

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02076

研究課題名(和文)乱流希薄予混合旋回火炎から生じる燃焼騒音の発生・変調メカニズムの解明

研究課題名(英文)Elucidation of mechanism of combustion noise generation and modulation from turbulent lean premixed swirling flame

研究代表者

黒瀬 良一 (Kurose, Ryoichi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70371622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、精巧な実験と高精度の数値解析を併用することにより、燃焼騒音の発生・変調メカニズムを、特に壁面の影響に着目して明らかにすることを目的とした。本研究により、騒音スペクトルの音圧レベル(SPL)のピークは、壁面を設置することにより不明瞭になり、その特性が壁面と火炎の距離に応じて変化することが分かった。また、この変化が壁面と接触することにより火炎形状が変化し、火炎から直接放出される音波の特性が変化することや、その火炎から直接放出された音波が壁面反射波と干渉することに起因することを明らかにした。さらに、開発した数値解析手法が燃焼騒音特性に及ぼす壁面の影響を精度よく予測可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

燃焼騒音に関する研究の歴史は古く、数多くの研究が存在するが、そのほとんどは火炎から直接発生する直接燃焼騒音に関するものであり、壁面や周囲乱流渦等の外的因子の影響を受けて変調する間接燃焼騒音に関するものは極めて数少ない。本研究は、間接燃焼騒音の中でも特に取り扱いが困難な壁面の影響に着目し、そのメカニズムの一端を明らかにしたものであり、学術的意義は極めて高い。また、本研究において確立した数値解析手法は、様々な燃焼機器から生じる燃焼騒音、ひいては燃焼振動の特性を高精度に予測可能であり、脱炭素社会の実現につながる水素燃料利用促進技術の開発にも大いに役立つことが期待できるため、本研究の社会的意義も高い。

研究成果の概要(英文)：In this study, the generation and modulation mechanism of combustion noise was investigated both by sophisticated experiment and high-fidelity numerical simulation in detail, especially for the effect of wall. The results showed that the peaks of the Sound Pressure Level (SPL) spectrum of combustion noise become obscure due to the presence of the wall, and the characteristics change depending on the distance between the wall and flame. This is considered to be due to the facts that the flame shape and therefore the characteristics of direct sound waves from the flame change when the flame attaches the wall, and/or that the direct sound waves are interfered by the reflected waves from the wall. In addition, the numerical approach developed in this study was proven to be capable of precisely predicting the effect of wall on the combustion noise characteristics.

研究分野：熱流体工学

キーワード：燃焼騒音 希薄予混合火炎 旋回火炎 水素燃焼 乱流 壁面 計測 数値シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機用や産業用に用いられるガスタービンエンジンから発生する騒音は、人体への悪影響を危惧する医学的見地から規制の対象になっているばかりでなく、機器の甚大な損傷を引き起こす燃焼振動のトリガーに成り得ることが指摘されていることから、その予測と制御は極めて重要な課題である。騒音は、ファンや排気ジェットを音源とする流体騒音と燃料/酸化剤の発熱反応を音源とする燃焼騒音とに大別され、多くの場合では流体騒音が支配的となることが知られている (Dowling and Mahmoudi [1])。そのため、流体騒音に関する研究は従来から国内外で数多く行われており、その低減は着実に進んでいる。しかし、その結果として、近年では燃焼騒音の寄与率が急激に上昇し、その低減が世界的な喫緊の課題となっている。

燃焼騒音に関する研究の歴史は古く、関連する論文は数多く存在するが、そのほとんどは開放空間における火炎の外に音響インテンシティプローブを設置することにより音圧レベル (Sound Pressure Level: SPL) を計測した実験的研究 (例えば, Piscoya *et al.* [2]) や、燃焼騒音を捉えるための数値解析手法を提案した数値的研究 (例えば, Ihme and Pitsch [3], Pillai and Kurose [4]) であり、燃焼騒音の発生メカニズムを議論するまでに至っていないのが現状である。この主な理由としては、実験的研究では測定可能な物性や燃焼条件が限られていること、また、数値的研究では未だ計算コストに見合った高精度の数値解析手法が確立されていないことが挙げられる。その上、ガスタービンエンジン等、実際の実機からの燃焼騒音は、火炎から直接発生する直接燃焼騒音ではなく、壁面や周囲乱流渦等の外的因子の影響を受けて変調する間接燃焼騒音になると考えられるが、その現象の複雑さ故に、これらの外的因子が燃焼騒音に及ぼす影響についてはほとんど明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究では、精巧な実験と高精度の数値解析により、燃焼騒音の発生・変調メカニズムを明らかにすることを目的とした。具体的には、開放空間に形成した水素の乱流希薄予混合旋回火炎の傍らに壁面を配置し、その壁面の存在が局所における圧力、温度、速度等の変動特性に及ぼす影響を実験的、数値的に詳しく調べた。

