

# 燃料及び燃焼システムの開発による F-1 エンジン性能

## Optimising Formula 1 Engine Performance through Fuel and Combustion System Development

安岡 章 雅\*

松 本 弥寸嗣\*\*

Akimasa Yasuoka

Yasushi Matsumoto

A.R. グローバー\*\*\*

I.R. ガイアード\*\*\*\*

A. R. Glover

I. R. Galliard

### 要 旨

本稿では、F-1 用燃料および燃焼システムの技術的な要素の概要と、1991年のF-1シーズンに行った開発について述べる。そして、燃料と燃焼システムの各パラメータが性能におよぼす影響を、コンピュータによる予測値と実際のテストで得られた測定値を比較して示す。

さらに、燃料および燃焼システムの開発が、1991年のホンダ・マクラーレンF-1チームおよびホンダ・シェルの協力でもたらされた結果について概説する。

### ABSTRACT

The technical requirements for Formula 1 fuels and combustion systems are outlined and the process by which they were developed during the 1991 Formula 1 season is described. The effects of fuel and combustion system parameters on performance are discussed and data are presented to compare measurements with computer predictions.

In conclusion, the benefits of fuel and combustion system developments, both to the Honda/McLaren Formula 1 team in 1991 and to Shell and Honda in terms of longer term product development, are discussed.

### 1. ま え が き

モーターレースの歴史を通じ、多くのチームが空気力学、操舵性、制動性そして出力性能の優れた最も競争力のある車を手に入れる努力をしてきた。そしてエンジン性能の向上は、燃料テクノロジーの向上に反映されてきた。そのため、現在では数多くの燃料が様々な形態のレースにおいて使用されている。これらにはインディカレースで用いられているメタノール燃料“プロ・フェュエル”、ドラッグレースの燃料であるニトロメタン、あるいは一部の二輪レースで使用されているオクタン価の非常に高いガソリンまでの広い範囲のものがある。<sup>1)</sup>

F-1では、レギュレーションによってオクタン価が規定され、かつメタノールおよびニトロメタン系燃料の使用が禁じられているが、それでもエンジンおよび燃料の設計において、より高い性能を求めて開発協力が行われてきた。ホンダおよびシェルにとって、これは新しい技術に取り組む機会として、非常に意義のあるものであった。つまり、厳しい技術競争と過酷な要求や計画の中

から最良のものを発見することであり、専門化された分野において一般の制約に縛られないアイデアを探究し、それを通じて得られた経験を製品設計に展開させる機会を与えられたわけである。

F-1レースにおけるホンダとシェルの協力関係は、ターボエンジンの最終年であった1988年に始まり1992年まで続いた。この期間、両社のスタッフは、研究所やサーキットにおいてあらゆる面で燃料を始めエンジンの性能を最適化するための研究に緊密な連帯を保った。<sup>2), 3)</sup> この間、ホンダからは基本構造の大きく異なる3種類のエンジンを供給してきた。すなわち、1988年の1.5ℓ V6ターボエンジン、1989/1990年のV10自然吸気(NA)エンジン、1991・1992年におけるV12自然吸気エンジンである。本報告は、これら3種類のエンジンに適用したレース燃料および燃焼システムを開発する上で用いられた手法、特に1991年におけるV12エンジンの開発で用いた手法について説明する。

尚、ここでは、エンジンの燃焼に関与する諸元、パラ

\* 栃木研究所

\*\*\* 昭和シェル石油㈱

\*\* 和光研究所

\*\*\*\* シェルリサーチ Ltd.

メータを総称して 燃焼システム” という言葉で取り扱う。

## 2. 設 計 要 件

燃料および燃焼システムの設計に必要な条件を検討する場合、まず最初にパワーユニット全体としての必要な条件を考える。エンジンおよび燃料タンクは、ドライバーとギヤボックスの間に一つのユニットとしてコンパクトに設定されている。F-1 ではレース中の燃料補給が許されていないため、スタートラインにおいては、いわばレース中に使われる化学エネルギーの総てをこのパワーユニットの中に貯蔵していると考えることができる。そして、エンジンで化学エネルギーを効率よく動力に変換するための鍵は燃焼システムの設計と燃料組成にあるとすることができる。

Fig. 1 は、パワーユニット設計における主要な4つの要件を示している。これらの中でレギュレーションおよびドライバーの健康と安全性は絶対的な制約である一方、性能と信頼性は最大の競争力を得るためにすべて面で最適化が求められるものである。エンジンの基本構造や燃料タンク容量などは、初期の設計段階で決定される要素であるが、燃料および燃焼システム設計の一部は、シーズン中でも最適化していくことの可能な要素である。本稿では、この開発プロセスに焦点を当てて説明する。

### 2.1. レギュレーション

1991年のエンジンおよび燃料に対する F I S A レギュレーションの概要を、それぞれ Table 1、2 に示す。規制対象の燃料性状を測定する場合、それぞれに計測誤差が存在すること、ならびに軽質留分の気化あるいは再凝縮によるレース前、中、後における燃料特性変化の可能

Table1 1991 Engine Regulations

Engine Type	Spark ignited, reciprocating piston, 4-stroke engine (1).
Maximum Swept Volume	3.5 litres
Supercharging	Forbidden
Number of Cylinders	Maximum 12

(1):Wankel,Diesel,2-strokes and turbine engines are forbidden. Section of Cylinders must be circular

Table2 1991 Fuel Regulations

RON(max)	102
MON(max)	92
Oxygen(max) (1)	2 % by weight
Nitrogen(max) (1)	0.2% by weight
Benzene(max)	5 % by volume
Reid Vaper Pressure(max)	700 hPa

(1):Alcohols,nitrocompounds prohibited.

