

Application News

超音波疲労試験機 USF-2000A
マイクロフォーカスX線CTシステム inspeXio™ SMX™-225CT FPD HR Plus
電子線マイクロアナライザ EPMA™-8050G

3Dプリンティングにより製造したチタン合金の疲労寿命に対するボイドの影響

Bressan Stefano 小谷 和範 小野 卓男

ユーザーベネフィット

- ◆ CT撮影により3Dプリンタで造形した部品のボイド（欠陥）を可視化できます。
- ◆ 超音波疲労試験機の利用により、疲労試験を短時間で実施できます。
- ◆ ボイドによる疲労寿命への影響を明らかにできます。

■はじめに

チタン合金Ti6Al4V（Ti64）は高い比強度、優れた耐腐食性、性能適合性といった特性を有し、人工関節や航空宇宙分野といった幅広い業界で使用されています。これらの分野で使われる部品の作製方法には様々な種類がありますが、近年、3Dプリンティング（積層造形方法：Additive Manufacturing）が注目されています。3Dプリンティングは従来の製作方法と比較して、設計の自由度が高く、製作時間が短いなどのメリットがあります。また、3Dプリンティングには様々な造形方式があり、主にPBF方式（粉末床熔融結合方式、Powder Bed Fusion）が使用されています。電子ビームを利用したPBF方式のイメージを図1に示します。

3Dプリンティングにより造形した製品は、機械加工により作製した製品と比較するとボイドが多い傾向があります。そのため、製品の信頼性を確保するには、ボイドの特徴（分布・寸法・位置など）と疲労強度との相関を調査することが重要となります。

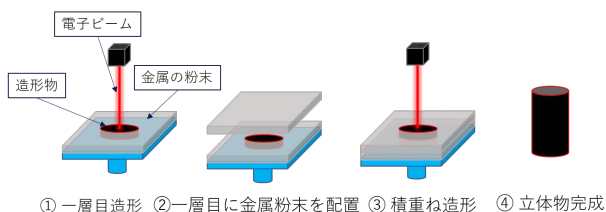


図1 積層造形のイメージ（PBF）

本稿では、電子ビームを利用したPBF方式で造形したTi64の試験片について、3種類の装置を利用した事例を紹介します。最初にX線CTシステムを使用して、試験片のボイドの分布と寸法を調査し、次に超音波疲労試験機を利用して疲労強度を測定し、最後に電子線マイクロアナライザEPMAを利用して破面の観察を行いました。疲労き裂の起点となるボイドを特定し、ボイド位置と疲労強度との相関を得ました。

■試験片

図2に試験片の寸法を示します。電子ビームPBFにて直径10 mmの円柱を造形（図の右側から左方向に向かって積層）し、その後で機械加工を行い、超音波疲労試験機に適したサーキュラーテーパ形の試験片としています。この形状の試験片を6本作製して、以後の測定を実施しました。

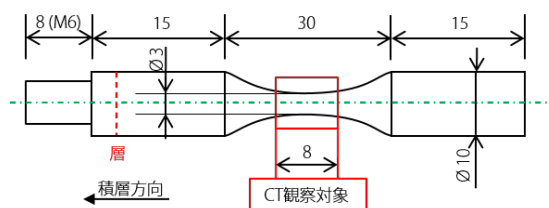


図2 試験片の寸法 (単位はmm)

■CT撮影結果

疲労試験で破断が予想される中央のくびれた部分を観察するため、試験片中央±4 mm（図2の赤枠部）に対してCT撮影を行いました。本撮影では、対象物の三次元構造を非破壊で可視化できるX線CTシステムinspeXio SMX-225CT FPD HR Plus（図3）を使用しました。また、ボイドの寸法と分布を調べるため、画像解析処理ソフトVGSTUDIO MAXを用いました。

6本の試験片に対する観察結果の一例として、図4にボイドの分布を示します。ボイドのサイズは定量的に評価することができ、左側のカラーバーの通り、ボイドの体積によって色分けされます。観察されたボイドの最大体積は約 $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ であり、他の試験片についても同様のボイド分布であったことから、再現性良く造形されていることを確認できました。図5はボイド部を拡大した断面画像です。ボイドの形状は主に球状でしたが、細長形状でき裂の様なボイド（Crack-Like Defect）もありました。また、ボイドは内部だけでなく、表面にも分布していることが分かります。



