

〔原著〕 松本歯学 7:16~49, 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

山崎 喜之

東京歯科大学 病理学教室第二講座（指導 山村武夫 教授）

### Comparative Electron-microscopy on the Sclerosed Coronal and Root Dentin Using the Teeth of Aged Patients

YOSHIYUKI YAMAZAKI

*Department of Pathology, Tokyo Dental College  
(Director: Prof. T. Yamamura)*

#### Summary

Using 29 teeth obtained from aged patients belonging 61-to 84-year-old, coronal sclerosed dentin and transparent root dentin were observed by optical, x-ray and electron microscopy both of transmission and scanning, and electron probe microanalysis both of wavelength dispersive x-ray spectroscopy and energy dispersive x-ray spectroscopy.

Results were as follows:

1. It was impossible to distinguish the peritubular matrix and the beginning of deposit in dentinal tubule by optical microscopy and microradiography.

2. In the coronal sclerosed dentin, the peritubular matrix and the closure of dentinal tubule were able to discriminate by electron microscopy. The peritubular matrix is not formed as a sclerotic age change but formed as a normal process, so these two are never confused.

3. Ultrastructure of intratubular deposits in the coronal sclerosed dentin could be divided following four types; rhombohedral, polyhedral sand-like, needle-like and minute granular crystals. The rhombohedral crystal was considered to be whitlockite.

4. The opaque sclerosed dentin consisted of the dentinal tubules filled with the crystals belonging the former three types, while the transparent sclerosed dentin, appeared rarely in the crown, was composed of the ones obliterated by minute granular crystals.

5. In the transparent root dentin the tubule closures always consisted of minute

granular crystals, so it may be called transparent sclerosed root dentin.

6. The closures of dentinal tubules both in coronal and root dentin had a property of acid-resistant.

7. Although the peritubular matrices and tubule closures in the transparent root dentin were generally difficult to discriminate even by electron microscopy, when the ultrathin sections were treated with a weak acid the closures became to appear because the peritubular matrices were demineralized.

8. According to elementary analyses the intratubular deposits both in coronal and root dentin contained usually the elements of Ca, P, Mg, Na, S, Cl and K, and some time of Si, Sr and Ba. The element of F was showed only in the intratubular deposits in the coronal dentin.

9. The quantitative analyses revealed that the tubule closures contained Ca and P with the same ratio as that of hydroxyapatite in abundance, and Na, Mg and S in a small quantity. These elements in the closures were all higher than those in the intertubular matrix.

## は じ め に

いわゆる硬化象牙質 (sclerosed dentin, sclerotic dentin) は齲蝕などの病的なもののばかりでなく、歯牙の増齢的变化として歯冠や歯根にも現われる。そしてこの象牙細管の内部には石灰塩が沈着していることが知られている (Beust, 1931 a<sup>5)</sup>, b<sup>6)</sup>; Bergman & Engfeldt, 1955<sup>4)</sup>; Röckert, 1956<sup>46)</sup>; Amprino & Camanni, 1956<sup>3)</sup>; Bradford, 1958<sup>8)</sup>; Nalbandian, et al., 1959<sup>41)</sup>; Van Huysen, 1961<sup>60)</sup>; Dreyfuss, et al., 1964<sup>11)</sup>; Mendis & Darling, 1979 a<sup>33)</sup>).

Franks & Hedegard (1973)<sup>20)</sup>の「Geriatric Dentistry」(老年歯科学)の中の「Teeth」の項にも、「歯牙の増齢的变化には、隣接部の咬耗による生理的近心移動、食物や金属イオンによる着色、咬耗と磨耗、象牙細管内石灰塩の沈着、そのための疼痛の鈍化、歯根透明象牙質の出現、セメント質の増殖などがある」と記されている。この中の象牙細管内石灰塩の沈着は、咬耗や磨耗によるものと考えられるが、光学顕微鏡的には不透明層および透明層の出現として観察され、それぞれ不透明硬化象牙質 (opaque sclerosed dentin) および透明硬化象牙質 (transparent sclerosed dentin) と呼ばれている (Beust, 1931 b<sup>6)</sup>; 1934<sup>7)</sup>). 一方、歯根部の透明象牙質も象牙細管内へ石灰塩が沈着することによって形成されるので、これも透明硬化象牙質 (transparent sclerosed dentin) と呼ぶ

ことができる。

さて、歯冠部の硬化象牙質が主として不透明になりまれに透明になることがあるのに対し、歯根部では例外なしに透明になる理由や石灰塩の由来については、いまだ詳細に検討されていないようである。そこで筆者は高齢者の歯牙を用い歯冠部と歯根部の硬化象牙質について、それぞれの超微構造を観察し、また化学的組成を分析して、これらを比較検討することにより、光学的透明性の問題および石灰塩の由来を考察しようと考え、本研究を行なった。

## 材 料 と 方 法

材料は抜去後直ちに2%グルタルアルデハイド液または10%ホルマリン液にて固定した年齢61歳以上最高84歳まで患者から得た歯牙で、肉眼的に齲蝕のない計29本を用いた(表1)。

方法: 1) マイクロラジオグラフィ

18本の歯牙について、ダイヤモンド・ジスクを用い主として歯牙の長軸に平行に厚さ約300 $\mu$ の切片を作り、砥石を使って厚さ50~70 $\mu$ の研磨標本を作製した。また一部には長軸に直角の研磨標本を作ったものもある。これらをSoftex CMRを用い、撮影条件5 kV, 5mA, 20~30分でマイクロラジオグラフを撮影した。フィルムは Eastman Kodak 社の fine grained spectroscopic film 649-0 で現像は20 $^{\circ}$ C, 5~8分間行なった。これを水洗後乾燥し、スライドグラスにバルサムにて

表1：検索歯牙

研磨標本(光顕とX線)	透過型電子顕微鏡(TEM)と X線微小部分分析装置(EPMA)
1. Ⅲ 72歳 ♂	1. Ⅱ 75歳 ♂
2. Ⅰ 84歳 ♂ *	2. Ⅱ 84歳 ♀
3. Ⅱ 72歳 ♂ *	3. Ⅰ 84歳 ♂ *
4. Ⅰ 84歳 ♀ *	4. Ⅱ 72歳 ♂ *
5. Ⅲ 70歳 ♀	5. Ⅰ 84歳 ♀ *
6. Ⅵ 74歳 ♀	6. Ⅵ 67歳 ♂ *
7. Ⅵ 67歳 ♂ *	7. Ⅱ 73歳 ♂ *
8. Ⅲ 81歳 ♀	8. Ⅱ 79歳 ♀
9. Ⅱ 73歳 ♀	
10. Ⅰ 76歳 ♀	走査型電子顕微鏡(SEM)と X線微小部分分析装置(EPMA)
11. Ⅱ 73歳 ♂ *	
12. Ⅲ 75歳 ♀	1. Ⅴ 75歳 ♂
13. Ⅳ 70歳 ♂	2. Ⅱ 75歳 ♂
14. Ⅲ 75歳 ♂	3. Ⅱ 70歳 ♂
15. Ⅰ 75歳 ♂	4. Ⅰ 78歳 ♀
16. Ⅱ 67歳 ♂	5. Ⅲ 68歳 ♂
17. Ⅷ 73歳 ♀	6. Ⅱ 75歳 ♂
18. Ⅶ 61歳 ♂	7. Ⅲ 72歳 ♂
	8. Ⅲ 74歳 ♀

註：\*印は共通の歯牙である。

封入した。研磨標本は、乾燥のまま2枚のスライドガラスにはさみ、透過光線と落下光線を使用し、顕微鏡写真を撮影した。これらと同一視野のマイクロラジオグラフの顕微鏡写真を撮り比較観察した。

2) 透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron-microscope, TEM と略)

3本の歯牙を1)と同様にダイヤモンド・ジスクで歯牙の長軸に平行に、厚さ約300 $\mu$ の切片とし、歯冠不透明層および歯根透明象牙質を確認して、その部を切り出した。また1)の研磨標本のうち5枚からも、不透明層および透明象牙質を切り出した。これらの材料をエポキシ樹脂(Epon 812)に包埋し、象牙細管が横断されるように、ダイヤモンド・ナイフ(Diatome)にて非脱灰超薄切片を作製した。これらの切片は無染色にて電子顕微鏡(日本電子 JEM 100 B)を用いて検索した。さらにこの中には電子線制限視野回折法を試みたものもある。また切片の一部については、表2に示した如き、塩酸、乳酸、燐タングステン酸、クロム硫酸の4種の酸で種々の脱灰を行なって後に観察した。

表2：切片の酸処理の条件

酸の種類	濃度	脱灰時間
塩酸	0.5mN	60sec
	1mN	15, 30, 60sec
	0.01N	15sec
	1N	15sec
乳酸	0.01%	2, 3 min
	0.1%	2 min ×
リンタングステン酸	0.025%	1 min
	0.05%	1, 1.5, 2 min
	0.1%	1 min ×
クロム硫酸	0.5%	30, 45min
	1%	10min ×

註：×印は破壊がひどく使用できなかったもの。

3) 走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron-microscope, SEM と略)

8本の歯牙をダイヤモンド・ジスクにより歯牙の長軸に平行になるよう厚さ約3mmに切断し、歯冠不透明層ないし歯根透明象牙質を確認後、象牙細管が縦断または横断になるように凍結切断を行なった。これらに金イオンスパッタ・コーティングを施して電子顕微鏡(日本電子 JEM 100 B-ASID または同 JCXA-733 型X線マイクロアナライザー)にて観察した。加速電圧はともに20kVである。

4) X線微小部分分析装置 (Electron Probe x-ray Microanalyser, EPMA と略)

これには定性分析及定量分析とがある。

i) 定性分析：3)と同じ歯牙の他の部分を用い、歯冠不透明層を凍結切断し、カーボン蒸着を施した。歯根透明象牙質は、エポキシ樹脂包埋後、バフ研磨し、カーボン蒸着を行なった。

イ) 波長分散型X線分光器 (Wavelength dispersive X-ray spectroscopy, WDS と略)によるオンライン高速定性分析

日本電子 JCXA-733 型X線マイクロアナライザーにWDSを3チャンネル装置し、コンピューター・コントロール・システムと結合させ、72元素を同時に数分間で分析した。その結果は「確実に存在している元素」と「存在の可能性がある元

素」とに区別して表示される。なお加速電圧：15 または 20 kV, プローブ電流： $2\sim 5\times 10^{-9}$  A, プローブ径 $3\sim 30\mu\phi$  ( $ZrO_2$ 上), X線取出角度： $40^\circ$ , 分光結晶：TAP, PET, LIF である。

ロ) エネルギー分散型X線分光器 (Energy dispersive X-ray Spectroscopy, EDS と略)

日本電子 JCXA-733 型X線マイクロアナライザーに Kevex-7,000 EDS を装着して分析した。加速電圧：15 または 20 kV, プローブ電流： $2\times 10^{-9}$  A, X線検出器：Si(Li) 半導体検出器である。

ii) 定量分析：イ) 歯冠硬化象牙質については、2) TEM 用の非脱灰超薄切片の一部を用い、日本電子 JEM-200 CX 分析電子顕微鏡 (Analytical Electron-microscope, AEM と略) および Kevex-7,000 EDS にて分析した。加速電圧：200 kV, プローブ電流： $10^{-11}$  A (order), X線取出角度： $72^\circ$ , 測定時間：200秒, 測定面積： $0.3\sim 1\mu m^2$ , 定量補正法：内部標準法 (クリフ・ロリマー法)

ロ) 歯根透明象牙質は、4) の i) 定性分析用と同じ材料の他の部分をバフ研磨し、カーボン蒸着を施し、日本電子 JCXA-733 型X線マイクロアナライザーに WDS を装着して分析した。加速電圧：15 kV, プローブ電流： $5\times 10^{-9}$  A, プローブ径： $2\mu\phi$  ( $ZrO_2$ 上), X線取出角度： $40^\circ$ , 分光結晶：TAP-Na, Mg PET-P, S, Ca, 標準試料：Na-NaCl, Mg-pure Mg, S-CaSO<sub>4</sub>, P, Ca 一合成磷酸カルシウムアパタイト [ $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ]

## 観 察 結 果

### 1. マイクロラジオグラフィによる観察

咬耗により露出した歯冠部の象牙質の大部分は光学的に不透明になり、透過光線で暗くみえるが (図1, 4), この部分は落下光線によると光輝を発して明るくみえる (図2)。しかし咬耗の中心部の象牙質に、前とは逆に、透明になって透過光線では明るく (図1矢印), 落下光線では暗くみえる部分が現われることがある (図2の同部位)。マイクロラジオグラフでは、これら咬耗部の不透明層、透明層とも同様にX線不透過性になっていることが注目される (図3, 5)。

歯根透明象牙質は透過光線では明るく (図1), 落下光線では暗くみえるが (図2, 6), マイクロラジオグラフではややX線不透過性で (図3), こ

れを詳細に観察すると正常象牙質では象牙細管が明瞭であるのに、透明象牙質では象牙細管が不明瞭になっていることが判る (図7)。

以上のことをさらに検討するため、象牙細管が横断されている研磨標本のマイクロラジオグラフを観察してみる。図8は咬耗象牙質の表層に近いところである。象牙細管内に種々な程度にX線不透過性物質が沈着している。すなわち細管を完全に閉鎖した状態のもの、中央部のみがわずかにX線透過性のもの、さらにほとんど沈着の認められないものなどである。象牙細管内にまったく沈着物がなくても輪状のX線不透過性の構造物があるのは、管周基質 (peritubular matrix) と呼ばれるものである。このものと象牙細管壁にわずかに沈着したものとの区別は光顕レベルでは不可能である。

歯根透明象牙質においても、象牙細管横断標本によれば、象牙細管内にX線不透過性の物質が種々な程度に沈着していることが明らかである (図9)。右上方に正常象牙質がみられるが、ここでは象牙細管内に沈着物はまったく認められない。なお、歯根部では管周基質の発達は悪いため、図8でみられたような輪状構造物を持たないものも観察される。

### 2. 歯冠硬化象牙質

#### i) SEM 所見

まず咬耗部象牙質の象牙細管縦断面を調べてみる。図10は最表層で上部は咬耗面を示す。咬耗面に続く一層は象牙細管が不明瞭であるが、その下層からは象牙細管が識別できるようになり、さらに一部のものでは細管腔が現われている (図10中央より左側)。それらの象牙細管では緻密平坦な管周基質が粗な管間基質 (intertubular matrix) と区別されて明瞭である。図11は同様の部位の拡大像である。最表層は微細な沈着物のために象牙細管は判然としない。直下では象牙細管が認められるが、大部分は均一平坦な断面で、左側の1本のみが管腔が明瞭で内部に不定形の沈着物を保有している。なお管腔を持たない象牙細管のすべてが、細管の中心部で切断されたものとは限らないことは論を俟たない。

次に象牙細管内沈着物の形態をみてる。図11に示した微細顆粒状物が密集して沈着しているものの他に、やや大きな砂状物 (図12中央上部) や



大小不同の六面体結晶(図12右側, 図13)などがあり, とくに後者は特徴的である。図14, 15はともに象牙細管内にみられた collagen 線維と六面体結晶との関係を示したものである。collagen 線維を囲繞するように沈着している。なおこの collagen 線維が管周基質を経て管間基質と連絡するかの如き所見が得られた(図14矢印)。

象牙細管が横断されるような断面では, 図8のマイクロラジオグラフでみたような沈着物により完全に閉鎖したものから(図16左上矢印, 右下矢印)沈着物が内壁にわずかに認められるもの(図16右上枠内, 図17)まで種々であった。またいずれも管周基質と沈着物の境界は不明であった。

#### ii) TEM 所見

非脱灰超薄切片により象牙細管内沈着物を詳細に検索してみる。図18には, 3個の象牙細管がみられるが, 右上のもの(枠内)は四角形の結晶が細管内に充満しており, 他の2個では結晶は不定形でさらに若干のすき間が認められる。図19は図18上(枠内)の象牙細管の拡大像である。四角形の結晶が明瞭で, さらに管周基質が微細な顆粒状結晶の集合として, 四角形の象牙細管沈着物および collagen 線維の走行に関連して排列する微細なリボン状結晶の管間基質とは, 区別して観察される。

象牙細管内沈着物には微細な顆粒状を呈するものもある。図20の中央のものおよび右上(枠内)の象牙細管の場合がそれで, 後者(枠内)を拡大してみると微細顆粒状であることがあきらかである(図21)。これは光学的に透明ないわゆる透明硬化象牙質に多くみられる。そしてこの場合には同じような結晶から成る管周基質との区別が困難となる。なお図20において左上と右下の象牙細管内には針状の結晶がわずかに沈着しているが, これについては次にとりあげる。

図22は象牙細管内沈着の初期像を示す。管周基質の内壁に四角形の結晶が計5個(うち2個は薄い)形成され, さらに内壁にはほぼ直角に針状の結晶が付着している。さらに沈着が進むと四角形の結晶が数を増し, その間を埋めるように針状の結晶が沈着するようになる(図23)。しかし, 針状結晶のみが発達することもあり, 細管内壁から沈着しはじめて, 管腔内に針状結晶の球状集合体( $\phi$  0.4~0.6  $\mu$ )を作ることとあれば(図24), 針状結

晶のみで管腔を閉鎖してしまうこともある(図25)。

以上を総括すると, 咬耗部硬化象牙質の象牙細管内沈着物には, 1) 六面体結晶, 2) 粗大砂状物, 3) 針状結晶, 4) 微細顆粒状物の4種に大別できる。この化学組成などについては, 歯根透明象牙質の形態を記載して後に調べることにする。

### 3. 歯根透明象牙質

#### i) SEM 所見

歯冠象牙質の場合にならって, 歯根透明象牙質も象牙細管の縦断面から観察する。ほとんどすべての象牙細管は微細な沈着物により完全に閉鎖し, 粗面を呈する管間基質に対し, 滑沢な断面をみせている(図26)。拡大しても同様に, 管周基質と細管内沈着物との識別は困難である(図27)。わずかに中心部に空隙を残している象牙細管が認められる(図27矢印)。沈着が開始したばかりの象牙細管をみると, 象牙線維はすでに消失しており, また歯冠部硬化象牙質でみられた六面体や砂状の大きな結晶はまったく観察されなかった(図28, 29)。

以上の所見は象牙細管の横断像の場合も同様で, 完全に閉鎖しているもの(図30下 $\frac{2}{3}$ , 図32)中心部に空隙を残すもの(図30上 $\frac{1}{3}$ , 図31)がみられた。いずれの場合も六面体結晶はまったく認められないことが注目された。

#### ii) TEM 所見

非脱灰超薄切片による歯根透明象牙質の象牙細管内沈着物の形態も SEM 像と同様に微細顆粒状で(図33, 34), 四角形, 砂状あるいは針状の結晶はこれをまったく観察することができなかった。また管周基質との区別も判然としなかった(図34)。

### 4. 電子線回折所見

歯冠部の不透明硬化象牙質における象牙細管内六面体の電子線回折パターンを調べてみると6方向にちらばるスポット・パターンで, 単結晶であることを示した(図35, 挿入図)。一方, 歯根透明象牙質の象牙細管内微細沈着物は同心円状の回折パターンから, 方向性をもたない均質な状態であることが示唆された(図36, 挿入図)。管間基質においては, すでに図19で説明した如く細長いリボン状の結晶が collagen 線維に関連して排列して

