

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：57601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04296

研究課題名（和文）EFD・CFD・気泡力学融合による高速水中キャビテーションの初生機構と条件の解明

研究課題名（英文）Investigation of Mechanism and Condition on Cavitation Threshold in High-Speed Water Flow by EFD-CFD-Bubble Dynamics Combination

研究代表者

藤川 俊秀 (FUJIKAWA, Toshihide)

都城工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：10777668

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は高速水流中の円柱表面近傍で局所的な張力により単一気泡核が成長する問題について、気泡核成長の機構と条件を動的閾値の観点から理論と実験により明らかにしたものである。まず気泡力学の基礎方程式（Rayleigh-Plesset方程式）から非線形モデル方程式を導出して動的閾値を定式化した。次にCFD解析による乱流場で、水の非平衡蒸発、熱伝導、気泡壁での並進減圧を考慮することにより、気泡核の成長と並進運動をラグランジュ的に追跡して動的閾値の正しさを確認し、実験により検証した。その結果、従来の静的閾値は気泡核成長の必要条件であり、動的閾値は成長の十分条件であ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

高速水流中の円柱表面近傍で局所的な張力により単一気泡核が成長する場合、単一気泡核の並進運動をラグランジュ的に追跡し、気泡壁での非平衡蒸発、熱伝導、並進減圧を考慮してRayleigh-Plessetの式により気泡核の成長を解析、その結果を実験と比較して気泡核成長の動的閾値（張力、持続時間、気泡核半径の関係）を解明した（学術的意義）。

本報告者が提案した動的閾値は流体機器内のキャビテーションのみならず、キャビテーションを利用したディーゼルエンジンの燃料霧化、水中ウォータージェット、水処理などにおいてもノズル設計に係る有用な成果である（社会的意義）。

研究成果の概要（英文）：The present study clarifies dynamical threshold of a bubble nucleus in theoretical and experimental manners under tension induced in high-speed water flow within the narrow slit between the flat solid wall and the cylinder surface. The model equation of nucleus growth under tension is formulated based on Rayleigh-Plesset equation, resulting in dynamical threshold of cavitation. The result is ascertained to be reasonable compared with the growth of the nucleus in turbulent water flows by CFD simulation where nonequilibrium evaporation and heat conduction through the nucleus wall, and wall pressure reduction due to the translational motion of the nucleus traced by Lagrangian technique. Consequently, Blake's threshold (static threshold) is found to be the necessary condition for cavitation whilst the dynamical one is the sufficient one.

研究分野：流体工学

キーワード：非循環型キャビテーションタンネル キャビテーション流れのCFD解析 気泡力学 気泡核成長の動的閾値理論 張力

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

水は張力下では熱力学的準安定状態となるが、水中で気泡核が自然に生成するためには100 MPa以上の張力(絶対圧力で負圧であるが、ここでは張力を正の量として表現する)が必要とされる。しかし、通常のポンプなどの流体機器中ではこのような強い張力は発生しない^{(1)~(4)}。このため水中にはマイクロで安定な気泡核が存在すると考えられており、弱い張力(たかだか1 MPa程度)下での気泡核成長に及ぼす気泡核サイズ、張力の強さ、張力の持続時間の影響の解明が必要とされているが、気泡核成長はマクロな流体力学スケールのみならずマイクロな気泡核サイズにも依存する複雑な現象であるため、未解決であった。

本研究は高速水流中の円柱表面近傍で局所的な張力により単一気泡核が成長してキャビテーションに至る動的過程を、気泡核成長の動的閾値の観点から理論と実験により明らかにしたものである。ここで「動的閾値」とは張力下で、ある有限の時間に気泡核が有限の大きさにまで成長する条件を云う。現実のキャビテーションでは気泡核が有限の時間に成長するため、無限時間における気泡核成長を扱う従来の静的閾値(Blakeの閾値)ではキャビテーションの予測ができなかった。このため、任意の液体に対して張力の強さと持続時間が与えられたときに、ある初期半径の気泡核がどの程度の大きさにまで成長するかが当該分野での重要な研究課題であった。

