

次世代ハイブリッド車用ターボチャージャの適用技術

Development of Turbocharger for Next Generation Hybrid Vehicles



尾崎 誠^{*1}
Makoto Ozaki

吉田 豊隆^{*2}
Toyotaka Yoshida

藤田 豊^{*3}
Yutaka Fujita

二江 貴也^{*4}
Takaya Futae

新井 貴^{*5}
Takashi Arai

山田 祐樹^{*2}
Yuki Yamada

近年、地球温暖化対策としてカーボンニュートラルへ向けた取組みが加速されており、乗用車ではハイブリッド車のシェア向上が予測されている。それにより内燃機関の作動範囲は従来のものより限定され、ターボチャージャにもその特性に適合した開発が求められている。三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社(以下、当社)ではハイブリッド車の要求特性に合わせた高効率コンプレッサ、高効率化を狙い設計したベンドノズルタービン、機械損失低減を企図したボールベアリング及びデータサイエンスを活用した低コストタービンハウジング材の開発を実施し、自動車メーカ各社に提案している。

1. はじめに

近年の地球温暖化に伴う気候変動により世界各国でカーボンニュートラルに向けた取組みが加速されている。自動車業界ではCO₂排出量規制の強化が計画されており、欧州では2030年に2021年比-37.5%までの規制強化が見込まれる。この規制強化により各国ではよりCO₂排出量の少ない車両(プラグインハイブリッド車:PHEV、電気自動車:BEV、燃料電池車:FCEV など)の導入促進が図られており、また欧州各国では概ね2030年~2040年の間に内燃機関搭載車の販売が禁止となる。一方、電動車に搭載されるバッテリー原料(リチウム、ニッケル、コバルト)の埋蔵量は有限であり、現時点のバッテリー技術では全ての自動車を電気自動車化するシナリオは考えづらい。また、電気自動車は、再生可能エネルギーによる発電が普及した地域でないとCO₂排出量はゼロとは言えないという問題もある。現実的なシナリオとしては昨年中国自動車技術会(SAE-China)が発表した“省エネ・新エネ車技術ロードマップ 2.0”のように、BEVの普及は促進されるものの、ハイブリッド化により作動点を限定しつつ低燃費化を図った内燃機関を搭載した自動車も継続的に生産することが考えられる。また、世界主要市場において普及が予想されているハイブリッド車の型式は図1の通りで、欧州、米国、中国では電源を48V化したパラレル形式のマイルドハイブリッド車が最も普及すると予想されている。一方、日本市場では世界各国に先んじてハイブリッド車を量産化したこともあり、パワースプリット型及びシリーズ型のストロングハイブリッド車が大きなシェアを占めると予想されている。本技術トレンドへの対応として、当社ではハイブリッド車に搭載される内燃機関に対応したターボチャージャの開発を実施しており、本報ではその開発状況を説明する。

*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 技術士(機械部門)

*2 三菱重工工業株式会社 総合研究所ターボ機械研究部

*3 三菱重工工業株式会社 総合研究所ターボ機械研究部 技術士(機械部門)

*4 三菱重工工業株式会社 総合研究所 機械研究部 技術士(機械部門)

