

論文・解説

35

サブタンクレスFFV (Flexible Fuel Vehicle) の開発 Development of Sub-Tank Less FFV (Flexible Fuel Vehicle)

古市 展之*1 島本 祥*2 西尾 貴史*3
Nobuyuki Furuichi Sho Shimamoto Takafumi Nishio
渡辺 友巳*4 大橋 美貴典*5 安田 京平*6
Tomomi Watanabe Mikio Ohashi Kyohei Yasuda

要 約

近年、バイオエタノールが注目されており、ブラジルではE22（エタノール22%、ガソリン78%）からE95（エタノール95%、水5%）に対応したFFV（Flexible Fuel Vehicle）が普及している。ただし、エタノールは低沸点成分を含まない単一成分の燃料であるため、冷間での気化改善と燃焼改善が課題となる。そのため、ブラジル向けのFFVは一般的に補助燃料タンク（サブタンク）等の追加システムを採用し、冷間始動性や走行性を改善させるが、マツダはSKYACTIV-Gの圧縮比やバルブタイミングを最適化し、そして直噴であることを活かすことで、サブタンクレスFFV（サブタンク等の追加システムを用いないE95対応のFFV）を開発した。

Summary

Bio-ethanol fuel attracts attention in recent years. FFV (Flexible Fuel Vehicle) that can run on E22 (ethanol 22%, gasoline 78%) and up to E95 (Ethanol 95%, Water 5%) has become popular in Brazil. Since ethanol is a single-component fuel that does not contain any low-boiling point components, vaporization and combustion performance at low temperature need to be improved. FFV for Brazilian market are generally equipped with sub-fuel tank systems to avoid cold startability and driveability problem.

This paper introduces our newly developed sub-tank less FFV that can use E95 by optimizing compression ratio and valve timing, and taking advantage of the direct-injection system of our SKYACTIV-G engine.

1. はじめに

近年、地球温暖化への関心の高まりから、再生可能燃料であるバイオエタノールが注目されている⁽¹⁾。そして、既にブラジルではE22からE95に対応したFFVが普及しており、アメリカやヨーロッパでもガソリンからE85（エタノール85%、ガソリン15%）に対応したFFVが普及しつつある^{(2) (3)}。

ただし、エタノールは低沸点成分を含まない単一成分の燃料であるため、エタノールを自動車用燃料として使用する際には、冷間での気化改善と燃焼改善が課題となる。そのため、ブラジル向けのE95に対応したFFVは一般的にサブタンク等の追加システムを採用し、このサブタンクに低温でも蒸発する成分を有するE22を入れ、冷間ではこのE22を噴射することによって始動性や走行性を確保する。

しかし、SKYACTIV-Gの高圧縮比かつ直噴エンジンである利点を最大限に活用すれば、冷間でもシリンダ内でE95の飽和蒸気圧を超える状態を作り、E95を気化させることが可能であると考え、E95に対応したサブタンクレスFFVの開発を行った。

2. 開発条件

FFVにはブラジルで普及するE22からE95に対応したFFVと、欧州、米国、タイで普及するガソリンからE85に対応したFFVの2種類が存在する。エタノールおよびガソリンの性状から、開発難易度が高いのはE22からE95に対応したFFVである。そのため、E95に対応できる技術が構築できれば、E85を含む全てのエタノール混合燃料での運転も保証できると考えた。そこで、このE95が普及するブラジル市場を想定して開発条件を設定した。

*1, 2 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance
Development Dept.

*3 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.
*4~6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

2.1 温度、燃料条件

Table 1に示すように最低保証温度はブラジルの最低気温に合わせて-5℃とした。また、評価燃料はブラジルに流通している燃料と同様にE22と含水5%のE95とした。

Table 1 Evaluation Temperature and Evaluation Fuel

Minimum Temperature	-5degC	
Fuel	E22	Ethanol 22%, Gasoline 78%
	E95	Ethanol 95%, Water 5%

2.2 ベースとしたエンジンの仕様

エンジンはTable 2に示す新型Mazda2に搭載される油圧S-VT (Sequential Valve Timing) を採用するSKYACTIV-G 1.5Lをベースに検討した。このエンジンのスペックは以下のとおりである。

