

支台歯の構造改変による歯根保全に関する研究
— 弾性体応用による歯根の保護性 —

奥羽大学大学院歯学研究科 歯内・歯周療法学専攻

松本 一文

(指導教員: 菊井徹哉)

Root Preservation by Modification of Abutment Tooth
- Root Protection by Elastic Material Application -

Department of Endodontics and Periodontics,

Ohu University,

Graduate School of Dentistry

Hidefumi Matsumoto

(Director: Tetsuya Kikui)

Abstract: A fiber-reinforced plastic post (FRP) with an elastic coefficient close to the tooth structure is recommended for the abutment of extensive crown restorations to avoid root fracture. However, some commercially available FRPs have elastic coefficients larger than the tooth structure, and, therefore, there is a risk of root fracture using abutments in the presence of extensive tooth decay. The present study investigated root protection when elastic material is used to support FRP posts.

Materials and Methods: Melamine teeth with standardized physical properties and shapes and human tooth roots were used as root canal models. A post hole of 10 mm in length and 1.4 mm in diameter was formed. The root canal orifice was a simple cylinder or the flare type. The protection performance of elastic material was evaluated comprehensively considering the thickness of remaining teeth. FIBER POST[®] (FP) was used as FRP. CLEARFIL DC CORE[®] (CR) was used as a post-supporting material. AFFINIS[®] (AFF) impression material and 2 silicone elastic adhesives, PREMIER GOLD[®] (PG) and Super-X[®] (SUX), were used as elastic supporting materials. Silicon dioxide powder (0, 20, and 50 wt%) was added to AFF as a filler. The abutment teeth were classified into the following 4 groups: 1) control group (FP was supported by CR), 2) PG group (FP supported by PG), 3) AFF group (FP supported by AFF), 4) SUX group (FP supported by SUX). Static load was applied at 45 ° to the long axis of the abutment tooth in the bending test. The bending strength was calculated from the breaking load. Student's t-test and the Man-Whitney u-test were performed at a risk rate of 5% to evaluate the significance of differences among groups. The fracture type of the abutment were classified into 5 types, and [Root preservation index = (frequency of fracture without dental root) / (frequency of fracture including root) x 100 / (the number of conditions of abutment)] was defined to assess the performance to protect the root.

Results: 1. In melamine teeth, the bending strength of the elastic support abutment groups depended on the bond strength between constitutional materials, and was significantly weaker than in the control group. The bending strength and protection index were: 1) control group: 100 MPa, 6, 2) PG group: 83 MPa, 32, 3) AFF group: 88 MPa, 17, and 4) SUX group: 58 MPa, 93. The elastic material showed root protection, and the “root protection index” could be used to objectively evaluate the protection performance. 2. The protection index of the control group in human roots was 6, and the bending strength was 266 MPa. In the PG group, the protection index was maximal (32), but the bending strength was 56 MPa (21% of the control group). In the AFF group, the protection index was 7, and the bending strength was 97 MPa (36% of the control group), suggesting the lowest bending strength. In contrast, the protection index was 10 and bending strength was 169 MPa in the SUX group, which were 64% of the control group. This suggested a relatively strong bending strength. Elastic coefficients of each supporting material were 5GPa in the control group CR, 0.6 MPa in the PG group, 1 MPa in the AFF group, and 3.6 MPa in the SUX group, suggesting that a certain level of elastic coefficient was needed for the supporting force.

Conclusion: Elastic material application in abutment construction suggested the possibility of avoiding root fracture. However, a specific balance between the critical bonding strength, in which interface failure occurs at the core-root junction, and elastic coefficient was required to obtain the necessary bending strength for abutment ability.

Key Words: abutment construction, root fracture, root preservation, elastic material, fiber post

抄 録

目 的： 広 範 囲 の 歯 冠 修 復 に 適 応 す る 支 台 に は 歯 根 破 折 回 避 の た め に 歯 質 に 弾 性 係 数 を 近 づ け た フ ァ イ バ ー ポ ス ト (FRP) 応 用 の 支 台 築 造 が 推 奨 さ れ て い る が ， 市 販 の FRP に は 弾 性 係 数 が 歯 質 よ り 大 き い 製 品 も あ り ， 歯 質 崩 壊 が 大 き い 支 台 歯 で は 歯 根 破 折 の 可 能 性 が 残 っ て い る 。 本 研 究 で は ， FRP ポ ス ト の 支 持 に 弾 性 材 料 を 用 い た 支 台 築 造 法 に お い て 歯 根 の 保 護 性 を 検 討 し た 。

材 料 お よ び 方 法： 根 管 モ デ ル に は 規 格 化 さ れ た 物 性 ・ 形 状 で あ る メ ラ ミ ン 歯 と ヒ ト 歯 の 歯 根 部 分 を 用 い た 。 長 さ 10mm， 先 端 径 1.4mm の ポ ス ト ホ ール を 形 成 し ， 根 管 口 部 は 単 純 な テ ー パ ー 型 と ロ ー ト 型 の 2 形 態 に 成 形 し て 残 存 歯 質 の 厚 み を 加 味 し て 弾 性 材 料 の 歯 根 保 護 性 を 包 括 的 に 評 価 し た 。 FRP に は FIBER POST® (FP)， ポ ス ト 支 持 材 料 に は ク リ ア フ ィ ル DC コ ア® (CR) と 弾 性 支 持 材 と し て 印 象 材 の AFFINIS® (AFF) と 2 種 類 の シ リ コ ー ン 系 弾 性 接 着 材 の PREMIER GOLD® (PG) と Super-X® (SUX) を 用 い た 。 AFF に は フ ィ ラ ー と し て 二 酸 化 ケ イ 素 粉 末 を 0, 20, 50wt% で 配 合 し 弾 性 調 整 し た 。 支 台 歯 は FP を CR で 支 持 し た 対 照 群 ， 各 弾 性 材 料 で 支 持 し た PG 群 ， AFF 群 ， SUX 群 と し て 構 成 し た 。 抗 折 試 験 は 支 台 歯 の 長 軸 に 対 し て 45° の 角 度 で 静 的 に 加 重 し ， 破 壊 荷 重 か ら 抗 折 強 さ を 算 出 し た 。 統 計 学 的 な 分 析 は Student's t-test お よ び Man-Whitney u-test を 用 い て ， 危 険 率 5% で 実 験 群 間 の 差 異 の 有 意 差 を 検 定 し た 。 ま た ， 支 台 歯 の 破 折 状 況 を 5 形 態 に 分 類 し て [歯 根 保 護 指 数 = (歯 根 を 含 ま な い 破 折 の 頻 度) / (歯 根 を 含 む 破 折 の 頻 度) × 100 / 支 台 条 件 の 数] を 定 義 し て 歯 根 の 保 護 性 を 評 価 し た 。

結 果：

1.メラミン歯において弾性体支持支台群の抗折強さは、構成材間の接着強さに依存傾向があり対照群に比べていずれも有意に小さく、抗折強さと保護指数はそれぞれに対照群：100MPa，6，PG群：83MPa，32，AFF群：88MPa，49，SUX群：58MPa，93であった。弾性材料は歯根保護性を示し、歯根保護指数により保護性を客観的に評価できた。

2. ヒト歯根での対照群は保護指数6，抗折強さ266MPaであった。PG群は保護指数が最大の32であるが抗折強さは56MPaで対照群の21%，また，AFF群では保護指数が7，抗折強さは97MPaで対照群の36%と抗折強さが低かった。一方，SUX群での保護指数は10，抗折強さは169MPaで対照群の64%とある程度の抗折強さが示された。各ポスト支持材料の弾性係数は対照群のCRで5GPa，PGは0.6MPa，AFFは1MPa，SUXは3.6MPaであり，支持力にはある程度の弾性係数の大きさが必要であることが示唆された。

結 論： 支台築造への弾性材料の応用において歯根破折を回避できる可能性が示唆された。しかし，支台能力として必要な抗折強さを得るには，支台・根面接合で界面破壊になる臨界接着強さと弾性係数との調和を図る必要があった。

キーワード：支台築造，歯根破折，歯根保護，
弾性材料，ファイバーポスト

緒 言

歯の喪失は歯周病，齶蝕の次に歯根破折が原因となっており，抜歯になった歯の60%は無髄歯である¹⁻³⁾。広範囲の歯質崩壊に対する歯冠修復では金属鑄造体による支台築造が行われてきたが，金属と歯根歯質の弾性係数の差により歯根破折の誘因になっていた^{4,5)}。近年，支台築造歯の歯根破折回避のために根部象牙質に弾性係数を近づけたファイバーポスト(FRP)を応用したコンポジットレジンによる支台築造が推奨されている^{6,7)}。一方，市販のFRPの中には弾性係数が歯質より大きい製品もあり⁸⁾，歯根破折の可能性は存在している⁵⁾。高橋⁹⁾は弾性係数が象牙質に近似するポストを用いた場合，歯根部への負荷伝達は減少するが支台歯として機能するためにはポストの曲げ強さが要求されると述べている。岡本ら¹⁰⁾はポストにFRPを用いた支台歯の応力解析において，メタルコアを用いた場合に比較して歯根の残存歯質量が少ない場合に最大応力発現部位は歯冠側へ変化する可能性を示唆している。さらに，坪田¹¹⁾はFRPの応用により破折様相が改善し，歯根の再利用ができる可能性が高くなったと報告しており，破折予防に対するFRPの有用性が明らかになってきた。

支台能力は歯冠歯質が残存する場合は適切に確保されるが，歯冠部歯質を大きく失い根部歯質の軟化が進行し，感染歯質の除去により漏斗状根管となった状態の悪い歯根では，支台築造が困難であり，FRPを用いても歯根破折を招くことが懸念されるため破折回避の方策が検討されている。佐々木¹²⁾はFRP併用レジン支台築造の補強において，漏斗状根管におけるレジン支台築造では複数のファイバーポストもしくはスリーブを配置させた支台築造法が望ましいと報告している。しかし，拡大された根

管をFRPとコンポジットレジンで満たす方法では多量のコンポジットレジンの重合が必要となり、重合収縮による剥離や根管深部への重合度に問題を生じる。また、再根管処置が必要となった場合には根管内のレジンを切削する必要を生じるため、ポストおよびポスト支持材の除去操作が容易なことも必要と考えられる。

本研究では支台歯の歯根保護性と再根管治療への配慮において、ポスト支持材料にシリコーン樹脂を用いる支台築造法を考案し、歯根保護性ならびに支台能力を検討した。

材料と方法

1. 実験材料

実験材料、製造元およびコードを表1に示す。根管モデルとして規格化された形状と物性における検討にメラミン歯、また、天然歯質における検証のためにヒト歯・歯根を用いた。抜去歯の収集は奥羽大学倫理委員会の承認を得て行った(No.116, 収集期間:2014,12,26~2015,9,31)。支台歯の構成はコア部にコンポジットレジンであるソラーレ[®]、根管部にクリアフィル[®]DCコア(以下CR)、また、歯質接着システムMEGA BOND[®](以下MEGA)、ファイバーポストにはFIBER POST[®](以下FP)、FPのシラン処理にはTOKUSO CERAMIC PRIMER[®]、根管壁の接着処理にはMEGAを用いた。ポストを支持する弾性材料にはシリコーンゴム印象材のAFFINIS[®](以下AFF)と、2種類の一般用シリコーン系弾性接着材のPREMIER GOLD[®](以下PG)とSuper-X[®](以下SUX)を用いた。AFFに対する接着剤としてシアノアクリレート系接着材のPPX[®](以下PPX)、また、AFFの弾性調整のために二酸化ケイ素粉末を用いた。

