

チタン製品の疲労強度に関する研究（第1報）

鈴木 大介・西村 通喜・山田 博之・長田 和真・高尾 清利

Mechanical and Fatigue Stress properties on Titanium alloy (1st report)

Daisuke SUZUKI, Michiyoshi NISHIMURA, Hiroyuki YAMADA, Kazuma OSADA and 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。疲労特性について数値解析を行うためには、材料の S-N 曲線が必要であるが、S-N 曲線の取得には比較的長時間を要するうえ、切削や放電加工といった加工方法や熱処理などで疲労特性は変化する。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、チタン材の引張強さならびに X 線の応力定数の測定を行った。その結果、切削加工を行った純チタン材は切込量 $a_p=0.5$ 以上の切削条件において引張強さが未処理材に対し 4%程度減少していた。また、同じ切込量 a_p においては、送り量 f の大きい条件で引張強さは増加したが、 $a_p=1.0$ においてはその傾向が見られなかった。さらに、チタン合金の X 線の応力定数の測定を行ったところ、 σ -M 線図の直線性ならびに再現性が見られなかったことから、応力定数の測定は不可能であった。

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が、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。

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数値解析が多用されるようになってきたが、数値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。特に、疲労特性に関して解析しようとした場合は、解析手法により材料の S-N 曲線が必要となるものの、S-N 曲線の取得には試験荷重について $10^4 \sim 10^8$ 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、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、疲労解析が開発・試作現場での利用普及につながるよう、加工により変化する材料特性を明らかにし、数値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。本年度は純チタンおよびチタン合金に対し、各加工条件が引張強さに与える影響ならびに加工により付与される応力を測定するため、X 線の応力定数の測定を行った。

2. 実験方法

2-1 引張試験

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 101.5mm で切出後、標点部直径 $\phi 6$ mm、標点部長さ 20mm、ショルダー R30mm の引張試験片を作成した。つかみ部寸法は両側それぞれ 30mm である。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 旋盤で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 0.1mm、送り量 0.1mm/rev 試験片については、 $a_p 0.1/f 0.1$ と呼称することとした。

切削は切込量 0.1, 0.5, 1.0mm、送り速度 0.1, 0.2mm まで変化させて行い引張試験に供した。引張試験速度は 2mm/min である。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° 回転させ再度測定を行い、それらの平均値から算出した。さらに、加工試験片との比較として受入材のままの試験片（以降では未加工試験片と表記）についても引張試験を実施した。

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
1.0	0.1
	0.2

2-2 応力定数測定

X線応力測定に供した供試材は Ti-6Al-4V チタン合金板材 (70^l×20^w×5^tmm) であり、板厚方向の板材表面はフェイスマイルによる切削加工が施されている。X線応力測定には、(株)リガク AutoMATE を使用した。応力測定測定条件を表 2 に示す。測定当初は Cu 管球および Cr 管球を使用して測定を行っていたが、測定に十分なピーク強度が得られなかったことから、その後 Ti 管球を使用し測定を行った。回折面は八代らの報告¹⁾を勘案し、 α 相の底面である 11 $\bar{2}$ 0 回折面を用いた。

応力定数の測定は、試験片に 4 点曲げ治具を用いて引張側の曲げ応力を付加し、各曲げ応力における 2θ - $\sin^2\psi$ 線図を作成することで行った。曲げ応力は、試験片の表面に張り付けたひずみゲージから得られたひずみ ε に縦弾性係数 113GPa²⁾を乗じることで算出した。

表 2 X線応力測定条件

特性 X 線	TiK α
管電圧, kV	30
管電流, mA	20
コリメータ径, mm	4
回折面	11 $\bar{2}$ 0(α 相)
回折角, deg	137.4
計数時間, sec	70
測定方法	並傾法による

3. 実験結果

3-1 引張試験結果

各加工条件における引張強さを図 1 に示す。未加工試験片の引張強さは約 451MPa であった。切込量 a_p に関連する引張強さを比較したところ、 $a_p=0.1$ では未加工試験片と比較しごくわずかに増加していたが、切込量 $a_p=0.5$ 以上の条件では有意に変化しており、 $a_p=0.5/f=0.1$ や $a_p=1.0/f=0.1$ では未処理材に対し約 4%の減少がみられた。

