

アライナー型矯正装置に使用するアタッチメント装着時の分離材による影響

嘉悦 峻

日本大学大学院歯学研究科歯学専攻口腔構造機能学分野
日本大学歯学部歯科矯正学講座
(指導: 本吉 満 教授, 納村泰弘 准教授, 平場晴斗 助教)

要旨

【目的】アライナー型矯正装置を用いた治療に併用するアタッチメントを歯面に付与する際に使用するテンプレートへの分離材塗布が、アタッチメントの形態や表面性状に与える影響については不明な点が多い。そこで、アタッチメント装着時の分離材の塗布が、テンプレートとアタッチメントとの間に生じる撤去力、アタッチメントの表面性状および硬さへの影響を検討した。

【方法】直方体のアタッチメント原型を用いてテンプレートを製作した。試料は、テンプレートのアタッチメント部の窪みにコンポジットレジンを入り、エッチングされたウシの切歯歯冠部エナメル質に圧接、光照射し作製した。テンプレートに対する分離材による処理は、ワセリンまたはレジン分離材をテンプレートのアタッチメント部の窪みに一層塗布した。コントロールは非塗布群とした。万能試験機を使用してテンプレート脱離までの最大力を測定し撤去力とした。共焦点レーザー顕微鏡によってテンプレート表面の性状観察と算術平均粗さ (Ra) 測定を行い、走査電子顕微鏡を用いて表面性状を観察した。微小硬さ試験機を用いて、光重合直後と24時間保管後のヌーブ硬さを測定した。測定値は、Tukey's HSD と paired *t*-test を用いて統計的に比較した。

【結果】撤去力は、ワセリン群とレジン分離材群に比べて非塗布群で有意に高く、ワセリン群とレジン分離材群は有意差が認められなかった。表面粗さは、各群間で有意差は認められなかった。共焦点レーザー顕微鏡および走査電子顕微鏡による表面性状では、ワセリン群とレジン分離材群は分離材による歪みのある表面が観察され、ワセリン群の方がより明瞭に観察された。光照射直後と照射24時間後のヌーブ硬さの比較では、非塗布群、ワセリン群、レジン分離材群の全てにおいて有意な増加が認められた。光照射直後における3群間の比較では各群間で有意差を示さなかったが、照射24時間後では非塗布群はワセリン群およびレジン分離材群に比べて有意に高かった。

【結論】アタッチメントの装着時にテンプレートに分離材を塗布することは、テンプレートの撤去を容易にする一方で、アタッチメントの表面性状や機械的性質に影響を与えることが示された。したがって、テンプレートに分離材の塗布を行う際、適正な方法で実施する必要があることが示唆された。

キーワード: アライナー型矯正装置, アタッチメント, レジン分離材, ワセリン

Effect of separating material on attachments used for aligner-type orthodontic appliances

Ryo Kaetsu

Department of Oral Structural and Functional Biology, Nihon University Graduate School of Dentistry
Department of Orthodontics, Nihon University of School of Dentistry
(Directors: Prof. Mitsuru Motoyoshi, Assoc. Prof. Yasuhiro Namura and Assist. Prof. Haruto Hiraba)

Abstract

【Purpose】 There is little information about the effects of applying separating materials to a template for bonding attachments used with aligner on the shape and surface texture of the attachments. The effects of applying the separating materials were investigated on the removal force generated between the template and the attachment, the surface texture, surface roughness, and surface hardness of the attachment.

【Method】 The template was made using a rectangular attachment prototype. The sample was prepared by filling a resin composite into the attachment cavity on the template with pressing it onto the etched enamel of a bovine incisor tooth, and curing it with light. Template were treated by applying a vaseline or a resin separating material to the attachment cavity. Control was the non-applied group. In a tensile test, a universal testing machine was used to measure the maximum force required to remove the template. The attachment surface was observed using confocal laser microscopy and arithmetic mean roughness (Ra) was measured. The surface texture was also observed using scanning electron microscopy. Using a microhardness tester, Knoop hardness was measured immediately after photopolymerization and after 24-h storage. Tukey's HSD and paired *t*-test were used to conduct comparisons statistically.

【Results】 The removal force was significantly higher for the non-applied group than for the vaseline group and the resin separator group, and no significant difference was observed between the vaseline group and the resin separator group. No significant difference in surface roughness was observed among the groups. The surfaces of the vaseline group and the resin separator group had distortions due to the separating material, more clearly observed in the vaseline group. Significant increases in Knoop hardness numbers were observed in all groups when comparing immediately after light irradiation and 24-h storage. A comparison between the three groups immediately after light irradiation showed no significant differences between each group, but non-applied group after 24-h after was significantly higher than the vaseline group and the resin separator group.

