

授与番号	甲第 367 号
------	----------

## 論文内容の要旨

Tensile and shear bond strengths of a stainless steel used in orthodontic brackets bonded to bovine enamel using two types of resin cement

—牛歯エナメル質に2種類のレジンセメントで接着したステンレス鋼のせん断および引張接着強さ—

(Dental Materials Journal 第42巻、第2号、令和5年4月掲載予定)

ふかざわ けいこ  
深澤 慶子

### I. 研究目的

矯正歯科治療で多用されるマルチブラケット法は歯科矯正用ブラケットをエナメル質に接着性レジンセメントで装着し、矯正用ワイヤーからの力を伝えることで三次元的な歯の移動を可能にしている。エナメル質に対する接着は水分や有機質が少ないことから、その接着性は十分な強度であると報告されている。しかし、矯正歯科治療でのマルチブラケット装置は治療に耐えうる接着強さを一定期間保持し、治療終了後歯面の損傷を最小限に撤去しなければならない。つまり、治療中に矯正用ブラケットに負荷される力（特にせん断力）に対しては十分な接着により維持されることが必要であるが、撤去する際には歯面から垂直方向（引張り力）に対して容易に撤去できることが必要である。本研究では、マルチブラケット装置装着時に用いる接着性レジンセメントに求められる性質を考慮するために、力が負荷される方向に対する接着強さや撤去時の歯面の損傷につながる要因を明らかにし、治療中のブラケット脱離や撤去時の歯面の損傷への影響を評価することを目的とした。

### II. 研究方法

#### 1. 試料作製

試料には40本のウシ下顎前歯をセメントエナメルジャンクションで切断し、歯冠のみを使用した。歯冠をエポキシ樹脂に包埋し、600番までの耐水研磨紙で研磨、平坦なエナメル質に調整した。被着体として金属製ブラケットと同様の素材であるステンレス鋼棒（SUS304、直径4mmの円柱）を厚さ2.5mmの円板状（せん断試験用）と高さ6mmの棒状（引張試験用）に切断し、接着面を50 $\mu$ mのアルミナでブラストした。ステンレス鋼のエナメル質への接着は、2種類の接着性レジンセメント（MMA系レジンセメントとコンポジット系レジンセメント）を使用し、それぞれメーカー指定の方法で接着した。接着操作後、試料を水中に浸漬させ37 $^{\circ}$ Cの恒温槽にて1週間静置した。また一部の試料は、セメントの接着強さに及ぼす温度の影響を調べるためサーマルサイクルによる加速劣化試験を行った。加速劣化試験は、5 $^{\circ}$ Cと55 $^{\circ}$ Cの水槽に30秒間ずつ交互に浸漬させ繰り返し数は5000回と10,000回とした。

## 2. 接着試験と評価

接着試験は万能材料試験機を用いてせん断試験と引張試験を行った。せん断試験は、被着面と平行にクロスヘッドスピード 1.0 mm/min で荷重を負荷し、得られた最大荷重値よりせん断強さを算出した。引張試験は、被着面と垂直にクロスヘッドスピード 3.0 mm/min でエナメル質からステンレス鋼が脱離するまで荷重を負荷し、最大荷重値から引張強さを算出した。接着試験後の全ての試料の破断面をデジタル実体顕微鏡で観察し、破断様式を分類した。また、いくつかの試料については、破断面を電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) で観察した。

## III. 研究成績

### 1. 接着強さ

接着強さをレジンセメントの種類 (MMA 系とコンポジット系) と接着試験方法 (せん断と引張り) を要因とする二元配置分散分析を行ったところ、交互作用に統計学的有意差は認められなかったが、レジンセメントの種類および試験方法には有意差が認められた。セメントの種類ではコンポジット系レジンセメントの方が MMA 系より試験方法に依らず大きな接着強さを示した。また、セメントの種類に依らず、せん断接着強さが引張接着強さよりも大きい値になった。サーマルサイクルによる加速劣化試験を行ったところ、10,000 回までの試験ではそのせん断接着強さの低下は認められなかった。

### 2. 破断面の観察

接着試験後の破断面は、MMA 系レジンセメントではレジンセメントの凝集破壊またはエナメル質とレジンセメントの界面破壊が混在していたが、コンポジット系レジンセメントでは各条件でレジンセメントの凝集破壊の割合が多かった。SEM で確認したところ、凝集破壊ではエナメル質側とステンレス鋼側にレジンセメントが認められた。界面破壊ではステンレス鋼側にエナメル小柱の転写が観察された。

