

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：33302

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14916

研究課題名（和文）流れの脈動化と沸騰伝熱の融合による冷却機構の創成

研究課題名（英文）Development of Novel Cooling System by Combination of Flow Pulsation and Boiling Heat Transfer

研究代表者

福江 高志（Fukue, Takashi）

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：80647058

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：生体内にみられる脈を打つ流れと沸騰冷却を融合した、新しい強制水冷技術の可能性について実験を通じ明らかにした。次世代の三次元LSIの冷却を想定した、狭隘な流路における沸騰冷却の促進を実現する上で、冷却を阻害する要因となる気泡を、流れの脈動化により能動的に制御する新たな冷却メカニズムの創成を図った。狭隘場実装した発熱体の、脈動流を付与した場合の冷却能力と、発熱体まわりで発生する気泡の成長や離脱との関係を実験で検証した。結果、適切な脈動波形の設定により、気泡の成長を阻害したり、成長を抑制したりすることが可能であり、冷却能力の向上に寄与することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、バイオミメティクス思想にヒントを得て、高発熱密度の冷却に用いる沸騰伝熱に、生体内の脈動流を融合させた新たな冷却メカニズムの実現を目指したものである。脈動流の適切な応用による沸騰伝熱の冷却促進が実現可能な感觸が得られ、これは冷却流路が極めて狭隘になることが予想される次世代の超高密度素子の直接冷却に向けた有用な知見である。Society 5.0のフィジカル空間とサイバー空間の融合化社会の構築が、ウィズコロナの掛け声のもとに加速されているが、情報機器の更なる進化が必須で、ボトルネックとなる電子機器の冷却技術にも新境地が求められる。本研究の成果がひとつの橋頭堡になることを期待している。

研究成果の概要（英文）：This study describes a possibility of a novel forced-water cooling technique that combines the pulsating flow in living organisms and boiling heat transfer through a heat transfer experiment and visualization of evaporated bubbles. A new heat transfer enhancement mechanism that controls the bubbles' motions by generating the flow pulsation was investigated to enhance boiling heat transfer in narrow flow channels for cooling next-generation 3D LSIs. The heat transfer experiment and the flow visualization were conducted separately. A relationship between the cooling performance of the pulsating flow around a cylindrical heating element mounted in the narrow cooling channel and the growth and the detachment of the bubbles around the element were investigated. It is found that the optimum pulsating wave pattern can control the bubbles' growth and detachment, and this achieves effective heat transfer enhancement around the heating element.

研究分野：熱流体工学，熱流体設計学

キーワード：脈動流 気泡制御 沸騰伝熱 高密度実装 狭隘場の冷却 伝熱促進 熱交換器 バイオミメティクス

1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things) や機械学習 (AI) の社会実装に向け、電子部品の高度化が新境地を迎えている一方で、熱問題も深刻化している。三次元 LSI などの新技術では、更なる高集積化が進み、積層部品からの熱がパッケージ内に籠るようになり局所的な温度上昇(ホットスポット)をもたらす、最終的に破壊を招く。そこで、微細な冷却流路を同時に形成し、冷媒を直接流し込み冷却する強制水冷の応用が有益となる。しかし微細流路は流れの抵抗が極めて大きくそのままでは冷却効率が悪い。そこで冷媒を沸騰させ、潜熱輸送も併用することが考えられる。しかし、冷却能力を得るために実装される伝熱促進体のまわりでは、流れのはく離が発生することで、高温の蒸気が、はく離領域に滞留し、熱抵抗になったり冷媒の流れを阻害したりして冷却能力を著しく低下させる。かつ、限界熱流束 (CHF) を超える熱流束が与えられると、気泡の膜に発熱面全体を覆う膜沸騰へ遷移し、発熱面に冷媒が直接接触されなくなるため、さらに熱抵抗が上がり熱損傷に至る可能性がある。かつ流れの抵抗の増加も引き起こし、ポンプ動力の増加を招く。従来の伝熱促進体の構造最適化を図るアプローチだけでは、その実装自体が原因で問題が起こっており、抜本的な解決は難しくなる。そこで ① 狭隘な流路で効率的に冷媒を送り込み、② 沸騰気泡の発生や成長を抑え冷却能力を得るため、従来と異なる視点の熱流体制御が必要となる。

