

バイオエタノール含有燃料を有効利用する エンジン制御の研究

Research on Engine Control to Make Effective Use of Bioethanol-Blend Fuels

黒谷 忠司*
Tadashi KUROTANI

葛岡 浩平*
Kohei KUZUOKA

工藤 洋嗣*
Hirotsugu KUDO

要 旨

エタノール含有燃料 E10 ガソリン中の限られたエタノールを有効に利用して、熱効率と最大トルクを向上させるエンジンシステムと制御の研究をおこなった。E10 ガソリンを高オクタン価燃料（高濃度エタノール）と低オクタン価燃料（低濃度エタノール）に分離し、高負荷運転時のノッキングが発生しやすい条件でエタノールを効果的に使用し、低負荷運転時は主にガソリンを使用する制御を高圧縮比エンジンに適用した。このシステムにおいて、燃料の保持割合に応じて筒内オクタン価（エタノール噴射割合）と点火時期の基本特性を決定し、その時のエンジン熱効率に合わせて最適な回転数と負荷になるよう変速比を協調する燃料マネジメント制御のロジックを構築した。その効果を車両シミュレーションにより確認したところ、一般的に高負荷頻度の高い運転モードとして知られる US06 モードにおいて、エタノールが不足することなく走行が可能となることを示した。また US-COMB. のように低負荷の運転モードにおいては、分離したエタノールを有効に利用することで燃費性能を最大で 26.8% 向上できる可能性を示した。

ABSTRACT

Research was carried out on engine systems and control that increase both thermal efficiency and maximum torque by making effective use of the limited ethanol content in E10 gasoline, which contains ethanol. Control that separates E10 gasoline into high octane number fuel (high-concentration ethanol) and low octane number fuel (low-concentration ethanol), using the ethanol effectively under conditions that tend to cause knocking during high-load operation and using mainly gasoline during low-load operation, was applied to a high-compression-ratio engine. A fuel management control logic was created so that, under this system, the basic characteristics of ignition timing and octane number (ethanol fraction) inside the cylinder are determined in accordance with the residual percentage of the fuel, and the gear ratio is cooperatively adjusted to yield an optimal engine speed and load matched to the engine's thermal efficiency at that time. Confirmation of this result in vehicle simulation indicated that in US06 mode, known to be an operating mode that generally is frequently under high load, the system is capable of operating without running short of ethanol. It also indicated that in a low-load operating mode such as the US combined mode, the system was capable of a maximum 26.8% increase in fuel economy through the effective use of separated ethanol.

1. ま え が き

近年、環境問題における解決策として再生可能なエネルギーの普及が拡大している。なかでもバイオエタノールはトウモロコシやサトウキビなどを原料として作られ、自動車用燃料としてガソリンと少量混合させた形で使用する方法により従来のガソリンエンジンとほぼ同等の性能を得られることが知られている^{(1), (2)}。米国においてはガソリンにバイオエタノールを 10% 混合した E10 ガソリンが普及している。また、高濃度のバイオエタノール含有燃料に対

応した Flexible Fuel Vehicle (FFV) と呼ばれる車両が開発され普及している⁽³⁾。

エタノールはガソリンに比べて高い耐ノック性を持つ燃料であり、その特性を利用して圧縮比を高めて高い熱効率を得られることが知られている⁽⁴⁾。また、バイオエタノール含有ガソリンの有効利用方法として、E10 ガソリンを高オクタン価燃料（高濃度エタノール）と低オクタン価燃料（低濃度エタノール）に分離することを想定したエンジンにおいて、高効率かつ高トルクのポテンシャルが実証されている⁽⁵⁾。さらに、燃料分離システムで実際に分離した燃料

* 四輪 R&D センター

が自動車用燃料として使用できる性質であり、高負荷頻度の高いUS06モードにおいても必要な高オクタン価燃料量を分離によって得ることができるという結果が報告されている⁽⁶⁾。

このシステムが搭載された車両を実際のユーザに適用する際の課題の一つとして、さまざまな走行条件を考える必要があるということが挙げられる。ユーザの使い方や環境によって走行条件は一定ではなく、高濃度エタノールもしくは低濃度エタノールの消費量に偏りが生じる場合がある。例えば高濃度エタノールの保持量が少なくなった場合、十分なエタノール噴射割合を確保できず、ノッキングの発生によるトルク制限が必要となることがある。そのため、US06モードのような高負荷頻度の高い運転モードでもエタノールが不足しない設定が必要である。しかし、その設定だけでは逆に低負荷の運転モードの場合、高濃度エタノールの使用量が少なく余剰となってしまうことがある。余ったエタノールはノック抑制に有効に使用されず、燃料を分離するメリットが活かされない。このように、分離した高濃度エタノールを有効に利用するためには、2種類の燃料保持量の偏りを小さく抑え、偏りが生じても燃費性能を低下させない制御手法が必要となる。

そこで本研究では、エンジン制御に加え、トランスミッションの協調制御を取り入れた燃料マネジメント制御を考案し、車両走行を模擬したシミュレーションによりその効果を確認した。

