

Model-based Development Methods

モデルベース開発手法

執筆者

Stefan Hoffmann 氏

ドイツ、リュッセルスハイム

Hyundai Motor

Europe Technical

Center Gmb

先進ディーゼル

燃焼開発グループ

チーム管理担当

Michael Schrott 氏

ドイツ、リュッセルスハイム

Hyundai Motor

Europe Technical

Center GmbH

ディーゼルエンジン

燃焼開発プロジェクト

上級エンジニア

Thorsten Huber

および **Dr.-Ing.**

Thomas Kruse

ETAS GmbH

モデルベース適合製品

マネージャ

最新のエンジン適合の鍵

実験計画法（DoE）およびモデルベースのパラメータ最適化は、複雑なエンジン管理システムを使いこなす鍵です。以下のレポートでは、モデルベース開発の手法が最新のエンジンの適合をいかに合理的にサポートできるかについて、Hyundai 社と ETAS がご紹介します。

CO₂ および排ガスの規制が厳格化され続けているのに対応して、エンジン管理システムも徐々に複雑化しています。その結果、システム全体の中で最適化を必要とする適合パラメータは絶え間なく増加し続けています。同時に、メーカーは熾烈な競争により開発サイクルの短縮と開発コストの削減を強いられています。このような状況の下で最高の乗り心地、高いダイナミクス、および低排出性を実現するエンジン適合を行えるようになるためには、コンピュータを使う新しい適合手法で従来の適合手法¹を補う必要があります。

ドイツのリュッセルスハイムにある Hyundai Motor Europe Technical Center GmbH (HMETC) のエンジニアたちは、すぐにこの必要性に気づきました。パワートレイン開発では、2005 年以降自動化のレベルを上げてきたのに加えて、実験計画法（DoE）およびモデルベース最適化の手法をより多用するようになりました。初期のソリューションは使いやすさに欠けていたうえ、エンジン開発プロセスの全ステップをカバーできていなかったため、その受入れは著しく阻まれていました。

しかし、ETAS ASCMO2 ソフトウェアの導入がこの局面を打開しました。このソフトウェアは、プログラム構造とユーザーインターフェースがモデルベースの ECU 適合に合わせて作られているだけでなく、経験の乏しいユーザーをサポートする便利な機能も備えています。一例として、以下の項では HMETC パワートレイン部門の試作エンジンプロジェクトにおいてこの新しいソリューションを利用した様子をご紹介します。

プロジェクトのシナリオ

テスト対象は 2.0-l という、試作エンジンハードウェアを搭載する 4 気筒ディーゼルエンジンおよび ECU ソフトウェアでした。テストを開始する時点で、それまでの適合で Euro 5 排出基準にはすでに対応していたので、テストの目標は DoE ソフトウェアを使用してエンジンの燃費をさらに低減することでした。

そのためには、以下の適合パラメータについて最適なバランスを見つけることが重要でした。

- エア質量 / EGR レート
- 噴射開始時
- スワールフラップポジション
- 低圧 EGR 調整用排気背圧フラップポジション
- 給気圧
- レール圧

これに関連する目標変数は以下のとおりです。

- 燃料消費量 (CO₂)
- 粒子質量 (soot)
- 亜酸化窒素 (NOX)
- 炭化水素 (HC)
- 一酸化炭素 (CO)
- 燃焼騒音レベル (dBA)

すべてのテストがエンジンテストベンチで行われ、続いてエミッションシャーシダイナモメータによる車載検証が行われました。基本計測ランの実行中に、最適化の基準値として CO₂ 値が計測されました。図 1 に示すように、NEDC テストにおけるエンジン回転数のドウェル時間および負荷に基づき、最適化を行うのに適した動作ポイントが得られました。

テストベンチにおけるデータ取得の計画

テストの計画に使用される DoE モジュールは、ワークフローを 8 個の扱いやすいステップに分割します。有益な機能により、選択された入力変数を使用して計測ポイントを容易に圧縮することができます (図 2)。今回の場合、計測ポイントはエア質量が小さめの領域に圧縮されました。なぜなら、計測の不正確さが増大していくことに加え、高い EGR レートに起因してこの領域の物理的依存関係も平坦でなくなると予想されたからです。

