

快削チタン合金コネクティングロッドの開発

Development of Free Machining Titanium Alloy for Connecting Rods

松原 敏彦*
Toshihiko Matsubara

佐藤 泰紀*
Yasunori Sato

木村 健二*
Kenji Kimura

川瀬 直和*
Naokazu Kawase

伊藤 茂*
Sigeru Ito

要 旨

ニュースポーツカー「ホンダNSX」に搭載した3.0ℓV型-6気筒エンジンのコネクティングロッドに新しく開発したチタン合金材料を適用し、四輪車で初めて量産化を実現した。

チタン合金材料の実用化にあたり、快削チタン合金技術・ β 相域高温制御加熱プレス鍛造技術・表面硬化技術を確立し、容易にチタン合金コネクティングロッドの製造が可能となり、安定した製品品質が得られるようになった。

またチタン合金の適用により、鋼製コネクティングロッドに対し、30%の軽量化が図られ、これによりエンジンの高回転・高出力化とエンジン騒音の低減に寄与した。

ABSTRACT

A new titanium alloy was developed for use in the connecting rod of the V-6 3-litre engine of the NSX. The application of such material is unprecedented in automobile production.

In order to realize its use in production, various technologies were investigated. Among the techniques established were those for free cutting titanium alloy, β -phase high-temperature control, press forging and surface hardening. All of these techniques combine to make the production of a titanium-alloy connecting rod more feasible than before, with more stable production quality.

Another advantage of this titanium alloy connecting rod is a 30% savings in weight as compared with an equivalent one made of steel, thus contributing to an increase in the speed and power of the engine and a reduction of engine noise.

1. ま え が き

自動車部品の軽量化は、出力性能向上・省燃費の要求から、構成材料の特性改善あるいは軽量材料の適用が精力的に展開されている。特に軽量金属材料としては、アルミニウム（アルミ）合金の適用拡大は著しいものがある。一方、チタン合金は高い比強度特性を生かし、エンジン部品への適用が検討されている。しかし高原材料費、難機械加工性、二次加工がしづらい、適当な表面硬化法がない等の問題から、レーシングエンジン部品等の特殊な用途を除いては、量産部品への適用例はごく一部にとどまっている。⁽¹⁾

今回、当社でニュースポーツカー「NSX」を

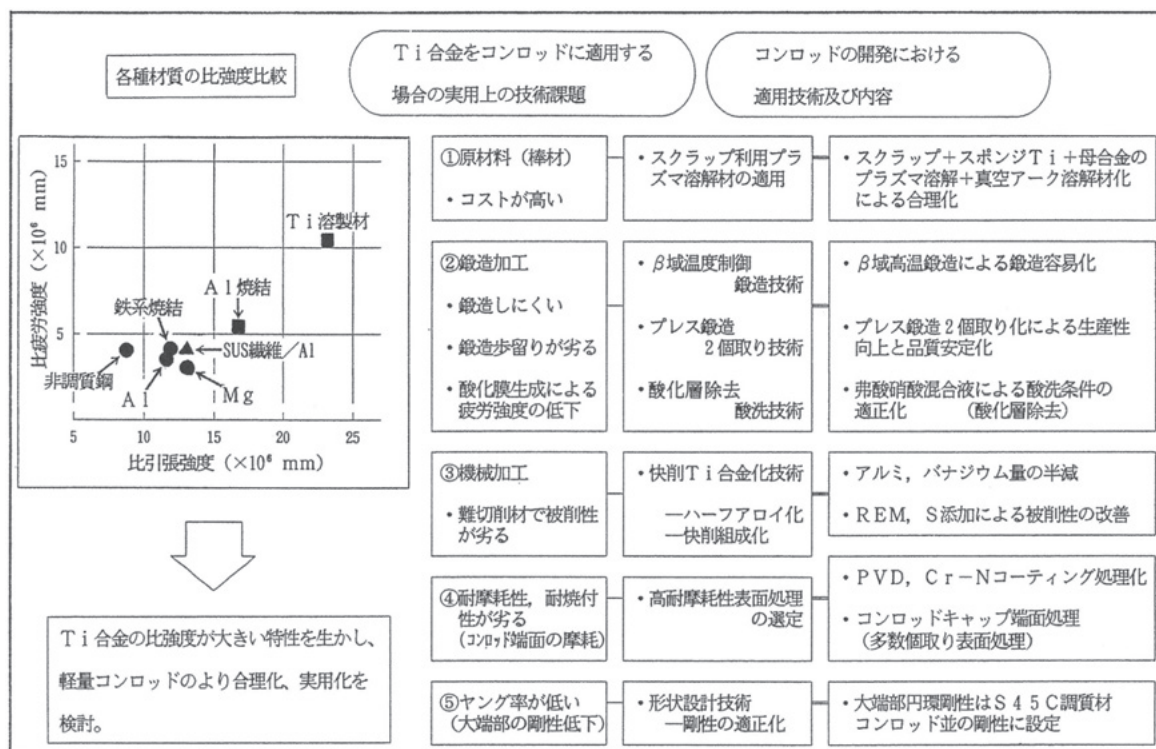
上市した。搭載しているエンジンは、新開発した3.0ℓ、V型-6気筒で、280ps/7300rpmの高回転・高出力性能が得られている。⁽²⁾

著者らは、従来からチタン合金の自動車部品への適用化を検討してきたが、新エンジン開発に合わせ、高回転・高出力化技術の一つとして、快削チタン合金コネクティングロッドを開発し、四輪車では初めて量産化を実現した。⁽³⁾

本稿では、この開発した快削チタン合金コネクティングロッドの量産化技術について、その概要を紹介する。

* 栃木研究所

表1 チタンコネクティングロッドの実用化に対する適用技術



2. 開発の狙い

コネクティングロッド(以下コンロッドと略称する)は高回転・高負荷状態で使用されるため、強度・剛性・耐久性に対し高い特性と信頼性が要求される。このため、安定した材料品質・鍛造品質・加工精度の維持が必要となる。通常は、安定した特性および品質が得られ、コストが安い中炭素鋼ベースの調質材あるいは非調質鋼が使用されている。

チタン合金を適用し、目標品質を満たして多量生産を行う場合には、チタン合金特有の特性である鍛造性の改善、難加工性の改善、表面処理による耐摩耗性の改善が必須である。また、これらの改善を行って得られる目標とした品質の製品を、容易にかつ合理的に生産流動させる必要がある。このため、開発はこれらの技術改善を基本にし、生産技術を鋼製コンロッドの製造技術レベルにより近づけ、目標とした品質が維持可能となり、合理的設計にあった軽量チタン合金コンロッド技術を完成させることを狙いとした。

表1にチタン合金をコンロッドに適用し、実用

化を図る上での懸案項目とその開発対応技術を示した。以下主要開発技術である下記の項目について報告する。

- ・快削チタン合金材料技術
- ・β域高温加熱鍛造技術
- ・酸化層除去技術
- ・高特性表面処理技術

3. チタン合金コネクティングロッド実用化のための基本技術

3.1. 快削チタン合金材料の開発

従来、コンロッド材料はS45C調質(HRC20~30)相当材が使用されている。開発には、この実績のあるS45C調質材と同等以上の強度特性があり、また、可能なかぎり調質鋼の切削性に近づけることを主眼に材料開発を行った。

開発の着眼は、

- ・一般にレース用のコンロッドは、比強度の高いTi-6Al-4V材が使用されているが切削性が劣る。
- ・純チタンは、チタン合金より切削性は優れてい

表2 試験したチタン合金の化学成分範囲 (wt%)

Grade	Al	V	C	Fe	O	N	S	REM	Ti
Free machining	0 ~6.6	0 ~4.1	0.008 ~0.03	0.03 ~0.26	0.12 ~0.20	0.004 ~0.018	0.07 ~0.23	0.29 ~1.3	Bal.
Conventional	0 ~6.1	0 ~4.1	0.009 ~0.02	0.04 ~0.20	0.14 ~0.18	0.005 ~0.018	—	—	Bal.

