

---

# 原 著

## セルフエッチングプライマータイプ矯正歯科用接着システムの ヒト歯面における接着強さとエナメル質への影響

遠藤 則和<sup>1</sup> 松井 成幸<sup>1</sup> 品川 令<sup>1</sup> 富田 至保<sup>2</sup> 箕田 碧<sup>1</sup> 日比野 靖<sup>2</sup>  
中 寛 裕<sup>2</sup> 須田 直人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>明海大学歯学部形態機能成育学講座歯科矯正学分野

<sup>2</sup>明海大学歯学部機能保存回復学講座歯科生体材料学分野

ENDO Norikazu<sup>1</sup>, MATSUI Shigeeyuki<sup>1</sup>, SHINAGAWA Rei<sup>1</sup>, TOMITA Shihō<sup>1</sup>, MINODA Aoi<sup>1</sup>, HIBINO Yasushi<sup>2</sup>,  
NAKAJIMA Hiroshi<sup>2</sup>, SUDA Naoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Orthodontics, Department of Human Development&Fostering, Meikai University School of Dentistry

<sup>2</sup>Division of Dental Biomaterials Science, Department of Restorative and Biomaterials Sciences, Meikai University School of Dentistry

---

# 原 著

## セルフエッチングプライマータイプ矯正歯科用接着システムの ヒト歯面における接着強さとエナメル質への影響

遠藤 則和<sup>1</sup> 松井 成幸<sup>1</sup> 品川 令<sup>1</sup> 富田 至保<sup>1</sup> 箕田 碧<sup>1</sup> 日比野 靖<sup>2</sup>  
中 嘉 裕<sup>2</sup> 須田 直人<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 明海大学歯学部形態機能成育学講座歯科矯正学分野

<sup>2</sup> 明海大学歯学部機能保存回復学講座歯科生体材料学分野

ENDO Norikazu<sup>1</sup>, MATSUI Shigeysuki<sup>1</sup>, SHINAGAWA Rei<sup>1</sup>, TOMITA Shibo<sup>1</sup>, MINODA Aoi<sup>1</sup>, HIBINO Yasushi<sup>2</sup>,  
NAKAJIMA Hiroshi<sup>2</sup>, SUDA Naoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Division of Orthodontics, Department of Human Development & Fostering, Meikai University School of Dentistry

<sup>2</sup> Division of Dental Biomaterials Science, Department of Restorative and Biomaterials Sciences, Meikai University School of Dentistry

キーワード：セルフエッチングプライマー，接着，せん断接着強さ，エナメル質

抄録：近年，ダイレクトボンディング法において，セルフエッチングプライマー（SEP）による歯面処理後に接着する機会が増えている。そこで市販されている各種SEPの歯面処理による影響とその接着システムによる接着強さを検討した。

ヒト抜去小臼歯にカルボン酸系モノマー1種，リン酸系モノマー2種（A，B）のSEPによる歯面処理後，その表面性状を走査電子顕微鏡（SEM）下で観察し，レーザー顕微鏡により表面粗さを計測した。またSEP処理後，各SEPにより構成される接着システムを用いて歯面にブラケットを装着し，24時間後の接着強さを測定した。

SEM所見より，リン酸エッチングと同様に3種のSEP処理直後にも，エナメル小柱と小柱間質が可視化された。

表面粗さは，未処理，カルボン酸系モノマー，リン酸系モノマーA，リン酸系モノマーB処理において，おのおの $3.1 \pm 0.2 \mu\text{m}$ ， $3.5 \pm 0.1 \mu\text{m}$ ， $4.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$ ， $3.8 \pm 0.2 \mu\text{m}$ であった。カルボン酸系モノマーとリン酸系モノマーB処理後の数値は，リン酸エッチング処理後（ $4.3 \pm 0.2 \mu\text{m}$ ）に比べ有意に低かった。

接着強さは，3種の接着システム間に有意な差はなく，リン酸エッチング処理後に4-META / MMA系レジセメントを用いて接着した値とも有意な差はなかった。

以上の結果より，今回検討したSEP処理は，ヒトエナメル質表面の変化が軽度で，臨床的に十分な接着強さが得られた。

(Orthod Waves - Jpn Ed 2016 ; 75(1) : 8 - 18)

### Bonding strength and enamel surface conditions on human teeth using self-etching primer-type orthodontic adhesive systems

**Abstract** : Recently, tooth priming using self-etching primers (SEPs) is becoming popular in direct bonding systems. The present study examined the effect of SEPs on enamel surface roughness and shear bonding strength of commercially available bonding systems using SEPs. Acid etching by 31% phosphoric acid or priming by three different kinds of SEPs (carboxylic monomer, and phosphoric acid monomers A and B) were performed on enamel surfaces of human extracted premolars. After acid etching or priming, these surfaces were observed using a scanning electron microscope (SEM), and the surface roughness (Ra) was measured by laser microscope. Orthodontic metal braces were bonded on the enamel surfaces by using the bonding systems composed of acid etching or SEPs. The shear bonding strength of braces were measured twenty-four hours after bonding. The results are as follows :

1. Observations using SEM showed that the enamel prism and interprism were seen after priming by all SEPs and acid etching.
2. The values of Ra were  $3.1 \pm 0.2 \mu\text{m}$  for untreated enamel surfaces, and  $3.5 \pm 0.1 \mu\text{m}$ ,  $4.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$ ,  $3.8 \pm 0.2 \mu\text{m}$  after priming by carboxylic monomer and by phosphoric acid monomers A and B, respectively. Values of carboxylic monomer and phosphoric acid monomer B were significantly lower those that of acid etching ( $4.3 \pm 0.2 \mu\text{m}$ ).
3. There were no significant differences in values of the shear bonding strength among three different bonding systems using SEPs. These values were also not significantly different from the value bonded after acid etching and 4-META / MMA resin.

These findings indicate that some of SEPs are less invasive to teeth and are clinically effective for the direct bonding of braces.

