

ホンダ F-1 V6 1.5L ターボ過給エンジンの開発

Honda Formula One Turbo-charged V6 1.5L Engine

青 木 朗	雄 *	乙 部	豊 *	後 藤	治 *
Akio Aoki		Yutaka Otake		Osamu Goto	
宮 野 英	世 *	河 本 通 郎 *		小 川	徹 *
Hideyo Miyano		Michio Kawamoto		Tohru Ogawa	

要 旨

1988 年 F-1 レース用にホンダは RA168E 型ターボチャージャー付き V6 1.5 ℓ エンジンを開発した。

このエンジンは 2.5Bar の過給圧規制の中で最大出力 504kw (685Ps) 、排気量当りの出力としては 336kw/ℓ (457Ps/ℓ) を発生した。又燃料消費についても改良を加えた結果、最小燃料消費率は 272g/kwh (200g/Psh) を達成した。

この論文では、RA168E 型エンジンの主要諸元、出力特性及び燃料消費特性を紹介すると共に、吸気温度、過給圧、空燃費、燃料温度、燃料成分について、それらの燃料消費及び出力への影響を調べた結果を述べる。

ABSTRACT

The 'RA168E', a turbo-charged V6 1.5-liter engine, was developed by Honda Motor Co., Ltd. for the 1988 Formula One Championship Race events.

Despite boost restrictions (2.5bar), the engine boasts a maximum power of 504kw (685ps), which is equivalent to 336kw/ℓ (457ps/ℓ). The development also involved improvements on fuel consumption, allowing the engine to achieve a minimum brake specific fuel consumption of 272g/kwh (200g/Psh).

This paper introduces major specifications, along with power output and fuel consumption characteristics of the RA168E racing engine. In addition, the effects of intake air temperature, boost pressure, air-fuel ratio, fuel temperature and fuel ingredients on fuel efficiency and power output are presented.

1. まえがき

ホンダは 1983 年から Formula 1 (F-1) レーシングチームに対し、V6、1.5 ℓ ツインターボエンジンを供給してきた。このレース用エンジンは基本型式は同一であるが、F-1 競技規定の改定に対応して毎年改良が加えられており、年ごとに諸元が異なっている。

F-1 競技規定の中で、エンジンの性能に対して最も影響の大きいものは、過給圧と燃料タンク容量であり、表 1 に示す様に次第に厳しく規制されてきた。特に 1988 年には過給圧が 2.5Bar に規制されたばかりでなく、車輛の燃料タンク容量が

150 ℓ 以下となった為、レース中に使用可能なエネルギーが制約され、実質的にレース中に発生し得る出力が制限された。1988 年型 F-1 レース用エンジン“RA168E”はこれらの規定に対応し出力の向上と燃料消費の低減を主要目標として開発された。

F-1 レース用エンジンの様な高回転、高過給エンジンを紹介した論文は過去に少なく⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾特にその燃費性能に関する研究は発表された例がない。そこで本論文では RA168E の主要諸元と出力特性を紹介すると共に、燃料消費に関する研究の中で得られた幾つかの知見について述べる。

* 和光研究所

2. エンジン諸元

表 2 に RA168E の主要諸元を、図 1 に断面図を示した。

シリンダブロックはダクタイル鋳鉄からできており、鋳造肉厚は 3.5mm から 2mm の間で部位に応じ最適肉厚を選んでいる。強度、剛性の高いダクタイル鋳鉄を使用する事によって小型、高剛性のシリンダブロックとなっている。シリンダヘッドにはアルミニウム合金を使用し、オイルサンプ、ヘッドカバー等の部品の多くはマグネシウム合金である。その結果エンジン全体の軽量化が図られ、

エンジン重量は全装備状態で 146kg である。軽いエンジン重量は、優れた出力特性、信頼性と共にレースに於ける高い競争力の要因となった。

高い熱効率を得るためには、コンパクトな燃焼室が得られる諸元選定を行う必要がある。

RA168E はストロークボア比 0.643 であり、通常のレース用エンジンと比較するとやや長いストロークを採用している。バルブ挟角は 32° で比較的小さく、ピストン頂部もほぼフラットであり、これら諸元全体としてコンパクトな燃焼室を形成しつつ 9.4 の圧縮比を得ている。

