

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K14566

研究課題名（和文）微小金属材料の両振応力条件における疲労挙動の評価

研究課題名（英文）Fatigue behavior evaluation by tension-compression fatigue testing of micron sized metals

研究代表者

名越 貴志（Nagoshi, Takashi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：40769668

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：材料の疲労進展について、その素過程を深く理解するため、微小疲労試験片を作成し、異なる内部組織を持つ試験片においてその疲労がどのように進行するか明らかにするため、詳細な組織変化を電子顕微鏡法などによって評価した。チタン材料における微小疲労試験の結果として同一すべり面の繰り返し変形により疲労破壊の起点となりうる表面起伏が成長していく過程や結晶相界面を伝播して滑りが活動してゆく過程を3次元的に明らかにした。これらの変形過程は疲労の素過程を理解する上で非常に重要な知見であると言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料の疲労過程において、実際にすべり面が再利用され、活動することによって表面起伏が生じ、亀裂の起点となりうることを明らかにしており、疲労の深い理解につながるこの知見は時に甚大な被害を起こしうる疲労損傷の予防という意味で非常に重要である。また、3次元的な変形の進行を観察できる微小疲労試験手法は様々な材料においてその疲労過程を理解するうえで非常に重要な実験方法となりうることから、本研究においてこの手法を確立したことは学術的にも非常に有意義なことであると考えられる。

研究成果の概要（英文）：For the deep understanding of the fatigue evolution of materials, micro specimens for fatigue test were prepared and the detailed microstructural evolutions during fatigue were evaluated by electron microscopy to clarify how fatigue progresses in specimens with different internal microstructure.

As a result of micro-fatigue test of Ti materials, the growth process of surface undulations, which could be the initiation point of fatigue failure, and the process of slip activity propagating across the interface of crystalline phases were clarified in three dimensions by repeated deformation of the same slip surface. These deformation processes are very important for understanding the elementary process of fatigue.

研究分野：微小材料試験

キーワード：微小疲労試験 チタン合金 すべり変形

1. 研究開始当初の背景

材料の力学的特性は試験片のサイズに大きく影響を受けることがサイズ効果として知られている。サイズ効果には脆性材料において欠陥存在確率が減少することによるものや、延性材料において転位の枯渇が起こることによるものなど、広範にわたって研究が進められている。近年の研究から、様々な金属単結晶において試験片サイズの減少に対する強度の上昇が一義的に示せることが明らかになっている¹⁾。このサイズ効果は数十ミクロン以下程度から顕著に現れ、強度と密接な関係にある疲労特性もこのサイズ効果の影響を受けることが予測できる。

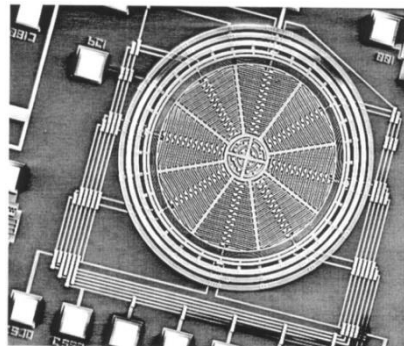


図1. MEMS ジャイロセンサ

MEMS デバイスは幅広い分野での応用が期待され、近年、急速に開発が進められている。これらのデバイスでは半導体の製造技術を応用し、図1のように可動部分を持つ三次元の微小構造体が作製される²⁾。作製プロセスの関係上、その材料にはシリコンを主体とした高強度な脆性材料が使用されてきた。しかしながら、MEMS デバイスのさらなる高性能化、高機能化を達成するために金属材料や高分子材料など幅広い材料の使用が望まれている。そのため、様々な材料における微小試験は MEMS の信頼性を評価するために非常に重要である。また、同時に微小領域での疲労挙動の評価は疲労メカニズムの解明に貢献でき、構造材料など広い分野への応用が期待できる。

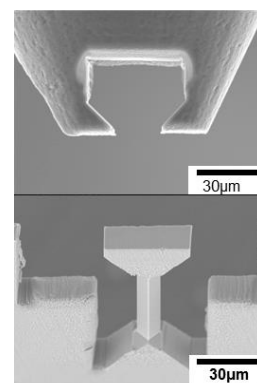


図3. 作製したインデントアークと試験片

2. 研究の目的

本研究では両振応力での微小疲労試験法を確立し、これによってマイクロサイズの金属材料における疲労の進展挙動を明らかにすることを目的とする。試験片サイズによって機械的特性が変化することはサイズ効果として広く知られている。近年小型化が急速に進む Micro-Electro-Mechanical-System(MEMS)に用いられる部材はこのサイズ効果の影響下にあり、マイクロ部材での疲労試験は MEMS デバイスの高信頼性を確保するうえで非常に重要である。また、微小材料において疲労進展の素過程を理解することは疲労メカニズムの解明に大きく貢献できるといえる。

3. 研究の方法

単相である純 Ti に加え、Ti6Al4V 合金に熱処理を施すことで等軸 α 相と $\alpha + \beta$ のラメラ相からなるバイモーダル組織を有する水冷材および α 相の粒界に β 相が存在する炉冷材を作製し、それぞれの材料から図3のような試験片を作製することで微小疲労試験を行う。

4. 研究成果

研究では、航空機用構造材料として用いられるチタンおよびチタン合金 (Ti-6Al-4V) を対象材料とし、微細組織を有する微小試験材料の力学的特性を調べ、その評価技術を確立することを

