



ARXモデルシステム同定手法を用いた 燃料挙動パラメーター適合方法

Fuel behavior parameter optimization method using the ARX model system
identification technique

田辺 大樹 梶井 直継 小出 充敏 鳥越 昌樹 迫田 茂穂

Abstract

In most fuel injection controls for automotive engines, a high precision air-fuel ratio control is used to accurately control the fuel injection volume in accordance with driving conditions using the fuel behavior model. This control technology is also implemented on Yamaha Motor Co., Ltd. motorcycles with fuel injection systems. However, it is difficult to carry out fuel control parameter optimization as it is extremely difficult for this control to measure the amount of injected fuel that becomes adhered to the intake pipe and the amount of adhered fuel that is taken into the cylinder. Consequently, we have developed a optimization technology that can achieve precise parameter optimization in a short time span using a system identification method that analyzes the event statistically using measurement data in an attempt to solve these types of issues. This report discusses the optimization technology used. Furthermore, this report summarizes the actual running evaluation results for fuel injection angle and temperature effects.

要旨

自動車用エンジンの燃料噴射制御には、燃料挙動モデルを用いた運転状況に応じ正確な燃料量を制御する高精度空燃比制御が一般的に採用されており、この制御技術はヤマハ発動機(以下、当社)のインジェクター搭載モーターサイクルにも応用されている。しかしながら、この制御は、噴射した燃料のうち、吸気管内に付着する量と付着していた燃料量等からシリンダーへ吸入される量を実測することが極めて困難であることから、燃料制御パラメーター適合が難しいという課題を有している。そこで我々は、実測データより統計的に事象を解析するシステム同定という手法を用いて、正確かつ短時間にパラメーター適合を実現する適合手法技術を開発し、これら課題の解決を試みている。この論文では、その適合技術について言及する。さらには、この手法で得られた適合パラメーターを用いた、燃料噴射角度や温度等の影響に対する実運転での評価結果をまとめ、その実用性についても示す。

1 はじめに

当社で扱う商品、特にモーターサイクルは、ファンライドがその商品の大きな魅力のひとつであり、高出力・高レスポンス等のニーズが強い。その一方、今日の地球環境への関心の高まりとともに、モーターサイクルを含む自動車業界では、排気ガス浄化や燃費向上への取組みを加速させている。

これらを両立させる解決策のひとつに、運転状況に応じ正確な燃料量を制御する高精度空燃比制御があげられる。空燃比(以下、A/F)制御は、空気(Air)と燃料(Fuel)の制御を行うものであり、空気量の制御には、エアフローセンサー等の、空気量を測定するセンサー情報を使用する、もしくは、吸気負圧、スロットル開度、エンジン回転数等の入力パラメーターを用いて、非線形モデルを表すルックアップテーブルを参照する方法等が一般的に応用されている。また、燃料量の制御に関しては、エンジン運転状態により大きく2つの領域に分けて以下のような検討をするのが一般的である。

①定常運転領域:エンジン回転数やスロットル開度等が一定の場合

リニアA/Fセンサーもしくは、 O_2 センサーを用いたフィードバック制御の寄与率が高く、A/Fを目標値に速く収束するフィードバック制御設計が重要となる。

②過渡運転領域:スロットル等の変化による、加速・減速等の非定常運転の場合

定常領域の制御だけでは、センサーによるフィードバックではセンサーの遅れ時間などにより応答性に問題が生じる。よって、何らかのフィードフォワードによる制御を行う必要がある。この制御の一例として、エンジン回転数、スロットル開度等によって、非線形モデルを表すルックアップテーブルを参照する方法や、線形モデルを用いて数式による制御を行う方法等が挙げられる。多くの場合は、これら2つを併用して制御を行っている。

ところで、吸気ポート噴射エンジンでの燃料制御では、吸気ポート内に付着する燃料を考慮した燃料モデルを用いて、フィードフォワードによる燃料噴射制御を行うのが一般的であり、モーターサイクルでもこの制御技術は応用されている。

