

機関番号：24403

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760162

研究課題名（和文） 燃料不均一系の非定常燃焼挙動の解明とモデリング

研究課題名（英文） Elucidation and Modeling on Unsteady Combustion Behavior of Heterogeneous Fuel System

研究代表者

中谷 辰爾（NAKAYA SHINJI）

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号：00382234

研究成果の概要（和文）：微小重力環境下におけるアルコールや炭化水素燃料液滴の非定常燃焼解析を行い、燃焼挙動に及ぼす燃料性状、雰囲気成分、すすの効果調べた。空気中においてエタノールの燃焼は比較的準定常挙動に近いものの、水の溶込み効果が観察された。沸点の高い n-ブタノールでは緩やかな燃焼速度の増加が観察された。すすを含む炭化水素燃料ではステップ状の大きな非定常挙動が観察された。雰囲気中の二酸化炭素によりこの効果は抑制され、アルゴンにより促進される。非定常燃焼挙動に及ぼすすや雰囲気の影響を明確にした。

研究成果の概要（英文）：Unsteady combustion behaviors of the isolated droplet for alcohols and hydrocarbons were investigated and the effect of fuel properties, ambient components and soot were focused upon. Ethanol combustion in air showed a quasi-steady behavior and a weak effect of the water condensation into the droplet. N-butanol with a higher boiling temperature shows a gradual increasing trend of the burning rate. An unsteady stepwise increase in the burning rate for sooting fuels were clearly observed. High concentrations of ambient carbon dioxide suppress the soot production and it results in a mitigation of the unsteady behavior. On the other hand, high concentrations of argon enhances the soot production and the unsteady behavior was also promoted. The effect of sooting and ambient factors on the unsteady burning behaviors were clarified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：燃焼

1. 研究開始当初の背景

近年、内燃機関の環境負荷物質排出規制が非常に厳しくなっている。その抑制には内燃機関内の燃焼現象や流動・物質拡散、化学反応の詳細な理解が必要である。噴霧燃焼を用

いた内燃機関の設計や現象解明の手段として、計算機による実機の形状に合わせた CFD (Computer Fluid Dynamics) を用いた解析が行われるようになってきている。これにより実験では測定できない様々な情報が得られるよ

うになったものの、温度分布、環境負荷物質の生成量や分布などに関して、一部の条件を除いてはあまり良い一致が得られていない。この要因として、多くの簡略化されたモデルの利用による現象の再現性に問題があると考えられる。噴霧中の燃料液滴の蒸発および燃焼に関しては、準定常モデルに基づく d^2 則が幅広く用いられている。しかしながら、実際の液滴の燃焼挙動においても準定常仮定からのずれが報告されており、モデルの改善が望まれる。このため、一部の液滴燃焼研究では、燃焼速度の液滴直径への依存性のべき乗のオーダーを調べた研究などが実施されている。

2. 研究の目的

本研究は、噴霧燃焼モデルに用いられる液滴燃焼モデルの改善のため、微小重力環境下において、非定常液滴燃焼挙動の計測手法の確立、現象の解明およびそのモデリングの検討を目的として燃焼試験を行う。燃料不均一系の一つである噴霧燃焼中の燃料液滴に着目し、燃料液滴の燃焼を観察する。高速度カメラを利用して液滴の燃焼挙動の様子を精密に測定する。液滴表面積の変化を燃焼速度と定義し非定常燃焼速度を算出する。雰囲気成分や燃料性状を変化させることにより、燃焼速度に影響に及ぼす化学反応、気相放射、雰囲気成分、液滴への水の凝縮およびすすの効果を確認する。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

本研究では、微小重力環境における実験を実施するため、落下塔上部から二重箱方式の実験装置内で実験が行われた。実験装置の概略図を図1に示す。落下塔の高さは約10mであり、自由落下区間において約1.0秒の微小重力時間が得られる。実験装置は気密された