図3 inspeXio™ SMX™-225CT FPD HR Plus



図4 試験片①のポイド分布

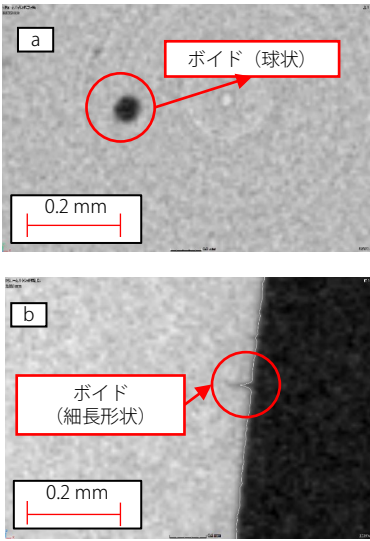


図5 ポイドの断面画像
(a) 球状のポイド (b) 細長形状のポイド

■ 疲労試験結果

疲労試験には、超音波疲労試験機USF-2000A²⁾ (図6) を利用しました。109 回の繰り返し負荷を加えるには、一般的な疲労試験機 (10 Hz) では3年程度かかります。しかし、この装置は20 kHzでの負荷が可能であるため、わずか14時間に短縮することができます。試験の様子を図7に示します。試験片は20 kHzの周波数で振動するホーンに取り付けられ、周りには試験片の温度を測定する放射温度計と、試験片を冷却するエアクーラーが配置されています。高周波の振動では試験片が昇温し、熱の影響を受けるリスクがあります。「金属材料の超音波疲労試験方法」WES 1112:2022規格には、試験片の表面温度を30℃以下とすることが記載されています。エアクーラーで試験片の中央を空冷するとともに、測定温度以下となるような負荷条件としています。

表1に示すように、6本の試験片について2種類の応力で疲労試験を実施しました。それぞれの試験片が破断したサイクル数を表1と図8に示します。この図より、破断繰り返し数は二つの領域に分れるようなグラフとなりました。試験片①・③・⑥は105~106 (高サイクル疲労) で、試験片②・④・⑤は108~109の繰り返し数 (超高サイクル疲労) で破断しており、破断繰り返し数が応力に依存しない結果となっています。光学顕微鏡で撮影した破面の写真の一例を図9に示します。



図6 超音波疲労試験機 USF-2000A

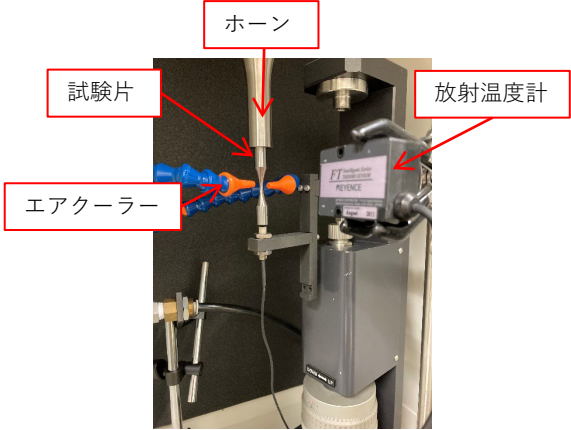


図7 疲労試験の様子

表1 試験結果

試験片	応力 MPa	サイクル数 N
-	-	-
①	350	6.42x10 ⁵
②	350	4.50x10 ⁸
③	350	6.65x10 ⁵
④	300	1.19x10 ⁸
⑤	300	3.56x10 ⁹
⑥	300	3.50x10 ⁵

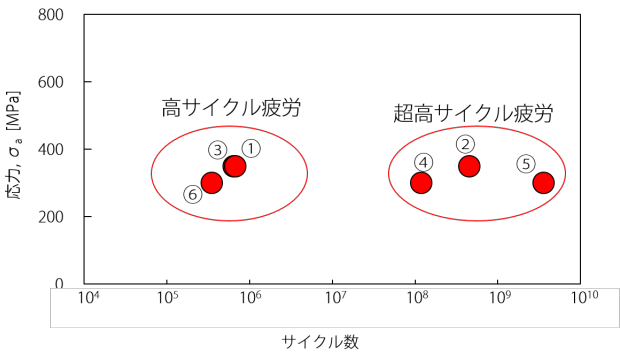


図8 応力と破断のサイクル数の関係

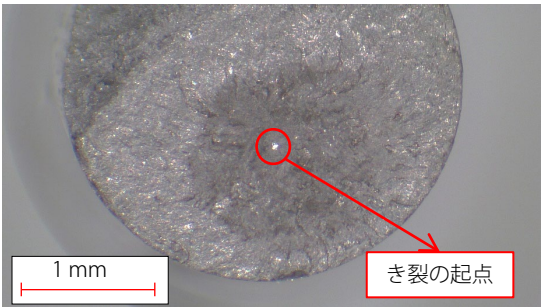


図9 破面の写真 (試験片②)

