

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：82723

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14179

研究課題名(和文) バイブレーションリブを用いたサブミリチャンネル内の伝熱促進手法の提案

研究課題名(英文) Heat transfer enhancement by using vibration-ribs in a submillimeter channel flow

研究代表者

山田 俊輔 (Yamada, Shunsuke)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・システム工学群・准教授)

研究者番号：90516220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：電子機器が安定して動作するには、発熱部品が動作保証温度を超えないように冷却する必要がある。そこで本申請課題では、小型電子機器を想定し、圧力損失を抑制し、かつ熱伝達率を向上させる小型伝熱促進制御デバイスを開発する。これまで伝熱促進が報告されているリブ形状に着目し、 piezo素子を駆動源としたリブ形状が振動するバイブレーションリブを製作し、ミリオーダーのチャンネル流路を用いて層流域の伝熱特性を評価した。その結果、バイブレーションリブの駆動周波数が700Hzで熱伝達率が最も増加した。これは、擾乱周波数が流れ場の不安定性を促進し乱流に遷移させ、熱伝達が12-15%増加することがわかった。

研究成果の概要(英文)：In order to stabilize the operation of the electronic device, it is necessary to cool so that the heat generating component does not exceed the permissible operating temperature. Therefore, small control device which suppresses pressure loss and improves heat transfer coefficient is developed assuming small electronic equipment. It has been reported that heat transfer was enhanced by the parallel ribs in the channels. In this study, the vibration-ribs which oscillated a plate with a piezoelectric element as a driving source were fabricated, and the characteristics of heat transfer by the vibration-ribs were evaluated in a mini-channel flow. As a result, the heat transfer coefficient had maximum value when the oscillating frequency of the vibration rib was 700 Hz. Because the disturbance frequency promotes instability of the flow field and transited from laminar to turbulence flow, the heat transfer coefficient decreased by 12-15% in comparison with no oscillation.

研究分野：熱流体工学

キーワード：電子機器 熱伝達 乱流遷移 伝熱制御 不安定性解析

1. 研究開始当初の背景

電子機器が安定して動作するには、発熱部品が動作保証温度を超えないように冷却する必要がある。電子機器に使用される集積回路の高速化・高性能化に伴い、発熱密度は増加傾向にある。今後、さらなる電子機器の小型・薄型化のためには、集積回路の冷却手法が重要な課題となる。電子機器で使用される冷却手法としては、空冷・水冷方式や相変化を利用したヒートパイプが挙げられる。空冷方式は、放熱面積を拡大させたヒートシンクを集積回路上に設置し、比較的低コストであり、メンテナンスが容易であることから、多くの電子機器で採用されている。しかし、金属部分の熱伝導のロスが大きく、集積回路に近い部分しか効率よく放熱することができないため、さらに放熱量を向上させるためには、金属面と空気との熱伝達の促進が期待される。

2. 研究の目的

本研究は、ヒートシンクのフィン間や省スペースな電子機器内に設置した集積回路を冷却する小型アクチュエータを開発する。電子機器内の流れは層流または弱い乱流であることから境界層内に微小擾乱を導入することが可能であれば、強い乱流に遷移し、熱伝達率を増加させ、伝熱促進が期待できる。伝熱促進手法とし、ボルテックスジェネレータや三角翼やリブといった突起物を利用した手法が提案されているが、狭い隙間の流れ場では、圧力損失が増大し、伝熱促進の費用対効果の低下が懸念される。そこで、上下振動が可能なプレートを設置し、壁面からリブ形状を出し入れすることにより、境界層内に微小擾乱の導入が可能なバイブレーションリブを提案する。本研究の最初の段階として、ミリオーダーの二次元平行平板チャンネルにバイブレーションリブを設置し、壁面加熱した際の熱伝達特性並びに流れ場を調査し、バイブレーションリブの特性を定量的に評価することが目的である。

