

楔状欠損辺縁の微細構造学的検討

神 山 卓 久

要旨：目的：歯頸部における楔状欠損の形成が、摩耗によるものか、あるいは咬合圧の応力により、頸部エナメル小柱が破壊される Abfraction に起因するものかを、微細構造の観点から明らかにした。

材料・方法：歯頸部に楔状欠損のある歯をマイクロX線CTとSEMにより観察を行った。

結果：画像を拡大して観察すると楔状欠損辺縁のエナメル質には摩耗の痕跡がみられ、応力によってエナメル小柱が破壊される Tensile stress の像はみることはできなかった。

楔状欠損の形成に関する Abfraction 説は支持されず、エナメル質の摩耗が原因であると考えられた。しかし、長期間にわたり咬合圧が歯質に影響を及ぼすことにより、他の部位に変化を引き起こす可能性については否定することはできなかった。

Key words：楔状欠損、Abfraction、マイクロX線CT、走査電子顕微鏡

緒 言

高齢になると歯の表面には、う蝕以外の要因による構造障害が多種発生することが知られている。これらの障害は Tooth Wear および、NCCL (Non-Carious Cervical Lesion) として分類され、前者は歯全体の摩耗や損傷を広く指し、後者は主に歯頸部付近の発生した非う蝕性の損傷を指す。Tooth Wear を構成する病態には歯の摩耗、咬耗、酸蝕、そして楔状欠損 (Abfraction) が含まれるとされている^{1,2,3)}。

Abfraction は Grippo⁴⁾により提唱された、歯頸部にみられる新月状、三日月状の欠損を特徴とし、それまで楔状欠損と称されていた歯頸部の欠損について、有限要素法により説明が加えられた。この欠損は摩耗により生じるものなのか、咬合力が Tensile stress (引っ張り応力) として歯頸部のエナメル質に作用し、エナメル小柱が破壊されることによって生じるものなのかは、議論が分かれている。しかし、この応力を実際に観察することは困難であるため、長らく図示によって説明が行われてきた。

こうした微小な歯質の慢性的な変化、特にエナメル小柱の破壊を詳細に観察するためにはマイクロフォーカス X 線 CT (以後マイクロX線CT) や走査電子顕微鏡 (以後 SEM) は有効であり、エナメル小柱単位の破折像や亀裂の中に増殖する細菌の観察も可能である⁵⁾。

近年では NCCL は多因子による複合疾患とされるが⁶⁾、本研究は、歯頸部の摩耗と Abfraction の関係を明らかにするために行った。特に Tensile stress によって生じるとされるエナメル質欠損の辺縁部に焦点を当て、マイクロX線CTとSEMにより構造解析を行い、楔状欠損は摩耗の結果であると考えたので、その概要について報告する。

本稿では、楔状欠損と Abfraction の関係について否定的な立場を採用して論じている。そのため、摩耗による形態には「楔状欠損」という用語を使用し、応力による形態については「Abfraction」として区別して記載する。またマイクロクラックとは肉眼では識別困難な、エナメル小柱の破壊を起因とする 10 μ m 以下の微小亀裂を指す。

なお研究実施に際して日本外傷歯学会倫理審査委員会の承認を得て行った (承認番号 H29-001)

材料ならびに観察方法

神山歯科医院において肉眼で歯頸部に楔状欠損があると認められた歯で、微小構造観察の許可を得られたものを用いた。

観察は除去後に 10% フォルマリン固定を行い、マイクロX線CT (MCT-225、ニコンインステック社、東京) を用い、撮影はビームエネルギー 130kV、ビーム電流 160 μ A、露光時間 708 ms、投影回数 1000-1500 回で画像取得を行った。撮影した画像は CT プロ 3D (ニコンインステック社、東京) で再構成を行い、解析と測定は VGStudio MAX ver 3.2 ならびに myVGL ver3.2 (Volume Graphics 社、ドイツ) にて行った。またマイクロX線CTの撮影中は乾燥による組織変形を防止するために、70% アルコール水溶液に浸漬して測定を行った。

SEM 観察は標本をアルコール脱水系列で脱水を行い、凍

結乾燥、Au 蒸着を行い、SEM (S-4700, 日立ハイテク社, 東京) により観察を行った。

結 果

症例 1 患者：70歳代後半、女性。歯種：上顎左側第二小臼歯。

肉眼では頬側歯頸部に楔状欠損がみられた。歯頸部の楔状欠損の深さは肉眼では象牙質にとどまっており、歯冠側の辺縁は鋭角にみえ、楔状欠損の底はいわゆる皿状で、歯根側の辺縁はなだらかにセメント質へと移行していた (図1-A,B)。

