

学位論文内容の要旨

愛知学院大学

論文提出者

白石 浩一

論文題目

レーザー積層造形法を用いた支台装置製作法の開発

I. 緒 言

工業界で生まれた CAD/CAM の技術は、歯科業界においても永い歴史を有する鋳造法に置き換わる、新たな補綴装置の設計、製作システムとして注目され、国内外の多様な企業や大学などで活発な研究開発が行われている。

近年、CAD/CAM システムのオープンシステム化が進み、様々な設計ソフトも選択できる様になり、複雑な形態の補綴装置の設計も可能になった。このように設計の幅が広がったことにより、部分床義歯分野への応用も可能となった。

本論文は、CAD/CAM システムの内、レーザー積層造形法（以下、積層法）で製作された支台装置の機械的強度に加え、適合精度と維持力を検討することにより、新技術の本格的な臨床応用を目指すものである。

II. 機具・材料および方法

1. CAD/CAM システム

本研究の CAD/CAM システムは、スキャナには Dental Wings 3 series、CAD には DWOS と Work NC、CAM(加工機)にはレーザー積層造形装置である EOSINNT M270 を用いた。

2. 材 料

積層法では、専用のレーザー積層造形法用 Co-Cr 合金粉末を用いた。比較対象としては、金パラジウム銀合金（以下、金パラ）と、鋳造用 Co-Cr

合金 (以下、Co-Cr) を用いた。

3. 統計分析

Bonferroni の検定を用いて、多重比較を行った。

4. 実験項目

1) 熱処理の影響

積層法で製作した試料に対する熱処理の影響を、以下の4項目から検討した。実験試料の熱処理温度は、800°C~1,100°Cの範囲で、100°C刻みで設定し、熱処理時間はそれぞれ30分間ファーンネス内に係留後、急冷を行った。

(1) 相の同定と元素分析

測定には、電子線マイクロアナライザー (EPMA) と X線回折装置 (XRD) を用いた。

(2) 組織観察

測定には、金属顕微鏡を用いた。試料の処理として、90%メタノールと10%硫酸の混合溶液を用いて、室温 25°C、電圧 20V、通電時間 5秒の条件で電解研磨を行った。

(3) ビッカース硬さ試験

測定には、微小硬度計を用いた。試料数は各温度で5個とし、測定回数はそれぞれ5回とした。

(4) 寸法変化量の検討

積層法を用いて、エーカースクラスプを模したリング状試料の製作を行

った。試料の変形防止枠として、鉤尖部付近に固定枠を付与した。測定には、デジタルノギスを用い、試料数は各温度で10個とし、測定回数はそれぞれ5回とした。熱処理は固定枠を付与した状態で行い、寸法変化量は、固定枠の切断前後の寸法差から求めた。

2) 片持ち梁試験

積層法にて製作した支台装置の適切なアンダーカット量を模索するため、片持ち梁試験を行った。比較対象には、金パラ、Co-Crを用い、試料数は各10個とした。測定には、万能材料試験機を用い、荷重部位は試料の先端から1mm内方とし、実験条件はクロスヘッドスピード0.5mm / minとした。

3) 支台装置の適合精度

下顎第一大臼歯を想定した金属原型と片持ち梁試験の実験で求めた各金属のアンダーカット量を用いて、積層法と鋳造法で支台装置を製作した。鋳造法では、金パラの型ごと埋没法、パターンレジンを引き抜き法、ワックス引き抜き法、Co-Crの型ごと埋没法の、4法を対象とした。完成した各支台装置を作業用模型に復位させ、包埋切断法にて観察をした。適合精度は、作業用模型と支台装置との間隙量から評価した。測定部位は、レスト、ガイドプレーン、鉤腕部、鉤尖部の4ヶ所とした。測定点は、支台装置と作業用模型が接触すべき部分を等間隔に5ヶ所選択し、それぞれ5回測定した。

