

# 自動車部品へのチタン材適用

## Application of Titanium and Its Alloys for Automobile Parts

藤井 秀樹<sup>\*(1)</sup>  
Hideki FUJII

高橋 一浩<sup>\*(2)</sup>  
Kazuhiro TAKAHASHI

山下 義人<sup>\*(3)</sup>  
Yoshito YAMASHITA

### 抄 録

自動車部品へのチタン材適用に関する最近の新日本製鐵の取り組みを紹介した。排気管、マフラーでは、純チタンに関する様々な利用加工データの充実を図るとともに、意匠性などのチタン固有の特徴を十分に発揮できる素材製造技術を確立した。エンジンバルブでは、高出力の二輪車にも対応可能な耐摩耗性、高疲労強度、耐熱性など的高機能特性を備えた、吸気および排気エンジンバルブの製造技術を確立した。これら技術開発により、多くの二輪・四輪車にて軽量、高強度をはじめとしたチタンの利点が活用されるようになった。また、チタンの適用をさらに拡大するために、Super-TIXシリーズなど新しい低コストチタン合金の開発を進めており、今後さらに多くの自動車部品がチタン化されることが強く期待される。

### Abstract

Some of the R & D activities by Nippon Steel on the application of titanium materials for automobile parts were introduced. Regarding exhaust pipes and mufflers, various material data needed to successfully handle commercially pure titanium was extensively accumulated while the manufacturing process by which products can show high performance inherent in titanium such as surface appearances was established. Regarding engine valves, both intake and exhaust valves having high wear resistance, high fatigue strength and high heat resistance were developed, which can be applied even in motorcycles with higher power engines. As a result of those activities, a lot of advantages of titanium usage including lightweight and high strength have become utilized in both many motorcycles and four-wheeled vehicles. In addition, to further enhance the use of titanium in automobiles, low-cost alloys such as Super-TIX series were newly developed, and it is strongly expected that more automobile parts will be made of titanium and its alloys in the very near future.

## 1. 緒 言

チタンおよびチタン合金は、優れた耐食性ととも高い比強度(強度/密度)を有しており、この特性を活用すべく化学・電力分野、宇宙・航空機産業などで主要な金属材料として多用されてきた。一方、自動車分野では、燃費や性能向上の観点から軽量、高強度のチタン材に強い興味こそ示されていたが、高価格であることから、レーシングカーや一部の限定車以外ではほとんど使用されることはなかった。

しかし近年、地球温暖化防止の観点から部品の軽量化が一層強く求められるようになったこと、チタンの低コスト製造技術開発が著しく進展したこと、チタン特有の意匠性、ファッション性が注目されるようになったこと、などの要因が重なり、チタン、チタン合金を一般量産車の様々な部品に適用する動きが活発化している。新日本製鐵でもこのような動きに呼応し様々な関連技術開発を展開中であり、その概要を先報<sup>1)</sup>で紹介したところである。実際にチタンが自動車部品に適用された例やチタンを使用することによる主要な利点についても先報にて紹介したのでこれらは割愛し、最近の新日本

製鐵の取り組みについてその一部を具体的に紹介する。

## 2. 排気管およびマフラー

### 2.1 チタン適用の利点

これまで排気管とマフラーには普通鋼やステンレス鋼、更にはアルミニウムやFRPなども使用されてきた。当該部品は車体の大型構造部品であり軽量化効果は大きく、燃費やエンジン出力そして走行性の向上に寄与する。また排気ガスが接触することから400 以上の高温になるが<sup>2)</sup>、この点チタンは鋼に比べて比強度が高くアルミニウムよりも耐熱性に優れており、軽量化効果を発揮する素材として適している。例えば、鋼をチタン化することによって二輪車で約3kg、四輪車で約8kgの軽量化が図られている。

