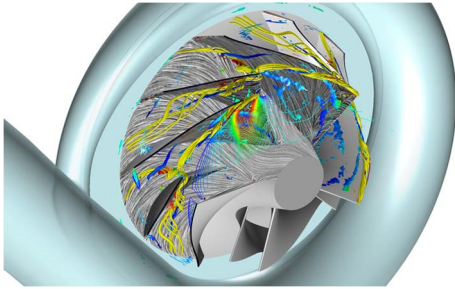


# ターボチャージャの高性能化を支える高度空力設計技術

## Advanced Aerodynamic Design Technologies for High Performance Turbochargers



横山 隆雄<sup>\*1</sup>  
Takao Yokoyama

岩切 健一郎<sup>\*2</sup>  
Kenichiro Iwakiri

吉田 豊隆<sup>\*3</sup>  
Toyotaka Yoshida

星 徹<sup>\*3</sup>  
Toru Hoshi

神坂 直志<sup>\*3</sup>  
Tadashi Kanzaka

茨木 誠一<sup>\*4</sup>  
Seiichi Ibaraki

近年、乗用車エンジンで過給ダウンサイジングによる低燃費化が進められているが、更なる燃費規制強化に対応するため、従来より作動範囲が広く高効率なターボチャージャが強く求められている。そこで、ターボチャージャの性能を支配するコンプレッサ及びタービンの高性能化を目的とし、エンジン排気脈動を考慮したタービン大規模流動解析やコンプレッサ再循環通路の内部流動可視化などにより、内部流動現象の解明と改良設計に取り組んだ。また、最適設計手法を適用し、コンプレッサインペラの高効率化コンセプト立案と2ステージターボ配管の改良設計を行った。その結果、可変容量タービンの極小流量時効率向上、ツインスクロールタービン効率向上、コンプレッサ作動範囲拡大、及び効率向上を達成した。

## 1. はじめに

地球温暖化の対策として温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の削減が世界的に推進されている。乗用車エンジンにも厳しい燃費規制が課せられ、今後も更に強化される計画である。エンジン低燃費化手法のひとつにターボチャージャを適用した過給ダウンサイジングがあり、ディーゼルエンジンはもとより、ガソリンエンジンへの適用も急拡大している。また、広範囲のエンジン作動点で高い過給効率と高レスポンスを得るため、可変容量タービン、電動コンプレッサ、2ステージターボの適用が進み、過給システムも複雑化しており、ターボチャージャ単体の高効率化や作動範囲拡大に加え、過給システム全体の性能向上が必要とされている。

当社では、従来より数値流動解析及び内部流動計測を活用したターボチャージャ高効率化の取り組みを進めてきたが、更なる高効率化のためにはより詳細な流動構造の分析が必須であった。そこで、可変容量タービンのノズル小開度におけるタービン全体流動解析、エンジン排気脈動下のツインスクロールタービン非定常流動解析、二次元平面内の非定常三次元流速計測が可能なステレオ PIV (Particle Image Velocimetry) 計測で、内部流動の詳細分析に取り組んだ。また、それぞれ得られた損失構造から改良形状を立案し、解析及び性能試験で高効率化を確認した。更に ANN-DE (Artificial Neural Network - Differential Evolution) 最適化法や Adjoint 法による、複雑な三次元流れ場の短時間最適設計に取り組んだ。本報では、これらターボチャージャ高性能化の取り組みについて紹介する。

## 2. 大規模流動解析

### 2.1 可変容量タービン

可変容量タービンは、タービン動翼の上流に回転可能なノズルベーンを有し、ノズルベーンのスロット面積を可変とすることで、タービン流量特性を制御できる。エンジン低速から広範囲でタ

\*1 総合研究所流体研究部 主席 技術士(機械部門) \*2 総合研究所流体研究部 工博

\*3 総合研究所流体研究部

\*4 総合研究所 主席プロジェクト統括 技術士(機械部門), 工博

ービンを駆動することが可能だが、近年ではより低速のエンジン回転数から過給圧を得るため、極小流量時の性能向上が求められている。一方、大流量側のタービン効率が高止まりすると、エンジン高回転において過給圧制御が困難になる場合があり、最大流量の増加と大流量側タービン効率の抑制も併せて必要とされている。

極小流量時にはノズルベーンの開度が非常に小さくなり、ノズル主流に対してノズルサイドクリアランスの漏れ流れの影響が増大する。またノズル出口流速と動翼周速の乖離が拡大し、動翼前縁に大規模な剥離流が発生して複雑な三次元流れになる。当社では、スクロールとノズルベーン、タービン動翼を含んだ全体領域を対象とし、サイドクリアランスの狭小空間を考慮した流動解析により、詳細な流れ場の分析に取り組んだ。

