

含水エタノール液滴の燃焼特性解析に関する研究

日大生産工(院) ○小木曾 理人 日大生産工 今村 幸

1. まえがき

地球温暖化における気候変動に対しては、「1.5℃目標」がパリ協定以降、地球の平均気温上昇を抑えるための目標とされており、そのために日本は2050年までにカーボンニュートラルを達成することを目標としている。カーボンニュートラルの実現に向けて、発電源を再生可能エネルギーに移行していくとともに、燃料利用についてはカーボンニュートラル燃料が切望されている。カーボンニュートラル燃料として社会実装が早期に行われると思われるバイオ燃料にここでは着目する。バイオ燃料は従前より利用されているカーボンニュートラル燃料であり、特にブラジルではバイオエタノールが用いられている。他方で、アルコール発酵でバイオエタノールを生成すると、酵母の種類にもよるが、アルコール度数が12度くらいまでしか酵母が活発に活動しない。よって蒸留によってアルコール濃度を上昇させることになるが、その際に多大なエネルギーが必要となる。また無水エタノールにするためには脱水の過程も必要である。ある程度、水を含んだ含水エタノールを有効に利用することができれば、蒸留にかかるエネルギーを削減でき、結果としてエネルギー変換効率を高めることができる可能性がある。実際、低濃度含水エタノールを燃料改質して熱効率の向上を目指した事例などがある¹⁾。他方で含水エタノールを燃料液滴としてそのまま燃焼させようとする、水蒸気の影響が大きいと予測され、その挙動の把握が必要である。以上のような背景から本研究では含水エタノール液滴の燃焼挙動の解明を目指すものとする。本報では、点火実験による含水率による点火エネルギーの比較と、他方で含水エタノールを燃料液滴としてそのまま燃焼させようとする、水蒸気の影響が大きいと予測され、その挙動の把握が必要である。以上のような背景から本研究では含水エタノール液滴の燃焼挙動の解明を目指すものとする。本報では、点火実験による含水率による点火エネルギーの比較と、液滴像の時系列画像から燃焼速度定数を算出して、含水率が燃焼速度定数に及ぼす影響について検討を行ったので、その概要について報告する。

2. 実験装置概要

Fig.1に実験装置の制御系の概要を示す。実験は燃料液滴をニクロム線を用いて熱面点火するものであるが、ニクロム線の加熱時間(図中のHotwireへの通電時間)とニクロム線の退避する時刻(図中のSOLENOIDへの通電OFF時刻)を制御できるようになっている。燃料液滴については、含水率を調整した燃料液滴を垂直に配置した石英線(直径125 μm)の下端に懸垂させた。石英線の下端は液滴を保持しやすいように球形になるように加工している。この液滴近傍にニクロム線を配置して通電することで、熱面点火を行った。ニクロム線はスパイラル上に加工しており、液滴の下方から液滴を加熱するようになっている。点火時の液滴とニクロム線の距離は190 μm 程度である。ニクロム線を保持する台座はソレノイドによって移動できるようになっており、液滴の蒸発挙動の観察を容易にするために液滴点火後にカメラの視野外に退避できるようになっている。これらの制御はFig.1に示すようにArduinoとリレー(OmronG5V-1 5VDC)によって構築しており、ソレノイド、ニクロム線ともに12Vを供給し、そのON/OFFをリレーを介してArduinoで行っている。実験開始と同時に、ソレノイドに電源が入り、ニクロム線が液滴近傍に移動する。実験者が目視できるようにLEDが3回点滅した後にニクロム線に一定時間電流が流れる。ニクロム線の電流遮断と同時にソレノイドへの電流も遮断され、ニクロム線が液滴近傍から退避するシステムとなっている。ニクロム線の加熱時間を Δt_{hg} として、この加熱時間が液滴の点火に及ぼす影響を調べた。なお雰囲気は室温、大気圧である。燃料液滴は無水エタノール(エタノール 99.5%)に対して、水の体積割合を0%から50%まで10%刻みで変化させて実験を行った。後述の式(1)にて算出した初期の液滴直径は1.3mm程度であった。

