

研究報告

チタン基複合材料製排気エンジンバルブの開発

古田忠彦, 齋藤 卓, 山口登土也

Development of Titanium Metal Matrix Composite Exhaust Valve

Tadahiko Furuta, Takashi Saito, Toshiya Yamaguchi

要 旨

1998年10月、トヨタ自動車(株)は量産車アルテッツァに世界で初めて、チタン基材料製吸・排気エンジンバルブを同時採用した。本報告では、排気バルブ用として独自に開発した低コストチタン基MMC (Metal Matrix Composite) の、開発基本コンセプトを紹介するとともに、本材料の機械的特性、排気バルブとしての耐久性、信頼性について報告する。開発チタン基MMCは、TiB粒子の複合化とマトリックス組成、組織の最適化により、室温からバルブ作動温度領域において、現用排気バルブ鋼21-4Nを上回る特性を有してい

る。安価な粉末冶金法による新製造プロセスを採用した開発チタン基MMC製排気バルブは、同時に開発した焼結Ti-6Al-4V合金製吸気バルブとともに、各種エンジン耐久試験、信頼性評価試験を全てクリアし、製造コストにおいても現用のバルブ鋼と対抗できるレベルに到達した。開発チタン基製バルブを採用した新型エンジンでは、旧型エンジンに比べ、バルブ質量で40%、バルブスプリング質量で16%の軽量化を達成した。その結果、最高回転数の10%向上と高回転域での騒音を3dB低減し、高性能化と静粛性の向上に貢献した。

キーワード チタン, TiB, 複合材料, 自動車, エンジンバルブ, 排気バルブ, 粉末冶金, クリープ特性, 疲労強度, 引張強度

Abstract

In October 1998, a new mass-produced car with titanium engine valves (both intake and exhaust) become available from the Toyota Motor Corporation. Both the intake and exhaust valves were manufactured via a newly developed cost-effective powder metallurgy process. Furthermore, the material, which was specially designed based on the mechanical properties of the exhaust one, is a unique TiB reinforced titanium metal matrix composite (MMC). This paper discusses the materials and manufacturing methods used. The tensile strength, the high-cycle fatigue strength and the creep resistance of the MMC from room temperature to 800°C are always superior to those for the

typical 21-4N heat-resistant steel and Ti-1100 (heat-resistant Ti Alloy). These properties have been realized by the best combination of a special heat-resistance titanium alloy and the ideal reinforcement particle, TiB. Both valves have achieved sufficient durability and reliability with a manufacturing cost acceptable for mass-produced automobile parts. The new engine using the developed titanium-based exhaust and intake valves reduced the valve weight by 40% and the valve spring by 16%. As a result, the maximum revolution increased by 10% and the noise in the high revolution range decreased by 3dB.

Keywords

Titanium, TiB, Metal matrix composite, Automobile, Engine valve, Exhaust valve, Powder metallurgy, Creep property, Fatigue strength, Tensile strength

1. まえがき

自動車用エンジンバルブへのチタン合金の適用は、古くから検討されており、レース車には既に多用されている。しかし、一般大衆車のエンジンバルブにチタン合金が採用された例は極めて少ない。極一部のスポーツカーの吸気バルブに限定採用されただけであり、いまだ、排気バルブに適用された例はない。コスト的な問題は言うまでもなく、レース車よりも遥かに過酷な市販車の使用環境に耐え得る排気バルブ用耐熱チタン合金が存在しなかったからである。

このため、最近の軽量排気バルブのアイテムとしては、チタンアルミ金属間化合物やセラミックスが注目されている。これらの材料は、確かに排気バルブの作動温度で使用可能な耐熱性を有しているが、常温延性、衝撃特性、摩耗特性、熱膨張率等に問題があるため、市販車用としての十分な耐久性、信頼性、静粛性を確保することは至難である。さらに、これらの素材は、チタン合金よりもさらに高価であることから、量産車への適用は極めて困難である。

