

ポピュラーサイエンス

エナメル質の表面構造:

虫歯は歯の表面から

脇田 稔

北海道大学歯学部口腔解剖学第2講座
〒060 札幌市北区北13条西7丁目

(1990年11月5日 受理)

Surface Structure of Dental Enamel: Dental Caries Initiates on the Tooth Surface

Minoru WAKITA

Department of Oral Anatomy II,
Hokkaido University School of Dentistry,
Kita 13 Nishi 7, Kita-ku, Sapporo-shi 060

(Received November 5, 1990)

歯の痛みとくにウ蝕(虫歯)の痛みは、ほとんどの人が体験する不快きわまりないものとして知られている。しかし、ウ蝕の原因については、不明な点も多いが、必ず歯の表面から最初が始まる。歯は、咀嚼器官としてのほかに、比較解剖学、人類学、法医学の分野で、重要な研究対象である。歯の最外層を被うエナメル質の表面にある複雑な皺(裂溝)が、それぞれの歯に特有の外形を与えている。裂溝はウ蝕好発部位の一つである。エナメル質は95%以上がハイドロキシアパタイトの結晶であり、知覚や自己修復能がないことも特徴である。エナメル質は容易に酸に溶解する。ウ蝕発生の最初の変化は、歯垢の細菌が産製する酸によるエナメル質の脱灰である。エナメル質表面のハイドロキシアパタイトを構成する Ca^{2+} や OH^- は、口腔内の種々のイオンと容易に置換する。とくに、 OH^- を F^- に置換すると、ウ蝕に対する抵抗性が増すので、ウ蝕予防の重要な手段となっている。

1. はじめに

世の中に人体にさまざまな痛みを伴う病気は実にたくさんある。最も激しい痛みの例としては、癌(悪性新生物)の末期に生じる痛みがあげられる。癌の末期には神経が侵されるので、麻薬でないと鎮めることができない激しい痛みが患者を苦しめる。このような死に直結する病気は別にしても、われわれは、自分の体の一部に、少しでも痛みを感じると、不安に駆られる。これは痛みが人体の不調の重要な信号であり、日常生活にさしさわりの放置しておく、より悪いほうにその状態が変化していくことを、本能的に知っているからである。だから人はどこかが痛くなると、すぐに薬を飲んだり、医者に

駆けつけたりする。

このようないろいろな痛みの中でも、ウ蝕(いわゆるムシ歯)の痛みは、とくに不快きわまりなく、耐え難いものの一つということになっている。ウ蝕の痛みは冷たい飲物がしみたり、あるいは咬むとなんとなくビリビリとを感じるという軽いものから、ズキズキと痛んでいても立ってもいられないものまであり、一つの器官でさまざまな種類のものがあることが特徴である。また、多くの場合全身状態が正常か正常に近く、鎮痛剤で治まる場合もあるが、痛みが激しい場合ほとんど効かないことも多く、湿布その他でも治まらない、というような特徴もある。さらに、わずかな痛みでも、食事にさしつかえ、“食べる”という人間の最大の楽しみの一つが損なわれる。あるいは発音が不自由になって社会生活にさしつかえることも少なくない。

それでは、このようなウ蝕はどのようにして起きるのか。その原因については、従来さまざまな理由が提唱されており、現在でも、他の多くの病気のような唯一の原因というものを特定できないでいる。

2. 歯と歯の表面の構造¹⁾

ただ一つ確かなことは、ウ蝕は必ず歯の口腔内に露出している部分の表面から始まるということである。表面といっても、口の中を覗きこんで直接見える部分ばかりを指すのではない。図1に示すように、口腔内に露出している部分を歯冠(臨床歯冠)と呼び、それ以外の顎の中に埋め込まれていて直接見ることでできない部分を歯根(臨床歯根)と呼ぶ。歯冠と歯根の境界部(歯頸)は歯肉におおわれており、この部分は直接のぞき込むことはできないが、口腔内に露出している部分である。また、歯と歯の間の部分(歯冠隣接面)も同様に多くは直接見るができない。