いるが、これの電子線回折パターンは対称性に光輝を発し、その結晶がある方向性をもっていることが確認された(図 37, 挿入図)。

### 5. 酸処理所見

各種酸による切片の脱灰的变化は、切片の厚さや沈着物の石灰化程度などにより若干異なるが、酸の濃度と脱灰時間は次の組みあわせが適当であった。すなわち 0.5 N 塩酸—60 秒, 0.01%乳酸—2~3 分, 0.025%リンタングステン酸—60秒, 0.5%クロム硫酸—30分である。なお0.1%乳酸—2分, 0.1%リンタングステン酸—1分, 1%クロム硫酸—10分は脱灰が高度のため所見がとれなかった。またコロジオン支持膜のない切片では破壊がひどく鏡検に耐えなかった。

図38は歯冠硬化象牙質の切片を 0.5 N の塩酸で60秒脱灰したものである。四角にみえる六面体結晶は隅角部がわずかになめられているがよくその形態を保っている。しかし管周基質に相当する部分は脱灰により空隙となっている。一方、図39は同じ切片の他の象牙細管であるが、六面体結晶のほとんどが溶出して空隙を作り、管周基質に相当する部分も破壊されている。しかし管間基質のリボン状結晶はいまだ残存し明瞭である。このような所見は0.01%乳酸3分処理の場合にも得られた。

次に歯根透明象牙質の脱灰による変化をみてみた。図40は0.025%リンタングステン酸で60秒処理したものである。管周基質の部分が変化を受け微細な顆粒状物が残存しているのみである。それに対し、象牙細管内の顆粒状沈着物および管間基質のリボン状結晶には大きな変化は認められない。同

様な成績は、0.01%乳酸で2分脱灰したもの(図41)、0.025%リンタングステン酸で1分、0.5%クロム硫酸で30分処理した切片でも得られた。

以上の結果から、歯冠硬化象牙質ならびに歯根透明象牙質のいずれの場合でも、象牙細管内沈着物は、管周基質よりも酸抵抗性があることが示唆された。

### 6. EPMA 所見

#### i) 定性分析

WDS および EDS による定性分析では、歯冠硬化象牙質、歯根透明象牙質ともに、象牙細管内沈着物に、Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca の各元素が検出された。その他にはとくに WDS による分析で、F と Si がわずかに検出できた。1 例を示せば、歯冠硬化象牙質の象牙細管内の六面体結晶(図 42)を EDS によって分析した結果では、Na, Mg, P, S, Ca のピークが認められた(図 43)。同様な六面体結晶を WDS で高速定性分析してみると、確実に存在する元素として、Na, Mg, P, Ca があり(図 44)、先の EDS による結果(図 43)とよく一致した。なお Re が 100%検出されているが、これは後に考察する。次に歯根透明象牙質の細管内沈着物(図 45)を EDS によって分析すると、歯冠と同じように Na, Mg, P, S, Ca にピークが出現したが、S のピークは歯冠のそれよりも若干高いようである(図 46)。WDS の分析でも、同様に Na, Mg, P, S, Ca が検出された(図 47)。さらに Re も認められたが、これは後に考察する予定である。

次に細管内沈着物における S の存在を検討するため多くの材料を分析してみると歯冠硬化象牙質において必ずしも S が認められない場合がある。

表 3：歯冠硬化象牙質および歯根透明象牙質の定性分析による各元素の検出頻度

元素名	歯 冠 硬 化 象 牙 質				歯 根 透 明 象 牙 質			
	EDS分析点数16		WDS分析点数36		EDS分析点数14		WDS分析点数18	
	検出点数	割合(%)	検出点数	割合(%)	検出点数	割合(%)	検出点数	割合(%)
Na	14	87	26	72	6	43	6	33
Mg	16	100	36	100	14	100	18	100
P	16	100	36	100	14	100	18	100
S	7	44	12	33	9	64	8	44
Cl	5	31	14	39	3	21	1	6
K	3	19	3	8	1	7	0	0
Ca	16	100	36	100	14	100	18	100

表4：定性分析による各元素の検出頻度の順位

試料 \ 順位	1	2	3	4	5	6	7
歯冠硬化象牙質	Ca	P	Mg	Na	S	Cl	K
歯根透明象牙質	Ca	P	Mg	S	Na	Cl	K

すなわち EDS 16 点, WDS 36 点の合計 52 点を分析してみたところ, 前者で 7 点 44%, 後者で 12 点 33% 両者の平均 36.5% で S が検出された (表 3). 同様に歯根透明象牙質でも S が認められない場合があり, EDS 14 点, WDS 18 点合計 32 点の分析結果は, 前者で 9 点 64%, 後者で 8 点 44%, 両者の平均 53% で検出できた (表 3). 同様に他の数種の元素について調べてみると, Ca, P, Mg は歯冠, 歯根ともに 100% 検出されたが, Na は歯冠硬化象牙質では 80% 内外認められ S の 36.5% よりかなり高率であった. 一方, 歯根透明象牙質では Na は 40% 内外で歯冠部の約半分しか認められず, S の 53% を下まわっていた. その他 Cl と K は歯冠部の方がやや多く検出された (表 3). 以上の結果を, 検出できた頻度の多い順に並べてみたのが表 4 である. 歯冠では Na の方が S よりも多く, 歯根では逆に S が Na より多いことが特異な点である.

## ii) 定量分析

歯冠硬化象牙質は, 分析電子顕微鏡 (AEM) を用い, 管間基質, 管周基質, 細管内沈着物に含まれる Mg, P, Ca の 3 元素について定量分析を行ない比較した. 図 48 は分析を行なった材料の透過電子顕微鏡による走査透過像 (STEM 像) で, i が管間基質, p が管周基質, c が細管内沈着物である. それぞれ 2 ヶ所ずつ分析したが, その場所はビーム照射によるコンタミネーションのため, 黒くみえる (1~6). 2 か所の分析値の平均を求め, Mg, P, Ca の 3 元素の濃度の合計 100% になるように計算すると, 表 5 のようになる. これをみると, Mg は管間基質にもっとも多いが管周基質には少なく, P は細管内沈着物に多く, Ca は管周基質に一番多量含まれていることがわかる. さらに細管内沈着物において, 先の定性分析で Mg は Ca, P と共に 100% の割合で検出されたが (表 3), 定量的には Ca, P と比較するときわめて微量であることが明らかである.

歯根透明象牙質は WDS を使用して, 管間基質と細管内沈着物に存在する Na, Mg, P, S, Ca に

表5：分析電子顕微鏡による歯冠硬化象牙質の定量分析値

元素名	濃 度 (wt %)		
	管間基質	管周基質	細管内沈着物
Mg	3.495	1.770	2.735
P	29.830	29.845	31.940
Ca	66.675	68.385	65.325

表6：WDSによる歯根透明象牙質の定量分析値

元素名	濃 度 (wt%)		管間基質に対する細管内沈着物の濃度差
	管間基質	細管内沈着物	
Na	0.949	1.240	+30.7%
Mg	0.653	0.994	+52.2%
P	18.745	20.068	+ 7.1%
S	0.173	0.241	+39.3%
Ca	26.393	29.416	+11.5%
O	53.087	48.041	-10.5%

ついて定量分析を行なった. 管周基質をとりあげなかったのは, 走査型および透過型電子顕微鏡所見のところで述べた如く, 管周基質と細管内沈着物との区別がかならずしも明瞭でないことと, 分析面積が大きく, 管周基質のみを分析することが困難であるからである. 図49は分析した歯根透明象牙質の組成像 (COMPO 像) で, 暗い管間基質に点在する明るくみえる部分が閉鎖した象牙細管である. これら管間基質と閉鎖象牙細管のそれぞれ10か所を分析し, 平均値を求めた結果が表6である. ただしO (酸素) は前の5元素を100から引いたものである. つまり管間基質, 細管内沈着物ともに6元素を合計すると100になる. 両者を比較すると, 細管内沈着物はO以外いずれの元素も管間基質より濃度が高く, とくに Na, Mg, S は全体からみれば微量であるが, 濃度差は30%以上の増加で, その差は大きいといえることができる (表6 右側).

## 考 察

### 1. 硬化象牙質という言葉について

咬耗や磨耗のため象牙質が露出することによりその部の象牙細管内に変化が起ることは, Fish (1928, 1931)<sup>15) 16)</sup> によって注目されている. そし

て彼は、"象牙細管が露出するかあるいは高度に刺激されると、細管内のリンパ液は凝固し、象牙線維は壊死を起す。そのためそのような象牙質は研磨標本では象牙細管が透過光線により暗く見える。"と述べ、このような不透明帯を dead tract(死帯)と呼んだ。さらにこの dead tract が齶蝕や露出した歯頸部などにも現われることやその象牙細管内に石灰塩が沈着することも観察している。その後 Beust(1931 b)<sup>6)</sup> は象牙細管内に無機物質が沈着している象牙質を sclerosed dentin (硬化象牙質) と呼び、これには光学的に透明な transparent sclerosed dentin (透明硬化象牙質) と不透明な opaque sclerosed dentin (不透明硬化象牙質) があることを明らかにしている。現在、これら dead tract と sclerosed dentin (sclerotic dentin) とが同義語的に用いられているが、前者には石灰塩の沈着に無関係の不透明象牙質も含まれ、逆に透明硬化象牙質は含まれていないので、それは誤用と考えられる。Bradford (1960)<sup>9)</sup> も dead tract に2つのタイプのあることを示唆している。以上のことをふまえて、筆者は硬化象牙質という言葉を使用したのである。

## 2. 従来の研究概要

咬耗や磨耗によって現われる歯冠部の硬化象牙質についての光学顕微鏡的研究は、古くは Fish (1931)<sup>16)</sup> や Beust (1931a, b; 1934)<sup>5) 6) 7)</sup> があり、Rushton (1948)<sup>47)</sup> さらには Richardson (1966)<sup>45)</sup>、Philippas & Applebaum (1968)<sup>44)</sup> などがある。X線的な研究は Van Huysen, et al. (1933)<sup>61)</sup> を初めとし、マイクロラジオグラフによるものとしては Bergman & Engfeldt (1955)<sup>41)</sup>、Röckert (1956)<sup>46)</sup>、Amprino & Camanni (1956)<sup>3)</sup>、Bradford (1958)<sup>8)</sup>、Van Huysen (1961)<sup>60)</sup>、Weber (1974)<sup>62)</sup>、見明 (1975)<sup>35)</sup>、Mendis & Darling (1979a)<sup>33)</sup> などが挙げられ、電子顕微鏡的な業績として、Takuma & Eda (1966)<sup>53)</sup>、Selvig (1968)<sup>48)</sup>、Isokawa, et al. (1970)<sup>27)</sup>、Tronstad & Langeland (1971)<sup>58)</sup>、Tronstad (1973a, b)<sup>56) 57)</sup>、見明 (1975, 1978, 1979)<sup>35) 36) 37)</sup>、Mendis & Darling (1979b)<sup>34)</sup> など多くがある。

一方、歯根透明象牙質については、分布範囲の増齡的变化として Gustafson (1947, 1950)<sup>23) 24)</sup> が有名であるが、光学顕微鏡的には、五井 1929)<sup>22)</sup>、Simon & Armstrong (1941)<sup>49)</sup>、加藤と山崎(1957)

<sup>30)</sup>、高橋 (1959)<sup>51)</sup>、Johnson (1968)<sup>28)</sup> などの業績がある。また電子顕微鏡的には Nalbandian, et al. (1959)<sup>41)</sup>、Takuma and Eda (1966)<sup>53)</sup>、Selvig (1968)<sup>48)</sup>、森口, 他 (1975)<sup>38)</sup>、枝, 他 (1978)<sup>14)</sup>、赤羽, 他 (1978)<sup>2)</sup> などがあるが比較的少ない。

なお齶蝕の場合にも硬化象牙質が出現することは Fish (1931)<sup>16)</sup> や Baust (1934)<sup>7)</sup> 以来多数の報告があり、これが象牙細管内への石灰塩の沈着によることも、マイクロラジオグラフィー (Amprino & Camanni, 1956<sup>3)</sup>; Bradford, 1960<sup>9)</sup>; Mendis & Darling, 1979a<sup>33)</sup> など) および電子顕微鏡 (Frank, et al. 1964<sup>19)</sup>; Dreyfuss, et al. 1964<sup>11)</sup>; Takuma, et al. 1969<sup>54)</sup>; 荻原, 1975<sup>42)</sup>; Mendis & Darling, 1979b<sup>34)</sup> など) によって観察されている。

以上の業績を参照しながら、今回の観察結果について考察する。

## 3. 象牙細管内沈着物の形態について

咬耗象牙質の最表層において、象牙細管のすべてが微細な結晶によって完全に閉鎖しているのを走査型電子顕微鏡にて観察することができたが、同様の所見はすでに Mendis & Darling (1979b)<sup>34)</sup> によって "咬耗面の象牙細管はすべて管周象牙質と類似した滑沢な均一な物質により閉鎖していた。" と記載され、走査電子顕微鏡写真も示されている。ここで問題になるのはこれと、後述する深層の象牙細管内沈着物との時期的関係である。つまり表層の沈着物が最初にしかも完全に形成されてしまうと、深部の沈着物の由来を歯髄側に求めなければならない。Mendis & Darling (1979b)<sup>34)</sup> も咬耗の表面にみられる沈着物は急激な咬耗が停止して後に、外からもたされるもので、それが形成されてしまうと、象牙細管内の沈着物は外からは来られないから "象牙細管の終末が第2象牙質により閉鎖されているようにみえても、内側から来るのであろう" と苦しい考察をしている。筆者は歯冠硬化象牙質では、細管内の石灰塩は外(唾液)からの由来を考えているが、この問題については項を改めて考察することにする。

さて歯冠硬化象牙質における象牙細管内沈着物のうちで、もっとも特徴的なものは骰子形の六面体結晶であろう (図12~15, 18~19, 22~23, 35)。Frank, et al. (1964)<sup>19)</sup> は齶蝕象牙質の細管内に大きなアバタイト結晶を認め、これをウィットロカイト (whitlockite,  $\beta$ -Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) と考えた。Selvig

(1968)<sup>48)</sup>は齶蝕のない高齢者の歯牙を用い、また Tronstad & Langeland (1971)<sup>58)</sup>は咬耗により露出した象牙質を用いて、共に象牙細管内に六面体結晶を見出し、これを制限視野電子線回折の結果、whitlockite であろうとした。これと筆者の制限視野電子線回折像(図35, 挿入図)と比較してみると類似性を認めたので、ハイドロオキシapatite (hydroxyapatite) よりはウィトロカイトの単結晶であろうと考えられた。なお咬耗や磨耗に関連する硬化象牙質の細管内に沈着している六面体を電子顕微鏡で観察している研究には、Takuuma, et al. (1969)<sup>54)</sup>, Tronstad (1973b)<sup>57)</sup>, Mendis & Darling (1979b)<sup>34)</sup>, 見明 (1979)<sup>37)</sup>, 枝 (1980)<sup>13)</sup> などがあり、齶蝕象牙質では荻原 (1975)<sup>42)</sup> を挙げることができる。さらに興味深いことは、これをよく似た六面体結晶が、まれに歯石(東他, 1978<sup>26)</sup>)や唾石(亀山他, 1979<sup>29)</sup>; 森永, 1980<sup>39)</sup>)などに出現することである。

歯冠硬化象牙質の細管内沈着物には六面体結晶の他に微細顆粒状(図16, 20~21), 粗大砂状(図12 中央上部), 針状(図22~25)などが認められた。微細顆粒状結晶は Tronstad & Langeland (1971)<sup>58)</sup>が、また針状結晶は Selvig (1968)<sup>48)</sup>や Tronstad & Langeland (1971)<sup>58)</sup>も観察している。さらに針状結晶が球状の集合体を作ることがあるが(図24), これときわめてよく類似した針状結晶の集合体を、森永 (1980)<sup>39)</sup>が唾石において観察している。ただし今回のものが直径0.4~0.6  $\mu$  であり、唾石のものは2~4  $\mu$  なので大きさは異なっている。また“微細な粒状, 針状ないし薄片状, 板状”の結晶は齶蝕象牙質の細管内でも観察されている(荻原, 1975<sup>42)</sup>)。

歯根透明(硬化)象牙質の細管内沈着物の形態は、例外なしに微細顆粒状であった(図26~27, 30~34, 36, 40~41)。そしてこれは、均密に多量に沈着し完全に閉鎖した象牙細管はもちろんのこと細管壁にわずかに沈着したものも同様であった(図28~31)。この事実は、結晶成長のためのスペースがないので大きくなれないという理由を否定するものである。そしてこの均密な沈着が光学的に透明性を招来するということが認められたわけである。歯根部象牙細管内沈着物の制限視野電子線回折所見は同心円状のパターンを示し(図36, 挿入図), これは Nalbandian, et al. (1959)<sup>41)</sup>や

Selvig (1968)<sup>48)</sup>の電子線回折像によく一致しているので、ハイドロオキシapatiteであることが確認された。さらに歯冠硬化象牙質の微細顆粒状沈着物と比較すると、歯冠部では管周基質(peritubular matrix)との区別が可能であるが(図20~21), Nalbandian, et al. (1959)<sup>41)</sup>も指摘しているごとく歯根部ではそれがきわめて困難なことにも注目したい(図30~34)。歯冠部に比べると歯根部では管周基質の発達が悪いことは知られているが(枝, 1969<sup>12)</sup>), それだけでは電子顕微鏡のレベルにおいて沈着物との区別が困難な理由にはなり得ない。超微形態は似ているが、両者間には区別があるはずである。この点に関しては後にもう一度とりあげて考察する予定である。

#### 4. 象牙細管内沈着物の化学的組成

定性的には歯冠硬化象牙質、歯根透明象牙質ともに Ca, P, Mg の3元素が100%検出され、両者の差は認められなかったが、S と Na の出現率に差異があった(表4)。すなわちSは歯冠硬化象牙質ではわずか36.5%に検出されたにすぎないのに対し、歯根透明象牙質では過半数の53%の検出率をみている。この傾向は、EDS 分析による成績の図43(歯冠部)と図46(歯根部)におけるSのピークの高さの比較において図43の方がやや低いことからもうかがい知ることができる。なお歯冠、歯根ともに象牙細管内沈着物に Re が検出されたが、分光結晶に TAP を用いた場合、Ca—K $\alpha$  線と Re—M $\alpha$  線が接近しているため、Ca のピークが Re のように表示されたものであると解釈できる。その次に多い割合で検出できたものは Cl と K であるが、これらは前記元素と比較するとはるかに少ない(表3, 4)。その他歯冠部では F, Si, Sr (図44), Ba など少数例に認められ、また歯根部でも F を除き歯冠部と同様 Si, Sr, Ba (図47)がわずかに検出されたが、これらは確実に含まれているものかどうか若干の疑問が残る。しかし、中村 (1962)<sup>40)</sup>の蛍光X線分析結果によると歯石や唾石から Ba と Sr が検出されているし、発光スペクトル分析では歯石や唾石から Si が認められている。

定量的に組成をみると、歯冠硬化象牙質では、細管内沈着物の P/Ca 比は管間基質および管周基質のそれよりも若干高いこと、および Mg は管間基質と管周基質のほぼ中間の値を示したこと

が注目された(表5)。なお今回の分析では Mg, P, Ca, の3元素についてのみ行なったため、それら3元素間の量的関係は把握できたが、管間基質、管周基質および細管内沈着物の3者間の量的関係は不明である。さらにハイドロオキシアパタイトの P/Ca 比 3/4 に対し、2/4 内外で P が少ない理由も判然としない。一方、歯根透明象牙質では、細管内沈着物の方が管間基質よりも Na, Mg, P, S, Ca の5元素がいずれも多量に含まれており(表6)、これはマイクロラジオグラフ(図9)、組成像(図45, 49)の所見とよく一致した。また P/Ca 比は約 3/4 でハイドロオキシアパタイトのそれに類似していた。

