

吸気系モデルを用いた燃料制御方式

Fuel Control Method using Simple Intake System Model

小森谷 勲* 長谷川 祐 介*
Isao KOMORIYA Yusuke HASEGAWA赤 崎 修 介* 牧 秀 隆*
Syusuke AKAZAKI Hidetaka MAKI

要 旨

自動車のエミッション低減に代表される厳しい要求に対応するための一つの技術として、エンジンの空燃比制御が挙げられ、中でもフィードフォワード系においてはシリンダ吸入空気量を計量することがもっとも基本となる。本研究では、吸気系内の空気の動的挙動を簡易的に表すモデルを構築し、吸入空気量を精度良く推定し、エンジンへの供給燃料量の決定に応用、さらに従来のスピード・デンシティ方式と組み合わせ、リアルタイム演算可能な噴射燃料量算出式を導いた。そして、実機エンジンに適用した結果、従来方式で用いられてきた多くの過渡補正項なしに空燃比制御性が向上することを確認した。

ABSTRACT

There is a strong requirement still exist to further reduce the automobile exhaust emissions. One of the technologies to meet such requirement involves with a precise control of air-fuel ratios. A main issue in this control technology is how best to measure accurately the intake air volume in cylinders with the feed-forward system. In this study, a simple model to observe the dynamic behavior of intake air was formulated. The model has enabled us to accurately predict the intake air amount and was suitably applicable for determining the amount of fuel to be supplied to the engine. Furthermore, the model with combination of a conventional speed density method has allowed us to make a real-time calculation of the amount of fuel injected which can be applied to actual engines. This method has not only improved the controllability of air-fuel ratio but also substantially reduced the number of items required for the transient fuel compensation.

1. まえがき

自動車の排気ガスは地球環境に大きな影響を持ち、近年ではアメリカ、カリフォルニア州で採択されたLEV規制に代表されるように、自動車のエミッション、燃費に対しますますます厳しい要求が課せられている。LEVカテゴリの中でガソリンエンジンでは最も厳しいULEVやさらなる低エミッション化には、燃焼や触媒浄化性能に大きく影響を及ぼす空燃比制御がキーテクノロジーであると言える。

リアルタイムコントローラを用いた空燃比制御においては、環境条件の変化、また運転条件の変化に応じてエ

ンジンへの供給燃料量を決定することが基本となり、そのためには、あらゆる運転条件下でシリンダへ吸入される空気量を正確にとらえることが要求される。

最近時、吸気系内での燃料や空気の挙動をモデル化しエンジンへの供給燃料量を決定する手法が提案されている。燃料に関しては、インテークポート壁面への付着燃料の挙動をモデル化し、吸入遅れを補償する手法が提案され、量産車への適用が検討されている^{1) 6)}。吸入空気に関しても吸気系内での挙動をモデル化するさまざまな手法が報告されている^{2) ~5)}。しかし、エンジンのElectronic Control Unit (以下ECUと記す)では演算処理時間が限られているため正確なモデルを用いることは難

* 和光研究所

しく、全ての運転条件下で精度よく吸入空気量を推定できるに至っていない。

一方、多くの量産システムに採用されているスピードデンシティ方式は、定常運転状態をもとに噴射燃料量が決定されており、過渡時においては“マニホールド内の圧力の応答遅れ”や“圧力センサ信号の遅れ”によって正確な燃料を決定できず、種々の運転領域でさまざまな補正項をキャリブレーションにより設定し対処している。前者は、マニホールドが容積を持つために、スロットルの開閉に対してチャンバ内の圧力の変化が遅れることに起因している。後者は、センサ自体の応答遅れとセンシングタイミングのずれによる。このような補正手法ではECUデータの他機種への汎用性が悪いいため、開発工数の効率化が図れない等の問題がある。

本研究は、リアルタイムコントローラへ実装することを前提に“マニホールド内の圧力の応答遅れ”を補正するモデルを提案し、上記問題点が解決されたのみならず、過渡時の空燃比制御性が向上したことを述べる。

