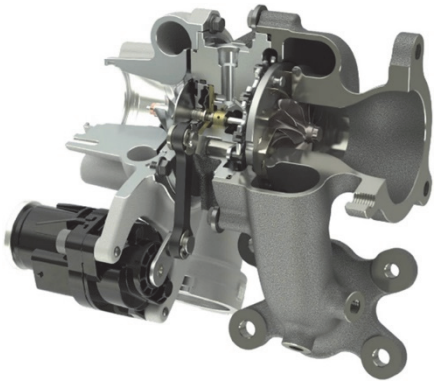
ガソリンエンジン向け次世代可変容量ターボの信頼性向上

Reliability Improvement of Next-generation VG Turbo for Gasoline Engine



内海 航介[*1] Kosuke Uchiumi
阪口 季望矢[*1] Kimiya Sakaguchi
中川 大志[*2] Hiroshi Nakagawa
新田 憲司[*3] Kenji Nitta
吉見 壮司[*4] Takeshi Yoshimi
佐久間 茂吉[*5] Shigeyoshi Sakuma

自動車業界における地球温暖化対策として脱炭素化を実現するため電動化の動きが加速しているが，電気自動車，燃料電池車の普及にはコスト低減技術の開発・インフラ整備が必要とされる。そこで中国や北米を中心にハイブリッド車の需要が急増しているが，地域によって求められる商品特性が異なりつつある。三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社では各地域のハイブリッド車用エンジンの要求特性に適合したターボの開発を進めており，それについて以下に述べる。

1. はじめに

欧州では，2015年頃からEuro6d規制に向けたエンジン開発が開始されたが，ここで排気ガス・燃費の評価試験法が見直された。これに伴い，それまで主流であったダウンサイジングターボエンジンから排気量の適正化，ミラーサイクル化が進んだ。ミラーサイクル化による低速トルク不足を補う手段としてガソリンエンジン向け可変容量ターボ（Variable Geometry Turbocharger 以下，VGT）が市場に登場した。また，中国でも2018年頃からEuro6d規制に類似するChina6a規制に向けた開発が開始され VGT の要求が現れた。三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社（以下，当社）においても参考文献(1)のとおり，欧州・中国市場に向けた 1.5L エンジン向け VGT を開発し 2020 年に市場投入した。その後，欧州・中国では電気自動車開発への移行を経て，直近ではストロングハイブリッド・プラグインハイブリッド車の開発が再び増えつつあるが，モータによる運転域拡大のためエンジン作動範囲が狭まり，VGT からより安価な機構のターボに変更する動きがある。当社はこちらについては参考文献(2)などの製品開発を進めている。一方，北米では連邦政府・カリフォルニア州それぞれの排気ガス規制が 2027 年から強化される動きがあり，2024 年よりエンジン開発（ミラーサイクル化）が活発になりつつある。特に，電気自動車では航続距離に課題がある大型乗用車（1600 kg以上）向けのエンジン（2.5～3.5L）の開発が急増しており，ターボメーカ各社は欧州・中国市場 1.5～2.0L エンジン向けに開発した VGT をアメリカ向けに大型化している。当社においては大型化とともに信頼性向上，原価低減に取り組んでいる。本報では以下に定義する改良仕様及びコストダウン仕様に対する取組み内容を紹介する。

*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
*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 課長
*3 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 次長
*4 三菱重工業株式会社 総合研究所 機械研究部 技術士（機械部門）
*5 三菱重工業株式会社 総合研究所 強度・構造研究部

現量産仕様:　2020 年より量産市場投入している仕様
改良仕様:　現量産仕様に対して信頼性を向上させた仕様
コストダウン仕様:改良仕様に対して原価低減を図った仕様

2. 信頼性向上のための改良点

ターボチャージャは，エンジンの排気ガスを利用してタービンホイールを駆動させ，同軸上に配置されたコンプレッサホイールを回転させ吸入空気を圧縮し，エンジンに供給する装置である。

VGT は，タービンホイールの上流にノズル面積を可変制御できる駆動機構を装着したターボチャージャである。可変ノズルにより，エンジン回転数・負荷に応じタービンの特性を制御することが可能となる。また，ノズルによりタービンホイールへのガスの流入角度を制御できるため，過給効率が向上する。

