

(解説)

マフラ用新チタン合金

A New Heat Resistance Titanium Alloy for Mufflers



松倉功和*
Norikazu Matsukura



屋敷貴司*(工博)
Dr. Takashi Yashiki

The high-temperature strength and heat resistance of pure titanium are not sufficient for muffler parts exposed to excessively high temperatures. To improve the compatibility of the cold workability, high-temperature strength and heat resistance properties of titanium, a new alloy was designed. Impurities were reduced to the minimum level possible, and small amounts of aluminum, which does not reduce cold workability, was added. The 0.2% proof strength of this alloy at 200 to 500 degree centigrade is as twice or three times as high as that of JIS 2 titanium. In addition, it has good cold workability and heat resistance.

まえがき = チタン材料は、近年ゴルフクラブのフェイス、メガネフレームなどに使用され始め、民生品としての用途が広がりつつある。バイクのエンジンマフラにもその軽量、耐食性、意匠性ゆえに純チタンが採用されており、大型のバイクではチタン製マフラが標準で搭載されている場合もある¹⁾。

純チタンは、常温では軟鋼並の強度を有しているが、温度の上昇とともに、鋼材に比べて強度が急激に低下するので²⁾、冷却されにくい場所に設置されている場合や冷却されていても高温の排気ガスが通る箇所などでは、高温での強度や耐酸化性が十分でない場合があり、チタンが採用できない部分もある。

図1にチタン材料およびステンレスの0.2%耐力の温度依存性を示す^{2),3)}。チタン合金に比べ純チタンの強度は低く、温度上昇にともなう強度低下の割合が高いこと

がわかる。図1に示すように、純チタンよりも高温での強度が高い材料として、Ti-3Al-2.5Vなどのチタン合金がある。しかし、入手性が悪く材料コストが高いうえに、マフラを量産するのに十分な加工性を有していない。

そこで純チタン(JIS 2種)よりも高温強度が高く、耐酸化性に優れ、かつ純チタンと同等の冷間加工性を有するチタン合金の開発を目標として、“Ti-1.5% Al”合金を開発した。本報では、本合金開発の経緯とマフラ用の材料として評価した各種特性を概説する。

1. 実験方法

AlはTiの相の固溶強化に有効な添加元素で⁴⁾、耐酸化性、高温強度を改善する添加元素として知られている⁴⁾⁵⁾。また、安価でもあることから添加元素としてAlを選択し、Tiとの2元系合金にすることとした。

そこで、冷間加工性が損なわれない程度に純チタンにAlを添加し、耐酸化性、高温強度の改善とともに、冷間加工性も確保することを検討した。なお、純チタンにおいてはOやFeなどの不純物元素は固溶強化元素であり⁵⁾、冷間加工性を損なうため、できるだけ低く抑えることとした。

まず純チタンの加工性に及ぼすAlの添加量の影響について調査した。OやFeなどの不純物元素がJIS 1種並の純チタンをベースにし、これに種々の量のAlを添加した組成をボタン溶解し、試料を用意した。この試料を冷間で板状に圧延し、圧延途中で幅方向の端部に耳割れが発生し始める圧延率を限界圧下率とし、これで加工性を評価した。ここでは、圧延率75%以上でも耳割れが発生しなければ実用上、量産上問題ないとの判断基準で、75%以上の圧延は実施しなかった。また、前述のAl添加量を変えた組成の板材について、焼鈍後に引張試験を行った。

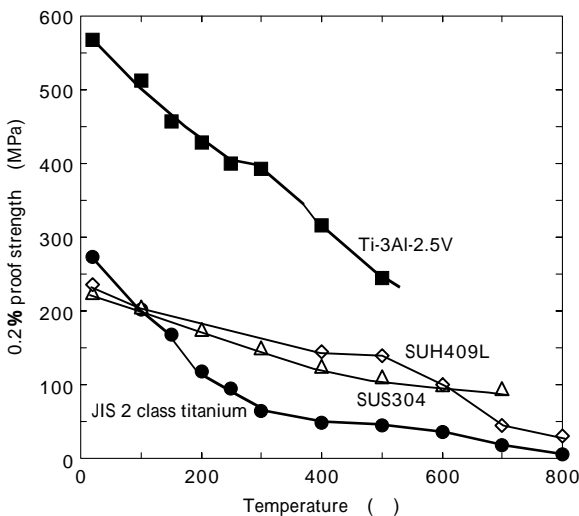


図1 チタン材料とステンレスの0.2%耐力の温度依存性
Fig. 1 Comparison of 0.2% proof strength of titanium materials and stainless steel at elevated temperatures

