

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05835

研究課題名(和文)液体燃料分散系の燃焼開始過程における二次元不均一性の影響の解明

研究課題名(英文) Investigation on the effects of two-dimensional inhomogeneity in the combustion-initiation process of dispersed liquid fuel

研究代表者

森上 修 (Moriue, Osamu)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：70363124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：燃料液滴間の干渉効果の解明により単一液滴の自着火の知見を噴霧の自着火に拡張する研究である。炭化水素の自着火では部分的な酸化である冷炎が発生して後に熱炎が発生する二段点火が起こる。発光しない冷炎の観測には干渉計が有効である。微小重力下で二液滴の自着火を干渉計二基を用いて三次元的に観測した。二液滴の外側の高温部で冷炎が発生し、内側の高燃料濃度部で熱炎が発生する傾向を確認した。初期径の異なる二液滴について、点火下限温度より十分高い温度では小さい液滴の存在は全体の熱発生を早めるが、点火限界近傍など条件によっては遅らせることを発見した。これらが局所的な物質輸送と化学反応のバランスにより理論化された。

研究成果の概要(英文)：This study expands the knowledge of spontaneous ignition of isolated fuel droplets to that of spray through the investigation of effects of droplet interaction. In the spontaneous ignition of most hydrocarbon fuels, two-stage ignition occurs, which is cool-flame appearance and subsequent hot-flame appearance. Two-stage ignition of a droplet pair was observed in microgravity using two interferometers, which enables three-dimensional observation. Cool flame appeared on the outer side of the droplet pair, and hot flame appeared on the inner side. In the spontaneous ignition of a droplet pair with different initial diameters, a smaller droplet promoted ignition normally, though it delayed in the limited conditions like near ignitable limit. Such tendencies were explained through local balance between species transport and chemical reactions.

研究分野：燃焼工学，内燃機関工学

キーワード：自着火 燃料液滴 干渉作用

1. 研究開始当初の背景

燃料噴霧の自着火による燃焼開始過程の機構解明は、熱機関の開発にとって重要である。最も簡単な素過程として単一の燃料液滴を扱う研究が多く行われてきたが、液滴間の干渉作用について解明し、単一液滴の知見を噴霧に拡張するための研究が必要である。炭化水素系燃料の自着火においては、燃料の部分的な酸化である冷炎が発生してある程度の遅れの後に熱炎が発生するという二段点火が生じ、このため点火遅れは複雑な雰囲気温度依存性を持つ。よって、冷炎から熱炎という過程に着目した解析が重要であるが、これまでの他者の複数液滴の研究は二段点火の生じない雰囲気条件で行われていた。研究代表者は熱電対を使用し複数液滴の二段点火の研究を行い、冷炎の発生前は自着火に液滴間干渉の負の影響が大きく、冷炎発生後は正の影響が大きいことを発見した。しかし、点計測であるため理論との比較が困難であった。

2. 研究の目的

二段点火の生じる雰囲気条件において、複数液滴の自着火における熱発生の空間的な観測を行い、冷炎と熱炎の点火遅れならびに発生位置への各種パラメータの影響を調査し、そのメカニズムを解明し予測可能とすることを目的とする。空間的な多次元不均一性の影響を調査するには、二次元不均一性で十分と考え、軸対称である二液滴ならびに一次元液滴列を対象とする。

3. 研究の方法

二液滴、一次元液滴列の高温空気における自着火実験を行う。冷炎は発光を伴わないため、その空間的挙動の観測には干渉計が有効である。熱発生の二次元的な観測を可能とする干渉計を二基搭載し、三次元的な観測を可能とする。実験では観測における空間的・時間的分解能を担保するために直径 1mm 程度の粗大液滴を扱うが、実際の噴霧を構成するような微小液滴に対してはほぼ影響の無い浮力を排すために微小重力実験を行う。液滴間隔の影響、点火限界近傍の自着火特性、初期液滴径のばらつきの影響を確認し、最終的に、観測される現象の体系的な解釈、理論化を行う。