また、チタンは鋼(フェライト系)よりも熱膨張率とヤング率が小さく、表1のように熱膨張、収縮による発生応力の半減が見込まれることから、熱サイクル疲労特性も有利である。さらに、当該部品は冷間でのプレスや曲げなど種々の成形加工により製造されることから冷間成形性が要求されるが、JIS 2 種クラスの純チタンはこれを十分に満足する特性を有している。

<sup>\*(1)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主幹研究員 工博  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2278

<sup>\*(2)</sup> 光技術研究部 主任研究員

<sup>\*(3)</sup> チタン事業部 グループリーダー

表1 熱膨張によって発生する応力の目安(熱膨張係数×ヤング率#)の比較

材料	熱膨張時の発生応力の目安 (熱膨張係数×ヤング率#)
フェライト系ステンレス鋼	1
オーステナイト系ステンレス鋼	1.5
チタン	0.45

#: フェライト系ステンレス鋼を1として規格化した値

上述の機能面に加えて、特にマフラーは車体外装デザインの対象部品であることから、チタン化により新規性やファッション性が高まり、これらもセールスポイントの一つとなる。また他金属とは異なる“チタンらしい”独特の表面肌も市場では好まれている<sup>2,4)</sup>。この他、使用中のチタン特有の干渉色が様々に変化することや鋼とは異なる独特の排気音も魅力とされている。

このように軽量化効果、加工性、新規性、ファッション性など多岐にわたる利点がチタン化により享受できることから、当該部品のチタン化が急速に進んでいる。

### 2.2 要求特性と新日本製鐵の取り組み

新日本製鐵では、チタンを熟知する部品メーカーや自動車メーカーだけでなく、チタンの取り扱いに必ずしも慣れていないメーカーにおいても十分にチタンを使いこなせるように、まず、既存材料である排気系耐熱ステンレス鋼(フェライト系)とチタンを比較したオリジナルデータの充実を図った。その内容は、室温の引張、 $n$ 値、 $r$ 値、高温の引張、疲労、酸化、熱サイクル疲労および酸化など多岐の特性にわたるものである。

室温の引張特性はJIS 2種純チタンレベルが排気系耐熱ステンレス鋼とほぼ同等である。丸井ら<sup>5)</sup>によると排気管とマフラーには様々な加工工程があり必要十分な引張伸びは30%程度とされている。純チタン2種レベルで30%の伸びは十分に達成できるが、高強度の純チタンJIS 4種では30%の伸びは困難であり、Ti-3Al-2.5V合金も20%程度の伸びしか得られない。そのため、純チタン2種レベルの材質が主として適用されている。

また実際の加工を反映したチタンの成形性を把握するために、曲げ、張り出し、穴広げなどの諸特性を独自に評価するとともに、図1に示すような成形限界図(FLD)を作成し、種々部品形状の多様な成形経路に対して加工限界を予測できる基礎データを整備した。これらの成形性データは、メーカーにおいてチタン製マフラー、排気

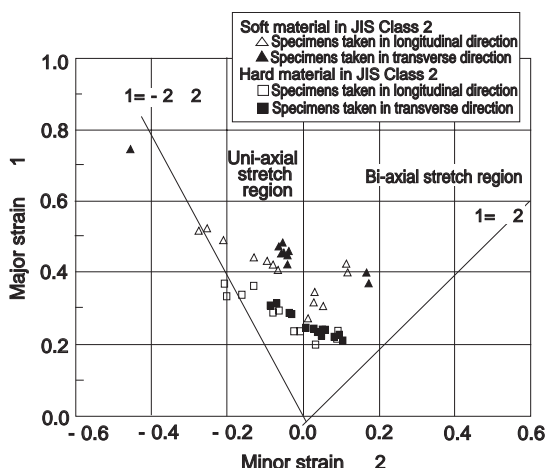


図1 純チタンJIS 2種相当材の成形限界図

管の製造工程を迅速かつ的確に確立する上で助力となったものと信ずる。

酸化限界温度は排気系耐熱ステンレス鋼で約850~1050 といわれているが<sup>6)</sup>、チタンはそれよりも低温の700 付近から急激に酸化が進行する。現状では全く問題となっていないが、今後、エンジンの高出力化や排ガス規制によって高温化することが予測されることから、排気系耐熱ステンレス鋼並みの耐酸化性が必要になる可能性もある。

