

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630060

研究課題名(和文) 10 MW/m²の除熱を可能とする空気冷却の研究研究課題名(英文) Study of air cooling to remove high heat flux of 10MW/m²

研究代表者

圓山 重直 (MARUYAMA, Shigenao)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：80173962

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：高発熱密度が問題となっている電子機器冷却を空気流で実現するために、断熱膨張で生じる低温の超音速流を利用し、さらに流路のマイクロ化によって境界層厚さの低減を図った新しい高熱流束冷却機構の実現可能性について評価した。その際、従来技術は計測不能であったマイクロチャンネル内超音速流の密度場の高精度な可視化計測を、位相シフト顕微干涉計により成功した。さらに、本計測と数値解析結果との比較から、本研究で提案したマイクロ超音速ノズルを有するマイクロ熱交換器は、空冷ながら1.5MW/m²もの冷却性能を有することが示された。

研究成果の概要(英文)：To achieve an air cooling system high heat flux for the electronics cooling, the supersonic air flow with low temperature, which was generated by an adiabatic expansion, and micro-channel were applied to micro-heat exchanger. By using a microchannel, the boundary layer thickness decreases and convective heat transfer coefficient is improved. The density distributions of the supersonic air flow inside the micro-channel, which was impossible to measure by conventional technique, were visualized and measured by using phase-shifting interferometer. From the comparison between the results of experimental and calculated, the cooling performance was evaluated. Then, it was evaluated as 1.5 MW/m² despite the air cooling.

研究分野：熱流体工学

キーワード：電子機器冷却 マイクロチャンネル 超音速流 干涉計

1. 研究開始当初の背景

電子デバイスの高密度化が著しく、それに伴い電子機器の除熱がデバイス高性能化のボトルネックとなっている。スーパーコンピュータのCray-1で代表される、フロンを用いた沸騰伝熱によるチップ冷却も行われてきたが、取り扱いが難しく信頼性の向上が得られないことから、現在はコンピュータ室全体を空調機で冷却してデバイス冷却を行っている。この問題はデータセンターでも同様であり、2011年には米国のデータセンター冷却のために原発5基分の電力が消費されている。さらに、大型のデータセンターでは電力消費の半分が冷却に費やされている(Macinichen, J.P., et al., *Applied Thermal Eng.*, 2012)。

そのような中、研究代表者は早くからマイクロチャネルの伝熱に着目しており(円山, マイクロマシンの熱流動, 機械の研究 2000)、その原理を応用した超断熱システムを提案した(Maruyama, S., et al., *Int. J. Heat and Mass Transf.*, 1991)。また、光の干渉とデジタル画像処理を組み合わせ、好感度に微細な温度・濃度場をその場観察するユニークな観測システムも開発している(Maruyama, S., et al., *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1999)。

そこで本研究では、これら知見を応用し、空気による電子機器デバイスの超高熱流束冷却技術の確立を提案する。ここでは、5気圧程度に昇圧した常温空気を流路幅約200 μm のマイクロ超音速ノズルで断熱膨張させ、低温高速の空気流を生成し、マイクロチャネル内に流す。この低温空気流による冷却により、10MW/m²の熱流束でも基板温度を80°C以内に保つことを目指す。しかし、これまでマイクロチャネル内超音速流の流動様相、特に加熱壁面下での超音速流による熱交換機構は明らかとなっていない。さらに、マイクロチャネル内超音速流の密度場の高精度な可視化計測も報告されておらず、その流動場の特徴は明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

そこで、電子機器の冷却を目的として、マイクロ超音速ノズルを用いた断熱膨張による低温高速空気をマイクロチャネル内に流すことにより、基板面積基準の熱流束を10MW/m²として、加熱面を80°C以下に保つことのできる超高熱流束冷却機構の実現を目指す。冷却機構の解明のためには、マイクロチャネル内の温度分布や速度分布計測が欠かせないが、マイクロチャネル内にはプローブが入らず、直接的な計測を行うことは困難である。一方で、光学的手法においては、確保できる光路長が短く超音速流れの衝撃波前後でもHe-Neレーザー光の約1波長分という、ごく僅かな光路差しか発生しない。そのため、マイクロチャネル内の超音速流の流動様相は未だ不明瞭であり、これを研究グループで開発した位相シフト顕微干涉計を用

