The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	歯科矯正用ブラケットのディボンディングにおけるレジンの歯面残留の抑制に関する研究
Author(s)	木南, 秀雄
Citation	大阪大学, 1987, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/35332
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

歯科矯正用ブラケットのディボンディングにおけるレジンの歯面残留の抑制に関する研究

第一編　接着系の破壊挙動

木　南　秀　雄

昭和　年　月　日受付

緒言

接着材を用いて，歯面に直接矯正用ブラケット類を接着させるダイレクト・ボンディング法は，歯科矯正臨床で現在広く用いられ，今日では必要不可欠の技術となっている．この方法は他の歯科領域での接着と異なり，接着が一時的なものであり，動的治療終了後に鉗子を用いてブラケットを歯面から撤去する操作，すなわちディボンディングを行う必要がある．

この際，ブラケット－レジン界面で接着の破壊が起こり，歯面にレジンが残留することが多く，その除去に多大なチェアータイムと労力が要求されるうえ，患者に疼痛を与え，場合によってはエナメル質を損傷する危険性があり，現在のディボンディング法には解決されなければならない大きな問題が含まれている[1,2]．

しかし，ディボンディングという接着系の破壊現象，特に口腔内でのそれについては，適当な評価方法がなかったために，現在までその実態は明らかにされていない．従来の研究では，ディボンディングの際に歯面にレジンが残留することを前提として，できるだけ歯を損傷しないレジンの除去方法が述べられたものをみるにすぎず[3-7]，歯面にレジンが残留しないディボンディングを目指した体系的な研究は，ほとんど行われていない．

そこで本編では，この問題に対する解決のいとぐちをさぐるため，ブラケット－レジン－エナメル質で構成される接着系の破壊挙動について検討することとした．すなわち，レジンの歯面残留状態ならびにディボンディングに要する力の評価方法を考案し，単純引張り試験と併せて接着特性について検討することとした．

研究方法

1．レジンの歯面残留状態に対する定量的評価法（図1）

1）レジンの歯面残留率

ディボンディング後のレジンの歯面残留状態に対する定量的評価に対しては，残留面積，および残留量の2つの評価が考えられる．ここでは，残留面積を取りあげることによって，臨床的に問題となる残留状態を，残留量を含めて評価し得ると考え，残留面積を取りあげることにした．従って，レジンの歯面残留状態に対する定量的評価を行うための指標として，レジンの歯面残留率を次の式で算出することとした．

$$\text{レジンの歯面残留率} = \frac{\text{レジン残留部の面積}}{\text{ブラケットベースの面積}} \times 100(\%)$$

従って，残留率100%はすべてのレジンが歯面に残留した場合を，残留率0%は全く残留しなかった場合を表していることになる．

このようにレジン残留面積の比率を算出することは，歯種によりブラケットベースの大きさが異なる場合でも基準化した値が得られることになる．

なお，ブラケットベースの外側に溢出したレジン，いわゆるバリの部分については，本来ブラケット接着時に除去しておくものとして，本研究における検討の対象には含めないことにした．

上式における面積は，ブラケットベースおよびディボンディング後の歯面を，以下B，Cで述べる方法により，写真上で測定することとした．

2）面積の測定に用いる写真の撮影法

（1）撮影対象

（i）口腔内の歯

ディボンディング後の歯面の印象採得を行い，それにより得た模型の歯面を撮影した．

印象材は，付加重合型シリコン印象材（プロビール，バイエル社）を用い，通法に従って一次印象（プロビールPを使用）および二次印象（プロビールLを使用）を行った．印象材硬化後は，ただちに歯科用超硬石こう（ベルミックスストーン，カー社）を注入した．石こうの練和に際しては，指定混水比(W/P 0.25)とし，真空攪拌を行った．

（ii）抜去歯

ディボンディング後の歯面を直接撮影した．

この際，レジンの色調がエナメル質のそれと類似しているため，レジン残留部とそれ以外の部分との識別が困難であった．そこで，レジン残留部以外の歯面を染色したのち，撮影を行った．

染色操作は，ディボンディング後の時点で，今一度歯面を 4Mリン酸水溶液で 1分間エッ

チング，蒸留水で10秒間水洗，30秒間乾燥したのち，5%メチレンブルー水溶液（和光純薬）をこの歯面に塗布することにより行った．ただちにガーゼで余分な液を吸収，除去したのち，乾燥させた．この操作により，再エッチングされた部分で，かつレジンが残留していない部分のみが青紫～紫色に染色された．

（iii）ブラケット

ディボンディングしたものと同型のブラケットを撮影した．ディボンディング後のブラケットを使用しなかった理由は，ディボンディング操作によって，ベースが大きく変形する場合があるためである．なお，同型のブラケットのベースの大きさに製品むらがみられるか否かを検査するため，次の予備実験を行った．すなわち，本研究で使用したブラケット各種について，無作為に5個ずつを同型の製品の中から選択し，それらを次に述べるような方法により写真を撮影した．これを原

寸の 5倍に拡大し，ベース辺縁をトレースした線画を重ね合せた結果，同型内では一致することを確認した．

（２）撮影方法

ブラケットベースまたはブラケット接着部中央の歯面に対する法線が，写真撮影時の光軸と可及的に一致するように，撮影対象を位置づけ，一眼レフカメラと接写用レンズ（マイクロニッコール55mm,F2.8 および接写用リングPK-13 ，日本光学）を用いて，カラーポジフィルム（エクタクローム 100，コダック社）に等倍で撮影した．

撮影時の照明は，染色を施した抜去歯の歯面に対しては，通常の方法により行った．一方，模型上の歯面に対しては，残留レジン部のコントラストを強調するのに適していた斜め10° 方向からの照明を行った．なお，フィルムの現像は指定現像所（イマジカ社）で行った．

３）面積の測定方法

カラーポジフィルム上に撮影されたブラケット像を，写真用引伸機（A690，富士写真フィルム）を用いて原寸の 5倍に拡大投影し，ベース辺縁を鉛筆(2H)を用いてトレースした．同様にして拡大投影した歯面上のブラケット接着部と，この線画が一致するように重ね合せたのち，レジン残留部辺縁の輪郭線をトレースした（図１）．なお，この操作は，実際の試料におけるレジンの残留状態をエクスプローラにより確認しながら行った．得られた線画はディジタイザーを用いて画像解析システム（デジグラマモデル Gシリーズ，武藤工業）に入力し，レジン残留面積を測定した．

面積測定の再現性については，写真撮影時，トレース時，入力時の誤差をすべて含めて考えることとし，以下の要領で予備実験を行い確認した．すなわち，無作為に選択した10組の歯面およびブラケットに対して，2回ずつの面積測定を行い，対を成す標本の t検定を

行ったところ，いずれも有意の変動を認めず，再現性を有すると考えられた．

なお，レジン残留率についても，歯面あるいはブラケットベース程度の曲率と大きさを有するものでは，それを平面上に投射した場合，ブラケットベースだけでなく，歯面上のレジン残留部も同様な投射像となるため，両者の面積比率を問題とする限りにおいては，その誤差は実際上1%に満たないことを確認した．

２．ディボンディングに要する力の測定法

１）測定に対する基本的な考え方

接着系の破壊現象について考える上で，どの程度の力の大きさによって，破壊が生じたかを知ることが必要である．

本研究におけるディボンディングは，通常，臨床で行われているように，ブラケット撤去用鉗子（ 804-104，ユニテック社）を用い，

鉗子の刃先をブラケットベース辺縁と歯面との境界部に接触させ，近遠心的にクサビを作用させるように力を加えて行った（図２）．

従って，接着系の破壊に要する力としては，鉗子の刃先部分に加わる力を測定することが望ましい．しかし，このような力を直接測定することは極めて困難である．そこで，鉗子の柄の部分に加えられた力を，鉗子の蝶番軸を支点とするてこの原理によって換算し，刃先部分に加わる力として測定することとした．すなわち，鉗子の蝶番軸の中心から刃先部分，および外力を加えた柄の最大幅をとる部分までの距離の比が 1 :2.81であることから，柄部に加えた力を 2.81 倍したものをディボンディングに要する力とした．

この力の大きさを求めるにあたっては，ブラケット撤去用鉗子に生じる歪みを利用する方法を考案した．

すなわち，ディボンディング時に鉗子に生じる歪みの大きさと，ディボンディングに要

する力の大きさとの間に１対１の対応関係が存在し，検定曲線の作成が可能となった場合，鉗子に生ずる歪みの大きさを測定することにより，ディボンディングに要する力の大きさを求めることができる．

そこで，以下の要領により予備実験を行い，このような検定曲線の作成が可能か否かについて検討した．

２）測定に必要な検定曲線の作成

（１）測定装置

鉗子に生じる歪みを測定するために，鉗子刃先と蝶番軸との間に，歪みゲージ 2枚を図２のように接着した．歪みゲージはゲージ長 3mm，ゲージ率 2.0，単軸方向測定用の箔ゲージで，内部抵抗 120Ω，自己温度補償型（昭和測器）である．ホイートストンブリッジ回路は，鉗子の構造上，ゲージ取付け部位に圧縮方向の歪みが生じることが予想された

ため，対辺２アクティブゲージ法8)に従って構成した．歪みゲージからの信号は，動歪み測定器（6M81，日本電気三洋）により検出，増幅したのち，レコーダー（EPR-108，東亜電気）で記録した．

（２）検定のための実験方法

鉗子柄部のうち，最大幅をとる部位に圧縮力が加わるようにするとともに，その力の方向が鉗子の刃先から柄に至る中心線に対して垂直となるように，鉗子の固定装置を製作し，インストロン試験機に取りつけた（図３）．

柄部の圧縮は，クロスヘッド速度毎分10mmで行い，各荷重に対して鉗子に生じた歪みを測定した．ここで，実際のディボンディングは，ブラケットをはさんだ状態，すなわち刃先が開いた状態で行われるため，各種ブラケットの大きさを想定した厚さ 3.0～ 5.0mmのステンレス片を刃先間にはさんだ状態で柄部の圧縮を行い，荷重と歪みを測定した．なお，

この測定は，弾性限界内で鉗子が破損しない安全な範囲内において行うこととし，ディボンディングに要する力にして45kgf までの範囲内で行った．

（３）検定曲線（表１）

刃先間距離が 3.0，4.0，4.5，5.0mm の，いずれの場合にも荷重と歪みとの間に比例関係がみられ，非常に高い決定係数で一次直線式に近似された．これにより，任意の歪みの測定値から鉗子の刃先に加わる力の大きさが求められることが示された．４つの一次式の回帰係数の比較を行ったところ，いずれの間にも有意な差は認められず，刃先間の距離による違いはみられなかった．そこで，これらすべての測定値から得た一つの直線回帰式によって，荷重と歪みとの対応関係を示すこととし，以後のディボンディングにおいては，各歪み量をこの式に代入することにより，ディボンディングに要する力を求めた．

３．ディボンディングに用いた試料

１）口腔内でのディボンディング

大阪大学歯学部附属病院矯正科受診の患者で，通法によるブラケットのダイレクト・ボンディングを行い，動的治療終了後にディボンディングを行う患者40人の永久歯 501歯を試料とした．歯種ごとの内訳は上顎中切歯68歯，上顎側切歯59歯，下顎切歯129 歯，上下顎犬歯 121歯，上顎小臼歯55歯，下顎小臼歯69歯であった．

接着材はすべてフィラーを含むコンポジットレジン（コンサイス，スリーエム薬品，または　ユナイト，ユニテック社）であり，ブラケットはトミーほか数社の製品から成るが，すべて金属製フォイルメッシュブラケットであった．

これらに対して，先に述べた鉗子を用いて，口腔内でのディボンディングを行ったのち，

前述した方法によってレジンの歯面残留率，ならびにディボンディングに要する力を求めた．なお，ブラケットの接着期間は，平均 1年11カ月（最短 4カ月～最長 3年 7カ月），ブラケット接着時の患者の年齢は，平均15歳 3カ月（最低10歳 1カ月～最高25歳 0カ月）であった．

2）抜去歯でのディボンディング

白斑および着色の認められないエナメル質を有するヒト抜去上顎中切歯，上顎側切歯，下顎切歯，上下顎犬歯，上顎小臼歯，下顎小臼歯に対して，それぞれ各歯種に対応するブラケット（図4）を接着した．ブラケットはすべてツインタイプのフォイルメッシュブラケット（$\underline{1}$:131-01 Extra wide, $\underline{2}$:131-23 Wide, $\overline{12}$:131-57 Narrow, $\underline{3}\overline{3}$:131-33 Wide, $\underline{45}$および$\overline{45}$:131-45 Medium, トミー社）である．試料数は 1条件につき15歯，計 180歯であった．

以下の接着操作はすべて室温23℃，湿度50％の恒温室中で行った．

臨床での通法に従い，接着に先だって，歯面をロビンソンブラシを低速回転させながら，歯面研摩材（Zircate prophy paste, Caulk，Dentsply）を用いて 5秒間研摩したのち， 4Mリン酸水溶液（33重量％ 相当）で60秒間エッチングした．次いで，蒸留水で10秒間水洗（水量約17ml）し，空気圧 2kgf/㎠の清浄なシリンジエアー（ホットマン，デントロニクス社）で30秒間乾燥させた．この際，歯面の温度にばらつきが生じることを避けるために，シリンジエアー装置付属の温風用ヒーターは使用しなかった．

接着材としては，現在市販されている矯正用接着材のうち，代表的な物性値を有するものとして，フィラーを含まないMMA 系レジン（スーパーボンド，サンメディカル社）と，フィラーを含むBis-GMA 系コンポジットレジン（コンサイス，スリーエム薬品）を使用し

た．通法に従って接着材を調製し，ブラケットベースに盛上げたのち，先に述べた歯面に充分に圧接した．この際，ブラケットの接着部位は，エッジワイズ法における標準的な位置とした．ブラケットベースの外側に溢出した余剰レジンは，硬化する前にスケーラーを用いて注意深く除去した．コンサイスについては，接着材層の組成を一種類に規定するために，液状レジンの塗布は行なわなかった．

ブラケットを接着した試料は30分間養生後，37℃蒸留水中24時間浸漬後，ディボンディングを行い，レジンの歯面残留率，ならびにディボンディングに要する力を求めた．

4．抜去歯での単純引張り試験

まず，前記の抜去歯でのディボンディングの実験と同様の方法によって，各歯種ごとに製作した試料を用意した．試料数は 1条件につき10歯，計 120歯であった．

単純引張り試験は，0.016インチ×0.016インチの矯正用角ワイヤー（エルジロイ，ロッキーマウンテン社）を用いた引き金具を製作し，ブラケットウイングの部分を介して力を加えることにより行った．この際，引張り方向がブラケット接着部中央の歯面に対して可及的に垂直になるようにした．すなわち，先に製作した試料の歯根ならびに余分な部分をダイアモンドディスク，ダイアモンドバーで切断，削除し，内径12mm，高さ10mmアクリル円筒内に即時重合レジン（ユニファスト，而至歯科工業）を用いて包埋，固定した（図5）　インストロン試験機を用いてクロスヘッド速度毎分10mmで単純引張り強さを測定するとともに，ブラケット剥離後の試料について，抜去歯を用いたディボンディングの場合と同様にしてレジンの歯面残留率を求めた．

5．有限要素法による接着系の応力解析

レジンの歯面残留を決定する因子を明らかにするには，接着系の破壊現象の解明が必要である．しかし，現在までブラケット－レジン－エナメル質という接着系の破壊機構については，ほとんど不明のままであった．

そこで，接着系の破壊現象に対する検討を行うための一助として，前記のディボンディングおよび単純引張り試験に加えて，有限要素法による応力解析[9)]を試みた．すなわち，切歯または小臼歯を想定したモデルを設定し，外力に対する接着系の応力分布が，外力の加え方や歯種あるいはブラケットの違いによって，どのように変化するかについて検討した．

1）有限要素モデル（図6）

解析に用いたモデルは，ブラケット－接着材－歯という接着体である．解析を単純化するために，ブラケットは，ウイング部分やア

ンダーカット形態などを省略し，厚さ 0.3mm のステンレス板(SUS304)とした．接着材は厚さ 0.1mmのPMMAまたはコンポジットレジンとした．歯はすべてエナメル質から成ると仮定し，平面的な切歯を想定したモデル１，豊隆が強い下顎小臼歯を想定して，藤田[10]の測定値を参考に，半径4mm の1/4 円としたモデル２を設定した．

２）解析方法

各モデル上のZ 軸を回転軸とする， Y-Z平面における二次元連続体要素の軸対称回転体問題として，大阪大学大型計算機センター，ACOSの汎用構造解析プログラムパッケージISAP[11]を使用して解析を行った．

各材料の物性定数は，過去に報告された値[12-15]を用いた（表２）．

節点の拘束条件は，座標軸回り回転変位，および X軸方向変位についてはすべて固定とし， Y軸， Z軸方向変位については Y軸上の節点ではともに固定， Z軸上の節点では Y軸

方向のみの固定，それ以外の節点では，ともに自由とした．

３）荷重条件

次の２つの場合を想定して，節点集中荷重を加えた．

（１）単純引張り試験

ブラケットウイングに相当する節点に，Z方向に10kgf の力を加えた．

（２）ブラケット撤去用鉗子によるディボンディング

鉗子の刃先位置の違いを考慮した以下の節点に，いずれもマイナス Y方向に10kgf の力を加えた．

①ブラケット－レジン境界部に近いブラケット上の節点．

②ブラケット－レジン境界部の節点．

③接着材辺縁でブラケット側に近い節点．

④接着材辺縁でエナメル質側に近い節点．

研究結果

1．口腔内でのディボンディング（図７）

１）レジンの歯面残留率（図７－１）

残留率は0%か100%の値をとることが多く，その出現率は歯種によって異なっていた．すなわち，$\underline{1}$，$\underline{2}$では100%のものが多く，$\overline{12}$，$\underline{33}$，$\underline{45}$の順に100%のものが減少し，0%のものが大幅に増加した．特に$\overline{45}$では100%のものはほとんどみられず，0%のものが過半数を占めていた．

なお，データの図示にあたっては，歯種により試料数に差があるため，出現頻度を出現率におきかえて表示した．この際，横軸のレジン残留率は，階級幅を 10%として分類したが，残留率が0%および100%という値に集中する特徴的な結果が得られたため，これらの値をとるものは，各階級の外に分類して図示した．