しかしながら、これらの制御は、高精度な空燃比を実現可能である半面、燃料制御パラメーターを適合することが難しいという課題もある。これは、噴射した燃料のうち、吸気管内に付着する量と付着していた燃料量等から、シリンダーへ吸入される量を実測することが極めて難しく、数値化が困難であることに起因する。このため、システム開発者にとってこの課題は、特に吸気系システムが時々刻々と変化して行く開発段階で多大な労力を要することになり、その早期解決が必要とされていた。

2 燃料噴射制御について

2.1 燃料挙動モデル

A/Fを精密に制御するには、シリンダーの中に吸入される空気量に合わせ、燃料噴射量を精密に制御する必要がある。シリンダーへの吸入燃料量は、インジェクターより直接吸入される燃料と、一度吸気管や吸気バルブに付着し、そこから持ち去られ、シリンダーに吸入される2つの経路がある。この経路を概念図として図1に示す。

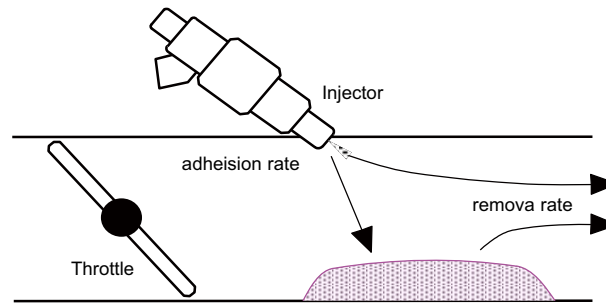


図1 燃料挙動モデル

これを数式として表現したものが、燃料挙動モデルと呼ばれるモデルであり、**図2**として表現することができる。また、**図3**に燃料挙動モデルをブロック図として示す。

$$\begin{aligned}
 M_{FI}(n) &= (M_F(n) - M_{FB}(n) \times \tau) / (1 - X) \\
 M_{FB}(n) &= M_{FI}(n) \times X + M_{FB}(n-1) \times (1 - \tau) \\
 M_{FB}(\infty) &= M_{FI}(\infty) \times X / \tau
 \end{aligned}$$

M_F : シリンダー必要燃料質量(燃烧室に入る燃料量)
 M_{FI} : 燃料噴射質量
 $M_{FI}(\infty)$: 定常状態での燃料噴射量(=燃烧室に入る燃料量)
 M_{FB} : 吸気管内に付着している燃料量
 $M_{FB}(\infty)$: 定常状態で吸気管内に付着している燃料量
 X : 燃料付着率
 τ : 燃料持ち去り率

図2 燃料挙動モデルの数式

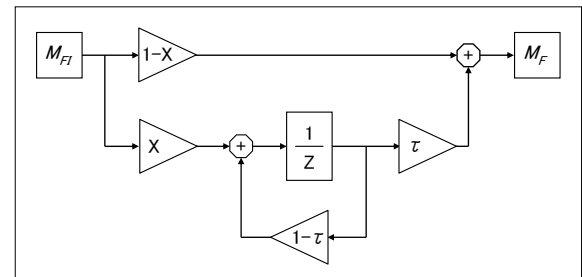


図3 燃料挙動モデルブロック図

2.2 燃料噴射制御コントローラー

燃料噴射制御は、シリンダーに吸入する燃料量を確定させた上で、インジェクターの通電時間を決定する。これには、燃料挙動モデルから逆モデルを作成し、これをコントローラーとして付着および持ち去りを考慮し、通電時間を決定する必要がある。

この場合、インジェクターから噴射された燃料のうち、吸気管に付着する割合を付着率(以下、 X)、付着している燃料からシリンダーへ持ち去られる燃料の割合を持ち去り率(以下、 τ)として、 X と τ をどのように決定するかが空燃比制御の性能を決定する。 X と τ は、吸気温度、エンジン回転数、スロットル開度などのエンジン運転状態に大きく依存し、非線形性が強いいため、一定値で全てのエンジン運転領域をカバーする事は難しい。そこで、現在はエンジン回転数とスロットル開度等によるルックアップテーブル(以下、MAPと呼ぶ)により、 τ 、 X を算出している。

