

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 24 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560209

研究課題名（和文）

ナノスラリーの対流伝熱促進への展開

研究課題名（英文）

Enhancement of Convective Heat Transfer by Using Nano-Slurry

研究代表者

北村 健三 (KITAMURA KENZO)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20126931

研究成果の概要（和文）：本研究は、ナノスラリーによって対流伝熱の促進が可能か調べたものである。まず 10wt% Al_2O_3 -水ベースナノスラリーについて、熱物性値の測定を行った。その結果、このナノスラリーの熱伝導率は水に比べ約 7% 程度の高い値を示した。つぎに、このナノスラリーを円管内に流した場合について伝熱実験を行った。その結果、円管のヌッセルト数は水の場合とほぼ同一の値を示した。また、スラリーの衝突噴流について熱伝達率を測定した結果でも、顕著な伝熱促進効果は得られなかった。

研究成果の概要（英文）：Enhancement of heat transfer by use of nano-slurry has been investigated experimentally. Thermal properties of water-based 10wt% Al_2O_3 nano-slurry were measured firstly. The slurry showed 7% higher thermal conductivity than that of the water. Heat transfer by the forced convection from the heated pipe to the nano-slurry was subsequently measured. The result showed that the Nusselt numbers are almost the same between the nano-slurry and water. The identical result was also obtained for the heat transfer by the impinging jet of nano-slurry and water.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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：対流、伝熱促進、ナノスラリー、対流伝熱、強制対流、管内流、衝突噴流

1. 研究開始当初の背景

ナノスラリー(Nano-slurry)あるいはナノ流体(Nano-fluid)と呼ばれる流体は、1990 年代初めに開発された新しい固液混相流体の一種であり、アルミ、シリコン、銅などの金属酸化物を数 nm～数十 nm 程度の大きさに粉碎し、水やエチレングリコールなどのベース流体中に適当な界面活性剤を介して分散、懸濁させた流体である。このスラリー中に懸濁されたナノ粒子はブラウン運動をするため沈降・沈

殿せず、長時間放置してもスラリー状態を維持する。また粒子サイズが極めて小さいことから、スラリーを搬送するために特殊なポンプや配管が不要で、既存のポンプや配管がそのまま利用できるなどの特長を有している。さらに、0.5～数 wt% 程度のごく微量の粒子を懸濁させたスラリーの熱伝導率は、ベース流体の熱伝導率よりも 10～30% 程度高い値を示すことが報告されている。さて、このナノスラリーの優れた伝熱、流力

的特性を利用することにより、今まで水や油を熱交換媒体とする多くの伝熱機器では、媒体をナノスラリーに置き換えるだけで、装置を変更することなく伝熱性能を飛躍的に向上できるものと期待されている。このことから、ここ数年ナノスラリーを対流あるいは沸騰伝熱等の促進に利用する試みが盛んに行なわれて来た。とくに対流伝熱の分野では、ナノスラリーの管内強制対流伝熱に関する実験結果が相次いで報告され、それによれば、とくに層流域の熱伝達率はベース流体単独の場合に比べて、多くの実験では20~40%、また一部の実験では2倍以上高くなる結果が得られている。

しかし、上述した管内流の伝熱促進率については、実験者による差が大きく、2倍以上の値を得たとの報告が有る一方で、ベース流体と同じか、逆に伝熱が劣化したとの報告も少なからず存在する。このように実験結果がばらつく原因として、スラリーの組成、濃度などに基づく熱物性値の不確かさに加えて、実験手法や測定精度上の問題が挙げられる。すなわち、今までナノスラリーの伝熱実験を試みた研究者のほとんどは対流伝熱の専門家ではなく、ナノ粒子の製造に携わる研究者であったため、実験装置の作成や熱伝達率測定のノウハウを持ち合わせていなかったこと、また、データ整理に際しても、スラリーの熱伝導率を考慮するだけで、動粘度や温度伝導率など測定結果に影響する他の熱物性値については全く考慮していないなど、対流伝熱を専門とする研究者から見れば、かなりずさんと思える実験・評価が行なわれているのが実情である。

