

## Very High Cycle Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Alloy

(Ti-6Al-4V 合金の超高サイクル疲労特性)

## 学位論文内容の要旨

超高サイクル疲労とは  $10^7$  回以上の超長寿命域でも疲労強度が低下し続け、疲労限度が認められない現象である。この現象は高強度鋼を始めとする高強度金属材料において報告されている。超高サイクル疲労における疲労限度の消失は、材料内部を起点とした疲労破壊（内部破壊）に起因する。すなわち、内部破壊は材料表面を起点とした疲労破壊（表面破壊）に比べ、低応力・長寿命域でも生じる特異性を持つ。近年、機械構造物の小型化・軽量化が進み高強度金属材料の使用が増加している。また、機器の高速化に伴い、これらの材料が  $10^7$  回を超える繰返し負荷を受けることは珍しくなくなってきた。このため、高強度金属材料の超高サイクル域での疲労特性を明らかにすることは機械構造物の長期信頼性を保証する上で重要な課題である。

チタン合金は比強度・耐熱性・耐食性に優れ、航空宇宙分野や医療分野をはじめ数多くの分野で使用されている。そして、前述の超高サイクル疲労はチタン合金においても確認されている。この材料のうちで代表的な Ti-6Al-4V 合金については通常の高サイクル疲労特性や疲労き裂進展特性に関する報告は多数ある。しかし、超高サイクル域に注目すれば、内部破壊が生じることは報告されているけれども、データは十分ではなくその疲労特性および破壊機構に関する統一的な見解は得られていない。従来の疲労限度設計 ( $10^7$  回時間強度設計) が危険側になる恐れがあるため、内部破壊による疲労強度の低下は Ti-6Al-4V 合金が一般の構造部材として使用されるようになってきた昨今において大きな問題となりつつある。

本論文の目的は Ti-6Al-4V 合金における内部破壊の発生過程ならびに疲労強度の低下の要因を明らかにすることにある。まず、本研究室で独自に開発した疲労試験機を用いて超高サイクル域までの疲労試験データを系統的に取得した。詳細な破面観察を行い内部破壊における破面様相の特徴を示した。そして、フラクトグラフィおよび破壊力学に基づく検討を行い、内部破壊特性および内部き裂の進展過程に及ぼす影響因子を明らかにした。さらに、材料内部を進展する疲労き裂が曝される環境に着目し、高真空環境中で疲労き裂進展試験 (CT 試験) を行い、疲労き裂進展特性を定量的に評価することを試みた。これらの結果を基に、内部破壊が表面破壊よりも低応力・長寿命域で生じる理由を示した。さらに内部破壊におけるき裂の進展機構を提案した。

本論文は全 7 章からなり、内容ならびに得られた結果は以下のように要約される。

第 1 章では、これまでに報告されている超高サイクル疲労および内部破壊の特徴について述べた。そして、チタン合金の超高サイクル疲労に関する研究を概観し、本研究の位置づけと目的を示した。

第 2 章では、 $(\alpha+\beta)$ Ti-6Al-4V 合金 (以下、STOA 材) を用いて  $10^8$  回までの軸荷重疲労試験を応力比 ( $R \equiv \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ ) 0.1 のもとで行い基礎データを取得した。その結果、疲労強度

は  $10^7$  回付近から急激に低下することが明らかになった。この疲労強度の低下は内部破壊の発生に対応した。続いて、フラクトグラフィを基に疲労き裂の発生と進展の特徴について明らかにした。破壊形態に関わらず疲労き裂は  $\alpha$  粒を起点として進展していた。さらに内部破壊の破面上に多数の破壊起点が観察された場合があった。このことは低応力域で、主き裂が複数のき裂の合体により形成される可能性があることを示す。一方、内部破壊の起点周囲に数  $\mu\text{m}$  の大きさで延性的な様相を呈する微細な凹凸領域（以下、粒状領域）が形成されていた。この粒状領域は表面破壊の破面上には観察されなかったことから、粒状領域の形成機構に関する検討が内部破壊の発生過程の解明につながることを示唆された。

第3章では、STOA 材を用いて種々の応力比のもとで軸荷重疲労試験を行い、応力比の違いが S-N 特性に与える影響を検討した。その結果、応力比の正負の違いにより S-N 曲線の傾向は変化することが明らかになった。また、応力比の効果を予測するために用いる修正 Goodman 線図による評価を、内部破壊が生じる長寿命域に適用することの危険性を示した。一方、複数のき裂による主き裂の形成は、正の応力比によって助長されることがフラクトグラフィより明らかになった。さらに、このことが S-N 曲線で見られた傾向の違いと対応していることを示した。また、粒状領域の形成は圧縮負荷によって促進されることが確認された。

