

吸入空気量と点火時期の適応制御による 始動後急速暖機システム

A Quick Warm-up System during Engine Startup Period
Using Adaptive Control of Intake Air and Ignition Timing

上野 将樹*	赤崎 修介*
Masaki UENO	Shusuke AKAZAKI
安井 裕司*	岩城 喜久*
Yuji YASUI	Yoshihisa IWAKI

要 旨

冷間始動時の排気ガス低減には触媒の急速昇温による早期活性化が効果的であり、一手法として点火時期の大幅遅角によって排気温度を高め触媒の早期活性を図る技術が知られている。本研究では、フィードフォワード制御で大量の空気を吸入させエンジン回転数を点火時期の遅角で制御する手法により、触媒の急速暖機を実現した。加えてエアデバイスの流量ばらつきや経年変化に起因する制御性悪化を防止するため、適応スライディングモードコントローラを用いた流量補正と、流量補正係数の学習から構成される吸入空気量制御手法を考案した。以上のような手法の導入により適応性が向上した始動後急速暖機システムについて述べる。

ABSTRACT

To warm up catalyst quickly has an effect on emission reduction during engine startup mode, to give an example, a method using ignition retarding is generally known.

In this investigation the quick warm-up system was put into practice by the logic which much intake air was guided into the cylinder using feedforward control, and engine speed was controlled by ignition timing.

In addition this method had need to prevent deterioration of control with variations in air-device flow. Therefore it had been able to advance performance by means of compensation for the mass flow rate using an Adaptive Sliding-mode Controller and learning coefficient of compensation for the mass flow rate.

1. まえがき

近年、各国の自動車の排気ガス規制がますます強化されている中、ホンダでは97年秋に最も厳しい排気ガス規制である米国カリフォルニア州LEV規制のULEV(Ultra Low Emission Vehicle)カテゴリーに適合した乗用車ACCORD-EX^{1), 2)}を、世界で初めて量産化した。ACCORD-EXでは始動時と始動直後および暖機後のそれぞれに応じたエミッション低減技術を適用している。始動から始動直後期間では、VTEC(Variable Valve Timing and Lift Electronic Control System)機構の片側吸気バルブ休止によって得られるスワールにより安定した希薄燃焼を可能として触媒活性前のHC低減を図っている。また暖機後においては、三元触媒の浄化性能を最大限に利用するために適応制御理論を用いたSTR(Self Tuning Regulator)によって高精度な空燃比制御³⁾を行い、極めて高い触媒浄化率を得ている。このように暖機後

の有害ガス量はすでに非常に少なくなっているため、今後予想される更なる厳しいエミッション規制に対応するには、始動時の更なるエミッション低減技術の確立が必要となる。

冷間始動時から触媒温度が活性温度に達するまでの期間には、排気有害ガスが触媒で十分に浄化されずに大量に大気中へと排出されている。この始動時の有害ガス排出量を低減するために、触媒の温度を活性温度に早く到達させる電気ヒータ⁴⁾やバーナ⁵⁾などを用いる方法が広く研究されている。また、吸入空気量の増量と点火時期の遅角を行い排気温度を上昇させることにより、エンジンの排気ガスが触媒を加熱する電気ヒータやバーナーと同じような働きをする手法が知られている。

本研究では特別なハードウェアを必要としない後者の手法に着目し、必要十分な触媒加熱を可能とした始動後急速暖機システムの開発とその結果について述べる。

2. 記号

- G** : 1サイクル当たりの吸入空気重量
 k_1, k_2 : 単位換算係数
 N_E : エンジン回転数
 P_{BA} : 吸気管絶対圧力
Q : 熱量積算値
 θ : RACV(Rotary Air Control Valve)開度
(n) : 今回値
(n-1) : 前回値

