F1エンジン用高圧燃料供給系の開発

Development of High-Pressure Fuel Supply System for Formula One Engine

棚橋哲哉* Tetsuya TANAHASHI
小野和二* Kazuji ONO
早船正典* Masanori HAYAFUNE
澤田陽介* Yosuke SAWADA
清水淳史* Atsushi SHIMIZU

要　旨

近年，F1エンジンにおけるエンジン性能向上には，高燃圧による短時間噴射，燃料微粒化によって，理想的な混合気を形成させ燃焼効率を改善させるとともに，低負荷領域での安定した燃焼を確保することが重要である．

そこでインジェクタ噴霧特性を総合的に解析し，Honda内製の高効率な高圧燃料供給系の開発をおこない，エンジン出力を 15 kW 向上させた．

ABSTRACT

Important factors in boosting the performance of today's Formula One engines include: the realization of the formation of ideal air-fuel mixtures and the achievement of greater combustion efficiency, through the use of shorter fuel injection periods and increased spray atomization resulting from higher fuel pressures; and, in addition to this, the achievement of stable combustion in the low-load operating range.

A comprehensive analysis of injector spray characteristics was conducted, leading to the development of a Honda-made high-efficiency, high-pressure fuel supply system. This enabled the achievement of a 15 kW increase in engine power.

1．はじめに

自動車用エンジンにおける燃料供給系の開発は，燃費や排出ガス低減等における技術課題解決のため，その重要度が高まってきており自動車メーカ，部品メーカ，研究機関によって，より高度な技術開発，事象解析が進められている．

F1エンジンにおいても，特に燃料噴霧はエンジン出力への寄与度が大きく，燃焼室形状，吸気ポート形状に対して最適な噴霧形態が存在する．それらの仕様変更に伴い噴霧についても検証と再設定がなされてきた．

このような背景から，Honda F1エンジン開発では，開発への追従性，独自技術による対他競争力向上をねらいとして，燃料供給システムは内製を基本としてきた．

本稿では高圧燃料を供給する燃料ポンプ，燃料圧力を制御するレギュレータ，燃料を噴射し噴霧を形成するインジェクタについての技術概要を紹介する．

＊四輪R&Dセンター

2．高圧燃料噴射による出力向上メカニズム

F1エンジンにおける燃料系の開発は単気筒エンジンを用い，吸入空気と燃料にまつわる事象解析をおこなった．

その結果をもとに，レースエンジンにおいては 2006 年までの高燃圧化および，それ以降の噴霧改良により約15 kWの出力向上を得ている．

Fig. 1にレースエンジンでの燃圧の推移と出力，Fig. 2に燃料供給系の構成概略を示す．

参戦当初の燃料圧力 1.2 MPa から 10 MPa までの高燃圧化および，噴霧形態改良により得られた出力向上メカニズムは大きく以下の３項目と言える．

（1）大流量化（短時間噴射）により吸気冷却効率が向上する．
（2）燃料噴霧微粒化により燃焼が向上する．
（3）噴霧形態改良により吸気冷却効率が向上する．

2.1. 大流量化による吸気冷却効率の向上

初期の燃圧 1.2 MPa，流量 43 L/h 仕様では，燃圧が低いことよりインジェクタ最大流量も少なく1サイクル中の噴射期間が長い状態であった．これに対し高燃圧化による大流量化は噴射時間を短くすることができ，最適なタイミング(噴射期間)での噴射が可能となる．

Fig. 3 に計算により求めたファンネル端面の吸気流速と噴射タイミングの関係を示す．

解析の結果，ファンネル端面の吹き返しが最大となるタイミングまでにインジェクタの噴射を終わらせることで，吸気冷却効果を最大限に引き出せることが明確となった．

吸気温度の低下は，吸気脈動の変化で計ることができるが，Fig. 4に示すように短時間噴射により吸気脈動の位相が遅れる事象が確認でき，吸気温度の低下による充填効率向上の効果であると判断できる．

