

Modeling and Deterioration Diagnosis of Catalyst for Automobile Exhaust Gas by On-Line Identification Method With Variable Forgetting Factor

Yasushi Okada Non-member (Utsunomiya University)

Hiroyuki Okuda Non-member (Utsunomiya University)

Shuichi Adachi Member (Keio University, adachi@appi.keio.ac.jp)

Shinji Niwa Non-member (Daihatsu Motor Co., Ltd., Shinji_Niwa@mail.daihatsu.co.jp)

Mitsunobu Kajitani Non-member (Daihatsu Motor Co., Ltd., Mitsunobu_Kajitani@mail.daihatsu.co.jp)

Seiji Hashimoto Member (Gunma University, sejiha@el.gunma-u.ac.jp)

Keywords: catalyst, deterioration diagnosis, system identification, variable forgetting factor, recursive least squares method

The environmental preservation is a critical task for the automotive industry. In relation to this matter, regulations for automobile exhaust gas are enforced. The present exhaust gas purification system has been composed of an electric fuel-injection system and a three-way catalytic converter, that simultaneously oxidizes excess levels of exhaust carbon monoxide (CO) and unburned HCs, and reduces excess levels of the oxides of nitrogen (NO_x). In such system, the purification ability of the catalyst drastically lowers when the catalyst deteriorated. On the other hand, since the operability of the automobile is not affected by the deterioration, there is a danger which keeps using the car with deteriorated catalyst. Therefore, on-board diagnosis for the catalysts is strongly required.

The object of this study is to construct an on-board catalyst diagnosis system to detect the deterioration under the actual driving conditions. In this paper, the on-line identification and deterioration diagnosis of the catalyst based on the recursive least squares (RLS) method with variable forgetting factor (VFF) is proposed.

Fig. 1 shows the automobile exhaust gas purification system. It is well known that the air-fuel ratio (A/F) is controlled in order to effectively utilize the purification performance of the catalyst. The control is carried out by constructing double feedback loop which uses outputs of two exhaust gas sensors installed on upstream and downstream of the catalyst. In this study, from the viewpoint of the cost reduction and the practical utilization on the market, the oxygen sensor which possesses the non-linearity to the A/F is employed instead of the more costly linear A/F sensor. For the non-linearity of the sensor, the hysteresis property is dominant. The catalyst also has a dynamic non-linearity which is caused by the chemical reaction.

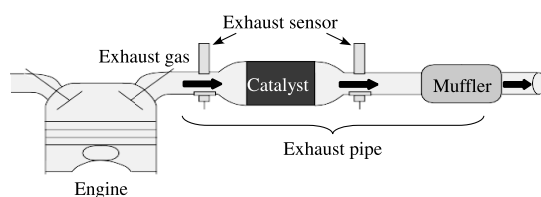


Fig. 1. Automobile exhaust gas purification system

Input and output signals in the modeling of the catalyst are the voltage signal from the oxygen sensors. Therefore, the identified object includes both non-linearities. Since the hysteresis property is dominant in the non-linearities of the identified object, we adopt the on-line identification based on RLS method with VFF which can adaptively identify the change of the characteristic. The advantage to introduce the forgetting factor into the RLS method is that the data in a past can be exponentially forgotten in the parameter estimation. In addition, by making the forgetting factor variable, it is expected that the hysteresis characteristic of the object, which divisionally changes in proportion to the piecewise regions, can be accurately identified. Moreover, the main contribution to introduce the RLS method with VFF is that the deterioration diagnosis of the catalyst become possible through the time ratio of VFF defined as R_{VFF} .

The identification and diagnosis experiments were carried out with three kinds of catalysts that differ in deterioration and two driving patterns. The introduced R_{VFF} with respect to the deterioration degree is shown in Fig. 2. The horizontal axis represents the deterioration degree normalized by the deterioration of the 60,000 km driving. It can be confirmed that R_{VFF} linearly increases with the deterioration degree. The validity of utilizing this value for the catalyst deterioration diagnosis has been experimentally verified.

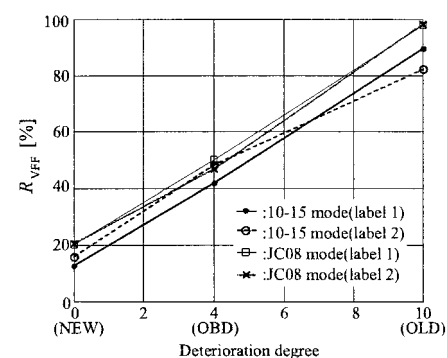


Fig. 2. Rates of change of forgetting factor

可変忘却要素を用いたオンライン同定法による 自動車排出ガス用触媒のモデリングと劣化診断

非会員 岡田 康志* 非会員 奥田 裕之*
 正員 足立 修一** 非会員 丹羽 伸二***
 非会員 梶谷 満信*** 正員 橋本 誠司****

Modeling and Deterioration Diagnosis of Catalyst for Automobile Exhaust Gas by On-Line Identification Method With Variable Forgetting Factor

Yasushi Okada*, Non-member, Hiroyuki Okuda*, Non-member, Shuichi Adachi**, Member,
 Shinji Niwa***, Non-member, Mitsunobu Kajitani***, Non-member, Seiji Hashimoto****, Member

The majority of the conventional system purifying exhaust gas is composed of a three-way catalyst and an electronic fuel injection. However, harmful pollutants are increasingly emitted when the catalyst becomes aged. Therefore, it is necessary to detect the deterioration of the catalyst by means of on board diagnosis. In this paper, we propose a diagnosis method of the aged catalyst using recursive system identification method with variable forgetting factor. We focus on the parameter of identified model which represents a characteristic of the catalyst, and possibility to describe the diagnosis of the aged catalyst.