2. 吸気系モデルの考え方

本項では、スロットルの開閉とこれに伴う“チャンバ内の圧力変化の応答遅れ”をどのように扱うかについて説明する。Fig. 1に示すように吸気系各部への空気量を、スロットル通過空気量 G_{th} 、シリンダ吸入空気量 G_c 、マニホールド内に充填されている空気の変化量を ΔG_b とし、また、スロットルが動かない定常運転状態の G_{th} を G_{th1} 、スロットルの開閉に伴う過渡運転時の G_{th} を G_{th2}

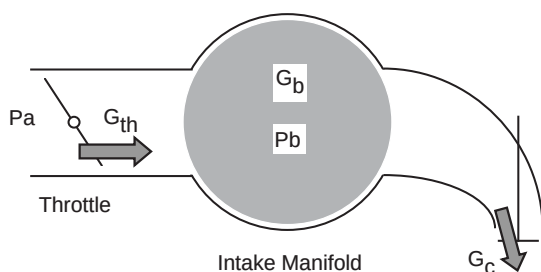


Fig. 1 Model of Intake System

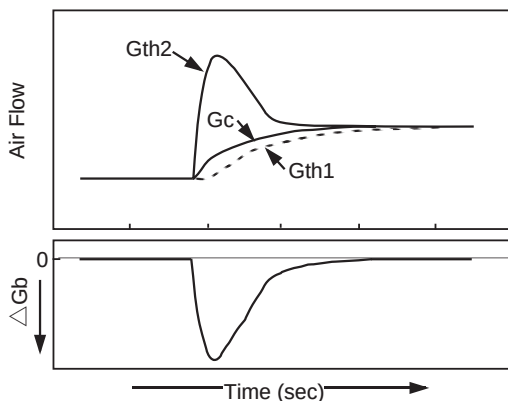


Fig. 2 Behavior of G_{th1} , G_{th2} , G_c and ΔG_b

とする。定常運転状態ではマニホールド内の空気量変化はなく ($\Delta G_b=0$)、次式 (1) の関係が成り立つ。

$$G_c = G_{th} = G_{th1} \quad (1)$$

Fig. 2に吸入空気の挙動を模式的に表した。スロットルの開閉時は ΔG_b が発生、そのためマニホールド内圧力が遅れることによりスロットル前後差圧は定常運転時よりも大きくなり G_{th2} はオーバーシュートをすると考えられる。すなわち、スロットル通過空気量はいったんマニホールドに充填され、遅れをもってシリンダへ吸入される挙動を示す。このときの G_c は次式 (2) のように表せる。

$$G_c = G_{th2} - \Delta G_b \quad (2)$$

従来のスピードデンシティ方式では定常運転時の式 (1) の関係が基本であり、 $G_c (= G_{th1})$ はエンジン回転数とマニホールド圧力を用いて決定され、過渡運転時には求められた $G_c (= G_{th1})$ に対し補正を加えていた。この手法では、前述のように圧力センサからの信号に遅れがあることから、過剰、もしくは過小補正にならざるを得ない。

これに対し、過渡状態を引き起こすスロットルの開閉の情報を G_c 算出過程に直接取り組み、従来の補正項の削減と制御精度の向上を試みた。すなわち、過渡運転時のスロットル通過空気量 G_{th2} をスロットルの動きから求め、マニホールド充填空気の変化量 ΔG_b を差し引くことでシリンダ吸入空気量 G_c を算出する手法を構築し、最

最終的にスピードデンシティ方式より求められるGth1から直接Gcを算出する演算式を導いた。

その際に用いた基本式は以下の式(3)、(4)を基本式として用いた。スロットル通過空気量Gth(Gth1,2)はオリフィスの式を用いて式(3)のように表す。

$$\frac{d}{dt} G_{th(1,2)} = A_{(1,2)} \cdot \rho \sqrt{2 \cdot g \frac{(P_a - P_b)}{\gamma}} \quad (3)$$

