

機関番号：17401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656142

研究課題名(和文) ナノ流体と爆発衝撃新素材を用いた革新的沸騰伝熱促進と機構解明

研究課題名(英文) Advanced boiling heat transfer enhancement and its mechanism using nanofluid and heat transfer surface made by shockwave

研究代表者

鳥居 修一 (Torii, Shuichi)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：30180201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はナノ流体を用いた円管内熱流動現象とマルチヒートパイプを開発して伝熱性能に及ぼす熱流束の影響について検討する。実験中、加熱部と冷却部は断熱され、冷却部が水冷却装置を接続されている。試験部へのナノ流体の充填率は30%から100%の範囲で行った。加熱部の熱流束は5W/cm² to 20W/cm²の範囲で行った。

円管内対流伝熱性能は粒子の付加によって促進され、粒子の凝集(ゼータ電位)によって影響される。ナノ流体の充填率と熱流束によって、マルチヒートパイプの有効熱伝導率は純水の場合より高い。即ち、マルチヒートパイプの伝熱性能はナノ流を用いることによって促進された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present study is (i) to disclose transport phenomena in pipe flow using nanofluid and (ii) to develop a multi heat pipe cooling device and to study the effects of charge ratio and heat flux on its heat transfer performance. The fill charge ratio between fill charge volume of working fluid and internal evaporator section volume were ranged from 30% to 100%. The heat fluxes applied to the evaporator section were changed from 5W/cm² to 20W/cm².

Heat transfer performance in the circular tube flow is amplified by suspension of nanoparticles in comparison with that of the pure water and Heat transfer enhancement is effected by the occurrence of particle agglomeration, i.e., zeta potential of nanoparticles in suspension. The effective thermal conductivity for nanofluid is higher than that for pure water and this trend is the same in the wide range of heat flux.

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：ナノ流体 ナノ粒子 沸騰伝熱 対流伝熱 伝熱促進効果

1. 研究開始当初の背景

提案者は銅とカーボンの複合材料を開発し、沸騰伝熱が促進されることを下記の学術雑誌で明らかにしている。

POOL BOILING ON COMPOSITE SURFACES OF GRAPHITE MICROFIBERS IMBEDDED IN METAL MATRIX, International Journal of Transport Phenomena, Vol. 9, No. 2, pp. 149-159, 2007.

平成18年度採択された科学研究費補助金萌芽研究「ナノダイヤモンドの爆発圧着による金属材料の高伝導化の熱工学的解明(課題番:18656068)」では、細線にナノダイヤモンドを爆発圧着させたものを沸騰伝熱面とした実験を行い、限界熱流束が著しく向上することを確認した。従来の限界熱流束と比較して著しく向上したことから、次世代の沸騰伝熱面開発の新しい手法として期待できる。

ナノ流体を用いた対流伝熱促進効果については、下記の学術雑誌で明らかにし、ナノダイヤモンドを用いたナノ流体が次世代作動媒体としての可能性を秘めていることを明らかにしている。

Heat Transfer Augmentation of aqueous suspensions of nano-diamonds in turbulent pipe flow, ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 131, pp.043203-1 - 043203-5, 2009.

一連の研究成果から、ダイヤモンドと爆発衝撃波を用いた革新的沸騰伝熱促進面を製作し、ナノダイヤモンドを用いたナノ流体を用いれば、伝熱促進の飛躍的向上が期待できる。この成果を伝熱機器に応用することで、次世代機器の冷却性能に対応することが考えられる。

2. 研究の目的

微粒子を含む懸濁液の熱伝導率について多くの研究が行われている。流体に添加物を加えることで、伝熱性能を向上させる研究が試みられてきた。例えば、室温における銅の熱伝導率は水と比較して約700倍、エンジンオイルと比較して約3,000倍大きい。

