

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：33302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18022

研究課題名(和文) 流れの脈動による複雑流路内の伝熱促進機構の解明とホットスポット直冷技術への展開

研究課題名(英文) Investigation of Mechanisms of Heat Transfer Enhancement in Complex Flow Passages by Pulsating Flow and Application to Direct Hot Spot Cooling

研究代表者

福江 高志 (Fukue, Takashi)

金沢工業大学・工学部・講師

研究者番号：80647058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：電子機器冷却ではファンやポンプの定常動作が常識であった。本研究は、この既成概念を覆し、生体内にみられるような脈を打つ流れを応用し、冷却デバイスの寸法を問わない高効率冷却技術を開発する。まず筐体内空冷に着眼し、cmスケールの冷却部品に脈動流を供給する場合の冷却性能を実験で明らかにした。次に脈動流のスケール効果の解明を行い、ホットスポットの直接水冷を企図した水冷チャンネルにおける脈動流の効果を評価した。適切な伝熱促進体との組み合わせで高い伝熱促進を実現できる可能性を明らかにした。本研究を通じ、作動流体や冷却対象のスケールを問わない伝熱促進技術の核として、脈動流が応用できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の実施により、流れに周期的な脈動を加えることによって、一連の伝熱促進と省エネルギーの熱交換が、対象とする熱流体機器の寸法や作動流体を問わず得られる感觸を得ることができた。この成果は、単にホットスポットをもつ超高密度実装の電子機器に向けた冷却技術への応用に留まらず、同様に小型化や省エネルギー化が求められる自動車関連機器やエネルギー機器への展開も期待できる。従来の「定常な流れによる冷却」という既成概念を覆した、脈動を前提とした冷却システムや熱交換システムは、持続可能な社会の構築の推進にも寄与が期待でき、熱流体設計の思想を十分に変えるインパクトを得られる可能性を得た。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to develop a novel cooling technology with high efficiency that can be applied regardless of dimensions of cooling devices. We focused on an application of a pulsating flow that exists in flow systems in our body, deviating from an existing concept for conventional flow control method for cooling devices. Firstly, the heat transfer enhancement around centimeter scale heating components by the pulsating flow was clarified. Secondly, the scale effect of the heat transfer enhancement by the pulsating flow was investigated while changing working fluids and the dimensions of the flow passages. Finally, an effectiveness of the pulsating flow in a miniaturized flow passage that simulates the direct hot spot cooling was evaluated. Through this study, a possibility of a development of a novel cooling methodology based on the application of the pulsating flow is clarified regardless of the working fluids and the dimensions of the cooling systems.

研究分野：熱流体工学，熱流体設計学

キーワード：脈動流 交換器 バイオミメティクス 電子機器の冷却 強制対流熱伝達 伝熱促進 伝熱効率 直接冷却 熱

1. 研究開始当初の背景

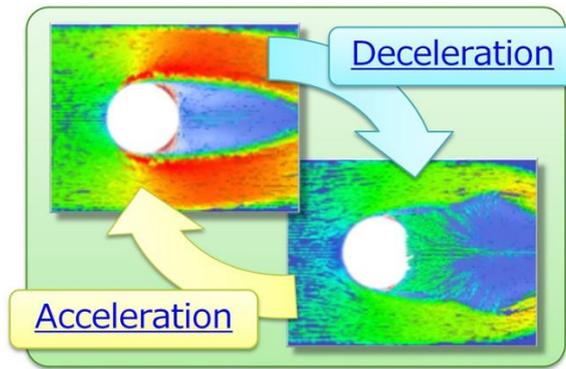


図1 流れの脈動化による減速期間での後流域の逆流生成と伝熱促進

持続可能な社会の構築に向け、電子機器の冷却技術にも省エネルギー化が強く求められる。一例として、データセンターでは消費電力の約半分が冷却系に使用されている現状[1]で、冷却性能を維持・向上しながらの消費電力低減が火急の課題であり、一例としてシステムレベルでの熱設計の研究がある[2]。一方、性能向上やデザイン性向上のため更なる高集積化が進んだ結果、素子の一部で局部的に高温になるホットスポットが発生し、破壊を招く。冷却デバイスそのものの単位伝熱面積当たりの放熱性能を向上しながら、占有面積を縮小することが要求されており、微細流路によるミニチャネル構造の開発と素子直接冷却への応用に向けた技術開発などが、国内外で広く取り扱われている[3]。

