

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 6月15日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760161

研究課題名（和文）赤外レーザー吸収法を用いた部分予蒸発液滴間の火炎伝播特性の解明とモデリング

研究課題名（英文）Investigation on flame spread characteristics of partially prevaporized droplets by using infrared laser absorption method and modeling

研究代表者

菊池 政雄（KIKUCHI MASAO）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任開発員

研究者番号：80371144

研究成果の概要（和文）：噴霧における火炎伝播メカニズム解明に向けた基礎研究として、液滴周囲の燃料蒸気濃度分布が部分予蒸発液滴間の火炎伝播特性に与える影響の解明と現象のモデル化を行うため、 $3.39\mu\text{m}$ 赤外レーザー吸収法による燃料蒸気濃度計測法を適用した微小重力実験を行った。500Kの空气中で1.2秒程度蒸発させた直径約1mmのn-デカン液滴列に対し、液滴列の中心軸に沿ってレーザー光を走査することにより、直線上の燃料蒸気濃度分布を定性的に取得することに成功した。

研究成果の概要（英文）：Application of $3.39\mu\text{m}$ Infrared laser absorption method for measurement of fuel vapor concentration to microgravity experiments was performed, toward clarification of the effects of fuel vapor concentration distribution around droplets on flame spread characteristics between partially prevaporized droplets. By scanning the laser path along the axis of the array in 500K air after 1.2s prevaporization, qualitative measurement of fuel vapor concentration distribution along the axis was successfully achieved, for n-decane droplet array with 1mm droplet diameter.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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

研究代表者らは、噴霧における火炎伝播メカニズムの解明を目指した基礎研究として、直線上に等間隔配置した燃料（n-デカン）液滴による液滴列の火炎燃え広がりメカニズムに関する研究をこれまで進めてきた。落下塔による微小重力実験および非定常数値解析を用いた研究により、液滴予蒸発の進行に

伴い、液滴列を燃え広がる火炎の構造に変化が現れること、また火炎の燃え広がり（伝播）速度が予蒸発の進行度によって大きな影響を受けることが示されていた。数値解析結果の詳細な検討によれば、予蒸発により液滴周囲に形成された濃度勾配を有する燃料蒸気層の中を予混合火炎が伝播し、その後に液滴列を取り囲む拡散火炎が形成されることに

より、火炎先端部に Triple Flame 構造が発現することが分かっていた。

しかし、それまでの微小重力実験においては、予蒸発により液滴列周囲に形成された燃料蒸気濃度分布に関する直接的な計測を行っていなかった。実験時の燃料蒸気濃度分布を計測・把握することは、数値解析結果と比較する上での妥当性を確保するのみならず、燃料蒸気濃度分布、特に液滴列中心軸と直交方向の燃料蒸気濃度勾配が Triple flame の主要な特性に与える影響を定量的に議論しモデル化するためにも重要である。

そこで本研究では、研究代表者らがこれまで地上実験における計測技術構築を図ってきた $3.39\ \mu\text{m}$ 赤外レーザ吸収法による液滴周囲の燃料蒸気濃度計測法を微小重力実験に適用し、部分予蒸発液滴列の火炎燃え広がり特性に与える燃料蒸気濃度分布の影響を定量的に解明することを意図した。

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者のこれまでの研究をさらに発展させ、液滴周囲の燃料蒸気濃度分布が部分予蒸発液滴間の火炎伝播特性に与える影響の解明と現象のモデル化を行うことを目的としている。研究代表者らがこれまで地上実験における計測技術構築を図ってきた $3.39\ \mu\text{m}$ 赤外レーザ吸収法による液滴周囲の燃料蒸気濃度計測法を落下塔による微小重力実験に適用し、非定常数値解析との連携により、部分予蒸発液滴の燃焼過程において発現する Triple Flame の構造と火炎伝播速度に与える燃料蒸気濃度分布の影響を解明することを目指した。

3. 研究の方法

本研究においては、微小重力実験と非定常数値解析の連携により、液滴周囲の燃料蒸気濃度分布が部分予蒸発液滴間の火炎伝播特性に与える影響の解明を目指した。

微小重力実験の手段としては、北海道赤平市にある3秒級落下塔（コスモトーレ）（図1）を使用した。



図1 3秒級落下塔（コスモトーレ）外観

液滴列の燃え広がりに関する研究で使用したコスモトーレ用実験装置を本研究の目的に合わせて改修し、微小重力実験を実施した。燃料としては、これまでの研究と同じく n-デカンを使用した。

数値解析については、これまでの研究で使用してきた非定常数値解析コードを用いた。

4. 研究成果

本研究では、まず微小重力実験を行うための実験装置の改修を行った。液滴列の燃え広がりに関するこれまでの研究で使用していた実験装置は、燃焼容器、液滴列生成装置、液滴移動装置、観察装置、制御装置などで構成されている。観察装置としては、火炎の燃え広がりを観察するために、高速度ビデオカメラあるいは OH ラジカル発光撮影用の光学系が搭載されていた。