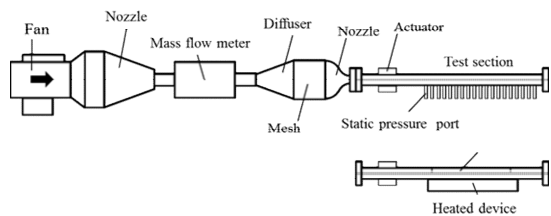
3. 研究の方法

3.1 実験装置

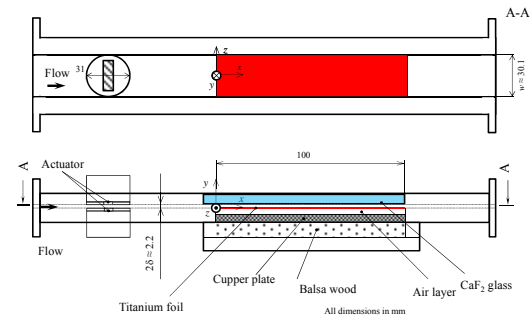
図1にバイブレーションリブを評価するための風洞・加熱実験装置の概要を示す。図1(a)の風洞実験装置は小型送風機、流量計、ディフューザー、整流板、ノズル、助走区間、流路で構成される。ノズル下流の計測部はPIV測定用、壁面が加熱可能であり温度測定用の流路と交換可能である。流路の-span方向長さ  $w \approx 30.1$  mm、流路高さ  $2\delta \approx 2.2$  mm から、アスペクト比  $\varepsilon = 13.7$  である(流路矩形断面の水力直径  $D = 4.2$  mm)。ノズル下流 410 mm から 510 mm に加熱模型を設置し、加熱開始点の流路高さ中央、及びspan中央を座標原点に設定した。ノズル下流 65 mm のspan中央に、直径 30.6 mm の piezo素子を駆動源としたバイブレーションリブを流路の両壁面

に設置した。加熱模型の壁面の温度を赤外線カメラで温度測定するため、 $x = -10 \sim 110$  mm の領域を  $\text{CaF}_2$  (フッ化カルシウム) の透明窓とし、赤外線カメラで流路内部の壁面温度の計測が可能となる。流量  $Q$  を 26 L/min に固定し、断面平均流速  $u_m$ 、並びに流路の半値高さ  $\delta$  を代表値としたレイノルズ数  $Re$  は、 $Re = 380$  ( $Re_D = u_m D / \nu = 1450$ ) で実験を行った。

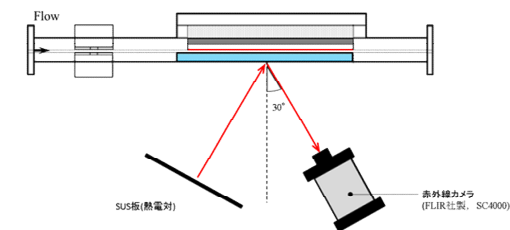
図1(b)に温度測定用の加熱装置を示す。図1(b)に示す加熱装置の壁面は、厚さ  $2.1 \mu\text{m}$  のチタン箔をヒーターとし、等熱流束加熱条件で加熱可能な模型を製作した。加熱した熱流量  $Q_{in}$  は、0 - 5 W に設定した。図1(c)のように、加熱模型壁面の温度を赤外線カメラで温度測定するため、 $\text{CaF}_2$  窓の透過率を考慮し、チタン箔の放射率を評価した。図2より、その値は 0.143 であった。赤外線カメラ(FLIR社製, SC4000, フレームレート: 500 Hz, 撮影枚数 1024 枚)を用いて  $x = 23 \sim 95$  mm,  $z = -10.0 \sim 10.0$  mm の領域の温度画像を取得した。また、赤外線カメラによる温度測定  $T_w$  では、測定面が金属であることから、周囲放射の影響が計測値に影響する。このことから、図1(c)に示すように SUS板を設置することで周囲放射の影響を軽減し、SUS板の放射束の影響を除去して壁面温度  $T_w$  を算出した。



