コモンレールシステム用インジェクタにおける高圧燃料噴射機構に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/45357

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学位論文要旨

コモンレールシステム用インジェクタにおける高圧燃料噴射機構に関する研究

専攻名　　：システム創成科学

講座名　　：先進自動車工学

学籍番号　　：*1223122014*

氏名　　：松本　修一

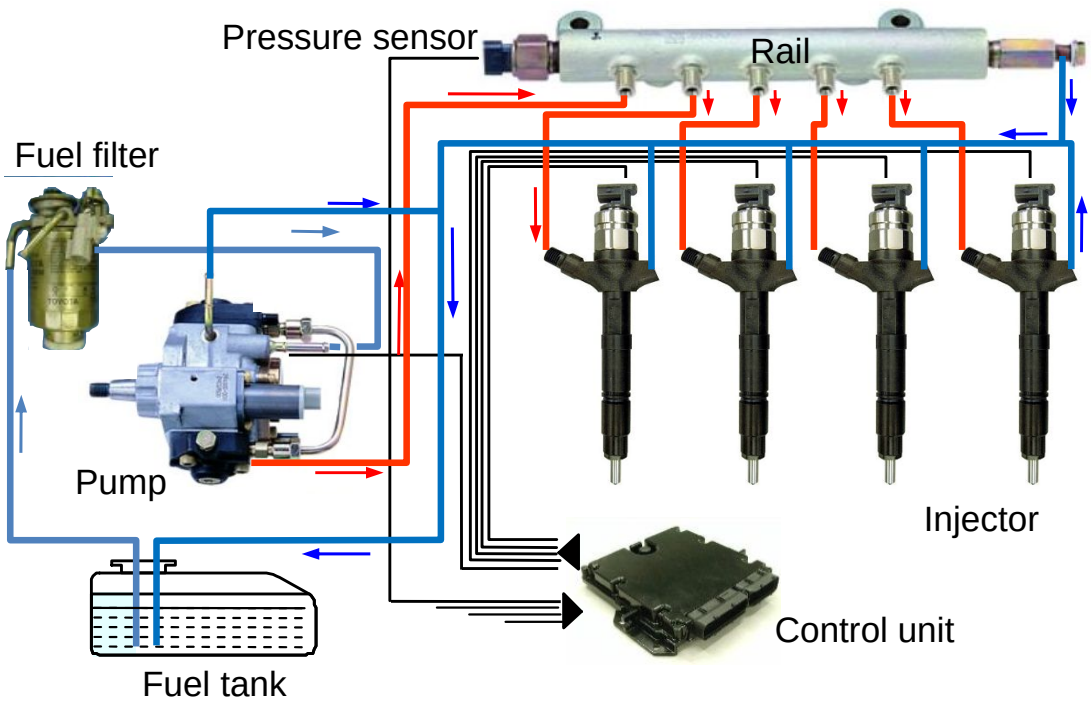
1. ディーゼルエンジンへの期待

近年の急激な地球環境悪化に対して、種々の地球温暖化対策が進められている。このような中、ディーゼルエンジンは燃費が良く、二酸化炭素の排出量が少ないため、地球温暖化防止に貢献する内燃機関として注目されている。*1995*年にはディーゼルエンジンの性能を大きく左右する重要な部品である燃料噴射装置としてコモンレールシステムが開発され、幾多の改良が進められることにより、ディーゼルエンジンの性能向上に貢献している。先進国のみならず新興国でも、噴射装置におけるコモンレールシステム比率は増加しつつある。年々厳しくなる排出ガス規制、燃費規制に伴い、燃料噴射の更なる高圧化･高機能化のニーズがあり、コモンレールシステムもディーゼルエンジンの期待に応えて進化している。また、ディーゼルエンジンと相性の良いターボ技術の進歩、排ガス後処理技術の進歩など、ディーゼルエンジンの性能向上に貢献する技術開発も確実に進んでおり、ディーゼルエンジンへの期待は高まっている。

2. ディーゼルエンジン用燃料噴射装置の役割

ディーゼルエンジンでは、燃料を燃焼室内へ噴射し、空気と混合した上で自己着火させる必要がある。その性能を最大限に発揮させ、安定的に運転するためには、噴射量、噴射時期を適正にコントロールする必要があると共に、適切な噴霧を形成する必要がある。つまり燃焼室内空間に、微粒化した燃料分布を時間軸も含めて最適に配置することが求められる。最適な分布はエンジンの運転状態によっても異なるため、運転状態に応じて形成される噴霧状態を変える必要がある。燃焼室内での液体燃料の微粒化は、噴射圧力エネルギーを運動エネルギーに変換することにより実現される。通常燃料噴射装置は、燃料を昇圧するためのポンプ、燃料を燃焼室内に噴射するためのノズル、これらを接続する噴射管から構成される。この基本構成は、ディーゼルエンジンが開発されて以来現在も変わっていない。しかし、*1995*年に開発されたコモンレールシステム（*Fig.1*に示す）と呼ぶ噴射装置では、ポンプとノズルをつなぐ噴射管の途中にレールと呼ぶ容器を追加配置するようになったこと、ノズルに噴射をコントロールするためのアクチュエータが追加されインジェクタと呼ばれるようになったことが大きな変化点である。

現在コモンレールシステムはますます厳しくなる排ガス、燃費等への要求にこたえるために、特に排ガス規制の厳しい地域、車種において主流になりつつある。そして市場からの更なるニーズに対応するために、コモンレールシステムの1つの構成要素であるインジェクタへの要求項目は非常に多い。



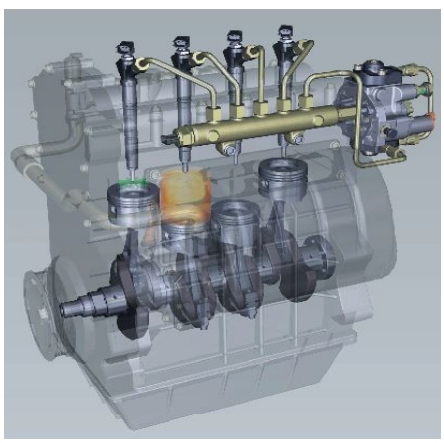


Fig.1 Common rail system

エンジン燃焼、つまり噴霧形成の観点からは、噴射の高圧化及びノズルニードル作動の高応答化が要求となる。これに加えて、世界中の様々な環境で継続的に使用されることを考慮した燃料ロバスト性向上、車両の燃費改善にためのエネルギーロス低減、*ISS*（*Idle Stop and Start*）への対応、エンジン搭載性向上のための小型化なども同様に重要である。*ISS*対応で求められることは、エンジン再始動時の始動性確保である。このためにはエンジン停止中の燃料圧力維持が必要である。これらインジェクタへの要求を改めてまとめると、高圧化、高応答化、燃料ロバスト性向上、エネルギーロス低減の4つに大別できる。

本研究では、成果を普及させることを考え、一般的に広く普及している「*1*個の*ON-OFF*ソレノイドアクチュエータ」を用いたコモンレールシステム用インジェクタを対象とした。