#### 5. 象牙細管内沈着物の耐酸性について

今回の透過型電子顕微鏡を用いての研究において、歯冠部硬化象牙質、歯根部透明象牙質ともに象牙細管内沈着物は管周基質より耐酸性があることが証明された(図38~41)。この事実については Nalbandian, et al. (1959)<sup>41)</sup>, Takuma & Eda (1966)<sup>53)</sup>, Selvig (1968)<sup>48)</sup>らによりすでに観察されているが、筆者はここに鯨坂ら(1970)<sup>1)</sup>が走査型電子顕微鏡的に“弱酸処理により象牙細管腔内に現われた Tomes 維維とは似て否なるもの”は実は象牙細管内沈着物に他ならないと考えるものである。すなわち長谷川(1970)<sup>25)</sup>が若年者の埋伏第3大臼歯を用いて追試したところ、そのような構造物は認められなかったとしているので、筆者は先の鯨坂ら(1970)<sup>1)</sup>の材料を調べてみたところ10本の歯牙について年齢を明記していないのである。つまり10本の歯牙の中には、咬耗や磨耗の高度な高齢者の歯牙が含まれていたものと想像される。さらにこれを証明するかのように Isokawa, et al. (1970)<sup>27)</sup>は咬耗のみられないものにはこの構造物は現われず、咬耗のある象牙細管にのみ、酸処理により出現すると述べているのである。以上を要するに、鯨坂ら(1970)<sup>1)</sup>が記載した酸処理により出現する Tomes 線維に似て否なるものは耐酸性の象牙細管内沈着物が、耐酸性の弱い管周基質が溶出したために浮き彫りにされたものということができよう。

#### 6. 象牙細管内の象牙線維と Collagen 線維について

硬化象牙質において象牙細管内に石灰塩が沈着している場合、象牙線維は消失しているのが普通

である(Tronstad & Langeland, 1971<sup>58)</sup>)。今回の観察でも象牙線維と確認できる例は認められなかったが、Tronstad & Langeland (1971)<sup>58)</sup>は咬耗による硬化象牙質にたまたま存在した石灰塩の沈着をみない象牙細管に、変形し凝固した象牙線維を記載している。齲蝕の場合の硬化象牙質では、まず象牙線維が変性をこうむり、その後にアパタイトが沈着することが知られている(Frank, et al. 1964<sup>19)</sup>)。

歯冠硬化象牙質の象牙細管内に、まれに collagen 線維が認められることがある(図14~15: Frank, 1968<sup>18)</sup>; Tronstad & Langeland, 1971<sup>58)</sup>; Tronstad, 1973 b<sup>57)</sup>)。今回、象牙細管内の collagen 線維が、管周基質を通して管間基質と連絡を持つことを示唆する所見をとらえることができた(図14, 矢印)。また Thomas (1979)<sup>55)</sup>は正常な象牙質においても象牙細管内に collagen 線維が存在することがあると述べているが、これらの問題については今後さらに検討されなければならない。

#### 7. 管周基質と細管内沈着物との関係

人歯象牙質には象牙細管の周囲に石灰化の高い輪状の構造物があり、これは管周基質(peritubular matrix)または管周象牙質(peritubular dentin)と呼ばれている(Takuma & Eda, 1966<sup>53)</sup>; Takuma, 1967<sup>52)</sup>; 枝, 1969<sup>12)</sup>; Isokawa, et al. 1970<sup>27)</sup>; Mendis & Darling, 1979 a<sup>33)</sup>, b<sup>34)</sup>)。その形成については、はじめ管間象牙質(intertubular dentin)が形成されて後に作られるという説が、主として光学顕微鏡的観察(マイクロラジオグラフィを含む)から導き出された(Kramer, 1951<sup>31)</sup>; Bergman & Engfeldt, 1955<sup>4)</sup>; Bradford, 1958<sup>8)</sup>; Symons, 1968<sup>50)</sup>など)。しかもそれは年齢の増加とともに、さらに咬耗や磨耗によって形成が促進され、ついには象牙細管腔は完全に閉鎖するに至るとも記載されている(Röckert, 1956<sup>46)</sup>; Bradford, 1958<sup>8)</sup>; Mendis & Darling, 1979 a<sup>33)</sup>)。しかし電子顕微鏡的研究によって管周基質は管間基質(intertubular matrix, =管間象牙質, 広い意味の象牙質基質)が形成されるのと同時に出現することが明らかにされ(Takuma & Eda, 1966<sup>53)</sup>; Takuma, 1967<sup>52)</sup>)。このことはさらに光学顕微鏡的にも、管周基質の発達したウマの象牙質を材料にした研究で証明された(枝, 1969)<sup>12)</sup>。以上のことから、管周基質という構造物は、

発達と比較的悪い人歯を材料とした場合に光学顕微鏡的レベルでは観察がやや困難で、さらに咬耗や磨耗の際に象牙細管内壁から徐々に沈着する石灰塩との区別がまったく不可能なために、管周基質と細管内沈着物とを混同し、細管内沈着物の出現を管周基質の形成と見誤ったものであることが明白である。そのよい例として、Mendis & Darling (1979 a)<sup>33)</sup>は、最初マイクロラジオグラフィを用いて光学顕微鏡的に検索し、“管周象牙質は年齢の増加と共に成長する”と明記しているのに、次にSEM(走査型電子顕微鏡)を用いた研究では“驚くべきことには、真の管周象牙質の形成は、咬耗や齧蝕の反応として促進することではなく、年齢によっても変化しない”と訂正しているのである(Mendis & Darling, 1979 b<sup>34)</sup>)。

今回の観察でも、マイクロラジオグラフでは歯冠硬化象牙質および歯根透明象牙質の双方において管周基質と細管内沈着物との区別はできなかった(図8~9)。しかし電子顕微鏡的には、歯冠硬化象牙質では走査型(図10~15)、透過型(図18~19, 22~25)ともにあきらかに区別できた。すなわち、細管内沈着物が、六面体、砂状、針状の結晶の場合には、管周基質の緻密なものとはあきらかな対照をみせていたのである。しかし細管内沈着物が微細顆粒状の場合には、両者の区別が困難で(図16~17, 21~22)、Frank, et al. (1964)<sup>19)</sup>やTakuma & Eda (1966)<sup>53)</sup>の如き、両者の境界が明瞭な像は得られなかった。

一方、本章第3項においてすでにふれた如く、歯根透明象牙質では、電子顕微鏡をもってしても管周基質と細管内沈着物の結晶形態はともに緻密な微細顆粒状で類似しており、また両者の境界も不明瞭であった(図26~34)。この所見は、一見、管周基質が次第に厚径を増してついには細管を閉鎖してしまうことを示唆するように見えるかもしれない。しかしながら、弱酸で処理すると、管周基質は容易に溶去するのに細管内沈着物は耐酸性のため残存し、両者の区別は明瞭化する(図40~41)。この事実は、前の考え方すなわち管周基質が年齢の増加あるいは咬耗や磨耗によって成長するという説を否定するものである。なぜなら、もし管周基質が後天的に同じ形成機構で成長するのであれば、耐酸性にこのような明瞭な差異が現われることは考えられないからである。第3項の最

後において歯根部の管周基質と細管内沈着物について、もう1度考察する予定であると記したのは以上のことである。

#### 8. 象牙細管内沈着物の由来について

冒頭に記した如く、本研究の首題が歯冠硬化象牙質と歯根透明象牙質の象牙細管内沈着物を比較することにより、その由来を考察することであり、本章第3項でもその由来については項を改めて考察することになると述べているので、最後に、象牙細管内沈着物の由来について考えてみたい。Fish (1928)<sup>15)</sup>のdead tract以来、歯冠硬化象牙質の細管内に沈着する石灰塩は唾液に由来することになっているし、また歯根透明象牙質は歯髄側より由来することも確からしい。しかしこのことを確実な証拠により証明することは困難である。そこに本研究のねらいがある。

Mendis & Darling (1979 b)<sup>34)</sup>は咬耗の表面にみられる沈着物は外から由来し、深部のものは内側から来るものであろうと記しているが、枝(1980)<sup>13)</sup>は咬耗あるいは磨耗のある歯牙を用いマイクロラジオグラフィにより検索した成績を根拠に、歯冠部の硬化象牙質では、象牙細管内沈着物は唾液由来と推定している。筆者も、歯冠硬化象牙質の沈着物は、既述の如く、その結晶形態が、唾液由来の歯石や唾石に類似していることから唾液由来と考えるものである。すなわち特徴的な六面体結晶は歯石(東, 他, 1978<sup>26)</sup>)および唾石(亀山, 他, 1979<sup>29)</sup>; 森永, 1980<sup>39)</sup>)にも認められているのである。

歯根透明象牙質の成因について、五井(1929)<sup>22)</sup>は“おそらく一方において歯細管鞘、歯線維およびその側枝に、他方において灰化基質に、二次的石灰塩の浸潤沈着するによりてこれらの諸構造が平等の密度を有するに至りたる結果ならん”と述べているが、石灰塩の由来については何らの記載もない。今回の観察によると、象牙細管内沈着物は例外なしに微細顆粒状結晶で、歯石や唾石にこれに類似のものを求めることはできなかった。従って解剖学的部位もあわせ考えて、歯髄經由の組織液由来と思考される。

なお由来考察の手懸りとしようとした象牙細管内沈着物の化学的組成の定性分析においては歯冠硬化象牙質と歯根透明象牙質との間に予期したような大きな差異が認められず、沈着物由来を考察

するに至らなかった。つまり、両者間にある程度の差異があり、歯冠硬化象牙質では、細管内沈着物の化学的組成が歯石や唾石に類似するの、歯根透明象牙質のそれは歯石や唾石とはまったく異なるものと予想したのであった。なお化学的組成で残された問題点は今回は試みただけで詳細に検討できなかった定量分析にあると期待している。

## 結 論

年齢61歳から84歳までの患者から得た肉眼的に齲蝕のない前歯あるいは臼歯29本を用いて、咬耗による歯冠硬化象牙質と歯根透明象牙質について、光学顕微鏡、マイクロラジオグラフィー、走査型ならびに透過型電子顕微鏡、X線微小部分分析装置を使用して比較検索し次の如き結論を得た。

1. 光学顕微鏡的には管周基質と象牙細管内沈着物の初期像との区別はきわめて困難である。

2. しかし、歯冠硬化象牙質ではこれら両者は電子顕微鏡的には識別できるのが普通である。また管周基質は象牙質本来の構造物であり、象牙細管内沈着物は増齢的（後天的）変化であるから、この両者は明瞭に区別されなければならない。

3. 歯冠硬化象牙質の細管内沈着物の超微形態は、六面体結晶、粗大砂状結晶、針状結晶、微細顆粒状結晶などである。

4. これらの結晶のうち、六面体、粗大砂状および針状の結晶が沈着すると不透明硬化象牙質になり、微細顆粒状結晶が沈着すると透明硬化象牙質になることが確認された。

5. 歯根透明象牙質では、すべての例で象牙細管内に微細顆粒状結晶が均密に沈着していた。つまりこれは透明硬化象牙質である。

6. 硬化象牙質における細管内沈着物は、歯冠および歯根を問わずいずれも耐酸性であった。

7. 歯根透明象牙質では、細管内沈着物と管周基質との区別が電子顕微鏡をもってしても判然としないことが多いが、酸処理によると耐酸性の弱い管周基質が溶出するため、耐酸性の細管内沈着物が明瞭化した。

5. 象牙細管内沈着物の化学的組成では、定性的に、歯冠硬化象牙質と歯根透明象牙質ともにCa, P, Mg, Na, S, Cl, K（検出頻度順）などが検出されたが、歯根透明象牙質ではSがNaよりも

検出頻度が高かった。微量元素としては、ともにSi, Sr, Ba が認められたが、Fは歯冠硬化象牙質からのみ検出された。

9. 象牙細管内沈着物の定量分析では、Ca, P, Na, Mg, S の順に多く含まれていた。しかも歯根透明象牙質においては、これらは、管間基質よりいずれも多量に含まれていた。

稿を終るにあたり御指導と御校閲を賜った東京歯科大学病理学教室第2講座主任 山村武夫教授に対し深甚なる感謝の意を表わし、御指導と御鞭撻を得た松本歯科大学口腔病理学教室主任 枝重夫教授ならびに東京都養育院付属病院歯科口腔外科医長 渡辺郁馬博士に感謝を捧げ、さらに御助力を戴いた東京歯科大学病理学教室第2講座、松本歯科大学口腔病理学教室の各教室員一同と松本歯科大学電子顕微鏡室主任 赤羽章司学士に謝意を表する次第である。

## 文 献

- 1) 鯉坂正彦, 内野新平, 富田 篤, 森本昌男, 今井三男, 児玉 昭 (1970) 弱酸処理により象牙細管腔に現われた管状構造物の走査電子鏡的研究. 日大歯学, 44: 90—92.
- 2) 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.
- 3) Amprino, R. and Camanni, F. (1956) Histodiographic and autoradiographic researches on hard dental tissues. Acta Anat. 28: 217—258.
- 4) Bergman, G. and Engfeldt, B. (1955) Studies on mineralized dental tissues. VI. The distribution of mineral salts in the dentine with special reference to the dentinal tubules. Acta odontol. Scand. 13: 1—7.
- 5) Beust, T. B. (1931 a) Reactions of the dentinal fibril to external irritation. J. Amer. dent. Ass. 18: 1060—1073.
- 6) Beust, T. B. (1931 b) Post eruptive changes in the maturation of teeth. J. Amer. dent. Ass. 18: 2186—2192.
- 7) Beust, T. B. (1934) Demonstration of sclerosis of dentin in tooth maturation and caries. Dent. Cosmos, 76: 305—311.
- 8) Bradford, E. W. (1958) The maturation of the dentine. Brit. dent. J. 105: 212—216.
- 9) Bradford, E. W. (1960) The dentine, a barrier to



- caries. Brit. dent. J. 109: 387—398.
- 10) Brännström, M. and Garberoglio, R. (1972) The dentinal tubules and the odontoblast processes. A scanning electron microscopic study. Acta odontol. Scand. 30: 291—311.
  - 11) Dreyfuss, F., Frank, R. M. et Gutmann, B. (1964) La sclerose dentinaire. Bull. Group. Int. Rech. Sc. Stomat. 7: 207—229.
  - 12) 枝 重夫 (1969) 象牙質形成に関する組織化学ならびに Microradiography による研究——管周基質の形成を中心として——. 荒谷真平他編：硬組織研究. 177—208. 医歯薬出版, 東京.
  - 13) 枝 重夫 (1980) 歯牙硬組織の増齢的变化. 歯界展望, 56: 893—903.
  - 14) 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.
  - 15) Fish, E. W. (1928) Dead tracts in dentine. Proc. Roy. Soc. Med. 22: 227—236.
  - 16) Fish, E. W. (1931) The reaction of the dental pulp to peripheral injury of the dentine. Proc. Roy. Soc. B. 108: 196—208.
  - 17) Frank, R. M. (1967) The ultrastructure of the tooth from the point of view of mineralization, demineralization and remineralization. Int. dent. J. 17: 661—683.
  - 18) Frank, R. M. (1968) Ultrastructural relationship between the odontoblast, its process and the nerve fibre. in Symons, N. B. B. ed.: Dentine and Pulp: Their structural and Reactions. 115—145. Univ. of Dundee, Dundee.
  - 19) Frank, R. M., Wolff, F. et Gutmann, B. (1964) Microscopic electronique de la carie au niveau de la dentine humaine. Archs oral Biol. 9: 163—179.
  - 20) Franks, A. S. T. and Hedegård, B. (1973) Geriatric Dentistry. 1st ed. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, Edinburgh, Melbourne.
  - 21) Garberoglio, R. and Brännström, M. (1976) Scanning electron microscopic investigation of human dentinal tubules. Archs oral Biol. 21: 355—362.
  - 22) 五井道夫 (1929) 透明歯根端の組織学的所見. 歯科新報, 22: 288—298.
  - 23) Gustafson, G. (1947) Microscopic examination of teeth as a means of identification in forensic medicine. J. Amer. dent. Ass. 35: 720—724.
  - 24) Gustafson, G. (1950) Age determinations on teeth. J. Amer. dent. Ass. 41: 45—54.
  - 25) 長谷川 泰 (1970) 弱酸酸蝕によるヒトの象牙質の変化に関する走査電子鏡的研究. 日大歯学, 44: 909—912.
  - 26) 東 昇平, 小高鉄男, 小林美由紀, 井村哲子, 中川宏明 (1978) 歯石がセメント質におよぼす影響についての組織学的研究. 歯基礎誌, 20: 669—689.
  - 27) Isokawa, S., Toda, Y., Ajisaka, M., Inoue, Y., Saito, T. and Tsuchida, S. (1970) Scanning electron microscopic observation of the peritubular zone in dentin sclerosis. J. Nihon Univ. Sch. Dent. 12: 105—111.
  - 28) Johnson, C. C. (1968) Transparent dentine in age estimation. Oral Surg. 25: 834—838.
  - 29) 龜山忠光, 森永 太, 川原秀樹, 本川和寿, 北川博一, 朱雀直道, 渡辺 隆 (1979) 自然排出した大きな唾石症の 1 例. 口科誌, 28: 269—275.
  - 30) 加藤一男, 山崎長夫 (1957) 象牙質透明層の理学的性質の年齢的变化について. 日歯医誌, 10: 465—468.
  - 31) Kramer, I. R. H. (1951) The distribution of collagen fibrils in the dentine matrix. Brit. dent. J. 91: 1—7.
  - 32) Martens, P. J., Bradford, E. W. and Frank, R. M. (1958) Tissue changes in dentine. Int. dent. J. 9: 330—348.
  - 33) Mendis, B. R. R. M. and Darling, A. I. (1979 a) Distribution with age and attrition of peritubular dentine in the crowns of human teeth. Archs oral Biol. 24: 131—139.
  - 34) Mendis, B. R. R. M. and Darling, A. I. (1979 b) A scanning electron microscope and micro-radiographic study of closure of human coronal dentinal tubules related to occlusal attrition and caries. Archs oral Biol. 24: 725—733.
  - 35) 見明 清 (1975) 増齢に伴う歯牙の変化. 日歯評論, 387: 73—88.
  - 36) 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変化. 歯科学報, 78: 353—367.
  - 37) 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.
  - 38) 森口美津子, 上松博子, 坂井 剛, 見明 清, 松井隆弘, 東 昇平 (1975) 咬耗, 歯ぎん嚢および歯根透明象牙質の増齢的变化. 歯科学報, 75: 1870—1879.
  - 39) 森永 太 (1980) 走査電子顕微鏡による唾石の微細構造の観察. 口科誌, 29: 254—267.
  - 40) 中村博司 (1962) 歯石と唾石との硬組織の組成に関する物理化学的比較研究. 歯科医学, 25: 246—264.
  - 41) Nalbandian, J., Gonzales, F. and Sognnaes, R. F. (1959) Sclerotic age changes in root dentin of

