

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14167

研究課題名(和文) 熱流束 1 MW/m<sup>2</sup>を超える電子機器用空冷フィンの挑戦研究課題名(英文) Challenge to air-cooling fin for electronic device with exceeding 1MW/m<sup>2</sup> of heat flux

研究代表者

圓山 重直 (Maruyama, Shigenao)

東北大学・流体科学研究所・名誉教授

研究者番号：80173962

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000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の冷却問題に対し、流路内に設けたマイクロノズルを通過し断熱膨張する際に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高熱伝達化を図った新しい高熱流束冷却機構を評価した。製作に適した形状を有するマイクロノズルを数値解析により評価し、流動様相および伝熱過程を明らかにした。またマイクロノズルを有したヒートシンクを実際に製作し、マイクロノズルを有無による違いや伝熱量を実験的に評価した。実験によりマイクロノズルの有効性を示し、入口ゲージ圧0.3MPaG、加熱面温度 80 の条件で、0.761MW/m<sup>2</sup>の熱流束を達成した。

研究成果の概要(英文)：To realize a high heat flux air cooling system for the electronics cooling, low temperature supersonic flow, which was generated by an adiabatic expansion, and micro-channel were applied to micro-heat exchanger. The boundary layer thickness, which is related with an amount of heat transfer, is decreasing with the downscale. At first, the flow field and heat transfer in the micronozzle which has the suitable shape for manufacturing were evaluated by numerical simulation. Furthermore, the heat sink with micronozzle was manufactured and its cooling performance was evaluated by experiment. The effectiveness of micronozzle was clarified by the comparing experiment with heat sink without micronozzle. The heat sink with micronozzle showed the cooling performance of 0.761MW/m<sup>2</sup> in the condition of 0.3MPaG of inlet pressure and 80 degree C of heat transfer surface.

研究分野：熱工学

キーワード：電子機器冷却 マイクロチャネル 超音速流 高熱流束冷却

### 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。最近のデバイスの熱流束は、高密度化により原子炉の燃料棒を超えて、1 MW/m<sup>2</sup> 以上になっている。

電子機器冷却で問題なのは、原子炉やロケットノズルのように大温度差によって高熱流束を実現できないことである。デバイスと環境温度の間で、高エネルギー密度の機器を冷却しなければならない。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の冷却も行われたが、信頼性の向上が得られない。水を使ったデバイス冷却システムもあるが、取り扱いが難しい。電子機器の冷却は常温空気が望ましいが、通常のフィンによる冷却では、基盤基準の冷却性能に限界がある。実際の電子機器では、外気とデバイスの温度差が 50°C 程度で、基盤基準の熱流束は 50 kW/m<sup>2</sup> が限界である。

本研究は、従来の空冷フィンより 20 倍高性能な電子機器デバイスの超高熱流束冷却にチャレンジする。つまり、7 気圧に昇圧した常温空気をマイクロ超音速ノズルで断熱膨張し、低温高速の空気流を得て、マイクロチャンネル内に流す。この超音速低温空気流による冷却により、1 MW/m<sup>2</sup> の熱流束でも基盤温度を 100°C 以内に保つことの出来る熱交換機構を明らかにする。

### 2. 研究の目的

本研究は、マイクロデバイスの制作技術と空気による高熱流束冷却というチャレンジングなテーマに対して、従来高速流体で扱う超音速流を組み合わせることによって初めて可能となるものである。0.7 MPa の常温空気をマイクロノズルで膨張させ約 -50°C の超音速流を得て、それを熱伝達率が著しく大きいマイクロチャンネルに流して冷却を行う着想は画期的である。

気体による高熱流束冷却が可能になれば、より単純かつ安全性の高い冷却システムの構築が可能となるため、冷却コストの低下やより広範囲での応用が期待できる。そこで本研究では、マイクロノズルヒートシンクを製作し、冷却性能を実験的に評価する。圧延ローラーとプレス金型を用いたヒートシンクを製作し、マイクロノズルヒートシンクの性能試験を行い、結果について考察する。

### 3. 研究の方法

本研究を遂行するに当たり、数値解析により断熱膨張マイクロノズルの最適化とマイクロチャンネル内の伝熱機構の解明を行い、高熱流束を実現するマイクロヒータの製作、フィン高さの著しく大きいマイクロフィンアレーの開発、これらの研究で最適化した形状を用いて、多列のマイクロチャンネル熱交換器を制作し、実際のチップ冷却を想定した高熱流束冷却実験を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 非対称縮小拡大ノズルの解析