4) 維持力測定

実験試料は、積層法で製作した支台装置と金パラ・Co-Cr の型ごと埋没法で製作した支台装置とした。

支台装置の維持力測定には、小型卓上試験機を用い、測定条件はクロスヘッドスピード 10mm/min とし、試料数は各 5 個、測定回数はそれぞれ 5 回とした。

Ⅲ. 結果

1. 熱処理の影響

1) 相の同定と元素分析

EPMA の結果から、積層法用 Co-Cr 合金に熱処理を行うと、Cr が表層に向かって移動しており、同様の傾向は、0 でも確認された。

X 線回折の結果より、800℃で ϵ 相が認められた。900℃では、 $\alpha + \epsilon$ 相の状態であった。また、1,000℃以上では α 相のみの状態となった。

2) 組織観察

熱処理なしの試料では、積層造形する時にできる融解痕状の構造が認められた。800℃、900℃においてもこの構造は認められたが、1,000℃以降の温度では認められなかった。

3) ビッカース硬さ試験

熱処理前では 413.4 ± 11.2 HV であり、800℃では 446.8 ± 20.2 HV、900℃では 521.7 ± 11.4 HV と増加傾向を示した。その後、1,000℃から 438.2 ± 5.7 HV

と減少し、1,100°Cでは 434.0 ± 9.4 HVと1,000°Cのものに近似していた。また、900°Cは1,000°Cと1,100°Cに対して、有意差を認めた ($p < 0.01$)。

4) 寸法変化量の検討

鉤尖間距離は、熱処理なしでは -148.6 ± 25.0 μm 、900°Cでは -83.4 ± 12.1 μm 、1,000°Cでは -31.0 ± 9.3 μm 、1,100°Cでは -29.6 ± 6.6 μm と、熱処理温度の上昇に伴い、寸法変化量が減少する傾向を示した。また、熱処理なしは900°Cと1,000°Cおよび1,100°Cとで、それぞれ有意差を認め、900°C処理では1,000°Cと1,100°Cとの間で、いずれも有意差を認めた ($p < 0.01$)。

鉤腕間距離では、熱処理なしでは -42.4 ± 15.3 μm 、900°Cでは -33.2 ± 9.4 μm 、1,000°Cでは -17.4 ± 7.4 μm 、1,100°Cでは -18.9 ± 5.2 μm と、鉤尖間距離と同様の傾向を示した。

2. 片持ち梁試験

金パラを0.25mm変位させる荷重量は、194gfであった。この荷重量を他の試料に加えた時、変位量は積層法の熱処理ありでは0.14mm、熱処理なしでは0.16mmであった。またCo-Crでは0.12mmであった。

3. 支台装置の適合精度

レスト、ガイドプレーン、鉤尖部の適合性に関して、積層法は最も適合精度の良好な金パラの型ごと埋没法とも有意差は認められなかった。鉤腕部では、積層法はワックス引き抜き法以外の方法と有意差を認めた ($p < 0.01$)。

4. 維持力測定

維持力の測定結果では、積層法で 233.2 ± 14.5 gf、金パラの型ごと埋没法で 259.1 ± 53.9 gf、Co-Cr の型ごと埋没法で 217.6 ± 48.8 gf であり、これら三者間に有意差は認められなかった。

IV. 考 察

1. 熱処理の影響

1) 相の同定と元素分析

Co-Cr 合金の α 相は面心立方格子 (fcc) であり、加工性に優れるが、 ϵ 相は最密六方格子 (hcp) であり、硬く脆い性質がある。1,000°C以上の熱処理は、 ϵ 相が析出しない合金相であり、力学的に望ましいと言える。

Cr は合金の不動態化を助長し、不動態皮膜により耐食性を向上させる特徴がある。800°C以上の熱処理により、表層に Cr_2O_3 の化合物ができたため、不動態皮膜が形成され、耐食性が向上したと考えられる。

