

審査の結果の要旨

氏 名 高橋 克佳

本論文は、「Development of a novel microfluidic device by utilizing micro droplet collision and its application to chemical processes (マイクロ液滴衝突を用いた新規マイクロ流体デバイスの開発と化学プロセスへの展開)」と題し、制御閉空間であるマイクロチャネル内での液滴の加速と衝突により、液滴の運動エネルギーを時間・空間的に集中させることにより化学プロセスを実現する新規マイクロ流体デバイス、すなわちマイクロ液滴コライダーの創成に関する研究結果をまとめたものである。

第1章では、近年の μ TAS や Lab-on-a-chip といわれる類似的研究の歴史的背景とその意義をまとめ、マイクロ化学システムの有用性を示した。また、従来のマイクロ流体プロセスについてまとめ、これはマイクロ空間のスケール効果のみを利用していることを示した。そして、これらの研究に対し、本研究の液滴の運動エネルギーを積極的に利用するマイクロ液滴コライダーの意義を明確にし、本研究の目的を述べた。

第2章では、創案したマイクロ液滴コライダーについて述べた。マイクロチャネル内での液滴の生成・発射・加速操作および高速衝突操作を1つのマイクロチップ上に集積化するために、気相中での液滴操作および気液ラプラス圧を用いた設計を着想した。設計・作製したチップを用いサブナノリットルオーダーの液滴を気液ラプラス圧を用いたバルブ機能により生成し、圧縮空気により発射・加速した。液滴速度はメートル毎秒オーダーとなり従来の油中液滴プロセスの100倍以上高速化を実現した。また、気液ラプラス圧を用いた衝突チャンバー設計により、標的液滴を保持した状態で、液滴間の気体を迅速排除し、加速液滴との高速衝突（衝突時間1ミリ秒以下）を実現した。表面張力制御など制御閉空間の効果を活用して、衝突位置・時間の制御、高速・非弾性の衝突を実現し、加速液滴の運動エネルギーを衝突により効率的に利用可能とした。本章の結果はマイクロ液滴コライダーの原理をはじめて実証したものである。

第3章では、マイクロ液滴衝突を高速で可視化計測し、衝突現象と流動現象を解析した。前章で開発したマイクロ液滴コライダーにおける流動ダイナミク

スを解明し、化学プロセスに展開するため、液滴の高速運動を顕微鏡下の高速カメラで可視化計測した。液滴は発射後、下流流路で終端速度に達し、印加圧力に比例して終端速度が増加することを示した。管摩擦係数を用いて液滴運動の支配因子について評価し、液滴運動には気体流れの影響が大きいことを示した。また、液滴の高速衝突時の内部流動を蛍光粒子を用いて可視化計測した。同一径を有する加速液滴でも、衝突後は標的液滴の中心部に貫入する特異な流動を見出した。衝突後の液滴形状等は表面張力で制御され、加速液滴が標的液滴に慣性により浸入することを示した。これは、液滴の運動エネルギーの集中による内部流動の誘起をはじめて実証したものである。従来のマイクロ液滴プロセスやバルク自由空間での液滴衝突では困難であった液滴の運動エネルギーを用いた化学プロセスが、制御閉空間での液滴衝突により可能であることを示した。

第4章では、マイクロ液滴コライダーを用いたマイクロ化学プロセスを開発した。従来の拡散支配のマイクロ流体プロセスでは困難である、体積の大きく異なる液滴間の迅速混合を実現した。加速液滴の運動エネルギーで衝突により標的液滴の内部流動を誘起することにより、体積比 1:10 の微量液滴間迅速混合（拡散の 6,000 倍迅速）を実現した。また、油中液滴操作やインクジェットなど従来法では困難だった平行流プロセスと液滴プロセスの融合を実現した。マイクロ液滴コライダーの圧縮空気を用いた加速機構と気液ラプラス圧を用いた流路設計により、液滴の平行流への撃ち込みを実現した。本章で開発したマイクロ化学プロセスにより、従来困難であった前処理を含むオンチップ血液分析、滴定分析、単一細胞分析といった複雑かつ広範囲の分析化学への展開が可能となる。

第5章では、第2章から第4章までで開発・解析したマイクロ液滴コライダーのマイクロ流体工学としての意義についてまとめ、展望を示した。

以上要約したように、本論文は、液滴の運動エネルギーを時間・空間的に集中するマイクロ液滴コライダーの創成により、従来困難であった様々な化学プロセスへの展開を実証したものである。今後、開発したデバイスの目的に応じた性能向上により、化学・バイオ分析および反応・合成化学への広範囲な応用が期待される。以上、本論文はバイオエンジニアリングの進展に貢献するものである。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。