

FFV 用エンジンにおける低温燃焼の改善

Enhancement of Low-temperature Combustion in Flexible Fuel Vehicle (FFV) Engine

中 島 進*

Susumu NAKAJIMA

要 旨

近年、内燃機関から排出される CO₂ による地球温暖化の抑制の観点から、さまざまな植物由来の代替燃料が提案されている。その一つにバイオエタノールがある。ブラジルでは、含水エタノール 100% (E100) からエタノール 22% 混合ガソリン (E22) までが使用可能な Flexible Fuel Vehicle (FFV) が使用されている。エタノールは低沸点成分が無い単一成分の燃料であり、低温時の燃焼に課題がある。エタノールの低温時の燃焼を改善するために、最適な圧縮比の選定をおこなった。また、吸気 1 バルブ運転にて流動を高め、低温時の燃焼を改善した。さらに、E100 使用時の低温時の商品性を向上させるために、FFV 専用の新たなエンジン制御も構築した。以上の技術を採用し、出力と E100 使用時の商品性を両立させた FFV 専用エンジンを開発した。

ABSTRACT

A variety of vegetable oil-based alternative fuels have been suggested in recent years with a view to preventing global warming due to the CO₂ emitted by internal combustion engines. One of those fuels is bio-ethanol. Flexible fuel vehicles (FFV) that are able to run on varieties ranging from 100% aqueous ethanol (E100) to a 22% mixture of ethanol with gasoline (E22) are in use in Brazil. Ethanol is a single-component fuel that does not contain any low-boiling-point components, and there are issues with combustion at low temperatures. The optimum compression ratio was selected to enhance the combustion of ethanol at low temperatures. The flow was also raised and low-temperature combustion was enhanced by operating with one intake valve. In order to raise the commercial product appeal when using E100 at low temperatures, a new engine control was built exclusively for the FFV. Through the use of these technologies, a dedicated FFV engine was developed that achieves a balance of commercial product appeal and power output when using E100.

1. まえがき

バイオエタノールは、地球温暖化抑制の観点から近年注目されている代替燃料である。バイオエタノールは太陽エネルギーによる光合成により成長した植物から作る。そのため、燃焼によりエネルギーを取り出しても大気中の CO₂ の総量は増加しないため、カーボンニュートラル燃料として扱われている。

一方、エタノールを自動車用エンジンに用いる場合の課題は、気化潜熱が大きく、低沸点成分を含有しないことによる低温時の気化性の低下である。

ブラジルではサトウキビからバイオエタノールを生成し、エタノール 100% 燃料と、エタノールを 20-25% 添加したガソリンが併売されている。つまり、ブラジル向けの

FFV 用エンジン⁽¹⁾はエタノール濃度 20-100% まで、任意の濃度でも十分な性能が発揮できることが求められる。

2. FFV 用燃料としてのエタノールの物性

Table 1 にエタノールとガソリンの特性を示す。

1. オクタン価は大きい
2. 低沸点成分がない
3. 気化潜熱が大きい
4. 空気あたりの発熱量は若干多い
5. 体積あたりの発熱量が少ない

この燃料性状から予想される、エタノールを自動車用エンジンに用いた際の課題は低温時の燃焼であると予想される。

* 四輪 R&D センター

Table 1 Fuel characteristics

		Gasoline	Ethanol
Octane number RON/MON		93/81	110/92
Boiling point (°C)		25-200	78
Latent heat of evaporation (kJ/Air kg)		30.2	101
Low calorific value	(MJ/Air kg)	2.95	2.99
	(MJ/kg)	43.4	26.9
	(MJ/L)	32	21.2
Theoretical air fuel ratio	(Weight)	14.7	8.9
	(Volume after carburetion)	43.1	14.3
Ratio of the number of moles of combustion before and after		1.07	1.14
Specific gravity (kg/L)		0.737	0.789

Table 2 Engine specifications

Fuel		Gasoline
Cylinder configuration		In-line 4-cylinder
Bore × stroke (mm)		81 × 87.3
Displacement (cm ³)		1799
Compression ratio		10.5
Valve		2 intake valves
Valve diameter (mm)	In.	32
	Ex.	26

3. 低温時のエタノール燃焼特性確認

3.1. 低温時の燃焼の確認

Table 2 に試験エンジンの仕様を示す。Fig. 1 に E100 とガソリンの空気過剰率を変化させた場合の低温時の THC (Total Hydro Carbon), CO₂ の比較を示す。ファーストアイドル相当の低負荷 (-60 kPa) と発進時相当の高負荷 (-13 kPa) で比較をおこなった。E100 は高負荷では THC が多い。原因として、E100 は低沸点成分が無く、気化潜熱が大きいいため、高負荷では大量の燃料が完全には気化できないためであると考えられる。これを裏付ける現象として、CO₂ の排出特性はリッチ側へずれた傾向である。

