論 説

自動車用快削チタン合金コンロッドの開発

木村篤良*, 中村貞行*, 五十川幸宏*, 松原敏彦**, 木村健二**, 佐藤泰紀**

Development of Free Machining Titanium Alloy Connecting Rods for Passenger Cars

Atsuyoshi Kimura, Sadayuki Nakamura, Sachihiro Isogawa,
Toshihiko Matsubara, Kenji Kimura and Yasunori Satoh

Synopsis

Some fundamental research on alloy design of new titanium alloy and process design such as forging and surface treatment were carried out in order to develop new titanium alloy connecting rods. Free machining Ti-3Al-2V alloy is the best alloy for connecting rods because it has the mechanical properties equivalent to quenched and tempered medium carbon steel, a popular material for connecting rods. The alloy can be machined at higher speed than the most popular titanium alloy Ti-6Al-4V. Forging in the β phase temperature range is desirable to enable one heat forging of connecting rods and to eliminate crack initiation. New technology such as induction heating in forging and coating on large ends was developed. As a result of this research, new titanium alloy connecting rods which can be applicable to mass production have been developed.

1. ま え が き

自動車部品の軽量化は出力性能の向上や燃費改善に有効であることから従来より探求されていたが、近年、環境保護が強く叫ばれるようになり、新しい機種の開発に際しては重要なテーマになっている。特に、自動車用エンジンのコネクティングロッド（以下コンロッドと略称する）やバルブ、バルブスプリング、リテーナなどの往復運動部品の軽量化は、車全体に占める軽量化率は小さいが、摩擦抵抗の低減による燃費改善、高出力化に効果

的である。このため比強度の高い特性を活用したチタン合金の適用による軽量化の検討が従来から進められている。しかし、チタン合金は素材が高価であることに加えて、熱間鍛造や機械加工が困難であり、また、高価な表面処理を必要とするなど、量産車種に適用するには多くの課題があり、量産部品への適用はごく一部に留まっている。

著者らはチタン合金の自動車部品への適用化の検討を進めてきた。その結果、チタン合金コンロッドを開発し、四輪車で初めて量産化を実現した。本論説では開発したコンロッドの快削チタン合金化技術と量産化技術について述べる。

2. 快削チタン合金の開発

鋼製のコンロッドは、通常、熱間鍛造—熱処理

1991年10月22日受付

*大同特殊鋼㈱研究開発本部

**㈱本田技術研究所栃木研究所

一機械加工という工程で製造される。チタン合金の場合にも類似した工程を仮定すると、コンロッド用チタン合金として、次のような性能が要求される。

- ・鋼製コンロッド（例えばS 45C 調質材）と同等の機械的性質および疲れ強さを有すること
- ・コンロッドの形状に熱間で鍛造することが可能であること
- ・中炭素鋼調質材に匹敵する被削性を有すること

開発に当たっては上記の性能を目標にした。溶解については、スクラップを原料に使うことが可能であり、チタン合金の製造コストの低減が可能なPPC炉（プラズマ積層凝固炉）¹⁾を第一次溶解装置に選択した。スクラップとして最も入手しやすいものは純チタンとTi-6Al-4V合金である。したがって、これらの原料を混合して利用することを前提にして、AlとVの比が6：4になるように合金設計を行った。

快削チタン合金に関するこれまでの研究の結果、S（硫黄）とREM（希土類金属元素）を複合添加することにより機械的性質を損わずに被削性を改善できることが明らかになっている^{2),3)}。そこで、コンロッド用の材料として最適な化学組成を決定するために、追加実験を行った。

機械的性質や疲れ強さ、被削性の試験に用いた材料の化学成分の範囲をTable 1に示す。快削合金は快削成分としてSとREMを含有している。REMの添加原料にはCe約47%、La約27%のミッシュメタルを用いた。Table 1のREMの量は希土類元素の全含有量を示している。AlとVの比は前述のように6：4一定である。

これらの材料をPPC炉で溶解し、真空アーク炉で2次溶解を行って直径240mmのインゴットに鋳込んだ。このインゴットを1423Kにて熱間鍛造を行い、直径60mmと25mmの丸棒に加工し