表 1 ターボ過給エンジンに関する規定と
ホンダ F-1 エンジン主要開発目標の推移

年度	規 制		エンジン コード名	主要開発目標
	過給圧 (Bar)	燃料タリ (ℓ)		
1985	無制限	220	RA165E	1)高過給圧
1986	無制限	195	RA166E	2)エンジン信頼性
1987	4.0	195	RA167E	1)高精度過給圧制御 2)エンジン回転限界向上 3)ノッキング特性に優れた 高比重燃料の開発
1988	2.5	150	RA168E	1)エンジン過渡特性の向上 2)燃費向上

表 2 RA168E 主要諸元

型 式	80° V6
シリンダボア	79.0mm
ストローク	50.8mm
総排気量	1494cc
圧縮比	9.4
重 量	146kg
燃料噴射システム	電子式
過給機	セラミックターボ

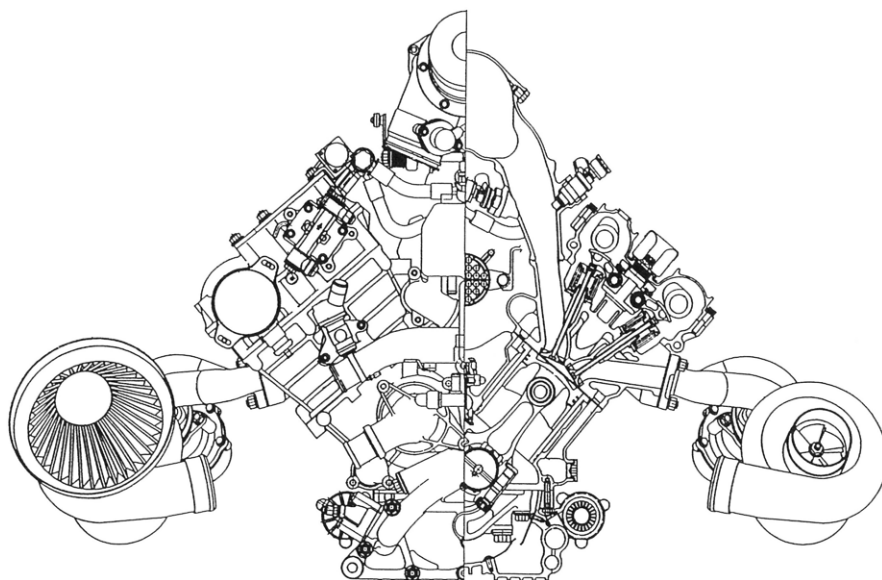


図 1 RA168E 断面図

燃料噴射システムは自社製の電子式燃料噴射システム (PGM-FI) を使用しており噴射方式は6気筒順次噴射である。インジェクターは気筒毎に2本取り付けられており必要燃料量に応じて1本のみ、又は2本同時噴射を切り換えている。

ターボチャージャーは、セラミック製タービン翼車と、ボールベアリングを用いており、回転部の慣性モーメントとフリクションの低減により良好な過渡特性を有している。

3. エンジン制御システム

RA168E は、過給圧、吸入空気温度、燃焼温度、混合気濃度の各運転条件の組み合わせにより、出力及び燃費特性をコントロールしている。エンジンコントロールシステムの主要部分を図2に示した。

過給圧は、排気マニホールドに設けたウェストゲートのダイアフラム室の圧力をソレノイドバルブで調整する事によりコントロールされている。

吸入空気は過給機により加圧されたのち、空冷式のインタークーラーを通してエンジンの吸入チャンバに導かれている。インタークーラーには、バルブ付のバイパス通路が設けられており、バルブの開度によって吸入空気温度がコントロールされる。

