# ディーゼルエンジンにおける目標空気過剰率，EGR率及び運転性を両立する制御手法の研究

糸山　浩之　　三浦　学　　長村 謙介　　太田 健司　　岩野 浩

（日産自動車株式会社）

A Study of a Control Algorithm for Achieving Accurate Control of Lambda and the EGR Ratio Combined with Good Drivability in Diesel Engines

Hiroyuki Itoyama　Manabu Miura　Kensuke Osamura　Kenji Oota　Hiroshi Iwano

( NISSAN MOTOR Co., Ltd.)

Key Words : Diesel Engine, Electronic Control / Lambda Control, Aftertreatment System

## 1. はじめに

昨今，環境問題の高まりから燃費性能を向上する技術開発が各社とも盛んに行われ，ディーゼルエンジンはその一つの主要技術として注目されている。ディーゼルエンジンは良燃費性能を有するものの，排気の低減が大きな課題である。その課題に対処すべくエンジンから排出される排気を低減する燃焼技術の開発がコモンレール式噴射系などのアイテムを取り入れて各社とも行われている。われわれは燃焼技術については，独自の低温予混合燃焼[1)]を採用し，燃焼室や噴射系の改良により，さらなる排気低減とロバスト性を向上する開発を行っている。またこの性能を過渡運転状態も含めて最大限に発揮できる制御技術の開発も行い，エンジンから直接排出される排気の低減を図ってきた。[2)]

一方で，更なる排気低減のため最近では後処理システムの開発が盛んになっている。HCやCO，排気微粒子（PM）を処理するため酸化触媒の採用が多く行われているが，その一般的な特性として，活性した状態ではその能力を十分発揮できるものの，活性前の低温時は能力を充分に発揮することは困難である。通常の車両の使い方では必ず低温始動条件は存在し，ディーゼルエンジンでは特に燃費が優れる一方で排気温度が低く，触媒活性時間がガソリンと比較して一般的には長く必要である。そのため，低温時の排気低減と共に触媒早期活性化の工夫を各社で行われている。その中に三浦ら[3)]の報告にあるように，エンジンのλとEGR率を最適に制御することにより，大幅に活性化時間を短縮することが可能であることが示されている。

また，ディーゼルエンジンではPMの削減が望まれている。そのPMを画期的に低減することが可能なディーゼルパティキュレートフィルタ（以下DPF）の市販車への導入が行われつつある。このシステムでは通常走行ではPMを捕集し，所定の時期が来るとその蓄積されたPMを所定の手段で処理することが必要となる。その処理方法の一つにDPFの温度を上昇させて蓄積されたPMを燃焼させて処理することが考えられている。このシステムの場合燃焼させて処理することから，目標温度へ達し燃焼を開始した後には、その燃焼によりさらに温度が上昇する可能性があり，その際には耐久性に関して懸念が残る。図１は横軸がDPFへのPM堆積量，縦軸にDPF温度をとり，PM処理中の酸素濃度を変えた場合の温度上昇状態を示したものである。一般的にも燃焼中は供給される酸素濃度により燃焼状態が変化するが，このPM処理中でも同じことが言え，その濃度で温度をコントロールすることが出来ることを示している。

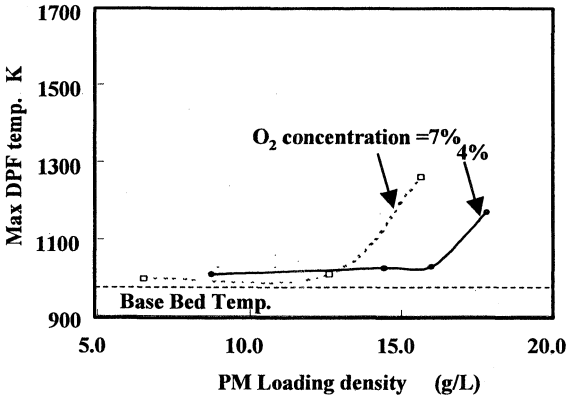


**Fig. 1 Relation Between PM Loading Density and DPF Bed Temperature During DPF regeneration**

以上から，エンジンからの排気エミッション低減においても，さらには後処理システムの能力を充分発揮させるためにも，ディーゼルエンジンにおいてガソリンエンジンでは一般的に行われているλを精度良く管理し，また従来からNOxを低減するために採用されているEGRについても精度良く制御する手法の開発への要求が従来以上に強まっている。

本論文では，この主要なパラメータを最適に制御する手法を検討･開発し，シミュレーションおよび実車で確認した結果を示す。

## ２．対象システム

図２に今回アルゴリズムおよび制御手法を開発した際のシステムを示す。噴射システムは制御自由度が高いコモンレール噴射システムを用いている。吸気システムは上流から吸入空気量を検知するエアフローセンサを設定し，過給機コンプレッサ，インタークーラを介してコレクタに流入する。コレクタ上流には吸気量を制御可能な電子制御式スロットル弁を設けている。排気系は排気ガスが過給機タービンに流れ込み，酸化触媒およびDPFを通過して大気へ放出される。EGRはガスをタービン上流から取り出し，EGRクーラを介してコレクタに流入する。EGR管の途中にEGRガス量を制御可能なEGR制御弁を設けている。また，過給システムについては，今回は過給圧もしくは吸気量の制御自由度が高い可変容量式を用いた。