A: 有効開口面積

ρ : 空気密度

g: 重力加速度

Pa: スロットル上流圧力

Pb: インテークマニホールド圧力

γ : 比重量

また、空気の手動は等温変化と仮定して、マニホールド充填空気量Gbを理想気体として扱い、状態方程式を用いて式(4)で表す。

$$G_b = \frac{V}{R T} \cdot P_b \quad (4)$$

V: インテークマニホールドの容積

T: インテークマニホールド内空気温度

R: ガス定数

3. モデル化

実際には前述のように演算処理は限られた時間、タイミングで行う必要があり、理論的にたてた式を解くことはできない。本項ではGth、 ΔG_b の簡易式を求める過程について述べる。

3. 1. スロットル通過空気量

理論的には、過渡運転中のスロットル通過空気量(Gth2)はオリフィスの式を積分し求められる。しかし、実機のECUでは制御周期毎でしか空気量をとりえていないことから、次式(5)のように制御周期 Δt を乗算してスロットル通過空気量Gth2を表す。

$$G_{th2} = A_2 \cdot \rho \sqrt{2 \cdot g \frac{(P_a - P_b)}{\gamma}} \cdot \Delta t \quad (5)$$

しかし、式中には実機ECUでの演算に不向きなべき乗演

算があり、また、スロットル開度の計測誤差が有効開口面積値A2に直接影響してしまう。

ここで、式(5)とPbが同一になる定常状態を考える。このときスロットル通過空気量(Gth1)は次式(6)で表せる。

$$G_{th1} = A_1 \cdot \rho \sqrt{2 \cdot g \frac{(P_a - P_b)}{\gamma}} \cdot \Delta t \quad (6)$$

A1はこの定常運転時でのスロットル開度に対応した有効開口面積である。Gth1は定常状態での空気量であるので、直接式(6)を解く必要がなく、従来のスピードデンシティ方式によって求めることができる。従って、式(5)、(6)の二式から、Gth2はGth1を用いて式(7)のように表せ、ブロック線図をFig. 3(a)に示す。

$$G_{th2} = \frac{A_2}{A_1} \cdot G_{th1} \quad (7)$$

RatioAの決定方法について述べる。定常運転状態では、式(7)はGth2 = Gth1となり、有効開口面積の比A2/A1(この値をRatioAと記す)が1になる必要がある。RatioAの分子A2は、実際の運転状態でのスロットル開度に対応したものであるため、算出には実機でのセンサ検出開度値を用いればよい。一方、A1については例えば

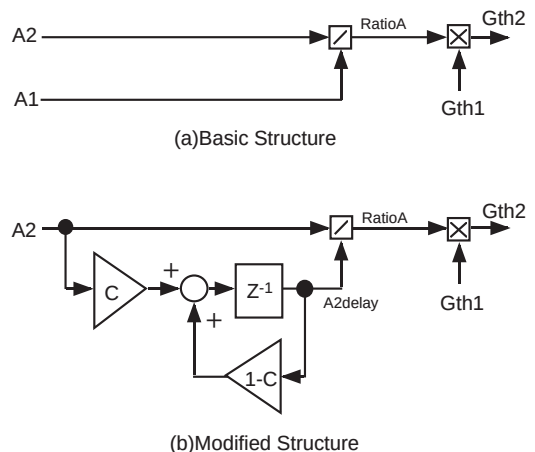


Fig. 3 Calculation Method of RatioA

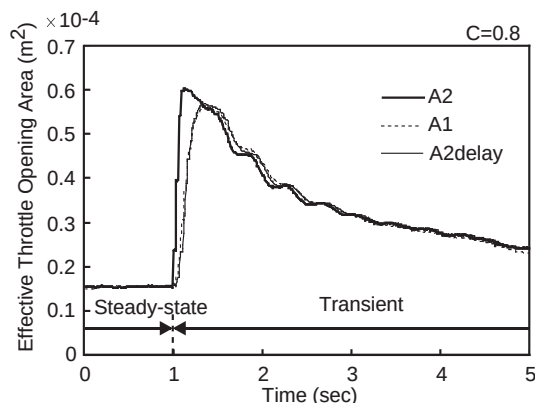


Fig. 4 Actual Behavior of Effective Throttle Opening Area

エンジン回転数とマニホールド圧力によってあらかじめスロットル開度値（またはA1）を設定しておく方法があるが、前述のRatioAの条件から空燃比に直接影響するEGRやパージ等の導入に対しての補正が必要となり、設定のため多くの工数を要する。

