

# 博士学位論文審査要旨

2015年2月17日

論文題目： ガソリンエンジンの燃料挙動解析と未燃炭化水素低減に関する研究

学位申請者： 武田 啓壮

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 千田 二郎

副査： 同志社大学理工学部 准教授 松村 恵理子

副査： 同志社大学 名誉教授 藤本 元

要 旨：

ガソリン機関は乗用車用内燃機関として未だ主流の座を占めている。一方、昨今の地球温暖化問題および化石系資源、特に原油の将来的な枯渇問題を踏まえて、ガソリン機関では高効率化するなか燃料消費率の大幅な低減の要請が急務である。同時に、局地的な環境破壊源であるエンジンからの有害な排出ガスの低減およびその規制の強化も進んでいる。

本論文は、ガソリン機関からの有害排出ガスの主成分である未燃炭化水素（排出 HC）と吸気ポートや燃焼室壁面などへの噴射燃料の付着挙動との関係を定量的に解析し、排出 HC 濃度の低減を新規の噴射システムの構築によって達成した研究開発に係わるものであり、9章から構成されている。第1章では、今般の環境/エネルギー問題を自動車の観点から総括し、ガソリン機関の燃料供給系の変遷について述べている。第2章では、本研究に関連する従来の研究を体系的にまとめ、燃料噴射系、特に燃料噴霧と機関内の各種壁面との干渉過程が未燃排出 HC 濃度に大きな影響を及ぼす点を明らかにしている。これを受けて、第3章から第5章において、ポート噴射式ガソリン機関を対象として、可視化型機関、独自開発の油圧駆動型動弁式機関および量産型機関を用いて、各種の噴射条件下で噴射燃料の壁面付着挙動と排出 HC 濃度との相関を定量的に実験解析して、各種制御因子による排出 HC 濃度の低減手法の提案を行い、実機関へ適用した場合の低減効果を検証している。さらに第6章では、近年実用化されている高効率機関である筒内直接噴射式機関においてシリンダ壁面への燃料付着量の増加による機関からの排出 HC が大幅に増加することを踏まえて、排出 HC を低減可能な新規の噴射システムを考案し、それを適用し機関作動時の排出ガス低減を実現した。そして、第7章において本研究で得られた知見から機関の低公害化と低燃費化を両立し得る噴霧特性を有する噴射系システムの提案を行い、第8章においてその燃料噴霧の微粒化改善状況と噴霧特性を数値解析し、噴霧挙動およびその壁面付着挙動と排出 HC 濃度の定量的な関係を明らかにした。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位を授与するにふさわしいものであると認められる。

## 学力確認結果の要旨

2015年2月17日

論文題目： ガソリンエンジンの燃料挙動解析と未燃炭化水素低減に関する研究

学位申請者： 武田 啓壮

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 千田 二郎

副 査： 同志社大学理工学部 准教授 松村 恵理子

副 査： 同志社大学 名誉教授 藤本 元

要 旨：

本論文提出者は、千葉大学工業短期大学部を1971年3月に卒業後、トヨタ自動車工業株式会社（現 トヨタ自動車株式会社）に入社し、東富士研究所にて一貫してガソリン機関の燃料噴射系、先行開発業務に従事した後、2005年1月に愛三工業株式会社に転籍し開発部長、テクニカルアドバイザーとして現在に至っている。

本論文の主たる内容は、SAE Transaction に6編、JSAE Review に2編、自動車技術会論文集に1編、それぞれ論文として出版されている。さらにフルペーパー査読付きの関連の国際会議に4件の研究発表を行っており、内外の学会において十分な評価を得ている。

2015年1月24日午後1時より約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。さらに講演終了後、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、英語による論文発表も多数行っており、十分な語学力を有することを確認した。

以上のことから、本学位申請者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分なものであると認める。

# 博士学位論文要旨

論文題目： ガソリンエンジンの燃料挙動解析と未燃炭化水素低減に関する研究  
氏名： 武田 啓壮

## 要旨：

本論文では、自動車用ガソリンエンジンの低公害化、低燃費化（CO<sub>2</sub>低減）を目的とし、排出ガス悪化の要因となっている機関壁面（吸気ポート、吸気バルブ、燃焼室、ピストンおよびシリンダなどの壁面および表面）に付着した燃料の挙動を解明し、エンジンから排出される未燃炭化水素（エンジン排出 HC）の低減に取り組んだ研究成果をまとめたもので、9章より構成されている。

