

# 博士学位論文審査要旨

2024年6月29日

論文題目： 吸気管噴射式火花点火機関における燃料噴霧微粒化過程のモデリング  
および数値解析

学位申請者： 西村 佳那子

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 松村 恵理子

副査： 理工学研究科 教授 千田 二郎

副査： 千葉大学大学院工学研究院 教授 森吉 泰生

要旨：

内燃機関における噴霧の微粒化過程はその後の燃焼過程を支配しており、カーボンニュートラルの達成に向けて重要となる機関の熱効率向上や低エミッション化などの機関性能を大きく左右する要因となるため、最適な噴霧の設計および混合気濃度の時空間分布制御が重要となる。

火花点火機関や圧縮着火機関の燃料噴霧の分裂形態について、ジェット数を用いて体系的に整理し、本研究で対象とする吸気管噴射式火花点火機関における燃料噴霧の分裂形態を明らかにしている。その上で本論文は、高精度数値解析の実現のため、燃料噴霧の実験解析による微粒化過程の深い現象理解とその根底にある基礎理論適用によるモデリングさらには数値解析へと展開させている。具体的には、可視化光学計測による噴霧分裂過程および液滴生成過程の実験的解析により、液膜状に噴出する燃料噴霧の分裂メカニズムを解明し、液滴生成過程において噴射過程、液膜分裂過程、液系分裂過程、分裂後の液滴動的特性について実現象に基づいたモデリングを考案している。また、そのモデルを3D数値シミュレーションコードへ実装し、数値解析結果から本開発モデルの精度を検証している。さらに、実用的な噴射弁を想定した多噴孔噴霧の噴霧形成過程に対するモデルの精度検証やカーボンニュートラル燃料の実機関への適用を考慮し、実機関霧囲気条件を想定した減圧沸騰条件下における燃料噴霧特性についても実験的解析による把握と相変化過程について明らかにしている。本論文は、燃料噴霧の混合気形成機構に関する実験的な解析結果から、3次元数値シミュレーションへ適用可能な噴霧微粒化モデルを開発し、その効果と精度を検証し、その有効性を確認している。

以上より、本論文は博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2024年6月29日

論文題目： 吸気管噴射式火花点火機関における燃料噴霧微粒化過程のモデリング  
および数値解析

学位申請者： 西村 佳那子

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 松村 恵理子

副査： 理工学研究科 教授 千田 二郎

副査： 千葉大学大学院工学研究院 教授 森吉 泰生

要 旨：

本論文提出者は、2022年3月に同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を修了後、2022年4月より本学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に在学している。提出者は、博士課程（前期課程）から博士課程（後期課程）の在学中にわたり一貫してエンジンスプレーを対象とした実験解析による微粒化過程の深い現象理解とその根底にある基礎理論適用によるモデリングさらには数値解析への展開と高精度数値解析実現のための基礎的研究を行ってきた。

本論文の主たる内容は、「自動車技術会論文集」に4編、「微粒化」に1編、「Society of Automotive Engineers (SAE Technical Papers)」に1編が掲載され既に十分な評価を得ている。

2024年6月29日（土）10時30分より約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。また、提出者は本学大学院での語学試験（英語）の認定を受けており、さらに多数の国際会議発表の実績を有することから、十分な語学能力を有すると認められる。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

Abstract of Doctoral Dissertation

論文題目： 吸気管噴射式火花点火機関における燃料噴霧微粒化過程の

Title of Doctoral Dissertation モデリングおよび数値解析

Dissertation

氏名： 西村 佳那子

Name

要旨：

Abstract

内燃機関における噴霧の微粒化および混合気形成はその後の燃焼過程を支配しており、燃費や排気特性などの機関性能を大きく左右する要因となるため、最適な噴霧の設計および混合気濃度の時空間分布制御が重要となる。噴霧燃焼における噴霧の微粒化過程や液滴の衝突・合体、蒸発過程、壁面への衝突時の挙動について、実験的解析や CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) による数値解析が広く行われており、現象解明およびモデルの提案がなされている。しかし噴霧は非定常かつ空間的に不均質な気液二相流であり、噴霧の分裂現象や噴霧とその周囲気体間における相変化や拡散混合など様々な要素が複雑に関連しているため、いまだすべての現象の解明には至っていない。そのため、現象を正確に記述するモデルの開発による予測精度の向上が求められている。吸気管噴射式火花点火機関における燃料噴霧は、プレートタイプのマルチホールノズルから噴射差圧力 0.2~1.0MPa にて噴射され、ノズル内部での乱れを利用した高い微粒化性能を有している。この噴霧の微粒化過程は噴出時の乱れを考慮する必要があり、単純な理論解析が適用できないため、数値計算により分裂過程を予測する噴霧分裂モデルはなく、シミュレーションの高精度化のためには噴霧分裂モデルの開発が急務となっている。

よって本研究では、吸気管噴射式火花点火機関に用いられる吸気管噴射用マルチホールノズルより噴射される燃料噴霧について、実験的解析による現象理解に基づく現象のモデリングと CFD シミュレーションによる数値解析をおこない、実験的解析と数値解析の双方からメカニズム解明をおこなった。

本論文は 6 章で構成される。

第 1 章では、研究背景としてカーボンニュートラル社会の実現に対して実験的解析とモデリングによる噴霧微粒化過程の解明とその高精度な予測が重要であることについて述べた。また、燃料噴霧と内燃機関について既往研究における燃料噴霧研究と噴霧モデリング研究について紹介し、シミュレーションの高精度化のための噴霧分裂モデル開発の重要性を示し本論文の位置づけと構成を述べた。