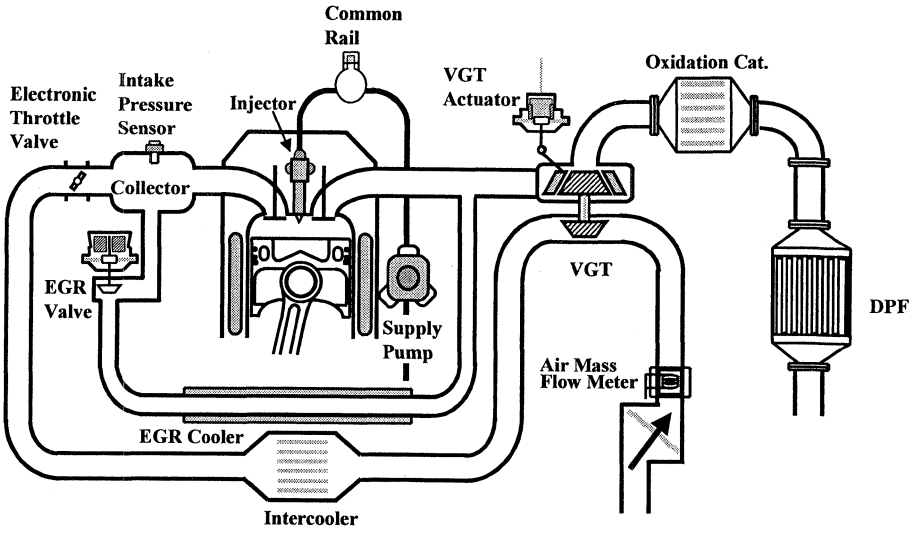


**Fig. 2 Typical Diesel Engine System**

## ３．制御システム

図３に従来一般的に行われている制御システムの構成を示す。アクセル開度とエンジン回転数から燃料噴射量を演算し，その結果からEGR等制御指令値を演算する，いわゆる燃料先行型制御システムである。特に従来のディーゼルエンジンでは通常はリーン雰囲気で作動し燃料噴射量そのものがエンジントルクほぼ線形的な特性を有することと，吸気量は成り行きとなるため，このような制御システムが多く用いられてきた。

図４はガソリンエンジンで従来から一般的に用いられているシステムである。吸入空気量もしくは吸気圧とエンジン回転数から目標空燃比を演算し，吸気量または吸気圧とから式(a)を用いて燃料噴射量を演算する。

Qfuel＝Qir/AFR　―――式(a)

EGR等の制御指令値も吸気量や吸気圧から演算する。ガソリンエンジン，特に従来のマルチポイントインジェクションエンジンの場合は，スロットル弁で制御して吸気量を変化させてトルクをコントロールするもので，またリーンでの燃焼限界があることと三元触媒などの後処理装置を有効に発揮させるために空燃比を厳密に制御する必要があることから，このようなシステムとしているものが一般的である。

ディーゼルエンジンでは前述したように，燃費を維持しつつまたエンジンからの排気低減や後処理装置を有効に働かせる要求の強まりにより，より精度良くλを管理する必要が出てきたため，ガソリンエンジンでの考え方等を参考にすべき部分が多くあると考えられる。

まず，上記二つの方法でエンジントルク応答性を比較する。図５は従来のディーゼルエンジンでのアクセル開度に対するトルクのステップ応答を示したものである。基本的にリーン時は燃料噴射量にほぼ比例してトルクが出るため，応答性はサイクル遅れが存在するのみである。一方図６はEGR，VGTの指令値をステップ変化させた時の空気量の