Fig. 4に過渡時の有効開口面積A1、A2を示す。A1はA2の変化に対し遅れて追従することがわかった。そこで、Fig. 3(b)のようにA2の一次遅れ演算を施した推定有効開口面積（この値をA2delayと呼ぶ）でA1を表すことを考えた。数式で表すと次式（8）のようになり、A1を実験的に設定する必要がなくなる。

$$A2delay(k) = A2(k) \cdot C + A2delay(k-1) \cdot (1-C) \quad (8)$$

k : 制御タイミング

Fig. 4で示したように定常運転時にA2delayはA2と一致し、過渡運転時にはA1の動きをトレースしている。このことから、A1をA2delayにて代用し、式（7）を次式（9）に置き換えた。

$$G_{th2} = \frac{A_2}{A2delay} \cdot G_{th1} \quad (9)$$

多くの運転条件にてテストを行ったところ、TDCに同期した演算ではA2delayの時定数は一つの値でほぼ代表でることがわかった。

この関係式（9）を用いることで、オリフィスの式（4）

を演算する必要がなくなり、また、有効開口面積の比で補正する形式であることから、スロットル開度の計測誤差の影響を小さくできる。

3. 2. マニホールド充填空気変化量

ECUの制御周期 Δt 間でのマニホールド充填空気の変化量 ΔG_b は、式（10）のように状態方程式にマニホールド圧力の制御周期間での変化量 ΔP_b を代入して表わす。

$$\Delta G_b = \frac{V}{R T} \cdot \Delta P_b \quad (10)$$

3. 3. 予測結果

スロットル通過空気量 G_{th2} を表す式（9）とマニホールド充填空気量 ΔG_b の式（10）から、シリンダ吸入空気量 G_c は式（2）の関係から次式（11）となる。

$$G_c = \frac{A_2}{A2delay} \cdot G_{th1} - \frac{V}{R T} \cdot \Delta P_b \quad (11)$$

この G_c を推定する演算式の検証のため、実際に過渡時のスロットル通過空気量とシリンダ吸入空気量の計測を行った結果をFig. 5に示す。空気量の計測にはエアーフ

