

二輪車用軽量チタンコンロッド

Development of Titanium Connecting Rod for Mass-produced Motorcycles

萩原 好敏* 高橋 恭* 村上 敦*

Yoshitoshi Hagiwara Kyo Takahashi Atsushi Murakami

丸井 勇治*

Yuji Marui

要 旨

軽くて強いチタン材料は内燃機関の性能向上につながるため、二輪車でも早くからレース用部品に利用されていた。エンジン部品では出力向上を目的として、コネクティングロッド (以後コンロッドと略す。)、バルブ、バルブスプリングリテーナーなどがチタン材料に置きかわっている。

現在、レース用部品に使われているチタン合金とその表面処理は、航空機を対象とした仕様の為価格が高く、比較的成本制約の少ないレーサーでも使用は限られており、量産車への適用は更に困難な課題となっていた。

そこで、廉価なチタン材料と表面処理の開発を行い、二輪車へのチタン部品の適用拡大を図った。

その結果、二輪レーサー用としてチタン製のキット部品の商品化を足掛かりに、1987年には量産市販車 (VFR750R) として初めてチタン製コンロッドの適用を図ることができた。

本報では、そのチタンコンロッドの内容について材料、処理を中心に述べる。

ABSTRACT

As a material which is lightweight and rigid enough to improve performance of the engines, titanium has long been used in racing motorcycles. Among other components, the connecting rods, valves and valve spring retainers have been fabricated out of titanium alloy to boost output power.

Because the material specification and surface treatment process is originally based on the aerospace application, cost becomes so prohibitive when used in the racing motorcycles that the application become limited. Its extended use in mass-produced motorcycles was a further difficult challenge.

This paper outlines the development of a new titanium surface treatment and alloy specification for use first in racing motorcycle option components. Since then it has been applied to the connecting rod of a mass-produced motorcycle VFR 750R, in 1987.

1. ま え が き

近年、二輪車のエンジンは高回転、高出力化が進められており、往復運動部品であるコンロッドの軽量化は重要な課題である。そのためコンロッドの材料は炭素鋼から非調質鋼へ、更には浸炭鋼へと変更する事により軽量化が図られて来た。表1に示すように鉄系材料での重量軽減は浸炭鋼で

限界にあり、それ以上の軽量化にはアルミニウム合金やチタン合金への置換が必要となる。中でもチタン合金は軽量化効果が大きく、材料の信頼性も高いことから以前よりレーサー等では使用されてきた。¹⁾²⁾ しかし、量産車への適用は、製造コストが高く困難とされていた。³⁾⁴⁾ その理由のひとつとして、現在使われているチタン合金と

* 朝霞研究所

表 1 材料別コンロッド理論軽量化率

Material (Treatment)	Carbon steel S48C (as forged)	Carbon steel S35VC (non-refining)	Alloy steel SCM420 (carburizing)	Aluminum alloy Powder Metal (T6)	Titanium alloy Ti-6Al4V (annealing)
Specific gravity (gr/cm ³)	7.85	7.85	7.85	2.80	4.43
Young's modulus (MPa)	206000	206000	206000	78500	113800
Tensile strength (MPa)	617	687	1275	334	1138
Proof strength (MPa)	431	481	785	221	804
Endurance limit (MPa)	303	344	785	196	540
Light-weight ratio	±0	7.0	19.7	38.6	44.8

表面処理は、航空機を対象とした仕様のため、高品質ではあるがコストが高いことがあげられる。そこで筆者らは、陸上内燃機関用としてチタン合金の見直しを行った。その結果、廉価な自動車用チタン合金 (Ti-6Al) を開発し、1986 年 (株) ホンダレーシングより販売のレース用キット部品 (コンロッド、インレットバルブ、バルブスプリングリテーナー) に適用した。さらにチタン材料の安価な表面処理 [OD 処理 (Oxygen Diffusion treatment) と名づけた] を開発し、チタン部品の大幅なコスト低限を可能とし、1987 年 9 月量販二輪車 (VFR750R) で初めてチタンコンロッドが採用された。^{5) 6)}

