

直噴ガソリンエンジン用高圧燃料システムの開発

Development of High-pressure Fuel System for Direct Injection Gasoline Engine

後 藤 博 之*
Hiroyuki GOTO
松 本 誠 司*
Seiji MATSUMOTO

広 瀬 研 二*
Kenji HIROSE
飯 高 智*
Satoshi IITAKA

齋 藤 正 美*
Masayoshi SAITOH
高 芝 和 弘*
Kazuhiro TAKASHIBA

要 旨

新開発の直噴ガソリンエンジンでは、エンジン燃焼室センターに高圧フューエルインジェクタを配した、センターインジェクション方式が採用されている。高圧フューエルインジェクタは最小噴射時間 0.7msec の高応答性と、平均粒径 12 μm 以下の超微粒化噴霧を特徴とする。独自のセンターインジェクション方式に対する高圧フューエルインジェクタ取付け構造は、アーム押さえ込みレイアウトを採用し、耐久信頼性を確保した。高圧燃料供給ラインは、シミュレーションによる最適設計をおこない、応力を低減すると共に、燃料脈動に対する減衰構造を採用し、高い信頼性を持たせた。高圧燃料ポンプは単プランジャー・スピルソレノイド方式を採用することで、小型・低駆動力と、高精度な燃料圧力コントロールを達成した。

ABSTRACT

A center injection system in which a high-pressure fuel injector is located in the center of the combustion chamber has been employed in a newly developed direct injection gasoline engine. The high-pressure fuel injector is highly responsive, with a minimum injection timing of 0.7 msec, and injects an ultra-atomization spray with an average droplet diameter of less than 12 μm . To ensure durability and reliability in this original center injection system, the high-pressure fuel injector mounting employs a layout in which the unit is secured by arms. The design of the high-pressure fuel supply lines was optimized using simulations, and the reduction of stress and the adoption of a structure to damp fuel pulsation have resulted in the achievement of high reliability. A simple plunger and spill solenoid system has been employed in the high-pressure fuel pump, enabling the required driving force to be reduced, the component to be reduced in size, and the achievement of high-accuracy fuel pressure control.

1. まえがき

近年ますます高まりつつある燃費向上への要望に応えるべく、Hondaは2.0L直噴ガソリンエンジンを開発した。これまでの量産直噴ガソリンエンジンでは、エンジン燃焼室サイド部にインジェクタを配した、サイドインジェクション方式が主流だった。

本エンジンは、直噴ガソリンエンジンにおける超希薄成層燃焼における燃費向上効果を最大限に得ると共に、排気エミッションと出力性能を両立させるために、センターインジェクション方式を採用している。その結果、高精度燃料噴射制御システム及び、高性能リーン NO_x 触媒等との組合せにより、同カテゴリートップの燃費を達成すると共に、国内最高水準の排出ガス規制をクリアする事が出来た。

本稿では、難易度の高いセンターインジェクションシステム構築のために、新規に開発した直噴エンジン用高圧燃料系コンポーネント及び、システムについて報告する。

2. システム概要

新開発の直噴ガソリンエンジンに採用している、燃料供給システムを Fig. 1 に示す。燃料タンクから低圧燃料ポンプにて、ポート噴射燃料供給システムと同様の 343kPa で送られた燃料を、エンジンに設置された高圧燃料ポンプにて昇圧し、デリバリパイプを経て高圧フューエルインジェクタ(以下インジェクタ)に供給する。燃料圧力は通常時 10MPa、アイドル時 8 MPa、全負荷時 10.5MPa のコントロールをおこなっている。直噴ガソリンエンジン用高圧燃

*栃木研究所

料システムの主な特徴を以下に示す。

- (1) センターインジェクション方式に合致した、高応答・超微粒化噴霧インジェクタの採用
- (2) 燃焼ガスシール信頼性とインジェクタ耐久信頼性を両立させた、アーム押さえ込みインジェクタ取付け構造の採用
- (3) 大容量チャンバ、燃料フィードパイプ部オリフィス構造を有した、燃料脈動安定化デリバリエイブ及び、万一の異常燃圧上昇に備えた、高圧燃料リリーフリターンシステムの採用
- (4) 小型・低駆動力のカム駆動単プランジャ・スプリング・ソレノイド制御方式高圧燃料ポンプの採用

