

区画化型スキャンストラテジーを駆使した 歯科補綴装置の高機能・長寿命化

東京医科歯科大学 生体補綴歯科学分野
助教 高市 敦士

(2019年度 奨励研究助成(若手研究者枠) AF-2019235-C2)

キーワード: SLM, ブリッジ, アイランドスキャンストラテジー

1. 研究の目的と背景

Additive manufacturing 技術の一つであるレーザー積層造形 (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、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、医療分野において患者個々に適したオーダーメイド化が必要とされる歯科補綴装置のうち、比較的構造の単純なクラウンへの臨床応用が急速に拡大している。日本においては 2018 年 4 月に SLM 法用コバルトクロム (Co-Cr-Mo-W) 合金粉末が厚生労働大臣から国内で初めてクラス II の医療機器として製造販売承認されたことを受け、より複雑な構造であるブリッジや義歯のメタルフレームワークへの応用も今後進んでいくことが予想される。

歯科補綴装置が口腔内で長期的に機能を維持するには高い適合性が求められる。SLM 法で製作した歯科補綴装置は従来の歯科鑄造法と比較して、単純なクラウン構造では適合精度が優れているという報告が認められる。しかしながら、ブリッジや義歯メタルフレームなどの複雑で大きな補綴装置では従来方法より劣っており、未だ臨床応用例が非常に少ないのが現状である [1,2]。SLM 法では造形過程において金属粉末の熔融・凝固を繰り返すため、造形体に急激な温度勾配に起因した残留応力が発生し、変形が生じることが明らかになっている。さらに造形体の変形は形状が大きくなる程顕著に現れるとされている。そのため変形の生じやすい大型の歯科補綴装置の適合性の向上には、造形中の残留応力を低減する方策が有効であると考えられる。SLM 法における残留応力を減少させる方法は複数考案されており、その一つにアイランドスキャンストラテジーと呼ばれる、積層物を小さな領域に区切ってそれぞれの領域でレーザースキャンをおこなう方法が存在する。 [3,4,5]。しかしながら歯科補綴装置製作に関しては、これまでの研究報告は全てメーカー標準条件のみで行われており、歯科補綴装置特有の設計に特化した戦略的レーザー走査法の究明と高機能・長寿命化への試みは見受けられない。そこで、本研究では大型の歯科補綴装置であるブリッジ製作に対しアイランドスキャンストラテジーを応用した積層造形方法を開発し、残留応力の低減および適合精度の向上を試みることを

を目的とする。

2. 実験方法

2-1 試験片作製

44 及び 46 の形成後の支台歯模型 (A55A-441 及び A55A-461, NISSIN 社) を顎模型に装着した状態で光学印象を行い、模型の STL データを作成した。次に CAD ソフト (EXOCAD, EXOCAD 社) 上で 44, ポンティック部 (45), 46 陶材焼付冠ブリッジの設計を行った。その設計に基づき、Co-Cr 粉末 (MP-1, EOS 社) を用いて SLM 法でブリッジを製作した。区画化法では、ブリッジを 44 部, 45 部, 46 部の 3 区画に区別しレーザー走査を区画ごとに行い造形した。各層のレーザー走査は図 1 に示す順番のように、先に①45 部, 続いて 44 部, 46 部の順に造形した。45 及び 44 部, 46 部との境界は、0.2mm ずつレーザースキャン領域を重ねることにより各区画が一体かつ連結部の強度が十分になるようにした。ブリッジ製作後、アルゴン雰囲気下で、650 度で 30 分、その後 1150 度で 1 時間の熱処理を行った。熱処理後は空气中に放冷し室温まで冷却した。また、区画に区別せず、全体を一体として造形する従来法を対照群として設定した。積層造形法で製作したブリッジ試料を図 2 に示す。

