

機関番号：11101  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560205  
 研究課題名（和文） マイクロ流路内を自励駆動する感温磁性流体の可視化と熱輸送特性に関する研究  
 研究課題名（英文） Heat Transfer Characteristics of a Thermo-sensitive Magnetic Fluid in Micro-channel  
 研究代表者  
 麓 耕二 (FUMOTO KOJI)  
 弘前大学・大学院理工学研究科・准教授  
 研究者番号：50259785

研究成果の概要（和文）：本研究は感温磁性流体を用いたマイクロ熱輸送機器の開発を目的として可視化実験を行った。実験の結果、感温磁性流体は、加熱部近傍において磁場に影響を受けた特異な流動様相を示すことが明らかになった。また加熱部において熱伝達率促進効果が期待できることも明らかになった。さらに感温磁性流体中に混入することにより、熱輸送量の増大を目的とした相変化ナノエマルジョンに関する付随的研究では、流動性を有する新たな蓄熱材開発の可能性を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：In the present study, the flow characteristics and heat transfer of a thermo-sensitive magnetic fluid, which is a multiphase-flow material, were investigated experimentally. The experimental results indicated that force convection based on the magnetic characteristics of the fluid in the mini-channel exhibited excellent cooling performance. In particular, the observed variations in the flow patterns were compared with the results of a boundary layer of the flow velocity in the pipe, which is generally known. And the relationships between the phase-change characteristics and the stability of the emulsion are discussed in detail on enhance for the heat transfer of the thermo-sensitive magnetic fluid flow. The experimental results reveal that the phase-change nano-emulsion, which has fluidity and heat storage characteristics, was a functionality material.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：感温磁性流体，熱輸送デバイス，伝熱促進，ナノエマルジョン

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、小型電子機器やコンピュータのCPUに代表される高密度発熱体の冷却ならびに小型熱交換器の性能向上を目的として、マイクロチャンネルやミニチャンネルを用いた伝熱促進技術に関する研究が数多く行われている。特に小径流路内に液相を満たし

た単相流による熱輸送方式は、相変化を有する気液二相方式に比べて伝熱現象が簡素であるため、様々なパラメータの下で多岐におよぶ研究が行われている。一方、相変化に伴う潜熱を利用できない単相流方式においては、熱輸送特性の向上を目的として、小径流路内における熱伝達率向上と流動特性の関

係が、解決すべき重要な要因となっている。これまで流路壁近傍における境界層の積極的崩壊、流路壁の微細振動、および二次的流れの利用等による熱伝達率の向上が試みられている。

(2)本研究は、混相流の一つである感温磁性流体の熱流動特性に関する実験的研究である。これまで磁性流体を利用した熱輸送システムは、多くの研究者らによって検討が行われている。しかしミニチュア機器の開発は行われていない。感温磁性流体は強磁性の微粒子を溶媒中に多量に安定分散させたコロイド溶液であり、特に分散粒子にマンガン-亜鉛フェライト等のキュリー点温度が低いものを混濁することにより、常温域において温度変化に対する磁化の変化率が大きい性質を持っているのが特徴である。一般に磁性流体はフェライト微粒子と溶媒による固液二相流のスラリー状であるため、単相流に比べて高い熱伝達率を得ることが可能であるが、これまで磁性流体の高い粘性が圧力損出を増大させるため、マイクロ流路内の熱移動媒体として利用された例は見当たらない。

## 2. 研究の目的

(1)本研究の主たる目的は、マイクロ流路内に感温磁性流体を満したマイクロ熱輸送システムに関する基礎的研究である。特に直線流路内を流動する感温磁性流体に対し、温度差と磁場を付与した場合のマイクロ流路内の熱伝達特性の把握を目的とし、磁力の影響による磁性流体の流動様相を把握するため可視化実験を行った。主な実験パラメータは、磁力、磁場の位置、および磁性流体の温度である。なお本システムは流路内に常温域において磁化の温度依存性が大きい磁性流体を用い、さらに温度差に起因する磁化の非平衡状態を利用することによりポンプ等を必要とせず磁性流体が自励駆動する特徴を有している。これまでマイクロ流路内に感温磁性流体を満し、さらに流動させる研究報告例は無く、この点において本研究課題は、全く独創的な視点による取り組みと言える。

