

授与番号	乙第 125 号
------	----------

論文内容の要旨

Wear Behavior between Aesthetic Restorative Materials and Bovine Tooth Enamel

— 審美修復材と牛歯エナメル質との摩耗挙動 —

(Materials, 2022, 15(15), 5234; <https://doi.org/10.3390/ma15155234>, 令和 4 年 7 月)

はたなか あきひこ
畑中 昭彦

I. 研究目的

歯の齲蝕や欠損などが生じた場合、クラウンやブリッジなどの歯科補綴装置によってその形態や口腔機能が再建される。近年、機械的特性、審美性、生体適合性に優れたセラミックやコンポジットレジンなどのメタルフリー材料が直接修復法および間接修復法に使用されるようになってきている。歯科用コンピュータ支援設計・製造 (CAD/CAM) 技術の導入と進歩、歯冠色修復材料の開発、接着システムの改善により、ジルコニアや二ケイ酸リチウム系ガラスセラミック、コンポジットレジンの臨床応用が可能になった。一方で、口腔内で使用する材料は強度の他に、経年的な材料の劣化（疲労）や摩耗についても考慮する必要がある。本研究では、製作方法の異なる歯冠審美修復材料と牛歯エナメル質との摩耗挙動を *in vitro* 二体摩耗試験により評価することを目的とした。

II. 研究方法

1. 試料作製

歯冠審美修復材料の CAD/CAM 用材料として 3mol% イットリア含有ジルコニア (ZR)、二ケイ酸リチウム系ガラスセラミック (LS)、従来法での製作として歯科用陶材 (DP) と間接法用コンポジットレジン (RC) とした。上部構造は支台歯形成した下顎第一大臼歯の石膏模型をスキャンして、CAD/CAM 法でクラウン形状の研磨試料を製作した。従来法では、前述した研磨試料の咬合面形態を付加型シリコーンゴム印象材で印象採得後、それを型として歯科用陶材は築盛、焼成して、コンポジットレジンでは築盛して光重合後に加熱して製作した

($n=6$)。対象として、牛歯歯冠に咬頭を模した突起をダイヤモンドポイントで形成したものをを用いた。製作した半分は摩耗試験前に 3D レーザー顕微鏡で観察し、表面粗さを算出した。上部構造の材料は、板状試料も準備し、600 番の耐水研磨紙で研磨した後、機械的性質としてビッカース硬さ試験 (4.9N 荷重、15 秒) を行った。摩耗試験の下部基材は牛歯エナメル質 (BE) とし、エポキシ樹脂に包埋後、平らな面が出るように 600 番の耐水研磨紙で研磨した。

2. 摩耗試験と評価

摩耗試験機に上部構造と下部基材を取り付け、上部から垂直に 4.9N を負荷し、ストロー

ク幅 5mm として 2.5Hz で 3 万回の摩耗をおこなった。摩耗試験後、上部構造と下部基材の摩耗面をデジタルマイクロスコップで観察した。また、下部基材の摩耗痕の中央部分を垂直に輪郭形状測定器で測定した。さらに、上部構造および下部基材の摩耗面を 3D レーザー顕微鏡で観察し、摩耗面積と摩耗体積を算出した。また、いくつかの上部構造および下部基材は電界放出型走査電子顕微鏡（SEM）で観察した。

統計処理は正規性と等分散性を評価した後、ビッカース硬さと表面粗さは一元配置分散分析の後、Tukey の多重比較検定で行った。摩耗面積および摩耗体積は正規性が認められなかったため、ノンパラメトリック検定の Kruskal-Wallis 検定の後、Steel-Dwass の多重比較検定で統計処理を行った。

III. 研究結果

1. 上部構造の機械的性質と表面粗さ

ビッカース硬さは ZR が最も大きく、LS、DP、BE、RC の順であった。また、表面粗さには有意差は認められなかった。

2. 下部基材の摩耗幅と摩耗深さ（輪郭形状測定）

下部基材の摩耗幅は審美性修復材料（ZR、LS、DP、RC）と比較して、牛歯エナメル質（BE）で有意に大きかった。一方で、摩耗深さは ZR と BE が同等で深く、 $DP > LS = RC$ となっていた。

3. 下部基材の摩耗面積と摩耗体積

下部基材の摩耗面積および摩耗体積は、審美性修復材料と比較して BE で大きな値になった ($P < 0.05$)。また、ZR ではその摩耗体積が RC よりも大きな値になった。