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、流れをあえて周期的に変化させる脈動流に着目し、沸騰冷却と脈動流を融合した新しい強制水冷技術を創成し、3次元 LSI などに代表される次世代デバイスの冷却技術として提案することを目的とする。

図 1 に伝熱促進体まわりで発生する脈動流のイメージを示す。主流を周期的、かつ効果的な条件で定期的に加減速を繰り返すと、はく離領域に向かって逆流が生じ、はく離領域で熱を受け取ったまま滞留する冷媒を排除しながら伝熱促進体の背面に衝突する。衝突した冷媒は、次の加速期間で排除される。この繰り返すことで、はく離領域の発生に依らず、伝熱促進体全体の伝熱性能向上に寄与する[1]。そこで本研究では、沸騰強制対流の条件下において伝熱促進体や発熱体まわりで発生する蒸気泡を脈動流の圧力変動により除去し、伝熱促進を図ることを狙った。脈動流を誘起させることができる高熱流束の実験が可能なシステムを構築した。脈動波形をパラメータに、脈動流による沸騰気泡除去の可能性の評価を行い、流れの可視化も通じ、蒸気泡を除去することによる冷却性能の向上可能性について明らかにすることを目的とした。

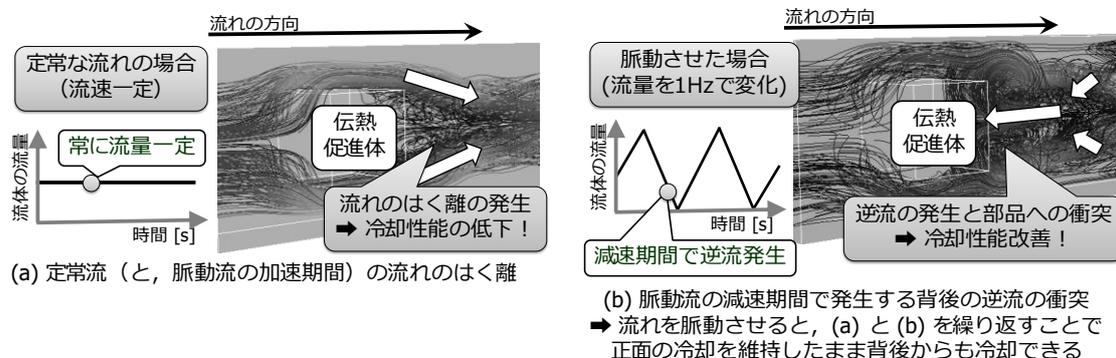


図 1 矩形伝熱促進体に誘起した脈動流によるはく離領域の冷媒除去と伝熱促進の様子

3. 研究の方法

本研究では、主として脈動流を誘起できる強制水冷性能の実験システムによる伝熱実験および流れの可視化を通じて推進した。

図 2 に本研究で構築した実験系およびテストセクションを示す。まず実験系は、チャンバ、マグネットポンプ、電磁弁、デジタルタイマ、超音波流量計、テストセクションおよび作動流体を冷却するための熱交換器から構成される。作動流体としては蒸留水 (以下、水) を用いた。水はマグネットポンプによって実験系を循環させた。流量は超音波流量計により計測した。流路の途中に実装した電磁弁の開閉により脈動流を発生させた。デジタルタイマにより弁の開閉の時間履歴を変化させ、脈動波形の条件設定を行った。テストセクション流入前のステンレス配管にはヒータを巻き付け、チャンバには投げ込みヒータを実装し、予熱することで作動流体のサブクール度を 50 °C に制御して実験を行った。テストセクション後ろの熱交換器は、蒸気を含む混相を液相に戻すために利用した。

続いてテストセクションは、高さ 10 mm、幅 10 mm の矩形水路と、発熱部品を模擬した円柱発熱体で構成した。円柱発熱体まわりの伝熱特性を、脈動流を起こした場合と定常流の条件で比較した。円柱発熱体の直径は、狭隘な流れ場での伝熱促進を評価することを企図し、筐体と発熱体間のクリアランスを狭くした環境で実験を行う観点から 8 mm (クリアランス 1 mm) とした。

テストセクションの側面と下部に、可視化用の窓として石英ガラスを取り付けることで、テストセクション内部の様子を確認できるようにした。過熱はカートリッジヒータを 4 本取り付けした加熱ブロックから、熱流を収束させる熱収縮部と円柱部を通じ、流路内の円柱発熱体に直接熱を付与した。円柱発熱体の底面と、加熱ブロックと円柱発熱体の間の接続部に熱電対を取り付け、それぞれ加熱量の算出および冷却能力の評価に用いた。