２）ディボンディングに要する力（図７－２）

歯種によって力の大きさに異なる傾向がみられ，切歯に比し犬歯，小臼歯では小さい値をとるものが多かった．力の大きさとしては，$\underline{1}$では25～30kgf，$\underline{2}$と$\overline{12}$では20～25kgf のものが最も多いのに対して，$\underline{3}\overline{3}$や$\overline{45}$では 5～10kgf と比較的小さい力でディボンディングが可能なものが多くみられた．

３）レジンの歯面残留率とディボンディングに要する力との関係（図７－３）

レジン残留率は0%と100%に二分化する傾向がみられ，正規分布を示す所見がみられなかった．したがって、ディボンディングに要する力との間の相関係数の算出は行わず，一歯ごとにディボンディングに要する力の大きさとの関係をみた場合，その結果，両者の間に特定の対応関係はみられず，互いに独立した

因子であると考えられた．

2．抜去歯でのディボンディング（図８）

１）レジンの歯面残留率

MMA 系レジン，Bis-GMA 系コンポジットレジンとも，歯種によって異なる傾向がみられたが，0%または100%という値への二分化傾向は，口腔内と異なり明確には認められなかった．

MMA 系レジンでは，$\underline{1}$，$\underline{2}$で高い残留率のものが多く，$\overline{12}$，$\overline{33}$，$\underline{45}$，$\overline{45}$の順に低い残留率をとるものが多くなった（図８－１）．Bis-GMA 系コンポジットレジンでは，$\underline{1}$，$\underline{2}$では残留率100%のものが多かったが，$\overline{12}$，$\overline{33}$，$\underline{45}$，$\overline{45}$の順に低い残留率をとるものが多くなった（図８－２）．

２）ディボンディングに要する力

MMA 系レジンでは，いずれも25～45kgf

の値をとることが多く，歯種による差は認められなかった（図８－３）．Bis-GMA 系コンポジットレジンでは，全体的にMMA 系レジンの場合よりも小さな値をとっていたが，歯種による差は認められなかった（図８－４）．

３）レジンの歯面残留率とディボンディングに要する力との関係

一歯ごとに両者の関係をみた場合，いずれのレジンとも明確な対応関係は認められなかった．（図８－５，８－６）

レジン残留率について，各歯種ごとに分類せずにすべての試料に対する出現率をみた場合（図８－７），MMA 系レジンの歯面残留率が0%から100%にかけて広く分布しており，またBis-GMA 系コンポジットレジンでは，口腔内の歯のディボンディング時にみられたごとく，0～20% のものと100%のものが多く，二分化傾向を有していた．一方，いずれのレジ

ンにおいてもディボンディングに要する力の大きさは，図８－３，４を総覧してわかるようにほぼ同程度であった．

従って，レジン残留率とディボンディングに要する力との間に特定の対応関係はなく，両者は互いに独立した因子であると考えられた．なお，レジン残留率についてこのような特徴的な分布がみられたため，ディボンディングに要する力との間の相関係数の算出は行わなかった．

３．抜去歯での単純引張り試験（図９）

１）レジンの歯面残留率（図９－１）

抜去歯でのディボンディングの場合と同条件で製作した試料を用いたにもかかわらず，レジン残留率はいずれの歯種，いずれのレジンにおいてもほぼ100%で歯種による差は認められず，ブラケット撤去用鉗子を用いてディボンディングを行った時のレジン残留率の様相とは大きく異なっていた．

２）単純引張り強さ（図９－２）

いずれのレジンにおいても，1の単純引張り強さは他の歯種よりも小さい値をとっており，ブラケット撤去用鉗子を用いた場合のディボンディングに要する力の大きさとは異なる傾向がみられた．一方，いずれのレジンにおいても，歯面に豊隆の強い45での単純引張り強さは大きい傾向にあり，45でのブラケットーレジン界面での破壊が1に比し，起こりにくい傾向がみられた．

４．有限要素法による応力解析結果（図１０）

解析は各要素の重心における最大最小主応力を用いて行い，その応力分布状態を検討することにより，次の成績を得た．

１）単純引張り試験の場合（図１０－１）

モデル１，２ともブラケットウイング付近のブラケット部分ならびにその直下のレジン部分に応力値の高い部位がみられた．

このような応力分布は，いずれのレジンを

用いた場合でも同様な傾向がみられた．

２）ディボンディングの場合（図１０－２）

モデル１，２とも鉗子の刃先付近に応力値の高い部位がみられ，歯あるいはブラケット形態の違いによる著明な差はみられなかった．また接着材に力を加えた場合は局所的な応力分布をとっていた．

このような応力分布は，いずれのレジンを用いた場合でも同様な傾向がみられた．

考察

1．ディボンディングについて

ディボンディングは，ブラケットをダイレクト・ボンディングする前の状態に歯面を回復することを目的として行われる．

通常，臨床の場でブラケットを歯面から撤去する際，ブラケット－レジン間で破壊が起こることが多く，歯面にレジンが残留した場合には，このレジンを除去する必要がある．すなわち，ディボンディングにはブラケットの撤去ならびに歯面残留レジンの除去という２つのステップが要求される．

歯面残留レジンを除去する操作は，各種鉗子やスケーラーあるいはバー，ポイント類の使用によって機械的に行われており，ブラケットを歯面から撤去する操作よりも多大なチェアータイムが要求され，また，患者に強い

疼痛を与えたり，器具の誤った使用によってエナメル質を損傷する危険性も指摘されている[1,2]．

もし，ブラケット撤去時にレジンが歯面に残留しないディボンディング法が開発されれば，レジンの除去操作が不要となり，先に述べた問題点に対して解決の道が開かれることになる．

さて，「レジンが残留しない状態」といっても，肉眼的レベルから電顕的レベルまで，それぞれ判定基準が異なる．本研究では以下の理由により，これを肉眼的レベルにおいた．

レジンの歯面残留について，Retief[16] は，レジン－エナメル質という接着系に対する単純引張り試験を行った時，みかけ上界面破壊が起こった場合でも，電顕的に観察するとレジンタッグがエナメル質内に残留し，また逆にエナメルタッグがレジン内に残留していたと報告した．これは，界面破壊を起こしたレジン試料を酸で処理したところ常にカルシウ

ムが検出されたことによっても裏付けられ，接着に先だって歯面の前処理としてエナメル質のエッチングを行った場合には，真の界面破壊は存在せず，レジンとエナメル質の破壊が混在した形式の破壊が起こると述べている．

このような単純引張り試験の場合だけでなく，臨床の場でディボンディングを行ったのちの歯面についても，X線元素分析法を用いてCaspersen [17] やDiedrich[18] により同様な所見が報告されている．

従って，肉眼的レベルでレジンが歯面に残留していなくとも，電顕的観察あるいは化学分析で確認すると，レジンタッグがエナメル質内に常に残留し，また，歯質のわずかな破壊が生じていると考えてよかろう．この場合，歯面に対してどのような影響を及ぼすのか，特に微小漏洩による歯面の着色などが問題となる．

この点について，Zachrisson[3]は，ディボンディング後の患者の歯面に対する詳細な観

察を行った結果，色素沈着や変色などの臨床的な問題を生じた場合はなく，むしろレジンタッグが存在することによって，脱灰に対する歯面の抵抗性が大きくなると述べている．Silverstone [19] も，フィッシャーシーラントを適用したのち表面を一層研摩した歯面は，エナメル質内のレジンタッグの存在によって耐酸性が向上すると報告した．さらに，Burapavongら[5]は，この説を支持するとともに，レジンの歯面残留によって着色が起こることはほとんどなく，可能な範囲でレジンの除去を行えばよいと述べている．

ディボンディング後の歯面に対するプラークの付着について，Garberoglio and Cozzani [20] は，表面粗さが非常に重要な因子であり，プラーク付着を防止するには，可及的に歯面を平滑にすることが重要であると述べている．また，Gwinnett and Ceen [21] も，ディボンディング後の歯面にレジンの一部が残っても，歯面が十分平滑になっている

場合，プラークの付着促進は特に認められず，電顕的レベルでの残留レジンの有無よりもむしろ，患者個人個人の口腔内の衛生状態の向上をはかることの方が重要であると述べている．

以上を総合すると，Retief and Denys [22] が述べているように，必ずしもすべての残留レジンを完全に除去する必要はなく，また，わずかな歯面破壊も歯面を平滑にすることに留意すれば，審美的で，臨床的に許容される歯面を得ることがディボンディングの目的となろう．従って，本研究ではディボンディング後の歯面残留レジンの有無を，肉眼的レベルにより判定することとした．

2．研究方法について

1）ブラケットの歯面からの撤去方法

現在，臨床におけるブラケットの歯面からの撤去は，すべて機械的に行われている．その方法は術者によって若干異なるが，大別すると２種類あると考えられる．ひとつは本研究で用いたような鉗子を使用し，刃先をブラケットベース辺縁と歯面との境界部に接触させ，クサビを作用させるようにして力を加える方法である．他のひとつはホウの鉗子，あるいはそれに類する鉗子でツインタイプのブラケットウイングを近遠心的に把持して力を加え，ブラケットベースをたわめるように変形させて歯面から撤去する方法である．

後者は，歯根膜にストレスを生じさせず，患者に疼痛を与えることが少ないが，ブラケット－レジン界面で応力集中が起こり，この部位での破壊が起こるために，本質的にレジンがすべて歯面に残留する方法である．また，シングルタイプのブラケットでは，このような力の加え方ができないこと，ベースの変形によって，リサイクルによるブラケットの再

使用23）が不可能となること，T-スロットブラケットのように，ウイング部分に力を加えても，その構造上変形しにくく，撤去が困難な場合がみられること，といった欠点を有している．従って，この方法はブラケットの撤去方法としては，必ずしも適当ではないと判断し，本研究では採用しなかった．

さらに，最近新しく臨床の場に登場したブラケット撤去用鉗子(Lift-off debracketing instrument,ノースウエスト社）についても，ブラケットの撤去方法が，ウイングの一部を引張り，ベース部分を端からめくりながら剥がすようにして変形させるものであるため，同様な理由で採用しなかった．

従って，本研究で用いた方法が，レジンの歯面残留の抑制を可能とするブラケットの撤去方法と考えられ，また実際，最もよく臨床で用いられている方法でもある．

なお，以上述べたような機械的なブラケットの撤去方法に対して，著者らはすでに，接

着の阻害因子としての熱を利用する方法について検討し，ブラケット自体に電流を流し，生じた抵抗熱によって，接着系にほとんど力を加えることなく，ブラケットを歯面から撤去することが可能であることを見出した[24,25]．このことは，可撤性を有する接着，すなわち，充分な接着強さを有しながら，必要な時は容易に脱着を行えるような接着方法の開発という課題[26]に対して，ひとつの示唆を与えたと考えられるが，歯面に必ずレジンが残留することや，生体に対する熱および電流の影響など，今後さらに検討を要する点があるために，ここでは採用しなかった．

一方，従来から接着強さに関する研究に用いられてきた単純引張り試験も，ブラケットを歯面から撤去する方法の一つであるかもしれない．この方法は，歯根膜にストレスを与えて強い疼痛を引き起こす力の加え方をするものであるため，臨床的に応用し得るブラケットの撤去方法ではない．しかし，この方法

によるレジンの歯面残留様相を観察し，ブラケット－レジン界面での破壊に要する力の大きさを知ることは，接着系の破壊現象を検討するうえで有用である．そこで本研究では，鉗子を用いたディボンディングだけでなく，単純引張り試験の場合も併せて検討した．

2）有限要素法による応力解析について

ブラケット－レジン－エナメル質という接着系は非常に複雑な形態をとっており，外力を加えた際の内部応力の分布状態は，現在までほとんど明らかにされていない．今回，接着系の形態を簡略化した二次元有限要素モデルを設定し，この問題に対する検討を行った．

モデルは三次元的な性格を有する軸対称回転体を考えて設定した．この場合，外力は回転軸を中心としてまわりから一様に加えられることになる．これは，実際の力の加わり方

とは少し異なっているが，解析およびその結果の解釈が容易であり，実際の接着系においても外力の作用部位付近では，応力分布に同様な傾向がみられるものと考えられた．

今回の解析にあたっては，10kgf の節点荷重を与えた．これはレジン部分に破壊が生じると考えられる数％程度の歪みを生じさせる荷重であるが，計算上便利な数値であること，さらに，モデルに加える荷重とそこに生じる応力とは比例関係にあるため，たとえ節点荷重の大きさが違った場合でも，応力の大きさが異なるだけでその分布状態の傾向は同じであると考えられることなどの理由で用いたものである．

さて，破壊がどのような応力によって起こるかについては，最大主応力説，最大せん断応力説，最大主歪み説などの強度理論がある[27]．しかし，実際の接着系では，複雑なアンダーカット形態を有するブラケット－レジン界面や，エッチングにより生じた微細な凹

凸部を有するレジン－エナメル質界面などのように，応力集中が起こりやすい部位が存在する．そのため，等方均質体のように破壊の主役となる力を限定して考えることはできない．そこで，他の応力などの推定にも便利な最大最小主応力で解析結果を示すことにした．

３．研究成績について

１）ディボンディング時のレジンの歯面残留率とディボンディングに要する力，および両者の関係について

レジンの歯面残留の有無は，外力による接着系の破壊がどの部位で起こるかによって決まる．すなわち，き裂がどの部位で生じ，それがどのように伝播していくかによって決定

される．しかし，ブラケット－レジン－エナメル質という複雑な接着系の破壊現象の解明は極めて難しい問題であり，この方面に関する報告は，現在までほとんどみられない．

ディボンディング時のレジンの歯面残留率は，口腔内の歯（図７－１）および抜去歯（図８－１，８－２）のいずれの場合にも，歯種によって異なっており，$\underline{1}$，$\underline{2}$で高い残留率をとるものが極めて多く，$\overline{12}$，$\overline{33}$，$\underline{45}$，$\overline{45}$の順に低い残留率をとるものが多くなった．これは，接着系に外力を加えた際の内部応力の分布状態が，歯種によって異なっているためではないかと考え，有限要素法による応力解析を行った（図１０－２）．しかし，モデル１（$\underline{1}$），モデル２（$\overline{45}$）とも，鉗子の刃先付近に応力値の高い部位がみられ，この部位が破壊の起始点になると考えられたが，応力の分布傾向について，歯種の違いによる差は認められず，接着系に外力が加わった際に生じる破壊挙動を直接示す解析結果を得るこ

とはできなかった．従って，接着系の破壊部位の決定に対しては，接着系に外力を加えた際に生ずる初期的な応力分布よりも，むしろ，いったん破壊が生じた後のき裂の伝播経路を決定する因子が重要であると考えられた．

レジン残留率において0%または100%に二分化する特徴的な所見が、口腔内の前歯に見られ（図７－１）、また、抜去歯の場合歯数を十分多くするため総歯数でみた場合のレジン残留率（図８－７）でも正規性を検討した結果、生物学上多く見られる正規分布を示さなかった．これは破壊という現象が極めて複雑であることを示すものであろう．そのため本研究におけるデータ，特にレジンの歯面残留率に対しては，前述したように一般に行われている統計処理は行わず，主にグラフによる検討を行うことにした．

抜去歯でのディボンディングに要する力の大きさ（図８－３，８－４）は，ブラケット

ベースの大きさが歯種によって異なるにもかかわらず、歯種による差は認められず，各レジン内では同程度の力の大きさであった．

口腔内でのディボンディングに要する力の大きさには，小臼歯など後方の歯の方が小さい傾向がみられた（図７－２）が，これは口腔内という環境に起因する接着強さの低下によるためであるかもしれない．

レジン残留率が正規分布しないことから、口腔内の歯および抜去歯について、１歯ごとにディボンディングに要する力の大きさと，レジン残留率との関係をみたが，両者の間には特定の対応関係はみられなかった（図７－３，８－５，８－６）．従って，接着系の破壊部位は，外力の大きさとは直接関係を持たない別の因子によって決定されると考えられた．このことは、有限要素法での解析結果（図１０－２）からもみられるごとく、ディボンディング時の外力は，鉗子の刃先付近に局所的に加わる力であり，ディボンディング

に要する力の大きさは，単にこの部位での初期的な破壊に要する力の大きさを反映したものであろう．

２）単純引張り試験におけるレジンの歯面残留率と単純引張り強さについて

抜去歯での単純引張り試験を行った場合，レジンの歯面残留率は，歯種による差を認めず，いずれもほぼ100%の値をとっており（図９－１），ディボンディングの場合と大きく異なっていた．

これは，接着系に対する外力の加わり方が，ディボンディング時と異なるためであろう．単純引張り試験を想定した場合の有限要素法による応力の解析結果（図１０－１）によれば，モデル１，モデル２とも，ブラケットウイング直下のブラケットあるいはレジン部分の応力値が高く、そのために，この付近でのブラケットベースに変形が生じ，ブラケット

－レジン界面で破壊が発生したのであろう．この場合，外力の加わり方からみて，以後のき裂の伝播はエナメル質界面に向かって進む可能性は少なく，引き続きブラケット－レジン界面に沿って進むと考えられた．従って，ブラケットベースに変形を生ぜしめる単純引張り試験のような力の加え方は，本質的にレジンが歯面に残留する方法であると考えられた．同時に、ブラケットベースの強度が歯面へのレジン残留と関係する因子であることが示唆された．

一方，抜去歯での単純引張り強さは，いずれのレジンにおいても$\underline{1}$で小さく，$\underline{45}$，$\overline{45}$で大きい値をとる傾向にあった（図９－２）．これは小臼歯用ブラケットのようなベースの弯曲が強い場合には、ブラケット－レジン界面での強度が、前歯用ブラケットのようなベースの平坦なものの強度よりも大であったことを示している．すなわち、ブラケットベースの形態が平坦なものよりも、弯曲の程度の

強いものほど，ブラケット－レジン界面での破壊が起こりにくいことを示すものと考えられる．

３）ディボンディングにおける接着系の破壊について

破壊には塑性変形を起こしたのちに破壊する延性破壊と，塑性変形をほとんど起こさずに破壊する脆性破壊，および応力が繰返し作用して少しずつ破壊が進む疲労破壊とがある[28]．

一般に，延性破壊は大きな変形が生じたのちに起こり，き裂の伝播速度は遅い．一方，脆性破壊は塑性変形をほとんど起こさずにき裂が発生し，それが非常に早い速度で伝播して破壊が起こる．有機高分子材料は，弾性と粘性の両方の性質を持っており，各種外力に対しては，一般に延性破壊を起こすと考えられている[13]．