2. コンセプトとシステムの概要

2.1. 筒内オクタン価制御

一般的な高圧縮比エンジンにおいて点火タイミングをMinimum spark advance for Best Torque (MBT) とするために必要なオクタン価のイメージとして、エンジン回転数とエンジントルク（エンジン負荷）の関係を Fig. 1 に示す。高オクタン価を必要とするのは高負荷の運転時のみであり、低負荷の運転時には低オクタン価でも MBT タイミングで点火することができる。この特性に合わせ、高

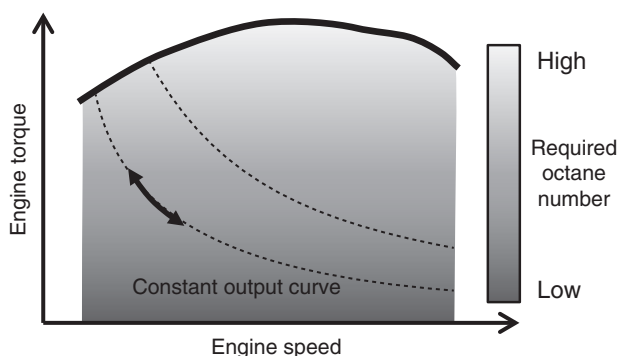


Fig. 1 Image of required octane number at MBT timing

負荷運転の要求時にのみオクタン価の高いエタノールを効果的に供給することで、E10 ガソリン中の限られたエタノールを有効に利用してノッキングを抑制することができる。このように、供給オクタン価を可変にする筒内オクタン価制御により、高圧縮比エンジンによる高効率化とノック抑制による高トルク化を両立することが可能となる。

また、要求される車両駆動力に対して、トランスミッションとの協調制御を用いて、エンジンの等出力線上においてエンジン回転数とエンジントルクを可変にする。すなわち、エンジンの要求オクタン価をトランスミッションで制御し、その要求オクタン価に応じて筒内への供給オクタン価を制御する。これにより、エタノールの消費量を制御することができる。

2.2. システムの概要と燃料噴射構成

Fig. 2 に筒内オクタン価制御を実現するためのシステム構成を示す。エタノール含有ガソリンから高濃度エタノールを含むガソリンを分離する方法として、浸透気化法 (PV 法) の原理を用いた膜による燃料分離システムを製作した⁽⁶⁾。分離した高濃度エタノール (Fuel 1) と低濃度エタノール (Fuel 2) をそれぞれ二つのタンクに保持した上でそれぞれを任意の噴射割合でエンジンの各気筒に供給する。要求される運転条件に応じて筒内のオクタン価を任意に制御するため、1気筒当たり2系統の燃料噴射装置 (インジェクタ) を用いて筒内のエタノール割合を瞬時に変更できる構成とした。要求される車両駆動力に対してエンジン回転数とエンジントルクを制御するため、自動変速機を組み合わせた。

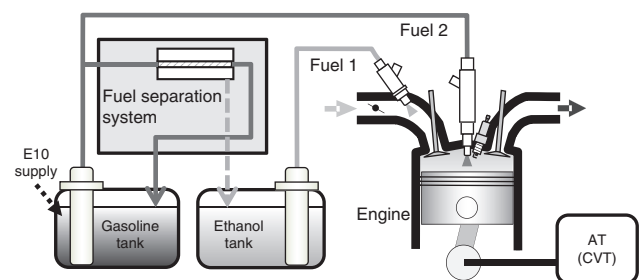


Fig. 2 System configuration

3. 実験装置

エンジンの性能取得と、その性能を得るために必要な筒内エタノール割合を見積もるため、4気筒過給エンジンを実験に使用した。実験に使用した2種類の燃料の諸元を Table 1 に、エンジン諸元を Table 2 に、エンジンシステムを Fig. 3 に示す。燃料はエタノールとガソリンをE10ガソリンから分離することを想定し、レギュラガソリンとエタノールを独立したタンクに別々に保持した上でそれぞれ

Table 1 Fuel specifications

Fuels	Gasoline	Ethanol
Density [g/cm ³]	0.72	0.79
Boiling point [deg C]	-	78
Calorific value [J/g]	43.3	26.8
Octane number	91	115

Table 2 Engine specifications

Number of cylinders	4
Displacement [cm ³]	1755
Compression ratio	12.5
Combustion chamber	Pent roof
Valve control systems	VTEC, VTC
Fuel systems of each cylinder	Port injector Direct injector

を任意の噴射割合でエンジンの各気筒に供給する仕様とした。1気筒当たり2系統の燃料噴射構成を持ち、燃料の総量が吸入空気量に対して量論混合比になるように運転条件に合わせて2種類の燃料割合を任意に制御するシステムとした。ポートインジェクタにエタノール、直噴インジェクタにガソリンを供給する基本構成と、比較としてポートインジェクタにガソリン、直噴インジェクタにエタノールを供給する構成との2パターンについて検証した。エンジンは過給機を備え、吸気バルブの開閉時期を可変バルブリフト機構 (VTEC) と連続可変バルブタイミング (VTC) によって制御が可能であり、運転条件に応じて吸気バルブの開閉時期を変更し吸入空気量と有効圧縮比を変えて、過給アトキンソンサイクル運転が可能となる仕様とした。