Table 2 Specifications of Base Engine

Fuel	Gasoline
Cylinder Type	In-line 4
Bore × Stroke[mm]	74.5 × 85.8
Displacement[cm ³]	1495
Compression Ratio	12 : 1
Valve System	DOHC 16Valves Hydraulic In-VT
Fuel Injection System	Direct-injection

3. 開発目標

ブラジル市場でBICのFFVを開発することを目指し、次の①~③を開発目標とした。

- ① サブタンクレスであること。
- ② 環境によらずE22からE95の使用が可能であること。
- ③ E95使用時でもガソリン車やE22使用時と同等の始動性、走行性であること。

4. エタノールの特性とエンジン性能

Table 3にガソリンとエタノールの性状を、Fig. 1にガソリンとエタノールの蒸留特性を示す。これらからエタノールの以下の特性が確認できる。

- ① エタノールのオクタン価はガソリンより高い。
- ② エタノールの単位空気量当たりの発熱量はガソリンと同等である。
- ③ エタノールの気化潜熱はガソリンよりも多い。
- ④ エタノールは低沸点成分を含まず沸点が一定である。
- ⑤ エタノールは蒸気圧が低く一定である。

①~③から、エタノールを自動車用燃料として使用することで、出力向上の利点がある反面、④~⑤から、冷間での気化改善が課題であることが分かる。

Table 3 Fuel Property of Gasoline and Ethanol

		Gasoline	Ethanol
Chemical Formula	-	-	C ₂ H ₅ OH
Theoretical Air Fuel Ratio	-	14.6	9.0
Density	g/cm ³	0.75	0.79
Octane Number	Ron	91-100	111
Low Calorific Value	MJ/kg	44	27
	MJ/Air kg	3	3
Latent Heat of Vaporization	MJ/kg	0.30-0.38	0.84
Boiling Point	degC	30-200	78
Flash Point	degC	-43	13
Reid Vapor Pressure	kPa	50-80	20

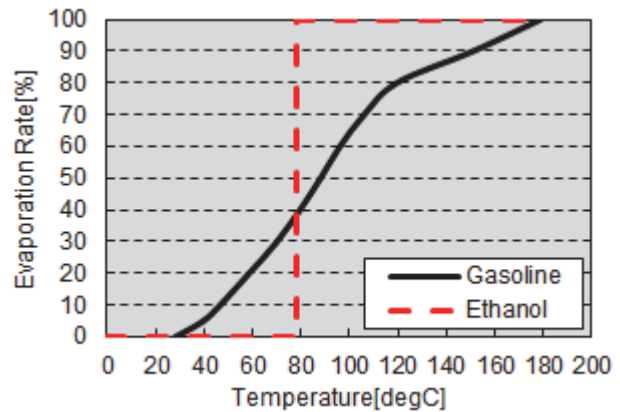


Fig. 1 Evaporation Properties of Gasoline and Ethanol

5. 冷間でのE95の気化改善

5.1 考え方

ガソリンは低沸点成分を含むため、冷間でも燃料噴射量を増やすことで混合気を最適な空燃比にすることが可能である。ただし、E95は低沸点成分を含まないため、ブラジルの最低気温である-5℃のような環境下では、燃料噴射量を増やしても最適な混合気にはならない。

そこで、E95の冷間での気化改善および最適な混合気形成を目的にTable 4の技術を織り込んだ。

- (a) 圧縮行程時の混合気温度を高めるために、圧縮比を上げるとともにIVC (Intake Valve Close, 吸気バルブ閉時期) を進め有効圧縮比を高めた。
- (b) 燃料の微粒化とペネトレーションの低下によるシリンダ壁面への燃料付着を抑制するために、燃料噴射燃圧を最大20MPaまで高めた。
- (c) E95が気化できるシリンダ内の温度と圧力の時に燃料噴射するために、圧縮行程噴射を行った。
- (d) 混合気分布を最適化するために、圧縮行程ー圧縮行程もしくは吸気行程ー圧縮行程の分割噴射を採用した。
- (e) シリンダ内の温度低下を抑制しE95の気化を向上させるために、電動スロットルの最小開度を制限した。
- (f) シリンダ内の負圧を確保しE95の気化を向上させるために、電動スロットルの最大開度を制限した。