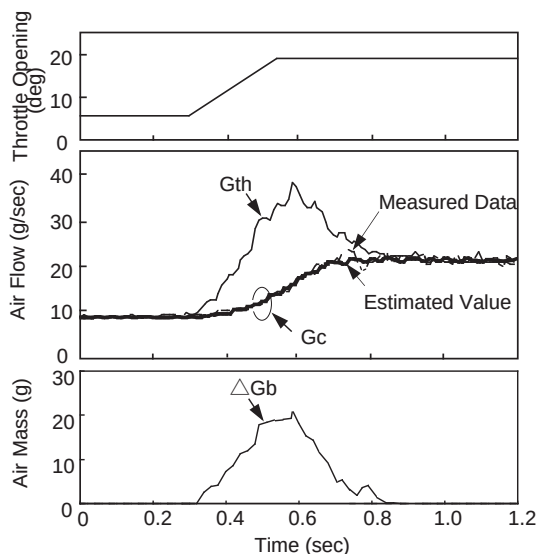


Fig. 5 Comparison of Measured and Estimated Value for Cylinder Intake Air Flow

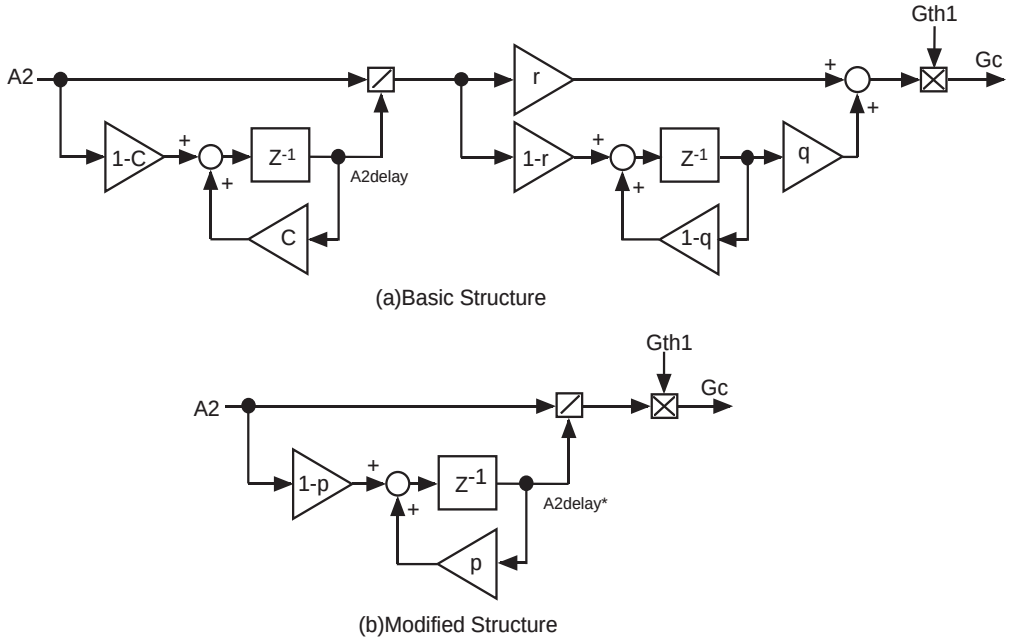


Fig. 6 Simplified Intake System Model

ローメータを用いた。スロットル通過空気量 G_{th2} とマニ
ホールド充填空気の変化量 ΔG_b より求めたシリンダ吸
入空気量 G_c の推定値は実測値を精度よく再現しており
式 (11) の妥当性が確認された。

4. アルゴリズム

実機ECUへの適用を考え、さらに数式の簡略化を図っ
た。すなわち、マニホールド充填空気を直接計測せずに
その遅れを考慮した演算式を導き、最終的に次式 (12) の
ようにスピードデンシティ方式で求められる基本燃料量
 $Timap$ にスロットルの動きから求められる補正係数 $K(t)$
を乗算した形で噴射燃料量を算出する演算式を導いた。

まず、式 (2) は、以下の等価な式 (13) へ変換する

$$\begin{aligned} T_{out} &= K(t) \cdot Timap \\ T_{out} &: \text{基本燃料量 (マップ検索値)} \\ T_{out} &: \text{噴射燃料量} \\ K(t) &: \text{過渡補正係数} \end{aligned} \quad (12)$$

ことができる。この式 (13) の三式からスロットル通過
空気量 G_{th2} とシリンダ吸入空気量 G_c の関係が得られ、
伝達関数形式で式 (14) のように表わせる。
そして、 G_{th2} と G_{th1} の関係式 (9) を代入し、定常運

$$\left. \begin{aligned} G_c(k) &= r \cdot G_{th2}(k) - q \cdot G_b(k-1) \\ G_b(k) &= (1-r) \cdot G_{th2}(k) + (1-q) \cdot G_b(k-1) \\ \Delta G_b(k) &= G_b(k) - G_b(k-1) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

k : 制御タイミング
 r, q : G_b 算出パラメータ

$$G_c(z) = \frac{r - (r-q) \cdot z^{-1}}{1 - (1-q) \cdot z^{-1}} \cdot G_{th2}(z) \quad (14)$$

転時の空気量 G_{th1} から直接シリンダ吸入空気量 G_c を求
める式 (15) が得られ、ブロック線図で表したものをFig.
6(a) に示す。

ここで、さらに式 (15) を簡易化する。 A_{2delay} の挙動

$$\begin{aligned} G_c(z) &= \frac{A_{2delay}}{A_{2delay}} \cdot R(z) \cdot G_{th1}(z) \\ R(z) &= \frac{r - (r-q) \cdot z^{-1}}{1 - (1-q) \cdot z^{-1}}, \\ A_{2delay}(z) &= \frac{(1-C) \cdot z^{-1}}{1 - C \cdot z^{-1}} \cdot A_2(z) \end{aligned} \quad (15)$$