以下詳細について記述する。

3. 高圧フューエルインジェクタ

3.1. インジェクタ構造概略

インジェクタ構造を Fig. 2 に示す。基本構造はポート燃料噴射ガソリンエンジンで用いられる電磁ソレノイド方式

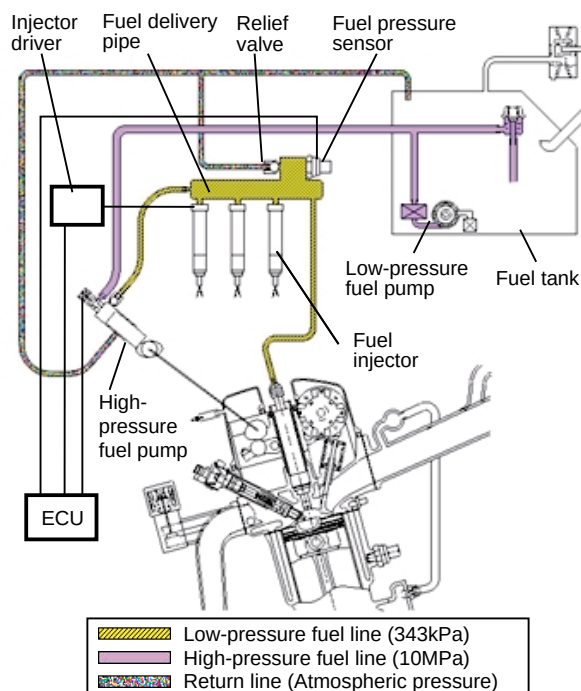


Fig. 1 High pressure fuel supply system

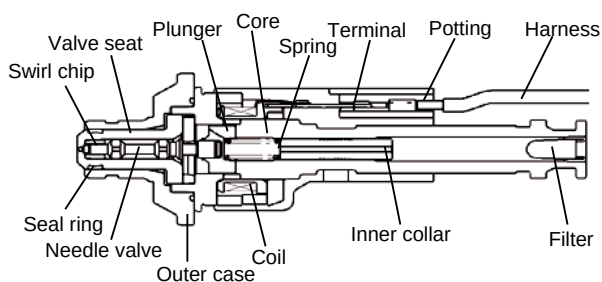


Fig. 2 Cutaway view of high-pressure fuel injector

インジェクタに準じている。直噴ガソリンエンジン用インジェクタの特徴を以下に示す。

- (1) 高応答・ワイドレンジの要求を満足する、高効率磁気回路の採用
- (2) インジェクタ内部に発生する脈動を低減する、燃料通路小径化インナーカラーの採用
- (3) 超微粒化した狭角・高貫通力噴霧を形成する、スワールチップの採用
- (4) インジェクタ先端部に、エンジンヘッドとインジェクタ間の燃焼ガスシールガスケット面を構成する、アウターケースを設置
- (5) アウターケースとバルブシート間に、燃焼ガスのシールをおこなう四フック化エチレン樹脂(以下 PTFE 樹脂)を用いたシールリングを設置
- (6) ダイレクトコネクタを廃した、結線部ポッティング封止ハーネス引出し構造の採用

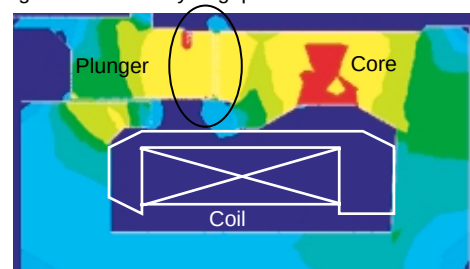
3.2. 高応答、ワイドレンジ化

直噴ガソリンエンジン用インジェクタの超希薄成層燃焼領域では、上昇するピストンキャビティに向けて短い時間で燃料を吐出し、成層混合気を形成する必要があるため、全負荷運転領域では吸入工程から圧縮工程中に、必要な燃料の噴射を完了することにより、高応答性を有し、かつ大流量の特性が要求される。

この要求を満足し、アイドル領域から全負荷運転領域まで直線性を持った流量特性を確保するため、インジェクタは Fig. 3 に示す磁気シミュレーションを用い、磁気回路中に損失が無く、プランジャとコア間の吸引空隙部が最も磁

【Inappropriate example】

Magnetic flux density of gap section is low.



【Appropriate example】

Magnetic flux density of gap section is high.

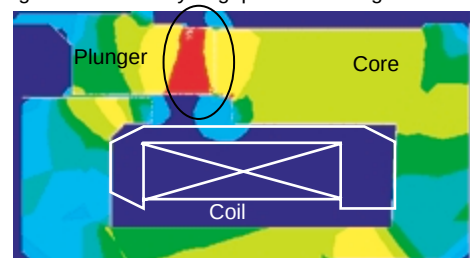


Fig. 3 Results of simulation of magnetism

束密度高くなる様な、高効率磁気回路設計をおこなっている。またニードルバルブのバウンスによる閉弁ばらつきを低減するため、インナーカラー燃料通路を小径化($\phi 1\text{ mm}$)し、インジェクタ内部で発生する燃料脈動を減衰させ、低噴射領域での流量安定化を計っている。

駆動ドライバは 150V の昇圧回路を持った、Fig. 4 に示す駆動電流波形のピークホールド式ドライバを採用し、応答性を向上させている。Fig. 5 に示す様に、ピーク電流値は