た。この温度は、チタン合金の一般的な $\alpha+\beta$ 鍛造温度に比べると高い。これは、後に述べるように、 $\alpha+\beta$ 鍛造では複雑なコンロッドの形状まで鍛造するには何回も再加熱を必要とするために、変形抵抗の低い高温での鍛造(β 鍛造)を採用したためである。鍛造の後に987Kで焼ならし処理を行った。

AlとVの含有量が増加するとチタン合金の硬さが上昇する。本試験ではAlとVの比を一定にしているのでAl含有量で整理することができる。Fig. 1にAl含有量と耐力および引張強さの関係を示す。試験片は25mmの丸棒の中心部から採取した。耐力も引張強さもAl含有量の増加にともない上昇している。快削合金とベース合金の間に明確な差は認められない。S 45C 調質材の耐力は約600N/mm²であり、引張強さは約800N/mm²である。これに対応するチタン合金のAl含有量は約3%（Vは約2%）である。

鋼の疲れ強さは硬さや耐力、引張強さと深い関係にある。Fig. 2にチタン合金の平滑材回転曲げ

Fig. 1. Influence of aluminum content on 0.2% proof stress and ultimate tensile strength.

Table 1. Range of chemical compositions of tested titanium alloys. (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.

Fig. 2. Influence of 0.2% proof stress on the fatigue limit in rotating bending fatigue test.

試験における疲れ限度(10^7)と耐力の関係を示す。試験片は25mmの丸棒の中心部から採取した。この図で、耐力が約850N/mm²以下では耐力の上昇にともない疲れ限度が上昇するが、これ以上では飽和する傾向が認められる。また、850N/mm²以下の範囲では快削合金とベース合金の間に疲れ限度の差は認められないが、高強度域での飽和疲れ限度はベース合金の方が高い。これは快削合金に含まれるREMの硫化物が、靱性の低下する高強度域で、亀裂の発生や伝播を促進するためと考えられる。Fig.1とFig.2からAl含有量が4%以下であれば快削合金とベース合金の疲れ強さが無い、すなわち、耐力と疲れ限度が比例する領域に入ることがわかる。最も普及しているTi-6Al-4V合金の耐力は約950N/mm²であり、快削合金はベース合金より疲れ強さが低くなる。S45C調質材の疲れ限度は約430N/mm²であるので、これと同等以上の疲れ限度を得るAl含有量は約3% (Vは約2%)である。

コンロッドの機械加工においてドリル加工は能率を左右する重要な工程である。Fig.3にドリル加工における1000mm寿命速度とAl含有量の関係を示す。1000mm寿命速度とは工具寿命が1000mmになる切削速度であり、加工能率の指標となるものである。この試験における切削条件をTable2に示す。Al含有量の増加に伴い硬さが上昇し、Fig.3に示されるように、ドリル加工性が低下する。Ti-6Al-4V合金の1000mm寿命速度はTi-3Al-2V合金の約2分の1である。快削合金は

Fig. 3. Influence of aluminum content on the 1000mm tool life speed in drilling.

Table 2. Cutting conditions in the drilling test.

Tool	Co-HSS (M36eq.), 5mm
Feed	0.07mm/rev
Depth of cut	15mm (blind hole)
Speed	Varied
Cutting fluid	Water insoluble oil
Tool life criterion	Tool failure

ベース合金に比べて1000mm寿命速度が約70%高い。したがって、Ti-3Al-2V快削合金はTi-6Al-4Vベース合金に比べて3倍以上の速度で加工することが可能である。S45C調質材の1000mm寿命速度は約0.7m/sであるので、Ti-3Al-2V快削合金はこれとほぼ同等のドリル加工性を有していると考えられる。

旋削加工性もコンロッドの加工において重要な性質である。Fig.4は超硬工具寿命におよぼすAl含有量の影響を示したものであり、切削条件はTable3に示した。鋼の切削では超硬合金P種、あるいはサーメットが用いられるが、これらの工具でチタンやチタン合金を切削すると摩耗速度が著しく速くなる。したがってK種の超硬合金を用いて試験を行った^{4),5)}。Al含有量の影響はドリルの場合と類似している。Ti-3Al-2V快削合金の工具寿命はTi-6Al-4Vベース合金に比べて約5倍である。S45C調質材をP種の工具を用いて速度1m/sで切削する場合の工具寿命は約20000sで

Fig. 4. Influence of aluminum content on the carbide tool life in turning.

