

平成 31 年 4 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04278

研究課題名(和文)液体燃料の微粒化と燃焼振動の相互作用メカニズムの解明

研究課題名(英文)Elucidation of mechanism of interaction between liquid fuel atomization and combustion instability

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) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、液体燃料を扱う噴霧燃焼を対象に、液体燃料の微粒化・蒸発・燃焼反応・燃焼振動の全過程を考慮可能な数値シミュレーション(LES)コードを開発した。また、本LESをJAXAが所有する矩形ガスタービン燃焼器およびバックステップ流れ燃焼器内の噴霧燃焼場に適用することにより、液体燃料の微粒化と脈動が噴霧燃焼振動特性に及ぼす影響を詳しく調べた。その結果、燃焼振動に伴う酸化剤空気の流速変動により燃焼器に流入する液体燃料の液滴径分布が時間的に変動すること、また、この液滴径分布の時間的変動や燃焼器に流入する液体燃料の流量の時間的変動が燃焼振動の強度に強く影響を及ぼす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

燃焼振動に関する研究は国内外に数多く存在するが、気体ではない、液体の燃料を扱う研究は未だに数少なく、液体燃料の微粒化～蒸発～燃焼反応～燃焼振動の一連の過程を数値的に再現し、その上で燃焼振動特性を詳しく調べた研究は世界初である。そのため、本研究の成果は学術的に高く評価され、海外からも注目されており、研究代表者は2019年6月の噴霧燃焼に関する国際ワークショップで招待講演を行う予定である。また、本研究で開発した解析技術は、今後、ベンダーを通して幅広いユーザに利用可能とする予定である。これにより、産業界における燃焼器設計開発の効率化に貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a Large-eddy simulation (LES) code which can take into account the detailed spray combustion process, namely, the liquid-fuel atomization/evaporation/combustion reaction/combustion instabilities, was developed. In addition, the effects of oscillations of liquid-fuel droplet size and flow rate on the characteristics of the spray combustion instabilities were investigated in detail by applying the LESs to a JAXA combustor and a back-step flow combustor. The results showed that the oscillation of air flow rate due to the combustion instabilities causes the oscillation of the liquid-fuel droplet size distribution, and that the oscillations of the liquid-fuel droplet size distribution and flow rate strongly affect the characteristics of the combustion instabilities.

研究分野：熱流体工学

キーワード：燃焼振動 微粒化 実験 数値シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

燃焼は、航空機のカスタービンエンジンや自動車のエンジンなどのエネルギー変換装置や、ロケットエンジンなどの推進装置をはじめ、様々な工業装置で利用されている。従って、このような工業装置の開発、最適設計を効率的に進めるうえで、燃焼のメカニズムを明らかにし、その正確な予測を行うことは極めて重要である。

燃焼に関連する様々な研究・開発課題の中で、長年、産業界からの要求・期待が一貫して高いにも関わらず未だに解決できていない課題の1つとして、燃焼振動の制御が挙げられる。しかし、特に、灯油やジェット燃料などの液体燃料を取り扱う噴霧燃焼は、気体の燃焼反応に加えて燃料液滴の気流への分散や蒸発が起こる極めて複雑な現象であるため、その燃焼振動に関する研究は世界的に見ても数少ないのが現状である。最近、報告者らは、実験と数値シミュレーション (Large-eddy Simulation, LES) により、航空エンジン用矩形ガスタービン燃焼器内に発生する噴霧燃焼振動の発生メカニズムを詳しく調査している (Tachibana et al. 2015 [1])。この中で、報告者らは、噴霧燃焼の振動現象を世界で初めて数値的に捉えることに成功し、燃焼器内の圧力、燃料液滴蒸発速度、および反応率の関連性を明らかにしている。また続報として、液体燃料の液滴径が噴霧燃焼の振動強さに強く影響を及ぼすことを明らかにしている (Kitano et al. 2016 [2])。しかし、実験に比べて、燃焼振動発生時の圧力変動のピーク周波数は比較的良く一致するものの、圧力変動強度が定量的に合わないといった課題も浮き彫りになっていた。

2. 研究の目的

本研究では、特に現象が複雑な液体燃料を扱う噴霧燃焼を対象に、世界初の「液体燃料の微粒化～蒸発～燃焼反応～燃焼振動」の全過程を考慮可能な LES コードを開発し、本コードを用いて液体燃料の微粒化と燃焼振動の相互作用メカニズムを解明することを目的とする。特に、燃焼振動発生時の燃焼器内圧力変動に起因して起こる液体燃料の流量脈動がその微粒化特性に及ぼす影響については、液体クロス噴流の微粒化を再現した風洞実験により詳しく調査し、LES に導入する微粒化モデルの検証・構築も試みる。