また、**図4**に、このモデルが制御可能となるパラメータの組み合わせ領域、安定領域を示す。この図の $\times$ となる τX パラメータの組み合わせは、燃料噴射を発散させてしまい、制御不能になることが論理的に算出可能である。ここで発散とは、あるサイクルで燃料を大量に噴射し、次のサイクルでは全く燃料を吹かないといった安定した燃料噴射ができない状態を意味する。このため τX パラメータは $\circ$ となる領域での組み合わせを選定する必要がある。

X(付着) [%]

	10	20	30	40	50	60	70	80	90
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○	○	○	○	×
30	○	○	○	○	○	○	○	○	×
40	○	○	○	○	○	○	○	×	×
50	○	○	○	○	○	○	○	×	×
60	○	○	○	○	○	○	×	×	×
70	○	○	○	○	○	○	×	×	×
80	○	○	○	○	○	×	×	×	×
90	○	○	○	○	○	×	×	×	×

τ (持ち去り) [%]

図4 安定領域

2.3 従来の課題

従来、このパラメータ適合は、運転領域で回転数やスロットルを変化させ、この運転から得られるA/Fの変動が最小となるように、適合技術者の判断で適合を行っていた。しかし、この手法では、多大な時間を要する上に、適合者のスキルに依存し、定量的な評価ができないといった課題があった。

3 原理

3.1 システム同定とARXモデル

システム同定とは、対象とする動的システムの入出力データの計測値から、ある目的のもとで、対象と同一であることを証明できるような、なんらかの数学モデルを作成すること¹⁾である。本稿ではAuto-Regressive eXogeneous(以下、ARX)モデルと呼ばれる式を用いてシステム同定による適合を行った。

3.2 ARXモデルシステム同定と適合

ARXモデルとは、ある時刻 n の時の離散系システムへの入力値を $U(n)$ 、出力値を $Y(n)$ 、ノイズを $W(n)$ とすると、

$$Y(n) + a_1 Y(n-1) + \dots + a_{na} Y(n-n_a) = b_1 U(n) + \dots + b_{nb} U(n-n_b) + W(n) \dots \textcircled{1}$$

として表すモデルである。ところで、燃料挙動モデルの数式に、

入力: 燃料噴射量を M_{FI}

出力: A/F を Y_{AF}

として代入し、式を整えると、

$$\frac{1}{Y_{AF}(n)} - (1-\tau) \frac{1}{Y_{AF}(n-1)} = \frac{(1-X+\tau X)}{M_{air}} M_{FI}(n) - \frac{(1-\tau)(1-X)}{M_{air}} M_{FI}(n-1)$$

$M_{air}(n)$: 吸入空気量[g]
 $M_F(n)$: 燃料噴射量[g]
 X : 燃料付着率
 τ : 燃料持ち去り率

と、表すことができる。ここで、

$$Y(n) = \frac{1}{Y_{AF}(n)}$$

$$U(n) = T_{FI}(n)$$

とおくと、YとUに関し、①のARXモデルのn=2とした時の式と同じ形になる。よって、上記2式の係数比較より

$$\tau = a_1 + 1$$

$$X = \frac{b_2 - a_1 b_1}{b_1 + b_2} \quad \dots \textcircled{2}$$

と、 τ 、Xを表すことができる。ここで、①の式が、ARXモデルであることから、入力(噴射燃料量)と出力(A/Fの逆数)を正確に計測することで、予測誤差法により、 a_1, b_1, b_2 を求め、その結果を②に代入し、 τ 、Xを算出することができる。この適合方法をARXモデルシステム同定による τ 、Xパラメーター適合と呼ぶ。

4 適合実験と適合結果

ARXモデルシステム同定による τ 、Xパラメーター適合実験を4ストローク・1000cm³エンジン(表1)を用いて行った。

表1 エンジン諸元

Engine type	Liquid-cooled, 4-stroke, DOHC
Displacement	998cm ³
Cylinder arrangement	Forward-inclined parallel 4-cylinder
Bore × stroke	77.0 × 53.6 mm
Compression ratio	12.4:1

ARXモデルシステム同定を行うには、同定対象の正確な入出力データを、実験により計測する必要がある。本実験では、入力信号Uを燃料噴射量、出力信号YをA/Fの逆数として下記の手順にて実験を行った。本実験での排ガス計測概要を図5に、実験概要を図6に示す。

