自動車パワートレイン制御パラメータのモデルベース適合技術

北尾武史*

Model-Based Calibration Technology for Automotive Powertrain Control Parameters

Takeshi Kitao

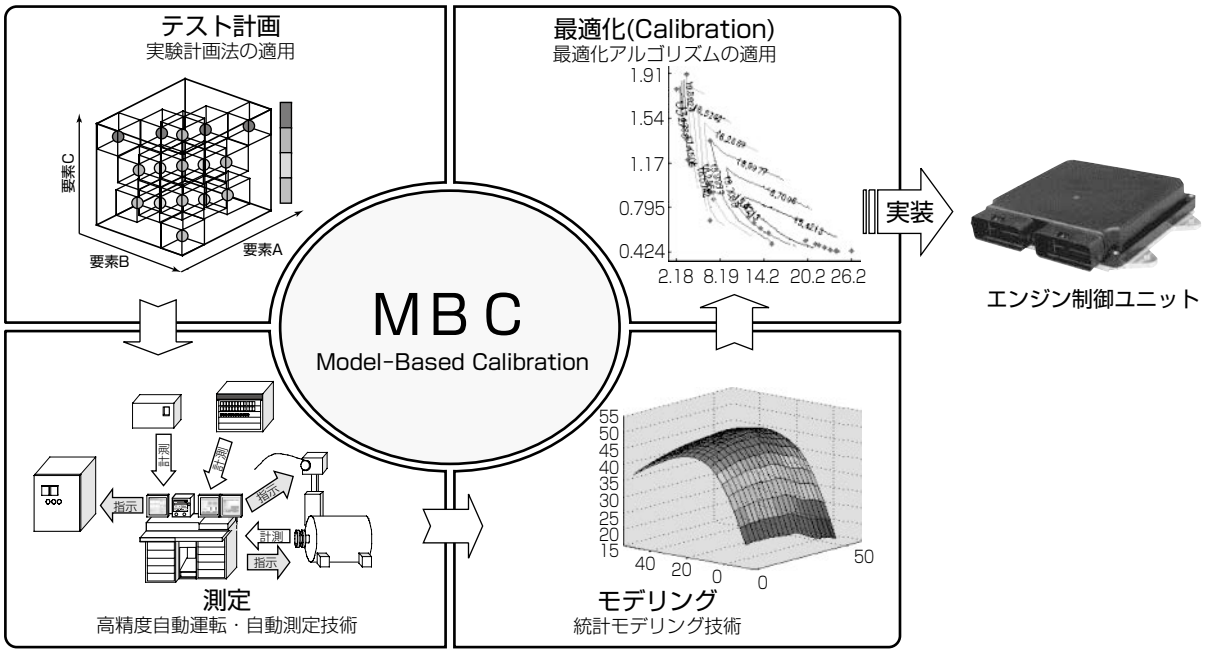
要　旨

大気汚染や原油の枯渇等の環境課題に対応するため，自動車のパワートレインは高性能・高機能化が図られている。それに伴い，EMS(エンジン制御システム)に搭載される制御仕様も肥大化し続けている。同時にその制御パラメータの適合工数も増大しており，実機を用いてパラメータを変更しながら最適な値を探す方法では，工数と品質のバランスが取れた開発が不可能となりつつある。

このような状況の中で自動車業界では，エンジンをプラントモデルに置き換えて，その上で適合を行うモデルベース適合(Model-Based Calibration：MBC)技術の検討がなされてきた。検討初期のプラントモデルは，基本法則を組み合わせて表現する物理モデルと呼ばれるものを利用していたが，この制御系を最適化する適合作業に活用可能な精度を確保したプラントモデルを物理モデルで作成するのは容易ではなく，実用化に至っていなかった。

しかし近年，プラントモデルを実験データに基づいた統計モデルで表現する方法が注目され始め，自動車業界ではスタンダードな方法になりつつある。この方法は，実験データに基づき，対象の特性をモデル化する統計モデル化技術，それを最小限のデータ量で高精度に表現するための周辺技術である実験計画法，高精度データ測定環境及びパラメータの調整を支援する最適化技術で構成される。