動的閾値は概念として新規であるため、従来の静的閾値との関係を明らかにする必要があり、またその結果を検証するためには非循環型キャビテーションタンネルによる実験、CFDおよび気泡力学に依らなければならなかった。本研究は研究開始当初のこのような状況でなされた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、キャビテーション発生における気泡核の役割と気泡核成長の動的閾値を実験および理論により明らかにすることである。この目的を達成するため、図1に示す非循環型キャビテーションタンネルを製作し、目開きの異なるろ過フィルタで処理した水を用いて気泡発生の実験的に検討した。本タンネルはタンネル観測部で発生したキャビテーション気泡が再び観測部に戻らないように非循環型として設計されている。実験ではとくに1個あるいは多くとも区別できる複数個の気泡が発生する条件に焦点を当てた。これはキャビテーションの動的閾値は単一気泡の気泡力学に基づいて研究されるべきであるとの本報告者らの考えに基づいている。このため静止液体中の気泡核にある有限時間だけある強さの張力が働く状況に対して気泡力学に基づく新しい動的閾値^{(5),(6)}を提示し、これと従来の静的閾値^{(1),(2)}との関係を明らかにするとともに、実験結果と比較する。

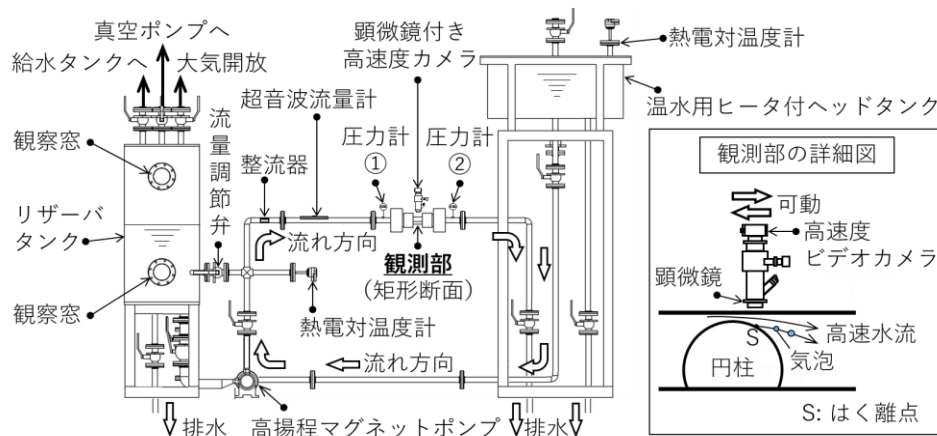


図1 実験装置概略図と観測部詳細(観測部での流れの持続時間=約15分、のど部の隙間高さ=0.7 mm、のど部でのレイノルズ数 $Re_{th} = 4 \times 10^4$ 、はく離点 S ではく離が周期的に発生)

3. 研究方法

【I. 実験】

非循環型キャビテーションタンネル観測部は2次元流路で、流れと直角に置かれた円柱と流路壁の隙間(のど部:隙間高さ=0.7 mm)を水が25m/s程度($Re_{th} = O(10^4)$)の流速で通過する。隙間下流のはく離点近傍で張力(1.4MPa程度)が発生し、張力発生と単一気泡核生成、その後の初生に関する実験を行う。本タンネルはつぎの特徴を有し、所期の実験を可能にする:①試料水が循環しないため観測部で発生した気泡は観測部に戻らない、②試料水の空気含有度と水温を調節できる、③流速や圧力を制御できる、④ヘッドタンクからポンプに水が押し込み状態であるためポンプ内では気泡が発生しにくい。

試料水は観測部で発生する気泡とは直接関係がない気泡の影響を極力小さくするために、目開きの異なる3種類のろ過フィルター (0.1 μm , 1 μm , 10 μm) により、水道水中に含まれる固形物と浮遊気泡を除去した後、ヘッドタンク内に貯留した。以下の実験を行う：

