

# シリーズ型ハイブリッド車用ターボチャージャの開発

## Development of Turbocharger Dedicated to Series-hybrid Engines



阪口 季望矢\*<sup>1</sup>  
Kimiya Sakaguchi

尾崎 誠\*<sup>2</sup>  
Makoto Ozaki

森 直之\*<sup>3</sup>  
Naoyuki Mori

神坂 直志\*<sup>4</sup>  
Tadashi Kanzaka

中村 揚平\*<sup>5</sup>  
Yohei Nakamura

坂本 慶吾\*<sup>6</sup>  
Keigo Sakamoto

地球温暖化対策として温室効果ガス排出低減に向けた取組みが進められ、自動車についても低炭素化、脱炭素化を達成するため電動化の動きが加速している。ハイブリッド車用エンジンは高効率化を求めため、モータによるアシストを利用し、運転領域を限定している。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、このようなハイブリッド車用エンジンの要求特性に適合した、高効率ベンドディフューザコンプレッサ、及びベンドノズルタービンを開発した。また、これらを低コストで提供するために簡素化構造を検討し、評価したため、以下でこれらについて述べる。

### 1. はじめに

CO<sub>2</sub>をはじめとする温室効果ガスの排出に伴い、平均気温や海水温の上昇による海面の上昇や大雨、干ばつといった異常気象が地球規模で発生し、全世界で取り組むべき課題として取り上げられている。本課題の解決に向けて、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指した種々の取組みがなされている。自動車産業においても、CO<sub>2</sub> 排出規制強化の動きがとられ、欧州では2035年に2021年比△100%とする削減目標が制定されている<sup>(1)</sup>。このような規制強化に伴い、自動車メーカーでは車両からのCO<sub>2</sub> 排出がないバッテリー式電動自動車(BEV: Battery Electric Vehicle)や燃料電池自動車(FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle)の開発を加速させている。その一方で、これらの普及に向けては車両への給電、水素供給インフラの整備が必要であり、またそれら動力源の製造に関しても、製造過程で温室効果ガスを排出しないよう、再生可能エネルギーを用いた製造工程や設備の開発が必要になるなど、課題は多い。将来的な課題解決を見据えて、BEVやFCEVの販売比率は増加していくと考えられるものの、過渡期においては内燃機関とモータの両方を推進力とするハイブリッド車両が継続的に生産されると想定される。このような状況下で低炭素化を実現するためには、ハイブリッド車両の低炭素化が必要であり、中でも燃費改善効果の高い、ストロングハイブリッド車のエネルギー変換効率向上が有効である。現在、当社ではハイブリッド車用エンジンの高効率化に貢献するターボチャージャの開発、設計を行っており、本報では、ストロングハイブリッド車の1つであるシリーズ型ハイブリッド車のエンジン特性に適合した高効率ターボチャージャの開発状況、並びにその低コスト化を実現するための構造について述べる。

\*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

\*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 主席技師 技術士(機械部門)

\*3 三菱重工工業株式会社 総合研究所 燃焼研究部

\*4 三菱重工工業株式会社 総合研究所 ターボ機械研究部

\*5 三菱重工工業株式会社 総合研究所 流体研究部 工博

\*6 三菱重工工業株式会社 総合研究所 強度・構造研究部 技術士(機械部門)

## 2. シリーズハイブリッド車用エンジンのターボチャージャへの要求特性

ハイブリッド車用エンジンでは、モータアシストによってエンジン効率が低い領域を主として利用することができ、主要作動域にマッチしたエンジン仕様を採用することができる。その中でも、発電に特化したシリーズハイブリッド車用エンジンでは、高効率な運転点を探索し、ピーク熱効率50%を目指す取組みが進められている<sup>(2)</sup>。このような高効率化にあたっては、作動ガスの比熱比向上による理論熱効率向上や、燃焼温度低減による筒内冷却損失の抑制ができるリーンバーン（希薄燃焼）が重要となり、NO<sub>x</sub> 後処理も考慮して空気過剰率 $\lambda > 2.0$  条件の採用が検討されている。このようなエンジンでは、従来のストイキ仕様から圧縮比や吸排気バルブ設定等が変更されることが予想される。ここでは、社内で取得したエンジン試験データを活用して構築したGT-Power サイクル計算モデル(図1)を用いて、これらエンジンで採用される機関諸元仕様を推定し、その際にターボチャージャへ要求される性能を分析した。

