新世代ターボチャージャ RHZ シリーズの開発

Development of the New Generation Turbocharger RHZ Series

高　橋　和　臣　産業システム・汎用機械事業領域車両過給機 SBU 技術統括センター開発部
大　東　祐　一　産業システム・汎用機械事業領域車両過給機 SBU 技術統括センター開発部　主査
金　田　真　一　産業システム・汎用機械事業領域車両過給機 SBU 技術統括センター開発部　グループ長
木　村　太　治　産業システム・汎用機械事業領域車両過給機 SBU 技術統括センター設計部

近年，地球温暖化対策のため二酸化炭素排出量削減・低燃費意識が向上しており，自動車用内燃機関の効率改善，排気ガスクリーン化など，さまざまな技術開発が進められている．こうしたなか，自動車エンジンで取り入れられている技術として，ミラーサイクルがある．株式会社 IHI では，お客さまのニーズに対応するため，ミラーサイクルエンジン，エンジン油の低粘度化（オイルグレード 0W-12）に対応し，高性能，高い過渡応答性を備え，軽量でコンパクトなデザインである RHZ シリーズを開発した．本稿では，RHZ シリーズがエンジンに与えるメリットおよび，それを支える技術を紹介する．

In recent years, awareness of reducing CO_2 and fuel consumption has increased as a measure against global warming, and various technological developments such as improving the efficiency of internal combustion engines and cleaning exhaust gas are being promoted. Under such circumstances, the Miller cycle is a technology that has been adopted in automobile engines. In order to meet the needs of our customers, IHI has developed the RHZ series, which can be used with Miller cycle engines, low-viscosity oil (oil grade 0W-12), has high performance, good transient response, and a lightweight, compact design. This paper introduces the merits of the RHZ series to engines and the technologies that support them.

1. 緒　　言

気候変動が起因した自然災害の激甚化を抑えるため，地球温暖化対策が必要となってきており，政府と自動車ユーザ双方の二酸化炭素（CO_2）排出量の削減・低燃費の意識が向上してきている．

そのため，IHI のお客さまである自動車メーカは，環境規制および自動車ユーザの要求水準（燃費やドライバビリティ（運転しやすさ・操作性））を満たす技術開発を行っている．既存の内燃機関の効率改善，排気ガスクリーン化，さらにはそれらの技術の低コスト化に加え，次世代車といわれるハイブリッド車（Hybrid Vehicle：HV），電気自動車（Electric Vehicle：EV），燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle：FCV）など，さまざまな技術開発を進めている．

そうした背景を考えると，自動車用内燃機関は縮小するようにみえるかもしれない．しかし，EV で内燃機関と同等の航続距離を確保するために電池搭載量を増やすと，車両重量および価格は内燃機関に対して約 2 倍になるなど課題も多く，内燃機関の活躍はまだまだ続くといえる．

こうしたなか，内燃機関の動向をみると，ヨーロッパメーカが採用して主流であったダウンサイジングターボエンジンの開発が一段落し，無理に排気量を下げずに車格に対して適正な排気量とするライトサイジングターボエンジンへの移行が進んでいる．燃費の評価モードが変わり，「乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法（Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure：WLTP）」や，実路走行における排出ガス規制の RDE（Real Driving Emission）が導入されている．市街地での高負荷走行が大幅に採り入れられる状況では，高負荷での効率性に難のあるダウンサイジングでは対応が難しくなってきているためである．そのため，排気量を適正化させたうえでミラーサイクルエンジンと組み合わせることにより，中低速域の高効率化を実現するライトサイジングターボが導入された．一方で，さらなる燃費改善を狙って，急速にエンジン油の低粘度化が進んでおり，0W-12 といった低粘度油が 2019 年度から JASO GLV-1（JASO M 364：2019）(1) により規格化された．よって，ターボチャージャにはそれに対応した機能が求められている．