Fig. 5. Influence of temperature on the reduction of area in tensile test.

Table 3. Cutting conditons in the turning test.

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

あるので、Ti-3Al-2V 快削合金は S 45C 調質材よりも超硬旋削加工性が劣っている。しかし、Ti-3Al-2V 快削合金はコンロッド用のチタン合金の中では最も優れていると考えられる。

熱間加工性、特に熱間延性を評価するために高温高速引張試験を実施した。室温から試験温度まで 100s で加熱し、60s 間保持した後、評点間距離約 10mm を 50mm/s の速度で引張試験を行った。試験温度と絞りの関係を Fig. 5 に示す。 β 変態点より高い温度ではどの材料も 90% 以上の高い絞りを示している。これより低い温度域では Al 含有量が高いほど延性が低い。また、ベース合金に比べて快削合金の方が延性が低い。Ti-3Al-2V 快削合金は 1173K より高い温度で 90% 以上の絞りを示しているので、この温度域でコンロッドの鍛造を行うことが望ましいと考えられる。

合金設計に関する以上の結果から、Ti-3Al-2V 快削合金はコンロッド用チタン合金として最適であると判断される。なお、本合金は 2t の PPC 炉

(Plasma Progressive Casting furnace) で溶解され、真空アーク炉で 2 次溶解される。インゴットは GFM 精密高速鍛造機でビレットにされ、さらに熱間圧延で丸棒に加工される。必要があれば、焼なまし処理や、ピーリング加工（皮削り）が行われる。

3. 製造工程の開発

チタンコンロッドの製造工程には多くの開発すべき課題があるが、なかでも熱間加工と表面処理が重要である。ここではチタン合金の性質におよぼす製造技術要因の影響に関する基礎データと選定した条件について述べる。

前述のように、チタン合金は靱性の高い微細組織を得るために $\alpha + \beta$ 温度域で熱間鍛造されるのが通常である。しかし $\alpha + \beta$ 温度域では変形抵抗が高く、また、延性が低いので、熱間鍛造が極めて困難である。特に、断面積の小さい I セクション部は容易に温度が低下し、数回の再加熱が必要になる。コンロッドに関しては靱性はそれほど重要ではないと考えられるので、他の要求性能さえ満足できれば、鍛造温度を高めることが可能である。

Fig. 5 に示したように、Ti-3Al-2V 快削合金の場合、1200K より高温の β 温度域では高い延性を示す。また、快削合金は硫化物のピンニング作用によりベース合金よりも結晶粒粗大化傾向が低いので、より高温まで加熱することが可能である。鍛造中の温度低下を考慮すると、鍛造時の加熱温

度としては1373Kが適正と考えられる。

疲れ強さにおよぼす鍛造条件の影響を明らかにするために、小野式回転曲げ試験を実施した。Ti-3Al-2V 快削合金は β 温度の1373Kで鍛造した。Ti-3Al-2V ベース合金は $\alpha+\beta$ 温度の1173Kで鍛造した。Ti-6Al-4V ベース合金は $\alpha+\beta$ 温度の1193Kおよび β 温度の1373Kの2種類の条件で鍛造を行った。これらの条件で直径20mmの丸棒に鍛造し、978Kで焼なましを行った。ミクロ組織は、 β 温度域で鍛造した材料は粗いラメラ組織であり、 $\alpha+\beta$ 温度域で鍛造した材料は等方性の α と微細なラメラ組織の混合であった。疲れ試験の結果をFig. 6に示す。Ti-6Al-4V ベース合金の切欠き試験片の場合を除いて鍛造温度の影響は小さいことがわかる。粗いラメラ組織は微細な等方性の組織よりも疲れ亀裂の伝播速度が小さいことが報告されている⁶⁾。ラメラ組織の場合には亀裂が蛇行して、破面の面積が増加するためである。Fig. 6において、 β 鍛造のTi-6Al-4V ベース合金が $\alpha+\beta$ 鍛造材に比べて高い切欠き疲れ強さを示しているが、同様な機構であると考えられる。この図からも、 β 鍛造したTi-3Al-2V 快削合金はS 45C 調質材と同等の疲れ強さを有することがわかる。これらの傾向は423Kの温度での回転曲げ試験でも同様であることを確認している。これらの結果より、コンロッドの鍛造においてTi-3Al-2V 快削合金は高温の β 温度域で鍛造することが適当であると判断される。

チタン合金を高温で加熱すると容易に酸化し硬

Fig. 6. Fatigue strength of titanium alloys at room temperature.

