

# 自動車用ダブルスクロールタービンの低騒音化技術

## Noise Reduction Technology for Double Scroll Turbocharger for Automobile



北川 大葵\*<sup>1</sup>  
Daiki Kitagawa

永代 行日出\*<sup>2</sup>  
Yukihide Nagayo

星 徹\*<sup>3</sup>  
Toru Hoshi

富川 邦弘\*<sup>3</sup>  
Kunihiro Tomikawa

秋山 洋二\*<sup>4</sup>  
Youji Akiyama

岡 信仁\*<sup>5</sup>  
Nobuhito Oka

近年の CO<sub>2</sub> 排出規制下においては、商品力としての加速性能と燃費改善の両立が必須であり、ターボチャージャについてはエンジン低速域で高トルクを発生させるための高い過給圧が求められる。ダブルスクロールタービンは2つの流路とバルブを備え、エンジン低速域では分割流路の性能特性を実現しつつ、高速域ではバルブを開くことでシングルスクロールタービンに近い性能特性を得ることができる。一方、2つの流路を持つためタービン周方向に圧力分布が発生し流体音が過大になる課題があった。三菱重工業株式会社(以下、当社)では解析技術と試験検証を活用して大幅な低騒音化を実現しており、本報ではその取組み結果について述べる。

## 1. はじめに

乗用車用ターボチャージャは、タービンがエンジンの排気ガスエネルギーを回収して回転することで同軸上の圧縮機羽根車を駆動し、圧縮空気をエンジンに供給している。コンベンショナルなターボチャージャでは、エンジン排気管からタービン動翼までを1本の配管で接続するシングルスクロールタービンが用いられる。シングルスクロールタービンはエンジン高速域の定格出力に合わせて設計されるため、エンジン低速域では排気ガスの流量が減少して過給圧が低下する。エンジン低速域と高速域の性能向上を両立する手段として、可変機構を有する可変容量タービンや、エンジンの排気脈動を積極的に活用した分割型スクロールタービンが開発されている。本報では、分割型スクロールタービンの一つであるダブルスクロールタービンにおいて、空力性能と騒音性能の両立を実現した製品の開発状況について述べる。

## 2. ダブルスクロールタービンとは

ダブルスクロールタービンとは、分割型スクロールタービンの方式の一つである。4気筒エンジンの場合、分割型スクロールタービンではタービンハウジングのスクロールが2流路に分割されており、それぞれが独立してエンジンの排気ポートに接続されている。第1気筒と第4気筒、第2気筒と第3気筒を組み合わせることで、エンジンの排気干渉を低減し、シングルスクロールタービンよりも高い過給圧を得ることが可能である。

図1に分割型スクロールタービンの2方式であるツインスクロールタービンとダブルスクロールタービンを比較して示す。ツインスクロールタービンとダブルスクロールタービンでは、スクロールが

\*1 総合研究所 振動研究部

\*2 総合研究所 振動研究部 主席研究員 博士・技術士(機械部門)

\*3 総合研究所 ターボ機械研究部

\*4 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

\*5 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 博士

それぞれ軸方向と周方向に2分割されている。ツインスクロールタービンでは、仕切り板の先端と動翼先端との間にクリアランスができるが、製造性と強度を確保しながらこのクリアランスを小さく抑えるのが難しく、動翼全周において、一方のスクロールからもう一方のスクロールへのガス漏れが発生する。ダブルスクロールタービンには仕切り板がなく、スクロール終端部(舌部)位置のみに形成されるクリアランスを小さくすることが比較的容易であるため、製造性や強度の確保とガス漏れ低減の両立が可能であり、ツインスクロールタービンよりも高い過給圧を得ることができる。一方、エンジン低速域では、排気脈動の影響から動翼先端が舌部を通過する前後の圧力差が大きいため、翼通過周波数(BPF: Blade Passing Frequency)騒音がシングルスクロールタービンやツインスクロールタービンよりも大きくなり、特に静粛性が求められる車両向けには BPF 騒音の低減が大きな課題となっていた。