以上のような世界的なトレンドに対し、トヨタ自動車は1998年10月、大衆車アルテツァ用の新エンジンに、チタン合金製の吸気バルブならびに排気バルブを世界で初めて同時採用した¹⁾。本報告では、排気バルブ用として独自に開発した低コスト高性能チタン基MMC (Metal Matrix Composite) の、開発基本コンセプトを紹介するとともに、本材料の機械的特性、排気バルブとしての耐久性、信頼性について報告する。

2. 排気エンジンバルブ用チタン基MMCの開発基本コンセプト

一般に、自動車エンジンの排気バルブには、バルブ用耐熱鋼として知られる21-4N鋼が使用されている。この材料は、常温ならびに高温（800°C付近）における静的強度特性、疲労特性、クリープ特性、耐酸化性等のバランスに優れ、しかもコストも安い。チタン合金製の排気バルブをこの耐熱鋼製バルブの代替として適用するためには、まず、これと張り合えるだけの低コスト化を実現する必要がある。

低コストの実現のために我々が試みた手段は、粉末冶金法の一つである素粉末混合法 (Blended Elemental Method) である²⁾。事前のフィージビリティスタディにより素粉末混合法を適用すれば、原料素材コストの低減、材料歩留まりの向上、加工コストの低減等により、通常の溶製法によるチタン合金製バルブよりも大幅な低コスト化が可能で、耐熱鋼製のバルブとも十分競合し得ることが推察された。

さらに、粉末冶金法の特長を活かすことにより、溶

製材では製造不可能であった材料設計も可能となった。すなわち、素粉末混合法のコストメリットを活かしつつ、従来のチタン合金では考えられなかった、画期的な性能を有するTiB粒子強化型チタン基MMCを開発するに至った³⁻⁴⁾。Table 1にTiB粒子の物性値を示す。チタン用として考え得る他の強化粒子に比べ、ヤング率、硬度に優れ、しかもチタンマトリクスとの相互固溶度や熱膨張係数差が極めて小さいなど、チタン合金の強化粒子として理想的であることがわかった。

前述したように、一般大衆車の排気バルブは、極めて過酷な環境雰囲気において高速で往復運動する部品である。したがって、高温における高歪み速度での繰り返し引張り、曲げ、衝撃の応力に耐える必要がある。また、850°Cを超える燃焼ガスに直接晒されるため、高温での耐クリープ特性、疲労強度、耐酸化性を確保する必要がある。さらには、バルブシートやバルブガイドとの摺動部における耐摩耗性、耐焼き着き性の確保も不可欠である。そこで、この開発チタン基MMCを排気バルブに適用するため、材料組成ならびにプロセスの最適化を検討し、最終的に、量産車エンジンへの適用を可能とするコストパフォーマンスを達成するに至った。

3. チタン基MMC製排気エンジンバルブの基本製造プロセス

Fig. 1に開発バルブの基本製造プロセスを従来の溶製法と比較して示す。粉末冶金法を適用した新製造プロセスでは、溶製法に比較し大幅な工程削減を実現している。原料チタン粉末には、低コストな水素化チタン粉末を用いた。強化用合金としては、後述する材料特性を満足し得る組成として、Al-25Sn-25Zr-6Nb-6Mo-1.2Si合金粉末を用いた。さらに、TiB粒子をIn-Situに複合化させるためのボロン源としてTiB₂粉末を使用した。

各原料粉末を所定の比率で混合するとともに、潤滑剤粉末を0.5%添加し、円柱形状に金型成形後、

Table 1 Adaptability of several candidates as reinforcement for the titanium MMC.

