

概況

ターボチャージャの技術動向と当所における
研究の取り組み

内田博

Trends in Automotive Turbocharger Technology and Research &
Development in Our Laboratories

Hiroshi Uchida

要 旨

ターボチャージャは、エンジンの小型高出力化に不可欠な手段であり、さらに熱効率の向上、エミッションの低減に有効である。特に乗用車用では高い加速性能が要求されるため、高応答化をねらったチタンアルミタービン、樹脂インペラ、可変ノズル (VN) 等を採用したターボチャージャが実用化されている。

当所では、ターボチャージャの高性能化に有効と考えられる下記の技術アイテム (1) 可変入口案内翼 (VIGV) と自由曲面翼インペラ、(2) 固定ベーンの間に同枚数の可動ベーンを配置した半可変ノズル (HVN)、(3) 軽量・高強度材料 (TiAlタービ

ンホイール、Mg合金インペラ、高剛性鋼軸)、を盛り込んだ可変容量・高過給ターボチャージャの研究開発を進めている。VIGVおよびインペラの自由曲面翼化は、コンプレッサのサージ限界の拡大と効率向上に有効であり、HVNは可動ベーンのクリアランスを小さくでき、効率向上と信頼性向上に有効である。また、軽量・高強度材料の回転体への適用は、レスポンスの向上と軸振動の低減に有効である。空力・強度解析、軸振動解析および材料技術の結集により、新技術を盛り込んだ高性能・高応答の可変容量ターボチャージャを実証した。

キーワード

ターボチャージャ、過給エンジン、遠心圧縮機、タービン、可変入口案内翼、可変ノズル、インペラ、チタンアルミ

Abstract

Turbochargers are indispensable for improving the power-weight ratio, emissions and fuel consumption of diesel engines. Especially, high response is demanded for turbochargers for automotive use. High performance turbochargers with ceramic or TiAl turbines and variable nozzles have since been commercialized.

We have developed a variable geometry turbocharger that has involves technical items as follows: (1) A compressor with Variable Inlet Guide Vanes (VIGV) and an impeller having convex blades. (2) A mixed flow turbine with a half vane-type variable nozzle (HVN) that has variable vanes located mutually between fixed vanes. (3) Lightweight and

high strength materials used for rotating parts.

The VIGV and convex blade impeller improve the surge limit and adiabatic efficiency of the compressor. HVN has the merit of minimizing the clearance between the variable vane and the wall of housing and thus, improves the turbine efficiency. The TiAl turbine wheel, magnesium impeller and high modulus steel for the shaft improve the response and rotating vibration of turbochargers.

Through numerical aerodynamic analysis, stress and blade vibration analysis, rotating vibration analysis and the technology of materials, variable geometry turbocharger with high efficiency, a wide flow range and high response has been developed.

Keywords

Turbocharger, Turbocharged engine, Centrifugal compressor, Turbine, Variable inlet guide vane, Variable nozzle, Impeller, Titanium-aluminum alloy

1. まえがき

乗用車用ターボチャージャは、ガソリン車用とディーゼル車用に大別される。ガソリン車用では、ノッキングの発生によって過給圧が制限されるため、比較的過給圧の低いターボチャージャが用いられる。すなわち、圧力比の低い領域で効率が高く、応答性の高いターボチャージャが要求される。また、熱機関の特性として、理論上最高圧力が高いほど熱効率が高いことから、ガソリンエンジンのターボ過給は燃費よりも出力アップに重点がおかれることが多い。一方、最近になって直噴ガソリンエンジンが市場に出回るようになり、そのターボ過給化が注目されるようになった。ガソリンエンジンの直噴化は、ディーゼルエンジンの特性に近づく方向であることから、ターボ過給により燃費の向上が期待されている。

ディーゼル車では、ターボ過給が小型・高出力化、燃費の向上およびエミッションの低減に有効であることから、最近の排気規制の強化もあってターボ過給が必須になっている。特に、ディーゼル車の割合が多い欧州では、ターボ過給による小型・高出力化が急速に進み、高性能ターボ過給エンジンの開発競争が激化している。それを背景に、高性能化の手段として可変ノズルターボチャージャ（以下、VNターボと呼ぶ）を搭載するディーゼル車が増加している。エンジンの低速域では、VNを絞ることにより過給圧を上げてエンジントルクを向上させ、高速域では、VNを開くことによりエンジンの背圧を下げて燃費を向上することができる。さらに、VN開度とEGR量を制御することでエミッションを低減できることから、コストが上がるにもかかわらず今後さらに普及してくるものと思われる。

