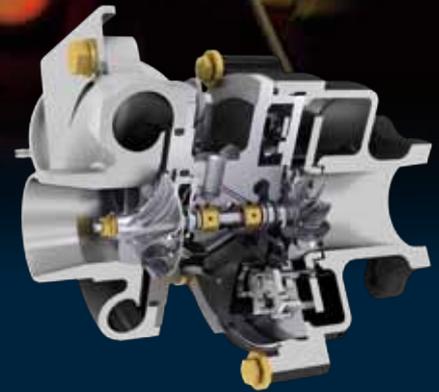


Techno Scope

エンジンに搭載したターボチャージャの耐久・耐熱試験の様子。ガソリンエンジンの排気ガス温度は1,000℃以上に達するものもある。ターボチャージャは高温の排気ガスに曝されながら過酷な環境で使用される。

# 自動車エンジンのダウンサイジングに対応するターボチャージャ

今、世界で需要が高まっている自動車部品がある。エンジンの熱効率を高めるターボチャージャ(過給機)である。ターボチャージャの世界市場は著しく拡大しており、その約半分は日本製品が占めるという。世界中の自動車メーカーが注目する日本のターボチャージャ技術の動向を追う。



## 世界各地で高まる需要

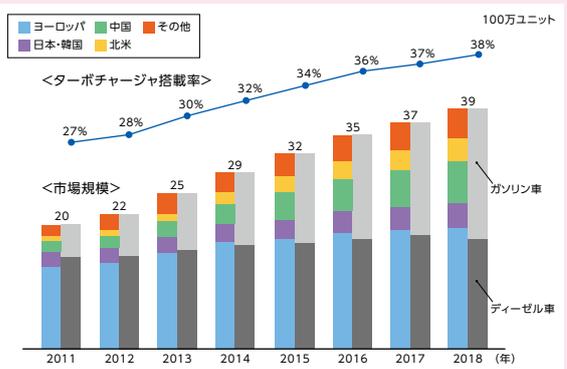
世界各地で自動車の燃費や排気ガスの規制が厳しくなっている。自動車メーカー各社にとって、燃費向上や排気ガスのクリーン化といった環境性能を満足させるための技術開発は、国際競争を勝ち抜くための大きな課題となっている。こうしたなか、需要が高まっているのがターボチャージャである。欧州をはじめ中国や米国でターボチャージャの需要が伸び、世界市場は年率10%の成長を続けている(図1)。

ターボチャージャとは、エンジンからの排気ガスのエネルギーを利用し過給する装置で、大きく分けてコンプレッサとタービン、それらを同軸上で支持するベアリング部で構成されている(図2)。その仕組みはエンジンからの排気ガスを受けてタービンホイールが回転し、同軸上のコンプレッサホイールも同じ速度で回転する。この回転によって空気を圧縮し、圧縮空気をエンジンに送り込むと、エンジンの熱効率が向上する(図3)。これによって一回り大きなエンジンと同等以上の出力を生み出すことができる。例えばターボチャージャを搭載した排気量1.6Lのエンジンは自然吸気の排気量2.0Lのエンジンと同等の出力を生み出す。

エンジンが小さくなることで、各所軸受の摩擦抵抗などの機械ロスが低減し、また軽量化効果もあって、ターボチャージャ搭載エンジンは自然吸気エンジンに比べ燃費を20%程度改善することが可能となる。

かつてターボチャージャと言えばスポーツカーのための特殊な

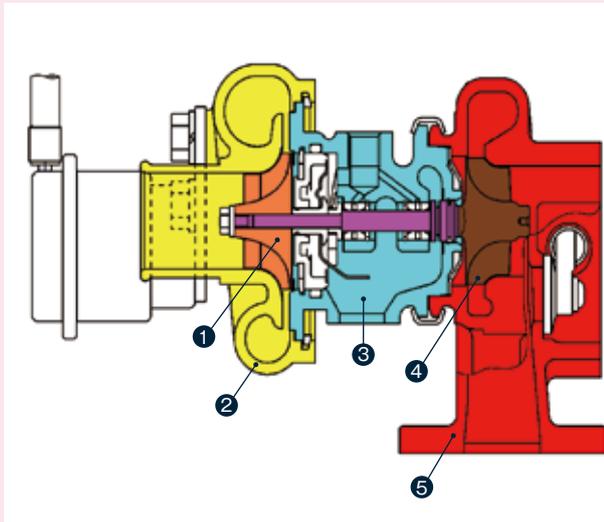
●ターボチャージャ需要の推移(図1)



