# 第3期F1エンジン総括

Summary of Honda Formula One Engine in Third-Era Activities

櫻原一雄\*

Kazuo SAKURAHARA

## 要旨

第3期 Honda F1 エンジンとして、V型 10 気筒エンジン(以下 V10)6機種と、V型 8 気筒エンジン(以下 V8)3機種をレースに投入した・第2期のターボ時代に迫る出力を自然吸気で達成するとともに、車輌の重心高、重量配分、空力を重視し、小型軽量化と低重心化を目指した・各部の構造見直し、材料、表面処理の改良、設計技術、評価手法の進歩などにより、第2期に対し自然吸気 V10 同士の比較で、約100 kW/L のリッター当り出力と約6500 rpm の出力ピーク回転数向上、50 mm 以上の全長短縮、約70 kg の軽量化、約50 mm のクランクセンタハイト低減、3倍以上のマイレッジを達成した・V8エンジンもさらなる高回転化をねらい開発を進め、第3期優勝を果たしたが、レギュレーションによる最高回転数制限、ホモロゲーション規定によるエンジン開発凍結などにより、ドライバビリティ(以下DR)の対応に課題を残した・

#### **ABSTRACT**

Honda has entered six models of V-type engines with 10 cylinders (below, V10 engine) and three models of V-type engines with eight cylinders (below, V8 engine) as third-era Honda Formula One engines. The goals of development were to achieve output approaching that of the second era, the turbocharged engine era, with natural aspiration, and to realize a smaller, lighter engine with a low center of gravity, focusing on the vehicle's height of gravitational center, weight distribution and aerodynamics. Revising the structures of different parts, modifying materials and surfacing processes, and making design engineering and evaluation technique progress among other advancements resulted in per-liter power that is 100 kW/L greater than a second-era naturally aspirated V10 engine, as well as having approximately 6 500 rpm higher engine speed for peak output, being more than 50 mm shorter in length and about 70 kg lighter, having about 50 mm lower crank center height and more than three times the mileage. Honda has proceeded with development of V8 engines with the goal of high engine speed and won a third-era victory. However, because of regulations restricting maximum engine speed and an engine development freeze due to homologation regulations, issues relating to drivability (below, DR) have been left unsolved.

### 1.はじめに

第3期 Honda F1 エンジンは 2000 年の参戦復帰に向け 1998 年秋から開発が始まった、2000 年の RA000E を皮切りに、RA005EまでのV10、6機種と、RA806EからRA808E のV8、3機種の、合計9機種のエンジンを世に送り出した、ここでは第3期の総括として、第2期のエンジンの振り返りから第3期への流れを大枠で述べ、その後第2期と第3期の V10 エンジンの比較からその進化を述べる。

# 2.1. レギュレーション

第2期のエンジンは 1983 年から 1992 年までエンジンサプライヤとして10年間開発が続けられた.当時もエンジンレギュレーションの変化が激しく,参戦開始の1983年は 1.5 L 過給エンジンが主流であった.その後 740 kW(1000 hp)を超えるような出力を制限するため,過給圧と燃料総量 規制を実施し Table 1 に示すように,1987 年からは 3.5 L