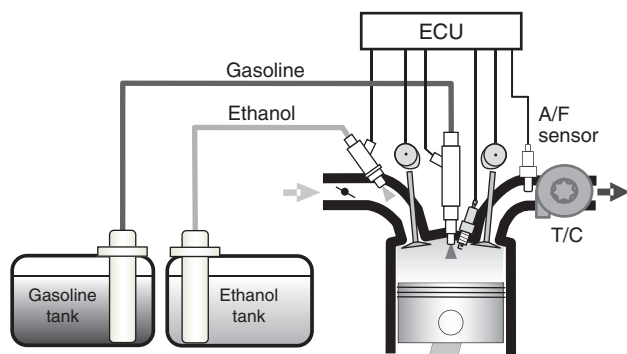


Fig. 3 Experimental engine system set-up

4. 実験結果

4.1. 燃料噴射構成の比較

Fig. 4 に燃料噴射システムとして、ポートインジェクタにエタノール、直噴インジェクタにガソリンを供給する構成の Injection system 1 と、ポートインジェクタにガソリン、直噴インジェクタにエタノールを供給する構成の

Injection system 2 との二つのパターンについて比較した結果を示す。同じエンジン負荷 (図示平均有効圧:IMEP) と図示熱効率を得るために必要なエタノール割合は、Injection system 2 に対して Injection system 1 の方が約 10 ポイント抑制できた。これは、主に筒内に直接噴射するガソリンの蒸発潜熱による影響で、少ないエタノール量でもノッキングを抑制することができたためと考えられる。E10 ガソリンからエタノールを分離するという本システムの限られたエタノール使用可能量の観点から、エタノールの使用量は少ない方が有利であると考え、Injection system 1 を基本構成とした。

4.2. エタノール噴射割合の影響

Fig. 5 に基本構成において、筒内のエタノール噴射割合を変更したときの影響を示す。横軸の IMEP に対し、エタノール噴射割合と、燃焼時期の指標として質量燃焼割合 (MFB) が 50% の時期、図示熱効率、図示燃料消費率 (ISFC) との関係を示す。ガソリンのみの過給アトキンソンサイクル運転では、IMEP が 900 kPa を超えた点からノッキングによる点火時期遅角が必要となり図示熱効率が低下する。そして IMEP が 1600 kPa の最高負荷となりそれ以上高負荷の運転が不可能となった。これに対し Case 1 の条件ではエタノールを高濃度で使用するにより、高負荷 (IMEP=1800 kPa) まで MBT タイミングでの点火が可能となり図示熱効率が向上した。さらに、エタノールが持つ低い発熱量特性の影響を考慮し、Case 2 の条件では MBT 運転時と同程度の ISFC となるようにエタノール割合を低く調整した運転を試みたところ、必要なエタノール割合は約 17 ポイント抑制できる結果となった。このようにエタノール使用量の抑制をしながら、かつ高負荷 (IMEP=2100 kPa) までの運転が量論混合比において可能であることを確認した。

Case 1 と Case 2 を比較すると、ISFC が同等であるた

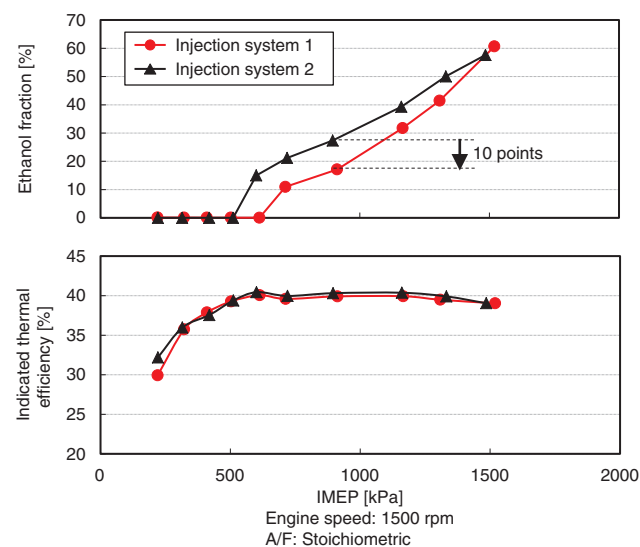


Fig. 4 Comparison of injection system

め同じモード走行を仮定したとき、質量当たりの燃費は同等となることがわかる。ここで、1 回当たりの走行で消費するエタノール量を考慮すると、Case 2 の方がより少ないエタノール量での走行が可能となる。このように、図示熱効率を多少低下させながら燃費性能を低下させない最適なエタノール噴射制御をおこなうことで、E10 ガソリン中の限られたエタノール使用可能量において、高負荷運転が比較的多いユーザに対してもエタノールの効果（燃費性能と加速性能の向上）を提供することができる。Case 2 を基本の設定とし、エタノールが余剰のときは Case 1 に切り替えるなど、エンジンの制御幅においてエタノールの消費量を調整することができる。