<添字>

- OBJ** : 目標値(規範モデル値)
ACT : 実測値(推定値)
CMD : 指令値
SLD : スライディングモード制御出力値

3. 原理説明

点火時期による排気温度の影響を調べるために、2.2L SOHC-VTECエンジン(圧縮比=8.8)を用いて暖機後、定速(1000,1500,2000rpm)、無負荷状態におけるエンジン単体試験を行った。点火時期を変化させた時の吸入空気流量をFig.1に、直下触媒前20mmの位置における排気ガス温度をFig.2に示す。この結果から、点火時期を遅角するに従って同じエンジン回転数を維持するのに多くの吸入空気量が必要となることからわかる。これは、吸入空気量一定のまま点火時期を遅角していくとIMEP(図示平均有効圧力)が低下するためである。また、点火時期を遅角していくと排気温度が上昇することがわかる。これは、サイクル中の断熱膨張期間の減少によって燃焼ガスの温度低下が減少する効果と、吸入空気量の増加によって熱量が増大する効果が加わって起こるものである。

始動後急速暖機システムの基本原理は、このように吸入空気増量と点火時期遅角を冷間始動時に適用することにより、触媒の昇温を促進させることである。

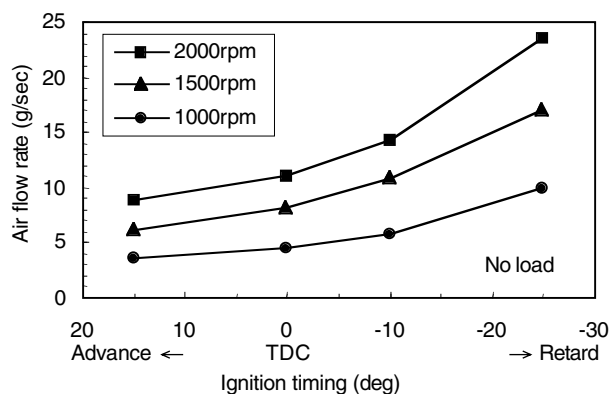


Fig.1 Effect of ignition timing on air flow rate

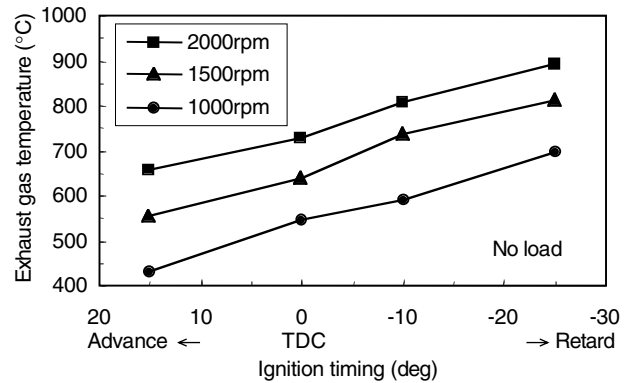


Fig.2 Effect of ignition timing on Exhaust gas temperature

次に、この基本原理を実現させるための吸入空気制御と点火時期制御の方法について述べる。排気温度を急速に上昇させる制御手法として、点火時期を優先的に遅角させて空気量でエンジン回転数を制御する方法があるが、この方式をとった場合吸気系アクチュエータの遅れや吸気系体積に起因する遅れなどから、エンジン回転変動の動きに追従しきれない。

そこで、点火時期には指令値に対する操作量の遅れが無いことに注目し、エアデバイスを用いて大量の空気をフィードフォワード制御により優先的に供給しエンジン回転数を目標値となるように点火時期で制御することにより、始動後急速暖機システムの精度と安定性の向上を図ることにした。

4. 課題

しかしながらエアデバイスには構造上、流量ばらつきが存在する。一例を挙げると、量産車に用いられるRACV(Rotary Air Control Valve)の場合にはTable 1に示すように設計要件の流量許容誤差が10%以上となっており、コストや製造技術のためこのような大きな値に設定せざるを得ない。また、経年変化により流量特性が変化してしまうことも想定される。これらによってエアデバイスの開度司令値と実際の開度が一致しなくなると、流量変化により所要の熱量を触媒に与えることができなくなり、始動後急速暖機システム終了時における触媒の到達温度にばらつきが発生してしまう問題点がある。

このように、吸入空気をフィードフォワード制御により

Table 1 Example of flow rate tolerance of RACV

Flow rate (m ³ /h)	Tolerance (m ³ /h)
1.8 (Min.)	-0.7, +0.6 (39%)
22.0	±2.3 (10.5%)
64.0 (Max.)	±6.8 (10.6%)