研究代表者は主として電子機器の強制対流冷却設計を専門にしており、ファンの空冷性能予測技術や高集積化に対応した冷却デバイスの伝熱促進を研究してきた。この中で、従来から冷却に用いる流体は、冷却性能の変動を回避するため定常流を供給することが常であった。しかし自然界や生物の流れには「脈を打つ流れ」のような非定常性をもつ流れが散見される。部品点数が多い電子機器では、部品背後の流れのはく離により冷却性能が低下する。やみくもに流量を増やすことは流体抵抗の増加に伴うファンやポンプの消費電力の増加を招く。このことから、定常流に頼る冷却思想から脱却した電子機器の強制空冷技術の研究が必要と考えた。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、自然界に散見される脈動流をヒントにした、冷却対象や熱交換系のスケールを問わない次世代高効率冷却技術の設計技術の構築を目指す。特に、系の寸法や作動流体に対する脈動流の伝熱促進効果の有無および差異を明らかにする。そのうえで、半導体ホットスポットの直冷機構を想定したミニチャネル流路モデルにおける脈動流の有効性を検証し、熱交換機器への応用可能性を評価することを目的とした。

3. 研究の方法

研究は実験と数値シミュレーション（以下、解析）の両方で推進した。

まず実験については、図2(a)に示す脈動風洞、図2(b)に示す脈動水流試験系を独自に開発し実験に供した。まず風洞については、ファンで空気の流れを発生させ、ピストン・カム機構を用いてテストセクション入口の開閉度を変化させることで脈動流を発生させた。一方、脈動水流試験系では、ポンプで水の流れを発生させ、ダイヤフラムバルブの開閉度を変化させ脈動流を発生させた。双方ともにピストンまたはバルブの下流側に実験用のテストセクションを設け、テストセクション内部に実装した発熱体まわりの伝熱について評価を行った。並行して、解析では、テストセクションの内部構造を模擬した数値モデルを構築し、非定常熱流体解析を実施した。流路入口の流速の境界条件を時々刻々と変化させ、テストセクション内部の脈動流の発生を再現した。なお解析コードとして、オープンソースの数値流体解析コードであるOpenFOAM®を用いた。

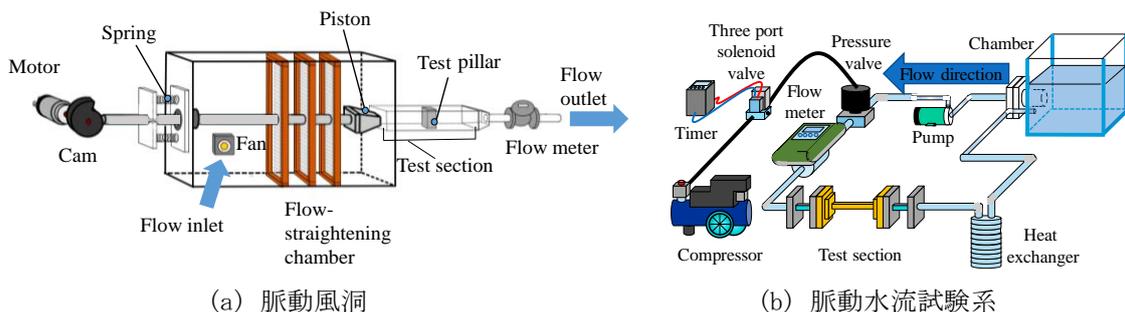
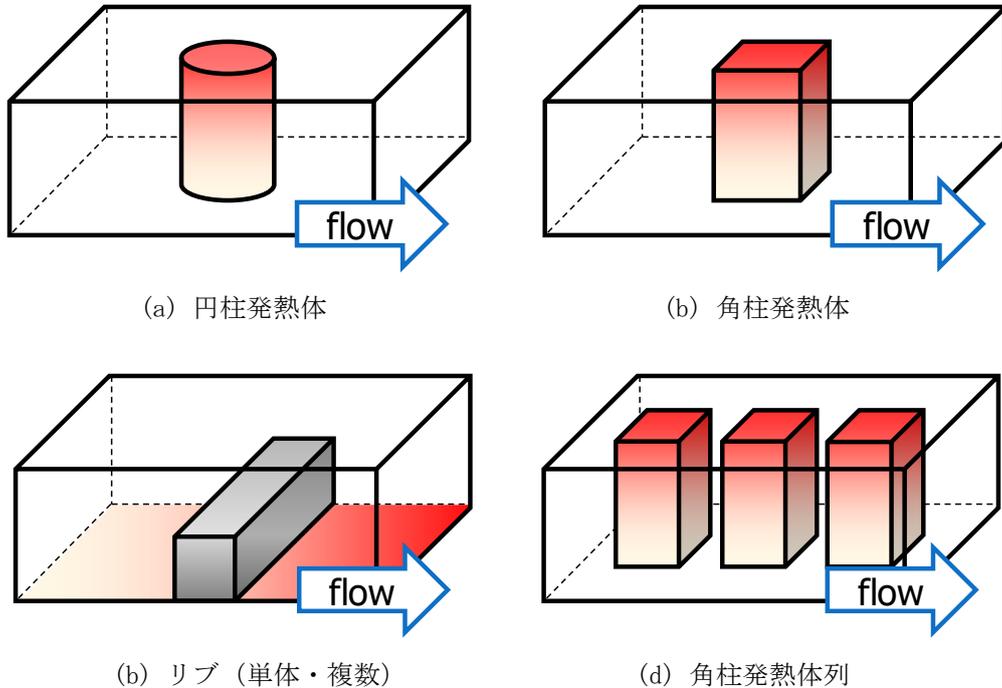