- human teeth as observed by optical, electron, and x-ray microscopy. *J. dent. Res.* 39 : 598—607.
- 42) 荻原 弘 (1975) ヒト象牙質齲蝕病巣の二次的石灰化. *歯科学報*, 75 : 256—285.
- 43) Pashley, D. H., Livingston, M. J., Reeder, O. W. and Horner, J. (1978) Effects of the degree of tubule occlusion on the permeability of human dentin in vitro. *Archs oral Biol.* 23 : 1127—1133.
- 44) Philippas, G. G. and Applebaum, E. (1968) Age change in the permanent upper canine teeth. *J. dent. Res.* 47 : 411—417.
- 45) Richardson, A. (1966) Dead tracts in human teeth. Relation between incidence of tracts and age, eruptive state and degree of attrition. *Brit. dent. J.* 121 : 560—563.
- 46) Röckert, H. (1956) Some observations correlated to obliterated dentinal tubules and performed with microradiographic technique. *Acta odontol. Scand.* 13 : 271—275.
- 47) Rushton, M. A. (1948) The exposed dentine of lower incisor teeth. *Brit. dent. J.* 84 : 91—96.
- 48) Selvig, K. A. (1968) Ultrastructural changes in human dentine exposed to a weak acid. *Archs oral Biol.* 13 : 719—734.
- 49) Simon, W. J. and Armstrong, W. D. (1941) Translucent dentin. *J. Amer. dent. Ass.* 28 : 1115—1120.
- 50) Symons, N. B. B. (1968) The formation of primary and secondary dentine. in Symons, N. B. B. ed. : *Dentine and Pulp: Their Structure and Reactions.* 67—76. Univ. of Dundee, Dundee.
- 51) 高橋正行 (1959) 歯根部透明層の観察と実験的研究. 第1報 歯根部透明層の形態について. 第2報 歯根部透明層の増齡的变化について. 第3報 歯根部透明層の組織学的観察について. *口科誌*, 8 : 459—481.
- 52) Takuma, S. (1967) Ultrastructure of dentinogenesis. in Miles, A. E. W. ed. : *Structural and Chemical Organization of Teeth.* 1 : 325—370. Acad. Press. New York & London.
- 53) Takuma, S. and Eda, S. (1966) Structure and development of the peritubular matrix in dentin. *J. dent. Res.* 45 : 683—692.
- 54) 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.
- 55) Thomas, H. F. (1979) The extent of the odontoblast process in human dentin. *J. dent. Res.* 58 : 2207—2218.
- 56) Tronstad, L. (1973 a) Ultrastructural observations on human coronal dentin. *Scand. J. dent. Res.* 81 : 101—111.
- 57) Tronstad, L. (1973 b) Scanning electron microscopy of attrited dentinal surfaces and subjacent dentin in human teeth. *Scand. J. dent. Res.* 81 : 112—122.
- 58) Tronstad, L. and Langeland, K. (1971) Electron microscopy of human dentin exposed by attrition. *Scand. J. dent. Res.* 79 : 160—171.
- 59) Van Huysen, G. (1960) The microstructure of normal and sclerosed dentine. *J. Pros. Dent.* 10 : 976—982.
- 60) Van Huysen, G. (1961) The microstructure of normal and sclerosed dentine. *Norelco Reporter*, 8 : 95—97, 100.
- 61) Van Huysen, G., Hodge, H. C., Warren, S. L. and Bishop, F. W. (1933) Quantitative roentgen-ray study of certain pathological changes in dentin. *Dent. Cosmos*, 75 : 729—738.
- 62) Weber, D. F. (1974) Human dentine sclerosis : A microradiographic survey. *Archs oral Biol.* 19 : 163—169.
- 63) 山崎長夫 (1959) 歯根透明象牙質の組織学的並びに物理学的研究. *口病誌*, 26 : 216—232.

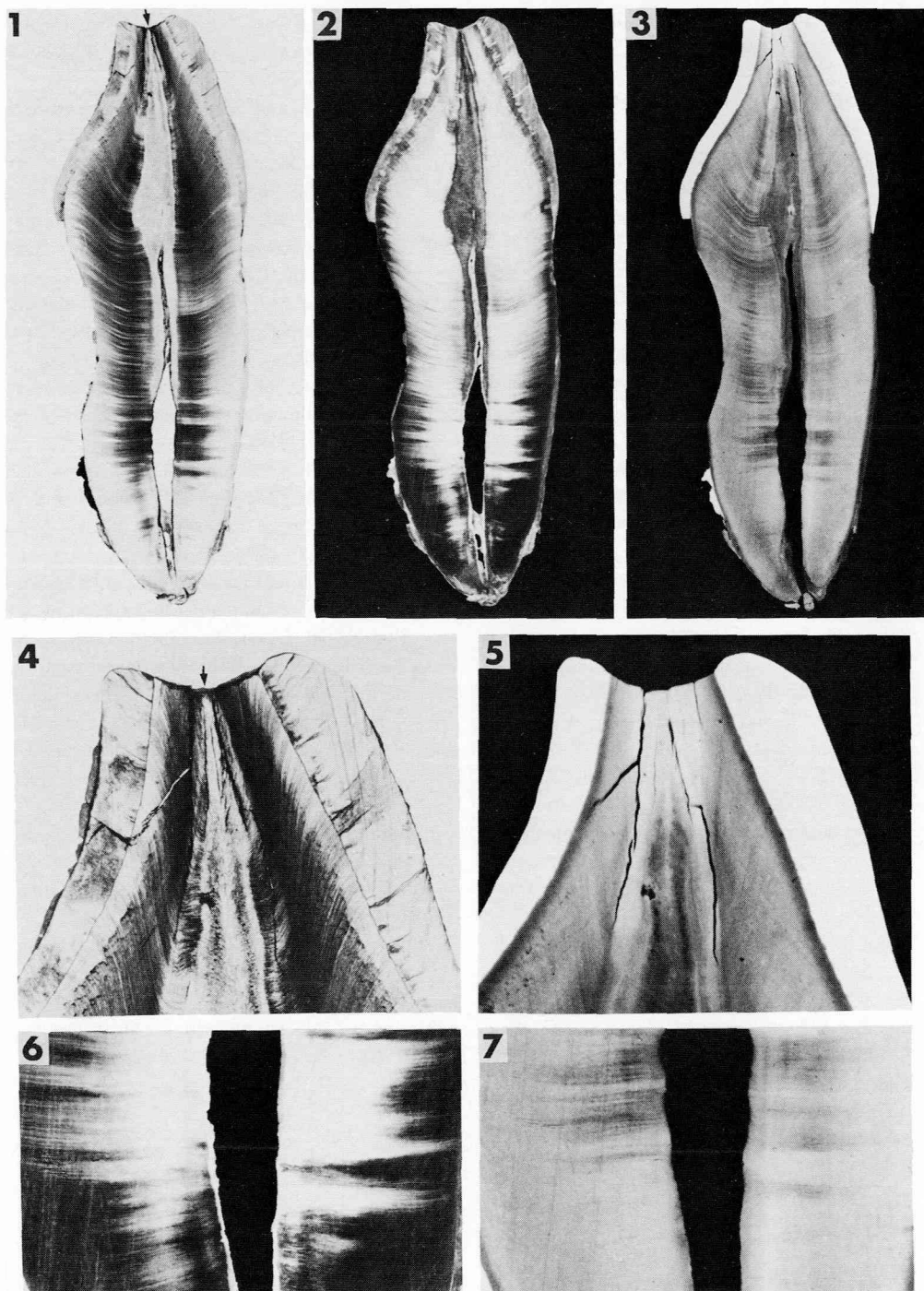


図1から図7までは84歳女性下顎右側中切歯の非包埋研磨標本から得たものである。

図1：透過光線でみたもの。切端部に不透明層がありその中心部に透明層がある(矢印)。歯根部には透明象牙質がある。 図2：落下光線でみたもので、前者とは各層の明暗が逆転している。 図3：マイクロラジオグラフ。切端部、歯根部ともにX線不透過性になっている。 図4：図1の切端部を拡大したもので、矢印は不透明層にはさまれた透明層を示す。 図5：図4と同部位のマイクロラジオグラフ。 図6：図2の歯根部の拡大像。 図7：図6と同部位のマイクロラジオグラフ。

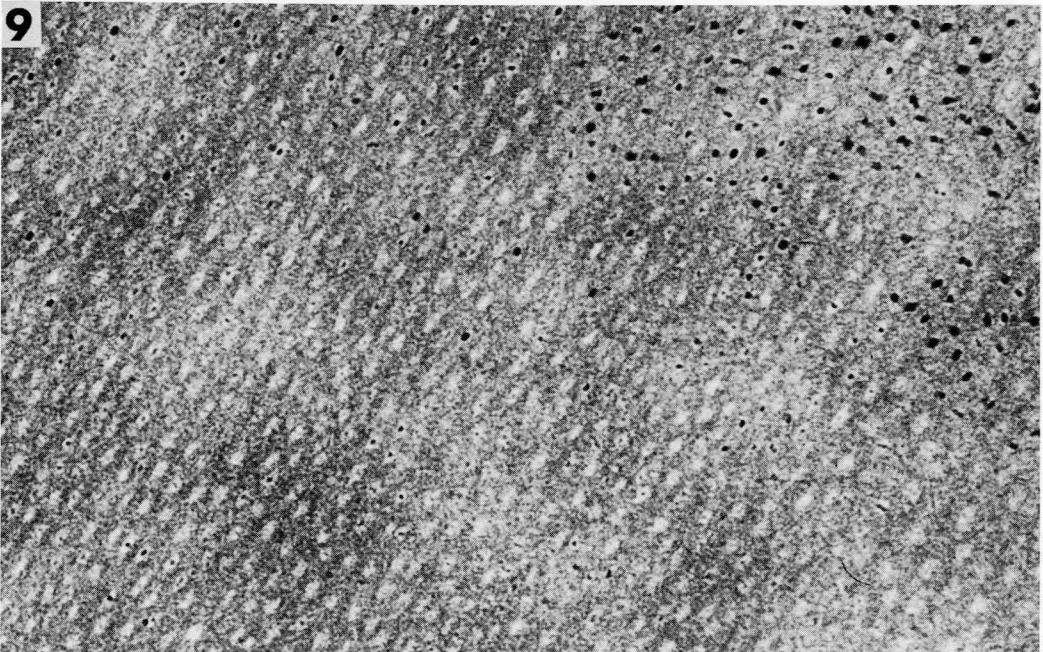
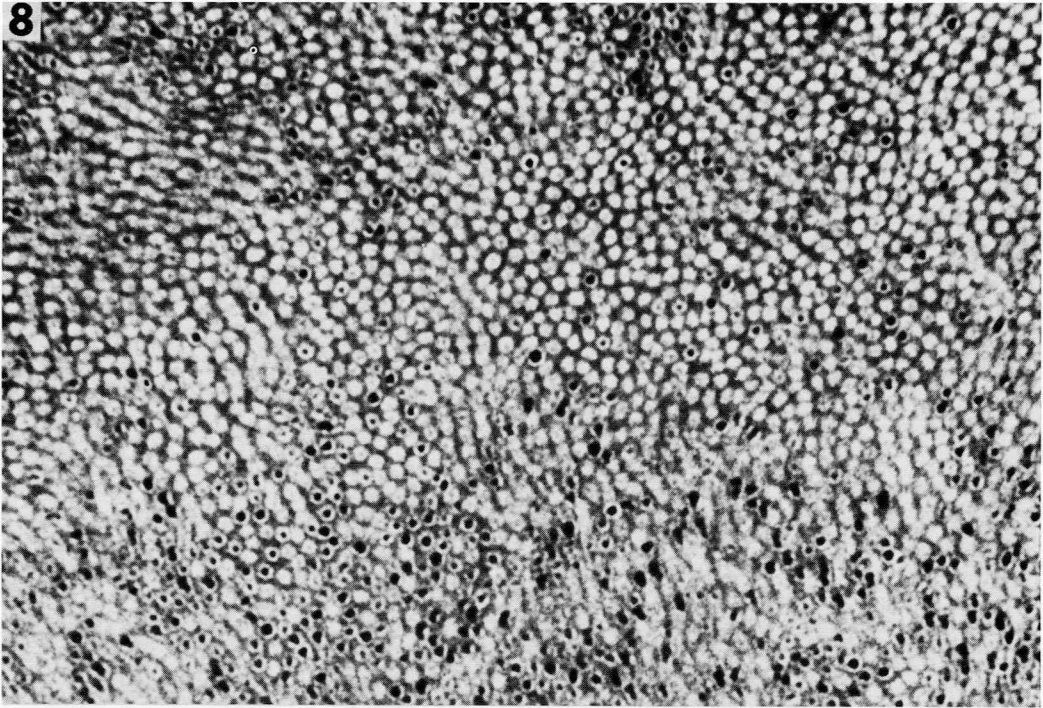
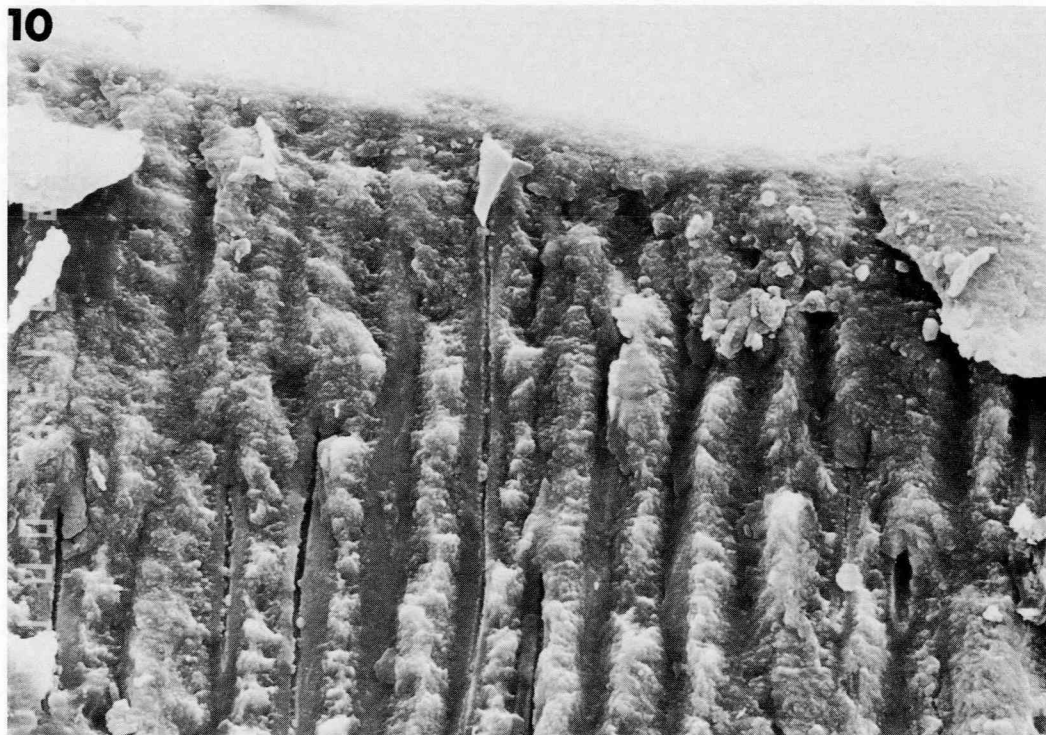


図 8：切端部不透明層のマイクロラジオグラフ，象牙細管の閉鎖の程度は種々で，完全に閉鎖したものから，沈着物のほとんど認められないものまでである．後者でも輪状のX線不透過性の構造物（管周基質）は明瞭である．（67歳，♂，1）×450

図 9：歯根透明象牙質のマイクロラジオグラフ，象牙細管は種々な程度に閉鎖し，X線不透過性になっている．右上方は正常象牙質で，象牙細管はX線透過性である．管周基質の発達が悪い．（61歳，♂，7）×460

10



11

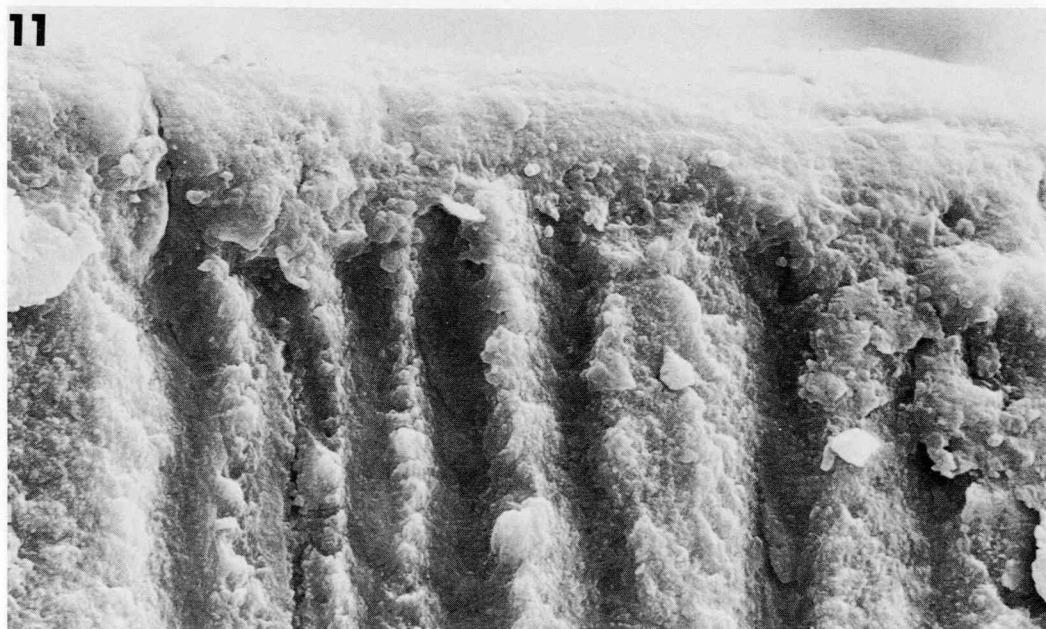


図10：咬耗による露出象牙質の象牙細管縦断のSEM像。上部は最表面である。表面の一層では象牙細管がまったく識別されないが、その下層からは認められるようになり、さらに一部では細管が現われる（左側）。(75歳, ♀, 1)  $\times 1,500$

図11：図10と同様の部位の拡大像。最表層は微細な沈着物のため、象牙細管腔はもとより管周基質も判然としない。直下からは緻密で平坦な管周基質（暗くみえる）が粗造な管間基質（明るくみえる）と区別して認められる。(75歳, ♀, 1)  $\times 3,000$



