

# チタン製品の疲労強度に関する研究（第2報）

西村通喜・山田博之・長田和真・鈴木大介・高尾清利

## Mechanical and Fatigue Stress Properties on Titanium Alloy (2nd Report)

Michiyoshi NISHIMURA, Hiroyuki YAMADA, Kazuma OSADA, Daisuke SUZUKI, Kiyotoshi TAKAO

### 要 約

チタン製品の疲労特性は製品の安全性や経済性を確保するために非常に重要である。疲労特性について製品評価を行うためには、疲労試験が必要であるが、S-N 曲線の取得には長時間を要する。そこで、本研究では疲労解析の精度を高度化することを目的に、チタン材の加工条件を変え疲労強度試験を行い、そのデータを用いて疲労解析を行った。その結果、切削加工を行った純チタン材は、加工時の切削条件において、疲労強度に差が生じた。同じ切込量においては、1 回転あたりの送り量が増加すると、表面粗さが大きくなり疲労強度は低下した。また、同じ送り量であれば、切込量が大きいほうが疲労強度は低下した。また、実際の試験により取得した疲労データを疲労解析に用いることで、試験結果とほぼ同様の解析結果を得ることができた。

### 1. 緒 言

チタン材料は、軽量かつ高強度、また耐食性、人体への親和性が高いといった材料特性を有することから、航空宇宙、医療といった先端分野の製品などへ使用用途が広がっている。このような先端分野では使用環境が厳しいものが多く、高い水準の機械的特性ならびに製品品質が要求される。その中でも疲労強度は製品の安全性や経済性を確保するために非常に重要である。しかし、疲労特性に関して製品評価を行う場合は、疲労試験機を用いて S-N 曲線の取得が必要であるが、試験荷重について  $10^4 \sim 10^8$  回におよぶ試験を行う必要があるため、疲労特性の取得には比較的長時間を要する。また、製品の開発・試作では形状変更やそれに伴う強度の最適化などが検討されるが、近年開発期間の短縮ならびにコストの低減が重要視されるようになってきている。これを達成するための手段として、構造や流体などのコンピュータシミュレーションが多用されるようになってきたが、解析を行うには材料特性をはじめとした様々なパラメータが必要となる。また、金属材料は切削や放電加工、ブラスト加工や溶接などの加工方法や熱処理によって様々に変化するため、これに伴い疲労特性も変化する。そのため文献や書籍などで公開されているものでは精度の高い解析を行うには十分であるとはいえず、実測を行うことが非常に重要となる。

そこで本研究では、加工により変化する材料特性を明らかにし、解析による疲労特性予測の精度を高度化させることを目的とした。

### 2. 実験方法

#### 2-1 疲労試験

引張試験に供した供試材は  $\phi 10$  mm の純チタン材 (JIS H4600 2 種) であり、この供試材を全長約 100 mm で切出後、標点部直径  $\phi 5$  mm、標点部長さ 10 mm、ショルダー R30 mm の引張試験片を作製した。切削に用いた工具はコーナー R0.2、ノンコーティングの超硬工具で、ヤマザキマザック製 NC 旋盤 (INTEGREX200Y) で水溶性切削液による冷却を行いながら加工を行った。切削条件の一覧を表 1 に示す。以降における試験片名は、切込量 0.1 mm、送り量 0.1 mm/rev 試験片については、ap0.1 / f0.1 と呼称することとした。また、牧野フライス製作所製ワイヤー放電加工機 (UPH-1) で、0.1 mm のワイヤーを用い荒加工 1 回で、4 面を同様の形状で切り落とした標点部断面の 1 辺の長さが約 4.5 mm の正方形の試験片を作製した。

疲労試験は、図 1 のインストロン社製疲労試験機 (E10000LT) を用いた。疲労試験条件は引張側片振り正弦波で、試験速度 40 Hz、応力比 0.1 で行い、最大試験回数を 10,000,000 回とし、途中で破断したものは、試験回数を記録した。試験片の断面積は試験片標点部の直径から算出し、直径はマイクロメーターを用いて直径方向のある方向で測定後、試験片を  $90^\circ$  回転させ再度測定を行い、それらの平均値から算出した。