キーワード：触媒，劣化診断，システム同定，可変忘却要素，逐次最小 2 乗法

Keywords: catalyst, deterioration diagnosis, system identification, variable forgetting factor, recursive least squares method

1. まえがき

近年，環境問題への関心が急速に高まっており，自動車の排出ガスに対する規制強化が行われている。このような動向に対応するため，排出ガス中の有害成分低減のための研究が各メーカーや研究機関において精力的に行われ，1970年代に有害成分 HC, CO と NO_x を同時に浄化する特性をもつ三元触媒が実用化された。現在の排出ガス浄化システムの主流は，この触媒と電子燃料噴射を用いたものとなっ

ており，これにより排出ガスの清浄化を実現している。

しかし，触媒が劣化し，その浄化能力が低下した場合，排出ガスは大幅に悪化する一方で，自動車の運転性にはほとんど影響しないことから，異常な排出ガス車が長時間，無意識に使われ続ける危険性がある。したがって，触媒に対する車載式故障診断（OBD：On Board Diagnosis）システムの役割は重要になると予想される。ただし，触媒の劣化を車上で直接検知できる技術がないため，現状では触媒の前後に設置された排気センサなどの間接情報から触媒の劣化を診断する手法が用いられている⁽¹⁾。しかし，それらの方法は診断対象の運転域を限定して処理する例が多く，実使用条件下での触媒劣化診断には，必ずしも十分なものとはいえない。

本論文では，実使用条件下での触媒劣化診断を実現するため，オンラインのシステム同定法のひとつである可変忘却要素（VFF：Variable Forgetting Factor）を用いた逐次最小二乗（RLS：Recursive Least Squares）法⁽²⁾により触媒のモデリングを行い，その結果として算出される忘却要素の値を触媒劣化診断の指標とすることを提案する。なお，システム同定のための入出力データとして触媒前後に設置された排気センサの出力を用いる。

本論文では，まず，排出ガス浄化システムについて簡単

* 宇都宮大学
〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2
Utsunomiya University
7-1-2, Yoto, Utsunomiya 321-8585

** 慶應義塾大学
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
Keio University
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

*** ダイハツ工業
〒520-2593 滋賀県蒲生郡竜王町山之上 3000
Daihatsu Motor Co., Ltd.
3000 Yamanoue, Ryuo-cho, Gamo-gun, Shiga 520-2593

**** 群馬大学
〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1
Gunma University
1-5-1, Tenjin-cho, Kiryu 376-8515

に説明し、触媒や排気センサの特性ならびに同定問題を明確にする。そして、VFFを用いたRLS法を触媒のモデリングに適用することとなった動機づけを示し、そのアルゴリズムならびに同定過程にえられる忘却要素に基づく触媒劣化診断法を提案する。最後に、実使用条件を模擬した国内の排出ガス規制の走行モードである10-15モード、JC08モード下で行われた同定実験結果より、提案するVFFを用いたRLS法に基づく高精度モデリング手法ならびに触媒劣化診断手法が有効であることを検証したので報告する。

2. 排出ガス浄化システム

〈2・1〉 浄化システムの構成 現在の主流となっている排出ガス浄化システムの構成を図1に示す。エンジンから排出された直後の有害成分を多量に含むガスは、触媒内での化学反応によって浄化され、大気中に放出される。なお、触媒浄化性能の有効活用のため、触媒前後に設置された排気センサの出力を用い、2重のフィードバックループを構成することによって、空燃比の制御が行われていることはよく知られている⁽³⁾。ここで、空燃比とはエンジン内に流入する空気と噴射する燃料の比である。

図1中の触媒の劣化が進行すると、その浄化能力が低下し、有害成分がそのまま大気中に放出される。ここで、劣化の度合いと自動車走行距離との相関は低く、また、劣化度合いはドライバの運転の仕方によって異なる。したがって、単純に“自動車が一一定距離走行したので触媒が劣化した”と判断することはできない。以上の観点から、触媒の劣化を検知する技術が必要不可欠であるが、それを車上で直接的に行う方法については、まだ研究段階である。現在は、触媒の前後に設置した排気センサの情報から、間接的に触媒の劣化度合いを判断しているが、それらの方法はエンジン回転数や吸気圧など診断対象の運転域を限定して処理するケースが多く、実使用条件下での触媒劣化診断には、必ずしも十分なものではない。

また、図1の触媒前後の排気センサは、空燃比に対する出力電圧特性から線形空燃比センサ（以下、線形A/Fセンサと略記）と酸素センサの2つに分類することができる。線形A/Fセンサは空燃比に対して線形な出力特性を示すが、高コストである。本研究では低コスト化という観点から排気センサとして酸素センサを使用しているが、このセンサは空燃比に対して図2に示すような非線形な出力特性を有する。図2は線形A/Fセンサで計測した空燃比を真値と仮定

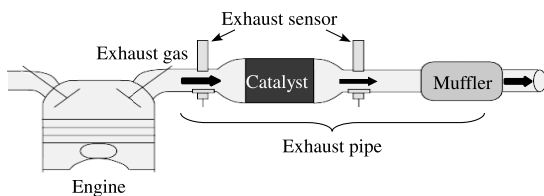


図1 排出ガス浄化システムの構成
Fig. 1. Composition of system purifying exhaust gas.

