

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289046

研究課題名(和文) ナノ流体で満たされた発泡金属充填流路による革新的伝熱促進

研究課題名(英文) An innovative heat transfer enhancement using a conduit filled with a nanofluid saturated metal foam

研究代表者

中山 顕 (Nakayama, Akira)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：60155877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ流体で満たした発泡金属充填流路により革新的な伝熱促進が可能となることを示した。アルミナ、シリカおよびダイヤモンドのナノ粒子を水に懸濁させたナノ流体を用いて一連の熱実験を実施した。アルミナのナノ流体が6%と最も高い熱伝導率の増加率を示すのに対し、ダイヤモンドのナノ流体は2%の増加率に留まった。これより、ナノ流体の有効熱伝導率は粒子の熱伝導率や体積分率のみならず多くに因子に支配されていることが分かる。ナノ流体の熱伝導率の増加率を超えて現れる異常伝熱促進は実験的に確認できなかった。これは発泡金属内の熱分散が大きく異常伝熱による伝熱促進効果を分離した形でとらえることができなかったためと考えられる。

研究成果の概要(英文)：An investigation was conducted to explore an innovative heat transfer enhancement using a conduit filled with a nanofluid saturated metal foam. Alumina-water nanofluid exhibits an increase of 6% in its effective thermal conductivity, while that of diamond-water nanofluid reaches only 2%. Thus, the effective thermal conductivity of nanofluid depends not only on the nanoparticle thermal conductivity and volume fraction but also on various other factors. Anomalous heat transfer, namely, heat transfer increase more than expected from its thermal conductivity increase, was predicted in the present theory. However, such anomaly was not clearly captured by the present experiment, since heat transfer enhancement due to thermal dispersion in a metal foam overwhelms the anomaly. The present theoretical and experimental study clearly shows that forced convection in a conduit filled with a nanofluid saturated metal foam is quite promising in view of innovative heat transfer enhancement..

研究分野：熱工学

キーワード：ナノ流体 強制対流 発泡金属 伝熱促進 機械的分散

1. 研究開始当初の背景

熱流体機器において単位体積当たりの発熱密度は増大の一途を辿っており伝熱促進技術のブレイクスルーが求められている。

作動流体に微粒子を懸濁させることで伝熱促進を図る試みは以前から行われてはいたが、粒子の凝集、流路のつまりや浸食に加え、圧損の増大などの問題により、工業的応用には至らなかった。近年のナノ技術の進歩によりナノオーダーの粒子が安価に製造可能となった。

一方、発泡金属は気孔率が高く圧損を犠牲にせず高性能熱交換が可能なることからコンパクトな熱交換媒体として注目されてきたが、製造コストが高く、航空宇宙分野を除き現在まであまり使用実績がない。しかし、近年の製造技術の進歩により、広く入手が可能になりつつある。

本研究では、ナノ流体が有する量子サイズ効果による高熱伝導性と、ブラウン運動と熱泳動のバランスで決定されるナノ粒子分布がもたらす変則的伝熱促進 (Anomaly: 熱伝導率の増加割合以上の伝熱促進を意味する) に注目した。革新的伝熱促進技術を開発することにより伝熱促進技術のブレイクスルーを決定的なものとするべく、ナノ流体の伝熱促進要素と発泡金属が有する高比表面積、高透過率、高熱伝導性および熱分散に起因する伝熱促進要素との相乗効果に注目し、最大の伝熱促進が得られるナノ流体について検討を行った。

2. 研究の目的

本研究では、比表面積と熱伝導率が高くかつ圧損が小さい発泡金属 (メタルフォーム) に、量子サイズ効果から高い熱伝導率を示すナノ流体を満たすことで、革新的伝熱促進の達成を目指した。近年の技術進歩により入手可能となったアルミ発泡金属とアルミナ粒子懸濁ナノ流体を用い、ナノ流体で満たされた発泡金属充填流路の伝熱促進のメカニズムを探った。発泡アルミ充填矩形流路にナノ流体を流し加熱実験を行い、熱分散効果、界面熱伝達の促進、ナノ流体の変則的伝熱促進 (Anomaly) などについて定量的計測を行った。申請者らが、局所体積平均理論に基づき予測した壁近傍での流速のオーバーシュート現象を実験で再現することも併せて試みた。さらに、熱分散・ブラウン拡散・熱泳動の相乗効果を実験と理論の両側面より検討することで、この新たな伝熱促進機構を検討した。

3. 研究の方法

内径が 5mm の円管に、アルミナ、シリ

カおよびダイヤモンド粒子を懸濁させたナノ流体を流し、等熱流束条件下で、ナノ流体層流強制対流における壁温および上流・下流のバルク温度を計測した。このようにして得られるナノ流体管内流の伝熱特性を、我々が導いた厳密解と比較しつつ、変則的伝熱特性 (異常伝熱 Anomaly) が発現する条件を探った。次に、アルミ発泡金属を充填した辺長 5cm 程度の矩形管にナノ流体を流し、壁を通电加熱した際の流動場および熱伝達特性を検討した。我々の解析が予測する壁近傍におけるダルシー速度のオーバーシュートは、金属発泡体の後端直後に設置した超音波流速計により計測を試みた。レイノルズ数を変化させ得られる熱伝達特性より、オーバーシュートや熱分散と伝熱促進の関連を明らかに革新的伝熱促進をもたらす機構を解明することを本研究の主な目的とした。

