



ミニ特集・2

チタンおよびチタン合金の現状と展望

構造用体心立方系チタン合金の現状と動向

Recent Developments and Trends of β -type Titanium Alloys for Structural Applications

萩原益夫

Masuo Hagiwara

九州工業大学

先端エコフィッティング技術研究開発センター
特任教授

1 はじめに

体心立方結晶構造 (bcc) を持つ β 相を主体とした体心立方系チタン合金 (β 型チタン合金と呼ばれている) は、最近の研究により、塑性変形能特性、生体親和性、超弾性特性、形状記憶特性、高温特性などにも優れていることが判明しており、従って、このような優れた特性を活かすことにより、航空機用途のみならず新しい用途分野の構造用及び機能用合金が開発されると期待される。実際に現在日本では、このような特性を更に一層高度化する研究が盛んである¹⁾。一方米国では、主として航空機用途の新型高強度・高靱性 β 型チタン合金の開発が盛んである。ちなみに2003年のチタン国際会議 (ドイツ) では β 型チタン合金に関する発表は世界全体で44件であったが、2007年チタン国際会議 (京都) では世界全体で71件と急増した。

本稿では、 β 型チタン合金の分類及びその合金学について簡単に述べた後で、主として構造用途の β 型チタン合金の研究開発に関わる日本及び米国での現状と動向を紹介する。

2 β 型チタン合金の合金学

純チタンは鉄と同じように同素変態を起こし、885℃以下では最密六方 (hcp) 構造 (α 相) を、高温側では体心立方 (bcc) 構造 (β 相) をとる。この同素変態温度 (β -transus 温度と呼ばれている) は、他の元素の添加により上昇あるいは低下する。Al、C、N、Oなどの元素は β -transus 温度を上昇させ、即ち α 相領域を高温側に拡大させるので α 相安定化元素と呼ばれている。一方、Fe、Moなどの遷移金属は β -transus 温度を低下させ、 β 相領域を低温側に拡大させるので β 相安定化元素と呼ばれている。

本号記事「研究が進む体心立方系チタン合金」中の「■チタン合金の種類と状態図」(655ページ) に示してあるように、

チタン合金は、室温において α 相が大部分を占める α 型チタン合金、 α 相と β 相がほぼ同量で存在する ($\alpha + \beta$) 型チタン合金、 β 単相域から焼入れた際にマルテンサイト変態を起こさずに β 単相となる β 型チタン合金の3種類に分類される。 β 型チタン合金は、更に、 β -transus 温度が室温以上にあり β 相中に α 相が析出する ($\alpha + \beta$) 二相組織の準安定 β 型チタン合金、この温度が室温以下にあり β 単相となる安定 β 型チタン合金に分けられる。また Ms 点 (マルテンサイト変態が開始する温度) が室温付近にある合金のことを near β 型チタン合金と呼んでいる。安定 β 型チタン合金は、Ti-35V-15Cr のような耐火合金の開発例があるものの熱処理性が無く、構造物材としての実用性に乏しい。そのため β 型チタン合金とは一般的には準安定 β 型チタン合金及び near β 型チタン合金を指す^{2,3)}。

準安定 β 型チタン合金では、熱間加工、冷間加工、溶体化処理の各工程は基本的に β 単相域で行われ、高強度化のための時効処理のみ ($\alpha + \beta$) 二相域で実施される。しかし Ti-10V-2Fe-3Al のような near β 型チタン合金は二相域で熱間加工、溶体化処理が実施され、工業的なプロセスは ($\alpha + \beta$) 型チタン合金に準じている。

各種チタン合金の代表的組成、特徴は、前掲記事中の「■チタンの組織と材料特性」で示されているように、 α 型チタン合金及び near α 型チタン合金はヤング率が高く、また高温強度 (特にクリープ) 及び溶接性に優れている。一方 β 相が主体の準安定 β 型チタン合金及び near β 型チタン合金は、静的強度、破壊靱性が高く、また熱処理感受性、加工性に優れていることが大きな特徴である。 β 型チタン合金が加工性に優れているのは製品の製造上大きなメリットであり、実際、 β 型チタン合金の熱延棒線、冷間伸線材、熱延及び冷延ストリップ薄板などは、強力な鉄鋼製造ミルを用いて製造されている。また十分に再結晶させた場合には bcc 構造が主体であることから一方向圧延した ($\alpha + \beta$) 型チタン合金のような極

