

Feature Article

アプリケーション

ECU自動適合ツール STARS Calibrateのご紹介

Introduction of ECU Calibration tool, STARS Calibrate

塩見 和広

Kazuhiro SHIOMI

今日の燃費向上の要求に加え、清浄な排気ガスと高い商品性をも両立させるために、エンジンの制御は年々複雑となり、ECU(エンジンコントロールユニット)というコンピュータで制御されている。複雑化の例としては、可変バルブ技術の導入や、ガソリンエンジンの直噴化・ディーゼルエンジンのコモンレール化などがあり、このような制御の対象の飛躍的に増大に伴い、これらを運転状態によっていかに最適制御するかがエンジン性能を大きく左右するようになってきている。そのため、この最適値の決定作業＝「ECU適合作業」が開発の大きな負荷になっており、効率化が強く求められている。本稿では、この作業を効率的に行うための「ECU適合ツール」である「STARS Calibrate」を紹介する。本製品は弊社と世界的なエンジニアリング会社であるRicardo社で共同開発したもので、特にそのDoE部分はRicardo社の「Efficient-Calibration (η CAL)」ツールを使用している。

The control of engine is becoming more complicated over the years for balancing clean exhaust gas with high merchantability in addition to the fuel mileage improvement demand today and is controlled by the computer, ECU (Engine Control Unit). As the example of complexes, there are the implementation of Variable Valve Technology, Direct Injection to Gasoline Engine/ Common-Rail Injection to Diesel Engine and so on went with the exponential growth of those control targets, and how optimize the control depending on driving conditions will give the large influence on engine performance. Therefore, the decision making work on the optimum value, [ECU Calibration task], is becoming the large burden of development and making efficient of the development is strongly requested. The [STARS Calibrate] which is [ECU Calibration Tool] for performing the work efficiently is introduced in this paper. This product is joint developed by HORIBA and Ricardo who is global engineering company, and especially its DoE part is coming from their “Efficient Calibration (η CAL)” tools.

はじめに

現代の自動車用内燃機関は、良好な燃費と清浄な排ガスならびに商品性の両立が必須の要件となっており、火花点火と圧縮点火を問わず電子制御により制御パラメータを変更し、最良の性能を引き出している。また、燃料の噴

射やバルブタイミングをはじめとして、電子制御により最適化されるパラメータの数も年々増加しており、この最適化の作業(適合作業)に要する工数が増大するとともに、従来のエンジニアの経験や勘に頼ったやり方では十分効率的に適合を行うことが困難となってきている。

このような課題を解決する手段として、1990年代より

ECU適合ツールと呼ばれるソフトウェアが導入されはじめ、現在の車両開発においては広く使われるようになって来ており、産業用エンジンにおいても、このようなツールの有用性が確認され始めている。本稿では、このECU適合ツールについてHORIBAグループがRicardo社と共同開発した製品である「STARS Calibrate」の紹介と合わせてその基本原理と効果について説明する。

現在の適合ツールの基本動作

適合ツールが使われだした当初は、従来人間が行ってきた適合作業手順をそのまま自動化する形が採られた。すなわち、実際のエンジンベンチにおいて、計測と制御パラメータの変更を行いながら最適点の探索を行っており、手順の一例としては以下のような形となる。

- (1) 各々の変数について、できるだけ少数の組み合わせを選んで最初の計測を行う。(スクリーニング)
- (2) 次にその中の最適点を出発点とし、より良好な性能を得られる変数の変化方向(ベクトル)をこの点の周りに各々の変数を変化させて計測を行うことにより求める。
- (3) ベクトルに沿って変数の組み合わせを変化させ、この線上での最適点を求める。
- (4) (2)に戻って、性能が飽和状態になるまで繰り返す。

ところが、複雑な最適化対象にこれを適用しようとするときさまざまな課題が発生する。たとえば、ステップ(2)において、複数目的で最適化を行おうとした場合には、この複数の目的間にトレードオフ関係があることが多く、最適な変化の方向が定義しにくい。あるいは、計測結果そのものにノイズがあるため、ベクトル方向が定まらない等の課題が発生する。さらに、パラメータ相互の依存性がある場合さらにこの課題は複雑化することになる。