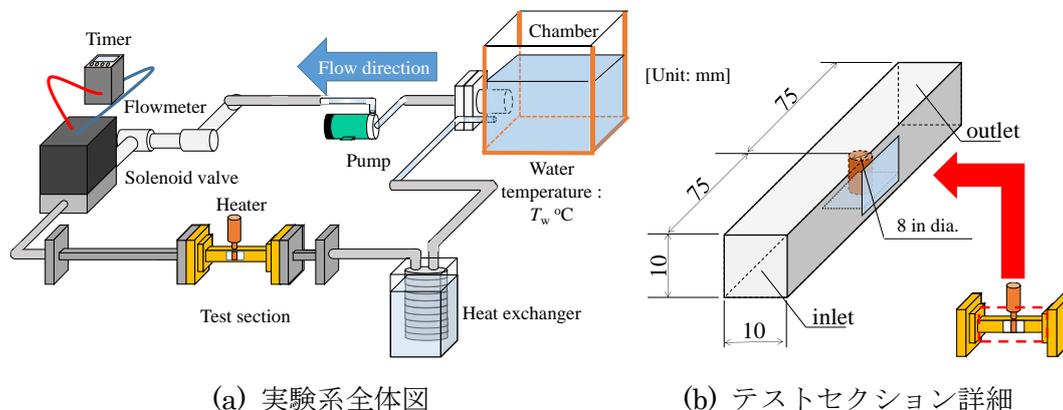


図 2 脈動水流の実験系とテストセクション

図 3 に、流量の時間変動の一例、表 1 に、沸騰気泡の様相を観察した際に実施した脈動流の付与条件の一覧を示す。まず流量の実験条件は、代表流速にテストセクション内部の時間平均流速、代表寸法にテストセクションの水力等価直径を用いた時間平均 Reynolds 数が 320~3150 の範囲とした。これは小型冷却デバイスのような狭隘な流路において、流れが粘性支配となり Reynolds 数が小さくなることを想定したものである。脈動波形については、表 1 のように加速周期と減速周期を組み合わせた 9 種類を準備し実験に供した。加速周期と減速周期は、それぞれ 0.3 秒から 1 秒の間で変更した。以下、表 1 に示した「Type A1」から「Type C3」で各脈動波形を呼称する。なお本稿において、脈動時の時間平均流量については、ポンプの動作電力を一定として、バルブの開閉でのみ制御を行ったことから、それぞれの波形に対して時間平均 Reynolds 数は一意の値として実験を行った。

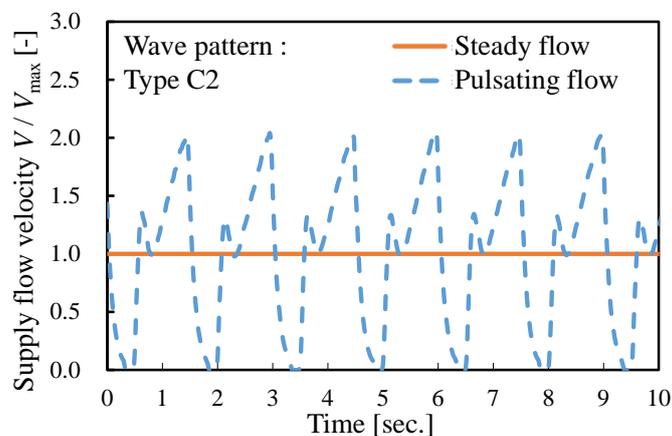


図 3 脈動流の付与条件一例（加速 1.0 秒，停止 0.5 秒を繰り返す）

表 1 脈動条件の一覧

left : Acceleration periods [s] - right : Deceleration periods [s]					
Type A1		Type B1		Type C1	
0.3	0.3	0.5	0.3	1.0	0.3
Type A2		Type B2		Type C2	
0.3	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5
Type A3		Type B3		Type C3	
0.3	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0

4. 研究成果

(1) 脈動流付与による沸騰発生時の冷却能力の変化

まず図4に、円柱発熱体を通る熱流束（面積 1cm^2 あたりの通過熱量）が 170 W/cm^2 の場合に得られた、時間平均 Reynolds 数に対する冷却能力（時間平均 Nusselt 数）の関係を示す。赤の破線が定常流で得られた冷却性能、それぞれのプロットが表1の各脈動波形で得られた冷却性能である。