本稿では，この統計モデルを用いたMBC技術導入の背景及び概要，そして三菱電機で構築したMBC技術を用いた適合プロセスの改善実証効果について述べる。



モデルベース適合(MBC)技術

従来，実エンジンを用いて行っていたエンジン制御ユニットの制御パラメータ適合を，統計モデルで表現される仮想エンジン上での適合に置き換えることで，品質を悪化させることなく工数の短縮を図り，将来の開発工数増加への対応を実現するためのバーチャル開発手法で，統計モデリング技術を中心に，実験計画法を活用したテスト計画，高精度自動運転・自動計測環境を活用した高精度測定データ収集，最適化アルゴリズムを活用した最適値探索サポートによって実現する。

*姫路製作所

1. まえがき

自動車の普及とともに環境課題(大気汚染や原油の枯渇等)への対応や高度な安全性能の確保等が求められ続けており，その要求は年々高まっている。この要求に対応するために自動車の制御は，様々な要素が電子制御化されており，さらに，電子制御デバイスもマイコンの処理速度やROM(Read Only Memory)／RAM(Random Access Memory)の容量を筆頭に，年々進化を続けている。この結果，制御容量は増大し続けており，開発工数が指数関数的に増大している。

開発工数が増大する要因としては，制御要素の増加又は高度化による制御仕様の複雑化，機能検証工数の増大及び制御仕様に存在する制御パラメータの調整工数の増大によるところが大きい。

パラメータ調整工数低減のため，その調整対象を現物からモデルにシフトさせる取組みを行ってきた。しかし，パラメータ調整(適合)は，開発プロセスにおける終盤の工程であり，現物の特性に合わせて最適化することが目的であるため，モデルに対する要求精度が高くなり，実用化が困難であった。

本稿ではこのような背景の中で近年注目されている制御パラメータ適合プロセスの効率化技術であるモデルベース適合(MBC)技術の概要と当社で構築したMBC技術を用いた適合プロセスの改善実証効果について述べる。

2. モデルベース適合

2.1 MBC手法にいたる背景

自動車用パワートレイン制御は，エンジンのコントローラであるエンジン制御システム(Engine Management System：EMS)を中心に周辺システムと協調させることが多いので，ここではEMSを対象とした事例で述べていく。

2.1.1 EMSにおける定常基本制御

EMSは，エンジンの出力を制御することが主な機能である。自動車用エンジンは内燃機関であり，燃料と空気の混合ガスを燃焼させた熱エネルギーを動力として取り出す。燃料噴射量から始まった電子制御化は，点火時期や吸入空気量(電子制御スロットル)，排気ガス再循環(Exhaust Gas Recirculation：EGR)，吸排気弁の可変化(開閉弁角，リフト量)等，年々複雑化している。これらの要素によるエンジンの燃焼性は単一デバイスで一意に決まるものではなく，すべての要素が相互に影響しあう複雑な関係にある。

2.1.2 従来の適合手法の限界

図1に示すとおり，デバイス(入力要素)が増えるとその組合せ(工数)は指数関数的に増加する。このような状況で行う最適な組合せを探す作業(＝パラメータ適合)は，真の最適値を求めるために，すべての組合せ結果に基づいて判断する必要があり，各組合せで実際にエンジンを順次運転しながらデータを収集しなければならない。しかしこれでは製品の開発期間が長くなるので，適度な組合せを選定して評価せざるを得ない。その場合，最適化結果が真の最適値であることの保障ができず，適合品質の低下につながってしまう。このように，制御パラメータの適合エンジニアは相反する品質と開発期間のバランスに常に悩まされてきた。

2.2 課題解決に対するアプローチ

2.2.1 プラントモデル上での適合への転換

この相反する課題を解決するためには従来の手法を大きく転換する必要があり，自動車業界では様々な取組みがなされてきた。その中でも大きな効果が期待されるのがシミュレーション技術を活用する方法である。これは制御対象をプラントモデル化し，そのプラントモデル上で制御パラメータの適合を行うというものである。