3. コモンレール用インジェクタの構造と作動、及び特徴

インジェクタの基本構造と作動について、*Fig.2*を用いて説明する。この構造では、インジェクタ外部から制御される*ON-OFF*制御弁の開閉により、制御室の圧力をコントロールし、ノズルニードル及びノズルニードルと当接し一体となって作動する制御ピストン上下の燃料圧力バランスを利用してノズルニードル及び制御ピストンを作動させている。コモンレールシステムでは、高圧燃料はポンプからレールを介して常時インジェクタまで供給されている。インジェクタにてノズルニードルを開閉することにより、高圧燃料の噴射を制御することとなる。噴射を開始するためには、ソレノイドに通電し制御弁を開弁することにより*OUT*オリフィスを通して制御室の燃料を排出する。この排出燃料を以降「動リーク」と呼ぶ。その結果、制御室圧力は低下し、ノズルニードルをノズルシート部に押し付ける力が低下する。制御室圧力がノズルニードルを押し下げる力が、ノズル室圧力がノズルニードルを押し上げる力より小さくなったときに、ノズルニードルが開弁し噴射が開始する。ソレノイドの通電を終了すると制御弁は閉弁し、制御室からの燃料の排出は停止する。その後も*IN*オリフィスより燃料が制御室に流入して制御室圧力は上昇し、ノズルニードルを押し下げる力が増加することによりノズルニードルがノズルシートを閉弁する方向に動き出す。その結果、最終的にノズルシートが閉弁し噴射が終了する。

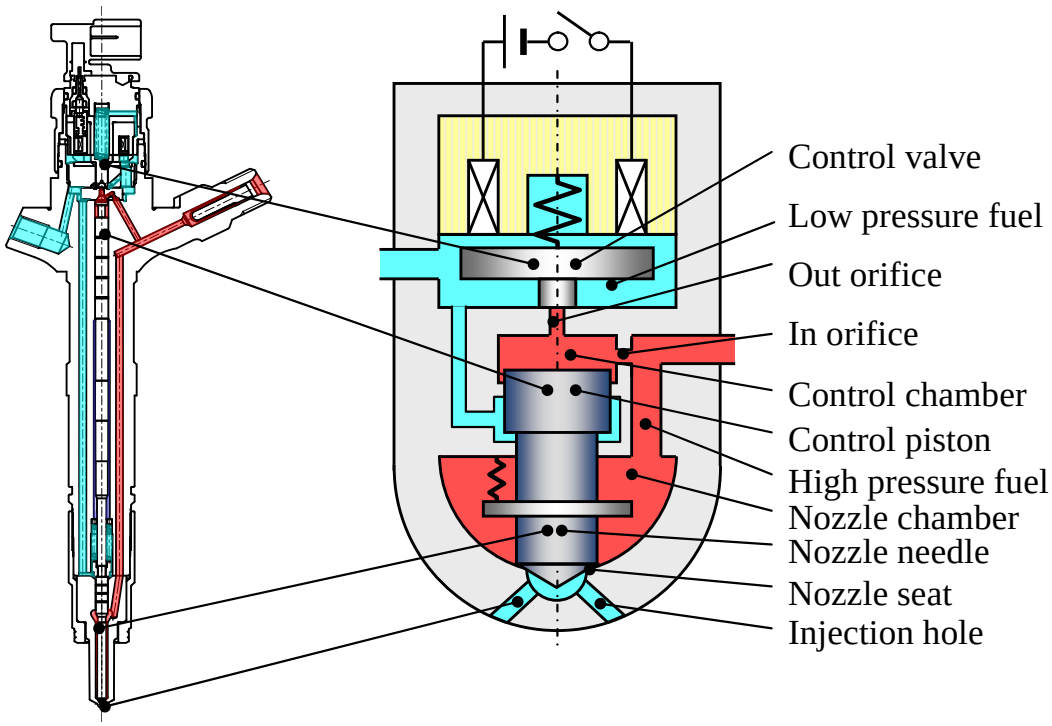


Fig.2 Schematic diagram of Injector

インジェクタの構造比較を*Fig.3*に示す。原理的には、中央に記載している「直接駆動」の構造が最もシンプルな構造であり、噴射圧力が低いガソリンポート噴射用インジェクタはこの構造が一般的に用いられている。しかし、高圧燃料を取り扱う必要があるディーゼルエンジン用インジェクタにおいては、インジェクタ体格内に収容できるサイズのソレノイドアクチュエータでは駆動力が不足しているため、制御室の油圧を介してノズルニードルの開閉をコントロールする構造をとっている。また現在普及している左端に記載する「従来構造」では、摺動部クリアランスより常時発生しているリークが2か所存在する。この常時発生しているリークを以降「静リーク」と呼ぶ。また、制御室圧を低下させるために制御弁開弁中は、高圧部から*IN*オリフィスを通って燃料が制御室に流入しており、制御室圧を低下させるために本来必要とされる以上の燃料を制御室から*OUT*オリフィスを通して排出する必要がある。これらの無駄をなくすためには、*Fig.3*右側に記載の「狙う構造案」に示す3*WV*を用いた構造が望ましい。

本研究では、前述したインジェクタへの要求である、高圧化、高応答化、燃料ロバスト性向上、エネルギーロス低減を実現するために、制御弁構造の最適化（3*WV*機能の実現）及び静リークレスを目指すこととした。3*WV*機能の実現により、動リーク低減（エネルギーロス低減）のみならず、制御弁が取り扱うリーク燃料を低減できるため、アクチュエータの駆動力余裕を得ることもできる。