3. 研究の方法

3.1 実験

図1に高速風洞装置のテストセクションおよび脈動噴霧装置の概略を示す。燃焼振動は速度場や燃焼反応などが複雑に相互作用するため、条件を全て再現した実験では解析が困難である。そこで、燃焼を伴わないコールドフローの条件での実験を行った。本実験では、主流方向に120 mmの長さおよび30 × 30 mmの正方形断面をもつ風洞に一樣流速最大134 m/sの空気を流し、空気の流れ方向に対してテストセクション底面直径0.2 mmの穴から水を直交させるよう平均流量0.23 mL/sで噴射させた。水はシリンジポンプによりインジェクタへと送液され、またインジェクタ内部の電磁弁の開閉タイミングはプログラマブル電源により制御された。本制御により、等間隔の脈動液体吐出(0, 20, 150 Hz)を実現した。液流量の測定には粒子画像流速計(PIV)を用いた。透明アクリル板内に3 mm以下の正方形断面の流路を設け、トレーサ粒子を含んだ水を通し、背面からハイスピードカメラで撮影することで液流速測定を行った。液滴の脈動噴霧時における脈動周波数の微粒化現象への影響を調べるために、微粒化の様子をCCDカメラで撮影した。また、画像解析にはShadow Sizing法(Dantec Dynamics)を用いた(Takagaki et al. (2018) [3])。

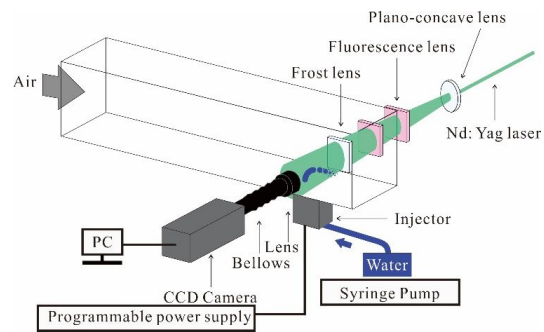


図1 高速風洞装置。

3.2 数値シミュレーション

(1) 液体燃料微粒化について

気液二相流解法として Euler/Lagrange 法を採用した3次元直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation, DNS) をクロスフロー型液体燃料の微粒化および蒸発現象に適用することにより、燃料ノズル内流速分布が液体燃料の一次微粒化に与える影響、および Weber (We) 数が液柱の一次微粒化機構と蒸発現象に与える影響($We=10, 46, 200$)について調査を行った。気液二相流の界面追跡法として VOF 法と Level-Set 法をカップリングした Coupled Level-Set and VOF method (CLSVOF) 法を用い、微小液滴を Lagrange 粒子に変換することで計算負荷の低減および計算の安定化を試みた。計算領域および条件の概略を図2に示す($We=10$ のケースは高さ3.2mm)。底面の壁はノンスリップ境界条件として計算した。計算格子は等間隔スタガード格子を用い、格子間隔は各方向とも5 μm とした。支配方程式を解く際の時間進行法として SMAC 法を用いた。空間差分には二次精度中心差分を用い、対流項にのみ川村・桑原のスキームを用いた。なお、本計算はインハウスの熱流体解析コードである FK³[4]を用いて行った。

(2) 燃焼振動について

燃焼振動の数値シミュレーションにはラージ・エディ・シミュレーション (Large-eddy Simulation, LES) を採用し、バックステップ流れ燃焼器と実機燃焼器を対象に実施した。

バックステップ流れ燃焼器の LES に関しては、液体燃料の微粒化による液滴径分布の時間変動および流量の時間的変動を考慮可能なモデルを導入し、燃焼器に流入する液体燃料の液滴径分布の時間変動、流量の時間変動、およびそれらの相互作用が噴霧燃焼振動特性に与える影響を詳しく調べた。図3に計算領域と条件の概略を示す。ステップ位置を $x = 0 \text{ mm}$ とする。流入部から空気を流入し、ステップの上流 $x = -5 \text{ mm}$ の等間隔に設けた7箇所の燃料ノズルより燃料 (ケロシン) 液滴を鉛直上向きに噴霧した。燃料液滴の投入量は、当量比が1.0となるように調整した。流入空気温度は 760 K 、燃料液滴温度は 300 K とした。