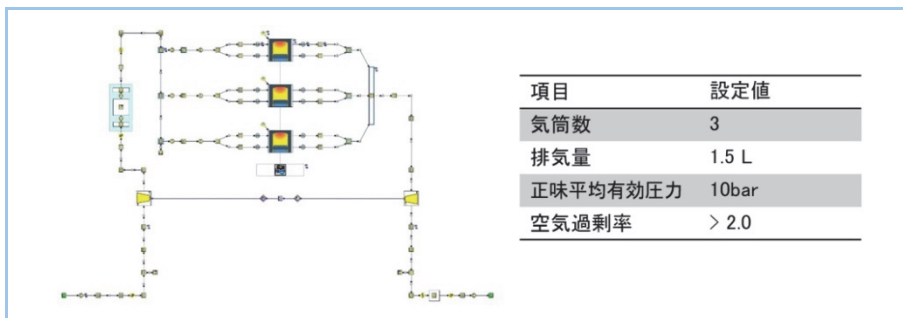


図1 シリーズハイブリッド向けエンジン GT-Power モデル

シリーズハイブリッド用エンジン向けターボチャージャの要求性能を検討するためのGT-Power サイクル計算モデル

図2に、公表されているリーンバーンエンジンをベースに、更なる高効率化を実現するために必要な機関諸元条件を検討した結果を示す。圧縮比やバルブタイミング、ターボ効率を変更し、熱効率が向上する条件を探索した。熱効率向上には、高圧縮比とともに、吸気バルブ早閉じミラー化によってノックを抑制することが有効となる。一方で、ミラー度を高めたことによるエンジンの体積効率の低下や、高入化による必要空気量の増加によって、吸排気バルブの圧損等に起因してポンピングロスが増加するため、要求ターボ効率がより高まる傾向となる。

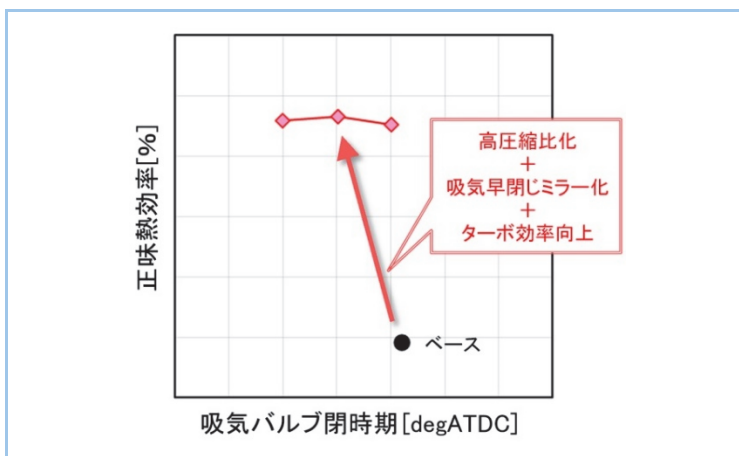


図2 シリーズハイブリッド向けエンジン 高効率化仕様検討結果

シリーズハイブリッド用エンジン高効率化のためのパラメータスタディ結果

これらの計算結果から、シリーズハイブリッド車用エンジンの発電点を対象として、目標熱効率達成のために要求されるターボ作動点を推定した結果を図3に示す。従来の乗用車用エンジンの作動線イメージも併せて示すが、発電用として中間負荷域での作動中心となるため、コンプレッ

サ、タービン共に従来用途と比べ低い圧力比領域で運転され、これらの領域で、従来の乗用車用エンジンより高いターボ効率が求められると推測する。次章以降でターボ高効率化に対する具体的な取組み内容について述べる。