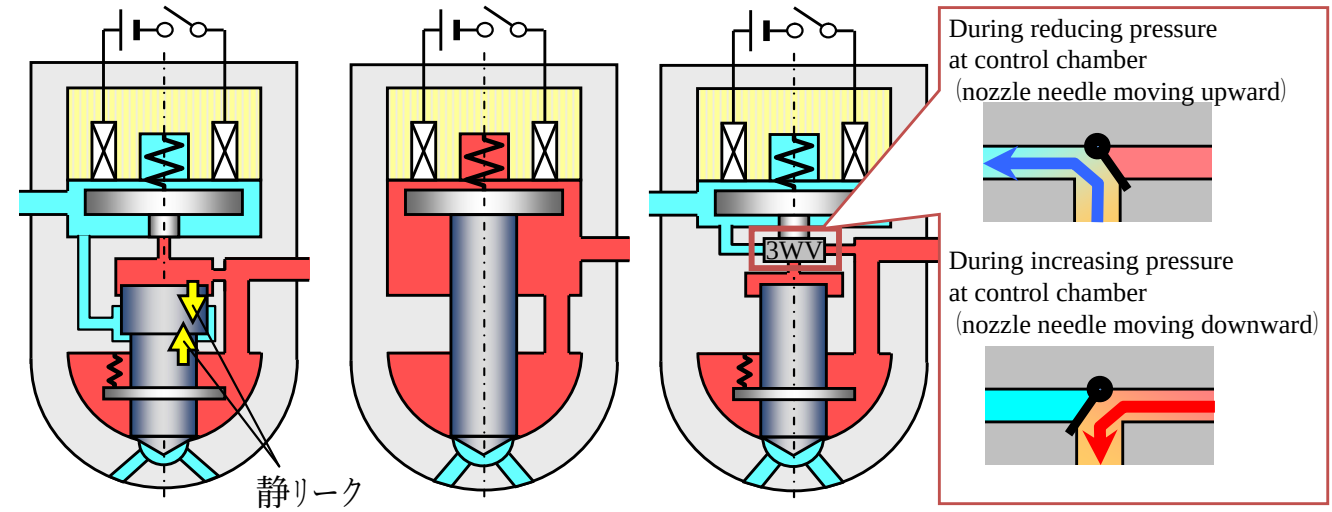


Fig.3　インジェクタ構造比較

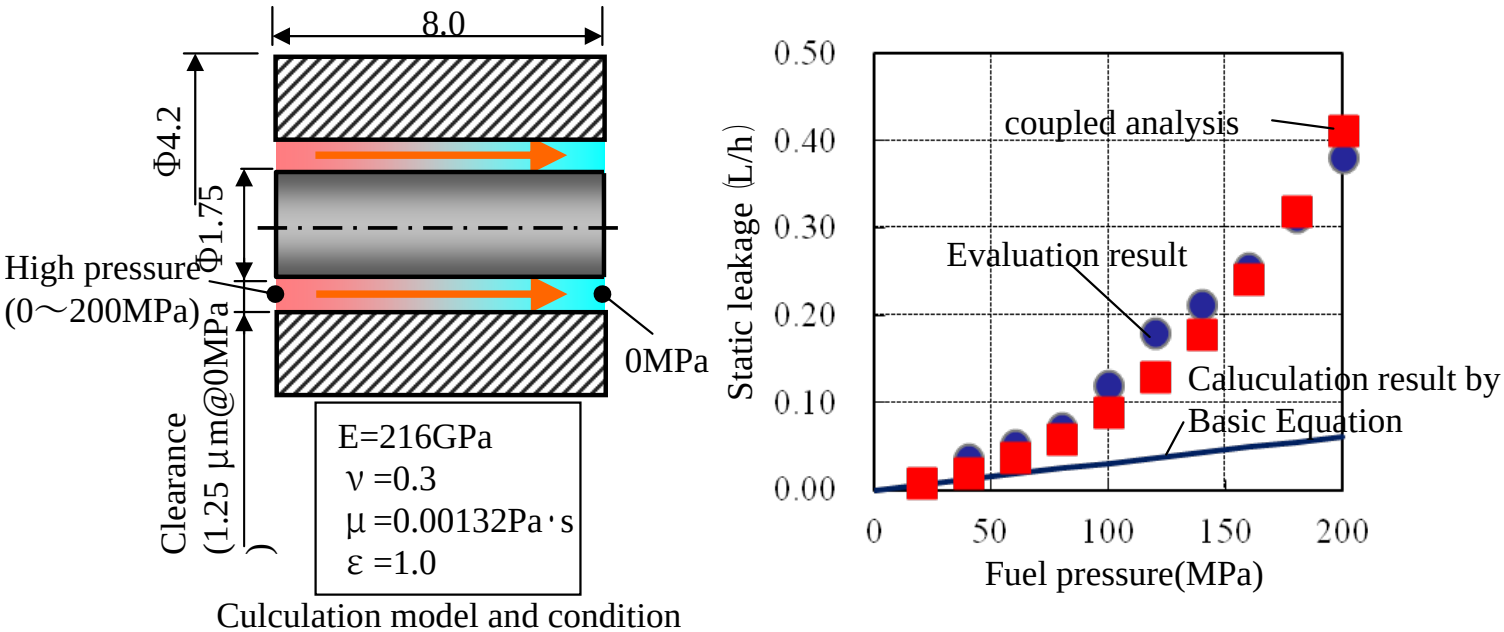


Fig.4　圧力と静リークの関係

また静リークは摺動隙間を常時流れる漏れであり、一般的な基本式では、リーク量は隙間の3乗及び圧力に比例する。しかしコモンレールインジェクタでは*100MPa*以上の圧力が使用されるために、圧力による隙間の増加（部材変形）が無視できない。*Fig.4*に一般的な基本式で計算した結果、圧力による隙間の拡大を考慮した連成計算結果、実測結果を示す。連成計算結果と実測結果はほぼ一致しており、圧力の増加に伴い流量が大幅に増加することがわかる。また、燃料リークにより、燃料の持つ圧力エネルギーが温度エネルギーに変換されるために、燃料温度が上昇する。燃料温度の上昇が燃料劣化をもたらすことは知られており、これらの観点からも、高圧化のために静リークを無くすことは必須とであると考える。

4．3*WV*機能の実現

3*WV*機能を実現する、つまりアクチュエータの*ON-OFF*により制御室を高圧部か低圧部のいずれかに連通させるためには、アクチュエータの*ON-OFF*により、弁体を2つシートのいずれかにシートさせる必要がある。アクチュエータは低圧部に配置する、静リークを発生させる高圧-低圧間の摺動部はもたない、使えるアクチュエータは*1*個で*ON-OFF*制御するもの、という前提の範囲内で検討すると基本構造として、*Fig.5*に示す構造に収束する。これま量産化されてきたコモンレールインジェクタ用3*WV*も*Fig.5*に示す構造を採用している（駆動力が大きいピエゾアクチュエータを用いたインジェクタで採用されている）。この構造において最も設計が難しいのは、シート配置、流路確保、駆動部配置と多くの機能が集中する低圧側シート部周りである。*Fig.5*に示すように、シート径、孔径、ピン径の関係は、確実に「シート径＞孔径＞ピン径」である必要がある。現実的な条件で計算した場合、油圧負荷を駆動部ピンの座屈限界以下とするためには、ピン径が*φ0.37*以上必要となる。結果を*Fig.6*に示す。シート径が最小とできるこの場合でも油圧負荷は、計算上*116N*となり、インジェクタ体格に収容できるソレノイドで発生できる最大駆動力（約*80N*）を超えている。したがって、低圧部に配置した*ON-OFF*制御するソレノイドアクチュエータ1個で静リークレス3*WV*を実現するためには、従来構造の延長上では答えが見当たらず、全く新しい発想で検討する必要がある。