ガソリンエンジン向けVGTの信頼性確保における課題は，1000℃を超えるような高温排気ガスへの対応である。当社は，1000℃を超えるガソリンエンジン向け VGT の開発に際して，クリープ特性や耐摩耗性を考慮した材料選定を行った。加えて以下のような改良を実施した改良仕様のVGTを開発し信頼性を向上させている。

2.1 設計の改善による，ノズル駆動力の低減

改良仕様は，各部の設計を見直すことで，ノズルベーンの開閉に必要な駆動力を低減させている。必要な駆動力の低下は，各摺動部位に作用する摩擦力を低減させ，耐摩耗性を向上させることが期待できる。図 1 に各部の設計見直しの一例を示す。図 1 中①はリンク機構の改善例である。ノズルベーンの開閉はVGTに取り付けられたアクチュエータの駆動力が図1中①のアームに伝わり，その駆動力がアームからドライブリング，ベーンレバー，ノズルベーンに伝達される。図1中①の例ではアームとドライブリングの構造を見直し，ベーン全開・全閉付近における力の伝達効率を改善させている。図 1 中②はタービンホイールとノズルベーンの空力的設計の見直しである。この変更によってノズルベーンに作用する流体力を最適化した。図 1 中③はスクロール形状の改善である。VGT においては流入してきた排気ガスは舌部を通過後，旋回しながら各ベーンに流入するが，舌部直後のベーンは舌部直後の流れと，旋回してきた再循環流の影響を受け流体力のばらつきが大きくなる傾向がある。本例ではスクロール形状を見直し，再循環流が支配的に舌部直後のベーンに作用するようにしている。これらの設計見直しによって，改良仕様はノズルを開閉させるために必要な駆動力を最大 52%低下させ耐摩耗性を向上させることができた。また，開度ヒステリシス(同一開度指示に対して実開度が動作方向によって異なること)の低下も達成した。これらにより実用時の制御性の向上，摺動部の摩耗低減が期待される。

2.2 性能の改善

図1中②の空力設計の変更の効果は，上述の耐摩耗性の向上だけでなく，近年のお客様からの要望を踏まえた中間開度の効率向上にも寄与している。図 4 に現量産仕様とコストダウン仕様の性能試験結果を示す。コストダウン仕様は現量産仕様に対して，ピーク効率を約 5%向上させており，エンジンの燃費改善等の効果が期待できる。

2.3 ベーン振動の抑制による摩耗量の低減

図 2 に示すとおり改良仕様ではガス流路とリンク室が連通している。これは，リンク室内の圧力を上昇させ，ノズルベーンを一方向に押し付ける効果がある。これによりノズルベーンの振動が抑制され，摩耗の低減が期待できる。当社は，エンジン運転中のノズルベーンの振動を直接計測し，振動がおおよそ 2 割以下に低減していることを確認した。さらにエンジン耐久試験においても，摩耗量が現量産仕様に対して70%低減していることを確認した。