*5 三菱重工工業株式会社 総合研究所 製造研究部 主席研究員

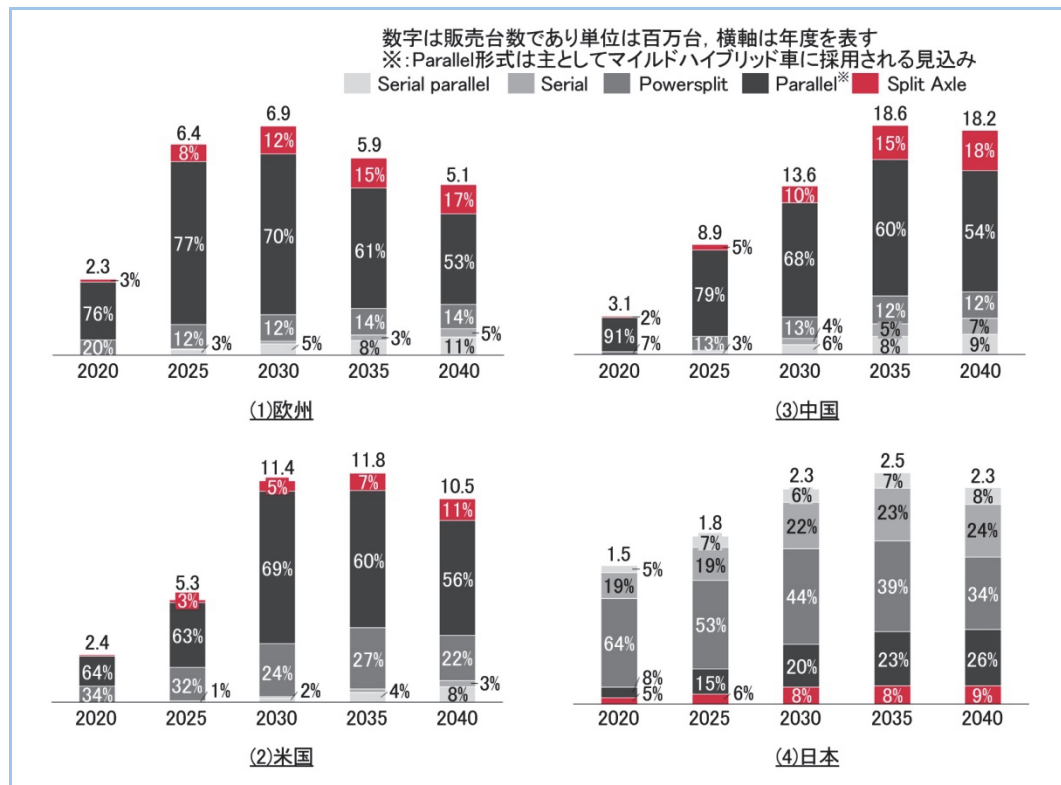


図1 主要市場におけるハイブリッド車シェア比較 (FEV Consulting GmbH 社調べ)

2. ハイブリッド化によるターボチャージャへの性能要求変化

車両のハイブリッドシステムは大まかに分類すると走行にモータとエンジン両方を使用するパラレル型と、走行にはモータのみ使用しエンジンは発電のみに特化するシリーズ型に分類される。(なお、パワースプリット型はエンジン出力を駆動用、発電用に配分しており、パラレル型とシリーズ型の中間に分類されるが、ターボチャージャの作動点としてはシリーズ型の作動点と近くなるため、ここでは説明を割愛する)

前者は車両要求出力に対しエンジンを主発動機としモータを補助的に利用することでエンジンの作動点を効率の良い領域に集め車両燃費を高めている。例えば低速走行時であれば、エンジンを停止させモータのみで走行し、効率の良いエンジン低負荷での動作を回避する。また、急加速時もモータでアシストすることで燃費の良い中トルク領域を使用し、車両燃費の向上を図る。図2に従来型ダウンサイジングターボ過給エンジントルク線図に対して、モータのみでの走行するために使用しないエンジン作動領域、及びモータアシストを使用するため使用しないエンジン作動領域を示す。また、この場合のターボチャージャの全負荷コンプレッサ作動点変化を図3に示す。エンジン低回転時の最高トルクが緩和されたことで、コンプレッサの小流量作動点の圧力比は低下し、最高出力を抑制したことで最大流量も減少している。タービンはエンジン低速時のトルクが緩和されたことで、エンジン高回転・高出力を重視した大容量品が使用でき、エンジンを主動力として使用する高速走行時のタービン効率向上、燃費向上が期待できる。

一方、後者のシリーズ型ハイブリッド車ではエンジンを発電のみに使用するため、エンジン回転数に依存せずに出力ごとに最も燃費の良い作動領域を使用できる。図4に従来型ダウンサイジングターボ過給エンジントルク線図に対して、シリーズ型ハイブリッド車に搭載されたエンジンの作動点を示す。従来型ダウンサイジングターボ過給エンジンでは、作動領域(面)が必要になるが、シリーズ型ハイブリッド車では、作動線での運転が可能となる。この場合のターボチャージャの全負荷作動点変化を図3に示す。エンジン燃費の良い作動点のみ使用するため、コンプレッサ・タービンともに作動範囲は狭くなる。

以上のようにハイブリッドシステムが採用された場合、エンジンとターボチャージャの作動領域

は低燃費化を狙い狭くなる傾向がある。作動域が狭くなることでターボチャージャとしてはより高効率化が図れる見込みであり、コンプレッサ、タービン、軸受各要素の高効率化について次章以降にて説明する。