本研究における接着系の破壊部位，すなわ

ちき裂の伝播経路を考える上で，接着系の形態的な特徴として，レジンがブラケットと歯との間の，いわば閉鎖された環境内に存在していることが挙げられる．

すなわち，レジン部分は剛性の大きなブラケットと歯面とによって，そのまわりを取り囲まれており，ブラケットとはベース底面のアンダーカットによって，歯とはエッチングにより生じた微細な凹凸によって機械的に強力に嵌合している．そのため，接着系に外力が加えられた際に，レジン部分はその変形が抑制され，内部応力は多軸応力状態[29]にあると考えられる．

このように破壊に至るまでの変形が抑制された場合，降伏，すなわち破壊が起こるためには，通常よりもさらに大きな内部応力が必要となる[30]．従って，いったん破壊に至った時には，本来，延性的な破壊を起こすものでも，脆性的で急激な破壊挙動を示すことがある[30]．ディボンディング時の破壊挙動も，

接着系の形態的特徴からみて，このような性格を有しているのではないかと考えられた．そこで，ディボンディング時の破壊は以下のようにして起こるのではないかと推察された．

破壊が起こる最前線では，破壊の進行過程で必要とされるエネルギーが最小となるようにき裂が進んでいくと考えるのが，一般的な熱力学のエネルギー法則からも妥当であろう．従って，脆性的な破壊ではき裂が急激に進むために，基本的には鉗子の２つの刃先を最短距離で結ぶように破壊が起こると考えられた．

そこで，本研究で歯種によってディボンディング時のレジン残留率の違いがみられたのは，次のように，接着系の形態の違いによって，破壊の伝播路が異なってくるためであると考えられた（図１１）．

すなわち，モデル１（１）では，鉗子の２つの刃先を結ぶ外力の仮想作用線，すなわち予想されるき裂の伝播路に対して，２つの界面が並行しており，かつ近接した位置関係を

とっている．従って，レジン－エナメル質界面だけでなく，ブラケット－レジン界面での破壊が起こることが多くなり，その結果として，高いレジン残留率を呈するものが多くなったと考えられた．

一方，モデル２（$\overline{45}$）では，歯面自体の豊隆によって，外力の仮想作用線が，歯面と交じわるようにレジン－エナメル質界面に向かっている．従って，ブラケット辺縁から発生したき裂の伝播がこの界面に沿って進むことが多くなり，その結果として，低いレジン残留率を呈するものが多くなったと考えられた．このように，レジンの歯面残留の有無を決定する上で，接着系の形態，すなわち，歯面の豊隆またはブラケットベースの弯曲が重要な因子であると考えられた．

以上のことから、ディボンディング時のレジン残留の抑制は、レジン－エナメル界面付近に存在すると考えられるディボンディング時にかかる外力の仮想作用線から、ブラケッ

トーレジン界面を遠ざけることにより可能となるのではないかと考えられた．そのために、ディボンディング時に高いレジン残留率を示す平坦な歯面形態を有する歯に対しては、ブラケットベースに弯曲を与えて、ベース辺縁部以外の中央部分を外力の作用線から遠ざけることで、レジンの残留率を低下させることが可能になると考えられる．

また，このような形状の変化をブラケットベースに与えることによって，接着系に外力が加わった際にブラケット－レジン間の保持力が一方向だけでなく，様々な方向からレジン部分全体を保持するように作用し，この界面での破壊が起こりにくくなる可能性も考えられ，先の単純引張り試験で豊隆の強い小臼歯の単純引張り強さが他の歯種よりも大であったのはこのような効果も加わったためかもしれない．

以上のように，ブラケット－レジン界面での破壊挙動を決定する上で，ブラケットベ－

スの形状が重要な因子であることが示唆された.

結 論

歯科矯正用ブラケットのディボンディングにおけるレジンの歯面残留状態，ならびにディボンディングに要する力の評価方法を考案し，単純引張り試験と併せてブラケット－レジン－エナメル質で構成される接着系の破壊挙動について検討し，以下の知見を得た．

1．レジンの歯面残留状態に対する定量的評価を行うための指標として，ブラケットベースの面積に対する歯面上のレジン残留部の面積の比率をレジンの歯面残留率とした．

口腔内でのディボンディングを行った場合，残留率は0%または100%の値をとることが多く，その出現率は歯種によって異なっていた．すなわち，$\underline{1}$，$\underline{2}$では100%のものが多く，$\overline{12}$，$\underline{3}\overline{3}$，$\underline{45}$，$\overline{45}$の順に100%のものが減少し，0%のものが大幅に増加した．

抜去歯でのディボンディングを行った場合，

MMA 系レジン，Bis-GMA 系コンポジットレジンとも，口腔内と同様に残留率が歯種によって異なっており，$\underline{1}$，$\underline{2}$で高い残留率をとるものが最も多く，$\overline{12}$，$\underline{3\overline{3}}$，$\underline{45}$，$\overline{45}$の順に低い残留率をとるものが多くなった．このことにより，歯面形態の豊隆の強い小臼歯の場合，すなわち，ブラケットベース形態が豊隆している場合，レジンの歯面残留率が低くなることが示唆された．

２．ブラケット撤去用鉗子の刃先部分に加わる力をディボンディングに要する力として測定した．

口腔内でのディボンディングを行った場合，歯種によって力の大きさに異なる傾向がみられ，切歯に比し犬歯，小臼歯では低い値をとるものが多かった．

抜去歯でのディボンディングを行った場合，MMA 系レジン，Bis-GMA 系コンポジットレジンとも，力の大きさに歯種による差は認められなかった．

３．一歯ごとにレジンの歯面残留率とディボンディングに要する力との関係をみた場合，口腔内，抜去歯とも，両者の間に特定の対応関係は認められなかった．

４．抜去歯での単純引張り試験を行った場合，MMA 系レジン，Bis-GMA 系コンポジットレジンとも，レジンの歯面残留率は歯種による差を認めず，いずれもほぼ100%であり，ブラケット撤去用鉗子を用いたディボンディングを行った時のレジン残留率の様相とは大きく異なっていた．また，いずれのレジンにおいても，１の単純引張り強さが小さいのに対して，小臼歯では大きい値をとる傾向にあった．すなわち，このように歯面豊隆の強い歯の場合，すなわち，ブラケットベースの形態が豊隆している場合，ブラケット－レジン界面での接着強さが大きくなる傾向が示唆された．

５．切歯または小臼歯を想定したモデルを設定し，有限要素法による接着系の応力解析を行ったところ，単純引張り試験を想定した荷

重条件下では，いずれのモデルともブラケットウイング付近のブラケット部分，ならびにその直下の接着材部分に応力値の高い部位がみられた．このことから，単純引張り試験の成績とともに，ブラケットベースの強度がブラケット－レジン界面での破壊に関係していることが示唆された．また，鉗子を用いたディボンディングを想定した荷重条件下では，いずれのモデルとも鉗子の刃先付近に最も応力値の高い部位がみられた．このような応力分布は，MMA 系レジン，Bis-GMA 系コンポジットレジンを用いた場合でも同様な傾向がみられた．

以上より，歯科矯正用ブラケットのディボンディングにおいては，ブラケットベースの形状，ならびにブラケットベースの強度が接着系の破壊挙動を決定する上で，重要な因子であることが示唆された．

稿を終えるにあたり，終始御懇篤なる御指導と御校閲を賜わりました，大阪大学歯学部歯科矯正学講座作田　守教授に深謝の意を表しますとともに，数々の御懇篤なる御指導を賜わりました大阪大学歯学部歯科理工学講座木村　博教授に深く感謝致します．また，本研究の開始当初より終始細部にわたる御懇篤なる御教示と御助言を賜わりました，大阪大学歯学部歯科理工学講座岡崎正之講師に心から謝意を表しますとともに，本研究の遂行に際し，一方ならぬ御教示と御助言を賜わりました，大阪大学歯学部附属病院矯正科高田健治講師に心から感謝致します．さらに材料力学ならびに有限要素法について御教示を賜わりました，大阪大学工学部機械工学科第２講座北川　浩助教授に心からお礼申しあげますとともに，計算機運用に際して御協力いただきました，大阪大学大学院工学研究科修士課程本家浩一氏に厚くお礼申しあげます．最後

に，本研究に対して御援助，御協力下さいました歯科矯正学講座ならびに歯科理工学講座の諸先生方，さらにブラケットを提供していただいたトミー株式会社に厚くお礼申しあげます．

Studies on the Suppression of Remaining of the Resin on the Tooth Surfaces in Debonding of Orthodontic Brackets

Part 1. Destruction Behaviors of Adhesion System

Hideo KINAMI

Department of Orthodontics,

Osaka University Faculty of Dentistry

1-8, Yamadaoka, Suita, Osaka 565, Japan

Key words: Debonding , Remaining of resin

Bracket base form design

By measuring the area of residual resin on the tooth surface after debonding and the forces required for debonding, the destruction behaviors of the bracket-resin-enamel adhesion system were investigated in relation to the data obtained from the tensile tests.

1. The ratio of a residual resin area on the debonded tooth surface to the bracket base area was calculated and referred to as resin remaining ratio.

In case of intraoral debonding, the distribution

of the ratios showed almost all or nothing pattern, that is 0% or 100% of resin was left with very few intermediate values. The proportion between the two was different on every tooth type. As to $\underline{1}$ and $\underline{2}$, the ratios indicated mostly a 100% pattern, the number of the teeth which showed 100% ratio gradually decreased toward the posterior teeth. On the other hand the proportion of teeth with a 0% ratio such as $\overline{12}$, $\underline{3}$,$\overline{3}$, $\underline{45}$, and $\overline{45}$ increased successively in this order. In case of extraoral debonding on extracted teeth, the resin remaining ratio showed a similar tendency, regardless of the type of resin used in this study; MMA resin and Bis-GMA composite resin.

2. The forces loaded on the blades of the debonding pliers were measured to estimate the forces required for debonding.

The forces at the incisors were the largest, followed by canines and premolars in case of intraoral debonding, but no difference was noted among tooth types in case of extraoral debonding, regardless of the resin types.

3. There was almost no correlation between resin remaining ratios and forces required for debonding in either intraoral or extraoral

debonding.

4. In the tensile tests, resin remaining ratios were nearly 100% in every tooth type and apparently different from the ratios in case of debonding by pliers.

5. Stress analyses by the Finite Element Method were carried out on the incisors and premolars used as models.

The tendency of the stress distribution in these models was similar regardless of the resin types. A high-stress point was detected near the bracket wing portion and the resin layer under the bracket wing in case of tensile tests, but near the bracket marginal portion at which external forces were applied in case of debonding.

These results indicated that the bracket base form design and the strength of bracket base were important factors in determining destruction behaviors of the bracket-resin-enamel adhesion system.

文献

1) Moin,K. and Dogon,I,L.(1978): An evaluation of shear strength measurements of unfilled and filled resin combinations. Am.J.Orthod., 74,531-536.

2) Zachrisson,B.U. and Brobakken,B.U.(1978): Clinical comparison of direct versus indirect bonding with different bracket types and adhesives. Am.J.Orthod., 74, 62-77.

3) Zachrisson,B.U.(1977): A posttreatment evaluation of direct bonding in orthodontics. Am.J.Orthod., 71,173-189.

4) Gwinnett,A.J. and Gorelick,L.(1977): Microscopic evaluation of enamel after debonding: Clinical application. Am.J.Orthod., 71,651-665.

5) Burapavong,V., Marshall,G.W., Apfel,D.A., and Perry,H.T.(1978): Enamel surface characteristics on removal of bonded orthodontic brackets. Am.J.Orthod., 74,176-187.

6) Zachrisson,B.U. and Arthun,J.(1979): Enamel surface appearance after various debonding techniques. Am.J.Orthod., 75,121-137.

7) Rouleau,B.D., Marshall,G.W., and Cooley,R.O.(1982): Enamel surface evaluations after clinical treatment and removal of orthodontic brackets. Am.J. orthod., 81,423-426.

8) 川田雄一，平　修二，多田美朝(1972)：応力測定マニュアル，1版，オーム社，東京，昭和47.

9) 川井忠彦，岸　正彦(1983)：機械のための有限要素法入門，1版，オーム社，東京，昭和58.

10) 藤田恒太郎(1965)：歯の解剖学．11版，金原出版，東京，55-62．昭和40.

11) ＮＥＣ編(1986)：複合構造解析システム説明書<ISAP> 9版．日本電気，東京，昭和61.

12) ステンレス鋼便覧(1973)，124．日刊工業社，東京，昭和48.

13) Nielsen, L. E.(1965)：高分子の力学的性質（小野木重治訳）．1版，化学同人，京都，8，昭和40.

14) 花岡孝治，中嶋　正，岩本次男(1986)：白歯用コンポジットレジンの材料評価．第7回日本歯科理工学会学術講演会講演集：歯材器，5，特別号，158-159．昭和61.

15) 荒井　泉(1978)：咬合力の歯牙・歯周組織に及ぼす応力に関する力学的研究．補綴誌，22，865-873．昭和53．
16) Retief,D.H.(1974): Failure at the dental adhesive-etched enamel interface. J.Oral Rehab., 1,265-284.
17) Caspersen,I.(1977): Residual acrylic adhesive after removal of plastic orthodontic brackets: A scanning electron microscopic study. Am.J.Orthod., 71, 637-650.
18) Diedrich,P.(1981): Enamel alterations from bracket bonding and debonding: A study with the scanning electron microscope. Am.J.Orthod., 79,500-522.
19) Silverstone,L.M.(1974): Fissure sealants: The susceptibility to dissolution of acid-etched and subsequently abraded enamel in vitro. Caries Res., 11, 46-51.
20) Garberoglio,R. and Cozzani,G.(1979): In vivo Effect of oral environment on etched enamel: A scanning electron microscopic study. J.Dent.Res., 58,1859-1865.
21) Gwinnett,A.J. and Ceen,R.F.(1978): An ultraviolet phographic technique for monitoring plaque during direct bonding procedures. Am.J.Orthod., 73,178-186.
22) Retief,D.H. and Denys,F.R.(1979): Finishing of enamel surfaces after de-bonding of orthodontic attachments. Angle Orthod., 49,1-10.
23) Wright,W.L. and Powers,J.M.(1985): In vitro tensile bond strength of reconditioned brackets. Am.J.Orthod. 87, 247-252.
24) 木村　博，岡崎正之，木南秀雄，作田　守(1984)：歯科矯正治療における歯とブラケットとの接着に関する研究（第一報）接着の熱的影響，歯材器，3，118-121．昭和59．
25) 木村　博，岡崎正之，木南秀雄，作田　守(1985)：歯科矯正治療における歯とブラケットとの接着に関する研究（第四報）熱を利用したディボンディングの可能性，歯材器，4，599-607．昭和60．
26) 蟹江　壽(1984)：新しい接着剤のニーズ．日本接着協会誌，20，392-393,昭和59．
27) 河本　実(1967)：材料力学．1版，共立出版，東京，221-230，昭和42．
28) 中山秀太郎(1983)：材料力学入門．2版，大河出版，東京，203-205,昭和58．

29) 小寺沢良一(1979)：材料強度学要論． 1版，マグロウヒル好学社，東京，94-96，昭和54.

30) Wayne Hayden, William G. Moffatt and John Wulff(1967)：材料科学入門Ⅲ 機械的性質（大塚穎三，生嶋 明訳）． 1版，岩波書店，東京，131-133,昭和42.

図・表の説明

図１　レジンの歯面残留状態に対する定量的評価法

図２　歪みゲージを取りつけたブラケット撤去用鉗子によるディボンディング

図３　ディボンディングに要する力の測定に必要な検定曲線を作成するための実験

鉗子の刃先に加わる力（鉗子柄部に加えた力を 2.81 倍したもの）と，鉗子に生じた歪みを測定し，両者の対応関係をみた．

測定にあたっては，鉗子の刃先間距離を 3.0～ 5.0mmに設定した．

図４　抜去歯でのディボンディングおよび単純引張り試験に用いたブラケット

図５　単純引張り試験に用いた試料

引き金具による引張り方向が歯面に対して垂直になるようにした．

図６　解析に用いた有限要素モデル

モデル１は平面的な切歯を，モデル２は豊隆が強い下顎小臼歯を想定したものである．

図７－１　口腔内でのディボンディングを行ったときのレジンの歯面残留率

残留率は0%または100%の値をとることが多く，その出現率は歯種によって異なっていた。

切歯では100%のものが多いのに対して，小臼歯では100%のものは極めて少なく，0%のものが多かった．

図７－２　口腔内でのディボンディングに要する力

歯種によって差がみられ，切歯に比し，犬歯，小臼歯では小さい値をとるものが多かった．

図７－３　口腔内でのディボンディングを行ったときのレジンの歯面残留率とディボンディングに要する力との関係

両者の間に特定の対応関係は認められなかった．

図８－１　抜去歯でのディボンディングを行ったときのレジン残留率（ MMA系レジンの場合）

$\underline{1}$，$\underline{2}$では高い残留率のものが多く，$\overline{12}$，$\underline{3}\overline{3}$，$\underline{45}$，$\overline{45}$の順に低い残留率をとる

ものが多くなった。

図８－２　抜去歯でのディボンディングを行ったときのレジン残留率（Bis-GMA 系コンポジットレジンの場合）

$\underline{1}$，$\underline{2}$では残留率100%のものが多かったが$\overline{12}$，$\underline{3}\overline{3}$，$\underline{45}$，$\overline{45}$の順に低い残留率をとるものが多くなった。