燃料はポンプにより加圧されたのち、エンジン冷却水を利用した熱交換器を通して加熱され、インジェクターへ分配されている。燃料温度は、熱交換器を流れるエンジン冷却水の流量の調整によりコントロールされている。

過給圧、吸入空気温度、燃料温度の各運転条件の他、燃料噴射量、点火時期を含め、コンピュータによるコントロールを行っている。

4. 出力及び燃費特性

レースに於いては、エンジンの出力及び燃費に対する要求が各サーキットにて異なる。これらの要求に応じて、適宜、最適な運転条件を選択する

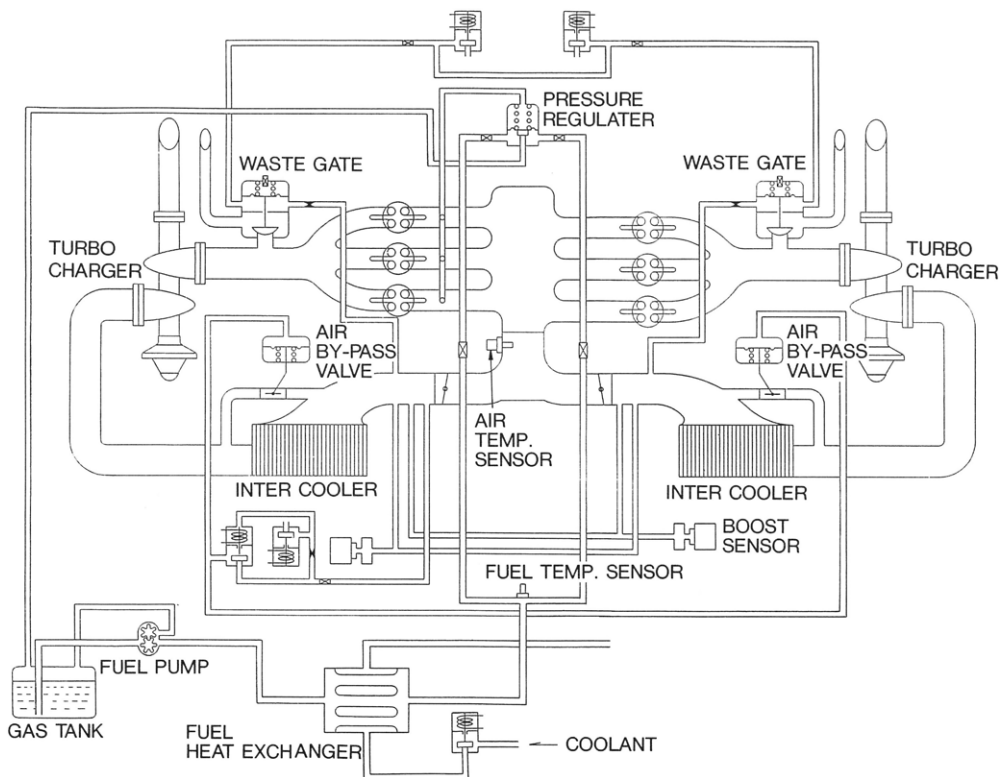


図2 エンジンコントロールシステム

事が重要である。

図 3 の左側に示すのは、出力最大となる運転条件とその時の出力、正味燃料消費率 (B.S.F.C.) 特性である。最高出力は 504kw (685Ps) であり、リッター当り出力では 336kw (457Ps) と極めて高いレベルにある。図 3 の右側には、B.S.F.C. 最小となる運転条件とその時の出力、B.S.F.C. 特性を示す。左図の性能と比べると運転条件の違いにより、最高出力は 48kw (65Ps) 低下しているが B.S.F.C. は 13% 改善されている。B.S.F.C. 改善の為に、高い吸入空気温度及び燃料温度、より小さい当量比を設定しているのが特徴である。

5. 燃焼変動の解析

レース用高回転、高出力エンジンでは、燃料の噴霧状態等によって、しばしば運転中の燃焼状態が不安定となり、最悪の場合はミスファイアが発生して安定した出力を得る上で大きな問題となる。RA168E では燃料噴射システムの改良、吸気ポート形状の改良を行い燃焼の安定化を図ってきた。この様な高回転、高過給エンジンのサイクル

