



HAL
open science

Combustion of a Methanol Droplet under High Pressure Conditions

Daisuke Segawa, Toshikazu Kadota, Akira Nakainkyo, Christian Chauveau,
Iskender Gokalp, Bruno Vieille

► **To cite this version:**

Daisuke Segawa, Toshikazu Kadota, Akira Nakainkyo, Christian Chauveau, Iskender Gokalp, et al.. Combustion of a Methanol Droplet under High Pressure Conditions. *International Journal of Microgravity Science and Application*, 1998, 15 (4), pp.197-205. hal-02015649

HAL Id: hal-02015649

<https://hal.science/hal-02015649>

Submitted on 25 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

■■■■ 原著論文 ■■■■

高圧力下におけるメタノール単一液滴の燃焼

瀬川 大資^A・角田 敏一^A・中隠居 晃^BChristian CHAUVEAU^C, Iskender GÖKALP^C, Bruno VIEILLE^C

Combustion of a Methanol Droplet under High Pressure Conditions

Daisuke SEGAWA^A, Toshikazu KADOTA^A, Akira NAKAIKYO^B,
Christian CHAUVEAU^C, Iskender GÖKALP^C and Bruno VIEILLE^C

Abstract

An experimental study was carried out on the combustion process of a methanol droplet in high pressure air under the normal gravity condition and reduced gravity conditions which are available in a drop shaft and during the parabolic flight of an airplane. Methanol was chosen as the test fuel both for its lower sooting tendency and also because it is considered to be one of the most promising candidates as alternative fuel for several applications. A methanol droplet was suspended at the tip of a fine quartz fiber in a high-pressure combustion chamber and ignited with an electrically heated kantal wire. A high-speed video camera was provided to obtain the time histories of the squared droplet diameter which were available to determine the burning rate constant. The results showed that the d-square law was valid for all the conditions of the present experiments. The burning rate constant increased with the ambient pressure and did not show a peak around the ambient pressure equal to the critical pressure of methanol. Also evident was that the burning rate constant decreased with gravitational acceleration.

1. 序 論

ガスタービン機関，ディーゼル機関，ロケットモータ，ボイラなど多くの燃焼器において広く採用されている噴霧燃焼の機構を解明することは，燃焼器の性能向上と環境汚染の原因となる有害排出物の低減とを実現するために必要不可欠であり，関連した研究が多岐にわたってなされてきている．しかしながら，噴霧燃焼は，液体燃料の微粒化，加熱，蒸発，拡散，点火，燃焼などの多くの素過程からなる非常に複雑な現象であり，そのため現在でも機構解明は充分には進んでいない．

噴霧燃焼の機構解明には，噴霧の構成要素である燃料液滴の燃焼特性を明らかにすることが必要となる．このような観点から，これまでに単一燃料液滴を対象とした燃焼実験¹⁻⁴⁾が数多く行われ，比較的低い圧力範囲における液滴の燃焼機構については多くの知見が得られている．

一方，性能向上を目的として燃焼器内圧力は年々高まる傾向にあり，液体燃料はその臨界圧力・臨界温度を超える雰囲気中で燃焼するようになってきている．この場合，燃料の気液界面は消失し，燃焼に関与する輸送過程は低圧雰囲気中の場合と質的に異なっている可能性があると考えられ

A 大阪府立大学工学部 〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1

Department of Mechanical Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Sakai, Osaka 599-8531, Japan (E-mail kadota@ava.osakafu-u.ac.jp)

B 大阪府立大学大学院 〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1

Department of Mechanical Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

C Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs, CNRS, 45071 Orléans Cedex 2, France

る。したがって、高圧雰囲気中における液体燃料の燃焼特性は、低圧雰囲気中における燃焼特性とは異なると推測されるが、実験データが不足しており、不明な点が多く残されている。例えば、燃料液滴の燃焼時間とそのほぼ逆数に相当する燃焼速度定数（燃焼液滴の直径の2乗の、単位時間当たりの変化量）との圧力依存性については、これまでに実験⁵⁻⁷⁾および理論解析⁸⁾によって調べられており、燃料の臨界圧力付近においてそれぞれ極小値および極大値を示すと報告されている。これは、液滴燃焼は臨界圧力以下においては蒸発律速であり、気化熱は圧力上昇とともに小さくなるため、蒸発および燃焼が圧力上昇とともに促進されるのに対し、臨界圧力を越えると燃焼中に液滴が臨界点に達してガス塊となるために拡散律速となり、燃料や酸素などの拡散に要する時間が圧力上昇とともに長くなるため、燃焼が圧力上昇とともに抑制されることが原因であると説明されている。しかしながら、液滴の燃焼時間が臨界圧力付近で極小値を示さないという実験報告^{9,10)}もある。