第4章では、STOA 材よりも組織が細かい  $(\alpha+\beta)\text{Ti-6Al-4V}$  合金（以下、MA 材）を用いて種々の応力比のもとで  $10^9$  回までの疲労試験を行った。破壊形態は短寿命域と長寿命域とで異なった。短寿命域では応力比の違いにより、通常の高サイクル疲労き裂進展過程とは異なる現象も確認された。長寿命域では内部破壊の疲労限度が確認され、それは疲労き裂の停留に起因することを示した。一方、表面・内部という 2 つの破壊モードを考慮した競合リスクモデルを用いて 3 母数 Weibull 分布による疲労寿命分布特性の解析を行った。その結果、本供試材の特殊な疲労特性を合理的に説明することができた。さらに、内部破壊の寿命分布に破壊確率の飽和が生じること、この現象は疲労限度がき裂の停留によって生じたことを示した。続いて STOA 材と MA 材の結果を比較し、組織の違いが疲労特性に与える影響を検討した。組織の微細化は内部破壊の疲労強度の上昇に大きく寄与することが明らかになった。また、内部破壊における粒状領域の形成ならびに  $R > 0$  での内部破壊起点の増加は組織に依存しない現象であることを示した。

第5章では、高真空環境において MA 材の疲労試験を行い、大気中での結果との比較を行った。その結果、内部破壊と高真空中表面破壊は大気中表面破壊に比べ、疲労寿命の増加という点で同様の傾向を示した。また、内部破壊の破面様相は高真空中表面破壊のものと類似していた。以上から、疲労特性に与える影響は内部き裂が曝される環境（以下、内部環境）と高真空環境で類似していることが示唆された。内部環境の影響を定量的に評価するために STOA 材を用いて大気中と高真空中で CT 試験を行った。同じ応力拡大係数範囲 ( $\Delta K$ ) において高真空中の方が大気中よりもき裂進展速度 ( $da/dN$ ) が低いことを示した。また、破面観察から粒状領域の形成はき裂開口の強い領域で生じ、 $\Delta K$  や  $da/dN$  に依存しないことが明らかになった。このことから粒状領域は真空中で破面の繰り返し接触によって生じることが示された。

第6章では、これまでに得られた結果をもとに、内部破壊が表面破壊よりも低応力、長寿命域で生じる原因について検討した。その結果、高真空環境に類似した内部環境がき裂進展に与える影響によって、超高サイクル域における疲労特性を説明できることを示した。また、ここまでで明らかになったことに、Cold-welding の考えを組み合わせることにより新しい疲労き裂進展機構を提案した。そして、粒状領域の形成と内部破壊の疲労特性との相関を示した。

第7章では、本研究で得られた結果を総括した。

# 学位論文審査の要旨

主査	助教授	中村	孝
副査	教授	佐々木	一彰
副査	教授	但野	茂
副査	教授	野口	徹

学位論文題名

## Very High Cycle Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Alloy

(Ti-6Al-4V合金の超高サイクル疲労特性)

超高サイクル疲労は、 $10^7$ 回以上の長寿命域で材料内部を起点とする破壊（内部破壊）が発生し、明瞭な疲労限度を示さない現象である。内部疲労破壊は、材料表面を起点とする疲労破壊（表面破壊）に比べ低応力・長寿命域で生じるため、 $10^7$ 回を基準とする従来の疲労限度設計法では適切に評価できない。また、き裂発生・進展のその場観察が困難なことから、破壊機構に関する統一的な見解も得られていない。これまで超高サイクル疲労の問題は、高強度鋼を中心として検討されてきたが、近年、チタン合金でもその存在が知られるようになってきた。チタン合金は航空宇宙分野や医療分野をはじめ各種先端的分野で使用されているけれども、 $10^7$ 回を超える疲労特性はほとんど明らかにされていない。特に代表的なTi-6Al-4V合金については、一般の機械構造部材への利用が拡大していることから、超高サイクル疲労特性の解明が強く望まれている。以上を背景として、本論文はTi-6Al-4V合金の長寿命疲労特性とその影響因子を明らかにするとともに、材料内部のき裂が曝される環境に着目することによって内部き裂進展機構の解明を試みたものである。