2.第2期から第3期への流れ

**<sup>\*</sup>四輪**R&D**センター** 

Table 1 F1 engine regulations

Year	Amendments to F1 Engine Regulations		
1984	Engine capacity (with supercharging) : 1.5 L maximum		
	(without supercharging) : 3.0 L maximum		
	Number of cylinders : 12 maximum		
	Fuel storage capacity : 220 L maximum		
	Fuel RON : 102 maximum		
1986 1987	Engine capacity (with supercharging) : 1.5 L maximum		
	Fuel storage capacity: 195 L maximum		
	Engine capacity (with supercharging) : 1.5 L maximum		
	(without supercharging) : 3.5 L maximum		
	Manifold pressure (turbocharged engine): 4.0 bar maximum		
	Fuel storage capacity: 195 L maximum		
1988	Manifold pressure (turbocharged engine): 2.5 bar maximum		
	Fuel storage capacity (turbocharged engine only): 150 L maximum		
1989	Supercharging prohibited		
	Engine capacity: 3.5 L maximum		
1991	Fuel RON: 102 maximum, Fuel MON: 92 maximum		
1992	Fuel RON: 100 maximum, Fuel MON: 90 maximum		
1993	Fuels of a kind used by general public mandatory		
1995	Engine capacity: 3.0 L maximum		
	Fuel sampling at circuit		
	Fuel approval before use		
1999	Throttle and pedal relationship fixed whilst car is in motion		
	Restriction for engine and clutch control (traction control prevention)		
	Cooling system pressure 3.75 bar maximum		
	Fuel incorporate 2000 EU limit		
2000	Number of cylinders : 10 maximum		
	Fuel incorporate 2006 EU limit		
2001	High specific modulus of elasticity material (Be-Al, etc.) completely prohibited		
	Traction and launch control permitted		
2002	Spraying substances other than fuel into engine prohibited		
2003	Parc ferme rule (no engine change between qualifying and race)		
2004	1 engine for 1 race event		
	Launch control and fully automatic gear shift prohibited		
2006	90 degree V8 2.4 L engine		
	1 engine for 2 race events		
2007	Engine homologation (freezing of engine main component development)		
	Rev limit: 19000 rpm		
2009	8 engines throughout 1 race season		
	Rev limit: 18000 rpm		
	KERS (hybrid system) permitted		

自然吸気エンジンに移行が開始され、1989年からは最大12 気筒の自然吸気エンジンに統一された.ワークスとしての参戦を休止した後の 1995 年には排気量が 3.0 L に縮小され V10 が主流となった.ここからレギュレーション変化が小さくなり、V10 3.0 L 時代が 2005 年まで 11 年間続くことになり、第3期として 2000 年から6年間このレギュレーション下での開発となった.その後 2006 年から V8 2.4 L に変更され、V8 初年度で第3期優勝エンジンとなることができた.

# 2.2. 出力

第2期当時のレーシングエンジンに求められた要素も,出力,ドライバビリティ,信頼性,軽量コンパクト性,燃費であり現在と変わりはない.しかし,時代やレギュレーションによりそのプライオリティは異なり,車体の空力がまだシンプルでスリックタイヤが認められていた第2期のエンジンは,とにかく出力に特化したエンジンであった.

Fig. 1 に示すように 1983 年参戦時においても既に 440 kW (600 hp )の出力を有し, 1.5 L V型 6 気筒ターボエンジン(以下 V 6 )の時代は過給圧を上げることによりさらなる出力向上を果たした. 1986 年には 770 kW(1050 hp )まで達し, 3 年間で実に 300 kW 以上向上したため, その結果としてレギュレーション変更により過給エンジンは禁止となった.

また,この時期出力を向上させたもう一つの要因として燃料の開発が挙げられる. Table 1 に示すように,この時代のレギュレーションでは燃料の規制が少なく,特にエネルギー密度の制限が無かったため市販品からかけ離れた燃料が使われていた.1992 年のハンガリー GP からは市販プレミアムレベルの燃料に限定され,特殊な炭化水素の使用が禁止されたため,前戦のドイツGPと比較して,実に32 kW(43 hp)も出力が低下した.これは燃料がエンジン出力にいかに寄与していたかを示す一例である.

第3期においては、1999年以降過当な競争を防止するため市販プレミアムレベルでさらに厳密なレギュレーションとなり、燃料による第2期のような大きな出力向上は達成できなかったが、エンジンの開発が自由に認められていたV10時代には第2期のターボ時代の出力に迫るところまで自然吸気エンジンで性能が進化した。これはエンジン自体の技術が速いスピードで進化したことを示しており、その内容の一部を第2期と第3期のエンジン比較で後述する。

#### 2.3. 重量

エンジン重量の変遷について述べる. Fig. 2 に示すように V6 時代でもエンジン単体重量は 120 130 kg 有り,自然吸気の V10 または V12 3.5 L では 155 160 kg もあった. 当時も軽量化材料としてマグネシウムやチタニウムを

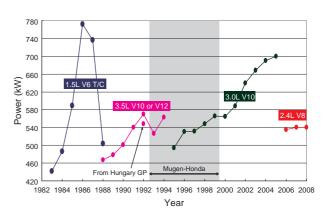


Fig. 1 Honda F1 engine power

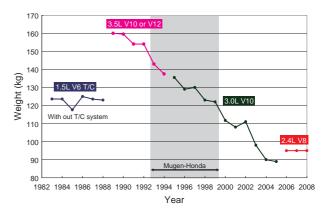


Fig. 2 Honda F1 engine weight

使っていたが、あまり軽いとはいえないエンジンであった. 1992年以降はワークスとしての活動ではなかったが、この時代になると Fig. 1 でわかるようにレギュレーション影響やワークスエンジンの不参加もあり、エンジンの出力は停滞気味となった.このため各車輌チームは重量配分や空力を重視するようになり、エンジンの軽量化と低重心化がそれまで以上に求められるようになった.それゆえ、無限Hondaとして参戦していた時代においても開発が年々進み、1998年には 122 kg にまで達した.

