補助事業番号　2024M-430
補 助 事 業 名　2024年度　超音波ナノエマルションデバイスを利用した急冷ナノ粒子生成システム補助事業
補助事業者名　岡山大学　大学院環境生命自然科学研究科システム構成学研究室　神田岳文

1　研究の概要

薬剤、食品、化粧品、電子材料等に用いられるナノ粒子製造に利用することを目標として、分散の小さいナノ（サブマイクロメートル）レベルの直径を持つ粒子を生成する小型のフロー系システムを実現することを目的とした研究を行った。マイクロ流路内に生成されたエマルションに含まれるマイクロメートルレベル、あるいはサブミクロメートルレベルの直径を持つ微小液滴を急冷し、溶解度の差を利用した晶析技術である再結晶現象を用いて結晶粒を得るフロー系システムを構築し、実験的に検証を行った。エマルション生成には圧電素子による超音波領域の高周波振動を利用した手法を用い、マイクロ流路デバイス内に液滴径の分散の小さなエマルションを生成する。これにより分散相となる原料溶液を、連続相で満たされたマイクロ流路へ多数の液滴として分散させる。この方法により、従来の流れによるせん断を利用した液滴生成に比べて微細な液滴を含むエマルションの供給が可能となり、システムとして生成される微粒子の微細化（ナノ粒子化）につながる。また、温度制御が容易であるマイクロリアクタの特性を生かし、主として金属製のプレートで構成されたマイクロ流路内で液滴を冷却することによって大きな冷却速度を実現し、再結晶現象により微小な結晶粒を得て回収する。原料溶液を微小液滴を含むエマルションとして供給することにより、単位体積当たりの比表面積が増大して温度制御（冷却）がより効果的に行えるようになるほか、温度分布が均一となり生成される粒子の分布も均一となる。さらに液滴として連続相内に分布することによって析出した粒子（結晶核）によるマイクロ流路の目詰まりも防止することが可能であり、生成された粒子の回収も容易となる。本事業において、マイクロ流路内での超音波振動を用いた微小液滴の高速生成と、マイクロ流路内での急冷を利用するマイクロデバイスによりナノ粒子生成が可能であり、小型の連続的なシステムで実現可能であることを示すことを目標とした。

2　研究の目的と背景

本研究は、超音波振動を用いたマイクロ流路内での微小液滴を含むエマルションの生成と、マイクロ流路内での急冷を利用するマイクロデバイスによりナノ粒子生成が可能であり、積層型のマイクロ流路プレートを利用した小型の連続的なシステムで実現可能であることを試作と評価実験によって示すことを目的としている。

高付加価値のナノ粒子生成をマイクロ流路を利用するデバイスにおいて実現することは広く試みられているが、結晶の析出による目詰まりなどが課題となっている。本研究は、連続相中に分散した液滴内での結晶析出を利用して目詰まりなどの問題を回避し、フロー系として生成と回収を容易にする点で特徴があり、さらに申請者らが実績のある超音波振動を用いるエマルション生成技術に基づいてマイクロ流路中に微小液滴を生成する方法によって微細化と生成速度の確保を実現する点で新規性が高いものである。

３　研究内容

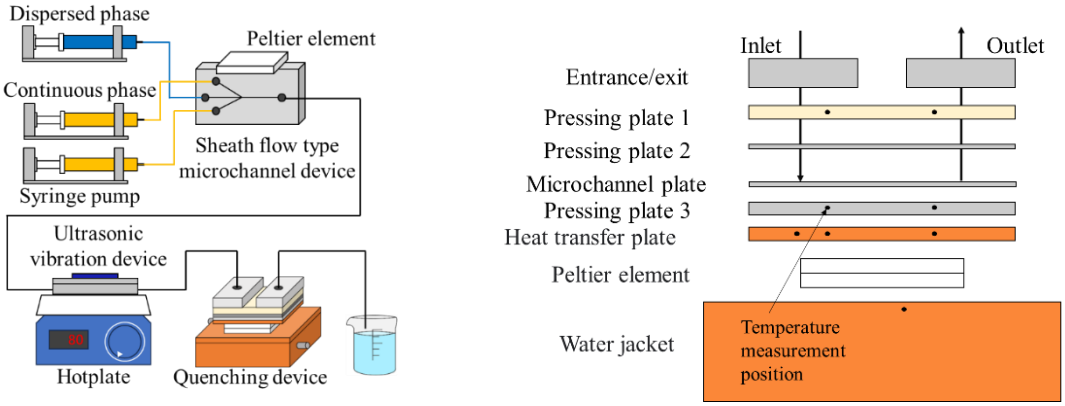
- 超音波ナノエマルションデバイスを利用した急冷ナノ粒子生成システムの試作評価

http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp/kouseigaku/_japanese/microreactor_j.html