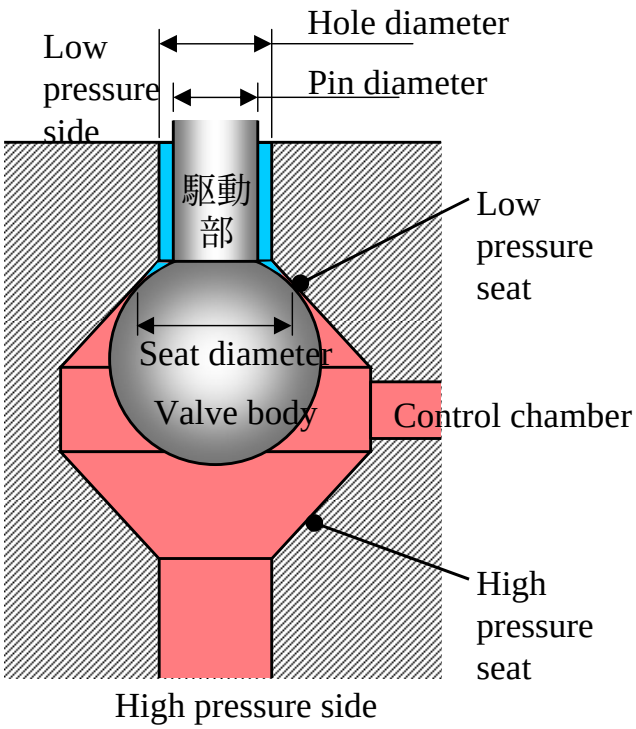


Fig.5　3way valve structure

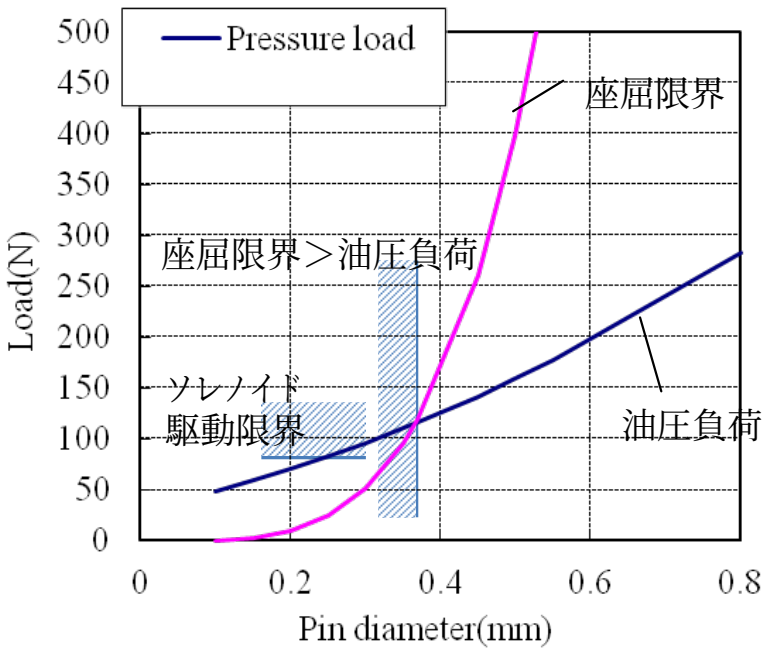


Fig.6　駆動ピン径と負荷の関係

そのため新しい発想で考えることとした。ここまでの検討から3*WV*の駆動は不可能であり、2*WV*駆動しかできない。一方理想を実現するためには3*WV*が必要である。3*WV*は必要機能から考えると2つのシートを同じタイミングで開閉（一方を開き、一方を閉じる）できればよいということである。前記制約から考えると、アクチュエータでは直接1つのシートを開閉し、もう一方のシートをなんらかの方法で連動させることで実現できないかと考えた。この発想に立って再度現状の制御弁構造を見ると、*Fig.7*に示すように、本来圧力を制御したい制御室以外にも、制御弁の開閉に伴って圧力が変化する部位があることがわかる。それは*OUT*オリフィスと制御弁シートの間である。この部位は、制御弁閉弁中は高圧であるが、開弁することにより低圧に変化する。また制御弁を閉弁することにより、ノズルニードル閉弁作動中は制御室と同じ中圧となり、ノズルニードルが閉弁後は再度高圧に戻る。この圧力変化を利用して、アクチュエータで直接駆動できない弁体を連動させることを検討した。

以下、*Fig.2*に示す現状の制御弁（2*WV*）及び制御室の模式構造を基本として検討内容を*Fig.8*を用いて説明する。①に制御弁が駆動していない状態を示す。この状態は噴射していない状態であり、燃料の流れは存在しない。噴射するためには、②に示すように制御弁を開くが、ここで理想と異なるのは、高圧部から*IN*オリフィスを通って燃料が制御室に流れ込んでくることである。これを防止するためには、高圧部から制御室へ連通する通路を塞ぐ必要がある。通路を塞ぐためには③に示すように、通路を塞ぐ部材（以下、プレートと記載する）が必要である。しかしプレートを配置するだけでは機能せず、高圧側圧力と制御室圧力の差に対抗する力、例えば③に記載しているスプリング力が必要となる。一方、噴射終了のために制御弁を閉弁し高圧部から制御室へ燃料を導入するときにはこのプレートを開く必要がある。しかし③に示すように固定スプリングを設置すると、高圧側から制御室への通路は閉じられたまま開くことはない。ここで先述した*OUT*オリフィスと制御弁シート間の変化する圧力を利用することとした。制御弁開弁時には、この部位の圧力は低圧となるため、制御室の中圧とこの低圧の圧力差を利用して、高圧と制御室の圧力差によるプレートを開ける力に打ち勝ち、プレートを閉弁維持するのである。このために、④に示すように、まず*OUT*オリフィスをプレートに移動し、プレートの下流側が低圧になるようにした。さらにこの低圧部の面積を広げることにより、プレートに作用する、高圧、中圧、低圧のバランスを取り、制御弁開弁時に、プレートが閉弁維持できるようにした。この場合、制御室内のスプリングはプレート閉弁維持のための機能は不要となり、単にプレートを閉弁側に付勢させるだけの力があればよい。この状態から制御弁が閉じると、⑤⑥に示すように*OUT*オリフィスと制御弁シート間圧力は上昇し、制御室と同じ中圧となる。その結果プレートを閉弁方向に付勢する力がなくなるため、プレートは高圧部からの圧力で開弁し、高圧部から制御室への燃料流入が可能となる。以上にように、2*WV*である制御弁開閉により低圧側シートを直接開閉しつつ、この開閉に伴う*OUT*オリフィスと制御弁シート間の圧力変化を利用し、もう一方の高圧側シート開閉を連動させる構造案を見出した。この構造はアクチュエータで直接駆動するのは2*WV*であるが、全体として3*WV*の機能を備えており、実質的にはソレノイドアクチュエータにより圧力バランス弁を使わず3*WV*を実現できることになる。

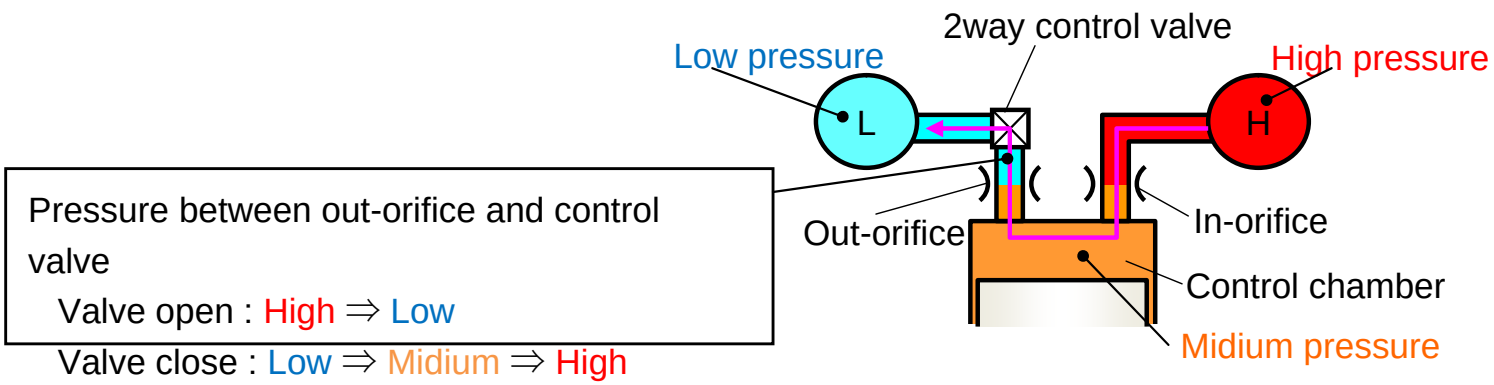
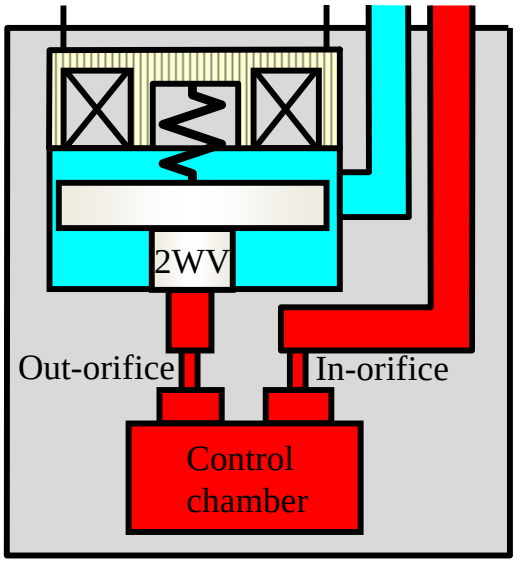
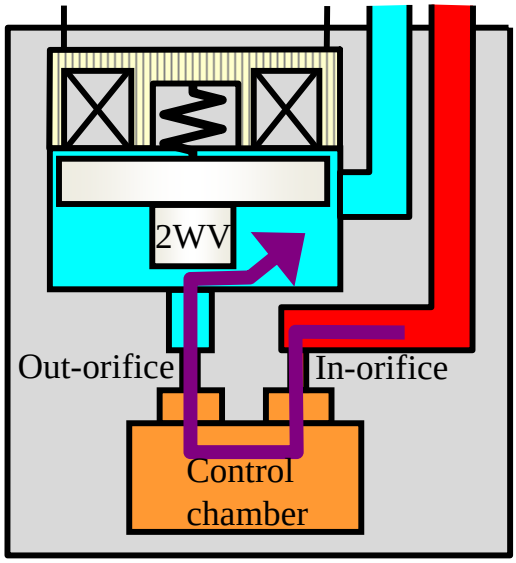


