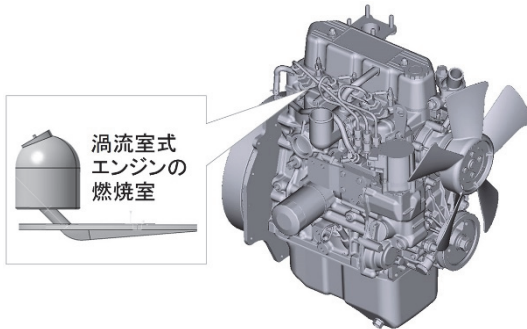


CFD と AI の連成による小型ディーゼルエンジンの 燃焼室形状最適化

Combustion Chamber Shape Optimization for Small Diesel Engines
by Coupling CFD and AI



中野 博紀*¹
Hiroki Nakano

牧 正也*²
Masaya Maki

網代 健也*³
Kenya Ajiro

三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社(以下、当社)は、産業用小型ディーゼルエンジンで幅広く利用されている渦流室式エンジンの燃焼室形状に対して、CFD(Computational Fluid Dynamics)とAI(Artificial Intelligence)を連成させた最適化設計プロセスを初めて適用し、当社製品の商品力向上に取り組んだ。渦流室式エンジンにおける燃焼・流動コンセプトを定義した後、CFD と AI を連成させることで、最適な燃焼室形状を自動的に探索させた。探索過程で得られたデータ群に対して、データ分析を行うことで、最適な燃焼室形状を選定するとともに、実機試験にて、目論見通りの性能向上が得られていることを確認した。また、最適化した燃焼室を、開発中の新L型エンジンに適用することで、従来機に対して、出力レンジを大きく拡大するとともに、クラストップレベルの正味平均有効圧力(BMEP: Brake Mean Effective Pressure)及び燃費率を実現できることを確認した。

1. はじめに

ディーゼルエンジンは、高出力密度といった特徴を有し、自動車・船舶・建機・農機・発電機等の幅広い領域で使用されている。そのうち、渦流室式(IDI: Indirect Injection)エンジンは、直噴(DI: Direct Injection)エンジンに対して、燃焼室内に強い流動を形成することで、安価な燃料噴射システムを採用しつつ、高出力密度が得られるといった利点がある。この特徴は、安価かつ高出力密度が要求される産業用小型エンジンの市場要求にマッチしていることから、渦流室式エンジンは、過去から現在に至るまで幅広く利用され続けている。一方、近年、モデルベース開発の広がりとともに、3次元流体解析技術(CFD)や、最適化技術(AI)などが、設計現場にも十分に浸透してきているが、これらの技術を渦流室式エンジンに適用した事例はほとんどない。そこで、本報では、渦流室式エンジンの燃焼室に対して、これらモデルベース関連技術を適用し、形状を最適化する設計プロセスを構築した。また、開発中の新L型エンジンに最適化した燃焼室を適用することで、対応出力レンジの拡大、及びクラストップの性能実現を目指した。

2. 燃焼室形状設計プロセス

2.1 燃焼・流動コンセプト

最適化の目的は、低エミッションかつ低燃費率を達成することである。燃焼および流動コンセプトの考え方を図1に示す。一般的に渦流室式エンジンの燃焼率は2山になることが示されており、前半が副室燃焼、後半が主室燃焼に相当すると言われている。低エミッションの観点からは、

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術開発室

*2 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術開発室 首席技師

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術部

NO_x 及びスートを同時に低減するために、燃焼重心を遅角しつつ、燃焼終わりを進角させる必要がある。そこで、これら理想的な燃焼率を得るために、副室燃焼を抑制し、主室燃焼を活性化させる燃焼コンセプトを提案する。混合律速であるディーゼル機関において燃焼をコントロールするには、流動をコントロールする必要がある。すなわち、副室燃焼を低減するために副室流動を抑制し、主室燃焼を活性化するために主室流動を強化することで、低エミッションを達成できると考えた。次に、低燃費率の観点において、渦流室式エンジンの冷却損失の大部分は副室で生じていると言われている。そのため、副室流動を低減することが、熱伝達率の低減、ひいては低燃費率の達成に繋がると考えた。以上より、燃焼コンセプトから発して、副室・主室の流動に取って強弱をつけるという流動コンセプトが導出された。また、最適化における目的関数として、副室流動低減と主室流動増大という2つの流動に関するパラメータを選定した。

