

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420168

研究課題名(和文) 微細流路内のO/Wマイクロエマルションの熱流動特性の解明

研究課題名(英文) Study on heat transfer characteristics of O/W emulsion in micro channel

研究代表者

熊野 寛之 (KUMANO, Hiroyuki)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：30262299

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：水と油のように混じり合わない2種類の液体の一方が、もう一方の液体中に分散しているエマルションを対象に、微細な流路内においてエマルションの組成などに関連づけて伝熱特性を把握するを試みた。直径が7.5mmの円管と、隙間厚さが1mm以下のマイクロチャネル内に様々な組成で生成されたエマルションを流動させ、熱伝達特性の把握を行った。その結果、エマルションの熱伝達特性は、層流域において理論値より高い傾向があり、油の動粘度が高く、油の含有率が高い場合により高くなることがわかった。さらに、マイクロチャネル内の伝熱実験からは、流れに対する粒子の相対的な大きさを用いることによって、伝熱特性を整理することが出来た。

研究成果の概要(英文)：Emulsion is a mixture of two materials that generally don't mix with each other. It has been used in various fields, such as food, cosmetics, paints, pharmaceuticals, chemical products, and thermal storage media. Oil-water emulsion has a lot of very small oil particles in water. In this study, since the particle might affect the flow and heat transfer characteristics in tube and microchannel, the flow and heat transfer characteristics is investigated experimentally. Emulsion consists of pure water, silicone oil, and surfactant. The combination of the ratio and kind of each material and the channel width was varied as experimental parameters. As the result, the effect of these parameters on Nusselt number were clarified. It was found that the heat transfer coefficient of the emulsion can be estimated as that of a single-phase fluid in the case of low viscosity of the dispersed oil. Meanwhile, the heat transfer was enhanced in the case of high viscosity of the dispersed oil.

研究分野：熱工学

キーワード：エマルション 熱伝達 流動特性

### 1. 研究開始当初の背景

水と油のように混じり合わない2種類の液体の一方が、もう一方の液体中に分散している液-液分散系を一般にエマルジョンという。通常、時間とともに分散している液体は合一し、いずれ完全に分離することとなる。しかし、界面活性剤などの効果により、安定して分散相の存在することが可能となる。安定なエマルジョンの分散相は、 $0.1\mu\text{m}$  から  $10\mu\text{m}$  程度の直径で非常に微小な状態で分散している。一般に、連続相となる水の中に分散相となる油が分散しているエマルジョンを O/W エマルジョンと呼び、その安定性や、基礎的な物性などについては、化学、食品分野等で古くから研究がなされている。

近年、エマルジョンは、液-液界面を極めて大きくとることができるために、バイオエンジニアリング、創薬などの反応プロセスとしても活用されている。また、蓄熱材として活用することも可能であり、分散相が相変化し、流動性を保つことから、高効率な蓄熱システムの構築が可能となる。

これらの反応プロセスや蓄熱材として利用に際して、加熱や冷却などを伴うため、エマルジョンの流動・熱伝達特性の把握は、必要不可欠であるにもかかわらず、十分な検討がなされていないのが現状である。申請者らによる予備的な検討により、O/W エマルジョンを直径が  $7.5\text{mm}$  の円管内に流入させた場合の管摩擦係数を計測した結果、見かけの粘性係数により、従来の層流および乱流域の実験式と同様の結果を示すことがわかった。一方、微細な流路内での流動および熱伝達では、分散相の大きさが熱移動などに大きな影響を及ぼすことが考えられるとともに、流動特性が非ニュートン性を示すことになり、より複雑な現象となることが考えられるが、その詳細な熱流動機構は明らかとされていない。

### 2. 研究の目的

本研究の最終的な目標となるのは、微細な流路内においてエマルジョンの組成や分散相と連続相の割合などに関連づけて流動特性と伝熱特性を把握することである。熱伝達特性に及ぼす種々のパラメータの影響について検討し、伝熱特性に対して大きな影響因子を抽出することにより、伝熱機構の解明を目的としている。まず、伝熱特性の影響因子として考えられる、分散相と連続相の割合、分散相の大きさなど、マイクロエマルジョンの基礎特性を把握する。また、エマルジョンは非ニュートン流体と考えられるために、そのレオロジー特性を抽出する。次に、分散相と連続相の割合などを変化させたエマルジョンを用いて、配管内に流入して加熱することにより、壁面熱伝達係数を測定する。これにより、エマルジョンの伝熱特性を支配する因子を抽出できる。