いて高精度に可視化計測を実施する。また超音速マイクロチャネルを利用した冷却フィンを検討し伝熱量を評価する。

3. 研究の方法

本研究では、(1)数値解析により断熱膨張マイクロノズル形状の検討とマイクロチャネル内超音速流の流動様相、および伝熱機構の解明を行い、(2)研究グループで開発した位相シフト顕微干涉計によって、マイクロ超音速ノズル内およびマイクロチャネル内の密度場について可視化計測を実施した。(1)については、先ず、断熱膨張流を得るための簡易なノズル形状を提案し、これをチャネル壁面における熱輸送能力の観点から、一様な超音速流を得るために広く用いられているラバルノズルの場合と比較するなど、ノズル形状の検討を実施した。(2)については、マイクロ超音速ノズルを有するマイクロチャネルは東北大学ベンチャービジネスラボラトリー、および東北大学大学院工学研究科附属マイクロ・ナノマシニング研究教育センターの設備を使用して作製した。(3)これら(1)、(2)の研究成果に基づく新たにマイクロ超音速ノズル形状を提案し、これを有するマイクロチャネル熱交換器について冷却性能評価を行い、本研究の提案する高性能冷却機構の実現可能性を評価した。

4. 研究成果

先ず、マイクロ超音速ノズルの形状について数値解析による流動様相、特に加熱壁面とマイクロチャネル内超音速流との間の熱輸送について評価した。一様な超音速流の生成のために、超音速風洞などで一般に広く用いられているラバルノズルと、本研究で提案した簡易な円弧によって構成されるバンプノズルについて、圧縮性流体の数値解析を行い、混合平均温度、およびヌセルト数を計算した。それらの分布を比較した結果をFig. 1に示す。結果より、バンプノズルとラバルノズルにおいて変化の様相は異なっているものの、平均的な値に大きな差がないことが明らかになった。混合平均温度、ヌセルト数ともに概ね

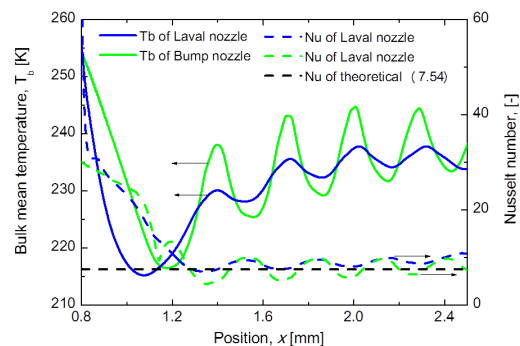


Fig. 1. Bulk mean temperature and Nusselt number distribution at the downstream of the nozzle section.

同程度の値となり、熱輸送能力も概ね同程度であることが示唆された。パンプノズルは、ラバルノズルのように幅広な縮小部を持たないため、基板面積当たり、より多くの流路を配置することが可能となっている。つまり、簡易な円弧によって構成されるパンプノズルの形状でも、断熱膨張による低温流生成という役割には充分であり、実用化にあたって重要な知見が得られた。

次に、パンプノズルの有用性についてより詳細に検討するために、位相シフト顕微干涉計を用いたマイクロチャンネル内超音速流の密度場の高精度可視化計測を実施した。流路は東北大学のマイクロマシニングセンターの設備で作成した。光学計測を行うにあたり、光軸方向の長さ、すなわち流路深さが重要である。加工の最大深さである $500\ \mu\text{m}$ で流路を加工し、光学計測用マイクロチャンネルを作成した。光軸方向長さ $500\ \mu\text{m}$ では、衝撃波前後でも He-Ne レーザー光の約 1 波長分という、ごく僅かな光路差しか発生しないため、従来技術では密度差を検知することが困難である。そこで本研究では位相シフト技術を用いて 1 波長以下の位相差を解像して計測を行った。まず予備計測として、ノズル部を有

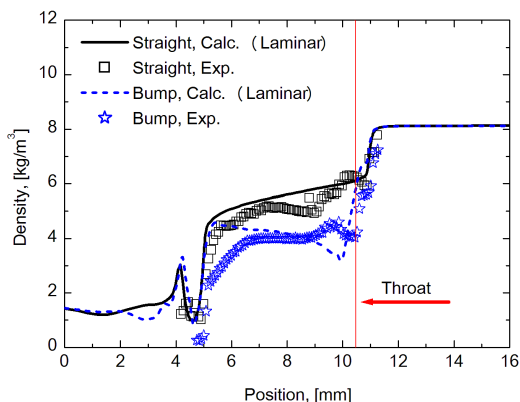


Fig. 2. Comparison of the density distributions between the experimental and calculated results.

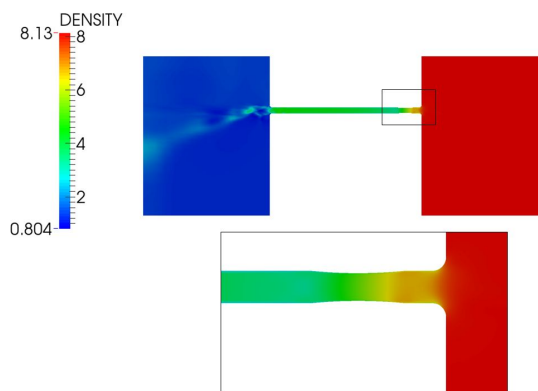


Fig. 3. Density distribution of the entire micro-channel from the numerical simulation.