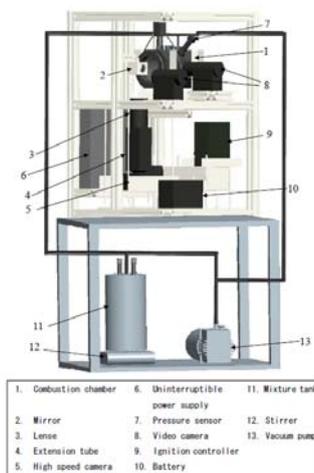


Fig.1 Experimental apparatus

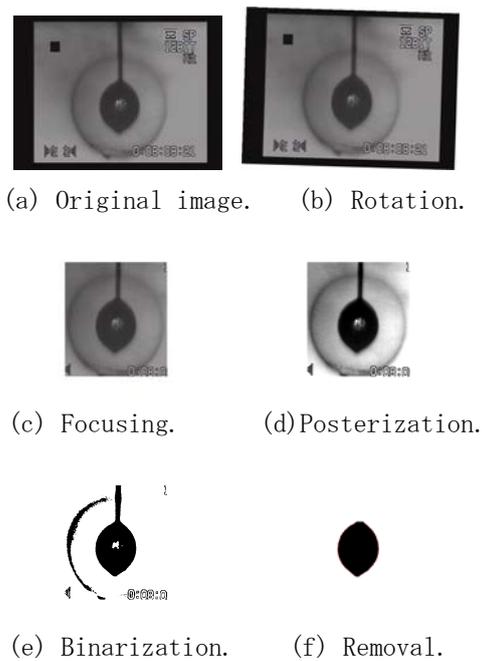


Fig. 2 Procedure of image processing of fuel droplet by a computer program.

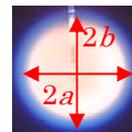


Fig. 3 Minor diameter, a , and major diameter, b , of flame as an ellipsoid.

燃焼容器、混合気タンク、真空ポンプ、高速度カメラ (Redlake Motionmeter or Visionresearch Phantom Miro) やビデオカメラ (SONY, DCR-PC300K) からなる。燃焼容器には4個の光学窓が取り付けられており、液滴の影画像および火炎像を測定することができる。また、温度測定の際には、1個の光学窓を熱電対支持用のフランジに取り換える。燃焼容器内に充填する気体は混合気タンク内で調整され、燃焼容器を脱気した後、容器内に充填される。ほとんどの場合においては、酸素濃度を体積割合で21%に固定する。残りは窒素を基本とし、窒素を二酸化炭素またはアルゴンで置き換える。一部の条件においては酸素濃度を増加させた。

燃料にはアルコール燃料であるエタノールと n -ブタノールを、炭化水素燃料であるヘプタンおよびデカンを用いた。すす生成特性および沸点の違いをパラメータとした。

(2) 非定常燃焼速度の算定

本研究では高速度カメラで撮影した液滴の影写真から液滴の表面積を求め、その変化から燃焼速度を求める。図2にその手順を示す。高速度カメラで撮影された動画を個々の画像に分割し、懸垂線が垂直になるように画像を回転させる。その後、余分な領域を削除した後、隣接8ピクセルのメディアンフィルタ

を適用する。粗階調化を行い液滴の境界面を明確にする。その後、画像の2値化を行い、液滴形状を確定する。液滴と懸垂線以外の物体を同定しノイズとして取り除く。最後に懸垂線と液滴の界面を同定し、懸垂線を削除する。液滴を軸対称の回転体とし、その表面積を求める。表面積の時間履歴に対して、隣接4平均により、ばらつきを軽減したのち、時間二次精度中心差分により表面積の導関数を求める。その導関数を π で割ったものが非定常燃焼速度である。

(3) 火炎径の測定

火炎形状は液滴とは異なり真球に近い形状をしている。そのため、図3に示されるように火炎は回転楕円体とし、長径 a と短径 b を測定し、体積の等しい球の直径を等価直径とする。

4. 研究成果

(1) 従来の測定方法との比較

これまで多くの液滴燃焼に関する研究において、石英線に懸垂された液滴の燃焼速度を求める際に、液滴を回転楕円体と近似し液滴の長径(縦長)と短径(横長)から楕円体の体積を求め、体積の等しい球の等価直径を手動で求めた。従来の手法と本研究の測定結果を図4において比較する。1atm, 室温の空气中におけるエタノール液滴燃焼の結果である。従来の方法で測定した場合、大きく値がばらついている。後半に平均的な燃焼速度定数を求める場合にはあまり影響が無いと考えられるが、非定常燃焼速度を計測する場合は不適である。この条件の場合74pixelで1mmであり、約0.6mmの初期液滴径であった。手動で長径、短径を計った場合には読み取り誤差がばらつきの原因となる。液滴はレモンのような形状をしており、正確な回転楕円体となっていない。液滴の温度の上昇とともに、液滴の表面張力や懸垂線との界面張力が変化するため、形状が変化する。また、液滴が

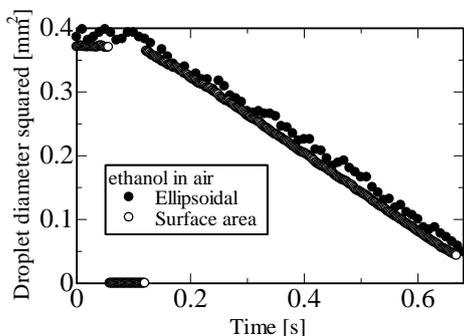


Fig.4 Droplet diameter squared for ethanol droplet measured by conventional and this study's methods.

