

エレメント積層型混合技術

アイセル株式会社

代表取締役 望月 貴司

アイセル(株) 技術顧問 望月 昇
アイセル(株) 事業開発部 課長 田中 鋭治

はじめに

混合・攪拌操作は化学プロセスにおける重要な単位操作の一つである。多孔板形状の混合エレメントを積層したエレメント積層型混合器（以下、「MSE ミキサー（MSE：Multi-Stacked Elements）」）は、これら混合・攪拌操作に使用されるものであり、流体を分割・合流、せん断等により効率的に混合する。静的な混合にも動的な攪拌にも適用できる、幅広い分野で使用可能な応用範囲の広い技術である。

開発のねらい

MSE ミキサーは、静的混合器や攪拌翼等のデバイスへのアプリケーションがあるが、共通する開発のねらいは以下の通りである。

- ① 効率の優れた混合
- ② 柔軟性を備えたシンプルな構造

①について、よく使用されている攪拌翼は羽根タイプのものであり、流体はこれら攪拌翼により主に羽根周辺で混合される。しかし、攪拌槽内で混合状態が飽和に達した流体が、繰り返し羽根周りを流れてもそれ以上混合は進行しない一方で、羽根から離れた流体の混合は遅く、いわば「過混合」ともいえる状況が発生し、そのため全ての流体を所定の混合状態にするには長時間を要する場合がある。②については、羽根タイプの攪拌翼は改造が難しく、羽根を多段

にする以外に構造の変更は困難である。同様に静的混合器も混合性能調整のために、内部品の構造の変更は困難である。本技術は以上の2点を課題として設定し、開発したものである。

装置の概要

MSE ミキサーは、図1に示す2種類の多孔板形状の混合エレメント（以下、単に「エレメント」）の積層体（以下、単に「積層体」）を、全てのデバイスの基本構成要素とする。エレメントのうち一方は外周部の貫通孔が開いて内周部の貫通孔は閉じており（外開き）、他方のエレメントは逆に外周部の貫通孔が閉じて内周部の貫通孔が開いている（内開き）。各エレメントの貫通孔間の円周方向の壁は、積層時に重ならないように配置されているため、各貫通孔が連通して流路が形成される。さらにエレメントを多層化することにより、三次元的に複雑に連通しながら整列した流路を有する MSE ミキサーが形成される。流体は以上の流路を流れる際に、積層方向及び半径方向に三次元的に分割・合流され、さらにはせん断作用や渦流等により効率的に混

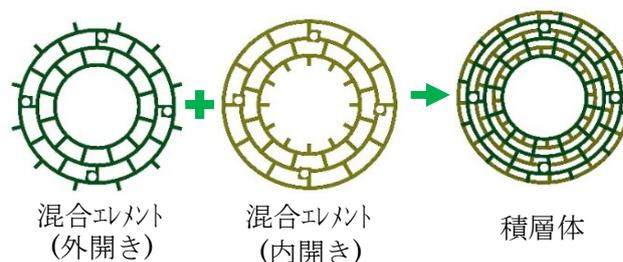


図1 混合エレメント及び積層体

合される。積層体内部の積層方向及び半径方向の流体の流れを図2に示した。

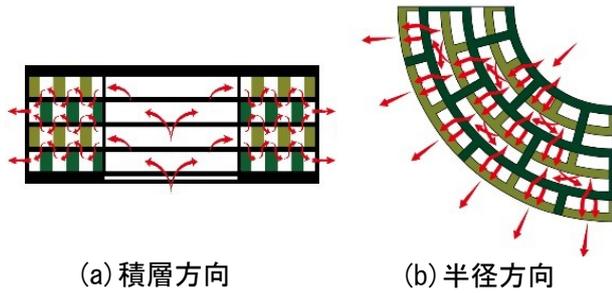


図2 積層体内部の流体の流れ

以上の積層体を基本構成要素として、静的混合器、攪拌翼等のデバイスが構成される。以下に、各デバイスについて説明する。

(1) MSE スタティックミキサー

配管内部で自身は動くことがなく流体を混合するデバイスを静的混合器（スタティックミキサー）と呼ぶ。中央に貫通孔を有する中間板の両側に積層体を配置し、その両端にブラインド板を配置することで MSE スタティックミキサーが構成される。図3(a)に分解斜視図を、図3(b)に流体の流れを示した。