送り量 f に関連する引張強さの比較では、 $a_p=0.1$ および $a_p=0.5$ の条件において、送り量 $f=0.2$ の条件で引張強さが増加する傾向が見られたが、 $a_p=1.0$ においては送り量 f に起因した変化を認めることはできなかった。

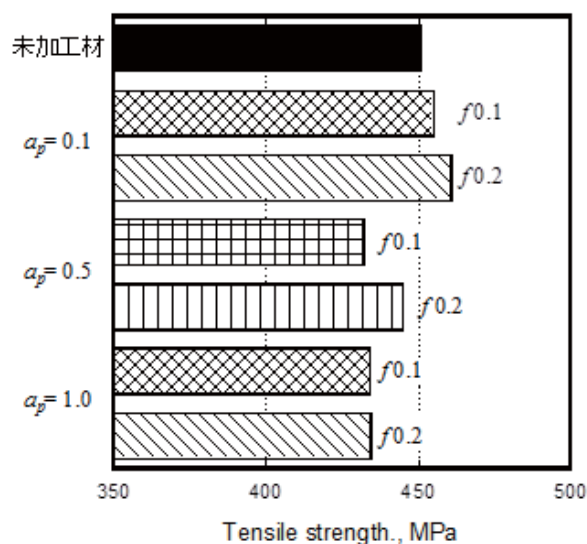


図 1 各切削条件における引張強さ

3-2 応力定数測定

図 2 に TiK α を用いて測定を行った σ -M 線図を示す。 σ -M 線図におけるプロット点は ψ_0 一定法により測定した $\sin^2\psi$ -線図における勾配 M である。測定は無負荷状態 (0MPa) から 11.3MPa ごとに最大負荷応力の 42.4MPa まで負荷応力 σ を上昇させながら行った。最大負荷応力における測定後は 0MPa まで除荷し、再び同じ応力負荷条件で 2 回目の測定を行い、測定の信頼性の検証を行った。

$\sin^2\psi$ 法による X 線応力測定では、理論上負荷応力 σ と傾き M の間には 1 次の相関関係があるため、直線近似ができるはずであるが、本研究で供試材とした表面切削された Ti-6Al-4V チタン合金では σ -M 線図の直線性が見られないうえ、1 回目の測定および 2 回目の測定における再現性が認められず、応力定数の算出は不可能であった。なお、揺動についても検討を試みてみたものの、再現性および直線性は認めることができなかった。

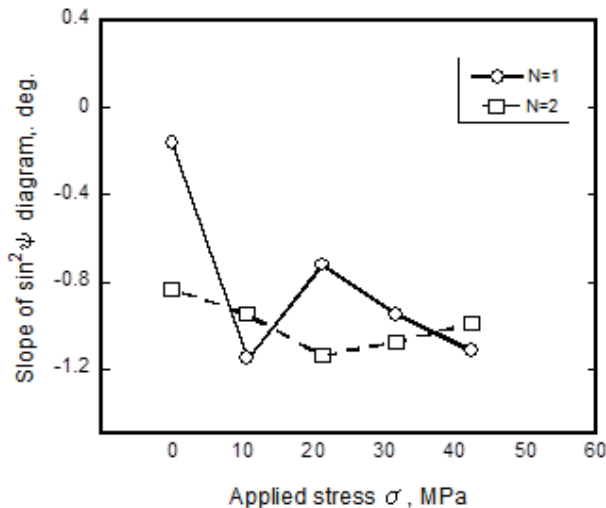


図2 TiKaによる各負荷応力 σ に対する $\sin^2\psi$ 線図の傾きM

4. 考察

本研究ではチタン材に対して、加工により変化する材料特性を明らかにするために、表面に切削加工を施した試験片の引張強さならびに応力測定に関して評価を行った。以下においては加工条件による引張強さの変化および応力定数測定が行えなかったことについて考察を加える。

はじめに、図1に示した加工条件による引張強さの変化について述べる。引張強さは切込量 a_p および送り量 f に関連する変化が見られたが、引張強さに影響を及ぼす因子として考えられるのは、加工面の表面粗さの違いおよび切削時の発熱や加工力に起因する加工硬化や組織変化である。