- ①所定のスロットル開度、回転数に設定する。
- ②A/Fリッチーリーンとなる燃料噴射時間を2値のランダム信号(例えばM系列信号)として出力する。
- ③排気ガス中のA/Fを算出する。
- ④算出したA/Fデータと入力データを用いてARXモデルシステム同定を行い、その結果から、 τ 、X値を算出する。

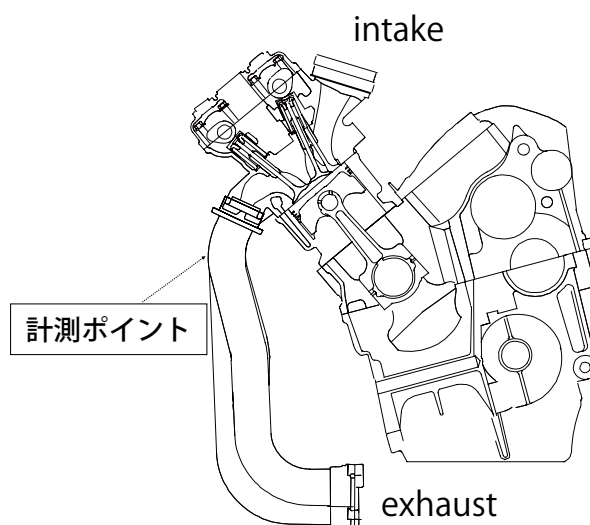


図5 排ガス計測概略図

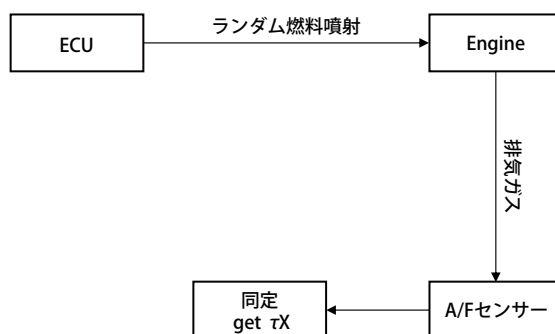


図6 実験概要図

ただし、前提条件として、エンジン回転数とスロットル開度一定の条件では、吸入空気量の変化は燃料量の変化に対し十分小さいと仮定している。得られた τ -X MAPの一例を表2に示す。

表2 τ -X MAP の一例

τ [%]		Throttle angle[deg]			
		4	10	20	40
E/G [rpm]	2000	41	45	32	35
	3000	31	33	28	30
	4000	45	41	42	28
	5000	45	40	35	28

X[%]		Throttle angle[deg]			
		4	10	20	40
E/G [rpm]	2000	31	35	40	39
	3000	34	38	40	39
	4000	45	43	46	40
	5000	43	42	40	40

5 評価

5.1 実験方法

この適合方法により得られた τ -X MAP(例えば表2)がA/F制御性、および、トルク変動に対し、どの程度有効性があるかを確認するために評価実験を行った。評価方法は、Virtual Real Simulationベンチ(以下、VRS)と呼ばれる、過渡走行状態をシミュレーションにより再現することのできる台上試験機を用いて行った。具体的な評価手順を以下に述べる。

- ①VRSを、走行シミュレーションモードに設定し、ギヤをGに固定し、エンジン回転数2000rpm付近で安定させる。
- ②2000rpmの安定した時点のスロットル開度からステップ状にスロットル開度を Th° 増加させ、 t 秒間加速させる。
- ③①相当のスロットル開度になるように閉じる。

