

# チタン

# TITANIUM JAPAN

October 2019

Vol.67 No.4

## 目 次

## 〈紹介〉

チタンめぐり XXI (海外②) カラーグラビア	編集委員会	3
チタンめぐり XXI (海外②)	編集委員会	5
チタン合金を用いた、スポーツ用義歯「コンフォートスポーツ」の特徴	篠崎 功治	6
カザフスタンのスポンジチタン取引の開発秘話	中村 繁夫	10

## 〈第14回チタン世界会議結果紹介〉

第14回チタン世界会議参加報告—基調講演—	成島 尚之	15
製錬と粉末製造	渡辺 明治	18
溶解と casting	水上 英夫	19
展伸および成形加工	後藤 恭彦	20
積層造形, ニアネットシェイプ成形	大橋 善久	21
ミクロ組織と特性の関係—Room 300	森 健一	22
ミクロ組織と特性の関係—Room 200	江村 聡	23
ミクロ組織と特性の関係—Room 150	鷲見 芳紀	24
ミクロ組織の進化	今野 昂, 伊藤 良規	25
金属間化合物とチタン基複合材料	松若 大介	26
腐食環境	國枝 知徳	27
航空宇宙応用	佐原 亮二	28
生体・福祉応用	上田 恭介	29
海洋, ガス, その他のアプリケーション	高橋 一浩	30

## 〈報告〉

チタン溶接トラブル事例講習会報告	上瀧 洋明	32
------------------	-------	----

## 〈研究報告〉

積層造形法を用いたチタン/生体活性ガラスコンポジットによる骨形成促進新規 生体材料創成	李 誠鎬	36
チタン合金の結晶粒微細化による高強度化	蘆田 茉希	37
準安定組織・不均質組織制御したチタン合金の高温塑性・超塑性変形	松本 洋明	38
結晶塑性モデルによる純チタン板の塑性変形挙動の予測	浜 孝之	44
電子ビーム積層造形法を用いて造形したTiAl合金の特異な微細組織と力学特性	趙 研, 安田 弘行, 當代 光陽, 上田 実, 竹山 雅夫, 中野 貴由	50
電子ビーム三次元積層造形プロセスにおけるTiAl合金部材の伝熱解析と熔融池の可視化	池田 亜矢子	57

## 〈展示会情報〉

第6回関西高機能金属展2019への出展報告	芦原 幸一	62
2019年度第1回チタン市場開発・製品開発スタッフ養成講座受講報告	中松 尚徳	64
2019年度第2回チタン市場開発・製品開発スタッフ養成講座受講報告	原田 将大	66
2019年夏季賛助会員総会・研修会・交流会報告	関 秀隆	68
経済産業省「こども見学デー」2019年報告	芦原 幸一	71

## 〈事務局からの案内〉

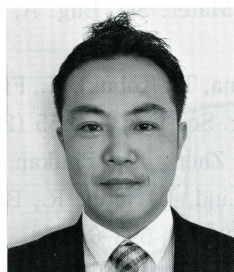
文献抄録	72	
令和元年6月～8月中の主なニュース	76	
金属チタン統計	78	
委員会報告	80	
チタンに関係する催物紹介	81	
チタン需要開拓助成事業	83	
令和2年度チタン研究助成対象研究課題の公募	84	
編集委員長就任のご挨拶	中村 宣雄	86
〈編集後記〉	山口 誠	87





## 電子ビーム積層造形法を用いて造形した TiAl 合金の 特異な微細組織と力学特性

Unique Microstructure and Mechanical Properties of TiAl Alloys  
Fabricated by Electron Beam Melting



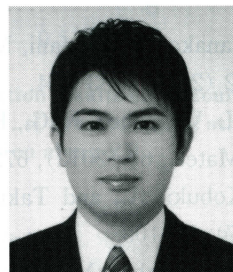
趙 研<sup>\*1</sup>

CHO, Ken<sup>\*1</sup>



安田 弘行<sup>\*2</sup>

YASUDA, Hiroyuki<sup>\*2</sup>



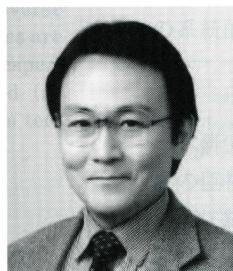
當代 光陽<sup>\*3</sup>

TODAI, Mitsuharu<sup>\*3</sup>



上田 実<sup>\*4</sup>

UEDA, Minoru<sup>\*4</sup>



竹山 雅夫<sup>\*5</sup>

TAKEYAMA, Masao<sup>\*5</sup>



中野 貴由<sup>\*6</sup>

NAKANO, Takayoshi<sup>\*6</sup>

<sup>\*1</sup> 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 講師  
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1  
Associate Professor, Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University  
2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

<sup>\*2</sup> 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 教授  
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1  
Professor, Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University  
2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

