

# F-1用V-12高性能エンジンの開発

## Development of F-1 V-12 High-performance Engine

園田 俊也\*

Toshinari Sonoda

小川 徹\*

Toru Ogawa

青木 朗雄\*

Akio Aoki

森 丈夫\*

Joubu Mori

西澤 一俊\*

Kazutoshi Nishizawa

柴田 光弘\*\*

Mitsuhiro Shibata

### 要 旨

### ABSTRACT

ホンダは1992年のF-1レース用に、V12、3.5ℓ自然吸気（NA）エンジン、RA 122E/Bを開発した。

このRA 122E/Bは、レース用エンジンとして単に小型軽量、高性能を追求したことにとどまらず、空気圧バルブスプリング、可変吸気管長システム、5分割スカベンジングシステム、およびモータ駆動スロットルシステムの採用により、高機能化を図ったエンジンである。

適切な主要諸元の選定とこれら新システムの採用により回転限界の向上、熱効率の改善、低フリクション化が行われ、最高出力570kW/14400rpm、乾燥重量154kgwを達成した。

本報告では、RA 122E/Bの主要諸元、出力性能、および各新システムの概要について紹介する。

The RA122E/B" is a naturally-aspirated V-12 3.5-liter engine, and was developed by Honda Motor Co., Ltd. for the 1992 Formula-One Championship Racing season.

The development program for the racing engine was not confined to the pursuit of light weight, compact size and high performance. It was far ranging in scope, including the provision of a pneumatic valve return system, variable induction system, five-section scavenging system and motor driven throttle system to give the engine a high level of functionality.

The main characteristics and the new systems incorporated in the RA122E/B engine increased the maximum engine speed, enhanced thermal efficiency and contributed to lower friction. The maximum power was 570kW at 14,400rpm, and the engine has a very light dry weight of 154 kg. This paper describes the main specifications, performance and new systems incorporated in the RA122E/B engine.

### 1. ま え が き

当社は、F-1レースに対し、1988年まではターボエンジン<sup>1)</sup>を、1989年以降はNAエンジン<sup>2)</sup>を供給した。1992年にはRA 122E/B型V-12気筒エンジンを開発し、多くの方々のご支援のもと、レースにおいて年間5勝の成績を残すことができた。

F-1は、走行距離が約300kmと比較的短いスプリントレースであることから、これに供給するエンジンには、300km強を走り切るのに必要十分な耐久性を有する事を条件として、限界を極めた高い出力性能と小型軽量化が要求される。このため最大12気筒のレギュレーションのもとに、各社V8、V10、V12の異なった型式のエンジ

ンを製作し、いずれも耐久性の確保と高性能、小型軽量を狙った開発競争が行われている。

RA 122E/Bは小型軽量化はもとより、更なる高性能化、高機能化を目指して、適切な主要諸元の選定に加えて空気圧バルブスプリング [Pneumatic Valve Return System (以下P V R S)]、可変吸気管長システム [Variable Induction System (以下V I S)]、及び5分割独立スカベンジングシステムを採用し、更にスロットルバルブコントロールには、F-1エンジンとしては初めてモータ駆動スロットルシステム [Drive By Wire (以下DBW)]を採用した。

本稿では、このRA 122E/Bの主要諸元、出力特性、及び各新システムの概要について紹介する。

\*和光研究所 \*\*栃木研究所

2. 主要諸元

Table 1にRA 122E/Bの主要諸元を、Fig. 1, 2に外観及び断面図を示す。

RA 122E/Bでは、バンク角を前年モデルの60° から75° とすることによりエンジン全高を約20mm下げ、かつオルタネータ、フューエルポンプ、VISアクチュ

エータをVバンク内へ設置して、各取り付け部の支持剛性の向上とスペースの有効活用を図った。

また、エキゾーストマニホールドは車体レイアウト上ラジエタ後方に位置しており、その全幅は冷却効率に影響するためRA 122E/Bでは、オイルポンプ、ウォーターポンプ等の補機類を全てエンジン前半部に配置してエキゾーストマニホールドの拡幅を防ぎ、テールパイプをエンジン付近に位置させる事で排気系レイアウトをコンパクトにした。

性能面では、レース競争力を維持するため毎年4～5%の出力向上が必要とされ、RA 122E/Bも前年モデルより最高出力で30kW、最高出力発生回転数で

Table1 Main Specification of the RA122E/B

Type	75° V12
Displacement (cm <sup>3</sup> )	3 4 9 6
B×S (mm)	88.0 × 47.9
Compression Ratio	12.9
Valve Train	DOHC, 4 Valve pneumatic valve return system (PVRs)
Fuel System	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electrically-controlled sequential injection</li> <li>• 2 injectors per cylinder</li> </ul>
Ignition System	Electrically-controlled distributorless CDI
Intake System	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Butterfly type-motor-driven throttle (DBW) with 12 valves in a row</li> <li>• Variable induction system(VIS)</li> </ul>
Cooling System	Single water pump
Lubrication system	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dry sump</li> <li>• 5-section scavenging system</li> </ul>
Weight (kg)	154 (dry)

