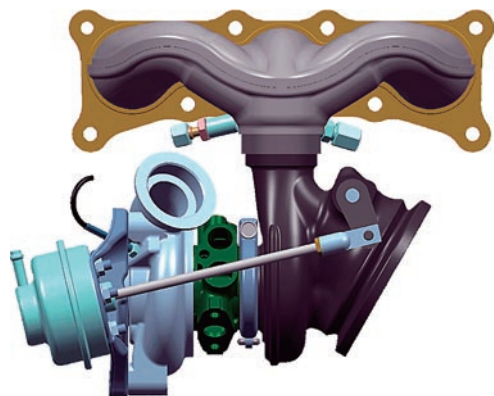


特 集 論 文

1 050℃対応小型高性能ターボチャージャの開発

Development of Compact and High Performance Turbocharger for 1 050 °C Exhaust Gas



松本 鋼 児^{*1}
Koji Matsumoto

東 條 正 希^{*2}
Masaki Tojo

陣 内 靖 明^{*2}
Yasuaki Jinnai

林 慎 之^{*3}
Noriyuki Hayashi

茨 木 誠 一^{*4}
Seiichi Ibaraki

世界的な排気ガス規制や燃費規制によって、乗用車用エンジンのダウンサイジングが進み、排気量当たりの出力が増大する傾向にある。ターボチャージャはエンジンの小型高出力化に有効な装置であり、需要が増大するとともに技術的要求も高まっている。特にガソリンエンジンでは燃焼の効率化から排気ガスの温度が上昇傾向にあり、これに対応できるターボチャージャの開発が急務であった。このたび世界最高レベルである 1 050 °C の高温排気ガス下で稼働できる小型高性能ターボチャージャを開発し客先納入を開始した。

1. は じ め に

近年、環境規制対策のために自然吸気式の大排気量エンジンの代わりにターボチャージャ搭載の小排気量エンジンとし、ほぼ同等のエンジン出力を維持する手法、いわゆるダウンサイジングが進みターボチャージャの搭載比率が増加している。ガソリンエンジンの場合、これまでは高出力のスポーツタイプに搭載されるのが主で、ユーザが限られており生産台数もそれほど多くはなかった。しかしながら近年ガソリンエンジン向けにターボチャージャの需要が増加している。

背景として、ガソリン価格の高騰と CO₂ 規制の強化（図 1）とがあいまって燃費向上に対するニーズが急速に高まっていることが上げられる⁽¹⁾。

今後ガソリンエンジン向けターボチャージャの需要

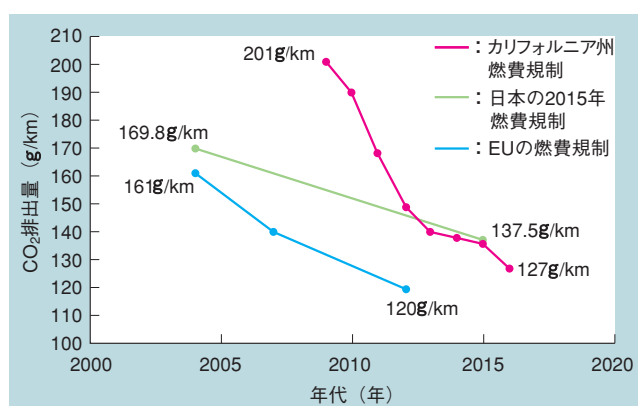


図 1 CO₂ 規制値の推移

が更に増加すると考えられ、また排気ガス温度など、使用条件が厳しくなることから、この高排温に対応したターボチャージャを開発することが急務となっている。

2. ガソリンエンジン向けターボチャージャの特徴

ガソリンエンジンはディーゼルエンジンより一般的に 200 °C 程度排気ガス温度が高く、ガソリンエンジン向けターボチャージャはより高温対応の技術が要求される。さらに近年の排気ガス規制対応や小型高出力化のため排気ガスの温度は上昇傾向にあり、近年では 1 050 °C に達する仕様も出てきた（図 2）。

