

バイオマテリアルの長寿命化に向けた、積層造形プロセスにおける 新たなサポート設計原則の確立

東京医科歯科大学 部分床義歯補綴学分野
医員 高市 祐佳
(平成 28 年度 奨励研究助成 AF-2016231)

キーワード：積層造形、サポート設計、Co-Cr 合金

1. 研究の目的と背景

レーザー積層造形 (Selective Laser Melting; SLM) 法は、高出力のレーザーを粉末材料に照射し熔融凝固させた薄い層を積み重ねることで 3 次元的な製品を製造する技術である [1]。本技術により複雑な形状でも半自動的に直接製造が可能となるため、低コスト化や作業の簡略化が図れることが知られている。さらに現在歯科界で普及している切削加工 (subtractive manufacturing) では造形が困難な 3 次元的に複雑な形状を有する補綴装置も造形が可能となるため、患者個々に適したオーダーメイド化が必要とされるインプラントや歯科補綴装置への応用が期待されている [1, 2]。

しかしながら、SLM 法による造形物の疲労強度は異方性の影響が強く現れ、歯科鑄造法より顕著な強度の低下を示す造形方向が認められることが問題となっている。原因として、SLM 法は金属粉末をレーザーで熔融しながら繰り返し積層していく技術のため、造形過程での急激な熱勾配に起因した残留応力が発生することや、熱応力による内部き裂の影響が指摘されている [2, 3] が、それに対する対応策は未だ解明されていない。

SLM 法では、設計原則として下に支えとなる構造がない上開きの形状を造形する際には、その角度が 45° を下回る部分にはサポートの付与が必要である [3]。このサポート構造は造形体の形状維持を目的として設計されているが、同時にその上部構造の造形時に発生した熱を拡散し、残留応力の緩和に寄与する役目もある [3]。つまり設計原則でサポート付与の必要がないとされる 45° 以上の角度の部分にもサポート構造を付与することで残留応力の制御が図れ、疲労強度の向上が期待出来るが、サポート構造は加工時の煩雑さを招く欠点もあることから、これまでの研究ではサポートレスでの造形に焦点が置かれてきた。しかし、バイオマテリアルの疲労による破断は時として生体に重篤な障害を与えるため、サポート構造の違いが疲労強度に与える影響を明らかにした上での新たな設計原則の立案が必要である [4]。

そこで本研究では造形体の支えとなるサポート構造を利用して残留ひずみ発生を抑制を図り、造形体の疲労強度向上を試みることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 試料作製

SLM 法を用いて、歯科補綴装置の一つであるメタルフレームワークのクラスプ形状を想定した試料を製作した (図 1) [4, 5]。試料はサポート部の設計の違いにより 2 種類 (サポートなし; サポートあり・ブロック構造) とした (各 $n=7$) (図 2)。造形角度は、一般にサポートなしでも造形可能とされる 45° 以上に設定した。

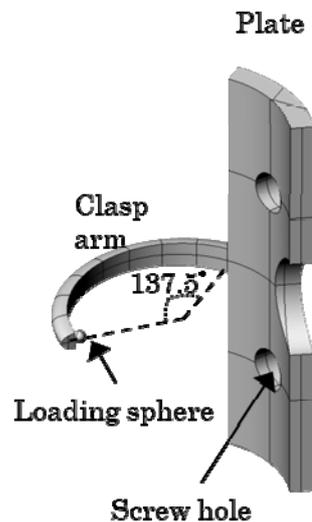


図 1. クラスプ試料の設計 (クラスプアーム、プレート、荷重を負荷するための球をアーム部先端に取り付けている)