優先的に供給する方式を用いて始動後急速暖機システムを実現させるためには、エアデバイスの流量ばらつきを補償するための吸入空気量の補正を行なうことが非常に重要になってくる。

5. 制御手法

5. 1. 基本構成

Fig.3に始動後急速暖機システムの構成を、Fig.4に基本動作を示す。RACVはロータリーバルブを用いたエア・アクチュエータであり、スロットル弁と並列に配置されている。

始動からの時間によりRACV開度が決定されているRACV開度指令値テーブルに従って暖機終了までの期間、通常始動時よりも増量した吸入空気をフィードフォワード制御で供給する。エンジン回転数が設定回転数を超えると、設定回転数となるように点火時期のPI制御が開始される。ここで供給された吸入空気量はすでに増量されているために、点

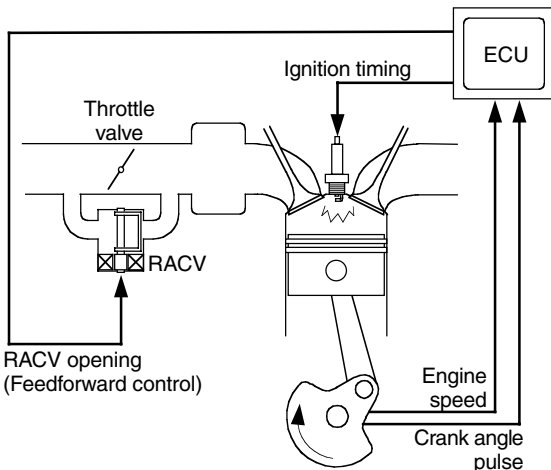


Fig.3 Structure of the Quick Warm-up System using RACV

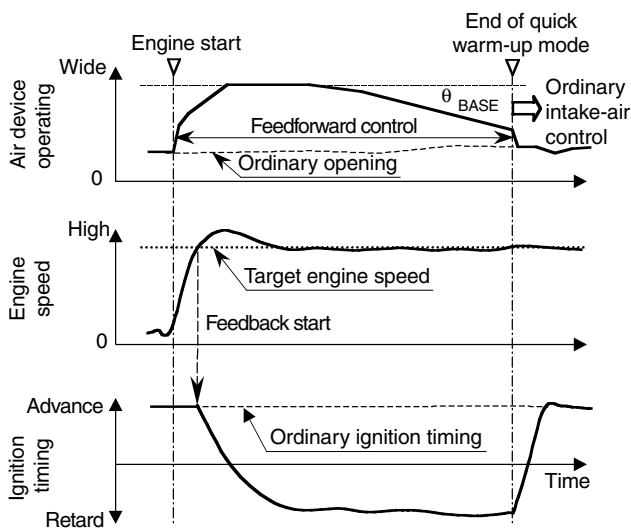


Fig.4 Fundamental action of the Quick Warm-up System

火時期は遅角側に動き吸入空気量の増加分とつりあう点火時期まで遅角したところで平衡する。よって、RACV開度指令値テーブルは始動性や点火時期の推移などを考慮して設定しておく必要がある。

また、点火時期を遅角していくとIMEPが徐々に低下するが、点火時期の遅角量が多くなるほどIMEPの変化率が大きくなり点火時期の操作量に対するエンジン回転数の変動が大きくなる傾向にある。よって、点火時期の遅角量にしたがってフィードバックゲインを小さくすることによってエンジン回転数の制御性の向上を図っている。

5. 2. 吸入空気量の補正

5. 2. 1. エアデバイス制御への要求項目

エアデバイス流量補正を行う際に要求される項目を挙げると以下ようになる。

- (1) 点火時期と吸入空気量の2入力2出力系の相互干渉回避
- (2) 以下の原因によるばらつきに応じた流量補償

- ・指令値に対する実際のエアデバイス開度の変動
- ・生産誤差や経年変化によるエアデバイス開度の定常偏差

以上のような要求項目を実現するために、始動後急速暖機システム実行中に流量補正を同時に行う「リアルタイム流量補正機能」と、エアデバイス開度の定常偏差を打ち消す「エアデバイス開度学習機能」の2つの機能から構成される流量補正手法を以下に述べる。