図2 脈動流の実験系

実験および数値シミュレーションの対象として検証を行ったテストセクションは図 3 の通りである。電子機器内部に散見される狭隘な矩形流路に設置された発熱体を模擬した円柱および角柱の発熱体、冷却チャンネルに実装される伝熱促進体を想定したリブのまわりで発生する脈動流による伝熱促進効果を検証した。角柱については、複数の発熱体列についても検証している。

図 4 には実験と解析それぞれで検証を行った脈動波形の一例である。実験では前述した弁の開閉により脈動を誘起させた。解析では矩形波状の流量変動を与え脈動流を再現した。なお、脈動流の優位性は、定常流における解析結果と比較した。このときの定常流の流量は ① 脈動時の時間平均流量と同一、② 脈動時の最大流量で固定、のいずれかとした。



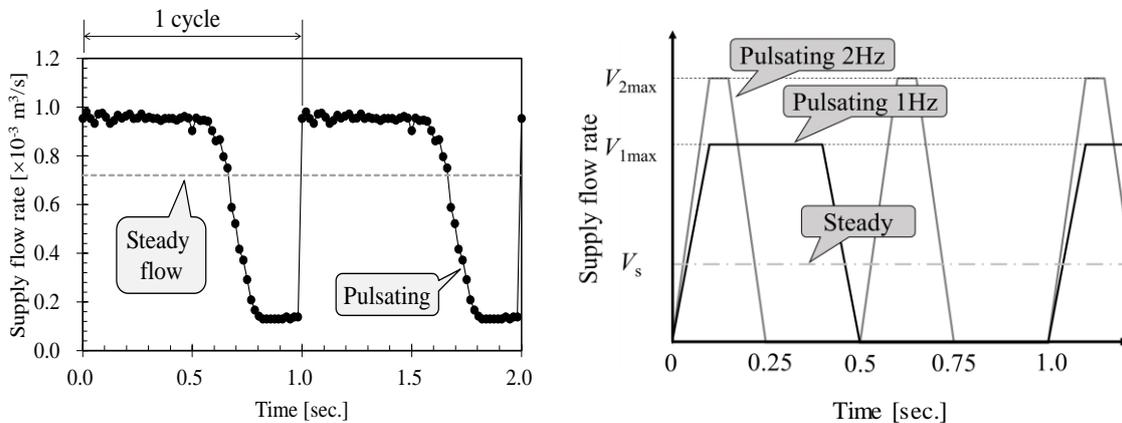
(a) 円柱発熱体

(b) 角柱発熱体

(c) リブ (単体・複数)