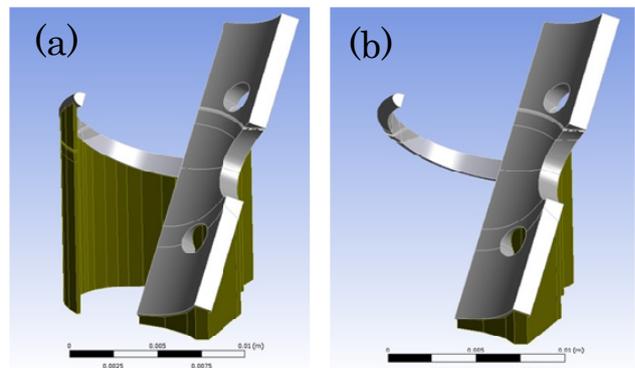


図 2. クラスプ試料サポート部の設計 (a): サポートあり (b): サポートなし

積層造形装置はファイバーレーザーを備えた EOSINT M280 を使用し、合金粉末は EOSINT 社製の MP1 を用いた。合金粉末の組成を表 1 に示す。製作条件は標準のパラメーターとし、窒素雰囲気下で造形を行った。

表 1. CoCrMo 合金粉末の化学的組成

Material composition
Co: 60 – 64 wt-%
Cr: 25 – 30 wt-%
Mo: 5 – 7 wt-%
W: 4 – 6 wt-%
Ce : 0.3 – 0.7 wt-%
Si: max. 1.6 wt-%
Mn: max. 1.5 wt-%
Fe: max. 0.7 wt-%
C: max. 0.10 wt-%
Ni: max. 0.10 wt-%

2・2 組織観察

各条件から試料をランダムに選択し、クラスプアーム部を切断研磨後、結晶方位解析装置付走査型電子顕微鏡 (SEM-EBSD; TexSEM Laboratories) を用い、加速電圧 15 kV、測定範囲 500 μ m \times 500 μ m、ステップ間隔 1 μ m として観察を行った。得られた EBSD 画像に対して (株) ソリューションズ社製の OIMver7.3b を用い、微小領域の結晶粒径や結晶粒内の歪分析 (Kernel Average Misorientation; KAM) を行った (n= 1)。

2・3 疲労試験

サポートありとなしの試料を、それぞれ表面粗さを OLS4000 (OLYMPUS) にて測定した。その後、疲労試験機 250N (Shimadzu) にて疲労試験に供し、クラスプ先端部に 5 Hz で 0.5 mm の周期的変形を 10⁶ サイクル与えた (n= 6)。続いて荷重・変形曲線を観測し、クラスプの変形に要した荷重量、破断に要した回数、及び永久変形量を求めた。試料破断後、走査型電子顕微鏡 ((SEM; S-3400NX、 日立) にて破断面の観察を行った。

2・4 有限要素解析

また、試験片と同一形状の解析用モデルを構築し、サポート形状の違いによる試料の温度勾配の差を三次元有限要素法 (ANSYS 11.0 FEM) で解析した。製作したモデルを図 3 に示す。要素数 58207、節点数 223651 とした。Gaussian heat flux source を造形時の熱源の動きをシミュレーションするのに用いた。

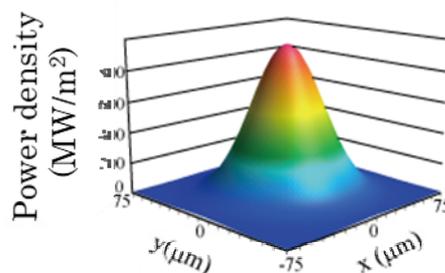
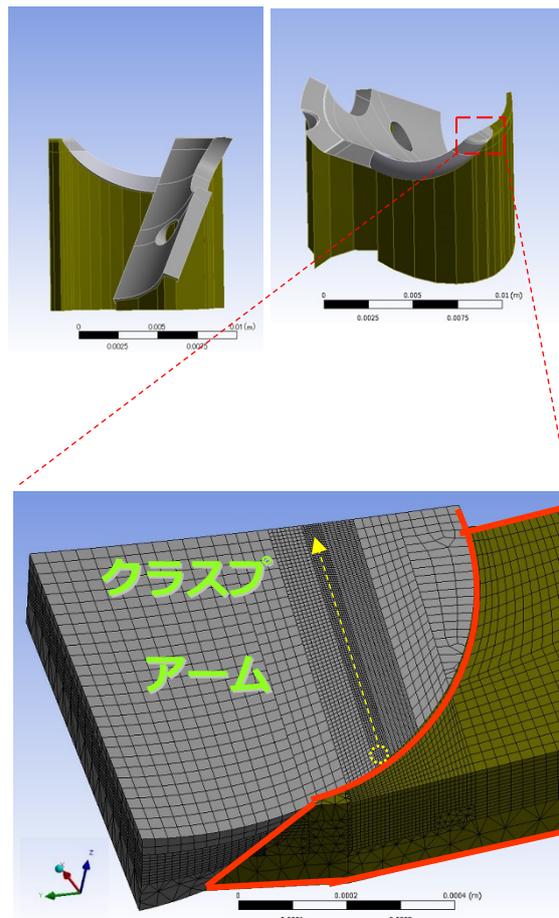