2. 実験に用いた弾性材料の成分と弾性係数および接着強さ

各弾性材料の成分と性質を表2に示す。材料の弾性係数は、PG, SUX(直径6mm, 高さ10mm)ならびにAFFにフィラーとして二酸化ケイ素粉末を0,20,50wt%で混合した場合(直径10mm, 高さ20mm)の円柱状試料を万能試験機にて圧縮試験(cross head speed=0.5mm/min)を行い, 得られた加重-変形曲線から弾性係数を算出した(表2, 表3)。また, メラミンおよびヒト歯根部象牙質に対する接着強さは, 各接着材でコンポジットレジン円板(直径6mm, 厚さ3mm)とAFF円柱(直径6mm, 長さ10mm)をそれぞれ接着し, 24時間, 37℃の恒温槽で保管した後, 圧縮剪断接着試験(cross head speed=0.5mm/min)を行って破断荷重から剪断接着強さを求めた(表4, 表5)。FP, ソラーレ®およびクリアフィルDC®コアの曲げ弾性係数(表6)は3点曲げ試験を行い算出した。

3. 実験の操作手順と内容

1) ポストホールの調整

メラミン歯およびヒト歯の根管モデルはスチールラウンドバーおよびオットレンギリマーを用いてポストホール(長さ10mm, 先端径1.4mm)を形成した。また, 根管口部の形状を単純なシリンダー型とロート型の2形態に成形して, 根管口部の残存歯質の厚みの影響を比較した(表7)。

2) 支台歯の調整

収集したヒト抜去歯は実態顕微鏡で歯質に亀裂がないことを確認して実験に用いた。ヒト歯は歯頸線にて歯冠を切断し, 歯根部分について通法に従って根管内容物を

除去，根尖孔付近の拡大を#40としてガッタパーチャポイント(Zippeler, 茂久田, 神戸)およびキャナルス®(昭和薬品化工, 東京)を用いて根管充填を行った。

3) 抗折試験

支台構造の概略を図1に示す。各支台の構造条件は表8に示すように，対照群ではCRでポストを支持し，実験群では弾性材料のPG, AFF, SUXで支持する構成とした。コア部はソラーレ®で築盛して光照射器Blue shot®(松風, 京都)を用いて重合・成形し，さらに今回の実験ではレジンの重合不全の抗折強さへの影響を避けるために光重合器LABO LIGHT LV-III®(ジーシー, 東京)を用いて最終重合を5分間行った。なおAFFについては，メラミン歯の場合0, 20, 5wt%のフィラー配合率で，ヒト歯の場合20wt%のフィラー配合率で用いた(表8)。各試料は24時間，37℃のインキュベーター内で保管した後，歯根部分を約2mm露出してMMAレジんに包埋し抗折試験に供した。抗折試験(図2)は水平面に対して試料の歯軸を45°傾斜して測定用ジグに固定，万能試験機で歯根径の長軸方向に静的に加重(cross head speed=0.5mm/min, DW1310, Aikoh Engineering, 東京)し，測定された破壊荷重から抗折強さを算出した(表7)。

4) 統計学的分析

統計学的分析はStudent's t-testおよびMann-Whitney u-testを用いて各条件間の抗折強さの差異について危険率5%で有意差を検定した(表7)。

5) 破壊様相の分析

抗折試験後の支台試料の破壊状況(図3)を実体顕微鏡ならびにエックス線写真を用いて観察し，破壊状況を5形態(表9)に分類した。

6) 歯根保護性の評価

表 7 に保護性の評価方法を示す。破壊状況の発生頻度より「歯根保護指数 = $[(A+B+C)/(D+E) \times 100] / N$, N; 支台条件の数: 数値の大きい方が歯根保護性に優れる」と定義して歯根の保護性を評価した。さらに, 歯根保護指数, 支台の抗折強さ, 支台・根面界面接着強さおよび支持材料の弾性係数により支台歯のバランスを評価した。

結 果

1. メラミン歯における結果

1) 各支台構造における抗折強さ

(1) ポスト径 0.8 mm での抗折強さを図 4 に示す。対照群はポストホール形状に左右されずシリンダー型で $93.9 \pm 23.1 \text{ MPa}$, ロート型で $93.4 \pm 30.6 \text{ MPa}$ と同程度の抗折強さを示した。これに対して実験群ではシリンダー型において PG 群 80.8 ± 29.8 , AFF 群 45.5 ± 13.5 , SUX 群 $57.9 \pm 21.4 \text{ MPa}$ であり, 対照群に比較して AFF と SUX は有意に小さかった。ロート型では PG 群 76.2 ± 57.5 , AFF 群 87.0 ± 42.2 , SUX 群 $53.4 \pm 9.5 \text{ MPa}$ であり, SUX 群が有意に小さかった。

(2) ポスト径 1.6 mm での抗折強さを図 5 に示す。対照群の抗折強さはシリンダー型で 129.2 ± 21.6 , ロート型で $188.4 \pm 20.7 \text{ MPa}$ と 0.8 mm 径より大きいことが示された。実験群のシリンダー型では PG 群 52.5 ± 6.5 , AFF 群 65.9 ± 23.7 および SUX 群 $37.4 \pm 7.8 \text{ MPa}$ であり対照群に比べて有意に小さい。ロート型においても対照群に比べ有意に小さく, PG 群は 96.7 ± 30.2 , AFF 群 126.4 ± 36.4 , SUX 群 $70.0 \pm 7.8 \text{ MPa}$ であった。

2) メラミン支台歯の破壊様相と歯根保護指数

メラミン支台の破壊状況と歯根保護指数を表 10 に示す。対照群ではポストホール形状によらず歯根を含む混合破壊が多く、ロート型ではすべて歯根破壊を伴っていた。平均抗折強さは 100MPa であるが保護指数は 6 で最も小さい。一方、PG 群では界面破壊が多く保護指数は 32 と高値を示したが、抗折強さは 83MPa であった。また、AFF 群も界面破壊の割合が多く指数は 49、抗折強さは 88MPa、SUX 群ではシリンダー型およびロート型ともに界面破壊が多く、指数は 93 と最大であるが、抗折強さは 58MPa で支持力は最も小さかった。

3) AFF の弾性係数の違いについて

(1) 抗折強さ

AFF においてフィラー配合率を変えた場合の抗折強さを図 6、図 7 に示す。シリンダー型の 0wt% 群は 0.8mm 径で 44.5 ± 12.7 MPa、1.6mm 径では 75.7 ± 29.8 MPa、また、ロート型の 0.8mm 径では 59.1 ± 16.8 MPa、1.6mm 径で 84.8 ± 42.0 MPa とポストホール形状にかかわらず 1.6mm 径の抗折強さが大きかった。一方、シリンダー型 0.8mm 径では 20wt% 群と 50wt% 群で抗折強さの有意な上昇が示されたが、他の条件間では有意差は検出されなかった。

(2) 破壊様相

AFF の弾性係数の差異における破壊様相を表 11 に示す。シリンダー型、ロート型ともに弾性係数が高くなると抗折強さは増強するが、歯質を含む混合破壊も増加した。歯根保護指数は 0wt% で 32、20wt% と 50wt% では 9 であった。弾性係数が小さいと保護指数は大きいことが示された。一方、抗折強さは 20wt% で高値を示した。

4) メラミン歯支台におけるバランス評価

弾性材料応用の各支台の抗折強さは歯根・コア接合界面の接着強さに依存する傾向があり、対照群に比べて

いずれも有意に小さい(表4, 図4, 図5)。支台歯構成4条件の平均抗折強さと保護指数はそれぞれに对照群100MPa/6, PG群83MPa/32, AFF群77MPa/41, SUX群58MPa/93であった(図8)。弾性材料は歯根保護性を示し, 歯根保護指数は保護性を客観的に表した。

2. 天然歯質(ヒト歯)における検証

1) ヒト歯支台における抗折強さ

对照群の抗折強さはポスト径0.8mmのシリンダー型で 323.5 ± 124.4 MPa, ロート型で 231.1 ± 133.5 MPa(図9), ポスト径1.6mmではシリンダー型で 328.5 ± 135.7 MPa, ロート型では 181.8 ± 146.2 MPaであり(図10), シリンダー型が大きい傾向を示した。

ポスト径0.8mmでは両ポストホール形状ともに類似した傾向であるが, 对照群に比べ実験群は有意に小さかった(図9)。抗折強さはPG群 $33.4 \pm 17.3 < AFF$ 群 $99.6 \pm 27.3 < SUX$ 群 108.3 ± 56.7 MPaの順に大きくなり, 弾性係数の大きさに準じていた(図9)。SUX群は歯質・コア間の接着強さが小さい(表5)が抗折強さは大きく, ロート型で对照に近い抗折強さ 230.2 ± 70.8 MPaを示した。

また, ポスト径1.6mmにおいても0.8mmと同様にシリンダー型ではPG群 $42.7 \pm 12.5 < AFF$ 群 $100.2 \pm 45.7 < SUX$ 群 111.0 ± 27.3 MPa, ロート型でもPG群 $99.8 \pm 57.7 < AFF$ 群 $100.0 \pm 44.4 < SUX$ 群 225.3 ± 53.8 MPaの順に抗折強さが大きく, SUX群は对照群に近い抗折強さを示した(図10)。

2) ヒト歯支台での破壊様相と保護指数

ヒト歯における支台の破壊様相を表12に示した。对照群では歯根を含む混合破壊の割合が多く, 歯根保護指

数は6であるが、弾性材料支持の実験群では歯根を含む混合破壊の割合が減少し、PG群で32、AFF群で7、SUX群では10であった。

3) ヒト歯支台におけるバランス評価

ヒト歯支台において対照群は保護指数6、平均抗折強さは266MPaであった。これに対してPG群は保護指数が最大の32であるが抗折強さは対照群の21%、またAFF群では保護指数が7、SUX群での保護指数は10で抗折強さが対照群の約64%であった(図11)。

3. ポストホール形状、ポスト径と抗折強さ

ポストホール形状とポスト径の影響について表13に示す。メラミン歯支台ではシリンダー型に比較してポスト径0.8mmではAFFのロート型が有意に大きく、また、ポスト径1.6mmでは支持材料にかかわらずロート型で抗折強さが有意に大きいことが示された。

AFFへのフィラー配合の影響による抗折強さの有意な変化は示されなかった。

ヒト歯支台ではポスト径0.8mmのSUX支台のロート型、ポスト径1.6mmではPG支台とSUX支台のロート型で抗折強さが有意に大きいことが示された。

考 察

支台歯の咬合負担の能力には材料間の接着強さ^{13,14)}やポスト材料の弾性的性質の影響が大きい¹⁵⁾。また、支台構造全体の耐久性についてはポストの疲労耐久性、構造欠陥¹⁶⁾、ポストの引き抜き試験¹⁷⁾や抗折試験¹⁸⁾ならびに接着システムの選択¹⁹⁾によって検討されている。本研究では支台能力の4要素(歯根保護性、抗折強さ、ポスト支持材の弾性係数、歯質・コア接合の接着強さ)に