性が潜在的に存在することから、レギュレーションにある燃料性状に適合させるためには非常に多くの配慮が要求された。

### 2.2. 健康および安全性

ホンダとシェルが共同で開発を進めるなかで、F-1 燃料の健康や安全面に対する影響が、市販のガソリンと同等以上であるようにするため、非常に厳しい内部基準を設けていた。これは、モータースポーツ、特にF-1 といえども、自動車技術や燃料技術と同様に環境および安全問題においてもおろそかにせず、むしろ先導的役割を果たすべきであるという考えに基づいている。1991年

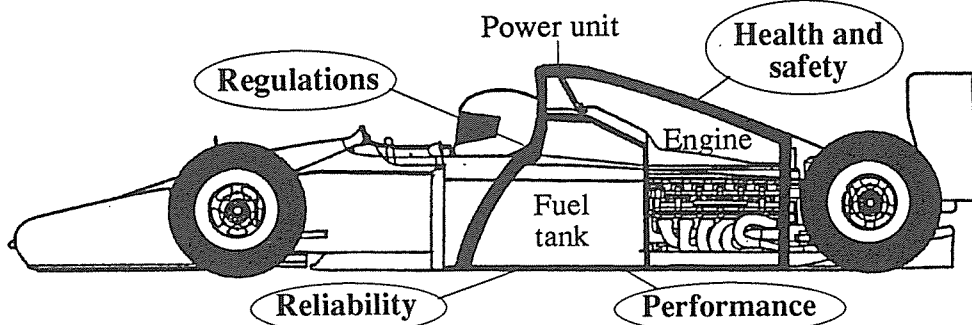


Fig. 1 Power Unit Design Requirement

に供給されたシェルのF-1燃料は無鉛であり、ベンゼンは一切含有していなかった。さらに、燃料を内部基準に適合させるために、使用されている全ての成分は健康安全の専門家によって検査された。また、シェルによる有鉛燃料の段階的廃止は、すべての燃料を無鉛にすることを決めた1992年のレギュレーション改正以前の1990年の初めにはすでに完了していた。

その他に、F-1燃料を使用する際の問題としては火災があり、その予防のためにホンダ、マクラーレン、シェルの3者で燃料取扱い方法を規定し、定期的な見直しを行った。

2.3. 信頼性

レースおよび予選において、性能と信頼性のバランスは非常に重要であり、レースにおけるチームの立場にも大きく影響される。パワーユニットの信頼性は、主としてエンジンの機械的設計と制御システムによって決まってくる。一方、燃料および燃焼システムの設計も重要であり、特に数秒間でエンジンを破壊する可能性のあるノッキングに関しては潜在的な重要性を持っている。

2.4. 性能

ここでは、ラップタイムに影響を与えるパワーユニットの全ての要因を説明するため“性能”という言葉を用

り広義に用いる。Fig. 2には、パワーユニットの性能要因が車両の総合性能に及ぼす影響が示されている。また、車両の性能について、最高速度や加速性能、コーナリング速度、制動力など広い観点から見る事ができる。車両の性能に影響を及ぼす主たる要因は空力特性であり、これがパワーユニットの性能が全体の性能に及ぼす効果を判定する時、その評価を複雑にしている。例えば、エンジンの出力が増加すれば、トップスピードを損なうことなくより優れたコーナリング、加速および制動性能を求めるため、より強いダウンフォースの得られるウイングの使用が行われる。つまり、総合的な車両性能は、パワーユニットの性能に直接あるいは間接的に関与してくるのである。

燃焼システムおよび燃料がパワーユニットの性能に及ぼす影響についてもFig. 2の中に示されている。それぞれの技術の開発によって、スタート時の重量軽減と燃料タンク容量の削減を可能にし、さらに、エンジンの出力と応答性を増加させ、燃料消費量を低減することが可能になる。重量削減、最高エンジン回転数の上昇、機械効率の改善といったエンジン設計のその他の面も同様に重要なものであるが、これらについては、別に報告されている。<sup>4)</sup>

Fig. 3には、エンジン性能を決定する上で、燃焼システム設計と燃料処方との間の主な相関が示されている。こ

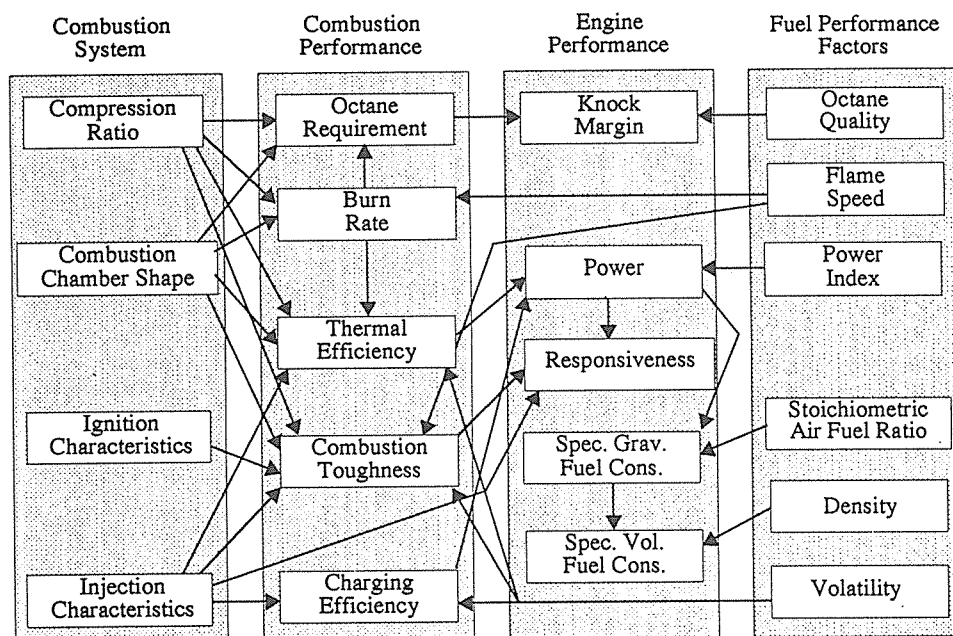


Fig. 2 Power Unit Effects on Car Performance

ここに示されているエンジン性能要因は、Fig. 2のパワーユニットの要因と対応するものである。重量換算および容積換算の燃料消費が、軽量、コンパクト化に代わり、さらに燃焼システムと燃料組成の両方にとって重要な制

約条件である“ノック余裕度”が追加要因として導入されている。また、低負荷、希薄空燃比、低温といった非定常状態において燃焼の安定度を表す言葉として“燃焼タフネス”という用語を定義して用いている。