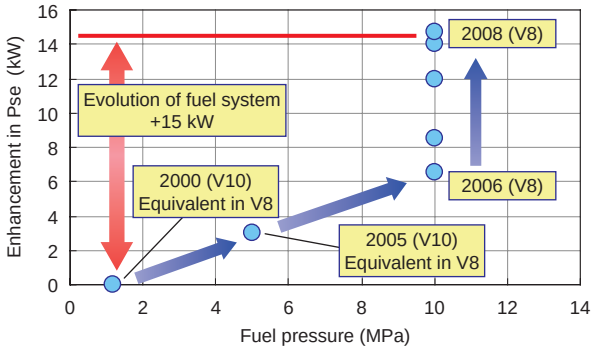


Fig. 1　Evolution of fuel system

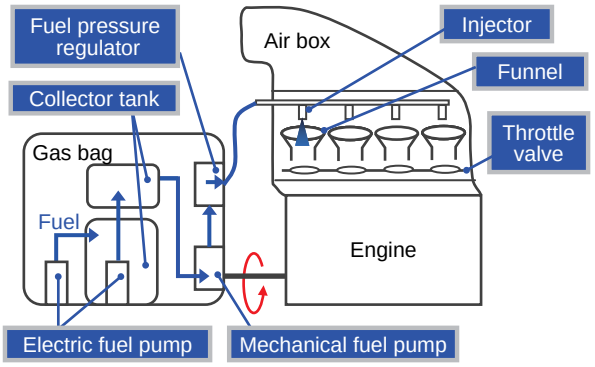


Fig. 2　Components of fuel supply system

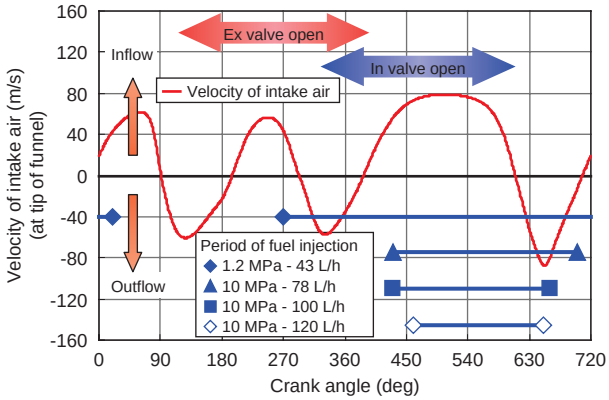


Fig. 3　Relationship between intake air velocity and injection timing

2.2. 燃料噴霧微粒化による燃焼効率向上

噴霧粒径は燃料圧力 1.2 MPa の約 50 μm に対し 10 MPa では 20 μm 以下に微粒化となり，その結果として Fig. 5 に示すように出力が向上している．この要因としては吸気と燃料のミキシングの向上および，ポート壁面への付着低減が考えられる．

2.3. 噴霧形態改良による吸気冷却効率向上

先に述べてきたように高燃圧化により，吸気冷却効率向上と燃焼効率向上の効果を引き出してきた．

この効果をさらに引き出すため，噴霧形態についても検討をおこなった．Fig. 6に単気筒エンジンにおける軸出力の変化を示す．

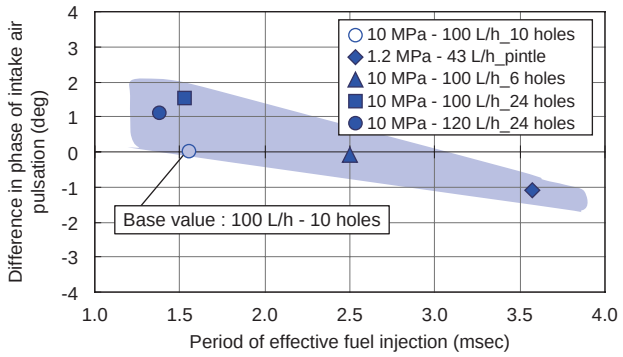


Fig. 4　Effect of injection time on difference in phase of intake air pulsation

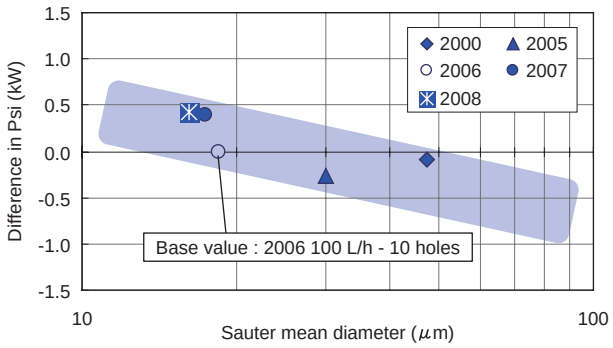


Fig. 5　Effect of droplet refinement on power

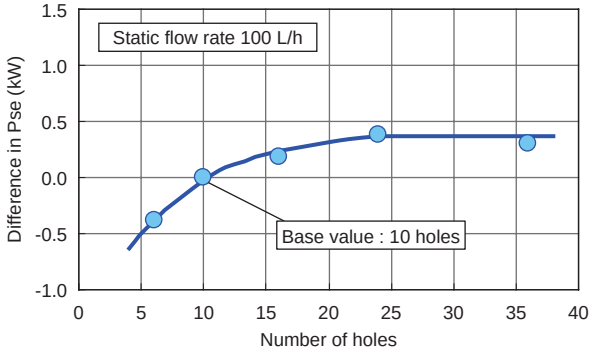


Fig. 6　Effect of number of holes on power

噴孔数増加による出力向上は，微粒化によるものであり，Fig. 7に示すように吸気脈動の位相が遅れる事象から，吸気温度の低下による充填却効率向上であることが確認できた．

また，ペネトレーションと吸気脈動位相との関係も確認した結果，Fig. 8に示すように位相遅れにはピークがあり，吸気冷却効率向上には最適なペネトレーションが存在することが明確となった．これはペネトレーションが低いと，噴霧が吸入空気の影響影でポート中心に寄せられ，また高すぎると，ポート壁面への付着が増加するためである．

