

〔原著〕 松本歯学 4 : 127~137, 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

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

松本歯科大学 口腔病理学教室 (主任 枝 重夫 教授)

渡辺郁馬, 山崎喜之

東京都養育院付属病院 歯科口腔外科 (主任 渡辺郁馬 博士)

Microradiography and Electron-microscopy on
the Transparent Root Dentin, Second Report
Comparative observations by the wavelength dispersive x-ray
spectroscope and the energy dispersive x-ray analyser

SHOJI AKAHANE

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

SHIGEO EDA, TOSHIYUKI KAWAKAMI, TOSHIKO HAYASHI and CHIHITO NAKAMURA

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

IKUMA WATANABE and YOSHIYUKI YAMAZAKI

Department of Dentistry and Oral Surgery,
Tokyo Metropolitan Geriatric Hospital
(Chief: Dr. I. Watanabe)

本論文の要旨は第4回松本歯科大学学会例会(昭和52年6月18日), および第20回歯科基礎医学会学術大会(岐阜, 昭和53年9月24日)において口演された。(1978年10月30日受理)

Summary

Using the same materials as of the first report, transparent root dentin was studied by means of microradiography, electron-microscopy both of transmission and scanning, field limited diffraction, wavelength dispersive x-ray spectroscopy and energy dispersive x-ray analysis.

Results are as follows:

1. The transmission and scanning electron-microscopies revealed that the crystals of calcium salt deposited in the dentinal tubules (Figs. 2, 3, 5) were much smaller than that of intertubular dentin which were in big needle-like shape (Figs. 2-4).
2. Although the crystals of intertubular dentin arranged in some order due to collagen fibers (Figs. 3, 4), the ones in the dentinal tubules put in disorder (Figs. 3, 5).
3. The quantitative analysis by the energy dispersive x-ray analyser showed that the emission counts of Ca and P were somewhat higher in the depositions in the dentinal tubules than in the intertubular dentin. However it was noticed that quantitative differences between the two were changed markedly in the different sites examined (Table 1).
4. By the elementary analysis with the wavelength dispersive x-ray spectroscope, it was observed that the depositions in the dentinal tubules contained the elements of Ca, P, Mg, Na, S, O and that the counts of Ca, P and Mg were 10% higher in the depositions than in the intertubular dentin (Table 2).

緒 言

近年透過電子顕微鏡の性能向上は非常に目ざましいものがあるが、走査電子顕微鏡においても試料作製法あるいは操作性の容易さから、あらゆる分野で手軽に応用されている。そしてX線分析装置との一体化により、単に試料の形態観察を行なうだけでなく、微小部分の組成分析も行なえる機器として発展しつつある。

X線微小部分分析装置 (Electron probe X-ray microanalyser, 以下略して EPMA と記す) による分析方法には、X線を波長の長さで分析する波長分散形X線分光器 (Wavelength dispersive x-ray spectroscopy, 略して WDS) と、X線のエネルギーの大きさによって分析するエネルギー分散形X線分析器 (Energy dispersive x-ray analyser, 略して EDX) があり、前者は走査電子顕微鏡との組合せにより通常X線マイクロアナライザー (XMA と略称する)²⁵⁾と呼ばれ、後者は特に透過電子顕微鏡との組合せにより分析電子顕微鏡 (Analytical electron microscope 略して AEM)

19) 27) と呼ばれている。この分析電子顕微鏡とは、通常の透過電子顕微鏡にサイドエントリーゴニオメータ (SEG), 走査像観察装置 (ASID) 及びエネルギー分散形分析器 (EDX) を取り付け、試料の回転・傾斜を行ないながら任意の場所で元素分析を行なえるようにしたもので、ASID によって走査透過像 (STEM 像) も観察できる。

EPMA の硬組織への応用はかなり古くから行なわれ、歯牙についても数多くの研究がなされているが^{9) 10) 13) 15) 16) 21) 23) 24)}, 歯根部透明象牙質についてはほとんどこれを見ない。そこで今回は歯根部透明象牙質の組織組成を検索するため電子顕微鏡による微細構造の観察と電子線回折、及び EPMA による元素分析を行なった。

材料と方法

材料は年齢60歳以上の患者から得られた前歯あるいは臼歯で、歯槽膿漏症等で抜去した肉眼的に齲蝕のないものを用い、抜去後ただちに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。

マイクロラジオグラフ、走査電子顕微鏡及び透過電子顕微鏡の試料作製法は第1報と全く同様で、走査電顕像は日本電子 JEM-100B 型透過電顕に装着した ASID で観察した。また透過電顕像は同じく JEM-100B によって観察し、その試料の一部について電子線制限視野回折を試みた。

波長分散形による元素分析では、試料を象牙細管が横断されるよう切断後アルミナ粉末によるバフ研磨を行ない、Al コーティングを施して島津 ARL エレクトロン・マイクロプローブ X 線アナライザー EMX-SM により、各元素の点分析及び線分析を行なった。またエネルギー分散形による分析は、非脱灰超薄切片（無染色）をカーボン・コーティング後日本電子 JEM-100C 型透過電子顕微鏡に装着した、Kevex 5100 x-ray energy spectrometer（エネルギー分解能 146 eV）によって行なった。