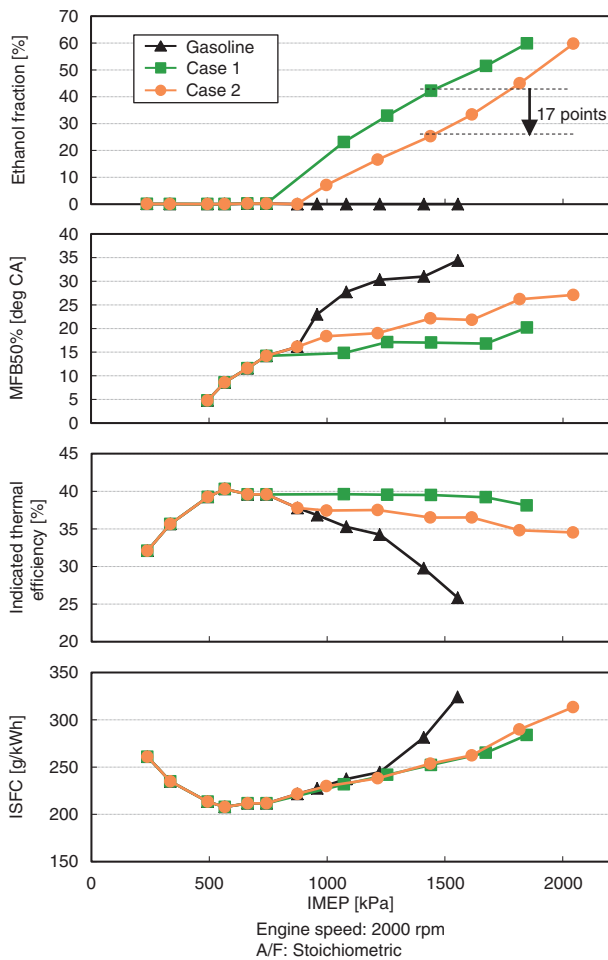


Fig. 5 Effect of altering ethanol fraction

5. 燃料マネジメント制御検証

5.1. 燃料保持量に応じたエンジン回転数と負荷制御

4 章の試験で得られた特性を踏まえ、燃料保持量に応じたエタノールの有効な使い方を実現する燃料マネジメント制御を構築した。Fig. 6 にエタノール保持率に応じてエンジンの運転ポイント（エンジン回転数と負荷）を変化させる制御コンセプトを示す。エンジン回転数が 1500 rpm のと

き MBT 運転となる設定を Case 1 とする。同様に MBT 運転時と同程度の ISFC となる設定を Case 2 とする。エタノールの保持量が少ないときを想定し、エンジン回転数を 2000 rpm としてエタノール使用量を節約する設定を Case 3 とする。比較としてエンジン回転数が 1500 rpm のままエタノール使用量を節約する場合を Case 4 として示す。例として 30 kW のエンジン出力を発生する場合を考えると、エンジン回転数が 1500 rpm のときは IMEP が約 1400 kPa、エンジン回転数が 2000 rpm のときは IMEP が約 1100 kPa となる (Table 2 のエンジン諸元想定)。エタノールが余剰のときは、高い図示熱効率を得られる Case 1 の A 点で運転する。エタノール保持量が低下してきた場合、Case 2 の B 点で運転することで、エタノール噴射割合を A 点に比べて約 13 ポイント抑制することができる。図示熱効率は約 2 ポイント低下するが、ISFC はほとんど変化しない。さらにエタノール保持量が低下してきた場合は、エタノール噴射割合を抑えた設定に加え、トランスミッションとの協調制御を加えて Case 3 の C 点で運転する。このとき、図示熱効率としては B 点に比べて約 3 ポイント低下するが、エタノール噴射割合を約 36 ポイント抑制することができる。C 点の運転は、仮に Case 4 の D 点の運転をした場合に比べて図示熱効率の低下分を抑制することができる。このように、燃料保持量に応じてエンジン制御だけでなくトランスミッションの制御を加えることで、燃費