IHI では，FCV 向けターボチャージャ，内燃機関向けターボチャージャの開発を進めている．特に内燃機関については，排出ガス規制が強化されたため，ディーゼルエン

ジンからのガソリンエンジン化が進んでいるのを受けて，ディーゼルエンジンよりも高温下で使用される，ガソリンエンジン向け可変容量型 (Variable Geometry System：VGS) ターボチャージャの開発を進めている．

本稿では，ミラーサイクルエンジン，低粘度油 (0W-12) にも対応でき，コンパクトで高性能を有するターボチャージャ RHZ シリーズを紹介する．

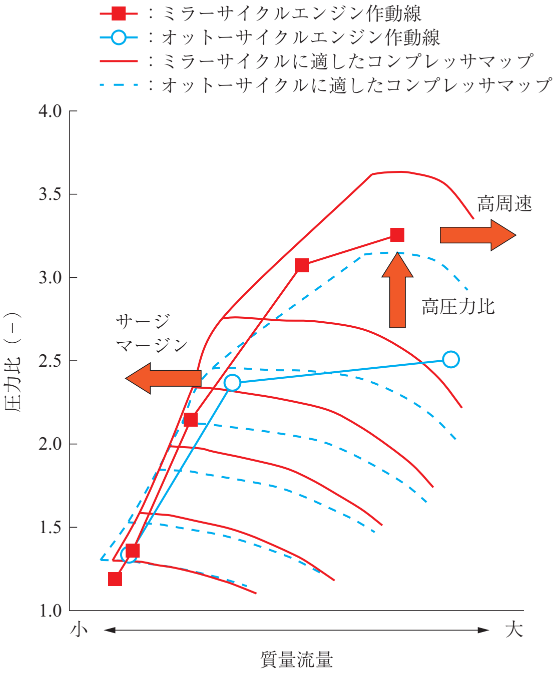
2.　ミラーサイクルエンジンとターボチャージャ

ターボチャージャの説明をする前に自動車エンジンにおいて燃費改善策として着目されているミラーサイクルエンジンについて説明する．

既存のガソリンエンジン (オットーサイクル) では，吸気，圧縮，膨張，排気の各行程の長さは同じ (すなわち，圧縮比 = 膨張比) である．一方，ミラーサイクルは，吸気弁の閉弁時期の調整によって圧縮行程 (圧縮比) よりも，膨張行程 (膨張比) を長くした熱サイクルである．

ミラーサイクルエンジンは，吸気弁の開閉タイミングにより，遅閉じ型と，早閉じ型に分けられる．詳細についてはほかの文献 (2) などに譲るが，結論から述べるとターボチャージャは早閉じミラーサイクルエンジンとの相性が良い．

第 1 図にエンジン作動線とコンプレッサマップを示す．既存のガソリンエンジン (オットーサイクル) およびミラーサイクルを適用したガソリンエンジンのターボチャージャの作動線と，それぞれのターボチャージャのコンプレッサマップを載せている．**第 1 図**により，既存のエンジン作動線よりもミラーサイクル適用時の方が，高周速 (ターボチャージャ回転数マージン)，サージマージン (コンプレッサ作動点が失速状態に至るまでのマージン) の拡大，高圧力比のコンプレッサが必要であることが分かる．



第 1 図　エンジン作動線とコンプレッサマップ
Fig. 1　Engine operating line and compressor map

また，ドライバビリティの向上，エンジンレイアウトの自由度向上の観点から，過渡応答性 (ターボチャージャのエネルギーがエンジンに伝わるまでの時間) やターボチャージャの小型化も重要な要素となる．