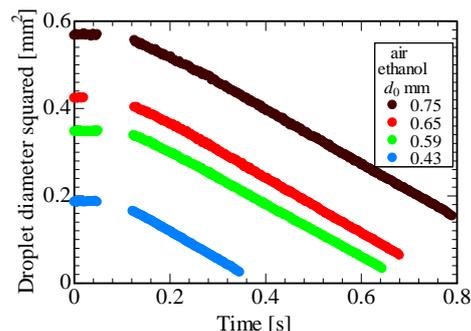


Fig.5 Droplet diameter squared for ethanol droplet in air.

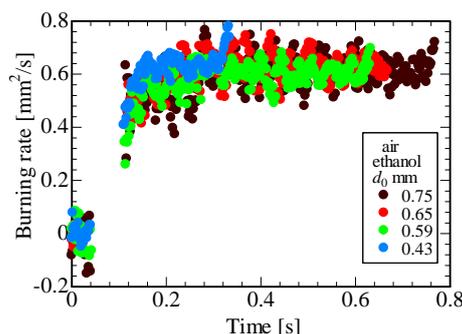


Fig.6 Instantaneous burning rate for ethanol droplet in air.

若干上下にバウンスしていた。このバウンスもばらつきに影響していた。本研究の画像処理アルゴリズムを組み込んだ表面積測定手法ではばらつきが非常に少なく、精度良い測定が可能となる。

(2) 空気中におけるアルコールおよび炭化水素燃料の非定常燃焼速度

図5に空気中におけるエタノールの液滴径2乗の変化を示す。エタノールの場合、初期液滴径の変化に関わらず燃焼速度はほぼ一定である。非定常燃焼速度を求めた結果を図6に示す。燃焼速度は最初は熱膨張により負である。その後、着火により急激に上昇した後、ほとんど一定となる。初期液滴径が変化しても燃焼速度はほぼ一定であり、準定常挙動に近い。エタノールの火炎は輝炎が観察されず、すす殻や放射の影響は小さいと考えられる。一方で、液滴径が大きい場合、わずかに燃焼速度が減少しているように見える。エタノールの沸点は78.3°Cであるため、水蒸気の凝縮による燃焼速度の低下の可能性がある。放射の影響および凝縮の効果などの相互作用により、準定常的な挙動になると考えられる。メタノールの場合には、水の凝縮の効果が大きく出ている報告がある。

水の溶解込みの効果を調べるため、エタノールより沸点の高いn-ブタノールに対して同様の試験を行った。図7に液滴径2乗の変

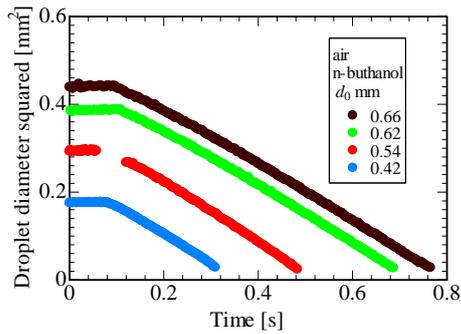


Fig. 7 Droplet diameter squared for n-butanol droplet in air.

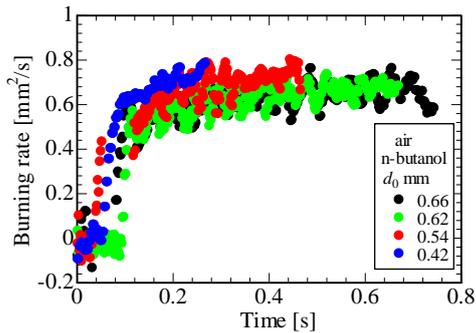


Fig. 8 Instantaneous burning rate for n-butanol droplet in air.

