

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03874

研究課題名（和文）熱音響エンジンによる音波を用いた高効率な二酸化炭素回収技術の創生

研究課題名（英文）Development of efficient carbon dioxide capture with acoustic waves by a thermoacoustic engine

研究代表者

横山 博史（YOKOYAMA, HIROSHI）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：60581428

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）：二酸化炭素物理吸着への音響加振による制御効果およびその制御機構を解明するため、吸着特性評価、モノリス下流の速度場、二酸化炭素を含む平面噴流におけるBackground-Oriented Schlieren法を用いた濃度場の計測を行い、次の知見を得た。1)吸着速度は音響加振により増加し、モノリスを速度変動の腹に設置した場合に特に大きな制御効果を得た。2)加振時には流路内で周期的に平坦かつ高い速度分布、高い二酸化炭素濃度が現れると推察され、これらが吸着促進に寄与している可能性があると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工場や発電所ではCO₂排出量の削減が求められており、排出ガス中のCO₂を吸着し回収する手法が着目されている。吸着方法の一つにファンデルワールス力を利用した物理吸着があるが、実用化のためには吸着速度や回収率の改善が必要と考えられる。

本研究により音響加振を用いた制御がCO₂物理吸着を促進可能であることが示された。さらに、吸着促進に適切な音響加振条件が明らかになり、今後CO₂分離回収技術の確立に貢献する研究成果を得たと考えられ、社会的意義は大きい。また、研究の中で得られたBOS法を用いた濃度場分析技術は種々の濃度場の分析に活用可能であり学術的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：The effects of acoustic excitation on CO₂ physisorption were investigated using a monolith coated with zeolite. The monolith was placed in a flow duct, where acoustic resonance occurred due to acoustic excitation by speakers. The adsorption was promoted by acoustic excitation, and the promotion was intensified when the monolith was placed at the anti-node of the velocity fluctuations. The high velocity profiles downstream of the monolith occurred periodically under acoustic excitation. Moreover, the effects of acoustic excitation on the CO₂ concentration field in a planar jet comprising a CO₂ + N₂ gas mixture were investigated using a background-oriented Schlieren method. The CO₂ concentration around the jet exit was indicated to become periodically larger compared with the baseline case without sound. This indicates the possibility of enhanced CO₂ concentration in the monolith with acoustic excitation, which can contribute to promotion of CO₂ adsorption.

研究分野：流体工学

キーワード：二酸化炭素分離回収 物理吸着 ゼオライト 音響共鳴 音響加振 流体制御

1. 研究開始当初の背景

工場や発電所では CO₂ 排出量の削減が求められており、排出ガス中の CO₂ を吸着し回収する手法が着目されている。吸着方法の一つにファンデルワールス力を利用した物理吸着があるが、実用化に向けて吸着速度や回収率の改善が必要と考えられる。既存技術として、シリカゲルを用いた水蒸気の物理吸着において、音響加振による吸着促進効果が示されていたが、CO₂ 吸着への音響加振による影響は十分に明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、CO₂ 吸着への音響加振による制御効果および制御メカニズムを解明することを目的とし、モノリスを用いた CO₂ 吸着実験と CO₂ を含む平面噴流の濃度場計測を行った。

3. 研究の方法

3. 1 モノリスを用いた CO₂ 吸着実験

CO₂ 吸着実験には、図1に示すように一辺42 mmの正方形断面を有する管路を用いた。管閉端を原点とし長手方向にx_r軸をとる。CO₂ 吸着のためにゼオライト4Aを担持させた一辺40 mmのモノリスを管内に設置した。モノリスは1辺h = 3 mmの正方形セルを121個有する。

作動流体は CO₂ (15vol%) と N₂ の混合気体とし、モノリス流路部を通過する断面平均流速を $U_{ef} = 0.017\text{--}0.069\text{ m/s}$ とした。モノリスは音響加振時の速度変動の腹、節となる位置 $x_{r,m} = 425, 670\text{ mm}$ に設置し、各条件での管の共鳴周波数 $f_r = 200, 243\text{ Hz}$ で音響加振を行った。この時、音の波長 λ に対し、モノリス設置位置はそれぞれ $x_{r,m}/\lambda = 0.25, 0.50$ となる。さらに、閉端圧力振幅 $p_{a,c} = 0\text{--}75\text{ Pa}$ の範囲で加振強さを変化させた。