そこで、これらの課題を解決するものとして、モデルベース適合(Model Base Calibration: MBC)という手法が提案され、これが現在の適合ツールの主流となっている。この手法のエッセンスはエンジンの性能を実測結果に基づいて「数学的なモデル」で表現することで、いかなるパラメータに対しても、エンジン性能を机上で推定可能とし、これに基づいて机上で最適化を行うという点である。具体的には、Figure 1のようなステップを踏んで最適化を行うことになる。このことにより、モデル化のステップで

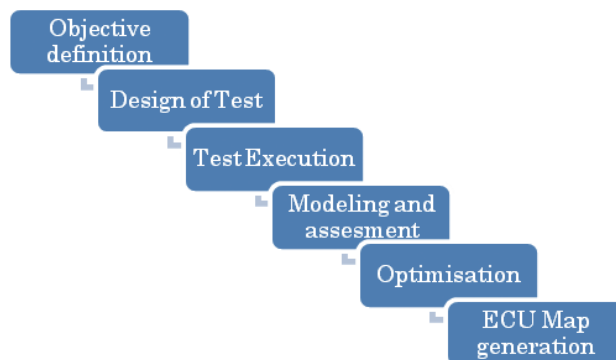


Figure 1 Steps of Optimization Based on MBC

計測のノイズを除くことができる、モデルを使用することで一つ一つの運転条件に対するエンジン性能が実ベンチの計測に比べてはやいためトレードオフ等の検討が容易となるなどの効果を得ることが可能である。以下の章では、この様なMBCに基づく最適化について、各ステップごとに説明を行うこととする。

適合内容の定義：Objective Definition

「ECUの適合」と言った場合、広義には、回転数と負荷が一定な「定常状態」におけるエンジン性能の最適化だけではなく、加減速等の「過渡状態」も含めた最適化、さらには現代の自動車に義務付けられている「自己故障診断機能(OBD)」に対する合わせ込みなど非常に広い範囲が含まれる。この中で、現在もっとも自動化が進んでいるのは、エンジンが定常状態で最適なエンジン性能を出すためのECUのパラメータの最適化(定常適合)であり、本稿ではこの部分について説明する。適合内容の定義とは、具体的には次の各項目を定義することを指す。

- (1) 目的関数の定義：最適化を行いたい性能とその方向(望小・望大)を定義することであり、たとえば燃料消費率の最適化、トルクの最大化などがあげられる。
- (2) 変数の定義：最適化を行うに当たって、どのようなエンジンの運転条件を変化させるかを定義することで、例としては点火タイミング、吸気・排気のパルブタイミング、燃料の噴射タイミングなどがある。
- (3) 制約条件の定義：最適化を行うにあたって、エンジン性能または変数の範囲をどこまで許容するかを定義を行う。対象がHC排出量や燃焼の変動率などエンジン性能である場合、目的関数と混同されることがあるが、目的関数の場合には望小・望大特性となるのに対し、制約条件はある値以

下・以上もしくはある値を取ることが条件となる点が異なっている。

- (4)最適化する運転条件の定義：実際に最適化作業を行うためには、離散的な回転数と負荷の組を定義してやる必要がある。このような回転数と負荷の組の実例としては、乗用車がJC08などの規制モードを走行した際の走行頻度を解析して得られるモードの代表点の組などが通常用いられる。

この部分はツールではなく、主にエンジニアが判断することになる。

試験計画 Design of Test

エンジンの性能を「数学的なモデル」で表現するためには、パラメータの組合せによって定義される離散的な運転条件において、実際にエンジンを運転してその時のエンジン性能を測定する必要がある。この離散的な運転条件の組を生成する作業を試験計画と呼んでいる。直感的にわかるように、この運転条件の組が多ければ多いほどモデルを作成するための情報は多くなり、モデルの精度は向上する。しかし、実際のエンジンにおいて、十分安定した条件でエンジンの性能を測定するには、ある運転条件から次の運転条件まで移行する時間も含めて考えると1点当たり、数分から場合によっては10分以上かかることになり、むやみに多数の点を計測することはできない。たとえば、古典的な試験計画の一つであるFull Factorial (要因実験 総当たり法)を考えた場合、次の表にあるように、実験点数はパラメーターつ当たりの水準の数：Lとパラメータの数nを使って