(d) 角柱発熱体列

図 3 検証対象のテストセクションのイメージ図



(a) 脈動風洞で誘起した脈動波形の一例

(b) 解析で用いた脈動波形の一例

図 4 検証を行った脈動波形の一例

4. 研究成果

(1) 流れの脈動化による冷却面における伝熱性能の変化

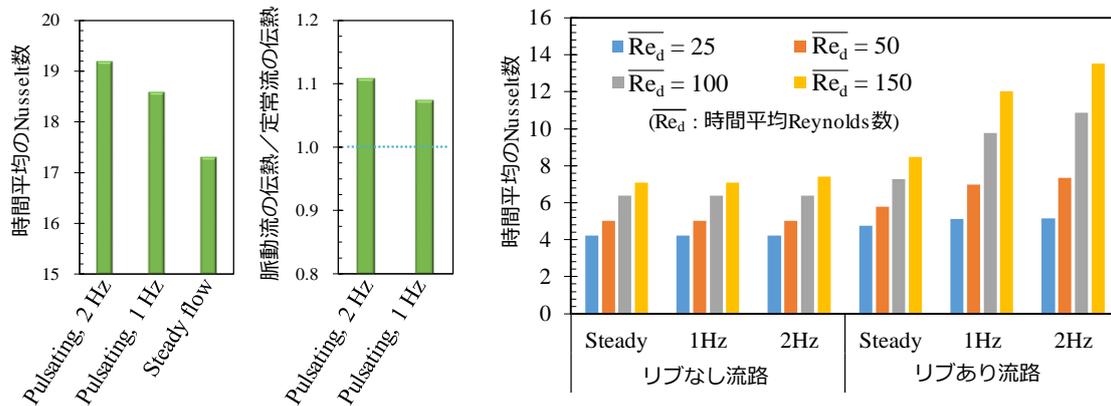
一例として、まず図 5 (a) に、時間平均流量 $0.72 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ の空気を幅 8 cm、高さ 4 cm の流路の中央に設置した角柱発熱体 (幅 3 cm、奥行 3 cm、高さ 4 cm) に供給した場合の、脈動流と定常流の伝熱性能の差異を実験により比較したものを示す。左は時間平均の Nusselt 数 (伝熱性能) の差異、右側は定常流の時間平均 Nusselt 数に対する脈動流の時間平均 Nusselt 数の比で示している。本実験では脈動流と定常流の時間平均流量を一致させており、脈動化だけで発熱体まわりの伝熱性能を増加させることができた。また、脈動周波数が速い 2 Hz において、伝熱性能の増加が顕著になることも確認した。

また、図 5 (b) は、幅 5 mm、高さ 5 mm のリブ付き流路に水を供給した場合の、流路底面の伝熱を脈動流と定常流で追った結果である。リブなしの流路では、脈動のあるなしで伝熱性能が大きく変わることはなかった。一方、リブあり流路では脈動化による顕著な伝熱促進が確認でき

た.特に,リブの設置により定常流でも見られる底面の伝熱促進が,脈動化により顕著になった.リブなし流路と比較すると,リブあり流路と 2 Hz の脈動流の組み合わせで最大 82 % の伝熱促進率を実現できた.

さらに,図 6 には,脈動水流試験系を用いた実験で得られた,脈動水流の伝熱促進効果について示す.この事例は,幅 10 mm,高さ 10 mm の流路に直径 6 mm の円柱発熱体を設置した場合である.このときは,弁を完全開放した状態の定常流 (Reynolds 数=3000) と,そこから弁を開閉させ脈動を起こした場合の伝熱性能の比を比較した.よって脈動の実験時は定常流より時間平均流量が低い.横軸は定常流の時間平均 Reynolds 数に対する脈動時の時間平均 Reynolds 数の比 (すなわち,弁を開閉させたことによる脈動時の時間平均流量の低下割合),縦軸は定常流の時間平均 Nusselt 数に対する脈動流の時間平均 Nusselt 数の比を示している.青の実線より上であれば,脈動時の時間平均流量の低下に対し,伝熱性能の低下が小さい,すなわち脈動による伝熱促進が相対的にみられることを示す.凡例は加速期間と減速期間の組み合わせで表記した.結果から,同図に表記するすべての条件で流れの脈動化による顕著な伝熱促進を確認できた.この結果により,水冷デバイスにおいて脈動流を応用することによる,時間平均流量の抑制を図りながら伝熱性能の確保が可能であることを示すことができ,脈動流の冷却デバイスでの有用性を実践的に明らかにすることができた.