変動についてなされた研究は少ない為、出力最大となる運転条件下での筒内圧測定を行い、燃焼の安定性を調べた。測定はエンジン回転数 12500rpm、点火時期 35° で行った。図 4 は 500 サイクルの平均指圧線図であり、最大筒内圧は 16.7 MPa を示した。

サイクル変動の指標として図示平均有効圧力の頻度分布を図 5 に示した。図示平均有効圧力の平均値 3.8MPa に対し、標準偏差は 0.20MPa であり、ほぼ安定した燃焼状態が得られていると言える。

6. 正味燃料消費率に及ぼす運転条件の影響

RA168E では、レースに於ける燃費を改善する為に、エンジンの燃料消費を低減する事が主要目標となった。レース中のエンジンの運転状況を知る為に、絞り弁開度の使用頻度分布を調べた。一例として、1988 年サンマリノグランプリに於けるアラン・プロスト選手の実測値を図 6 に示した。中間開度の使用頻度に比べ、全開及び全閉の使用頻度が非常に高いことがわかる。全閉時は

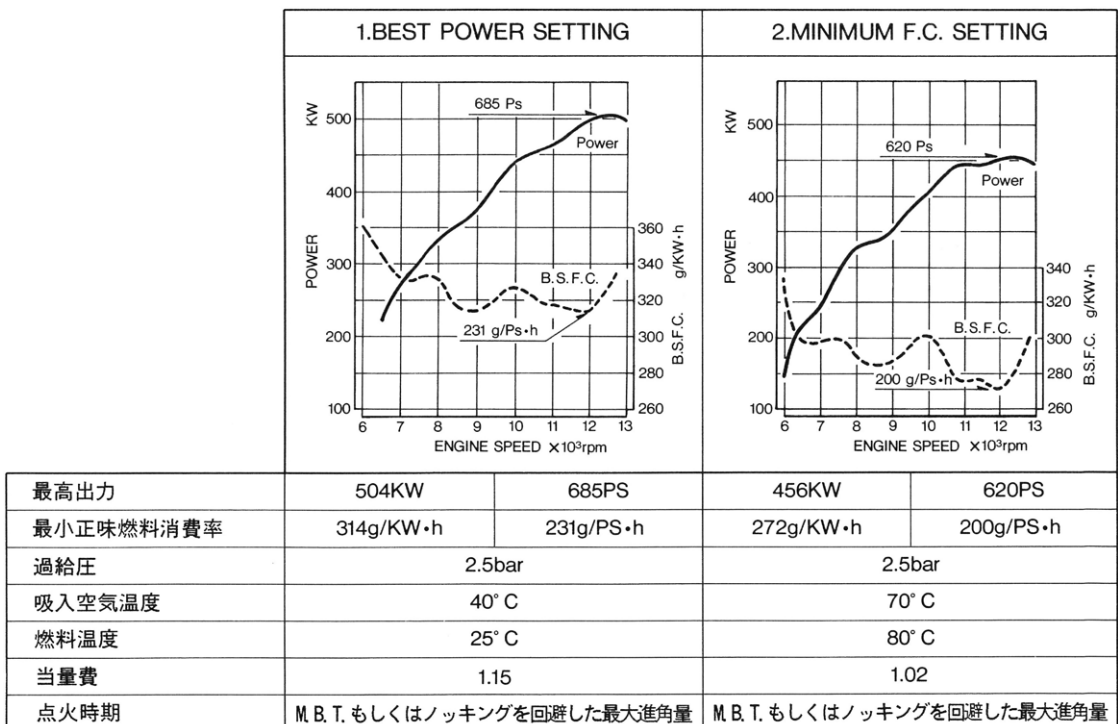


図 3 運転条件と出力及び燃費特性

減速中であり、燃料の噴射を行わない為、燃料の殆どは全開運転時に消費される。この結果から、レースに於ける燃費の改善には絞り弁全開時の燃料消費率低減が重要である事が判る。RA168Eは、前述の各運転条件の最適化により絞り弁全開時に於ける燃料消費率の改善を計っている。次に各運転条件の正味燃料消費率に及ぼす影響について述べる。