端な板面内異方性が生ずることはなく、ステンレス鋼や軟鋼と同様に比較的等方的な加工性を持つ²⁾。

3 日本及び米国における β 型チタン合金開発の現状と動向

3.1 日本における β 型チタン合金開発の現状と動向

3.1.1 日本鉄鋼協会における β 型チタン合金の研究開発活動¹⁾

日本では、1980年代において、 β 型チタン合金の室温強度特性の高度化に関する研究が、大学、会社、金属材料技術研究所（現：物質・材料研究機構）などで非常に活発に行われた^{3,4)}。このように β 型チタン合金は、従来、室温用の高強度構造材料と見なされていたため、医療・福祉用途、高温用途などの新規な用途開発を目的とした研究は極めて不十分であった。このような状況を鑑みて日本鉄鋼協会材料の組織と特性部会では、 β 型チタン合金の新しい用途展開に関する学術及び技術情報の発信とその共有化を目的に、平成13年度より産・学・官の研究者、技術者が一同に会して、「体心立方系チタン合金開発の新しい展開」フォーラム（平成13年6月～平成14年5月）、「体心立方系チタン合金」フォーラム（平成14年6月～平成15年5月）及び「高加工性チタン合金」フォーラム（平成15年6月～平成16年3月）の各フォーラム活動を行ってきた。

またこのようなフォーラム活動を発展的に引き継ぐ形で、平成16年4月から平成20年3月までの4年間、「体心立方系チタン合金の新しい展開」と題した研究会活動が行われた（主査：萩原益夫）。本研究会は β 型チタン合金の用途の拡大に資するような学術的情報の取得を目的に、(1) 相安定性（相平衡、相分解過程など）、微視組織発現機構及び特性発現機構の解明などの物性データベース研究、(2) 組成及び金属組織制御による特性のより一層の高度化に関する研究、(3) 熱間及び冷間加工性などの加工性能に関わる研究の三つの研究範疇を対象に、参加者がそれぞれ具体的な目標を決め、研究を行うものであった。研究テーマ数は全部で19であり、また参加機関の内訳は、大学等が14、会社4及び日本チタン協会である。

各研究範疇の具体的研究テーマ名とその実施機関は次のようである。各テーマの具体的研究内容は研究会の報告書¹⁾を参照して頂くことにし、本稿では各範疇での成果の概要を記すことにする。

(1) 体心立方系チタン合金の相安定性、特性発現機構の解明などの物性データベース研究（7テーマ）

- ・陽電子消滅法によるTiNi系合金のマルテンサイト変態前駆現象の研究（大阪大：荒木秀樹、水野正隆、白井泰治）

- ・ β 型チタン基単結晶合金の育成と塑性変形挙動の解析（大阪大：中野貴由、萩原幸司、馬越祐吉、東北大：新家光雄）
- ・Ti-Nb合金の相変態に及ぼすZr添加効果の解明（愛媛大：小林千悟、仲井清眞、坂本辰顕）
- ・ β 型チタン合金の斜方晶マルテンサイト変態に関する研究（神鋼：大山英人、逸見義男、大分高専：薬師寺輝敏）
- ・マルテンサイトを有するTi-Mo合金の機械的特性と微視組織（岡山大：竹元嘉利）
- ・ β 型チタン合金中の格子欠陥の役割に関する電子顕微鏡学的研究（岡山理大：助台栄一）
- ・ β 型チタン合金の組織に及ぼす侵入型元素添加の影響（東北大：古原忠、富尾悠索、安中聡、牧正志）
- ・水素を利用したチタン合金の組織制御（東北大：成島尚之、大内千秋、今野昂、村上太一）

成果の概要：

β 型チタン合金では熱処理により脆い ω 相が形成され易い。また水焼入れ処理によりマルテンサイト相や格子欠陥も形成される。そこでこれらの相や欠陥の生成機構を金属組織学的に、また陽電子消滅法を用いて明確にし、またこれらを利用した機械的特性の向上についても検討した。更に単結晶合金を用いた塑性変形挙動を解析するとともに、機械的特性の向上に対する侵入型元素（N, C）及び微細TiCの利用も検討した。その結果、 ω 相、マルテンサイトなどの準安定相、格子欠陥、TiCなどの構造及びそれらの特性向上への利用、変形機構、侵入型元素の挙動に関して新しい知見を得た。

