

Tiは1155Kに $\alpha \rightleftharpoons \beta$ の同素変態点があり、低温安定相は稠密六方晶で α 相と呼ばれ、高温安定相は体心立方晶で β 相と呼ばれている。この関係は鋼の A_3 変態における高温側のオーステナイトが最密構造の面心立方晶で低温側のフェライトが原子の隙間の多い体心立方晶であるのに対比すると逆になっている。Tiに対してほとんどの元素は固溶するが、 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 変態温度を上昇させて α 領域を拡大するものを α 安定型元素と呼び、O, N, C及び金属元素としてはAlがある。逆に β/α 境界(β トランザス)を下げるとともに β 相中の固溶度が大きいものを β 安定型元素と呼び、ほとんどの金属元素がこれに該当する。なお、同族のZr, Hfは中立で、Snは α 安定能が弱で中立的である。Ti合金の機械的性質はその基調となる結晶構造への依存性が大きいので、実用合金においては β 型、 $\alpha+\beta$ 型及び α 型(near α)に大別して整理される。

1 チタン合金の組織と性質

開発されているTi合金の組織は、要求される材料特性に適した結晶構造系を指向し、さらに個々の特性を向上させるよう配合元素の種類、組み合わせ及び配合量を選ぶとともに加工・熱処理等の製造プロセスの制御によって、金属組織をマクロ的・ミクロ的に調節したものである。

1-1 β 型チタン合金

純Tiは急冷しても室温で β 相は得られない。 β 安定型元素のかなり多量を配合することにより室温で安定した β 型合金が得られる。 β 型Ti合金は立方晶であるために六方晶の α 型よりも塑性加工性に富み、また通常20%以上の高濃度合金であるために大きな固溶強化や熱処理性が期待できる。実用合金では金属組織の調節と安定化及びより大きな固溶強化をはかるため、通常3%程度のAlが配合されていて、Ti合金のうち最大の引張り強さを持つ強力合金が得られているが、ヤング率は α 型合金に比べると約10%低く、耐熱性や耐クリープ特性の要求には不向である。

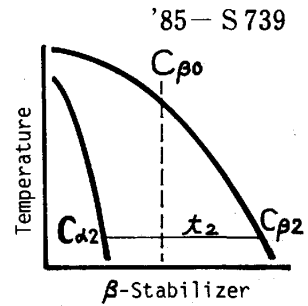
1-2 α 型チタン合金

α 型Ti合金は変態温度以下では組織的に安定で、現状の耐熱Ti合金の使用上限温度の約820Kを勘案すれば耐熱性に優れ、六方晶のためにヤング率は β 型合金より大であるのでクリープ特性も優れているが塑性加工性が悪い。高濃度合金ではないために中程度の強度であり、変態は関与しないので溶接性がある。 α 安定型元素のうち、実用の対象となるものは非金属元素のOと金属元素のAlに限られる。 α -Ti中のOの固溶限は14.5%と非常に大きい、0.3~0.4%以上含有するとTi材は脆化する。CP Tiを常温付近で使用する場合にはOを強化元素と考えることができるが、約600K以上ではこの強化効果がほとんど消失するほか、極低温の靱性は約0.1%のOの存在によっても損われる。

Ti合金において α 安定型元素として唯一でかつ重要なものはAlである。AlはTi中に室温で約6%、高温では約8~13%固溶するが、固溶限を越えると α_2 (Ti₃Alの規則格子)が現われて靱性及び加工性を低下する。Alはほとんどすべての強力Ti合金に配合される元素であるが、Ti-Al系2元平衡状態図は研究者によりかなりの差異が報告され、その考動に影響を与える因子が多い。実用されている α 型Ti合金はAlを5~8%配合し、強度、安定性、靱性及び加工性を改善するために中性的なSnやZr及び僅かの β 安定型元素を併せて配合したものである。さらに一層の耐熱性、強さ、及びクリープ特性の向上をはかるため、 α の単相にこだわらず少量の β 安定型やSiを配合して特性を高めたnear α 型Ti合金も開発されている。

