



燃料インジェクタのノズル内キャビテーションと液体噴流微粒化に関する研究

増田, 誠

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2018-03-25

(Date of Publication)

2019-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7219号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007219>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 増 田 誠

専 攻 海 事 科 学 専 攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

燃料インジェクタのノズル内キャビテーションと液体噴流微粒化に関する研究

指導教員 宋 明 良

(氏名：増田 誠 No.1)

ディーゼルエンジンの燃費と排ガス特性の改善が求められる中、燃料噴射技術の革新が迫られている。特にディーゼルエンジン用燃料噴射ノズルは、エンジン燃焼室の燃料噴霧特性を支配する重要な設計部品である。これまでノズル内のキャビテーションと燃料噴霧の関係を把握するため、ノズル内の可視化実験が数多く行われている。最も基本的な素過程である単噴孔ノズルの知見を確立できれば、複雑に相互作用する多数の形状因子を最適化することが求められる実機ノズルの設計過程の基礎として有益となる。当研究では燃料噴射ノズル設計過程の基礎として有益設計な知見を積み重ねるため、ノズル噴孔の設計パラメータである噴孔長比及び噴孔入口曲率半径という因子に着目し、これらがノズル内キャビテーションと液体噴流に与える影響を、2次元(2D)ノズルを用いた可視化実験によって定量的に評価した。また近年、燃料の多様化が進んでおりバイオディーゼル燃料やジメチルエーテルなどの代替燃料が注目されている。しかしながら多様化する燃料の物性値がノズル内キャビテーション及び噴流に与える影響は明らかにされておらず、それらに関する情報は見受けられない。そこで物性値が異なる様々な流体を用い、物性値がノズル内キャビテーションの挙動及び液体噴流に与える影響を解明するため2Dノズル内キャビテーション流れと液体噴流の定量的な解析を行った。

第2章では、噴孔入口の曲率がノズル内キャビテーションと液体噴流に及ぼす影響を解明するために、様々な曲率半径を有する2Dノズル内のキャビテーションの厚さと長さ、気膜下流端から放出されるキャビテーション気泡群の大きさと放出周波数および液体噴流の可視化画像の定量的解析を行った。2Dノズルの幅 W は4mm、長さ L は16mmで一定とし、噴孔入口曲率半径 R が3, 12, 30, 40, 180, 260, 500, 800 μm の試験ノズルを製作し用いた。その結果、以下の結論を得た。

(氏名：増田 誠 No.2)

- (1) ノズル幅 W に対するノズル入口エッジ部の曲率半径 R の比 R/W が 1% より十分小さいと、 R/W がキャビテーションの厚さ及び長さに及ぼす影響は無視できるほど小さくなる。
- (2) 丸い入口エッジのノズルでは剥離境界層が薄くなり、縮流係数が大きくなるため、キャビテーションも薄くなり、より高流速にならないと初生や発達しない。スーパーキャビテーション様式における気膜も薄くなるため、その下流端から断続的に放出される気泡群は小さくなり、高周波数で放出される。その結果、液体噴流の界面変形の規模と波長は小さくなり、噴流角も小さくなる。
- (3) 噴孔入口の縮流を考慮した修正キャビテーション数を用いることで、噴孔入口エッジ部曲率がノズル内キャビテーションと液体噴流に及ぼす影響を定量的に評価できることが確認できた。

第3章では、燃料インジェクタのノズル噴孔長さがノズル内キャビテーションと液体噴流に及ぼす影響を2Dノズルの可視化実験によって定量的に検討した。噴孔幅 W は 4.0mm に固定し、噴孔長 L が 8, 16, 24mm の3種類のノズル ($L/W=2, 4, 6$) を製作し、ノズル内キャビテーションと液体噴流の可視化画像を解析した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) $L/W=2$ の噴孔長が短いノズルでは、噴孔長が長いノズル ($L/W=4$ 及び 6) と比べて、キャビテーション長さの時間的変動が大きく、噴流角は大きい。特に低流速でキャビテーションが生じない条件でも、時間的に変動する剥離境界層の再付着点が噴孔出口付近になるため、噴流角は顕著に大きくなる。

(氏名：増田 誠 No.3)

- (2) $L/W=6$ の噴孔長が長いノズルでは、キャビテーション長さの変動が小さい。キャビテーション気膜が噴孔出口近傍まで成長するスーパーキャビテーション状態が幅広い流速条件において継続し、ハイドロリックフリップ状態に遷移しにくい。
- (3) $L/W=2$ の噴孔長が短いノズルでは、安定した大規模な気膜が形成されず、キャビテーション気泡群放出後にリエントラント・ジェットが噴孔入口付近まで達し、剥離境界層厚さより大きなキャビテーション気泡群が 1.3kHz の低周波数で形成され、噴孔出口から放出される。その結果、大きなキャビテーション気泡群を伴う大規模な渦流れが液体噴流を 1.3kHz の同じく低周波数で大規模に変形させ、噴霧角を顕著に大きくする。
- (4) 安定した気膜が形成される $L/W=4$ の噴孔長が長いノズルでは、噴孔内で気膜厚さ程度の比較的小さいキャビテーション気泡群が明確なピーク周波数は有さない幅を持った高周波数帯で放出され、これが液体噴流の界面を高周波数で小刻みに変形させる。

