



燃料噴射制御の最適化によるディーゼルエンジン開発の迅速化

A Rapid Development of Diesel Engines Using an Optimization of Fuel Injection Control

佐竹 宏 次*¹
Koji Satake

茂中 俊 明*²
Toshiaki Monaka

山 田 哲*³
Satoshi Yamada

遠藤 浩之*⁴
Hiroyuki Endo

柳澤 満彦*⁵
Mitsuhiko Yanagisawa

阿部 隆春*⁶
Takaharu Abe

地球温暖化防止の観点から、熱効率に優れ、CO₂ 排出量削減効果が期待されるディーゼルエンジンが見直されている。また、窒素酸化物や粒子状物質の排出の課題も、近年の排出低減技術や燃焼制御技術により大幅に改善されてきている。これら、最新の燃焼制御技術の適用には、種々の運転条件で排ガス抑制と熱効率の改善を両立させる制御パラメータの適正化が必要となる。本論文では、実機エンジンにおける制御パラメータの最適化を効率的かつ、高精度に実施するための手法について述べる。

1. はじめに

今日、二酸化炭素 (CO₂) による地球温暖化が問題となっており、CO₂ 排出量低減の観点から、自動車用エンジンとしてのディーゼル機関が見直され、各社ともその研究・開発に力を注いでいる。その一方で、日本、米国、欧州ともに排ガスに対する規制を大幅に強化している。ディーゼル車の普及が進んでいる欧州においても、図1に示すように2014年には日米と同等の規制である Euro6 の実施が計画されており、更なる排ガス、特に NOx (窒素酸化物) と PM (Particulate Matter) の同時低減を日米欧のいずれにおいても求められている。このため、環境にやさしい新しい世代のクリーンなディーゼルエンジンの技術開発を進めている。

最新のクリーンディーゼルエンジンを支える主要な技術として、EGR (Exhaust Gas Recirculation : 排ガス再循環装置)、コモンレール式燃料噴射装置、可変容量過給機などがある。エンジン性能、排ガスを改善するためには、これらの制御装置を適正に働かせ、

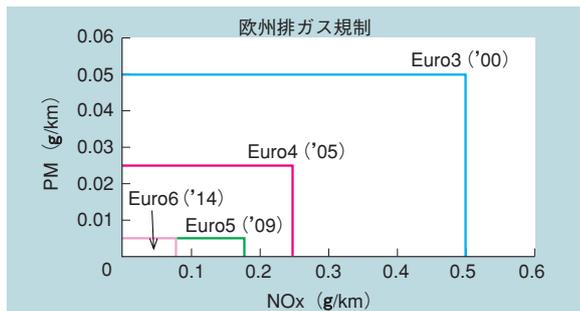


図1 欧州排ガス規制
2014年には日米と同等の規制である Euro6 の実施が計画されている。

多数の制御パラメータを効率的に最適化する必要があり、従来のエンジン試験による試行錯誤的な方法ではもはや限界に達している。

そこで本研究では、エンジン試験、応答曲面モデル⁽¹⁾、最適化手法を組み合わせることで、制御パラメータのキャリブレーションを少ない時間で、かつ正確な最適値設定を可能にする最適化手法を追求した。

2. 応答曲面モデルを用いたハイブリッド最適化

応答曲面モデルとは、入力に対する出力データがある場合、そのシステムの入出力関係を記述するモデルのことであり、多項式やニューラルネットワークなどがある。精度の良いモデルを作成できれば、そのモデルを用いた予測や最適化などを効率的に実施することができる。応答曲面モデルを用いた実験と解析のハイブリッド最適化の基本的な手順は以下のとおりである。

- (1) エンジンの運転条件、制御パラメータ条件の範囲と水準を設定し、試験の組合せ (直交表) を決定する (実験計画法の適用)。
- (2) 直交表に従って、エンジン試験を実施し、排ガスなどの応答値を計測する。
- (3) 試験条件と応答値の組合せから、応答曲面モデルを作成する。
- (4) 応答曲面を用いて、所望の排ガス特性を得るための制御パラメータを決定する最適化計算を実行する。
- (5) 最適解を実機エンジンで確認試験する。