	TiB	TiC	SiC
Knoop Hardness (GPa)	28.0	24.7	25.5
Young's Modulus (GPa)	550	460	394
Coefficient of Linear Expansion ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	8.6	7.4	4.0
Maximum Solubility (at%)	Matrix	0.1	1.8
	Particle	1.0	15.0
Estimation	Excellent	Passable	Failure

Coefficient of Linear Expansion of titanium alloys is around $9.0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$

1300°Cで真空焼結を行い、熱間加工用のピレットを製作した。その後、このピレットを、約1200°Cに高周波加熱し、バルブステム部の押し出しと傘部の鍛造を実施した。組織調整のための焼鈍処理を施し、最終形状へ機械加工した後、耐摩耗性確保のための大気中酸化処理を施した。

4. 合金組成の選定と熱処理条件の最適化

4.1 マトリクス合金の選定

開発チタン基MMCの優れた材料特性は、耐熱マトリクス合金と強化粒子 (TiB) との相乗効果により達成される。上記のエンジンバルブの作動環境に応じた性能確保を考慮した結果、マトリクス合金の基本組成はTi-6Al-4Sn-4Zr-1Nb-1Mo-0.2Si-0.3Oに、また、上記の各強度特性に加え、部品製造に際して重要な、延性、熱間加工性、被削性、ならびにコストを考慮した結果、TiB粒子量は5vol.%に決定した。

4.2 熱処理条件の最適化

チタン合金の材料特性には強い組織依存性があり、特に、マトリクスの組織形態は、高温クリープ特性や

高温疲労特性に強い影響を与える。すなわち、粗大な針状組織を有するとクリープ特性に優れ、一方、微細な針状あるいは等軸組織とすれば疲労特性に優れる。そのため、通常の耐熱チタン合金の組織は、クリープ特性と疲労特性とが高度にバランスするよう、熱処理 (溶体化 + 時効) 条件により微妙に調整される。

開発耐熱チタン基MMCにおいても、マトリクスの組織形態は熱履歴により大幅に変化する。ここでは、TiB粒子複合化による β 結晶粒成長抑制効果⁵⁾を有効に活用することにより、通常の耐熱チタン合金では結晶粒粗大化のために適用困難であった完全 β 焼鈍処理を採用し、生産性が低くコスト高に繋がる時効処理は省略した。この場合、マトリクス合金の β 変態温度と焼鈍処理温度との関係、ならびに焼鈍処理後の冷却条件が重要となる。

Fig. 2は、開発MMCの組織形態に及ぼす焼鈍温度の影響を示したもので、焼鈍温度が高いほど組織の針状化は顕著となる。なお、本合金の β 変態温度は約1100°Cであり、完全 β 領域の1150°C焼鈍材では、組織はほぼ100%針状化しているにもかかわらず、旧 β 結晶粒の異常成長は一切認められない。Fig. 3は、800°Cにおけるクリープ特性に及ぼす焼鈍処理温度の影響を調べた結果である。横軸には、Fig. 2の組織写真から測定した、マトリクスにおける針状組織の面積率も併記してある。高温焼鈍処理材ほど、すなわち針状組織の面積率が増加するほど、クリープ変形量は小さくなり、耐クリープ性はTi-1100 (現在世界最高といわれる耐熱チタン合金) のみならず、21-4N鋼をも上回ることがわかる。

以上の結果から、排気バルブ用耐熱チタン基MMCの熱処理条件としては、組織調整焼鈍処理温度を1150°Cとし、その後の冷却速度を1K/sに決定した。

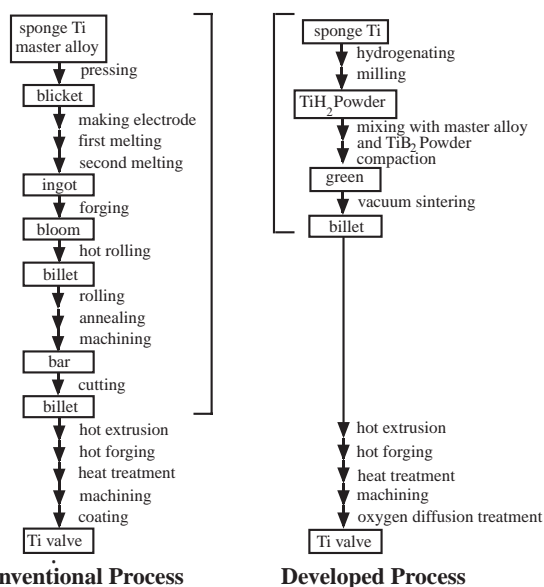


Fig. 1 Summary of the titanium valve manufacturing process.