Table 4 Technology of Sub-Tank Less FFV for E95 Vaporization

	Rise Temperature	Atomize Fuel	Inject E95 when Cylinder Temp. is High	Reduce Adhering Fuel on Cylinder Wall	Optimize Air-Fuel Mixture
High Compression Ratio	(a)				
IVC Advance	(a)				
High Pressure Injection		(b)		(b)	
Compression Stroke Injection			(c)		
Divided Injection					(d)
Min. Guard of Throttle Angle	(e)				
Max. Guard of Throttle Angle		(f)			

次節から実際の自動車の運転状態に沿ってサブタンクレスFFVに織り込んだTable 4の技術について具体的に説明する。なお、自動車の運転状態は次の3つに分けた。

- ① 冷間始動性領域
- ② 冷間アイドル領域
- ③ 冷間走行性領域

5.2 E95での冷間始動性

(1) 考え方

エンジンの圧縮行程中ではシリンダ内の温度と圧力は共に上昇する。そのため、圧縮比を上げIVCを進めることで、圧縮行程時のシリンダ内の温度と圧力はE95が気化できる状態まで上昇する。次に、SKYACTIV-Gの直噴エンジンである噴射時期の自由度を活かし、圧縮上死点付近のE95が気化できる時に燃料噴射することで、サブタンクレスでもE95での冷間始動が可能と考えた。

(2) 圧縮比、IVCの選定

Table 5に示すようにFFVエンジンでは圧縮行程中の温度を上げるために圧縮比を上げるとともにIVCを進めた。

Table 5 Specifications of Gasoline Engine and Sub-Tank Less FFV Engine

		Gasoline Engine	FFV Engine
Fuel		Gasoline	E22-E95
Cylinder Type		In-line 4	In-line 4
Bore × Stroke[mm]		74.5 × 85.8	74.5 × 85.8
Displacement[cm ³]		1495	1495
Compression Ratio		12 : 1	14 : 1
Valve System		DOHC 16Valves Hydraulic In-VVT	DOHC 16Valves Hydraulic In-VVT
Valve Timing	IVO	ATDC8degCA	ATDC8degCA
	IVC	ABDC82degCA	ABDC60degCA
Injection System		Direct-injection	Direct-injection

Fig. 2にE95の蒸気圧曲線とTable 5に示すガソリンエンジンおよびFFVエンジンの圧縮行程時の温度と圧力変化を示す。

ガソリンエンジンではシリンダ内の温度と圧力はほぼE95の蒸気圧曲線を越えないが、FFVエンジンでは圧縮比を上げIVCを進めた効果でシリンダ内の温度と圧力はE95の蒸気圧曲線を大幅に越える。すなわち、FFVエンジンはE95が気化できる状態を作り出せることが確認できる。

また、Fig. 2の星印のポイントがシリンダ内の温度と圧力がE95の蒸気圧曲線を越えるポイントであり、FFVエンジンでは約BTDC40degCAである。

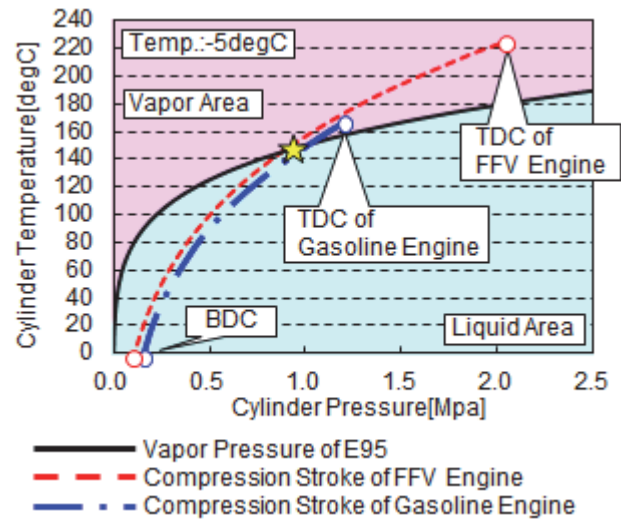


Fig. 2 Relationship between Ethanol Vapor Pressure and Cylinder Condition at Compression Stroke

