

微小重力環境における炭酸ジメチル液滴の蒸発・点火

日大生産工(院) ○上條 晃宜 小川 太新 日大生産工 野村 浩司
日大生産工 菅沼 祐介

1. 緒言

温室効果ガスによる地球温暖化が深刻化し、問題となっている。その中でも二酸化炭素は温室効果ガス全体の排出量の大半を占めている。主に化石燃料の燃焼によって排出され、世界全体の排出量は年々増加している。二酸化炭素の排出量削減は早急な対応が必要な世界的課題である。対策の1つとしてBEV(Battery Electric Vehicle)の導入が挙げられているが、大型の輸送機器であるトラック、航空機および船舶などのエネルギー源には体積エネルギー密度の観点から液体燃料が望ましい。理想的な候補として、既存の内燃機関に大きな変更を加えずに利用できる液体カーボンニュートラル燃料が挙げられている。特に、二酸化炭素と再生可能エネルギー由来の水素を合成して製造されるe-fuelは、従来の化石燃料に替わる新たな液体燃料として利用拡大が見込まれる。液体燃料は今後も継続して使用されると考えられ、液体燃料の燃焼技術向上は重要である。

新液体燃料を短期間で効率的に使用するためには、精度の高い数値シミュレーションが必要である。しかしながら、e-fuelなどの新しい液体燃料の実験データは依然不足している。本研究では運輸機器において幅広く使用されているディーゼル機関およびジェット機関の燃焼室で液体燃料の燃焼に用いられる噴霧燃焼に注目した。噴霧燃焼は無数の液滴群の燃焼であり、複数の燃焼現象が同時多発的に進行するため詳細なメカニズムは解明されていない。噴霧燃焼において蒸发现象は燃焼を律速している場合が多い。そこで本研究では、噴霧の最小構成単位である単一燃料液滴を対象とした蒸発および点火実験から噴霧燃焼の基礎データを収集し、新しい液体燃料の燃焼シミュレーション数値モデルに対する検証データを収集するとともに、代替燃料の蒸発・点火に関する知見を得ることを目的とする。

本報ではe-fuelの候補の炭酸ジメチル(DMC)を実験試料とした。雰囲気温度および雰囲気圧力を実験パラメータとして、通常重力場および微小重力場での蒸発・点火実験を行い、炭酸ジ

メチル液滴の直径履歴および蒸発速度定数の計測を行った。

2. 実験装置および方法

実験装置には野村らが使用した装置を用いた^{*1}。装置の概略をFig. 1に示す。中央の内部モジュール、高圧容器、観測装置で構成されている。内部モジュールは下部の液滴生成部と上部の高温容器で構成される。液滴生成部には、燃料液滴を懸垂する液滴支持器が取り付けられる。液滴支持器は、頂点で交差する2本のステンレス線（直径：50 μm）とその交点の3 mm上方でアーチの頂点が交差する14 μmのSiCファイバで構成される。SiCファイバの交点にはガラスビーズが設置されている。ガラスビーズの直径は、燃料液滴への熱的影響を考慮して初期液滴体積の5%液滴体積の直径の3/4以下とした。ガラスビーズにはガラス針を用いて生成された燃料液滴を付着させる。燃料液滴は目標の初期液滴直径になるまで生成部で待機させ、その後、液滴移動装置で高温容器内へ初期液滴直径0.45 mmの条件では110 msで移動させた。

従来使用していた燃料供給系のフッ素ゴムチューブは、炭酸ジメチルによる溶け出しが発生し、燃料液滴の蒸発後にガラスビーズに黒い残留物として残ることが観察された。このことからチューブの材質をポリテトラフルオロエチレン(PTFE)樹脂に変更した。実験時には内部モジュールは高圧容器内に設置される。高圧容器には給・排気口が設けられ、高圧容器内の気

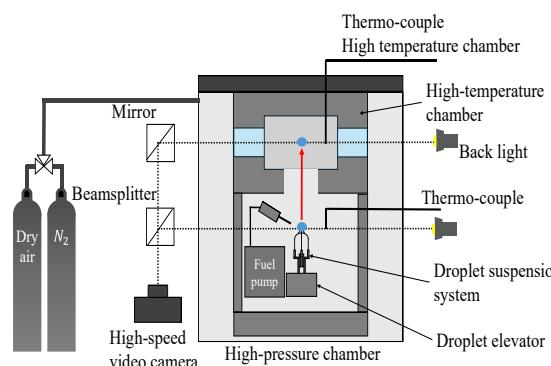


Fig. 1 Experimental apparatus.