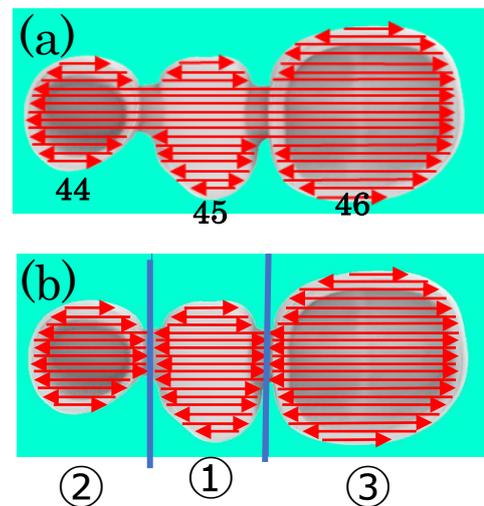


図 1. レーザースキャンイメージ
(a): 通法 (b): 区画化法



図2. SLM法で製作したブリッジ外観

2・2 適合試験

ブリッジの内部に適合診査材(フィットチェッカーアドバンス, GC 社)を満ちし, 顎模型に装着した支台歯模型に 50N を加え, 5 分間圧接させ, 硬化させた (図3). その後, ブリッジ及び適合診査材を支台歯模型より除去し, 適合診査材の内部に色の異なるシリコン材料(エグザミクスファインインジェクションタイプ, GC 社)を流し入れ, 硬化させることで適合診査材とシリコン材料を一体化させ, 適合診査材を補強した (図4). その後, 適合診査材を切断し, 共焦点レーザー顕微鏡 (CLSM) にて近心, 遠心, 咬合面について適合診査材の厚みの測定を行った.

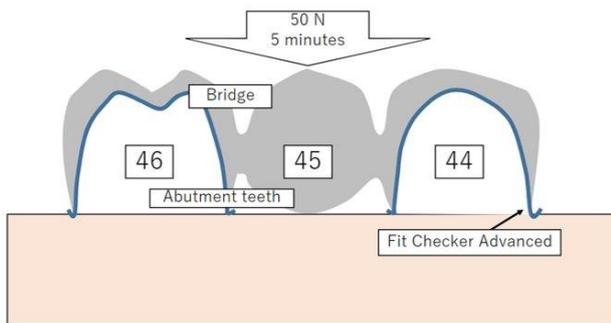


図3. ブリッジ適合試験の模式図



図4. 硬化した適合診査材

測定箇所は, 近心 (M), 遠心 (D), 頬側面 (B), 及び舌側面 (L) のマージン部と咬合面 (O) 5 箇所とした (図5).

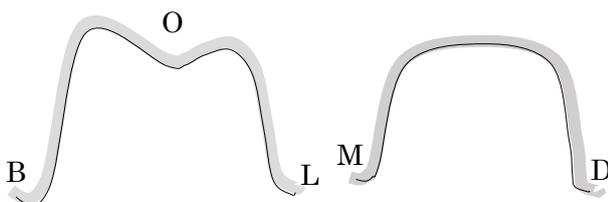


図5. 適合試験における測定箇所 M:近心, D:遠心, O:咬合面, B:頬側, L:舌側

2・3 残留応力試験

残留応力を測定するための試料を2. 1で言及した通法および区画化法を応用してSLM法により製作した. 適合試験に用いた同形状のブリッジ試料をおよそ歯冠部中央付近の高さで, かつ積層終了時のレーザースキャン方向がブリッジの長軸 (X 軸) に対して直交する方向になる高さで造形を中止し製作した (図6). このようにして製作された試料の上部には積層途中の平面が存在する. この試料の上部表面上で X 線を用いた表面の残留応力測定法の一つである XRD 法を用いて測定した. 測定箇所は 44 及び 45 の連結部, 45 中央部, 45 及び 46 の連結部とし, 測定方向はブリッジの長軸に対して X 軸方向, Y 軸方向の 2 方向とした. 図7に実際に積層造形し製作した試料を示す.