(受付: 令和6年1月19日)

責任著者連絡先: 嘉悦 峻

日本大学歯学部歯科矯正学講座

〒101-8310 東京都千代田区神田駿河台1-8-13

TEL: 03-3219-8105

FAX: 03-3219-8365

E-mail: dery19006@g.nihon-u.ac.jp

【Conclusion】 It was shown that applying the separating materials to the template when placing the attachment reduced the removal force of the template, and also affected the surface texture and the hardness of the attachment. Therefore, it was suggested that an appropriate method is required when applying the separating on the template.

Keywords: aligner-type orthodontic appliance, attachment, separating material, vaseline

緒 言

近年、矯正歯科治療を行う成人患者において、従来から行われてきたマルチブラケット装置を用いた治療よりもアライナー型矯正装置を用いた治療の希望が増えている¹⁾。その理由として、アライナー型矯正装置は透明なマウスピースを用いることから、マルチブラケット装置と比較して治療期間中の装置装着による違和感が少なく、快適性と審美性に優れていることが挙げられる¹⁾。また、マルチブラケット装置で必要なアーチワイヤーの屈曲や結紮などの操作がないアライナー型矯正装置は、チェアタイムの短縮という術者と患者の両者にとっての有効性も報告されている²⁾。

アライナー型矯正装置による矯正歯科治療では、正常咬合にセットアップされた患者の歯列に向かって、元の歯列から歯が移動していく過程を分割し、各ステップの歯列をもとにマウスピースを成形する。患者は、歯科医師の指示に従って逐次的に各ステップのマウスピースを口腔内に装着することによって、マウスピースと位置の異なる歯に力をかけ、移動させることで正常咬合を確立する。しかしながら、本法ではマルチブラケット装置を用いる方法と比較して歯の挺出や回転のような移動は特に困難とされている^{3, 4)}。さらに小臼歯の便宜抜去を要するような歯の移動が大きい症例においては、計画した歯の移動が達成できないことがある。

そこで、歯の移動精度と効率を向上させる目的で歯面にコンポジットレジンを用いたアタッチメントを付与する方法が用いられている⁵⁾。この方法では、歯の移動を補助するための形態を付与した径 1～4 mm の半円形または直方体のコンポジットレジンを経ナメル質に接着し、その上からアライナー型矯正装置を装着する。アタッチメントは力の伝わる方向を制御し、その形状⁶⁾ や付与する位置⁷⁾ が歯の移動に影響を与えることから、アタッチメントを付与する条件は重要となる。

アタッチメントを歯面に接着する操作では、まず、コンピュータ上で患者歯列のスキャンデータの被接着歯冠部に適切なアタッチメントを設計し配置する。このデータを用いてアタッチメントが付与された形状の樹脂製の歯列模型を製作し、その歯列模型に加圧型成形器を用いて熱可塑性樹脂製シートを軟化圧接し、アタッチメントの形状を反映させたマウスピース型テンプレートを製作する。次に、患者の被接着歯に接着前処理を行い、マウスピース型テンプレート内面のアタッチメント部にコンポジットレジン

填入し、そのテンプレートを歯列に装着し、光照射によるコンポジットレジン硬化後にテンプレートを歯列から撤去する。実際の臨床操作では、このマウスピース型テンプレートを撤去する際に、コンポジットレジン填入部の窪みによってアタッチメントの破折や脱離などが生じてしまう恐れがある。一方、アタッチメントと同種の熱可塑性樹脂製シートを用いてナイトガードやマウスガードを製作する場合には、石膏模型上のアンダーカットから撤去しやすくするために分離材を用いる方法が報告されている⁸⁾。この方法と同様に、マウスピース型テンプレートのコンポジットレジン填入部に分離材を塗布することで、テンプレート撤去時の抵抗を小さくできると考えられるが、分離材の塗布がアタッチメントの形態や表面性状に与える影響については不明な点が多い。

そこで本研究では、アタッチメント装着時のマウスピース型テンプレート内面に対する分離材の塗布が、テンプレートとアタッチメントとの間に生じる撤去力、アタッチメントの表面性状および硬さへの影響を検討した。

