

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360419

研究課題名（和文） 微小重力環境実験による三次元離散化燃料系の燃焼ダイナミズム解明研究

研究課題名（英文） Elucidation study of combustion dynamism of three-dimensionally dispersed fuel system through experiments in microgravity environment

研究代表者

瀬川 大資（SEGAWA DAISUKE）

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00264804

研究成果の概要（和文）：三次元離散化燃料系としてほぼ球形となるように配置された燃料液滴群を実際に作成し、これを急速に高温の空気雰囲気中へ移動させて、蒸発、自発着火、燃焼させる実験を行い、光学観測により蒸発、自発着火、燃焼の挙動や特性時間、火炎形態を測定、検討した。とくに構成液滴がより微細な場合と不均質性な場合に着目し、その影響について検討した。その結果、寸法効果に関する知見、数値が蓄積されたほか、構成液滴の一部が消滅（蒸発）してから着火する状況が再現されることを初めて確認した。

研究成果の概要（英文）：Fuel droplet clusters in which the droplets were arranged to form nearly spherical outer shape were actually produced as the three-dimensionally dispersed fuel systems, and the experiments of evaporation, autoignition and combustion, of those clusters were conducted where the clusters were quickly introduced into hot air ambience. The behaviors and the characteristic time periods of the evaporation, autoignition and combustion as well as the flame shapes were measured and examined through optical observation. We focused our attention especially on the cases for finer droplets and for polydisperse droplets, and those effects were examined. As the results, the knowledge and values concerning the scale effects were accumulated, and moreover, it was confirmed for the first time that the situations where the autoignition occurred after the part of the droplets were disappeared (evaporated) were reproduced.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	2,000,000	600,000	2,600,000
総計	8,200,000	2,460,000	10,660,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学，航空宇宙工学

キーワード：推進・エンジン，液体燃料，噴霧燃焼，群燃焼，非定常蒸発

1. 研究開始当初の背景

産業分野から民生分野（業務）まで広く利用されているガスタービンエンジンやジェットエンジンなどでは、主として化石燃料から精製される各種液体燃料を用いた噴霧燃焼が利用されている。それらエンジンの性能向上と高効率化のため、噴霧燃焼機構の解明、

およびそれをもとにした噴霧燃焼法の改善が従来より課題となっている。さらに、近年の地球環境問題への社会的関心の高まりから、エンジンより排出される環境負荷物質の低減とさらなる高効率化とが最重要課題となっている。これまで噴霧燃焼は燃焼分野における主要研究課題の一つとして、多くの研

研究者によりその機構解明が進められてきたが、依然として不明な部分が多く残されているのが現状である。これは、噴霧燃焼が液体燃料の微粒化、相変化、燃料蒸気と空気との混合、化学反応、熱伝達といった時間スケールが大きく異なる素過程が相互に関連しつつ進行する非常に複雑な非定常現象であることに起因している。

実験による噴霧燃焼機構解明の手法の一つは、実機あるいは実験室の制御された条件下で形成される噴霧火炎そのものを対象として、火炎形状、液体燃料および燃料蒸気の挙動、温度および生成物濃度分布などを測定することにより、主として噴霧火炎の全体像を明らかにし、内部の微細構造あるいは燃焼機構の解明へと前進するものである。やや古いものとしては小沼ら[1]、中部、水谷ら[2]、赤松、香月ら[3]などの実験研究が、最近のものとしては三上ら[5]や野村ら[4]などの実験研究がこれにあたる。もう一つは、噴霧の構成要素である燃料液滴に関する現象を明らかにした後、その結果を展開することにより噴霧燃焼機構あるいはその構造を解明するものである。広い空間におかれた一つの燃料液滴（単一液滴）の燃焼現象に関する研究は周知のとおり大幅に進捗し、最近の関心は複数の燃料液滴系の燃焼現象へと移りつつある。少し前のものとしては小林、新岡ら[6]、永田、伊藤ら[7]の実験研究があり、最近では JAXA の主導により実験と数値解析の両面から液滴列燃焼の解明が進んでいる[8-10]。噴霧燃焼の機構解明には野村や三上らが行っているように、噴霧火炎を対象とする実験研究と複数燃料液滴系を対象とする実験研究の、それぞれ長所と短所を持つ両者による成果を統合していくことが必要である。