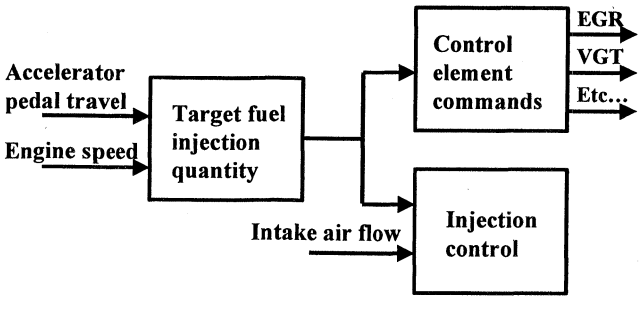


**Fig. 3 Outline of Typical Control System Configuration for Diesel Engines**

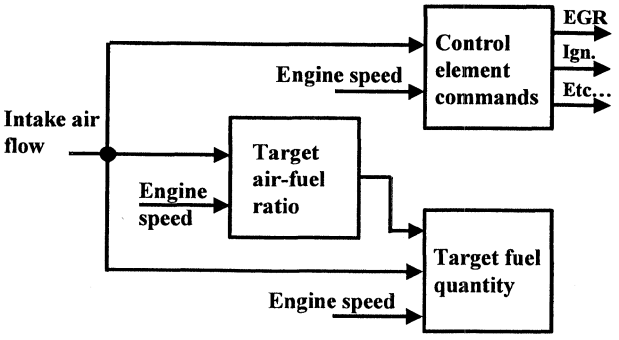


**Fig. 4 Outline of Typical Control System Configuration for Gasoline Engines**

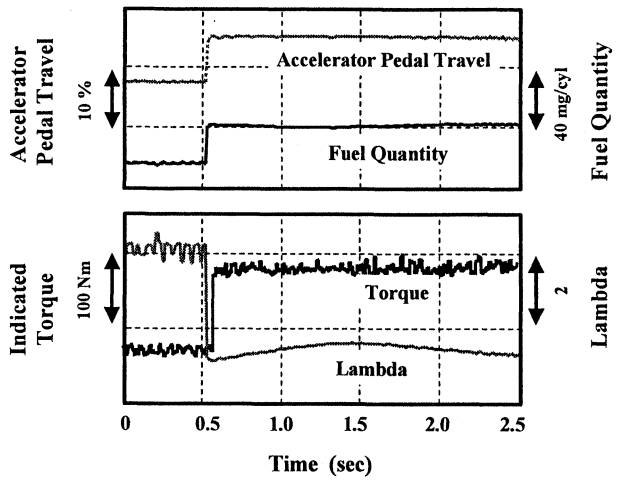


Fig. 5 Characteristics of Step Response for Engine Torque

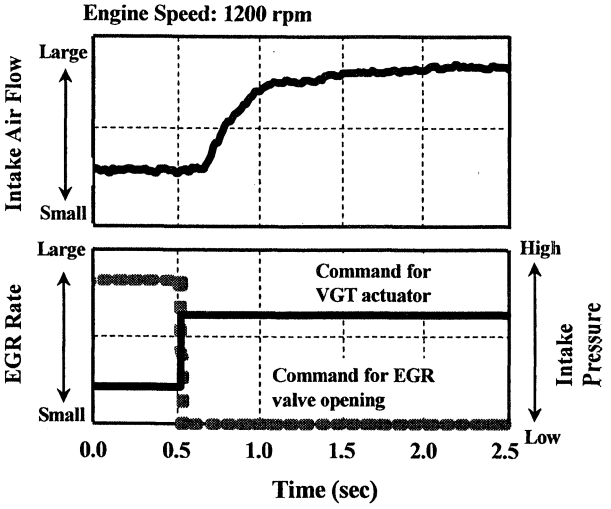


Fig. 6 Step Response of Intake Air Flow for EGR and VGT

応答を示したもので，吸気の遅れ，過給の遅れ等が存在する。これは図５でも示されているが，空燃比はステップ初期ではλが落ち込むことを意味しており，燃料の変化速度が大きいほど落ち込みは大きくなる。ガソリンエンジンの場合は，基本的には上記式(a)で噴射量が決定されるため，λは一定である。

一方，図７に示すように，運転条件により，λに対する排気の感度が異なるため，条件によりλとトルク応答の優先順位を変更することが可能である。従って，これらを両立するようなアルゴリズムを検討した。

## ４．制御アルゴリズムの検討

### 4.1. シミュレーションモデルの構築

ディーゼルエンジンでは，NOx低減のためにEGRを作動させ，最近では大量のEGRを実行する傾向にある。上述のように，基本的にはリーン状態であるため，EGRガス中にも多くの酸素を含んでいることとなり，シリンダに供給すべき酸素量はEGRガス中の酸素量も考慮に入れ，λを管理できる手法を構築する必要がある。

以上のように制御アルゴリズムの検討を行うに当たり，実機での作動確認実験を極力減らしてアルゴリズムの完成度を向上すると共に，EGRガス量など特に過渡運転時には測定困難なパラメータを把握した検討や様々なロジックの比較検討が容易にできるように，制御系CAD上にモデルを構築した。

構築したモデルの概要を図８に示す。大きく分けて，吸気系モデル，トルク・排気演算するシリンダモデル，排気系モデル，過給機モデル，EGRモデル，後処理モデルから構成されている。それぞれのモデルでは，様々なダイナミクスを演算している。このモデルの検証結果の一例を図９に示す。ここではその一つとしてこのモデルと車両モデル，コントローラモデルを組み合わせて１０−１５モードを走行したときの主要な演算パラメータのうちの吸気圧や排気