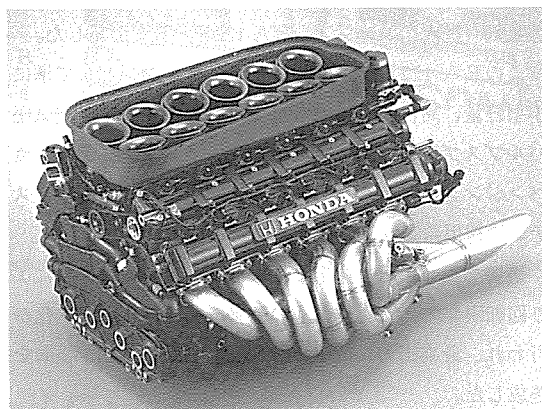


Fig. 1 External View of RA122E/B

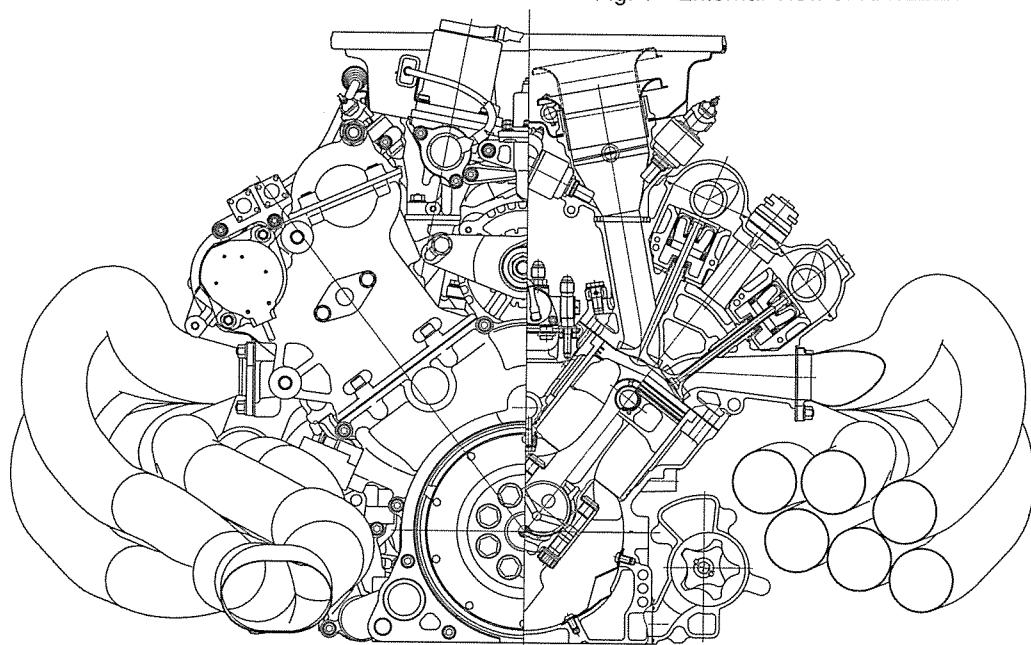


Fig. 2 Cross Section of RA122E/B

700rpm の向上を狙いとして、基本諸元であるボア／ストロークを88mm／47.9mmと設定した。

動弁系は、インレットバルブにチタン合金を、エキゾーストバルブに中空構造のニッケル合金を使用し、後述のP V R S構造とともに軽量・高回転化を図っている。

燃料系は、電子制御のシーケンシャル噴射で、インジェクタを各気筒に2個ずつ配置している。また、インレットバルブの開弁時間内に燃料噴射を終了させるために最適な噴射時期、時間及び燃圧を設定している。

スロットル系は、レスポンス及びセミオートマチックトランスミッションとのマッチングの観点より12連バタフライ～DBW方式を採用し、点火系は電子制御C D I デスビレスで各気筒に独立したコイルを持つ構成とした。

冷却系、潤滑系では、従来のエンジンの両側並列配置のポンプ類を片側ずつに集約させることにより、冷却水、潤滑油容量の低減も含め軽量化を図った。

次に、主な機能部品では、シリンダブロックはアルミ鋳造ハーフスカート構造とし、ロアケースは軽量、高剛性を狙いにFig. 3のようにラダービーム部とオイルパン部を一体とし、材料はマグネシウム鋳造材<sup>3)</sup>を使用した。

クランクシャフトは、カウンタウエイトの重量が主軸受荷重や振り振動に大きく影響し、幾つか試作、検討を行いフリクション、振動、重量の最適点でウエイト量を決定した。

ピストンは、天井部温度を低減させるためにオイルジェットによる冷却を行っており、約10～20℃の冷却効果が得られている。

最終的にRA 122E／Bは、P V R S、V I S、DBW等のシステムを付加したにもかかわらず、積極的な軽量化で前年モデルに比べ6kgの軽量化が達成され乾燥重量で154kgとなった。

### 3. 出力特性

Fig. 4にRA 122E／Bの出力特性を示す。点火時期はMBTであり燃料は市販の無鉛ハイオクである。

高回転化によりオーバラン域でのバルブジャンプ時の干渉を避けるためのピストンのリセス部分が深く、また高回転化に対応するためS／B（ストローク／ボア）比を0.544とした事に伴い燃焼室が扁平となり、開発初期には熱効率の悪化がみられた。これに対し、DBWとセミオートマチックトランスミッションの採用により、シフトダウン時のオーバランを防ぐ事でリセス部深さを

縮小させて高い圧縮比を維持し、更にピストン頭部形状を改良する事により熱効率を改善させることができた。

更に、ピストンリング仕様の最適化によるブローバイガス低減、5分割スカベンジングシステム採用によるオイル回収性向上、クランクケース内圧力の低下によるフリクション低減を行った結果、最高出力570kW／14400rpm、排気量当り出力では163kW／ℓを達成することができた。尚、1992年のドイツグランプリ以前に使用していた特殊燃料を用いた場合は600kW以上を発生した。