第3期に入りさらに軽量化のニーズが高まり,最後の V10 では 89 kg まで開発が進んだ.

#### 3 . RA100E と RA005E の比較

### 3.1. 外観比較

第2期と第3期において同じ V10 形式同士である,1990年の RA100E と 2005年の RA005E を比較し,大枠で 15年間の進化を述べる.比較数値を Table 2 に示す.

Fig. 3 の外観写真で示すように、RA005E の高さ寸法が低く抑えられていることがわかる。この違いはVバンク角72 度と90 度の差であり、言うまでもなくVバンク角の広いエンジンが低重心になる。V10 エンジンであれば、左右バンクのクランシャフトのピンが共通の場合、ピンに加わる荷重を考慮すると、等間隔爆発のVバンク角72度が理論的に有利である。しかしながら、第3期は初年度の2000年のエンジンからすでに80 度を採用し、不等間隔爆発を

あえて選択している・2001 年も 80 度 , 2002 年は 94 度 , 2003 年から 90 度であり , 完全に等間隔爆発は優先していない・その理由として第 3 期の F1 カーでは車の速さを決める要素として空力向上や低重心化が優先されており , 車輌の一部品であるエンジンは自らの理想を追いかけるのではなく , 車輌パッケージを優先した骨格となっているためである・ルノーに至ってはより低重心化を図るため一時期 V バンク角を 100 度以上に設定していたこともあった・現行の V8 エンジンはレギュレーションで 90 度と定められ選択肢は無くなったが , V10 で既に全チームが 90 度を採用していたため何も問題は発生しなかった・ただしこれは , 今後ルノーのような特徴のあるエンジンが生まれないことを意味している・

#### 3.2. 出力比較

リッター当たり出力を比較すると、RA100E は 143 kW/L、RA005E は 240 kW/L で約 100 kW/L も向上している. 改善要素は体積効率と燃焼効率の向上、フリクションの低減で、これらはエンジン開発の基本であり特別なところはない. 自然吸気エンジンなので体積効率は回転数が支配的であり、出力ピークは RA100E が 12250 rpm、RA005E が 18700 rpm で約 6500 rpm も高い. 高回転化の条件として、

Table 2 RA100E versus RA005E

	RA100E	RA005E
V-Bank angle (degree)	72	90
Power (kW/L)	143	240
Ps peak Ne (rpm)	12250	18700
Engine length (mm)	633.0	581.5
Engine weight (kg)	160	89
Crank center height (mm)	109.0	58.5
Mileage (km)	400	1400

動弁系等価質量低減によるバルブ挙動の安定化とレシプロ 廻りの耐久信頼性の向上が必要であった.具体的にはバケットタイプの直押し構造からロッカアーム方式に構造を変更,さらにバルブをチタニウム材からチタニウム・アルミ合金材とし,ステム部の細軸化を進め等価質量低減を達成した.レシプロ系では,アルミマトリックスコンポジット (AMC)材のピストンや金属間結合製法によるボックス構造コネクティングロッド(以下コンロッド)の採用で往復部重量低減を可能とした.またコンロッドペアリング(プレーンメタル)に熱伝導の良い合金を採用することでクランクシャフトピンとのしゅう動温度を低下させ,高回転信頼性を実現した.

#### 3.3. 全長比較

エンジン体格を比較すると,全長は RA100E の 633 mm に対し RA005E では 581.5 mm で,51.5 mm 短縮されている.シリンダボア径はそれぞれ 93 mm と 97 mm であり RA005E のボア径のほうが 4 mm 大きいので,そのままでは全長は 20 mm 長い 653 mm となるはずである.そこから換算すると 71.5 mm 短くなっている.