以上①～③を5回繰り返し、この時のA/Fの変化、エンジントルクを計測し、平均を行う。

評価実験では、 $G=2$ 速、 $Th=5^\circ$ の評価を行った(図7)。

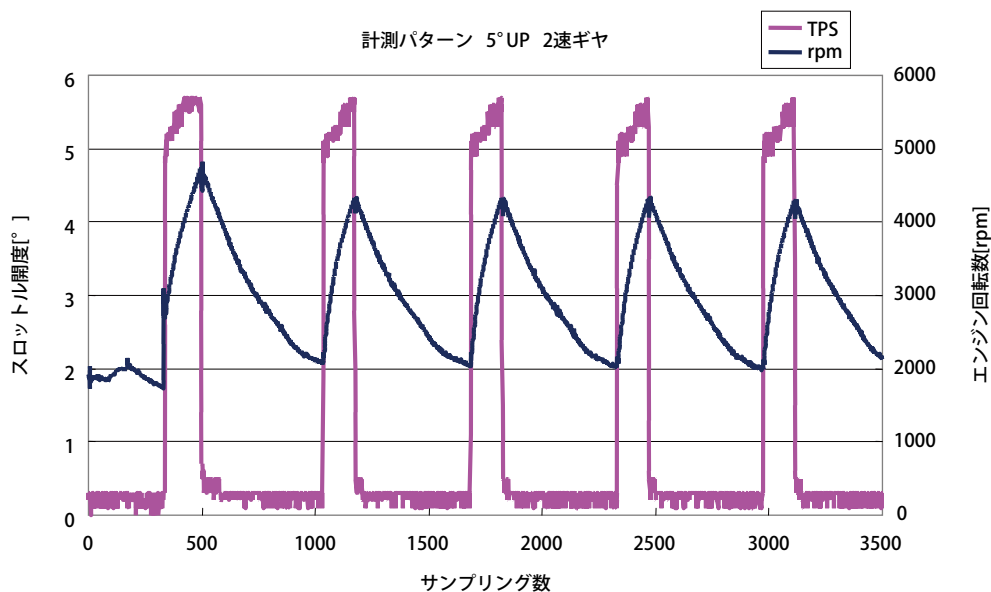


図7 評価実験パターン

尚、A/F計測は、排気バルブ後約10cmにNGK社製の全域空燃比センサーを用いている。また、トルクは、高速応答エンジンダイナモのトルク計を用いている。

5.2 A/F制御性評価

ARXモデルシステム同定適合による τ -X MAPを用いて、実際にエンジン制御を行った。目標A/Fの13.2に対し、本手法を用いた τ -X MAPを利用した場合と、従来の適合者による τ -X MAPを利用した場合と比較すると、A/Fの最大リーン値を14.36→14.07と少なくすることができた(図8参照)。また、評価を行った全ての条件(スロットル開度、ギヤ)においてA/Fの最大リーン値を1.2%～3.3%減少させることも確認できた(表3)。そして、A/Fの最大リーン値を抑制することにより、後のサイクルの目標A/Fへの収束速度も速くなっていることも確認できた。この目標A/Fへの収束時間も含めたA/F制御性能の評価を行う