(Orthod Waves - Jpn Ed 2016 ; 75(1) : 8 - 18)



## 緒 言

現在、矯正歯科治療において、接着性レジン系材料を用いたダイレクトボンディングシステムが広く使用されている<sup>1-4)</sup>。近年のダイレクトボンディングシステムに用いる接着材料の進歩は目覚ましく、ブラケットのエナメル質への接着力も向上している<sup>5-6)</sup>。

これまでダイレクトボンディングシステムでは、ブラケットの歯面への接着に先立ち、リン酸やクエン酸などの酸性溶液を用いたエッチングによる歯面処理が行われてきた<sup>7-9)</sup>。このような酸エッチングにより、接着表面積や嵌合力の向上を図ることができ、より確実なブラケットの歯面への接着が可能となっている<sup>10,11)</sup>。しかしながら、酸エッチング法の欠点として、過剰なエッチングによるブラケット周囲のエナメル質の脱灰、白濁の可能性<sup>12)</sup>やブラケット撤去時のエナメル質への損傷<sup>13,14)</sup>が報告されている。

矯正治療に求められる接着システムは、ブラケットがエナメル質表面に臨床的に十分な接着力によって装着されると同時に、エナメル質への侵襲を最小限にすることが求められる。そこで、近年ブラケットの歯面接着に先んじて行われる歯面処理において、酸エッチングと比較してエナメル質への有害作用が少ない、セルフエッチングプライマー (SEP) が使用されるようになった<sup>15-19)</sup>。SEPは、エッチング、プライミングおよびボンディングの3つの機能を同時に併せもち、歯面処理後の水洗を必要としないことから、操作手順の簡略化とチェアタイムの短縮を図ることも可能である<sup>19)</sup>。このような安全性と簡便性から、SEPを含む矯正歯科用接着剤が多く市販されている。

SEPは、4-メタクリル酸エステル (4-META) に代表されるメタクリル系樹脂を主成分とするものが多いもの (表1)、各製品の成績には不明な点も多い。またこれまで、矯正用ブラケットのエナメル質に対する接着強さに関して得られた成績は牛歯を用いたものも多く<sup>16,20-24)</sup>、ヒトの歯を用いた成績に十分な知見が得られているとは言い難い。そこで本研究では、市販されている種々のSEPが歯質表面に与える影響とSEPとともに構成されるさまざまなレジンセメントの接着強さを、ヒト抜去歯を用いて検討した。

## 材料および方法

### 1. 実験材料

実験歯には、遺伝性や先天性疾患が疑われない15~33歳健康者由来で、矯正歯科治療のために便宜抜去され、エナメル質と象牙質に形成不全がなく、著しい摩耗や咬耗をみないヒト上下顎小白歯を用いた。抜

去歯は、抜去後に蒸留水により水洗し、蒸留水中に浸漬し4℃保存した。

本研究で用いたエナメル質表面処理剤とレジンセメントを、おのおの表1と表2に示す。エナメル質表面処理には3種類のSEPを用い、レジンセメントは各SEPにより構成されたレジンセメント製品を使用した。SEPには、ティースプライマー<sup>®</sup> (サンメディカル社、滋賀)、トランスボンドプラス<sup>®</sup> (3Mユニテック社、ミネソタ、アメリカ)、フィックスフォースプラス<sup>®</sup> (トクヤマデンタル社、東京)を用いた。レジンセメントには、スーパーボンド<sup>®</sup> (サンメディカル社、滋賀)、トランスボンドXT<sup>®</sup> (3Mユニテック社、ミネソタ、アメリカ)、フィックスフォースプラス<sup>®</sup> (トクヤマデンタル社、東京)を用いた。矯正用ブラケットとして、下顎中切歯用メタルブラケット (0.018inch Standard bracket, 100-5100, デンツプライ三金社、東京)を用いた。このブラケットのベース面積は約4mm<sup>2</sup>であった。

なお、本研究の実施は、明海大学歯学部倫理審査委員会により承認 (承認番号:A1117) された。

### II. 実験方法

#### 1. 微細構造の観察

##### 1) 試料の作製

4℃保存されたヒト小白歯の抜去歯を蒸留水により水洗後、歯根部の付着物をスケラーで除去し、カーバイドディスク (ホリコ社、ベルリン、ドイツ)を用いて歯冠と歯根に半切し、歯冠部のみを実験に供した。これらの歯冠に以下のリン酸エッチングまたはSEPの2種の処理を行った。

##### ・リン酸エッチング処理

ブラケットの被着歯面を31%リン酸エッチングジェル<sup>®</sup> (デンツプライ三金社、東京)で30秒間処理後、蒸留水により5秒間水洗し、10秒間圧縮空気により乾燥させた。

##### ・SEP処理

上記の3種のSEPを用いて、おのおのの添付文書に従い以下の処理を行った。

ティースプライマー<sup>®</sup>: ブラケットの被着歯面にSEPを塗布し、湿潤状態のまま20秒間静置後、10秒間圧縮空気により乾燥させた。

トランスボンドプラス<sup>®</sup>: ブラケットの被着歯面にSEPを10秒間塗布後、1~2秒間圧縮空気により乾燥させた。

フィックスフォースプラス<sup>®</sup>: ブラケットの被着歯面にSEPを20秒間塗布後、10秒間圧縮空気により乾燥させた。

##### 2) 走査電子顕微鏡 (SEM) による超微細構造の観察



表1 本研究に用いたエナメル質表面処理剤

商品名	形状	主な組成	製造会社
エッチングジェル <sup>®</sup>	ペースト状	31%リン酸溶液 精製水 着色材	デンツプライ三金
ティースプライマー <sup>®</sup>	液	4-META 精製水 アセトン	サンメディカル
トランスボンドプラス <sup>®</sup>	液	メタクリレート化リン酸エステル 精製水	3Mユニテック
フィックスフォースプラス <sup>®</sup>	液	アセトン 精製水 リン酸モノマー UDMA 触媒	トクヤマデンタル

4-META: 4-メタクリル酸エステル, UDMA: ウレタンジメタクリレート

表2 本研究に用いたレジンセメント製品

商品名	構成	組成	製造会社
スーパーボンド <sup>®</sup>	ポリマー モノマー キャタリスト	PMMA MMA, 4-META トリ-n-ブチルホウ素部分酸化物	サンメディカル
トランスボンドXT <sup>®</sup>	ペースト	Bis-GMA, TEGDMA Bis-EMA, ジルコンサンド	3Mユニテック
フィックスフォースプラス <sup>®</sup>	ポリマー モノマー	PMMA, PEMA, 助触媒 MMA, UDMA, HEMA ボレート触媒, MTU-6	トクヤマデンタル

PMMA: ポリメチルメタクリレート, MMA: メチルメタクリレート, 4-META: 4-メタクリル酸エステル, Bis-GMA: ビスフェノール A・グリシジルメタクリル酸, TEGDMA: トリエチレンジグリコールジメタクリレート, Bis-EMA: ビスフェノール A・ジアクリレート, PEMA: ポリエチルメタクリレート, UDMA: ウレタンジメタクリレート, HEMA: 2-ヒドロキシエチルメタクリレート, MTU-6: メタクリル酸-6

未処理のエナメル質表面および、前述したリン酸エッチング処理または3種のSEP処理を行ったエナメル質表面の超微細構造をSEM (JSM-6360LV, 日本電子社, 東京) により観察した。未処理および各表面処理を行った実験歯を真空蒸着装置で金蒸着 (厚み: 20 nm) を施した後, SEMを用いて倍率900倍と5,000倍下で被着面を観察した。なお, この時の加圧電圧は15 kVであった。