2. 研究の目的

これら研究の現状を考慮すると、ナノスラリーを対流伝熱促進に利用するに当たっては、解決すべき課題が幾つか指摘できる。

その一つは、ナノスラリーの熱物性値である。このナノスラリーの物性値については、ナノ粒子の種類、粒径、濃度、ベース流体や界面活性剤の種類等によってかなり大きく変化することが予想される。しかし、従来の実験者の大部分は、スラリーの熱物性値がベース流体のそれと同じと仮定して、実験値を整理している。このため伝熱実験でたとえベース流体単独の場合と異なる熱伝達率が得られたとしても、それが単に熱物性値に因るものか、それともナノスラリー固有の伝熱促進効果に因るものか不明であった。このためには、ナノスラリーの密度、熱伝導率、粘度などの熱物性値を予め正確に見積もる必要があると考える。二つ目は、ナノスラリーによってどの程度高い伝熱促進効果が得られるか、現在でも信頼に足るデータが得られていないという問題である。このことから、本研究では、

まず初めに実験に使用するスラリーの熱物性値の測定を試みる。測定する熱物性値としては、熱伝導率、粘度および比重の3つを考えている。これらの測定で得られた物性値を参考にして、つぎにスラリーの伝熱・流動実験を行う。この実験に当たっては、解析解や伝熱相関式が既に確立され、実験や測定も比較的容易と考えられる(1)円管内強制対流熱伝達および(2)衝突噴流熱伝達を対象に測定を試みる。これらの実験を通じて、ナノスラリーの流動特性および伝熱促進効果について定量的かつ信頼性の高いデータを得ることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、試験流体として市販の Al_2O_3 -水ベースナノスラリー(濃度10wt%)を用いた。このナノスラリー中の Al_2O_3 粒子の平均粒径は58.4nm、粒径標準偏差は19.7nmである。このナノスラリーは、下図1に示すように白濁色をしている。



図1. Al_2O_3 -水ベースナノスラリー

(1) ナノスラリーの熱物性値測定

本研究では、伝熱・流動実験に供する Al_2O_3 -水ベースナノスラリーの熱伝導率 λ を非常細線加熱法、粘度 μ を円錐-回転円板式粘度計、動粘度 ν をウペローデ粘度計、比重 γ を浮子式比重計により、それぞれ測定した。

(2) ナノスラリーの管内強制対流実験

本実験で用いた装置の概要を図2に示す。リザーバに貯えられたナノスラリーはポンプにより試験円管内に流入し、リザーバへと戻る。試験円管は内径 $d=4.4\text{mm}$ 、肉厚 0.1mm 、長さ 900mm のステンレス管製で、パイプ壁に交流を直接通電することにより等熱流束条件で加熱した。この試験円管は内径に対して200倍以上の長さを有しており、管路内で流力、熱的に完全に発達した乱流状態を実現できる。また、本実験では、この管路出入口での圧力差 Δp をマンメータにより計測することにより管摩擦係数 f を算出した。またステンパイプ外表面には、流れ方向に9本のK型熱電対がスポット溶接されている。この熱電対により局所壁温 $T_{w,x}$ を測定し、管路の局所熱伝達率 h_x を次式により求めた。

$$h_x = q_w / (T_{wx} - T_{xbulk}) \quad (1)$$

ここで、 q_w は壁面熱流束であり、パイプのジュール加熱量を管内表面積で除すことにより求め、また、 T_{xbulk} は位置 x における流体の混合平均温度であり、管路入口-出口温度およびジュール加熱熱流束 q_w から求めた。なお、試験円管の外表面は断熱材で断熱しており、パイプのジュール加熱量と、管路入口-出口間の温度差および流量から見積もった対流伝熱量は、ほぼ一致する結果を得ている。実験は管路直径 d 基準のレイノルズ数 $Re_d (=u_m \cdot d/\nu)$ =3000~10000 の発達した乱流域を対象に行った。