図８－３　抜去歯でのディボンディングに要する力（MMA 系レジンの場合）

図８－４　抜去歯でのディボンディングに要する力（Bis-GMA 系コンポジットレジンの場合）

図８－５　抜去歯でのディボンディングを行ったときのレジン残留率とディボンデ

ィングに要する力との関係（MMA 系レジンの場合）

両者の間に明確な対応関係は認められなかった．

図８－６　抜去歯でのディボンディングを行ったときのレジン残留率とディボンディングに要する力との関係（Bis-GMA 系コンポジットレジンの場合）

両者の間に明確な対応関係は認められなかった．

図８－７　総歯数でみた場合のレジン残留率（抜去歯でのディボンディング）

MMA 系レジンの残留率は0%から100%にかけて広く分布していた。

Bis-GMA 系コンポジットレジンでは，0 ～20% 程度の値と100%とに二分化する

傾向がみられた．

図９－１　抜去歯での単純引張り試験を行ったときのレジン残留率

いずれのレジンにおいても残留率は，ほぼ100%であった．

各歯種につき試料数は10とした．

図９－２　抜去歯での単純引張り試験を行ったときの接着強さ

いずれのレジンにおいても1の単純引張り強さが小さいのに対して、ブラケットベースの弯曲が強い45，$\overline{45}$では大きい値をとる傾向にあった．

各歯種につき試料数は10とした．

図１０－１　単純引張り試験を想定した力を加えたときの最大最小主応力分布

モデル１，２ともウイング付近のブラケット，およびその直下のレジン部分に応力値の高い部位がみられた．

ここでは接着材がPMMAの場合を示したが、コンポジットレジンでも同様な傾向がみられた．

図１０－２　ディボンディングを想定した力を加えたときの最大最小主応力分布

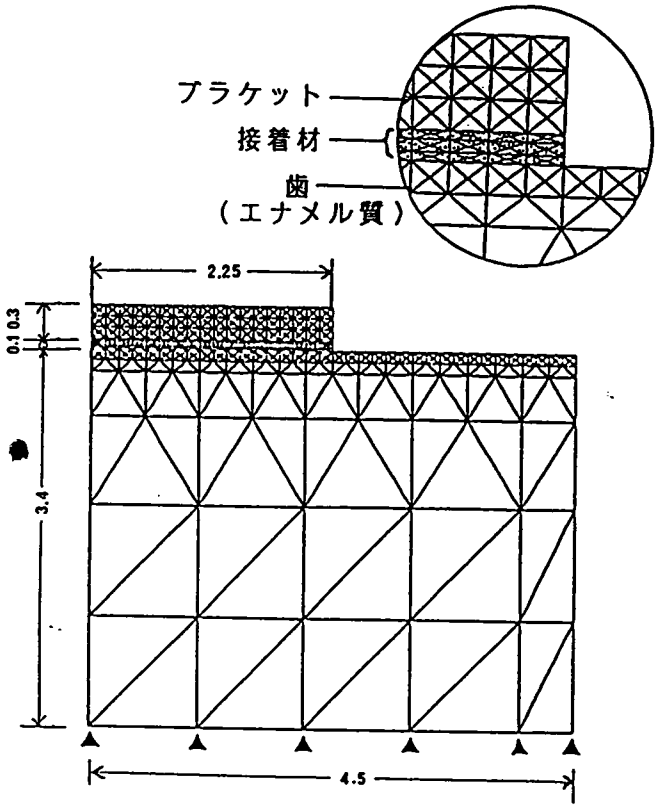
モデル１，２とも鉗子の刃先付近に応力値が高い部位がみられた．接着材に力を加えた場合は局所的な応力分布をとっていた．ここでは接着材がPMMAの場合を示したが，コンポジットレジンでも同様な傾向がみられた．

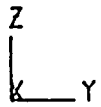
図１１　ディボンディング時のき裂の伝播に関する模式図

鉗子の２つの刃先を結ぶ点線はき裂の予想伝播路である．歯面の形態によって，この伝播路に対する２つの界面の位置的関係が異なることがわかる．モデル２ではレジン－エナメル質界面に沿ってき裂が伝播することが多くなると考えられた．

表１　鉗子の刃先に加わる力と歪みとの関係

表２　有限要素モデルの各構成材料の物性定数

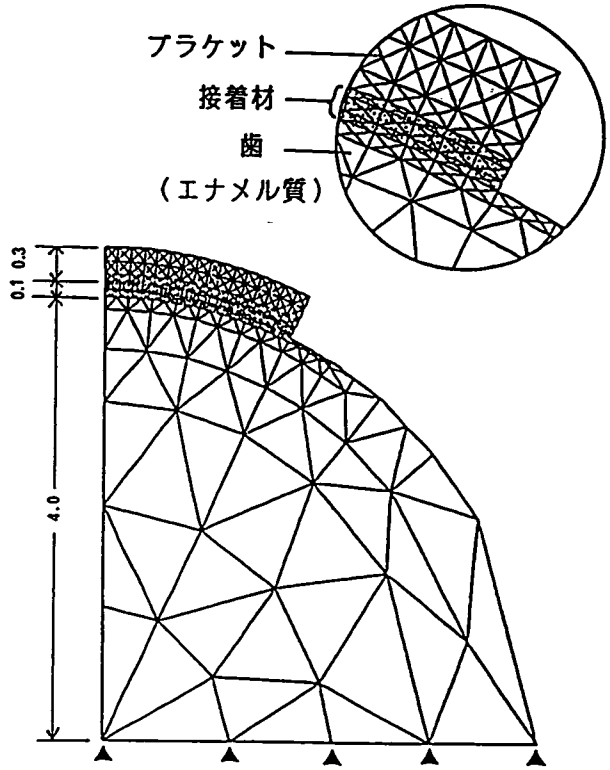


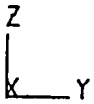


節点数 370
要素数 691

寸法の単位は㎜

モデル１





節点数 303
要素数 555

寸法の単位は㎜

モデル２

図６

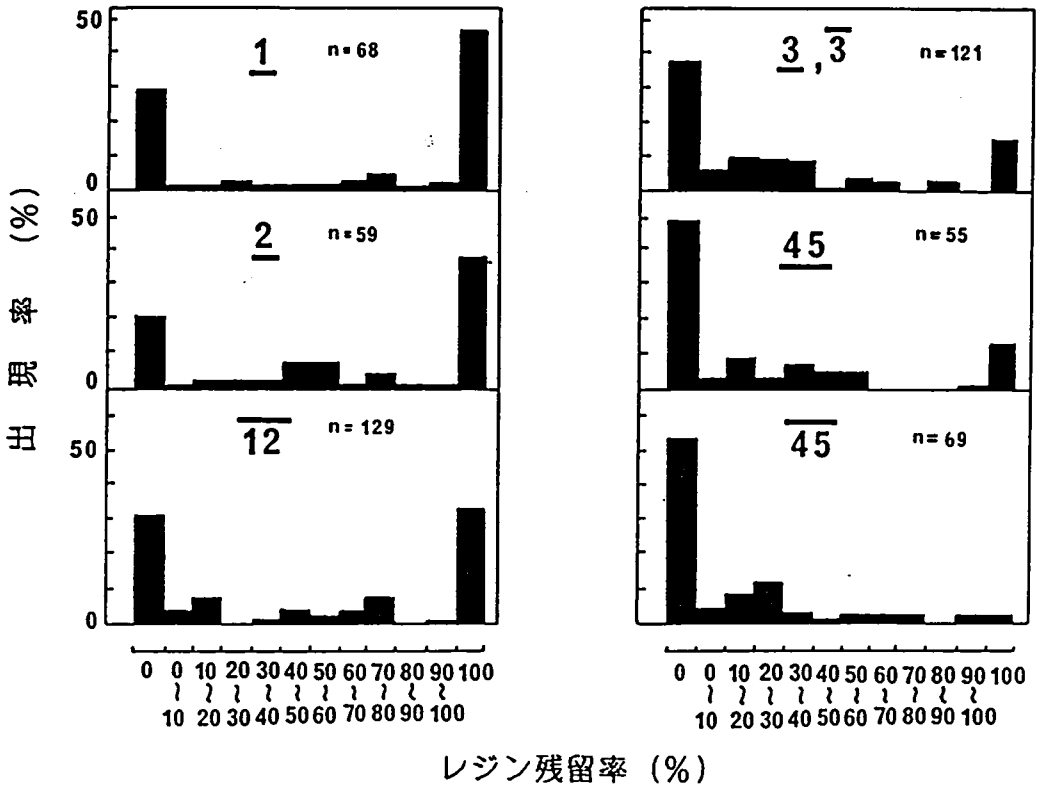
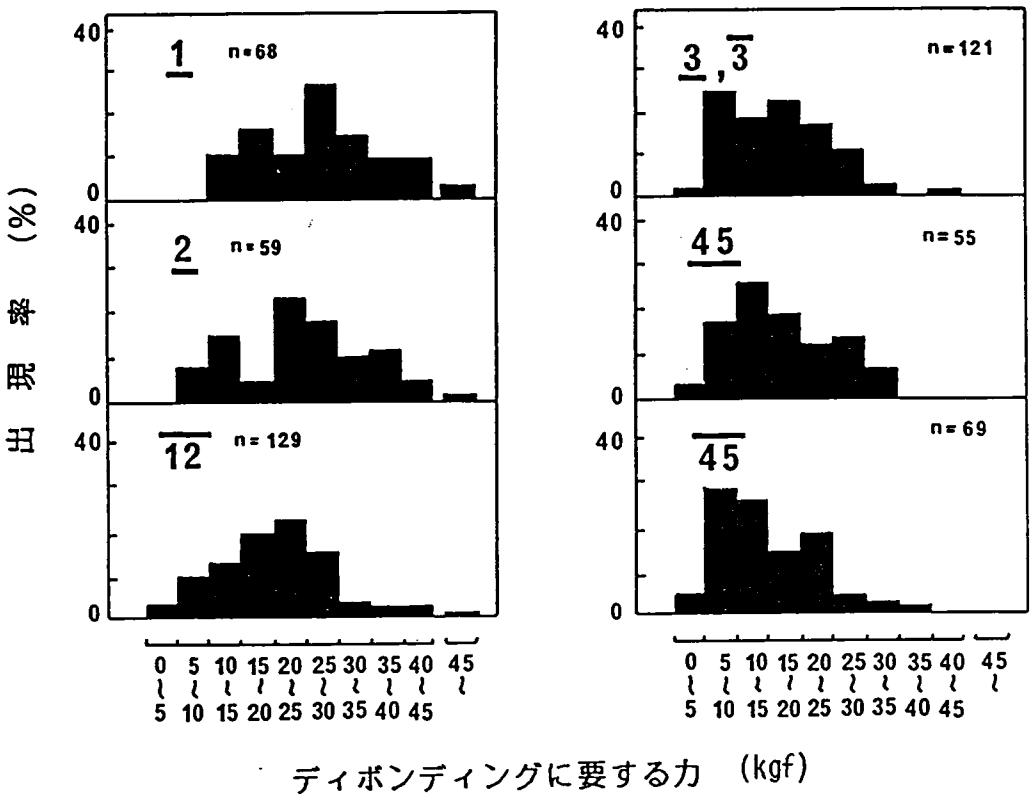

出現率（%）
50
0
1
n=68
2
n=59
12
n=129
3, 3
n=121
45
n=55
45
n=69
0 0~10 10~20 20~30 30~40 40~50 50~60 60~70 70~80 80~90 90~100
レジン残留率（%）

図７－１



ディボンディングに要する力 (kgf)

図 7 − 2

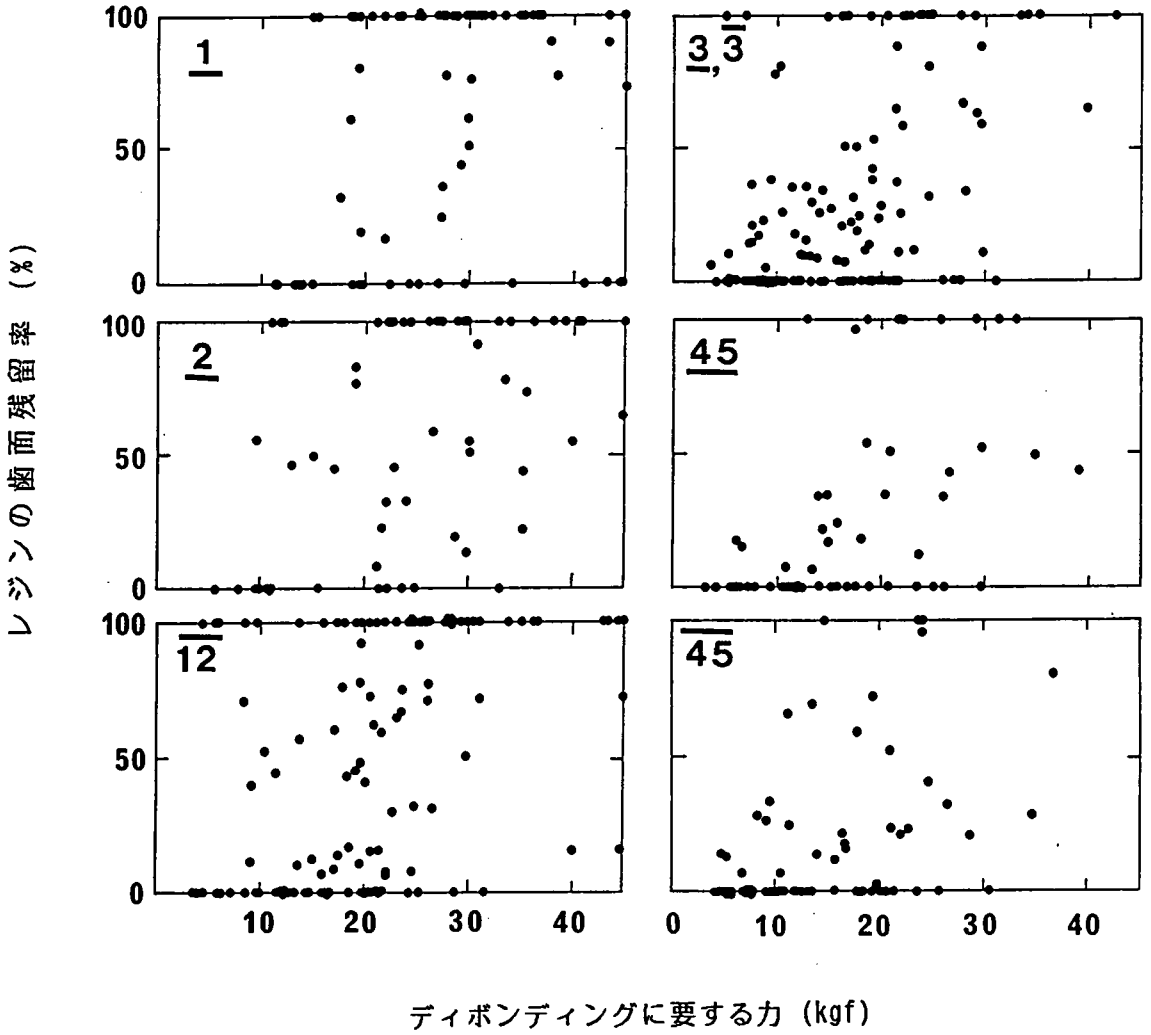

レジンの歯面残留率（%）
100
50
0
1
3,3
2
45
12
45
10
20
30
40
0
ディボンディングに要する力（kgf）

図７－３

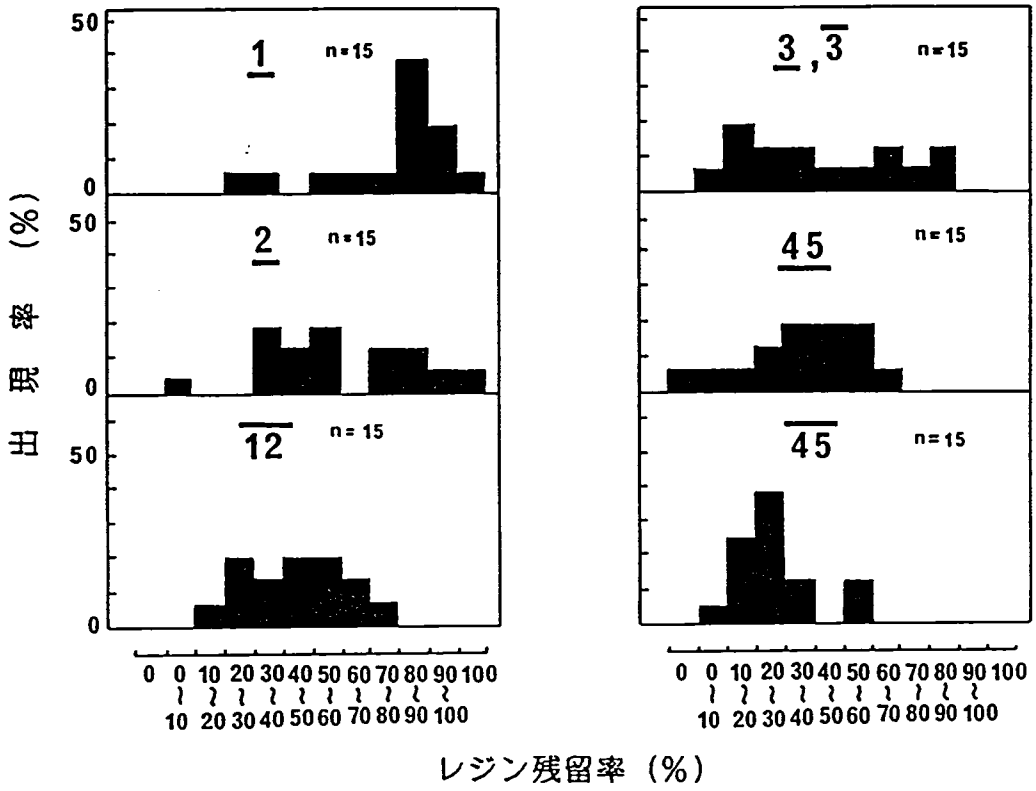

出現率（%）
50
0
1
n=15
2
n=15
12
n=15
3, 3
n=15
45
n=15
45
n=15
0 0~10 10~20 20~30 30~40 40~50 50~60 60~70 70~80 80~90 90~100
レジン残留率（%）

図８－１

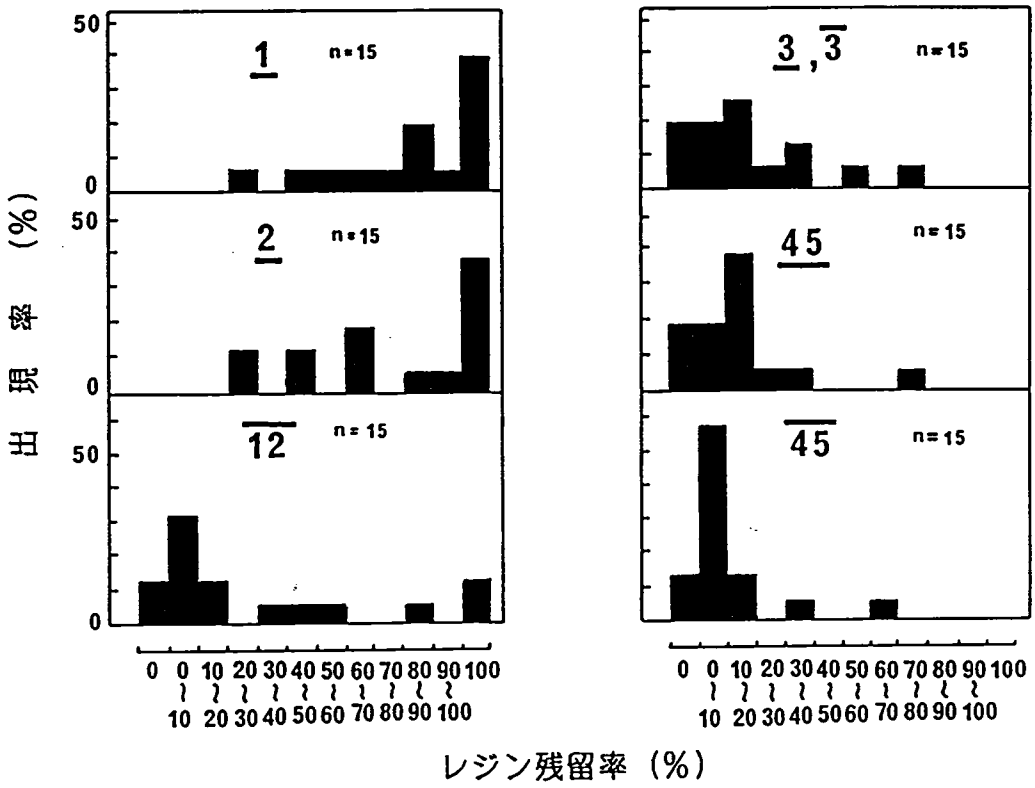

出現率（%）
50
0
1
n=15
2
n=15
12
n=15
3, 3
n=15
45
n=15
45
n=15
0 0~10 10~20 20~30 30~40 40~50 50~60 60~70 70~80 80~90 90~100
レジン残留率（%）