3.2. FFV における困難な運転条件

FFV は E100 による低温始動が困難なため、低温始動専用の E22 用燃料タンクと噴射システムを有している。Fig. 2 は始動直後の燃料の使い分けを示したものである。実線が低温時の燃料の噴射方法、破線は高温時の燃料の噴射方法を示している。低温時は E22 により始動し、その後 E100 に切り替える。E22 による運転時間は極力短いことが望ましく、その場合 FFV で運転が困難な条件は、

1. E100 を用いる下限温度での始動性 (Fig. 2 図中 A)
2. 低外気温時の高負荷運転への移行 (Fig. 2 図中 B)

である。

3.3. E100 による始動試験

E100 による低外気温時の始動性を確認する。Fig. 3 に外

気温と始動時間の関係を示す。外気温の低下に伴い、始動時間は長くなる。原因は冷機始動時のエタノールの気化性の低下によると考えられる。20 °C まで E100 で始動することを考慮すると、始動時間 3.4 sec を短縮する必要がある。

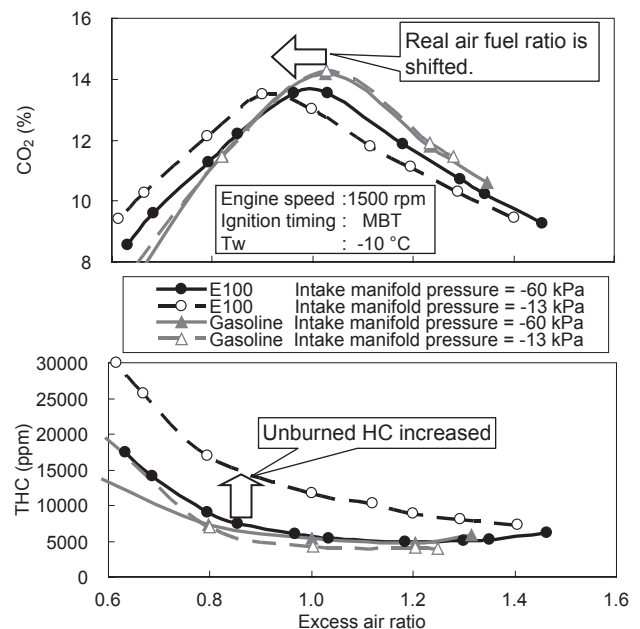


Fig. 1 Characteristics of excess air ratio at low temperature

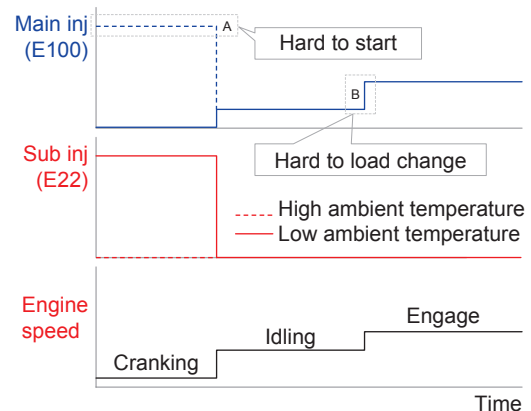


Fig. 2 Fuel used at starting and after start

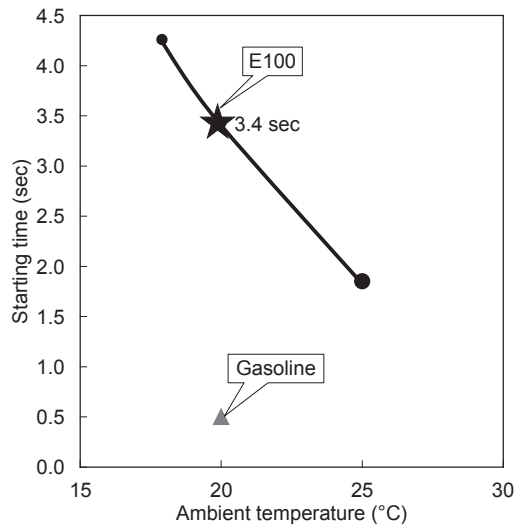


Fig. 3 Relationship between ambient temperature and starting time

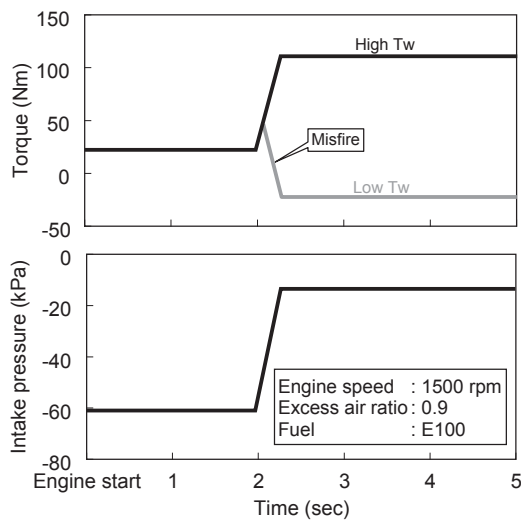


Fig. 4 Transient torque characteristics under high loads immediately after starting