第4章では、液体の密度、粘性係数、表面張力などの物性値が異なる様々な液体を用い、液体の物性値がノズル内キャビテーション及び液体噴流に与える影響を定量的に解明するために、2Dノズル内のキャビテーションと液体噴流の定量的解析を行った。液体には、温度が 10°C, 30°C, 50°C の水道水、軽油及びシリコンオイルを用いた。水は温度 T_L を 10°C から 50°C に変えることで、動粘度 ν_L が約 2 倍、飽和蒸気圧 P_v が約 10 倍変化するが、密度 ρ と表面張力 σ の変化は小さい。表面張力 σ の影響を抽出するために表面張力 σ が水の約 1/4、動粘度 ν_L はほぼ同じシリコンオイルを用いた。軽油の動粘度 ν_L はシリコンオイルの約 3.5 倍である。その結果、以下の結論を得た。

(氏名：増田 誠 No.4)

- (1) 表面張力はインジェクタ内流れ、縮流係数およびキャピテーションの厚さと長さに影響しない。
- (2) 動粘度が顕著に小さいと、噴孔上流の壁面近傍の流れが若干速くなり、その結果として縮流係数が若干小さくなり、若干低流速条件でキャピテーションが初生および発達する。
- (3) 縮流係数が分かれば修正キャピテーション数 σ_c を用いることで、様々な動粘度の液体を様々なレイノルズ数で噴射する場合でも、ノズル内キャピテーションの初生や発達過程を精度良く予測できる。
- (4) 表面張力が小さいと、液体噴流の界面に多数の細かな液糸が形成され、微小液滴が広範囲に分散し、噴流角が大きくなる。
- 以上、第2章から第4章を通じて最も基本的な素過程である単噴孔ノズル内キャピテーションの特性とそれが噴射される液体噴流の変形微粒化過程が解明され、さらにそれらに及ぼす噴孔入口エッジ部の曲率半径、噴孔長比および液体物性値が及ぼす影響を定量的に解明するとともに、縮流係数を通じて修正キャピテーション数を用いることでそれらを定量的に評価予測できることを確認できた。今後、複雑に相互作用する燃料インジェクタの多数の形状因子が縮流係数に及ぼす影響を定量化できれば、本研究を通じて得られた知見を基に、その他の全形状因子を最適化することで、多噴孔ノズルの噴孔内キャピテーションと液体噴流微粒化特性および噴霧の時空間特性を高精度に制御し、噴霧燃焼の戦略的改善を図れると期待される。

氏名	増田 誠		
論文 題目	燃料インジェクタのノズル内キャピテーションと液体噴流微粒化に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	宋 明良
	副査	教授	西尾 茂
	副査	教授	段 智久
	副査		
要 旨			
<p>概要</p> <p>本研究の目的は、従来は経験と試行錯誤に依存していたディーゼル機関用の燃料インジェクタの設計手法を一新し、燃料インジェクタのノズル内キャピテーションと液体噴流微粒化過程を、各素過程に分解し、各々を可視化計測実験により定量的に解明し、それらを積み上げることで燃料インジェクタの論理的で体系的な新しい設計手法を構築することである。特にその各素過程のうち、未解明であった噴孔入口部曲率半径、ノズル噴孔長比、液体燃料の物性値という3つの影響因子について、独自の修正キャピテーション数という無次元数を軸に導入することで、各々工夫を凝らした2次元構造のノズルを用いることにより、それら影響因子がノズル内キャピテーションと液体噴流微粒化過程に及ぼす影響を定量的に解明している。</p> <p>本論文の第1章では、ディーゼル機関から排出される二酸化炭素と窒素酸化物および粒子状物質の同時削減の実現に不可欠な、燃焼室内における液体燃料噴霧の粒径と時空間分布を制御するための技術として、燃料インジェクタのノズル内キャピテーションとそれが液体噴流微粒化過程に及ぼす影響に関する先行研究の概説とそれらに立脚した本学位論文の課題設定とともに、本論文の目的が述べられている。</p> <p>第2章では、噴孔ノズルの入口エッジ部の曲率半径がノズル内キャピテーションと液体噴流微粒化過程に及ぼす影響を定量的に解明するために、工夫を凝らした二次元的な構造のノズルを多数作成し、各々の曲率半径を3ミクロンから800ミクロンまで変化させた系統的な高速度可視化実験と画像解析を行っている。その結果、ノズル入口曲率半径が大きいと、剥離境界層が薄くなり、縮流係数が大きくなって、縮流部局所圧力が上昇するため、高流速にならないとキャピテーションが初生及び発達せず、さらにスーパーキャピテーション状態においてノズル出口付近で断続的に放出される渦構造に伴われる気泡群のサイズが小さく、放出周波数が高くなるため、噴射される液体噴流の界面変形も小規模で低波長になるという流動現象を解明している。さらに、縮流部静圧に着目した修正キャピテーション数を用いることでこの一連の現象を定量的に評価できることを示している。</p> <p>第3章では、ノズル噴孔長比がノズル内キャピテーションと液体噴流微粒化過程に及ぼす影響を解明するために、ノズル噴孔長比が異なる複数の二次元ノズル内キャピテーションと液体噴流の高速度可視化実験と画像解析が行われている。その結果、標準的な噴孔長より短いノズルでは、気膜は形成されないが、剥離流の再付着点が噴孔出口付近になるため、再付着点からの大規模渦構造の断続的放出によって液体噴流微粒化が促進され、噴流角が大きくなること、逆に長いノズルでは、噴孔出口での変動が相対的に低減されるため、液体噴流微粒化が阻害されるハイドロリックフリップ状態に遷移しにくく、液体噴流微粒化が飛躍的に促進されるスーパーキャピテーション状態が幅広い流速条件で継続するが、液体噴流界面構造の変動は小規模で噴流角は小さくなることを定量的に解明し、新しい燃料インジェクタの可能性を見出している。</p> <p>第4章では、液体燃料の密度、粘度、表面張力という物性値がノズル内キャピテーションと液体噴流微粒化過程に及ぼす影響を解明するために、様々な温度の水、軽油、シリコンオイルなどの噴射過程の可視化計測実験を行い、密度、粘度、表面張力各々の影響を抽出して評価している。その結果、表面張力は縮流係数に影響しないためキャピテーションには影響しないが、表面張力が大きいと液体噴流界面変形を阻害し、密度と粘度の影響は高レイノルズ数流れ故に限定的であるが、縮流係数に僅かな影響を及ぼすことを解明し、さらにその影響を修正キャピテーション数によって定量的に評価できることを示している。</p>			