るが比強度特性が低い。

- 自動車部品用特殊鋼は、通常、多量生産性をあげる目的でCa・S・Pb等を添加した快削鋼の適用を行っている。

この事実から、被削性の改善に対して低合金化及び快削性化の可能性を検討した。その結果、低合金化技術とサルファ(S)及びレアアースメタル(REM)添加による介在物の分散技術の組み合わせが有効であることを見いだした。⁽⁴⁾

以下この開発材について述べる。表2に検討した開発快削材と非快削材の組成範囲を示す。検討にあたって、AlとVの比を6:4の一定とし、被削性改善のためにSとREMを添加した。REMはCe=47%とLa=27%のミッシュメタルを使用し、REMとSの添加比率は、先行検討の結果被削性の改善効果が主にREM₃S₄によることから原子%で3:4とした。

図1に、引張強さ及び0.2%耐力とAl添加量(Al:V比率6:4一定)の関係を、快削チタン材と非快削チタン材について比較した結果を示

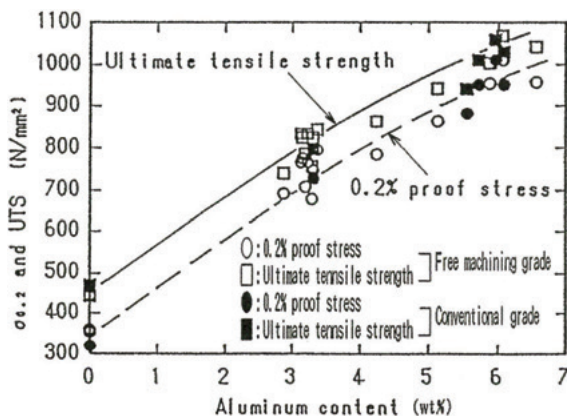


図1 引張強さ及び0.2%耐力に対するAl含有量の影響

す。この結果から、快削チタン材と非快削チタン材の引張強さ・0.2%耐力の特性差は少なく、またS45C調質材の引張強さ・0.2%耐力は約800N/mm²・600N/mm²であり、このレベルはチタン合金のAlミ含有量約3.0%(V=2.0%)に相当する。

図2に、快削チタン材と非快削チタン材の回転曲げ疲労強度と0.2%耐力の関係を示す。快削チタン材の疲労強度は、0.2%耐力約800N/mm²以上でサチュレートする。この快削チタン材の800N/mm²レベルとは、図1の関係より、Al含有量4%に相当し、これ以上のAl含有量域では、非快削チタン材より疲労強度は低下する。これは、快削元素の添加による介在物の影響と考えられる。

一方、S45C調質材の疲労強度は、約430N/mm²であり、快削チタン材のこの疲労強度レベルは、0.2%耐力約650N/mm²、Al含有量27%に相当し、これ以上のAlおよびV添加量レベルではS45C調質材と同等以上の疲労強度が得られる。このため、Ti-3Al-2V(ハーフアロイ)を基本合金系として設定した。

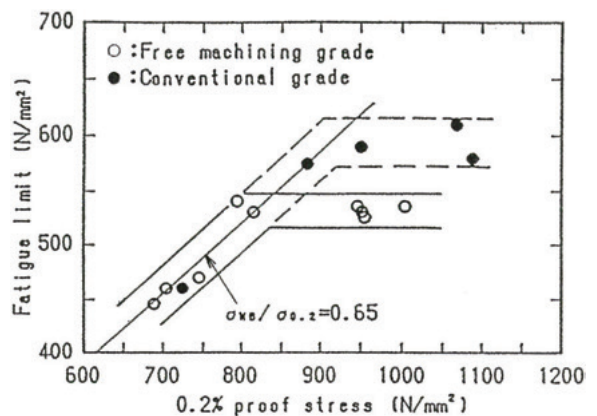


図2 0.2%耐力と回転曲げ疲労強度の関係

表3 ドリル切削性試験条件

Tool	Co-HSS(M36 eq.), 5mm dia.
Feed	0.07mm/rev
Depth of hole	15mm (blind hole)
Speed	Varied
Cutting fluid	Water insoluble oil
Tool life criterion	Tool failure

コンロッドの機械加工を行う上で、ドリル加工性・ターニング加工性は重要であることから、両加工法について快削チタン材と非快削チタン材の切削性の比較検討を行った。

表3にドリル加工条件を示す。

図3は表3の加工条件に於ける工具寿命 1000 mm 時の切削速度と Al 含有量の関係を示す。非快削チタン材のドリル加工性は Al (V) の含有量の減少に伴い改善される傾向を示し、Ti-3Al-2V 材 (ハーフアロイ) は、Ti-6Al-4V 材の約 2 倍程度、切削速度が向上する。また快削チタン材は、非快削チタン材に対し、さらに約 70% の向上があり、S + REM の添加と Al・V の添加量を半減させた Ti-3Al-2V 材にすることにより、通常使用されている Ti-6Al-4V 材に対しドリル加工性は 3 倍以上改善される。

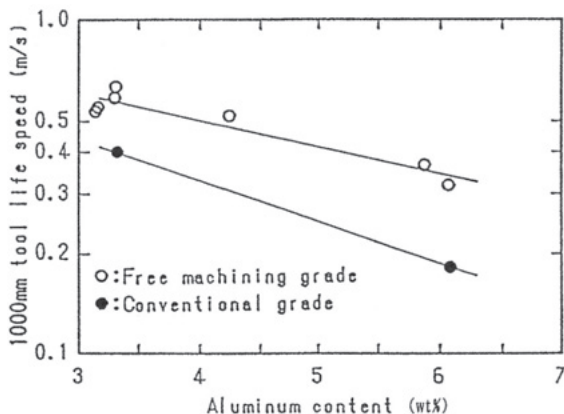


図3 ドリル加工の工具寿命 1000mm 時の切削速度に及ぼすアルミ含有量の影響

表4 ターニング加工試験条件

Tool	Carbide K10, (5, 5, 6, 6, 30, 0, 0.4)
Feed	0.15mm/rev
Depth of hole	1.5mm
Speed	1m/s
Cutting fluid	Dry
Tool life criterion	Crater wear=0.05mm

図4は、ドリル加工における工具寿命 1000 mm 時の切削速度と S 含有量との関係を示す。S 含有量の増加とともに、ドリル加工性は向上する傾向にあるが、0.1% 以上の含有量では改善効果が少ない。また多量の S の含有は、熱間での靱性低下を伴うことが心配されることから、コンロッドでの S 含有量は 0.1% を目標値とした。さらに、REM 添加量は、先に述べたように切削性の改善は主に REM₃S₄ の分散によることから、REM と S の添加比率が原子 % で 3 : 4 になるように設定した。

表4にターニング加工条件を示す。

図5は表4に示す加工条件での工具寿命と Al (V) 含有量との関係を示す。ターニング加工性についてもドリル加工性と同様に快削 Ti-3Al-2V 材にすることにより、切削性は大幅に改善され、通常使用されている Ti-6Al-4V 材に対し約 5 倍の寿命改善が図られている。