成 績

図1は61歳男性下顎左側第2大臼歯の歯根部透明象牙質のマイクロラジオグラフであるが、横断された象牙細管のほとんどがX線不透過性を示し、それは管間基質よりはるかに高度となっている。しかし象牙細管の一部には中心がX線透過性になっているものも認められる（矢印）。図2は72歳女性下顎右側犬歯の走査電顕像で、歯根部透明象牙質を象牙細管が横断されるよう破折した断面を示す。暗く見える2本の象牙細管のうち下方のものは完全に閉鎖されているが、右上方のものは細管中心部に円形の空隙が観察される。また管間基質の破折面はきわめて粗造であるのに対し象牙細管内沈着物は緻密なのが注目される。透過電子顕微鏡所見は79歳女性上顎左側側切歯の歯根部透明象牙質を非脱灰超薄切片とし、無染色にて観察した。図3は1本の象牙細管の横断像で、細管内に電子密度の高い微細顆粒物が密に沈着していることが明瞭である。しかし管間基質は判然としていない。次に管間基質と象牙細管の微細構造を観察するためさらに強拡大し、同時にそれぞれの結晶状態を検索するため電子線制限視野回折を行なった。図4が管間基質の強拡大像で、構造的にはコラーゲン線維の走行に関連して針状のやや大きい結晶が排列し、回折パターン（挿入図）は対

称性に光輝を発し、その結晶がある方向性を持っていることを示している。また図5から象牙細管内沈着物が非常に微小な結晶物であり、その回折パターン（挿入図）から結晶は方向性を持っていないことがわかる。

次に EPMA による元素分析であるが、まずエネルギー分散形による結果から述べる。図6は透過電顕観察に用いたものと同じ試料の走査透過電顕像（STEM 像）で、中央部に象牙細管が観察される。そして管間基質と象牙細管内をエネルギー分散形によって定性分析したスペクトルが図7と8である。管間基質、象牙細管ともに Ca と P のピークが現われているが、どちらの元素も象牙細管内の方がわずかに高く見える。しかしその差は分析点、あるいは試料（切片）によってバラツキがあり一部には管間基質の方が相対的に Ca, P が多いことも少例ながら認められた。また他の元素についてはとくに判別できるピークを得ることができなかった。なお右側のピークは、いずれも試料を載せたグリッドからの Cu のピークである。表1は管間基質と象牙細管内における Ca と

表1：エネルギー分散形による Ca, P の管間基質及び象牙細管における分析値とその相対濃度差

切片	元 素	管間基質 (count)	象牙細管 (count)	相対濃度 差 (%)
A	Ca	2157	2347	8.8
	P	999	1106	10.7
B	Ca	4159	4909	18.0
	P	2056	2557	24.4
C	Ca	4469	5296	18.5
	P	2355	2718	15.4

Pの相対濃度を比較するため、分析点と切片を変えて約 $2\mu^2$ の面積を一定時間分析した時のカウント数の平均値で、管間基質に対する象牙細管内の差を%で示した。それによると Ca, P ともにどの切片においても象牙細管内の方が多くなっているが、その相対的濃度差は約8~24%と非常にバラツキが大きくはっきりしたデータは得られなかった。図9・10は74歳女性上顎左側第1大臼歯を波長分散形によって線分析したデータで、写真上丸く明るく見える所が象牙細管に相当し、中央の

白線上を分析した。図9はCa, P, Oのピークを示し, Ca, Pとも象牙細管内において管間基質より多少の高まりを見せているが, Oははっきりした差が出ていない。図10はSとMgのピークであるが, Mgは明らかに象牙細管内で高くなっているのに対し, Sはいく分高いようであるがその差ははっきりしていない。またそのほかにNaが検出されたが, ほとんど変化が現われていなかった。表2は管間基質と象牙細管におけるCa, P,

表2：波長分散形によるCa, P, Mgの管間基質及び象牙細管における分析値とその相対濃度差

元 素	管間基質	象牙細管	相対濃度差 (%)
Ca	8318.0	9225.0	10.9
P	8427.8	9371.6	11.2
Mg	1102.3	1201.4	9.0

Mgの相対濃度を比較するため点分析を行ない統計処理したデータである。この場合もCa, P, Mgとも象牙細管内沈着物の方が管間基質よりも約10%高くなっている。しかしNa, S, Oについては, 顕著な差がなかったため相対濃度の比較ができなかった。またその他の元素としてF, Cl, Znの分析を試みたが検出することが不可能であった。

考 察

まず波長分散形とエネルギー分散形の特徴について比較考察してみたい^{6) 26) 27)}。波長分散形は周知の如く, 電子線を試料表面に照射した際発生する特性X線を分光結晶によって波長別に分光し, 試料を構成する元素の種類(定性)や含有量(定量)を分析する装置であるのに対し, エネルギー分散形は特性X線のエネルギーの大きさをSi(Li)半導体検出器を用いて選別し, 各元素の分析を行なう装置である。

(1) 分析元素範囲

波長分散形ではBe~Uまでの元素分析ができるが, エネルギー分散形は検出器のBe窓によりX線が吸収されるため, 通常Naまででそれ以下の軽元素の検出は極めて困難である。

(2) 波長分解能

分光結晶の作製技術の進歩により, 波長分散型ではかなり高い波長分解能をもっているが, エネルギー分散形は半導体検出器の精度の問題などで波長分散形の1/10以下となっている。