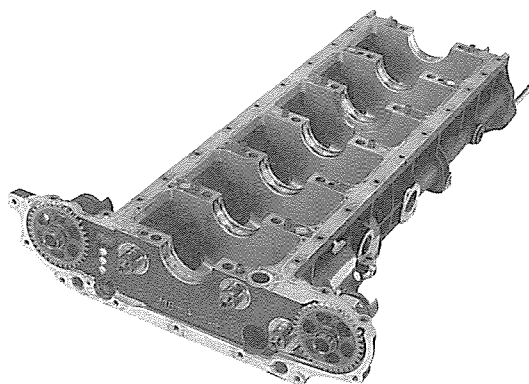


Fig. 3 Lower Case Incorporating Magnesium Casting

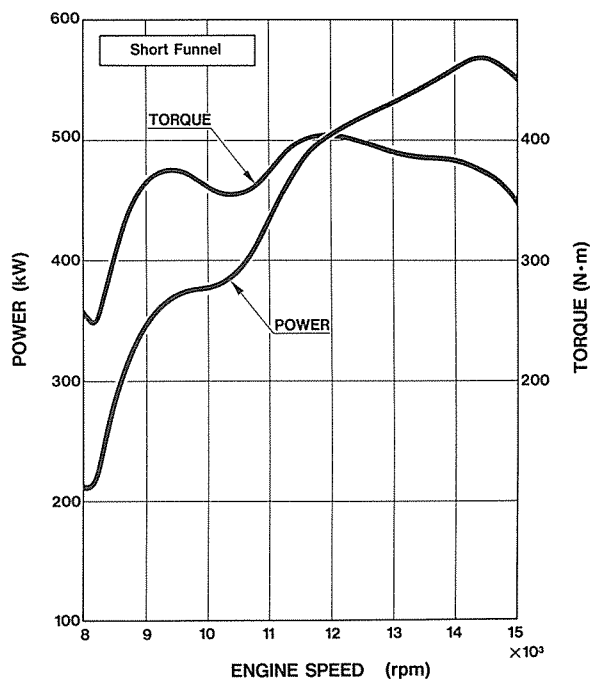


Fig. 4 Output Characteristics

4. 新システム概要

4.1. P V R S

近年F-1エンジンは出力競争の激化により高回転化が急速に進んでおり、当社も最高エンジン使用回転数を毎年5~7%上昇させてきた。そのため、必要十分なバルブリフト量を維持しつつ、サージング等により発生するバルブスプリングの応力について安全率を確保する事が非常に困難となり、また、バウンス発生回転数を上げるためにバルブスプリングのリフト荷重を増加させる手法も、Fig. 5に示すように有効な回転数向上の手段とならないため、RA 122E/Bではコイルスプリングに換えて動弁系の軽量化を可能とするP V R Sの採用に踏み切った。

P V R S概要図をFig. 6に、またコイルスプリングとの等価慣性重量比較をTable 2に示す。等価慣性重量の約30%を占めるコイルスプリングを空気シール構造に置換したP V R Sは、全体で20%の軽量化が図られている。

作動ガスは、安全性・入手性を考慮しN<sub>2</sub>を使用し、レース中に各シール部からのリークを補うのに必要な量を高圧ボンベから供給するシステムとした。

約15MPa(abs.)に蓄圧されたガスは、通常のバルブスプリングセット荷重程度に近づけるために0.6~0.8MPa(abs.)までレギュレータで減圧され、ピストン及びピ

Table2 Comparison of Evaluated Masses in Working Order

Parts	P V R S	Coil Spring
Coil Spring & Retainer	—	53.7
Piston and Seal Ring	27.8	—
Others	74.0	74.0
Total	101.8	127.7

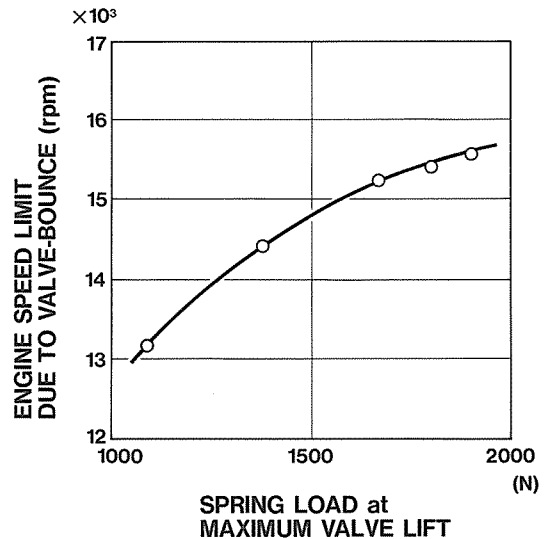


Fig. 5 Relationship between Spring Load at Maximum Valve Lift and Engine Speed Limit due to Valve Bounce (when coil spring are used)

