
ナノダイヤモンドを用いたナノ流体による消音冷却システムの開発

Development of Cooling System using NanoFluid including Nanodiamond Particles

1 0 6 1 0 1 3

研究代表者 熊本大学大学院自然科学研究科 教授 鳥居修一

[研究の目的]

従来使用されているマイクロチャネルを用いた発熱体の冷却では、ポンプ駆動を使用して作動媒体を循環させているので、ポンプ駆動音が発生する。そこで本研究では、閉ループマイクロチャネルを製作し、流路の一部を加熱することによって自然対流でチャネル内の作動媒体を流動させながら、作動媒体が循環する事でループ全体から放熱させる冷却方法を検討する。

水、オイル、エチレングリコールなどの作動媒体にナノオーダーの金属・非金属粒子を混合させた新しい種類の流体が開発され、Choi[1]によって「ナノ流体(nanofluid)」と名付けられた。ナノ流体は長時間安定な状態を保ち、伝熱性能の高い流体である[2]。Lee[3]の研究によると、粒子径 35nm の Cu 粒子をエチレングリコールに懸濁させたナノ流体を用いて伝熱実験を行った結果、エチレングリコールと比較して体積分率 4% のナノ流体の熱伝導率は 20% 上昇した。また、Xuan と Li[4]は熱流速一定の下、Cu ナノ流体を用いて伝熱実験を行ったところ、水と比較してナノ流体の熱伝達率が大幅に向上していることを確認し、ナノ流体の体積分率が低い場合は管摩擦による損失の増加はほとんどないと主張した。しかし、Pak と Cho[5]の γ -Al₂O₃(粒径 13nm) と TiO₂(粒径 27nm) を水に懸濁したナノ流体を用いた研究では、ナノ流体の体積分率 3%、平均流速一定の下で伝熱性能の評価を行った結果、純水と比較してナノ流体の熱伝達率は 12% 低かった。その理由として、体積分率が高い場合、ナノ流体の粘度は純水と比較して非常に大きくなるのが原因であると

考えられた。また、Yang[6]によるグラファイトナノ流体を用いた研究にも同様の傾向が見られた。この研究に用いたグラファイト粒子は、平均直径 1-2 μ m、厚さ 20-40nm で円盤のような形状をしている。層流下で円管内を流れるナノ流体の伝熱性能を評価したところ、熱伝達率の向上率は熱伝導率の向上率と比較して、非常に低かった。熱伝導率との比較は考慮に入れないうとして、グラファイトナノ粒子のアスペクト比は 0.02 ほどであり、非常に大きいアスペクト比を持つカーボンナノチューブ (CNT) 懸濁液 (>100) の研究結果[7]から、ナノ粒子のアスペクト比はナノ流体の伝熱性能において非常に大きな役割を持っていることが分かった[8]。

そこで、本研究では、マイクロチャネルとナノ流体 (液体にナノダイヤを添加したもの) を用いた冷却法を検討し、高効率冷却システムを構築することを目的とする。ナノダイヤモンド (約 2000W/mK) を使用したナノ流体の伝熱性能が既存のナノ流体による既存の実験結果に比べて性能がどの程度向上するかを、ナノダイヤモンドの添加量に対して検討する。

[実験装置と方法]

(1) マイクロチャネルの製作と流動試験

アルミ基板上に幅が 50 μ m で深さ 500 μ m の溝を切削する [図 1]。この基盤全体を極薄ガラス板で覆う。加工と製作は熊本大学中央実験工場のマイクロマシニング装置で行う。形成されたマイクロチャネル内の流動はほぼ 2 次元であると見なせる。

マイクロチャネルの一部にヒーターを取り

付ける。この流路を垂直に固定し、下端を水容器に入れる。その際、マイクロチャンネル内には、水を充填させておく。その後、ヒーターを加熱させることによって作動媒体は浮力によって流路内部を上昇する。この時のマイクロチャンネル内での上昇高さを測定する。図2に使用した装置を示す。

