

# RHV4 可変容量型 ( STEP4 ) ターボチャージャの開発

## Development of VGS Unit ( STEP4 ) for RHV4 Turbocharger

井 上 智 裕 車両過給機セクター技術統括センター開発部  
小 林 祐 二 車両過給機セクター技術統括センター開発部  
松 山 良 満 車両過給機セクター技術統括センター設計部 主査  
酒 井 康 隆 車両過給機セクター生産統括部

世界的に自動車の排気ガス規制が厳しくなるなかで低燃費、低環境負荷に対応したディーゼルエンジンの開発が進められている。そのなかでディーゼルエンジンと相性の良い VGS ( Variable Geometry System : 可変容量型 ) ターボチャージャの小型高出力化が要求されている。この要求に対応するため、クリアランスフローの制御や VGS 構造の改良と新工法である MIM ( Metal Injection Molding ) 工法や開発材の材料評価を行い、妥当性の確認を完了し適用することで、タービン性能向上と信頼性を向上させた VGS ターボチャージャを開発した。

As emission regulations are increasingly tightened worldwide, the development of fuel-efficient diesel engines that are less burdensome on the environment is progressing. When coupled with engine downsizing, VGS ( Variable Geometry System ) turbochargers are very effective in reducing diesel engines' fuel consumption and emissions. As further engine downsizing is a major trend, there are strong demands to increase the power density of VGS turbochargers while improving their performance and reliability. To meet such demands, a new VGS turbocharger with improved turbine performance and reliability has been developed. This paper introduces key technologies adopted for the new VGS turbocharger, such as clearance flow control, improved VGS structure, MIM ( Metal Injection Molding ; a new technique ), and new materials.

## 1. 緒 言

地球温暖化などの環境問題に対応するため、世界的に自動車の排気ガス規制が厳しくなっており、低燃費、低環境負荷のエンジンの開発が進められている。

ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べ機関熱効率が高く燃費に優れており CO<sub>2</sub> の排出量も少ないため、ヨーロッパでは乗用車のディーゼルエンジンの割合が 50%程度と高くなってきている。また、ディーゼルエンジンはターボチャージャとの相性も良く、ターボチャージャの搭載が標準的な仕様になっている。また、従来のウェイトゲート付ターボチャージャに代わり、そのほとんどが可変容量型 ( Variable Geometry System : 以下、VGS と呼ぶ ) ターボチャージャになっている。エンジンの低燃費化のためターボチャージャの小型高出力化が求められており、さらなる性能の向上が要求されている<sup>(1)</sup>。

ターボチャージャ市場はグローバルに拡大しており、そのなかで競争力をもつため、VGS 構造の改良や新工法、新材料の適用によるタービン性能の向上、および信頼性の向上を達成した VGS ターボチャージャの開発を実施し、実機適用を開始したので紹介する。

