

(論文)

## 4 輪車マフラー用耐熱チタン合金

### Heat-resisting Titanium Alloy for Automobiles Exhaust Systems



屋敷貴司\*(工博)  
Dr. Takashi Yashiki



山本兼司\*(工博)  
Dr. Kenji Yamamoto

Research was performed to develop a titanium alloy which had a high temperature oxidization resistance greater than that of Ti-1.5Al (ASTM Gr.37) which is the titanium alloy currently used for exhaust systems. A new alloy, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb, which had a high temperature oxidization resistance and suitable strength for exhaust systems used at high temperatures was developed. This alloy is currently being considered for both motorcycle and automobile exhaust systems.

まえがき = 純チタンは軽量性、耐食性および成形性などに優れるとともに、高級感や意匠性にも富むことから、大排気量 2 輪車マフラーへの適用が定着しつつある<sup>1)</sup>。一方、4 輪車においては、マフラーが車体下部に隠れて見えないことから、高級感や意匠性がアピールされ難いことに加えて、排ガス温度が 2 輪車よりも高く、耐高温酸化性と高温強度などの問題で、純チタンの使用はオプションマフラーなどの限定的適用にとどまっている。このような状況において、当社では純チタンの成形性を大きく損なうことなく、耐高温酸化性と高温強度を改善した Ti-1.5Al を開発した<sup>2),3)</sup>。本合金は、エンジン形式や触媒搭載などの理由により、排気ガス温度が従来よりも高温の 700 ~ 750 前後となる 2 輪車のマフラーに採用されている。また、2004 年に ASTM 規格に登録される (ASTM Gr.37) とともに、これまでにアメリカ、イギリス、ドイツ、イタリア、フランスにおいて特許を取得するに至っている。

4 輪車の場合、チタンの採用が検討されるのは、比較的低温であるセンチパイプ以降の部位であるが、車種によってはこの部位でも排気ガス温度が局所的に 750 ~ 800 に達するものがある。チタンがこのような高温に長時間曝された場合、酸素の拡散侵入により、表面近傍に硬化層が形成され脆化する。また、剥離性の酸化スケールが形成され、金属チタン部分の減肉が生じ、これが強度低下を招く。さらに、結晶粒の粗大化による疲労強度の低下と脆化も生じる。このような高温環境では、Ti-1.5Al 合金でも耐酸化性の面では対応できない場合がある。したがって、Ti-1.5Al 合金以上の耐高温酸化性を有し、なおかつマフラーシステムを構成する部品形状に加工できる Ti-1.5Al 程度の強度特性を持ったチタン材の開発が望まれている。

本研究はこのような背景の中、強度レベルは実績のあ

る Ti-1.5Al 合金と同程度で、2 輪車マフラーのみならず、4 輪車マフラーにも適用できうる耐高温酸化性を有するチタン合金を開発すべく実施したものである。本報では、チタンの耐高温酸化性を向上させる可能性のある添加元素として Al および Si に注目し、これらのチタンへの微量添加が、引張特性、酸化による重量増、表面硬化層の形成、減肉および結晶粒成長に及ぼす影響を調べた結果を報告する。また、Ti-Al-Si 系合金への Nb 添加が上記特性に及ぼす影響についても一部報告する。さらに、この Nb 添加合金の耐脆化性評価結果、常温・高温引張試験結果および耐酸化メカニズムの調査結果も報告する。また、以上の検討により、開発材と位置づけた Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金冷延板を 6ton 大型鋳塊より量産試作し、常温引張特性および成形性を評価した結果についても報告する。

#### 1. 実験方法

##### 1.1 供試材

表 1<sup>4)</sup> に 8 種類の供試材を示す。No.1 ~ 3 はボタンアーク炉にて溶解した約 90g の小型鋳塊から、熱間鍛造、熱延および冷延を経て作製した厚さ 1mm の板である。

表 1 供試材の詳細  
Table 1 Details of specimens

No.	Nominal composition (mass%)	Weight of Ingot (kg)	Thickness (mm)	Note
1	Ti-0.5Al	0.09	1	Trial product
2	Ti-0.5Al-0.3Si	0.09	1	Trial product
3	Ti-0.5Al-0.6Si	0.09	1	Trial product
4	Ti-0.5Al-0.6Si	20	3.5	Trial product
5	Ti-0.5Al-0.6Si-0.2Nb	20	3.5	Trial product
6	Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb	600	1 & 1.2	Trial product
7	JIS class 2 CP*Ti	-	1 & 1.2	Commercial product
8	Ti-1.5Al (ASTM Gr.37)	-	1 & 1.2	Commercial product