Evaporation and ignition experiment on dimethyl carbonate droplet under microgravity conditions

Koki KAMIJO, Taishin OGAWA, Hiroshi NOMURA and Yusuke SUGANUMA

Table 1 Experimental conditions.

Fuel	Dimethyl carbonate			
Ambient gas	Nitrogen	Dry air		
Fuel ambient pressure, P_a , MPa	0.10	0.10	0.30	
Gravity condition	1G	1G	1G,	μG
Fuel ambient temperature, T_a , K	423,473,573,673,773±1	423,473,573,673,773±1	673,723±1	673±1
Initial droplet diameter, d_0 , mm	0.46-0.47	0.44-0.47	0.44,0.46	0.48

体を真空ポンプで排出し、燃料蒸気の排気、雰囲気気体の充填を行う。液滴の蒸発する様子を観察する観測装置は、ハイスピードカメラ、ミラー、ビームスプリッタおよびLEDバックライトから構成され、Backlit法で観察した。バックライトは液滴支持器の位置と連動して点灯が切り替わり、1台のハイスピードカメラで生成部と高温容器内の液滴像の記録が可能となる。ハイスピードカメラの画像の分解能は約340 pix/mm、撮影速度は200 fpsとした。

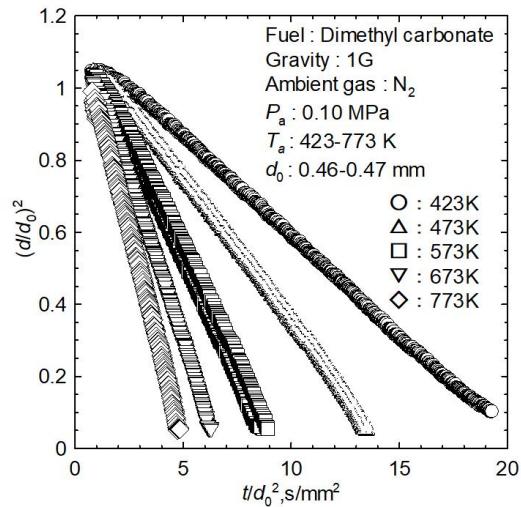
Table 1に実験条件を示す。雰囲気気体は蒸発実験では燃料の自発点火を防止するために窒素、点火実験では乾燥空気を使用した。通常重力場(1G)および微小重力場(μG)で蒸発・点火実験を行った。雰囲気温度 T_a は目標温度の±1 Kの範囲内とした。微小重力場の673 Kの温度条件では実験に必要な微小重力時間を確保するため、50 m級落下実験施設COSMOTORRE（微小重力時間約2.5秒）*2を使用した。初期液滴直径 d_0 は0.45 mm±5 %以内を目標値とした。

観察した映像を連続静止デジタル画像に変換し、写真に切り出し、自作の画像処理プログラムで解析した。液滴の輪郭を橢円近似し、回転橢円体の体積と等しい体積の真球の直径を液滴直径 d とした。初期液滴直径は燃料液滴が高温容器内に挿入される直前0.1秒間の直径の平均値とした。蒸発速度定数 k は液滴直径を初期液滴直径で除した無次元液滴直径の2乗が0.5から0.15まで減少する区間を最小2乗法により直線近似した直線の傾きの絶対値と定義した。

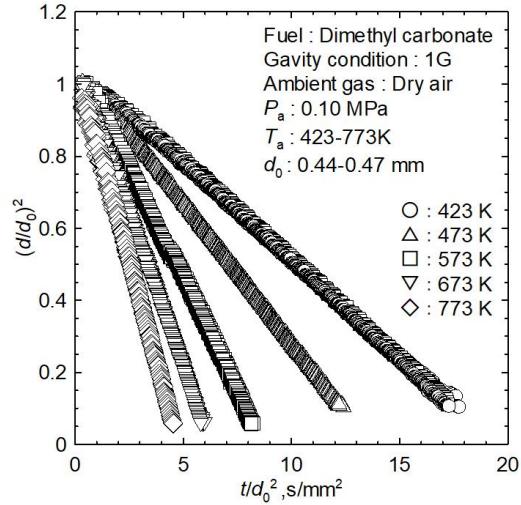
3. 実験結果および考察

Fig. 2に(a)窒素雰囲気中および(b)乾燥空気雰囲気中における燃料液滴の直径の2乗の履歴を示す。重力環境は通常重力である。縦軸は無次元液滴直径の2乗、横軸は時間を初期液滴直径の2乗で除した正規化時間である。いずれの雰囲気温度条件においても、短い初期加熱期間を経て無次元液滴直径の2乗が直線的に減少して