一方、実機燃焼器の LES に関しては、報告者らの既往研究 (Tachibana et al. 2015 [1]) を基に矩形ガスタービン燃焼器 (航空エンジンを対象にした JAXA 試験燃焼器) を対象とし、液体燃料の微粒化による液滴径分布の時間変動および流量の時間的変動の影響を調査した。

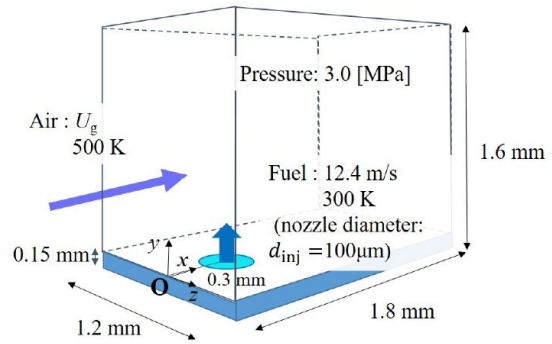


図2 計算領域および計算条件。

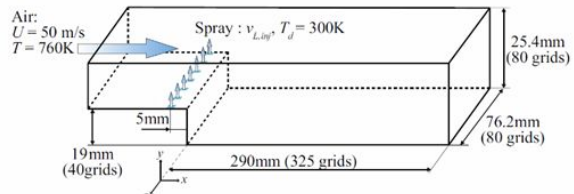


図3 計算領域および計算条件。

4. 研究成果

4.1 実験

得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 風速 134 m/s 、脈動なしの条件では、袋状の構造が微粒化を起こす Bag breakup と、液柱が気側シアの影響によって直接液滴化を起こす Shear breakup が同時に生じる Multimode breakup が起こる (Salman et al. 2004 [5])。また、 20 Hz 脈動時の微粒化特性は、脈動なしの場合に対してあまり変化が見られず、本条件では、液柱の脈動は微粒化現象に定性的に影響を及ぼさない (図4)。
- (2) 粒子濃度 $C(D)$ の粒径分布 (D は粒径、 $C(D)$ は総粒子濃度 C_{total} で正規化) は、 $50 \mu\text{m}$ 近傍でピークを持ち、定性的には脈動周波数に依存しない。一方、総粒子濃度 C_{total} は、脈動なしの状態に比べて脈動ありの状態の方が小さい。これは、脈動により、粒子がより遠方まで粒子が運ばれる可能性を示唆する。
- (3) ザウター平均径 D_{32} は、風速の増加に従って減少し、低風速時には $125 \mu\text{m}$ 程度であるが、高風速時には $50 \mu\text{m}$ 程度まで低下する。また、この傾向は脈動周波数に依存しない。
- (4) Lee et al. (2018) [6] が開発したザウター平均径に関する運動量収支モデルは、脈動を伴う液流に対しても適用可能であり、本モデル中の比例定数 K は 0.10 が適切である。

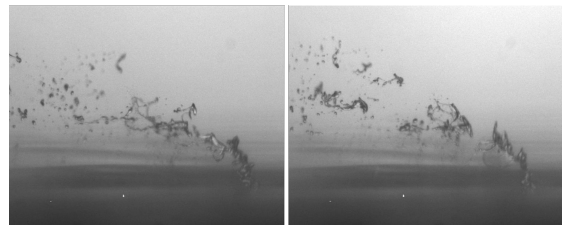


図4 高速風洞装置における微粒化の可視化。左図：脈動なし，右図： 20 Hz 脈動。

4.2 数値シミュレーション

(1) 液体燃焼微粒化について

得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 本 DNS では、液体燃料の一次微粒化特性に与える We 数の違いの影響を良好に再現可能である (図5)。具体的には、 We 数の増加に伴い、液柱先端部で液柱が分裂することにより生じる Colum breakup 液滴の径は小さくなる。また、 We 数の増加に伴い、液柱表面から液系を経て分裂することにより生じる Shear breakup 液滴の生成が促進される。
- (2) 一次微粒化により生じる液滴の挙動は、液柱背後に形成される循環流の影響を強く受ける。 $We=10$ の場合、液柱背後の液柱先端部で時計回り、壁面近傍で反時計回りの2つ

