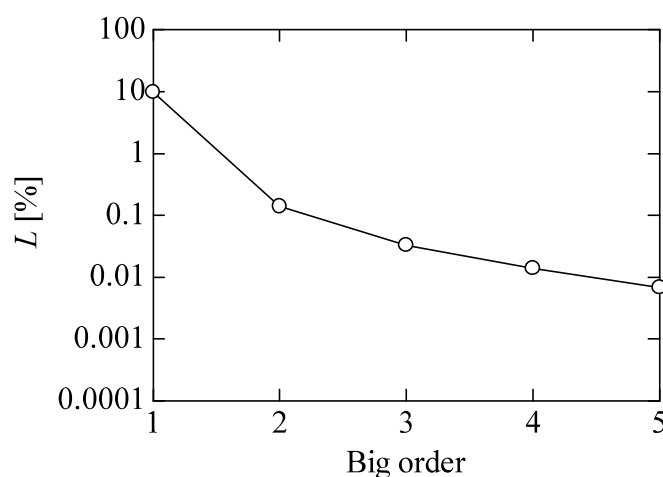


図 4-13 スタティックミキサーを設置しない場合に残存する濃厚塊の大きさ (注入流体：グリセリン)

4.3.2 水との相溶性の低い流体の場合

水との相溶性の低い流体として CMC2260 の 0.75 wt%水溶液を注入流体として使用した場合の画像を図 4-14 に示した。図より、none では大きな濃厚塊が見られるが、NS および MSE ではいずれもわずかに小さな濃厚塊が見られた。

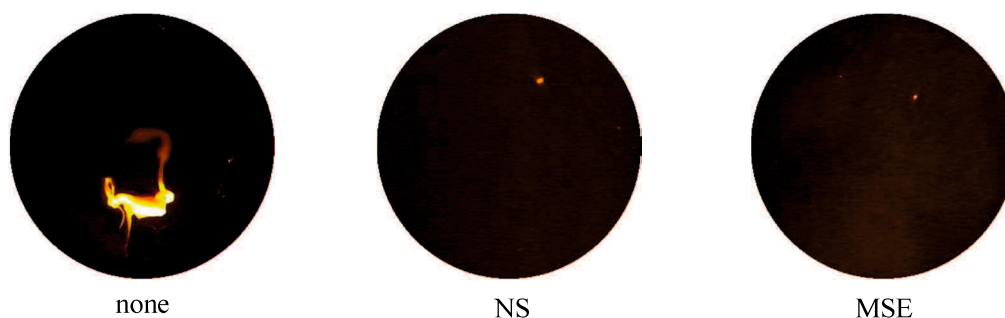


図 4-14 可視化画像（注入流体：CMC2260 の 0.75 wt%水溶液）

定量的指標による評価を表 4-4、図 4-15 に示した。グリセリンの場合と同様にスタティックミキサーの設置により M が大幅に増加している。 R_{med} もグリセリンの場合と同様に none、NS、MSE いずれも 40 程度と低く、 R'_{max} はグリセリンの場合と異なり NS と MSE で顕著な差が見られた。 R_{med} は輝度の中央値であり、none は濃厚塊の存在が目立つものの全体には希薄な蛍光領域が広がるために、結果として NS、MSE と同程度になっている。一方、 R'_{max} は濃厚塊中の輝度そのものであるため、本条件のように混合状態が不十分な場合には塊の存在を明確に評価できるといえる。 Dev は、グリセリンの場合と同様に、none では円管下部の濃厚塊の存在により -0.26 と絶対値が大きい負の値となったが、NS、MSE では蛍光領域が管断面全体に広がっているためほぼ 0 となった。

表 4-4 スタティックミキサーの混合特性
(注入流体：CMC2260 の 0.75 wt%水溶液)

	none	NS	MSE
M [%]	28.30	95.83	98.92
R_{med}	40	43	46
R'_{max}	255	151	52
Dev	-0.26	-0.01	0.01

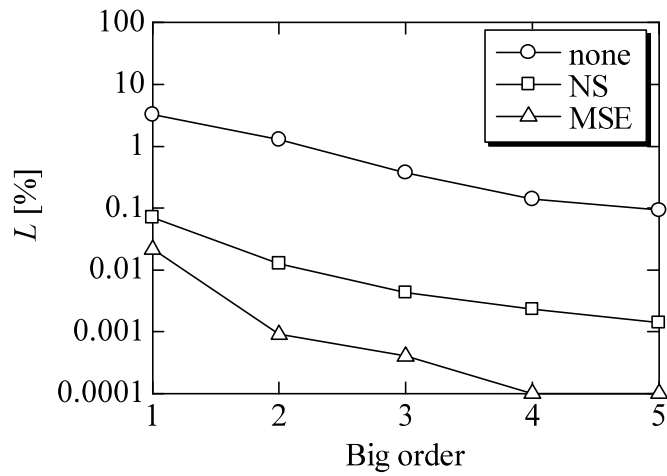


図 4-15 スタティックミキサーの分割性能
(注入流体：CMC2260 0.75 wt%水溶液)

次に水との相溶性が低い CMC2260 について、濃度を 1.5 wt%とした場合の管断面画像を図 4-16 に示した。0.75 wt%の場合よりも粘度が高くなったことにより対流による混合が進みにくくなり、濃厚塊の存在がいずれの場合でも多くなった。NS ではらせん状の混合エレメントの形状効果による旋回流により濃厚塊が略円環状に分散して見られたが、MSE では小さな濃厚塊が分散した状態であった。

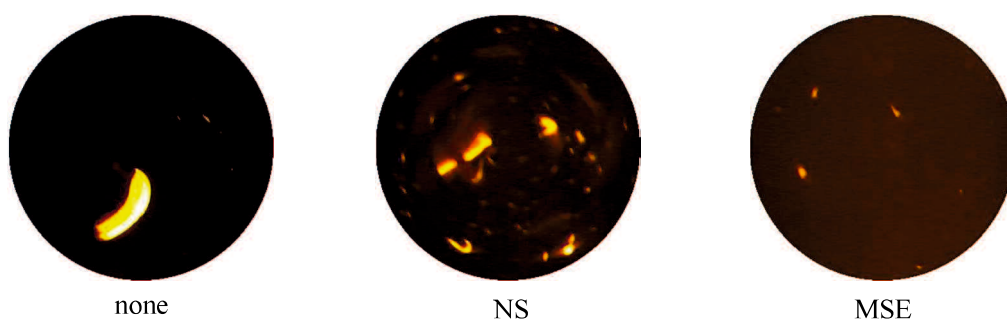


図 4-16 可視化画像 (注入流体：CMC2260 の 1.5 wt%水溶液)

指標による評価を表 4-5、図 4-17 に示した。 M はスタティックミキサーの設置により大幅に増加した。また、0.75 wt%の場合と異なり NS が 50.54%であるのに対し、MSE は 99.99%

となつて、スタティックミキサーの混合性能の差異が顕著に現れている。 R_{med} は M の大きい MSE と M の小さい none が同程度であり、NS が最も低くなっている。均一分散により R_{med} は大きくなるが、中央値であるため大きな濃厚塊の影響を受けるものと考えられる。一方、 R'_{max} は 0.75 wt% の場合と同様にスタティックミキサーの有無による差異、スタティックミキサーの混合性能の差異を明確に示している。 Dev は、画像での濃厚塊の分布はかなり異なるものの NS、MSE とともにほぼ 0 であり、NS のように濃厚塊が存在してもある程度分散されていれば平均化されると考えられる。 L は none、NS、MSE それぞれ最大で 2.81%、1.81%、0.07% であり、MSE は NS に比べて 10% 以下であった。これは MSE の混合性能が NS より高いため注入流体が細分化されたことを示している。

表 4-5 スタティックミキサーの混合特性
(注入流体：CMC2260 の 1.5 wt% 水溶液)

	none	NS	MSE
M [%]	6.82	50.54	99.99
R_{med}	72	36	70
R'_{max}	255	255	93
Dev	-0.17	0.02	0.00

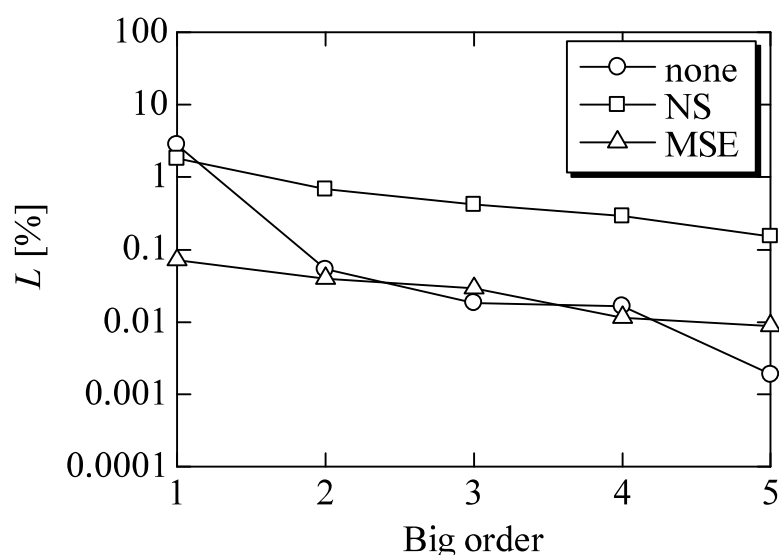


図 4-17 スタティックミキサーの分割性能
(注入流体：CMC2260 1.5 wt% 水溶液)

