

# L2F による非定常ディーゼル噴霧の不均一構造に関する研究

長崎大学大学院工学研究科  
川原田 光典

持続的発展可能な社会の実現に向けて、環境負荷の低いバイオ系燃料の利用が内燃機関において促進されている。内燃機関の1つであるディーゼル機関は高熱効率かつ環境負荷が低いという特徴を有する。しかし排気中に粒子状物質（PM）や窒素酸化物（NOx）を含み、グリーンシステムの動力源とするには、排気物質の低減およびさらなる熱効率の向上が必要である。ディーゼル機関では、液体燃料が高温高圧の燃焼室内に噴射されて噴霧を形成し、噴霧内の液滴の微粒化・蒸発・混合気形成を経て自己着火が起こる。すなわち空間的および時間的に適切な噴霧の制御が燃焼・排気特性の改善において重要である。特に噴孔近傍の噴霧特性は噴霧全体の挙動を支配するため、適切な制御の実現には刻一刻と変化する噴孔近傍の噴霧の非定常特性および不均一特性について詳細に把握する必要がある。これまで噴孔近傍の噴霧特性について様々な研究がなされてきたものの、噴孔近傍では高速高数密度で液滴が存在するため計測が困難であり、噴霧内の液滴の挙動に関する知見は極めて限られている。そのため、噴孔から離れた位置での計測結果を基に様々な研究者により考案された噴霧モデルの妥当性は確認できていない。

本論文は、測定体積を微小化することによって高速高数密度で液滴が存在する領域での計測を可能とし噴霧計測に特化させたレーザー2焦点流速計(L2F ; Laser 2-Focus velocimeter)を用いて、噴孔近傍の液滴の速度およびサイズの計測を行った。この結果を基に噴孔近傍における非定常噴霧内の不均一性について明らかにした。さらに噴霧内液滴の分散をモデル化する手法を提案し、本モデルによる評価結果と L2F による計測結果を比較することにより噴霧モデルの妥当性を確認した後、本モデルを用いて噴霧特性について考察した。各章の内容を以下に要約する。

第1章では、本研究の位置付けと目的を明らかにし、第2章では、本研究で使用した計測装置であるレーザー2焦点流速計（L2F）および位相ドップラー流速計（PDA）について述べた。

第3章では、噴孔近傍の噴霧内の液滴の分散を噴霧の軸方向および半径方向に分けて考慮し、液滴数密度を評価する新たなモデルを提案した。

第4章では、非定常噴霧の構造を理解するため、液滴の速度、サイズおよび数密度の時間変化について調査した。次に、噴射が時間とともに変化するという非定常性が噴霧内の液滴速度の時間変化に及ぼす影響を両時間変化の相互相関係数により評価した。さらに PDA による噴霧外周部の計測結果を用いて、噴霧外周部での渦構造について考察を行った。

その結果、以下の点が明らかとなった。

1. 噴霧中心部において液滴のサイズとその間の距離に正の相関があることから、大きな液滴はその間隔が広く、小さな液滴はその間隔が狭い状態で噴霧内に存在する。すなわち、分裂後の小さな液滴はその周囲の大きな液滴と混合せず、分裂前の液滴の位置から大きく移動しない。
2. 噴霧画像の濃淡、すなわち噴霧中心部が濃く、噴霧外周部はやや淡いという不均一構造は、針弁リフトおよび噴射率の時間変化の影響が噴霧中心部では液滴速度の時間変化に強く現れ、噴霧外周部では現れないことに対応する。
3. 噴霧外周部において、噴霧の半径方向内向きの速度成分を有する液滴および半径方向外向きの速度成分を有する液滴による渦構造が存在するものと判断される。
4. 噴霧外周部の半径方向内向きの速度成分を有する液滴のサイズは相対的に小さく、噴霧周囲の空気とともに取り込まれた分裂後の液滴が噴霧のより内側に飛行した後、その飛行は噴霧軸下流方向に変化するものと判断される。
5. 上記3、4の渦構造により、針弁リフトおよび噴射率が噴霧外周部の液滴速度に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

第5章では、液滴の数密度について本論文で提案する分散モデルを用いて評価を行った。また、液滴の速度乱れとサイズの相関関係を調査するとともに、液滴の分裂過程について液滴分散モデルを用いて考察した。その結果、以下の事項が明らかとなった。