(a) 風洞装置の構成



(b) 加熱模型



(c) 赤外線カメラによる温度測定の様子

図1 実験装置の概略図

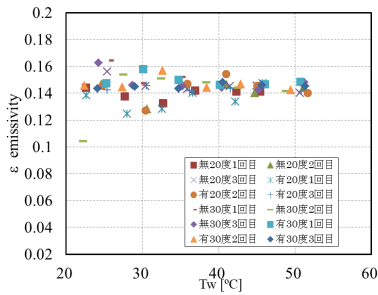


図2 CaF<sub>2</sub>窓の有無によるチタン箔の放射率

### 3.2 バイブレーションリブの構造

図3にバイブレーションリブの概要を示す。バイブレーションリブは、流路壁面と一致するように設置し、 piezoelectric element を駆動源とした。 piezoelectric element の駆動には、ファンクションジェネレータで出力したサイン波形(出力電圧 20 Vpp, 印加周波数  $f = 0 \sim 900$  Hz に設定)を、アンプで 10 倍に増幅し、 piezoelectric element に接着した振動プレートが  $y$  方向に微小振動する。

各周波数の振動変位を計測するためにハイスピードカメラで振動プレートを撮影し、得られた画像から振動変位を測定した。図4にバイブレーションリブの振動変位  $d_p$  を示す。図4の点は計測した値の平均値を示し、振動変位の最大/最小値の絶対値をエラーバーで示す。図4より、振動変位は  $f = 100, 500$  Hz の時、およそ  $85 \mu\text{m}$ 、 $f = 300, 700$  Hz の時、およそ  $75 \mu\text{m}$  となる。 $f = 900$  Hz の時、エラーバーの範囲が大きい。これはカメラの時間分解による誤差である。各周波数で多少の値の差はあったが、全体としておよそ  $75 \sim 85 \mu\text{m}$  程度の振動変位と考えられる。

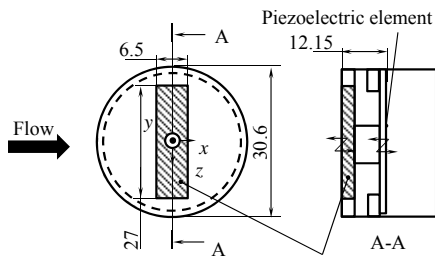


図3 バイブレーションリブの概略図

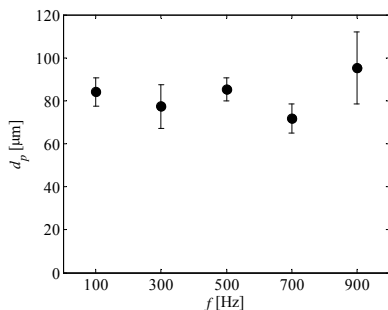


図4 バイブレーションリブの振動変位

### 3.3 熱伝達率の算出

熱伝達率の算出した熱伝達率は、等熱流束加熱した熱流量に対し、チタン箔面上の損失する熱流束を考慮し、非定常熱伝導方程式の熱慣性項、及び熱拡散項を考慮し、対流熱伝達による熱流束を算出した。また、熱伝達率の妥当性を評価するため、ヌセルト数  $Nu$  を算出し、理論解と比較した。

### 3.4 速度計測方法

PIV による速度分布測定の詳細を示す。図1(a)のノズル下流 128 mm の位置から 143 mm の位置にアクリル板の観察窓を設置し、送風機からトレーサ粒子を流入した。図1(b)の CaF<sub>2</sub> の透明窓にレーザシート(New Wave Research 社製 SoloPIV-30mJ)を照射し、 $xy$  断面の  $x = 20 \sim 30$  mm の領域を、フレームレート 15 Hz、カメラシャッターの開放時間  $8 \mu\text{s}$  で撮影した。PIV 解析には、IDT 社製 ProVision-XS のソフトウェアを使用し、二次元 PIV により時間平均速度分布を算出した。

得られた  $f = 0$  Hz における時間平均速度分布を用いて、流れの不安定性解析を実施した。時間平均速度分布を正弦波の和と考え、周期関数で近似した。得られた近似関数を二次元 Orr-Sommerfeld 方程式に代入し、準スペクトル法を用いて、連続波数の第一固有モードにおける時間成長率  $\omega_i$  を算出した。連続波数を周波数に換算することにより、流れの不安定性領域を示す周波数領域を数値的に解析することが可能である。