図８－２

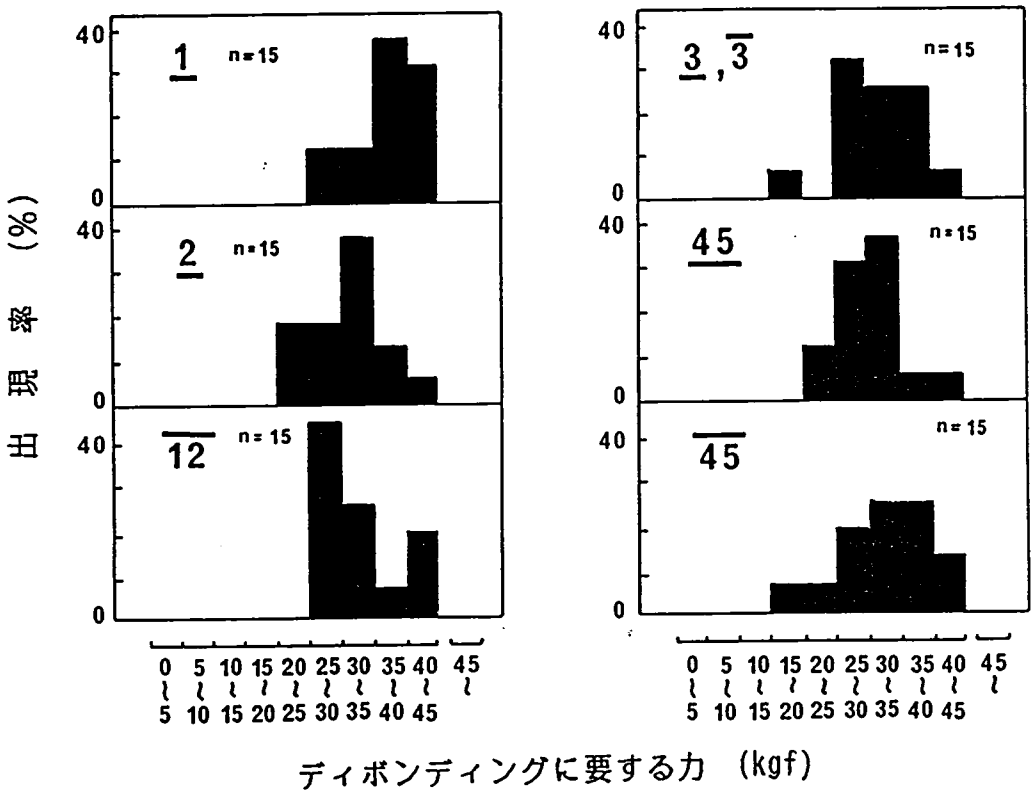

出現率 (%)
40
0
1
n=15
2
n=15
12
n=15
3, 3
n=15
45
n=15
45
n=15
0 ~ 5
5 ~ 10
10 ~ 15
15 ~ 20
20 ~ 25
25 ~ 30
30 ~ 35
35 ~ 40
40 ~ 45
45 ~
ディボンディングに要する力 (kgf)

図８－３

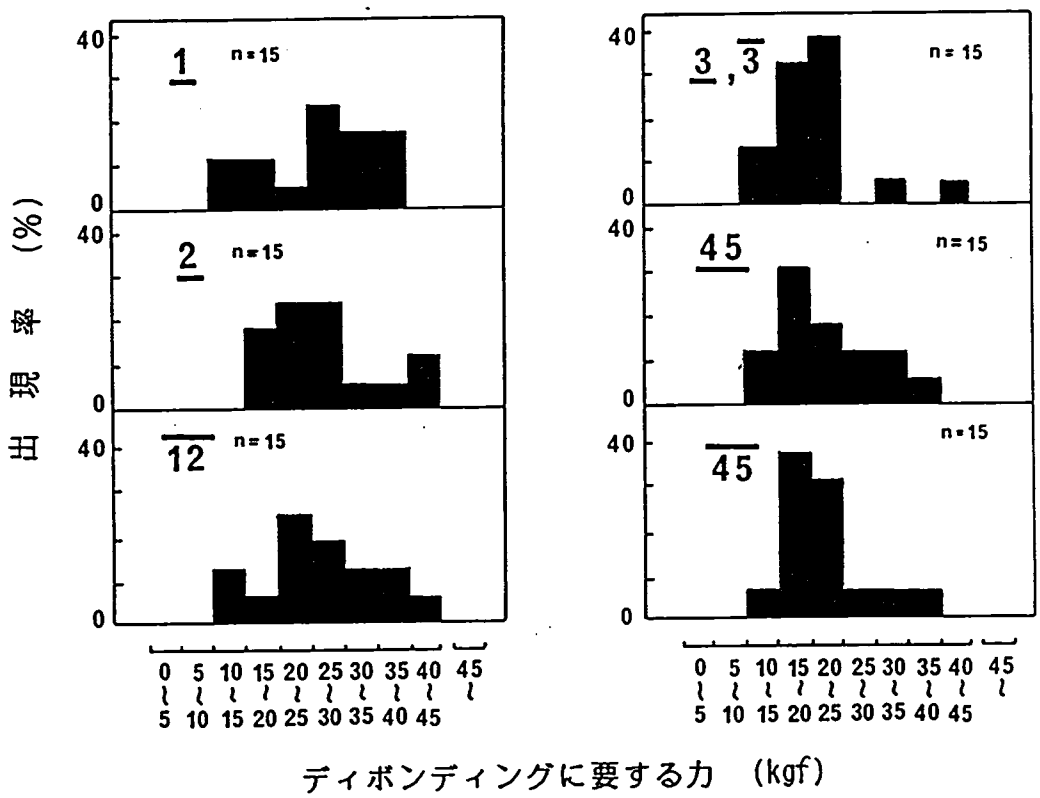

出現率 (%)
40
0
1
n=15
2
n=15
12
n=15
3, 3
n=15
45
n=15
45
n=15
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45
5 10 15 20 25 30 35 40 45
ディボンディングに要する力 (kgf)

図８－４

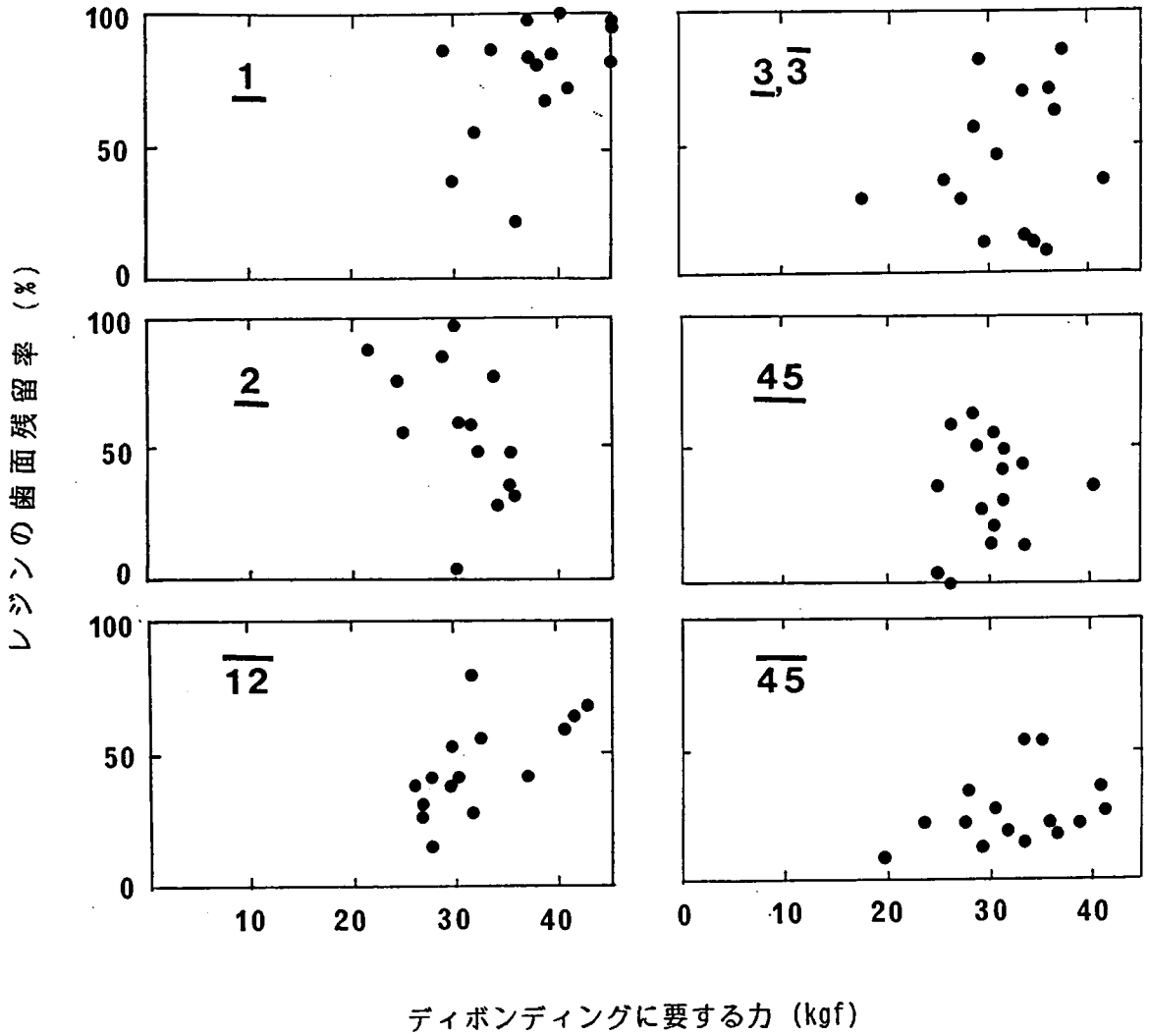

レジンの歯面残留率（%）
100
50
0
1
3,3
2
45
12
45
10
20
30
40
0
ディボンディングに要する力（kgf）

図８－５

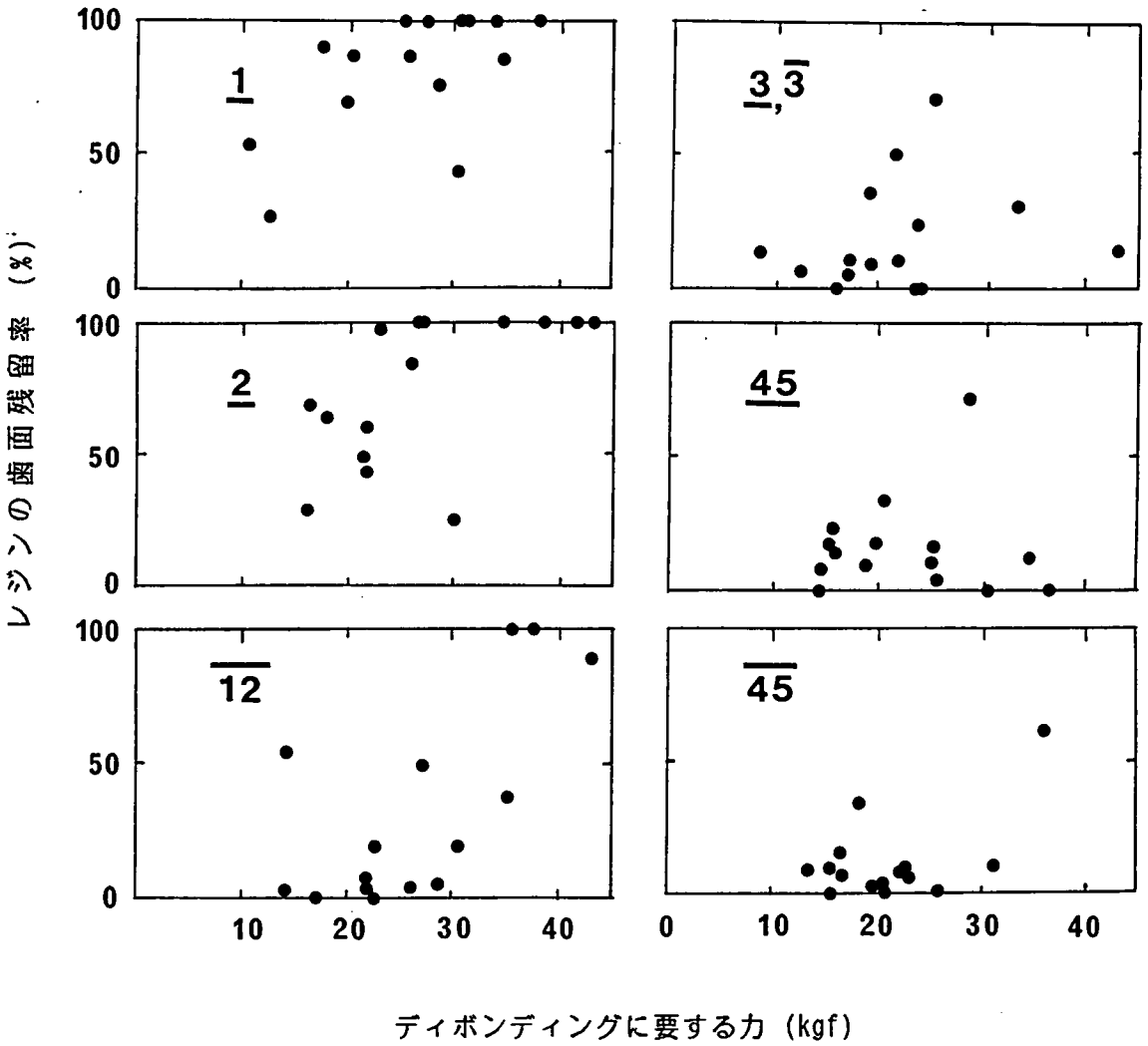

レジンの歯面残留率（%）
100
50
0
1
3,3
2
45
12
45
10
20
30
40
0
ディボンディングに要する力（kgf）

図８－６

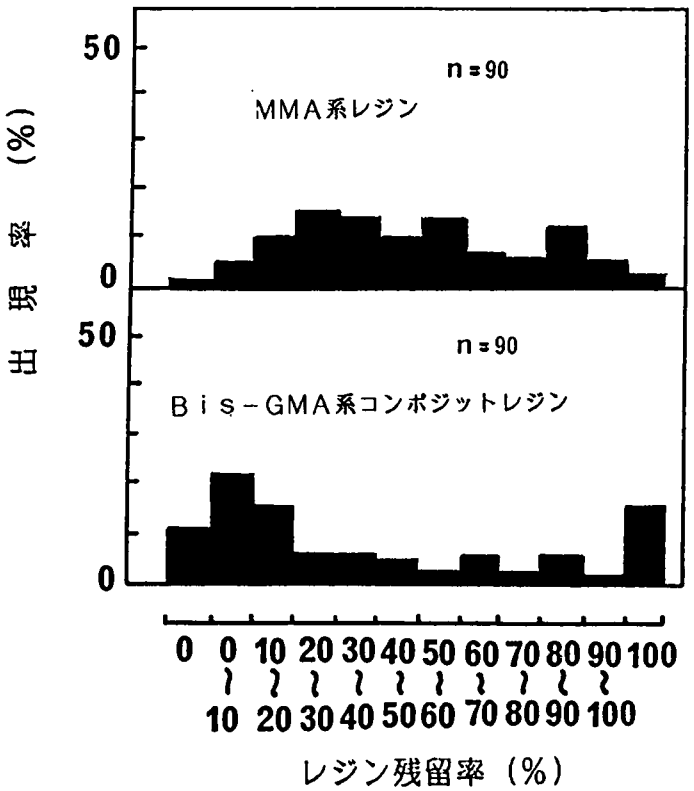

50
0
50
0
n=90
MMA系レジン
n=90
Bis-GMA系コンポジットレジン
出現率（%）
0
0 ~ 10
10 ~ 20
20 ~ 30
30 ~ 40
40 ~ 50
50 ~ 60
60 ~ 70
70 ~ 80
80 ~ 90
90 ~ 100
レジン残留率（%）