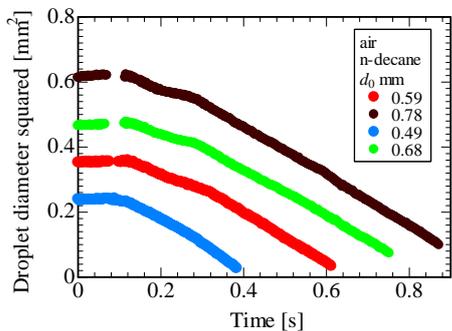


Fig. 9 Droplet diameter squared for n-decane droplet in air.

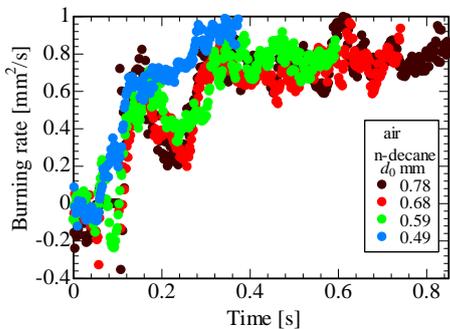


Fig. 10 Instantaneous burning rate for n-decane droplet in air.

化を、図 8 に燃焼速度の経時変化を示す。エ

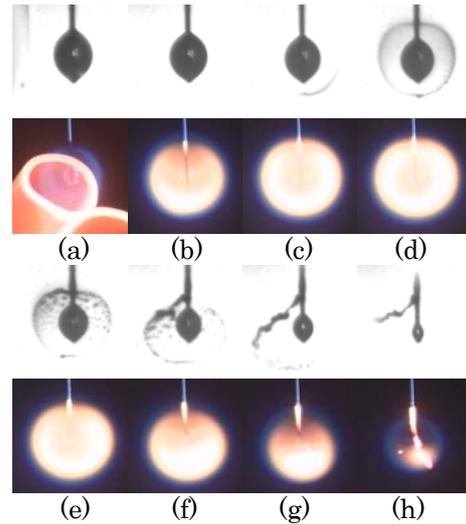
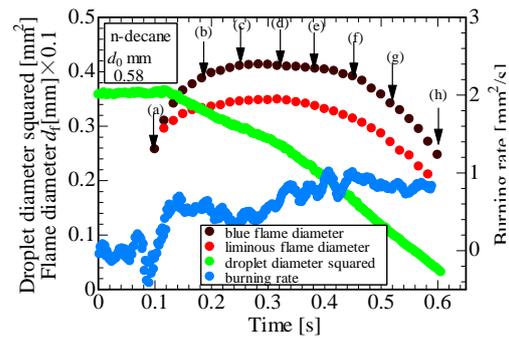


Fig. 11 Relationship between droplet diameter squared, burning rate, flame diameter squared, flame diameters, flame images and droplet

タノールと異なり、燃焼期間中に徐々に燃焼速度が増加している。n-ブタノールは沸点が 117°C であり、水蒸気がほとんど凝縮しないと考えられる。そのため、燃焼後期になるにつれて、気相放射の影響が小さくなり、燃焼速度が増大すると考えられる。この結果から、エタノールの場合における水蒸気の凝縮の効果により放射の影響が相殺されると考えられる。

次に炭化水素燃料である n-デカンの場合の結果を示す。n-デカンの場合には図 9 で観察されるように、液滴径 2 乗値の変化が一定でないことがわかる。図 10 に燃焼速度の変化を示すが、全体的に燃焼速度は増大している。また、液滴径が大きくなると 0.3 秒付近で燃焼速度がステップ状に変化している。この傾向はアルコール燃料では観察されなかった。液滴径が大きくなるほどこの傾向が強いと思われる。炭化水素燃料では大きな非定常挙動が観察される。液滴径が小さくなるとこの傾向が観察されなくなるため、すすの影響があると考えられる。

このステップ状の変化の原因を調べるため n-デカンに対し、液滴、すす、火炎の変化の様子を図 11 に示す。青炎、輝炎の径、液

滴径の2乗値および液滴および火炎の様子を示す。燃焼速度のステップ状の上昇は概ね画像 d と e 付近で観察される。この付近ではすす殻が形成され、すすが凝集して大きくなり、不安定性によりすす殻が崩壊している。すす殻の存在による強い放射によるエネルギーの散逸、あるいはすす殻による拡散の抑制により初期の燃焼速度の抑制、その後の崩壊による燃焼の促進がステップ状の燃焼挙動の原因になったと考えられる。すすの有無により、液滴燃焼のモデリングは非常に複雑となる。