(3) P/B比, 検出感度

検出した特性X線のピーク(P)とバックグラウンド(B)との比が高いほど良いわけであるが, エネルギー分散形については検出器からのノイズ, あるいは試料を支持する材質の影響などもあり, 波長分散形よりP/B比が悪くなっている。また検出感度についてもエネルギー分散形の方が劣っている。

(4) 試料電流

分析時に試料を照射する電子線の電流値はエネルギー分散形の方がはるかに小さく, これによって試料へのビームダメージ, コンタミネーションを少なくし, 同時に透過電顕像を観察するのと同じ条件のため, 薄膜試料においては非常に微小部(数100 Å)の分析が可能である。

(5) 定性・定量分析

定性分析は, 波長分散形では分光結晶を移動させながら, 一つ一つの特性X線を分析して行くのでかなりの時間を要するが, エネルギー分散形では同時に多元素の分析ができるため, わずか数分で定性分析が行なえる。しかし定量分析については, エネルギー分散形はエネルギー分解能やP/B比の悪さからくる補正の問題, また特に生物試料における標準試料の問題などがあり, まだ十分な定量法が確立されていない。

以上をまとめると表3の如くなる。現状では定量分析においては波長分散形に頼らざるを得ない感があるが, 試料へのダメージやコンタミネーションの少なさ, 定性分析の速さ, 透過電顕像を観察しながらの微小部分分析といった点で, 特に生物試料の分析においてエネルギー分散形は非常に有効な手段であると思われる。

さて歯根部透明象牙質をマイクロラジオグラフで観察するとほとんどの象牙細管は完全に閉鎖し, しかも管間基質よりはるかに石灰化度が高くなっている。さらに透明象牙質の破折面を走査電顕で観察すると, 管間基質と象牙細管ははっきり区別され, 象牙細管部分の表面が滑らかなところからそれは管間基質より密度が高く, 硬いことが

表3：エネルギー分散形と波長分散形の特徴比較

項 目	エネルギー分散形	波長分散形
分析元素範囲	$_{11}\text{Na} \sim _{92}\text{U}$	$_{4}\text{Be} \sim _{92}\text{U}$
波長分解能 ($\Delta\lambda/\lambda$)	$2 \sim 10 \times 10^{-2}$ (150 eV)	$1 \sim 5 \times 10^{-3}$ (10 eV)
P・B比 (P/B)	~100	100~1,000
検出感度	0.3~1 (%)	0.001~0.01 (%)
試料電流	$10^{-10} \sim 10^{-12}$ (A)	$10^{-7} \sim 10^{-8}$ (A)
定性分析のスピード	数(分)	数10(分)
定量分析の精度	悪い	良い

想像される。同じく透過電顕で観察した場合も管間基質においては針状の大きな結晶が比較的疎に排列しているが、象牙細管は非常に微小な結晶が密に沈着しており、電子線回折パターンからも均質な結晶状態であることが観察された。

以上のことから歯根部透明象牙質では象牙細管内部の方が管間基質より石灰化が高いことがわかるが、両者の組織組成とくに Ca や P をエネルギー分散形分析器によって比較してみるとほとんどの場合象牙細管の方が高くなっていた。しかし中には逆に管間基質が高い場合もあった。これは試料自身において石灰沈着が軽度なため象牙細管内の方が元素濃度の低い場合も考えられるが、それはむしろ考察の冒頭で述べたエネルギー分散形の P/B 比の問題が大きく影響しているものと思われる。つまり P/B 比は分析時の加速電圧と試料を支持するグリッドの材質とに密接な関係があり、Cu グリッドはよくないとされているのである。もちろん加速電圧の低い方がノイズ（バックグラウンド）は減少するが、水平¹¹⁾の実験によれば加速電圧を 10~100 kv まで変化させてバックグラウンドを測定すると、試料支持台に Cu グリッドを用いた場合加速電圧 60 kv で最も悪く、次にカーボン板を用いると急激にバックグラウンドは減少し、カーボンフィルムにおいてはほとんど問題

にならないほど減少すると報告されている。そして結論として加速電圧については、元素にもよるが 10~40 kv の低加速電圧において分析を行なうのが良く、また試料支持台はカーボングリッドにカーボン膜を張ったものに試料を載せて分析するのが理想的な方法としている。その点今回我々の行なった分析条件は試料支持台に Cu グリッドを用い、加速電圧も 60 kv で行なっているので P/B 比の点からもっとも悪い条件ということになる。また表 1 に示したエネルギー分散形による面分析を行なったカウント数において、象牙細管の方がいずれも Ca, P とも多くなっているがその差については 8~24% と非常に幅が広く、ここにおいてもエネルギー分散形の試料作製法、分析条件、検出器の性能などの定量的な分析における難かしさが出ていると思われる。

波長分散形による分析では、象牙細管内において Ca, P, Mg の各元素が相対濃度として管間基質より約 10% 高かったがこの成績は相対的な濃度比較としてかなり信頼できると思われる。しかし須賀¹⁵⁾の指摘するように組織の密度のちがうものを分析した場合、電子線の浸入深さが異なるので密度の低い方の組織では X 線の発生領域が広がり、そのため単位容積内に含まれる検出元素の量の差は実際より小さい値を示すことになることを考慮しなければならない。この問題を解決するには、分析する試料を電子線が透過してしまうだけの厚さの薄切片を作製すればよいのであるが、非常に微量元素の場合は検出感度の問題もあり膜厚や測定条件の検討が必要となってくる。