2. 開発の狙い

チタンコンロッドの開発に当たり以下を狙いとした。

(1) 軽量化

従来の浸炭鋼コンロッドに対し、15% 以上の重量軽減と十分な耐久信頼性の維持を図ること。

(2) 低コスト化

廉価なチタン材料と表面処理 (OD 処理) の開発及びチタン部品の製造技術の確立により量販可能なコストを目標とする。

(3) チタン部品製造体制の確立

鍛造と機械加工での生産技術を確立し、量産化

により低コスト化を図れる製造体制を作る。

(4) チタン化進展の端緒

エンジン部品のチタン化推進の足掛かりとし、チタン材料採用の端緒とする。

3. 材 料

3.1. 自動車用チタン合金

自動車用チタン合金の開発は、強度確保と低コスト化とを目標に大同特殊鋼 (株) と共同で開発を進めた。表 2 に各種チタン合金の機械的性質を掲げる。これによれば、15% の重量軽減を達成するには引張強さ 90kg/mm^2 (882MPa) 以上を必要とする。また、低廉価のためにはスクラップ材の入手が容易な事が必要であり、Ti-6Al4V 合金を主要成分として選んだ。

材料価格の高い理由のひとつは、高価な原材料を用い、溶解を真空溶材解法によって製造していることが挙げられる。そこでプラズマ積層凝固炉 (PPCF) を用い、スクラップ材の再使用を可能とするとともに、溶解回数も短縮した。これにより、従来法に比べ廉価な自動車用チタン合金を開発できた。^{7) 8)}

表 3 に開発材料の製造法と主な仕様を示す。主要成分の 6% Al、4% V は Ti-6Al4V と同様であるが、酸素、鉄等の不純物元素を従来仕様より高めに許容しているのが特徴である。

表2 各種チタン合金の機械的性質

Type	Material	Heat treatment	Tensile strenght	Proof strength	Elongation	Reduction of Area
α	CPTi (ST-50)	Ann.	441	294	35	—
near α	Ti-8Al1Mo1V	Ann.	1000	952	15	28
	Ti-6Al2Sn4Zr2Mo	Ann. STA	971 1275	893 1138	15 11	35 20
$\alpha + \beta$	Ti-3Al2.5V	Ann.	687	589	20	—
	Ti-6Al4V	Ann. STA	981 1167	912 1099	14 10	35 25
	Ti-6Al6V2Sn	Ann. STA	1059 1275	1001 1167	14 10	30 20
β	Ti-13V11Cr3Al	STA	1324	1226	8	—
	Beta C (Ti-3Al8V6Cr4Mo4Zr)	STA	1440	1372	7	—
	Ti-15V3Cr3Sn3Al	STA	1275	1158	10	—
	Ti-22V4Al	ST STA	735 1372	686 1323	22 5	65 10

Ann.: Annealing STA: Solution treatment+aging ST: Solution treatment

表3 自動車用チタン合金の内容

()は従来仕様

Symbol of Material	Ti-64A (Ti-6Al-4V)							
COMPOSITION (Standard)	C ≤ 0.20 (0.10)	Al 5.50 { 6.75	V 3.50 { 4.60	Fe ≤ 0.40 (0.30)	O ≤ 0.25 (0.20)	N ≤ 0.05	H ≤ 0.015 (0.0125)	Ti Remainder
STRENGTH	Tensile Strength ≥896MPa		0.2% Pfoof Strength ≥827MPa		Elongation ≥10%	Reduction of area ≥25%		Charpy impact value ≥491J/cm ²
Method of Production	sponge Ti, parent alloy scrap				sponge Ti parent alloy			
	melting in PPFC				compact forming electrode forming by welding Melting in VAR (primary)			
	melting in VAR				Melting in VAR (secondary)			
	ingot							
	processing in to malleated material							