歯冠の表面には、図2のようにたくさんの皺があって、特に、咬合面の皺(その谷を裂溝という)は、上下左右32本の歯を見分ける重要な指標となっている。また、この皺の形によって決まる咬合面の浮き彫り像は、歯種および動物によって特徴があるので、動物の分類に使われ、また、ヒトをはじめとする動物の進化の過程を知ることができるので、人類学や古生物学において重要な指標として用いられる^{2,6,7)}。歯は生体を構成する組織の中で、とくに有機質の含有量が少ない。エナメル質では2%ほど、象牙質でも20%以下である。このため、死後に地中で分解や腐敗によって失われることが少ないので、化石として残る可能性が高くなる。さらに、歯の外形と、咬合面の浮き彫り像は、個体識別の重要な指標として、裁判科学、犯罪科学など、法医学の分野でも用

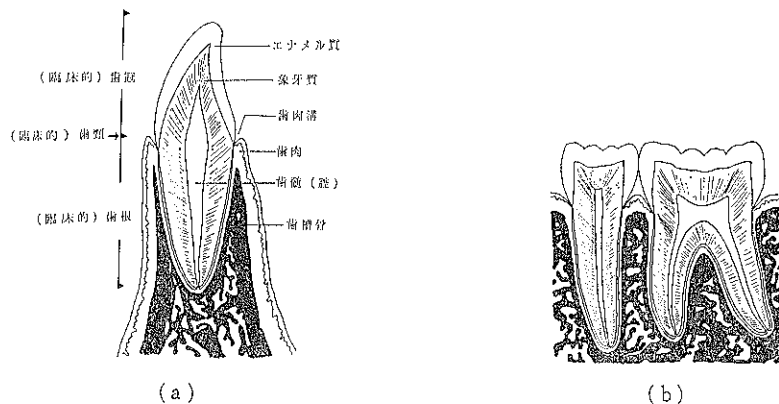


図 1 歯の植立状態を示す模式図。(a)は前歯を唇舌方向から、ならびに(b)は臼歯部を近遠心的に縦断した様子を示す。歯肉溝に面するエナメル質の表面や歯冠隣接面も隠れた口腔露出面である。

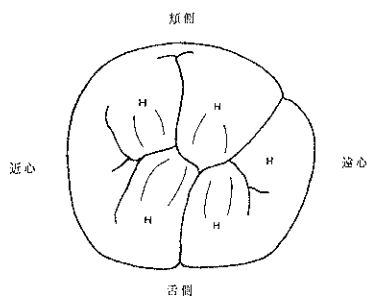
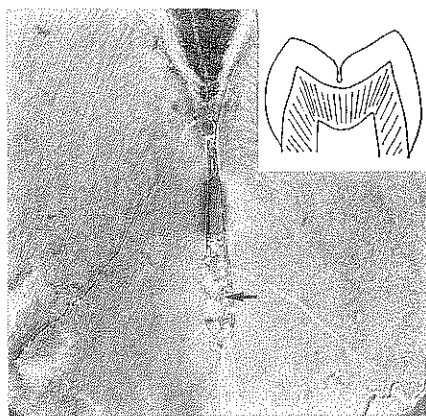


図 2 下顎右側第1大臼歯の咬合面観。咬合面の中央部で、5個の咬頭Hの間を走る裂溝がY字形をしているものを、ドリオピテクス型という。

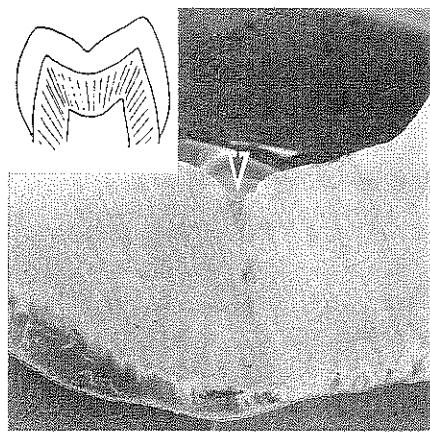
いられている¹⁾。さらに、およそ200万年前に生存していたとされるドリオピテクスという動物は、発見された化