しかし，我々が制御対象とするパワートレイン，その中でも特にエンジンの応答特性は非線形であることが多く，この非線形な特性を各種基本法則に基づくモデル(ホワイトボックスモデル，又は物理モデルと呼ばれる)を用いたプラントモデル化は，影響因子の多さから計算量が膨大となることや，物理モデルを構成する理論式には観測困難な因子を含むこと等から容易ではなかった。

一般的に物理モデルは，特定の状態を仮定することによって複雑化する問題を回避しており，細部で現物との相違(＝誤差)が生じる。制御パラメータの適合を対象としたプラントモデルとしては，この誤差が許容できなかった。

2.2.2 統計モデルの活用

このような状況のもと近年では，プラントモデルに統計モデルを適用する事例が注目を集めてきている。統計モデルは実験モデルとも呼ばれ，観測結果に基づき入出力の関係を近似式で表す手法である。この観測結果には分離困難な因子も含んでおり，それを基に数式化された統計モデルは物理モデルに比べて現物との誤差を少なくできる特長がある。

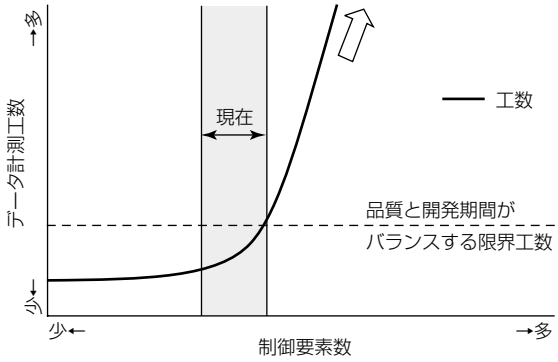


図1．制御要素数とデータ計測工数の関係

2.3　MBCを構成する要素技術

MBC手法を簡潔に表現すると，プラントモデルを用いた制御パラメータの適合手法のことであり，**図2**に示すように，統計モデルによるプラントモデル化技術と，そのプラントモデルを少ない工数で高精度に表現するための周辺技術(実験計画法，自動運転・自動計測)，そしてパラメータ最適化支援技術(最適化アルゴリズムの適用)によって構成されている。これらの技術について，次に述べる。

2.3.1　統計モデリング技術

統計モデルは，実験データに基づいて入出力の関係を近似式で表したものであり，適切な近似式の選択が重要となる。対象とするプラント(ここではエンジン)は非線形かつ多入力であることが多く，高次多項式で表現できる事例は少ない。そこでMBC手法では，放射基底関数(Radial Basis Function：RBF)や確率過程モデル(Stochastic Process Model：SPM)等を用いる例が多い。

図3に実験データに基づいて統計モデル化した例を示す。この図で，ドットで示すものが実験データ，面で示すものが統計モデル(関数近似した結果)である。

このモデルの品質が最終的な制御パラメータの適合品質を決定付けるため，モデル生成段階での妥当性検証が非常に重要となる。妥当性は精度とモデルの複雑さで検証する。良いモデルは必要最小限の変数で特性を表現できていることが望ましく，この検証手法を構築することがMBC運用上のポイントであり，ノウハウが必要な部分である。

