



Development of Prediction Models on String Cavitation Flows in Diesel Fuel Injectors and Spray Angles

Nurcholik, Samsu Dlukha

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2023-03-25

(Date of Publication)

2026-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8669号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482417>

※ 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 SAMSU DLUKHA NURCHOLIK

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。)

Development of Prediction Models on String Cavitation

Flows in Diesel Fuel Injectors and Spray Angles

(ディーゼル燃料インジェクタ内ストリングキャビテーション
流れと噴霧角の予測モデル開発)

指導教員 宋 明良

The improvement and innovation of internal combustion engines have been driven to meet stricter emission requirements. Controlling the combustion process is essential since it plays an important role in improving thermal efficiency and reducing exhaust gas emissions. One of the most important parts of a diesel engine is the injector. That is why fuel injectors that can generate fuel sprays with attractive characteristics for the combustion process have been developed. As determined by the stoichiometric air-to-fuel-ratio, sufficient mixing between fuel and oxygen is needed to obtain clean combustion. Excessive fuel and some leftover droplets in the air-fuel mixture can cause soot buildup and increase particulate matter emissions.

Without a fully break-up processes, fuel spray atomization can be divided into two processes, primary and secondary break-up which the mechanism thought to be aerodynamics atomization theory. The spray atomization is not only affected by the interaction between gaseous phases and the liquid but also by internal nozzle flow phenomena like turbulence due to cavitation, even though sometimes cavitation induces erosion. Cavitation phenomena are known to play a significant role in improving the fuel spray characteristics to ensure adequate mixing between air and fuel in the combustion chamber. Therefore, a comprehensive understanding on cavitation and fuel spray atomization is essential for developing the next-generation fuel injector.

Two kinds of cavitation may occur in the diesel fuel injectors. The first is orifice wall cavitation. This type of cavitation typically occurs at the orifice entrance, where flow separation occurs due to sudden contraction. Flow disturbance caused by the collapse of cavitation bubbles near the orifice exit enhances liquid jet atomization. The second is string cavitation, which a strong vortex flow occurs in the sac and orifices.

Recently, it was pointed out that string cavitation has larger impact on spray characteristics than that of orifice wall cavitation. String cavitation may appear in multi-hole fuel injectors at low needle lift, which increases spray angle and decreases droplet diameters. There maybe two different types of string cavitation. Prasetya et al. (2019) found that two string cavitation with small diameter occurs intermittently. This type of string cavitation connects between neighboring orifices, and the spray angle reaches 15 degrees. On the other hand, He et al. (2016) found that only single string cavitation occurs from an orifice to the needle surface. This type of string cavitation occurs steadily resulting a very large spray angle which reaches 45 degrees.

However, the previous researchers have used their own injectors with different geometries, and the complicated three-dimensional velocity distributions in the injectors have not been clarified yet, which make it difficult for us to reveal the overall string cavitation flow phenomena. Moreover, since the dimensionless parameters governing string cavitation are not known, we cannot quantitatively predict string cavitation appearance in the injectors with different shapes and sizes as well as the spray angle.

The main goal of this study is to reveal the various string cavitation phenomena and propose the model to predict the appearances of these string cavitation and the resulting spray angles for various diesel fuel injectors with different geometries and needle lifts. As the first step, to clarify the string cavitation flow patterns in the multi-hole mini-sac fuel injector with different flow channel shapes and their effects on spray characteristics, visualization of string cavitation in a transparent three-hole mini-sac injector at different needle seat gaps Z and spray as well as Particle Image Velocimetry (PIV) analysis of the flow on a plane not through the central axis but perpendicular to the axis of an orifice are carried out. The results clarify that there are two types of string cavitation flows, twin string cavitation flow and single string cavitation flow. Twin string cavitation flow, which one or two string cavitations occurs from an orifice to the neighboring orifices at the needle seat gap-to-orifice diameter ratio $Z/D = 1$. Twin string cavitation flow occurs due to twin swirling flow, which the magnitude of circulation in the right is almost equal to that in the left half, and the sum of two circulations is almost zero. On the other hand, single string cavitation, which only one string cavitation connects from an orifice to the needle surface at the very low needle lift of $Z/D = 0.5$, significantly increases spray angle with a hollow-cone spray. The large magnitude of the total circulation when single string cavitation occurs, induces a hollow-cone spray by the strong centrifugal force.