(3) 雰囲気成分の液滴燃焼挙動への影響

すすなどが液滴燃焼に大きく影響を及ぼす可能性が示唆されたため、雰囲気などの放射が液滴燃焼に及ぼす影響は大きいと考えた。そこで、空気中の窒素を二酸化炭素やアルゴンにおきかえ燃焼試験を行った。二酸化炭素濃度を变化させた場合の結果を示す。輝炎を多く発生する n-デカンの場合、図 12 に示されるように、二酸化炭素濃度の増大とともに輝炎の輝度が小さくなるのがわかる。この低下の様子は初期液滴径が小さいほど顕著である。エタノールの場合にはあまり火炎の様子に変化がない。二酸化炭素の熱物性値や放射による火炎温度の低下がすすの生成を抑制したのに加え、二酸化炭素によるすすの酸化等も考えられる。図 13 に n-デカン液滴の燃焼速度の変化を示す。二酸化炭素濃度が増大すると、燃焼速度のステップ状の変化が観察されなくなった。しかしながら、燃焼期間全体にわたって燃焼速度が徐々に増大していることがわかる。これは空気中での n-ブタノールの場合と同じである。一方で全体的な燃焼速度は二酸化炭素濃度増大とともに減少している。n-ブタノールの場合もほぼ同様の傾向であった。エタノールの場合には全体的に二酸化炭素濃度の増大とともに燃焼速度の低下が観察されるが、期間にわたる燃焼速度の増大は観察されない。雰囲気中のアルゴン濃度を变化させた場合の n-ブタノールの燃焼速度の変化を図 14 に示す。アルゴン濃度の増大により全体的に燃焼速度が大きくなった。二酸化炭素と同様に熱物性値の影響と考えられる。一方で、n-デカンや n-ヘプタンなどの場合にはすすの生成が促進され、強いステップ状の変化が観察された。n-ブタノールの場合もすすの生成は観察されたが、すす殻は観察されなかった。

雰囲気中の成分が火炎温度に及ぼす影響を調べるため、温度測定を行った。図 15 はエタノールおよび n-デカンに対し液滴中心から 2.3mm における火炎温度を直径 0.050mm の熱電対を用いて測定した結果である。熱電対は石英でコーティングしている。今回のデータでは放射による温度補正などはおこな

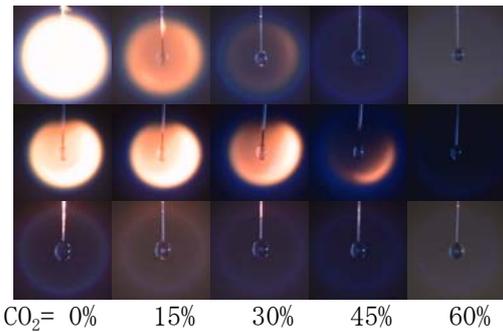


Fig. 12 Flame images in carbon dioxide-riched ambience for n-decane with $d_0=0.55\text{mm}$ (top), n-decane with $d_0=0.80\text{mm}$ (middle) and ethanol with $d_0=0.55\text{mm}$ (bottom).

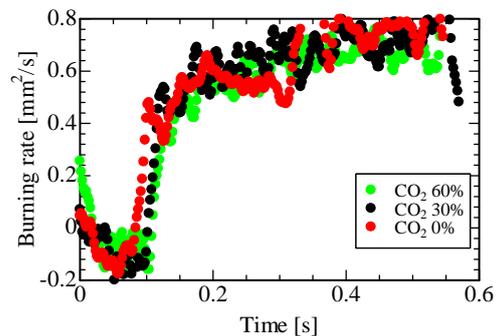


Fig. 13 Instantaneous burning rate for n-decane droplet in carbon dioxide-riched ambience.

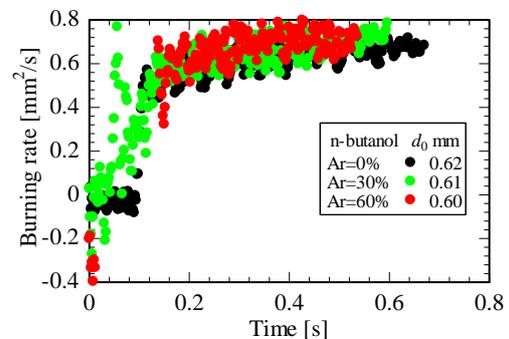


Fig. 14 Instantaneous burning rate for n-butanol droplet in carbon argon-riched ambience.