<sup>\*3</sup> 新居浜工業高等専門学校 准教授  
〒792-8580 愛媛県新居浜市八雲町 7-1  
Associate Professor, Department of Environmental Materials Engineering, National Institute of Technology, Niihama College  
7-1, Yagumo-cho, Niihama, Ehime 792-8580

<sup>\*4</sup> 金属技研株式会社技術本部 取締役本部長  
〒164-8721 東京都中野区本町 1-32-2 ハーモニータワー27階  
Director General Manager, Technical Division, Metal Technology Co. Ltd  
Harmony Tower 27F, 1-32-2, Honcho, Nakano-Ku, Tokyo 164-8721

<sup>\*5</sup> 東京工業大学物質理工学院 教授  
〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
Professor, School of Materials and Chemical Technology, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

<sup>\*6</sup> 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 教授  
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1  
Professor, Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University  
2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

TiAl alloys are considered to be prime candidates for new high-temperature structural materials due to their high specific strength and good corrosion resistance. However, the poor room temperature ductility and high reactivity of the alloys hinder their precise manufacturing. Electron beam melting (EBM) which is one of the additive manufacturing technologies has attracted much attention as a new manufacturing process for the alloys. We found the alloys fabricated by EBM have unique layered microstructure consisting of duplex-like regions and equiaxed  $\gamma$  grains regions ( $\gamma$  bands). In this study, the effect of the layered microstructure on mechanical properties of the alloys was investigated focusing on the orientation of the layered microstructure.

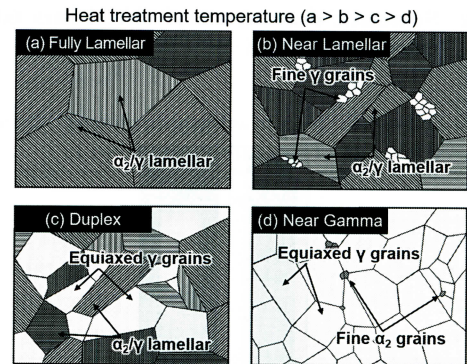
## 1. 緒 言

TiAl ( $L_{10}$ 構造,  $\gamma$ 相) と  $Ti_3Al$  ( $D0_{19}$ 構造,  $\alpha_2$ 相) から主に構成される TiAl 合金は、高比強度かつ優れた耐酸化性を有することから、新しい高温耐熱材料として研究開発が盛んに行われてきた<sup>1)~3)</sup>。本合金の特徴の一つとして、熱処理によって多彩な微細組織をとり、力学特性が大きな影響を受けることが知られている。例えば、代表的な TiAl 合金の一つである Ti-48Al-2Cr-2Nb (at%) 合金では、熱処理により **Fig. 1** に示すように、温度が高い方から  $\gamma$ 相と  $\alpha_2$ 相からなる fully lamellar 組織 (**Fig. 1** (a)), lamellar 組織中に少量の  $\gamma$  等軸粒を含む near lamellar 組織 (**Fig. 1** (b)), lamellar 組織と等軸  $\gamma$  粒が混在した duplex 組織 (**Fig. 1** (c)), 等軸  $\gamma$  粒中に一部微細な  $\alpha_2$  相が存在する near  $\gamma$  組織 ((d)) と微細組織が変化する<sup>4)</sup>。そして、fully lamellar 組織は高いクリープ強度を、微細な duplex 組織は優れた強度-延性バランスを得るのに有効である<sup>4)</sup>。

近年、General Electric 社などが新型航空機用ジェットエンジンの低圧タービン翼として TiAl 合金を実用化しており、その応用範囲は今後ますます拡大すると考えられる<sup>5),6)</sup>。しかし、現在タービン翼をはじめとする TiAl 合金製部品の多くは、ロストワックス法を含む鋳造法で製造されており<sup>7),8)</sup>、本合金の高い反応性による表面酸化や不純物混入が問題とされている。そのため、鋳造材の表面は大きく切削する必要があり、原材料のロスが課題となっている。また、本合金は、湯流れ性が悪く、鋳造との相性が悪いことに加え、室温延性が低いいため切削自体も困難であり、これらも問題視されてきた。そこで、これらの問題を解決するため、新しい合金の開発および新しい製造法の開発が進められている。

新合金として特に盛んに開発されているのは、東工大の竹山氏が世界で初めて提唱した熱間鍛造可能な  $\beta$  相含有 TiAl 合金である<sup>9)~11)</sup>。本合金は、Al 量を減少させ、Nb や Mo を添加することで  $\beta$  相 (bcc 構造) を安定化させたものであり、従来の TiAl 合金には適用できなかった熱間鍛造を行うことができる。本コンセプトに基づいて開発された Ti-Al-Nb-Mo-B 合金 (TNM 合金<sup>12),13)</sup>) は、Pratt & Whitney 社製 PW1100G-JM エンジンの低圧タービン翼に実用化されている<sup>5),14)</sup>。