は、スロットル変化に対するエンジンの過渡応答特性か
ら決定されるものである。よって、次式 (16) のように

A2delayの遅れ要素(時定数C)に対し、直列に補償器を入れることによって、マニホールドの充填遅れを含めた過渡応答を表せる。

$$A_{2delay}^*(z) = \frac{(1-C) \cdot z^{-1}}{1-C \cdot z^{-1}} \cdot \frac{1-C \cdot z^{-1}}{(1-C) \cdot z^{-1}} \cdot \frac{(1-p) \cdot z^{-1}}{1-p \cdot z^{-1}} \quad \text{補償器}$$

$$= \frac{(1-p) \cdot z^{-1}}{1-p \cdot z^{-1}} A_2 \quad (16)$$

ブロック線図であらわすと、Fig. 6(a)が(b)の形へと簡略化される。すなわち、A2delayの遅れ時定数Cをpに変えたことになり、Fig. 6(b)の時定数pでの応答をA2delay*と記す。

Fig. 7にFig. 6(a)、(b)両者に対しスロットルをランプ変化させた場合のGth1の補正項の挙動をシミュレーションした結果を示す。Fig. 6(b)のパラメータの時定数pに適当な値を選ぶことでFig. 6(a)の補正項の応答をトレースすることが可能であることを確認した。

以上のことから、スピードデンシティ方式から決まる空気量に対しマニホールド充填の遅れを含めたスロットルの有効開口面積比を乗算する形の吸入空気量算出式(17)を導くことができた。

$$G_c(z) = \frac{A_2}{A_{2delay}^*} \cdot G_{th1}(z) \quad (17)$$

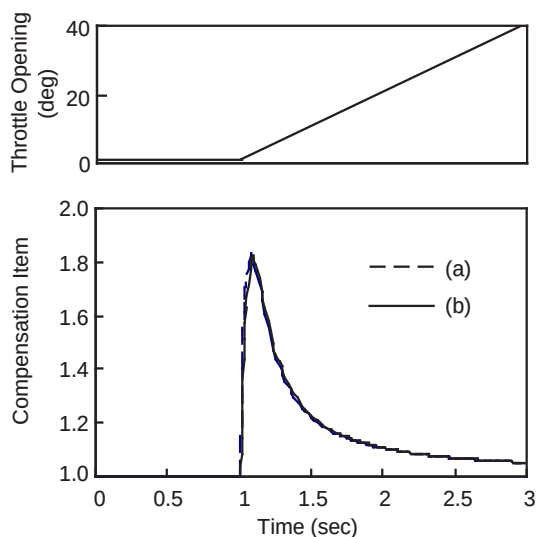


Fig. 7 Simulation Results

ここで、Gth1をエンジン回転数とマニホールド圧力によってマップ化した基本燃料量データに置き換えることで、実機適用の燃料算出式(18)が得られる。

$$T_{out} = \frac{A_2}{A_{2delay}^*} \cdot T_{imap} \quad (18)$$

Timap: 基本燃料量 (マップ検索値)

Tout: 噴射燃料量

前述した式(12)の補正係数K(t)は、空気の挙動から決定される有効開口面積の比(A2/A2delay*)となり、セッティング要素はA2delay*のひとつとなる。よって、本手法によれば、従来までのキャリブレーションによる多くの過渡補正項を用いるの必要がなくなり、開発工数を大幅に低減できる。

5. 実機テストおよび結果

Fig. 8に実際のエンジンに適用した噴射燃料量算出ブロックを示す。また、Fig. 9に示したプロトタイプのL-4, 2.2Lエンジンを用い、5速マニュアルトランスミッションと組み合わせた実車によりテストを行った。