4.3.3 疎水性流体の場合

これまでの実験では、親水性の注入流体を水流中に注入しているため、注入流体は水に混合されて管断面に広がるが、疎水性の注入流体を注入した場合には、注入流体は水中で液滴となり、分割されても輝度が変化しないため、親水性流体と同様の評価はできない。そこで、疎水性流体に対するスタティックミキサーの混合性能を評価するために、画像中の液滴の鉛直方向の直径の分布による評価指標を新たに6番目の評価指標として導入した。

実験は、疎水性流体として食用油を選択し、これに親水性流体の実験と同じ蛍光顔料 NEOLAN PINK B を 1.0 wt% 添加したものを本流中に注入し、可視化実験により混合特性を評価した。

水流中に疎水性の食用油を注入した際の画像を図 4-18 に示した。none では液滴が円管上部にあり、NS の画像では none の画像よりも小さい液滴が旋回流によって渦巻状に存在しているが、MSE ではその高い混合性能により NS より液滴がさらに細分化され、液滴が画面全体に広がっている。

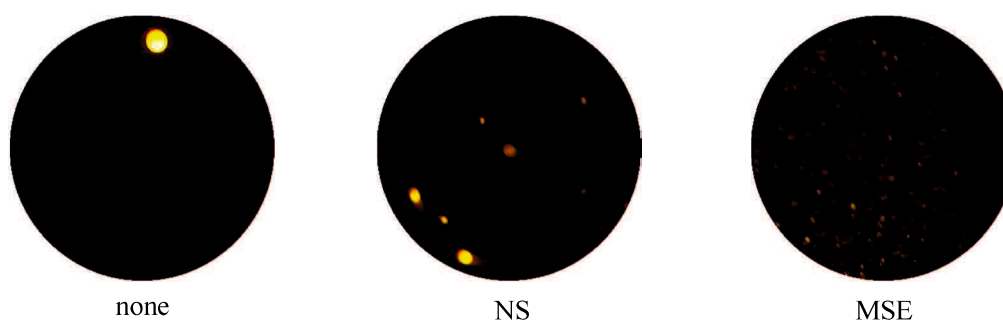


図 4-18 可視化画像（注入流体：食用油）

食用油の粒度分布を図 4-19 および表 4-6 に示した。50%粒子径に注目すると、none と NS はほとんど同じであり、これに対し MSE は 70%まで液滴径が減少している。また、MSE は D_{10} と D_{90} が none と NS より小さいことから、シャープな粒度分布であるといえる。このことは、エマルション製造などにおいて液滴径分布を制御する際に有利である。

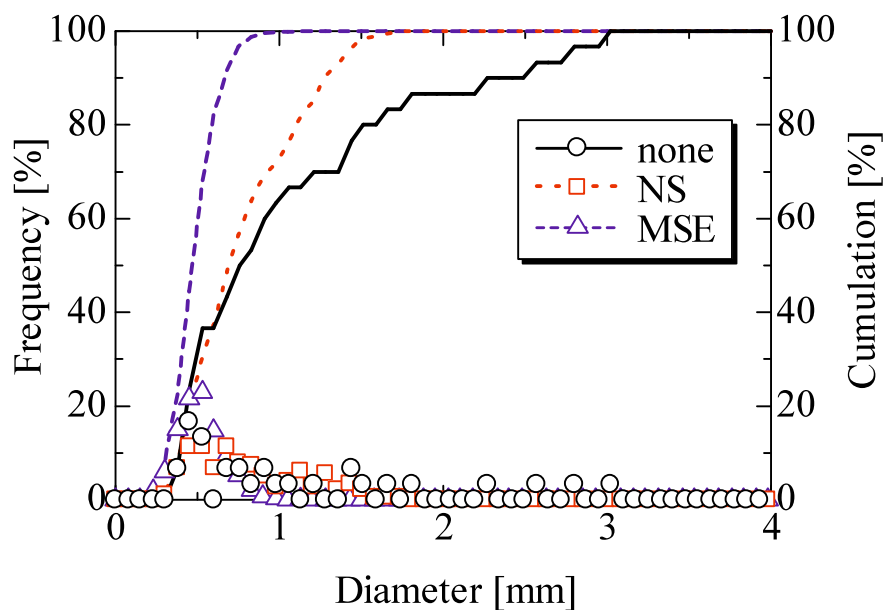


図 4-19 液滴の粒度分布

表 4-6 液滴径の分布

	none	NS	MSE
D_{10} [mm]	0.45	0.45	0.38
D_{50} [mm]	0.76	0.75	0.53
D_{90} [mm]	2.27	1.28	0.68

以上、スタティックミキサーの混合性能について、本流中に蛍光顔料を含む各種注入流体を注入して円管断面の可視化画像を撮影することにより、蛍光領域が円管断面にどのように存在しているかを示し、可視化画像から混合性能についての評価指標を導出して流体の混合度を定量的に評価することを可能にした。

混合度 M は本流中への注入流体の分散状態を示す一つの指標であるが、蛍光領域中の濃度分布を考慮しないため、濃淡のある蛍光領域が存在する場合にはその差異が明確ではない。例えば、水に対して相溶性の高いグリセリンの場合では **none** が 73.41% を示しており、 R'_{\max} や Dev と組み合わせて評価することが必要である。一方、中央輝度 R_{med} は蛍光領域の平均値を示す指標であって面積は考慮しないため、注入流体が CMC2260 1.5 wt% の場合に、 M に差異があっても R_{med} には現れない場合があったが、 R'_{\max} や Dev と組み合わせて評価することで蛍光領域の均一性を評価できる。最大輝度 R'_{\max} は、最大濃度を抽出するので蛍光

領域の面積を考慮しないが、濃厚塊の大きさ L と合わせて考慮することで混合状態が不十分な塊の存在を評価できる。 Dev は蛍光領域の偏在を示す指標であるので、混合性能が低く注入した流体が大きな塊として偏在している場合はこれを評価できるが、蛍光領域の大きさに関わらず濃厚塊が円周方向に一様に分布している場合にはほぼ 0 となる。疎水性流体に対する混合性能を評価するために導入した粒度分布は、none、NS、MSE の混合特性の差異を明確に示すことができた。よって、提案した 6 つの指標によりスタティックミキサーの混合性能を定量的に評価することができたといえる。

ケニックス型スタティックミキサーと MSE スタティックミキサーを比較すると、注入流体が水との相溶性の高いグリセリンでは各評価指標にそれほどの差異は無いが、相溶性の低い CMC2260 0.75 wt% では R'_{max} に大きな差が表れた。さらに粘度が高い CMC2260 1.5 wt% では M にも大きな差が現れ、スタティックミキサーの混合特性の差異が明確に示された。また、疎水性流体の食用油を注入した場合には粒度分布に大きな差が現れた。これは、ケニックス型スタティックミキサーでは、流体は配管断面視で管中心を通る 1 本の直線として存在する 6 つの混合エレメントにより分割され、反転・転換されて混合されるのに対し、MSE スタティックミキサーでは、流体は混合エレメント積層体内部の複雑な連通路を流通することにより、分割・合流、せん断等が繰り返される混合促進効果によるものと考えられる。

MSE スタティックミキサーは混合エレメントの種類や積層枚数によらず高い混合効果を示すものの、ケニックス型スタティックミキサーに対して圧力損失がかなり大きいので、両スタティックミキサーがほぼ同等の混合性能を示したグリセリンのような水との相溶性の高い流体の混合には、ケニックス型スタティックミキサーが有利である。一方で、MSE スタティックミキサーは、CMC2260 の 1.5 wt% 水溶液のような相溶性が低く粘度が高い流体に対しても良好な混合特性を示しているので、混合する流体の親和性を考慮したスタティックミキサーの選択が重要といえる。

4. 4 結言

本章ではスタティックミキサーの混合性能の定量的な評価手法の開発、当該方法による MSE スタティックミキサーおよび汎用のケニックス型スタティックミキサーの混合性能の比較について以下の結論を得た。

(1) MSE スタティックミキサーのうち、中間板の下流側に混合エレメント A と B を 20 枚積層した場合 (A, B, 0|20) が最も低い圧力損失を示したが、混合性能評価方法により混合性能が低いことがわかった。混合エレメントを中間板の両側に配置した場合には、積層枚数や積層パターン、混合エレメントを変更した MSE スタティックミキサーはいずれもほぼ同等の混合特性を示した。

