

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K11702

研究課題名(和文)非う蝕性歯質欠損のin vitroによる発生機序解明に関する研究

研究課題名(英文)Experimental study on non-carious cervical lesion

研究代表者

古本 達明(Furumoto, Tatsuaki)

金沢大学・設計製造技術研究所・教授

研究者番号：60432134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：非う蝕性歯質欠損の発生機序を解明するため、荷重負荷、摩耗、酸蝕を個々で作用させたときの歯質の変化、各因子を複合的に作用させたときの歯質の変化について実験的、数値力学的に検討した。その結果、摩耗や酸蝕が関与した歯質でも、荷重負荷で歯質の後退を再現することはできなかった。歯質の後退に最も影響を与える因子は摩耗であり、酸蝕もまた摩耗に影響を及ぼすことから、これらの複合的な作用が歯質の後退に寄与することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、非う蝕性歯質欠損の発生機序を解明することを目的とした。個々の成因に対して実験的かつ解析的にアプローチし、各要因が複合的に作用する環境下で検討した。その結果、非う蝕性歯質欠損の主要な因子は摩耗と酸蝕であることを示唆した。得られた結果は、患者に対する効果的な指導や予防法を提供する一助となり、今後ますますの増加が予測される歯頸部および歯根面部の治療に対して、最善な手技を提供することで新たな治療法の確立につながる。

研究成果の概要(英文)：A non-carious cervical lesion (NCCL) is characterized as the atrophy of tooth substance without any bacterial effect. In this study, the influences of abfraction, abrasion and erosion on the atrophy of tooth substance were experimentally investigated. In addition, the combined effect in each factor was also evaluated. The specimen used was extracted human teeth. The loading with indenter and abrasion with toothbrushing were continuously performed, and the surface profile and chemical composition was analyzed. As results, the principal factor affecting the occurrence of NCCL was abrasion and erosion. The abfraction could not appear experimentally.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：非う蝕性歯質欠損 アブフラクション 応力 摩耗 酸蝕 複合的作用

1. 研究開始当初の背景

う蝕以外の原因で生じる欠損(Non-carious Cervical Lesion, 以後 NCL)は, Grippo によって 4 つの成因が提唱された¹⁾。すなわち, 歯ブラシと歯磨材の不正使用で生じる摩耗, 咀嚼時に対合歯との過剰な接触で生じる咬耗, 胃液の逆流に起因した内因性および食品に含まれる酸に起因した外因性の酸蝕, 咬合時の生体力学的荷重に起因した, たわみや疲労によって生じるアブフラクション, の 4 つである。歯頸部や歯根面部に形成される NCL は, 物理・化学的要因, 生物学的要因, 行動要因などが複雑に関連した多因子性の疾患であると捉えられている。

これまで, NCL の発生機序について様々な検討が行われている。Lee らは²⁾, 咬合時に歯頸部へ作用する応力集中によって歯質を構成する粒子が破壊され, 化学的・機械的な侵襲を受けるアブフラクションが主因であると報告している。Dzakovich らは³⁾, 歯ブラシと歯磨材の併用による歯質の摩耗, Cheng らは⁴⁾, ソフトドリンクなどの摂取による外因性要因で生じる歯質の酸蝕が NCL 発生の主因であるとそれぞれ報告している。また, 歯冠部の評価から NCL の発生は咬耗に大きく関与しているとの報告もある⁵⁾。一方, NCL が生じる各要因に対して否定的に報告する文献も多く存在する。このように, NCL の発生機序は未だに明らかにされていないことが多く, 多因子性の疾患であることもあり, 各成因について詳細に検討するとともに, それぞれの要因を複合的に考慮した発生機序の解明が必要である。