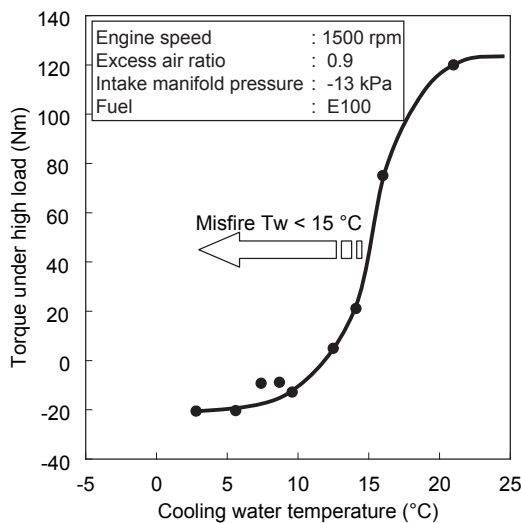


Fig. 5 Relationship between cooling water temperature and torque immediately after shifting to high load

Table 3 Comparison of engine performance when using gasoline and E100

Engine type		Gasoline	
Fuel		Gasoline	E100
Bore × stroke (mm)		81 × 87.3	
Displacement (cm ³)		1799	
Compression ratio		10.5	
Valve		2 intake valves	
Power		97.8	102
Torque (Nm)	Max	165	173
	At 2000 rpm	147	151
Starting time (sec; Ta = 20 °C)		0.5	3.4
Ambient temperature limit (°C)		-25 °C	15 °C

3.4. 低温時の負荷増加試験

FFVは低温時はE22で始動し、その後はE100で運転する。Fig. 4に、始動直後のアイドル運転を2 secおこなった直後に、マニュアルトランスミッション車の発進に相当する高負荷に移行した際のトルクの過渡特性の概念図を示す。水温(Tw)が高い場合は、スロットル開度に追従してトルクが発生するが、低温時には失火してしまう。Fig. 5に水温と高負荷時のトルク特性を示す。水温が15 °C以下の場合、始動直後のE100使用時に高負荷運転に移行しようとすると失火することがわかる。原因は、前述のように、高負荷運転時に大量の燃料が全ては酸化できないためであると考えられる。

Table 3にガソリン仕様のエンジンをそのままFFVに適用した場合の性能を示す。低温時の酸化性低下に起因する始動時間の増大と、使用可能外気温度等の商品性上の課題があることが確認できる。この課題を解決するために、低温時の酸化性に起因するリーン化した混合比(A/F)の適正化を検討する。

4. 低温時におけるA/Fの適正化の検討

低温時のA/Fを適正化する手法として、燃料の気化割合を増す方法と、空気を減らす方法がある。燃料の気化を促進する手法としては、

1. 混合気の温度上昇
2. 燃料の壁面付着防止
3. 圧縮時圧力減少による沸点の低下

が挙げられる。空気を減らす手法としては始動時の混合気量の適正化が挙げられる。具体的には、

1. 圧縮比の増加および点火時期の進角による冷却損失を利用した圧縮端の温度上昇
2. 筒内流動の強化による付着防止
3. 混合気量の適正化による燃料削減と圧縮時圧力減少

が挙げられる。以下にここに述べた手法の効果の確認をおこなう。

4.1. 圧縮比最適化

圧縮比を上げると圧縮端の温度が上昇するため、燃料の気化性が向上する。FFV として最適な圧縮比を決定する際の観点を以下に示す。

1. 任意のエタノール濃度で十分な出力特性である
2. E100 使用時の燃費、出力の向上

Fig. 6 に E100 使用時に圧縮比を変化させた場合の出力を示す。E100 はオクタン価が高いため、圧縮比が 12.5 の場合でもほぼ全域で MBT (Minimum advance for Best Torque) 運転が可能である。したがって、E100 使用時の圧縮比としては 12.5 以上が望ましいことが確認される。Fig. 7 に E22 を使用した場合の出力を示す。下限エタノール濃