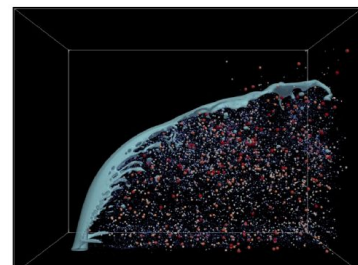


図5 微粒化計算結果の一例 ($We=46$)。

の循環流（共にスパン方向の軸をもつ縦型渦）が形成される。そのため、Column breakup液滴は下流へと運ばれる。これに対して、 $We=46$ 、 200 の場合には、液柱の傾きが大きくなることで反時計回りの循環流が拡大し、液柱先端部まで到達するため、Column breakup液滴およびShear breakup液滴はこの循環流の影響を受けて上流へと押し戻される。

- (3) 液滴の蒸発が顕著に起こる領域は、上記(2)の影響を受けて変化する。 $We=10$ の場合、Column breakup液滴が生成される液柱先端部において蒸発率が高くなる。これに対して、 $We=46$ 、 200 の場合には、液柱の傾きの顕著化に起因する反時計回り循環流の強化により壁面近傍領域における液滴数密度が上昇し、この壁面近傍領域の蒸発率も上昇する。

(2) 燃焼振動について

得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) バックステップ流れの燃焼器（図6）では、燃焼振動に伴う酸化剤空気の流速変動により、燃焼器に流入する液体燃料の液滴径分布は時間的に変動し、この液滴径分布の時間的な変動は、燃焼振動の強度を低減する。また、燃焼器に流入する液体燃料の流量の時間的な変動は、燃焼振動の強度に強く影響を及ぼし、流量変動と圧力変動との位相のずれが大きくなるほど燃焼振動の強度を増大させる傾向がある。さらに、液体燃料の液滴径分布の時間的な変動が燃焼振動の強度を低減させる効果は、流入する液体燃料の流量変動と圧力変動との位相のずれが大きくなるほど顕著になる。
- (2) 実機燃焼器（図7）では、液体燃料の微粒化による液滴径分布の時間変動および流量の時間的な変動が燃焼器内の燃焼振動特性（ピーク振動周波数、圧力変動強度など）に強く影響を及ぼす。また、液体燃料の噴射差圧が1つの影響因子になりうる可能性もある。現状では、液体燃料流量の圧力変動に対する時間遅れは不明であるが、これを解明し、モデル化することにより、燃焼振動のより正確な予測が可能になることが期待できる。
- (3) 上記の知見は本研究で実施した燃焼条件の範囲に限られるものであり、燃焼振動挙動の普遍的なメカニズムの解明には燃焼条件等をより広範囲に変化させた実験および数値シミュレーションの実施など、更なる検討が不可欠である。

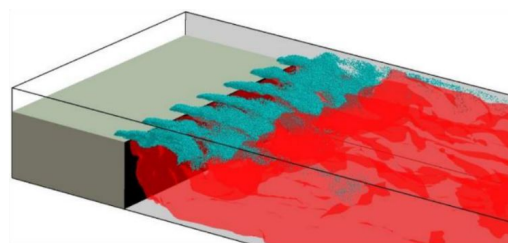


図6 燃焼振動計算結果の一例。

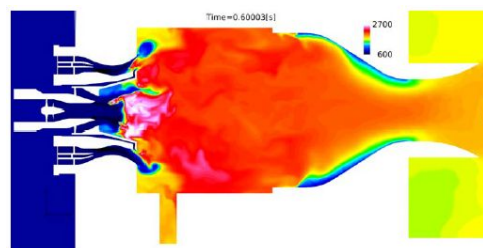


図7 燃焼振動計算結果の一例。

< 引用文献 >

- [1] S. Tachibana, K. Saito, T. Yamamoto, M. Makida, T. Kitano, R. Kurose, “Experimental and numerical investigation of thermo-acoustic instability in a liquid-fuel aero-engine combustor at elevated pressure: validity of large-eddy simulation of spray combustion”, *Combustion and Flame*, 162, 2621-2637 (2015).
- [2] T. Kitano, K. Kaneko, R. Kurose, S. Komori, “Large-eddy simulations of gas- and liquid-fueled combustion instabilities in back-step flows”, *Combustion and Flame*, 170, 63-78 (2016).
- [3] N. Takagaki, K. Iwano, E. Ilyasov, S. Komori, Y. Shirakawa, “Development of an optical imaging technique for particle number density”, *Journal of Fluid Science and Technology*, 13, JFST0001 (2018).
- [4] <http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/link.php>
- [5] K. A. Sallam, C. Aalburg, G. M. Faeth, “Breakup of round nonturbulent liquid jets in gaseous crossflow”, *AIAA Journal*, 42, 2529-2540 (2004).
- [6] T. W. Lee, J. E. Park, R. Kurose, “Determination of the drop size during atomization of liquid jets in cross flows”, *Atomization and Sprays*, 28, 241-245 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

C.T. d'Auzay, U. Ahmed, A. L. Pillai, N. Chakraborty, R. Kurose, “Statistics of progress variable and mixture fraction gradients in an open turbulent jet spray flame”, *Fuel*, 247, 198-208 (2019).