まず、加速期間に対し減速期間が極端に長い Type A3 については、定常流と比較し低い冷却能力を示した。これは単純に減速期間が長いことで冷媒が流れずに単純に冷却能力が得られなかったことと、沸騰した気泡が発熱体周囲に長時間滞留したことによると考える。一方で、そのほかの脈動条件についてみてみると、脈動化させた際の平均 Nusselt 数は、定常流と同等、ないしは定常流より高い冷却性能が得られ、Type B2 および Type C2 では上がり幅が顕著であった。

このことから、狭隘な流路に実装した発熱体まわりで沸騰の発生がみられる高熱流束の冷却においても、脈動流を付与することによって、同程度の流量の定常流と比較した場合に冷却能力を向上できる可能性について、実験を通じ明らかにすることが出来た。

(2) 可視化結果から考える冷却促進のメカニズム

この原因について探求するため、気泡成長の可視化結果について確認する。まず図5に、定常流を流した場合においてみられた、各 Reynolds 数における円柱周囲の気泡成長を可視化し撮影した結果を示す。定常流の条件では、円柱周囲において蒸気泡が発生し成長している様子が Reynolds 数を問わずに確認できた。Reynolds 数が低い場合には、流量が少ないこともあり新しい冷媒の供給が滞ることから、上流側にも気泡成長がみられ、冷却を阻害している様子がみてとれた。これが、Reynolds 数が高くなるにつれて変化し、特に気泡の発生が円柱後方のはく離領域に限定される傾向を確認した。

次に、脈動による冷却性能の向上がみられた Type C2 を例に、脈動流を付与した条件における気泡の運動の変化について示す。まず、加速期間を例に、円柱発熱体の後ろでみられる気泡の成長度合について比較する。同等の時間平均流量の定常流（図5の $\text{Re} = 2000$ ）に比べ、発生している気泡の大きさが明らかに小さいことが確認できる。このことから、脈動によって気泡の成長が抑制されている傾向が明らかになった。かつ、減速期間を確認すると、加速期間で発生した気泡が、減速期間ではく離領域から離脱し、この場合には円柱の上流側まで押し流されている様子が確認できた。これは、脈動の減速周期で発生する、主流における静圧の回復による、はく離領域