しかしながら、これまでの複数燃料液滴系の燃焼に関する実験研究は数個の液滴を一次元や二次元に配置した系を対象としたものに限られている。この理由は、多数の液滴から構成される燃料系の作成が困難なことに起因する。そこで、本研究の提案者は前任者の角田らと協同して、従来より格段に多い十数個から数十個の燃料液滴を三次元に配置した離散化燃料系を実現する手法を開発した。この離散化燃料系の独創性は、燃料液滴の初期直径とその分布、液滴間隔、液滴の配置などを任意に設定できることにある。この燃料系を単分散（液滴の初期直径を同一）として炉内の高温空气中に導入し、蒸発、自発着火、燃焼させる実験をこれまでに行い[11-13]、三次元配置は二次元配置と比較して着火の遅れ時間はやや長くなるものの燃焼時間は大幅に短縮されること、液滴間隔が小さくなると配置によらず着火遅れ時間も燃焼時間も短くなることを明らかにしたほ

か、液滴間隔が大きい場合には各液滴に個別に火炎（個別火炎）が形成されるのに対し、液滴間隔が小さくなると系全体を覆うように火炎（群火炎）が形成され、中間の液滴間隔では初期の個別火炎が成長して融合し群火炎へと遷移することを明らかにした[11]。さらに、ほぼ球形の三次元離散化燃料系について火炎形態の違いを液滴の初期直径と液滴間隔で整理するとともに、火炎の成長過程についての知見も得ている[12]。また、同様に蒸発挙動の検討も行っているが[13]、液滴直径、液滴間隔、配置などの不均質性の影響や燃料および雰囲気組成の影響など、課題はまだ多く残されている。

2. 研究の目的

本研究では、実験研究により相互干渉を含む三次元離散化燃料系の燃焼形態の体系的、総合的に把握することを目的とした。これまでの手法と知見を基礎として、構成液滴の微細化を行うことで知見を拡張するとともに、新たに液滴直径の不均質性の影響を明らかにし、噴霧燃焼機構の解明に寄与する。

十個を超える液滴で構成され、ほぼ球形の外形を持つ三次元離散化燃料系の高温雰囲気中での蒸発、自発着火、燃焼の挙動解明という大目的は、これまでの実験研究と同様であるが、前述の残された課題の中で、

- ・構成液滴の微細化
- ・液滴直径の不均質性の影響

に着目した実験研究を行った。実用的な燃焼噴霧を構成する燃料液滴は数 μm から数十 μm 程度の大きさであるのに対し、これまでの実験研究では燃料液滴は数百 μm の後半の大きさであった。そこで、燃料液滴を百 μm まで微細化して、その燃料系を高温雰囲気 접촉させて蒸発、自発着火、燃焼させることで、それらの挙動や特性時間、火炎形態を明らかにした。また、実用噴霧中の燃料液滴が単分散であることは非常にまれであり、粒径の不均質性の影響に関する知見も重要である。そこで、初期液滴直径の不均質性の影響についても同様に検討した。

なお、通常重力場において三次元離散化燃料系を燃焼させると、顕著な自然対流の影響により現象の三次元対称性が損なわれる可能性がある。したがって、現象の本質的解明には自然対流の影響の抑制が重要であり、そのため微小重力実験を実施した。

3. 研究の方法

前述のとおり、十個を超える液滴で構成され、ほぼ球形の外形を持つ三次元離散化燃料系を実際にあらかじめ作成しておき、これを実験試料とした。実験においてはこの燃料系を急速に高温の空気雰囲気中へ移動させることで、蒸発、自発着火をへて燃焼に移行さ

せる。そして光学観測により、蒸発、自発着火、燃焼の挙動や特性時間、火炎形態を検討した。本研究の微小重力実験では実験装置を手動操作できないため、装置の作動、制御および計測は自動化した。また、実験装置を構成する部品が配置可能な空間は限られているため、各部品を小型軽量化した。