(2) ケニックス型スタティックミキサーは、CMC2260 の 0.75 wt% 水溶液のような水との相溶性が高く、低粘度の流体に対しては MSE スタティックミキサーと同等の混合効果が得られた。一方で、CMC2260 の 1.5 wt% 水溶液のような相溶性が低く、高粘度の流体に対しては MSE スタティックミキサーほどの高い混合効果は得られなかった。

(3) 疎水性流体の混合において、MSE スタティックミキサーではケニックス型スタティックミキサーよりも液滴の均一化が促進されていた。このことから、MSE スタティックミキサーを構成する混合エレメント積層体の複雑流路による分割・合流およびせん断等の効果が疎水性流体の混合に対して有効であることが確認できた。

(4) 新たに導入した 5 つの指標である混合度 M 、中央輝度 R_{med} 、最大輝度 R'_{max} 、濃厚塊の大きさ L 、偏在度 Dev を適宜組み合わせることで、蛍光顔料の濃度や注入流体の相溶性等の変化に対して、断面の可視化画像の定性的な印象を適切に定量化することができた。

第5章 MSE 翼および MSE スタティックミキサーの工学的応用

MSE 翼および MSE スタティックミキサーは幅広い工学的分野に応用される可能性を有する。以下に、これまでの工学的応用の主要な実績についてまとめた。

5. 1 MSE 翼の BDF 製造設備への適用

株式会社アースクリエイティブ（山口県宇部市）では廃食油を原料とし、バイオディーゼル燃料（BDF）を製造している。廃食油は触媒としての水酸化ナトリウムの存在下でメタノールと加熱攪拌すると、メチルエステル交換反応によって脂肪酸メチルエステルとグリセリンになる。ここで、図 5-1 に示すように、同じ廃食油を原料としたにもかかわらず、実設備で製造された BDF のメチルエステル転化率が、実験室で製造した BDF よりも低くなる傾向が見られた。実設備は邪魔板の無い角型の攪拌槽内で 4 枚パドル翼を使用しており、不十分な攪拌が一因であることが推測された。

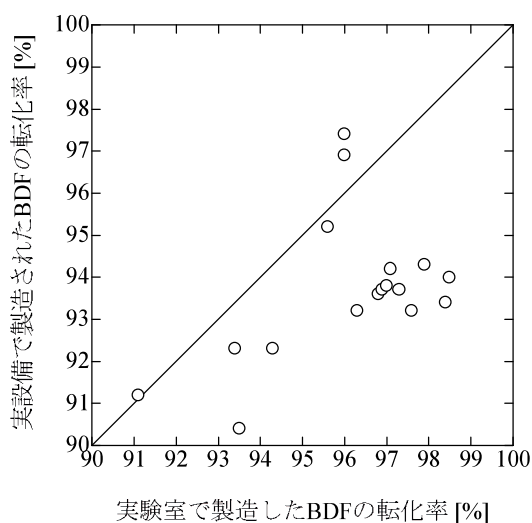
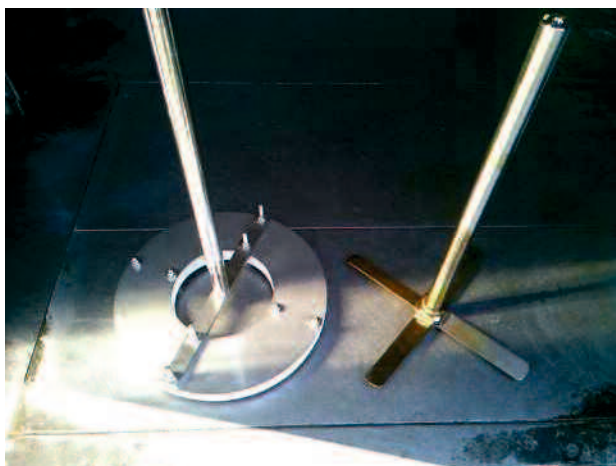


図 5-1 実設備と実験室で製造した BDF 転化率の差異

MSE 翼によれば、攪拌槽内部の流体が MSE 翼の中空部から吸い込まれ、翼内部の流体が遠心力によって外部に吐出されるが、混合エレメントにより形成された複雑な連通流路を流通する際に分割・合流、せん断等による混合効果を促進できる。そこで、メチルエステル転化率の向上を目的とし、既設の 4 枚パドル翼を MSE 翼に交換した。MSE 翼のサイズは既設の 4 枚パドル翼と同様に外径 320 mm、高さ 20 mm とした。また、攪拌開始時のモーター

の負担を小さくするために、MSE 翼はフッ素樹脂製とすることにより軽量化した。図 5-2 に、MSE 翼と 4 枚パドル翼、MSE 翼内部、および MSE 翼による攪拌の様子を示した。



(a) MSE 翼(左)と既設 4 枚パドル翼



(b) MSE 翼内部



(c) MSE 翼による攪拌の様子

図 5-2 BDF 製造装置への MSE 翼の設置

攪拌翼を交換した前後のメチルエステル転化率の経時変化を図 5-3 に示した。交換直後はメチルエステル転化率に明確な変化は見られなかったが、約 2 週間後から徐々に上昇し始め、約 1 ヶ月後には目標値である 96.5% (JIS 基準) をほぼ満足するようになり、バッチ

毎の変動も減少した。当初の転化率が低かった理由として、本攪拌工程の後に水洗浄工程やフィルター処理工程があり、これら後工程の機器内部に残留していたパドル翼使用時の残留物が徐々に置換されたものと考えられる。

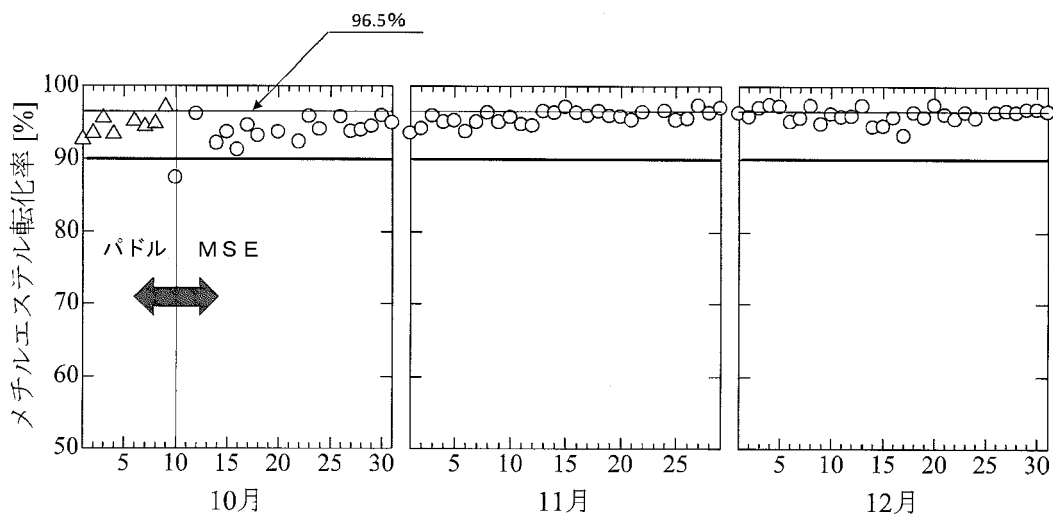


図 5-3 MSE 翼設置前後のメチルエステル転化率の経時変化

以上、反応を伴う攪拌への MSE 翼の適用が、反応効率を向上させる可能性があることを示した。翼内混合によりメチルエステル化反応を促進したことが原因であると考えられる。なお、滋賀県の油籐商事㈱でも同様に既設設備のパドル翼を MSE 翼に変更し、問題なく運転が継続されている。

5. 2 MSE 翼の攪拌子としての応用

実験室でビーカー等の容器内の流体を混合する場合、マグネチックスターラーと攪拌子が使用されることが多い。使用される攪拌子は、図 5-4 のような棒状攪拌子が圧倒的に

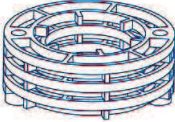


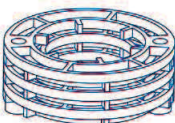

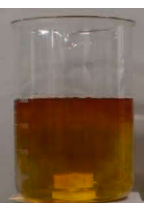

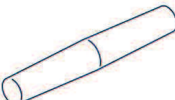


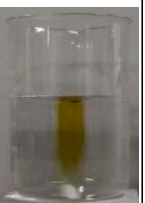
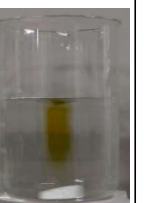





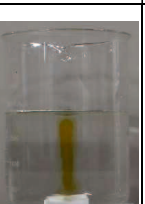
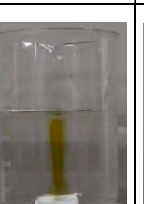




図 5-4 攪拌子の例

多く、その他クロス撹拌子や三角柱の撹拌子も使用されている。これら撹拌子は回転中心となる中央部の接線速度が遅いため、容器中央部の流体がよく撹拌されないという問題がある。