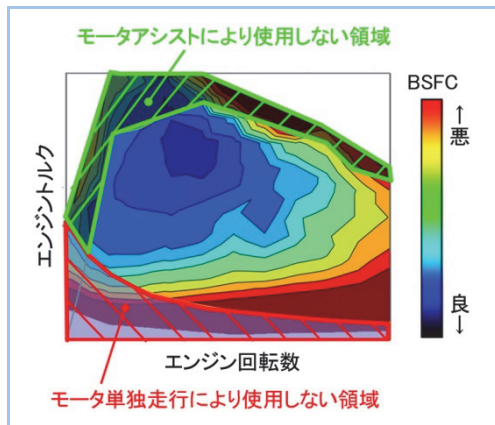


図2 パラレル型ハイブリッド車搭載エンジンの作動領域

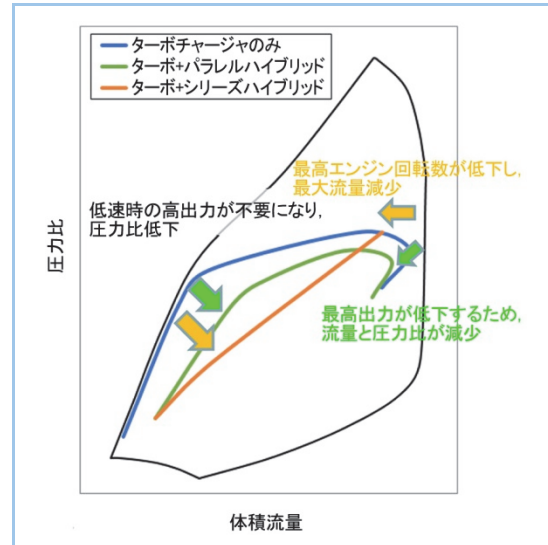


図3 ハイブリッド用コンプレッサの全負荷作動点

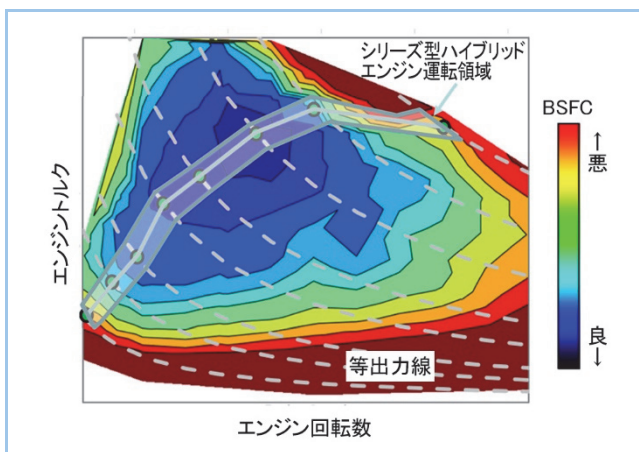


図4 シリーズ型ハイブリッド車搭載エンジンの作動領域

3. コンプレッサ性能向上

これまで乗用車用エンジンに用いられる遠心コンプレッサには、中・高比速度領域の高性能化が要求され、3次元インペラや翼負荷分布を考慮した最適化などによる二次流れ損失・剥離損失の抑制に努めてきた^{(1),(2)}。しかしながら、近年開発が急速に進んでいるハイブリッド車用エンジンでは、作動範囲の広くない低比速度遠心コンプレッサの高性能化が必要となる。そこで、低比速度域で顕著となる摩擦損失や混合損失を抑制する高効率遠心コンプレッサの開発に取り組んだ。

図5に今回設計を実施した遠心コンプレッサ外観を示す。本コンプレッサは、想定されるハイブリッド車用エンジンの作動点を設計点として、漏れ流れ・衝撃波・衝突損失を抑制する入口設計の適正化と、ウェーク・混合損失・下流の摩擦損失を抑制する出口設計を行った。図6に性能試験結果を示す。今回の遠心コンプレッサが高効率化を達成できていることが分かる。

次に、図7に当社の遠心コンプレッサの性能試験結果を、横軸：比速度と縦軸：最高効率で整理した結果を示す。今回設計したコンプレッサが低比速度域での大幅な高効率化を達成していることが確認できる。今後は本形状をベースにディフューザー内部に整流翼を配置したベンドディフューザ適用や翼形状最適化による更なる高効率化に取り組んでいく予定である。