## 4. 研究成果

### 4.1 加振無しの際の熱伝達率とヌセルト数分布

熱流量  $\dot{Q}_{in} = 5\text{W}$ 、加振周波数  $f = 0\text{Hz}$  におけるヌセルト数分布を図5に示す(理論解、破線: 等熱流束加熱、一点鎖線: 等温加熱)。加熱開始点からヌセルト数は高い値となり、下流へ向かい徐々に低下する。 $x/D$  が 17 より下流になると、ヌセルト数はほぼ一定の値を示す。黒の点線は矩形管流れの十分発達した温度境界層のヌセルト数の理論解であり、本実験で得られたヌセルト数と同程度の値であるため、温度分布から得られた熱伝達率は、妥当な解析値と言える。

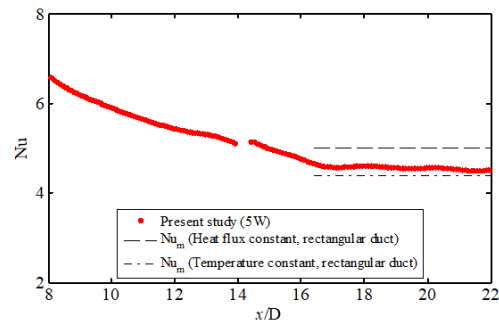


図5 局所ヌセルト数分布( $\dot{Q}_{in} = 5\text{W}, f = 0\text{Hz}$ )

#### 4.2 加振の有無における熱伝達分布の比較

$\dot{Q}_{in} = 5 \text{ W}$ ,  $f = 0, 300, 700 \text{ Hz}$  の局所熱伝達率分布を図 6(a) ~ (c) に示す．図 6(a) より，熱伝達率は上流から下流へ向い下降し，スパン方向にやや偏りがあるものの，際立った変化は見られない．流れ場は層流と考えられる．しかし，図 6(b) では，バイブレーションリブにより， $z/D = 0$  付近に熱伝達率の増加が， $z/D = \pm 0.6$  付近では，熱伝達率の減少が見られる．図 6(c) では，スパン方向に周期的な熱伝達率の増減が確認でき，また高い熱伝達領域が下流へ伸長した縞状の分布となる．これはバイブレーションリブにより，流れ場が乱流へと遷移し，壁近傍の流動構造の変化に対応した熱伝達率分布と考えられる．

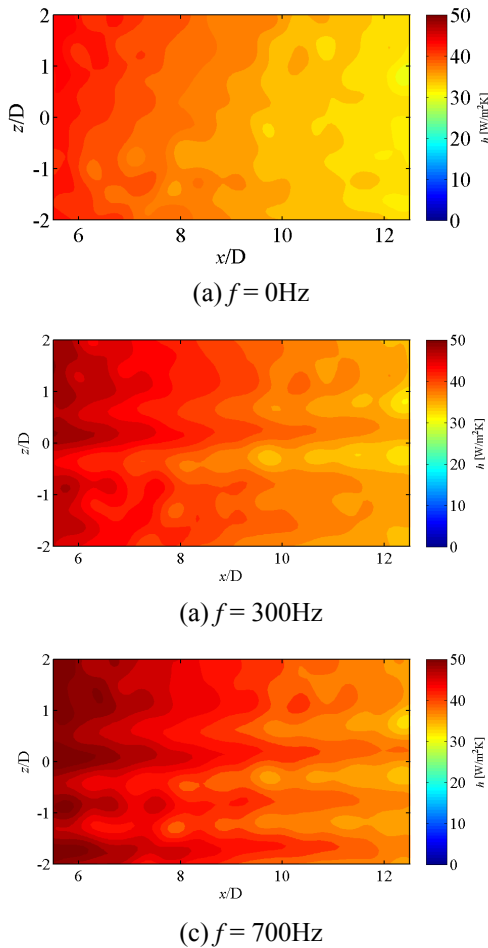


図 6  $\dot{Q}_{in} = 5 \text{ W}$  における局所熱伝達率分布

図 7 に， $\dot{Q}_{in} = 5 \text{ W}$  の(a)スパン方向平均及び，(b)  $z/D = 0$  における局所熱伝達率を示す．図 7(a) では， $f = 0 \text{ Hz}$  に対し，周波数の増加に伴い，熱伝達率が大きく増加する．また， $f = 700, 900 \text{ Hz}$  の熱伝達率が高い値を示す．図 7(b) の  $z/D = 0$  では，図 6(c) の縞状の高い熱伝達領域であり， $f = 700 \text{ Hz}$  の熱伝達率が最も高い． $f = 700 \text{ Hz}$  と  $0 \text{ Hz}$  を比較すると熱伝達率が  $12 \sim 15\%$  増加することがわかる．バイブレーションリブの駆動周波数により縞状の熱伝達率分布が現れ， $f = 700 \text{ Hz}$  の時，局所熱伝達率が最も高いことから，流れ場に応じ