After clarifying the two flow patterns, to develop model to predict the occurrence of single string cavitation and orifice wall cavitation, visualization of cavitation in simple rectangular injectors representing the Valve-Covered Orifice nozzles and the mini-sac nozzles with its needle tip near the orifice entrances is carried out, whose needle seat gap Z , sac width W , orifice diameter D , liquid kinematic velocity ν , and mean liquid velocity V are varied. Based on the ratio among inertia and viscous forces in the injector, dimensionless parameter of single string cavitation Re_I is derived. PIV analysis is conducted to measure the velocity distribution in the sac, to clarify the flow structure and to quantify the circulation in the sac. As a result, regardless of the shape and size of the fuel injector, the length of cavitation in an orifice can be predicted by using the modified cavitation number σ_c , which based on the local pressure at the vena contracta of the orifice. The appearance of single string cavitation and circulation in the sac are possible to be predicted quantitatively by using the dimensionless number Re_I , which based on inertia of the liquid flow in the orifice, viscous force to prevent the bathtub swirling flow in the sac, viscous force caused by the velocity distribution at the upstream of the orifice inlet and viscous force to weaken the spiral flow in the orifice.

Finally, a model to quantitatively predict the formation of single and twin string cavitations as well as the spray angles in the diesel fuel injectors with various geometries are developed. High-speed imaging of the cavitating flows in the sac and orifice in various multi-hole mini-sac injector is conducted to clarify the effect of hole angle, needle seat gap, needle angle, sac diameter, and orifice number on the occurrence of down flow, single string cavitation and twin string cavitation and their effects on spray angles. The results clarify that at the large needle seat gap, the liquid flows directly to the orifice to form down flow. The close distance between the needle surface and orifice inlet and the large distance between neighboring orifices induce single string cavitation by the bathtub flow effect, thereby, leading to a large spray angle. The small sac with small distance between sac inlet and the orifice enhances a strong vortex caused by small diffusion and large momentum in the sac. The occurrences of down flow, single string cavitation and twin string cavitation can be predicted using the new flow regime map based on the critical distance between the needle surface and orifice inlet. Then, the spray angle under variety of geometries can be quantitatively predicted by using the correlations based on σ_c , Re_s and Re_I .

The model proposed to predict string cavitation flow pattern and the resulting spray angle in this study can greatly contribute to make better design of diesel fuel injectors that can generate desirable spray characteristics for clean combustion. The concept of the model can be implemented in different applications.