石はほとんどが歯や顎骨なのであるが、その下顎大臼歯に、後にドリオピテクス型と呼ばれるようになる特有の形態がみられ、このような歯の形と表面形態から、ヒトを含む高等霊長類の共通の祖先であることがわかったのである。また、有名な北京原人 *Sinanthropus pekinensis* の発掘も、1921年に北京郊外の周口店の石灰岩採掘場で発見された1本の歯がその端緒となっている²⁾。このような皺はしばしば、図3に示すようにエナメル質内部にまで入り込み、深い溝となっている。また、裂溝の合流点は特に深くなっている(小窩)。そして、ウ蝕はこのような歯ブラシの届きにくい小窩・裂溝から始まることが多く、隣接面とともにウ蝕好発部位として知られている³⁾。

口腔内にみられる歯冠は、図1に見られるように、エ



(a)



(b)

図 3 咬合面の裂溝の断面図。(b)のように裂溝が浅い場合には(矢印)、食物のカスなどが貯りにくい、深い溝の場合には、カスが貯りやすく、除去しにくい。とくに底部がコルベンのように膨らんでいる場合には(a)、一度押し込まれたものは除去できない。ここでもいろいろなものがつまっている(矢印)。

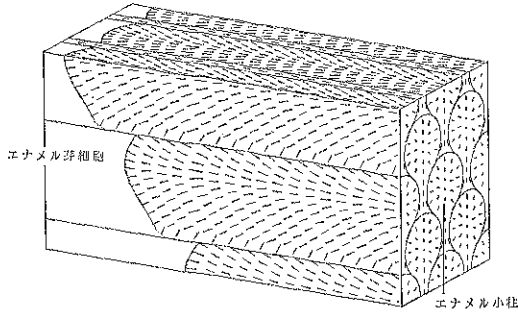


図4 エナメル質内部の結晶の三次元的に規則的な配列とエナメル小柱の関係を示すもの。結晶が細胞(TP)の表面に垂直に配列するという条件のもとでシミュレーションを行ったもので、このような結晶の配列が、細胞の立体的な表面構造によって決定されることを示している¹⁶⁾。

ナメル質の表面そのものである。エナメル質は個々の歯冠の外形を決定しているのであるが、同時に人体を構成している他の組織と比べて、特徴ある性質を有している^{3,4,15,16)}。

その第1は、最も硬いという点である。その硬さは、モースの硬度段階の6~7°で、ほぼ石英のそれに匹敵する。これは、エナメル質の95%以上が結晶リン酸カルシウム(ハイドロキシアパタイト)によって占められていることによる。この結晶は一般に六角柱状で、エナメル質の内部で、ある特有の反復する三次元的な配列をもっていて、これが顕微鏡下にさまざまな組織像として現われる¹⁶⁾(図4)。アパタイト結晶は、容易に酸で溶解される。歯を薄い酸に入れると、泡を出して溶け、5%の塩酸の中ではほぼ1日でエナメル質は完全に溶けてしまう。しかも、有機質を2%ほどしかもっていないので、溶けた後にはほとんど何も残らない。ウ蝕に際して最初に起こる現象は、細菌によって産生された乳酸・酪酸のような有機酸によるエナメル質の部分的な脱灰であると考えられている。

第2は、内部に血管や神経がないという点である。虫歯になると痛いではないかという疑問がでてくるが、これはウ蝕がその下の象牙質に達しているからである。エナメル質は熱に対して不良導体であるが、歯がしみるのは、これが何かの原因で欠けたり、急速に摩耗したりして、エナメル質の厚さが減少することによってエナメル質が薄くなって、象牙質に伝わる刺激が増すからである。

第3に、エナメル質は歯が萌出するときに、それを分泌形成した細胞(エナメル芽細胞)その他を脱ぎ捨てる。その結果、口腔内には裸のエナメル質が露出する。まったく裸かというところでもなく、萌出直後のその表

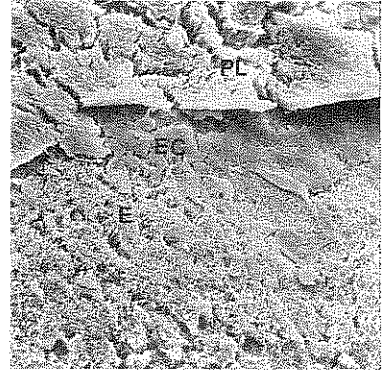


図5 かみ合っていない上顎第3大臼歯(親知らず)の表面を酸でエッチングして、走査電子顕微鏡で見たもの。エッチングされたエナメル質最表層(E)を被っていた歯小皮(EC)とその表面の歯垢(PL)が部分的にはがれ落ちている。