この他、意匠の観点からの付加価値を高めるために、ショットピーニング<sup>9)</sup>や大気酸化<sup>2,4)</sup>などの表面処理によりチタン独特の風合いの表面肌を付与する場合があります、素材肌の均一性が要求される。新日本製鐵は、表面肌の意匠性と均一性が重視される建材で培った高い表面制御技術<sup>7)</sup>を有しており、この技術はマフラー向けチタン材の生産にも十分に活用されている。

### 2.3 適用例

チタンの適用は国内では1997年頃大型二輪車のアフターマーケットから火が付き、1998年には大型二輪車の市販量産車に搭載されるようになった。現在では約400 t規模のマーケットに成長している。最近では、写真1に示す大型二輪車をはじめチタン製の排気管やマフラーを搭載した二輪車を見かけることも少なくない。四輪車



写真1 チタン製マフラーを搭載した二輪車



写真2 チタン製マフラーの四輪車への適用例

では依然としてアフターマーケットが中心であるが、軽量化効果とデザイン性が評価され、市販車への搭載例(写真2)も増えてきている。

### 3. エンジンバルブ

エンジン部品の軽量化は、燃費改善、静粛性、高出力化など、他の部品に比べその効果が大きく、特にエンジンバルブはチタンのこのような特徴が最大限に発揮できる部品として、いち早くチタン化が検討されてきた。

#### 3.1 吸気バルブ

最近までに多くの二輪車、四輪車にチタン合金製吸気バルブが搭載されるようになったが、大部分はチタン合金の中でも最汎用のTi-6Al-4Vである。新日本製鐵でも、吸気バルブの使用環境や量産性からTi-6Al-4Vが最適であると考え、この合金を、特に軽量化および高出力化ニーズの高い二輪車の吸気バルブに適用すべく研究開発を愛三工業株式会社と共同で実施してきた<sup>8)</sup>。

チタン合金を吸気バルブに適用するにあたり最大の課題は、耐摩耗表面処理技術の開発である。チタン合金は耐摩耗性が低いことは良く知られており、硬質のTiNコーティング、Mo溶射、Crめっきなどの表面処理などが用いられることが多いが、いずれも高コストであり、かつ長期間の耐摩耗性維持が難しいという問題点があった。そこで、チタン中に高濃度に固溶し硬度を高め、かつ内方に拡散し比較的厚い硬化層が得られるという特徴を有する酸素を活用した“酸化処理”を適用することにした<sup>9,10)</sup>。

酸化処理は、基本的に大気中で高温域に加熱、保持する熱処理であるが、Ti-6Al-4Vの耐高温クリープ特性は必ずしも良好ではなく、酸化処理中に自重でバルブが変形するのを極力防止する必要がある。



写真3 Ti-6Al-4V製吸気エンジンバルブの光学顕微鏡組織

る。そこで、耐クリープ特性が特に劣悪な等軸組織やいわゆるミル焼鈍組織を避け、最も耐クリープ特性の優れた針状組織を採用した。写真3に軸部断面の微視組織を示す。バルブ全体をこのような微細針状組織とすることで、酸化処理中の変形も抑制できるようになった。

一般に針状組織は延性や疲労特性が低いとされるが、粗大な相を粒界に析出させることなく十分に微細な針状組織とすることで、高い延性や等軸組織並の疲労特性を確保することが可能である<sup>11)</sup>。実際バルブ軸部から切り出した試験片を用いて引張特性を評価したところ、980MPa以上の高い引張強度と12%以上の高い伸びが確認されており、また図2に示すように、針状組織でも等軸材と比べ遜色ない疲労特性を有していることが確認されている。