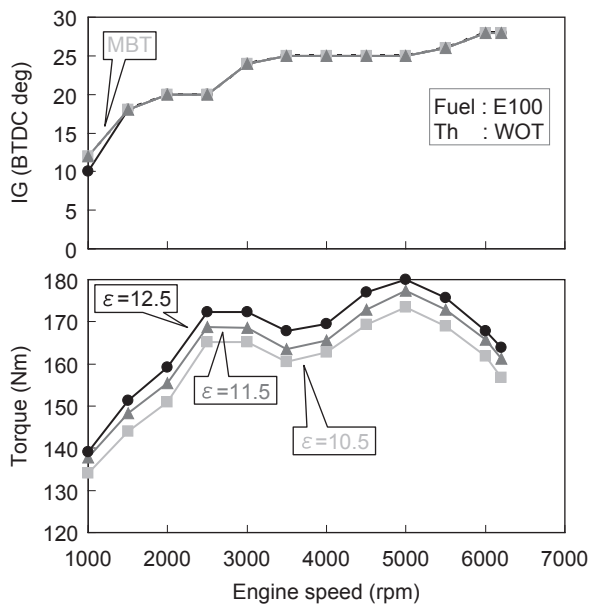


Fig. 6 Relationship between compression ratio and torque (E100)

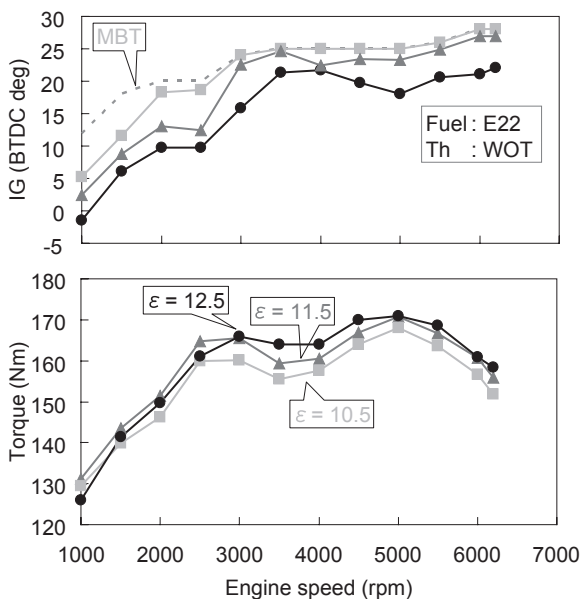


Fig. 7 Relationship between compression ratio and torque (E22)

度である E22 の場合は圧縮比を上げすぎるとノッキングが発生するため点火時期の遅角が必要となり、出力が低下することがわかる。Fig. 8 に圧縮比と低速トルク、出力の関係を示す。下限エタノール濃度にて運転した場合でも、ガソリン仕様のトルク以上とするために、圧縮比は 11.5 を選定した。

4.2. 筒内流動強化

流動改善による効果を確認するために、流速の増加とスワールの生成が可能な吸気 1 バルブ運転の検討をおこなった。以下のシミュレーションおよび試験は始動直後のアイドリングを想定している。

4.2.1. 流速の向上とスワールの生成

吸気バルブの一方のリフトを最小限とし、吸気 1 バルブ運転をおこなうと、流速が向上し、スワールが生成される。Fig. 9 に吸気 1 バルブ運転と吸気 2 バルブ運転の圧縮端での乱れの状態のシミュレーション結果を示す。吸気 1 バルブ運転は、圧縮端まで乱れが残存していることが確認できる。このスワールにより、壁面への燃料の付着が減少し、点火後の火炎伝播が促進されると予想できる。

4.2.2. 壁面への付着量低減

流速の向上が壁面への燃料付着低減に対し有効であるか検証するために、ピストン、シリンダヘッド、スリーブ各々の領域に対する付着量のシミュレーションをおこなった。燃料はガソリンを使用している。Fig. 10 にシミュレーションの結果を示す。吸気 1 バルブ運転をおこなうと、主として排気側のスリーブへの燃料の付着が減少することが確認できる。これにより、気化性が改善されると考えられる。

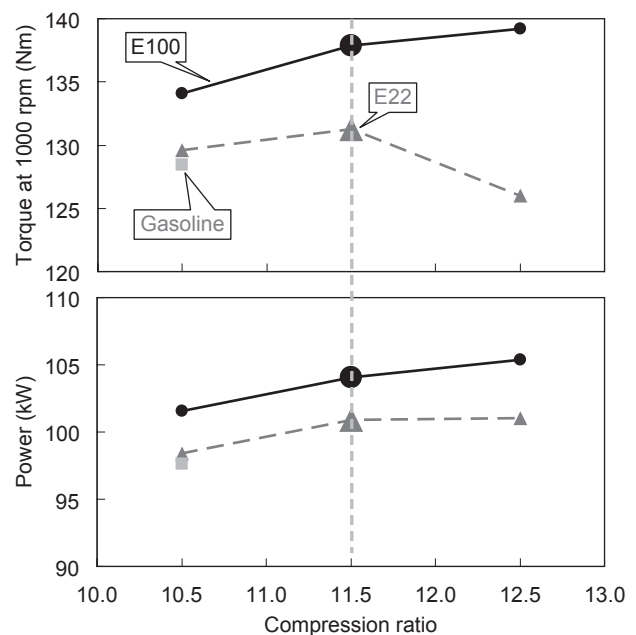


Fig. 8 Relationship between compression ratio and engine power (E22, E100)