より物理的バランスの評価を試みた。

1. 弾性材料の応用

支台築造歯における歯根破折は再治療を困難にしているため²⁰⁾、本研究ではポストの支持に弾性材料を応用することによる歯根保護性を検討した。支持材料として用いたシリコーン樹脂はシリコーンゴム印象材や根管充填材“RSA RoekoSeal[®]”(成分：ポリジメチルシロキサン，シリコンオイル，パラフィンオイル，ヘキサクロル白金酸，二酸化ジルコニウム)として用いられている。シリコーン樹脂は生体不活性であることが確認されており²¹⁾、また、ヒトの口腔内環境における温度変化範囲(-10~50℃)では弾性的性質もほとんど変化しないため、熱膨張係数の異なる材料間の接合に適している。付加型シリコーンゴム印象材の硬化時寸法変化率(線収縮)は約0.05%²²⁾であり、コンポジットレジン²³⁾の重合収縮率(線収縮)の0.2~0.5%²³⁾に比較して小さいため、硬化時の寸法変化では剥離しないと考えられた。実験では付加型シリコーンゴム印象材(AFF)を用い2種類の弾性接着材(PGとSUX)と比較した。AFFには弾性係数調整のためにフィラーを配合した。AFFの根管注入という操作性と硬化時間において配合率は50wt%が限度であった。一方、根管充填材のRSA RoekoSeal[®]は流動性に優れるが硬化に45~50分間必要であり支台築造用材料としては不適當である。シリコーン樹脂をポスト支持材にするには、フィラー充填率をさらに高めた上で根管注入を障害しない操作時間を確保するために光重合方式へ変更し、操作性と硬化特性を調整する必要があると考えられた。

2. 材料間接着強さの抗折強さへの影響

接着材として用いたシアノアクリレート系接着材 PPX ならびに2種類の湿気硬化型シリコン系弾性接着材の PG と SUX は大気中あるいは被着体表面の水分を吸収して硬化する。また, PG と SUX は被着体表面の OH 基と反応する性質があるため歯質接着においても有効と考えられる。一方, AFF の場合には OH 基との反応性はないため PPX により接着を図った。根管内面の接着前処理に用いた MEGA には機能性モノマーとして OH 基を有する HEMA 等が配合されており, 湿気硬化型の PG と SUX との化学結合の可能性はある。しかし, MEGA 単体においてメラミンに比較してヒト根部歯質との接着では接着強さが約 1/2 と小さく, 他の接着方式ではさらに小さくなった(表 4, 5)。MEGA 単体に比較して弾性材料である PG, AFF, SUX が介在したことで接着層の弾性変形により接着強さが低下したと考えられた。ヒト歯根では弾性係数の比較的大きな SUX (3.9 MPa) で抗折強さも大きく, 保持力を確保しつつ, 接着層が変形・剥離してポストを脱離させる事により歯根破折を防ぐことが期待できると考えられた。

3. ポストホール形状と抗折強さが歯根破折に及ぼす影響

ポストホール形状は臨床における様々な歯根の状態を想定して, 冠部歯質の全くない場合において比較的状态の良いシリンダー型と状態の悪いロート型を設定した^{9, 11, 12)}。また, FRP の太さを2種類にして4条件の支台を構成し, 包括的に歯根保護性を検討した。

1) メラミン歯支台について

弾性材料支持支台のポスト径 0.8 mm ではポストホール形状での抗折強さの差異は小さいが, 1.6 mm ではロート型の方が抗折強さは大きく, ロート状部における補強効果

と考えられた。しかし、SUX 支台の抗折強さはいずれの条件においても小さく、メラミンとの接着強さが小さいことが影響していると考えられた。また、湿気硬化型接着材である PG (弾性係数 0.6 MPa) と SUX (弾性係数 3.6 MPa) との比較においても SUX の方が小さいことから、被着体に水分の少ない条件では硬化が不十分であったとも考えられた (表 13a)。一方、AFF へのフィラー配合の影響による抗折強さにおいても、ポスト径 1.6 mm で抗折強さは大きい傾向が見られたが、ポストホール形状間に有意な差異は示されなかった (表 13b)。いずれの弾性材料においても対照群に比べて高い保護性が示されたが、メラミン歯における抗折強さは対照の 60~80% と小さく、根面・コア接合界面の接着強さに影響を及ぼされていると考えられた (図 8)。

2) ヒト歯支台について

ポスト径 1.6 mm の PG 支台でロート型での抗折強さが有意に大きく、SUX 支台では両ポスト径ならびに両ポストホール形状において、ロート型の抗折強さは同程度であり、シリンダー型に比べ有意に大きく、ロート部での補強効果とポスト径の太さが相乗していると考えられた。(表 13c)。ヒト歯根では象牙質接着材である MEGA の特性を反映して対照群の抗折強さは 200 MPa 以上と高い値を示した (図 11)。一方、実験群は歯根保護性に優れるが、根面・コア接合界面の接着強さが弱いため接合界面から接着破壊が進展しやすく抗折強さが低くなったと考えられた。支台のバランスにおいて適切な抗折強さを得るには根面・コア接合界面での接着強さを高める必要があると推察された。また、シリコン系接着材の弾性係数を高めて根管内面との接着強さを改善することができれば、ポストの引抜き抵抗が増加して支台の機能強化に繋がり、佐々木ら¹²⁾のよう

に FRP を複数挿入する方法に比べ簡便にもなると考えられた。

4. 歯根保護性の評価方法

従来，支台歯における歯根の保護性は破折様相と発生頻度で議論^{4,12,13,20,24}されてきたが，本研究では保護性を客観化するために破壊状況の発生頻度から歯根保護指数を定義した。歯根保護指数は破壊状況の発生頻度の割合をさらに実験した支台条件の数で除して普遍化を図った。歯根の破壊様相分類において A, B, C であれば歯根の再利用が可能である(表 9)。メラミン歯支台における結果(図 8)において保護性が客観的に表現され，妥当な評価方法と考えられた。ヒト歯支台のバランス評価においてもメラミン歯と同様の図形(図 11)になり，歯根保護指数，抗折強さ，根面・コア接合界面の接着強さおよびポスト支持材料の弾性係数の4つの値により支台の物理的なバランスを明示できた。

結 論

本研究では支台歯の歯根保護性と再根管治療への配慮において，ポスト支持材料にシリコーン樹脂を用いる支台築造法を考案し，歯根保護性と抗折強さのバランスを検討した。ヒト歯根においては以下の結論が得られた。

- ① PG は歯根保護性に優れるが支持力は弱かった。
- ② AFF は歯根保護性，支持力ともに十分ではなかった。
- ③ SUX は比較的高い歯根保護性とある程度の支持力が示された。
- ④ 抗折強さに対するポストホール形状とポスト径の影響において，SUX 支台ではポスト径 0.8 mm、1.6 mm 双方で

ロート型の抗折強さが大きく、ロート部での補強効果とポスト径の太さが相乗して示された。

ポスト支持材料として、弾性材料を応用することで外力による歯根破折を回避できる可能性が示唆された。しかし、歯根保護と支台として必要な抗折強さを両立させるには、ポスト支持材料の弾性係数と根面・コア接合部において、界面破壊となる接着強さで調和を図る必要があると考えられた。

利益相反

本論文において開示すべき利益相反はありません。

謝辞

稿を終えるに鑑み、ご協力をいただいた保存修復学分野の先生方に感謝致します。

参考文献

- 1) 安藤 雄一, 相田 潤, 森田 学, 青山 旬, 増井 峰夫: 永久歯の抜歯原因調査報告書 平成 17 年 3 月; 14-22 財団法人 8020 推進財団 東京 2005.
- 2) Axelsson P., Nyström B., Linde J.: The long-term effect of a plaque control program on tooth mortality, caries and periodontal disease in adults. Results after 30 year of maintenance. *J.Clin.Periodontol.* **31**;749-757 2004.
- 3) Toru S., Hideki F., Fumiaki S.: A study on the risk of tooth loss among individuals receiving long-term maintenance care at a dental clinic. *日歯医療管理誌* **40**;317-331 2006.
- 4) 岡本和彦, 猪野照夫, 日比野靖, 曾根峰世, 中嶋裕, 大川周治: 支台築造歯の歯根破折に関する実験的研究 - 歯根部歯質の残存量および支台築造法の影響について -. *明海歯学* **35**;69-75 2006.
- 5) 峯 篤史: "2013 年における"歯根破折防止策のための文献的考察. *日補綴会誌* **6**;26-35 2014.
- 6) Ferrari M., Vichi A., García-Godoy F.: Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and cores. *Am.J.Dent.* **13**;15B-18B 2000.
- 7) Willershausen B., Tekyatan H., Krummenauer F., Briseño Marroquin B.: Survival rate of endodontically treated teeth in relation to conservative vs post insertion technique - A retrospective study. *Eur.J. Med.Res.* **10**;204-208 2005.
- 8) 高橋英和, 岩崎直彦: ファイバーポストの特徴. DE

- 145;5-8 2003.
- 9) 高橋英和：支台築造歯の破折メカニズム．補綴誌
45;669-678 2001.
- 10) 岡本和彦，猪野照夫，岩瀬直樹，清水栄太郎，鈴木めぐみ，佐藤剛，曾根峰世，大川周治：三次元有限要素法を用いたポストコア装着歯における応力解析－歯根部残存歯質量および支台築造法が歯根部歯質の応力分布に及ぼす影響について－．明海歯学 36;30-36 2007.
- 11) 坪田有史：接着と合着を再考する－支台築造を中心に－．日補綴会誌 4;364-371 2012.
- 12) 佐々木圭太：漏斗状根管に対するファイバーポスト併用レジン支台築造の補強に関する研究．日補綴会誌 2;157-166 2010.
- 13) 青崎有美：ガラスファイバーポストの表面処理法に関する微小引張り試験による検討．日補綴会誌 3;238-247 2011.
- 14) 本多利人，渡邊文彦：支台歯形成時期がレジンコアの象牙質接着強さに及ぼす影響．日補綴会誌 4;403-410 2012.
- 15) 副島寛貴，武本真治，小田豊，河田英司：ファイバー強化型コンジットレジンポストを用いて直接法で支台築造したポストの維持力．日歯保存誌 58;185-191 2015.
- 16) マルコ フェラーリ，シモーネ グランディーニ，セシリア ゴラッチ，フランチェスカ モンティチェリ：ファイバーポストの疲労抵抗と構造的欠陥：3点曲げ試験とSEM観察．*Adhes.Dent.* 22;254-261 2004.
- 17) 坪田有史，深川菜穂，北村茂，大称貴俊，西村康，橋本興，福島俊士：各種接着材によるファイバー

- ポスの引き抜き強さ. *Adhes.Dent.* **24**;136-144 2006.
- 18) Mezzomo E., Massa F., Libera SD.: Fracture resistance of teeth restored with two different post-and-core designs cemented with two different cements: an in vitro study. Part I. *Quintessence Int.* **34**;301-306 2003.
- 19) Boschian Pest L., Cavalli G., Bertani P., Gagliani M. : Adhesive post-endodontic restorations with fiber posts: push-out tests and SEM observations. *Dent.Mater.* **18**;596-602 2002.
- 20) 天川 丹, 林 都美香, 石井信之: 根管充填歯の垂直歯根破折に関する臨床研究－歯根破折の早期診断法と破折防止法の確立－. *日歯保存誌* **58**;381-390 2015.
- 21) 筏 義人, 立石哲也, 中林宣男, 山下修蔵, 赤須弘幸, 浅原智彦, 石原一彦, 岩田博夫, 片倉健男, 黒柳能光, 高良真一, 佐渡峯生, 田辺進, 堤定美, 中村晃忠, 野尻知里, 橋田充, 増田繁, 山内愛造, 横山雄一: 形成外科領域における人工補填物の使用 生体適合材料<その機能と応用>(筏義人編) 第1版;214-215 日本規格協会 東京 1993.
- 22) 橋本弘一, 野口八九重, 高橋重雄: 第4章 歯科技術と使用材料 1. 印象材採得 標準歯科理工学(橋本弘一編) 第1版;101 医学書院 東京 1990.
- 23) 橋本弘一, 野口八九重, 高橋重雄: 第1章 歯科材料総論 4. 操作性 標準歯科理工学(橋本弘一編) 第1版;14 医学書院 東京 1990.
- 24) 時庭由美子: 支台築造用コンポジットレジンに対するファイバーポスの配置に関する研究. *日補綴会誌*

2;167-176 2010.