1. 液滴数密度が噴霧中心部と外周部の間で高く、噴霧中心部および噴霧外周部で低いという不均一構造が存在する。
2. 噴霧中心部では分散モデルによる数密度と計測された数密度が一致することから、分裂後の液滴が分裂前の大きな液滴の位置から大きく移動しないまま噴霧幅の増加および速度の減速に従って分散したものと理解できる。
3. 噴射圧が高い場合の噴霧中心部では液滴サイズが大きく、液滴速度の減少率が高いため液滴が密集し、液滴の分裂が生じにくいものと理解される。
4. 噴霧外周部および噴射圧が低く針弁が動き続ける条件の噴霧中心部では液滴サイズが小さく、液滴サイズと速度乱れの間には負の相関が現れた。噴孔内部の乱れが大きいものほど小さな液滴に分裂したものと考えられる。

第6章は本論文の総括である。

# Study on Heterogeneous Structure of Unsteady Diesel Spray by Using L2F

Graduate School of Engineering, Nagasaki University  
Noritsune Kawaharada

The utilization of bio-fuels in heat engines is promoted for building a sustainable society. Diesel engine, which is one of internal combustion engines, has a high thermal efficiency. However, particulate matter (PM) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) are contained in a discharge gas. Diesel combustion occurs after air/fuel mixture formation process which begins with fuel injection followed by spray formation, atomization, and vaporization. Therefore, spatial and temporal control of fuel spray injection is important for reducing the exhaust emissions and for achieving further improvement of the thermal efficiency of diesel engine. It is needed to know heterogeneous unsteady diesel spray near the nozzle exit, which dominates the behavior of whole spray, for realization of appropriate control. Research works on the spray characteristics have been conducted by many other researchers. However, there are a few knowledge about a relationship between an injection condition and a structure inside diesel fuel spray due to high number density and high velocity droplets near the nozzle exit. The spray model based on the measurement results at the further downstream from the nozzle exit was proposed by various researchers. It has not been able to confirm the validity of these spray models.

In this study, a laser 2-focus velocimeter (L2F) was developed for the measurement of diesel fuel sprays where the droplets exist in high number density and high velocity. The L2F having micro-scale probe volume was used to the spray measurement of the heterogeneous structure near the nozzle exit in unsteady diesel spray. In addition, a method of modeling the dispersion of the spray droplets was proposed. After confirming the validity of the spray model by comparing with the measurement results of L2F, the spray dispersion was discussed.

This thesis comprises six sections. The first section is the background and a literature review about measurement of diesel sprays. The systems of L2F and phase doppler anemometry(PDA) were explained in the second section.

A new spray model based on dispersion of droplets near the nozzle exit was proposed for evaluating the number density of droplets in the diesel spray in the third section. The correlation between the droplet size and the distance between droplets was investigated in connection with the model. There was a positive correlation between the droplet size and

the distance. In other words, small droplets after the breakup were not mixed with surrounding large droplets and were not significantly moved from the position before the breakup. In order to understand the structure of unsteady diesel spray, the time variation of the velocity, size, and number density of droplets were investigated in the fourth section. In addition, the vortex structure in the spray periphery region was discussed by using the results of PDA. Conclusions in this section are summarized below,

1. The effect of time variation of needle lift and injection rate on spray behavior were strongly appeared in the spray center region.
2. It is found that there was a vortex structure composed of radially inward movement and radially outward movement of droplets in the spray periphery region.
3. The size of droplets with radially inward velocity components was relatively smaller than that with radially outward velocity components. These smaller droplets were moved together with the surrounding entrained air. And their directions of flight were changed to the spray axis.
4. It is considered that the effect of needle valve and injection rate on droplet velocity hardly appeared in spray periphery region because of the vortex structure mentioned in conclusion 2 and conclusion 3.

In the fifth section, the dispersion and breakup characteristics were investigated by using proposed droplet dispersion model. Conclusions in this section are summarized below,

5. The number density of droplet was highest at the position between spray center and periphery region.
6. It is understood that the spray droplets were dispersed with the decrease in the spray velocity and the extend in spray width in the spray center region.
7. The droplet size in the spray center region was larger at the higher injection pressure condition. It is understood that the breakup of droplets were suppressed because of the higher concentration by the higher decreasing rate of droplet velocity.
8. A negative correlation appeared between droplet size and turbulence of droplet velocity in the spray periphery region. It is considered that the large turbulence in injector nozzle enhances the breakup of droplets.

The results in this thesis are summarized in the sixth section.