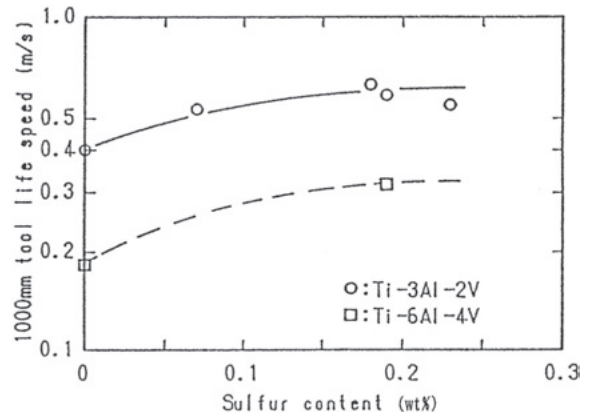


図4 ドリル加工の工具寿命 1000mm 時の切削速度に及ぼす S 含有量の影響

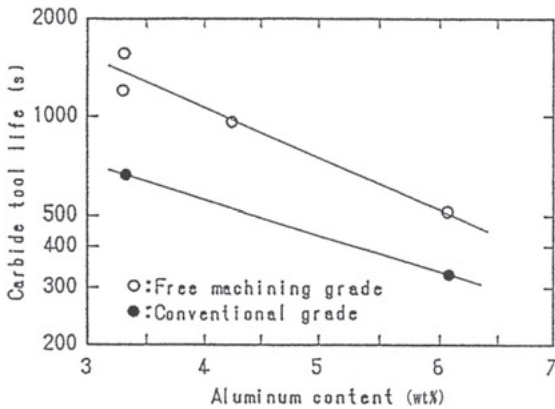


図5 ターニング加工の工具寿命に及ぼすアルミ含有量の影響

以上の結果、通常使用されているTi-6Al-4V材の切削性に対し、Al・V合金量の減少によるハーフアロイ化(Ti-3Al-2V)およびS、REMの添加により大幅に切削性の改善が図られることが明らかとなった。この切削性の改善は、ハーフアロイ化による硬度の低下に加え、REM₃S₄の分散により、切粉の破碎性が改善され切削抵抗が減少することに起因すると考えられる。

表5にコンロッドに用いられているS45C調質材と同等以上の疲労強度を持ち、かつ切削性の改善を図ったコンロッド用快削チタン合金材の化学組成および機械的性質を示す。

3.2. β域温度制御鍛造

通常α+βチタン合金は、α+β等軸晶の微細組織を得るためにα+β相温度域での仕上げ鍛造が行われる。開発した快削チタン合金材は、Al・V含有量を減少させているが、REM₃S₄の分散を図っているため、鍛造成形性が劣ることが懸念される。またコンロッドのI断面部は薄肉形状のため、金型との接触による温度低下を伴い、I断面R部表面に引張応力が作用し、鍛造欠陥誘発の懸念がある。このため鍛造欠陥を防ぎ安定した鍛造品質を得るには、十分な延性が必要と考えられる。従って高温・高速引張試験(引張速度50 mm/s)を行い、高温条件での断面収縮率を調べ、鍛造成形性としての変形能の評価を行った。

表5 開発快削チタン合金の化学組成と機械的性質

〈化学成分規格〉

元 素	含有量(wt%)
Al	2.70 - 3.50
V	1.80 - 3.00
S	0.20 以下
Fe	0.40 以下
O	0.21 以下
C	0.20 以下
N	0.05 以下
H	0.015以下
REM	0.60 以下
その他各元素	0.15 以下
その他元素の合計	0.60 以下
Ti	残

〈機械的性質〉

性 質	規 格
引っ張り強さ	686N/mm ² 以上
耐力(0.2%)	630N/mm ² 以上
伸び	10% 以上
絞り	25% 以上

図6に各種チタン材の断面収縮率と温度の関係を示す。全てのチタン合金材は、β変態域より高い温度域では、90%以上の断面収縮率を示し容易に成形が可能といえる。β変態域以下の温度域では、快削チタン合金材の断面収縮率は非快削チタ

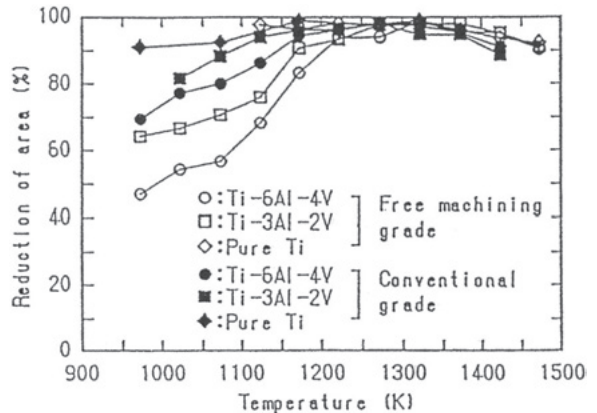


図6 高温高速引張試験における各種チタン材の温度と断面収縮率の関係

ン合金材より低い断面収縮率となり、熱間成形性は不利となる。

この結果、コンロッド用として設定した快削 $Ti-3Al-2V$ 合金は、1173K より高い β 相温度域では 90% 以上の断面収縮率が得られ、鍛造成形は容易に行えると推定される。

次に β 変態域温度で加熱鍛造をすることにより、結晶粒の粗大化等によって靱性低下が生じ、疲労強度の低下が懸念される。従って、各鍛造温度条件で鍛造した棒材での回転曲げ疲労強度を確認した。

図 7 に各合金の鍛造温度条件での回転曲げ疲労強度を示す。鍛造条件を、快削 $Ti-3Al-2V$ 合金は 1373K の β 相域の温度に、また非快削 $Ti-3Al-2V$ 合金は 1173K の $\alpha + \beta$ 相域の温度に加熱後鍛造した。 $Ti-6Al-4V$ 合金は、1173K および 1373K に加熱後鍛造した。

コンロッドの場合、形状が異形状であり、実用時には応力集中を生じることから、切り欠き試験片を用い強度評価するのが妥当である。切り欠き試験片での結果においては、各合金系とも鍛造温度の影響は少なく、 β 相温度域での加熱鍛造が可能であることを確認できた。

以上の結果、コンロッドの熱間成形性改善として、 β 相温度域での加熱鍛造を採用し、加熱温度はコンロッドの薄肉形状の I 断面部が金型との接触で冷却される点を考慮し、1373K を目標温度として設定した。

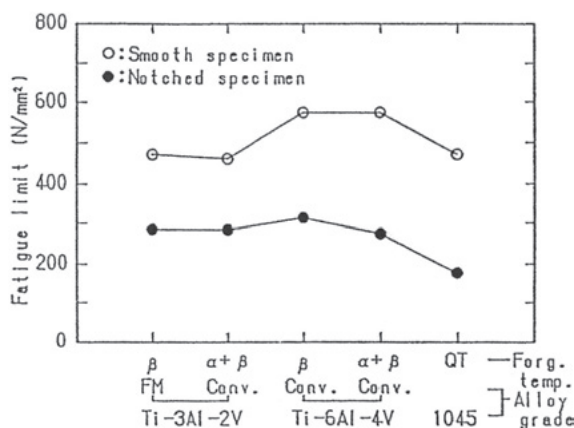


図 7 各合金の鍛造温度条件での回転曲げ疲労強度

3.3. 酸化層除去処理

チタンを高温加熱すると表面に TiO_2 等の酸化層が形成され、疲労強度が低下することは一般的に知られている。

図 8 に 1373K で開発材を加熱した場合の酸化層の生成厚さと加熱時間との特性を示す。酸化層は、加熱初期 2～3 分で急速に生成され、5 分以降の生成速度は減少する傾向を示す。このことは、実際の鍛造工程に於いて、加熱冷却時間をコントロールして酸化層の生成を抑制することが困難であることを意味する。