(2)一方、感温磁性流体中に相変化時の潜熱蓄熱が可能なエマルジョンを混入し、磁性流体流動とともに蓄熱効果による高い熱輸送量を実現する機能性流体の開発を目的とした研究を行った。特に当該期間では、エマルジョン粒子をナノレベルまで小さくした、ナノエマルジョンの生成および各種物性の把握を行った。

## 3. 研究の方法

(1)流動様相の可視化を行うため、透明流路を有する可視化装置を作成した。本装置はシリ

ンジ、冷却部、加熱部を有する感温磁性流体封入パイプ、超音波流量計、流量調節用コック、ドレンタンク、磁場供給部、可視化用装置、および各種測定機器より構成されている。

磁性流体封入パイプ(以下、チューブと言う)は、内径  $D_1=2\text{mm}$ 、外径  $D_2=3\text{mm}$  のテフロンチューブを矩形断面形状に加熱再成型しており、内寸法は、高さ  $t=0.5\text{mm}$ 、幅  $b=2.5\text{mm}$  である。流路は全長  $L=500\text{mm}$ 、上流部にシリンジ(250ml)が接続してあり、シリンジ上部の錘の調整、および下流部のコックの開閉により流速を調節している。また流路中央部に位置する試験部は、200mmの直線流路となっており、温度制御された水槽部に浸されている。試験部の上流側(100mm)を冷却部、下流側を(100mm)としている。冷却部は温度制御された冷却液をチューブ外側の水槽部に循環させている。加熱部は、同じくチューブ外側の水槽部に電気ヒータ設置し、周囲液体温度を上昇させることにより試験部を加熱している。可視化部温度測定は試験部出入口部の流路内にそれぞれ K 型熱電対 ( $D=0.1\text{mm}$ )、また加熱部、冷却部の水槽部にそれぞれモニター用の K 型熱電対 ( $D=0.1\text{mm}$ ) を設置している。さらにチューブ外表面温度を 4 本の熱電対 ( $D=0.1\text{mm}$ ) によって計測している。各所に設置した熱電対および流量計のデータは、A/D コンバータを介したコンピュータにより 0.5sec 毎に計測している。磁性流体の流速は、小型超音波流速計により計測している。輸送熱量は、加熱部出入口の温度差および超音波流量計による流速測定の結果より算定している。平均熱伝率は、チューブ外表側面の平均値を用いて算出している。なおチューブ厚さ方向の温度分布は無視した。流動様相の可視化には、キセノンライトを用いて流路の下側より透過光を照射し、上方より CCD カメラを用いて流路を接写撮影している。磁力付与は、コの字形ガイド(鋼製)の両内側に同じ磁束密度を持つ磁石を付着させた磁気回路により行っている。また実験では磁石設置方法の違いによる熱伝達特性の把握を行うため、磁石なし、片側磁石設置、両側磁石設置の 3 種類の実験を行っている。磁気回路は、回路の中心位置と流路チューブの軸心が一致するように配置されている。各磁気回路による磁力強さは、事前にテスラメータを用いて測定している。供試磁性流体は、常温域で強い磁化の温度依存性を持つケロシンベース、マンガン-亜鉛フェライト粒子(タイホー工業製; フェリコロイド TS-50K)を用いている。実験に用いた磁性流体は、動粘度を低めるため、かつ可視化を行うため、溶液のケロシンを増量し、希釈している。

(2)次にナノエマルジョンに関連する研究方

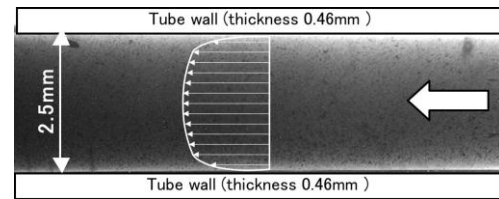
法を示す。ナノエマルションは、ナノ粒子となる溶質にテトラデカン、溶媒に水、および非イオン系の界面活性剤を PIT(Phase inversion temperature)法に基づき、設定温度条件下においてホモジナイザ(Max: 3500rpm)を使用して乳化した。なお生成時の温度管理には、温度制御可能なオイルバスを用いている。オイルバスおよびナノエマルション内には、温度測定用として各2本のK型熱電対(直径0.3mm)が配置されている。全ての温度データはデータロガーを介してコンピュータに取り込まれている。物性値の測定には、音叉型振動式粘度計。密度測定には、ハンドヘルド密度計を用いている。またナノエマルション粒径分布測定用として、ファイバ光学動的散乱光度計を使用した。さらに熱伝導率測定には、白金細線を用いた自作の熱伝導率測定装置を使用した。