このことにより,本研究の範囲内において,cm スケールの筐体内空冷を想定した場合,mm スケールの水冷デバイスを想定した場合のそれぞれで,脈動流による冷却対象 (発熱体表面または流路底面) の伝熱促進を確認でき,脈動流の伝熱促進が,スケールや作動流体によらず実現できることを確認することができた.さらに,脈動化による伝熱促進効果は図 3 (d) に示すような,複数の発熱体が連続して実装される場合でも確認することができ [4] [5], 実在の電子機器や熱流体機器のような複雑構造の冷却対象にも応用できる感触を得た.



(a) 脈動させた空気流による矩形障害物まわりの伝熱性能 (実験結果) (b) 脈動水流によるリブまわりの伝熱促進の割合 (解析結果)

図 5 角柱障害物まわりの伝熱性能およびリブ付き管における伝熱促進に対する脈動流の効果

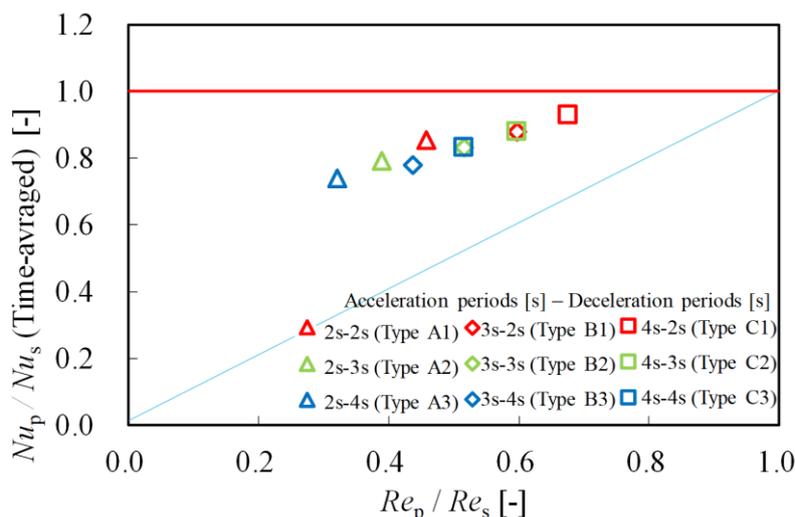


図 6 円柱発熱体に脈動水流を付与した場合の伝熱実験結果

(2) 伝熱促進のメカニズム

流れの脈動化に基づく伝熱促進のメカニズムは、脈動化により発生する流れ構造の変化に基づく。図7には、リブあり流路において発生する脈動時の流れ場の変化と、それに伴い発生する局所の伝熱性能の分布を示す。流れに対する障害となる構造物の後方では、一般に流れのはく離が生じ、はく離の影響を受ける範囲では流れがよどむことで伝熱性能が低下する。ところが、流れを脈動させた場合に、むしろその減速期間（流れを止める期間）において、主流の作動流体が、はく離領域に高速で流れ込み、よどんでいた作動流体を吐き出している様子が確認できる。このことにより、従来、流れがよどみ十分な冷却能力を確保できなかった構造物の背後においても伝熱促進が実現可能になり、結果として冷却対象全体の伝熱性能を向上させることができるというメカニズムであった。以上のメカニズムは本稿で報告したすべての系（図3）において示された。実際に、図7に示したリブの背後の伝熱性能の分布を確認すると、脈動流を付与した場合に、はく離領域における大幅な伝熱促進が確認できる。

当然ながら、冷媒をより多く、より高速に流動させることは冷却能力獲得の方向性の1つである。しかし、ホットスポットを直冷するような小型デバイスを考えた場合に、流量の増加や流れの高速化は、圧力損失の顕著な増加を招くことから、冷却システム全体の省エネルギー化の観点では建設的ではない。また cm スケールの管内冷却においても、脈動化によるはく離領域の流れの制御は、発熱部品の実装箇所を選ばないことにも繋がり、設計の自由度の拡大にも繋がる。