その一方で、低価格車向けのターボチャージャには低コスト化の要求が強い。各メーカーでは、性能が多少低下しても構造および形状を簡素化して部品点数を減らした低コストターボチャージャを開発している。今後は、高性能と低コストを両立させる技術開発が重要になってくるものと思われる。

2. ターボ過給技術の動向

ターボ過給ディーゼルエンジンは、本来ガソリンエンジンよりも燃費で優れたエンジンである。しかし、近年直噴ガソリンエンジンが市場に現れ、燃費上の優位性が弱くなりつつある。また、排気規制の強化ともあいまって、ガソリンエンジン並みの排気・比出力を目指して各メーカーの開発競争が激化している。Fig. 1にディーゼルエンジンの比出力を、Fig. 2に比トルクの推移を示す。年々、比出力および比トルクが増加している。この高出力化は、ターボチャージャによる高過給化によるところが大きい。Fig. 3に過給圧の推移を示す。最近では乗用車用でも、過給圧が160kPaに達するディーゼルエンジンが現れてきている。

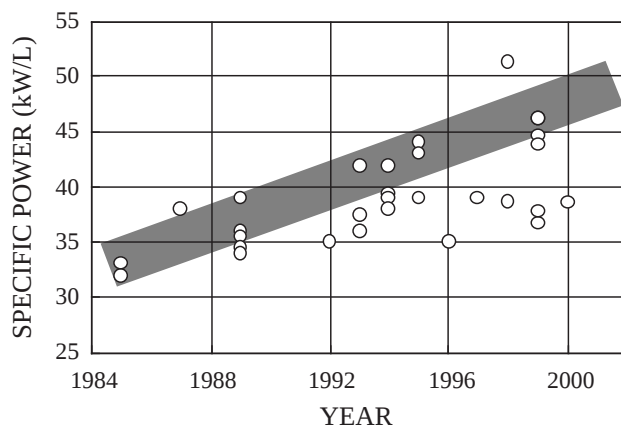


Fig. 1 Trend of specific power of turbocharged diesel engines for automotive use.

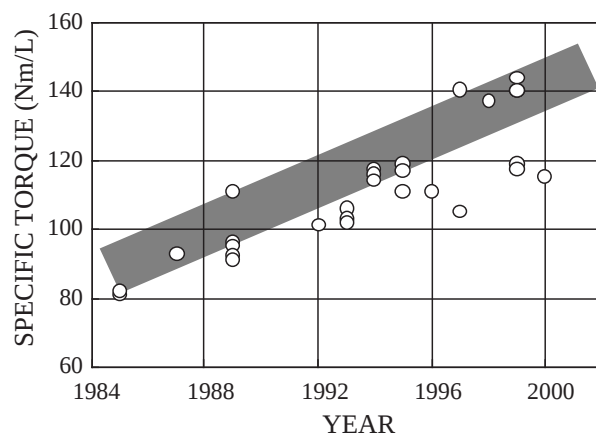


Fig. 2 Trend of specific torque of turbocharged diesel engines for automotive use.

ターボチャージャの動向としては、VNターボに代表される高性能化と低価格車用に構造を簡素化して部品点数を削減する低コスト化の2つの方向がある。Fig. 4にVNターボの例を示す。VNの駆動方法としては、コストの点で有利な空気（負圧）アクチュエータが主流になっている。しかし最近では、VN開度とEGR量を協調制御してエミッション低減を図る動きが強く、制御応答性の高い電気モータ式アクチュエータも採用されている。低コストターボチャージャの一例をFig. 5に示す。タービンハウジングとベアリングハウジングは一体であり、組み付け上の制限からタービ

ンホイールの入口径と出口径を同一にしている。したがって、タービン効率の低下は避けられないが、部品点数削減によるコスト低減効果大きい。Fig. 6は、エンジンの排気管とタービンハウジングを一体にした例である。エンジンメーカーとターボチャージャメーカーが協力してコスト低減を図った例として特筆すべきものであり、今後さらにエンジンと一体化した性能向上、コスト低減が図られていくものと思われる。

3. ターボチャージャの技術課題

ターボチャージャに要求される技術は、エンジンの性能を向上させるための技術であり、エンジンの種類もしくは乗用車の種類によって異なる部分も少なくない。ここでは、ディーゼルエンジン