また別の機能を使用すると、テストプランを変数のセクション (「ブロック」) に分割することができます。十分な数の計測ポイントが設定されると、各ブロックはモデリングのために最適な分布を提供します。その結果、テストベンチにおけるライブ計測では、必要なモデル品質に達したかどうかを各ブロックの実行後すぐに判断できるので、テストランを早く完了することができます。これにより、計測にかかる時間および労力を大幅に減らせる可能性があります。一例として、図 3 では煤煙数のモデリング精度を、モデル生成用の計測ポイント数の関数として示しています。

重要な要素：生データ分析

計測データが収集されたら、次のフェーズは生データ分析です。多くの場合、これが最も重要なデータ評価ステップになります。問題のある計測値およびドリフトを識別できるだけでなく、最適化の可能性に対する見解をも、もたらします。この DoE ソフトウェアはこのプロセスを非常に効率良くサポートします。ユーザーは対話型ダイアグラムを使用して、適合パラメータや目標変数を互いに関連させて表示し、さらに、たとえば目標変数が最適値を示す領域を特定することができます。これにより、計測データを目視で効果的に評価でき、パラメータの適切な組み合わせを明確にします。

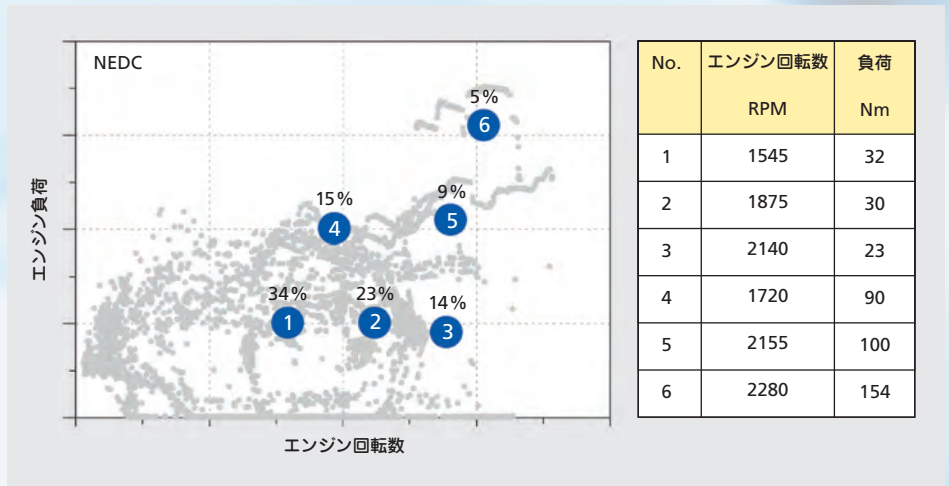
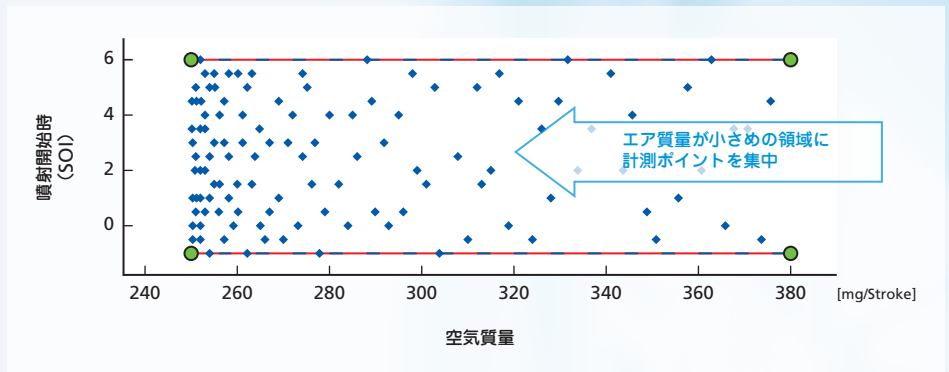
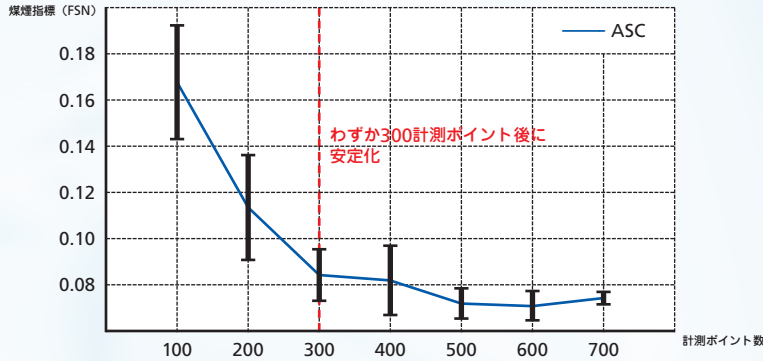


