

造形姿勢が異なる3D積層造形による純チタン歯科補綴 クラスプのマイクロCTイメージベース有限要素解析

Micro-CT Image-based Finite Element Analysis of Additively Manufactured Pure Titanium Prosthetic Clasps with Different Building Orientations

川本大智¹⁾, 菅野幹也¹⁾, 高野直樹²⁾, 小高研人³⁾, 松永智³⁾

Taichi Kawamoto, Mikiya Sugano, Naoki Takano, Kento Odaka and Satoru Matsunaga

1) 慶應義塾大学大学院 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

2) 慶應義塾大学 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

3) 東京歯科大学 (〒101-0061 東京都千代田区神田三崎町2-9-18)

The additive manufacturing of pure titanium prosthetic clasps for partial denture is studied for their design and quality assurance. Especially, the authors have focused on the prediction of fatigue life under cyclic loading before manufacturing with the help of finite element method (FEM). The CAD model is used for this analysis, but this paper compared the numerical results between CAD based analysis and micro-CT image-based analyses of additively manufactured clasps with different building orientations. The moment of inertia of area was calculated to investigate the geometrical accuracy of the manufactured clasps and was also referred in the discussion of the predicted fatigue life. The obtained results could support the authors' previously proposed method of fatigue life prediction.

Key Words : Additive Manufacturing, Clasps, Fatigue Life Prediction, Micro-CT Image-based Analysis

1. 緒言

クラスプは自然歯を掴むパーシャルデンチャーの部品であり、患者の歯に合わせてティラーメイドする必要があり、コバルトクロム合金を用いた鋳造品が主流である。著者ら^{[1], [2]}は3D積層造形への置換を目指し、純チタン(CPTi)とチタン合金(Ti-6Al-4V, Ti64)を用いた研究を行ってきた。具体的に、品質保証のため疲労寿命のばらつきを考慮した事前予測法を開発し、独自の疲労試験機を用いて予測に必要なパラメータの同定や検証を行った。本研究では、CADデータに基づく事前予測手法の有用性について考察するため、造形品のマイクロCTイメージベースFEM解析を行い、造形姿勢による影響についても検討した。

2. 研究の流れ

Fig.1の赤枠で示した通り、CADデータから製品を3D積層造形する前に、FEM解析により求めた応力、ひずみを用いて疲労寿命予測を行うことで品質保証をすることができる^{[1], [2]}。しかし、3D積層造形は幾何的精度の低さが懸念されており、CADデータに基づくFEM解析によって疲労寿命予測をする手順の妥当性を示す必要がある。そこで、Fig.1の左側の流れの通り、造形品をマイクロCT撮像(分解能19.7 μm)することによって得た3Dデータに基づくFEM解析結果と、CADデータに基づくFEM解析結果を比較する。画像処理と立体再構築にはSimplewareを用いた。さらに、これと同じ手順で、造形姿勢が異なる造形品の幾何的精度と疲労寿命の調査を行う。

疲労寿命予測法はFig.2(a), (b)に示すように疲労試験の

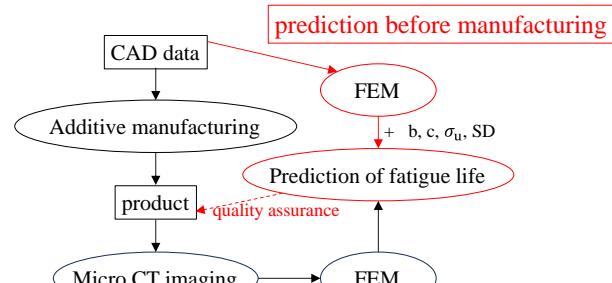
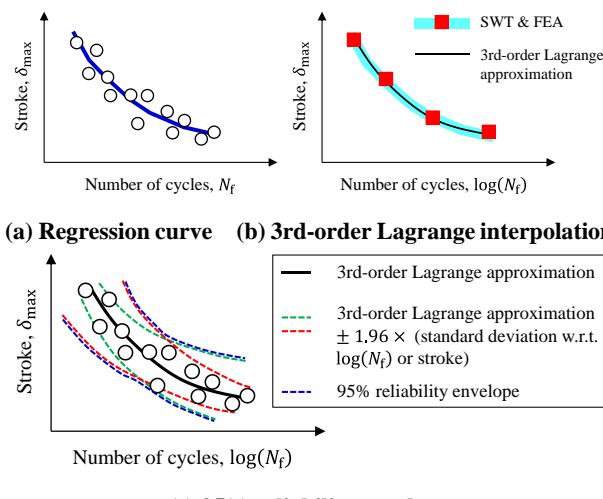