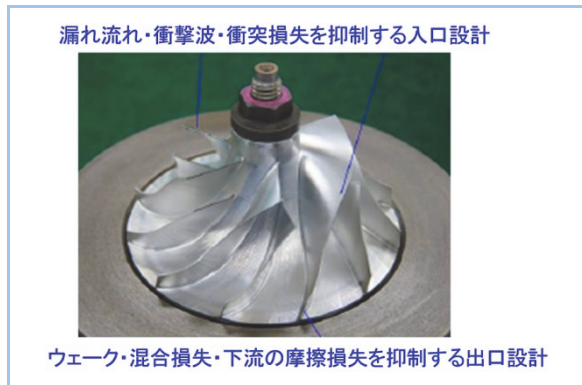


図5 高効率遠心コンプレッサ外観

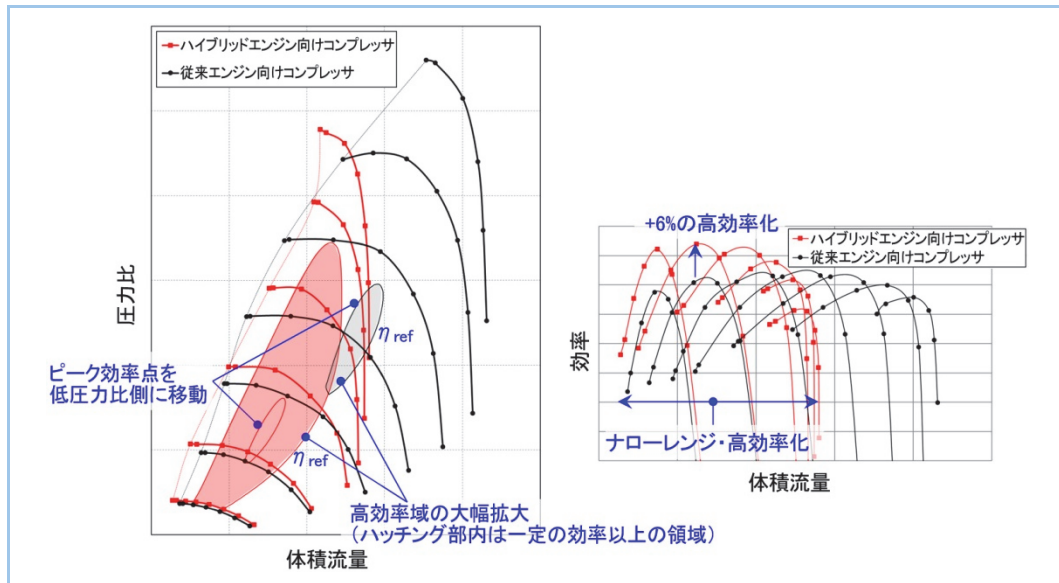


図6 新規設計コンプレッサ性能試験結果

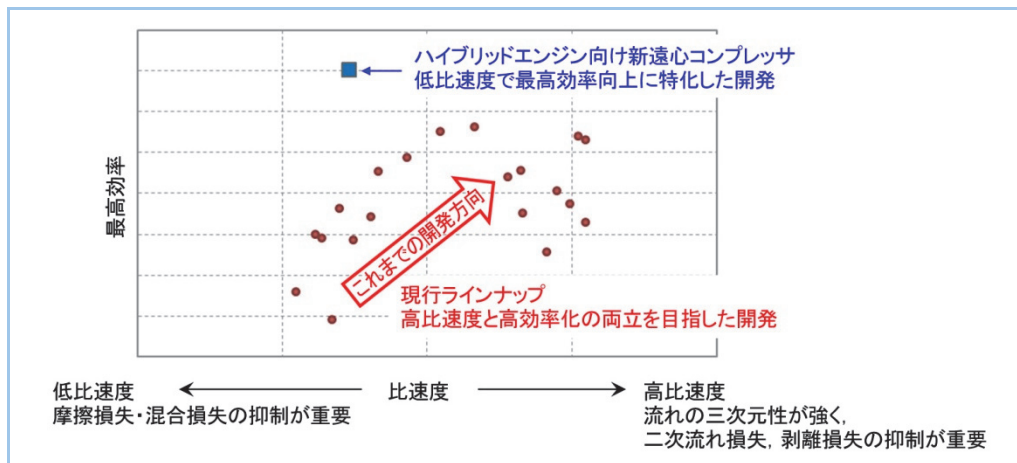


図7 比速度と最高効率

4. タービン性能向上

従来、乗用車向けターボは広域の作動範囲に対応するため、動翼に排気ガスを導く流路に整流翼を配置しないベーンレスノズルタービンや整流翼を可変化しタービン流量を調整できる可変ベンドノズルタービンが適用されてきた。一方、ハイブリッド車に搭載されるエンジン、特にシリーズ型ハイブリッド車に搭載されるエンジンでは、作動範囲が大きく限定された上で高性能化が求められる。このようなニーズには発電用ディーゼルエンジンに用いられる動翼に排気ガスを導く流路に整流翼を配置したベンドノズルタービンが最適となる。