このような全長短縮を可能とした技術要素は大きく三つある.一つ目はシリンダブロック(以下ブロック)とシリンダライナ(以下ライナ)構造の一体化が可能となったためである.従来 F1 エンジンではプロックとライナが別体であり,一般的に冷却水が直接接触するウエットライナ構造で



Fig. 3 Engine photo

あった.ライナのピストンしゅう動面には特殊な表面処理 が施されるため, ブロックとは別になっている方が都合が 良く、プロック自体のウォータジャケット設計自由度や、メ ンテナンス時にライナだけの交換で済むメリットがある別 体構造が採用されてきた.しかしながら,近年のブロック鋳 **造技術やピストンしゅう動面の表面処理技術の進化により**, 一体化が可能となってきていた. さらに高回転化によるブ ロック寿命の減少とレギュレーションで要求されるエンジ ンアセンブリとしての長寿命化により, エンジンアセンブ リ寿命とブロック寿命が同等となってきたため,ライナだ けをメンテナンスする意味合いが薄れ、第3期には他エン ジンサプライヤも含めて一体化が進んだのである.また,ブ ロックとシリンダヘッドの間をシールするガスケット構造 も大きく変化し、従来の板状からボア廻りだけシールする オーリングタイプとなった.この結果シリンダ軸間の寸法 を短縮できエンジン全長を低減することが可能となった. 二つ目は,ギヤ材料の高強度化とギヤ振動低減技術の進化 により、バルブギヤトレインをリダクション構造から直列 構造にすることで,薄くできたためである.三つ目は,コン ロッドベアリングの進化により幅狭化が進み,左右バンク のオフセット量を低減できたためである.

#### 3.4. 重量比較

重量は RA100E が 160 kg で,RA005E は 89 kg である.15 年間で約70 kg の低減が図られ 40%以上軽量化された.第3期だけを見ても2000 年の RA000E は 112 kg であったので5年間で23 kg,年間平均約4 5 kg の低減が図られた.2002 年に一旦サチュレートしていたが2003 年からまた軽量化が進展した.第2期でも軽量化に有利なマグネシウムやチタニウムは使われており,第3期における材料的な優位性は少ないと考えられ,この要因としては設計技術の進化が挙げられる.第2期から第3期の途中までは設計手法は2Dが主流であったが,2003 年頃から少しずつ3D設計が導入され,Fig.4に示すCATIA V5 化で完全3D設計とCAEが設計者レベルで容易となり,それに伴いさらに軽量化が進んだ.現在は過当競争を防止するためにレギュレーションでV8の重量は95 kg以上と規定されており,材料もマグネシウム,チタニウム,

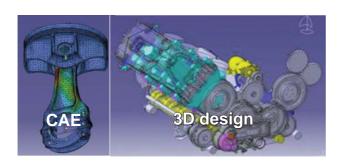


Fig. 4 CATIA V5

樹脂,CFRPの使用が禁止されている.もし,この規定がなければ計算上 78 kg 程度で設計が可能であり,それほど軽量化技術は進化している.

#### 3.5. クランクセンタハイト比較

クランクセンタハイトはエンジン重心を決定するファク タであり,車輌全体の重心高に影響し,運動性能を決める 重要な寸法である、それゆえ現在のレギュレーションでは 過当競争を防止する意味で 58 mm 以上と決められてお り, さらにエンジン重心自体もエンジン底面から165 mm 以上と規定されている. RA100E の 109 mm に対し, RA005E では 58.5 mm で 50 mm 以上も短縮されている. これを実現した技術要素は大きく三つあり、一つ目は鉄系 材料の高強度化による,クランクシャフトの細軸化と,コ ンロッドボルトの細軸化で,コンロッドの軌跡(ローカス) が小さくなったためである.二つ目はクランクシャフトの カウンタウエイトの設計技術が進展し,パランスウエイト として使用しているタングステン等の高比重素材を20000 rpm の高遠心力下でも直にボルト留めすることが可能と なり、クランクシャフトの回転半径を縮小できたためであ る.三つ目はクラッチの摩擦材や構造が改良され,外径を 縮小しても十分なトルク伝達容量が確保できるようになっ たためである.