また従来の吸気ポートへの燃料噴射ではノッキング

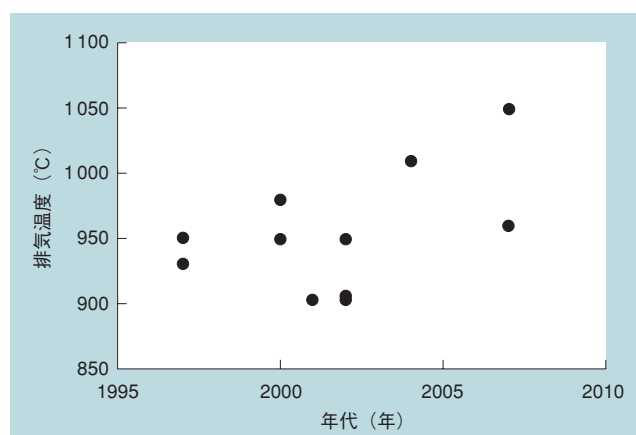


図 2 当社客先におけるガソリンエンジンの排気ガス温度の推移

^{*1} 汎用機特車事業本部ターボ技術部ターボ設計二課長

^{*2} 汎用機特車事業本部ターボ技術部ターボ設計二課

^{*3} 汎用機特車事業本部ターボ技術部技術戦略グループ主席 工博 技術士（機械）

^{*4} 技術本部長崎研究所ターボ機械研究室主席 工博

の回避のためエンジンの圧縮比は自然吸気式エンジンよりも低く設定するのが一般的であったが、直噴エンジンでは燃料噴霧の気化熱による冷却効果でノッキングが抑制され自然吸気式エンジン並みの圧縮比となっている。このことからタービン入口圧力が増大しターボチャージャへの負荷が増加している⁽²⁾。

ガソリンエンジン向けターボチャージャの需要増加が期待できる一方、高温化、高排圧化などの外的要因の変化に対して、耐久性を満足するターボチャージャを開発することが急務である。耐久性を満足するためには以下の機能についての評価が重要となる。

- タービンホイールの強度設計
 - タービンハウジングの強度設計
 - ウェイトゲートバルブ機構の最適化
- これらの点について次章で詳しく述べる。

3. 高排気温度対応技術

3. 1 タービンホイール

タービンホイールの材質として標準的に用いられているものは Inconel 材である。Ni 基の耐熱合金であるが、1 050℃では耐クリープ特性が当社の基準を満たさないため同じ Ni 基の耐熱合金でもより強度の高い MarM 材を使用することとした。当社ではラリーなどの競技用車両のターボチャージャで MarM 材を使用してきたが、市販車に使用するのは今回が初めてである。MarM 材は Inconel 材に対し鍛造が難しく、微細な鍛造欠陥が出やすいため、HIP 処理を実施して鍛造欠陥を除去し材質均質化をはかった。HIP 処理とは熱間等方圧加圧法（Hot Isostatic Pressing）の略で、アルゴンなどの不活性ガスを圧力媒体とし、通常 100 MPa 以上の圧力と 1 000℃以上の温度との相乗効果を利用して加圧処理する技術である。

市販車への適用にあたり、MarM 材の高温引張り強度、クリープ破断試験を行い、材料特性データを補完し、タービンホイールの応力解析（図 3）、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タービンホイールの回転中の翼面温度を計測した。また、実機によるタービンホイール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 4 に排気ガス温度 1 050℃、最高回転数でのクリープ破断試験後のタービンホイールを示す。タービン後縁の翼根部からクリープ破断しており、解析結果の高応力部と一致する。従来の Inconel 材製タービンホイールとの比較試験も行い、MarM 材製が約 3 倍のクリープ寿命を有することを確認した。

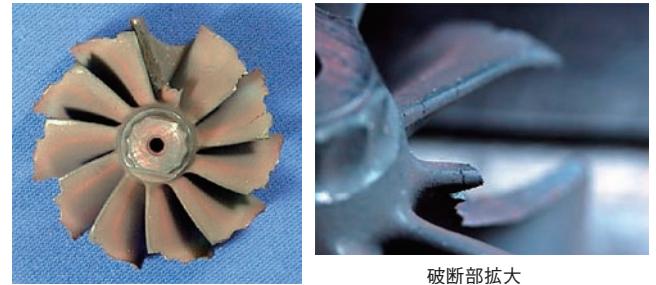


図 4 タービンホイールのクリープ破断試験
(排気ガス温度 1 050℃、最高回転数)。

3. 2 タービンハウジング

タービンハウジングについては排気ガス温度条件より許容温度 700℃のダクタイル鋳鉄から、1 000℃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、客先要求にあった材質を当社では揃えている（図 5）。昨今のガソリンエンジン向けターボチャージャではオーステナイト系ステンレス鋳鋼を使用しているものが多いが、高温強度を確保する上で、材料選定以外にも形状の最適化が必要となる。タービンハウジングはエンジンの作動条件により加熱、冷却を繰り返し受けるため熱疲労による亀裂の発生が懸念される。これを防ぐために、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（図 6）、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て高応力領域を把握