図８－７

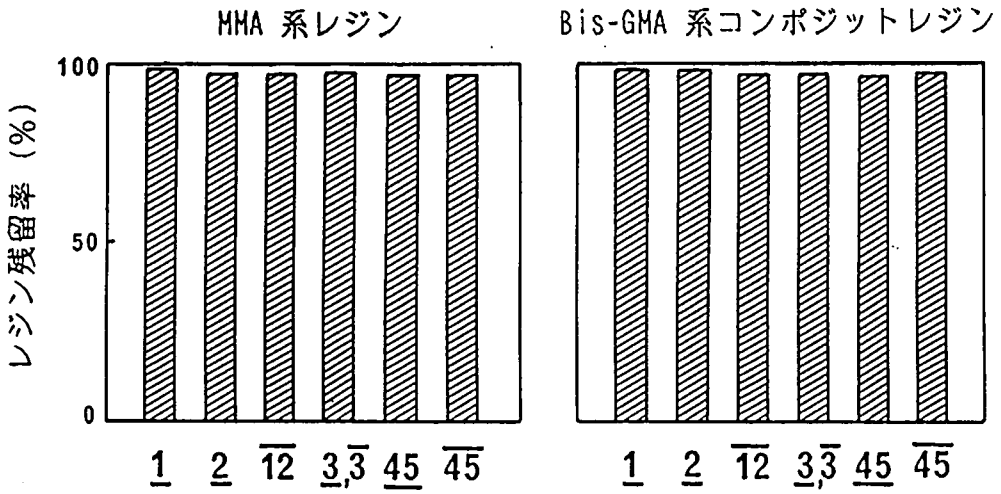

MMA 系レジン
Bis-GMA 系コンポジットレジン
レジン残留率（%）
100
50
0
1
2
12
3,3
45
45
1
2
12
3,3
45
45

図９－１

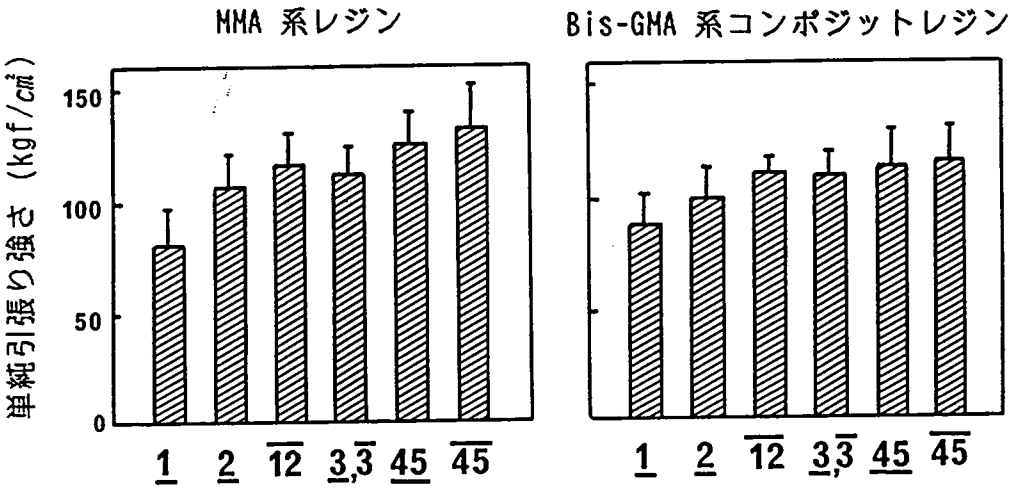
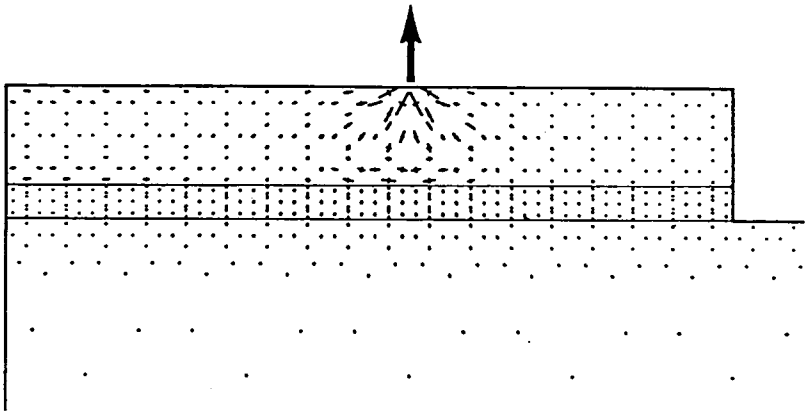
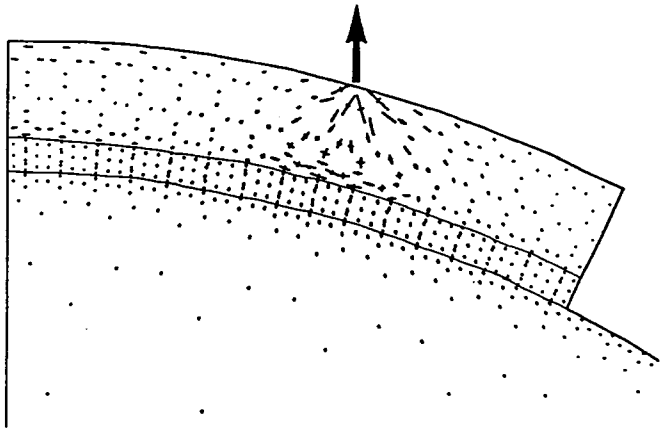

MMA 系レジン
Bis-GMA 系コンポジットレジン
単純引張り強さ (kgf/cm²)
150
100
50
0
1
2
12
3,3
45
45
1
2
12
3,3
45
45

図９－２

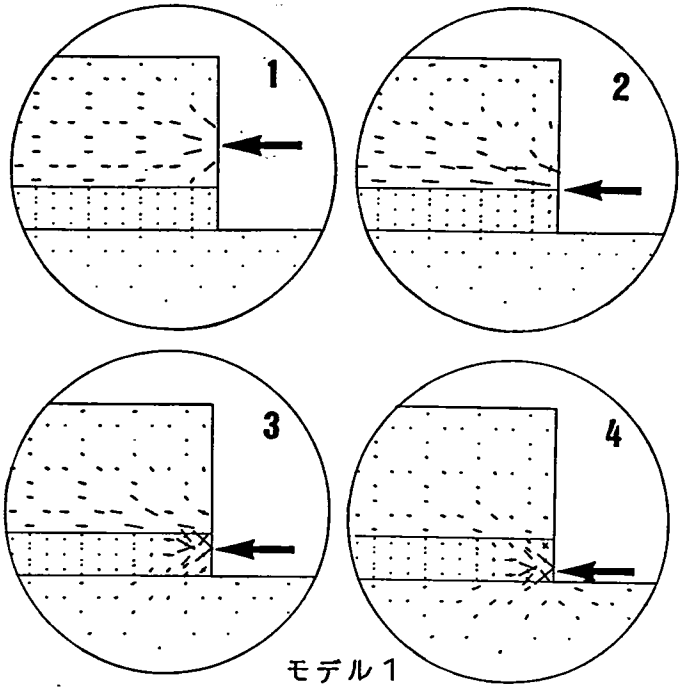


モデル１

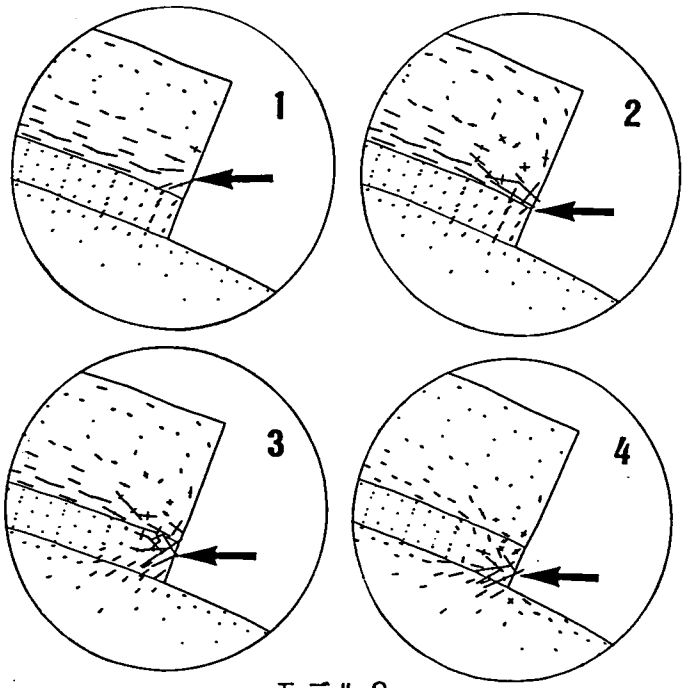


モデル２

図１０－１

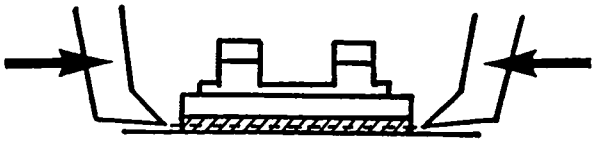


モデル１

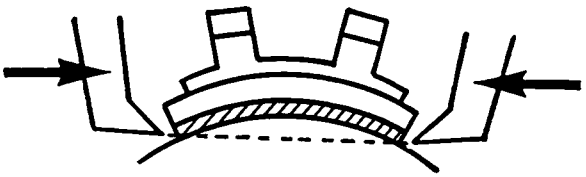


モデル２

図１０－２



モデル１
（上顎中切歯）



モデル２
（下顎小臼歯）

図１１

表1．　鉗子の刃先に加わる力と歪みとの関係

刃先間距離(mm)	回帰式	決定係数
3.0	Y＝13.46 X＋ 0.81	0.9998
4.0	Y＝13.46 X＋ 0.96	0.9998
4.5	Y＝13.46 X＋ 1.11	0.9999
5.0	Y＝13.38 X＋ 1.15	0.9997
3.0～ 5.0mmのすべての測定値から得た回帰式	Y＝13.47 X＋ 1.42	0.9998

X：歪み量（ $\times 10^{-3}$），Y：鉗子の刃先に加わる力(kgf)

表2　有限要素モデルの各構成材料の物性定数

	ヤング率 (kgf/mm²)	ポアソン比
ブラケット （SUS304ステンレス鋼）	2.20×10^4	0.30
接着材 (PMMA) (Bis-GMA系コンポジット レジン：コンサイス）	3.77×10^2 2.11×10^3	0.33 0.30
歯 （エナメル質）	5.00×10^3	0.30

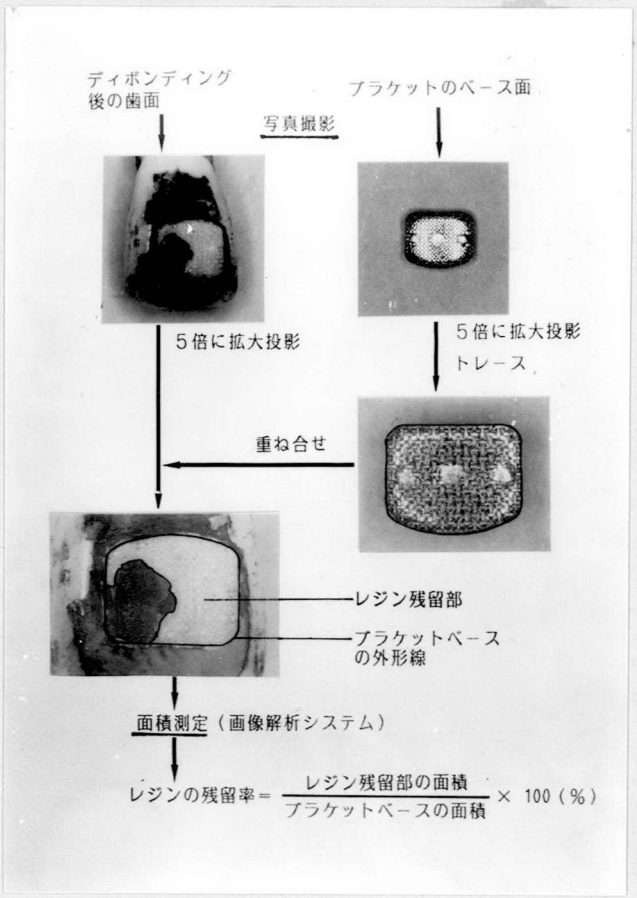

ディボンディング
後の歯面
ブラケットのベース面
写真撮影
5倍に拡大投影
5倍に拡大投影
トレース
重ね合せ
レジン残留部
ブラケットベース
の外形線
面積測定（画像解析システム）
レジンの残留率＝ レジン残留部の面積 / ブラケットベースの面積 × 100（%）

図 1

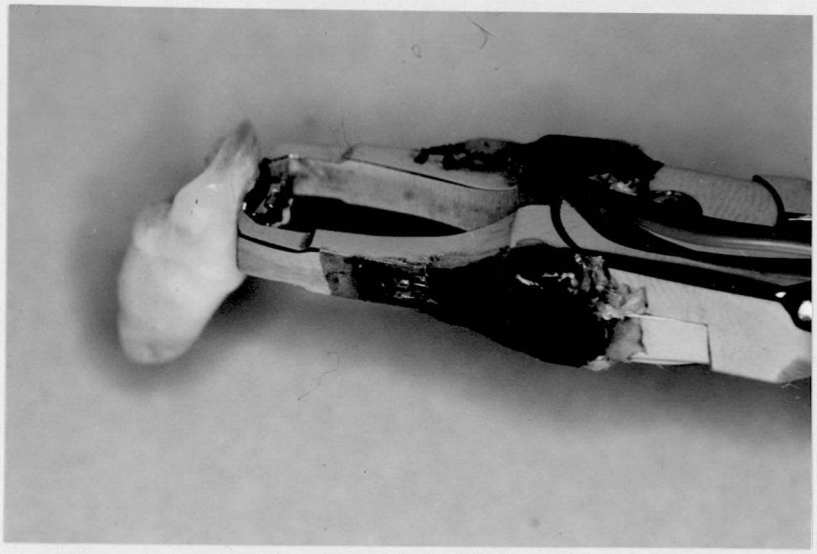


図 2

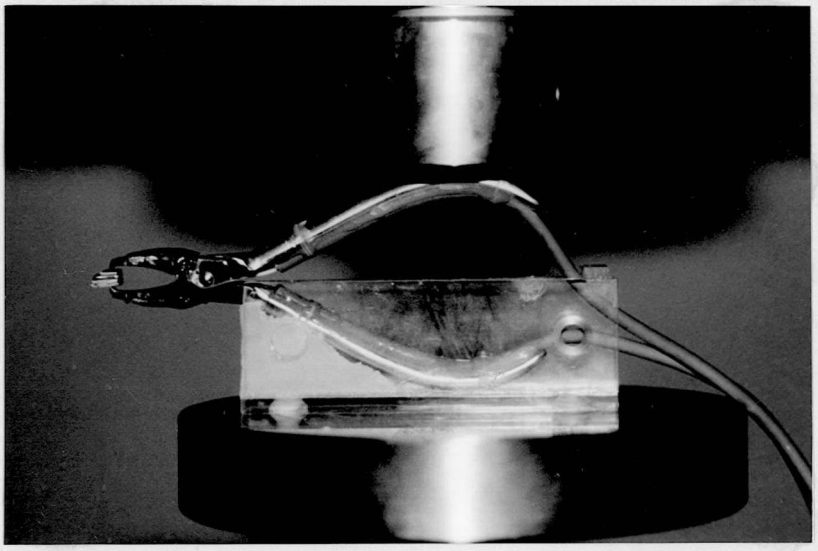


図 3

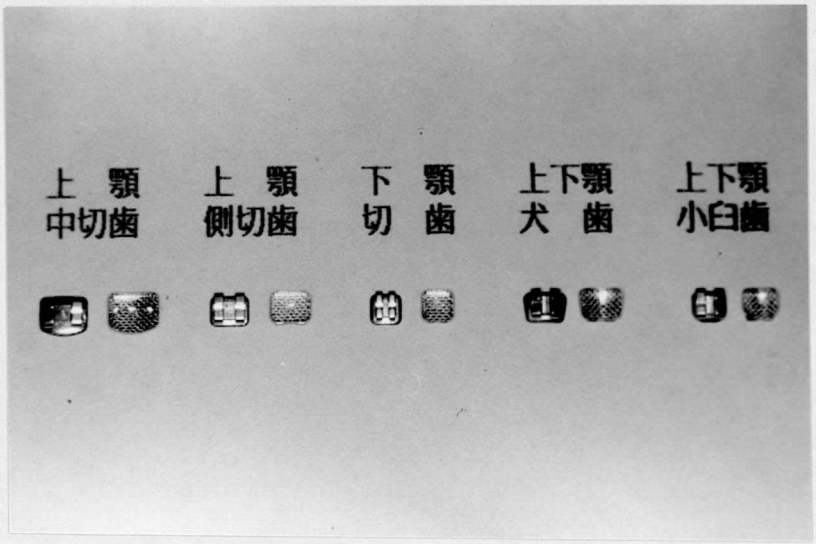


図 4

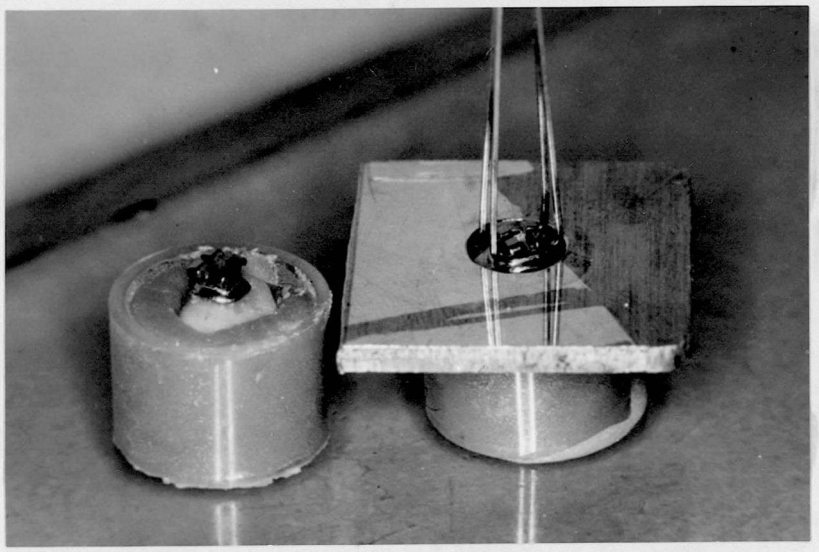


図 5

歯科矯正用ブラケットのディボンディングにおけるレジンの歯面残留の抑制に関する研究

第二編　ブラケットベースの形状とレジンの歯面残留の様相との関係

木　南　秀　雄

昭和　年　月　日受付

緒言

ブラケット－レジン－エナメル質という接着系において，破壊が生じる主な部位としては，ブラケット－レジン界面，レジン－エナメル質界面が挙げられる．これら２つの界面は，それぞれある一定の接着強さを有しているが，両者の大きさに著明な差がある場合には，それが小さい方の界面で破壊が起こることになる．なお，レジン自体の強さは，これら２つの界面における強さよりも大である[1-3]ため，破壊がレジン内のみで起こる凝集破壊の形式をとる場合は極めて少ないと考えられる．

そこで，ディボンディング時のレジンの歯面残留を抑制するためには，ブラケット－レジン界面での破壊を起こりにくくするか，レジン－エナメル質界面での破壊を起こりやす

くするか，の2通りの方法が考えられる．この問題を考えるうえで，治療を円滑に進めるうえで必要とされる適切な接着強さの範囲を知ることは意義のあることであるが，方法論的な困難性のゆえもあり，不明な点が多い[4-10]．いずれにしても，レジン－エナメル質界面での破壊を起こりやすくすることは，同部の接着強さを低下させることを意味し，動的治療中のブラケットの歯面よりの脱落を極力防止するという臨床的な要求とは相反するものである．

