

技術資料



Technical Paper

バナジウムフリー $\alpha + \beta$ 型チタン合金「VLTi」の特性

小川道治*¹, 清水哲也*¹, 野田俊治*¹, 鈴木昭弘*², 福田達雄*²

Characteristics of Vanadium Free Alpha+Beta Titanium Alloy 'VLTi'

Michiharu Ogawa, Tetsuya Shimizu, Toshiharu Noda, Akihiro Suzuki, and Tatsuo Fukuda

Synopsis

By virtue of their high strength and low density, $\alpha + \beta$ titanium alloys have been used for various applications, such as airplanes and consumer products. Ti-6Al-4V alloy is one of the most popular $\alpha + \beta$ titanium alloys. Ti-6Al-4V alloy contains vanadium as alloying element. However, the official quotation of vanadium is not stable, limiting their usefulness as alloying elements. We adopted iron, whose official quotation is more stable than this of vanadium, and developed Ti-6Al-1Fe alloy, VLTi.

The tensile and fatigue properties of VLTi are comparable with Ti-6Al-4V. Therefore VLTi could be used for the applications substituting for Ti-6Al-4V such as consumer products and automobile components. Moreover VLTi with lower density than Ti-6Al-4V is a suitable Ti alloy for golf head.

1. はじめに

チタン合金は鉄鋼材料に比べて比強度（強度／密度）に優れていることから、古くから航空機産業を中心に多く使われてきた。さらに最近では航空機以外に民生品にも多く用いられるようになってきた^{1),2)}。代表的なチタン合金として $\alpha + \beta$ 型の Ti-6Al-4V 合金が挙げられ、自動車部品やゴルフヘッドなど、さまざまな用途に用いられている。

しかしながら、近年原料価格の高騰によってチタン合金の価格を低位安定させることが難しくなってきた。Fig.1 にフェロバナジウムの価格比の推移を示す³⁾。2003 年までは変動幅は比較的小さいものの、2004 年以降は変動幅が大きく、価格が安定していないことが分かる。このような原材料の需要環境変化によって、価格変動の小さいチタン合金の開発が重要となってきた⁴⁾。そこで、著者らは変動幅の大きいバナジウムをなくし、それに代わる元素として価格が比較的安定した鉄に着目し、優れた強度を有するバナジウムフリー $\alpha + \beta$ 型チタン合金

「VLTi」を開発した。

ここでは、まず合金設計の際、基礎特性として採取した Ti-6Al-(0.4～3)Fe 合金の機械的性質について述べた後、今回開発した VLTi の特性について紹介する。

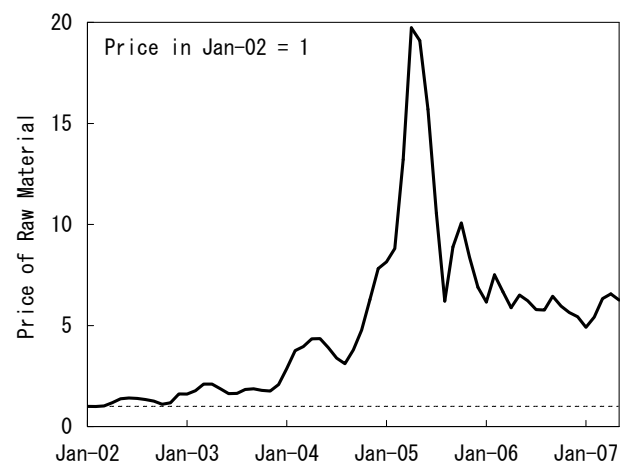


Fig.1. Prices of raw materials.

2008 年 6 月 5 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)高機能材料事業部チタン材料部商品企画開発室 (Products Planning & Development Sect., Titanium Dept., Advanced Materials Div., Daido Steel Co., Ltd.)

