

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ステップ乳化とDLD法の統合による液滴および粒子処理の高度化
Title(English)	Integration of step emulsification and deterministic lateral displacement for advanced droplet and particle processing
著者(和文)	季広冲
Author(English)	Guangchong Ji
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第8号, 授与年月日:2024年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:西迫 貴志,吉田 和弘,進士 忠彦,柳田 保子,石田 忠
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第8号, Conferred date:2024/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	季 広沖	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	西迫 貴志	准教授	石田 忠	准教授
	審査員	吉田 和弘	教授		
		進士 忠彦	教授		
柳田 保子		教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文「Integration of step emulsification and deterministic lateral displacement for advanced droplet and particle processing」は、7章から構成されている。

第1章「Introduction」では、マイクロ流路を用いた液滴や粒子の処理技術の意義と重要性について述べ、段差構造と界面張力勾配を用いて液滴を生成するステップ乳化(SE)法と、支柱配列を用いて粒子をサイズに基づき分離するDeterministic Lateral Displacement(DLD)法について概観している。その上で、本論文では上記の液滴生成法と粒子分離法を統合し、SE法の副生成物であるサテライト滴の分離や液滴の蛍光標識、ゲル粒子生成、液滴の滞留抑止、そして生産量スケールアップに係る各種の革新的要素技術を提案し、その有効性を実証することを目的としている。

第2章「Separation of main and satellite droplets」では、SE法の副生成物であるサテライト滴の分離を目的に、SEノズルアレイの下流にDLD流路を配置したデバイスを提案している。60個の楔形SEノズル(深さ16 μm)と16 \times 280本のDLD支柱(深さ91 μm , 分離直径37 μm)を持つシリコン樹脂製デバイスを作製し、生成された水中油型(O/W)の単分散主滴(平均直径58 μm , CV値2.8%)とサテライト滴(平均直径3 μm , CV値25.9%)の完全分離を実証している。さらに、回収された主滴に光重合処理を行い、平均直径55 μm , CV値2.9%の単分散アクリル粒子を得ている。

第3章「Post-formation fluorescent labeling of main droplets」では、SE法で生成した液滴にDLD法を用いて蛍光標識を付与する手法を提案している。デバイスの上流のSEノズルアレイに沿ってポリビニルアルコール(PVA)水溶液と蛍光ナノ粒子(直径約300nm)の分散液を並行させ、平均直径50 μm の単分散主滴に蛍光ナノ粒子を取り込ませた後にDLD流路内を斜行させ、蛍光標識が付与された主滴をPVA水溶液中で分離、回収している。さらに光重合により、平均直径47 μm の単分散蛍光アクリル粒子を得ている。共焦点顕微鏡と電子顕微鏡で評価し、蛍光ナノ粒子が液滴や粒子の表面ではなく内部に取り込まれていることを確認している。

第4章「In-situ external gelation for alginate hydrogel particle synthesis」では、DLD流路内の斜行軌道を用いたアルギン酸カルシウム(Ca-alginate)ゲル粒子の新しい生成法を提案している。まず、デバイスの上流に設けた3個のSEノズルで、平均直径68 μm のアルギン酸ナトリウム(Na-alginate)水溶液からなる主滴をオレイン酸中に生成し、下流のDLD流路では塩化カルシウム水溶液と界面活性剤含有コーン油からなるWater-in-Oil(W/O)エマルジョンに対してNa-alginate主滴を斜行させてイオン架橋を促し、平均直径66 μm のCa-alginateゲル粒子を生成している。さらに、これらのCa-alginateゲル粒子をオレイン酸の流れから80wt%グリセロール水溶液の流れまで斜行させ、溶液置換を実証している。

第5章「Mitigation of droplet accumulation through pillar-assisted nozzle design」では、SEノズル近傍での液滴の滞留と合一を抑制する新しい流路構造を提案している。作製したデバイスは100本のSEノズルアレイと、それと流れが直交するDLD流路から構成され、生成した平均直径53 μm の主滴がノズル近傍に留まらず、生成直後にDLD支柱配列に沿って斜行し、SEノズルアレイと反対側の流路側壁に濃縮される様子を確認している。また、DLD支柱配列を傾斜配置した改良デバイスを用い、SEノズルで生成した主滴をより均一に流路内に分布させることを実現している。

第6章「Scalable droplet processing via module parallelization」では、SE法とDLD法を統合して生産技術に応用する際の課題である生産量スケールアップを目的とした新たな並列化デバイスを提案している。このデバイスは二層構造を持ち、下層にSEノズル1000個とDLD流路10本、上層に各流路に均等に液体を分配するためのリザーバを備えている。まず、3次元流体シミュレーションでリザーバ形状が分配流量に与える影響を評価し、さらにリザーバとDLD流路の流体抵抗モデルに基づき、流路間の最大分配流量比を推定している。実験では、サテライト滴を完全に除去した平均直径66 μm , CV値2.2%の主滴を回収率99.6%で得られ、従来の非並列化装置の15倍の生産速度を達成している。

第7章「Conclusion and outlook」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について述べている。

以上を要するに、本論文は、SE法とDLD法を統合したマイクロ流路を用い、サテライト滴の分離、液滴・粒子の化学修飾、ゲル粒子の作製、液滴の流路内分布制御、処理量スケールアップ法について新たに提案・実証したものであり、工学上ならびに工業上貢献するところが大きい。よって本論文は、博士(工学)の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

注意:「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。