従って，ディボンディング時のレジンの歯面残留の効果的な抑制を行うためには，レジン－エナメル質界面での接着強さの低下をはかるよりも，ブラケット－レジン界面での破壊挙動を制御すると考えられる要因について検討を加えることが妥当であろう．

本編では，ブラケット－レジン界面での破壊を抑制することを目的として，第一編の報告[11]からこの界面での破壊挙動を決定する

うえで，重要な因子であることが示唆されたブラケットベースの形状および強度に変化を与え，この界面における接着強さを測定するとともに，ディボンディング時のレジンの歯面残留が多いと考えられた平坦な歯面に対するディボンディングを行い，レジンの歯面残留の抑制効果について検討することとした．

研究方法

1．ブラケット

ブラケット－レジン界面での破壊挙動に影響を及ぼすと考えられる以下の因子について検討するために，特に考案，試作したブラケットを用いた（図１）．

ベースの弯曲形態をＡ因子として４種類，すなわち平らな板状のものをＡ１とし，曲率の程度の異なった割球状のものを，曲率の小さいものから順にＡ２，Ａ３，Ａ４とした．Ａ２～Ａ４の形態は，大きさの異なる球面を切り口が直径 4.5mmの円となるように切りとったものであり，エナメル質側の接着面積（直径 4.5mmの円）に対するブラケット側の接着面積の比率はそれぞれ1，1.069，1.163，1.283である．

次に，ベース補強をＢ因子として２種類，

すなわち無補強の従来型をＢ１とし，ステンレス小片をベースにろう着した補強型をＢ２とした．

さらに，ベースのアンダーカット形態をＣ因子として２種類，すなわちフォイルメッシュ型をＣ１とし，マイクロロック型をＣ２とした．

これらのＡ～Ｃの因子を組合せた16種類のブラケットを製作した．

２．ブラケット－レジン界面における接着強さの測定

同一種類の試作ブラケット２つを，ブラケットベースの接着面を向きあわせた状態で，先の実験で使用したMMA 系レジンまたはBis-GMA 系コンポジットレジンを用いて接着した（図２）．このような試料は16種類の試作ブラケットごとに10個ずつ製作し，37℃蒸留水中24時間浸漬後，単純引張り試験を行った．

ブラケットに対する引き金具（図２）は，ウイング形態を有していないベース補強型（Ｂ２）では，ブラケット上部をネジ止めできるように特に製作したものを用いた．一方，従来型（Ｂ１）では，前編の研究で使用した 0.016インチ× 0.016インチの矯正用角ワイヤーから成る引き金具を用いた．

３．ディボンディング時のレジンの歯面残留状態の評価

前編の研究でディボンディング時のレジン残留の抑制が特に必要であると考えられた切歯を想定して，歯面形態が均等な条件で平坦となるようにエナメル質を次のように研摩した抜去歯を用いた．

電動研摩機（RS-C，ウインゴー社）を用いて，ヒト抜去歯唇面中央部に，接着面として直径 4.5mm以上の平坦なエナメル質面を形成した．この面が上になるように，内径12mm，

高さ6mm のアクリル円筒に即時重合レジン（ユニファスト，而至歯科工業）を用いて包埋固定した．接着面は，こののち最終的にエメリーペーパーで 600番まで湿式研摩した．

以下の接着操作はすべて室温23℃，湿度50％の恒温室中で行った．

臨床での通法に従い，接着に先だって，歯面をロビンソンブラシを低速回転させながら，歯面研摩材(Zircate prophy paste, Caulk, Dentsply) を用いて 5秒間研摩したのち，4M リン酸水溶液（33重量％ 相当）で60秒間エッチングした．次いで，蒸留水で10秒間水洗（水量約17ml）し，清浄なシリンジエアー（ホットマン，デントロニクス社）で30秒間乾燥させた．この際，歯面の温度にばらつきが生じることを避けるために，シリンジエアー装置付属の温風用ヒーターは使用しなかった．

接着材は，フィラーを含まないMMA 系レジン（スーパーボンド，サンメディカル社）と，

フィラーを含むBis-GMA 系コンポジットレジン（コンサイス，スリーエム薬品）を使用した．通法に従って接着材を調製し，ブラケットベースに盛上げたのち，先に述べた歯面に充分に圧接し，ブラケットベースの外側に溢出した余剰レジンは，硬化する前にスケーラーを用いて注意深く除去した．コンサイスについては，接着材層の組成を一種類に規定するために，液状レジンの塗布は行わなかった．

試料は16種類の試作ブラケットごとに10個ずつ製作し，30分間養生後，37℃蒸留水中24時間浸漬した．ディボンディングは前編で報告した方法により，ブラケット撤去用鉗子（ 804-104，ユニテック社）を用いてディボンディングを行い，レジンの歯面残留率を求めた．

研究結果

１．ブラケット－レジン界面における単純引張り強さ（図３）

平坦かつ無補強型で，従来型ブラケットに相当するＡ１Ｂ１Ｃ１，Ａ１Ｂ１Ｃ２よりも，Ａ，Ｂ各因子を変化させた改良型ブラケットの方が，ブラケット－レジン界面における接着強さが大であった．

各因子の効果を比較するために，Ｃ１に対するＡ，Ｂ両因子の効果をみたところ，MMA系レジン（図３－１），Bis-GMA系コンポジットレジン（図３－２）のいずれの場合についても，ベースの弯曲形態（Ａ因子）を平板状から割球状にすることによって，またその弯曲を強くするほど，ブラケット－レジン界面における単純引張り強さが増大した．また，ベース補強（Ｂ因子）については，無補強型（Ｂ１）よりも補強型（Ｂ２）の方が大きな

値をとる傾向が認められた．Ｃ２に対するＡ，Ｂ両因子の効果も同様な傾向を示していた．各条件におけるＣ１およびＣ２の比較では，両者の間に著明な差は認められなかった．

なお，破壊がすべてレジン内で起こる，いわゆる凝集破壊は認められなかった．

２．ディボンディング時のレジンの歯面残留率（図４）

各因子の効果を比較するために，Ｃ１に対するＡ因子の効果をみたところ，MMA 系レジン（図４－１），Bis-GMA 系コンポジットレジン（図４－２）のいずれの場合についても，Ｂ１，Ｂ２にかかわらず，ベースの弯曲形態（Ａ因子）を平板状から割球状にすることによって，またその弯曲を強くするほど，レジン残留率が低下する傾向が認められた．

Ｃ１に対するＢ因子の効果をみるために，同じＡ因子についてＢ１，Ｂ２を比較した場合，MMA 系レジンでは無補強型（Ｂ１）より

も補強型（Ｂ２）の方がレジン残留率がやや低い値をとる傾向が認められたが，Bis-GMA系コンポジットレジンでは，Ｂ１，Ｂ２の間に著明な差は認められなかった．Ｃ２に対するＡ，Ｂ両因子の効果も同様な傾向を示していた．

各条件におけるＣ１およびＣ２の比較では，両者の間に著明な差は認められなかった．

なお，ディボンディング時のエナメル質の破折はみられなかった．

考察

1．ダイレクト・ボンディング用ブラケットの改良について

金属ブラケットとレジンとの間の保持力は機械的嵌合力に頼らざるを得ず，そのためになんらかのアンダーカット形態の付与が必要である．

Mizrahi and Smith [12] は，メッシュにウイング部分を取りつけたもの（メッシュブラケット），あるいは薄い金属板を穿孔したものにウイング部分を取りつけたもの（パーフォレイティッドブラケット）の使用が，接着材との機械的嵌合に適していると報告した．

これらのブラケットでは接着材部分が口腔内に露出しているために，接着材の材質としてブラッシングなどに対する耐摩耗性が要求されたため，歯面との親和性が良好な充塡用

コンポジットレジンがダイレクト・ボンディング用接着材として導入された．一方，歯面にブラケットを圧接する際に，溢出したレジンがウイング直下やスロット部分に入りこまないように，ウイング部分とブラケットベースとの間に薄板を差込んだいわゆるフォイルメッシュベースが開発され[13]，現在では多用されている．このような型のメッシュベースの開発に伴い，接着材の耐摩耗性は必ずしも必要ではなくなった[14]が，フィラー添加型レジンは今なお多く用いられているため，ディボンディング時に歯面に残留したレジンの除去が困難であるという問題は，未だ解決していない[15]．

メッシュベースを使用したブラケットの接着強さの向上を目指した研究としては，メッシュサイズの大きさについて検討したもの[2,7,16-18]がみられるが，接着材あるいは試験方法の違いもあり，統一的な見解は出ていない．また，ブラケットの製作過程で行われる

点溶接によって，ブラケットの保持力に寄与する実効面積が減少するとともに，鋭いエッジが生じた場合には，そこが応力集中点となり，接着強度を大幅に低下させる危険性を指摘した報告[2,7,18]もある．

一方，メッシュにかわるアンダーカット形態として，谷田部[19]はフォトエッチタイプ（マイクロロック型）金属ブラケットを考案した．また最近では，特殊な焼結過程によってステンレス板に金属微粒子をコーティングしたブラケットが考案され，ブラケット－レジン間の接着強さが著しく向上したという報告[20,21]もみられる．

以上のような報告は，いずれもブラケット－レジン界面における接着強さの向上を目指したものであるが，ディボンディング時のレジンの歯面残留の抑制を主目的とする報告は，現在までほとんどみられない．

本研究では，ブラケット－レジン界面における接着強さを向上させて，この部位での破

壊を抑制することにより，ブラケット撤去用鉗子を用いたディボンディングにおけるレジンの歯面残留の抑制を図ることを試みた．

前編の報告[11]で，ディボンディング時の接着系の破壊においては，ブラケット撤去用鉗子の２つの刃先を結ぶ外力の仮想作用線が，き裂の伝播路になると推察された（図５）．切歯のような平坦な歯面に対しては，鉗子の２つの刃先の位置から考えると，このようなき裂の予想伝播路はレジン－エナメル質界面付近に存在することになる．ところが，従来型ブラケットのように，ベース形態を単に歯面の解剖学的形態に適合させた場合には，ブラケット－レジン界面もき裂の予想伝播路に近接するために，この部位での破壊が起こりやすくなると考えられた．そこで，弯曲度の評価および製作が容易な形態である割球状の弯曲形態をＡ因子として採用した．そして，き裂の予想伝播路からブラケット－レジン界面を遠ざけることによって，この部位での破

壊が実際に起こりにくくなるか否かについて検討を加えた．

次に，前編の研究ではブラケットベースを変形させ，ブラケット－レジン界面での応力集中を引き起こすような方法によってブラケットを歯面から撤去した場合，レジンが歯面に残留しやすいことが示唆された．そこで，本編では外力によるブラケットベースの変形を防止するために，ステンレス小片をベースにろう着してベースの補強（Ｂ因子）を行い，ブラケット－レジン界面での破壊抑制について検討した．

さらに，従来からブラケット－レジン界面における強さを左右する最も大きな因子として考えられてきたアンダーカット形態（Ｃ因子）が，これらＡ，Ｂ因子の変化に対してどのような影響を及ぼすかについても検討することにし，以上のＡ，Ｂ，Ｃの３因子を組合せた計16種類のブラケットを試作した．

２．研究成績について

ベースの形状を平坦から割球状とし，その曲率を大とするほど，ブラケット－レジン界面での接着強さが増大した（図３）．これは，ベースに弯曲形態（Ａ因子）を与えることにより，ブラケット－レジン界面での接着面積が増加したためと考えられた．また，ベースの弯曲によりベースがレジン部分をまわりから一塊として抱え込んだ状態となる．そのため，接着系に外力が加わった際に，ブラケット－レジン間の保持力が，一方向だけでなく様々な方向からレジン全体を保持するように作用し，この界面での破壊が起こりにくくなったのではないかとも考えられた．次に，ディボンディング時のレジンの歯面残留率についてはＡの各因子について同様な順で著明に低下した（図４）．これは，前述したようなブラケット－レジン界面における接着強さの増大に加えて，ブラケット－レジン界面をき

裂の予想伝播路から位置的に遠ざけたことによる効果も存在すると考えられた．

次に，ブラケットベースの補強（B因子）を行うことによって，ブラケット－レジン界面での単純引張り強さが増大する傾向がみられた（図３）．これは，ベースの補強によってその変形が抑制されるため，ブラケット－レジン界面での破壊が起こりにくくなったことを示唆したものと考えられ，ブラケットベースが厚い方が接着強さが大であるという永田の報告[22]とも一致する．ディボンディング時のレジン残留の抑制効果は，MMA 系レジンを用いた場合にみられた（図３－１）が，その効果はA因子ほど著明ではなかった．これは，もともとブラケット－レジン間の接着強さの増大効果が，A因子と比較すると小であったためと考えられた．

以上のように，ブラケットベースの形状を変化させ，弯曲形態を与えることによって，

ブラケット－レジン界面における接着強さが向上するとともに，ディボンディング時のレジンの歯面残留が著明に抑制されることが明らかとなった．臨床の場においても，このようにレジンの歯面残留を抑制することができれば，ディボンディング時のレジンの歯面残留に関する問題点は大きく改善されるため，今後は臨床応用についての検討が必要となろう．

結 論

ブラケット－レジン界面での破壊を抑制することを目的として，第一編の研究で得た知見にもとづくブラケットの改良を行い，ブラケット－レジン界面における接着強さを確認するとともに，ディボンディング時のレジンの歯面残留の抑制について検討した結果，次の成績を得た．

1．ブラケット－レジン界面における単純引張り強さは，MMA 系レジン，Bis-GMA 系コンポジットレジンいずれの場合も，ブラケットベースの形状を平板状から割球状にすることによって，またその弯曲を強くするほど増大した．一方，ベース補強の効果はベース形態の効果ほど著明ではなかったが，補強を行ったものの方が単純引張り強さが増大する傾向が認められた．

2．ディボンディング時のレジンの歯面残留

は，MMA 系レジン，Bis-GMA 系コンポジットレジンいずれの場合も，ブラケットベースの形状を平板状から割球状にすることによって，またその弯曲を強くするほど抑制される傾向が認められた．

以上より，ブラケットベースの形状を変化させ，弯曲形態を与えることによって，ブラケット－レジン界面における接着強さが向上するとともに，ディボンディング時のレジンの歯面残留が抑制されることが明らかとなり，今後の臨床応用の可能性が示唆された．

稿を終えるにあたり，終始御懇篤なる御指導と御校閲を賜わりました，大阪大学歯学部歯科矯正学講座作田　守教授に深謝の意を表しますとともに，数々の御懇篤なる御指導を賜わりました大阪大学歯学部歯科理工学講座木村　博教授に深く感謝致します．また，本研究の開始当初より終始細部にわたる御懇篤

なる御教示と御助言を賜わりました，大阪大学歯学部歯科理工学講座岡崎正之講師に心から謝意を表しますとともに，本研究の遂行に際し，一方ならぬ御教示と御助言を賜わりました，大阪大学歯学部附属病院矯正科高田健治講師に心から感謝致します．さらに本研究に深い理解を示され，試作ブラケットの製作に御協力下さいましたトミー株式会社に厚くお礼申しあげますとともに，本研究に対して御協力下さいました歯科矯正学講座ならびに歯科理工学講座の諸先生方に厚くお礼申しあげます．

文献

1) Faust,J.B., Grego,G.N., Fan,P.L., and Powers,P.L.(1978): Penetration coefficient, tensile strength, and bond strength of thirteen direct bonding orthodontic cements. Am.J.Orthod., 73,512-525.

2) Dickinson,P.T. and Powers,J.M.(1980): Evaluation of fourteen direct-bonding orthodontic bases. Am.J.Orthod., 78,630-639.

3) 宮崎　隆，藤島昭宏，稲用隆史，大峰由美子，宮治俊幸(1985)：コンポジットレジンの引張り試験に関する研究．第 6回日本歯科理工学会学術講演会講演集：歯材器，4，特別号，13-14. 昭和60.

4) Rensch, J.A.(1973): Direct cementation of orthodontic attachments. Am.J. Orthod., 63, 156-160.

5) 桑原洋助(1975)：ポーセレン焼付金属ブラケットとダイレクト・ボンディング法に対する私見．日本歯科評論，392, 153-155,昭和50.

6) Zachrisson, B.U.(1977): A posttreatment evaluation of direct bonding in orthodontics. Am.J.Orthod., 71, 173-189.

7) Lopez, J.I.(1980): Retentive shear strengths of various bonding attachment bases. Am.J.Orthod., 77, 669-678.

8) Newman, G.V.(1965): Epoxy adhesives for orthodontic attachments: Progressive report, Am.J.Orthod., 51, 901-912.

9) 三浦不二夫，中川一彦(1969)：レジン製ブラケット直接接着法の臨床応用例，日矯歯誌，28, 344-354,昭和44.

10) Raynolds,I.R.(1975): A review of direct bonding. Brit.J.Orthod., 3, 91-95.

11) 木南秀雄(1987)：歯科矯正用ブラケットのディボンディングにおけるレジンの歯面残留の抑制に関する研究．第一編　接着系の破壊挙動．阪大歯学誌，32，昭和62.

12) Mizrahi,E. and Smith,D.C.(1971): Direct attachment of orthodontic brackets to dental enamel. Brit.Dent.J., 130,392-396.

13) 亀田　晃(1975)：熱硬化性アクリル樹脂系接着剤(Genie) を用いたベッグ法について．日本歯科評論，392, 142-148,昭和50.

14) Moin,K. and Dogon,I.L.(1978): An evaluation of shear strength measurements of unfilled and filled resin combinations. Am.J.Orthod., 74,531-536.

15) Newman,G.V.(1978): A posttreatment survey of direct bonding of metal brackets. Am.J.Orthod., 74,197-206.

16) Raynolds,I.R. and Fraunhofer,J.A.(1976): Direct bonding of orthodontic attachments to teeth: The relation of adhesive bond strength to gauge mesh size. Br.J.Orthod., 3,91-95.

17) Thanos,C.E., Munholland,T., and Caputo,A.A.(1979): Adhesion of mesh-base direct-bonding brackets. Am.J.Orthod., 75,421-430.

18) Maijer,R. and Smith,D.C.(1981): Variables influencing the bond strength of metal orthodontic bracket bases. Am.J.Orthod., 79,20-34.

19) 谷田部賢一：パーソナルコミュニケーション

20) Hanson,G.H., Gibbon,W.M., and Shimizu,H.(1983): Bonding bases coated with porous metal powder:A comparison with foil mesh. Am.J.Orthod., 83,1-4.