5. 2. 2. リアルタイム流量補正機能

エアデバイスの流量ばらつきが生じた場合でも、始動後急速暖機モード終了時まで必要十分な熱量を与えることができるように流量補正をおこなうことを考える。まず、実際に吸入した空気量を計測しながらあらかじめ決定しておいた規範となる流量モデルとの偏差を求めることにより流量変化を検知し、次にその偏差を無くするような補正値をエアデバイス開度に随時出力するコントローラを設計する。

Fig.5にリアルタイム流量補正機能の概略図を示し、始動後急速暖機システムにおける流量補正手法の構成要素ごと

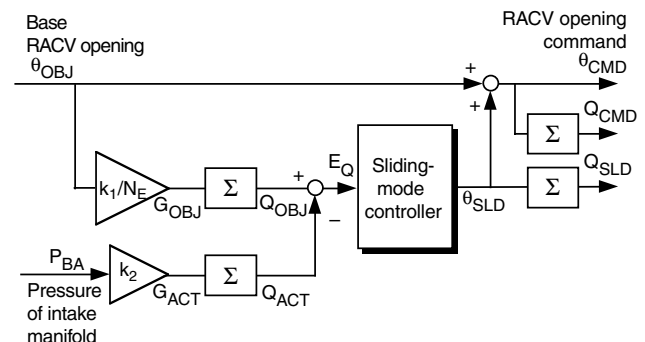


Fig.5 Flow rate compensator for RACV

の詳細を以下に述べる。

(a) 吸入空気量規範モデルの算出

ここでは始動後急速暖機システムにおいてエアデバイスの流量ばらつき補正を導入する際の規範モデルを算出する手順を述べる。始動後急速暖機システムでは触媒に必要な熱量を与えることが目的なので、規範モデルとしてはその熱量を表すことができれば良い。さらに空燃比を一定とすれば熱量は吸入空気量に比例するので、熱量とその積算値を求めるにはそれぞれ吸入空気量とその時間積分値を求めれば良い。エアデバイスを通ずる空気量はその開度と前後差圧によって決定されるが、規範モデルは観測値から算出される推定モデルと比較されるため、観測値を使わずに規範モデルの算出を行う必要がある。そこで吸入空気量の規範モデルは観測値である前後差圧は使用せず、(1)式に示すようにRACV開度指令値(θ_{OBJ})を吸入空気量の代表値と考えることにより算出した。(2)式ではその吸入空気量を積算することにより規範モデルとなる熱量積算値(Q_{OBJ})を算出している。

$$G_{OBJ} = k_1 \cdot \theta_{OBJ} / N_E \quad (1)$$

$$Q_{OBJ}(n) = Q_{OBJ}(n-1) + G_{OBJ} \quad (2)$$

ここで、 k_1 はすべての単位換算係数と大きさを合わせるための係数を含めたものである。また、RACV開度指令値(θ_{OBJ})はFig.4のように実験的検討により決定した始動からの時間に対するRACV開度の数値テーブルになっており、その面積は吸入空気量の積算値、すなわち触媒に与えた総熱量と等価である。

(b) エンジン吸入空気量の推定

燃料噴射量演算方式の一つであるスピードデンシティ方式では、吸入管圧力とエンジン回転数より吸入空気流量を推定しており、ここでも(3)式のように吸気圧 P_{BA} を用いてサイクル当たりの吸入空気量(G_{ACT})を演算した。(4)式では、その吸入空気量を積算することにより熱量積算値(Q_{ACT})を算出している。

$$G_{ACT} = P_{BA} \cdot k_2 \quad (3)$$

$$Q_{ACT}(n) = Q_{ACT}(n-1) + G_{ACT} \quad (4)$$

ここで k_2 は単位換算係数であり、標準状態で始動後急速暖機を実行したときに推定値(G_{ACT})が規範モデル(G_{OBJ})と同じ値となるように設定する。

(c) 適応スライディングモード制御を用いた流量補正手法

本項では、エアデバイス流量補正機能における制御部について述べる。

規範モデルと推定値の熱量積算値の偏差(E_Q)を(5)式により求める。

$$E_Q(n) = Q_{ACT}(n) - Q_{OBJ}(n) \quad (5)$$

始動後急速暖機システムの設定された実行時間の終了までの間に、この偏差(E_Q)をすばやく安定的に補正するためにFig.6に示すようなスライディングモード制御⁶⁾を適用した。