図 1: NEDC テストにおける動作ポイントの分布および重み付け

図 2: 計測ポイントの局所集中を用いる実験計画

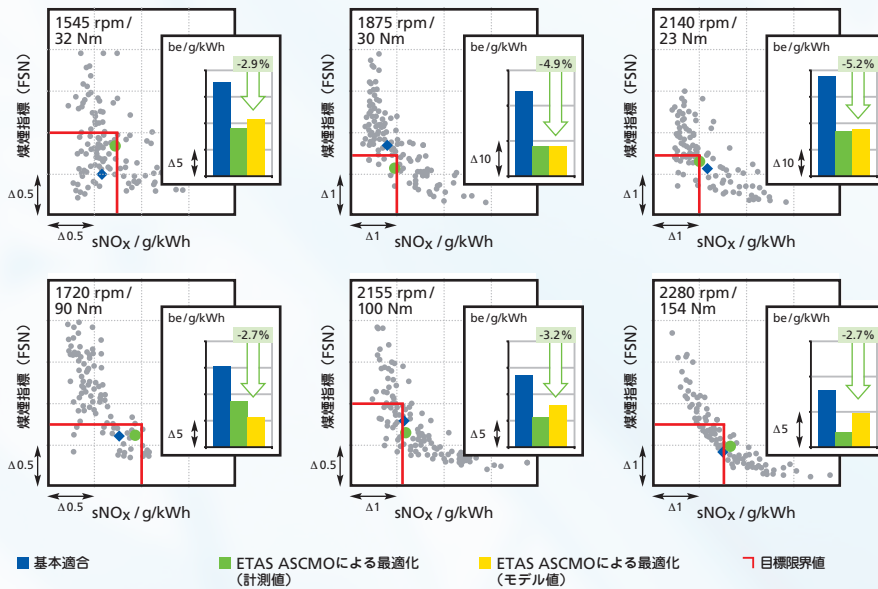


グローバル煤煙数モデルの平均誤差
エラーバー → 5回の反復計測から得られた標準偏差



自動モデリング

ETAS ASCMO の中核は使いやすいモデリング機能であり、これはほぼ自動化されています。今までに市販されているモデルベース適合ツールを使用する場合とは異なり、多くの選択肢の中から特定のモデルタイプをユーザーが選択する必要はなく、代わりにツールが特にフレキシブルで強力なモデルタイプを、ガウス過程 (GP) に基づいて1つだけ提案してくれます。このアプローチにより、非常に複雑なシステムによる高非線形挙動でさえも、オーバーフィッティングすることなく高い精度でモデリングすることができます。これを行うにあたり、ユーザーがモデルをパラメータ化する必要はありません。GPモデルの場合、広い計測範囲を処理するために必要な計算時間およびメモリ容量が往々にして重大な問題となります。



最適化前の予測

ダイナモメータ予備テストの結果により調整された値

Prognosis Results			
Extras			
Name	Prognosis	Change[%]	
SOOT[g/km]	100%		
NO.[g/km]	100%		
CO[g/km]	100%		
CO ₂ [g/km]	100%		
SFC[l/100km]	100%		

最適化後の予測

適用された重みおよび調整係数に基づく予測

Prognosis Results			
Extras			
Name	Prognosis	Change[%]	
SOOT[g/km]	92%		
NO.[g/km]	92%		
CO[g/km]	107%		
CO ₂ [g/km]	97.5%		
SFC[l/100km]	97.6%		

	NO _x /g/km	CO/g/km	Soot/g/km	CO ₂ /g/km	FC/l/100 km
車載計測値に対するETAS ASCMOのずれ	-3.7%	-4.0%	-12.5%	+0.2%	+0.3%
傾向	+	+	-	++	++