5. 機械的性質と熱間加工性に及ぼすTiB粒子量の影響

5.1 機械的性質に及ぼすTiB粒子量の影響

Fig. 4に、室温ならびに800°Cにおける材料特性に及

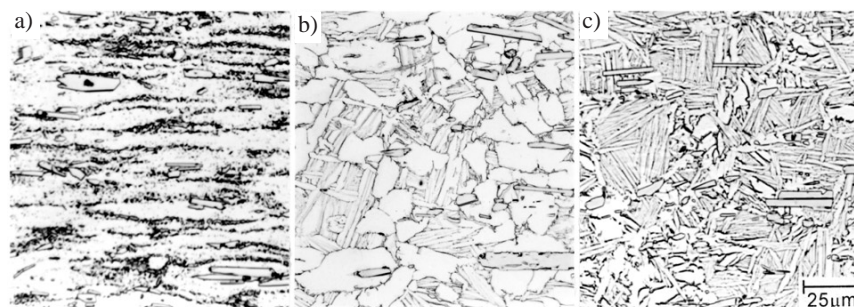


Fig. 2 Influence of annealing temperature on the microstructure of the hot-extruded MMC. Annealing temperature are a) at 950°C, b) at 1055°C and c) at 1150°C.

ばすTiB粒子の影響を示す。室温から高温までの引張強度ならびに疲労強度は、いずれもTiB粒子量の増加とともに大幅に上昇していることがわかる。特に、排

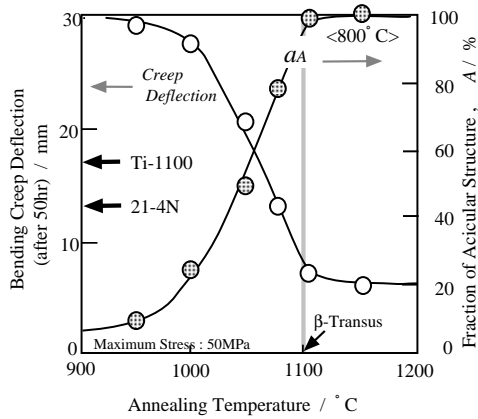


Fig. 3 Change in the creep deflection and the fraction of the acicular structure with annealing temperature.

気バルブ特性として極めて重要な、高温疲労強度に及ぼすTiB粒子の効果は注目に値し、5vol.%TiB程度の複合化で21-4N鋼を凌駕している。

一方、高温クリープ特性は、TiB粒子複合化による向上効果は認められず、粒子量の増加とともに若干低下する傾向を示す。粒子量の増加に伴ってマトリクス

の針状組織が微細化されるとともに等軸化することが、クリープ特性低下の主原因と考えられる。ただし、クリープ特性に及ぼすTiB粒子量の影響は僅かであり、10vol.%TiB材でも、21-4N鋼より優れたクリープ特性を維持している。

室温延性はTiB粒子量によらず、2~3%と、ほぼ一定であるが、高温延性は著しく粒子量の影響を受ける。すなわち、少量の粒子添加で延性が大幅に向上し、3~5vol.%TiBで約12%の最大値を示し、10vol.%TiBでも約10%を維持している。