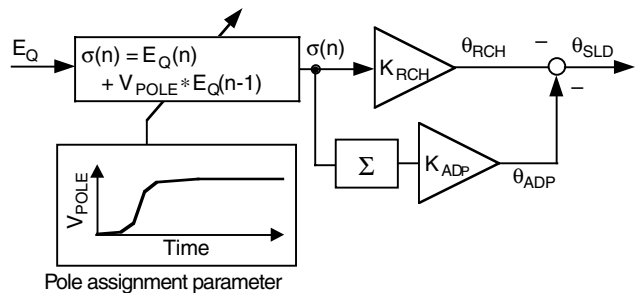


Fig.6 Structure of adaptive sliding mode controller in the flow rate compensator

スライディングモード制御は以下のような構成となっている。まず、制御対象の状態変数である熱量偏差の今回値 $E_Q(n)$ と前回値 $E_Q(n-1)$ を座標軸にとった位相平面上に、切換直線⁷⁾と呼ばれる状態変数によって構成される関数を定義する。次に、到達モードと呼ばれる状態量を切換直線に拘束するような制御を行う。切換直線に到達した後は制御系は入力のない一次遅れ系となるため、状態量は切換直線に沿って位相平面の原点、すなわち目標値へ漸近的に近づくようになる。

スライディングモード制御の特徴として、システムの動特性を位相平面上の切換関数の傾きを表すパラメータ V_{POLE} によって一義的に指定できることが挙げられる。このことにより V_{POLE} を時間にしたがって変化させることにより始動直後は流量補正を実行せずに、しばらくしてエンジン運転状態が安定したところから流量補正を徐々に開始することが容易に可能となる。また、 V_{POLE} により偏差の収束速度も規定できるため、流量補正フィードバックを点火時期フィードバックに比べてローゲインに設定することによって、常に2つのフィードバック系が干渉しないようにすることも可能となる。

以上のように、RACV流量補正に適応スライディングモード制御を採用することによって、RACVに流量ばらつきが生じている場合でも必要十分な吸入空気供給を可能としている。

5.2.3. エアデバイス開度学習機能

エアデバイスの経年変化などで開度に定常偏差が発生した場合、毎回の冷間始動時に同じ偏差を含む流量補正を

行ってしまうことが考えられる。

そこで、今回の始動後急速暖機実行時に補正量がより少なく済むように、リアルタイム流量補正機能による補正量を基にベースのRACV開度を学習させる手法を導入した。Fig.7に演算法を示す。 Q_{CMD} は始動後急速暖機が終了した時点における規範熱量の積算値であり、 Q_{SLD} はスライディングモード制御部における補正熱量の積算値、 C_{LRN} は学習値演算時の重み係数である。 K_{LRN} は次の始動後急速暖機のベース開度に乗算する流量補正係数の学習値であり、リアルタイム流量補正で実際に行った補正量の割合から演算される。

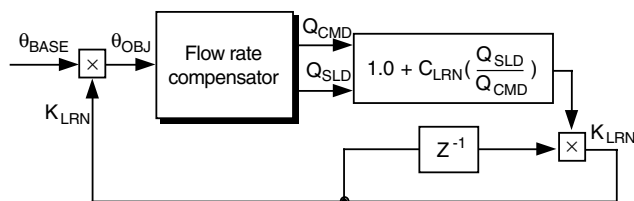


Fig.7 Learning method of the RACV flow rate

6. 実験結果

6. 1. 始動後急速暖機システムの効果

米国カリフォルニア州で市販されている98年モデル ACCORD (LEV規制ULEVカテゴリー車)をベースにしたプロトタイプ車を用いて始動後急速暖機システムの効果を確認した。Fig.8に実車テストで使用したエンジンと触媒の断面図および測温点を示し、Table 2に諸元を示す。