以上の背景から、燃料の臨界圧力を越えるような高圧雰囲気中における燃料液滴の燃焼現象を把握することを目的として、著者らは単一燃料液滴の燃焼実験を行ってきた¹¹⁾。なお、このような実験では多くの場合、パラフィン系燃料が実験対象となっているが、高圧雰囲気中で燃焼する際には高輝度で発光するすすを大量に生成するため、液滴の挙動を光学測定することが困難となる。また、近い将来に予測される化石燃料の潤滑に対処するために、メタノールや天然ガスなどの代替燃料の燃焼特性の把握が必要となってきている。そこで、本実験ではすす生成の少ないメタノールを実験対象とした。さらに、通常重力下、高圧雰囲気中では、界面張力の低下のために懸垂線によって燃焼液滴を保持することが困難となる。また、燃焼により誘起される自然対流が燃焼過程に強い影響を及ぼすと同時に、複雑な燃焼場が形成されるため、燃料液滴の燃焼現象を本質的にとらえることが非常に難しくなる。そこで、航空機のパラボリックフライトおよび落下施設によって実現される微小重力環境を利用して実験を行った。これまでに得られた実験結果について、ここ

に報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 落下実験および通常重力実験

JAMIC（地下無重力実験センター）での落下実験（微小重力実験）および通常重力下での実験に用いた実験装置の概略を Fig. 1 に示す。本実験装置は、高圧燃焼容器、容器内部撮影用の8 mm ビデオカメラ、液滴バックライト像撮影用の高速度ビデオカメラ、シーケンサおよび各種電源などで構成されており、すべてJAMIC 落下実験用の基台上に取り付けられている。高圧燃焼容器の内部は内径80 mm、高さ130 mm の円筒形で、設計耐圧は20 MPa である。この容器円筒部には、対向する2対の観察窓（直径30 mm）が取り付けられている。メタノール液滴は、高圧燃焼容器の上部フランジに金具を介して取り付けられた石英線の先端に懸垂させ、点火・燃焼させた。石英線の線径は0.25 mm で、その先端は液滴が懸垂されやすいように直径0.5 mm 程度の球形に加工されている。メタノールは、石英線先端に近づけられた液滴生成装置の注射針先端から供給される。この注射針は、液滴を懸垂させた後に、液滴の燃焼に影響を及ぼさないよう液滴から遠ざけられる。液滴の点火は、電気加熱したコイル状のカンタル線を液滴に近づけて行われる。このカンタル線も、液滴の燃焼に影響を及ぼさないよう点火後には液滴から遠ざけられる。液滴生成装置のプ

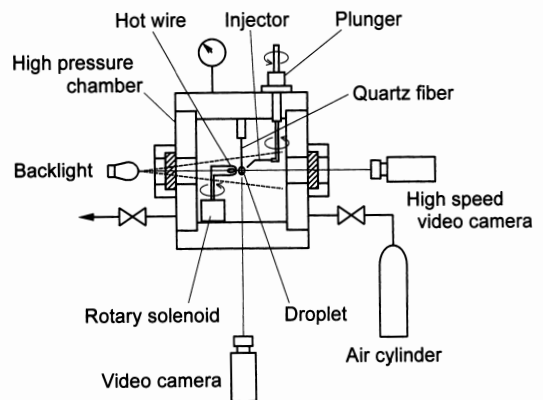


Fig. 1 Experimental apparatus under normal gravity and under microgravity in the drop shaft.

ランジャ部の作動および注射針の移動には、フランジ上部（容器外部）に取り付けられたステッピングモータを利用した。また、カンタル線の移動には、小型のロータリソレノイドを利用した。

落下実験における各装置の作動シーケンスは、以下のように設定した。まず、落下開始30 s前までに、液滴生成装置により石英線先端に任意直径のメタノール液滴を懸垂させる。そして、落下開始直後にカンタル線を電気加熱し、その2 s後にカンタル線を液滴に近づけて点火する。本実験では液滴の初期直径を1 mm程度としたので、微小重力環境が実現される落下中の10 s以内に燃焼は終了した。なお、通常重力下においても、落下実験の場合と同様のシーケンスで実験を行った。

液滴挙動の観察は、高速度ビデオカメラを用いて行った。液滴の背後にハロゲンランプ光源を置き、前方より液滴のバックライト像を2 ms間隔（500 frame/s）で撮影した。また、液滴火炎の直接像を、容器内部撮影用の8 mmビデオカメラにより、側方から撮影した。

