ISSN 2186-5647

3-31

燃料液滴列の冷炎燃え広がり観測用実験装置の開発

日大生産工(院)　○新海　祥悟　　日大生産工　野村　浩司
日大生産工　菅沼　祐介　　日大生産工(院)　齋藤　郁

1.　緒言

ICAO では, 2010年に行われた第37回総会で, 国際航空分野の環境対策を進めるため,　温室効果ガス排出量の削減において「世界的な推進目標（Global Aspirational Goal）」を設定することを決定した．その目標は2つあり，1つ目は2050年まで燃料効率を年平均2%改善, 2つ目は2020年以降温室効果ガスの総排出量を増加させないことである．しかしながら，ジェット燃料を電気や水素等のエネルギー媒体に代替することは困難なため, ジェット燃料の消費量は長期的に増加する見込みである.

次世代バイオ燃料は，自動車や船舶，航空機等の輸送機器において利用することが可能であり, 長期的には液体バイオ燃料の過半数を占める可能性がある. バイオマスは再生可能な生物由来の有機性資源で化石資源を除いたものと定義され, 我々の周りにバイオマスは数多く存在しており, 例として植物や紙, 食品廃棄物, 建築発生木材，飼料作物などが挙げられる．これらを加工して燃料としたものがバイオマス燃料であり，固体や液体，気体で利用するものがある.

バイオマスが注目されている理由としてカーボンニュートラルがある．バイオマスは, 再生可能なエネルギー資源として利用することが可能であるとともに, 燃焼時に排出する二酸化炭素と等量の二酸化炭素を成長時に吸収していることから, 利用時の二酸化炭素排出量をゼロとみなすことができるため, 低炭素なエネルギー資源として，温暖化抑制に貢献でき, 導入が進められている.

次世代バイオ燃料には既存のインフラ設備とより親和性の高い炭化水素系のバイオ燃料がある. これは酸素を含まない炭化水素系の燃料であるため, 適切に精製することで化石燃料由来の燃料とほぼ同じ燃焼特性を実現でき, また, ジェット燃料にも混合できることが最大の特徴である. バイオ液体燃料を実機に適用し, 環境負荷の少ない形で利用するには既存の化石燃料の基礎燃焼特性を明らかにする必要がある．.

炭化水素燃料は高温, 高圧力環境では冷炎と呼ばれる低温酸化反応に続き, 熱炎と呼ばれる高温酸化反応がみられており, 二段階燃焼が起きる場合がある.

この冷炎が後の熱炎における熱発生などに影響を及ぼすことが明らかになっており, 冷炎の発生条件や燃焼挙動を明らかにすることは, 燃焼現象の詳細を把握するために重要である. これまで冷炎をターゲットとした燃料液滴の自発点火実験は数多く実施されているが, 冷炎の燃え広がり挙動については調べられていない. 冷炎燃え広がり挙動を解明することで内燃機関を設計する際のシミュレーションの精度向上や燃焼プロセスの把握などに役立つ.

本研究では冷炎の燃え広がり現象に着目し, 冷炎のダイナミクスを解明することを目的としている. 液滴を熱面点火方式で点火させるが, 点火装置の出力を制御しない場合, 液滴は冷炎ではなく熱炎を発生させてしまう. そこで雰囲気温度に合わせて点火線の温度を制御可能な点火装置を使用した.

本報では冷炎点火時の初期液滴直径が及ぼす点火遅れ時間の影響について述べる.

2.　実験装置及び方法

点火装置は, 点火部と回路部および電源から構成されている.

点火部を図1に示す．点火部は電熱線と胴部から構成されている．胴部は直径1.0 mm，長さ150 mmの銅の単芯線を使用した．その銅導線に直径0.10 mm，冷間抵抗値0.4 Ωのニッケル線をハンダ付けし作製した. 熱線の材質選定には温度係数と抵抗がどちらも高いことが求められる．鋼やニクロムは温度係数が低いため, 加熱・冷却による抵抗率の変化が少ない．銅は温度係数が高いものの，抵抗が低い．また白金は高価で, タングステンは非常に酸化しやすい. ニッケルは酸化するもののタングステンよりも耐久性がある．以上のことから，ニッケル線を採用している.