した場合の空燃比に対する酸素センサの出力電圧特性を示す。このように酸素センサの出力電圧は理論空燃比（14.5）近傍で急峻な傾きをもち、その前後の領域で飽和するという非線形な特性を示す。ここで、理論空燃比とはガソリンが完全燃焼するときの理論値であり、14.5近傍の値をとる。また、触媒の浄化能力が最大となるのもこの理論空燃比近傍であるため、空燃比制御の目標値は理論空燃比の14.5、もしくはそれに対応する酸素センサの出力電圧値（0.6V近傍）に設定される場合が多い。

〈2・2〉 触媒に対する同定問題 空燃比制御により触媒浄化能力の向上を計るためには、触媒のモデルが不可欠となる。図3に示すように触媒の前後には酸素センサが設置されており、触媒のモデリングにおける入出力信号は、触媒前に設置された酸素センサの電圧信号（OXAD）と、触媒後の酸素センサ信号（OX2AD）である。ここで、触媒への入力空燃比（Front A/F）と出力空燃比（Rear A/F）をそれぞれ \tilde{u} 、 \tilde{y} とし、OXADとOX2ADをそれぞれ u 、 y 、触媒の特性を P 、酸素センサの特性を触媒前後での特性の違いを考慮してそれぞれ S_1 、 S_2 とすると、

$$\tilde{y} = P\tilde{u} \dots\dots\dots (1)$$

$$u = S_1\tilde{u} \dots\dots\dots (2)$$

$$y = S_2\tilde{y} \dots\dots\dots (3)$$

となり、 u から y までの特性は次式のように記述できる。

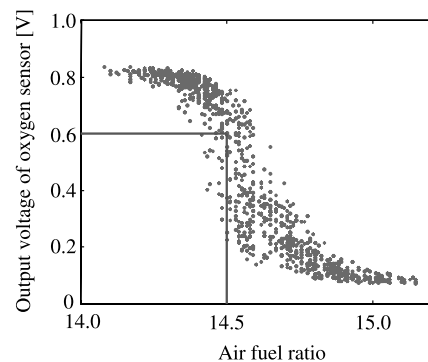


図2 酸素センサの出力電圧特性
Fig. 2. Characteristics of output voltage of oxygen sensor.

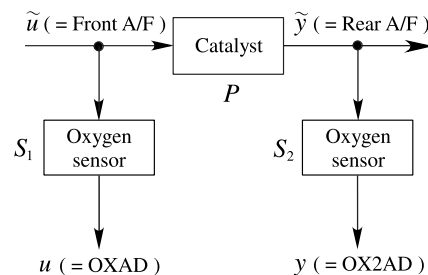


図3 触媒系の同定に対する問題点
Fig. 3. System identification problem of catalyst.

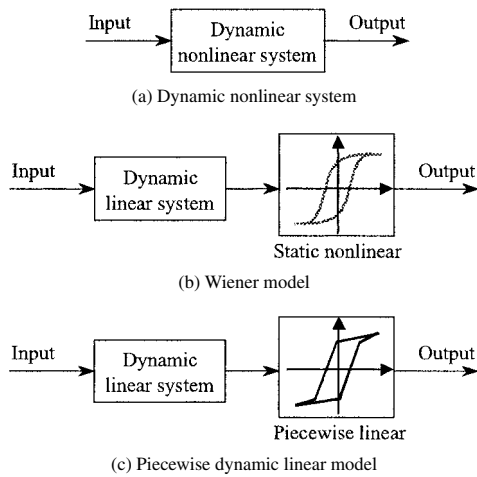


図4 動的・非線形システムから区分的・動的線形システムへの変換

Fig. 4. Conversion from dynamic nonlinear to piecewise and dynamic linear.

$$y = S_2 P S_1^{-1} u \dots\dots\dots (4)$$

したがって、触媒前後に設置された酸素センサの出力を用いてモデリングを行う場合、触媒のみではなく、前後に設置されたセンサ特性も同定対象に含まれてしまうが、本論文では(4)式の $S_2 P S_1^{-1}$ を同定対象と考える。

触媒は運転条件や劣化などにより特性が変化し、酸素貯蔵能力⁽⁴⁾などの化学的特性を有することから、図4(a)に示すような動的な非線形時変システムである。したがって、物理モデリングは元より、最小二乗法などのオフラインの線形システム同定法でも高精度なモデリングは困難である。

3. 逐次最小二乗法による触媒の劣化診断手法

〈3・1〉 可変忘却要素を用いた RLS アルゴリズム 前述したとおり、触媒は動的な非線形時変システムである(図4(a))。時変システムに対しては、RLS法のようなオンラインのシステム同定法を適用することは一般的であるが、非線形性の強いシステムでは高精度なモデリングが困難である。

本対象では、触媒の非線形性に加え酸素センサのヒステリシス特性が支配的であることから、対象を図4(b)のように動的線形システムと静的非線形性から構成される Wiener モデル⁽⁵⁾であると仮定できる。ここで、ヒステリシス特性を4つ、もしくは6つといった複数の線形区間の組み合わせと考えれば、図4(c)のように触媒の特性を表すことが可能である。すなわち、触媒を動的・区分的線形システムとしてではなく、動的・区分的線形システムとして考えることができる。

区分的線形システムの同定に対しては、近年、ハイブリッドモデリングに基づくアプローチが研究されているが⁽⁶⁾、本論文では特性変化を適応的に同定するアプローチである可変忘却要素(VFF)を用いたRLS法⁽²⁾を適用する。

忘却要素をRLS法に導入することにより、パラメータ推

定において過去のデータを指数的に忘却できる。さらに、この忘却要素を対象の変化の度合いに応じて可変にすることで、立ち上がりや立ち下がりで仮想的ではあるが区分的に変化する触媒特性を、分割的に高精度に同定可能であることが期待できる。