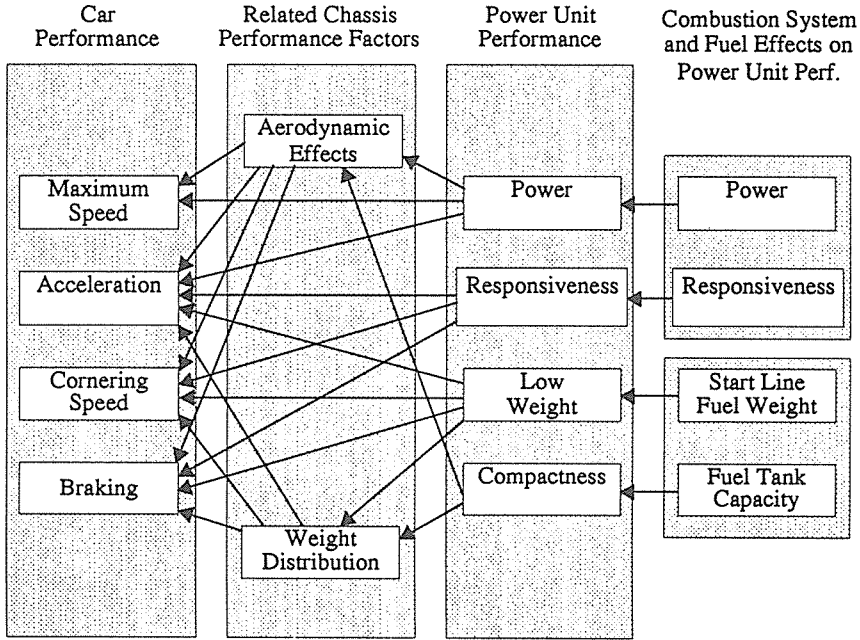


Fig. 3 Combustion Effects on Engine Performance

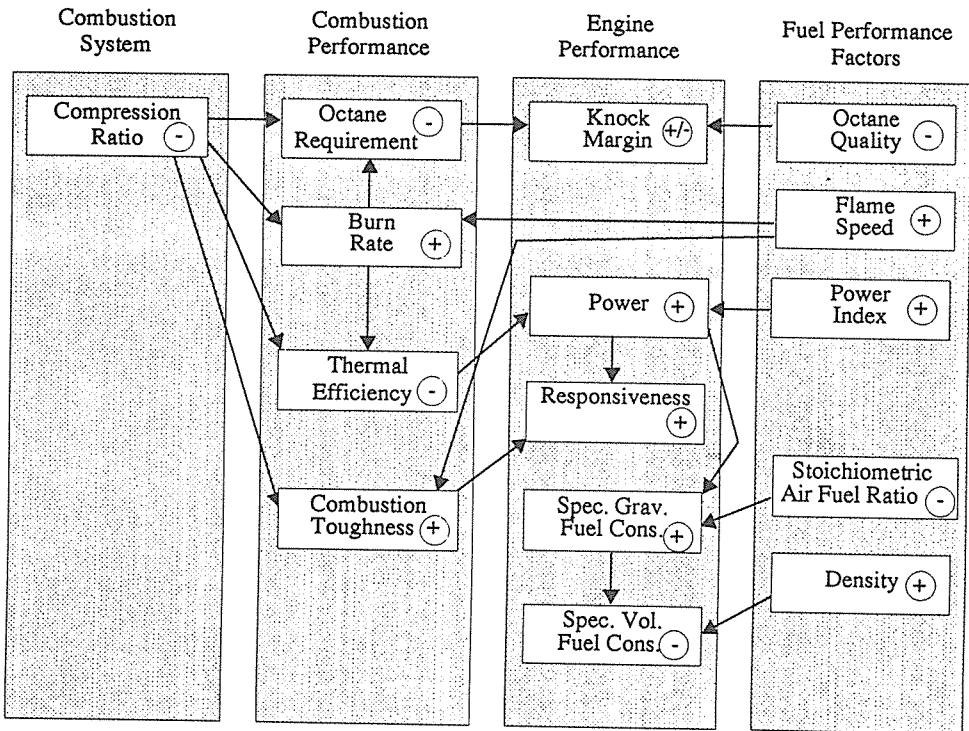


Fig. 4 Effect of Fuel Change on Combustion System and Engine Performance

燃焼システムと燃料についての“性能設計要件”は、Fig. 3に記されている要因を最適化することであると言える。これらの要因が性能におおよぼ影響についての技術的な解説は、本稿の第4節と第6節に示す。以下の項では、燃料組成を変えた場合に生じる影響を例にとって、燃料と燃焼システム間の複雑な相互作用について説明する。

2.5. 燃料と燃焼システム間の相互作用

1991年における燃料開発のテーマは、より高いエネルギーの燃料開発であった。Fig. 4には、この開発経過を解説するため、前出の図の一部を抜粋して用いている。これらの高エネルギー燃料はオクタン価が低く、密度が高く、そして燃焼時の火炎速度が速く、理論空燃比が小さな値をとる傾向にあった。オクタン価が低くなるとノッキング限界点火時期(KLSA)が遅れ、火炎速度が速くなるとMBTが遅角する。これらを比較すると、一般にKLSAによる影響の方が大きく、従ってノッキング余裕度を保つために圧縮比をわずかに下げる必要があった。熱効

率、燃焼タフネスは双方とも火炎速度の増加によって改善するが、圧縮比の低下によっては悪化する。ただし、正味の効果としては、ごくわずかではあるが熱効率の減少と燃焼タフネスの改善が見られた。全体としては、熱エネルギーの増加が熱効率の低下を大幅に上回るため、得られる出力および応答性は共に向上する。

燃料消費量は重量では増加する傾向にある。これは出力増加による低減はあるものの、理論空燃比の値が小さくなったことが原因として挙げられる。しかしながら、容積換算での燃料消費量は、燃料の密度が高いため減少の傾向を示した。このことは、燃費が問題になるサーキットにおいては、最大出力を与える空燃比により近づけた設定が可能になり、エンジン制御に巾をもたせて出力を維持することができる。

この例は、燃焼に対する直接的な効果と、車の性能に対する総合的な効果の両面を持つため、エンジンの燃焼と燃料の相互作用が非常に複雑であることを示している。したがって、相反する要素の多い中において、最適なバランスを見出すための高度な技術の開発が必要であった。

3. 開発プロセス

Fig. 5には、1シーズン中に行った開発プロセスをフローチャートで示している。これは、レース転戦体制の中で、新しい燃料と燃焼システムの開発が可能になるように設定されたもので、より長期的な開発を検討、推進したオフシーズン中の計画とは対照をなしている。