3. 研究の方法

(1) 実験

実験で使用した弱旋回予混合バーナ及び計測システムの概略を図 1 に示す。燃焼器上流で混合された水素ガスと空気の前混合気は燃焼器下部から燃焼器内へ流入し、二つの整流板と一つのスワローを通過して、内径 $D=35\text{mm}$ のバーナ出口へ流れる。スワローは、中心部の多孔板と燃焼器中心軸に対して 37 度の傾斜角を持つ 12 枚の軸流ベーンによって構成される。スワローは燃焼器出口から 43mm 上流に設置されており、スワロー数は約 0.39 である [5]。バーナ出口における平均バルク流速 V_m を 15m/s に固定し、当量比 ϕ は 0.45 で一定とする。

壁面が燃焼騒音に与える影響を調査するため、バーナ出口の傍らに高さ 300mm × 幅 300mm × 厚み 2mm の石英板を設置して実験を行う。石英板は x 軸に垂直に、バーナ出口に近い端面の中心座標を $(x, y, z) = (d_w, 0, 150)$ mm となるように設置する。壁面位置を $d_w = 17.5 \sim 420\text{mm}$ の計 18 条件に変化させる。

燃焼騒音は、5つのプリアンプ一体型マイク (G.R.A.S. 146AE 1/2") を、それぞれ異なる場所に設置して計測する。以下では、 $(x, y, z) = (-180, -10, 50)$ に設置したマイク 1 で計測した騒音データのみを示す。また、燃焼騒音と合わせて、 10kHz OH* 自発光画像計測及び 40kHz ステレオ PIV 計測を行う。