4. 研究成果

ナノ流体で満たした発泡金属充填流路により革新的な伝熱促進が可能となることを示すべく、理論と実験の両側面から検討を行った。図 1 にナノ粒子 (シリカ) の TEM 画像、図 2 に熱流動実験装置の概略をそれぞれ示す。

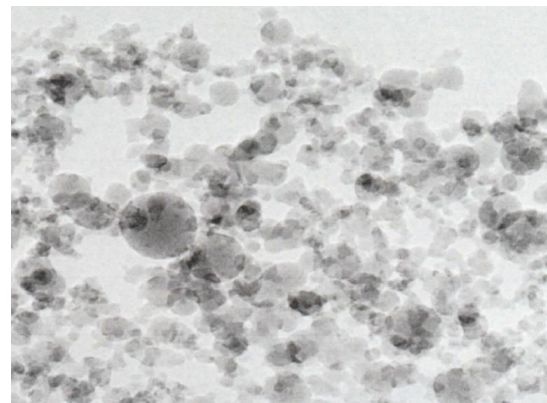


図 1 ナノ粒子の TEM 画像

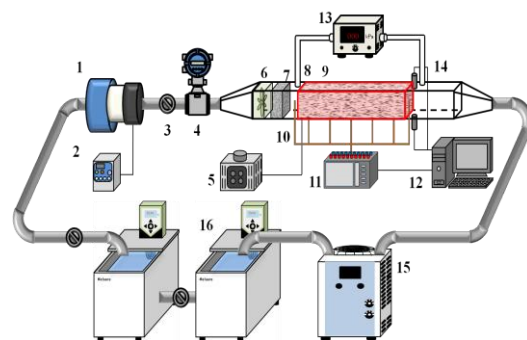


図 2 熱流動実験装置の概略

アルミナ、シリカおよびダイヤモンドのナノ粒子を水に懸濁させたナノ流体を用い、一連の熱実験を実施した。

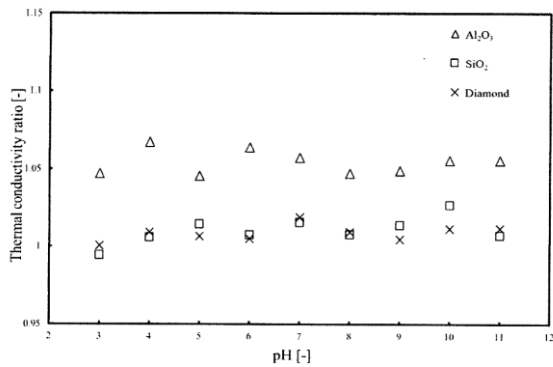
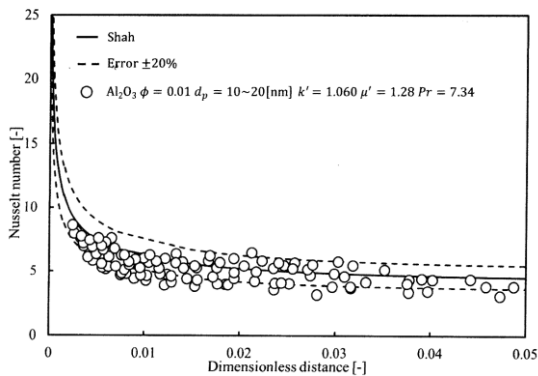
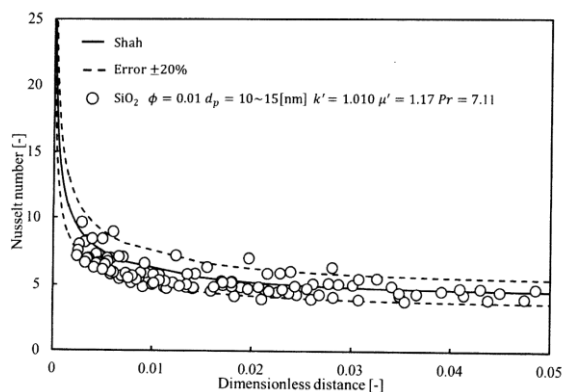


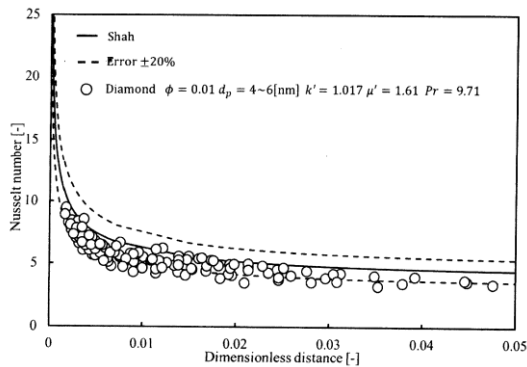
図3 ナノ流体の有効熱伝導率



(a)アルミナ・ナノ流体の熱伝達



(b)シリカ・ナノ流体の熱伝達



(c)ダイヤモンド・ナノ流体の熱伝達

図4 ナノ流体の熱伝達

図3より、アルミナのナノ流体が6%と最も高い熱伝導率の増加率を示すのに対し、ダイヤモンドのナノ流体は2%の増加率に留まることが分かる。これより、ナノ流体の有効熱伝導率は、粒子の熱伝導率や体積分率のみならず、他の多くに因子に支配されていることが予想される。