Development of experimental apparatus for observing cool flame spread along a fuel droplet array

Shogo SHINKAI,　Hiroshi NOMURA,　Yusuke SUGAMUMA,　Iku SAITO

点火回路は昨年度に和賀らが開発した装置を用いた[1]．熱線流速計の原理を応用した点火回路である．この点火回路は冷炎燃え広がりを観測するために強制点火でき，熱炎に移行させないため点火装置の出力を制御し，冷炎を維持できることや冷炎点火する温度に調節する機能がある．点火回路は，ホイートストンブブリッジ，差動増幅器，トランジスタ，その他構成部品により構成されている．作動原理は，ブリッジ内の可変抵抗の値を変化させ，あらかじめ調べておいた，熱線が目標温度となるときの電気抵抗の値をねらい，ブリッジの抵抗値の比を変化させる．次に電流を流し，点火用電熱線を加熱する．ホイートストンブリッジからの不平衡電圧が差動増幅器へ入力される．さらにトランジスタによって電流が増幅され，加熱に必要な電流を生み出す．ブリッジからの不平衡電圧を，差動増幅器によって0 Vにするようなフィードバック回路になっており，熱線を瞬時に赤熱させ，これを一定温度に保つことができる．

液滴支持枠は1.6 mmのSUS管8本と1.0 mmのSUS管4本で構成しSUS管の交点を銀ロウ付けする．液滴支持枠固定プレートには液滴支持装置が燃焼容器内に挿入された際に，燃焼容器内の温度低下を避けるため，熱伝導率の小さいセラミックスを使用した．

冷炎時の初期液滴直径が点火遅れ時間に及ぼす影響を調べるため，本実験を行った．装置の概略を図2に示す．液滴列支持装置に1つの液滴を懸垂し，液滴が熱線の螺旋部中心に位置するように置いた．その後，あらかじめ設定しておいた温度で点火装置を作動させた．この時の熱線温度は約650℃である．燃料は正デカン，正ヘプタン，正ヘキサデカンの3種を使用した．正デカンは初期液滴直径 d_0=0.50～1.0 mmの範囲で変化させた．正ヘプタンは d_0=0．50～1.0 mmの範囲で変化させた．正ヘキサデカンは $d_0$0.50～1.0 mmの範囲で変化させた．それぞれの燃料液滴で本実験を35回ずつ行った．実験結果への影響を抑えるために，雰囲気温度は20～25℃に設置した．図3にCCDカメラで撮影した燃料液滴を示す．初期液滴直径の計測は，液滴の背後からバックライトを当てるバックリット法を用いて，液滴の輪郭をCCDカメラで撮影し，自作のプログラムにて液滴直径を解析した．この際，液滴が熱線と重なっているため，画像中の熱線を消去して解析を行った．また電流波形をオシロスコープで記録した．その後，初期液滴直径が点火遅れ時間に及ぼす影響を調べた．また，電流波形記録開始時刻を，電源投入時刻と同期させた．また，点火遅れ時間を，電源投入時刻から燃焼開始時刻までの時間と定義した．このとき，燃焼開始時刻を，一定電流値(1.320 A)から5.5%外れた電流値(1.248 A)を測定した時刻と定義した．

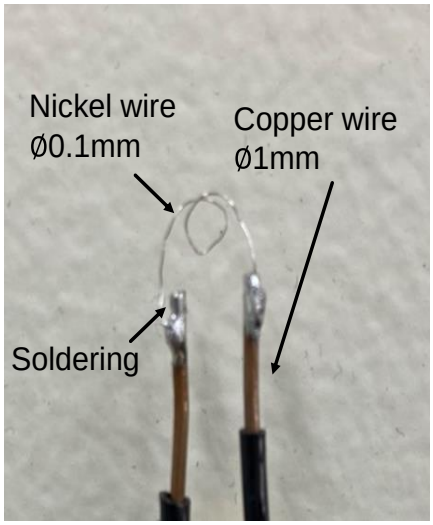


Fig. 1 Igniter.