- ① はく離点 S 近傍 (図1の右側の枠内を参照) で発生する張力による単一気泡核成長、
- ② 気泡核状態から成長した気泡のはく離点からの離脱、
- ③ その後の気泡の並進運動の顕微鏡付き高速度カメラによる観測。

【II. CFD 乱流場での気泡核成長と動的閾値】

非定常ナビエ・ストークス方程式の CFD 解析により、3次元乱流場 (のど部で $Re_{th} = O(10^4)$) を作り、この中で成長しながら並進運動する単一気泡をラグランジュ的に追跡する。乱流モデルには LES model (SGS model : Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity Model) を採用する⁽⁷⁾。気泡は観測部の液体の体積と比較して無視できる体積であるため流れは液単相流とする。

図2に示すように、気泡は微細であるため球形とし、気泡の並進運動では、大域的な圧力勾配による力、液体の粘性による抵抗力、付加質量による抵抗力、抗力、揚力及び浮力を考慮して、3次元の並進運動の微分方程式を解く。気泡核の成長は Rayleigh-Plesset 方程式により解析し、その並進運動は CFD 解析による乱流場でラグランジュ的に追跡する。さらに Rayleigh-Plesset 方程式 から非線形モデル方程式を導出して動的閾値を定式化する。CFD 流れ場での気泡核成長の結果と動的閾値を比較して動的閾値の妥当性を検証する。

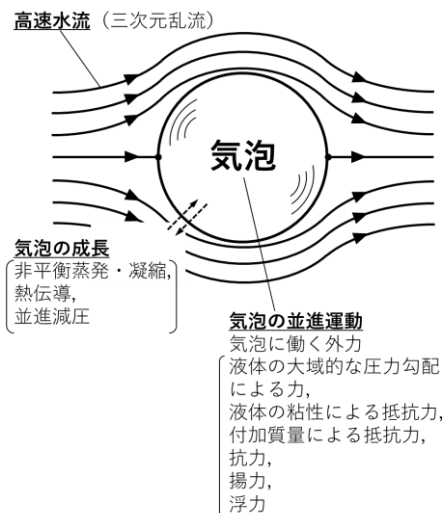


図2 気泡力学で考慮する因子 (気泡は誇張して描かれており、周囲の流れは乱れている)

4. 研究成果

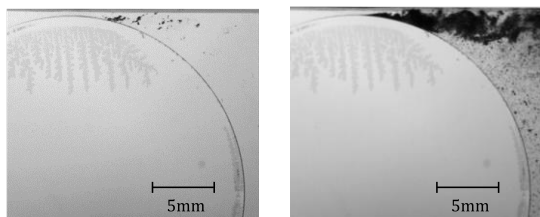
【I. 気泡核成長の動的閾値】

本研究で提示した動的閾値はある半径の単一球形気泡核が、与えられた張力の強さと持続時間内にどこまで大きくなるかを予測する理論である⁽⁸⁾。一方、従来の静的閾値 (Blake の閾値) はある半径の気泡核が与えられた条件下で無限の時間をかけて成長するかしないかの判定条件である。動的閾値は液体の種類により気泡核の成長を支配する因子が異なっており、水の場合は張力の強さと持続時間および表面張力係数が支配因子であるのに対し、グリセリンのような高粘度液体の場合には張力の強さと持続時間および粘性係数である^{(5),(8)}。本報告者らが提案した動的閾値はキャビテーションを利用したディーゼルエンジンの燃料霧化⁽⁴⁾、水中ウォータージェット⁽⁹⁾や水処理⁽¹⁰⁾などにおいて、ノズルを設計する際に有用な成果である。