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.111>

Y. Hu, R. Kurose, “Partially premixed flamelet in LES of acetone spray flames”, *Proceedings of The Combustion Institute*, 37, 3327-3334 (2019).

<https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.020>

- 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).
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.10.041>
- Y. Haruki, A. L. Pillai, T. Kitano, R. Kurose, “Numerical investigation of flame propagation in fuel droplet arrays”, *Atomization and Sprays*, 28, 357-388 (2018).
 DOI: 10.1615/AtomizSpr.2018022342
- A. L. Pillai, R. Kurose, “Numerical investigation of combustion noise in an open turbulent spray flame”, *Applied Acoustics*, 133, 16-27 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.11.025>
- H. Tani, H. Terashima, Y. Daimon, M. Koshi, R. Kurose, “A numerical study on hypergolic combustion of hydrazine sprays in nitrogen tetroxide streams”, *Combustion Science and Technology*, 190, 515-533 (2018).
<https://doi.org/10.1080/00102202.2017.1402010>
- Y. Hu, R. Kurose, “Nonpremixed and premixed flamelets LES of partially premixed spray flames using a two-phase transport equation of progress variable”, *Combustion and Flame*, 188, 227-242 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.10.004>
- R. Kai, A. Kishimoto, K. Takenaka, M. Muto, R. Kurose, “DNS and LES of soot formation in oxy-fuel spray flame: Application of a non-adiabatic flamelet/progress-variable approach”, In Proc. of *The 16th International Heat Transfer Conference (IHTC-16)*, Chinese National Convention Center, Beijing, China, USB, IHTC16-22496 (6 pages), 2018.
- A. Kishimoto, H. Moriai, K. Takenaka, T. Nishiie, M. Adachi, A. Ogawara, R. Kurose, “Application of a non-adiabatic flamelet/progress-variable approach to Large Eddy Simulation of H₂/O₂ combustion under a pressurized condition”, *Journal of Heat Transfer*, 139, 124501 (4 pages) (2017).
 doi: 10.1115/1.4037099
- Y. Hu, R. Kurose, “LES/Flamelet modeling of piloted partially premixed acetone spray flame”, In Proc. of *Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9)*, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan, USB, TFEC9-1034 (5 pages), 2017.
- R. Awane, K. Kaneko, R. Kurose, “Large-eddy simulation of combustion instability of spray combustion in a back-step flow -Effect of fuel injection condition-”, In Proc. of *Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9)*, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan, USB, TFEC9-1502 (5 pages), 2017.
- N. Takagaki, M. Adachi, R. Kurose, N. Suzuki, T. Michioka, S. Komori, H. Kumamaru, “Observations on atomization of a pulsating liquid jet in a crossflow”, In Proc. of *Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9)*, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan, USB, TFEC9-1064 (5 pages), 2017.
- H. Takahashi, N. Hashimoto, H. Watanabe, R. Kurose, O. Fujita, “Prediction of soot formation in 4 kW coal jet flame by Large Eddy Simulation employing the TDP Model”, In Proc. of *Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9)*, Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan, USB, TFEC9-1480 (5 pages), 2017.
- A. L. Pillai, R. Kurose, “Analysis of combustion noise in an open turbulent ethanol spray flame using direct numerical simulation: effect of radiative heat loss”, In Proc. of *Tenth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10)*, Swissotel, Chicago-IL, USA, USB (6 pages), 2017.
- A. L. Pillai, M. Muto, R. Kurose, “Numerical investigation of effect of Reynolds number on noise from turbulent non-premixed hydrogen jet flames”, In Proc. of *the Asian Congress on Gas Turbines (ACGT2016)*, Indian Institute of Technology Bombay Mumbai, India, USB (9 pages), 2016.