近年、伝熱比表面積が大きく、液体中での分散安定性に優れたナノ粒子が容易に入手できるようになり、ナノ材料の応用に関する研究が注目されている。作動媒体に微粒子を混合する場合、熱伝達は粒子の表面で生じるため、莫大な総表面積がある粒子を用いるのが望ましい。同じ体積の場合、粒子の表面領域は直径10 μ mの粒子より直径10nmの粒子の方が1,000倍大きい。即ち、莫大な表面積を持つナノ粒子は、伝熱性能の向上に寄与できる優れた潜在能力を秘めている。従って、流体にナノ粒子を混入して熱伝導率を増加させ、それを熱媒体(これをナノ流体という)として用いることにより総合的な伝熱特性の向上が試みられている。ナノ流体の特徴としては、伝熱面積、熱容量の増加や伝熱性能

の向上、流体の安定性などが挙げられる。

高密度化する電気・電子部品の冷却においては、高効率かつ低コスト熱輸送デバイスが求められている。ヒートパイプは軽量小型で熱輸送能力に優れていることから、幅広いニーズがあり、平板型ヒートパイプ、ループ型ヒートパイプ、自励振動型ヒートパイプへの展開が拡大している。

本研究では、流体に水、ナノ粒子にダイヤモンド、Al₂O₃およびCuOを用いたナノ流体の粘度、圧力損失および対流伝熱に関する実験的に検討を行う。更に、ナノダイヤモンドの爆発圧着させた伝熱面を有する相変化を伴うマルチヒートパイプを製作し、ナノ流体を作動媒体として用いた場合の伝熱性能を検討して、次世代機器の冷却性能に対応するための限界熱流束の爆発的向上を目指すことを目的とする。

3. 研究の方法

実験方法は2部で構成されている。即ち、対流伝熱に関する基礎実験と作動媒体の相変化を伴うマルチヒートパイプを用いた伝熱実験を行う。

(1) 対流熱流動実験

実験装置は、恒温槽、変圧器、温度計測用データロガー、流量計、差圧計、循環ポンプ、電圧計およびステンレス管で構成されている(図1)。恒温槽で20℃に保ったナノ流体は円管の試験部に流入し、加熱された後、恒温層に戻るようになっている。試験部にはステンレス管(内径3.96mm、肉厚0.17mm、長さ1000mm)を使用し、両端に電極が固定されている。この区間は変圧器を用い直接通電して加熱できるようになっており、断熱材を使用してその区間からの熱損失が軽減されている。加熱管表面にはT型熱電対が軸方向に等間隔に固定され、加熱部前後の流体温度も同様の熱電対が使用されている。加熱部の圧力損失は、試験部の流入口および流出口に設けた圧力孔に差圧計を取り付けて測定した。

使用したナノ粒子はダイヤモンド、Al₂O₃、およびCuOの3種類であり、それぞれの物性値を表1に纏める。使用するナノダイヤモンド粒子のTEM画像を図2に示している。図から分かるように、粒子形状および直径をほぼ同じである。

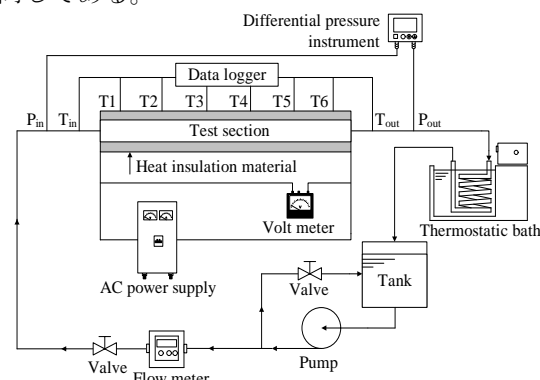


図1 実験装置

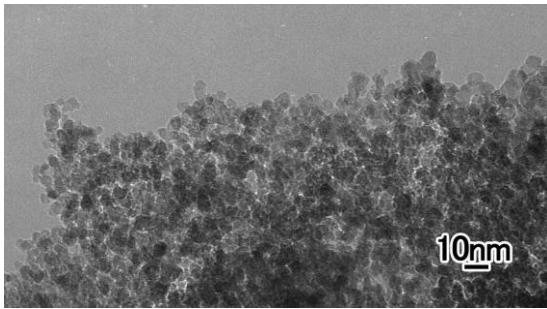


図2 ナノダイヤモンド粒子のTEM画像

表1 各種ナノ粒子の物性

Nanoparticle	Particle diameter [nm]	Thermal conductivity [W/mK]
Diamond	2~10	2000
Al ₂ O ₃	33	36
CuO	47	20

