

氏 名 堤 明正

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1748 号

学位授与の日付 平成27年3月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 バイオアルコールの燃焼に関する研究—メタノールおよびエタ
ノール同軸火炎の吹飛び特性—

論文審査委員 主 査 准教授 小川 博之
准教授 徳留 真一郎
准教授 澤井 秀次郎
教授 堀 恵一 宇宙航空研究開発機構
教授 西岡 牧人 筑波大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

バイオアルコールの燃焼に関する研究
—メタノールおよびアルコール同軸火炎の吹飛び特性—

化石燃料を代替する有力な燃料としてバイオ燃料が注目されており、バイオ燃料の新しい精製プロセスや燃焼応用技術に関する研究が実施されている。一般にバイオ燃料とは化石燃料以外の自然由来燃料を指す。トウモロコシまたは大豆などの栽培作物から精製されるバイオエタノールおよび、植物油または廃食用油などから精製されるバイオディーゼルなどが現在の代表的なバイオ燃料である。バイオマスに植物を用いるバイオ燃料はカーボンニュートラルの観点から優れた代替燃料であるが、培作物をバイオマスに用いる場合、当該食物価格の高騰を招くなどデメリットがある。化石燃料が発見される以前、人類の発展を支えるエネルギーは薪または木炭といった木質バイオマスによってまかなわれてきた。日本でも木炭に関しては年間 290 万トン(1940 年)、薪に関しては年間 1400 万トン(1943 年)の生産量を記録している。しかし現在では森林バイオマスの利用率は年々低下の一途をたどっており、安い価格の海外産木材に押され木材需要の 80%ほどを輸入に頼っている。このような状況にあっても依然として日本には多量の森林資源があり、二酸化炭素吸収源として有用である。良質な森林を維持するためには定期的な間伐作業が必須であるが、国内産木材需要減が原因で森林整備の動機がなく、森林の荒廃が指摘されている。木質バイオマス由来燃料の応用範囲を広げていくことは良質な木材生産および森林維持に直結する。また現在、化石燃料のほとんどは中東を始めとする海外産である。エネルギー・セキュリティの観点からも、資源を国内で調達することは重要である。バイオメタノールは廃棄木質バイオマスから容易に精製することができ、日本の風土に適したバイオ燃料である。以上のようにメタノールおよびエタノールはバイオ燃料として利用価値があるが、熱分解過程や火炎温度、層流燃焼速度など理想化された系における基礎燃焼特性が研究されているのみで、実用燃焼器に応用可能な研究例はない。本研究はメタノールおよびエタノール火炎の吹飛び・浮上り現象を考察し、実用燃焼器の運転可能範囲の決定などに有用な耐消炎性能に関する知見を得ることを目的に行うもので、本論文は以下の 5 章から構成される。

第 1 章では最近のバイオ燃料の動向など本研究の背景を述べている。また拡散燃焼研究において一般的に用いられる対向流火炎および同軸火炎を概説し、それらによるメタノールおよびエタノールの既往研究について述べている。本研究での観察対象である同軸火炎の安定・不安定性および同軸火炎基部の物理化学に関しても概説している。章末でメタノールおよびエタノールの基本物性ならびに基礎燃焼特性を述べている。

第 2 章では本研究の目的を述べている。本研究の目的はメタノールおよびエタノールの燃焼に適用可能な詳細化学反応機構を決定し、それを用いて火炎基部の様態を明らかにすること、メタノールおよびエタノール同軸火炎の消炎現象を考察し、その差異の要因を明らかにすること、ならびに同火炎の安定燃焼範囲を明らかにすることの三点である。低級炭化水素やアルコールの燃焼への適用を謳い提案されている詳細化学反応機構の中から、dme2000, dme2007, konnov2005, marinov, および sandiego2014 を選択し、検討している。それぞれの反応機構を用いて CHEMKIN PREMIX によりメタノールおよびエタノールの層流燃焼速度を計算し、既往の層流燃焼速度実験値と比較した結果、dme-2007 が

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

最も妥当であることを見出している。

第 3 章では実験結果および数値計算結果の比較を行っている。dme-2007 を用いてメタノールおよびエタノール 2 次元同軸火炎を計算するとともに、同軸火炎の火炎温度および OH ラジカル分布を、線径 25.4 μm の R 型熱電対および平面レーザ誘起蛍光法 (Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF 法) によりそれぞれ計測し、計算結果および実験結果を比較した結果、dme-2007 はメタノールおよびエタノール 2 次元同軸火炎を正しく再現できることを確認している。第 2 章で示した層流燃焼速度の結果も総合的に踏まえ、dme2007 がメタノールおよびエタノールの燃焼に適用可能な詳細化学反応機構であると判断している。次に、吹飛びに関して実験結果ならびに dme2007 を用いた数値計算結果を比較している。燃料成分として、メタノール分率 50%・窒素分率 50%、エタノール分率 50%・窒素分率 50%、メタノール分率 60%・窒素分率 40%、およびエタノール分率 40%・窒素分率 60% の同軸火炎の吹飛びおよび浮上り限界を、周囲空気の流速をパラメータとし調べている。メタノール分率 60%・窒素分率 40%、およびエタノール分率 40%・窒素分率 60% は当量比 1 での断熱火炎温度がおよそ 2200K と等しくなるように設定した混合分率である。安定燃焼範囲に関する実験では、メタノール火炎では浮上り火炎を形成することなく吹飛びに至るが、エタノール火炎では浮上り火炎を形成後、周囲空気により吹飛びに至ること、メタノール火炎の吹飛び限界燃料流速はエタノール火炎のそれを若干上回ることを確認した。数値計算では、ある一定の空気流速で火炎温度分布が維持されず下流に遷移する現象が見られ、この空気流速はそれぞれの混合気の吹飛び・浮上り空気流速実験値とよく一致することを見出した、このことは 2 次元火炎計算によってメタノールおよびエタノールの吹飛び・浮上り限界を見積もることが可能であることを示している。