さて、オンラインシステム同定に用いる入出力データを

$$\{u(k), y(k) : k = 1, 2, \dots\}$$

とし、この入出力データを ARX (Auto-Regressive with exogenous input) モデル

$$y(k) = \theta^T \phi(k) + w(k) \dots\dots\dots (5)$$

に当てはめる問題を考える。ただし、

$$\theta = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n]^T \dots\dots\dots (6)$$

は同定すべき未知パラメータベクトルで、

$$\phi(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n)]^T \dots\dots\dots (7)$$

は回帰ベクトルである。また、 $w(k)$ は白色雑音であり、 n はモデル次数である。

いま、システム同定のための評価規範として、

$$J_k(\theta) = \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} \varepsilon^2(i) \dots\dots\dots (8)$$

を用いる。ただし、 $\varepsilon(i)$ は時刻 i における予測誤差である。

以上の準備のもとで、VFFを用いたRLS法のアルゴリズムは以下のようにまとめられる。

Step 1: 予測誤差 $\varepsilon(k)$ の計算

$$\varepsilon(k) = y(k) - \phi^T(k) \hat{\theta}(k-1) \dots\dots\dots (9)$$

Step 2: ゲイン $K(k)$ の計算

$$K(k) = \frac{P(k-1)\phi(k)}{\lambda(k-1) + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k)} \dots\dots\dots (10)$$

Step 3: パラメータ推定値 $\hat{\theta}(k)$ の更新

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)\varepsilon(k) \dots\dots\dots (11)$$

Step 4: 忘却要素 $\lambda(k)$ の計算

$$\lambda(k) = 1 - \frac{1 - \phi^T(k)K(k)}{\Sigma_0} \varepsilon^2(k) \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 $\lambda(k) < \lambda_{\min}$ のときは、 $\lambda(k) = \lambda_{\min}$ とおく。

Step 5: 共分散行列 $P(k)$ の更新

$$P(k) = \frac{1}{\lambda(k)} [I - K(k)\phi^T(k)]P(k-1) \dots\dots\dots (13)$$

なお、Step 4 で、 Σ_0 は追従速度を決定するパラメータであり、ユーザが指定する。 Σ_0 を小さくすると追従性が向上し、反対に大きくすると安定性が向上する。また、 λ_{\min} は忘却要素の下限であり、このパラメータもユーザが設定する。

〈3・2〉忘却要素による劣化診断 触媒の劣化について着目する。前述の通り、触媒は酸化還元と酸素貯蔵の2つの能力を有する。有害成分のNO_xは還元反応によりN₂とO₂に、そして、有害成分HCとCOは酸化反応によりH₂OとCO₂に無害化される。各成分に対する触媒の浄化率を図5に示す。また、酸素貯蔵能力とは、還元反応により生じた酸素を貯蔵する能力であり、新品触媒ほど貯蔵能力が強い。この貯蔵能力で蓄えられた酸素量に依存して、触媒前後に設置された酸素センサの出力信号間に時間的な応答遅れが生じる。また、この貯蔵量に依存して浄化率（酸化還元の反応速度）そのものも変化する。そして、これらの諸効果は、触媒の組成、容量、形状、流速、劣化状態などに影響される。このような触媒の非線形的な振る舞いが、触媒のモデル化を困難にしている。

しかしながら、触媒の劣化度合いが大きくなるにつれて、排出ガス中の有害成分を浄化する酸化還元反応並びに酸素貯蔵能力が弱まり、触媒自体の非線形性が弱まる。その結果、劣化触媒ほど線形モデリングが容易になると予想できる。ただし、酸素センサのヒステリシス特性は残ることに注意する。

また、触媒からの出力信号(OX2AD)の立ち上がりや立ち下がりにともなって、忘却要素の値は大きく変化することもブレ同定実験により確認している。これはOX2ADの立ち上がりや立ち下がりの際に、酸素センサのヒステリシス特性から対象が変化したと忘却要素が判断していることに起因する。したがって、劣化度合いが大きくなるにつれて、OX2ADの変化も頻繁に生じるため、忘却要素の変化の度合いも大きくなる。よって、この忘却要素の変化の度合いを劣化診断に利用する以下の手法を提案する。

すべてのサンプリング点に対して次式のような判定を導入し、この判定式を満たしたサンプリング点の割合を触媒劣化診断に利用する。

$$\lambda(k-i) \leq \lambda_b, \quad \forall i = 0, \dots, l \dots\dots\dots (14)$$

すなわち、忘却要素の値 λ が現時刻 k から l サンプルにわたりその閾値 λ_b 以下であれば、同定対象の特性が変化したと判断する。なお、上式は区分的もしくは動的な忘却要素

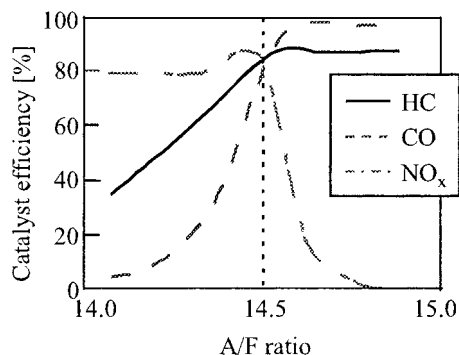


図5 触媒の空燃比に対する有害成分浄化能力
Fig. 5. Conversion efficiency versus A/F ratio.

