

論文審査の結果の要旨

氏名：傅 建 華

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：小型風洞を用いた流動場における放電特性に関する研究

審査委員：（主 査） 教授 山 崎 博 司

（副 査） 教授 秋 濱 一 弘

教授 野 村 浩 司

地球温暖化への対策は喫緊の課題であり、輸送部門では電気自動車とカーボンニュートラル燃料を利用した内燃機関の活用が考えられる。このような状況下において、現行のガソリンエンジンの熱効率を向上させることは、近々の温室効果ガスの削減に寄与するとともに、将来のカーボンニュートラル燃料の利用においてもエネルギー需要の低減に資することから有意であるといえる。他方で熱エネルギー変換として燃焼を用いる場合に点火技術は重要な要素であり、エネルギー効率や熱効率の向上を目指した極限状態での安定した点火が求められる。ガソリンエンジンの熱効率の向上策のひとつに希薄燃焼技術が有望視されている。希薄燃焼すなわちリーンバーン状態では燃焼速度が低下するため乱流燃焼速度を高めて燃焼期間を短縮する必要がある。特に高希積化が進むと要求される流動が強くなり、あわせて点火時期が進角することから、安定して点火することが困難になる。ここでは流動により放電路が引き延ばされる現象が発生しているが、それらについて十分な現象解明とモデル化ができているとは言い難いのが現状である。本論文は、流動場における火花放電変形の現象把握を行い、それに基づくモデル化を実施して既存実験式の適用範囲の拡張、その物理的な解釈と高精度化への知見を得ることを目的としたものであり、以下の全6章で構成されている。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的について述べている。本研究を始めるにあたっての地球温暖化とそれを取り巻く現状、それを受けての自動車用ガソリンエンジンに求められる熱効率の更なる向上やリーンバーンの必要性について述べ、関連する過去の研究について示した。それらをもとに自動車用ガソリンエンジンの火花放電については、現象把握が十分になされておらずモデルベース設計に使えるモデル式に関する課題を指摘し、流動場での火花放電の放電路変形を研究の主対象とすることを述べている。特に火花放電路の変形を含むモデルについては、従前のモデル式が流動場中での点火を念頭に作成されたものではないことから、その適用範囲検証と更なるモデルの高精度化の必要性について述べている。そのうえで、本研究の目的として、流動場における火花放電変形の現象把握とそれに基づくモデル化であることを示している。

第2章では、第1章で示した目的を実現するための実験装置および実験方法について述べている。本研究ではより現象を観察しやすくするため、現象の再現性をよくするために新規に小型風洞を設計開発しており、その設計思想や詳細について述べている。また高流動場中での放電を実現するための放電回路について解説している。また小型風洞を製作したため、その気流の同定を一部の装置を改良して実施した。その詳細と結果について示し、併せて装置の特性について示している。

第3章では、従前のモデル式が流動場中での点火を念頭に作成されたものではないことから、その適用範囲の検証と点火モデルとして必要なパラメータの取得を主題としている。第2章で述べた実験装置を用いて流動場中での放電路の変形とその電気特性について、様々な流速、圧力、雰囲気気体条件で実験を行った結果について示している。その結果から現象の把握と解釈を行い、点火モデルを考えるうえで必要なパラメータについて実験値を報告している。そこでは、火花放電路の先端の移動については周囲流速とほぼ一致していること、さらに放電路の延伸に従って放電路の形状が維持できなくなり、放電路の短絡もしくは再放電が起こる現象を観察し、それが電圧によって整理できることを示している。また、短絡、再放電については雰囲気気体の影響が大きいこと、雰囲気気体によって放電路の短絡もしくは再放電が起こる電圧値が異なることも示している。これらはガソリンエンジンの点火や火炎伝播を考えるうえで、有用なデータと考えられる。得られたデータを、既存実験式を用いて整理することによりリーンバーン条件下で想定される流動や圧力条件としても適用可能といえることを示した。これらはリーンバーン条件下での点火および火炎伝播のモデル化に必要な実験データを提供したものと見える。

第4章では既存実験式の高精度化を主眼として行った実験結果および理論的考察が示されている。第3章の結果では既存実験式の適用範囲が拡張可能であることが示したが、実験式であることから、この式の物理的な解釈を推し進め高精度化の検討、また物理モデルに基づいた修正を行うことで適用範囲を広げる可能性について検討したものである。まず既存実験式では放電路長さを単純な矩形近似で表していることから放電路長さの計測方法の高精度化について検討した。複数の計測方法について検討した結果、放電画像における輝度の2値化情報を用いることで限定的ではあるが放電路長さを高精度で計測できることを示した。この手法を用いた計測結果は概ね既存実験式の結果と一致しているものの、特に1回目短絡までの経路抵抗値に差異がみられることなどが明らかとなった。これに基づき、静電場を仮定して再検討を行い、電流の関数となるパラメータとして画像上の放電路太さが電流の関数であると仮定して検討を行った。画像処理により放電路太さを算出することで、放電路太さを電流の関数として表したところ、既存実験式と一定の相関がみられた。これから、他のパラメータを導入することによって既存実験式を物理的に解釈できることが示された。またISO感度の高い高速度カメラを用いた実験から、画像上で放電路太さとして認識したものは、放電路自体の発光強度と移動に分離して検討することができるようになり、より詳細なモデルへの道筋が示された。さらに2方向から放電路を観察できるようなシステムを構築し、得られた画像から放電路の3次元形状を再構築した。これにより、より正確な放電路長さを求めて実験データと突き合わせる事が可能となったことが示されている。

第5章では総合考察として行った補足実験の結果が示されている。第4章では放電路内の電界が一様ではなく変化があるとして検討を行うことでいくつかの課題について高精度化に道筋をつけることができた。ここでは、放電路の輝度分布について、電流が一定でありかつ放電路での電圧差と輝度値に相関があるとの仮定のもとに、放電路内の電圧の分布について検討した結果、概ね線形に沿った結果が得られるものの、僅か線形からずれていることが見受けられた。これに関して今後更なる検討が必要と考えられるが、この差は前章で議論した場所ごとに電界が変化していることに起因したものと考えられる。静止場であれば電界一定という仮定が成立していたと考えられるが、流れによる荷電粒子の移動が電界に変化を及ぼし、この差が発生したものと考えられることを示している。次に本研究では電荷の移動による電場の変化を考えると、これによって既存実験式をより物理的に解釈できる可能性を示したが、これを荷電させた液滴に適用した実験を行い、電荷の移動により電場が変化する場合についての実験的な検証を行った。その結果、微粒化モードのデータをもとに、前章と同様な仮定で電界の変化を考えると現象をよく捉えていることを示している。以上のことにより電界の変化を加味することで理論的な考察が可能となる現象もありえることを示唆するものと考えられる。これらの結果は、荷電粒子の移動による電界変化を加味することの有効性を示すものであり、今後の検討について指針を示すものと考えられる。

第6章は結論であり、第1章から第5章までの結果が総括されている。

以上のとおり、本論文は、今後利用が期待される希薄燃焼時を想定し、流動場における放電路延伸と電圧・電流との関係を明らかにするとともに、静電場に関する理論的考察は今後の火花点火モデルへの拡張に大きく貢献できるものと期待でき、生産工学、特に熱工学に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令 和 4 年 3 月 3 日