第1章では、自動車用ガソリンエンジンを取り巻く環境とその時代のニーズを示し、ガソリンエンジンの燃料供給系の変遷について述べている。この中で、ガソリンエンジンは、火花点火による理論空燃比の混合気燃焼と三元触媒による後処理システムを組み合わせた排気浄化技術によって排気ガス規制に対応してきた。今後、さらに厳しくなる有害物質を低減するための排気ガス規制や、地球温暖化防止のための燃費規制（CO<sub>2</sub>低減）への対応が求められており、触媒システムが活性化する前の排出ガスを低減する技術開発が重要であることを示した。触媒活性前の排気ガス悪化は、前述の機関壁面への燃料付着の影響が支配的であるが、この燃料付着が多く発生する条件は、冷間時のエンジン始動を含む暖機過程である。この始動・暖機過程はエンジン内の混合気形成過程および燃焼過程が複雑で定量的把握が困難であることから、機関壁面に付着する燃料を含めた燃料挙動とエンジン排出 HC の関係は十分に解明されていないことを述べ、この解明を本研究の目的と定めて研究方針を示している。

第2章では、本研究に関連する従来の研究について、特にエンジンから排出される未燃 HC について、エンジン本体の設計諸元に起因するものと、燃料噴射系やエンジン制御系に起因する研究について述べるとともに、排気系触媒浄化システムが不活性な条件での後処理技術による HC 低減に関する研究についてもふれる。これら排出ガス低減技術を用いても、冷間時のエンジン始動初期にエンジンから排出される未燃 HC は非常に多く、浄化率の高い後処理が困難であることを述べている。さらに、空燃比（A/F）フィードバックシステムの課題にもふれ、冷間始動時のエンジン排出 HC の低減に対して、機関壁面への燃料付着を抑制することが重要であることを示している。これら過渡時の燃料挙動は、機関運転条件および環境条件の影響を大きく受けることや、この挙動が顕著に表れる冷間時のエンジン始動・暖機過程における機関壁面への燃料付着を伴う燃料挙動とエンジン排出 HC の関係についてふれ、本研究の必要性、重要性について示している。

第3章では、ポート噴射式（MPI; Multi Point Injection）ガソリンエンジンの燃料挙動について、車両搭載エンジンの実現現象をできるだけ忠実に可視化できるよう、多気筒エンジンの改造可能な範囲で可視化解析をおこなった。様々な可視化手法を用いて、噴射燃料の吸気ポート内とシリンダ内での燃料挙動を観察した。また、シュリーレン撮影と直接撮影の同時撮影による燃焼挙動の観察をおこない、冷間時のエンジン始動・暖機過程の噴射燃料のマクロ挙動を明らかにした。特に、吸気ポート壁面への燃料付着や、シリンダ壁面への燃料付着の挙動について定性的ではあるが明らかにし、この燃料挙動と燃焼挙動との関係について示している。また、噴霧特性の影響についても可視化を行ない、燃料の微粒化特性の影響について明らかにした。

第4章では、第3章の燃料挙動の可視化で明らかにした、吸気ポート壁面およびシリンダ壁面への燃料付着を含めた燃料挙動とエンジン排出 HC の関係を明らかにするため、サイクル毎に定

量的解析が可能な、独自に開発した研究実験エンジン（油圧駆動型多自由度動弁系エンジン）の概要と計測方法について述べる。始動・暖機過程のサイクル毎の燃料挙動を定量化し、サイクル毎の要求燃料噴射量( $F_{re}$ )、吸気ポート付着燃料量( $F_{pw}$ )、シリンダ付着燃料量( $F_{cw}$ )、燃焼燃料量( $F_{bu}$ )およびエンジン排出 HC の挙動について明らかにした。また、エンジン排出 HC に対する燃料噴射時期の影響、燃料性状の影響および噴霧特性の影響についても考察し、始動・暖機過程のエンジン排出 HC 低減の可能性と改善方向について示している。MPI エンジンの場合、吸気ポート壁面への燃料付着が多く、始動・暖機過程の燃料挙動をより複雑化し、空燃比 (A/F) の制御性を悪化させていることを明らかにした。この吸気ポート付着燃料の低減策として、燃料の微粒化と吸気同期噴射（吸気弁開弁時期に同期して燃料噴射）の組み合わせが有効であり、その効果を明らかにした。