\*CP : commercially pure

\* 鉄鋼部門 チタン本部 チタン技術部 \*\* 技術開発本部 材料研究所

No.4, 5 はコールドクルーシブル誘導溶解炉にて溶製した約 20kg の小型鑄塊から作製した厚さ 3.5mm の熱延板である。No.6 は消耗電極式真空アーク溶解炉にて作製した約 600kg の鑄塊から、熱間鍛造、熱延および冷延を経て作製した厚さ 1mm および 1.2mm の板である。No.7, 8 は市販の厚さ 1mm および 1.2mm の冷延板である。供試材の作製には 3 種類の重量の鑄塊を用いたが、これは開発材の組成を決定していく過程で、量産を意識し、逐次鑄塊を大型化していったことによる。

## 1 2 評価

### 1 2 1 常温引張試験

表 1 の No.1 ~ 3 の供試材から、厚さ 1mm、標点間距離 25.4mm、平行部幅 6.35mm の引張試験片を作製した。ひずみ速度は 0.2% 耐力までは 0.5%/min、その後は 1 分以内に破断する条件で引張り、0.2% 耐力、引張強さおよび全伸びを求めた。なお、引張方向は圧延方向とした。

### 1 2 2 高温引張試験

表 1 の No.6 ~ 8 の供試材から、厚さ 1mm、標点間距離 25mm、平行部 6.25mm の引張試験片を作製し、室温、200、400、600 および 800 にて、高温引張試験を実施した。引張は各温度に達してから 15 分保持した後開始し、ひずみ速度は 0.2% 耐力までは 0.5%/min、それ以降は 5%/min とした。なお、引張方向は圧延方向とした。

### 1 2 3 耐高温酸化性評価

表 1 の No.1 ~ 3 および No.7, 8 の供試材から、幅 8mm、長さ 100mm の短冊状の試験片を作製し、電気炉にて 800、100 時間の大気加熱を実施し、加熱前の表面積と、加熱前後の重量変化から、単位面積あたりの重量変化を求めた。

800、100 時間の大気加熱前後の上記短冊状試験片を、厚さ 1mm、幅 8mm の断面が観察できる向きに樹脂埋めし、鏡面研磨とエッチングを実施した。そしてこの断面において、表面から深さ方向に向かってマイクロピッカー硬度を測定した。荷重は 0.245N とし、測定間隔は表面から 10、20、40、60 および 80 μm とした。なお、この断面硬度測定は表 1 の No.4, 5 の 800、100 時間大気加熱後も実施した。

表 1 の No.1 ~ 3 および No.7, 8 の 800、100 時間の大気加熱前後の試料の厚さ方向断面中央部のミクロ組織観察を光学顕微鏡にて ×100 で実施した。さらに、これら試料を光学顕微鏡を用い、×75 にて一方の表面から他方の表面までが写るように写真撮影し、これら断面写真から試験片の肉厚を測定した。そして、800、100 時間加熱前の肉厚から加熱後の肉厚を減じることで酸化による減肉量を求めた。なお、800、100 時間加熱後の断面は酸化スケール部分と金属チタン部分に分かれるが、光源

の光を反射して白く写っている部分を金属チタン部分と判断し（酸化スケールは光を反射しないので暗灰色に見える）、この白く写る部分の肉厚を加熱後の肉厚とした。

表 1 の No.6, 7 および 8 を用い、厚さ 1.2mm、外径 38.1mm、長さ 50mm の溶接管を作製した。そして、これらを 800 で 200 時間大気加熱した後、バイスで溶接管の外周を挟み、割れが発生するまで圧縮扁平させた。そして次の式で扁平率を算出した。この扁平率の大小と破壊形態より耐脆化性を評価した。

$$\text{扁平率}(\%) = (38.1 - \text{圧縮扁平方向で測定した割れ発生時の溶接管外径}) / 38.1 \times 100$$

### 1 2 4 分析

表 1 の No.6 および No.7 の 800、100 時間の大気加熱により形成された表面酸化スケールの断面微細構造を、SEM にて ×500 および ×2000 で観察した。また、表 1 の No.6 の耐高温酸化性向上機構を調べるために、800、100 時間の大気加熱前後の試料の表面近傍部断面を EPMA にてマッピングした。マッピング条件は加熱前後で同じとした。

### 1 2 5 量産試作材の評価

本研究により決定した開発材組成 Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb を有する合金冷延板を、量産試作の位置づけで、実生産と同じ製造設備を用い製造した。すなわち、当社高砂製作所チタン溶解工場の消耗電極式真空アーク溶解炉にて 6ton 鑄塊を製造し、3000ton プレスにて分塊鍛造後、当社加古川製鉄所にて分塊圧延、熱延、冷延および最終焼鈍を実施し、厚さ 1mm および 1.5mm の冷延板を作製した。このうち、厚さ 1mm の冷延板の常温引張試験を JIS H 4600 および JIS Z 2241 に準じて行った。そして、0.2% 耐力、引張強さ、全伸びおよびヤング率を求めた。なお、引張方向は圧延方向およびその直角方向とした。