図8にハイブリッド車向けに設計したベンドノズルタービンの外観を示す。特徴として排気ガスを整流する渦巻き状通路:スクロールと回転する動翼の間に整流翼が配置されていることが挙げられる。整流翼によりスクロール周方向における流動ひずみを緩和し、動翼にとって最適な流れを形成し高効率化を図っている。併せてスクロール単体での排気ガスの膨張を主にベーン側で行いスクロール部での摩擦損失低減も図っている。また、本タービンでは整流翼が固定されているため、可変ベーンで見られる動作不良回避のための整流翼端クリアランスをゼロとすることが可能であり、それによる高効率化も図れる。

図9にベーンレスノズルタービンに対するベンドノズルタービンの空力的な効率向上代を示す。ベンドノズルタービン化することで、10%程度のタービン効率向上が図れる。また、目標とする要求作動点に応じて、ノズルベーン開度や形状、動翼仕様をカスタマイズすることで更なる高効率化が図れる設計自由度もメリットとして挙げられる。

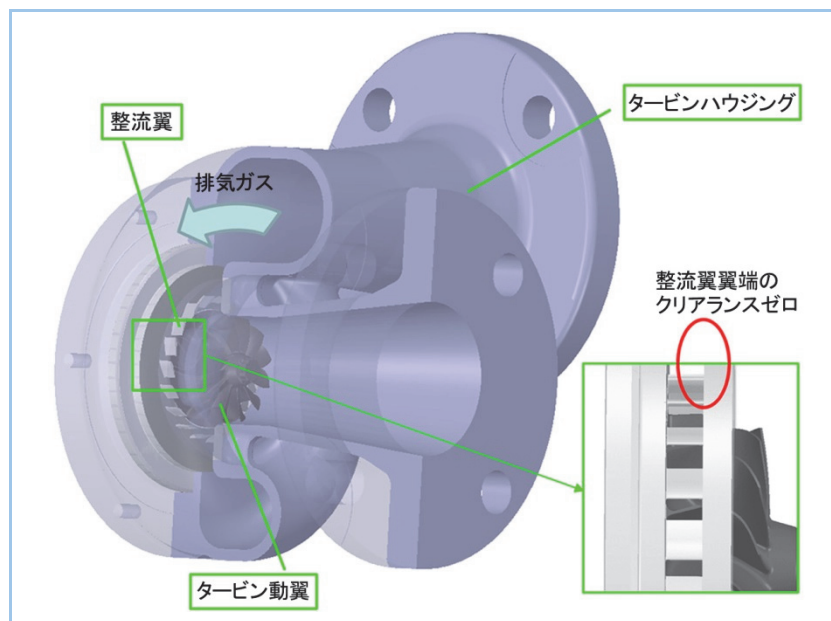


図8 ベンドノズルタービン外観

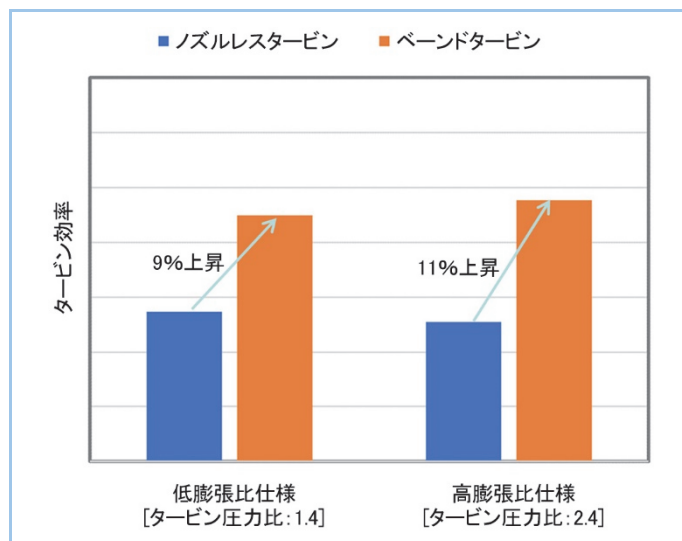


図9 ベンドノズルタービンの空力的な効率向上代
(低温効率比較)

5. ベアリングシステム改善

ハイブリッド車は燃費の悪いエンジンの低負荷領域を使用しないため、アイドリングストップ後の起動時に急速にエンジン負荷が上昇する。それに伴いターボ回転数も上昇するため、ターボの給油遅れが発生する。上記の対応として無給油でも運転可能なボールベアリングの採用を検討した。図10に断面図を示す。