面は、歯小皮(またはエナメル小皮)と呼ばれる薄い均質な膜で被われている(図5)。これはエナメル芽細胞が最後に分泌したものとその細胞の一部からなっており、有機質に富んでいる。単純に考えると、酸で溶けやすいエナメル質の表面に、有機質の多い、酸に抵抗性のある膜が被っているのは都合がよいように思われる。しかし、この歯小皮は萌出後の咬合・咀嚼によって簡単にはがれ落ちてしまい、その結果その下のエナメル質が露出する。したがって、歯小皮は、あまり科学的な表現ではないが、包装紙のようなものと考えてもよく、臨床的意義は少ない。このように、萌出後には、その表面にエナメル芽細胞が欠如しているので、エナメル質が失われても、エナメル質自身には自己修復機能がまったくないという点も、エナメル質の特徴の一つである。

ウ蝕は、一般的にエナメル質の表面で、エナメル質の崩壊として始まる。先に述べたように、エナメル質の95%以上を占めるハイドロキシアパタイトは酸に弱く、口腔内の環境に酸が存在すると、容易に溶解する。試みに、酸味の多い清涼飲料水(ファンタなど)を十数秒間口に含んでから、前歯を互いにこすり合わせてみられるとよい。それまでのようななめらかな感触が失われ、不愉快な軋み感が得られるであろう。これはエナメル質の表面が、飲料に含まれるクエン酸などの酸によって脱灰され、粗造になったからである。

エナメル質結晶は、歯科の領域では、単純にハイドロキシアパタイトと呼んでいるが、天然の結晶といくつかの点で異なっているといわれる。とくに、 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ で表わされる結晶のCa:P比が1.61以下と理論値の1.66より小さい点である。これはMgや CO_3^{2-} をかなり多量に含むためといわれ、このほかNa, K, F

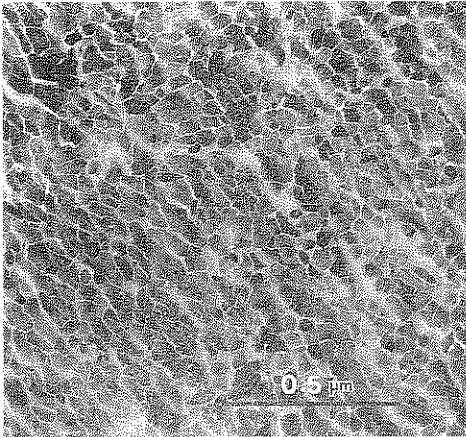


図 6 成熟エナメル質の透過電子顕微鏡像。口腔内に長時間露出していたエナメル質の表面のエナメル質は、唾液からのイオンの供給によって成長し、図のような多角形の断面を示すようになる¹²⁾。(東京医科歯科大学一条 尚教授撮影)

なども含まれている³⁾。

透過電子顕微鏡でみるエナメル質結晶は、幅(厚み)が 50~100 nm の六角柱で(ただし、口腔内に長期間露出していた歯の表層部では、形が不均一である)(図 6)¹²⁾、長さはさまざまな数値が提唱されている³⁾。ウ蝕による脱灰あるいは酸やキレート剤によるエッチングの際に、この結晶が溶けると、まず結晶の中心(結晶の芯)が選択的に溶解するといわれている¹¹⁾。透過電子顕微鏡で観察していても、同様の部位から結晶が壊れてゆくのを見ることができる。これは、結晶の形成初期の針状結晶の時期に Mg や CO_3^{2-} が比較的多量に取り込まれ、この部分が、成長した結晶の中心部に、結晶の芯として残るためといわれている。また、このことはエナメル質表面、あるいは断面を酸などでエッチングして、走

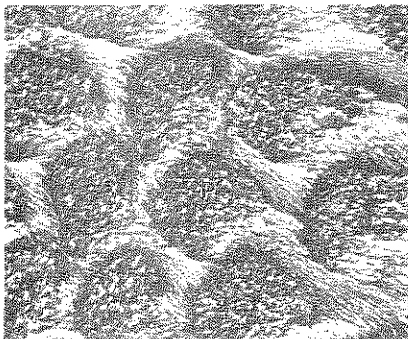


図 7 走査電子顕微鏡で見たヒトエナメル質の断面。表面に見られる細かい粒状のものは、ハイドロキシアパタイト結晶の集合体である。結晶の標本表面に対して平行に近いものほど、突出している。P: エナメル小柱の頭部。