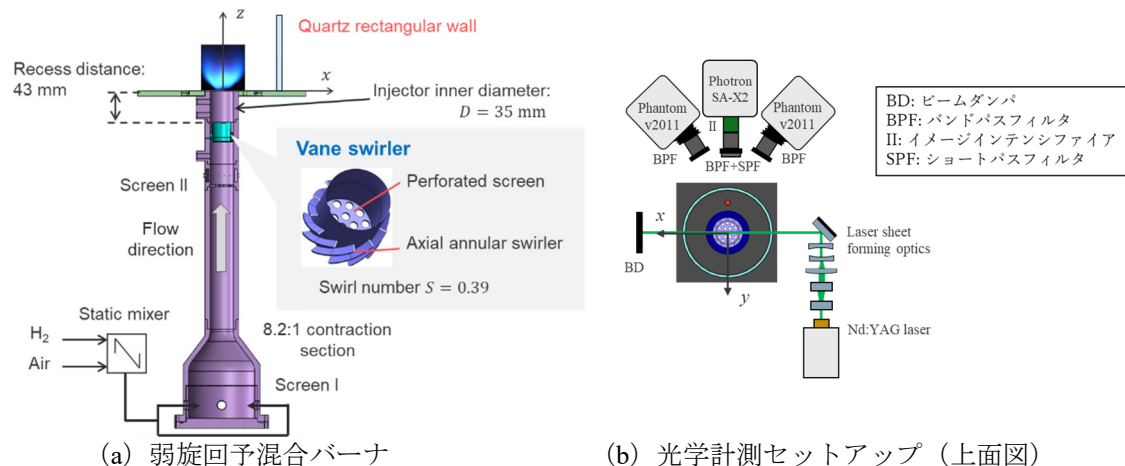


図 1 実験の概要

(2) 数値解析

数値解析には、燃焼モデルとして Flamelet Generated Manifold 法[6]を採用した LES (Large Eddy Simulation) を使用する。支配方程式は、質量、運動量、混合分率、反応進行変数であり、音響解析 (CAA, Computational Aerodynamics) には、Acoustic Perturbation Equations for Reacting Flows (APE-RF) [7]を用いる。APE-RF は現在まで壁面の影響を含む音響場に適用された例がないため、壁面の音響場における境界条件として、Ghost point 法[8]を拡張して適用する。また、計算領域および計算条件の概略を図 2 に示す。対象とする火炎は、上述の JAXA 弱旋回流希薄水素火炎であるが、計算負荷の観点から流入部の計算は含めない。壁面については、実験と同様に燃焼器入り口中心から 29 mm の位置に 300 mm×300 mm で厚さ 5 mm の板を置き、断熱壁として取り扱う。初期条件として計算領域全体を 300 K、0.1 MPa の空気で満たし、流入する水素-空気予混合気については当量比を 0.45、温度 300 K としてバルク速度 15 m/s で流入させる。具体的な流入速度分布については、実験の流入速度分布に合うように設定する。また、計算コードにはインハウスコードである FK³-CAA[9]を用いる。

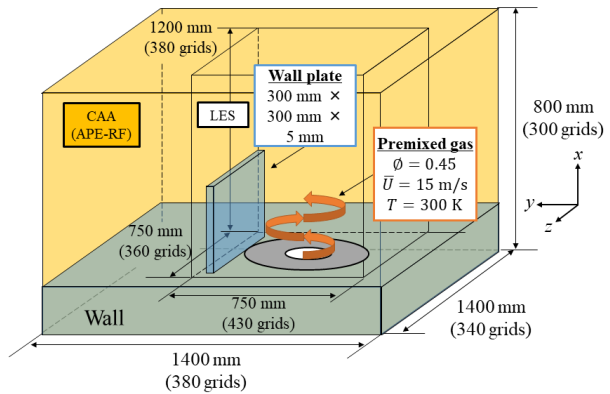


図 2 計算領域及び条件

4. 研究成果

(1) 実験

実験により得られた主な知見を以下にまとめる。

- ① 壁面なし条件では、燃焼騒音スペクトル上の約 500 Hz 及び 940 Hz に 2 つの特徴的なピークが観測されたが[5]、壁面あり条件 (特に、壁面が火炎と物理的に干渉する位置に設置された $d_w = 29$ mm の条件) では、2 つの特徴的なピークは弱まり、広帯域において比較的高い SPL を示すスペクトルが観測される (図 3)。これは、壁面の存在により渦の移流が阻害され、燃焼騒音の発生要因である渦と火炎の干渉が生じにくくなることに起因すると考えられる。
- ② d_w の値によって、特徴的な 2 つのピークの SPL が大きく変化する (図 4)。これは、火炎から直接生じた音波と、壁面で反射した音波が干渉することによる影響であると考えられる。

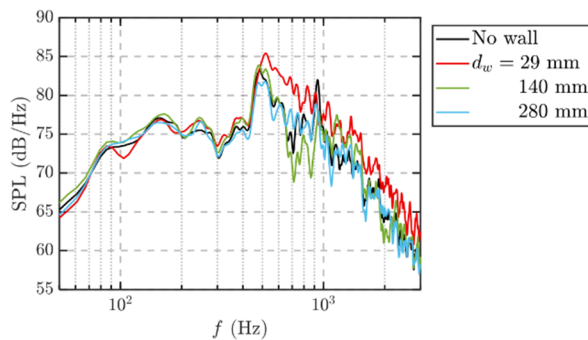
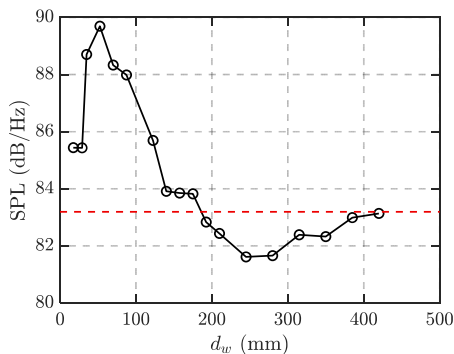
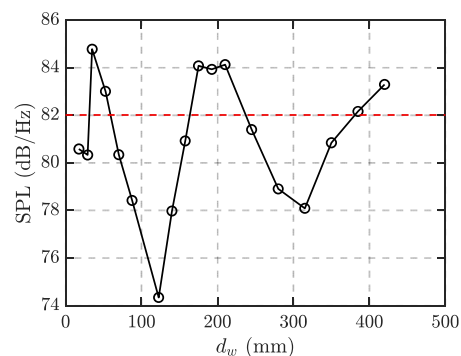