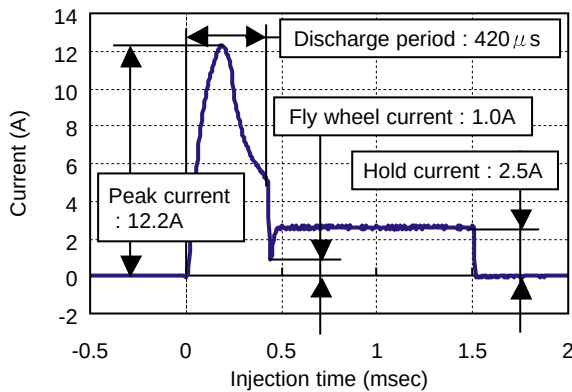


Fig. 4 Injector current wave

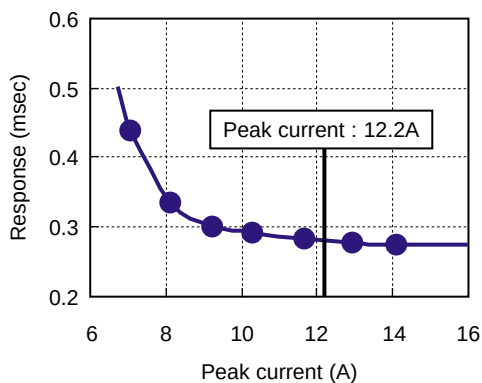


Fig. 5 Needle valve response and peak current

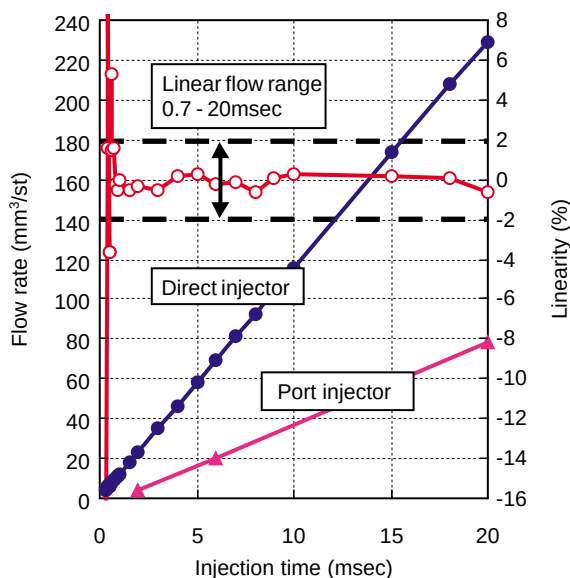


Fig. 6 Injector flow rate

開弁レスポンスが最良かつ、電流値が低いポイントに設定されている。

これらの対応の結果、Fig. 6 に示す様に、最小噴射時間 0.7msec まで直線性を持つ高応答、ワイドレンジ流量特性を達成すると共に、ポート噴射インジェクタに対し 2 倍以上の噴射流量を得ることが出来た。

3.3. 噴霧特性

直噴ガソリンエンジンはインジェクタが燃焼室に直接燃料を噴射し、混合気を燃焼する事より、インジェクタには微粒化した噴霧が要求される。また、Fig. 7 に示す独自のセンターインジェクション燃焼コンセプトによる成層混合気形成のため、インジェクタには噴霧角 25deg と角度が狭く、貫通力の高い噴霧が要求される。Fig. 8 はインジェクタ全量噴射時の噴霧の角度を、Fig. 9 はインジェクタ噴射終了一定

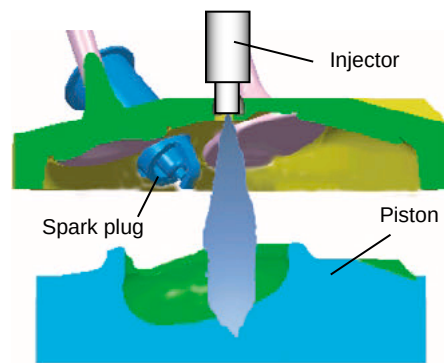


Fig. 7 Concept of combustion in direct injection gasoline engine

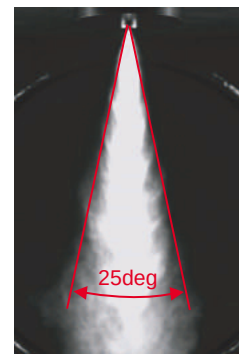


Fig. 8 Spray angle of newly developed injector

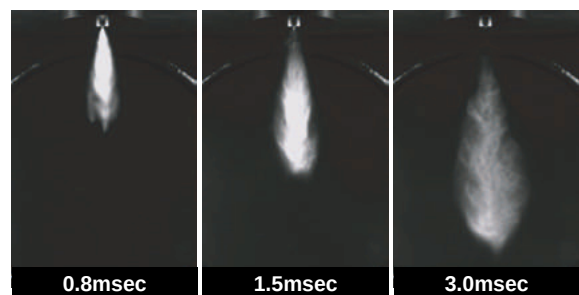


Fig. 9 Spray penetration of newly developed injector

時間後の噴霧の貫通力を示す。

超微粒化噴霧を得るため、燃料圧力は通常時 10MPa を採用することにより、Fig. 10 に示す様に Sauter & Mean diameter(以下 SMD)12 μm 以下の粒径が得られた。粒径は燃料圧力が高くなるほど微粒化が促進されることが知られており⁽¹⁾、Fig. 11に示す様に、本インジェクタは10MPaにて粒径が最良になる様に設定されている。