図 9 は実際のコンロッドによる、引張-圧縮疲労強度への鍛造時に生成する酸化層有無の影響を確認した結果を示す。酸化層は、コンロッドの実

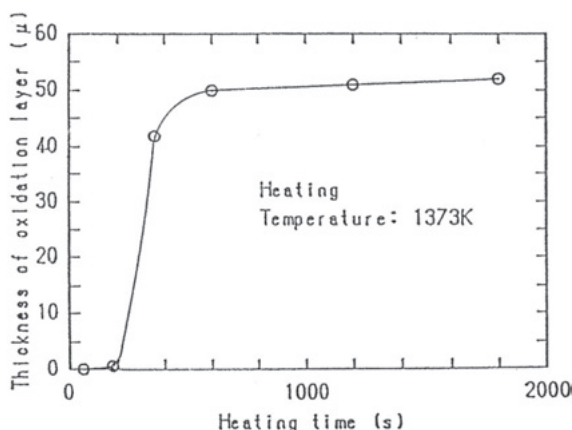


図 8 加熱時間と酸化層の生成厚さとの関係

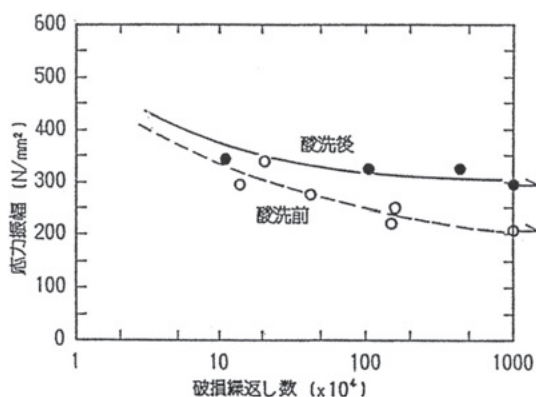


図 9 引張-圧縮疲労強度に対する酸化層の影響

体疲労強度を約 30% 低下させる。よって、安定した強度特性を得るためには、酸化層の除去を行う必要がある。また酸化層は、硬度が高く、機械加工性も低下させる要因となるので、加工性の面からも酸化層の除去が必要である。

このため、コンロッドの量産化にあたっては、鍛造時に生成される酸化層を除去する手法としてコストおよび信頼性の観点より、ステンレス線材、棒材のスケール除去処理に実用化されている弗酸・硝酸混合液への浸漬法を用い濃度と時間を管理して安定除去する手法を採用した。

3.4. 表面硬化法

コンロッドは、エンジンに組み込まれて使用される場合、潤滑された状態でクランクシャフトと端面接触が生じる。この時の接触面圧は小さいが、エンジンが高回転下で使用される場合、摩擦速度が高くなり、コンロッド端面の摩耗・かじり等の傷が発生し、エンジンへ大きなダメージを与える。

このため、チタン合金のコンロッドの実用化にあたっては、端面部の摩耗を防ぐための表面硬化処理を行う必要があり、その検討を行った。

表面硬化処理として、溶射法 (Fe, Mo 等)・肉盛り硬化 (プラズマにて局部溶解させ、TiC, CrC 等の炭化物を分散させる方法)・窒化法・酸化法・PVDコーティング法 (TiN,

CrN 等)の予備検討を行い、耐摩耗性・品質定性・実績の点から、Mo 溶射法および PVDコーティング法を選定し、摩耗性についての過酷評価試験を実施した。

図 10 に、チップ・オン・ディスク試験で SiO₂ ダスト混入オイルを用いた過酷摩耗試験の結果を示す。Mo 溶射、CrNコーティング処理とも、現在、使用されている S45C 調質コンロッド材と同等以上の耐摩耗性が得られる。

Mo 溶射は、レーシング用チタン合金コンロッドの硬化法として実用化され、その実績はあるが溶射前後の加工を必要とし、加工工程の複雑化とともにコストもアップする。また、Mo 溶射より CrN-PVDコーティング処理の方が、大幅に耐摩耗性がよいことから、コンロッド端面部の表面硬化処理として CrN-PVDコーティング処理を採用した。この CrNコーティング厚さは、各種のエンジン耐久テスト・実車耐久テストの結果から、信頼性のある耐久性が確保できるレベルとして 3~6 μm 厚さに設定した。

4. チタン合金コネクティングロッドの製造加工および製品品質について

表 6 に、開発チタン合金コンロッドの製造工程を示す。この製造工程の中で、チタン合金コンロッドの生産にあたってポイントとなる鍛造加工、酸化層除去処理、機械加工、表面硬化処理について、技術の概要と製品品質について述べる。

4.1. 鍛造加工

鍛造は、β 相域高温加熱鍛造を基本に、鍛造法案として、ドロップハンマー鍛造での 1 個取り手法およびプレス鍛造による 2 個取り手法について検討を行い、鍛造品質の安定性、生産性の観点から、プレス 2 個取り鍛造を実施している。

図 11 に、ドロップハンマ方式とプレス方式での鍛造工程状態を比較示す。プレス鍛造素材の重量歩留りは約 64% レベルで、原材料費が高いチタン合金を実用する上で、この歩留りの向上改善が今後の課題である。