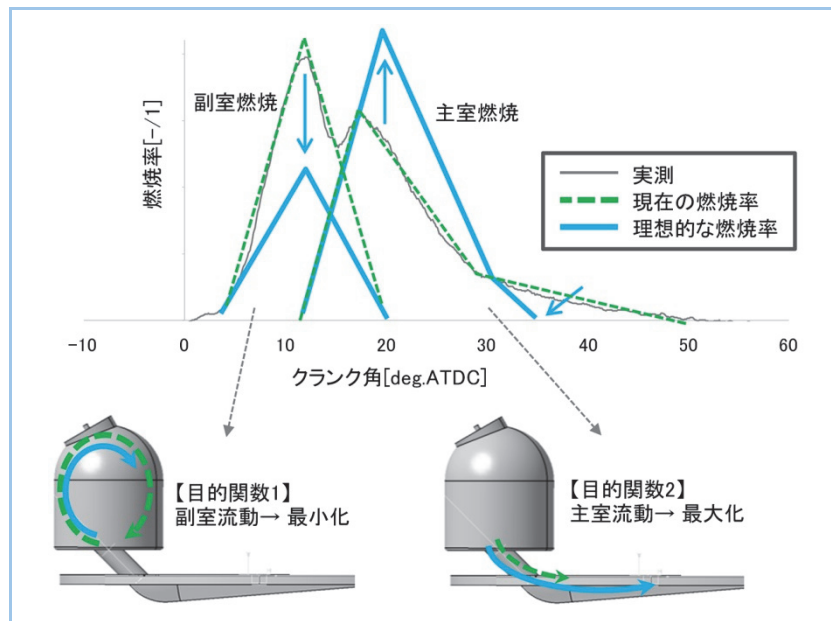


図1 理想的な燃焼率と流動コンセプト

2.2 最適化プロセス

CFD と AI を用いて燃焼室形状を最適化するプロセスを図2に示す。従来、CFD は計算コストが大きく最適化には適さないと考えられていたが、AI を組み合わせることで計算コストと計算精度のトレードオフの改善が可能になると考えられる。今回は、形状を最適化する手法としてパラメトリック最適化を適用した。まず、図3に示すように、燃焼室形状を vari1~vari7 の7つのパラメータを用いて表現する。次に、実験計画法(DOE: Design of Experiments)にて7つのパラメータをランダムに組み合わせた初期燃焼室形状を 200 ケース生成する。それぞれの形状にて CFD 解析を行い、設計変数と目的関数の相関を、ニューラルネットワークを用いて整理する。得られた相関上で遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行い、次ステップの燃焼室形状を生成する。これらの過程を数ステップ繰り返し、計 300 ケースの計算を実行することで、最適な燃焼室形状を自動的に探索させた。