#### 3.6. マイレッジ比較

RA100E エンジンが使われた 1990 年当時は,金曜日の 練習走行,土曜日の予選,日曜日の決勝にそれぞれ個別のエ ンジンの使用が認められており,1ドライバ最低3台のエ ンジンを使用していた.決勝の走行距離が約 300 km であ るので,日曜日朝のウォーミングアップを入れても400 km の信頼性があれば十分であった.一方RA005Eエンジンは, 高騰したエンジン費用削減のため 2004 年から始まったエ ンジン使用数削減レギュレーションの2年目に当たり,1 ドライバ2レースイベント1エンジンでの使用を規定され, 約 1400 km の耐久性が必要となった.この規定は 2008 年 まで続いたが,2009年からはさらに,1ドライバ年間8エ ンジンと規定されることになった.以上のように第2期と 比べて耐久信頼性を3倍以上に向上させた技術要素として, エンジン自体の進化と評価手法の進化が挙げられる.エン ジン自体は前述している内容に加えて,ダイヤモンドライ クカーボン(以下DLC)コーティングに代表される表面改質 技術の進化がある.特に DLC の進化は著しく,現在の F1 エンジンでは殆どの主要なしゅう動箇所にさまざまな仕様 のDLCが使用されており,もし禁止になれば信頼性も性能 も大きく低下すると考えられる.次に評価手法であるが,一 番進化した要因は低慣性トランジェントダイナモ(ホイール およびタイヤと同じ慣性力のダイナモ)によりエンジン単体 で完全なサーキット走行シミュレーションが可能となった

ことである.エンジンの耐久信頼性は,トラクションコントロール作動時や回転数制限時の点火カットによる不整回転に影響を受けるが,従来はこれを実際の走行でしか再現できず,16以上あるサーキットの全てに対して事前に確実な保証を得ることは不可能であった.

# 4. V8 エンジン

2006 年から使用が義務付けられた V8 エンジンは 2004 年 11 月から開発がスタートし, 2005 年 5 月には, 2004 年 型 10をベースに 8 に改良した先行エンジンでヘレスサー キット(スペイン)において他チームに先駆けて実走行テス トを敢行した.2006年用の本番エンジンは最高回転数20000 rpm を目標に, 2005 年 8 月に火を入れ急ピッチで開幕に 向けて開発を進めた. その結果, 夏のハンガリー GP で第 3期唯一の優勝を果たし、HondaV8エンジンの優秀さを証 明できた、2007年に向けてはさらに高回転化をねらい開発 を進めていたが、レギュレーションにより最高回転数が 19000 rpm に制限されるとともに,ホモロゲーション規定 でエンジン本体の年間開発が制約され、その対応が満足に できないまま 2008 年以降の開発凍結のベースとなるエン ジン仕様が定められた.この結果,過渡域の燃焼が安定せ ず,2008年のトラクションコントロールの禁止で,DRの 課題が顕在化し、開発可能な範囲で対策したが抜本的な解 決に至らず, DR 不十分のまま不本意なシーズンとなった. 2009 年に向けては FIA との話し合いで凍結を一部解除し てもらい開幕に向けて DR の課題を解決するべく, 2009 年 10 月から開発に取組み,ねらい通りの性能を 12 月に確認 したが,残念ながら F1 からの撤退によりその改善結果を 証明することはできなかった.現在の F1 エンジン開発は, Honda が得意としていた最高出力重視の考え方ではなく, 特に DR に影響する領域の出力特性向上や不整燃焼をいか に排除するかに重点がおかれている.なぜなら,出力を10 kW 向上させても , ラップタイムは 0.1 秒以下しか向上せ ず , それに比べ DR が悪いためにコーナ出口でスロットル を緩めざるをえないだけで,0.5秒以上もロスをするからで ある.我々がそこに重点を置いた開発をしなかったことを 大いに反省しなければならない.

#### 5. おわりに

第2期と第3期のエンジンの比較を数値で振り返ったが、 改めて 15 年間の技術の進化の凄さを実感することができた.現在はレギュレーションでの規制が多いため今までのような進化は望めないが、それでも少しずつは今後も向上して行くであろう.我々は Honda としての F1 復帰の有無に関係なく、これまでに構築した情報のネットワークを切らさないよう努力し、今後も技術の進化(考え方)を追いか けられるようにしていかなければならないと考える.さもなければ,この進化の速い世界で,次にこのようなチャンスがあったとしても,キャッチアップに膨大な時間を費やすことになるからである.

著者



櫻原一雄