ため、次の新たな評価指標を定義した。

A/Fスパイク量：目標A/Fから計測A/F値を引いて絶対値を計算し、15サイクル分積分した値

結果、6速ギヤの場合は30%以上、2速ギヤの場合も16%以上スパイク量の低減が確認できた(表4)。

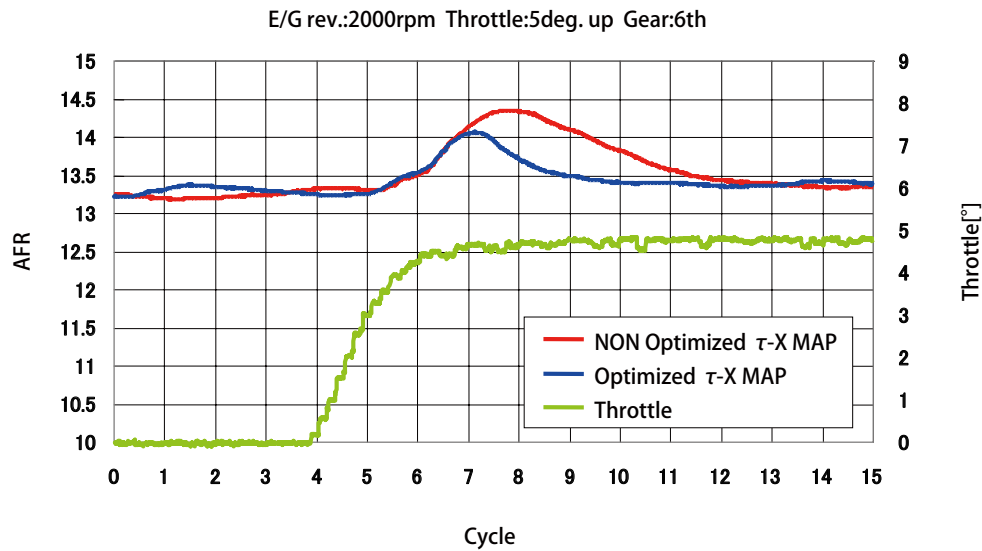


図 8 評価 A/F

表 3 A/F 最大値改善率 (5 回平均)

		A/F 最大値		
		5up	10up	40up
2 速ギヤ	τ - X なし	13.90	14.55	17.08
	τ - X あり	13.74	14.34	16.55
	改善率 [%]	1.2	1.5	3.1
6 速ギヤ	τ - X なし	14.36	15.18	16.81
	τ - X あり	14.07	14.34	16.26
	改善率 [%]	2.0	5.5	3.3

表 4 A/F スパイク量改善率 (5 回平均)

		A/F スパイク量		
		5up	10up	40up
2 速ギヤ	τ - X なし	3109.9	7477.929	14837.14
	τ - X あり	2252.7	6228.5	10988.46
	改善率 [%]	27.6	16.7	25.9
6 速ギヤ	τ - X なし	3756.5	10595.4	11677.4
	τ - X あり	2541.8	7264.6	7428.7
	改善率 [%]	32.3	31.4	36.4

5.3 トルク応答性評価

ARXモデルシステム同定適合による τ -X MAPを用いて、エンジン制御を行い、トルクに与える影響の評価を行った。その結果、トルクの立ち上がりが以前の τ -X MAPを使用した場合と比較し、1サイクル早く立ち上がることを確認できた。

ARXモデルシステム同定適合を行った τ -X MAPを用いることにより、スロットルを開けた際に、正確に燃料補正を行っており(図9参照)、トルクの立ち上がりが早まったためと考えられる。