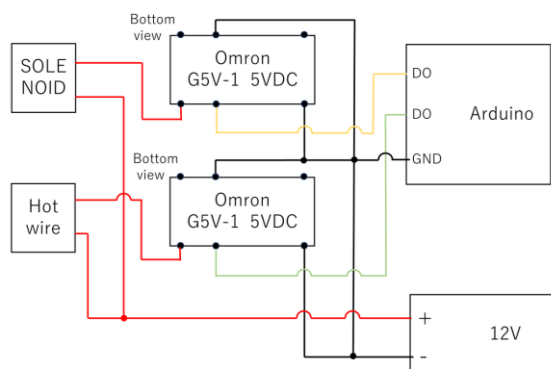


Fig.1 実験装置の概要

3. 液滴画像の解析

液滴画像はFig. 2に示されるように拡大してハイスピードカメラで撮影できるようになっている。撮影された映像をOpenCVを用いて画像処理を行った。Fig.3に示されるように、各画像コマにおいて、鉛直に懸垂されている液滴の横直径 a および縦直径 b をピクセルから算出した。これから式(1)に示すように、液滴を回転楕円体と仮定して体積の等しい球の直径を液滴直径 d と定義した。液滴直径の二乗 d^2 の時間変化を調べることで、式(2)から燃焼速度定数 C_b を算出した。

$$d = (a^2 b)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$\frac{d(d^2)}{dt} = -C_b \quad (2)$$

燃焼中の液滴挙動を定量的に解析するために、撮影映像から液滴の形状を自動抽出する画像処理プログラムを作成した。まず、液滴の中心座標を基準に200×200ピクセルの領域を切り出し、グレースケール化とガウシアンフィルタによりノイズを低減した。その後、固定しきい値による二値化を行い、液滴が背景より暗い特徴を持つことから白黒を反転して液滴領域を白として抽出した。得られた画像に対してモルフォロジー処理（オープニング処理：収縮の後に膨張）を適用した。これにより、微小なノイズや懸垂線などの細い構造を除去し、液滴の輪郭を滑らかに整えた。処理後の二値画像に対し、各行の白画素数を解析することで液滴領域を検出した。最大幅を有する行における左右端の白画素位置から液滴の幅を算出し、さらに白画素を含む最上部および最下部の行位置をそれぞれ液滴の上端および下端と定義して高さを求めた。各フレームでは、検出された端点と中心座標を動画上に可視化し、撮影条件に基づ

くフレームレートを用いて時間情報を付与した。得られた測定結果はCSV形式で自動保存され、液滴の燃焼過程における形状変化を効率的に定量化できるようにした。

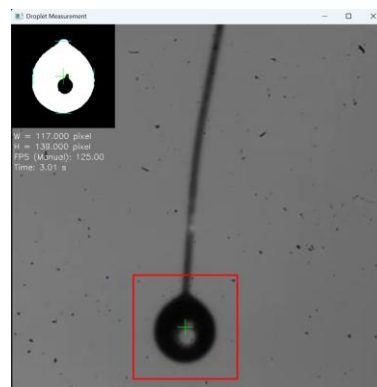


Fig.2 液滴画像処理の様子

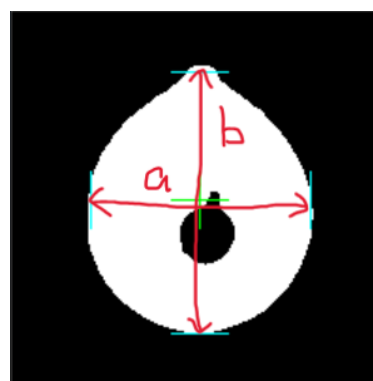


Fig.3 液滴画像処理の詳細

4. 点火の加熱量計測

まず実験系の特徴を把握するために、エタノールのみの場合でニクロム線を加熱する時間 Δt_{tig} を1000msから2000msの間で変化させて実験を行った。Fig. 4は実験の点火の様子を表しており、表1にその結果を示す。○は点火したことを示し、×は点火していないことを示している。加熱時間が1400msec以下では、液滴の点火がみられなかった。また、1500msec以上では点火がみられたが、点火しない場合もあった。以上から、エタノールのみの場合、本実験系では安定した点火のためには、1600msec以上の加熱が必要であることが明らかとなった。