(2) 体心立方系チタン合金の組成及び組織制御による特性の高度化に関する研究（9テーマ）

2-1 高強度チタン合金

- ・Ti₂AlNb基合金の高温特性に及ぼすbcc元素添加の影響（物質・材料研究機構（現 九工大）：萩原益夫、物質・材料研究機構：江村聡）
- ・ β 相の組織変化を活用した $\alpha + \beta$ 型チタン合金の加工熱処理による高強度化（新日鉄：森健一、藤井秀樹）
- ・メカニカルアロイング法による超微細粒 β 型チタン合金の創製（九州大：土山聡宏、濱本紗江、高木節雄）

2-2 人工骨などの生体構造部材用途の低弾性率高強度チタン合金

- ・Ti-Nb-Ta-Zr系 β 型チタン合金の強加工による機能発現に関する研究（東北大：新家光雄）

2-3 生体・医療機器用途の超弾性・形状記憶チタン合金

- ・Ti-Cr-Al-Sn系合金の相構成と熱処理挙動（関西大：池田勝彦、上田正人、大同特：小川道治）
- ・Ti-Mo系合金の組織と機械的性質に及ぼす希土類元素添加の影響及びB2型Ti-Ni合金の粒界制御と粒界構造（熊本大（現九州大）：西田稔）
- ・Ti-Nb合金の超弾性特性に及ぼす内部組織及び添加元素の影響（筑波大：金熙榮、宮崎修一）
- ・生体用チタン基超弾性合金の集合組織制御と高機能化（東工大：稲村朋也、細田秀樹）

成果の概要：

人工骨などの用途の低弾性率高強度合金、生体・医療機器用途の超弾性形状記憶合金、航空機エンジン用途の軽量耐熱チタン合金を対象に、特性の高度化を目的とした金属組織学的研究を詳細に行った。その結果、超弾性（～3%）や形状記憶も付与された低弾性率（60GPa）高強度（800MPa）合金、ユビキタス元素から構成される医療機器用低コスト型合金、Ti-Ni合金並みの超弾性特性を示すNiフリーTi基形状記憶合金、750℃まで使用可能な軽量耐熱合金などが開発された。

(3) 体心立方系チタン合金の加工性能に関する研究（3テーマ）

- ・生体用体心立方チタン合金の高温変形特性と組織制御（茨城大：伊藤吾朗、本橋嘉信、東北大：新家光雄）
- ・チタン合金の冷間多段深絞り加工（豊橋技大：森謙一郎）
- ・ β 型チタン合金の諸特性に及ぼす冷間加工の影響（住金：前田尚志、松本啓）

成果の概要：

主として塑性加工性、深絞り加工性について検討した。その結果、温間で繰返し重ね圧延法を用いることにより、低ヤング率を維持したまま結晶粒の微細化に成功し、強度の大幅な増加を得た。また素材の表面に酸化皮膜処理を行うことにより、 β 型合金の深絞り成形性の改善に成功した。更に高温塑性変形は転位による溶質原子の引きずり機構により起こることを明確にした。

また本研究会活動の全体的な成果として次のことが挙げられる。

- (1) 本研究会での各参加機関の研究テーマは多岐に亘っているが、これらは同じ体心立方系合金という土俵の上での研究であり、得られた知見は参加機関全てが共有できるものであった。
- (2) 従来の β 型チタン合金は、Mo、Ta、Nb、Vなどの高価な β 相安定化元素を添加してその特性の向上を図ってきたが、

本研究会のテーマの一部は、研究期間中に、これらの元素の一部をFe、Crなどの安価な β 相安定化元素で置き換えるという低コスト型組成の合金の開発に移行してきた。現在、産業経済省、文部科学省では希少資源節約の観点からユビキタス元素の有効利用を唱えているが、本研究会はこのような動きを先取りした研究を先導的に行ったと評価できよう。

- (3) 日本のチタン製錬技術、加工技術及び生産量は世界のトップクラスにある。また合金開発も多くの実績がある。後発国の追従を許さないでこのトップランナーの位置を維持するためには、絶えず高付加価値合金の開発、新プロセス技術の開発を行うことが重要であると認識された。