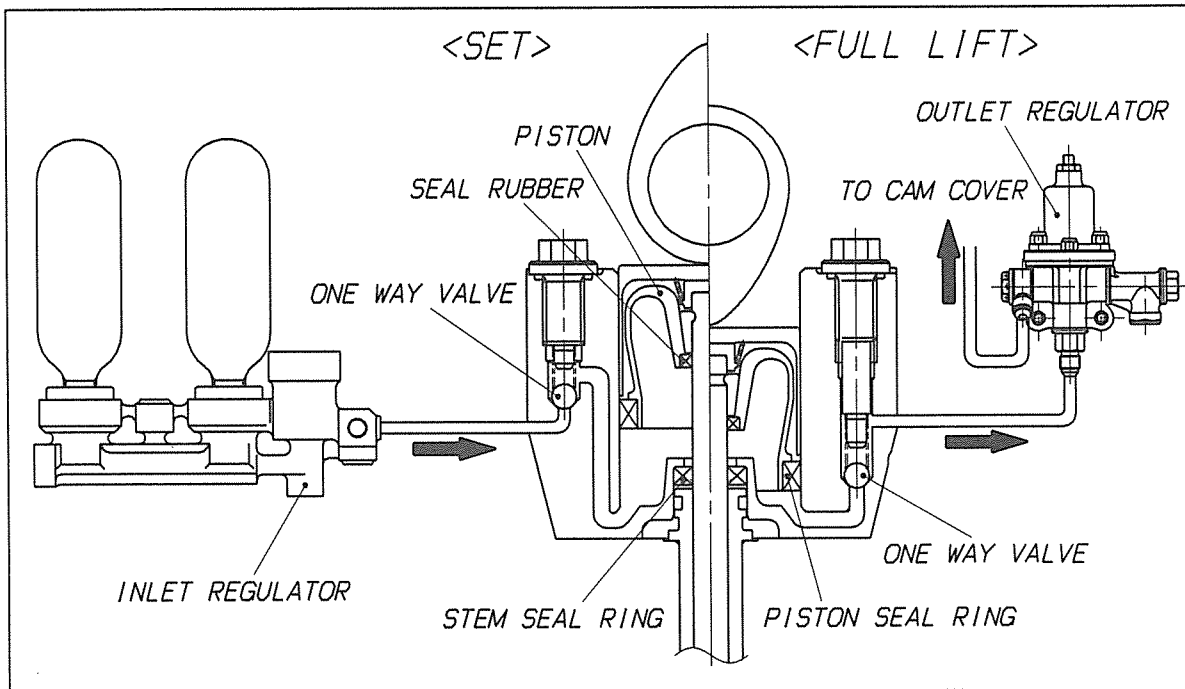


Fig. 6 Cutline of P V R S

ールリング類で形成されたシリンダ室に 1 way バルブを介して供給される。

シリンダ内のガスは、バルブのリフトに応じて圧力上昇し、その反力でバルブのジャンプ挙動を抑えるメカニズムであるが、このシリンダ内の圧力変化は次式で示されるように、従来のコイルスプリングとは異なりバルブリフト量の指数関数となる。

$$F_L = S \cdot P_0 [V_0 / (V_0 - S \cdot L)]^{\kappa} \dots\dots P V R S$$

$$F_L = F_0 + K \cdot L \dots\dots\dots \text{コイルスプリング}$$

$F_L$ : リフト時荷重                       $\kappa$ : 窒素ガスの比熱比

$L$ : バルブリフト量                       $F_0$ : セット時荷重

$S$ : シリンダ断面積                       $K$ : コイルスプリング

$P_0$ : セット (バルブリフト0)              バネ定数  
時のシリンダ内圧力

$V_0$ : セット時シリンダ容積

P V R S とコイルスプリングの荷重特性の違いを Fig. 7 および Fig. 8 に示す。

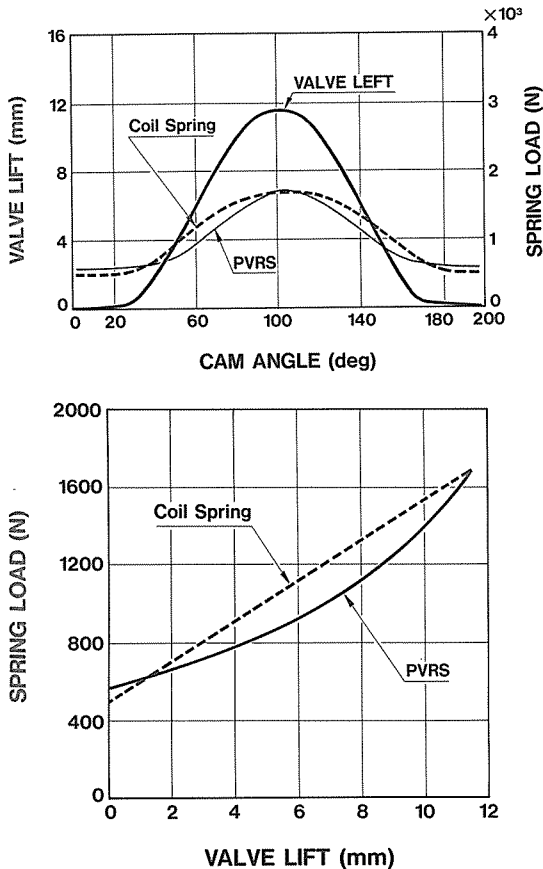


Fig. 8 Comparison of Load Characteristics (2)

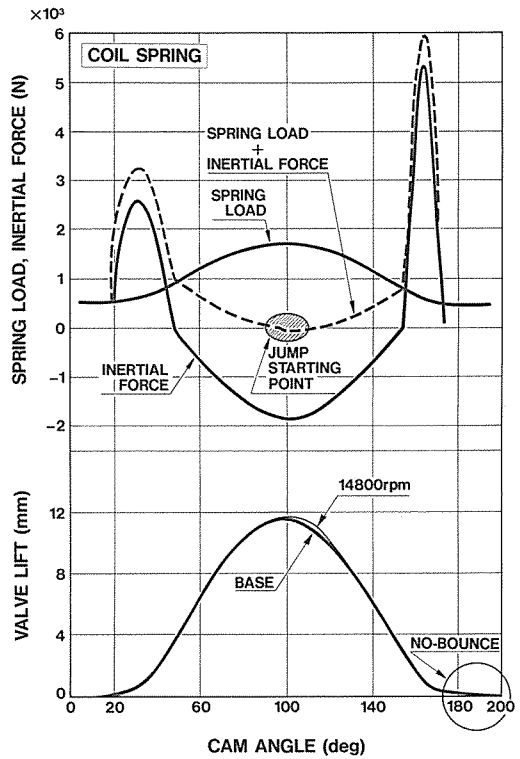


Fig. 9 Load Characteristics and Valve Behavior for Coil Spring System (14800rpm)