3.2. 材料強度試験結果

開発材 (Ti-64A) の実験値と従来材 (Ti-6Al4V) の機械的性質を図1に、疲労強度の比較を図2に示す。引張強さと耐力、疲労強度は従来材より高く、伸び、絞りはやや低くなっている。これは酸素量を高めた影響であるが衝撃

値低下への影響はなく、靱性上の問題もない。

4. 表面処理

4.1. チタンの表面処理

チタンは、チタン同士あるいは異種材との組み合わせの何れでも、金属面のままでは活性で極め

て焼付易い性質がある。そのため、チタン部品の摺動面には、焼付防止の表面処理を必要とする。従来あるチタンコンロッドでは、クランクシャフトあるいはコンロッド同士の接触する大端サイド面にはモリブデン溶射を、ピストンピンと摺動する小端の内径には銅のブッシュを圧入し対処しているが、これらの生産性は悪く、コストアップの要因となっており適切な表面処理の開発を必要とした。この為、筆者らは窒化、メッキ、溶射、酸化等チタンの表面処理について調査検討を加えた。その結果、クロムメッキ処理は耐摩耗性に優れるので以前は使用されていたが、処理液の公害問題があるので量産での採用には難がある。そして、現在最も良く用いられているモリブデン溶射は耐摩耗耐焼付性に優れているが高コストと、剥離等の品質安定に問題がある。次に 800℃ 以上の高温

窒素ガス中の加熱処理で得られる窒化層は硬く耐摩耗性に優れるが、疲労強度が平滑試験片で 44% も低下し (図 2)、又膨張等による寸法変化が大きい問題もありコンロッドの表面処理としては適当でない。

そこで、大気中の低温加熱で得られる酸化処理に着目し、その可能性について検討した。

4.2. チタン合金の OD 処理

チタンは大気中で加熱すると 350℃ 付近から酸化し、低温では酸素含有量の少ない酸化物を、高温 (約 600℃ 以上) では TiO_2 が形成され、被膜厚さは温度と時間に応じて変化する。加熱温度

