

接着性舌側リテナーのワイヤーと接着材に及ぼす大気圧窒素プラズマ処理の影響

高田 麻希¹, 栗栖 有希², 鶴見 春乃², 稲葉 瑞樹^{1,3},
内田 靖紀^{1,3}, 納村 泰弘^{1,3}

¹ 日本大学歯学部歯科矯正学講座

² 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

³ 日本大学歯学部総合歯学研究所臨床研究部門

要旨

【目的】 大気圧プラズマは、様々な接合場面で接着力向上に貢献しているが、フレキシブルでらせんの形状を持つ接着性リテナーのワイヤーとコンポジットレジン接着材との接着性が向上するかは不明である。そこで本研究の目的は、大気圧プラズマ処理の有無による接着性舌側リテナーのワイヤーと接着材との脱離力を調べ、接着性舌側リテナーの保持について大気圧プラズマ処理の影響を検討することである。

【方法】 接着性リテナーのワイヤーとして6本巻きマルチストランドステンレス鋼線と単線ステンレス鋼線を2種類使用した。大気圧窒素プラズマ処理したワイヤー側面方向に対して保定用コンポジットレジン接着材を接着する試料とワイヤーを垂直にコンポジットレジン接着材に埋め込む試料を作製した。引張試験にて脱離力を測定し、大気圧プラズマ未処理群と比較した。また、垂直にワイヤー植立した試料について、走査電子顕微鏡(SEM)にてワイヤー横断面のコンポジットレジン接合部を観察し検討を行った。

【結果】 マルチストランドワイヤーでは、垂直方向の脱離力はプラズマ照射によって1.3倍有意に増加した。単線ワイヤーは、脱離力がプラズマ照射によって2.5倍有意に増加した。ワイヤー側面方向での脱離力は、マルチストランドワイヤーにおいて有意な増加はみられなかったが、単線ワイヤーについてはプラズマ照射によって1.5倍有意に増加した。

SEM像では、マルチストランドワイヤーの表面においてコンポジットレジン接着材との接合の解離がみられたが、プラズマ照射では密着して見られた。

【結論】 大気圧プラズマ処理によって接着性リテナーのワイヤーとコンポジットレジン接着材の接着保持性は向上することが示唆された。

キーワード: 大気圧プラズマ、接着性舌側リテナー、歯科矯正、接着、引張試験

Effect of atmospheric pressure nitrogen plasma on wires and adhesive in bonded lingual retainers

Maki Takata¹, Yuuki Kurisu², Haruno Tsurumi²
Mizuki Inaba^{1,3}, Yasuki Uchida^{1,3}, Yasuhiro Namura^{1,3}

¹ Department of Orthodontics, Nihon University School of Dentistry

² Major in Oral Structural and Functional Biology, Nihon University Graduate School of Dentistry

³ Division of Clinical Research, Dental Research Center, Nihon University School of Dentistry

Abstract

【Purpose】 Atmospheric pressure plasma contributes to improving adhesive strengths in bonding situations, but it is unclear whether it improves the adhesive strength of multi-strand retainer wires that are flexible and spiral-shaped. Therefore, the purpose of this study was to investigate the removal force between the wire and adhesive of bonded lingual retainers with the plasma treatment, and to examine the effect of the plasma treatment on the retention of the bonded retainers.

【Methods】 Two types of bonded retainer wires were used: a six-stranded stainless steel wire and a solid stainless steel wire. Specimens in which a composite resin adhesive for retainers was bonded to the side of the wire treated with atmospheric pressure nitrogen plasma and a plasma-treated wire embedded vertically in the composite resin adhesive were prepared. Removal forces were measured by tensile test and compared with the group without the plasma treatment. In addition, the cross-section of the wire touching the adhesive was observed using a scanning electron microscope (SEM) for samples with the wire embedded vertically.

【Results】 For the multi-strand wires, the removal force in the vertical direction with plasma treatment was significantly greater by 1.3 times than that without plasma treatment. For solid wires, the removal force was significantly greater than that without plasma treatment by 2.5 times with plasma treatment. No significant increase in removal force in the lateral direction of the wire was observed for multi-strand wires, but plasma treatment was significantly greater force by 1.5 times for the solid wires.

SEM images showed dissociation of the bond with the composite resin adhesive on the surface of the multi-strand wire, but plasma treatment observed to obtain close adhesion.

【Conclusion】 These findings suggest that atmospheric pressure plasma treatment improves the adhesive retention between the wire of bonded retainers and the composite resin adhesive.