化する。この酸化層は疲れ強さと被削性の両面から好ましくない。Fig. 7はTi-3Al-2V 快削合金の回転曲げ疲れ強さにおよぼす表面酸化の影響を試験した結果であり、表面酸化材の疲れ強さが著しく低いことを示している。したがって、表面酸化をできる限り防止することと、酸化した層を除去することが必要である。Fig. 8はTi-3Al-2V 快削合金の1373Kにおける酸化時間と酸化層の厚さの関係を示したものである。5minの加熱で40 μ 以上の酸化層が形成されている。鍛造時の加熱はできるだけ短時間であることが望ましく、高周波炉により2~3minで加熱する方法が適している。しかし、量産時には加熱時間が長くなることも考えられるので、完璧を期するために酸化層の除去方

Fig. 7. Influence of oxidation on fatigue strength.

Fig. 8. Influence of oxidation time on the thickness of oxidized surface layer on the free machining Ti-3Al-2V alloy.

法も検討した。酸化層の除去にはさまざまな方法が考えられるが、コストと信頼性を考慮して、ステンレス鋼やチタン合金を線材の酸洗装置を用いる方法を考案した。酸の濃度と温度を制御することによって除去量をコントロールすることが可能である。コンロッド実体の引張圧縮疲れ試験において、Fig. 9に示すように、酸洗によって約30%の疲れ限度の向上が確認された。酸洗は全表面を均一に除去するのでコンロッドのような複雑形状部品の酸化層の除去には適していると考えられる。

チタン合金と鋼をこすり合わせると容易に反応し、摩擦係数が高くなり、摩耗速度も上昇する。チタン合金コンロッドと鋼製のクランクシャフトは高速でこすり合うので、何らかの耐摩耗処理が必要である。レース用エンジンのコンロッドの場合、大端部のコーティング処理としてMo溶射が実用化されている。しかし、Mo溶射は高価であり、また溶射後に研削などの仕上げ加工が必要である。したがって、量産コンロッドの開発には新しい低廉な処理方法が必須である。

チタン合金にさまざまな表面処理を行って、その耐摩耗性を評価した。大越式摩耗試験機で比摩耗量を測定した。その結果をTable 4に示す。Crメッキとガス窒化およびCrNのPVD処理がMo溶射と同等の性能を示している。膜の密着性や膜厚の安定性の点を考慮してCrNのPVD処理を選択した。より実用状態に近い条件下でのCrNのPVD処理の性能を確認するために、チップ・オン・ディスク試験でSiO₂ダスト混入オイル

を用いた摩耗試験を行った。その結果をFig. 10に示す。CrNのPVD処理を行った試験片の摩耗速度はMo溶射材よりも小さく、コンロッドの表面処理として最適であると考えられる。なお、実体のコンロッドで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 μ mの厚さのCrNコーティングに設定した。

コンロッドの機械加工はチタン合金専用ラインを導入し、快削合金の採用と工具材種、切削条件、切削油剤など加工条件の適正化を図った。Ti-3Al-2V快削合金とTi-6Al-4Vベース合金の実加工状態での被削性を比較すると、例えば超硬エンドミルによるキャップ合わせ面の加工では、快削合

Table 4. Wear characteristics of various surface treatments.

Type of treatment	Surface hardness (HV)	Hardend depth (μ m)	Specific wear loss (mm^2/N)
Mo spray	700	600	4×10^{-9}
Fe spray	410	600	60×10^{-9}
Cr plating	750	20	5×10^{-9}
Gas nitriding	>1 000	20	2×10^{-9}
PVD of TiN	2 300	1	50×10^{-9}
PVD of CrN	1 800	3	7×10^{-9}

Fig. 9. Influence of pickling on the tension-compression fatigue strength of connecting rods.