の変化を表すものであり、この不等式を満足する割合を忘却要素変化率 R_{VFF} として次式のように定義する。

$$R_{VFF} = \frac{T_\lambda}{T_{exp}} \times 100 \quad [\%] \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 T_λ は判定式(14)を満たすサンプル数にサンプリング時間を掛けた値、 T_{exp} は全同定実験時間でいずれも単位は秒である。このように定義した R_{VFF} の値に基づいて劣化診断を行う方法を提案する。

次章では、提案するVFFを用いたRLS手法による触媒の劣化診断法を実際に同定実験を行い検証する。

4. 実験結果

〈4・1〉触媒に対する同定実験の構成 図6に触媒同定実験ならびに劣化診断のため実験装置の構成を示す。また、触媒同定実験のブロック図を図7に示す。F. B. はFeedbackの略である。ここで、図中で用いられるの各信号について説明する。まず、TTAUSは基本燃料噴射量であり、エンジン回転数や吸気圧によって変化する。また、Front A/FとRear A/Fはそれぞれ触媒の入力と出力となる空燃比であるが、線形A/Fセンサを用いなければ計測することはできない。したがって、フィードバック制御には触媒前後に設置された酸素センサの出力電圧であるOXADとOX2ADを用いる。フロントF. B. コントローラの出力FAFは燃料噴射補正量と呼ばれており、TTAUSを空燃比制御のために何%補正するかといった量である。そのため、FAFとTTAUSの偏差ではなく積を算出し、その信号により燃料噴射量を決定し、インジェクタを通电駆動する。また、FACFはリアF. B. コントローラの出力であり、この信号によりフロントF. B. コントローラの制御誤差を補正している。OXAD*とOX2AD*はそれぞれOXADとOX2ADの目標値であり、0.6V近傍の値に設定されている。

ここでは、OXADを入力、OX2ADを出力として触媒のシステム同定を行うが、その問題は図7から明らかなように、閉ループシステム同定問題となる。しかし、TTAUSが運転条件の違いによって変化するため、時変設定値のような外部入力が存在していると考えられることができる。したがっ

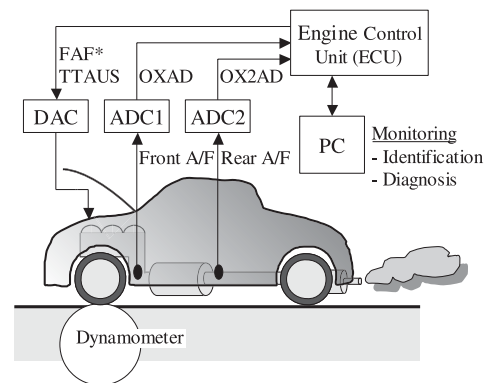


図6 実験装置の構成
Fig. 6. Configuration of tested equipment.

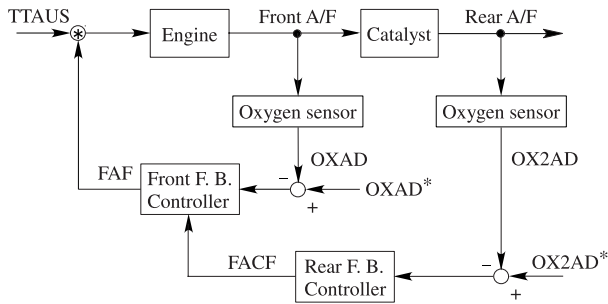


図7 触媒システム同定実験のためのブロック図
Fig. 7. Block diagram of identification experiment for catalyst.

て、閉ループシステム同定法に対し、直接法の可同定性のは保証されている。

また、劣化による触媒の同定結果の違いを明らかにするため、図7中の触媒として、以下のような劣化度合いの異なる3種類の触媒を使用した。

- (1) 劣化触媒：通常評価時に使用する触媒は6万km走行相当の劣化であるが、本実験で使用した劣化触媒はその10倍以上劣化したものである。ここで10倍以上とは、浄化率が1/10以下になっているということであり、60万km以上の走行相当ということではないことに注意されたい。
- (2) OBD触媒：通常評価時に使用する触媒の4倍劣化した触媒
- (3) 新品触媒：劣化のない新品の触媒

〈4・2〉 同定実験 以上の実験構成のもと、同定実験を行った。触媒同定実験時の運転条件としては現状で用いられている10-15モードと、2008年より導入予定のJC08モードの2つの走行パターンを採用した。これらの走行モード下における車速の変化（表示上の見やすさより一部分0~400sを記載）を図8に示す。

10-15モードは加速や定常が直線で結ばれているのに対し、JC08モードは実走行のデータから作られたテストモードであるため、そのほとんどが過渡運転になっている。すなわち、JC08モードの走行条件は実使用条件に近いといえる。ここでは、10-15モード、JC08モードの走行モード下とともに2回の触媒同定実験を行った。したがって、同条件下で収集されたデータセットが2つ存在し、それらを区別するため、ラベル1、ラベル2と呼ぶこととする。同定実験におけるサンプリング周期は0.1秒、実験時間は1,400秒である。

上記のような設定によって収集された各種触媒のシステム同定のための入出力データ OXAD と OX2AD を図9に示す。なお、図9には一例として JC08 モード、ラベル1 に対する実験データ（表示上の見やすさより一部分0~400sを記載。以下、同様）を示した。劣化触媒、OBD触媒、新品触媒の入力データは劣化度合い以外、すべて同じ条件下で実験を行っているため、ほぼ同様の特性を示す。触媒の出

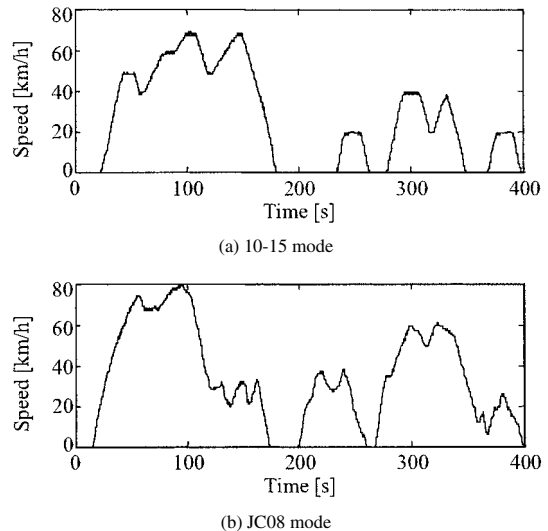


図8 10-15モードとJC08モードに対する車速変化

Fig. 8. Changes of vehicle speed of 10-15 mode and JC08 mode.