2. 研究の目的

本研究では, 申請者がこれまでに得た各分野における知見を融合し, 歯頸部や歯根面部に形成される多因子性の疾患である NCL について, 摩耗, 咬耗, 酸蝕, アブフラクションそれぞれの成因を静的・動的観点から検討していく。まず, 静的・動的荷重を负荷させたときの非定常解析や形態学的変化から, NCL と各因子との関連を明らかにする。そして, 各因子が複合的に作用する環境下で NCL の発生機序を実験的・解析的に検討し, 複合環境下で, いずれの因子が NCL の発生に主体的に寄与しているかを特定する。得られた結果から, NCL の発生機序を解明し, 効果的な指導・予防法を提供するとともに, 安全で確実な治療法の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究は, 歯頸部や歯根面部に形成される NCL の発生機序を解明することを目的とした。NCL は, 摩耗, 酸蝕, アブフラクションが主な要因であり, これらが密接に関連した多因子性の疾患である。そこで, 咬耗時に歯質の各位置で生じる応力をセンシングし, 咬耗状態と生じる応力との関連を調べた。また, 数値解析で歯質内部に生じる応力分布を求めた。さらに, 動的応力を繰り返し負荷したときの, 歯頸部および歯根面部の形態学的変化を詳細に検討した。

次に, 摩耗や酸蝕と NCL との関連を明らかにするため, 摩耗や酸蝕を有した抜去歯で同様の応力負荷実験を行い, 各因子の影響度合いと NCL の発生との関連を詳細に検討した。得られた結果から, NCL の成因である摩耗, 咬耗, 酸蝕, アブフラクションのどの因子が歯質欠損に対して主体的に寄与しているかを検討し, 多因子性の疾患である NCL の発生機序を考察した。

4. 研究成果

4.1 有限要素法を用いた歯頸部応力解析

解析モデルは, 抜去歯を CT 撮影して STL ファイルで出力させ, 3次元 CAD ソフト「Solidworks」で IGES 形式の中間フォーマットへ変換した後, 数値解析ソフト「ANSYS 16.0」へ取り込んだ。解析条件を表 1 に示す。解析では, 側歯方向を x 軸, 唇-舌方向を y 軸, 根本-先端方向を z 軸とし, 前歯頭頂部中央を原点と定義した。前歯頭頂部に負荷する荷重は, これまでに得られている咬合力の平均値である 40-70 N, 最大咬合力の平均値である 520 N を考慮して 300 N とした。そして, 歯頸部(z=-12 mm)以下の変位を固定し, 舌-唇方向(z-x 平面)と側歯方向(z-y 平面)に-90°~90°の範囲で 30 度毎に荷重を変化させ, 各荷重負荷時の内部応力を評価した。また, 歯肉退縮が歯頸部で生じる応力に及ぼす影響を調べるため, 歯頸部の変位固定位置を変化(z=-12~-14 mm)させたときの応力変化を調べた。

図 1 は, 頭頂部中央に対して荷重方向を-90 度から 90 度の範囲で変化しながら 300 N の荷重を負荷し, そのとき歯頸部各位置の z 軸方向に生じる内部応力の変化を示している。横軸は歯頸部の各位置を表しており, x=2.6 mm, および x=3.7 mm の位置が歯頸部表面である。図から, 荷重方向を変えることで歯頸部に生じる応力が変化する様子が見える。頭頂部に対して垂直方向に荷重を負荷したとき(荷重方向:0 度), 表面および内部を含めて歯頸部にはほとんど応力が発生していない。一方, 頭頂部に負荷させる角度を大きくすると次第に歯頸部に生じる応力が増加し, 負荷角度が 90 度では歯頸部表面に引張・圧縮ともに 77 MPa の応力が生じていた。エナメル質の曲げ強度が 80-90 MPa であることから, 負荷荷重の方向によってはエナメル質を破壊しうる応力が生じていることが明

