

論文の内容の要旨

論文題目：燃料噴射系のモデル化とその応用による小型汎用直噴ディーゼルエンジンの生産性向上に関する研究

氏 名：山西 学

1. はじめに

熱効率が他の内燃機関と比べて最も高いディーゼルエンジンの開発・生産において、排出される有害物質および燃料消費の低減などの課題解決のためには、燃料噴射技術が重要な対応策のひとつである。75(kW)以下の小型汎用直噴ディーゼルエンジンは、自動車用の場合に比べて多種少量生産であり、生産財としての経済効率が最優先されるため、専用の高価な燃料噴射装置の採用は極めて困難である。

本研究では、このエンジンと燃料噴射系のチューニングを短期間かつ低コストで行うため、複数の型式の燃料噴射系のモデル化とその検証、およびディーゼル噴霧モデルとのリンクを行い、開発および生産の場においてモデル計算の活用の多大な効果を得ることを目的とする。

すなわち、燃料噴射開始に至る過程から燃料の微粒化状況のモデルの連結と計算を実施し、その検証を実際の場で行う。さらに、得られた結果を開発・生産の場に活用する点に、従来の研究には見られない本研究の最大の特徴がある。

2. 燃料噴射系のモデル化

作成したモデル(図1)は、主につぎの特徴をもつ。

- ① 燃料カムリフトまたは噴射管内圧力の実験値を入力値とし、燃料噴射量、燃料噴射率、燃料噴射圧力、燃料噴射速度をはじめとする燃料噴射系内の圧力、流量、バルブリフトの時間経過を計算する。
- ② 各構成要素の組替えにより、構造が異なる燃料噴射系への対応が容易である。
- ③ 燃料噴射特性の計算精度を高めるため、ノズル噴口部に発生するキャビテーションの影響による噴口の流量係数の時間変化(式(1)(2))も考慮している。このため、計算で得られる燃料噴射特性を入力値として、既存のディーゼル噴霧モデルとのリンクが可能である。

$$R_{in} = C_{dhole} \cdot A_{hole} \sqrt{\frac{2(P_{sac} - P_{back})}{\rho_{liquid}}} \quad (1)$$

- ・ R_{inj} は燃料噴射率 (mm^3/ms), Cd_{hole} はキャビテーションを考慮した噴口の流量係数, P_{sac} はサック部圧力 (bar), P_{back} は背圧 (bar), ρ_{liquid} は燃料密度 (kg/m^3).
- ・ Cd_{hole} は次の実験式を適用する.

$$Cd_{hole} = \frac{Cd_{cav}}{0.85} \frac{1}{\frac{1}{Cd_{max}} + \frac{20}{Re} \left[1 + 2.25 \frac{L}{D} \right]} \quad (2)$$

- ・ Cd_{cav} はキャビテーション数を用いて計算される, キャビテーションにより変化する流量係数, Cd_{max} は噴口形状により定まるキャビテーション無しの場合の噴口の流量係数, Re は噴口のレイノルズ数, L は噴口長 (m), D は噴口径 (m).

④ 非常に短時間で計算可能であるため, 生産現場において多大な寄与をする.

3. モデルの検証

エンジンと独立した別の駆動モータを用いる計測システムに加え, デリバリバルブリフトセンサ (図 2) およびポンプ室内圧力センサを本研究用に新しく開発し, 燃料噴射系の初期の圧力上昇場所である燃料噴射ポンプ内部の状態の詳細な情報も得て, 実験と計算結果の比較・評価を行った. その結果, 標準条件 (搭載エンジン定格出力 62.5(kW)) をはじめ (図 3), プランジャ径, スピル溝数, およびデリバリバルブ構造が異なる特殊条件, およびサイズが異なる小型条件 (搭載エンジン定格出力 33.8(kW)) について, 低速から高速高負荷までの広い計測条件において, モデル化にさいして設定した目標精度レベル (燃料噴射量の計算精度 10%, 燃料噴射開始時期の計算精度 0.4(deg.)) の十分な達成が確認された.