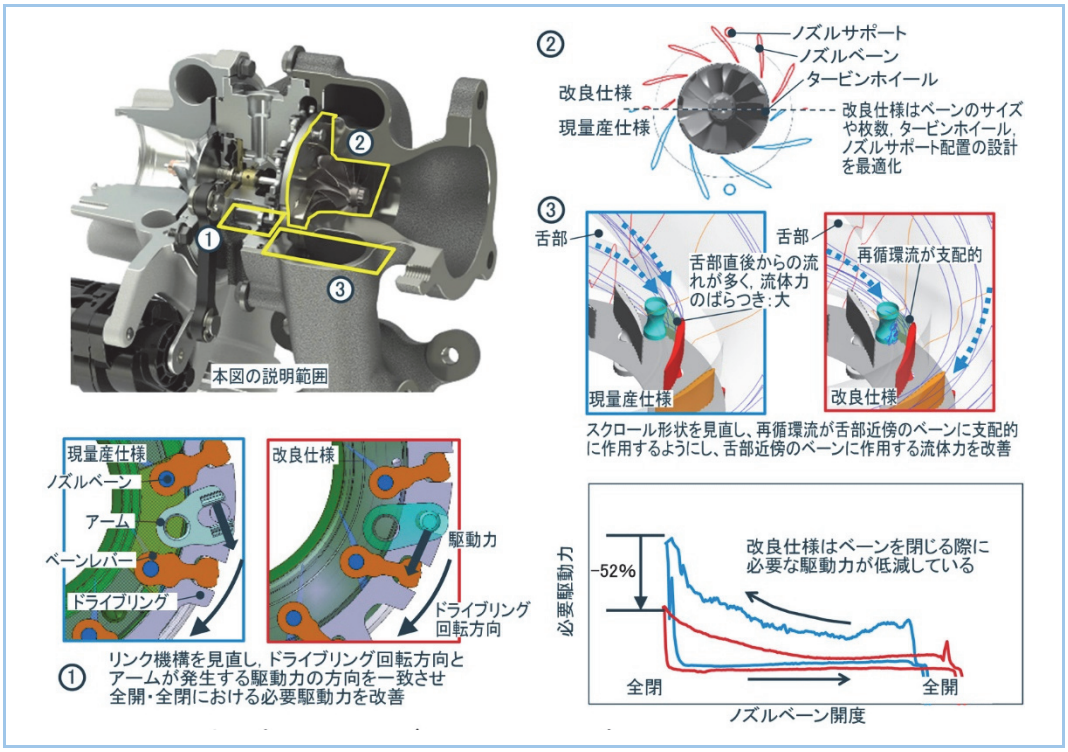


図1　設計見直しによるノズル駆動力の低減

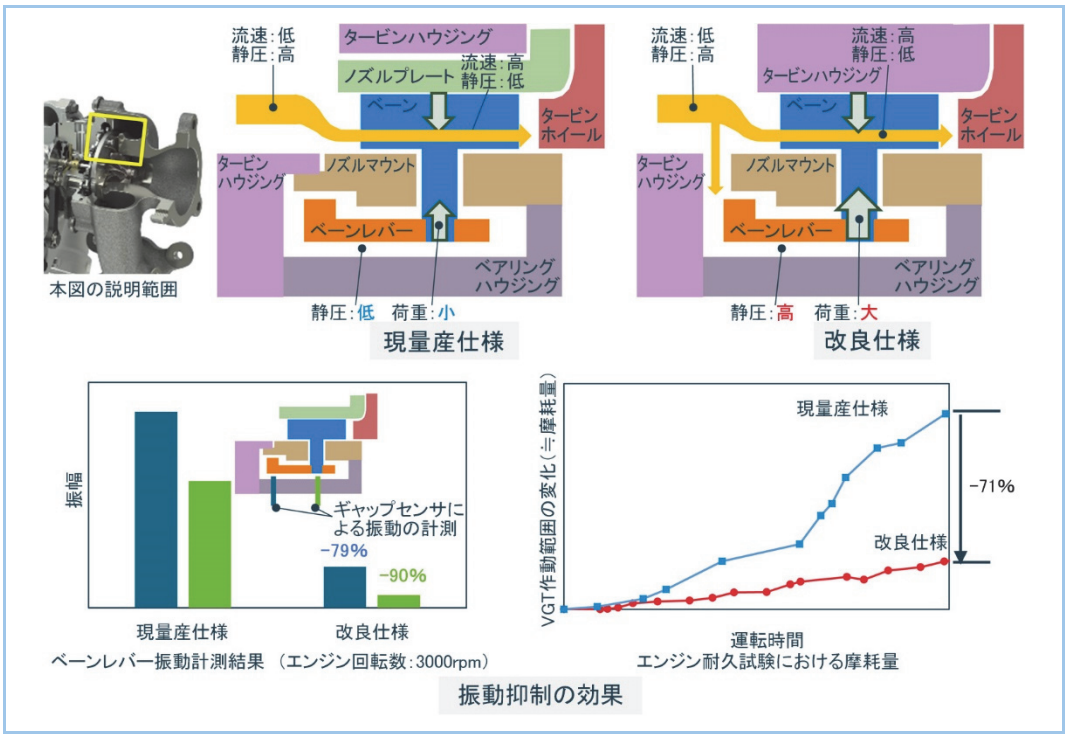


図2　ノズルベーン周辺の圧力バランスの最適化による振動の抑制

3. 低コスト化のための改良点

ガソリンエンジン用 VGT は 1000℃前後の排気ガスにさらされる可変機構を備えていることから，可変機構を備えない一般的なターボチャージャに比べて高コストである。一方でお客様の車両製造コストはハイブリッドシステムの追加などで増加する傾向にあり，エンジン製造コストの抑制が重要となっている。よって，当社の VGT がお客様に採用されるためにはコスト競争力の確保がこれまで以上に重要となっている。当社のガソリン VGT の低コスト化のための取組み事例を以下に示す。

当社が開発したガソリンエンジン用 VGT のタービン側構造を図 3 に示す。上段はコストダウン

仕様を示し，下段は現量産仕様を示している。コストダウン仕様の構造上の特徴は，ノズルプレート，シールリングを廃止していること，及びバックプレートの枚数を削減していることである。

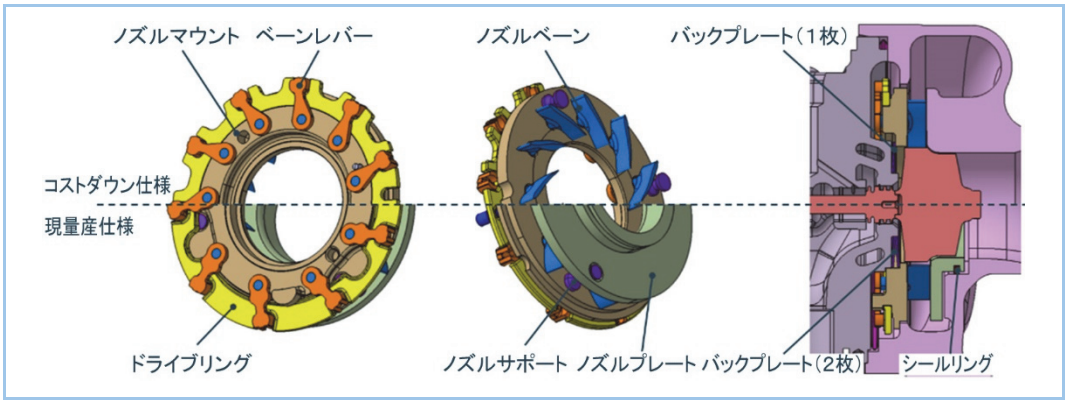


図3 コストダウン仕様の構造

3.1 ノズル構造の見直しによる部品点数の削減