【II. 実験および CFD 解析】

一例として、図3(a), (b)には目開き0.1 μm のろ過フィルタでろ過した水道水に対して行った場合の円柱と流路壁の隙間ののど部前後でのキャビテーション気泡発生の様子を示す。流速はそれぞれの図中に示してある。図3(a)の場合のはのど部下流の円柱表面近傍で直径約1mm以下の気泡が断続的に発生しているのに対して、図3(b)の場合のはのど部下流の円柱表面近傍で多くの気泡がほぼ定常的に発生、合体している。次節での気泡力学解析で明らかとなるように、どちらの場合も気泡は張力の強さが最大となるのど部の円柱表面で発生している。

図4はレイノルズ数 Re_{th} とキャビテーション数 σ_{th} の関係を示す。 Re_{th} と σ_{th} は次式で定義した：



(a) : Intermittent state (Δ)
 $u_{up} = 0.203 \text{ m/s}$
(b) : Quasi-steady state (\circ)
 $u_{up} = 0.293 \text{ m/s}$

図3 円柱ののど部下流でのキャビテーションの様子

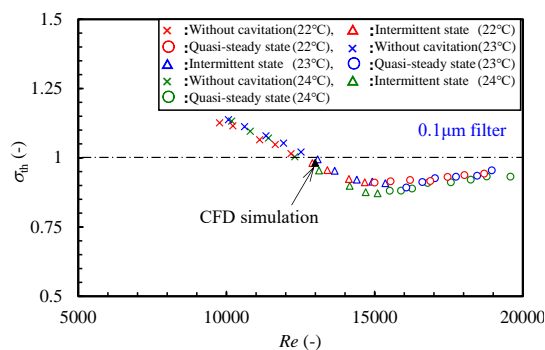


図4 Re_{th} と σ_{th} の関係
(目開き0.1 μm のろ過フィルタの実験結果と CFD 解析結果の比較)

$$Re_{th} = \frac{Du_{th}}{\nu} \quad (1),$$

$$\sigma_{th} = \frac{p_{up} - p_v(T_l)}{0.5\rho u_{th}^2} \quad (2)$$

ここで D はのど部の隙間、 u_{th} はのど部の断面平均流速、 ν は試料水の動粘性係数、 p_{up} は観測部上流側の圧力、 $p_v(T_l)$ は水温 T_l の影響を考慮した水の飽和蒸気圧、 ρ は水の密度である。図中の×印は気泡が生成しない条件、△印は気泡が断続的に生成する条件（気泡が成長し始めた段階）、○印は気泡がほぼ定常的に生成する条件で、▲は気泡が生成する条件 $\sigma_{th} = 0.967$ での CFD 解析結果である。キャビテーションは $\sigma_{th} < 1$ で生成していることがわかる。

【III. CFD 乱流場での気泡核成長と動的閾値の比較】

図 5 は一例として、CFD 乱流場での円柱の前縁と後縁を通る垂直面間で、のど部での円柱表面から $10\mu\text{m}$ （青線）および $350\mu\text{m}$ （赤線）の位置を通る流線上の水の圧力変化である。円柱表面上の境界層の厚さは約 $70\mu\text{m}$ であるため、青線は境界層内、後者は境界層外にある。前縁の位置を数字0で、絶対圧力0の位置を数字1で、のど部の位置を数字2で、はく離点の位置を数字3で、ほぼ一定の張力状態が終了する位置を数字4で示してある。点1から点4までは水は張力状態で、張力はのど部で最大である。

図 6 は図 5 の点0の位置で初期半径 $R_0 = 1.313\mu\text{m}$ と $R_0 = 1.530\mu\text{m}$ の気泡核が点0と点4までを移動するとき、CFD 解析による流れ場で Rayleigh-Plesset 方程式を解いて求めた半径の時間変化である。初期半径は点0での圧力と温度で気泡核がのど部での張力下で Blake の準静的閾値条件^{(1),(2)}を満足する気泡核半径である。気泡核はどちらもこのど部で臨界半径に達し、その後、急激に成長している。図中、左上の模式図に流線上の点4の時点での気泡を示す。ここで明らかにした気泡核の成長は本報告者らが提案^{(5),(6)}した気泡核の動的閾値理論により予測できる（図 6 の△、△）。