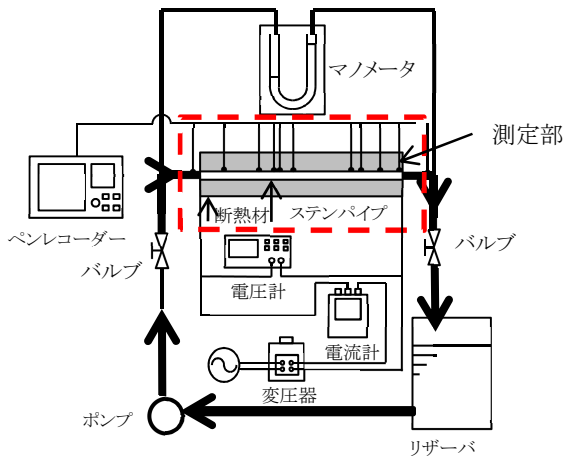


図2. 管内流実験装置

(3) ナノスラリーの衝突噴流伝熱実験

本実験で用いた実験装置の概要を図3に示す。ナノスラリーは、断面 $320 \times 320 \text{mm}^2$ 、深さ 450mm の水槽内に貯えられ、この水槽からポンプでスラリーを吸い込み、整流胴、ハニカムにて整流された後、縮流比 14:1 の縮流ノズル出口 (断面 $8 \times 80 \text{mm}^2$) から2次元噴流となって流出する。衝突平板は幅 100mm 、奥行き 250mm のアクリル平板にステンレス箔ヒータを貼り付けたもので、箔に交流を通電することにより、等熱流束条件で加熱した。この箔の裏面には、所定の間隔で K 型熱電対がスポット溶接されており、局所壁温 T_{wx} を測定できる。この壁温 T_{wx} およびノズルから噴出する流体の温度差 $\Delta T (=T_{wx} - T_\infty)$ を基に、平板の局所熱伝達率 h_x を次式により算出した。

$$h_x = q_w / (T_{wx} - T_\infty) \quad (2)$$

実験は、ノズル-平板間距離 H とノズル幅 b との比 (H/b) が 2 および 9 の 2 通りについて行い、前者は噴流のポテンシャルコア域が、また後者は発達した噴流が平板に衝突する条件に対応している。また、噴流出口流速 u_0 を変化させることにより、ノズル幅 b 基準のレイノルズ数 $Re_b (=u_0 \cdot b/\nu) = 1000 \sim 4000$ の範囲で実験を行った。

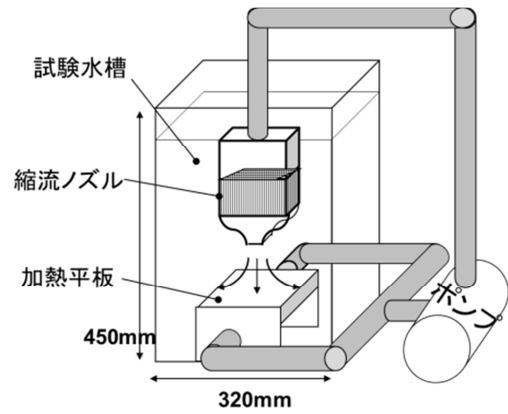


図3. 衝突噴流実験装置

4. 研究成果

(1) Al_2O_3 -水ベースナノスラリーの物性値

まず、非定常細線法により、 $10 \text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$ -水ベースナノスラリーの熱伝導率 λ_s を測定した。その結果、温度 27.3°C におけるスラリーの熱伝導率として、 $\lambda_s = 0.699 \text{W/mK}$ なる値を得た。この値は同温度における水の熱伝導率 $\lambda_w = 0.625 \text{W/mK}$ に比べて約 7% 程度高い値となった。つぎにスラリーの粘度 μ を円錐-回転円板式粘度計およびウベローデ粘度計により測定した。その結果を下図4に示す。この図より、 $10, 5, 3 \text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$ スラリーの粘度 μ_s は、純水の粘度 μ_w に比べ、それぞれ 30, 12, 5% 高くなることが判った。なお、 $1 \text{wt}\%$ のスラリーでは水の値にほぼ一致する。また、スラリーの比重 γ を浮子式比重計により測定したところ、温度 $20 \sim 40^\circ\text{C}$ の範囲において $\gamma = 1.08$ なる値を得た。