ボールベアリングは、従来ターボチャージャに採用されているすべり軸受に比べて機械損失を低減できるメリットがあるが、減衰性能が低下し、軸振動が増加、騒音レベルが悪くなるリスクがある。そこで、ボールベアリング外周にスクイズフィルムダンパを設計し、減衰性能を確保した。まず図11に機械損失計測結果及びターボチャージャ効率試験結果を示す。ボールベアリングを採用することで、機械損失を約50%低減(@120krpm)できており、ターボチャージャ効率が運転全域で2%程度向上していることが分かる。次に、図12に軸振動及びターボチャージャ騒音の代替値として計測したターボチャージャハウジング加速度を示す。本図より回転数の増加に対してハウジング加速度の急増がなく、定格回転数まで運転できていることが分かる。また本図より250時間耐久試験前後の加速度データはほぼ変化していないことが分かる。

今回設計したボールベアリングは従来型のすべり軸受よりも機械損失が低減し、振動特性にも問題がないことが確認できたため、今後は本仕様をベースにして機種展開に取り組んでいく予定である。

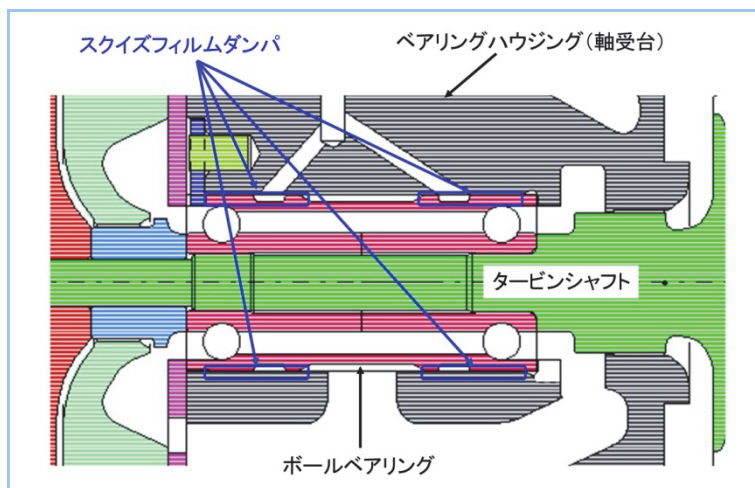


図10 ボールベアリング断面図

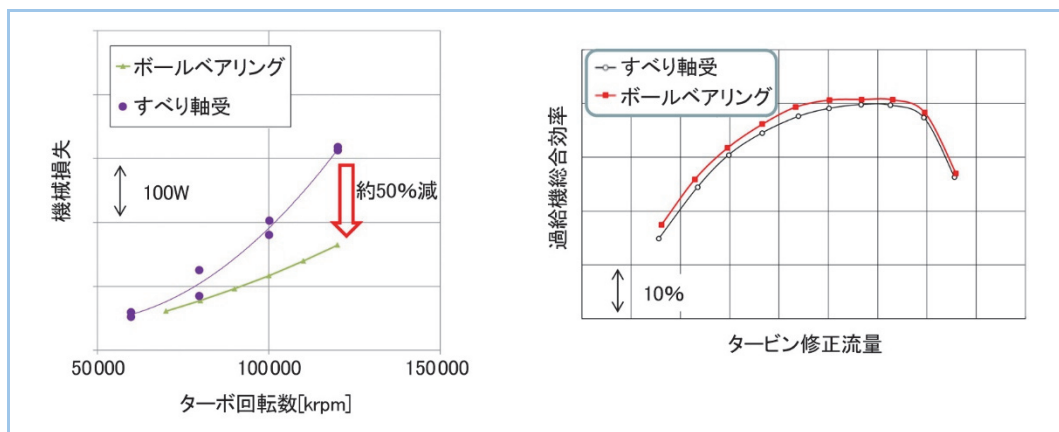


図11 機械損失および過給機総合効率比較(すべり軸受と転がり軸受)