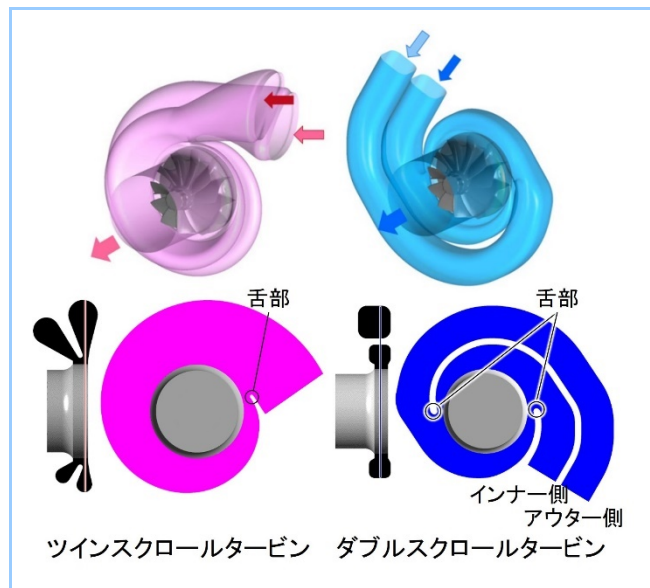


図1 分割型スクロールタービン

### 3. タービン流体音の低騒音化

ダブルスクロールタービンの課題であった流体音の低騒音化に向け、初めに、流動(CFD: Computational Fluid Dynamics)及び音響解析を実施し、騒音発生メカニズムの解明と音源位置の特定に取り組んだ。CFD解析には、汎用の三次元粘性流動解析コードANSYS CFXを使用し、乱流モデルには  $k-\omega$  SST モデルを使用した。解析メッシュは、インナー及びアウタースクロールからタービン動翼までをモデル化し、非定常 CFD 解析により流動を評価した。また、音響解析には汎用ソフトのMSC Actranを使用し、CFD解析で得られた流速、密度等の流れ場情報を入力条件とした Mohring analogy に基づく音源計算及び伝搬解析を実施し、騒音発生メカニズムの解明と主要な音源位置の特定、対策方針の策定を図った。

CFD解析で得られた流速分布と音響解析により得られた音圧レベル分布を図2に示す。騒音が課題であった従来仕様は、舌部とタービン動翼のクリアランスが小さいため、舌部から生じた後流とタービン動翼が干渉し、大きな圧力変動が生じていた。音響解析でも同様に、舌部付近の音圧レベルが高い傾向を確認し、騒音増大の主要因は舌部位置のポテンシャル干渉であると推定できた。また、舌部に加えてタービン動翼周りの音圧レベルも高い傾向にあり、翼通過に伴う圧力変動も騒音増大の要因であると推定できた。