図表の解説

表 1 : 実験材料

表 2 : 弾性材料・接着材の弾性係数と成分

表 3 : AFF へのフィラー配合と弾性係数

表 4 : メラミンに対する接着強さ

表 5 : 根部象牙質に対する接着強さ

表 6 : 支台材料の性質

表 7 : 実験方法

表 8 : 支台歯の材料構成

表 9 : 破壊様相の分類

表 10 : メラミン歯支台の破壊様相

表 11 : AFF のフィラー配合率と保護指数

表 12 : ヒト歯支台の破壊様相

表 13 : 各支台の抗折強さ

図 1 : 支台の構造

図 2 : 抗折強さの測定

図 3 : 抗折試験の状況

図 4 : メラミン歯支台における抗折強さ(ポスト径 0.8 mm)

図 5 : メラミン歯支台における抗折強さ(ポスト径 1.6 mm)

図 6 : AFF のフィラー配合率と抗折強さ(メラミン歯, シリンダー型)

図 7 : AFF のフィラー配合率と抗折強さ(メラミン歯, ロート型)

図 8 : メラミン歯支台のバランス評価

図 9 : ヒト歯支台における抗折強さ(ポスト径 0.8 mm)

図 10 : ヒト歯支台における抗折強さ(ポスト径 1.6 mm)

図 11 : ヒト歯支台のバランス評価

表1. 実験材料

根管モデル	メラミン歯	歯根部(規格化形状, 物性)(ニッシン)		
	ヒト歯	歯根部(切歯, 犬歯, 第2小臼歯:単根歯) 奥羽大学倫理委員会承認(No.116), 収集期間:H26,12,26~H27,9,31		
		材 料	製造元	コード
コンポジットレジン	コア部	ソラーレ [®]	ジーシー	
	根管部	クリアフィル [®] DCコア	クラレノリタケ	CR
歯質接着システム		MEGA BOND [®]	クラレノリタケ	MEGA
ポスト材		FIBER POST [®] (φ0.8mmと1.6mm:ペンシル形態)	ジーシー	FP
シラン処理剤		TOKUSO CERAMIC PRIMER [®]	トクヤマデンタル	
弾性支持材料		AFFINIS [®] (シリコーンゴム印象材)	Colténe whaledent	AFF
多用途接着材(一般用)		PREMIER GOLD [®] (弾性接着材)	スリーエム	PG
		PPX [®] (接着材)	セメダイン	PPX
		Super-X [®] (弾性接着材)	セメダイン	SUX
フィラー用材料		二酸化ケイ素	和光純薬	

表2. 弾性材料・接着材の弾性係数と成分

弾性材料 (接着材)	弾性係数 20°C	成分
AFFINIS®	0. 8MPa	シリコーンゴム(100%)
PREMIER GOLD®	0. 6MPa	変成シリコーン(100%)
PPX®	—	シアノアクリレート(97%) 合成樹脂(3%)
Super-X®	3. 9MPa	変成シリコーン(60%) 合成樹脂(40%)

表3. AFFへのフィラー配合と弾性係数

SiO ₂ 配合率(wt%)	弾性係数(MPa)
0	0. 8
20	1. 0
50	1. 4

表4. メラミンに対する接着強さ

接着材	接着強さ(MPa)
MEGA	12.8±1.2
MEGA+PG	1.4±0.2
MEGA+PPX(AFF _{0wt%})	7.0±3.0
MEGA+SUX	1.4±0.2

表5. 根部象牙質に対する接着強さ

接着材	接着強さ(MPa)
MEGA	6.7±1.5
MEGA+PG	1.0±0.3
MEGA+PPX(AFF _{20wt%})	5.1±1.1
MEGA+SUX	1.0±0.1

表6. 支台材料の性質

	曲げ強さ (MPa)	曲げ弾性係数 (GPa)
ソラーレ®	91	5
クリアフィル®DCコア	119	5
FIBER POST®	1077	44

表7. 実験方法

手 順	操 作 内 容
1 ポストホールの調整	<ul style="list-style-type: none"> ・歯根部分に長さ10mmのポストホールを形成(オットレンギリーマー, #3) ・根管口部の形状は ①シリンダー型 ②ロート型の2形態とした。 → メラミン歯, ヒト歯
2 支台歯の調整	<ul style="list-style-type: none"> ・根管内面の接着処理(MEGA) ・FP/CR支台(対照)とFP/弾性材料支持支台(実験群3種)の4群とした。 ・コア部のレジン築盛・重合には光重合器Blue shot®を用い, 最終重合はLABO LIGHT LV-Ⅲ®で5分間行なった。 ・試料を24時間・37°Cで保管後に歯根部を約2mm露出させて, MMAレジンに包埋して抗折試験に供した。
3 抗折試験	<ul style="list-style-type: none"> ・抗折試験は支台の歯軸に対して45° で静的に荷重した。 (クロスヘッドスピード0.5mm/min) ・測定した破壊荷重より抗折強さを算出した。
4 統計学的分析	<p>得られた値をStudent's t-testおよび Man-Whitney u-test (P<0.05)で有意差を検定した。</p>
5 破壊様相の分析	<p>支台の破壊様相を5形態(A,B,C,D,E;発生頻度)に分類, 比較した。 : 実態顕微鏡, X線写真による観察</p>
6 歯根保護性の評価	<p>歯根保護指数 = $[(A+B+C)/(D+E) \times 100] / N$, N: 支台条件の数 : 数値の大きい方が歯根保護性に優れる。</p>

表8. 支台歯の材料構成

	ポスト FP: ϕ 0.8mmまたは1.6mm シラン処理: CERAMIC PRIMER [®] 処理		
	ポストホール壁面	ポスト支持材	コア部分
対 照	MEGA 処理	C R	根面部: MEGA 処理 コア部: ソラーレ [®] 築盛
P G	MEGA 処理	P G	
AFF	MEGA 処理 + PPX	AFF + フィラー (SiO ₂)	
		<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">フィラー 配合率</td> <td>メラミン歯の場合 0, 20, 50 wt%</td> </tr> <tr> <td>ヒト 歯の場合 20 wt%</td> </tr> </table>	
フィラー 配合率	メラミン歯の場合 0, 20, 50 wt%		
	ヒト 歯の場合 20 wt%		
SUX	MEGA 処理	SUX	

表9. 破折様相の分類

分類	支台破壊状況
A	レジンコア部分の凝集破壊
B	接着界面+コア部分の混合破壊
C	界面破壊のみ
D	界面破壊+歯根部分の混合破壊
E	歯根の凝集破壊

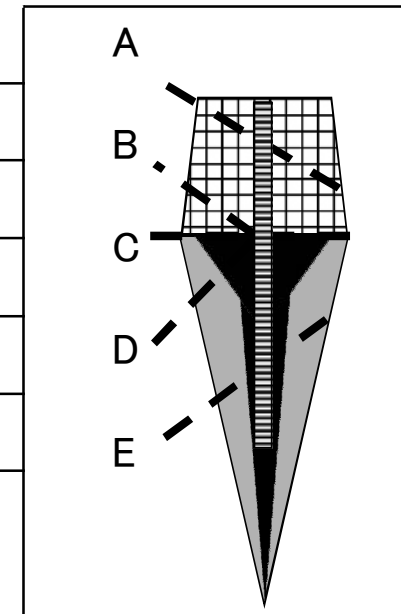


表10. メラミン歯支台の破壊様相

ポストホール形状		支台条件				歯根保護指数	支持材の弾性係数	平均抗折強さ
		シリンダー型		ロート型				
ポスト径(mm)		0.8	1.6	0.8	1.6			
破壊様相の分類		n=12	n=12	n=12	n=12			
対 照	A	0	0	0	0	6	5 GPa	100
	B	40	20	0	0			
	C	0	20	0	0			
	D	60	60	100	100			
	E	0	0	0	0			
P G	A	0	0	0	0	32	0.6 MPa	83
	B	0	0	0	12			
	C	50	50	75	38			
	D	50	50	25	50			
	E	0	0	0	0			
AFF (0wt%)	A	0	0	0	0	49	0.8 MPa	88
	B	33	8	0	0			
	C	42	58	38	86			
	D	25	33	63	14			
	E	0	0	0	0			
SUX	A	0	0	0	0	93	3.6 MPa	58
	B	0	0	0	0			
	C	88	71	86	71			
	D	13	29	14	29			
	E	0	0	0	0			
%						N=4		MPa

表11. AFFのフィラー配合率と保護指数（メラミン歯）

ポストホール形状		支台条件				歯根保護指数	支持材の弾性係数	平均抗折強さ
		シリンダー型		ロート型				
ポスト径(mm)		0.8	1.6	0.8	1.6	32	0.8	66
フィラー配合率	破壊様相の分類	n=8	n=8	n=8	n=8			
0wt%	A	0	0	0	0	9	1.0	90
	B	33	8	0	0			
	C	42	58	42	42			
	D	25	33	58	58			
	E	0	0	0	0			
20wt%	A	0	0	0	0	9	1.4	85
	B	0	17	17	0			
	C	17	0	17	33			
	D	83	83	67	67			
	E	0	0	0	0			
50wt%	A	0	0	0	0	%	N=4	MPa
	B	17	0	17	17			
	C	17	17	0	17			
	D	67	83	83	67			
	E	0	0	0	0			

表12. ヒト歯支台の破壊様相

		支台条件				歯根保護指数	支持材の弾性係数	平均抗折強さ
		シリンダー型		ロート型				
ポストホール形状		シリンダー型		ロート型		6	5 GPa	266
ポスト径(mm)		0.8	1.6	0.8	1.6			
破壊様相の分類		n=7	n=7	n=7	n=7	32	0.6 MPa	56
対 照	A	0	0	0	0			
	B	14	0	0	0			
	C	0	0	14	43			
	D	72	86	86	57			
	E	14	14	0	0			
P G	A	0	0	0	0	10	3.6 MPa	169
	B	7	0	0	0			
	C	73	87	14	43			
	D	20	13	86	57			
	E	0	0	0	0			
AFF	A	0	0	0	0	%	N=4	MPa
	B	0	0	0	0			
	C	14	14	43	14			
	D	86	86	57	86			
	E	0	0	0	0			
SUX	A	0	0	0	0			
	B	0	0	0	0			
	C	28	43	29	14			
	D	72	57	42	72			
	E	0	0	29	14			

表13. 各支台の抗折強さ

a. メラミン歯支台 n=12	ポスト径0.8mm			ポスト径1.6mm		
	シリンダー型		ロート型	シリンダー型		ロート型
対 照	93.9±23.1 *		93.4±30.6 *	129.2±21.6 *	※	188.4±20.7 *
P G	80.8±29.8		76.2±57.5 †	52.5± 6.5	※	96.7±30.2 *†
AFF(SiO ₂ :0wt%)	45.5±13.5 *†	※	87.0±42.2	65.9±23.7 *†	※	126.4±36.4 *†‡
SUX	57.9±21.4 *†		53.4± 9.5 *†	37.4± 7.8 *†	※	70.0± 7.8 *‡

