

# Ti-6Al-4V 合金の高サイクル疲労における 材料内部／真空環境の類似点

北海道大学[院] (現 信越化学工業) 正○風見 志郎  
 北海道大学[院] 正 金子 真  
 北海道大学 正 中村 孝  
 北海道大学 正 野口 徹

## 1. 緒言

チタン合金は比強度・耐熱性・耐食性に優れ、航空宇宙産業をはじめとして化学工業・自動車産業など年々その用途は急速に拡大している。中でも、Ti-6Al-4V 合金は強度、熱処理性、溶接性などにバランスのとれた合金であるため、最も多く使用されている。Ti-6Al-4V 合金の疲労特性として、短寿命で表面を起点とする破壊（以下、表面破壊）を生じた後、長寿命で内部を起点とする破壊（以下、内部破壊）を生じることが知られている<sup>(1)</sup>。しかし破壊機構が表面から内部へ遷移するメカニズムについては未だ明らかにされていない。

本研究では、両破壊に寿命差が生じる理由を検討するために、材料表面と材料内部環境に注目した。内部は非酸化性環境と考えられるので、真空環境中の疲労試験で得られた結果と比較し、両環境が疲労特性に及ぼす影響の類似性について検討を行った。

## 2. 実験方法および実験装置

供試材には Ti-6Al-4V 合金を用いた。熱処理として、720～740℃、保持時間 1 時間の空冷焼き鈍しを行い、組織は  $\alpha + \beta$  である。化学成分と機械的性質を Table1, 2 に示す。試験片形状を Fig.1 に示す。試験片は、機械加工後 #1500 までエメリ紙で研磨した。また、真空中の試験に用いる試験片にはアセトン液による超音波洗浄を 20 分間行った。疲労試験は応力比 0.1、周波数 40Hz の軸荷重引張疲労試験である。真空槽内への往復運動の導入は真空ペローズを用い、フランジは全て超高真空用コンフラットフランジである。排気ポンプは油回転ポンプ 100 (l/min) とターボ分子ポンプ 190 (l/sec) を用いた。一定の真空圧力で試験を行うために、圧力が最高到達圧力である  $2 \times 10^{-5}$  (Pa) に到達後、試験を開始した。

Table1 Chemical compositions of specimen

| Al   | V    | O    | N    | C    | Fe   | H      | Ti   |
|------|------|------|------|------|------|--------|------|
| 6.04 | 4.01 | 0.18 | 0.01 | 0.02 | 0.20 | 0.0008 | Bal. |

Table2 Mechanical properties

| $\sigma_B$ (MPa) | $\sigma_Y$ (MPa) | Elongation (%) | Hv  |
|------------------|------------------|----------------|-----|
| 988              | 899              | 16             | 309 |

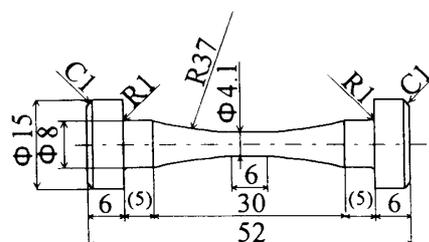


Fig. 1 Specimen for fatigue test

## 3. 実験結果

Fig.2 に疲労試験結果を示す。大気中疲労試験の S-N 曲線は緩やかな右下がり傾向を示した後、 $10^7$  を越える領域で、傾きが急になり時間強度が大幅に低下した。前者は表面破壊、後者は内部破壊の領域に対応する。真空中でも、表面破壊と内部破壊を生じたが、表面破壊の寿命は大気環境中に比べ伸びた。しかし、内部破壊の寿命は大気中のものと同程度であった。また、880(MPa)において、大気環境中では表面破壊を生じ、真空環境中では内部破壊を生じた。その内部破壊も含め、内部破壊の寿命は一本の直線となった。すなわち、真空中では表面破壊の疲労強度は向上するが、高サイクル域では、内部破壊の疲労強度が問題となる。

## 4. 破面観察結果および考察

SEM 破面観察を行った。それぞれの破面模式図を Fig.3 に示す。表面破壊と内部破壊ともに、破壊起点は平坦なファセットであった。その起点周りには Stage II a に対応する組織敏感な比較的粗い破面（以下、粗面領域）が形成されていた。その後、Stage II b に対応する組織不敏感な平坦な破面が形成され、最終破断に至っていた。

巨視的な破面観察の結果を Fig.4 に示す。Fig.4(b) より、真空中表面破壊の破面には、内部を起点とする進展中の微小き裂が多数観察された。これは、真空中において表面破壊の寿命が伸びたため生じたものと考えられ、大気中では表面破壊の寿命が短いためその発生頻度は少なかった。これより、表面破壊と内部破壊が競合していることがわかった。

微視的な破面観察の結果、表面／内部／真空環境により、粗面領域に顕著な相違点が見られた。大気中表面破壊・真空中表面破壊・内部破壊の粗面領域の写真を Fig.5 に示す。

