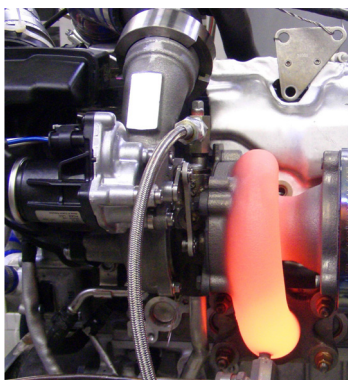


次世代ガソリンエンジン向け VG ターボの開発

Development of VG Turbocharger for Next-Generation Gasoline Engine



段本 洋輔*¹
Yosuke Danmoto

富田 勲*²
Isao Tomita

吉田 豊隆*³
Toyotaka Yoshida

グプタ ビピン*²
Bipin Gupta

秋山 洋二*⁴
Youji Akiyama

近年、ガソリンエンジンでは、熱効率向上のためミラーサイクル・EGR の適用が進んでいる。これら技術の適用とともに、より高過給に対応した可変容量ターボチャージャ(以下 VG*¹ターボ)の適用が、欧州・中国を中心に急速に進んでいる。三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)(以下、当社)では、コンプレッサ・タービンの空力設計を一新した VG ターボを開発し、現行品に対して低速+1%、高速+9%の過給機総合効率改善を達成した。

※1:Variable Geometry

1. はじめに

近年、乗用車の実走行時の燃費・排出ガスがより注目されるようになり、実車走行時の排出量規制適用が検討されている。このような状況の中、実車走行時の排出ガス規制対応に多大なコストが必要となるディーゼルエンジンはそのシェアを減らしつつあり、一方相対的にコストパフォーマンスに優れたガソリンエンジンでは、シェア拡大と技術革新が急速に進んでいる。

近年のガソリンエンジンは、過給ダウンサイジング化が一段落し、更なるダウンサイジングよりも実車走行時の燃費・排出ガス低減技術の適用が進んでいる。その中で、可変動弁によるミラーサイクル化、EGR(Exhaust Gas Recirculation)、エンジン広域での理論空燃比燃焼により、VG ターボにはより高過給・高効率化・信頼性の向上が求められている⁽¹⁾。

2. ガソリンエンジン向け VG ターボの要求性能

VG ターボは、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。図1に VG ターボの構造を示す。

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株) ターボ事業部 技術部 主席技師

*2 三菱重工業(株) 総合研究所 流体研究部 主席研究員 技術士(機械部門)

