

氏 名	みず の よし のり 水 野 吉 規
学位(専攻分野)	博 士 (情 報 学)
学 位 記 番 号	情 博 第 137 号
学位授与の日付	平 成 17 年 1 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	情 報 学 研 究 科 複 雑 系 科 学 専 攻
学位論文題目	Chaotic mixing in a model of static mixer (スタティックミキサーの一つのモデルにおけるカオス混合)

論文調査委員	(主 査) 教 授 船 越 満 明	教 授 藤 坂 博 一	教 授 木 上 淳
--------	----------------------	-------------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、流体の混合装置であるスタティックミキサーの一つのモデルであるパーティションド・パイプ・ミキサー（以下 PPM）と呼ばれる系を対象として、この系における流体混合をカオスに関係した概念や力学系の理論を用いてさまざまな観点から調べることによって、この混合の特徴を明らかにするとともに、流体の混合装置の設計における指針を与えようとするものである。ここで PPM とは、長い円筒の内部に、ある長さをもつ二種類の平板をある角度で交差するように交互に周期的に配置したもので、圧力勾配によって円筒の軸方向に流れを作り出すと同時に、円筒壁の回転により断面方向の流れを発生させて、円筒内を進む流体の混合を促す系である。

一般に、流体の各微小部分がカオス的な運動をする場合には効率の良い混合が期待できるので、そのようなカオスの性質を利用した混合はカオス混合と呼ばれている。第 1 章では、このカオス混合に関するこれまでの研究の流れについて解説されているほか、PPM の具体的な形状等についての説明が行われている。

第 2 章では、PPM におけるストークス流れと呼ばれる遅い流れを近似的に表す比較的単純な速度場を用いて、隣り合う平板の長さの比や交差角などのシステムパラメータに対する混合性能の依存性を、新たに提案した二つの評価法を用いて詳細に調べている。一般に、カオスの性質を利用して流体を混合しようとする場合、流体のすべての微小部分がカオス的に運動するとは限らないが、上記の評価法のうちの一つでは、輸送障壁に囲まれカオス的に運動しない流体部分の流量によって混合性能を定量化している。またもう一つの方法では、円筒内の平板による流れの分断に着目して「分離曲線」という概念を導入し、その分布を基にして、流体が軸方向に比較的短い距離だけ進む間の混合性能の定量的評価を行っている。ここで分離曲線とは、平板の前端に到達するような流体粒子の軌道とある円筒断面との交点からなる集合である。本論文では、これらの評価法を用いて、良好な混合性能が得られるパラメータの範囲を明らかにし、隣り合う平板の長さの比や交差角を適切な値に設定することによって混合性能が大きく改善されることを示している。また、平板前端での流れの分断が流体の混合過程において重要な役割を果たしていることも示している。

第 3 章では、ストークス流れが満たすべき流体の基礎方程式を数値計算によって精度良く解いて得られた速度場を用いて、PPM における混合過程を定量的に詳細に調べている。その結果、この速度場の下での混合の過程は第 2 章で用いた近似的な速度場の下での混合と定性的には同様であることが示され、第 2 章の近似的な速度場に基づく解析の妥当性が示されている。また、平板による流れの分断は、その後の円筒壁付近の高せん断領域でおこる流体の大きな引き伸ばしに先行する過程として、PPM における混合過程において大きな役割を果たすことを示している。

第 4 章では、PPM における速度場と流体混合が、系を特徴付ける重要な無次元パラメータであるレイノルズ数 Re にどのように依存し、また $Re \rightarrow 0$ の極限で与えられる流れであるストークス流れの場合に比べてどのように異なるかを数値的な計算によって調べている。その結果、輸送障壁に囲まれた非カオス的運動の領域は Re の増加に伴って拡大、縮小、消滅などの複雑な変化を示すが、これらの変化は速度場の空間的構造の変化と関係づけられることが示されている。また、 Re

が小さい範囲では、ストークス流れのときと同様に主に平板による流れの分断とそれに続く円筒壁付近での流体の引き伸ばしが流体の混合過程に寄与するが、 Re が大きくなると、混合を促進させる高せん断領域が円筒壁付近以外にも新たに出現して混合過程の定性的変化が見られることが示されている。

第5章では、これまでの章での結果のまとめとそれに関連した議論が示され、また今後に残された課題が書かれている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、流体の混合装置の一つのモデルであるパーティションド・パイプ・ミキサー（以下 PPM）と呼ばれる系を対象として、この系における流体混合をカオスに関連した概念や力学系の理論を用いてさまざまな観点から調べることによって、この系での流体混合の特徴を明らかにするとともに、流体の混合装置の設計における指針を与えたものである。その主な成果は以下の通りである。

PPM におけるストークス流れを近似的に表す比較的単純な速度場を用いて、隣り合う平板の長さの比や交差角のさまざまな値に対する混合性能を、輸送障壁に囲まれカオス的に運動しない流体部分の流量、分離曲線の分布、という新たに提案した二つの評価法を用いて詳細に調べ、次の結果を得た。(1)隣り合う平板の長さの比や交差角を適切な値に設定することによって、混合性能が大きく改善される。このことは、一般のスタティックミキサーの設計において、円筒内部の形状の対称性を少し破る方が混合性能が良くなる可能性を示唆している。(2)分離曲線の分布は、流体が軸方向に比較的短い距離だけ進む間での混合性能の定量的評価の指標として有効である。

数値計算によって高精度で求めたストークス流れの速度場を用いて混合過程を定量的に詳細に調べ、次の結果を得た。(1)この速度場の下での混合過程は上記の近似的な速度場の下での混合と定性的には同様であるので、近似的な速度場に基づく混合過程の解析の妥当性が確認できる。(2)平板前端での流れの分断は、その後の円筒壁付近の高せん断領域でおこる流体の大きな引き伸ばしに先行する過程として、PPM での流体の混合過程において重要な役割を果たしている。

PPM における速度場と流体混合が、レイノルズ数 Re にどのように依存し、また $Re \rightarrow 0$ の極限での流れであるストークス流れの場合に比べてどのように異なるかを数値計算によって調べ、次の結果を得た。(1)輸送障壁に囲まれた非カオスの運動の領域は Re の増加に伴って拡大、縮小、消滅などの複雑な変化を示し、 Re が増加するときに必ずしもカオス的な運動が単調に強まっていくわけではない。また、これらの領域の変化は速度場の空間的構造の変化と関係づけられる。(2) Re が小さい範囲では、主に平板前端による流れの分断とそれに続く円筒壁付近での流体の引き伸ばしが流体の混合過程に寄与するが、 Re が大きくなると、混合を促進させる高せん断領域が円筒壁付近以外にも新たに出現して、混合過程の定性的変化が見られる。

以上の成果は流体の混合過程に関するカオスや力学系の理論の立場からの研究の発展に大きく貢献するものであると判断される。よって、本論文は博士（情報学）の学位として価値あるものと認める。

また、平成16年12月17日に実施した論文内容とそれに関連した事項に関する試問の結果、合格と認めた。