3.1.2 その他の β 型チタン合金の研究開発

上記のような β 型チタン合金の研究開発の他に、現在日本では下記のような研究開発が鋭意行われている。

・ゴムメタル^{5,6)}

豊田中研の齊藤らが中心となり本 β 型チタン合金（ゴムメタルと称している）の開発及び特性出現の機構の解明に取り組んでいる。本合金は基本的にはTi₃（Nb, Ta, V）+（Zr+Hf）+Oと表示される体心立方構造を有する合金である。本合金の低ヤング率（40GPa）は、組成平均の荷電子数 e/a 比が約4.24、DV-X α クラスター法による結合次数 B_o が約2.87、Md値が約2.45eVに対応した組成のときに生じる。ただし組成を定めただけではゴムメタルの特性は発現しない。このような組成の合金に強冷間加工を加えることにより優れた特性が発現する。その他のゴムメタルの特徴は以下のようである。①弾性変形能が2.5%と超弾性的な性質を有する、②フックの法則に従わず、ヒステリシスのない非線形的な弾性変形挙動を示す、③酸素量の増加によって強度は著しく増加するが、従来のチタン合金のように脆化はしない、④低温時効によって強度は容易に上昇し、高酸素材ではチタン合金の中で最高の引張り強さ（2,000MPa以上）に達し、しかも延性を維持している、⑤室温以下の温度で強加工を施しても全く加工硬化を示さず、99.9%以上の超塑性的な冷間加工性を有する。図1はゴムメタルの引張り強さを従来の金属材料と比較したものである。同一のヤング率で比較した際に著しく高い値を示すことが分かる。

本合金メタルはその多機能性を生かして自動車部品、医療機器、生体材料、精密機器、航空・宇宙分野での幅広い応用が期待されている。

・高耐食性高強度チタン合金⁷⁾

従来、耐食性が要求される用途分野では、RuあるいはPd

といった地球資源的に将来の安定供給が望めない高価な貴金属を含んでいる α 型のチタン合金が使用されている。従って、貴重金属資源節約あるいは資源循環という社会的要請に対応した高耐食性の高強度チタン合金の開発が望まれている。 β 型チタン合金は、溶体化処理後の時効処理により1,000～1,500MPaの引張り強さを達成することが可能である。そこで物質・材料研究機構の江村、西村、関らは、Mo添加 β 型チタン合金を対象に、組成制御、析出物形態制御により高強度化を達成し、また高強度化に伴う耐すきま腐食特性、表面被膜の耐衝撃特性・原子濃化状態などの変化を解析し、高耐食性高強度 β 型チタン合金という新しい範疇の構造用チタン合金の開発を行っている。

3.2 米国における β 型チタン合金開発の現状と動向

米国ではここ数年 β 型チタン合金が見直され、新しいタイプの高強度、高靱性合金の開発が活発になってきた^{8,9)}。従来合金よりも3倍も破壊靱性値の高い新型高強度、高靱性合金の研究もなされている。主要な用途はやはり航空機の構造部材である。昨今の燃料費高騰の状況から航空機も可能な限り軽量化し燃費を改善することが迫られている。そのため従来の重たい鋼製部材を新たに開発する高強度高靱性チタン製部材で置き換える動きが加速している。

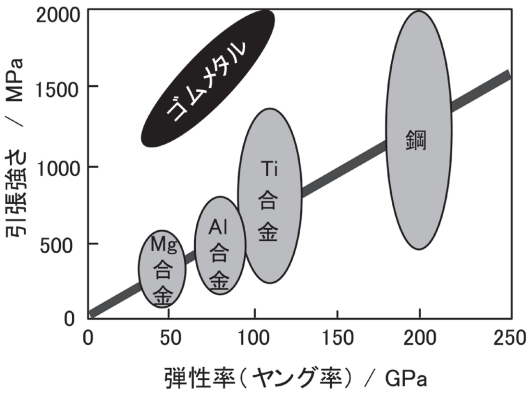


図1 金属材料の引張り強さとヤング率の関係

3.2.1 ランディングギア用途の高強度 β 型Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr- (0.3～0.6) Fe (Ti-5-5-5-3) 合金^{10,11)}

従来の航空機のランディングギアには4340M、HSLAのような引張り強さが1,930MPa以上の高強度鋼が使用されてきたが、B777とA380の最新鋭機種において初めて β 型Ti-10V-2Fe-3Al (Ti-10-2-3) 合金の鍛造材がランディングギアとして採用された。これにより大幅な重量減が図られ、また鋼製部材が持つ腐食やメンテナンスの問題が解決された。しかしこのTi-10-2-3合金は、1) Feが2%も含まれているために凝固偏析の問題を抱える、2) 溶体化処理後水焼入れを行うが、硬化能 (hardenability) が良好ではないため、75mm厚以上の素材では均質な微視組織が得られない、3) プロセッシング窓 (Window) が狭いために加工熱処理に困難が伴う、などの欠点⁹⁾を抱えている。