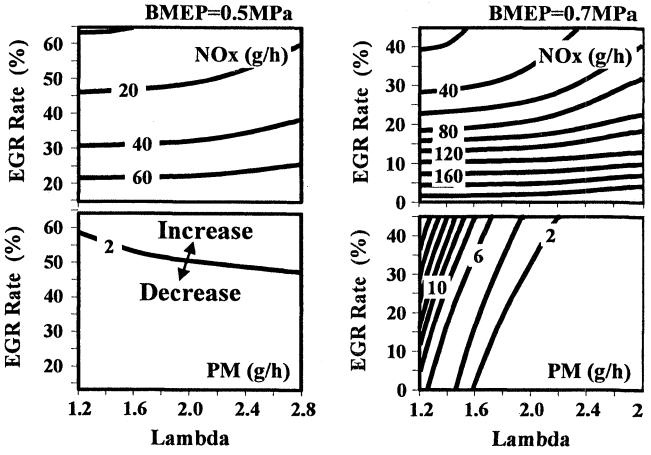


Fig. 7 Effect of Lambda and EGR Rate

圧を実機と比較している（左図）。この計算に用いられるドライバモデルの特性の実機との相違やセンサ検知遅れなど計測系の影響で若干の差は認められるが、ダイナミクスに関してほぼ実車を模擬できていると考えられる。また，右の図は後処理モデルのうちの酸化触媒モデルに於いて，その性能へ大きく影響するベッド温どの比較をした結果である。これについてもほぼ実機を模擬できており，アルゴリズムの検討には適用可能と考えられる。

### 4.2. 制御アルゴリズムの検討

前記に示したように，PMおよびNOx低減のためにはEGRを精度良く制御し，さらにλを精度良く制御できると同時に，最終的にはこれらのような物理量を目標値として設定可能にすることが実用上望ましい。一方で通常の車両の使い方を考えると大半は過渡状態であり，複数のパラメータを協調させることが，運転性向上や排気低減には必須となる。特に上記のようにEGR，λを同時に最適に制御することを考えた際，EGR，スロットルなどの吸気システム，過給機