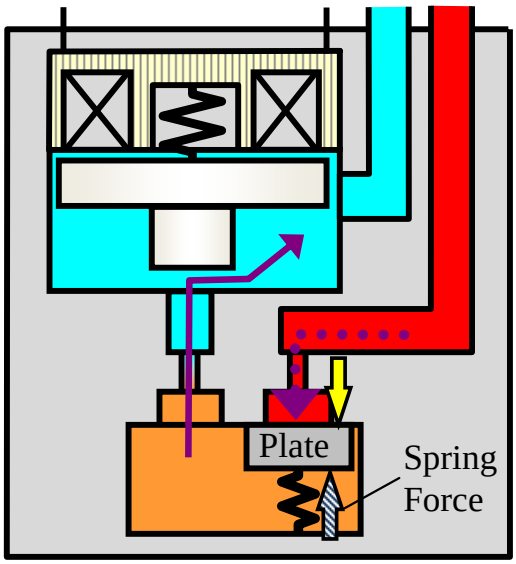
Fig.7 Pressure change around conventional 2way valve



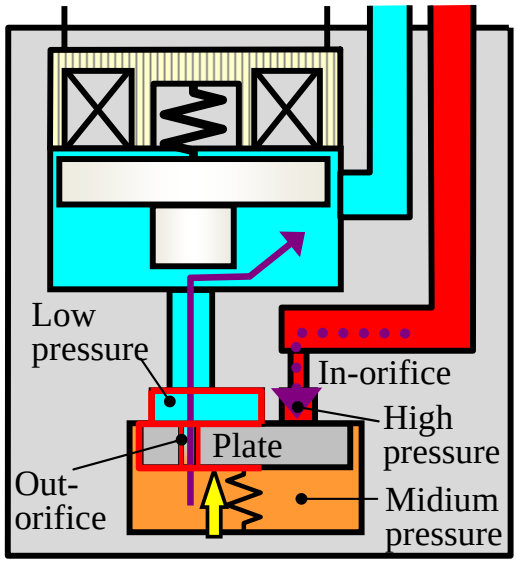
①Conventional 2WV(Valve close)



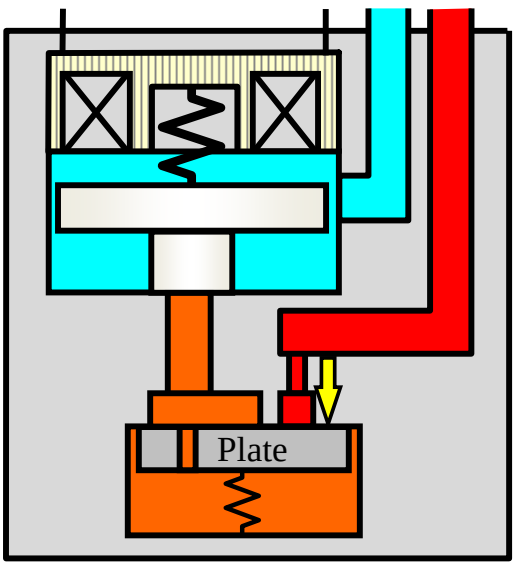
②Conventional 2WV(Valve open)



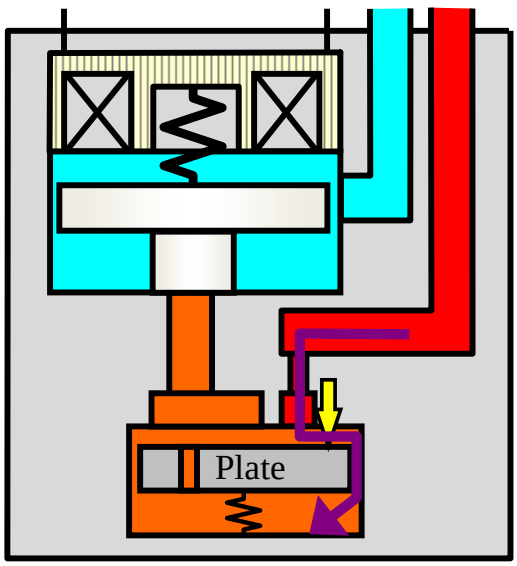
③Under consideration



④New concept structure(Valve open)



⑤New concept structure
(Just after valve close)



⑥New concept structure
(Valve close,Plate open)

Fig.8 Idea of new concept control valve

5．3WV機能を活かしたインジェクタ設計検討

ここでは3WV機能実現のメリットを活かし、インジェクタ全体の静リークレス化、250MPaまでの高圧化、ソレノイドアクチュエータ及び制御弁のインジェクタボデー内への配置（＝ノズルニードル直上への配置、Fig.9に示す）の実現を検討する。理由は以下に述べる複数のメリットがあるためである。メリットは、制御ピストン廃止による可動部質量低減による応答性向上、インジェクタ小型化によるエンジンへの搭載性向上、インジェクタ軽量化による車両燃費向上などである。ソレノイドアクチュエータは従来インジェクタ上部に配置していたためφ18の体格が許容されていたが、ボデー内に搭載するためにはφ11まで縮小する必要があり、駆動力も低下する。ソレノイドアクチュエータの駆動力は、体格断面積におよそ比例すると仮定し、ここでは駆動力低下を従来比37%（$=11^2/18^2$）としたが、3WV機能の実現により制御弁が取り扱う燃料を低減できるため、実現可能であると考えた。計算結果をFig.10に示す。最大噴射圧を従来同等の200MPaとした場合には、噴射圧力全域でノズル開閉弁速度を従来以上とすることができた。最大噴射圧力を250MPaまで増加させた場合には200MPaでの開弁速度は従来構造比若干小さくなっているが、最大噴射圧でのノズルニードル開弁速度は従来構造より増加している。よって「性能悪化無く、250MPaの高圧化及びソレノイドアクチュエータのインジェクタボデー内への配置が静リークレスインジェクタにて実現可能」と考えた。尚、ここでの設計計算を行うために、インジェクタ作動に関する基本計算式を本研究において構築し、その計算式を用いて計算を行っている。

6．新しいインジェクタ構造検討

次に量産されることを考慮し、ここまで検証した結果を反映した具体的構造を検討した。概略図及び主要部分の構造をFig.11に示す。Fig.11を見ると従来構造と比較して新規構造では、アクチュエータ、制御弁、制御室をノズル直上のインジェクタボデー内に配置し、また制御ピストンも廃止することにより、非常にコンパクトな構造にできていることがわかる。新規構造ではノズルニードル上部が制御ピストンを介さず直接制御室に面していることにより、よりダイレクトに制御室圧力変化をノズルニードルの作動に伝達できる。制御ピストンがある場合には、制御ピストンの質量による応答遅れ、曲がりや軸方向弾性変形による応答遅れや共振にも配慮した設計が必要であったが、これらも不要となる。