6.1. 過給圧

過給圧の上昇に伴って出力が増大すると同時にB.S.F.C.は現象する(図7)。これは過給圧の上昇に対して、充填効率及び図示出力がほぼ比例し

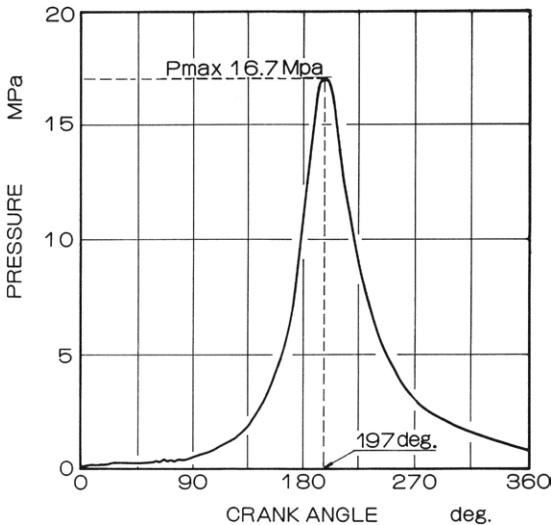


図4 平均指圧線図

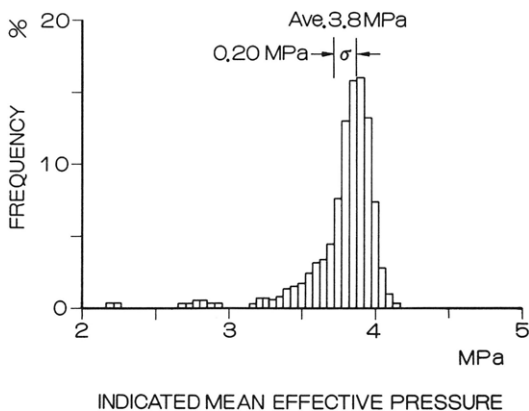


図5 正味平均有効圧力の頻度分布

て増加するのに対し、エンジンの機械損失は殆ど変化しない為に機械効率が向上する事が主な理由である。

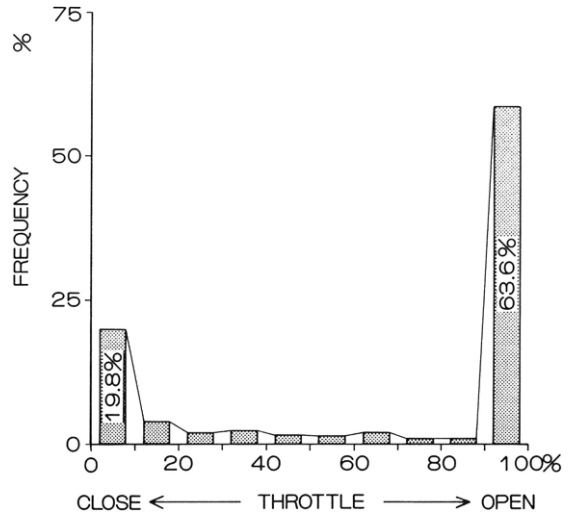


図6 レース中に於ける絞り弁開度の使用頻度分布(例)