直交表は最も少ない試験回数でパラメータ空間の応答特性を網羅的に調べることができる試験条件の組合せを提供する方法である。エンジン特性は非線形性を持つので、L18, L27, L36 のような3水準系の直交

*¹ 技術本部高砂研究所製造技術開発センター主席 工博

*² 技術本部先進技術研究センタープロジェクトグループ主席 理博

*³ 技術本部長崎研究所内燃機研究室

*⁴ 技術本部横浜研究所流体・伝熱研究室主席 工博

*⁵ 三菱自動車工業(株)開発本部エンジン実験部マネージャー

*⁶ 三菱自動車工業(株)開発本部エンジン実験部エキスパート

表を基本とし、場合によっては、4水準以上の多水準系の直交表を用いた。

応答曲面モデルには、多項式モデルを使用した。モデルの作成方法を図2に示す。一次多項式から出発し、二次以上の項を順次増加または削減してモデル精度を改善する。モデル精度の改善方法は、モデル精度に対する各項の有意性をt検定⁽²⁾を用いて判定する。t検定は、各項の係数の標準誤差が大きい時は有意性なしとしてその項を棄却する統計的手法である。さらに、項を増加又は削減する前後のモデル精度を赤池情報量基準(AIC)⁽²⁾を計算し、増加減前の多項式のAICと比較して、その数値が小さくなればモデル精度が向上したと判断し、その項を取捨選択する。AICは、モデルの精度と項の数の和を評価関数として、多数の項を使った過剰な当てはめ精度を抑制し、複数のモデルでどのモデルが最もロバストかつ高精度かを判断する基準となる指標である。ただし、絶対的基準ではなく、相対的な数値の大小で判断する指標である。最終的に、与えられたデータ点に対するモデルの当てはまりの良さを表す自由度調整済み相関係数がある数値以上となった場合に終了する。この方法により、与えられたデータを基に計算機を用いて自動実行することで、最適な多項式モデルを得ることができる。ここで、すべての項を使う完全多項式を使う場合は、少なくともその項数以上の試験を実施する必要があるが、上記の方法を使えば、より少ない試験数の直交表で済むことになり、試験の効率は大幅に向上する。

3. 2段燃料噴射時の最適化手法の適用

3.1 応答曲面の精度検証

2章で述べた方法の有効性を確認するために、

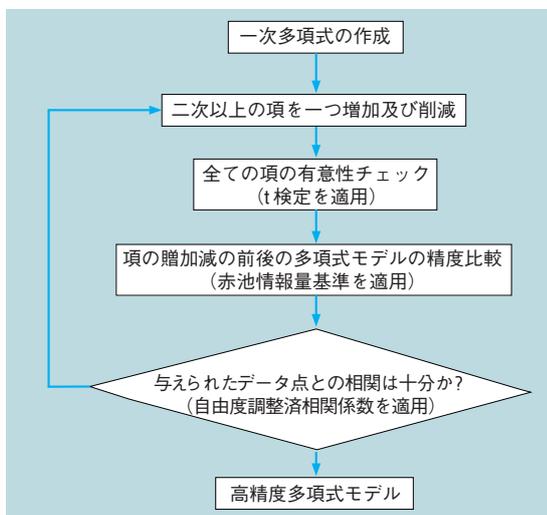


図2 応答曲面モデルの作成手順
多項式モデルの各項の取捨選択を統計的な手法に基づいて実施し、モデル精度の改善を図る。

Main噴射 + Pre噴射の2段燃料噴射に適用した。制御変数は、レール圧 (Pcr), Pre噴射量 (PreQ), Pre噴射期間 (Pre_interval), Main噴射タイミング (MainIT), EGR率の5個である。応答は、NO_x, HC, CO, PM, 燃費率 (BSFC: Brake Specific Fuel Consumption), 騒音の6個を計測した。試験条件は、(i) 回転数 1 500 min⁻¹, 筒内圧 P_{me} = 0.4 MPa 及び (ii) 2 000 min⁻¹, 0.7 MPa とした。応答曲面を得るためのエンジン試験には、5個の制御変数に対して各3水準をとったL36直交表を用いた。