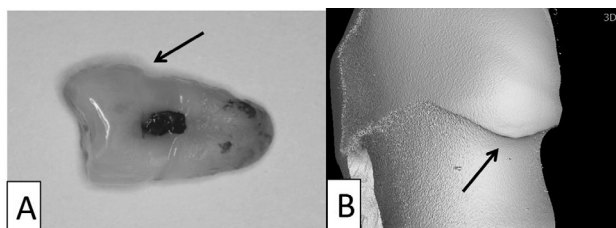


図1：症例1の抜歯歯外観と3D画像

A: 高度な歯周病により動揺があったため、根尖が吸収し根尖まで点状の歯石が付着している。頬側歯頸部に楔状欠損が認められる (矢印)。

B: マイクロX線CTの3D画像でみると歯冠側の楔状欠損の辺縁は、歯頸線に平行な緩い曲線を描いていた (矢印)。

マイクロX線CT所見：マイクロX線CT撮影時のボクセルサイズは $10.2\mu\text{m}$ で撮影を行った。歯冠側の辺縁は中央が下がるような歯頸線に平行な湾曲した曲線を描いていた。拡大して観察すると辺縁は曲線で構成され、鋭角な角度をもった辺縁はみられず、丸みをおびた辺縁であった。断面を観察すると、内側の象牙質の消失が大きく、表面のエナメル質がオーバーハングしている像が観察された (図2-A,B)。

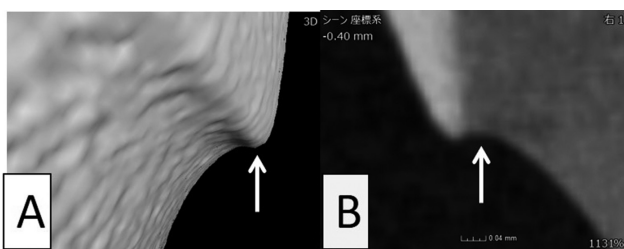


図2：マイクロX線CT像

A: 3D画像で楔状欠損の歯冠よりの辺縁を拡大すると、象牙質が消失しているが、エナメル質はひさしの様に突出している像が観察された (矢印)。

B: 歯列直交断像で拡大すると、断面ではエナメル質が残存し直下の象牙質がラウンド状に消失している像が観察された (矢印)。

SEM 所見：低倍の観察ではマイクロX線CT所見のように滑らかな曲線による辺縁が観察され、肉眼では鋭利にみえる辺縁でも、内側にむかって丸みをおびた辺縁が観察された。鋭角な部分はみられなかった。また、食物や何らかの硬いものによってできた引っ掻き傷のような構造はみられたが、Tensile stress があった場合に楔状欠損の辺縁に発生するとさ

れる歯の長軸に直交するマイクロクラックはみられなかった (図3-A,B)。

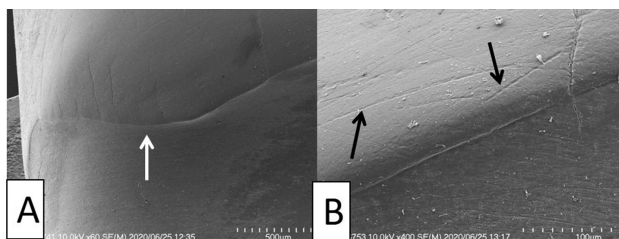


図3：楔状欠損辺縁のSEM像

A: 60倍の観察で鋭角な辺縁は確認できず、丸みを帯びた辺縁であった (矢印)。

B: 400倍で辺縁は丸みをおびた形態を示し、エナメル質には摩耗の跡と考えられる傷が観察された (矢印)。

症例 2 80歳代後半、男性。歯種：上顎左上側切歯。

肉眼で観察すると楔状欠損の範囲は切端よりはエナメル質に、根尖よりはセメント質におよぶ欠損がみられた。

マイクロX線CT所見：マイクロX線CT撮影時のボクセルサイズは $11.1\mu\text{m}$ で撮影をおこなった。マイクロX線CTの3D画像でみると楔状欠損が2段になり中央に山脈のような構造がみられた。また、歯列直交断像で観察すると、楔状欠損の底には山形の隆起のようなものが観察された (図4-A,B)。