## 2. 表面粗さおよび接着強さの測定

### 1) 試験体の作製

実験歯を半切し歯冠部を使用した。その後, 切端に近い唇側のエナメル質を観察しやすいように, エポキシ樹脂 (Epofix<sup>®</sup>, 丸本ストラス社, 東京) により歯冠部を包埋用リングに包埋した。24時間後, 硬化したエポキシ樹脂をリングから取り出しエナメル質が露出するように耐水研磨紙400番, 600番, 800番を

用いて自動研磨機 (Ecomet 3, ビューラー社, イリノイ, アメリカ) により注水下のもと研磨・調整し, 試験体とした。研磨終了後, 超音波洗浄を5分間行った。

### 2) 表面粗さの測定

レーザー顕微鏡 (VK-9700, キーエンス社, 大阪) により, リン酸エッチングと3種のSEP処理後の試験体エナメル質表面の表面粗さを算術平均粗さ (Ra) として測定した。なお, コントロールとして, 歯面処理を行っていないヒト小白歯を用いた。Ra値の測定にあたり, 凹凸の影響を最小限にするために, 方向性をもった線上の研磨痕と直行する方向にレーザー顕微鏡を用いて, 測定長さ1.5 mmの範囲で測定を行った。なお, 各処理ごとに3試料 (N=3) を実験に供した。

### 3) ブラケット接着, 接着強さの測定

作製した試験体のエナメル質表面に未処理, リン酸

エッチング処理あるいはSEP処理後、各レジンセメントをブラケットベース面に築盛し、被着面に一定の荷重を負与してメタルブラケットを接着した。本研究では各レジンセメントにより得られる、できる限り臨床的な接着強さの結果を検討することを目的とした。そこで、外来診療でブラケット装着を歯面に対して行う手指圧をもとに実験を行った。ブラケット接着時の圧接力を、1,000 gまで計測できる計量器（タニタ社、東京）により10回測定した。その結果、圧接力は297~318 gfの範囲にあり、その平均と標準偏差は306±7.5 gfであった。

#### ・リン酸エッチング処理後の接着（図1）

ブラケットの被着歯面を31%リン酸エッチングジェル®（デンツプライ三金社、東京）で表面処理後、スーパーボンド®（サンメディカル社、滋賀）を用いて筆積み法によりブラケットを歯面に接着した。なお、ブラケット周囲の余剰レジンセメントは採針により除去した。

#### ・SEP処理後の接着（図2）

ティースプライマー®：ブラケットの被着歯面にSEPを塗布後、スーパーボンド®（サンメディカル社、滋賀）を用いて筆積み法によりブラケットを歯面に接着した。

トランスボンドプラス®：ブラケットの被着歯面にSEPを塗布後、トランスボンドXT®（3Mユニテック社、ミネソタ、アメリカ）を用いてブラケットを接着した。その後、可視光線照射器（LD-105、ヨシダ社、東京）で光照射を30秒間行いブラケットを接着した。

フィックスフォースプラス®：ブラケットの被着歯面にSEPを塗布後、フィックスフォースプラス®（トクヤマデンタル社、東京）を用いて筆積み法によりブラケットを歯面に接着した。

おのこのブラケット接着後、ブラケット周囲の余剰レジンセメントは採針により除去し、37℃蒸留水中に24時間浸漬した。接着強さの測定は、せん断試験機（4302、インストロン社、マサチューセッツ、アメリカ）を用いてブラケットの長軸と平行で、歯頸側から歯冠側へせん断圧子の荷重が加わるように試験体を装着し（図3）、クロスヘッドスピード1 mm/minで破断荷重から接着強さを算出した。この時、せん断圧子は可及的にブラケットベースに近接するように試験体を装着した。なお、リン酸エッチング処理5試料（N=5）、各SEP処理5試料（N=5）を実験に供した。

### 3. 統計解析

各群の表面粗さと接着強さを、SPSS®（Version 19.0、IBM社、ニューヨーク、アメリカ）を用いて、Student *t*-testとANOVA/Scheffe's-testによる比較を行

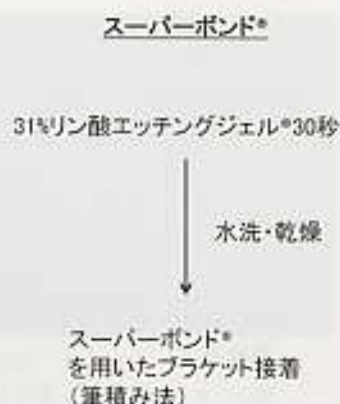


図1 リン酸エッチング処理後のブラケット接着のプロトコール

った。p<0.05を統計学的に有意とした。

## 結 果

### I. 微細構造の観察

図4~8に表面処理を行わなかった未処理、リン酸エッチングあるいはSEP処理を行ったエナメル質表面のSEM像を示す。未処理の歯面では、平滑なエナメル質表面が観察され、エナメル小柱構造は可視化できなかった（図4）。リン酸エッチング処理面では、エナメル小柱とその周囲の小柱間質が明瞭に観察された（図5）。

SEP処理後、ティースプライマー®処理面ではリン酸エッチングおよび他2種のSEP処理面と比較して、エナメル小柱と小柱間質は可視化されたものの、これらはやや不明瞭であった（図6）。トランスボンドプラス®（図7）とフィックスフォースプラス®（図8）処理面でも、エナメル小柱の概形と小柱間質がいずれも可視化された。

### II. 表面粗さおよび接着強さの測定

#### 1. 表面粗さの測定

リン酸エッチングとSEP処理後のエナメル質における算術平均粗さ（Ra）の3回の測定結果とその平均±SDを表3に示す。Ra値は、表面処理を行っていない歯面では、3.0 μm, 3.3 μm, 3.1 μm（平均±SD：3.1±0.2 μm）であった。リン酸エッチング処理後では、4.1 μm, 4.3 μm, 4.4 μm（平均±SD：4.3±0.2 μm）であった。ティースプライマー®処理後は、3.5 μm, 3.6 μm, 3.4 μm（平均±SD：3.5±0.1 μm）であった。トランスボンドプラス®処理後は、4.0 μm, 4.2 μm, 4.1 μm（平均±SD：4.1±0.1 μm）であった。フィックスフォースプラス®処理後は、3.7 μm, 4.0 μm, 3.8 μm（平均±SD：3.8±0.2 μm）であった。