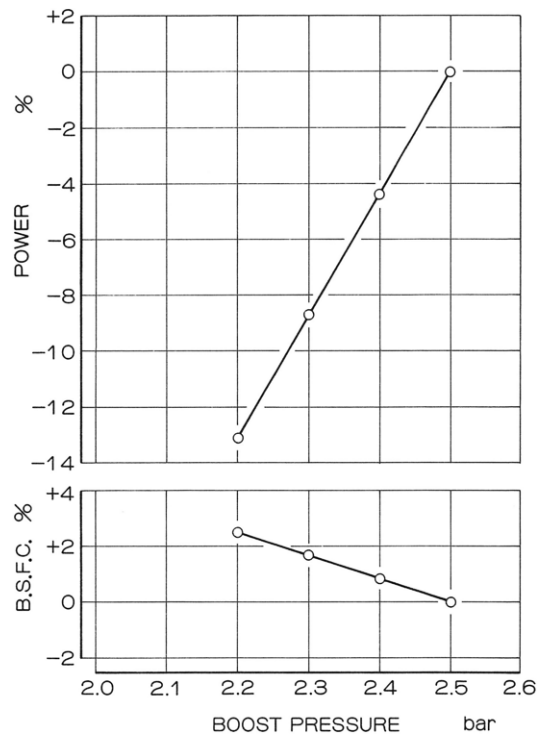


図7 過給圧の影響(エンジン回転数 12000rpm)

6.2. 吸入空気温度

吸入空気温度の上昇に伴い、空気密度が小さくなり出力は低下する。一方、吸入空気温度が 70℃ になるまでは、吸入空気温度の上昇に伴い B.S.F.C. は徐々に減少する (図 8)。RA168E のレース用燃料は、トルエン 84%、ノルマルヘプタン 16% であり、通常のガソリンに比べると常温での気化性が低い。この為、吸入空気温度の上昇が燃料の気化を促進し、B.S.F.C. の低減に効果があった。但し、気化促進効果が一定の吸入空気温度以上では小さくなる事と、一方で吸入空気温度の上昇がノッキング特性の悪化をまねき、点火時期の遅角が必要となることから、高い吸入空気温度領域では B.S.F.C. 低減の効果が小さくなっている。

6.3. 燃料温度

高い吸入空気温度による燃料の気化促進が B.S.F.C. の低減に効果があった様に、燃料の加熱にも同様の効果が見られた。

燃料温度による B.S.F.C. の変化を図 9 に示した。

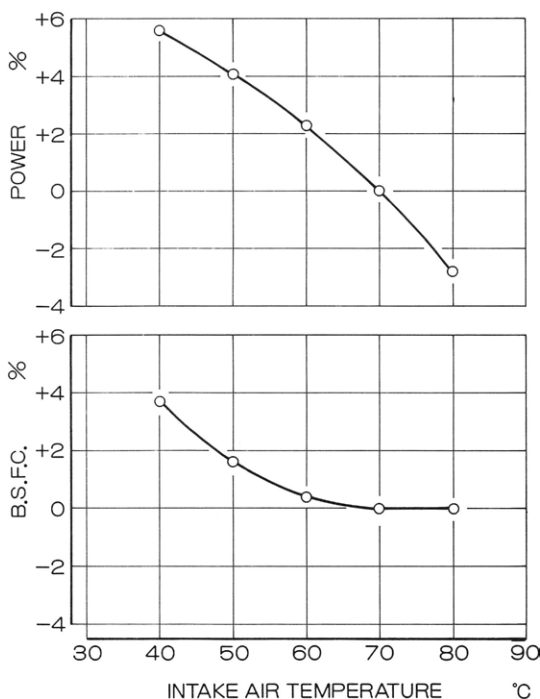


図 8 吸入空気温度の影響
(エンジン回転数 12000rpm)

燃料加熱による B.S.F.C. の低減効果は、吸入空気温度によるものに比べると小さいが、燃料温度を上げるに従って B.S.F.C. が改善していることが判る。

6.4. 当量比

出力は当量比 1.15 で最大となり、当量比が小さい程減少する (図 10)。但し、当量比が 1.02 より小さくなるとエンジンの過渡特性の不良、トルク変動の増大といった運転性上の問題が発生し、実用的ではなくなる為、レースに於ける実用上の当量比の限界は 1.02 であった。