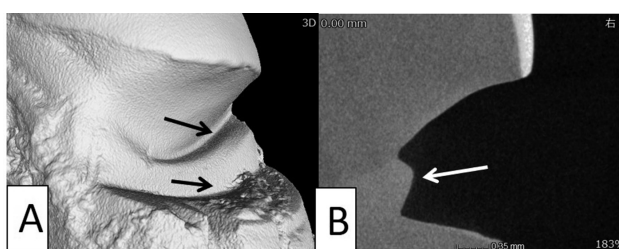


図4：症例2のマイクロX線CT画像

A: 3D画像でみると楔状の内部に2段の楔形がみられた (矢印)。

B: 歯列直交断像でみると、断面に山形の部分が明瞭に観察できた (矢印)。

欠損した部位をSEMで観察すると、低倍率ではマイクロX線CTの3D画像と同じように二段にわかれた楔状欠損の底が観察され、欠損内部には細菌の集合もみられた (図5-A)。強拡大で観察すると辺縁はラウンドの形態をしておりエナメル小柱単位のようなマイクロクラックは存在していなかった (図5-B)。

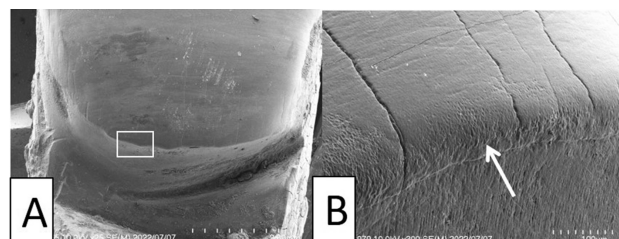


図5：SEM所見

A: マイクロX線CTと同じように2段になった欠損部の像が観察される。

B: 図5-Aの矩形の部分拡大、辺縁部は丸みをおびた摩耗がみられ、エナメル小柱の破壊による亀裂は認められなかった (矢印)。

症例 3 80歳代前半、男性。歯種：下顎右側第二大臼歯
肉眼で観察すると下顎右側第二大臼歯頬側に楔状欠損がみられた。神経変性疾患を発症しており、それまではブラッシングを行っていたが、急激に歯周病が悪化し抜歯にいたった。SEMで観察すると弱拡大像では歯頸線に平行に楔状欠損がみられ、象牙質の消失が高度で内部の欠損が広がっていた（図6-A）。

強拡大で観察すると、エナメル質の断端はなめらかな曲線を描いていた。肉眼では鋭角な断端を形成しているという形態でも、拡大してみると滑らかな形状であり、歯頸線に平行なエナメル質のマイクロクラックは観察できなかった（図6-B）。しかしエナメル質には歯の長軸に平行な、いわゆる縦の亀裂が多数みられた。

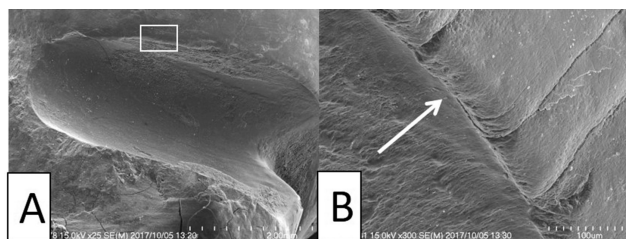


図 6：症例 3 の SEM 像

- A: 第二小臼歯の頬側の楔状欠損、歯冠側のエナメル質の辺縁をみると低倍率でも鈍角を呈していた。
B: 図 6-A の矩形を拡大すると、丸みをおびたエナメル質の断端がみられ（矢印）、内側の象牙質が消失しオーバーハングのような形態をしていた。（文献 7 より引用）

考 察

本邦では高齢化と 8020 運動により多数の歯をもった高齢者が増加している⁸⁾。また、口腔衛生の理解が深まることにより口腔内環境が改善し、う蝕や歯周病が減少しているのに対して、歯を数十年にわたって咬合に使用するため、慢性的な歯の構造障害が増えている。咬耗や摩耗による歯の変化は Tooth wear と称され、1) 咬耗、2) 酸蝕、3) 摩耗、4) 楔状欠損（Abfraction）に分類されることが多い³⁾。特に 4) の楔状欠損（Abfraction）の原因については、歯ブラシと歯磨剤による摩耗説と、実際の荷重点から離れた位置にひずみが生じ、歯質が欠損するアブフラクションという 2 つの説が報告されている。また、現在では NCCL という概念が提唱されているが、この Tooth wear と NCCL の違いは部位の違いによる分類と考えられる。