旧ソ連時代では、VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe) という名称・組成の β 型高強度チタン合金が開発され¹²⁾、イリュージン旅客機のランディングギアに使用されてきた。当時西側諸国でこの合金を使用した例は皆無とのことである。その後米国TIMET社は、本合金をベースにCr量とFe量を僅かに修正し機械的特性を向上させた改良版のTi-5Al-5Mo-5V-3Cr- (0.3～0.6) Fe (Ti-5-5-5-3) を開発した。Fe量を減らしたのは偏析を減少させるためであり、それにより生じた β 相安定化能の低下をCr量を増加したことで相殺している。なお本合金はボーイング社の最新鋭機種であるB787型機のランディングギアに採用された (本号654ページの写真を参照)。

本Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr- (0.3～0.6) Fe (Ti-5-5-5-3) 合金の特徴は次のようである^{10,11)}。

- 1) 本合金、Ti-10-2-3及びVT22の強度、延性、靱性の代表例を表1に示す。VT22を開発したVSMPO社では本合金に関して、「Ti-10-2-3と同一の延性水準で比較すると、本合金の方が強度は6%高い」と記している。
- 2) Ti-10-2-3では溶体化処理後水焼入れを行うが、本合金では α 相の析出が遅いために溶体化処理後は空冷で十分であり、その後の時効処理で微細な α 相が析出する。
- 3) 偏析の問題はない。

表1 溶体化時効材の引張り特性及び破壊靱性値の典型例

合 金	引張強さ MPa	降伏強さ MPa	伸び %	絞り %	破壊靱性値 MPa・m ^{1/2}
Ti-10V-2Fe-3Al	1280 1188	1202 1130	7.0 10.2	21.2 39.2	53.6 76.9
VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe)	1296 1140	1229 1071	9.0 11.8	23.2 28.2	42.5 72.9
Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.3Fe (Ti-5-5-5-3)	1369 1211	1293 1117	7.0 9.9	12.4 19.7	43.4 61.0

4) 硬化能 (hardenability) が高く、素材の肉厚が150mmまで均質な微視組織が得られる。

5) 熱処理後の硬化した状態で機械切削加工が可能である。などが挙げられる。以上のことより、本Ti-5-5-5-3は、Ti-10-2-3やVT22と比較して取り扱いが容易な (Friendlier) な合金であることが一番の大きな特徴であろう。なお第11回チタン国際会議のプロシーディングには本合金の機械的特性の最良化、高温加工性能の評価、部材の製造などに関する論文が多数収録されている¹³⁾。

本合金に関しては、時効に伴う金属組織変化、数値的モデルプロセスによる熱間加工性シミュレーションなどの研究が引続き行われている^{8,9)}。

3.2.2 ボロン添加β型チタン合金の開発

チタン合金インゴットから部材を製造するに際しては、インゴット中の柱状凝固組織を破壊し、また成分元素の偏析を無くすことを目的に、高温のβ相単相域でインゴットに変形を加える (インゴットブレイクダウン)。もしインゴットの段階でその柱状凝固組織が微細であれば、このような変形工程は必要なくなるので、これはチタン製品のコストダウンに繋がる。

Tamirisakandala¹⁴⁾らの研究により、純チタンあるいはチタン合金に微量のボロン (B) を添加すると、溶湯の凝固の際に形成された直径がミクロン以下のTiBの粒界ピン止め効果によりインゴットの結晶粒は著しく微細となることが判明した。図2はTi-6Al-4Vに0.06重量%のBを添加した際のインゴットのマクロ組織である。この僅かな量のBの添加により凝固組織は著しく微細化していることが理解できる。図3はTi-6Al-4V及びTi-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si (Ti-6242S) インゴッ

トの粒径に及ぼすB量の影響を示したものである。B添加量の増加とともに粒径は急激に減少するが、B量が0.1重量%以上では、粒径は約100μmと一定値を示す。即ち結晶粒の微細化のためには、B量は最大で0.1重量%で十分である。

このように微量B添加により粗大な柱状凝固組織はほぼ消滅し、また元素の偏析も大幅に低減するのでB添加したインゴットでは、柱状凝固組織を破壊し、また偏析を減少させるための変形処理は不要になり、インゴットを直接二相域で鍛造成形を行えばよいことになる。この粒微細化効果により、二相域での鍛造はより早い歪速度で、またより低温側で行うことが可能となる¹⁵⁾。これもコスト低減に寄与する。また鍛造後に焼鈍処理を行ってもTiBの粗大化や粒の粗大化は起こらないので、結晶粒が微細である状態は最終製品にまで持ち来たされる。これは、室温延性、引張り強さ、高サイクル疲労強度などの機械的特性の大幅に向上に繋がる^{14,15)}。