以上、本研究の範囲内において、あえて減速期間で流体へのエネルギー付与を止め、流体の自発的な流動を促すという冷却プロセスの革新を実現する、1つのキーテクノロジーとしての脈動流の可能性を、作動流体、冷却対象、対象のスケールのすべてに依存しない包括的な成果として示すことができた。次のステップとして、従来から構築されている「定常流」を前提とした、流れの駆動方法も含めた冷却システムについて、「脈動化」を踏まえた新境地での設計思想を構築する必要がある。脈動流の実応用に向け、「流れを起こし」「熱を奪い」「低温熱源に熱を捨てる」までの、冷却システムおよびプロセス全体の改革を実現するための議論を、今後の課題として進めていきたい。

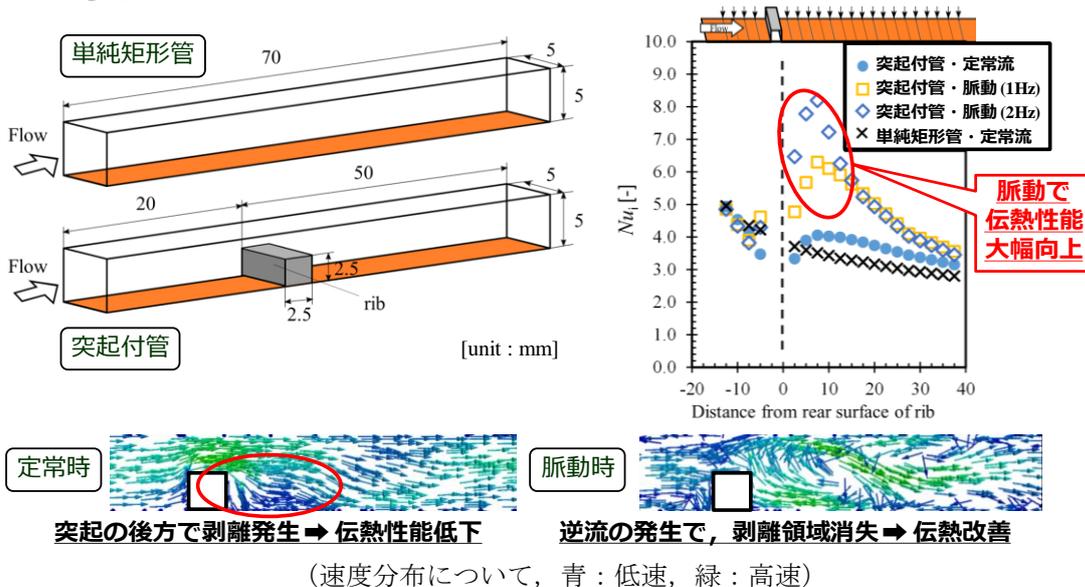


図7 リブあり流路における脈動化による伝熱促進のメカニズム

<引用文献>

[1] Emerson Electric Co., Energy Logic: Reducing Data Center Energy Consumption by Creating Savings that Cascade Across Systems (2012).
 [2] Samadiani, E., Joshi, Y. and Mistree, F., “The Thermal Design of a Next Generation Data Center: A Conceptual Exposition”, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 130 (2008), 041104.
 [3] Ditri, J., Hahn, J., Cadotte, R., McNulty, M. and Luppia, D., “Embedded Cooling of High Heat Flux Electronics utilizing Distprojectionuted Microfluidic Impingement Jets”, Proceedings of ASME InterPACK/ICNMM2015 (2015), Paper No., 48689.
 [4] Fukue, T., Shirakawa, H. and Hiratsuka, W., “Basic Study on Flow and Heat Transfer Control around Heating Components in Rectangular Duct by Pulsating Flow”, Proceedings of FLUCOME2019 (2019), Paper ID: 122.
 [5] 市川航平, 福江高志, 浜谷慧一, 白川英観, “曲がりをもつ矩形管内に設置した発熱体まわりの脈動流の数値解析”, 第57回日本伝熱シンポジウム (2020), Paper No., H312.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 福江高志	4. 巻 2018/6/25
2. 論文標題 冷却だってバイオミメティクス、脈動で伝熱促す	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日経xTECH	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福江高志	4. 巻 Vol. 19, No. 6
2. 論文標題 自然界の知恵から学ぶ脈動流による電子機器冷却の新展開	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 エレクトロニクス実装学会誌	6. 最初と最後の頁 114-121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5104/jiep.21.114	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukue, T., Hirose, K., Shirakawa, H., Suzuki, J. and Saga, Y.	4. 巻 6-8
2. 論文標題 Effects of Clearance around Square Pillar in Rectangular Enclosure on Cooling Performance of Pulsating Airflow	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics Engineering and Automation	6. 最初と最後の頁 385-391
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17265/2159-5275/2016.08.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 福江高志, 白川英観
2. 発表標題 矩形流路内に設置した複数の発熱部品まわりの脈動流の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福江高志
2. 発表標題 バイオミメティクスの視点に基づく脈動流による熱流体制御
3. 学会等名 第61回北陸流体工学研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平塚わかな, 福江高志, 白川英観, 廣瀬宏一, 鈴木順
2. 発表標題 リップ付きミニチャンネル内の脈動流による伝熱促進に関する数値解析
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木信昭, 福江高志, 廣瀬宏一, 白川英観, 鈴木順
