

フッ素イオン導入法による象牙質微細構造
の変化に関する実験的研究*

宮 吉 誠

東京歯科大学大学院歯学研究科
オーラルメディシン講座
(指導 : 川島 康教授)

An Experimental Study of Ultrastructural Changes Caused In
Dentin by Fluoride Iontophoresis

Makoto MIYAYOSHI

Department of Oral Medicine , Tokyo Dental College
(Director : Prof . Yasushi Kawashima)

歯科学報別冊

第87巻 第4号 575～602頁 (昭和62年4月)

Reprinted from The shikwa Gakuho

Vol.87, No.4(1987)

フッ素イオン導入法による象牙質微細構造 の変化に関する実験的研究*

宮 吉 誠

東京歯科大学大学院歯学研究科

オーラルメディスン講座

(指導 : 川島 康教授)

(1987年2月2日 受理)

An Experimental Study of Ultrastructural Changes Caused In
Dentin by Fluoride Iontophoresis

Makoto MIYAYOSHI

Department of Oral Medicine, Tokyo Dental College

(Director : Prof. Yasushi Kawashima)

I 緒 言

象牙質知覚過敏症とは自発痛がなく、象牙質露出面に機械的、温度的、科学的刺激が加わると過敏に反応して、一過性の不快感ないし痛みがあり、その痛みのおこり方は電撃的で鋭く、持続しないことを特徴とし、歯髄にはほとんど組織学的変化を認めないものとされている¹⁾。

この象牙質知覚過敏症の発現頻度は高村²⁾によれば約20%という率で、う蝕、歯周疾患について高率であると報告されており、日常臨床においてかなり頻繁に遭遇する歯科疾患であるにもかかわらず、象牙質知覚過敏症の発症原因について十分解明されていないのが現状である。ところで、本症についての治療方針としては、¹⁾ 露出した象牙細管の表面を機械的に被覆または目詰まりさせ、外来刺激を遮断する。²⁾ 象牙細管内の石灰化を促進して象牙細管を閉鎖し、外来刺激を遮断する。³⁾ 象牙芽細胞を変性凝固させ、外来刺激に反応しないようにする。⁴⁾ 第2象牙質の形成を促進し、外来刺激に反応しないようにする。さらに、最終的な処置として、⁵⁾ 外来刺激が遮断できない場合は抜髄及び根管充填を行う、というようなものが一般的に検討され、また実施されている³⁾。

*本論文の要旨は第226回東京歯科大学学会総会(昭和60年11月9日、千葉)において発表した。

しかしながら、このような考え方に基づく種々の治療法と臨床応用については、その選択に困難をきたす場合が少なくない。

Grossman⁴⁾は象牙質知覚過敏症に対する治療薬剤の必要条件として、1) 歯髄に刺激のないこと 2) 疼痛をあたえないこと 3) 簡便に使用できること 4) 速効性のあること 5) 持続性のあること 6) 歯を変色させないことの6項目をあげているが、これらのすべての項目を満足させる治療法は未だ確立されていないようである。これに対して、フッ素イオン導入法は以上の必要条件を比較的良く満足させ、臨床的にも優れた効果をあげることができるという報告がかなり多くみられる^{5)~16)}

陰極通電によるフッ素イオン導入法の応用に関しては、金井ら^{17) 18)}が歯周疾患の治療に用いたのが最初であり、その報告において、このフッ素イオン導入法が象牙質知覚過敏症にかなり有効であることを指摘している。その後、加藤ら^{19)~21)}は歯周疾患に対してフ

ッ素イオン導入法が優れた臨床効果をもたらすことを報告しており、それ以後、本講座における一連の研究として高橋²²⁾、川島²³⁾、相²⁴⁾、小林²⁵⁾らがフッ素イオン導入法の有効性をそれぞれ報告している。

一方、象牙質知覚過敏症に対するフッ化物の応用は、Lukomsky²⁶⁾以来、数多くの報告^{27)~33)}があるが、siemon⁵⁾とManning⁶⁾は象牙質知覚過敏症に対する新しい治療法の試みとしてフッ素イオン導入法を紹介し、その明らかな有効性を報告している。それ以後、現在に至るまで、象牙質知覚過敏症に対するフッ素イオン導入法の有効性について数多くの報告^{7)~16)}がなされているにもかかわらず、この知覚過敏症消退の機序については未だ明らかにされていないのが現状である。

Greenhillら³⁴⁾は象牙質知覚過敏症治療後の象牙細管内溶液の流れが、治療前と比較して最も減少する治療法が本症に対して最も有効であるとの観点から実験を行った。その中で、2%フッ化ナトリウムの局所塗布に比較して、2%フッ化ナトリウムをフッ素イオン導入法によって作用させた方が象牙細管内溶液の流れを大幅に減じることができる報告を行っている。

またWilsonら³⁵⁾は2%フッ化ナトリウムの局所塗布に比較して、2%フッ化ナトリウムによるフッ素イオン導入法が象牙質におけるフッ素取り込み量を増加させることを、酸エッチング法により確認している。

さらに、長谷³⁶⁾は2%フッ化ナトリウムによるフッ素イオン導入法を施した歯の象牙質内フッ素濃度分布状態について、マイクロラジオグラムおよびX線マイクロアナライザーによって分析を行い、2%フッ化ナトリウムの局所塗布に比較してフッ素イオン導入法がフッ素の象牙質内浸透性を著しく高め、さらにフッ素の象牙質浸透量が通電量に依存することを確認している。また細管式等速電気泳動装置を用いてフッ素イオン導入法によるフッ素の象牙質通過性に関して検討を加え、フッ素イオン導入法において僅かではあるが、フッ素が象牙質を通過して歯髄腔に達することを報告している。

しかしながら、これらの研究はフッ素の浸透性および、その分布に関して検討したものが主であって、フッ素イオン導入法による象牙質自体の微細な組織変化を形態的観察した報告は見当たらない。

著者は高橋²²⁾、川島²³⁾、相²⁴⁾、らの報告している

ごとく、フッ素イオン導入法が歯牙硬組織を極めて強く形成・促進する効果を示すことに注目した。そこで象牙質知覚過敏症の消退に関する因子としてあげられる象牙細管内の石灰化発現による象牙細管閉鎖に対して、フッ素イオン導入法が極めて有効な手段となりえるものと考え、本研究を試みた。すなわち、成犬の歯に対して象牙質露出状態を実験的に作製し、フッ素イオン導入後の象牙質内における元素分布状態の変化をX線マイクロアナライザー(XMA)によって検索し、その部における象牙質の微細構造の変化を走査型電子顕微鏡(SEM)によって観察を行い、象牙知覚過敏症治療に対する基礎的解明の一助となる実験研究を行った所、興味ある知見をえたのでここに報告する。

II 研究材料および研究方法

1. 実験動物

実験動物としては健康な雑種成犬(8~12Kg)を使用し、咬耗や実質欠損などのない健全な下顎前臼歯を対象とした。一定期間(2週間)飼育後、ペントバルビタールナトリウム(ネンブタール^R, 大日本製薬)の静脈内注射(25mg/Kg)による全身麻酔下に、口腔内に水銃にて洗浄後、注水下でダイヤモンドディスクにより各歯の尖頭部珐瑯質内に取り込みを入れ、骨ノミを用いて尖頭部を除去し、象牙質面を露出させた。そして、フッ素イオン導入、フッ素局所塗布および生理食塩水による陰極通電について、下顎左側前臼歯を実験群、下顎右側前臼歯を対照群とした。

2. 実験条件

1) フッ素イオン導入法

本実験群においては、歯冠象牙質を前述のごとく切断、露出した直後、その露出面に2%フッ化ナトリウム水溶液によるイオン導入法(以下フッ素イオン導入群とする)を施した。通電条件は表1に示すごとく、通電量は1回500 μ A, 5分間陰極通電とし、週1回、計3回、導入を行った。図1は実験に用いたイオン導入装置の配線図である。

2) フッ素局所塗布法

他のフッ素応用法と比較検討するために、2%フッ化ナトリウム水溶液による露出面への局所塗布(以下フッ素局所塗布群とする)を行った。条件は表1に示すごとく、1回5分間、週1回、計3回、塗布を行った。

