

自動車パワートレイン制御における システム同定への期待

足立 修一* 橋本 誠司**

* 慶應義塾大学 工学部, 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

** 群馬大学 工学部, 群馬県桐生市天神町 1-5-1

* Keio university, Hiyoshi 3-14-1 Kohoku-ku Yokohama 223-8522, Japan

** Gunma university, Tenjin-cho 1-5-1, Kiryu, 376-8515, Japan

* E-mail: adachi@appi.keio.ac.jp

** E-mail: seijih@el.gunma-u.ac.jp

キーワード：システム同定，エンジン，劣化診断，逐次最小二乗法

JL 002/02/4202-0086 ©2002 SICE

1. まえがき

近年、自動車産業を中心として、モデルベースデベロップメント (Model-Based Development: MBD) のように「モデルベース」というキーワードが注目を集めている。に入る単語と、その用語を使う立場によって異なる解釈があるが、本稿では「モデルベース制御」(Model-Based Control: 以下では MBC と略記) とその自動車への応用について論じてみたい。

現代制御、ロバスト制御、そしてモデル予測制御はいずれも MBC である。これらの制御理論は大学などでは精力的にも研究されているにもかかわらず、必ずしも実プラントへの応用例が多いとはいえなかった。特に、プロセス産業における現実の問題では、最終的には PID 制御のような古典制御理論を適用することが多かった。これにはさまざまな原因が考えられるが、そのいくつかを列挙してみよう(注1)。

- (1) 従来と同程度の制御性能が要求されているのであれば、無理をして新しい制御理論を導入する必要はない。
- (2) MBC を適用するためには制御対象の数学モデルが必要になるが、プロセス制御では一般にモデリングが難しい。第一原理モデリングで得られるモデルは複雑すぎて制御系設計には利用しにくいし、操業中のプラントを乱すことになるシステム同定実験はできれば行いたくない。
- (3) アドバンスト制御理論を導入しても、その後のメンテナンスが大変である。

それに対して、自動車産業がおかれている現在の立場はかなり異なっている。

- (1) 本稿で紹介する排出ガス規制のように、非常に高精度な制御性能が要求されている。
- (2) 短期間のうちに多数の機種の新車が発表されており、それらに対して、毎回毎回、さまざまな制御系を一から設計しなおすことは非常に大変である。

(注1) もちろん、これらはある側面について述べただけであり、プロセス産業でもモデル予測制御の積極的な導入など、アドバンスト制御理論の適用検討は行われている。

これらに対する解決策の一つに、「モデルを用いた制御系設計」による制御系設計手順の標準化がある。特に、ロバスト制御理論の登場によって、制御対象の数学モデルと設計仕様が与えられれば、設計者の能力に大きく依存しない制御系設計法が構築できるようになってきた。このとき、最も必要なものが高精度な数学モデルであり、そのためロバスト制御理論の発展に伴い、モデリング・システム同定の重要性が再認識された。

モデリングの王道は、対象の物理・化学的な第一原理に基づく第一原理モデリングである。しかしながら、第一原理モデリングにより得られる数学モデルは、通常、連立・非線形・偏微分方程式で与えられ、必ずしも制御系設計には適していない。そのようなときには、もう一つのモデリング法であるシステム同定の出番である。自動車における制御のためのモデリングを考えた場合、前述のプロセス産業と決定的に違う点は、システム同定実験を行うことに比較的抵抗が少ないということがあげられる。自動車産業では、これまで多くの実験の繰り返しによって、制御系設計のためのモデル(あるいは、テーブル)を構築してきた背景がある。したがって、理論的に洗練されており、システム同定法のツールボックスも完備しているシステム同定理論は、自動車産業にとって第一原理モデリングに並ぶ強力なモデリングツールになり得る可能性を秘めている。

本稿では、オンラインシステム同定法の一つである、可変忘却要素を用いた逐次最小二乗法(以下 RLS 法と略記)による排出ガス浄化用触媒のモデリングと劣化診断の事例を紹介する。

2. システム同定法による排出ガス用触媒のモデリングと劣化診断¹⁾

2.1 触媒を用いた排出ガス浄化システム

現在主流の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る有害成分を含むガスは、触媒内での酸化還元反応と酸素貯蔵能力²⁾を用いた化学反応によって浄化され、大気中に放出される。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