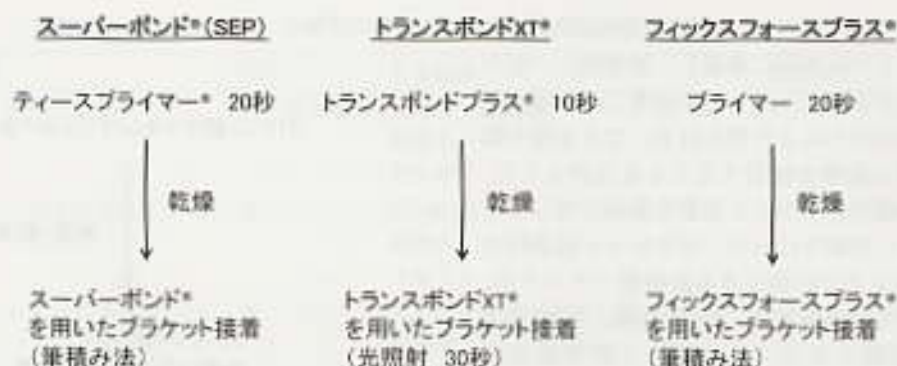


図2 セルフエッチングプライマー (SEP) 処理後のブラケット接着のプロトコール

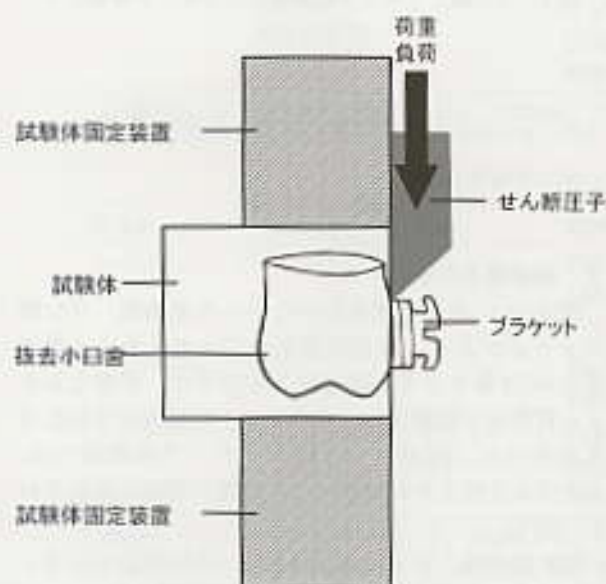


図3 接着強さの測定法の模式図

リン酸エッチング、トランスボンドプラス®, フィックスフォースプラス® の Ra 値は、表面処理を行っていない歯面の Ra 値よりも有意に大きかった ( $p < 0.05$ )。ティースプライマー® と表面処理を行っていない歯面の Ra 値間には、有意な差はなかった。また、リン酸エッチングの Ra 値は、ティースプライマー® とフィックスフォースプラス® の Ra 値よりも有意に大きかった ( $p < 0.05$ )。リン酸エッチングとトランスボンドプラス® の Ra 値間には、有意な差はなかった。

## 2. 接着強さの測定

図9に、ブラケットの接着強さの結果を示す。エナメル質への表面処理を行わなかった歯面におけるスーパーボンド®, トランスボンドXT®, フィックスフォースプラス® の接着強さは、おのおの  $6.0 \pm 1.8$  MPa,  $8.9 \pm 1.3$  MPa,  $5.3 \pm 1.2$  MPa であった。SEP 処理後とリン酸エッチング処理後のスーパーボンド® の接着強さは、おのおの  $24.3 \pm 4.0$  MPa と  $31.1 \pm 5.8$  MPa であった。

SEP 処理後のトランスボンドXT® とフィックスフォースプラス® の接着強さは、おのおの  $28.9 \pm 7.1$  MPa と  $25.7 \pm 2.5$  MPa であった。エナメル質表面への SEP 処理やリン酸処理により表面処理を行った歯面と、表面処理を行わなかった歯面を比較して、いずれのレジメンセメントの接着強さも、有意に増加した。なお、スーパーボンド® による接着強さに関しては、SEP 処理とリン酸エッチング処理間に有意な差はみられなかった。

次に、SEP 処理後のスーパーボンド®, トランスボンドXT®, フィックスフォースプラス® 間の接着強さを比較した。その結果、3種のレジメンセメント間の接着強さには、有意な差はなかった。さらに、SEP 処理後に3種のレジメンセメントで得られた接着強さは、いずれもリン酸エッチング後のスーパーボンド® の接着強さと有意な差はなかった。

## 考 察

### 1. 試料と方法

本研究では、ダイレクトボンディング法の歯面処理における SEP の有用性を、エナメル質表面に与える影響と、SEP とともに構成されるさまざまなレジメンセメントの接着強さをもとに定量的に検討した。これまで同様な検討を行った研究では、入手が容易で組織学的構造がヒトの歯に類似している牛歯が用いられてきた<sup>16,23,24</sup>。本研究では、より矯正歯科臨床に近似した評価を行う目的でヒト抜去歯を用いた。しかしながら、このようなヒト抜去歯には多くの多様性があり、客観的評価が困難となる場合がある。そこで本研究では、遺伝性や先天性疾患が疑われず、エナメル質と象牙質に構造異常がみられず、著しい摩耗と咬耗をみない上下顎小白歯に限定した。抜去歯提供者の年齢についても 15~33 歳に限定し、可能な限り試料の近似を図った。

多くの先行研究において、接着操作に先立ちエナメ

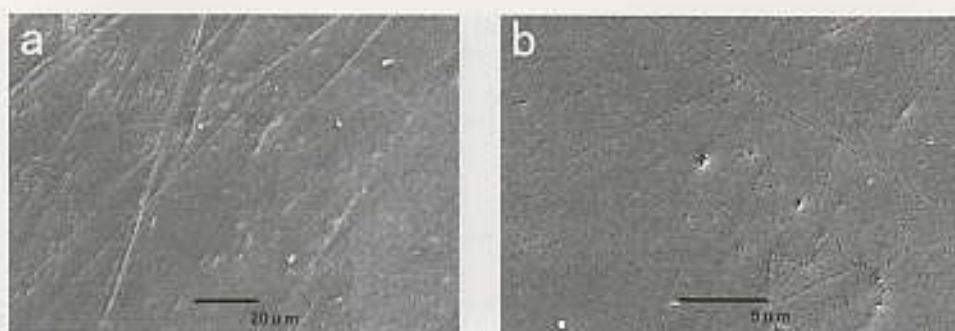


図4 未処理のエナメル質表面性状

a:  $\times 900$ , bar=20  $\mu\text{m}$   
 b:  $\times 5,000$ , bar=5  $\mu\text{m}$