噴霧形成はインジェクタ内部通路の最終部に設置される、Fig. 12に示すスワールチップの溝設定にて直線流と旋回流の割合を最適化しており、その結果、噴霧角度、貫通力及び、粒径のバランスに優れた噴霧を得ることが出来た。

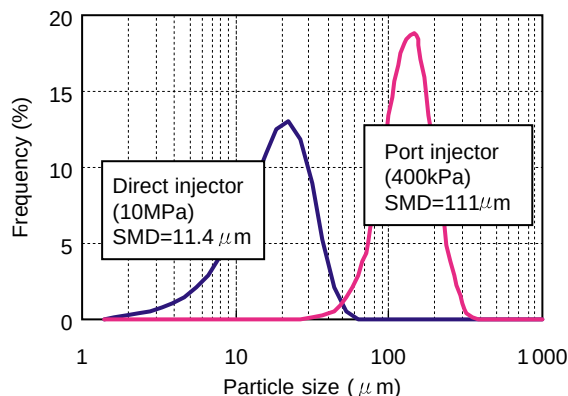


Fig. 10 Comparison of SMD between conventional port injector and high-pressure direct injector

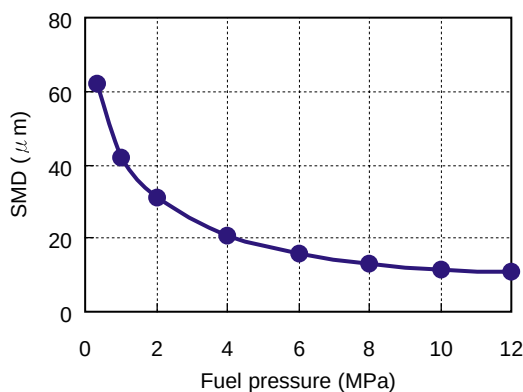


Fig. 11 Relationship of SMD and fuel pressure

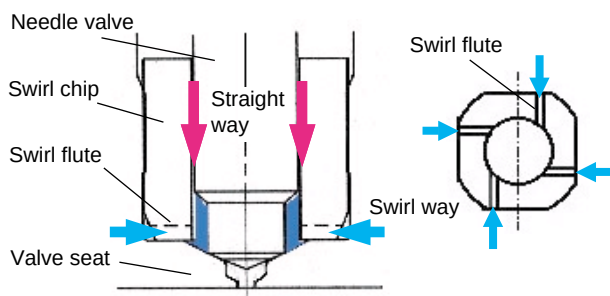


Fig. 12 Configuration of injector swirl guide

3.4. センターインジェクタ取付け構造

独自のセンターインジェクションレイアウトを成立させるためには、下記の課題を両立させる必要があった。

- (1) 燃焼ガスの信頼性の高い確実なシール
- (2) インジェクタノズル詰まりデポジット対策として、インジェクタバルブシート先端温度の低減

これらを達成するため、Fig. 13に示すアーム押さえ込み構造を採用している。本構造はディーゼルエンジン用燃料噴射ノズルの取付けに多く見られ、本直噴ガソリンエンジンにも応用した。

Fig. 14に示すインジェクタ外周部燃焼ガスシールにはメタルガスケットを採用し、シリンダヘッド側にインジェクタシートを設置することでガスケットのシール面を形成している。燃焼室側のインジェクタ先端ガスケットにはラバーコーティングレスのガスケットをファイヤウォールとして設置し、バルブシート先端温度を下けている。インジェクタ上段にラバーコーティング付きのガスケットを用いて、完全シール構造としている。これらのガスケットのシールをおこなうため、インジェクタ外周にホルダー、インジェク

