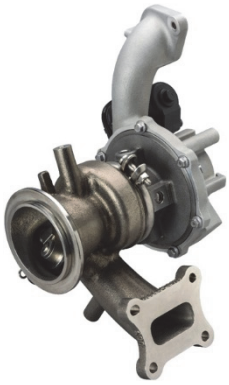
新エネルギー車向けターボチャージャの開発

Development of Turbocharger for New Energy Vehicles



若島 幸司[*1]
Koji Wakashima

山田 祐樹[*2]
Yuki Yamada

星 徹[*3]
Toru Hoshi

市川 太郎[*2]
Taro Ichikawa

鈴木 淳[*2]
Jun Suzuki

地球温暖化対策として，世界各国で自動車産業への規制が強化されており，これに対応するため，新エネルギー車（電気自動車，プラグインハイブリッド車，レンジエクステンダー式電気自動車，燃料電池車）への移行が進んでいる。本報では，プラグインハイブリッド車に適合するターボチャージャ開発の取組みについて紹介する。当該車両向けエンジンでは，燃費改善が重要な課題であり，ターボチャージャには燃費点での高効率化が求められることから，性能に寄与する要素（マッチング，空力性能，軸受機械損失）の改善に取り組み，ターボチャージャの総合効率改善，エンジンの燃費改善の見込みが得られている。

1. はじめに

温室効果ガスの増加による地球温暖化に伴い，海面水位の上昇，感染症の拡大，等の気候変動問題が予測されており，この対策が喫緊の課題となっている。これを受け，世界各国ではパリ協定に基づき中期（～2030 年）の削減目標を設定し，CO_2 削減に取り組んでいる。CO_2 排出量は，エネルギー転換部門，産業部門，運輸部門が大半を占めており，運輸部門の大半を占めるのが自動車産業である。自動車産業では年々規制が強化されており，電動化が加速するとともに，多様な燃料（水素，合成燃料，等）の採用が検討されている。欧州では，2035 年までに欧州域内で二酸化炭素を排出する乗用車と小型商用車（合成燃料を使用する車両は除く）の販売を禁止することを合意しており，電気自動車への移行が進んでいる。日本でも，2035 年までに新車販売は全て電動車とする政府方針が示されており，電気自動車への移行が進んでいる。一方，中国では，ダブルクレジット規制（各自動車メーカの新エネルギー車の生産台数の規制と CO_2 排出量の規制）により，新エネルギー車の比率増加と CO_2 削減に取り組んでいる。新エネルギー車とは，電気自動車（以下，BEV），プラグインハイブリッド車（以下，PHEV），レンジエクステンダー式電気自動車（以下，REEV），燃料電池車（以下，FCEV）の総称であり，PHEV，REEV にはターボチャージャ付きエンジンが搭載されている。BEV は航続距離への懸念から需要増加が鈍化する一方，PHEV は需要増加が加速していることから，各社とも PHEV 向けエンジンの開発を進めており，燃費改善が重要な課題となっている。この中国市場での受注拡大を目指し，PHEV 向けエンジンに適合するターボチャージャを開発した。

*1 三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部 主席技師
*2 三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部
*3 三菱重工業株式会社 総合研究所 知能化機械研究推進部

2. プラグインハイブリッド車向けエンジンのターボチャージャへの要求特性

ハイブリッド車には様々なハイブリッドシステムがあり，現在，中国市場で主流となっているのは，複数のモータを搭載したシリーズ・パラレル式である。図 1 に示すとおり，シリーズ・パラレル式の駆動方式には，Ⅰ．パラレルモード（急加速時・牽引時）：エンジンとモータのアシストで駆動，Ⅱ．シリーズモード（通常走行時）：モータのみで駆動，エンジンは発電用として熱効率の高い領域（以下，燃費点）で運転，Ⅲ．ダイレクトモード（高速巡行時）：エンジンのみで駆動，Ⅳ．EV モード（始動時・通常走行時）：モータのみで駆動，がある。PHEV では，バッテリー容量・モータ出力の増加に伴い，Ⅱの運転範囲が拡大しⅢの運転範囲が縮小する。ここで，内燃機関車（以下，ICEV）向けエンジンと PHEV 向けエンジンの代表的なターボチャージャ作動点を図 2 に示す。PHEV ではトルク・出力が要求されるⅠでモータのアシストがあることから，エンジンに要求される低速トルク・最大出力が低下し，ターボチャージャへの要求作動範囲が狭くなる。また，使用頻度の高いⅡの運転範囲が拡大することから，エンジンには燃費点での更なる熱効率向上が要求される。熱効率向上により排気エネルギーが減少する一方で必要な過給圧を確保する必要があることから，ターボチャージャには燃費点での更なる高効率化が求められる。以上の要求特性を踏まえ，PHEV 向けエンジンの燃費点でのターボチャージャ高効率化を目指し，性能に寄与する要素（マッチング，空力性能，軸受機械損失）の改善に取り組んだ。

