

Ti-6Al-4V 材におけるき裂伝ば速度の寸法効果*

(小穴材の回転曲げ)

山田 繁治*¹・宮城 雅夫*¹・西谷 弘信*²
皮籠石紀雄*³・田中 哲志*⁴・本田 政彦*⁴

SIZE EFFECT ON CRACK GROWTH RATE IN Ti-6Al-4V (ROTATING BENDING FATIGUE OF SPECIMEN WITH A SMALL BLIND HOLE)

Shigeji YAMADA, Norio MIYAGI, Hironobu NISITANI,

Norio KAWAGOISHI, Satoshi TANAKA and Masahiko HONDA

The size effect on the growth rate of a small surface crack and the significance of fatigue limit in Ti-6Al-4V were investigated in rotating bending test by using specimens of two kinds of size which have a small blind hole (0.3mm in dia.).

The main results obtained are as follows:

- 1) The fatigue limit of specimen with a small blind hole is determined by the limit of a crack initiation.
- 2) The crack growth rate is determined by the stress intensity factor range (ΔK) uniquely, therefore, the size effect on the crack growth rate is evaluated through ΔK .

Key words ; fatigue, Ti-6Al-4V, rotating bending, size effect, stress intensity factor, small crack growth rate, fatigue limit

1. 緒 言

*本研究の一部は日本機械学会九州支部第42期総会講演会において講演したものである。

*¹機械工学科

*²九州大学・工学部・材料強弱学教室

*³鹿児島大学・工学部・共通講座

*⁴九州産業大学・工学部・機械工学科

優れた耐食性に加え、高い比強度を有するチタン合金は、耐食性の他に軽量化を特に必要とする航空宇宙機器をはじめとして各種機器、構造部材への利用が拡大している¹⁾。そのためチタン合金を構造部材に使用する上で重要な疲労特性についての研究もかなり行われているが不明な点も少なくない²⁾。

一般に疲労強度を考えると、微小き裂の伝ば抵抗の評価は特に重要である³⁾。低・中強度材の場合、微小き裂を伝ばさせる応力は静強度に比べ比較的高い応

力となるため小規模降伏条件は満たされにくい。しかしながら、高強度材では静強度の割にき裂伝ば抵抗は小さいため、比較的低い応力でも伝ばし、したがって小規模降伏条件は満たされやすく、また応力拡大係数の有効なき裂長さの下限値も小さくなる⁴⁾。

本論文では、数多いチタン合金の中で最も多用されているTi-6Al-4Vの小穴を有する二種類の寸法の試験片を用いて回転曲げ疲労試験を行い、微小表面き裂の伝ば特性および疲労限度における停留き裂の有無を調べ、本材料におけるき裂伝ば速度の寸法効果および疲労限度の意味について検討した。

2. 材料, 試験片および実験方法

用いた材料はTi-6Al-4Vである。表1に化学成分を示す。素材を705℃, 2hの加熱後空冷の熱処理を行ってから図1に示す二種類(直径5, 10mm)の形状, 寸法を有する小穴付き試験片に機械加工した。表2に熱処理後の機械的性質を示す。

試験片は、機械加工後、ペーパー研磨およびアルミ

表1. 化学成分 (wt%)

Al	V	Fe	N	O	H	Ti
6.10	4.20	0.20	0.0034	0.14	0.0079	Re.

表2. 機械的性質

$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	σ_T (MPa)	ψ (%)
1010	1070	1940	44

ナ研磨で最終仕上げとし、加工影響層除去のための焼なましや化学研磨等は行っていない。

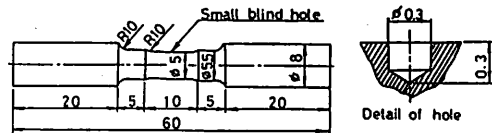
き裂長さの測定にはレプリカ法を用いたが、その際のき裂長さは試験片表面に沿う円周方向の長さ(小穴径0.3mmも含む)とした。

用いた試験機は、二種類の小野式回転曲げ疲労試験機(容量および回転数はそれぞれ15N.mと98N.mおよび3000rpmと3500rpm)である。

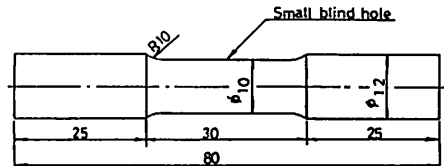
3. 実験結果および考察

3.1 S-N 曲線

図2に大径および小径試験片のS-N曲線を示す。図中、Nfは破断寿命を、Niは穴縁にき裂が発生する



(a) 小径試験片



(b) 大径試験片

図1. 試験片の形状・寸法 (mm)