以上の解析結果をふまえて，高圧燃料供給系の技術概要を以下に述べる．

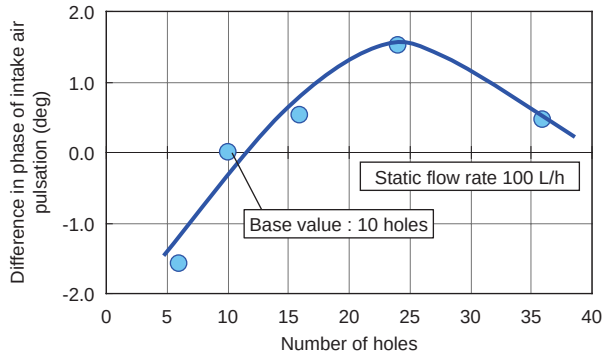


Fig. 7　Effect of number of holes on difference in phase of intake air pulsation

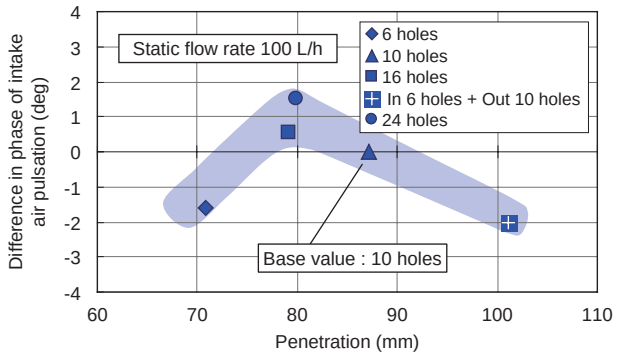


Fig. 8　Effect of penetration on difference in phase of intake air pulsation

3．高圧燃料ポンプ開発

Honda第2期でのF1エンジンの燃料供給系は，燃圧(以下PFという)1.2 MPaのギヤポンプ，調圧レギュレータと燃料をインジェクタの側面から供給するサイドフィードインジェクタの構成を適用していた．第3期 F1 エンジン開発スタートにおいては，基本的構成は踏襲し，インジェクタの型式のみ，燃料を上部から供給するトップフィードタイプへ変更し，各モデルイヤーのエンジンに対しての適合性を考慮しつつ開発展開を図ってきた．

その後 2005 年以降，燃料供給系の高燃圧化によるインジェクタ噴霧粒径微粒化と短時間噴射をおこない，吸入効率と燃焼の改善を達成するためのシステム開発に着手した．

10 MPa 仕様の開発は 2006 年開幕にターゲットを定め，2005 年シーズンは市販 5 MPa 燃料システムを適用することで 10 MPa 仕様に開発工数を集中させた．

燃料ポンプ開発において PF = 10 MPa によるエンジン出力向上を実現するためには，これまで用いてきたギヤポンプ構造ではなく，高燃圧で必要流量を満足し得る高効率かつ軽量なメカニカルフューエルポンプの自社開発が必要不可欠である．この理由として，これまで適用してきたギヤポンプ式では，高い燃料圧力の状態においてギヤの歯先や側面隙間からの燃料漏れにより，十分な燃料輸送量を確保できないことが挙げられる．

それを改善すべく，当初はギヤ側面隙間を一定に保ちリーク量を適正化した可動式側板を用いたギヤポンプ仕様の確立を目指した．しかし，ギヤ側面しゅう動部焼付きなどの耐久性の観点で技術的に成立が困難なことから高燃圧，高効率を目指す上で新規にプランジャピストン方式の燃料ポンプ開発をおこなうこととした．

3.1. 高燃圧燃料供給システム概要

機械式高圧燃料ポンプ，調圧レギュレータ，1次電動ポンプおよび2次電動ポンプの配置を含めた燃料タンク内システム図を Fig. 9 に示す．F1 マシンはガスバッグと呼ばれる防爆構造の樹脂ライナ製燃料タンクをモノコック内部に配置しており，各年度ごとにモノコックに合わせて製作され，その容量範囲内のサイズとなる．コレクタタンクはガスバッグの燃料を旋回および加減速Gで発生する電動ポンプの吸い込み不良防止と，機械式高圧燃料ポンプに対して前圧を掛ける役割を果たす．コレクタタンクには二つの部屋を設けており，高圧コレクタ室と低圧コレクタ室にわかれる．ガスバッグ内部の燃料は，底部左右に配置された1次電動ポンプにて低圧コレクタタンクに供給される．さらに，低圧コレクタ室底部に取り付けられた2次電動ポンプによって高圧コレクタタンクにくみ上げられる．高圧コレク