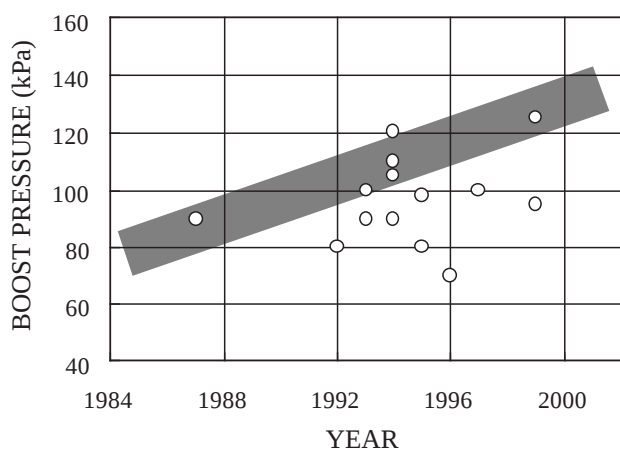


Fig. 3 Trend of boost pressure of turbocharged diesel engines for automotive use.

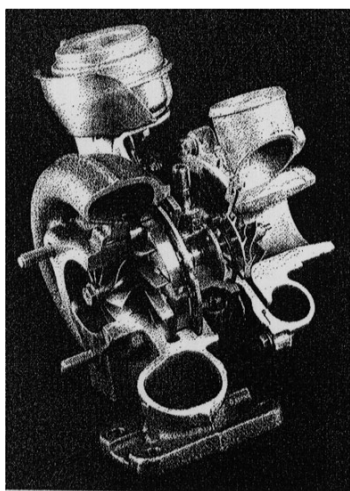


Fig. 4 Picture of a variable nozzle turbocharger (Garrett VNT20).

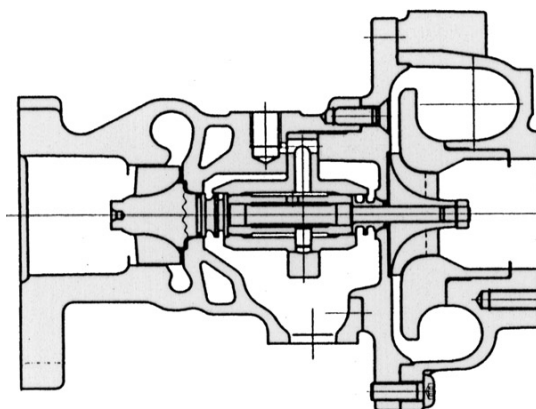


Fig. 5 Structure of a low cost turbocharger (IHI mild turbo).

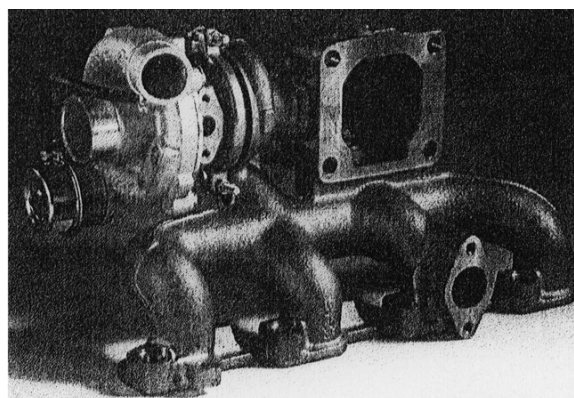


Fig. 6 Picture of a turbocharger with integrated exhaust manifold and turbine housing (Garrett).

を主体に述べる。乗用車用ターボチャージャには広い作動範囲と高応答性が要求され、特徴として、部分負荷における性能が重要な点が上げられる。

Fig. 7にターボチャージャの技術課題を示す。空力性能に関しては、最近の数値解析 (CFD) 技術の進歩に伴い、翼および流路形状の設計に3次元流れ解析が用いられ、小型のターボチャージャにおいても高効率のコンプレッサ、タービンが実現されている。また、作動範囲の拡大についてはVN等による可変容量化が有効であり、各社で開発を急いでいる。エンジンの過渡性能向上に有効な慣性モーメントの低減に関しては回転体の軽量化が上げられ、最近では、タービンホイールにチタンアルミをコンプレッサ用インペラに樹脂を採用した例がある。Fig. 8にエンジンの技術課題とターボチャージャの関係を示す。エンジンの小

型・高出力化には高過給化が必要であり、ターボチャージャには回転体の強度向上と高圧力比域における効率向上が要求される。効率向上はエンジンの背圧低減、燃費向上につながる。また、低速トルクの向上と加速性能の向上には低速域の過給圧アップが必要であり、ターボチャージャにはコンプレッサのサージ限界の拡大と少流量域の効率向上が要求される。