まず、汎用熱流体解析ソフトウェア ANSYS FLUENT によりノズル内の熱流動現象を解析した。マイクロノズル壁面は 350 K の等温壁とし、入口圧力、出口圧力、および入口全温度をそれぞれ 0.7 MPa、0.1 MPa、300 K とした。マイクロノズルの概形は図 1 に示す通り、流路幅約 250 μm、長さ 6000 μm である。また、マイクロノズル入口直後 200 μm から、片側壁面にのみ絞り比 1.18 のバンプを設置し、超音速流生成のための絞り部としている。衝撃波の発生を抑制し、かつ断熱膨張により急激に低下させた気流温度を低温のままに保つため、約 0.3 度の緩やかな拡がりの勾配を設定した。

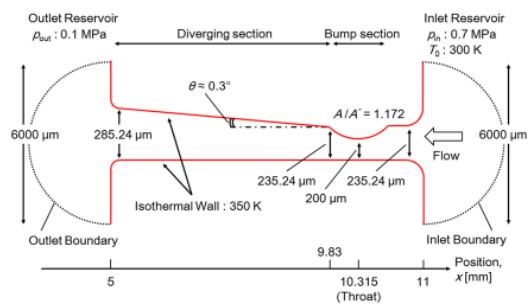


図 1. マイクロノズルの解析モデル

マイクロノズル内の混合平均温度分布  $T_b$ 、およびマイクロノズル壁面における熱伝達率  $h$  の分布を図 2 に示す。混合平均温度は、ノズル縮小部における断面積の減少、およびノズル拡大部における断熱膨張による空気流の膨張、加速に伴い急激に減少しており、マイクロノズル内での低温流の生成が確認できた。ノズル下流において、衝撃波が発生し混合平均温度が増加した。その後、マイクロノズル下流端との圧力差、および断面積の緩やかな拡大により、220 K 程度で概ね一定となっており、ノズル部で生成した低温流を維持できていることが示された。電子機器冷却を考慮した場合、その性質から 350 K 程度の上限温度が存在するため、高熱流束の冷却デバイス実現の上で、ノズル部で生成した低温流を維持することは欠かせない。片側バンプノズルの存在により、ノズル部における熱伝達率の熱伝達率分布には上下壁で差異が生じている。さらに、ノズル部では温度境界層が十分に発達していないため、混合平均温度が比較的高いにもかかわらず、高い熱伝達率となっている。ノズル部の下流域では、マイクロスケール化の効果もあり、空冷にもかかわらず 1000 W/(m<sup>2</sup>·K)程度と高い熱伝達率が実現している。

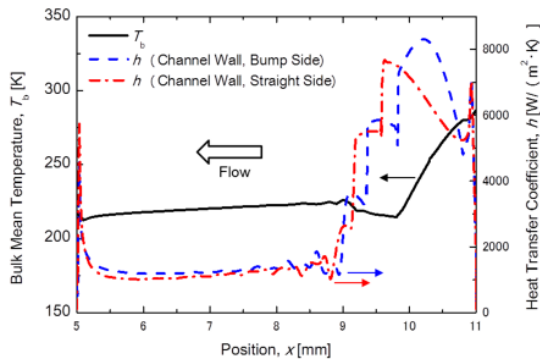


図 2. 混合平均温度と熱伝達率の空間分布

片側バンプノズルを有するマイクロノズルによって構成されるヒートシンクに関して冷却能力を評価した。ヒートシンクの底面は  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  とし、フィン間の形状は、図 1 に示したマイクロノズルの形状とした。また、フィンの幅、上下端厚さは  $200\ \mu\text{m}$  とし、このとき、流路は 22 本となる。フィン付伝熱面における熱流束、および断面積様の矩形フィンにおけるフィン効率をそれぞれ算出した。この際、冷却に用いる空気流は層流であり、ノズル下流の緩やかな流路幅の拡大、およびノズルの凸部による断面積への影響は無視できるものとし、十分に発達した温度場における、等温加熱平行平板間のヌセルト数の漸近値 7.54 を使用し、フィンの熱伝導率は  $237\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  とした。空気の熱伝導率は、混合平均温度  $220\ \text{K}$  における値として  $1.97 \times 10^{-2}\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  を使用した。得られたフィン効率、およびヒートシンク底面における熱流束を 図 3 に示す。フィン高さの増加に伴い、伝熱面が増加し、またフィン効率が減少することから、熱流束は一定値に収束している。このとき、空冷デバイスにもかかわらず、約  $6.9\ \text{mm}$  のフィン高さで  $1\ \text{MW}/\text{m}^2$  を達成しており、また、フィン高さ  $20\ \text{mm}$  では、約  $1.5\ \text{MW}/\text{m}^2$  に達することが示唆された。