*鉄鋼部門 チタン本部 チタン技術部

以上の実験結果から、Ti-Al 系 2 元合金の冷間加工性と引張特性の Al 添加量依存性を評価し、Al の添加量を決定することとした。

さらに、決定した組成のチタン合金について、マフラ用の材料として評価するため、常温・高温での引張特性、溶接性、成型性や耐酸化性を評価した。成型性についてはエリクセン試験で、耐酸化性の試験については、800 で 100 時間加熱し、そのときの酸化によるスケールロス量で評価した。なお、マフラ用に使用される純チタンは通常 JIS 2 種材であるので、JIS 2 種純チタンとの比較により特性の評価を行った。

2. 結果と考察

2.1 Al 添加量の検討

図 2 に、純チタンに対する Al の添加量と限界圧下率の関係を示す。Al を添加していくと限界圧下率が小さくなり加工性が悪くなっているが、Al 添加量が 2% 以下であれば限界圧下率は 75% 以上で、冷間加工性に大きな悪影響はないことがわかる。

図 3 に、純チタンに対する Al の添加量と強度特性の関係を示す。JIS 2 種純チタンの強度規格は、0.2% 耐力が 215MPa 以上、引張強度が 340~510MPa であり、図 3 から Al の添加量が約 2.8% 以下の範囲でこの規格を満足することがわかる。また伸びについては、図 3 に示す Al : 4% 以下の全ての範囲で規格の 23% 以上を満足してい

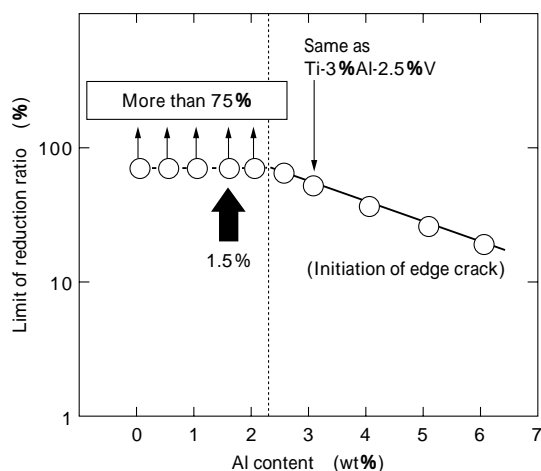


図 2 純チタンに対する Al 添加量と限界圧下率の関係
Fig. 2 Effect of Al content on limit of rolling reduction ratio

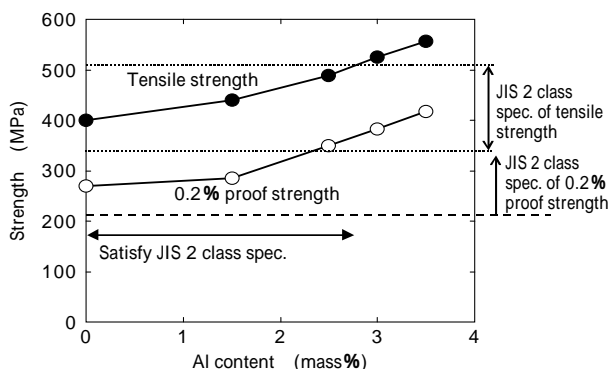


図 3 純チタンに対する Al の添加量と強度特性の関係 (ボタン溶解材)
Fig. 3 Effect of Al content on the tensile properties (Button ingot)

た。

以上の結果から、Al の添加量が 2% 程度であれば冷間加工性を損なうことなく、また JIS 2 種の強度規格を満足している。しかし、量産製造上のバラツキも考慮し、標準的な組成を Ti-1.5%Al とした。

2.2 Ti-1.5%Al の特性の確認

2.2.1 量産工程で製造した薄板の特性

前述の Ti-1.5%Al 組成の 5 トン鑄塊を製造し、加古川製鉄所の純チタンの量産工程で薄板を製造した。表 1 に、量産コイルの引張試験結果の一例を示す。Ti-1.5%Al は、純チタン JIS 2 種規格相当の引張特性を有している。また、表 2 に Ti-1.5%Al の物性値を、純チタンと Ti-3Al-2.5V との比較で示す。密度、線膨張係数、ヤング率ともほぼ純チタンと同等の特性を示すが、変態点が純チタンに比べて 60 程度高くなっているのがわかる。