Fig.1 Flowchart of this study



(c) 95% reliability envelope

Fig.2 Prediction method of fatigue life

データ点の回帰曲線をSmith-Watson-Topper (SWT)法とFEM解析により求めた後、3次のラグランジュ曲線で近似

し、横軸と縦軸のそれぞれの標準偏差を用いて95%信頼区間を描き、包絡線によりばらつきを考慮した疲労寿命予測を行う手法である^[2]。

Fig.3の疲労試験片を純チタンとチタン合金で造形した場合の疲労寿命予測および検定の結果を**Fig.4**に示す。文献^[1]では、材料間の比較の際にばらつきを考慮していなかったが、**Fig.4**より、純チタンはチタン合金よりも統計的にも有意に疲労寿命が長いことが新たに示されたため、本研究では純チタンを対象とした。

3. 造形前にCADデータに基づくFEM解析により疲労寿命予測することの妥当性の評価

Fig.5左図は、**Fig.3**の造形品のマイクロCT撮像により得たSTLデータである。図中の拘束条件と文献^{[1], [2]}の疲労試験と同じ負荷条件で行ったFEM解析により得た主応力図を**Fig.5右**に示す。負荷を与えた片側のアーム部で観察された応力の最大値を用いて予測した疲労寿命と95%信頼区間を、**Fig.6**にCADデータに基づく結果とともに示す。赤丸は文献^[1]に示した実験結果であり、それ以外は本研究で取得したものである。1日3回の着脱で10年間保証するための疲労寿命 10^4 回付近では、青実線が黒破線の範囲内であること、黒実線と青実線が概ね一致していることより、造形前の予測（黒線）は造形品の寿命をよく表していると判断できる。よって、CADデータに基づくFEM解析によって疲労寿命予測をする手順の妥当性が示された。