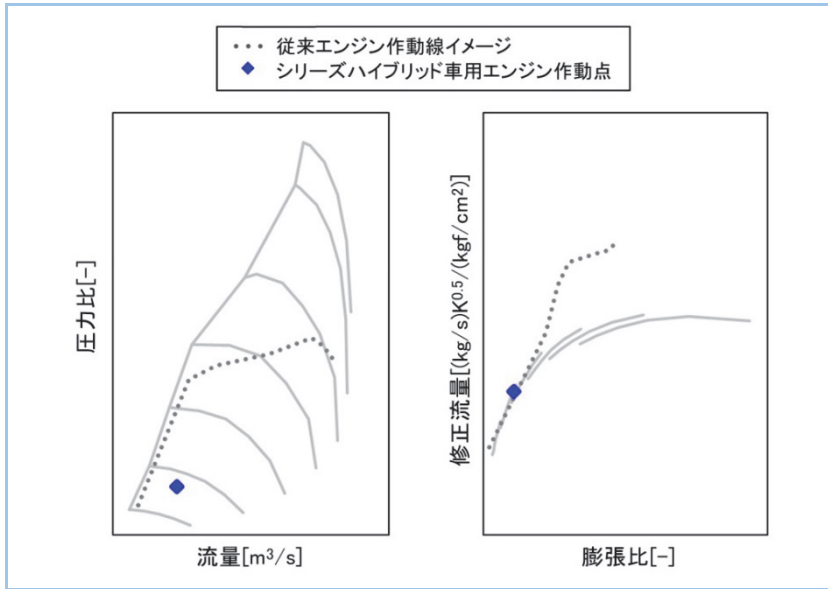


図3 シリーズハイブリッド向けエンジン ターボ作動点推定結果

シリーズハイブリッド用エンジン向けターボの要求性能検討により得られたターボの作動点と従来エンジンでのターボ作動点(イメージ)の比較

### 3. コンプレッサ性能の改善

これまでにハイブリッド車用エンジンの特性に適合したコンプレッサの開発として、遠心インペラで発生する衝撃波・漏れ損失・摩擦損失及び混合損失の低減による高効率化を図ってきた<sup>(3)</sup>。2章で述べたように、発電に特化したシリーズハイブリッド車用エンジンは、高効率な運転点を主として利用することから、コンプレッサ出口に整流翼を配置したベンドディフューザを採用することでエンジン作動点における更なるコンプレッサ効率向上が可能となる。そこで、ベンドディフューザを適用したベンドディフューザコンプレッサの開発に取り組んだ。

図4に新設計インペラ及びベンドディフューザの外観を示す。インペラの改良設計では、エンジン作動点に合致するよう翼形状を調整し、インペラ内部の損失を低減した。また、回転数に対する圧力比を向上させることで、作動回転数の低減によるターボ軸受損失の低減を狙った。ディフューザベーンは、最適化アルゴリズムを用いて損失が最小となるベーンプロファイルを探索した。

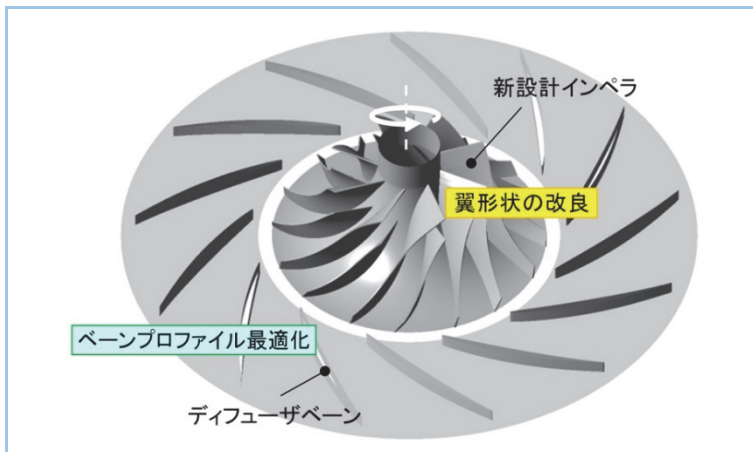


図4 遠心コンプレッサ外観図

新設計コンプレッサの外観と効率向上アイテム

図5に新設計したコンプレッサの性能試験結果を示す。コンプレッサマップ中のサージング限界線よりも左側は運転不可の領域となるが、従来のベーンレスディフューザ仕様に対してサージング限界が大流量側に移動し、作動領域が縮小している。一方で、エンジン作動点は運転領域内にあり、エンジン作動点近傍の効率は4.7pt向上していることが確認できる。また、作動ターボ回転数を6.6%低減できていることから機械損失低減も期待できる。