2.2 航空機実験

航空機のパラボリックフライトを利用した微小重力実験は、フランスで1997年に運用が開始されたエアバスA300微小重力実験専用機「Airbus Zero-G」を使用して行った。エアバスA300のパラボリックフライト中における加速度の測定例を、Fig. 2に示す。このように、航空機実験で得られる微小重力環境の重力加速度は $10^{-2} g_0$ 程度であり、微小重力環境としては比較的大きい。しかしながら、微小重力環境の実現される時間が25 s程度と長いのが特長である。また、いわゆる自由落下法の場合に必要な計測装置の耐衝撃性についての特別な配慮は不要（ただし、航空機運航における安全面から、 $10 g_0$ の過重力で装置が飛散することがないようにしておかなければならない）であり、装置寸法の制約も少ない。

航空機実験に用いた実験装置¹⁰⁾の概略をFig. 3に示す。本実験装置は、高圧燃焼容器、容器内部および液滴バックライト像撮影用の2台の高速度ビデオカメラ、シーケンサ、高圧液体ポンプおよび各種電源などで構成されており、これらはすべて1つの縦型のラックに収納されている。このラックと高圧ポンペを収納するラックは、航空機

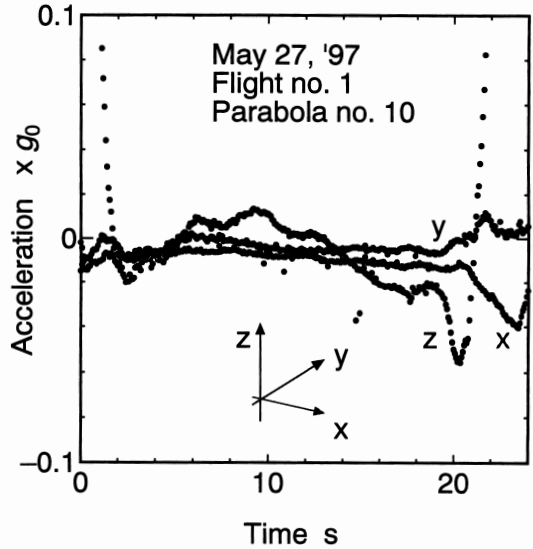


Fig. 2 An example of acceleration during the parabolic flight.

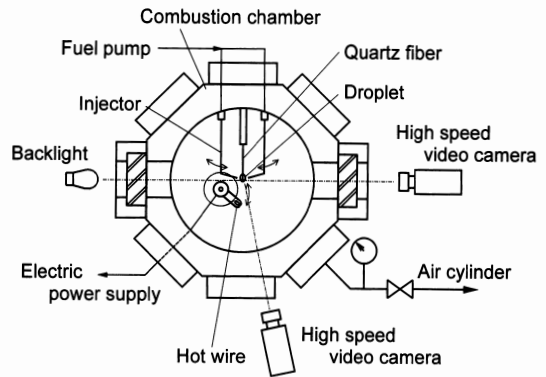


Fig. 3 Experimental apparatus under microgravity during the parabolic flight.

内の床面に固定される。高圧燃焼容器の容積は $11 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 、設計耐圧は12 MPaである。容器内部には、燃料液滴を懸垂させる石英線、液滴生成装置、点火用カンタル線およびその移動装置などが取り付けられている。石英線は線径0.20 mmで、その先端部は直径0.4 mm程度の球形に加工されており、この部分に初期直径1~2 mmのメタノール液滴を懸垂させた。メタノールは、石英線先端近くに開口部が対向するように配置した、液滴生成装置の2本のステンレス製細管の先端から同時に供給される。この2本の細管は、任意の量の

メタノールを供給した後に反対方向へ急速に引き離され、それによって石英線先端に液滴が生成・懸垂される。液滴の点火は、加熱したカンタル線のコイルを液滴に近づけて行われる。このカンタル線は、液滴の燃焼に影響を及ぼさないよう点火後には液滴から遠ざけられる。液滴生成装置の細管およびカンタル線の移動には、容器内部に取り付けたソレノイドを利用した。また、ステンレス製細管へのメタノールの供給には、容器外部に設置した高圧液体ポンプを利用した。

航空機実験における各装置の作動シーケンスは、以下のように設定した。重力加速度がほぼ安定するパラボリックフライト開始から5 s後 (Fig. 2) に、液滴生成装置により石英線先端に任意直径のメタノール液滴を懸垂させる。そして、液滴生成の直後にカンタル線を電気加熱し、その5 s後にカンタル線を液滴に近づけて点火する。なお、航空機実験の場合にも、落下実験の場合と同様に、微小重力環境が実現されている間に液滴の燃焼は終了した。