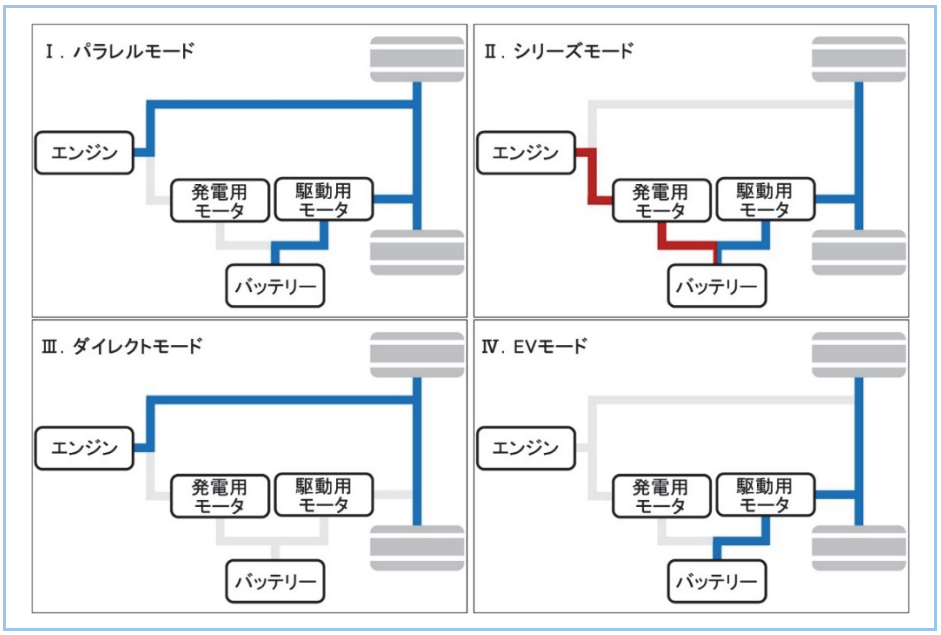


図1 シリーズ・パラレル式ハイブリッドシステムの駆動方式

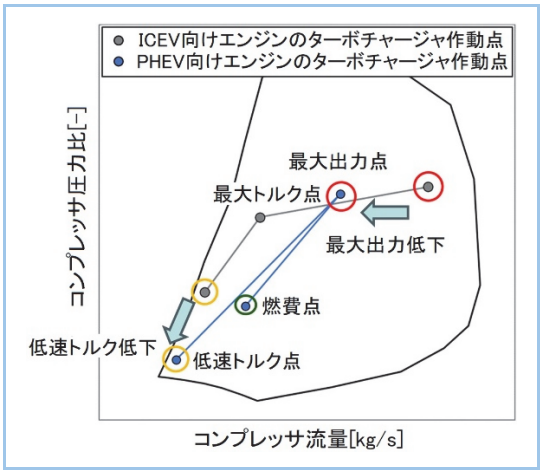


図2 ICEV 向けエンジンと PHEV 向けエンジンの代表的なターボチャージャ作動点の比較

3. マッチングの適正化

マッチングとは，エンジンの要求性能にマッチするコンプレッサとタービンの組合せを選定することである。PHEV 向けエンジンの要求特性を踏まえ，PHEV 向けエンジンに特化したマッチングを検討した。

マッチングを検討する際，タービンの性能特性の考慮が必要であり，性能特性を表すパラメータの一つとして速度比がある。速度比とは，タービン動翼入口周速 U とタービン動翼内を断熱膨張して流れる理論速度 C_0 の比（以下，U/C_0）であり，ターボチャージャ向けのタービン動翼は U/C_0=0.65 前後でピーク効率となる特性を持つ。ターボチャージャの作動回転数はコンプレッサによって決まり，U はコンプレッサインペラ径 D_c とタービン動翼径 D_t との比（以下，D_c/D_t）に依存していることから，D_c/D_t はマッチングにとって重要なパラメータである。

