

## 論文内容の要旨

論文題名： 「直噴エンジン用燃料噴射ノズル内流れと噴霧形成メカニズムに関する研究」

氏名： 久保 賢明

燃費低減と排気性能向上を両立する直接噴射式エンジンを実現するためには、キー技術である噴射弁から噴射される噴霧の改善が極めて重要である。この背景のもと、本研究では、ノズル内部流れ解析および噴霧解析技術に関する基盤技術を開発した後、その基盤技術をもちいて、ガソリン直噴エンジンと直噴ディーゼルエンジンのそれぞれの顕在化している以下の課題を解決することを目的とした。

- ①直噴ガソリンエンジン用スワールノズルの噴霧特性とそのメカニズムを明らかにすること。とりわけ本ノズルの特徴である「噴霧のしぼみ現象」のメカニズムを把握し、周囲気体圧力の高い場合においても確実に点火栓近傍に混合気を形成する噴霧を形成可能にするノズルを提案すること。
- ②より微粒化した噴霧を達成するためのノズルを提案すること。
- ③直噴ディーゼルエンジン用マルチホールノズルにおいて、サックレスノズルにおける噴孔間の噴霧ばらつきメカニズムを解明すること。
- ④上記メカニズムから噴霧ばらつきを低減するノズル形状に関する知見を得ること。

本論文では以上の目的にて行われ、得られた知見を以下に述べる。

上記目的①および②に相当する直噴ガソリンエンジン用スワールインジェクタに関しては、まず、噴霧形成メカニズムを把握することが重要であり、このために必要なノズル設計技術および噴霧予測技術の開発を行った。ノズル設計技術に関しては、ノズル内部流れに対し、VOFモデルを用いた新たな気液2相流を用いた数値解析手法を提案した。また、一方でこの数値計算手法を検証するために重要となる噴孔出口の液膜厚さの測定に対し、新たにPIVを用いたノズル出口における流速測定技術を開発し、これを用いた間接的な液膜厚さの測定技術を提案した。得られた検証結果をもとに従来用いられてきた棚沢らの式の検証を行い、本3次元VOFモデルを用いた方法の妥当性を明らかにした。その結果以下の知見を得た。

(1)ノズル内の流れ場に関し、VOFモデルを用いた気液2相流の3次元流れ解析技術を用いた計算を行い、上記液膜厚さの結果と比較検証した。その結果、計算結果と実験結果は定量的に比較的一致し、実験と計算の両面から得られた液膜厚さの妥当性を確かめることができた。

(2)従来の設計法である棚沢らの式とVOFモデルを用いた3次元流れ解析技術を用いたノズル設計技術を比較し、実験結果と比較検証することにより、相対的に3次元の数値解析を用いた設計手法の方がより高い予測精度であることが明らかとなった。

次に、以上の設計手法を活用して目的の1番目である「噴霧のしぼみ現象」の解明を行うとともに、周囲気体の圧力によってこのしぼみ現象の生じない噴霧について、出口に傾斜面を有するいわゆるテーパ付きノズルを提案した。このメカニズムに関して得られた知見を以下に示す。

(3)テーパ付きノズルはテーパの付いた側に噴霧が偏るとともにテーパの付いた側の背圧下での「噴霧のしぼみ現象」は逆側に比較して小さい。

(4)テーパの角度を大きくしてゆくとその程度は大きくなり、高背圧下でテーパの付いた側の「噴霧のしぼみ現象」を非常に小さくできる。

続いて、目的の2番目であるより微粒化した噴霧を実現するためにスワールノズルとしては燃料噴射圧力の極めて高い条件である20MPaという条件で、その噴霧特性の解析を行った。得られた知見を以下に示す。

(5)燃料噴射圧力を20MPaまで高めることで、噴霧の微粒化は進み、大気圧下においてザウター平均粒径は $10\mu\text{m}$ 以下となる。

(6)燃料噴射圧力を高めることで、微粒化が進むとともに周囲気体に

与える運動量が大きくなり、噴射開始からある時間が経過した後に、周囲気体によって逆に噴霧が運ばれる状態が発生し、このとき噴霧形状は大きく変化する。

さらに、テーパ付きノズルと高燃料噴射圧力の組み合わせによって、以下の知見を得た。

(7)テーパ付きノズルを 20MPa の高燃料噴射圧力で噴射することにより、高背圧下において大気圧下より噴霧角度が大きくなるといった現象が生じることが明らかとなり、これは「噴霧のしぼみ現象」に関する仮説を用いて合理的に説明することが可能である。