表1 実験条件

フッ素イオン導入群(2%NaFイオン導入)	500 μ A, 5分間/回/週:合計3回
フッ素局所塗布群(2%NaF局所塗布)	5分間/回/週:合計3回
生理食塩水通電群(生理食塩水陰極通電)	500 μ A, 5分間/回/週:合計3回

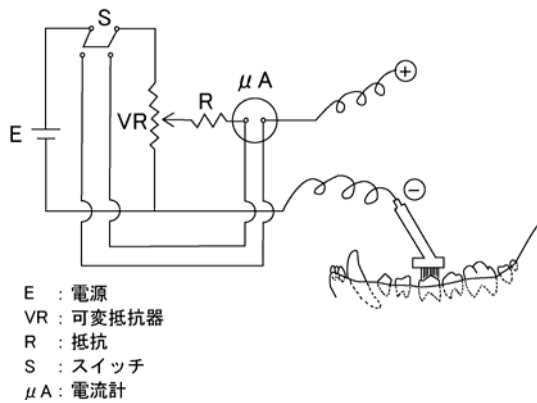


図1 イオン導入装置の配線図

3) 生理食塩水による陰極通電法

通電による効果を観察するために、露出面への生理食塩水による陰極通電（以下生理食塩水通電群とする）を行った。通電条件は表 1 に示すごとく、通電量は 1 回 500 μ A、5 分間陰極通電とし、週 1 回、計 3 回、通電を行った。

4) 対照

フッ素イオン導入群、フッ素局所塗布群および生理食塩水通電群において、下顎左側前臼歯を実験歯として用い、反対側の下顎右側前臼歯を対照（以下対照群とする）とし、象牙質面を露出後、実験終了まで無処置とした。これらの各実験に供した歯数は、表 2 に示すごとくである。

表 2 実験歯数

	XMA	SEM
フッ素イオン導入群	24 歯	12 歯
フッ素局所塗布導入群	6 歯	6 歯
生理食塩水通電群	3 歯	6 歯
対照群	21 歯	24 歯
合計	54 歯	48 歯

実験終了後、直ちに 10%中性緩衝ホルマリンによって頭頸部局所灌流固定³⁷⁾を行った。その後、歯と共に下顎骨を摘出し、更に同液による浸漬固定を 2~3 日間行った。

3. 資料調整法および分析法

1) X線マイクロアナライザー(XMA)のための試料調整
浸漬固定終了後、実験歯および対照歯をそれぞれ抜歯し、さらにそれらをダイヤモンドディスクを用いて頬舌的に、歯軸に平行させて縦切断し、厚さ 1~2mm の薄切片とした。その後、水洗、さらに注水下において、砥石を用い、厚さ約 150 μ m の両面平行な縦断研磨片とし、上昇エタノール系列による脱水の後、スチレンモ

ノマーを通過させてポリエステル樹脂 (Rigolac 2004 および Rigolac 70F) に浸漬、包埋した。その後、No. 240 ~No. 1200 のエメリー紙で粗研磨し、さらに 0.5~0.05 μ m のアルミナ粉末を用いてバフ研磨を行い、分析面を仕上げた。この分析面は歯軸に平行で、露出象牙質から髓腔壁にかけての縦断面を呈するものである。これに真空蒸着機(HUS-5GB、日立製作所)によるカーボン蒸着を行い、微小部走査 X 線分析装置(X-560、日立製作所)による元素分析の試料とした。

(1) XMA による線分析

上記の試料の分析面において、露出象牙質最表層から、髓腔壁にかけて線分析を行った。分析部位は図 2 に示すごとくである。分析元素はフッ素、カルシウム、リン、マグネシウムの 4 元素とした。分析条件は表 3 に示すごとくである。

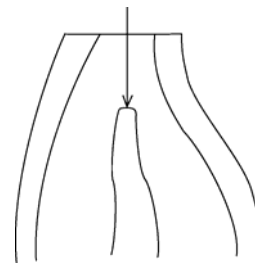


図2 XMA による線分析の分析部位
→印：線分析を行った部位

表 3 XMA 分析条件

試料電圧	15kV
試料電流	0.15 μ A
分光結晶	1chan : PET 2chan : RAP
特性 X 線	1chan : Ca-K α , P-K α 2chan : F-K α , Mg-K α
分析方法	線分析、面分析

(2) フッ素イオン導入群とフッ素局所塗布群におけるフッ素浸透距離の比較

XMA による線分析チャート上において、明らかにフッ素のピークの出現した点を起点として、それより歯髓腔に向かってフッ素のピークが対照群にみられるレベルに低下した点までをフッ素浸透部分とみなした。そして、フッ素イオン導入群とフッ素局所塗布群におけるフッ素の露出象牙質表層からの浸透距離を算出し、両者の比較を行った。

(3) XMA による面分析

フッ素イオン導入群、フッ素局所塗布群および对照群のフッ素の分布状態を視察するために、露出象牙質最表層、中間層および歯髄側においてフッ素の面分析を行いフッ素の分布領域を明らかにした。分析部位は図3に分析条件は表3に示すごとくである。

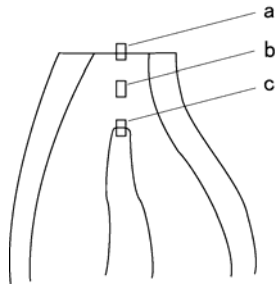


図3 XMA による面分析の分析部位

- a: 露出象牙質最表層
- b: 中間層
- c: 歯髄側

2) 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察のための試料調整
浸漬固定の終了した歯を頬舌的に、露出象牙質を含めて骨ノミにて歯冠を長軸に平行になるように2分割し、その分割面を SEM による観察面とした。分割した試料は上昇エタノール系列で脱水を行い、臨界点乾燥装置 (HCP-1、日立工機社) によって乾燥を行った。さらに、イオンスプッター (IB-3 型、エイコーエンジニアリング) を用いて、Au-蒸着を行い、走査型電子顕微鏡 (JSM-50A 型、日本電子社、および S-530、日立製作所) により加速電圧 15Kv または 20 Kv の条件下で上述の象牙質切断面の観察を行った。

III 研究成績

1. XMA による元素分析

1) XMA による線分析所見

(1) 对照群について；

フッ素元素の濃度は露出象牙質最表面から深部象牙質にわたりほぼ同程度に低く、顕著な濃度変化は認められなかったが、髄腔壁付近において僅かながら濃度の上昇を示した (図4)。カルシウム元素の濃度が露出象牙質最表層より髄腔壁にわたりほぼ一定で、特に顕著な濃度変化を示さなかった (図4)。

リン元素の濃度はカルシウム元素の濃度変化と同様、上述の象牙質内においてほとんど濃度変化を示さなかった (図5)。

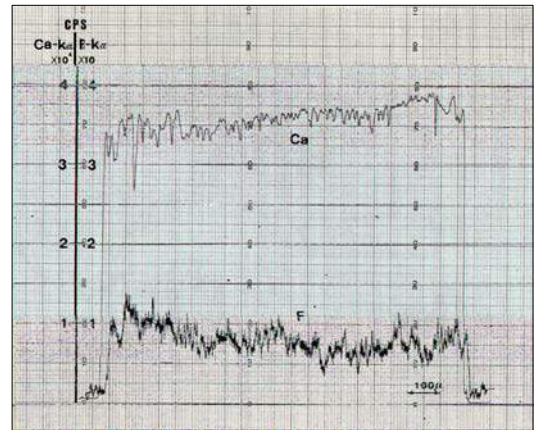


図4 对照群における F、Ca 元素の線分析
(線分析はすべて右側が露出象牙質最表層である)