表 1 解析条件

Software	ANSYS 16.0	
Tooth material	Enamel	
Young's modulus [GPa]	<i>E</i>	41.4
Poisson ratio	<i>ν</i>	27
Load [N]	<i>F</i>	300
Load position	Top center (x=0, y=0, z=0)	
Tooth type	Front tooth	
Load direction	z-x plane $-90 \leq F \leq 90$	
	z-y plane $-90 \leq F \leq 90$	
Restraint range [mm]	$z \leq -12$	
Analysis range	X-axis (y=0, z=-12)	
	Y-axis (x=0, z=-12)	

らかとなった。

図2は、荷重負荷方向が90度するとき、歯頸部で生じる歯肉退縮を模擬し、変位固定位置を変えたときの応力変化を示している。図中に示す0mmの結果がz=-12mmの位置であり、それぞれ1mm(z=-13mm), 2mm(z=-14mm)に対応している。図から、歯肉が退縮するにつれて歯頸部表面で生じる応力が増加している様子がわかる。歯肉が2mm退縮すると、歯頸部表面で生じる応力は105MPaとなり36%の増加となった。歯肉退縮によって荷重位置と拘束位置の距離が大きくなり、歯頸部で生じる曲げモーメントが増大したためと考えられる。歯肉退縮によって、エナメル質の曲げ強度を大きく上回る応力が集中することから、歯肉退縮は歯頸部で生じる応力へ及ぼす影響が大きいといえる。

4.2 咬合力の連続負荷実験

図3は、本研究で製作した咬合力試験装置である。十分な剛性を得るため、本装置は、BT40番のスピンドルを有するマシニングセンタへ取り付けて使用する。DCブラシレスモータからの回転出力は、カム機構を用いて直線運動へ変換し、歯質を模した押し付け部を連続的に上下運動させることができる。カムの表面は7山の正弦曲線形状であり、押し付け部の往復運動ストロークは2mmである。外周面は、カムフォロワとの摩擦を軽減するため焼き入れ処理が施されている。また、歯質と接触させる圧子は歯質形状を模して製作した。圧子はキャップ状となっており、咬合力試験装置の先端にイモネジで固定でき、形状に応じて変更可能である。圧子のビッカース硬度はHV400でエナメル質のビッカース硬度HV408と近く、圧子の形状および硬度は実際の咬合状態に近い。さらに、300Nの咬合力を得るために必要なトルクは180mN・mであり、このトルクが得られるモータやギアヘッドを選定した。咀嚼時に負荷される静的荷重と運動時に加わる動的荷重が再現でき、モータの回転数を変更することで、ギア比とカムの山数から負荷荷重の周波数が設定できる。装置下部に設置したリニアブッシュは水平方向への振れを抑え、鉛直方向運動を補助する。

実験概要を図4に示す。荷重負荷位置は、咬合力試験装置を取り付けたマシニングセンタの機械座標を用いて1μm単位で制御した。実験は、生理食塩水で保存されたヒトの抜去歯を用い、歯肉とヤング率が近い樹脂を介して治具へ固定した。抜去歯に負荷された荷重は、固定治具下部に取り付けた動力計で測定し、チャージアンプを介してオシロスコープで出力した。動力計はバイスによって固定し、固定した歯先先端に対してx,y,z各方向に荷重を負荷することで校正した。

図5は、荷重周波数が1.0Hz、押し付け変位が0.01mmのとき、動力計から得られたz方向の荷重変化を示している。z方向の出力は、図5(a)に示すように50~100Nの範囲で周期的に変化した。出力された荷重はカム山数と一致し、カムの回転時に生じる振り回りにより周期的な変化が生じた。また、図5(b)に示すように、各出力波形は荷重負荷後緩やかに増加し、ピークを越えると急激に減少した。本装置は、カムによって押し下げられた圧子をバネによって回復させる機構であり、これに対応した出力が得られた。

図6は、周波数を1~4Hzで変化させたとき、圧子の押し込み量とz方向に生じる荷重との関係を示している。いずれの条件でも、押し込み量が深くなるにつれて出力される荷重は大きくなった。圧子と歯質の干渉が増えることで、歯質内部に生じる応力が増加したためである。一方、