## 2. タービン性能向上

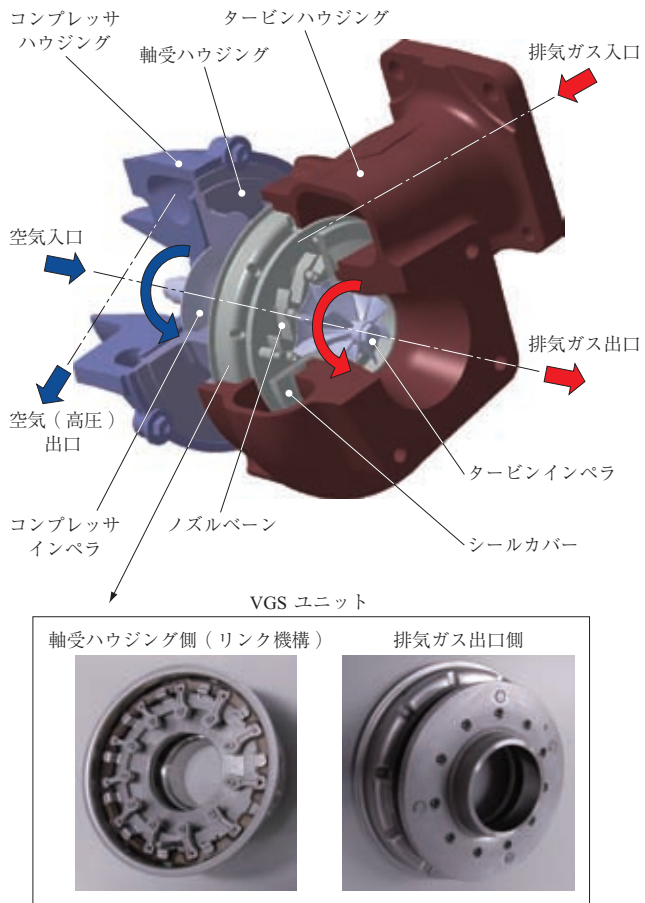
### 2.1 VGS ターボチャージャの構造

ターボチャージャはエンジンの排気ガスを利用してタービンを駆動し、同軸上に配置されたコンプレッサを回転させ、エンジンに高圧の空気を過給する装置である。

VGS ターボチャージャはノズルベーンの開閉によって過給圧とエンジンの排圧を制御することで EGR ( Exhaust Gas Recirculation : 排気ガスの吸気側への循環 ) 率を高めることができるので、燃焼時に発生する窒素酸化物 ( NO<sub>x</sub> ) の生成を抑制できる。また、ガス流量の少ないエンジン低回転時にはノズルを閉じることでタービンインペラへ流入するガス流速を高め、ターボの回転数を上昇させエンジンの過渡応答性や低速トルクを向上させることができる。VGS ターボは 800℃ の高温無潤滑環境下で使用されるため、ノズルベーンを開閉させるリンク機構の耐久性などの信頼性も要求される。

当社の VGS ターボの特長としては、ノズルベーンの両サイドへ軸を配置した構造 ( 両軸受 ) が挙げられる。この構造によってノズルベーンに掛かる流体荷重やノズル開閉時の摺動荷重を軽減させることが可能になっており、耐

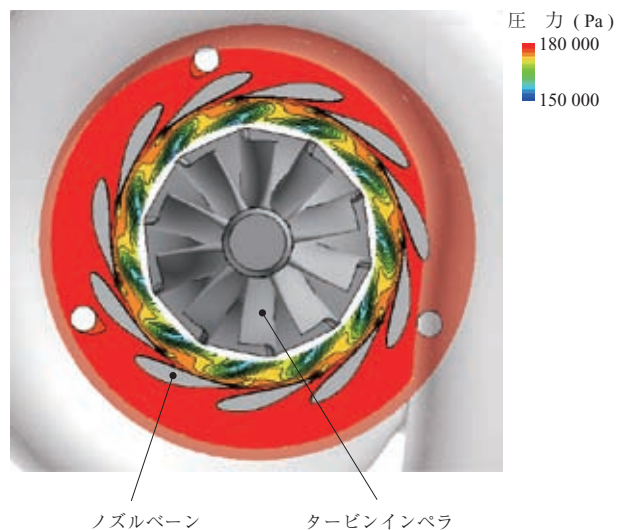
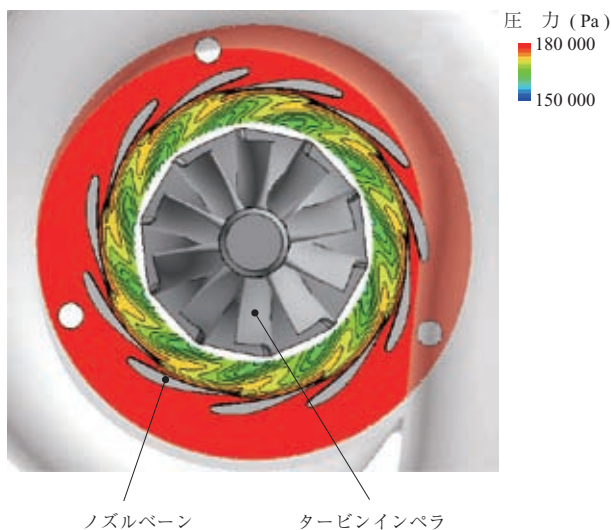
久性と過渡性能に優れたスムーズな作動特性をもつ。また、ノズル開閉のリンク機構を軸受ハウジング側にもたせた VGS ユニット構造にしており、コンパクトなターボチャージャーになっている（第 1 図）。