21) Smith,D.C. and Maijer,R.(1983): Improvements in bracket base design. Am.J.Orthod., 83,277-281.

22) 永田賢司(1978)：ダイレクト・ボンディング法における種々のメタル・ベースが接着強度に与える影響について．歯科学報，78,1155-1170. 昭和53.

Studies on the Suppression of Remaining of the Resin on the Tooth Surfaces in Debonding of Orthodontic Brackets

Part 2. Correlation between Bracket Base Form Design and Remaining of the Resin on the Tooth Surfaces

Hideo KINAMI

Department of Orthodontics,
Osaka University Faculty of Dentistry
1-8, Yamadaoka, Suita, Osaka 565, Japan

Key words: Debonding , Remaining of resin , Bracket base form design

In order to minimize destruction at bracket-resin interface, brackets with different base form designs were prepared based on the findings obtained in the preceding report.

Newly designed brackets were prepared to examine possible factors which affect destruction bahaviors at the bracket-resin interface.

Followig factors were evaluated;

1. Base curvatures -- one plate-form base, three shell-form bases with different curvatures.

2. Base reinforcement - a conventional type and a soldered type with a piece of stainless steel.

3. Base undercut -- foil meshed type and photoetched type.

The tensile strength at bracket-resin interface was measured, and areas of residual resins on the tooth surfaces after debonding brackets were determined.

The results obtained were as follows;

1. Tensile strengths at bracket-resin interface increased as the the curvatures of bracket bases increased, altered base design from plate-form to shell-form, for both MMA resin and Bis-GMA composite resin.

The effect of the base reinforcement was not so great as that of the bracket base curvatures. On the other hand no difference was detected between two undercut forms.

2. The amounts of residual resin on the tooth surfaces after debonding decreased, as the curvature of bracket base increased, for both MMA

resin and Bis-GMA composite resin.

These findings suggested that an improvement of the bracket base form design may contribute to solve clinical problems associated with debonding procedures, when complete removal of resins from tooth surfaces is required.

図表の説明

図１　試作ブラケット

１．ベースの弯曲形態（Ａ因子）

２．ベースの補強（Ｂ因子）

３．ベースのアンダーカット形態（Ｃ因子）

４．Ａ，Ｂ，Ｃの因子を組合せて製作した16種類のブラケット

図２　単純引張り試験用引き金具と試験用ブラケット

１．無補強型ブラケット（Ｂ１）

２．補強型ブラケット（Ｂ２）

図３－１　ブラケット－レジン界面での単純引張り強さ（MMA 系レジンの場合）

Ａ１からＡ４にかけて，単純引張り強さが増大した．

Ｂ因子についてはＢ２の方が大きな値をとる傾向が認められた．

各条件につき試料数は10とした．

図３－２　ブラケット－レジン界面での単純引張り強さ（Bis-GMA 系コンポジットレジンの場合）

Ａ１からＡ４にかけて，単純引張り強さが増大した．

Ｂ因子についてはＢ２の方が大きな値をとる傾向が認められた．

各条件につき試料数は10とした．

図４－１　ディボンディング時のレジンの歯面残留率

Ａ因子の違いによる残留率の低下傾向が認められた．

Ｂ因子についてはＢ２の方が残留率がや

や低い値をとる傾向が認められた．

図４－２　ディボンディング時のレジンの歯面残留率（Bis-GMA 系コンポジットレジンの場合）

Ａ因子の違いによる残留率の低下傾向が認められた．

図５　本研究におけるブラケット改良の着目点

１．従来型ブラケットのベース形態は，歯面の解剖学的形態に適合させたものである．

２．予想されるき裂の伝播経路（点線）から，ブラケット－レジン界面を遠ざけた．

３．ブラケットベースの外力による変形を防ぐために，ベースを補強した．

MMA系レジン

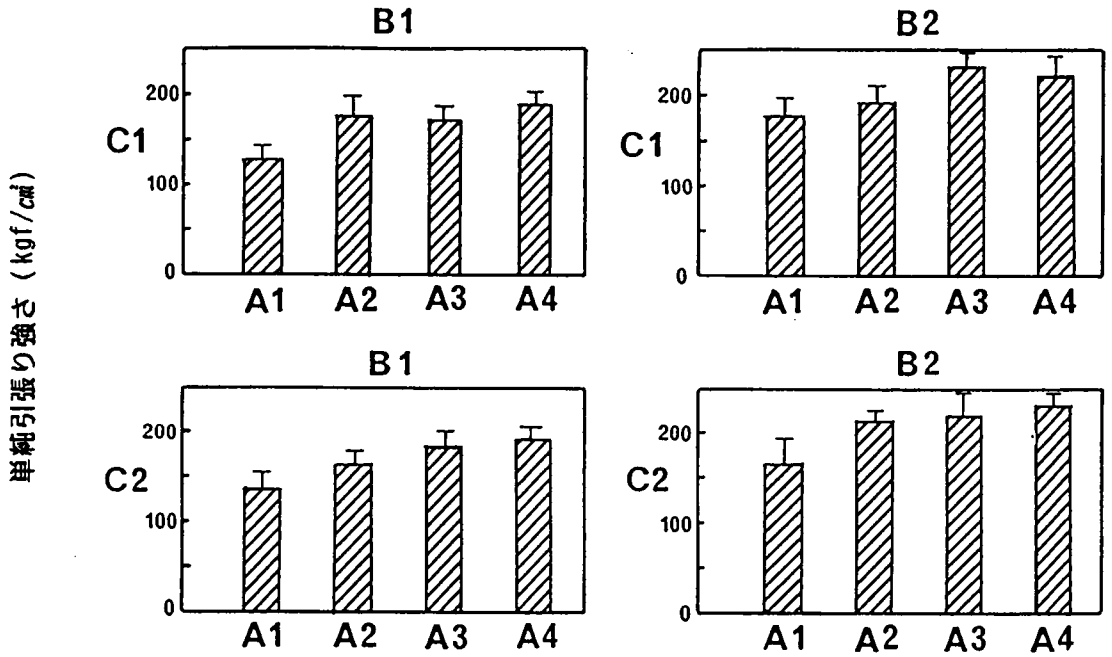


図３－１

Ｂｉｓ－GMA系コンポジットレジン

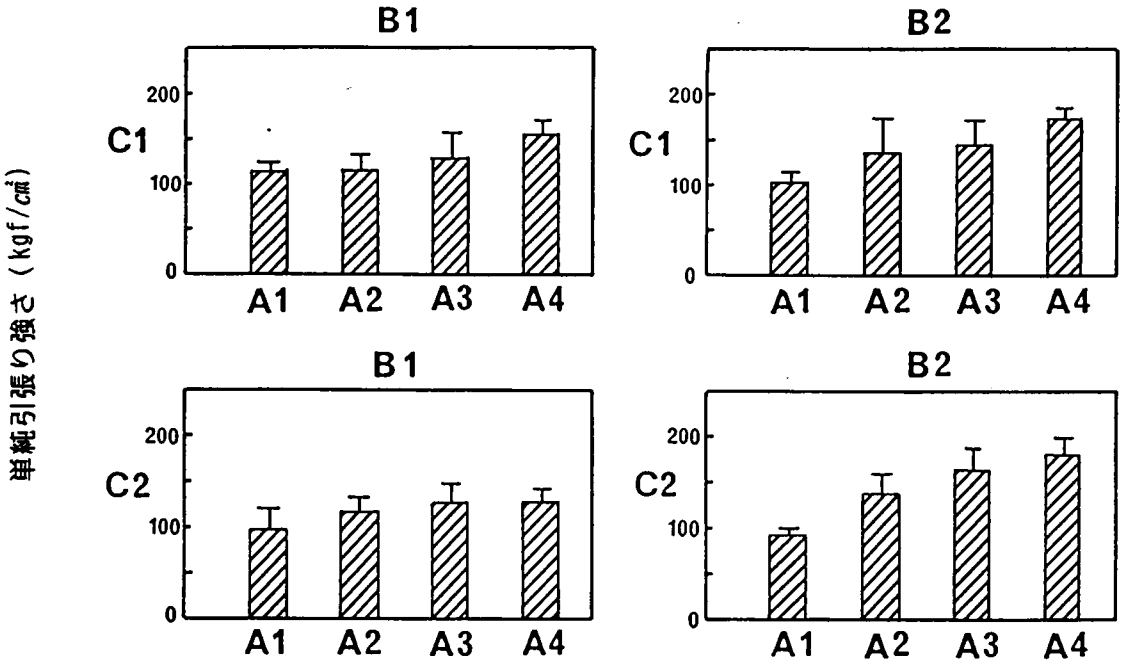


図３－２

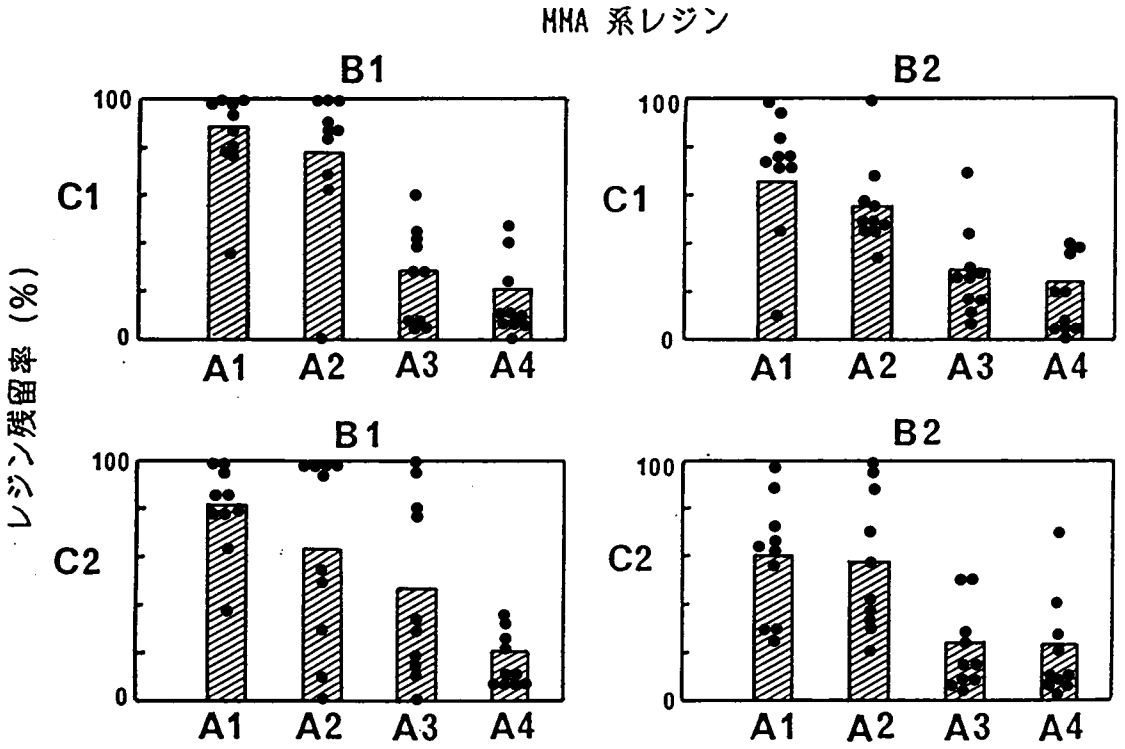


図４－１

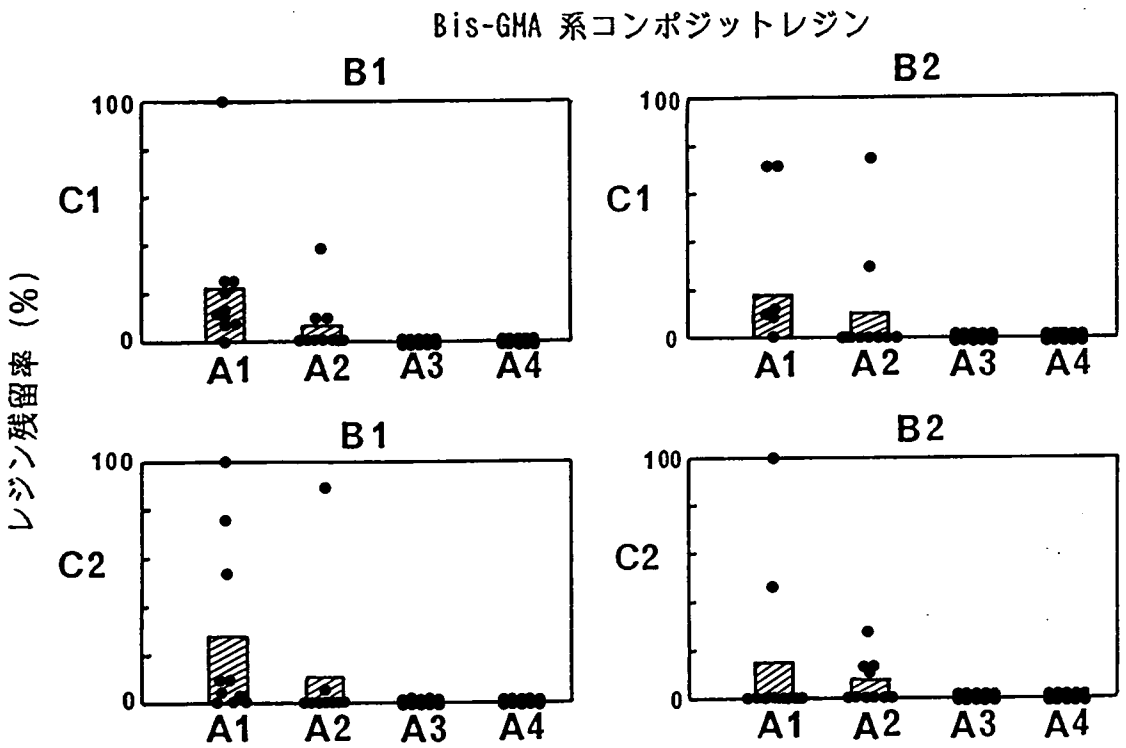
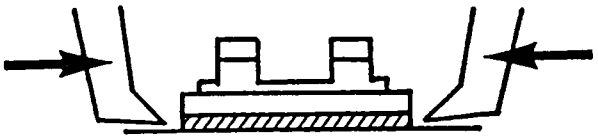
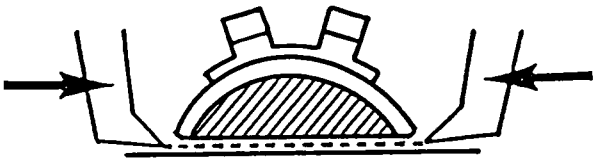


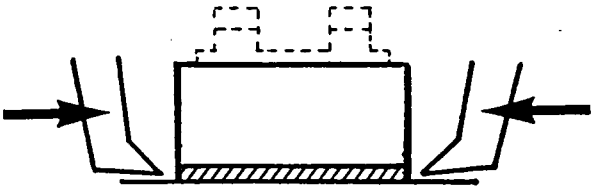
図４－２



1．従来型ブラケット



2．ベースに弯曲形態を与えた
ブラケット（A因子）



3．ベースを補強した
ブラケット（B因子）

図5

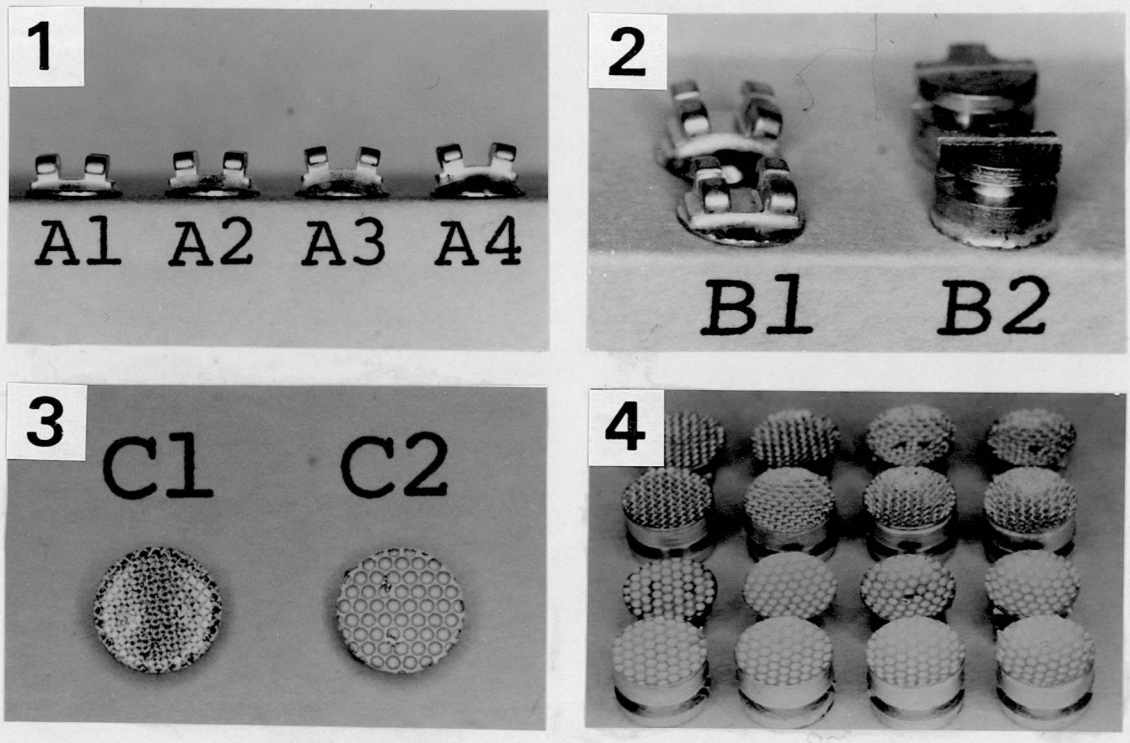


図 1

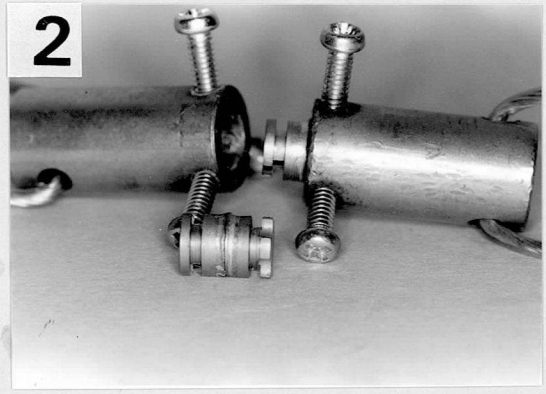


図 2