これに対し、MSE 翼の底部に磁石を取り付けた MSE 撹拌子を試作し、その混合特性を棒状撹拌子およびクロス撹拌子と比較した。3l ビーカーを使用し、回転数を 200 rpm として行ったヨウ素とチオ硫酸ナトリウムによる脱色試験の結果を表 5-1 に示した。MSE 撹拌子は、外径 54 mm のものが撹拌開始後 5 秒で、外径 37 mm のものが撹拌開始後 20 秒で脱色されている。これに対して、従来型の棒状撹拌子およびクロス撹拌子は共に撹拌開始から 1 分を経過しても中央部に着色部が見られた。これより、MSE 撹拌子は容器内の流体を迅速に混合できることがわかる。

表 5-1 脱色試験の結果

	撹拌開始時	5 秒後	20 秒後	30 秒後	45 秒後	1 分後
MSE 撹拌子 (外径 54 mm) 						
MSE 撹拌子 (外径 37 mm) 						
棒状撹拌子 (長さ 60 mm) 						
クロス撹拌子 (外径 40 mm) 						

MSE 攪拌子を使用した場合の流動解析の結果を図 5-5 と図 5-6 に示し、棒状攪拌子については図 5-7 に示した。ここで MSE 攪拌子は外径 40 mm、高さ 20 mm とし、棒状攪拌子は外径 8 mm、長さ 40 mm とした。また、容器内径は 106 mm、高さは 150 mm とし、容器容量 1000 mL とした。流体は 25°C の水で、回転数はいずれも 200 rpm とした。図 5-5(a)、図 5-5(b) および図 5-6(b) からは、MSE 攪拌子の中央部の吸入口から容器中央部の流体が吸い込まれ、外周部から吐出されて容器内周部に沿った上昇流に合流し、その後方向転換して容器中央部へ向かう。また、中央部の吸入口から吸い込まれた流体の一部は、攪拌子内部には流入せずに中央部を通り抜けて容器内周部の上昇流に合流している。そして攪拌子に吸い込まれた流体は、攪拌子外周部から吐出され、その後容器内周部に沿った上昇流となっている。また、一部は再循環して攪拌子の吸入口へ吸い込まれている。

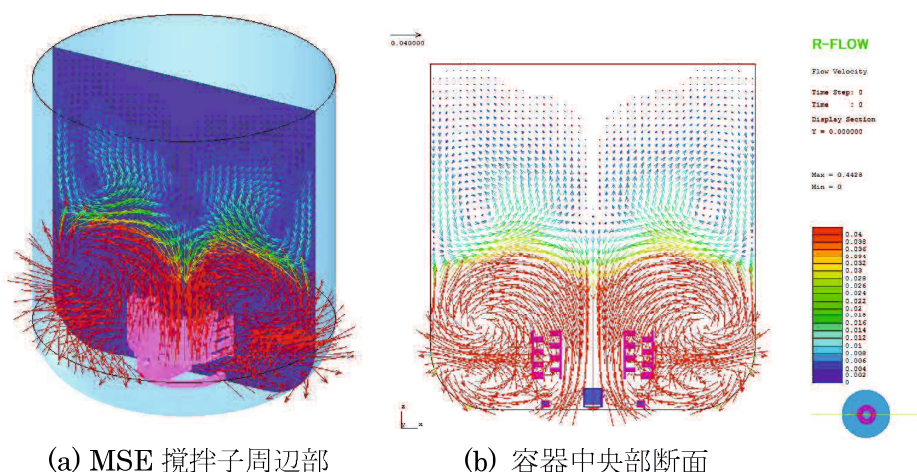
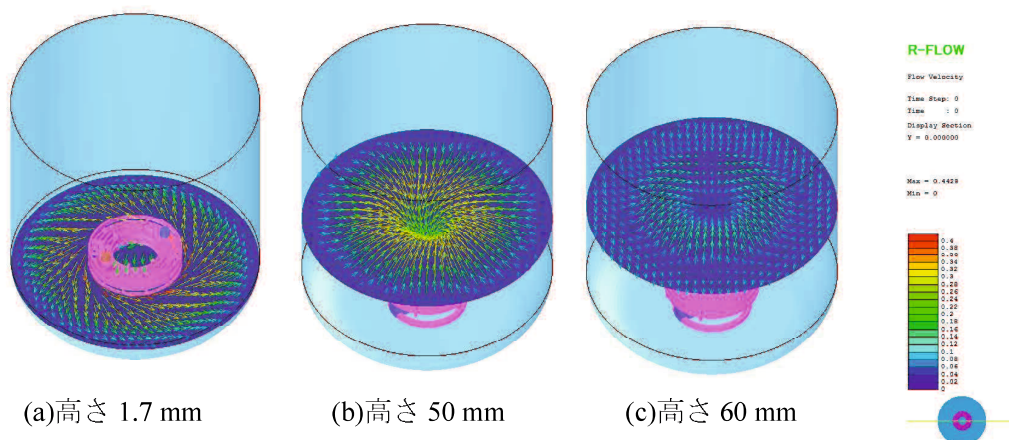


図 5-5 MSE 攪拌子による容器内部の速度ベクトル



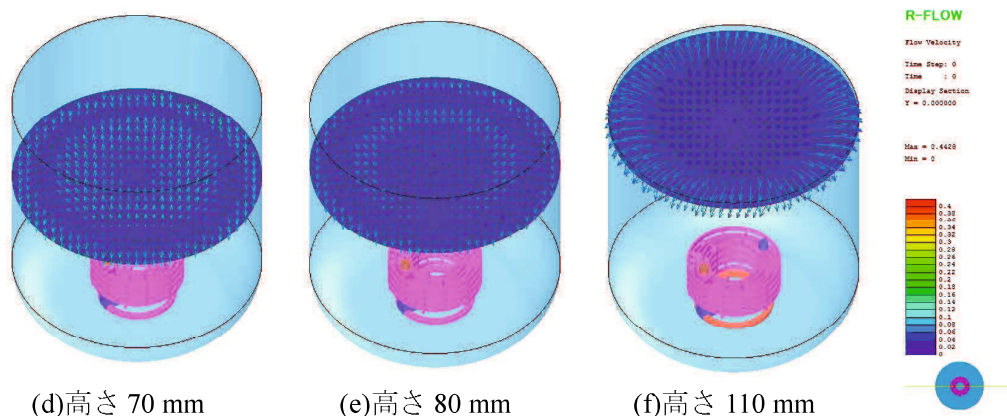
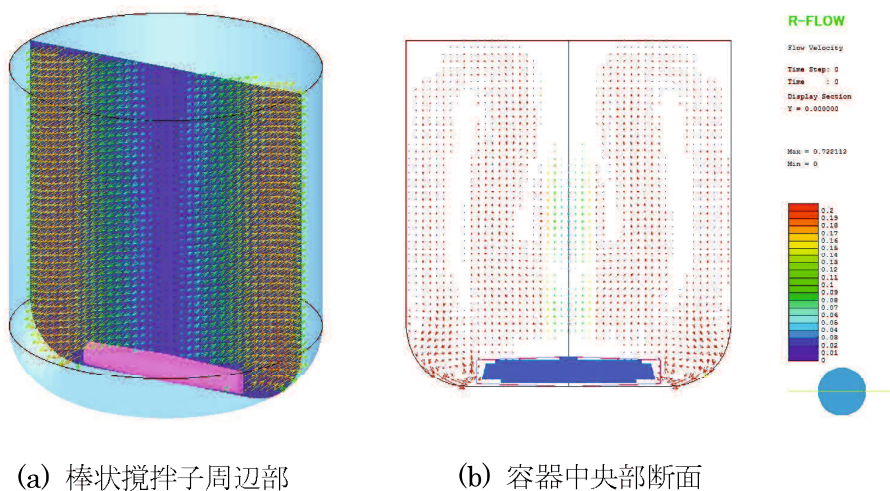


図 5-6 MSE 攪拌子による容器内部の速度ベクトル
(高さは底面からの距離を示す)

図 5-6(c)～図 5-6(e)から、流体が容器内周部から中央部に向かい、その後、容器中央部を上昇して、液面近傍で容器内周部へ向かう循環流れの存在を示している。容器高さが 50～80 mm の位置で外周部からの流れが中央部に到達し、上下方向に分かれて流れていることがわかる。図 5-6(f)から、液面近傍の中央部に到達した流体は容器内周部に向かって流れている。

一方、棒状攪拌子回りの流れについては、図 5-7(a)および図 5-7(b)に容器中央部の高さ方向全体にわたって低流速の領域の存在が確認され、流体の流れが停滞に近い状態であることが指摘される。表 5-1 の脱色試験において棒状攪拌子で確認された容器中央部の停滞領域は、この低流速の部分に対応するものと考えられる。また、図 5-7(c)および図 5-7(d)からは、