作動媒体として、蒸留水およびナノ粒子と蒸留水の体積分率が0.1%, 1%, 5%のナノ流体を使用した。実験では、レイノルズ数が $Re = 3500\text{--}10000$ の範囲で行った。

(2) マルチヒートパイプを用いた伝熱実験

図3はテスト部(マルチヒートパイプ)を含む実験装置を示している。装置は、出力を調節できる電気ヒータによる加熱部と冷却部からなっている。冷却部はチラユニットを用いて定量の定温冷却水を循環させるようになっている。図4はマルチヒートパイプの断面を示している。マルチヒートパイプは蒸発部、断熱部、凝縮部からなり、その内部伝熱面はナノダイヤモンドによる爆発圧着された加工が施されている。この断熱面を図5に示す。図中の黒点の部分ナノダイヤモンドである。ナノダイヤモンドは伝熱面内部の極表面近傍に浸透している。

マルチヒートパイプ内部には、ナノ流体が注入されている。使用したナノ流体の体積分率は0.1%である。

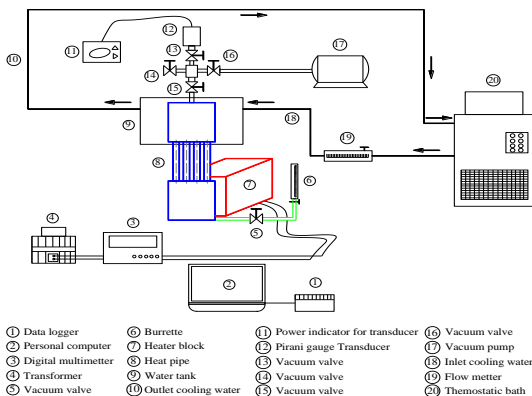


図3 実験装置

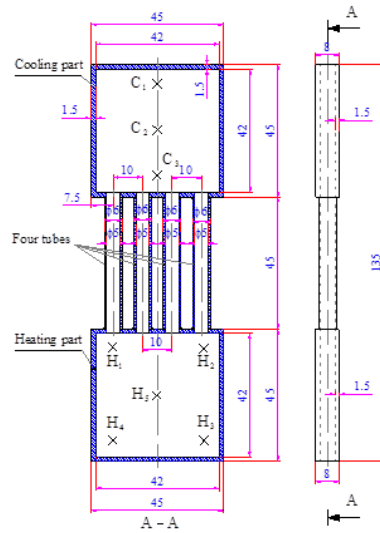


図4 マルチヒートパイプ

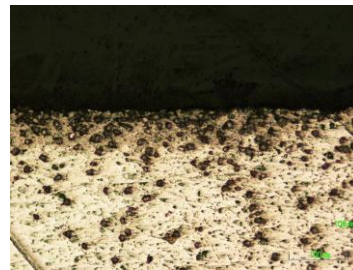


図5 伝熱面内部のナノダイヤモンド

4. 研究成果

(1) 対流熱流動実験結果

ナノ流体を作動媒体として採用する場合、流体(ここでは水)にナノ粒子が添加された媒体が時間の経過に伴って粒子と水の分離の有無を把握することは重要である。図6はナノダイヤモンド流体が60日経過した時の状態を示したものである。図中では体積分率が1%のナノ流体の写真である。時間が経過しても、水と粒子が分離するようなことはなく、ナノ流体として安定していることが分かる。