開発は、英国シェル・ソントンリサーチセンター(TRC)と日本のホンダ・和光研究所で行われた。2カ所の主要研究所が地理的に離れていることから、昭和シェル石油の厚木研究所ならびに英国にあるホンダのF-1ヨーロッパ前線基地、ラングレーオフィス(UKL)も要となる支援を担っていた。

開発のプロセスは、対象となるエンジンと燃料の諸元決定を迅速に行うための基礎研究を明確にするために、短期開発のコンセプトを同意する事から始まった。次に3つの基本的な評価段階があり、第1段階では予選燃料とレース燃料の試料を識別する。そして、第2段階では、レース燃料の試料をテストし、第3段階に入ると、第2段階までで得られた効果に対する理論的な裏付けを行うことに焦点が当てられた。各段階で実施された作業の詳細は、次節において解説する。

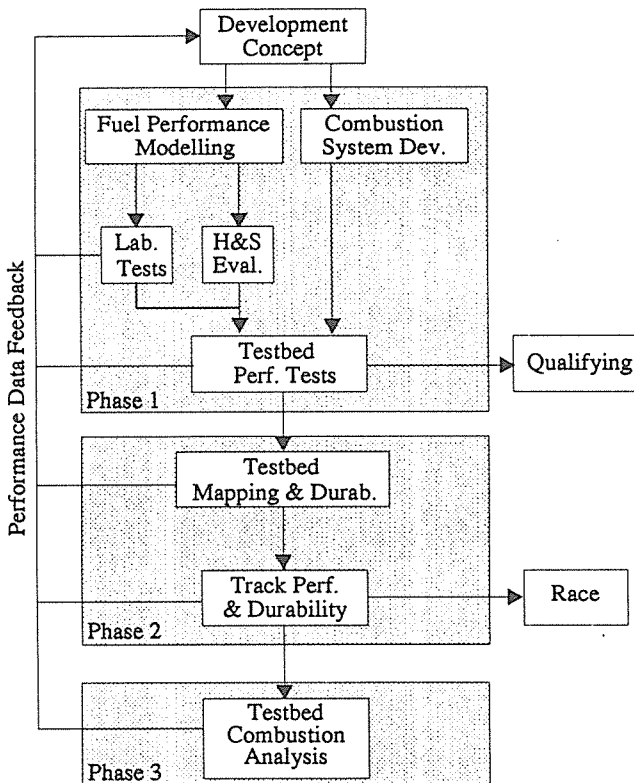


Fig. 5 Development Process

#### 4. 燃焼システムの開発

ここで“燃焼システム”と総称しているエンジンの燃焼にかかわる諸元や設定値は、エンジンの全体レイアウトの段階で決定されるものが多く、それらを変更するためには、エンジンの大きな設計変更を必要とする。1991年には、エンジンの最高回転数を上げるためにボア/ストローク比を大きくする設計変更が行われた。このエンジンの設計変更を可能にした理由のひとつに燃料の開発も挙げることができる。一般に、ボアを増加させると、火炎伝播距離が増大し、適正な圧縮比を得るには燃焼室の高さも下げなければならないため、燃焼そのものの悪化を招くことになりやすい。しかしながら、1991年に開発された高速燃焼の燃料を用いることで、燃焼の悪化を防ぐことが可能となり、エンジン回転数を上げて出力の増加が図れた。

また、燃料と燃焼システムの開発を連携させて行った結果、エンジンの圧縮比に大きな影響が見られた。通常エンジンは圧縮比の増加とともに熱効率も高くなるが、実際には熱分解や熱損失の増加があるため圧縮比 13.0 付近で最大点が存在する。

1991年のシーズン当初は、オクタン価の高い燃料を用いて、最も効率の良い圧縮比近辺の諸元をとることができた。一部のエンジン回転域でノッキングの回避を行ったが、これらの条件下において点火時期のリタードによる性能の低下は殆どなかった。低オクタン価の高エネルギー燃料が開発されたことから、圧縮比が高いと点火時期を遅らせる必要が生じ、MBTに近い点火時期設定を行

MBT map

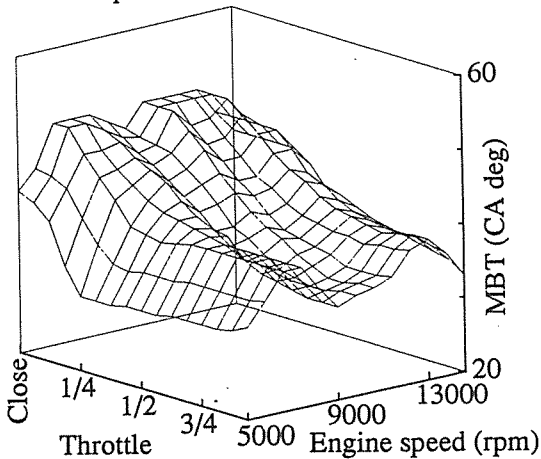


Fig. 6 Typical MBT Timing Map

Table3 Testbed and Track Testing Objectives

Phase	I	II		III
Location	Langley	Wako	Track	Wako
Type	Testbed	Testbed	Car	Testbed
Fuel Quantity (ℓ)	25	400	400	400
Performance Evaluation	*	*	**	
Durability Test		*	*	
ECU Calibration		*	**	
Understanding				*

\* Primary Objective      \*\* Secondary Objective

うためには圧縮比を下げるほうが好ましくなった。圧縮比の低下は、ピストン頭部の形状変更によって行い、圧縮比を下げることによって、より好ましい燃焼室形状がとれるようになった。燃料の火炎速度の増加と併せ、この燃焼室形状の改善は圧縮比を下げたことによる効率の低下を相殺する効果があった。

#### 5. エンジン単体テストと走行テスト

第3節では、開発プロセスの概要を示したが、ここでは、検討した燃焼システム諸元および試料燃料を評価するために用いたテスト手順について詳述する。評価は3段階で実施され、性能評価、ECU補正、耐久試験そしてTable 3に概略を示した基本的な評価を行った。