$$\text{実験点数} = L^n$$

となり、5水準で6変数の場合15,625点となり、到底試験不可能な個数に達してしまう。

今日のエンジンは、吸排気バルブのタイミングやリフトの

Table 1 Experimental Score in the Case of Full Fractional 5 Levels

Number of parameters	Number of experiments
1	5
2	25
3	125
4	625
5	3125
6	15625

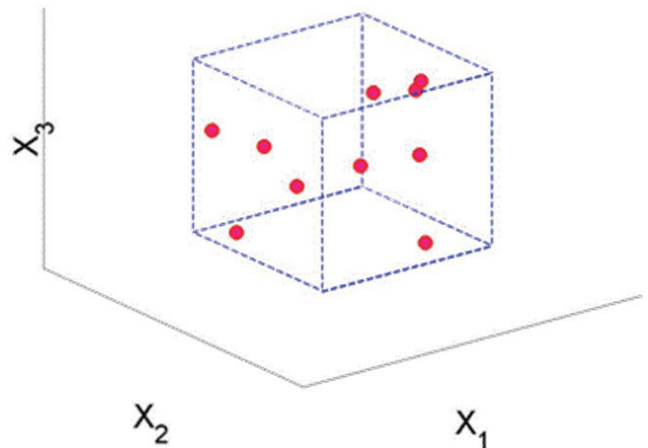


Figure 2 Image of Latin Hyper Cube

可変化、ガソリンエンジンの直噴化やディーゼルエンジンのコモンレールを採用等により、パラメータは容易に6個程度の数は超えてしまう傾向にあり、このような試験計画はもはや現実的ではない。このような課題を解決するために生み出されたのが実験計画法(DoE: Design Of Experiment)と呼ばれる手法であり、精度良い結果を効率的に得られるような実験を設計し、その実験で得られた結果を解析して結論を出すような手法である。MBCの場合、どのような試験計画を行うかはモデリングにおいてどのような手法を用いていくかということと密接な関係があり、「STARS Calibrate」では、モデリング手法であるSPM(後述)との相性を考え、Space Filling(空間充填法)の一種であるLatin hyper cubeという手法を用いている。この手法は与えられた空間をランダムに満たす手法で、3次元空間を例にとれば、Figure 2のようなイメージで実験点を生成することになる。

Full Factorialと異なり、実験点の数は数学的に一意に求まるわけではなく、モデリングの精度との関係で決定していくことになる。「STARS Calibrate」では、Ricardo社での経験に基づいて、パラメータの数に基づいて、推奨する試験点数を自動で演算する機能も備えている。実際には、モデル化しようとしているエンジン性能の複雑さによりこの点数は変更が必要な場合があるが、パラメータの数が多いほどFull Factorialとの実験点数の差は大きくなり、6パラメータの場合、1/100~1/200まで実験点数を減少させる可能性も持っている。また、実際のエンジンの運転領域はこのような「立方体」形状ではなく、たとえば、低負荷領域では安定した運転が可能なバルブタイミングの範囲が狭められるなど複雑な形状となることが多いが、そのような場合でも全く問題なく試験計画を定