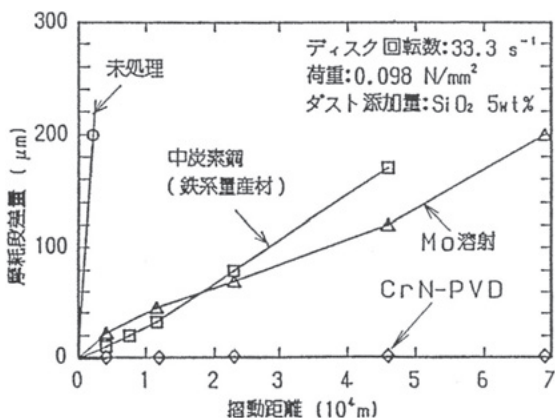


図 10 各表面硬化法による耐摩耗性

表6 開発チタン合金コネクティングロッドの製造工程

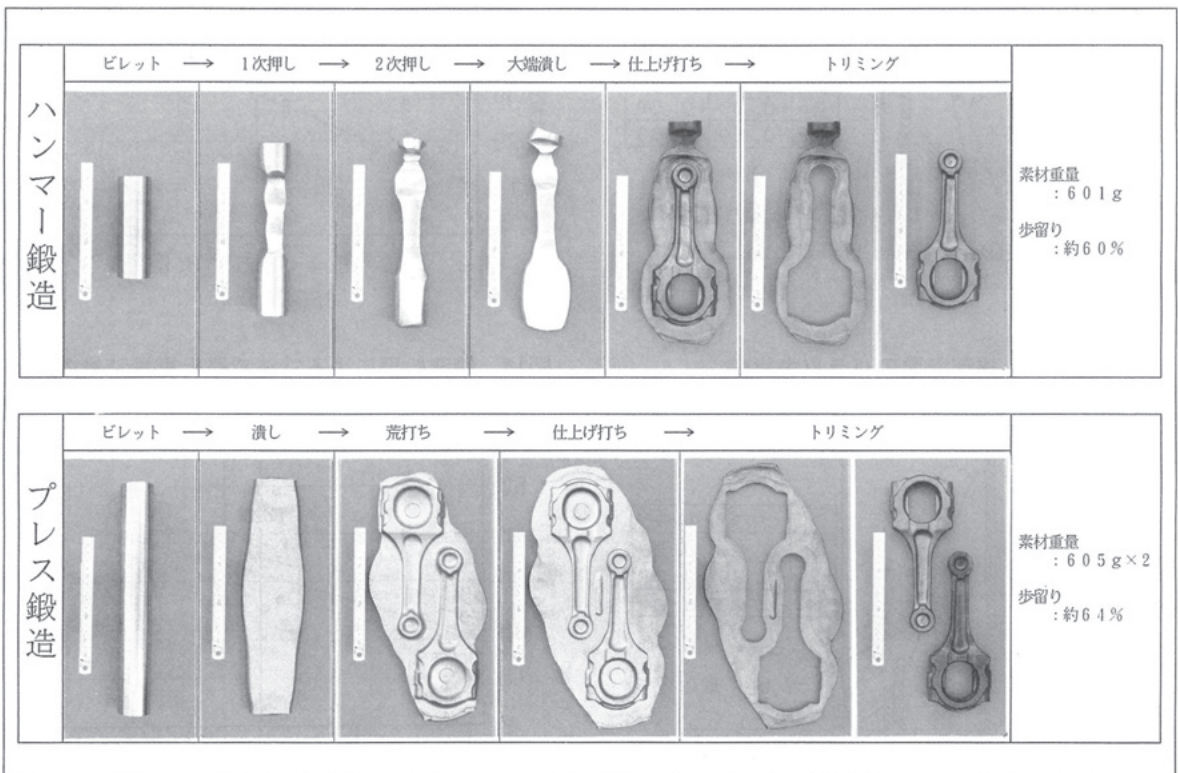
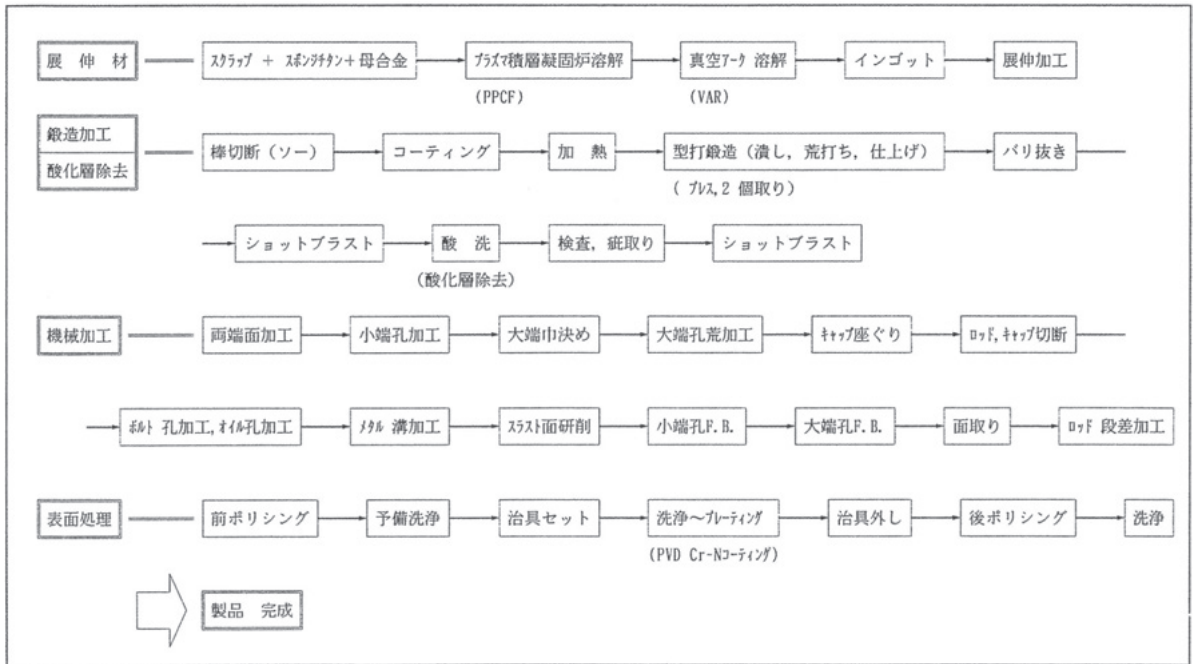


図11 ハンマー方式及びプレス方式の鍛造工程比較

図 12、13 に、鍛造品の素材寸法精度の代表例と曲がり量について、ドロップハンマー鍛造品とプレス鍛造品のレベルを比較提示する。プレス鍛造は、ドロップハンマー鍛造と比較し、主な次のメリットがある。

- a) 寸法精度がよく、重量バラツキが少ない。
- b) 曲がり量が少なく、曲がり修正工数が削減できる。
- c) 安定した鍛造作業ができ、鍛造欠陥(シワ等)の発生が少ない。
- d) 方案歩留りがよい。
- e) 作業性がよい。

開発チタン合金コンロッドの鍛造加工は、上記の様に β 相域高温加熱鍛造とプレス鍛造での 2 枚取りを基本に、適正鍛造条件、形状方案の設定を図り、製品歩留り 95% 以上を確保し、安定した流動を可能とした。

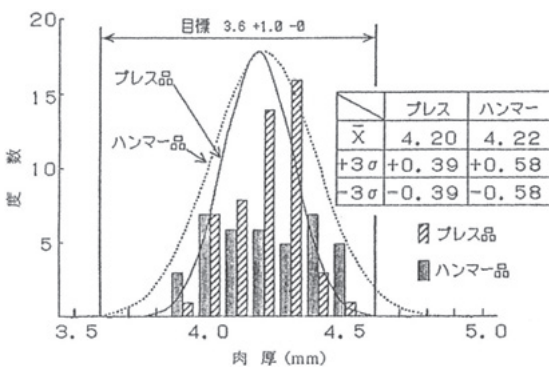


図 12 桿部肉厚のバラツキ比較

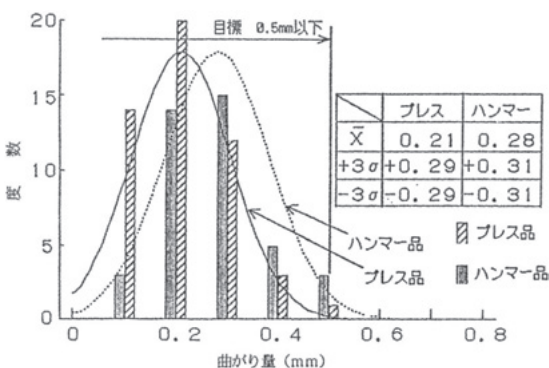


図 13 曲がり量のバラツキ比較

4.2. 酸化層除去処理

酸化層除去処理は、弗酸・硝酸混合液の濃度と処理時間を管理し、酸化層除去量の制御を行っている。

図 14 に、酸洗処理による重量減量と寸法減量の関係を、図 15 に酸洗処理による重量減量と処理時間の関係を示す。鍛造加工により、生成される酸化層の厚さの代表例を図 16 に、表面の硬度勾配を図 17 に示す。生成される酸化層厚さは約 0.3 mm であり、図 14 と図 15 から酸洗処理時間および目標とする重量減量が設定でき、この重量減量管理により酸化層厚さ除去量のレベル管理を実施している。