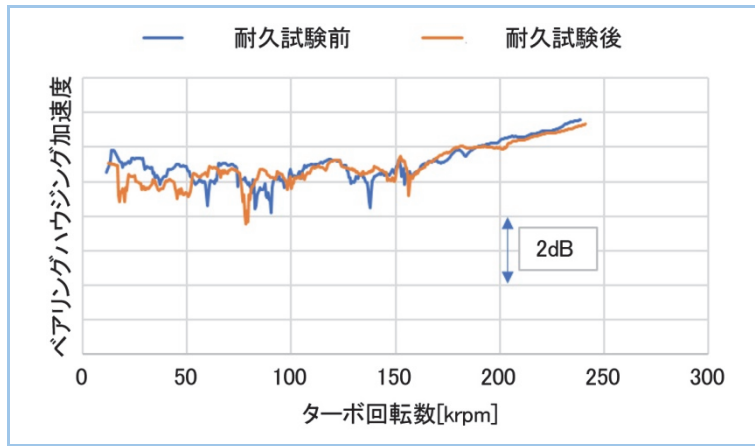


図 12 耐久前後のターボ振動加速度比較

6. 材料開発

ハイブリッド車ではモータ、インバータ及びバッテリーなどが追加されるため、これらによるコストアップ化が予想される。そのためターボチャージャを含むエンジンには低価格化が求められており、ターボチャージャ構成部品の中で最もコストの高い排気ガスを整流するための渦室：タービンハウジングの低コスト化は不可欠である。当社ではガソリンエンジン向けターボチャージャのタービンハウジング材料として、標準的に DIN 規格^{*}のオーステナイト系ステンレス耐熱鋳鋼を使用している(図 13)。昨今、お客先よりご提示頂くタービンハウジングの入口温度：排気ガス温度の高温化に伴い、高価なニッケルを多く含有する DIN 材(1.4848 材, 1.4849 材)を使用せざるをえず、高コストとなっている。

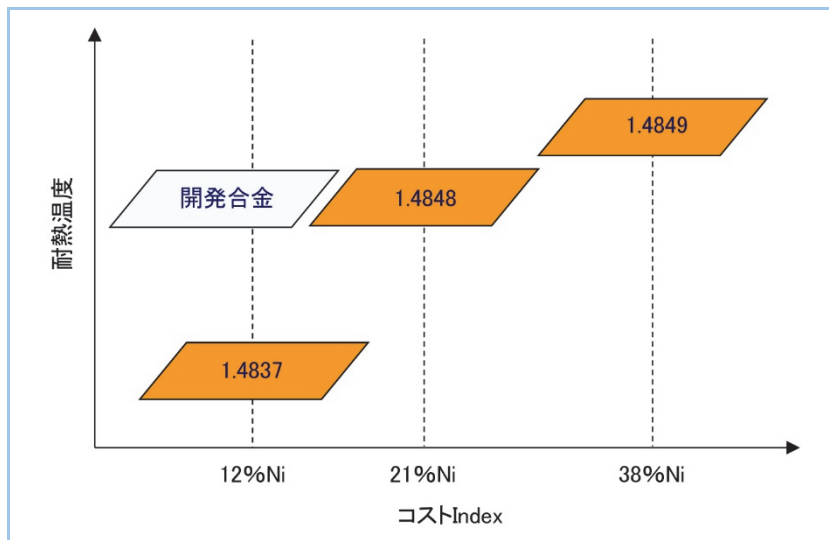


図 13 DIN 規格オーステナイト系ステンレス鋳鋼の耐熱温度と Ni 含有量

当社は、耐熱材料の合金設計などの事業を行う Alloyed 社と共同開発を行い、Alloyed 社の有する計算材料設計技術(Alloys-by-Design, ABD[®])を用いて 1.4848 材と同等の材料特性を有する低コストタービンハウジング材料の開発を実施した。図 14 に低コストタービンハウジング材料の合金設計手順を示す。化学成分-材料組織-材料特性の各関係性とデータベースや計算工学を組合せることで、材料特性を予測可能であり、従来の試行錯誤や実験的アプローチ的な手法に比べ短期間・低コストで合金設計できる手法である。オーステナイト系ステンレス鋼の広い化学成分範囲内で組合せ可能な全合金の性能を予測した後、1.4848 材よりも低コストでかつ同等の材料特性(高温強度、組織安定性、耐酸化性)を有する化学成分を選定した。図 15 に合金設計した候補材2種における試作材の材料試験結果の一例を示す。1.4848 材と比較して、同等以上

の高温強度を有し、素材コストを 10～30%程度低減できることを確認できた。今後は候補材のタービンハウジング形状における铸造性、加工性の評価を行うとともに、エンジンの作動状態に対応した耐久性評価を行い、市販車への適用を図る予定である。