モノリスの上流および下流において CO₂ 濃度を計測し、吸着速度は上流と下流の濃度差に密度と流量を乗ずることで評価した。この際、上流・下流の濃度計間の気体移動に伴う時間遅れは補正して評価を行った。

モノリス下流の速度場を熱線風速計を用い計測した。計測精度を考慮し、 $U_{ef} = 0.34\text{ m/s}$ の条件で、 $p_{a,c} = 50\text{ Pa}$ の音響加振が流れ場に及ぼす影響について計測を行った。ここではモノリス下流断面中央を原点、流れ方向にx軸、上向きにy軸をとり、y方向の速度分布を評価した。

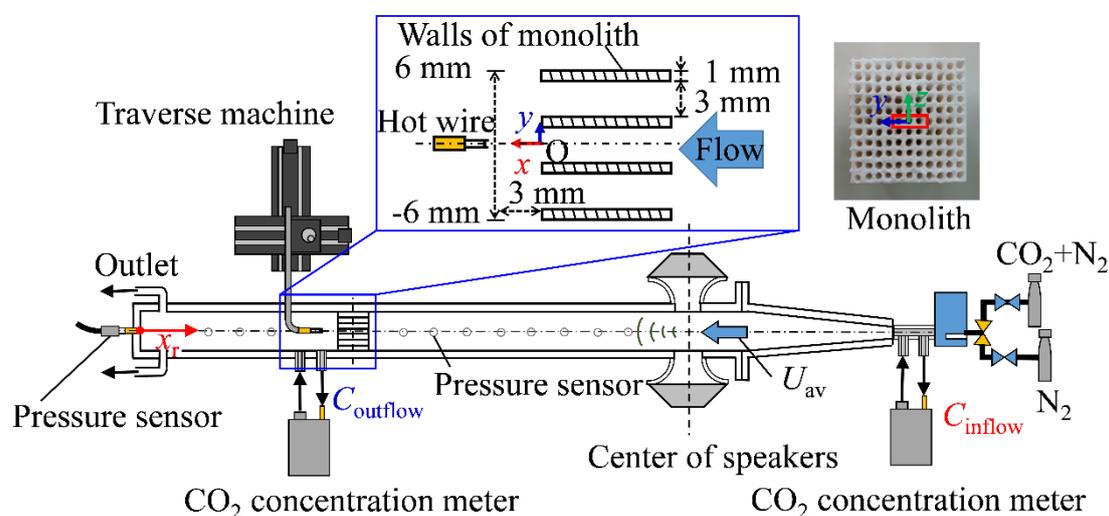


図1 吸着実験装置

3. 2 CO₂ 混合気体の平面噴流の濃度場計測

音響加振による吸着促進メカニズムを明らかにするため、図2に示すように、モノリスのセル一辺と同じ高さ $h = 3\text{ mm}$ の流路 (幅40 mm) から噴出する平面噴流の濃度分布を計測した。作動流体には吸着実験と同様にCO₂ (15vol%)とN₂の混合ガスを用い、断面平均流速は $U_{ef} = 0.069\text{ m/s}$ とし、音響加振が噴流の濃度分布に及ぼす影響を調べた。加振周波数は $f = 200\text{ Hz}$ とし、音の強さは流路内の出口から5 mm上流の位置で評価し、圧力振幅を $p_a = 15\text{ Pa}$ とした。

濃度場の計測にはBackground Oriented Schlieren (BOS) 法を用いた。BOS法は密度こう配により生じる光の屈折量を背景パターンの移動量から評価する。ここでは背景画像 (6 mm間隔の縞模様) のパターンの移動量をウェーブレット分析で検出し、密度こう配を求めた。得られた密度こう配を空間積分することで各点の密度を求め、CO₂ 濃度を評価した。