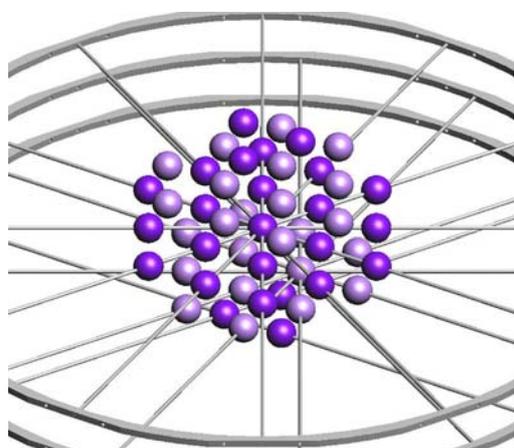


図1 三次元離散化燃料系

三次元離散化燃料系は、液滴を懸垂線で保持する液滴懸垂法をもとにした方法で作成した。金属製の枠（燃料保持枠）を用意し、これに耐熱性の極細線を交差させて張る。燃料をこの交差点に付着させることで、燃料液滴は枠内の任意の位置に固定される。付着させる燃料の量を調整することで、液滴初期直径を変えることができる。枠に極細線を多数張り、その方向や交差位置を変えることで、燃料液滴の間隔および配置を任意に設定することができる。本研究では、十個を超える燃料液滴を等間隔に、ほぼ球形となるように配置した。初期液滴直径が大きい場合には、これまでと同様に常温で凝固する燃料を利用し、熟練した作業者の手作業により、燃料をわずかに加熱、融解して、その液滴を1つずつ極細線に付着させた[11-13]。燃料保持枠は初期液滴直径に合わせて大きめのものを用意し、極細線には線径百 μm 程度の石英線を利用した。一方、初期液滴直径が小さい場合には、燃料保持枠は小さなものを用意し、極細線には線径十 μm 程度の炭化ケイ素線を利用した。そして、インクジェット技術を応用した液滴生成手法[17]を今回新たに採用し、三次元離散化燃料系の作成、実験に成功した。極微量の液体を高精度で吐出できる液滴ディスペンサシステムを導入し、そのディスペンサヘッドから炭化ケイ素線に向けて、極微量の燃料を数回吐出させることにより、極細線に液滴として付着させた。この操作を繰り返すことで、三次元離散化燃料系を作成した。液滴間隔は前述のとおり極細線の配置で

決まるが、液滴直径については拡大鏡で1つずつ確認しながら、十分に時間をかけて調整した。

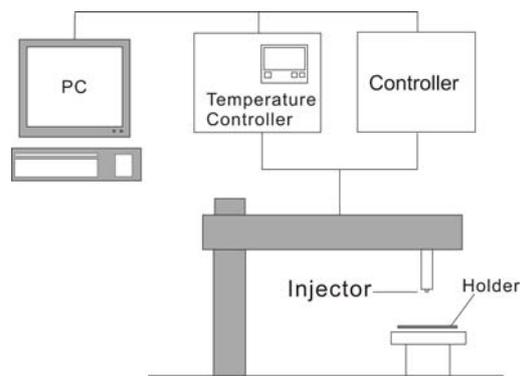


図2 液滴ディスペンサシステム

実験装置は、制御装置、計測装置なども組込まれた燃焼実験装置本体と、微小重力環境を実現するための自由落下装置で構成されている。そして燃焼実験装置本体は、電気炉、遮熱用シャッタ、試料供給系、高速度ビデオカメラを含む光学系および制御系で構成されている。電気炉の下部には試料である離散化燃料系挿入用の開口部が設けられている。電気炉直下にはシャッタがあり、炉内気体温度の低下と試料の昇温が低減される。試料を電気炉内に挿入する場合にのみ、シャッタをエアシリンダにより開く。試料およびその供給装置はシャッタ下方に配置されている。試料は保持装置に固定され、それがエアシリンダにより上下に移動する。試料である燃料系の挙動観察には、高速度ビデオカメラを利用した。

自由落下装置は、落下塔、ドラッグシールド、ドラッグシールド切離し装置、減速時の衝撃緩和装置などからなる。燃焼実験装置本体はドラッグシールド内に封入するが、ドラッグシールドとは非拘束とするため、それらの運動は独立である。ドラッグシールドと燃焼実験装置本体は、実験開始前に電動ウインチで落下塔の上部へ移動させた後、細線で全体を懸垂する。この細線を切断すると、ドラッグシールドと燃焼実験装置本体が落下を開始する。このとき、遮熱用シャッタおよび試料供給装置を作動させて、燃料系を高温の電気炉内へ移動させる。落下開始後、ドラッグシールドは空気抵抗により減速するが、燃焼実験装置本体は空気抵抗の影響を受けず、良質な微小重力環境となる。安全が保証される場所から実験者が遠隔操作して、実験を行った。