今後は、ターボ効率を更に向上するべく、コンプレッサのキーコンポーネントの一つであるスクロールの改良等にも取り組んでいく。

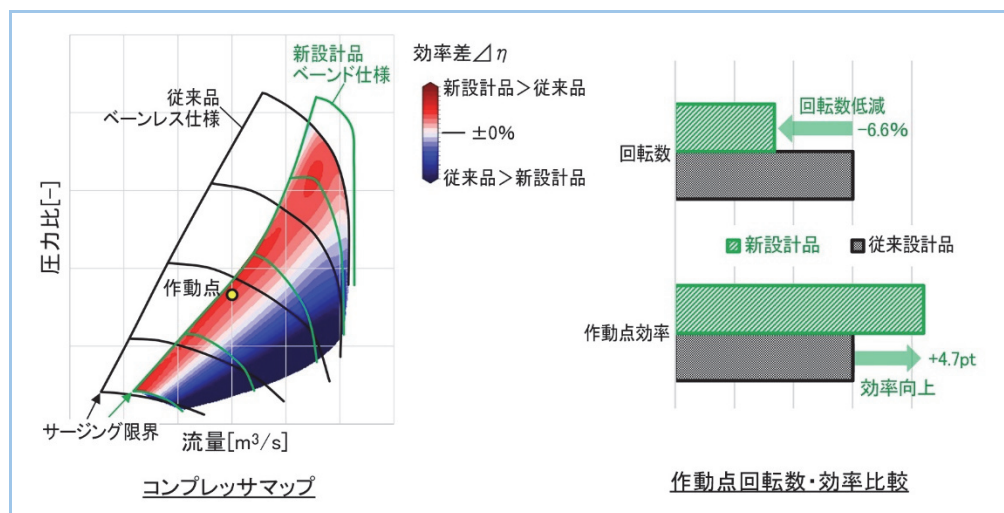


図5 シリーズハイブリッド向け 遠心コンプレッサ性能試験結果  
シリーズハイブリッド向け遠心コンプレッサと従来品の性能試験結果比較

#### 4. タービン性能の改善

コンプレッサ同様、タービンにおいても、発電点に特化した高効率化を狙い改良設計を実施した。従来の乗用車向けタービンは作動範囲を確保するため、タービン入口に整流翼を設けないベーンレスノズルや整流翼を可変とした可変ベンドノズルを採用してきたが、広い作動領域を必要としないハイブリッド車用エンジン向けには、固定の整流翼をタービン入口に配置することで、設計点で理想的な流れ場が形成できるベンドノズルタービンが有利であると考えている。ベンドノズルはベーンレスに対しスクロール部やノズル部での損失を低減できる他、可変ベンドノズルに対しても、整流翼端部の漏れ流れを低減できるメリットがあるため、ハイブリッド車用エンジン向けに適用すべく開発を行ってきた<sup>(3)</sup>。

既存のベンドノズルタービンの更なる高効率化に向けて、動翼やベンドノズルの改良設計に取り組み、高効率化を実現したベンドノズルタービンを開発した。図6は従来品に対する効率改善代を示すが、従来品に対し、運転点での効率を2.9pt改善することができた。