Keywords: atmospheric pressure plasma, bonded lingual retainer, orthodontics, adhesion, tensile testing

(受付: 令和7年4月11日)

責任著者: 高田麻希

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: takata.maki@nihon-u.ac.jp

緒 言

矯正歯科治療終了後には、治療によって整列した歯列を保つため保定が行われる。保定には、主に可撤式保定装置（リテナー）が用いられる。しかし、可撤式リテナーは、患者の協力が大きく影響することから、舌側歯面にワイヤーを接着固定するリテナーが用いられるようになってきた。いっぽうで、接着性舌側リテナーは脱離のリスクがあり、脱離が生じた場合には歯の後戻りが生じるため、再治療が必要となる。Arquibら¹⁾は、対象患者の42.9%が脱離の経験があると報告している。

接着性舌側リテナーの脱離に関して、ワイヤーの種類や接着面積が関連する²⁾との報告があり、様々な脱離防止に関する研究が、行われている報告がされている^{3,4)}。また、保定期間の初期においては接着部での脱離が多くみられ、これは歯質とコンポジットレジン接着材間だけでなく、ワイヤーと接コンポジットレジン接着材間でも起こるため、歯列の後戻りに耐えられる強力な接着力は、歯質表面だけでなくワイヤー表面にも必要となる。

大気圧プラズマは、様々な接合場面において接着力の向上に寄与している^{5,6)}。しかし、これまでの研究の多くは、歯面と接着材との结合力や、接着材とジルコニア内面との结合力に焦点があてられており⁷⁻¹⁰⁾、フレキシブルでらせんの形状を持つワイヤーとの接着性が向上するかどうかについては明らかになっていない。そこで本研究は、大気圧プラズマ処理の有無によって、接着性舌側リテナーのワイヤーと接着材との脱離力を調べ、大気圧プラズマ処理が接着性舌側リテナーの保持に及ぼす影響を検討することを目的とした。

材料および方法

1. 材料

接着性リテナーのワイヤーについて、形状が6本巻きマルチストランドステンレス鋼線（レスポンドワイヤー、Ormco, Brea, CA, USA；直径0.017インチ）（マルチストランドワイヤー）と単線ステンレス鋼線（ステンレスストレートワイヤー、トミーインターナショナル、東京；直径0.018インチ）（単線ワイヤー）を使用した。

2. 試料作製

接着性を評価するため、ワイヤー側面方向に対して保定用コンポジットレジン接着材（Transbond LR, 3M Unitek, Monrovia, CA, USA）を接着する試料とワイヤーを垂直にコンポジットレジン接着材に埋め込む試料を作製した。すなわち、ワイヤー側面では、直径4 mm 高さ3 mm のポリプロピレン製円柱モールドの下端をワイヤーの側面にのせ、ワイヤーと反対のモールド上端からコンポジットレジンを充填し、モールドが被さっているワイヤー

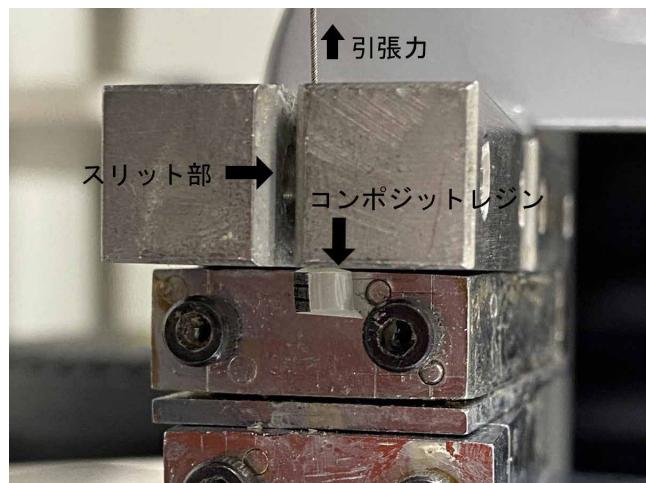


図1 引張試験の固定部

コンポジットレジンに植立されたワイヤーをスリット部に差し込み上方に引張力を加えた。

両端から接合面に向かって各20秒間、光照射器にて光照射し重合硬化させ試料とした。いっぽう、垂直方向では、直径4 mm 高さ3 mm のポリプロピレン製円柱モールド中央にワイヤー末端から2 mm 植立し、植立部に向かって左右方向より各20秒間、光照射し重合硬化させ試料とした。プラズマ照射をする場合は、ワイヤーのコンポジットレジン接着部分に大気圧プラズマ発生装置（Damage-Free Multi-Gas Plasma Jet, Plasma Factory, 横浜）を用いて10秒間窒素プラズマ処理を行い、同様に試料作製した。試料は、24時間37℃蒸留水中に試験まで保管された。