2. Ti-6Al-(0.4 ~ 3)Fe の機械的特性

2. 1 実験方法

供試材として、 α 相の固溶強化を図るべく、Ti-6Al-4Vと同じ6%のAl量を維持し、 β 安定化元素であるFeを0.4%から3%まで変化させたTi-6Al-(0.4 ~ 3)Feを用いた。

溶解は一次溶解をプラズマ積層凝固炉^{5),6)}によって、次いで二次溶解を真空アーク溶解炉によって実施し、直径240 mm、重量100 kgのインゴットを作製した。熱間鍛造・圧延を行い、直径19 mmの棒材を得た。各合金の化学組成をTable 1に示す。

焼鈍を1073 K、7.2 ksで実施した後、平行部分6.35 mmのASTM3号試験片を作製した。引張試験はASTM E8に準拠して、引張強さおよび伸びを調査した。また平行部

分6 mmの高温引張試験片を作成し、試験温度673 Kで、引張強さおよび伸びを調査した。

回転曲げ疲労試験片は、平行部分8 mmの試験片を作製した。回転曲げ疲労試験は回転数3500 rpmで実施し、 10^7 回転曲げ疲れ限度を調査した。

2. 2 実験結果

Fig.2に引張特性に及ぼすFe添加量の影響を示す。Fe添加量の増加に伴い、0.2%耐力および引張強さの増加が認められる。また伸びおよび絞りりはFe添加量によらずほぼ同じ値を示す。Ti-6Al-(0.4 ~ 3)Fe合金は優れた強度-延性バランスを有している。なお、Fe添加量が1%で900 MPa以上の引張強さが得られ、10%以上の伸びを示す。代表的なチタン合金であるTi-6Al-4V合金(JIS 60種)

Table1. Alloy marks and chemical compositions of alloys used in this study.

Alloy marks	(mass%)			
	Al	Fe	N	O
0.4Fe	6.01	0.41	0.01	0.05
1Fe	5.90	1.06	0.01	0.18
2Fe	5.95	2.00	0.01	0.18
3Fe	5.87	2.87	0.01	0.18

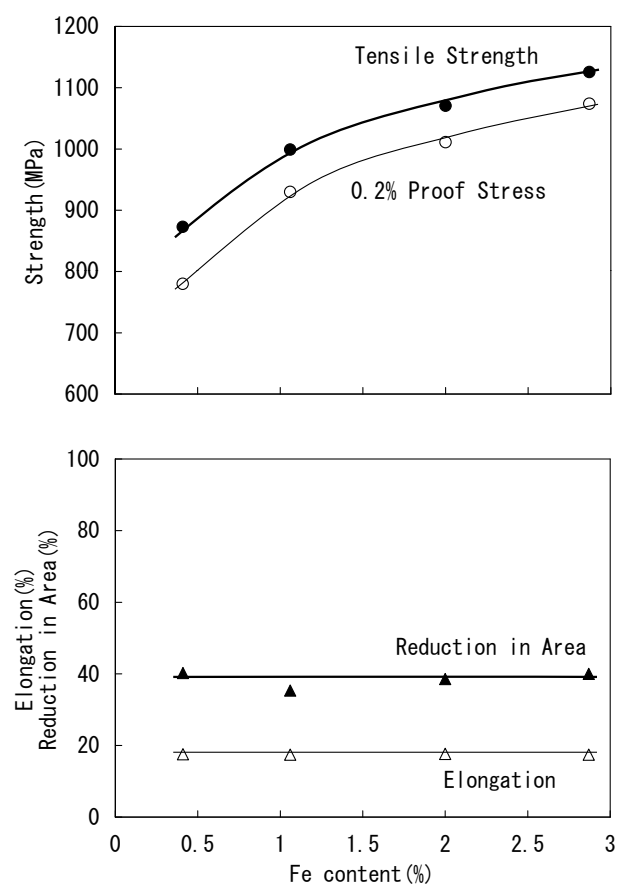


Fig.2. Changes of tensile strength, 0.2% proof stress, elongation and reduction in area with increase of Fe content at room temperature.

