

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22592279

研究課題名(和文)破壊靱性値を指標とした乳歯エナメル質のバイオメカニクスの特性 - 永久歯との比較 -

研究課題名(英文)Biomechanical properties of human primary enamel derived the fracture toughness - comparative study of permanent enamel -

研究代表者

坂井 幸子(林幸子)(HAYASHI-SAKAI, SACHIKO)

新潟大学・医歯学系・助教

研究者番号：70397131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：微小圧子圧入試験を用いてヒト永久歯および乳歯エナメル質の破壊靱性とビッカース微小硬さを検索した。ビッカース微小硬さは、試験片の部位や押し込み荷重に依存しないことが明らかになった。乳歯エナメル質ビッカース微小硬さはMiddle部位がUpper部位よりも高かったものの、Middle部位における永久歯と乳歯では有意差は認められなかった。永久歯エナメル質の破壊靱性はMiddle部位が最高値であった。エナメル小柱が不規則に走向し方向を変え小柱間隙に沿ったき裂伝播が阻害されたため破壊靱性が増加し、本研究から乳歯は永久歯の未熟あるいは縮小版ではなく機械的特性において独自の特徴をもつことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present study was to examine the fracture toughness and Vickers microhardness number of permanent and primary human enamel using the indentation microfracture method. Crack resistance and a parameter indirectly related to fracture toughness were measured in 48 enamel specimens from 16 permanent teeth and 12 enamel specimens obtained from six primary teeth. The Vickers microhardness number of the middle portion was greater than the upper portion in primary enamel. The fracture toughness was highest in the middle portion of permanent enamel, because fracture toughness greatly depends upon microstructure. These findings suggest that primary teeth are not miniature permanent teeth but have specific and characteristic mechanical properties.

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：歯学・矯正・小児系歯学

キーワード：歯学 物性実験 バイオメカニクス 破壊力学

### 1. 研究開始当初の背景

生体硬組織の力学的性質を明らかにすることはバイオメカニクス研究の中で基礎的かつ重要である。歯は骨と並び重要な硬組織であるが、本分野における乳歯についての研究はほとんどないのが現状である。しかし、口腔領域の発育をはかるためには、健全な乳歯を維持することは重要であり、近年少子化が進む中で小児期から健康増進への関心が増している。一方で、歯科バイオメカニクス分野における乳歯に関する報告がほとんどないため、基礎的研究が必要とされていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、破壊力学パラメーターである破壊靱性値 ( $K_{IC}$ ) を微小圧子圧入破壊 (Indentation Microfracture, 以下 IM) 法を応用して評価し、乳歯および永久歯エナメル質の力学的応答について検索し比較検討した。さらに、共焦点レーザー顕微鏡による破壊様式の形態学的評価、マイクロ CT による石灰化度の測定、アッシュデンシティーによる水分重量含有率の測定を行った。マルチスケールアナリシスの概念のもと力学的特性、微細組織構造、分析化学、放射線学の観点から相補的に解明し、小児歯科領域の命題ともいえる乳歯における歯科バイオメカニクスの特性を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試料準備および加工

本学医歯学総合病院にて治療上の理由から抜歯に至った乳歯および永久歯のうち、患者と保護者が廃棄処分を希望したものを試料として用いる。歯冠を3分割し、マイクロカッターにて1mm厚にて切出し加工を行う。作製中は *in vivo* を想定し湿潤状態を維持した。耐水研磨紙 (#400~1000) と粒度  $3\mu\text{m}$  ダイヤモンドで研磨後、 $0.04\mu\text{m}$  コロイダルシリカにて琢磨し表面状態を向上させる。

#### (2) 破壊靱性値を指標とした力学的挙動の検索

押込荷重  $P=1.96, 2.94, 4.90$  (N), 負荷時間 30 秒, 除荷後 90 秒経過後の計測条件設定にて計測を行う。試験片ごとに各荷重を 2~5 回測定し、部位ごとの平均値により測定値とする。

#### (3) 共焦点レーザー顕微鏡による破壊様式の評価

共焦点レーザー顕微鏡にて indentation area 全体の組織観察および破壊様式の評価を行う。一般的にクラックは Palmqvist crack (pc), Median crack (mc), Lateral crack (lc) に分類されるが、pc と mc は試料表面のクラックが同一に観察されるため識別不可能となることが予想された。よって本研究では、P 1 の場合は pc、P  $c^{3/2}$  の場合は mc として評価を行う。