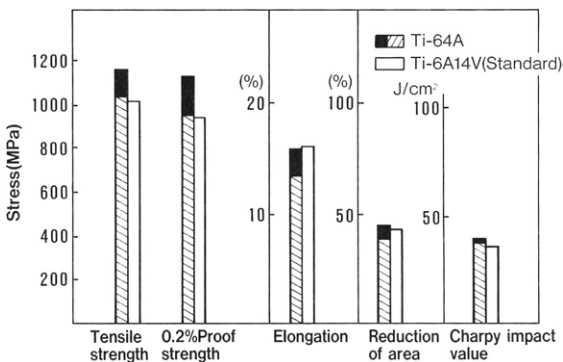


図 1 自動車用チタン合金の機械的性質

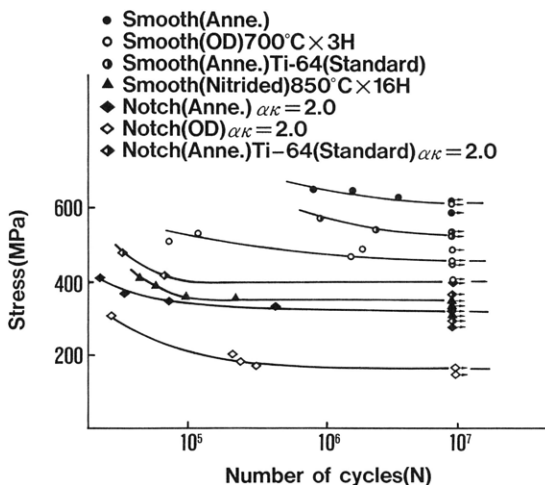


図 2 自動車用チタン合金の回転曲げ疲れ強さ

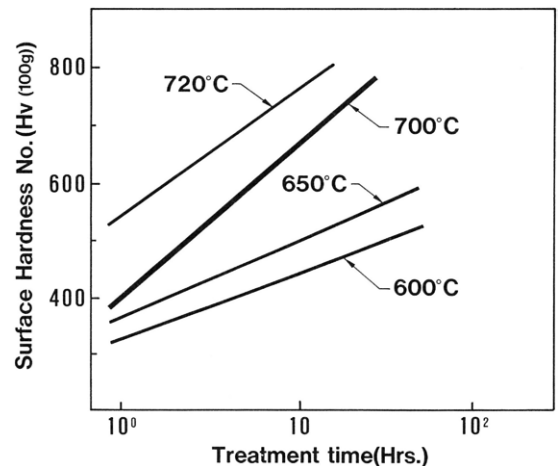


図 3 チタン合金の OD 層特性

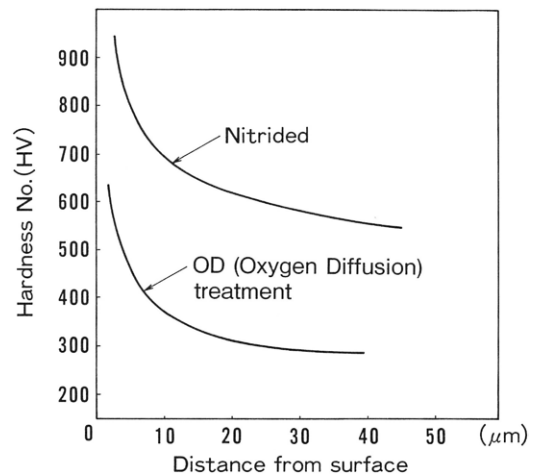


図 4 表面処理した合金の断面硬さ分布

と時間による表面硬さの変化を図3に、断面硬さ勾配を図4に示す。耐摩耗上表面硬さはHV500以上必要で、処理温度は650℃以上が望ましい。

歪みの傾向については酸化加熱時の寸法変化を調べた。(図5) テスト方法は100mmのスペンで二点保持した8.2φのチタン合金棒を炉中で16Hr加熱冷却し、曲がり測定した。素材の前組織が粒状 $\alpha + \beta$ 組織の場合、曲がり加熱温度900~950℃で最も大きくなり、これより高温では再び小さくなる。これはこの温度域がTi-6Al4V合金の超塑性温度域であり、自重による塑性変形が主原因である。超塑性は結晶粒径が10ミクロン以下と微細なことが必要条件であり、加熱温度が

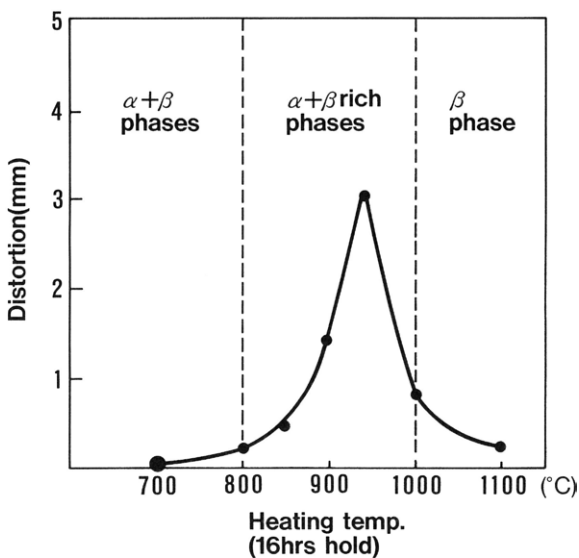


図5 チタン合金の加熱温度による寸法変化

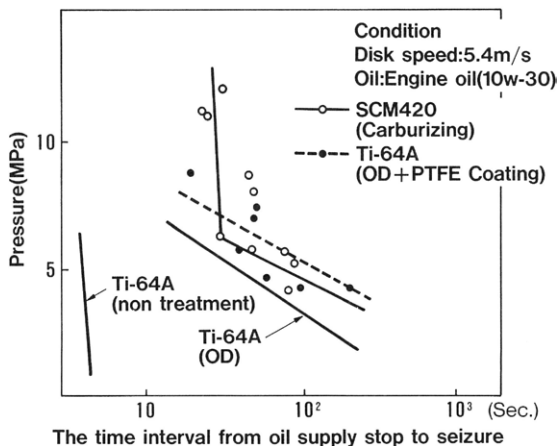


図6 チタン合金の焼付試験結果

1000℃付近の β 変態点を越えると結晶粒径が急に大きくなるため曲がり小さくなる。従って、750℃以上の温度では歪みが問題となり、650℃以下では酸化に長時間を要するので処理温度は700~720℃が適正であった。