なお、図4に示すように、ナノ流体の熱伝導率の増加率を超えて現れる異常伝熱促進は実験的には確認できなかった。これは発泡金属内の熱分散が大きく異常伝熱による伝熱促進効果を分離した形でとらえることができなかったためと考えられる。

伝熱促進のメカニズムを探るには、ナノ流体に特有なブラウン拡散と熱泳動に加え、多孔質体に特有な機械的分散（熱分散と粒子分散）のそれぞれを把握し、かつ、これらの相乗効果を把握する必要がある。本研究の理論的側面では、ナノ流体で満ちた発泡金属多孔質体内の熱流動に適用し得る局所体積平均支配方程式群を導いた。さらにナノ流体で満ちた発泡金属充填流路の数値モデルを提案し、微視的数値計算を実施した。これらの微視的計算結果を局所体積平均することで、機械的分散係数を決定した。図5に示すように、熱分散項の相関式におけるナノ粒子の体積分率の効果は限定的であること、熱分散項およびナノ粒子の機械的分散項間にアナロジーが成立すること、金属界面から加熱されるナノ粒子の質量流束は界面熱流束が高くなるほど大きくなることなどを明らかにした。

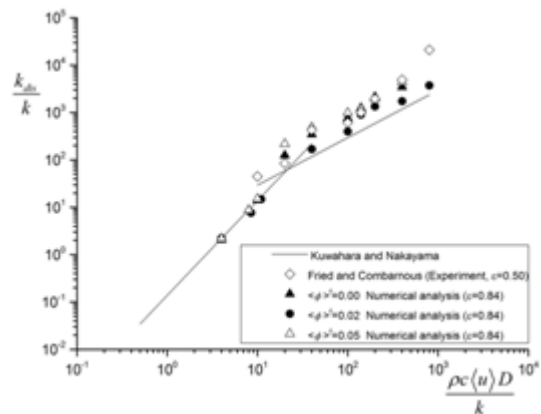


図5 ナノ流体の熱分散係数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

1. W. Zhang, 中山 顕, ナノ流体で満たされた発泡金属充填流路における機械的分散に関する検討, 化学工学会論文集, 査読有, 43-2, pp. 95-102 (2017)

2. C. Yang, K. Peng, A. Nakayama, T. Qiu, Forced convective transport of alumina water nanofluid in micro-channels subject to constant heat flux, Chemical Engineering Science, 査読有, 152 (2), pp. 311-322 (2016).
3. W. Zhang, W. Li, C. Yang, A. Nakayama, A volume averaging theory for convective flow in a nanofluid-saturated metal foam, Fluids, 査読有, 1 (1), 8, pp. 1-35 (2016).
4. W. Zhang, W. Li, A. Nakayama, An analytical consideration of steady-state forced convection within a nanofluid-saturated metal foam, Journal of Fluid Mechanics, 査読有, 769, pp. 590-620 (2015).
5. C. Yang, Q. Wang, A. Nakayama, T. Qiu, Effect of temperature jump on forced convective transport of nanofluids in the continuum flow and slip flow regimes, Chemical Engineering Science, 査読有, 137 (1), pp.730-739 (2015).
6. W. Li, A. Nakayama, Temperature dependency of thermophysical properties in convective heat transfer enhancement in nanofluids, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 査読有, 29 (3), pp. 504-512 (2015).

[学会発表] (計 4 件)

- 1) W. Zhang, 桑原不二朗, 中山顕, ナノ流体で満たされた多孔質体における粒子機械分散の数値解析. 日本機械学会熱工学コンファレンス2016, 2016年10月22日, I-122, 愛媛大学 (愛媛県松山市文京町)
- 2) W. Zhang, 桑原不二朗, 佐野吉彦, Mobedi M., 中山顕, ナノ流体の粒子機械分散と熱分散に関する一考察. 日

本伝熱学会第53回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2016年5月24日, G131: 1-2, グランキューブ大阪 (大阪市北区中之島)

- 3) W. Zhang, 中山顕, ナノ流体に満たされた発泡金属内の対流伝熱促進. 日本伝熱学会第52回日本伝熱シンポジウム, 2015年6月3日, I123, 福岡国際会議場 (福岡市博多区名城町)
- 4) W. Zhang, 中山顕, 発泡金属充填流路内のナノ流体の機械的分散. 日本機械学会熱工学コンファレンス, 2014年11月9日, E226, 芝浦工業大学 (東京都江東区豊洲)

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 顕 (NAKAYAMA, AKIRA)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号: 60155877

(2) 研究分担者

桑原不二朗 (KUWAHARA, FUJIO)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号: 70215119

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()