た最適な周波数が存在すると考えられる．

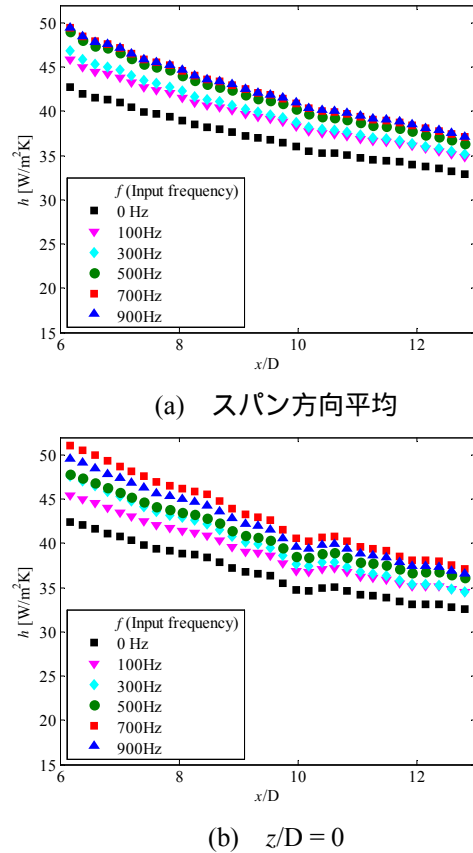
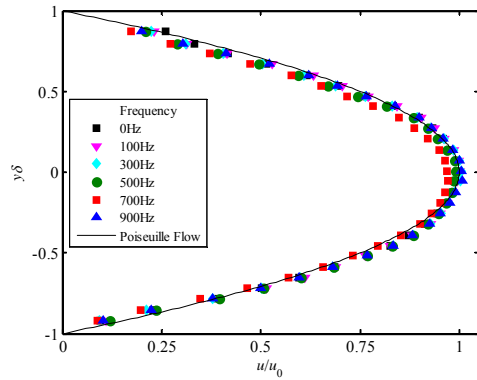


図 7  $\dot{Q}_{in} = 5 \text{ W}$  における局所熱伝達率分布

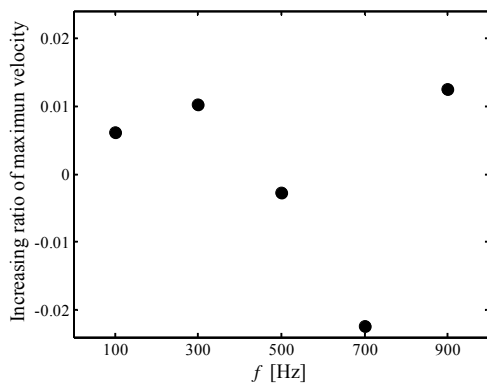
#### 4.3 加振の有無における速度分布の比較

図 8(a) に， $x/D = 6.0$  における各周波数の速度分布を示す．また，図 8(b) に  $f = 0 \text{ Hz}$  の最大速度を基準とした各周波数の最大速度の増加率を示す．図 8(a) より， $f = 0 \text{ Hz}$  と比較し， $y/\delta = 0$  の速度は， $f = 500, 700 \text{ Hz}$  では減少する．図 8(b) より， $f = 100, 300, 900 \text{ Hz}$  では， $f = 0 \text{ Hz}$  よりも増速し， $f = 500, 700 \text{ Hz}$  では， $1 \sim 2\%$  程度減速していることがわかる．これは振動板の加振により流れ場が変化し， $f = 500, 700 \text{ Hz}$  では，圧力損失がやや増加したと考えられる．しかし，その割合が小さいことから，送風機への負荷は小さいと考えられる．