次に、含水率による点火可否への影響を調べるため、含水率を変化させた液滴を使用して、実験を行った。加熱時間 Δt_{hg} を1700msecに設定し、それぞれの液滴の点火可否を調べた。表2はエタノールの割合と点火可否の結果を示し

ている。表中の記号は表1と同様に、○は点火したことを、×は点火していないことを示しており、さらに△は点火したが液滴が完全に燃焼せず、液滴が残っている状態で消炎したことを示している。エタノール 90%：水10%液滴では点火はするが、完全に燃焼しない場合があった。またエタノール80%：水20%液滴では点火はするが、完全に燃焼しなかった。さらに含水率が多くなり、エタノール50%：水50%液滴では点火しないことが明らかとなった。表1から加熱量が1700msecに比べて1割程度低くても点火することと、表2において含水率が10%程度では点火することから、外部からの加熱量と初期の液滴燃焼による加熱量との間に相関があると考えられる。他方でそれ以上含水率が高くなると途中で消炎することから、点火の加熱量にかかわらず燃焼時の発熱量などが支配的であると考えられる。燃料の含水については、水との沸点の温度差が大きければ、マイクロエクスプロージョンなどが期待できるが、エタノールと水ではそのような現象は観察されず、本研究で用いたような大きな含水エタノール液滴を有効に利用するためには、燃焼開始後も液滴燃料の周りの火炎以外からの熱量の供給などを考慮する必要があるといえる。



Fig.4 実験での点火の様子

Table.1 加熱時間による点火可否
(エタノール100%)

| Number of times/heating time(msec) | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 2 | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 3 | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 4 | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 5 | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |

○ : ignited △:extinction after the ignition
× : no ignition

Table.2 含水率が点火に及ぼす影響
($\Delta t_{ig} = 1700 \text{ msec}$)

| Number of times / Ethanol percentage | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% |
|--------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | ○ | ○ | △ | △ | △ | × |
| 2 | ○ | ○ | △ | △ | △ | × |
| 3 | ○ | △ | △ | △ | △ | × |
| 4 | ○ | ○ | △ | △ | × | × |
| 5 | ○ | △ | △ | △ | × | × |

○ : ignited △:extinction after the ignition
× : no ignition

5. 燃焼速度定数の結果および考察

4. で示した結果のうち、点火が確認された以下の条件において液滴径の二乗の時間変化を調べた。Fig. 5はエタノールのみで加熱時間が1800msの際の液滴径二乗の時間変化を示している。この図に示されるように液滴径の二乗は一定の時間でほぼ線形に減少していることが明らかとなった。このためFig. 5から液滴径二乗の変化率を求めて燃焼速度定数を算出すると、 $0.6371 \text{ mm}^2/\text{s}$ となった。含水の場合についても、エタノール90%：水10%の液滴の場合は加熱時間が2000msec、エタノール80%：水20%液滴の場合は加熱時間が2200msec、エタノール70%：水30%液滴の場合は加熱時間が2400msec、エタノール60%：水40%液滴の場合は加熱時間が2500msecにおいて燃焼速度定数を算出した。各々含水率10%, 20%, 30%, 40%における燃焼速度定数は $0.5517 \text{ mm}^2/\text{s}$, $0.5342 \text{ mm}^2/\text{s}$, $0.5065 \text{ mm}^2/\text{s}$, $0.3587 \text{ mm}^2/\text{s}$ であった。なお加熱時間が異なるが、4. で議論したように点火後は点火の際の加熱時間の影響は小さいと考えられることから、異なる加熱時間における値を比較した。また、Fig. 5から液滴が小さくなることを基準として、時間区間(1.80s~4.22s)を設定し、液滴径二乗の変化率を求めて燃焼速度定数を算出すると、 $0.6523 \text{ mm}^2/\text{s}$ となった。含水の場合についても、エタノール90%：水10%の液滴の場合は加熱時間が2000msec、時間区間が0.48s~2.20s、エタノール80%：水20%液滴の場合は加熱時間が2200msec、時間区間が1.50s~3.22s、エタノール70%：水30%液滴の場合は加熱時間が2400msec、時間区間が1.88s~3.15s、エタノール60%：水40%液滴の場合は加熱時間が2500msec、時間区間が3.40s~2.25sにおいて解析した。各々含水率10%, 20%, 30%, 40%における燃焼速度定数は $0.5522 \text{ mm}^2/\text{s}$, $0.5448 \text{ mm}^2/\text{s}$, $0.6448 \text{ mm}^2/\text{s}$, $0.3802 \text{ mm}^2/\text{s}$ であった。これらの結果をまとめたのがFig.6である。