材料および方法

1. 材料

アタッチメントの材料としては、光重合型コンポジットレジン（オルソリー ユニバーサルボンド ボンディング、ジーシーオルソリー、東京）を使用した。アタッチメントの装着に用いるテンプレートには、厚さ 0.5 mm のグリコール変性ポリエチレンテレフタレート（G-PET）製シート（Track A、フォレストudent・ジャパン、東京）を用いた。分離材には、ワセリン（白色ワセリン、日医工、富山）およびアルギン酸ナトリウム水溶液（以下レジ分分離材；アクロセップ、ジーシー、東京）を用いた。被着体には、齶蝕や亀裂のないウシの下顎切歯を使用した。被着面に対するエッチング剤として 37% リン酸ジェル（FineEtch, Spident, Incheon, Korea）を用いた。使用した材料を表 1 に示す。

2. 試料作製

アタッチメントの形態は従来から用いられている直方体（3.0 mm × 2.0 mm、高さ 1.0 mm）に設定した⁹⁾。常温重合アクリルレジン（トレーレジン II、松風、京都）の平面上に光重合型コンポジットレジン（築盛）を築盛し、実験用アタッチメントの原型を製作した。その原型に対して、加圧成形器（Biostar, JM ortho, 東京）を用いて、G-PET 製シートを軟化圧接してテンプレートを製作した。テンプレート

表1 使用材料

製品名	製造会社	Lot. No.	組成
テンプレート			
Track A, 0.5 mm	フォレストアデント・ジャパン	10874	グリコール変性ポリエチレン テレフタレート
分離材			
白色ワセリン	日医工	C00700	白色ワセリン
アクロセップ	ジーシー	2210111	アルギン酸ナトリウム 3% 水 97%
アタッチメント			
オルソリー ユニバーサルボンド ボンディング	ジーシーオルソリー	2306011	ジメタクリレート Bis-MEPP シリカ微粉末 ガラスフィラー リン酸エステルモノマー 光重合開始剤
表面処理剤			
FineEtch 37%	Spident	FE22420	リン酸 37%

Bis-MEPP: 2,2-bis[4-(2-methacryloxyethoxyphenyl)] propane



図1 撤去力測定試験装置

は、アタッチメント部を中心に5 mm 四方で切断し、その一端をわずかに捲り上げ、直径1 mm の穴を付与し直径0.25 mm のステンレス鋼線を結び付けた (図1)。

被着試料の製作では、まずウシの下顎切歯の歯根を切断し、歯冠部唇側面のエナメル質が直径6~8 mm 露出するように常温重合アクリルレジン (トレーレジン II, 松風) にて包埋した。平坦なエナメル質表面を得るために、モデルトリマー (Y-230, ヨシダ, 東京) にて調整後、耐水研磨紙 #2,000 (Fuji Star DCCS-H, 三共理化学, 桶川) で注水研削, 研磨した。蒸留水を用いて超音波洗浄を5分間行い, 余分な研削片を除去した後, 圧縮空気乾燥させた。アタッチメント接着前の歯面処理は, 製造者指示に従

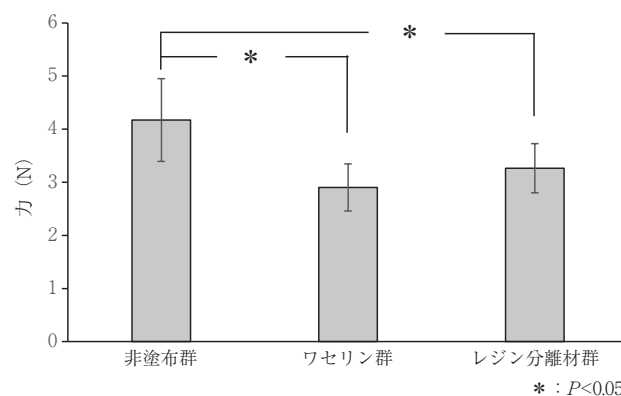


図2 各条件におけるテンプレートの撤去力

い, 37% リン酸ジェル (FineEtch, Spident, Incheon, Korea) を歯面に20秒間塗布した後, 水洗後に圧縮空気十分に乾燥した。

テンプレートに対する分離材による処理は, 分離材塗布条件としてワセリン (白色ワセリン, 日医工, 富山) またはレジン分離材 (アクロセップ, ジーシー, 東京) を, テンプレートのアタッチメント部の窪みにマイクロブラシ (マイクロアプリーケータースーパーファイン, フィード, 横浜) を用いて一層塗布し (ワセリン群, レジン分離材群), またコントロールとして分離材の塗布を行っていないものを非塗布群とした。各テンプレートのアタッチメント部の窪みにコンポジットレジン を填入し, 包埋試料の歯面を被覆し圧接後, 照射器 (Optilux 501, sds Kerr, CT, USA) を用いて, 歯面に対して平行なアタッチメン

