

〔原著〕 松本歯学 7 : 238~258, 1981

硬化象牙質に関する電子顕微鏡的研究
第1報 歯冠硬化象牙質の細管内の沈着物と線維について

赤 羽 章 司

松本歯科大学 電子顕微鏡室 (主任 赤羽章司 学士)

枝 重夫, 川上敏行, 林 俊子, 中村千仁, 河住 信

松本歯科大学 口腔病理学教室 (主任 枝 重夫 教授)

Electron-microscopical Studies on the Sclerosed Dentin
First Report : Intratubular deposits and fibers
in the coronal sclerosed dentin

SHOJI AKAHANE

Laboratory of Electron-microscope, Matsumoto Dental College
(Chief: B. Sc. S. Akahane)

SHIGEO EDA, TOSHIYUKI KAWAKAMI, TOSHIKO HAYASHI,
CHIHITO NAKAMURA and MAKOTO KAWASUMI

Department of Oral Pathology, Matsumoto Dental College
(Chief: Prof. S. Eda)

Summary

For the purpose of searching the origin of crystals in the dentinal tubules, firstly, the coronal sclerosed dentin of upper right incisor, obtained from a 75-year-old male, was observed by a scanning electron microscope and an electron probe microanalyser with energy dispersive x-ray spectroscopy.

Results were as follows :

1. The attrition surface was covered by a layer of smooth homogeneous deposits in

about 8 μ thick.

2. The intratubular structures were able to divided into crystals and fibers.

3. The crystals began to appear in the dentinal tubules from 30 μ underneath the worn surface. No differences of number and form of crystals were observed among the regions of dentinal tubules from underneath to near irritation dentin.

4. The intratubular crystals were classified into the following 10 types: rhombohedral, complex type, pyramid faces, step-like, plate-like, cuboidal, roundish edge, prismatic, minute granular and rod-shaped crystal.

5. The fibers within the dentinal tubules were collagen and odontoblast processes, and were both involved in calcium deposition. The former was mostly observed in the region between 0.75 and 1.60 mm from the attrition surface.

6. The surface layer of homogeneous deposits on the worn dentin contained the elements of Al, Si, P, S and Ca, while the subsurface of them only the ones of Mg, P and Ca.

7. The amount of Mg was highest in the intratubular deposits, middle in the peritubular matrix and lowest in the intertubular matrix.

緒 言

咬耗や磨耗によって歯冠部に硬化象牙質が出現する。この硬化象牙質には Fish (1928, 1931)^{8) 9)} のいう dead tract や Beust (1931)²⁾ が明らかにした透明硬化象牙質および不透明硬化象牙質が含まれており、それらの相互関係の詳細についてはすでに山崎 (1981)⁴⁴⁾ が述べている。咬耗によって象牙質の露出した歯冠硬化象牙質を走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM と略) で観察した研究は多く (Tronstad, 1973 a³⁸⁾, b³⁹⁾; 見明, 1978²²⁾, 1979²³⁾; Mendis & Darling, 1979²¹⁾; 木津, 1979¹⁷⁾; 山崎 (芳), 1980⁴³⁾; 枝, 1980⁶⁾; 山崎 (喜), 1981⁴⁴⁾), とくに Tronstad (1973 b)³⁹⁾ は象牙細管内の結晶物の構造について詳細に記載している。しかしながら細管内沈着物を系統的に観察した報告はきわめて少ない。

歯冠部硬化象牙質の細管内沈着物の由来について、枝 (1980)⁶⁾ はマイクロラジオグラフィによる検索結果から唾液由来を推定している。山崎 (1981)⁴⁴⁾ もその結晶形態から唾液由来と考察しているが、歯冠硬化象牙質と歯根透明象牙質の細管内沈着物の化学的組成の比較からはその由来を結論づけるに至っていない。そこで著者らは咬耗による歯冠硬化象牙質の細管内沈着物を位置的、形態的に観察すると共に EPMA (Electron Probe x-ray Microanalyser) による組成分析を行ない、

さらに歯石および唾石についても同様の検索を行なってこれらを比較し、象牙細管内沈着物の由来を考察しようと考えた。今回は第1報として歯冠硬化象牙質の象牙細管内沈着物の、とくに結晶形態および線維構造物とについて報告する。

材料と方法

材料は75歳男性上顎右側中切歯で、これを10%ホルマリン液にて固定し、近心および遠心を研磨しながら厚さ約 0.5 mm の長軸断研磨標本を作製した。その後通法に従いエタノールで脱水、象牙質の露出した咬耗部分を含むよう液体窒素による歯牙の長軸凍結切断を行ない、CO₂ によって臨界点乾燥を施した。切断された一面は形態観察用として金イオンスパッタ・コーティングし、反対の面は組成分析を行なうためにカーボン蒸着をし、日本電子 JCSA-733 X線マイクロアナライザーによる走査電顕像の観察と、Kevex-7000 エネルギー分散型分光器 (Energy Dispersive x-ray Spectroscopy, EDS と略) による元素分析を行った。

観 察 結 果

咬耗によって象牙質の露出した歯冠硬化象牙質の長軸縦断面を観察すると、咬耗部に対応して刺戟象牙質が形成されていた (図1)。また象牙質の中央より上方にかけて明るい発育線が見られた

が、その拡大像(図2)から發育線に相当する部分で明るくみえる管間基質の幅がやや広く、その連続として観察できることが理解された。象牙質の表面近くでは細管が不明瞭で(図3)、拡大して見ると表面から約 8μ の厚さの微細な沈着物の層が存在し、その下方に象牙細管が現われていた(図4)。この表層について図4に示す各点の元素分析を行なうと図5~7のごとくなる。すなわち図5は象牙質表面(A)の組成でAl, Si, P, S, Caが検出され、PはCaより高いピークを示している。しかし表面下 1μ の点(B)ではPとCaのほかSiがわずかに存在しており、AlとSは検出されていない(図6)。さらに表面下 5μ (C)になるとPとCa以外にMgが現われて来た(図7)。

次に象牙細管内沈着物の位置的变化を検索するため表面より刺戟象牙質に至る約2.0mmの区間を順次観察してみると、すでに表面下 30μ の場所で細管内への沈着物が見られた。表面下 45μ の細管内には大きな結晶(図8, C)が密に沈着し、細管の両側には緻密な構造をした管周基質(図8, P)、その外側には粗造な形態を呈する管間基質(図8, I)が観察された。これらの部分の組成をEDSで分析すると細管内の大きな結晶物(図9)、管周基質(図10)、管間基質(図11)ともにMg, P, Caが存在し、とくにMgの量を比較すると細管内結晶>管周基質>管間基質なる関係を示した。さらに表面下0.2mmの象牙細管内には様々な構造の結晶物が見られた。図12(表面下0.2mm)において下方には菱面体結晶(rhombohedral crystal, 1)、その上に角柱結晶(prismatic crystal, 2)、中央部に菱面体結晶などの結合によって形成されたと見られる複合体結晶(complex type, 3)が見られ、その結晶の頂上には角錐形(pyramid faces, 4)の結晶も認められた。上方の複合体結晶は中央部に微細な顆粒が沈着し、あたかも花が開いた様な構造を呈していた。その他大部分の結晶は菱面体結晶に類似していた。細管内には結晶が単独で存在する場合もあり、その細管壁には直径が40~50nmある微細顆粒状結晶(minute granular crystal)が沈着していた(図13, 表面下0.3mm)。また表面より同じ位置であってもその細管によって結晶物の沈着状態は異なり、その大きさも100~400nmとまちまちであるが、菱面体結晶が大多数を占め、中には階段状

構造(step-like structure)をもった結晶も観察された(図14, 矢印, 表面下0.5mm)。細管内が沈着物によって閉鎖された場合、その管周基質との境界を形態的に確認することは困難であるが、ほぼ閉鎖の完了した細管腔を観察すると直径が40~50nmの桿状結晶(rod-shaped crystal)が見られた(図15, 表面下0.8mm)。また菱面体結晶が比較的粗に沈着している細管内にも桿状結晶が見られ、それは微細顆粒状結晶の連なりとして確認された(図16, 17, 矢印, 表面下0.7mm)。その他、一つの結晶を覆うように成長した板状結晶(plate-like crystal)も見られた(図17, 星印)。象牙質の露出表面から刺戟象牙質の中間に位置するところでも菱面体結晶は多数出現しとくに変化は見られないが、立方体結晶(cuboidal crystal)が混在することがある(図18, 星印, 表面下1.2mm)。刺戟象牙質に境界を接する部分でも細管内には一辺の長さが約700nmの大きな結晶があり(今回の観察の中では最大級)、細管壁には長さ約100~300nm, 直径が40~50nmの桿状結晶が見られた(図19, 表面下2.0mm)。

他の細管内構造物としてはコラーゲン線維、あるいはその石灰化したものが観察された。最も表層では、表面下0.4mmの所に線維性構造が見られ(図20)、さらに深層の部位に観察されたものも含めて、それらの表面には約60nmの周期的な縞構造が認められたのでコラーゲン線維と判定した(図22, 24)。またコラーゲン線維の直径は約50~80nmで、多くの場合細管中に菱面体結晶と共に数本存在していた(図21, 22, 表面下0.6mm)。コラーゲン線維の石灰化像は表面下0.75mm(図23)から1.6mmの間で観察されたが、その間に石灰化していないものも見られた。コラーゲン線維の石灰化は直径が約40~50nmの微細顆粒状結晶の沈着に始まり、しだいにその太さを増しながらついには細管壁中に埋没してしまう様相を呈していた(図23, 24)。刺戟象牙質との境界に近づくと石灰化像は見られなくなり、数本のコラーゲン線維が吻合して太い束を成していた。図25では表面下2.0mmの所でコラーゲン線維束の吻合あるいは分岐が観察され、その中の一つは細管を横断して反対側に到達しその先端は大きな結晶物に挟み込まれていた(矢印)。また下方のコラーゲン線維(星印)は管周基質の中へ深く侵入

表1：歯冠硬化象牙質の細管内構造物の分類

基 本 形	形 態	特 徴
斜方面体晶系（菱面体晶系） (rhombohedral system)	菱面体結晶 (rhombohedral crystal)	主体をなす
	複合体結晶 (complex type crystal)	多い
	角錐形結晶 (pyramid faces crystal)	比較的多い
	階段状結晶 (step-like crystal)	比較的多い
	板状結晶 (plate-like crystal)	少ない
立方晶系 (cubic system)	立方体結晶 (cuboidal crystal)	少ない
	丸型結晶 (roundish edge crystal)	少ない
正方晶系 (tetragonal system)	角柱形結晶 (prismatic crystal)	少ない
六方晶系 (hexagonal system)	六方体結晶 (hexagonal crystal)	未確認
微細顆粒状結晶	微細顆粒状結晶 (minute granular crystal)	沈着物の基本単位
	桿状結晶 (rod-shaped crystal)	微細顆粒状結晶の結合
コラーゲン線維	微細顆粒状結晶の沈着	石灰化
象牙線維	板状に変形	石灰化