7. 燃 料

F-1 レース用燃料はリサーチオクタン価 (RON) 102 以下の炭化水素とされている。過給エンジンの圧縮比を高める際にはノッキングが障害となる為、実質的に燃料のノッキング特性によってエンジンの圧縮比が制限される。RON が同一であっても炭化水素の組成により実際のノッキング特性は異なる為、圧縮比を高めるにはエンジンの実際の使用条件に於いてノッキング特性の良好な燃料の開発が不可欠である。

一方では、レース中に使用可能なエネルギーが燃料タンク容量で制限されている為、容量当りの発熱量の大きな燃料が好ましいが、この様な要求に対してトルエンを多く含んだものが最適である事が種々の燃料のテストの結果判った。

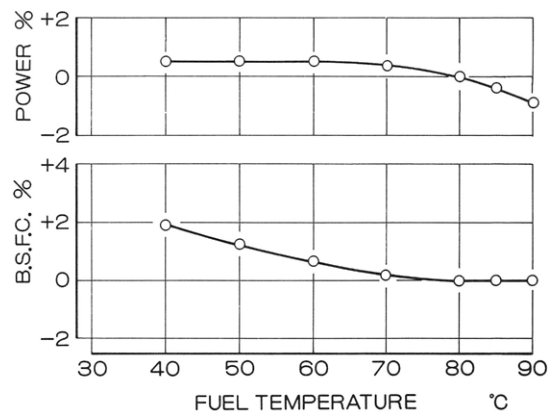


図 9 燃料温度の影響
(エンジン回転数 12000rpm)

一例として表3に示す燃料について、ノッキング特性及び燃料消費率を調べた結果を示す(図11)。テスト燃料のトルエン含有率はそれぞれ30%、60%、84%でノルマルヘプタンとイソオクタンを加えてRON102となるように調整してある。トルエンの含有率が大い程、容量当りの発熱量が大きい。

ノッキングの発生点火時期はトルエン量の増加により進角し、M.B.T.に近づく為B.S.F.C.は減少する。さらに各燃料の比重の違いも考慮し、容積燃料消費率(B.S.V.F.C.)に注目すると、トルエンの含有量の増大につれて大巾に少なくなる事がわかる。

表3 燃料性状

		A	B	レース用燃料*
組成	トルエン (%)	30	60	84
	ノルマルヘプタン(%)	4	9.5	16
	イソオクタン (%)	66	30.5	0
リサーチオクタン価		101.6	101.9	101.8
モーターオクタン価		94.2	91.2	90.0
比重 (15°C)		0.747	0.799	0.840
低発熱量 (Kcal/kg)		10300	10015	9816.7
低発熱量 (Kcal/ℓ)		7690	8000	8250
蒸発性	初留点 (°C)	96.0	98.5	100.0
	50% (°C)	98.5	102.0	106.0
	終点 (°C)	104.5	108.0	116.0

*表3中のレース用燃料は、F-1レース専用にエルフフランスとホンダにより共同開発されたものである。

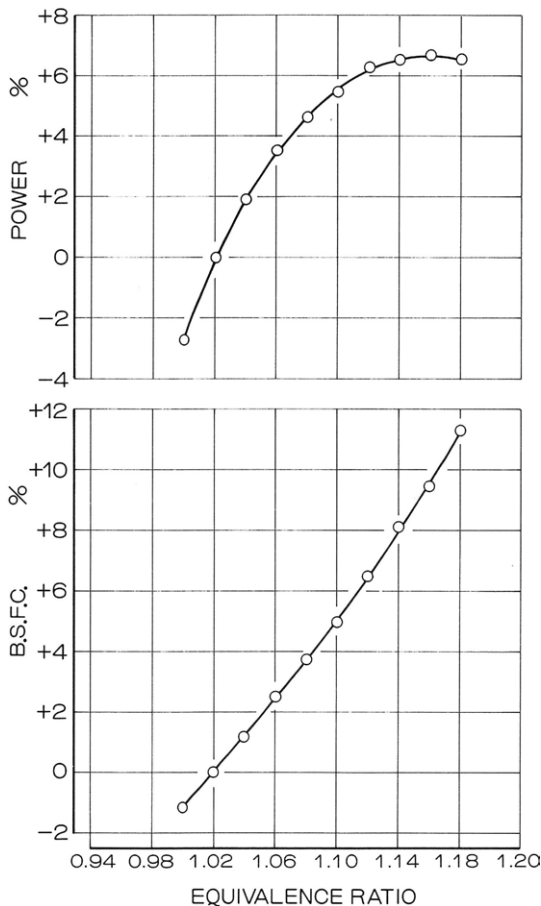


図10 当量比の影響 (エンジン回転数 12000rpm)