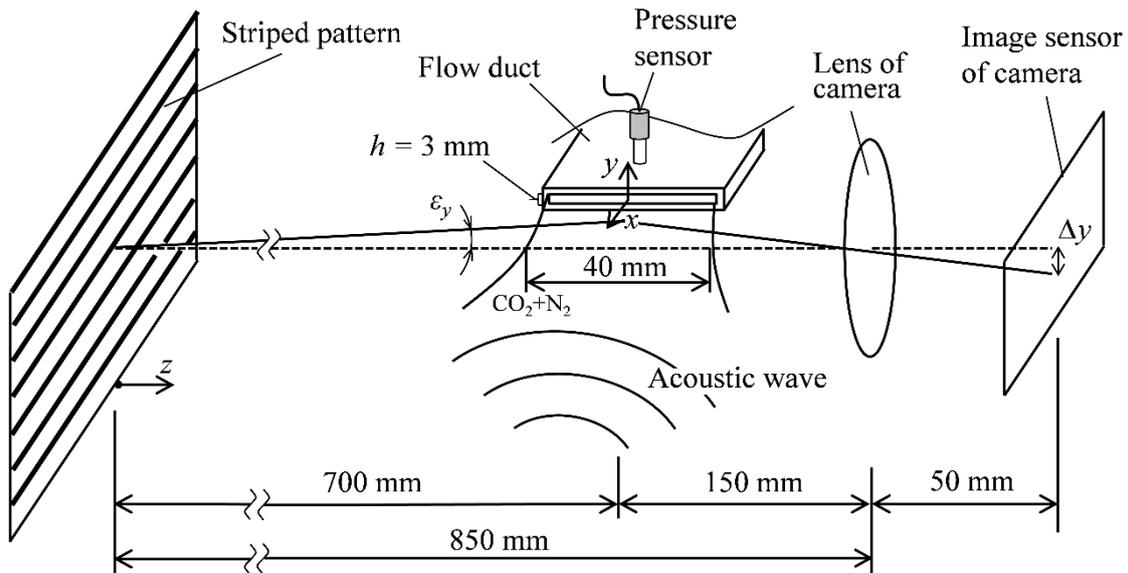


図2 BOS法を用いた濃度場の計測

4. 研究成果

4. 1 モノリス吸着材による CO₂ 吸着

図3(a)は音響加振なしの条件において、モノリス上流・下流での CO₂ 濃度の時間変化を、各位置を CO₂ が通過し始めた時間を $t = 0$ と示したものである。モノリスの下流では上流よりも緩やかに濃度が増加し、モノリスにおいて CO₂ が吸着されていることが確認できる。モノリス上流での濃度変化には流速による大きな違いは見られなかった。一方、下流での CO₂ 濃度の立ち上がりはより高い流速 $U_{ef} = 0.069 \text{ m/s}$ の方が $U_{ef} = 0.017 \text{ m/s}$ よりも急峻になり、より迅速に吸着が行われたと考えられる。図3(b)に吸着速度を示す。吸着速度は $t = 30 \text{ s}$ 付近で最大となり、最大の吸着速度は流速が増加するにつれて大きくなることがわかった。