4.2.3. 火炎伝播の促進

圧縮端までスワールが残存すると、燃料の気化性が向上するため、火炎伝播が促進されることが考えられる。それを確認するため、High Speed Flame Ionization Detector を用いて燃焼室の各領域の THC 濃度を計測した。燃料の消費状態を測定した。シミュレーションとの整合のため、燃料はガソリンを使用している。Fig. 11 に測定結果を示す。燃焼

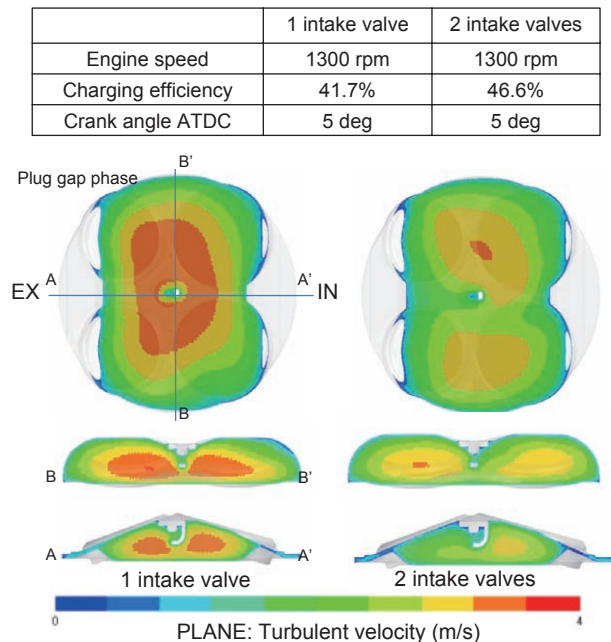


Fig. 9 Turbulent velocity simulation results (1 intake valve, 2 intake valves)