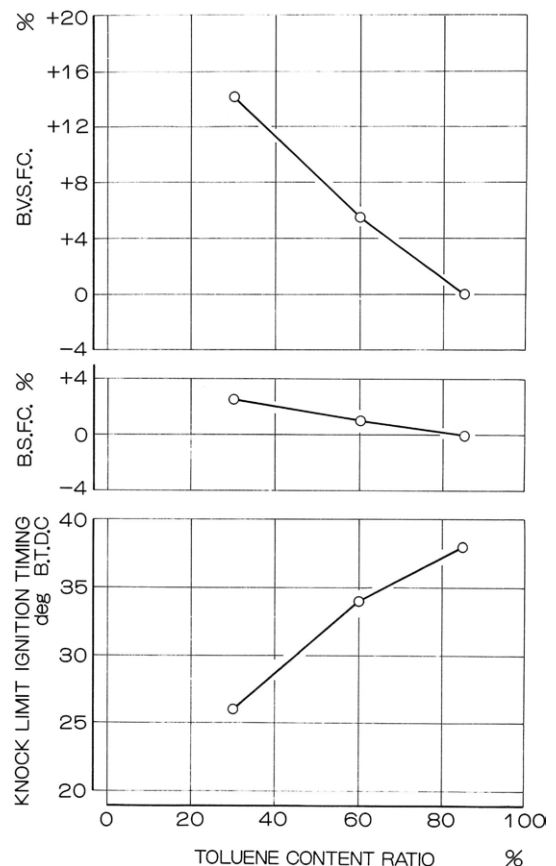


図11 燃料のノッキング特性とB.S.F.C.に及ぼす影響 (エンジン回転数 12000rpm)

8. 結 論

F-1 用 V6, 1.5ℓ ツインターボエンジン RA 168E を開発し、出力特性及び燃料消費特性について検討を行った結果、以下の事がわかった。

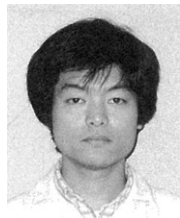
- (1) 過給圧 2.5Bar の条件下で各諸元及び運転条件の最適化を行った結果、最高出力 504kw を発生した。
- (2) 燃料消費率を最小とする運転条件下で、最小正味燃料消費率 272g/kwh を達成した。又この時のエンジン出力は 456kw である。
- (3) 高過給圧、高吸入空気温度、燃料加熱及び小当量比の適用が B.S.F.C. の改善に効果があった。
- (4) 燃料中トルエン量の増加はノッキングの発生を抑え、燃料消費率の改善に効果のある事

がわかった。

参考文献

- (1) Christian Hoefer, "Renault Gordini EF1-erster Formel-1-Motor mit Abgasturboaufladung", Motortechnische Zeitschrift, 45 (1984) 10, PP. 415-418
- (2) W. Rixmann, Esslingen, "Der BMW-Formel-2-Rennmotor M12/6" Automobil-technische Zeitschrift, 78 (1976) 4, PP 147-149
- (3) Christian Hoefer, Fellback, "Die Ferrari-Grand-Prix-Modelle", Automobil-technische, Zeitschrift, 78 (1976) 7/8, PP. 321-325

■ 著 者 ■



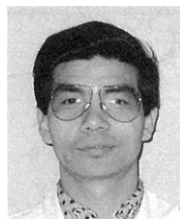
青 木 朗 雄



乙 部 豊



後 藤 治



宮 野 英 世



河 本 通 郎



小 川 徹