4. 研究成果

三次元離散化燃料系としてほぼ球形となるように配置された燃料液滴群を実際に作成し、これを急速に高温の空気雰囲気中へ移

動させて、蒸発、自発着火、燃焼させる実験を行い、光学観測により蒸発、自発着火、燃焼の挙動や特性時間、火炎形態を測定、検討した。とくに構成液滴がより微細な場合と不均質性な場合に着目し、その影響について検討した。その結果、寸法効果に関する知見、数値が蓄積されたほか、構成液滴の一部が消滅（蒸発）してから着火する状況が再現されることを確認した。寸法、配置が制御された三次元離散化燃料系では、今回の構成液滴の微細化によって、実際の噴霧燃焼で見られるこの現象が初めて観察され、制御された条件下での実験による噴霧燃焼過程の模擬を、さらに進展させることができた。以下に、研究成果の中で特徴的なものを列挙する。

初期液滴直径が大きい場合、加熱開始直後には中心液滴はゆっくりと熱膨張した。この初期加熱期間は、周囲液滴径が大きくなるにつれて、長くなる傾向が表れている。初期加熱期間においては伝熱が支配的であり、周囲の液滴径が大きくなると、液滴の単位量あたりの高温空気が減少することになって、熱源の減少により液滴加熱に要する時間が増大したと考えられる。初期の膨張後は、液滴直径はゆるやかに減少していき、着火後にその傾きが大きくなった。中心液滴の消滅時期は、周囲の液滴直径が小さいほど早く、大きくなるほど遅れることが確認された。これは周囲液滴が大きくなるにつれて、初期加熱期間の場合と同様に、液滴の単位量あたりの高温空気が減少した影響が強く現れ、温度上昇、蒸発に要する時間が増大したためである。

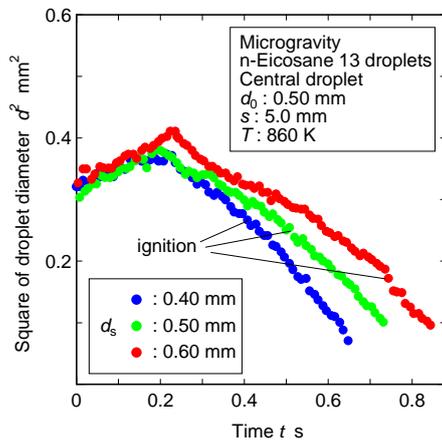


図3 中心液滴直径変化の例(1)

液滴直径が大きいほど着火遅れは長くなり、液滴間隔が小さいほど着火遅れは長くなるという、これまでの知見から予想されたとおり、周囲液滴直径が大きくなるにつれて、着火遅れは長くなった。高沸点燃料の場合、燃料液滴の温度上昇、蒸発に要する時間が着火遅れ要因の大半を占め、そのための熱は高

温の周囲空気から供給される。これまでの説明と同様に、液滴の単位量あたりの高温空気が減少した影響が強く現れ、着火遅れが長くなった。

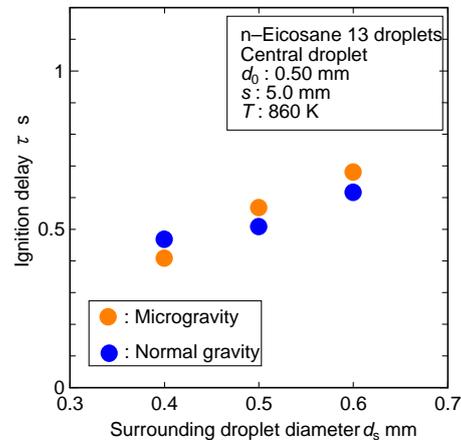


図4 着火遅れの例

液滴直径二乗の経時変化が準定常的となった蒸発および燃焼の後半について、蒸発速度および燃焼速度を算出すると、ともに周囲液滴径が大きくなるにつれて小さくなった。蒸発速度については、これまでの説明と同様に、液滴の単位量あたりの高温空気が減少した影響が強く現れ、小さくなったと考えられる。燃焼速度に関する周囲液滴の干渉効果には、火炎から液滴への放射熱伝達による蒸発促進効果と、火炎間の酸素不足による蒸発抑制効果がある。この場合には周囲液滴径が大きくなるにつれて燃料蒸気が密となり、後者の影響が強く現れ、燃焼速度が低下した。