(3) 噴射時期の選定

FFVエンジンではBTDC40degCAより上死点寄りではE95が気化できる状態になることが確認できたため、このBTDC40degCAを基に噴射時期を選定した。

Fig. 3は冷間で当量比2のE95を噴射した時の気化率をCAE解析した結果である。

一括噴射では噴射時期が上死点近くに依り、気化率は高くなる傾向にある。しかし、噴射時期がBTDC20degCAになるとBTDC40degCAと同等の気化率であり、気化率は改善しない。これは噴射後の気化時間が不足するためである。

更に、シリンダ壁面の燃料付着を減らし、かつ気化率を高めるため、分割噴射についてもCAE解析を行った。Fig. 3に示すようにBTDC40degCAとBTDC20degCAの分割噴射は、BTDC40degCAの一括噴射よりも気化率が改善する。この結果からE95での冷間始動の噴射時期はBTDC40degCAとBTDC20degCAの分割噴射とした。

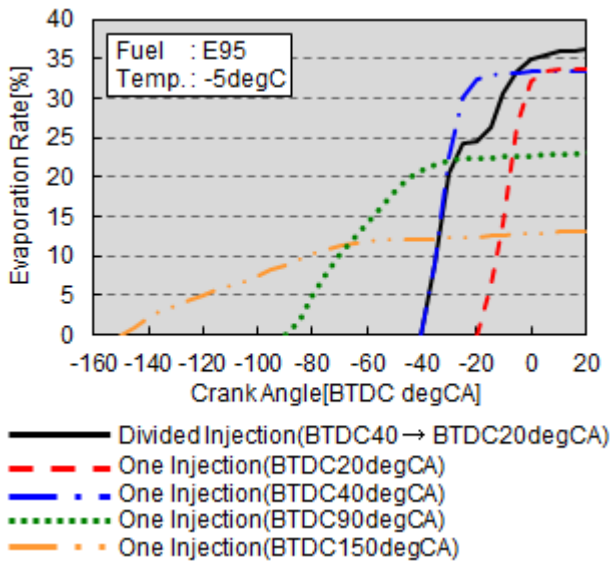


Fig. 3 Relationship between Injection Timing and Vaporization Rate

Fig. 4にAT車での始動性評価結果を示す。サブタンクレスでありながら、E95の始動性はブラジルの平均的な気温である20°C以上ではE22と同等であり、ブラジルの最低気温である-5°Cでも始動時間は2秒以内である。すなわち、サブタンクレスFFVは燃料や温度に寄らず、迅速な始動性を実現できているといえる。

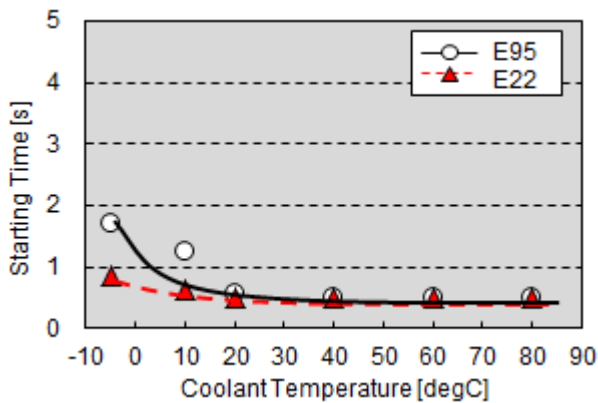


Fig. 4 Relationship between Coolant Temperature and Starting Timing of AT Vehicle

(4) プリイグニッションの抑制

圧縮比を高めIVCを進めることで、低オクタン燃料使用時や熱間時はプリイグニッションが発生する懸念がある。

そこで、まずノックコントロールシステムの信号から燃料のオクタン価を推定する制御モデルを作成した。次に、この推定オクタン価と吸気温、エンジン水温からプリイグニッションの発生を予測する制御モデルを作成した。

そして、始動時にプリイグニッションの発生が予測される場合は膨張行程噴射を行い、走行時にプリイグニシヨ

ンの発生が予測される場合はIVCを遅らすとともに電動スロットルの最大開度の制限し、プリイグニッションを抑制した。

5.3 E95での冷間アイドル安定性

(1) 噴射制御の最適化

一般的にガソリン車ではアイドルは吸気行程の一括噴射である。ただし、E95の冷間では吸気行程の一括噴射は気化率が低く、アイドル安定性が悪化する。そこで、噴射時期を吸気行程と圧縮行程の分割噴射とし、気化率の向上と混合気形成の最適化を行った。