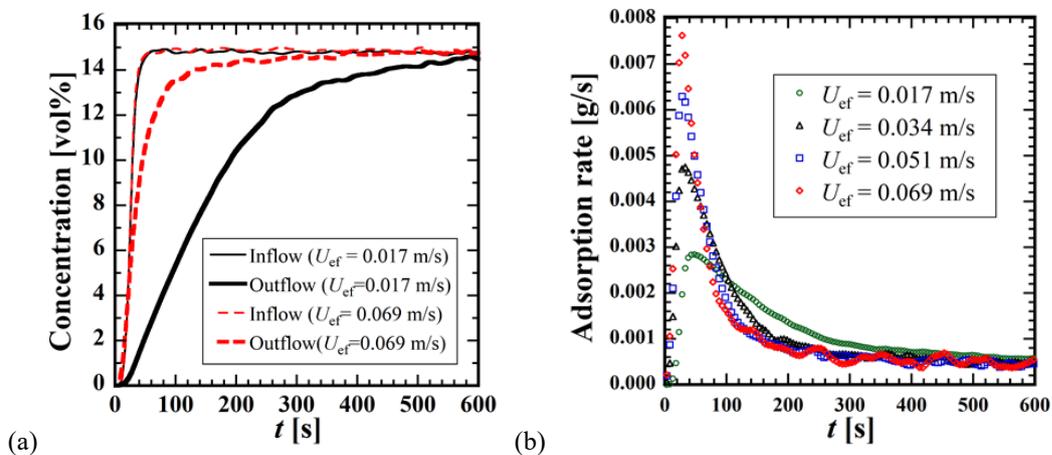


図3 モノリスでの CO₂ 吸着. (a) 濃度の時間変化. (b) 吸着速度の時間変化.

4. 2 音響加振による吸着への影響

図4(a)には吸着速度を時間積分することで得られる吸着量 q の時間変化を示す。音響加振した条件 ($p_{a,c} = 75 \text{ Pa}$) では、音響加振なしと比較して吸着量の立ち上がりが速くなり、これは吸着が促進されていることを意味する。

音響加振が吸着に及ぼす影響を評価するため、吸着速度が吸着材の平衡吸着量と吸着量の差 ($q^* - q$) に比例するとした Linear driving force モデル⁽¹⁾に基づき、式(1)を用い物質移動係数 k を求めた。

$$dq / dt = k(q^* - q) \quad (1)$$

ここで、本実験の CO₂ 分圧は低く、平衡吸着量が分圧に対し線形的に変化する領域であると考え、

平衡吸着量 q^* の推定にはヘンリーの吸着等温式を用いた⁽²⁾.

図4(b)には、各閉端圧力振幅での物質移動係数 k を音響加振なしの値 k_{ref} で除した値を、音響加振による吸着促進率として示す. 吸着促進率はより大きな閉端圧力振幅 $p_{a,c}$ で強まり、 $p_{a,c} = 75 \text{ Pa}$ ($x_{r,m}/\lambda = 0.25$) では1.17となった. なお、この条件での音響粒子速度の振幅は $2.6U_{ef}$ と推定される. また、速度変動の腹となる $x_r/\lambda = 0.25$ にモノリスを設置した条件では、 $x_{r,m}/\lambda = 0.50$ に比べ、より高い吸着促進効果が得られた.

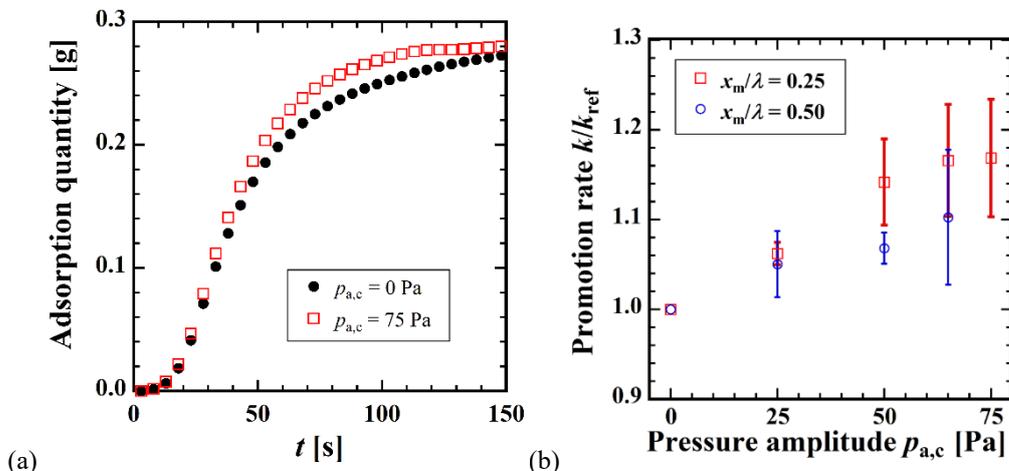


図4 音響加振による吸着への制御効果 ($U_{ef} = 0.069 \text{ m/s}$). (a) 吸着量の変化. (b) 吸着促進率.