■ き裂の起点の詳細観察

き裂の起点を精密に特定するために、破面画像と断面画像を比較しました。破面観察には、破面の形状を明瞭に観察できる電子線マイクロアナライザEPMA-8050G（図10）を用いています。

図11は、高サイクル領域で破断した①と⑥の試験片の画像です。左側のa部では試験片中央部分の図にき裂の起点となったボイドを赤い点で示しています。中央のb部ではEPMAで観察したき裂の起点を拡大図とともに示しています。右側のc部にはき裂の起点となったボイドを断面画像で示しています。いずれの試験片とも、き裂の起点は試験片の表面のボイドであったことがわかりました。図12では、超高サイクル領域で破断した④と②の試験片について、図11と同様に示しています。いずれの試験片とも、き裂の起点は試験片の表面ではなく、試験片内部のボイドであったことがわかりました。

以上のことから、ボイドの位置が疲労寿命に大きな影響を与えることがわかりました³⁾。



図10 電子線マイクロアナライザ EPMA™-8050G

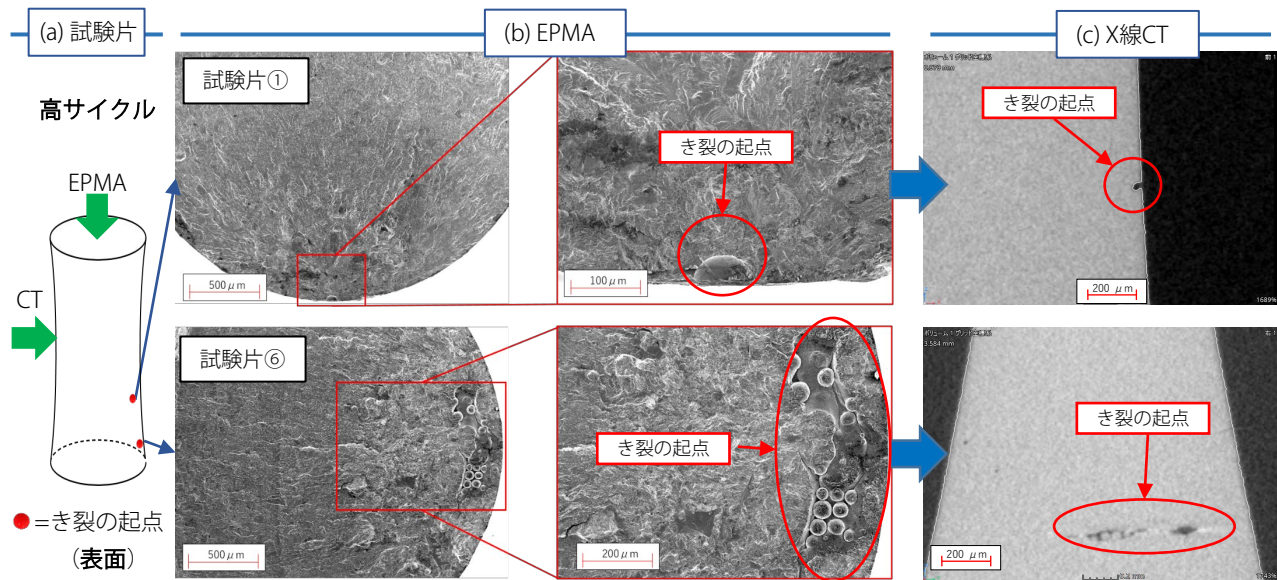


図11 高サイクル領域（ $10^5 \sim 10^6$ サイクル数）で破断した試験片のEPMAとCT撮影の結果（試験片①、⑥）
(a) 試験片 X線CTとEPMAの撮影方向及びき裂の起点の位置 (b) EPMA き裂の起点の写真 (c) き裂の起点の断面画像