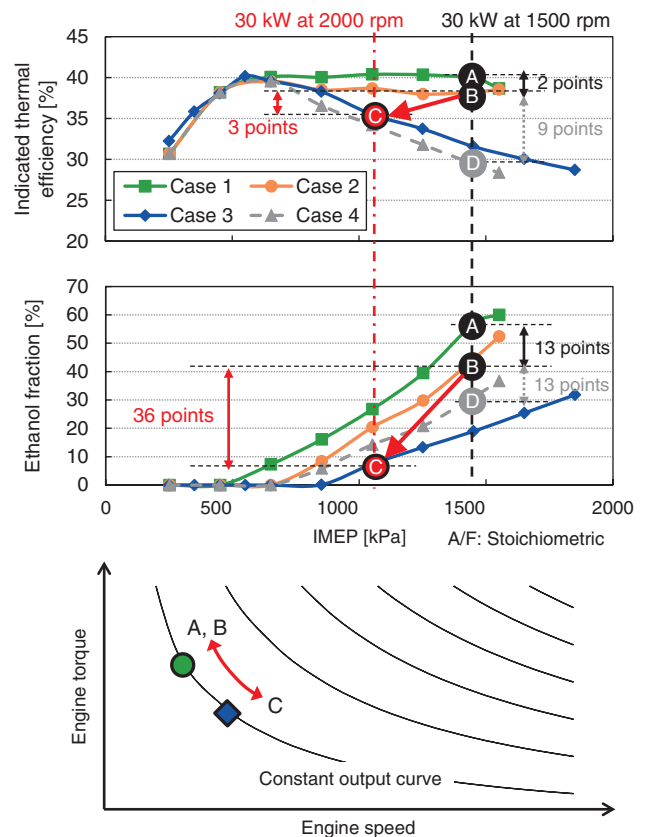


Fig. 6 Fuel management concept

性能の低下を抑制しながらエタノールの消費量を抑制することが可能となる。要求される車両駆動力を一定とした無段変速機 (CVT) の場合、エンジン回転数とエンジントルクは、A、B 点から C 点まで、ほぼ等出力線上をトレースすることになる。

5.2. 燃料マネジメントの制御ロジック

Fig. 7 に燃料マネジメント制御の概要と流れを示す。まず、ドライバの操作から要求される車両の駆動力を算出する。次に燃料濃度推定器により、2 種類の燃料のエタノール濃度を算出し、その濃度値とそれぞれのタンク内燃料保持量とを用いて、燃料保持量推定器により、車両トータルでのエタノール保持率を式 (1) にて算出する。

$$ER = (EC_1 \times RQ_1 + EC_2 \times RQ_2) / (RQ_1 + RQ_2) \quad (1)$$

ER: Total ethanol residual rate [%]

EC₁: Ethanol concentration of fuel 1 [%]

EC₂: Ethanol concentration of fuel 2 [%]

RQ₁: Ethanol residual quantity of fuel 1 [L]

RQ₂: Ethanol residual quantity of fuel 2 [L]

分配器のなかでは、Fig. 6 で示した例などから最適なケースを選択する。具体的には、エタノール保持率に応じて要求する筒内オクタン価、すなわち筒内のエタノール割合の目標値 (基本マップ) を決定し、それに合わせて基本点火時期特性を決定する。そして、変化する熱効率特性に合わせて燃費が最適となるエンジン回転数と負荷になるよ

う、変速マップ (シフトスケジュール) を決定し、ドライバからの要求駆動力を、トランスミッションへの目標エンジン回転数と、エンジンへの要求トルクとに分配する。トランスミッションはエンジン回転数が目標回転数 (目標レシオ、目標ギヤ段) となるよう変速比を制御する。エンジンは要求トルクを発生させるために吸気量を制御し、燃料噴射量および点火時期を制御する。