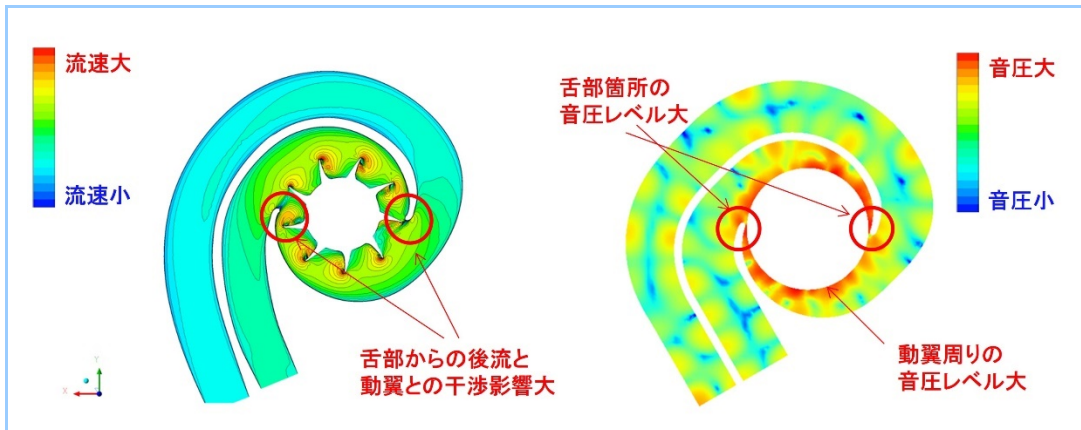


図2 従来仕様の流速分布と音圧レベル分布

以上より、タービン流体音の低騒音化に向け、①舌部のポテンシャル干渉の緩和と②翼通過に伴う圧力変動の低減を実現できる対策仕様の立案を図った。①に関しては、舌部とタービン動翼とのクリアランスの拡大と舌部形状の最適化を図ることで、騒音低減を実現しながらタービン性能の維持を両立する仕様を検討した(タービン性能への影響に関しては4章で詳述)。また、②については、翼形状・翼枚数の最適化により翼1枚あたりの負荷を減少させ、音源の強さの低減を図った。上記項目を CFD 解析及び音響解析技術を用いて効果を検証し、解析結果を基に低騒音化を実現し得る新タービン仕様を立案し、実機試験にて低減効果を評価した。試験は当社総合研究所(長崎)にあるターボ試験ベンチにて実施し、回転数と翼枚数により決まる周波数成分であるタービン BPF 騒音に関して評価を行った。試験時のイメージは図3に示すとおりであり、騒音計をターボチャージャ周囲に複数配置して網羅的に騒音データを取得することで、音波の指向特性の違いで生じる計測誤差影響を可能な限り排除した評価を実施した。試験で得られた対策前後のタービン仕様におけるタービン BPF 騒音のソナグラム分析結果を図4に示す。横軸がタービン回転数[rpm]、縦軸が周波数[Hz]であり、騒音レベルをカラーコンターで表示している。図4より、対策前の従来仕様においては、タービン BPF 騒音が顕著に表れており、周辺の周波数帯域に比べ BPF の騒音レベルも高いため耳障りな音として問題になっていると推定できる。一方、対策後の新タービン仕様(舌部クリアランス拡大や翼形状の最適化等を採用)では、BPF 騒音のレベルが減少し、大幅な改善がみられた。タービン回転数ごとに BPF 騒音レベルを算出し、従来仕様と対策仕様で比較した結果を図5に示す。なお、横軸がタービン回転数[rpm]、縦軸が BPF 騒音レベル[dBA]を示している。図5に示すとおり、新タービン仕様はほぼ全回転数域にわたって 10dBA 以上の高い騒音低減が実現できており、大幅な低騒音化を達成できた。