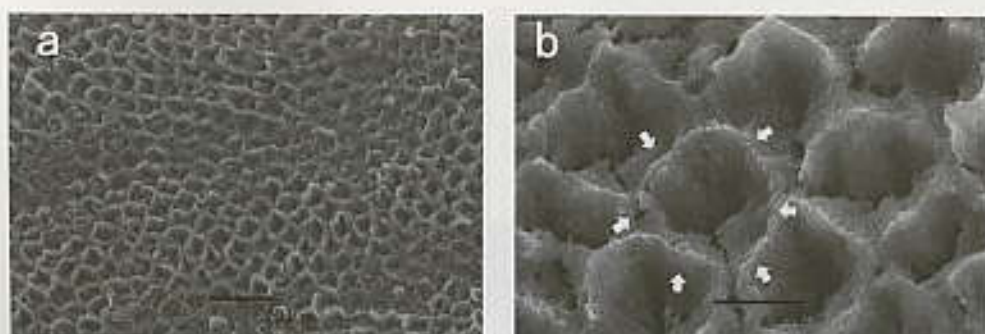


図5 リン酸エッチング処理後のエナメル質表面性状

a:  $\times 900$ , bar=20  $\mu\text{m}$   
 b:  $\times 5,000$ , bar=5  $\mu\text{m}$   
 エナメル小柱がはっきりと可視化されその周囲が粗造 (矢印)

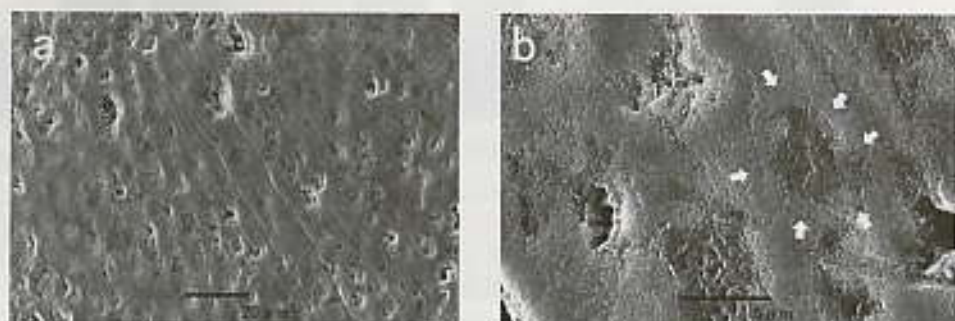


図6 ティースプライマー® 処理後のエナメル質表面性状

a:  $\times 900$ , bar=20  $\mu\text{m}$   
 b:  $\times 5,000$ , bar=5  $\mu\text{m}$   
 エナメル小柱の概形が不明瞭ながら可視化 (矢印)

ル質の接着面を耐水性研磨紙などにより接着面の面出しを行っている<sup>5,7,10,11,16,20-24</sup>。本研究においてもこれらの報告と同じように、おのおのの歯の表面が同一条件となるように接着面を研磨後、実験に供した。この時、ヒト抜去歯ではエナメル質の厚さが牛歯に比べ薄いため<sup>25</sup>、象牙質が露出してしまふ可能性が考えられた。そこで研磨後に象牙質の露出が起らないように、エナメル質が厚く切端に近い唇側エナメル質を観察し

やすいように位置づけ、ユーティリティーワックスで固定後、エポキシ樹脂により包埋した。その後、耐水研磨紙 400 番、600 番、800 番を用いて自動研磨機により研磨した。研磨後、エナメル質と歯頸部にわずかに露出した象牙質との境界が明確に確認され、エナメル質に限定してブラケットを接着することが可能であった。

接着強さを測定するために規定すべき実験条件の一



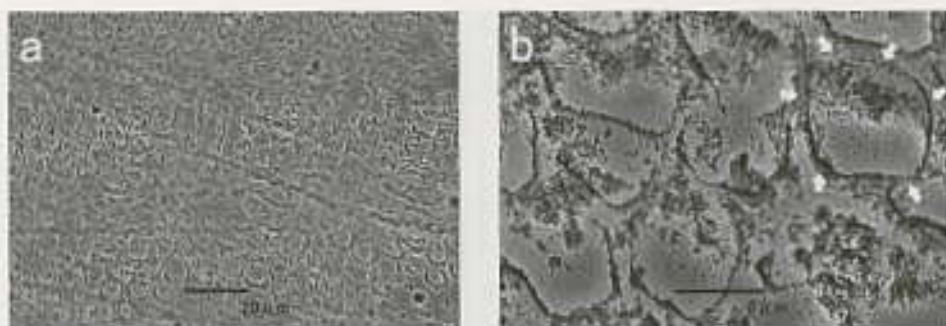


図7 トランスボンドプラス®処理後のエナメル質表面性状

a: x900, bar=20 μm  
b: x5,000, bar=5 μm  
エナメル小柱の概形が可視化 (矢印)

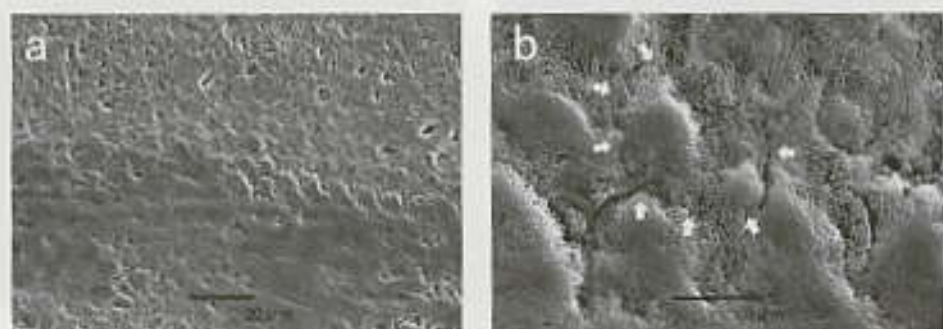


図8 フィックスフォースプラス®処理後のエナメル質表面性状

a: x900, bar=20 μm  
b: x5,000, bar=5 μm  
エナメル小柱の概形が可視化 (矢印)

つとして、ブラケットの圧接力がある。作製した試験体のエナメル質表面をリン酸エッチング処理およびSEP処理後、各レジメンセメントをブラケットベース面に築盛し、被着面に一定の荷重を負与してメタルブラケットを接着した。本研究では、外来診療で臨床的に用いられるブラケットへの圧接力により得られる接着強さについて検討した。本研究のブラケット接着時の圧接力は、接着前に10回測定した結果、平均 $305 \pm 7.5$  gfであった。臨床的なブラケットの圧接力に関しては、これまで80 gf, 200 gf, 300 gf, 400 gf, 500 gf, 600 gfなどのさまざまな数値が報告されている<sup>23,24</sup>。松山<sup>21</sup>は臨床経験4年以上の矯正歯科医10名のブラケット圧接力を、平均値500 gfと報告している。北原<sup>22</sup>らは8名の矯正歯科医のブラケット圧接力に関して、一人当たりの平均が80~350 gfと、比較的その多様性が大きいことを報告している。また、Itoh<sup>21</sup>らは、矯正歯科医5名のブラケット圧接力を平均200 gfと報告している。このように、ブラケット装着時に臨床的に付与される圧接力にはある程度の幅があるものの、本研究の $305 \pm 7.5$  gfという数値は臨床的に標準的な圧接力と考えられる。