すなわち, 噴射管内圧力または燃料カムリフトを入力する極めて簡便な計算方法によって, 最も簡単な計測系を用いる実験による計測精度の範囲で燃料噴射特性が予測可能であり, 実際の場での応用性に富むことが十分認められる.

4. 燃料噴射系モデルと噴霧モデルのリンク

燃料噴射特性の計算結果を入力値とし, ザウタ平均粒径, 噴霧到達距離の計算を行った. 噴霧到達距離の計算結果について実験結果と比較すると, 両者がよく一致することを検証した.

燃料噴射特性と噴霧特性をリンクさせて計算・検証を行い, モデルの活用に結びつけた点は, 本研究の特徴の一つである.

5. モデルの活用

得られたモデル計算結果のなかでは, エンジン性能上要求される燃料噴射量を保つことを前提として, 燃料の微粒化, 二次噴射の有無, 燃料噴射期間, 燃料噴射開始時期, 初期噴射率, および燃料噴射ポンプの耐圧の観点から, 燃料噴射ノズルの噴口径が小, 噴口入口部曲率半径が大, プレリフト・開弁圧力が現設計公差内で小, および燃料噴射ポンプの燃料カムリフト, プランジャ径の組み合わせの最適化が重要である.

モデルの開発・生産の場への活用内容は, つぎのとおりである.

(1) 基本諸元の方角決め

- ① 燃料噴射系の主な諸元を標準値にたいし $\pm 20\%$ 変えた場合, 燃料噴射ポンプのスピルポート径, ノズル噴口径, プランジャの有効ストローク, 燃料カムリフトの影響が燃料噴射量にたいして大きく, \pm 約 40% から 20% の範囲で変化する.
- ② 燃料噴射開始時期については, 燃料噴射管長さ, 燃料カムリフト, ノズル第 1 開弁圧力の影響が大である.

- ③ 燃料噴射期間は、燃料噴射ポンプのスピルポート径、プランジャの有効ストローク、燃料カムリフト量、噴射管内径、ノズル噴口径、ノズル開弁圧力の影響が大きい。
- ④ ノズル噴口径、噴口角度、および噴口入口部の曲率半径をそれぞれ小に変化させた場合、噴射期間中に変化する噴口内のキャビテーションの発生量の増加により有効噴口面積および燃料噴射量が減少し、ノズル噴口部圧力の最大値は増す。とくにノズル噴口径を小にした場合、噴霧のザウタ平均粒径は噴口径の変化率(0.19(mm)から0.16(mm),0.84倍)以上に小(0.79倍)になり、噴霧到達距離はわずかに短くなる(図4)。
- ⑤ モデル計算の応用により、ノズル噴口の機械加工条件と噴口入口部の曲率半径、流量係数、および燃料噴射特性、ディーゼル噴霧特性、エンジン性能が対応づけられる可能性がある。
- ⑥ 主な諸元を組み合わせた計算結果では、二次噴射が発生しない範囲内で、高圧噴射によって微粒化が促進される点において、ノズル噴口径小および燃料カムリフト速度大の組み合わせが優れている。一方、ノズル噴口径小の場合は燃料噴射期間が長くなり、その結果エンジンから排出される排出微粒子が増加する短所がある。この対策として、小噴口径化と同時に噴口入口部の曲率半径を大にすると、噴射期間が短く抑えられる可能性がある(図5)。ノズル噴口径の変化に伴う二次噴射が生じる領域の変化は実験と計算で確かめた。

(2) 部品公差の検討

- ① NOx 生成に寄与度が大きい初期燃料噴射率にたいしては、とくに中速高負荷条件において、ノズルプレリフトと、ノズル第1開弁圧力が設計公差の上下限で変化することの影響が大であり、初期の燃料噴射率を低く抑えるブーツ型噴射を満たし得る。ノズルプレリフトが変化した場合の初期燃料噴射率の変化は、実験結果と計算結果とでよく一致する(図6)。
- ② 同一エンジンを用いた実験で、ピストン上死点位置を設計公差上下限に変えた場合と、ノズルプレリフトおよびノズル第1開弁圧力を設計公差上下限に変化させた場合のNOx+HCの変化量を比較すると、後者は前者にたいして約5倍の大きい変化になる。この結果と燃料噴射特性の計算結果を関連づけると、燃料噴射系の部品精度が設計公差範囲内で変化した場合のNOx+HCの変化の傾向が予測可能である。
- ③ 生産工程において、モデル計算の活用により燃料噴射特性異常の場合の迅速な原因推定が可能となる。こうした手法は、多くの試作を省略するための有効な手段である。