第 1 図 VGS ターボチャージャーの構造  
Fig. 1 Structure of VGS turbocharger

(a) 新ノズルベーン

(b) 従来ノズルベーン



第 2 図 ノズルサイドクリアランス近傍の全圧分布  
Fig. 2 Total pressure distribution around nozzle side clearance

## 2.2 タービン性能の改良

排気ガス規制が厳しくなるなか、ターボチャージャーの性能向上の要求も強くなってきている。VGS ユニットは高温無潤滑環境で使用されるため、熱変形や作動性を考慮し、部品間にクリアランスを設ける必要がある。特にノズルベーンと摺動面に設けたクリアランス（ノズルサイドクリアランス）部から漏れる半径方向速度成分が支配的な流れ（クリアランスフロー）によって、タービンインペラ内部で発生するはく離などの損失（エントロピーの生成）が性能へ及ぼす影響が大きいことが知られており、タービン性能低下の主要因として挙げられる<sup>(2)</sup>。

これに対し、本開発ではノズルサイドクリアランス部の損失を抑制してタービン性能向上を図るため、クリアランスの変化による性能変化が小さい薄肉、ロングコード（ベーン長が長い）の新ノズルベーンを開発した。この形状は新工法として MIM（Metal Injection Molding：金属粉末射出成形）を適用したことによって量産性を高めることができ可能になった。この新ノズルベーンのクリアランス近傍の全圧分布を第 2 図に示す。クリアランスフローの影響で発生するノズル通過後の圧力損失を比較すると、新ノズルベーン（第 2 図 - (a)）の方が圧力損失は小さくなっており、クリアランスフローの影響が小さくなっていることが確認できる。

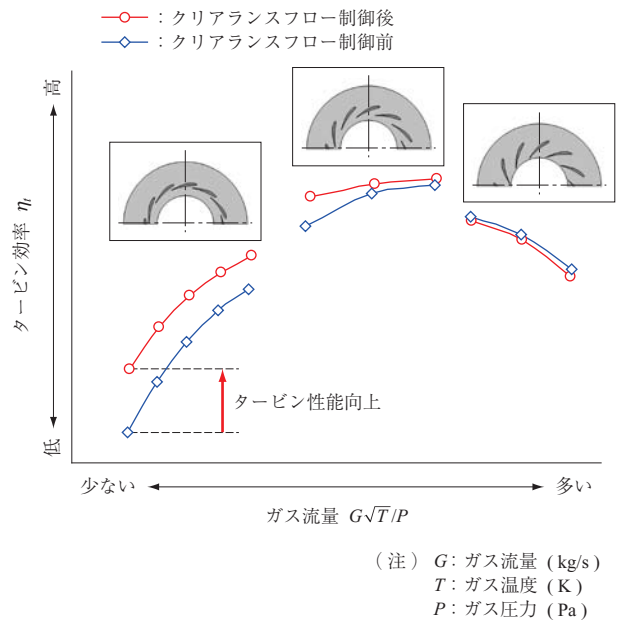
クリアランスフローの影響を抑制することはノズル下流のタービンインペラの性能向上につながる。クリアランスフロー制御前後でのタービンインペラ内部流れの CFD 解