表面粗さが異なる場合、マイクロメーターによる直径の測定誤差が生じることが考えられる。各加工条件における標点部の表面粗さ Rz を測定したところ、送り量 $f 0.1$ における Rz は約 $7\mu\text{m}$ 、送り量 $f 0.2$ では $20\sim 25\mu\text{m}$ であった。一方、切込量 a_p に関連した Rz の変化は認めることができなかった。送り量 $f 0.2$ における Rz が大きいことから、マイクロメーターによる直径値が本来の直径よりも大きく測定されている可能性があると思われる。しかし、直径値が大きく測定されれば断面積も増加するため、送り量 $f 0.2$ における引張強さは減少するはずである。また、 $a_p=1.0$ の条件においては、送り量 f による違いがみられなかったことから、表面粗さによる変化であるとは考えがたい。

次に、切削時の発熱や加工力による組織変化については、切削時の熱は実測が困難であることから実施していないもの、切削液による冷却を行っていることから、加工時における発熱は大きく影響を及ぼさないものと推察される。

加工力による組織変化は、本実験で用いた供試材が純チタン合金である点から、加工により試験片表面近傍に双晶が発生していると考えられる。しかし、図3に示す $a_p 0.1/f 0.1$ および $a_p 0.5/f 0.1$ の組織観察結果では、両者の試験片表面において、明らかな双晶の違いは見られなかった。一方、 $a_p 0.5/f 0.1$ については、 $a_p 0.1/f 0.1$ と比較し結晶粒が微細化しているように見受けられる。このことが引張強さに影響を及ぼしたのかについては、組織変化や加工硬化による影響とともに未だ精査中である。

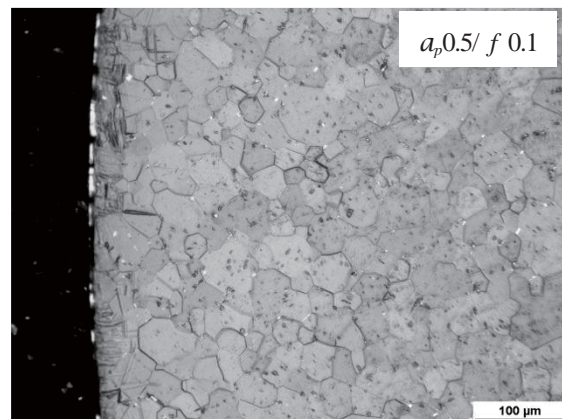
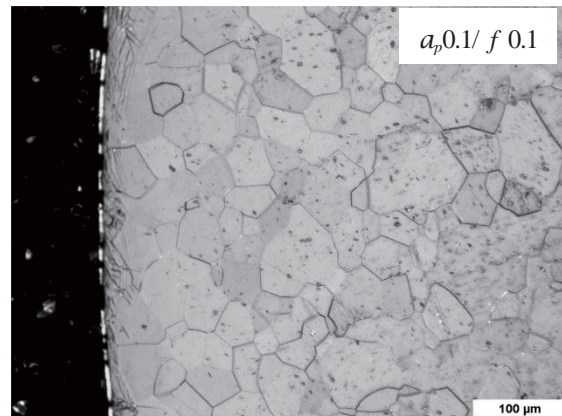


図3 断面組織観察結果

次に、応力定数測定について述べる。本研究に供したチタン合金にはフェイスミルによる切削加工が施されている。前述のとおり、試験片表面近傍には加工に起因した双晶ないし加工変質層が存在していることが示唆されていることから、応力定数測定においてもこれらが影響を及ぼした可能性は大きい。八代ら¹⁾は、チタン合金と同じ六方晶金属であるマグネシウム圧延板の応力測定において、加工された表面の応力定数の測定に集合組織ならびに双晶が影響を及ぼすことを報告しており、極点図の変化について言及している。そこで、供試材を5%フッ酸により化学研磨し、Schulz'sの反射法を用いて研磨量約 $20\mu\text{m}$ 毎における0002面の極点図を測定することで組織の変化を捉えることを試みた。その結果、図4に示すように、0002面の集合は約