いることがわかる。また、雰囲気温度の増大に伴って、正規化液滴寿命は減少した。

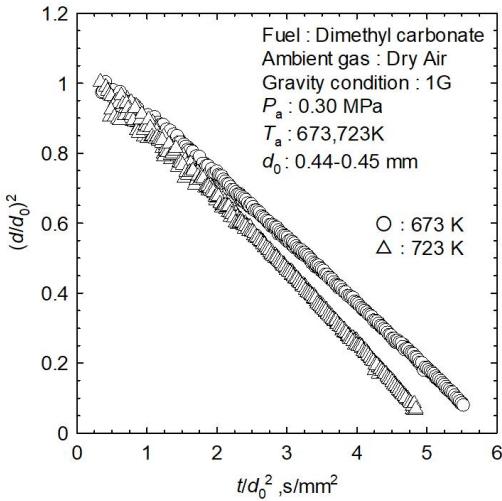


(a) in nitrogen

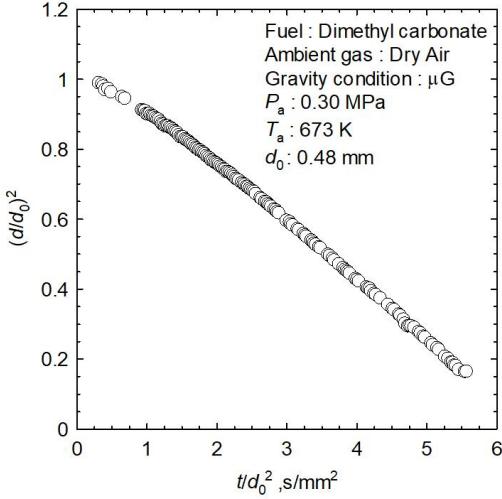


(b) in dry air

Fig. 2 Squared droplet diameter histories at 0.10 MPa and normal gravity.



(a) Normal gravity

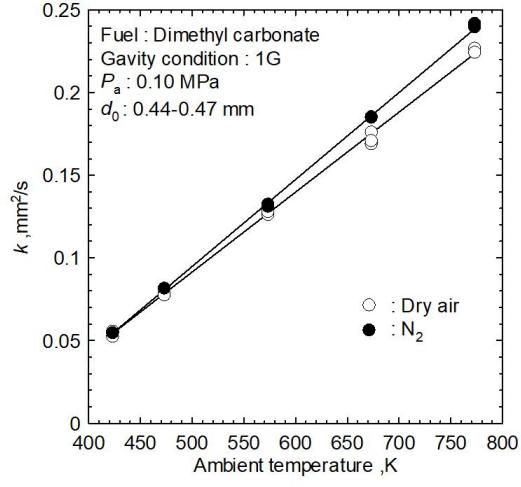


(b) Microgravity

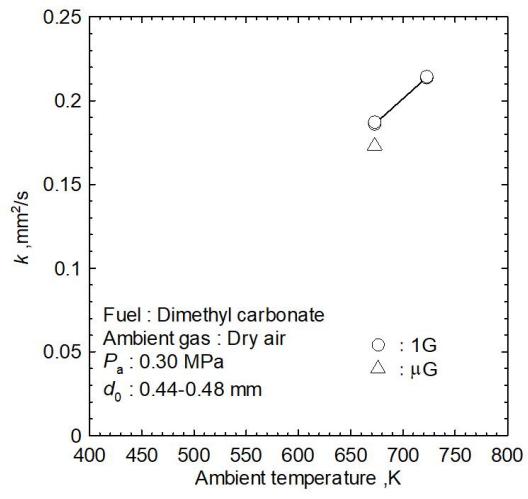
Fig.3 Squared droplet diameter histories at 0.30 MPa. (in dry air)

Fig. 3に霧囲気圧力0.30 MPa, 乾燥空気霧囲気中における燃料液滴の直径の2乗の履歴を示す。Fig. 3(a)は通常重力場における結果, Fig. 3(b)は微小重力場における結果である。いずれの霧囲気温度条件および重力場においても、Fig. 2と同様、短い初期加熱期間を経て無次元液滴直径の2乗が直線的に減少していることがわかる。

Fig. 4に乾燥空気霧囲気中での霧囲気温度が蒸発速度定数に及ぼす影響を示す。燃焼反応が起こっているのかを判断するため、Fig. 4(a)には窒素霧囲気中で蒸発する燃料液滴の蒸発速度定数を示した。縦軸は蒸発速度定数、横軸は霧囲気温度である。霧囲気圧力(a)010 MPaの圧



(a) $P_a = 0.10 \text{ MPa}$



(b) $P_a = 0.30 \text{ MPa}$

Fig.4 Effect of ambient temperature on evaporation rate constant.