4.3. 焼付摩耗特性

実際のエンジンではコンロッド同士やクランクシャフトとの摩擦があり耐焼付かじり性は重要である。そこで、焼付かじり性への表面処理の効果についていくつかの摩擦摩耗試験を行った。チップオンディスクタイプの摩擦摩耗テスターでは、回転円盤に接触面積100mm²で試片を押しあて、オイルカットから焼付きまでの時間を測定し、焼付き性を評価した。チタン合金同士、浸炭鋼同士の評価結果を図6に示す。焼付き易いチタン合金同士でも、樹脂コーティング(弗素樹脂をOD層上にスプレー塗布し、180℃で焼き付けた8~18ミクロンの樹脂層)と組み合わせたOD層により浸炭鋼同士と同じレベルにまで改善される。図7はコンロッドの小端内径部のピストンピンとの摩擦を想定し、一定面圧で連続摩擦中の摩擦係数の変化を測定し、かじり性を調べた結果である。浸炭鋼同士に比べ、酸化処理したチタンと浸炭鋼の組み合わせの方が摩擦係数の変化が少なく、かじりの少ないことを示している。以上は面接触状態での結果であるが、実際のコンロッドではむしろ片当りの線接触状態の方が問題になり、それを想定したテスト結果を図8に掲げる。コンロッド小端

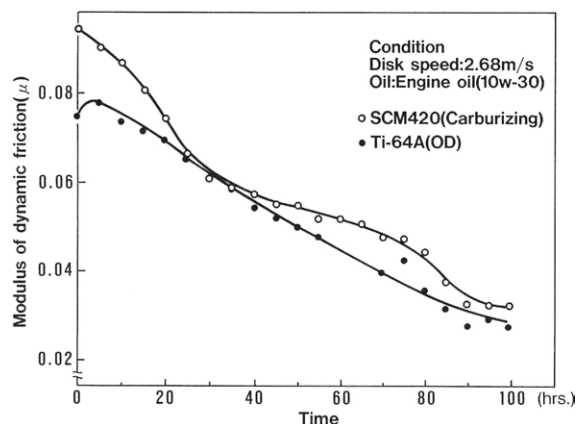


図7 チタン合金の摩擦試験結果

のピストンピンとの倒れによる片当たり (図8-a)、及び大端サイドのはぐみによる片当たり (図8-b, c) について連続摺動中のかじり発生限界荷重、時間 (図8-c) を求めた。小端側では正常接触、片当たり接触共に OD 処理のみで浸炭鋼同士よりやや高い限界荷重が得られた。大端サイド同士の結果は図8-b に示すように、OD 処理のみでは浸炭鋼同士より限界面圧は低下するが、樹脂コーティングを OD 層上に付加すると大幅に耐かじり性が改善される結果を得た。

4.4. 疲れ強さ

表面処理を施したチタン合金の疲れ試験の結果は図2 で示した様に、OD 処理を施したチタン合金の静的な機械的性質に変化はないが、疲れ強さは平滑試験片で 26%、切欠片 ($\alpha = 2.0$) では 50%