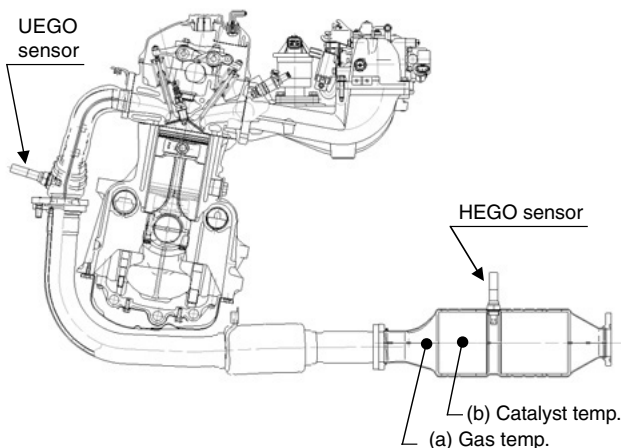


Fig.8 Cross section of ULEV Engine and thermocouple position

Table 2 Specification of experimental vehicle

Vehicle	: 98 Model year ACCORD EX-ULEV
Engine	: L-4 , 2.3liters SOHC-VTEC (Prototype)
ECU	: Prototype
Catalyst	: Tri-metal type (Pt:Pd:Rh=1:15:1) 277.5g/ft ³ , 600cell/in ² , 1.7L,100,000mile aging

Fig.9に始動後急速暖機システムの有無によるLA-4モードの一山目におけるHCおよびNOxの排出量の比較を示す。始動時と始動後の初期においては、始動後急速暖機システムを適用した場合の排気エミッションが通常の始動と比較して増大している。これは始動後急速暖機システムはオープン制御で大量の空気を吸入させるため、触媒活性前のフィードガス量が増大するためである。始動後急速暖機システムの導入による触媒の昇温効果をFig.10に示す。始動20秒後の発達加速時には触媒がほぼ活性温度に達するため、これ以降のエミッション排出量は従来手法よりも大幅に減少していることがわかる。

始動後急速暖機システムを導入した場合のLA-4モードでの排気エミッションの低減率をTable 3に示す。このように排気エミッションをほぼ半減させることが可能となった。

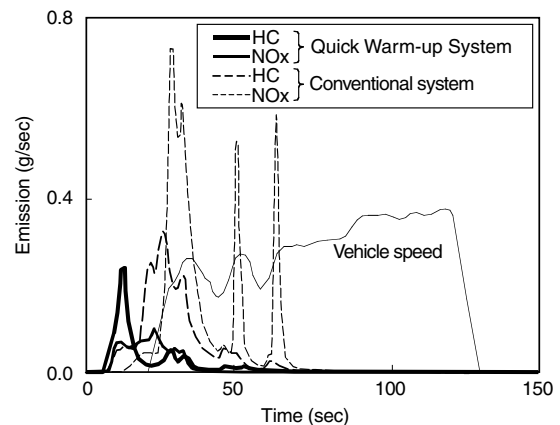


Fig.9 Modal emissions during LA-4 1st hill

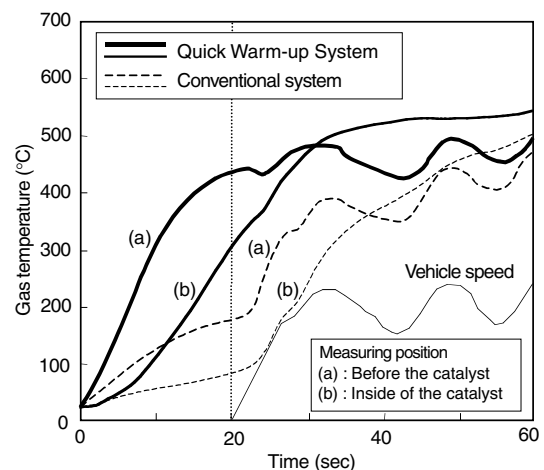


Fig.10 Catalyst temperatures using the Quick Warm-up System

Table 3 Emission reduction rate using Quick Warm-up System (LA-4 Mode)