図 3 壁面を異なる位置に設置した際の SPL (4 条件のみ図示)



(a) 第一ピーク (500Hz 付近)



(b) 第二ピーク (940Hz 付近)

図 4 壁面の位置と SPL の関係 (赤破線は壁面なし条件における各ピークに対応する SPL)

(2) 数値解析

数値解析により得られた主な知見を以下にまとめる。

- ① 壁面あり条件の火炎は、浮き上がり火炎ではあるものの、その形状は壁面によって変形し、火炎表面も複雑な乱流場によってゆがめられる (図 5)。また、火炎から発生した音波は、主に壁面とは反対方向に伝播する (図 6)。これは、壁面の後方に音波が伝播するには壁を回り込んで進む必要があり、単純に伝播する距離が増えるため減衰の効果が大きくなることに加え、壁面後方に伝播した複数の音波が干渉し合うことに起因する。
- ② 実験と同様、数値計算においても、壁面なし条件で予測された遠方 $((x,y,z)=(50\text{ mm}, 180\text{ mm}, 0\text{ mm}))$ における 900Hz 周辺のピークが、壁面を配置することによって消滅する (図 7)。これは、壁面と火炎が相互作用することによって、火炎の振動が空間的に不均一となり、結果として単一の音波生成を抑制することに起因する。また、この変化は、特に旋回方向の壁面近傍における火炎の振動において顕著である。

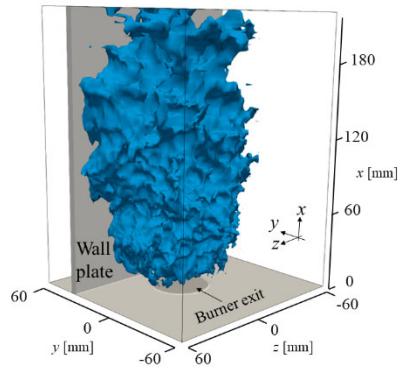


図 5 火炎温度等値面の瞬間分布

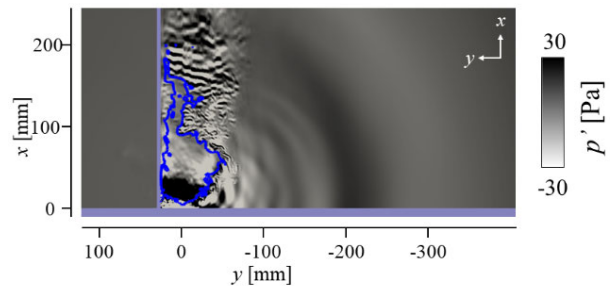
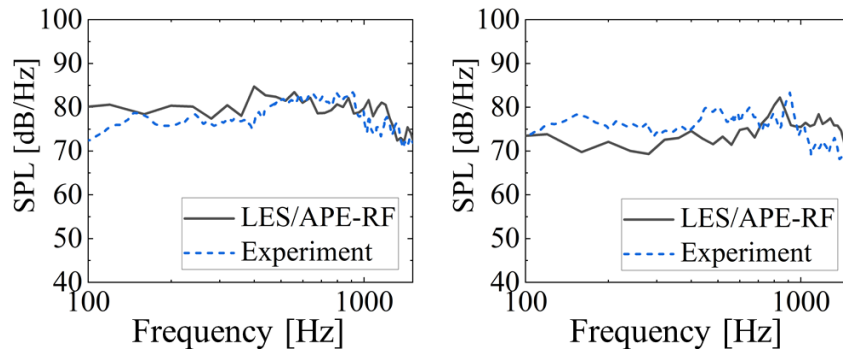