ト部の面を上面として、上面とその面の長辺方向 2 方向の計 3 方向から 20 秒間ずつ計 60 秒間光照射を行った。

3. 引張試験による撤去力の測定

引張試験は、万能試験機 (Type 5500R, Instron, MA, USA) を使用して行った。引張試験用の試料は各群 10 個とし、テンプレートの端に固定したステンレス鋼線を被着歯面に対して垂直方向にクロスヘッドスピード 1.0 mm/min で牽引し、テンプレート脱離までの最大力を測定し撤去力とした (図 1)。

4. 共焦点レーザー顕微鏡による表面粗さの測定および観察

共焦点レーザー顕微鏡 (VK-9710, キーエンス, 大阪) を用いて表面観察と算術平均粗さ (Ra) を測定した。試料は各群 10 個とし、テンプレート撤去後の試料を蒸留水にて 5 分間超音波洗浄し、乾燥後、アタッチメント上面中央部を共焦点レーザー顕微鏡にて拡大率 400 倍で走査し、表面性状を観察した。また、解析ソフト (VK analyzer, キーエンス) にて表面の Ra を計測し、各群の平均値を表面粗さとして評価した。

5. 走査電子顕微鏡 (SEM) による観察

SEM (ERA-8800FE, エリオニクス, 東京) を用いて、テンプレート撤去後のアタッチメントの表面性状を観察した。試料は、テンプレート撤去後の試料を蒸留水にて 5 分間超音波洗浄を行い、ブタノールにて脱水後、凍結乾燥機 (モデル ID-3, エリオニクス) で -20°C の条件で 30 分間乾燥した。次いでイオンコーター (Quick Coater Type SC-201, サンヨー電子, 東京) で金蒸着した後、アタッチメント上面中央部を加速電圧 10 kV, 拡大倍率 50 倍, 1,000 倍の条件下で観察した。

6. ヌープ硬さの測定

ヌープ硬さの測定は、各試料のテンプレート撤去後のアタッチメント上面中央部を測定部位として行った。測定は、微小硬さ試験機 (HVM-2, 島津製作所, 京都) を用いて、負荷荷重 98.7 mN, 荷重保持時間 15 秒の条件で行った。各群 20 個の試料を作製して半分に分け、光重合直後と 36°C の

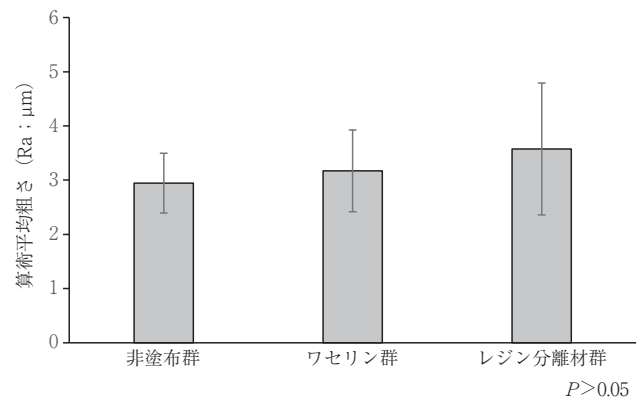


図 3 各条件における表面粗さ

蒸留水内に 24 時間保管後の 2 時点において測定した。

7. 統計分析

本研究のサンプルサイズは統計解析ソフト (G Power, University Kiel, Germany) を用いて検出力 80%, 信頼区間 95% で求めた。すべての分析は統計解析ソフト (EZR on R Commander, 自治医科大学, 埼玉) を用いて行った。Kolmogorov-Smirnov 検定で正規性が認められ, Bartlett 検定で等分散性が認められたため, パラメトリック統計法を選択した。撤去力, 平均粗さおよびヌープ硬さの結果については, Tukey's HSD を用いて各群間の多重比較を行い, 光重合直後と 24 時間後のヌープ硬さの結果については paired *t*-test を用いた。検定は有意水準 5% で判定した。

結 果

1. 撤去力

引張試験の結果を図 2 に示す。撤去力が最も大きかったのは非塗布群の 4.2 N であった。ワセリン群は 2.9 N であり, レジン分離材群は 3.3 N であった。ワセリン群とレジン分離材群に比べて非塗布群は有意に高く, ワセリン群とレジン分離材群との間には有意差が認められなかった。分離材の塗布によって撤去力が 21~31% 減少した。

