

# 学 位 論 文 の 要 旨

ガソリン直噴エンジン用インジェクタの噴霧の質向上に向けた粒径予測手法に関する研究  
(A droplet size prediction methodology for atomization improvement of injectors  
for direct injection gasoline engines)

氏 名 安部 元幸 印

燃費と出力に優れるガソリン直噴エンジンに用いる燃料噴射弁（インジェクタ）において、エンジンの性能の向上に資する噴霧の質への寄与が大きい性能指標である噴霧の粒径予測手法を多孔ノズル向けに検討し、工学的に粒径分布を予測しうる方法論の仮説を実験とシミュレーションとによってその妥当性を示した。

本研究の目的は、多孔式ノズルを用いる直噴ガソリンエンジン用インジェクタとしての工業的な成立性を担保しながら、その中心的な性能指標の一つである微粒化性能の事前設計を可能にし、そのための予測手法の妥当性を示すことである。この妥当性の確認のために、過渡的に排出される粗大液滴の防止機構を採用したインジェクタを用い、平均流速と平均粒径との間の相関関係を調査し、ノズルの幾何学的設計パラメータと粒径との関係とを明らかにした上で、粒径分布予測の検討に用いるインジェクタの諸元を決定して、数値流体解析（CFD）による流速分布と計測による粒径分布とを対応付けるマスターカーブの存在を仮定し、これを実証した。

過渡的な粗大液滴排出の防止に対しては、インジェクタ内部の弁体の閉弁時のバウンド挙動を抑制する駆動機構を組み込んだ。この駆動機構は、通常の電磁弁では一体となっている可動子と弁体とを分離したことが特徴である。可動子に作用する磁気吸引力は、開弁時には弁体に伝達されて弁を開状態に引き上げるが、閉弁時には停止した弁体と可動子とがバネマス系を形成することなく相対運動を行い、弁体は支持スプリングによって閉状態を維持する機構である。通常の電磁弁では可動子と弁体とで形成するバネマス系によって細い弁体が縮み、反発することでバウンド挙動が起こるが、本研究で開発した機構ではこれを防止できる。本研究では、このバウンド防止機構を組み込んだインジェクタを製作し、過渡的な粗大液滴の排出を抑止できていることを実験的に確認した。

平均流速と平均粒径との間の相関関係の調査は、ノズルの噴射孔径と弁体のストローク量とが大きく異なる8種類のインジェクタを試作し、粒径および流速を測定して行った。試験には模擬燃料として LAWS を用い、粒径のレーザー回折法によって測定した。また、流速については、容積式の流量計によって計測される流量値を噴射孔の断面積で除して平均流速とした。このように測定された粒径および流速値を用いて、ガソリン直噴エンジン

に用いる多孔式ノズルに関する測定を行った本研究においては、粒径が平均流速の指数乗に比例する領域にあることが確認され、その指数は-1.5乗であった。この指数はザウタ平均粒径および90%累積体積粒径の双方に対して同一であり、代表粒径を予測する指数となり得ることが示された。

噴射ノズルの幾何学的設計パラメータが平均粒径に与える影響の検討は、圧力損失の式を噴射孔周辺について立式する理論的アプローチを併用して行った。代表的狭隘部である噴射孔断面積と弁座部分の流体通路面積（シート断面積）とを幾何学的パラメータとして採用して式の整理を行った結果、シート断面積と噴射孔断面積との比（シート面積比）で噴射孔出口流速を表現できることが示され、これを定式化した。この式が実験的にも成立することを、流量の実測値から得た流速とシート面積比との比較によって妥当性があることを示した。この式と、流速－代表粒径間の関係とを用いることによって、代表粒径をシート面積比によって表す式を定式化した。

代表粒径の予測方法を粒径分布の予測法に拡張することの検討は、CFDによって得られる噴孔断面内の流速の体積頻度分布と、レーザー回折法によって測定された粒径の体積頻度分布とを対応付けるマスターカーブが存在するとの仮説を立て、これを実験的に実証することで行った。CFDでは、これまでの検討で粒径に対する影響が大きいことが分かっている噴射孔および弁座周辺をモデル化して計算を行い、噴射孔出口位置の断面の流速分布を算出し、流速の体積ごとの累積頻度分布を算出した。実験ではレーザー回折法によって得られる体積頻度分布から体積ごとの累積頻度分布を算出し、CFDによる結果と対比できるようにした。噴射ノズルとしては、シート面積比が0.75および2.7と大きく異なる2種類のノズルを用い、燃料圧力を5/10MPaの2条件で計算と実験を行った。累積頻度分布の対応付け、横軸に流速を圧力の0.5乗で正規化した値をとり、縦軸に粒径を圧力の指数乗(-0.75乗)で正規化してとったマスターカーブをプロットした。この結果、シート面積比が大きく異なり、圧力が異なる実験・解析データが概ね一つの曲線で示され、すなわち粒径と流速を対応付けるマスターカーブが存在することを示した。

以上の結果を以て、ガソリン直噴インジェクタの噴霧ノズルの代表粒径および粒径分布の予測が可能であることを本研究の結論とした。

# 学 位 論 文 の 要 旨

ガソリン直噴エンジン用インジェクタの噴霧の質向上に向けた粒径予測手法に関する研究  
(A droplet size prediction methodology for atomization improvement of injectors for direct injection gasoline engines)

氏 名 安部 元幸 印

A methodology for droplet size prediction for sprays generated through multi-hole type nozzles which are equipped on direct injection gasoline (DIG) engines has been established. The DIG engines are known as low fuel consumption with high output power ones, in which the droplet size as atomization quality contributes engine performance significantly. The authors proposed a hypothesis of the methodology and concluded that the validity of the hypothesis was confirmed by experiments and simulations.