さないダクト状流路に対して、また本研究で対象としているパンプを有した流路に対して計測を行った。さらに計測結果の妥当性を検証するため、数値解析も合わせて行った。Figure 2 に示すように、計測結果と数値解析結果は良い一致を示しており、位相シフト顕微干涉計を用いたマイクロチャンネル内超音速流の密度場計測の有効性を示した。Figure 3 はパンプを有した流路での密度分布の数値解析結果である。パンプノズルにおいては、マイクロチャンネル下端の位置 5mm において、強い圧縮性の影響から差異が生じているものの、その値は概ね一致している。圧力差についてはダクト状流路およびパンプを有した流路とも同じであることから、パンプを有した流路内はより低温の流れが生じていることがわかる。

上述の結果に基づき、数値解析により得られた温度場の情報、および次元のエネルギー保存式を用いて Fig. 4 に示すようなマイクロ熱交換器について冷却性能評価を実施した。熱交換器は 10mm 角のアルミニウム製を仮定した。Figure 5 に示すように、フィン幅などを最適化した結果、本マイクロ熱交換器は、空冷ながら $1\text{MW}/\text{m}^2$ を超える冷却性能を有することが明らかとなった。

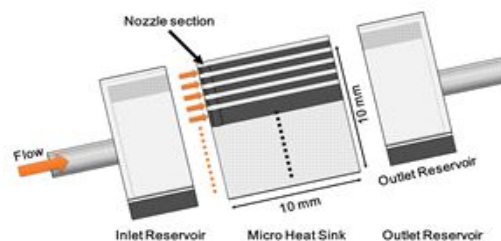


Fig. 4. Schematic diagram of the concept of micro heat sink. Upper plate of micro heat sink is not shown in this figure because of the viewability.

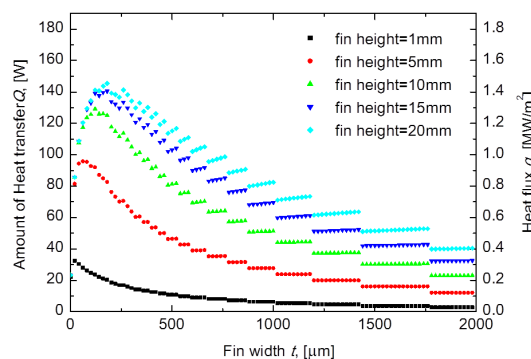


Fig. 5. Heat flux of the micro heat exchanger on the fin thickness for 1, 5, 10, 15, 20mm in fin height.

さらに、より簡易、かつ工業的に製造が容易なマイクロ超音速ノズル、およびマイクロチャンネル形状について数値解析により検討を実施した。この結果、ノズル部での低温高速な空気流の生成は上述のバンプノズルと同程度であるが、マイクロチャンネル全体の圧力損失の低減、生成した低温流の維持を図ることが可能となった。また、この新しいノズル、チャンネル形状を有するマイクロ熱交換器について冷却性能評価を実施した結果、 1.5MW/m^2 の除熱性能を有することが明らかとなった。今後は更なる流路の最適化や、フィン高さや流路本数などの最適化を行うことで 10MW/m^2 の超高性能冷却機構実現が期待できる。

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1件)

1. Y. Takahashi, J. Okajima, Y. Iga, A. Komiya, and S. Maruyama, Preliminary experiment of supersonic micro-channel gas flow visualization by using Interferometer, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol. 9, p. JFST0069, 2014.
DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0069

[学会発表](計3件)

1. Y. Takahashi, J. Okajima, Y. Iga, A. Komiya, and S. Maruyama, Measurement of Density Field of Supersonic Flow Inside a Micro-Channel by Phase Shifting Interferometer, The 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014.11.06, Krabi, Thailand.
2. Y. Takahashi, J. Okajima, Y. Iga, A. Komiya, and S. Maruyama, Density Measurement of Supersonic Air Flow inside a Bumped Micro-channel Using Interferometer, 11th International Conference on Flow Dynamics, 2014.10.08, Sendai, Japan.
3. Y. Takahashi, J. Okajima, Y. Iga, A. Komiya, and S. Maruyama, Preliminary Experiment of Supersonic Micro-channel Gas Flow Visualization by Using Interferometer Tenth International Conference on Flow Dynamics, 2013.11.26, Sendai, Japan.

[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

圓山 重直 (MARUYAMA, Shigenao)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号: 80173962

(2)研究分担者

小宮 敦樹 (KOMIYA, Atsuki)
東北大学・流体科学研究所・准教授
研究者番号: 60371142

伊賀 由佳 (IGA, Yuka)
東北大学・流体科学研究所・准教授
研究者番号: 50375119

岡島 淳之介 (OKAJIMA, Junnosuke)
東北大学・流体科学研究所・助教
研究者番号: 70610161