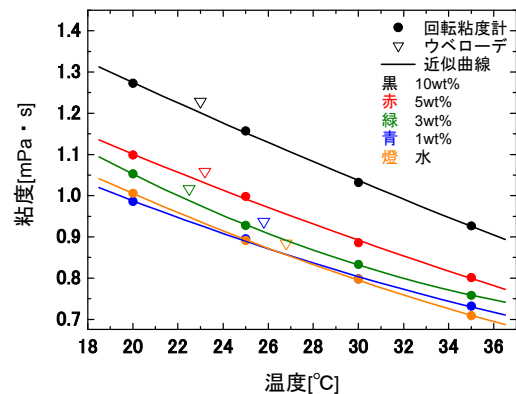


図4. ナノスラリーの粘度

(2) ナノスラリーの円管内強制対流熱伝達

以上の熱物性値の測定結果を参考にして、つぎに $10 \text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$ -水ベースナノスラリーを円管内に流した場合について、管摩擦係数 f および局所熱伝達率 h_x の測定を行ってみたい。そのうち、管路出入口間の圧力損失 Δp を測定した結果を図5に示す。この図の横軸には管

路内を流れる平均流速 u_m をとり、スラリーと水の実験値を示している。図では差が小さく判りにくいですが、10wt%スラリーの圧力損失 Δp は、水に比べて6-14%程度高い値を示している。

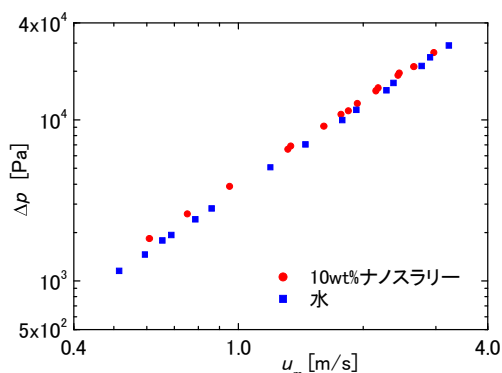


図 5. ナノスラリーの圧力損失

一方、この圧力損失 Δp および前述した粘度の測定値を基に管摩擦係数 f を求め、横軸にレイノルズ数 Re_d を取ってプロットした結果を下図 6 に示す。この図より、ナノスラリーの管摩擦係数は水と同様、発達した乱流に対するブラジウス(Blasius)の式に従うことが判る。この結果は、ナノスラリーが通常のニュートン流体として取り扱えることを示している。

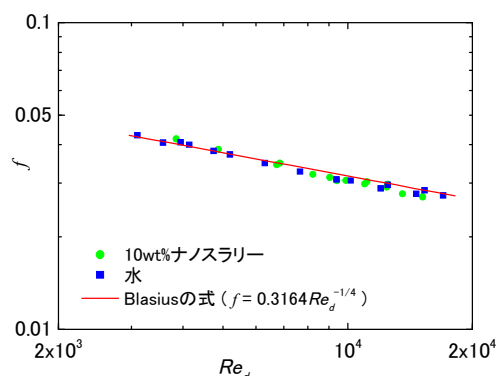


図 6. ナノスラリーの管摩擦係数

つぎにナノスラリーを加熱円管内に流した場合について、発達した乱流域における熱伝達率 h を測定した結果を図 7 に示す。図の横軸には管路内の平均流速 u_m をとっている。この図から、10wt%ナノスラリーの熱伝達率は、同じ流速条件下の水の熱伝達率とほとんど変わらないことが判る。また、この熱伝達率 h からヌッセルト数 $Nu_d (=h \cdot d / \lambda)$ を求め、横軸にレイノルズ数 $Re_d (=u_m \cdot d / \nu)$ をとって無次元表示した結果を図 8 に示す。なお、これら無次元数中の物性値 λ および ν には、本実験で得た測定値を採用している。図 8 から明らかなように、10wt% ナノスラリーのヌッセルト数は、水のそれと一致しており、その値は、

発達した乱流域の伝熱相関式である、ディッタスーベルター (Dittus-Boelter) の式に一致している。この結果は、少なくとも本実験で使用した 10wt% Al_2O_3 -水ベースナノスラリーでは、顕著な伝熱促進効果が得られないことを示しており、重要な結果と思われる。