TiAl 合金タービン翼の新しい製造法としては、金属



**Fig. 1** Schematic drawings of variation of microstructure caused by heat treatment in TiAl alloys.

3D プリントなどの付加製造 (Additive Manufacturing, AM) が注目されている<sup>15)~20)</sup>。特に、電子ビームを熱源として使用し、CAD データを基に薄い金属粉末層の積層・熔融・凝固を繰り返すことで、任意形状の構造体を造形可能な電子ビーム積層造形 (Electron Beam Melting, EBM) 法は、真空中で直接造形するため、表面酸化や不純物混入を低減できることから、TiAl 合金タービン翼を高精度かつ高効率に製造可能な手法として期待されている。

我々の研究グループでは、2014年から内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の助成をいただき、EBM 法を用いた TiAl 合金タービン翼の製造に関する研究開発を行ってきた<sup>21)~25)</sup>。本研究では、EBM 法を用いた形状制御だけではなく、金属粉末層を繰り返し熔融する際の入技熱量制御による微細組織の最適化にも着目し、健全かつ優れた力学特性を有する TiAl 合金タービン翼の実現を目指した。本稿では、EBM 法で造形した TiAl 合金の特異な微細組織とその力学特性について概説する。

## 2. EBM 法による TiAl 合金の健全造形

本研究では、鋳造製 TiAl 合金タービン翼として実用化されている Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金の粉末を使用し、Arcam 社製の EBM 装置により直径 10 mm、長さ 70 mm の丸棒材を造形した。本丸棒材を造形する際、**Fig. 2** に示すように丸棒材の長軸方向と造形方向のなす角  $\theta$  が  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  (以下それぞれ  $\theta=0^\circ$  材、 $\theta=45^\circ$  材) となる



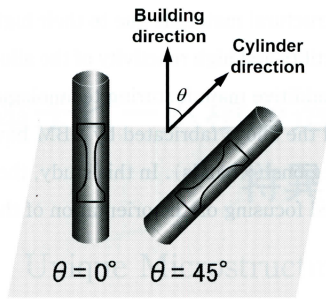


Fig. 2 Schematic drawing of cylindrical bars fabricated by EBM<sup>(21,22)</sup>.

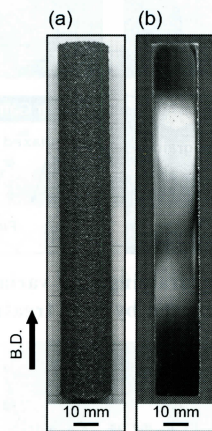


Fig. 3 TiAl cylindrical bar fabricated by EBM at  $\theta = 0^\circ$ ; (a) external view and (b) longitudinal sectional view.

よう CAD を設計することで、微細組織及び力学特性の造形方向依存性を調査した。また、EBM 法では、造形時のプロセスパラメータである、ビーム電圧  $V$ 、ビーム電流  $I$ 、走査速度  $v$ 、走査ピッチ  $h$ 、積層厚さ  $d$  などの最適化が健全造形ならびに微細組織制御の要となる。本研究では、最適条件を探索するための指針として、(1)式で表される投入エネルギー密度  $E$  に着目してプロセスパラメータを系統的に変化させた。

$$E = \frac{VI}{vhd} \quad (1)$$

Fig. 3 に本研究で探索した最適条件で造形した  $\theta = 0^\circ$  材の外観写真及び縦断面写真を示す。試料表面および試料内部にき裂や顕著な凹凸、欠陥などはなく、寸法精度は誤差  $\pm 0.2$  mm 以下、相対密度は 99% 以上であった。また、Table 1 に使用した原料粉末と本丸棒材の化学組成を示す。造形の前後で Cr 及び Nb 濃度に大きな差異は認められないものの、Al 濃度が約 2 at% 程度減少している。これは、Al の飽和蒸気圧が他の金属元素に比べて高いためである。炭素や酸素、窒素も造形前後の差異は小さく、造形体への不純物混入や酸化、窒化は低いレベルに抑制されていることが分かる。以上のことから、最適なプロセスパラメータを設定することにより、

Table 1 Chemical composition (at%) of the raw powder and the cylindrical bar fabricated by EBM<sup>(21)22)</sup>.