#### (4) 破壊靱性値算出式の導出

IM 法では一回の試験で硬さ (Hv) と破壊靱性値 ( $K_{IC}$ ) の両方が算出可能である。しかし、破壊靱性値の算出式は、現在報告されているだけで 30 以上存在する。このうち乳歯と永久歯の両方に適用可能な算出式を導出するため、寸法的制限や組織学的特徴を考慮し、本研究に最も適した算出式を比較検討する。

#### (5) (2)~(3)の反復実験

(2) 力学試験直後に (3) 組織観察を連続して行う必要がある。(4) で得られた算出式を用い、試料ごとに (2)~(3) を連続して繰り返し行う。また、(7) アッシュデンシティー法による不可逆的試験を行う前に (2)~(3) の反復実験を行っておく必要がある。

#### (6) マイクロ CT による石灰化度の測定

マイクロ CT を用いてエナメル質の石灰化度を検索する。非破壊的検査手法として定量的に石灰化度を測定する。

#### (7) アッシュデンシティーによる水分重量含有率の把握

組織内部の水分状態の把握のためアッシュデンシティー法を用いて検索する。力学的挙動は組織内部の水分状態に深く依存すると予想されることから、表出する力学的特性に直接的に作用すると考えられる水分重量含有率を測定する。

#### (8) まとめおよび成果発表

(3)~(7) の検索の結果から、どのような組織学的背景や石灰化度、組織内部の水分重量含有率を持つために表出した力学的特性であるのかを読み取り、研究成果を発表する。

### 4. 研究成果

微小圧子圧入試験を用いてヒト永久歯および乳歯エナメル質の破壊靱性とビッカース微小硬さを検索した。永久歯エナメル質 16 歯から 48 試験片を、乳歯エナメル質 6 歯から 12 試験片を作成し、き裂抵抗と破壊靱性について計測した。

その結果、ビッカース微小硬さは、試験片の部位や押し込み荷重に依存しないことが明らかになった。

また、乳歯エナメル質におけるビッカース微小硬さは Middle 部位が Upper 部位よりも高かったものの、Middle 部位における永久歯と乳歯では有意差は認められなかった。

共焦点レーザー顕微鏡による破壊様式の評価を行ったところ、クラック形態は mc であると仮定し破壊靱性値を測定した。

破壊靱性値の算出式には Lewis らの式が乳歯と永久歯の両方に適用可能と判断し、以降の算出式として用いることにした。

永久歯エナメル質における破壊靱性は Middle 部位が最高値であった。これはエナメル小柱が不規則に走向し方向を変え、小柱間隙に沿ったき裂伝播が阻害されたため破壊靱性が増加したものと示唆された。

また、非破壊的検査手法としてマイクロCTを用いてエナメル質の石灰化度の定量的測定を試みたところ、輝度値からおおよその密度を算出できたものの、キャリブレーション基準の改良を行い、今後さらに詳細を調べる必要があると考えられた。

アッシュデンシティー法による水分重量含有率は、乾燥処理 15 時間、乾式灰化処理 1 時間の条件下にて 80.4%であった。

本研究から、乳歯は永久歯の未熟あるいは縮小版ではなく、機械的特性において独自の特徴をもつことが示唆された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 29 件)