析結果を第3図に示す。図の示すとおり、クリアランスフロー抑制前(第3図-(b))に発生していたインペラ内部での損失を小さくすることができた。これはクリアランスフローによるタービン効率低下の影響が大きいエンジン低速領域(ガス流量が少なくノズルを閉じ側で使用)での効果が大きく、タービン性能の向上が顕著である(第4図)。また、クリアランスフローを抑制することで性能向上だけでなく、性能に対するロバスト性(変化を抑制する)の向上も達成できる。通常ノズルサイドクリアランスが大きくなるとクリアランスフローも多くなり、ノズル後流にあるインペラ内部で流れの損失が増加するためタービン性能が変化する。しかし、クリアランスフローを抑制することでインペラ部の損失を低減させることが可能になり、性能変化幅を小さくすることができる。

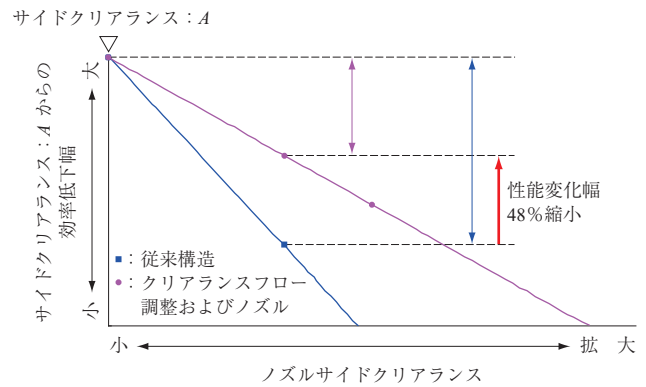
新ノズルの適用とそれによるクリアランスフローの制御によって、従来構造と比較してノズルサイドクリアランス変化による性能変化幅を48%小さくすることができ、性能に対するロバスト性の向上を達成した(第5図)。

### 2.3 シール構造の改良

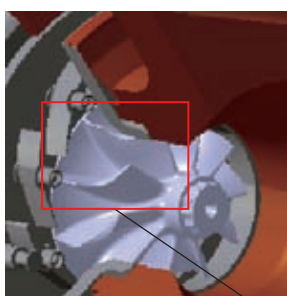
VGS ターボチャージャの構造は VGS ユニットへの外力を小さくしノズルバーンの引っかかりを防止する必要がある。そのため温度が低く熱変形が小さい軸受けハウジング側で VGS ユニットの固定し、高温で熱変形が比較的大きなタービンハウジングの熱変形の影響を受けにくい構造にしている。この構造において、VGS ユニットとタービ



第4図 タービン性能  
Fig. 4 Turbine performance

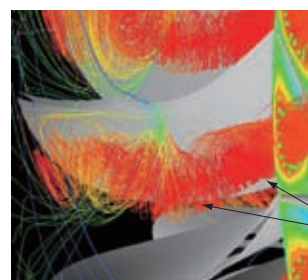
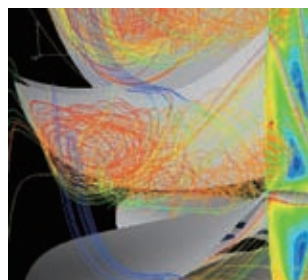


第5図 ノズルサイドクリアランス変化によるタービン効率変化  
Fig. 5 Turbine efficiency after change to nozzle side clearance



(a) クリアランスフロー制御後

(b) クリアランスフロー制御前



(注) カラーマップは流線とタービンインペラ出口面のエントロピーを示す。

第3図 タービンインペラ部のエントロピー比較  
Fig. 3 Comparison of entropy in turbine wheels

ンハウジングは締結されておらず、形成されるガス流路部はすき間をもつ。このため、この流路部のシール性を保つ必要がある。本開発ではこれらを両立させたシール構造を採用している。