力条件では、窒素および乾燥空気のどちらも霧囲気温度の増大に伴って、蒸発速度定数は直線的に増大した。霧囲気と液滴の温度差の拡大および液滴温度の増大による蒸発潜熱の減少が要因である。いずれの温度条件においても乾燥空気霧囲気の蒸発速度定数が窒素霧囲気よりも低かった。また、霧囲気温度の増大に伴って、窒素霧囲気との蒸発速度定数の差が増大した。燃料蒸気の密度と霧囲気気体の密度差は窒素霧囲気中の方が大きい。そのため、自然対流の蒸発促進効果は窒素霧囲気中の方が大きいと推察される。空気中の蒸発速度定数と窒素中の蒸発速度定数の差が霧囲気温度の増大に伴つて大きくなったのは、霧囲気温度の増大に伴つ

て自然対流の蒸発促進効果が大きくなつたためだと考えられる。また、窒素の熱伝導率および拡散係数が空気のそれらより若干大きいことも原因と考えられる。これらの考察および空気中の蒸発速度定数が窒素雰囲気中のそれと比較して小さいことから、通常重力環境の雰囲気圧力0.10 MPaの条件においては、本実験の雰囲気温度範囲および初期液滴直径では、液滴は点火しなかつたと判断される。

Fig. 4(b)においては、乾燥空气中の蒸発速度定数と窒素雰囲気中のそれとを比較できていないため、点火が起こったかどうかの確実な判断はできない。燃焼する液滴は自然対流の影響を強く受けるため、蒸発速度定数は通常重力場と微小重力場とで大きな差が生じる。このことを考慮すると、Fig. 4(b)において雰囲気温度673 Kの蒸発速度定数は、通常重力場と微小重力場で大きな変化が見られなかつたことから、液滴は点火していないと推察される。

いずれの実験条件で初期液滴直径0.45 mmの炭酸ジメチル液滴が点火する結果は得られなかつた。これは燃料液滴の直径が小さいためにステファン流が強く、かつ反応時間が短くなるため、ダムケラー数が液滴点火の条件を満たしていないと考えられる。今後、液滴初期直径を実験パラメータに加え、研究を進める。

4. 結言

炭酸ジメチル液滴における通常重力環境および微小重力環境での蒸発・点火実験を行つた。雰囲気温度を423から773 K、雰囲気圧力を0.10および0.30 MPaで変更させ、液滴直径履歴、蒸発速度定数および炭酸ジメチル液滴の点火条件について調べた。以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 炭酸ジメチル液滴の蒸発は窒素および乾燥空気においても短い初期加熱期間の後、 d^2 則に則つて液滴直径の2乗が直線的に減少する。また、雰囲気温度の増大に伴つて、正規化液滴寿命は減少した。
- (2) 蒸発速度定数は雰囲気温度の増大に伴つて、直線的に増大した。
- (3) 初期液滴直径0.45 mm、雰囲気圧力0.10 MPa、雰囲気温度423から773 Kの範囲では炭酸ジメチル液滴の自発点火は観察されなかつた。
- (4) 雰囲気圧力0.30 MPa、雰囲気温度673および723 Kの通常重力場または673 Kの微小重力場において炭酸ジメチル液滴の自発点火は観察されなかつた。

参考文献

- 1) H. Nomura, T. Murakoshi, Y. Saganuma, Y. Ujiie, N. Hashimoto, H. Nishida : Microgravity Experiments of Fuel Droplet Evaporation in Sub- and Supercritical Environments, 36(2017), 2425-2432.
- 2) 植松電機、微小重力実験塔,
<https://uematsudenki.com/rd/%E5%BE%AE%E5%B0%8F%E9%87%8D%E5%8A%9B%E5%AE%9F%E9%A8%93%E5%A1%94/>

最終アクセス日 2025年10月16日