1. Sakamoto M, Kobayashi K: The contact analysis of joint using the axisymmetric mechanical model, The 7th Asian Pacific Conference on Biomechanics: 56-57, 2013. 査読無
2. Kobayashi K, Hosseini A, Sakamoto M, Qi W, Rubash HE, Li G: In vivo kinematics of the extensor mechanism of the knee during deep flexion, Trans ASME J Biomech Eng, 135: in press, 2013. 査読有
3. 坂本信: 応力・ひずみ解析の活動報告と今後の展望, 非破壊検査, 61: 368-373, 2013. 査読無
4. Hayashi-Sakai S, Sakai J, Sakamoto M, Endo H.: Determination of fracture toughness of human permanent and primary enamel using an indentation microfracture method. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 23(9): 2047-2054, 2012. 査読有
5. 馬場篤子, 湊美信子, 林坂井幸子, 平野慶子, 人見さよ子, 小田訓子, 下村黒木淳子, 仲野道代, 朝田芳信, 井上美津子, 齊藤秀子, 森 榮, 吉田昊哲, 高野博子: 日本小児歯科学会に属する女性小児歯科医への本音トークアンケート調査, 小児歯科学雑誌 50(5): 383-392, 2012. 査読有
6. Kobayashi K, Sakamoto M, Hosseini A, Rubash HE, Li G: In-vivo patellar tendon kinematics during weight-bearing deep knee flexion, Journal of Orthopaedic Research, 30: 1596-1603, 2012. 査読有
7. 坂本信, 長田郁美, 吉田秀義, 風間清子, 川上健作, 小林公一: MRIを用いた膝蓋腱長さ変化の生体内解析, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 33: 81-87, 2012. 査読有
8. 坂本信, 応力・ひずみ解析の活動報告と今後の展望, 非破壊検査, 61: 370-375, 2012. 査読無
9. 山岸英太, 佐藤光, 田邊裕治, 菊池達哉, 坂本信, 小林公一, 古賀良生: 透過型近赤外線分光法によるヒト関節軟骨含水率の定量的評価, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 33: 13-17, 2012. 査読有
10. Yamagishi E, Tanabe Y, Kikuchi T, Sakamoto M, Kobayashi K: Validation of near infrared spectroscopy for measurement of water content in human articular cartilage using gelatin model, Journal of JSEM, 11 (Special Issue): 239-243, 2011. 査読有
11. 坂本信, 牧岡諒太, 吉田秀義, 小林公一, 笹川圭右, 田邊裕治: MRIを用いた脛距関節における接触領域のIn Vivo解析, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 32: 215-223, 2011. 査読有
12. 坂本信: 海綿骨のMRIによる構造解析, 非破壊検査, 60: 653-657, 2011. 査読無
13. 解晨, 坂本信, 田邊裕治: 人工股関節摺動面における接触応力解析の個別別手法の開発, 実験力学, 11 (2): 112-117, 2011. 査読有
14. 窪田陽介, 坂本信, 小林公一, 古賀良生, 湊泉, 落合清秀, 清徳則雄: 3次元下肢アラメント評価システムを用いた人工股関節ステム挿入管理法の開発, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 32: 339-345, 2011. 査読有
15. 解晨, 坂本信, 湊泉, 古賀良生, 佐藤卓, 小林公一, 田邊裕治: 人工股関節摺動面における応力分布の解析, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 32: 283-289, 2011. 査読有
16. 豊田貴嗣, 小林公一, 坂本信, 大森豪, 古賀良生, 田邊裕治: イメージマッチングによる膝関節接触状態評価法の実験的検証, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 32: 483-487, 2011. 査読有
17. Hayashi-Sakai S, Maruyama Y, Taguchi Y.: Horizontal impaction of bilateral mandibular second premolars with distal inclination: a case report. Pediatric Dental Journal 2010, 20(2), 196-200, 2010. 査読有
18. Sakamoto M, Notaguchi Y, Tanabe Y, Sasagawa K, Kubota Y, Yoshida H, Kobayashi K: In vivo contact areas of tibiotalar joint measured with magnetic resonance imaging, Journal of JSEM, 10 (Special Issue): 234-239, 2010. 査読有
19. Sakamoto M, Kobayashi K: Estimation of trabecular bone structure using magnetic resonance imaging, Proceedings of the 4th Japan-US Symposium on Emerging NDE Capabilities for a Safer World, 4: 88-93, 2010. 査読有
20. Kubota Y, Sakamoto M, Kobayashi K, Koga Y, Tanabe Y: Accuracy verification of image-matching in a setting method for the stem during Total hip arthroplasty, Journal of JSEM, 10 (Special Issue): 234-239, 2010. 査読有
21. Kai S, Sakamoto M, Kobayashi K, Minato I, Koga Y, Tanabe Y: Numerical analysis pressure on cup surface after THA, Journal of JSEM, 10 (Special Issue): 251-255, 2010.