コストダウン仕様はノズルプレートの廃止によって，ノズルプレートだけでなくノズル出口のシールリングが不要となり，部品点数削減によるコストダウンに貢献した。従来，ノズルプレート及びシールリングが担っていた機能はタービンハウジングが受け持つ。この変更による懸念は，プレート部の熱変形量の増大によるベーン周辺クリアランスの変化であり，これはタービン性能に影響する。当社は FEM 解析によりクリアランス変化を最小にする形状を設計し，図 4 に示すとおりエンジン耐久試験前後でのタービンピーク効率変化量は 1p 以内であり，エンジン性能への影響は最小限に抑えられていることを確認した。

ここで，コストダウン仕様特有の信頼性向上について述べる。従来，ノズルプレートは，ノズルサポートを介してノズルマウントと固定されノズルベーンが摺動する空間を規定していた。ノズルプレートとノズルマウントは運転時の排気ガスを受けて熱変形するが，両者の熱変形の様相は同一にはならないため，両者を固定しているノズルサポート部に径方向の歪みが発生し，破損するリスクがあった。一方，ノズルプレートを廃止したコストダウン仕様はタービンハウジングとノズルサポートは軸方向に接しているが，径方向には固定されておらず，運転時の熱変形に対する追従性が確保されている。これによってターボチャージャの信頼性が向上した。

コストダウン仕様は図 5 に示すようにノズルマウントの形状を単純化した。現量産仕様のノズルマウントはドライブリングを軸方向に固定する部材を一体成形している。これによって部品点数は削減されたが，ノズルマウントの製造法が限られ，コストダウン手法が限定されていた。コストダウン仕様は形状を単純化することによって，製法，材料，熱処理の選択肢が拡充された。