4. 研究成果

干渉計二基による液滴群の二段点火の三次元観測が世界で初めて行われた。このため、従来観測できなかった二液滴を通る軸方向からの観測が可能になり、液滴間干渉の効果が詳細に解析可能となった。熱炎はほぼ二液滴を含む面で発生していることが確認された。また、二段点火の生じる雰囲気条件では、二液滴の外側の高温部において冷炎が発生し、その後二液滴の内側の高燃料濃度部において熱炎が発生する傾向を確認した。この傾

向は燃料濃度場、温度場の不均一性により説明できる。すなわち、冷炎の発生する低温酸化反応には化学反応的に燃料濃度よりも温度が支配的であるということから、冷炎は局所温度の高い側すなわち二液滴の外側で発生したと考えられる。一方、化学反応的に、概して燃料濃度が高いほど冷炎の温度は高くなる。よって、局所での冷炎発生後に冷炎が二液滴周囲に広がった状態では、局所燃料濃度の高い側すなわち二液滴の内側で局所温度が高くなり、そこで高温酸化反応がより活発となり熱炎が発生したと考えられる。以上、冷炎の発生前は相互冷却の影響が支配的であり、冷炎の発生後に熱炎が発生するには燃料供給源が増えた影響が支配的であった。

また、初期直径の異なる二液滴の二段点火の実験を世界で初めて行ったところ、点火下限温度より十分高い温度では、小さい方の液滴の初期液滴径を小さくするほど二液滴の点火遅れは短くなった。すなわち、小さい液滴の存在は二液滴全体の熱発生を早めることが確認された。これは単純に小さい液滴ほどその加熱期間が短くなり、低温酸化反応を可能とする混合気の形成に要する時間が短くなり、小さい液滴の近傍で局所的に発生した冷炎が二液滴全体の熱発生につながるためと解釈される。一方、点火限界近傍の条件では、小さい方の液滴の初期液滴径を小さくするほど二液滴の点火遅れは長くなった。すなわち、小さい液滴の存在は二液滴全体の熱発生を却って遅らせることが確認された。これは化学反応の特性時間に対する流れの特性時間の比であるダムケラー数によって説明される。このような点火限界近傍では、液滴が小さ過ぎて液滴表面からの燃料蒸気の流束が大き過ぎる(すなわち流れの特性時間が短すぎる)、もしくは雰囲気温度が低過ぎて化学反応が遅すぎる(すなわち化学反応の特性時間が長すぎる)ことによりダムケラー数が小さくなり、系の点火遅れが長くなったと考えられる。

以上、二液滴の二段点火の三次元観測、また異なる径の二液滴の二段点火の観測が世界で初めて行われ、熱発生場所、点火遅れの雰囲気条件、液滴径、液滴間距離への依存性が、濃度場、温度場の不均一性、ならびに局所的な物質輸送と化学反応のバランスにより解析され、理論化された。今後は数値計算を利用したモデル化が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Masato MIKAMI, Hidetaka WATARI, Tsutomu HIROSE, Takehiko SEO, Herman SAPUTRO, Osamu MORIUE, Masao KIKUCHI, Flame spread of droplet-cloud elements with two-droplet

interaction in microgravity, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.12, No.2, Paper No.17-00310, 2017, 査読有 DOI:

<https://doi.org/10.1299/jtst.2017jtst0028>

M. MIKAMI, M. KIKUCHI, Y. KAN, T. SEO, H. NOMURA, Y. SUGANUMA, O. MORIUE, D. L. DIETRICH, Droplet Cloud Combustion Experiment “Group Combustion” in KIBO on ISS, International Journal of Microgravity Science and Application, Vol. 33 No. 2, pp. 330208-1 ~ 330208-7, 2016, 査読有 DOI:10.15011/jasma.33.330208