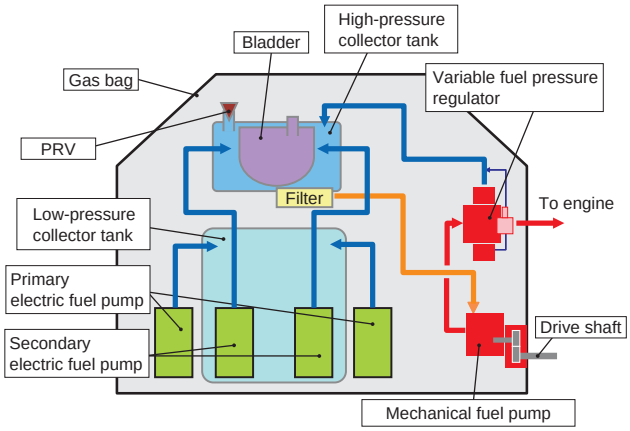


Fig. 9　Fuel system for Formula One engine

タタンクには，機械式高圧燃料ポンプへの供給前圧が必要圧力を下回らないようにするためのブラダという空気圧を利用した可変容積の加圧デバイスを用いる．ブラダは，高圧コレクタ内に燃料が無い状態ではコレクタタンク内いっぱいに膨らみ，燃料が充てんされるとその燃圧によって縮んでいく．これにより，高圧コレクタタンク室内を常に燃料で満たすことができる．また，一緒に備え付けられているPRV（Pressure Relief Valve）によりコレクタタンクの圧力上限を一定に保つ．このブラダとPRVによって機械式ポンプへの供給圧を安定化させ，高温下での機械式高圧燃料ポンプ吸入時のキャビテーションを防ぐことができる．

3.2. 機械式高圧ポンプ構造

本開発における燃料ポンプの外観図をFig. 10に示す．開発初期段階の燃料ポンプはエンジンからの回転取り出しに対して，機械式ポンプの減速をおこなうためのリダクションギヤボックス，プランジャポンプ部への前圧確保をするためのギヤポンプ，そして高燃圧供給をおこなうプランジャポンプの三つのユニット構成とした．後に燃料ポンプ軽量化のためにリダクションギヤボックスとギヤポンプを一体化させたリダクションギヤポンプを適用し，エンジンからの回転入力をドライブギヤにて減速しつつギヤポンプとしての燃料供給も兼ねる方式とした．これによりポンプ全長で 30 mm，ポンプ重量で 340 g のコンパクト化，軽量化に成功した．リダクションギヤボックスおよびリダクションギヤポンプの減速比はエンジン回転に対して最適化をおこない，耐久性と流量性能の両立を図っている．

3.3. ポンプ仕様選定

プランジャポンプへの安定した前圧確保のためにギヤポンプを搭載しているが，ギヤポンプに対しては小型軽量であることと走行中の高い燃料温度状況下における輸送燃料のキャビテーション防止が不可欠である．そこでエンジンの要求燃料流量を満足しつつキャビテーションタフネスを両立するためにポンプの吸入ポートの圧力損失を低減できる形状設計とギヤポンプの厚さのセッティングをおこなった．また，プランジャピストンのサイズ選定や燃料通路抵抗削減によるポンプ輸送効率の向上，ポンプボデーの剛性最適化等の改良を施すことで Fig. 11 に示すようにポンプ全効率として 80%を得た．その結果，Fig. 12 に示すように市販ポンプの全効率に対して十分優位性のある性能結果を得た．