接着強さの測定の際、ブラケットを接着した試験体は歯頸部から歯冠側へせん断圧子の荷重が加わるように装着した。この時、せん断圧子がブラケットウィングに接してブラケットが変形をした後に脱落する可能性が考えられる。そこで本研究では、せん断圧子がブラケットウィングに接することなく、圧子先端が接着界面近傍に接するように試験体を装着した。

## II. SEP処理後の歯面性状について

SEM所見では、トランスボンドプラス® (図7)、フィックスフォースプラス® (図8)の処理面には、エナメル小柱の概形がみられ、周囲を小柱間質が取り囲んでいた。チーヌプライマー®処理面では、リン酸エッチングおよび他2種のSEP処理面と比較して、エナメル小柱と小柱間質がやや不明瞭であった (図6)。SEMでは、比較的大きく深い表面の凹凸やうねりを観察することができる<sup>30</sup>。一方、表面粗さの測定にあたっては、対象物の表面の粗さ曲線を得て、粗さ曲線からRa値を計算する。Ra値の対象は比較的小さい間隔で現れる実表面の微細な凹凸であり、SEMで観察される大きなスケールのものとは異なる。



表3 リン酸エッチングとSEP処理後のエナメル質表面粗さ (Ra)

	未処理	リン酸 エッチング	ティース プライマー*	トランスボンド プラス*	フィックスフォース プラス*
Ra 値 ( $\mu\text{m}$ )	3.0	4.1	3.5	4.0	3.7
	3.3	4.3	3.6	4.2	4.0
	3.1	4.4	3.4	4.1	3.8
平均 $\pm$ SD ( $\mu\text{m}$ )	3.1 $\pm$ 0.2	4.3 $\pm$ 0.2 <sup>ab</sup>	3.5 $\pm$ 0.1*	4.1 $\pm$ 0.1*	3.8 $\pm$ 0.2*

3回の計測結果とそれらの平均 $\pm$ SDを表示

未処理：表面処理を行っていない歯面

#：未処理と有意差あり ( $p < 0.05$ )，a：ティースプライマー\*と有意差あり ( $p < 0.05$ )，b：フィックスフォースプラス\*と有意差あり ( $p < 0.05$ )，\*：リン酸エッチングと有意差あり ( $p < 0.05$ )

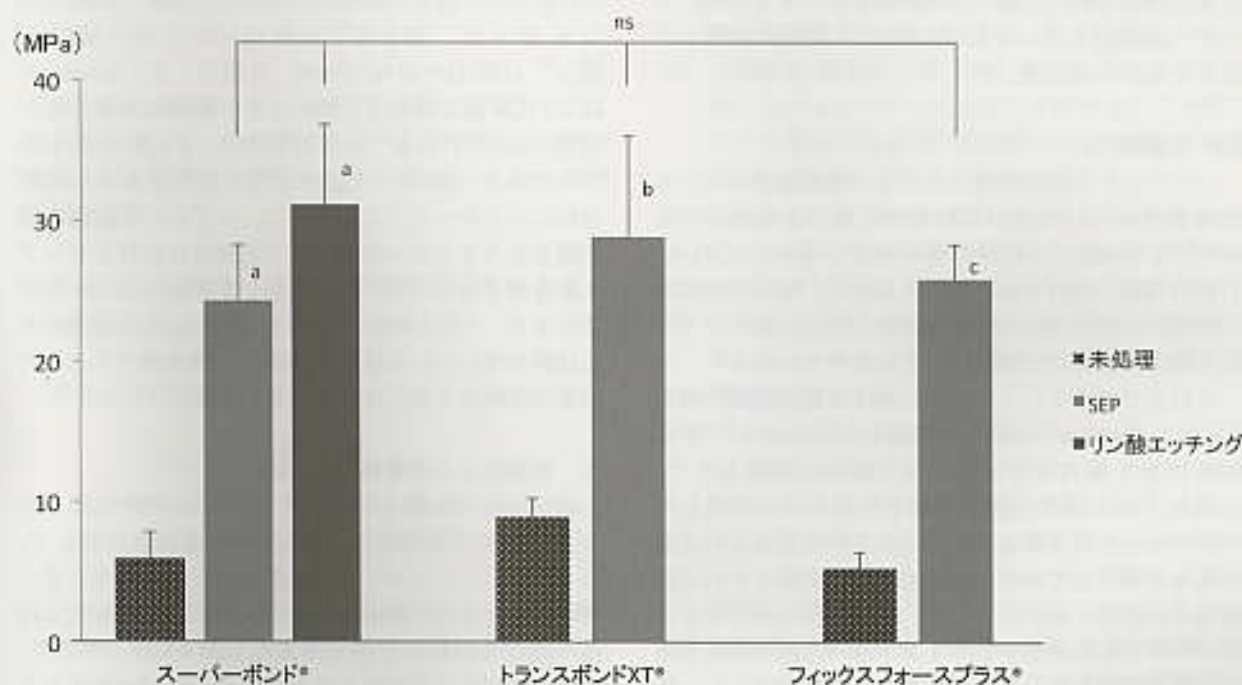


図9 各種レジメンメントによる接着強さの比較

各数値は平均 $\pm$ SDで表示 (N=5)

a：未処理のスーパーボンド\*と有意差あり (ANOVA / Scheffe's-test,  $p < 0.05$ )，b：未処理のトランスボンドXT\*と有意差あり (Student *t*-test,  $p < 0.05$ ) c：未処理のフィックスフォースプラス\*と有意差あり (Student *t*-test,  $p < 0.05$ )，ns：群間に有意差なし (ANOVA / Scheffe's-test)

Ra 値は、未処理の歯面で  $3.1 \pm 0.2 \mu\text{m}$  であった。SEP 処理後に、ティースプライマー\*、トランスボンドプラス\*、フィックスフォースプラス\* により、おのおのの Ra 値は  $3.5 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、 $4.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 、 $3.8 \pm 0.2 \mu\text{m}$  に増加したが、ティースプライマー\* 処理後の値は、未処理の歯面と有意な差がなかった。ティースプライマー\* には、トランスボンドプラス\* やフィックスフォースプラス\* のようなリン酸系モノマーではなくカルボン酸系モノマー (4-META) が使用されているため、エナメル質の脱灰作用は弱いと考えられる。その結果、未処理の歯面と比較して、Ra 値に有意な

差がなかったと考えられる。一方、他の2つの SEP 処理後の Ra 値は、未処理の歯面と比較して有意に大きかった。なお、ティースプライマー\* とフィックスフォースプラス\* 処理後の Ra 値はリン酸エッチング処理後 ( $4.3 \pm 0.2 \mu\text{m}$ ) に比べ有意に低く、歯面の脱灰作用が弱かった。