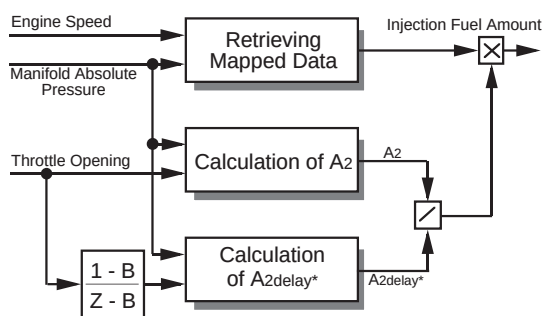


Fig. 8 Block Diagram for Fuel Injection Calculation Model

5. 1. スロットルステップ応答テスト

Fig. 10にスロットルをステップ状に変化させた時の空気過剰率λの測定結果を示す。テスト条件はエンジン回転数一定、マニホールド圧力が46.6kPaから63.7kPaとなるスロットル開度のステップ変化を与えた。1500r/minにて従来手法と比較した結果、スロットルのステップ変

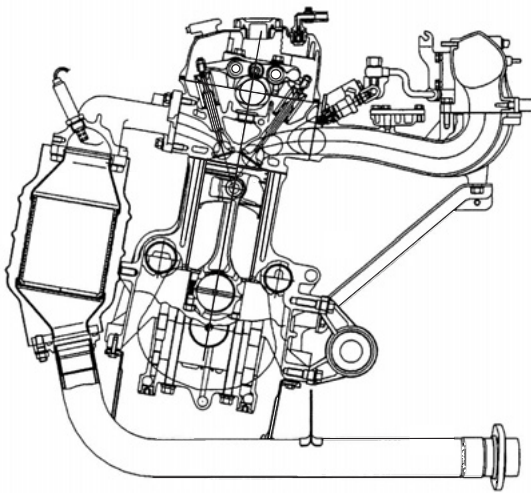


Fig.9 Test Engine

化に対し、従来手法では大きく λ が変動しているのに対し、今回のモデルを用いた場合、その変動幅が約5分の1程度に抑えられていることが確認された。また、700、3500r/rpmのエンジン回転数においても、同様に空燃比制御性が安定して得られることを確認した。