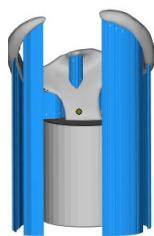


Fig.3 Building orientation of specimen for fatigue test

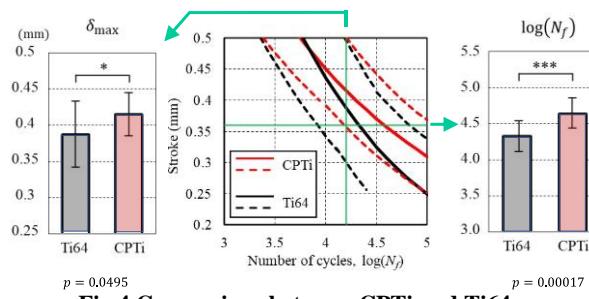


Fig.4 Comparison between CPTi and Ti64

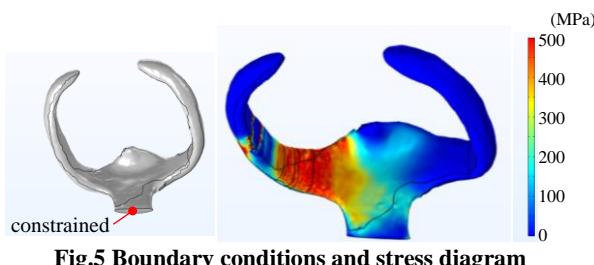


Fig.5 Boundary conditions and stress diagram

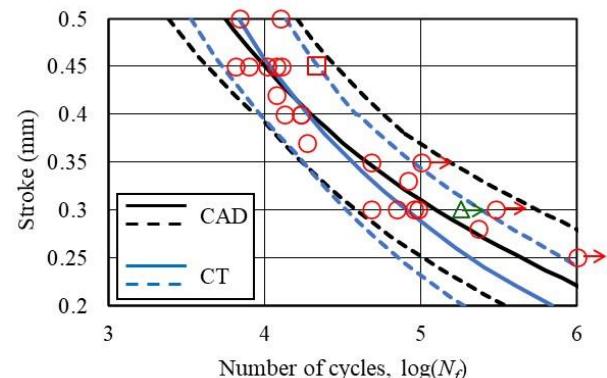


Fig.6 Fatigue life by CAD and CT images

4. 造形姿勢の影響の調査

造形姿勢は3D積層造形のプロセスパラメータの中で特に重要である。**Fig.3**の疲労試験片は円筒のチャック部の造形精度を優先して造形姿勢を決定したが、臨床で用いる円筒部がないクラスプに対しては、**Fig.7**に示した2通りの造形姿勢(orientation)が考えられた。それぞれO1,O2と呼称し、**Fig.3**すでに示した造形姿勢をO3と呼称する。図にはサポートもあわせて示す。

O1～O3の3通りの造形姿勢の造形品のマイクロCTイメージベースFEM解析と、CADデータに基づくFEM解析の比較においては、3章とは異なり、左右の両アームの全範囲に曲げモーメントが作用するよう、**Fig.8**の荷重条件で疲労寿命予測を行った。**Fig.8**は10節点四面体要素分割もあわせて示す。

Fig.9の疲労寿命予測結果においては、CADデータに基づく事前予測手法の場合（黒線）のみ95%信頼区間を示している。疲労寿命の平均値は、CADデータに基づく予測に最も近い結果となった造形品は、疲労試験片（O3：緑色）であった。臨床用の造形品（O1：赤色、O2：青色）はCADデータに基づく事前予測より長かったが、臨床上重要な 10^4 ～ 10^5 回の疲労寿命の範囲では、事前予測における95%信頼区間の内側にあった。

上記の原因は、CADデータと造形品の幾何的不一致によるものと考え、断面二次モーメントと断面積の計算を行った。STLデータを用いて、**Fig.10**に示すように左右のアームそれぞれを3つの小領域に分けた後、各小領域を円弧で近似し、小領域につき21断面を等間隔に定義した。断面二次モーメントの座標系を定義するため、**Fig.10**右図より重心Gを計算した後、**Fig.11**に示すように黄色点と青色点を定義し、**Fig.11**右図の座標系を定義した。**Fig.8**の荷重条件下で注目すべき断面二次モーメントは I_y である。

各断面について断面二次モーメントを計算すると、左アームの方が右アームよりも断面二次モーメントが小さい値を示すことが確認できた。断面積も同様であった。最大応力も左アームに発生し、左アームの疲労破壊が予測された。そこで、左アームの I_y を**Fig.12**に示し、最大応力の発生部位を図中に□で示した。破壊箇所の近傍で、CADデータとO3の断面二次モーメント I_y は近い値であり、