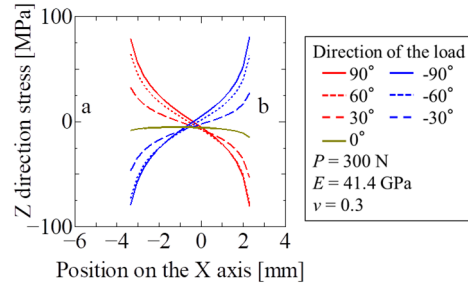


図1 荷重負荷方向による歯頸部応力の変化

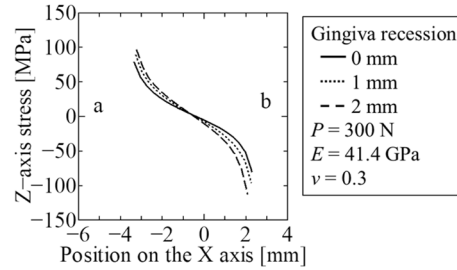


図2 歯肉退縮による応力変化

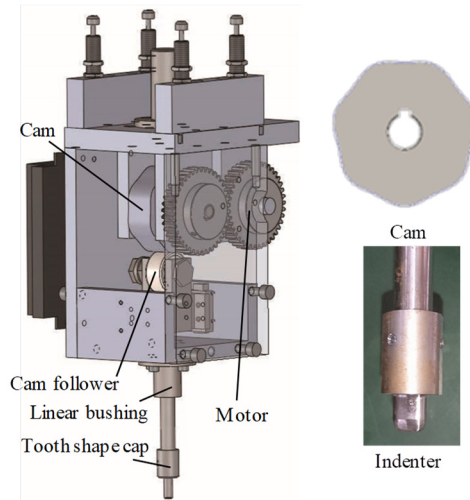


図3 咬合力負荷装置

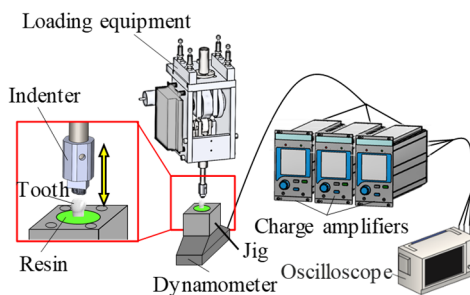


図4 実験方法概要

出力される荷重は周波数が大きくなるにつれて増加した。周波数が増加することで鉛直方向に生じる加速度が大きくなったためであり、周波数を変化させることで動的荷重も再現できた。これらの結果から、本装置の周波数や押し込み量を変えることで、7-390 N の荷重が負荷でき、咬合力の再現が十分に可能であった。

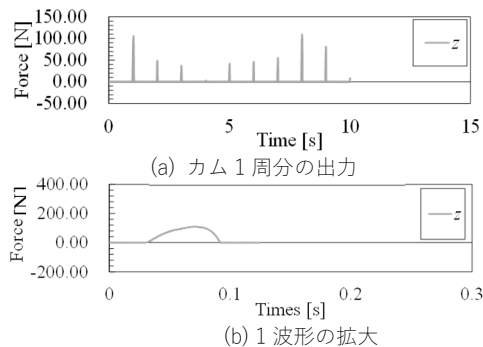


図5 動力計からの出力波形

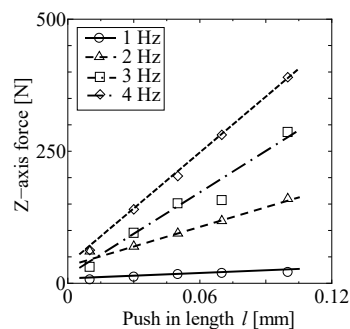


図6 押し込み深さと負荷荷重

図7は、数値解析で歯頸部に生じた応力が最大であった90度の方向に対して、荷重が30~50 N および周波数が8 Hz の条件で合計489,600回負荷し、荷重負荷前後の歯質表面形状を3次元粗さ計で測定した結果を比較している。図に示すように、連続的な荷重負荷では表面形状に違いが見られず、アブフラクションを実験的に再現することはできなかった。