マグネシウム元素の濃度は露出象牙質最表面層により、髄腔壁に向かい除々に上昇を示し、髄腔壁付近において急激な濃度の低下を示した (図5)。

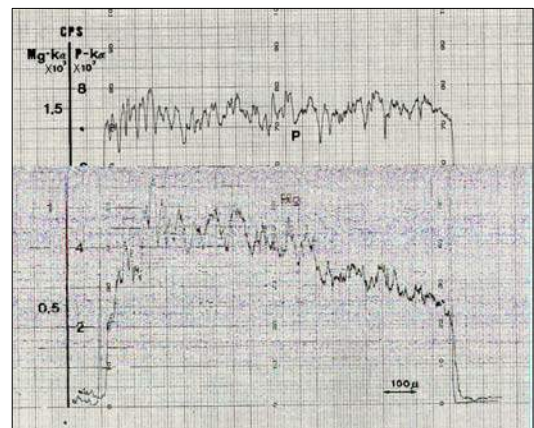


図5 对照群における P、Mg 元素の線分析

(2) フッ素イオン導入群について；

フッ素元素の濃度は露出象牙質最表層より平均 282 μm 付近において著しく高いピークを示した。さらに、このピークを示した象牙質層より深部のフッ素濃度レベルは対象群と比較してやや高いレベルを示した (図6)。また象牙質中間部の数ヶ所において、フッ素元素の濃度の著しい上昇を示す例も認められた。図7はその代表例であるが、露出象牙質表層のみでなく、最表層から約 1800~3000 μm 深部の象牙質においてフッ素濃度の上昇が認められた。

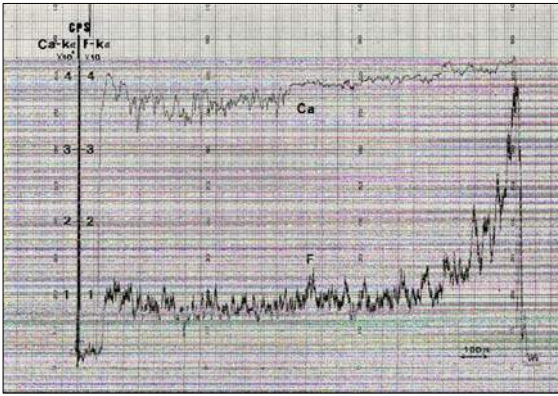


図6 フッ素イオン導入群におけるF, Ca 元素の線分析

カルシウム元素の濃度は露出象牙質最表層から髓腔壁にわたりほぼ一定で、とくに顕著な濃度変化を示さず、対照群とほぼ同様な状況を示した(図6)。

リン元素の濃度はカルシウム元素の濃度変化と同様、象牙質内において顕著な濃度変化を示さず、対象群と同じ状況を示した(図8)。マグネシウム元素の濃度は露出象牙質最表層より髓腔壁に向かい徐々に上昇し、髓腔壁付近において急激な濃度の低下を示し、対象群と同じ状況を示した。(図8)。

(3)フッ素局所塗布群について

フッ素元素の濃度は露出象牙質最表面層より平均 52 μm 付近において著しく高いピークを示した。しかし、この象牙質層より深部におけるフッ素元素の濃度は

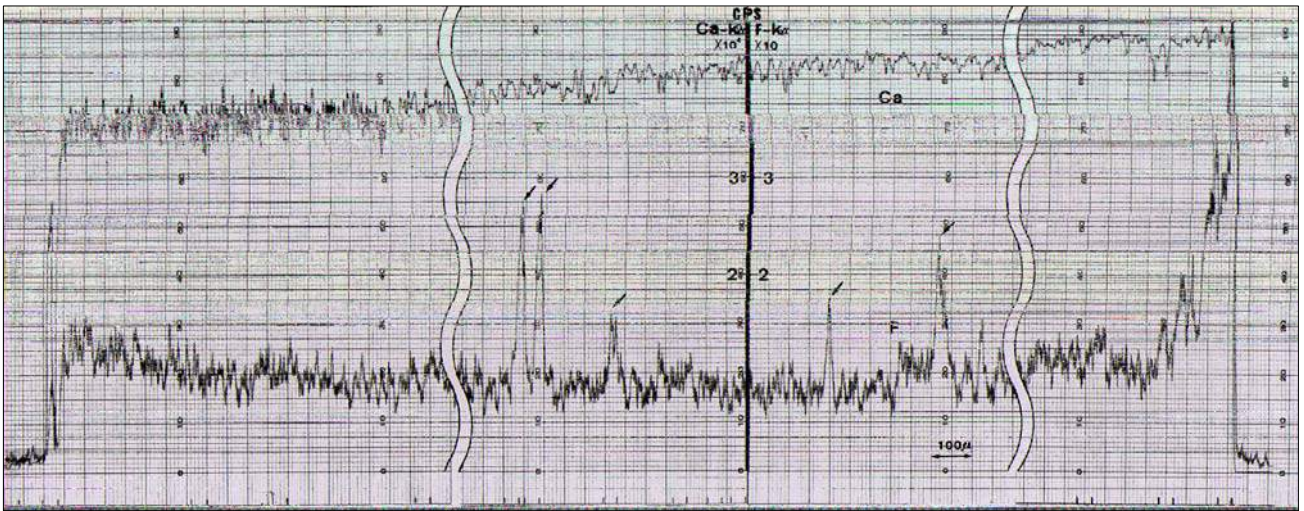


図7 フッ素イオン導入群におけるF, Ca 元素の線分析

低く、対象群とほぼ同程度の濃度レベルを示した(図9)。カルシウム元素の濃度は露出象牙質最表面層より髓腔壁にわたりほぼ一定で、とくに顕著な濃度変化を示さず、対象群と同じ状況を示した(図9)。リン元素の濃度はカルシウム元素の濃度変化と同様、象牙質内において顕著な濃度変化を示さず、対象群と同じ状況を示した(図10)。マグネシウム元素の濃度は露出象牙質最表面より髓腔壁に向かい徐々に上昇し、髓腔壁付近において急激な濃度の低下を示し、対象群と同じ状況を示した。(図10)。