フランジ間に設置された MSE スタティック

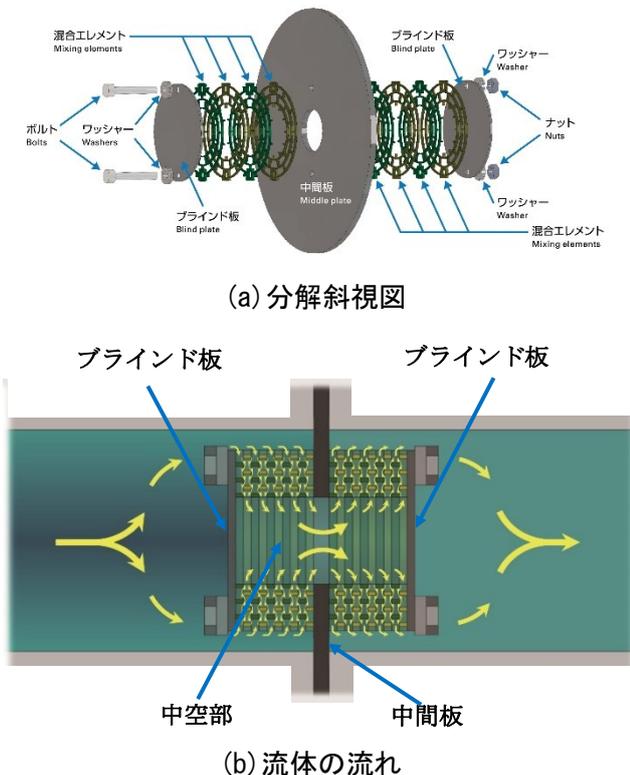


図3 MSEスタティックミキサー

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、上流側の積層体の側壁から積層体内部へ流入し、中空部に流出する。次いで流体は中間板の貫通孔を通過し、下流側の積層体内部を通過して配管内に戻る。流体が積層体内部の複雑な流路を通過する際に、図2に示したように三次元的に分割・合流、せん断等を繰り返して高効率に混合される。

MSE スタティックミキサーの主な特徴としては、①短距離での高効率混合、②設置が容易、③エレメント積層枚数・方式の変更による機器特性の調整が可能等が挙げられる。

8～20Aの小径配管用に、積層体をニップル内に収容したニップルタイプも用意されており、これらは配管にねじ込むだけで使用できる。

(2) MSE 攪拌翼

MSE 攪拌翼（以下、「MSE 翼」）は、図4(a)に示すように積層体をリング状の板で挟み、これに回転軸を取り付けて構成される。図4(b)に攪拌槽内における流れのイメージを示す。

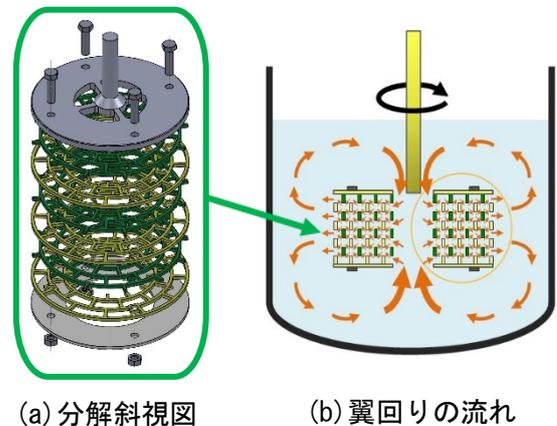


図4 MSE攪拌翼

MSE 翼を回転させると遠心力により積層体内部の流体が吐出され、中央の中空部から流体を吸い込んで積層体に流入する循環流れが発生する。流体は積層体内部の複雑な流路を流れる際に、分割・合流、せん断等により混合される。MSE 翼の主な特徴としては、①高効率で穏やかな攪拌、②巻上げ・吸込み等多彩な攪拌が可能、③流体が同形状の流路を通過することによる均質な混合等が挙げられる。また、略円筒形状のた