図 1 にノズル小開度における流線、及び動翼前縁の流速ベクトル分布を示す。図 1(a)に示す従来ノズルでは、極小流量であるために動翼内部で流れが広がらず、遠心力でシュラウド側に偏る傾向がある。そのため、翼全面で翼負荷を確保できずにタービン効率が低下し、また、動翼出口ではシュラウド側の流速が高く、ハブ側の流速が低くなることで、不均一な流速分布により発生する混合損失が大きくなる。この流動に着目して、シュラウド側にテーパーを配置したノズル構造を考案した。このコンセプトによって図 1(b)に示すように動翼入口の流れがハブ側に転向され、動翼内部の流れがハブ側まで広がっていることが確認できる。このコンセプトを性能試験で検証した結果を図2に示す。従来ノズルに対して、大流量側のタービン効率を抑制しつつ、ノズル小開度の極小流量領域ではタービン効率が+2.2%向上することを確認できた。

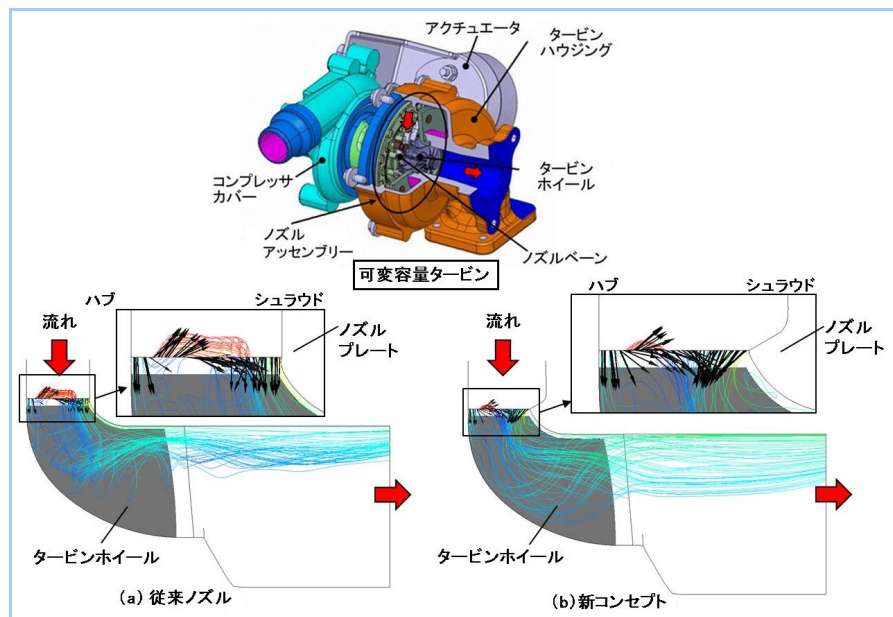


図1 流線と動翼前縁の流速ベクトル分布(ノズル小開度)

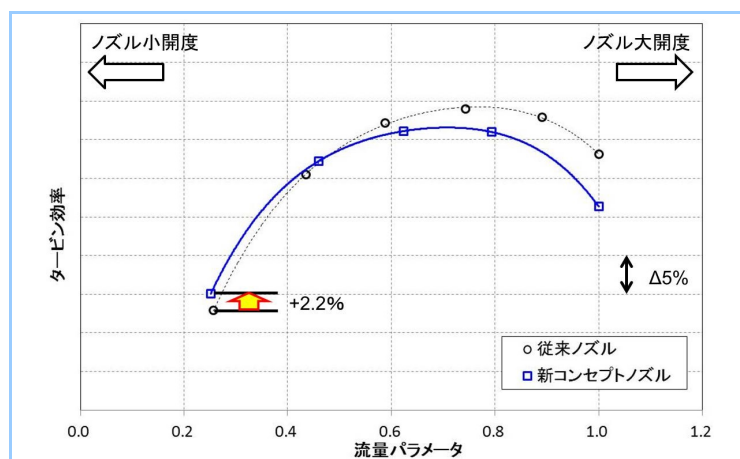


図2 VGタービン性能試験結果

## 2.2 ツインスクロール

エンジン低速におけるタービン出力向上技術として、ツインスクロールがある。タービンスクロール断面を軸方向に二分割し、それぞれ異なるエンジンシリンダに接続することで、エンジンからの排気脈動を有効に活用する。一方、ツインスクロールは小型化の制約から断面が非対称となり、フロント側に対しリア側送入時の効率が低下する課題がある。部分送入時の効率差はエンジンシリンダ間の性能バラツキを発生させるため、改善が求められている。