MPa

b. AFF+フィラー配合 メラミン歯支台 n=8	ポスト径0.8mm			ポスト径1.6mm		
	シリンダー型		ロート型	シリンダー型		ロート型
0wt%	44.5±12.7 *		59.1±16.8	75.7±29.8		84.8±42.0
20wt%	90.4±35.8 *		81.6±25.6	100.7±34.5		86.2±23.5
50wt%	99.5±29.3 *		76.7±15.6	84.4±29.0		78.7± 7.4

MPa

c. ヒト歯支台 n=7	ポスト径0.8mm			ポスト径1.6mm		
	シリンダー型		ロート型	シリンダー型		ロート型
対 照	323.5±124.4 *		231.1±133.5 *	328.7±135.7 *		181.8±146.2
P G	33.4± 17.3 *†‡		47.6± 20.2 *†‡	42.7± 12.5 *†	※	99.8± 50.7 †
AFF(SiO ₂ :20wt%)	99.6± 27.3 *†		89.5± 33.4 *†	100.2± 45.7 *		100.0± 44.4 †‡
SUX	108.3± 56.7 *‡	※	230.2± 70.8 ‡	111.0± 27.3 *†	※	225.3± 53.8 ‡

MPa

(対照との有意差; *, 支台条件間有意差; †, ‡, ポストホール形状間有意差; ※ : P<0.05)

《シリンダー型》
根管部分
 $\phi = 1.4 \sim 3\text{mm}$

《ロート型》
歯頸部残存歯質の少ない条件
根面縁厚 $\approx 1.5\text{mm}$
ロート $\phi \approx 5\text{mm}$
深さ $\approx 3\text{mm}$
根管部分 $\phi = 1.4 \sim 3\text{mm}$

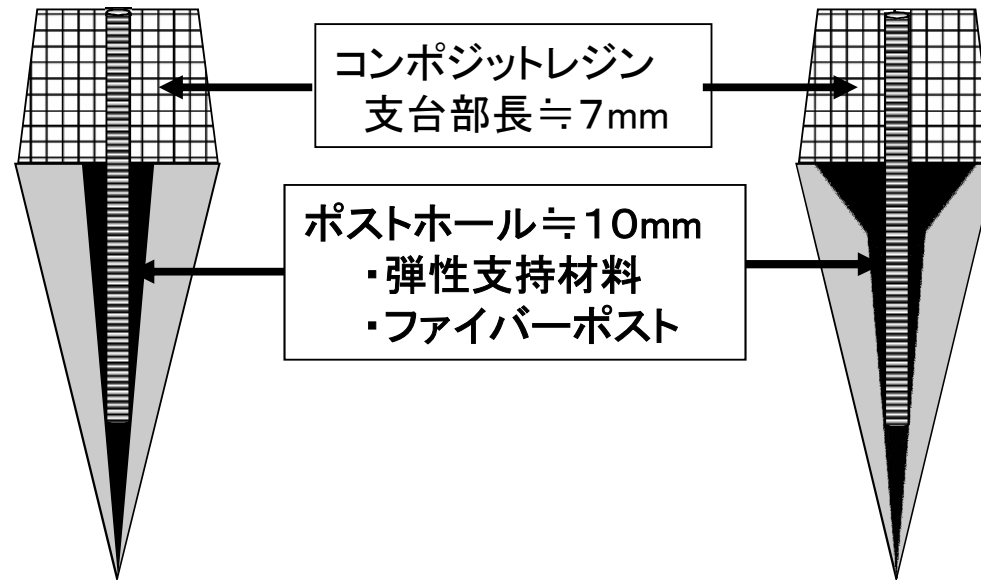
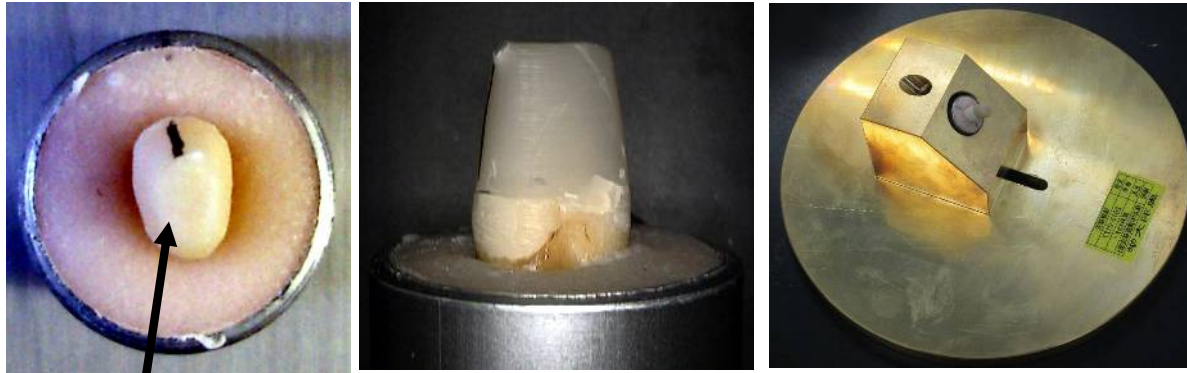


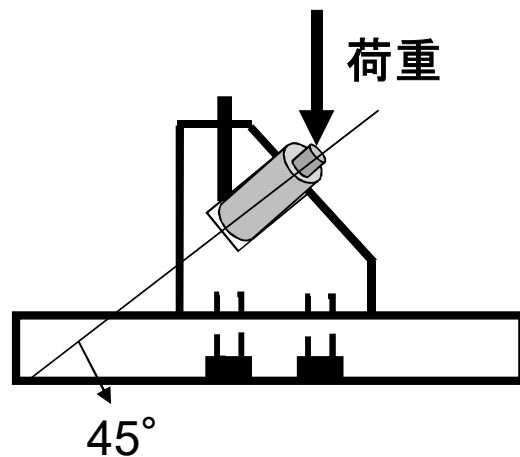
図1. 支台の構造



支台歯

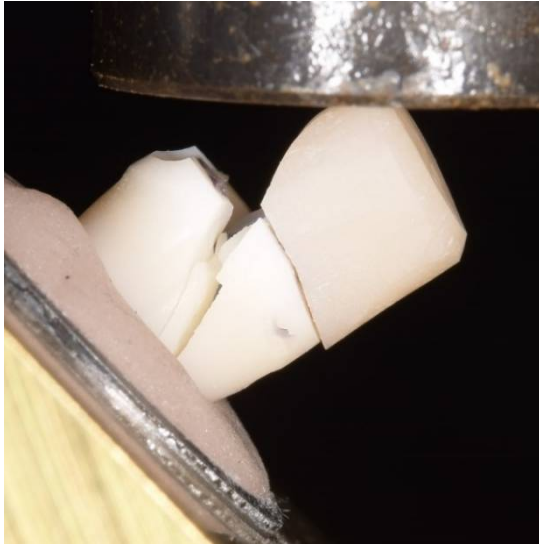
測定用ジグ

万能試験機 (Aikoh Engineering、DW1310)
 ロードセル: 200kN, cross head speed=5mm/min



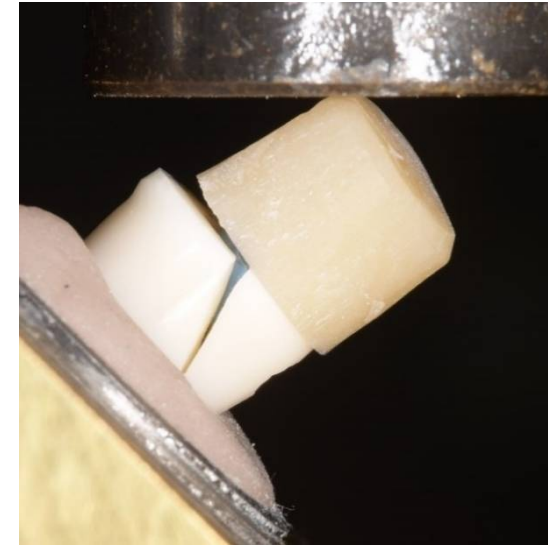
抗折強さ: $S = 8PL / \pi d^3$ (MPa)
 $P = \sin(45^\circ) \cdot \text{破壊荷重 (kgf)}$
 L: 支台部の長さ(mm)
 d: 支台根面部の直径(mm)