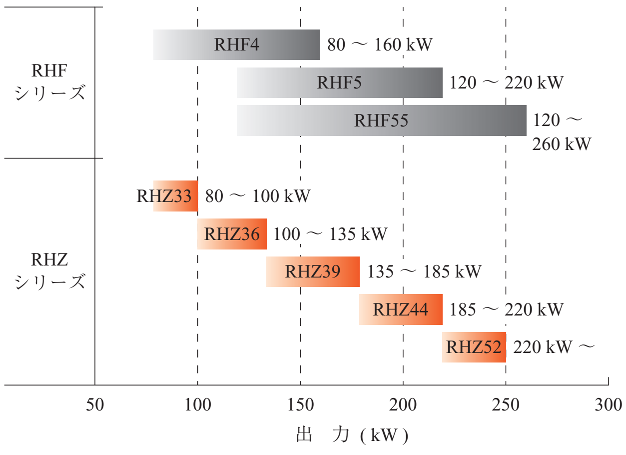
ターボチャージャの要求事項をまとめると，以下に分類され，求められる要素は多い．

(1)　広い作動領域 (ワイドレンジ)，高圧力比，高効率を有し，エンジンの燃費改善に貢献できる．
(2)　低イナーシャのロータ・アセンブリと低摩擦軸受を有し，過渡応答が良いこと．低粘度油にも対応できる．
(3)　軽量でコンパクトなデザインである．

3.　RHZ シリーズターボチャージャの開発

IHI では，このような点を踏まえて新機種 RHZ シリーズ開発を実施している．

第 2 図に RHF シリーズおよび RHZ シリーズのラインナップ計画を示す．車両出力とターボチャージャ機種の比較表を記載している．従来の RHF シリーズでは，一つの機種で幅広い車両出力をカバーしていたが，オーバスペックやコストアップになり，競争力を発揮できない場合



第 2 図　RHF シリーズおよび RHZ シリーズのラインナップ計画
Fig. 2　RHF series and RHZ series lineup plan

があった．そのため，RHZ シリーズでは機種を増やすことでエンジンごとに最適なアプリケーション (スイートスポットマッチング) が可能となった．本稿では，主力機種である RHZ39 について紹介する．

3. 1　ターボチャージャの回転数向上と燃費改善 — RHZ シリーズがエンジンに与えるメリット

RHZ39 ターボチャージャをミラーサイクルエンジンに搭載した場合，既存機種 (RHF4) に対してどのくらいのメリットが得られるのか，排気量 2.0 *l*，出力 80 kW/*l* についてエンジン性能を推定した．

第 3 図[3] に代表作動点における燃費の比較を示す．エンジン回転数に対する正味平均有効圧力 (Break Mean Effective Pressure：BMEP) を示し，次期燃費測定モードである WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) での，RHF4 に対する RHZ39 の燃料消費率 (Specific Fuel Consumption：SFC) を割合で示している．**第 3 図**から分かるように，ほとんどの作動点において SFC が低下しており，燃費が改善していることが分かる．