エンジン上では、2つに分割されたスクロールには交互に排気脈動が流入するため、それらが合流するタービン動翼上流では強い非定常流動が発生する。当社では、既報<sup>(1)</sup>のとおり排気脈動を境界条件とした非定常流動解析に取り組み、特にリア送入時のフロント側漏れ流れにより損失が発生している流動課題を把握した。図3にリア側送入時におけるリア断面(送入側)とフロント断面(非送入側)の損失分布と流速分布を示す。リア側からフロント側への漏れ流れが発生し、フロント側に大規模な損失領域が確認できる。ツインスクロールでは排気脈動がリア側とフロント側に交互に流入し、両者に圧力差が発生することから低压側への漏れ流れが発生する。この流動構造に着目し、リア側からフロント側の漏れ流れを抑制できる出口形状を考案して、流動解析で効率+1.9%向上の見込みを得た。図4に示すとおり、性能試験にてタービン断熱効率を評価した結果、狙い通りリア送入時の性能が+2.1%向上していることを確認した。新形状ではフロント送入時とリア送入時の流量バランス、効率バランスも改善しており、エンジン上の高性能化が期待できる。以上により、排気脈動を考慮した非定常流動解析の有効性が確認できた。

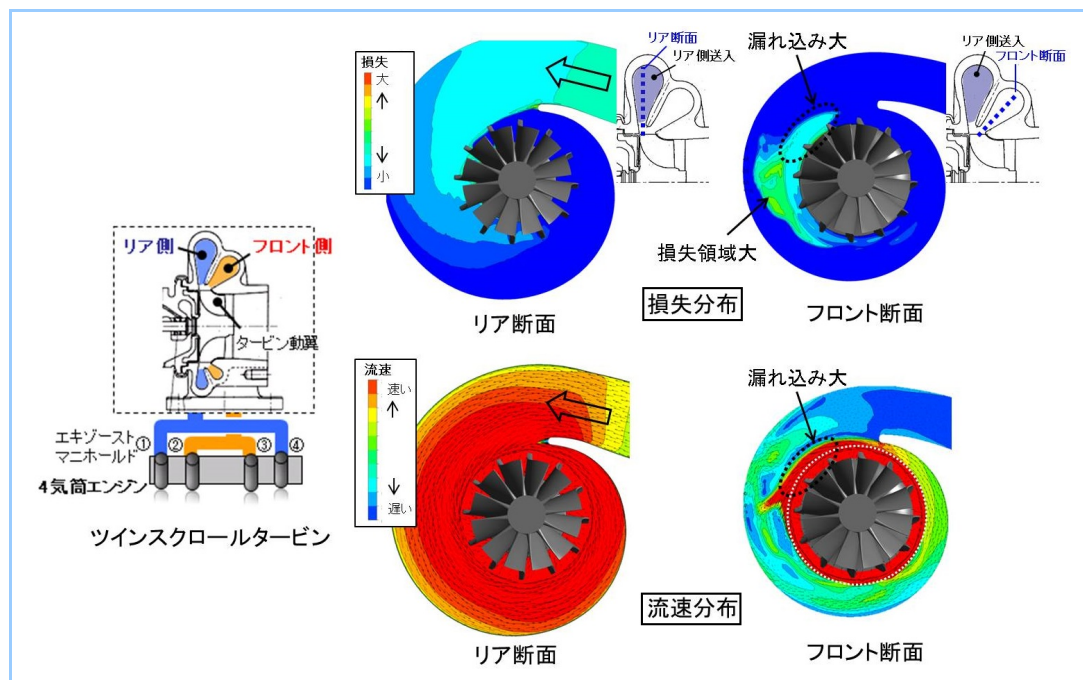


図3 リア側送入時のタービンスクロール内部流動

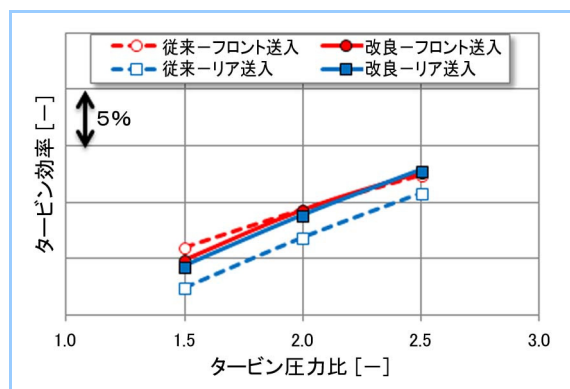


図4 ツインスクロールタービン性能試験結果

### 3. 三次元内部流動計測

コンプレッサ作動範囲拡大デバイスとして、ケーシングトリートメントが使用されている。このケーシングトリートメントは、コンプレッサカバーのインペラスロット近傍に設けられたスリットと再循環流路及びそれを形成するストラットから構成されている。