さて、酸化硬化層を付与すると耐摩耗性は向上するが、一方、硬化層の付与により疲労特性が低下することが知られている<sup>9,10)</sup>。したがって、この相反する二特性がバランスする最適な熱処理条件を把握しこれを適用する必要がある。そこで、670~820の温度範囲で1~16hの大気熱処理を行い、表面性状や表層部の硬度分布を測定した。

図3は、各温度で1h酸化処理した試料の表層硬度分布である。また、図4に670および820で時間を変えて酸化処理した試料の表層硬度分布を示す。処理温度が高くなるにつれ、あるいは処理温度が長くなるにつれ、酸素がチタン合金内部に拡散する距離が長くなり、より深くまで硬度値が高くなっている。本試験条件中最高温度長時間の820、4h処理した試料では約50μmが、最も低温短時間の670、1h処理した試料では約10μm程度が硬化していることが確認された。もちろん表面にはTiO<sub>2</sub>の酸化スケールが生成し、ここから

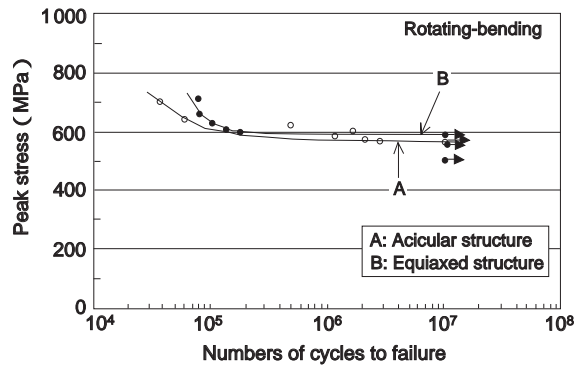


図2 等軸組織および微細針状組織を有するTi-6Al-4Vの回転曲げ疲労特性

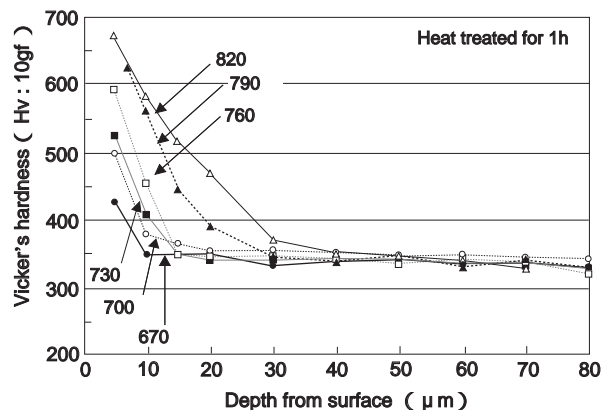


図3 670~820で1h大気中熱処理したTi-6Al-4Vの表層硬度分布

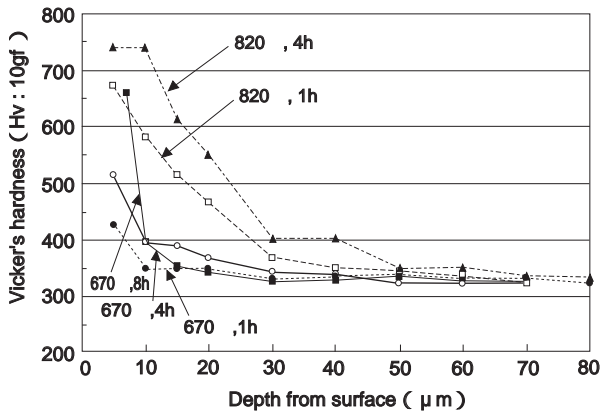


図4 670 および820 で大気中熱処理したTi-6Al-4Vの表層硬度分布におよぼす熱処理時間の影響

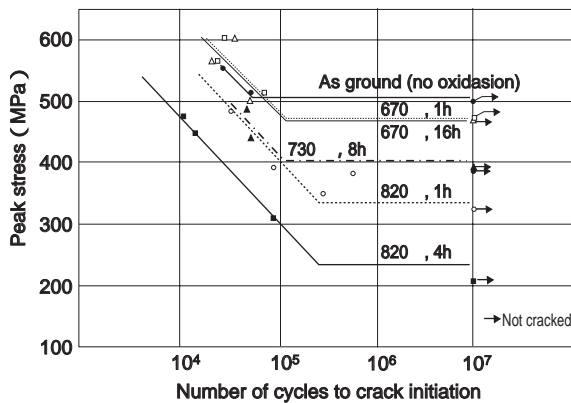


図5 種々の条件で酸化処理を施したTi-6Al-4V製吸気エンジンバルブの実体疲労特性

酸素がマトリクス中に拡散するので、スケール直下最表層部の硬度はどの条件で熱処理を行っても同等になると考えられる。しかし硬度測定可能な表層から数μmの深さでは、各熱処理条件によって顕著な硬度差が生じていた。また、一部の高温長時間条件では、酸化硬化層に割れが認められた。このような条件は酸化処理としては不適であり、実際のバルブ製造では避ける必要がある。