また、JIS Z 2247 に準じ、エリクセン試験を実施した。比較のため、市販の厚さ 1mm の Ti-1.5Al 合金についても常温引張試験とエリクセン試験を実施した。さらに板厚 1.5mm の冷延板を用い、成形限界線図を作成した。本線図の作成は、短冊状試験片の作製 スクライブドサークルの転写 成形試験 破断部のひずみ測定 成形限界線図作成、の手順で実施した。成形試験における変形様式は、単軸変形、平面ひずみ変形、等 2 軸変形、およびそれぞれの間（不等 2 軸変形）の 5 種類とした。成形条件の詳細を表 2 に示す。

## 2. 実験結果および考察

### 2. 1 Ti-0.5Al-Si 系合金の評価

図 1<sup>4)</sup> に Ti-0.5Al-Si 系合金の常温引張試験結果を示す。Si 添加により 0.2% 耐力、引張強さとともに上昇する。一

表 2 成形限界線図作成における成形条件  
Table 2 Forming conditions for making forming limit diagram

Deformation mode	Test pieces size (mm)	Forming test	Others
Uniaxial tensile strain	JIS Z 2202 No.5	Tensile rate : 10mm/min	Longitudinal direction=Rolling direction Scribed circle dia. : 6.35mm Room temperature n=3
Plane-strain	81 <sup>w</sup> × 160 <sup>l</sup>	Spherical head punch : 50mm Die : 54.8mm, R=10mm Fold pressure : 12 tf	
Equibiaxial tensile strain	160 <sup>w</sup> × 160 <sup>l</sup>		
Inequibiaxial tensile strain	65 <sup>w</sup> × 160 <sup>l</sup> 83 <sup>w</sup> × 160 <sup>l</sup>		

Ti-1.5Al (ASTM Gr.37) tensile properties specification  
 0.2% proof strength : 215-450MPa  
 Tensile strength : min. 345MPa  
 Elongation : min. 20%

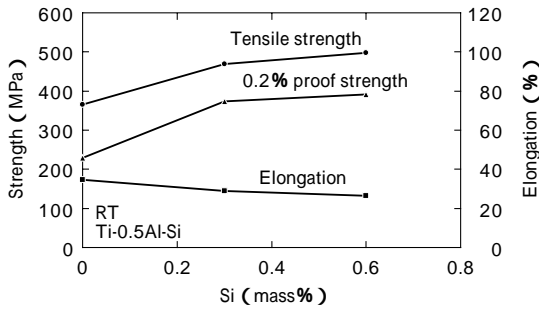


図1 Ti-0.5Al-Si合金の室温引張試験結果

Fig. 1 Tensile test results of Ti-0.5Al-Si at room temperature

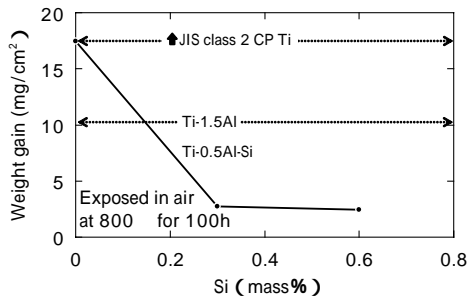


図2 Ti-0.5Al-Si合金, JIS 2種純チタンおよびTi-1.5Al合金の800 °C, 100時間大気加熱による重量増

Fig. 2 Weight gain of Ti-0.5Al-Si, JIS class 2 CP Ti and Ti-1.5Al by exposure in air at 800 °C for 100h

方,伸びはSi添加により低下する。図1にはTi-1.5Al合金の0.2%耐力,引張強さおよび伸びのASTM規格値を記載している。最も高強度かつ低伸びとなるTi-0.5Al-0.6Si合金でも0.2%耐力はTi-1.5Al合金の規格値の範囲内であり,伸びも規格下限値よりも高い値となっている。このことから,Ti-0.5Al-Si系合金はマフラーを構成する部品に加工しうる程度の強度特性を有しているものと判断される。

図2<sup>4)</sup>はTi-0.5Al-Si系合金を,800 °C,100時間大気加熱したときの重量増を,JIS 2種純チタンとTi-1.5Al合金のものと比較した結果である。JIS 2種純チタンは酸化スケールの剥離,脱落が激しく,重量増を正確に測定できなかったが,Ti-0.5Al合金以上の酸化増量であった。Alのみの添加によっても酸化による重量増は抑制されるが,Siの複合添加により一層抑制され,Ti-1.5Al合金よりも酸化増量は少なくなる。また,Si添加量0.3mass%で,この効果はほぼ飽和する。