サージ限界近傍の小流量作動点では、インペラに流れる流量の一部が本スリットを経由して上流配管に再循環し、インペラ上流での流量を増加させ前縁剥離を抑制する。この効果により、圧力特性の改善とサージ限界流量の低減が可能となる。図5に循環流路内のストラット本数を変更した際のコンプレッサ性能の比較を示す。ストラット本数によりサージング流量が変化することがわかっており、現象理解のためには再循環流路の流動を分析することが重要である。ケーシングトリートメント近傍の流れは、順流と逆流が混在し、またインペラの影響で強い旋回成分を持つため、流動の三次元性が強い。そこで、二次元平面内の三次元流速成分を計測可能なステレオ PIV (Particle Image Velocimetry) を適用し、内部流動の詳細分析に取り組んだ<sup>(2)</sup>。

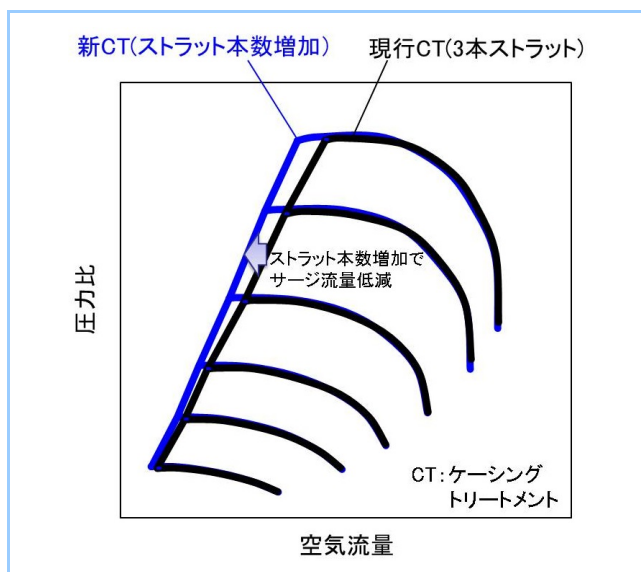


図5 ケーシングトリートメント性能試験結果

対象としたコンプレッサを図6に示す。本計測では、①3本ストラットと②13本ストラットの2種類について循環流路出口における速度3成分を計測した。図7に循環流路出口における軸方向流速カラーコンタと面内流速ベクトルを示す。流速カラーが青の領域はスリットからの循環を意味するが、3本ストラット、13本ストラットともに循環流が発生していることが確認できる。また、3本ストラットでは流路中央において大きな旋回流が発生している。これは、インペラからスリットを通過した旋回流が循環流路出口まで残っていることを意味している。一方、13本ストラットの場合は流路での旋回流が抑制されていることが確認できる。以上より、ストラットの本数が循環流の旋回流れに影響していることを確認した。