今回、燃料液滴周囲の燃料蒸気濃度分布を計測するために、従来の観察装置を取外し、赤外レーザ吸収法による計測系を搭載した。これまでの地上実験で用いてきた光学系の概略図を図2に示す。

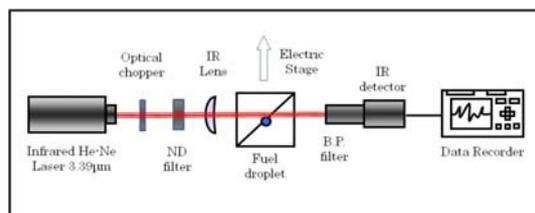


図2 赤外レーザ吸収法光学系の模式図

赤外吸収法の基本原理は、入射光と透過光の割合の対数が測定物の光路長と濃度に反比例するランベルト・ベールの法則に基づいている。ランベルト・ベールの法則の基本式を式(1)に示す。

$$\log \left(\frac{I}{I_0} \right) = -\varepsilon c L \quad (1)$$

ここで、 I_0 は入射光強度、 I は透過光強度、 ε は物質固有の吸光係数、 c は濃度、 L は測定部の光路長である。n-デカン等の炭化水素系燃料は、炭素原子と水素原子の単結合(C-H結合)を有している。一般に、赤外光の吸収は原子の結合の伸縮振動と変角振動とに起因する。C-H結合には伸縮振動に起因する $3.39\ \mu\text{m}$ ($2950\ \text{cm}^{-1}$) 付近に強い吸収帯が認められる。そのため、赤外光源として波長 $3.39\ \mu\text{m}$ のレーザを使用して炭化水素系燃料の蒸気が吸収した赤外線量を測定することにより、燃料蒸気の濃度が求められる。

地上実験で使用した赤外レーザ吸収光学系の小型化を図り、落下実験装置へ機器を搭載した。赤外光の光源としては、ロシア・

PLASMA 社製の赤外 He-Ne レーザ、GNIK-3-1 を使用した。波長は $3.3922\ \mu\text{m}$ 、出力は 3mW である。赤外レーザを、光路変更用のミラー、集光レンズおよび観察窓を介して燃焼容器に導入した。燃焼容器内部において、液滴列の中心軸に対し直交方向からレーザ光が導入される形となり、中心軸上に焦点位置が来るように光路調整を行った。液滴列の中心軸を通過したレーザ光は、燃焼容器の反対側の観察窓から容器外部に透過し、TSUKASA TEC 社製のバンドパスフィルター、BP-3410-290-D を通過した後、浜松ホトニクス社製のプリアンプ付赤外検出モジュール P4639 に入射して透過光の強度が計測される。赤外検出モジュールからの出力信号は、データロガーに記録される。

燃焼容器内への入射光導入用ミラー、集光レンズおよび燃焼容器を挟んで反対側にある赤外検出モジュールは、液滴列の中心軸に沿う方向に一体化して移動することが可能となっている。実験時には、まず 500K の高温に予熱された燃焼容器の外部で燃料液滴列を生成する。実験装置を搭載したカプセルの落下とほぼ同時に燃焼容器底面にあるシャッターを開き、液滴列を燃焼容器内部に挿入する。燃焼容器内部の高温空気中で液滴列を一定時間（最大 1.2 秒程度）蒸発させた後、入射光導入用ミラーおよび赤外検出モジュールを液滴列の中心軸に沿って水平移動させる。これにより、赤外レーザ光の焦点が液滴列の中心軸に沿ってスキャンする形となり、透過光強度の変化に基づき、液滴列周囲の直線上の燃料蒸気濃度分布を計測することができる。

赤外レーザ吸収計測用の光学系を搭載した落下実験装置の外観を図 3 に示す。

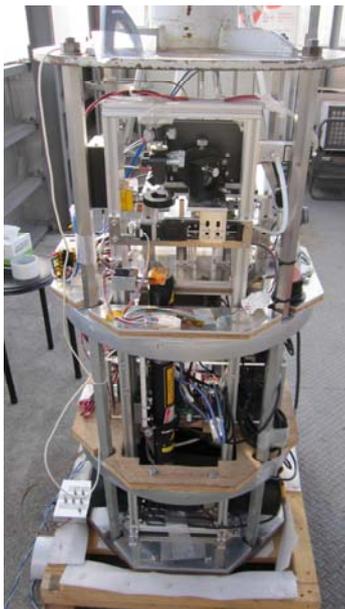


図 3 改修後の落下実験装置の外観

微小重力実験時間の制約により、液滴列中心軸に沿った赤外レーザ光のスキャン後に液滴の着火・燃焼まで行うことは困難であった。また、実験装置搭載スペースおよび機器配置の制約により、赤外レーザ吸収計測系に加えて燃焼容器内の液滴列挙動を観察するためのカメラを搭載することはできなかった。このため、微小重力実験時の取得データとしては、液滴列中心軸に沿った透過光強度の分布が唯一のものとなった。