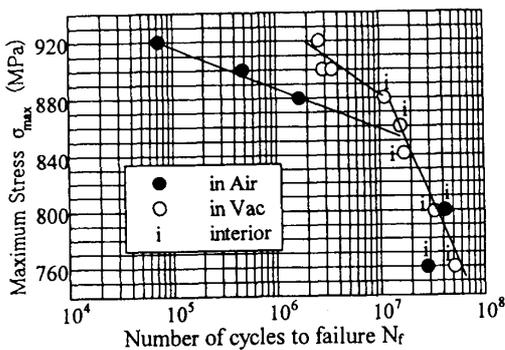
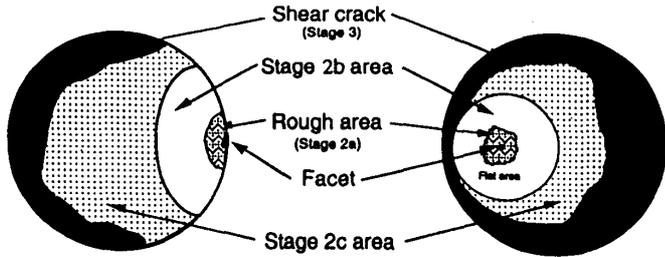
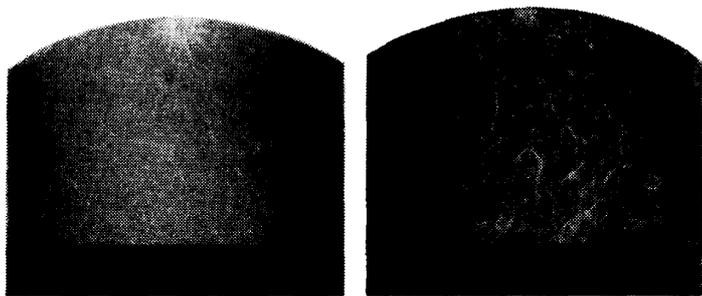


Fig. 2 S-N curves



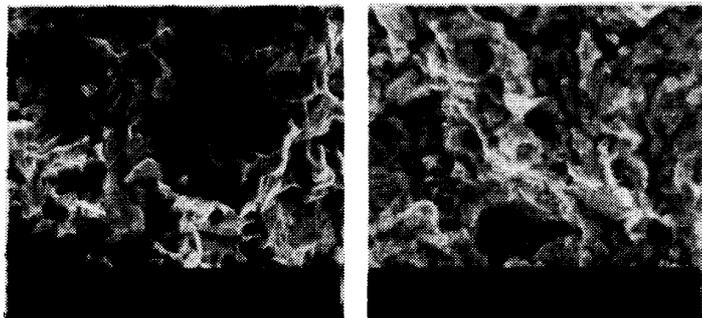
(a) Surface fracture (b) Interior fracture

Fig. 3 Schema of fracture surface

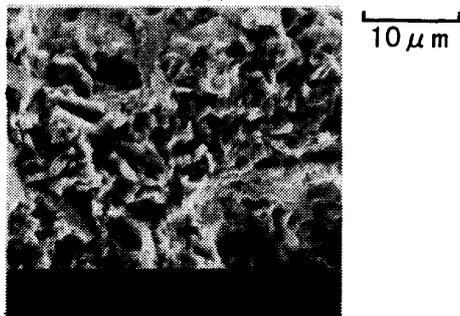


(a) in air (b) in vac 500 μm

Fig. 4 Fracture surface



(a) Surface fracture in air (b) Surface fracture in vac



(c) Interior fracture

Fig. 5 Rough area of fracture Surface

Fig. 5(a)より、大気中表面破壊の粗面領域は全体的に角張っており、階段状の様相が多数観察された。Fig. 5(b),(c)より、真空中表面破壊と内部破壊の粗面領域は全体的に丸みを帯びており、階段状様相は明瞭には見られなかった。すなわち、内部破壊の破面は大気中表面破壊の破面とは明らかに異なり、むしろ真空中表面破壊の破面に極めて類似していることがわかった。また、内部と真空中の粗面領域における全体的に丸みを帯びた破面は、き裂新生面同士の再結合の可能性を示唆する。

Fig. 3 に示すように粗面領域から平坦な破面への遷移域は Stage II a と Stage II b の境界に対応する。そこで、粗面領域寸法から求めた遷移域の $\Delta K$  に及ぼす表面/内部/真空環境の影響について比較した。Fig. 6 に応力拡大係数範囲 $\Delta K$  と疲労寿命  $N_f$  のグラフを示す。 $\Delta K$  は村上らにより提案されている式<sup>2)</sup>を用いて求めた。

同図より、真空中表面破壊と内部破壊の $\Delta K$  は約  $8(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$  とほぼ等しいのに対し、大気中表面破壊の $\Delta K$  は約  $12(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$  と異なる値を示す。すなわち、き裂伝ぱが Stage II a から Stage II b に移行する境界の $\Delta K$  が真空中表面破壊と内部破壊でほぼ等しく、このことから内部環境が真空環境に類似しているといえる。

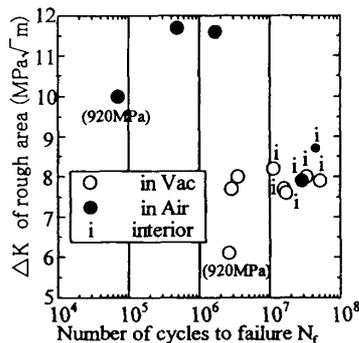


Fig. 6  $\Delta K$ - $N_f$  graph

### 5. 結言

- (1) 真空環境中では表面破壊の寿命は大気環境中に比べ大幅に伸びる。しかし、内部破壊の寿命は環境によらず変わらない。
- (2) 破面観察および $\Delta K$ - $N_f$ から、き裂進展に及ぼす内部環境の影響は真空環境に類似している。
- (3) 表面破壊と内部破壊は競合している。

本研究により、内部破壊における破面の再結合の可能性が示唆された。これは表面破壊と内部破壊の寿命差に関連すると思われる、さらなる検討が必要である。

### 参考文献

- (1) 中村・他 3 名, 日本機械学会北海道支部第 37 回講演会講演論文集, No.972-1(1997), 53
- (2) 村上・他 2 名, 機論, 57-500, A(1988), 688