*3 三菱重工業(株) 総合研究所 流体研究部

*4 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株) ターボ事業部 技術部

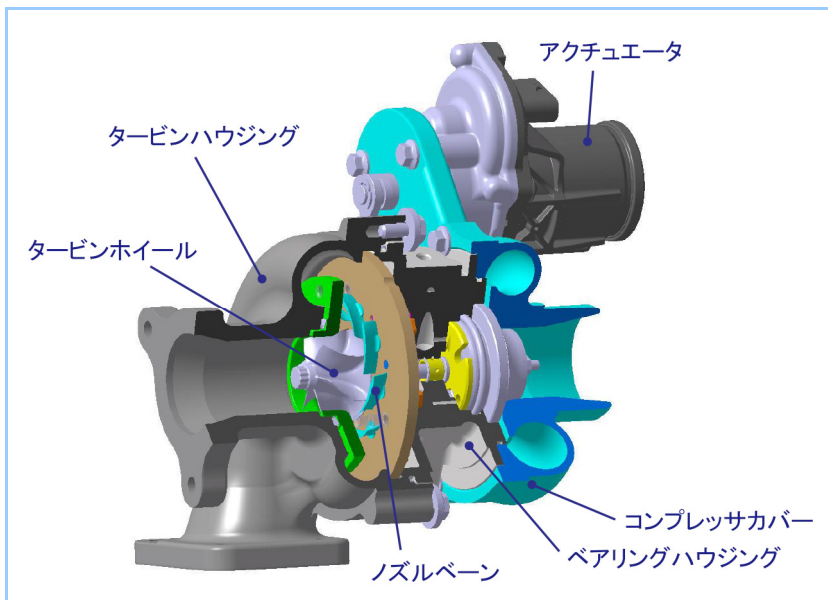


図1 VGターボの構造

図2に、ミラーサイクルを適用しエンジンの全運転領域で $\lambda = 1$ とした場合のコンプレッサ作動点の変化を示す。エンジン回転数が1000~1500rpmの低速領域においては、 $\lambda = 1$ 達成のためスカベンジング^{※2}を実施できないことから、作動点が大幅に小流量側にシフトするため、従来型のコンプレッサではサージング(大規模な逆流を伴う配管系の振動)領域に入る。また、ミラーサイクルを適用するため、全域で要求圧力比が上昇する。このコンプレッサを作動するためのタービンの作動点を図3に示す。エンジン低速では、コンプレッサの圧力比を上昇させるため、ミラー非適用のW/G^{※3}と比較して更に小流量の特性が要求され、エンジン高速では大流量域をカバーする必要がある。