図2. 抗折強さの測定



混合破壊

- ・レジン凝集破壊＋界面破壊
- ・界面破壊＋歯根凝集破壊



界面破壊

メラミン・コンポジットレジン
接着界面での接着破壊

歯根に損傷を生じない。

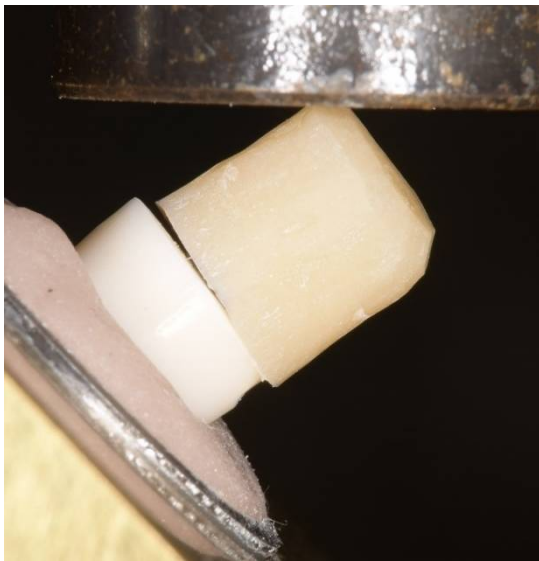


図3. 抗折試験の状況

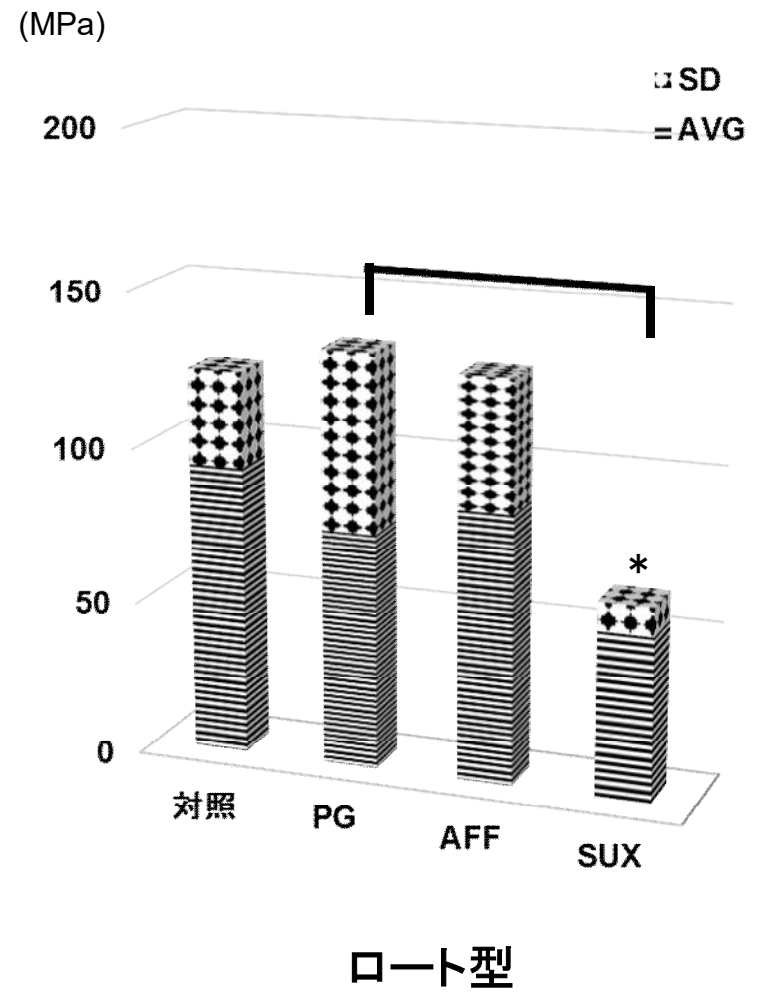
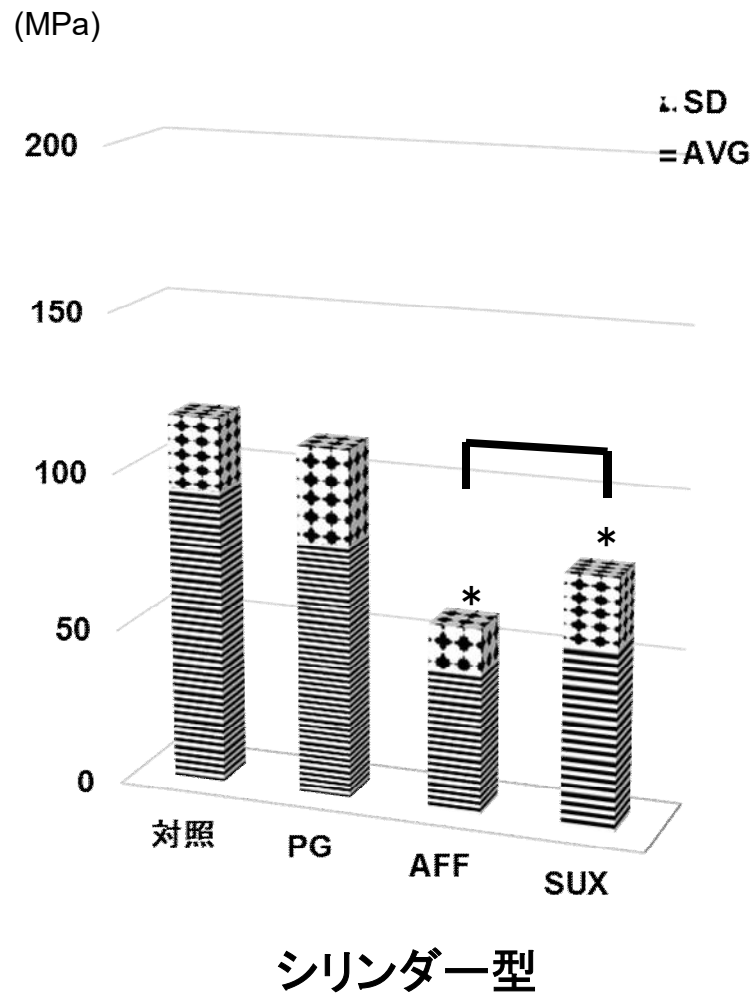
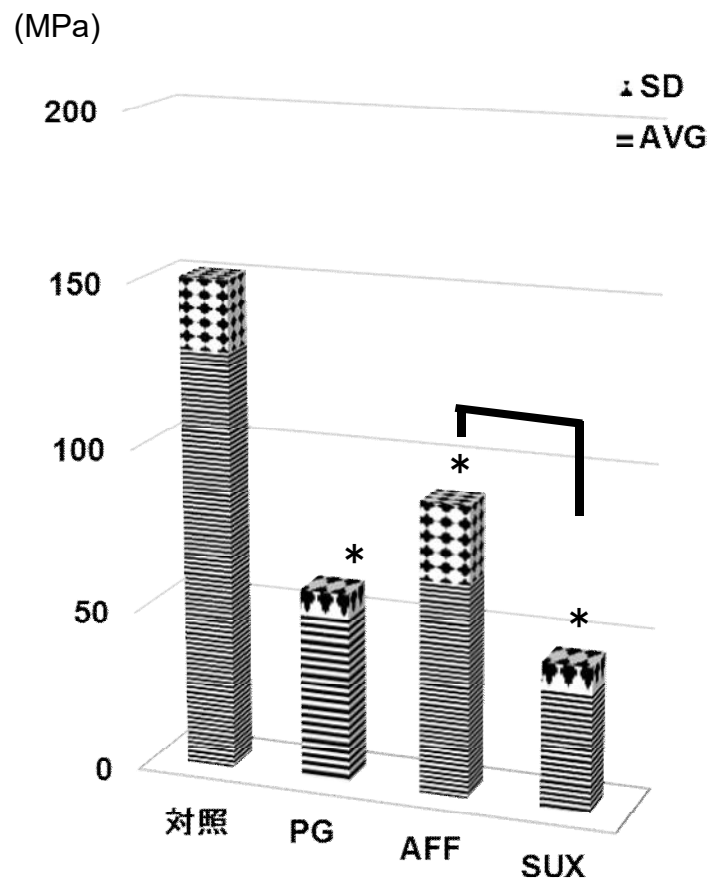
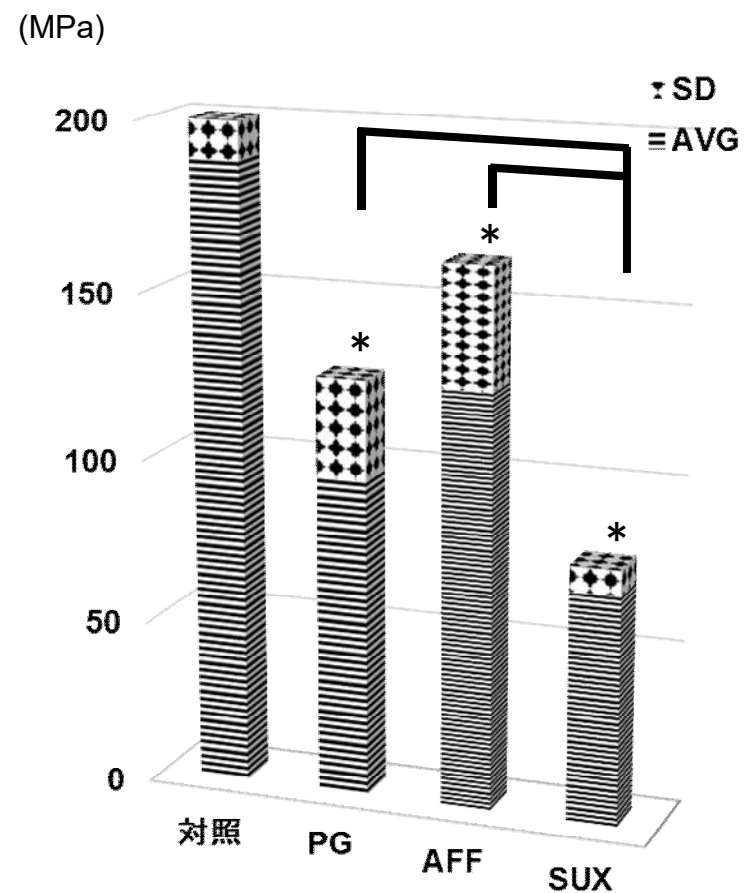


図4. メラミン歯支台における抗折強さ(ポスト径0.8mm)

(n=12, * - :P<0.05)



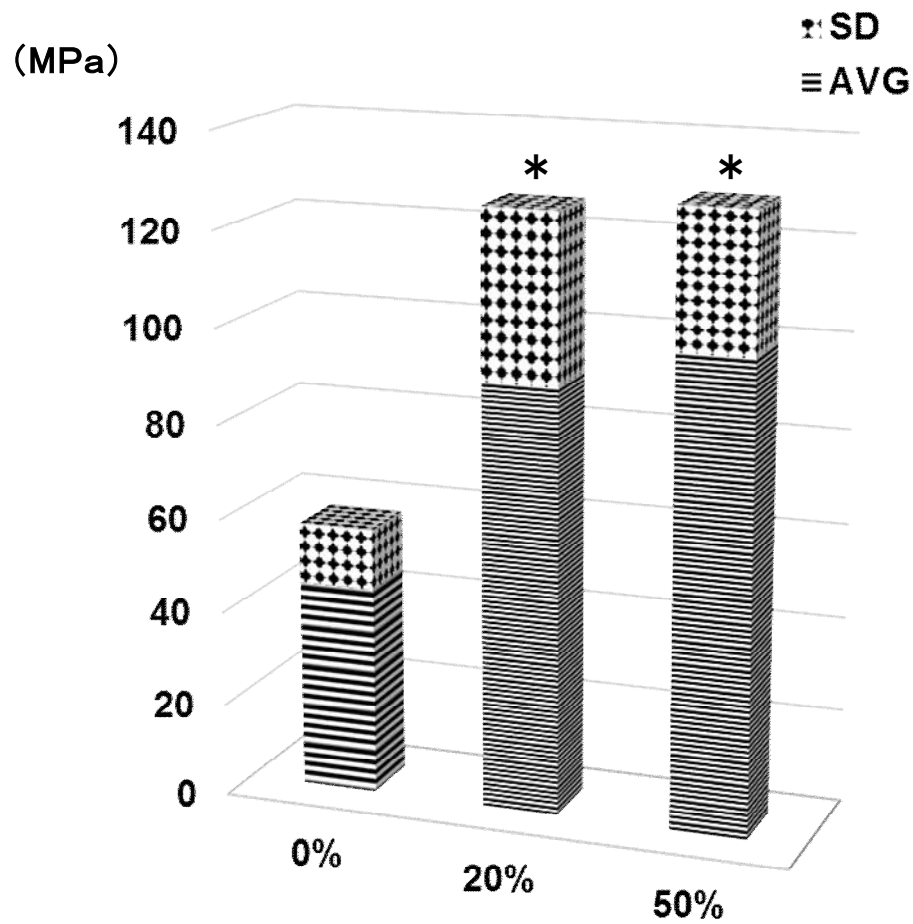
シリンダー型



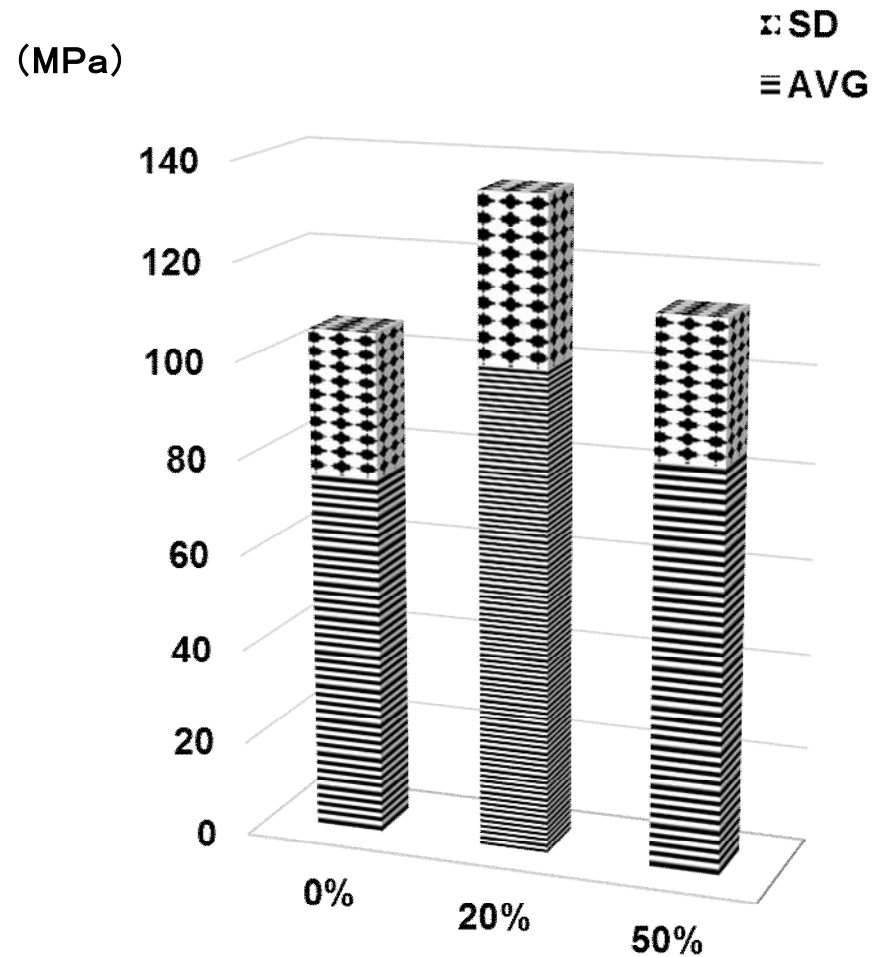
ロート型

図5. メラミン歯支台における抗折強さ(ポスト径1.6mm)