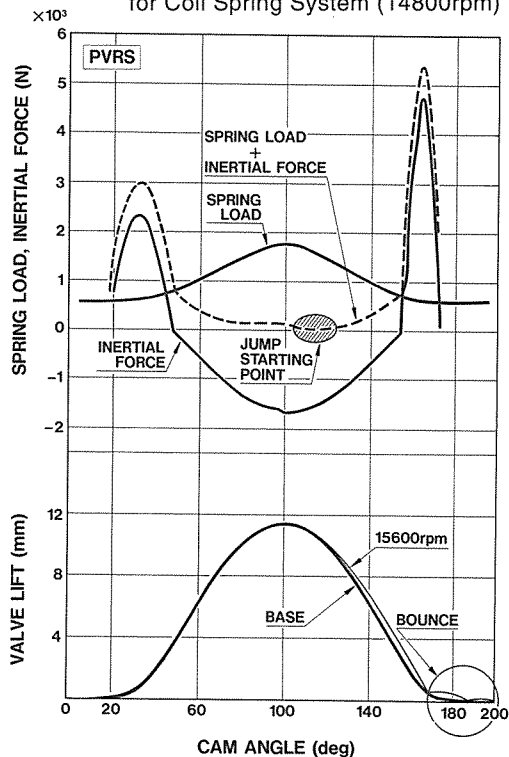


Fig. 10 Load Characteristics and Valve Behavior for PVRS (15600rpm)

RA 122E/Bのバルブリフト特性は、排気行程後TDC近傍でのピストンとの干渉を回避するために非対称のカーブとしており、このためインレットのバルブ加速度特性はバルブの開き側と閉じ側で異なり、閉じ側が正、負の加速度とも大きくバルブジャンプが発生しやすい。この様な加速度特性の中でコイルスプリングとPVR Sの荷重特性と慣性力との合成を比較してみると、PVR Sの方が明らかに最大リフト後にジャンプが発生しやすい特性となり、この影響でバウンスが起きやすくなる。(Fig. 9,10)

これに対しインレットのリフトカーブに、開き側に負の加速度ピークを有する特性を考案し、修正を加えることにより、Fig.11に示す様にジャンプ、バウンス形態を改善することができた。

修正カムプロフィールを用いることにより、同一最大リフト荷重下で約800rpmのバウンス発生回転数の向上が得られた。(Fig.12)

また、開発当初シール部分<sup>4)</sup>の摺動等に伴うフリク

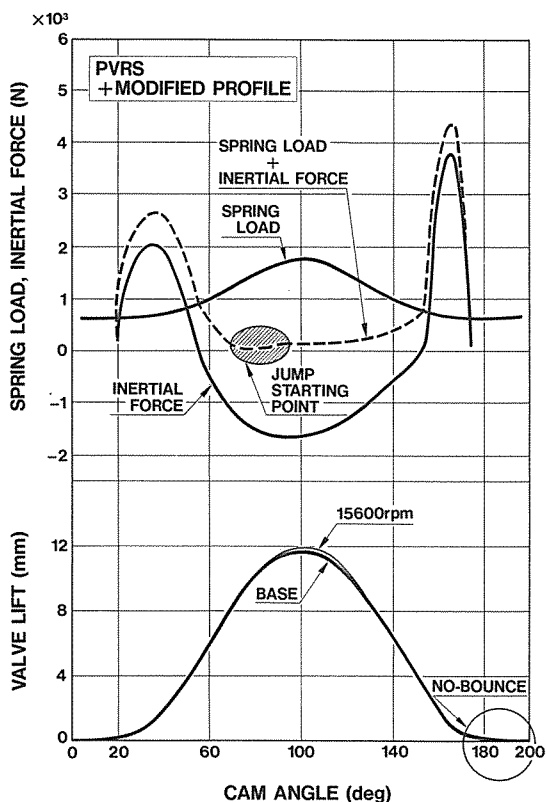


Fig. 11 Load Characteristics and Valve Behavior for Modified Lift Curve (PVR S)

ションの増大が懸念されたが、設定圧力の適正化により同一リフト荷重を有するコイルスプリングの場合とほぼ同等のフリクション値を得た。(Fig.13)

また、運転中に、シールリングの微小オイルの流入やシリンダ内温度上昇等で、シリンダ内のリフト時の圧力が設定値を上廻る事があり、それを制御するため排気通路を設け、1 wayバルブとその下流のレギュレータバルブにより圧力をコントロールしている。圧力のコントロールの精度は、主に排出側のレギュレータに依存してい