第 2 章では、可視化計測による噴霧分裂過程および液滴生成過程の実験的解析について述べた。また、燃料液滴の空間分布に PTV 解析を適用し噴霧液滴の動的特性および液滴生成長さを解析した。吸気管噴射における燃料噴霧の噴射条件はジェット数による分類により波状流に分類され、マルチホールノズルより噴射された燃料は液膜状に噴出し、液膜から液糸、液滴への分裂に加え端面からの分裂や Bag 分裂を経て液滴へと分裂することを明らかにした。一方、液膜分裂により分裂した液滴がさらに微小な液滴へ分裂する様子は観測されなかった。また、液膜の噴出とその後の液滴の飛散角度についても解析したところ、噴孔角度と液膜の噴出方向は一致せず、液膜の噴出角度は噴射差圧に依らないことが明らかになった。燃料噴霧の液膜分裂は噴孔軸方向距離 2~8mm の間で空間的に分布を持って発生していた。噴射差圧の高圧化に伴い液膜分裂長さは短くなり小粒径化することがわかり、ザウタ平均粒径の噴射差圧に対する指数値は-0.38 と

なった。燃料噴霧は噴孔角度より小さい角度を分布の中心として飛散し、大粒径の液滴が液膜噴出方向を中心に飛散するのに対し小粒径は広範囲に飛散していた。液滴の飛散方向は、噴出時の条件に大きく影響を受け、噴出後の気液の相互作用による影響は小さいことが示唆された。基準条件における液滴径と液滴生成長さの関係について解析した結果、 $35\ \mu\text{m}$ 程度の粒径で最も液滴生成長さが短く、液滴径の増加に伴い液滴生成長さが増加することを明らかにした。

第3章では、吸気管噴射用マルチホールノズルの噴霧微粒化過程における液膜の噴出過程、液膜分裂過程、液系から液滴への分裂過程、分裂後の液滴に関する現象のモデリングについて述べた。液膜の噴出過程について、噴孔へ燃料が流入する際の噴孔部入口損失が、流入時の速度ベクトルの変化により生じるとする損失推定手法を提案し、質量保存から円環状に噴出する液膜厚さを与える手法を修正することで均一な液膜厚さをもつ半楕円環形状で噴出液膜を模擬した噴射モデルを提案した。液膜分裂過程について、液系が分裂する時間を液滴の分裂特性時間を用いてモデル化し、液滴生成長さを算出する手法を提案した。液膜分裂理論に基づく分裂過程に加えて液系端からの分裂を考慮することで、粒径分布の予測精度が向上した。また、一様性乱流のエネルギースペクトルを用いて粒度分布を予測する手法にエネルギー減衰を考慮する方法を提案した。液膜分裂後の液滴速度の算出手法として、液滴生成時に必要となる表面張力エネルギーを考慮しエネルギーバランスから分裂後の液滴速度を算出する手法を考案した。

第4章では、新規噴霧液膜分裂モデルを用いてCFDシミュレーションによる数値解析を行ない、モデルの妥当性を検証した結果について述べた。数値解析結果については可視化計測結果との比較によりモデルの妥当性を検証した。これにより本研究で提案した液系端の分裂を考慮した新規分裂モデルは、液滴径の個数頻度分布、重量頻度分布の実験結果を最大誤差15%の精度で再現可能であることが示された。また、多噴孔ノズルより噴射される燃料噴霧の噴霧形成について、噴孔数、噴射差圧および霧囲気密度をパラメータとし可視化計測を行った。この結果、噴孔数を変更すると噴霧形状は大きく変化するが、噴射差圧および霧囲気密度が噴霧形成に与える影響は小さいことが明らかとなった。これにより噴孔数すなわち噴孔配置の違いによるノズル内流動の変化が噴霧形成に大きく影響を及ぼすことが示唆された。また、噴射条件を変更し数値計算を実施することで、噴射条件が噴霧形成過程に及ぼす影響について調査した。これにより、隣接噴霧による負圧誘引の効果と比較しノズル内流動の変化による噴射方向の変化が噴霧形成に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

第5章では、吸気管噴射用マルチホールノズルを用いた減圧沸騰噴霧の噴霧特性解析について述べた。また、減圧沸騰噴霧の相変化量をエネルギーバランスより推定し、減圧沸騰による相変化特性を調査した。これにより、液体燃料が減圧沸騰によって蒸気化し、蒸気相の状態でのノズル出口から噴出した蒸気噴流が観測され、本実験条件のうち最も減圧沸騰が強く生じる霧囲気圧力 $0.02\ \text{MPa}$ の条件にて、4孔による個々の噴霧を識別できない紡錘形の集合噴霧が観測された。集合噴霧を形成していない条件では、蒸気噴流の先端到達距離の時間指数値が0.5程度であり気体噴流理論と一致したため、蒸気相と液相は分離した状態で噴孔出口から噴出していることが示唆された。これらの実験的解析とあわせて減圧沸騰噴霧による相変化過程をエネルギーバランスより推定するモデルを提案した。これにより減圧沸騰による蒸気の生成およびこれに伴うノズル出口からの燃料噴出流量の減少が、エネルギーバランスから推定された。

第6章では、結論として本研究の内容を総括した。

以上、吸気管噴射式火花点火機関における燃料噴霧微粒化過程のモデリングおよび数値解析から、吸気管噴射式火花点火機関における燃料噴霧の微粒化過程が明らかとなり、減圧沸騰条件を含めた多噴霧の噴霧形成過程についての知見が得られた。

以上が本論文の要旨である。