(n=12, * - :P<0.05)



ポスト径0.8mm



ポスト径1.6mm

図6. AFFのフィラー配合率と抗折強さ(メラミン歯, シリンダー型)

(n=8, * - : P<0.05)

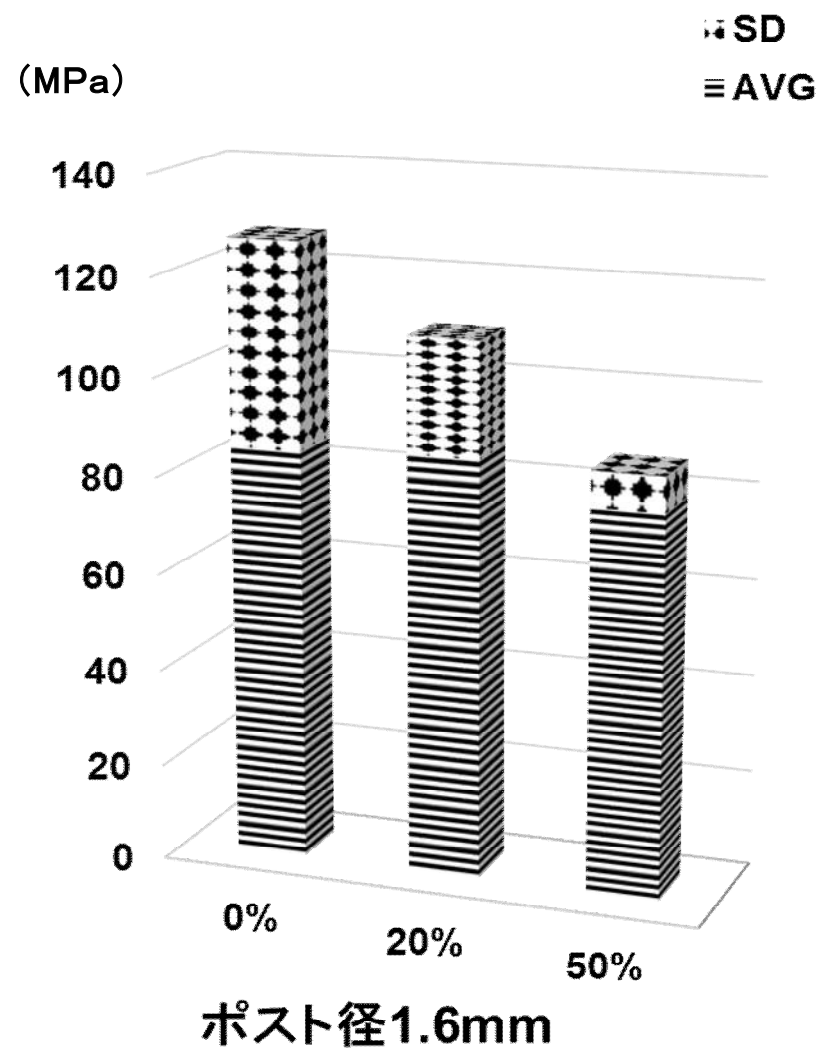
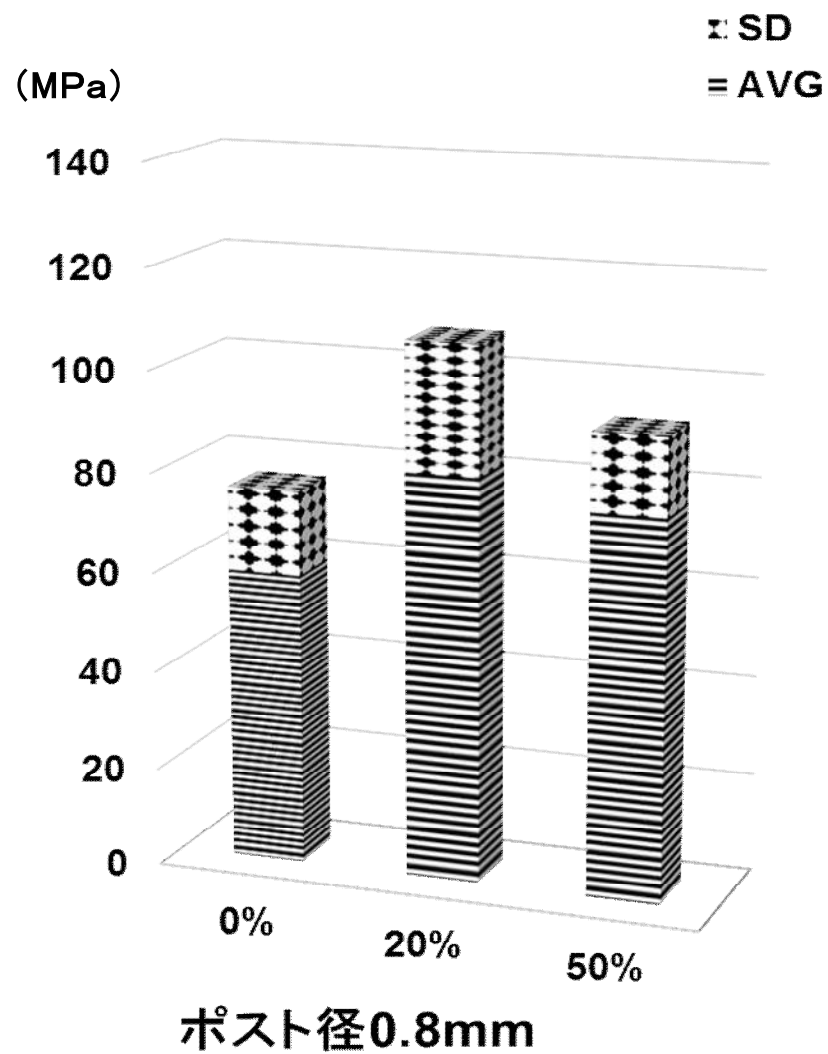
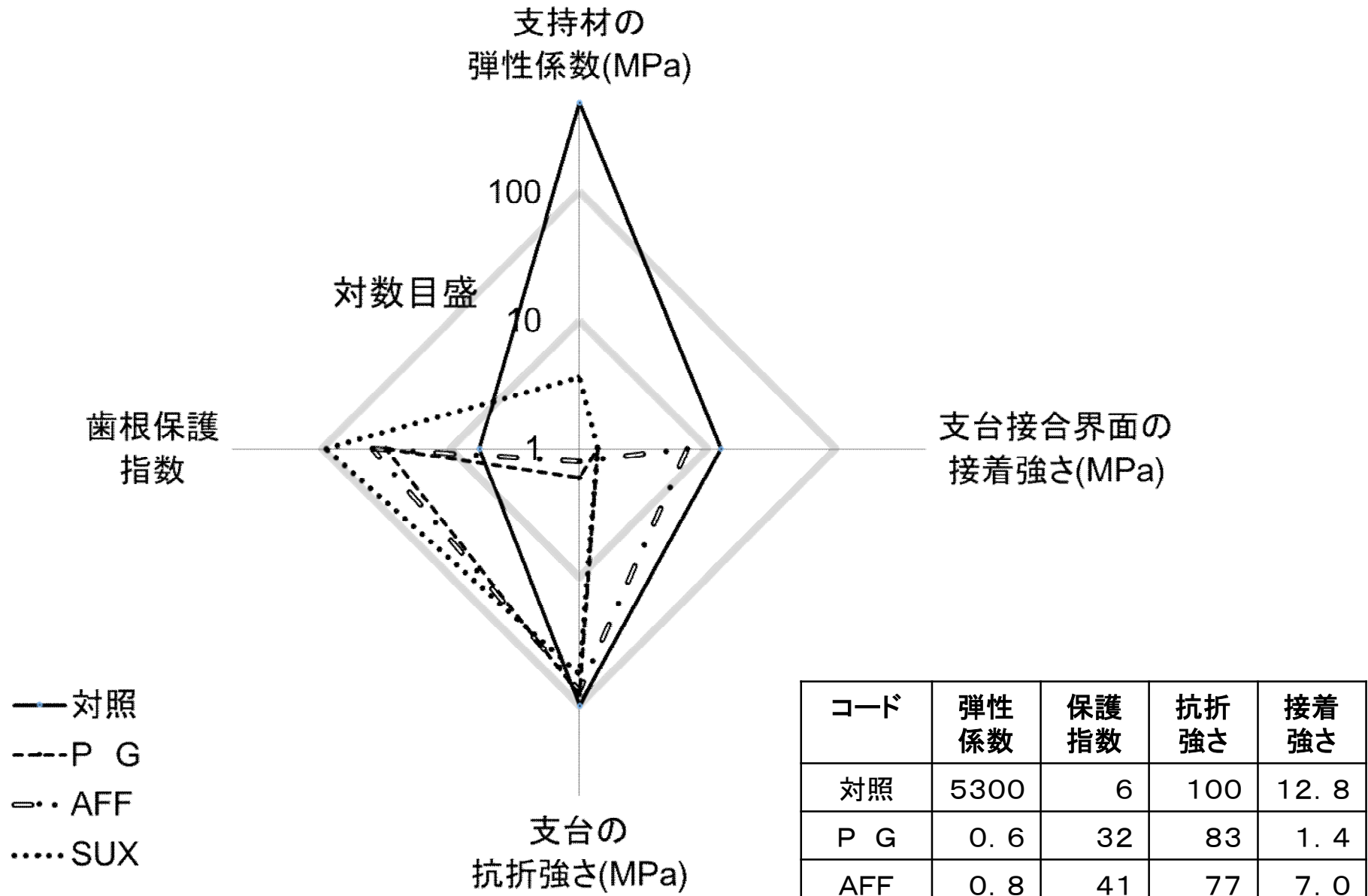


図7. AFFのフィラー配合率と抗折強さ(メラミン歯, ロート型)

(n=8, * - : P<0.05)



コード	弾性係数	保護指数	抗折強さ	接着強さ
対照	5300	6	100	12.8
P G	0.6	32	83	1.4
AFF (0wt%)	0.8	41	77	7.0
SUX	3.6	93	58	1.4
	MPa	N=4	MPa	MPa