効率を向上できた要因を2つ取り上げる。1つ目として、動翼とハウジング間の漏れ流れ低減が挙げられる。ターボチャージャのタービン動翼は、ハウジングとの接触を避けるため翼先端部にクリアランスを設けているため、翼前後の圧力差からクリアランス部に漏れ流れが発生し、損失となる。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占める割合が大きく、漏れ流れの影響が大きくなる傾向にある。図7に従来品と改良設計品の解析結果における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流れの流速が低減し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、効率が向上した。効率を向上できた要因の2つ目として、動翼の翼厚低減が挙げられる。2章で述べたように、シリーズハイブリッド用ターボチャージャは従来の乗用車用と比べ、低い圧力比領域でのみ運転されるため、運転回転数が低く、動翼に加わる応力も下がることで、要求強度の低下から翼を薄く設計することが可能になる。これにより動翼後流の混合損失を低減し、効率を向上した。

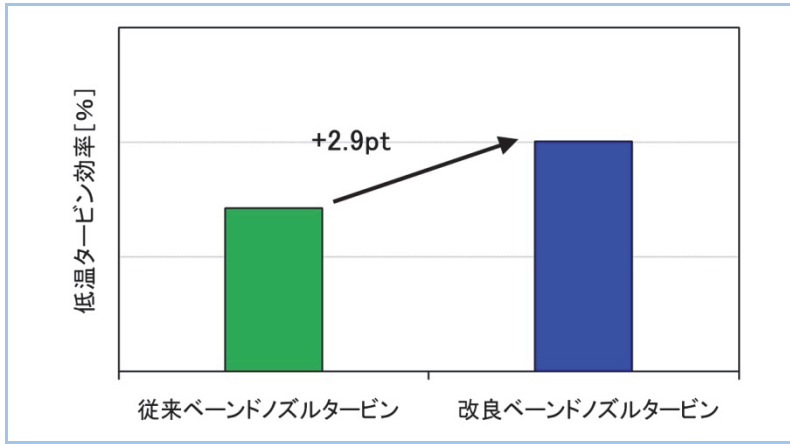


図6 改良バンドノズルタービンの空力効率向上  
改良バンドノズルタービンの従来品に対する空力効率向上

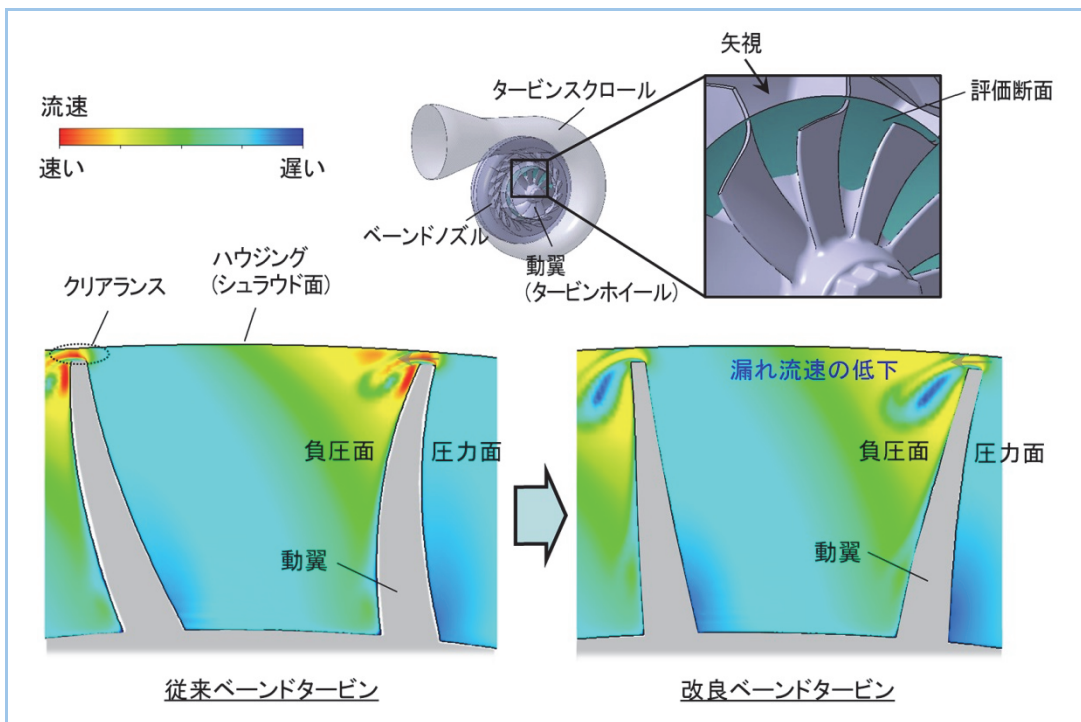


図7 翼形状改良による翼端漏れ流速の低減  
従来バンドタービンと改良バンドタービンの解析結果における流路に直行する断面の流速分布

## 5. 低コスト化のためのバンドノズルタービン構造改良

4章で述べたように、シリーズハイブリッド向けタービンの効率向上を目的としてバンドノズルタービンの開発を進めている。バンドノズルタービンは、エンジンからの排気ガスによる過酷な高温環境下で運用され、高い信頼性を要求される一方で、耐熱合金を使用するためコストが高くなる傾向にあり、構造の工夫や適切な材料の選定による低コスト化が求められる。そこで図8に示すように、従来の構造に対して部品点数の削減や構成部品の小型化を図ったコスト低減構造を検討した。従来は大型の発電用エンジン向けターボチャージャで実績のある締結構造をベースとしており、重量のあったノズルリングをリジッドに固定する締結構造としていた。新開発の構造では、ターボチャージャの小型化に伴いノズルリングが軽量となったことを活かし、ノズルリングをバックプレートのバネ力でタービンハウジングに押し付ける構造とした。それによりノズルプレートやスプリングリングを廃止、部品点数を削減するとともに、ノズルリングの小型化を図った。