図 3. 三次元有限要素法により構築したモデル

3. 研究成果

サポートありおよびサポートなしの試料間で表面粗さにおける有意差は認められなかったが、サポートを付与した試料はサポートのない試料と比較して、2 倍以上の疲労強度を示した。疲労試験結果と表面粗さ結果をそれぞれ図 4 および表 2 に示す。

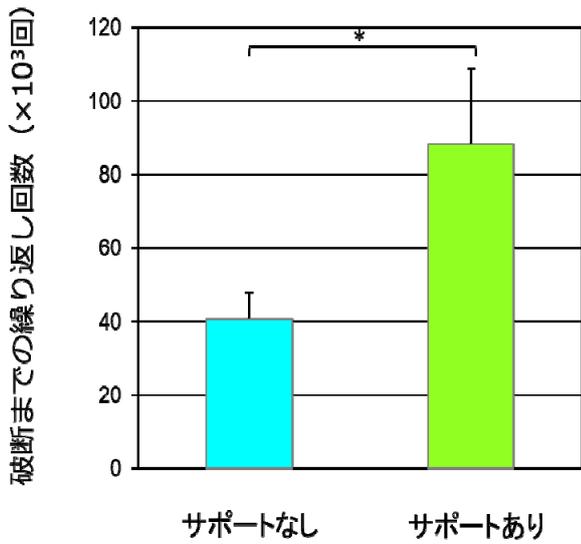


図4. 疲労試験結果 (* $P < 0.01$)

表2. 表面粗さ測定結果

	Ra (μm)
サポートあり	9.76 (1.2)
サポートなし	9.89 (1.1)

続いて図5に疲労試験後の試料破断面のSEM像を示す。サポートを付与していない試料では、大きなクラックが荷重方向に対し平行に観察された。一方サポートを付与した試料では、荷重方向に対し抵抗するように垂直に進んでいる様子が観察された。