米国では、Beta-21S (Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si)、Ti-5-5-5-3などのβ型チタン合金を対象に、0.1重量%程度の微量のボロン (B) を添加し、高温鍛造性・加工性、機械的特性の改善を試みている^{16,17)}。疲労特性の改善例として (これは日本での研究であるが)、Ti-22Al-11Nb-2Mo-1Fe合金 (Ti₂AlNb化合物にB2相を約20%組み入れたチタン系耐熱合金) の高サイクル疲労強度に及ぼす微量B添加の影響を図4に示す¹⁸⁾。供試材は高温のB2域単相から冷却しラメラ組織とした。B無添加材では旧B2粒径は200μm以上に粗大化していたが、B添加材ではそれは80μmと微細化していた。図より微量のB添加は高サイクル疲労特性の向上に著しく効果的であることが明瞭である。なおTiBは疲労の起点にはなっていなかった。

これらの研究により、機械的性質、加工性能に対するB添

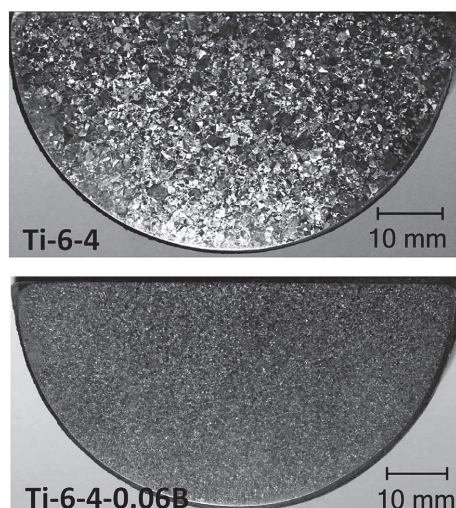


図2 0.06重量%のBを添加したTi-6Al-4V合金インゴットのマクロ組織

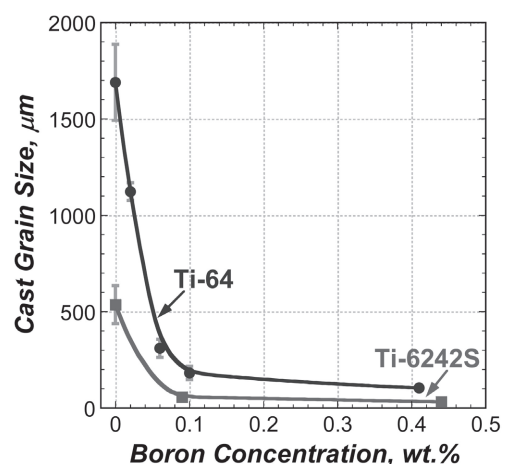


図3 Ti-6Al-4V (Ti-64) 及び Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si (Ti-6242S) 合金インゴットの粒径に及ぼすB量の影響

加のポジティブな効果が例証されたので、今後この微量ボロン添加に関する研究は注目され、広範に行われていくと予想される。

3.2.3 Beta Gamma TiAl 合金¹⁹⁾

Ti : 50%、Al : 50%の組成に出現する金属間化合物相 (γ -TiAlと呼ばれている) は確かに高温特性に優れているものの、過去の研究努力にも係わらず高温加工性能の悪さや室温延性の欠如が完全に改善されたとは言い難い。そのため実用化はごく一部の部材に留まっている。そこで γ -TiAlの開発の立役者であった米国UES社のY.W.Kim博士は、 γ 相にbcc構造を持つ β 相を5%程組み入れた合金 (Beta Gamma TiAlと称している) の開発を数年前から試みている。このような β/γ 2相組織となるような組成は ($\gamma + \beta$ / B2 + α / α 2) 3元相境界近傍のTi- (42-45) Al- (2-6) Nb- (1-6) (Cr, Mn, Mo, V) - (0.2-0.4) (B, C) である。これらの合金は、その高温特性に関しては γ -TiAlよりも劣るものの、均質かつ微細な金属微視組織が得られ、また延性にも優れ、更にはプロセッシング窓も広いことから、新しいタイプの軽量高強度材料として魅力的である。実用化までには解決すべき課題が沢山あるとのことであるが、現在、例えば英国パーミンガム大学と共同研究を行うなど、国際共同研究を積極的に推し進めている。