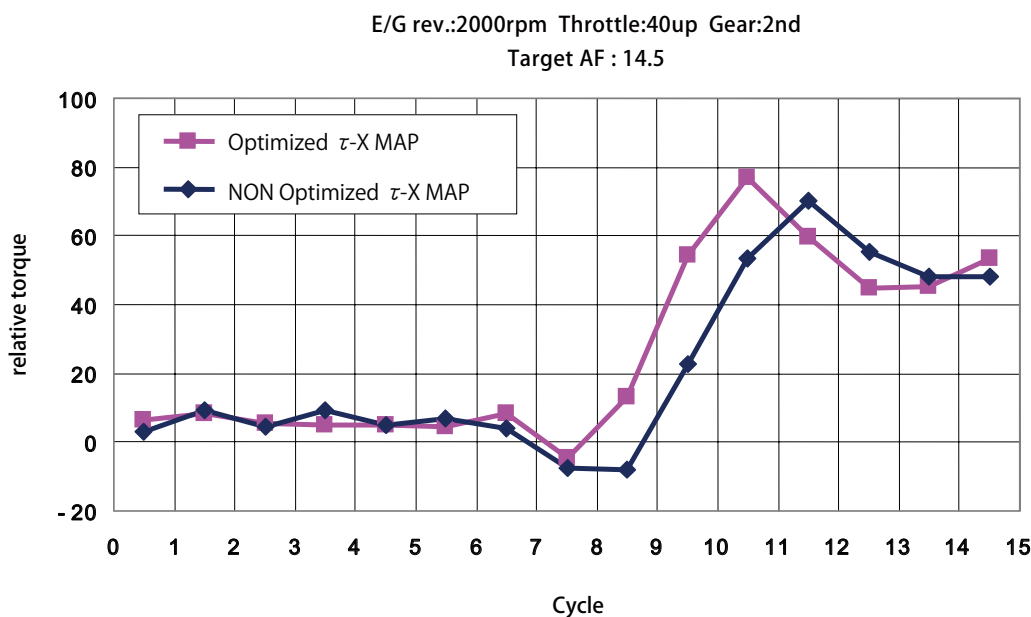


図9 エンジントルク特性

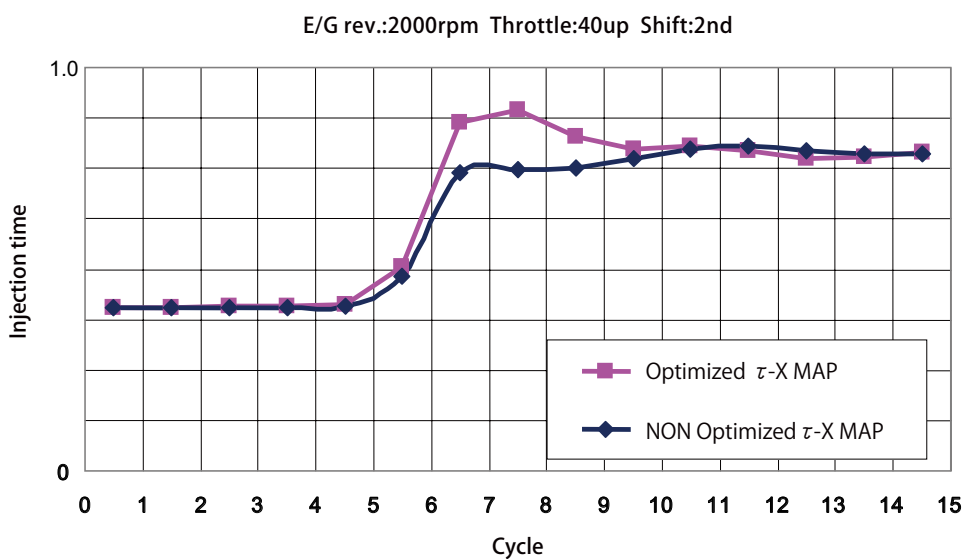


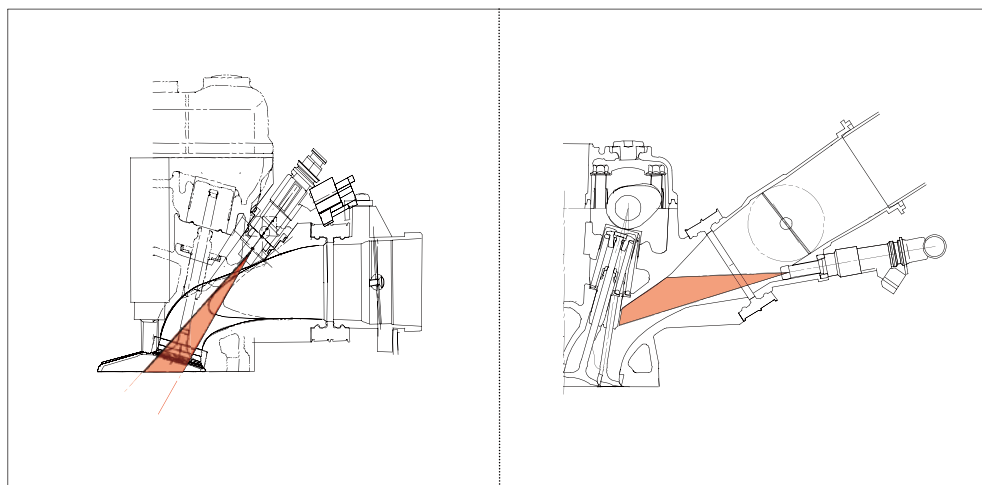
図10 燃料噴射時間

5.4 インジェクター配置の影響

ARXモデルシステム同定による τ -X MAP適合を、A:吸気バルブねらい配置、B:吸気ポート壁面ねらいこの2種類の配置(図11)で行い、インジェクター配置位置による τ およびXの比較を行った。

この結果、平均値にて比較を行ったところ、A:吸気バルブねらいの方が、約10%Xが低いことが分かった。また、 τ に関しては、逆にBの方が5%程大きいことが分かった。