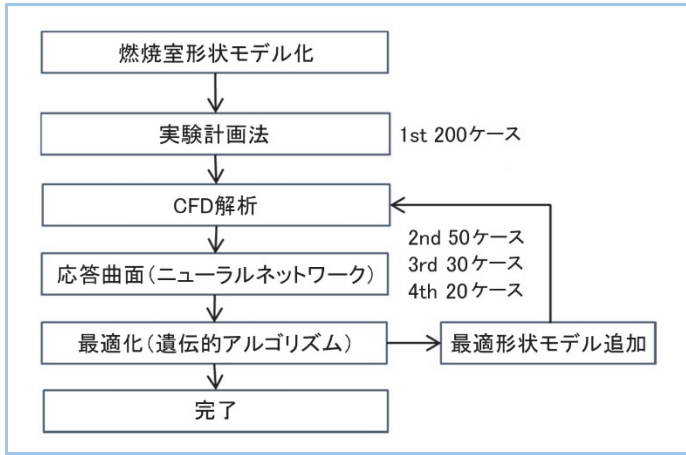


図2 最適化プロセス

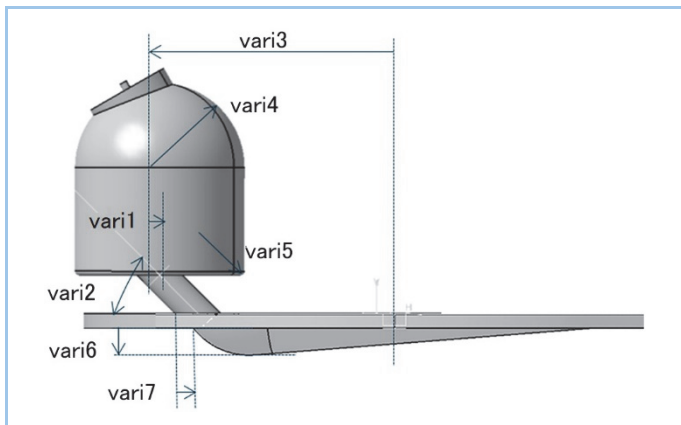


図3 パラメトリック最適化

2.3 最適化結果

計 300 ケース計算した後の目的関数の散布図を図4に、目的関数に対する設計変数の感度分析結果を図5に示す。図5より、副室流動抑制に関しては vari5 (副室下面隅R) の感度が高いことが分かる。また、主室流動強化に関しては vari7 (キャビティオフセット) を設計対象とすべきであることが分かる。データ分析を通して、現象を効率よくコントロールするために律速となる設計変数を把握できたとともに、上記2つの特徴を有する最適形状を図4のパレート解近傍から選定した。

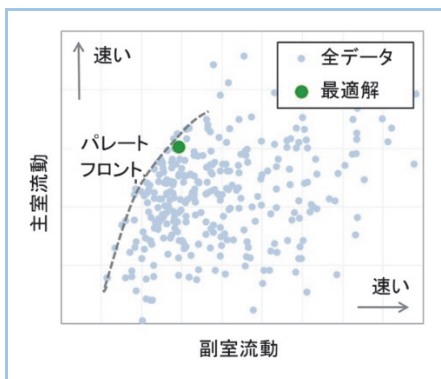


図4 パレート性能

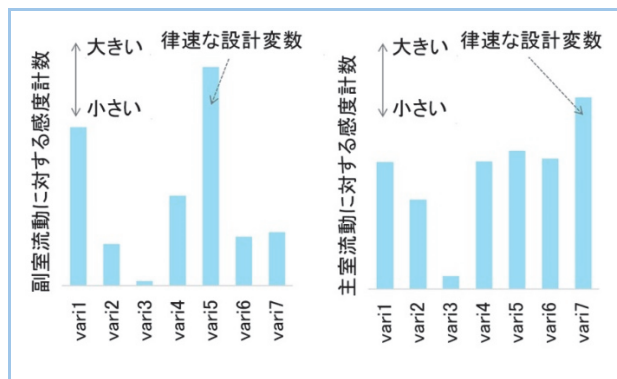


図5 感度分析結果

2.4 知識化

最適化で得られた解の物理的な意味を把握し、設計として有用な知識を残すために、上記で抽出した2つの律速となる設計変数を変化させた場合の影響を CFD 解析にて確認した。

(1) 副室流動低減

vari5 (副室下面隅R) を変化させた場合の上死点における CFD 解析結果を図6に示す。副室下面隅Rを小さくすることで、副室下面隅R近傍で、流れが膨張・収縮を繰り返すことで、副

室流動が抑制されていると考えられる。

(2) 主室流動強化

vari7(キャビティオフセット)を変化させた場合の膨張行程における CFD 解析結果を図7に示す。キャビティオフセットを大きくすることで、噴口からキャビティにかけての流れの剥離が抑制され、主室流動が強化されていると考えられる。