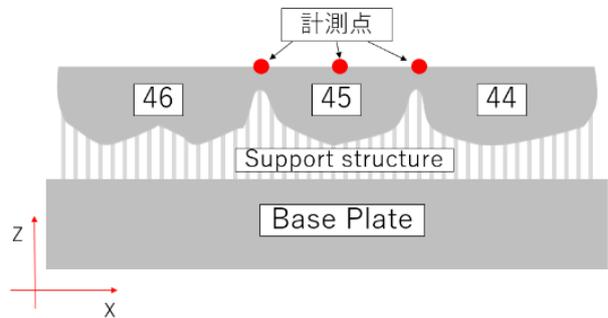


図6. 残留応力測定用試料の模式図

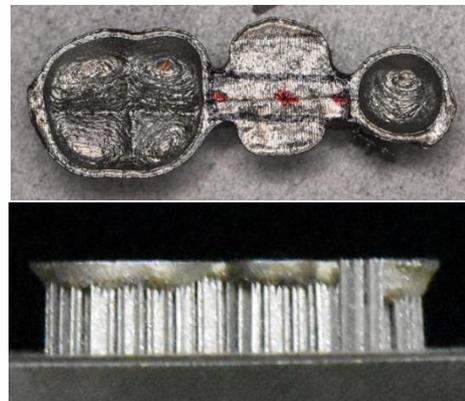


図7. 残留応力測定用試料外観

2・4 内部気泡の観察

SLM 法によって製作したブリッジをマイクロフォーカス X 線 CT システム (XDimensus 300, 島津社) によりスキャンし, 3 次元画像としてデータ処理を行った. その後, 画像データの分析ツール (VGSTUDIO MAX, VOLUME GRAPHICS 社) を用いて試験片内部の気泡の数を計測した.

3. 実験結果

3・1 適合試験結果

区画化法にて積層造形した試料と通法にて積層造形した試料の適合試験の結果を図8に示す. 適合診査材の厚

みは、すべての箇所でも 100 μm ~250 μm の範囲であった。このグラフからは、区画化及び通法のどちらにおいても適合診査材の厚みは同程度であることが示され、適合精度に有意な差が認められなかった。

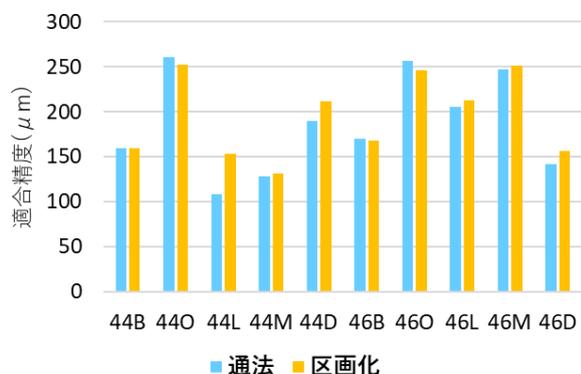


図 8. 通法及び区画化型における適合試験結果 (M:近心, D:遠心, O:咬合面, B:頬側, L:舌側と表記)

3・2 残留応力測定結果

区画化法にて製作した試料と通法にて製作した試料を用いて残留応力測定を行った結果を図 9 に示す。区画化型では、レーザー走査方向と並行になる X 方向の残留応力は、44 及び 45 の連結部、45 中央部、45 及び 46 の連結部の 3 点全てにおいて通法と比較して減少が認められた。一方でレーザー走査と直交する方向の Y 方向については通法及び区画化型でほぼ同様の結果となった。また、45 及び 46 連結部に関しては、区画化法のほうが通法と比較して残留応力が増加するという結果になった。

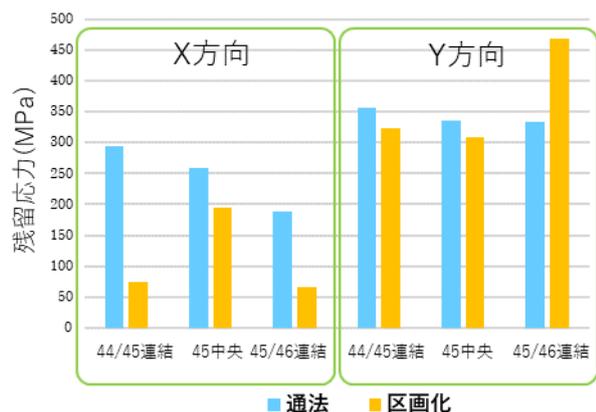


図 9. 残留応力測定の結果

3・3 内部組織観察結果

試験片を観察した画像を図 10 に示す。内部気泡はほとんど認められず区画化法及び通法で有意な差は認められなかった。また、内部性状も緻密で均一な造形であることが確認できた。