このようにして酸化硬化層厚さと処理条件の関係が得られたところで、実際に酸化処理を施したエンジンバルブを作製し、疲労特性および耐摩耗性を評価した。図5は、実バルブに繰り返し曲げ応力を付与することにより測定した酸化処理バルブのS-N曲線である<sup>9)</sup>(愛三工業(株)による)。酸化硬化層の厚い条件ほど疲労強度は高くなっているが、670℃処理材では1hと16hで顕著な差はなく、両方とも酸化処理無しの場合とあまり変わらない高疲労強度が得られている。もちろん、酸化処理条件の選定には耐摩耗特性を考慮する必要があり、バルブの摩耗寿命と要求疲労特性の両方を勘案のうえ酸化処理条件を決定することになる。

### 3.2 排気バルブ

事例は少ないが、使用中高温に曝される排気バルブには代表的な耐熱合金であるTi-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si(6242S)が使用されることが多い。しかし、二輪車産車では、バルブはより高温域に長期間曝されるため、耐熱性や信頼性のより高い材料を適用することが望ましい。そこで、チタン合金中最も耐熱性に優れるとされるTIMETAL@1100(Ti-2.7Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si)の適用を検討することにした。この合金は実用チタン合金の中では最も耐熱性に優れる合金の一つとされるが、その耐用温度は高々600℃程度といわれてお

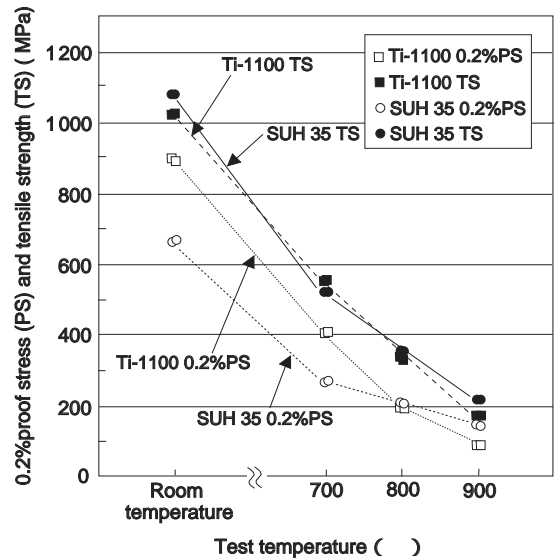


図6 TIMETAL@1100(Ti-1100)およびSUH 35の室温～高温引張特性

り<sup>12)</sup>、二輪車排気バルブのように800℃付近までの耐熱性が要求される用途に対しては、改めて最適な熱処理条件を把握し、実際に800℃付近での材質特性を確認しておく必要がある。そこで、種々の熱処理を施した材料を用いて室温～800℃付近までの強度や耐高温クリープ特性を評価し、最高の材質特性バランスを発現させる条件を把握するとともに、実際にエンジンバルブを作製しこれを評価した。

