金属３Ｄプリンターにより造形した Ti-6Al-4V 合金の疲労強度

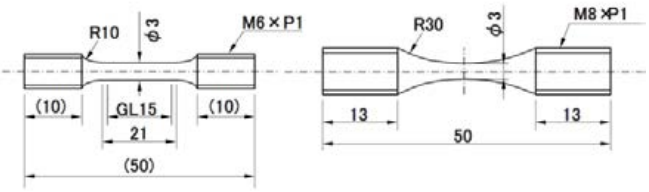
殿塚　易行、大谷　行雄(機械・材料技術部　材料評価グループ)
安田　剛敏（富山大学）
山内　隆嗣(ヤマウチマテックス・エンジニアリング株式会社)

１．　はじめに

金属３Ｄプリンターによる積層造形は、複雑な形状の部品を直接製作出来るなどのメリットがあるため、患者に合わせて形状が異なるような整形外科用インプラントの造形に適している。このインプラントには体内で長期間の使用に耐えるよう高い疲労信頼性が求められるが、金属３Ｄプリンターによる造形では内部欠陥が発生する可能性が高く、疲労強度の低下が懸念される。今回 Ti-6Al-4V 合金について疲労強度特性を調査したので結果を報告する。

２．　実験方法

供試材は Ti-6Al-4V 合金で、長さ方向に電子ビーム積層造形後、機械加工仕上げで製作した。引張試験及び疲労試験は、図 1 のような試験片形状で、引張試験を 4 ロット 144 本、疲労試験を 2 ロット 28 本実施した。疲労試験条件は室温大気中、引張片振り（応力比 R=0.1）、試験周波数 10Hz、10^7 回打ち切りで、製造ロット違いの「3rd」と「5th」の 2 種類について実施した。試験片および試験方法は、経済産業省「三次元積層造形技術を用いた椎体間固定デバイスの開発ガイドライン 2018」を参考にした。試験機はインストロン製 8802 型疲労試験機および、島津製作所製 ACT5KN100 型疲労試験機を使用した。またすべての疲労破面を走査電子顕微鏡(SEM)で観察し、一部の疲労起点に対しエネルギー分散型 X 線分光分析(SEM-EDX)で成分分析を実施した。



(a)引張試験片(JIS Z2241)　　(b)疲労試験片

図 1　試験片形状

表 1　引張試験結果および硬さ

0.2% 耐力	引張強さ	破断伸び	絞り	硬さ
(MPa)	(MPa)	%	%	HV
864	973	12.2	17	329

３．　結果および考察

引張試験の結果およびマイクロビッカース硬さの測定結果を表 1 に、疲労試験の結果を図 2 に示す。図 2 から、いずれの種類（ロット）も疲労限度は明瞭に現れず、10^6 回を超えても疲労強度は低下傾向であり、ばらつきも大きかった。 2 種類で大きな差異はみられなかった。