義できるという特徴も持っている。

試験の実行 Test Execution

前ステップで試験計画が出来上がったので、実際の試験を行い、エンジン性能を測定することになるが、従来のエンジンの試験とはいくつか異なった部分がある。その一つは、実験の精度を従来以上に要求することである。DoEに基づいて実験点を最小化し、その限られた計測点に基づいて「数学的なモデル」を作っていくわけであるから、一つ一つの実験結果の精度の結果への影響は従来以上に大きくなる。また、従来のように、エンジンの最適化をエンジンベンチ上でパラメータを変えながら行っていた際には、直前のパラメータの組合せの計測結果と良し悪しを比較するので、極論すれば「相対評価」が出来る精度でよかったものが、「絶対評価」出来る精度を要求することになる。そのため、エンジンの組み立てやす合わせ運転の方法、温調装置や吸気の供給装置をはじめとする周辺装置、排気ガスや燃焼の測定装置の各々に精度を要求することになる。これらをECU適合ツール側で解決する手段として、実験の途中で装置のパーズや校正を行うことが有効であるが、「STARS Calibrate」では、試験エディタ上のドロップダウンボックスなどの容易な手段でこのような動作を設定することができる。また、試験計画に基づいて、パラメータを変更した後、実際の性能の計測を行う前には、一般には安定待ち時間を設けているが、計測精度を優先するあまりこの時間を長めに設定すると、一点当たりの計測時間が長くなり、実験効率が低下してしまう。この相反する要求を高い次元で両立させるため、「STARS Calibrate」では単純に時間によるのではなく、計測項目が安定したことを確認してから計測を開始できるような機能も標準で搭載している。

もう一つの課題は、試験計画で定義した運転条件が、実際には、エンジンの失火、ノッキング、排気温度の過昇などにより運転できない可能性があるということである。通常の自動運転では、このような条件が発生した場合、試験を中断し、エンジンを停止させることが一般的である。ところが、MBCによる実験では、DoEにより最適化されているとはいえ、多数の実験点を運転する必要がある、そのたびに実験が停止し運転者が介在

するのは非常に効率が悪くなる。「STARS Calibrate」では、このような課題を解決するためにあらかじめ設定した手順に従って、

- (1) 運転が困難なポイントの計測を中断し、次のポイントを計測する
- (2) または、運転が困難なポイントについて、試験計画で定義したパラメータの組の代わりに実験可能なパラメータの組合せを探索し、その代替条件で計測する

等の機能を備えており、実験者が介在することなく効率的に自動で試験を継続することを可能としている。

モデルの生成と検証 Modeling & Assessment

すでに述べたとおり、MBCにおいてモデルの生成は心臓部と言える。エンジンの開発において「モデル」といった場合、様々な意味があるが、MBCにおけるモデルとは純粋に「数学的なモデル」であり、物理現象や化学現象をシミュレーションするわけではない。モデルは、しばしば応答曲面(Response Surface)という名前でも呼ばれており、その本質は、昔エンジニアが離散的な実験結果を雲形定規で結んでいたものに近いともいえる(Figure 3)。このMBCにおけるモデルには、一般的に以下のような特徴がある。

- (1) モデルは、燃料消費率やHCなどの排気ガス濃度などの個々のエンジン性能に対して各々別個に生成する
- (2) モデルは実験結果を折れ線ではなく、何らかの

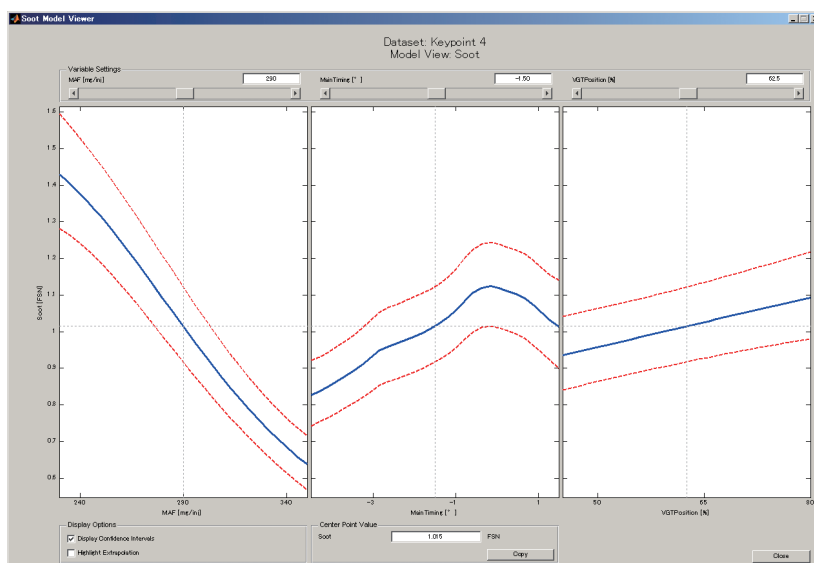


Figure 3 Display Example of Model Prepared with 3 Parameters
(図中青実線がモデル、赤点線は信頼性区間)