	Ti	Al	Cr	Nb	C	O	N
Powder	Bal.	48.6	1.74	1.95	0.032	0.193	0.008
Cylindrical bar	Bal.	46.3	1.72	2.10	0.049	0.215	0.020

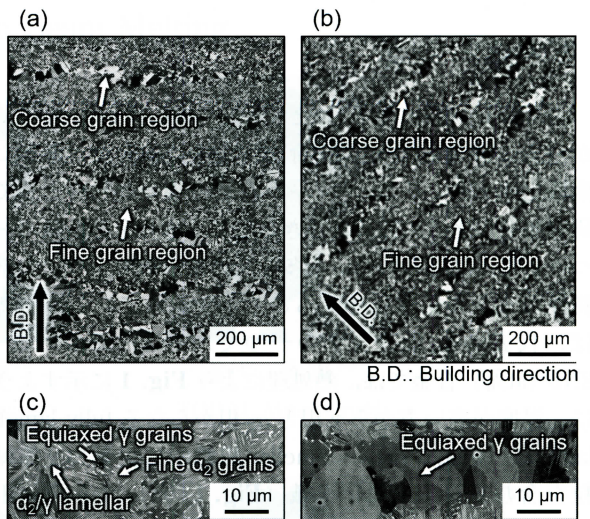


Fig. 4 Microstructure of  $\theta = 0^\circ$  (a) and  $\theta = 45^\circ$  (b). Enlarged images of duplex-like region (c) and  $\gamma$  band (d)<sup>(21)</sup>.

EBM 法によって健全な TiAl 合金構造体を造形できることが示された。

### 3. EBM 法で造形した TiAl 合金の微細組織<sup>(21)</sup>

Fig. 4(a) と (b) に上記と同じ最適条件で造形した  $\theta = 0^\circ$  材と  $\theta = 45^\circ$  材の微細組織をそれぞれ示す。両丸棒材ともに造形方向に対して垂直な微細粒の領域と粗大粒の領域からなるバンド状組織を有していることが分かる。Fig. 4(c) と (d) に微細粒からなる領域と粗大粒からなる領域の拡大像をそれぞれ示す。微細粒からなる領域は、微細な lamellar 粒と  $\gamma$  粒、 $\alpha_2$  粒で構成されており、duplex 組織 (duplex 領域) となっている。これに対して、粗大粒の領域は、主に等軸  $\gamma$  粒で構成されている。我々は、この等軸  $\gamma$  粒の領域を「 $\gamma$  バンド」と呼んでいる。このバンド状組織は、duplex 領域の幅と  $\gamma$  バンドの幅を足したものが積層厚さ  $90 \mu\text{m}$  と一致しており、丸棒材内の位置によらず概ね全体に分布している。しかし、より詳細にその分布を調査すると、丸棒材の最終造形部約 1 mm の領域には形成されないことが明らかとなった。Fig. 5 に  $\theta = 0^\circ$  材の最終造形部の微細組織を示すが、丸棒材の最上部から下部に向けて、fully lamellar, near lamellar, duplex, near  $\gamma$  組織と微細組織が変化していることが分かる。この最終造形部に見られるグラ



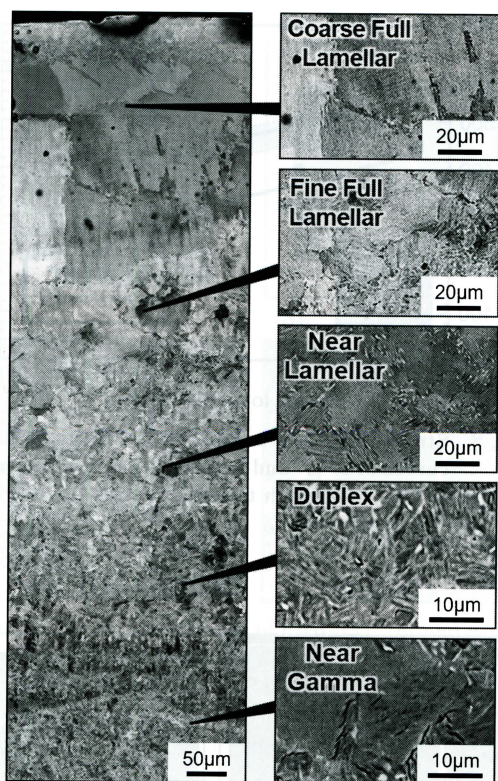


Fig. 5 Microstructure of top part in  $\theta=0^\circ$ .

レーション組織の変化の順番は、熱処理による微細組織の変化と同じ順番で変化している (Fig. 1)。このことは、熔融池からの熱影響により熔融池直下が熱処理され、各位置の温度に応じた微細組織が順番に形成されることを示唆している。

これら微細組織観察結果から、EBM法でTiAl合金を造形した際に得られる特異なバンド状組織の成因は、以下のように考えられる。

- ①電子ビームの照射によって熔融池ができ、そこからの熱影響により直下に fully lamellar, near lamellar, duplex, near  $\gamma$  組織 (グラデーション組織) が形成される。
- ②90  $\mu\text{m}$  新たな粉末が積層され、電子ビームの照射により熔融池ができ、新しいグラデーション組織が形成する。これにより①で形成されたグラデーション組織を上書きする。
- ③この時、①で形成されたグラデーション組織の内、下部の90  $\mu\text{m}$  は②での熱影響が届かないため、duplex 組織と near  $\gamma$  組織が残留する。
- ④以後、これらが繰り返されることで、duplex 領域と  $\gamma$  バンドが交互に現れるバンド状組織が形成される。