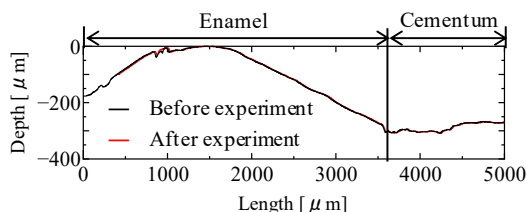


図7 荷重負荷前後の表面形状比較

4.3 歯質の連続摩耗実験

歯頸部の連続摩耗実験装置を図8に示す。図3で示した咬合力負荷装置の先端をブラシに変え、直流モータから得られる回転出力をカムによって水平方向の往復運動へ変換し、歯頸部に対してブラシを往復運動させることでブラッシング状態が再現できる。実験では、加速的に歯質の摩耗を得るためワイヤブラシを採用し、洗浄用の粒子(CaCO₃)を含む歯磨剤をブラシ表面に塗付した。生理食塩水で保存されたヒトの抜去歯は汎用アクリル系レジンを介して固定し、抜去歯とブラシの接触力は動力計で測定した。初期条件を統一するため、実験前にy方向へ生じる力は1 Nで一定とした。実験前後の歯質表面は、3次元粗さ計を用いて計測した。

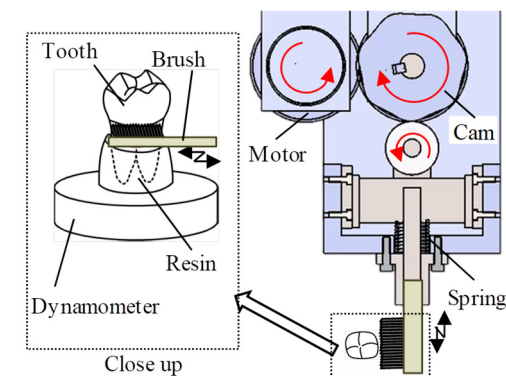


図8 摩耗実験試験

図9は、周波数が4.8 Hz の条件で397,000回ブラシを往復運動させ、ブラッシング前後の歯質表面プロファイルと比較した結果である。図に示すように、ブラシと歯質が接触しながら往復運動することで、歯根部で歯質が後退した箇所が存在していたが、エナメル質での歯質後退は認められなかった。歯根部での最大後退深さは40 μmであった。これらの結果より、歯磨材を介してブラッシングすることで歯質が後退する現象が実験的に再現可能であることが明らかとなった。

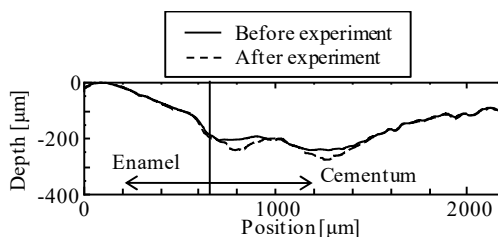


図9 摩耗実験前後の表面形状比較

4.4 歯質の酸蝕実験

乳酸を水道水で希釈した水溶液を用い、水質計で水溶液のpH値を測定しながら歯質を浸漬させ、pH値や浸漬時間が歯質の表面性状に及ぼす影響を調べた。酸蝕の有無による比較のため、歯質表面の一部は樹脂で覆って保護した。pH値が2.0で一定のとき、浸漬時間と歯質除去深さとの関係を調べた結果を図10に、浸漬時間が5 hで一定のとき、pH値による除去深さの変化を調べた結果を図11に示す。歯質の除去深さは、浸漬時間が長くなるにつれて直線的に大きくなり、浸漬時間が7 h のとき平均除去深さは160 μmとなった。ま