液滴および液滴火炎の挙動の観察には、2台の高速度ビデオカメラを用いた。液滴の背後にハロゲンランプ光源を置き、前方より液滴のバックライト像を1台のカメラで撮影するとともに、火炎の直接像をもう1台のカメラで側方より撮影し、両画像を同期させて記録した。撮影間隔はそれぞれ4 ms (250 frame/s) とした。

2.3 共通の実験方法

燃料には、脱気処理を行った脱水メタノールを用いた。なお、メタノールの臨界温度 T_c は513 K、臨界圧力 P_c は8.09 MPaである。高圧燃焼容器には、高圧ポンプより室温の乾燥空気を充填した。

本実験では、メタノール液滴を懸垂線の先端部に保持させた。この際、界面張力の影響によって液滴は球形にはならず、懸垂線の軸方向に引き延ばされた形状となる。そこで、この液滴形状を回転楕円体とみなし、得られた画像から測定した長径と短径より、その表面積を算出した。そして、同じ表面積となる球の直径(等価直径)を算出し、これを液滴直径 d と定義した。以上の方法により、液滴直径の経時変化および燃焼速度定数 K_0 を導出するとともに、これらに及ぼす雰囲気圧力

および重力加速度の影響を明らかにした。

また、落下実験および航空機実験における重力加速度は、いずれも液滴が燃焼している間に変動するが、本実験では、以下のようにして算出した平均重力加速度をそれぞれの場合の代表値として用いた。互いに直交する3方向の加速度を、落下実験では25 ms、航空機実験では71 msの間隔で測定し、その測定値より重力加速度ベクトルの大きさの液滴燃焼中における時間平均値を算出した。そして、各燃焼実験における時間平均値を算術平均したものを、落下実験と航空機実験のそれぞれの場合における平均重力加速度 g とした。なお、本実験では液滴の燃焼時間が最長で3 s程度と短かったことから、液滴燃焼中において測定された3方向の加速度が時間平均値と比較して著しく変動することはなかった。

3. 実験結果および考察

3.1 通常重力実験

通常重力下では、メタノールの臨界圧力の約1.25倍 (10.1 MPa) まで雰囲気圧力を変えて、燃焼実験を行った。撮影された燃焼液滴のバックライト像の例を、Fig. 4に示す。図より、雰囲気圧力が高くなると液滴周囲に比較的強い自然対流が形成されている様子がわかる。また、雰囲気圧力が9.1 MPa および10.1 MPa の場合には、臨界圧力以上となっているが、図に示されるように気液境界面は明確に観察されることから、これらの液滴は臨界点に達していないものと推測される。

これらのバックライト像より、前述の方法で液滴直径 d を求めた。種々の雰囲気圧力における液滴直径2乗の経時変化を、Fig. 5に示す。図の横軸は、点火後の経過時間 t を点火時の液滴直径の2乗 d_0^2 で除している。また、縦軸は、 d^2 を d_0^2 で除して無次元化している。図より、いずれの雰囲気圧力においても液滴直径の2乗は時間経過とともに直線的に減少している。つまり、本実験の範囲内では、通常重力下において、燃料の臨界圧力を越える雰囲気圧力まで d^2 が成り立っていることがわかる。また、雰囲気圧力の上昇にともなって直線の傾きは大きくなることがわかる。

液滴直径2乗の経時変化を直線近似し、その直線の傾き、つまり燃焼速度定数 K_0 を最小2乗法

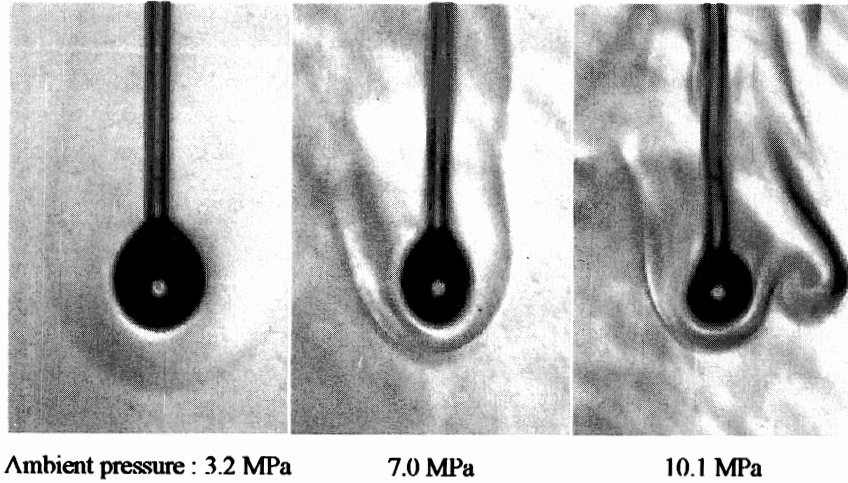


Fig. 4 Backlight images of the burning droplet under normal gravity.