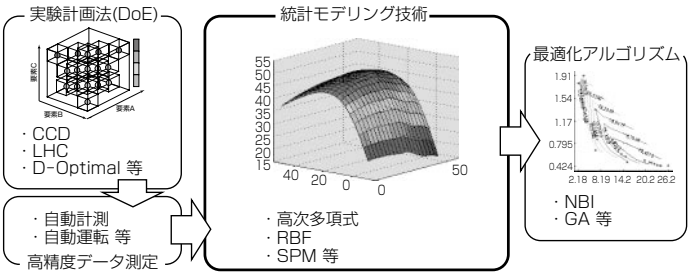


図2．MBC構成要素と処理フロー

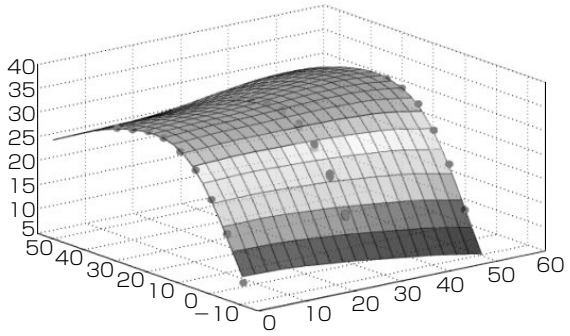


図3．実験データに基づく統計モデルの例

2.3.2　実験計画法

統計モデルの生成に使用するデータの計測条件を設定するのに，実験計画法(Design of Experiments：DoE)を適用する。

従来の計測は，エンジンの運転状態をすべて網羅しつつすべての組合せを計測する，いわゆる古典的手法の一つであるFull Factorial(Full Gridとも呼ばれる)手法で行っており，制御要素数(＝入力因子数)が増加すると計測点数が累乗で増えていく問題があった。MBC手法ではこの問題を克服するために，中心複合計画(Central Composite Design：CCD)やラテン超方格(Latin Hyper Cube：LHC)，D最適化(D-Optimal)等の適用が提唱されており，モデル化手法やモデル対象の特性に合わせて最適な手法を選択する。この実験計画法の適用によって計測段階での工数は，上記従来手法に対して50～80%の削減が可能である。

2.3.3　高精度データ測定

一般論として計測データには誤差が存在するが，この誤差は十分なサンプルが存在する場合には影響が小さくなることが知られている。MBC手法では最低限の計測数とするため，一つの誤差による全体への影響度合いが高まる。そのため可能な限り誤差のない計測環境でデータを収集することが望ましく，それを実現するために次の要素を取り入れている。

(1)　高精度な計測機器を使用した統合計測制御環境を実現する自動計測設備の適用

(2)　テスト条件の再現性や繰り返し性を実現する自動運転設備の適用

これらの設備を活用した高精度自動運転・自動計測環境を当社姫路製作所に整備した。

2.3.4　最適化アルゴリズム

コンピュータシミュレーションによって従来手法と比較して短時間で特性データの取得が行えるため，従来のエンジンで実際に運転を行いつつ最適な組合せを見つける作業をコンピュータ上での作業に置き換えるだけでも作業時間の短縮につながる。しかもこのような膨大なデータの処理はコンピュータが得意とする作業であり，作業を自動化することによって更に効率化を図ることができる。

この実現に，NBI(Normal Boundary Intersection)法や遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm：GA)等の工学的最適化手法を適用する。これらの最適化手法の中から，目的変数の数や制約条件の状態，又はモデルの傾向に応じて最適な手法を選択する。

実際には，燃料消費率が低く排気ガスも少ない等，目的変数の数は2つ以上あることが多く，さらに，その目的変数の結果はトレードオフの関係にあることが多い。そこで，パレート解と言われる目的変数ごとの最適解と，双方の結果がバランスする組合せを数点(候補)生成し，適合エンジ

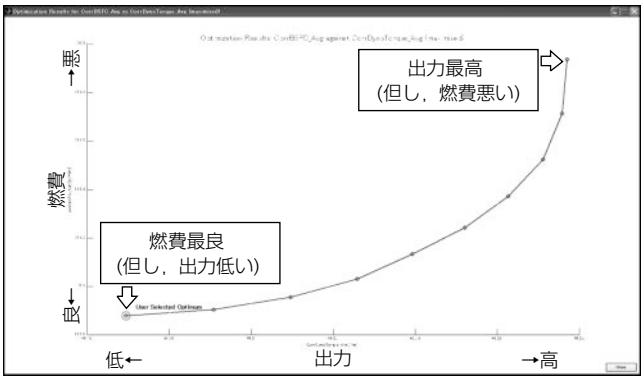
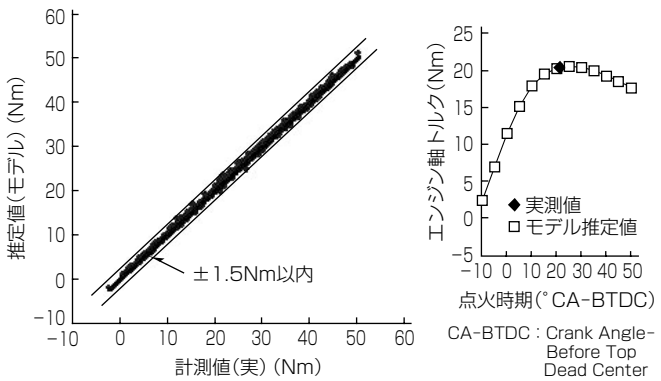