第1章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成を述べている。

第2章では、平均 $\alpha$ 粒径 $10\mu\text{m}$ の $(\alpha+\beta)$ 型Ti-6Al-4V合金（STOA材）を用いて、応力比 $(\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$  0.1の条件で $10^8$ 回までの軸荷重疲労試験を行っている。その結果、疲労強度は $10^7$ 回付近から急激に低下すること、これが内部破壊の発生に起因することが明らかとなった。破面観察の結果、疲労き裂は表面破壊・内部破壊ともに $\alpha$ 粒を起点として進展していたが、き裂の進展過程は起点位置によって異なることが見出された。すなわち、表面破壊では単一の起点からき裂が発生するのに対し、内部破壊では複数の起点から発生したき裂が合体して主き裂を形成する傾向が確認された。一方、内部破壊の起点周囲に直径数 $\mu\text{m}$ の微細な凹凸に覆われる特殊な粒状の破面（粒状領域）が観察された。この粒状領域は表面破壊の破面上には見られなかったことから、内部破壊に特有のき裂進展過程であると推測している。

第3章では、STOA材を用いて種々の応力比のもとで軸荷重疲労試験を行っている。その結果、長寿命域での内部破壊に起因する疲労強度の低下は、正の応力比で顕著になることが明らかとなった。また、応力比の効果を予測するために従来から用いられている修正

Goodman 線図では、内部破壊の疲労強度が危険側に評価されることを指摘している。破面観察の結果、複数のき裂が合体して内部破壊が生じる傾向は、正の応力比によって助長されることを示し、これが疲労強度低下の理由であると推察している。さらに、内部の起点周囲における粒状領域の形成は、負の応力比すなわち圧縮負荷が加わる場合に促進されると述べている。

第4章では、平均 $\alpha$ 粒径 $4\mu\text{m}$ の $(\alpha+\beta)$ 型Ti-6Al-4V合金(MA材)を用いて種々の応力比のもとで $10^9$ 回までの軸荷重疲労試験を行っている。その結果、内部破壊に疲労限度が存在すること、これがき裂の停留によって生じることが明らかとなった。一方、表面・内部という2つの破壊モードを考慮した競合リスクモデルを用いて寿命分布の解析を行った結果、本供試材の特殊な疲労特性を合理的に説明することができた。特に内部疲労き裂の停留に対応して破壊確率の飽和が見られたことから、破壊機構を調べる上で寿命分布解析が有効な手段になることを示した。さらに、本供試材の結果をSTOA材と比較することによって、内部破壊の疲労強度は組織の微細化によって上昇するけれども、粒状の破面形成や、内部き裂の発生が正の応力比で助長される傾向は、組織に関わらずに生じることを示している。

第5章では、内部き裂が曝される環境を模擬する目的で、応力比0.1の条件でMA材の高真空中疲労試験を行っている。その結果、高真空環境は表面破壊の寿命を内部破壊と同程度の領域まで増加させることを明らかにした。また、破面解析によって、高真空中の表面破壊の特徴と内部破壊の特徴がほぼ一致していることを示した。次に、内部き裂周囲の環境がき裂進展機構に与える影響を定量評価するために、高真空中でSTOA材のき裂進展試験を行っている。その結果、高真空中のき裂進展速度は、応力拡大係数範囲の低い領域において大気中の $1/100\sim 1/1000$ に低下することが明らかとなった。さらに、破面観察の結果、内部破壊で観察されたものと同様の粒状領域がき裂閉口の強い箇所で見出された。以上から、粒状領域の形成には、真空環境とき裂進展過程における破面の繰返し接触が必要であると結論づけている。

第6章では、これまでに得られた結果と他の研究者の報告をもとに、内部破壊が表面破壊よりも低応力、長寿命域で生じる理由を考察している。特に、き裂進展速度が真空中で低下する現象と、き裂進展下限界の欠陥寸法依存性が真空中で強くなる現象を組み合わせることで、内部破壊の特異性を説明している。さらに、内部き裂周囲の環境と繰返し圧縮負荷の相乗効果を考えることで、本供試材のほか、高強度鋼や他の材料にも共通する内部き裂進展機構を提案している。

第7章は総括であり、本研究で得られた主な成果をまとめている。

以上のように本論文は、Ti-6Al-4V合金の超高サイクル疲労特性とその影響因子を明らかにし、高強度金属材料一般に適用可能な内部き裂進展機構を提案したものであって、材料強度学ならびに機械材料学の分野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。