目的とした。

(1) 集束イオンビーム装置による独自開発した加工手法を用いて、試験片ゲージ部にテーパのないヘッド部付きの微小試験片の作製に成功した。また、マイクログリッパーを作製することにより、微小試験片を適切なアライメントでグリップできた。さらに、引張圧縮をとまなう繰り返し荷重で行う疲労試験にも対応した試験装置を開発し、繰り返し応力下における微小試験評価技術を構築した。

(2) 試験片の最適な形状の検討を有限要素解析を用いて行った。試験片のゲージ長を一定の範囲で変化させてもゲージ部の応力分布が均一になることを確認できた。また、マイクログリッパーを模擬したチャック部により強制変位を与える解析からも、同様にゲージ部で均一な応力分布となることがわかった。これらの結果から、本研究で提案した作製方法によって作製した微小試験片の試験片形状は妥当であることを示せた。

(3) 多結晶純チタンの試料から微小試験片を作製し、EBSD 測定により単結晶であることを確認した。作製した試験片を用いて引張試験を行い、すべり線を観察した。得られた微小試験片の降伏応力とすべり系のシュミット因子から臨界分解せん断応力を求めた結果、バルク材の文献値と近い値を示した。このようにバルク多結晶材料から加工したミクロンサイズの単結晶試験片による微小引張試験がバルクと同等の変形挙動を示すことから、微小試験による単結晶試料の変形挙動の評価が十分可能であることを示した。

(4) Ti-6Al-4V に 3 種類の異なる熱処理を行った。炉冷材は、等軸 α 相の粒界にのみ β 相が存在するニア α 組織を形成した。水冷材は、等軸 α 相と針状組織のラメラ相が半分程度存在するバイモーダル組織を形成した。2 種類的水冷材うち、950°C で溶体化処理を行った水冷材は、等軸 α 組織の結晶粒径が 1050°C で溶体化処理した水冷材に比べて小さくなった。

(5) 3 種類の異なる熱処理を行った Ti-6Al-4V から微小試験片を作製し、圧縮と引張の試験を交互に繰り返すことで両振り応力条件での微小疲労試験を再現した。水冷材では等軸 α 相の平均粒径が小さい水冷材の方が降伏強度が大きく、結晶粒径の大きさと降伏強度の相関が得られた。また、等軸 α 相の結晶粒径の大きさとラメラ相内でのすべり発生が左右されることから、針状組織のラメラ相が強度に対して支配的な影響を及ぼしていると示唆された。

(6) バイモーダル組織かニア α 組織の違いに加え、結晶粒の大きさの異なる水冷材と炉冷材を比較すると降伏強度は炉冷材の方が高くなった。試験片のサイズが小さくなると試験片表面の結晶粒同士の拘束が減ることから、試料表面の接する結晶粒の割合が試験片の力学的特性において支配的な要因であると考えた。

(7) 水冷材、炉冷材の繰り返し負荷を与えた試験において、実際にすべり帯を再利用して変形していることを確認した。炉冷材の繰り返しの試験では単結晶の繰り返し応力の結果として知られている固執すべり帯の発達を確認した。一方、水冷材は粒径が小さいため固執すべり帯はみられなかった。

(8) 微小試験片とバルク試験片の引張試験の結果の比較を行った。炉冷材についてはバルク試験片よりも微小試験片の方が降伏応力は高くなっていることがわかった。水冷材については試験片サイズが小さくなったことにより結晶粒どうしの拘束が少なくなり強度が低くなったと推定した。

(9) 3 種類のチタン合金に対して SEM/EBSD を用いてすべり系の方向を算出した。炉冷材では (0001)<11-20> と (11-20)<11-20> のすべり系が働いていた。結晶粒の小さいバイモーダル組織の水冷材では等軸 α 相にて (0001)<11-20> のすべり系が働いており、hcp 構造の α チタンで多

く報告されている底面すべりははたらいしていることがわかった。結晶粒の大きいバイモーダル組織の水冷材では等軸 α 相で(0001)<11-20>のすべり系が主として働いているが、一部(10-10)<11-20>のすべり系も働いていた。このように、底面すべりが主で、柱面すべりが一部発生したと推定した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 岸本 甫、名越 貴志、原田 祥久、大久保 雅隆
2. 発表標題 Ti-6Al-4V合金の微小疲労試験による力学特性評価
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸本 甫、名越 貴志、原田 祥久
2. 発表標題 Cyclic Deformation Behavior of Titanium Alloy by Using Micro-Testing Method
3. 学会等名 The 4th Symposium on Innovative measurement and analysis for structural materials (SIP-IMASM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸本 甫、名越 貴志、原田 祥久
2. 発表標題 微小試験による金属材料の力学的特性評価
3. 学会等名 日本機械学会2018年茨城講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 名越 貴志
2. 発表標題 微小材料試験による電析金属の力学的特性評価
3. 学会等名 ナノプレーティング研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 名越貴志、岸本 甫、原田 祥久
2. 発表標題 Cyclic deformation behaviour of Ti alloys by using micro sized specimens
3. 学会等名 45th Micro& Nano Engineering, MNE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Takashi Nagoshi, Tso-Fu Mark Chang	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Intech	5. 総ページ数 10
3. 書名 Novel Metal Electrodeposition and the Recent Application	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------