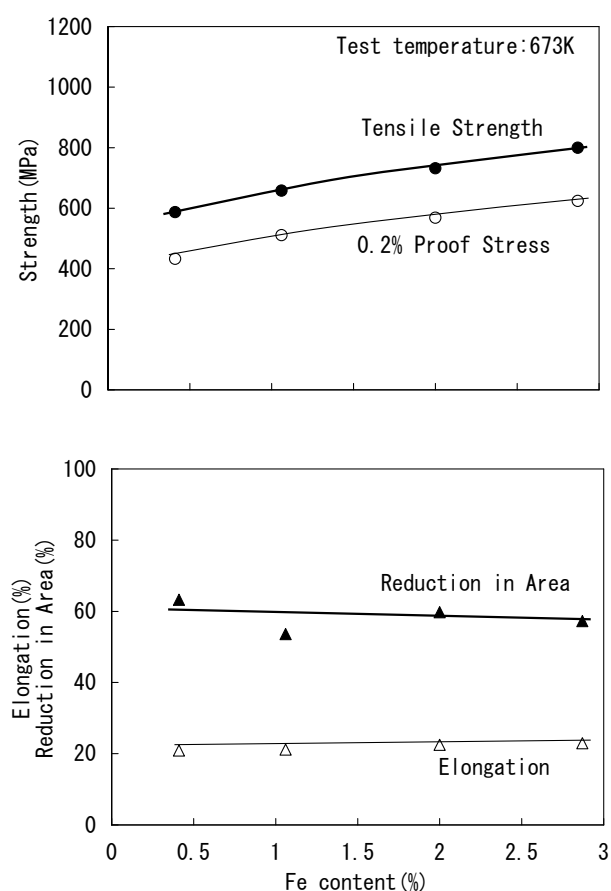


Fig.3. Changes of tensile strength, 0.2% proof stress, elongation and reduction in area with increase of Fe content at 673 K.

は引張強さが 895 MPa 以上、伸びが 10 % 以上であることから、Ti-6Al-4V 合金とほぼ同等の引張特性が得られることが分かる。

Fig.3 に試験温度 673 K での高温引張試験の結果を示す。室温における引張試験の結果と同様に、Fe 添加量の増加に伴い、0.2 % 耐力および引張強さの増加が認められる。延性についても Fe 添加量によらずほぼ同じ値を示す。なお、Fe 添加量が 1 % で 600 MPa 以上の引張強さを示す。

Fig.4 に 10^7 回転曲げ疲れ限度に及ぼす Fe 添加量の影響を示す。1 % までの Fe 添加で、 10^7 回転曲げ疲れ限度の増加が認められるものの、それ以上の Fe 添加ではその増加量はわずかである。1 % の Fe 添加で 600 MPa 程度の疲れ限度が得られる。

Fig.5 に Ti-6Al-(0.4 ~ 3)Fe 合金の引張強さと 10^7 回転曲げ疲れ限度の関係を示す。Fe 添加量 1 % で良好な引張特性および 10^7 回転曲げ疲れ限度が得られることから、Ti-6Al-1Fe 合金を選定した。本開発材「VLTi」の特性について以下に述べる。

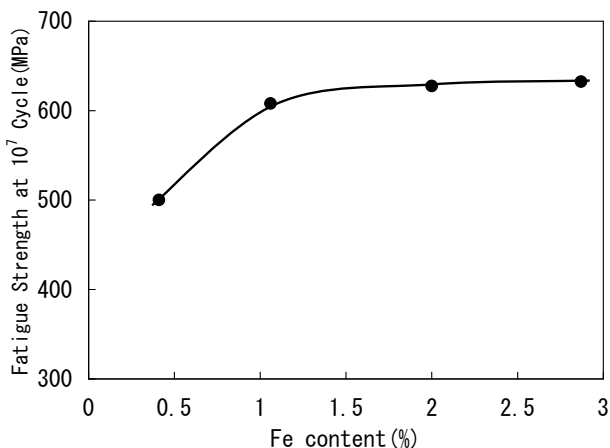


Fig.4. Change of fatigue strength at 10^7 cycle with increase of Fe content.

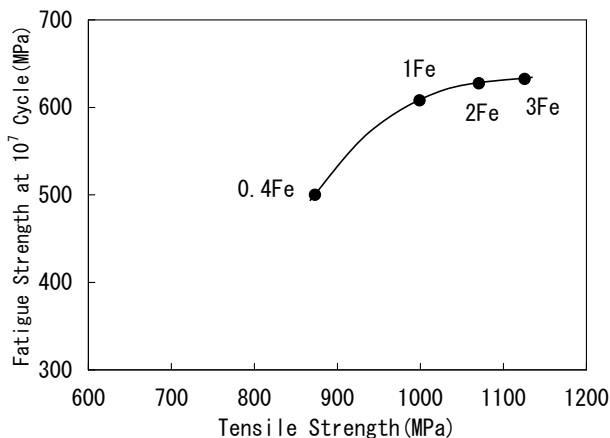


Fig.5. Relationship between tensile strength and fatigue strength at 10^7 cycle.