※2 吸排気バルブオーバーラップによって燃焼室内を掃気すること

※3 Waste Gate:タービン流量の一部をタービン出口にバイパスするバルブ機構

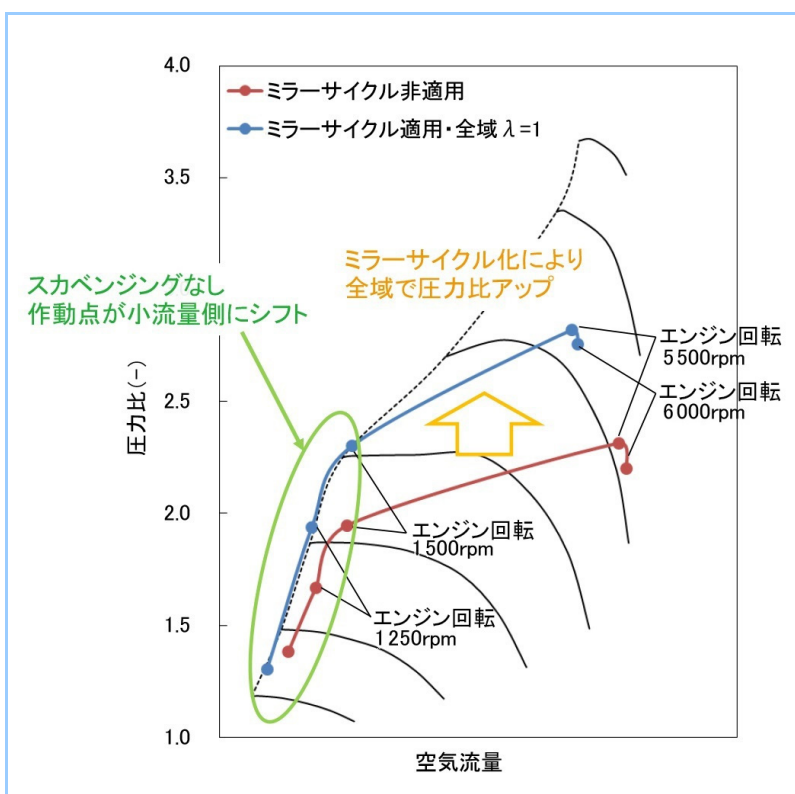


図2 ミラーサイクル適用によるコンプレッサ作動点の変化

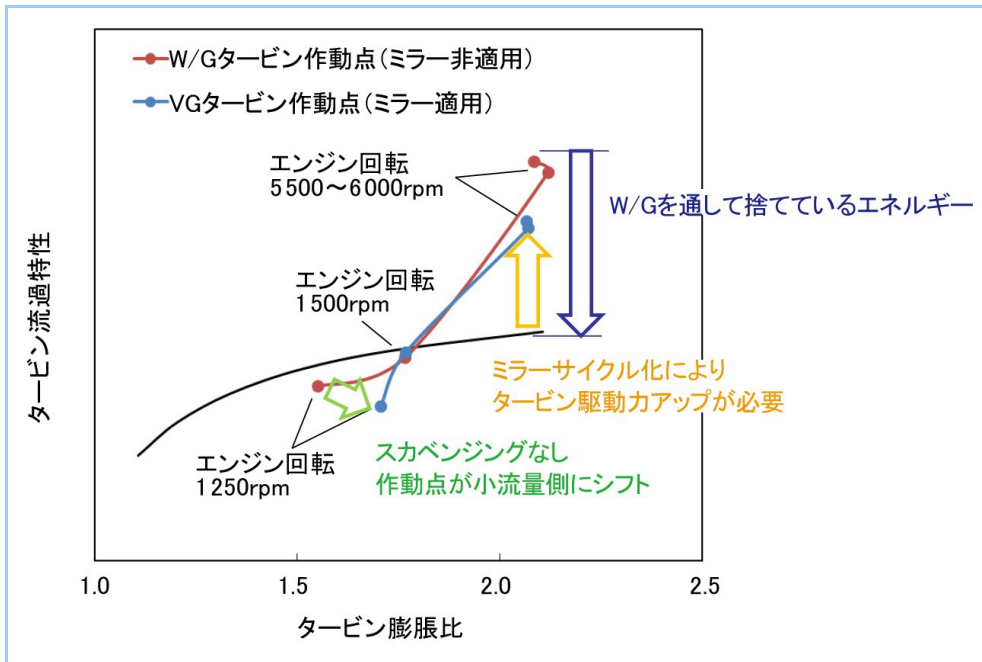


図3 ミラーサイクル適用によるコンプレッサ作動点の変化

3. 遠心コンプレッサの性能向上技術

次世代ガソリン用 VG ターボで使用される遠心コンプレッサは、従来よりも

- ①広い流量範囲で安定して運転できること
- ②エンジンから要求される高い圧力比を達成すること
- ③全域で高効率であること

が要求される。

これら性能要求に対して、

- ①小流量側の作動限界であるサージング流量低減のため流路面積(羽根車スロート面積、ディフューザ幅、スクロール面積など)を縮小すると最大容量が減少する
- ②圧力比を上げると逆流のリスクが高まりサージングが発生しやすくなる
- ③小流量側の流動に合わせて羽根車を設計すると大流量作動時には流速が上がり効率が低下する

などのように要求される性能間には根本的に強いトレードオフが存在する。

そのため、各部で発生する現象を詳細・定量的に分析したうえで、すべての性能を同時に向上できるようなバランスの良い空力設計が必要となる。

今回、VG ターボ用に専用設計したコンプレッサ羽根車を図4に示す。小流量作動点では羽根車の失速と各部の剥離による損失、大流量側作動点では高い流速による衝撃波や壁面摩擦による損失が支配的となる。ここでは、最大流量を確保するため流路面積を拡大しつつ、羽根車先端での失速と翼根本側から先端側に向かう流れを低減できるように翼負荷分布を最適化した。図5に最大トルク点に相当する低速小流量作動点での周方向平均損失分布を示す。改良設計では翼負荷分布修正により翼先端側逆流を縮小させ、特に羽根車入口付近での損失発生を低減できていることが分かる。図6に最大出力点に相当する高速大流量作動点での翼先端側相対マッハ数分布を示す。衝撃波前後の強い圧力変化は境界層の発達や流れ領域の拡大など流動歪みを発生させるため、可能な限り抑制する必要がある。現行羽根車では最小流路面積位置にて強い衝撃波が発生していたが、羽根車の角度分布修正により損失発生要因である衝撃波を緩和できた。