図 18 に酸洗後の表面硬度勾配を、図 19 には鍛造状態の素材重量および酸洗後の重量バラツキを示す。

これらの結果、酸化層は充分除去されていることがわかり、上記の処理、条件管理設定により、安定した酸化層除去状態が得られている。

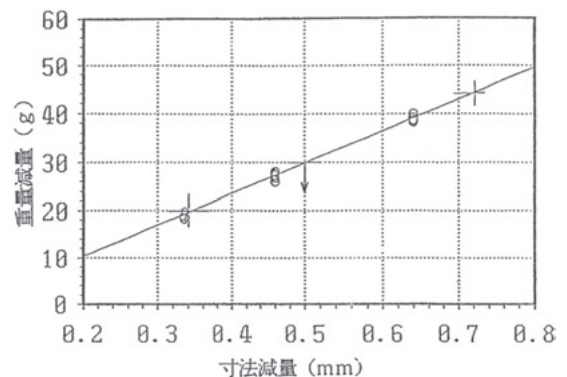


図 14 酸洗処理による寸法減量と重量減量の関係

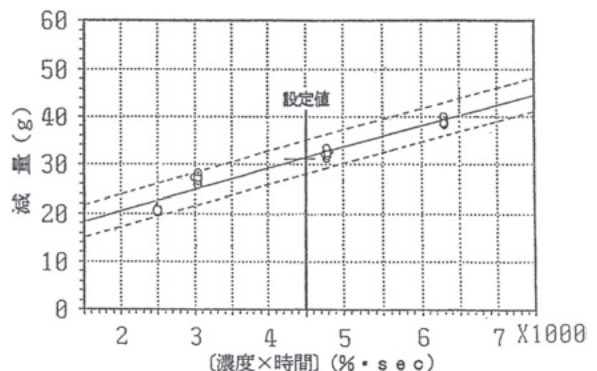


図 15 酸洗処理による処理時間と重量減量の関係

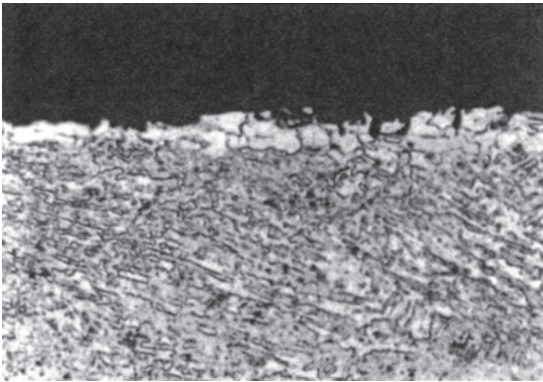


図 16 鍛造加工による表面酸化層

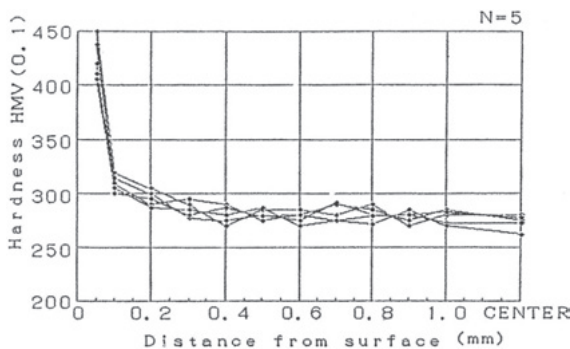


図 17 酸洗前の硬度分布

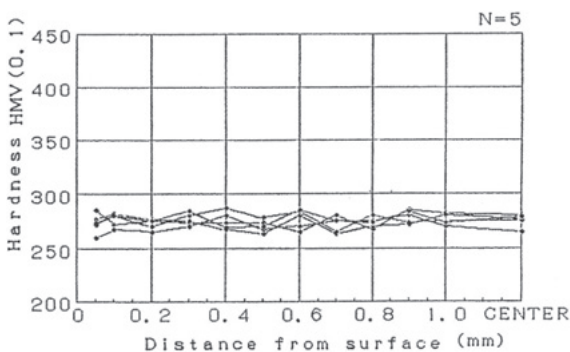


図 18 酸洗後の硬度分布

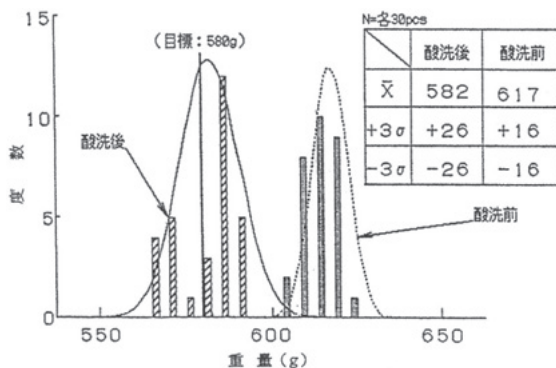


図 19 酸洗前後の重量バラツキ

4.3. 機械加工

コンロッドの機械加工は、部品の機能形状から各種の加工法を必要とし、かつ高い寸法精度が要求される。チタン合金コンロッドは、鋼製コンロッドに対し切削性が低下することから、鋼性コンロッドを加工している量産ラインを活用し加工することが困難である。このため、チタン合金コンロッドの加工は専用ライン（汎用+専用設備）を増設し加工を行っている。

加工は、快削Ti-3Al-2V合金材の適用により切削性の改善は図っているが、高効率化を図るため、刃具材種・切削条件・切削油等加工条件の適性化を図り、安定加工流動を可能にした。

表7に類似形状のTi-6Al-4V材コンロッドと快削Ti-3Al-2V材コンロッドの加工比較の一例として、合わせ面の加工条件と刃具寿命、被削性指数を示す。この結果は一部であるが、快削前Ti-3Al-2V材の採用により、切削効率は大幅に向上が図られている。

表7 快削チタン合金とTi-6Al-40材の実体加工性比較（キャップ合せ面加工一例）

工 程	合せ面加工			
	荒	仕上げ	荒	仕上げ
区 分	Ti-6Al-4V		快削チタン合金	
設 備	マシニングセンター		マシニングセンター	
刃具名称	φ24エンドミル		φ30エンドミル	
刃具材質	K10		←	
加 工 条 件	加工径 mm	24	24	30
	切込 mm	1.4	0.1	0.3
	回転数 r/min	399	599	530
	周速 mm/min	30	45	50
	送り mm/rev	0.50	0.16	0.45
	送り mm/1刃	0.13	0.04	0.11
件	刃数	4	4	4
	加工長 mm	23	30	30
	切削油	ポラチップ		←
	寿命	78		375
命	1刃当り加工数	20		94
	加工面積 mm ²	9.5		11
A=加工面積×加工長/1000		0.2185		0.33
B=回転数×回転送り/10		9.59		18.04
C= A×B		2.10		5.95
1刃当り寿命×C		41		558

A:加工量, B:加工効率, C:単位時間当りの切り屑除去量
1刃当り寿命×C:被削性指数

4.4. 表面硬化処理

前記の様にコンロッドの端面に摩耗防止のため Cr-N-PVD コーティング処理を行っている。このコーティング方法は、アークイオンプレーティング法を用い、下記の原理でコーティングされる。またその基本構成を図 20 に示す。⁽⁵⁾

コーティングを行う真空チャンバー内に、真空アーク放電によって蒸発させる物質 (Ti, Cr 等) からなるカソードを設置、これとアノードとの間に外部から電力を供給する。

カソードには、アークを点火するための機構とランダムに激しく移動するアークスポットを所定の蒸発面内に閉じ込める制御機構が設けられている。基板はカソードから発生する蒸発プラズマ流中に置き、この基板に負のバイアス電圧を印加して、蒸発イオンを基板に向けて加速しながらコー

ティングを行う。

真空チャンバーには、プロセスガスの導入ラインが設けてあり、例えば Cr のカソードに対し N_2 ガスを導入することで Cr-N の反応コーティングが可能となる。

コーティング装置は、図 21 に示すように 4 室形のインラインタイプを用いて生産性を維持している。また、コーティングは、合理化を計るためにコンロッドのキャップ側の端面のみを行い、キャップの積み重ね方式を用いて、多数個処理を可能としている。コーティング前の治具取り付け状態を図 22 に示す。