図3(上):

データレコードサイズに対するETAS ASCMOモデル(ASC)のモデル精度: グローバル煤煙数モデルの平均誤差 (検証計測によって算出された。エラーバー = 5回の反復計測から得られた標準偏差)

図4(中央):

エンジンテストベンチ上で、6個の動作ポイントで取得した計測値に基づく最適化の結果

図5(下):

最適化の前および後のサイクル推定に基づく予測 (一部スクリーンショット)

しかし、この効率的な GP 実装では、標準的な PC を使用しても、許容できる時間内に何万もの計測ポイントに基づくモデルを生成することができます。

また、この GP モデルは非常にフレキシブルなので、ユーザーはさらにエンジン回転数および負荷を入力変数として追加して、グローバルなエンジンモデルを作成することもできます。このサンプルプロジェクトにおける到達可能な最高品質を算定するために、6 個の動作ポイントの計測データが使用されて、ローカルモデルに加えてグローバルモデルも作成されました。どちらのモデルについても、モデルの品質は満足できるものであり、物理的依存関係のモデリングはほぼ的確でした。場合によっては、グローバルモデルの方が、対応するローカルモデルよりも優れた特性を示しました。CO 排出量のモデリングだけは、最大 16g/kWh という値の範囲で標準偏差は 0.57g/kWh となり、やや不正確過ぎたままになっています。下の表は、検証計測に基づくグローバルモデルの統計的品質レベルを示しています。

最適化の結果

ETAS ASCMO の一連の機能は、ローカル最適化に関しては他の市販ツールの機能と同程度ですが、このツールにはグローバルなモデリングおよび評価を行えるという強みがあり、それを利用すると運転サイクルに関してエンジンマップ全体を自動的に最適化することができます。それから、重み付き動作ポイントのリストに基づいて、特性マップの各変化についての電流サイクル予測がオンラインで計算されます。つまり、強力なオブ

ティマイザを使用することにより、サイクルの限界範囲内にとどまって、局所限界値やマップ平滑度を考慮しながら最小燃料消費量を達成できるような適合データを自動生成できるようになります。このような方法で得た分析に基づいて達成された最適化の結果を図 4 にまとめて示します。ダイナモメータによる検証時には、最適な適合が行われた車両は基本データに比べて燃料消費量が 2.5 パーセント少なくなると同時に、煤煙および NOX の排出量もわずかながら減少しました。まずは第一に基本データバージョンは成熟したと考えられるので、この素晴らしい結果の高まりは成熟していると言ってよいでしょう。しかも、計測された値は DoE のモデル予測に非常に近い値です。図 5 は、最適化の前および後のサイクル推定の結果を示しています。

まとめ

全体的に見て、ETAS ASCMO の評価では非常に良い結果が得られました。このツールはタスク中心の先進機能と使いやすさから、特にエンジン適合の領域にある適合エンジニアたちに瞬く間に高評価を得て受け入れられました。モデルベース最適化に関する多くの文献では、モデルベース最適化により時間とコストを削減できることが強調される傾向にありますが、HMETC が注目したのはそのことよりも、品質が目に見えて向上したこと、そして適合結果のドキュメンテーションが改善されたことでした。

参考資料

- 1) Klar, H.; Klages, B.; Gundel, D.; Kruse, T.; Huber, T.; Ulmer, H.: Neue Verfahren zur effizienten modellbasierten Motorapplikation (効率的なモデルベースのエンジン適合のための新手法) . 5th International Symposium for Development Methodology, Wiesbaden, 2013
- 2) Huber, T.; Kruse, T.; Lauff, U.: Modellbasierte Applikation komplexer Systeme (複合システムのモデルベース適合) . In: Hanser automotive, 10/2013, pp. 33-35

検証計測により設定された定義範囲内におけるグローバルモデルの品質

	sNO _x /g/kWh	sCO/g/kWh	煤煙/FSN	CO/FSN	燃焼騒音/dBA	be/g/kWh
モデルの範囲	0.4 - 2.5	0.7 - 16	0 - 6	4 - 13	75 - 95	210 - 460
RMSE	0.058	0.57	0.089	0.059	0.23	5.32
R ²	0.97	0.98	0.97	0.99	0.98	0.99