(4)生理食塩水通電群について

フッ素元素の濃度は露出象牙質最表面層より深部象牙質にわたりほぼ同程度に低く、顕著な濃度変

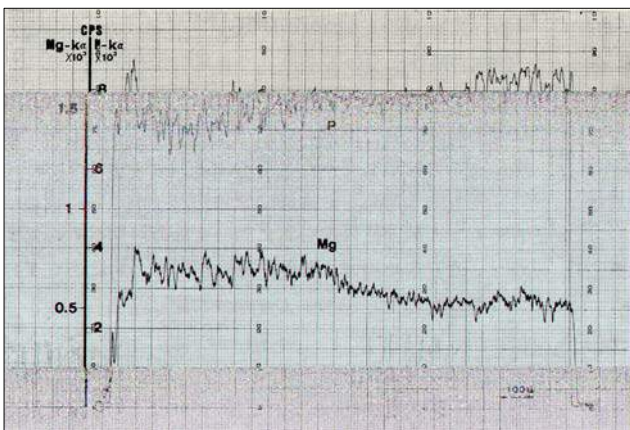


図8 フッ素イオン導入群におけるP, Mg 元素の線分析

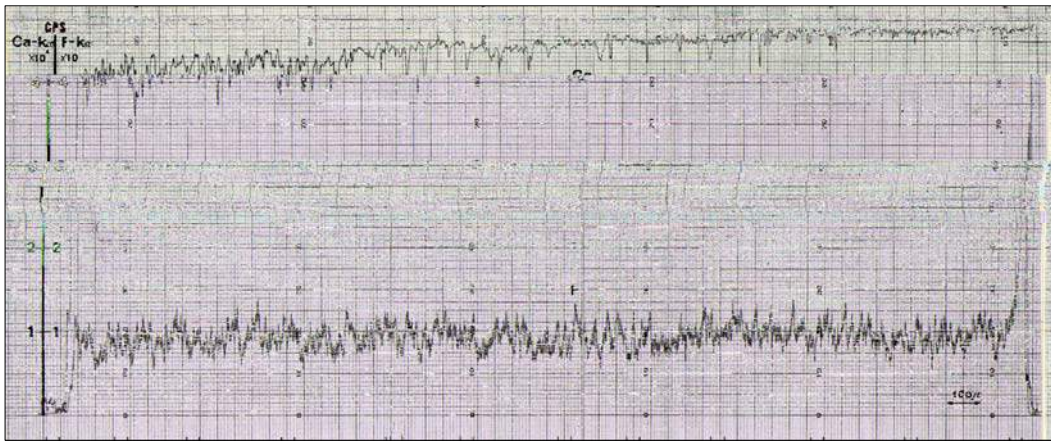


図9 フッ素局所塗布群における F,Ca 元素の線分析

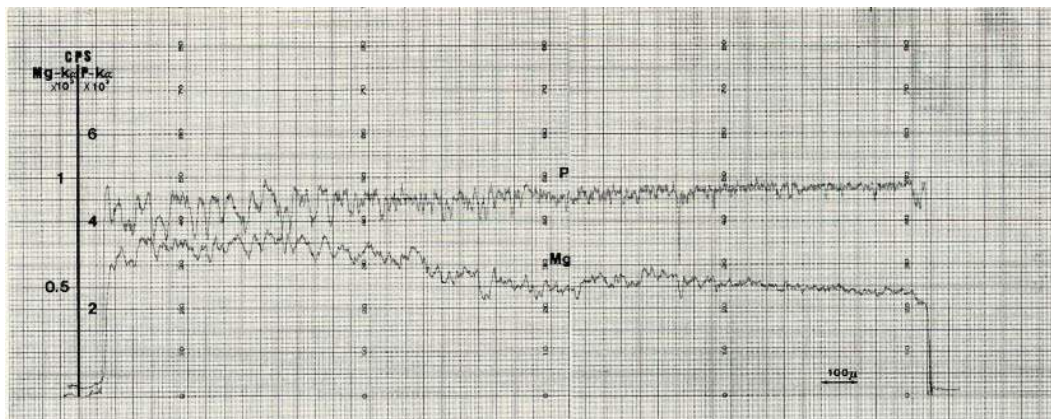


図10 フッ素局所塗布群における P,Mg 元素の線分析

化を示さず、対象群と同じ状況を示した(図11)。カルシウム元素の濃度は露出象牙質最表面層より髓腔壁にわたりほぼ一定で、とくに顕著な濃度変化を示さず、対象群と同じ状況を示した(図11)。リン元素の濃度はカルシウム元素の濃度変化と同様、象牙質内において顕著な濃度変化を示さず、対象群と同じ状況を示した(図12)。マグネシウム元素の濃度は露出象牙質最表面層から髓腔壁に向かい徐々に上昇し、髓腔壁付近において急激な濃度の低下を示し、対象群と同じ状況を示した。(図12)。

2) XMAによるフッ素イオン導入群とフッ素局所塗布群におけるフッ素浸透距離の比較

フッ素元素の浸透距離はフッ素イオン導入群では平均 $282\mu\text{m}$ であり、これに対してフッ素局所塗布群では平均 $52\mu\text{m}$ であった。このことは、統計学的処理(独立 t 検定)によって、0.5%の危険率をもって両者間に有意の差のあることが認められた。(図13)。これに対して生理食塩水通電群および対照群においては、フッ素元素の浸透は全く認められなかった。

3) XMAによる面分析結果

(1) 対象群について；

露出象牙質最表面層(図14-a)、中間層(図14-b)および歯髓側(図14-c)においてフッ素元素の分布を面分析像によって比較してみたところ、これら3部位におけるフッ素分布の明らかな差異は認められなかった。前述のごとく、この部位の線分析においては髓腔壁付近に僅かなフッ素元素の濃度上昇を認めたが、面分析においてはフッ素濃度の上昇を示すような分布像は認められなかった。

(2) フッ素イオン導入群について；

露出象牙質最表面層(図15-a)において、フッ素元素の分布が中間層(図15-b)および歯髓側(図15-c)に比較して、明らかに多量のフッ素元素の分布する状況が認められた。しかしながら、フッ素元素は分析対象となった象牙質全体に広く分布しており、フッ素元素が象牙細管、管周象牙質および管間象牙質などの特定部位に一致して局在するか否かは不明であった。

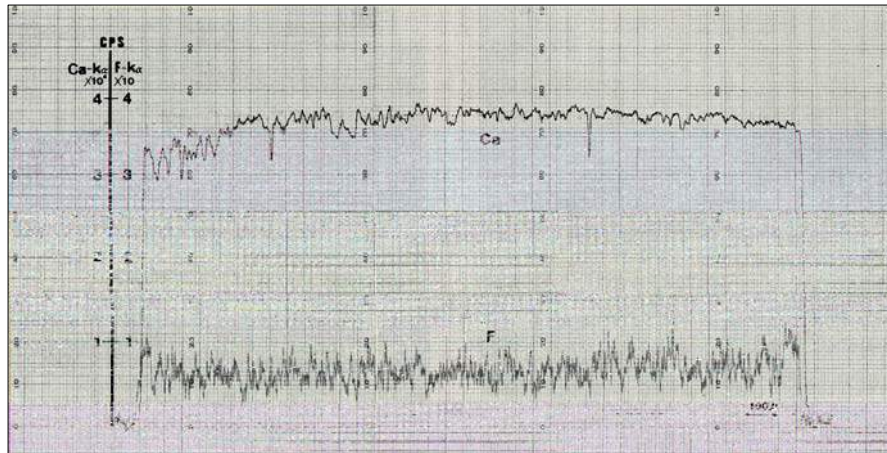


図 11 生理食塩水通電群における F,Ca 元素の線分析

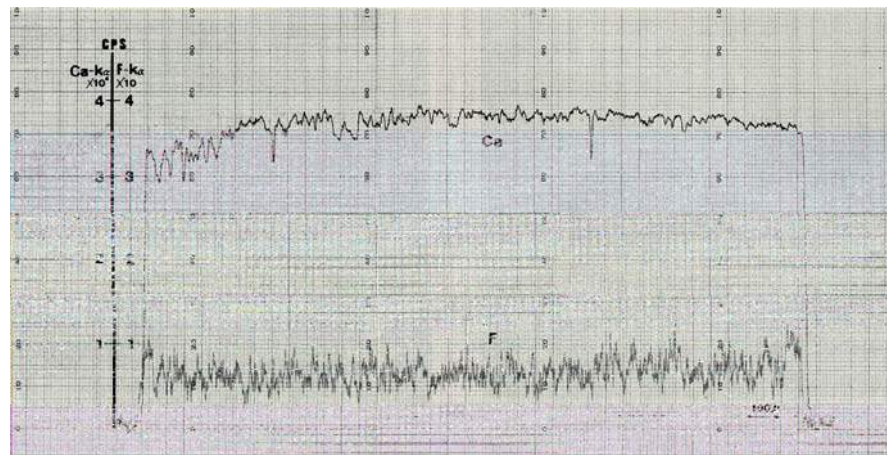


図 12 生理食塩水通電群における P,Mg 元素の線分析

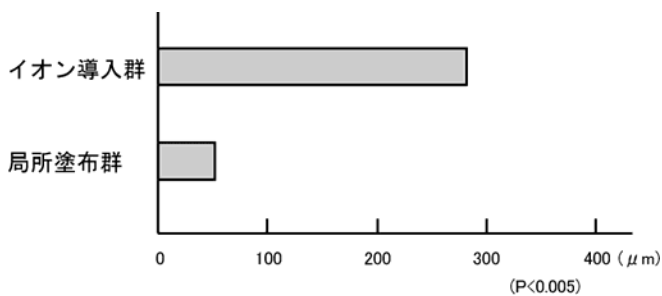


図 13 フッ素イオン導入群とフッ素局所塗布群におけるフッ素浸透距離の比較

(3) フッ素局所塗布群について;

露出象牙質最表面層(図 16-a)において、それより内層の中間層(図 16-b)および歯髄側(図 16-c)の両者に比較して、明らかに多量のフッ素の分布する状況が認められた。しかしながら、フッ素イオン導入群と同様に、フッ素元素が象牙細管、管周象牙質および管間象牙質などの特定部位に一致して局在するか否かは不明であった。

2. SEMによる観察所見

1) 対照群について

露出象牙質直下の象牙質断面においては、切断された象牙細管、管周象牙質および管間象牙質が明瞭に区分されて観察された。管間象牙質は比較的平滑ながら、不規則凸凹な表面構造を呈していたが、これに対して象牙細管を取り巻く管周象牙質の断面は平滑で、その均質緻密な構造的長を丙各に示していた。