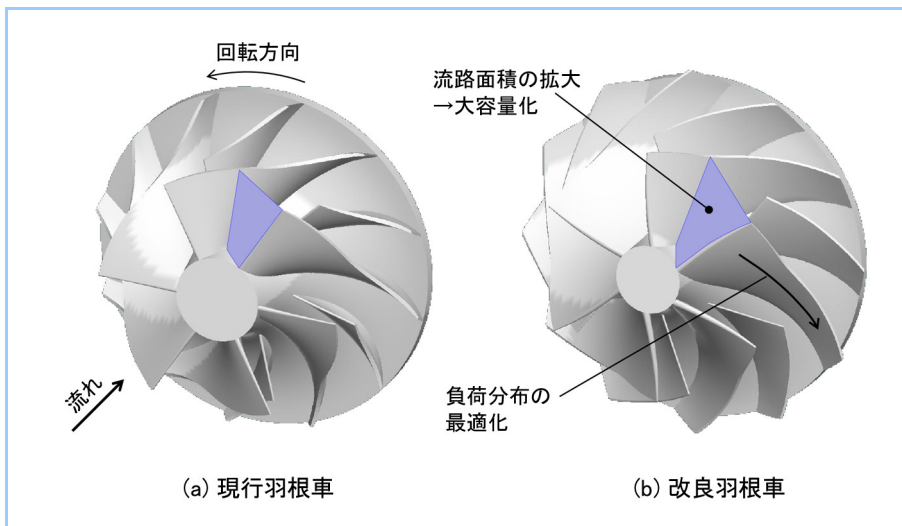


図4 コンプレッサ羽根車の改良

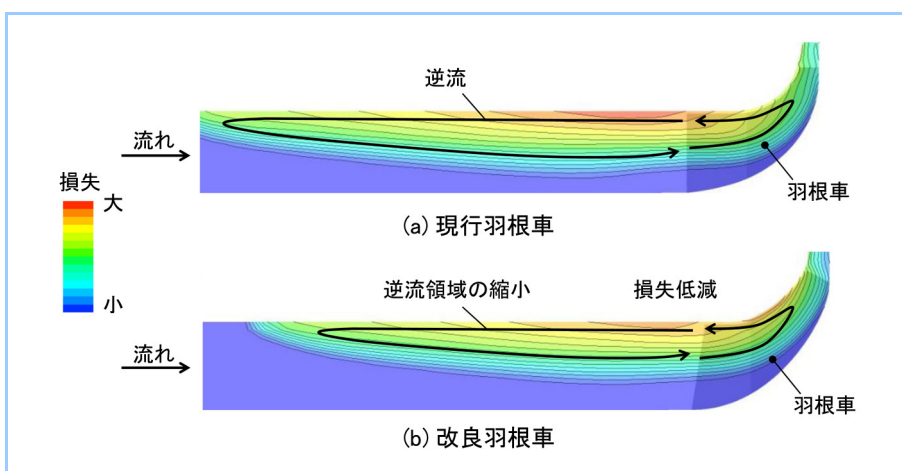


図5 最大トルク点の損失分布

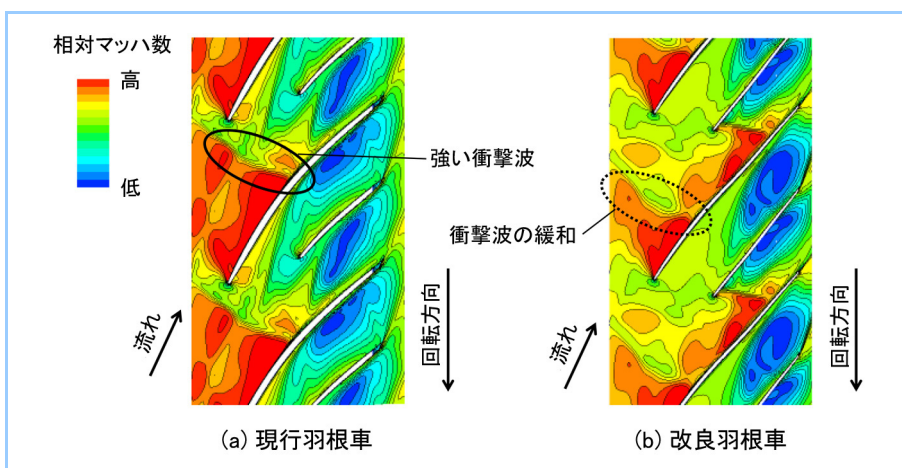


図6 最大出力点の相対マッハ数分布

図7に改良羽根車用に専用設計したディフューザとスクロールを示す。ディフューザは流路面積を拡大させて圧力を回復させるコンプレッサの構成要素の一つであるが、圧力回復をあえて抑えることでサージング流量を低減させることとした。一方、スクロールの形状最適化により損失生成を抑制し、高効率化と広作動範囲化の両立を図った。

図8にコンプレッサの単体性能特性を示す。現行品と比較し、改良品はサージ流量を維持したまま容量+12%となり作動範囲が20%拡大、同一回転数での圧力比向上3.5→3.7、最大出力点を従来よりも7%低い回転数で到達できた。これにより、余裕を持って要求点をカバーできるだけ