従来のICEV向けエンジンのターボチャージャでは，過渡応答性の要求に対応するため，比重の大きいタービン動翼は相対的に小さな径とし，D_c/D_t を 1.2 前後としてマッチングしている。一方で，PHEV 向けエンジンのターボチャージャでは，過渡応答性の要求が緩和されるため，タービン動翼を大きな径とし，D_c/D_t を低減したマッチングが可能である。ここで，燃費点の排気脈動下のタービン作動線を図 3，タービン作動線における排気ガスのエネルギー密度を図 4 に示す。図 3 に示すとおり，D_c/D_t を変化させることで排気脈動下のタービン作動線は平行移動する。また，図 4 に示すとおり，排気ガスは高・中・低膨張比それぞれにエネルギー密度が高い領域を持つ。D_c/D_t を従来の 1.2 とした場合，最もエネルギー密度が高い高膨張比領域の作動 U/C_0 が適正値より低くなり，平均タービン効率が低下する。一方 D_c/D_t を小さくし過ぎると高膨張比領域のタービン効率は向上するが，低膨張比領域の作動 U/C_0 が適正値より高くなり，平均タービン効率が低下する。今回，排気脈動下の作動 U/C_0 とタービン動翼の効率特性を鑑み，D_c/D_t を最適化した。この時，排気ガスのエネルギー密度が高いのは膨張比 1.5，U/C_0=0.60（以下，設計点 1），膨張比 2.0，U/C_0=0.50（以下，設計点 2）であることから，タービンについては，設計点 1，2 での効率向上を狙い，改善に取り組んだ。

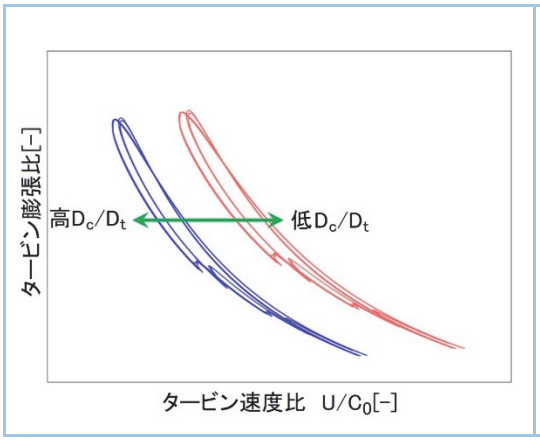


図3 PHEV 向けエンジンの排気脈動下のタービン作動線

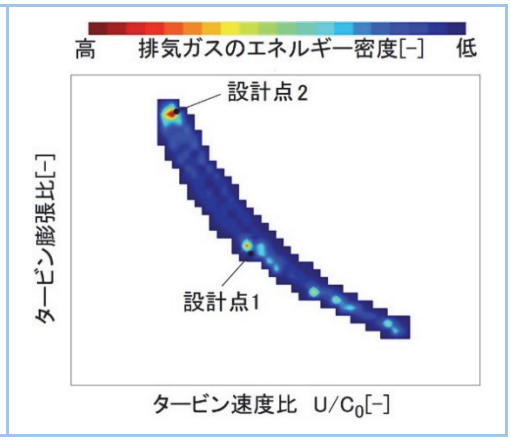


図4 PHEV 向けエンジンの排気ガスのエネルギー密度分布

4. 空力性能の改善

4.1 コンプレッサ性能の改善

2 章で述べたように，コンプレッサは，最大流量及び小流量作動限界流量の要求は緩和され，燃費点での高効率化が求められる。そこで，本要求に適合するよう，ICEV 向けエンジンの従来インペラをベースに新規にインペラを設計した。具体的には，燃費点近傍の作動点に適合するよう翼高さを調整するとともに，前縁羽根角を燃費点の流れ角に合致させた。さらに，最適化アルゴリズムを用いて燃費点での損失が最小となるインペラ形状を探索した。従来インペラと新設計イン