ばらつきを統計的に見るために、日本材料学会「S-N 曲線回帰法（Ver.2.0.3)」による片対数連続低下直線モデ

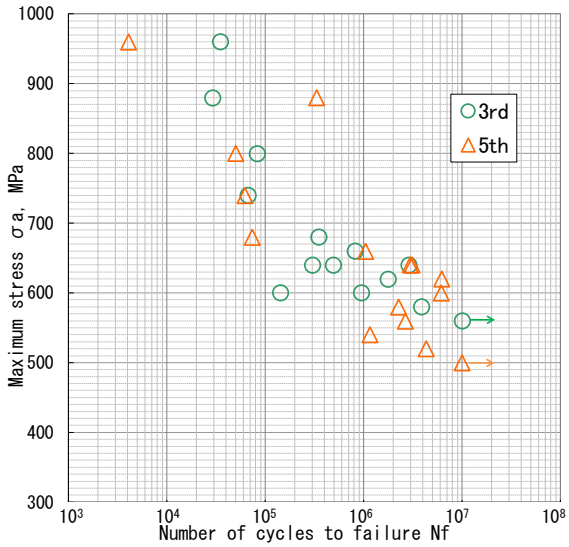


図 2　S-N 線図

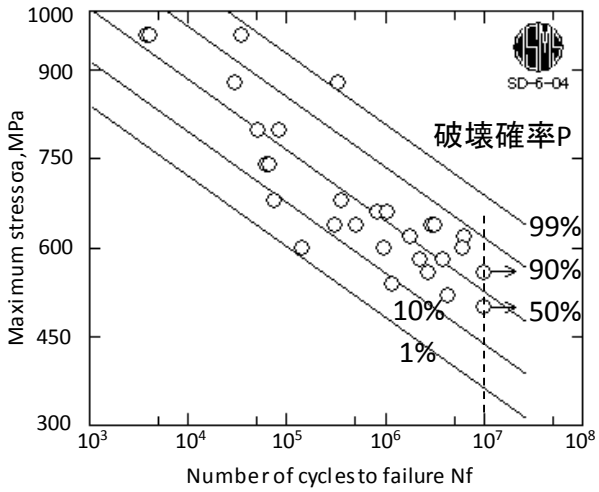


図 3　P-S-N 線図

ルを用いて P-S-N 線図を求めた（図 3）。 10^7 回における破壊確率 50%の最大応力は 530MPa 程度であるが、ばらつきが大きいため破壊確率を 1%にするには最大応力を 370MPa 程度まで下げる必要がある。

SEM を用いて破面を観察した結果、疲労起点は内部欠陥が多く、特に破断繰り返し数が 10^6 回を超える高サイクル域では、ほとんどが内部欠陥であった。疲労起点となった内部欠陥の多くは図 4 のように引け巣のような複雑な形状で、深さは浅く底面は平坦であった。一部の欠陥は円形で、そのうちの 1 本を詳細に観察した結果、図 5 のように片面は浅く底面は平坦であったのに対し、反対面はすり鉢状でやや深く、底面はやはり平坦であった。

疲労起点となった欠陥の代表寸法$\sqrt{area}$ の頻度分布を図 6 に示す。 このばらつきを正規分布で近似すると、中央値、標準偏差はそれぞれ 119μm、 46μm になる。以下に示す内部に欠陥のある材料の疲労限度の予測式(1)を用いると、欠陥寸法$\sqrt{area}$の中央値での応力振幅σ_wは 256MPa で、 これを最大応力 σ _a に換算すると 569MPa となり、

$$\sigma_w = \frac{1.56(HV+120)}{(\sqrt{area})^{1/6}}\left[\frac{(1-R)}{2}\right]^{\alpha} \qquad (1)$$

ここに、 σ_w：疲労限, MPa
HV：ビッカース硬さ
$\sqrt{area}$：欠陥寸法, μm
R：応力比(= $\sigma_{min}/\sigma_{max}$=0.1)
α：=0.226＋HV×10^{-4}

図 3 の 10^7 回における破壊確率 50%の最大応力(530MPa)に近い値となった。ばらつきについて見ると、図 6 より欠陥全体の 99%をカバーする$\sqrt{area}$は 225 μm でこれは σ_a=513MPa に相当する。一方、図 3 の 10^7 回、破壊確率 1%(信頼度 99%)に相当するσ_aは 370MPa で$\sqrt{area}$をもとにした応力よりかなり小さい。このことは、本試験結果のばらつきの要因が欠陥の寸法だけではなく、位置（表面開口、表面付近、内部等）や 3 次元形状など他にもあることを示唆している。

疲労起点となった内部欠陥付近の成分分析を SEM-EDX を用いて Ti,Al,V について実施した結果、いずれの欠陥も図 7 のように周囲と同一成分であった。このことから欠陥は介在物等の異物ではなく造形時の溶け残りと思われる。

4． まとめ

電子ビーム積層造形されたチタン合金 Ti-6Al-4V の疲労強度特性を調べた結果、10^6 回を超える領域でも明確な疲労限を示さず疲労破壊が発生し、ばらつきも大きかった。疲労起点の多くは積層造形時に形成された内部欠陥と思われ、その大きさや分布が疲労特性に影響している。疲労強度向上には、この内部欠陥の小形化、分散化、および圧縮残留応力の付与などが有効と考えられる。

【参考文献】
(1) 村上敬宣：金属疲労　微小欠陥と介在物の影響,養賢堂 (1993),103.