20 μm ごとに変化することが判明した。未研磨の 0002 面の極点図は圧延方向 RD に対し 180deg.の方向に集合していたが、研磨量が 22 μm では RD に対し 0deg., 180deg.方向に双極として分布し、43 μm まで研磨を行うとこの双極が消失し、0deg.から 180deg.まで RD 方向に一様に分布していた。

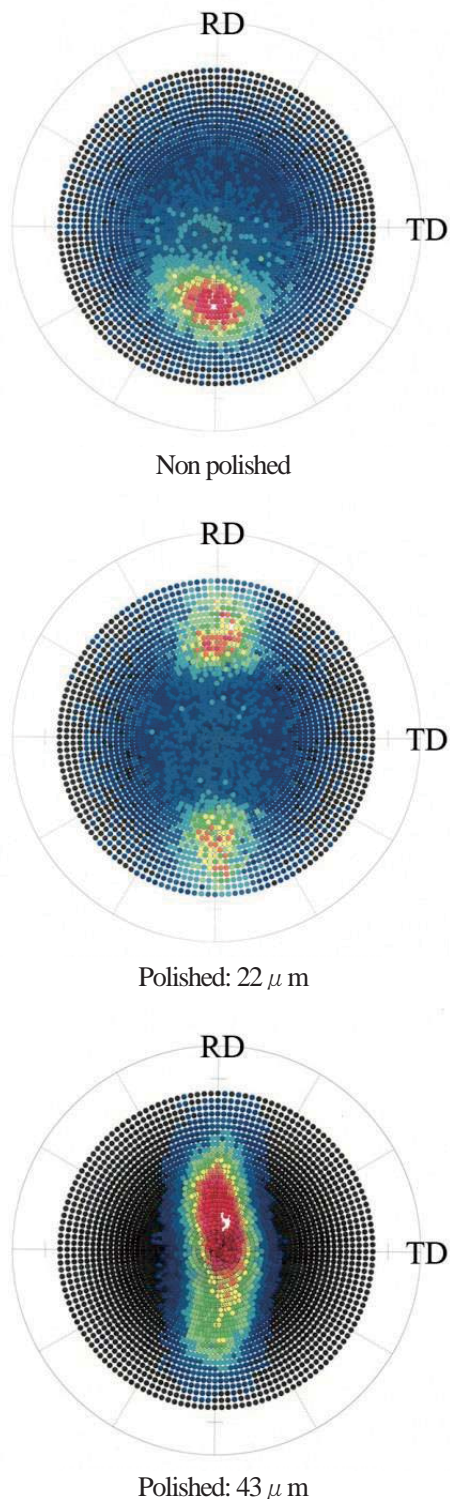


図4 各研磨量における 0002 面の極点図

研磨量ごとに变化した極については、今後詳細な検討を行う必要があるが、加工により導入された組織変化やひずみなどによるものと考えられる。

以上、引張強さの変化ならびに応力定数測定について述べてきたが、いずれの結果も加工により生じた組織変化やひずみなどが測定値に影響を及ぼしていると考えられるものの、詳細については今後さらに検証を行っていく必要があると考える。

5. 結 言

純チタン材に対し、NC 旋盤による切削加工を行い、各加工条件が引張強さに与える影響を調査した。また、加工により付与される応力を測定するため、Ti-6Al-4V 合金の X 線の応力定数の測定を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 切削加工を行った純チタン材は、切込量 $a_p=0.5$ 以上の切削条件において引張強さは減少し、未処理材から 4%程度減少していた。
- (2) 同じ切込量 a_p において、送り量 f の大きい条件では引張強さが増加する傾向が見られたが、 $a_p=1.0$ ではその傾向が認められなかった。
- (3) 4 点曲げにより Ti-6Al-4V の X 線の応力定数の測定を行ったところ、 σ -M 線図に直線性ならびに再現性がなく、応力定数を測定することが不可能であった。

参考文献

- 1)八代ら：材料，Vol.63，No.7，P.539-544 (2014)
- 2)長谷川良栄：精密工学会誌，Vol.75，No.8，P.953-957 (2009)