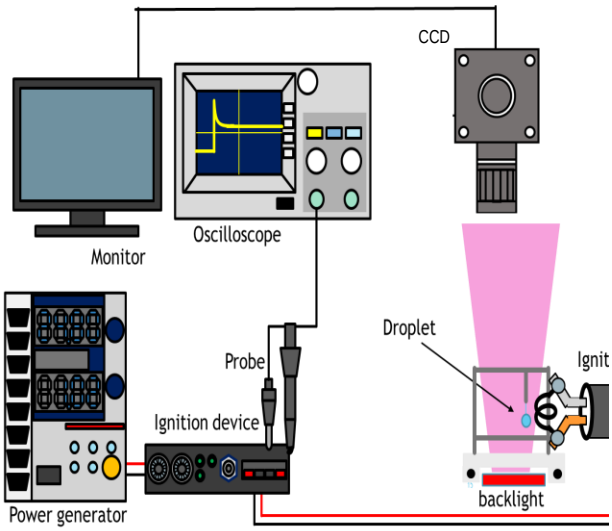


Fig. 2 Experiment apparatus.

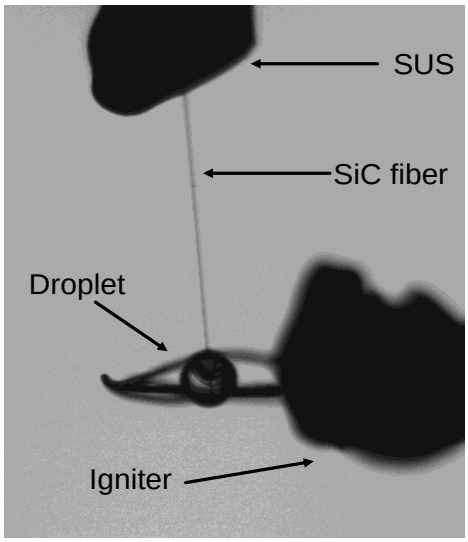


Fig. 3 Initial droplet.

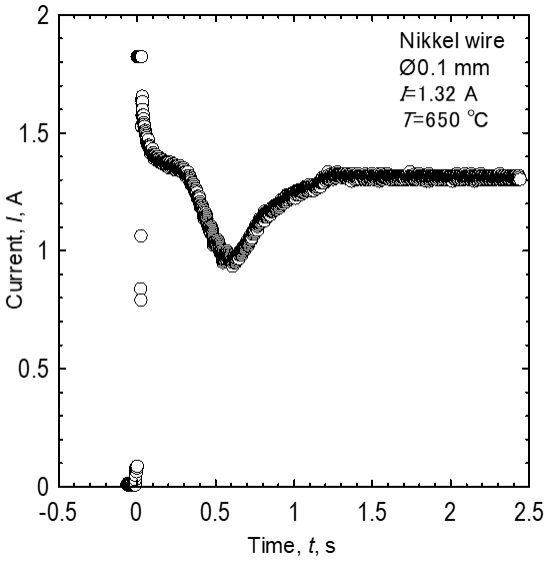
3. 実験結果及び考察

冷炎時のオシロスコープの波形を図 4 の(a)に示す．また比較用に，液滴がない状態で点火した時の波形を図 4 の(b)に示す．それぞれ縦軸がイグナイターの電流値，横軸が時間である．図 4 の(a)より，t =0 s で室温の熱線を加熱するため一時的に電流値が急激に上昇し，すぐに下がっていることがわかる．t=0.3～1.2 s で電流値に緩やかな谷が見られた．これは，熱線が加熱され，回路中の作動増幅器が初期設定値に戻そうと，出力を下げたことを示している．また，このとき目視で熱炎を確認できなかった．よって冷炎が発生していると考える．図 4 の(b)より t=0 s で室温の熱線を加熱するため一時的に電流値が急激に上昇し，すぐに下がっていることがわかる． 燃料液滴がない状態のためイグナイター部分に温度変化がなく一定電流値を維持していることがわかる．また，このときの熱線温度は約 650℃である．