同一データに対し抽出範囲のみを変えて最大傾きで評価した結果、含水率0%・10%・20%で低下し、30%で回復、40%で急激に低下し、燃焼速度定数が最小となった。よって水分組成に対し非単調な組成依存性を示すことが分かった。しかし、30%では燃焼速度定数が $0.507\text{ mm}^2/\text{s}$ と $0.645\text{ mm}^2/\text{s}$ で乖離しており、範囲依存性が大きく、短時間の急峻区間を抽出したか否かで値が大きく振れた可能性が高い。したがって、最大傾きのみで組成依存性を議論すると30%付近で過大評価し得ると考えられる。よって今後は含水率30%の挙動の再検討が必要であると考ええる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、本学の山崎博司特任教授にご支援をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 白川 雄三, 島田 敦史, 石川 敬郎“低濃度含水エタノールを用いた燃料改質エンジンシステムによる熱効率向上と NO_x 低減”, 日本機械学会論文集第82巻840号(2016), DOI: 10.1299/transjsme.15-0057

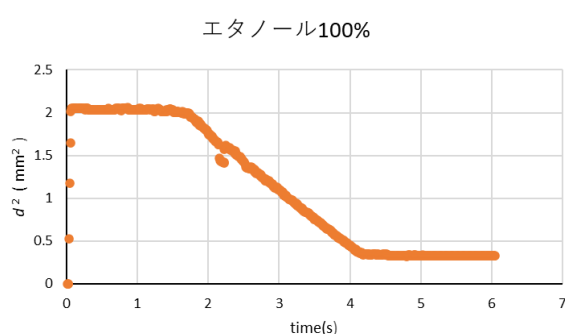


Fig.5 エタノール100%液滴の液滴直径の2乗の時間変化

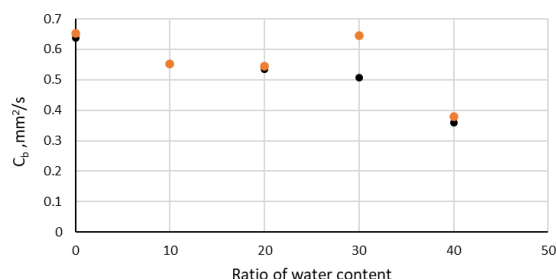


Fig.6 含水率による燃焼速度定数の変化

6. 結言

本研究では、含水エタノール液滴の点火性および燃焼特性に及ぼす含水率の影響を、加熱条件が制御された熱面点火源による点火可否と燃焼速度定数 C_b の観点から検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・エタノールの含水率が高くなるにつれて点火しにくくなり、特に含水率が50%では点火が困難であった。

- ・燃焼速度定数 C_b は含水率の増加とともに低下する傾向にあり、特に40%以上では急激な減少が確認された。