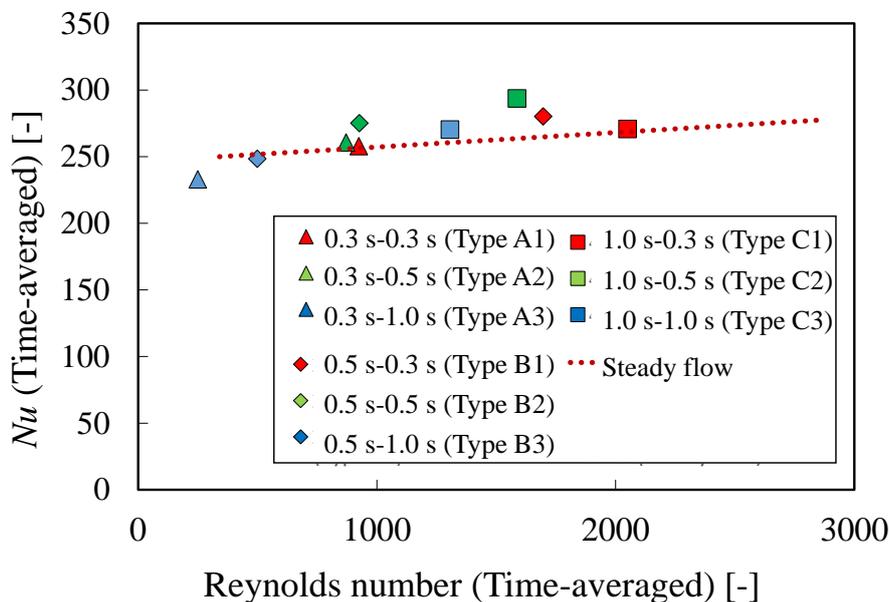


図4 脈動流付与時に見られた伝熱性能の変化（熱流束 170 W/cm^2 ）

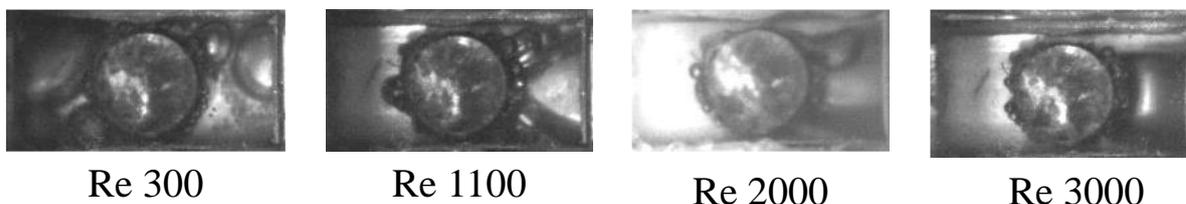


図5 定常流を流した場合の各 Reynolds 数における円柱周囲の気泡成長

域への逆流の生成[1]に基づくもので、単相流においても、脈動流による物体まわりの冷却促進効果に寄与しているものである。沸騰条件下では、その効果が、気泡の成長抑制や気泡の離脱促進、気泡の移動にも影響し、全体的な冷却性能の向上に寄与する可能性を明らかに出来た。

最後に図7に、円柱発熱体の背面の冷却能力について、脈動流と、時間平均流量が同等の定常流の結果を比較したものを示す。このグラフから、後流の気泡の除去がされている条件においては、円柱の背後の冷却能力が高くなっている傾向が確認できた。したがって、脈動による気泡の成長や運動に対する影響の有無が、定常流より高い冷却能力を得るキーである感触を得た。

以上、狭隘流路内に実装された高熱流束の発熱体を冷却することを念頭に、沸騰による蒸気泡の生成に対して、あえて流れを脈打たせることによる冷却促進の可能性とそのメカニズムについて探った。本研究の範囲内において、脈動流の付与により、発生した気泡の成長や滞留を阻害し、気泡を効果的に後流から排除できることで、効果的な冷却促進が可能である感触を得た。それには最適な脈動波形の選択が必要であり、適切な加速・減速期間の設定が必要であるが、この最適化を行うことにより、冷却促進と供給流量の低減の両立ができる可能性も見いだすことが出来た。以上の、狭隘な流路において実装される発熱体の冷却を脈動流により効率化できるという結果は、今後の三次元 LSI の高集積化に対する、ホットスポットの直接冷却などに応用する観点でも有益なものである。一方、気泡の成長や離脱を促進するための、脈動流の効果的な付与や、脈動流と気泡の成長・離脱のメカニズムとの関係については、まだまだ検討の余地があり、将来的な超高集積デバイスの基礎冷却技術として大成するための詳細な検討を、今後の課題として進めていきたい。