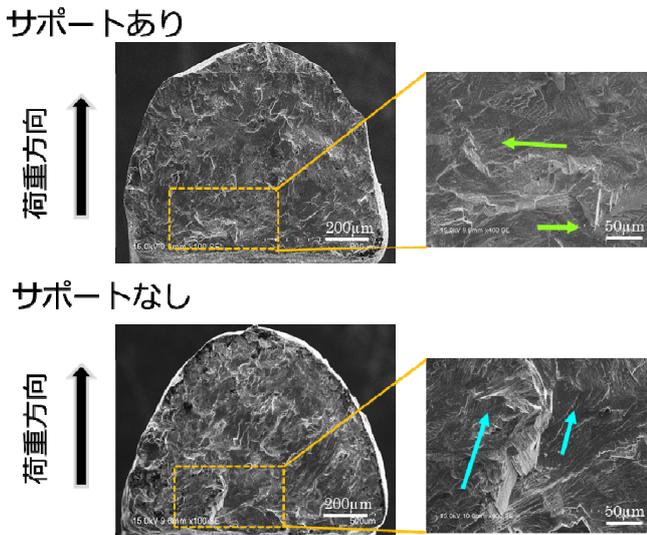


図5. 疲労試験後の破断面のSEM像

続いて図6および7に試料切断面のSEM-EBSD法による解析結果を示す。結晶粒径の分布傾向からは、サポートを付与した試料ではサポートのない試料より結晶粒径が小さくなることが分かった。平均粒径はサポートを付与した試料で51.9μm、付与していない試料で63.3μmであった。結晶方位においてはいずれの試料も配向傾向は認められなかったが、局所方位差に関してはサポートを付与した試料の方が小さくなった。

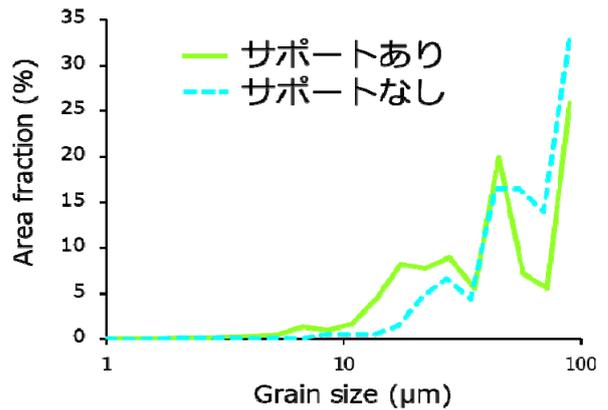


図6. 結晶粒径の分布

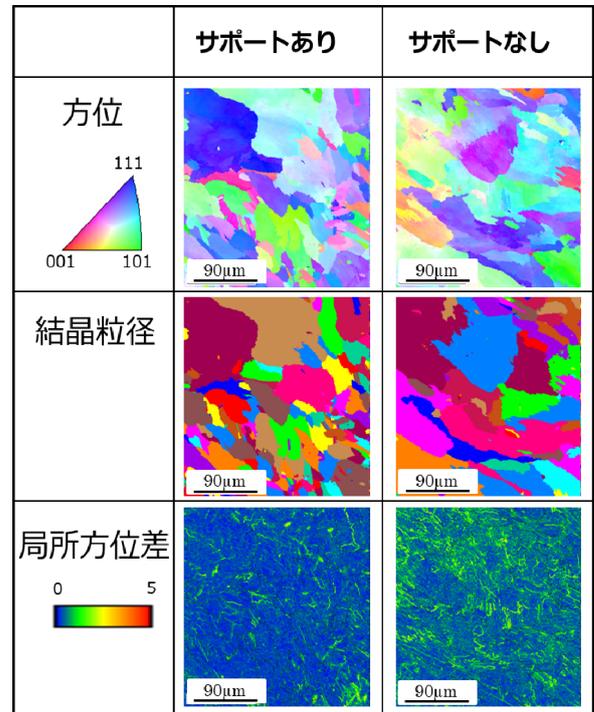


図7. EBSDによる分析結果

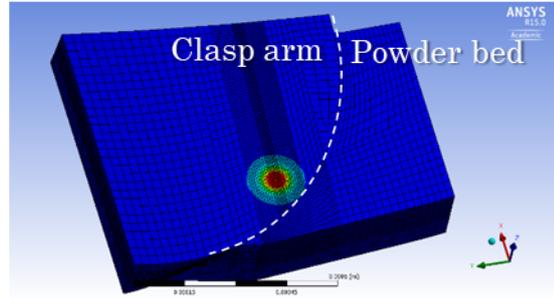
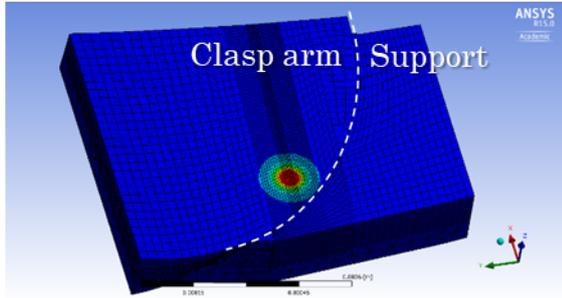
続いて図8に有限要素解析結果を示す。