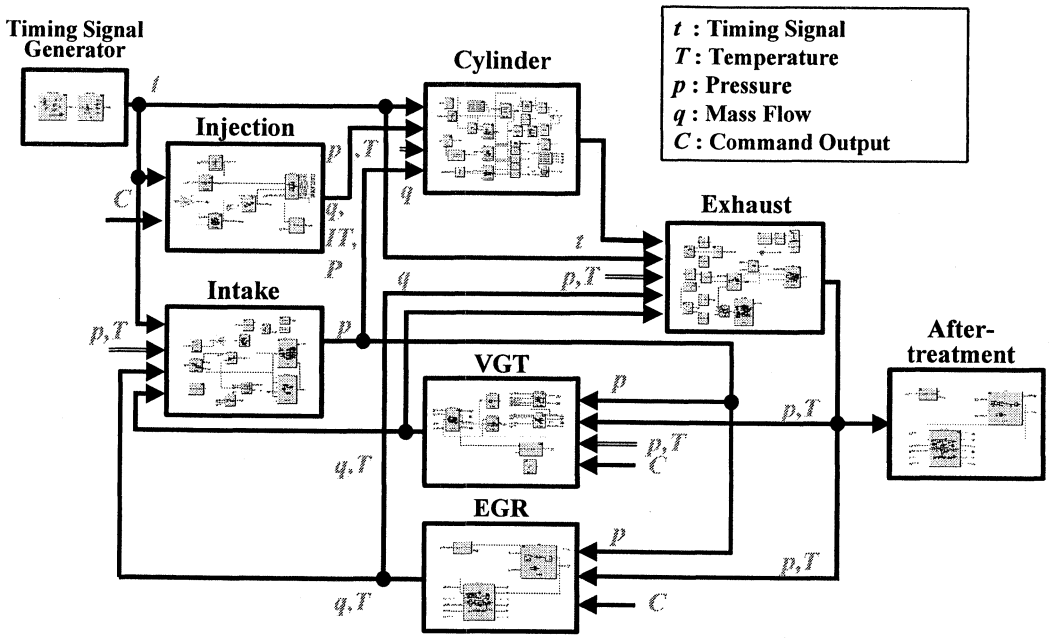


**Fig. 8 Diesel Engine Simulation Model Created with in the Control System CAD Program**

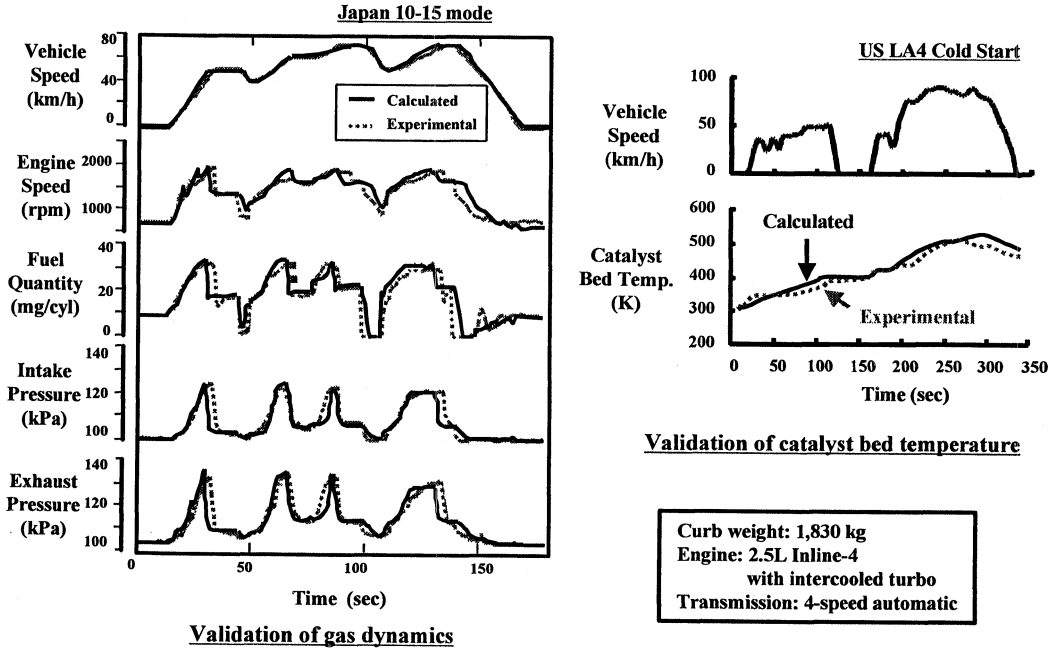


**Fig. 9 Validation of Simulation Model**

システムなど各アクチュエータを協調させて作動させる必要がある。以上のことを考慮し制御アルゴリズムを検討した。

4.3. 吸気量の制御

λを制御するためには，吸気量を精度良く制御する必要がある。吸気量はEGR量，過給機，スロットルのいずれでも制御可能である。したがって，これらは燃費や排気，後処理装置対応など，その要求時定数，ダイナミックレンジで決定する必要がある。

一方，上記複数の制御パラメータはお互いに影響し合う特性を有するため，一つのパラメータ目標値を変化した場合は他も再度最適化する必要があるという，適合上も複雑でかつ困難な状況となり，過渡状態では特にその傾向が強くなると予想される。

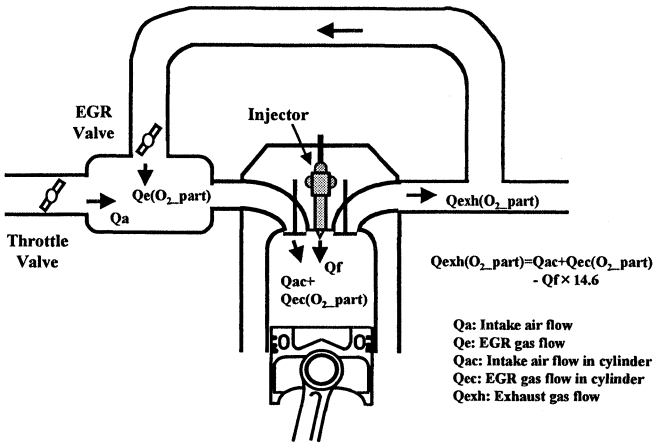


**Fig. 10 Outline of Gas Dynamics in Engine System**

図10にEGR条件での各位置での酸素量の関係を示す。前述したようにディーゼルエンジンでは基本的には通常運転時はリーン状態であるため，EGRガス中にも酸素は多く含まれている。したがって，シリンダの中の酸素濃度を制御する場合には，吸気遅れと共にその酸素濃度の変化も考慮して制御する必要がある。基本的には式(b)で目標吸気量を演算することができる。

$$tQa_cyl = tLambda \times tQf \times 14.6 - Qegr(O2_part) \quad \text{———式(b)}$$

ここで，tLambdaは目標のλである。ここで用いられる各パラメータは夫々ダイナミクスを有しているため，過渡時のλ制御にはこれらの影響を考慮することが必要となる。

一方，燃料噴射量は前述の式(a)で示される，すなわちガソリンエンジンで一般的に用いられる式により演算することでλを精度良く制御することが可能となる。

これらのことを鑑み，図11に示すような構成を検討した。

過渡時の制御性を向上させるために，従来より取り組んでいる[2),4)]エンジン各部の動特性を考慮したモデルベースコントロールを基本とし，さらにλの制御性を向上させることを狙って構築した。

(1) EGR－過給機の協調動作 通常，ディーゼルエンジンではスロットリングを行わず，吸気量はEGRと過給機で制御される。EGRと過給機はお互いに影響しあう特徴がある。また，図12に示すようにEGR率により過給機の動作目標値は変化させることが望ましい。したがって，適合や過渡の制御性を向上させるためにはお互いに協調させる構成とする必要がある。また一方で，λもしくはEGR量のような物理量を目標値に制御する場合には，それらの影響する因子でアクチュエータの作動目標値を決定する必要がある。また，特に過渡時の制御性を向上するためには動的挙動をフィードフォワードによる指令値の設定が必須である。そこで今回，吸気量とEGR量で，可変容量過給機の作動目標値を決定する構造とした。図13に横軸に排気流量すなわち吸入空気量，