図6に、適正な熱処理を行ったTIMETAL@1100合金の室温～高温域の強度を示す。Ti-1100の0.2%耐力は、室温～700℃の温度範囲では、鋼製排気バルブの主要素材であるSUH 35よりも高く、800℃でほぼ同等の水準である。800℃における疲労強度もSUH 35と同等レベルであることも確認されており<sup>1)</sup>、懸念された耐高温クリープ特性もむしろSUH 35より優れていることが確認されている<sup>1)</sup>。このように、本合金に適切な熱処理を施すことにより、排気バルブとして十分な特性を引き出すことができた。

また、Alを含有するチタン合金では600℃付近の温度域に長時間曝露すると $\alpha_2$ と呼ばれる規則相が生成し延性が低下することが知られているが<sup>13)</sup>、本合金は数千時間もの長期間600℃付近の温度域に曝しても、延性が残留していることも確認済みである。

## 4. 自動車部品向け新合金開発とその適用研究

先に紹介した例は、いずれも既存の材料を自動車部品に適用しようとした例であるが、新日本製鐵では、チタン合金が自動車部品を始めとした身近な民生品部品に多用されるようになることを目的とし、低コスト合金の開発も実施している。そして、この合金を自動車部品に適用すべく研究開発も実施している。

その一つが、Super-TiXシリーズと呼ばれる一連の合金群であり、図7にその強度・延性バランスを他の既存合金と比較して模式的に示す。このSuper-TiXシリーズはTi-Al-Fe系とTi-Fe-O-N系に大別されるが<sup>14-19)</sup>、その中のTi-Al-Fe系合金群は、既存合金で多用されている高価な相安定化元素であるVやMoを使用せず、安価なFeでこれらを代替した合金群で、特に中温域にまで温度上昇をとまうような用途に適している。その中核合金であるSuper-TiX51AFはTi-5%Al-1%Feを中心組成とし、Ti-6Al-4V並の1000MPa程度の引張強さ

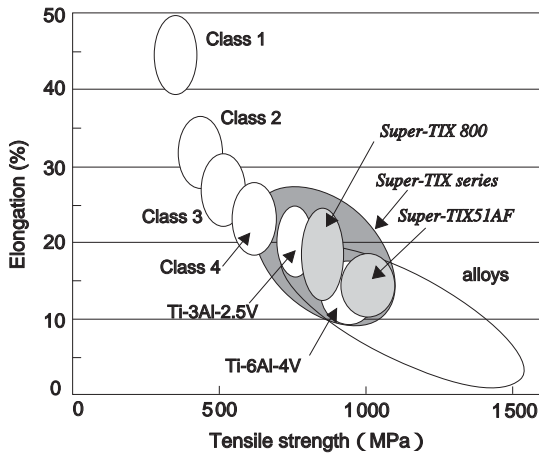


図7 Super-TiXシリーズおよび代表的チタン材の強度、延性の関係 (模式図)

を有する合金で、棒線を中心にその適用検討が進められている。

一方、Ti-Fe-O-N系合金は、室温付近で使用される部品など、あまり高温域に曝されることのない用途に特に適しており、安価なFe、酸素、窒素をバランスよく配合することにより、優れた熱間加工性をはじめ様々な高機能特性を引き出している。その中核合金であるSuper-TiX800はTi-1%Fe-0.35%O-0.01%Nを基本組成とし、Ti-6Al-4VとTi-3Al-2.5Vの中間の800MPa程度の引張強さと、優れた熱間および冷間での加工性を有しており、厚中板、熱間圧延・冷間圧延薄板、棒・線材など様々な形状の製品の製造が可能となっている。