1-3 $\alpha+\beta$ 型チタン合金

構成要素である α 相と β 相の特長に加え、マクロ的に組み合わせることによる複合効果を示す。熱処理による材質調節の中が大きく、現在Ti合金中で最も多量に使われている6Al-4V-Tiは本系に属している。組成は α 安定型のAlと β 安定型の元素を組み合わせた多元合金で、その金属組織を理解するためFig.のように β 安定型元素に着目して擬二元系状態図を考える。 $\alpha+\beta$ 2相領域では保持温度に応じて平衡関係にある α 粒と β 粒の組成が変わるが、 β トランザスの温度勾配がかなり大きいこと及びこれらの熱平衡がかなり早く(現場熱処理作業時間の範囲)達成されることが特徴である。Fig.において β 安定型元素の含有量が $C_{\beta 0}$ の合金は t_2 度の保持により $C_{\alpha 2}$ 濃度の α 粒と $C_{\beta 2}$ 濃度の β 粒となるが、 $C_{\beta 2}/C_{\beta 0}$ の比が2~3となる場合もしばしばで、この他 α 安定型元素についても同様である。またこれらの配分の差は20~30度の温度差によっても明瞭である。



$\alpha+\beta$ 型Ti合金は高濃度の粒子と低濃度の粒子とのマクロ的な混合よりなり、濃度、形状、寸法及び分布の調整により時効熱処理の挙動や安定性ならびに各種の材料特性を調節できる中が大きくことを示唆している。

1-4 チタン合金に見られるその他の組織など

マルテンサイト: Tiの $\beta \Rightarrow \alpha$ 変態はBurgersの関係 $(110)_{\beta} // (0001)_{\alpha}$, $[111]_{\beta} // [11\bar{2}0]_{\alpha}$ により無拡散で格子長の若干のずれによつてゐるが、実際には補足変形が必要で、これらの跡が針状のマルテンサイト組織(α')として観察される。Tiのマルテンサイトが鋼の場合のように硬化しないのは結晶格子に大きな歪を与える侵入型原子が考えられず、硬化は主として置換型の金属原子に依るためである。

オメガ相: 残留 β が安定組織となるとき遷移相として ω 相を生じる場合がある。この生成過程と形状は多彩で、 ω 相を生じるとTi合金は硬く、脆くなつて靱性が損われるので“ ω 脆性”と呼ばれる。

針状 α : 高温における結晶粒の成長速度は α 相よりも β 相の方がはるかに大きく、粗大な β 粒より得られる α 相は針状に発達してWidmanstätten α またはacicular α とも呼ばれるが、引張り特性においては靱性に劣る。この場合を“ β 脆性”と呼ぶことがある。Ti合金の溶体化処理を β トランザス直下で行うのは金属組織の粗大化を防ぐことに主眼がある。なお針状 α 組織はクリープ特性を向上する。

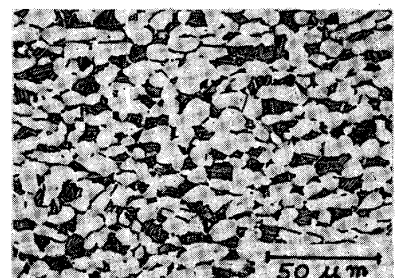
集合組織: 六方晶の α Tiは塑性変形に参与するすべり系や双晶が限定されているのでTi展伸材では集合組織を示す傾向が強くなり、通常板材には異方性がある。一般に横材は縦材よりも1~2%程度高い耐力、引張り強さを示す。

2 チタン合金の課題

構造用Ti合金に関し現在課題とされている主な項目は次のようである。

- ① 部品の生産性やコスト低下に寄与する加工性の向上,
- ② エンジンやタービン等機器の信頼性と効率を高めるクリープ特性
- ③ 使用可能温度上限を高める耐熱性の向上,
- ④ 安全性と信頼性を高める破壊靱性や疲労特性の向上,
- ⑤ 表面処理などの他
- ⑥ 常に要求されている高い強度、耐食性などとこれらの特性との両立がある。

Photo.は高い靱性を保障する等軸 α 粒と優れたクリープ特性を示す針状晶を組み合わせることにより、総合的な材料特性を高めた6Al-4V-Ti合金の例である。



Microstructure of 6Al-4V-Ti

文献

- 1) 草道ほか: 金属チタンとその応用, (1983), 日刊工業新聞社
- 2) H. Kimura & O. Izumi 編: Titanium '80 (1981) [第4回チタン国際会議プロシーディングス],
- 3) MCIC-HB-02, Titanium Alloys Hand Book (1972), Battelle C.L.
- 4) U. Zwicker ほか: (1985) 第5回チタン国際会議プロシーディングス