図6 60日経過した後のナノ流体

各ナノ流体の粘性係数は回転式粘度計(BROOKFIELD LVDV-II+pro-CP)を用いて測定した。20°Cにおける各体積分率のナノ流体の粘度と Batchelor の式(1)により算定した

ナノ流体の粘度を図7に示す。ここで、懸濁液の粘度は以下に示す Batchelor の式により算定することができる。

$$\mu/\mu_{\text{base}} = 6.2V^2 + 2.5V + 1 \quad (1)$$

ここで、 μ はナノ流体の粘度、 μ_{base} は単相の液体の粘度、 V はナノ粒子の体積分率である。ナノ流体の粘度は算定した粘度よりもはるかに高いので、Batchelor の式を用いてナノ流体の粘度を算定することができないだけでなく、体積分率が増加するにつれて粘性係数は急激に増加することが分かる。使用したナノ流体中では、ダイヤモンドを用いたナノ流体の粘度が最も高い。

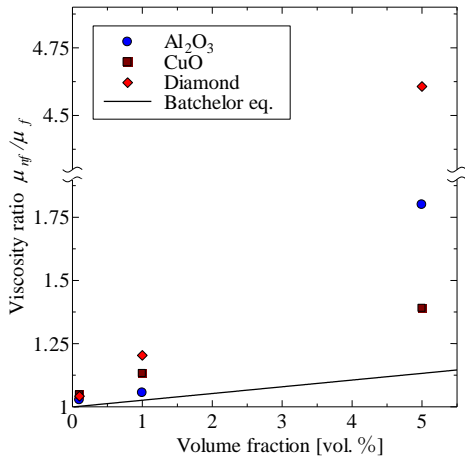


図7 各種ナノ流体の粘性係数

図8はナノ流体の熱伝導率測定結果を示している。ここでは、非定常細線法を使用し、熱特性計 KD2 (DECAGON, USA) を用いて測定を行なった。比較のため、Hamilton and Crosser の相関式を用いて算定したものを実線で図中に併記している。

$$k = k_f \left[\frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)V(k_f - k_s)}{k_s + (n-1)k_f + V(k_f - k_s)} \right] \quad (2)$$

ここで、 k_f は単相流の熱伝導率、 k_s はナノ粒子の熱伝導率、 V は体積である。また、 n は形状係数であり、ここでは1を用いた。ナノ流体の違いによって熱伝導率は異なるので、ナノ流体の熱伝導率として使用されてきた相関式は使用するナノ流体によって十分な精度を持たないことが分かった。

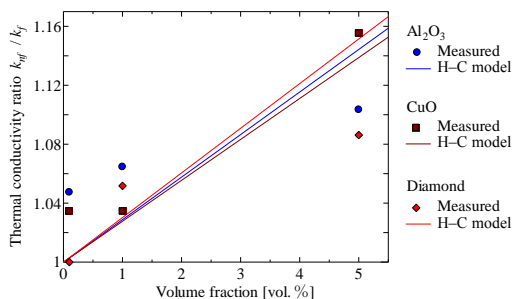


図8 各ナノ流体の熱伝導率

図9は、無次元距離で150における熱伝達係数を無次元数であるヌセルト数 Nu で整理し、レイノルズ数 Re の関係で纏めたものである。ここで、150 直径下流位置では十分に流体力学的にも熱的に十分発達していることを予備実験で確認している。 Nu を算出する際、代表長さに管直径 D を用いた。また、熱伝導率 k は図8の測定値を用いた。図中の実線は Gnielinski の単相流の熱伝達相関式であり、次式で表される。