このように、バンド状組織の形成は、熔融池からの熱影響に大きく影響される。そのため、投入エネルギー密度を変化させた場合、熔融池からの温度分布が変化し、微細組織も変化する。Fig. 6(a)と(b)に最適条件よりも投

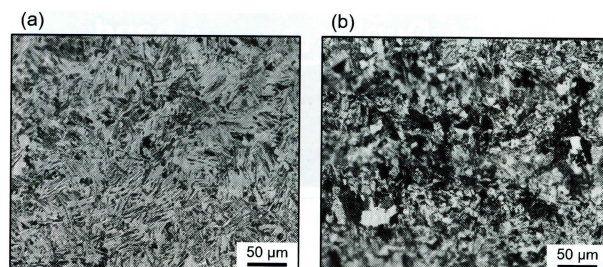


Fig. 6 Effect of  $E$  on the microstructure of TiAl alloys fabricated by EBM; (a) fabricated at high  $E$  and (b) fabricated at low  $E$ .

Table 2 Tensile properties of  $\theta=0^\circ$  (a) and  $\theta=45^\circ$  (b) at room temperature (RT) and 750°C<sup>21)</sup>.

	$\sigma_y$ (MPa)	EL (%)
$\theta=0^\circ$ (RT)	605	0.7
$\theta=45^\circ$ (RT)	580	2.8
$\theta=0^\circ$ (750°C)	462	26.9
$\theta=45^\circ$ (750°C)	472	41.8

入エネルギー密度  $E$  を大きくした場合と小さくした場合の微細組織をそれぞれ示す。  $E$  を大きくした場合、熔融池から温度分布はより高温にシフトするため、全面が高温の組織である near lamellar 組織となる。一方、  $E$  を小さくした場合に温度分布が低温にシフトするため低温の組織である near  $\gamma$  組織が全体に形成される。以上のことから、バンド状組織を有する TiAl 合金は、特定の範囲の造形条件でのみ得られることが分かる。別の見方をすると、造形条件を適切に選択することによって、バンド状組織だけではなく、均一な near lamellar 組織から near  $\gamma$  組織まで、幅広く微細組織を選択することができると言える。これは、EBM法が TiAl 合金の造形だけではなく、微細組織制御にも極めて有効であることを示している。

#### 4. EBM法で造形したTiAl合金の引張特性<sup>21)</sup>

前述のように、duplex 領域と  $\gamma$  バンドからなるバンド状組織は常に造形方向に対して垂直に形成される。このため、丸棒材の長軸方向を荷重軸とすると、バンド状組織を荷重軸に対して配向させることが可能となる。Table 1 にバンド状組織を有する  $\theta=0^\circ$  材と  $\theta=45^\circ$  材の室温および750°Cでの引張特性を示す。 $\theta=0^\circ$  材、 $\theta=45^\circ$  材ともに室温では約600 MPaと鋳造材に比べて高い降伏応力 ( $\sigma_y$ ) を示す。これは、鋳造材の組織に比べEBMで造形したTiAl合金のそれが非常に微細なためである。これに対して、伸び (EL) は、大きな異方性を示す。 $\theta=0^\circ$  材の室温伸びは、鋳造材と同様の1%以下であるのに対して、 $\theta=45^\circ$  材は3%近く伸びる。この原因は、Fig. 7 に示すように duplex 領域よりも  $\gamma$  バンドの方が硬さが低く、変形しやすいためである。 $\theta=45^\circ$



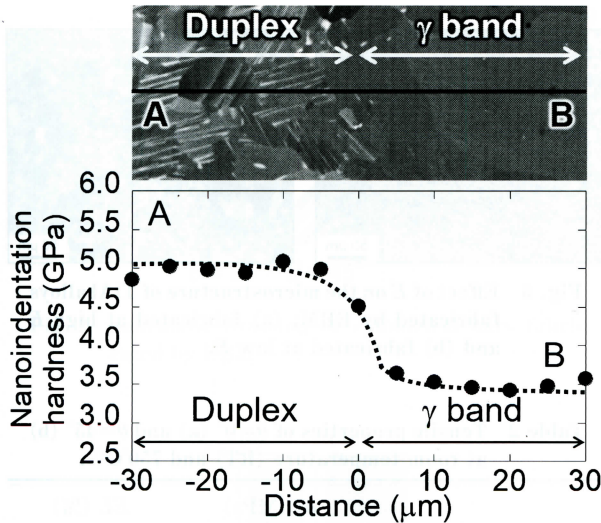


Fig. 7 Nanoindentation hardness distribution measured near the duplex-like region/ $\gamma$  band interface<sup>22)</sup>.