### 3. 研究の方法

#### (1) エマルジョンの安定性

エマルジョン中の分散相の大きさや組成が、エマルジョンの安定性にどのような影響を及ぼすかの把握を重点において検討を行った。試料には、分散相としてシリコンオイル、連続相として水を用いた。界面活性剤としては、過去の研究で十分な効果が期待できるイオン系界面活性剤を用いた。エマルジョンの生成方法としては、攪拌機で水を攪拌しながら、オイルを滴下していく機械的攪拌による生成方法を用いた。エマルジョンの組成としては、オイルの割合を 10% から 50% の範囲で変化させた。これらのエマルジョンに対して、エマルジョンが分離することなく保持されるかを確認する安定性の評価の他、顕微鏡システムでの観察、粒度分布計を用いた粒度分布計測などを行った。

#### (2) 円管内の熱伝達特性

実験装置の概略を図 1 に示す。ビーカー内のエマルジョンは恒温槽によって  $25^\circ\text{C}$  一定に保持されている。断熱したチューブによってギアポンプを介して内径  $7.5\text{mm}$  の断熱されたステンレス管に繋がれている。配管は、 $1\text{m}$  の助走区間が設けてあり、測定はその後ろに接続された  $1\text{m}$  の測定区間で計測する。測定区間の両端に差圧計 (レンジ  $\pm 20\text{kPa}$ ) を設置し、測定区間の出口には流量計を設置した。長さ  $1\text{m}$  の測定区間に、入り口から  $0.1\text{m}$  の位置から  $0.9\text{m}$  の位置までポリイミドテープで完全に絶縁したニクロムリボンヒーターを巻きつけ、直流安定化電源にて熱流束一定条件の下で通電加熱する。その外側は断熱材 (armaflex) で覆っており、外側への熱量の移動はないものとしている。熱流束の値を計測するため、ヒーターに加わる電流、電圧の測定も行い、データロガーを介して PC で記録した。管壁温度と流路を流れる液体温度の測定には T 型熱電対 ( $\phi 1\text{mm}$ ) を使用した。管壁温度は、加熱区間入口 ( $x = 0$ ) から  $x = 0.1, 0.4, 0.7\text{m}$  の各断面の上部、中部、下部に熱電対を埋め込み、計 9 箇所の間所熱伝達係数を測定することができる。

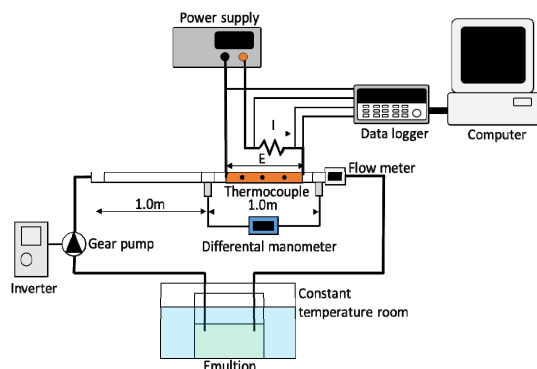


図 1 円管内熱伝達測定用実験装置

#### (3) マイクロチャネル内の伝熱特性

実験装置の概略図を図 2 に示す。恒温槽に

よって25°Cに保たれたビーカー内のO/Wエマルジョンをチューブとマグネットギヤポンプを介してマイクロチャネル装置に流動させる。試験流路出口後方のチューブには微小流量計が設置してあり、流体の体積流量を計測する。マイクロチャネルは流路形状に穴加工したステンレスシートを厚さ15mmの亚克力板で上下から挟んでネジ留めして作成している。流路幅 $t$ の値となるステンレスの厚さは0.80, 0.27mmとした。流路奥行きと速度助走区間の寸法は、測定部が発達した平行平板間流れと見なすことができる十分な値をとっている。測定区間の両端には差圧計が設置してある。下板の測定部にあたる部分には銅の伝熱板が埋め込まれてあり、下部のカートリッジヒーターによって流路を片面加熱できる仕様となっている。下板の流路近傍の銅壁にはT型熱電対を加熱開始地点から流れ方向に15, 35, 55, 75, 85mmの位置にそれぞれ埋めてあり、壁面温度を計測する。

