

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、車輛の重心高、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 倍以上のマイレージを達成した。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。

*四輪R&Dセンター

2. 第2期から第3期への流れ

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

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	Engine capacity (with supercharging) : 1.5 L maximum Fuel storage capacity : 195 L maximum
1987	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V6)の時代は過給圧を上げる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か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

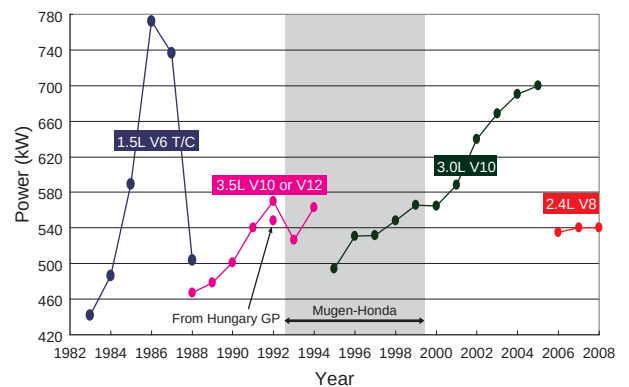


Fig. 1 Honda F1 engine power

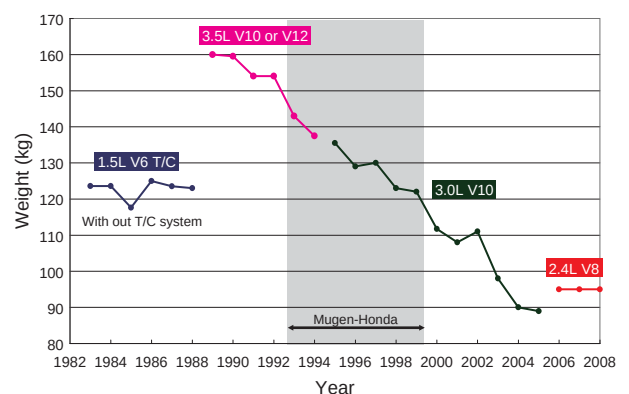


Fig. 2 Honda F1 engine weight

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。このため各車輦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ク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、車輦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、車輦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 エンジンレギュレーションで 90 度と定められ選択肢はなくなったが、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。またコンロッドベアリング (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 エンジンではブ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ェットライナ構造で



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、ブロック自体のウォーター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、近年のブロック鑄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んだ。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、

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、車輛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、バランスウエイトとして使用しているタンダ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 エンジンには、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(ピストンリング、クランクピン、コンロッドピン、バルブトレイン等)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

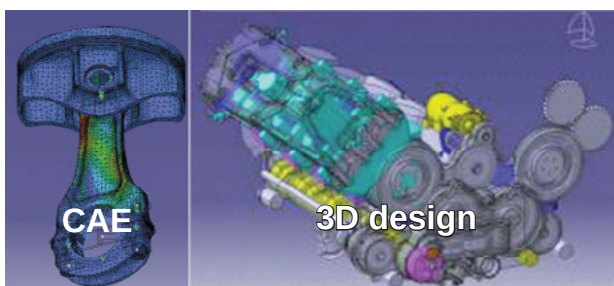


Fig. 4 CATIA V5

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 V10 をベースに V8 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発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、Honda V8 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

けられるようにしていかなければならないと考える。さもないければ、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