第 4 図[3] にエンジン性能とターボチャージャ性能を示す．

RHZ39 は RHF4 に対してコンプレッサインペラの許容周速を 630 m/s まで高めて圧力比が増加しており，これがエンジン性能に大きな影響を与えている．

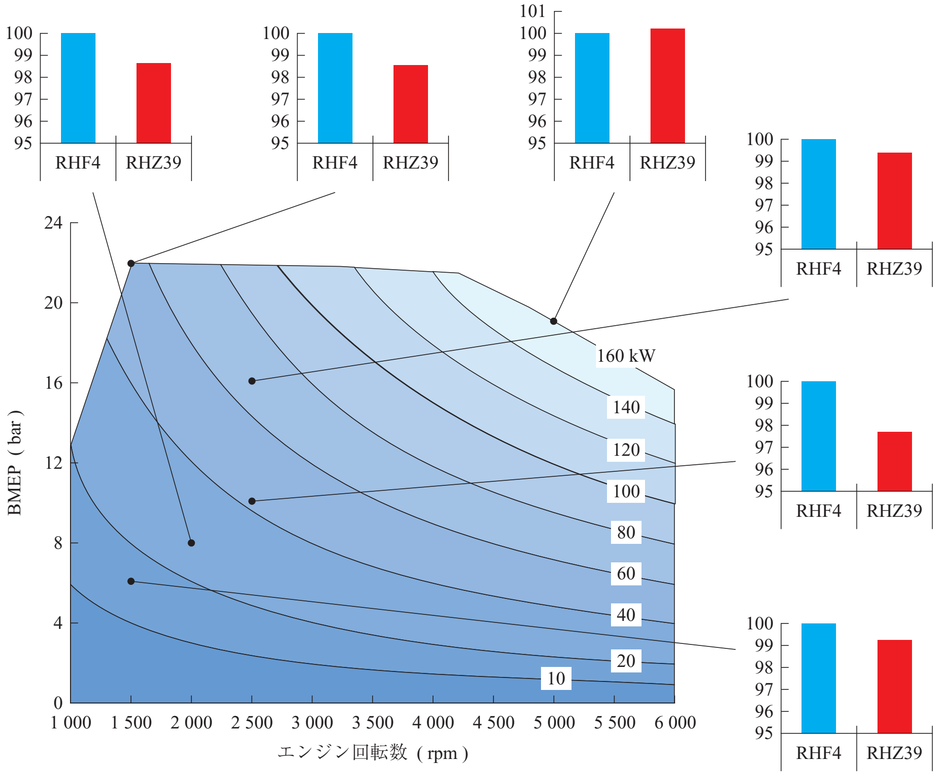
つまり，ミラーサイクルエンジンは，ターボチャージャの高圧力を利用して，定格出力やシステムの動的応答を損なうことなく CO_2 の排出を抑制できることを意味する．

また，許容周速向上だけではなく，小径コンプレッサとタービンホイールを用いることで 20％低いイナーシャを実現し，最適設計された軸受により 40％機械損失を低減させ，0.36 s (2 000 rpm で 2 bar から 90％のトルクまで) の応答性が改善した．

このように RHZ シリーズは，ワイドレンジ化，高圧力比化，高効率化，低イナーシャ化，軸受の最適化などを実現することで，エンジンの燃費改善に貢献できることを示した．次に，これらを達成するために RHZ シリーズで開発した代表的なアイテムを解説していく．

