

氏名	古澤 宏明
授与した学位	博士
専攻分野の名称	工学
学位授与番号	博甲第3885号
学位授与の日付	平成21年 3月25日
学位授与の要件	自然科学研究科 産業創成工学専攻 (学位規則第5条第1項該当)
学位論文の題目	螺旋状層流形成マイクロロータリーリアクタの研究
論文審査委員	教授 鈴森 康一 教授 則次 俊郎 教授 五福 明夫

### 学位論文内容の要旨

マイクロリアクタシステムや $\mu$ TAS (Micro Total Analysis System), Lab-on-Chip等のマイクロ流体システムの研究開発が活発になっており、マイクロ流体システムの実現には微小空間内と短い反応距離において効率よく液体の混合や反応を行うマイクロリアクタの開発が重要な課題となっている。

アクチュエータを用いて能動的に混合と反応を促進・制御するアクティブ型マイクロリアクタとしてマイクロロータリーリアクタの開発を行った。マイクロロータリーリアクタは幅 0.5mm の二重円筒間流路を持ち、永久磁石を内筒のローターとしている。これにより、デバイス外部から磁場を制御することで内部のローターを非接触で駆動・制御することができ、複雑なシール機構を必要とせず、構造がシンプルで密閉性の高いマイクロリアクタを実現した。マイクロロータリーリアクタはローターの回転を用いて2液による螺旋状層流を形成する。螺旋状層流の形成は、2液の反応表面積が増大し、また反応距離が直線状層流と比べて長くなるため反応効率が向上する。また、ローターの回転数や流量を変化させることにより螺旋状層流の層幅を任意に制御でき、反応表面積や反応時間を任意に制御することで混合と反応を制御することが可能となる。これにより、反応効率が高いマイクロリアクタにおいて問題となる、過度の反応による不要な副産物の生成を抑制することも可能となる。

開発したマイクロロータリーリアクタにおいて不混和性2液による螺旋状層流の形成が可能であるかを、流体解析シミュレーションを行うことにより確認した。その結果、ローターとアウターケーシングとのギャップにおいて螺旋状層流が形成されること、また、流路が数百 $\mu$ mの空間では重力の効果が無視できるほど小さいということを確認することが出来た。

螺旋状層流のローター円周方向の平均流速と層幅、螺旋長さ、2液間の接触界面積、そして拡散距離の理論特性式を導出した。マイクロロータリーリアクタの理論値と市販されているマイクロリアクタの実測値との比較を行った結果、マイクロロータリーリアクタは市販されているマイクロリアクタに比べて2液間の接触界面積が約40倍、デバイス体積に対する2液間の接触界面積比が約11倍と非常に優れることがわかった。よって、マイクロロータリーリアクタにより螺旋状層流を形成することが出来れば、実用性に優れたマイクロリアクタが実現できるということが考えられる。

実際にシリコンオイルと水道水の不混和性2液を流路に供給し、ローターを回転させた時のローターとアウターケーシングとのギャップにおける液体の流動状態を実験により検証した結果、螺旋状層流の形成を確認することが出来た。また、実験により形成された螺旋状層流の層幅を測定した結果、ローターの駆動周波数が高くなるにつれて層幅が細くなっていき、流量が多いほど層の幅が太くなる傾向があることを確認した。

開発したマイクロロータリーリアクタを化学反応プロセスに適用し、有効性の評価を行った。適用する化学反応プロセスは水相中の銅イオンを油相中に抽出する溶媒抽出反応である。実験の結果、反応時間が等しい場合にはローターの駆動周波数が高いほど、つまり螺旋状層流の層幅が小さくなり2液間の界面積が大きくなるほど抽出率が高くなった。また、螺旋状層流の層幅が等しい場合には反応時間が長いほど抽出率が高くなった。一般的に液体の混合や反応を行う際に用いられる回分式攪拌装置を用いた実験結果と比較した結果、マイクロロータリーリアクタの方が優れていることがわかり、有効性を確認することが出来た。

このように、マイクロ流体システムの組み込みに適したマイクロリアクタの開発に成功した。

## 論文審査結果の要旨

近年、化学プロセスの分野で研究が進められているマイクロリアクタシステム(微小化学反応装置)の実現には、微小空間における高効率の液体混合や反応促進が最も重要な工学的課題の一つとなっている。本研究では、アクチュエータを用いて能動的に混合と反応を促進、制御するマイクロリアクタとして、回転型の新しいリアクタ(マイクロロータリーリアクタ)を考案し、その設計法、特性、有効性を明らかにした。

本研究で提案したマイクロロータリーリアクタは、ガラス製の円筒管とその中に設置した永久磁石製のロータリーから構成され、円筒管およびロータリー間の微小空間に2液による螺旋状層流を形成することで界面積を増大し反応効率を上げるとともに、反応界面や滞留時間を任意に制御することで副産物の生成抑制を可能とする。

論文では、流体数値解析により不混和性2液による螺旋状層流の形成条件を明らかにしている。また、螺旋状層流のロータリー円周方向の平均流速と層幅、螺旋長さ、2液間の接触界面積、そして拡散距離の理論特性式を導出した。開発したリアクタは従来の標準的なマイクロリアクタに比べて、リアクタ容積に対する2液の界面積が約11倍と非常に優れることを示した。

シリコーンオイルと水道水の不混和性2液を用いた実験により、螺旋状層流の形成を確認することができ、その層幅の制御が行えた。次に、水相中の銅イオンを油相中に抽出する溶媒抽出反応に適用し、一般的に用いられる回分式攪拌装置と比較して、有効性を示した。

以上のように本論文は、新しいマイクロリアクタを提案し、その設計法や特性を明らかにするとともに、基礎的な化学プロセスに適用してその有用性を実証したものであり、岡山大学大学院自然科学研究科における博士論文の認定基準を満たしており、博士(工学)の学位論文として認められる。