3. 試験

それぞれの試料について引張試験を行った。引張試験は、万能試験機（Type 5567, Instron, Norwood, MA, USA）を使用しクロスヘッドの治具からワイヤーを結び、接着材は固定された治具スリットに挟み込むように固定した（図1）。ワイヤー側面にコンポジットレジン接着材を接着した試料は、円柱モールド両端のワイヤーを上方に垂直に曲げクロスヘッドの治具と結び、同様に固定した。そして、被着接着材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、ワイヤー脱離までの最大力を測定し脱離力をとした。試料は各群10個測定された。

4. 走査電子顕微鏡（SEM）観察

ワイヤーとコンポジットレジン間の空間を確認するため、コンポジットレジンに垂直にワイヤーを2 mm 埋めて植立した試料について、アクリル樹脂にて包埋し、植立部を平坦に研削後、イオンコーティング（Quick Coater Type SC 201, サンユー電子、東京）で金蒸着を実施した。SEM (ERA-8800FE, エリオニクス、東京) を用いて、加速電圧10 kV、拡大倍率200倍、1,000倍の条件下で、試料

表1 垂直方向の引き抜き脱離力 (N)

| | | 平均 (標準偏差) | Sig* |
|--------------|---------|------------|------|
| マルチストランドワイヤー | プラズマ照射 | 68.4(7.3) | A |
| マルチストランドワイヤー | プラズマ非照射 | 51.4(5.3) | B |
| 単線ワイヤー | プラズマ照射 | 58.5(16.1) | AB |
| 単線ワイヤー | プラズマ非照射 | 23.1(7.8) | C |

*異なる文字間では有意差 ($p<0.05$) があることを示す

表2 側面方向の引張脱離力 (N)

| | | 平均 (標準偏差) | Sig* |
|--------------|---------|-----------|------|
| マルチストランドワイヤー | プラズマ照射 | 13.4(2.3) | B |
| マルチストランドワイヤー | プラズマ非照射 | 12.8(5.7) | B |
| 単線ワイヤー | プラズマ照射 | 19.7(4.3) | A |
| 単線ワイヤー | プラズマ非照射 | 12.6(4.2) | B |

*異なる文字間では有意差 ($p<0.05$) があることを示す

のワイヤー横断面のコンポジットレジン接合部を観察した。

5. 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 Version 3.1.9.6, Kiel University, Kiel, Germany) を用いて同様の実験系の脱離力を計測した研究文献¹¹⁾を参考にして検出力95%で求めた。その結果、サンプルサイズはグループ毎で6が得られ、それ以上のサンプルサイズで10とした。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、Tukey's HSD にて各群間の多重比較を行った。検定は有意水準5%で判定した。

成 績

1. ワイヤーの脱離力

ワイヤーの垂直方向の引き抜き脱離力を表1に示す。マルチストランドワイヤーは、51.4 N であった脱離力が、プラズマ照射によって68.4 Nと1.3倍有意に増加した。単線ワイヤーは、23.1 N の脱離力がプラズマ照射によって58.5 N に2.5倍有意に増加した。また、プラズマ非照射のマルチストランドワイヤーはプラズマ非照射の単線ワイヤーと比べて脱離力が有意に大きく、プラズマ照射すると両ワイヤーの脱離力に有意な差はみられなかった。ワイヤー側面方向での脱離力は、マルチストランドワイヤーにおいて12.8 N の脱離力であったがプラズマ照射によって13.4 N であり有意な增加はみられなかった。いっぽう単線ワイヤーについては12.6 N の脱離力がプラズマ照射によって19.7 N と1.5倍有意に増加した。また、プラズマ非照射のマルチストランドワイヤーはプラズマ非照射の単線ワイ