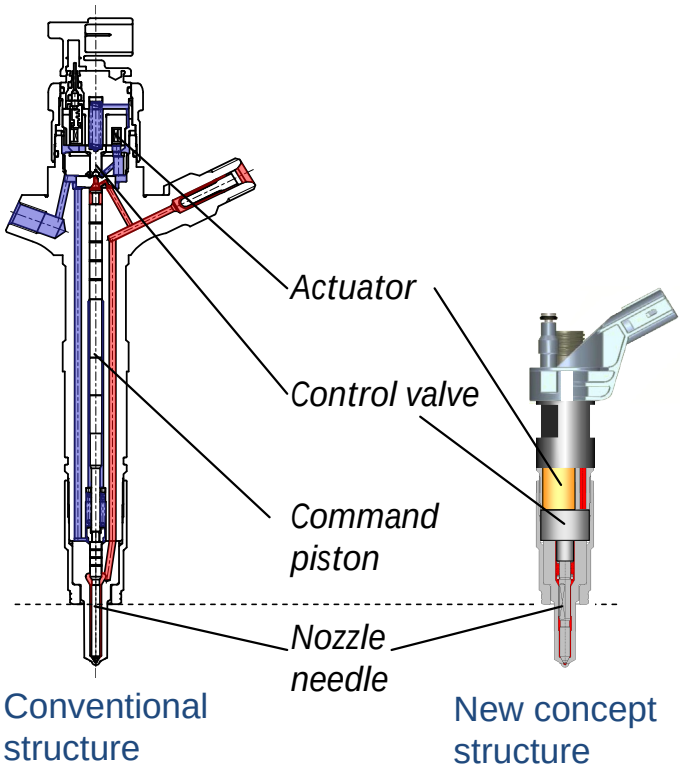


Fig.9　実現したいインジェクタ構造

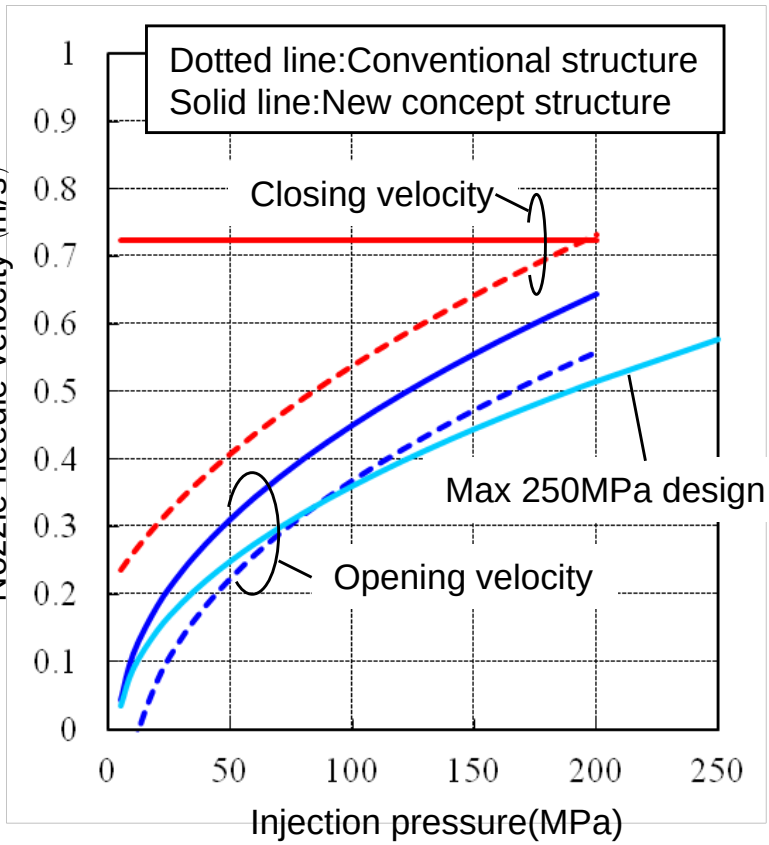


Fig.10　Comparison of Nozzle needle velocity

7. 評価結果

はじめに駆動時間に対する噴射量と噴射安定性（毎回噴射ばらつきの標準偏差）を、従来構造ソレノイドインジェクタ、新規構造ソレノイドインジェクタ、及び参考のためにピエゾインジェクタについて*Fig.12*に示す。ピエゾインジェクタは、従来ソレノイドインジェクタと比較して*10*倍以上の駆動力を持つピエゾアクチュエータ及び制御弁をインジェクタボデー内のノズル直上に配置することにより、従来ソレノイドインジェクタと比較してより安定した高速噴射を実現している。それぞれ3つの噴射圧力について示しているが、新規構造ソレノイドインジェクタのみ最高圧力が*250MPa*となっている。この結果より、新規構造ソレノイドインジェクタでは、*250MPa*という高圧まで噴射を実現していると共に、従来ソレノイドより安定したピエゾインジェクタ同等レベルの噴射が実現できていることが確認できた。

*Fig.13*には2条件のエンジン運転点における燃料リーク特性を示す。リーク量はエンジン*1*サイクル当たりのリーク量を示している。エンジントルク同等ということはインジェクタの噴射圧力及び*1*サイクル当たりの噴射量が同等であることを示す。またエンジン回転数の違いは、噴射から噴射までの間隔の違い、つまり静リークが発生する時間の違いを示している。従って、ここに示すエンジン運転2条件においては、動リークに対しては同一条件であると言える。しかし常時発生している静リークは噴射から噴射までの時間に比例するために、1サイクル当たりの静リーク量で表現するとエンジン低回転ほど増加することになる。それぞれのインジェクタはそれぞれの最大噴射圧力で噴射しており、従来構造は*200MPa*、新規構造は*250MPa*である。しかし新規構造はノズルニードル開弁中に*IN*オリフィスが閉じられているために動リーク量が少なく、動リークは従来構造と比較して約*1/3*以下を実現できていることが確認できた。また、新規構造においては静リークがないため、特にニーズが高まりつつある低速高トルク領域において従来構造とのリーク量の差が顕著になる。この領域のトータルリーク量では、新規構造は従来構造比*1/8*以下を実現できていることを確認できた。

*Fig.14*には、リーク量の経時変化を示す。静リークは、摺動部の隙間流れであり、隙間の*3*乗に比例するため、作動による磨耗等により隙間が増加することにより経時的に増加していく。またわずかなクリアランスの差の影響を受けるため、そのばらつきも大きい。従って従来構造ソレノイドインジェクタでは、経時的にリーク量が増加するとともにそのばらつきも増加する。これに対して、静リークのない新規構造ソレノイドインジェクタ及びピエゾインジェクタでは、経時的にリーク量は安定していることが