材では、変形を担う $\gamma$ バンドが最大せん断応力面と平行になるため、せん断変形が $\gamma$ バンドに集中し、高延性化していると考えられる。一方、750°Cでは降伏応力、伸びともに異方性が小さくなる。これは、高温ではduplex領域と $\gamma$ バンドの力学特性の差異が小さくなるためだと考えられる。

低室温延性は、TiAl合金の実用化において、重要な課題の一つである。そのため、 $\theta=45^\circ$ 材の示す優れた室温強度-延性バランスは、EBM法を用いて特異なバンド状組織を有するTiAl合金を造形することでその実用範囲をさらに拡大し得ることを示唆している。

5. EBM法で造形したTiAl合金の疲労特性<sup>22)</sup>

Fig. 8に室温での疲労試験（応力比-1，周波数10 Hz）から得られた $\theta=0^\circ$ 材， $\theta=45^\circ$ 材の疲労寿命曲線を示す。室温延性と同様，室温疲労特性もバンド状組織の配向に強く依存し， $\theta=45^\circ$ 材は $\theta=0^\circ$ 材よりも疲労強度が高い。また， $\theta=45^\circ$ 材は，造形欠陥や気孔を低減させるための熱間等方圧加圧（Hot Isostatic Pressing, HIP）処理を施していないにも関わらず，HIP処理を施した鋳造材と同程度の高い疲労強度を示す。 $\theta=45^\circ$ 材の優れた室温疲労特性は，高い室温延性に起因する疲労き裂発生 の遅延によるものである。また，Fig. 9に示す $\theta=0^\circ$ 材（Fig. 9(a)）及び $\theta=45^\circ$ 材（Fig. 9(b)）の疲労破面を比較すると， $\theta=0^\circ$ 材では複数の気孔が存在するのに対して， $\theta=45^\circ$ 材では気孔がほとんど見当たらない。このことから，気孔が荷重軸に対して45°に配列する $\theta=45^\circ$ 材では，疲労き裂の進展に気孔が及ぼす影響が小さいと考えられる。

これに対して，750°Cでは，引張特性と同様に疲労特性も異方性を失う。Fig. 10に示すように750°Cでの $\theta=$

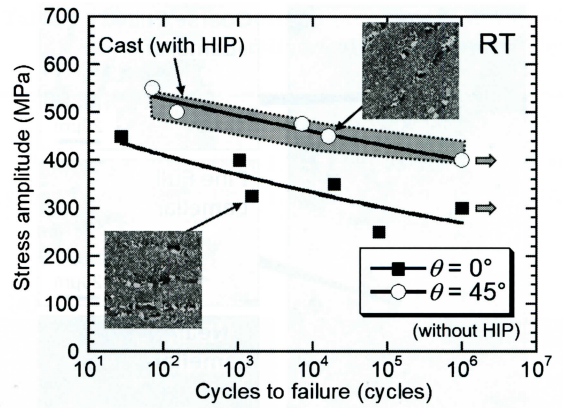


Fig. 8 Stress amplitude-number of cycles to failure curves of  $\theta=0^\circ$  and  $\theta=45^\circ$  cyclically deformed at RT, along with that of the cast alloys with HIP treatment<sup>22)</sup>.

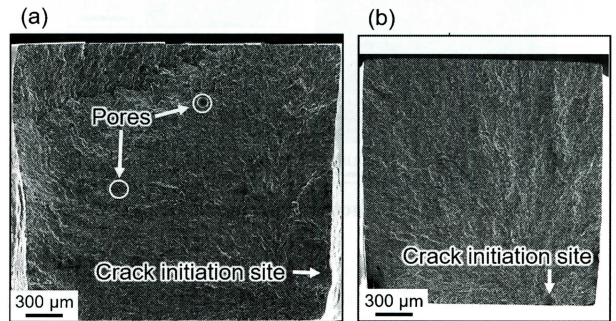


Fig. 9 Fracture surfaces of  $\theta=0^\circ$  (a) and  $\theta=45^\circ$  (b) cyclically deformed at RT<sup>22)</sup>.

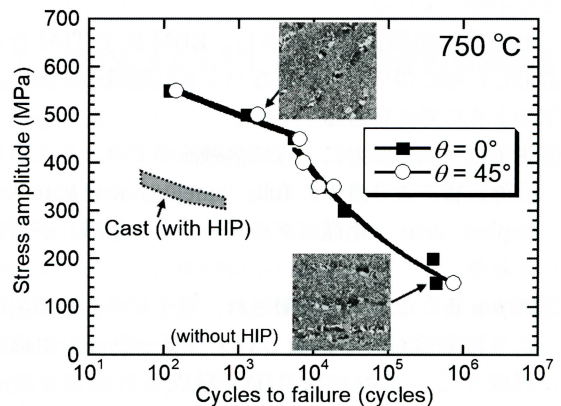


Fig. 10 Stress amplitude-number of cycles to failure curves of  $\theta=0^\circ$  and  $\theta=45^\circ$  cyclically deformed at 750°C, along with that of the cast alloys with HIP treatment<sup>22)</sup>.