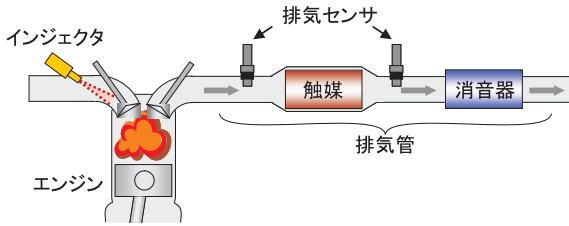


図1 排出ガス浄化システムの構成

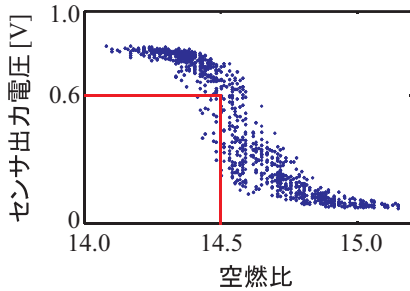


図2 酸素センサの出力電圧特性

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排気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（酸化還元反応速度）そのものも変化する。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。ここで、触媒が劣化するとその浄化能力は低下し、有害成分がそのまま大気中に放出されることになる。この触媒劣化の度合いは、ドライバの運転の仕方により異なり、自動車走行距離との相関は低い。したがって、単純に「自動車が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。図1に示すように現在は、触媒の前後に設置した2つの排気センサの情報から、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間接的に劣化度合いを判断している。したがって、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。環境保全のためにも、触媒劣化を車上でリアルタイムに検知する技術の開発が急務である。

図2に排気センサである酸素センサの出力電圧特性を示す。エンジンの空燃比制御において、その目標値はガソリンが完全燃焼する理論空燃比(14.5)、またはそれに対応する電圧出力(0.6V)に設定される。触媒の浄化能力もこの理論空燃比において最大となる。したがって、触媒浄化性能の有効活用のため、触媒前後に設置した排気センサにより、2重のフィードバックループを構成し、空燃比の制御が行われている³⁾。空燃比制御系のブロック線図を図3に示す。 ξ は基本燃料噴射量であり、エンジン回転数や吸気圧により変化する。また、 \tilde{u} と \tilde{y} はそれぞれ触媒の入出力となる空燃比であり、 u と y が排気センサによるその出力電圧である。フロントフィードバックコントローラの出力 η は燃料噴射補正量と呼ばれており、 ξ を何%補正するかと

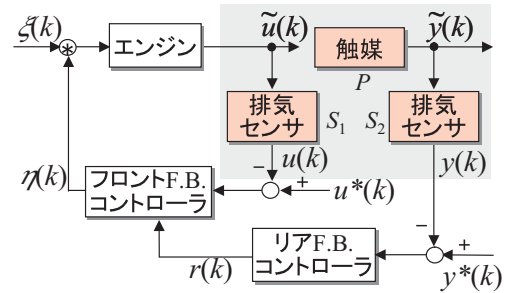


図3 触媒システム同定実験のためのブロック図

いった量である。そのため、 η と ξ の偏差ではなく、積を算出する形式となる。また、 r はリアフィードバックコントローラの出力であり、この信号によりフロントフィードバックコントローラの制御誤差を補正している。 u^* と y^* はそれぞれ u と y の目標値であり、0.6V近傍の値に設定される。同図からわかるように、触媒の浄化能力向上、さらには劣化診断においてはそのモデルが必要となるが、触媒前後に設置された酸素センサ出力を用いてモデリングを行う場合、 $y = S_2 P S_1^{-1} u$ となり、触媒に加え、センサの特性も同定対象に含まれる。このように、運転条件や劣化による特性変化に加え、空燃比に対する出力電圧の非線形特性もリアルタイム劣化診断を困難とする要因の一つである。

以上から、第一原理モデリングはもとより、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となる。

2.2 可変忘却要素に基づく触媒の劣化診断手法

前述の通り、触媒は動的な非線形時変システムである。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は期待できない。

本制御対象は、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、対象を動的線形システムと静的非線形性から構成されるウィナーモデル⁴⁾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のように触媒の特性を動的・区分的線形システムとして表すことが可能である。

区分的線形システムの同定に対しては、ハイブリッドモデリングに基づくアプローチもあるが、ここ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⁵⁾を適用する。したがって、たとえばVFFを小さくしてRLS法を適用すれば、立ち上がりや立ち下がり、その区間により異なる触媒特性を分割的に同定できると期待される。