サポートあり

サポートなし

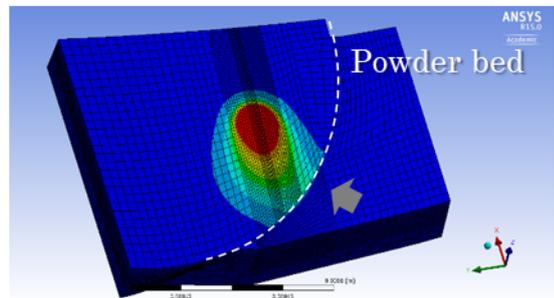
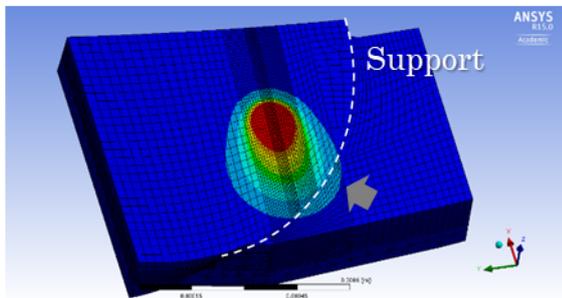
$t = 3.2 \times 10^{-6}$ (s)

$t = 3.2 \times 10^{-6}$ (s)



$t = 3.0 \times 10^{-4}$ (s)

$t = 3.0 \times 10^{-4}$ (s)



$t = 6.3 \times 10^{-4}$ (s)

$t = 6.3 \times 10^{-4}$ (s)

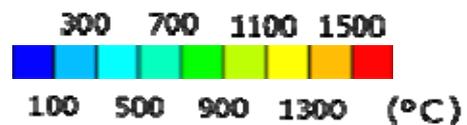
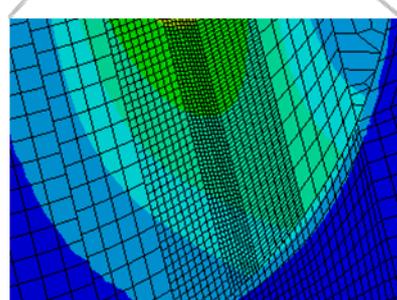
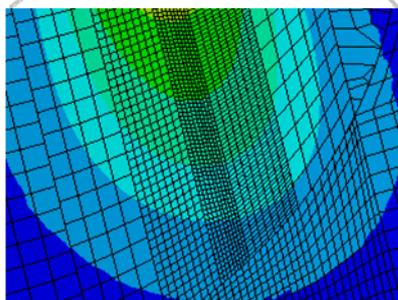
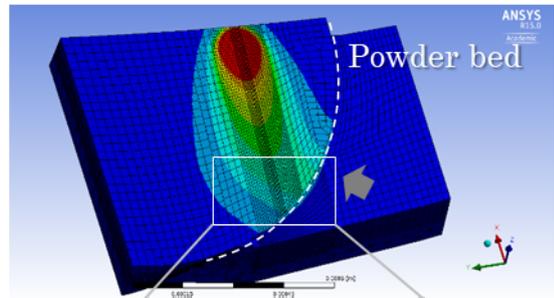
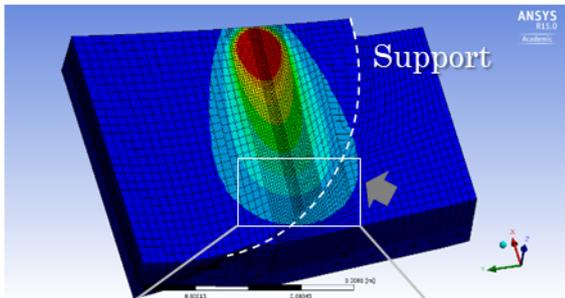