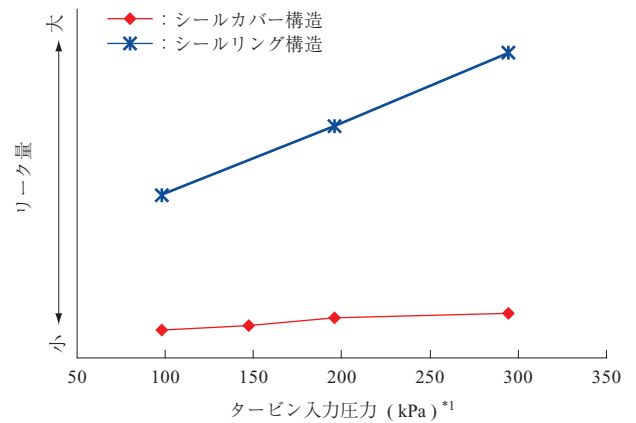
従来の VGS のピストンリング構造 (STEP3) に対し、シール方法を改良し、リーク量を低減させたシールカバー構造 (STEP4) にした (第 6 図)。また、第 7 図にリーク量の計測結果を示す。この結果が示すとおり従来のシール方法と比べ良好なシール性を保つことができる。

### 3. 新工法, 新材料の適用

#### 3.1 MIM 工法の適用

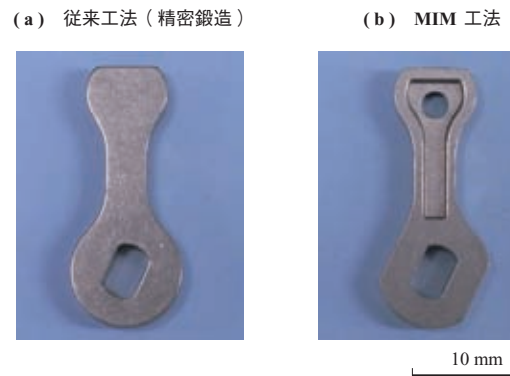
近年、技術の成熟化、高精度化に伴いノズルのような薄肉で複雑な三次元形状の部品が MIM 工法によって製作可能になってきている。

MIM とは原料となる金属粉末と、それをつなぎ合わせる樹脂バインダとを混練し流動性をもたせて射出成形した後、その成形体中の樹脂分を加熱や薬品処理で除去 (脱脂) し、焼結のように焼き固めて金属部品を得る工法である<sup>(3)</sup>。射出成形を使うことで精度の高い部品を作成することが可能である。また、今回適用した株式会社 IHI ターボの MIM 工法は精度が高く、機械加工レスで製造可能になっている。また、MIM 工法の特長を活かすことで、第 8 図で示すように部品の軽量化が可能になり、エ