でなく、レスポンスの改善や更なる出力向上にも寄与できるようになった。効率は最大トルク点で+0.2%、最大出力点で+5.3%と大幅な改善を達成でき、本改良設計の有効性を検証できた。

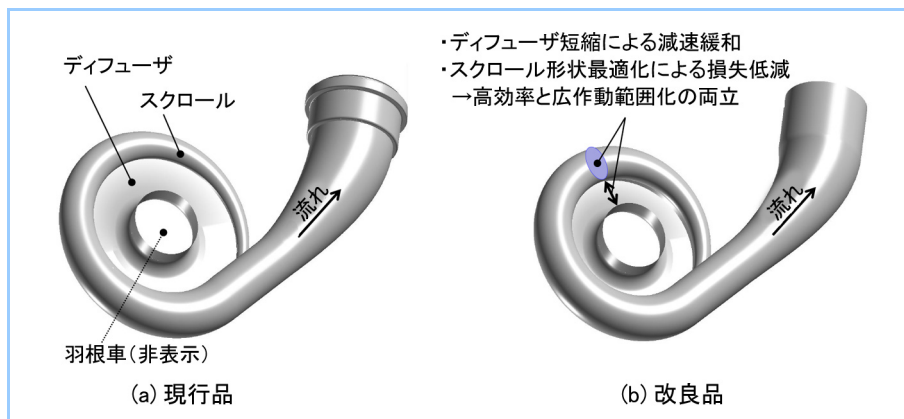


図7 ディフューザ・スクロールの改良

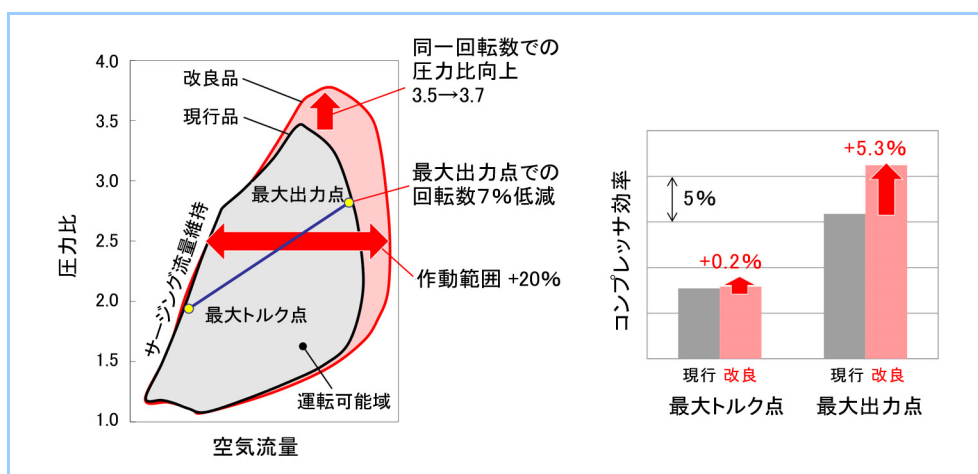


図8 改良コンプレッサによる性能向上

4. タービンの空力設計

VG タービンの空力設計は、性能のみならず信頼性にも影響を与えるため、以下の3つの要求を満足できるように開発を行った。

- (1) 要求作動点における空力性能の向上
- (2) 流量制御性の確保(流量ヒステリシス^{※4}の低減)
- (3) 駆動部品の摩耗低減

上記3つの要求を満足するため、スクロール/ノズル/動翼それぞれの流動に着目、改良設計を実施した。

スクロール外観を図9に示す。今回開発したスクロール(図9(b))は、スクロール周方向の流動ひずみ抑制と、複数のノズルベーンに対して均質な流動となるよう、入口～スクロールにかけての形状やスクロール断面構造、周方向の断面変化を最適化した。スクロール内部流動を図9に示す。従来スクロールでは、スクロール内で形成される流動ひずみがノズルへ流入することで損失が発生していたが、改良スクロールではスクロール中間付近から損失が低減されている。また、流動ひずみが大きくなる舌部付近においても改良スクロールでは低圧領域が減少し、損失が抑えられていることが確認できる。