第 5 章では、量産型ポート噴射式 (MPI) ガソリンエンジンでのエンジン排出 HC の排出挙動について示している。第 4 章で、研究実験エンジンを用いて始動・暖機過程でのサイクル毎の燃料挙動の定量化解析について述べたが、これはファーストアイドル運転での解析結果であり、実際の車両におけるエンジン停止状態からのスタータによるクランキング始動を忠実にシミュレートできている訳ではなかった。そこで、実車冷間時の実始動過程を忠実にシミュレートし、その複雑な燃料挙動を定量的に解析するエンジン起動実験装置を新たに開発した。その実験装置の概要を述べるとともに、研究実験エンジンでの定量化解析結果との差異について明らかにし、研究実験エンジンでの結果と対比して、燃料噴射時期の影響、燃料性状の影響および噴霧特性の影響について示している。これらの解析結果から、燃料の微粒化によりシリンダ壁面への付着燃料の低減によるエンジン排出 HC の低減と燃料性状の影響度の低減による A/F の制御性の向上が期待できることを明らかにした。

第 6 章では、筒内噴射式 (DISI; Direct Injection Spark Ignition) ガソリンエンジンの燃料挙動について、第 4 章で述べた研究実験エンジンを用いて定量化した。機関の冷間始動において、DISI は筒内に直接燃料を噴射するため、MPI と比較して、シリンダ壁面への燃料付着量が増加し、エンジン排出 HC も大幅に増加する。この違いについて、両者の燃料挙動を比較して述べるとともに、DISI における具体的な低減手法について明らかにした。低減手法として、燃料噴射時期の影響、燃料圧力の影響、噴霧特性の影響および吸気バルブタイミングの影響について定量化解析し、いずれの技術も 20~35% のエンジン排出 HC の低減効果があることを示している。また、各低減技術の組み合わせにより、MPI を下回るレベルのエンジン排出 HC を達成できることを明らかにした。特に、可変動弁系の活用例として吸気弁の遅開きが、シリンダ壁面への燃料付着を 40% と大きく低減させ、エンジン排出 HC 低減に寄与することを明らかにした。

第 7 章では、筆者がトヨタ自動車株在籍中に取り組んだ MPI および DISI 用燃料噴射弁の微粒化改善技術について示している。MPI 用燃料噴射弁では、4 弁エンジン化にともなう噴霧特性の改善と、その時代のニーズ、環境変化に対応して開発、採用された燃料噴射弁の変遷について述べる。特に、4 弁エンジン特有の課題について明らかにし、燃料の微粒化と噴霧の方向性の両立が重要であることを示すとともに、最適な噴霧特性を有するエアアシスト噴射弁と多噴孔高微粒化噴射弁について、エンジン実機を用いてエンジン排出 HC の低減効果について検証した。DISI 用燃料噴射弁では、2000 年に量産化された新規コンセプトの第二世代 DISI に採用されたスリットノズル（ファンスプレー）の噴霧特性について、従来のスワールノズルの噴霧特性と比較してその優位性を示している。また、噴霧特性を決定する設計因子について明らかにし、それらの因子の影響度に関して実験的手法を用いて示している。

第 8 章では、第 7 章で述べたスリットノズル（ファンスプレー）の噴霧形状および噴霧特性に影響する設計因子についてスリットノズル内の燃料流れを数値解析し、設計因子の影響度について定量化するとともに、これらの噴霧特性が混合気形成に与える影響について明らかにした。また、各種エンジンにも適用できるように支配的設計パラメータを明らかにし、他機種エンジンへ

も最適な噴霧特性が実現できるノズル設計手法を開発した。また、この新規コンセプトでは、エンジンの高性能化を狙いストレートポートの吸気系が採用されるため、新しい混合気形成が要求される。それは強い気流に頼らない混合気形成過程であり、噴霧自身の持つ貫徹力とピストン形状の最適化によって混合気を点火栓周りへ導くことである。そこでファンスプレーによる混合気形成過程を数値解析し、ファンスプレーの持つ噴霧貫徹力と噴霧形状の最適化により点火栓周りに成層混合気を形成できることを確認し、実機の可視化解析でもそのことを検証した。

第9章の終章では、第3章から第8章で得られた研究成果をまとめるとともに、将来に向けたさらなる課題と今後の展望について述べている。

本研究により、機関壁面への燃料付着現象とエンジン排出 HC の関係が明らかとなり、MPI、DISI を含めたガソリンエンジンの重要課題である排気系触媒浄化システムが不活性な条件である始動・暖機過程のエンジン排出 HC 低減に対する解決策を導き出した。これらの中で、その時代のニーズや環境変化に対応して、MPI および DISI の燃料噴射弁に求められる性能を明らかにし、それぞれの課題に適応した燃料噴射系システムと燃料噴射弁を開発しガソリンエンジンの高性能化に寄与できた。