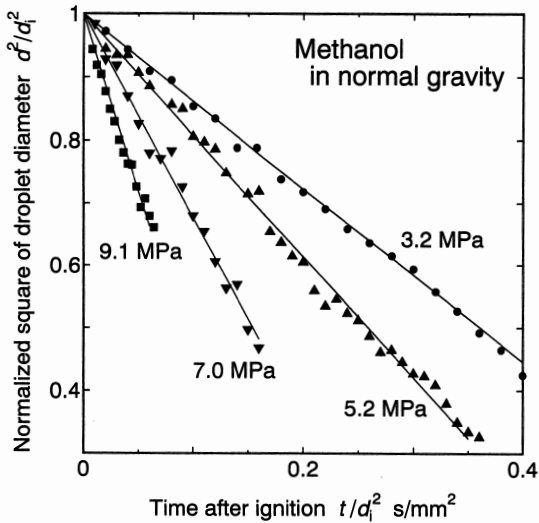


Fig. 5 Time histories of the squared droplet diameter under normal gravity.

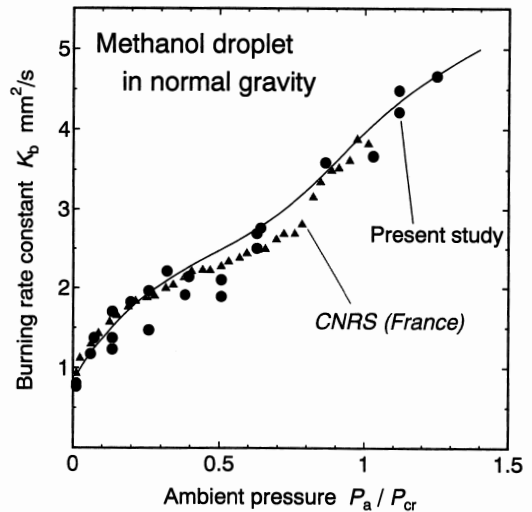


Fig. 6 Relationship between ambient pressure and burning rate constant under normal gravity.

により算出した。得られた燃焼速度定数 K_b と雰
 囲気圧力 P_a との関係を、Fig. 6 に示す。横軸は、
 雰囲気圧力をメタノールの臨界圧力 P_{cr} で除した
 圧力比である。図には、本実験の航空機実験にお
 いて使用したものと同一実験装置によって、以前
 に得られた通常重力下での実験データ¹⁰⁾も示して
 いる。両者の実験結果は、実験装置に多少の違い
 があるにもかかわらずよく一致しており、1本の
 曲線上に乗ることがわかる。さらに、燃焼速度定

数は臨界圧力の約1.25倍まで、雰囲気圧力の上昇
 とともにほぼ単調に増大し、メタノールの臨界圧
 を越えた範囲まで極大値を示さないことが明らか
 となった。この結果は、いくつかのパラフィン系
 燃料を用いて通常重力下で実験を行った Kadota
 らの結果⁹⁾と、定性的に一致している。一方、メ
 タノールを含むいくつかの燃料を用いて通常重力
 下で実験を行った佐藤らの結果¹²⁾では、いずれの
 燃料の場合にも、圧力比 P_a/P_{cr} が1付近で燃焼

速度定数はほぼ一定となり、それよりも圧力比が上昇すると燃焼速度定数は減少する傾向が見られ、本実験の結果と異なっている。佐藤らはアーク放電によって液滴を点火していることから、点火方法の違いが実験結果に差異の現れた原因である可能性があるが、現時点では原因の詳細は不明である。

なお、雰囲気圧力が臨界圧力の約1.25倍を越えると液滴が点火直後に落下してしまい、データを取得することはできなかった。

3.2 微小重力実験（航空機実験および落下実験）

航空機実験において、従来の実験¹⁰⁾では、メタノールの臨界圧力の約1.15倍までのデータが得ら

れていたが、本実験では、臨界圧力の約1.4倍（11.1 MPa）まで雰囲気圧力を変えて、燃焼実験を行った。撮影された燃焼液滴のバックライト像の例を、Fig. 7 に示す。図に示される液滴周囲の濃淡の形状より、高圧力下では液滴周囲に弱い自然対流が形成されていると思われる。しかしながら、航空機実験における平均重力加速度は0.018 g_0 であったことから、この自然対流は非常に緩やかなものであると推測される。また、雰囲気圧力が11.1 MPaの場合はメタノールの臨界圧力以上となっているが、低圧力下の場合と同様に気液境界面は明確に観察される。このことから、11.1 MPaの場合も液滴は臨界点に達していないものと推測される。