しているように観察された。他の部分を見るとその線維はさらに増加してきていた（図26，表面下2.0 mm）。

次にわずか2ヶ所ではあるが、象牙線維の変性物と思われる像が観察できた。一つは表面下0.6 mmの所で、菱面体結晶の沈着した細管と並んで非常に長い板状の構造物を認めた（図27）。この板状構造物を拡大して見ると（図28），その表面は滑らかで周期的な縞構造もなく、微細顆粒状結晶の沈着も見られなかったのをこれを象牙線維の石灰化物と判定した。さらに表面より2.0 mmの細管内にもう一つの長い構造物を観察したが（図29），それを拡大して見ると（図30）表面は比較的滑らかであり、厚みがあまり無いので石灰化の進んでいない象牙線維の変性物と判断した。最後に象牙細管内に沈着した結晶物と、象牙線維の石灰化物についてステレオ写真を撮影し、その構造の立体視を試みた（図31～33）。その結果図31の角の丸くなった結晶 (roundish edge crystal) や階段状に成長した結晶、図33の石灰化した象牙線維の構造がより明確に把握できた。表1に歯冠硬化象牙質の細管内構造物の分類を、表2にEPMA (EDS) による歯冠硬化象牙質の元素分析結果を示す。

考 察

1. 細管内にみられた構造物について

歯冠硬化象牙質を走査電子顕微鏡で観察する

表2：EPMA (EDS) による歯冠硬化象牙質の元素分析（★印が検出された元素）

試 料		元 素					
		Ca	P	Mg	S	Si	Al
硬化象牙質	表面	★	★		★	★	★
	表層(表面下1μ)	★	★			★	
	表層(表面下5μ)	★	★	★			
	細管内結晶	★	★	★			
	管周基質	★	★	★			
	管間基質	★	★	★			

と、その細管内の構造物は結晶物と線維構造物の2つに大別され、さらにそれらは形態的に細かく分類できる（表1）。以下、それらについて考察する。

細管内の結晶物は主として菱面体結晶 (rhombohedral crystal, 図12, 1) から成っていた。これは従来六面体結晶といわれていたものであるが、稜角（軸間角）が必ずしも直角ではなく、その面は菱形をしているので結晶系でいえば斜方面体晶系（菱面体晶系, rhombohedral system）に属し、形態的には菱面体結晶と呼ぶのが正確であると思われる。次に多いものとしてはいくつかの菱面体結晶の結合によって形成された複合体結晶 (complex type crystal, 図12, 3) があり、菱面体結晶の成長過程を示すと思われる角錐形結晶 (pyramid faces crystal, 図12, 4) や、結晶面に階段状の構造をもった結晶 (step-like crystal, 図14, 矢印) が比較的多く見られた。他には四角形

の柱状を成した角柱形結晶(prismatic crystal, 図12, 2)や, 一つの結晶を覆うように成長した板状結晶(plate-like crystal, 図17, 星印)があり, 骰子形をした立方体結晶(cuboidal crystal, 図18, 星印), あるいは角の丸くなった立方体様の結晶(roundish edge crystal, 図31)が少量ながら観察された。また細管壁には微細顆粒状結晶(minute granular crystal)およびその連なった桿状結晶(rod-shaped crystal)が密に沈着していた(図17)。咬耗や磨耗によって出現する歯冠硬化象牙質の細管内沈着物の透過電子顕微鏡的研究は Selvig(1968 a, b)^{28) 29)}, Lester & Boyde(1968)²⁰⁾, Tronstad & Langeland(1971)⁴⁰⁾, 枝(1980)⁶⁾, 山崎(1981)⁴⁴⁾などが挙げられ, いずれの場合も菱面体結晶, 微細顆粒状結晶および針状結晶を観察している。中でも菱面体結晶については Lester & Boyde(1968)²⁰⁾がカーボン・レプリカ法を用いたステレオ写真によってその構造の立体視を行なっているし, Selvig(1968 a)²⁸⁾, Tronstad & Langeland(1971)⁴⁰⁾, 山崎(1981)⁴⁴⁾は電子線制限視野回折法により菱面体結晶はウィットロカイト(whitlockite)としている。しかし透過電子顕微鏡的にしばしば見られる針状結晶は, 今回の走査電子顕微鏡的観察ではこれをまったく認めることができなかった。これは前者では非常に薄い切片を用いるために平面的な針状となって観察されるのであって, その多くは走査電子顕微鏡観察における桿状結晶に相当するものと思われた。しかしその本態についてはさらに厚い切片の高加速電圧透過電子顕微鏡によるステレオ写真を撮影し詳細に検討する必要がある。走査電子顕微鏡による業績には Tronstad(1973 a, b)^{38) 39)}, 見明(1978, 1979)^{22) 23)}, Mendis & Darling(1979)²¹⁾, 木津(1979)¹⁷⁾, 山崎(芳)(1980)⁴³⁾, 枝(1980)⁶⁾, 山崎(喜)(1981)⁴⁴⁾などがあり, 特に Tronstad(1973 b)³⁹⁾は詳細な観察を行なっている。それによると細管内構造物を菱面体結晶, 六方体結晶(短六角柱), 角柱形結晶, 角錐形結晶, 角柱と角錐の結合形, 鎖状になった丸型結晶, 階段状構造, 微細顆粒状結晶, 桿状結晶, コラーゲン線維およびその石灰化物, 細管腔を閉鎖した微細な構造物などに分類できるという。この中で六方体結晶と鎖状になった丸型結晶については, 著者らはこれをとらえることができなかった。

次にこの菱面体結晶の大きさについて比較すると, Tronstad(1973 b)³⁹⁾は100~350nm, 木津(1979)¹⁷⁾はsimple typeで80~250nmとしているが, 著者らの観察では100~700nmと前2者と比べかなり大きな結晶までが見られた。また桿状結晶については Tronstad(1973b)³⁹⁾は200nm(L)×40nm(W), 木津(1979)¹⁷⁾は70~80nm(L)×30nm(W)と計測し, 著者らは100~300nm(L)×40~50nm(W)の値を得た。勿論この値は材料や観察部位によっては異なるものと思われるが, 桿状結晶の幅については約40nm前後というほぼ同一の結果を得た。次に細管内における菱面体結晶の成長状態を見ると, そのすべてがいずれかの面で細管壁に直接的あるいは他の結晶を介して接触していた。そしてその断面を見ると細管壁に接する部分では微細顆粒状結晶がはつきりと認められるが, 内腔へ向かうに従って平滑な面へと移行しておりそこには明確な境界は存在していなかった(図14)。以上のことから細管壁に見られる直径約40nm前後の微細顆粒状結晶は, 走査電子顕微鏡観察によって得られた沈着物の単位結晶と考えられる。

咬耗あるいは磨耗によって象牙質が露出すれば当然細管内の生理的環境は変化し, その影響は露出面に近いほど受け易いことが想像される。しかるに細管内沈着物の主体を成す菱面体結晶は象牙質の露出面より刺戟象牙質に至る間で常在的に見られ, 量的には表面近くでやや増加する傾向ではあるが明瞭な差を認めることはできなかった。また微細顆粒状結晶はどの部位にも存在した。これは沈着物の単位結晶という見方からすれば当然のことと考える。桿状結晶については十分な検索を行っていないので不明である。このような結晶物の細管内沈着は咬耗や磨耗のみならず齶蝕象牙質においても出現し, 菱面体結晶や針状結晶を電子顕微鏡的に観察した業績は多くある(Helmcke, 1955¹²⁾; Takuma & Kurahashi, 1962³³⁾; Frank, et al., 1964¹¹⁾; Vahl, et al., 1964⁴²⁾; Herting, 1965¹³⁾; Sarnat & Massler, 1965²⁷⁾; Lester & Boyde, 1968²⁰⁾; Takuma, et al., 1967³⁵⁾, 1969³⁶⁾; Mjör, 1972²⁴⁾; 荻原, 1975²⁶⁾; 横山, 1979⁴⁵⁾)。いわゆる齶蝕結晶の一つとして多く見られる菱面体結晶について Frank, et al.(1964)¹¹⁾, Vahl, et al.(1964)⁴²⁾, 荻原(1975)²⁶⁾らは電子線回折を行ない

ウィットロカイト (whitlockite) と同定しており、横山 (1979)⁴⁵⁾ は走査電子顕微鏡による観察で、咬耗や磨耗によって象牙細管内に出現するものと非常に良く似た結晶物の写真を示している。増齡的变化として歯根部に出現する透明象牙質の電子顕微鏡の研究には Nalbandian, et al. (1960)²⁵⁾, Takuma & Eda (1966)³⁴⁾, 枝, 他 (1978)⁷⁾, 赤羽, 他 (1978)¹¹⁾, 枝 (1980)⁶⁾, 山崎 (1981)⁴⁴⁾ などがあり、いずれも歯根透明象牙質の細管内には微細顆粒状の結晶が密に沈着していると記載している。一方 Selvig (1969)³⁰⁾ は歯頸部の露出したセメント質下にみられた脱灰層の象牙細管内に菱面体結晶を見出し、環境によっては細管内沈着物に大きな変化の生ずることを示している。

硬化象牙質の細管内には線維構造物も観察され、これは約 60nm の周期的構造をもったコラーゲン線維と、非常に長くて幅の広い構造をした象牙線維とに区別することができた。コラーゲン線維は表面下 0.4mm の部位から刺戟象牙質と境界を接する 2.0mm の間で散在的に観察されたが、表面下 0.75~1.6mm の間にはコラーゲン線維に微細顆粒状結晶の沈着した石灰化像も認められた。このようにコラーゲン線維の石灰化がある一定区間で見られた原因については推測の域を脱しないが、たまたまその場所における環境が結晶成長に適していたため、つまり結晶化学的至適環境であったためと想像される。一般に象牙細管内にコラーゲン線維が存在するのは稀なものと考えられているが、透過電子顕微鏡によって象牙細管内にコラーゲン線維を認めた報告には Johansen & Parks (1962)¹⁶⁾, Boyde & Lester (1967)³¹⁾, Frank (1968)¹⁰⁾, Sundström, et al. (1970)³¹⁾, Tsatsas & Frank (1972)⁴¹⁾, 一条, 他 (1975)¹⁴⁾, Thomas (1979)³⁷⁾ などがあり、また走査電子顕微鏡的には Brännström & Garberoglio (1972)⁴⁾, 出口 (1972)⁵⁾, Tronstad (1973 a, b)^{38) 39)}, 今井 (1973)¹⁵⁾, 吉江 (1974)⁴⁶⁾, 桑幡 (1979)¹⁹⁾, 山崎 (1981)⁴⁴⁾ などがこれを観察している。とくに Tronstad (1973b)³⁹⁾ は歯冠硬化象牙質の細管内に石灰化したコラーゲン線維を認めている。また今回の観察によって刺戟象牙質に近い部分の細管内には束を成したコラーゲン線維が存在し、それは吻合や分岐をしているため一見樹枝状に見え

た。Tronstad (1973a)³⁸⁾ はこれによく似た樹枝状の線維を神経線維と解釈しているが、今回の写真 (図 25, 26) を詳細に観察するとそれは 50~80nm の太さで表面には約 60nm の周期的な縞構造をもっているのでコラーゲン線維の集合であることが容易に判断できた。