図3<sup>4)</sup>は,Ti-0.5Al-Si系合金,JIS 2種純チタンおよびTi-1.5Al合金を800 °C,100時間大気加熱したときの表面近傍の厚さ方向断面マイクロピッカース硬さ測定結果である。Alの単独添加およびAlとSiの複合添加により,断面硬さはJIS 2種純チタンよりも低くなる。またAlとSiを複合添加したものの表面近傍の断面硬さは,Ti-1.5Al合金よりも低い。表面の硬化は,酸素の拡散進入による固溶強化によるものと考えられる。JIS 2種純チタンの硬さよりもAlの単独添加材およびAlとSiの複合添加材の方が硬さが低くなっている理由の一つには,酸素の拡散侵入の障壁となる緻密な酸化スケールの形成が考えられる。

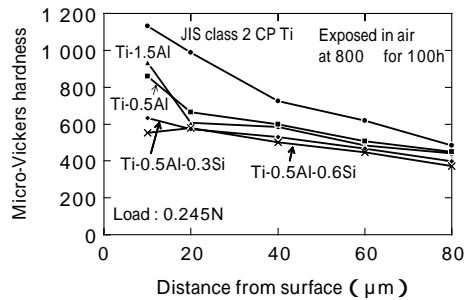


図3 Ti-0.5Al-Si合金,JIS 2種純チタンおよびTi-1.5Al合金の800 °C,100時間大気加熱後の断面マイクロピッカース硬さ

Fig. 3 Cross sectional micro-Vickers hardness of Ti-0.5Al-Si, JIS class 2 CP Ti and Ti-1.5Al after exposure in air at 800 °C for 100h

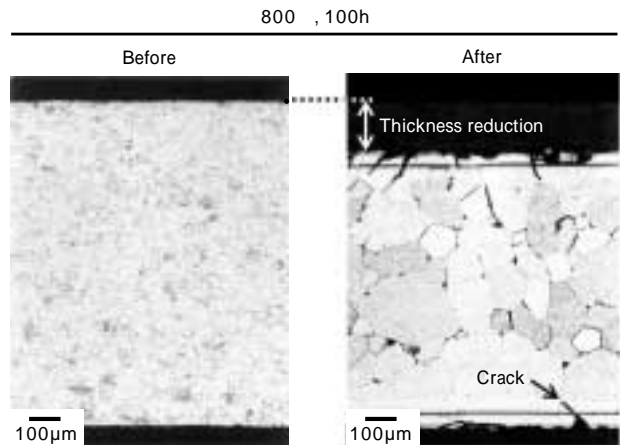


写真1 JIS 2種純チタンの800 °C,100時間大気加熱前後の断面マイクロ組織

Photo 1 Cross sectional microstructure of JIS class 2 CP Ti before and after exposure in air at 800 °C for 100h

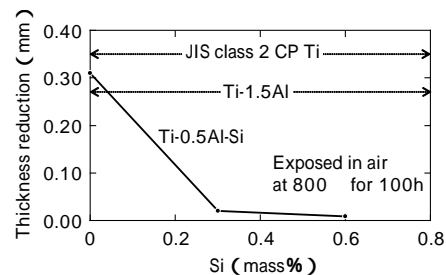


図4 Ti-0.5Al-Si合金,JIS 2種純チタンおよびTi-1.5Al合金の800 °C,100時間大気加熱による減肉量

Fig. 4 Thickness reduction of Ti-0.5Al-Si, JIS class 2 CP Ti and Ti-1.5Al by exposure in air at 800 °C for 100h

また図3より,最表面の測定点を除いた場合,JIS 2種純チタンの硬さ変化の傾きよりも,Alを単独添加したもの,およびAlとSiを複合添加したものの傾きがわずかながら小さいように見受けられる。このことから,Al,Siの添加により母材中の酸素の拡散がわずかながら抑制されている可能性が考えられる。

写真1<sup>4)</sup>はJIS 2種純チタンの800 °C,100時間大気加熱前後の断面マイクロ組織である。結晶粒が粗大化し,結晶粒径が100μmを超えると見なされる粒も存在する。また酸化による減肉も生じている。さらに表面近傍には深い割れが生じている。一方,Ti-0.5Al-Si系合金についても同様の観察を実施したところ,このような割れは認められなかった。