(2) 充填効率の最適化

Fig. 5はAT車の外気-5°Cでの冷間アイドル安定性評価結果であり、冷間アイドル時の充填効率と角加速度変動（回転変動）の関係を示す。角加速度変動が小さいほどアイドル安定性は良いことを意味する。Fig. 5から、E95の冷間は充填効率0.5前後ではガソリン同等のアイドル安定性であるが、低負荷と高負荷では共にアイドル安定性が悪化することが確認できる。低負荷でのアイドル安定性の悪化は、圧縮行程時のシリンダ内の温度が低くE95の気化が悪化するためであり、高負荷でのアイドル安定性の悪化は燃料噴射時のシリンダ内の圧力が高くE95の気化が悪化するためである。

そこで、E95での冷間アイドルでは充填効率が0.5程度になるように点火時期を遅角するとともにアイドル回転数を最適化することで、E95でもE22と同等のアイドル安定性と耐エンスト性を実現した。

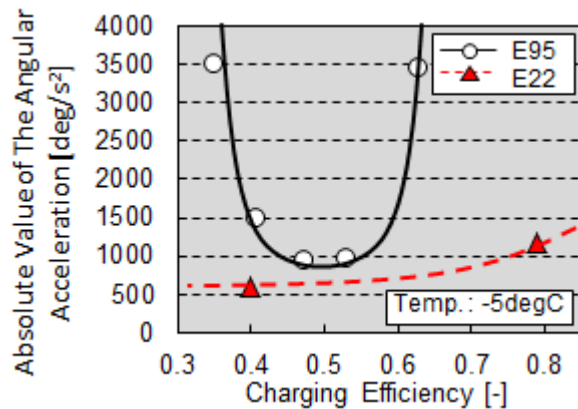


Fig. 5 Cold Idling Stability of AT Vehicle

5.4 E95での冷間走行性

(1) 噴射制御の最適化

前節のアイドル安定性の改善と同様に、冷間での走行領域についても混合気形成の最適化を目的に、吸気行程と圧縮行程の分割噴射を採用した。

Fig. 6にE95の冷間での分割噴射の効果を示す。Fig. 6から分割噴射は一括噴射に比べ、燃焼変動率を表すCOV

(Coefficient of Variance : 所定サイクル中の図示平均有効標準偏差を所定サイクル中の図示平均有効圧平均値で割った値) が下がり、かつ燃料噴射量も減っていること、すなわち、分割噴射により気化率の改善と混合気形成の最適化が図れ燃焼安定性が改善することが確認できる。

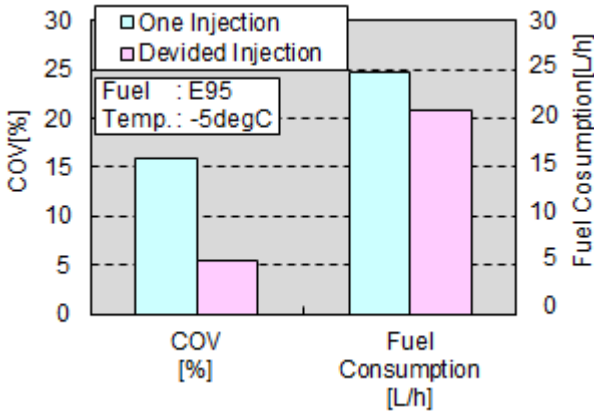


Fig. 6 Effect of Divided Injection with E95

Fig. 7に分割噴射及び一括噴射を行う領域を示す。吸気行程と圧縮行程の分割噴射は、気化率が低くなるエンジン水温が低く、かつエタノール濃度が高い領域のみで使用する。