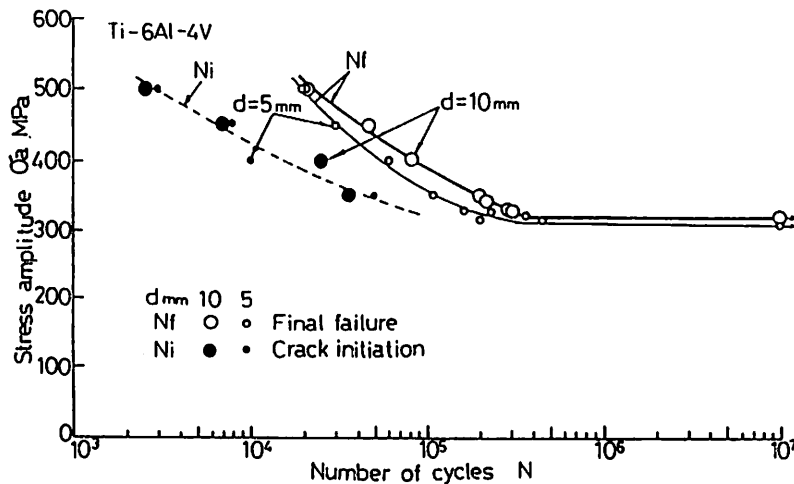
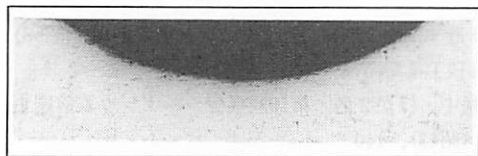


図2. 小穴付き試験片のS-N曲線 (d = 5, 10mm)

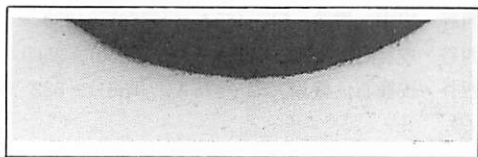
繰返し数(き裂伝ば曲線を外挿することにより求めた)を意味している。いずれの試験片のS-N曲線にも、繰返し数が 3×10^5 回付近に明瞭な折れ点が認められ、疲労限度は、大径、小径それぞれ320 MPa、310 MPaとほぼ等しい。破断寿命 N_f は、大径試験片が長寿命となるが、き裂発生繰返し数 N_i には、両試験片間で大きな差異は認められない。

図3は、大径試験片の疲労限度の応力($\sigma_a = 320$ MPa)を繰返した場合の小穴縁で観察した表面写真である。

一般に、小穴をもつ鋼の疲労限度は、小穴縁から発生したき裂の伝ば限界で決まる⁵⁾。ところが本材料の場合、図3からわかるように、小穴縁の変化はほとんど認められず、したがって停留き裂も観察されない。すなわち、今回用いた試験片の疲労限度はき裂発生限界で決まることになる。



(a) N = 0 cycle

(b) N = 10⁷ cycles

100 μm

図3. 疲労限度における穴縁の表面状態(直接観察, $d = 10$ mm, $\sigma_a = 320$ MPa, \longleftrightarrow 軸方向)

[$\rho = 0.15$ mmの場合、疲労限度では停留き裂は認められない]

3. 2 き裂伝ば特性

緒言でも述べたように、静強度の上昇がそのままき裂伝ば抵抗の改善につながらないのが一般的である。そのため、高強度材程、小規模降伏条件は満たされやすい。

今回実験した範囲も、耐力 $\sigma_{0.2}$ に比べ負荷応力はかなり低く($\sigma_a / \sigma_{0.2} < 0.5$)、小規模降伏条件が満たされているものと考えられる⁶⁾。