2. 発表標題 脈動流による矩形筐体内の発熱部品の伝熱促進に対する脈動波形の影響
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福江高志, 平塚わかな, 白川英観, 廣瀬宏一, 鈴木順
2. 発表標題 脈動流水冷デバイス開発に向けた最適脈動波形の探査
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Fukue, T., Hiratsuka, W., Shirakawa, H., Hirose, K. and Suzuki, J.
2. 発表標題 Numerical Investigation of Effects of Pulsating Wave Pattern on Heat Transfer Enhancement around Square Ribs by Pulsating Flow
3. 学会等名 The 28th International Symposium on Transport Phenomena; ISTP-28
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Suzuki, J., Fukue, T., Hiratsuka, W., Shirakawa, H. and Hirose, K.
2. 発表標題 Visualization of Heat Transfer Mechanism of Pulsating Flow around Ribs mounted in Rectangular Duct
3. 学会等名 The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing; PSFVIP-11
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 廣瀬裕介, 福江高志, 白川英観, 鈴木順, 廣瀬宏一
2. 発表標題 T字分岐への脈動流付与により発生する伝熱の変化
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第53期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福江高志, 石塚勝
2. 発表標題 バイオメテックスの視点に立った電子機器の強制対流冷却促進技術の検討
3. 学会等名 日本機械学会 RC271 高密度エレクトロニクス実装における信頼性評価と熱設計に関する研究分科会 第2回分科会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 嵯峨遥介, 福江高志, 廣瀬宏一, 白川英観
2. 発表標題 脈動流を用いた発熱部材の伝熱促進に対する流路寸法の影響
3. 学会等名 日本機械学会 第21回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鈴木信昭, 福江高志, 白川英観, 廣瀬宏一, 嵯峨遥介
2. 発表標題 構造物まわりの脈動流の伝熱促進機構における寸法効果の基礎的研究
3. 学会等名 2016年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福江高志, 廣瀬宏一, 白川英観, 鈴木順
2. 発表標題 ファンの電圧制御による脈動流の生成と伝熱促進の可能性
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 平塚わかな, 福江高志, 鈴木信昭, 白川英観, 鈴木順, 廣瀬宏一
2. 発表標題 矩形管ミニチャネル内部の脈動流による伝熱促進の可能性検討
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Fukue, T., Hirose, K., Shirakawa, H., Suzuki, J. and Saga, Y.
2. 発表標題 Effects of Clearance around Heating Prism on Cooling Performance of Pulsating Airflow
3. 学会等名 The 4th International Forum on Heat Transfer ; IFHT2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Suzuki, N., Hiratsuka, W., Fukue, T., Shirakawa, H., Suzuki, J. and Hirose, K.
2. 発表標題 CFD-Based Basic Investigation on Heat Transfer Characteristics of Pulsating Flow in Narrow Cooling Passages
3. 学会等名 IEEE CPMT Symposium Japan 2016; ICSJ2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

福江研究室ホームページ https://www.fukuelab.net/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	白川 英観 (Shirakawa Hidemi) (00295122)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	平塚 わかな (Hiratsuka Wakana)		
研究協力者	新田 則佳 (Nitta Noriyoshi)		