



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	放射光CTを用いたチタン合金の超高サイクル疲労に関する実験的研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	吉中, 奎貴
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13204号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/69936
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Fumiyoshi_Yoshinaka_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 吉中 奎貴

学 位 論 文 題 名

放射光 CT を用いたチタン合金の超高サイクル疲労に関する実験的研究

(Experimental study of very high cycle fatigue in titanium alloy using synchrotron radiation CT)

機械構造物の破損原因の大半は疲労であり、機械技術者にとって疲労破壊への対策は安全性確保の根幹をなす課題である。一方、近年では機器の高速化や使用期間の長期化に伴い、負荷繰返し数が 10^7 回を超える超高サイクル域における疲労特性（超高サイクル疲労）の重要性が認識されるようになった。これまでに、超高サイクル疲労では材料内部を起点として疲労き裂が発生・進展する内部破壊を生じることが報告されている。そのため、機械構造物の長期信頼性を確保するためには、この内部破壊のメカニズムを解明することが求められる。

現在までに内部破壊過程の詳細は明らかにされていない。これは主に X 線 CT のような一般の非破壊観察手法の分解能では内部き裂の観察に不十分であり、破壊過程の観察が極めて困難であることによる。一方、近年では大型放射光施設 SPring-8 に代表される第三世代の放射光施設の登場に伴い、極めて高輝度の放射光が得られるようになった。このような高輝度放射光により、放射光 CT と呼ばれる高分解能非破壊観察法が金属材料に対し適用可能となりつつある。

本研究の目的は、放射光 CT をチタン合金 Ti-6Al-4Al の超高サイクル疲労に適用し、内部破壊過程を直接観察により明らかにすることである。そのために、SPring-8 において疲労試験と CT を繰返し行うことにより内部き裂の発生・進展過程を観察した。また、試料内部の微小な結晶粒の可視化を試みた。

本論文は 6 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、現在までの超高サイクル疲労に関する研究状況を整理するとともに、その発生機構の詳細を明らかにする上での課題として内部破壊過程の直接観察が不可欠であることを指摘し、本研究の目的を示した。

第 2 章では、実験条件を示すとともに、本研究で用いた観察系に関する説明を記した。

第 3 章では、内部疲労き裂の発生・進展観察結果として、観察像および内部き裂の発生寿命・進展速度の計測結果を示した。具体的な実験結果は以下のとおりである：放射光 CT を用いることにより発生直後の結晶粒径程度の寸法の内部き裂の検出に成功した。内部き裂は観察視野内において多数発生し、これらの発生寿命には大きなばらつきが見られた。発生が確認されたき裂について、その進展挙動を調べるためにき裂進展速度を計測したところ、き裂ごとにばらつきが認められたものの、内部き裂の進展速度は 10^{-10} m/cycle 以下であり、極めて低速で進展した。なお、き裂発生寿命は小さいが、発生後ほぼ進展しなかったき裂がある一方、き裂発生寿命は大きいものの、発生後急速に進展したき裂があるなど、き裂発生寿命とその後の進展挙動に直接的な関係は見出されなかった。

第 4 章では、第 3 章において取得した内部き裂の発生寿命及び進展速度に対し考察を加えた。初めに、本供試材では α 相におけるファセットと呼ばれる平坦面の形成を契機として疲労き裂が発生・進展することに着目し、発生が確認されたすべての内部き裂について起点ファセット寸法を計測し、これと発生寿命・進展速度の間の関係を調べた。その結果、起点ファセット寸法と発生寿命・

進展速度の間に有意な関係は認められなかった。この結果と、他の研究者らによる報告に基づき、発生寿命・進展速度のばらつきは起点ファセットとその周囲の結晶粒の結晶方位の違いを主要因として生じると考察した。次に、内部き裂が低速で進展した理由についてき裂周囲環境に着目して検討を行った。ここで、内部き裂は大気から遮断された一種の真空環境を進展すると指摘されている。そこで、真空中における表面き裂進展試験を実施し、その結果を内部き裂と比較した。一方、内部き裂周囲の圧力（真空圧力）の実測は不可能であるから、内部き裂周囲環境がどのような真空であるのかを直接知ることはいできない。そこで本研究では $10^0 \sim 10^{-6}$ Pa の範囲の種々の真空圧力において表面き裂進展試験を実施した。その結果、内部き裂の進展速度は 10^{-6} Pa の超高真空における表面き裂のものとよく一致した。このことから、内部き裂は超高真空に近い極めて低圧の環境の影響により低速で進展すると考えられる。

第 5 章では、内部破壊過程と材料組織の同時・非破壊観察の実現に向けた Ti-6Al-4V 内部の結晶粒の可視化に取り組んだ。4 章までの実験では、放射光 CT により内部き裂を可視化することにより、その発生・進展特性を調べた。一方、金属材料の疲労破壊過程は結晶粒界のような局所的な材料組織的特徴に著しく影響を受ける。そこで本章では、微視組織の可視化のために観察系や試験片寸法の再検討を行った。さらに、一般の X 線吸収を利用したイメージング手法に対し、位相シフトを利用した高感度撮像法である位相コントラスト法の適用を試みた。実験の結果、観察部寸法を 0.5 mm 程度以下まで小型化した試験片に対し位相コントラスト法を用いることで、試験片内部の平均粒径 $10 \mu\text{m}$ の結晶粒を明瞭に観察することに成功した。また、あらかじめ内部き裂を発生させた砂時計型疲労試験片に対し観察を実施することにより、内部き裂と結晶粒を同時に観察した。

第 6 章では、今後の展望として放射光 CT による超高サイクル疲労研究を鉄鋼材料にも適用可能とするために、予備実験として高強度鋼 SNCM439 内部の非金属介在物の非破壊観察を実施した結果を示した。さらに、本研究の総括として、得られた成果とその意義を記した。