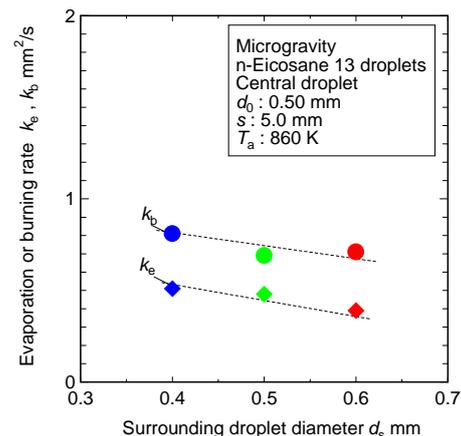


図5 蒸発速度と燃焼速度の例

初期液滴直径が小さくなると、初期加熱期間も短くなった。この初期液滴直径では、比較対象とした単一液滴の場合には着火が見られない、液滴着火限界となっている。周囲

液滴からの燃料蒸気の効果により、中心液滴に対する液滴着火限界がシフトして、着火した（図中でプロットがなくなった時点. この条件では着火後のすす生成が多く、液滴が観察されなくなった）と考えられる. このため、中心液滴の消滅時期は非常に早くなった.

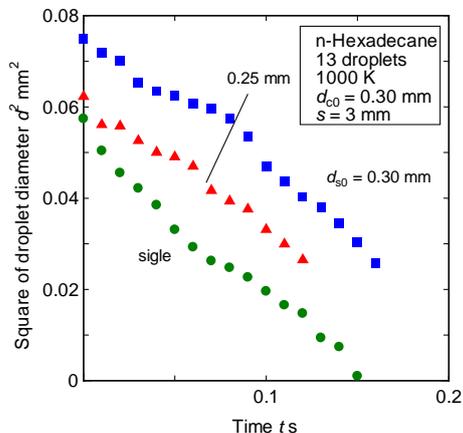


図6 中心液滴直径変化の例(2)

そして、初期液滴直径がさらに小さくなると、いずれの場合にも液滴群の液滴が消滅（蒸発）してから着火するようになった.

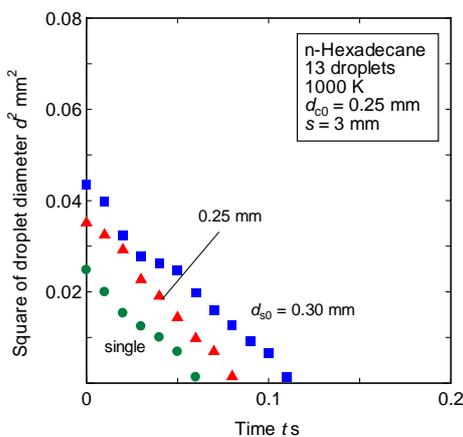


図7 中心液滴直径変化の例(3)

同じく初期液滴直径が小さい場合について、雰囲気温度を下げると、いずれの場合にも液滴群は着火しないで消滅（蒸発）するようになった. このとき、周囲の初期液滴直径の増減に対し、中心液滴の直径二乗の増減はその程度が異なっており、液滴直径の寸法効果が確認される.

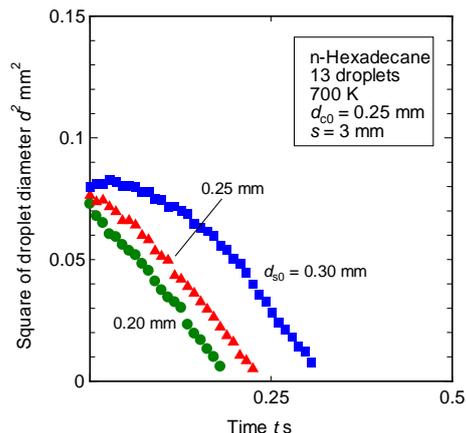


図8 中心液滴直径変化の例(4)

初期液滴直径が小さい場合についても、液滴直径二乗の経時変化が準定常的となった蒸発の後半について、蒸発速度を算出すると、初期液滴直径が大きい場合との間に、大きな違いが見られなかった. このことから、初期加熱期間や着火反応など非定常な過程が、寸法効果をもたらしていると考えられる.