4. 上部構造の摩耗面積

上部構造は下部基材と接触する咬頭での摩耗が観察され、 $ZR < RC < LS = DP < BE$ となった。SEM 観察の結果、BE では大きな摩耗によるファセットが観察されたが、ZR では小さかった。

IV. 考察及び結論

歯冠修復材料の特性を理解することは、歯科医療における修復物の長期的な臨床的成功のために非常に重要である。複雑な口腔内の摩耗状況を把握するためには、臨床的な研究が不可欠であるがこれまで統一の見解はない。本研究での *in vitro* 試験では、牛歯より硬い上部構造の試料（ZR）はそれ自体の摩耗挙動が小さく、摩耗において上部構造の硬さが一因となっていることを示している。一方で、材料の供給方法、すなわち、CAD/CAM による均質的な材料とハンドメイドで製作する方法でも異なることが考えられる。

一方で、牛歯エナメル質同士の摩耗挙動は試験した試料の中で最も大きかった。これまでの研究でも摩耗試験によりエナメル質は粗糙になりピッチングを伴う高い摩耗が観察されていると報告されている。またエナメル質の欠けたハイドロキシアパタイト粒子が研磨媒体

として機能するため、摩耗が大きくなる可能性も示唆されている。したがって、今後、同種の材料間での摩耗挙動を検討する必要があると考える。

以上より、下記の結論を得た。

- (1) 審美性修復材料と牛歯エナメル質は、表面粗さは類似しているが異なる硬さを有しているため、対合の牛歯エナメル質に対する摩耗挙動が異なることが明らかになった。
- (2) 審美性修復材料と比較して、牛歯エナメル質同士での摩耗面積および摩耗体積が最も大きかった。
- (3) 牛歯と比較して、ジルコニア、二ケイ酸リチウムガラスセラミック、歯科用陶材の硬さは大きく、摩耗面積や摩耗体積は小さかった。また、対合の下部基材の牛歯エナメル質の摩耗量が少なかった。
- (4) 試験した審美性修復材料で下部基材（牛歯エナメル質）の摩耗量に差はなかったが、ジルコニアの摩耗面積は二ケイ酸リチウムガラスセラミックおよび歯科用陶材のそれよりも有意に小さかった。－
- (5) コンポジットレジンでは、それ自身の摩耗挙動は中程度で、下部基材（牛歯エナメル質）の摩耗量は最も少なかった。

以上の結果から、歯科医師は歯冠形態を再構築するための修復材料の選択において異なる摩耗挙動を考慮することが必要であることが明らかになった。

論文審査担当者

主査 近藤 尚知 教授（補綴・インプラント学講座 補綴・インプラント学分野）
副査 岸 光男 教授（口腔医学講座 予防歯科学分野）
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

口腔内に齲蝕や欠損などの生物学的問題が存在する場合、クラウンやブリッジ等による歯冠修復によってその形態や口腔機能が再建される。近年、審美性、生体適合性、機械的特性に優れたセラミックやその複合材料などが歯科用直接修復物および間接修復物に使用されるようになってきている。歯科用コンピュータ支援設計・製造（CAD/CAM）技術の導入と進歩、歯冠色修復材料の開発、接着システムの改善により、ジルコニアや二ケイ酸リチウム系ガラスセラミックス、コンポジットレジン（RC）の臨床応用が可能になった。一方で、口腔内で使用する材料は強度の他に、経年的な材料の劣化（疲労）や摩耗についても考慮する必要がある。本研究では、製作方法の異なる審美修復材料と牛歯エナメル質との摩耗挙動を *in vitro* での二体摩耗試験により評価することを目的とした。

審美修復に用いられている 3mol% イットリア含有ジルコニア（ZR）および二ケイ酸リチウム系ガラスセラミック（LS）を、CAD/CAM によって下顎第一大臼歯の形状に製作した。一方で、従来の製作法として、歯科用陶材（ポーセレン：DP）を用いた築盛焼成法と間接法用コンポジットレジン（RC）を用いた築盛重合法で下顎第一大臼歯の形状に製作した。参考試料として牛歯歯冠に下顎第一大臼歯の咬頭を模した突起を形成した試料を準備した（BE）。これらの試料を上部試料として、下部試料には平坦に研磨した牛歯エナメル質を用いて二体摩耗試験を行った。また、同試料の表面粗さと硬さ（板状試料）を計測した。