図 4 に、Ti-1.5%Al の引張特性の温度依存性を JIS 2 種純チタンとの比較で示す。常温では引張強度、0.2% 耐力とも JIS 2 種純チタンと同等であるが、温度上昇にともなう強度低下の割合が Ti-1.5%Al のほうが小さく、200 以上の高温域で引張強度は 2 倍程度、0.2% 耐力は 2 ~ 3 倍になっていることがわかる。特に、200~500 付近でその強度の差が顕著になっている。伸びについても両材料は同等で、500~600 付近では Ti-1.5%Al のほうがむしろ高い値を示しているのがわかる。

2.2.2 耐酸化性

バイクマフラは、高温の排気ガスに長時間曝される環境で使用される。したがって、高温での耐酸化性について調査した。板材に大気炉で 800 - 100h の熱処理を行い、そのときのスケールロス量で評価した。写真 1 に、熱処理前後の板材の断面組織写真を純チタンとの比較で示す。純チタンのスケールロス量が約 190 μm に対して、Ti-1.5%Al では約 70 μm となっており、耐酸化性が

表 1 量産工程で製造した Ti-1.5%Al コイルの引張特性の一例
Table 1 Tensile properties of Ti-1.5%Al mass production coil

	Tensile direction	0.2% proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Ti-1.5%Al	L	314	457	32
	T	354	441	36
Standard of JIS 2 class	T	215	340 ~ 510	23

表 2 Ti-1.5%Al の物理的性質
Table 2 Physical properties of Ti-1.5%Al

Physical properties	Ti	Ti-1.5%Al	Ti-3Al-2.5V
Density (g/cm ³)	4.51	4.47	4.48
Linear expansion coefficient (× 10 ⁻⁶ /)	8.4	8.9	9.6
transus ()	885	943	935
Young's modulus (GPa)	106	110	105

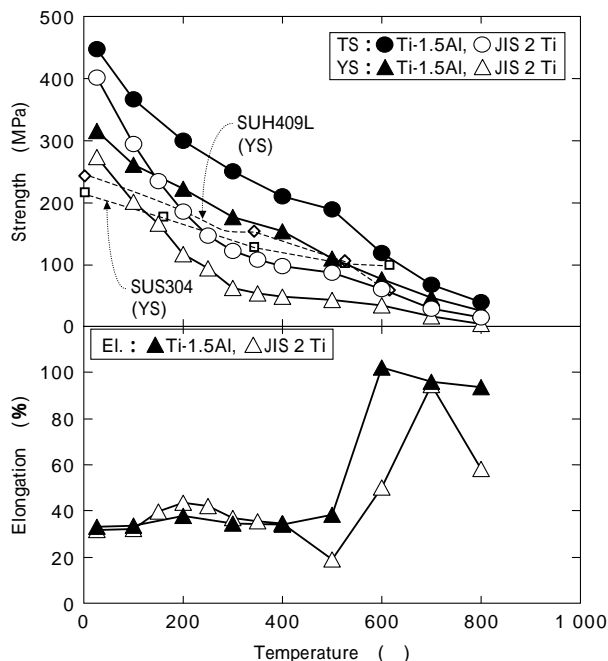


図4 Ti-1.5% Al と JIS 2 種純チタンに関する引張特性の温度依存性の比較
 Fig. 4 Comparison of tensile properties at elevated temperatures between Ti-1.5%Al and JIS 2 class titanium

著しく改善されていることがわかる。

図5に、純チタンとTi-1.5% Alについて800 - 100hの熱処理後、スケールを除いた部分の表層付近の硬度分布を示す。両材料を比較すると、内部では両材料の硬度は同等であるが、最表面の硬度は純チタンのほうが高く、また硬度の高い部分が純チタンのほうが表面から深いところまで分布していることがわかる。チタンは酸素含有量が高くなると固溶硬化するので、これからもTi-1.5%Alのほうが酸素の拡散が抑えられ、耐酸化性が改善されていることがわかる。

2.2.3 加工性

マフラでは内装品などがプレス成型で作られるため、成型性についてエリクセン試験で評価した。図6に、Ti-1.5%Alの測定値の一例を純チタンとの比較で示す。これから、成型性についてもJIS 2種純チタンと同等であることがわかる。

溶接性については、板厚1mmの板でTIGでの突合せ溶接を行い、溶接継手の引張試験を実施して評価した。表3に、溶接継手と母材の引張試験結果の一例を、JIS 2種純チタンとTi-3Al-2.5Vとの比較で示す。継手の伸びが母材に比べて低下しているが、JIS 2種の規格範囲内であり、溶接後も良好な引張特性を有することがわかった。