ターボチャージャの効果をエンジンで十分に発揮させるためには、ターボチャージャとエンジンの特性を適合させる必要がある。ターボチャージャの性能マップ上で効率の高い部分をエンジンの作動線が走るようにすることが重要であり、エンジンメーカーではエンジン性能シミュレーションにより、その適合を予測しつつ開発を進めている。

4. 当所における研究の取り組み

エンジンから要求される高過給・高性能化に対して、当所では前述した技術課題を解決するために、新しい技術アイテムを盛り込んだ可変容量・高過給ターボチャージャの技術開発を進めてきた。

Fig. 9に可変容量・高過給ターボチャージャの構造図を示す。VIGVはコンプレッサのサージ限界の拡大と少流量域の効率向上に、HVNは可動

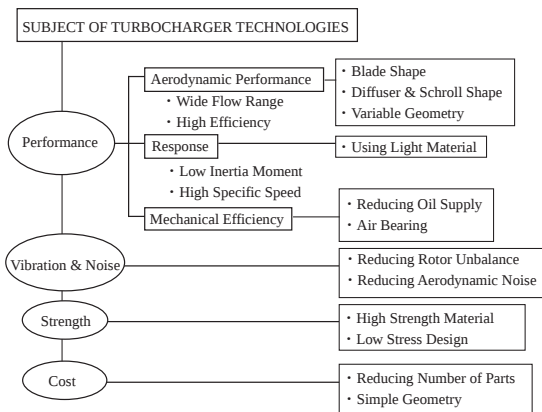


Fig. 7 Subject of a turbocharger technology.

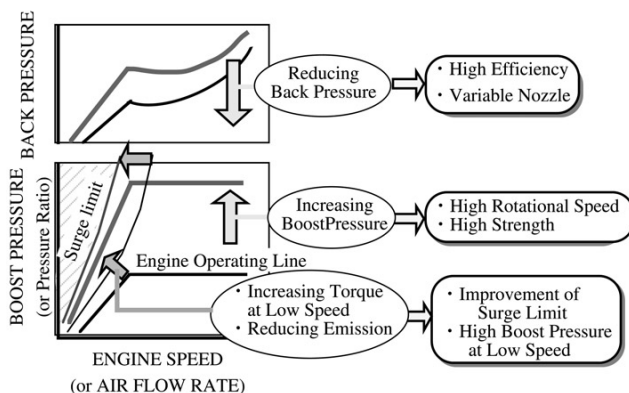


Fig. 8 Subject of a turbocharged engine technology relating to turbocharger.

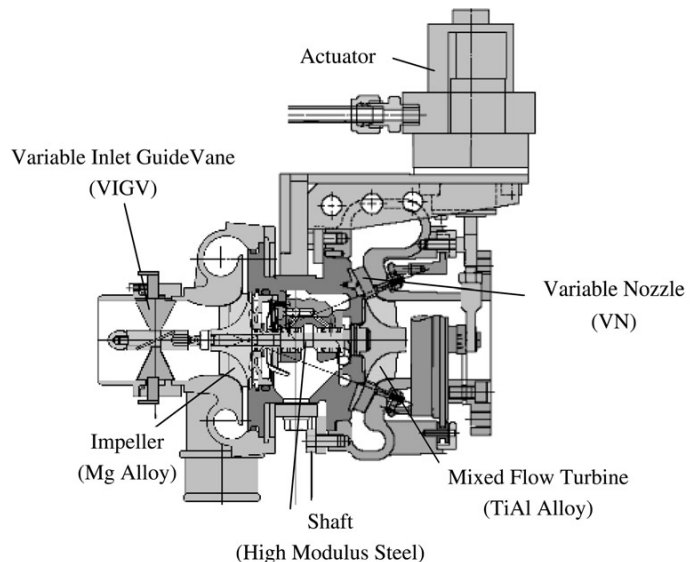


Fig. 9 Structure of the variable geometry turbocharger developed in TCRDL.