図4<sup>4)</sup>はTi-0.5Al-Si系合金,JIS 2種純チタンおよびTi-

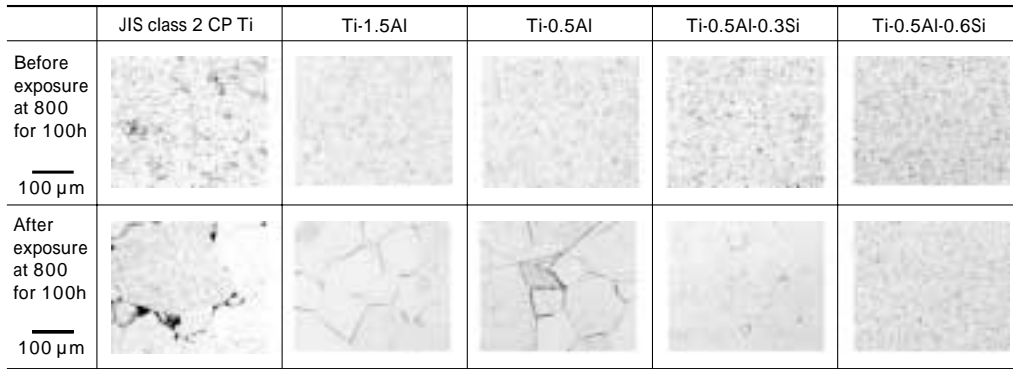


写真2 Ti-0.5Al-Si 合金, JIS 2 種純チタンおよび Ti-1.5Al 合金の800 , 100時間大気加熱前後の断面マイクロ組織  
Photo 2 Cross sectional microstructures of Ti-0.5Al-Si, JIS class 2 CP Ti and Ti-1.5Al before and after exposure in air at 800 for 100h

1.5Al 合金の800 ,100時間大気加熱による減肉量を調べた結果である。Al 添加および Si 添加により減肉は抑制されるが,その効果は Si 添加の方が高い。また, Si 添加の減肉抑制効果は 0.3mass% でほぼ飽和する。

写真2<sup>4)</sup>は Ti-0.5Al-Si 系合金, JIS 2 種純チタンおよび Ti-Al 系合金の 800 , 100 時間大気加熱前後の厚さ方向断面中央部のマイクロ組織である。Al 添加および Si 添加により, 結晶粒成長が抑制されるが, その効果は Si 添加の方が大きい。Al 添加および Si 添加による結晶粒成長の抑制は, 疲労強度の低下や脆化の抑制に有効と考えられる。以上の結果から, Ti-0.5Al-0.3Si 合金および Ti-0.5Al-0.6Si 合金は, いずれもマフラーシステムを構成する部品に加工できる程度の成形性と, マフラー材として実績のある Ti-1.5Al 合金よりも優れた耐高温酸化性を有していると考えられる。これら 2 合金の内, 800 , 100 時間の大気加熱により結晶粒成長が見られなかった Ti-0.5Al-0.6Si を, 以上の検討における最適組成と位置づけた。

## 2.2 Ti-0.5Al-Si-Nb 系合金の評価

図5<sup>4)</sup>は, Ti-0.5Al-0.6Si 合金, および更なる耐酸化性の向上を狙い, これに Nb を 0.2mass % 添加した Ti-0.5Al-0.6Si-0.2Nb 合金の 800 , 100 時間大気加熱後の表面近傍の厚さ方向断面マイクロピッカース硬さ測定結果である。なお, Nb を選定した理由としては, Ti-Al において Nb が耐高温酸化性を向上させる元素の一つとして報告されていること<sup>5)</sup>, およびチタンに Nb を添加した Ti-Nb 2 元系合金もチタンの耐高温酸化性を改善するとの報告

があるためである<sup>6)</sup>。

Nb の耐高温酸化性向上機構については, いずれの場合も原子価制御の原理, すなわち TiO<sub>2</sub> 中にチタンよりも価数の大きな元素 (5 価以上) を固溶させることで, 酸素空孔を減らし, これを介しての酸素の拡散を抑制し, 耐高温酸化性を向上させるとされている。ただし, Ti-Al で耐高温酸化性の向上が認められたと報告されている Nb 量は 2mass% (約 0.8at%) であり, また Ti-Nb 合金の場合では 0.3 ~ 3mol% (0.3 ~ 3at%) であり, 一方本研究での Nb 添加量は, 成形性の劣化とコスト上昇を最小限に抑えるべく, 0.2mass% (約 0.1at%) のわずかな量に設定している。この点と Ti-Al-Si 系合金への Nb 添加である点が, 上記文献と本研究の相違点である。

図5より Nb 添加材の方が, マイクロピッカース硬さが約 100 ポイント程度低くなっている。また, Ti-0.5Al-0.6Si 合金と Ti-0.5Al-0.6Si-0.2Nb 合金の硬さ変化の傾きはほとんど同じと見受けられる。したがって, Nb 添加は, 母材中の酸素の拡散侵入抑制に寄与しているのではなく, 酸素の侵入を抑制する緻密な酸化スケールの形成に影響しているものと考えられる。なお, Nb 添加の有無により常温・高温強度, 酸化による減肉量および結晶粒成長度合いに差はほとんど見られなかったことを別途確認している。