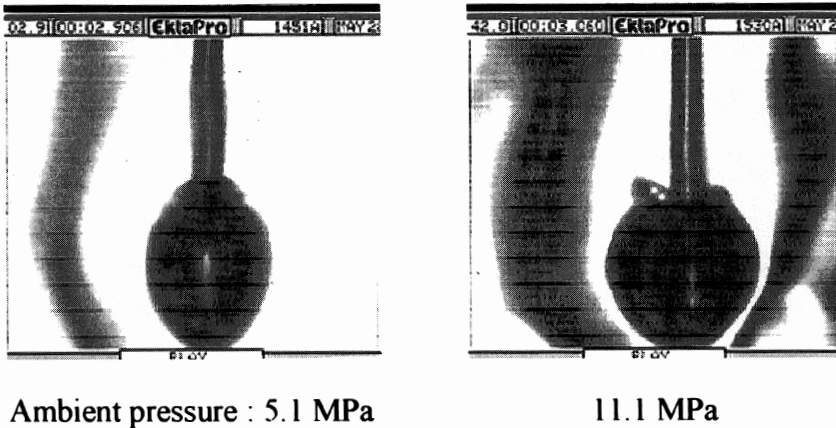


Fig. 7 Backlight images of the burning droplet under microgravity during the parabolic flight.

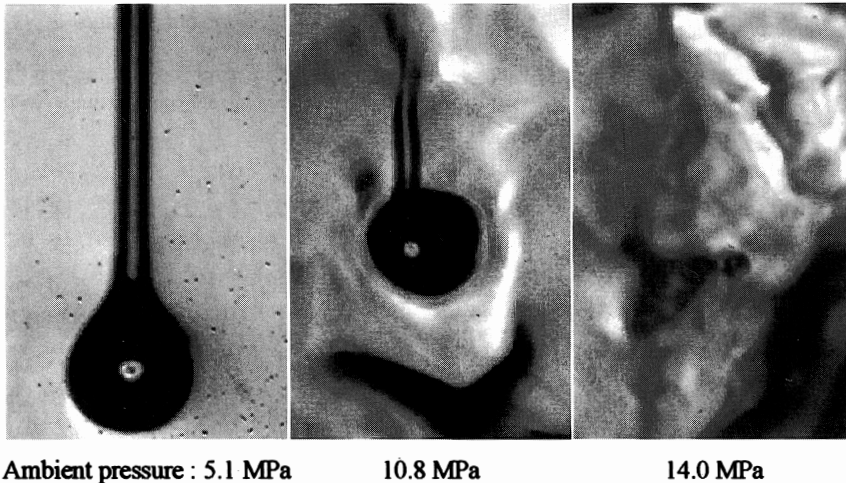


Fig. 8 Backlight images of the burning droplet under microgravity in the drop shaft.

一方、落下実験では、臨界圧力の1.7倍程度(14.0 MPa)まで雰囲気圧力を変えて、燃焼実験を行った。撮影された燃焼液滴のバックライト像の例を、Fig. 8に示す。図より、落下実験においては自然対流は発生していないものと思われる。しかしながら、雰囲気圧力を臨界圧力の1.3倍(10.8 MPa)以上とした場合には、点火の直後に液滴バックライト像が歪んで回転楕円体とみなせなくなるとともに、その像自体が不明瞭となり、液滴直径の算出は困難であった。これは、加熱された点火用カントル線の移動にともなって周囲気体に擾乱を与え、一方でそれを減衰させる自然対流がないために、液滴周囲の密度および温度の空間変動が大きくなり、シュリーレンレンズ効果¹³⁾のために液滴バックライト像が正常に撮影されなかったことが、主な原因であると思われる。ただし、雰囲気圧力14.0 MPaの画像より、液滴から微小な液滴が飛び出している様子がわかる。これは、液滴の表面張力が低下したためであると考えられる。このことから、液滴は14.0 MPaでは臨界点に達していないものの、臨界点に近づいていると推測される。なお、落下実験における平均重力加速度は0.00044 g_0 であり、航空機実験の場合より2桁程度小さかった。

これらのバックライト像より、前述の方法で液滴直径 d を求めた。落下実験により得られた液滴直径2乗の経時変化を、Fig. 9に示す。図より、いずれの雰囲気圧力においても液滴直径の2乗は時間経過とともに直線的に減少することがわかる。航空機実験においても同様な結果が得られた。このことから、本実験の範囲内では、微小重力下・高圧雰囲気中においても d^2 則が成り立っていることがわかる。