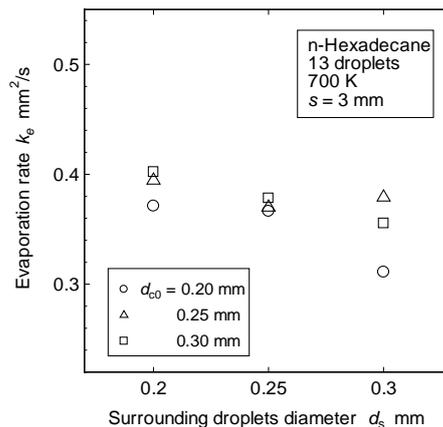


図9 蒸発速度の例

今回の研究成果は、従来の多くの研究成果の関連付けに活かされ、噴霧燃焼の機構解明に向けた研究の進展が期待される. 理論および数値解析をもとに「群燃焼」の概念がChiuにより提起されたが[14-16]、その検証にも本実験研究の成果は活かされる. また、噴霧燃焼研究には現在、数値解析手法が多用されているが、いくつかの素過程モデルには不確定な係数が含まれており、そういった数値解析の検証にも活かされる. 噴霧燃焼はガスタービンエンジンやジェットエンジンだけでなく社会全体で広く利用されていることから、研究成果の広範な波及効果が期待される.

※以上で引用している文献

- [1] Y. Onuma, M. Ogasawara, Proc. Combust. Inst. 15(1975) 453-465.
- [2] K. Nakabe, Y. Mizutani, T. Hirano, S. Tanimura, Combust. Flame 74 (1) (1988) 39-51.
- [3] F. Akamatsu, Y. Mizutani, M. Katsuki, S. Tsushima, Y.D. Cho, Proc. Combust. Inst. 26 (1996) 1723-1730.
- [4] M. Mikami, K. Yamamoto, O. Moriue, N. Kojima, Proc. Combust. Inst. 30 (2005) 2021-2028.
- [5] H. Nomura, M. Hayasaki, Y. Ujiie, Proc. Combust. Inst. 31 (2007) 2265-2272.
- [6] T. Kadowaki, K. Maruta, H. Kobayashi, S. Hasegawa, T. Niioka, Microgravity Sci. Technol. 9-4 (1996) 269-274.
- [7] H. Nagata, I. Kudo, K. Ito, S. Nakamura, Y. Takeshita, Combust. Flame 129 (2002), 392-400.
- [8] M. Kikuchi, T. Arai, S. Yoda, T. Tsukamoto, A. Umemura, M. Uchida, M. Kakei, T. Niioka, Proc. Combust. Inst. 29 (2002) 2611-2619.
- [9] M. Kikuchi, Y. Wakashima, S. Yodaa, M. Mikami, Proc. Combust. Inst. 30 (2005) 2001-2009.
- [10] M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, M. Kikuchi, Y. Wakashima, S. Yoda, Combust. Flame 141 (2005) 241-252.
- [11] D. Segawa, M. Yoshida, S. Nakaya, T. Kadota, Microgravity Sci. Tech. 17-3 (2005) 23-30.
- [12] D. Segawa, M. Yoshida, S. Nakaya, T. Kadota, Proc. Combust. Inst. 31 (2007) 2149-2156.
- [13] D. Segawa, S. Nakaya, T. Kadota, G. Agata, D. Hara, H. Sugihara, 26th Int. Sympo. Space Tech. Sci. (2008) #h-37(CD-ROM).
- [14] H.H. Chiu, T.M. Liu, Combust. Sci. Tech., 17 (1977), 127-142.
- [15] H.H. Chiu, H.Y. Kim, E. J. Croke, Proc. Combust. Inst. 19 (1982), 971-980.
- [16] H.H. Chiu, C.L. Lin, Proc. Combust. Inst. 26 (1996), 1653-1661.
- [17] F. Renaud, C. Chauveau, I. Gokalp, D. Segawa, T. Kadota, Proc. of European Combust. Meeting 2003 (2003) #188 (CD-ROM).

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)

[学会発表] (計1件)

①岡祐輔, 藤室孝之, 多田純輝, 山下宏顕, 瀬川大資, 片岡秀文, 不均一な燃料液滴群の

蒸発および燃焼挙動, 日本機械学会関西支部第87期定時総会講演会, 平成24年3月17日, 関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.me.osakafu-u.ac.jp/combust/>
(準備中)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬川 大資 (SEGAWA DAISUKE)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00264804

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者