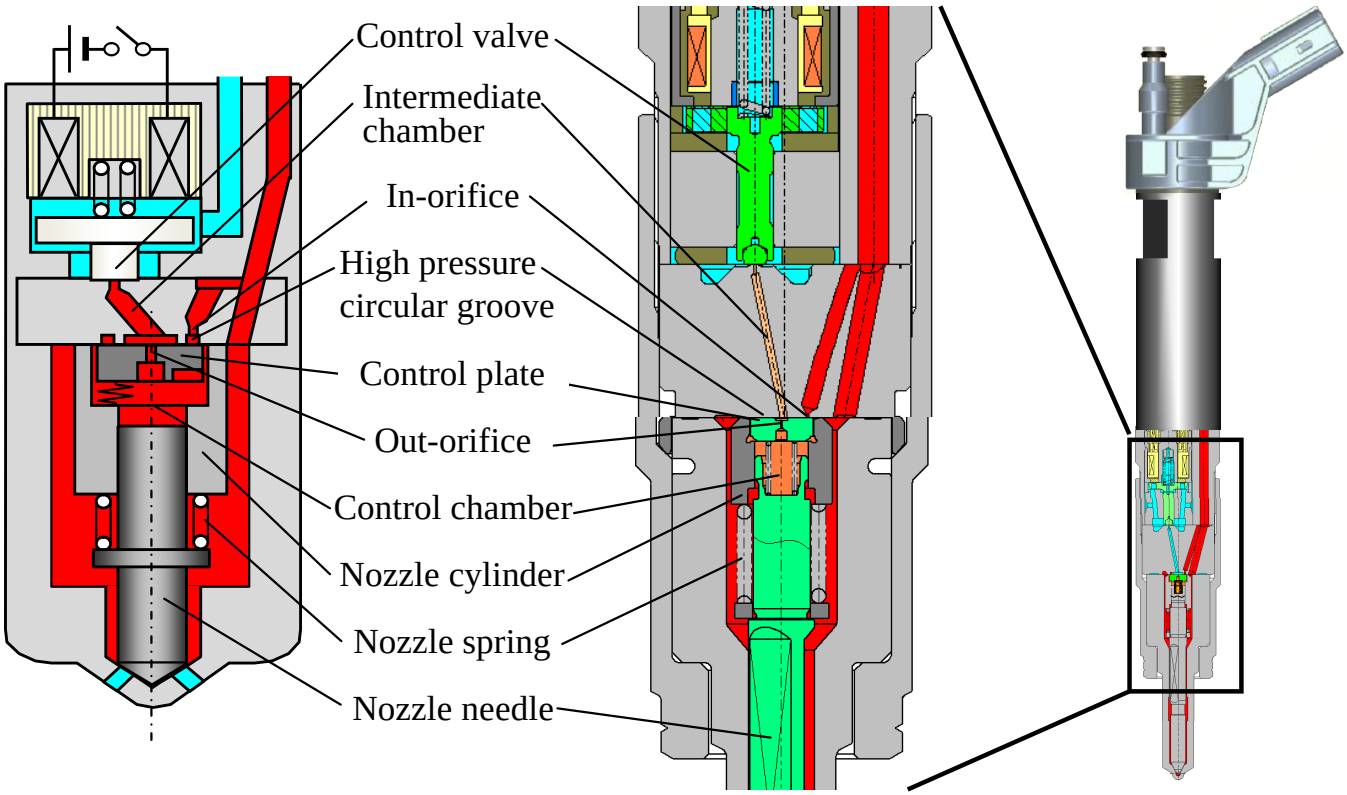


Fig.11　New concept structure

確認できた。このように新規構造ソレノイドインジェクタを使う場合には、リーク量の絶対値が少ないと共にそのばらつきも小さいため、経時劣化まで考慮して決められるポンプへの要求吐出量も少なくできる。従ってポンプ体格を小さくできると共に、ポンプが必要とする駆動トルクも低減できるため、車両としての燃費の向上にも貢献できる。

燃料劣化に関する耐久評価結果を*Fig.15*に示す。耐久評価は使用燃料の全酸化が市場最悪想定値である*0.25mgKOH/g*及びそれを超える*0.30mgKOH/g*となるまで継続し、これらを超えるタイミングで新燃料に交換して継続した。グラフの縦軸は燃料を交換した全酸化の値を示す。いずれにおいても、従来構造では一定時間経過後に燃料デポジットを起因とする摺動不良により噴射量変化が発生しているのに対して、新規構造では*1600*時間まで評価したが問題ないこと、つまり燃料劣化に対してロバスト性が向上できていることが確認できた。

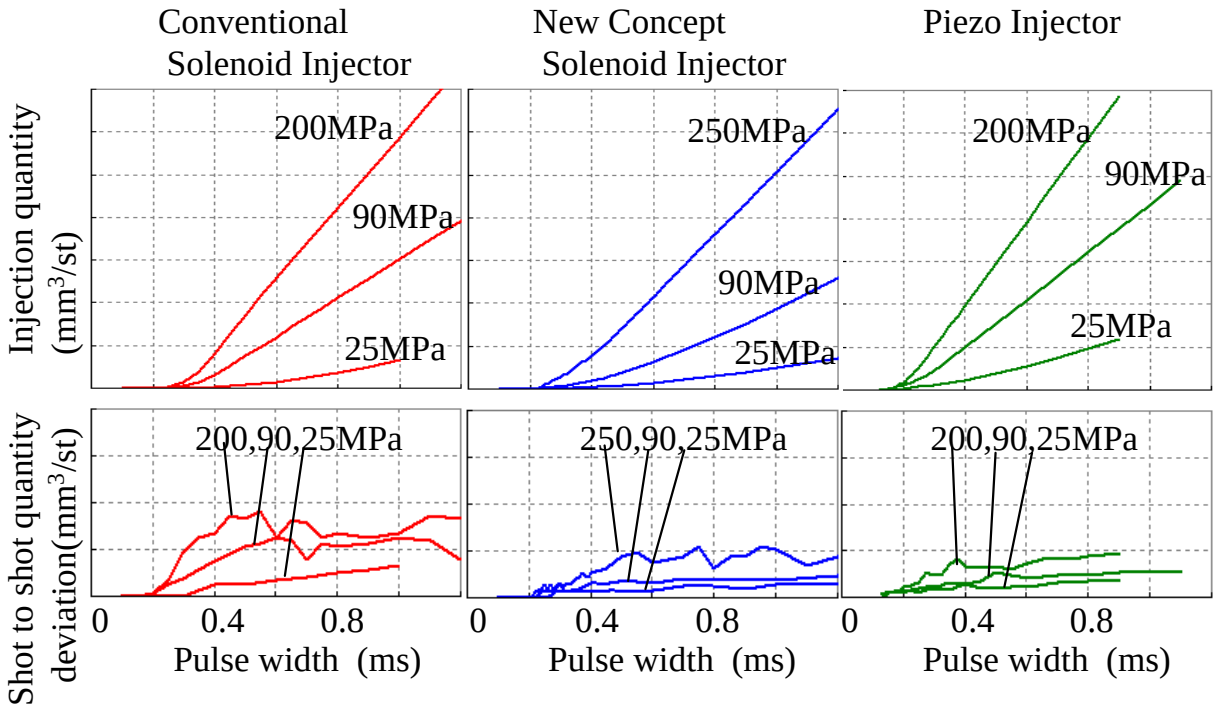


Fig.12 Injection quantity gain characteristics and Injection deviation (shot to shot) characteristics

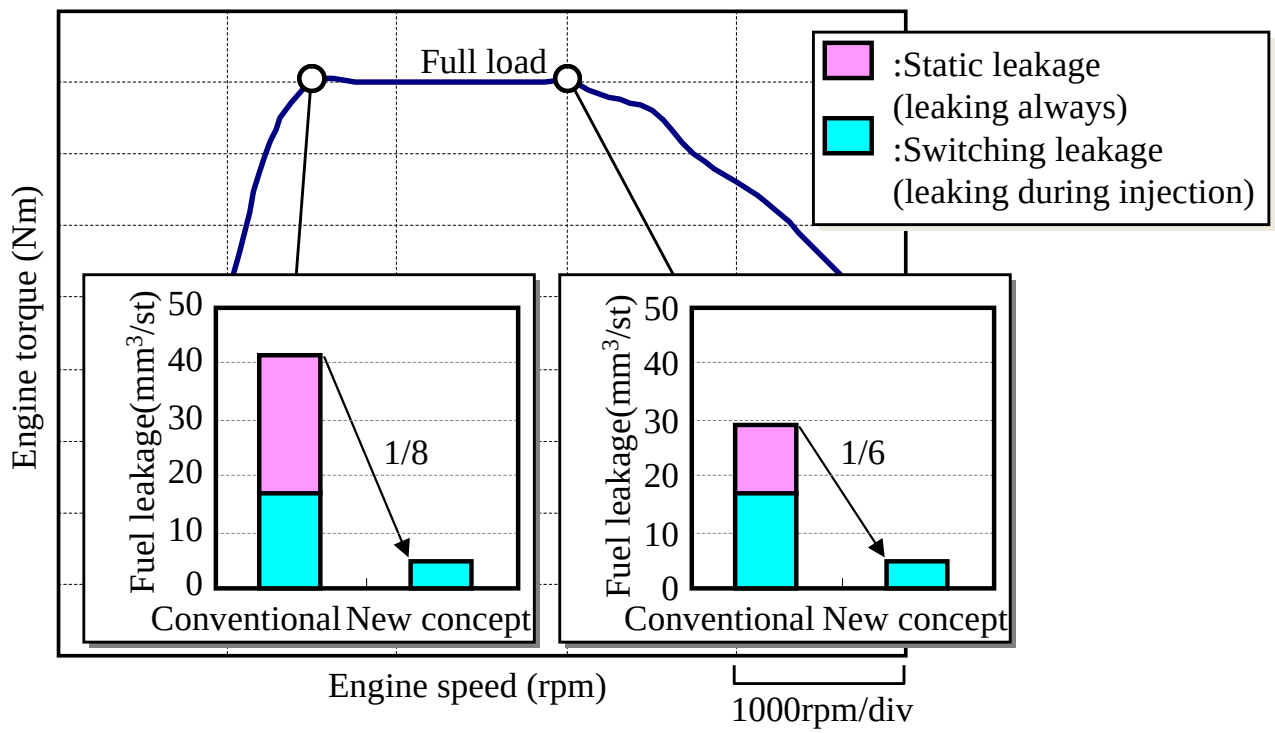
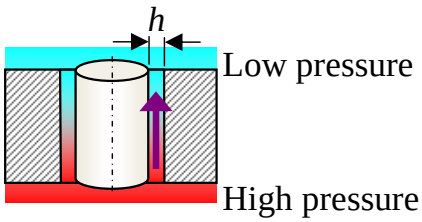