燃料およびエンジンの開発段階において、諸元の変更によって得られる試験データの差はわずかであり、その精度は非常に重要であった。なぜなら、測定誤差により

Injection map

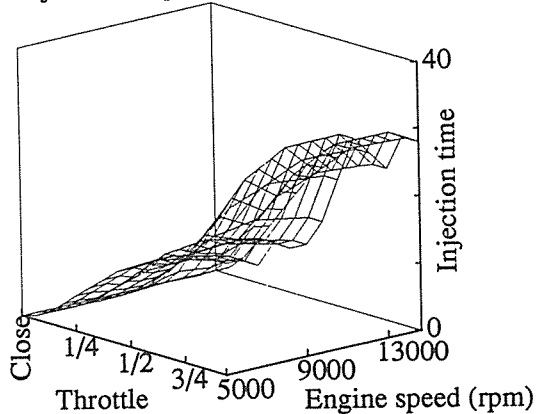


Fig. 7 Typical Fuelling Map

予測モデルの解釈を誤ることがあるからである。

開発プロセスの第1段階の一環として、ホンダ・ラングレーにて5～6種類の試料燃料を少量用いて出力ポテンシャルを測定した。エンジンを最高出力を得る回転数で運転し、最高出力、最高出力時の空燃比、MBT、そしてKLSAを算定して予選燃料とレース用燃料の選択基準を作成した。時間的に厳しい中、これらのデータから予選用燃料供給マップ（EFIマップ）ならびに点火時期のマップが作成された。

第2段階では、レース用燃料として試料と燃焼システムに関してより深い評価を、ベンチテストおよび実車テストの両方で行った。マッピング、燃料消費量計のキャリブレーション、耐久テストを、ホンダの和光研究所のエンジンテストベンチで行った。このテストでは、最高出力を与えるMBTとインジェクタのパルス巾をエンジンの全運転領域に渡って測定した。その代表的な測定例をFig. 6, 7に示す。KLSAはエンジン回転数、空燃比ごとに12気筒すべてのシリンダについてマッピングした。耐久試験は、レースの全走行距離に相当するトランジェントシミュレーションを行なった。

実走テストの主要目的は、実際のコースコンディションのもとでレースと同等の走行をすることにより、実車での使い勝手を考慮した耐久性のチェックを行うことにある。さらに、エンジンの諸性能を評価するとともに、燃料消費量計測のための微調整も行った。実走テストでは、最高出力や中速トルクなどのベンチテスト結果を再確認でき、一方、操縦性と応答性に関してはドライバー

のコメントから実走データを収集、補正値の追加をすることが重要な目的でもあった。

レース用燃料の選択はホンダで行った。使用燃料の最終的な決定は、プラクティス中の走行結果とレース当日の天候に基づいて行われるため、複数の燃料をサーキットに搬入することはめずらしくなかった。

テスト項目の多くは、和光研究所において基本的な解析を目的に第3段階まで評価が行われた。Fig. 8にこのテストに用いた計測システムを示す。1番シリンダにはラミナ・フローメータ、燃焼室内圧力センサおよび排気分析用のサンプリングプローブが取り付けられている。そして、エンジン性能の変化に理論的説明を加えるために詳細な燃焼解析が行われた。

これらのテストでの全ての評価段階において、性能予測を行うアルゴリズムに改良が加えられ、また更に新しい技術開発のためにアイデアを数量化することが必要であり、テストの結果を燃焼システムモデルと燃料性能モデルにフィードバックした。

## 6. 燃料性能のモデル化

一般に、市販のガソリンは200種類以上の科学物質を含んでいるが、F-1燃料は、検討段階から3～5種類の特定成分を選択配合している。これらの成分は、厳密に配合され、その物理的、熱化学的特性を高い精度で予測できるようにした。したがって、コンピュータによるモデル化はF-1燃料開発の要となり、燃料特性およびエンジン性能予測の双方に利用された。

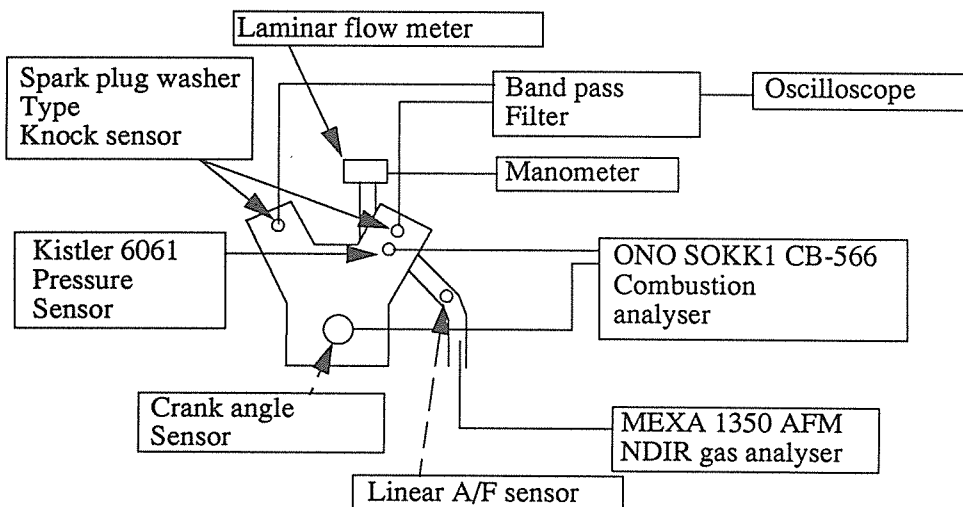


Fig. 8 Test Bed Instrumentation for Combustion Analysis

Table4 Links between Component Properties and Engine Performance

BASIC COMPONENT PROPERTIES						
CxHyOz		*	*			*
LCV			*			*
Density	*					
B.P.				*		
Component performance factors:	Density	AFR <sub>st</sub>	Power Index	RVP	Flame Speed Index	RON MON
Linear blending weighting factor	volume	mass	stoich (1)	mole	stoich	volume
Blend performance factors:	Density	AFR <sub>st</sub>	Power Index	RVP	Flame Speed Index	RON MON
Power			*	(*)	(*)	(*)
Vol fuel cons.	*	*	*			
Grav fuel cons.		*	*			
Burn rate					*	
Knock Margin					*	*
ENGINE PERFORMANCE						

Table 4. Links between component properties and engine performance

\* Indicates relevant factors

(1): Blend properties calculated as linear sum of component properties weighted with stoichiometric fraction (proportion of air taken by each component).