め、攪拌時の回転軸の振動が小さい。

MSE ミキサーは構造がシンプルなので、これらのデバイスにおいては、材質やサイズの自由度が高く、金属だけでなくフッ素系樹脂等々の材料での製作が可能である。また、積層枚数・方式の変更による圧力損失や攪拌槽内循環流量の調整ができるため、運転状況により改造が必要になった場合でも、デバイスの特性や混合状態の調整が可能である。

技術上の特徴

当社と山口大学が主導して JIS B8702 として制定された混合性能測定方法により、MSE スタティックミキサーと汎用のケニックス型スタティックミキサーを比較した。測定に使用した流れ系を図5に示した。流れ系に設置したスタティックミキサーの上流から、蛍光顔料で着色した 1.5wt%CMC（カルボキシメチルセルロース）水溶液を水流に対して 0.2vol%の流量で注入し、出口流体が導かれる可視化流路にレーザーシート光を照射し、管断面画像を撮影した。

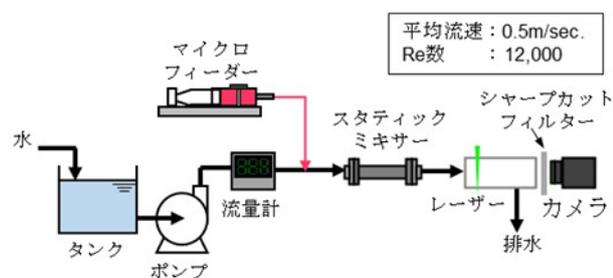


図5 混合性能評価のための流れ系

図6に撮影画像の一例を示した。CMC水溶液は水との相溶性が低く、ケニックス型では濃厚塊が円環状に分断されている一方で、MSEではわずかに小さな濃厚塊が存在するものの、ほぼ均一な混合が達成されているのが分かる。

JIS B8702 に規定されている指標の内の2つについて、図6の画像を対象に求めた結果を表1に示した。混合度 M は管断面全領域に対する蛍光領域の割合で、注入流体の広がりを表す指標である。ケニックス型では約 50%であるのに



図6 管断面画像

対し、MSE はほぼ 100%にまで注入流体が広がっている。一方、濃厚塊の最大輝度 R'_{max} は注入流体の希釈度合いを表す指標であり、大きいほど濃厚塊の濃度が高いことを示す。ケニックス型では注入流体と同じ 255 であるが、MSE では 93 まで低下している。以上により水流に対する 1.5wt%CMC 水溶液の混合では、MSE の優位性が定量的に示されている。

表1 混合度指標

	ミキサーなし	ケニックス型	MSE
M [%]	6.82	50.54	99.99
R'_{max}	255	255	93

実用上の効果

(1) 高分子液体凝集剤の希釈

水処理において高分子液体凝集剤の使用が拡がりつつあるが、MSE スタティックミキサーは高分子液体凝集剤の希釈において実績を上げている。図7に示すように、従来は希釈槽内で攪拌翼により希釈していたが、これを MSE スタティックミキサーによるインラインでの希釈に切り替えることにより、希釈槽・攪拌翼、希釈剤ポンプを不要とし、希釈設備の省スペース、コス

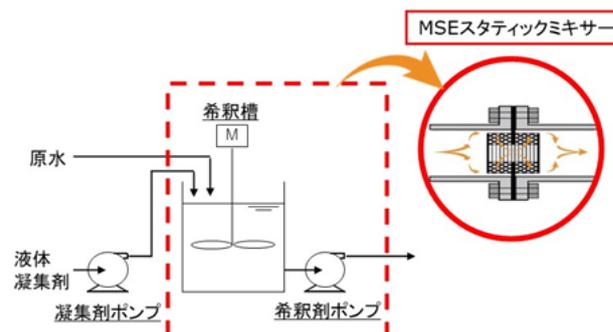


図7 高分子液体凝集剤希釈設備の改造

トダウンを実現した。希釈された高分子液体凝集剤は従来方法と同等以上の凝集効率を示しており、積層体内での一様で適度なせん断作用により高分子が十分に展開されたものと推定される。なお、本希釈操作は、水流への小流量の高粘性流体の混合という点で、前述した JIS に規定されている測定方法の条件と同様である。