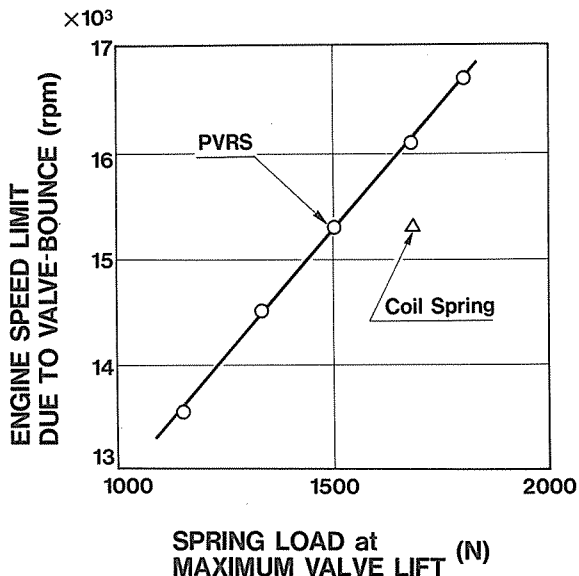


Fig. 12 Comparison of Engine Speed due to Valve Bounce

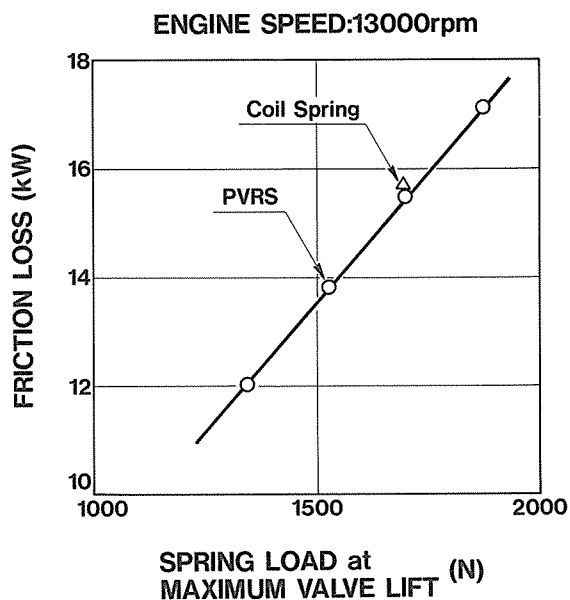


Fig. 13 Comparison of Valve Train Friction

るが、コイルスプリングのような運転中の荷重特性劣化がほとんどないため、リフト荷重設定も必要最低限におさえて使用することが可能で、フリクション低減にも効果が得られた。

4.2. V I S

公道のサーキットも含むF-1レースにおいてはコーナーからの立ち上がり加速性に対する要求は強く、最高出力のみならずワイドトルクを有する出力特性が望まれる。このために可変バルブタイミング、可変吸排気等の機構も考えられたが、RA 122E/Bでは構造がシンプルな可変吸気管長システムを採用してトルクバンドの拡大を図った。

吸気管可動部はリンクを介して油圧アクチュエータで作動し、リフト量を給・排2個のソレノイドバルブで制御している。(Fig.14)

Fig.15にVISによる出力特性を、Fig.16に最短管長状態での吸入管内圧力を測定した結果を示す。

最高出力発生回転数の14400rpmにおいては、吸入管内圧力は、その脈動がインレットバルブ閉時期に同調し高くなっている。一方、最短管長状態で出力の落ち込みの見られる10500rpmにおいては、脈動は同調せずインレットバルブ閉時期の吸入管内圧力は低い。このような脈動の非同調回転数領域については、エアファンネルを伸長し脈動周期を大きくする事でインレットバルブ閉時期の吸入管内圧力を高め、トルク特性の改善を図っている。

4.3. 5分割独立スカベンジングシステム

当社の従来のドライサンプ方式は、エンジン全域に供

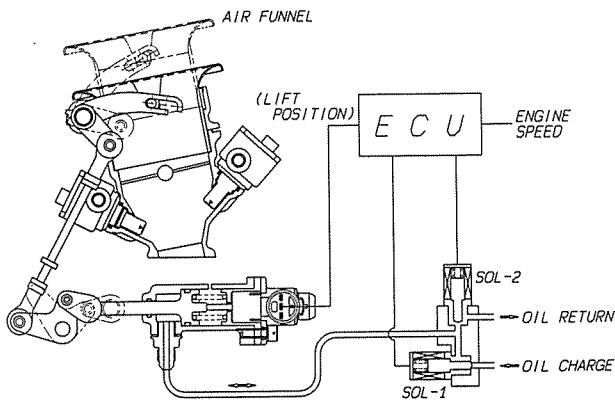


Fig. 14 Outline of VIS

給されたオイルをクランクケース近傍のチャンバに自然落下で集合させ、それを複数のスカベンジングポンプで吸引していたが、高速旋回時や急加減速時はオイルの片寄りで効率よいオイル回収がなされなかった。

RA 122E/Bでは、エンジン内を前後クランクケース、左右カムケース、ギアケースと5分割し、各々にスカベンジングポンプを個別に配置することによりオイル回収性が向上し、搭載オイル容量の低減とフィード側オイルのエアかみ防止に役立った。(Fig.17)