まず、はじめに試験条件 (i) における応答曲面の予測精度について述べる。作成した応答曲面のサンプリング点への合わせ込み精度は、いずれの応答値に対しても、自由度調整済み相関係数 R² = 0.95 であり、NO_x を例に挙げれば、図3に示すように、各試験条件において、良好な精度のモデルが得られている。また、図4にNO_x を例に制御変数として MainIT, EGR率を採った時の応答曲面を示す。応答曲面を可視化することで、エンジン制御のためのパラメータ空間の理解を深めることができる。さらに、応答曲面の予測精度を検証するために、応答値が異なる4つの制

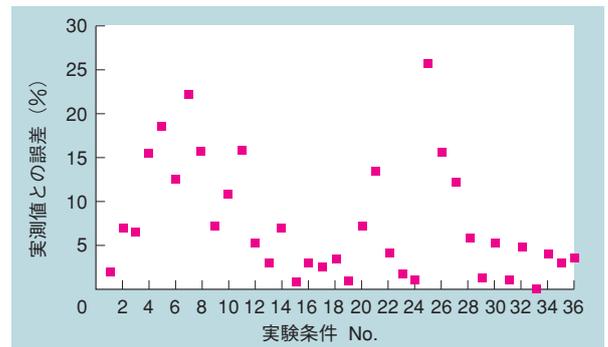


図3 応答曲面モデルの精度の確認
L36直交表の各試験条件における実測値との誤差を示す。応答曲面の予測精度は十分と判断できる。

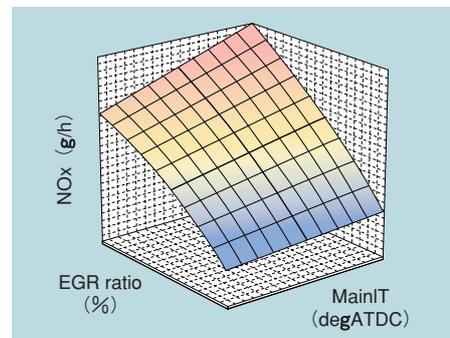


図4 応答曲面の一例
制御パラメータとして、Main噴射タイミング (MainIT), EGR率を、応答特性として、NO_xを示す。エンジン特性をビジュアルに理解することができる。

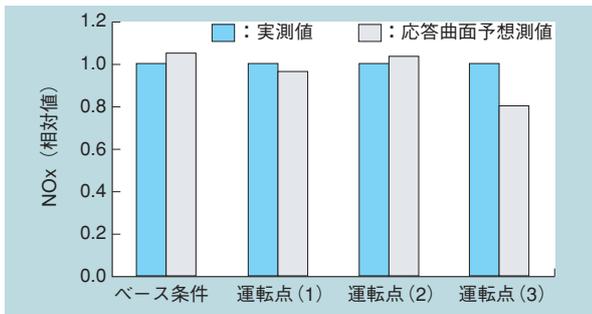


図5 応答曲面モデルによる予測値と実測値の比較
各条件ともに、NO_xの予測精度は良好である。実測値を1.0としている。

御変数の組合せにおいて、実測値と比較した結果を図5に示す。いずれの応答においても、定量的に良好な予測精度であることが分かる。

3.2 最適化手法の適用

次に、作成した応答曲面を用い最適化手法を適用した。適用した最適化手法は焼きなまし法 (SA: Simulated Annealing) である。SA法は、複数の局所最適解の存在が予想される場合に、局所解に陥るのを避けながら大域的な最適解を見つける手法である。試験条件(ii)の試験データを基に作成した応答曲面上で、PMとBSFCに上限値を設定する制約条件の下、NO_xを最小化する最適化を実施した。その結果、NO_xが従来よりも11%低減する条件を得、実際に確認試験を実施したところ、ほぼ予測値どおりの結果を得ることができた。応答曲面上での最適化は、与えられた多項式を使って実行するので、非常に高速に計算できる。したがって、予測精度が満足できる応答曲面さえ作成できれば、試行錯誤的な試験をする必要がなく、効率的なエンジン制御適正化が可能となる。