歯根部透明象牙質において今回我々の観察では管周基質と細管内沈着物との区別が判然としなかったため、両者の比較はなし得なかった。しかし透明象牙質をエネルギー分散形によって分析した一条ら⁷⁾によると象牙細管が完全に閉鎖していても crystal の沈着が疎な状態においては Ca, P とも管周基質が一番多く、次に管間基質、象牙細管と続くが、crystal が非常に密に沈着した細管では管周基質とはほぼ同様な測定値を示すという。また透明象牙質ではないが、Takuma ら²³⁾は、馬の臼歯歯冠部象牙質の非脱灰切片を波長分散形によって元素分析を行ない、Ca, P とも管間基質より管周基質において約 2 倍の量であることを報告している。森本¹²⁾は、ヒト第 3 大臼歯歯冠部象牙

質を蟻酸で腐蝕し、それによって現われた象牙細管内の管状構造物あるいは管周基質、管間基質などについてエネルギー分散形を用いて元素分析を行ない、Ca、Pとも管周基質の方が管間基質より多いことさらに管周基質においてMg、Siの元素を検出している。管周基質に関する研究はかなりの数にのぼるが^{1) 3) 4) 8) 20) 22)}、その成立は象牙細管内沈着物の由来との関連において非常に興味深いところなので、今後検索を続ける予定である。EPMAによって象牙質中の各元素を精度良く分析するには硬組織であるとはいえ、水分や有機質があるからには軟組織における試料作製と同程度の注意が必要と思われる。すなわち試料の固定、脱水、乾燥、包埋、染色などの操作によって特に電解質が流れ出たり、試料のコンタミネーションなどの心配があるからである。ちなみに軟組織をエネルギー分散形によって分析する場合の試料作製法としては、現在のところ固定をわずか行なったのち凍結超薄切片を作製し、無染色で分析する方法が良いとされている^{2) 11) 14) 17) 18) 27) 28)}。

結 論

第1報に続いて歯根部透明象牙質を顕微X線の観察し、さらに象牙細管内沈着物と管間基質の微細構造および結晶状態を検索するため走査電子顕微鏡および透過電子顕微鏡による観察と電子線制限視野回折を行なった。また両者の組成を比較検討するため、エネルギー分散形及び波長分散形による元素分析を行ない比較検討した。

1. 走査電顕による観察で象牙細管内沈着物は非常に緻密な構造を示し、透過電顕像でも管間基質においては比較的大きな針状結晶が疎に排列しているのに対し、象牙細管内には微小な結晶が密に沈着しているのが観察された。

2. 電子線回折パターンから、管間基質では結晶がある方向性をもっているのに対し、象牙細管内では方向性がなく均質的な状態であることが認められた。

3. エネルギー分散形による元素分析でCa、Pが検出され、ともに象牙細管内沈着物において濃度の高いことが認められたが、その差は分析点によってバラツキが大きかった。

4. 波長分散形ではCa、PのほかMg、Na、S・Oの各元素が検出され、Ca、P、Mgについて

はいずれも象牙細管内で相対的に約10%濃度が高かった。

最後にエネルギー分散形分析器（分析電子顕微鏡）および波長分散形分光器（X線マイクロアナライザー）の使用に当たり、多大なご協力をいただいた日本電子株式会社並びに株式会社島津製作所に対し深謝するしだいである。