査読有

22. Sasagawa K, Sakamoto M, Yoshida H, Kobayashi K, Tanabe Y: Three-dimensional in vivo contact analysis of the wrist joint during wract motion, Journal of JSEM, 10 (Special Issue): 261-266, 2010. 査読有
23. 坂本信: ヒト関節接触領域の生体内解析, トライポロジスト: 55 (3): 166-171, 2010. 査読無
24. 坂本信, 小林公一, 吉田秀義, 笹川圭右, 窪田陽介: 距骨および踵骨海綿骨のMRIによるIn Vivo構造解析, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 31: 13-20, 2010. 査読有
25. 笹川圭右, 坂本信, 小林公一, 古賀良生, 佐藤卓, 田邊裕治, 大森豪: MRI 骨・軟骨モデルを用いた 3 次元下肢アライメント評価システムの精度評価, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 31: 341-348, 2010. 査読有
26. 窪田陽介, 坂本信, 小林公一, 古賀良生, 湊泉, 伊藤知之, 清徳則雄: 3次元下肢アライメント評価システムを用いた人工股関節ステム挿入管理法におけるイメージマッチングの精度検証, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 31: 313-320, 2010. 査読有
27. 松本剛, 小田島広記, 菊池達哉, 小林公一, 坂本信, 田邊裕治, 古賀良生: 軟骨における近赤外線透過特性 - ゼラチンモデルによる基礎的検討, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 31: 73-77, 2010. 査読有
28. 小田川健一, 豊田貴嗣, 笹川圭右, 小林公一, 坂本信, 田邊裕治, 谷藤理, 佐藤卓, 古賀良生, 大森豪: イメージレジストレーション法による膝関節の接触動態解析, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 31: 349-355, 2010. 査読有
29. 解晨, 笹川圭右, 古賀良生, 佐藤卓, 谷藤理, 坂本信, 小林公一, 田邊裕治: 脛骨骨形状コンピュータモデルの座標系自動構築法, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 31: 333-340, 2010. 査読有

〔学会発表〕(計 6 件)

1. 春日勇人, 坂井幸子, 坂本信, 小林公一, 遠藤英昭: マイクロ CT を用いた三次元歯軸の評価, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会, 神戸, 2013.11.22-23, 抄録集 142, 2013
2. 春日勇人, 坂井幸子, 近藤達也, 坂本信, 小林公一, 遠藤英昭: マイクロ CT を用いたヒト象牙質のミネラル密度の評価, 日本実験力学会 2013 年度年次講演会, 由利本荘, 2013.8.20-22, 日本実験力学会講演論文集 2013 年度年次講演会 No.13: 317-321, 2013
3. 齋藤珠実, 駿河由利子, 浅川麻美, 青山有子, 加川千鶴世, 林-坂井幸子, 佐野富子, 庄内喜久子, 土岐志麻, 福井亜実, 芳野素子, 下村-黒木淳子: 日本小児歯科学会北日本地方会に所属する女性小児歯科医の

本音トークアンケート結果 女性の私生活と仕事に関する調査, 第 29 回日本小児歯科学会北日本地方会, 札幌, 2011.10.29, 小児歯科学雑誌 50(1): 72, 2012

4. 早崎治明, 松山順子, 佐野富子, 林-坂井幸子, 沼津津子, 大島邦子: Evidence Based Dentistry in Pediatric Dentistry (1) 診療ガイドラインについて, 第 28 回日本小児歯科学会北日本地方会, 郡山, 2010.12.3, 小児歯科学雑誌 49(1): 66, 2011
5. 林-坂井幸子, 田口洋, 飯澤二葉子, 金城奈津子: 下顎両側第二小臼歯の水平埋伏を認めた 1 例, 第 48 回日本小児歯科学会大会, 名古屋, 2010.5.19-20, 小児歯科学雑誌 49(2): 319, 2010
6. 田口洋, 林-坂井幸子, 飯澤二葉子, 村山直子, 小林博昭: 上顎側切歯の形成遅延による隣接歯の萌出障害, 第 48 回日本小児歯科学会大会, 名古屋, 2010.5.19-20, 小児歯科学雑誌 49(2): 249, 2010

〔図書〕(計 1 件)

1. 坂本信: MRI による関節接触領域の測定, よくわかる実験技術・学術用語 第 2 版, 日本実験力学会出版: 13-16, 2012.

2. 〔産業財産権〕  
出願状況 (計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況 (計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
坂井 幸子 (林幸子) (HAYASHI-SAKAI SACHIKO)  
新潟大学・医歯学系・助教  
研究者番号: 70397131
- (2) 研究分担者  
坂本 信 (SAKAMOTO MAKOTO)  
新潟大学・医歯学系・教授

研究者番号：80215657

坂井 淳 (SAKAI JUN)  
新潟工業短期大学・自動車工業科・講師  
研究者番号：70425370

(3)連携研究者

早崎 治明 (HAYASAKI HARUAKI)  
新潟大学・医歯学系・教授  
研究者番号：60238095