Fig.13 Fuel leakage

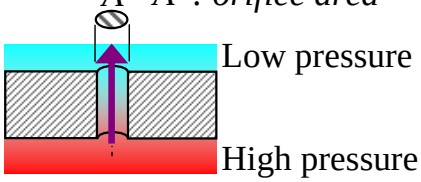
Static leakage

$Ql \propto h^3$ Ql : leakage
h : clearance



Switching leakage

$Ql \propto A$ Ql : leakage
A : orifice area



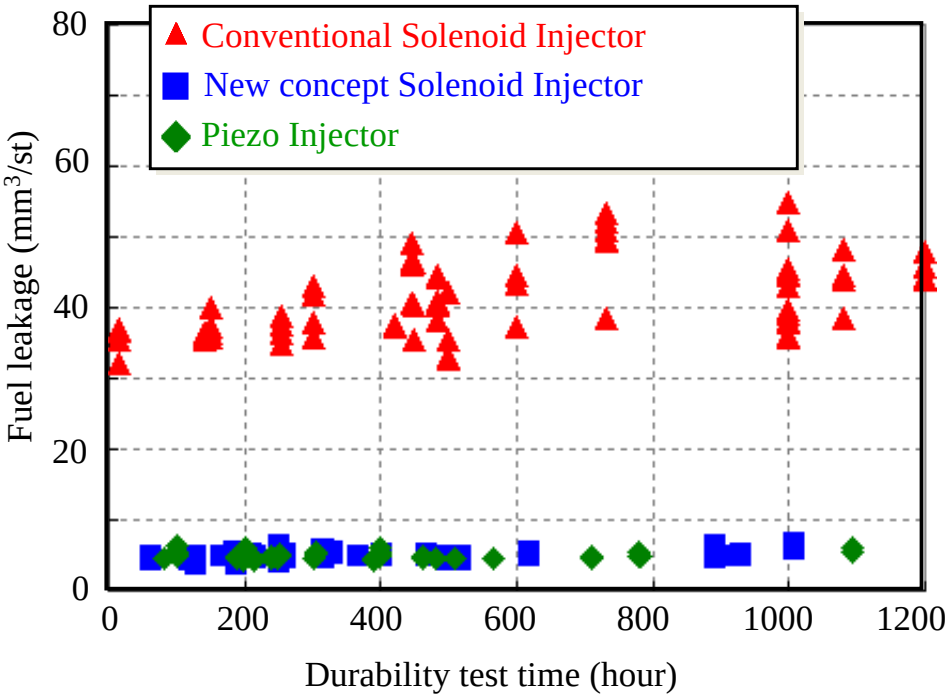
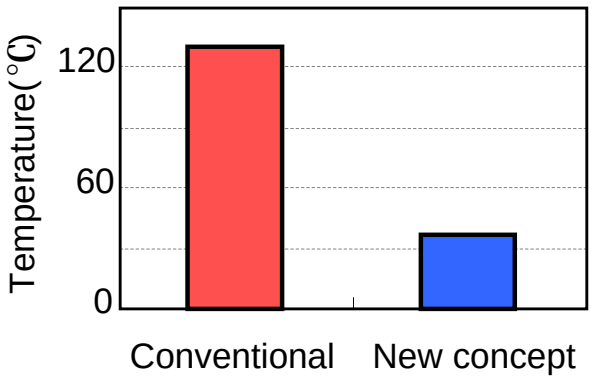


Fig.14 Durability test result of fuel leakage

Fuel leakage temperature



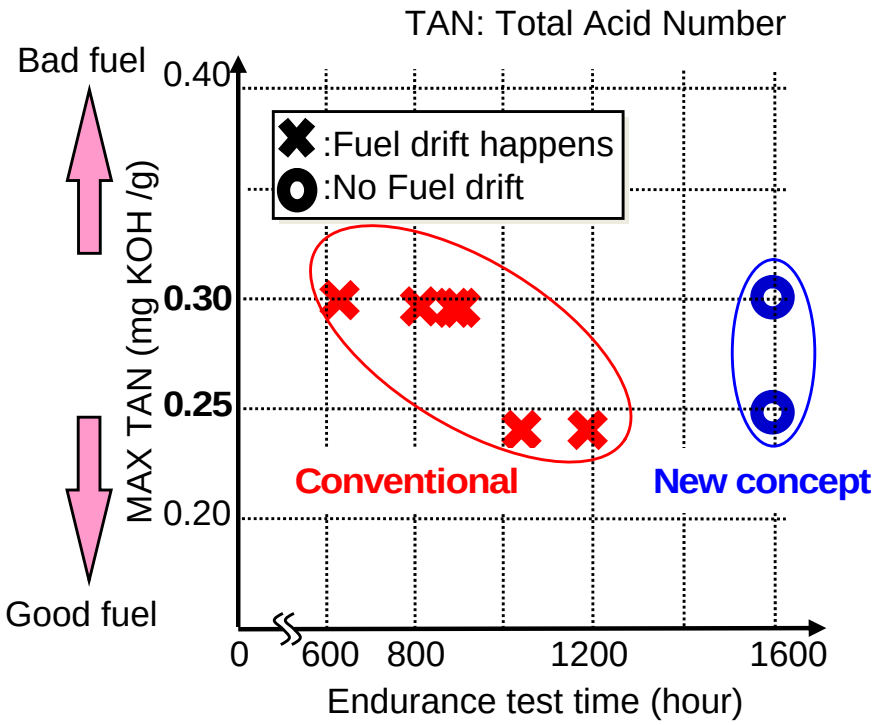


Fig.15 Rig test result

8. まとめ

「1個のON-OFFソレノイドアクチュエータ」を用いたコモンレールシステム用インジェクタの検討を実施してきた。従来構造ソレノイドインジェクタにおいては静リークをなくすことは困難であり、ポンプへの要求吐出量が増加することによる車両の燃費悪化、燃料の高温化によるシステム信頼性低下や燃料デポジットの懸念増加、高圧化への障害となっていた。一連の検討を通して改めて静リークの課題を明確にすると共に、創出した新規構造を採用することによりインジェクタの小型化、高応答化、高圧化、静リークレス、耐久性向上を同時に実現可能とした。これらインジェクタの性能向上を実測データにより確認すると共に、新規構造インジェクタを搭載したエンジン性能の向上も確認することができた。