

## 学位論文題名

航空機用チタン合金鋳鍛材の機械的性質の  
早期評価法に関する研究

## 学位論文内容の要旨

チタン合金は軽量・高比強度であることから、軍用・民生用を問わず各種飛翔体の最も重要な構造材料となっている。近年、航空機の安全性の向上がますます重要な課題となるに伴い、チタン材料には高い信頼性が要求されている。従来、チタン合金鋳鍛材に発生する偏析、粗大結晶粒、パイプ等の欠陥は製品の最終段階においてエッチング検査や超音波探傷等により検査されてきたが、これら最終段階における検査方法では経済的・時間的損失が大きく、製造工程においてより早期の段階での欠陥検出が望まれている。

本研究は超音波の減衰を指標として、航空機用チタン合金の鋳鍛材に見られる欠陥を製造工程の早期の段階で識別する方法を提案するとともに新しい熱処理法を考案することによって機械的性質の向上、さらには製造コストダウンを計ることに成功したもので、全8章より構成されている。

第1章は緒論であり、チタン合金の工学的背景と研究の目的について述べている。

第2章では航空機に多用されている Ti-6Al-4V合金の組織に含まれる $\alpha$ 相の含有量と機械的特性および超音波減衰値の関係を明らかにした。これらの結果から、超音波の減衰値とマイクロ組織および引張強さには良い相関が認められ、鍛造時に温度のビルトアップによって発生する組織変化を識別できることを示した。この超音波探傷検査法は製造中間工程において迅速に欠陥を検査するための手段として有効であることを提案した。

第3章は Ti-6Al-4V合金の機械的性質と組織的特徴、特に $\alpha$ 相のアスペクト比の関係を実験的に検討し、引張強さはアスペクト比に依存しない、破壊靱性値はアスペクト比が大きくなるほど増大する、疲労限界比は微細 $\alpha$ 相を有する合金がやや高い値を示す、さらに、亀裂伝播特性に関しては、亀裂進展域では結晶粒の大きさの影響は認められないものの亀裂進展速度の遅い領域と早い領域ではアスペクト比の小さい方が使用上有利である、ことなどを明らかにした。これら機械的性質と超音波減衰値は良い相関性を示すことから、超音波減衰値から $\alpha$ 相のアスペクト比を介して機械的特性を推定できることを提案している。

第4章では $\beta$ 相の温度領域で溶体化・過時効処理したTi-6Al-4Vの機械的性質は溶体化処理温度と処理時間及び焼き入れ遅延時間によって $\beta$ 相の結晶粒径は著しく変化することに着目して、 $\beta$ 相の結晶粒径と機械的性質の関係について検討した。その結果、結晶粒は $\beta$ 域での溶体化処理の初期において速やかに成長し、約0.8 $\mu\text{m}$ 付近よりその成長速度は緩慢になる。焼き入れ遅延時間の影響のない場合、引張強さと耐力は $\beta$ 相の結晶粒径にはほとんど依存しないが、伸びと絞りも結晶粒径が0.8 $\mu\text{m}$ 付近まで低下の傾向を示す。さらに粗大化すると、ほぼ一定の値を取る。焼き入れ遅延時間が20s以上の場合、 $\beta$ 結晶粒径が0.8 $\mu\text{m}$ 付近で引張強さと耐力は低下の傾向を、また、伸びと絞りは増加の傾向を示し、ミクロ組織の変化と良く対応することを明らかにした。一方、焼き入れ遅延時間が長くなると $\alpha$ 相は粗大化し、引張強さと耐力は低下し、伸び・絞りは向上する。この傾向は、鍛錬比の異なる供試材においても同じ傾向を示した。

第5章では $\beta$ 相域で溶体化後に過時効処理したTi-6Al-4V合金の動的機械的性質に及ぼす溶体化処理温度と時間、焼き入れ遅延時間、ミクロ組織と動的機械的性質との関係について検討した。本論文で提案した熱処理法においては、合金の引張強さと耐力は処理時間に依存せずほぼ一定の値を示したが、伸び・絞りは時間とともに低下する傾向を示した。また、焼き入れ遅延時間が20sまでは一定の引張強さを有するが、20s以上になると引張強さと耐力は低下し、伸び・絞りは逆に上昇する傾向を示した。焼き入れ遅延時間がない場合の破壊靱性値、疲労強度および亀裂伝播特性は通常の熱処理材（焼鈍、溶体化時効処理等）の値と比較すると、いずれも優れた特性を示すことを明らかにしている。

第6章ではTi-5Al-2.5SnELI casting材の機械的性質とミクロ組織（結晶粒径と $\alpha$ 相の幅）の関係を常温から20Kまでの温度範囲で検討するとともに、常温での疲労特性を明らかにした。その結果、結晶粒径の増大とともに引張強さと耐力は低下し、同時に伸び・絞りも低下する傾向を示すことが明らかになった。

第7章では本論文で提案した超音波による早期評価法を航空機をはじめ各種飛行体で使用されているチタン合金に応用した例を示している。本研究で提案した評価方法は $\beta$ 相域で行う特殊な熱処理や casting材の製造工程において、超音波減衰特性、マクロ・ミクロ組織と機械的性質の関係をあらかじめ把握しておけば、以後の製造過程での中間検査あるいは受け入れ検査において迅速、かつ低コストで材料の使用可否の判断ができる事を実証した。この方法は、材料製造者はもちろん使用者側でも、航空機の製造工程管理において十分に活用できることを明らかにした。

第8章は総括であり、本論文で得られた知見についてまとめたものである。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 成 田 敏 夫  
副 査 教 授 鈴 木 朝 夫  
副 査 教 授 工 藤 昌 行  
副 査 教 授 高 橋 平七郎