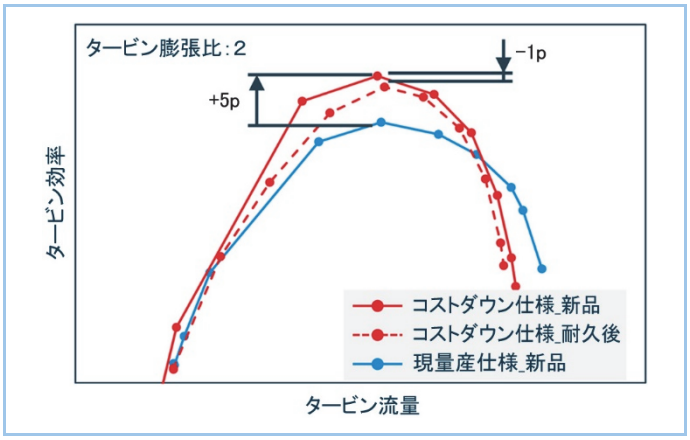


図4 コストダウン仕様の性能試験結果

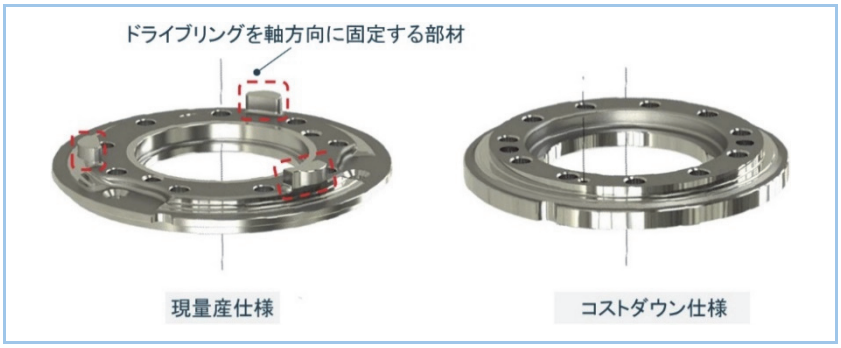


図5 ノズルマウント比較

3.2 締結構造の見直しによるバックプレート枚数の削減

現量産仕様ではベアリングアハウジングとノズルマウントの間にバックプレートを 2 枚設置していた。これは，当該部の運転時の熱変形による寸法変化を吸収しつつ，十分なばね反力を発生させるためである。コストダウン仕様はベアリングハウジングとタービンハウジングの締結を見直し，バックプレート設置部の寸法変化を低減させることに成功した。これによって，バックプレート 1 枚で十分な反力を確保できるようになり，コストダウンが図れた。

図 6 に VGT 熱変形モードとバックプレート挿入部の変動量を示す。コストダウン仕様は現量産仕様に対してバックプレート挿入部の熱変形量が抑えられている。加えて，コストダウン仕様の熱変形の方向はバックプレートの圧縮側であるため熱変形時でも高いばね反力を維持しやすくなっている。