2. 表面粗さ (Ra)

Ra の結果を図 3 に示す。Ra は, 非塗布群が $2.9 \mu\text{m}$, ワ

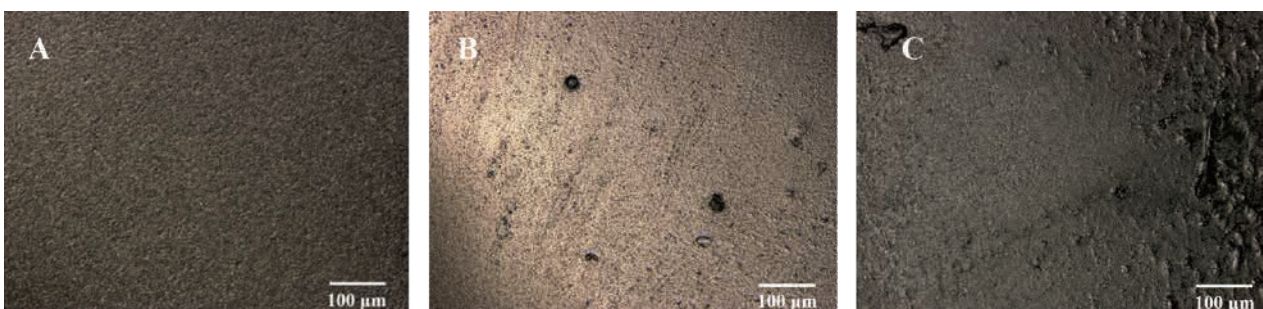


図 4 アタッチメント表面のレーザー顕微鏡画像 (A: 非塗布群, B: ワセリン群, C: レジン分離材群)

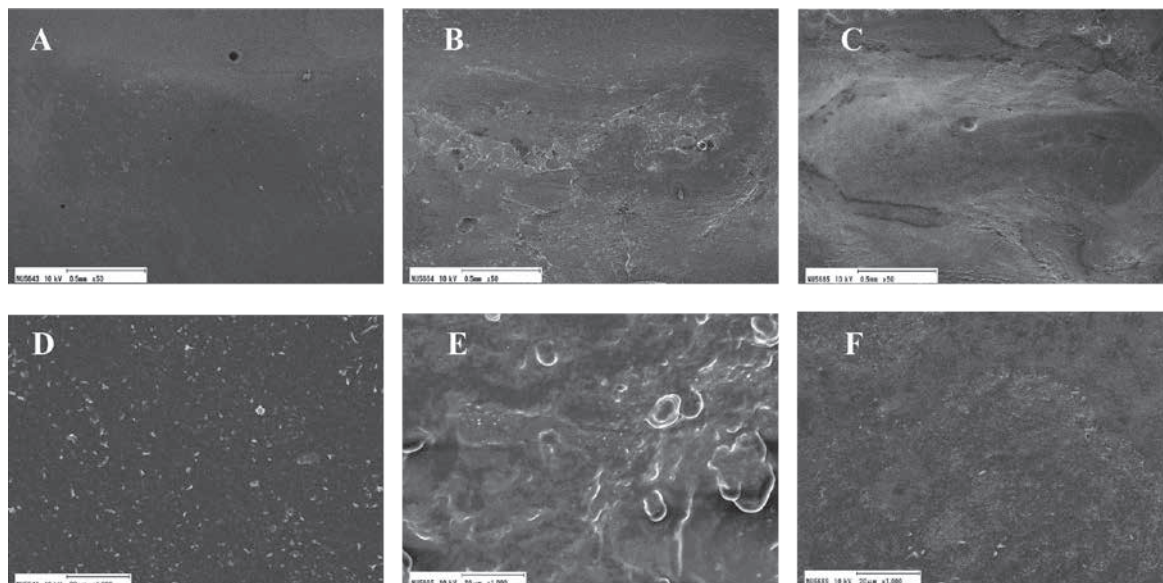


図5 アタッチメント表面の走査電子顕微鏡画像 (A, D：非塗布群, B, E：ワセリン群, C, F：レジン分離材群 [A, B, C：拡大率50倍, D, E, F：拡大率1,000倍])

表2 ヌープ硬さ (HK)