(a) 棒状攪拌子周辺部

(b) 容器中央部断面

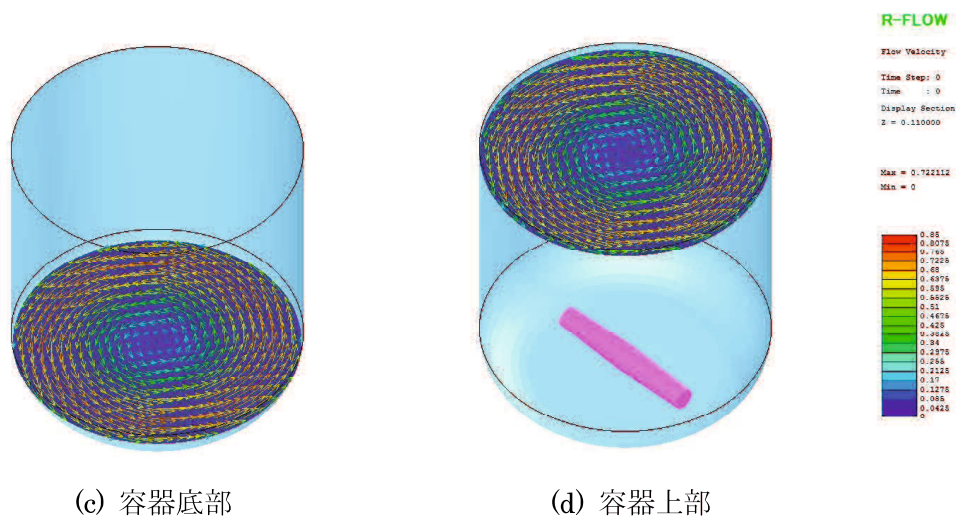


図 5-7 棒状攪拌子による容器内部の速度ベクトル

容器底部および液面近傍の速度ベクトルはほぼ同様の分布を示しており、図 5-7(a)を考慮すると、容器内部の流体は円筒状に同一速度の固体的回転部が半径方向に分布を持ちながら形成されていると考えられる。棒状攪拌子による混合は、これら固体的回転部が各々の相対的な速度の差によりそれらの境界で徐々に対流しながら進んでおり、MSE 攪拌子のように容器上下方向および水平方向への強い流れを生み出すことができず、容器内の流体を速く混合することができないと推定される。

5. 3 排水処理用液体凝集剤の希釈工程への適用

5.3.1 概要

排水処理用の液体凝集剤は、使用時に凝集操作に最適な濃度になるように水により希釈する必要があり、一般的には攪拌槽操作による希釈設備が使用される。しかし、設置スペースや建設コストの点でスタティックミキサーによる方法も検討の余地があると考えられる。一方、わが国で広く使用されているケニックス型スタティックミキサーでは、高粘性溶液や食用油に対しては混合が不十分な場合があり、高粘性である液体凝集剤の希釈には適切でないとも考えられる。また、スタティックミキサーを設置するためには、その設置スペースを確保する必要がある。第 4 章でも述べたとおり、MSE スタティックミキサーの混合エレメント積層構造は高粘性流体の混合に適しており、しかもフランジ間に挿入するだけで利用できるため、圧力損失を考慮して設置すれば、液体凝集剤の希釈に有効に機能すると考えられる。

ここでは、実際にある企業により MSE スタティックミキサーの適用の可能性を検証する際に行った液体凝集剤の溶解混合性の評価と、希釈した凝集剤の性能評価について述べる。

5.3.2 性能確認テストおよび結果

安定した液体凝集剤溶解液の効果を得るためには、希釈溶解液中の凝集剤濃度に局所的・時間的な分布のない安定した状態で使用する必要がある。そこで図 5-8 に示すように、水道水ライン中に液体凝集剤を注入するようにラインを構成し、注入点下流に MSE スタティックミキサーを設置して、ミキサー出口の凝集剤の濃度変化を測定した。測定は、水道水の流速を 0.2 ～ 1.0 m/s と変えて行った。

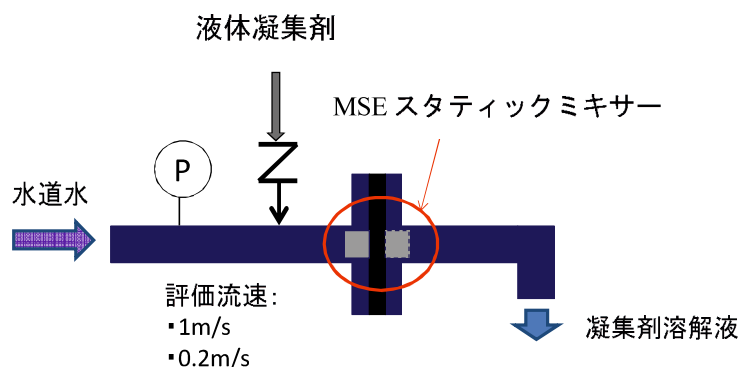


図 5-8 凝集剤希釈テストライン

対象となる凝集剤はスラッジおよび排水処理用に開発された高性能ポリマー（守秘義務により明確にできない）であり、攪拌槽内での希釈および 30 分以上のエイジングが推奨されている。また、予備転化したものを連続的に希釈すると、さらに効果が高くなるという特性がある。

図 5-9 に流速 1 m/s の場合、図 5-10 に流速 0.2 m/s の場合について、ミキサー出口における液体凝集剤濃度の経時変化を示した。いずれの流速においても、凝集剤の注入開始から 1 分以内で凝集剤濃度は安定しており、使用に際しての十分な応答性が確認された。

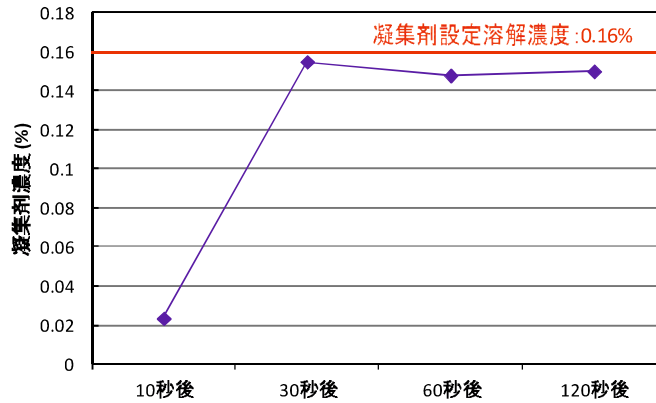


図 5-9 高流速時の凝集剤濃度変化(流速 : 1 m/s)

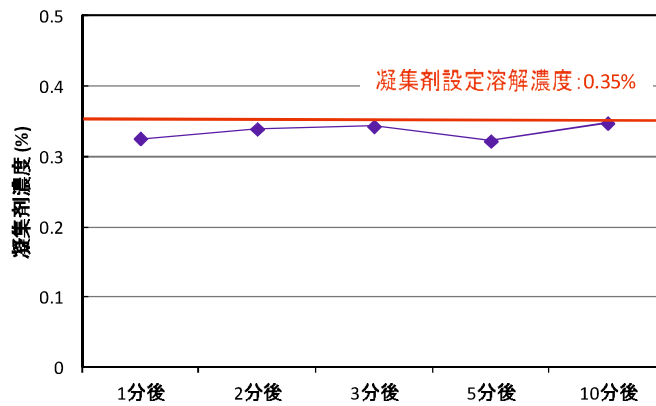







図 5-10 低流速時の凝集剤濃度変化(流速 : 0.2 m/s)

得られた液体凝集剤の希釈溶液を使用して、実際の排水を処理した結果を以下に示す。排水は MLSS が約 3000 mg/L の活性汚泥で、希釈凝集剤溶液は高流速溶解条件における 120 秒経過後のものである。表 5-2 にフロックの形成状態を観察した結果を示した。攪拌槽により十分に溶解およびエイジングを行った通常溶解の場合は、凝集剤濃度が 20 mg/l でフロックサイズは 2~3 mm となり、沈降性が良で、総合評価は良であった。一方、MSE スタティックミキサーで溶解した場合は、添加濃度を通常溶解に対して 20%増加させた 24 mg/l にすることにより、通常溶解の 20 mg/l と同じフロックサイズ 2~3 mm となり、沈降性が良で、総合評価も良となった。これにより、MSE スタティックミキサーによる希釈凝集剤の添加濃度を、通常溶解による希釈凝集剤に対して 20%増加させることで、フロック形成において同等の性能を示すことを確認した。

表 5-2 排水処理試験結果

溶解方法	通常溶解	MSE スタティックミキサーで溶解			
添加濃度*(mg/L)	20	20	22	24	26
外観					
フロックサイズ	2~3 mm	1~2 mm	1.5~2.5 mm	2~3 mm	3 mm
沈降性	良	良	良	良	良
評価	良	並	並~良	良	良~優