3.2.4 その他の β 型チタン合金の研究開発

β 型チタン合金はヤング率が低いためにバネ材としても適している。Ti-200 (Ti-3.8Al-2.3V-2.5Mo-3.0Cr-2.3Zr-2.0Sn-0.5Fe) なる名称・組成の合金がバネ用途の高強度合金として開発された。本合金は ($\alpha + \beta$) 二相域で最終仕上げ鍛造を行い、その後焼鈍処理を行う。自動車、オートバイ、ホーバー

クラフトなど航空機以外の多くの民生用途に適用可能とのことである²⁰⁾。またTIMET社ではLCB (Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al) を自動車サスペンションスプリングコイルに適用すべく、プロセッシングと特性との関係を詳細に調べている²¹⁾。

米国の大学では最新の β 型チタン合金の他にも、Ti-10V-2Fe-3Al、 β -Cez (Ti-5Al-2Sn-4Zr-4Mo-2Cr-1Fe) のような既存の β 型チタン合金も対象にして、熱処理に伴う金属組織進展、金属組織と機械的特性の関係といった物理冶金学的な研究を詳細に行っている^{8,9)}。

4 おわりに

日本でのチタンの出荷は、好況と低迷の凸凹はあるものの、ここ10年程の間は全体的に見て右肩上がりに順調に推移してきた。近年の民間航空機需要の回復、自動車用途の拡大、中国向け輸出の急増などで2008年のチタン展伸材の出荷量は19,727トンにまで急激に増加した。史上最高の生産量である。(その内、内需は10,164トン、輸出は9,563トンである。)。2009年はリーマンショック後の世界的な景気低迷の影響を受け、2008年と比較して約40%減の11,999トンに減少した。展伸材出荷量の大幅な回復は平成22年末以降と見込まれている²²⁾。

日本では、バブル崩壊後は停滞の時期もあったものの、チタンの揺籃期から現在に至るまでチタン合金の開発は活発に行われてきた。実際に、耐食性チタン合金、高強度チタン合金、耐熱チタン合金など数多くの合金が開発され、産業界で使用されている。とはいえ日本では、合金の最大の需要先である航空機産業がそれほど大きくないので、チタン転伸材出荷量の中で合金の占める割合は10%以下と僅かである。「合金開発に多大な努力を払ったのに係わらずそれに見合う合金需要が少ないのは、いずれ研究開発能力の衰退に繋がるのではないかと、またここで新しい合金を開発しても市場はあるのか?」と言うのが率直な感想であろう。従って日本の持つこのような高い合金開発力を今後も維持し、更に発展させるためには、新たな合金需要の出現が不可欠である。ところが幸運にもここ数年、日本でのチタン合金需要が大幅に増大することを予期させるような新しい動きが出てきた。具体的には、1) 日本でも航空機開発の計画が複数存在する。新型航空機ほどチタン合金の使用量は増加の傾向にあり、従って日本発の航空機にも多量のチタンが使用されると期待される。2) 普通乗用車にチタン部品を搭載する試み (トヨタ、VWなど)。特にVWはサスペンションスプリングコイルに β 型チタン合金の適用を試みている。3) 高齢化社会の到来を反映して人工骨などの生体代替材料や医療・福祉機器へのチタンの適用の動きである。

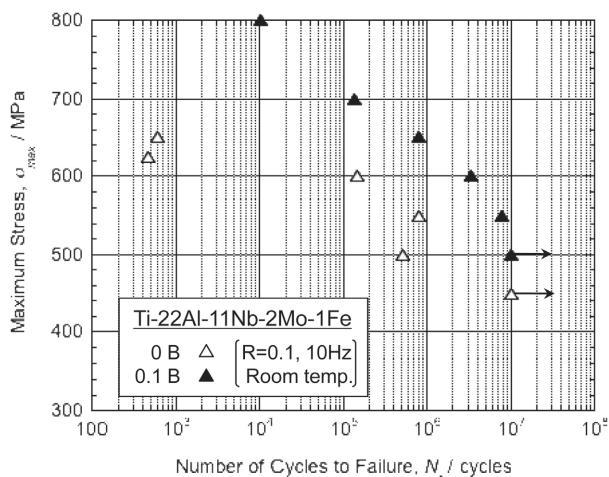


図4 B添加及び無添加のTi-22Al-11Nb-2Mo-1Fe合金の高サイクル疲労曲線

このような新たな動きに対応するかのように、日本ではここ数年来、バブル期以前の合金開発とは特性、用途を異にする新しいタイプの合金開発活動が活発に行われるようになってきた。それらは、本稿で述べたように、高強度・高塑性変形合金、生体用途の低弾性率・高強度合金、高温用合金、生体・医療機器用途のNiフリー型超弾性・形状記憶チタン合金、低廉元素のみから構成されるチタン合金などである。即ち今後は、新たに開発された β 型チタン合金が航空機用途のみならず新しい構造用途及び機能用途において需要を大幅に拡大していくと期待される。