文 献

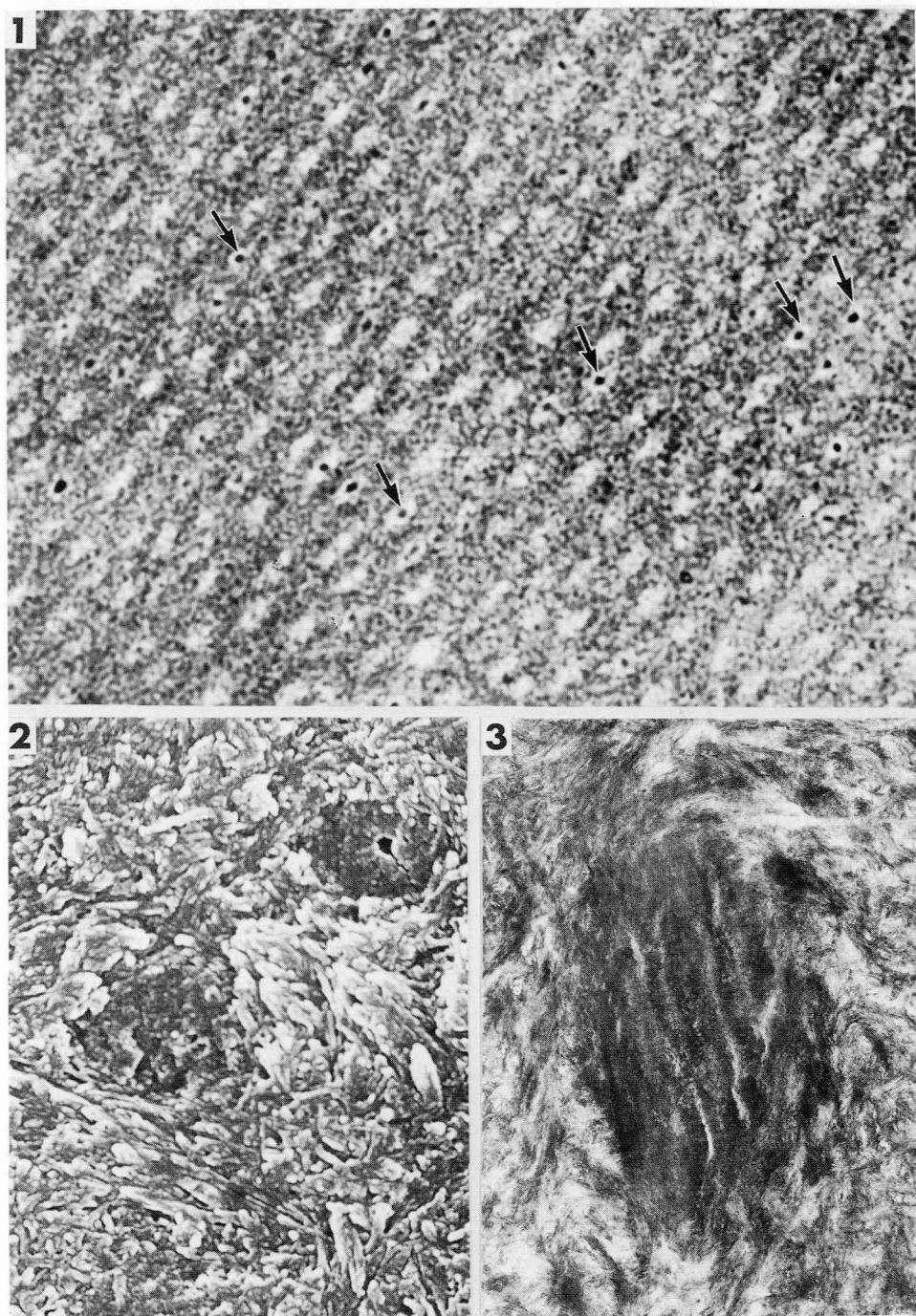
- 1) Blake, G. C. (1958) The peritubular translucent zones in human dentine. *Brit. dent. J.* 21: 57—64.
- 2) Coleman, J. R. and Terepka, A. R. (1974) Preparatory methods for electron probe analysis. *Principles and Techniques of Electron Microscopy*. (Ed. Hayat, M. A.) 4: 159—207. Van Nostrand Reinhold Co. New York.
- 3) 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にして、硬組織研究（荒谷他編）。177—208. 医歯薬出版、東京。
- 4) Eda, S. and Takuma, S. (1965) Microstructure of the peritubular matrix in horse dentin. *Bull. Tokyo dent. Coll.* 6: 1—14.
- 5) 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.
- 6) 長谷川与一 (1978) X線マイクロアナリシス—分散. 細胞, 10: 514—522.
- 7) 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.
- 8) Isokawa, S., Toda, Y. and Kubota, K. (1970) A scanning electron microscopic observation of etched human peritubular dentine. *Archs oral Biol.* 15: 1303—1306.
- 9) Miake, K., Chang, C. H. and Matsui, T. (1973) Studies in calcification in the interglobular dentin. *Bull. Tokyo dent. Coll.* 14: 65—94.
- 10) 見明 清、上松博子、小高鉄男、泉地榮寿、多胡彬、花井美智子、坂井 剛 (1974) 象牙質 Dead tracts の microradiography と XMA による元素分析について. 歯科学報, 74: 212—213.
- 11) 水平敏知 (1977) 分析電子顕微鏡の医学・生物学領域への応用. 電子顕微鏡, 12: 107—121.
- 12) 森本一徳 (1977) 象牙質破折面を酸蝕した際にみられる管状構造物ならびに細管内無構造物質の元素分析. 日大歯学, 51: 728—732.

- 13) 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.
- 14) 小沢英浩, 山田まりえ, 高野吉郎, 山本敏男 (1977) 凍結超薄切片法による硬組織石灰化機構の研究. 日本電子顕微鏡学会第33回学術講演会講演予稿集, 150.
- 15) 須賀昭一 (1967) X線マイクロアナライザによる生物組織, 特に硬組織の研究について. 歯学, 55: 217—224.
- 16) 須賀昭一 (1968) X線マイクロアナライザによる硬組織の分析. 歯界展望, 32: 113—120.
- 17) Simard, R. (1976) Cryoultramicrotomy. Principles and Techniques of Electron Microscopy. (Ed. Hayat, M. A.) 6: 290—311. Van Nostrand Reinhold Co. New. York.
- 18) 酒井俊夫 (1977) 凍結超薄切片法. 細胞, 9: 87—100.
- 19) 高野行夫, 渡辺智美, 会田差武朗 (1975) 分析電子顕微鏡の概要と応用. 細胞, 7: 143—148.
- 20) 田熊庄三郎 (1968) 象牙質管周基質. 歯界展望, 32: 795—807.
- 21) 田熊庄三郎 (1976) 齲蝕象牙質の再石灰化. 歯界展望, 47: 197—209.
- 22) Takuma, S. and Eda, S. (1966) Structure and development of the peritubular matrix in dentin. J. dent. Res. 45: 683—692.
- 23) Takuma, S., Katagiri, S. and Ozasa, S. (1966) Electron-probe microanalysis of horse dentin. J. Electron Microscopy. 15: 86—89.
- 24) 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.
- 25) 内山 郁, 渡辺 融, 紀本静雄 (1975) X線マイクロアナライザ. 6版, 日刊工業新聞社, 東京.
- 26) 渡辺忠雄, 永谷 隆 (1978) X線マイクロアナライズ—非分散. 細胞, 10: 523—533.
- 27) Weavers, B. A. (1975) The analytical electron microscope, EMMA-4. Principles and Techniques of Electron Microscopy. (Ed. Hayat, M. A.) 5: 174—244. Van Nostrand Reinhold Co. New. York.
- 28) 山本敏男, 小沢英浩 (1978) 凍結超薄切片法による骨組織の分析電顕の研究. 日本電子顕微鏡学会第34回学術講演会講演予稿集, 117.