これら合金群の詳細は文献(14)~(19)に紹介されているので、焼鈍材の引張特性と回転曲げ疲労特性を図8~図10に紹介するとともに、これら合金は、いわば自動車部品向けGradeとして、その特性に応じて、バルブ、コンロッド、リテーナ、ファスナーなど各種自動車部品への適用が進むことが強く期待されている。

なお、このSuper-TiXシリーズは製造コスト低減のために選択し

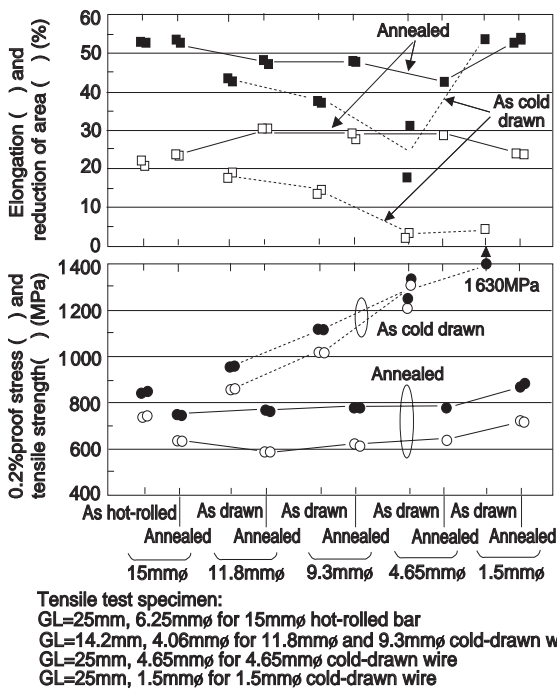


図8 Super-TiX800 (Ti-1%Fe-0.35%O-0.01%N)の熱間圧延棒および冷間伸線材の引張特性

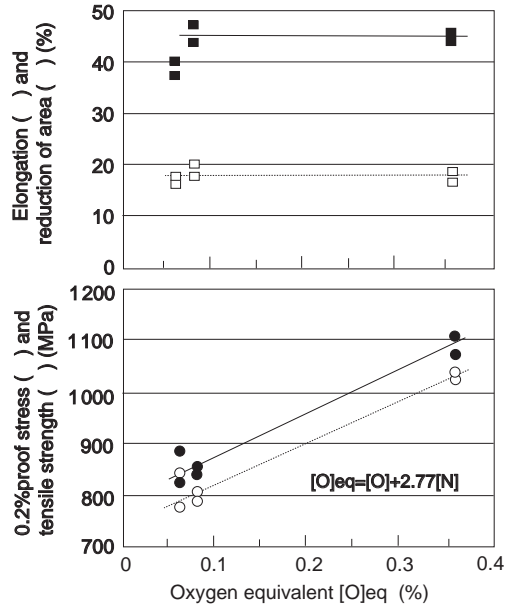


図9 Super-TiX51AF (Ti-5Al-1Fe)の引張特性におよぼす酸素等量の影響

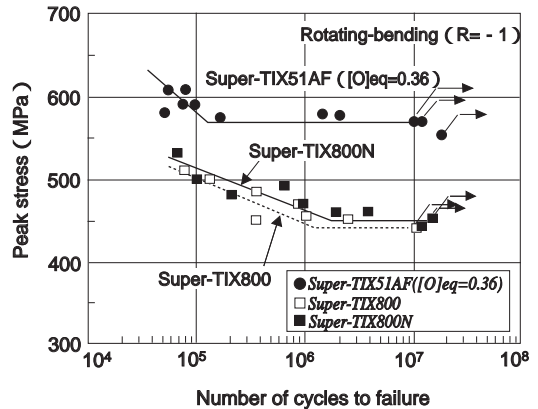


図10 Super-TiX800およびSuper-TiX51AF熱間圧延焼鈍棒(15mm径)の回転曲げ疲労特性 焼鈍条件は750℃, 1h, 空冷

た特有の合金元素構成に起因し、いくつかの使用上の注意点がある。これらについては文献(14)~(19)に詳細が紹介されているので参照されたい。

上記Super-TiXシリーズのように航空機向け以外の用途を前提に設計されたチタン合金としては、型チタン合金のTIMETAL@LCB (Ti-4.5Fe-6.8Mo-1.5Al)も好例として挙げることができる。この合金は米国TIMET社で開発された合金であり、型チタン合金の特徴である低ヤング率(約80000MPa)と高強度(約1400MPa)を活用し、サスペンションスプリングなどへの適用が検討されている。実際、2001年にはフォルクスワーゲンLupo FSIに採用されており、日本市場でもその採用が期待されている。

## 5. 結 言

軽量、高強度の特徴を活用し、いくつかの自動車部品が量産でもチタン化されるようになってきた。しかし、今後さらにチタンの活用を進めるには、さらに多くの課題を解決していく必要がある。その一つが、低下したとは言え未だに高級素材の感の強いチタンの製造コストの大幅低減である。これは素材のコスト低減のみを意味するものではなく、部品加工コストの低減も極めて大きな要素であ

ることに留意する必要がある。すなわち、安価な自動車部品向け素材を開発すると同時に、十分その素材の特徴を理解し、適切な加工・処理方法を開発・適用し、トータルでコスト低減を図る必要がある。これを実現するためには、我々素材メーカーと部品メーカー、自動車メーカーの三者がより強い協力関係のもと、研究開発を押し進める必要がある。