以上によれば、基本設計時には部品公差に関する情報が容易に得られるのみならず、生産工程において発見される不具合にたいする対処も迅速に実施し得る。

(3) エンジン生産における燃料噴射時期の検査

モデル計算結果および実験結果を応用することにより、センサの寿命が短い従来のニードルリフト計測に代えて、長期間計測精度が十分に安定して得られやすい噴射管内圧力を、生産ライン上での動的噴射開始時期の代用値とした。これにより生産ライン上での燃料噴射開始時期の高精度かつ効率的な検査方法を確立した。

従って、生産ラインにおける省力化が極めて容易になる。

(4) モデル活用による全体の効果

パソコンレベルの計算によって燃料噴射系の諸元を絞り込んだ後に試作実験を行うため、試作品の種類が半減し、一種類当りの繰り返し用試作数も半減可能である。このため、試作期間がほぼ半減し、試作コストは約4分の1に削減できる可能性がある。

6. おわりに

とくに、多品種少量生産である対象エンジンにおいては、これらモデルは、今後世界的に一層厳しさを増す排出ガス規制に対応するための有力な手段となり得る。

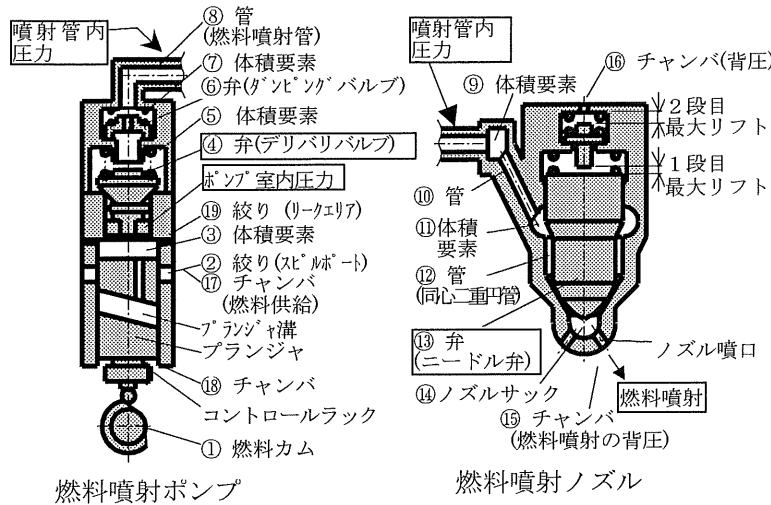


図1 燃料噴射系のモデル (□内は計測点)