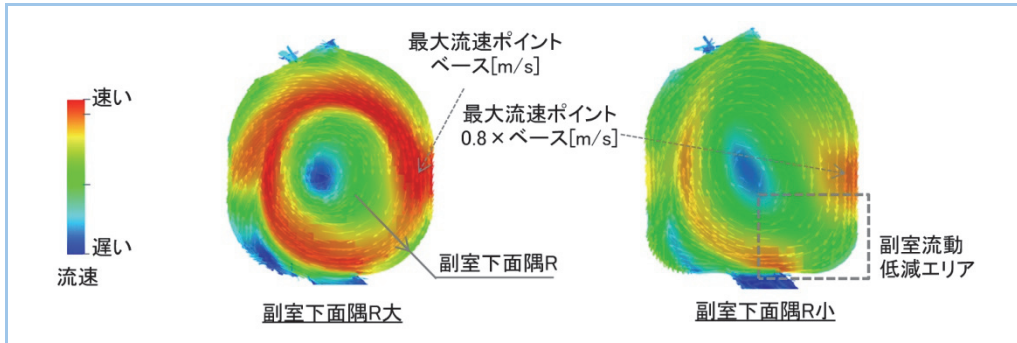


図6 副室下面隔R変更時の CFD 解析結果

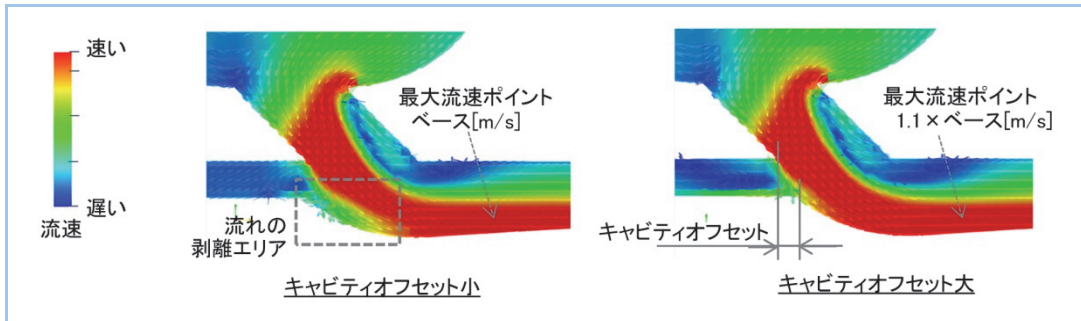


図7 キャビティオフセット変更時の CFD 解析結果

3. 検証結果

3.1 新旧製品間の性能比較

開発中の新L型エンジンに最適化した燃焼室を適用し、従来機と性能を比較した結果を図8に示す。新L型エンジンでは、ターゲットとしている高負荷域のソートが 80%低減、排ガス計測モードで重心点となる低中負荷域の NOx が 15%低減し、かつ、定格燃費率が5%改善することが確認できた。目論見通りの性能向上効果が得られており、設計プロセスの妥当性を確認できたとともに、燃焼室形状を最適化したことで低エミッションかつ低燃費率を実現した。

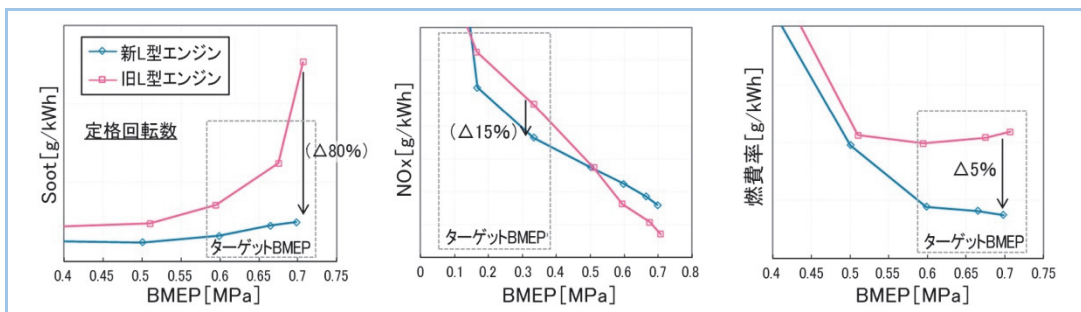


図8 性能試験結果

3.2 新L型エンジンの出力レンジ拡大

燃焼室形状を最適化した新L型エンジンは、高負荷域の排ガス性能が大きく改善したため、北米向 EPA-Tier4 規制に適合可能な出力レンジを拡大することができた。新旧L型エンジンの定格出力レンジを比較した結果を図9に示す。従来L型エンジンが最大 13.2kW まで対応していたのに対して、新L型エンジンでは、フットプリントおよびコストを同等としつつ、最大 18.4kW まで対応

