



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Initiation and propagation processes of internal fatigue cracks in beta titanium alloys [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	XUE, Gaoge
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15619号
Issue Date	2023-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90892
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	XUE_Gaoge_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 XUE Gaoge

審査担当者 主査 特任教授 中村 孝
副査 教授 佐々木 克彦
副査 教授 佐藤 太裕
副査 准教授 高橋 航圭

学位論文題名

Initiation and propagation processes of internal fatigue cracks in beta titanium alloys

(ベータチタン合金における内部疲労き裂の発生・進展過程)

β チタン合金はチタン合金の中で最も広範に用いられる $\alpha + \beta$ 型 Ti-6Al-4V と比べて、さらに高い強度と優れた加工性を備えた材料であり、極めて高い比強度を有することから、航空宇宙分野への用途拡大が期待されている。一方、この材料は他の高強度金属と同様に、材料内部を起点として疲労破壊を生じる。一般に内部疲労破壊は、繰返し数が 10^7 回を超える長寿命域で生じるが、 β チタン合金のそれは 10^5 回程度の短寿命域でも発生するという特異性を有する。 β チタン合金のこのような特殊な内部疲労破壊の理由を明らかにするには、内部き裂の発生・進展挙動を解明する必要がある。しかし、X線や超音波などを用いた一般的な非破壊検出技術では、 β チタン合金の破壊起点に対応する数~数十 μm の初期き裂の観察は不可能である。そこで本研究では、 β チタン合金:Ti-22V-4Al を対象として、大型放射光施設 SPring-8 におけるマルチスケール CT(micro-CT および nano-CT のコンビネーション技術)を活用することにより、内部き裂発生・進展過程の非破壊観察を試みた。得られた結果と破面解析を組み合わせることで、これまで明らかにされていなかった内部破壊のプロセスを定量的に評価した。さらに、内部き裂が大気に曝されない一種の真空中を進展するという考えに基づき、高真空中における表面き裂進展試験を行い、その進展速度を放射光マルチスケール CT で計測した内部き裂のそれと比較した。

本論文は7章からなり、各章の内容は以下のように要約される。

第1章では、材料内部を起点とする疲労現象の研究状況を整理し、 β チタン合金における内部疲労破壊の特徴や特異性を示した。さらに、本材料における内部破壊機構を解明するために必要な研究方法を提案し、本研究の目的を説明した。

第2章では、異なる熱処理により β 相中における α 相の析出状態を変えた2種類の β チタン合金(Coarse Precipitation: CP材および Fine precipitation: FP材)を用いて疲労試験を行い、内部破壊に与える組織の影響を明らかにした。走査型電子顕微鏡 SEM を用いた破面観察により、CP材およびFP材ともに複数の隣接する結晶粒に生じるせん断型き裂(マルチファセット)の発生が内部破壊の起点となることを明らかにするとともに、マルチファセットが瞬間的にではなく、き裂の進展により徐々に形成される可能性を指摘した。

第3章では、SPring-8 のビームライン BL20XU を用いた撮像実験を行ない、放射光マルチスケール CT による観察条件を検討した。2章で製造した材料のうち組織の特徴がより明瞭な CP 材を用い

て、X線エネルギー、X線透過率、露光時間とCT像の関係を調べ、材料内部を観察するために最適な撮像条件を決定した。

第4章では、ビームライン上での疲労負荷を可能とする in-situ 疲労試験システムを開発し、CP材の表面に発生するき裂を対象として、その非破壊観察を行った。き裂発生と組織の3次元的対応関係を明らかにし、その後のき裂進展挙動や進展速度の計測を行い、放射光マルチスケールCTによる微小き裂の非破壊観察手法を確立した。

第5章では、4章で開発した観察システムを用いて、FP材の内部に発生する微小疲労き裂の可視化を行った。マルチスケールCTで得たき裂の進展過程をSEM破面観察結果と比較することにより、内部き裂の進展挙動を定量化した。その結果、内部き裂は疲労寿命の約60%で生じること、破壊起点におけるマルチファセットは瞬間的ではなく、繰返し数の増加とともにせん断型き裂が徐々に進展することで形成されることが明らかとなり、2章で提案したファセット形成モデルの妥当性が確認された。さらに内部き裂進展挙動における全ての過程に関する進展速度の同定に成功し、内部き裂が表面き裂よりやや遅い速度で進展することを明らかにした。

第6章では、高真空環境における疲労試験を行ない、試験片表面に発生するき裂の進展挙動を調べた。その結果、高真空中のき裂進展速度は大気中のそれと比較してやや低下し、内部き裂の進展速度と一致することが明らかとなった。すなわち内部疲労破壊の特殊性は内部き裂周囲の真空に類似した環境により生じることが示した。さらに内部き裂進展挙動の真空に対する感受性が材料により異なると考えれば、 β チタン合金の内部疲労破壊が他の高強度金属より短寿命域で現れることが説明できると述べた。

第7章は結論であり、本研究で得られた主な知見をまとめた。

以上のように本論文は、 β チタン合金を対象として、放射光マルチスケールCTと in-situ 疲労試験技術を組合わせた手法により、内部微小き裂の発生・進展過程およびその支配因子を明らかにしたものであり、材料強度学分野の発展に貢献するところ大である。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。