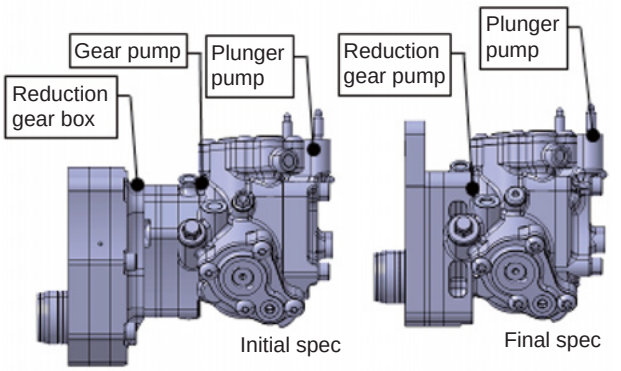


Fig. 10　High-pressure fuel pump

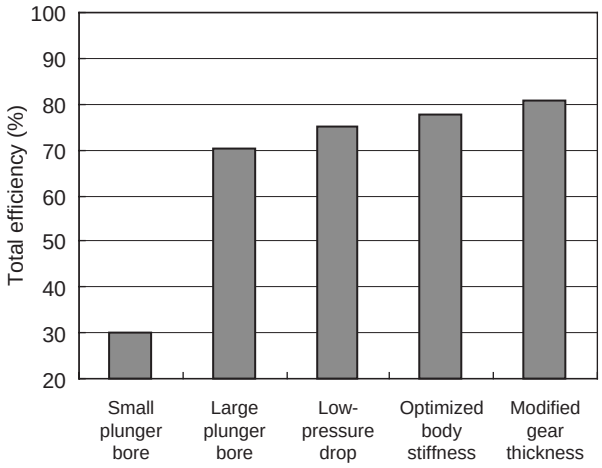


Fig. 11　Fuel pump characteristics

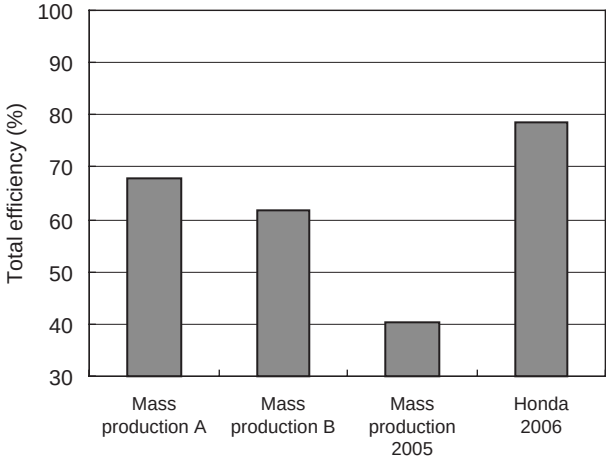


Fig. 12　Fuel pump characteristic comparison

4．可変燃圧レギュレータの開発

2006年シーズンの燃料供給系開発はインジェクタの大流量化による短時間噴射をおこなうことにより出力向上を図ったが，技術課題として，エンジン低負荷領域やアイドル運転領域における微少流量域での高燃圧での噴射流量制御が困難となった．そこで低負荷領域やアイドル運転領域の燃圧を低圧化させ，高負荷領域ではエンジン出力を最大限に生かすように燃圧を高圧化できるダイヤフラム背圧制御方式の可変燃圧レギュレータを開発し，高燃圧大流量インジェクタの流量制御を成立させた．

4.1. 可変燃圧レギュレータ構造

可変燃圧レギュレータの構造と作動原理を Fig. 13 に示す．可変燃圧レギュレータはダイヤフラムによるリターン方式の調圧レギュレータを基本とし，レギュレータのダイヤフラムに背圧をかける背圧スプリング室(以下背圧室という)へ強制的に燃圧をかけてダイヤフラムの差圧を一定に維持したまま調圧を高燃圧化させる機構を適用した．背圧室に対する燃料供給は供給経路に設けたオリフィスによって一定の流量に保つ．また，背圧室の燃圧を一定にするために小型ニードルバルブレギュレータを設定した．小型ニードルバルブレギュレータは微少流量をコントロールするため，小型ニードルバルブレギュレータの前にもオリフィスを設けて調圧性を保った．