Abfraction という病名は 1991 年に Grippo⁴⁾ が提唱したが、その元となる概念は、1984 年の Lee ら⁹⁾ が発表した Tensile stress という、咬合面に作用した力が歯頸部に応力として作用し、歯頸部のエナメル小柱が破壊されるという仮説が基となっている。そして Lee らが歯の長軸方向と直交するエナメル小柱の破壊を説明した図は、その後 Abfraction を説明する図として、現在まで多くの報告で引用されている。

本邦では 1996 年に阿南¹⁰⁾、2000 年、2001 年に陳ら^{11,12)}

が咬合圧による歯のゆがみを計測し、楔状欠損の原因として咬合が関与する可能性を報告している。しかし 2000 年代になると楔状欠損と咬合との関係に疑問がもたれ、Michael ら¹³⁾ は 2009 年に楔状欠損は咬合との関係はうすいと報告している。

2002 年に黒江ら¹⁴⁾ は Abfraction に肯定的な立場から報告をおこなったが、その後 2011 年になると否定的な文献も紹介し、1980-90 年代の仮説をそのまま肯定することはできないと述べている¹⁵⁾。その理由として Abfraction 説の根幹部分である、マイクロクラックについて確認できていないことを挙げている。もし楔状欠損に隣接するエナメル質にマイクロクラックがあれば、Abfraction の成因理論である Tensile stress によりエナメル小柱が破壊されたことの証明になる。

この歯頸部にあるマイクロクラックを観察し証明する方法として、走査電子顕微鏡は非常に有用な観察機器であると考えられる。しかし Abfraction や NCCL 観察に走査電子顕微鏡を用いた研究は少なく、医中誌 Web で検索すると、「アブフラクション」とカタカナで検索し、「SEM」との論理積検索を行うと 20 件一致するが、「NCCL」と「SEM」の論理積検索では 2 件しか一致しない¹⁶⁾。同様に PubMed で同じクエリで検索しても 5 件しか該当せず¹⁷⁾、理由は不明だが NCCL の研究では、SEM を使用した評価は、あまり採用されてこなかったようである。

今回、楔状欠損に隣接する部位の歯質を、マイクロ X 線 CT と SEM を用いて観察した結果を報告した。特に今回使用した電界放射型走査電子顕微鏡は、タングステンフィラメントを線源とする SEM より高分解能の観察が行えるため、エナメル小柱単位の破壊はもちろん、エナメル小柱の亀裂間に入った細菌も観察できる¹⁸⁾。また、この機種は 10^{-8} パスカルという超高真空の環境で観察を行うため、歯の硬組織の変形がおきる。これは、歯にはアルコール脱水系列で脱水を行い、臨界点乾燥や凍結乾燥を行っても乾燥しきれない水分が残っているため、超高真空ではその水分の蒸発で形態の変形が発生する。

この副次的効果は歯のマイクロクラックという状態をより顕著に捉えることができる。例として口腔内では歯質に脆弱性がおきていたが、エナメル小柱が分離までしていない状態でも、超高真空の中では脆弱性の部分が亀裂として顕在化してくる。

このような観点から、咬合面のエナメル質にみられるブロック状の破壊像と、その亀裂の間にある細菌を観察し、微小亀裂の観察にはマイクロ X 線 CT と SEM の使用は有用であることを報告してきた⁵⁾。

そして、機会があるごとに楔状欠損の辺縁を観察したが、辺縁には歯の長軸に直交する、Tensile stress の証明となるようなエナメル小柱の破壊像は、今まで観察することはできなかった。

観察した楔状欠損部のエナメル質の辺縁は、滑らかな曲線

を描き、摩耗した結果の丸みを帯びた構造をしていた。象牙質の消失量が多い欠損部では、内側の象牙質がえぐれたように消失しているため、オーバーハング状態のものもあった。また、内部の象牙質の部分にも亀裂は存在せず、象牙細管の横断像が観察できる症例もあった。

症例2の観察では楔状欠損の底部に山形の構造がみられたが、この山形の構造は Tensile stress では説明ができない。歯ブラシの動かし方が2方向あり、摩耗が進行する様式が2つあったことにより、このような構造が形成されたと考えた。

この結果は2008年の Nguyen ら¹⁹⁾の報告と同じであり、肉眼では自然界では形成されないような鋭角の辺縁をもった構造でも、拡大して観察していくと、丸みを帯びた摩耗の跡が明瞭に観察された。