〔付図 次頁より〕

第1報 (松本歯学, 4: 19~26, 1978) 正誤表

頁	段・行	誤	正
22	右・4~5	管間基質	管周基質
26	下 2	管間基質は	管周基質は



- 図1：61歳男性下顎左側第2大臼歯の非包埋研磨標本のマイクロラジオグラフ。
歯根透明象牙質の横断された象牙細管はほとんどが閉鎖し、それは管間基質よりもX線不透過性となっている。しかし一部には中心部にX線透過部をもつ象牙細管も認められる(矢印)。(×1,250)
- 図2：72歳女性下顎右側犬歯の歯根透明象牙質の破折面を走査電子顕微鏡でみたものである。右上方の象牙細管は中央部に円形の空隙がみえるが、左中央の象牙細管は完全に閉鎖し、いずれも管間基質より緻密な構造をしている。(×10,000)
- 図3：79歳女性上顎左側側切歯の歯根透明象牙質の非脱灰切片を無染色にて透過電子顕微鏡で観察したものである。中央に電子密度の高い閉鎖した象牙細管がみられる。(×20,000)

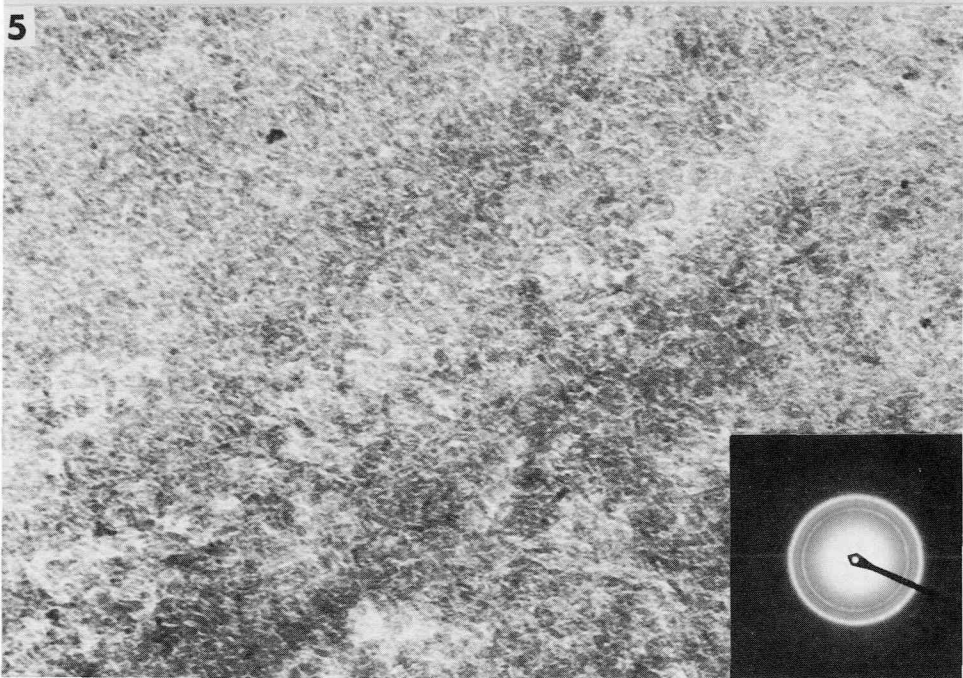
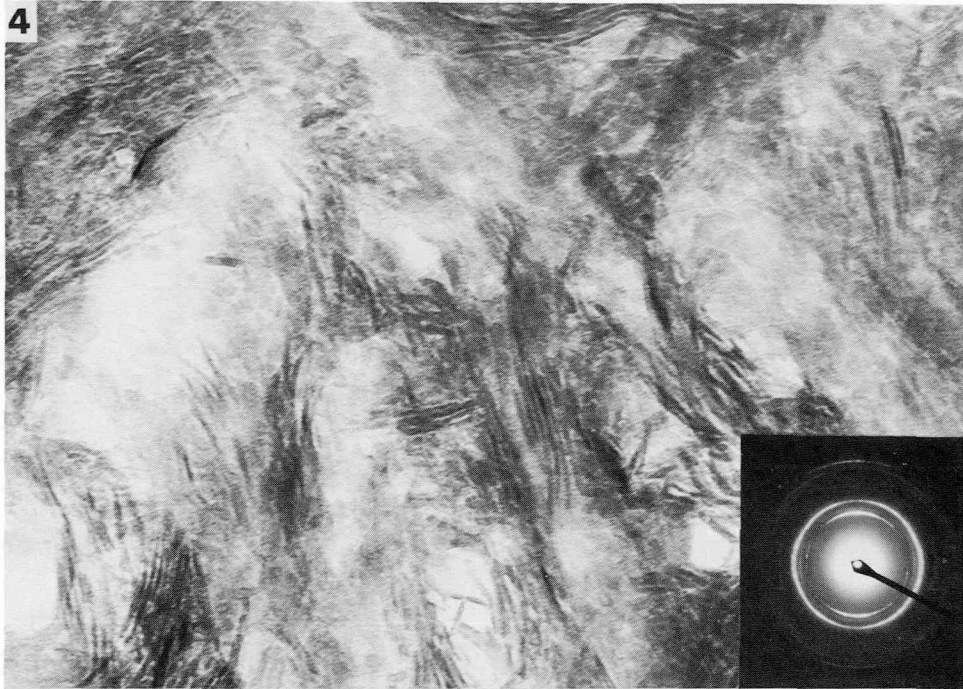