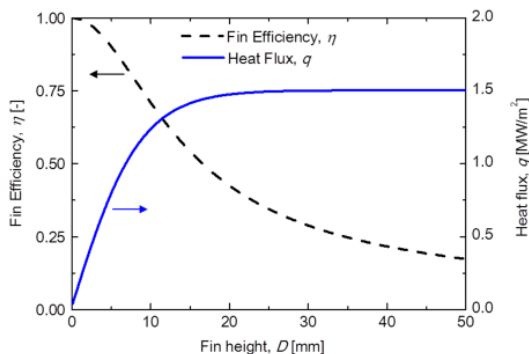


図 3. マイクロヒートシンクの熱流束とフィン効率

## (2) マイクロヒートシンクの製作

数値解析結果を踏まえて、図 2 に示すような流路形状を決定した。片側の勾配を省略し、流路幅を  $0.2\ \text{mm}$  とした。また、流路部とスロート部の断面積比は 1.17 であるため、バンプ高さを約  $0.03\ \text{mm}$  に変更し、断面積比が同じく 1.17 となるようにした。一般的には等エントロピー膨張後のマッハ数は断面積比に依存するため、断面積比を等しくすることで、生じる超音速流のマッハ数も等しくなる。図 3 はマイクロチャンネルヒートシンクの寸法である。フィンの製作には圧延ローラーと、プレス金型を用いた。性能比較のために、バンプを付けたバンプフィンと、つけていないストレートフィンの二種類を製作した。製作したフィンには、厚さ  $0.2\ \text{mm}$  のテフロンシートを挟んだ上で積層し、クリームはんだを塗った厚さ  $0.5\ \text{mm}$ 、縦横  $10\ \text{mm}$  の上下板と共に電気炉で  $300\ ^\circ\text{C}$  に加熱し、冷却することではんだ付けを行った。流路数は 14 本である。製作後、光学顕微鏡を用いて厚さと流路幅を測定した。ストレートフィンは平均厚さ  $0.420 \pm 0.02\ \text{mm}$ 、平均流路幅  $0.175 \pm 0.04\ \text{mm}$  であり、バンプフィンは平均厚さ  $0.425 \pm 0.02\ \text{mm}$ 、平均流路幅  $0.216 \pm 0.05\ \text{mm}$  であった。実際のヒートシンクの寸法には  $1/100\ \text{mm}$  オーダーの誤差およびバラつきが存在していた。この原因としては、まずローラーおよびプレス機による圧力が均等に加わらず、厚さにばらつきが出てしまったことや、積層したフィンの固定時に用いたバイスの力で、流路幅が変化してしまったこと等が考えられる。本研究では、これらのヒートシンクを用いて性能試験を行った。