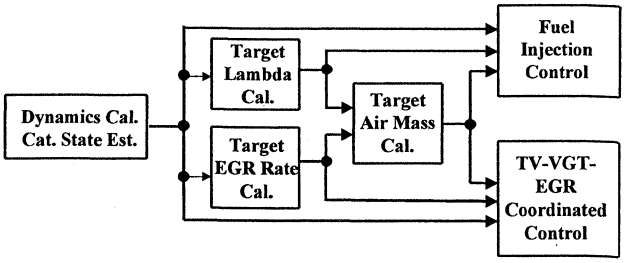


**Fig. 11 Basic Control System Configuration**

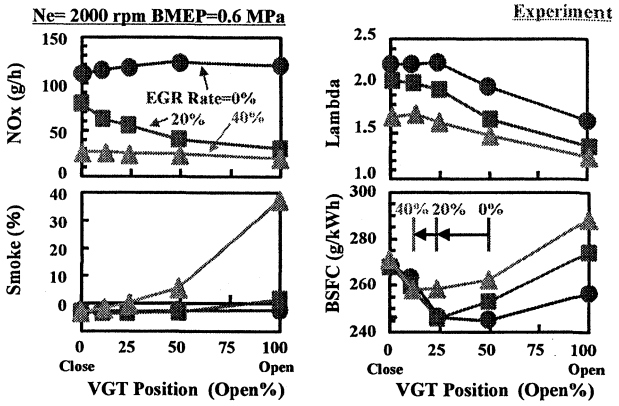


**Fig. 12 Effects of VGT Position and EGR Rate on Emissions and BSFC**

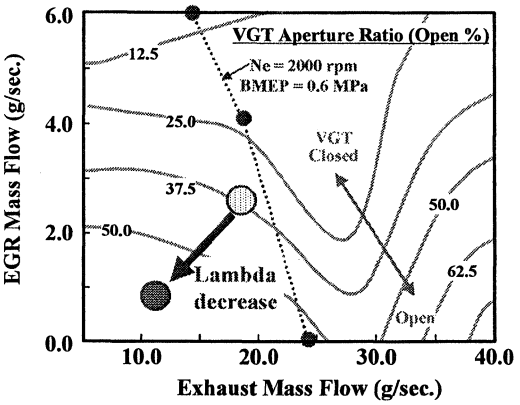


**Fig. 13 Characteristics of VGT Position on Air Mass Flow and EGR Mass Flow**

縦軸にEGR流量で，本供試システムを用いた場合の燃費を最良にした場合の可変容量過給機のノズル開度を示す。このような構成にすることにより，吸気絞り弁を併用してλを小さくするような条件では，矢印で示すように自動的に目標値が変化し，過給仕事を変化させて，吸気絞り弁を可能なだけ大きく保つと同時に，過給機のサージ現象も自動的に抑制が可能となる。

(2) スロットル，EGR，VGTの協調動作 (1)にEGR，VGTの協調動作手法を示したが，λのダイナミックレンジを拡大するためにスロットルでさらに吸気量を可変とした場

合，スロットルの開度でコレクタ内圧が変化するため，EGR弁の前後差圧が変化することになる。したがって，所望のEGR率を達成しようとする場合にはその前後差圧の変化を考慮して，EGRを制御する必要がある。

図14にこれらのパラメータの協調動作例を示す。

4.4. トルクコントロール

λ，EGRなどを制御することにより，エンジンアウトエミッションの低減や後処理装置の能力発揮は可能となるが，同時に運転性も違和感のない状態にすることが必要となる。

(1) 比熱比の変化　λが大きい条件では燃料噴射量とエンジントルクはほぼ線形性を保つが，λが小さくなると比熱比が小さくなり，その線形性が失われることになる。したがって，これを考慮して目標値を演算する必要がある。

(2) ポンピングロスの変化　吸気絞り弁を用い，コレクタ内圧が負圧になる場合には，ポンピングロスが変化するため，これも考慮した目標値演算が必要となる。

(3) トルク応答性の確保　前述したとおり，吸気量に合わせて燃料を噴射した場合，λの制御性は確保できるものの，図5で示した，本来所有するトルク応答性の良さを損なうことが考えられる。また，図７で示したように，運転領域でλの制御要求精度が異なるため，すべての条件で，特に過渡条件では，λを目標値に精度良く制御するよりも運転性を重視できる部分があると考えられる。

ここで，式(c)に示すような補正を運転条件に対して加えて，過渡的には運転性を確保し，定常的には常にλに制御できるようにした。

tQf＝Qac/AFR×f(Qac, tQac, Ne, tLambda etc)　——式(c)