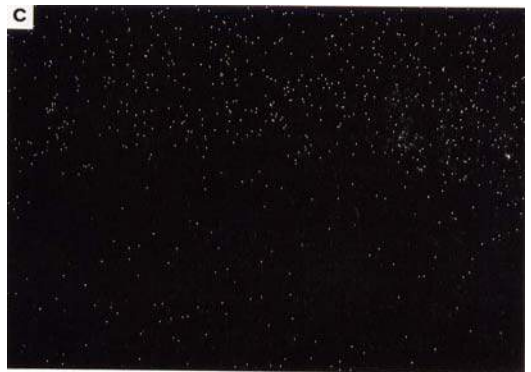


図 14 対照群における F 元素の面分析像

- a : 露出象牙質最表面層
- b : 中間層
- c : 歯髄側

象牙細管腔は直径約 $0.8\sim 1.2\mu\text{m}$ の大きさのものであり、直径を異にするものが多く、大小不ぞろいのもので見られた。縦断された象牙細管壁は平滑な面を呈し、同部位には象牙細管側枝の基部としてみられる小孔も認められた。(図 17, 18)。歯髄側においては、直径 $1.5\sim 2.0\mu\text{m}$ の象牙細管が多数平行に走行しており、象牙細管壁は露出象牙質直下のそれと同様で、平滑な面を呈していた。(図 19, 20)。



図 15 フッ素イオン導入群における F 元素の面分析像

- a : 露出象牙質最表面層
- b : 中間層
- c : 歯髄側

2) フッ素イオン導入群について;

露出象牙質直下の象牙細管内には、直径約 $500\sim 800\text{\AA}$ の大きさの、細管壁に付着した微小球状構造物がみられ、それらは細管壁全周に蜜に存在しているのが認められた。この微小球状構造物は、微細な球状様物が互いに数個から数十個が集合密接して、より大きな球状または塊状の構造物を形成し、象牙細管を狭窄しているのが認められた。



図 16 フッ素局所塗布群における F 元素の面分析象
 a: 露出象牙質最表層
 b: 中間層
 c: 歯髄側

また、同様の微小球状構造物が管周象牙質には僅かに、管間象牙質には著しく、在来のそれぞれに基質構造上に添加されてみられた (図 21、22)。

露出象牙質最表層から約 150 μm 深層の象牙細管内においては、露出象牙質直下の象牙細管内と同様の微小球状構造物が認められた。その数は、露出象牙質直下と比較するとやや少ないが、単独または数個から数十

個が塊状構造物となって象牙細管壁に固着しているのが認められた (図 23, 24)。

さらに、露出象牙質最表層から約 300 μm 深層の象牙細管内にも、前者と同様の微小球状構造物が認められ、微細な結晶様構造物が単独に、あるいは多数集合して象牙細管壁に固着していた。しかし、その数は前者に比べて少なく、平滑な象牙細管壁がかなり広い範囲にわたって観察された (図 25、26)。

ところで、最内層となる歯髄側象牙質断面においては、上記 3 部位に認められたものと同程度の大きさの微小球状構造物はほとんど認められなかったが、象牙細管壁面には多数の微小な結晶様構造物の付着が認められた (図 27, 28)。

3) フッ素局所塗布群について ;

露出象牙質直下の象牙細管内に、フッ素イオン導入群と同様の直径約 500~800Å の微小球状構造物の存在が認められた。しかしながら、この微小結晶の集団からなる微小球状構造物はフッ素イオン導入群とは異なり、数も少なく、さらに集合として大きな塊状の構造物を形成することなく、単独で象牙細管壁に固着しているように認められた。また、フッ素イオン導入群と同様に、管周象牙質および管間象牙質に微小球状構造物が添加されてみられたが、その発現はフッ素イオン導入群において観察されたほど著しくはなかった (図 29, 30)。

露出象牙質最表層から約 300 μm 深層の象牙細管内においては、同様の微小球状構造物が認められたが露出象牙質直下と比較して、その発現数は少なかった (図 31, 32)。

歯髄側においては、象牙細管壁に固着する多数の微小な結晶様構造物が認められた (図 33, 34)。

4) 生理食塩水通電群について ;

露出象牙質直下の象牙細管内および歯髄側の象牙細管内は、対照群と同様の所見を示し、ほぼ平滑な壁面を呈し、フッ素イオン導入群およびフッ素局所塗布群において観察された微小球状構造物は認められなかった (図 35, 36, 37, 38)。

IV 考 察

1. 象牙質内フッ素濃度の変化(XMA分析結果について)

フッ素イオン導入法により、象牙質内に存在するフッ素が分布上の変化を示すものとするならば、当該部位の象牙質の微細構造上に器質的な変化をもたらしているものとする事ができる。そこで著者は、フッ素イオン導入法を行った象牙質の形態的变化、とくに微細構造上の変化を観察、さらに、それら観察部位における象牙質のフッ素濃度変化を XMA を用いてそれぞれの条件下で分析を行った。

ところで、フッ素イオン導入後の象牙質内フッ素濃度の変化については Zadok ら³⁸⁾の報告が最初であり、フッ素イオン導入法がフッ素局所塗布単独に比較して、フッ素濃度の上昇のあることを認めている。また Wilson ら³⁵⁾も同様の結果を報告しているが、これら両者とも酸エッチング法による科学分析結果であり、その分析部位は表層付近に限られており、全層にわたる連続的な濃度変化の分析は行っていない。最近、長谷³⁶⁾はヒト抜去歯において窩洞形成を施し、窩底面にフッ素イオン導入方を試み、窩底面から髄腔壁にわたる象牙質のフッ素濃度の変化を XMA 線分析により連続的に分析した結果を報告している。

一方、杉本³⁹⁾はヒト抜去歯の象牙質内のフッ素濃度分布について XMA 線分析により分析、観察を行っている。その分析結果によれば、象牙質内のフッ素濃度は、珐瑯質(珐瑯質の最表層は別とする)より高く、珐瑯質側あるいは白亜質側から歯髄に向かう間、全層の約3/4の間ではほとんど変化しないが、髄腔壁に沿う幅狭い範囲に入ると次第に上昇し、髄腔壁で最高の値を示すと報告している。

今回著者の行った XMA 線分析の結果によれば、無処置の対照群(象牙質を露出した前臼歯)においてはフッ素濃度は露出象牙質最表層から深層にわたり低いレベルを示し、髄腔壁付近において僅かな上昇が認められた。この実験結果は、研究試料がヒト抜去歯ではなく成犬の前臼歯を対象としたものであるが、ヒトの歯と類似した所見が得られている。

つぎに、フッ素イオン導入法とフッ素局所塗布との象牙質におけるフッ素の浸透状態の比較を行うために、フッ素局所塗布群における XMA 分析を前述のごとく行った。その結果、フッ素局所塗布群では、露出象牙質最表層におけるフッ素の濃度は著しいピークを示し、平均 $52\mu\text{m}$ の深さまでフッ素の浸透が推察された。また XMA 面分析においても、露出象牙質最表層ではフッ素の濃度分布が対照群に比較してかなり高いことが認められた。このことは、フッ素局所塗布群において露出象牙質最表層からフッ素元素の浸透が行われたことを示すものであり、Zadok ら³⁸⁾、Wilson ら³⁵⁾の所見

と一致している。

さらに、長谷³⁶⁾は2%フッ化ナトリウムを窩底象牙質に局所塗布したところ、窩底面より $150\mu\text{m}$ 程度まで断続的ではあるがフッ素濃度のピークが XMA 分析によって認められ、鋭いピークが消失した以後の象牙質内フッ素濃度は、対照群と同様のパターンを示したと報告しているが、その所見ともほぼ一致している。

さらに、著者の行ったフッ素イオン導入群においては、フッ素濃度は露出象牙質最表層において著しいピークを示し、平均 $282\mu\text{m}$ の深さまでフッ素の浸透が推察された。フッ素イオン導入群によるフッ素の浸透距離がフッ素局所塗布群と比較して大幅に大きいことは、通電効果によってもたらされたものであることを示している。そしてまた、その深部において対照群よりもフッ素の濃度レベルがやや高かったが、この事実は、面分析の象牙質中間部における所見が対照群と比較して明らかな差異を見い出せなかったこと、フッ素の特性 X 線の強度が非常に低い状況での比較であることなどを考えあわせると、フッ素イオン導入群の露出象牙質最表層におけるピーク以降のフッ素濃度が対照群と比較して明らかに高いものであるとは断言できない。しかしながら、興味深いことはフッ素イオン導入群において露出象牙質最表層のみでなく、象牙質中間部においてもかなり高いフッ素濃度の上昇を示した例がみられたことである。このような例は対照群、フッ素局所塗布群、生理食塩水通電群のいずれにおいても認められず、フッ素より深部への浸透が通電効果によるものであると考えられる。長谷³⁶⁾も同様に $1.0\text{mA}\cdot\text{分}$ ($0.2\text{mA}\times 5$ 分間)のフッ素イオン導入群においては、フッ素濃度は表層部におけるピーク消失以降にも僅かではあるが上昇が認められたが、 $5.0\text{mA}\cdot\text{分}$ ($1.0\text{mA}\times 5$ 分間)のイオン導入群においてはなお一層顕著に認められ、フッ素の著しく高いピークが歯髄側方向に近づいた位置に認められたと述べている。そしてこのことは、フッ素イオンが多量に象牙細管を通過して髄腔壁付近にまで到達していることを示すものであると報告している。