Fig. 8 にエンジンおよびトランスミッション制御の概要

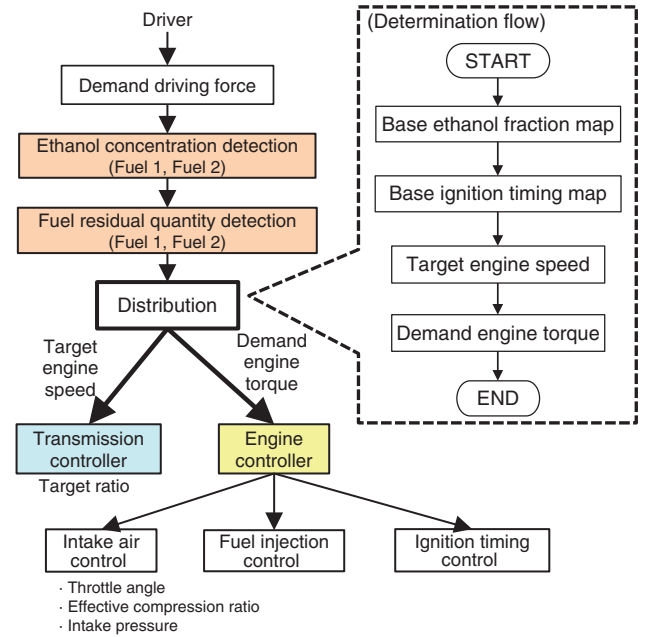


Fig. 7 Overview of fuel management control logic

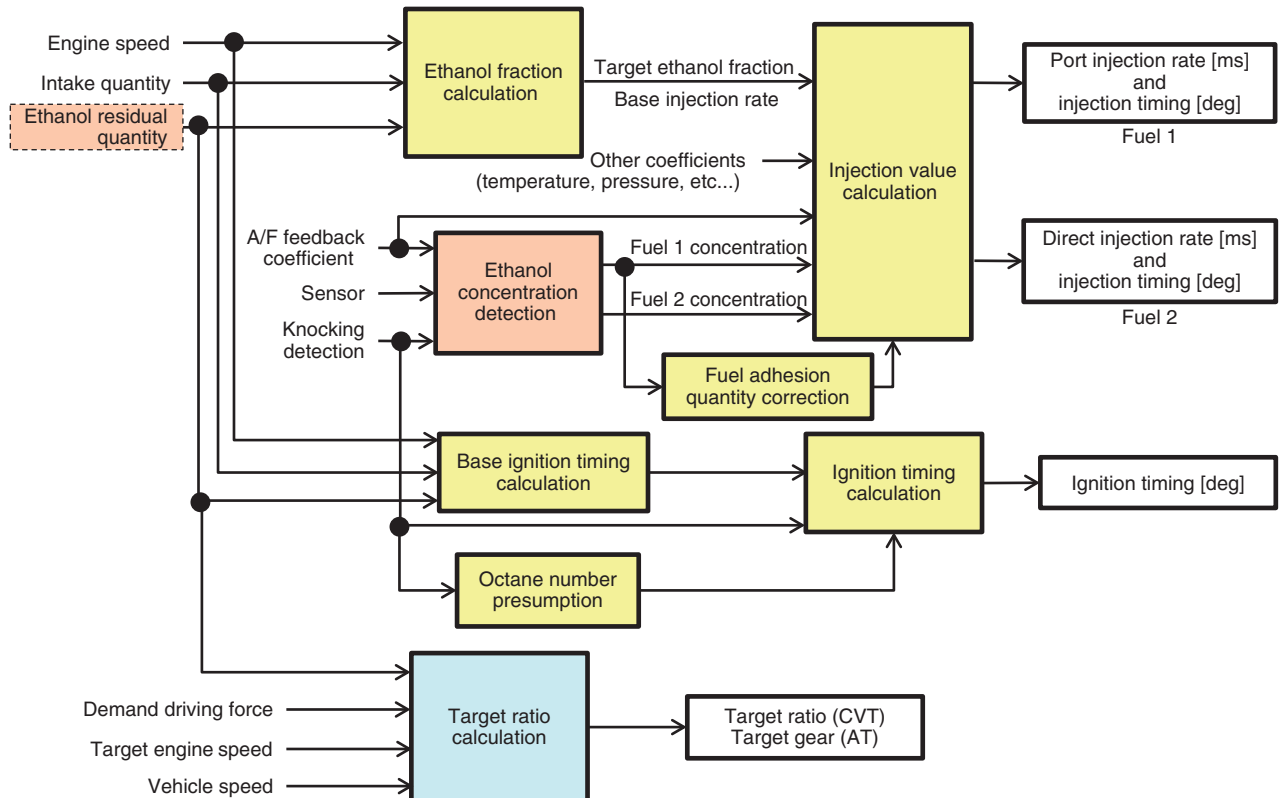


Fig. 8 Overview of engine and transmission control

を示す。現在のエンジン回転数、吸気量、エタノール保持率から先に決定した基本マップに従ってエタノール割合と基本燃料流量を決定する。排ガスの空燃比補正值およびノック検出値やエタノール濃度センサ値などの情報を基に算出したエタノール濃度推定値、ポート壁面付着補正值、その他環境補正值を加えてポートインジェクタおよび直噴インジェクタの噴射量と噴射時期を決定する。同様に、基本マップから基本点火時期を算出し、ノッキング特性などから推定されるオクタン価推定値の補正を加えて点火時期を決定する。トランスミッション制御部は、要求駆動力、目標回転数、車速によって目標レシオ（目標ギヤ段）を決定する。

5.3. 燃費性能とエタノール消費率の検証結果

取得したエンジン性能を用い、ベースとした自然吸気エンジン（NA）の量産車両に対し、燃料分離システムと過給エンジンを搭載した車両を想定し、車両シミュレーションにより燃費性能とエタノール消費率の検証をおこなった。シミュレーションに用いた車両条件を Table 3 に示す。高負荷まで高効率特性が得られる本技術の効果を活かすため、エンジン排気量を下げたダウンサイズ過給エンジンを想定した。Case 1 は、エタノールが余剰のとき MBT 運転となるエタノール噴射割合の条件 A とした。Case 2 は、MBT 運転時と同程度の ISFC となるエタノール噴射割合の条件 B とした。Case 3 は、エタノールの保持率が低下した際、エタノールを節約する設定とした噴射割合マップに、トランスミッションとの協調制御を加えた条件 C とした。

E10 ガソリンからの分離を想定すると、エタノール使用量は燃料総量中の 10% 以下に抑える必要がある。ここでは E10 ガソリンから全てのエタノールを分離抽出したとして、これを全て使用した場合をエタノール消費率 100% と規定する。本シミュレーションでは、高負荷頻度の高い