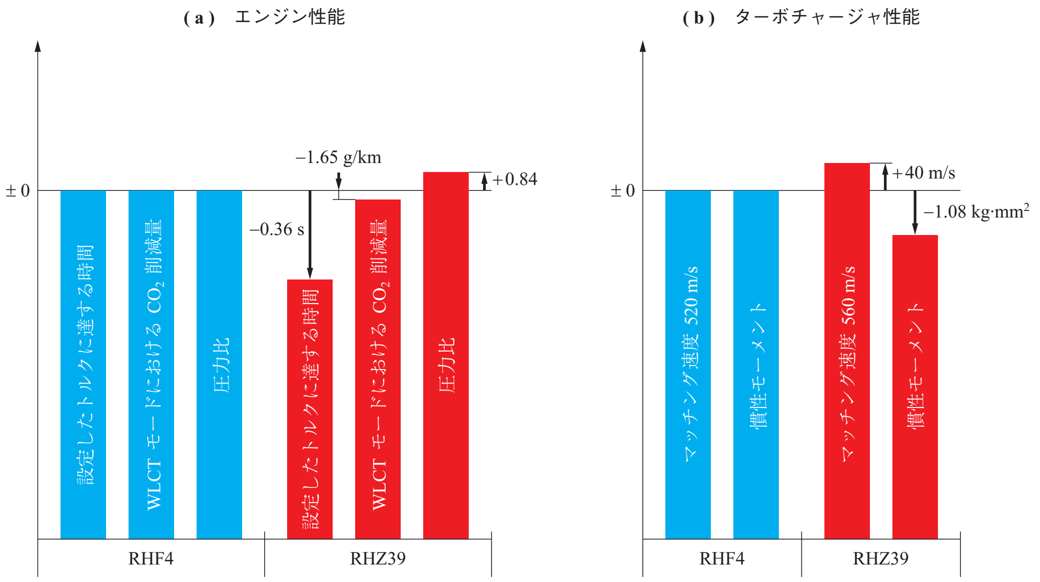
3. 2　ワイドレンジ，高圧力比，高効率への道

先に述べたとおり，ミラーサイクルエンジンに対応していくためにも，ターボチャージャはワイドレンジ，高圧力比，高効率を有する必要があるが，これらと強度はトレードオフになることが多い．加えて，ミラーサイクルエンジンはオットーサイクル使用時よりも低燃費であるが，排気



（注）　棒グラフの縦軸は燃料消費率（%）を示す．

第 3 図　代表作動点 (WLTC モード) における燃費の比較[3]
Fig. 3　Comparison of fuel consumption at representative operating points (WLTC)[3]



（注）　エンジンシミュレーションの結果を示す．

第 4 図　エンジン性能とターボチャージャ性能 [3]
Fig. 4　Engine performance and turbocharger performance [3]

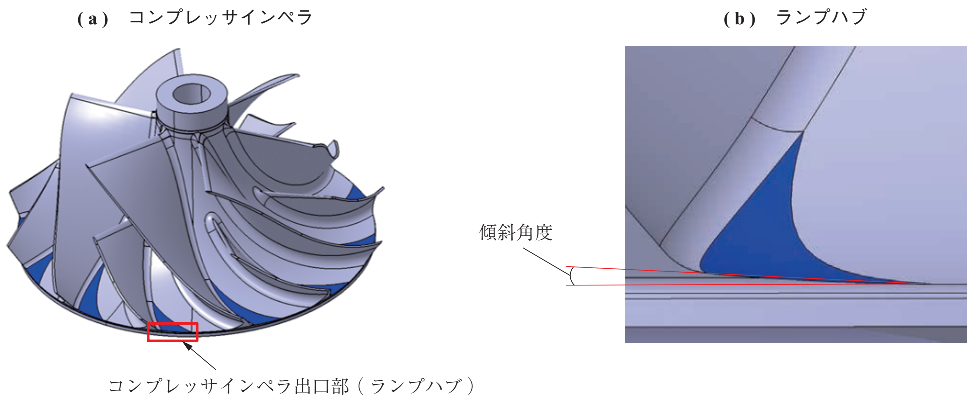
ガス温度が低下し，排気ガス量も低下するため，ターボチャージャにとっては小さいインプットエネルギーで大きなアウトプットエネルギーを出すことが求められる．そのため，モデルベース開発 (Model Based Development：MBD) を活用した最適化設計や新技術が必要であった．