Tronstad & Langeland (1971)⁴⁰⁾ は咬耗による硬化象牙質の細管内に、変性した象牙線維を透過電子顕微鏡的に観察しているが、今回著者らの走査電子顕微鏡による検索では、2ヶ所において象牙線維の石灰変性像を見ることができた。一つは表面下 0.6mm の所で、角ばった板状の長い形態を呈しその表面は非常に平滑であった。一方の象牙線維は表面下 2.0mm で見られ、同様に長い板状をしていたが、その表面には歪がありいまだ石灰化の進んでいない変性像のように思われた。

2 硬化象牙質の組成分析

咬耗により象牙質の露出した部分を切断して走査電子顕微鏡で観察すると、表面近くには微細な沈着物の層が存在しその下に象牙細管が現われてくることを Mendis & Darling (1979)²¹⁾ や山崎 (1981)⁴⁴⁾ が報告している。Mendis & Darling (1979)²¹⁾ の観察では表面下に 5~10 μ の厚さの層があるとし、著者らの観察した部位では約 8 μ の層が見られた。この層は咬耗によって象牙質が露出してから一定の期間を経てから形成されるものと考えられるが、その形成時期や組成は細管内沈着物の形態や成因を探る上で重要なポイントの一つと思われる。それは Lester & Boyde (1968)²⁰⁾ が蝕蝕における象牙細管内の結晶成長の生理的環境について述べ、桿状結晶は無機塩が低 pH 中で急速な沈着をした時にでき、逆に菱面体結晶は無機塩の非常にゆっくりした沈着と細管内での経時変化によるものと記載しているからである。

EPMA による元素分析では象牙質表面に沈着した層の中間から象牙細管に接する部分で Mg, P, Ca が検出され、これは象牙質の成分と一致している。しかし表面では P と Ca 以外に Al, Si, S も存在し、口腔内における複雑な環境を思わせるが、この結果についてはさらに検索を続けて行く予定である。また硬化象牙質の細管内結晶、管間基質、管間基質についての元素分析では細管内結晶物に Mg が比較的多く存在していた。田熊 (1976)³²⁾ は "環境中に二価の Mg, Fe, Mn イオ

ンが少量存在すると、形成されるリン酸カルシウム結晶はリン酸オクタカルシウムよりウィトロカイト (whitlockite, 第三リン酸カルシウム, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) に似てくる", そして "ウィトロカイトの出現しやすい領域は、蝕蝕変化固有の酸性環境ではなくて、充分量の Mg を含む中性ないしは弱アルカリ pH の領域であり、従って象牙質細管などにおけるウィトロカイト結晶の存在は蝕蝕変化の進行よりも、おそらく局所的アルカリ化により蝕蝕が停止したことを意味している" と記載し、また Kodaka, et al. (1981)¹⁸⁾ は歯石中の六面体結晶(Mg を含むリン酸カルシウム結晶)を元素分析し、その Ca と P, Mg と Ca のモル比から Mg-ウィトロカイト (whitlockite) と同定している。これらを考え合せると、Mg の存在は大変興味深い結果である。しかし細管内における結晶形成と微量元素の問題は非常に複雑であり、さらに検索を進めて行く必要がある。

結 論

咬耗による歯冠硬化象牙質の細管内沈着物について、その形態と位置的分布状態を走査電子顕微鏡によって観察し、一部は EPMA (EDS) による組成分析を行ない次の如き結論を得た。

1. 咬耗象牙質の露出表面には微細な沈着物の厚さ約 8 μ の一層が形成されていた。

2. 象牙細管内の構造物は、結晶物と線維構造物とに大別される。

3. 結晶物は露出表面下約 30 μ から刺戟象牙質に至る間ではばば様に分布し、明瞭なる量的および形態的差異は認められなかった。

4. 象牙細管内の結晶物は形態的に菱面体結晶、複合体結晶、角錐形結晶、階段状結晶、板状結晶、立方体結晶、丸型結晶、角柱形結晶、微細顆粒状結晶、桿状結晶に分類できた。

5. 線維構造物にはコラーゲン線維と象牙線維があり、いずれも石灰塩が沈着していた。また前者は表面より 0.75~1.6mm の部に多くみられた。

6. 咬耗象牙質表面の沈着物の組成は、その表面では Al, Si, P, S, Ca が存在しているが、深部では Mg, P, Ca になっていた。

7. 細管内結晶物と象牙質の Mg の量を比較すると、結晶物>管周基質>管間基質なる関係を示した。

文 献

- 1) 赤羽章司, 枝 重夫, 川上敏行, 林 俊子, 中村千仁, 渡辺郁馬, 山崎喜之 (1978) 歯根透明象牙質の Microradiography と Electron-microscopy, 第2報. とくに波長分散形とエネルギー分散形との比較観察. 松本歯学, 4: 127-137.
- 2) Beust, T. B. (1931) Post eruptive changes in the maturation of teeth. J. Amer. dent. Ass. 18: 2186-2192.
- 3) Boyde, A. and Lester, K. S. (1967) An electron microscope study of fractured dentinal surfaces. Calc. tiss. Res. 1: 122-136.
- 4) Brännström, M. and Garberoglio, R. (1972) The dentinal tubules and the odontoblast processes. A scanning electron microscopic study. Acta odontol. Scand. 30: 291-311.
- 5) 出口 靖 (1972) ヒトの歯の象牙細管およびその側枝の走査電子鏡の研究. 日大歯学, 46: 183-188.
- 6) 枝 重夫 (1980) 歯牙硬組織の増齡的变化. 歯界展望, 56: 893-903.
- 7) 枝 重夫, 川上敏行, 林 俊子, 中村千仁, 赤羽章司, 渡辺郁馬, 山崎喜之 (1978) 歯根透明象牙質の Microradiography と Electron-microscopy, 第1報. 松本歯学, 4: 19-26.
- 8) Fish, E. W. (1928) Dead tracts in dentine. Proc. Roy. Soc. Med. 22: 227-236.
- 9) Fish, E. W. (1931) The reaction of the dental pulp to peripheral injury of the dentine. Proc. Roy. Soc. B. 108: 196-208.
- 10) Frank, R. M. (1968) Ultrastructural relationship between the odontoblast, its process and the nerve fibre. in Symons, N. B. B. ed.: Dentine and Pulp. 115-145. Univ. of Dundee, Dundee.
- 11) Frank, R. M., Wolff, F. and Gutmann, B. (1964) Microscopie electronique de la carie au niveau de la dentine humaine. Archs oral Biol. 9: 163-179.
- 12) Helmcke, J. G. (1955) Elektronenmikroskopische Strukturuntersuchungen an gesunden und kranken Zahnen. Deuts. Zahnärztl. Z. 10: 1461-1478.
- 13) Herting, H. C. (1965) Elektronenmikroskopische beobachtungen an kariösem Dentin. Deuts. Zahnärztl. Z. 20: 704-716.
- 14) 一条 尚, 山下靖雄, 小野 毅, 脇田 稔, 鈴木駿介, 小沢幸重, 後藤仁敏 (1975) 象牙質の基質線維と象牙細管の構造について. 口病誌, 42: 75-139.
- 15) 今井三男 (1973) ヒトの歯の象牙質基質線維の走

- 査電子鏡的研究. 日大歯学, 47: 376—381.
- 16) Johansen, E. and Parks, H. F. (1962) Electron-microscopic observations on sound human dentine. *Archs oral Biol.* 7: 185—193.
 - 17) 木津健夫 (1979) Dead tract 部象牙細管の走査電顕による観察. 日大歯学, 53: 50—55.
 - 18) Kodaka, T., Debari, K. and Higashi, S. (1981) Crystals composed of Ca, P and Mg in human dental calculi. *J. Electron Microsc.* 30: 238.
 - 19) 桑幡常昭 (1979) 第2象牙質の走査電子顕微鏡的観察. 日大歯学, 53: 1059—1065.
 - 20) Lester, K. S. and Boyde, A. (1968) The surface morphology of some crystalline components of dentine. in Symons, N. B. B. ed.: *Dentine and Pulp.* 197—219. Univ. of Dundee, Dundee.
 - 21) Mendis, B. R. N. and Darling, A. I. (1979) A scanning electron microscope and microradiographic study of closure of human coronal dentinal tubules related to occlusal attrition and caries. *Archs oral Biol.* 24: 725—733.
 - 22) 見明 清 (1978) 歯の局所微細構造について—老化に対する超微細構造的变化. 歯科学報, 78: 353—367.
 - 23) 見明 清 (1979) 増齢に伴う歯牙の変化—硬組織と歯髓について. 日歯評論, 440: 34—44.
 - 24) Mjör, I. A. (1972) Human coronal dentine: structure and reactions. *Oral Surg.* 33: 810—823.
 - 25) Nalbandian, J., Gonzales, F. and Sognnaes, R. F. (1960) Sclerotic age changes in root dentin of human teeth as observed by optical, electron, and x-ray microscopy. *J. dent. Res.* 39: 598—607.
 - 26) 荻原 弘 (1975) ヒト象牙質蝕蝕病巣の二次的石灰化. 歯科学報, 75: 256—285.
 - 27) Sarnat, H. and Massler, M. (1965) Microstructure of active and arrested dentinal caries. *J. dent. Res.* 44: 1389—1401.
 - 28) Selvig, K. A. (1968 a) Ultrastructural changes in human dentine exposed to a weak acid. *Archs oral Biol.* 13: 719—734.
 - 29) Selvig, K. A. (1968 b) Effect of fluoride on the acid solubility of human dentine. *Archs oral Biol.* 13: 1297—1310.
 - 30) Selvig, K. A. (1969) Biological changes at the tooth-saliva interface in periodontal disease. *J. dent. Res.* 48: 846—855.
 - 31) Sundström, B., Takuma, S. and Nagai, N. (1970) Ultrastructural aspects of human dentine decalcified with chromium sulphate. *Calc. Tiss. Res.* 4: 305—313.
 - 32) 田熊庄三郎訳, Newesely, H. 原著 (1976) 歯の石灰化と微量元素. 33—68. 医学書房, 東京.
 - 33) Takuma, S. and Kurahashi, Y. (1962) Electron microscopy of various zones in a carious lesion in human dentine. *Archs oral Biol.* 7: 439—453.
 - 34) Takuma, S. and Eda, S. (1966) Structure and development of the peritubular matrix in dentin. *J. dent. Res.* 45: 683—692.
 - 35) Takuma, S., Sunohara, H., Sekiguchi, K. and Egawa, I. (1967) Electron microscopy of carious lesions in human dentin. *Bull. Tokyo dent. Coll.* 8: 143—165.
 - 36) Takuma, S., Sunohara, H., Watanabe, H. and Yama, K. (1969) Some structural aspects of carious lesions in human dentin. *Bull. Tokyo dent. Coll.* 10: 173—181.
 - 37) Thomas, H. F. (1979) The extent of the odontoblast process in human dentin. *J. dent. Res.* 58: 2207—2218.
 - 38) Tronstad, L. (1973 a) Ultrastructural observations on human coronal dentin. *Scand. J. dent. Res.* 81: 101—111.
 - 39) Tronstad, L. (1973 b) Scanning electron microscopy of attrited dentinal surfaces and subjacent dentin in human teeth. *Scand. J. dent. Res.* 81: 112—122.
 - 40) Tronstad, L. and Langeland, K. (1971) Electron microscopy of human dentin exposed by attrition. *Scand. J. dent. Res.* 79: 160—171.
 - 41) Tsatsas, B. G. and Frank, R. M. (1972) Ultrastructure of the dentinal tubular substances near the dentino-enamel junction. *Calc. tiss. Res.* 9: 238—242.
 - 42) Vahl, J., Hohling, H. J. and Frank, R. M. (1964) Elektronenstrahlbeugung an rhomboedrisch aussehenden Mineralbildungen in kariösem Dentin. *Archs oral Biol.* 9: 315—320.
 - 43) 山崎芳昭 (1980) 乳歯の Dead tract 部象牙細管の走査電顕による観察. 日大歯学, 54: 403—408.
 - 44) 山崎喜之 (1981) 高齢者の歯牙による歯冠および歯根の硬化象牙質に関する電子顕微鏡的研究. 松本歯学, 7: 16—49.
 - 45) 横山 健 (1979) ヒト蝕蝕象牙質の走査電顕による観察. 日大歯学, 53: 770—779.
 - 46) 吉江 保 (1974) 走査電子鏡によってヒトの歯の象牙細管腔に観察された線維について. 日大歯学, 48: 218—221.