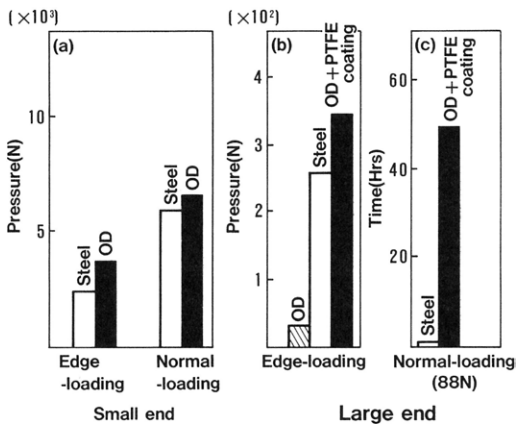


図8 コンロッドかじり試験結果

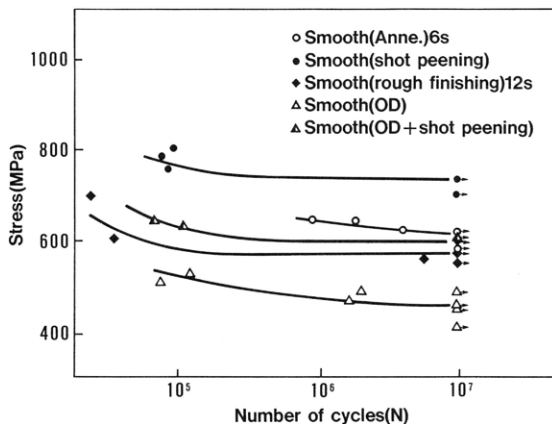


図9 加工アラサ ショットピーニングによる疲れ強さの変化

も低下する。これは、硬くて脆い表面の酸化層に発生した亀裂が母材表面へ切欠効果をあたえるものとする。

チタン合金の切欠感受性は素材のままでも高く、窒化や酸化などの表面処理によって更に倍以上にも高くなる。コンロッド強度上の配慮として、加工粗さに注意したり大端のボルト座 R 部のような高応力の発生する部位では、OD 層を加工で除去し、あるいはショットピーニングを施行し、疲れ強さの回復を計る必要がある。図9 に疲れ強さにおよぼす粗さの影響、ショットピーニングの効果を掲げる。

5. チタンコンロッドの概要

5.1. 構造

開発したチタンコンロッドの構造を図10 に製造工程を図11 に示す。材料は開発した自動車用の低コストなチタン合金 (Ti-64A) を採用した。

耐摩耗表面処理としては、大端スラスト部に OD 処理と樹脂コート、小端内径には OD 処理を採用し、大端部のモリブデン溶射と小端のプッシングとを廃止した。

5.2. 鍛造

特徴は熱間鍛造の一回加熱である。チタン合金は加熱冷却の繰り返し鍛造を何回も行うと強度低下を引き起こすので、最少の加熱回数で鍛造する必要がある。鍛造温度は $\alpha + \beta$ の特性を失わず鍛

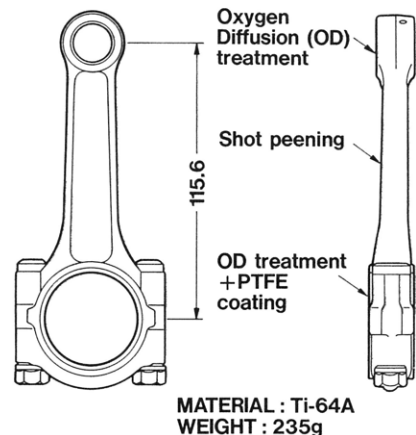


図10 チタンコンロッドの構造

造可能な温度を選定すると、ベータ変態点直下で行うのが良く、その為に鍛造温度は 970℃ に設定した。さらにチタン合金はスプリングバックが大きいので、歪み矯正はトリミング直後に熱間コイニングにより行っている。そして、後工程の OD 処理時に生じる歪みを減少させるため、715℃ で焼鈍を鍛造後に取り入れた。