表 1 切削条件一覧

切込量 $a_p$ (mm)	送り量 $f$ (mm/rev)
0.1	0.1
	0.2
0.5	0.1
	0.2



図 1 疲労試験機

### 2-2 疲労解析シミュレーション

疲労解析シミュレーションには、Solidworks2018 Simulation を用いた。解析モデルには、疲労試験の試験片形状を用いた。引張強度とヤング率は、島津製作所製材料試験機 (AG-IS50kN) を用い、疲労試験と同じ材料で未加工  $\phi 10$  mm、つかみ具間距離 120 mm、引張試験速度は 2 mm/min で試験を行い求めた。ポアソン比は、一般的なデータを用いた。また、疲労解析に用いる S-N 曲線は、疲労試験を行った結果を用いた。

## 3. 実験結果および考察

### 3-1 疲労試験結果

切削加工による疲労試験結果を図 2 に示す。試験結果は、縦軸に最大応力、横軸に試験回数を示し、最大試験回数で破断しなかった試験結果は矢印を付加した。全体としてばらつきが出た結果となった。送り量  $f$  に関連する疲労強度を比較したところ、切込量  $a_p0.1$  では差が顕著に出なかったが、切込量  $a_p0.5$  では送り量  $f0.1$  と比較して送り量  $f0.2$  の方が、疲労強度が低下する傾向となった。一般的に疲労強度は、表面粗さの影響を受ける傾向

があり、各加工条件における標点部の表面粗さ  $R_z$  を測定したところ、送り量  $f0.1$  における  $R_z$  は約 7  $\mu\text{m}$ 、送り量  $f0.2$  では 20~25  $\mu\text{m}$  であった。切削加工による、微かな表面粗さ谷部への応力集中が亀裂発生の要因と考えられる。

また、切込量  $a_p$  に関連する疲労強度を比較したところ、送り量  $f0.1$  では、差が顕著に出なかったが、送り量  $f0.2$  では切込量  $a_p0.1$  より切込量  $a_p0.5$  の方が、疲労強度が低下する傾向となった。これは、切削加工時の熱や応力により、表面付近の金属組織の変化を与え、亀裂進展の要因になったと思われる。

このため、切削加工時の条件設定には、注意が必要である。加工条件に注意すれば、疲労強度の低下を防ぎ、100 万回以上の疲労に耐える応力範囲が広がることがわかった。

次に、ワイヤー放電加工による疲労試験結果を図 3 に示す。切削加工による疲労強度と比較して全体的に疲労強度が、低下した結果となった。ワイヤー放電加工面の金属組織を観察した結果を図 4 に示す。ワイヤー放電加工を行った加工面付近の金属組織は特に変化した様子はない。切削加工と比較して疲労強度が低下した要因として、以下の三要因が考えられる。一つ目は、試験片の断面形状が影響していると考えられる。切削加工の試験片の断面は円形状であるが、ワイヤー加工による試験片の断面は正方形であり、破断した試験片を観察すると、角部から亀裂が進行し、破断に至った破断面を示していた。二つ目に、一般的に放電加工表面には熔融再凝固が行われているので、引張応力が残留しており、破断の原因となる微小なクラックの発生を誘因すると考えられる。三つ目に、試料作製に使用したワイヤー放電加工機は油中での加工のため、加工表面には TiC 合金が形成される。この合金は、硬いため、引張応力により、破断の原因となる微小なクラックの発生を誘因すると考えられる。