$0^\circ$ 材と $\theta=45^\circ$ 材の疲労寿命曲線は重なる。この原因は，引張特性と同様，異方性の原因であるduplex領域と $\gamma$ バンドの力学特性の差異が小さくなるためだと考えられる。また， $\theta=0^\circ$ 材， $\theta=45^\circ$ 材ともに高応力・低疲労寿命側と低応力・長疲労寿命側の間に屈曲点を有することはバンド状組織を有する合金の特徴であり興味深



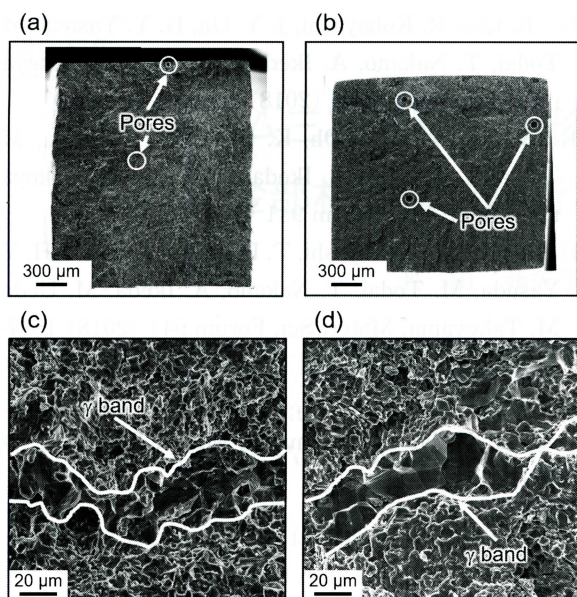


Fig. 11 Fracture surfaces of  $\theta=0^\circ$  (a), (c) and  $\theta=45^\circ$  (b), (d) cyclically deformed at  $750^\circ\text{C}^{22)}$ .

い。高応力・低疲労寿命側では、HIP 処理を施した鋳造材に比べて圧倒的に高い疲労強度を示す。これは、高温では、両丸棒材ともに高い延性を示すため、疲労き裂発生が遅延したことに由来すると考えられる。一方、低応力・長疲労寿命側では、HIP 処理を施した鋳造材と同程度の疲労強度となった。この時の疲労破面を観察するとバンド状組織の配向に依存せず、すべての試料で気孔と $\gamma$ バンドの粒界破壊が認められた (Fig. 11)。このことから、低応力・長疲労寿命側では、気孔および $\gamma$ バンドが疲労き裂の発生ならびに伝播を助長していると考えられる。

EBM 製 Ti-6Al-4V 合金や Ni 基超合金などでは、HIP 処理を施した鋳造材や鍛造材と同程度の疲労強度を得るため HIP 処理が不可欠である。一方、 $\theta=45^\circ$ 材は、造形ままでも HIP 処理を施した鋳造材と同程度の優れた室温・高温疲労特性を示す。これは、特異なバンド状組織が疲労特性の向上にも有効であることを明確に示している。なお、本研究では、EBM 製 TiAl 合金においても HIP 処理を施すことでさらに疲労特性が向上することを確認している<sup>25)</sup>。

## 6. 結 言

本研究では、EBM 法を用いて Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金を造形することにより、EBM 法特有のプロセスに起因して特異なバンド状組織が形成し、極めて優れた引張特性、疲労特性が得られることを明らかにした。TiAl 合金の微細組織は、合金組成に強く依存することから、合金組成を変えることで全く異なる微細組織が得られ、TiAl 合金の力学特性をさらに引き出せる可能性が高い。今後は、 $\beta$ 相含有 TiAl 合金等にも注目し、EBM