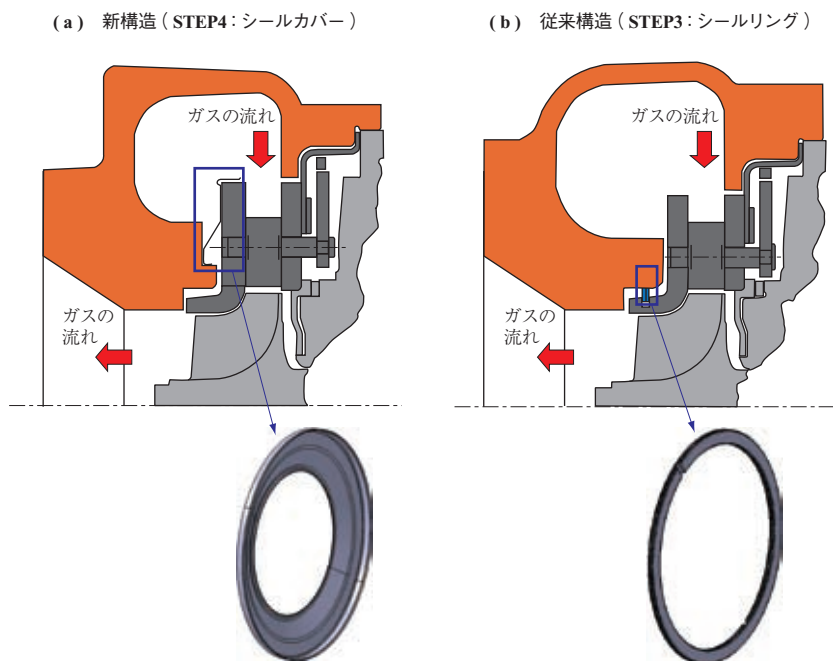


(注) \*1: ゲージ圧を示す。

第 7 図 リーク量計測結果  
Fig. 7 Measurement of leakage



第 8 図 MIM 製品 (リンク板)  
Fig. 8 MIM product (Link plate)



第 6 図 シール構造比較  
Fig. 6 Comparison of seal structures

ンジンなどの振動による耐摩耗性の向上にも期待ができる。

### 3.2 MIM 材の材料評価

充てん率が低い焼結品の場合は強度が低く、また高温ガス雰囲気での酸化による破損が懸念され、高温環境下で使用されるターボチャージャ部品への適用が見送られていた。しかし、今回適用した MIM 工法の場合は 95% 以上の高い充てん率を確保することが可能になった。

この工法の妥当性確認として実体切出しによる引張試験、疲労試験、クリープ試験などの強度評価を行い、従来工法である鍛造材と同等以上であることを確認した。

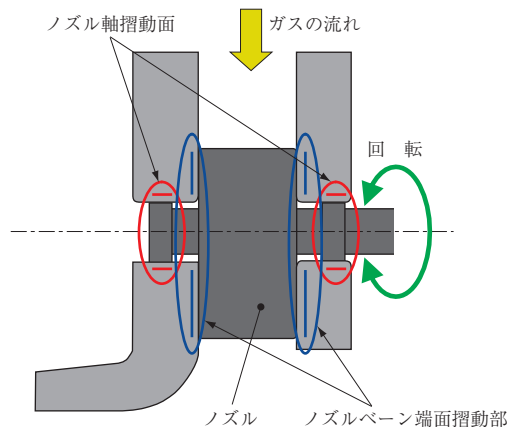
また、高温酸化による問題がないことを確認するため、高温ガス雰囲気での酸化試験を実施し鍛造材と同等以上の耐酸化性をもつことを確認した（第 9 図）。

### 3.3 開発材の適用

VGS は高温環境下でリンク機構によるノズルバンの開閉を繰り返すため、ノズルの軸やノズルバン端面摺動部の良好なトライボロジー（摩擦・摩耗）特性が求められている（第 10 図）。

今回、摺動部材（ノズルと相対する部材）に従来のステンレス鋼から高シリコンステンレス鋼の開発材を適用することで、摩擦係数の低減や耐摩耗性の向上が得られた。

以下に、材料の組合せを選定するため要素試験として



第 10 図 ノズルの動き

Fig. 10 Schematic of nozzle movement

行った A（従来材の組合せ）と B（開発材の組合せ）の高温摺動試験結果を第 11 図および第 12 図に示す。高温摺動試験は実機での使用条件から雰囲気温度、荷重、摺動速度を設定した。

摩擦係数は平均値比較で 14%，最大値比較では 12% 小さくなっており高温時の作動特性の改善を確認した。

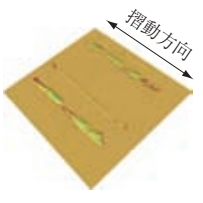
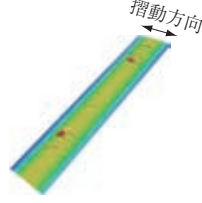