図4：図3の管間基質の拡大像で，長いリボン状の結晶が疎に排列しており，挿入図の電子線回折パターンはそれらがある方向性をもっていることを示している．（ $\times 250,000$ ）

図5：図3の象牙細管内の拡大像と電子線回折パターンである．
微小な結晶が密に沈着し，電子線回折パターンからそれは方向性をもたない均質な状態であることがわかる．（ $\times 250,000$ ）

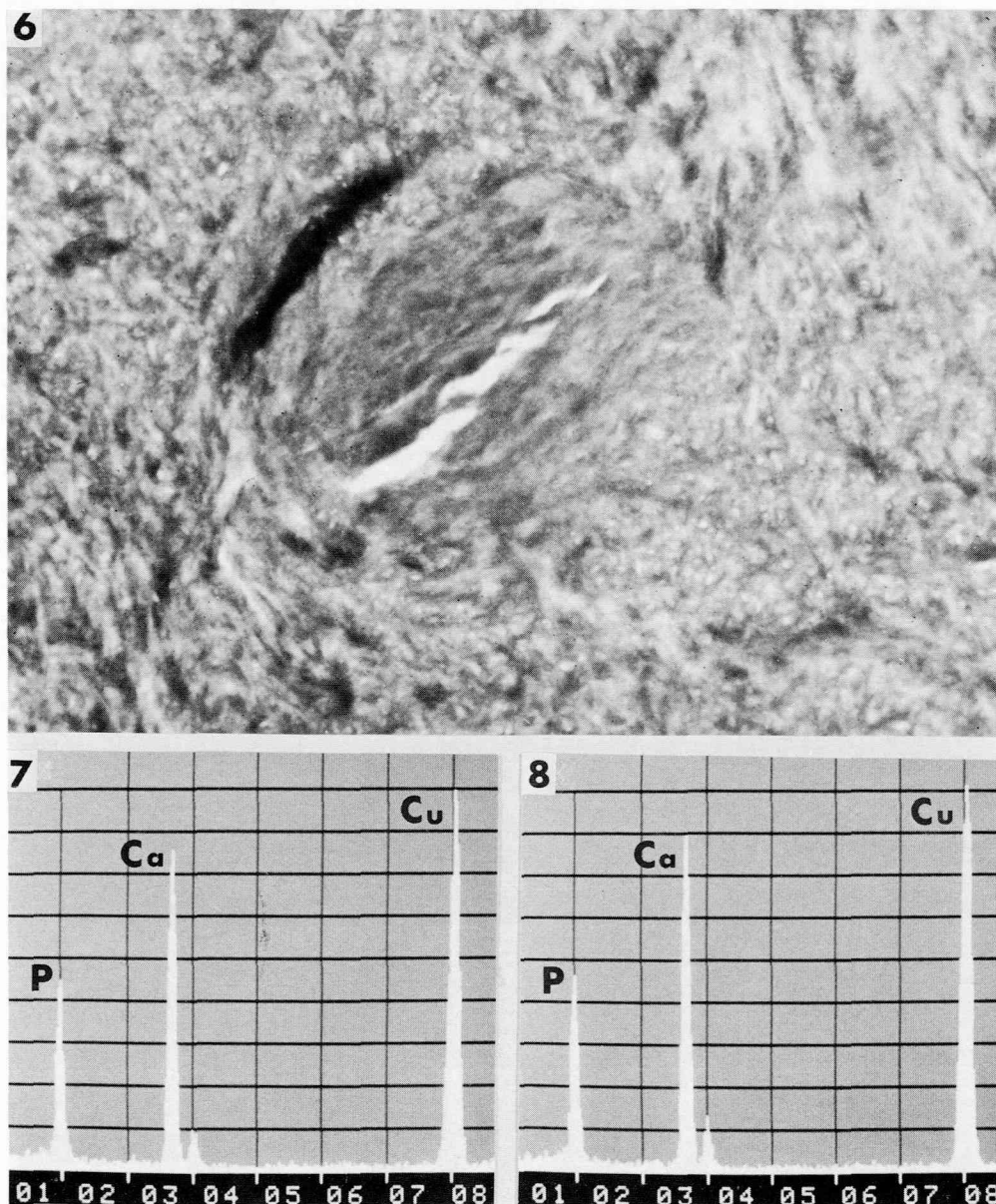


図6：図3と同じ試料の非脱灰無染色切片の走査透過電子顕微鏡像（STEM像）である。中央部に密で電子密度の高い閉鎖象牙細管がみえる。亀裂は人工産物である。（ $\times 30,000$ ）