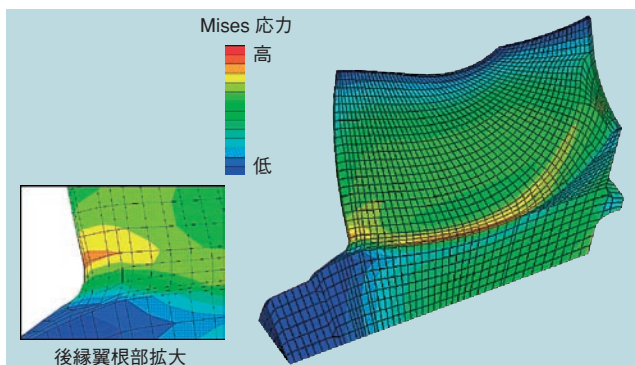


図 3 タービンホイールの応力解析（Mises 応力）

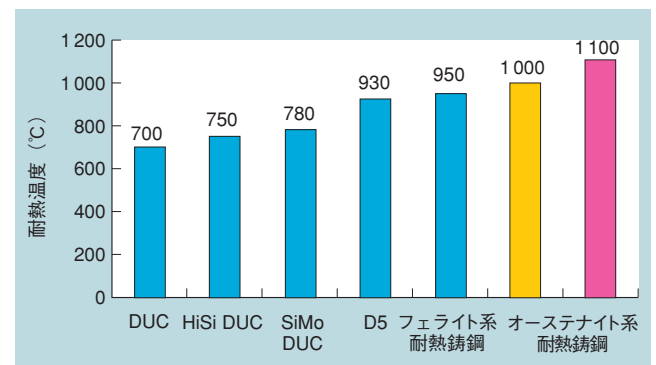


図 5 タービンハウジング材料と許容温度

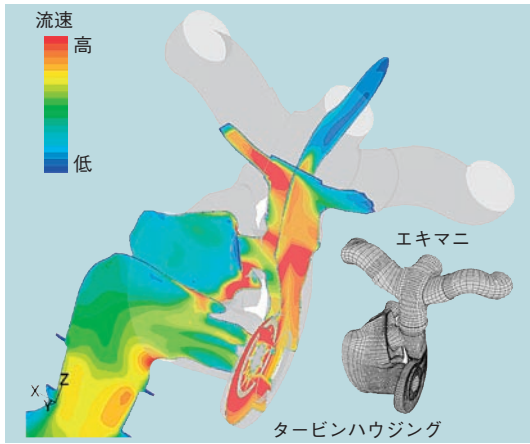


図6 流動解析結果（流速分布）

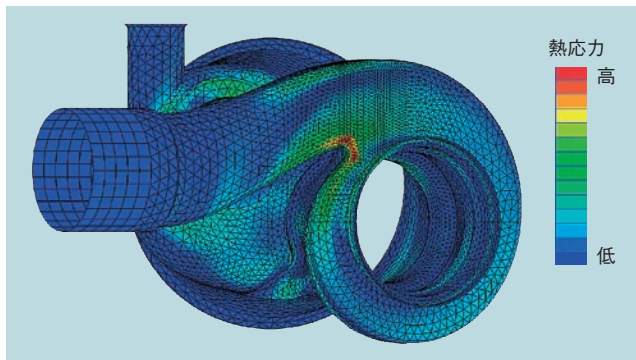


図7 タービンハウジングの熱応力解析例



図8 高温摩擦試験装置

した（図7）。オーステナイト系ステンレス鋼の適用に加え、タービンハウジングの構造不連続を無くし、肉厚を均一化することで、亀裂発生を防止している。

3.3 ウェイストゲートバルブ

ウェイストゲートバルブは排気ガスをバイパスさせることにより、エンジンに供給する空気の圧力を制御する機構であるが、従来以上に高温の排気ガスに曝さ

れながら無潤滑でしゅう動するため、特に焼付きに対する信頼性向上が要求される。

今回の開発ではウェイストゲートバルブに使用する材料につき、耐焼付き性を検証するための高温摩擦試験を図8に示す試験装置にて実施した。その結果、従来に比べ耐焼付き性に優れる材料組合せを見出した（図9）。

一方、ウェイストゲートバルブ機構の摩耗を低減するため、機構解析を用いた形状検討を実施した。機構解析モデルを図10に示す。本モデルにてバルブに排気脈動相当の変動荷重が作用した際のしゅう動部の摩耗発生の過酷さ（すべり量、荷重）を、機構各部の寸法をパラメータとして計算した。計算結果例を図11に示す。本解析より、摩耗発生の過酷さを低減できる寸法を見出し、その結果を製品に適用することで摩耗低減を行った。