ペラに関する燃費点近傍の内部流動解析の可視化結果及び流れ方向の損失生成量の分布を図 5 に示す。図 5(a)を見ると，従来インペラは前縁部で流路が閉塞しており損失生成を伴っているが，新設計インペラでは流路の閉塞が解消している。また，図 5(b)より新設計インペラは翼コード全域にわたり従来インペラよりも損失が抑えられており，特に翼前縁部の損失生成が顕著に低減していることが分かる。新設計インペラと従来インペラの性能試験結果を図 6 に示す。新設計インペラは従来インペラよりも最大流量が低流量側に移動しているものの，エンジン作動範囲を十分にカバーしつつ，燃費点近傍の効率が 2.0pt 向上することを確認した。

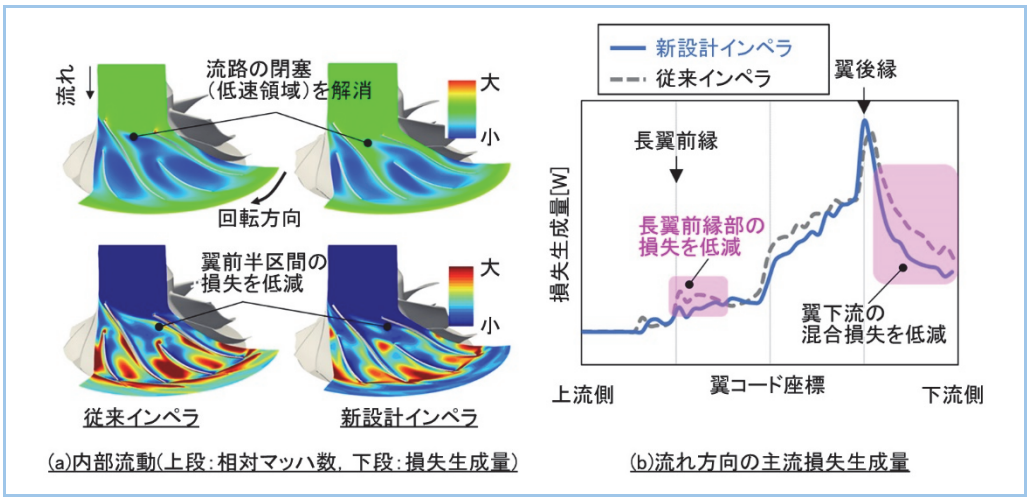


図5 新設計インペラの内部流動及び流れ方向の損失生成量

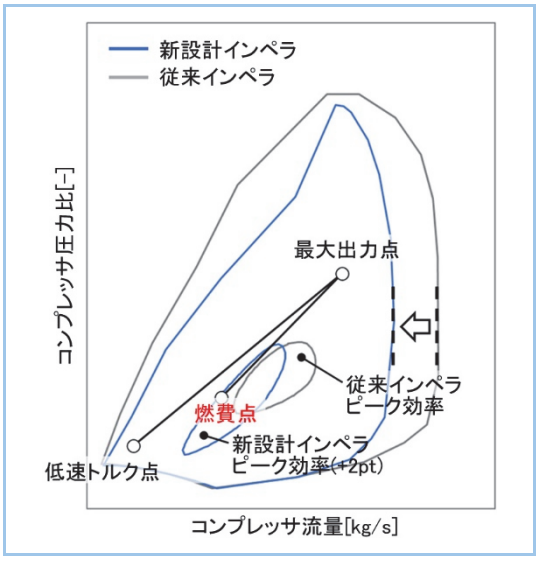


図6 新設計インペラの性能試験結果

4.2 タービン性能の改善

3 章で述べたように，タービンは，過渡応答性の要求が緩和され，設計点 1，2 での高効率化が求められる。そこで，本要求に適合するよう，ICEV 向けエンジンの従来動翼をベースに新規に動翼を設計した。設計のポイントは 2 点あり，1 点目は動翼とハウジング間の漏れ流れの低減である。タービン動翼は，ハウジングとの接触を避けるために翼先端部にクリアランスを設けている。このクリアランスによって，翼前後の圧力差から漏れ流れが発生し，損失が生じる。特に小型のターボチャージャでは，クリアランスが流路高さに対して大きく，漏れ流れの影響が顕著である。従来動翼に対して，新設計動翼では設計点 2 に合わせて翼前縁の傾斜角や前縁から後縁にかけての翼角分布を最適化した。図 7 に従来動翼と新設計動翼の流路に直行する断面の流速分布を示す。翼形状の改良によって，漏れ渦の低速領域が抑制されていることがわかる。これにより，タービン動翼の内部流れが改善し，設計点 2 の効率が向上した。2 点目は排気ディフューザの損失低減であ