ところで、象牙細管内の組織液はその組成が細胞外液と極めて類似しているといわれている^{40) 41)}。したがって、象牙細管内の組織液は電解質溶液であると考えることができ、フッ素イオン導入法は電気泳動の立場から論じることができる。一定のイオン強度と一定の pH のもとでは、泳動速度は電場の強さに比例し溶媒の粘性、粒子の半径に反比例することが知られている⁴²⁾。このことより、陰極通電であるフッ素イオン導入法は、電気泳動によりフッ素イオンが泳動され、フッ素局所塗布に比較してフッ素がより深部に浸透していくものと考えられる。

以上のように、フッ素イオン導入法におけるフッ素の象牙質内浸透は電気泳動の立場から、速やかに象牙質、とくに象牙細管に沿って浸透していくものと考えられる。

一方、象牙質の構造物である管周象牙質および管間象牙質に対してフッ素イオンがどのように浸透するかについて検討した報告は少ない。中村⁴³⁾は間接歯髄覆層効果を象牙質基質に期待し、それによって歯髄組織を保護しようという観点から、窩洞形成後の smear layer 除去後の象牙質面に対し、4%フッ化ナトリウムを応用したところ、コンタクトマイクロラジオグラムにおいて X 線透過度が低下しているのを認め、さらにこのカラーデンシトメトリーにおいても象牙質全域に至る範囲で無機質の総和量が高いことから、象牙細管のみならず象牙質基質にもフッ素が浸透、沈着し、歯質との反応を生じたと考えられる再石灰化現象を招来させたものと報告している。また、下岡⁴⁴⁾は若年者の健康永久歯を用いてフッ化ジアミン銀溶液の象牙質への浸透を XMA による線分析、面分析および SEM のよって検索した結果、銀元素およびフッ素元素ともに主な浸透経路が象牙細管であり、基質への浸透がほとんど認められなかったと報告している。奥山⁴⁵⁾はフッ化ジアミン銀溶液の乳歯う蝕象牙質への浸透を同様の方法によって検索した結果、銀元素の一部が象牙細管にそって浸透している像を XMA の面分析において認めたが、フッ素元素が象牙細管に沿って浸透している所見は認められなかったと報告している。さらに、石川⁴⁶⁾はフッ化ジアミン銀溶液の象牙質への浸透について、根管から歯根象牙質にフッ化ジアミン銀を作用させ、その浸透状況を検索している。そのなかで、XMA の線分析においてフッ素は髓腔壁側で最高の濃度を示し象牙質の内部に進むにつれてごく僅かな変動をしめしながら徐々に濃度を低下し、その間、象牙細管部で急な立ちあがりを見ることがないことから、フッ素は象牙細管だけに浸透していくのではなく、象牙質の石灰化基質にも浸透していくことが想像されると述べている。

著者が行ったフッ素イオン導入群およびフッ素局所塗布群の実験歯において、露出象牙質最表層のフッ素の面分析結果によると、フッ素元素は必ずしも象牙細管相当部に局在しておらず、分析した象牙質全体に分布しているのが認められた。このことから、象牙細管、管周象牙質および管間象牙質などへのフッ素元素の浸透が推測され、したがって XMA の面分析の結果のみによって、フッ素元素の浸透経路を確認することは困難とみられた。また今回実験に供した試料について、その象牙質の形態的特徴からして XMA 線分析において、象牙細管などを選択的、連続的に分析することは不可能である。したがって、今回はフッ素元素の浸透経路

について明らかにすることはできなかったものと思われる。しかしながら、象牙細管に沿って浸透したフッ素元素は拡散効果によって周囲基質に浸透することが考えられる。一方管周象牙質や管間象牙質は象牙細管に比較して電解質成分が非常に少ないことから、電気泳動によってフッ素元素の浸透が象牙細管と同程度に行われるものとは考えられない。ただしこのことが、フッ素イオン導入による管周象牙質および、管間象牙質へのフッ素元素の浸透を全く否定するものであるとは考えられない。

2. 象牙質における微細構造上の変化

(SEM 観察結果について)

1) 象牙細管内にみられる微小球状構造物について

フッ素イオン導入法が象牙質におけるフッ素濃度の上昇をきたさせ、フッ素元素の象牙質深部への浸透を高めることが上述の XMA による分析結果から判明した。このフッ素濃度上昇部の象牙質において、どのような微細構造上の変化が生じているかは非常に興味深い問題点である。

ところで、象牙細管内に Ca を核とした無機物質の沈着の起ること、すなわち咬耗や磨耗^{47)~50)} およびう蝕病巣下^{51)~54)}において、しばしば生じることはよく知られている。

Selvig⁵⁵⁾はフッ化ナトリウムを象牙質に応用したところ、象牙細管内に菱面体あるいは不規則な板状結晶を認めたが、このような沈着物はフッ化ナトリウムを応用しない象牙細管にも同様に認められることから、これらはフッ化ナトリウムの応用とは関係なく、加齢による変化の結果であると報告している。Ehrlich ら⁵⁶⁾は歯根露出象牙質にフッ化ナトリウムの局所塗布を行い、塗布後 2 週間および 6 ヶ月間経過した歯の象牙細管壁に球状の沈着物が折出したことを報告している。Tal ら⁵⁷⁾は歯根の露出象牙質面にフッ化ナトリウムを応用したところ、直径 0.1~0.5 μm の顆粒状沈着物が管周象牙質や管間象牙質に多量に認められ、歯髄側よりも、フッ素を応用した露出象牙質表層に多量に沈着を認めたと報告している。Laufer ら⁵⁸⁾も同様に、フッ化ナトリウム応用後、管周象牙質や管間象牙質に沈着物の局在を認めている。中村⁴³⁾は抜去歯の咬合面に象牙質窩洞を形成し、その窩洞内にフッ化ナトリウムを作用させ、髓室へ精製水あるいはタイロッド液を注入した場合、窩底直下からやや深部に至る象牙細管内に直径 0.1~0.5 μm の球状結晶様構造物を認め、その大きさは窩底直下から髓腔壁に向かうにつれて減少したと報告している。

著者の研究結果においては、フッ素イオン導入群、フッ素局所塗布群、生理食塩水通電群および対照群における象牙質断面を SEM により観察したところ、露

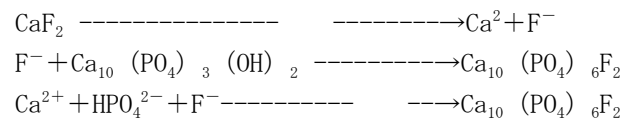
出象牙質最表層により髓腔壁まで同一象牙細管を連続的に観察することは試料作製上、不可能ではあったが、前述のごとく部位別に象牙細管、管周象牙質および管間象牙質について詳しく観察したところ、フッ化ナトリウムを応用したフッ素イオン導入群およびフッ素局所塗布群において、XMA 分析によるフッ素濃度の高い部位に微小球状構造物が出現し、とくにフッ素イオン導入群において最も多く出現した。そしてまた、露出象牙質最表層においては、いずれの部位も上述の構造物が著者に認められという事実を確認した。しかしながら、対照群および生理食塩水通電群においては、この微小球状構造物は認めることができなかった。これらのことから、フッ素イオン導入法がより多くの微小球状構造物の生成を促進するものであると考えられる。また、フッ素イオン導入群およびフッ素局所塗布群において、フッ素濃度の高い部位の管周象牙質には僅かに、管間象牙質には著しく、象牙細管内と同様の微小球状構造物が在来のそれぞれの基質構造上に添加されてみられた。このことは、フッ素イオン導入法およびフッ素局所塗布によって、フッ素は象牙細管、管周象牙質および管間象牙質の各所において、程度の差はあるが、表層よりかなり深く浸透していることを示唆するものと考えられる。さらに、象牙細管内に認められたこれらの微小球状構造物は、直径が約 500~800Å の大きさのものが数個から数十個集合し、より大きな塊状の構造物へと成長していくことが確認された。この傾向はフッ素濃度の高い部位において著しく現れるようであり、フッ素濃度の低い深部に向かうに従って、微小球状構造物はその数を減少していったが、大きさ自体には変化がみられなかった。