力データ OX2AD を比較すると、劣化触媒は比較的振動的な応答を示すのに対し、新品触媒の出力は振動的ではないことが確認できる。これより、劣化によって OX2AD が高周波成分を含む信号となることが確認できる。例えば、触媒の周波数帯域幅をオンラインでモニターできれば、劣化診断を行うことができるかもしれない。しかしながら、周波数領域で劣化度合いを判断するためには、VFFを用いたRLS法により同定される離散モデルパラメータからオンラインで周波数帯域幅を算出する必要があり、それは計算量の増大を意味し実用的ではない。そこで、われわれはこのようなアプローチではなく、前述した忘却要素の変化率に着目したより簡便な劣化診断法を導入した。

また、入出力データともに0.1Vと0.8V近傍の値をとることが多くなっているが、これは図2に示した酸素センサのスイッチング特性とも解釈することができる非線形性のためである。各入出力データ間のコヒーレンス関数を図10に示す。図より、新品触媒、OBD触媒、劣化触媒の順で出力間の相関が増加するが、前述の非線形性により全体的な相関は低く、通常のアフラインでの一括処理的な線形同定法では同定が困難なシステムであることがわかる。しかしながら、サンプリング周期0.1sで取得された実験データでは、立ち上がり立ち下がりの応答の間に50~100点のデータが存在するため、その間で忘却要素を小さくしRLS法を適用すれば、立ち上がりや立ち下がりで異なる特性を分割的に同定できる可能性がある。

〈4・3〉 同定結果と劣化診断 VFFを用いたRLS法を図9に示した入出力データに適用する際、オフセットの影響を除去するため、サンプル平均値 $\bar{u}(k)$, $\bar{y}(k)$ を以下に示す確率近似法のアルゴリズム⁽⁵⁾

$$\bar{u}(k) = \bar{u}(k-1) + \frac{1}{k} [u^m(k) - \bar{u}(k-1)] \dots \dots \dots (16)$$

$$\bar{y}(k) = \bar{y}(k-1) + \frac{1}{k}[y^m(k) - \bar{y}(k-1)] \dots\dots\dots(17)$$

を用いてオンラインで推定し、次式のように入出力データから減じた。

$$u(k) = u^m(k) - \bar{u}(k) \dots\dots\dots(18)$$

$$y(k) = y^m(k) - \bar{y}(k) \dots\dots\dots(19)$$

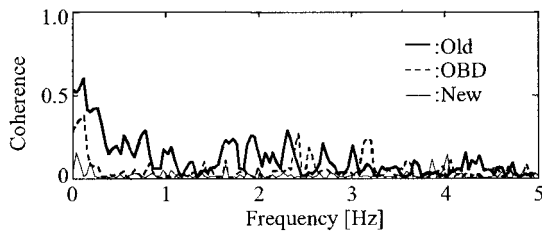


図 10 入出力データ間のコヒーレンス

Fig. 10. Coherence functions between input and output data.

ただし、 $u^m(k)$ 、 $y^m(k)$ はそれぞれサンプリングされた生の入出力データ、すなわち、図 9 に示した入出力データである。また、スペクトル解析法⁽⁵⁾と比較した結果、劣化状態

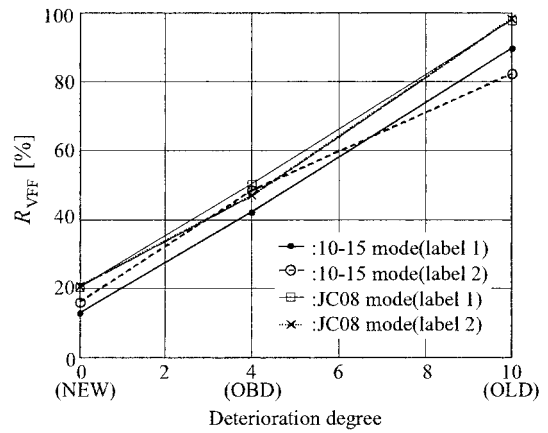


図 12 触媒劣化に対する忘却要素の変化率

Fig. 12. Rates of change of forgetting factor.