氏名	SAMSU DLUKHA NURCHOLIK		
論文 題目	Development of Prediction Models on String Cavitation Flows in Diesel Fuel Injectors and Spray Angles (ディーゼル燃料インジェクタ内ストリングキャビテーション流れと噴霧角の予測モデル開発)		
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	大澤 輝夫
要 旨			
本学位申請論文では、船舶や自動車などで利用されているディーゼル機関の熱効率向上と粒子状物質大幅削減の可能性が示唆されている、ニードル弁の開弁直後と閉弁直前における燃料インジェクタ内ストリングキャビテーション（以下、SC と略す）流れを研究対象としている。これまでは、SC が現れた場合に、極低流速にもかかわらず噴霧角が顕著に増大し、燃焼特性が改善することなどが報告されているが、SC の流動現象は体系的には解明されておらず、SC が発生し得るインジェクタ形状も体系的に把握されておらず、SC 発生時の噴霧角の定量的予測手法もなかった。本論文では、複数の従来報告を詳細に調査分析した上で、透明拡大インジェクタを作成し、その内部 SC と噴霧の可視化と、これまで高精度計測が実現されていなかった噴孔に垂直な断面内速度分布計測実験を実現し、シングル型とツイン型の SC 流れがあることを世界で初めて体系的に明らかにしている。その上で、シングル型 SC に関しては、様々な寸法と流体物性でのシンプル矩形サックの単孔インジェクタを用いた可視化計測実験を行い、シングル型 SC の発生機構を考察してその支配無次元数を抽出し、サック内循環を定量化し、シングル型 SC 発生時の噴霧角の定量的予測方法を確立している。最終的には様々な形状と寸法が多噴孔透明インジェクタを作成して可視化計測実験を行い、ツイン型 SC の発生機構をもとに支配無次元数を抽出し、シングル型 SC の無次元数とツイン型 SC の支配無次元数に基づいて、どちらの SC が発生するのかを設計段階で推算する方法を確立し、さらにシングル型 SC 発生時、ツイン型 SC 発生時、両者とも発生しない時の各々において噴霧角を定量的に予測できる方法を構築している。この結果、ディーゼル機関やインジェクタの設計者は、事前に両 SC の発生と噴霧特性を見積もることが可能となり、ディーゼル機関の熱効率向上と粒子状物質大幅削減に貢献する成果を挙げている。 本学位論文草稿の第 1 章では、本論文の背景、先行研究のレビュー、目的が記述されている。 第 2 章では、透明拡大インジェクタを作成し、その内部の SC と噴霧の可視化と噴孔垂直断面内速度分布計測実験を実現し、シングル型とツイン型の 2 種類の SC 流れがあることを世界で初めて明らかにし、ツイン型 SC 発生時には噴霧角が顕著に増大し、さらにシングル型 SC 周囲には噴孔中心軸を中心に強い旋回流が生じて噴霧角は約 45 度に達することを明らかにしている。 第 3 章では、シングル型 SC の発生条件を決める形状因子と流体物性因子の影響を解明するために、様々な寸法と流体物性でのシンプル体系単孔インジェクタを用いたシングル型 SC 可視化計測実験を行い、シングル型 SC の発生機構を考察して支配無次元数を確立し、サック内循環を定量化し、シングル型 SC 発生時の噴霧角の定量的予測方法を確立している。			

氏名	SAMSU DLUKHA NURCHOLIK
第4章では、様々な形状と寸法の多噴孔透明インジェクタを作成して可視化計測実験を行い、ツイン型 SC の発生機構を考えて支配無次元数を抽出し、シングル型 SC の支配無次元数とツイン型 SC の支配無次元数を基に、どちらの SC が発生するのかを設計段階で推算する方法を確立し、さらにシングル型 SC 発生時、ツイン型 SC 発生時、両者とも発生しない時の各々において噴霧角を定量的に予測できる方法を構築している。 第5章では、結論が総括されている。 なお、第2章を構成する内容は本学位申請者が第1著者として査読付き英文学術専門誌に投稿し掲載決定、第3章を構成する内容は本学位申請者が第2著者として査読付き英文学術専門誌に投稿し印刷中である。また、第4章の内容の一部については学位申請者本人が第1著者として国際会議において英語で2回口頭発表を行っている。 このように、本論文ではディーゼル機関の熱効率向上と排気ガス削減に資する燃料インジェクタ内ストリングキャビテーション流れの体系的説明とシングル型 SC 及びツイン型 SC の発生ならびに噴霧角の定量的予測モデルを構築しており、ディーゼル機関の性能向上に資する重要な知見と手法を提供した工業的および工学的価値のある内容である。また、本研究では適切な研究課題が設定され、その内容は独創性と創造性に満ち、科学的な論理展開がなされていると判断され、本申請者は課題解決のための研究計画力と実行力、十分な専門知識とその応用展開力、論文作成力を有していると判断した。 以上より、提出された論文は海事科学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の SAMSU DLUKHA NURCHOLIK は博士（工学）の学位を得る資格があると認める。	