成形性向上の観点から, Ti-0.5Al-0.6Si-0.2Nb 合金に対し, Si 量を 0.45mass% に減じた Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金に加えて, JIS 2 種純チタンおよび Ti-1.5Al 合金を用い, 厚さ 1.2mm, 外径 38.1mm の溶接管を作製し, これらを 800 で 200 時間大気加熱した後, バイスで挟み, 割れが発生するまで扁平させた結果を写真3<sup>4)</sup>に示す。なお, 未酸化の状態ではいずれも扁平率 74% (外径 38.1mm を 10mm まで扁平) でも割れを生じないことを確認している。

JIS 2 種純チタンで 9%, Ti-1.5Al 合金で 8% の低い扁平率で脆性的な破壊が見られたが, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金は扁平率 26% まで割れが発生せず, また前出 2 材質のような脆性的破壊形態も呈していない。これは Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金の方が, JIS 2 種純チタンおよび Ti-1.5Al 合金よりも, 高温曝露による酸素の拡散侵入と結晶粒の粗大化が抑制され, 脆化度合いが小さかったことに起因するものと考えられる。写真3の結果から, Ti-0.5Al-

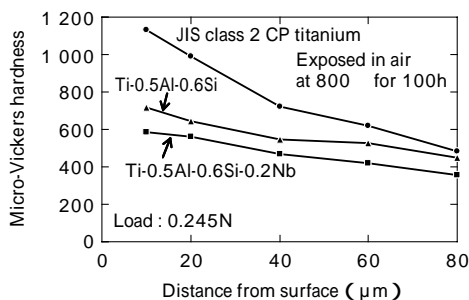


図5 Ti-0.5Al-0.6Si 合金, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金および JIS 2 種純チタンの 800 , 100 時間大気加熱後の断面マイクロピッカース硬さ

Fig. 5 Cross sectional micro-Vickers hardness of Ti-0.5Al-0.6Si, Ti-0.5Al-0.6Si-0.2Nb and JIS class 2 CP Ti after exposure in air at 800 for 100h

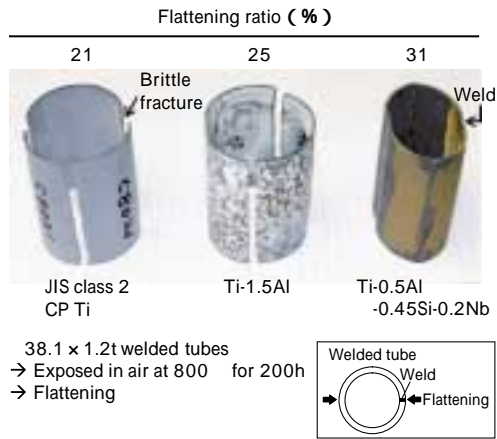


写真3 Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金, JIS 2 種純チタンおよび Ti-1.5Al 合金溶接管の扁平試験後の外観

Photo 3 Appearance of welded tubes made of Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb, JIS class 2 CP Ti and Ti-1.5Al and after flattening test

0.45Si-0.2Nb 合金は, JIS 2 種純チタンや Ti-1.5Al 合金が脆化の問題で使用できないような高温でも使用できるものと考えられる。

なお, 写真3において扁平後の各溶接管の外観が異なっているが, これは次のように説明できる。JIS 2 種純チタンと Ti-1.5Al 合金は, 扁平により最外層の剥離性の酸化スケールが完全に脱落した状態となっている。JIS 2 種純チタンは均一な灰色となっているのに対し, Ti-1.5Al 合金はまだらな白っぽい表面を呈している。一方, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金もまだらな外観を呈しているが, 黄土色の部分は, 最外層の酸化スケールが扁平によっても剥離せずに残存している部分であり, 灰色の部分は酸化スケールが剥離した部分である。これら3材質の扁平による最外層の酸化スケールの剥離状況から, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb の最外層の酸化スケールは剥離しにくい。2 輪車および4 輪車において, 走行中にマフラーに衝撃力が加わり変形することはしばしばあると予想される。この最外層の酸化スケールが剥離しにくい特性は, 外観上のメリットになるものと考えられる。

図6<sup>4)</sup>に Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金, JIS 2 種純チタンおよび Ti-1.5Al 合金の常温および高温における0.2%耐力と引張強さを示す。高温における Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金の0.2%耐力と引張強さは Ti-1.5Al 合金のものに近い値であり, JIS 2 種純チタンと比較すると, 400 以上の高温において, 0.2%耐力で純チタンの3~4倍, 引張強さで純チタンの2~3倍である。このことから, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金は Ti-1.5Al 合金と同様に, 高温使用のマフラー材として好適な強度特性を有している。