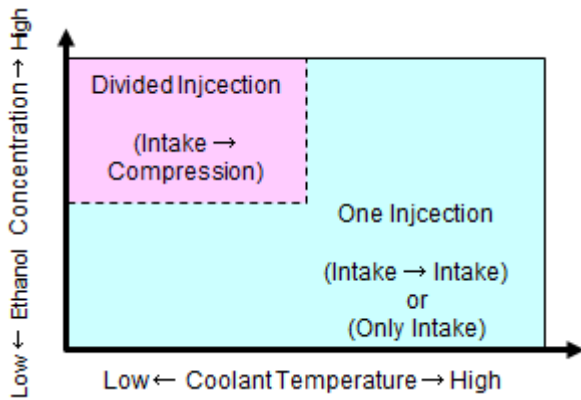


Fig. 7 Area of Divided Injection

(2) 充填効率の最適化

サブタンクレスFFVは前述のとおり噴射制御により積極的に冷間でのE95の気化改善を行う。Fig. 8にE95での充填効率と失火度合いを表すLNV (Lowest Normalization Value : 所定サイクル中の図示平均有効圧最小値を所定サイクル中の平均有効圧平均値で割った値) の関係を示すが、これらの噴射制御による気化改善技術を織り込んで、低負荷及び高負荷では燃焼安定性が悪化することが確認できる。

低負荷でのLNVの悪化は、圧縮行程時のシリンダ内の温度が上昇せずE95の気化が悪化するためであり、高負荷

でのLNVの悪化は、燃料噴射時のシリンダ内の圧力が高くE95の気化が悪化するためである。

そのため、E95使用時はエンジンの運転範囲をFig. 8の赤線で示した領域に制限するために、電動スロットルの最小開度と最大開度に制限を設定し、燃焼安定性が確保できる領域でのみ運転するようにした。なお、この充填効率の制限はエンジン水温の上昇に伴い減少する。

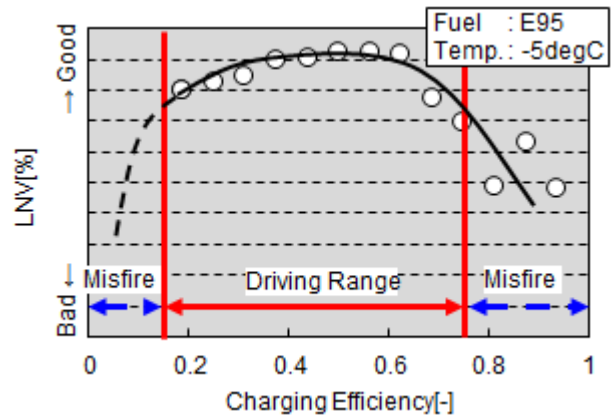


Fig. 8 Cold Combustion Stability of E95

Fig. 9にMT車の外気-5℃での冷間走行評価結果を示す。Fig. 9から、サブタンクレスFFVはE95でも冷間始動直後からアクセル開度に寄らずE22同等の加減速ができることが確認できる。すなわち、サブタンクレスFFVは燃料や温度によらず応答性の良い走行性能を実現できているといえる。

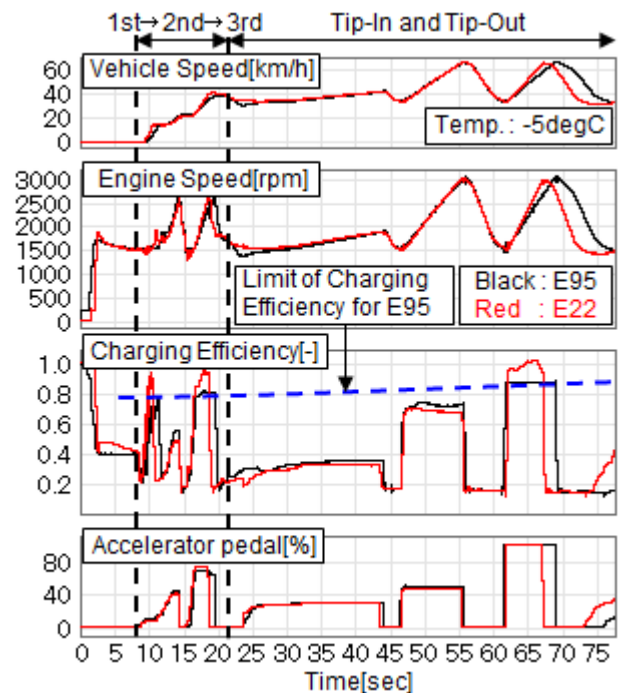


Fig. 9 Cold Driveability of MT Vehicle

6. エンジン制御

6.1 エタノール濃度推定制御

E22とE95では理論空燃比が異なるため、E95使用時はE22使用時よりも燃料噴射量を増やさないと理論空燃比にはならない。また、FFVエンジンはガソリンエンジンと同様に、LAFS (Linear Air-Fuel Ratio Sensor) を用いて理論空燃比にフィードバック制御している。そこで、この燃料フィードバック制御の増減量から燃料タンク内のエタノール濃度を推定する。