2) 組織観察

積層法は、積層方向により異方向性があり、層状に造形をするため、組織観察において融解痕状の構造 (金属同士の接合面) が観察され、この部分は機械的性質に問題があると言われている。1,000°C以上の熱処理で、融解痕状の構造が認められなかったため、レーザーの融解方向による機械的強度の異方性を解決できる可能性が示唆された。

3) ビッカース硬さ試験

積層法は、局部的に金属粉末を融解していくため、凝固収縮と残留応力が生じ、造形後に再結晶が必要となる。900℃では、熱処理によって母相である α 相に第2相である ϵ 相が析出し、ビッカース硬さが最大値を示した。一方、1,000℃以上の温度では、 α 相単一の安定相となり、硬さの減少が生じた。したがって、短時間で十分に再結晶させ、前述した硬く脆い性質の ϵ 相が析出しない熱処理温度は、1,000℃以上が望ましいと考えられる。

4) 寸法変化量の検討

積層法で製作した試料は、熱処理の有無に関わらず、全ての試料において固定枠切断後の鉤尖間・鉤腕間距離のいずれも小さくなった。すなわち、造形時の残留応力が内方に向かって働くことが判明した。また、その影響は鉤尖において顕著であった。熱処理温度900℃でも残留応力の解放は若干認められたが、1,000℃以上のものよりは寸法変化量が大きかったため、十分ではないことが分かった。また、1,000℃と1,100℃では寸法変化量に差がないが、過度の熱処理は金属の物理的性質を低下させる恐れがあるため、1,000℃が最も適していると考えられる。

2. 片持ち梁試験

一般的に、金パラを用いたエーカースクラスプの鉤尖部でのアンダーカット量は0.25mmである。したがって、片持ち梁試験で金パラを0.25mm変位させる荷重量を他の試料に加えた時の変位量が、各金属に最適なアンダ

一カット量と仮定できる。

ビッカース硬さ試験と片持ち梁試験の結果から、積層法用 Co-Cr 合金は、熱処理を行うと、硬さの増加に伴い、たわみにくくなっていた。したがって、熱処理温度が 900°C のものは、1,000°C や 1,100°C より著しくたわみにくい材料となる可能性があり、支台装置として使用することは困難になると考えられる。すなわち、積層法用 Co-Cr 合金を支台装置として使用する際のアンダーカット量は 0.14mm が妥当であり、1,000°C の熱処理も必須である。

3. 支台装置の適合精度

積層法を用いて製作した支台装置の適合精度は、レスト、ガイドプレーン、鉤尖部においては、鋳造法と比較しても同程度であり、臨床的にも問題がないレベルと考えられる。鉤腕部においては、150 μm 程度の間隙が観察され、鉤尖部がレストやガイドプレーンの方向へ金属収縮を起こしたものと推察される。

4. 維持力測定

積層法と鋳造法で製作した支台装置の維持力は、いずれも 250gf 程度であり、過去の文献と比較しても同程度の維持力を示した。

V. まとめ

積層法を用いて製作した支台装置の臨床応用の可能性を検討するために、

各種基礎実験を行った結果、以下の結論が得られた。

1. 内部応力を解放させる最適な熱処理温度は 1,000°C であり、熱処理により寸法変化量が減少することが確認された。
2. 熱処理を行うことで、融解痕状の構造が消失し、従来から問題視されている機械的強度の異方性を改善できる可能性が示唆された。
3. 積層法を用いて製作した支台装置（エーカースクラスプ）の適正なアンダーカット量は、0.14 mm であった。
4. 積層法を用いた支台装置は、レスト、ガイドプレーン、鉤尖部において、鋳造法と同程度の適合精度を示した。
5. 積層法を用いた支台装置は、鋳造法と同程度の維持力を示した。

以上の結果から、レーザー積層造形法を用いて製作された支台装置は、臨床的に必要な適合精度と維持力を有し、今後の臨床応用への可能性が示された。