第 4 章ではメタノールおよびエタノール消炎現象および耐消炎性能の差異を考察している。エタノール分率 50%・周囲空気流速 15cm/s の火炎を対象に数値計算結果を精査したところ、リム上部に未燃の燃料および酸素からなる混合気が存在することを見出している。燃料および酸化剤の混合強度を表す *mixedness* を用いてリム上部の予混合性の定量的評価を試みたところ、解析を行った燃料濃度および空気流速の火炎全てでリム上部において予混合気が存在することを確認している。ついで火炎基部に存在する化学種濃度を精査し、リム上部には未燃予混合気に加え、下流の火炎から発生・拡散した既燃ガスが存在していることを確認している。この混合気が持ちうる 1 次元層流燃焼速度を「潜在燃焼速度」と定義し、燃料種類、燃料濃度、および周囲空気流速が異なる場合での潜在燃焼速度の変化を体系的に調査している。燃料濃度が異なる条件で比較的吹飛びに近い状況の火炎を考察し、その差異が潜在燃焼速度によって説明されることを示し、次に燃料種類が異なり潜在燃焼速度が比較的近い状況の火炎を考察し、その場合の吹飛び現象の差異は火炎位置の違いによる周囲空気流束の影響で説明ができることを示している。

第 5 章では本論文を総括している。本研究ではメタノールおよびエタノールの燃焼に適した詳細化学反応機構を決定し、火炎基部での予混合気の挙動を定量的に評価し潜在燃焼速度の概念を導入することで、燃料種類および燃料濃度による吹飛び現象の差異を説明している。本研究で示した潜在燃焼速度の概念は一般的な炭化水素燃料にも応用可能なものであり、それらの安定燃焼範囲を数値計算によって見積もることが可能であることを示している。

博士論文の審査結果の要旨
Summary of the results of the doctoral thesis screening

バイオアルコールの燃焼に関する研究
—メタノールおよびアルコール同軸火炎の吹飛び特性—

本論文は、化石燃料の有力な代替燃料として考えられているバイオアルコール燃料の応用を、第一の視点として出発している。申請者は、わが国の国土の特性から森林バイオマスの重要性を強調し、木質バイオマス由来のバイオメタノールを、トウモロコシ、大豆などの栽培作物から精製されるバイオエタノールなどと比較し優位にあるとし、局所的な「その場発電利用」や航空機用燃料などで、バイオメタノールがわが国のカーボンニュートラルな次世代エネルギー源の一翼を担ううるとしている。

本論文では、メタノール、エタノールともに、熱分解過程や火炎温度・層流燃焼速度など理想化された系における基礎燃焼研究は広範に実施されているものの、実用燃焼器に応用可能な研究例は乏しいとし、メタノールおよびエタノール同軸火炎の吹飛び現象を調べ、実用燃焼器の運転可能範囲の決定などに有用な耐消炎性能を実験、数値計算の両面から理解し、最終的にはメタノールの優位性を確認することを目的としている。

数値計算で使用する詳細化学反応機構の選定から実施している。メタノール、エタノールを含んだ形で提唱されている、DME2000, DME2007, konnov2005, marinov, および sandiego2014 の 5 つの反応機構を対象として検討している。それぞれの反応機構を用いて CHEMKIN PREMIX によりメタノールおよびエタノールの層流燃焼速度を計算し、実験値と比較することで、DME2007 がもっとも妥当な反応機構であると判断している。

両アルコールの同軸拡散火炎の火炎温度分布および OH ラジカル濃度分布を、線径 25.4 μm の R 型熱電対および平面レーザー誘起蛍光法 (Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF 法) により計測し、その結果を DME2007 を用いた 2 次元数値計算結果と比較し、良好な一致を確認している。さらには、同軸拡散火炎の実験から得られた両燃料の吹飛び限界流量を数値計算結果と比較し、同じく良好な一致を見出している。これらの結果から、DME2007 および本研究で使用する数値燃焼コードの組合せが、メタノールおよびエタノール 2 次元同軸拡散火炎を正しく表現できることを確認している。

同軸火炎を上記数値計算法により詳細に検討し、火炎がバーナリムに付着している場合でも、火炎基部下方向より周囲空気が中心の燃料側に拡散し予混合気を形成し、燃焼速度を有することを見出している。予混合性については mixedness の概念を用い、数値的にも証明している。さらにはこの予混合気が 800K 程度まで予熱されていることに注目し、潜在燃焼速度の概念を導入し、火炎の安定性について論じている。また、吹飛んだ火炎の状況を調べ、火炎位置と周囲空気流速との相関を論じ吹飛びのメカニズムを明らかにしている。

吹飛び特性に於けるメタノールの優位性については、化学反応の相違による火炎位置の差異が支配的であることを数値的に明らかにし、各燃料の濃度の影響は潜在燃焼速度の差で説明できることを解明している。

本論文は、メタノールが吹飛び特性でエタノールに勝ることを実験的に確認した上で、その機構について数値計算で解明している。同軸火炎の安定性、吹飛び特性に関するこれらの成果は工学的に高く評価できる。

以上より、申請された論文は博士 (工学) の学位論文としてふさわしい水準にあると判定した。