まずヒーターの電源をOFFにした状態でエマルジョンを装置に循環させ、80mmの差圧測定区間を流れる際の圧力損失と体積流量をそれぞれ計測し、平均流速と圧力勾配の関係を調べる。次に流量を固定し、ヒーターの電源を入れて流路を一定熱量で加熱し、壁面温度と、流路を流れる際のエマルジョンの混合平均温度、および壁面にかかる熱流束から局所熱伝達率を求め、流速方向の位置との関係を調べる。

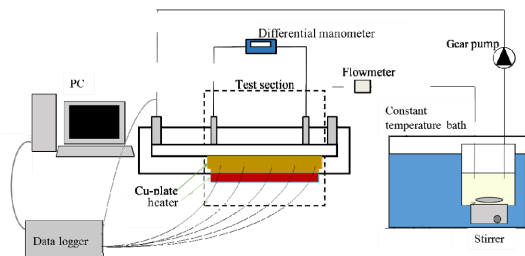


図2 マイクロチャネル用実験装置

#### 4. 研究成果

##### (1) エマルジョンの安定性

図3に機械的乳化法で生成したエマルジョン(油の含有率30 vol%, 油の動粘度 $100 \text{ mm}^2/\text{s}$ , 界面活性剤の量2.0 vol%)の外観の写真と顕微鏡を使って撮影した写真を示す。生成したエマルジョンの外観は白濁していて、顕微鏡で見ると直径数 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ の細かい粒子があることが分かる。

図4に油の含有率30 vol%, 油の動粘度 $100 \text{ mm}^2/\text{s}$ , 界面活性剤の量2.0 vol%の条件で生成したエマルジョンの流動分布の時間変化を示す。3時間の範囲では、流動分布に変化はなく、高い安定性を示していることがわかる。また、図5に、分散相の油の粘度を変化させた際の粒度分布を示す。油の含有率30 vol%, 界面活性剤の量2.0 vol%の条件で生成している。この図より、油の粘度が高くなる