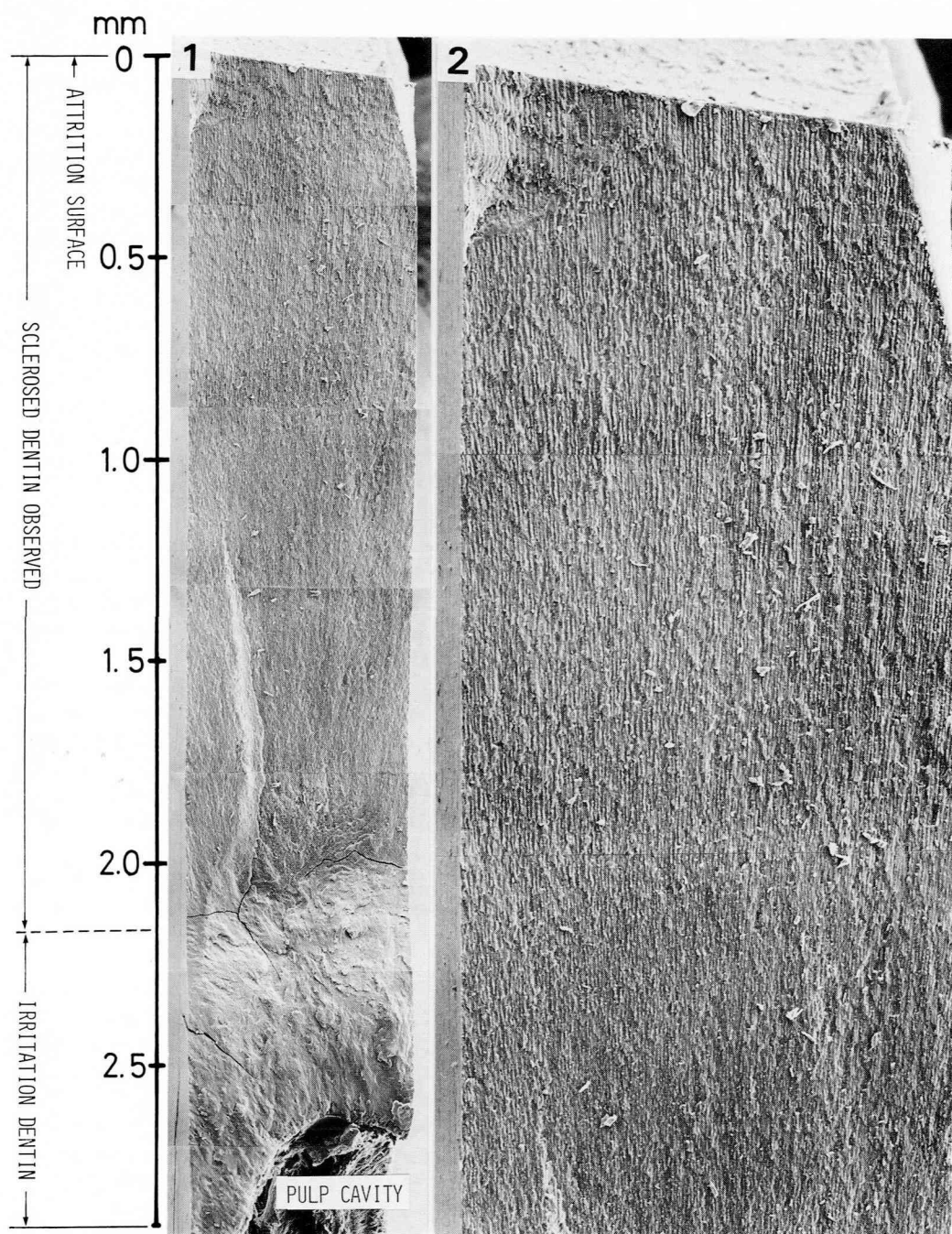
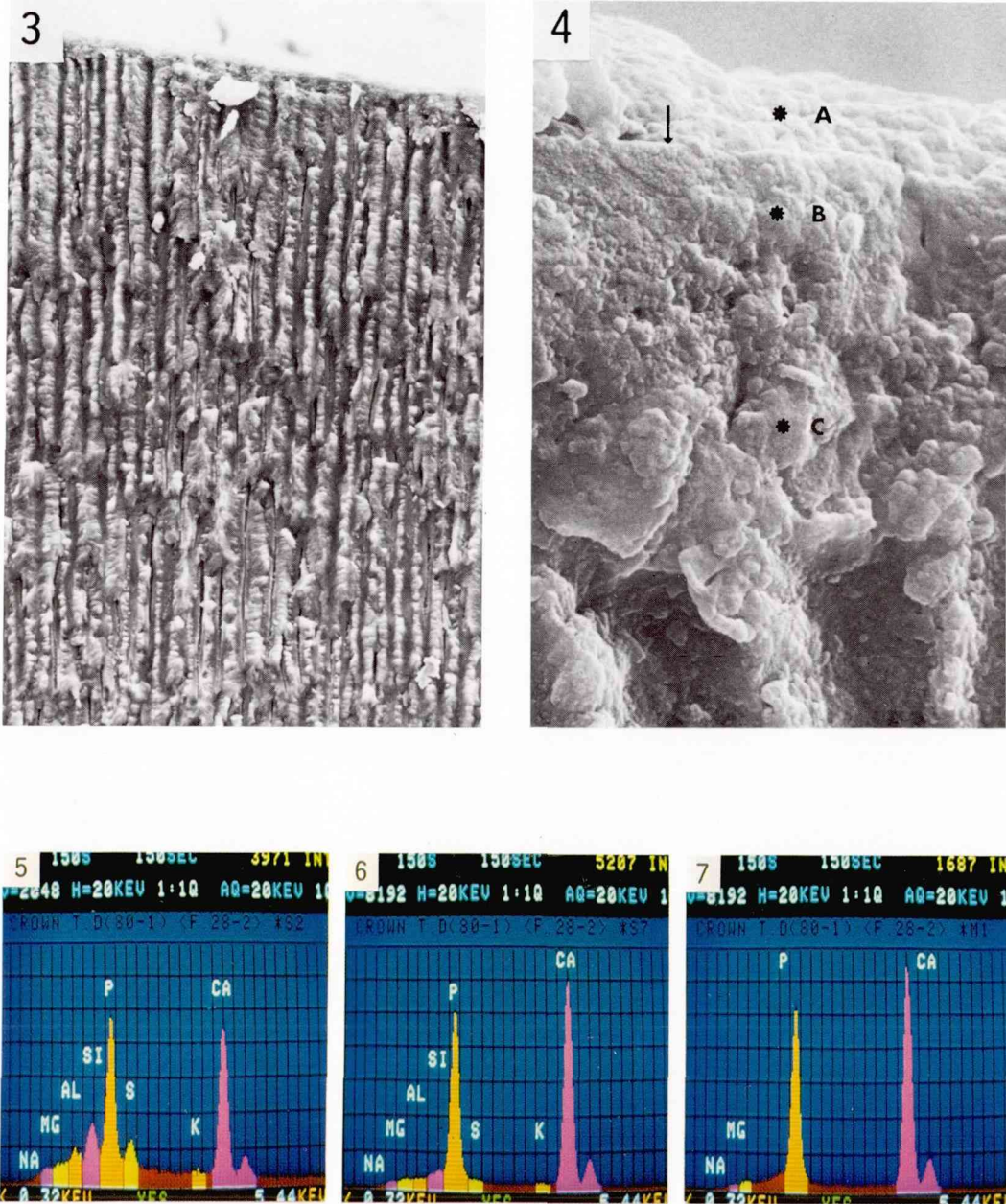


図1：咬耗により露出した歯冠硬化象牙質の断面のSEM像。以下，特にことわらない限りすべてSEM像である。上部は咬耗面である。反対側に高度な刺戟象牙質の形成がある。（75才，♂，1）
×96（以下，すべて同一試料である。）

図2：図1の一部拡大像。象牙細管が縦断されている。中央より下方にかけて数本の発育線が認められる。×210



- 図3：図2の一部拡大像，最表層では象牙細管は不明瞭であるが，下方には縦断された細管が多数見られる。×450
- 図4：図3の同様の部位の拡大像，表面（矢印）より約8 μ の厚さで微細な沈着物の層があり，その下に象牙細管が現われている。×7,500
- 図5，6，7：図4の表層部分のEDSによる元素分析スペクトル，図5は表面(A)のスペクトルでAl, Si, P, S, Caが検出されている，図6は表面下1 μ (B)におけるスペクトルでPとCaのほかSiがわずかに検出されている，図7は表面下5 μ (C)のスペクトルでMg, P, Caのピークが認められる。