*凝集剤濃度は、原体濃度を 100%とした値

5.3.3 まとめ

以上の結果を受けて当該企業は、以下のように結論付けた。

「MSE スタティックミキサーを使用して液体凝集剤の希釈を行った結果、流速に関わらず十分に溶解していた。また、ミキサー内の混合エレメント積層体部分に凝集剤の目詰まりは見られなかった。希釈凝集剤溶液は、十分に溶解攪拌およびエイジングを行った場合と比較して、固形分量として 1.1~1.2 倍を添加することで同等の処理性能を示した。この結果より、通常の溶解攪拌装置と比べると凝集剤が 10~20%程度多く必要となるが、設備の導入コストやスペースの制限される顧客に対しては、液体凝集剤の溶解混合設備として、MSE スタティックミキサーを提案できる可能性がある。」

その後の打合せにより、当該企業は今後客先の要望によって MSE スタティックミキサーを適用したシステムを提案するということである。またこれ以降、定期的に受注があり、液体凝集剤の希釈に MSE スタティックミキサーが有効に機能しているとのことである。

5. 4 経済産業省「新市場創造型標準化制度」事業への採択による JIS 制定

本研究に係るスタティックミキサーの特性評価方法が、経済産業省の「新市場創造型標準化制度」事業に採択され、平成 29 年 3 月初旬までに JIS 原案を作成することになった。これを日本工業標準調査会へ JIS 原案として提出し、その後正式に JIS として公示される予定である。また、将来は ISO 化も目標としている。以下に、上記事業に採択されるまでの経緯および事業概要についてまとめた。

5.4.1 経緯

日本工業規格（JIS）や ISO に代表される国際標準規格は、工業製品を取り扱う事業を推進するに当たって重要な位置を占めるが、従来は我が国はどちらかという受身の態勢にあり、自ら積極的に標準化について働きかけることは活発に行われていなかった。しかし、標準化は新しい技術や優れた製品を速やかに普及させるために重要なツールであり、事業を推進するに当たって知的財産権と並ぶ重要なツールとなり得るものである。そのため、近年のビジネス環境の急激な変化により、その重要性があらためて認識されているところである。このような状況に鑑みて、経済産業省も近年積極的に標準化の利用を推進しており、平成 26 年 5 月に開催された標準化官民戦略会議において取りまとめられた「標準化官民戦略」においては、戦略の一つとして中小企業等が保有する新技術等に係る標準化を対象にした「新市場創造型の標準化制度」の構築が決定し、平成 27 年度から「新市場創造型標準化制度」がスタートした。同制度は、中小企業が保有する新しい技術や優れた製品が、市場で際立つような評価基準や品質基準などを標準化することによって、中小企業の技術・製品の市場での信頼性の向上と共に、市場での速やかな普及の可能性を高めることを目的としている。

そこで、これまで定まった評価方法のなかったスタティックミキサーの混合性能について、本研究の対象である混合性能の評価方法の同制度への応募を検討した。まず、平成 27 年 8 月に著者の所属するアイセル㈱が、本制度を支援するパートナー機関である㈱池田泉州銀行と共に経済産業省を訪問し、経済産業省基準認証政策課および（一財）日本規格協会規格開発ユニットが同席の下に事前相談に臨んだ。事前相談では本評価方法について説明を行い、標準化の適否について議論を行った。事前相談の結果、本制度への採択の可能性ありとの回答を受け、その後さらに規格がカバーする範囲や山口大学の協力体制について調整を行った。そして平成 28 年 1 月に申請したところ、同 3 月に正式に「静的流体混合装置「スタティックミキサー」に関する標準化」のテーマで本制度へ採択されるに至った。この採択は、パートナー機関が関わる第 1 号案件ということで大きな反響を呼び、同年 5 月 19 日の日刊工業新聞の第一面をはじめとした新聞・雑誌に取り上げられた。また、日本規格協会主催の「標準化と品質管理 近畿地区大会」をはじめとした数件のセミナーでも事例発表としての講演を行った。

5.4.2 JIS 原案作成およびスケジュール

平成 28 年 3 月の採択決定後、日本規格協会と共にアイセル㈱で JIS 原案作成のための標準化委員会参加メンバーを募った。調整の結果、委員会を構成するメンバーが決定され、同年 6 月に委員会がスタートした。図 5-11 に委員会の構成を示した。委員会は本委員会と分科会により構成され、本委員会では全員が集まって JIS 原案について協議する。分科会では、必要に応じて特に関係するメンバーにより JIS 原案や評価試験方法等について協議する。本委員会は、ユーザー委員、メーカー委員、中立委員、オブザーバーおよび事務局から構成さ

れ、アイセル㈱はメーカー委員として参加し、オブザーバーとしては経済産業省の担当者が参加し、事務局としては日本規格協会の担当者がそれぞれ本委員会のメンバーとなった。委員長には、中立委員の中から本評価方法について当初から主導的立場にあった山口大学佐伯教授が就任した。

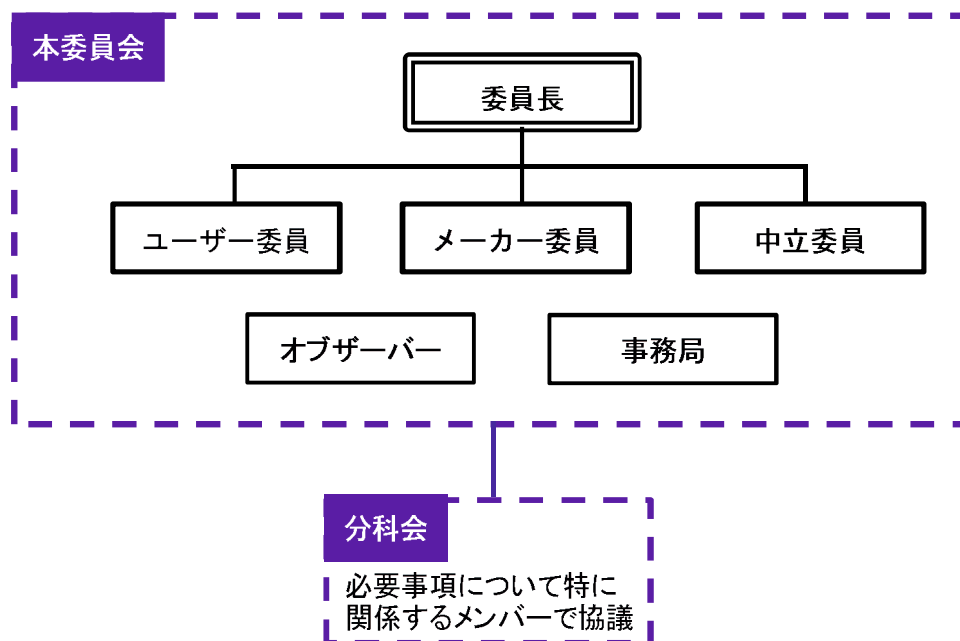


図 5-11 標準化委員会構成

平成 28 年 6 月に第 1 回本委員会が開催され、その後、4 回の委員会と 2 回の分科会を経て、平成 29 年 2 月に素案を作成した。そして、平成 29 年 3 月に日本工業標準調査会へ JIS 原案として申出を行い、平成 29 年度中に JIS として公示される予定である。

第6章 結論

本研究では、2種類の混合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のアイデアを基本として、積層構造内の複雑な連通流路により形成されたせん断場を積極的に利用した新しいデバイスとしての攪拌翼とスタティックミキサーを開発するとともに、スタティックミキサーの混合特性の評価方法を提案することを目的とした。さらに、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、将来展望とともに述べた。

第1章では、攪拌・混合操作を概観し、本研究の対象である攪拌翼およびスタティックミキサーの位置付けについて示した。次いで攪拌操作の問題点について指摘し、それらの問題点の解決のために我が国で開発された大型特殊翼について説明し、さらに、本研究が関連する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指摘した。スタティックミキサーについては、現状の技術を概観して、これまでの研究開発についてまとめ、特徴および問題点について指摘した。そして、特に実用上重要な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明らかにした。最後に、本研究の対象であるエレメント積層構造を基本構造とした攪拌翼とスタティックミキサーについて説明し、それらの基本特性を明らかにすることの必要性、およびスタティックミキサーの混合性能の評価方法を提案することの必要性について説明した。

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、その基本特性を明らかにすることを目的とした。まず、MSE翼の構成について述べ、次いで従来から使用されている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や流動解析による翼内部・周辺の流動状態、混合時間について検討することにより、MSE翼内部・周辺の流動状態を明らかにした。

グリセリン水溶液を使用した攪拌動力については、MSE翼の混合エレメント積層枚数を増加させることにより、FBDT翼より大きい動力を流体に与えることができることを示した。MSE翼およびFBDT翼共にグリセリン濃度が低くなるに従い、低回転数における邪魔板の影響が徐々に小さくなり、その傾向は濃度が低くなるほど邪魔板の影響が小さくなる回転数が高回転数にまで拡大することが分かった。同じ回転数におけるグリセリン濃度を変数とした攪拌Re数と動力数の関係からは、MSE翼は攪拌Re数が低下、すなわち流体の粘度が大きくなると、FBDT翼や永田の式によるFBT翼よりも動力数が大きくなる傾向を示し、高粘性流体に対して異なる挙動を示すことが明らかになった。