ほど、粒子径が大きくなっていることがわかる。これは、油の動粘度が低いほど油がせん断されやすく、粒子径が小さくなりやすいためだと考えられる。

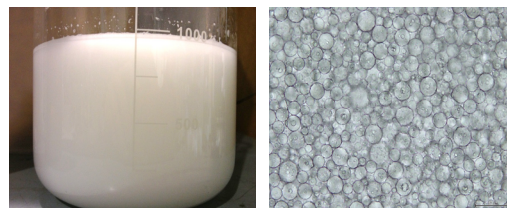


図3 エマルジョンの様子

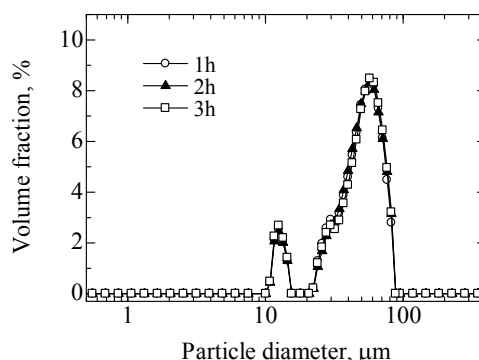


図4 粒度分布の時間変化

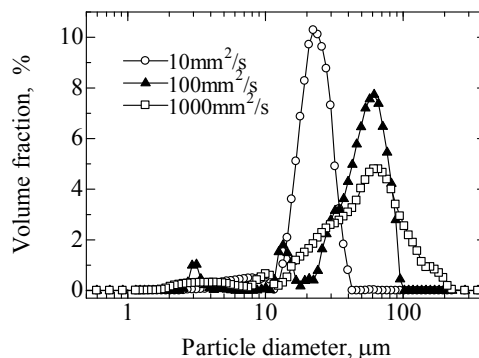


図5 粒度分布に対するオイル粘度の影響

##### (2) 円管内の熱伝達特性

図6にエマルジョンを加熱流動させた際のレイノルズ数とヌセルト数の関係を示す。横軸にレイノルズ数、縦軸にヌセルト数、実線に理論値を示している。また、図6は油の動粘度 $1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ , 界面活性剤の量2.0 vol%の場合の層流域の結果を用いている。図6より、油の含有率毎に理論値が異なり、統一的な比較ができないことがわかる。そこで、実験値から得られるヌセルト数 $Nu$ と理論値のヌセルト数 $Nu_{th}$ の比をとって比較を行った。

図7, 図8はレイノルズ数とヌセルト数比の関係を示し、横軸にレイノルズ数、縦軸にヌセルト数比を示している。これらは、油の動粘度 $1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ , 界面活性剤の量2.0 vol%の場合の結果であり、図7は層流域、図8は乱流域の結果を用いている。図7より、層流域ではいずれの結果もヌセルト数比は1

を上回り、油の含有率高くなるほどヌセルト数比は高くなることわかる。これは、油の含有率が高くなるほど油粒子の数が増え、攪拌効果が大きくなるためだと考えられる。一方、図8の結果を見ると、乱流域でも  $Re = 2000 \sim 5000$  の間では油の含有率が高いほどヌセルト数比は高くなっているが、その後1程度となっていることがわかる。

図9はレイノルズ数とヌセルト数比の関係を示し、横軸にレイノルズ数、縦軸にヌセルト数比を示している。また、図9は油の含有率50 vol%、界面活性剤の量2.0 vol%の場合の結果を用いている。結果を見ると、油の動粘度が高いほどヌセルト数比は高くなることわかる。これは、油の動粘度が低いほど油粒子内の攪拌効果が大きくなり、油粒子内の温度が均一になりやすく、熱交換の効果が薄くなることが原因と考えられる。また、油の動粘度が低いほど、油粒子は小さく、攪拌効果が弱いことも原因の一つと考えられる。