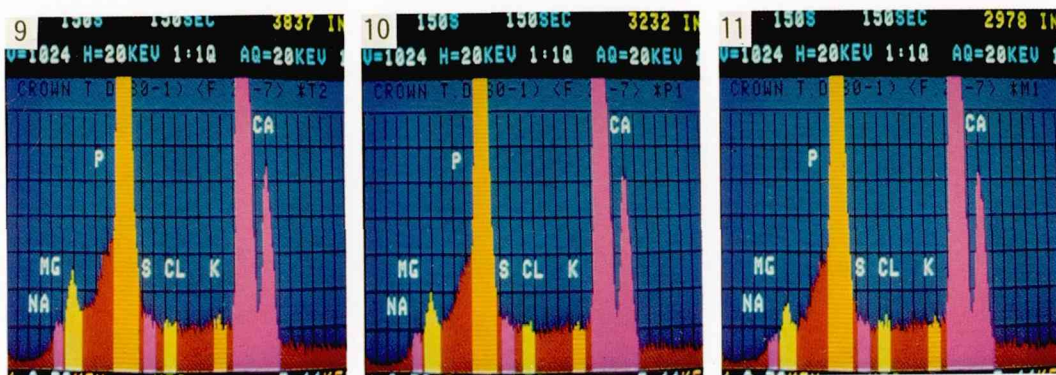
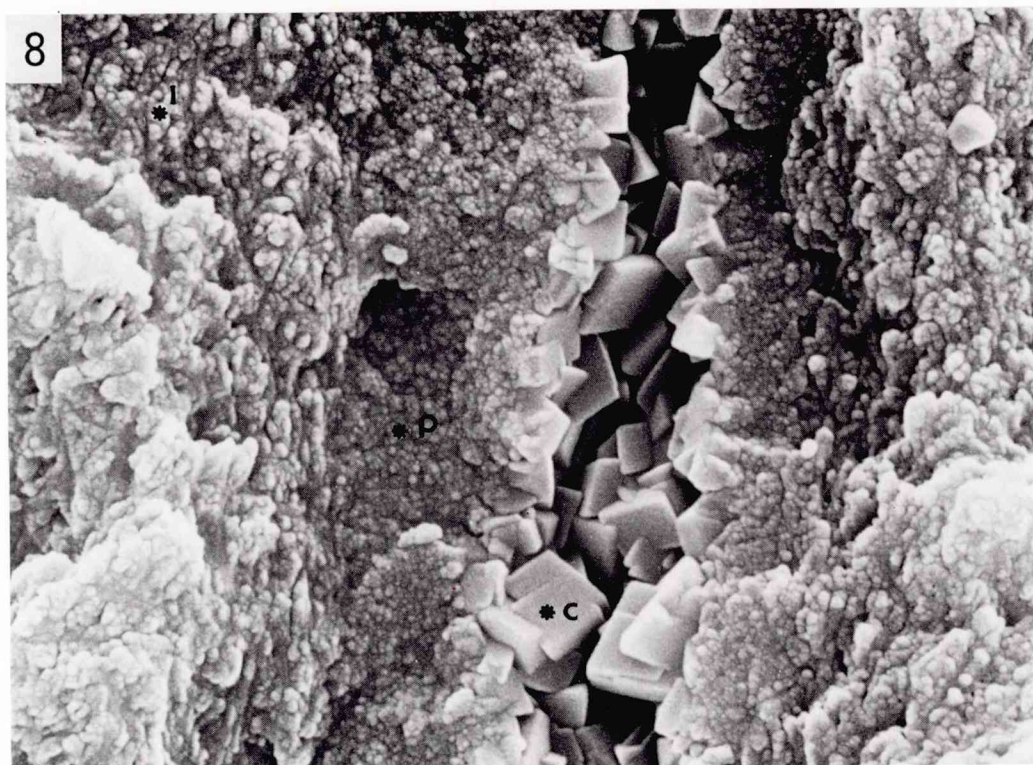


図8：歯冠硬化象牙質の表面下45 μ 。細管内には結晶性の良い大きな結晶(C)が密に沈着している。その外側には緻密な構造をした管周基質(P)，粗造な形態を呈する管間基質(I)，が観察される。
×22,000

図9，10，11：図8に見られるような細管内結晶，管周基質，管間基質のEDSによる元素分析スペクトル。図9は細管内結晶，図10は管周基質，図11は管間基質のスペクトルでMgの量で比較すると，細管内結晶>管周基質>管間基質の関係を示している。

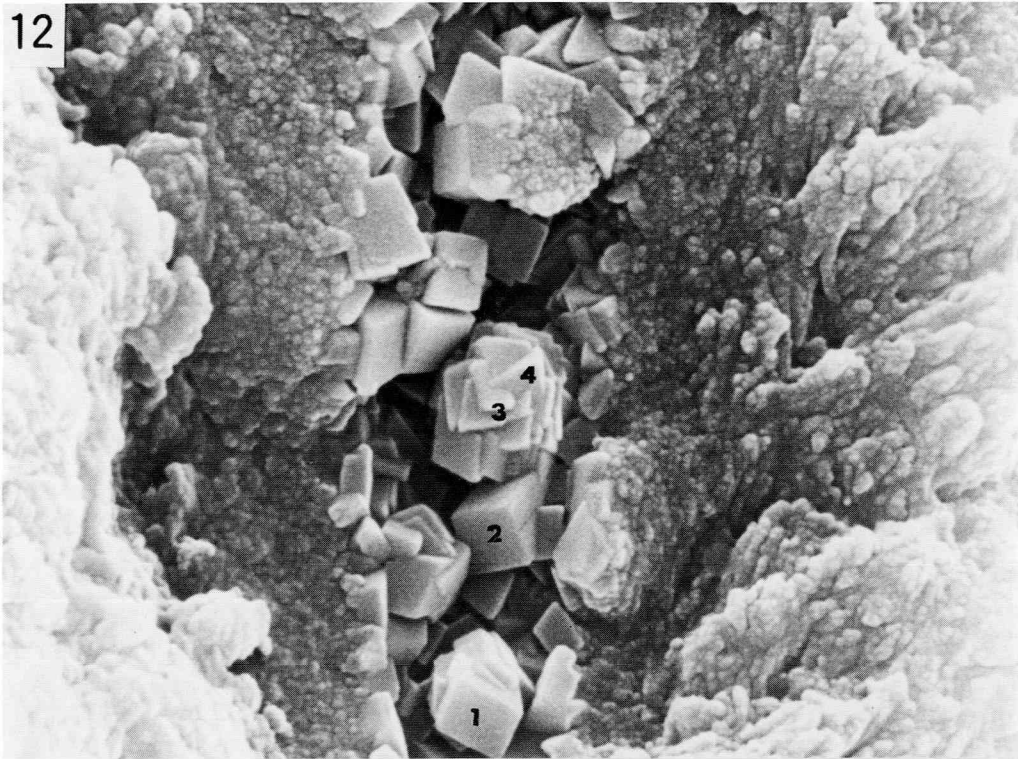


図12: 表面下0.2mmの歯冠硬化象牙質。細管内には菱面体結晶(1)が多く、一辺が約300nmの角柱結晶(2)もある。他には菱面体結晶などの結合によってできた複合体結晶(3)があり、その頂上には角錐形の結晶(4)が見られる。×25,000

図13: 表面下0.3mmの象牙質。細管内には菱面体結晶と複合体結晶があり、細管壁には直径が40~50nmの微細顆粒状結晶が沈着している。×22,000

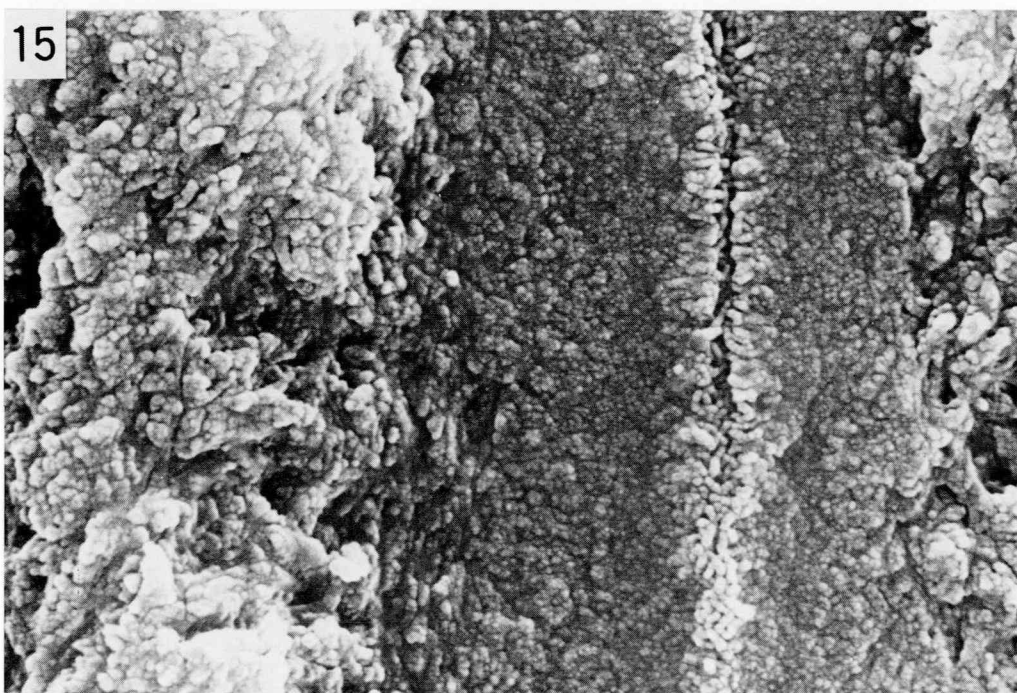
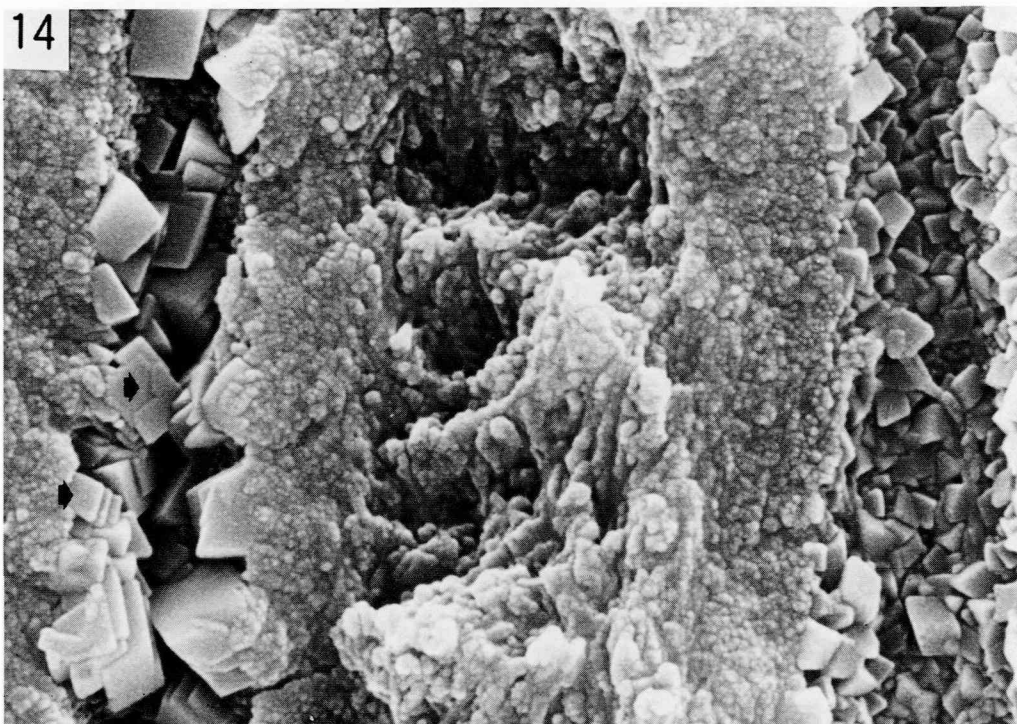