#### 4. 研究成果

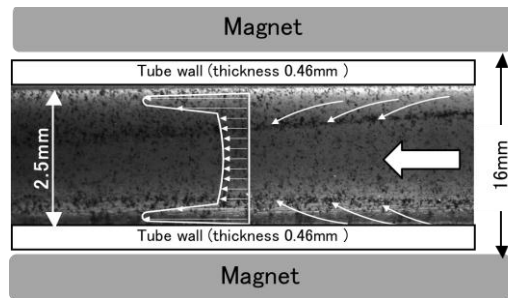
次に感温磁性流体を使用した可視化実験の結果とナノエマルション生成に関する結果を示す。

(1)図 1(a), (b), および(c)は、それぞれ試験部の可視化画像を示している。図 1(a)に温度差および磁力を供給しない場合の流動様相を示す。磁性流体は一般にビンガム流体の一つとされているが、定常流状態では管内中央部の速度が最も大きくなり、ニュートン流体と同様の速度分布を示す。なお図中に磁性流体粒子の流動様相(動画)を用いて確認した速度分布を模式的に示す。図 1(b)に流路側面の両側に磁石を設置した場合の流動様相を示す。向い合った磁石の磁力は異極である。磁性流体速度は 11.98m/s, 磁性流体温度差は 16.1°C, 輸送熱量は 0.45W である。図より流路中央部を流動してきた磁性流体は、壁近傍の磁性流体より低い温度のため、磁力が大きく作用し、結果的に壁近傍へ引き寄せられる。一方、壁面近傍の磁性流体は、内壁面との熱伝達によりその温度が上昇するため、磁力の影響が小さくなり、その結果として流路中央部へ導かれる。このように磁性流体は流路断面において複雑な速度分布を示す。また図のように速度せん断層が形成されると共に、せん断層上では小さな旋回流が形成される。さらに流路方向の速度分布は、一般に磁性流体流動で良く知られる、壁近傍速度が最も速く、流路中央部が比較的遅い速度分布を形成する。図 1(c)は流路側面の片側(図では上部)に磁石を設置した場合の磁性流体の流動様相を示す。磁性流体速度は 11.98m/s, 磁性流体温度差は 16.5°C, 輸送熱量は 0.45W である。実験条件は(b)の供給磁力を片側に変えたのみである。図中の白線に示す様に流路内に偏った流れが形成されることが分かった。特に流路中央部の磁性流体が磁力側(図では上側)に引き寄

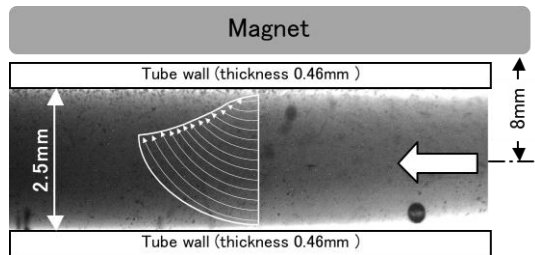
せられる流れが観察された。これは加熱部の影響が小さい流路中央部の磁性流体が周囲の加熱された磁性流体に比べて磁化が大きくなるためである。



$T_{in} = T_{out} = 22^\circ\text{C}$ ,  $U = 4.5\text{ mm/s}$ ,  
(a) No magnet.