る。ターボチャージャの排気ディフューザはエンジン搭載性の観点からコンパクトな設計が求められるが，コンパクトにした場合，動翼下流の動圧エネルギーを十分に圧力回復させることが難しくなる。そこで，動翼から排気ディフューザに流出する流速分布を改善するため，動翼の出口翼角分布と子午面形状を改良した。この改良により，排気ディフューザの圧力回復率が向上し，結果として設計点 1，2 の効率が向上した。従来動翼と新設計動翼の流動解析結果を図 8 に示す。従来動翼に対して，設計点 1 で効率 2.0pt 向上，設計点 2 で効率 4.2pt 向上することを確認した。

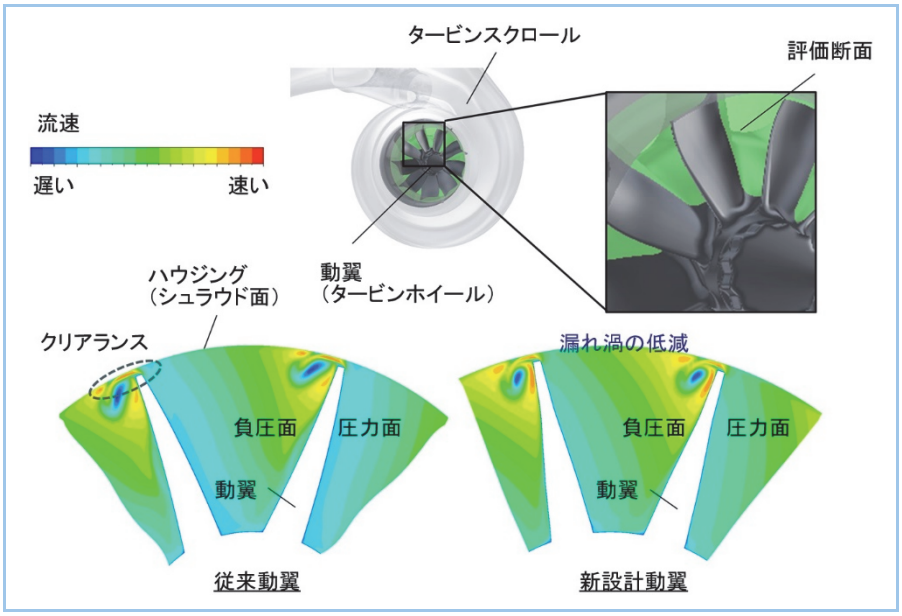


図7　動翼形状改良による翼端漏れ流れ流速の低減

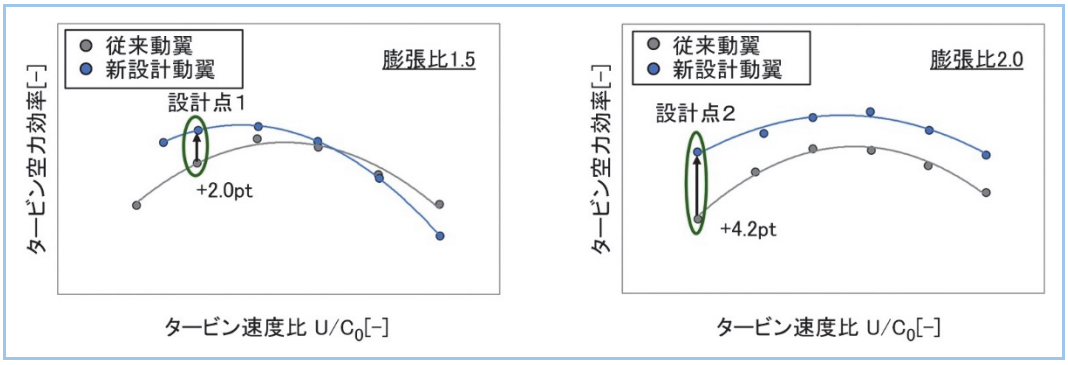


図8　新設計動翼の解析結果におけるタービン効率

5. 軸受機械損失の改善

ターボチャージャ向けの軸受には，フルフロート軸受，セミフロート軸受，ボール軸受，等があり，当社では，フルフロート軸受を採用している。軸受機械損失の低減にはシャフト径低減が有効だが，フルフロート軸受では，回転安定性の制約上，これ以上シャフト径を縮小できない状況にある。そこで，シャフト径縮小による軸受機械損失低減を狙い，構造的に回転安定性の高いセミフロート軸受を開発した。社内の軸振動解析ツールにより軸受諸元を設定し，フルフロート軸受に対して，翼背面間距離を約 10%短縮，軸径と軸受面幅をそれぞれ約 15%，30%低減した（図 9）。実機試験の結果，セミフロート軸受を採用することで，タービン効率を約 1pt 改善できることを確認した（図 10）。