滑らかな曲面で結んでいる。

- (3)そのため、生成されたモデルは実験結果のポイントそのものを通るとは限らない。このことにより、実験結果のノイズに左右されすぎない本来のエンジン特性を表現できる可能性がある。
- (4)雲形定規と異なり、パラメータに関して多次元の方角で面を作ることができる。そのため、最新のエンジンのような多数のパラメータを取り扱うことができる。

この滑らかな曲面の生成の方法として、当初は取り扱いの容易さと計算負荷から2次の多項式が採用されていた。ところが、エンジン性能の中には、ノッキングや燃焼変動率(CoV)など、途中から急激に性能が変化しだす物があり、最近のエンジンではパラメータの増大と合わせて、2次の多項式では十分に実用的な近似を得ることが難しくなっている。この課題の解決法として、ニューラルネットワークやRBF(Radial Basis Function)などの手法を用いるものもあるが、十分に実用的な精度を得るには、モデリング条件を注意深く合わせてやる必要があり、実験者の使い勝手という面では課題があった。それに対して、「STARS Calibrate」では、Ricardoで実績のあるSPM(Stochastic Process Models)というモデリング手法を用いている。これは「Kriging」や「DACE (Design and Analysis of Computer Experiments)」として知られる統計的な手法の発展形であり、以下の特徴がある。

- (1)ノイズの多い計測結果でも比較的良いモデリング結果が得られる
- (2)特に実験点数が多くない場合でもほかの手法に比べて精度が出しやすい
- (3)途中から急激な変化をおこすような非線形性の高いエンジン性能もモデリング可能
- (4)設定が簡単で誰でも精度のよいモデルが得やすい

このうち、途中から急激に変化するようなエンジン特性への適合性について2次の多項式と比較した結果をFigure 4に示す。

なお、このようにして生成したモデルを用いて次ステップである最適化を行うわけであるが、モデルの精度がそのまま最適化の精度を左右することになるので、モデルを作成したら、その精度を評価し、必要に応じ、異常計測値の削除などのモデルの調整を行ったり、場合によっては

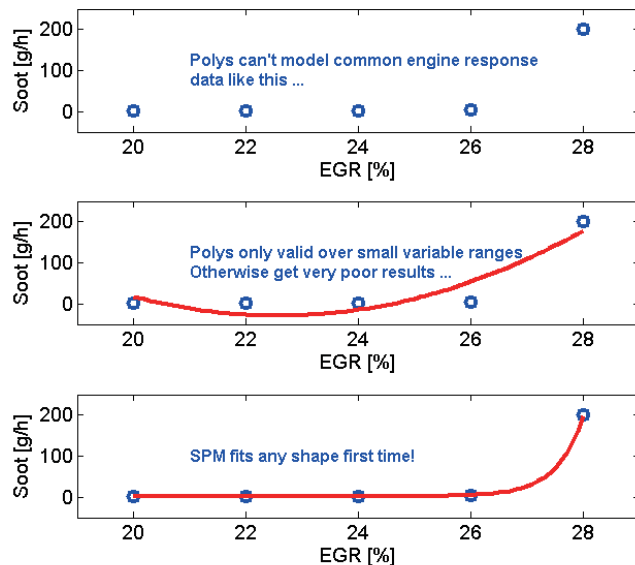


Figure 4 Model Comparison by Quadratic Equation and SPM

実験点数の増大や試験精度を向上した再試験をしたりといった対応が必要となる。「STARS Calibrate」では、このようなモデルの精度の評価手段として、決定係数(R²)・二乗平均誤差(RMSE)などをモデルと実測値の間だけではなく、交差検定結果に対しても計算するようにしている。加えて、モデルと実測値の差：残差をグラフィカルに表示する機能も備えることで、そこから直接に異常計測結果の除外等の操作を行い、モデルの作り直しを行うことができる。