図 8. 有限要素解析結果

三次元有限要素法による解析から、サポート構造があることで積層造形時に発生した熱をより迅速に伝えることが可能となっていることが分かる。一方サポートを付与していない試料では試料を取り囲み得る粉末部分には熱が伝わっていない。以上の結果から、サポートを付与することで冷却速度が速くなることが分かった。EBSD 分析結果から、サポートを付与した試料の方が、結晶粒径が小さくなっていることが分かるが、これは冷却速度の速さが結晶粒の微細化に寄与したものと思われる [6]。これまでに結晶粒径が小さくなると材料の疲労強度が向上することが明らかになっている。これは、それぞれの結晶粒の結晶粒界が転位の障害因子として働くためであると考えられる [6]。本研究においても、サポート構造の付与により冷却速度が速くなり、これにより結晶粒が小さくなったため、サポートを付与していない試料より疲労強度が向上したと思われる。また、サポートを付与することで、造形時に発生する熱応力に耐え得る強度が得られ、材料の変形やマイクロクラックの発生を防ぐことができると思われる [7]。本研究においてサポートを付与した試料では EBSD 分析による局所方位差の結果から、材料内に蓄積された残留ひずみが少なくなっていた [8]。これにより、サポートを付与したことで、造形時の材料の変形やマイクロクラックを防ぐことができ、これも疲労強度の向上に貢献したと考えられる。

4. 結論

三次元有限要素法による解析から、サポート構造があることで積層造形時に発生した熱をより迅速に伝えることが可能となり、サポート構造のない試料よりも冷却速度が速くなることが分かった。また、試料切断面の SEM-EBSD 法による解析からは、サポートのある試料ではサポートのない試料より結晶粒径が小さくなることが分かった。この結果から、サポートのある試料では冷却速度の増加が結晶粒の微細化に寄与し、より高い疲労強度を示したと考えられる。さらに、結晶粒内の歪分析ではサポートのある試料でより低い KAM 値を示したことから、サポートがあることで熱応力に対して耐え得る機械的強度が得られ、造形中の材料の変形を防ぐことができたと予想される。本研究により、サポート構造を付与することで、積層造形法により製作した造形体の疲労強度を向上できる可能性が示された。

謝 辞

本研究は平成 28 年度天田財団奨励研究助成のご支援によるものであり、同財団に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] Aboulkhair, N.T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I., Everitt, N.M., 2016. Improving the fatigue behaviour of a selectively laser melted aluminium alloy: influence of heat treatment and surface quality. *Mater. Design* 104, 174–182.
- [2] Edwards, P., Ramulu, M., 2014. Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti–6Al–4V. *Mat. Sci. Eng. A Struct.* 598, 327–337.
- [3] Calignano, F., 2014. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Mater. Design* 64, 203–213.
- [4] Kajima, Y., Takaichi, A., Nakamoto, T., Kimura, T., Yogo, Y., Ashida, M., Doi, H., Nomura, N., Takahashi, H., Hanawa, T., Wakabayashi, N., 2016. Fatigue strength of Co–Cr–Mo alloy clasps prepared by selective laser melting. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 59, 446–458.
- [5] Mahmoud, A., Wakabayashi, N., Takahashi, H., Ohyama, T., 2005. Deflection fatigue of Ti–6Al–7Nb, Co–Cr, and gold alloy cast clasps. *J. Prosthet. Dent.* 93, 183–188.
- [6] Kaiser, R., Williamson, K., O'Brien, C., Ramirez-Garcia, S., Browne, D.J., 2013. The influence of cooling conditions on grain size, secondary phase precipitates and mechanical properties of biomedical alloy specimens produced by investment casting. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 24, 53–63.
- [7] Liu, Y., Yang, Y., Wang, D., 2016. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 87, 647–656.
- [8] Kamaya, M., Kuroda, M., 2011. Fatigue damage evaluation using electron backscatter diffraction. *Mater. Trans.* 52, 1168–1176.