本研究で用いたナノ粒子生成システムでは、はじめに、シリンジポンプから連続相と分散相の液体をシースフロー型マイクロチャネルデバイスに送り、マイクロメートルサイズの液滴を生成する。次にマイクロメートルサイズの液滴を超音波振動デバイスに送り、液滴に超音波を照射することによってナノ液滴を生成する。最後に急冷デバイスでナノ液滴を急冷することで再結晶現象の原理によりナノ粒子を生成し、ビーカーに吐出する。

はじめにシースフロー型マイクロチャネルデバイスで生成するマイクロメートルサイズの液滴の液滴径測定を行った。連続相流量が増加すると平均液滴径は小さくなり、いずれの流量においても流量比の大きい40:1の方が、平均液滴径が小さくなる傾向が得られた。

次に超音波振動デバイスで生成されるナノ液滴の液滴径測定を行った。連続相流量と流量比を変化させ、超音波振動デバイスから吐出されるナノ液滴を採取し、動的光散乱法により測定した。連続相流量が増加すると平均液滴径は小さくなり流量比が大きい方が平均液滴径が小さくなる傾向が得られた。シースフロー型マイクロチャネルデバイスで生成する液滴を微小化したことで、ナノ液滴も微小化したと考えられる。

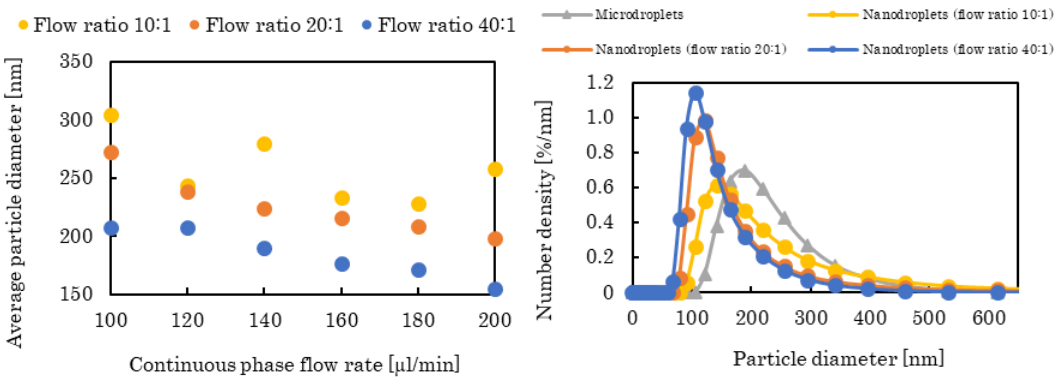


マイクロ流路デバイスを用いたナノ粒子生成システム（左）と急冷デバイスの構成（右）

また、有限要素法を用いて伝熱解析を行い、急冷デバイスの設計を行った。過渡伝熱解析を行い、水ブロックの温度変化を比較することにより冷却に効果的な条件を求めデバイス形状を決定した。製作した急冷デバイスの温度とデバイスから吐出される液体の温度変化を測定して比較を行ったところ、デバイスの温度および液温のどちらについても、急冷の効果が確認された。

さらに、製作した急冷デバイスを用いてナノ粒子生成実験を行った。溶質には硫酸カリウムアルミニウム12水和物、連続相にはシリコーンオイルを用いた。シースフロー型マイクロチャネルデバイスはペルチェ素子の放熱面を接触させて80℃に加熱し、超音波振動デバイスは圧電素子の発

熱と加熱温度を80℃に設定したホットプレートで加熱した。硫酸カリウムアルミニウム水溶液が液温40℃で飽和状態になる濃度の条件で、連続相:分散相の流量比が40:1のとき、急冷により平均141.6 nmのナノ粒子が得られた。



生成したナノ粒子の平均粒子径と流量条件の関係（左）と
ナノ液滴を急冷して生成されたナノ粒子の粒子径分布（右）

4　本研究が実社会にどう活かされるか―展望

可搬性が高く外気と遮断された連続的プロセスでナノ粒子を生成する小型の装置は存在せずその実現が望まれている。製造技術として小型の生成装置を必要とする製剤、食品、化粧品、工業原料の製造への応用が想定されるほか、ナノ粒子は経肺投与製剤として副作用の軽減に寄与したり、太陽電池の光電効率の改善に寄与したりするなど広く応用されることが期待される。