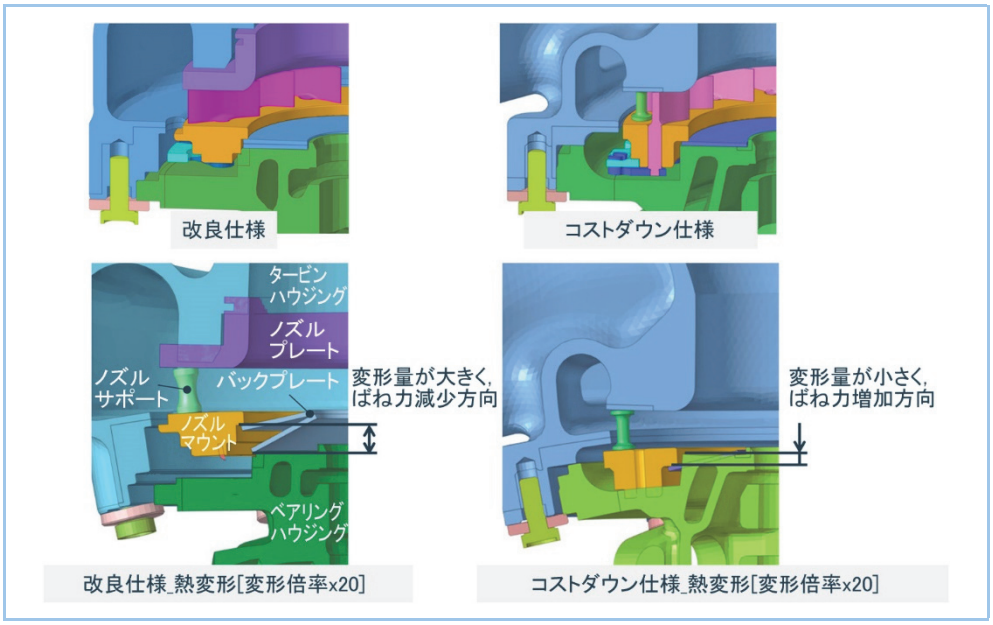


図6 熱変形時のバックプレート挿入部変形量

3.3 熱処理の見直し

当社はノズルに適用される熱処理を見直し，コストダウンを図った。ノズルに適用される熱処理は主に耐摩耗性の観点で実施される。ノズルに実施される熱処理のうち，ノズルマウントに実施される熱処理は，耐摩耗性の観点で効果があったが，熱処理後の寸法管理が難しい等の理由で高コスト要因となっていた。そこで，コストダウン仕様はノズルマウントの熱処理を廃止すると共に，比較的寸法管理の容易な他の部品に熱処理を実施することで，耐摩耗性を維持しつつコストダウンを図った。図 7 にノズルに適用される熱処理とノズル各部の材料の摩耗試験の結果を示す。

図中の“低温時”とはアイドル運転等を想定した数百℃のメタル温度における試験結果，図中の“高温時”とは排ガス温度 1000℃前後での各部品のメタル温度における試験結果である。図 7 中，①のドライブリング材とベーンレバー材の摩耗量は大幅に低減した。②のノズルベーン材とノ

ズルマウント材，及び③のノズルマウント材とドライブリング材の摩耗量は同程度を維持している。これらの結果と 2.3 に示した設計変更を併用することで摩耗低減とコストダウンを両立した。