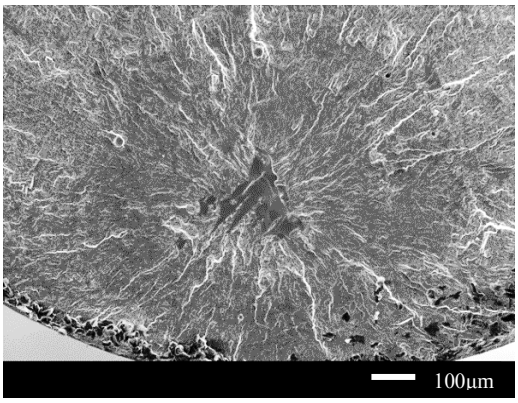
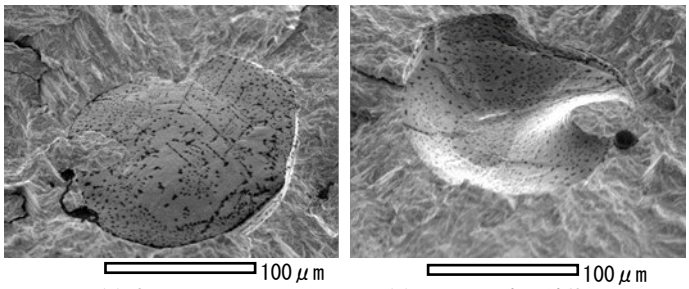


図 4　内部欠陥（複雑な形状）



(a) 片面（平坦）　(b) 反対面（すり鉢状）

図 5　内部欠陥（円形, 斜め 30°方向から見た同一部位の両破面）

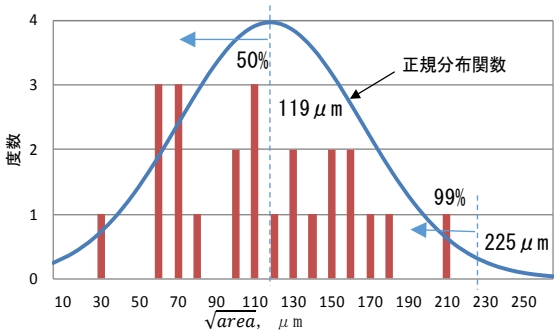


図 6　欠陥の代表寸法 $\sqrt{area}$ の頻度分布

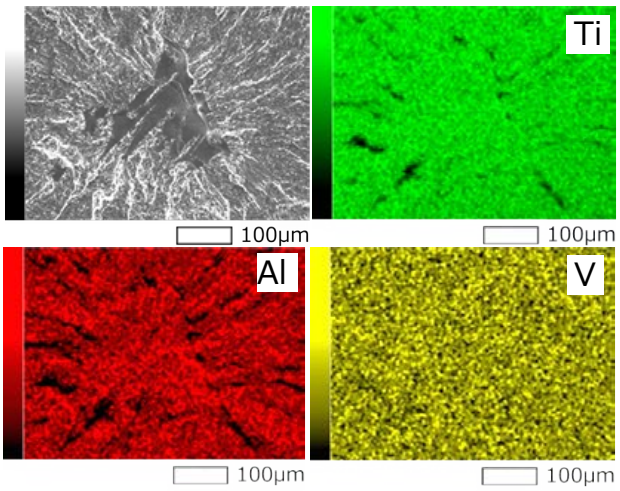


図 7　欠陥付近の Ti, Al, V 成分分布