これらのブレンドの評価には、燃焼プロセスに關する基本的なパラメータが用いられた。これらパラメータとエンジン性能の相関関係は、嚴密にはエンジンの特性によって影響されるため、実験的に求められた。この手法をTable 4に示す。表の上部は燃料の基本成分が影響するエンジン性能を表し、下部は燃料の配合とエンジン性能の基本的な相関を示す。この2つの関係を関連付けるため、各成分特性から配合を予測する適度な重み付けの係数をあたえている。幾つかの成分を組み合わせることによって、非線形の配合効果が見られる可能性があり、特にオクタン価やRVPについてその傾向が見られる。検討した燃料成分については、その範囲が比較的限られており、十分説明出来るものであった。Fig. 9-(a),(b)では、ほぼ同じオクタン価に対する影響度を持つ成分の配合による高出力燃料について、RONとMONの線形予測が測定値と良い一致を見せている。

6.1. 出力予測

容積効率が燃料特性の影響を受けないと仮定すると、単位質量の空気と燃料の燃焼を検討することによって、出力の初期予測を行うことができる。理論空燃比でかつ

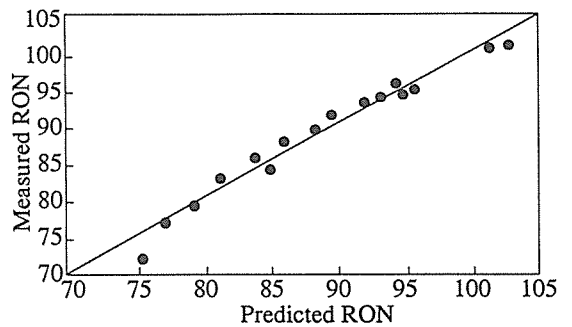


Fig. 9 (a) Linear Prediction of RON

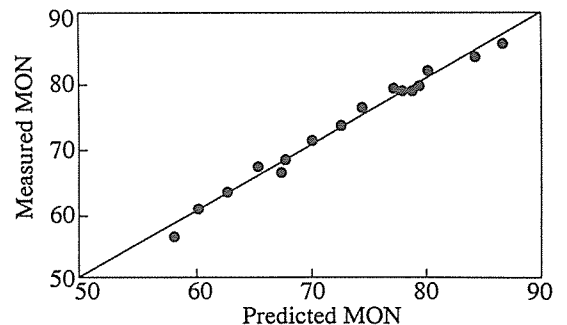


Fig. 9(b) Linear Prediction of MON



完全燃焼が行われ、水と二酸化炭素に変換すると仮定した場合、出力を求める式は次のような簡単な式で表される。

$$\text{出力指数} = (\text{LCV} / \text{AFG}_{st}) \times (m_{\text{prods}} / m_{\text{react}})$$

ここで : LCV = 発熱量  
 AFG<sub>st</sub> = 理論空燃比  
 m<sub>prods</sub> = 燃焼生成物のモル数  
 m<sub>react</sub> = 反応体のモル数

なお、第1項は単位質量当たりの空気により発生する熱に関するもので、第2項は燃焼による気体モル数の増加である。この定義の中では簡略化された要素が多く含まれているが、それでも実際の値にかなり近いことが実験的に明らかにされている。したがって、この簡単な式を第1の選択基準として用いた。

さらに正確な出力予測を行うには、燃焼プロセスをより詳細に検討し、かつ熱解離などの要因を適切に考慮する必要がある。このため、燃焼モデルを用いて、出力の予測に加えて最高出力を得る当量比および火炎速度の予測も行った。

Fig.10に、1991年にテストしたすべての燃料に関する出力の測定値と予測値の相関を示す。予測誤差は2.5PSで、これは出力の0.3%未満である。さらに燃料成分を限定すれば、予測誤差は1PS未満であった。

6.2. 燃料消費量

ここで、吸入空気量に対して燃料性状は影響しないと仮定すれば、燃料の消費重量は空燃比に比例する。さらに全ての燃料が同一の当量比で、しかも15%過濃な空燃

比で最大出力が得られると仮定した場合、燃料の消費重量は理論空燃比に直接関連付けて考えることができる。最高出力を得る当量比と容積効率が変わることによっても燃料の消費重量は変化する。こうして、総燃料消費量と出力からBSFCが推定される。

燃料密度は、燃料の消費重量に対して直接影響を及ぼさないものの、消費容積の算出においては重要である。車のデザインからは、燃料タンクの寸法をできるだけ小さくすることが必要であり、燃費の重要なサーキットについては容積的な制約を受けることになる。したがって、スタート時、必要とされる燃料の容積を削減するためには密度をより高くし、理論空燃比をできるだけ大きな値にする必要がある。

6.3. 燃焼割合

MBT、あるいは、例えば点火から90%までの燃焼期間で定義される燃焼割合は、どちらも燃料の組成により大きく影響される。Fig.11には、燃焼モデルより計算された火炎速度指数とMBT測定値の間の関係が示されている。やや非線形であるが、相関はとれており、新しい燃料のMBT予測のための基準を示すことができる。

Fig.12は、従来の燃料および速燃性燃料について、シリンダ圧から計算した燃焼割合を示している。10500rpmで運転されるF-1用ホンダV12エンジンと1500rpmで運転する従来型の単気筒エンジン共に燃焼割合は同じ傾向である。速燃性燃料の燃焼割合は、燃焼期間全体で増加しており、特に燃焼の初期段階の間に最大の増加を示す。

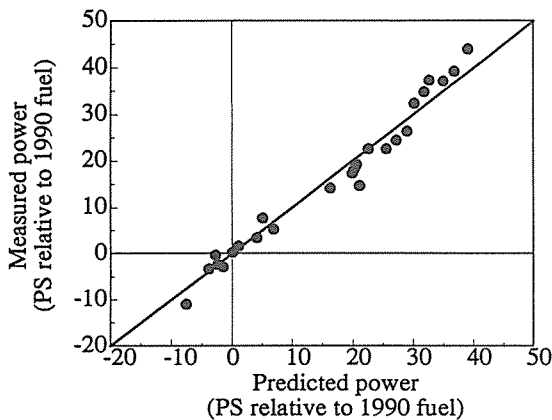


Fig. 10 Measured versus Predicted Power for 1991 Fuel (Relative to 1990 Fuel)