以上より、燃料制御時に壁面、および、バルブへの付着の影響を受けにくい構成として、A:のような構成にすることが有効であることがいえる。



A : バルブねらい

B : 壁ねらい

図 11 インジェクター位置の影響

5.5 温度の影響

エンジン冷却水の温度により、付着率、持ち去り率に変化があるかを確認した(図12)。

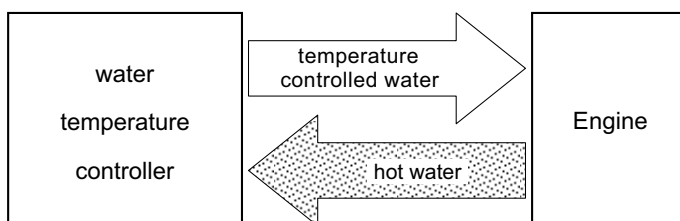


図 12 エンジン水温調整概要

表 5 水温による τ , Xの違い

		X [%]	τ [%]
water temp	30°C	60	30
	55°C	50	43
	70°C	42	60

表5は、エンジン冷却水温によるXと τ の平均値の表である。これより、水温が上がるにしたがってXの値が小さくなり、 τ の値が大きくなっていることが分かる。これは、エンジン冷却水温が高くなるにしたがって、燃料の気化が促進され、吸気管内に残留する燃料が減少しているためと推測する。

以上、5.4、5.5によって、ARXモデルシステム同定による τ 、X適合は、インジェクターの配置位置や、冷却水温による吸気管内の燃料の挙動を正確に捉えていることが確認できた。

6 おわりに

燃料挙動モデルを燃料噴射制御に利用する際、その制御の重要なポイントとなる τ -X MAP適合方法として、ARXモデルシステム同定を用いた適合方法を開発した。これにより、適合者のスキルによらない統計的な適合を可能にしながら、以下の結果を得た。

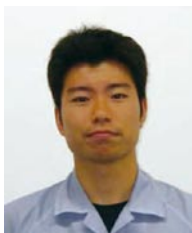
- ①ARXモデルシステム同定を用いた τ -X MAPを用いた制御を行うことにより、スロットルの急開による過渡時のリーンA/Fスパイク量を従来比16%以上抑制することができた。
- ②トルクの応答に関して、1サイクル早く応答することを確認した。
- ③論理的に τ 、Xを求めることが可能となり、インジェクターの設置位置や、エンジン水温による τ 、Xの違いも定量的に算出できた。

本技術は、新潟市朱鷺メッセにて開催された、2007年SETCにて論文賞を頂いており、学術的な見地からもその有用性が認められたと考えている。現在は、基礎研究の段階を終え、商品実験部門と商品開発ツールとしての有益性を検証中である。今後、この手法がよりよい商品作りに反映されることを期待したい。

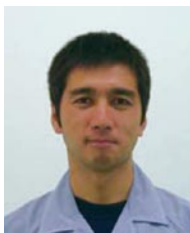
■参考文献

- (1) 足立修一:制御のためのシステム同定,東京電機大学出版局
- (2) 足立修一:制御のための上級システム同定,東京電機大学出版局
- (3) 藤沢英也・小川王幸・小林久徳・棚橋敏雄, 新電子制御ガソリン噴射 山海堂
- (4) 中島泰夫・村中重夫 自動車用ガソリンエンジン 山海堂
- (5) ポート噴射ガソリンエンジンの燃料挙動定量計測(第13回内燃機関シンポジウム講演論文集(1996-7-9~11))
- (6) ガソリンエンジンの過渡運転時の空燃比挙動(自動車技術会 学術講演会前刷集964 1994-10)
- (7) Model-Based Fuel Injection Control System for SI Engines(自動車技術会961188)

■著者



田辺 大樹
Hiroki Tanabe
コーポレートR&D統括部
システム技術研究部



柵井 直継
Naotsugu Masui
MC事業本部 商品開発統
括部 商品実験部



小出 充敏
Mitsutoshi Koide
MC事業本部 商品開発統
括部 商品実験部



鳥越 昌樹
Masaki Torigoshi
コーポレートR&D統括部
パワートレイン研究部



迫田 茂穂
Shigeo Sakoda
コーポレートR&D統括部
システム技術研究部