ここで，tQfは目標燃料噴射量，Qacは実吸入空気量，AFRは目標空燃比，tQacは目標空気量，Neはエンジン回転数，tLambdaは目標λである。

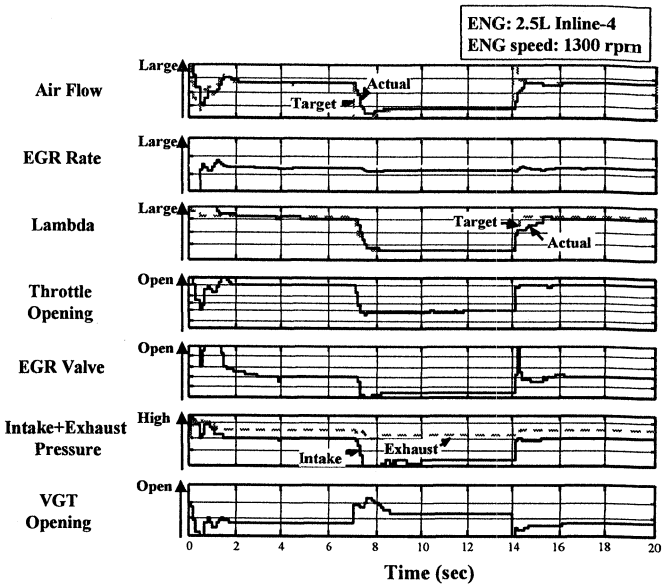


**Fig. 14 Example of Simulation Result for Lambda Change**

4.6. 検証

以上の検討事項を盛り込み，アルゴリズムの動作の確認とλの制御性を前記モデルを用いたシミュレーションと実車により確認した。

(1) シミュレーションによる確認　図15に本アルゴリズムを用いて，ディーゼルエンジンにおいて，λを一定にて日本の１０—１５モードを走行した結果を示す。代表的にλの制御に大きく影響するパラメータ及びその結果として現れる吸気量，EGR率，λを示した。これを見てもわかるように，目標λ近傍をトレースし，EGRとの制御性を両立していることがわかる。このことから，本アルゴリズムを用いると，実車での適用においてもλとEGRとの両立の可能性が確認できた。

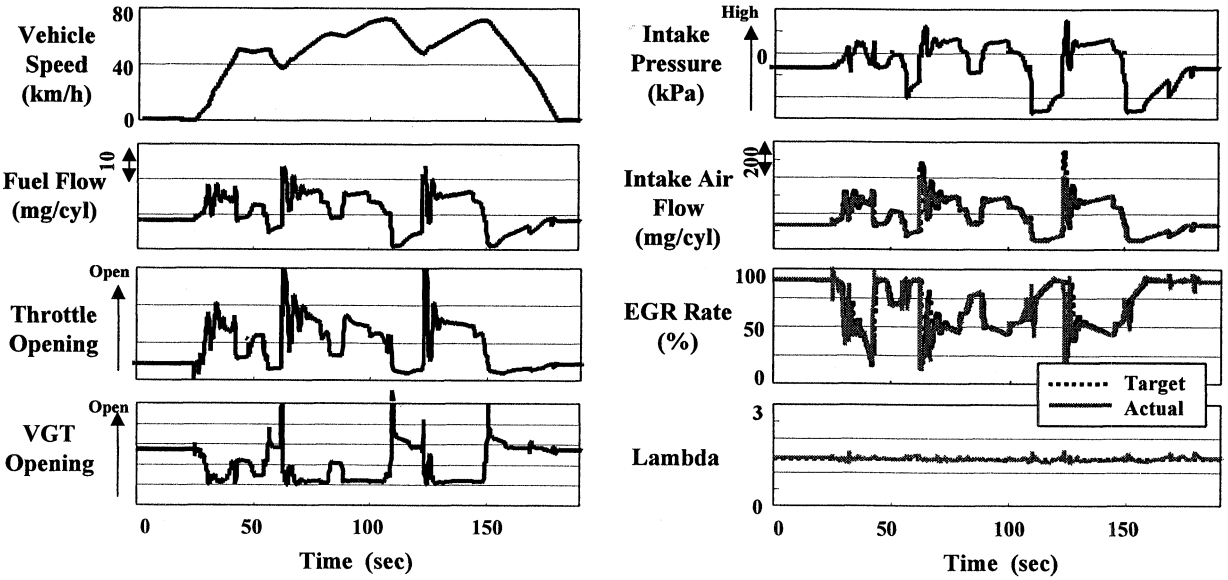


**Fig. 15 Confirmation of Control Algorithm by Simulation**

(2) 実機による確認 図16に本アルゴリズムを用いて，実車を用いてλ一定で確認した結果を示す。実車ではEGR率の測定が困難なため，その制御性の確認は不可能であるが，少々の適合誤差，及びスロットルのダイナミックレンジ設定の不十分な部分が残っているものの，λは定常，過渡どちらの条件でも目標値をほぼトレース可能であることが確認できた。