4. 3 流れ場および濃度場

図5にモノリスのセル後流 ($U_{ef} = 0.34 \text{ m/s}$, $x/h = 1.0$) での速度 u の分布を示す. ここで音響加振あり ($p_{a,c} = 50 \text{ Pa}$) の条件では速度変動のピーク値を位相平均した流速、音響加振なしの条件では時間平均した流速を示している. 音響加振なしの条件ではセル中心で流速が最も大きく、放物線型の速度分布が得られた. 一方、音響加振ありでは平坦かつ高い速度分布が得られた. これは音響的な振動境界層厚さ $\delta_v/h = (\nu/\pi f_i)^{0.5}/h = 0.05$ が流路幅に対し薄いため、セル壁面近傍においても高い流速が通過するためと考察された.

図6にBOS法を用いて計測された平面噴流内($x/h = 0.1$) の濃度分布を示す. 音響加振ありの条件 ($p_a = 15 \text{ Pa}$) では濃度分布が時間的に変動し、ここでは最大となる時間での分布を示す. 流路中心 ($y = 0$) では音響加振なしの条件に比べ2.5%濃度が増加した. これは、前述したように壁面近傍を含め流路内全体で周期的に高い速度が発生し、 CO_2 がより効果的に下流に運ばれたためと考えられる. こうした濃度場分析技術は今後の CO_2 回収技術の発展に貢献すると考えられる.

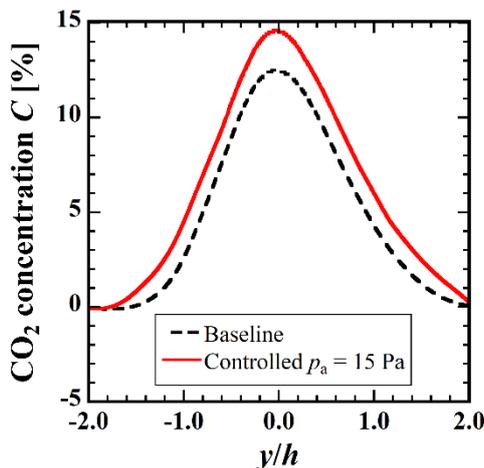
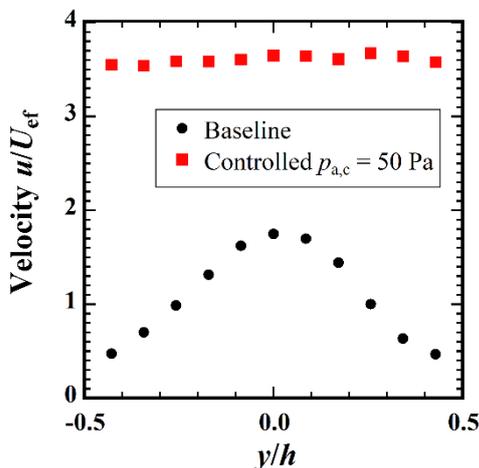


図5 セル後流の速度分布 ($U_{ef} = 0.34 \text{ m/s}$)

図6 噴流の濃度分布 ($U_{ef} = 0.069 \text{ m/s}$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 0件）

