

機関番号：14401
 研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560191

研究課題名 (和文) 複合光学計測と詳細数値解析による高圧噴霧燃焼機構の解明とモデリング

研究課題名 (英文) Elucidation of Spray Combustion Mechanism under High-Pressure Condition and the Modeling by Optical Measurement and Detailed Numerical Simulation

研究代表者

赤松 史光 (AKAMATSU FUMITERU)
 大阪大学・工学研究科・教授
 研究者番号：10231812

研究成果の概要 (和文)：

液体燃料噴霧が高圧雰囲気下で分散・燃焼するプロセスである高圧噴霧燃焼現象に対して、当研究室で保有している高圧下での連続燃焼試験を可能とする実験設備を用いて、高精度な複合光学計測とモデルをほとんど用いない直接数値シミュレーションの双方によって詳細に評価し、その燃焼メカニズムを解明すると共に、上記の技術開発に役立つ数値解析モデルの考案、並びに同数値解析コードの開発を行なった。

研究成果の概要 (英文)：

To elucidate the mechanism of spray combustion phenomena under high-pressure condition, optical measurement and detailed numerical simulation were conducted. In addition, the model and the numerical simulation code were developed.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2008 年度 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |
| 2009 年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2010 年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：高圧燃焼，噴霧燃焼，複合光学計測，数値シミュレーション，モデリング，詳細化学反応，ガスタービン

1. 研究開始当初の背景

液体燃料噴霧が高圧雰囲気下で分散・燃焼するプロセス（以下、高圧噴霧燃焼と呼ぶ）は、ガスタービン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、多くの加熱炉，熱処理炉等の工業装置で広く利用されており、より環境性や運用性に優れた新技術の開発が望まれている

る。特に、航空機用のガスタービンエンジンに関しては、エネルギー密度の高い液体燃料の噴霧燃焼が必要不可欠となる。しかし、このような高圧噴霧燃焼場では、燃料となる液滴の気相への分散、蒸発、および燃料蒸気と酸化剤の混合と燃焼反応が同時に起こるために進行過程が極めて複雑となる。また、灯油のような（平均分子式で炭素数 12 程度）の比較的軽質な液体燃料が燃焼した際においても、1200 種類もの化学種が関連した 5000 以上の化学反応が乱流場と干渉しながら、ナノ秒の時間スケール、マイクロメートルの空間スケールで急速に進行しているために、その詳細な燃焼機構は常圧下ですら十分に解明されておらず、圧力の影響については全く明らかにされていない。したがって、これらの燃焼装置やバーナなどの設計・開発は試行錯誤的な経験工学に頼るところが大きく、その手順は極めて煩雑であるため、多大なコストや期間を要しているのが現状である。また、最近注目されている数値解析も、乱流モデルがほぼ確立されて、その精度が確認されている常圧下の等温場を対象とした技術の開発には利用されることも多いが、メカニズムすら解明されていない高圧下の噴霧燃焼場に対しては、信頼性の問題からほとんど用いられていない。

2. 研究の目的

当研究室で現有している高圧下での連続燃焼試験を可能とする実験設備を用いて、液体燃料噴霧が高圧下において燃焼する高圧噴霧燃焼場を、高精度な複合光学計測とモデルをほとんど用いない直接数値シミュレーションの双方によって詳細に評価し、そのメカニズムを解明すると共に、上記の技術開発に役立つ数値解析モデルの考案、並びに同数値解析コードの開発を行う。

3. 研究の方法

実験においては、雰囲気圧力と酸素濃度を変化させることのできる高圧バーナにおける噴霧燃焼火炎を対象にした高精度複合光学計測により、燃焼機構の解明を試みた。具体的には、液体燃料の噴霧燃焼火炎を、雰囲気圧力と酸素濃度、燃料の供給当量比、