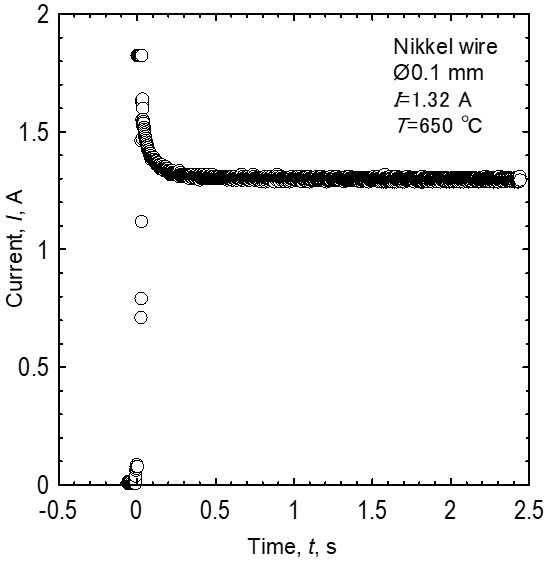
図 5 に正デカンの初期液滴直径が及ぼす点火遅れ時間の影響を示す．初期液滴直径 d_0=0.50～1.0 mm の範囲で 35 回実験を行ったが，d_0 = 0.66 mm 以下の 5 条件では，オシロスコープで電流降下を検出できず，冷炎が発生していると判断できなかった．これらを除外した 30 個のデータは液滴直径の増大に伴い，点火遅れ時間が曲線的に減少し， 0.8 mm 以上は減少しないことがわかる．

図 6 に正ヘプタンの初期液滴直径が及ぼす点火遅れ時間の影響を示す． 初期液滴直径 d_0=0.50～1.0 mm の範囲で 35 回実験を行ったが，d_0 = 0.67 mm 以下と 0.71mm の 4 条件では，オシロスコープで電流降下を検出できず，冷炎が発生していると判断できなかった． これらを除外した 31 個のデータは液滴直径の増大に伴い，点火遅れ時間が曲線的に減少し，0.8 mm 以上は減少しないことがわかる．

図 7 に正ヘキサデカンの初期液滴直径が及ぼす点火遅れ時間の影響を示す．初期液滴直径 d_0=0.45～1.0 mm の範囲で 35 回実験を行った．



(a)



(b)

Fig. 4 Signal waveform during cool flame.

35 個のデータは液滴直径の増大に伴い，点火遅れ時間が一次関数的に増加していることがわかる．

正デカンと正ヘプタンは液滴直径の増大に伴い，点火遅れ時間が曲線的に減少している．ここで，燃料空気と酸素の反応時間を考える．液滴径 d の 2 乗は時間とともに直線的に減少する．すなわち，単位時間あたりの蒸発量は d に比例することになる．表面積で除した燃料蒸気の質量流束は d に反比例する．液滴直径が大きいと質量流束が減少し，反応に要する時間が減少する．