近年の環境規制に対応した乗用車用ディーゼルエンジンにはほぼすべてにターボチャージャが搭載され、ガソリンエンジンも欧州を中心に搭載率が向上している。

●ターボチャージャの構造と機能(図2)

ターボチャージャは、大きく分けてコンプレッサとタービン、それらを同軸上で支持するベアリング部から構成されている。構成部品は一般的な仕様で三十数点にのぼる。



- ① コンプレッサホイール(インペラ)  
流体を圧縮する機能を持つ。要求仕様により形状が異なる。材料はAl 鋳造材やAl鍛造材、高圧力仕様にはTi材が使われている。
- ② コンプレッサハウジング  
流体を集めながら、渦巻状にしたスクロール部で圧力回復を行う機能を持つ。Al鋳造材が使われ、重力鋳造もしくはダイキャストで製造される。
- ③ ベアリングハウジング(センターハウジング)  
軸系を保持し軸方向不釣り合いの解消や、軸振動を抑制する機能を持つ。軸系に潤滑油を供給する。材料はねずみ鉄材が使われている。
- ④ タービンホイール  
流体の膨張過程でエネルギーを取り出す機能を持つ。材料は1,000℃ 超の高温仕様のNi合金が使われている。
- ⑤ タービンハウジング  
流体が一様にタービンホイールに流入するように、流れを整える機能を持つ。排気ガス温度によって使用する材料が異なる(図6参照)。

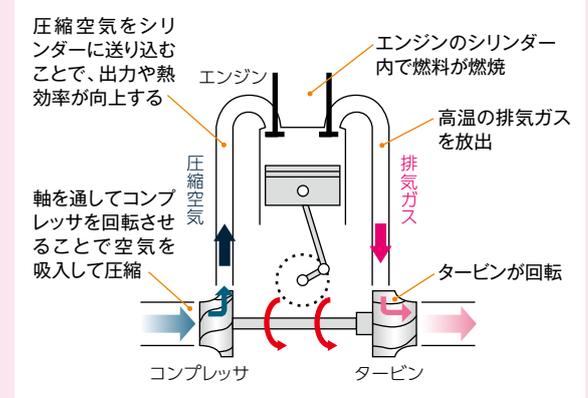
装置であったが、近年では環境対策としてターボチャージャを搭載する自動車が増えている。2000年代に入って環境規制が厳しい欧州では、燃費の良いディーゼル車が普及した。乗用車用ディーゼルエンジンではトルク、出力の向上、排気ガスクリーン化のためにほぼ100%ターボチャージャが搭載されている。

またガソリン車でも、自然給気エンジンにターボチャージャを搭載し、排気量の小さいエンジンとすることで燃費を改善する、いわゆる過給ダウンサイジングエンジンの普及が欧州を中心に急速に進んでいる。これまでガソリン車はディーゼル車に比べ燃費が良くないと言われてきたが、ターボチャージャの搭載で動力性能を向上させながら効果的に燃費が改善でき、その燃費はディーゼルエンジンに近づきつつある。またガソリン車は、ディーゼル車に比べ排気ガス対策が比較的容易であり、今後ガソリン車でもターボチャージャの搭載が増えると予想されている。

過渡応答性向上を目指した材料の最適化

ターボチャージャは800℃を超える高温下で、20万回転/分を超えるスピードでタービンやコンプレッサが回る超高速回転機械である。振動と遠心力、熱が加わり作用しても強度上安全であることを担保するため、材料には高い性能と信頼性が求められる。そのため主にコンプレッサホイールにはAlやTi材、コンプレッサハウジングにはAl鋳造材、タービンホイールにはNi基合金、タービンハウジングにはオーステナイト系ステンレス鋼などが使われている。

●ターボチャージャの仕組み(図3)



タービンホイールの材料については、Ni基合金より比重の小さい材料も検討されている。これはターボチャージャで課題とされる過渡応答の遅れ(ターボラグ)の改善を図るためである。ターボラグとは、例えば発進時や追い越し時にアクセルペダルを急に踏み込んでも、ターボチャージャの回転数上昇に時間を要して、思ったように加速しない現象をいう。原因はタービンロータの慣性モーメントが大きく、過給圧の立ち上がり時間が遅れるためである。そこでタービンロータの慣性モーメントの低減を図るため、タービンの小径大容量化が進められるとともに、比重の小さい材料の検討が行われている。例えば比重4.2のTiAlを用いると、比重7.9程度のNi基合金に比べ20%程度の過渡応答性向上効果が期待できる。

さらにコンプレッサホイールも同様に慣性モーメントの低減には小径大容量化を進めるとともに、材料の最適化が重要となる。材料については、Mg合金や樹脂が候補となる。Mg合金製コンプレッサホイールの慣性モーメントは、現在のAl合金製に対し73%程度で、過渡応答性は約12%向上する。現在さらなる耐久性、生産性向上への取り組みが行われており、Al合金と同等の耐久性を持つ合金開発が進められている。

またベアリングについては、機械損失がエンジン低回転時の過渡応答性に大きく影響する。すべり軸受から転がり軸受に変更することで、26%程度の過渡応答性改善が可能になる。しかし転がり軸受には軸受騒音、耐オイルコンタミ性(油脂汚れに対する防汚性)、コストなどの課題もあり、従来型のベアリングの機械損失低減への取り組みも引き続き行われている。

このほか過渡応答性の改善には、ツインスクロールタービンハウジングも有効である。ツインスクロールとは、タービンへの排気ガス入口(スクロール)を2つに分けて、各スクロールに4気筒のうち2気筒の排気をそれぞれ導入することで、排気エネルギーを効率良くタービンの回転エネルギーに変換できる。これにより、特にエンジンの低速運転時の過給圧や、シングルスクロールに比べトルクが改善され、発進時の加速性能が向上できる。

コンプレッサの性能については、エンジンの作動状態に合わせて広範囲で安定して作動できるワイドレンジ遠心圧縮機の開発が進んでいる。遠心圧縮機は排気ガスの流量が減少するとサージ現象(自励振動)を起こし作動限界となるため、遠心圧縮機の作動レンジを拡大するためには、サージが発生する限界流量を低減させる必要がある。しかしサージ付近の流動現象は複雑かつ非定常であるため、これまで内部の詳細な流動構造はわかっていなかった。そこで流れの可視化技術や数値流体解析を用いて非定常現象時の流動を調べたところ、コンプレッサホイールの翼端漏れ渦を制御することで、圧縮機の作動レンジを拡大できることがわかった。この検討結果に基づきコンプレッサホイールの形状を見直すことで、作動レンジは従来型に比べ約16%、圧力比は3.5%向上し、効率はほぼ同等を維持することができる。

タービンの性能については、タービンホイール上流の変可ノズルベーンで過給圧をコントロールする可変容量タービンが、ディーゼルエンジンを中心に主流になりつつある。エンジン条件に合わせてノズル開度を調整、過給圧を最適条件にコントロールすることで、エンジンのトルク・出力の向上、燃費低減などに効果を上げている(図4)。

**幅広い作動レンジで空力性能を改善**

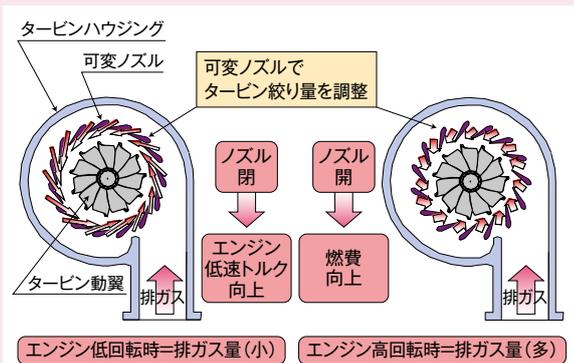
ターボチャージャには、エンジンの発進時や低速時だけでなく、高速時に至るまでの幅広い作動レンジにおける高効率化が求められており、空力性能の改善が最も基本的で難しい課題とされている。そのためコンプレッサやタービンの性能向上により、空力性能の改善が図られている。

**高温排気ガスに対応するタービンハウジング**

ガソリン車でのターボチャージャ搭載が進むなか、エンジン始動時の触媒が活性化する前に排出される排気ガスのクリーン化が大きな課題となっている。この課題を克服するためには触媒を昇温し、活性化時間を短縮する必要がある。そのためタービンハウジングを通過する際の排気ガスの温度低下を少なく

●タービンハウジングの変可ノズルベーン機構(図4)

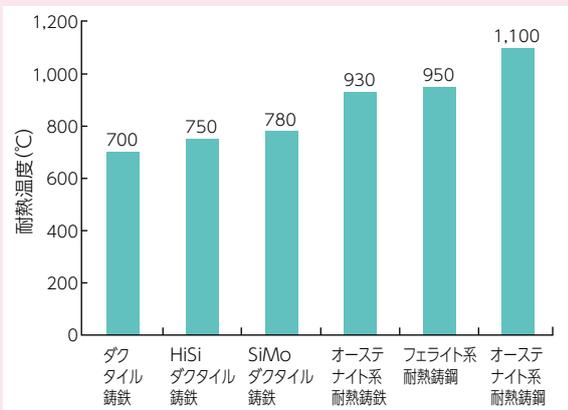
エンジン低回転時にはノズルベーンを絞り、高回転時には開くことで、過給圧を最適に制御する。



●板金エキゾーストマニホルダー一体型ターボチャージャ(図5)



●タービンハウジング材料と許容温度(図6)



しなければならない。排気ガスの熱を奪わないようにするためには、部品の熱容量を少なくする必要があり、タービンハウジングの薄肉化が進められている。タービンハウジングの肉厚は鋳造法の改良により、現在2 mm程度まで低減されている。

また鋳造ではなく、板金でタービンハウジングの製作を行う試みも進められている(図5)。鋳物に比べて板金で製作したものは触媒が活性化温度に上昇するまでの時間を短縮し、エンジン始動時に排出されるHC、CO、NO<sub>x</sub>の量が低減できる。

タービンハウジングは高温下で優れた耐熱性および耐久性を有する必要がある。ガソリンエンジンはディーゼルエンジンより一般的に排気ガス温度が200 °C程度高く、近年では1,050 °Cに達する仕様もある。そのため排気ガスの温度条件により、許容温度700 °Cのダクタイル鋳鉄から1,000 °C超まで対応可能なオーステナイト系ステンレス鋳鋼まで、さまざまな材料が使われている(図6)。

高温強度を確保する上で、材料選定とともに形状の最適化も重要になる。タービンハウジングはエンジンの作動条件により加熱と冷却を繰り返すため、熱疲労による亀裂の発生が懸念される。これを防ぐため、エンジンの作動条件に対応した過渡運転条件で排気ガスの流れ解析、排気ガスとタービンハウジング間の伝熱解析、タービンハウジングの熱応力解析を合わせて実施した結果、オーステナイト系ステンレス鋳鋼の適用に加え、タービンハウジングの構造不連続をなくし肉厚を均一化することで、亀裂発生を防ぐことができることがわかっている。

### 絶え間ない技術革新

ターボチャージャーは高度な設計・生産技術とさまざまなノウハウが要求される製品である。エンジンに装着して使用されるため、エンジンに合わせコンプレッサホイールの形状等を変えるなど、

### ターボチャージャーの製造の様子

(三菱重工業(株)相模原製作所)



タービンロータ加工ライン

ラインの長さは50 m以上に及び、すべて自動化されているが、最終チェックは作業者が行い、必要に応じて修正して仕上げている。



タービンホイールの加工  
ロボットアームがシャフトを置き、タービンホイールを載せると、台座が180度回転して移動し、電子ビーム溶接を行う。

各自動車メーカーの車種ごと、エンジンの数だけターボチャージャーは存在する。設計・生産が非常に難しいため、ターボチャージャーは日米4社で世界市場の90 %以上のシェアを握っている。その半分のシェアを占める日本メーカーは、発電用のガスタービンや航空機用のジェットエンジンなどでの実績を持つ。その蓄積された技術を活かして開発された製品は安定した品質を誇り、世界トップクラスの評価を得ている。さらに製品中の部品は、日本の部品メーカーや材料メーカーから供給されており、部品のなかには世界で圧倒的なシェアを持つものもある。日本のターボチャージャーの品質は優れた部品や材料が支えているのである。

現在、自動車エンジンのダウンサイジングが進む一方で、ターボチャージャーの役割はいっそう重要度を増している。今後は、厳しい環境規制に対応するため、たんに排気量を縮小するのではなく、「ライトサイジング」(適正なサイジング)という考えで、エンジンの熱効率も含めたトータルでの燃費改善が進むと予測されている。さらなる高効率化を目指して、ターボチャージャーの技術革新が必要となっており、その動向から目が離せない。

●取材協力、写真・図提供 三菱重工業(株)  
●文 藤井美穂