### 3-2 疲労解析シミュレーション結果

図 5 に未加工材料の応力ひずみ線図を示す。この結果より、材料の引張強度は 471 MPa、ヤング率 94.4 GPa を用いた。また、ポアソン比 0.34 を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションに用いたモデル形状は、実際に疲労試験に用いた試験片と同じ形状を用いた。解析条件として、引張試験と同様に丸棒のつかみ部周辺を固定し、反対側のつかみ部周辺に引張荷重を与えた。図 6 は、解析結果の一例として、試験片に静荷重の引張荷重 (7,148 N) を加えた応力解析結果である。解析結果は、試験片の細い部分に引張応力の集中し、破断に至る実際の試験結果と同様の結果を得られた。しかし、破断箇所は広い範囲で示された。次に、同様の解析モデルを

用いて疲労強度シミュレーションを行った結果の一例として、切込量 0.5 mm、送り量 0.2 mm の切削加工条件で作製した加工試験片に引張荷重 (340MPa) 応力比 0.1 の片振り繰り返し荷重を 10,000,000 回加えた解析を図 7 に示す。疲労を与える荷重条件と解析データに用いるデータは実際の疲労試験で得たデータを用いた。その結果、解析結果と実際の試験結果は同様の結果を得られた。応力解析では、試験片の細い部分が均一に応力を受けていたが、疲労強度予測結果は、試験片の中心部が均一でなく、中心部よりもショルダー部の根本部分が最も疲労強度が弱く予想された。実際の試験においても、同じ個所での破断が多く、破断箇所の予測もほぼ行えることができた。このため、試験データを正確に求めることで、疲労予測強度を高精度に行うことができた。

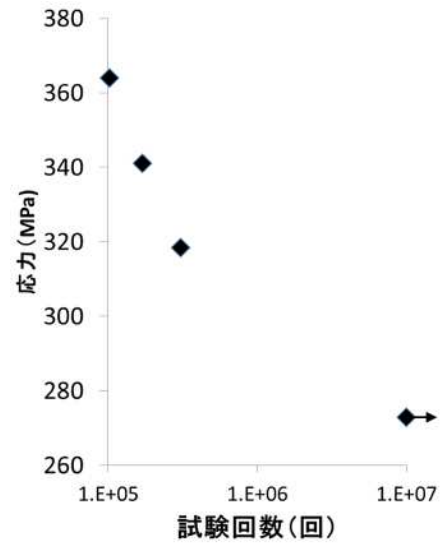
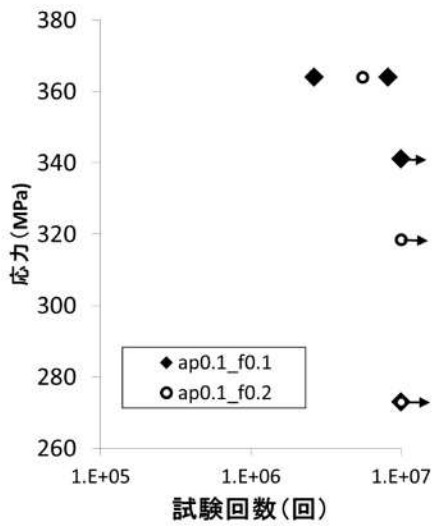
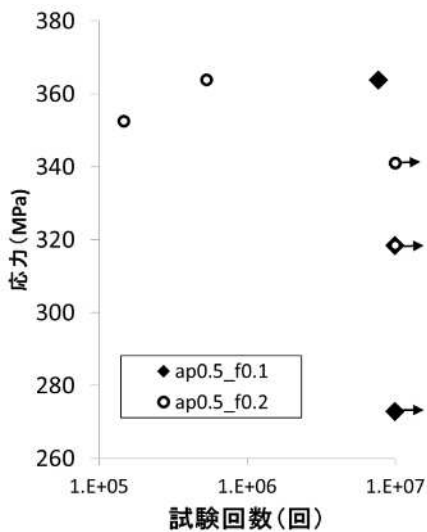