気流の乱れ強さ、燃料噴霧の性状などを変化させた様々な条件下で作り出し、それらの火炎にレーザードップラー流速計 (LDV)、位相ドップラー計測法 (PDA)、粒子画像流速計 (PIV)、ポイント・カセグレン光学系、レーザー誘起蛍光法 (LIF)、および輻射 2 色温度計測法、時間分解レーザー誘起赤熱法を適用することにより、気流流速、液滴速度、液滴径、ラジカル自発光強度、ラジカル濃度、および火炎温度、すすの濃度と粒径を計測し、詳細かつ総合的な評価を行った。

また、上述の全ての計測手法を駆使しても、極めて複雑な高圧場における噴霧燃焼機構を解明するための手段としては、当然限界があると思われるので、DNS による検討を並行して実施した。次に、上述した光学計測と DNS の結果を基に、高圧噴霧燃焼の数値解析に必要な様々な計算モデルを構築し、これらのモデルを採用した数値解析コードの開発を行った。

4. 研究成果

1) 光学計測が適用可能で、高圧下で連続燃焼が可能な燃焼器を用い、単純な流れ場を形成するバーナを用いてケロシン—酸素の同軸噴流噴霧火炎を形成した。雰囲気圧力を 0.1 MPa から 1.0 MPa の範囲で変化させて噴霧火炎の分光計測、二色法による温度計測、LII 計測を行い、時間平均的な火炎構造を観察した結果、以下の知見が得られた。

(1) 輝炎より下流の火炎先端では CO_2 が励起することによる発光が現れる。

(2) 火炎中心軸上では油滴の蒸発潜熱によって温度が低下する領域が現れる。圧力の上昇に伴い噴霧油滴の挙動が変化することにより、この領域は上流側に移動する。

(3)すす生成量が比較的多い領域は圧力の上昇にしたがって上流側に現れる。

(4) 圧力の上昇にしたがってすす体積分率の最大値は 0.5 MPa までの上昇するが、0.5 MPa 以上では減少する。

(5)すす体積分率の半径方向分布におけるピークは、圧力の上昇にしたがってより上流側で中心軸上へと移る。

2) 噴霧燃焼場におけるエントロピー生成過程に関する基礎的な知見を得ることを目的と

して、2次元場に形成された噴霧火炎のエントロピー生成速度の解析を行った。解析の結果、得られた知見を以下に示す。

(1) 燃焼開始直後においては、油滴間距離を変化させても化学反応に起因するエントロピー生成速度はほぼ同じ値をとる。また、時間の進行とともに油滴間相互作用の影響が大きくなり、油滴間距離が小さい条件の方がエントロピー生成速度が大きくなる。

(2) 単滴燃焼状態および内部群燃焼状態ともに、化学反応に起因するエントロピー生成速度が最も大きく、熱伝導に起因するエントロピー生成速度が2番目に大きい値をとった。粘性散逸と物質拡散に起因するエントロピー生成速度は、無視できるほど小さい。

(3) 単滴燃焼状態において、各因子によるエントロピー生成速度の総和に対する熱伝導に起因するエントロピー生成速度の影響は無視できる。一方で、内部群燃焼状態において、この影響は無視できなくなる。

(4) 燃焼が進行し、単滴燃焼が支配的な状態から群燃焼へ移行する場合、化学反応に起因するエントロピー生成速度は減少する。また、その減少時の挙動は、噴霧領域の中央と外周部における燃焼反応率の挙動によって決定される。

3) 層流対向流場における噴霧火炎の三次元非定常数値解析を行った結果、以下の知見を得た。

(1) 数値解析結果と実験結果を比較した結果、両者に良い一致が見られた。このことから、使用した数値解析法の現象再現性が確認できた。

(2) 噴霧火炎の2次元計算では、燃料濃度が実際の燃焼場よりも極端に小さく見積もられる。一方で、3次元計算においては、燃料が拡散する空間の体積を現実的な大きさに規定できるため、2次元計算よりも実現象の再現性が高い。