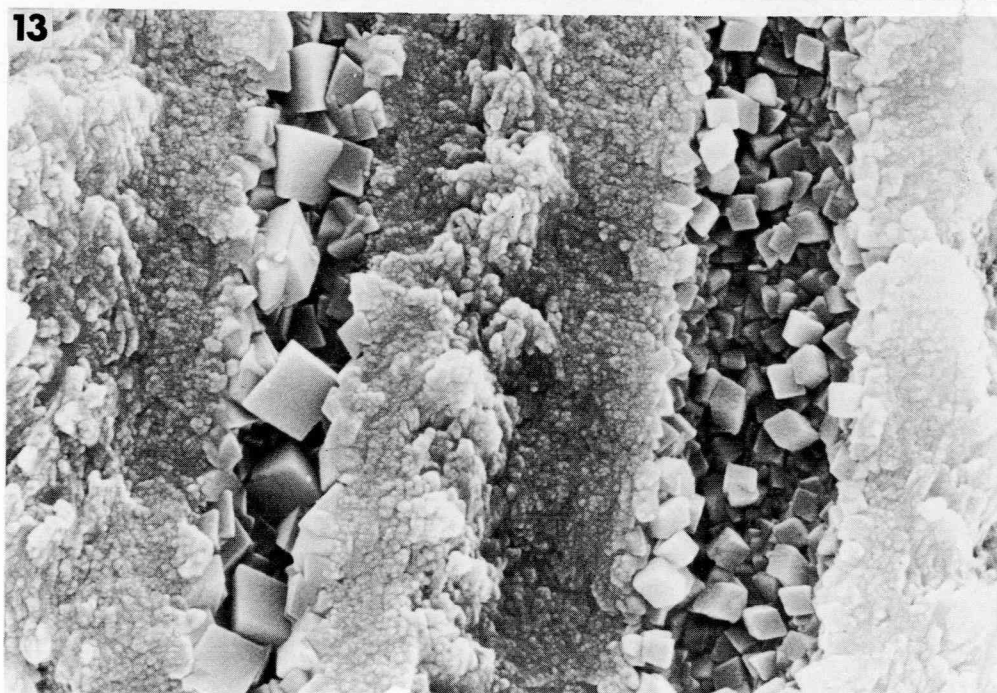
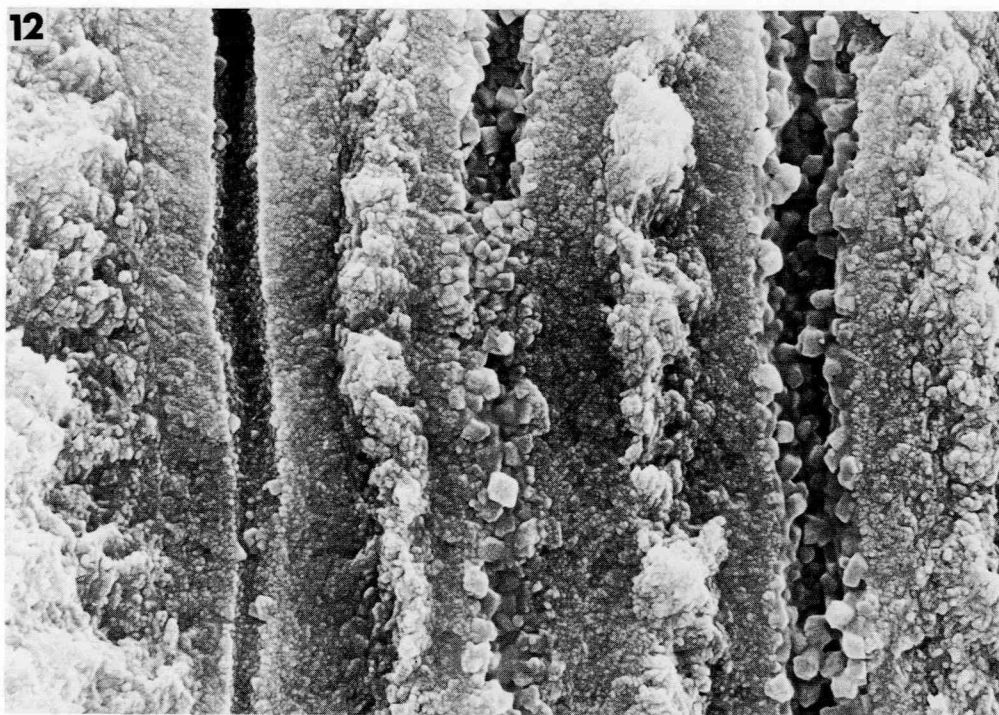


図12：咬耗による硬化象牙質の断面のSEM像。縦走する3本の象牙細管がみえる。緻密な管周基質に囲繞された管腔内には大きな砂状結晶（中央上部）、大小不同の六面体結晶（右側，中央下部）などが観察される。左側の沈着物は少ない。（75歳，♂，1） $\times 11,500$

図13：図12と同じ材料から得た六面体結晶のSEM像。2本の縦断された象牙細管内に大小不同の六面体結晶が多数沈着している。（75歳，♂，1） $\times 18,000$

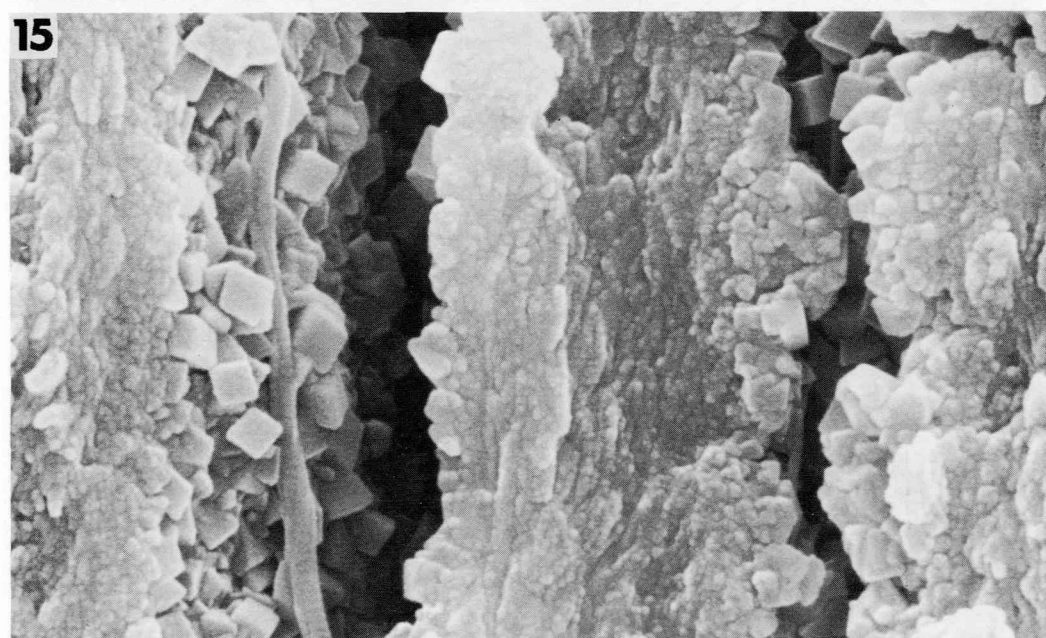
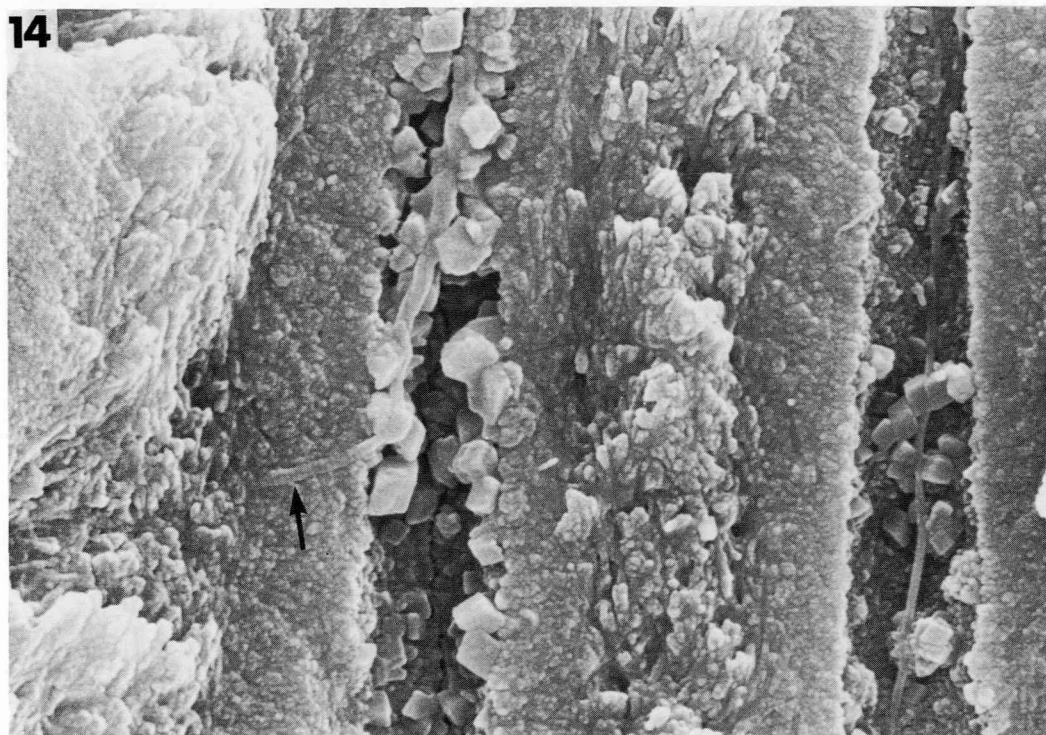


図14：歯冠硬化象牙質の割断面のSEM像。縦断された2本の象牙細管内には不定形粒状ないし六面体結晶が沈着している。よくみると両者ともに縞構造を持つcollagen線維が認められ、とくに左側のは途中から管周基質の中に折れ曲って侵入し、管間基質との連絡を示唆している（矢印）。（75歳，♂，Ⅰ）×15,300

図15：図14と同じ歯牙より得たSEM像。左の象牙細管内にやゝ太いcollagen線維があり、それを囲繞しさらには埋入するように六面体結晶が沈着している。×25,000

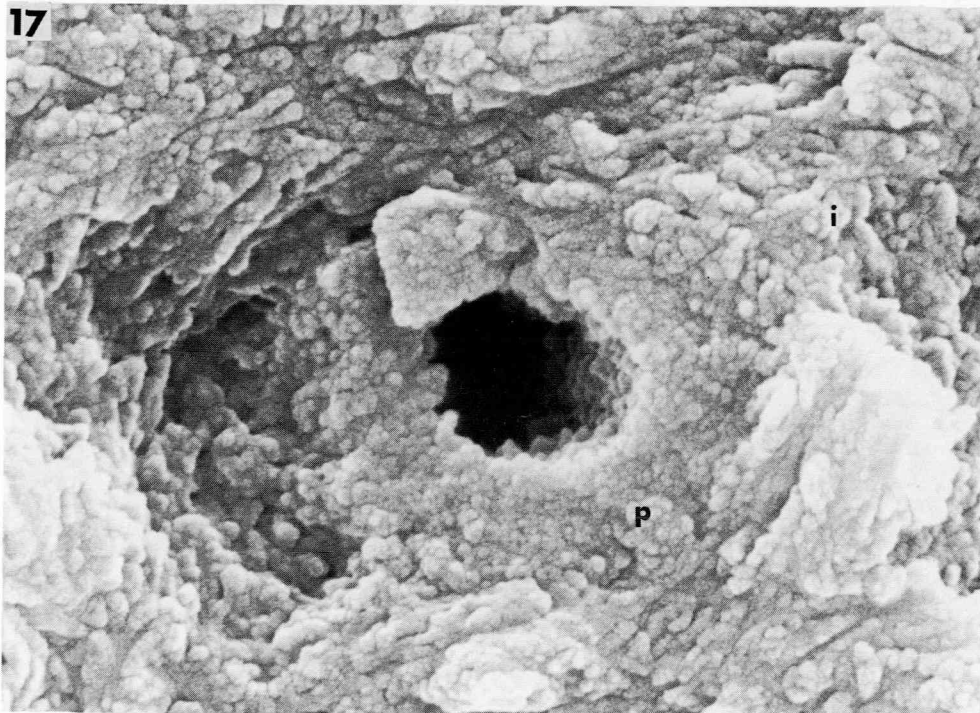
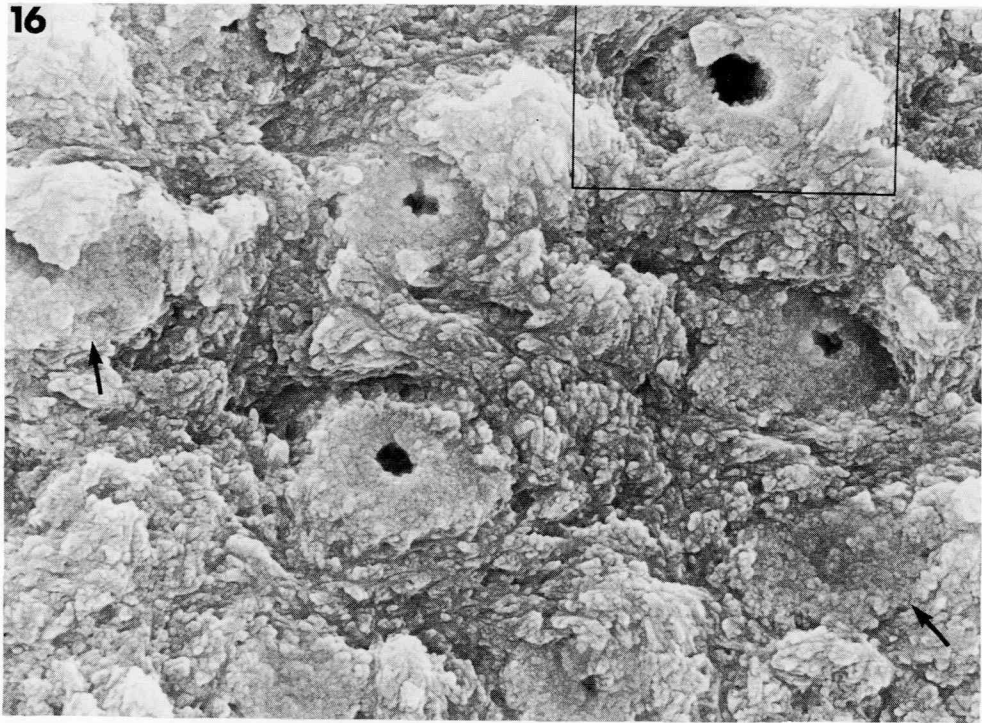


図16：歯冠硬化象牙質の象牙細管横断面のSEM像。細管が完全に閉鎖したもの（矢印）から、きわめて沈着が軽度のもの（枠内）まで種々である。沈着物と管周基質の境界は判然としない。（70歳，♂，Ⅱ）×9,200

図17：図16の枠内の拡大像。象牙細管内壁に砂状の結晶が沈着を始めている。管間基質(i)と管周基質(p)との区別は明瞭であるが、管周基質と沈着物の境界は不明瞭である。×27,000



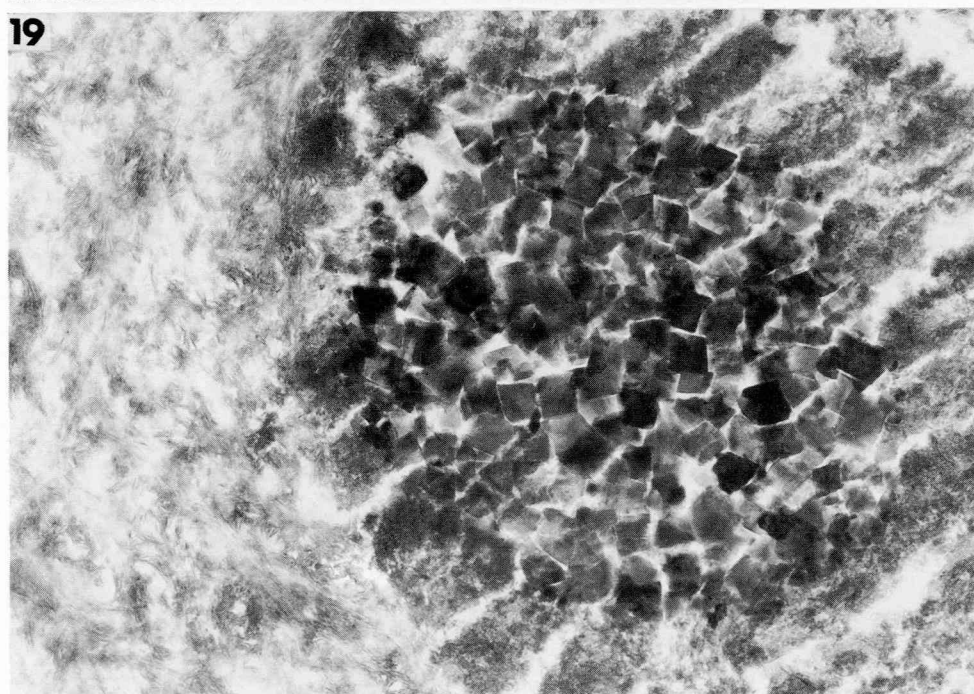
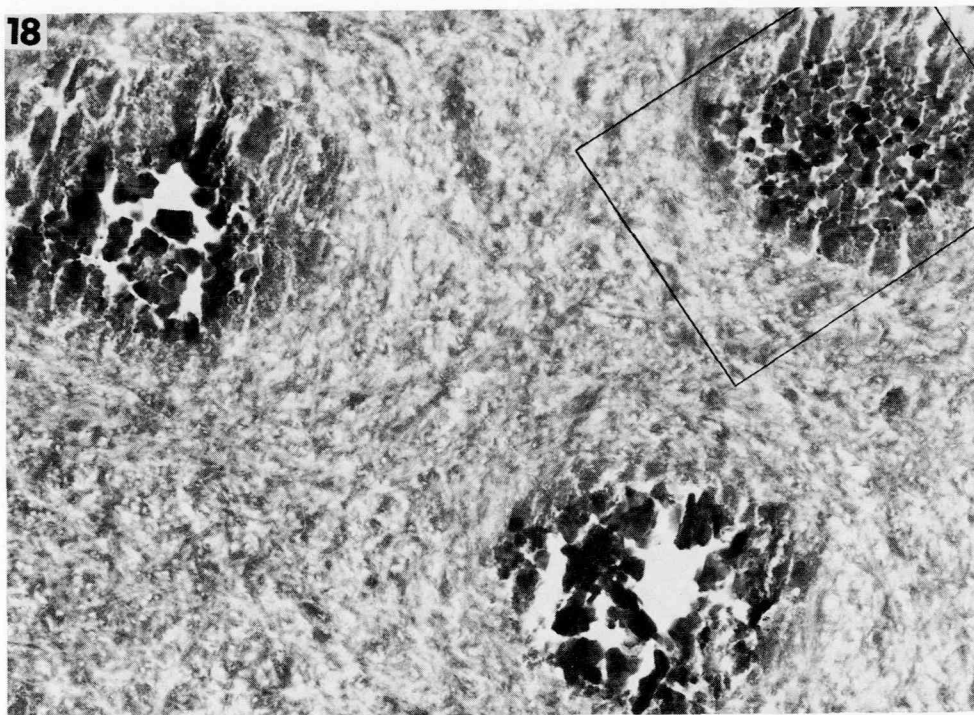


図18：歯冠硬化象牙質の非脱灰切片のTEM像。横断された3個の象牙細管内には四角形の結晶が種々な程度に沈着している。枠内のは完全に閉鎖している。(75歳，♂，Ⅰ) ×9000

