

学位論文内容の要旨

愛知学院大学

論文提出者

若杉 俊通

論文題目

レーザー積層造形法で製作した大連結子の寸法精度

I. 緒言

パーシャルデンチャーにおける構成要素の一つである大連結子は、義歯の構成要素を連結することによって、義歯に加わる咬合力や離脱力を、適正に残存歯や義歯床に伝達、配分することで義歯の動揺を抑え、義歯の安定を保つという非常に重要な支持、把持の機構を備えた役割を果たしている。大連結子が義歯に加わる機能圧を効果的に適正配分するためには、変形やたわみがなく、適合精度が高いことが必要である。

そこで、CAD/CAM システムの中の AM (Additive Manufacturing) 方式であるレーザー積層造形法に着目した。レーザー積層造形法 (SLS : Selective Laser Sintering) は薄く敷き詰めた金属粉末層に、選択的にレーザー光を照射して金属粉末を熔融・焼結し、その焼結層上にさらに粉末を供給する。この工程を繰り返すことで金属の造形が直接可能な方法である。SLS は、その耐食性、溶解度などの物理的性質、耐疲労性、弾性率などの機械的性質についても評価されている。この技術を、パーシャルデンチャーのフレームワークに応用することが可能となれば、鋳造操作を省略できるようになり、常に一定の精度と適合性を備えた補綴装置が製作できるようになり、その恩恵は非常に大きい。しかしながら、SLS に関する報告はいくつか存在するが、いずれも金属床のフレームワークを試作するのみであり、製作した補綴装置に関して、詳細な検討はなされておらず、その造形精度はいまだ不明である。

そこで、本研究では SLS を用いて大連結子を製作し、その寸法精度について詳細な検討を行った。

II. 材料および方法

1. 試料の製作

1) 原型模型のスキャンデータの作成

原型模型製作用のゴム枠として、上顎両側遊離端欠損モデル (HI-549、ニッシン) を選択し、ゴム枠に超硬質石膏 (ニューフジロック、ジーシー) を注入して、原型模型を一つ製作した。製作した原型模型を非接触レーザー方式の三次元デジタルスキャナー (Dental Wings 3 series、Dental Wings、Canada) にてスキャンを行い、原型模型のスキャンデータを作成した。

2) 大連結子の設計

作成した原型模型のスキャンデータ上に歯科専用 CAD ソフト (DWOS、Dental Wings、Canada) を用いて、大連結子の設計を行い、三次元 CAD データを作成した。作成した大連結子は、パラタルバー、パラタルストラップの2種類とした。大連結子の寸法は、パラタルバーで厚さ 1.5 mm、幅 5.0 mm とし、パラタルストラップで厚さ 0.7 mm、幅は正中部で 15 mm、フィニッシュライン部で 20 mm とした。

3) 積層造形

作成した大連結子の三次元 CAD データから、レーザー積層造型機 (EOSINNT

M270、EOS、Germany) を用いて、試料を製作した。試料はパラタルバー、パラタルストラップそれぞれ 10 個製作した。また、そのうち 5 個を非熱処理用、5 個を熱処理用とした。実験材料は、レーザー積層造形法用 Co-Cr 合金粉末 (SP 2、EOS、Germany) を使用した。

4) 熱処理

造形後の試料は、ベースプレート上にサポートを介して固着している。熱処理は、各種試料について 5 個ずつ、ベースプレートに固着させたままファーンネスに入れて行った。熱処理の条件は、室温から 2 時間 30 分かけて 1,050 °C まで昇温し、1,050 °C に達したところで 1 時間係留し、その後、室温まで徐冷した。ベースプレートから試料を取り外し、サポートを除去した。熱処理後の酸化膜を除去するため、アルミナサンドブラスト処理 (平均粒子 50 μm 、空気圧力 2.0~2.5 気圧) にて酸化膜の除去を行った。

2. 寸法精度の評価

造形した試料を治具に常温重合レジンにて固定し、ストライプライト投影方式の三次元デジタルスキャナー (Ceramillmap 400、Amann Girrbach、Germany) にてスキャンを行い、造形した試料のスキャンデータを得た。原型模型のスキャンに用いたスキャナーは可動域が狭いため、複雑な形状を有するデンチャーフレームのスキャンは困難であった。したがって、寸法精度の測定には可動域の広いスキャナーを使用した。寸法精度の評価においては、三次元データ検査ソフトウェア (GOM Inspect、GOM、Germany) の

部分ベストフィット機能を用いて、選択した範囲において CAD データとスキャンデータとが最も一致するように重ね合わせを行い、CAD データとスキャンデータとの差異を測定した。

3. 統計解析

統計学的有意差の検定には、Student の t 検定を用いた。また、有意水準は 1 % に設定した。

III. 結果

1. パラタルバーにおける差異

パラタルバーにおける設計時の CAD データと、造形試料のスキャンデータを重ね合わせた時の差異を 0.2 mm 未満、0.2~0.4 mm、0.4 mm 以上の 3 つに区分けし、それらの面積比率を計算した結果を示す。非熱処理のパラタルバーの試料の差異の面積比率は、0.4 mm 以上が約 11 %、0.2~0.4 mm が約 29 %、0.2 mm 未満が約 60 %であった。一方、熱処理後のパラタルバーの試料では、0.4 mm 以上の差異、0.2~0.4 mm の範囲の差異の割合ともに約 1 %で、0.2 mm 未満の差異の割合が約 98 %であった。非熱処理の試料の面積比率と、熱処理後の試料の面積比率との間には、すべての差異区分において有意な差が認められた ($p < 0.01$)。