次に、前述③、④の目的に対して、直噴ディーゼル用マルチホールノズルのサックレスノズルの噴霧が噴孔間にばらつくメカニズムに関し、ノズル内部流れおよび噴霧に関して、実験的解析手法ならびに数値計算による解析手法の提案を行った。この場合も上述と同様に、メカニズム把握のためには、その前段階としてこうした解析技術の開発が必要であり、本研究ではノズル内部流れに関しては、レイノルズ数を実機に一致させた 20 倍の拡大モデルの実験、およびキャビテーション係数を一致させた 5 倍の拡大モデルの実験を実験的解析手法として新たに開発し、数値計算としてはキャビテーションモデルを用いた計算手法を新たに提案した。

これに関して得られた知見を以下に示す。

(8)新たに提案したキャビテーションモデルを用いた数値計算手法によって得られた噴孔毎の流量ばらつきは、20 倍にて拡大した実験で得られた結果と定性的な傾向が一致した。

(9)本計算手法を用いた計算によるキャビテーションの発生状況は、5 倍モデルを用いたキャビテーションの可視化結果と定性的傾向が比較的良好に一致した。

以上の数値計算手法と実験手法を用いて、サックレスノズルにおける噴霧ばらつき発生メカニズムに関して、以下の知見を得た。

(10)サックレスノズルにおける噴霧の噴孔間ばらつきは、針弁のノズルに対する偏芯により変化するノズル内流れが直接の原因と考えられる。

(11)とりわけ針弁リフト量が小さい場合に、偏芯した噴孔側の両側の噴孔内において強い旋回流が生じ、そのためにそれらの噴孔からはホローコーン状の噴霧が発生するとともに流量が相対的に低下する。

(12)上記(11)の現象は、主としてノズルの開弁時以降低リフト量の条件で発生するが、針弁が過渡的に上昇する過程においては、中間

リフト時にまでその影響は続き、噴霧ばらつきは中間リフトにおいても発生する。

(13)針弁の低リフト量の条件で、上流側から燃料が流れ込むとその流路面積の差から各噴孔に到達する時間に差が生じ、偏芯した方向の噴孔に燃料が到達しないうちに他の噴孔に燃料が導入される。このため偏芯した方向とは逆の方向すなわち更に偏芯する方向に強い力が針弁に働く。これにより針弁が偏芯する可能性は非常に高くなる。ただし、この結論は仮説であり、計算結果に対する検証が今後必要である。

最後に、上記メカニズムを基に噴霧ばらつきを改善する方策について検討した。得られた結果を以下に示す。

(14)偏芯量が小さくなれば噴霧ばらつきは小さくなる。とりわけ  $2.5 \mu\text{m}$  以下では噴霧ばらつきは非常に小さくなる。

(15)偏芯量が  $5 \mu\text{m}$  以下において針弁にかかる力は非常に小さくなる。このため、偏芯量が大きくなる可能性は小さくなると推察される。

(16)溝付きのサックレスノズルを用いることにより針弁にかかる力は非常に小さくなり、上記(6)と同様に偏芯の確率が小さくなり、噴霧ばらつき現象が生じる可能性がさらに小さくなると推察される。

本研究では、直噴ガソリンエンジンならびに直噴ディーゼルエンジンの直噴エンジン用噴射系に関するノズル内流動と噴霧形成に関する数値計算技術ならびに実験的解析技術の開発を行い、その技術を直噴ガソリンエンジン用に対してはスワールノズルに、直噴ディーゼルエンジンに対してはマルチホールノズルにそれぞれ適用し、噴霧形成に関するメカニズム解明を行った。さらに、スワールノズルに関しては、直噴ガソリンエンジンの燃費と排気性能を向上させる可能性のあるノズル形状を提案した。また、マルチホールノズルに関しては噴孔間の噴霧ばらつきメカニズムに関して得られた知見より仮説を立て、この仮説をもとに噴孔間の噴霧ばらつきを抑えるノズル形状に対して指針を提案した。これらの知見によって直噴ガソリンエンジンならびに直噴ディーゼルエンジンの燃費ならびに排気性能が向上できる可能性がある」と期待できる。