4. 多段燃料噴射時の最適化手法の適用

4.1 多変数時の応答曲面の精度劣化

適正な応答曲面を作成できれば、良好な最適条件の予測が可能であることを示したが、噴射段数を増やした場合、必ずしも適正な応答曲面が作成できない場合がある。適正な応答曲面が作成できていないケースとして、以下の2ケースがある。

ケース①：直交表試験から作成した初期の応答曲面から予測される最適条件と確認試験の結果とのずれが大きい場合、

ケース②：直交表試験から作成した初期の応答曲面において、一部の応答の計算値が負値（物理的に有り得ない値）を採る場合

どちらのケースも応答曲面の精度不足が原因であり、変数の増加とともに、網の目が粗くなり、変数間の交互作用や非線形性が大きくなると、データ点が不

足になったところで、予測精度が劣化したり、負値が発生したりすることになる。2章で述べた方法により、与えられたデータに対しては、ベストな応答曲面を作成できるが、サンプリング情報が欠落している部分では、精度の劣化が避けられない場合がある。本研究では、応答曲面の予測精度の改善に対し、次に述べる逐次更新方法を適用した。

4.2 応答曲面の逐次更新による改善

2章で述べた応答曲面作成後、応答値に負値がないかチェックする。このチェックは、各制御変数を3水準として、すべての組合せの総当りで調べる。もし、負値が現れた場合、絶対値で最大の負値（最大負値と呼ぶ）となる条件を各応答ごとに抽出する。また、この応答曲面を使って、SA法により最適化計算を実行し最適条件を求める。抽出した最大負値の条件と最適条件を追加試験条件として、エンジン試験を実施する。新たに得られた試験データを最初の直交表試験データに加えて、応答曲面を作成し直す。負値が無くなったら、最適条件に加え、最適条件のまわりで応答値に対して感度の高い制御変数を3つ選択し、L4直交表を作成し、最適条件に加えて5つの追加試験条件でエンジン試験を実施し、このデータを更に追加して応答曲面を作成する。L4直交表は各変数2水準の直交表で、最適条件まわりでの応答の感度を調べ、真の最適条件への収束の判断のためと、最適条件まわりのデータ点数を増やし、予測精度の向上の双方をねらって利用している。予測した最適条件と確認試験の結果がほぼ一致し、最適条件の値がほぼ収束したと判断されれば、終了する。

この逐次更新法により、最初から試験データ点を増やすために大規模な直交表を使うよりも、少ない試験回数で速く最適条件に到達することができる。

4.3 3段燃料噴射— After 噴射追加の場合

3章で述べた2段噴射に、After 噴射の噴射量、噴射タイミングの2制御変数を追加した7個の制御変数に適用した結果について述べる。CO、PM、燃費、騒音にそれぞれ上限値を設定する制約条件のもとでNO_x最小化を最適化条件とした。L36直交表試験から応答曲面を作成した結果、負値の発生は認められなかった。このため、最適化計算により最適条件を求め、さらにその最適条件のまわりでNO_xに対する感度が高かったレール圧、Main 噴射タイミング、EGR率を2水準で変化させたL4直交表条件を合わせた、5つの条件を追加したエンジン試験を実施した。これらの結果を取り込んで、応答曲面を作成し直し、最適化計算により最適条件を求めた。この1回の更新時の最適条件の予測値と確認試験の結果、図6に示すように、

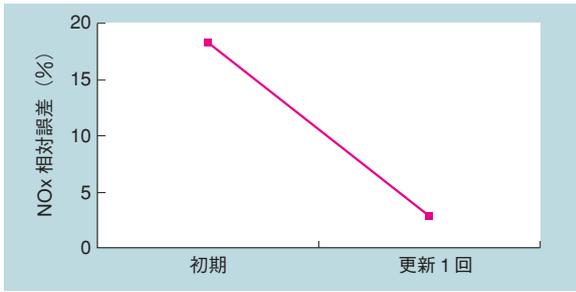


図6 After 噴射追加時の応答曲面モデルの予測精度の改善
 応答曲面モデルを1回更新することで、NOxの予測精度が改善された。実測値を基準にした相対誤差を示す。