Table 3 Vehicle simulation conditions

	Ethanol fraction	Displacement [cm ³]	Weight [kg]	Compression ratio	Fuels
Mass-production vehicle 5AT (NA, Base)	—	1799	1361	10.5	E10
Case 1	A	1496	1423	12.5	Separated
Case 2	B				
Case 3	C				

運転モードとして US06 モードを用い、低負荷の燃費基準モードとして US-COMB. を用いて計算した。Fig. 9 にエタノール割合を可変としたときの正味熱効率特性と、シミュレーションによる各走行モードの運転プロット（エンジン回転数と正味平均有効圧:BMEP）を示す。Case 1 と Case 2 は、高負荷でのエタノール噴射割合を高く設定し、高負荷までの高い熱効率特性に合わせたシフトスケジュールにより、低回転高負荷の運転となっている様子がわかる。Case 3 は、変化した熱効率の特性に合わせて比較的高回転低負荷側に運転範囲が変化している様子がわかる。

Fig. 10 にシミュレーションにより得たベースに対する燃費性能の向上率と、エタノール消費率の計算結果を示す。Case 1 の US-COMB. において、燃費性能の向上率が約 26.8% の最大値を示し、エタノール消費率が約 98% となった。しかし、US06 モードにおいては、エタノールの消費率が約 196% となった。これは、エタノールが余剰のときは問題無いが、高負荷頻度の高い運転を何度も繰り返す走行条件を想定するとエタノールの保持率が低下してくることを意味する。そこで Case 2 の設定を確認すると、US-COMB. において、燃費性能は約 25.3% 向上、エタノール消費率は約 53% となり、Case 1 に比べてエタノールの消費量を抑制することができた。しかし、US06 モードのエタノール消費率を約 131% まで抑制できたものの、高負荷頻度の高い運転を何度も繰り返す走行条件を想定する

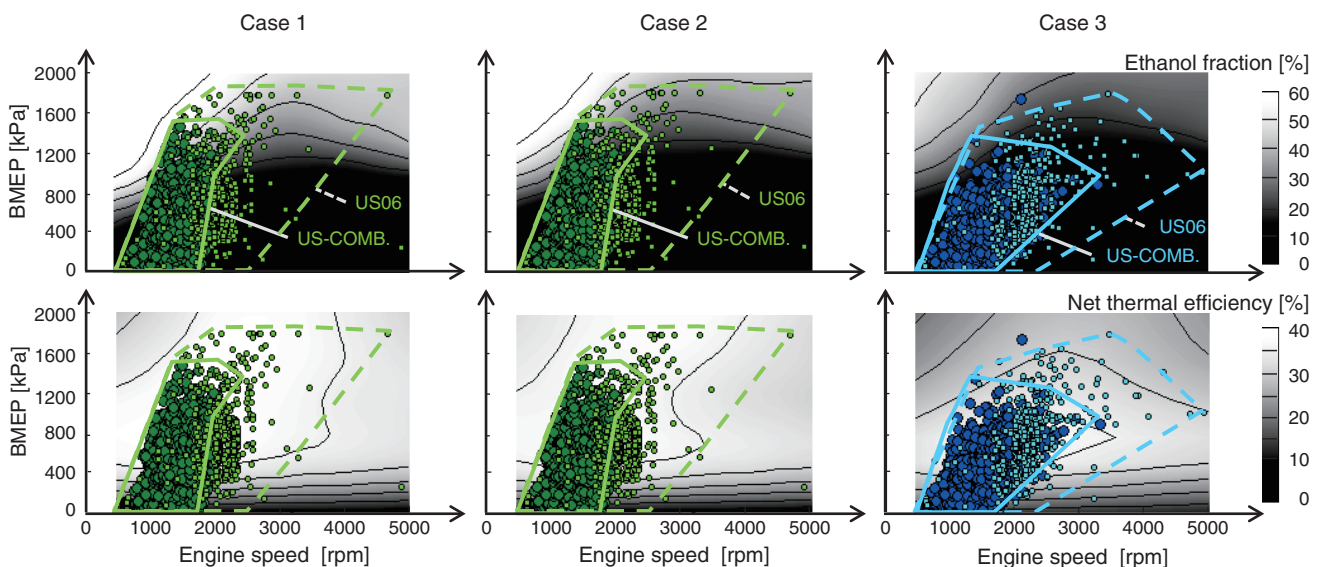


Fig. 9 Operating range with ethanol fraction and thermal efficiency

とエタノールの保持率は低下してくる。それに對し、Case 3 の設定では、US06 モードのエタノール消費率が約 65% となり、Case 2 よりもさらに抑制することができた。US-COMB. の燃費性能は約 23.4% の向上となり、燃費性能の低下を抑制することができた。このときのエタノール消費率は約 17% となり、低負荷の運転が続くとエタノールが余剰となっていくので、そのときは Case 2、さらには Case 1 に移行することで余剰のエタノールを燃費性能向上のために使うことができる。実際のユーザにおいては、ドライバの要求、運転状況、燃料保持量などに応じて、Case 1 から Case 3 の設定を連続的に可変する制御をおこなうことで、さまざまな走行条件に対応できる。