[学会発表](計 12 件)

- A. L. Pillai, T. Murata, T. Ikedo, R. Masuda, K. Inagaki, R. Kurose, “Heat Transfer between Wall and Impinging Spray Flames under Compression-Ignition Engine like Conditions: A DNS Study”, The 1st R-CCS International Symposium, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, 2019.
- A. L. Pillai, T. Murata, T. Ikedo, R. Masuda, R. Kurose, “Direct Numerical Simulation of Spray Flame-Wall Interaction under Compression-Ignition Engine Relevant Conditions”, 70th Annual Meeting of the American Physical Society’s Division of Fluid Dynamics (DFD), Georgia World Congress Center, Atlanta, 2018.
- 篠田 淳, 高垣直尚, 前田 航, 黒瀬良一, 小森 悟, 熊丸博滋, 「直交脈動噴流における微粒化した液体の測定」, 第 27 回微粒化シンポジウム, 岡山大学, 2018.
- 長尾 順, Abhishek L. Pillai, 栗根 遼, 黒瀬良一, 「噴霧燃焼振動の Large-eddy Simulation -液体燃料の初期粒径と流量の時間変動の影響-」, 第 56 回燃焼シンポジウム, 堺市産業振興センター, 2018.

武藤昌也, 家田涼平, 黒瀬良一, 本澤尚史, 「詳細反応機構を用いたメタン/空気拡散火炎中の NO_x 生成に及ぼす水噴霧の影響」, 日本流体力学会年会 2018, 大阪大学豊中キャンパス, 2018.

前田 航, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森 悟, 熊丸博滋, 「直交脈動噴流における微粒化した液滴の測定」, 日本機械学会 関西学生会 2017 年度学生員卒業研究発表講演会 摂南大学 2018. 武藤昌也, Yong Hu, 黒瀬良一, 森合秀樹, 「航空機エンジン用サブスケール燃焼器内乱流噴霧燃焼場の Large-Eddy Simulation -FPV モデルと FGM モデルの比較-」, 第 55 回燃焼シンポジウム, 富山国際会議場, 2017.

安達昌紘, 高垣直尚, 黒瀬良一, 鈴木直弥, 道岡武信, 小森 悟, 熊丸博滋, 「直交脈動噴流における液滴の微粒化観察」, 日本機械学会 関西学生会 2016 年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪大学, 2017 .

金子圭佑, 栗根 遼, 黒瀬良一, 「液体燃料の微粒化が噴霧燃焼振動特性に及ぼす影響」, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, タワーホール船堀, 2016.

金子圭佑, 栗根遼, 黒瀬良一, 「バックステップ流れにおける噴霧燃焼振動の Large-eddy simulation - 燃料インジェクション条件の影響 - 」, 第 54 回燃焼シンポジウム, 仙台国際センター, 2016.

H. Yong, R. Kurose, 「Tabulated chemistry approaches in the Large Eddy Simulation of turbulent reacting spray flows」, 第 54 回燃焼シンポジウム, 仙台国際センター, 2016.

A. Pillai, R. Kurose, 「Investigation of Combustion Noise in Turbulent Non-Premixed and Spray Flames Using Direct Numerical Simulation」, 第 54 回燃焼シンポジウム, 仙台国際センター, 2016.

〔その他〕

受賞

安達昌紘 (指導教員: 高垣直尚), 「直交脈動噴流における微粒化現象の観察」, 姫路工業倶楽部 姫路工業倶楽部賞, 2017 年 3 月 22 日 .

前田 航 (指導教員: 高垣直尚), 「直交脈動噴流における微粒化した液滴の測定」, 日本機械学会 関西学生会 2017 年度学生員卒業研究発表講演会 Best Presentation Awards 2018 年 3 月 10 日 .

中西顕大 (指導教員: 黒瀬良一), 「オイラー・ラグランジュ法を用いたクロスフロー型液体燃料微粒化現象の数値シミュレーション」, 第 27 回微粒化シンポジウム 優秀講演賞, 2018 年 12 月 18 日.

ホームページ等

<http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/kurose.php>

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 立花 繁

ローマ字氏名: TACHIBANA, Shigeru

所属研究機関名: 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名: 航空技術部門

職名: 主幹研究開発員

研究者番号 (8 桁): 50358496

(2) 研究分担者

研究分担者氏名: 高垣直尚

ローマ字氏名: TAKAGAKI, Naohisa

所属研究機関名: 兵庫県立大学

部局名: 工学研究科

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 00554221

※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、研究者個人に帰属されます。