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1.07 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (3)$$

$$f = [1.82\log_{10}(Re) - 1.64]^{-2} \quad (4)$$

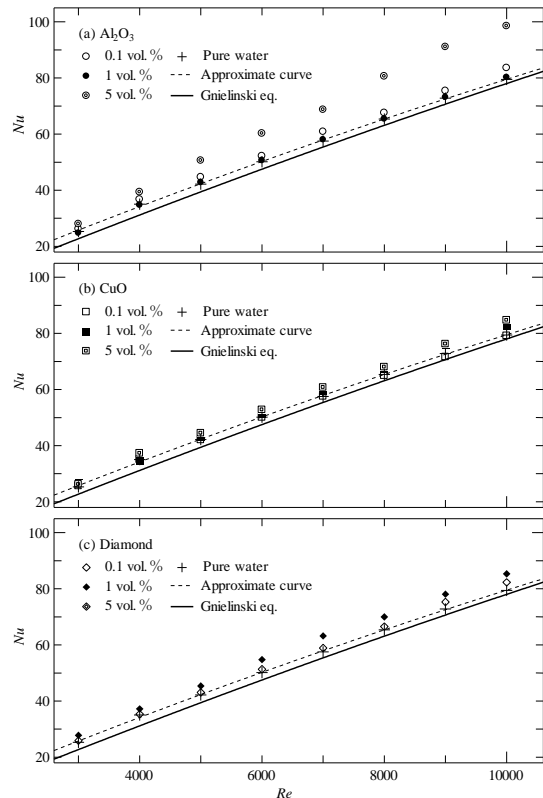


図9 各種ナノ流体のヌセルト数

ダイヤモンド、CuO および Al_2O_3 のナノ流体のヌセルト数は水と比較して増加している。体積分率が5%の時に於いて、伝熱促進効果は Al_2O_3 のナノ流体が顕著であることが分かる。ナノダイヤモンドを用いたナノ流体は体積分率が1%でかなりの伝熱促進効果が現われている。ナノダイヤモンドナノ流体を用いた先の研究と比較して、ナノダイヤモンドナノ流体を用いた場合の方が伝熱促進効果が高いことが分かった。即ち、使用したナノダイヤモンドは使用したナノ粒子では最小径であったが、凝集して見かけ上、大きな粒子となったために、当初予測していた伝熱促進効果が得られなかったと考えられる。そのことは、ゼータ電位の計測結果からも窺える(表2)。

表2 ナノ流体とゼータ電位

	Volume fraction ϕ [vol.%]	zeta potential ζ [mV]	Average particle diameter d_p [nm]	Primary particle diameter d_p [nm]
Al ₂ O ₃	0.1	62.48	128.3	
	1	67.72	117.3	33
	5	46.13	227.7	
CuO	0.1	0.67	3603.1	
	1	1.04	1288.7	47
	5	0.98	904.8	
Diamond	0.1	38.39	361.7	
	1	41.45	271.6	2-10
	5	36.80	625.4	

(2) マルチヒートパイプを用いた伝熱実験

図10は、作動媒体に純水を用いた場合の加熱面の温度を示している。横軸は作動媒体の装置内部への充填率を示している。作動媒体の充填率を一定にした場合、熱流束が増加するにつれて加熱面温度は上昇し、その傾向は充填率が増加するにつれて減少している。対応するナノ流体の結果を図11に纏める。ナノ流体を作動媒体にした場合を図10の傾向と同様である。但し、加熱面温度上昇がかなり抑えられている。即ち、ナノ流体を作動媒体に用いた場合、伝熱性能が向上することが明らかとなった。更に、その傾向はナノ流体の充填率を増すことによって、顕著になる。