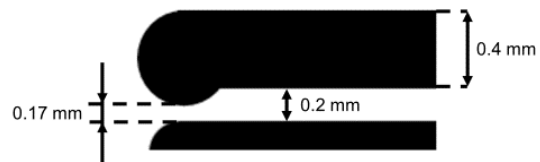


図 4. 製作したマイクロノズル形状

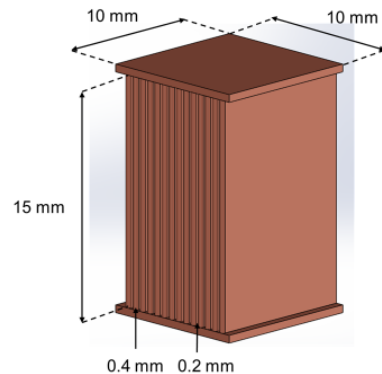


図 5. マイクロチャンネルヒートシンクの寸法

### (3) 性能試験

試作した超音速マイクロヒートシンクと開発したヒーターブロックを用いて、冷却試験を行った。ヒートシンクに空気を流入させ、熱流束の計測を行った。実験装置の概略を図6に示す。ヒーターブロック内に設置した熱電対により計測される温度分布より一次元熱伝導を仮定することで熱流束を算出した。また、ヒートシンク底面温度は算出した熱流束を用いて、温度分布を外装することで求めた。実験条件は、入口ゲージ圧 0.3MPaG、入口流体温度 11.1°C、流路数 14 本、加熱面温度 80°C、加熱面面積 100mm<sup>2</sup>である。超音速マイクロヒートシンクの優位性を示すため、同様な製法で突起部が無いストレートフィンヒートシンクと比較した。

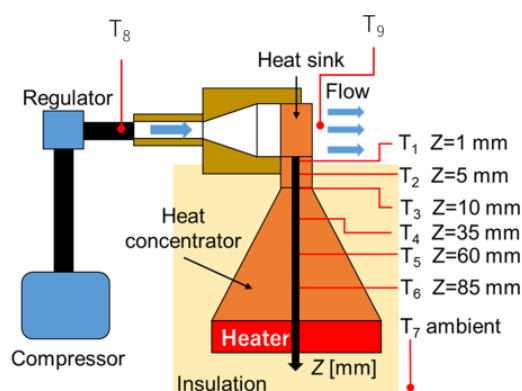


図 6. 実験システム

図7に冷却実験の結果を示す。図中の破線は、空気流を層流と仮定した場合の伝熱量の理論値である。図7よりマイクロノズルヒートシンクはストレートフィンヒートシンクよりも高い伝熱量を有していることが分かった。本研究で製作した超音速マイクロノズルヒートシンクは、入口ゲージ圧 0.3 MPaG、流体温度 11.1 °C、流路数 14 本、加熱面温度 80 °C、加熱面面積 100 mm<sup>2</sup> の条件で、0.761 MW/m<sup>2</sup> の熱流束を達成した。一方でその値は予測される理論値よりも小さい値であった。実験条件の補正なども考慮し、比較した結果、超音速マイクロヒートシンクはストレートフィンヒートシンクよりも 12~25% 大きな熱流束を示すことが明らかになり、超音速マイクロノズルの効果が明らかになった。その一方で、予測値よりも熱流束が小さいことについて、ノズルの突起部の転写が不十分であることが考えられる。金型をより硬い材料で製作するのが考えられるが、一般に材料の硬度が増すほど、今回のようなマイクロメートルオーダーの微細な加工は難しくなるため、量産を踏まえたプレス加工以外のバンプ転写法を考案する必要がある。

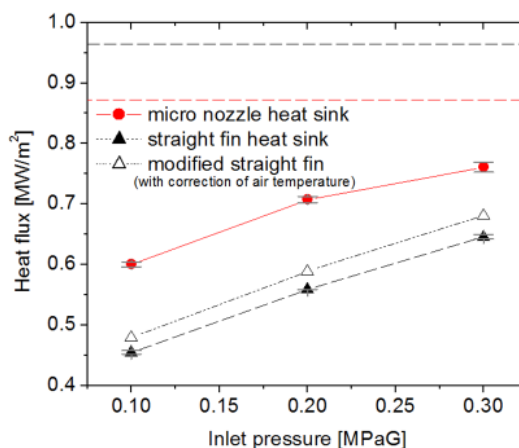


図 7. 冷却実験結果

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Yuya Takahashi, Lin Chen, Junnosuke Okajima, Yuka Iga, Atsuki Komiya, Wu-Shung Fu, and Shigenao Maruyama, Design and Feasibility Analysis of Microscale Bumped Channel with Supersonic Flow for Electronics Cooling, Journal of Microelectromechanical Systems, 査読有, Vol. 25, pp. 1033-1040. (2016)  
DOI: 10.1109/JMEMS.2016.2613942
2. Yuya Takahashi, Lin Chen, Junnosuke Okajima, Yuka Iga, Atsuki Komiya, and Shigenao Maruyama, Interferometric measurement and numerical comparisons of supersonic heat transfer flows in microchannel, Applied Thermal Engineering, 査読有, Vol. 109, pp. 582-590. (2016)  
DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.108

### 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・名誉教授  
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・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