予測精度が改善し、予測精度の高い最適条件を得ることができた。

4. 4 3段燃料噴射— Pilot 噴射追加の場合

次に、After 噴射の代わりに、Pilot 噴射を追加した場合の結果について述べる。L36 直交表試験から作成した応答曲面に対して、負値の有無を調べたところ、PMの予測精度が悪く、多数の負値が認められた。そこで、最大負値の条件と、この応答曲面上でのNOx最小の最適条件を合わせた2つの追加試験を実施し、応答曲面を作成し直した。これで得られた応答曲面においてもPMの負値が認められたため、最大負値と最適条件2条件を再度追加試験し、応答曲面を作り直した。2度の追加試験と応答曲面の再作成で、PMの負値は解消されたので、最適化計算で求めた最適条件とそのまわりでNOxに対する感度の高かった、レール圧、Main 噴射タイミング、EGR 率を変数としてL4直交表を作成し、5つの追加試験条件を実施した。合計3回の応答曲面の逐次更新でほぼ最適条件の収束値を得た。

図7に予測した最適条件でのNOx及びPMの予測値と実験値の推移を示す。4回目の確認試験では、NOx及びPMの予測精度は向上し、PM、CO、燃費、騒音はいずれも制約条件以下の結果を得ることができた。

After 噴射の追加、又はPilot 噴射の追加のいずれも7個の制御変数であるが、Pilot 噴射の方が予測精度の劣化が大きく、3回の更新が必要となった理由は、Pilot 噴射がPre + Main 噴射の前のタイミングでの燃料噴射であり、その噴射条件の変化が、Pre 噴射又はMain 噴射に影響を与え、交互作用あるいは非線形作用が強く現れたために予測精度がより大きく劣化したものを思われる。一方、After 噴射は、Pre + Main 噴射の後段であり、エンジン燃焼には大きな影響を与えない。いずれにしても、本研究の応答曲面の逐次更新による精度改善は、初期の直交表試験に最小限の追加試験を加えることで、多段噴射時の最適条件の予測に対し有効であることが分かった。

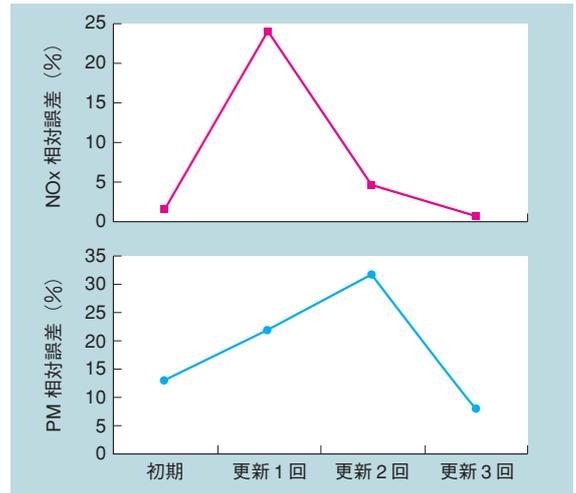


図7 Pilot 噴射追加時の応答曲面モデルの予測精度の改善
 応答曲面モデルを3回更新することで、NOx及びPMの予測精度が改善された。実測値を基準にした相対誤差を示す。

5. ま と め

多くの制御変数を有する最新のディーゼルエンジンの制御パラメータの最適化に、直交表試験、応答曲面モデル、最適化を組合わせたハイブリッド最適化手法が有効であることが分かった。本手法による最適化作業の効率化は、最後の3段噴射（Pilot 噴射追加）の例で、従来のエンジン試験ベースの手法と比較して約54%の試験工数の削減が可能との見通しを得ている。今後必要とされている過渡時の排ガス規制対応においても、燃焼制御技術と本稿で述べた最適化手法を更に高度化することで、お客様の信頼にこたえ、地球にやさしいエンジン開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) R. H. Myers and D. C. Montgomery, Response Surface Methodology, John Wiley & Sons, Inc, (2001)
- (2) 石村貞夫, すぐわかる多変量解析, 東京図書 (2000) p.2 ~ 57



佐竹宏次



茂中俊明



山田哲



遠藤浩之



柳澤満彦



阿部隆春