氏名 増田 誠

第5章では、本研究全体のまとめとして研究成果が総括されるとともに、上記知見を総合することによって、新しい論理的且つ体系的な次世代燃料インジェクタの設計戦略の展望が述べられている。

以上の論文内容について、神戸大学大学院海事科学研究科博士課程後期課程のディプロマ・ポリシーに照らし審議された結果は、以下の通りである。

1. ディーゼル機関の燃料インジェクタ内キャビテーション流れは微小流路内の高速流であり、可視化計測が困難あるが、本研究では独創的な無次元数である修正キャビテーション数を軸にして、工夫を凝らした二次元構造のノズルを駆使して定量的解析を実現し、且つ複雑な気液二相乱流現象を巧みに素過程に分解し、多数の因子の影響を個別に抽出するなど、本論文の内容には多くの新規性と卓越した独創性・創造性が認められる。
2. 本研究の目的は明確であり、目的達成のために工夫さらた戦略的な複数の実験から構成される研究過程が本論文に適切に記述されている。
3. 第1章において、海事科学分野における本研究の背景および位置付けが述べられており、本研究に密接に関連する内燃機関工学、混相流体力学、可視化計測技術、画像解析技術などの専門分野における多くの先行研究の引用とともに十分な検討がなされている。
4. 論旨に明確性と一貫性がある。
5. 論文体系及び論文体裁が整っている。
6. 剽窃チェックソフト (iThenticate) による審査前確認において問題は認められていない。
7. 本学位論文の根幹をなす論文として、以下の3編の有審査論文が公表されている。

(1) Makoto Mashida and Akira Sou, "Effects of Inlet Edge Roundness on Cavitation in Injector Nozzles and Liquid Jet", International Journal of Automotive Engineering, Vol. 9, (2018).

(2) 増田 誠, 宋 明良, "燃料インジェクタのノズル噴孔長さがノズル内キャビテーションと液体噴流に及ぼす影響(第1報)", 自動車技術会論文集, Vol. 49, No. 2, (2018).

(3) 増田 誠, 宋 明良, "燃料インジェクタのノズル噴孔長さがノズル内キャビテーションと液体噴流に及ぼす影響(第2報)", 自動車技術会論文集, Vol. 49, No. 2, (2018).

以上より、提出された学位論文は、ディーゼル機関の燃料インジェクタの様々な形状因子及び燃料液体の物性値がノズル内キャビテーションと液体噴流微粒化過程に及ぼす影響を抽出して定量的に解明し、有用な知見を提供するとともに、それらの知見を統合することで、ディーゼル機関の性能を飛躍的に向上させるポテンシャルを持つ次世代燃料インジェクタの新しい体系的な設計手法を構築しており、その成果は極めて高く評価できる。

さらに、本学位論文が、神戸大学大学院海事科学研究科博士學位論文の評価基準を満たしていることから、審査委員会は学位申請者の増田誠さんが博士(工学)の学位を得る資格を有すると判断した。