(2) MSE 攪拌翼による混合の制御

MSE 翼内部を流れる流体は、複雑であるが規則正しく整列した流路を通過するため、流体に均等にせん断力を作用させられ、混合の制御能力が高いと考えられる。一例として、ポリスチレン微粒子合成における羽根タイプの翼との比較結果を図 8 に示した。MSE 翼では羽根タイプの翼と比較して粒径は大きいですが、単一ピークのシャープな粒径分布が得られている。

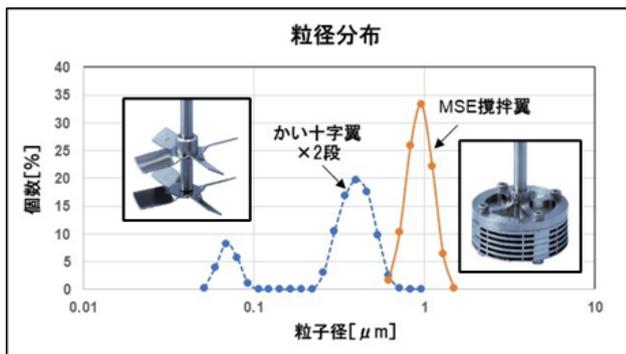


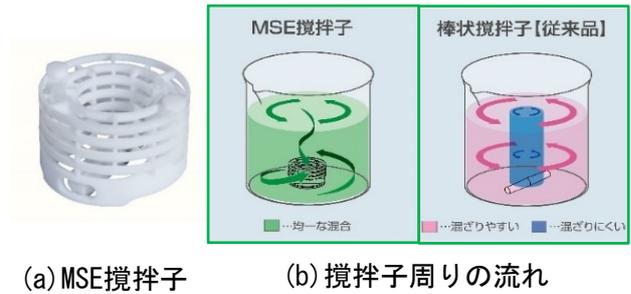
図8 生成ポリスチレン微粒子の粒径分布

この結果は翼内に形成される一様なせん断によるものと推定されるが、同じ理由で羽根タイプの翼からの変更により①貯槽内の液中粒子の沈降防止において、不均一なせん断により生じていた副生成物の抑制、② BDF 製造におけるメチルエステル反応効率の向上の実績もある。

(3) 攪拌子

実験室でビーカーやフラスコ内の流体の混合に使用される攪拌子に、MSE ミキサーを適用した MSE 攪拌子の外観写真を図 9 (a) に、流れを図 9 (b) に示した。積層体の効果により、条件によっては混合時間を 1/10 以下に短縮できる。

知的財産権の状況



(a) MSE 攪拌子

(b) 攪拌子周りの流れ

図9 MSE攪拌子及び混合の様子

本開発品に関する主な登録特許は以下である。対応する特許も米・欧等に登録されている。

① 日本国特許第 5500575 号

名称：混合要素、混合装置、混合方法、攪拌翼、攪拌装置及び攪拌方法

概要：基本特許

② 日本国特許第 5760205 号

名称：混合方法、混合装置、及び混合流体

概要：昇圧機能を備えるポンプ式ミキサー

③ 日本国特許第 6573240 号

名称：攪拌子、攪拌装置、攪拌方法、細胞培養方法、反応促進方法、及び攪拌子の組立方法

概要：攪拌子及び反応方法

むすび

MSE ミキサーは、流体に均等にエネルギーを作用させて混合すると共に、構成部材の組替えが容易であり、材質やサイズの自由度が広く、幅広い条件に対応することができる従来にない混合器である。この特性を生かし、さらに多くの分野に普及させていきたい。

引用文献

- 1) 望月昇, 来栖孝明, 森口優吾, 貝出絢, 佐伯隆, 化学工学論文集, 43, 75-80 (2017)
- 2) 望月昇, 佐伯隆, 化学装置, 60 巻 3 号, 4-7 (2018)