次に、触媒の劣化について着目する。触媒は酸化還元と酸素貯蔵の2つの能力を有することは前述の通りである。しかしながら、触媒の劣化度合いが大きくなるにつれて、

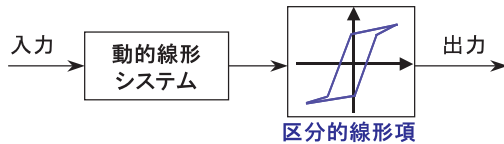


図4 動的線形システムから区分的・動的線形システムへ

酸素センサのヒステリシス特性は残るが、有害成分を浄化する2つの能力が弱まり、触媒自体の非線形性は弱まる。また、事前実験より、触媒からの出力信号 y 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を確認している。これは y 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。以上より、劣化度合いが大きくなるにつれて、 y の変化も頻繁になり、忘却要素の変化の度合いも大きくなる。この忘却要素の変化の度合いに着目した劣化診断手法を以下に提案する。

すべてのサンプリング点に対して次式の判定を導入する。

$$\lambda(k-i) \leq \lambda_b, \quad \forall i = 0, \dots, l \quad (1)$$

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、同定対象の区分的または動的に特性が変化したと判断する。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。

$$R_{VFF} = \frac{T_\lambda}{T_{exp}} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

ただし、 T_λ は判定式(1)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 R_{VFF} の値に基づいて劣化診断を行う。

2.3 同定実験と劣化診断の結果

本節では、提案する VFF を用いた RLS 法による触媒の劣化診断法の有効性を同定実験により検証する。システム同定においては u が入力、 y が出力となり、その問題は図3から明らかのように、閉ループシステム同定問題となる。しかし、 ξ が運転条件の違いによって変化するため、時変設定の外部入力が存在していると考えることができ、直接法の可同定性⁶⁾は保証されている。

実験においては、劣化度合いの異なる3種類の触媒、1) 劣化触媒：通常評価時に使用する触媒(6万km走行相当の劣化)の10倍劣化した触媒。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、を用いた。

運転条件としては現状用いられている10-15モードと、今後導入予定のJC08モードの2つの走行パターンを用いた。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モードは過渡状態が多く実走行条件に近い。ここでは、各走行モード毎に2回(ラベル1, ラベル2として区別)、計4回の同定実験を行った。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。

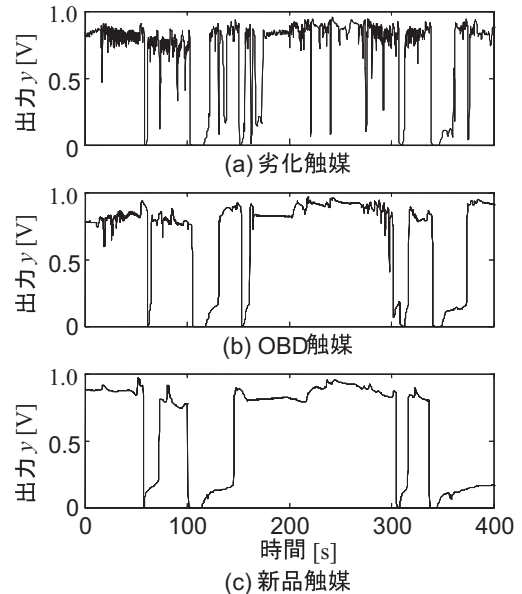


図5 各触媒に対する出力データの比較

一例として図5にJC08モード、ラベル1に対する各種触媒での出力データ(一部分0~400秒を記載)を示す。紙面の都合上、入力データは割愛したが、すべて同じ条件下で実験を行っているため、皆同様の特性を示す。同図より、劣化触媒は高周波成分を含み比較的振動的な応答を示すのに対し、新品触媒になるにつれ、高周波成分がなくなることが確認できる。また、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非線形スイッチング特性に起因している。各入出力データ間のコヒーレンス解析の結果では、新品触媒、OBD触媒、劣化触媒の順に相関が増加するが、劣化触媒でもその最大値は0.6程度であり、全体的な線形性は低い。したがって、通常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。

次に、VFFを用いたRLS法により各触媒の同定を行った。実験データにおいては、立ち上がり立ち下がりの応答の間に50~100点のデータが存在しており、その間で忘却要素を小さくすることにより、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。ここでは、同定モデルをARXモデルとし、次数はスペクトル解析法⁴⁾と比較し2次とした。また、むだ時間は1とした。オフセット除去には、確率近似法のアルゴリズム⁴⁾によりサンプル平均値をオンライン推定し、えられた入出力データより減じた。忘却要素の下限値 λ_{min} は0.9とし、メモリホライズン⁷⁾を最短でも10は確保できるようにした。