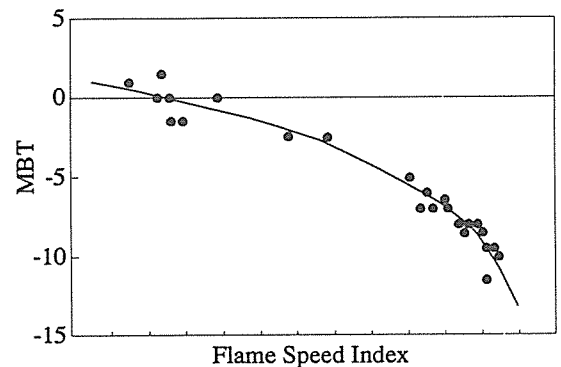


Fig. 11 Measured MBT Timing versus Flame Speed Index (Relative to 1990 Fuel)

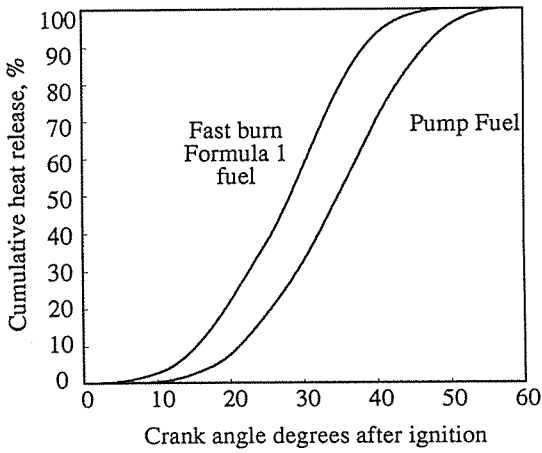
6.4. ノッキング余裕度

ここで、エンジンの各回転数におけるMBTとノッキング発生点火時期の差をノッキング余裕度と定義する。このノッキング余裕度について、オクタン価で整理することは従来のエンジン、燃料においても一般に行われている。しかしながら、この方法は火炎速度が同等な燃料についてのみ有効であり、ここで検討する燃料組成についてはあてはまらない。KLSAはMONとやや非線形ではあるが、900rpmのCFRエンジンと13000rpmのホンダV12エンジンという異なる条件にもかかわらず比較的良い相関を示し(Fig.13)ている。しかし、この相関関係は、燃料間のMBTの相異のため、ノッキング余裕度に直接関連してはいない。Fig.14では、MONに対してプロットされたKLSA、MBTおよびノッキング余裕度が示されている。わずか6度のノッキング余裕度によ

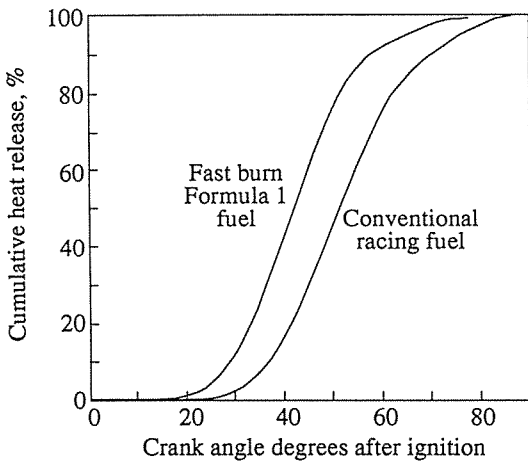
り、およそ30MONの削減が得られている。したがって、ある与えられた燃料および与えられたエンジン構成についてノッキング余裕度を予測するためには、MONおよび火炎速度指標の両方を利用する必要がある。

7. サーキットシミュレーション

上述の開発プロセスにより、1991年のF-1シーズン中に非常に大きな出力の増加があった。Fig.15は、GP全16戦の各予選時のエンジン最高出力を表している。データはアメリカGPを基準にした出力ゲインで表されており、燃焼システムおよび燃料の最適化の結果と他の改良によるゲインとを比較して示してある。これらは同程度の大きさであり、合計で70kW近い出力増加が得られた。予選では、燃料の積載量は極少なく、出力増加は直接ラップタイムの短縮につながった。しかしながら、決勝



(a) Single Cylinder Research Engine, 1500 rpm



(b) Honda V12 F1 engine, 10500 rpm

Fig. 12 Comparison of Fuel Burning Rate

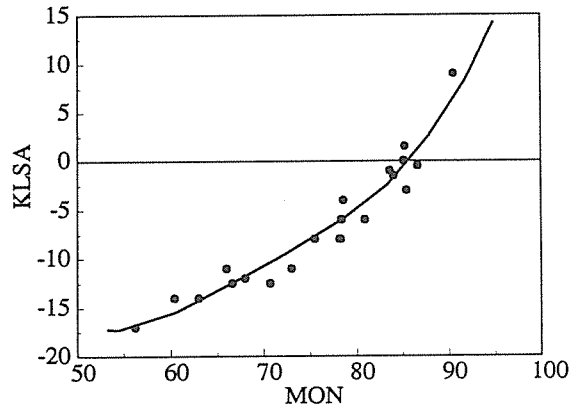


Fig. 13 KLSA. versus MON for 1991 Fuel (Relative to 1991 Fuel)

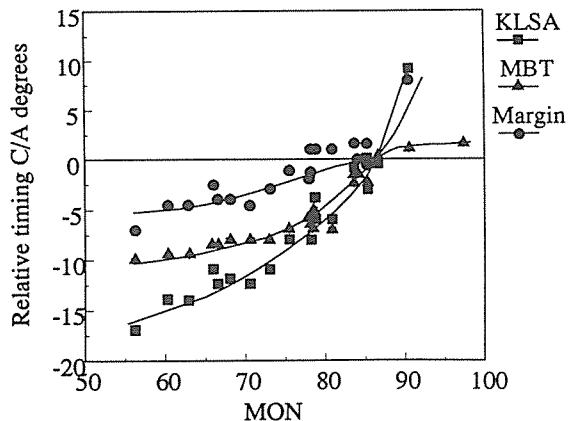


Fig. 14 Comparison of KLSA, MBT and Margin with MON (Relative to 1991 Fuel)

では、出力のゲインは分離して考えるべきではなく、むしろ全体的な車両性能に考慮されるべきものであった。出力変化および燃料積載量のラップタイムに及ぼす正味効果はサーキットシミュレーションを利用して推定した。以下に、代表的な低、中、高速サーキットにおける計算結果を示す。