4.7. 適用例

触媒が非活性状態である条件で，その活性早期化を図る手段の一例として、λとEGR率を最適に制御することにより効果があることが予測されている[3]。そこで本ロジックをその触媒活性促進に適用し，その効果を確認した。図17はその効果をシミュレーションで検討した結果を示す。運転パターンは北米LA4モードである。この結果が示すようにλとEGRを最適に制御すると，排気低減が望めることを予測できた。図18には実車で確認した結果を示す。触媒未活性時のHCを増加させず，活性を早期化しテールパイプのHCを低減できていることを，実車でもその効果を確認できた。

## 5. 結論

(1) 制御系CAD上へ吸気系，排気系のダイナミクス，EGR，過給機，後処理のモデルを有するエンジンモデルを構築し，アルゴリズム検討・構築へ活用した。

(2) エンジンアウトエミッション低減や後処理能力を発揮させるλとEGRの精度良い制御手法を，従来からの手法であるモデルベースコントロールを発展し構築した。

(3) EGR，λを所望の制御値に保ちつつ，運転性の確保が可能であることを確認した。

本アルゴリズムの活用例として，低温時の触媒暖機促進へ適用し，その効果を確認した。

## 引用文献


1. S. Kimura, et al.: "Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards", SAE Paper 2001-01-0200.
2. 白河 暁 他：ディーゼルエンジンのモデル演算に基づくEGRと過給器の制御手法の研究，自動車技術会学術講演会前刷集，9940521
3. 三浦 学 他：低温予混合燃焼を適用した直噴ディーゼル機関の冷間時排気改善に関する考察，自動車技術会学術講演会前刷集，20015431
4. H. Itoyama, et al.: "A Study of a Control Algorithm for Achieving Accurate Control of Lambda and the EGR Ratio Combined with Good Drivability in Diesel Engines", Proceedings of FISITA, F02V295, Helsinki, 2002


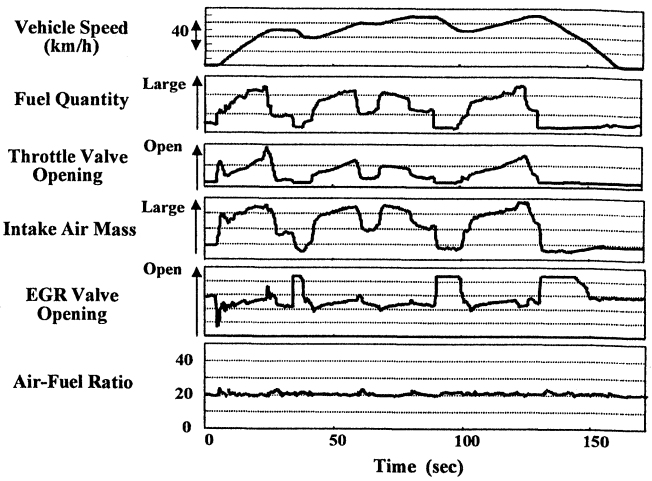


**Fig. 16 Confirmation of Control Algorithm in Actual Vehicle Test**

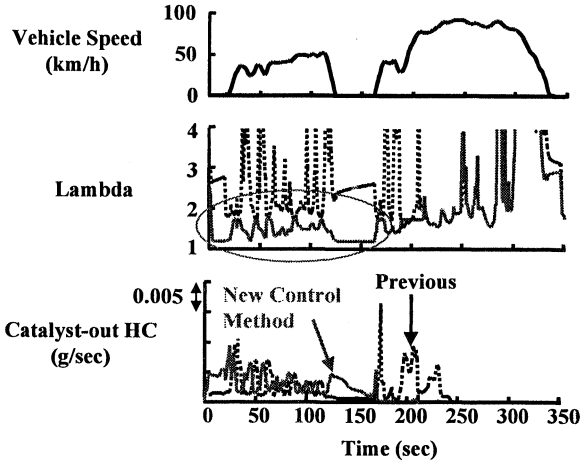


**Fig. 17 Application of Control Algorithm to Quicken Catalyst Light-off (Calculated)**

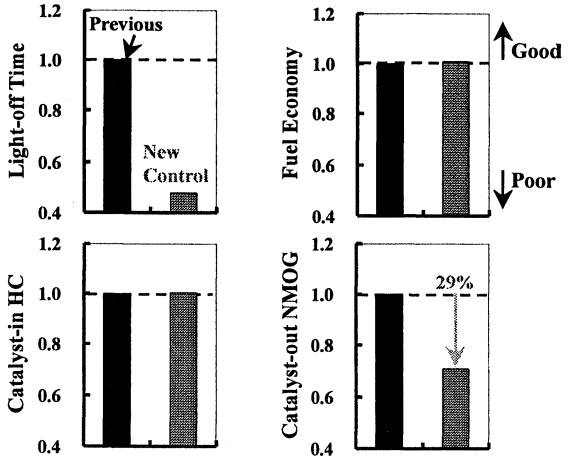


**Fig. 18 Application of Control Algorithm to Quicken Catalyst Light-off (Experimental)**