そこで，コンプレッサにおいては新技術を採用したランプハブを導入した．**第 5 図**にランプハブを示す．

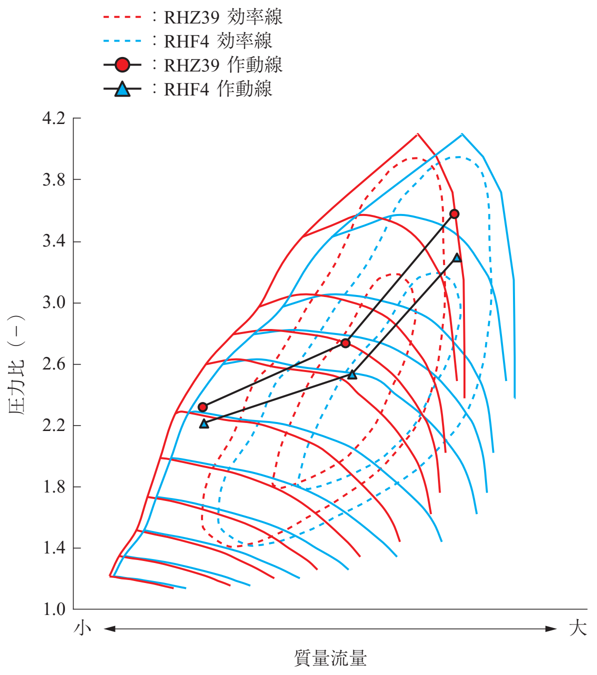
コンプレッサ出口部の翼付け根は，サージマージン確保や性能を向上する側に設置すると応力が高くなる傾向がある．一方でインペラ背面を厚くすると，ボス部 (タービン軸挿入部) の応力が高くなる課題があったが，このランプハブは，コンプレッサ出口部の翼付け根に傾斜をつけて厚くすることで，ボス部の応力上昇を抑えワイドレンジを確保することができる技術である．**第 6 図**に既存機種 (RHF4) と RHZ39 のコンプレッサマップを記載した．横軸は標準状態におけるコンプレッサ流量，縦軸はコンプレッサ圧力比，図中の等高線は RHF4 および RHZ39 の等効率線を示し，ミラーサイクルエンジン搭載時の作動点を記載した．**第 6 図**から，サージマージンの拡大，高圧力比化，常用作動点において高効率化が図れていることが分かる．

第 7 図にタービンホイールの断面図を示す．一方タービンにおいては，タービンホイールを，回転軸から放射状に伸びる翼の断面形状であったものを湾曲した翼の断面形状に変更した．それにより，タービンホイールの入口での損失 (ハブ側の渦流れ) を減少させ，出口流れを整流化することでディフューザでの損失を低減させた．また，ハウジングの容量を絞り，タービン入口での流体運動エネルギーを増加させる設計も取り入れた．

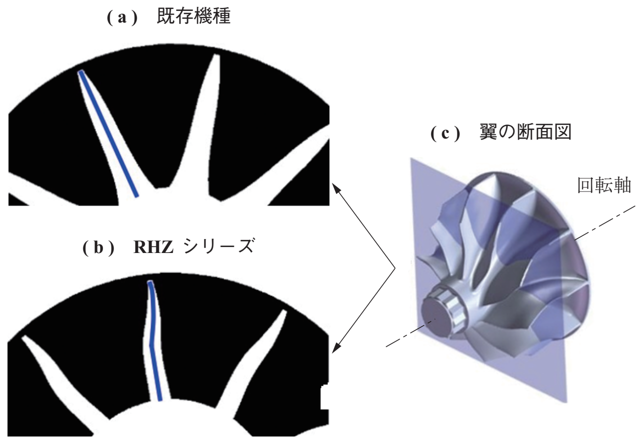
第 8 図に既存機種 (RHF4) に対する RHZ39 のタービ



第 5 図　ランプハブ
Fig. 5　Ramped hub



第 6 図　既存機種 (RHF4) と RHZ シリーズのコンプレッサマップ
Fig. 6　Compressor map of current model (RHF4) and RHZ series