ノズルベーン的设计では、ノズル小開度域のタービン性能向上・制御性の向上・駆動部摩耗量低減を両立させる設計を実施した。ノズル小開度域では、ノズル流路(スロート部)とサイドクリアランスからの流れが干渉することで渦を形成し、この渦を起因として動翼内部の損失が上昇す

ると考えられる。改良ノズルでは、この流れの干渉を制限するため、ノズル先端側のスロート幅を狭め、流れを翼中央スパン側へ導く3次元形状を採用することにより、流れの干渉を低減、渦形成を抑制した(図10)。また、流量ヒステリシス及び駆動部摩耗の低減を狙い、ノズルベーン周りの圧力分布により発生する空力モーメント及び荷重を最適化するようにベーンプロファイルを設計した。駆動部の摩耗評価には MBD^{※5} を用い、エンジン実機で計測した温度・圧力変動・振動を入力とし、各しゅう動部の摩耗過酷さを表すパラメータである FV 値^{※6} を最小化するように設計を実施した。

※4 同一の駆動装置作動位置フィードバック値における、閉→開動作時と開→閉動作時の流量差

※5 Multi Body Dynamics, 機構解析

※6 力としゅう動速度の積

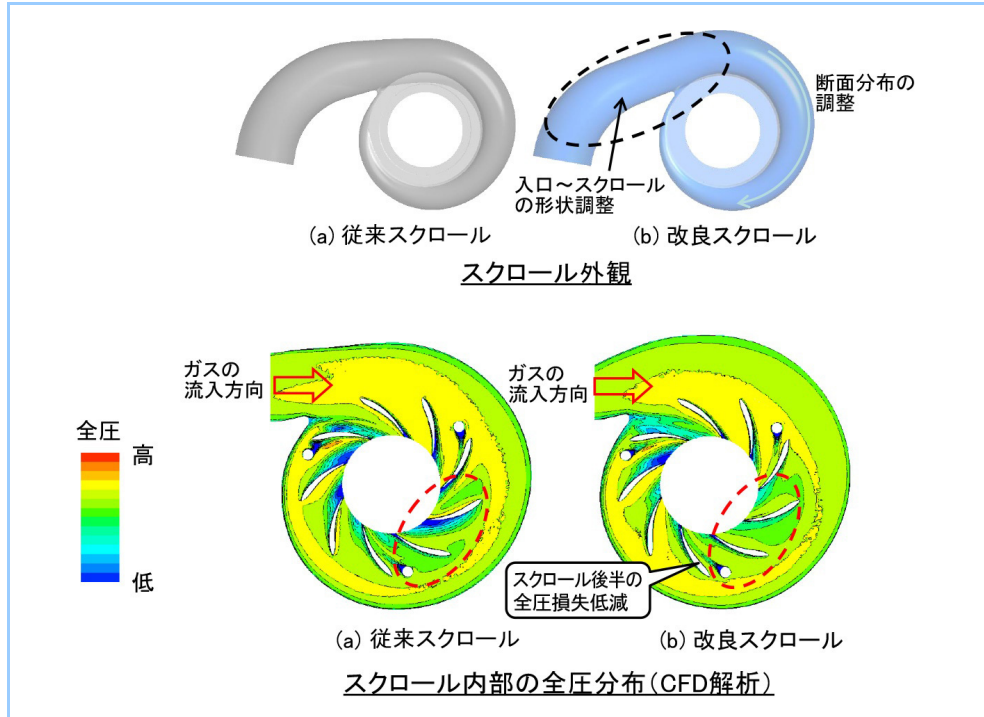


図9 タービンスクロールの改良設計

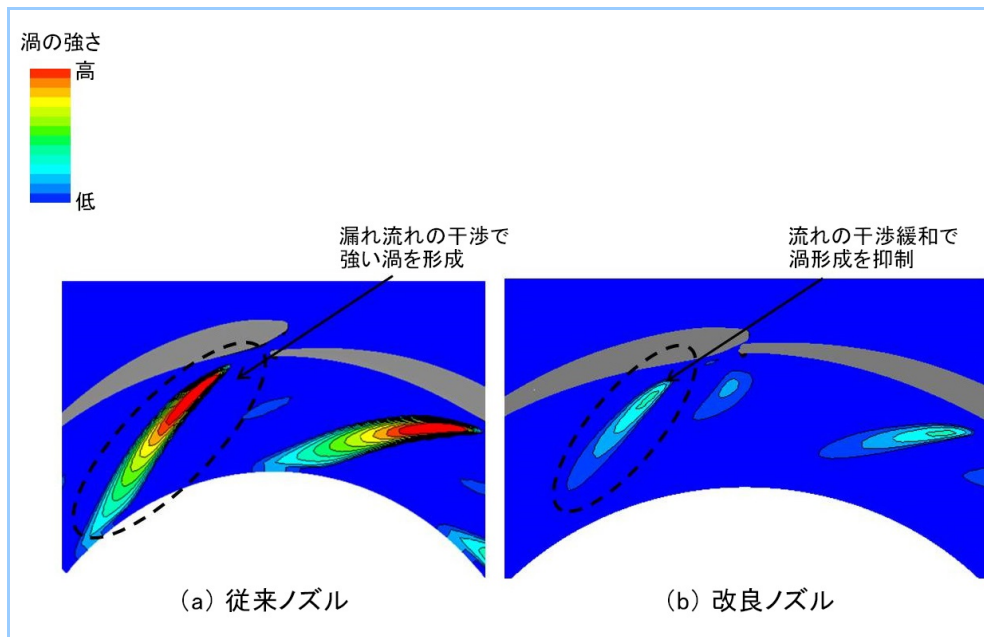