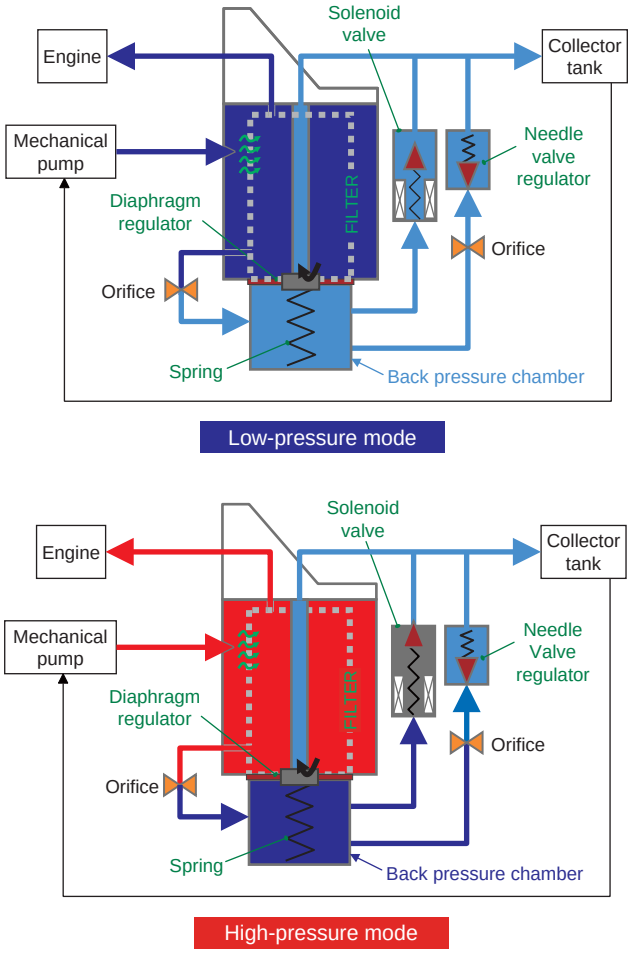


Fig. 13　Variable fuel pressure regulator system

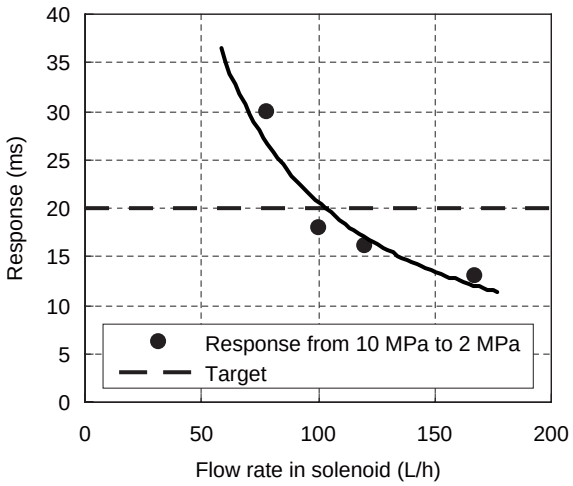


Fig. 14　Fuel pressure response characteristics

可変燃圧レギュレータにおける燃圧コントロールは，低圧側に切り替える時にはソレノイドバルブを開いて背圧室の燃圧を抜いて，本来のスプリング力のみでのダイヤフラム差圧による燃圧調整をおこなう．高圧側ではソレノイドバルブを閉じて背圧室に燃料を供給する．

4.2. 可変燃圧レギュレータ性能

可変燃圧レギュレータの主要要求性能として，高圧側と低圧側の燃圧切り替えの応答性能が挙げられる．燃圧切り替えが不十分な状態だと，インジェクタの実噴射流量が不安定になり，エンジンの燃焼状態が変化して空燃比制御が困難になり，エンジン出力が不安定になる．その不具合を防ぐために，低圧側から高圧側への切り替え応答性を 500 ms 以内，高圧側から低圧側への切り替え応答性を 20 ms 以内に設定した．

低圧側から高圧側への切り替え応答性は可変燃圧レギュレータ内部の燃料通路オリフィスサイズにより設定した．一方高圧側から低圧側への切り替え応答性は燃圧切り替え用の電子制御ソレノイドバルブの流量により設定され，その仕様を最適化することで応答性を達成し，空燃比安定性を実現した(Fig. 14)．

5．高圧燃料系耐久性能評価

高圧燃料ポンプおよび可変燃圧レギュレータについては実走耐久性を考慮し，確認テスト方法として単体でのモード運転によるポンプ回転頻度での保証をおこなった．評価設備は，実車と同じエンジン制御コンピュータを用いてサーキット走行モードを再現できるポンプ，レギュレータ，インジェクタ専用の単体試験装置を用いた．

燃料ポンプの耐久性の重要な着目点としては，ボデー剛性，潤滑性能，各部構成部品のタフネス等が挙げられ，レギュレータに関してはボデー剛性，内部樹脂パーツの膨潤タフネス等が挙げられる．

それらを改善することで，複数レース運用を可能とするメンテナンスインターバルを確保できる耐久性を確立した．

6．インジェクタ開発

6.1. インジェクタ仕様

2008 年までの参戦においてインジェクタ開発は Table 1 に示すように大きく 5 段階に分けることができる．年代を追ってその開発内容を紹介する．

Table 1　Injector type

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Year	'00 - '03	'04	'05	'06 - '07	'08
Inj layout	Top	Top + NI	Top + NI	Top	Top
Fuel pressure (MPa)	1.2	1.2	5	10	10
Static flow (L/h)	43	43 (NI:33)	55 (NI:55)	78, 100	100
Hole type	Pintle	Pintle (NI:Multi)		Multi	Multi
Number of holes	–	(NI:6)		6, 10, 24	24

6.1.1. Phase 1(2000年 - 2003年)

インジェクタ配置を Fig. 15 に示す．インジェクタは吸気ファンネル上部に設置され(以下 Top インジェクタという)燃料圧力 1.2 MPa での噴射であり，単噴孔ピントルタイプの円すい形噴霧を用いている．

6.1.2. Phase 2(2004年)

吸入効率，過渡領域のレスポンス向上をねらい，吸気バルブ近傍にインジェクタ(以下 NI：Near valve Injector という)を追加し，Topインジェクタと合わせて気筒あたり２本配置とした．NIはバルブ近傍に取り付けられるため，マルチホールタイプの噴孔を採用し，各ポートを直接ねらう２方向噴霧とした．また，微小流量を精度よくコントロールする必要から Top インジェクタに対し流量は少ない仕様とした．

6.1.3. Phase 3(2005年)

高圧噴射による燃料微粒化でのエンジン性能向上をねらい，燃料圧力 5 MPa のシステムを投入した．NI については従来品の内製インジェクタを改良し，高燃圧対応をおこない適用したが，Top インジェクタおよびポンプ，レギュレータ等については市販のものを適用した．

6.1.4. Phase 4(2006年 - 2007年)

Phase3 の NI インジェクタを改良することにより燃料圧力 10 MPa 対応とし，実戦へ投入した．2006 年より燃料圧力はレギュレーションにて 10 MPa の上限規制となり，さらにインジェクタも気筒あたり１本に制限された．そのため，インジェクタの噴霧開発としては NI の効果を Top の１本で得るべく，エンジンレスポンスへの影響も噴霧選定基準に追加し開発をおこなった．