上部試料の審美性に優れる歯冠修復材と牛歯エナメル質は、硬さは異なるが同等の表面粗さを有していた。摩耗試験の結果、BE はその他の試験した材料と比較して、上部試料としても下部試料としても摩耗面積および摩耗体積が最も大きかった。ZR は他の試料と比較して硬さが大きいことから、上部試料での摩耗は少なく、下部試料を摩耗させていた。LS および DP はガラス部と結晶部の均一性、結晶粒の大きさ、形状が異なるため、上部試料及び下部試料の摩耗挙動が異なっていた。試験した審美性に優れる歯冠修復材に対する牛歯エナメル質の摩耗体積は、ZR が RC と比較して有意に大きかった。

以上の結果より、歯冠修復に用いる材料の機械的性質、微細構造の差異によって、対合

の摩耗挙動も異なることが示唆された。したがって、本研究の成果は、歯科医師が修復材料の選択と補綴装置設計の一助となる可能性があり、歯科医療に対する貢献度の高いものと考え、学位論文に値すると評価した。

試験・試問結果の要旨

主査・副査から、多くの質問があり、下記のような質疑応答が行われた。

近藤主査

- 1) Table 2&3 の有意差の表記方法が分かりにくいので、グラフにしたほうが、よかったのではないかと。すでに論文としては受理されているので、今回は問題ないが、次回の論文執筆の際には、検討すべき点である。

回答：検討させていただきます。

- 2) 摩耗試験機の精度について説明して下さい。精度というのは、繰り返し作業を行った際にどれくらいの誤差、言い換えればブレが生じるかという意味です。

回答：本機は歯ブラシ摩耗試験機を応用したもので、下部構造（平らな牛歯エナメル質）に上部構造から垂直に 4.9N (500gf) の荷重を負荷し、ストローク幅 5mm で往復運動を行っています。誤差については、メーカーが公開していますが、大きなものではありません。

- 3) Abrader は上部構造、substrate とは下部構造ですか。

回答：その通りです。本研究では、Abrader として審美性に優れる 4 種類の材料（ジルコニア、二ケイ酸リチウム系ガラスセラミックス、歯科用陶材、硬質レジン）と牛歯エナメル質に咬頭様の構造を形成した試料を用いています。Substrate はすべて平坦な牛歯エナメル質です。

- 4) 考察のところで述べている、咬耗の程度と表面の滑沢性（滑らかさ、粗さ）との関係は、伴先生らが報告している摩擦係数の関係と一致していますか。

回答：摩耗試験前の Abrader の表面粗さはどの試料も有意な差がありませんでした。摩耗試験を行っている間に Abrader が歯科用陶材の場合は粗糙になっていきました。本研究でも陶材や二ケイ酸リチウム系ガラスセラミックスでは摩耗試験後は摩耗しているため伴らの結果と一致しています。しかし、ジルコニアはジルコニア自体が摩耗しないので対合エナメル質を摩耗した点は、伴先生らの摩擦係数からの摩耗の推測とは異なっていました。この点については、ジルコニア自体の硬さと微細構造、対合のエナメル質の形状

(平板) が影響していると考えています。

- 5) Table4 と Fig. 2 の見方を説明して下さい。

回答：Fig. 2 の輪郭形状から摩耗痕に対してその幅と深さを示しているものです。例えば、BE では摩耗痕の幅も大きく、摩耗深さも大きいことが分かります。一方で、ジルコニアの摩耗深さは深くなっている、歯科用陶材では幅も深さも中程度であることが分かります。

- 6) Fig. 3 での摩耗面積と摩耗体積は、Table 4 と Fig. 2 の輪郭形状の結果とは矛盾があるのではないかと？

回答：3D レーザー顕微鏡で下部試料（平らな牛歯エナメル質）を計測したデータから算出したものになります。摩耗体積に関しては、摩耗痕の幅と深さが影響しますので、より実質の摩耗量の算出には効果的であると考えます。したがって、摩耗面積では有意差が認められなかったジルコニアと硬質レジンとの間に、摩耗体積では有意差が認められる結果になっていると考えます。