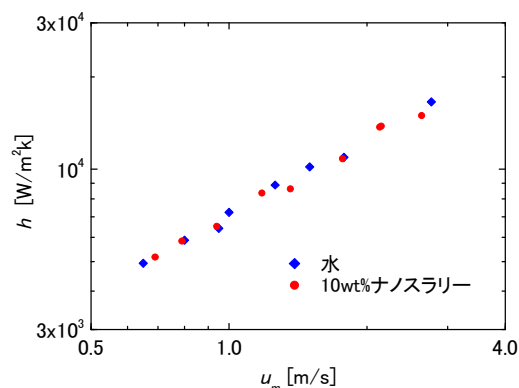


図 7. ナノスラリーの熱伝達率

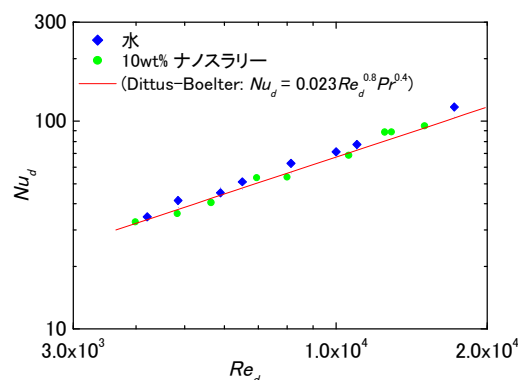


図 8. ナノスラリーのヌッセルト数

(3) ナノスラリーの衝突噴流熱伝達

上述したように、本研究で用いたナノスラリーは管内流の乱流伝熱の促進に対しては、ほとんど効果が認められないことが判った。そこで本研究では、管内流以外の体系でも同様か調べてみることにした。そのような体系として、ここでは衝突噴流の体系を取り上げる。図 9 はその結果の一例として、噴流流速 $u_0=0.23\text{m/s}$ 一定とし、ノズル-平板間距離 H とノズル出口幅 b の比 (H/b) を 9 および 2 としたときの、衝突平板の局所熱伝達率 h_x を、よどみ点からの距離 x をとってプロットしたものである。この図から、ナノスラリーの熱伝達率はよどみ点近傍において水のそれより高い値を示し、とくに噴流のポテンシャルコアが直接平板に衝突する ($H/b=2$) では、約 8% 程度高い値が得られた。しかし、その値は上述したスラリーの熱伝導率の向上割合 7% とほぼ見合っており、ナノスラリーの熱伝導率に伝熱促進の理由を帰すことができる。言い換えれば、ナノスラリー固有の伝熱促進機構は存在しないことを示唆している。

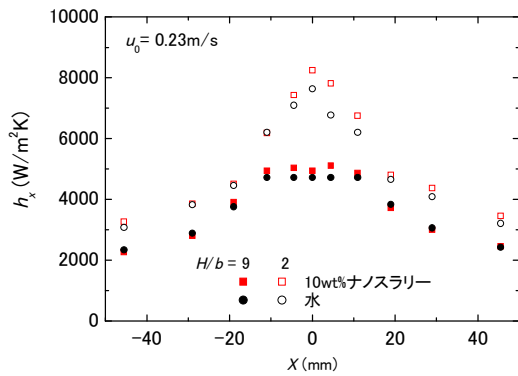


図 9. 衝突噴流の熱伝達率

(4)まとめ

本研究では、円管内強制対流および衝突噴流の伝熱実験を通じて、ナノスラリーの対流伝熱促進効果について論じた。本研究により得られた結果は、いずれもナノスラリーの伝熱促進効果がスラリーの熱物性値、とくにその熱伝導率を考慮することにより、通常対流伝熱相関式で予測される範囲内に留まることを示している。この結果はナノスラリー固有の伝熱促進機構は存在しないこと、また、ナノスラリーを熱交換媒体として使用しても、伝熱特性の飛躍的な向上は期待できないことを示唆している。なお、本研究で用いたナノスラリーは Al_2O_3 -水ベースナノスラリーに限られており、種類の異なる他のナノスラリーでも、本研究と同様な結果が得られるか定かではない。この点については今後検討を要する課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北村 健三 (KITAMURA KENZO)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20126931