Fig. 10に濃度推定制御の概要を示す。燃料給油時に燃料タンクのレベルゲージの出力を用いて給油判定を行い、この給油判定後にLAFSを用いた濃度推定制御が作動する。

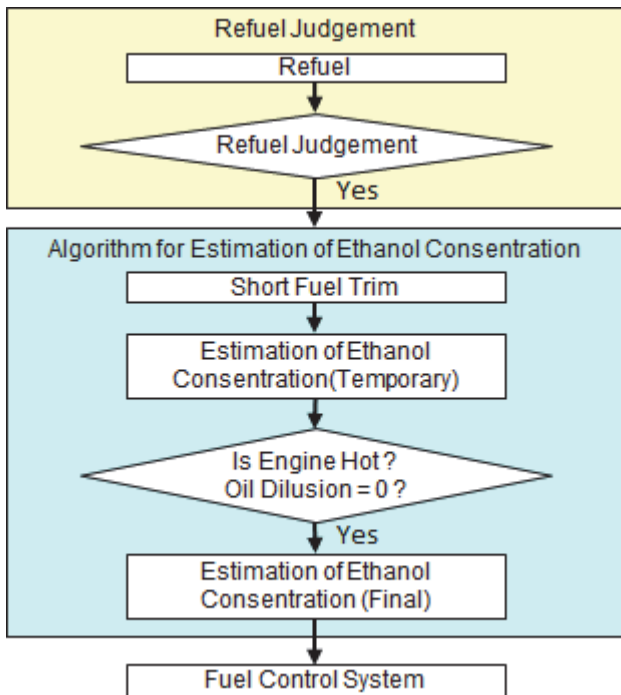


Fig. 10 Algorithm for Estimation of Ethanol Concentration

6.2 オイル希釈量推定制御

E95では冷間での燃料増量率が多いため、オイル希釈量(エンジンオイルに希釈している燃料量)がガソリン車よりも多い。暖機が進むと、このオイル希釈した燃料が蒸発するとともに、蒸発した燃料がシリンダ内に流入し空燃比がリッチとなる。すると、LAFSによるフィードバック補正は燃料を減量する側に補正し、濃度推定制御はアルコール濃度を低濃度と誤学習する。この誤学習を回避するためには、オイル希釈量を正確に推定する必要がある。

そこで、まず次の2つの制御モデルを作成した。

- ① 燃料噴射量とエンジン水温からエンジンオイルに混ざる燃料量を推定する制御モデル
- ② 推定エンジン油温と推定クランクケース内圧からエ

ンジンオイルから蒸発する燃料量を推定する制御モデル

そして、この2つの制御モデルを使い燃料希釈量と燃料希釈量がなくなるタイミングを推定し、濃度推定制御の精度を改善させた。

7. おわりに

サブタンクを用いることなくE95の冷間での気化改善と燃焼改善を行い、開発目標どおりE95でもガソリン車と同等の始動性、走行性能を有するサブタンクレスFFVが開発できた。

また、エタノール燃料は気化潜熱により吸気温度が低下することで充填効率が上がり、オクタン価上昇によりノックを回避できるため、出力が向上する。

すなわち、今回開発したサブタンクレスFFVは、冷間はガソリン車同等、温間はガソリン車以上の走行性を実現できるFFVである。更なる改善を行い、早い時期での市場導入を目指す。

参考文献

- (1) 齋木ほか：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, pp.13-19 (2007)
- (2) 中島：FFV用エンジンにおける低温燃焼の改善, Honda R&D technical review, Vol.22, No.2, pp.126-133 (2010)
- (3) 相川ほか：高濃度エタノール混合ガソリン (E85) の気化特性とエンジン低温始動性, Honda R&D technical review, Vol.21, No.1, pp.170-177 (2009)

■ 著 者 ■



古市 展之



島本 祥



西尾 貴史



渡辺 友巳



大橋 美貴典



安田 京平