3. VLTi の特性

Fig.6 に焼鈍状態での引張特性を示す。比較材として Ti-6Al-4V 合金とエンジンバルブなどに使用されている SUH11 を用いた。VLTi は SUH11 よりもやや強度が低いものの、Ti-6Al-4V 合金と同等の強度を有しており、900 MPa 以上の引張強さが得られる。また延性は Ti-6Al-4V 合金および SUH11 と同等の値を確保している。VLTi は焼鈍状態で Ti-6Al-4V 合金と同等の優れた強度－延性バランスを有している。

Fig.7 に試験温度が室温および 673 K での 10^7 回転曲げ疲れ限度を示す。VLTi は Ti-6Al-4V 合金と同等の疲労特性を有しており、室温においては約 600 MPa の疲れ限度が得られる。また試験温度 673 K においても SUH11 と比較して遜色ない疲れ限度を有していることが分かる。

バナジウムフリー化を図った本開発材「VLTi」は、PPC-VAR プロセス^{5),6)}で溶解が可能である。さらに鍛造などの熱間加工が可能であることから、Ti-6Al-4V 合金と同様の製造プロセスを適用できる。現在、VLTi は従来の

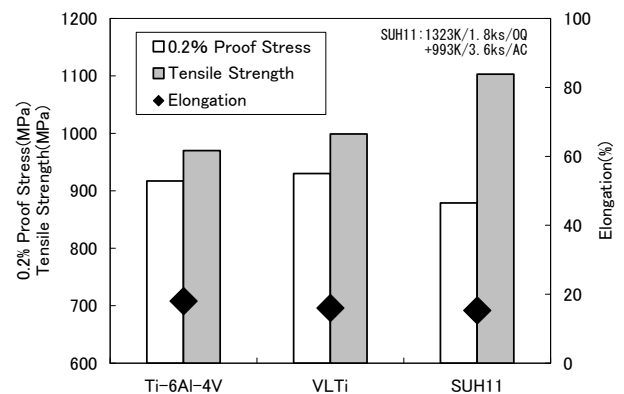


Fig.6. Tensile properties of Ti-6Al-4V, VLTi and SUH11.

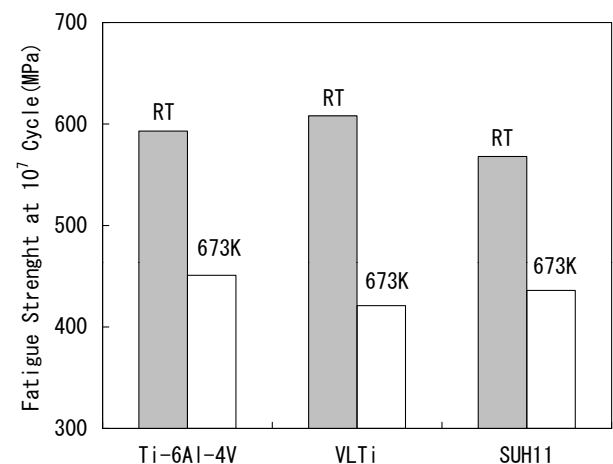


Fig.7. Fatigue strength at 10^7 cycle of Ti-6Al-4V, VLTi and SUH11 at room temperature and 673 K.

製造プロセスを用いて量産が開始されており、安定製造できることを確認している。

4. 適用例

チタン合金がゴルフヘッドに使用されたのは1990年頃であり、代表的なチタン合金であるTi-6Al-4V合金が用いられていた。その後、航空機用に開発されたTi-15V-3Al-3Cr-3Sn合金といった β 型チタン合金が使用され、さまざまなチタン合金が用いられるようになったり、チタン合金は軽量で、かつ強度に優れることからゴルフヘッドの大型化が進み、チタン製ゴルフヘッドが主流となっている。このチタン製ゴルフヘッドの普及によって、多くの人々がボールの飛距離を飛躍的に伸ばすことが可能となった。そのため、ボールとゴルフヘッドの反発を規制する必要がでてきた。

この規制に適合させるために比強度（強度／密度）に優れる材料が求められるようになり、バナジウムやモリブデンを多く含む β 型チタン合金は、ゴルフヘッドとして使用することが難しくなってきた。そこで、バナジウムやモリブデンを含まない本開発材「VLTi」がゴルフヘッドとして検討された。Fig.8に強度と密度の関係を示す^{7), 8)}。 $\alpha + \beta$ 型チタン合金は β 型チタン合金と比較して密度が低く、また優れた強度を示す。その中でもVLTiは他の $\alpha + \beta$ 型チタン合金よりも低比重であることが分かる。VLTiは低比重で、優れた強度が得られることから、Fig.9に示すようなゴルフヘッドに採用され、フェースに使用されている。



Fig.9. Application example to golf club head. VLTi was used for a golf head face. (Photograph offer : THE YOKOHAMA RUBBER CO., LTD.)