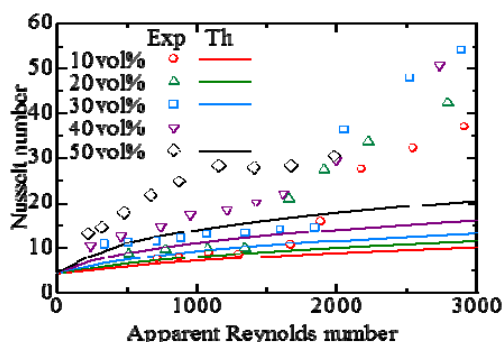


図6 レイノルズ数とヌセルト数の関係

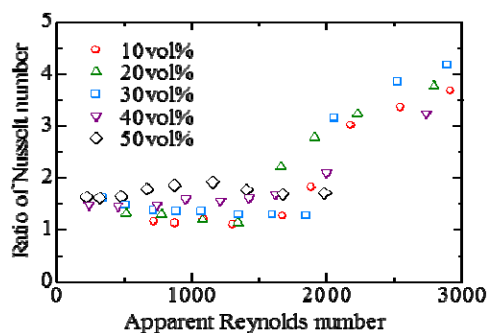


図7 層流域のレイノルズ数とヌセルト数比

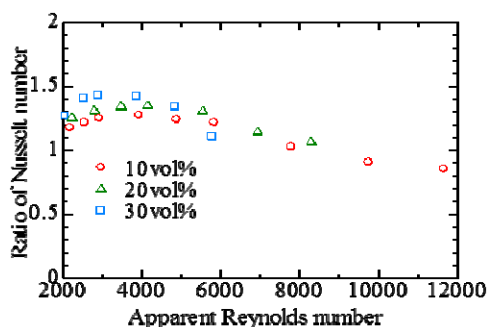


図8 乱流域のレイノルズ数とヌセルト数比

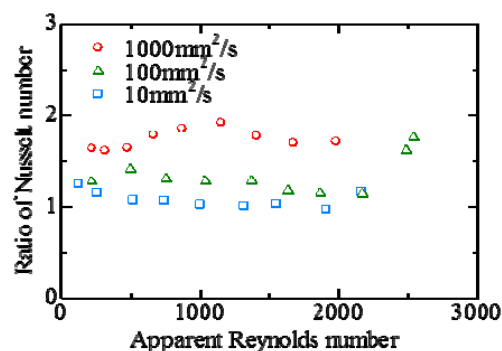


図9 ヌセルト数比に及ぼすオイル粘度の影響

### (3) マイクロチャネル内の伝熱特性

図10に流路幅0.27mmにおける純水による予備実験とエマルションの本実験の加熱距離と熱伝達率の関係の一例を示す。ここで熱量および流速は等しい条件で実験を行っている。純水の実験値は全ての条件で数値解析値と15%以内で一致しており、数値計算は妥当であると言える。エマルションの実験値は多くの条件において数値解析値を上回る傾向にあった。図10に示すように条件によっては、エマルションは水よりも熱伝導率の悪い油を含んでいるにも関わらず、純水よりも熱伝達率が大きくなっており、明確な伝熱促進効果が得られた。なお、実験は異なる熱量および上面加熱でも行ったが、同じ結果を示した。

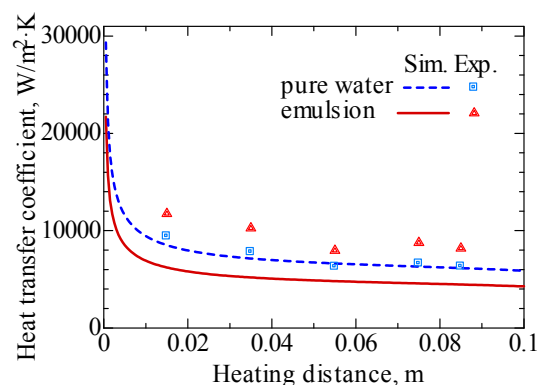
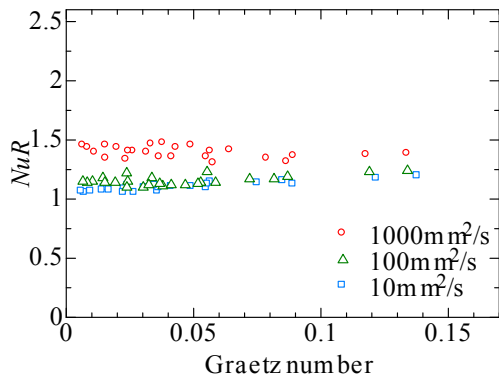
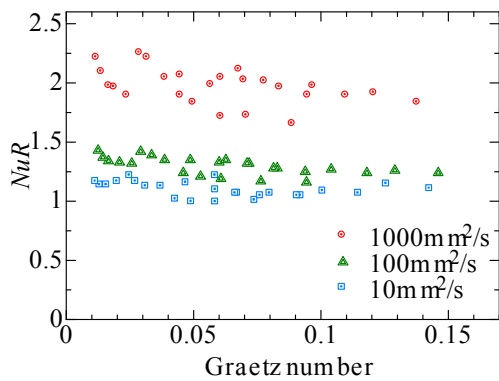


図10 熱伝達係数の変化

全流速、全温度測定位置の実験値を温度発達流れの関数であるグレッツ数と局所ヌセルト数で整理した。また実験値と数値解析値でどれだけ値が異なるかを評価するためにヌセルト数比を用いた。図11に油の含有率30vol.%のエマルションの油の動粘度を変化させたときのグレッツ数とヌセルト数比の関係を示す。油の動粘度が高いとき、また流路幅が小さい0.27mmほどヌセルト数は大きくなった。ヌセルト数比は流路幅0.27mmではヌセルト数比が大きい条件ほど値にばらつきが見られたが、これは測定誤差によるものである。そのためヌセルト数比はグレッツ数によらず一定であると言える。