また，セミフロート軸受の回転安定性について，低粘度油 0W-8 においても，軸振動振幅の増加はなく，最高回転数まで低いレベルに抑えられていることを確認した（図 10）。今回設計したセミフロート軸受はフルフロート軸受より軸受損失が低減し，低粘度油にも対応しつつ，コンパクト化による車両への搭載性にも優れることから，今後は本仕様をベースに機種展開に取り組んでいく予定である。

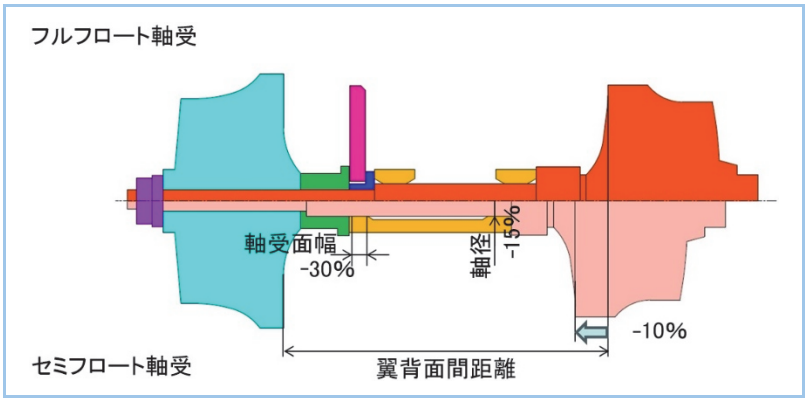


図9 フルフロート軸受とセミフロート軸受の断面図

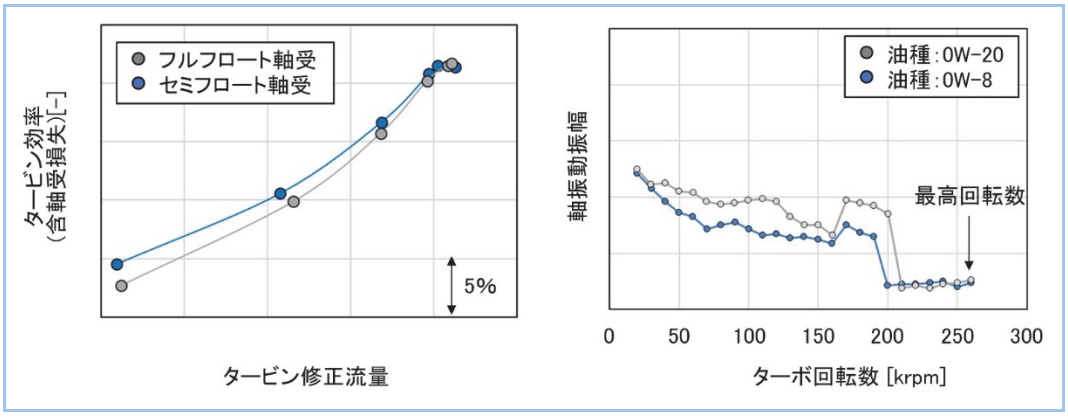


図 10 セミフロート軸受の性能試験結果及び軸振動試験結果

6. 改善効果検証

4 章, 5 章で述べた要素改善を取り入れたターボチャージャによるエンジン性能への影響を分析するため, エンジンシミュレーションを実施した。各エンジン作動点におけるタービン・コンプレッサ効率と燃費の変化を図 11 に示す。従来ターボチャージャに対し, 新設計ターボチャージャのエンジン 1 サイクルにおける総合効率は 2.4pt 向上し, それに合わせエンジン設定を見直すことで燃費は 1.1g/kW-h の改善が確認された。総合効率向上の内訳を分析すると, タービンの設計点 1, 2 における空力効率向上と, セミフロート軸受による軸受損失低減により, 排気脈動下の平均タービン効率が 1.5pt, コンプレッサの空力損失低減によりコンプレッサ効率が 2.0pt 向上した。図 8 に示すとおりタービンの設計点 1, 2 における空力効率は改善しているが, 図 4 に示す低膨張比領域の効率が低下しているため, 排気脈動下の平均タービン効率の向上量が小さくなった。従ってこの領域の空力効率を改善することでさらなる過給機効率向上が期待できる。