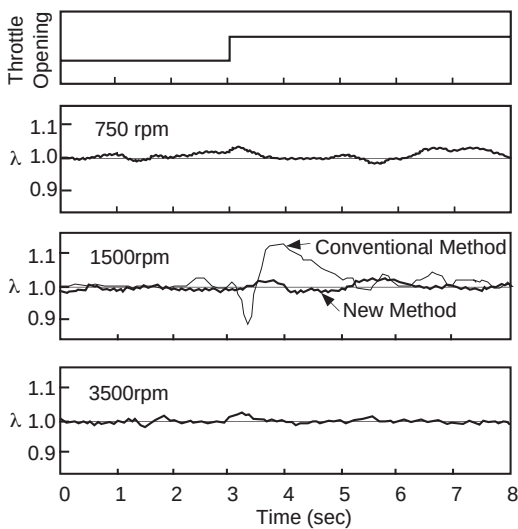


Fig. 10 Throttle Step Response

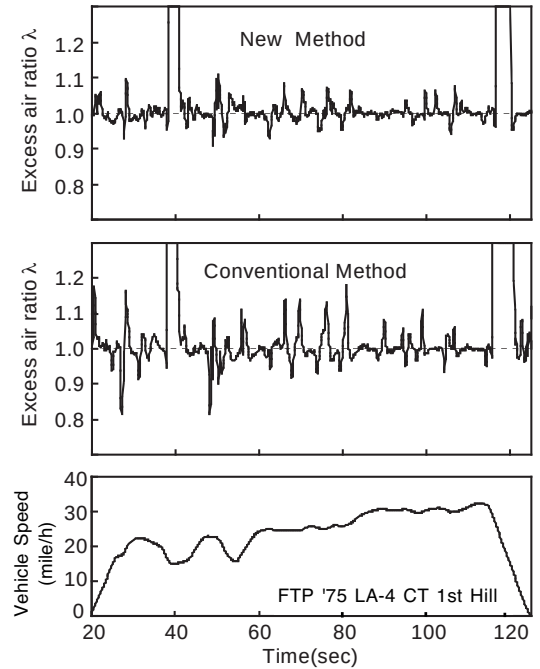


Fig. 11 Mode Operation Test

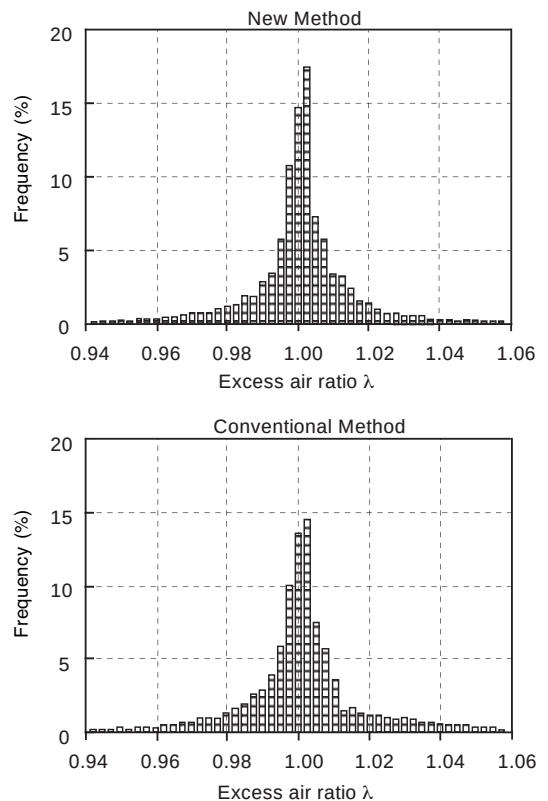


Fig. 12 Histogram

5. 2. モード走行テスト

次にFTP75 LA-4モードにおいて、 λ の制御性を確認した。Fig. 11にLA-4 CT1st HILLにおける λ の挙動、Fig. 12にモード全体での λ の頻度分布図を示す。

Fig. 11からわかるように、モード走行時の λ の挙動は従来方式に比べ目標値からのずれが小さく、特に、シフトチェンジ時の大きなリッチ／リーンのスパイク、また60秒以降の緩加減速でリーン側へのスパイクが従来手法に比べ抑制され、Fig. 12に示すように、モード全域において目標値付近への出現頻度が従来手法に比べ向上していることがわかり、制御性が飛躍的に向上していることを確認した。

6. 結論

本手法にてテストを行った結果、過渡域のリッチ／リーンスパイクが低減され、従来手法に比べ空燃比制御性が向上することを確認した。

また、空気の挙動をもとにモデル化したことで、以下のことが明らかになった。

- ① 過渡補正項はパラメータが一つの有効開口面積の比のみとなり、今まで実験的に設定していた過渡補正項をほとんど必要としない。
- ② 噴射燃料量算出式(18)は、従来のスピードデンスティ方式を基本に定常と過渡を区別することなく燃料量を算出することができる。また、一般的かつシンプルな形式であることから実機ECUへ実装することが容易に行える。

参考文献

- 1) C.F.Aquino, "Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injection Engine", SAE810494
- 2) 藤枝, 大山, 大須賀, 野木, "ガソリンエンジンの吸気内ガス流動の解析", 自動車技術会, 学術講演会前刷集 901 1990-5, pp297-300
- 3) 高橋, 瀬古沢, "自動車エンジンにおける気筒流入空気量推定による空燃比制御方式", 計測自動制御学会論文集 Vol.27, No.11, pp1258-1265, 1991
- 4) 十川, 亀岡, 松井, "吸気系チャンバモデルを用いたエンジン過渡特性の改善", 自動車技術, Vol.42, pp504-5094, 1988
- 5) John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", MacGraw-Hill Book Co., Inc.
- 6) N.F.Benninger and G.Plapp, "Requirements and Performance of Engine Management System under Transient Condition", SAE910083
- 7) 豊倉, 亀本, 「流体力学」, 実教出版株式会社, 1976

■著 者■



小 森 谷 勲



長 谷 川 祐 介



赤 崎 修 介



牧 秀 隆