最適化 Optimization

MBCにおいて最適化とは、前ステップで作成したエンジン性能の「数学的なモデル」を用いて、有限個数のエンジンの運転条件(エンジン回転数、負荷)において各々最適なパラメータの組合せを決定することである。その際に、モデルを作成したことにより、どのようなエンジンの制御条件(パラメータの組合せ)に対しても瞬時にエンジン性能が演算できるため、エンジンベンチ上で実エンジンを運転するよりも幅広い組み合わせについて短時間に検討を行うことができ、多数のパラメータ間やエンジン性能間の相互影響も適切に評価することができる。この相互影響の評価の例として、目的関数が複数の場合に、旧来の最適化ツールは、下記の例のような「評価関数」という概念を導入し、複数目的最適化問題を単一目的最適化に置き換えて解析していた。

$$\text{評価関数} : Q(\text{HC}, \text{NO}_x) = \text{HC} + k\text{NO}_x$$

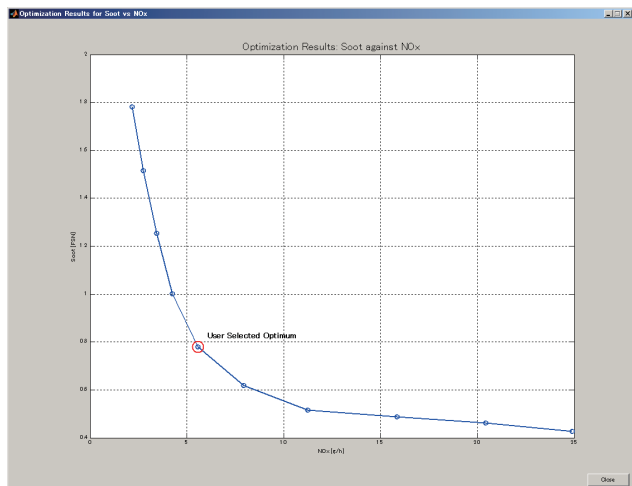


Figure 5 Pareto Solution Display of Double Objective Function (図中青実線がパレート解, 赤丸がピックアップした最適点)

しかし、この旧来の評価関数は、確かにトレードオフを示しているが、係数kの選び方によって最適解が異なってしまうことであり、kを「適切に」設定することが困難だという課題を抱えていた。そのため、最新のMBCツールの多くがFigure 5のようなパレート解を提示し、そこからエンジニアが最適点をピックアップするようになっている。これにより、どこまでの範囲であれば他方の性能を著しく悪化させずに一方の性能を改善できるか直感的に判断できるようになっている。

「STARS Calibrate」では、このパレート解の生成にはNBI法(Normal Boundary Intersection)を用いており、GA(遺伝的アルゴリズム)を用いる手法と比べて、極めて簡単な設定で十分に実用的なパレート解を求めることが可能である。この基本的な条件に加えて、実際のエンジンの最適化においては、目的関数以外にも考慮すべきことが多い。「STARS Calibrate」においては、下記の要件についても考慮した最適化を行うことが可能である。

- (1)パラメータ変更範囲の制約：たとえば、バルブタイミングの変更範囲がある範囲に絞って最適化を行うことが可能。
- (2)応答曲面の値の制約：前ステップでモデルを作ったエンジン性能、たとえばノック強度や燃焼変動率(CoV)の上限を考慮した最適化が可能
- (3)モード全体の最適化：複数の

定常条件の重み付け積算モード(例：重量車両や汎用エンジンの排気ガス規制モード等)に対して、モード全体の制約条件、たとえばモード積算のHC等の排出量の上限值を考慮した最適化が可能