表 8 に Cr-N コーティング層の目標仕様を示す。図 23、24 は、流動している Cr-N コーティング製品のコーティングの厚さ、面粗度のバラツキ特性を示す。各特性は安定した品質が得られている。また Cr-N コーティング層は薄く、面粗度は良いことから、コーティング処理状態そのまま実機使用している。

5. 快削チタン合金コネクティング ロッド製品特性と適用効果

図 25 は、開発したコンロッドを示す。このコンロッドは、「NSX」に搭載された 3.0 ℓ、V 型 - 6 気筒エンジンに採用している。このエンジンの出力特性は、280ps/7300rpm と V 型 - 6 気筒自然吸気エンジンとして高回転・高出力化を実現している。

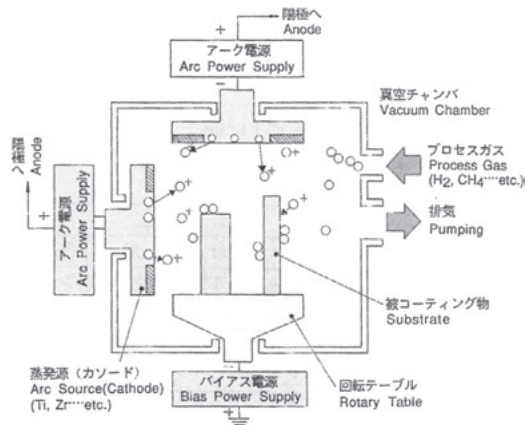


図 20 アークイオンプレーティング法基本構成図

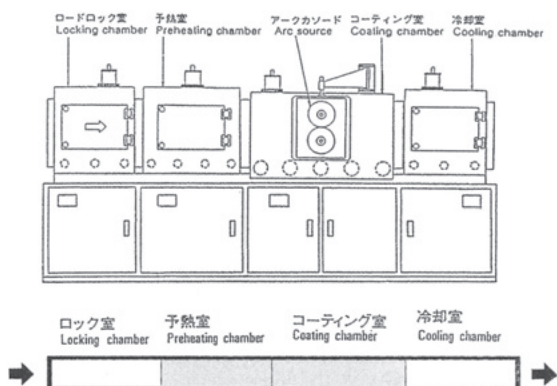


図 21 INLINE TYPE 4-chamber model

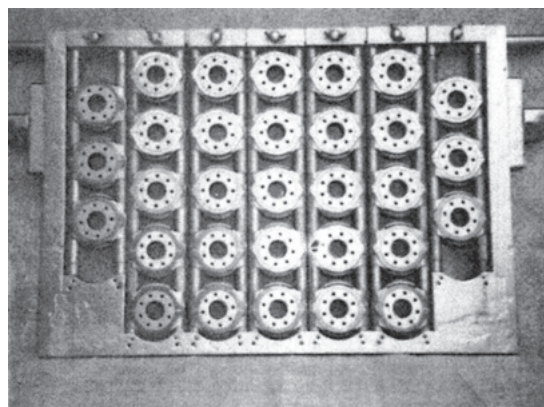


図 22 治具取り付け状態

表8 イオンプレーティング処理の品質

項 目	規 定
組 成	Cr-N系
皮 膜 硬 さ	H _R V (50) 1000以上
膜 厚	3～6 μ m
表 面 粗 さ	R _{max} 6.3 μ m以下

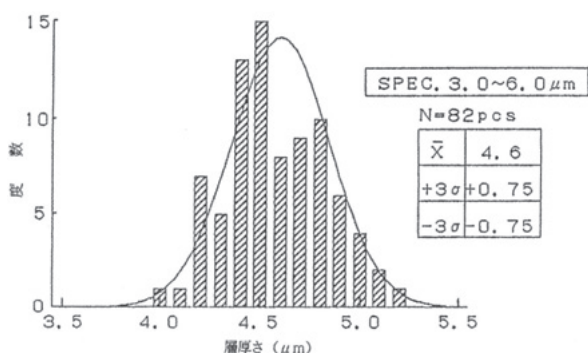


図23 Cr-N コーティング層厚さのパラツキ

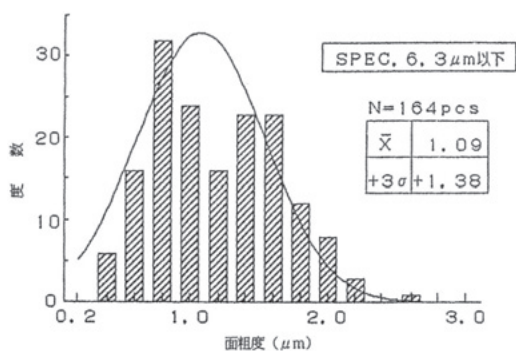


図24 Cr-N コーティング層表面粗度のバラツキ

エンジンの高回転化に伴い、往復運動部品であるピストンやコンロッド等の、慣性力は速度の2乗に比例して増加する。そしてクランクピン軸受の受圧面圧が増し、クランクピンとコンロッドメタル間の油膜厚さの減少を招く。また周速度も増加することから、軸受の耐焼付限界特性（ベアリング余裕度）が低下する。このため、慣性力の低下を図り、軸受焼付性を向上させるためには、コンロッドの軽量化が大きく求められる。さらに、コンロッドは高回転・高負荷条件下で使用されるため、高い強度耐久性も要求される。

これらの観点から、開発したコンロッドの製品特性と適用効果について述べる。

5.1. コネクティングロッドの強度

図26に開発快削チタンコンロッドの強度の一例として、コンロッドI断面部の引張－圧縮疲労強度を現在一般に使用されている鋼製コンロッド（中炭素非調質鋼）と比較した結果ならびに適用エンジンの最大負荷応力値を示す。鋼製コンロッドより高い引張－圧縮疲労強度特性が得られ、実用上も十分な強度余裕度をもっている。

5.2. 軽量化量

図27は、結合状態の開発快削チタンコンロッドと鋼製コンロッドの重量を比較した結果を示す。全体重量は、鋼製コンロッドに対し、約30%（－1.2kg/台）の軽量化を達成している。

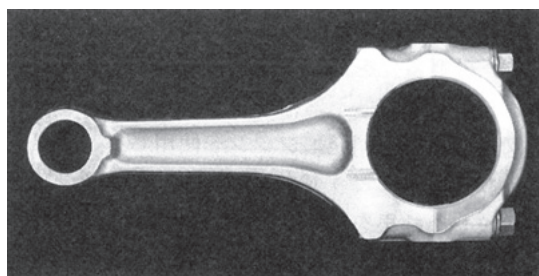


図25 開発チタン合金コネクティングロッド

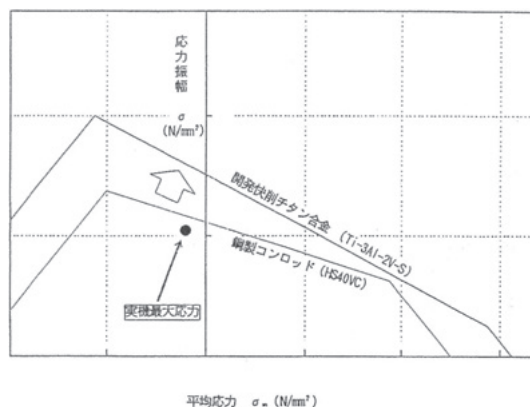


図26 開発快削チタン合金及び鋼性コネクティングロッドの引張－圧縮耐久限比較と実機負荷レベル

5.3. 実用上の機能効果

a) エンジン限界回転数の向上

前記した様に、コンロッドの軽量化は、慣性力を低下させ、クランクピンとコンロッドメタル間の油膜厚さを増し、耐焼付限界特性を向上させる。軸受の耐焼付限界特性でエンジン実用回転限界が制約されている高回転エンジンに於いては、この軸受の耐焼付限界特性が向上することは、エンジンの限界回転数の向上に直接結びつく。