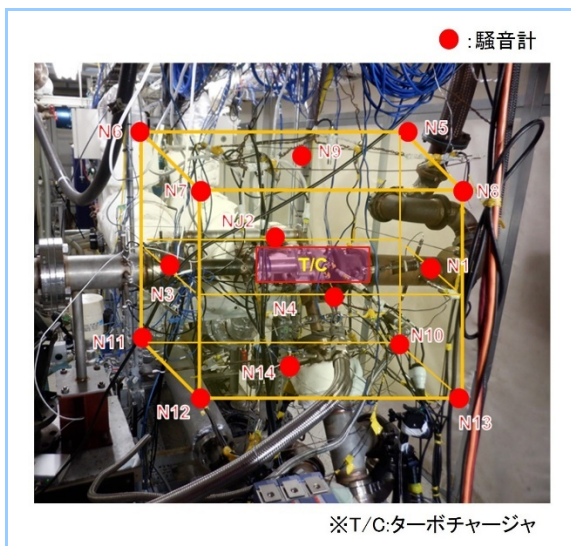


図3 試験概要

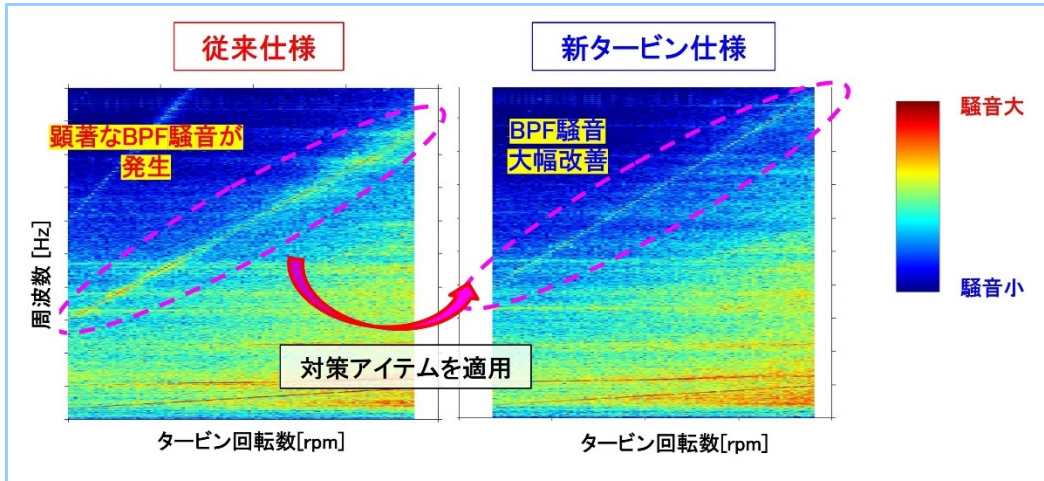


図4 ソナグラム分析結果

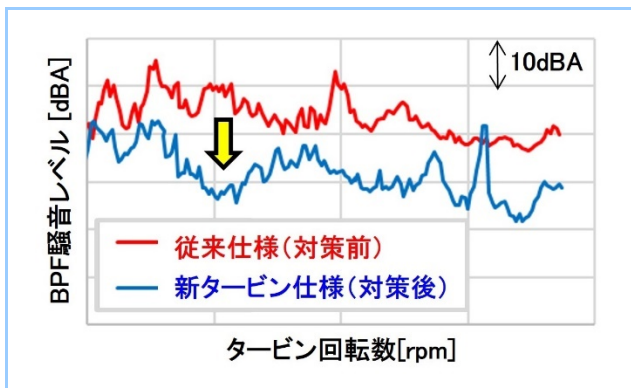


図5 回転数ごとの BPF 騒音の比較

#### 4. タービン性能の評価

ダブルスクロールタービンの特性を有効に活用するためには、スクロールの舌部クリアランスを適切に設計する必要がある。上述のとおり、舌部クリアランスの拡大により騒音低減が可能である一方、舌部クリアランスを介した他方のスクロールへのガス漏れの増加により過給圧が低下するというトレードオフが生じる。そこで、エンジン低速域における過給圧向上と騒音低減の両立を図り、舌部形状とタービン動翼の改良設計や反動度の最適化に取組み、タービンの高効率化を実現した。従来仕様に対するタービン効率の改善結果を図6に示す。図6では横軸にタービンの膨張比、縦軸にタービン効率を示す。新タービン仕様では、高膨張比側の効率を 0.4pt 改善し、低膨張比側の効率を 1.5pt 改善した。

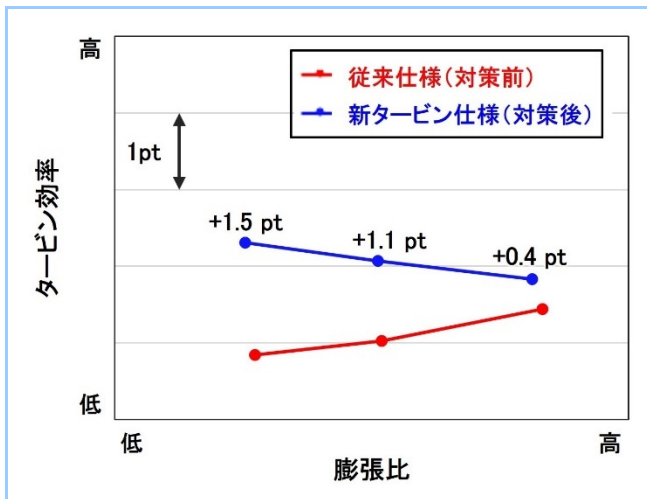


図6 タービン効率の改善

ターボチャージャのタービン動翼の主な損失には、前縁衝突損失、背面漏れ損失、翼端漏れ損失がある。新タービン仕様の効率改善の要因の一つとして、翼端漏れ損失の低減が挙げられる。CFD 解析結果における従来仕様と新タービン仕様の翼端漏れ流れの比較を図7に示す。舌部形状や翼枚数の追加を含むタービン動翼の改良設計により、翼端クリアランスを介した圧力面側から負圧面側への漏れ流れが低減された。翼端漏れ損失の低減により、膨張比全域でタービン効率が改善した。