5.3. 加工

難切削性のチタンの加工は課題の一つであった。

機械加工は量産自動車部品としては全く加工実績がないため、当初はクランプ法や工具の選定等の問題もあった。しかし、加工法での種々の工夫や経験の積み重ねにより大きな問題は解決していくことができた。例えば、チタン合金は非磁性であるためクランプ方法が従来と異なる。そのため、クサビ型の治具による固定とエアー吸引での浮き上がり防止にてワークのクランプを行った。又熱伝導が悪いため、加工時に熱がこもり切削抵抗が上がる為、特に穴加工では問題となった。これにはドリル先端を 2 段角にする工夫が有効であった。鍛造工程においても熱間鍛造の際の酸化した表面硬化層は、工具寿命に大きく影響するので鍛造酸化を極力抑える事も重要である。

5.4. コンロッド単体強度評価

実際のコンロッドでの引張圧縮耐久試験結果を

表 4 主なコンロッドの重量・コスト (比)

CONNECTING ROD SPECIFICATION (Material Treatment)		Weight Ratio	Cost Ratio
Carbon Steel S35VC Non-refining		1.00	1.0
Alloy Steel SCM415H Carburizing		0.85	1.2
Titanium Alloy	Ti-6Al4V (Aircraft use) Annealing Mo coating + Cu bushing	0.71	45.0
DEVELOPMENT SPECIFICATION			
Titanium Alloy	Ti-6Al4V (Automotive use) Annealing OD treatment + Resin coating	0.70	7.0

図 12 に示す。竿部の耐久限度としては、おおよそ応力振巾 (σa) = 22 kg/mm² (216 MPa), 平均応力 (σm) = 0 であり、炭素鋼コンロッドとほぼ同じレベルの耐久限度線図である。コンロッドが強度要素のみであれば、チタン合金は比強度が高いため、比重分の約 40% の軽量化が可能である (表 1)。しかし、実際の使用応力域は圧縮応力側であるため、座屈強度を含む剛性要素やボルト、ナットの鉄部品の使用により実際の軽量化率は理論計算値に比べ低下している。⁹⁾

5.5. 実機評価

エンジン性能評価において、チタンコンロッドの効果は、種々の耐久試験において従来の鉄コンロッドと同等以上の強度レベルでかつフリクション低減で約 2 馬力の優位差があった (V 型 4 気筒 750ccENG)。