5　教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

研究代表者（補助事業者）はこれまで大学教員として、機能性材料を利用したマイクロセンサやマイクロアクチュエータ、さらにこれらを集積、もしくは応用したマイクロシステムに関する研究を行ってきた。特に、微小な変形や振動を生じる機構を利用したマイクロデバイスを各種のシステムへ応用する研究課題に取り組んでいる。本研究の内容は、こうした研究成果の応用を模索する中で、化学工学の分野の研究者と交流し、意見交換をする中で発案したものである。

本研究全体で示した通りマイクロ流路デバイスは大型の設備を利用する場合と比べ環境制御が容易であり、温度条件の制御や回収を実現するデバイスと組み合わせることにより、ナノサイズの液滴や粒子の生成を実現するフロー系の生成・回収システムを構成するデバイスとして広く応用することが想定される。パイロットプラントとしての利用や高付加価値の光学素子などの原料生成を行うシステムへ適用することが考えられる。今後は広く関連分野との連携を模索する。

6　本研究にかかわる知財・発表論文等

- 岡本幸樹，神田岳文，脇元修一，山口大介，妹尾典久，中崎義晃，音山貴史，ナノ液滴急冷によるナノ粒子生成システム，第41回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム，

5P4-PS-19（2024年11月）

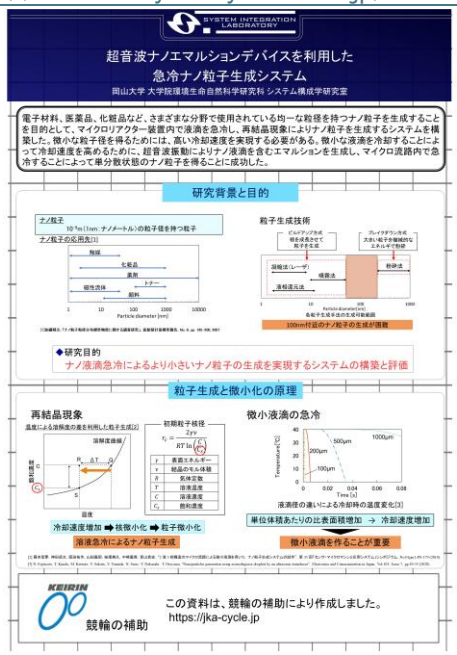
- 岡本幸樹，神田岳文，脇元修一，山口大介，ナノ粒子生成システムにおけるナノエマルション急冷条件の検討，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2025（ROBOMECH2025），2P1-K04（2025年6月　発表予定）

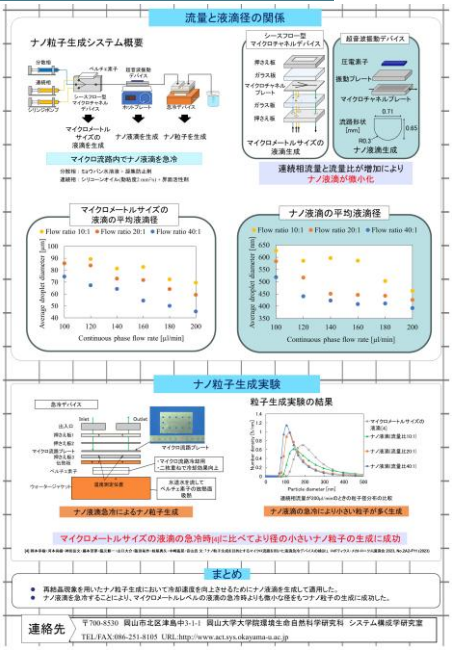
7　補助事業に係る成果物

（1）補助事業により作成したもの

- 研究内容紹介パンフレット

  http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp/kouseigaku/_japanese/img/file32.pdf





（2）（1）以外で当事業において作成したもの

該当無し

8　事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：　岡山大学（オカヤマダイガク）

住　　所：　〒700-8530

岡山県岡山市北区津島中三丁目1-1

担　当　者：　教授　神田岳文（カンダタケフミ）

担 当 部 署：　大学院環境生命自然科学研究科　システム構成学研究室（ダイガクインカンキョウセイメイシゼンカガクケンキュウカ　システムコウセイガクケンキュウシツ）

E - m a i l：　kanda-t@okayama-u.ac.jp

U　R　L：　http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp/kouseigaku/_japanese/index.html