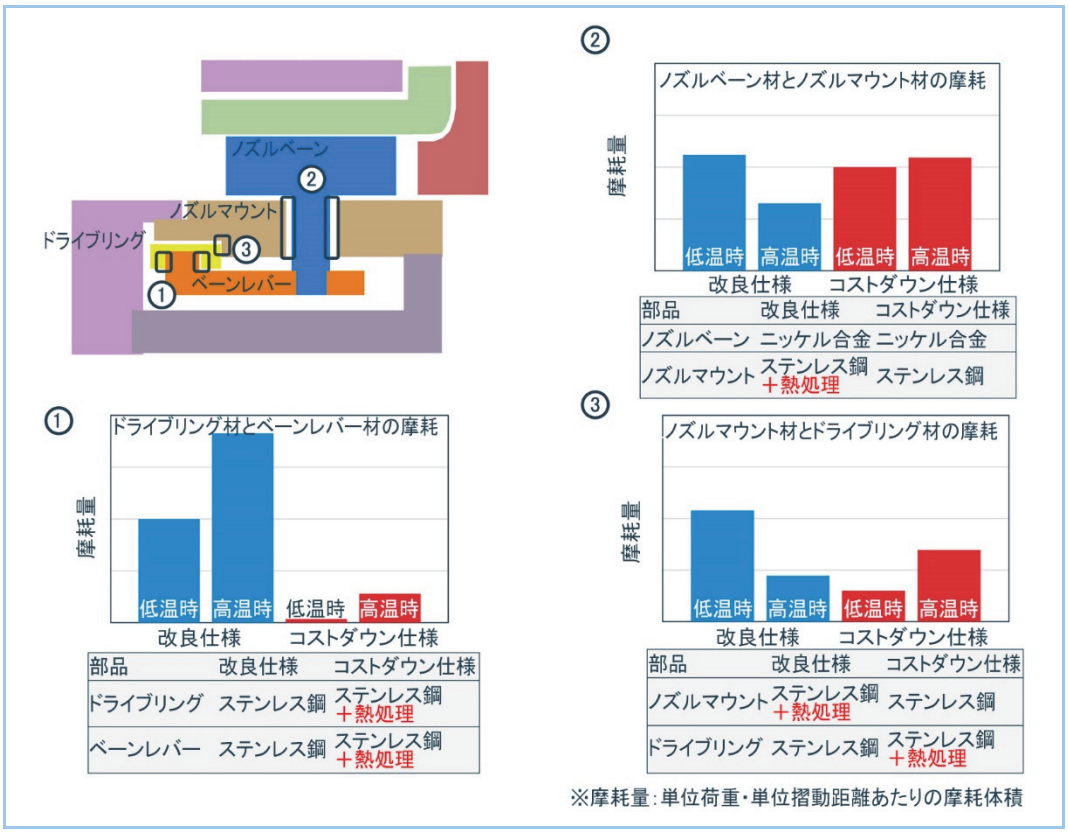


図7　摺動部位の材料と摩耗試験結果

3.4　タービンハウジング肉厚最適化による軽量化

ガソリンエンジン用タービンハウジングは耐熱性確保のためニッケルを多く含みターボ製造コストの約 3 割程度を占めるため，軽量化による材料費低減の効果は大きい。VGT では，タービンホイールの破裂時の破片飛出し防止機能の一部をノズル部に持たせることができるため，従来のタービンハウジングより肉厚を薄くすることが可能である。また，タービンハウジングは砂型鋳造での製造が主流であったが，製造技術の進化により WAX 型鋳造（精密鋳造）での量産が可能となった。これに製品形状，製造方案の各種最適化計算を組み合わせ，タービンハウジングの軽量化にも取り組んでいる。

最近ではタービンハウジングの FEM 解析の精度向上と鋳造方案の改善により，タービンハウジングを精密鋳造で製造することが可能になり，製品公差の低減による軽量化及び機械加工量の低減が可能になった。

図 8 に精密鋳造タービンハウジングと従来の砂型タービンハウジングの比較を示す。当社は形状最適化と精密鋳造タービンハウジングの採用で 12%の重量低減を図った。

上記のような VGT の低コスト化のための取組み等により，コストダウン仕様では現量産仕様に対して，ターボチャージャ製造コストとして 15%の低減が得られた。

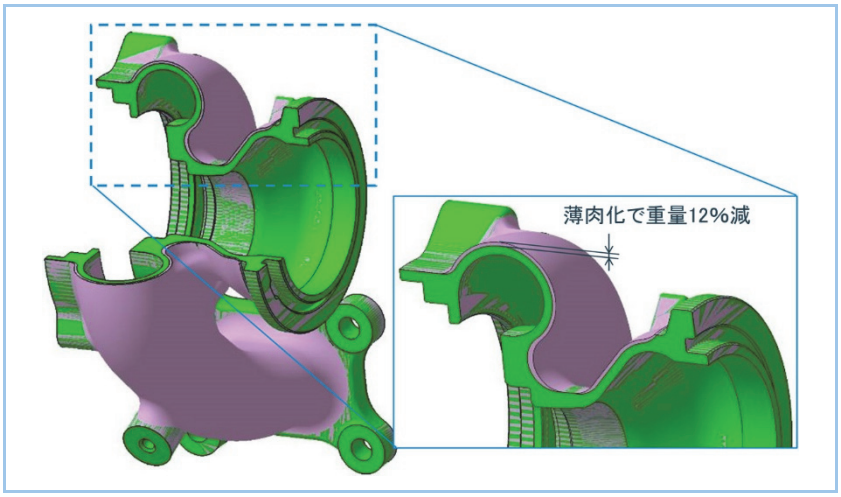


図8 精密鋳造タービンハウジングの効果

4. システムズエンジニアリング活用による短期開発対応

システムズエンジニアリングは，従来，宇宙，防衛，航空機産業で行われてきた開発手法だが最近は自動車産業でも活用されている。システムズエンジニアリングでは，Vプロセスと呼ばれるアプローチが使われる。Vプロセスはお客様の要求をシステム，サブシステム，コンポーネントの順に仕様に落とし込み，その逆の順序で小さな単位から検証を積み重ねていく。Vプロセスは，要求を着実に踏まえた製品やシステムを作り上げることができ，手戻り防止に有効な方法となっている。