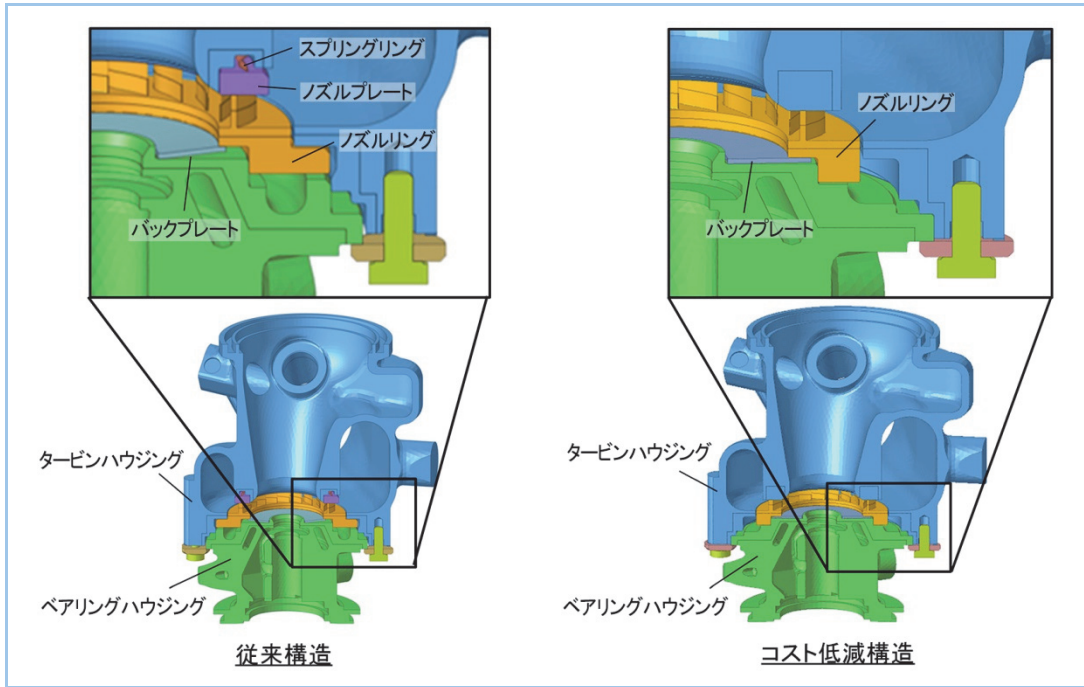


図8 従来構造とコスト低減構造の比較  
 ベンドノズルタービンのコスト低減構造と従来構造の比較

本構造の信頼性を評価するため、大規模 3D-FEM (Three Dimensional Finite Element Method) モデルによる構造解析を実施した。図9には、解析結果の一例としてメタル温度コンター図及び全ひずみ範囲コンター図を示す。図9a)より、ノズルリングをバネ支持とすることで、部品内が均一な温度となり、温度分布による熱応力を低く抑えることができる。図9b)の全ひずみ範囲コンターでは、ノズルリング・タービンハウジング・バックプレート等の高温部品について熱疲労強度評価を行い、目標寿命を満足することを確認した。この他にも、バックプレートのバネ力・ノズルペーンの接触面圧・ボルト締付け力等の多岐にわたる強度評価を行い、ベンドノズルタービンの信頼性を確保した。さらに、排気ガス温度や各部品の材質を変更した構造解析も実施し、お客様のエンジン排気ガス温度に合わせて適切な材料を選定することで材料費の低減も可能となる。

以上より、大規模 3D-FEM 構造解析を用いた強度設計・材料選定を行うことで、低コストかつ信頼性の高いベンドノズルタービンを開発した。