図3 ワイヤ放電加工の疲労試験結果



a) ap0.1



b) ap0.5

図2 切削加工の疲労試験結果

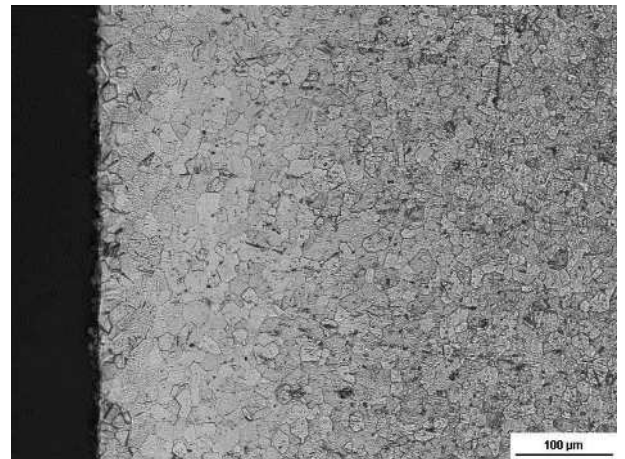


図4 ワイヤ放電加工断面組織観察結果

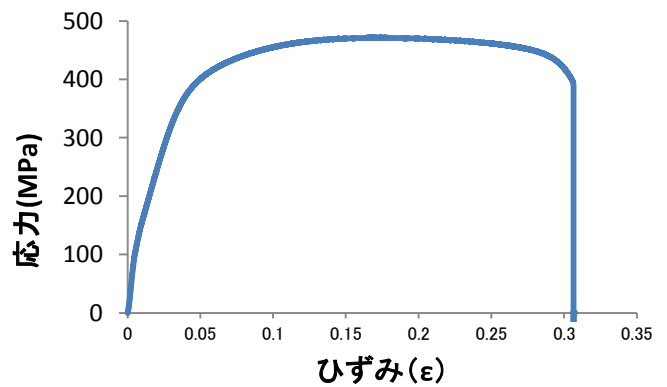


図5 未加工素材の引張強度試験結果

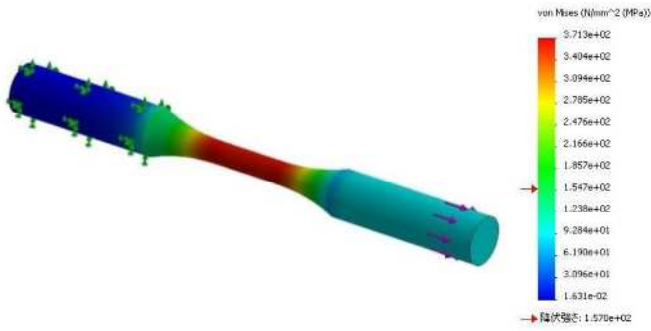


図 6 応力解析結果

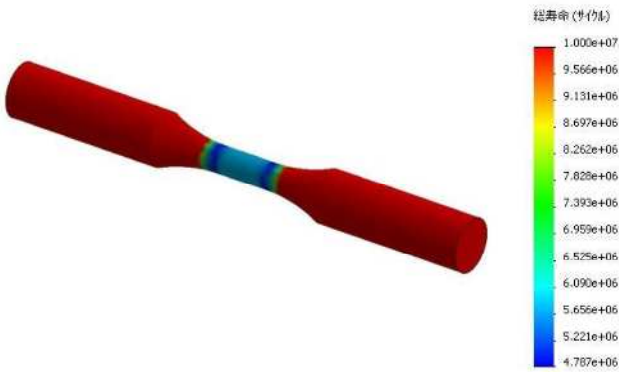


図 7 疲労解析結果

#### 4. 結 言

純チタン材に対し、切削加工やワイヤー放電加工を行い、各加工条件が疲労強度に与える影響を調査した。また、実際の試験結果を疲労強度シミュレーションに適用させ比較を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 切削加工を行った純チタン材は、同じ送り量であれば、切込量が多い方が、疲労強度が弱くなった。
- (2) 切削加工を行った純チタン材は、同じ切込量であれば、1回転あたりの送り量が多く表面粗さが粗い方が、疲労強度が弱くなった。
- (3) 実際の試験結果を用いて疲労解析を行った結果、破断場所や破断回数なども実施の試験と同様な結果を得ることができた。