また、象牙質とエナメル質の境界面には剥離したような構造はみられなかった。光干渉断層計(SS-OCT)を用いた研究では^{20,21)}、エナメル-象牙境(DEJ)にそってエナメル質が象牙質と剥離しているとしているが、SEMによる辺縁の表面の観察では、剥離している際に形成される亀裂は観察できなかった。このDEJの剥離は、マイクロX線CTにより観察できる可能性があるが、今回のマイクロX線CTの撮影条件では、ボクセルサイズが10 μ m程度なので、DEJの剥離間隙の検出は困難であったと考えられる。

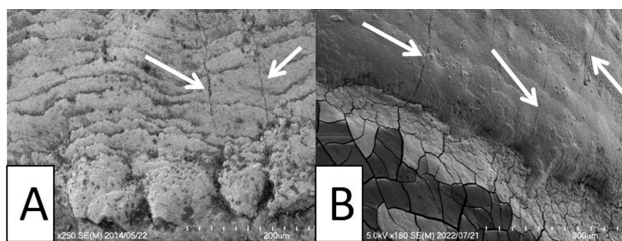


図7：楔状欠損のないCEJのSEM画像

A: 90歳の半埋伏智歯 一度も歯ブラシが当たっていないので周波条が明瞭に観察される。また、エナメル質に歯の長軸に平行な微小亀裂が多数見える(矢印)。(文献11より引用)
B: 20歳の矯正のため便宜抜去した上顎第一小臼歯の歯頸部。縦に走行する微小亀裂が認められる(矢印)。

興味深い点は、多くの歯の歯頸部エナメル質に、歯の長軸と平行な微小亀裂が多数みられたことである。この微小亀裂は幅2-10 μ mであり、中に細菌がみられることから、抜歯前から存在していたと考えられ、乾燥や超高真空下で抜歯後に発生した亀裂とは考えられなかった。この亀裂は一度も咬合に参加していない高齢者の半埋伏歯の歯頸部にもみられ²²⁾(図7-A)、また若年者の矯正治療のために便宜抜去した歯にもみられるため(図7-B)、萌出時からの解剖学的特徴と考えられた。

本研究の観察において、楔状欠損の辺縁に歯の長軸に直交するマイクロクラックがみられなかったことから、楔状欠損の発生原因としての、Abfraction 仮説は否定できると考える。しかしながら咬合圧は歯に対して全く影響を及ぼしていないわけではない。実際、咬合圧が作用する咬合面のエネメ

ル質には、微小亀裂が発生しており、慢性的な歯質の構造障害を引き起こしている。咬合圧が長期間、数十年にもわたり歯に作用し続けることで、他の部位にも何らかの障害を発生させる可能性は否定できない。このような変化は5年や10年といった短期間では観察されないが、数十年間経過後に構造変化として顕在化してくる。特に、歯の側面に沿って長軸に一致する縦方向の亀裂は、時間の経過に伴い破折へと進行していく可能性があり²³⁾、この現象までは否定できなかった。

結 論

マイクロX線CTとSEMを用いて歯の楔状欠損周囲の観察を行った。結果、楔状欠損部のエナメル質において、歯の長軸と直交する Tensile stress を示すマイクロクラックは確認されなかった。楔状欠損の辺縁を拡大すると丸みを帯び、摩耗による特徴的な構造が認められた。これに基づき、楔状欠損は Tensile stress の結果である、すなわち Abfraction によるものであるという仮説は否定できると考えた。