ECUマップの生成 ECU Map Generation

エンジンの定常適合の最終的な成果物は、最適化されたECUのマップである。ECUマップとは一般に二次元のルックアップテーブル(表)であり、縦軸：エンジン回転数、横軸：エンジンの負荷に対してパラメータの値を定義しており、ある運転条件(エンジン回転数、負荷)の条件でパラメータの値をどうするかを定義している。前ステップの最適化結果により、各々の運転条件において、個々のパラメータの値をいくつにすればよいか分かっていて、この結果からECUマップを生成する。その際に、このルックアップテーブルの縦軸の行数と横軸の列数は各々数十に及ぶことがあるので、格子点の数はこの二つの掛け合わせにより、数百に及ぶことがあるが、このそれぞれの格子点に対してパラメータの値を決定する必要がある。それに対して、一般的には最適化した点の数はそれよりもずっと少ないことが多く、この最適点の間は内挿(外挿)することによりすべての格子点の値を決定する。「STARS Calibrate」では、この補間関数には一般的なSpline関数とSPMのいずれかを選択して用いることができ、比較的少ない最適化結果から効率的に格子点のパラメータの値を滑らかに生成することが可能である(Figure 6)。

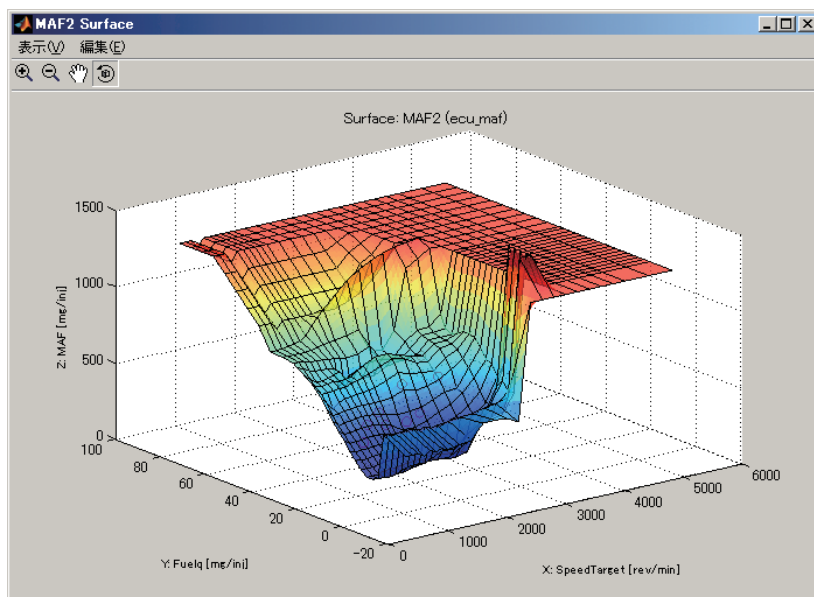


Figure 6 Example of Optimized ECU Map (縦軸：エンジン回転(Speed), 横軸：燃料流量(Fuelq), パラメータ：空気量(MAF2))

また、実際の最適化はエンジンのすべての運転領域を一回で行うことは少なく、たとえば中程度の回転数と中程度の負荷の範囲など、領域を限って順次行うことが多いため、最適化結果をもとのECUマップのこの部分にだけ反映し、それ以外の部分は元のマップのままとすることも可能である。最終的に生成されたマップは一般的なCSV形式やECU専用のフォーマットであるDCM等の形式で保存、エクスポートすることも可能である。

まとめ

近年のエンジンの複雑化により、ECUの適合はMBC（モデルベース適合）と呼ばれる手法を行うことで効率化を図ることが多くなっており、当社がRicardo社と共同で開発した「STARS Calibrate」はこの手法に基づく開発ステップを一貫してサポートしている。この「STARS Calibrate」ツールにより、ECUの適合は以下の諸点で効率化を行うことができる

- (1) DoEに基づく試験計画により、実験点数を最小化することができる
- (2) 実験精度の確保と運転の継続性を考慮した自動試験によりエンジン実験の省人化と短縮化が図れる
- (3) 簡単な設定で十分な精度を出すことができるモデリングと最適化の手法により、導入当初から、あるいは人によらず、精度よく運用できる

特に特長的なのは、(3)項にあるように、SPMをはじめとする最新の手法を採用することにより、ユーザーに複雑な設定を要求せずとも十分な精度を提供できることであり、ぜひお使いになっていただきたいと思う。



塩見 和広

Kazuhiro SHIOMI

株式会社 堀場製作所
経営戦略本部 自動車計測事業戦略室
Powertrain ビジネスオーナー
マネジャー