(3) 噴霧のSMD値が小さい場合、予混合的火炎と拡散的火炎が同時に観察された。拡散的火炎内では、油滴群燃焼挙動が確認された。

(4) 噴霧の供給当量比およびSMDが大きい条件において、油滴の蒸発により気相の熱が奪われる効果 (evaporative cooling effect)

が観察された。

(5) 噴霧の供給当量比が小さい場合、平面火炎の無い方が高温領域の幅が狭く、平均気相温度の最大値も小さくなる。一方で、噴霧の供給当量比が大きい場合、平面火炎の有無に関わらず平均気相温度の最大値はほぼ同じ値をとる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

1. 福井淳一, 林 潤, 赤松史光, 噴霧燃焼過程におけるエントロピー生成速度に及ぼす油滴群燃焼挙動の影響, 日本機械学会誌B編, 査読有, 76-769, (2010), 1433-1440.

2. 西岡大智, 中村摩理子, 林 潤, 赤松史光, 高圧化における同軸噴流噴霧火炎構造とすす生成領域の実験的観察, 日本機械学会誌B編, 査読有, 76-768, (2010), 1297-1304.

3. 中村摩理子, 中尾祥典, 西岡大智, 黄承敏, 林 潤, 赤松史光, 同軸噴流噴霧火炎の火炎構造と噴霧挙動に及ぼす圧力の影響, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 75-750, (2009), 354-362

4. 林 潤, 赤松史光, 安 鐵朱, 瀬尾健彦, 渡邊裕章, 黒瀬良一, 噴霧火炎中におけるすす生成過程に関する研究(燃料噴霧の粒度分布がすす生成過程に与える影響), 査読有, 日本機械学会論文集 B 編, 74-738, (2008), 429-437

5. 林 潤, 寺島幸士, 赤松史光, 徳岡直静, 粒度分布が燃料噴霧の着火性に与える影響, 日本機械学会論文集B編, 査読有, 74-741, (2008), 1161-1168

6. 赤間和樹, 林 潤, 瀬尾健彦, 安 鐵朱, 赤松史光, 橋本 望, バイオ液体燃料の噴霧燃焼特性に関する研究(燃料種のすす生成特性への影響), 微粒化, 査読有, 17-58, (2008), 95-101

[学会発表] (計18件)

1. 林 潤, 赤松史光, 橋本 望, 西田啓之, 層流対向流場におけるパームメチルエステル噴霧火炎中のすす生成特性, 第6回バイオマス科学会議発表論文集, (2011.1.12), 大阪大学, 128-129.