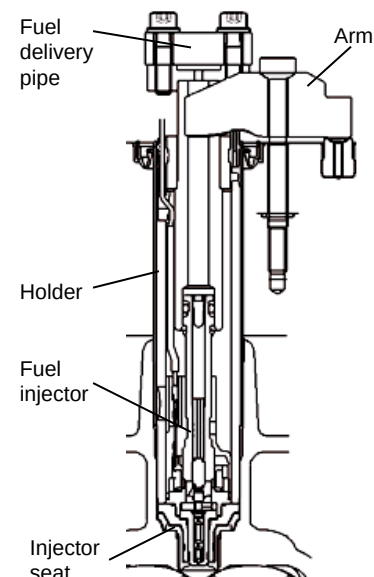


Fig. 13 Installation of injector

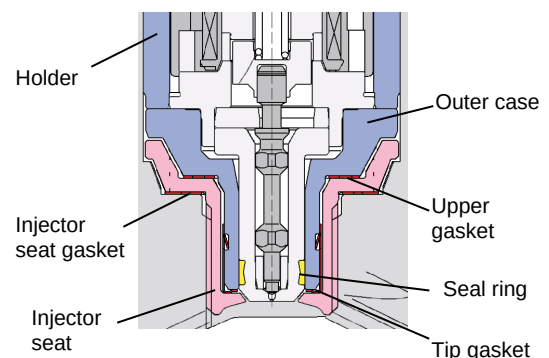


Fig. 14 Cutaway view of seal mechanism

タ先端部にアウターケースを配置し、シリンダヘッド上方よりアームを介して軸力を与えている。

またアウターケースとパルプシートの間には PTFE 樹脂を用いたシールリングを設置し、燃焼ガスの流入によるパルプシート温度の上昇を防止している。このシールリングの PTFE 樹脂は低温になると体積が減少し、シール性が低下する特性を持っているが、Fig. 15に示す様に、パルプシートに設けたシール溝体積に対するシールリング体積を 100 %以上の充填率に設定することで、極低温環境での燃焼ガスシールを可能とした。

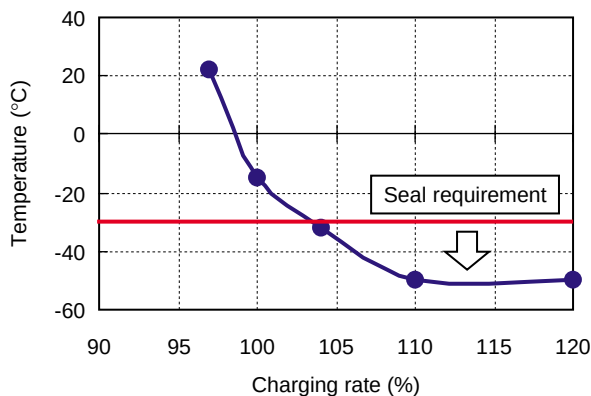


Fig. 15 Low temperature seal ability of seal ring

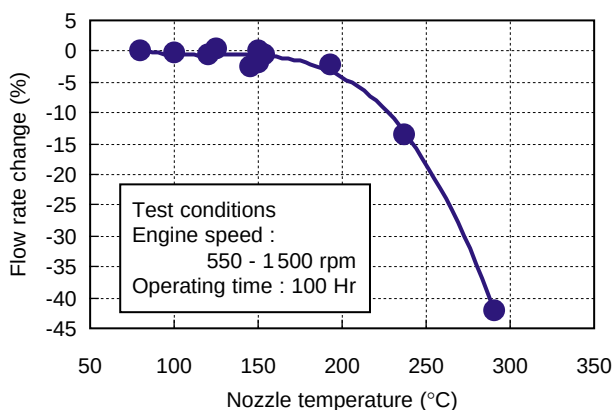


Fig. 16 Influence of nozzle temperature on flow rate

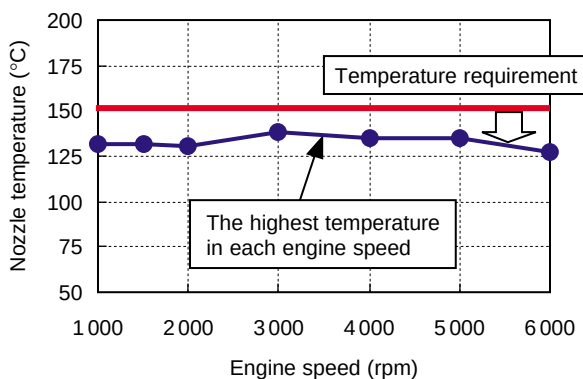


Fig. 17 Relationship of nozzle temperature and engine speed

直噴エンジン用インジェクタのパルプシート温度は、160 °Cを越えるとノズル部へのデポジットの付着により流量劣化が増加する傾向があることが知られている^{(2), (3)}。本エンジンでの試験結果を Fig. 16 に示す。前述の燃焼ガスシール構成を用いることで、本インジェクタパルプシート温度は Fig. 17 に示す様に、各回転数において開発目標とした 150°Cを下回り、実車耐久走行後におけるインジェクタ流量低下を防止している。

またインジェクタ先端部を燃焼室に沿った形状にし、燃焼ガス流動を絶えずノズル部に干渉する構造にすることにより、インジェクタ端面へのデポジット堆積を防止している。

4. 高圧燃料供給ライン

4.1. フューエルデリバリパイプ信頼性

フューエルデリバリパイプを中心とした、高圧燃料供給ライン構造を Fig. 18 に示す。フューエルデリバリパイプの材質は、耐腐食性及びエンジン振動によって発生する応力に対して有利な、ステンレス鋼を採用している。高圧燃料ポンプとチャンバ及び、チャンバ部とインジェクタを結ぶフィードパイプは、シミュレーションを用いて設計している。Fig. 19 に示す様に、デリバリパイプ側締付けフランジと相手側取付けフランジの位置ばらつきを考慮した静的応力シミュレーション及び、エンジン振動を考慮した動的応力シミュレーションをおこない、応力の集中するポイントが無いことを確認している。シミュレーション設計で信頼性を確保した上で、実機耐久試験にて確認をおこなうことで、信頼性の高い高圧燃料供給を可能にした。