図10 タービンノズル内部の流動

VG タービン動翼については、小型車向け流量範囲を前提とした翼体格の調整，及び翼形状の最適化により、小流量～大流量全域における性能向上を図った。特に中流量での性能向上を図るため、翼クリアランスからの漏れを起因とした損失構造に着目した。図 11 に動翼内部の流動を示す。従来形状はクリアランスからの漏れ流れが翼チップ側で渦を形成，この渦が翼面上を流れる過程で拡散していく渦が損失領域を増大させている。一方，改良動翼も渦自体は発生しているが，翼負荷を最適化することで渦の拡散を抑制，損失領域を低減し，性能向上を図った。

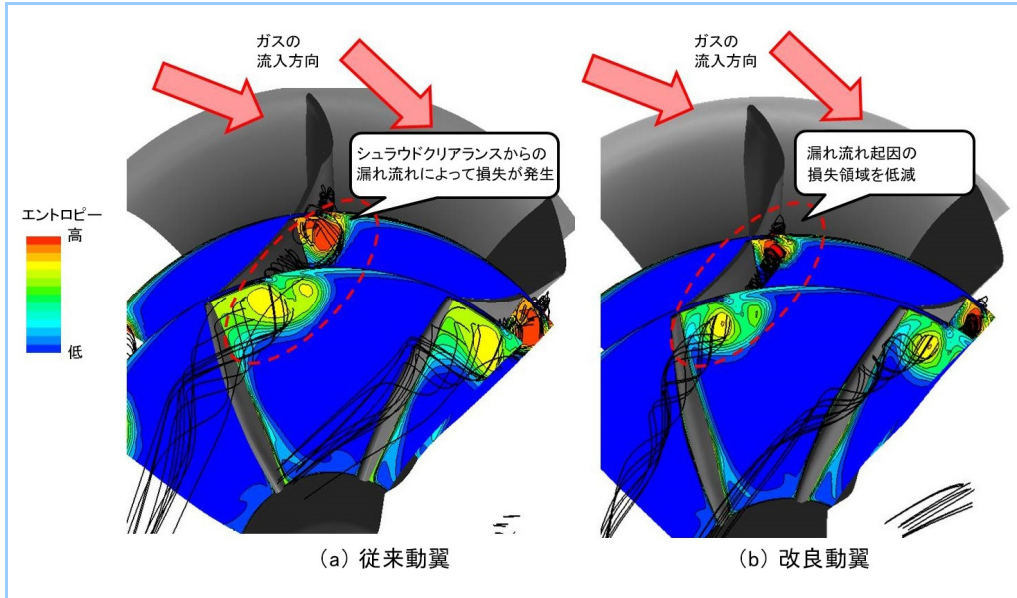


図 11 動翼内部のエンロピー分布と流線

これら新規開発技術を適用した VG ターボの性能試験結果を図 12 に，流量ヒステリシスの計測結果を図 13 に，エンジン耐久試験後の摩耗量評価結果を図 14 に，それぞれ示す。性能については，改善前の仕様に対し，トルク点・出力点における総合効率をそれぞれ1%・9%改善できた。流量ヒステリシスについては問題がないことを確認できた。駆動部の摩耗量は，改善前には部分的に摩耗が進行する傾向であったが，新開発品ではより均一に摩耗し且つ最大摩耗量が低減することが確認できた。