ヤーと比べて有意な差はなかったが、プラズマ照射した単線ワイヤーはプラズマ照射したマルチストランドワイヤーより1.5倍有意に増加した（表2）。

2. SEM 画像での比較

コンポジットレジン接着材に垂直に包埋された各ワイヤーの横断面 SEM 画像を図2および3に示す。マルチストランドワイヤーの表面やツイストされたワイヤー内側において、コンポジットレジンとの接合の乖離や空洞が所々みられた。そして、プラズマ照射群ではワイヤー周囲とコンポジットレジン接着材の間に空間がないことが観察された。単線ワイヤーについては、プラズマ照射およびコントロール群においてコンポジットレジン接着材とワイヤーとの接合が乖離している部分は観察できず、全体的にワイヤー周囲とコンポジットレジン接着材の間には空間がないことが観察された。

考 察

近年、ジルコニアクラウンやセラミッククラウン内面にプラズマ照射することで接着材との接合強度が向上するという報告がある^{8-10, 12)}。これは、プラズマ照射により表面改質が行われ、表面ぬれ性が向上するためであると考えられている¹³⁾。そこで本研究では、接着性舌側リテナーで用いられるワイヤーにおいても、プラズマ照射によるコンポジットレジン接着材との接着力が向上するか検討した。具体的には、臨床でワイヤーが脱離する時に想定される、ワイヤーに対して水平側方向にかかる脱離力と純粋な引き抜く方向の垂直側方向にかかる脱離力について計測を行った。その結果、プラズマ照射を行うことで、ワイヤーと接着材との保持力、とくに垂直方向の力に対する保持力が向上することが明らかになった。いっぽう、水平側方向の脱離力については弹性の低い単線ワイヤーで保持力が向上された。したがって、臨床上接着されているワイヤーは弹性の低いワイヤーの方がプラズマ処理の効果は高いのかもしれない。

Bearn ら¹¹⁾は、垂直的なワイヤーの引き抜き試験で、0.0175インチの2種類のスリーストランドタイプワイヤーを用いて、63.4 N と72.2 N の脱離力をそれぞれ報告している。いっぽう、本研究におけるプラズマ非照射のマルチストランドワイヤーでは、52.44 N とBearn ら¹¹⁾の研究と比較してやや低い値を示した。しかし、同時にBearn ら¹¹⁾の研究では同一のワイヤーを用いて各接着材での水平方向の引張脱離力を測定しており、今回我々が用いた接着材と同じ接着材を使用した場合には13.8 Nと報告した。本研究では、12.8 N とほぼ同等の結果が得られており、接着材の違いが脱離力に影響することが再確認された。

プラズマ処理により、金属表面の接触角は大幅に低下し、表面ぬれ性が向上することが報告されている¹⁴⁻¹⁶⁾。ま

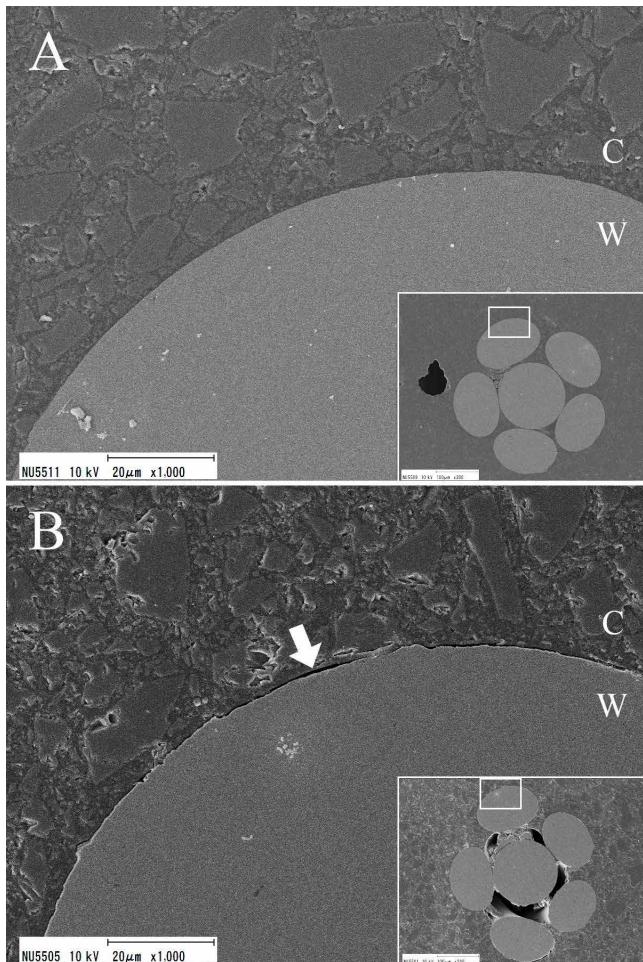


図2 コンポジットレジン接着材に埋め込まれたマルチストランドワイヤーの横断像
A) プラズマ処理したワイヤーの200倍と1,000倍拡大像、B) プラズマ未処理のワイヤーの200倍と1,000倍拡大像。コンポジットレジンとワイヤーの境界で間隙が観察される。(C: コンポジットレジン、W: ワイヤー) 矢印は乖離した境界部を示す。