図19：図18の枠内の拡大像。象牙細管内に四角形の結晶が均密に沈着している。管周基質は微細な顆粒状結晶，管間基質はリボン状結晶から成っている。×29,300

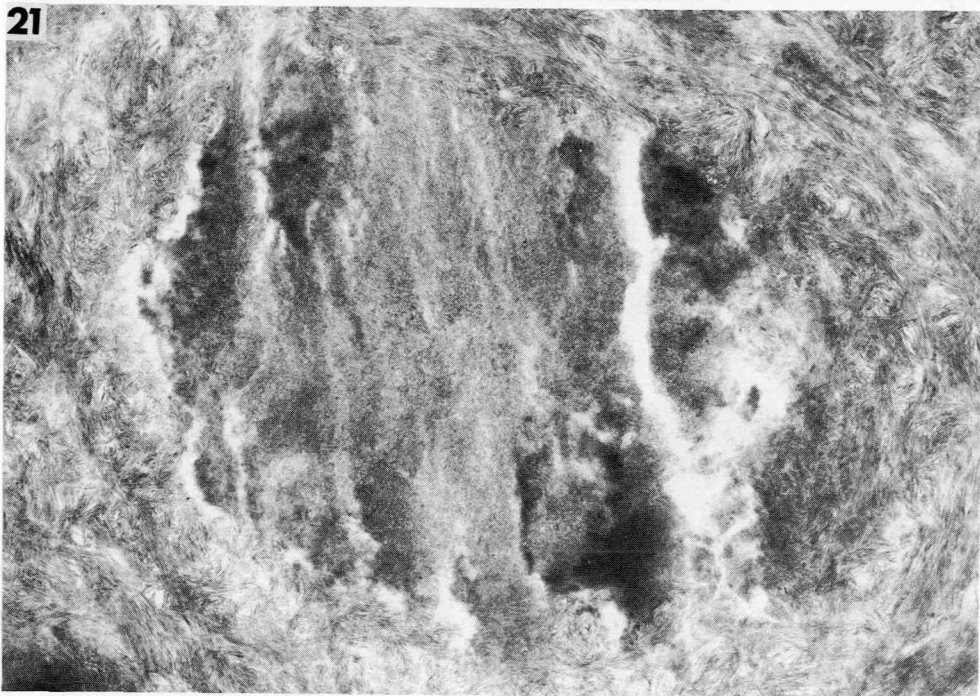
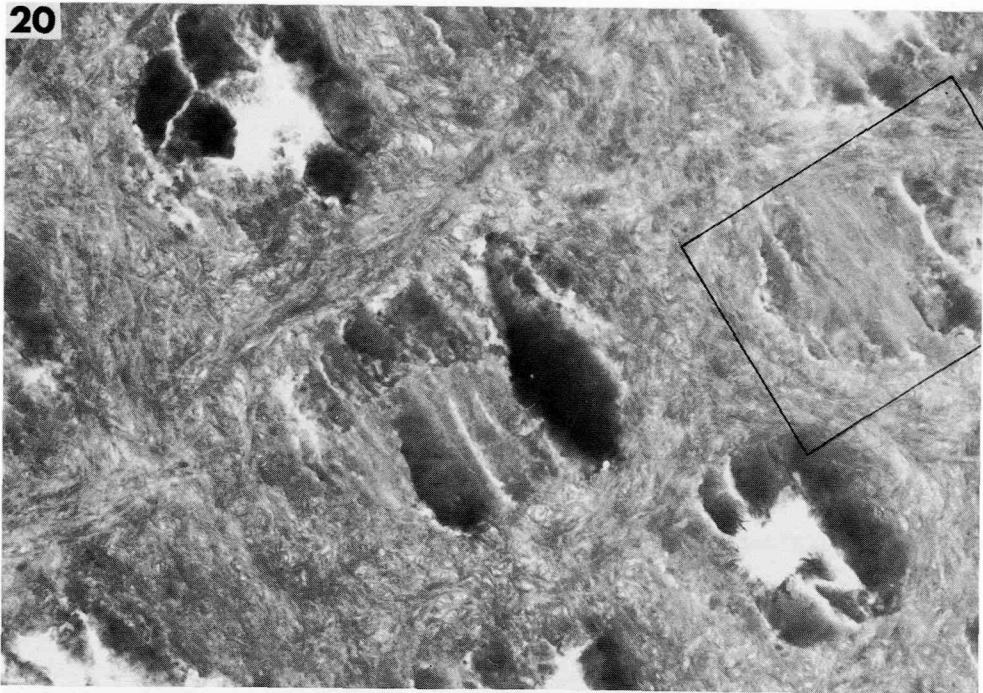


図20：歯冠硬化象牙質の TEM 像。中央と右側枠内の象牙細管内には微細な顆粒状結晶が沈着し完全に閉鎖している。(72歳，♂，[2])  $\times 4,300$

図21：図20の枠内の拡大像。象牙細管内の微細顆粒状結晶と管周基質の境界は判然としない、縦の亀裂は人工的産物。  $\times 35,000$

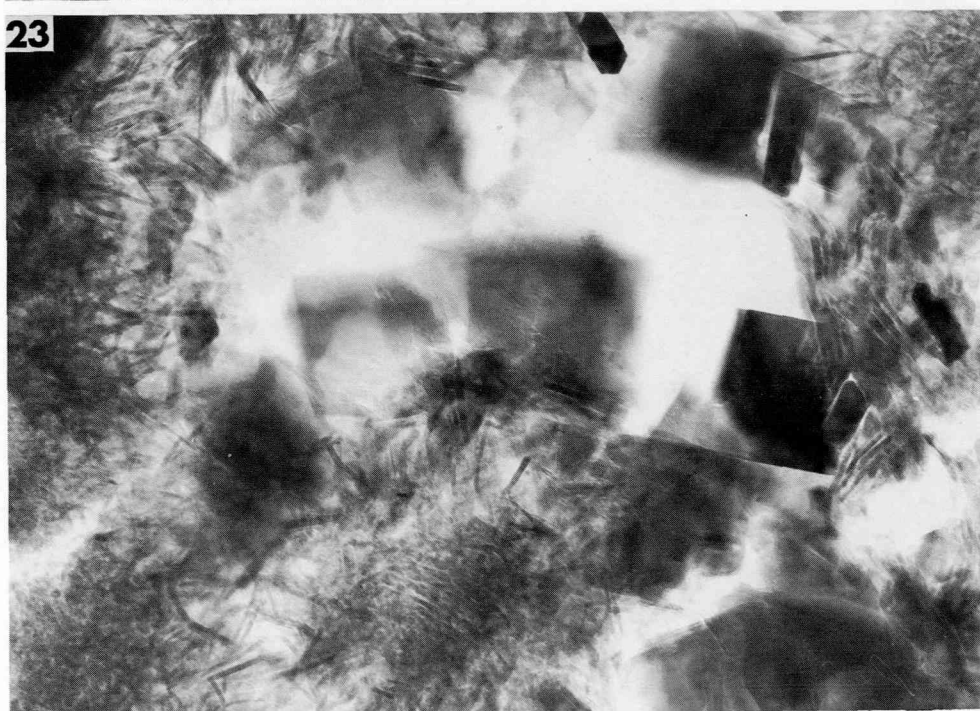
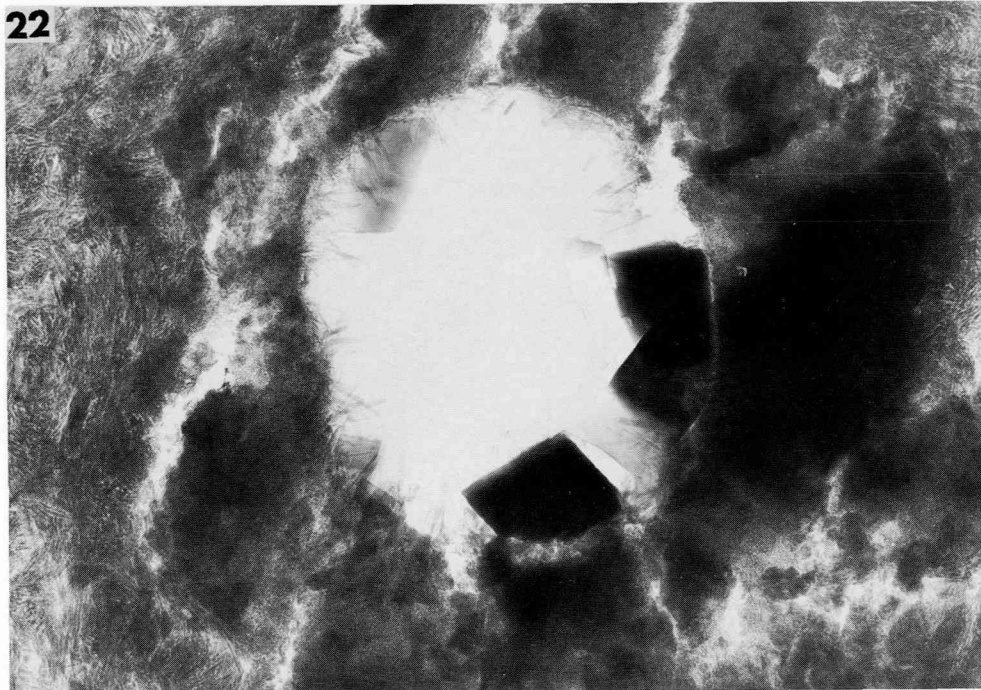
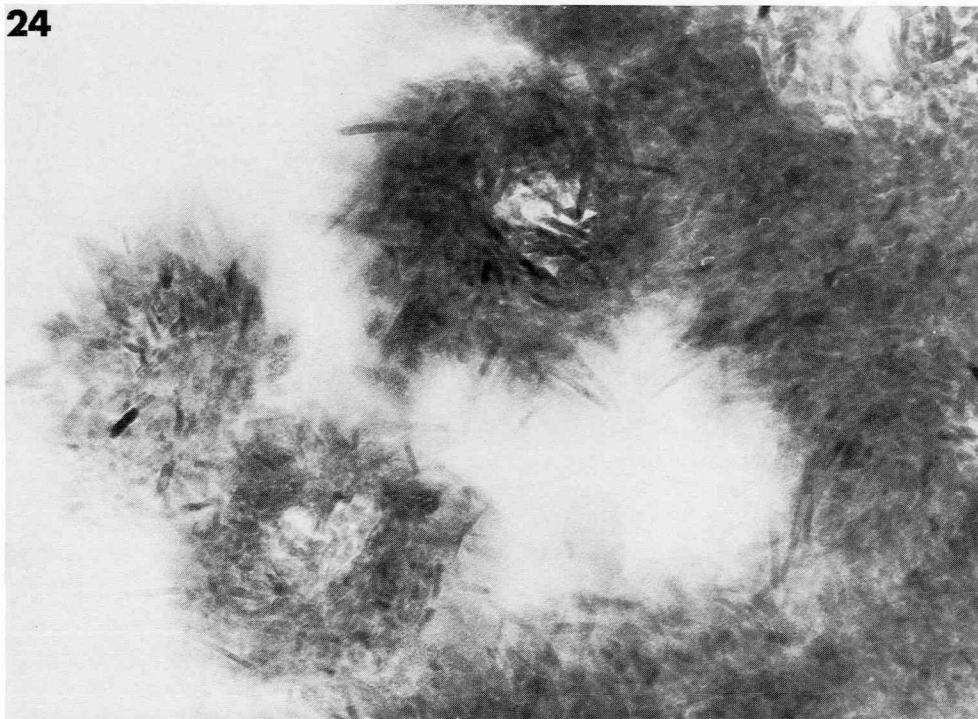


図22：歯冠硬化象牙質のTEM像。象牙細管内沈着の初期を示す。内壁に四角形の結晶が5個（うち2個は薄い）形成され、針状結晶が内壁にほぼ直角に付着している。（72歳，♂， $\bar{2}$ ） $\times 64,000$

図23：図22と同じ切片の他の象牙細管。四角形の結晶が数を増し、その間を埋めるように針状結晶が沈着している。 $\times 19,500$



24



25

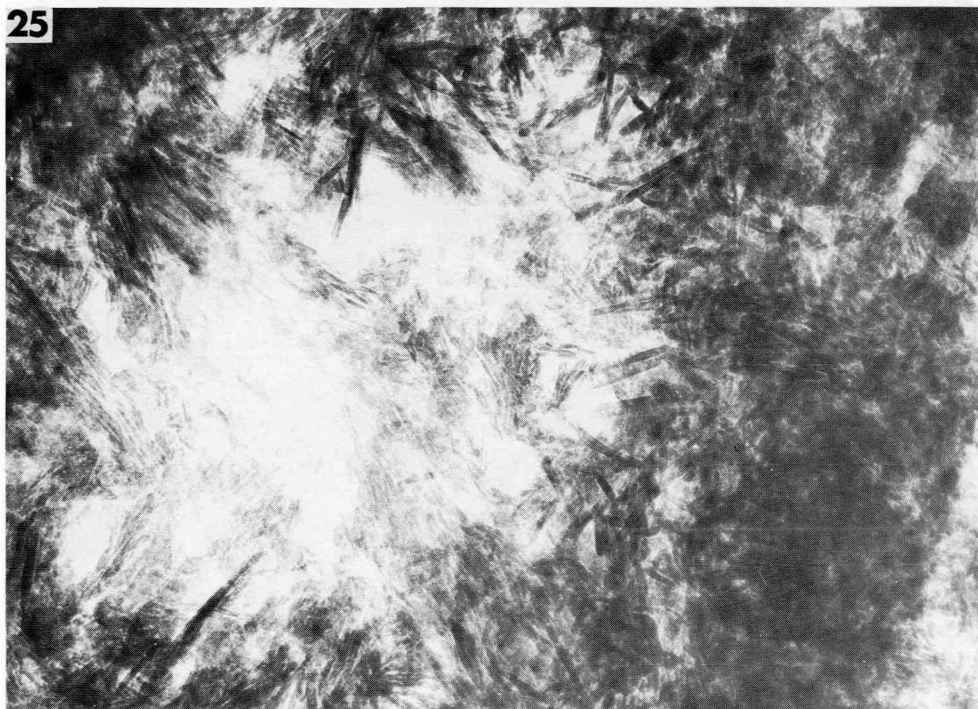


図24：歯冠硬化象牙質の TEM 像。象牙細管内に針状結晶が球状の集合体を作っている。その直径は  $0.4 \sim 0.6 \mu$  である。(72歳, ♀, [2])  $\times 75,600$

図25：図24と同じ切片の他の象牙細管。象牙細管は針状結晶のみではほぼ閉鎖している。  $\times 121,000$

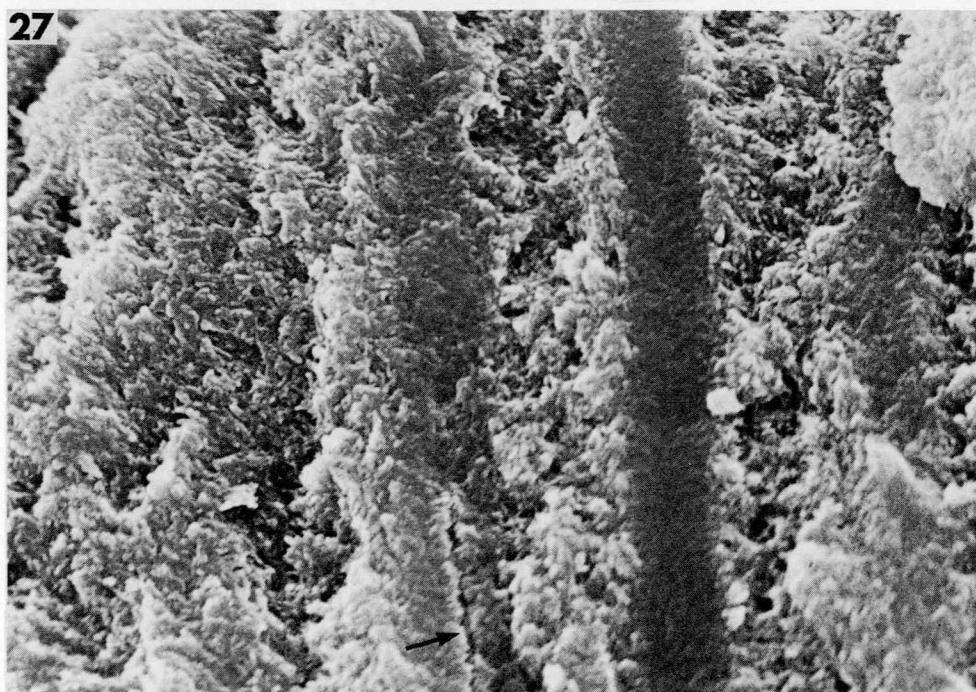


図26：歯根透明象牙質の象牙細管縦断面のSEM像。象牙細管は完全に閉鎖し、管周基質とともに滑沢な断面をみせている。(68歳，♂，|3)  $\times 3,000$

図27：図26の枠内の拡大像。細管内沈着物は微細で管周基質との識別はできない。細管中心部にわずかに空隙を残しているところもある(矢印)， $\times 8,900$

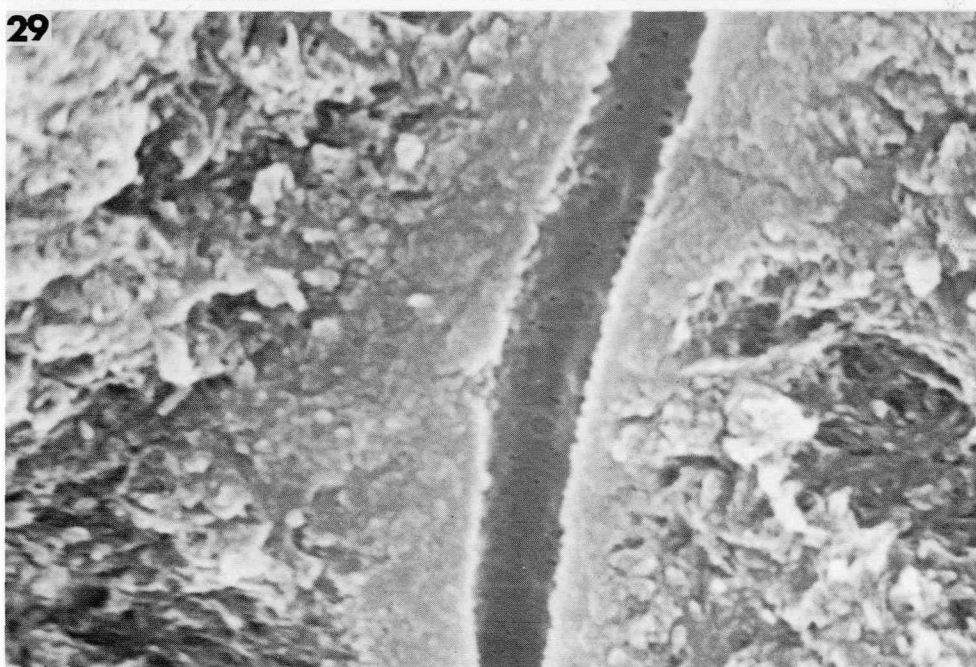
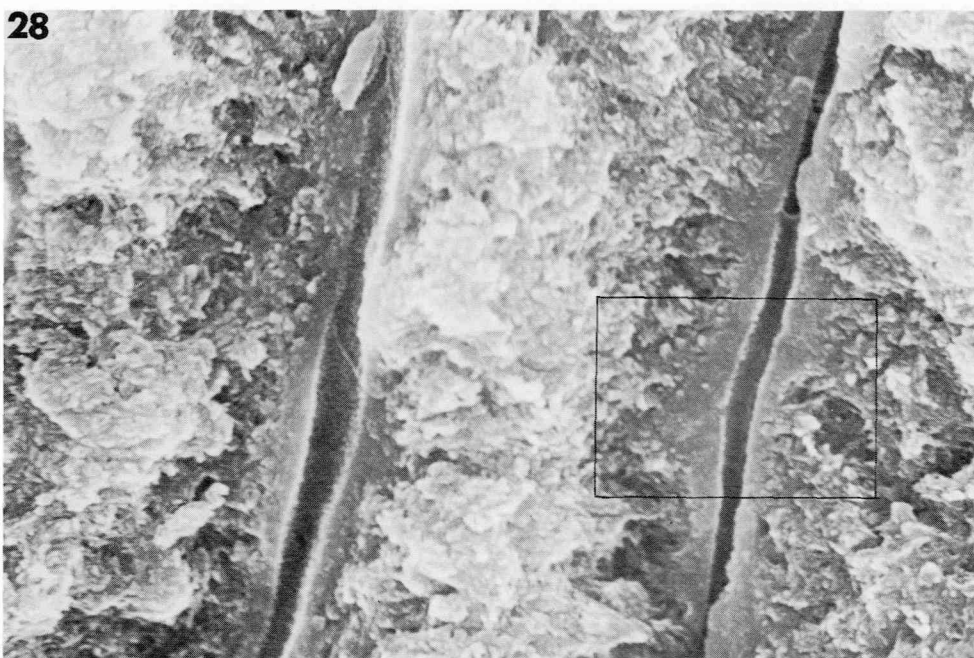


