

氏名	田中 幸美		
学位の種類	博士 (工学)		
学位記番号	博 甲 第 10575 号		
学位授与年月日	令和 4 年 9 月 22 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査学術院	理工情報生命学術院		
学位論文題目	微小力学試験を用いたチタン合金の変形機構解明に関する研究		
主査	筑波大学 教授 (連携大学院) (産業技術総合研究所)	博士 (工学)	原田祥久
副査	筑波大学 准教授	博士 (工学)	松田昭博
副査	筑波大学 准教授	博士 (工学)	松田哲也
副査	産業技術総合研究所 副研究部 門長	博士 (工学)	服部浩一郎
副査			

## 論文の要旨

審査対象論文は、航空機エンジン材料として用いられるチタン合金の疲労等のき裂生成・進展による破壊の抑制に向けた微細構造の制御に関する問題に対して、様々な微小力学試験から得られた微細構造の変化や変形機構を解明することを目的としたものである。これらの目的を達成するために、1) Ti-6Al-4V 合金の塑性変形挙動に対する微細構造の影響、2) 耐熱チタン合金における高温環境下での変形機構、3) 耐熱チタン合金における室温下での Dwell 疲労について明らかにすることを課題としている。

Ti-6Al-4V 合金の  $\alpha$  相と  $\beta$  相の結晶粒の強度や各結晶粒間の粒界が塑性変形に与える影響を明らかにするため、微小力学試験を行った結果、 $\beta$  相は結晶方位の異なる  $\alpha$  結晶粒に挟まれた場所で変形しやすく、 $\alpha$  結晶粒内のすべりも粒界による変形拘束によって生じる不均一な応力分布の影響を受けることが述べられている。耐熱チタン合金の高温下での微細組織と変形挙動の関係について、25°C と 350°C での微小力学試験を行った結果、高温強度は各結晶粒内で固溶元素による強度上昇が影響し、一方、き裂の生成への結晶粒界の影響は少ないことが述べられている。耐熱チタン合金の Dwell 疲労のメカニズムを解明するため、ナノインデンテーション試験および荷重保持を伴う微小曲げ・引張試験を行った結果、柔らかい結晶粒と硬い結晶粒のひずみ速度感度指数の差や Al 濃度の分布による硬さの変化は各合金によって違いが見られ、柔らかい結晶粒の変形が硬い結晶粒の変形に影響していることが述べられている。さらに、Dwell 疲労による強度低下の要因として考えられる応力の再分布は、結晶方位だけでなく、固溶元素濃度の分布による違いが関係していることを明らかにしている。

## 審査の要旨

### 【批評】

本論文は、航空機エンジン材料として用いられるチタン合金の疲労等なき裂生成・進展による寿命のばらつきに関する問題に対して、ナノインデンテーション、微小曲げ・引張等の様々な微小力学試験から得られた微細構造の変化や変形機構を明らかにし、破壊抑制に向けた微細構造の制御に関する検討を加えたものである。

Ti-6Al-4V 合金の疲労等なき裂生成に重要な $\alpha$ 相と $\beta$ 相の結晶粒の強度や各結晶粒間の粒界が塑性変形に与える影響について、ナノインデンテーション試験および微小曲げ試験を行った結果、 $\beta$ 相は結晶方位の異なる $\alpha$ 結晶粒に挟まれた場所で変形しやすく、 $\alpha$ 結晶粒内のすべりも粒界による変形拘束によって生じる不均一な応力分布の影響を受けることを明らかにしており、結晶粒径を均一にすることや粒径を微細にすることにより応力集中を低減させることで、き裂発生抑制につながるというこれまでに報告されていない新しい知見を得ている。また、耐熱チタン合金 IMI834 および Ti-6242S の高温下での微細組織と変形挙動の関係について、25°C と 350°C でのナノインデンテーション試験および微小曲げ試験を行った結果、高温強度は各結晶粒内での強度上昇が影響し、一方、き裂の生成への結晶粒界の影響は少ないことを明らかにしており、き裂進展を抑制させる合金開発の際には結晶粒の高温強度を向上させる添加元素の選択・配合が重要となる独自の結論を導いている。さらに、近年航空機事故等で問題となっている Dwell 疲労のメカニズムを解明するため、ナノインデンテーション試験および荷重保持を伴う微小曲げ・引張試験を行った結果、柔らかい結晶粒と硬い結晶粒のひずみ速度感度指数の差や Al 濃度の分布による硬さの変化は各合金によって違いが見られ、柔らかい結晶粒の変形が硬い結晶粒の変形に影響していることや、Dwell 疲労による強度低下の要因として考えられる応力の再分布は、結晶方位だけでなく、固溶元素濃度の分布による違いが関係していることを明らかにしており、固溶元素濃度や結晶方位を制御し各結晶粒の強度のばらつきを低減させるなど、これまでに明らかにされていない Dwell 疲労の強度低下を抑制するための新たな指針を提案している。

これらのことから、チタン合金の疲労等なき裂生成・進展による破壊のばらつきを抑制するには、微細組織の変化や各結晶粒の変形機構に着目する必要性があり、微小力学試験法が有効に機能することが示唆された。また、これらの成果は学術論文に 4 報掲載されるなど注目されており、学術上、実用上とともにチタン合金の開発や微小試験の分野の発展に寄与するところが大きい。

### 【最終試験の結果】

令和 4 年 8 月 5 日、理工情報生命学術院において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。この結果とシステム情報工学研究群構造エネルギー工学学位プログラムにおける達成度評価による結果に基づき、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。