$\Delta T (=T_{out} - T_{in}) = 15^\circ\text{C}$ ,  $U = 4.5\text{ mm/s}$   
(b) Magnets on both sides of the channel



$\Delta T (=T_{out} - T_{in}) = 14^\circ\text{C}$ ,  $U = 4.7\text{ mm/s}$   
(c) Magnet on one side of the channel

Fig.1 Photographs of the flow patterns

(2)図 2 にレイノルズ数(Re)と平均ヌセルト数(Nu)の関係を示す。図よりレイノルズ数の増加に伴い、平均ヌセルト数が単調に増加することが分かる。また本実験範囲内において、流路の両側面に磁力を付与した場合、最大平均ヌセルト数 4.7 を得ることができ、さらに磁場を供給しない場合と比較すると、レイノルズ数に関わらず平均ヌセルト数は 3 倍程度大きくなることが分かる。一方、本実験で使用した磁性流体の動粘性係数が水の約 17 倍と高いことから、レイノルズ数が小さくなり、他の研究報告例と単純比較することは困難であるが、矩形断面流路を有するマイクロチャンネルに水を用いた Peng らの実験結果(実線)と比較すると定性的な傾向を確認することができる。また流路側面の微小振動を利用

したマイクロチャンネル内の伝熱促進効果について報告している Nguyen らの結果(破線)も同様に図中に示している。両者共に本結果とレイノルズ数の範囲が異なるため定量的な比較は困難であるが、本装置はポンプ等の駆動装置を必要とせず、自励駆動を行うことが確認されているため、供給動力を必要としない点を考慮すると、伝熱特性において本装置が比較的優位であることが分かる。

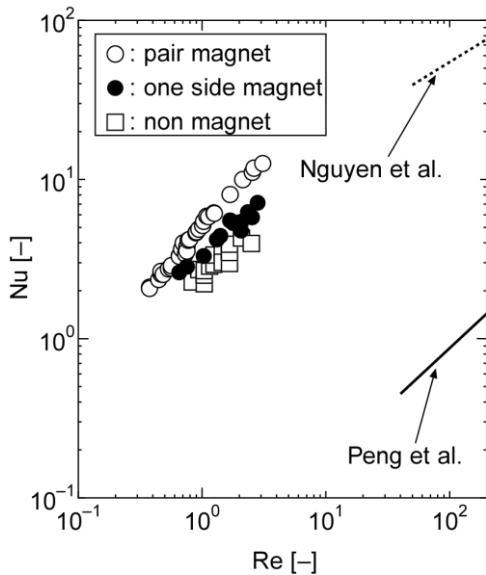


Fig. 2 Relationship between Nu and Re

(3)マイクロ流路内に感温磁性流体を満たし、伝熱特性におよぼす磁力と温度場の影響を把握するため、可視化実験を行った結果、本実験範囲内で以下の結論を得た。

- ①磁力強さ変化させた場合の磁性流体の流動様相を可視化した。さらに流路両側面に磁力を供給した場合に見られる特異な流動様相を明らかにした。
- ②磁力の供給により、磁性流体の流動変異することにより流路壁との熱伝達に大きな影響を与えることを示した。
- ③平均ヌセルト数の最大値が 4.7 になることを示した。

(4)次に蓄熱用相変化ナノエマルジョンに関する実験結果を示す。図3に本実験で得られたナノエマルジョンの外観を示す。成分比はテトラデカイン 10wt%、界面活性剤 5wt%である。一般にナノエマルジョンは、粒径が10nm以下になると、透明な外観を示すと言われているが、本実験で生成したナノエマルジョンは白濁していることが分かる。

(5)図4に常温状態で長期間保持した場合のナノエマルジョン平均粒径の経時変化を示す。横軸は生成時からの保持日数であり、パラメ

ータは界面活性剤の濃度である。なお平均粒径は、各条件で保持した後、常温下(25°C)において300個のエマルジョン粒径より算出している。図より平均粒径は時間の経過とともに緩やかに増大するが、28日後においても200nm以下の粒径を維持していることが分かる。また界面活性剤の濃度が高いほど、平均粒径が小さくなることが分かる。



Fig.3 Phase change nano-emulsion

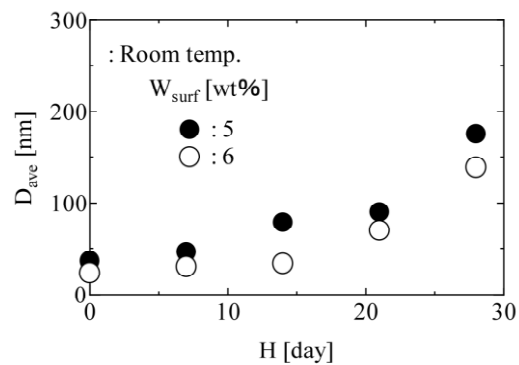


Fig. 4 Droplet diameter as a function of time and different surfactant concentrations