図14：表面下に0.5mmの歯冠硬化象牙質。左細管内には一辺200～400nmの菱面体結晶や階段状になった結晶（矢印）があり，右細管内には一辺100～200nmの比較的小さな結晶がある。同じ位置でもその細管によって沈着状態が異なる。×25,000

図15：表面下0.8mmの歯冠硬化象牙質。細管の中央部にわずかの間隙を残してその象牙細管は微細顆粒状結晶あるいは桿状結晶により閉鎖されている。しかし管周基質と沈着物の境界は判然としない。×22,000

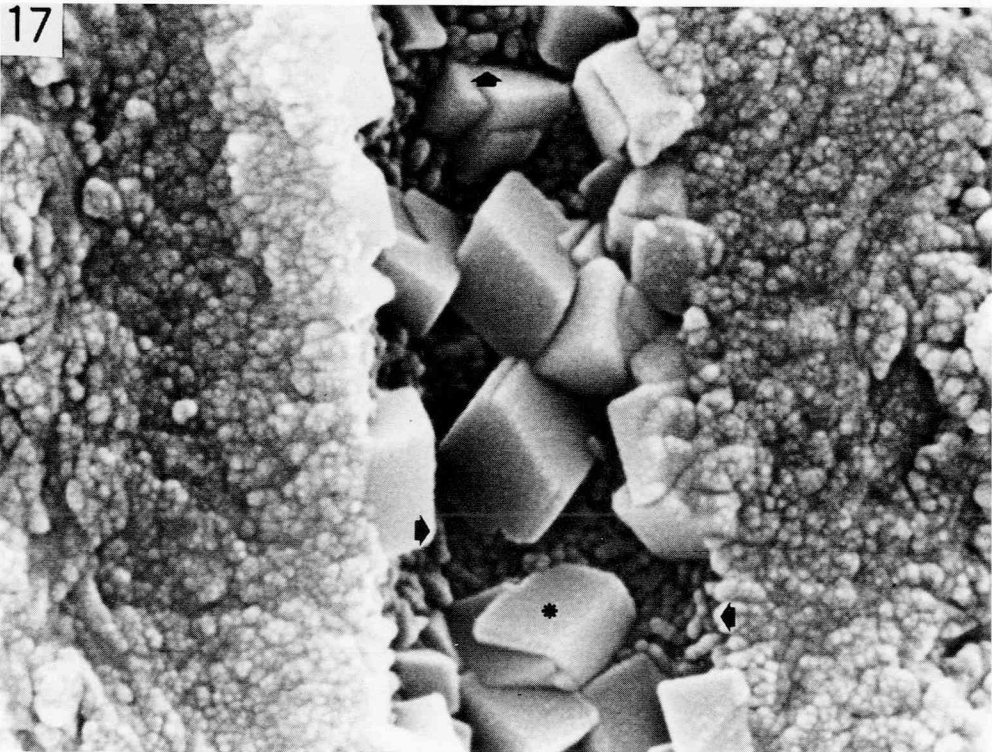
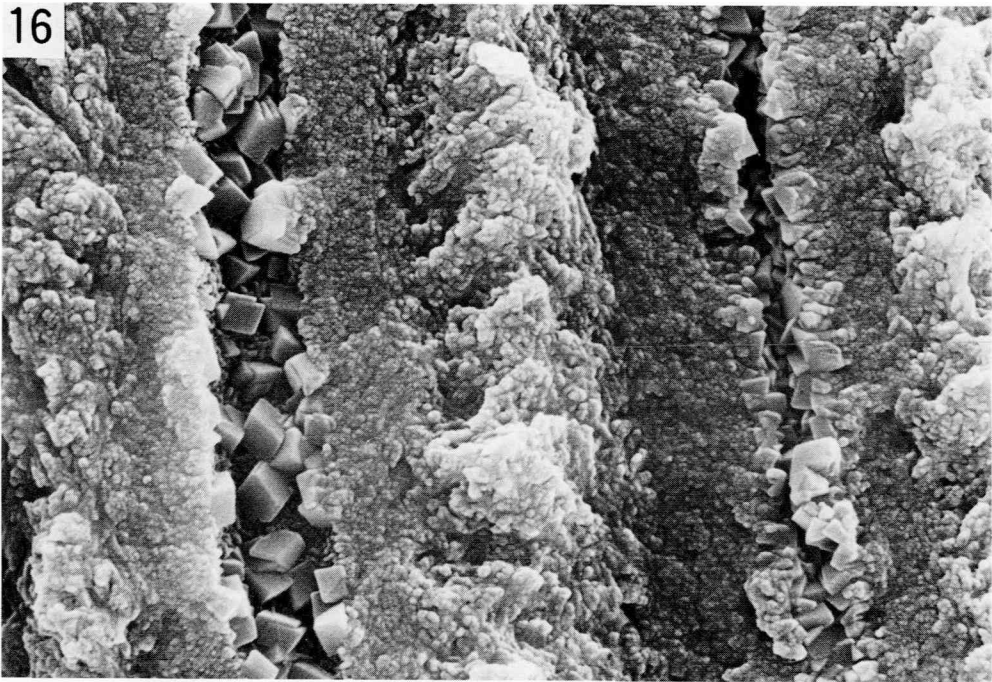


図16: 表面下 0.7mm の歯冠硬化象牙質. 左の細管内には大きな結晶が沈着し空間的なゆとりを残しているが, 右の細管はほとんど閉鎖している. $\times 13,200$

図17: 図16の拡大像. 一辺約 450nm の菱面体結晶が中央にあり, 下方の結晶(星印)は板状を呈している. 細管壁には直径約 40~50nm の微細顆粒状結晶があり, それが連なって桿状結晶(矢印)となっている. $\times 40,000$

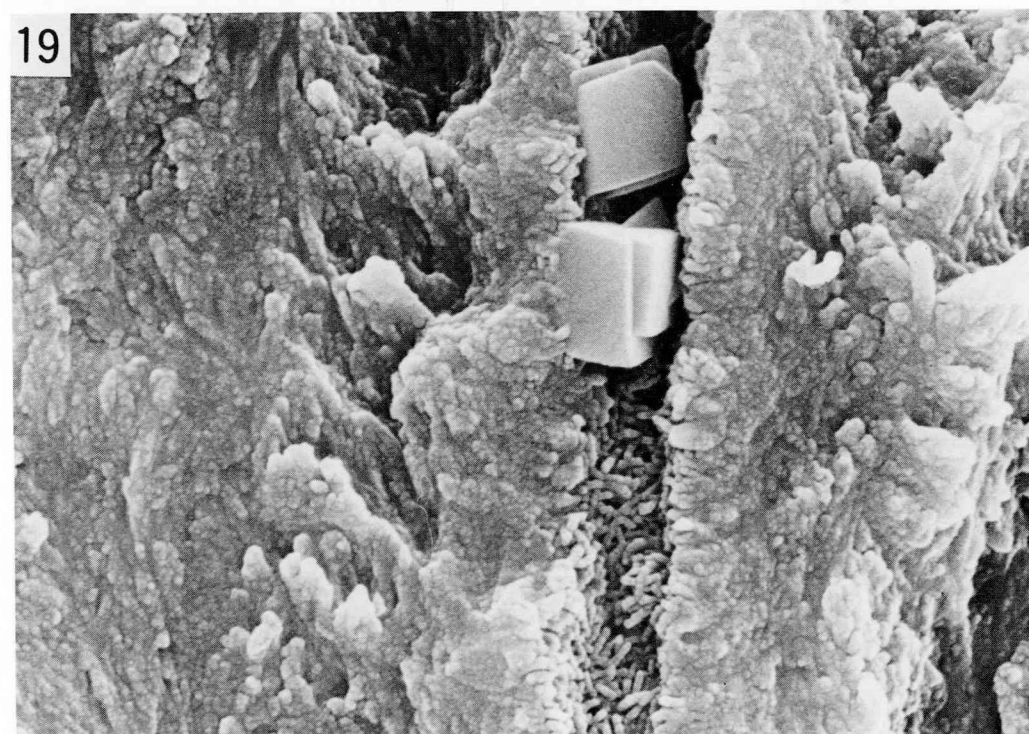
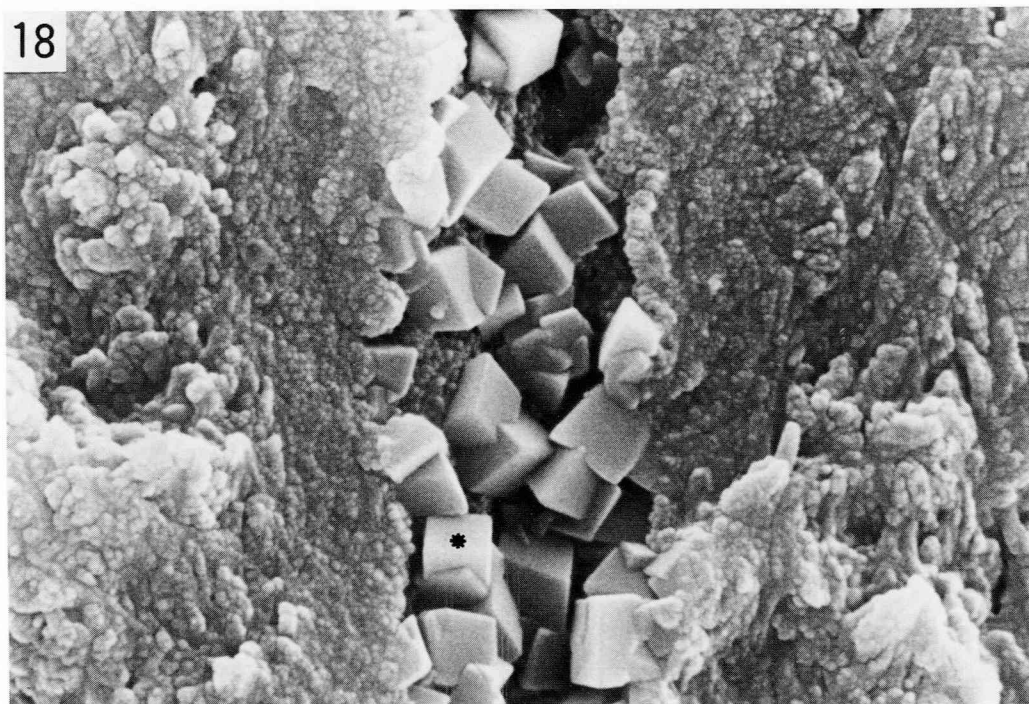
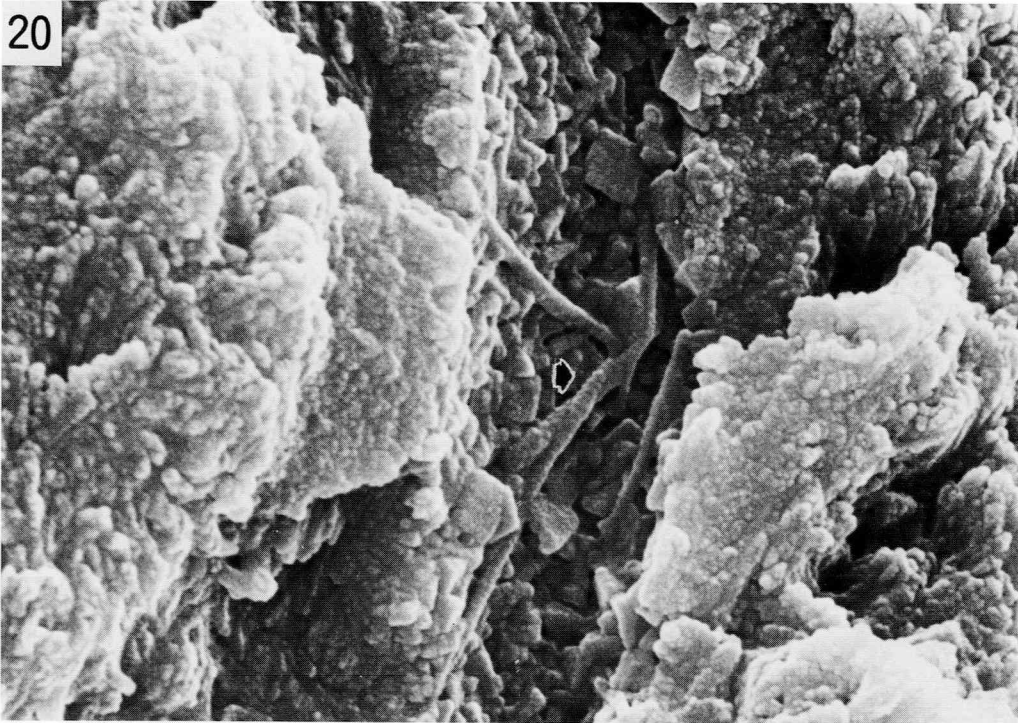