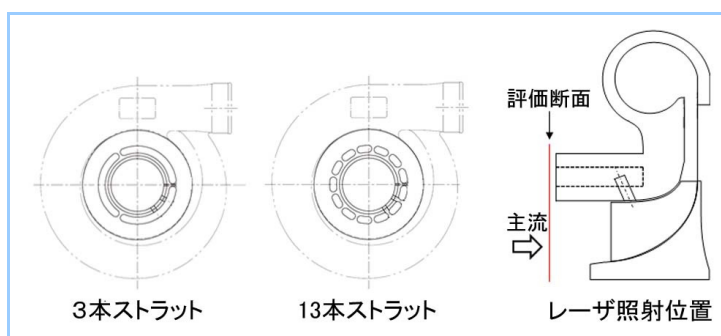


図6 ケーシングトリートメント内部流動計測



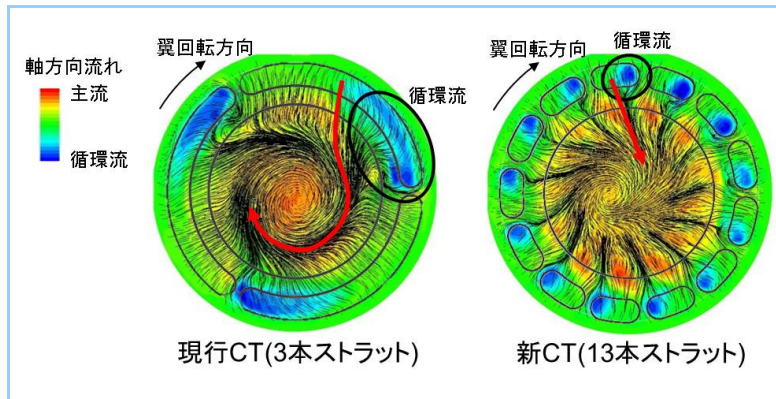


図7 ケーシングトリートメント内部流動計測結果

上記内部流動計測結果より、旋回流をコントロールした新デバイスを考案した<sup>(3)</sup>。図8に新デバイスの鳥瞰図を示す。これは、従来のケーシングトリートメント循環流路出口近傍にガイドベーンを設けている。ガイドベーンの取付角度はインペラ回転方向と反対方向に設置されており、循環流路で発生した旋回流を制御している。図9にサージ近傍点におけるインペラチップ付近のマッハ数分布を示す。従来のケーシングトリートメントでは翼の失速は抑えられているものの、翼負圧面側のマッハ数分布が周方向に非一様となっている。新デバイスでは翼負圧面と正圧面の速度差が大きく、翼負荷が維持できているとともに、マッハ数分布が周方向に一様化されている。性能試験にてサージ限界流量を評価すると、新デバイスは低圧力比から高圧力比まで全域でサージ限界流量が低減されていることが確認でき、本デバイスの有効性が確認された。

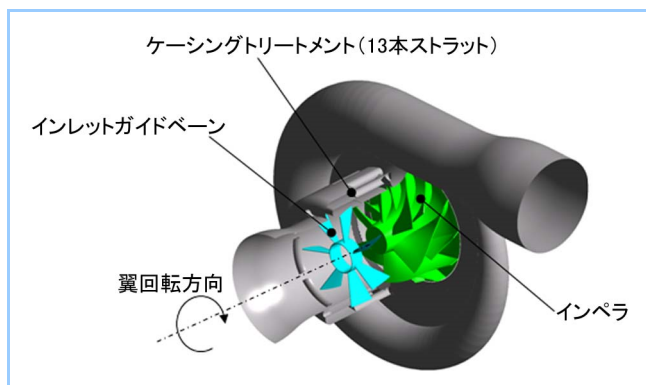


図8 新デバイス鳥瞰図

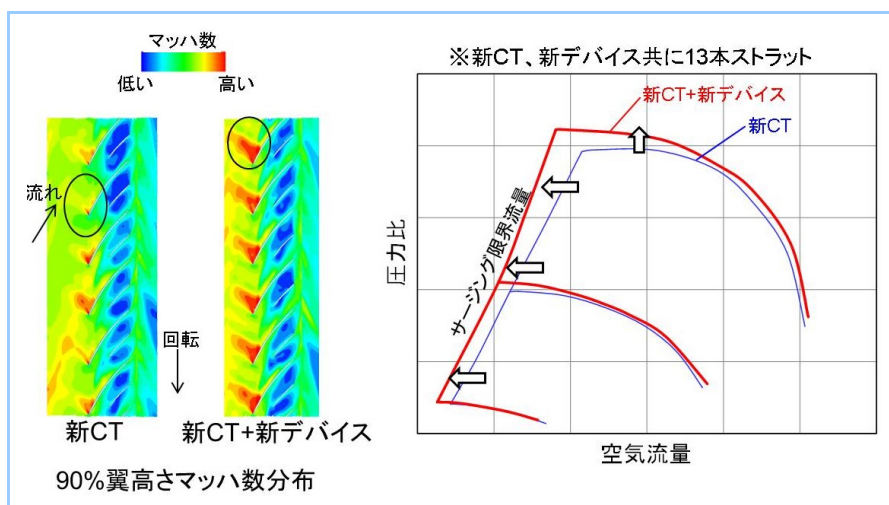


図9 新デバイスの内部流動と性能

## 4. 最適設計手法

### 4.1 ニューラルネットワークと最適化アルゴリズム

乗用車用エンジンでは、ダウンサイジングによるエンジントルク低下を補うため低回転時にも過給圧が必要とされ、コンプレッサのサージ小流量化やサージ近傍の高効率化が求められている。サージ近傍の流れ場は、剥離や失速を伴い高効率化が困難な上、同時にチョーク側の流量減少や効率低下の抑制も求められるため、設計に多大な時間を要する。

当社では、ANN(Artificial Neural Network)による性能・強度評価と DE (Differential Evolution) による個体探索を組み合わせ、高速な性能評価・最適化形状抽出が可能な最適設計手法を構築済みである。既報<sup>4)</sup>のとおり、インペラ単体の最適化により高効率化を達成した。今回、設計パラメータ、及び評価関数を見直し、複数作動点の最適設計による作動範囲拡大に取り組んだ。

図 10 に最適化前後のインペラ形状の比較と内部流動の比較を示す。最適化前の形状では翼前縁の形状が直線であったのに対して、最適化後の形状は翼前縁が三次元的に湾曲している。翼端近傍の損失分布を比較すると、翼負圧面にて発生していた損失が最適化後では大きく低減されていることが確認できる。図 11 に性能試験結果を示す。最適化後では圧力比特性が改善されてサージ限界流量が低減されており、コンプレッサの作動範囲が拡大されていることが確認できる。以上より、ANN と DE による最適化手法を用いた作動範囲拡大手法の有効性が確認された。