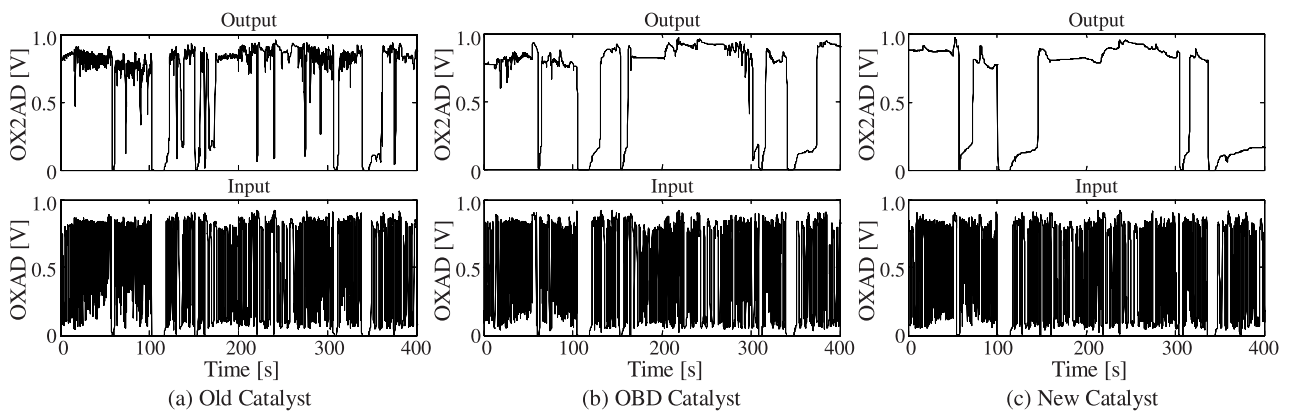


図 9 各触媒における入出力データ

Fig. 9. Input and output data.

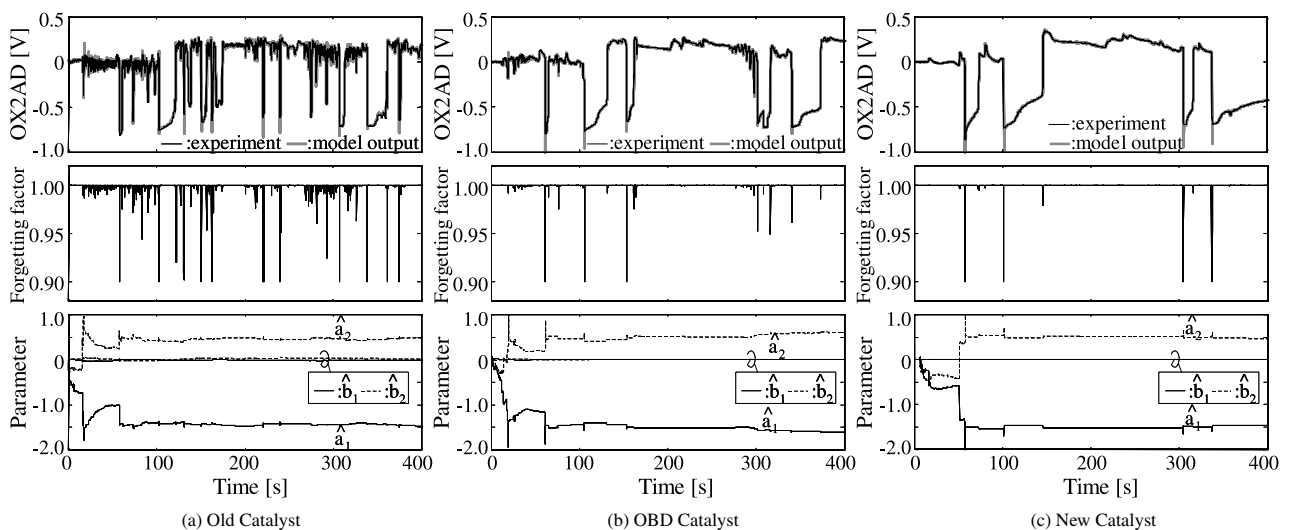


図 11 可変忘却要素を用いた RLS 法の同定結果

Fig. 11. Identification results by RLS method with VFF.

文 献

による変化はあるもののほぼ2次系として近似可能であることから、同定モデルを次数2のARXモデルとし、むだ時間を1とした。追従速度を決定する Σ_0 の値はVFFを用いたRLS法のモデル出力と実験出力との間の平均二乗誤差が最も小さくなるように決定し、その結果、 $\Sigma_0 = 1.0$ となった。また、 $\lambda_{min} = 0.9$ とした。これにより、次式によって算出されるメモリホライズン[®]を最短でも10は確保できるようにする。

$$\tau(k) = \frac{1}{1 - \lambda(k)} \dots\dots\dots (20)$$

このようにして、各種触媒のモデリングをVFFを用いたRLS法により行った結果を図11に示す。図において、上段はVFFを用いたRLS法により算出されるモデル出力と実験出力、中段は忘却要素の値、下段はARXモデルのパラメータ推定値 $[\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2]$ を示している。図より、全ての触媒に対してモデル出力(破線)と実験出力(実線)が区別できないほど一致しており、高精度な同定が達成できていることが確認できる。また、実験出力の立ち上がりや立ち下がりにともなって、忘却要素の値は大きく減少している。これは、酸素センサのヒステリシス特性からくる区分線形的変化に対し、忘却要素を減少させることにより過去のデータを素早く忘却し、高精度なパラメータ同定を逐次的に行っていることに起因する。触媒劣化に伴い実験出力の変化も頻繁に生じるが、この増大に伴い忘却要素の変化率が増加することからもヒステリシス特性に起因した区分線形的変化のメカニズムが確認できる。なお、オフライン同定のLS法では区分線形性を考慮できないため、比較的安定条件の良い劣化触媒でさえ、モデル出力が実験出力に追従できなかったことを付記しておく。

劣化度合いに対する忘却要素変化率の導出結果を図12に示す。ここでは幾度かの試行錯誤の結果、 $\lambda_b = 0.9999$ 、 $l = 10$ とした。図12はラベル1, 2すべてのデータに対して、VFFを用いたRLS法を適用し、忘却要素変化率を計算した結果である。図の横軸は、前述した6万km走行相当の劣化を劣化度合い1と規格化した場合の劣化度合いを示す。これより、劣化度合いに対してほぼ線形に忘却要素変化率が増加しており、この値を触媒劣化診断に利用することの妥当性が実証される。