(a) 0.80mm

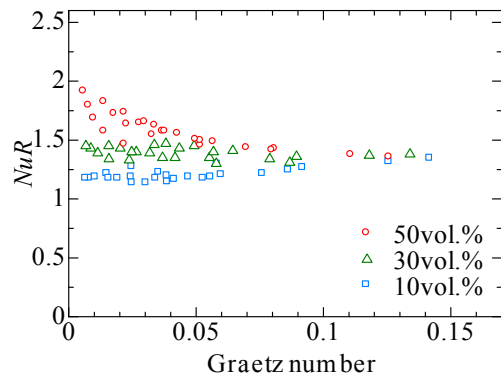


(b) 0.27mm

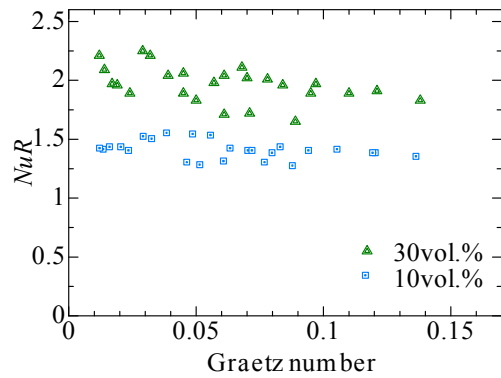
図 11 グレツ数とヌセルト数比の関係に及ぼす油粘度の影響

図 11 で最もヌセルト数の大きかった油の動粘度  $1000\text{mm}^2/\text{s}$  のエマルションの油の含有率を変化させたときのグレツ数とヌセルト数の関係を図 12 に示す. ホモミキサーの攪拌速度は  $10000\text{rpm}$  である. 油の含有率が高いとき, また流路幅が小さい  $0.27\text{mm}$  ほどヌセルト数は大きくなった. 流路幅  $0.80\text{mm}$  における油の含有率  $50\text{vol.}\%$  のみグレツ数が大きくなるほどヌセルト数比が小さくなっているが, これは生成時にエマルション内に熱伝導率の悪い気泡が混入してしまったためであり, 流速が遅い条件ほど熱伝達率が低くなってしまったものと考えられる.

ほとんどの条件でヌセルト数比はグレツ数によらず一定であったため, ヌセルト数比の平均をとり, 流動実験と同様に相対粒子径で整理した. 図 13 に全条件における相対粒子径とヌセルト数比の平均の関係を示す. 油の動粘度, 油の含有率によらずヌセルト数比は同じ軌道を進んだ. そのためヌセルト数比は流れに対する粒子の相対的な大きさのみによって決まるといえる.



(a) 0.80mm



(b) 0.27mm

図 12 グレツ数とヌセルト数比の関係に及ぼす含有率の影響

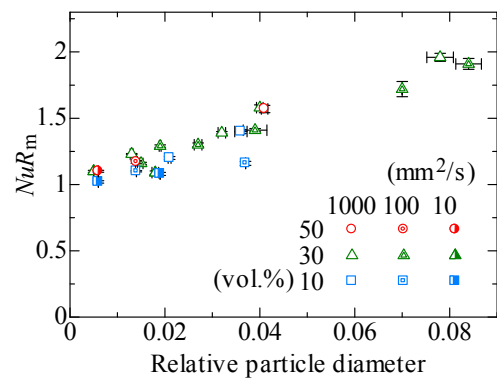


図 13 相対粒子径とヌセルト数比の関係

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

①野村恭平, 弓削尚久, 熊野寛之, マイクロチャンネルにおける O/W エマルションの流動および伝熱特性, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2015 講演論文集, 2015, H122 (2015, 10/24)

②廣井希和子, 高橋賢人, 熊野寛之, O/W 型エマルションの流動特性に及ぼす分散相性状の影響, 混相流シンポジウム 2014 講演

論文集, 2014, C145 (2014, 7/28)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊野 寛之 (KUMANO, Hiroyuki)

青山学院大学・理工学部機械創造工学科・

准教授

研究者番号 : 30262299