MSE翼の形状についての攪拌動力および流動解析による検討では、混合エレメントの積層枚数を増加させるほど、攪拌動力および翼内部を通過する流量が大きくなる傾向が見ら

れ、混合エレメントの厚さは、貫通孔の半径方向距離との関係で制限があることが分かった。分割・合流の回数が多いほど、攪拌動力および翼内部の流体通過流量が小さくなり、内径が攪拌動力および翼内部通過流量に与える影響は小さいことから、MSE 翼においては、半径方向への分割・合流の回数が翼性能に対しての影響が大きいことが分かった。円周方向の分割数による影響は小さかった。

回転する MSE 翼周りの PIV による可視化により、攪拌槽底部からの MSE 翼中央にある中空部への流体の速い上昇流の存在が観察され、翼側面からは高速の吐出流が観察された。混合特性の評価では、MSE 翼と FBDT 翼の攪拌動力が同じ条件下で、グリセリン水溶液中に塩化ナトリウムを添加し、攪拌槽内の所定位置における電気伝導度の経時変化を測定した。MSE 翼は、流体が高粘性になるほど FBDT 翼より混合時間を短縮できることが明らかになった。

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について評価すると共に、圧力損失測定結果と流動解析の結果を合わせて、MSE スタティックミキサー内部および周辺の流動状態を明らかにすることを目的とした。

圧力損失について、我が国で従来から広く使用されているケニックス型スタティックミキサーとの比較において、MSE スタティックミキサーの圧力損失の測定結果について評価した。ミキサー無しの場合の圧力損失と比較して、ケニックス型スタティックミキサーで約200倍、MSE スタティックミキサーで約10,000倍であった。MSE スタティックミキサーについては、混合エレメント積層枚数、形状、積層パターンにより圧力損失を制御できるため、その特性について測定結果をまとめた。

流動解析の結果、MSE スタティックミキサーについて、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で発生する高速流が上流側の積層体内に進入して、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複雑な流れを生み出し、乱流や渦流等を発生することで混合が促進されていると考えられる。また、混合エレメント積層体を中間板の両側に設置することが混合促進のために必要であることがわかった。

第4章では、本研究の最も重要なテーマであるスタティックミキサーの混合性能について、画素の輝度と蛍光顔料の濃度が比例関係にあることを示した上で、主流体である水流中に蛍光顔料で着色した注入流体を注入し、得られたスタティックミキサー下流の管断面画像を評価するために、新たに定義した以下の5つの評価指標について述べた。

- (1) 混合度 M : 管断面の全画素数に対する蛍光画素数の割合
 $M = (\text{蛍光画素数} / \text{管断面の全画素数})$

(2) 中央輝度 R_{med} : 蛍光画素中の R の輝度の中央値

(3) 最大輝度 R'_{max} : $n'(R)$ が最大となるときの R の輝度
ここで、 $n'(R) = n(R)^{R/255}$

(4) 濃厚塊の大きさ L : 全画素に占める濃厚塊の割合

(5) 偏在度 Dev : 管断面中心からの蛍光領域の y 座標における偏り

$$\text{ここで、輝度重心の座標 } (x,y) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i \times R_i)}{\sum_{i=1}^n R_i}, \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \times R_i)}{\sum_{i=1}^n R_i} \right]$$

そして、水流中に水との相溶性の異なる流体を注入し、上記 5 つの評価指標を用いて、スタティックミキサーなし、ケニックス型スタティックミキサー、MSE スタティックミキサーの 3 つのケースについての管断面画像を解析し、混合性能を評価した。

評価の結果、 M は直接的な評価指数として有効であるが、各画素の輝度を考慮していないため、濃厚塊が存在している場合は R'_{max} がその存在を示す評価指標として機能することがわかった。 R_{med} は大きな濃厚塊の影響を受ける場合があるが、均一化の進行を示す指標として有効であった。濃厚塊の大きさ L は、塊として存在する蛍光領域の評価に有効であり、偏在度 Dev は水との比重差がある注入流体を使用した場合に有効であった。

なお、 M については画像間でのバラツキが大きいという問題があったが、第 5 章で述べた新市場創造型標準化制度による JIS 原案作成過程において、第三者機関での実験結果を検討した結果、輝度のヒストグラムから低輝度（低濃度）側の輝度分布のピーク値の 10% に対応する輝度に 10 を加えた値をしきい値とすることにより改善することができた。

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、(株)アースクリエイティブの BDF 製造装置に対して、既存の 4 枚傾斜パドル翼を MSE 翼に交換することによりメチルエステル化率が上昇した経緯についてまとめた。さらに、MSE 翼の構造を応用した MSE 攪拌子について、従来の棒状攪拌子に対する優位性について、脱色試験結果および流動解析の結果により示した。

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への商業的適用に当たっての検討結果について述べた。水道水の流れ中への液体凝集剤注入後の希釈凝集剤濃度は注入後 1 分以内に安定し、希釈凝集剤の排水処理性能においては、攪拌装置によるものと比較して希釈凝集剤の使用量は 1~2 割多く必要になるが、設備コスト、設置スペース等を考慮して実用的であることを確認した。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」に採択されたので、その経緯および進捗状況についてまとめた。

第6章では、第2章から第5章までの結論を総括した。最後に、MSE翼およびMSEスタティックミキサーの工学的応用、およびスタティックミキサーの混合性能測定方法の将来展望について述べる。

MSE翼は、第5章で述べたBDF製造装置への適用が示すように、反応系の攪拌への適用が期待される。混合エレメントの貫通孔が連通することにより複雑な流路を形成し、流体が分割・合流、せん断等により接触効率が向上し、高い反応効率を実現することは今までの攪拌翼にない特徴である。本研究において示したMSE翼の基本特性は、新たなプロセスに適用される際の基礎データとして有用である。さらに、MSE翼を攪拌子に適用したMSE攪拌子は、今までの棒状攪拌子と比較して、短時間でビーカー等容器内の流体を均一に混合できるものである。

一方、わが国においてはケニックス型スタティックミキサーが広く使用されているが、本研究より注入流体が高粘性で水との相溶性が低く、かつ流量比が大きい場合には混合状態は十分とはいえなかった。MSEスタティックミキサーは圧力損失が大きいという短所はあるが、短距離でほぼ均一に混合することができる。第5章で示した液体凝集剤の希釈は、本研究の実験と同じ水流中への水との親和性の低い高粘性流体についての、水との流量比が大きい場合における混合である。この他にもMSEスタティックミキサーは、鶏卵の噴霧洗浄ラインにおける水道水と小流量の次亜塩素酸との短距離混合に採用される等、従来スタティックミキサーが適用されていない用途に使用されつつあり、今後は様々な分野・用途で使用されていくことが予想される。その際、本研究で新たに提案した5つの評価指標による混合性能の評価は意義があるといえ、来年度中に本評価方法がJIS化されることにより、その普及が加速するものと予想される。

振り返ってみれば、2011年にJSTからの特許関連のメールを見て、松崎コーディネーターを介して当時の佐伯准教授を山口大学に訪問したことから、MSE翼およびMSEスタティックミキサーへの実用化が本格的にスタートしたといえる。新商品を事業化するためには具体的な数値による優位性を示すことが要求されるが、中小企業であるがゆえに測定装置や技術、人材に限られており、説得力のある技術資料をまとめることができず、なかなか前に進めることができなかった。そのような状況において、佐伯教授との共同研究をスタートしたことが契機となり、国内外の学会発表や、それらにおける受賞、各媒体への記事掲載、新市場創造型標準化制度への採択等により、本格的に実用化を進めることができる体制が整いつつあることを実感している。本論文はこれまでに至る研究成果の集大成であり、ようやくここまで到達することができたことに実に感慨深いものがある。

科学技術は常に進歩することを要求されており、攪拌の効率化は従来から使用されている化学工業や食品工業等以外にも、今後大きく発展が予想されるバイオ関連技術や細胞関連技術をはじめとした各技術にとっても重要である。また、化学プロセスの連続化の重要性は、 NH_3 製造技術開発により可能となった空中窒素連続固定プロセスによる人類の食料問題の解決、ガソリンの連続精製プロセス開発に伴う自動車の普及の例が示しており、スタティックミキサーが化学プロセスの連続化に大きく貢献するものであることは、これまでの実用例からも明らかである。以上のような用途に MSE 翼および MSE スタティックミキサーが有効に利用されることを切に願う次第である。

参考文献

Abdolkarimi, V. and H. Ganji; “CFD modeling of two immiscible fluids mixing in a commercial scale static mixer,” *Brazilian J. Chem. Eng.*, 31, 4, 1-11 (2014)