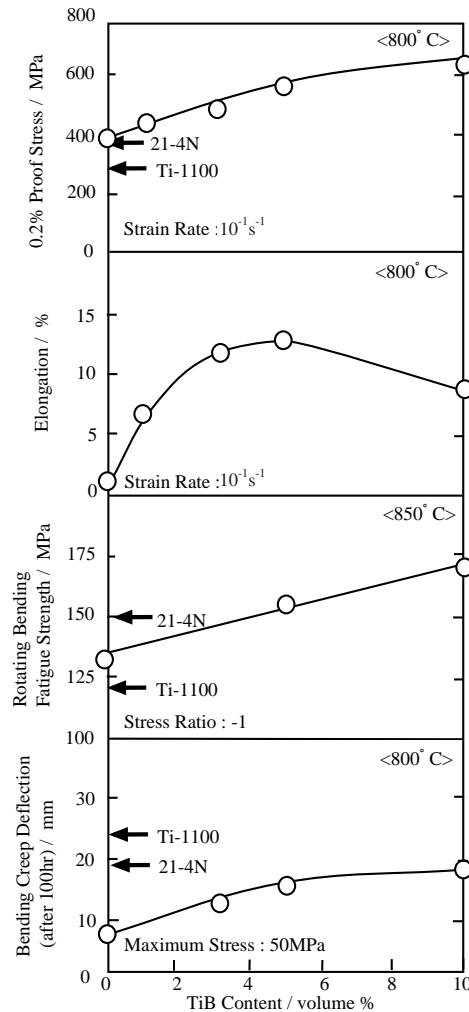
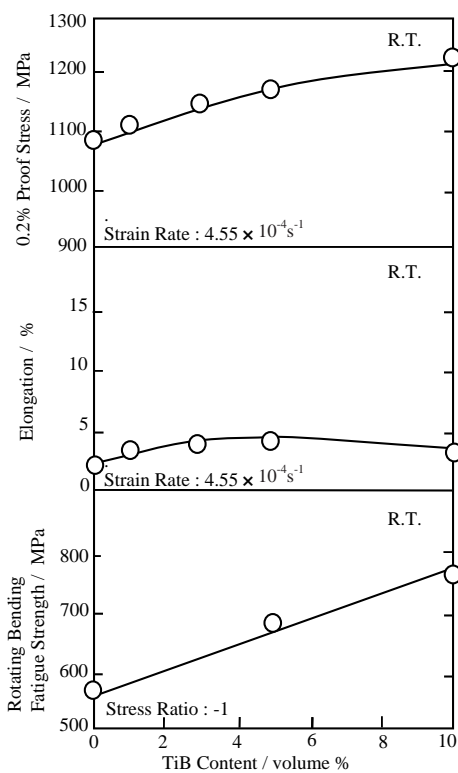


Fig. 4 Change in mechanical properties with TiB content . a) tensile properties and fatigue strength at room temperature and b) tensile properties and bending creep deflection at 800°C and fatigue strength at 850°C in air.

径の粗大化は、高温疲労特性、ならびに高温延性の大幅な低下を招く。したがって、排気バルブとしての、十分な高温クリープ特性と高温疲労特性および延性とを両立させるといった観点から、TiB粒子量を決定しなければならない。

5.2 熱間加工性に及ぼすTiB粒子量の影響

実際のバルブ鍛造温度領域（1200°C）での高速熱間変形能に及ぼすTiB粒子の影響について述べる。バルブ製造温度領域における高速（500%/s）変形時の延性をTiB量で整理すると、Fig. 5のようになる。Fig. 4に示した、800°Cでの低速（10⁻²/s）変形時の伸びと、その傾向はほぼ一致しており、適切なTiB粒子量の添加が熱間加工性を大幅に改善し得ることを示唆している⁶⁾。

Fig. 6は実際のバルブを熱間押し出しで製造した場合のステム部における割れ発生状況を示した結果である。TiB粒子を添加しない場合は、熱間押し出し時にβ粒径が異常に粗大化するため、多数のしわ、ならびに割れが発生する5vol.%TiBを添加したバルブにおいては、割れは一切発生せず、熱間押し出しが良好に行われていることがわかる。