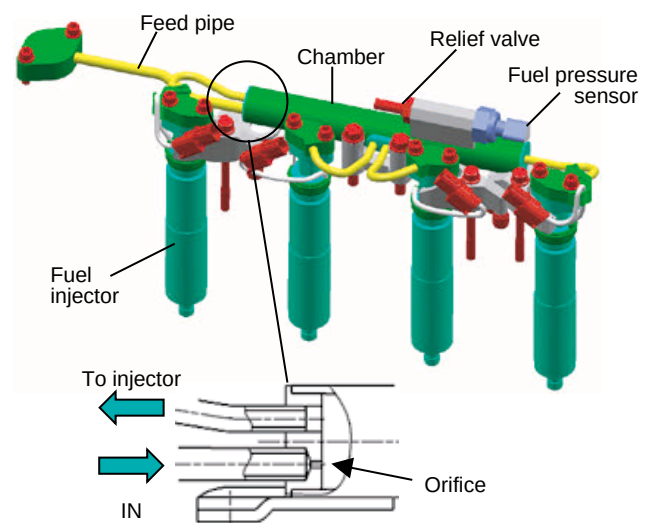


Fig. 18 Fuel delivery pipe

4.2. 高圧燃料脈動対策

デリバリパイプチャンバ部は約80cm³の容量を有し、高圧燃料ポンプの吐出やインジェクタの作動によって発生する脈動を減衰して、圧力の安定化を計っている。高圧燃料ポンプとチャンバ部を結ぶフィードパイプにはチャンバの入口部にオリフィスを設けている。このオリフィスは高圧燃料ポンプの吐出脈動によって発生するフィードパイプ内の共鳴を減衰する効果があり、配管燃料シール用Oリングの耐久信頼性を高めている。Fig. 20 はフィードパイプオリフィス有り、無しでの高圧燃料ポンプ吐出部の脈動波形を示しており、オリフィスにより大幅に脈動が低減されたことがわかる。

4.3. 高圧燃料リリーフシステム

高圧燃料リリーフシステムを Fig. 21 に示す。リリーフバルブはボールバルブをスプリングでバルブシートにシートさせるシンプルな構造となっている。リリーフバルブの

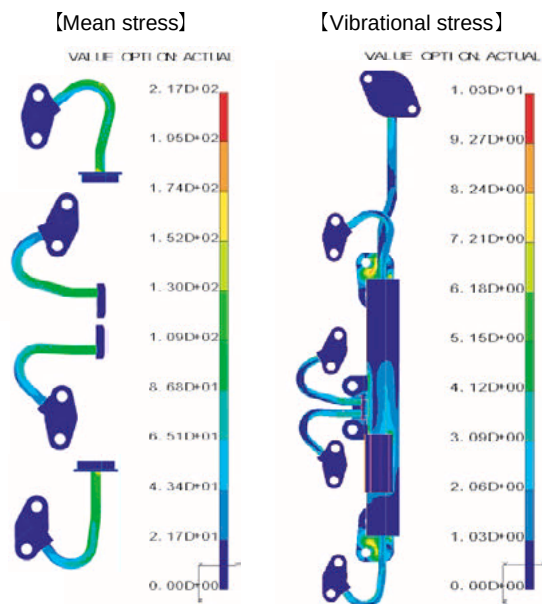


Fig. 19 Simulation results for mean stress and vibrational stress

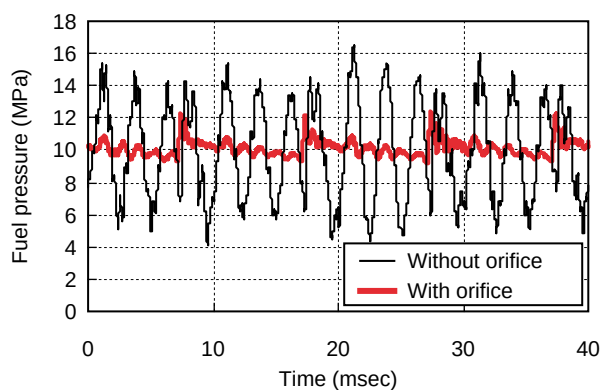


Fig. 20 Pulsation of high-pressure fuel pump

開弁圧力は12MPaに設定され、万一の異常燃料圧力上昇時の圧力開放に備えている。異常燃料圧力上昇時リリーフバルブから吐出された燃料は、エンジンルーム内で高圧燃料ポンプのプランジャからのリーク燃料のリターンラインと合流した後、車両床下に設置されたリターンパイプを経由し、燃料タンクへ開放される構造となっている。