ペーンの駆動トルク低減とハウジング壁とのクリアランス低減に有効である。また、インペラの翼形状を自由曲面翼化することにより、コンプレッサ効率の向上と作動範囲の拡大をねらっている。回転体に軽量・高強度材料を適用すると、レスポンスが向上すると共に軸振動を低減することができる。このターボチャージャの開発を通して、当所ではCFDを用いた翼の空力解析・設計技術、可変容量化技術およびターボ用軽量先進金属材料の開発を進めてきた。

4.1 CFDを用いた空力性能の向上

ターボチャージャ用コンプレッサでは、広い作動範囲を確保するために半翼 (Splitter Blade) を用いる場合が多く、翼間方向、流れ方向および Shroud-Hub間の流れ分布をできるだけ均等化することが効率向上につながる。Shroud-Hub間の流れ分布を均等化するため、従来の直線線素で構成される直線線素翼に対して回転方向に湾曲させた自由曲面翼にしたインペラの開発を進めている。Fig. 10に、直線線素翼と自由曲面翼インペラの形状を示す。翼を湾曲させる方向（回転方向に対し凸あるいは凹）、曲げ量および全翼と半翼との適合が効率、サージ特性および翼応力に影響するため、CFDと応力解析により最適な翼形状の設計法を開発している。また、VIGV付コンプレッサについては、静止しているVIGVペーンと高速で回転するインペラの翼列干渉流れを3次元で計算できるようになり、効率向上のための有力なツールになっている。

Fig. 11にコンプレッサスクロールの流れ計算例を示す。設計点付近では壁面に沿ってスムーズに流れるが、設計点よりも少流量側あるいは大流量

側では流れが周方向にゆがむ。この流れの周方向ゆがみがインペラの流れに影響するため、設計点から離れた点でのコンプレッサ性能を予測するためには、スクロールとインペラを含めた全体の流れを解析する必要がある。

VN付タービンの翼間流れについてもVIGV付コンプレッサと同様の解析を行い、VNペーンおよびタービンホイール翼形状の設計法を開発している。

4.2 可変容量化

エンジンが要求する広い作動範囲を満足させるために最も有効な方法が可変容量化である。特に、タービンを可変容量化することは、エンジンの回転数に応じて過給圧を制御できることになり、低速トルクの向上と排気エネルギーの有効利用による燃費の向上につながる。VNターボチャージャとウェイストゲートバルブ付ターボのエンジン性能を比較した例をFig. 12に示す。

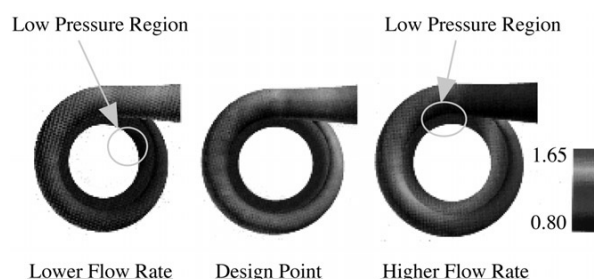


Fig. 11 Static pressure distribution on the wall of compressor scroll.

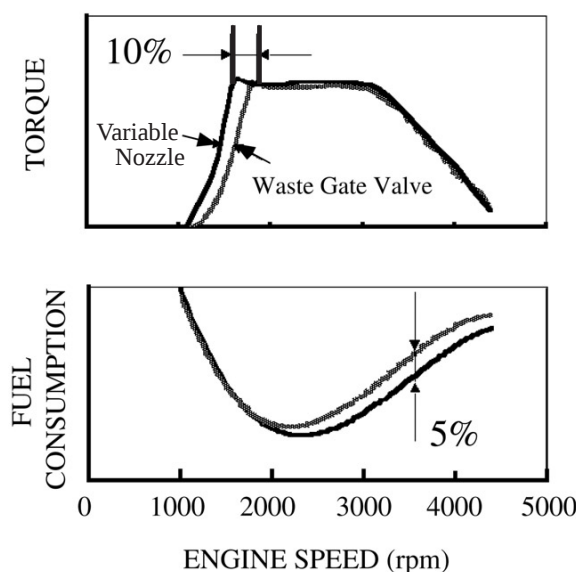


Fig. 12 Effects of the variable nozzle on a turbocharged diesel engine performance.

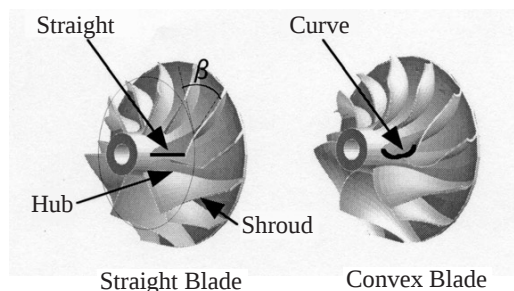


Fig. 10 Picture of impellers with straight blade and convex blade.