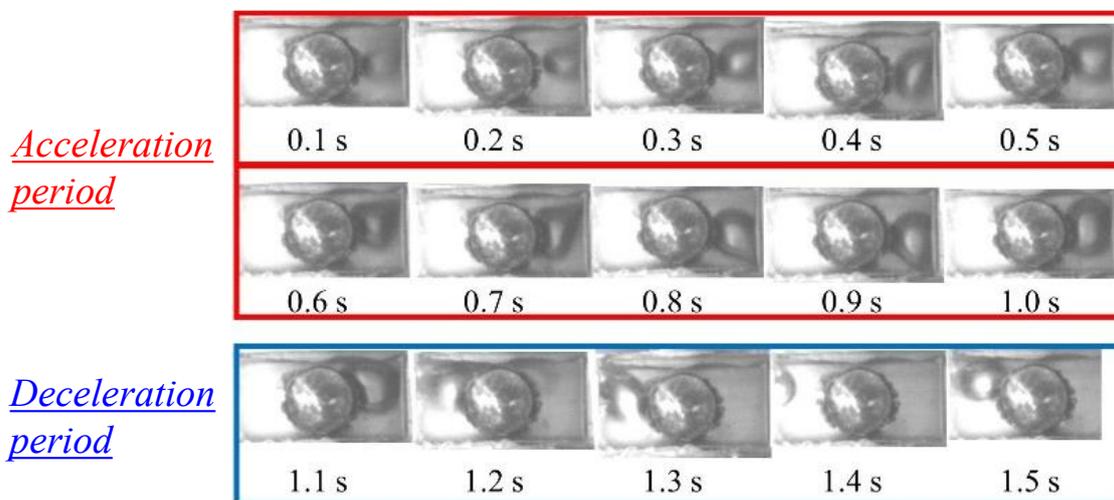


図6 冷却促進がみられた Type C2 の脈動波形における気泡の離脱の様子

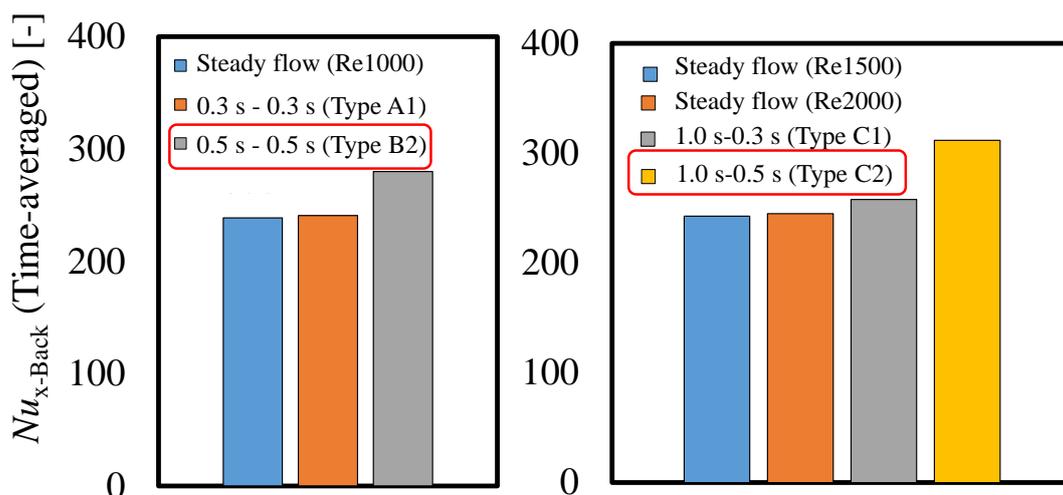


図7 円柱発熱体背面の冷却能力の差異

(引用文献)

[1] 福江高志, “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”, エレクトロニクス実装学会誌, 19-6 (2018), 114-121.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shintaro Hayakawa, Takashi Fukue, Yasuhiro Sugimoto, Wakana Hiratsuka, Hidemi Shirakawa, Yasushi Koito	4. 巻 18
2. 論文標題 EFFECT OF RIB HEIGHT ON HEAT TRANSFER ENHANCEMENT BY COMBINATION OF A RIB AND PULSATING FLOW	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5098/hmt.18.29	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 -

1. 著者名 Wakana Hiratsuka, Takashi Fukue, Hidemi Shirakawa, Katsuyuki Nakayama, Yasushi Koito	4. 巻 15
2. 論文標題 CFD-BASED STUDY ON HEAT TRANSFER ENHANCEMENT BEHIND A PROJECTION IN A MINIATURIZED FLOW CHANNEL BY PULSATING FLOW	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Heat and Mass Transfer	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） 10.5098/hmt.15.16	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 -