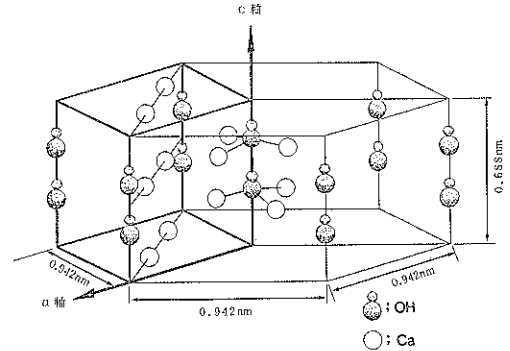


図 8 ハイドロキシアパタイトの単位胞の原子配列を簡略化して描いたもの。らせん軸(c軸)上の OH が周囲の Ca と同じ面にならないことを示している。この OH の位置に F が置き換わると、Ca と同一面に位置するようになる。

査電子顕微鏡で見たとき(図 7)、試料表面に対する結晶の長軸の角度が、直角に近いものほど強く溶解されるという事実の説明に使われる³⁾。

純粋なハイドロキシアパタイトの原子配列は図 8 のように表わされ、単位胞と呼ばれる¹²⁾。この単位胞が 3 個集まって六角形の結晶単位を構成する。この結晶単位が集合して六角柱の結晶を形成している。c 軸の周りには Ca が 3 個ずつ正三角形をつくって位置する。2 組の Ca の相対的位置は、c 軸をらせん状に 60° 回転させると重なる関係にある。そのため、この軸をらせん軸 screw axis と呼び、この軸の周りに位置する Ca を screw axis Ca と呼んでいる。一方、単位胞の中央で c 軸に平行に並んでいる Ca を columnar Ca と呼んでいる。このような単位が集合してできた大きな結晶の表面には、多くのさまざまなイオンが結合しており、口腔内環境では、結晶の周囲には吸着イオン層が形成されている。

口腔内に露出している歯の表層のハイドロキシアパタイトを構成している原子は、口腔内の各種イオンと常に交換を行っているといわれている。ハイドロキシアパタイトでは、らせん軸にある OH が、鏡面 (1/4c, 3/4c) から少しずれた位置にあるので、結晶が若干不安定になり、そのためハイドロキシアパタイトはわずかな酸性環境でも、溶解しやすい。この OH の位置に、他の元素たとえば F が入ると、F は正しく鏡面上に位置するようになるので、結晶性が安定し、酸に対する抵抗性も増す。

3. ウ蝕と予防について^{5,8)}

ウ蝕は、歯の硬組織の脱灰と有機基質の分解によって進行する不可逆的な病変である。病気は、原因・環境・素質がたまたま重なったときに生じるといわれる。ウ蝕の場合にも、柔らかく、歯にまとわりつく、とくに

砂糖を多く含む食事をして、その後に歯を磨かないという食環境と、食物のカスがたまりやすく、清掃しにくいという個々の歯の表面形態と、それらの配列という解剖学的な素因は、比較的よくわかっているが、原因となると十分に解明されていない部分が多い。