2) 微小球状構造物の科学組成と由来について

MacCann ら⁵⁹⁾ および Leach⁶⁰⁾ は象牙質粉末に高濃度のフッ化ナトリウム水溶液を作用させると、CaF₂ が生成されることを化学分析の結果、明らかにしている。野村⁶¹⁾ もまた同様に、象牙質に高濃度のフッ化ナトリウムを作用させると CaF₂ を生成することを X 線回析によって認めている。Tal ら⁵⁷⁾、Laufer ら⁵⁸⁾ は X 線回析の結果、前述のフッ化ナトリウム応用後に認められた顆粒状沈着物は CaF₂ およびアパタイトであると報告している。これらの報告^{57)~61)} のように、高濃度のフッ化ナトリウムを象牙質に作用させると CaF₂ が生成されることが知られている。

今回著者の実験においては、微小球状構造物は対照群および生理食塩水通電群では認められなかったが、フッ素イオン導入群およびフッ素局所塗布群において、フッ素濃度の高い部位に微小球状構造物が認められたことから、この構造物はフッ素を含有あるいはフッ素と密接な関係を有する構造物であると推察することが

できる。そして諸家の報告^{57)~61)} を参考として考察するならば、この微小球状構造物は CaF₂ の沈着によって構成させたと考えられる。米林⁶²⁾ は象牙質のアパタイトに生成された CaF₂ の動向を X 線結晶学的に追求したところ、CaF₂ は HPO₄²⁻ を含む水溶液のもとではヒドロキシアパタイトと CaF₂ が共存すれば、次の反応式により除々に CaF₂ 消失して、フルオルアパタイトが生成されることを立証した。



したがって、今回の著者の実験結果において、フッ素イオン導入法によって高濃度に取り込まれたフッ素は、一度 CaF₂ を形成した後、Ca²⁺ と F⁻ に遊離し、歯質中のヒドロキシアパタイトと反応し、あるいは H-PO₄²⁻ の存在下にフルオルアパタイトを形成したものと考えられる。

また、今回の実験は成犬の露出象牙質に対して、できるだけ自然の状態下、すなわちこの実験歯を口腔内に開放のまま 3 週間にわたり放置しており、したがって、露出象牙質に対する唾液の影響は無視出来ないものと考えられる。内田⁶³⁾ は象牙質にフッ化ジアミン銀溶液を塗布し、口腔内に露出しておくこと、象牙質表層部はフッ素の石灰化促進作用により、おもに唾液中の Ca、P を供給源として高石灰化し、とくに象牙細管は管周象牙質と構造的にも結晶学的にも同形のアパタイト結晶によって経時的に狭窄、封鎖される所見が認められたと報告している。唾液の組成については数多くの報告^{64)~67)} があるが唾液中の Ca²⁺ が露出象牙質表層において F⁻ と結合し、CaF₂ を生成することが考えられる。そして生成された CaF₂ は歯質と同様に、唾液中にも存在する H-PO₄²⁻ の存在において、米林⁶²⁾ が報告しているごとく、フルオルアパタイトが形成されていくことも推察される。そしてまた、今回の実験では成犬の生活歯を用いている in vivo の研究であることから、象牙細管内の組織液との関係についても考えなければならない。この組織液の組成は、細胞外液と極めて類似しているといわれている。^{40) 41)} したがって、象牙細管内に浸透したフッ素イオンは象牙細管内溶液の Ca²⁺ と結合して CaF₂ を生成し、HPO₄²⁻ の存在下において、フルオルアパタイトを形成していくことも推察される。

このように、フッ素イオンは歯質、唾液、また象牙細管内溶液とそれぞれ反応するものと考えられるが、これらの反応は相互に、何ら関係をもたず、個別に生じるのではなく、複雑に絡みあって反応していくものと考えられる。しかしながら、前述の微小球状構造物

の同定には、さらに X 線回析などの方法によって、その本体の解明をはかる必要がある。

3. 象牙質知覚過敏症に対するフッ素イオン導入法の効果について

象牙質知覚過敏症の発症原因は、象牙質の知覚機序が完全に解明されていない現在、不明であると言えよう。さて、この象牙質知覚機序解明のため、象牙質知覚神経線維の存在に関する研

究は多数行われてきているが、最近では、知覚神経線維の存在が象牙質最内層までに限らせているという考え⁶⁸⁾が一般に支持されている。

象牙質の知覚機序については、象牙芽細胞が受容器として働き、刺激を神経終末に伝達するという考え⁶⁹⁾⁷⁰⁾、また Brannstrom ら^{71)~75)}が提唱している動水力学説 (hydrodynamic theory) がある。この動水力学説は、象牙質への種々な刺激によって象牙細管内液が移動し、それによって知覚受容体を興奮させ、痛みを生じるというものである。また、堀内⁷⁶⁾は象牙質を刺激したときに生じる痛みの機序のすべてを一元的に説明することは容易ではなく、象牙質に与える刺激が違えば異った機序が働くという象牙質の知覚多元説を提唱している。さらに、郡司ら^{77) 78)}は象牙質に加えられた刺激が象牙芽細胞突起の細胞内液の流動・移動を引きお越し、さらにそれが突起自体の変形や移動といった形態的变化をもたらして、その変化が象牙前質や象牙質最内層に存在する知覚神経終末との選択的接合部まで伝わり、その終末を機械的に刺激し興奮させると述べている。これらのいずれの説の決定的なものとなっていないのが現状であるが、いずれにしても、刺激伝達経路として象牙細管が関与していると考えられる。

著者は今回、フッ素イオン導入法を施して、象牙細管内に多量の微小球状構造物が出現し、象牙細管を封鎖あるいは狭窄することを形態的にはじめて確認することができた。この現象は、象牙質の刺激伝達経路を閉鎖し、外来刺激を遮断するものとなり、それによって象牙質知覚過敏症を軽減あるいは消退させることを示唆するもので、フッ素イオン導入法の有効性を示すものである。しかしながら、フッ素イオン導入法は陰極通電療法であることから、象牙質内の形態的变化、すなわち、象牙質微細構造上の改変のみならず、電気生理学的立場からも、今後検索しなければならないものとする。

フッ素イオン導入法による象牙質知覚過敏症の知覚過敏消退機序を解明するための基礎的手がかりとして、フッ素イオン導入法が象牙質の化学組成および微細構造に及ぼす影響を及ぼすかについて検討した。すなわち、成犬を用い象牙質を実験的に露出させ、同部に 2% フッ化ナトリウム水溶液によるフッ素イオン導入、2% フッ化ナトリウム水溶液による局所塗布、および生理食塩水による陰極通電を施し、X 線マイクロアナライザー (XMA) による象牙質内の元素分布状態の変化、走査型電子顕微鏡 (SEM) による象牙質の微細構造上の変化を観察し、以下の結論を得た。

1. フッ素イオン導入およびフッ素局所塗布によって、フッ素濃度は露出象牙質最表層で最も高いピークを示した。
2. フッ素イオン導入によって、フッ素元素は露出象牙質最表層から平均 282 μm の深さの距離まで浸透した。
3. フッ素イオン導入によって、露出象牙質より内側の象牙質中間層においてもフッ素濃度に著しい上昇が認められた。
4. フッ素局所塗布によって、フッ素元素は露出象牙質最表層から平均 52 μm の深さの距離まで浸透した。
5. フッ素イオン導入によって、フッ素濃度が上昇した象牙細管内に微小球状構造物が認められ、とくに露出象牙質最表層において顕著であった。そしてこの微小球状構造物によって象牙細管が封鎖あついは狭窄することが認められた。
6. フッ素イオン導入によって、フッ素濃度が上昇した管周象牙質および管間象牙質においても、象牙細管内に認められたと同様の微小球状構造物が認められた。
7. フッ素局所塗布によって、フッ素イオン導入の場合と同様の微小球状構造物が認められたが、フッ素イオン導入の場合ほど顕著ではなかった。
8. フッ素イオン導入およびフッ素局所塗布によって出現した微小球状構造物は、 CaF_2 およびフルオロアパタイトであることが推察された。