図 28 は、開発快削チタンコンロッドと鋼製コンロッドを用いた場合のエンジン回転数とクランクピン・コンロッドメタル間の最小油膜厚さの模式図を示す。

チタンコンロッドの適用により、約 30% の軽量化が行われ、実用エンジン回転数としては約 700rpm の向上が計られ、大幅な出力性能向上を可能とした。

b) 騒音特性

エンジンの往復運動部品（ピストン、コンロッド等）の軽量化を行い、質量の減少を図ることは、エンジン騒音の低下に結びつく。

図 29 に、同一開発エンジンを使用して、チタンおよび鋼製コンロッドを組み込み、エンジン騒音を比較した結果を示す。チタンコンロッドの使用により、ほぼエンジン回転の全域でエンジン騒音の低下が認められている。

以上の様に、開発チタン合金コンロッドは、高い強度耐久性を有し、鋼に対して約 30% の軽量化を達成し、開発エンジンの高回転・高出力化および騒音の低減に寄与している。

6. 快削チタン合金コネクティングロッドの生産実績

開発した快削チタン合金コンロッドは、'90 年 9 月より量産を開始し、'91 年 5 月現在まで、延べ約 2 万 5 千本の生産を行い、現在は 6 千本/月の生産を行っている。これらの生産は、製造上の

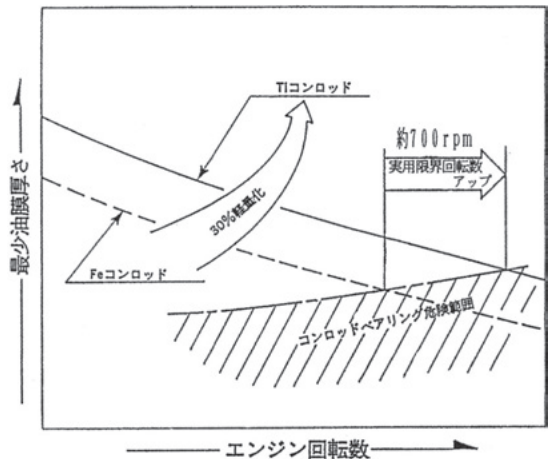


図 28 エンジン回転数と最小油膜厚さの関係

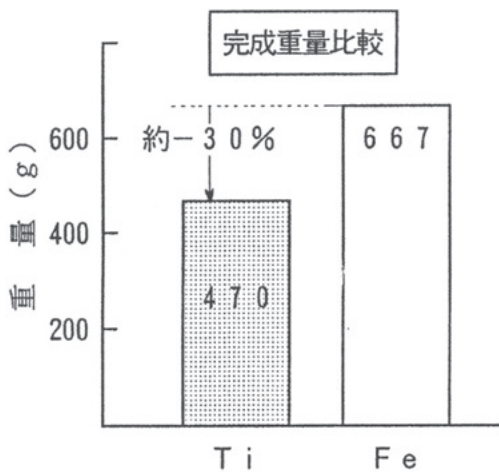


図 27 完成重量比較

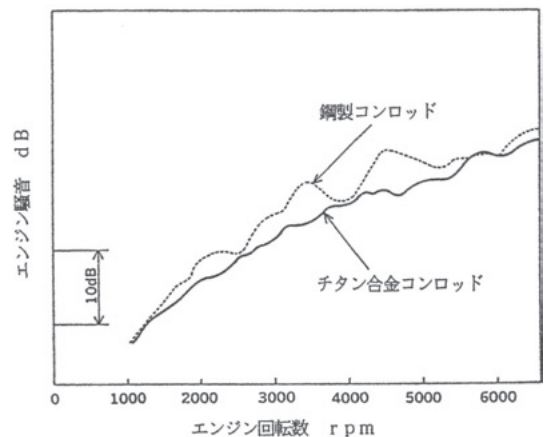


図 29 コネクティングロッド材質による騒音比較

問題もなく安定生産を行っており、初期の開発目的を十分に達成している。

7. ま と め

鋼製コンロッドと同等以上の強度特性を有し、鍛造加工・機械加工等の製造技術を確立し、容易に製造できる軽量チタン合金コンロッドを開発し、3.0 ℓ V型 - 6 気筒エンジンに適用、4 輪車で初めて量産化を実現した。

その技術内容を要約すると下記のことがいえる。

- (1) 開発した T i - 3 A ℓ - 2 V - S 快削合金コンロッドは、鋼製コンロッドより高い疲労特性を有し、かつ従来の T i - 6 A ℓ - 4 V 合金材に対し、大幅に切削性が改善され、コンロッドを実用化する上で有効な材料である。
- (2) 開発快削チタン合金コンロッドの鍛造は、 β 相高温制御加熱のプレス鍛造により、素材精度の安定化、鍛造品質の向上、生産性の向上が図られる。
- (3) チタン合金コンロッドの高疲労強度を安定して得るためには、鍛造時に生成する表面酸化層の除去を図ることが良く、酸化層除去は弗酸・硝酸混合液の温度処理時間管理で安定した除去が可能である。
- (4) チタン合金コンロッドの表面硬化処理は、Cr-N-PVDコーティングで十分な耐久性が確保でき、処理はコンロッドのキャップ側の端面のみに実施することにより、多数個処理が可能である。またエンジンの機能も十分に保障できる。
- (5) チタン合金コンロッドを開発エンジンに適用した結果、鋼製コンロッドに対し約 30% の軽量化が図られ、機能上、エンジンの限界回転数の向上として約 700rpm の高回転・高出力化を可能とし、さらにエンジンの振動騒音低減が図られた。

8. あとがき

生産性が高く安定した強度が得られる快削チタン合金コンロッドの開発技術と量産技術について述べた。環境問題等からの省燃費への要求は、今後さらに高まり、エンジン部品の軽量化は必須で

ある。

チタン材料は、その特性からエンジン部品への適用が期待されているが、採用を図る上では、コストの低減を図ることが今後の大きな課題である。このコスト課題を解決するためには、素材から加工までの一貫した合理化技術、あるいは Near-Net-Shape 化を可能とする新しい技術開発が必要となろう。

今回、生産量は少量であるが、チタン製エンジン部品の量産化を実現した。これが、一つの契機となり、今後技術課題の解決、適用の拡大に結びつくことの一助となれば幸いである。

最後に、この開発と量産化にあたり、御協力を頂いた(株)大同特殊鋼、(株)日本鍛工、その他社内外の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) M.Mushiake 他: Development of Titanium Alloy Valve Spring Retainers, SAE Paper, No.910428
- (2) 川瀬 他: ホンダ N S X 用 C30A 型 VTEC エンジン、内燃機関、Vol. 30、No.380
- (3) S.Nakamura, T.Matsubara 他: A Free Machining Titanium Alloy for Connecting Rods, SAE Paper, No.910425
- (4) S. Nakamura: Free Machining Titanium, Sixth World Conference on Titanium 講演資料, 1988
- (5) 王垣 他: アークイオンプレーティング法による硬質皮膜コーティング、神戸製鋼技報、Vol. 39、No.1 (1989)

■著 者■



松 原 敏 彦



佐 藤 泰 紀



木 村 健 二



川 瀬 直 和



伊 藤 茂