一例として、非線形性がもっとも強いと思われる新品触媒の同定結果を図6に示す。上段は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、すべ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

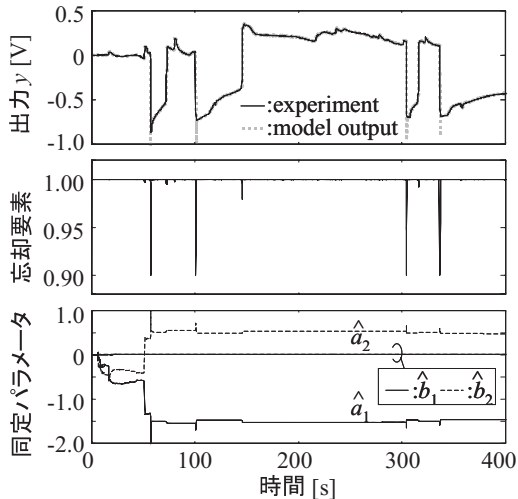


図6 可変忘却要素を用いたRLS法の同定結果

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によ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、新品触媒同様、OBD触媒、劣化触媒でも良好な同定結果がえられたこと、ならびに、オフライン最小二乗法では区分線形性を考慮できないため、比較的同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。

各モードすべてのデータに対して劣化度合いに対する忘却要素変化率を導出した結果を図7に示す。ここでは何回かの試行錯誤の結果、 $\lambda_b = 0.9999$, $l = 10$ とした。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た。

3. おわりに

本稿では、自動車排出ガス浄化用の触媒のモデリングと劣化診断の事例を紹介した。自動車では、オフライン、オンライン双方の環境において、さまざまなデータ(信号)が計測可能であり、それらを積極的に活用したモデリング法であるシステム同定への期待は大きい。

最後に、本研究の遂行にあたり多大なるご協力をいただいた宇都宮大学院生(当時)の岡田康志氏、奥田裕之氏に謝意を表す。

(2007年11月26日受付)

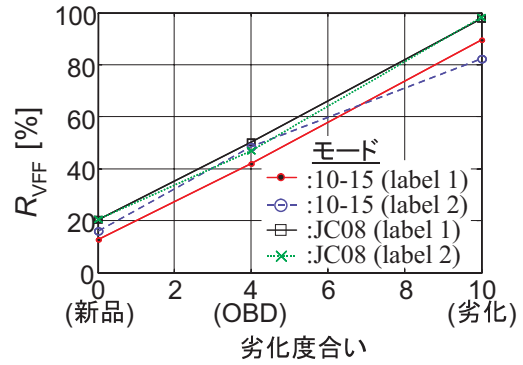


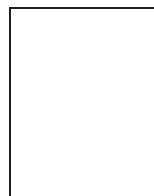
図7 触媒劣化に対する忘却要素の変化率

参考文献

- 岡田, 足立, 橋本ほか: 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, 電気学会論文誌 D, **126D-12**, 1637/1644 (2006)
- H. S. Gandhi, A. G. Piken, M. Shelef, and R. G. Delosh: Laboratory Evaluation of Three-way Catalysts, *SAE Paper*, 760201 (1976)
- 原田 宏: 自動車の制御技術, 朝倉書店 (1997)
- 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)
- T. R. Fortescue, L. S. Kershenbaum, and B. E. Ydstie: Implementation of Self-tuning Regulators with Variable Forgetting Factors, *Automatica*, **17-6**, 831/835 (1981)
- 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)
- 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)
- J. M. Maciejowski 著, 足立・菅野訳: モデル予測制御 制約のもとでの最適制御, 東京電機大学出版局 (2005)
- 岡田, 足立ほか: 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**, 142/148 (2005)

[著者紹介]

あ だ ち しゅう いち
足 立 修 一 君 (正会員)



1986年慶應義塾大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。同年(株)東芝総合研究所入社。90年宇都宮大学工学部電気電子工学科助教授を経て、2002年同教授。06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。制御工学、システム同定の理論と応用研究に従事。電気学会、日本機械学会、日本鉄鋼協会、システム制御情報学会、IEEEなどの会員。

は し もと せい じ
橋 本 誠 司 君 (正会員)



1999年宇都宮大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。96年~99年日本学術振興会特別研究員。2000年小山工業高等専門学校機械工学科助手。2002年群馬大学工学部助手を経て、2005年同助教授、現在に至る。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。電気学会、IEEEなどの会員。