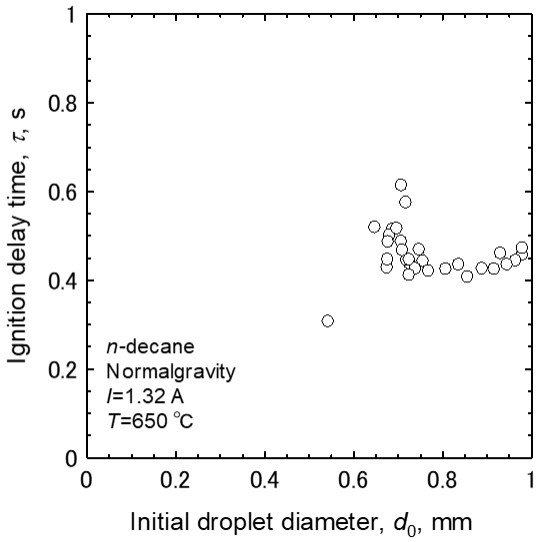


Fig. 5 Effect of initial droplet diameter on ignition delay time (*n*-decane)

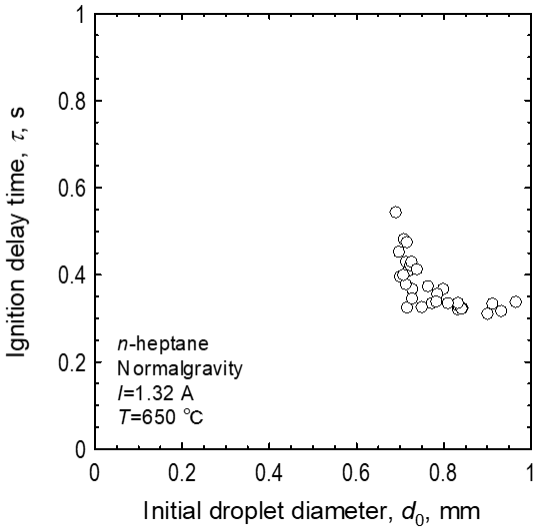


Fig. 6 Effect of initial droplet diameter on ignition delay time (*n*-heptane)

正ヘキサデカンは液滴直径の増大に伴い，点火遅れ時間が一次関数的に増加している． これは正ヘキサデカンの蒸発開始時間が遅いため液滴直径の増大に伴い，点火遅れ時間が増大する．

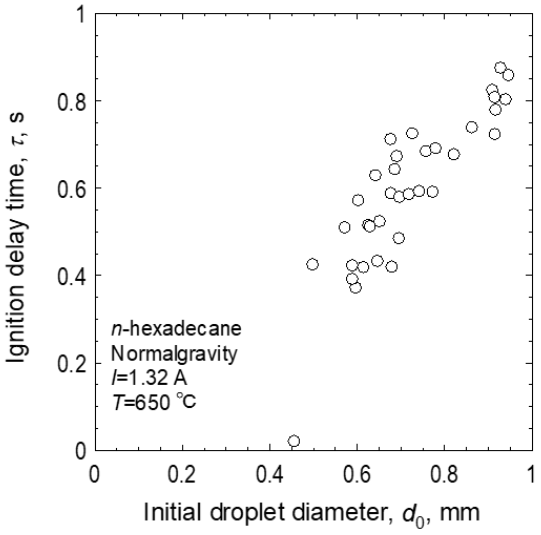


Fig. 7 Effect of initial droplet diameter on

4. 結言

以下に得られた知見を示す．

1) 正デカン単一液滴の冷炎点火時は， 液滴直径が増大すると燃料蒸気の質量流束が減少するため，点火遅れ時間が減少する．
2) 正ヘプタン単一液滴の冷炎点火時は， 液滴直径が増大すると燃料蒸気の質量流束が減少するため， 点火遅れ時間が減少する．
3) 正ヘキサデカン単一液滴の冷炎点火時は，蒸発開始時間が遅いため液滴直径が増大すると点火遅れ時間が減少する．

参考文献

1) 和賀正太， 小林瑞季， 成瀬翔，燃料液滴列燃え広がり速度に及ぼす圧力の影響調査と 冷炎燃え広がり現象観察のための点火装置の開発， 日本大学大学生産工学部機械工学科卒業論文，(2020)