図 6 圧力変動の瞬間分布



(a) 壁面あり条件

(b) 壁面なし条件

図 7 SPL に及ぼす壁面の影響と実験値との比較

<引用文献>

- [1] A. P. Dowling, Y. Mahmoudi, “Combustion noise”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 35, 65–100 (2015).
- [2] R. Piscocya, H. Brick, M. Ochmann, P. Költzsch, “Equivalent source method and boundary element method for calculating combustion noise”, *Acta Acustica united with Acustica*, 94, 514-527 (2008).
- [3] M. Ihme, H. Pitsch, “On the generation of direct combustion noise in turbulent non-premixed flames”, *International Journal of Aeroacoustics*, 11, 25-78 (2012).
- [4] A. L. Pillai, R. Kurose, “Combustion noise analysis of a turbulent spray flame using a hybrid DNS/APE-RF approach”, *Combustion and Flame*, 200, 168–191 (2019).
- [5] T. Shoji, Y. Iwasaki, K. Kodai, S. Yoshida, S. Tachibana, T. Yokomori, “Effects of Flame Behaviors on Combustion Noise from Lean-Premixed Hydrogen Low-Swirl Flames”, *AIAA Journal*, 162, 4505-4521 (2020).
- [6] J. A. V. Oijin, L. P. H. D. Goey, “Modeling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds”, *Combustion Science and Technology*, 161, 113-137 (2000).
- [7] R. Ewert, W. Schröder, “Acoustic perturbation equations based on flow decomposition via source filtering”, *Journal of Computational Physics*, 188, 365-398 (2003).
- [8] C. K. Tam, Z. Dong, “Wall boundary conditions for high-order finite-difference schemes in computational aeroacoustics”, *Theoretical and Computational Fluid*, 6, 303-322 (1994).
- [9] R. Kurose, FK³, <http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/link.php>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Malkeson S.P., Ahmed U., Turquand d'Auzay C., Pillai A.L., Chakraborty N., Kurose Ryoichi	4. 巻 286
2. 論文標題 Displacement speed statistics in an open turbulent jet spray flame	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 119242 ~ 119242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuel.2020.119242	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 Wen Jian, Hu Yong, Kurose Ryoichi	4. 巻 31
2. 論文標題 Numerical simulation of kerosene jet in crossflow atomization and evaporation under the elevated pressure and oscillating air-flow condition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atomization and Sprays	6. 最初と最後の頁 73 ~ 87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1615/AtomizSpr.2021035796	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 Pillai Abhishek L., Kai Reo, Murata Takuya, Ikedo Takato, Masuda Ryo, Kurose Ryoichi	4. 巻 in press
2. 論文標題 Numerical analysis of heat transfer characteristics of spray flames impinging on a wall under CI engine-like conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 111615 ~ 111615
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2021.111615	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 Wen Jian, Hu Yong, Nishiie Takayuki, Iino Jun, Masri Assaad, Kurose Ryoichi	4. 巻 237
2. 論文標題 A flamelet LES of turbulent dense spray flame using a detailed high-resolution VOF simulation of liquid fuel atomization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 111742 ~ 111742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2021.111742	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 該当する

1. 著者名 Malkeson S. P., Ahmed U., Pillai A. L., Chakraborty N., Kurose R.	4. 巻 33
2. 論文標題 Flame self-interactions in an open turbulent jet spray flame	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 035114 ~ 035114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039155	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 Konishi K., Kai R., Kurose R.	4. 巻 5
2. 論文標題 Unsteady flamelet modeling for N2H4/N2O4 flame accompanied by hypergolic ignition and thermal decomposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applications in Energy and Combustion Science	6. 最初と最後の頁 100022 ~ 100022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jaecs.2020.100022	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 Malkeson S. P., Ahmed U., Pillai A. L., Chakraborty N., Kurose R.	4. 巻 106
2. 論文標題 Evolution of surface density function in an open turbulent jet spray flame	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Flow, Turbulence and Combustion	6. 最初と最後の頁 207 ~ 229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10494-020-00186-2	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 該当する