5. おわりに

本論文では、非線形センサを有する排出ガス浄化用触媒の高精度なオンライン同定法を提案した。ここでは、特に対象の区分的線形性ならびに時変性を考慮し逐次最小二乗法に可変忘却要素を導入した。同時に、忘却要素の変化率に着目した触媒劣化診断法を提案し、その因果関係を実験条件を模擬した走行実験結果から定量的に検証した。

今後の課題は、オンライン同定モデルに基づいた触媒の浄化能力最大化を目指した空燃比制御システムの設計である。

(平成17年9月8日受付, 平成18年7月4日再受付)

- (1) 山本敏朗・野田 明:「O₂ センサ信号のFFT解析による自動車用触媒装置の劣化診断」, 日本機械学会関東支部第8期総会講演会講演論文集, 83/85 (2002)
- (2) T.R. Fortescue, L.S. Kershenbaum, and B.E. Ydstie: "Implementation of Self-tuning Regulators with Variable Forgetting Factors", *Automatica*, Vol.17, No.6, pp.831-835 (1981)
- (3) 原田 宏:「自動車の制御技術」, 朝倉書店 (1997)
- (4) H.S. Gandhi, A.G. Piken, M. Shelef, and R.G. Delosh: "Laboratory Evaluation of Three-way Catalysts", SAE Paper, No.760201 (1976)
- (5) 足立修一:「ユーザのためのシステム同定理論」, 計測自動制御学会 (1993)
- (6) G.F. Trecate, M. Muselli, D. Liberati, and M. Morari: "A Clustering Technique for the Identification of Piecewise Affine Systems", *Automatica*, Vol.39, No.2, pp.205-217 (2003)
- (7) 足立修一:「MATLABによる制御のための上級システム同定」, 東京電機大学出版局 (2004)
- (8) 足立修一:「MATLABによる制御のためのシステム同定」, 東京電機大学出版局 (1996)
- (9) J.M. Maciejowski 著, 足立修一・菅野政明 訳:「モデル予測制御 制御のもとでの最適制御」, 東京電機大学出版局 (2005)
- (10) Y. Okada, S. Adachi, and J.M. Maciejowski: "A System Identification in the Presence of Nonlinear Sensors", T. of SICE, Vol.41, No.2, pp.142-148 (2005-2) (in Japanese)
岡田康志・足立修一・J.M. Maciejowski:「非線形センサをもつセンサを用いたシステム同定」, 計測自動制御学会論文集, 41, 2, pp.142-148 (2005-2)
- (11) L. Ljung: "System Identification - Theory for the user (2nd edition)", Englewood Cliffs, Nj: Prentice Hall PTR (1999)
- (12) H. Maki, S. Akazaki, Y. Hasegawa, I. Komoriya, Y. Nishimura, and T. Hirota: "Real Time Engine Control Using STR in Feedback System", SAE Paper, No.950007 (1995)
- (13) H. Yakabe: "A/F Control of a Gas Engine Using Response Characteristics of Three-Way Catalysts under Dynamic Operation", T. of JSME, Vol.57, No.539, pp.268-275 (1991-7) (in Japanese)
矢加部久孝:「三元触媒の動特性を利用したガスエンジン空燃比制御の研究」, 日本機械学会論文集 (B編), 57, 539, pp.268-275 (1991-7)

岡田 康志 (非会員) 1980年4月23日生。2005年宇都宮大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年4月(株)日立製作所入社, 現在に至る。在学中, 主として制御理論の自動車への応用に関する研究に従事。



奥田 裕之 (非会員) 1983年2月15日生。2005年宇都宮大学工学部卒業。同年4月同大学大学院工学研究科博士前期課程入学, 現在に至る。制御理論の自動車への応用に関する研究に従事。



足立修一 (正員) 1957年10月19日生。1986年慶應義塾



大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年(株)東芝入社,総合研究所に勤務。1990年宇都宮大学工学部電気電子工学科助教授,2002年同教授,2003年から2004年ケンブリッジ大学客員研究員,2006年慶應義塾大学理工学部物理情報工学科教授,現在に至る。工学博士。システム同定理論・制御理論と,それらの産業応用に関する研究に従事。1993年SICE創立30周年記念著述賞1等受賞。1998年日本機械学会賞(論文)受賞。計測自動制御学会,日本機械学会,IEEEなどの会員。

丹羽伸二 (非会員) 1971年4月25日生。1994年三重大



大学工学部電子工学科卒業。同年ダイハツ工業(株)入社,現在に至る。エンジン制御の研究・開発に従事。自動車技術会会員。

梶谷満信 (非会員) 1953年3月20日生。1975年大阪市



立大学工学部機械工学科卒業。同年(株)日産自動車入社,機関設計部に勤務。1984年ダイハツ工業入社,エンジン部に勤務。2002年千葉大学自然科学研究科人工システム科学専攻博士課程修了。現在に至る。工学博士。主として環境対応エンジンおよびシステムの研究・開発に従事。計測自動制御学会,自動車技術会会員。

橋本誠司 (正員) 1971年12月19日生。1999年宇都宮大



学大学院工学研究科博士課程修了。1996年から1999年日本学術振興会特別研究員。2000年より小山工業高等専門学校機械工学科助手,2002年より群馬大学工学部電気電子工学科助手,2005年同助教授,現在に至る。博士(工学)。主にシステム同定・制御理論の産業分野への応用に関する研究に従事。2001年,2003年IEEE IES Best Presentation Award受賞。計測自動制御学会,日本機械学会,IEEE会員。