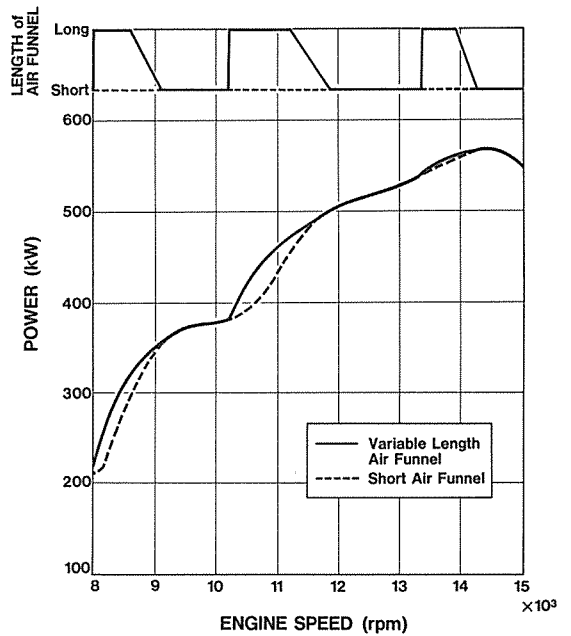


Fig.15 VIS Output Characteristics

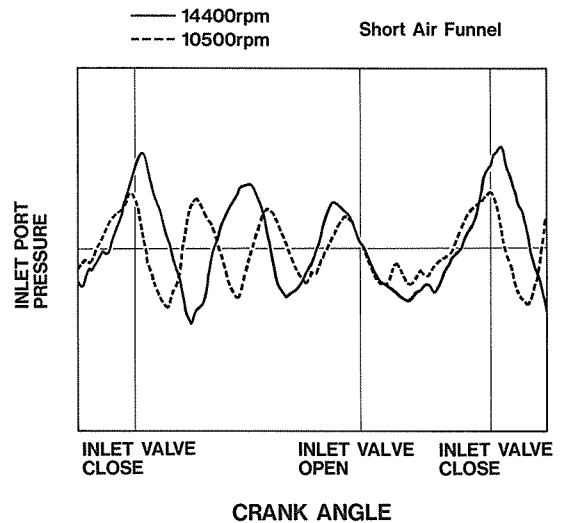


Fig.16 Pressure Inside the Inlet Port

また、クランクケースのスカベンジングの吸引位置は、従来の左右配置に片側配置を比較して同等の結果が得られたため、軽量・コンパクトの観点から片側配置とした。

高速回転を使用するレースエンジンではクランクケース内圧力がフリクションに大きく影響する。RA 122 E/Bでも10kPa 当たり 2.2kW/ 14000rpm の出力変化が確認され、スカベンジングポンプ、ピストンリング、オイルシール、ケース合わせ面の改良を加えることで運転中のクランクケース内を30kPa(abs.) としてフリクションの低減に努めた。( Fig.18)

4.4. DBW

1992シーズンにおいてセミオートマチックトランスミッションが導入されたため、RA 122 E/Bではシフト時のエンジントルク制御を行うためスロットルコントロ

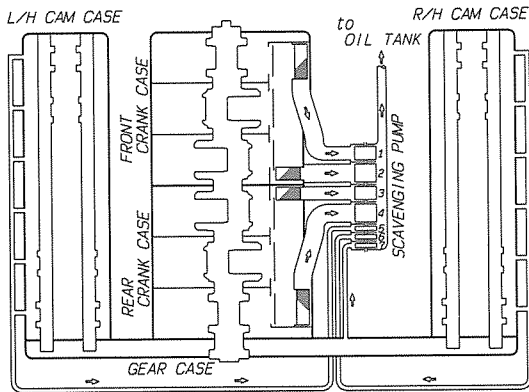


Fig. 17 5-section Scavenging System

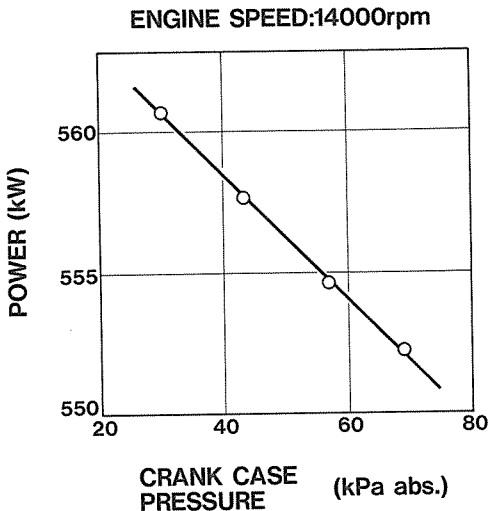


Fig. 18 Crankcase Internal Pressure and Power Output

ールにDBWを採用した。システム図をFig.19に示す。

スロットルのアクチュエータには4相ハイブリッド型ステップモータを採用し、その作動は、マイクロステップにより約 0.1度の分解能と、0.13秒の全閉～全開スピードを実現している。配置は車載性を考慮しスロットルボディ後端とし、ベベルギアを介してスロットルシャフトを駆動する構造とした。

フェイルセーフを考慮してペダルセンサは2個配置としアイドルポジショニングスイッチ ( I P S W ) を設け

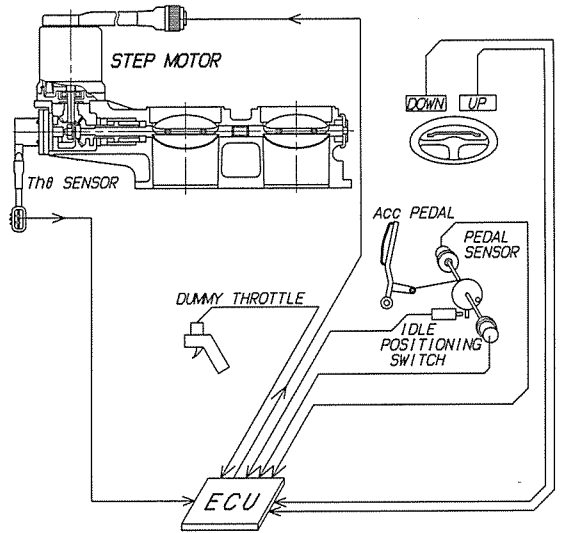


Fig. 19 Outline of DBW System

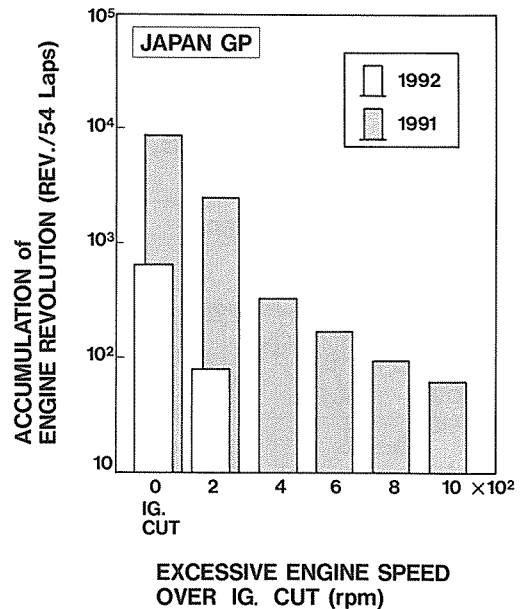


Fig. 20 Frequency Distribution of Engine SSpeed for the Excessive Engine Sspeed over IG Cut