学 位 論 文 題 名

## 航空機用チタン合金鋳鍛材の機械的性質の 早期評価法に関する研究

チタン合金鋳鍛材は、ジェット機、ヘリコプターなどの各種飛行体における重要な構造材料であり、航空機の運行・安全性を確保するために、材料には近年ますます高い信頼性が要求されている。そのためには、これらチタン合金に発生する偏析、粗大結晶粒、パイプ等の欠陥を、製造工程の早期の段階で非破壊で検出し、材料特性を推定するための方策を確立することが望まれていた。

本論文は、超音波の減衰を指標として、航空機用チタン合金の鋳鍛材に見られる欠陥を製造工程の早期の段階で識別できる方法を提案するとともに新しい熱処理法を考案することによって機械的性質の向上、さらには製造のコストダウンを計ることに成功したものであり、高い評価が与えられた主な成果は次の点に要約される。

航空機に多用されている Ti-6Al-4V合金の組織に含まれる $\alpha$ 相の含有量と機械的特性および超音波減衰値の関係を明らかにした。これらの結果から、超音波の減衰値とマイクロ組織および引張強さには良い相関が認められ、鍛造時に温度のビルトアップによって発生する組織変化を識別できることを示した。さらに、Ti-6Al-4V合金の機械的性質と組織的特徴、特に $\alpha$ 相のアスペクト比の関係を実験的に検討し、引張強さはアスペクト比に依存せず、破壊靱性値はアスペクト比が大きくなるほど増大し、疲労限界比は微細 $\alpha$ 相を有する合金がやや高い値を示し、さらに、亀裂伝播特性に関しては、亀裂進展域では結晶粒の大きさの影響は認められないものの亀裂進展速度の遅い領域と早い領域ではアスペクト比の小さい方が使用上有利である、ことなどを明らかにした。これら機械的性質と超音波減衰値は良い相関性を示すことから、超音波減衰値から $\alpha$ 相のアスペクト比を介して機械的特性を推定できることを提案している。この超音波探傷検査法は製造中間工程において迅速に欠陥を検査するための手段として有効であり、本論文で最も高く評価される。

$\beta$ 相の温度領域で溶体化・過時効処理したTi-6Al-4Vの機械的性質は溶体化処理温度と処理時間及び焼き入れ遅延時間によって $\beta$ 相の結晶粒径は著しく変化するこ

とに着目して、 $\beta$ 相の結晶粒径と機械的性質の関係について検討した。その結果、結晶粒は $\beta$ 域での溶体化処理の初期において速やかに成長し、約0.8mm付近よりその成長速度は緩慢になる。焼き入れ遅延時間の影響のない場合、引張強さと耐力は $\beta$ 相の結晶粒径にはほとんど依存しないが、伸びと絞りは結晶粒径が0.8mm付近まで低下の傾向を示す。さらに粗大化すると、ほぼ一定の値を取る。焼き入れ遅延時間が20s以上の場合、 $\beta$ 結晶粒径が0.8mm付近で引張強さと耐力は低下の傾向を、また、伸びと絞りは増加の傾向を示し、マイクロ組織の変化と良く対応することを明らかにした。一方、焼き入れ遅延時間が長くなると $\alpha$ 相は粗大化し、引張強さと耐力は低下し、伸び・絞りは向上する。この傾向は、鍛錬比の異なる供試材においても同じ傾向を示した。さらに、 $\beta$ 相域で溶体化後に過時効処理したTi-6Al-4V合金の動的機械的性質に及ぼす溶体化処理温度と時間、焼き入れ遅延時間、マイクロ組織と動的機械的性質との関係について検討した。本論文で提案した熱処理法においては、合金の引張強さと耐力は処理時間に依存せずほぼ一定の値を示したが、伸び・絞りは時間とともに低下する傾向を示した。また、焼き入れ遅延時間が20sまでは一定の引張強さを有するが、20s以上になると引張強さと耐力は低下し、伸び・絞りは逆に上昇する傾向を示した。焼き入れ遅延時間がない場合の破壊靱性値、疲労強度および亀裂伝播特性は通常の熱処理材（焼鈍、溶体化時効処理等）の値と比較すると、いずれも優れた特性を示すことを明らかにしている。これらの成果は工学的寄与のみならず材料組織制御の観点からも高く評価される。

チタン casting 材 (Ti-5Al-2.5SnELI合金) の機械的性質とマイクロ組織 (結晶粒径と $\alpha$ 相の幅) の関係を常温から20Kまでの温度範囲で検討するとともに、常温での疲労特性を明らかにした。その結果、結晶粒径の増大とともに引張強さと耐力は低下し、同時に伸び・絞りは低下する傾向を示すことを明らかにしている。

本論文で提案した超音波による早期評価法を、航空機をはじめ各種飛行体に使用されているチタン合金の製造に実際に応用した例を示し、 $\beta$ 相域で行う特殊な熱処理や casting 材の製造工程において、超音波減衰特性、マクロ・マイクロ組織と機械的性質の関係をあらかじめ把握しておけば、以後の製造過程での中間検査あるいは受け入れ検査において迅速、かつ低コストで材料の使用可否の判断ができる事を実証した点は高く評価される。この方法は、材料製造者はもちろん使用者側でも、航空機の製造工程管理に十分に活用できるものである。

これを要するに、著者は、航空機用チタン合金 casting 材に見られる各種欠陥を非破壊で早期に評価するための検査法を確立するとともに新しい熱処理法を開発したもので、材料工学に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。