図 9 に当社におけるシステムズエンジニアリング活用事例を示す。当社のターボ開発におけるシステムズエンジニアリングでは，お客様からの要求をターボへの工学的要求として明確化する。明確化された工学的要求は，ターボの構成要素であるコンプレッサ，軸受，タービン等のサブシステム，サブシステムの構成要素である各部品に機能目標値として割り付けられていく。各部品，各システムが割り付けられた機能目標値を満たしているか，システムごとの検証とシステム階層間の妥当性の確認を行うことで，お客様要求を満たせるようにしていく。当社は，お客様の要求に対するターボ仕様の設計根拠や検証試験の情報をデータベースに集約し，このデータベースを設計業務に活用するプロセスを確立している。これによって，お客様からの設計根拠の提出等の要求に対応することが容易になり，お客様の信頼を獲得し，受注に繋げていくよう取り組んでいる。

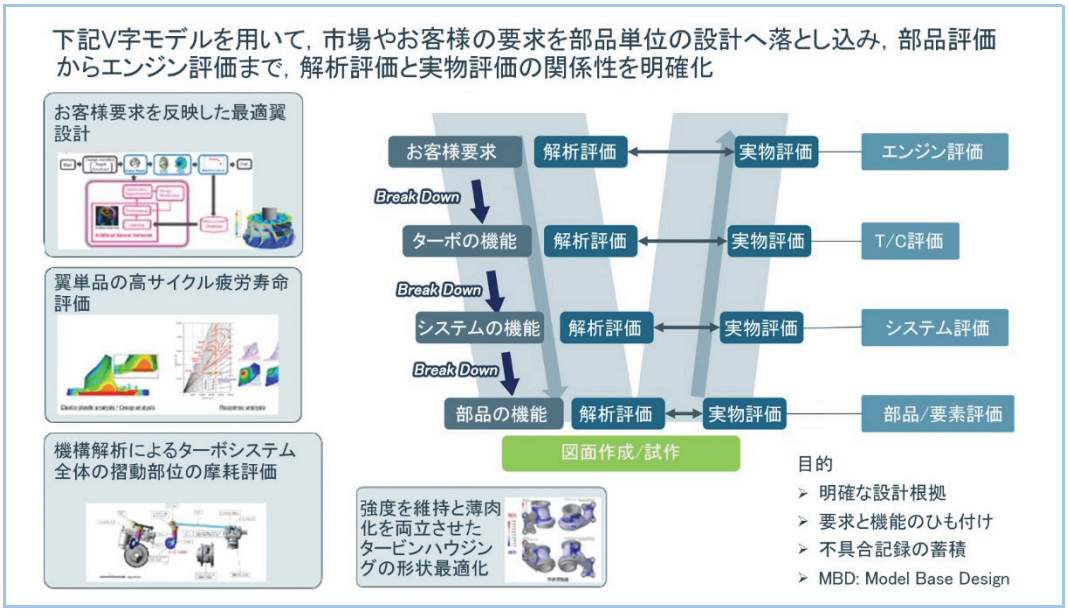


図9 ターボチャージャの開発におけるシステムズエンジニアリングの活用

当社では製品開発で積み上げた検証方法・結果をデータベース化し，見える化し，製品設計に活用している。本報で得られた成果によりデータベースの拡充が図られた。今後は，これを機種展開やお客様との短期開発に活用していく。

5. まとめ

当社はVGTの信頼性向上を目的とし，構造の改良に取り組み，摩耗低減，制御性向上を達成した。この成果を活用し，北米市場向けVGTの受注獲得に向けた活動を継続していく。

参考文献

(1) 段本ほか，次世代ガソリンエンジン向けVG ターボの開発，三菱重工技報 Vol.56 No.2 (2019)
(2) 阪口ほか，シリーズ型ハイブリッド車用ターボチャージャの開発，三菱重工技報 Vol.60 No.2 (2023)