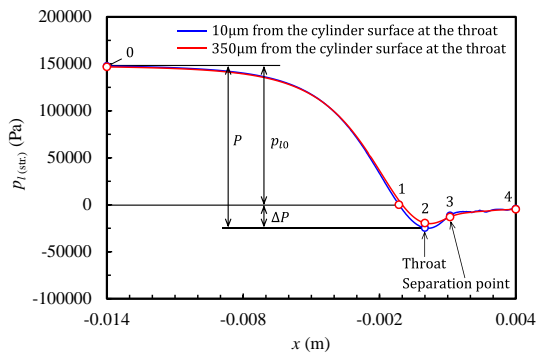


図 5 点0-4間の圧力分布の CFD 解析結果

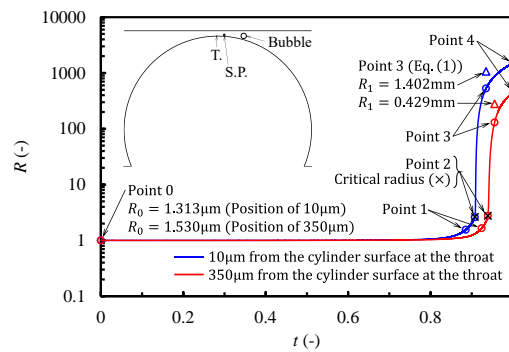


図 6 円柱のど部前後の CFD 流れ場における気泡核成長の気泡力学解析
(図中 T. はのど部, S.P. ははく離点)

<引用文献>

- (1) Franc, J.-P., and Michel, J.-M., “*Fundamentals of Cavitation*”, Kluwer Academic Publishers, (2004).
- (2) Young, F. R., “*Cavitation*”, Imperial College Press, (1999).
- (3) Washio, S., “*Recent Developments in Cavitation Mechanisms -A Guide for Scientists and Engineers-*”, Woodhead Publishing, (2014).
- (4) Giannidakis, E., Gavaises, M., and Arcoumanis, C., “Modelling of Cavitation in Diesel Injector Nozzles”, *J. Fluid Mech.*, Vol.616, (2008), pp. 153-193.
- (5) Fujikawa, T., Egashira, R., Hooman, K., Yaguchi, H., Masubuchi, H. and Fujikawa, S.: Theory of dynamical cavitation threshold for diesel fuel atomization, *Fluid Dynamics Research*, 54-4, (2022), 1-16.
- (6) Fujikawa, T., Egashira, R., Yaguchi, H. and Fujikawa, S.: Parametric classification and prediction method of cavitation inception under a tension for a finite time and subsequent atmospheric pressure (in Japanese), *Turbomachinery*, 47-2, (2019), 116-124.
- (7) Örley, F., Trummer, T., Hickel, S. Mihatsch, S. M., Schmidt, J. S. and Adams, A. N.: Large-eddy simulation of cavitating nozzle flow and primary jet break-up, *Phys. Fluids*, 27-8, (2015), 086101.
- (8) Fujikawa, T., Egashira, R., Jinnouchi, K., and Fujikawa, S., Experiments and Dynamical Threshold of Bubble Nucleus Growth in Water by Non-Recirculating Cavitation Tunnel (in Japanese), *J. Japan. Soc. Experi. Mech.*, 22-4 (2022), pp. 246–254.
- (9) Peng, G., Mori, M., Tazaki, T. and Oguma, Y.: Numerical simulation of unsteady cloud cavitation: A comparative study of compressible mixture models, *Earth and Environ. Science*, 240, (2019), 62043.
- (10) Soyama, H.: Luminescence intensity of vortex cavitation in a venturi tube changing with cavitation number, *Ultrasonics Sonochemistry*, 71-105389, (2021), 1-11.