2. 福井淳一, 林 潤, 赤松史光, 噴霧火炎の3次元非定常数値解析 -粒径分布の火炎特性に対する影響-, 機械学会関西支部 第85期定時総会講演会講演論文集, (2010. 3. 17), 神戸大学.
3. Muhammad Al-Hakim bin Naziruddin, 王 鵬, 森合秀樹, 林 潤, 赤松史光, 黒瀬良一, 小森 悟, スワール流れ場の噴霧燃焼挙動に関する研究, 自動車技術会関西学生支部学生自動車研究会 2009 年度卒業研究発表講演会 講演論文集, (2010. 2. 27) 京都大学.
4. 森合秀樹, 林 潤, 王 鵬, 中塚記章, 赤松史光, 黒瀬良一, 小森 悟, 航空機ガスタービンエンジン燃焼器のサブスケールモデル内部における噴霧燃焼場の光学計測, 第 48 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2010. 12. 3), 福岡ガーデンパレス, 432-433.
5. 林 潤, 福井淳一, 石原暢之, 赤松史光, 粒度分布幅が噴霧火炎中のすす生成特性に与える影響, 第 19 回微粒化シンポジウム講演論文, (2010. 12. 22), 日本大学 191-194 .
6. Junichi Fukui, Jun Hayashi and Fumiteru Akamatsu, Three-dimensional Numerical Simulation of Spray Flame in Laminar Counter flow, Proceedings of ICDRES2009, (2009. 7. 30), Oktyabrskay Square Centre (ベラルーシ・ミンスク), ID96(CD-R).
7. Jun Hayashi, Kazuki Akama, Nozomu Hashimoto, Hiroyuki Nishida and Fumiteru Akamatsu, Soot Formation Characteristics of Palm Methyl Ester Spray in Counterflow, Proceedings of the International Conference on Power Engineering 2009 (ICOPE09), 2(2009. 11. 18), 神戸国際会議場, 141-146.
8. Hideaki Moriai, Peng Wang, Jun Hayashi, Noriaki Nakatsuka, Fumiteru Akamatsu, Ryouichi Kurose and Satoru Komori, Recirculation Behavior in Subscale Gas Turbine Combustor, Proceedings of the ExHFT-7, (2009. 7. 2), Jagiellonian University (ポーランド・クラクフ), CD-R.
9. Junichi Fukui, Jun Hayashi and Fumiteru Akamatsu, Three-dimensional Structure of Spray Flame in Laminar Counterflow, Proceedings of the second international forum on multidisciplinary education and research center for energy science, (2009. 12. 13), ルネッサンスリゾート沖縄, 113-114.
10. 福井淳一, 林 潤, 赤松史光, 噴霧燃焼過程におけるエンタロピー生成の数値解析, 機械学会関西支部 第 84 回定時総会講演会講演論文集, (2009. 3. 17), 近畿大学.
11. 西岡大智, 中村摩理子, 塩島史哉, 林 潤, 赤松史光, 高圧下における同軸噴流噴霧火炎構造の実験的観察, 機械学会関西支部 第 84 回定時総会講演会講演論文集, (2009. 3. 16), 近畿大学, 12-14.
12. 西岡大智, 中村摩理子, 林 潤, 赤松史光, 高圧下における同軸噴流噴霧火炎構造の実験的観察: 噴霧油滴と燃焼領域の観察, 日本機械学会 2009 年度次大会, (2009. 9. 14), 岩手大学, 講演番号 G0601-6-5.
13. 王 鵬, 森合秀樹, 林 潤, M. A. Hakim, 志賀祐一, 西岡大智, 中塚記章, 黒瀬良一, 小森 悟, 赤松史光, 航空エンジン用スワール燃焼器内における噴霧燃焼流の挙動, 第 47 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2009. 12. 4), 札幌コンベンションセンター, 500-501.
14. Jun Hayashi, Fumiteru Akamatsu, Takehiko Seo and Chulju Ahn, Effects of droplet size distribution of fuel spray on soot formation in counter-flow, Abstract of accepted papers of the 32nd International Symposium on Combustion, (2008. 8. 4), McGill University (カナダ・モントリオール), 43.
15. 福井淳一, 林 潤, 赤松史光, 層流対向流場における噴霧火炎の三次元非定常数値解析, 第 21 回計算力学講演会講演論文集, (2008. 11. 1), 琉球大学, 209-210.
16. 赤間和樹, 林 潤, 瀬尾健彦, 赤松史光, 橋本 望, 西田啓之, バイオ液体燃料噴霧の燃焼特性に関する研究 - 平均粒径がすす生成特性に及ぼす影響 -, 第 46 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2008. 12. 4), 京都テルサ, 394-395.
17. 福井淳一, 林 潤, 赤松史光, 層流対向流場に形成された噴霧火炎の三次元非定

常数值解析, 第 46 回燃焼シンポジウム講演
論文集, (2008.12.5), 京都テルサ,
564-565.

18. 林 潤, 赤間和樹, 橋本 望, 西田啓
之, 赤松史光, パームメチルエステル燃料
噴霧のすす生成特性に関する研究, 第 17 回
微粒化シンポジウム講演論文集,
(2008.12.19), 慶應義塾大学, 251-254.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤松 史光 (AKAMATSU FUMITERU)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号: 10231812