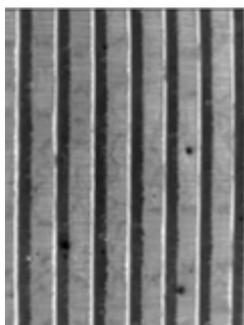


図1 マイクロ溝

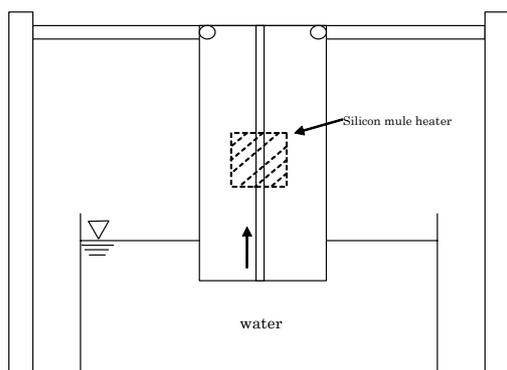


図2 実験装置

(2). ナノ流体を用いた流動試験

図3はナノ流体の伝熱性能実験装置を示している。実装置は冷却装置、電圧調整器、データロガー、流量計、ポンプ、電圧計、内径3.96mmのステンレス管、熱電対及び水槽で構成されている。電圧調整器を使いステンレス管に直接電圧をかけることによってジュール熱を発生させ、流体を加熱した。加熱試験部には6つのK型熱電対を設置しておりそれぞれの位置の管の外壁面温度を計測した。

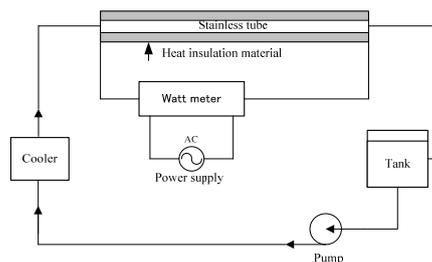


図3 実験装置

(3). マイクロフィンによる放熱量促進効果

市販のアルミ板(肉厚0.5mm)にエッチング微細加工を施して放熱面積を拡大させる。その一例を図4に示す。ここでは、図1のマイクロ加工フィン以外に、格子状のマイクロ加工を行ったフィンも使用した。伝熱板の放熱特性を検討するために使用した実験装置を図5に示す。装置は、断熱容器、伝熱板及び電動ファンからなる。実験では、断熱容器底部に固定されたヒーターに定格電力を与えて加熱させ、その時の容器内部の温度をK型熱電対で測定する。使用するファンは定格で運転する。板に格子状マイクロフィンを加工した場合(ピッチ250μm、深さ280μm、溝幅150μm)、板裏面に耐熱塗料(黒色)を塗布した場合、その放熱板表面を更にファンで冷却した場合について検討した。室内の温度は約24度に固定した。

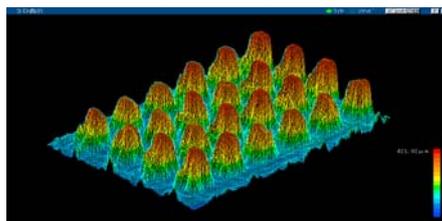


図4 マイクロフィンの加工断面

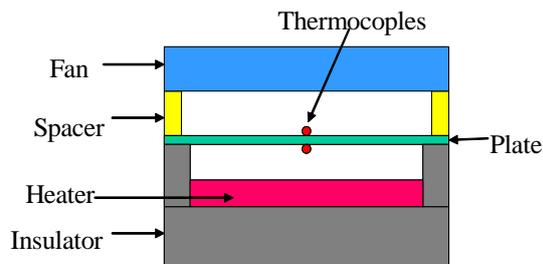


図5 実験装置

[結果と考察]