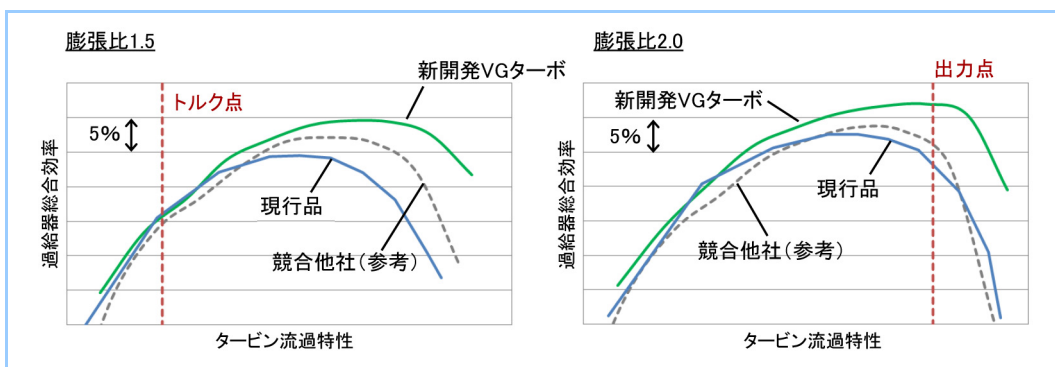


図 12 新開発 VG ターボによる過給機効率向上

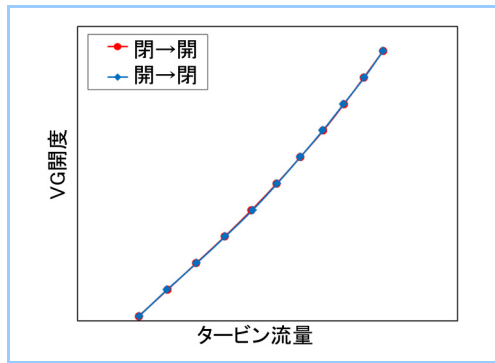


図 13 流量ヒステリシス評価試験結果

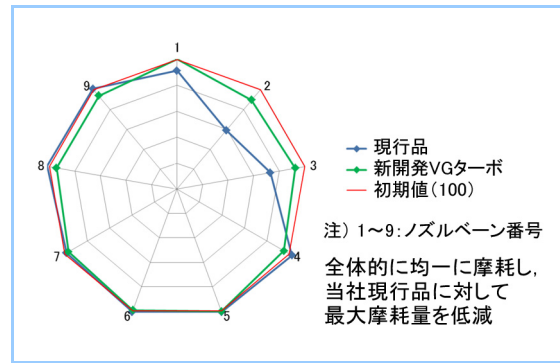


図 14 エンジン耐久試験時の駆動部摩耗改善

5. まとめ

VG ターボの高性能化・高信頼性の両立を目的とし、空力設計の改善に取り組み、制御性を維持しつつ過給機総合効率の改善と駆動部の摩耗低減を達成した。

近年、ガソリンエンジン向けターボチャージャの技術革新は目まぐるしい速度で進んでいる。高性能で高品質な製品をタイムリーに開発していく必要があり、当社も継続して性能・信頼性の改善を継続していく。

参考文献

- (1) 陣内靖明ほか, 欧州排気ガス規制対応 乗用車用VGターボチャージャの開発, 三菱重工技報Vol.49 No.2 (2012) p27~35
- (2) 恵比寿幹ほか, ガソリンエンジンの燃費改善に貢献する可変容量ターボチャージャの開発, 三菱重工技報 Vol.53 No.3 (2016) p27-33