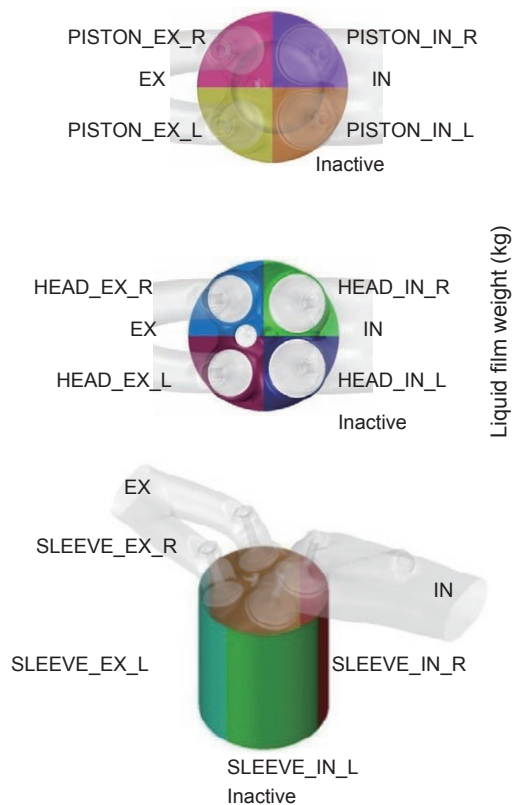


Fig. 10 Results of simulation of liquid film weight of fuel

THC 濃度が約半分に減少した角度を、その部分に火炎が伝播した角度であると定義する。

(1) 吸気 2 バルブ運転 火炎伝播の順序は、点火からプラグ部近傍 (Fig. 11 図中 A) が燃焼した後、ほぼ同時に排

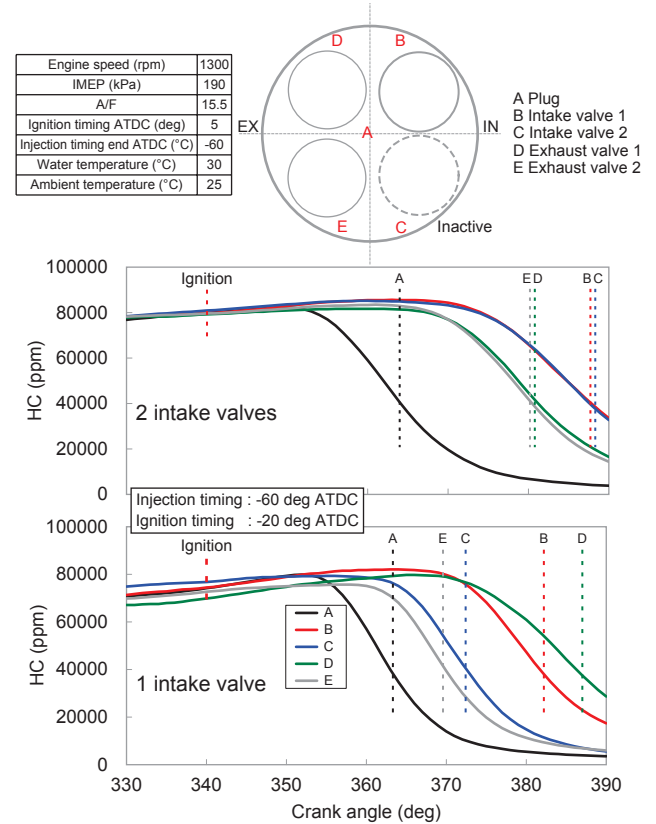
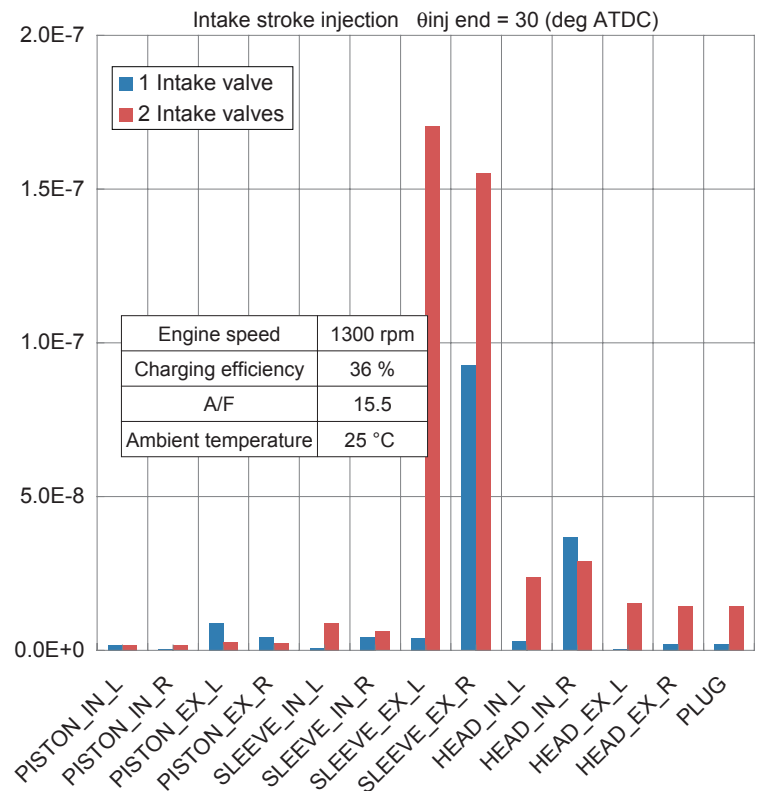


Fig. 11 Test result using high speed FID



気側 (Fig. 11 図中 D, E) へと火炎が伝播する。その後吸気側 (Fig. 11 図中 B, C) へ伝播する。火炎伝播はプラグ部を中心とした放射状に、温度が高い排気系がやや早く進行すると思われる。

(2) 吸気 1 バルブ運転 燃焼の進行順序は、点火からプラグ部近傍 (Fig. 11 図中 A) の混合気が燃焼した後、スワール流と同方向 (Fig. 11 図中 E-C-B-D) に火炎が伝播し、燃焼の進行は早い。

吸気 1 バルブ運転によるスワール流の生成で、気化性が向上するとともに、火炎伝播も促進されていることが確認できる。Fig. 12 に火炎伝播の進行の概念図を示す。以上のシミュレーションおよび計測により、吸気 1 バルブ運転が気化性を改善し、火炎伝播も促進させていることが確認された。

4.3. 点火時期進角

点火時期を進角させると冷却損失の増大の形で燃焼室の温度を上昇させることができる。進角限界を拡大するには、圧縮行程の途中でも十分に気化が進行していなくてはならない。

4.3.1. 吸気 1 バルブ運転の進角限界の拡大

気化性の改善に有効であった吸気 1 バルブ運転は、進角限界の拡大にも有効である。安定燃焼領域を空気過剰率と点火時期で定義して表現した。安定燃焼の定義は平均有効圧力の変動率が 7.5% 以下の領域である。空気過剰率に対する進角側限界と遅角側限界を Fig. 13 に示す。吸気 1 バルブ運転をおこなうと、進角側の燃焼限界が拡大することが確認できる。