航空機実験および落下実験で得られた液滴直径2乗の経時変化より導出された燃焼速度定数 K_b と、雰囲気圧力 P_a との関係を、Fig. 10に示す。航空機実験での結果に示されるように、臨界圧力の約1.4倍の雰囲気圧力まで、燃焼速度定数は雰囲気圧力の上昇とともにほぼ単調に増大し、臨界圧力を越えても極大値を示さないことがわかる。ただし、雰囲気圧力が上昇するとともに燃焼速度定数の増大率は小さくなる傾向が現れている。ここで、メタノールの臨界圧力8.09 MPaは単成分

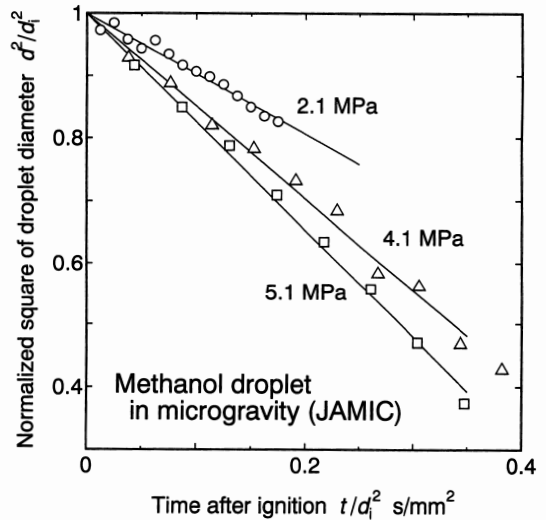


Fig. 9 Time histories of the squared droplet diameter under microgravity in the drop shaft.

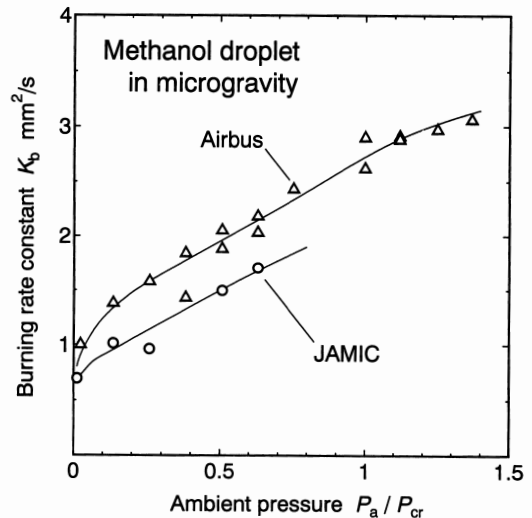


Fig. 10 Relationship between ambient pressure and burning rate constant under microgravity.

系における値であり、本実験で対象としているような多成分系においては、周囲気体のメタノール液滴への溶解およびメタノールの蒸発により、混合物とみなされる液滴の臨界圧力は、かなり高くなる可能性のあることが知られている¹⁴⁾。また、Fig. 8に示されるように、メタノールの臨界圧力よりも十分に高い雰囲気圧力14.0 MPaにおいても、燃焼中のメタノールは液体の状態であると推

測される。以上のことから、14.0 MPa以下の霧
 囲気中で燃焼するメタノール液滴は臨界点に達す
 ることがなく、そのために11.1 MPaまでの霧
 囲気圧力においては蒸発律速であり、燃焼速度定数
 は圧力とともに増大するものと考えられる。

また、本図と Fig. 6 との比較より、微小重力
 下では通常重力下よりも燃焼速度定数が小さくな
 ることがわかる。これは、通常重力下では自然対
 流の影響で燃焼が促進されているのに対して、微
 小重力下ではその燃焼促進効果が小さいか、ない
 ためであると考えられ、従来よりパラフィン系燃
 料を用いて数多く行われてきた実験の結果とも定
 性的に一致している。

一方、Fig. 10より、落下実験における燃焼速
 度定数は、航空機実験の場合よりも小さくなって
 いることがわかる。通常重力実験および微小重力
 実験により得られた燃焼速度定数のデータより、
 それぞれの重力環境下における霧囲気圧力—燃焼
 速度定数の関係を曲線近似し (Fig. 6 および
 Fig. 10中の曲線)、いくつかの圧力比 P_a/P_{cr} にお
 ける燃焼速度定数の値を推算した結果を、Fig.
 11に示す。図の横軸は、それぞれの重力環境下
 における平均重力加速度 g を g_0 で除して無次元
 化している。図に示されるように、重力加速度が
 小さくなるとともに燃焼速度定数は小さくなる。