また、マフラでは使われることはないと思われるが、ロウ付けについても試験を行った。2枚の板の間にTi-Cu-Ni系のロウ材を挟み、通電加熱によりロウ付けを行い、ロウ付け部のマイクロ組織の変化を調査した。写真2に、Ti-1.5%Alおよび純チタンのロウ付け部のマイクロ組織を示す。ロウ付けによって、トランザス以上に過熱された領域の結晶粒が大きくなっていると考えられるが、Ti-1.5%Alのほうが純チタンに比べて結晶粒が粗大化した領域が狭く、粗大化の割合も小さくなっている。

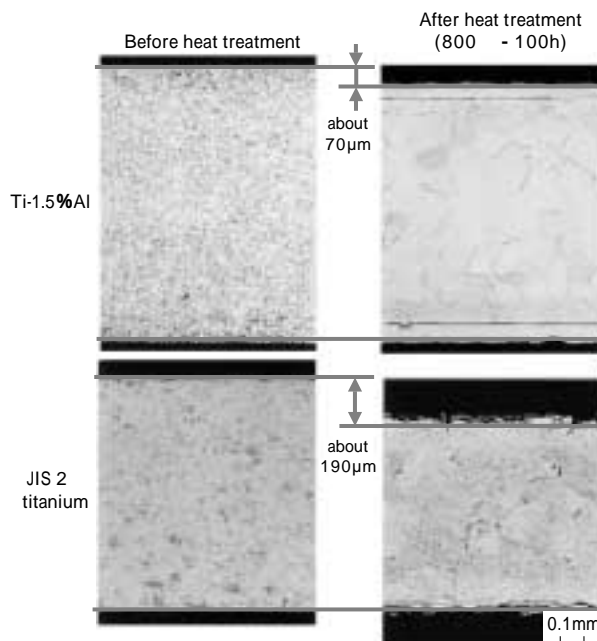


写真1 Ti-1.5%Al と純チタン(JIS 2)の熱処理前後の断面組織写真
 Photo 1 Microstructures of Ti-1.5%Al and JIS 2 titanium before and after heat treatment

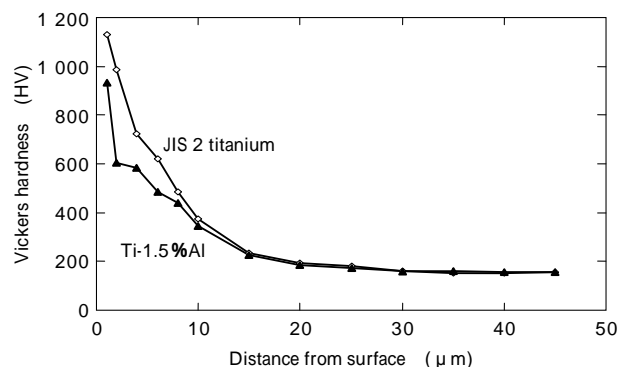


図5 Ti-1.5%Al と純チタン(JIS 2)の熱処理後(800 - 100h)の表層付近硬度分布
 Fig. 5 Distributions of hardness around surface of Ti-1.5%Al and JIS 2 titanium after heat treatment (800 - 100h)

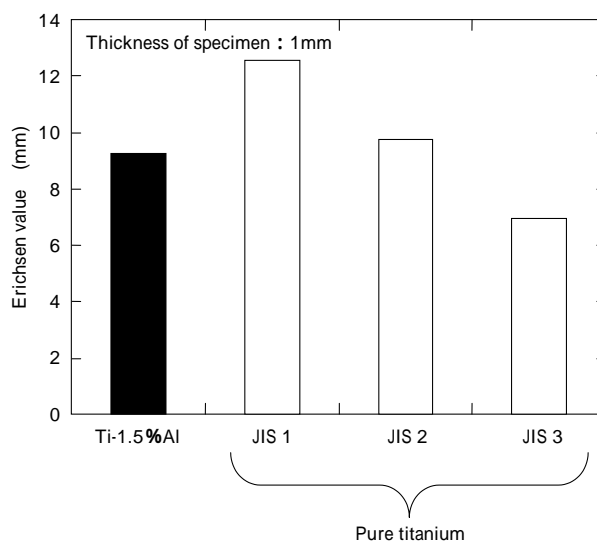


図6 Ti-1.5%Al と純チタンのエリクセン値
 Fig. 6 Erichsen value of Ti-1.5%Al and pure titanium

表3 溶接継手と母材の引張試験結果の一例 (TIG 溶接)
Table 3 Tensile properties after welding (TIG)