しかし、数十年にわたり咬合圧が持続的に加わることで、歯の長軸に沿った慢性的な構造障害が発生する可能性は否定できず、さらなる検討が必要であると考えた。

本研究において開示すべき利益相反はない。

文 献

- 1) 池見宅司, 硬組織疾患、歯の发育異常および関連疾患, 千田彰, 寺下正道, 寺中敏夫ほか, 保存修復学; 第6版, 医歯薬出版株式会社, 東京, 18-20, 2017.
- 2) 田上順次 奈良陽一郎 山本一世ほか: 保存修復学21; 第五版, 永末書店, 京都, 57-74, 2017.
- 3) 田上順次: トゥースウエアの病態と治療指針. 日本歯科医師会雑誌 71: 29-37, 2018.
- 4) Grippo GO: Abfractions: A new classification of hard tissue lesions of teeth. J Esthet Dent 3: 14-19, 1991.
- 5) 神山卓久: 歯にみられる慢性外傷としての歯の疲労. 日外傷歯誌 19: 29-34, 2023.
- 6) 黒江敏史: NCCL (非う蝕性歯頸部歯質欠損) Update 2019 アブフラクション仮説の盛衰 第1回総論. The Quintessence 38: 34-59, 2019.
- 7) 神山卓久: 走査電子顕微鏡で旅する口腔のミクロな世界; 第1版, 医歯薬出版株式会社, 東京, 106-107, 2020.
- 8) 川戸貴行, 上条英之: 第2回永久歯抜歯原因調査の概要. 8020: はち・まる・にい・まる 19: 125-129, 2019.
- 9) Lee WC, Eakle WS: Possible role of tensile stress in the etiology of cervical erosive lesions of teeth. J Prosthet Dent 53: 374-379, 1984.
- 10) 阿南恵三: くさび状欠損の成因に関する研究 ―くさび状欠損発生にかかわる咬合力の影響―. 九州歯会誌 50: 307-318, 1996.
- 11) 陳 克恭, 三宅清美, 庄野庸雄ほか: くさび状欠損の発生にかかわる咬合の影響 ―歯軸方向に生じる歯頸部のひずみ― 日歯保存誌 43: 870-876, 2000.
- 12) 陳 克恭, 三宅清美, 小川孝雄ほか: くさび状欠損の発生にかかわる咬合の影響 ―歯軸と直交する方向に生ずる歯頸部

- のひずみー. 日歯保存誌 44: 829-835, 2001.
- 13) Michael JA, Townsend GC, Greenwood LF, et al.: Abfraction: separating fact from fiction. *Aust Dent J* 54: 2-8, 2009.
 - 14) 黒江敏史, 伊藤秀美, 大畑 昇ほか: アブフラクションの成因・治療に関する文献的考察 Part 1: 成因論編. *The Quintessence* 21: 155-166, 2002.
 - 15) 黒江敏史: Abfraction Revisited — EBM 時代におけるアブフラクションの再検証 —. *補綴臨床* 44: 366-377, 2011.
 - 16) 医中誌 Web <https://search.jamas.or.jp/search> 令和6年10月14日アクセス
 - 17) PubMed のホームページ <https://pubmed.ncbi.nih.gov/?otool=ijpdmulib> 令和6年10月14日アクセス
 - 18) 田中敬一編: 医学・生物学領域の走査電子顕微鏡技術; 第1版, 講談社, 東京, 254-257, 1992.
 - 19) Nguyen C, Ranjitkar S, Kaidonis JA, et al.: A qualitative assessment of non-carious cervical lesions in extracted human teeth. *Aust Dent J* 53: 46-51, 2008.
 - 20) Wada I, Shimada Y, Ikeda M, et al.: Clinical assessment of non carious cervical lesion using swept-source optical coherence tomography. *J Biophotonics* 8: 846-854, 2015.
 - 21) 田上順次, 島田康史, Sadr Alireza ほか: OCT による研究がもたらした歯の内部構造に関する新知見. *日歯保存誌* 63: 267-271, 2020.
 - 22) 神山卓久: 走査電子顕微鏡で旅する口腔のミクロな世界; 第1版, 医歯薬出版株式会社, 東京, 42-43, 2020.
 - 23) 神山卓久: 歯の亀裂が破折へと拡大した一例. *日本外傷歯誌* 13: 89-94, 2017.

Microstructural Observation of a Wedge-shaped Defect

Takahisa KAMIYAMA

Kamiyama Dental Clinic, Tochigi, JAPAN

Abstract: Objective: Whether the formation of wedge-shaped defects in the cervical region of teeth is caused by wear or by abfraction—the breakdown of cervical enamel columns because of stress from occlusal pressure—was clarified from a microstructural perspective.

Materials and Methods: Teeth with a wedge-shaped defect in cervical region were observed by micro X-ray computed tomography and scanning electron microscopy.

Results: Magnification of the images showed traces of wear on the enamel at the margins of the wedge-shaped defect, but no evidence of tensile stress, which can destroy the enamel columns.

Conclusion: Our observation does not support the abfraction hypothesis of the formation of wedge-shaped defects; enamel wear was considered to be the primary cause of this defect. However, the possibility that occlusal pressure over a long period of time could affect the tooth structure and cause changes in other areas could not be completely ruled out.

Key words : Wedge-shaped defect, Abfraction, Micro X-ray CT, Scanning electron microscope