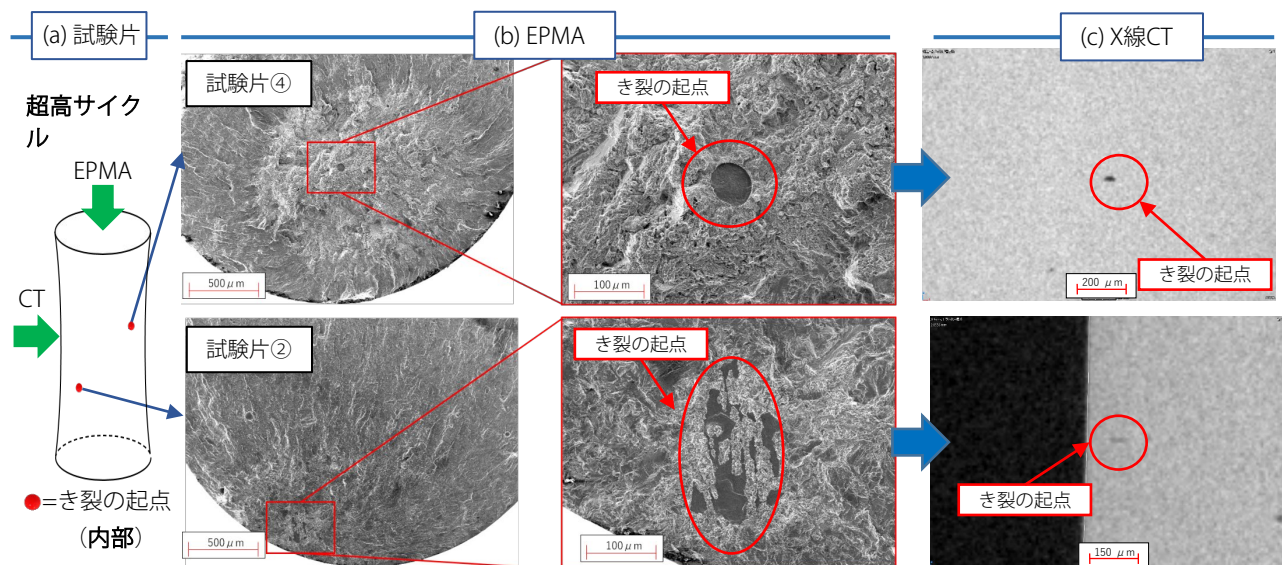


図12 超高サイクル領域（ $10^8 \sim 10^9$ サイクル数）で破断した試験片のEPMAとCT撮影の代表的な結果（試験片②、④）
(a) 試験片 X線CTとEPMAの撮影方向及びき裂の起点の位置 (b) EPMA き裂の起点の写真 (c) き裂の起点の断面画像

■まとめ

今回、積層造形方法で造形したチタン合金Ti6Al4VをCT撮影・疲労試験・破面観察を行い、ボイドの位置（表面・内部）が疲労寿命に大きな影響を及ぼすことがわかりました。今回はボイド位置の影響について考察しましたが、さらなる測定を行えば、ボイドの寸法や形状などによる疲労寿命の調査も可能です。このように本システムは、積層造形方法で作られた製品の信頼性確保の研究に活用できます。

参考文献

- 1) P. Li、D.H. Warner、A. Fatemi、N. Phan、Int J Fatigue、85、2016、130-143.
- 2) アプリケーションニュース No.i258
- 3) J. Günther、D. Krewerth、T. Lippmann、S. Leuders、T. Tröster、A. Weidner、H. Biermann、T. Niendorf、Int J Fatigue、94、Part 2、2017、236-245.

inspeXio、SMXおよびEPMAは株式会社島津製作所の日本およびその他の国における商標です。

株式会社 島津製作所 分析計測事業部
<https://www.an.shimadzu.co.jp/>

01-00515-JP 初版発行：2023年 3月

島津コールセンター ☎ 0120-131691

本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。
本文中に記載されている会社名および製品名は、各社の商標および登録商標です。
本文中では「TM」、「®」を明記していない場合があります。

＞ アンケート

関連製品 一部の製品は新しいモデルにアップデートされている場合があります。



関連分野

＞ 石油・化学工業

＞ ゴム・石油・化学工
業

＞ プラスチック・石油・
化学工業

＞ フィルム・石油・化
学工業

＞ 塗料・インキ・石油・
化学工業

＞ 繊維-石油・化学工業

＞ 自動車

＞ 価格お問い合わせ

＞ 製品お問い合わせ

＞ 技術お問い合わせ

＞ その他お問い合わせ