Sample	Position	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
JIS 2 titanium	Base metal	402	35
	Joint	394	34
Ti-1.5%Al	Base metal	446	34
	Joint	418	26
Ti-3Al-2.5V	Base metal	693	19
	Joint	692	12
Standard of JIS 2 class	-	340 ~ 510	Min.23

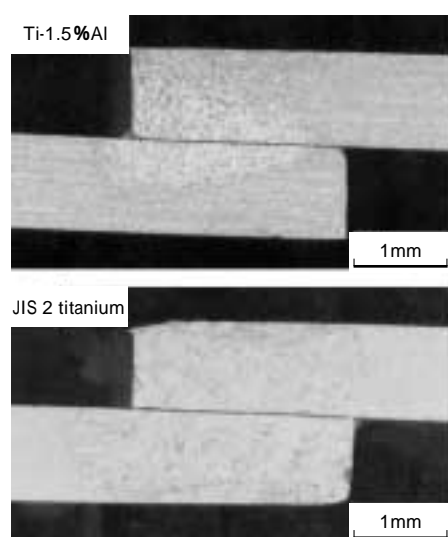
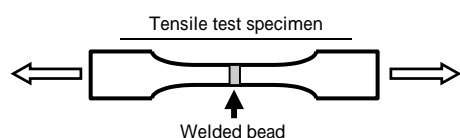


写真2 Ti-1.5%Al と純チタン (JIS 2) のロウ付け部のマイクロ組織
Photo 2 Microstructures of heat affected area after blazing of Ti-1.5%Al and JIS 2 titanium

トランザスが Ti-1.5%Al のほうが高いことや、Al による結晶粒粗大化の抑制の効果によると考えられるが、この結果から熱的にマイクロ組織が安定していることがわかる。眼鏡フレームでは、ロウ付けによる結晶粒の粗大化が強度特性に悪影響を及ぼすといわれており、このように熱的にマイクロ組織が安定している Ti-1.5%Al は、ロウ付けを必要とする製品への適用に有望と思われる。

最後に、マフラに必要な溶接管の製造も実施した。造管は純チタン溶接管の量産ラインにて実施し、通常純チタンと同様に溶接管を製造できることを確認した。写真3に、量産ラインで造管した溶接管の外観写真を示す。製造した溶接管について押広げ試験を行った結果、限界押広げ率が1.4以上で、JIS 2種純チタンの規格値1.14を十分クリアした。

以上の諸特性から、開発した Ti-1.5%Al 合金は、不純



写真3 Ti-1.5%Al の溶接管の外観写真
Photo 3 Ti-1.5%Al welded tubes (38.1 x 1mm)

物の抑制と適量の Al 添加により、JIS 2 種純チタンと同等の強度特性、冷間加工性、溶接性などを維持しつつ、かつ高温での強度、耐酸化性、マイクロ組織の安定性が JIS 2 種純チタンよりも優れ、かつ量産での製造に耐えうる材料であることを確認した。

むすび = 純チタンよりも高温強度が高く、耐酸化性に優れ、かつ純チタンと同等の冷間加工性を有する Ti-1.5%Al の開発を行った。本合金はその性能が認められ、2003年にヨーロッパの大手マフラメーカーに純チタンに替わる標準マフラ用材料として採用され、現在までに100トン以上の納入実績がある。また、今後 ASTM への登録を予定している。

現状、チタン製マフラは大型のバイクでの採用が中心であるが、環境への配慮から車体の軽量化が進むと、さらに小型のバイクや四輪車へ広がることが予想される。また、腐食環境の厳しい船舶用のマフラへの適用も進行している。四輪車や船舶用の乾式マフラでは使用温度がさらに高温になり、純チタンでは強度的に厳しい場合があると思われる。また、バイクマフラでも高温強度の高い材料があれば、薄肉化による軽量化が可能になる、あるいは設計の自由度が増すと思われる。このように、純チタンでは高温強度が足りない場合や純チタンをさらに薄肉・軽量化する場合などに、純チタンに替わって本合金を適用できるのではないかと期待される。

参考文献

- 1) 村上 仁: R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.3 (1999) p.73.
- 2) E. W. Collings: Materials Properties Handbook Titanium Alloys (1994).
- 3) ステンレス鋼便覧 - 第3版 - (ステンレス協会編), (1995).
- 4) 木村啓造: チタニウム・ジルコニウム, Vol.18, No.6 (1970) p.134.
- 5) 森口康夫: 特殊鋼, Vol.29, No.12 (1980) p.29.