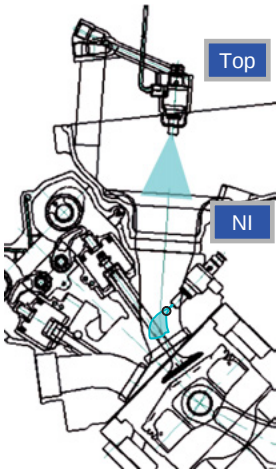


Fig. 15　Injector layout 2

シーズン中もエンジン性能向上のため，インジェクタの流量増加による短時間噴射，噴孔数増加による微粒化促進の開発を展開した．Phase 4の最終噴霧仕様としては，24孔，円すい型噴霧となる．また燃圧規制により，噴霧特性の重要度が増したことで，噴霧特性の新しい評価手法に関しての研究および，次世代インジェクタの仕様検討を開始した．

6.1.5. Phase 5(2008年)

前年に確立した噴霧計測評価手法を用い，噴霧の差異が実機性能に及ぼす影響を解析し，最適噴霧コンセプトを構築した．

新設計のインジェクタにこのコンセプトを反映し2008年開幕戦より実戦投入した．レギュレーションにより性能向上目的でのインジェクタ仕様変更は不可となり，シーズン中は信頼性向上の改良を随時おこなった．

以下に F1 最終仕様である Phase 5 について紹介する．

6.2. インジェクタ開発コンセプト

6.2.1. 小型軽量化

インジェクタ小型化はそれ自体の軽量化，レイアウトの自由度向上の他，デリバリーパイプ等も軽量化することが可能となり，エンジン上部に搭載されるインジェクタおよび，燃料系関連部品の重量が減少し，エンジンの重心位置の低下にも貢献する．

6.2.2. 流量特性改善

F1 エンジンにおいては最大 19000 rpm という高回転運転下においても，短期間に大流量を噴射させることにより燃料噴霧拡散を促進させ吸気冷却効果を得る必要がある．

また，アイドル，オフスロットル時の微小流量下においても安定して噴射しなければならず，これらを両立した流量特性実現のためには，インジェクタのニードルバルブの応答性向上が主眼となる．

6.2.3. 噴霧特性改善

噴霧特性としてはフォーム角，粒径，拡散，ペネトレーションのバランスが重要であるが，微粒化，拡散とペネトレーションはトレードオフの関係にあり，一方を向上させると他方の低下を招く．従来のインジェクタではそれらの各特性値は限界に達してきており，性能向上が急務となった．

そのような状況でレギュレーションにより燃圧の上限値が規制されたことで，燃料圧力がもつエネルギーを効率よく噴霧特性に生かすべく，インジェクタ内部の噴孔部(噴孔プレート)にかかる実際の燃料圧力(以下プレート前圧という)に着目した(Fig. 16)．インジェクタ内部の圧損低減にてプレート前圧を向上させ，実際に燃料圧力増加と同等の噴霧特性を引き出すものとする．

6.3. インジェクタ開発技術および性能

6.3.1. 小型軽量化

Fig. 17にインジェクタ外観を示す．小型軽量化のためにはインジェクタ用として開発した新磁性材(コバルト鋼)を適用した．また，ニードルバルブの構造を変更しニードルバルブ全長の短縮をおこなった．さらに，インジェクタのサイズはコイルの巻き数によって決まるため，巻き数を減少させた．

ただし，巻き数減少は，吸引力の低下につながるため，磁気回路の最適化，駆動電流増加にて吸引力は向上させた．

Table 2 にサイズおよび，コイル仕様を示す．

6.3.2. 流量特性

2007年型インジェクタでは可変燃圧制御なしではアイドルから全開まで安定した噴射をおこなうことが不可能であったが，新型インジェクタでは全域高圧下での燃料噴射を目標として開発した．その実現のため，可動部位であるニードルバルブの軽量化，磁性材，磁路変更での磁気特性向上，コイル巻き数減(抵抗値低減)の電流立ち上がり改善による起磁力の立ち上がり向上，駆動電流増加でのバルブ吸引力増加によりニードルバルブ立ち上がり応答性を向上させた．吸引力の向上分によりスプリングセット荷重増加が可能となり，ニードルバルブ立ち下がり応答性の向上も可能とした．

また，駆動電流波形の見直しもおこない，電流に対する燃料流量の直線性の向上を実現することにより，最終的には2007年と同等の噴霧であれば，全域高圧下の燃料噴射を達成した．

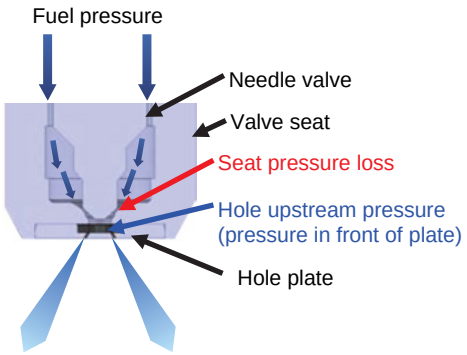


Fig. 16　Injector internal fuel flow (2007 model)