図7：図6の管間基質をエネルギー分散形（EDX）で元素分析したスペクトルである。Ca, Pのピークが出ている。一番右のピークは試料をのせたグリッドのCuを示す。

図8：図6の象牙細管内沈着物をエネルギー分散形（EDX）で元素分析したスペクトルである。同じくCa, Pのピークが出ているが、図7の管間基質と比較するとどちらのピークも少し高くなっており、象牙細管内沈着物の方がCa, Pとも多いことがうかがえる。

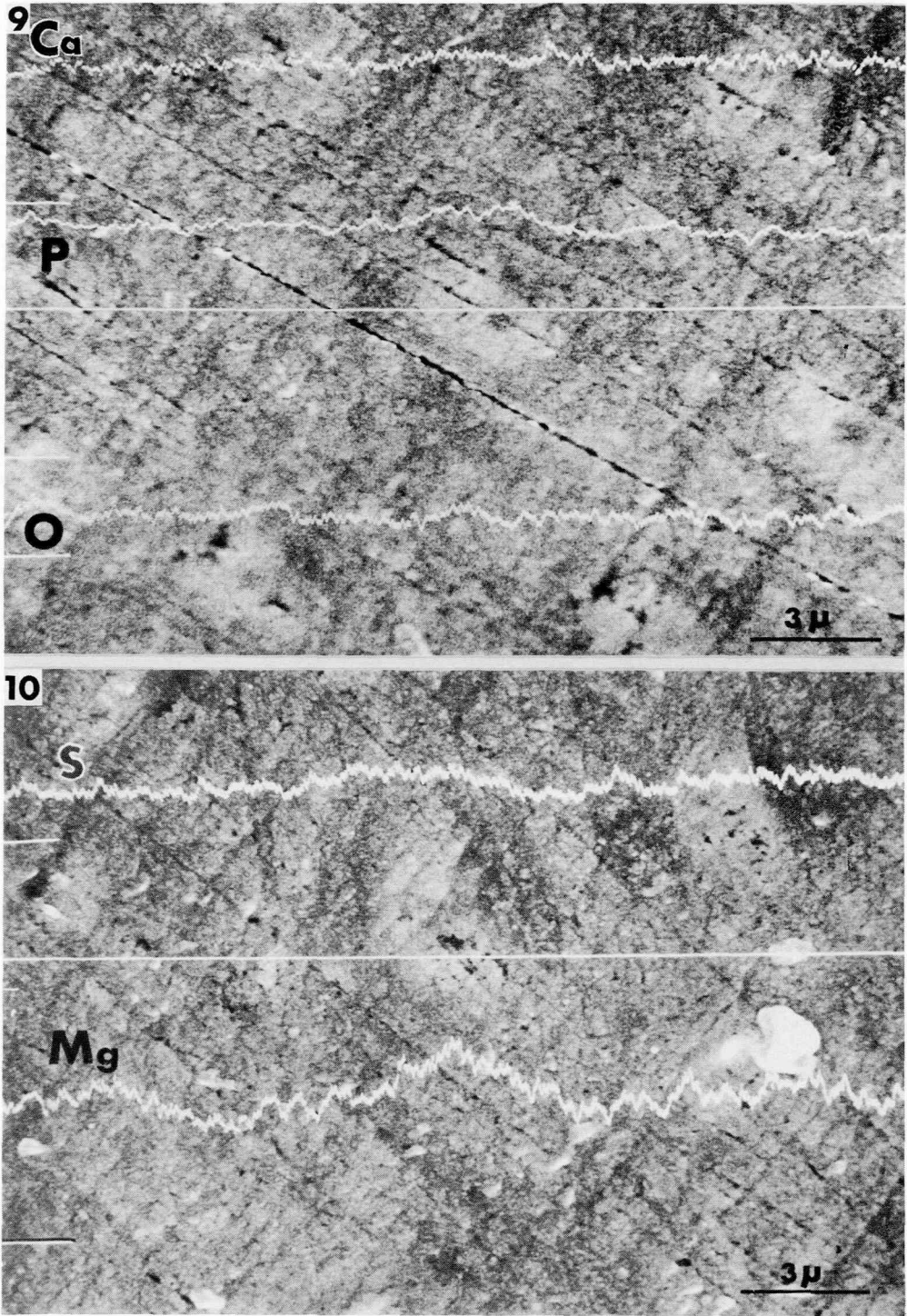


図9：74歳女性上顎左側第1大臼歯の歯根透明象牙質の破折面をバフ研磨し、波長分散形(WDS)で各元素の線分析を行なった写真である。中央の丸く明るくみえるところが象牙細管に相当し、中央の直線上をCa, P, Oについて分析してみると, Ca, Pは象牙細管内で多少の高まりをみせているがOはほとんど変化がない。(×7,000)

図10：図9と同じく波長分散形(WDS)でSとMgについて線分析した写真である。Mgは象牙細管内で明らかに高くなっているが、Sはわずかに高くなっているように見える。(×7,000)