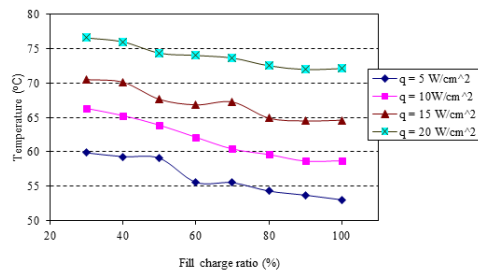


図10 純水を用いた加熱部表面温度

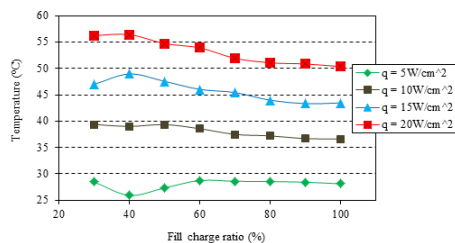


図11 ナノ流体を用いた加熱部表面温度

一連の実験より、ナノ流体を用いることによって対流伝熱が促進されることが分かった。更に、その対流伝熱促進効果に作動媒体の相変化が加わったマルチヒートパイプの冷却性能（加熱部の伝熱促進効果）は向上することが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① Shuichi TORII, EXPERIMENTAL STUDY ON THERMAL TRANSPORT PHENOMENON OF NANOFLUIDS AS WORKING FLUID IN HEAT EXCHANGER, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 査読有, Vol. 22, No. 1, pp. 1-6, 2014.
- ② Hajime Yoshino and Shuichi TORII, Heat transfer enhancement of Al₂O₃ nanofluid dispersed in Ethylene Glycol, International Journal of Earth Science and Engineering, 査読有, Vol. 05, No.03, pp. 532-534, 2012.
- ③ Dao Danh Tung and Shuichi TORII, Heat transfer performance of a multiple-heat pipe cooling device using pure water and alumina (Al₂O₃) nanofluid respectively as working fluid, International Journal of Earth Science and Engineering, 査読有, Vol. 05, No. 04, pp. 1004-1009, 2012.
- ④ Dao Danh TUNG and Shuichi TORII, Heat Transfer Performance of A Self-Oscillating Heat Pipe Using Pure Water and Effect of Inclination to Its Performance, ASEAN Engineering Journal Part A, 査読有, Vol. 2, No. 1, pp. 93-101, 2012.

〔学会発表〕(計7件)

- ① Shuichi TORII and Hajime YOSHINO, Thermal Transport Phenomena of Nanoparticle-in-Fluid Dispersions in Turbulent Pipe Flow, Proceedings of the 15th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, 査読有, TH110. pp. 1-6, February 28, 2014, Honolulu, USA.
- ② Yukiko FUKUOKA, Caner SENKAL and Shuichi TORII, Dependence of the thermal conductivity and viscosity with various temperatures using Al₂O₃-nano fluid in consideration of day elapsed after making, Proceedings of The Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environment and Energy, 査読有, pp. 341-346, February 16, 2014, Busan, Korea.
- ③ Shuichi TORII and Dao Danh Tung, Heat Transfer Performance of Multi Heat Pipe Cooling Device with the Use of Alumina Nanofluid, Proceedings of International Symposium on EcoTopia Science 2013, p1, December 13, 2013, Nagoya, Japan.
- ④ Shuichi TORII and Hajime YOSHINO, Thermal Transport Phenomena of

Nanoparticle-In-Fluid Dispersions in Turbulent Pipe Flow, Proceedings of the 4th International Symposium on Micro and Nano Technology, 査読有, pp. 1~16, October 8, 2013, Shanghai, China.

- ⑤ Shuichi TORII and Hajime YOSHINO, Thermal Transport Phenomena of Nanoparticle-In-Fluid Dispersions (Nanofluids) in Turbulent Pipe Flow, Proceedings of the 13th UK Heat Transfer Conference, 査読有, UKHTC2013, pp. 5-1~5-8, September 3, 2013, London, UK.
- ⑥ Hajime YOSHINO and Shuichi TORII, Heat Transfer Enhancement of Al_2O_3 Nanofluid Dispersed in Ethylene Glycol, Proceedings of INTERNATIONAL ENGINEERING SYMPOSIUM 2012, pp. M2-5-1 - M2-5-3, March 4, 2012, Kumamoto, Japan.
- ⑦ Dao Danh Tung and Shuichi TORII, Heat Transfer Performance of a Multiple-Heat Pipe Cooling Device Using Pure Water and Alumina Nanofluid respectively as Working Fluid, Proceedings of INTERNATIONAL ENGINEERING SYMPOSIUM 2012, pp. M3-1-1 - M3-1-6, March 4, 2012, Kumamoto, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥居 修一 (TORII Shuichi)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号： 30180201