## IV. 考察及び結論

本研究では接着強さは試験方法に依らず、MMA 系レジンセメントよりコンポジット系の方が大きかった。このことは用いたセメント自体の強さ、前処理材の効果、およびセメントに含有されている接着性モノマーの接着力が影響したと考えられる。コンポジット系レジンセメントは、セメントの強化材として無機質のフィラーを含有しているため MMA 系よりも弾性係数が大きく、セメント自体の強度も大きい。接着前にリン酸でエッチングを行うことでエナメル質表面が粗糙になり、その粗糙部分に硬化したセメントつまり、レジンタグが形成されその強度が大きいため接着強さも大きくなったと推測される。また、引張接着強さよりもせん断接着強さが大きかったのは、接着界面の観察からレジンタグはエナメル質面に対して垂直に形成しているため、レジンタグに抵抗するように負荷されるせん断力より垂直に負荷される引張力の抵抗が小さいことが要因と考える。

加速劣化試験のサーマルサイクルは 10,000 回で口腔内環境での 1 年間に相当すると報告

されている。本研究では 10,000 回のサーマルサイクルを負荷しても接着強さの低下は認められなかった。一方で、MMA 系レジメンセメントではサーマルサイクル試験により界面破壊の割合が増加し、レジメンセメントの吸水による加水分解や劣化が進行したと考える。

本研究の結果から、MMA 系およびコンポジット系レジメンセメントでの歯質への接着強さは、すべて矯正歯科治療を行う上では十分な接着強さであった。コンポジット系レジメンセメントでの接着強さは MMA 系と比較して大きく、さらに、凝集破壊が多いことからエナメル質と強固に接着している。エナメル質—セメント面での界面破壊の多い MMA 系レジメンセメントよりセメントの除去には時間がかかり、歯面にレジメンセメントが残存しているため、除去時のエナメル質損傷のリスクも高くなると考える。

以上の結果より、歯科矯正用ステンレス鋼製ブラケットの装着には、装着時の操作性と初期の接着強さのみならず、除去時のセメントの残存割合やエナメル質の損傷を考慮することが最終的な接着材料（接着性レジメンセメント）を選択するうえで必要であることが示唆された。

## 論文審査担当者

主査 野田 守 教授 (歯科保存学講座 う蝕治療学分野)  
副査 佐藤 和朗 教授 (口腔保健育成学講座 歯科矯正学分野)  
副査 武本 真治 教授 (医療工学講座)

## 論文審査の結果の要旨

### 主論文要約

矯正歯科治療で多用されるマルチブラケット法は、歯科矯正用ブラケットをエナメル質表面に接着性レジンセメントで装着し、矯正用ワイヤーからの力を伝えることで三次元的な歯の移動を可能にしている。治療中、矯正用ブラケットには、歯面に対してズリ応力（せん断力）が働く。治療終了時には、ブラケットは最小限の歯面損傷で撤去される必要がある。撤去時は、歯面に垂直方向、すなわち引張り力で容易に撤去できることが要求される。本研究では、マルチブラケット装置装着時に用いる接着性レジンセメントに求められる性質を考慮するために、治療中および治療終了時に力が負荷される方向に対する接着強さや歯面の損傷につながる要因を明らかにすることを目的とした。

試料には 40 本の牛下顎前歯歯冠を用いた。歯冠唇側エナメル質表面に対して、600 番の耐水研磨紙で得られた平滑研磨面を接着面とした。被着体として金属製ブラケットと同様の素材であるステンレス鋼の接着面をアルミナでブラストし用いた。ステンレス鋼のエナメル質への接着は、2 種類の接着性レジンセメント（MMA 系またはコンポジット系レジンセメント）を使用し、それぞれメーカー指定の方法で接着した。接着操作後、試料を水中に浸漬させ 37°C の恒温槽にて 1 週間静置した。また一部の試料は、セメントの接着強さに及ぼす温度の影響を調べるためサーマルサイクルによる熱刺激を加えた。

MMA 系およびコンポジット系レジンセメントのいずれのセメントにおいても、せん断接着強さの方が引張強さより大きかった。セメント間での比較ではコンポジット系レジンセメントの接着強さが MMA 系よりも大きかった。熱刺激による各種セメントのせん断接着強さは低下しなかった。一方、破断面観察では 1 週間の静的浸漬のみではセメントの凝集破壊が多く認められたが、サーマルサイクルによる熱刺激を負荷することによって MMA 系レジンセメントでは界面破壊の割合が増加していた。SEM 観察では界面破壊ではステンレス鋼側にエナメル小柱の転写が観察された。

以上の結果より、矯正歯科治療においてステンレス鋼製マルチブラケットを接着性レジンセメントでエナメル質に装着する場合、用いた MMA 系およびコンポジット系レジンセメントでも十分な接着力を有していることが明らかになった。一方で、MMA 系の方が撤去の際にセメントがステンレス鋼に残存しやすいことから、撤去に適していることが示された。したがって、本研究の成果はマルチブラケット装着時の操作性と初期の接着強さのみならず、撤去