(1). マイクロチャンネル内の流動実験

$$h = \frac{LT}{A\rho g} \quad (1)$$

ここで、 h は毛管現象で上昇する水の高さ(m), L は溝の周りの長さ(4×10^{-3} m), T は水の表面張力(0.0728N/m), A は溝の面積(1×10^{-6} m²), ρ は水の密度(1000kg/m³), g は重力加速度(9.806m/s²)である。式(1)より、毛管現象では水は 2.9×10^{-3} m上昇することが分かった。一方、そして、マイクロチャンネルの一部を加熱した場合、水は160mmほど上昇した。このことから、マイクロチャンネル内の流動は毛管現象で流動させるには限界があり、浮力によって作動媒体を流動させることができることが確認された。

(2). ナノ流体を用いた流動試験

ナノ流体の熱伝導率はHamilton-Crosser[9]の式(2)を使って予測した。

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

ここで、 k は熱伝導率、 V は体積分率、 f は基礎流体、 s は粒子を表している。 n は経験的に得られた形状係数であり、今研究では $n=3$ とした。

図6にナノ流体の熱伝導率の比較を示す。 Al_2O_3 やCuOと比べてダイヤモンドの熱伝導率の方が優れていることが分かる。したがって、ダイヤモンドナノ流体は他のナノ流体よりも優れた伝熱性能を持っているといえる。

体積分率0.4%、1%、及び水の熱伝達係数の測定結果を図7に纏める。レイノルズ数(Re)が低い場合、異なった作動媒体による熱伝達係数に違いが殆ど見られないが、Reが増すにつれて水と比べてナノ流体の熱伝達率の方が大きくなる事が分かる。体積分率が0.4%のとき、水の熱伝達率に比べて約6%上昇しており、1%のときは約14%上昇している。また、体積分率の

増加によっても熱伝達係数は増加している。これによりナノ流体は単層流と比べて優れていると思われる。

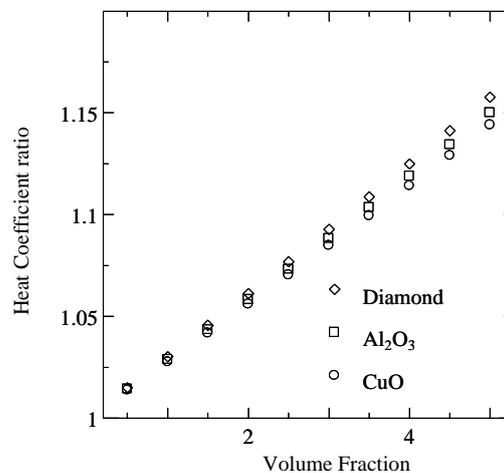


図6 ナノ流体の熱伝導率

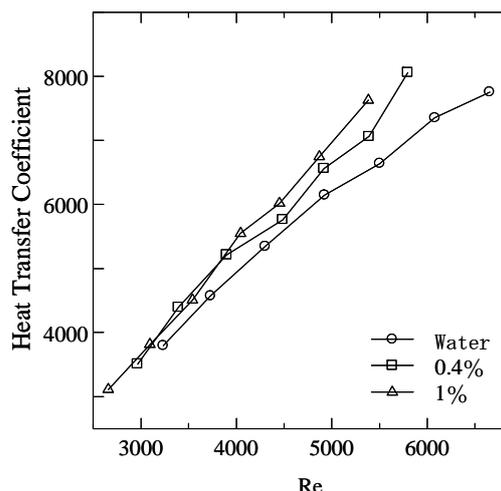


図7 ナノ流体の熱伝達係数とレイノルズ数との関係

一連の結果からナノ流体は熱伝導率の増加と同時に熱伝達係数も増加することから、ナノ流体は他の作動媒体に比べて伝熱性能がよいかどうかについては明確でない。そこで、無次元数を導入して再検討する。