以上の結果より、燃料分離システムと過給アトキンソンサイクルエンジンを搭載した本システムは、実際のユーザを想定した場合において E10 ガソリンから分離したエタノールを有効に使って燃費性能を向上することができる技術であるといえる。エタノール保持率に応じた燃料マネジメント制御をおこなうことにより、高負荷頻度の高い運転を要求された走行条件でもエタノールが不足することなく走行することが可能である。また一般的な走行条件においては、余剰のエタノールを有効に使用することで燃費性能を向上させることができる。

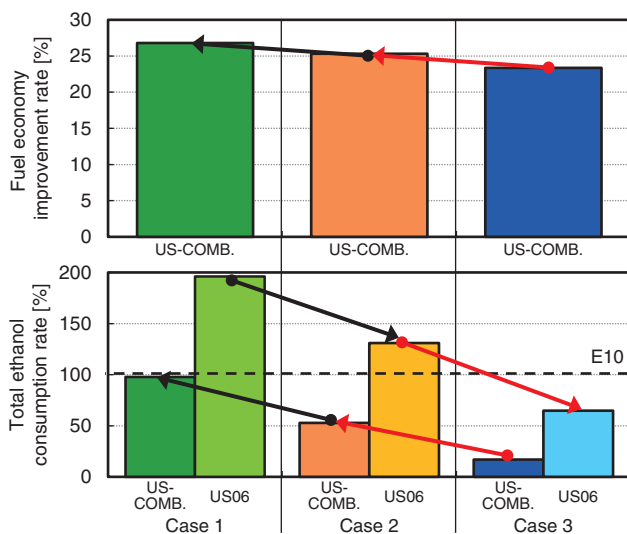


Fig. 10 Fuel economy improvement rate and ethanol consumption rate

6. まとめ

エタノール含有燃料 E10 ガソリンを高濃度エタノールと低濃度エタノールに分離し使用するエンジンシステムにおいて、分離した燃料を有効利用するために、過給アトキンソンサイクルエンジンとトランスミッション制御の組み合わせを検証した結果、以下の知見を得た。

(1) 燃料噴射装置は、ポートインジェクタにエタノール、

直噴インジェクタにガソリンを供給する構成とすることにより、エタノール使用量の抑制が可能となり、E10 ガソリン中に含まれる限られたエタノール量を有効に利用することができる。

- (2) 高濃度エタノールを E10 ガソリン燃料から分離することを想定し、効果的にノッキング抑制に用いることにより高負荷運転が可能となる。その場合の各運転条件においてエタノールを多量に噴射して熱高効率を向上させるだけでなく、燃料消費率を考慮した最適量を噴射することで、燃費性能の低下を抑制しながらエタノール使用量の抑制が可能となる。
- (3) E10 ガソリン給油時に燃料分離によって得られる 2 燃料を最適に使い分ける本システムの燃費性能向上効果を車両シミュレーションにより検証した結果、ダウンサイズ過給ガソリンエンジンに適用することにより、車両の燃費性能を最大 26.8% 向上できる技術である可能性を示した。
- (4) エタノールの保持率に応じてトランスミッションを協調する燃料マネジメント制御を組み合わせることにより、高負荷頻度の高い US06 モードにおいても、エタノールが不足することなく走行が可能となった。また US-COMB. のような低負荷の走行条件においては、余剰のエタノールを有効に利用して燃費性能を向上することができる。

参考文献

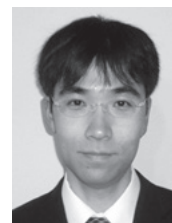
- (1) Cohn, D. R., Bromberg, L., Heywood, J. B.: Direct Injection Ethanol Boosted Gasoline Engines: Biofuel Leveraging for Cost Effective Reduction of Oil Dependence and CO₂ Emissions, MIT LFEE Report 2005-001(2005)
- (2) Bromberg, L., Cohn, D. R., Heywood, J. B.: Calculations of Knock Suppression in Highly Turbocharged Gasoline/Ethanol Engines Using Direct Ethanol Injection, MIT LFEE Report 2006-001(2006)
- (3) 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
- (4) 神尾純一, 黒谷忠司, 佐藤卓哉, 清弘幸彦, 橋本公太郎, 郡司貴浩: デュアルフューエル内燃機関の燃焼制御に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.55-07, p.19-22(2007)
- (5) 葛岡浩平, 久保康之, 黒谷忠司, 神尾純一, 工藤洋嗣: バイオエタノール含有燃料の有効利用による高圧縮比エンジンの研究, 第 23 回内燃機関シンポジウム, 2012-C1-04

- (6) 工藤洋嗣, 葛岡浩平, 久保康之, 千嶋啓之, 黒谷忠司:
バイオエタノール含有燃料の有効利用によるエンジンシステムの研究, 自動車技術会学術講演会前刷集,
No.87-13, p.1-4(2013)

■ 著 者 ■



黒谷 忠 司



葛岡 浩 平



工藤 洋 嗣