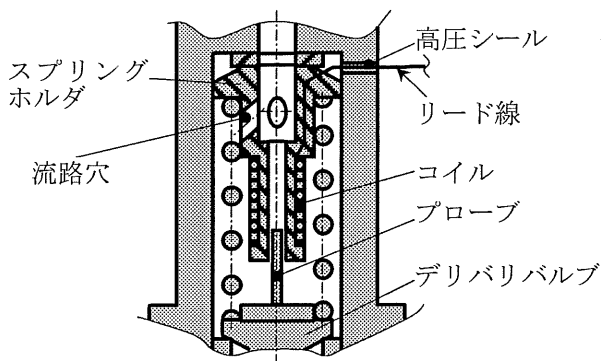


図2 デリバリバルブリフトセンサ

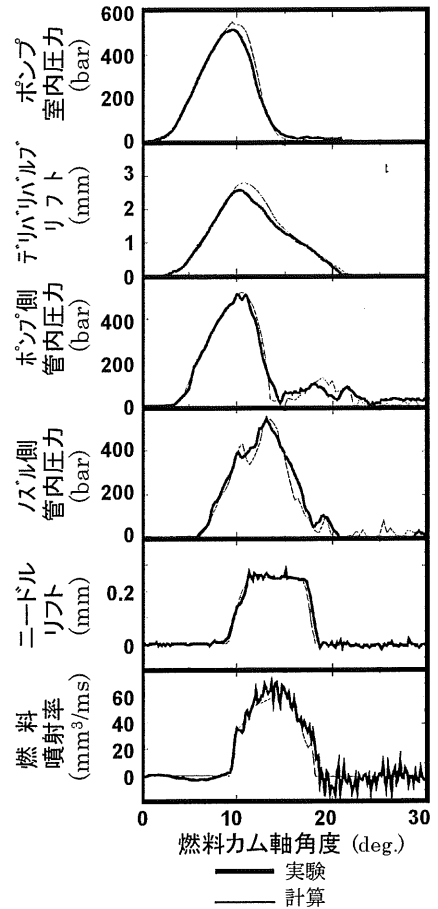
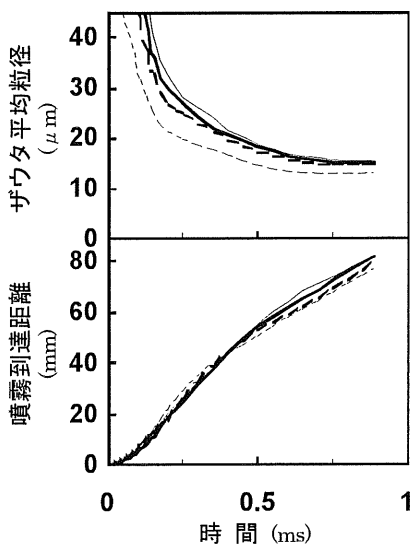
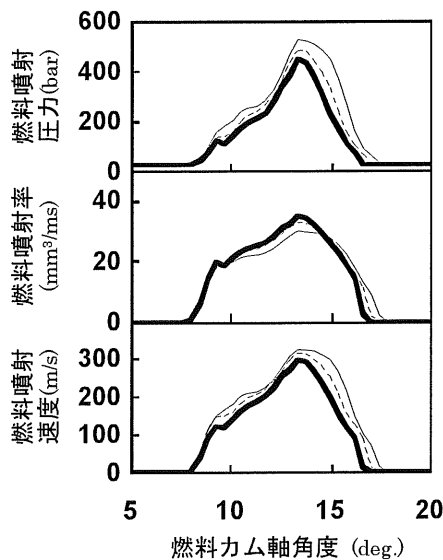


図3 燃料噴射特性の実験と計算の比較



	噴口角度 (deg.)	噴口径 D(mm)	噴入口 r/D
—	67.8	0.19	0.4
—	94.7	0.19	0.4
----	67.8	0.16	0.4
.....	67.8	0.19	0.0

図4 平均噴霧粒径と噴霧到達距離の計算結果



	噴口径 D(mm)	噴入口 r/D
—	0.20	0.0
—	0.18	0.0
----	0.18	1.0

図5 ノズル噴口形状を変更した場合の燃料噴射特性の計算結果

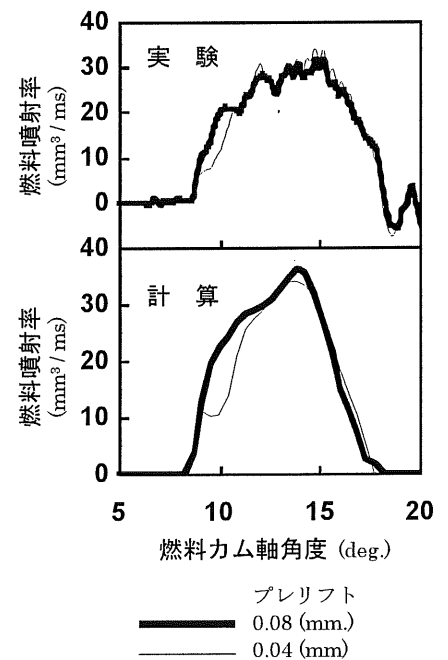


図6 ノズルプレリフトを変更した場合の燃料噴射率の実験と計算結果の比較