5. 高圧燃料圧力制御システム

Fig. 22に高圧燃料ポンプ構造を示す。エキゾーストカムシャフトを延長してポンプ駆動用二山カムを設け、単プランジャピストンを上下させて、燃料の吸入、吐出をおこなっている。燃料の調量にはスピルソレノイドを用い、吸入チェックバルブ開/閉タイミングをコントロールして、余剰燃料は低圧燃料ライン側へ排出し、必要燃料を高圧燃料ライン側へ吐出している。このスピルソレノイド燃料調量方式を用いることにより、必要最小限の仕事量にてポンプ駆動をすることが出来ると共に、小型化が達成出来た。

この高圧燃料ポンプの燃料入口部には、大容量パルセーションダンパが設置され、余剰燃料排出時に発生する脈動を吸収し、低圧燃料ラインの耐久信頼性を高めている。

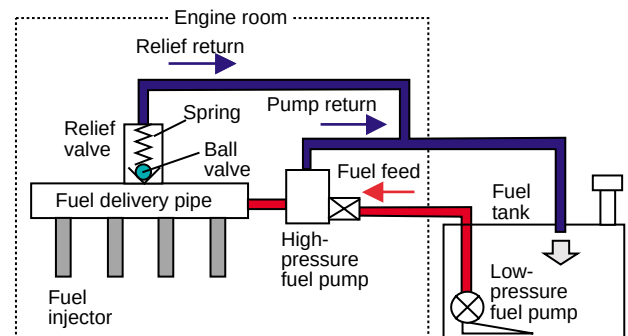


Fig. 21 High-pressure fuel relief system

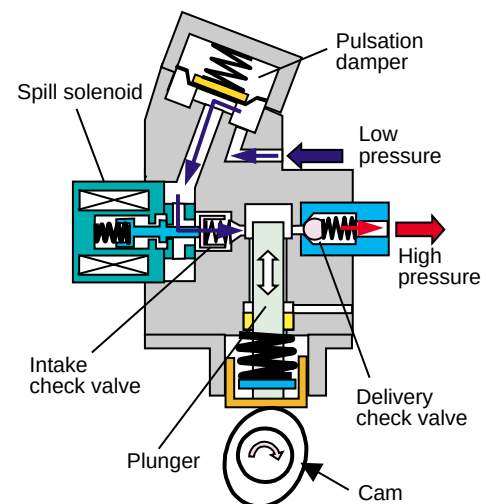


Fig. 22 Cutaway view of high-pressure fuel pump

6. まとめ

高圧燃料ポンプの流量特性はFig. 23に示されており、車両の全負荷要求流量に対し、余裕を持った流量特性が得られていることがわかる。

燃料圧力制御手法を Fig. 24 に示す。高圧燃料ポンプの吐出量は、エンジン回転数とインジェクタ吐出量より求めるスピルソレノイド作動マップにて基本制御量を決定している。さらに、フューエルデリバリパイプ部に設置された燃料圧力センサにて計測した圧力値と、目標燃料圧力値との偏差をPID制御にて補正する、フィードバック制御を実施することにより、目標燃料圧力値にコントロールしている。この燃料圧力制御手法を採用することにより、精度の高い燃料圧力コントロールが可能となった。