っておらず、定性的に議論する。エタノール液滴に対し二酸化炭素が 60% の場合、温度が 100K 以上低下していることがわかる。これにより温度低下による燃焼速度の低下が確認された。またこの温度低下によりすすの生成が抑制されていると考えられる。一方で、n-デカンにおいても空気の場合は初期の温度は高いものの、後に温度低下が観察され、また上昇する。この時、全期間において熱電対の位置はすす殻の外側であった。n-デカンの温度データは液滴径が異なるものの、すすに

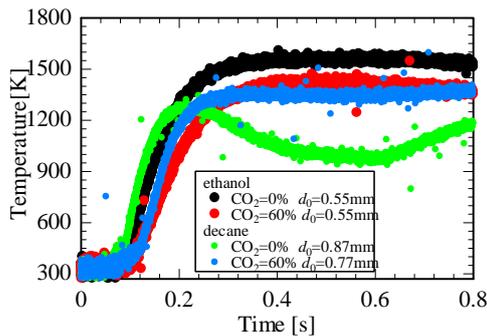


Fig.15 History of temperature for ethanol and n-decane droplets.

よる非定常性が温度履歴においても確認された。温度分布に対し、詳細な議論を行うにはデータが不足しており、今後さらなる温度データの蓄積が必要である。

(4) 液滴燃焼モデルの検討

本研究において示されたように、液滴の燃焼速度は放射、すすおよび水の凝縮の影響を大きく受ける。特にすすの存在は大きな非定常性の原因となる。液滴燃焼モデルは d^2 則あるいは d^x 則のような単純なモデリングは困難であることがわかった。燃料種以外にも上記の要素や気相の状態を組み込んだモデルが必要である。

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2件)

- ① Nakaya, S., Segawa, D., Kadota, T., Nagashima, Y., Furuta, T., Combustion behaviors of isolated n-decane and ethanol droplets in Carbon Dioxide-Rich Ambience under Microgravity, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol. 33, 2011, 2031-2038.
- ② Nakaya, S., Nagashima, Y., Takase, K., Segawa, D., Kadota, T., Effects of Carbon Dioxide on Unsteady Combustion of Isolated Fuel Droplet in Microgravity, Transactions of JSASS, Space Technology Japan, 査読有, Vol. 8, 2010, 1-7.

[学会発表] (計6件)

- ① 古田智也, 中谷辰爾, 瀬川大資, 角田敏一, 微小重力環境下での二酸化炭素を含む雰囲気中におけるアルコール系単一燃料液滴の非定常燃焼挙動に関する研究, 第48回燃焼シンポジウム, 2010年

12月2日, 福岡ガーデンパレス, 都久志会館

- ② Nakaya, S., Segawa, D., Kadota, T., Nagashima, Y., Furuta, T., Combustion Behaviors of Isolated n-Decane and Ethanol Droplets in Carbon Dioxide - Rich Ambience under Microgravity, 33rd International Symposium on Combustion, Aug. 5, 2010, Tsinghua University (China).
- ③ Nakaya, S., Furuta, T., Nagashima, Y., Segawa, D., Kadota, T., Effects of Carbon Dioxide on Isolated Droplet Combustion for Sooting and non-Sooting Fuels in Microgravity, Scientific Assembly of the Committee on space research 2010 (COSPAR 2010), Jul. 18, 2010, Bremen Arena (Germany).
- ④ 古田智也, 中谷辰爾, 長嶋芳明, 瀬川大資, 角田敏一, 空気雰囲気中における微小重力環境下での非定常液滴燃焼挙動に関する研究, 第47回燃焼シンポジウム, 2009年12月4日, 札幌コンベンションセンター
- ⑤ 中谷辰爾, 長嶋芳明, 古田智也, 瀬川大資, 角田敏一, 微小重力環境下での二酸化炭素を含む雰囲気中における非定常液滴燃焼挙動, 第47回燃焼シンポジウム, 2009年12月4日, 札幌コンベンションセンター
- ⑥ Nakaya, S., Nagashima, Y., Takase, K., Segawa, D., Kadota, T., Effects of Carbon Dioxide on Unsteady Combustion of Isolated Fuel Droplet in Microgravity, 27th International Symposium on Space Technology and Science, Jul. 9, 2009, Tsukuba International Convention Center (Japan).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中谷 辰爾 (NAKAYA SHINJI)
大阪府立大学・工学研究科・助教
研究者番号: 00382234