それでは、ウ蝕はなぜ起きるのか。やはり、歯の表面の脱灰によるエナメル質の崩壊が最初に起きると考えるのが常識である。口腔内では脱灰は大部分酸によって起きる。この酸の発生源としては、歯の表面に付着している歯垢（いわゆる歯ぐそ） plaque であるとされている¹⁴⁾。歯垢は歯の表面に増殖した細菌の塊で、これを形成している細菌のいくつかが原因菌として疑われている。とくに、*Streptococcus mutans* と呼ばれるものが、悪玉の筆頭と考えられているが、この細菌だけを、無菌動物などに接種しても、必ずしもウ蝕が生じないことから、ほかに種々の複雑な要因があると考えられている。歯垢をつくる細菌は、歯の表面や唾液の中の有機質とくに砂糖を栄養にして増殖する。試みに、よく歯を磨いた後、飴玉を一つしゃぶってみるとよい。1～2時間後には、歯の表面とくに咬合面の壁の中や、歯列の内側（舌側面）と外側（唇側面、頬側面）の歯肉に接する部分に、ネットリとした歯垢が付着する。口腔内の細菌が、糖を栄養源として急速に増殖し、自身の形成した多糖類によって歯の表面に付着したためである。歯垢の量や付き方には個体差があって、口腔内の菌叢や唾液の性状が原因と考えられている。歯の表面に形成された歯垢の細菌によって、糖が代謝されて有機酸が生じる。もともと歯の表面の凹凸は複雑で、しかもムシ歯になるような人は歯をろくに磨かないので、歯垢が長時間取り除かれにくい。そして、その部分の酸性状態が長く続くと、エナメル質の脱灰が生じる。この結果エナメル質の表面は粗造になり、ますます歯垢が付きやすくなり、また、除去しにくくなる。

エナメル質表面に歯垢がつくと、ただちにエナメル質に穴があくかというところではない。部分的に脱灰が生じたエナメル質は、口腔内の唾液から Ca をはじめとする種々のイオンの供給によって、再びカルシウム結晶の沈着が起きる。これを再石灰化という。白濁しているだけでまだエナメル質の欠失が生じていない初期ウ蝕では、再石灰化したエナメル質表面はその内部より石灰化度が高く、X線で見ると表層の不透過像として見える。しかし再石灰化したものは、もはや apatite ではなく、whitlockite で、結晶性が異なっており、脱有機したウ蝕表面には whitlockite の集合や、石灰化した細菌がみられるという報告もある³⁾。

それではウ蝕を予防するには、われわれはどうすれば

よいのであろうか。原因菌が特定されていないので、なかなかむずかしいのは事実であるが、歯垢をいつまでもエナメル質の表面に付着させたままにしておかないことと、エナメル質の少なくともその表面の酸に対する抵抗性を高めることは、できそうである。

まず、食事の後に歯を磨くこと。これはわかっているが、簡単なようでなかなか励行することがむずかしい。睡眠中は唾液が停滞するので、歯垢の増殖に都合がよい。したがって、就寝前にもものを食べないことと、食後によく歯を磨くことは、ウ蝕予防の第一歩である。歯肉との境界部の歯垢をていねいに取り除くことは、歯周病（歯槽膿漏など）の予防にもなる。歯はそれぞれ複雑な形をしているので、各部分の形態に応じた磨き方が考案されている。また、歯の配列（歯並び）も個体差があって、歯並びの不整な人では十分磨けないことが多いので、一度歯科医のところで、自分の歯と歯並びに合った磨き方を習ってこれることをお奨めする。

エナメル質の酸に対する抵抗性を高めるために、フッ素を積極的にエナメル質に取り込ませることが行われている。これは、飲料水に微量のフッ素が含まれている地域の住民にウ蝕が少ないことの研究に端を発している¹⁶⁾。通常は、薄いフッ化ナトリウムの水溶液が用いられており、これを歯の表面に直接塗布したり、うがいをしたり、歯磨剤に添加して使ったりする。これは前述のように、ハイドロキシアパタイトの OH を F に置換して、フッ素化アパタイトに変えて酸に対する抵抗力をつけようというものである。これはかなり有効で、事実各地のフッ素のうがいが行われている幼稚園や小学校では、子供のウ蝕が顕著に減少して効果が上がっている。さらに、歯が生え始めると、すぐに歯科医院でフッ素の塗布を受けて、子供のウ蝕予防を熱心に行っている母親も少なくない。しかしながら、エナメル質に取り込まれたフッ素は、やがて唾液中の他のイオンと交換してしまうので、定期的にフッ素を与え続けなければならないという煩雑な面もある。そこで、水道水のフッ素添加という考えもかなり以前からある¹³⁾。天然にフッ素を含む飲料水がウ蝕予防に効果があるのなら、子供の頃から、フッ素を人工的に添加した水道水を飲んでいれば、結晶の形成初期からエナメル質のハイドロキシアパタイトをすべてフッ化アパタイトに変えることができ、また、これを飲んで住む住民の歯には常にフッ素が接触しているので、ウ蝕予防に最適であるとする考え方である。ウ蝕予防を一義的に考えれば、理想的かもしれぬが、環境や他の疾病に及ぼす影響や、フッ素濃度の制御などの問題があって、実験の域を出ていない。