図4は、大径および小径試験片のき裂伝ば速度と応

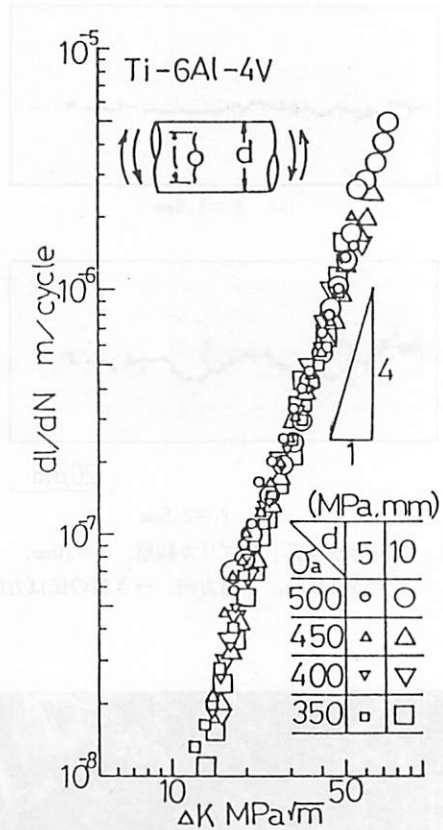


図4. き裂伝ば速度と応力拡大係数幅の関係 ($d = 5, 10$ mm)

力拡大係数幅 ΔK [($2/\pi$) $\Delta\sigma\sqrt{\pi\ell/2}$ で近似する]の関係である。き裂伝ば速度は応力拡大係数幅で一義的に決まり、したがって両者の間には試験片寸法の影響もみられず、ほぼ一本の曲線で近似されている。このように、き裂伝ば速度が応力拡大係数で整理される場合、その寸法効果も応力拡大係数を通じて説明される⁷⁾。

図5は、大径試験片に $\sigma_a = 500$ MPaの応力を繰返した場合の表面で観察したき裂形態写真の例である。き裂は、小さな分岐を繰返ししながら引張方向と直角にはほぼ直線的に成長している。

図6に破面写真($\ell = 3$ mm)を示す。き裂がかなり長くなると図に示すように明瞭なストライエーションが観察される。

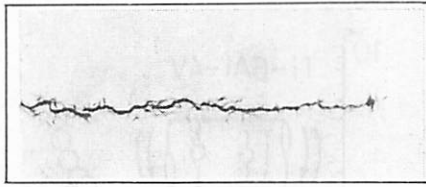
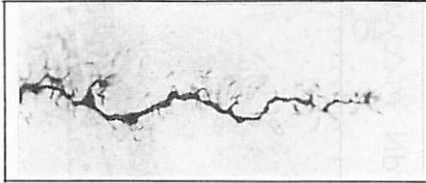
(a) $\ell \approx 1.6\text{mm}$ 20 μm (b) $\ell \approx 2.5\text{mm}$

図5. き裂形態写真(レプリカ観察, $d = 10\text{mm}$,
 $\sigma_a = 500\text{MPa}$, \downarrow 軸方向, \rightarrow き裂の伝ば方向)

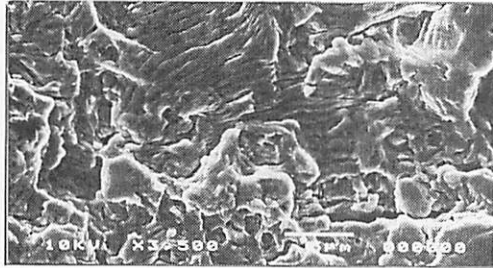


図6. 破面写真 ($d = 5\text{mm}$, $\sigma_a = 400\text{MPa}$, $\ell \approx 3\text{mm}$,
 $N_f = 6.2 \times 10^4 \text{cycles}$)

4. 結 言

Ti-6Al-4Vの小穴(直径0.3mm)を有する二種類の寸法の試験片を用いて回転曲げ疲労試験を行い、微小表面き裂の伝ば特性および疲労限度における停留き裂の有無を調べ、本材料におけるき裂伝ば速度の寸法効果および疲労限度の意味について検討した。得られた主な結果を要約すると次のようになる。

- (1) 小穴材の疲労限度はき裂発生限界で決まる。
- (2) いずれの試験片においても、き裂伝ば速度は応力拡大係数幅 ΔK で一義的に決まる。したがって、き裂伝ば速度の寸法効果も応力拡大係数を通じて説明される。

終わりに、材料を提供して頂いた神戸製鋼チタン本部に対し謝意を表する。

文 献

- 1) 草道・ほか3名編, 金属チタンとその応用, (昭58), 日刊工業新聞社
- 2) 幡中・ほか2名, 第19回疲労シンポジウム前刷集, (昭63), 140
- 3) 西谷・後藤, 機論, 51-462A, (昭60), 332
- 4) 北川・高橋, 機論, 45-399A, (昭54), 1289
- 5) 西谷・田中, 機論, 51-465A, (昭60), 1290
- 6) 西谷・皮籠石, 機論, 51-471A, (昭60), 2560
- 7) 西谷・皮籠石, 機論, 52-476A, (昭61), 882