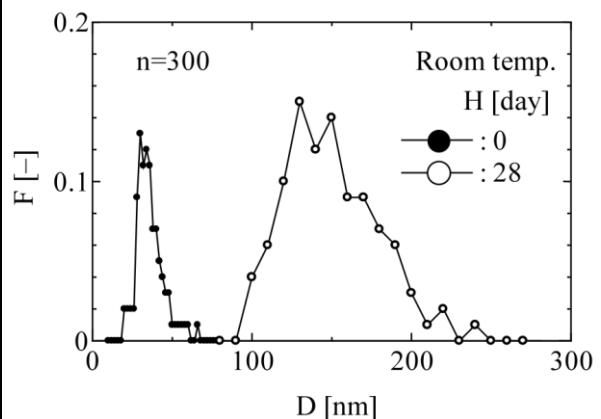


Fig. 5 Droplet size distributions

(6)次に図5は、図4において界面活性剤が5wt%の場合の粒径分布をヒストグラム表示している。黒丸(●)、白丸(○)はそれぞれナノ

エマルション生成直後、および 28 日後の粒径分布を表している。図より生成直後の粒径分布が狭い範囲に保たれているのに対し、28 日後では分布が広範囲にわたることが分かる。

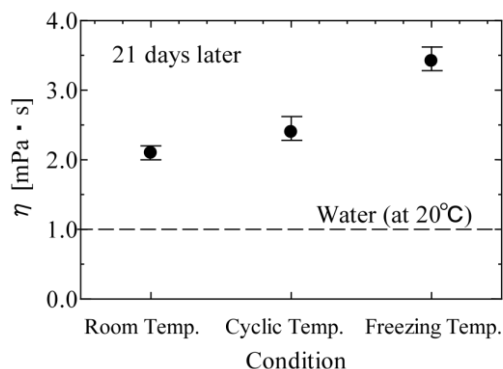


Fig. 7 Relation between viscosity and storage condition

(7)図7にナノエマルションの保持条件と粘度の関係を示す。供試エマルションは、それぞれ各条件下に 21 日間保持した後、常温下(25°C)にて測定を行っている。なおナノエマルション生成直後の粘度は2.0 mPa·sである。図より常温保持によるナノエマルションの粘度は2.1mPa·sを得ることができた。水20°Cにおける粘度が1.0mPa·sであることから、ナノエマルションの粘度は、水の約2倍となる。さらに生成直後の粘度とほぼ等しいことが分かる。また相変化条件下においても、水の約2.3倍の粘度であり、常温時に比べて若干高い値を示すが、従来のマイクロエマルションの結果と比較すると飛躍的にその粘度が低くなることが分かる。一方、溶液が凝固する凍結条件におかれた場合、粘度が他に比べて高い値を示している。これは先の平均粒径の結果から分かる通り、エマルション粒子が合成合体により大きくなることに起因していると考えられる。以上の結果より、ナノエマルションは、従来の相変化マイクロエマルションに比べ、相変化条件下においても大幅に粘度を低く抑えることができ、かつ長期安定性を有することが示された。

(8)図6にエマルションの熱伝導率と温度の関係を示す。図中には水とテトラデカンの単層時の熱伝導率、さらに Maxwell の分散相における熱伝導率の計算式より得られる値を合わせて示す。図よりナノエマルションの熱伝導率は、温度上昇とともに緩やかな増大傾向を示すことが分かる。さらに本実験範囲内では、測定値と計算値は4%の範囲以内で一致する事が分かった。一方、実験値は、予測値に比べて若干高い値を示しているのが分かる。これらはナノエマルション中の界面活性剤の影響が考えられる。

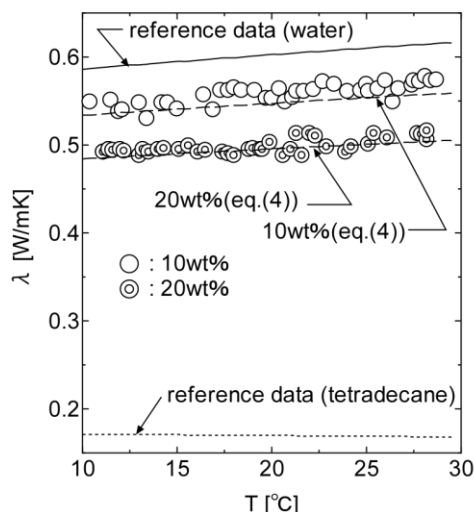


Fig. 6 Thermal conductivity of emulsion.