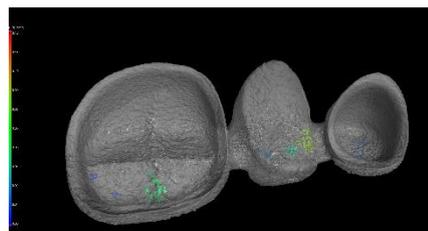


図 10. 試験片のマイクロフォーカス X 線 CT スキャン画像

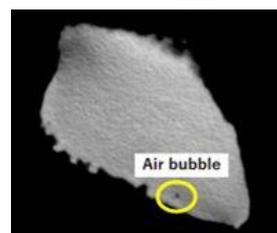


図 11. CT 画像に示されたブリッジ中の気泡

3・4 考察

残留応力において、X 軸方向では区画化型スキャンストラテジーを適応することにより、通法より応力低減が可能であることが明らかとなった。積層造形により発生する残留応力に関与する因子はいくつか知られているが、そのうちのひとつとしてレーザー走査時のスキャンベクトルの長さが、スキャンベクトルが長くなればなるほどスキャンに伴い発生する残留応力の量が増加するということが知られている。アイランドスキャンストラテジー法は、1 回のスキャンベクトルを短くして残留応力を低減することを目的として開発されたスキャン方法である。今回実験を行った区画化法はアイランドスキャンストラテジーを応用した積層戦略であり通法と比較して一回のスキャンベクトルを X 方向において短くすることができ、残留応力が低減された可能性がある。一方で Y 軸方向では区画化型も通法もスキャンベクトルの長さはほとんど変化がないため、残留応力も Y 軸方向においては有意な違いが認められなかったと考えられる。今回測定した箇所では、45/46 連結部でのみ区画化型の方が通法と比較してより大きな残留応力が計測されたが、なぜこのような結果になったかはさらなる分析、追加の検証が必要と考えられる。

適合試験では、区画化型と通法で有意な差を認めなかった。残留応力においては、X 軸方向では区画化法において有意に低下していたが、今回製作した形状のブリッジに関しては適合性を改善するほどの影響はなかったということになる。しかし、歯科で使用されるブリッジの中では、今回採用した 3 ユニットブリッジが一番小型であり、大型のブリッジになり区画化法を適応することでスキャンベクトルをより小さく改変できる場合には適合精度を改善できる可能性も考えられるため、今後はさら

なる大型の歯科補綴装置における検証を行っていく必要がある。

試料の内部観察は、試料内部の状態を非破壊で観察することができるマイクロフォーカス X 線 CT システムを用いて行った。今回使用したシステムでは解像度が $10\ \mu\text{m}$ 程度であるが、積層に用いた粉末の平均粒径は $20\sim 30\ \mu\text{m}$ であることを考えると、造形体中の主要な気泡数を計測できたと思われる。特に気泡の内包が心配された連結部においても気泡はほとんど認められず、また通法と区画化法で有意差がなかったため、区画化法による SLM 法でのブリッジ造形でも内部性状には影響を与えずに積層を行うことが可能であると考えられる。

4. 結言

SLM 法による造形では造形中の急激な温度勾配に起因した残留応力が発生することにより、大型の歯科補綴装置の変形やそれによる適合性の低下が生じることが懸念点であった。今回、新たに考案した区画化スキャンストラテジーを用いることでブリッジ内部性状に影響を及ぼすことなく部分的に残留応力の低下を図ることができた。これは SLM 法でのより大型の歯科補綴装置製作において区画化スキャンストラテジーを応用することで適合精度に有意な差をもたらす可能性を示唆された。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の 2019 年度 奨励研究助成 AF-2019235-C2 の支援を受けて遂行された研究で

あり、ここに記して、心より深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Chen H, Li H, Zhao Y, Zhang X, Wang Y, Lyu P. Adaptation of removable partial denture frameworks fabricated by selective laser melting. *J Prosthet Dent.* 2019 Sep;122(3):316-324.
- [2] Nesse H, Ulstein DM, Vaage MM, Øilo M. Internal and marginal fit of cobalt-chromium fixed dental prostheses fabricated with 3 different techniques. *J Prosthet Dent.* 2015 Nov;114(5):686-92.
- [3] Cheng B., Shrestha S., Chou K. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. *Addit. Manuf.* 2016;12:240–251.
- [4] A.J. Dunbar, E.R. Denlinger, J. Heigel, P. Michaleris, P. Guerrier, R. Martukanitz, T.W. Simpson, Development of experimental method for in situ distortion and temperature measurements during the laser powder bed fusion additive manufacturing process, *Additive Manufacturing.* 2016;12(A):25-30.
- [5] L. Parry, I.A. Ashcroft, R.D. Wildman, Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation, *Additive Manufacturing.* 2016;12(A):1-15.