写真4<sup>4)</sup>は, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金と JIS 2 種純チタンの, 800 , 100 時間大気加熱後の酸化スケールの断面 SEM 像である。JIS 2 種純チタンの酸化スケール厚さは約140 μmと厚く, またポーラスである。一方, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金の酸化スケール厚さは JIS 2 種純チタンの約1/14の10 μmであり, かつ緻密に見受けられる。この酸化スケールの薄さと緻密性に Al, Si および Nb の個々の元素がどのように作用しているかについては, より詳細な検討が必要と考える。

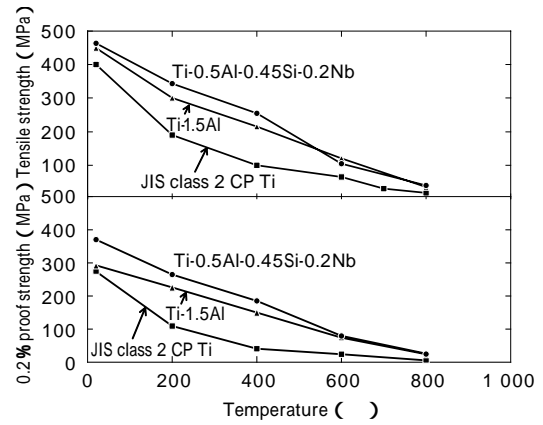
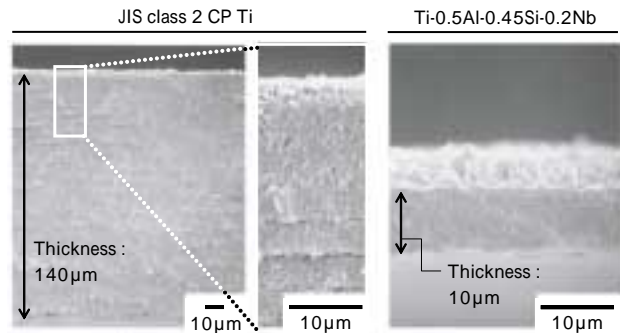


図6 Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金, JIS 2 種純チタンおよび Ti-1.5Al 合金の室温・高温引張試験結果

Fig. 6 0.2% proof strength and tensile strength of Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb, JIS class 2 CP Ti and Ti-1.5Al at room and high temperatures



Exposed in air at 800 for 100h

写真4 800 , 100 時間大気加熱後の Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金および JIS 2 種純チタンの酸化スケールの断面 SEM 像

Photo 4 Cross sectional SEM images of oxide scale of Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb and JIS class 2 CP Ti exposed in air at 800 for 100h

図7<sup>4)</sup>は, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金の800 , 100 時間大気加熱前後の表面近傍部の断面を EPMA にてマッピングした結果である。白い部分が最も濃化しており, 赤系の色が次いで濃化していることを示している。大気加熱により, Si が酸化スケール直下の母材部表面および母材中の各所において濃化しているのがわかる。また, Al も Si の場合ほど顕著ではないが, 酸化スケール直下の母材部表面および母材中の各所で濃化しているように見受けられる。この Si および Al の濃化理由は現時点では明確にできていない。一方, Nb については本分析からは明瞭な挙動は認められていない。

写真4と図7の結果から, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金の優れた耐高温酸化性には, 緻密な酸化スケールの形成と酸化スケール直下の母材表面層部近傍における Si および Al 濃化層の形成が関与していると考えられ, これらにより表面からの酸素の侵入が抑制されているものと推察される。

以上の検討より, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金を本研究における開発材と位置づけた。

### 2.3 量産試作材の評価

実生産と同じ製造設備を用い, 6ton 鑄塊より製造した開発組成を有する量産試作材の常温引張試験結果およびエリクセン試験結果を, 表3に示す。なお, 表3には既



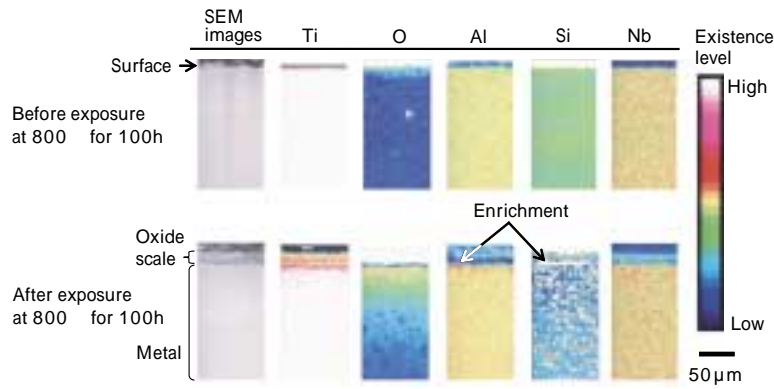


図7 800 °C, 100 時間大気加熱後の Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金表面近傍断面における EPMA マッピング像  
 Fig. 7 EPMA mapping results of cross sections near surfaces of Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb before and after exposure in air at 800 °C for 100h