森上修, 液滴と予混合気の自発点火の相互作用, 日本燃焼学会誌, 第 58 巻 183 号, pp.27-32, 2016, 査読無

[学会発表](計 13 件)

高橋 聡史, 竹内 悠記, 中村 大夢, 森上修, 直径の異なる二液滴の冷炎発生における液滴間干渉, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017

Osamu Moriue, Yuuki Takeuchi, Satoshi Takahashi, and Masaoki Sugihara, Spontaneous-Ignition Experiments of a Fuel Droplet Pair using Two Michelson Interferometers in Two Directions, The 31st International Symposium on Space Technology and Science, 2017

森上修, 野村浩司, 菅沼祐介, 田辺光昭, 三上真人, Christian Eigenbrod, 燃料液滴列の冷炎挙動の研究および TEXUS ロケット実験に向けた準備, 第 31 回宇宙環境利用シンポジウム, 2017

野村浩司, 菅沼祐介, 森上修, 橋本望, 稲富裕, 燃料液滴列の自発点火限界近傍の点火挙動に関する研究 - 点火までの蒸発挙動 -, 第 31 回宇宙環境利用シンポジウム, 2017

竹内 悠記, 杉原 正興, 高橋 聡史, 森上修, 村瀬 英一, マイケルソン干渉計を用いた二液滴の冷炎・熱炎発生位置の二方向からの観測, 第 54 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2016

Osamu Moriue, Masaoki Sugihara, Yuuki Takeuchi, Eiichi Murase, A Study on Droplet Interaction in Spontaneous Ignition of a Fuel Droplet Pair through Interferometry, 11th Asian Microgravity Symposium (AMS2016), 2016

下津曲 峻, 岩本 武尊, 杉原 正興, 橋本 英

樹, 森上修, ディーゼル噴霧の噴霧特性・蒸発特性に及ぼす燃料噴射圧の影響, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016

森上修, 野村 浩司, 菊池 政雄, 三上 真人, 田辺 光昭, 菅沼 祐介, 燃料液滴列の自発点火限界近傍の点火挙動に関する研究チームの 2015 年度活動報告および展望, 第 30 回宇宙環境利用シンポジウム講演論文集, 2016

森上修, 野村 浩司, 菅沼 祐介, 菊池 政雄, 三上 真人, 田辺 光昭, Christian Eigenbrod, TEXUS ロケットを利用した点火限界近傍における複数燃料液滴の自発点火に関する日独共同微小重力実験プロジェクトの準備状況, 第 16 回宇宙科学シンポジウム, 2016

杉原 正興, 森上修, 橋本 英樹, 村瀬 英一, 予混合気中における燃料液滴の自発点火の数値計算, 第 53 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2015

Osamu Moriue, Masao Kikuchi, Hiroshi Nomura, Masato Mikami, Mitsuaki Tanabe, Yusuke Suganuma, Christian Eigenbrod, Konstantin Klinkov, Jakob Hauschild, Microgravity Experiment Project on Spontaneous Ignition of Multiple Fuel Droplets near Ignitable Limit Using a TEXUS Sounding Rocket, 6th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS 2015), 2015

Osamu Moriue, Takeru Iwamoto, Masaoki Sugihara, Kota Yone, Hideki Hashimoto, Eiichi Murase, Hioshi Nomura, Effects of Droplet Interaction on Heat-Release Locations around a Fuel Droplet Pair in Hot Air in Microgravity, The 30th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Paper No. 2015-h-19 (in CD), 2015

森上修, 米 康太, 岩本 武尊, 杉原 正興, 橋本 英樹, 村瀬 英一, 野村 浩司, 点火限界近傍の二液滴の自発点火における液滴間干渉, 第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森上修 (MORIUE, Osamu)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 70363124

(2) 研究分担者

(3)連携研究者

(4)研究協力者

EIGENBROD, Christian