4.3.2. 負荷変動試験による確認

上記の結果に基づき、吸気 1 バルブ運転と点火時期進角を組み合わせることにより、低温時の高負荷移行時の燃料の気化性を改善することが可能となる (Fig. 14)。Fig. 15 に吸気 1 バルブ休止運転と点火時期進角を組み合わせた負荷変動試験の結果を示す。低外気温時の始動直後から E100 のみで高負荷運転が可能となったことが確認できる。

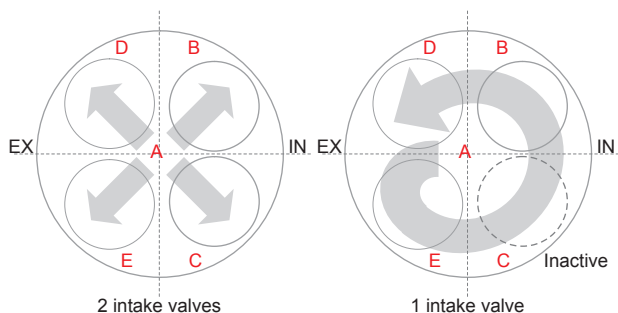


Fig. 12 Conceptual diagram of fire propagation

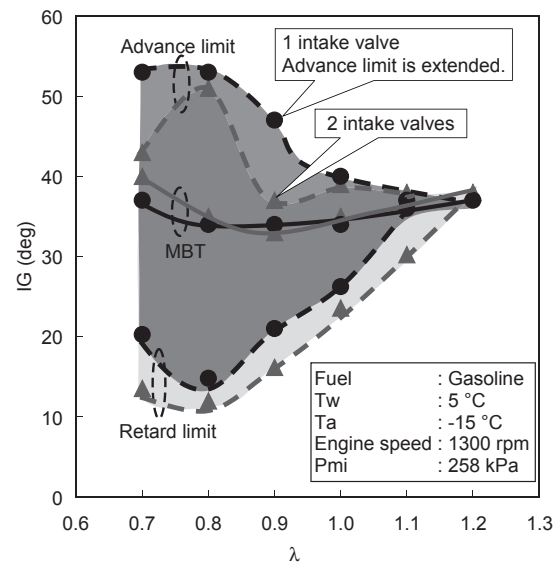


Fig. 13 Comparison of combustion stability zone with one intake valve and two intake valves

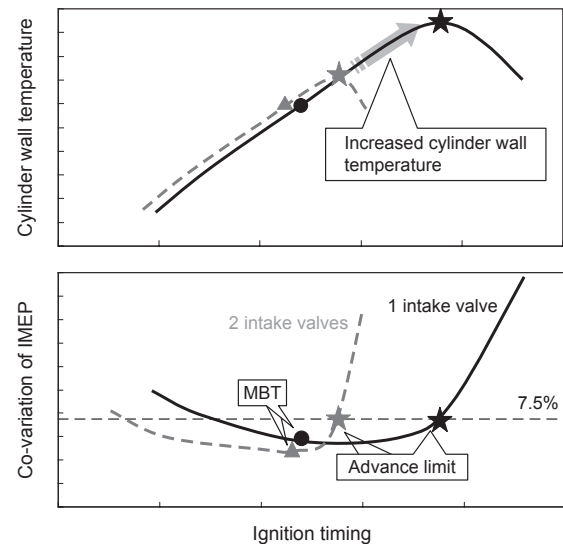


Fig. 14 Effect of ignition timing advance to increase cylinder wall temperature

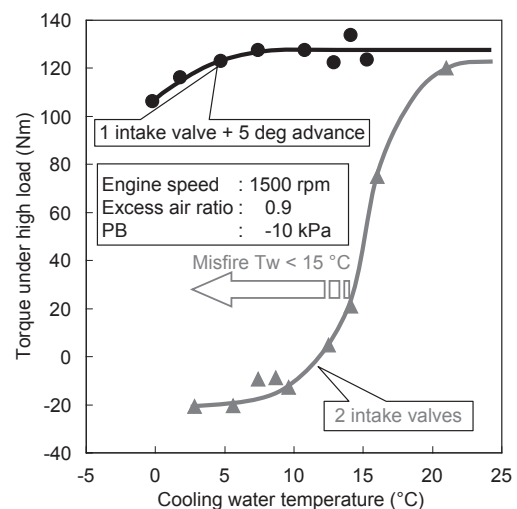


Fig. 15 Relationship between cooling water temperature and torque immediately after shifting to high load