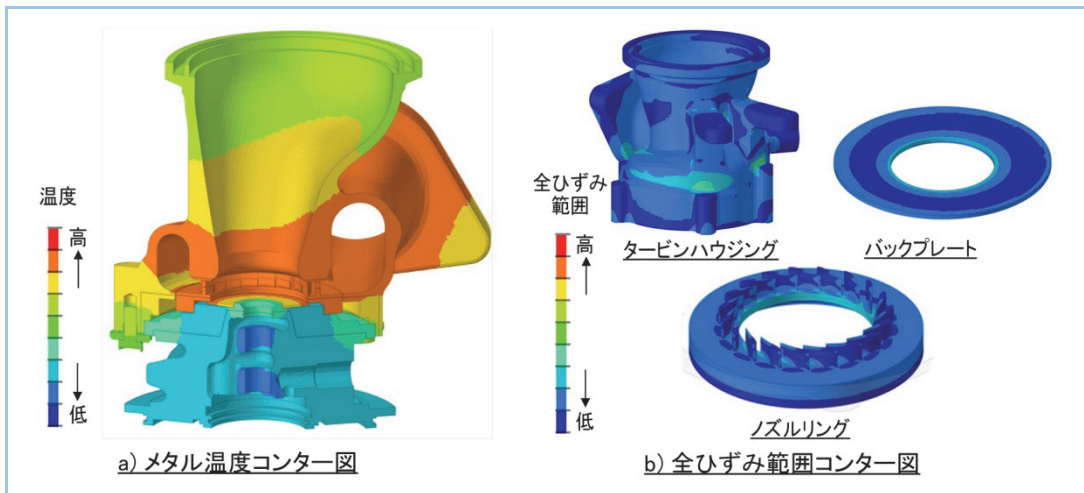


図9 非定常熱応力解析による強度評価  
 コスト低減構造の非定常熱応力解析による強度評価結果

## 6. まとめ

本報では、自動車の低炭素化に貢献する、シリーズハイブリッド車用エンジン向けターボチャージャーの高効率化を実現するためのベンドノズルタービン及びベンドディフューザコンプレッサの開発状況、並びに本ターボチャージャーを低コストで提供するための改良構造とその信頼性評価状況について紹介した。

引き続き、高効率かつ信頼性の高いターボチャージャーの開発を進めるとともに、各社自動車メーカーへの提案を通じてこれら技術の実用化と普及に努め、持続可能な低炭素社会の達成に貢献する。

## 参考文献

- (1) 日本貿易振興機構, 『欧州グリーン・ディール』の最新動向(第3回)モビリティ政策の動向, (2022)
- (2) T. Tsurushima, Future Internal Combustion Engine Concept Dedicated to NISSAN e-POWER for Sustainable Mobility, アーヘンコロキウム(2020)
- (3) 尾崎誠ほか, 次世代ハイブリッド車用ターボチャージャーの適用技術 三菱重工技報 Vol.58 No.2(2021)