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 藤川俊秀, 江頭 竜, 陣内 楓, 藤川重雄	4. 巻 22
2. 論文標題 非循環型キャピテーションタンネルによる水中での気泡核成長の実験と動的閾値	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本実験力学会誌	6. 最初と最後の頁 246-254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/jjsem.22.246	査読の有無 有
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 Fujikawa, T., Egashira, R., Hooman, K., Yaguchi, H., Masubuti, H., and Fujikawa, S.	4. 巻 54
2. 論文標題 Theory of Dynamical Cavitation Threshold for Diesel Fuel Atomization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/ac830d	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 藤川俊秀, 藤川重雄	4. 巻 20
2. 論文標題 模型実験と流れの相似則	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本実験力学会誌	6. 最初と最後の頁 72
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10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Fujikawa, S., Fujikawa, T., Egashira, R., and Hooman, K.
2. 発表標題 Dynamical Threshold of Cavitation due to Weak Tension Induced by Water Flows
3. 学会等名 International Conference for Multiphase Flows-2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松岡直弥, 宮司龍我, 岩永明大, 藤川俊秀, 中村祐二
2. 発表標題 熱流体データサイエンスによる高速準安定水中での気泡核生成と成長機構の解明
3. 学会等名 先進的技術シンポジウム (ATS2022: Advanced Technologies for SDGs 2022)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤川俊秀, 江頭 竜, 陣内 楓, 藤川重雄
2. 発表標題 非循環型キャピテーションタンネル内での気泡核成長実験と成長の動的閾値
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江頭 竜, 藤川俊秀, 陣内 楓, 藤川重雄
2. 発表標題 グリセリン中で有限時間張力にさらされた気泡核の動的キャピテーション閾値
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 陣内 楓, 江頭 竜, 藤川俊秀, 藤川重雄
2. 発表標題 テーパ円管内定常水流中での気泡核の膨張・収縮に与えるレイノルズ数の影響
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 陣内 楓, 江頭 竜, 藤川 俊秀, 藤川 重雄
2. 発表標題 テーパ円管内の定常流れにおける単一球形気泡の並進・膨張・収縮に関する気泡力学解析
3. 学会等名 日本機械学会九州支部 第75期総会・講演会 2022年3月9日
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩永 明大, 渡部 真将, 藤川 俊秀, 中村 祐二
2. 発表標題 熱流体データサイエンスによる高速準安定水中での気泡核生成機構の解明
3. 学会等名 先進的技術シンポジウム (ATS2021: Advanced Technologies for SDGs 2021) 2022年3月8日
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江頭 竜, 藤川 俊秀, 陣内 楓, 藤川 重雄
2. 発表標題 有限時間持続する水の張力下におけるキャピテーション初生解析
3. 学会等名 日本学術会議第20回キャピテーションシンポジウム 2021年12月9日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部 真将, 藤川 俊秀, 福田 正和, 江頭 竜, 中村 祐二, 藤川 重雄
2. 発表標題 非循環型キャピテーショントンネルにおけるキャピテーション初生条件の検討
3. 学会等名 日本実験力学会2021年度年次講演会 2021年8月25日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江頭 竜, 藤川俊秀, 矢口久雄, 増淵 寿, 藤川重雄
2. 発表標題 出口での圧力と速度の非一様性を考慮したストークス自由噴流理論
3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>(1) 2023年3月: 先進的技術シンポジウムATS2022優秀学術賞(発表者: 松岡直弥【指導学生】)。 (「熱流体データサイエンスによる高速準安定水中での気泡核生成と成長機構の解明」と題する研究発表に対する優秀学術賞)</p> <p>(2) 2022年3月: 先進的技術シンポジウムATS2021優秀学術賞(発表者: 岩永明大【指導学生】)。 (「熱流体データサイエンスによる高速準安定水中での気泡核生成機構の解明」と題する研究発表に対する優秀学術賞)</p>
--

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	江頭 竜 (EGASHIRA Ryu)	福岡工業大学・工学部知能機械工学科・教授 (37112)	

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		
オーストラリア	The University of Queensland		
オランダ	Delft University of Technology		