Alberini, F., M.J.H. Simmons, A. Ingram, and E.H. Stitt; “Assessment of different methods of analysis to characterise the mixing of shear-thinning fluids in a Kenics KM static mixer using PLIF,” *Chem. Eng. Sci.*, 112, 152-169 (2014)

Etchells, A.W., Meyer, C.F., Mixing in pipelines. In: Paul, E.L., Atiemo-Obeng, V.A., Kresta, S.M., editors, “Handbook of Industrial Mixing – Science and Practice,” John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 391-478 (2004)

Das, M.D., A.N. Hrymak, and M.H.I. Baird; “Laminar liquid-liquid dispersion in the SMX static mixer,” *Chem. Eng. Sci.*, 101, 329-344 (2013)

Fradette, L., P. Tanguy, H. –z. Li, and L. Choplin; “Liquid/liquid viscous dispersions with a SMX static mixer,” *Chem. Eng. Res. Des.*, 85, A3, 395-405 (2007)

Ghanem, Akram, T. Lemenand, D. D. Valle, and H. Peerhossaini; “Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods : A review,” *Chem. Eng. Research and Design*, 92, 205-228 (2014)

Kiss N., G. Brenn, H. Pucher, J. Wieser, S. Scheler, H. Jennewein, D. Suzzi, and J. Khinast; “Formation of O/W emulsions by static mixers for pharmaceutical applications,” *Chem. Eng. Sci.*, 66, 5084-5094 (2011)

Kubo, K., K. Shoji, and H. Suzuki; “Dispersion Characteristics of a New Motionless Mixer, Bunsankun,” (in Japanese), *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 34, 6, 545-550 (2008)

Legrand, J., P. Moraçais, and G. Carnelle; “Liquid-liquid dispersion in an SMX-sulzer static mixer,” *Trans ICHIME*. 79, A, 949-956 (2001)

Lemenand, T., D. Della. Valle, Y. Zellouf, and H. Peerhossani; “Droplets formation in turbulent mixing of two immiscible fluids in a new type of static mixer,” *Int. J. Multiphase Flow*, 29, 813-840 (2003)

Lobry, Emeline, F. Theron, C. Gourdon, N.L. Sauze, C. Xuereb, and T. Lasuye; “Turbulent liquid-liquid dispersion in SMV static mixer at high dispersed phase concentration,” *Chem. Eng. Sci.*, 66, 5762-5774 (2011)

R. Wadley, M.K. Dawson; “LIF measurements of blending in static mixers in the turbulent and transitional flow regimes,” *Chem. Eng. Sci.*, 60 2469-2478 (2005)

Suzuki, H., M. Minami, K. Kubo, K. Shoji, Y. Komoda, and H. Usui; “Mixing Characteristics of Newtonian Fluid by a Multi-Holed Static Mixer,” *J. Chem. Eng. Japan*, 39, 8, 807-813 (2006)

Suzuki, H., M. Minami, K. Kubo, K. Shoji, Y. Komoda, and H. Usui; “Mixing Mechanism of a Multi-Holed Static Mixer,” *J. Chem. Eng. Japan*, 41, 3, 139-144 (2008)

Thakur, R.K., Ch. Vial, K.D.P. Nigam, E.B. Nauman, and G. Djelveh; “Static mixers in the process industries –a review,” *Trans ICHIME*. 81, A, 787-826 (2003)

Theron, F. and N. Le Sauze; “Comparison between three static mixers for emulsification in turbulent flow” *Int. J. Multiphase Flow*, 37, 488-500 (2011)

奥野博之、山本博信：“ファインケミカル用多目的攪拌機 FCM (Fine campaign mixer) について”，*ケミカル・エンジニアリング*, 36, 523 (2003)

論文リスト

<学術論文>

- (1) 著者氏名：望月 昇、来栖孝明、森口優吾、貝出 絢、佐伯 隆
論文題目：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
学術雑誌名：Kagaku kougaku ronbunshu (化学工学論文集 和文 IF：0.410)
巻、号、頁：43、2 (印刷中)
発行年月：平成29年3月
本文との関連：第3、4、5章

- (2) 著者氏名：Noboru Mochizuki, Aya Kaide, Takashi Saeki
論文題目：Quantitative Evaluation of Static Mixers' Mixing Characteristics by
Visualization Experiments under the Turbulent Region
学術雑誌名：J. Flow Control, Measurement and Visualization (IF：1.28)
巻、号、頁：(投稿中)
発行年月：
本文との関連：第3、4、5章

<査読のある国際会議の会議録等>

- (1) 著者氏名：Takashi Saeki, Noboru Mochizuki
論文題目：Quantitative Evaluations for a Newly Developed Mixer with Stacked
Elements
学術雑誌名：Proc.of 5th Asian Particle Tech. Symp.(APT2012)
巻、号、頁：P190, 1-2
発行年月：平成24年7月
本文との関連：第2章

- (2) 著者氏名：Noboru Mochizuki, Takashi Saeki, Aya Kaide
論文題目：Development of a Quantitative Evaluation Method of Mixing for Static
Mixers
学術雑誌名：Proc.of XVIIth International Congress on Rheology
巻、号、頁：P027, 1-2
発行年月：平成28年8月
本文との関連：第3、4章

<参考論文>

- (1) 著者氏名：佐伯 隆、望月 昇
論文題目:エレメント積層型攪拌翼とその混合特性～翼内攪拌による短時間混合～
学術雑誌名：攪拌・混合技術とトラブル対策（技術情報協会）
巻、号、頁：第 1 章 第 5 節、39-43
発行年月：平成 26 年 4 月
本文との関連：第 2， 3 章

- (2) 著者氏名：佐伯 隆、望月 昇
論文題目:流体の高効率混合が可能なラインミキサー
学術雑誌名：ケミカルエンジニアリング
巻、号、頁：第 61 巻、第 4 号、23-26
発行年月：平成 28 年 4 月
本文との関連：第 3， 4 章

<その他>

- (1) 特許出願：3 件（山口大学と共願のもの）
特願 2015-089806 平成 27 年 4 月 7 日
特願 2015-112664 平成 27 年 5 月 15 日
特願 2016-97372 平成 28 年 4 月 7 日

- (2) 日本工業規格（JSA） ----- 標準化委員会
提案企業・氏名：アイセル株式会社・望月 昇（作成委員）
作成委員長：山口大学 佐伯 隆
名称：静的流体混合装置の混合性能の測定方法
Measuring method for mixing performance of static mixer
2 月 3 日に委員会終了 → 経産省へ提出準備

<学会発表（国内）>

- (1) 来栖孝明, 佐伯 隆, 大宮直也, 望月 昇
エレメント積層型攪拌翼(MSE)の基本特性と評価に関する研究
第14回化学工学会学生発表会宇部大会(西日本地区), K02(2012.3.3)

- (2) 望月 昇, 佐伯 隆, 大宮直也
エレメント積層型攪拌翼 (MSE) の混合特性
化学工学会第77年会, N205(2012.3.15)

- (3) 来栖孝明, 望月 昇, 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性能評価
化学工学会第46回秋季大会, B305(2014.9.18)

- (4) 望月 昇, 佐伯 隆, 来栖孝明
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性の定量的評価
化学工学会第80年会, C323(2015. 3.21)

- (5) 佐伯 隆, 来栖孝明, 望月 昇
スタティックミキサーの混合性能の定量的評価手法の開発
化学工学会第81年会, D202(2016. 3.14)

謝辞

本稿を結ぶにあたり、基礎理論をはじめ、実験の方針、結論の導き方や文書の作成に至るまで、ご指導とご鞭撻を賜りました佐伯 隆 教授、および貝出 絢 助教に心より感謝し、お礼を申し上げます。そして、本論文について貴重なご教示をいただきました、大学院創成科学研究科 工学系学域 望月 信介 教授、環境共生系専攻 今井 剛 教授、大学院理工学研究科 循環環境学分野 通阪 栄一 准教授に、謹んでお礼を申し上げます。

また、実験を行い、実験に関する結果をまとめていただいた卒業生の大宮 直也君、来栖 孝明君、在校生の森口 優吾君、研究室でお世話になった諸先輩方、同輩、後輩、そして佐伯教授との共同研究を調整していただいた松崎 徳雄 産学連携コーディネーターに深くお礼を申し上げます。

有益な助言をいただきました大阪市立工業研究所の齋藤 守 室長、図面作成や試作品製作等について協力いただいたアイセル株式会社の皆様や、ここに名前を挙げられなかった多くの方々にも深くお礼申し上げます。

最後に、学位取得に向けて著者の背中を押してくれた妻、混合エレメントを見ながらこれどうなるのと興味を示し、特に意識することなしに励ましてくれた小学生の息子、そして女手一つで著者と妹を幼い頃から育て、なにより今回の成果を待ち望んでいた老齢の母親に感謝するとともに、今後の皆様のご活躍をお祈り致しまして、謝辞とさせていただきます。

平成 29 年 3 月

望月 昇