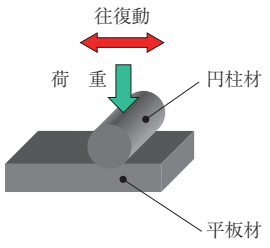
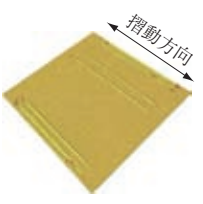
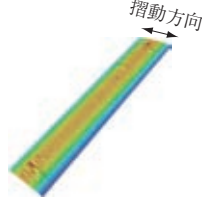

試験後の凝着高さを比較してみると開発材である平板は低く、また相手材である円柱の凝着高さも小さくなっており、組合せとして良好な結果が得られ、耐摩耗性の改善を確認した。

項目	MIM（充てん率：83%）	MIM（充てん率：95%）	従来工法（鍛造品）
試験前			
20 h 後			
100 h 後			
試験結果	酸化量 大	酸化量 小	酸化量 小

（注）試験条件  
 ・温度：900℃  
 ・ガス流速：95 m/s

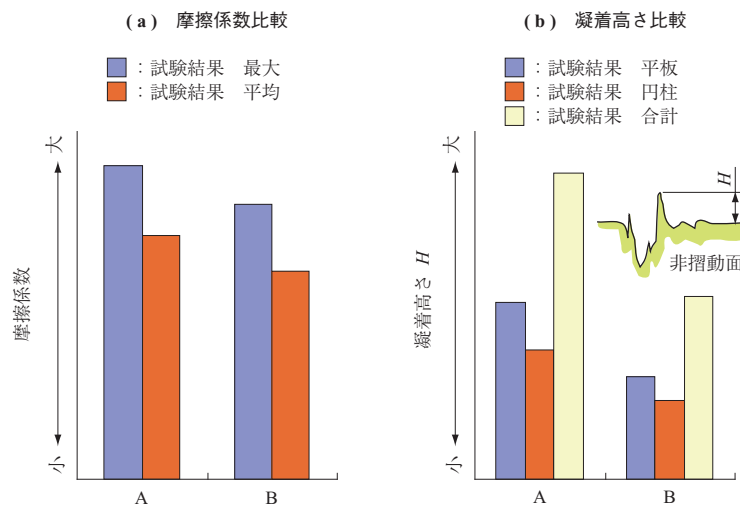
第 9 図 酸化試験結果

Fig. 9 Results of oxidation test

材質の 組合せ 記号	材質の組合せ		三次元による摩耗計測		試験後の摩耗状況 *1	試験のイメージ
	平板材	円柱材	平板材	円柱材		
A	従来材 (ステンレス鋼)	ステン レス鋼				
B	開発材 (高シリコン ステンレス鋼)	ステン レス鋼				

(注) \*1  
 ・雰囲気温度：800℃  
 ・サイクル：100 サイクル後

第 11 図 摩耗試験後の状態  
 Fig. 11 Material condition after wearing test



第 12 図 摩耗試験結果  
 Fig. 12 Comparison of wearing test result

#### 4. 結 言

クリアランスフローの制御やシール構造の改良、新工法、新材料の適用によってタービン効率の向上を達成し、信頼性を向上させた RHV4 型 VGS ターボチャージャの開発を完了した。本ターボチャージャは 2011 年から実機適用しており、今後は他機種へのシリーズ展開を進めていく。

当社はエンジンの小型高出力化に伴うターボチャージャの高性能化への要求にこたえるため、引き続き性能改善や高信頼性の確保に取り組んでいく。

#### 参 考 文 献

- (1) 小池篤史：ターボ過給機の技術動向 エンジンテクノロジーレビュー 第 2 巻 第 5 号 2010 年 12 月 pp. 36 - 42
- (2) K. Segawa et al. : Improvement of turbine performance for small size VGS Turbocharger, 9th International Conference on Turbochargers and turbocharging IMechE (2010.5) pp. 227 - 236
- (3) 車両過給機セクター営業部：変幻自在の素形材加工術 IHI 技報 第 51 巻 第 1 号 2011 年 3 月 pp. 20 - 21