人類を紀元前から苦しめてきたウ蝕は、歯の表面から

生じ、その予防も日常の心掛けでかなりできる一方、解剖学的に避け難い場合も少なくないということを解説的に書いたつもりである。何かの参考になれば幸いである。

文 献

〈歯に関する一般的な読み物〉

- 1) 藤田恒太郎: “歯の話” 岩波新書 (1966).
- 2) 鈴木 尚: “化石サルから日本人まで”, 岩波新書 (1971).

〈教科書および参考書〉

- 3) A. Boyde: “Handbook of Microscopic Anatomy”, V/6, A. Oksche and L. Vollrath (eds.) (Springer-Verlag 1989) p. 309.
- 4) 藤田恒太郎: “歯の組織学” (医歯薬出版, 1957).
- 5) G. N. Jenkins: “ジェンキンス口腔の生理・生化学”, 川村洋二郎監訳 (医歯薬出版, 1981).
- 6) J. Lehner and H. Plenck: “Handbuch der Mikroskopischen Anatomie des Menschen”, W. von Möllendorf (Hrsg.) 5. Bd., 3. Teil, (Verlag von Springer 1936) p. 29.
- 7) B. Peyer: “Comparative Odontology” (The University Chicago Press, 1968).

- 8) E. Sauerwein: “Kariologie, mit kurzgefaßter Histologie und Histopathologie des Zahnes”. (Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1974).
- 9) Ten Cate: “Ten Cate 口腔組織学”, 第2版, 平井五郎他訳 (医歯薬出版, 1987).
- 〈一般的な文献〉
- 10) N. J. Ainsworth: Mottled teeth. Br. dent. J. 55, 233 (1933).
- 11) G. Daculsi and R. Z. Regeros: “Tooth Enamel IV,” R. W. Fearnhead(ed.) (Florence Pub., Yokohama, 1989) p. 482.
- 12) T. Ichijo and Y. Yamasita: “Mechanisms of Tooth Enamel Formation.” S. Suga(ed.) (Quintessence Pub., Co. Inc., Tokyo 1983) p. 205.
- 13) F. J. McClure and R. C. Linkins: J. dent. Res 30, 172 (1951).
- 14) M. Swartz and R. W. Phillips: J. Periodontol. 28, 304 (1957).
- 15) 脇田 稔, 塩井 孝, 小林茂夫: “エナメル質, その形成, 構造, 組成と進化”, 須賀昭一編: (クインテッセンス出版(株), 1987) p. 76.
- 16) 脇田 稔: 昭和 60~62 年度文部省科学研究費補助金 (一般研究 A; 課題番号 60440082) 研究成果報告書 (1988).

軽金属奨学会グループ研究助成金募集のお知らせ

(財)軽金属奨学会

交付対象: 本助成金は軽金属の学術あるいは技術に関する高度な共同研究の展開をめざすグループに交付する。その構成員は原則として主導的な研究を進める立場にある異なった研究機関の研究者 (大学教授等) 2 名以上とし、相互に共同して緊密な連絡のもとに行う研究を対象とする。

研究内容: 軽金属に関する学術あるいは技術への確実な寄与が期待され、かつ、着眼点または研究方法が独創的な研究とする。

研究期間: 3 年

採用件数: 1 件

助成金額: 1,500 万円を限度とする。ただし、単年度 500 万円以内。

申請方法: (1) 申請者: グループ研究代表者 (2) 申請書様式: 本財団所定の申請書様式による。

問合せおよび送付先: 〒541 大阪市中央区北久宝寺町 3-3-8 (住生下島ビル)

東洋アルミニウム(株)気付 (財)軽金属奨学会 電話 06 (271) 3151

締 切: 1991 年 9 月末日

選 考: 本財団内に設けられた選考委員会によって選考を行い、その結果は 12 月末までに通知する。

助成金の交付: 本研究の助成金はグループを構成する研究者別に交付する。ただし、その経理は研究者の所属する機関に委任し、経理報告をそれらの機関から受けることを原則とする。