(9)相変化ナノエマルションを蓄冷熱材として利用することを想定し、長期安定性と粘度におよぼす各種パラメータの影響について実験的に検討を行った結果、本実験範囲内で以下の結論を得た。

- ①相変化ナノエマルションの平均粒径は、常温保持のそれに比べて大きくなるが、3週間後においても200nm以下の平均粒径を維持することが分かった。
- ②ナノエマルションの粘度は、水の2倍程度となること、さらに相変化させた場合においても2.5倍以下となることを明らかにした。
- ③従来の潜熱蓄冷熱材用マイクロエマルションの安定性および粘度と比較した結果、相変化ナノエマルションの有用性を示すことができた。

## 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)

[雑誌論文] (計8件)

- ①麓耕二, 川路正裕, 川南剛, テトラデカンを用いたナノエマルションの熱物性測定(密度,熱伝導率について),熱物性, 2011, 掲載決定。(査読有り)
- ②K. Fumoto, M. Kawaji and T. Kawanami, Study on Tetradecane Nanoemulsion for Thermal Energy Transportation and Storage,日本冷凍空調学会論文集, Vol.27, No.4, pp.45-52, 2010。(査読有り)
- ③K. Fumoto, M. Ikegawa and T. Kawanami, Heat Transfer Characteristics of Thermo Sensitive Magnetic Fluid in Micro Channel,

Journal of Thermal Science and Technology, Vol.4, No.3, pp.332-339, 2009. (査読有り)

④麓耕二, 川路正裕, 川南剛, 蓄冷熱用ナノエマルジョンの諸特性 第一報:安定性および粘度の検討,日本冷凍空調学会論文集, Vol.26, No.3, pp.265-271, 2009. (査読有り)

⑤麓耕二, 池川昌弘, マイクロ流路内における感温磁性流体の伝熱特性に関する研究,日本機械学会論文集, B 編, Vol.74, No.745, pp.1999-2005, 2008. (査読有り)

[学会発表] (計 13 件)

①麓耕二, 川路正裕, 川南剛, ナノエマルジョンの熱物性測定, 第 31 回日本熱物性シンポジウム 講演論文集, pp.1-3, 2010.

②K. Fumoto, M. Kawaji, P. Schalbart and T. Kawanami, Study on Physical Properties of Oil-Water Nano-Emulsion with Solid-Liquid Phase Change, Proceedings of 9th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, pp.11-18, 2010.

③K. Fumoto, M. Kawaji, P. Schalbart and T. Kawanami, Study on Tetradecane Nano-Emulsion for Thermal Energy Transportation and Storage, Proceedings of 5th Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning, No.C2-044, 2010. (全 8 頁)

④麓耕二, 川路正裕, 川南剛, P. Schalbart, ナノエマルジョンの相変化特性と物性測定に関する研究, 第 30 回日本熱物性シンポジウム 講演論文集, pp.37-39, 2009.

⑤麓耕二, 川路正裕, 川南剛, P. Schalbart, ナノエマルジョンの相変化特性に関する基礎的研究, 2009 年度日本冷凍空調学会年次大会 講演論文集, pp.213-214, 2009

⑥K. Fumoto, M. Kawaji, P. Schalbart and T. Kawanami, Long Term Stability of Phase Change Nano Emulsions, Proceedings of 8th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, pp.248-255, 2009.

⑦K. Fumoto, M. Ikegawa and T. Kawanami, Study on Heat Transfer Characteristics of Thermo-Sensitive Magnetic Fluid in Micro-Channel, Proceedings of 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, No.0154, 2008. (CD-Rom)(全 4 頁)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.hirosaki-u.ac.jp/~kfumoto/fumoto/Researches.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

麓 耕二 (FUMOTO KOJI)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号 : 50259785