第 7 図　タービンホイール断面図
Fig. 7　Turbine wheel cross section

ン出力を示す．**第 8 図**から出力 (性能) が増加していることが分かる．

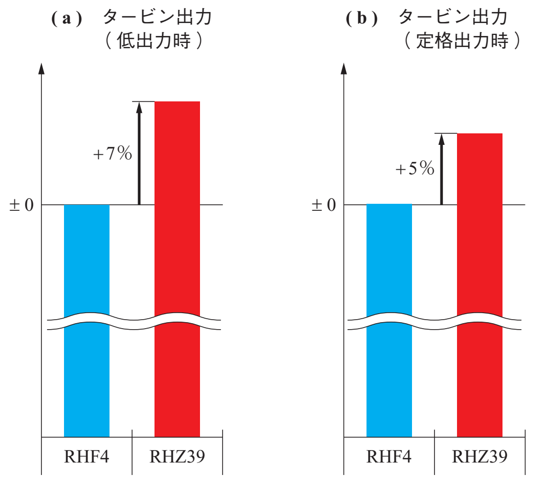
3. 3　ロータ・アセンブリの低イナーシャ，軸受の低摩擦

ターボチャージャを搭載するに当たり，ターボラグ (アクセルによる加速要求と実際の加速が発生するまでのタイムラグ) をなくすために，過渡応答性能は重要である．そこで RHZ シリーズでは，RHF シリーズよりも軸長を短くし，コンプレッサインペラとタービンホイールの径を小さくしたうえで両者とも斜流タイプにし，高周速化することで，イナーシャを 20％低下させた．**第 9 図**にイナーシャと軸受損失の比較を示す．既存機種に対する，コンプレッサインペラとタービンホイールを合計したイナーシャ低減量を示す．

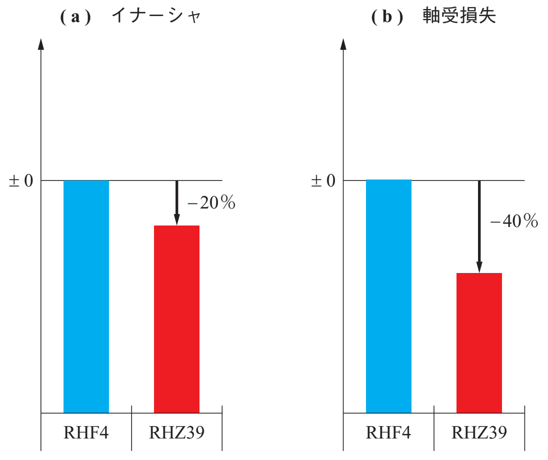
また，**第 9 図**には機械 (軸受) 損失も示しているが，ターボチャージャ回転数 150 000 rpm では軸受損失を 40％低減した．これは，軸径を小さくすることで軸受損失を低減させている．

そして軸受速度も，軸径を小さくすることで，インペラの周速度換算で 630 m/s まで向上させることができた．これは，軸径を減らせば，軸の剛性が減るため，回転安定性にとってはデメリットになるが，既存機種と比較して，ロータ全長を短くして剛性を補うことで機械損失と回転安定性の両立を実現できた．

加えて軸受材料も変更している．詳細については参考文献 (4) に記載されているが，RHZ シリーズでは，低粘度油にも対応できる耐焼付き性，耐熱性を確保するため，軸受材にアルミニウム (Al)，シリコン (Si)，マンガン (Mn)，亜鉛 (Zn) などの添加元素を加えた材料を使用している．そのため耐熱性は，既存機種よりも 100℃向上した．



第 8 図　既存機種 (RHF4) と RHZ39 のタービン出力
Fig. 8　Turbine power of current model (RHF4) and RHZ39



第 9 図　イナーシャと軸受損失の比較
Fig. 9　Inertia and friction loss comparison

3.4　軽量でコンパクトなデザイン

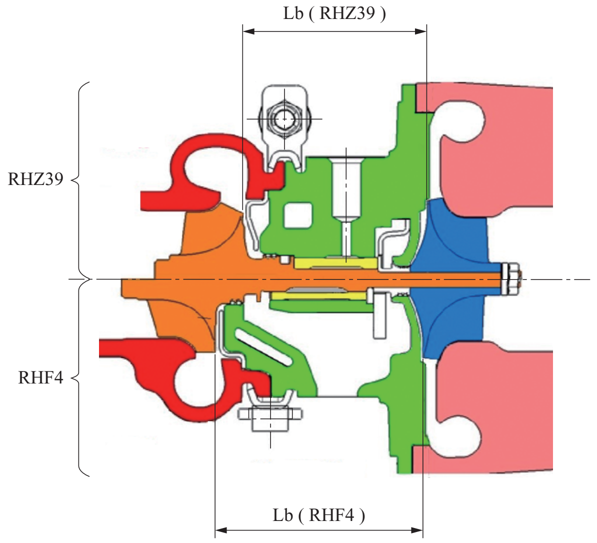
もう一つ特筆すべき点は，RHZ シリーズはコンパクトデザインであるということである．