	非塗布群	ワセリン群	レジン分離材群
光照射直後	4.3 (0.6) ^{aA}	4.1 (0.5) ^{aA}	4.1 (0.4) ^{aA}
照射終了から 24時間後	5.7 (0.9) ^{aB}	4.8 (0.4) ^{bB}	4.5 (0.5) ^{bB}

()：標準偏差

上付き英小文字は、同じ計測時点での3群の多重比較の結果を表し、英大文字は各群での光照射直後と24時間後の比較を表す。異なる文字間では有意差 ($P < 0.05$) があることを示す。

セリン群が3.2 μm 、レジン分離材群が3.6 μm であった。各群間で有意差は認められなかった。

3. 共焦点レーザー顕微鏡およびSEMによる表面性状

共焦点レーザー顕微鏡による各群の代表的な観察像を図4に示す。レジン分離材群の試料表面では、他の群で認められなかった小さな隆起が観察された (図4C)。SEMを用いた各群の観察像を図5に示す。50倍の拡大像では、非塗布群はワセリン群およびレジン分離材群と比較して平滑な表面であった。また、1,000倍の拡大像では、非塗布群にはフィラーによる細かい粒子が認められ、ワセリン群とレジン分離材群は分離材による歪みのある表面が観察され、ワセリン群の方がより明瞭に観察された。

4. ヌープ硬さ

ヌープ硬さの測定結果を表2に示した。光照射直後と比較して照射24時間後のヌープ硬さは、非塗布群、ワセリン群、レジン分離材群の全てにおいて有意な増加 (10～

33%) が認められた。光照射直後における3群間の比較では、非塗布群が4.3、ワセリン群が4.1、レジン分離材群が4.1であり、各群間で有意差を示さなかった。また、照射24時間後では、非塗布群が5.7、ワセリン群が4.8、レジン分離材群が4.5であり、非塗布群とワセリン群、非塗布群とレジン分離材群の間で有意差を示した。

考 察

アライナー型矯正装置を用いる矯正歯科治療において、歯の移動精度を向上させる目的でアタッチメントが併用される¹⁰⁻¹²⁾。そのため、テンプレートの撤去時にアタッチメントが変形や破折するなどの理由が必要とする形態が得られないことは、治療効果に大きく影響する。そこで、分離材塗布による撤去力に対する影響およびアタッチメントの表面性状に対する影響について検討した。

本研究では、テンプレート撤去時の力について、引張試験による歯面からの撤去力の比較を行った。その結果、撤去力は非塗布群で4.2 Nであったのに対して、ワセリン群

では 2.9 N, レジン分離材群では 3.3 N と非塗布群よりも有意に低かった。熱可塑性樹脂製シート (ポリエチレンテレフタレートおよびポリウレタン) に Bis-GMA 系の歯科矯正用接着材を用いて, ステンレス鋼またはポリカーボネート-ポリエチレンテレフタレート製歯科矯正用付加装置を接着した Pariyatdulapak ら¹³⁾ の研究においては, 1.17~7.04 MPa のせん断接着強さが報告されている。一方, 本研究において撤去したテンプレートのコンポジットレジン充填部には凝集破壊によるレジンの残渣やテンプレートの破損は認められなかった。一方, 本研究では充填したコンポジットレジン分離材塗布の有無に関係なくテンプレートに接着させていない。したがって, 分離材の塗布はテンプレート撤去時にアタッチメントにかかる力を減少させることが示唆された。

次に, 分離材塗布によるアタッチメントの表面性状への影響について検討した。テンプレート撤去後のアタッチメント表面の算術平均粗さは, ワセリン群, レジン分離材群および非塗布群の 3 群間で有意差は認められなかった。可撤性義歯製作において加熱重合レジン填入時に石膏表面に対するアルギン酸ナトリウム水溶液分離材の塗布が表面粗さに及ぼす影響を調べた研究では, 薄く塗り広げられた 1 回の分離材塗布では非塗布とレジンの表面粗さは変わらなかったと報告されている¹⁴⁾。本研究の結果からも, 分離材の塗布の有無やその種類はコンポジットレジン表面粗さに大きな影響を及ぼさないことが示唆された。Jaramillo-Cartagena ら¹⁵⁾ は, nano-hybrid および nano-filling コンポジットレジン研磨システムによる表面粗さが 0.03~0.76 μm であったと報告している。本研究での表面粗さは, 非塗布群が 2.9 μm , ワセリン群が 3.2 μm , レジン分離材群が 3.6 μm であった。本研究では非研磨であり, テンプレートのレジン填入部内面の形状や分離材の影響によって大きな値となったと考えられる。