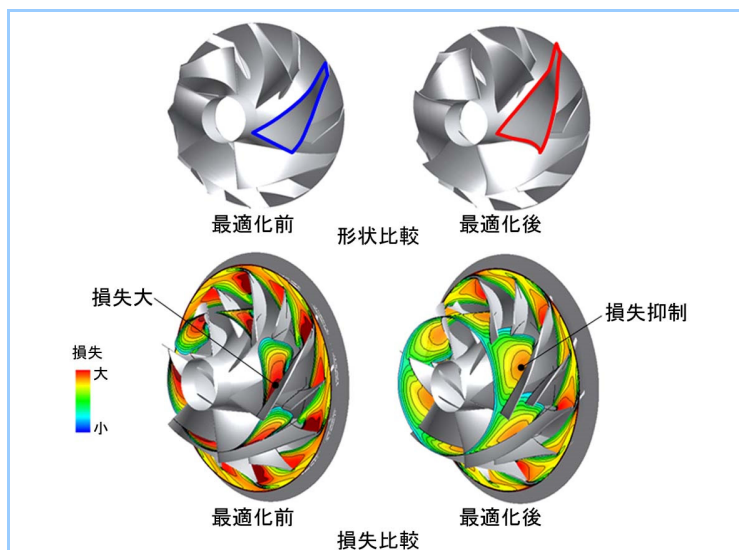


図 10 コンプレッサインペラ最適化前後の形状と内部流動の比較

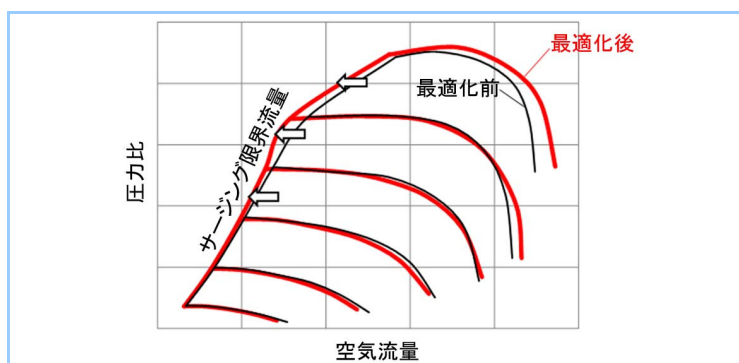


図 11 コンプレッサインペラ最適化前後の性能試験結果比較

### 4.2 Adjoint 法

エンジンレイアウトの制約や2ステージターボの採用などにより、ターボチャージャの性能を左右する給排気配管の形状が複雑化し、作動範囲縮小と効率低下の要因となっている。また、配管形状はお客様のエンジン仕様に依存し圧力損失などの流動課題は都度変化する。そこで、コン

プレッサスクロールと2ステージターボ配管を対象とし、Adjoint 法を用いた最適設計に取り組んだ。

Adjoint 法(随伴変数法)とは、目的関数に対する設計変数の感度を求めることで形状最適化を図るもので、決定論的最適化の一種である。確率論的最適化(前述の進化的アルゴリズムなど)と比べ、大域的な最適解の探索はできない一方、一度に全ての設計変数に対する目的関数の勾配を求めることができる(形状を表現する全接点を設計変数とした最適化が可能)、計算効率が良く短時間での最適化が可能といったメリットがある。

#### (1) コンプレッサスクロール

対象としたコンプレッサスクロールの最適化前後形状及び内部流動解析結果を図 12 に示す。本コンプレッサスクロールは、吐出口が回転軸方向に90度ベンド(湾曲)した、近年増加しているレイアウトであるが、このようなベンド部があると流動歪みの発生及び圧力損失増加に繋がる。一方、最適化後形状ではベンド部曲率が緩和され、流動が改善していることが確認された。また、最適化後形状ではスクロールの断面形状が周方向に三次元的に変化することで、スクロール内で発生する再循環流れがスムーズ化され、再循環損失が低減されていることが確認された。これらの結果、最適化スクロールはベース形状に対し、作動レンジ全域で圧損係数が低減され、効率を向上できる見込みを得た。図 13 に性能試験結果を示す。試験でも最適化スクロールの性能向上効果が確認され、作動レンジは同等のまま、効率が最大+1.3%向上する結果が得られた。