CO	NMOG	NOx
50%	45%	60%

6. 2. エアデバイス流量補正手法の効果

ここでは実車を用いた実験により確認したエアデバイス流量補正手法の効果述べる。

実験方法としてはRACV標準品を用いた水温25℃での始動テストにおいて、RACV開度の指令値を10%減少させることにより意図的にRACVに流量ずれを発生させ、エアデバイス流量補正を実行させる方法をとった。Fig.11は始動後急速暖機モードが設定タイマーにより終了するまでアクセルペダル開度を全閉のまま放置したときの規範熱量と推定熱量の推移である。Fig.12はその時のベースRACV開度と補正後のRACV開度を示している。基準RACV開度に対し実開度が10%少なくなるように設定されているので、推定熱量が規範熱量に比べて小さくなる。よって、スライディングモードコントローラによる流量補正 θ_{SLD} が基準RACV開度に対し増大方向に働く。これにより推定熱量が規範熱量に徐々に近づき、始動後急速暖機モード終了時には推定熱量が規範熱量に到達する。

次に始動試験を繰り返し行ったところ、十分に学習回数を重ねた後には規範熱量に推定熱量が一致するようになるので、RACV開度のリアルタイム流量補正量も無くなり定常的な経年変化などによるばらつきを打ち消せることを確認できた。

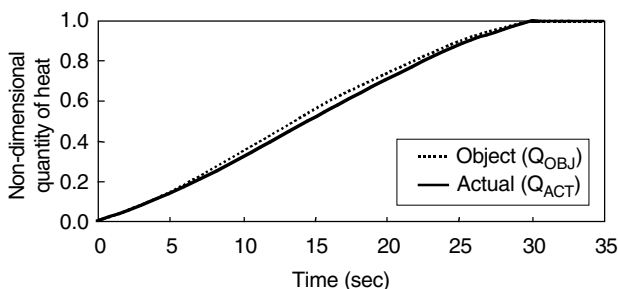


Fig.11 Compensation for quantity of heat by the Sliding mode controller

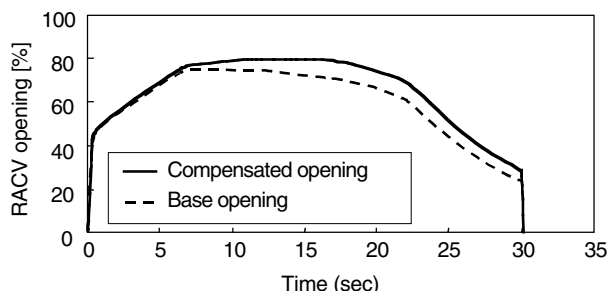


Fig.12 Compensation for RACV opening by the Sliding mode controller

7. まとめ

エンジンの冷間始動時における排気エミッション低減のため、吸入空気量を優先とするフィードフォワード制御と点火時期遅角制御を用いることによって、さらにエアデバイスの流量ばらつきと経年変化を補正することによって必

要十分な熱量を触媒に供給できる始動後急速暖機システムを構築した。

- (1) 始動後急速暖機システムの導入によりLA-4モードにおける排気エミッションをほぼ半減することができた。
- (2) 適応スライディングモードコントローラを用いたリアルタイム流量補正機能により、 $\pm 10\%$ 程度の流量ばらつきはその回の始動期間中に補正可能であることが確認できた。
- (3) 流量補正係数の学習機能により、経年変化などによるRACV開度の定常偏差を打ち消せることを確認した。

参考文献

- 1) 川合誠 他：Ultra Low Emission Vehicleのための高精度空燃比制御ECU, HONDA R&D Technical Review Vol.9, p.100-110 (1997)
- 2) 柴田光弘 他：'98モデル「アコード」用2.3L I4エンジンの開発, HONDA R&D Technical Review Vol.10, p.58-66 (1998)
- 3) 牧秀隆 他：適応制御理論を用いたA/Fフィードバックシステム, HONDA R&D Technical Review Vol.7, p.18-23 (1995)
- 4) 岸則行 他：極超低公害ガソリンエンジンの研究, 自動車技術会 学術講演会前刷集179, 1998-10
- 5) Langen, P., et al.: Heated Catalytic Converter Competing Technologies to Meet LEV Emission Standards, SAE Paper 940470
- 6) 野波健蔵, 田宏奇：スライディングモード制御, コロナ社, 1994, p.263
- 7) 安井裕司 他：触媒後 O_2 フィードバックのための適応スライディングモード制御, HONDA R&D Technical Review Vol.11 No.1, p.65-72 (1999)

■ 著 者 ■



上野 将樹



赤崎 修介



安井 裕司



岩城 喜久