時のセメントの残存割合やエナメル質の損傷を考慮することが最終的な接着材を考慮することが重要であること示されており、歯科医療に対する貢献度が高いものと考え、学位論文に値すると評価した。

## 試験・試問結果の要旨

主査および副査から多くの質問があり、下記のような質疑が行われた。

- (1) ステンレス鋼のクロム含有量が接着に及ぼす影響をどのように影響を考えますか。
  - 本研究で用いている SUS304 はステンレス鋼製矯正歯科用ブラケットと同様の組成で、約 20.8mass%のクロムを含んでいます。ステンレス鋼表面は酸化クロムの不動態皮膜を形成していることが知られているので、本研究での接着性レジンセメントに含まれているカルボン酸系およびリン酸エステル系接着性モノマーがその表面に接着していると考えます。また、ステンレス鋼でも別の組成（17-7PH 鋼）のものもありますが、クロム含有量が多い方が接着強さは大きい結果となっています。したがって、クロム含有量の増加は接着強さを増加させると考えます。
- (2) 劣化の定義はなにか。接着性レジンセメント組成から考察して下さい。
  - レジン成分が吸水によるものと考えます。レジン成分としては、メタクリル酸系モノマーで MMA 系レジンセメントではメチルメタクリレート、コンポジット系レジンセメントでは Bis-GMA である考えます。
- (3) そのレジン成分のどのような構造が吸水に影響していると考えていますか。
  - メタクリロイルオキシ基と考えています。
  - メタクリロイルオキシ基の二重結合は 60%程度が重合しています。その部位のケトン基 (C=O) が特に吸水の影響を受けて分解されることが推測されます。また、MMA と Bis-GMA では分子鎖の長さも違いますので、そのような相互的な影響が推測できると思います。今後考察してみてください（野田主査）。
- (4) サーマルサイクル試験を 5,000 回と 10,000 回で選んだ理由はなにか。
  - 歯冠補綴装置をレジンセメントで接着した文献で、7000 回程度の負荷（繰り返し）によって接着強さが低下してくるとの報告がありました。それを参考にサーマルサイクル試験の回数を 5000 回と 10000 回にしました。
- (5) 矯正装置の装着期間は 2~3 年との話でしたが、10000 万回でのサーマルサイクル試験の回数が口腔内のどれくらいの期間に該当しますか。

- 文献にも依存しますが、おおよそ1年です。今後、回数を多くすることなども検討する必要があると考えます。
- (6) エナメル質表面を 600 番の耐水研磨紙を選択した理由はありますか。また、表面粗さを測定していますか。
- 本研究ではこれまでの論文を参考にして 600 番までの耐水研磨紙としています。表面粗さについては測定していません。
  - 600 番は保存修復ではダイヤモンドポイントで切削した比較的粗い面です。矯正用のブラケットを接着するには粗いと思いますので、今後表面粗さも含めて検討して下さい。(野田主査)
- (7) ステンレス鋼の被着面はどのような形状ですか。また、表面粗さは測定していますか。
- SUS304 の板または棒を旋盤で端面を切削し、その後サンドブラスト処理を行っています。先ほどと同様に表面粗さは測定していません。
- (8) 本研究での帰無仮説に対する第 1 種の過誤と第 2 種の過誤を説明してください。
- 第 1 種の過誤は帰無仮説が正しいのに、帰無仮説を棄却してしまうことです。第 2 の過誤は帰無仮説が誤っているのに、帰無仮説を棄却してしまうことです。ですので、帰無仮説“せん断接着強さと引張接着強さに有意差がない。”を例にしますと、第 1 種の過誤は、“せん断接着強さと引張強さは有意差がある。”で、第 2 種の過誤は、“せん断接着強さと引張強さは有意差がある。”のに棄却しないことです。
  - 本研究を実施するに当たって n 数をどのように決定しましたか。N=10 で十分かどうか考えて行うことも今後考えて行って下さい。現実的に実験を行う上で、試料数と検出力のバランスを考慮されるとよいと思います。(野田主査)。
- (9) 今後の研究展開についてどのように考えていますか。
- ブラケットを装着している患者に対して現在磁気共鳴画像診断 (MRI) 測定が安全性の観点からできていません。安全性の中の一つが接着しているブラケットが脱離することですので、今後磁場環境での接着に及ぼす影響、アーチファクトに及ぼす影響を考えています。
  - エナメル質とステンレス鋼も実際の臨床とは離れていると思います。実際のエナメル質表面は粗さが小さい上に曲面ですし、ブラケットの基底面もメッシュ状があるとのことですのでそのような面を再現して研究を行うのもよいのではないのでしょうか。また、ブラケットの装着期間を考えると、さらに長い期間のサーマルサイクルによる熱刺激を負荷することも必要ではないのでしょうか。(野田主査)
  - ご指摘いただきありがとうございます。今後の検討課題としたいと思います。