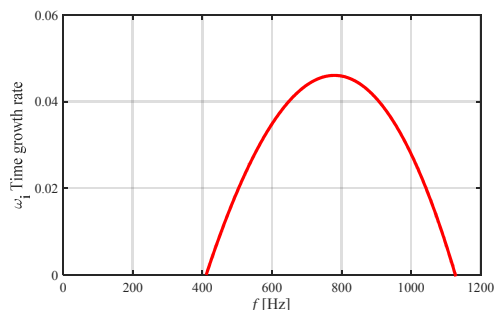
図 8(c) に図 8(a) の  $f = 0 \text{ Hz}$  の速度分布を用いた流れの不安定解析の結果を示す．図 8(c) の  $\omega_i > 0$  で曲線の内側の領域は，流れが不安定となる擾乱周波数領域を示している．つまり，本研究では，流れ場に導入した擾乱が成長する周波数領域は，およそ  $400 - 1100 \text{ Hz}$  であり，最も擾乱が成長する周波数は  $780 \text{ Hz}$  である．図 7(a) より熱伝達率が上昇した時の  $f = 700 \text{ Hz}$  と概ね一致している．また， $f = 100, 300 \text{ Hz}$  では，図 8(c) の時間成長率が  $0$  以下であり流れは安定と考えられるが，これは時間平均速度の計測精度によるものと考えられ，今後の課題である．これらの結果より，バイブレーションリブの駆動周波数により流れ場が乱流へと遷移し，伝熱促進効果が確認できた．



(a)  $x/D = 6$  における各周波数の速度分布



(b)  $f = 0\text{Hz}$  を基準とした最大速度の増加率



(c) 周波数に対する時間成長率

図8 流れ方向時間平均速度分布

## 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. S. Yamada, H. Nakamura, Simultaneous Measurements of Unsteady Thermal and Flow Fluctuations Using High-Speed Infrared Thermography and PIV Over a Backward Facing Step, ASME 2017 Heat Transfer Summer Conference, 査読有, pp. 1-10, doi:10.1115/HT2017-4737

〔学会発表〕(計9件)

1. S. Yamada, H. Nakamura, Visualization of Flow and Heat Transfer Behind

Reattachment Point in a Backward Facing Step Flow Using High-Speed PIV and Infrared Thermography, 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 2018.

2. 山田俊輔, 中村元, 後向きステップ流れにおける再付着点下流域の流れと熱伝達の同時測定, 日本流体力学会年会 2017, 2017.
3. S. Yamada, H. Nakamura, Temporal and Spatial Fluctuations of Velocity and Heat Transfer in Wall Turbulence Using Dynamic PIV and IRT, 10<sup>th</sup> International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2017.
4. S. Yamada, H. Nakamura, Time-spatial Fluctuations of Flow and Heat Transfer behind a Backward Facing Step, Asian Conference of Thermal Science 2017, 2017.
5. H. Nakamura, S. Yamada, 31<sup>st</sup> International Congress on High-speed Imaging and Photonics, 2016.
6. 山田俊輔, 中村元, ダイナミック PIV と高速赤外線カメラを用いたチャンネル乱流における流れ場と温度場の非定常同時計測の試み, 日本機械学会熱工学カンファレンス 2016, 2016.
7. N. Shiibara, H. Nakamura, S. Yamada, Unsteady Characteristics of Turbulent Heat Transfer in a Circular Pipe at Sudden Acceleration and Deceleration of Flow, 2016.
8. 山田俊輔, 中村元, 非定常熱流動場における壁近傍の速度-熱伝達の光学的同時計測について, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016.
9. 山田俊輔, 中村元, 時系列ステレオ PIV と赤外線カメラを用いた非定常熱流動場における速度と熱伝達変動の可視化, 第44 回可視化情報シンポジウム, 2016.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山田 俊輔 (YAMADA, Shunsuke)  
防衛大学校・システム工学群・准教授  
研究者番号：90516220

### (2) 研究分担者

中村 元 (NAKAMURA, Hajime)  
防衛大学校・システム工学群・教授  
研究者番号：80531996