ることで、ペダルセンサの一方が不良の場合も I P S W と他のペダルセンサにより通常通り走行できる様にした。Fig.20 に、'91 (MT) と、'92 (セミAT) とのイグニッションカット回転数以上のエンジン回転数頻度分布の一例を示す。

DBWとセミオートマチックトランスミッションの採用で、設定回転数をこえる領域の頻度が低減され、その結果、動弁系・ピストン系の耐久信頼性保証に大きく貢献することができた。

また、DBWはFig.21 に示すようにアクセルペダル〜スロットルバルブ開度特性をエンジン回転数、並びにシフトポジション毎に設定する事が可能であり、エンジンの運転性（コントロールビリティ）を飛躍的に向上させた。

### 5. ま と め

F-1用V12エンジンRA 122E/Bを開発し、次の結果を得た。

- (1) S/B比 0.544のショートストローク化により燃焼室が偏平となったが、P V R Sのバルブジャンプ挙動改善、DBWのオーバーラン防止によるバルブリセスクリアランスの縮小化により高い圧縮比が維持され、570kW/14400rpmの高出力を達成した。
- (2) P V R Sにおいて、等価慣性重量の低減分(-20%)がバウンス発生回転数の向上(+800rpm)につながる事が立証され、かつフリクションも同一最大リフト荷重下でコイルスプリングと同等であることが判った。
- (3) V I Sを用いた、エンジン回転数に応動させた管長可変化によりトルク特性の向上が得られ、レースエンジン用システムとして優位性があることが判った。
- (4) 5分割独立スカベンジングシステムは、オイル回収性の向上と軽量・コンパクト化に対し有効なシステムである事が判った。
- (5) DBWとセミオートマチックトランスミッションの

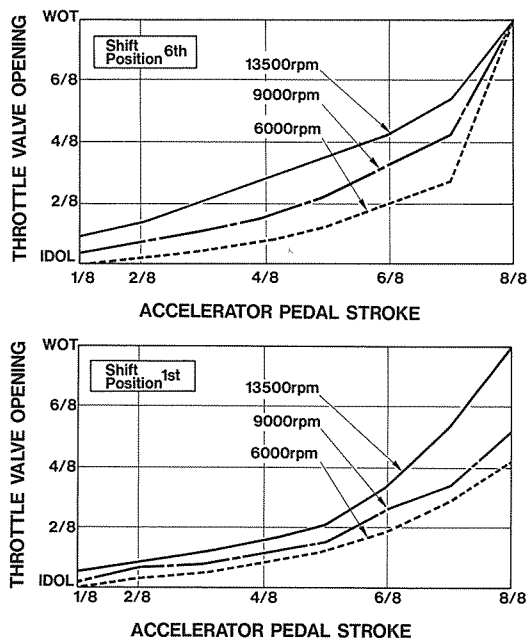


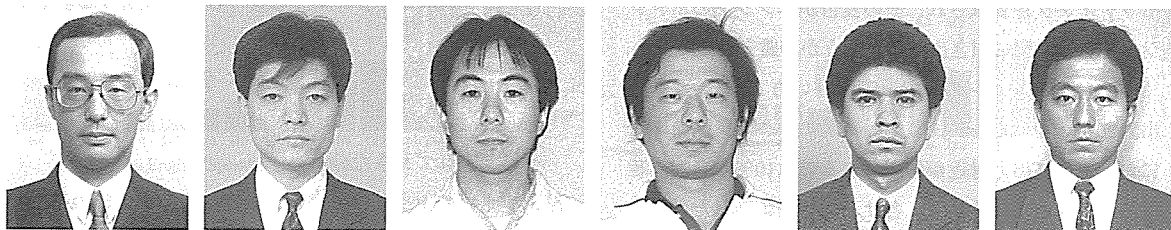
Fig. 21 Accelerator Pedal and Throttle Valve Opening Angle Characteristics

組合せにより、ドライバーの負荷軽減、オーバーラン回避によるピストン・バルブ廻りの信頼性向上、エンジン回転数あるいはシフトポジション毎にアクセルペダル〜スロットルバルブ開度特性を設定する事によるコントロール性向上が可能となった。

### 参 考 文 献

- 1) Yutaka Otobe et. al. "Honda Formula One Turbo-charged V-6 1.5L Engine", SAE 890877
- 2) 青木 朗雄ほか "1次バルブによるF-1エンジンの振動低減", HONDA R&D Technical Review Vol.3 (1991)P92~98
- 3) MEL "ELEKTRON WE54", A new magnesium casting alloy for use up to 300 °C. 資料No.466
- 4) 中出 章ほか "空気圧機器のシール", 空気圧機器シール研究会編、近代編集社刊

### ■ 著 者 ■



園田 俊也 青木 朗雄 西沢 一俊 小川 徹 森 丈夫 柴田 光弘