図18：表面下1.2mmの歯冠硬化象牙質。表面から刺戟象牙質に至るほぼ中間に位置し、菱面体結晶のほか立方体結晶（星印）もある。×25,000

図19：表面下2.0mmの部位。刺戟象牙質と境界を接する所である。細管壁には長さ約100～300nmの桿状結晶が多数見られる。菱面体結晶は一辺の長さが約700nmある。×22,000

20



21



22

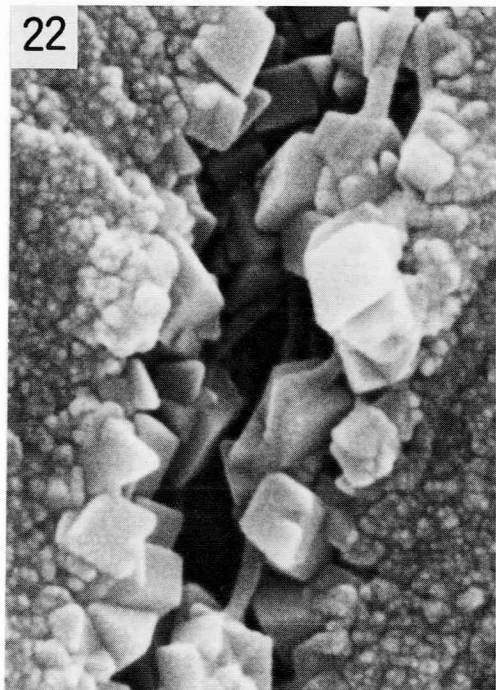


図20：歯冠硬化象牙質の表面下0.4 mmの細管内に見られた線維様物。2本の線維は矢印の所で交差し、そこに縞構造が認められるのでコラーゲン線維と判定できる。×22,000

図21：表面下0.6 mmにおいて菱面体結晶の間を走行するコラーゲン線維。×25,000

図22：表面下0.6 mmの象牙細管内において、不明瞭ながらコラーゲン線維に周期性のある縞構造が認められる。×40,000

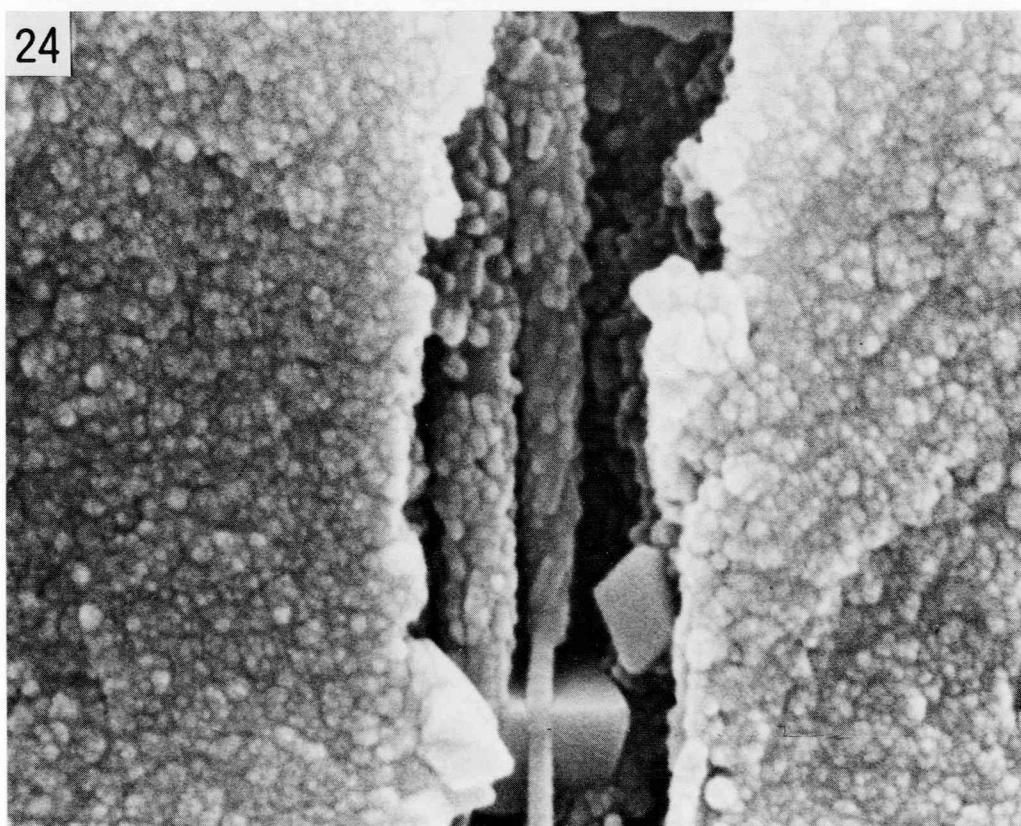
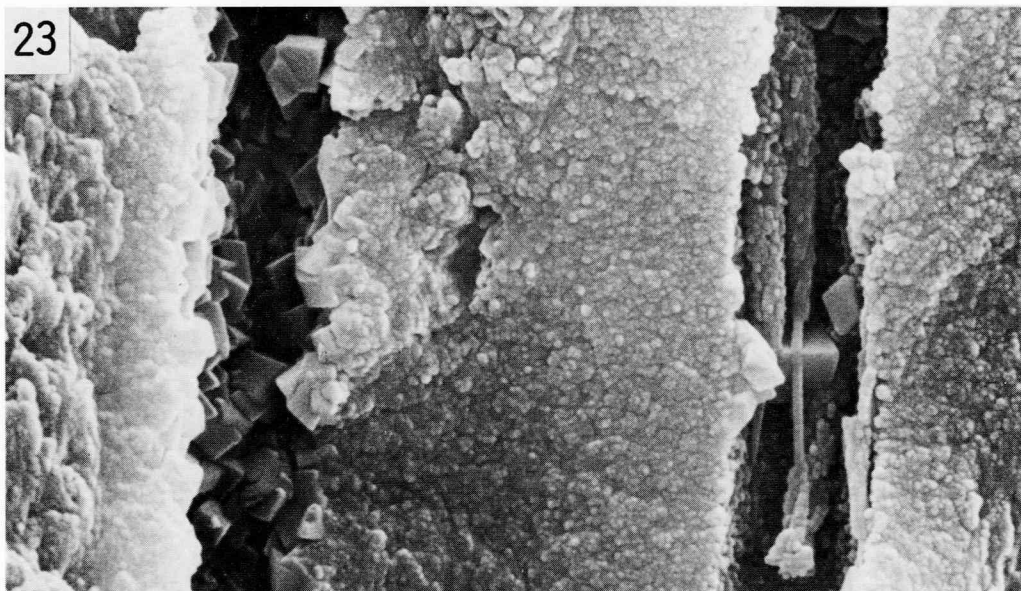
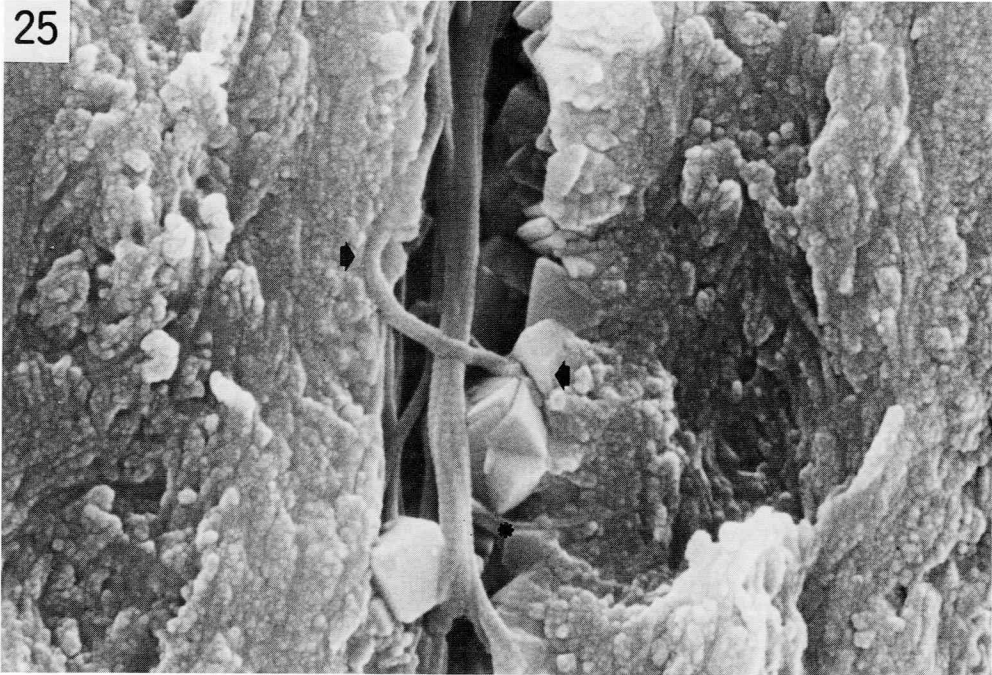


図23：表面下0.75mmの歯冠硬化象牙質。右の細管内に2本のコラーゲン線維が見られ、いずれもその途中まで微細顆粒状結晶が沈着した石灰化像を呈している。周期性的な縞構造も観察される。
×22,000