今後、このような連携を強固に押し進め、軽量、高強度のチタンの特徴が自動車分野においてさらに発揮されることを祈念して結びとしたい。

#### 参考文献

- 1) 山下義人 高山勇 藤井秀樹 山崎達夫:新日鉄技報 (375),11(2001)
- 2) 高橋尚久:ヤマハ発動機技報 .31 .39(2001)
- 3) 高橋 恭 丸井勇治:チタン .50 .93(2002)
- 4) 高橋尚久:チタン .50 .286(2002)
- 5) 丸井勇治 木下豊隆 高橋恭:Honda R&D Technical Review .14(2002)
- 6) 植松美博:自動車シンポジウム～高強度化の限界を探る～ .1993 p.97
- 7) 高橋一浩:チタン .50 .303(2002)
- 8) 富永忠良 鈴木多喜夫 竹内仁司 藤井秀樹:自動車技術会 2002年秋期大会前刷集 .2002
- 9) Takayama J., Yamazaki T.: SAE Technical Paper 950940 ,1995
- 10) 高山勇 山崎達夫 :新日鉄技報 (375),11(2001)
- 11) Lutjering G., Gysler A.:Titanium Science and Technology .Ed. Lutjering G., Zwicker J.J., Bunk W. Deutsche Gesellschaft fur Metallkunde E.V. 1985 p.2065
- 12) Bania P.J. :J Met ( March )20(1988)
- 13) Donlon W.T., Allison J.E., Lasecki J.V. : Titanium '92 Science and Technology . Ed. Froes F.H., Caplan J., TMS .1993 p.295
- 14) Fujii H., Takahashi K., Soeda S., Hanaki M.:Titanium '95 Science and Technology . Ed. Blenkinsop P.A., Evans W.J., Flower H.M., TIM ,1996 p.2539
- 15) Fujii H., Soeda S., Hanaki M., Okano H.: REF (14),230(1996)
- 16) 藤井秀樹 藤澤和郎 石井満男 山下義人:新日鉄技報 (375),9(2001)
- 17) 藤井秀樹 高橋一浩:新日鉄技報 (375),9(2001)
- 18) 藤井秀樹 山下義人 八太好弘 松橋一夫:チタン .49,171(2001)
- 19) 藤井秀樹 菊池正夫 山下義人 石井満男 松橋一夫:CAMP-ISIJ .15,130(2002)