2. パラタルストラップにおける差異分布

パラタルストラップにおける設計時の CAD データと、造形試料のスキャ

ンデータを重ね合わせた時の差異を 0.2 mm 未満、0.2~0.4 mm、0.4 mm 以上の3つに区分けし、それらの面積比率を計算した結果を示す。

非熱処理のパラタルストラップの試料の差異の面積比率は、0.4 mm 以上が約 7 %、0.2~0.4 mm の範囲が約 37 %、0.2 mm 未満が約 56 %であった。一方、熱処理後のパラタルストラップの試料では、0.4 mm 以上が約 1 %、0.2~0.4 mm の範囲が約 13 %、0.2 mm 未満が約 86 %であった。非熱処理の試料の面積比率と、熱処理後の試料の面積比率との間には、すべての差異区分において有意な差が認められた ($p < 0.01$)。

IV. 考察

1. レーザー積層造形法 (SLS : Selective Laser Sintering) について

SLS 方式は、金属を直接造形できること、より複雑な形態が造形可能であることが最大の特徴である。この特徴を最大に生かすことができるのは、支台装置や大連結子などの複雑な形態を有するパーシャルデンチャーのフレームワークへの応用であると考えられる。

2. 評価方法について

CAD データとスキャンデータの重ね合わせを行うことにより、複雑な構造を有する大連結子の三次元的な寸法精度の評価が可能となった。しかし、本研究で使用したスキャナーの精度は $< 20 \mu\text{m}$ であるため、得られた差異の測定結果はスキャンにより生じる誤差を含んでいると考えられる。

3. 実験結果について

大連結子の適合精度（原型模型と大連結子との間隙量）は、0.2 mm 以内であれば臨床応用可能であるとの報告がある。本研究では0.2 mm 未満の差異を臨床応用可能な寸法精度であると規定した。実験結果より、非熱処理のパラタルバーの精度は、0.2 mm 以上の差異の面積比率が約 40 %であるため、造形した試料の寸法精度は不十分であると考えられる。しかし、熱処理を行った場合、0.2 mm 以上の差異が約 2 %と大幅に減少し、0.2 mm 未満の差異が約 98 %と増加した。従って、熱処理を行ったパラタルバーは臨床応用可能な寸法精度を有すると考えられる。

次に非熱処理のパラタルストラップの精度は、パラタルバーと同様に0.2 mm 以上の差異が約 44 %であるため、造形した試料の寸法精度は不十分であると考えられる。熱処理を行うことにより、0.2 mm 以上の差異が約 14 %まで減少したが、その寸法精度は改善の余地があると考えられる。

本研究では、パラタルバー、パラタルストラップともに SLS で製作された試料は低い寸法精度を示した。その原因として、積層造形時に金属粉末を局所的に高いエネルギーを用いて溶融しているために、試料内の熱勾配が大きくなることで内部応力が生じ、それが熱ひずみとして試料に変形を引き起こしていると考えられる。しかし、熱処理を行った試料は、大幅に寸法精度が改善していることが明らかとなった。熱処理を行った試料は、試料内で発生した内部応力に対して、加熱により応力緩和を促進すること

が可能となり、寸法精度の改善につながったものと考えられる。非熱処理の試料において、パラタルバーとパラタルストラップとの間に寸法精度の大きな差は認められなかった。一方で、熱処理を行った試料の寸法精度を比較した場合、パラタルストラップは、パラタルバーより寸法精度が低いことが明らかとなった。熱処理を行った試料間でのみ、寸法精度に差が生じた理由は、パラタルストラップは装置自体が大きく、サポートによる変形の抑制が不十分となり易いために、造形中に内部応力が一部解放し、熱処理前に変形が生じてしまったことが原因であると考えられる。その結果、熱処理による応力緩和の効果を十分に得られず、寸法精度の低下につながった可能性が示唆される。また、本研究で行った熱処理の条件では、温度や係留時間が不十分であったことも考えられる。したがって、今後、適切な造形方向および熱処理条件の設定、さらには、サポートによる支持の強化など、より詳細な検討が必要であると考えられる。

V. まとめ

レーザー積層造形法 (SLS : Selective Laser Sintering) にて製作した大連結子に対して、設計時の CAD データと造形試料のスキャンデータの重ね合わせを行うことで、寸法精度の評価を行った結果、以下の結論が得られた。

1. SLS を用いて大連結子を製作した場合、パラタルバー、パラタルスト

ラップともに 0.2 mm 未満の差異の割合が約 60 %であった。

2. SLS を用いて製作した大連結子に熱処理を行うことにより、パラタルバー、パラタルストラップともに 0.2 mm 未満の差異の割合が増加し、寸法精度が向上した。

以上の結果より、SLS を用いて製作した大連結子（パラタルバー、パラタルストラップ）に、熱処理を行うことで、寸法精度の改善が可能であることが明らかとなり、臨床応用への可能性が示唆された。