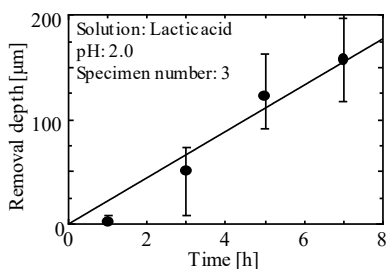


図10 浸漬時間による変化

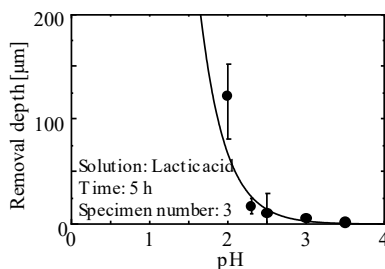


図11 pH値による変化

た、pH 値と歯質除去深さは指数関数的に変化した。浸漬部位を EDX 分析したところ、C や F などの成分が失われ、歯質表面が白色に変化していた。さらに歯質が溶出したことに伴い、表面に微小な穴が創出されていた。

4.5 各成因の複合負荷実験

摩耗実験によって表面が後退した抜去歯を用いて、70~100 N の条件で 144,000 回荷重を負荷した後の歯質表面プロファイルを実験前と比較した結果を図 12 に示す。図中に示す A および B は、摩耗実験によって顕著に歯質が後退した位置である。図に示すように、A および B で僅かに歯質が後退することは確認できるが、その変化量は約 10 μm 程度であり、アブフラクション発生時に生じると予測されているき裂も確認できなかった。

図 13 は、摩耗実験から荷重負荷実験までの A および B の位置での歯質除去深さの変化を示している。実験開始から 28 h までが摩耗実験、28 h 以降が荷重負荷実験である。図から、摩耗実験の開始直後に大きく歯質が後退し、その後は摩耗実験を繰り返しても歯質の後退量に大きな変化が見られないことがわかる。これは、摩耗によって歯質が後退することで、ブラシ先端と歯質表面の距離が長くなったためと考えられる。これらの結果より、歯質の後退に影響を及ぼす因子はブラッシングによる摩耗であり、歯質の後退は荷重負荷によって殆ど生じないことが明らかとなった。

pH 値が 2.5 の条件で 5 h 抜去歯を浸漬させた後、周波数が 10 Hz で 1,368,000 回ブラッシングした後の歯質表面プロファイルを実験前のプロファイルと比較した結果を図 14 に、酸蝕の有無による摩耗時の歯質後退深さを比較した結果を図 15 に示す。いずれも、接触荷重が 1 N のときの結果である。歯質の酸蝕によって、ブラッシングに起因した歯質の後退量が大きくなる様子がわかる。酸蝕していない部位では、歯質の後退深さが 20 μm に達した後は、図 13 と同様に歯質の後退量に大きな違いが見られなかったが、酸蝕した部位では摩耗時間が長くなるにつれて後退量も増大し、最大で 220 μm の深さまで後退していた。酸蝕によって、歯質内部の脱灰が進行して脆くなったためと考えられる。

図 16 は、酸蝕と摩耗によって歯質表面が後退した抜去歯を用いて荷重負荷実験を行い、荷重負荷前後の表面形状を比較した結果である。摩耗実験により歯質は後退したが、その後の荷重負荷ではそれ以上の後退は認められなかった。

以上の結果から、咬合によって歯頸部に対して応力集中が生じる場合があることがわかったが、繰り返し負荷される応力集中のみでは歯頸部の変化が認められなかった。一方、荷重負荷と摩耗を複合的に作用させると歯質表面が僅かに後退したが、アブフラクション発生時に生じると考えられているき裂は認められなかった。したがって、NCL の主因のうち、歯質の後退に最も影響を与える因子は摩耗であり、酸蝕もまた摩耗に影響を及ぼすことから、これらの複合的な作用が歯質の後退に寄与することが示唆された。