低速トルク点や最大出力点においても過給機効率はそれぞれ 0.5pt, 1.0pt 改善する等, いずれの作動点においても過給機効率向上が確認された。以上より PHEV 向けエンジンの出力特性において, 新設計ターボチャージャは全運転領域で従来ターボチャージャに対して過給機効率が向上し, エンジン性能改善が期待できる。今後エンジン台上においてエンジンの燃費・熱効率改善効果を検証していく予定である。

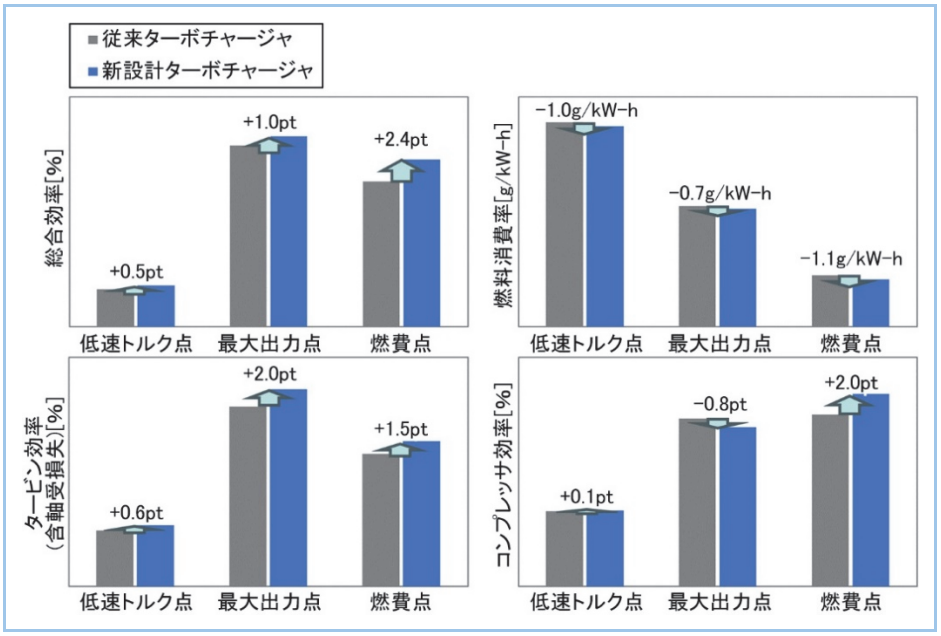


図 11 エンジンシミュレーションにおけるエンジン・ターボ性能評価結果

7. まとめ

PHEV 向けエンジンの燃費点の熱効率改善に寄与するため，ターボチャージャの高効率化を目指し，性能に寄与する要素（マッチング，空力性能，軸受機械損失）の改善に取り組んだ。マッチングについては，排気脈動下の作動点を分析し，作動 U/C_0 とタービン動翼の効率特性を考慮することで，タービン効率向上が見込める最適な D_c/D_t を設定した。コンプレッサについては，燃費点近傍の損失が低減するよう，翼形状を最適化することで，燃費点の作動点効率が 2.0pt 向上した。タービンについては，翼先端部のクリアランス部の漏れ流れを低減しつつ，排気ディフューザ部の流動を改善するよう翼形状を最適化することで，設計点 1 で効率 2.0p 向上，設計点 2 で効率 4.2pt 向上した。軸受については，セミフロート軸受採用により，シャフト径を 10%低減したことで，軸受損失が低減しタービン効率が 1.0pt 向上した。

これらのアイテムを適用しエンジン性能への影響を評価したところ，燃費点の燃費 1.1g/kW-h 改善の見込みが得られた。本報で実施した開発プロセスを，今後引合いが想定される新燃料対応エンジンにも横展開し，更なる受注拡大を図っていく。