1. 著者名 Kai R., Takahashi A., Kurose R.	4. 巻 15
2. 論文標題 Numerical investigations of C1-C3 alkanes and H2 premixed flame-wall interaction: Effectiveness of insulation wall on heat loss reduction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JTST0033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jtst.2020jtst0033	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 Pillai A. L., Nagao J., Awane R., Kurose R.	4. 巻 220
2. 論文標題 Influences of liquid fuel atomization and flow rate fluctuations on spray combustion instabilities in a backward-facing step combustor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Combustion and Flame	6. 最初と最後の頁 337 ~ 356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combustflame.2020.06.031	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20件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 A. L. Pillai, S. Inoue, T. Shoji, S. Tachibana, T. Yokomori, R. Kurose
2. 発表標題 Combustion noise generated by an open lean-premixed low-swirl hydrogen flame: A hybrid CFD/CAA study
3. 学会等名 13th Asia-Pacific Conference on Combustion 2021 (ASPACC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Muramatsu, A. L. Pillai, K. Kitada, R. Kurose
2. 発表標題 Numerical simulation of binary fuel droplet evaporation with level set method
3. 学会等名 Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kitada, J. Wen, H. Muramatsu, A. L. Pillai, R. Kurose
2. 発表標題 Numerical investigation of droplet evaporation with CLSVOF method
3. 学会等名 Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 L. Pillai, R. Kai, J. Li, R. Kurose
2. 発表標題 Applicability of LES for investigating spray flame impinging on a wall under compression-ignition engine-like environment
3. 学会等名 15th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Kitada, J. Wen, R. Kurose
2. 発表標題 Numerical investigation of evaporation phenomena of liquid fuel jet atomization in crossflow
3. 学会等名 15th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 甲斐玲央, 徳岡泰輝, 黒瀬良一
2. 発表標題 選択拡散効果を考慮したflamelet法の水素予混合燃焼解析への適用
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長尾 順, 庄司 烈, 立花 繁, 横森 剛, 黒瀬良一
2. 発表標題 弱旋回燃焼希薄水素火炎の騒音解析 - CFD/CAAカップリング手法に関する考察 -
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 甲斐玲央, A. L. Pillai, U. Ahmed, N. Chakraborty, 黒瀬良一
2. 発表標題 チャンネル乱流内における予混合火炎-壁相互作用のDNS
3. 学会等名 第59回日本燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長尾 順, 黒瀬良一
2. 発表標題 球状伝播水素火炎の数値解析へのAMRの適用
3. 学会等名 第59回日本燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長尾 順, 庄司 烈, 立花 繁, 横森 剛, 黒瀬良一
2. 発表標題 希薄水素乱流予混合弱旋回燃焼器内における燃焼振動のLES
3. 学会等名 第49回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒瀬良一
2. 発表標題 カーボンニュートラル社会の実現に貢献する燃焼数値シミュレーション
3. 学会等名 第5回CAEワークショップ ~CAEシミュレーションの最新動向~ (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒瀬良一
2. 発表標題 カーボンニュートラル社会の実現に向けた燃焼数値シミュレーションの役割
3. 学会等名 第2回「富岳」流体予測革新プロジェクトシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J.Wen, Y. Hu, J. Iino, T. Nishiie, R. Kurose
2. 発表標題 Numerical simulation of atomization and combustion of liquid fuel in Sydney piloted need burner
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 B. Kim, K. Tanno, R. Kurose
2. 発表標題 Numerical investigation on Markstein length in laminar flames
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村松宏起, A. L. Pillai, 黒瀬良一
2. 発表標題 輻射が壁面衝突噴霧火炎の熱伝達特性に及ぼす影響
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村上太一, Y. Hu, 黒瀬良一
2. 発表標題 Large Eddy Simulationを用いたエタノール噴霧浮き上がり火炎における着火挙動の解析
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 甲斐玲央, 高橋 梓, 黒瀬良一
2. 発表標題 予混合火炎-壁相互作用の共役熱伝達解析 -遮熱材壁による熱損失低減効果-
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村田拓也, A. L. Pillai, 黒瀬良一
2. 発表標題 非断熱FPV法と壁面液膜モデルを用いた高圧条件下での噴霧火炎壁面間熱伝達の直接数値計算
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Li, R. Kai, A. L. Pillai, Y. Hu, R. Kurose
2. 発表標題 LES of soot formation in a turbulent spray flame impinging on a wall using a hybrid method of moments model and non-adiabatic FPV approach
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上太一, Yong Hu, 黒瀬良一
2. 発表標題 噴霧浮き上がり火炎のLarge Eddy Simulation
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学 熱物理工学研究室（黒瀬研究室） http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp/</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
研究分担者	立花 繁 (Tachibana Shigeru) (50358496)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・上 席研究開発員 (82645)	
研究分担者	横森 剛 (Yokomori Takeshi) (90453539)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	

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