重量とコストの結果を表 4 に示す。

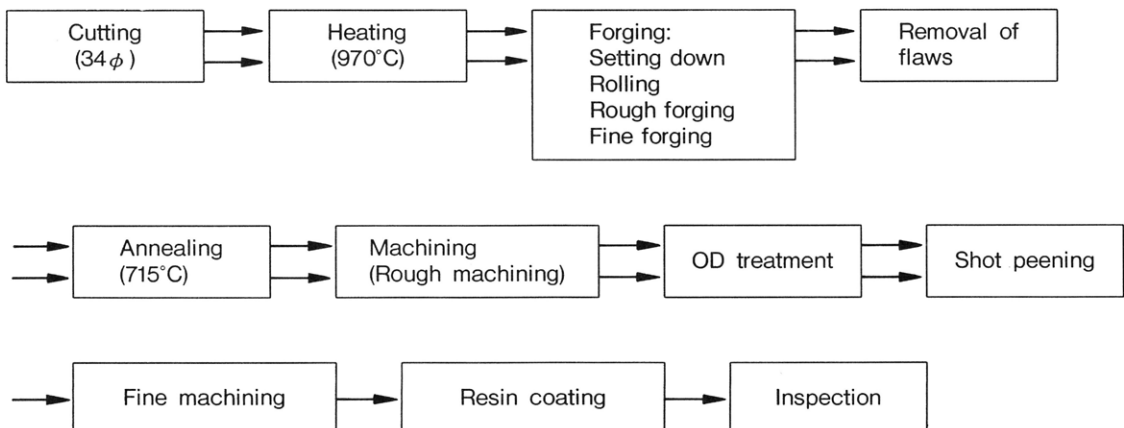


図 11 チタンコンロッドの製造工程

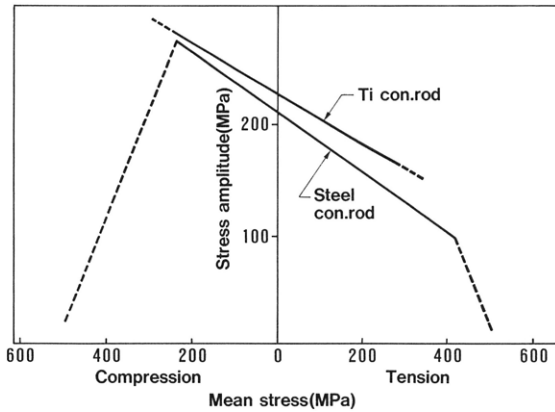


図 12 コンロッドの耐久限度線図

コストは従来のチタンコンロッドに比べると約 1/6 に大幅低減しているが、量産品 (浸炭鋼) に対しては約 6 倍と未だ高価である。重量は 17% 減 (対浸炭鋼) と目標を達成することができた。

6. ま と め

コスト低減と生産技術の確立とにより、量販二輪車用の軽量チタンコンロッドを開発できた。その内容をまとめると以下のことが言える。

- (1) スクラップ材利用による廉価なチタン合金 (Ti-64A) は苛酷な使用条件のコンロッド素材として問題がなく、自動車用として十分使用できる材料である。
- (2) チタン材への OD 処理 (酸化処理) は、その弱点を補い利用すると、廉価で簡便な耐摩耗処理である。
- (3) 鍛造では酸化と歪の防止が重要なポイントである。
- (4) 機械加工では非磁性体のクランプ法、難削材に対する加工条件と精度が大切なポイントである。

7. あとがき

以上、二輪車にて量産化したチタンコンロッドの開発について述べた。本コンロッドを搭載した VFR750R は国内を初めとして、ヨーロッパには 2 年以上も発売され、更に 1990 年初めより北米にも輸出されている。そしてレースユーザーはレース用として量産コンロッドをそのまま使用しても問題なく過酷な使用での信頼性も高く評価さ

れている。他社の二輪車でも 1989 年には同様のチタンコンロッド (表面処理は TiN イオンプレーティング) の量産化がみられ、また秋には β 型チタン合金に酸化処理を施した、バルブスプリングリテーナーを採用した乗用車の発表があり、エンジン部品のチタン化は徐々に動き出している。

そして、エンジンの往復運動部の軽量化は性能向上のみでなく燃費向上にも重要なテーマであり、そのなかでチタン部品の果たす役割は今後益々大きくなると予測される。

そのためにもコスト低減の努力は一層重要であり、材料と加工にはその可能性が未だ十分残されていると考える。その意味でも今回採用した酸化処理は従来の表面処理に比べ大幅に低廉であることから今後も耐摩耗処理として自動車部品のチタン化推進の一助になることを期待する。

最後に、チタンコンロッドの開発と量産化にあたり御協力頂いた大同特殊鋼(株)、(株)三條機械製作所、その他多くの関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 萩原, 高橋; 二輪レーサーとチタン材料, チタニウム・ジルコニウム, vol. 35 (1987) No.2, P2
- (2) 徳田; 神戸製鋼技法, vol.18 (1986) No.4, P36
- (3) A. M. Sherman; Potential for automotive application of titanium alloys, SAE paper, 860608
- (4) P. Jette; Titanium for energy and industrial applications, The metallurgical society of AIME, (1981), P199
- (5) 萩原, 高橋; 自動車用軽量チタンコンロッドの開発, 自動車技術, vol. 42 (1988) No.9, P1216
- (6) Hagiwara, Takahashi; Development of surface treatment and application to Mass-Production of Titanium Connecting Rods, SAE paper, 891769
- (7) 加藤; チタニウム, ジルコニウム, Vol. 32 (1984) No.2, P94

- (8) 山田; プラズマアーク炉によるチタンの溶解,
電気製鋼, Vol. 54 (1983) No.1, P53
- (9) K. Groth; Konstruktion, Vol. 121 (1969) No.19,
P381

■著 者■



萩原 好 敏



高 橋 恭



村 上 敦



丸 井 勇 治