図28：歯根透明象牙質の象牙細管縦断面のSEM像。緻密な管周基質と粗造な管周基質が見えるが、細管内の沈着物はほとんど認められない、また象牙線維は消失している。（74歳，♀，[6]）  
×8,900

図29：図28の枠内の拡大像。象牙細管内にわずかに沈着物が認められるが、六面体や砂状、針状の結晶ではない。×29,800



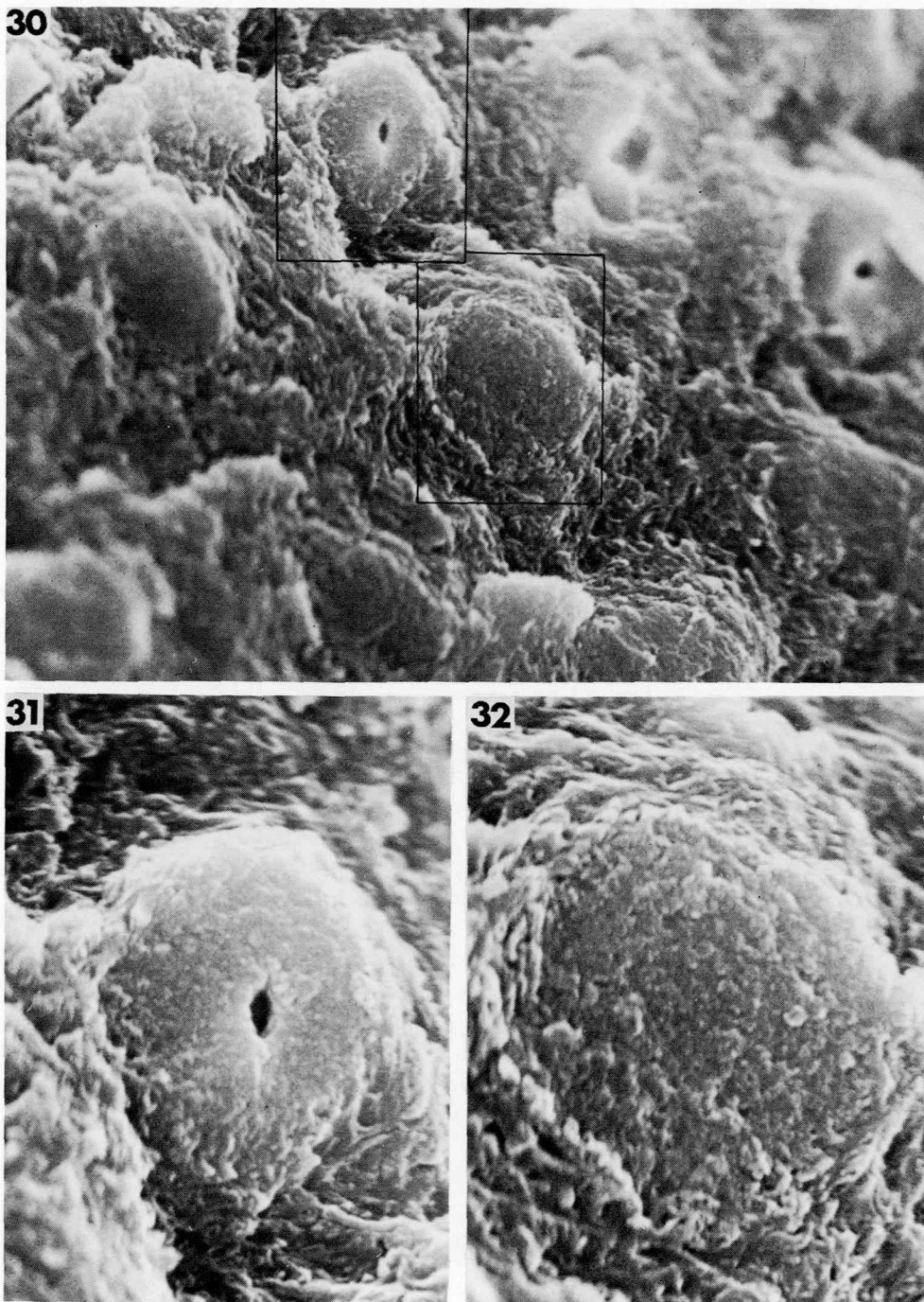


図30：歯根透明象牙質の細管横断面のSEM像。意識的に傾斜を与えてある。下 $\frac{2}{3}$ の5個の細管は完全に閉鎖しており、上 $\frac{1}{3}$ の3個の細管は中心部に空隙を残している。(68歳，♂，3)  $\times 9,200$

図31：図30の左上枠内の拡大像。中心部にわずかに空隙がある。内面は比較的なめらかである。管周基質との境界は不明瞭。  $\times 2,300$

図32：図30の中央枠内の拡大像。細管は完全に閉鎖している。  $\times 2,300$

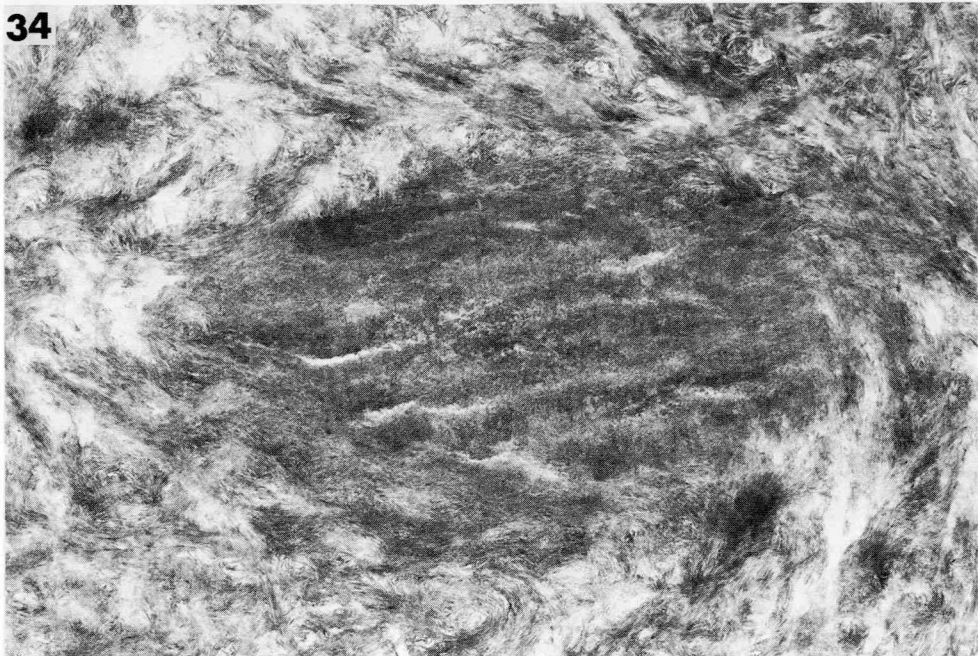
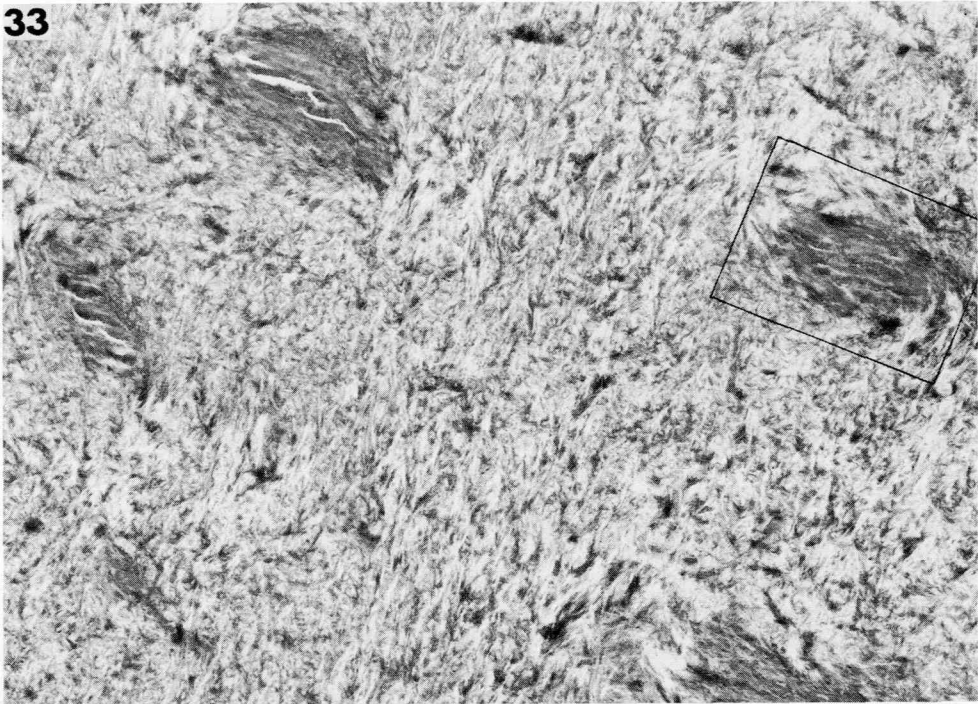


図33：歯根透明象牙質のTEM像。横断された象牙細管が5個みえるが、いずれも完全に閉鎖している。斜走する空隙は人工的亀裂である。(79歳，♀，2)  $\times 5,600$

図34：図33の枠内の拡大像。細管は微細顆粒状結晶により閉鎖している。管周基質との境界は判然としない。  $\times 22,500$



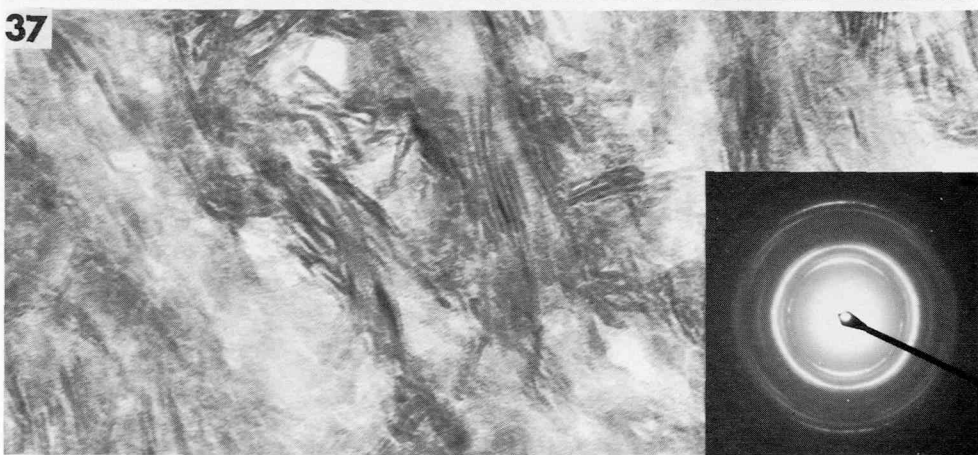
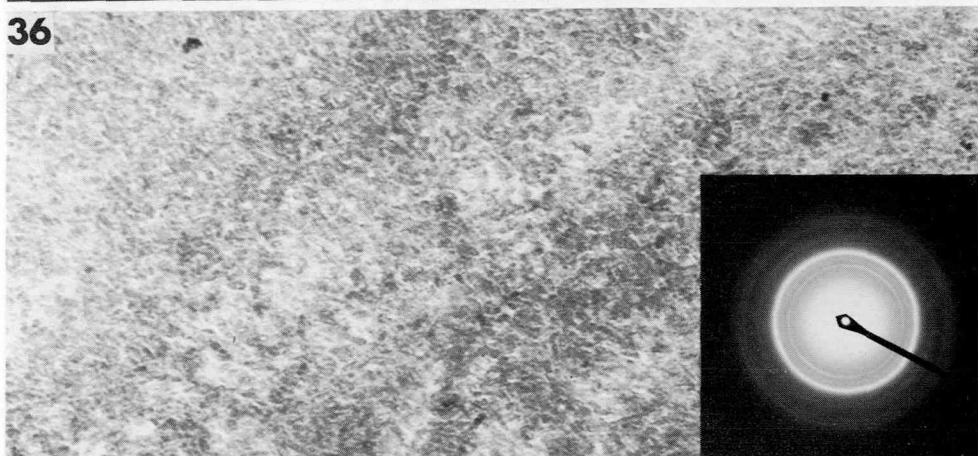
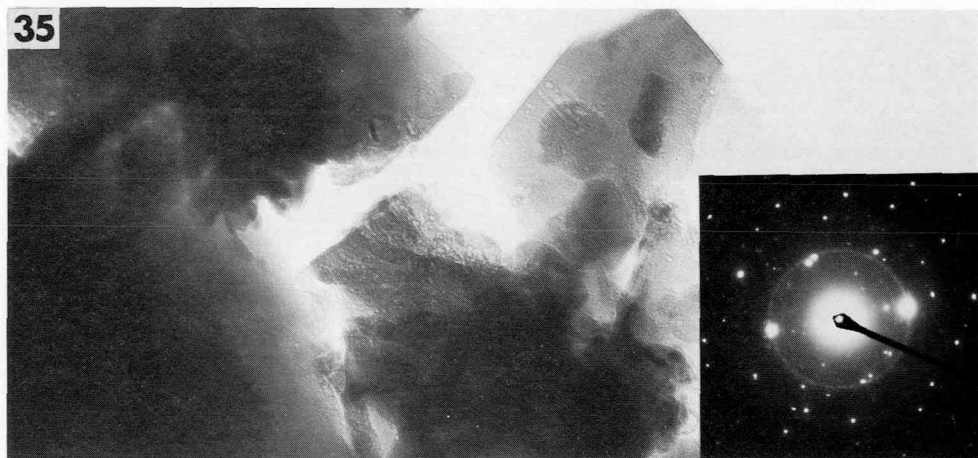
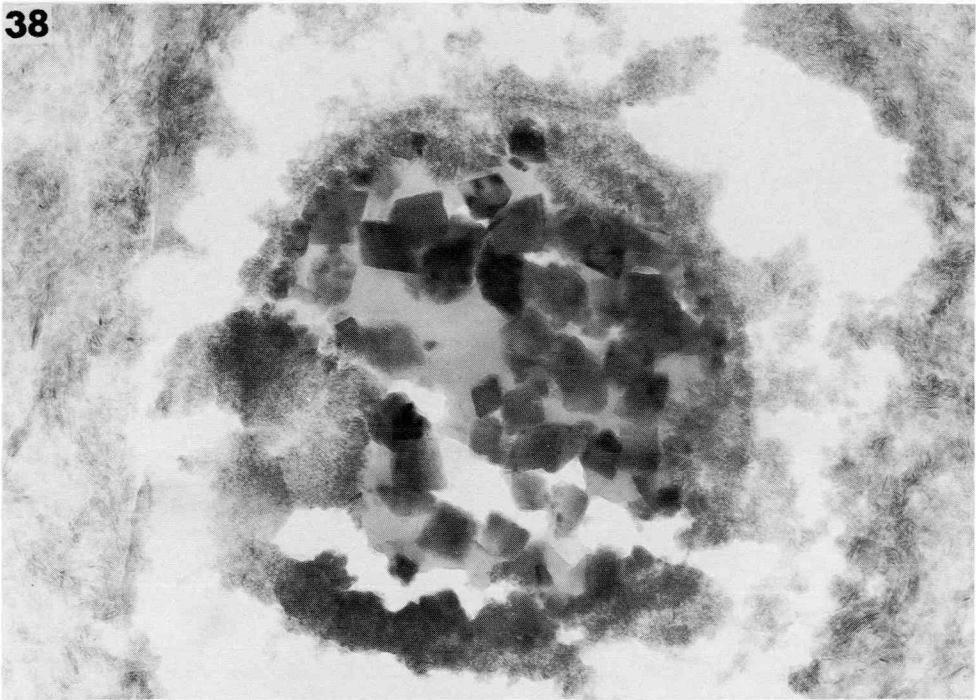


図35：歯冠硬化象牙質の細管内六面体結晶のTEM像。(72歳，♂， $\bar{2}$ ) $\times 156,000$ . 挿入図はその電子線回折像。6方向にちらばるスポット・パターンを示す。

図36：歯根透明象牙質の細管内微細顆粒状結晶のTEM像。(79歳，♀， $\bar{2}$ ) $\times 249,000$ . 挿入図はその電子線回折像。同心円状のパターンである。

図37：管間基質のTEM像。細長いリボン状の結晶が collagen 線維に関連して排列している。(79歳，♀， $\bar{2}$ ) $\times 269,000$ . 挿入図はその部の電子線回折像。対称性に光輝を発している。

38



39

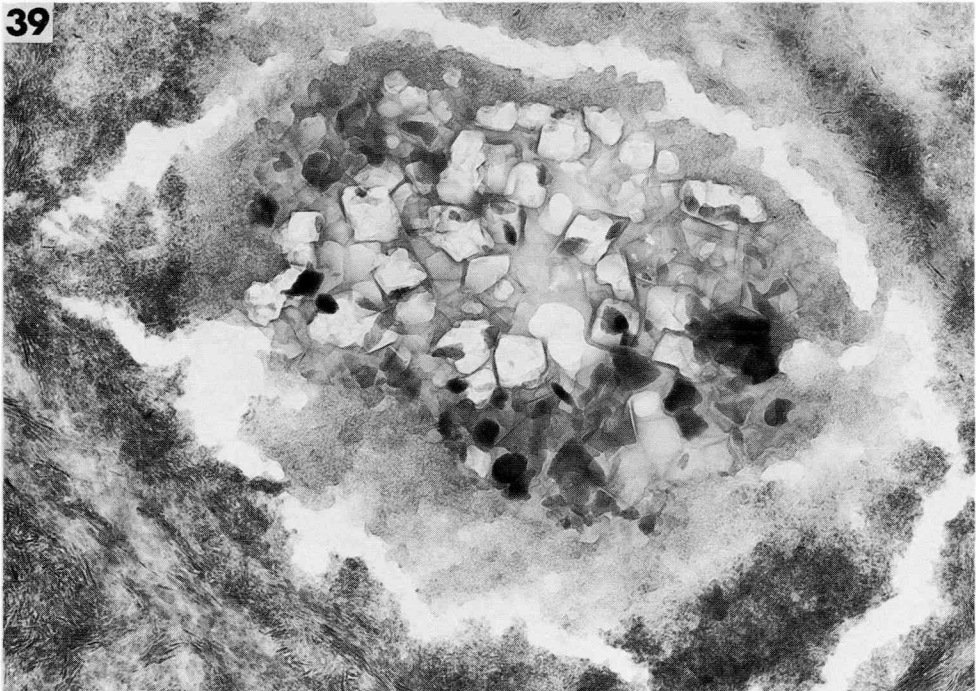


図38：歯冠硬化象牙質の切片を0.5Nの塩酸で60秒脱灰したもののTEM像。六面体結晶は隅角部がわずかになめられているがよくその形態を保っている。管周基質に相当する部分は脱灰により空隙となっている。(72歳，♂，Ⅱ)×64,000