図4．パレート解の例



(a) 計測値とモデル推定値　(b) 代表点の特性

図5．モデル精度の検証例

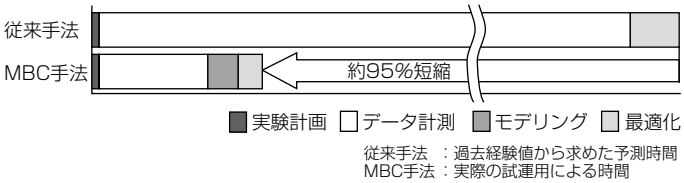


図6．MBCによるパラメータ適合時間削減効果

ニアによって生成された候補からエンジンの性格(味付け)に応じた選択を行うことで効率的に適合ができるように工夫している。**図4**にパレート解の例を示す。

3. MBC手法による効果

3.1 統計モデル精度の検証結果

当社が構築したMBC手法でエンジン特性をモデリングした際の結果について述べる。**図5**(a)は，エンジン軸トルクの計測値(横軸)とモデルの推定値(縦軸)をプロットしたものであり，推定精度の評価ができる。これを見ると，推定誤差は±1.5Nm以下と高い精度でモデリングできていることが確認できる。

また，**図5**(b)は，実験計画法で生成した計測点ではない運転状態での点火時期(横軸)に対するエンジン軸トルク特性(縦軸)を，実測値とモデル推定値でプロットしたものである。この比較から統計モデル生成時に基準とした点以外の領域，すなわちモデルの予測精度を検証することができる。この例ではモデル予測値と実測結果が一致しており，モデルの精度は十分であることが確認できる。

これらの結果から，このモデルは十分有効なモデルであると判断できる。

3.2 MBC技術適用による工数削減効果

この手法による制御パラメータ適合工数の削減効果を**図6**に示す。入力因子(状態要素と制御要素)を6要素(エンジン回転数，吸入空気量，空燃比，吸気弁開弁角，排気弁開弁角，点火時期)のエンジン基本制御マップを対象とした場合の適合工数(時間)の比較である。従来手法はFull Factorialで行った場合の工数であり，これに比べて今回構築したMBC手法では，データ計測工程で大幅な工数削減効果が得られていることが分かる。

このように，当社は，高品質な適合結果を短期間で提供できる制御パラメータの適合手法であるMBC技術を構築した。

4. む す び

年々複雑化し，将来的に現実的な工数での開発が困難と予想される自動車パワートレインの制御パラメータ適合を，統計モデルをベースとしたバーチャル開発にシフトして大幅に工数を削減する手法であるMBC技術に対する要素技術の開発めど付けが完了した。

しかしながら現時点のMBC技術は，自動車パワートレイン制御パラメータ適合項目の内の定常基本パラメータの適合を対象としたものであり，適合項目全体のごく一部にとどまっている。また今回開発した定常対応MBC技術自体も当面の工数増加に対応できる見込みが立ったに過ぎず，さらに将来の制御要素増大に向けた改良が必要である。

今後は，現在構築した技術を更に磨き上げつつ新しい技術の適用を模索していくとともに，この技術の適用範囲を広げ，製品の品質を損なうことなく更なる開発効率の改善を図り続けることで，自動車を取り巻く環境要求に応える製品をタイムリーに市場に提供していく。