Ra 値の計測にあたり、計測対象の表面粗さに特定の方向性があると測定値に影響を及ぼすことが知られている<sup>20)</sup>。本研究では、研磨・調整を行った試験体を用いてエナメル質表面処理後に Ra の測定を行った。この研磨過程において、自動研磨機により連続的な方

表4 表面粗さと接着強さ

	スーパーボンド <sup>®</sup> (リン酸エッチング)	スーパーボンド <sup>®</sup> (ティースプライマー <sup>®</sup> )	トランスボンド <sup>®</sup>	フィックスフォースプラス <sup>®</sup>
表面粗さ ( $\mu\text{m}$ )	4.3 $\pm$ 0.2	3.5 $\pm$ 0.1	4.1 $\pm$ 0.1	3.8 $\pm$ 0.2
接着強さ (MPa)	31.1 $\pm$ 5.8	24.3 $\pm$ 4.0	28.9 $\pm$ 7.1	25.7 $\pm$ 2.5

各数値は、平均 $\pm$ SDにより表示

向性を持った線状の凹凸が与えられ<sup>27,28</sup>、計測結果に影響を与えることが懸念された。そこで本研究では、この方向性を持った線状の研磨痕と直行する方向にレーザー顕微鏡を用いてRaを測定し、凹凸の影響が小さくなるように配慮した。

### III. 接着強さについて

ブラケットの歯面装着にあたり、最低限求められる接着強さについては、これまでさまざまな報告があり<sup>1,29,30</sup>、一致した見解が得られていない。これは、口腔外環境で検討された数値と異なり、臨床では唾液の作用、口腔内温度といった多数の要因が歯とブラケット間の接着強さに影響するためと考えられる<sup>31</sup>。

これまでブラケットの歯面に対する接着試験の結果として、Newman<sup>1)</sup>は最大29 MPa、McCourtら<sup>29)</sup>は10 MPa以上と報告している。また臨床的結果として、三浦ら<sup>30)</sup>は、矯正治療中の患者の歯面から脱落したブラケット数を数え、4 MPa以上の接着強さが必要であると報告している。このように、必要とされる接着強さの結果に差があるのは、実験に用いたさまざまなブラケットの材質やブラケットベース面の形状や被着面積が関係したものと考えられる。このように、臨床的に接着強さを規定することは容易ではない。

本研究で使用したSEPの処理後に、スーパーボンド<sup>®</sup>、トランスボンドXT<sup>®</sup>、フィックスフォースプラス<sup>®</sup>を用いてブラケットを接着した結果、接着強さはおおのそ24.3 $\pm$ 4.0 MPa、28.9 $\pm$ 7.1 MPa、25.7 $\pm$ 2.5 MPaと測定された。これらの接着強さ間に有意な差はなく、すべて20 MPa以上であった。さらにこの値は、これまで使用されることが多かったリン酸エッチング後にスーパーボンド<sup>®</sup>を用いて接着した値と有意な差がなかった。以上のことから、今回検討したSEP処理を伴う各接着システムは、矯正歯科臨床に十分耐えうる接着力をもつと考えられる。

本研究は、ヒト試料を用いた点と比較的群数が多いという実験デザインより、同一条件のサンプル数が少なく、データの信頼性が十分でない可能性がある。特に接着強さの測定は、N=5で行ったため、母集団の標準偏差と平均の比である変動係数 (coefficient of

variation: CV) を他の報告<sup>6,7,22)</sup>と比較した。ヒトの歯を用いた先行研究における接着強さのCV値に関して、青木ら<sup>6)</sup>は約10~40% (N=7)、茂木<sup>7)</sup>は約13~34% (N=10)、徳永ら<sup>22)</sup>は約14~30% (N=14)、日置ら<sup>22)</sup>は約14~50% (N=6)と報告した。PowersらはこのCV値に関して、20~30%の範囲にあることが重要と述べている<sup>32)</sup>。本研究では、CV値が約10~25%であり(表4)、上記の研究と同程度あるいは相対的に小さかった。このように、いずれの実験群の標準偏差も大きくないため、同一実験群におけるサンプル数を増やしてもCV値に大きな影響を与えない可能性がある。しかしながら、ヒトの歯という多様性のある試料を用いている以上、今後はn数を増やすことで結果の信頼性を向上させる必要がある。

### IV. 表面粗さと接着強さの関係について

図9よりリン酸エッチングあるいはSEP処理により、歯面への表面処理を行わなかった数値と比較して、いずれのレジンセメントの接着強さも増大した。また同時にこのような歯面への表面処理は、歯面性状に程度の異なる器質的变化を与えた(図4~8)。そこで、各表面処理後の表面粗さと、対応するレジンセメントにより得られる接着強さの結果を表4に示した。その結果、接着前の表面処理により表面粗さの数値が大きくなるほど、ブラケットの接着強さも大きくなる傾向がみられた。このように、ブラケットの接着においては化学的接着だけでなく機械的接着(嵌合力)の影響も大きな要素であると考えられる。しかしながら、ティースプライマー<sup>®</sup>処理後のRa値は未処理の値と差がなく、スーパーボンド<sup>®</sup>では化学的接着の効果は他のレジンセメントよりも大きい可能性が考えられる。

## 結 論

ヒト抜去小白歯に3種のセルフエッチングプライマー(ティースプライマー<sup>®</sup>:サンメディカル社、トランスボンドプラス<sup>®</sup>:3Mユニテック社、フィックスフォースプラス<sup>®</sup>:トクヤマデンタル社)により歯面処理を行い、その表面性状をSEM下で観察し、レーザ



一顕微鏡により算術平均粗さを計測した。また SEP 処理後、各 SEP により構成される接着システムを用いて歯面にブラケットを装着し、接着強さを測定した。SEM 所見より、2 種の SEP 処理直後に、エナメル小柱と小柱間質が可視化された。フィースプライマー<sup>®</sup> 処理面では、リン酸エッチングおよび他の 2 種の SEP 処理面よりも、エナメル小柱と小柱間質がやや不明瞭であった。表面粗さは、3 種の SEP 間に有意な差はなく、2 種の SEP 処理後の値はリン酸エッチング処理後と比較して有意に低かった。接着強さは、3 種の接着システム間に有意な差はなく、リン酸エッチング処理後にスーパーボンド<sup>®</sup> を用いて接着した植とも有意な差はなく、臨床的に十分な接着強さが得られたと考えられる。