アタッチメントの表面観察の結果から, ワセリン群, レジン分離材群において, 分離材塗布によるアタッチメント表面性状の違いが観察された。共焦点レーザー顕微鏡による観察では, レジン分離材群の表面は小さな隆起が観察された。SEM の 50 倍拡大像についても, ワセリン群とレジン分離材群で乱れた表面の像が観察された。1,000 倍の拡大像において, 非塗布群にはコンポジットレジン表面にフィラーが認められたが, ワセリン群とレジン分離材群では分離材によって生じた歪みのある表面が観察され, ワセリン群の方が顕著であった。均一な薄い層に塗布することが困難な粘性のあるワセリンは表面の形態に影響することが考えられる。レジン分離材塗布後の圧縮空気の圧力や当てる方向による分離材の厚みが, 石膏から加熱重合レジンの除去しやすさおよびレジンの表面粗さに影響すると報告されている¹⁴⁾。本研究でも, テンプレートに塗布した分離材がコンポジットレジン表面性状に影響することを示し

ていることから, 分離材塗布によってテンプレート撤去時の撤去力減少に繋がっている一方で, 過剰に分離材を塗布するとアタッチメントの表面性状に影響を与えると考えられる。

アタッチメントのヌープ硬さは, 光照射直後では, 非塗布群が 4.3, ワセリン群が 4.1, レジン分離材群が 4.1 であり, 24 時間後では, 非塗布群が 5.7, ワセリン群が 4.8, レジン分離材群が 4.5 と上昇していた。マルチブラケット装置の接着についての研究において, 本研究で用いた製品と同じコンポジットレジンヌープ硬さは, 光照射から 24 時間後で 6.2 と報告されている¹⁶⁾。また, 9 種類の歯冠修復用コンポジットレジンバルクフィルタイプのヌープ硬さを調べた研究では, 光照射後の表面は 16.2~89.4 と報告されている¹⁷⁾。このように治療後に撤去することを前提として歯科矯正で用いられるコンポジットレジンとは硬さが大きく異なっている。本研究の結果では, 光照射から 24 時間後の試料表面のヌープ硬さは, 非塗布群と比較してワセリンやレジン分離材を塗布した群で有意に小さかった。コンポジットレジン硬さは, 含有するフィラーの機械的性質や量のみならず, 重合反応に関与する二重結合の反応数の増加に伴って上昇する¹⁸⁾。また, コンポジットレジン光照射終了後も重合反応が継続し¹⁹⁾, さらに, コンポジットレジン表面の吸水量の違いが硬さや摩耗量に影響することが報告されている²⁰⁾。本研究の結果は, テンプレート除去後も水分や油分を含んでいる分離材がコンポジットレジン表面に付着した状態であったことや, コンポジットレジン表面の微細な形態の違いが水分と接する面積を増加させたことによって, 24 時間水中保管後のヌープ硬さの有意な差を生じたと考えられる。

アライナー型矯正装置に併用するアタッチメントの装着時に, テンプレートに分離材を塗布することは, テンプレートの撤去を容易にする一方で, アタッチメントの表面性状や機械的性質に影響を与えることが示された。したがって, テンプレートに分離材の塗布を行う際, 適正な方法で実施する必要があることが示唆された。

結 論

本研究において, アライナー型矯正装置のためのマウスピース型テンプレートへの分離材塗布によって, アタッチメントからの撤去力およびアタッチメントの表面性状, 硬さに及ぼす影響を比較検討した結果, 以下の結論が得られた。

- 1) テンプレートへの分離材の塗布によって, アタッチメントからテンプレートの撤去に必要な力が減少した。
- 2) テンプレートへの分離材の塗布は, アタッチメントレジン表面粗さには影響しなかった。
- 3) アタッチメントの表面観察から, テンプレートに塗布した分離材による表面性状の変化が認められた。

- 4) アタッチメントのヌープ硬さは、光照射直後には有意差はなかったが、24時間後において非塗布群と比較して、分離材を塗布した群が有意に小さかった。

稿を終えるにあたり、多大なるご指導を賜りました日本大学歯学部歯科矯正学講座本吉満教授、納村泰弘准教授、歯科理工学講座平場晴斗助教に心より感謝申し上げます。また、本研究を通じ多大なるご指導とご協力をいただきました日本大学歯学部歯科保存学第I講座高見澤俊樹准教授、歯科理工学講座掛谷昌宏専任講師を始め、日本大学歯学部歯科矯正学講座、歯科理工学講座および歯科保存学第I講座の皆様へ深く感謝申し上げます。