1. 著者名 福江高志	4. 巻 24
2. 論文標題 近未来の電子機器の強制対流冷却設計に必要なビジョンを考える	5. 発行年 2021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 178-187
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 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 4件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 福江高志, 浜谷慧一, 松浦克樹, 白川英観, 小糸康志
2. 発表標題 矩形管路に実装した円柱まわりの沸騰伝熱促進に対する脈動流の有効性
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福江高志, 早川慎太郎, 平塚わかな, 白川英観
2. 発表標題 矩形リブの熱伝達と流れの過渡変動履歴の関係についての数値解析
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会 2022年3月5日
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福江高志
2. 発表標題 1DCAEと自然界の熱流体
3. 学会等名 日本機械学会 1DCAE・MBDシンポジウム2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早川慎太郎, 福江高志, 白川英観
2. 発表標題 脈動流による伝熱促進に向けたリブ間隔の影響調査
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浜谷慧一, 福江高志, 白川英観
2. 発表標題 脈動流による沸騰気泡除去と伝熱促進に関する実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Fukue
2. 発表標題 Possibility of Next Innovation of Forced Convection Cooling in High-Density Packaging Electronic Equipment by Pulsating Flow Phenomena from Knowledge of Nature
3. 学会等名 2021 International Conference on Electronics Packaging (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shintaro Hayakawa, Takashi Fukue, Hidemi Shirakawa, Yasuhiro Sugimoto
2. 発表標題 CFD-BASED INVESTIGATION ON FLOW PATTERN AND HEAT TRANSFER OF PULSATING FLOW AROUND A RIB MOUNTED IN RECTANGULAR CHANNEL (RELATIONSHIP BETWEEN FLOW PATTERN AND RIB HEIGHT)
3. 学会等名 31st International Symposium on Transport Phenomena; ISTP31 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keiichi Hamatani, Takashi Fukue, Hidemi Shirakawa, Yasuhiro Sugimoto
2. 発表標題 EXPERIMENTAL STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN HEAT TRANSFER ENHANCEMENT AROUND CYLINDRICAL OBSTRUCTION AND WAVE PATTERN OF PULSATING WATER FLOW
3. 学会等名 Proceedings of the 31st International Symposium on Transport Phenomena; ISTP31 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shintaro Hayakawa, Takashi Fukue, Hidemi Shirakawa, Wakana Hiratsuka
2. 発表標題 CFD-Based Study on Relationship between Cooling Performance of Pulsating Flow and Rib Height mounted in Mini Rectangular Channel
3. 学会等名 Proceedings of the International Conference on Science, Technology and Society Studies; STS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中西航基, 福江高志, 浜谷慧一, 白川英観
2. 発表標題 脈動流下におけるピンフィンヒートシンクの冷却性能変化
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市川航平, 福江高志, 浜谷慧一, 白川英観
2. 発表標題 曲がりをもつ矩形管内における脈動流の冷却促進と発熱体実装位置の関係
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浜谷慧一, 福江高志, 白川英観
2. 発表標題 矩形流路内に設置した発熱体まわりの脈動流による伝熱促進とReynolds数の関係
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 早川慎太郎, 福江高志, 白川英観
2. 発表標題 リブつき水冷チャンネルの脈動流による伝熱促進に関するリブ高さとのReynolds数の影響
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福江高志
2. 発表標題 脈を打つ流れに着眼した能動的冷却制御の研究進捗
3. 学会等名 日本機械学会 RC287「新時代の電子デバイスと電子機器における信頼性設計評価と熱設計に関する研究分科会」第3回分科会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浜谷慧一, 福江高志, 白川英観
2. 発表標題 矩形流路内に設置した円柱周りの脈動流による強制水冷の実験的研究
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 早川慎太郎, 福江高志, 白川英観
2. 発表標題 矩形リブまわりに誘起した脈動流の伝熱促進とリブ高さの関係についての数値解析
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市川航平, 福江高志, 浜谷慧一, 白川英観
2. 発表標題 曲がり有する矩形管内に設置した発熱体まわりの脈動流の数値解析
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fukue, T., Shirakawa, H. and Hiratsuka, W.
2. 発表標題 Basic Study on Flow and Heat Transfer Control around Heating Components in Rectangular Duct by Pulsating Flow
3. 学会等名 The 15th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization; FLUCOME2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浜谷慧一, 福江高志, 白川英観
2. 発表標題 矩形障害物まわりに誘起した脈動流の減速期間における熱流体特性の基礎検討
3. 学会等名 2019年度日本伝熱学会北陸信越支部総会・春季セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浜谷慧一, 福江高志, 白川英観
2. 発表標題 脈動流による矩形発熱体まわりの伝熱促進に対する減速期間の影響度の評価
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早川慎太郎, 福江高志, 白川英観, 平塚わかな
2. 発表標題 脈動流とリブの組み合わせによる冷却チャンネル内の伝熱促進に対するリブ高さの影響
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福江高志
2. 発表標題 リバース1DCAEから考える電子機器の熱設計
3. 学会等名 日本機械学会 1DCAE・MBDシンポジウム2019 (招待講演)
4. 発表年 2019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, バイオミメティクス https://www.fukuelab.net/biomimetics/

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)	富山高等専門学校・教授 (53203)	
研究協力者	小糸 康志 (Koito Yasushi) (70347003)	熊本大学・准教授 (17401)	
研究協力者	浜谷 慧一 (Hamatani Keiichi)		

6. 研究組織（つづき）

	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	早川 慎太郎 (Hayakawa Shintaro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関