Fig. 10. Wear curves in the rubbing test with SiO₂ dust mixed oil (Free machining Ti-3Al-2V alloy and steel).

金の方が加工能率で約2倍、工具寿命で4倍強優れることが確認された。その他の加工工程においても快削合金の採用により工具寿命と加工能率が大幅に向上されている。

4. 快削チタン合金コンロッドの性能

Ti-3Al-2V 快削合金製コンロッドを Photo. 1 に示す。これは「NSX」に搭載の3ℓ、V型6気筒エンジンに採用されている。ここでは、このコンロッドの性能と適用効果について述べる。

Fig. 11 は快削チタン合金コンロッドの強度の一例として、コンロッド I セクション部の引張—圧縮疲れ強さを鋼製のコンロッド（非調質鋼）と比較した結果である。また、適用エンジンの最大負荷応力値も示してある。開発コンロッドは鋼製よりも高い疲れ特性が得られ、実用上も十分な強度余裕度を持っている。

快削チタン合金コンロッドと鋼製コンロッドの重量を比較すると約30%の軽量化を達成した。こ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おいては、この耐焼付限界特性の向上はエンジンの限界回転数の向上に直接結びつく。Fig. 12 に快削チタン合金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。実用エンジン回転数として約11.7/sの向上が得られ、大幅な出力性能向上が可能になった。

往復運動部品であるコンロッドの軽量化はエンジン騒音の低下にも効果がある。快削チタン合金コンロッドと鋼製コンロッドを比較すると、エンジン回転のほぼ全域で騒音の低下が認められた。

5. ま と め

新しいチタン合金のコンロッドの開発に際し、基礎的な合金設計と製造工程の開発研究を行い、次のような結果が得られた。

(1) 快削元素としてSとREMを含有するTi-3Al-2V 快削合金は中炭素鋼調質材と同等の機械的性質および疲れ強さを有する。

(2) Ti-3Al-2V 快削合金は中炭素鋼調質材と同等のドリル加工性を有する。旋削加工において

Fig. 11. Endurance limit diagrams of the new titanium alloy and microalloyed steel connecting rods.

Photo. 1. Connecting rod of free machining Ti-3Al-2V alloy.

Fig. 12. Influence of weight of connecting rod on the relationship between engine speed and lubricant thickness of the bearing.

は中炭素鋼調質材より被削性が劣るが、Ti-6Al-4V ベース合金よりも優れている。

(3) 快削合金はベース合金に比べて熱間加工性（延性）が劣る。したがって、Ti-3Al-2V 快削合金の場合には割れ防止のために高温の β 温度域で鍛造することが望ましい。 β 温度域で鍛造した快削合金はベース合金とほぼ同等の疲れ強さを示す。鍛造時の加熱には表面酸化を防止するために高周波炉による短時間加熱を行うことと、表面酸化層を完全に除去するために酸洗処理を行うこと

が適している。

(4) 開発した Ti-3Al-2V 快削合金製コンロッドは鋼製コンロッドにくらべて30%軽くなり、出力向上や騒音低減に役立つことが明らかになった。

(文 献)

- 1) T.Yajima, O.Tamari and H.Kamiya et al.: Proceedings of the 1986 International Conference on Titanium Products and Application, 1985, Titanium Development Association, Ohio.
- 2) S.Nakamura: Proceedings of the Sixth World Conference on Titanium, (1988), 1415, Societe Francaise de Metallurgie.
- 3) S.Nakamura: Preprint of 1st International Conference on Behaviour of Materials in Machining (1988), 4.1, Institute of Metals, London.
- 4) J.F.Kahles, M.Field, D.Eylon and F.H. Froes: Journal of Metals (1985) 4, 27.
- 5) P.D.Hartung and B.M.Kramer: Annals of the CIRP, 31 (1982) 1, 75.
- 6) M.Peters, K.Welpman and H.Doeker: Proceedings of the Fifth International Conference on Titanium (1984), 2267, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde e.V.