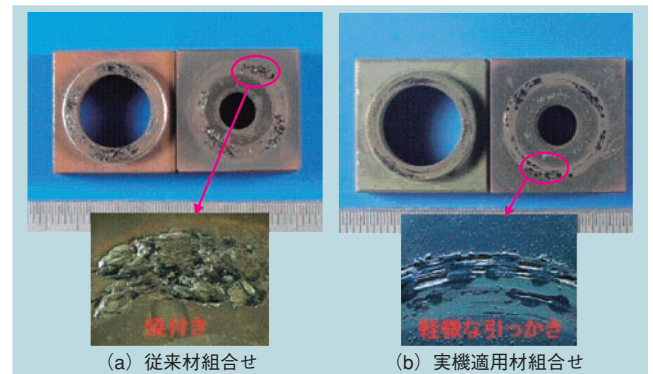


図9 高温摩擦試験後のしゅう動面の状況

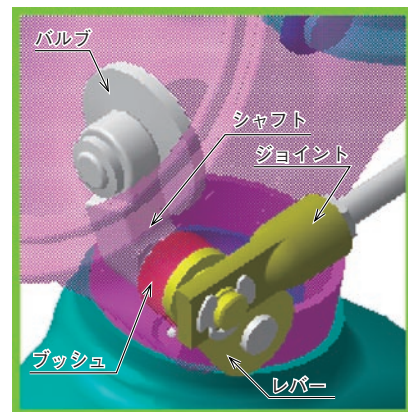


図10 ウェイストゲートバルブの機構解析モデル

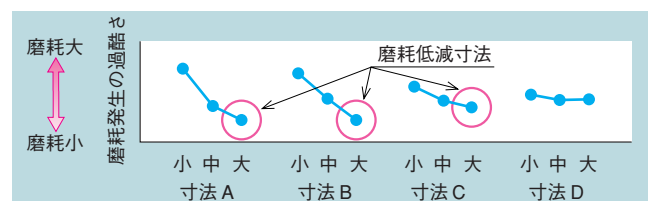


図11 機構解析による摩耗発生量の過酷さ計算例



図 12 排気マニホルダー一体ターボチャージャー (一体鋳造)

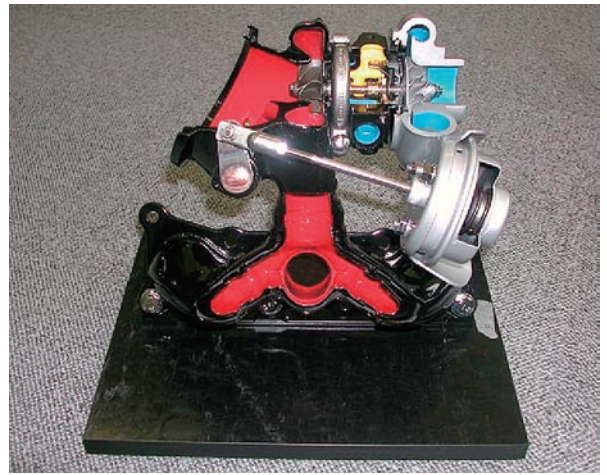


図 13 排気マニホルダー一体ターボチャージャー (溶接構造)

4. 小型、高性能化

ターボチャージャーの小型化はエンジンルームのレイアウトを容易にするため従来から要求があったが、近年ではエンジン始動時の触媒活性化時間の短縮の点でもターボチャージャーを小型化し触媒に至るまでの排気ガス流路の熱容量を低減することが求められている。これは触媒が活性化するためにはある程度的高温になる必要があり、排気マニホルドやタービンハウジングなど排気ガスの通路で吸収される熱を極力抑えたいからである。このような要求に応えるため当社では排気マニホルドとタービンハウジングを鋳物で一体成型したターボチャージャーを供給してきた(図 12)。今回の開発では更なる小型軽量化のため排気マニホルドをステンレスの板材からプレス成型で製作し、鋳造で製作されたタービンハウジングと溶接し一体化する手法を客先とともに開発した(図 13)。排気マニホルド部は二重構造になっており熱容量低減に効果が大い。

5. ま と め

排気ガス、燃費規制が強化される中、ガソリンエンジン向けターボチャージャーの高温排気ガス対応技術を結集し世界最高レベルである 1050℃の高温排気ガス下で稼働できる小型高性能ターボチャージャーを開発

し、客先納入を開始することができた。

今後、熱応力解析やしゅう動部の機構解析を充実させ試作以前に十分に評価し、客先要求の高度化、開発期間の短縮化に対応していくことを通じて、自動車の環境性能と運転する楽しさの追求に貢献していきたい。

参 考 文 献

- (1) 鶴原吉郎, 欧州の燃費規制, Automotive Technology, Vol.1 (2008) p.122
- (2) Luttermann, C. et al., BMW High Precision Fuel Injection Conjunction with Twin-Turbo Technology: a Combination for Maximum Dynamic and High Fuel Efficiency, SAE Paper 2007-01-1560



松本鋼児



東條正希



陣内靖明



林慎之



茨木誠一