The purpose of this research is to enable the pre-design of atomization performance, which is one of the core performance indicators, while ensuring the industrial feasibility of injectors for DIG engines using multi-hole nozzles. To confirm the validity of the prediction methodology to realize the pre-design of nozzles, we investigated the correlation between the average flow velocity and the average droplet size using several injectors that adopted a mechanism to prevent ejected coarse droplets by bounce motion of the valve. After clarifying the relationship between the geometric parameters and the droplet size, determine the specifications of the nozzle used to validate the prediction methodology. We assumed the existence of a master curve of relation between velocity distribution and droplet size distribution, finally demonstrated it by associating the flow velocity distribution by CFD with the droplet size distribution by measurement.

To prevent the transient coarse droplet ejection, we developed a new actuation mechanism that suppresses the bouncing behavior of the needle valve inside the injector when the valve is closing. The mechanism is characterized in that its magnetic armature and the valve body, which are integrated in a normal solenoid valve, are separated. The magnetic force acting on the armature is transmitted to the valve body when the valve is opening and pulls the valve to the open state, but when the valve is closing, the stopped needle valve and the armature can move relative to

each other without forming a spring mass system. The needle valve can maintain a closed state without bouncing by a spring. In a normal solenoid valve, a thin needle valve contracts and repels due to the spring mass system formed by the armature and the needle valve, causing bouncing behavior. But the developed mechanism can prevent this. In this study, we manufactured an injector incorporating this anti-bound mechanism and experimentally confirmed that it is possible to suppress the transient coarse droplets ejection.

The investigation of the correlation between the average flow velocity and the average droplet size was carried out by making prototypes of eight injectors with different orifice diameter of the nozzle and different stroke displacement of needle valve, and by measuring the droplet size and the flow velocity. LAWS (Low Aromatic White Spirit) was used as a simulated fuel in the test, and the droplet size was measured by laser diffraction particle analyzer. The averaged flow velocity was calculated the flow rate value measured by the displacement flow meter was divided by the cross-sectional area of the orifice hole. According to the experimental result, which measured the multi-hole nozzles used for DIG engines using the droplet size and flow velocity value measured, the droplet size is in the region proportional to the exponential power of the average flow velocity, in which its index of -1.5. This index was same for both Sauter averaged droplet diameter and 90% cumulative volume droplet size, and it has been shown that it can be an index for predicting the representative droplet size.

The effect of the geometric design parameters of the injection nozzle on the average droplet size was investigated by using a theoretical approach to formulate the pressure drop equation around the orifice hole. As a result of rearranging the equations by adopting two geometric parameters as typical narrow portion, which are the injection hole cross-sectional area and the valve-seat cross-sectional area as flow path. It was shown that the flow velocity at the orifice outlet can be expressed by the ratio between seat and orifice area, and this was formulated. It was shown that this formula is valid experimentally by comparing the flow velocity obtained from the measured flow rate and the sheet area ratio. By using both this formula and the relationship between flow velocity and droplet size, it was confirmed that the average droplet size can be expressed by the seat-orifice area ratio.

The study of predicting droplet size distribution is based on outlet flow velocity distribution (volume-based histogram) in the cross section of the orifice outlet obtained by CFD and the droplet size measured by the laser diffraction method. We proposed a hypothesis that there exists a master curve which associates the droplet diameter

distribution with the outlet velocity, and experimentally demonstrated the master curve. In CFD, the flow velocity distribution of the cross section of the orifice outlet is calculated by modeling around the orifice hole and the valve seat area, which are known to have a large effect on the atomization. Two types of nozzles with seat-orifice area ratios of 0.75 and 2.7 were used as prototype nozzles, both calculated and tested under two conditions of 5/10 MPa of rail-pressure. Correspondence of the cumulative distributions that velocity and droplet size showed the demonstration of the master curve, where the horizontal axis is the value normalized by the 0.5th power of the pressure, and the vertical axis is the droplet size normalized by the exponential power of the pressure (-0.75th power). As a result, it was shown that the experimental / analytical data with different seat-orifice area ratios and different pressures are shown as almost single curve, hence there exists a master curve that associates the particle size with the flow velocity.

According to the results mentioned above, it was concluded in this study that the representative droplet size and droplet size distribution of the spray nozzle of DIG injector can be predicted.