またVLTiは適用例として紹介したゴルフヘッドのほか、さまざまなゴルフヘッドに用いられており、使用量が増加してきている。

5. 今後の展開

産業の発展とともに、自動車の保有台数が増加しており、排ガスや騒音など自然環境に与える影響が大きくなってきている。そのため、近年排ガス規制などのさまざまな規制が広がってきている。軽くて強いチタン合金は、内燃機関部品の軽量化による大幅な性能向上につながるため有望な素材のひとつと考えられ、最近ではコンロッドやエンジンバルブなどの自動車部品への適用が増加し

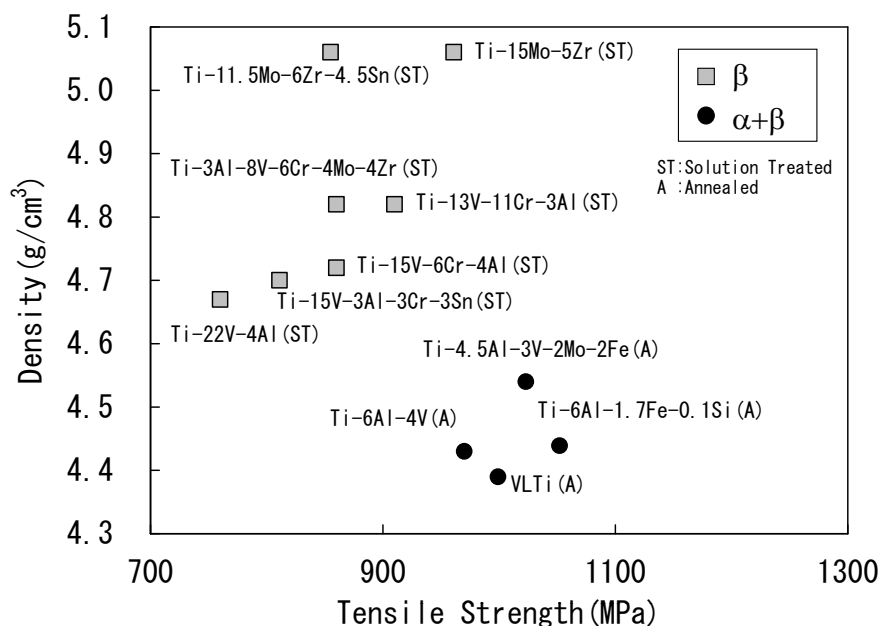


Fig.8. Balance of density and tensile strength.

てきている。素材使用量の多い自動車部品への適用は、チタン産業の発展のために有効と思われる。しかしながら、原料価格の高騰などのチタン合金を取り巻く環境の変化によって、チタン合金の価格変動が大きくなることが懸念され、適用拡大のためには価格の安定化が重要である。したがって、価格安定化を図ったバナジウムフリー $\alpha + \beta$ 型チタン合金「VLTi」は、価格の変動を小さくすることが可能であり、市場に安定して供給できる。

VLTi はバナジウムを含む Ti-6Al-4V 合金の代替材料として使用できることから、適用例として紹介したゴルフヘッドのほかに、コンロッドやエンジンバルブなどの自動車部品への展開が期待される。

(文 献)

- 1) 鈴木昭弘, 小川道治, 清水哲也: 電気製鋼, **75** (2004), 127.
- 2) 小川道治, 清水哲也, 野田俊治, 福田達雄, 池田勝彦: まてりあ, **46** (2007), 96.
- 3) 奥町健, 徳成滋, 佐野徹, 内藤洋: 工業レアメタル, **123** (2007), 77.
- 4) 小川道治: 軽金属, **55** (2005), 549.
- 5) 加藤剛志: チタニウム・ジルコニウム, **32** (1984), 96.
- 6) T.Yajima, O.Tamari, H.Kamiya et al : Titanium 1986 Products and Applications (Proceedings of the Technical Program from the 1986 International Conference), TDA, (1986), 985.
- 7) Eds. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings : Materials Properties Handbook Titanium alloys, ASM, (1994) .
- 8) J. C. Fanning: Beta Titanium Alloys and Their Role in the Titanium industry, Beta Titanium Alloys in the 1990's, Ed. by D. Eylon, R. R. Boyer and D. A. Koss, (TMS, Warrendale, 1993), 411.