もう一つの効率改善の要因として、反動度の最適化が挙げられる。反動度の調整によりタービン膨張比に対する効率の変化特性を制御することができる。新タービン仕様では、スクロールのスロート面積に対するタービン動翼のスロート面積の比率を従来仕様よりも小さくすることで、タービンを高反動度化した。高反動度化によりタービン効率のピークを低膨張比側へシフトさせることで、エンジン低速作動時のタービン効率を改善した。また、高反動度化によりタービン動翼入口のガス流速は低下する。これにより舌部周辺の圧力変動が緩和されるため、効率改善と併せて騒音低減にも貢献している。

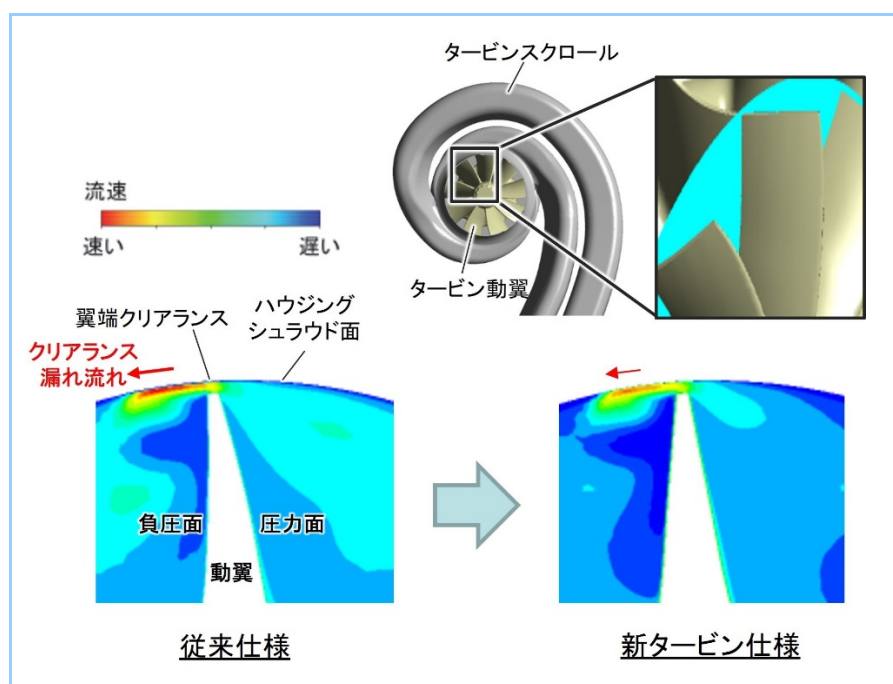


図7 翼端漏れ流れの低減

## 5. まとめ

環境規制と性能要求の観点から近年着目されているダブルスクロールタービンは、流体音 (BPF 騒音) の低騒音化が課題であった。そこで、流動 (CFD) 及び音響解析、実機運転試験を通して低騒音タービン仕様の開発に取り組んだ。

解析評価の結果、騒音増大の主要因はスクロール舌部から生じる後流とタービン動翼の干渉と推定でき、想定された対策アイテムを盛り込んだ仕様に対して、解析による低減効果予測を実施し、低騒音化が見込まれる新タービン仕様の立案を行った。設計した新タービン仕様に対し実機運転試験を行って低減効果を検証した結果、新仕様では従来に比べ、概ね全回転数域にわたって約 10dBA となる大幅な騒音低減を達成した。また、空力性能改善との両立も実現し、当社ダブルスクロールタービンの低騒音化実現に大きく貢献できたと考えている。

さらに、本取組みで得られた各対策アイテムの効果や、CFD 及び音響解析を用いたメカニズム推定・対策立案から、その後の実機検証、分析評価、低騒音化仕様の立案までの一連の評価プロセスは、自動車用ターボチャージャに限らず、各種製品開発に適用可能である。本成果を各種製品開発に活かし、当社製品の低騒音設計技術のさらなる向上に貢献していきたい。