微小重力実験においては、生成液滴直径を約 1mm 、液滴間隔を 3mm とし、3 個の液滴から成る液滴列に対し赤外レーザ光による計測を試みた。実験実施前には、制動時の衝撃によるレーザや赤外検出モジュールの故障が懸念されたが、十数回実施した落下実験後にも機器の異常や故障は起こらなかった。ただし、レーザ光の光軸は落下毎のズレが避けられず、毎回調整を行う必要があった。

実験により得られた結果の例を図 4 に示す。

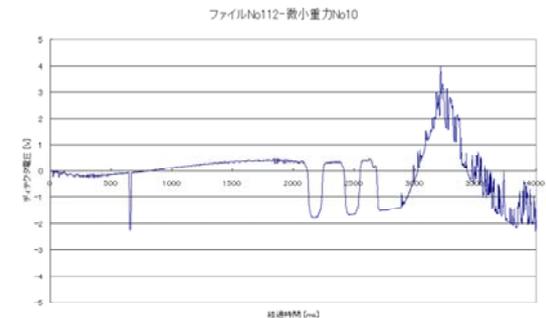


図 4 微小重力実験において取得された、透過光出力電圧データの例

図において、横軸はカプセル落下からの時間、縦軸は赤外検出モジュールにおいて計測された、燃焼容器透過後の赤外レーザ光の強度を示している。落下後 700ms 付近に表れている透過光強度の一時的な低下は、燃焼容器下方から液滴列が挿入される際に液滴支持部がレーザ光を遮ったことによるものである。液滴列の燃焼容器内への挿入完了後、約 1 秒経過した後に赤外レーザ光の液滴列に沿ったスキャンを開始している。 2000ms 後に表れている透過光強度の落ち込みは、第 1 液滴近傍の燃料蒸気によるレーザ光の吸収によるものであり、液滴自体にレーザ光が遮られている場合に極小となっている。レーザ光が第 1 液滴の反対側に出た後は、透過光強度は回復し、第 2 液滴についても同様の波形の変化が認められる。第 3 液滴にレーザ光が到達しなかった頃に制動がかかり、波形の乱れが始まっている。

このように、赤外レーザ光を液滴列に対し走査することにより、液滴列周囲の直線上の燃料蒸気濃度分布を微小重力下においても

計測できることが、定性的にはあるがはじめて確認することができた。ただし、今後検討を要する課題も明らかとなった。

図4より、微小重力環境に移行後、赤外検出モジュールで計測される透過光の強度が少しずつ大きくなっていく傾向が確認できる。この変化は、液滴列に対して赤外レーザー光のスキャンを開始する前から始まっている。一方、同様の手順を通常重力下で行った場合の結果の例を図5に示す。

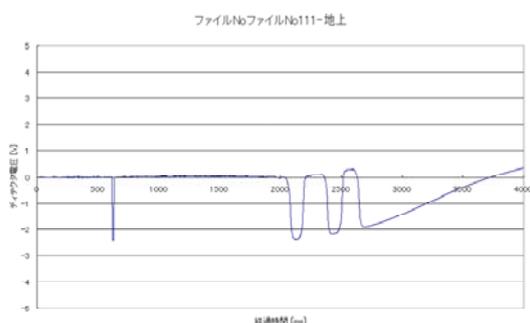


図5 通常重力下での実験において取得された、透過光出力電圧データの例

図4に示した微小重力下での計測とは異なり、計測開始後の透過光強度はほぼ一定であることが分かる。微小重力下における透過光強度の変化について考えられる可能性としては、レーザー光の出力変化、光軸のズレ等がある。自然対流の抑制による放熱状態の変化に伴い、レーザー光の出力が微小重力下で非定常的に変化している可能性がある。また、光軸のズレにより時間の経過と共に透過光強度が大きくなっている可能性も否定できない。今後、これらの原因を究明したうえで、定量的な議論を可能とする必要がある。

数値解析による検討については、部分予蒸発液滴列の燃え広がりに関する解析を行った。しかし、微小重力実験による燃料蒸気濃度分布の定量的な評価が困難であったため、数値解析結果と微小重力実験結果を連携させた検討まで到達することが難しかった。

今後、微小重力実験における課題への対策を施したうえで系統的な実験を行い、非定常数値解析コードによる結果との比較を通じた研究を引き続き進めていく予定である。

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 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

① Masao Kikuchi, Seijiro Fukuyama, Shin Yamamoto, “Study on fuel vapor

concentration measurement near fuel droplet surface by infrared laser absorption method”, The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012年3月19日, Songdo Convensia Center (Incheon, Korea).

② 福山誠二郎, 菊池政雄, 山本信, “赤外吸収法を用いた燃料液滴近傍の燃料蒸気濃度計測”, 日本機械学会2011年度年次大会, 2011年9月14日, 東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都).

③ Masao Kikuchi, Shin Yamamoto, Shinichi Yoda, Masato Mikami, “Effects of partial pre-vaporization on flame spread of n-decane droplet array: Ground and space-based study”, 第33回国際燃焼シンポジウム, 2010年8月3日, 清華大学 (北京・中国).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 政雄 (KIKUCHI MASAO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任開発員

研究者番号: 80371144

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし