

## 連携記事

# 自動車用ターボチャージャーの技術動向

## Technology Trends of Automotive Turbochargers

茨木誠一  
Seiichi Ibaraki

三菱重工業(株)  
総合研究所  
主席プロジェクト統括

### 1 はじめに

地球環境保全には自動車から排出されるCO<sub>2</sub>の削減が重要な課題であり、燃費規制(CO<sub>2</sub>排出量規制)は年々厳しくなっている。欧州では規制値に対する超過量に応じて自動車メーカーに制裁金が課せられる。燃費改善の有効な手段として、ターボチャージャー(以下ターボ)を搭載することでエンジンの排気量を低減するダウンサイジング化が進行している。エンジンの排気量が小さくなれば、機械損失も低減でき、エンジンも軽量になることから燃費を改善できる。このダウンサイジングの技術は欧州の自動車メーカーが先行し、欧州でいち早く普及したが、日本においても本格的に普及が始まった。

ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べて熱効率が高く、過給してもノッキングを起こさないためにターボとの相性も良く、出力向上と排気ガス浄化を目的に早くからターボ化が進み、現在ではターボの装着率はほぼ100%である。近年、ガソリンエンジンでも燃料の直噴化や可変動弁機構の採用などにより、ターボによるダウンサイジング化が急速に進んでいる。現在、ガソリンエンジンのターボの装着率は20%弱であるが、2022年には40%を超えると予想されている。

本稿では、ターボの技術動向として、特に高温材料や信頼性に関する技術を中心に概説する。

### 2 ターボとは

図1に自動車用ターボの構造を示す<sup>1)</sup>。ターボは同軸のタービンと圧縮機が軸受で支持された構造を有し、エンジンの排気ガスでタービンが駆動され、同軸の圧縮機で高圧空気をエンジンに供給する機械である。ターボによりエンジンの吸入空気量が増え、その分多くの燃料を燃やすことができるため、同一排気量で出力を増大できる。すなわち、同じ出力

では排気量を小さくできる。

エンジンを燃焼器に例えると、その構成要素は航空用や発電用ガスタービンと同じであり、空力、材料、強度、軸受など高度な技術を集約した高速回転機械である。ターボはタービン出力と圧縮機動力が略同じであり、出力ゼロのガスタービンと言える。排気ガス温度はディーゼルエンジンで850℃、ガソリンエンジンでは1000℃を超えるものもある。高温の排気ガスにより高速回転するタービンの動翼には、一般に高温強度に優れるニッケル基合金が使用され、精密鍛造で製造される。また、空気をエンジンに供給する圧縮機の羽根車にはアルミ合金が使用され、精密鍛造または機械加工で製造される。回転数は最高で30万rpmにもなるため、一般的に、浮動ブッシュ型軸受が採用されており、ブッシュ内外の油膜で軸振動を抑制し、ブッシュが軸と連れ回ることによって軸との相対速度を小さくして機械損失の低減を図っている。また、ターボは車両、エンジンの運転状況に応じて、常に回転数、流入する排気ガスの温度、圧力、流量が変化する過渡状態で常用されるのも特徴である。尚、ターボは国内メーカー2社で世界

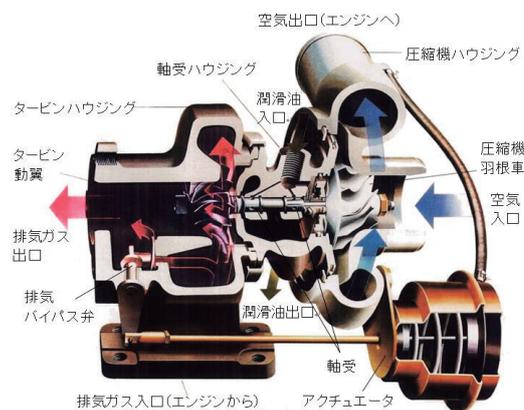


図1 自動車用ターボの構造

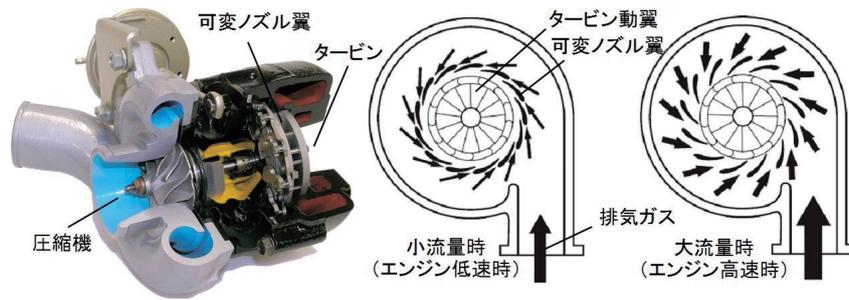


図2 可変容量ターボ (VG : Variable Geometry)

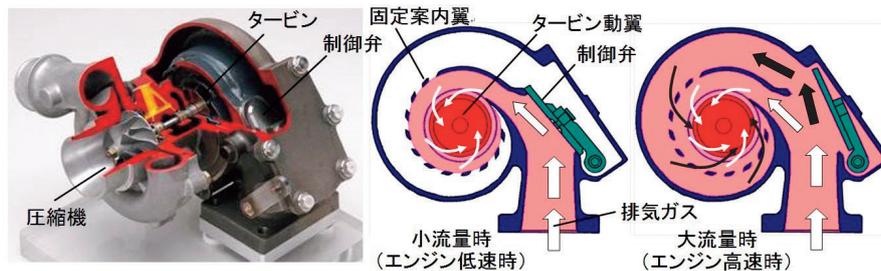


図3 簡易可変容量ターボ (VFT : Variable Flow Turbocharger)

シェアの約40%を占めており、タービン動翼も国内材料メーカーが世界シェアの50%以上を、軸受も国内メーカーが40%近くを占める。

自動車用ターボで最も一般的なのが図1に示す過給圧を調整できる排気バイパス弁付きターボである。排気バイパス弁を開いて排気ガスをタービン出口にバイパスすることで、過給圧を調整する。また、図2はVGターボ (VG : Variable Geometry、可変容量ターボ) であり、タービン動翼の上流に可変ノズル翼を備え、ノズル翼の角度を変えることで、流量と圧力を制御できる。このターボはディーゼル車に広く普及している。潤滑油も使用できない800℃を超える排気ガス環境下で、ノズル翼は回転し、エンジン空気量やNOx低減のための排気ガス再循環量を制御する<sup>1)</sup>。排気ガス温度が1000℃にも及ぶガソリン車には、信頼性の問題から、図3に示す摺動部の少ない簡易可変容量ターボ (VFT : Variable Flow Turbocharger) が適用されている。このターボは一つの弁の開閉により排気ガスの流路を切り替えるものである<sup>1)</sup>。また、過給圧の増大と作動範囲の拡大に対応して、図4に示すように大小のターボを2台直列に配置した2ステージターボも適用が進んでいる<sup>2)</sup>。このターボは制御弁により運転モードを2ステージとシングルステージに切り替えることができる。

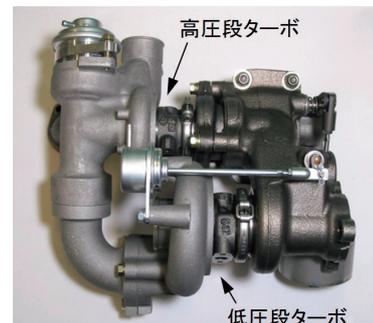


図4 2ステージターボ

### 3 技術動向

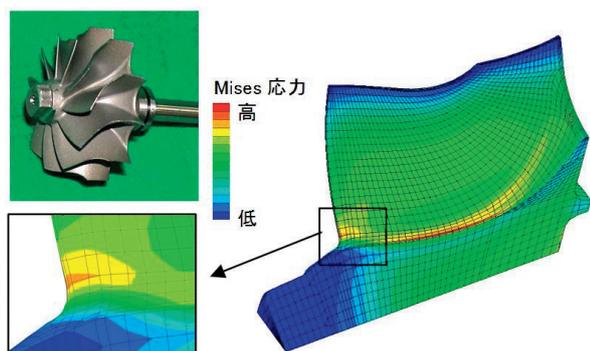
#### 3.1 高温耐久性性能

ガソリンエンジンでは理論空燃比燃焼による燃費改善が進められ、排気ガス温度が上昇している。更に、ターボの高圧力比化、大容量化に伴い、タービンには高温強度に優れた材料が不可欠である。

一般にタービン動翼にはニッケル基の耐熱合金であるインコネル713Cが用いられるが、排気ガス温度が980℃を超えるとクリープ特性が大幅に低下するため、更に耐熱性に優れた MarM247などが適用される。排気ガス温度が1050℃のタービン動翼を開発した際には、MarM247を適用するとともに、インコネル713Cに比べて鍛造性が悪いため、HIP (Hot Isostatic Pressing、熱間等方圧加圧法) 処理を行い、鍛

造欠陥を除去し、材質の均質化を図った<sup>3)</sup>。MarM247の適用にあたっては、高温引張試験やクリープ破断試験により材料特性データを補完し、図5に示すタービン動翼の応力解析、クリープ解析を行った。クリープ寿命評価では翼面の実態温度の推定が重要であるため、赤外線温度計を用いて回転中のタービン動翼の翼面温度を計測した。また、実機を用いたタービン動翼の過回転バースト試験、クリープ破断試験を行い、信頼性を検証した。図6に排気ガス温度1050℃において最高回転数で行ったクリープ破断試験後のタービン動翼を示す<sup>3)</sup>。タービン動翼後縁の翼根部からクリープ破断しており、図5の応力解析結果の高応力部と一致する。インコネル713Cタービン動翼との比較試験も行い、MarM247が約3倍のクリープ寿命を有することを確認した。また、バースト回転数もインコネル713Cに比べて、約3%向上することを確認した。

図7にタービンハウジングの材料と排気ガス温度の関係を



後縁翼根部拡大

図5 タービン動翼のクリープ解析結果 (ミゼス応力)

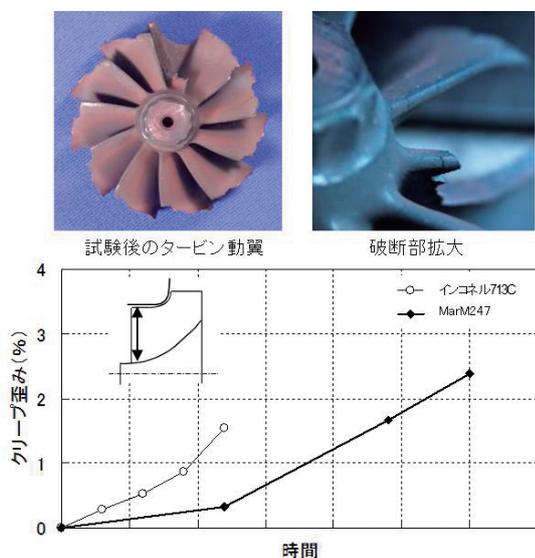


図6 タービン動翼のクリープ破断試験結果

示す<sup>2)</sup>。一般にディーゼルエンジンには鋳鉄が用いられ、ガソリンエンジンにはオーステナイト系鋳鉄またはフェライト系鋳鋼が用いられるが、1000℃を超える場合は高ニッケル含有のオーステナイト系耐熱鋳鋼が用いられる。タービンハウジングは渦巻形状の非軸対称構造であり、エンジンの排気マニホールドと一体で鋳造されることもあり、その複雑な形状に起因して応力集中による疲労破壊や、過渡運転に伴う加熱、冷却の繰返しによる熱疲労破壊が懸念される。そこで、過渡の運転状態に対応した条件で流動解析と伝熱解析を行ない、タービンハウジングのメタル温度を予測し、構造解析で応力履歴の評価を行ない、設計クライテリアを満足するよう形状と材質を選定する。

図8にVGターボの3次元デジタルモックアップを用いた伝熱解析結果を示す<sup>3)</sup>。過渡運転では、各部品の熱容量の違いにより、加熱、冷却時の温度変化が異なるため、熱応力や熱変形を把握して信頼性を評価する。3D CADからモデルを作成してターボ全体の耐久性能を評価できるシステムを開発

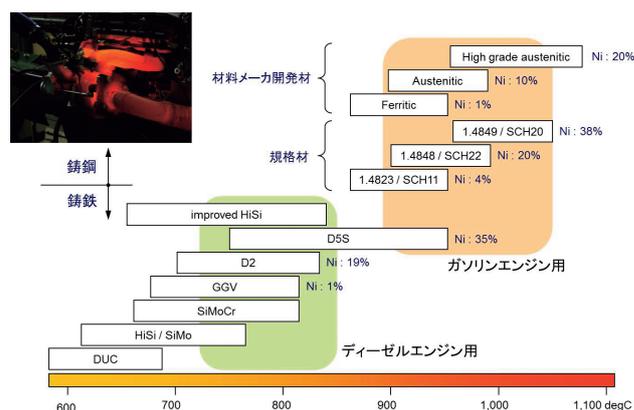


図7 タービンハウジングの材料

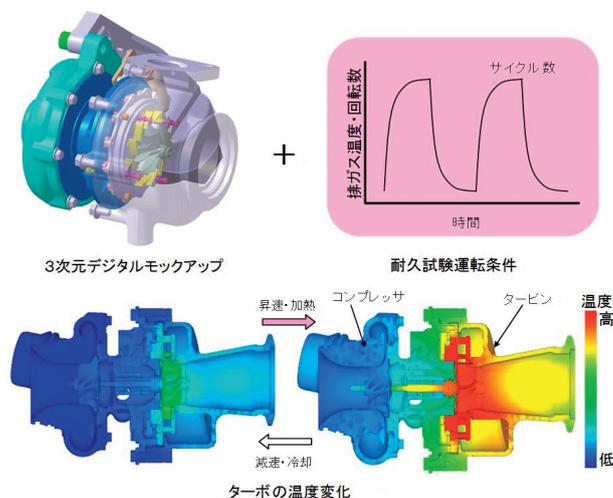


図8 VGターボのデジタルモックアップと熱解析結果

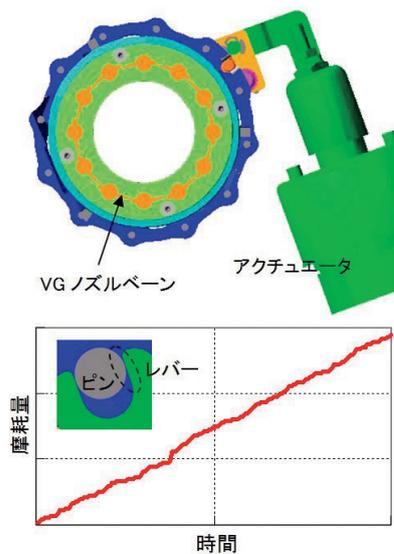


図9 VGターボの可変ノズルの機構解析モデルと摩耗量

し、自動車メーカーの耐久試験の回転数や排気ガス温度などの運転パターンから熱境界条件を算出し、伝熱解析により各部のメタル温度を算出する。その後、構造解析により各部の応力や変形を計算する。図8はターボの回転数が上昇して、加熱される過程における各部の温度分布を示したものである。このシステムにより、タービンハウジングやタービン動翼の熱変形、タービンハウジングなどの締結部の緩み、タービン動翼とハウジングのクリアランス変化など高温部品の信頼性を評価できる。

### 3.2 耐摩耗性

ターボの排気バイパス弁や可変ノズルは、ディーゼルエンジンでは850℃、ガソリンエンジンでは1000℃を超える排気ガス中で無潤滑で摺動する部品であり、摩耗が課題である。また、近年では燃費や排気ガス性状をきめ細かく制御するため、より精密に高頻度で開閉調整が行われることから、摩耗や固着のリスクも高まっている。

図9にVGターボの可変ノズルのアクチュエータと駆動リンク部を含んだMBD (Multi Body Dynamics、機構解析) のモデルを示す<sup>3)</sup>。このモデルに実機運転状態でのエンジン振動の周波数と加速度を与え、流動解析から求めたノズル翼にかかる流体力を入力して、可変ノズルの開閉動作を行なわせる。これにより、部品間に発生する接触力とすべり速度を時刻暦で求め、摩耗量を積算する。図9は可変ノズルの駆動リンク部にあるピンとレバーの接触力とすべり速度からレバーの摩耗量を予想したものである。また、ノズルの各部の寸法はタグチメソッドとMBDを用いて最適化している。図10は新構造と従来構造の耐久試験後の摩耗量を比較したものであ

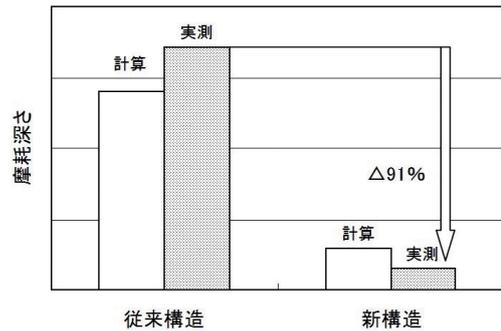


図10 VGターボの可変ノズルの耐久試験後の摩耗量の比較

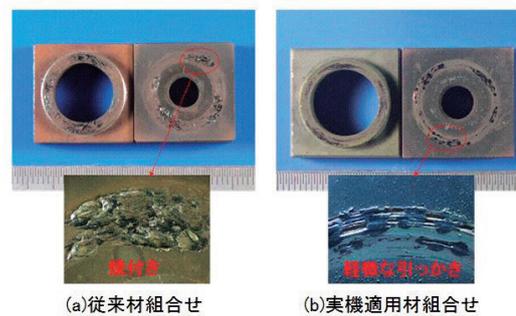
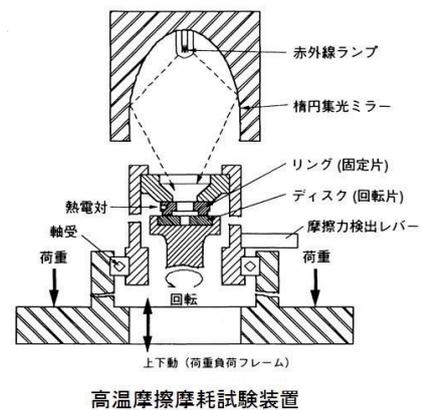


図11 高温摩擦摩耗試験装置と試験後のしゅう動面の状況

り、新構造により摩耗量を大幅に低減した。また、摩耗量の実測結果とMBDによる推定結果も定量的な差異があるものの、設計に十分活用できる精度を確認している。このMBDとタグチメソッドは排気バイパス弁の寸法や形状の最適化にも活用している。

また、図11に示す高温摩擦摩耗試験装置を用いて、凝着を抑制できる材料の組合せや表面処理を選定し、排気バイパス弁や可変ノズルのしゅう動部に適用している<sup>4)</sup>。図11は高温摩擦試験後のテストピースのしゅう動面の状況を示したものであり、従来材の組合せに対して、選定材では凝着が抑制されている。

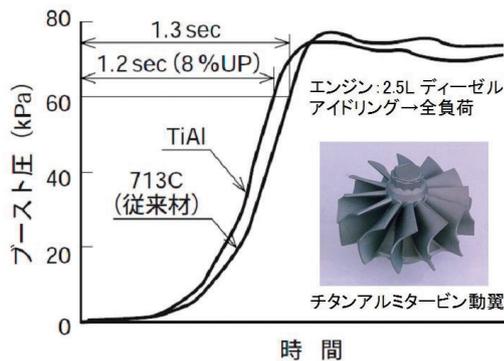


図12 チタンアルミタービン動翼によるレスポンス向上

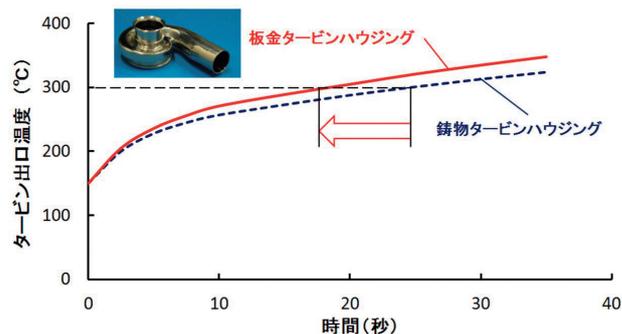


図14 鋳物と板金タービンハウジングの触媒活性化時間の比較



図13 鋳鋼製タービンハウジング

### 3.3 軽量化

ターボの本質的な課題がターボ・ラグと呼ばれるレスポンス遅れである。ターボの回転慣性により、排気ガスがターボを加速させるまでに時間を要する。特に、排気ガスが少ないエンジンの低速域で問題となる。この対策として、チタンアルミ合金のタービン動翼を実用化した。チタンアルミ合金は比重が従来のインコネル713Cの約半分であり、図12に示すように過給圧の立上がり時間を短縮し、ドライバビリティと環境性能の両立を図った<sup>1)</sup>。

圧縮機の羽根車についても、従来のアルミ合金に替わり、マグネシウム合金製を製品化している。圧縮機の羽根車の場合は空気温度が最高でも200℃のレベルで使用されるため、繊維強化樹脂が適用された事例もある。

タービンハウジングはターボの中で最も重い部品であり、ターボの軽量化、コストの観点からもその軽量化は重要である。図13はガソリンエンジン用の肉厚2.5mmの薄肉鋳鋼ハウジングと排気マニホールド一体型タービンハウジングであり、いずれも鋳鉄より溶解温度が高く、製造性の悪い鋳鋼を国内メーカの高い技術力で製品化している<sup>1)</sup>。また、軽量化により熱容量も低減でき、タービン下流に位置する触媒を短時間で活性温度に昇温することで排気ガス浄化にも貢献する。鋳造に替わり板金でタービンハウジングを製作することで更に軽量化できる可能性がある。前述の通り、タービンハ

ウジングは形状が複雑なため、板金での製造には高い技術が必要であり、実用化には、耐久性、コスト、品質向上が課題であるが、有望な技術である。図14は鋳物と板金のタービンハウジングでタービン出口温度の上昇時間を比較したものである<sup>5)</sup>。板金化により触媒が活性化温度(300℃程度)に達する時間が短縮されている。特にガソリンエンジンではエンジン始動時の触媒が活性化する前に排出するHC、CO、NOxの低減が課題であり、ターボの熱容量低減は有効な手段である。

圧縮機のハウジングも従来はアルミ合金鋳物が用いられているが、羽根車と同様に繊維強化樹脂の適用も検討されている。

### 3.4 排出ガス対策

ディーゼルエンジンでは排気ガス中のNOxを低減するため、排気ガス再循環(EGR: Exhaust Gas Recirculation)が適用されている。これは排気ガスの一部をエンジンの吸気に還流させて、燃焼温度を低減することでNOxの発生を抑制するものである。しかしながら、過給圧が高い場合、排気ガスをエンジンの吸気に還流させることが難しくなるため、排気ガスを圧力が最も低い圧縮機の入口に戻す低圧EGRの採用が増えている。圧縮機の入口はエアクリーナや配管の圧損で常に負圧になっており、タービン下流のDPF(Diesel Particulate Filter)を通して圧力の低下した排気ガスでも還流させることができる。

低圧EGRの場合、圧縮機は空気と一緒に排気ガスを吸い込むこととなり、羽根車には排気ガスに含まれる粒子状物質、排気ガス中の水蒸気が凝縮することによる水滴が吸い込まれる。このため羽根車には耐エロージョンコーティングが適用される。図15は実機運転状況を想定した異物混入試験後の羽根車の翼前縁の状況である<sup>5)</sup>。コーティングにより翼前縁の異物によるダメージが改善していることが分かる。また、排気ガスは冷却されてから圧縮機に還流するとは言え、通常よりも数十度高い空気と排気ガスの混合ガスを吸い込むこととなり、クリープ強度の高い耐熱アルミ合金が用いられる場合もある。

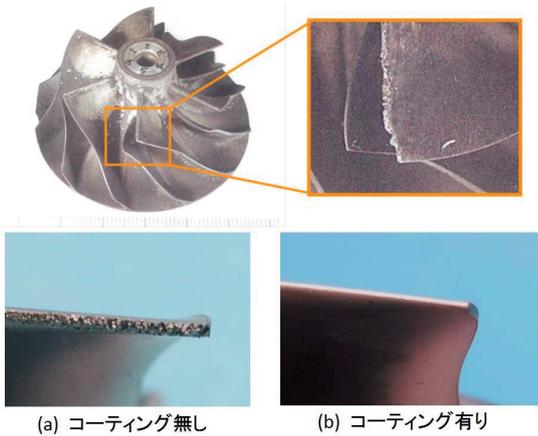


図15 EGRを想定した異物混入試験後の羽根車前縁の状況

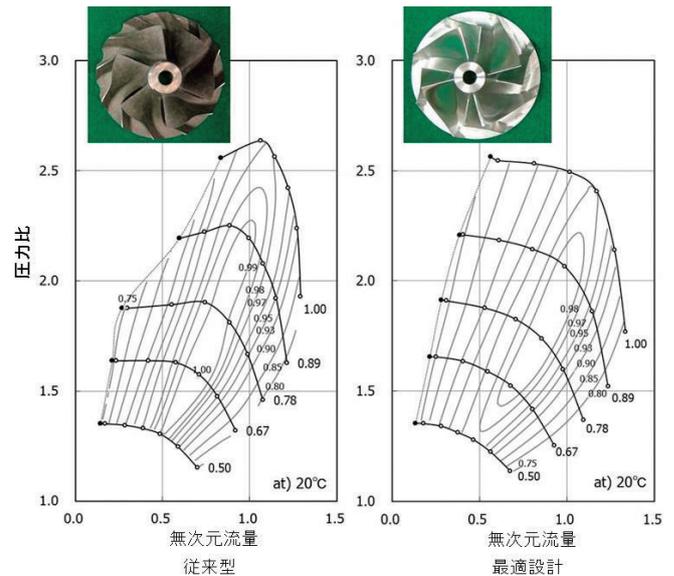


図17 圧縮機のパフォーマンスの比較

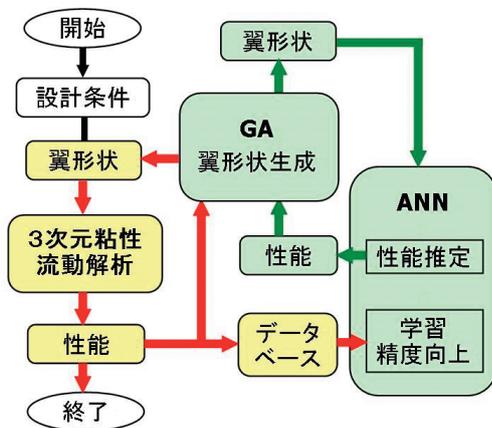


図16 最適設計プロセス

### 3.5 空力性能

ターボの性能にはタービンと圧縮機の空力性能が最も大きく影響する。現在では設計初期段階から詳細な流動解析を用いてタービン、圧縮機の翼を設計するが、性能は既に高いレベルに達しており、更なる性能向上は容易ではない。また、翼は3次元形状であり、設計変数も多く、高性能化設計には多大な時間を要する。

そこで、図16に示す遺伝的アルゴリズム (GA、Genetic Algorithm) と人工神経回路網 (ANN、Artificial Neural Network) を用いた最適設計手法を開発した<sup>6)</sup>。翼座標を遺伝子と見なし、GAを用いて遺伝子を掛け合わせて多数の翼形状を生成する。ANNは翼形状と性能のデータベースから流動解析を行うことなく、生成された翼形状の性能を瞬時に推定する。性能の優れた翼形状は図16左側の従来の設計ループに送られて、詳細な3次元流動解析で性能が評価され、その結果はデータベースに保管される。ANNには学習機能

があり、データベースが充実するほど性能推定精度が向上する。GAとANNで構成されるループは数千の翼形状の生成と性能推定を高速に行ない、高性能な翼形状のスクリーニングを行なう。この設計法により設計された圧縮機の性能試験結果を図17に示す。従来型に対して最高効率率は1%低下したものの、同一回転数において作動範囲が約2倍に拡大した。また、タービンに適用した事例では約4%の効率向上を確認した。このように最適設計法により従来では得られない翼形状を創出できる可能性があり、性能のブレークスルーが期待されることから適用が進んでいる。

### 3.6 電動化

エンジンの性能、排気ガスを改善するためターボにも高度な制御が要求されるようになり、排気バイパス弁や可変ノズルを駆動するアクチュエータの電子制御化が進んでいる。また、図18に示すように圧縮機を電動モータで駆動する電動スーパーチャージャやターボに高速モータ発電機を内蔵した電動ターボも開発が進められている<sup>6)</sup>。また、図19に示すように従来の2ステージターボに替わり、ターボと電動スーパーチャージャを組み合わせた電動2ステージターボも開発されており、電動化によるレスポンス向上とエンジンの背圧低減によるエンジン性能向上が図られる。

ターボの電子制御化や電動化、更には2ステージターボや電動スーパーチャージャとの組み合わせなどシステムの複雑化に伴い、制御技術が重要になっており、ターボだけでなくエンジンも含めた全システムでの性能評価と最適制御手法の開発が必要である。



図18 電動スーパーチャージャ (左) と電動ターボ (右)

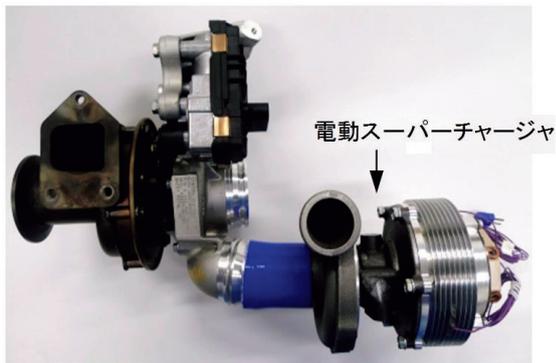


図19 電動2ステージターボ

## 4 おわりに

今やターボは能動的にエンジン性能を制御するキーコンポーネントとなり、今後も高効率化が求められる。基本となる空力性能の向上についてはニューラルネットワークなどを活用した高度な最適設計手法が適用され、継続的な研究開発が進められる。また、高温耐久性や軽量化に関しては、材料メーカーによる従来材の改良、新材料の開発が期待されるとともに、板金や樹脂など従来と異なる製造法の適用によるブレークス

ルーの可能性も秘めている。ターボはもはやエンジンや排ガス後処理装置と切り離して考えられるものではなく、エンジンシステムとして最適な性能、機能、信頼性が求められる。電子制御化、電動化、スマート化が進み、システムは複雑化し、センシングや制御技術も重要になると思われる。今後も、ターボの開発を通して自動車の排出CO<sub>2</sub>の削減、地球環境保全に貢献したい。本稿が関係各位の一助になれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 茨木誠一：日本機械学会誌, 117 (2014) 1144, 140.
- 2) 恵比寿幹, 前川昌三：日本ガスタービン学会誌, 38 (2010) 6, 389.
- 3) 茨木誠一, 大迫雄志, 林慎之, 平野雄一郎：日本ガスタービン学会誌, 38 (2010) 6, 431.
- 4) 茨木誠一, 林慎之：月刊トライボロジー, 2 (2015) 330.
- 5) 恵比寿幹：日本ガスタービン学会誌, 41 (2013) 2, 170.
- 6) 茨木誠一：ターボ機械, 42 (2014) 9, 551.

(2015年12月24日受付)