1. 著者名 Yokoyama Hiroshi, Yoza Katsuaki, Nishikawara Masahito, Yanada Hideki	4. 巻 205
2. 論文標題 Simulation of acoustic oscillatory flows around a curvature controlled by a plasma actuator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	6. 最初と最後の頁 109274 ~ 109274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apacoust.2023.109274	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 KANEKO Tomoaki, YOKOYAMA Hiroshi, SATO Mitsuru, NISHIKAWARA Masahito, YANADA Hideki	4. 巻 88
2. 論文標題 Flow fields around an axial fan with acoustic resonance in a duct	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 22-00044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00044	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 Yokoyama Hiroshi, Omori Yasuaki, Kume Masashi, Nishikawara Masahito, Yanada Hideki	4. 巻 185
2. 論文標題 Simulation of thermoacoustic heat pump effects driven by acoustic radiation in a cavity flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 122424 ~ 122424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122424	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 Yokoyama Hiroshi, Omori Yasuaki, Kume Masashi, Nishikawara Masahito, Yanada Hideki	4. 巻 185
2. 論文標題 Simulation of thermoacoustic heat pump effects driven by acoustic radiation in a cavity flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 122424 ~ 122424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122424	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15件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Hiroshi Yokoyama, Takahiro Minamoto, Masashi Kume, Masahito Nishikawara and Hideki Yanada
2. 発表標題 A thermoacoustic heat pump driven by self-sustained oscillations in a cavity flow with a stack
3. 学会等名 24th International Congress on Acoustics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Yokoyama, Masahito Nishikawara and Hideki Yanada
2. 発表標題 CONTROL OF FLUID-ELASTIC OSCILLATIONS WITH ACOUSTIC RESONANCE IN A CAVITY FLOW WITH A CANTILEVER BY A PLASMA ACTUATOR
3. 学会等名 The 28th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masashi Kume, Hiroshi Yokoyama, Takahiro Minamoto, Masahito Nishikawara, and Hideki Yanada
2. 発表標題 COMPRESSIBLE SIMULATION OF A THERMOACOUSTIC HEAT PUMP IN A CAVITY FLOW WITH A STACK
3. 学会等名 The 28th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久米将司, 横山博史, 西川原理仁, 柳田秀記
2. 発表標題 キャピティ音により駆動される熱音響ヒートポンプ
3. 学会等名 第42回流力騒音シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月健太, 横山博史, 西川原理仁, 柳田秀記
2. 発表標題 ハニカムフィルタを用いたCO2吸着に音響加振が及ぼす影響
3. 学会等名 第20回日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤充, 横山博史, 金子友暁, 西川原理仁, 柳田秀記
2. 発表標題 上流ダクト内の音響共鳴を伴う軸流ファン周りの流れ場計測
3. 学会等名 日本機械学会年次大会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久米 将司, 横山 博史, 源 貴裕, 西川原 理仁, 柳田 秀記
2. 発表標題 キャピティ音により駆動される熱音響ヒートポンプの数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 源 貴裕, 横山 博史, 久米 将司, 西川原 理仁, 柳田 秀記
2. 発表標題 細管流路を有するキャピティ流れの流体共鳴振動
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuaki Yoza, Hiroshi Yokoyama, Masahito Nishikawara, Hideki Yanada
2. 発表標題 Numerical Simulation for Control of Acoustic Oscillatory Flow in a Curved Duct by a Plasma Actuator
3. 学会等名 AUN/SEED-Net Joint Regional Conference in Transportation, Energy and Mechanical Manufacturing Engineering - RCTEMME2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 與座 克明, 横山 博史, 西川原 理仁, 柳田 秀記
2. 発表標題 プラズマアクチュエータを用いた曲がり管内の音響振動流の制御
3. 学会等名 第23回スターリングサイクルシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡進也, 西川原理仁, 横山博史
2. 発表標題 温度勾配を有するスタックを設置したキャピティ流れの空力音響解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東海和真, 長尾巨晃, 西川原理仁, 横山博史
2. 発表標題 小型軸流ファンの空力特性および発生音に対するプラズマアクチュエータを用いた制御
3. 学会等名 第21回日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉岡進也, 西川原理仁, 横山博史
2. 発表標題 温度勾配をもつスタックの設置がキャビティ音に及ぼす影響
3. 学会等名 2023年度熱音響研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福本遼太郎, 西川原理仁, 横山博史
2. 発表標題 キャビティ流れの流体共鳴振動により駆動される熱音響ヒートポンプ
3. 学会等名 第25回スターリングサイクルシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長尾 亘晃, 横山 博史, 東海 和真, 西川原 理仁
2. 発表標題 音響共鳴を伴う軸流ファン周りの流れに対するプラズマアクチュエータを用いた制御
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究室ホームページ http://ec.me.tut.ac.jp/ 大学教員紹介 https://www.tut.ac.jp/university/faculty/me/666.html 研究者情報 (researchmap) https://researchmap.jp/h-yokoyama/</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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------