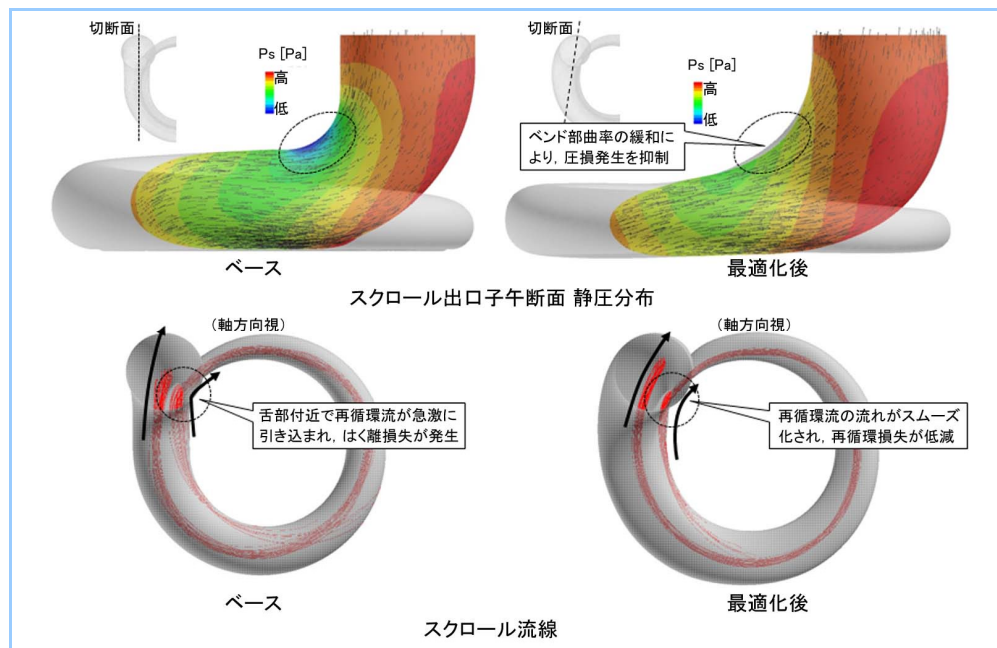


図 12 コンプレッサスクロール最適化前後の形状と内部流動の比較

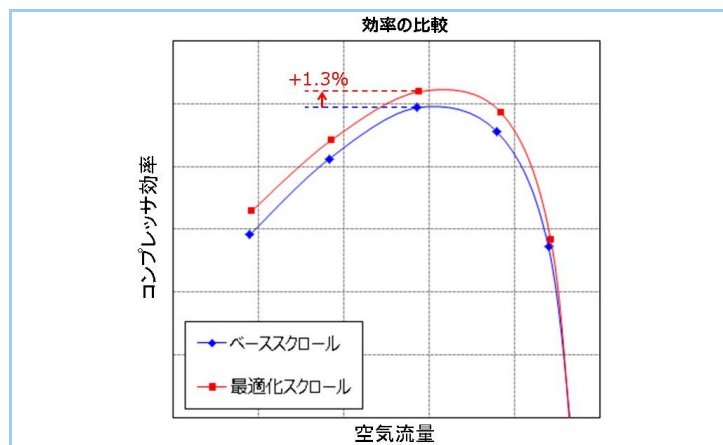


図 13 コンプレッサスクロール最適化前後の性能試験結果比較

## (2) 2ステージターボ配管

2ステージターボは、高圧段、低圧段の2つのターボチャージャを組み合わせることで、広範囲のエンジン回転数で過給圧を得ることができる。2つのターボチャージャをエンジンルーム内の狭小空間に収納するため、図13に示すとおり配管に曲率の大きい湾曲部が複数存在し、性能低下を引き起こす課題がある。そこで、2ステージターボの配管形状に対し Adjoint 法を用いた形状最適化を行った。

図14に最適化前後の形状と内部流動の比較を示す。高圧段タービン出口からバイパスバルブとの合流部に向かう Section 2 では、高圧段出口直後の急曲がりに伴う剥離が発生していたが、高圧段タービン出口長さの確保と湾曲部の面積拡大により、剥離が抑制された。また、バイパス部との合流部 Section 3 では、バイパスバルブを閉じた際に空隙部に強い旋回流が発生していたが、高圧段側合流部の曲率を縮小することで、旋回流が抑制された。図15に性能解析結果を示す。バルブ閉条件の圧力損失係数は Section 1、2、3 でそれぞれ 2%、45%、48% 低減し、効率が全体で+1.9%向上した。以上より、Adjoint 法を用いた配管形状最適化の有用性が検証された。