稿を終えるにあたり、本研究の遂行にご協力とご支援をいただきました明海大学歯学部歯科矯正学分野の諸先生方とトクヤマデンタル社の皆様方に心から感謝いたします。

本研究の一部は、第 72 回日本矯正歯科学会大会 (2013 年 10 月、長野) において発表した。

著者全員利益相反なし。

## 文 献

- 1) Newman GV. Epoxy adhesives for orthodontic attachments: progress report. *Am J Orthod* 1965; 51: 901-912.
- 2) Newman GV, Snyder WH, Wilson CE Jr. Acrylic adhesives for bonding attachments to tooth surfaces. *Angle Orthod* 1968; 38: 12-18.
- 3) 古賀圭子. 矯正用レジン改良型ガラスイオノマーセメントの接着強さ. *九州歯会誌* 2001; 55: 20-28.
- 4) 中嶋 亮, 徳永理利, 葛西一貴. 矯正用光重合型レジン系接着システムの接着性能. *接着歯学* 2013; 31: 159-166.
- 5) 大山晃代, 藤島昭宏, 斎藤 茂, 他. レジン添加型ガラスイオノマーセメントを用いた歯科矯正用接着システムに関する研究 (第 3 報) 各種接着体に対する接着強さと表面処理効果. *昭歯誌* 2002; 22: 1-12.
- 6) 青木義親, 中嶋 亮, 徳永理利, 他. 4-META/MMA-TBB 系レジン用セルフエッチングシステムの審美性ブラケットに対する接着特性. *日大口腔科学* 2013; 39: 10-16.
- 7) 茂木正邦. 4-META/MMA-TBB レジンの歯科矯正的研究 -1- エナメル質に対する接着性について. *日矯歯誌* 1982; 41: 260-271.
- 8) 松田哲明. Direct Bonding Method に関する研究: 各種酸性処理液によるヒトのエナメル質表面の脱灰効果について. *九州歯会誌* 1976; 29: 698-723.
- 9) 松田哲明, 山田建二郎, 佐藤通泰. Direct Bonding Method におけるエナメル質表面処理液の検討. *西日矯歯誌* 1977; 21: 45-49.
- 10) 中川一彦. レジン製矯正用ブラケットとエナメル質との接着に関する研究 (第 1 報) 即硬性メタクリルレジンとエナメル質との接着方法について. *歯理工誌* 1968; 9: 203-209.
- 11) 松山仁昭, 田谷かほる, 黒田栄子, 他. エッチング時間がブラケット接着強さと歯面に及ぼす影響. *奥羽大歯学誌* 2002; 29: 143-148.
- 12) 遠藤敏哉, 長谷川 優, 鈴木 洋, 他. 酸エッチング後あるいはレーザーエッチング後のエナメル質に対する矯正用接着剤の接着性の比較検討. *日矯歯誌* 1994; 53: 406-416.
- 13) Zachrisson BU, Skogan O, Höymyhr S. Enamel cracks in debonded, debanded and orthodontically untreated teeth. *Am J Orthod* 1980; 77: 307-319.
- 14) 小平真美, 山口 大, 徳永理利, 他. 矯正治療前後におけるエナメルクラック発生の比較検討. *歯科審美* 2009; 22: 48-54.
- 15) Stratmann U, Schaarschmidt K, Wegener H, et al. The extent of enamel surface fractures. A quantitative comparison of thermally debonded ceramic and mechanically debonded metal brackets by energy dispersive micro- and image-analysis. *Eur J Orthod* 1996; 18: 655-662.
- 16) 堀田邦孝, 斎藤康雄, 田代幸一, 他. 光重合型低粘性レジン矯正用接着材としての検討. *接着歯学* 2003; 21: 24-30.
- 17) Kitayama S, Nikaido T, Ikeda M, et al. Enamel bonding of self-etch and phosphoric acid-etch orthodontic adhesive systems. *Dent Mater J* 2007; 26: 135-143.
- 18) Horiuchi S, Kaneko K, Mori H, et al. Enamel bonding of self-etching and phosphoric acid-etching orthodontic adhesives in simulated clinical conditions: debonding force and enamel surface. *Dent Mater J* 2009; 28: 419-425.
- 19) 徳永理利, 西山典宏, 葛西一貴. ワンステップボンディング材を応用したブラケット新接着システム. *日矯歯誌* 2010; 69: 95-105.
- 20) 菅 国敏. 歯科矯正用プラスチックブラケットの被着面処理に関する研究. *岡山歯誌* 1998; 17: 75-87.
- 21) 新海 博, 小森 成, 石川晴夫. レジン強化型ガラスイオノマーセメントのダイレクトボンディング

- グへの応用: ブラケットベース形態の剪断接着強さに及ぼす影響について. 日矯歯誌 2000; 59: 263-271.
- 22) 日置まきは, 中原リザ子, 中曾根祐司. 歯科矯正用レジン添加型ガラスアイオノマーセメントのせん断接着強さ: 矯正用ブラケットベース面とエナメル質面形状による影響. 歯材器 2006; 24: 223-230.
- 23) 松山仁昭. 矯正用コンポマーを用いたブラケット反復接着が接着強さと歯面に及ぼす影響. 奥羽大歯学誌 2005; 27: 110-121.
- 24) 北原 愛, 新井一仁. 矯正用接着剤の稠度およびブラケットの圧接力と圧接時間がせん断接着強さに与える影響. 日矯歯誌 2012; 71: 129-140.
- 25) Itoh T, Fukushima T, Inoue Y, et al. Effect of water, saliva and blood contamination on bonding of metal brackets with a 4-META/MMA/TBB resin to etched enamel. *Am J Dent* 1999; 12: 299-304.
- 26) 青木保雄. 精密測定 (2). 第20版. 東京都: コロナ社, 1985; 302-310.
- 27) 深瀬康公, 西山 實, 斎藤仁弘, 他. 表面アラサの表記方法に関する一考察. 日大歯学 1989; 63: 379-387.
- 28) 河西宗一郎. 表面粗さの測定に関する研究: 第2報 エナメル質研磨面および象牙質切削面の R λ a-TOL 法による検討. 日大歯学 2003; 77: 179-188.
- 29) McCourt JW, Cooley RL, Barnwell S. Bond strength of light-cure fluoride-releasing base-liners as orthodontic bracket adhesives. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991; 100: 47-52.
- 30) 三浦不二夫, 中川一彦. レジン製ブラケット直接接着法の臨床応用例. 日矯歯誌 1969; 28: 344-354.
- 31) 中川一彦. レジン製矯正用ブラケットとエナメル質との接着に関する研究 (第2報): エナメル質の前処理効果について. 日矯歯誌 1969; 28: 278-285.
- 32) Powers JM, Kim HB, Turner DS. Orthodontic adhesives and bond strength testing. *Semin Orthod* 1997; 3: 147-156.

主任: 須田直人 教授

2014年8月1日受付

2015年7月14日受理

連絡先: 遠藤 則和

明海大学歯学部形態機能成育学講座歯科矯正学分野

〒350-0283 埼玉県坂戸市けやき台1-1

E-mail: norikazu023@gmail.com