た、プラズマガスのイオン化により、ジルコニア表面では酸素量の増加と炭素量の減少が生じるとの報告がある¹⁷⁾。本研究のSEM画像からも、プラズマ処理したストランドワイヤーの方がコンポジットレジン接着材との間に空間がなく密着した部分が多いことが確認された。これらの結果は、プラズマ処理によってワイヤー表面の有機汚染物の除去が行われ、接着材のぬれ性が向上した結果によるものと考えられる。

本研究では、マルチストランドワイヤーでの水平方向の脱離力に対して、プラズマ照射の効果は検出されなかった。マルチストランドワイヤーは单線ワイヤーに比べ柔軟性が高く変形しやすいため、引張脱離力に加えてワイヤー両端から上方へ引っ張られ剥離するような力も加わったことにより、プラズマ処理の効果が明確に検出されなかつた原因と推測される。そのため、今後は試験方法の影響も検

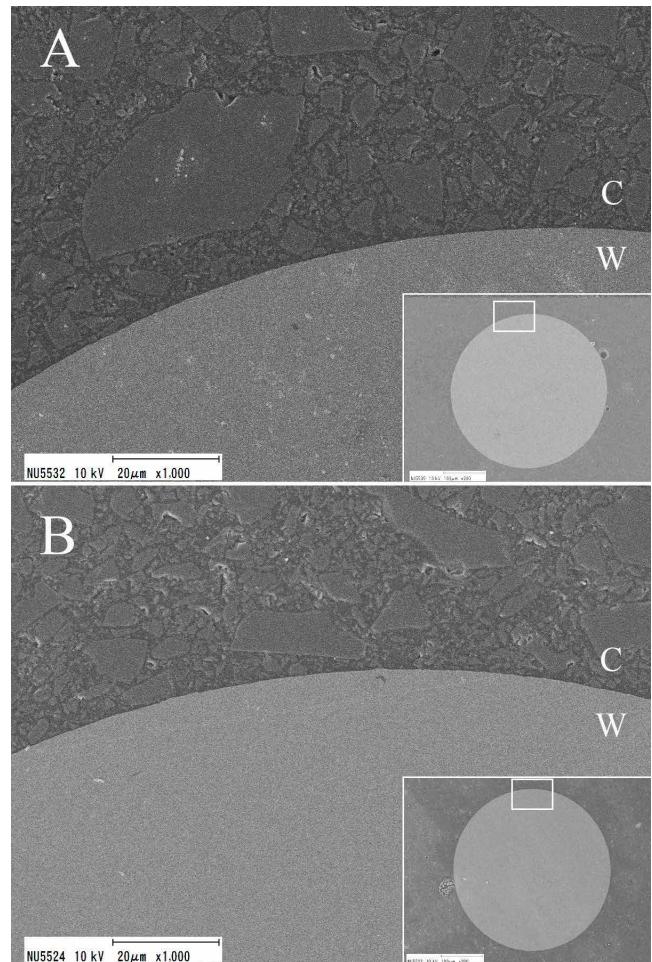


図3 コンポジットレジン接着材に埋め込まれた单線ワイヤーの横断像
A) プラズマ処理したワイヤーの200倍と1,000倍拡大像、B) プラズマ未処理のワイヤーの200倍と1,000倍拡大像。コンポジットレジンとワイヤーの境界で間隙は観察されなかった。(C: コンポジットレジン、W: ワイヤー)

討する必要があると考えられる。

結論

本研究では、保定装置として用いられる接着性リテナーについて、大気圧プラズマ処理がワイヤーとコンポジットレジン接着材との保持力の増加に効果があるかを検討し、以下の結論を得た。

1. 大気圧プラズマ処理により、ワイヤーの種類にかかわらずワイヤーとコンポジットレジン接着材間の垂直引き抜き方向における保持力が有意に增加了。
2. ワイヤーの側面方向における引張脱離力については、ワイヤーの種類によって大気圧プラズマ処理の効果に差が認められた。
3. マルチストランドワイヤーとコンポジットレジン接着材の接合部を比較した結果、プラズマ処理によって密