6. 排気エンジンバルブとしての耐久性、信頼性

開発MMCの高温強度特性は現用のバルブ鋼と同等以上であることは前節で示した通りであるが、バルブとして重要な耐摩耗性の確保が不可欠である。チタン製のバルブに対しては、従来はMo溶射をはじめとする、高価な表面処理が不可欠と考えられていた。しかし、本開発では、最終機械加工を行った後に、安価かつ極めて効果的な方法として、高温での大気中酸化処理を採用した。これにより、排気バルブとして十分な、フェイス部の高温耐摩耗性、ステム部ならびに軸端部の耐摺動摩耗特性を確保できた。Fig. 7に実機耐久評価後の各部摩耗量を示す。

チタンバルブとして次に懸念されることは、衝撃強度である。チタン合金は、耐熱鋼に比べて耐酸化性に劣り、高温の燃焼ガスに長時間晒されて、酸化が進む

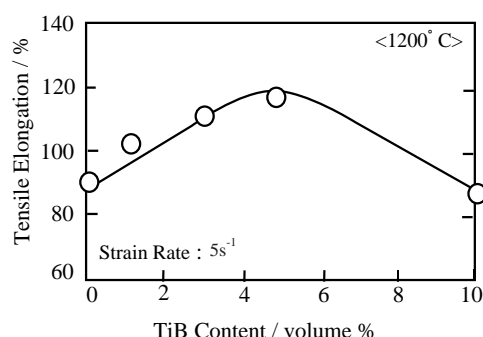


Fig. 5 Change in tensile elongation at 1200°C under strain of 500%/s with TiB content.

と、酸素の固溶量が増加して延性が低下する。高温下では前述の通り、良好な延性・強度を有するので、本研究では、衝撃的な荷重が負荷された場合の室温における耐衝撃特性を信頼性の指標とした。Fig. 8に、過酷な使用環境を想定した高温酸化に対する信頼性評価試験の結果を示す。900°Cで1000hr大気中暴露した後に行った試験でも、バルブが異常運動した際に想定しうる最大衝撃応力に対し、約5倍の衝撃強度を有していた。以上のような、実機耐久評価、信頼性評価試験により、開発チタン基MMC製のエンジンバルブは、十分な信頼性を有していることが確認された。

7. エンジン性能の向上効果

Fig. 9に開発チタン基材料製の吸・排気バルブの外観写真を示す。なお、吸気バルブは、通常のTi-6Al-4V合金を用い、排気バルブと同一工程で製造した。開発エンジンバルブはチタン基エンジンバルブとしては大幅なコストダウンに成功し、1998年10月に市場に投入された。本開発バルブを採用した新型エンジンでは、旧型エンジンに比べ、バルブ質量を40%軽量化、バルブスプリングを16%軽量化できた。その結果、最高回転数が10%向上し、高回転域での騒音を3dB低減した。さらに、フリクション低減によりカム駆動トルクを20%低減し、エンジンの高性能化と低燃費化に貢献した。

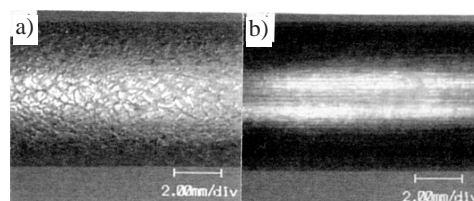


Fig. 6 Comparison of the hot-extruded surface of a) matrix alloy and b) MMC.

Part	In Wear Loss(μ m)		Ex Wear Loss(μ m)	
	5	10	5	10
Valve End	SUH11		21-4N	
	Ti-6Al-4V		Developed MMC	
Valve Stem	[Material]		[Material]	
	[Material]		[Material]	
Face	[Material]		[Material]	
	[Material]		[Material]	

Fig. 7 Result of the engine test.