本論文に関して、開示すべき利益相反はありません。

文 献

- 1) Ke Y, Zhu Y, Zhu M (2019) A comparison of treatment effectiveness between clear aligner and fixed appliance therapies. *BMC Oral Health* 19, 24.
- 2) Zheng M, Liu R, Ni Z, Yu Z (2017) Efficiency, effectiveness and treatment stability of clear aligners: A systematic review and meta-analysis. *Orthod Craniofac Res* 20, 127-133.
- 3) Boyd RL (2008) Esthetic orthodontic treatment using the invisalign appliance for moderate to complex malocclusions. *J Dent Educ* 72, 948-967.
- 4) Rossini G, Parrini S, Castorflorio T, Deregibus A, Debernardi CL (2015) Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review. *Angle Orthod* 85, 881-889.
- 5) Jones ML, Mah J, O'Toole BJ (2009) Retention of thermoformed aligners with attachments of various shapes and positions. *J Clin Orthod* 43, 113-117.
- 6) Ayidağa C, Kamiloglu B (2021) Effects of variable composite attachment shapes in controlling upper molar distalization with aligners: a nonlinear finite element study. *J Healthc Eng* 21, 5557483.
- 7) Fan D, Liu H, Yuan CY, Wang SY, Wang PL (2022) Effectiveness of the attachment position in molar intrusion with clear aligners: a finite element study. *BMC Oral Health* 22, 474.
- 8) 山田純子, 岡本守人, 前田芳信, 堀坂充広, 米畑有理, 町博之 (2002) マウスガード製作過程における作業模型表面処理の影響. *スポーツ歯学* 5, 37-40.
- 9) Dasy H, Dasy A, Asatrian G, Rózsa N, Lee HF, Kwak JH (2015) Effects of variable attachment shapes and aligner material on aligner retention. *Angle Orthod* 85, 934-940.
- 10) Gomez JP, Peña FM, Martínez V, Giraldo DC, Cardonad CI (2015) Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments: a three-dimensional finite element analysis. *Angle Orthod* 85, 454-460.
- 11) Ho CT, Huang YT, Chao CW, Huang TH, Kao CT (2021) Effects of different aligner materials and attachments on orthodontic behavior. *J Dent Sci* 16, 1001-1009.
- 12) Takara Y, Haga S, Kimura H, Maki K (2022) Mechanical analysis of factors affecting clear aliner removability. *Dent Mater J* 41, 534-544.
- 13) Pariyatdulapak N, Churnjitapirom P, Sriksirin T, Viwattanatipa N (2021) Bond strength of orthodontic buttons on clear aligner materials. *Orthod Waves* 80, 224-231.
- 14) 緒方敏明 (1998) レジン床用分離材の分離効果についての研究. *日歯技工誌* 19, 32-35.
- 15) Jaramillo-Cartagena R, López-Galeano EJ, Latorre-Correa F, Agudelo-Suárez AA (2021) Effect of polishing systems on the surface roughness of nano-hybrid and nano-filling composite resins: a systematic review. *Dent J (Basel)* 9, 95.
- 16) Tezuka Y, Namura Y, Utsu A, Wake K, Uchida Y, Inaba M, Takamizawa T, Motoyoshi M (2021) Influence of pre-etched area and functional monomers on the enamel bond strength of orthodontic adhesive pastes. *Appl Sci (Basel)* 11, 8251.
- 17) Rizzante FAP, Duque JA, Duarte MAH, Mondelli RFL, Mendonça G, Ishikiriyama SK (2019) Polymerization shrinkage, microhardness and depth of cure of bulk fill resin composites. *Dent Mater J* 38, 403-410.
- 18) Comba A, Scotti N, Maravié T, Mazzoni A, Carossa M, Breschi L, Cadenaro M (2020) Vickers hardness and shrinkage stress evaluation of low and high viscosity bulk-fill resin composite. *Polymers (Basel)* 12, 1477.
- 19) Berchtold KA, Randolph TW, Bowman CN (2005) Propagation and termination kinetics of cross-linking photopolymerizations studied using electron paramagnetic resonance spectroscopy in conjunction with near IR spectroscopy. *Macromolecules* 38, 6954-6964.
- 20) 銀屋一彦 (1989) Bis・GMA-Tri・EDMA系化学重合型コンポジットレジンの摩耗に及ぼす含水量の影響. *日補綴歯会誌* 33, 1233-1246.