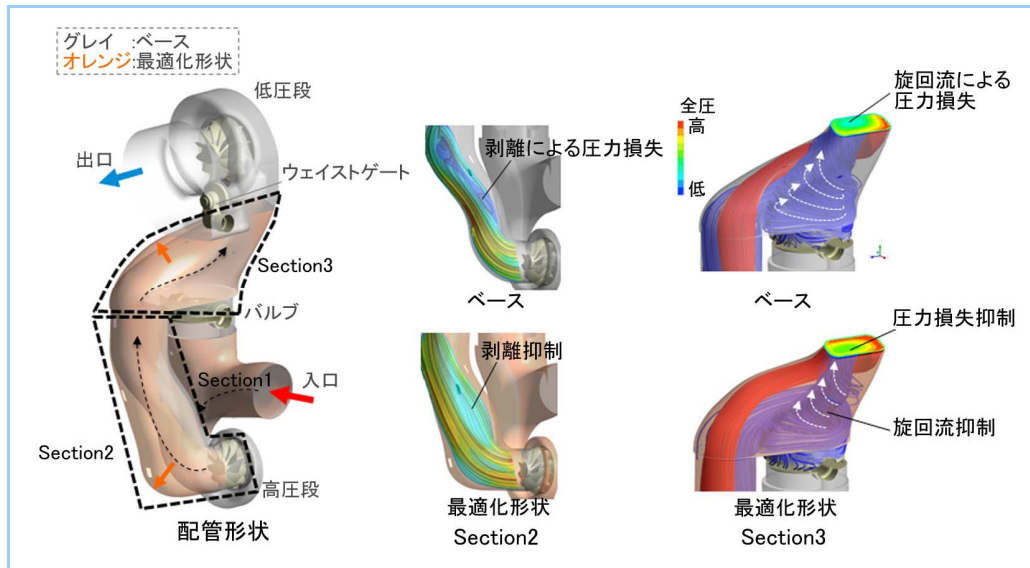


図14 2ステージタービン最適化前後の形状と内部流動の比較

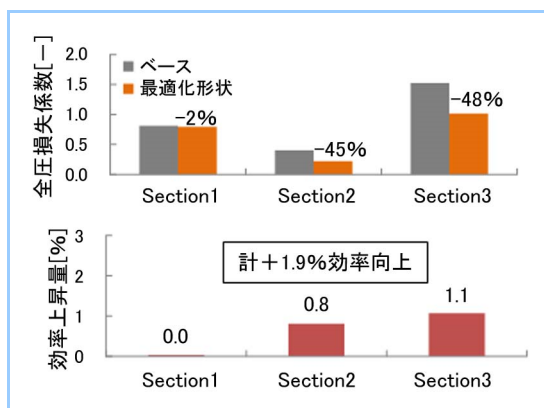


図15 2ステージタービン最適化前後での性能解析結果比較

## 5. まとめ

ターボチャージャの高性能化を目的とし、大規模流動解析、三次元内部流動計測、最適設計を適用して、内部流動の詳細分析と改良設計に取り組んだ。大規模流動解析では、広範囲かつ詳細な領域設定、またエンジン排気脈動の非定常条件を考慮することで、エンジン実機上の損失構造を把握して高効率化を達成した。ケーシングトリートメントの三次元内部流動計測では、順



流と逆流、及び旋回流が混在する複雑な三次元流れ場の流動構造を可視化し、新デバイスへの開発へ繋げた。最適設計では、設計変数が多いコンプレッサインペラと2ステージ配管の改良設計に取り組み、短時間で内部流動を改善し高効率化を達成した。

乗用車エンジンを取り巻く規制強化の動きは今後も続くため、乗用車メーカはパワートレインの電動化を含めた様々な開発を想定しており、必要とされる過給技術も絶えず変化していく事が予想される。年々向上する解析能力、高度化する内部流動計測技術と最適設計手法を常に取り込み、空力設計技術を更に発展させ迅速かつ革新的なターボチャージャの開発を推進していきたい。

尚、ANN-DE 最適設計手法はフォンカルマン研究所(ベルギー)と共同開発したものであり、同所の Van den Braembussche 名誉教授, Verstraete 助教, Alsalihi 博士に謝意を表す。

## 参考文献

- (1) 大迫 雄志ほか, 非定常数値解析技術を用いた自動車用ターボチャージャの高効率ツインスクロールタービンの開発, 三菱重工技報 Vol.50 No.1 (2013-1) P33~40
- (2) Kanzaka, T. et. al, Experimental Study of a Centrifugal Compressor with Self Recirculation Casing Treatment for Turbochargers, Proceedings of International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo, ISBN978-4-89111-008-6, 2015.
- (3) Tomita, I. et. al, A New Operating Range Enhancement Device Combined with a Casing Treatment and Inlet Guide Vanes for Centrifugal Compressors, 11th International conference on Turbochargers and Turbocharging, IMechE, pp.79-87, 2014.
- (4) 茨木誠一ほか, 遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークを用いたターボチャージャ用遠心圧縮機の最適空力設計, 三菱重工技報 Vol.52 No.1 (2015), p.82~86