8. 結言

排気バルブ用焼結耐熱チタン基MMCを開発し、量産車に適用した。主な結果をまとめて以下に示す。

(1) 安価な原料粉末を用いた素粉末混合法を活用した新プロセスにより、高性能かつ低コストな新しい排気バルブ用チタン基MMCを開発した。

(2) 開発チタン基MMCは、TiB粒子の複合化とマトリクス組成、組織の最適化により、室温からバルブ作動温度領域における、あらゆる強度特性において現用排気バルブ鋼を上回る性能を有している。

(3) 開発チタン基MMC排気バルブは、同時開発した焼結Ti-6Al-4V合金製吸気バルブとともに、製造コストにおいて現用のバルブ鋼と対抗できるレベルに到達した。これらのバルブは、各種エンジン耐久試験、信頼性評価試験を全てクリアし、1998年10月、量産バルブとして世界で初めて市場投入された。

(4) 開発チタン基バルブを採用した新型エンジンでは、旧型エンジンに比べ、バルブ質量で40%、バルブ

スプリング質量で16%の軽量化を達成した。その軽量化効果として、最高回転数の10%向上、高回転域での騒音の3dB低減、カムシャフト駆動トルクの20%低減を実現した。

謝辞

本開発は、トヨタ自動車(株)、愛三工業(株)との共同開発ならびに東京焼結金属(株)の協力により実現したもので、関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Yamaguchi, T., et al. : SAE Tech. Paper Ser. No. 2000-01-0905, (2000)
- 2) 斎藤卓, 古田忠彦 : 材料とプロセス, 4(1991),1739
- 3) 古田忠彦, 斎藤卓 : 材料とプロセス, 4(1991),1740
- 4) Saito, T., et al. : Recent Adv. in Titanium Metal Matrix Composite, edited by Froes, F. H. and Storer, J., (1995), 33 ~ 44, TMS
- 5) Saito, T., et al. : Mater. Sci. and Eng., A243(1998), 273 ~ 278
(2000年10月26日原稿受付)

著者紹介

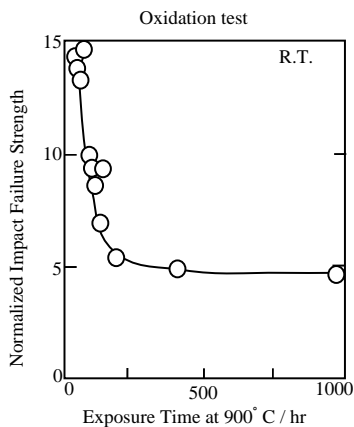


Fig. 8 Reliability evaluation by impact strength measurement at room temperature, showing high temperature oxidation test in air.



Fig. 9 The developed intake (left) and exhaust valves (right).



古田忠彦 Tadahiko Furuta

生年：1961年。

所属：金属加工研究室。

分野：Ti合金，Ti基MMC，粉末冶金（金属材料の合金設計・開発）。

学会等：日本金属学会，日本鉄鋼協会会員。

1995年度日本金属学会技術開発賞受賞。

1996年度R&D100選受賞。

1999年度日本材料学会技術賞受賞。

2000年度日本粉末冶金工業会新製品賞受賞。



斎藤卓 Takashi Saito

生年：1950年。

所属：材料1部。

分野：Ti合金，粉末冶金，合金設計

学会等：日本金属学会，日本鉄鋼協会，英国 Institute Materials 会員。

1994, 1995, 1996, 1998年度日本金属学会技術開発賞受賞。

1996年, 1998年度R&D100選受賞。

1999年度日本材料学会技術賞受賞。

2000年度日本粉末冶金工業会新製品賞受賞。

2000年度日本チタン協会技術賞受賞。

工学博士。



山口登士也 Toshiya Yamaguchi

生年：1965年。

所属：トヨタ自動車(株)

分野：粉末冶金材料及びプロセスの開発。

学会等：1995年度日本金属学会技術開発賞受賞。

1996年度日本粉末冶金工業会賞受賞。

1998年度日本材料学会技術賞受賞。

2000年度日本粉末冶金工業会新製品賞受賞。