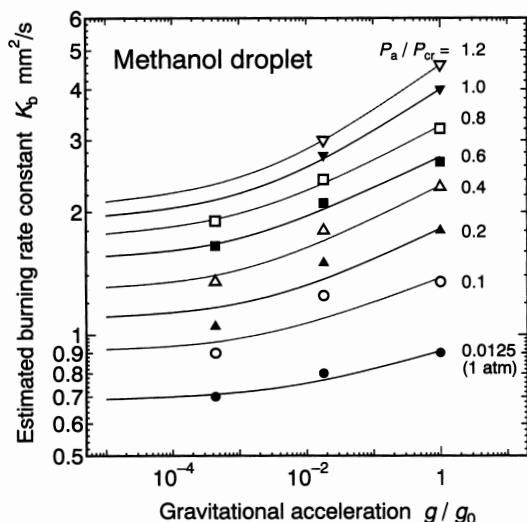


Fig. 11 Relationship between gravitational acceleration and burning rate constant.

つまり、重力は燃焼速度定数に非常に強い影響を
 及ぼし、その影響は、重力加速度が $10^{-2} g_0$ 程度
 まで小さい場合にも無視できないことがわかる。

4. 結 論

本実験の結果、以下の結論が得られた。

- 1) 明瞭な液滴バックライト像が得られた範囲
 内では、いずれの場合においても液滴直径の2乗
 は時間経過とともに直線的に減少し、 d^2 則が成
 り立つ。
- 2) 実験範囲内では、微小重力下と通常重力下
 のいずれの場合においても、燃焼速度定数は霧
 囲気圧力の上昇とともにほぼ単調に増大し、メタ
 ノールの臨界圧を越えても極大値は示さない。
- 3) 微小重力下で霧囲気圧力が上昇するにとも
 なって、燃焼速度定数の増大率は小さくなる傾向
 が現れる。
- 4) 微小重力下では通常重力下よりも燃焼速度
 定数は小さくなり、微小重力下においても重力加
 速度が小さいほど燃焼速度定数は小さくなる。
- 5) 重力は燃焼速度定数に強い影響を及ぼし、
 その影響は、重力加速度が $10^{-2} g_0$ 程度まで小
 さい場合にも無視できない。

謝辞

本研究は、「燃焼制御基盤技術の開発」の一環
 として、(財)宇宙環境利用推進センター (JSUP)
 が、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NE-
 DO) から委託を受けて実施したものである。こ
 こに感謝の意を表す。

さらに、大阪府立大学工学部学部生であった坪
 井和也氏と田久修氏、および Université
 d'Orléans-E.S.E.M の Dr. Christine Mounaïm-
 Rousselle と Ms. Farida Tiguemounine には、実験
 を行うにあたって、多大なご助力を頂いた。こ
 こに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) A. Williams: Combust. Flame, 21 (1973) 1.
- 2) G. M. Faeth: Prog. Energy Combust. Sci., 3 (1977)
 191.
- 3) C. K. Law: Prog. Energy Combust. Sci., 8 (1982)
 171.
- 4) W. A. Sirignano: Prog. Energy Combust. Sci., 9
 (1983) 291.

- 5) G. M. Faeth, D. P. Dominics, J. F. Tulpinsky and D. R. Olson: Twelfth Symposium (International) on Combustion, p. 9, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1969.
 - 6) J. Sato, M. Tsue, M. Niwa and M. Kono: Combust. Flame, **82** (1990) 142.
 - 7) 高橋 守, 新岡 嵩, 佐藤順一, 山川正紀: 航空宇宙技術研究所報告1001号 (1988).
 - 8) D. B. Spalding: ARS J., **29** (1959) 828.
 - 9) T. Kadota and H. Hiroyasu: Eighteenth Symposium (International) on Combustion, p. 275, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1981.
 - 10) B. Vieille, C. Chauveau, X. Chesneau, A. Odeide and I. Gökalp: Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, p. 1259, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1996.
 - 11) 瀬川大資, 角田敏一: 日本マイクログラビティ応用学会誌, **14** (1997) 169.
 - 12) 佐藤順一, 津江光洋, 河野通方: 第23回燃焼シンポジウム前刷集, 広島, Dec. 1985, p. 235.
 - 13) 流れの可視化学会: 流れの可視化ハンドブック, p. 164, 朝倉書店, 東京, 1986.
 - 14) 梅村 章: 日本機械学会論文集 (B編), **52** (1985) 2437.
- (1998年5月28日受理, 1998年7月29日採録)