先に述べたとおり，サイズが小さく軽量であることが燃費改善につながるが，RHZ シリーズではタービンとコンプレッサの背面長さ (Lb) を短くすることに成功した．

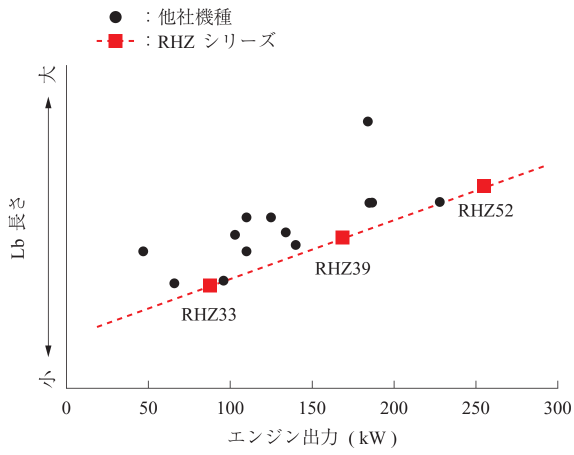
第 10 図に RHF4 と RHZ39 の比較を示す．タービンとコンプレッサの背面長さを Lb として，RHZ39 と既存機種 (RHF4) の比較図を記載した．RHZ39 は RHF4 よりも 10%短くなっている．

第 11 図に，長さ Lb に関する RHZ シリーズと他社機種との比較を示す．RHZ シリーズは，同出力帯の他社製ターボチャージャよりもコンパクトになっていることが分かる．

これは，長年のノウハウの積み重ねである軸振動の解析精度向上，軸長に対する軸受隙間のクライテリア精度向上，最新技術である公差解析技術などを活用することにより，限界設計および短軸長化を可能にした．また，短軸長化により製造性悪化が懸念されたが，生産部門やサプライヤと連携することで製造性を確保した．



第 10 図　RHF4 と RHZ39 の比較
Fig. 10　Comparison of RHF4 and RHZ39



第 11 図　長さ Lb に関する RHZ シリーズと他社機種との比較
Fig. 11　Comparison of RHZ series and competitor models regarding length Lb

4.　結　　　言

本稿では，お客さまのニーズに対応するため，ミラーサイクルエンジン，エンジン油の低粘度化 (オイルグレード 0W-12) に対応し，高性能，過渡応答性を備え，軽量でコンパクトなデザインである新世代ターボチャージャ RHZ シリーズの RHZ39 を紹介した．

このターボチャージャの高圧力を使用することで，ミラーサイクルエンジンは，定格出力やシステムの動的応答を損なうことなく，CO_2 排出量を削減することができる．

今後も，年々厳しくなる環境規制に対して貢献できるよう，脱 CO_2・資源循環型社会の実現に向け IHI グループは一丸となって技術開発に取り組み，社会に貢献していく．

参 考 文 献

(1)　JASO エンジン油規格普及促進協議会：自動車用ガソリン機関潤滑油規格，JASO M364，2019 年

(2)　畑村耕一，世良耕太：図解 自動車エンジンの技術，株式会社ナツメ社，2016 年，pp. 20 － 25

(3)　M. Rode, T. Suzuki, G. Iosifidis, L. Durbiano, D. Filsinger, A. Starke, J. Starzmann, N. Kasprzyk and T. Bamba：Boosting the Future with IHI: a comparative evaluation of state-of-the-art TGDI turbo concepts. 24th Supercharging Conference, (2019. 7), pp. 8 － 11

(4)　小島英之：自動車の燃費低減に貢献するターボチャージャのトライボロジー技術－軸受周辺の設計技術と今後の課題について－，トライボロジスト，第 65 巻，第 6 号，2020 年 6 月，pp. 362 － 369