※DIN 規格:ドイツ規格協会 (Deutsches Institut für Normung) が制定する, ドイツ連邦共和国の国家規格

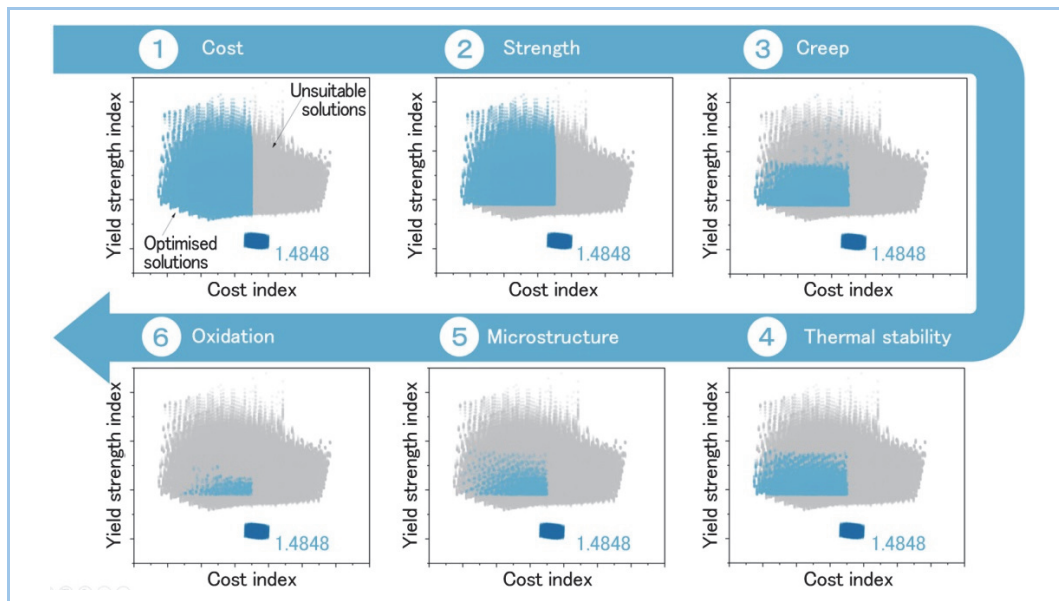


図 14 低コストタービンハウジング材合金設計手順

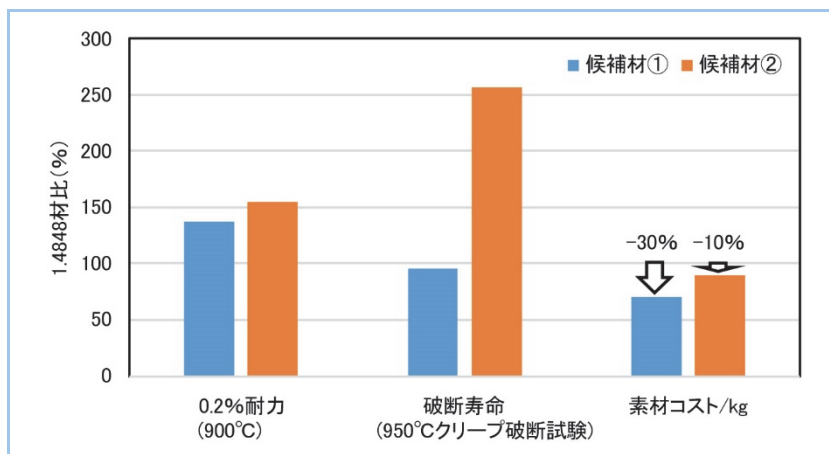


図 15 試作材材料試験結果

7. まとめ

本報ではハイブリッド化に伴うターボチャージャ要求作動点の変化を概観し、次世代ハイブリッド車用ターボチャージャの適用技術として新規開発高効率コンプレッサ、ベアードノズルタービン、低機械損失・低騒音ボールベアリング、及び低コストタービンハウジング材について説明した。近年は内燃機関を搭載しない電動車への注目度が高くなっているが、技術的課題も多いため、今後も内燃機関が果たす役割は多いものと考えている。その低燃費化に当たってターボチャージャが貢献できる部分は多いため、今後も自動車メカ各社と協業し、本報に記載した技術の普及に努めて、地球環境改善への取組みを続けていきたい。

参考文献

- (1) 横山隆雄ほか, ターボチャージャの高性能化を支える高度空力設計技術 三菱重工技報 Vol.54 No.1 (2017) p79-87
- (2) 段本洋輔ほか, 次世代ガソリンエンジン向け VG ターボ開発 三菱重工技報 Vol.56 No.2 (2019) p1-8