コンプレッサ入口にVIGVを設置することによりインペラに流入する空気に旋回を付与することで、インペラ翼への流入角を制御してコンプレッサの流量特性を可変にすることができる。VIGVベーンの設定角を大きくするとサージ限界が拡大し、少流量側で効率が向上する。エンジンでは、低速域のトルク、燃費および過渡性能の向上に効果があると考えられる。VIGVで流入空気に予旋

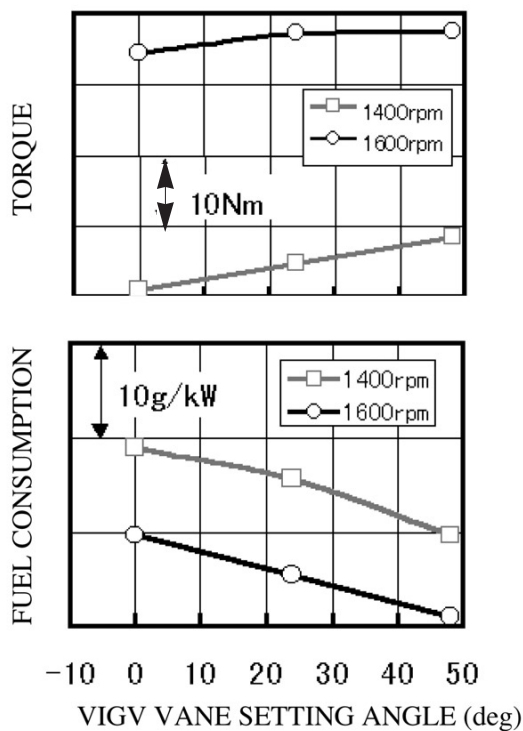


Fig. 13 Effects of the variable inlet guide vanes on a turbocharged diesel engine performance.

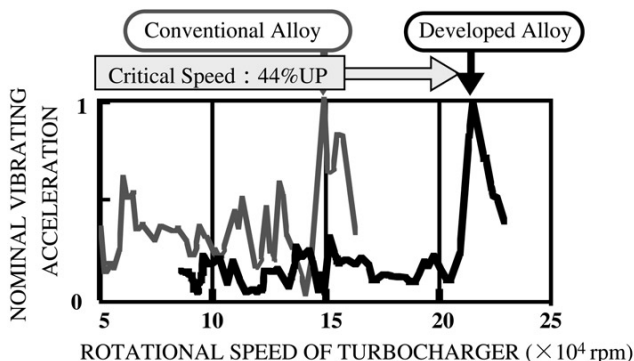


Fig. 14 Effect of the developed alloys on the shaft vibration.

回を付与することで、インペラへの流入マッハ数が低減し、流体摩擦損失が減少すると考えられる。したがって、マッハ数が高い高圧力比域でVIGVの効果が大きくなる。Fig. 13にエンジン性能向上へのVIGVの効果を示す。エンジンの低速域でVIGVを絞ることにより、トルクおよび燃費が向上する。

4.3 軽量・高強度材料の適用

回転体の慣性モーメント低減と軸振動の低減をねらって、チタンアルミ合金製タービンホイール、マグネシウム合金製インペラおよび高剛性鋼製軸を開発している。回転体の慣性モーメントを42%低減し、軸の曲げ共振回転数を44%上昇することができた。Fig. 14に軸振動の計測結果を示す。

5. まとめ

最近のコスト削減圧力、燃費・排気規制の強化に伴い、乗用車用ターボチャージャには、トレイドオフの関係にある低コスト化と高性能化の両立が強く求められている。ターボ過給は、エンジンのコストパフォーマンスを引き上げる最も有効な手段であり、今後も直噴ディーゼルおよび直噴ガソリンへの装着率が増してくるものと思われる。

参考文献

- 1) 小池篤史, 古川弘: 自動車技術会学術講演会前刷集, No.29-99-131(1999), 1
- 2) 松本鋼児, 陣内靖明: 自動車技術会学術講演会前刷集, No.29-99-132(1999), 5
- 3) 岩切雄二, 内田博: 第13回日本ガスタービン秋季講演会講演論文集, (1998), 247
- 4) 石野実, 内田博: 第13回日本ガスタービン秋季講演会講演論文集, (1998), 217
- 5) 西野和彰, 川浦宏之: 日本ガスタービン学会誌, 28-1(2000), 58

(2000年4月18日原稿受付)

著者紹介

内田博 Hiroshi Uchida

生年: 1952年。

所属: エンジン機能制御研究室。

分野: ターボ機械の空気力学。

学会等: 日本ガスタービン学会会員。