図39：図38と同じ切片の他の象牙細管。六面体結晶も大部分が溶出して空隙を作っているが、管間基質のリボン状結晶は残存している。×64,000

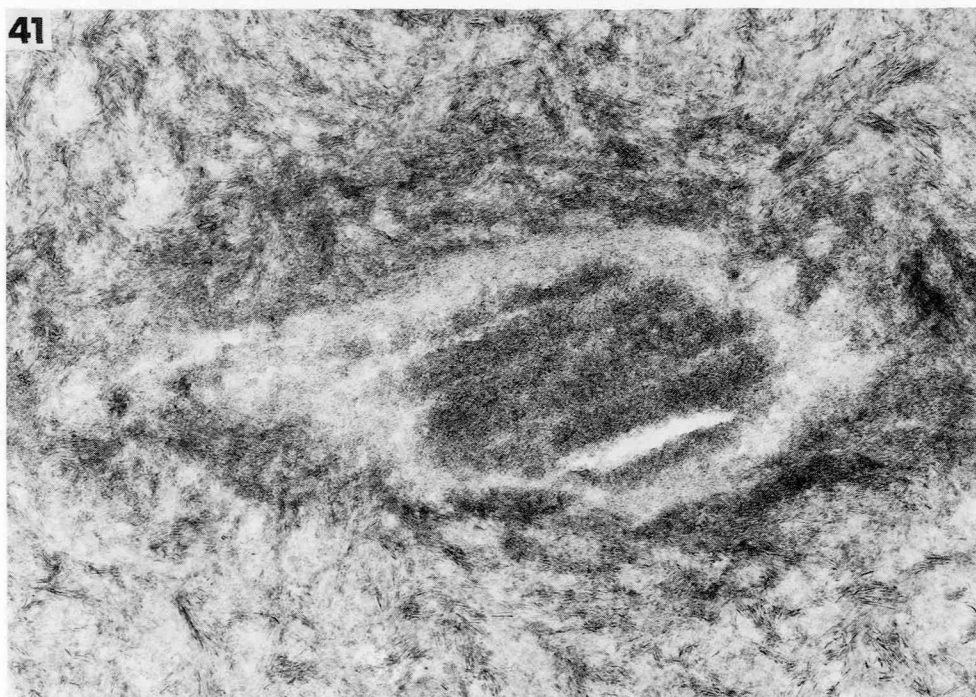
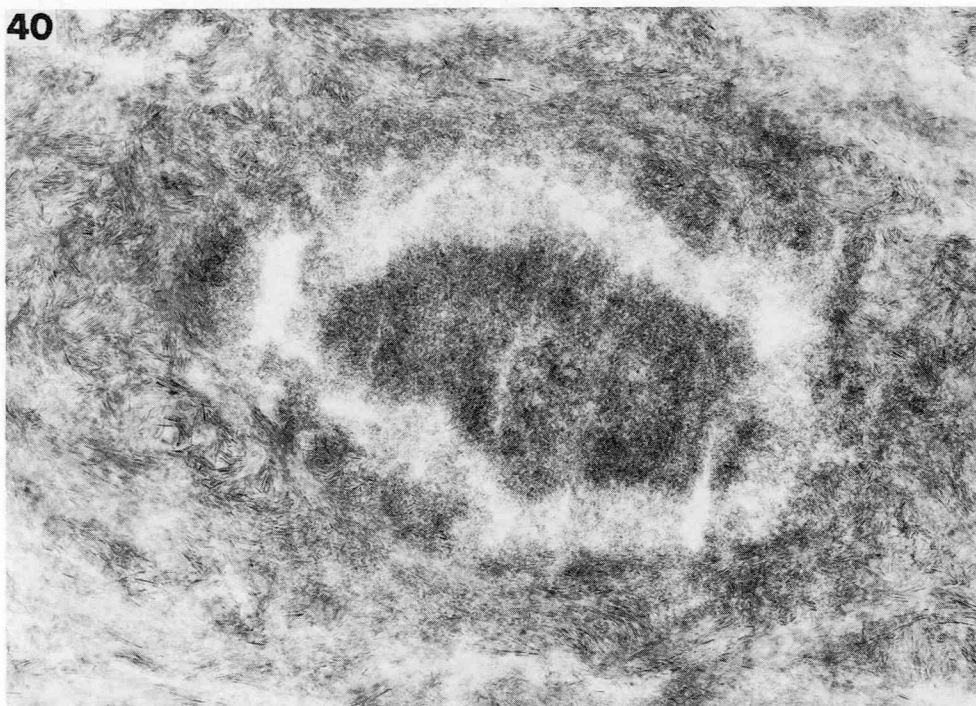
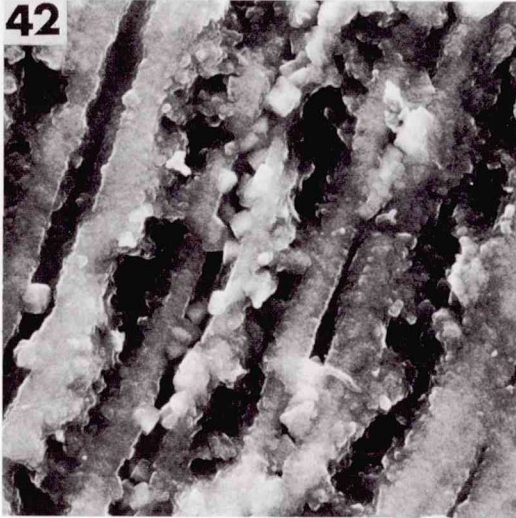


図40：歯根透明象牙質の切片を0.025% 燐タングステン酸で60秒処理したもののTEM像。管周基質のみが溶出し、細管内沈着物との区別が明瞭化している。(79歳，♀，12)×54,000

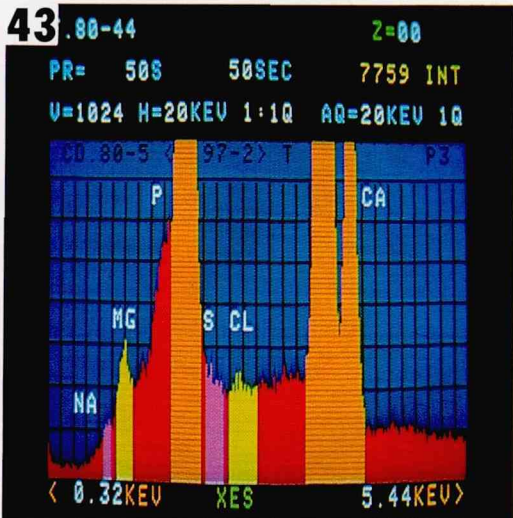
図41：歯根透明象牙質の切片を0.01% 乳酸で2分脱灰したもののTEM像。図40と同様に管周基質のみが脱灰されている。沈着物内に人工的亀裂がある。(79歳，♀，12)×54,000



42



43



44

SAMPLE NAME : CORONAL-DENTIN(CD.80-5)TURE,&lt;F.97-2&gt;

HOLDER NO.:11

ACCEL. VOLT. (KV):15

NO. OF MEAS. FDS.:11

NO.	X	Y	Z
1	16540	22097	11254

POS. NO. 1

PROBE CURRENT : 1.950E-08 (A)

STAGE POS. : X 16540 Y 22097 Z 11254

CH(1) TAP				CH(2) PET				CH(3) LIF			
EL	WL	COUNT	INTENSITY(LOG)	EL	WL	COUNT	INTENSITY(LOG)	EL	WL	COUNT	INTENSITY(LOG)
Y	6.45	80	*****	TI	2.75	10	*****	BI	1.14	7	*****
RE	6.73	353	*****	RA	2.78	10	*****	PR	1.17	8	*****
SR	6.86	65	*****	CS	2.89	9	*****	TL	1.21	9	*****
W	6.98	52	*****	SC	3.03	7	*****	HO	1.24	4	*****
SI	7.13	63	*****	I	3.15	11	*****	AU	1.28	7	*****
TA	7.25	40	*****	TE	3.29	6	*****	PT	1.31	7	*****
RB	7.32	43	*****	CA	3.36	2459	*****	IR	1.35	7	*****
HF	7.54	43	*****	SR	3.44	9	*****	OS	1.39	8	*****
LU	7.84	30	*****	SN	3.60	4	*****	ZN	1.44	9	*****
YB	8.15	28	*****	K	3.74	5	*****	CU	1.54	6	*****
AL	8.34	24	*****	TN	3.77	6	*****	NI	1.66	6	*****
BR	8.37	26	*****	U	3.91	3	*****	TM	1.73	5	*****
ER	8.82	17	*****	CD	3.96	5	*****	CO	1.79	3	*****
SE	8.99	24	*****	TH	4.14	3	*****	FE	1.94	4	*****
HO	9.20	24	*****	AG	4.15	2	*****	GB	2.05	2	*****
DY	9.59	24	*****	PD	4.37	5	*****	MN	2.10	3	*****
AS	9.67	18	*****	RH	4.60	1	*****	EU	2.12	2	*****
MG	9.89	136	*****	CL	4.73	4	*****	SM	2.20	1	*****
TB	10.00	21	*****	RU	4.85	1	*****	CR	2.29	1	*****
GE	10.44	12	*****	S	5.37	4	*****	ND	2.37	1	*****
GA	11.29	10	*****	MO	5.41	1	*****	FR	2.46	1	*****
NA	11.91	53	*****	NO	5.72	0	*****	V	2.50	2	*****
**	15.80	3	*****	ZR	6.07	1	*****	CE	2.56	1	*****
F	18.32	4	*****	P	6.16	303	*****	LA	2.67	1	*****

RESULTS:

THE FOLLOWING ELEMENTS ARE PRESENT

NA MG P S CA RE

THE FOLLOWING ELEMENTS ARE PROBABLY PRESENT

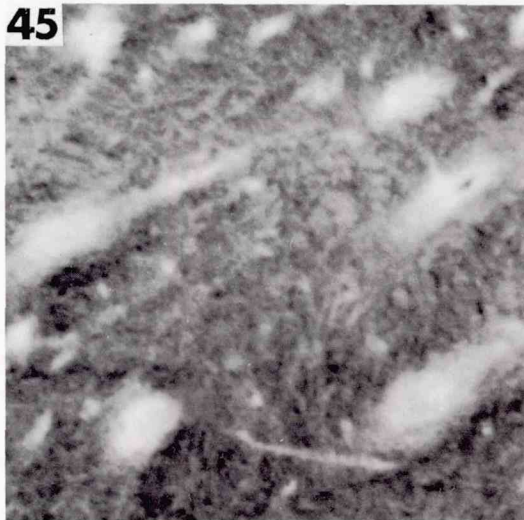
GE SR DY HO

図42: 78歳女性下顎右側中切歯の切端硬化象牙質を、象牙細管が縦断されるよう凍結割断した面のSEM像。細管内には立方形の大きな沈着物が見られ、中央部の細管では結晶物が密に沈着している。(×4,000)

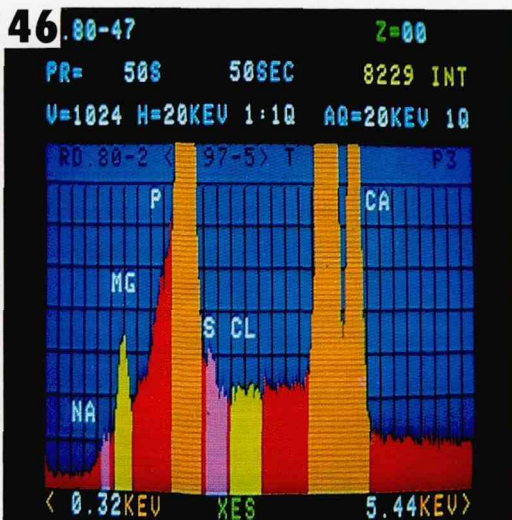
図43: 図42の細管内沈着物をEDSで元素分析したスペクトルで、Na, Mg, P, S, Caのピークが出ている。

図44: 図42と同じ試料の細管内沈着物をWDSで高速定性分析したもの。確実に存在している元素としてNa, Mg, P, Ca, S, 存在の可能性ある元素としてGe, Srが示されている。

45



46



47

SAMPLE NAME : ROOT-T.DENTIN(RD.80-1)TUBE,(F.97-4)

HOLDER NO.:1

ACCEL. VOLT. (KV):15

NO. OF MEAS. POS.:1

NO.	X	Y	Z
1	19619	19520	10817

POS. NO. 1

PROBE CURRENT : 2.000E-08 (A)

STAGE POS. : X 19619 Y 19520 Z 10817

CH(1) TAP				CH(2) PET				CH(3) LIF			
EL	WL	COUNT	INTENSITY(LOG)	EL	WL	COUNT	INTENSITY(LOG)	EL	WL	COUNT	INTENSITY(LOG)
Y	6.45	39	*****	TI	2.75	8	*****	BI	1.14	4	*****
RE	6.73	248	*****	BA	2.78	10	*****	PB	1.17	6	*****
SR	6.86	11	*****	CS	2.89	8	*****	TL	1.21	7	*****
W	6.98	12	*****	SC	3.03	3	***	HG	1.24	3	***
SI	7.13	9	*****	I	3.15	6	*****	AU	1.28	5	*****
TA	7.25	11	*****	TE	3.29	7	*****	PT	1.31	5	*****
RB	7.32	28	*****	CA	3.36	1641	*****	IR	1.35	6	*****
HF	7.54	27	*****	SB	3.44	6	*****	OS	1.39	5	*****
LU	7.84	23	*****	SN	3.60	4	*****	ZN	1.44	6	*****
YB	8.15	15	*****	K	3.74	3	***	CU	1.54	4	*****
AL	8.34	18	*****	IN	3.77	4	*****	NI	1.66	5	*****
BR	8.37	18	*****	U	3.91	4	*****	TH	1.73	2	**
ER	8.82	13	*****	CD	3.96	3	***	CO	1.79	3	***
SE	8.99	17	*****	TH	4.14	2	**	FE	1.94	3	***
HO	9.20	20	*****	AG	4.15	3	***	GD	2.05	3	***
DY	9.59	16	*****	PD	4.37	3	***	MN	2.10	3	***
AS	9.67	14	*****	RH	4.60	2	**	EU	2.12	5	*****
MG	9.89	250	*****	CL	4.73	5	*****	SM	2.20	2	**
TB	10.00	20	*****	RU	4.85	2	**	CR	2.29	2	**
GE	10.44	10	*****	S	5.37	7	*****	ND	2.37	2	**
GA	11.29	11	*****	MO	5.41	1	*	PR	2.46	1	*
NA	11.91	19	*****	NB	5.72	1	*	V	2.50	0	
**	15.80	3	***	ZR	6.07	1	*	CE	2.56	1	*
F	18.32	1	*	P	6.16	293	*****	LA	2.67	1	*

RESULTS:

THE FOLLOWING ELEMENTS ARE PRESENT  
NA MG P S CA GD RETHE FOLLOWING ELEMENTS ARE PROBABLY PRESENT  
BA EU

図45：75歳男性上顎右側中切歯の歯根透明像。牙質をエポキシ樹脂に包埋し、パフ研磨後、走査電頭によって観察した組成像（COMPO像）である。明るい楕円形として見られる部分が象牙細管に相当し、他の部分が管間基質である。象牙細管は沈着物によって完全に閉鎖し、そこは管間基質より石灰化の高いことが示唆される。（ $\times 3,000$ ）

図46：図45の細管内沈着物をEDSで元素分析したスペクトルで、Na, Mg, P, S, Caのピークが出ている。切端硬化象牙質の細管内沈着物に比べ、Sのピークが若干高くなっている。

図47：図45における細管内沈着物をWDSで定性分析した結果である。この場合にはNa, Mg, P, S, Caが検出され、とくにSの存在が興味深い。また他の元素の存在については、疑問である。

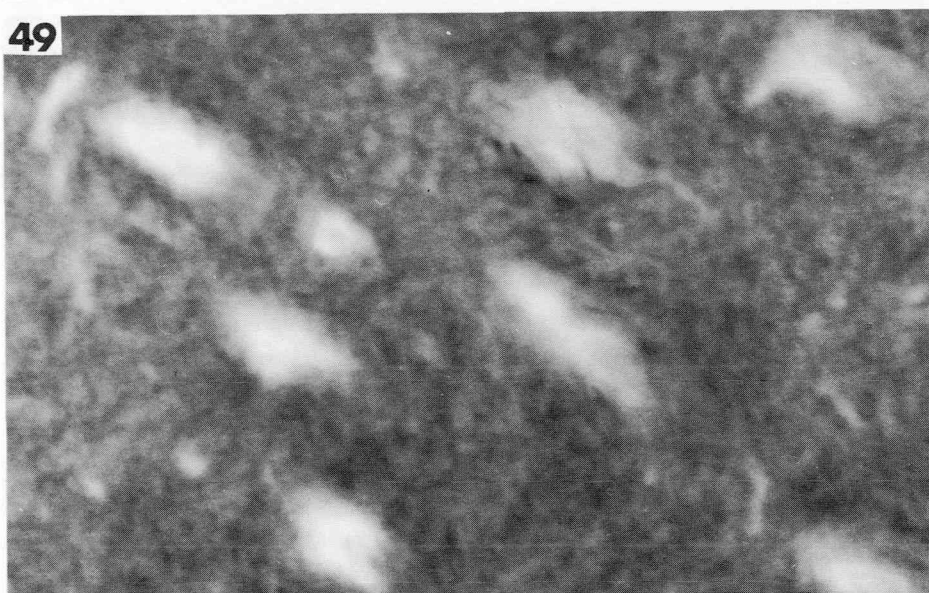
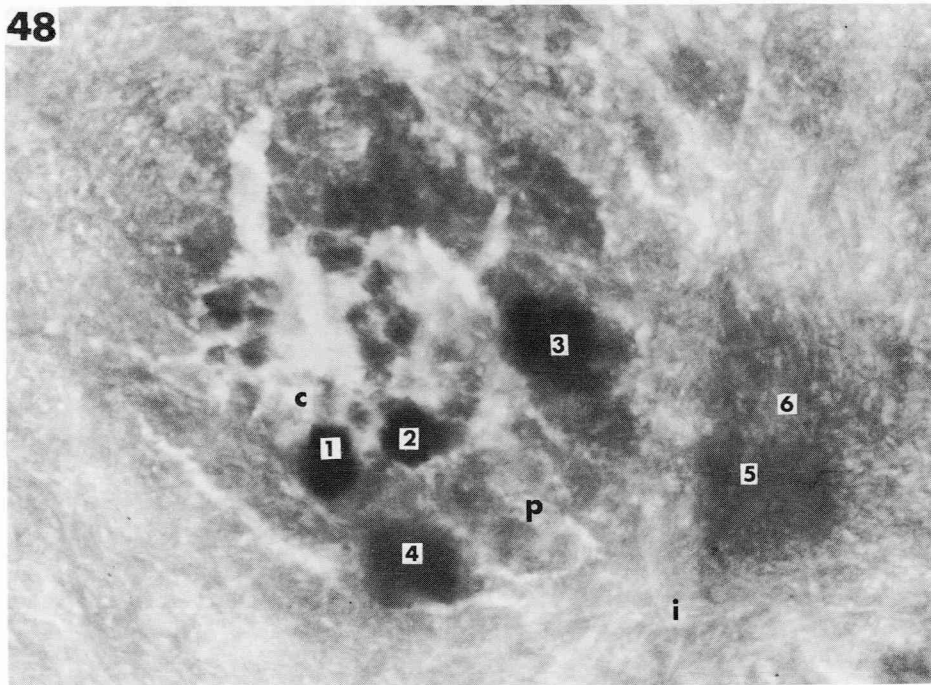


図48：75歳男性上顎右側中切歯の切端硬化象牙質を、非脱灰超薄切片とし、分析電顕で観察した走査透過像（STEM像）である。管間基質(i)、管周基質(p)、細管内沈着物(c)についてそれぞれ2箇所ずつ定量分析を行なった。ビーム照射によって生じたコンタミネーションのため黒く見える。1と2が沈着物、3と4が管周基質、5と6が管間基質である。(×10,000)

図49：75歳男性下顎右側第2小臼歯の歯根透明象牙質を、パフ研磨後、WDSによって定量分析を行なった場所の組成像（COMPO像）である。象牙細管内は沈着物によって閉鎖され、管間基質と明瞭に区別される。(×3,000)