可能となる見込みである。また、欧州、国内規制についても対応可能な見込みである。

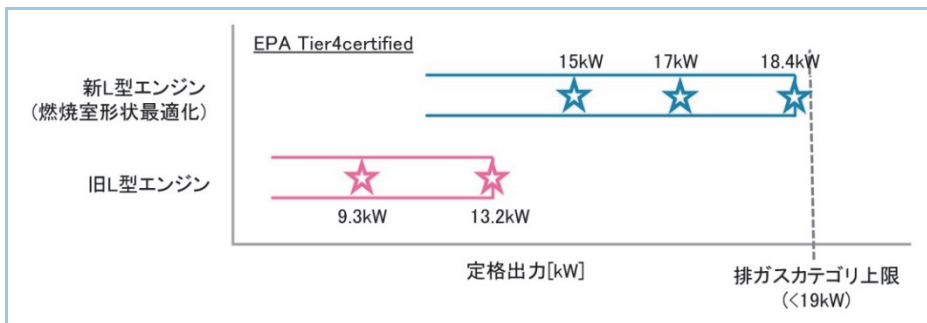


図9 新旧L型エンジンの定格出力レンジ比較

3.3 他社エンジンとの性能比較

新L型エンジンの正味平均有効圧力(BMEP)および定格燃費率を、EPA(米国環境保護庁)に申請されている他社すべての渦流室式エンジンと比較した結果⁽¹⁾を図10に示す。最適燃焼室を適用した新L型エンジンは、クラストップレベルのBMEP及び定格燃費率を達成できることを確認した。

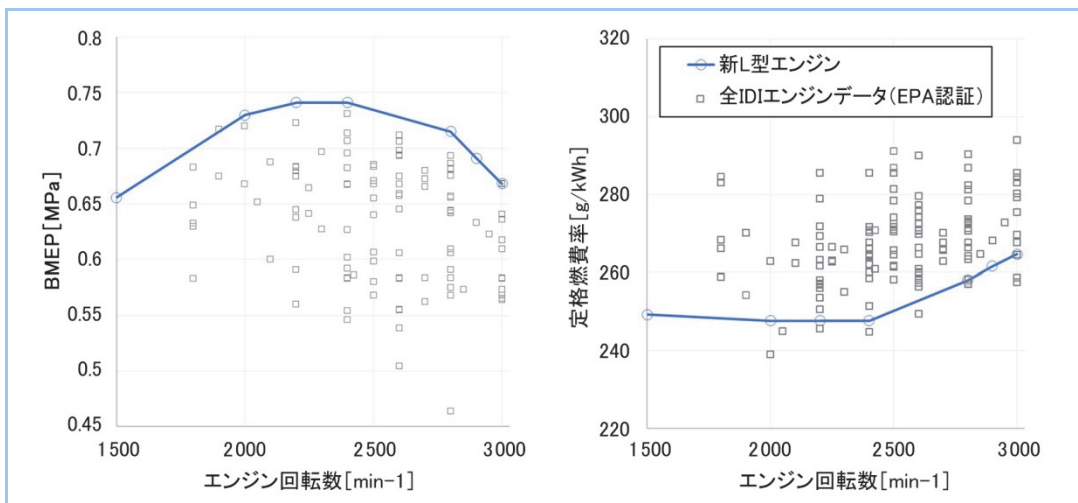


図10 他社エンジンとの性能比較

4. まとめ

渦流室式エンジンに対して、燃焼・流動コンセプトを定義するとともに、CFDとAIを連成させることで、燃焼室形状を最適化した。また、開発中の新L型エンジンに最適化した燃焼室を適用することで、従来機に対して、大幅な低エミッション化、低燃費率化が達成できることを確認した。さらに、従来機に対して、フットプリントおよびコストを同等としつつ、出力レンジを高出力側に大きく拡大し、ラインナップを拡充させた。最後に、他社エンジンとの性能比較を通して、クラストップレベルのBMEP及び燃費率を実現できていることを確認した。新L型エンジンは、現在開発評価中であり、2023年内に市場投入する計画である。

当社は、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、エネルギー供給の担い手として、水素エンジンなど最先端の技術を適用した脱炭素エンジンを開発するとともに、並行して、既存エンジンの性能向上による低炭素社会の実現に向けた取組みも実施していく。

参考文献

(1) United States Environmental Protection Agency, Annual Certification Data (2020)
<https://www.epa.gov/compliance-and-fuel-economy-data/annual-certification-data-vehicles-engines-and-equipment>