着性の向上が認められた。

以上の結果から、大気圧プラズマ処理は、接着性リテナーにおけるワイヤーとコンポジットレジン接着材の接着保持性を向上させることが示唆された。

本研究の一部は、令和6年度日本大学歯学部佐藤研究費(SATO-2024-18)の助成を受けて行われた。

本研究に関して、開示すべき利益相反はない。

文 献

- 1) Arqub SA, Bashir R, Obeng K, Godoy LDC, Kuo CL, Upadhyay M, Yadav S (2023) Survival and failure rate of lower lingual bonded retainers: A retrospective cohort evaluation. *Orthod Craniofac Res* 26, 256-264.
- 2) Paolone MG, Kaitas R, Obach P, Kaitas V, Benedicenti S, Sorrenti E, Barberis F (2015) Tensile test and interface retention forces between wires and composites in lingual fixed retainers. *Int Orthod* 13, 210-220.
- 3) Butler J, Dowling P (2005) Orthodontic bonded retainers. *J Ir Dent Assoc* 51, 29-32.
- 4) Cakmak Ozlu F, Yazıcıoğlu S (2022) Effect of self-etch primer application on the bond failure rate of a mandibular bonded lingual retainer. *BMC Oral Health* 22, 653.
- 5) Zhang H, Fang J, Hu Z, Ma J, Han Y, Bian J (2010) Effect of Oxygen plasma treatment on the bonding of a soft liner to an acrylic resin denture material. *Dent Mater* 29, 398-402.
- 6) Kim JH, Han GJ, Kim CK, Oh KH, Chung SN, Chun BH, Cho BH (2016) Promotion of adhesive penetration and resin bond strength to dentin using non-thermal atmospheric pressure plasma. *Eur J Oral Sci* 124, 89-95.
- 7) Dong X, Ritts AC, Staller C, Yu Q, Chen M, Wang Y (2013) Evaluation of plasma treatment effects on improving adhesive-dentin bonding by using the same tooth controls and varying cross-sectional surface areas. *Eur J Oral Sci* 121, 355-362.
- 8) Canullo L, Micarelli C, Bettazzoni L, Koçi B, Baldissara P (2014) Zirconia-composite bonding after plasma of argon treatment. *Int J Prosthodont* 27, 267-269.
- 9) Ito Y, Okawa T, Fukumoto T, Tsurumi A, Tatsuta M, Fujii T, Tanaka J, Tanaka M (2016) Influence of atmospheric pressure low-temperature plasma treatment on the shear bond strength between zirconia and resin cement. *J Prosthodont Res* 60, 289-293.
- 10) Tabari K, Hosseinpour S, Mohammad-Rahimi H (2017) The impact of plasma treatment of cercon zirconia ceramics on adhesion to resin composite cements and surface properties. *J Lasers Med Sci* 8, 56-61.
- 11) Bearn DR, McCabe JF, Gordon PH, Aird JC (1997) Bonded orthodontic retainers: the wire-composite interface. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 111, 67-74.
- 12) Sevilla P, Gseibat M, Peláez J, Suárez MJ, López-Suárez C (2023) Effect of surface treatments with low-pressure plasma on the adhesion of zirconia. *Materials Basel* 16, 6055.
- 13) Vilas Boas Fernandes Júnior V, Barbosa Dantas DC, Bresciani E, Rocha Lima Huhtala MF (2018) Evaluation of the bond strength and characteristics of zirconia after different surface treatments. *J Prosthet Dent* 120, 955-959.
- 14) Chen M, Zhang Y, Sky Driver M, Caruso AN, Yu Q, Wang Y (2013) Surface modification of several dental substrates by non-thermal, atmospheric plasma brush. *Dent Mater* 29, 871-880.
- 15) Prado M, Menezes MSO, Gomes BPFA, Barbosa CAM, Athias L, Simão RA (2016) Surface modification of gutta-percha cones by non-thermal plasma. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* 68, 343-349.
- 16) Kaimal A, Ramdev P, Shruthi CS (2017) Evaluation of effect of zirconia surface treatment, using plasma of argon and silane, on the shear bond strength of two composite resin cements. *J Clin Diagn Res* 11, ZC39-ZC43.
- 17) Piest C, Wille S, Strunskus T, Polonskyi O, Kern M (2018) Efficacy of Plasma Treatment for Decontaminating Zirconia. *J Adhes Dent* 20, 289-297