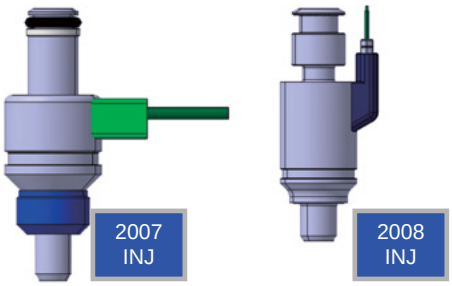


Fig. 17　Injector body shape

Table 2　Injector specifications 1

Year	2007	2008
Length (mm)	57	48
Diameter (mm)	20	16
Weight (g)	65	38
Number of coil windings	268	100
Coil resistance (Ω)	2.8	1.0
Operating current (A)	Peak: 2.4 Hold: 0.6	6.0

Table 3　Injector specifications 2

Year	2007	2008
Static flow (L/h)	100	100
Angle of spray (deg)	53	53
Seat diameter (mm)	ϕ 1.30	ϕ 1.48
Valve stroke (mm)	0.10	0.15
Plate thickness (mm)	0.4	0.2
Number of holes	24	24
Hole diameter (mm)	0.100	0.090

しかし，高出力化への噴霧改善を目的としたプレート前圧向上のため，ニードルバルブストロークの拡大および，シート径拡大をおこなったことから，低負荷および，アイドル領域の微小流量の制御は困難となり，結果として可変燃圧制御を継続採用した．

これは，噴霧特性の向上によるエンジン性能への効果と可変燃圧制御システムの廃止による実車性能(軽量化)への効果を比較検討した結果，噴霧特性向上が重要との判断によるものである．

6.3.3. 噴霧特性

シート部絞りでの圧損の低減としてストロークおよび，シート径の拡大をおこない，プレート前圧を向上させた．Table 3 に変更箇所，Fig. 18 に構造を示す．

また内部燃料通路の形状最適化，シート形状を球面として燃料流れを改善した．それらの効果によりプレート前圧は燃料供給圧力 10 MPa の設定で 4.7 MPa から 8.9 MPa へと上昇させることができた．

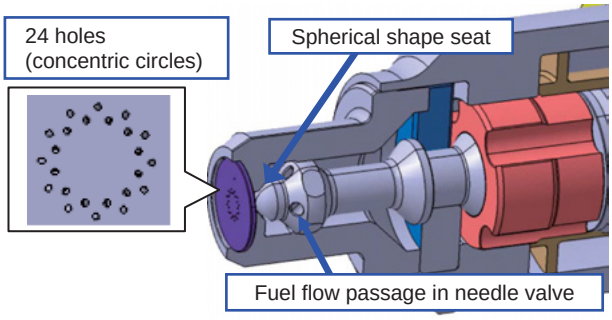


Fig. 18　Injector internal structure (2008 model)

これによりトレードオフの関係にある噴霧性能(粒径，ペネトレーション，拡散)を高いレベルで両立することが可能となり，2.1節で述べてきた事象解析をふまえ，噴霧仕様としては，実機性能上最適となる24孔，円すい型噴霧を採用した(Fig. 19)．

微粒化に関しては平均粒径(SMD)約17μmを実現した．

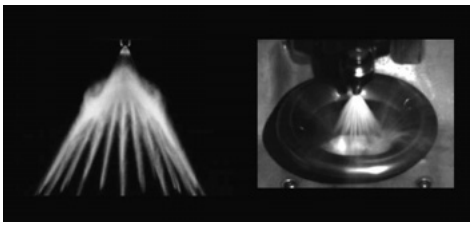


Fig. 19　Atomization achieved by 24-hole injector

7．まとめ

(1)高圧ポンプおよび，可変燃圧レギュレータ開発

ポンプ吸入ポートの圧力損失低減，プランジャピストンのサイズ最適設定等により，ポンプ効率80%を実現した．

また，可変燃圧レギュレータも適用することにより，インジェクタ大流量噴射を実現し，エンジン出力向上および，低負荷時の微小流量安定性を両立した．

(2)高圧インジェクタ開発

・新磁性材を採用し，構造および，駆動電流を見直し，小型化を実現した．

・燃圧の上限が規制されるなか，微粒化によるさらなる燃焼効率向上を目指し，インジェクタ内部圧損を低減させ，実際に燃圧を増加させた場合と同じ噴霧特性を実現した．

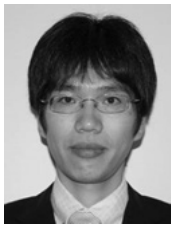
(3)エンジン性能

高燃圧化によりインジェクタ最大流量増大が可能となり，短時間噴射により燃料噴霧拡散を促進させ，吸気冷却効果を得ることができた．また，微粒化により吸気と燃料のミキシングも向上し燃焼効率改善となり，これらの効果により，参戦当初と比較し燃料系の開発で，約 15 kW の出力向上を得た．

■著　者■

棚橋哲哉

小野和二



早船正典

澤田陽介

清水淳史