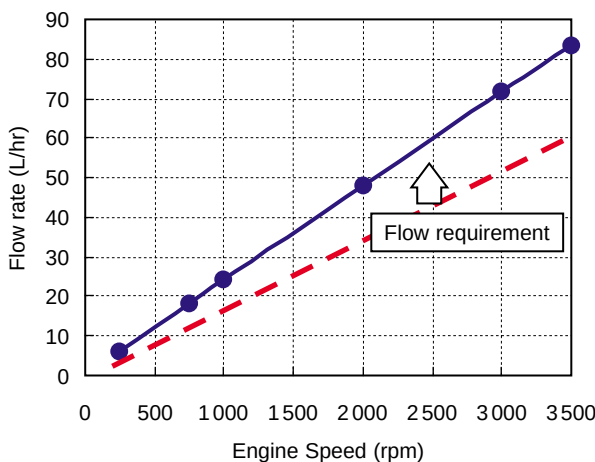


Fig. 23 Flow rate of high-pressure fuel pump

ガソリン直噴エンジン用高圧燃料供給システムの開発にて、以下の成果を得た。

- (1) 高圧インジェクタは、高効率磁気回路設計、インナーカラーの小径化及び専用設計の駆動ドライバにより、無負荷アイドルから全負荷運転まで直線性を持った流量特性を得ることが出来た。また噴霧特性は高燃料圧力とスワールガイド設定の最適化にて、センターインジェクション燃焼コンセプトに合致する、粒径・噴霧角度・貫通力を得ることが出来た。
- (2) センターインジェクションシステムのインジェクタ取付け構造は、アーム押さえ込み構造を採用することで、燃焼ガスシール性及び、インジェクタ先端温度目標値を満足し、耐久信頼性を確保することが出来た。
- (3) 高圧デリバリパイプは、各フィードパイプの応力シミュレーション設計と大容量チャンバ設定及び、燃料フィードパイプへのオリフィス設置にて、信頼性の高い高圧燃料供給を可能にした。またリリーフリターンシステムの設定にて、万一の異常燃圧上昇時の安全性を確保出来た。
- (4) 高圧燃料ポンプはカム駆動単プランジャ・スピルソレノイド制御方式を採用することで、小型・低駆動力を達成した。高圧燃料圧力制御システムは、マップを用いた基本制御量に、燃料圧力センサを用いたフィードバック制御を加えてコントロールすることにより、高精度な制御を可能とした。

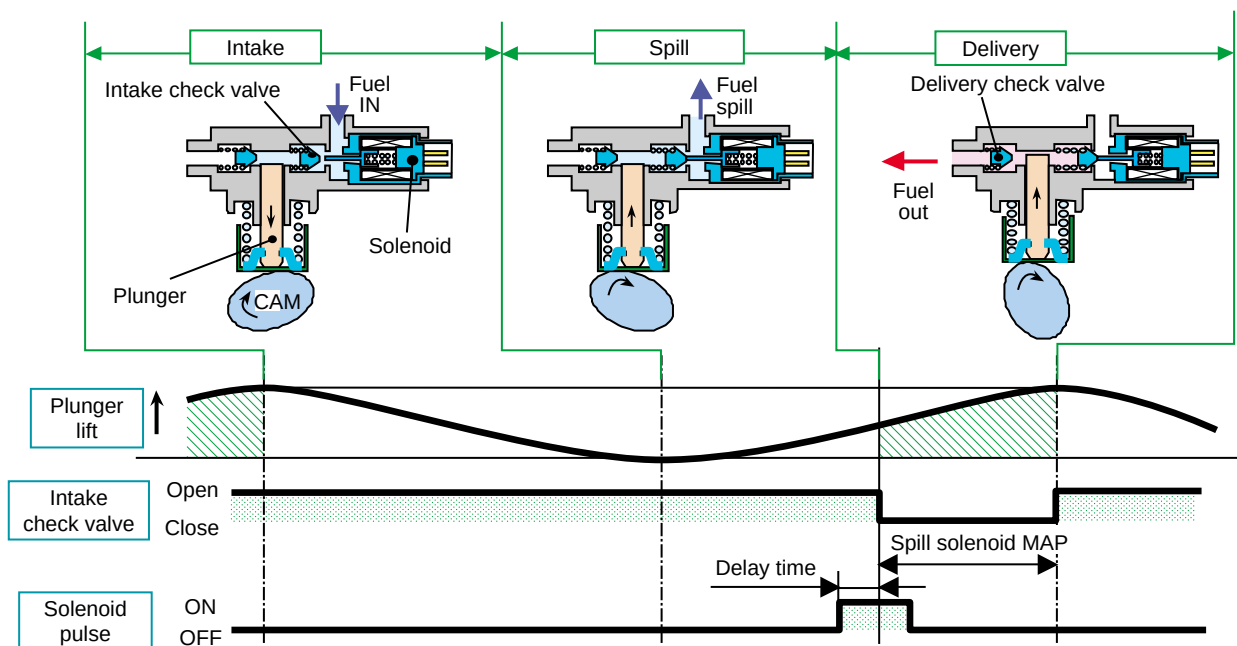


Fig. 24 Diagram of spill solenoid control

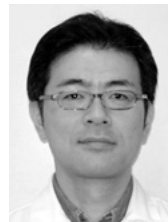
謝 辞

最後に本開発を推進するにあたり、ご協力頂きました、
(株)ケーヒン、三桜工業(株)、(株)日立製作所の関係者の
方々に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 松下 宗一, 中西 清, 郷野 武, 沢田 大作: 筒内噴射ガ
ソリンエンジンの燃焼特性, 自動車技術会学術講演会
前刷集 No.965, p.102(1996)
- (2) 木下 雅夫, 齋藤 昭則, 松下 宗一, 柴田 仁, 丹羽 豊:
直噴ガソリンエンジン用ノズルのデポジット生成解析,
自動車技術会学術講演会前刷集 No.976, p.23-24(1997)
- (3) 芦田 健: エンジンデポジット生成に及ぼす燃料の影響,
自動車技術会学術講演会前刷集 No.08-00, p.25-26(2000)

■ 著 者 ■



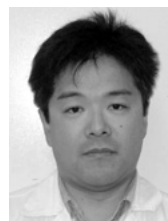
後 藤 博 之



広 瀬 研 二



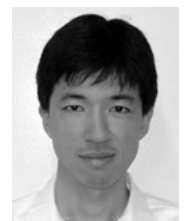
齋 藤 正 美



松 本 誠 司



飯 高 智



高 芝 和 弘