図8. メラミン歯支台のバランス評価

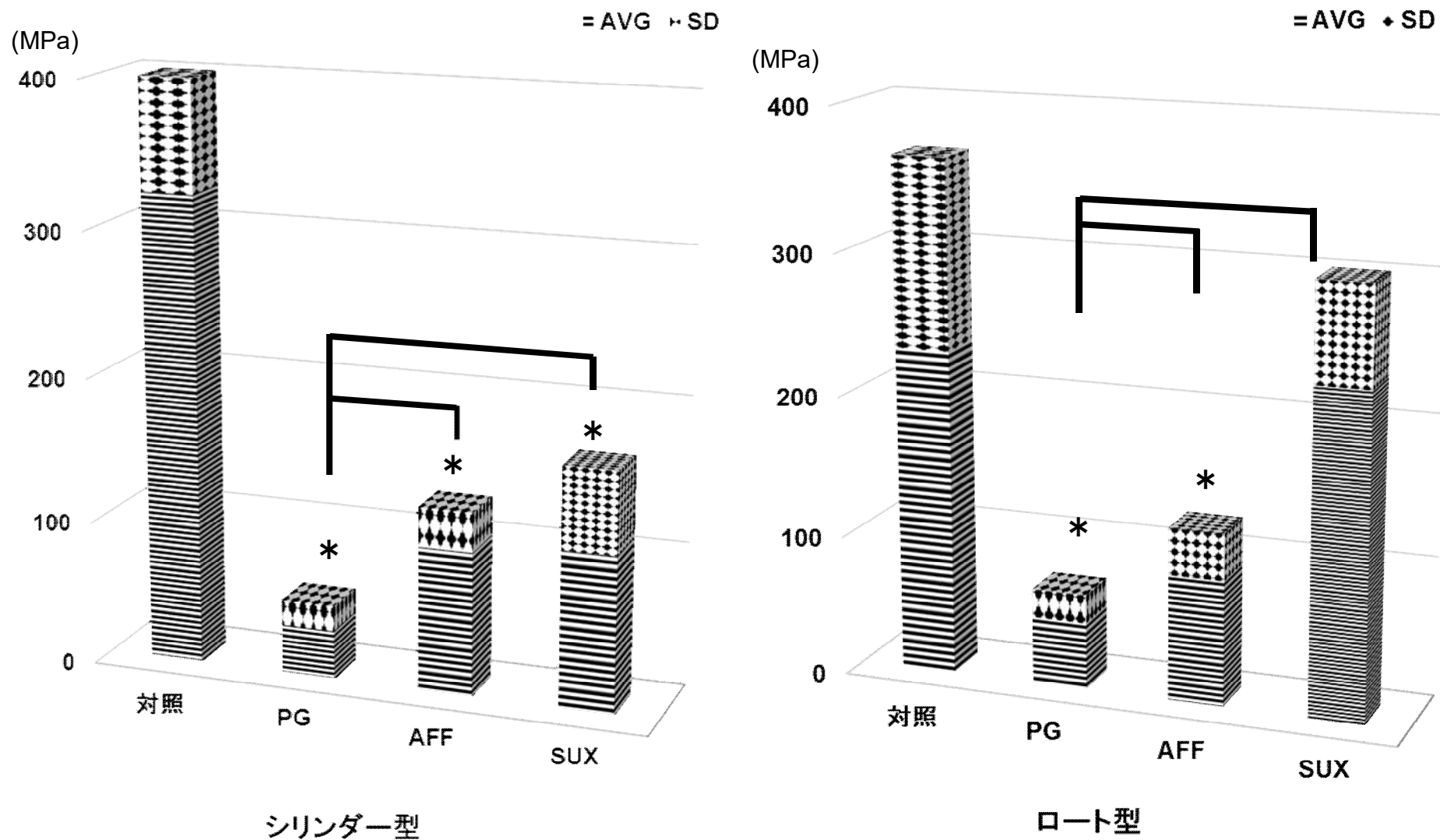


図9. ヒト歯支台における抗折強さ(ポスト径0.8mm)

(n=7, * - :P<0.05)

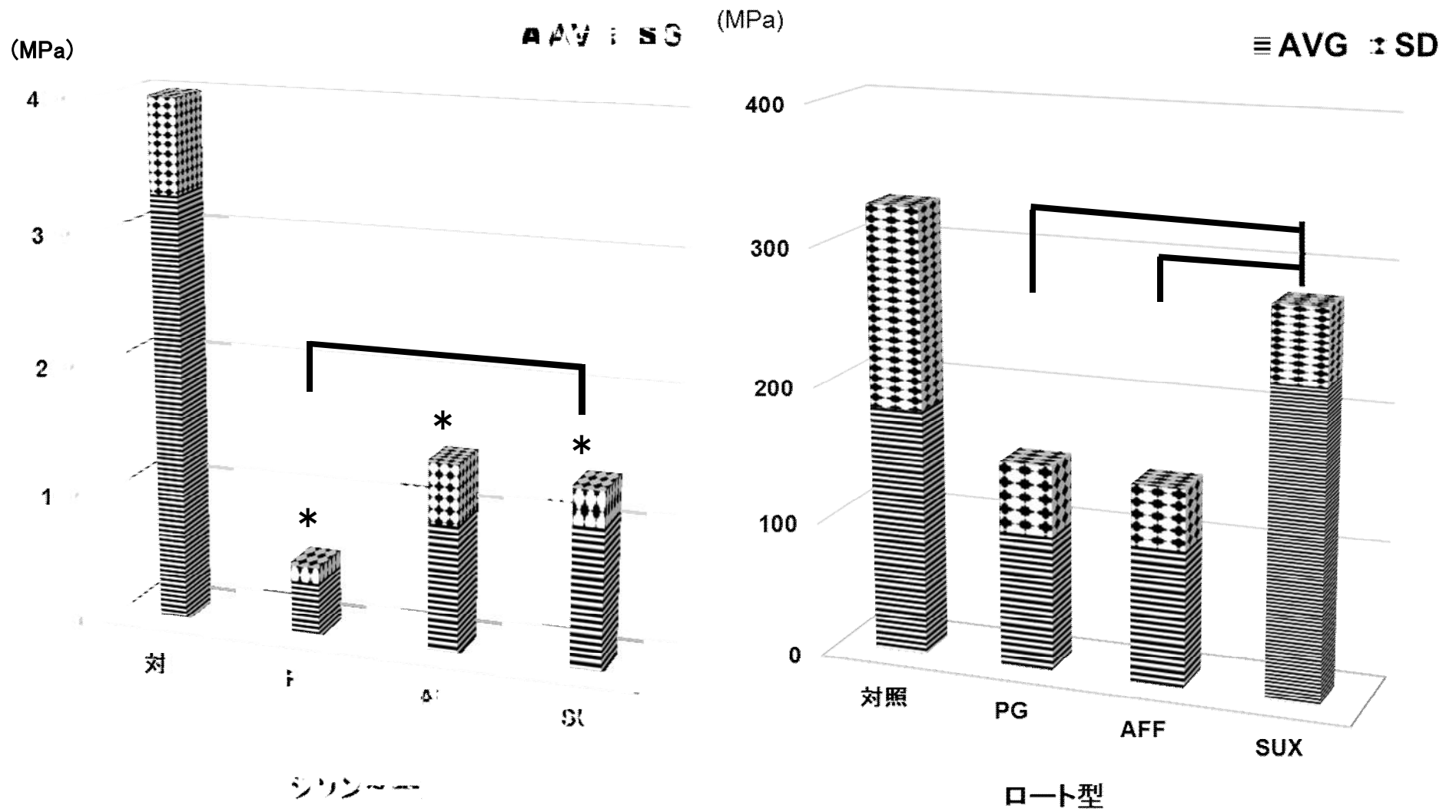


図10. ヒト歯支台における抗折強さ(ポスト径1.6mm)

(n=7, * - :P<0.05)

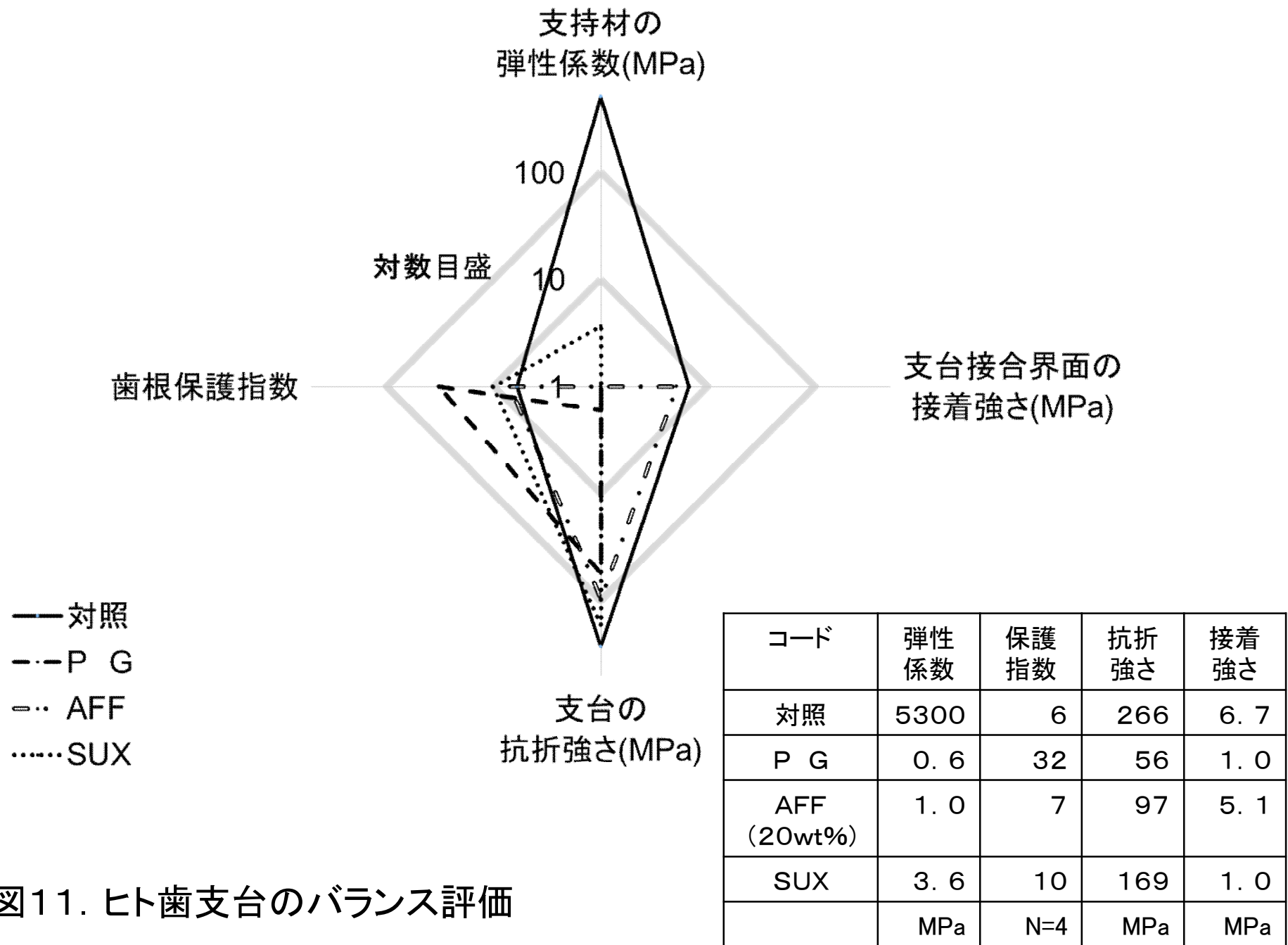


図11. ヒト歯支台のバランス評価