存のマフラー材である Ti-1.5Al 合金の代表値と JIS 2 種純チタンの引張特性規格値も記している。開発材の 0.2% 耐力, 引張強さ, 全伸び, ヤング率およびエリクセン値は Ti-1.5Al 合金のものとおおむね同等であり, また引張特性は JIS 2 種純チタンの規格範囲にある。したがって, 開発材はマフラー材に適用できうる常温引張特性および成形性を有していると見なせる。

図 8 に開発材の成形限界線図を示す。なお, 比較のために JIS 2 種純チタンの成形限界線図<sup>7)</sup>も記している。開発材では, 単軸変形で約 0.5, 平面ひずみ変形近傍で約 0.3, 等 2 軸変形近傍で 0.35 × 0.3 程度の成形限界ひずみ (いずれも真ひずみ) が測定された。JIS 2 種純チタンの成形限界曲線には 500, 600 および 700 °C で焼鈍したものの 3 種があるが, 通常の焼鈍は 600 ~ 700 °C で行われる。供試された純チタンは板厚 0.7mm であり, またスクライプドサークル径は 2.5mm であり, 開発材の試験条件とは異なっており, 厳密な判定はできないが, 両者を比較して, 開発材はおおむね JIS 2 種純チタンと同等の成形限界を有しているものと判断できる。なお, 5 種類の試験を実施した後の試験片の外観からは, いずれも肌荒れは認められず, 成形限界の範囲内に肌荒れ限界は存在しなかった。開発材は写真 2 で示した Ti-0.5Al-0.6Si と同等のマイクロ組織を有しており, 結晶粒径が微細なために, 比較的結晶粒径の大きい純チタンで見られるような肌荒れは発生しないものと考えられる。

むすび = 2 輪車マフラーのみならず, 4 輪車マフラーにも適用できうる耐高温酸化性と強度特性を有するチタン合金として, Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金を開発した。

本材は既存のマフラー材である JIS 2 種純チタンや Ti-1.5Al 合金よりも耐高温酸化性に優れ, これら既存材が脆化などの問題で使用できない高温環境での使用を可能にするものと考えられる。また, 高温強度は Ti-1.5Al 合金のものに近く, JIS 2 種純チタンと比較すると, 400 以上の高温において, 耐力で純チタンの 3 ~ 4 倍, 引張強さで純チタンの 2 ~ 3 倍もある。したがって, 開発材は Ti-1.5Al 合金と同様に, マフラー材として好適な高温強度特性を有している。

さらに, 本開発材は JIS 2 種純チタンと同等レベルの成形性が期待できる。開発材 Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金

表 3 Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金の機械的性質  
 Table 3 Mechanical properties of Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb

	Tensile direction	0.2% proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (GPa)	Erichsen value (mm)
Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb	L	356	467	35.9	102	8.9
	T	402	442	39.7	115	
Ti-1.5Al	L	309	455	34.4	107	8.8
	T	363	440	35.3	108	
JIS class 2 specification	T	215	340 ~ 510	23	-	-

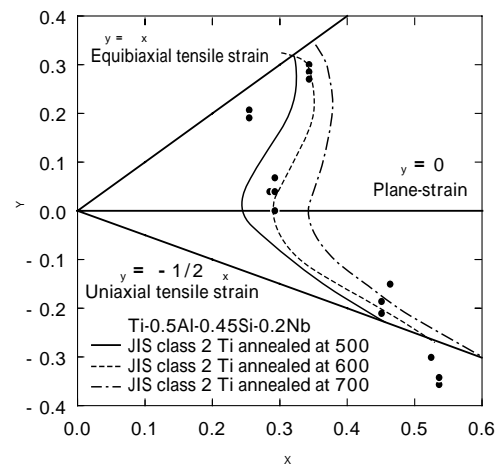


図 8 Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb 合金および JIS 2 種純チタンの成形限界線図  
 Fig. 8 Forming limit diagram of Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb and JIS class 2 CP titanium

は KSTI-1.2ASNEX(エーエスエヌエグゾースト)として, 現在 PR 中であり, 各方面より好評を頂いている。

#### 参考文献

- 1) 高橋 恭ほか: チタン, Vol.50, No.2(2002), p.93.
- 2) 公開特許: 2001-234266.
- 3) 委倉功和: R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.3(2004), p.38.
- 4) 屋敷貴司ほか: 軽金属, Vol.55, No.11(2005), p.592.
- 5) 谷口滋次: までりあ, Vol.37, No.3(1998), p.175.
- 6) G. Itoh et al.: W-Ti-RE-Sb '88 International Conference on the Metallurgy and Materials Science of Tungsten, Titanium, Rare Earths and Antimony 1st Changsha, 2(1989), p.900.
- 7) S. Kohara: Titanium Science and Technology, Vol.1, DGM, Germany(1985), p.547.