法による TiAl 合金の健全造形および微細組織制御法を確立したい。

## 謝 辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) (管理法人: JST) によって実施された。さらに、研究遂行に当たって、大学院生の Tianqi Liu 氏、小林良太氏、広部大樹氏、森田尚秀氏、坂田将啓氏、川端はじめ氏、福岡拓馬氏、尾堂裕隆氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) Y.-W. Kim, JOM 46 (1994) 53 (2006) 30-39.
- 2) Y.-W. Kim, D. M. Dimiduk, M. H. Loretto, Gamma Titanium Aluminides 1999, TMS (1999) Warrendale, PA.
- 3) F. Appel, J. D. H. Paul, M. Oehring, Gamma Titanium Aluminide Alloys, Wiley-VCH (2011) Singapore.
- 4) D. M. Dimiduk, D. B. Miracle, Y. W. Kim, M. G. Mendiratta, ISIJ Int. 31 (1991) 1223-1234.
- 5) B. P. Bewlay, S. Nag, A. Suzuki, M. J. Weimer, Mater. High Temp. 3409 (2016) 1-11.
- 6) 藤村哲司, 西川秀次, 守屋信彦, 今村満勇, IHI 技報48 (2008) 153.
- 7) J. Aguilar, A. Schievenbusch, O. Kattlitz, Intermetallics 19 (2011) 757-761.
- 8) Y. Dong, D. Zhang, K. Bu, Y. Dou, W. Wang, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 57 (2011) 1245-1258.
- 9) T. Tetsui, K. Shindo, S. Kobayashi, M. Takeyama, Scripta Mater. 47 (2002) 399-403.
- 10) M. Takeyama, S. Kobayashi, Intermetallics 13 (2005) 993-999.
- 11) T. Tetsui, K. Shindo, S. Kaji, S. Kobayashi, M. Takeyama, Intermetallics 13 (2005) 971-978.
- 12) H. Clemens, W. Wallgram, S. Kremmer, V. Guthier, A. Otto, A. Bartels, Adv. Eng. Mater. 10 (2008) 707-713.
- 13) H. Clemens, S. Mayer, Adv. Eng. Mater. 15 (2013) 191-215.
- 14) F.H. Froes, R. Boyer, Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, Elsevier (2019) Netherlands.
- 15) B. Cárcel, A. Serrano, J. Zambrano, V. Amigó, A. C. Cárcel, Phys. Procedia 56 (2014) 284-293.
- 16) L. Lober, F. P. Schimansky, U. Kühn, F. Pyczak, J. Eckert, J. Mater. Process. Technol. 214 (2015) 1852-1860.



- 17) D. Cormier, O. Harrysson, T. Mahale, H. West, Res. Lett. Mater. Sci. 2017 (2007) 34737-34740.
- 18) L. E. Murr, S. M. Gaytan, A. Ceylan, E. Martinez, J. L. Martinez, D. H. Hernandez, B. I. Machado, D. A. Ramirez, F. Medina, S. Collins, R. B. Wicker, Acta Mater. 58 (2010) 1887-1894.
- 19) J. Schwerdtfeger, C. Korner, Intermetallics 49 (2014) 29-35.
- 20) M. Seifi, A. A. Salem, D. P. Satko, Ulf. Ackelid, S. L. Semiatin, J. J. Lewandowski, J. Alloys Compd. 729 (2017) 1118-1135.
- 21) M. Todai, T. Nakano, T. Liu, H. Y. Yasuda, K. Hagihara, K. Cho, M. Ueda, M. Takeyama, Addit. Manuf. 13 (2017) 61-70.
- 22) K. Cho, R. Kobayashi, J.-Y. Oh, H. Y. Yasuda, M. Todai, T. Nakano, A. Ikeda, M. Ueda, M. Takeyama, Intermetallics 95 (2018) 1-10.
- 23) M. Sakata, J.-Y. Oh, K. Cho, H. Y. Yasuda, M. Todai, T. Nakano, A. Ikeda, M. Ueda, M. Takeyama, Mater. Sci. Forum 941 (2018) 1366-1371.
- 24) K. Cho, R. Kobayashi, T. Fukuoka, J.-Y. Oh, H. Y. Yasuda, M. Todai, T. Nakano, A. Ikeda, M. Ueda, M. Takeyama, Mater. Sci. Forum 941 (2018) 1597-1602.
- 25) D. Kondo, H. Yasuda, T. Nakano, K. Cho, A. Ikeda, M. Ueda, Y. Nagamachi, Mater. Res. Proc. 10 (2019) 114-120.



## 図書紹介

# 「目で見えるチタンの加工」

上瀧 洋明 著

近年、チタンの特性に着目し、新たにチタン関係事業に参加しようとする企業や団体が多くなり、すでにチタン加工の勉強を始めている事業所も多い。

チタン加工は、航空機部品やゴルフヘッド製作では、多くの実績を有するにも係わらず、難加工材であるというイメージが根強く、進出に躊躇する方も多い。なぜ、難加工材といわれるのであろうか。

その理由の一つは、チタンの性質が他の金属と違う点が多いため、従来の鉄鋼やステンレス鋼と同じ条件で加工しても巧くできないことにあると思われる。この課題を理論的に追跡していくと奥が深く、なかなか厄介である。しかし、この課題を解決せずに闇雲に加工を始めても失敗することとなる。

そこで本書では、チタン加工に新たに参入される方を念頭に、新規参入者や初心者が、まず頭に入れておかなければならない基礎を一目でわかるよう、なるべくイラストを用いて解説しわかりやすく紹介することとした。また加工上、知っておかなければならない事項を項目にわけ、しかも、項目毎に目で見えてわかるよう解説した。

本書は、いわばチタン加工の入門書である。意欲ある方は、これを足掛かりに、さらに専門的な勉強に進んでほしい。

発行所 日刊工業新聞社

定価2,420円(本体価格2,200円)送料別、本文:A5版、123ページ

一般社団法人日本チタン協会・会員割引あり