図8はヌセルト数(Nu)とレイノルズ数との関係で一連の結果を纏めたものである。Reが増加するにつれて、ナノ流体のNuも増加してることが分かる。

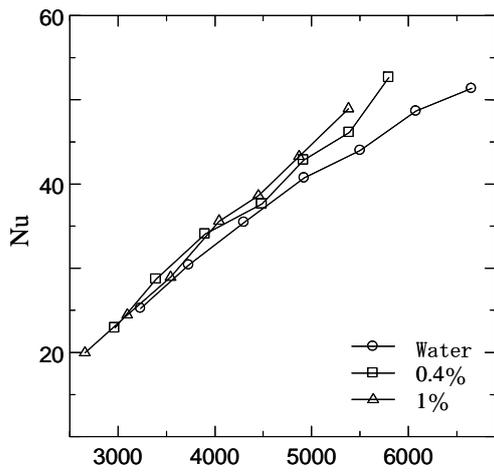


図8 ナノ流体のヌセルト数とレイノルズ数との関係

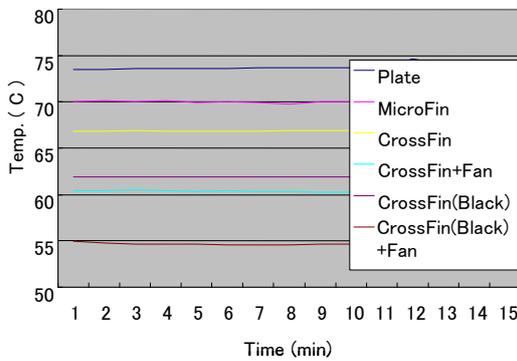


図9 各種放熱面の放熱特性

(3). マイクロフィンによる放熱量促進効果

図9は、断熱容器内温度と放熱面の関係を纏めたものである。市販のアルミ板からの放熱に比べて、アルミ板にマイクロ加工することによって断熱容器内の熱がアルミ板から放出され、内部温度が急激に低下していることが分かる。一連の結果から、断熱容器内部温度は、アルミ板を黒色に着色して格子状マイクロフィン加工し、その面を電動ファンで強制的に冷却した場合に急激に低下している。即ち、市販のアルミ板や通常マイクロフィン加工を施した場合よりも、格子状マイクロフィンにすることで、容器内部温度は低下する。更に、アルミ板に格子状マイクロフィン加工を施し、ヒーターからの放射熱を吸収しやすくするために黒塗料を鋼板裏面に塗布して、更にマイクロフィン側を強制

的にファンで冷却することで、鋼板からの放熱量を大きく増やすことができる。但し、ファンを駆動させれば音が発生するので、静寂を確保しつつ放熱性能を高めるには、アルミ板に格子状マイクロフィン加工を施し、黒塗料をアルミ板裏面に塗布する場合であることが分かった。

[まとめ]

ナノダイヤモンド粒子を使用してナノ流体の伝熱性能とマイクロフィンの放熱性能について実験を行った。その結果、ナノ流体は単層流と比べて優れた伝熱性能を示す。更に、マイクロチャンネルを使用して作動媒体と浮力によって駆動させることが可能であり、その作動媒体に単相流ではなくナノ流体を使用するための基礎データが得られた。

[参考文献]

- [1] U.S., Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, ASME FED Vol.231, pp.99-103, 1995.
- [2] K. Khanafer, K. Vafai, and M. Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.46, pp.3639-3653, 2003.
- [3] S. Lee, S.U.S. Choi, S. and Li, J.A. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, J. Heat Transfer, Vol.121, pp.280-289, 1999.
- [4] Y. Xuan, and Q. Li, Investigation on convective heat transfer of nanofluids, Journal of Heat Transfer, Vol.125, pp.151-155, 2003.
- [5] B. Pak and Y. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental Heat Transfer, Vol.11, pp.151-170, 1998.
- [5] Y. Yang, Z.G Zhang, E.A. Grulke, W.B. Anderson and G. Wu, Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.48, pp.1107-1116, 2005.
- [7] Y.Ding, H.Alias, D.Wen, R.A.Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.49, pp.240-250, 2005.
- [8] X.-Q. Wang and A.S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, Int. J. Thermal Sciences, Vol.40, pp.10-17, 2006.
- [9] A.E. Bergles, Recent development in convective heat transfer augmentation, Appl. Mech. Rev. Vol.26, pp.675-682, 1973.