なお本稿では取り上げなかったが、チタンの大幅な製造コストの低減が可能な新プロセスの研究も世界的な規模で行われている。従来のクロール法に替わる新しい製錬法の開発、Single melt溶解技法などである。またチタン粉末冶金も再度脚光を浴びている。新製錬法はまだ実験室規模の開発初期段階に留まっているが、後の二つのプロセスは既に商業化の段階にある。これらの低コスト化技術が完成の域に達しあるいはより一層高効率化し、新しいタイプの β 型チタン合金を含めて各種チタン合金のより一層の低コスト化に結びつくことを期待する。

参考文献

- 1) 体心立方系チタン合金の新しい展開研究会報告書, (社)日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会 体心立方系チタン合金の新しい展開研究会編, 2008年3月.
- 2) 藤井秀樹: チタンの基礎と加工, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 2008年2月, 31.
- 3) 森永正彦, 古原忠, 戸田裕之: 金属材料の加工と組織, 共立出版, 2010年2月, 156.
- 4) 河部義邦: 金属, 65 (1995), 667.
- 5) T.Saito, T.Furuta, J.Huang, S.Kuramoto, K.Nishino, N.Suzuki, R.Chen, A.Yamada, K.Ito, Y.Seno, T.Nonaka, H.Ikehata, N.Nagasako, C.Iwamoto, Y.Ikuhara and T.Sakuma: Science, 300 (2003), 464.
- 6) 倉本繁: チタンの基礎と加工, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 2008年2月, 59.
- 7) X.H.Min, S.Emura, T.Nishimura, K.Tsuchiya and K.Tsuzaki: Mat. Sci. & Eng., A, 527 (2010), 5499.
- 8) Beta Titanium Alloys in the 00's Symposium, 2005 TMS Annual Meeting and Exhibition (TMS 2005), San Francisco, Feb.13-16, (2005) 本シンポジウムで発表された各研究は, J.Mater.Eng.Perform., 14 (6), December2005に論文として収められている。
- 9) Mechanical Behavior, Microstructure, and Modeling of Ti and Its alloys Symposium, 2008 TMS Annual Meeting and Exhibition (TMS 2008), New Orleans, March 9-13, (2008)
- 10) J.C.Fanning and R.R.Boyer: Ti-2003 Science and Technology (Proc.10th World Conference on Titanium), Hamburg, (2003), 2643.
- 11) J.C.Fanning: J.Mater.Eng.Perform., 14 (2005), 788.
- 12) I.S.Polkin et al.: Proc.7th World Conference on Titanium, San Diego, (1992), 1569.
- 13) Ti-2007 Science and Technology (Proc.11th World Conference on Titanium), 京都, 日本金属学会, (2007)
- 14) S.Taramisakandala, R.B.Bhat, J.S.Tiley and D.B.Miracle: Scripta Mater., 53 (2005), 1421.
- 15) R.Srinivasan, D.Miracle and S.Taramisakandala: Mater. Sci.Eng.A, 487 (2008), 541.
- 16) S.Taramisakandala, R.B.Bhat, J.S.Tiley and D.B.Miracle: J.Mater.Eng.Perform., 14 (2005), 741.
- 17) B.Chelukuri, R.Srinivasan, S.Tamirisakandala and D.B.Miracle: Scripta Mater.60 (2009), 496.
- 18) 北浦知之, 萩原益夫, 小野嘉則, 由利哲美, 緒形俊夫: 日本学術振興会耐熱金属材料第123委員会研究報告, 51 (2010) 1, 113.
- 19) D.S.Shih and Y.W.Kim: Ti-2007 Science and Technology (Proc.11th World Conference on Titanium), Kyoto, (2007), 1021.
- 20) C.Pepka: TITANIUM 2008, Conference & Exhibition, Las Vegas, ITA, (2008)
- 21) Y.Kosaka, S.P.Fox, K.Faller and S.H.Reichman: J.Mater. Eng.Perform., 14 (2005), 792.
- 22) (社)日本チタン協会統計資料

(2010年9月2日受付)