図24：図23の拡大像。コラーゲン線維には粒子の直径が約50nmの微細顆粒状結晶が沈着し、上方に行くほどその厚さを増している。下方の縞構造は約60nmの周期をもっている。
×45,000

25



26



図25：表面下2.0mmの象牙細管内に見られた線維束の分岐や吻合。矢印に示すコラーゲン線維は左細管壁から右細管壁へ移行し、その先端は大きな結晶物に挟み込まれている。またその下のコラーゲン線維(星印)は管周基質の奥深く侵入している。×25,000

図26：表面下2.0mmの象牙細管内で、多くのコラーゲン線維が束になっているが、それ自身の石灰化は全く認められない。×25,000

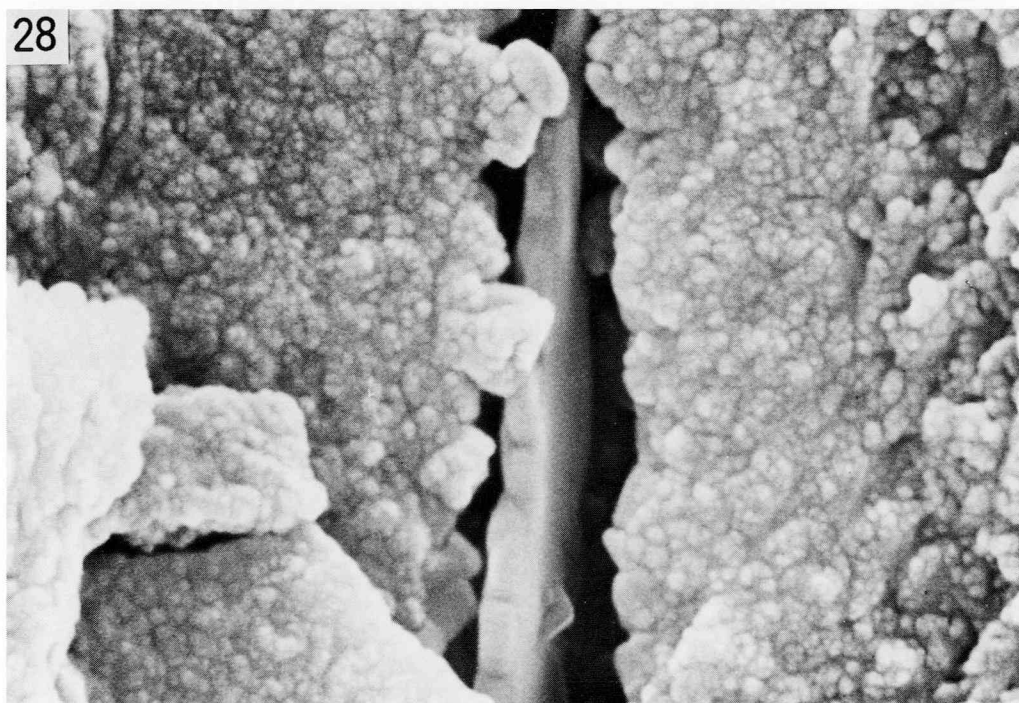
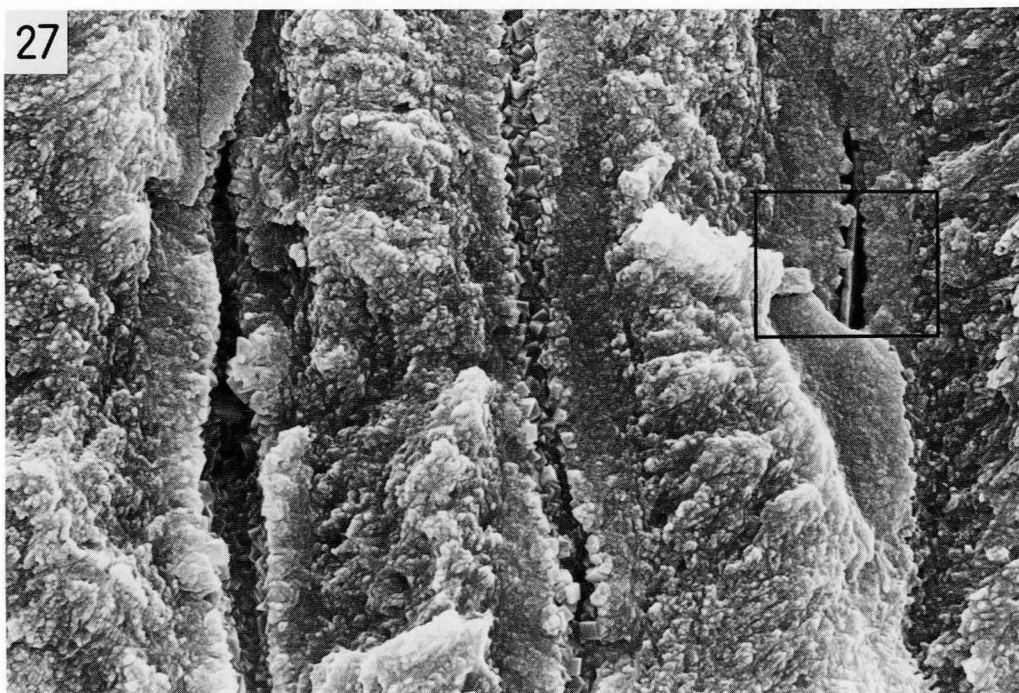


図27：表面下0.6mmの歯冠硬化象牙質，縦断された3本の象牙細管が見られる．右の細管内には板状の長い構造物が存在している． $\times 7,300$

図28：図27の枠内の拡大像．板状の構造物の表面は非常に滑らかで，微細顆粒状結晶の沈着もない．象牙線維の石灰変性物と推定される． $\times 40,000$

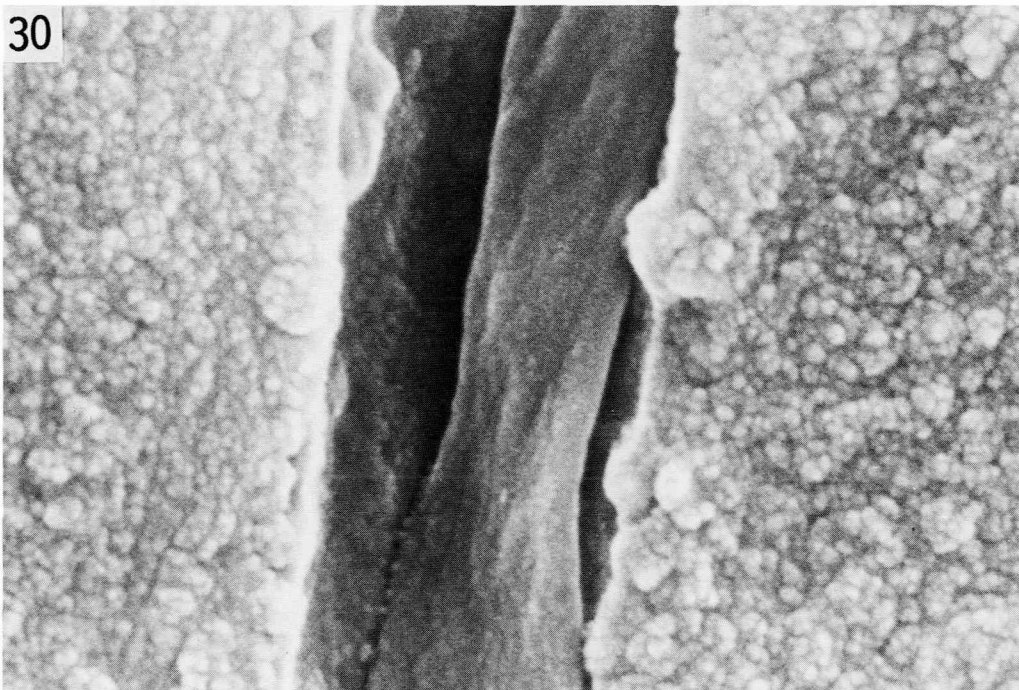
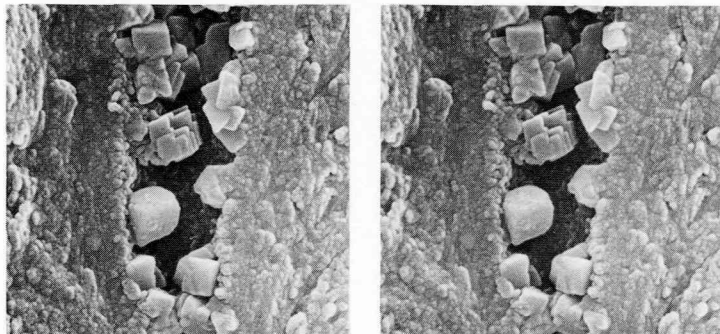


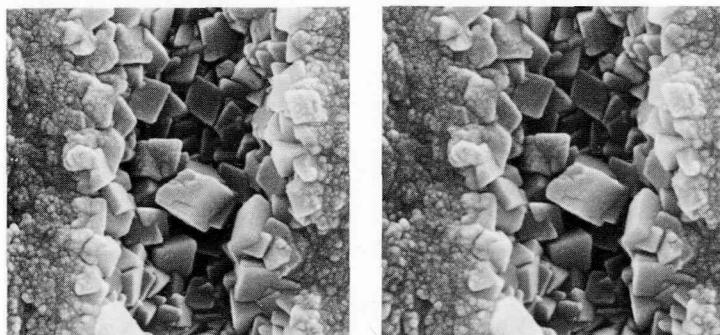
図29：表面下2.0mmの歯冠硬化象牙質。細管内に象牙線維の変性像が見られる。菱面体結晶などの沈着は全くない。×15,000

図30：図29の拡大像。微細顆粒状結晶や桿状結晶は象牙線維にも細管壁にも全く認められない。×45,000

31



32



33

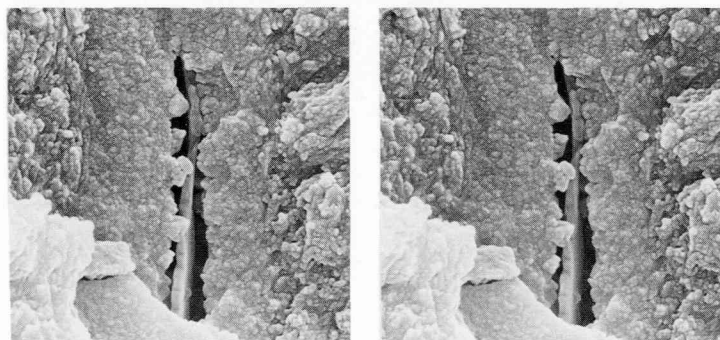


図31, 32, 33は歯冠硬化象牙質の細管内沈着物のSEM像ステレオ写真。

図31：表面下0.5mmの位置で、角の丸くなった結晶や階段構造をもった結晶が見られる。×12,000

図32：表面下0.6mmで、菱面体結晶が密に沈着している。×18,000

図33：図28のステレオ写真である。×10,000