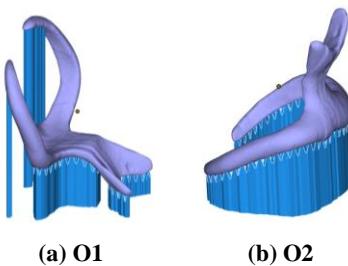


Fig.7 Building orientation for pure titanium clasps

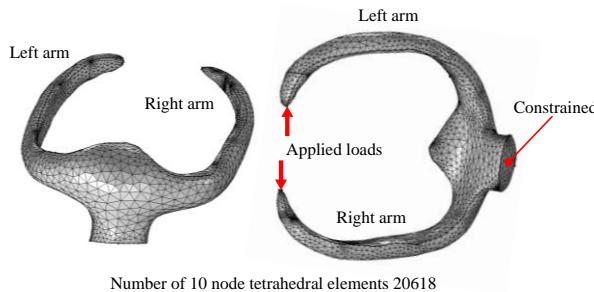


Fig.8 Finite element model and boundary conditions

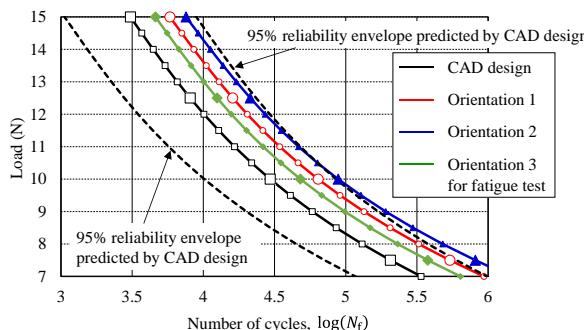


Fig.9 Predicted fatigue life for CAD data and specimens

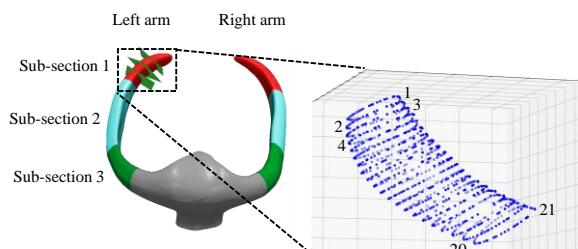


Fig.10 Definition of cross-sectional planes

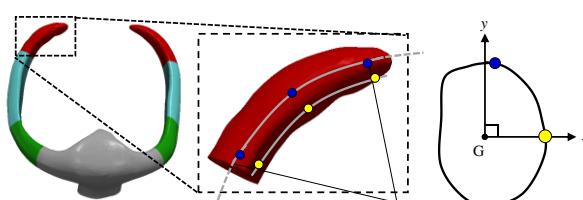
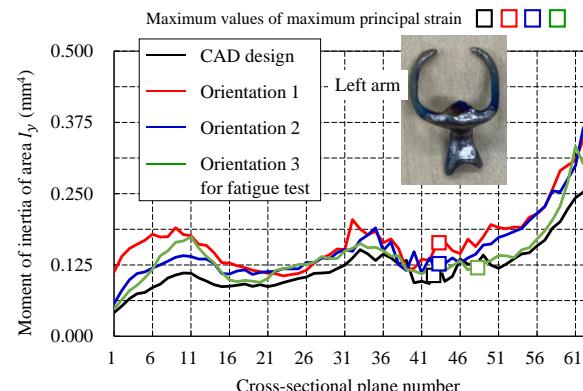


Fig.11 Definition of coordinate system

Fig.9の結果は合理的だといえる。一方、O1とO2については、疲労寿命と断面二次モーメントの密接な相関性は見

Fig.12 Moment of inertia of area I_y of left arm

出せなかった。

O1とO2の幾何的精度については、患者の歯への装着性 (fitness accuracy) という観点から、造形プロセス条件の改良または研磨などの事後処理が必要だといえる。造形ままの試験片のマイクロCTイメージベースFEM解析では疲労寿命は安全側の評価となったが、おおむね事前予測の95%信頼区間の範囲内であり、研磨などによる事後処理の結果は、事前予測の平均値または下限の範囲内におさまるものと推測され、事前予測法の有用性が示されたものと考える。

なお、Fig.12において、断面番号36以降では I_y の値が低く、この部位で疲労破壊も起きると予想された。クラップの設計段階において、断面二次モーメントを計算すれば、設計改善が可能になる。

5. 結言

歯科補綴クラップを対象とし、造形姿勢が異なる3通りの造形品のマイクロCT撮像により、ばらつきを考慮した疲労寿命ならびに断面二次モーメントを算出した。純チタンとチタン合金の疲労寿命を、ばらつきを含めて統計的に検定した結果、有意に疲労寿命が長かった純チタンを対象とした。

疲労試験に用いた試験片である造形姿勢O3については、疲労寿命の平均値および断面二次モーメントとともにCADデータに近い結果が得られた。また、臨床的に使用するクラップの場合にも、事前予測手法は有用であると考察された。

参考文献

- [1] Odaka, K. et al.: Comparison of the fatigue life of pure titanium and titanium alloy clasps manufactured by laser powder bed fusion and its prediction before manufacturing, *Journal of Prosthodontic Research*, 67, pp. 626-632, 2023.
- [2] Odaka, K. et al.: Fatigue life prediction considering variability for additively manufactured pure titanium clasps, *Journal of Prosthodontic Research*, Published online in advance, 2023.