- 7) Fig. 5 の SEM 像では LS は均一に滑らかになっているのか？

回答：ご指摘のように LS（二ケイ酸リチウム系ガラスセラミックス）では、試料自体は摩耗しているのですが、その摩耗面は DP（歯科用陶材）と比較すると均一で滑らかでした。

- 8) 最終的に、本研究結果から臨床ではどれが一番よいと考えますか？

回答：牛歯エナメル質に対する摩耗挙動と日本歯科理工学会に掲載予定の同種間での摩耗挙動から考えますと、症例によって異なると思いますが、臼歯部では咬合力に耐えうる強度が重要な要件となると思いますので、ジルコニアを上下に装着すると摩耗も少ないのでよいと考えます。一方で、前歯部での強度は臼歯部より小さくてもよいと思いますので、均一に摩耗する二ケイ酸リチウム系ガラスセラミックスや硬質レジンの方が良いのではないかと考えます。

岸副査

- 9) 本研究では牛歯エナメル質どうしが一番削れてましたが、牛歯以外の試料は臼歯の形態を高精度で同じにしているのに対し、牛歯試料は手作業で臼歯形態を彫刻して作成しています。その差が摩耗試験及ぼした影響はどのように考えるか。

回答：試料の作製方法は上部試料の牛歯エナメル質は、他の試料とは異なり牛歯歯冠にハンドメイドで咬頭様の突起を製作しました。したがって、他の試料が比較的均一であるのに対して、一部で不均一なところはある可能性があると思います。ただし、製作した

牛歯エナメル質の咬頭様構造はすべてデジタル顕微鏡で観察して、その範囲では特段の粗さや形状の違いがないことを確認して試験を行っています。

- 10) 試験方法で、上部試料と下部試料との接触はいずれも同じようにしておこなったのか。

回答：牛歯エナメル質以外のいずれの試料の場合も、遠心頬側咬頭が下部試料（平らな牛歯エナメル質）に接触していることを咬合紙で確認した後、摩耗試験を行いました。上部試料が牛歯エナメル質の場合には製作した咬頭様突起が接触していることを確認してから試験を行いました。

- 11) 口腔内を想定したモデルだと思うが、唾液を想定したモデルとして水以外に粘稠性の液体の使用などは検討したか？

回答：他の溶液については検討していません。臨床を想定すると咬合するための食べ物を入れた三体摩耗試験の検討も考えましたが、文献から材料間での直接摩耗試験を行う二体摩耗試験の方が材料間の比較には適していると考えて本研究を行いました。

- 12) 上部試料の二ケイ酸リチウム系ガラスセラミックスの摩耗に対して下部試料（エナメル質）の摩耗が小さかった理由はどのように考えるか。

回答：二ケイ酸リチウム系ガラスセラミックスの上部試料は、対合の下部試料（牛歯エナメル質）を摩耗していると考えます。ただし、上部試料の方が均一に摩耗しているため、対合の下部試料は均一に摩耗していました。また、上部試料の結晶粒が小さいことも下部試料の摩耗が小さかった要因であると考えます。

- 13) 上部試料の摩耗体積は算出しなかったのか。

回答：上部試料の摩耗体積は算出していません。体積算出を試みたいのですが、重ね合わせが上手くいきませんでした。今後の検討にしたいと思います。

武本副査からの追加コメント

- ・ 本試験方法は下部試料に平らであり、荷重も 4.9N (500gf) であることから、臨床とはかけ離れている。しかし、補綴治療で上下顎の咬合を考えた材料選択は必要なことであるため、本研究はその一助になると考える。
- ・ 上部試料での摩耗体積の算出については、レーザー顕微鏡でレーザー光の反射と吸収、散乱が発生して一部で重ね合わせができないことも影響しています。

近藤主査からの追加の質問

本研究ではこの試験方法で何度繰り返しを行いましたか。基礎研究においては、N=4～6 程度で複数回、できれば3回以上、実験を行い、その結果が一致していることを示すこ

とによって、信頼できる結果が得られたと言えるのではないのでしょうか。

回答：各群 N 数は 6 で、1 回です。材料学の分野では標準的な数で行っています。

近藤主査、岸副査からプレゼンテーションのスライドの説明、用語およびいくつかの文章について、適切な文言、言い回しに修正するよう、指摘があった。また、研究科委員会に提出予定の論文の要旨についても修正すべき点についての指摘があった。