<参考文献>

- 1) Grippo, J.O.: Abfractions: A New Classification of Hard Tissue Lesions of Teeth, International Journal of Esthetic Dentistry, 3, 1, pp.14-18 (1991).
- 2) Lee, W.C, Eakle, W.S.: Possible Role of Tensile Stress in the Etiology of Cervical Erosive Lesions of Teeth, The Journal of Prosthetic Dentistry, 52, 3, pp.374-380 (1984).
- 3) Dzakovich, J.J., Oslak R.R.: In Vitro Reproduction of Noncarious Cervical Lesions, The Journal of Prosthetic Dentistry, 100, 1, pp.1-10 (2008).
- 4) Cheng, R., Yang, H., Shao, M., Hu, T., Zhou, X.: Dental Erosion and Severe Tooth Decay Related to Soft Drinks: A Case Report and Literature Review, Journal of Zhejiang University, Science B, 10, 5, pp. 395-399 (2009).

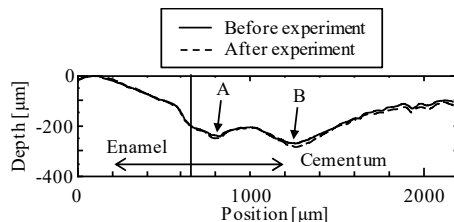


図 12 摩耗と荷重負荷の複合実験結果

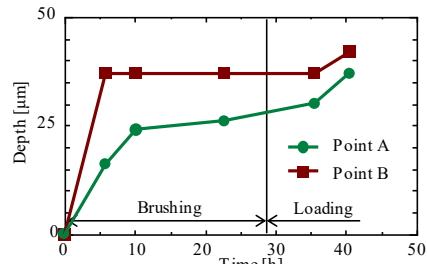


図 13 歯質後退量の変化

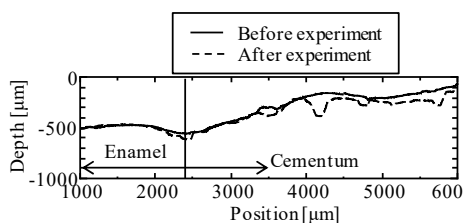


図 14 摩耗と酸蝕の複合実験結果

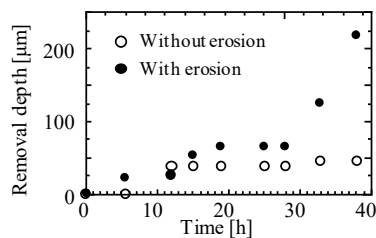


図 15 酸蝕による摩耗実験時の退縮

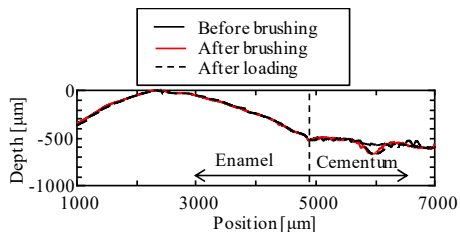


図 16 荷重、酸蝕、摩耗の複合実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大浦宙樹, 古本達明, 松波宏幸, 橋本洋平, 小谷野智広, 細川晃
2. 発表標題 歯科生体材料の各種特性に関する研究, 非う蝕性歯質欠損の実験的検討
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会 第25回「学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松波宏幸, 古本達明, 高杉敬吾, 橋本洋平, 小谷野智広, 細川晃
2. 発表標題 歯科生体材料の各種特性に関する研究, 非う蝕性歯質欠損の実験的検討
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Ohura, T. Furumoto, Y. Hashimoto, A. Hosokawa, T. Koyano
2. 発表標題 Study on material property of dental hard tissue: Evaluation of non-carious lesion
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2019) (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	橋本 洋平 (Hashimoto Yohei) (30456686)	金沢大学・機械工学系・助教 (13301)	