Table 5は、それぞれのタイプのサーキットについて、出力1kW、車両重量1kgの増加がラップタイムにおよぼす影響を示している。出力がラップタイムに与える影響は、最高速の影響が比較的大きな影響を持つため、各サーキットでの平均速度とともに増加する。対照的に、重量がラップタイムに与える影響は、加速および制動時間の比較的多い中速サーキットで最大となった。

シーズン当初と後半の標準的な燃料に関して、スタートラインでの燃料重量と出力の差をTable 6に示す。またその結果として、レースのスタート、中盤、最終ラップタイムに対する影響をTable 7に示す。低速サーキットでは、高出力燃料はレースのスタート時で0.16秒のラップタイムの増加と最終ラップで0.34秒の短縮と、わずかの効果しか見られなかった。ところが、高速サーキットではレース全体を通じてかなり短縮され、標準的なレース走行距離では合計1分のゲインを生み出すことになり、これは最終順位で数台の差をもたらすことになる。

Table5 Predicated Effect of Power and Weight on Lap Time

Circuit Average Speed	Power Factor (sec/kW)	Weight Factor (sec/kg)
Low Speed	-0.012	+0.025
Medium speed	-0.022	+0.032
High Speed	-0.034	+0.025

Table6 Power and Start Line Weight Difference for Typical Fuel from Early Late 1991

Fuel Typical of:	Power	Start Line Fuel Requirement	
		Volume	Weight
Early '91	Ref.	200 litres	Ref.
Late '91	+28.5 kW	180 litres	+20 kg

Table7 Predicated Effect of Fuel on Lap Time

Circuit Average Speed	Effect on Lap Time (seconds)		
	Start	Mid Race	End
Low Speed	+0.16	-0.09	-0.34
Medium Speed	+0.01	-0.31	-0.63
High Speed	-0.47	-0.72	-0.97

8. F-1 燃料及び燃焼システム開発の発展性  
フォーミュラ1燃料の開発は、ホンダとシェルが行った研究開発プログラムのごく一部でしかない。F-1活

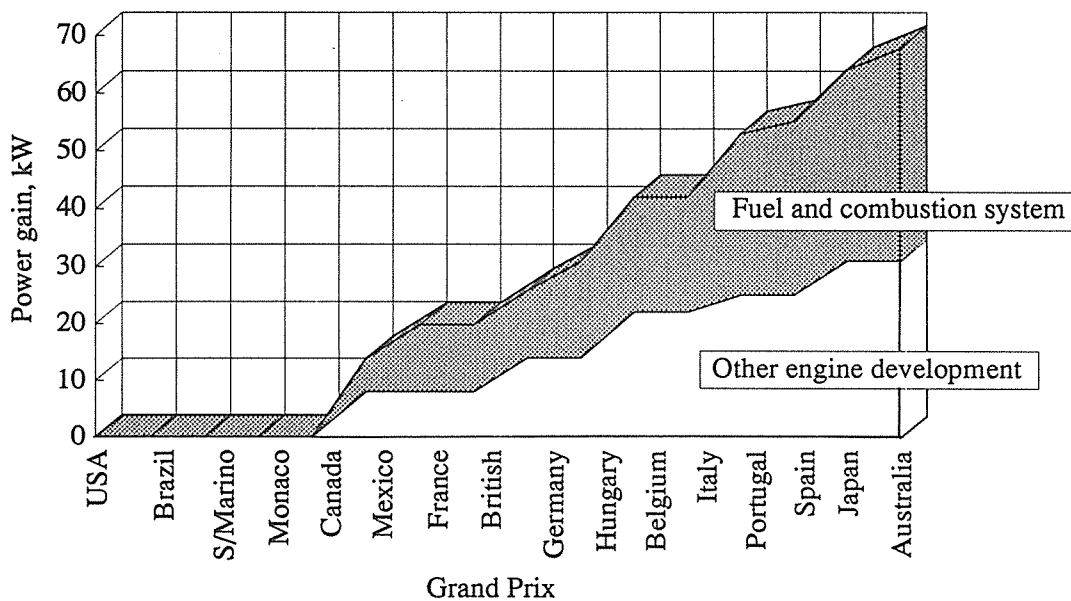


Fig. 15 Power Gain through 1991 Seasons in Qualifying Trim

動以外の燃料および燃焼システムに関する基本研究によって得られた基礎的知識なくしては、本稿中に報告されている開発は不可能であったと思われる。そしてこの代償として、1991年に通常の製品開発の枠外で、F-1は技術開発の機会を与えてくれた。ある部分では従来の技術、知識を覆す結果となり、基礎研究のための新しい道が拓かれ、将来の製品開発のための技術的な下地が得られた。それに加え、エンジンと燃料の共同開発プログラムによって、ホンダとシュルの間の協力関係の発展が得られた。

## 9. 結 論

燃焼システムと燃料の共同開発により、1991年シーズン中にエンジン性能の大幅な向上が得られた。そして、コンピュータモデリングおよび速やかで精度の高い測定技術を重用して開発を行った。

燃焼システムと燃料の開発は、車両性能のあらゆる面を通じて改良プログラムの一部であった。得られたゲインによって、マクラーレン・ホンダは競争力を維持することができ、ドライバーズ、コンストラクターズの両チャンピオンシップを獲得することができた。

使用された燃料は全て無鉛であり、ベンゼンも全く含

まれておらず、シュルの専門家による健康、安全の承認を得たものである。

開発プログラムは、出力の増大に加えて、高エネルギー燃料が応答性の改良に導く速い燃焼速度を有すること、またオクタン価基準の従来の評価法が誤りを招く場合もあることを明らかにした。

## 謝 辞

マクラーレン・インターナショナルに対して、本論文中で報告されている開発に大きく寄与されたことに深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) G.J.Germane, Technical Review of Automotive Racing Fuels", SAE 852129
- 2) Y.Otobe et al, Honda Formula One Turbocharged V6 1.5l Engine", SAE 890877
- 3) S.Miller and R.Pinchin, Engine Lubrication for the Formula 1 World Champions", I. Mech. E. C394/055 1990
- 4) 園田他、「F-1用V12高性能エンジン」、自動車技術会9307シンポジウム、1993.3.11

## ■ 著 者 ■



安 岡 章 雅



松 本 弥 寸 嗣



A. R. Glover



I. R. Galliard