Table 4 Test result at low ambient temperature

Engine type	Gasoline	FFV (optimized)
Compression ratio	10.5	11.5
Intake valve	2 intake valves	1 intake valve
Ignition timing (Fast idle at low Tw)	MBT	MBT + 5deg
Throttle opening angle (Engine start)	Normal	Close
Fuel	E100	E100
Starting time (sec; Ta = 20 °C)	3.4	2.0
Ambient temperature limit (°C; at load change test)	15	-10

Table 5 Test result of engine performance

Engine type	Gasoline		FFV (optimized)	
Fuel	Gasoline	E100	E22	E100
Compression ratio	10.5		11.5	
Valve train system	Normal		VTEC	
Low engine speed	2 intake valves		1 intake valve	
High engine speed			2 intake valves	
Power (kW)	97.8	102	101	105
Torque (Nm)	Max	165	173	171
	2000 rpm	147	151	162

4.4. 混合気量の適正化

前述のように、低負荷時は混合気量が少なく、気化性が良好である。その特性を利用して、ガソリン仕様に対して始動時の混合気量を減らし、気化性を改善する手法が考えられる。混合気量の減少により、気化に必要な熱量が減少する。また、圧縮端の温度は変わらずに圧力が減少するので、沸点が低下する効果もある。Fig. 16に吸気圧と始動時間の関係を示す。吸気圧力が下がると始動時間が短縮されることが確認できる。始動後は、Drive By Wire による空気量制御により、速やかに回転数を上昇させる。

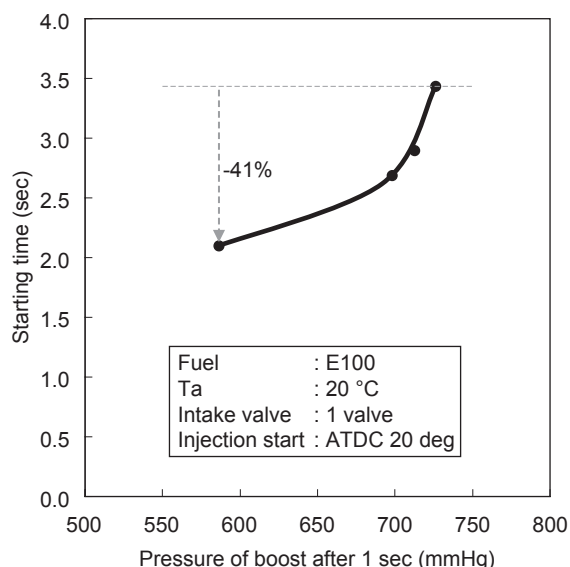


Fig. 16 Relationship between air intake pressure and starting time

5. エンジン仕様の最適化の効果

5.1. 低温時の性能の確認

吸気1バルブ運転による低温時の燃焼改善の結果をTable 4に示す。ガソリン仕様をそのままFFVに適用した場合に比べ、FFV用に最適化した仕様は、低温時の始動性が向上していることと、低温水時から負荷変動運転が可能となり、商品性が向上している。

5.2. 燃焼の改善と出力の両立

吸気1バルブ運転による低温時の燃焼の改善と出力の両立はVTEC (Valve Timing Electric Control system)により可能となる。Table 5にガソリン仕様をそのままFFVに適用した場合と、FFV用に最適化し、VTECを採用した場合の性能比較を示す。E22-100まで、ガソリン仕様よりも性能が向上していることが確認できる。

6. まとめ

ガソリン用エンジンをそのままFFVに適用すると、低温時の燃焼等に課題が生じる。解決手法の探索をおこなった結果、以下の結論を得た。

- (1) E100の低温時の燃焼の課題は、気化潜熱がガソリンの約3倍と大きいこと、低温では燃料が完全には気化できず、スリーブ等に付着することによって考えられる。
- (2) 最適な圧縮比を選定することによりE22使用時の性能を落とすことなくE100の気化性および出力、燃費を向上させることが可能である。

- (3) 吸気 1 バルブ運転による流速の向上とスワール生成により、低温時における E100 の付着量の低減が可能で、気化性が改善され、火炎伝播が促進される。
- (4) 吸気 1 バルブ運転は、点火時期の進角側限界を拡大する。
- (5) 点火時期の進角限界の拡大により、MBT を超えて進角させ、筒内温度を向上させ、発進時を想定した負荷変動試験でも失火を防止できる。
- (6) 始動時の吸気量制限により必要な燃料量が減少し、圧縮端圧力が低下し、沸点が低下するため、気化性が向上し始動性が向上する。
- (7) VTEC の採用による吸気 1 バルブ運転と吸気 2 バルブ運転の使い分けで、低外気温時の商品性と最高出力を両立することができる。

参考文献

- (1) 齊木良治, 中島進, 中島寛明, 三木健太郎, 沖秀行, 御領園陽一: ブラジル向け CIVIC 用 1.8L フレックスフューエルエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.13-19

■著 者■



中 島 進