以上の結果から、フッ素イオン導入法がフッ素の象牙質内浸透を高め、さらに微小球状構造物によって象牙細管腔を封鎖あるいは狭窄することを形態学的に明らかにすることができた。このことは、フッ素イオン導入法が象牙質知覚過敏症に対して著効を示すということを、外来刺激の遮断という立場から説明できうるものとする。

稿を終わるに臨み、終始御懇篤なるご指導、御校閲を賜った本学オーラルメディシン講座主任 川島 康教授に深甚なる謝意を捧げると共に、本研究にあたり直接御指導戴いた小林 博助教授に深謝いたします。また御助言、御校閲を賜った本学組織学講座主任 見明 清教授に深甚なる謝意を捧げます。さらに御助言、御援助戴いた本学組織学講座 上松 博子講師に深謝いたします。最後に種々御協力戴いたオーラルメディシン講座教室員諸兄ならびに形態系研究室、田所克巳氏、中村英子氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 石川修二(1969):象牙質知覚過敏症に関する臨床学的ならびに組織学的研究、口腔病会誌, 36:278~298.
- 2) 高村正徳(1975):歯頸部知覚過敏症の発現頻度に関する研究, 日歯保誌, 18:25~34
- 3) 若野洋一(1983):象牙質知覚過敏症の治療法, 薬物塗布法, 歯科ジャーナル, 18:155~159
- 4) Grossman, L. I. (1935): A systematic method for the treatment of hypersensitive dentin, J. Am. Dent. Assoc., 22:592~602
- 5) Siemon, W. H. (1960): A new approach in solving the problem of hypersensitivity and postoperative distress in dentin and cementum, J. Conn. State. Dent. Assoc., 34:5~10.
- 6) Manning, M. M. (1961): A new approach to desensitization of cervical dentin, Dent. Surv., 37:731~734
- 7) Simmons, J. J. (1961): Ionic desensitization of teeth, Texas Dent. J., 79:11~17
- 8) Jensen, A. L. (1964): Hypersensitivity controlled by iontophoresis: double blind clinical investigation, J. Am. Dent. Assoc., 68:216~225.
- 9) 住田守継, 奥村 淳, 鈴木征一(1970): 歯頸部象牙質知覚過敏に対する特殊治療の検討, Naf-Ion 導入法の臨床的成績, 愛知学院大歯会誌; 7:315~319.
- 10) Murthy, K. S., Talim, S. T. and Singh, I. (1973): A comparative evaluation of topical application and iontophoresis of sodium fluoride for desensitization of hypersensitive dentin, Oral. Surg., 36:448~458
- 11) Gangarosa, L. P., Heuer, G. A., Park, N. H., Hayes, B. B., Little, C. K., Baker, G. W. and Smith, M. A. (1978): Desensitizing hypersensitive dentin by iontophoresis with fluoride, NY state. Dent. J., 44:92

~94

- 12) gangarosa, L. P. and Park, N. H. (1978): Practical considerations in iontophoresis of fluoride for desensitizing dentin, J. Prosthet. Dent., 39:173~178
- 13) Gangarosa, L. P. and Heuer, G. A. (1979): A practical technique for treating tooth hypersensitivity, Dent. Surv., 55:37~40
- 14) 津田忠政(1980): イオン導入に関する研究, とくに象牙質への通電に伴う最小感知電流および知覚過敏症改善効果について, 日歯保誌, 23:301~312
- 15) Gangarosa, L. P. (1981): Iontophoretic application of fluoride by tray techniques for desensitization of multiple teeth, J. Am. Dent. Assoc., 102:50~52
- 16) Lutins, W. D., Greco, G. W. and MacFall, W. D., Jr. (1984): Effectiveness of sodium fluoride on tooth hypersensitivity with and without iontophoresis, J. Periodontol., 55:285~288
- 17) 金井昌邦, 丸山嘉彦(1954): 歯牙硬組織イオン透過に関する総合的研究(I)、歯牙硬組織に於けるイオンの電気遊動, 日口腔会誌, 3:245~247.
- 18) 金井昌邦(1959): 物化学療法最近の進歩, 歯界展望, 16:1~10.
- 19) 加藤倉三, 高橋廉平, 三崎鈔郎, 北村梧郎, 金井昌邦, 吉成邦雄, 平野英雄, 小守浩(1957): 電気歯ブラシによる所謂歯槽膿漏症の治療効果について、歯科学報, 57:210
- 20) 金井昌邦, 小守浩, 平野英雄, 加藤倉三, 高橋廉平, 北村梧郎, 金井良雄(1957): 歯槽膿漏症に対する物理化学療法の成績, 歯界展望, 14:739~744
- 21) 加藤倉三, 北原栄次, 高橋廉平(1958): 歯槽膿漏症の物化学療法におけるレ線病型の推移について, 歯科学報, 58:334~335.
- 22) 高橋廉平(1959): 麻酔抜髄時に於けるフッ素イオン導入法が根端附近組織の治癒に及ぼす影響に関する実験的研究, 歯科学報, 59:1275~1305
- 23) 川島康(1960): 実験的感染根管治療におけるフッ素イオン導入法の効果に関する病理組織的研究, 歯科学報, 60:231~254.
- 24) 相有三郎(1968): 窩洞形成後のフッ素イオン導入法が歯髄にあたえる効果に関する実験病理学的研究, 歯科学報, 68:1605~1641.
- 25) 小林博(1972): フッ素イオン導入法が珐瑯質の耐酸性(抗う蝕性) 増強に及ぼす効果についての実験的ならびに臨床的研究, 歯科学報, 72:1881~1902.
- 26) Lukomsky, E. H. (1941): Fluorine therapy for exposed dentin and alveolar atrophy, J. Dent. Res., 20:649~659.
- 27) Hoyt, W. H. and Bibby, B. G. (1943): Use of sodium

- fluoride for desensitizing dentin, J. Am. Dent. Assoc., 30:1372~1376
- 28) Sorrin, s. (1943): Sodium fluoride method for desensitizing erosion areas, NYJ. Dent., 13:399.
- 29) Clement, A. J. (1947): Sodium fluoride paste as a desensitizing agent for hypersensitive dentine, Brit. Dent. J., 82:168.
- 30) Stout, W. C. (1955): Sodium silicofluoride as a desensitizing agent, J. Periodontol., 26:208~210
- 31) Massler, M. (1955): Desensitization of cervical cementum and dentin by sodium silicofluoride, J. Dent. Res., 34:761~762
- 32) Kanouse, M. C. and Ash, M. M., Jr. (1969): The effectiveness of a sodium monofluorophosphate dentifrice on dental hypersensitivity, J. Periodontol., 40:38~39
- 33) Gedalia, I., Brayer, L., Kalter, N., Richter, M. and Stabholz, A. (1978): The effect of fluoride and strontium application on dentin: in vivo and in vitro studies, J. Periodontol., 49:269~272.
- 34) Greenhill, J. D. and Pashley, D. H. (1981): The effects of desensitizing agents on the hydraulic conductance of human dentin in vitro, J. Dent. Res., 60:686~698.
- 35) Wilson, J. M., Fry, B. W., Walton, R. E. and Gangarosa, L. P. (1984): Fluoride levels in dentin after iontophoresis of 2% NaF, J. Dent. Res., 63:897~900.
- 36) 長谷 徹 (1985): 象牙質知覚過敏症へのフッ素イオン導入法の基本的研究, 日歯保誌, 28:527~547.
- 37) 吉田導子, 堀田祐二, 宮崎恒雄, 渡辺 治, 市川 徹, 小池平一郎, 立川哲彦, 山根 瞳, 下野正基, 枝 重夫, 山村武夫 (1974): 電子顕微鏡のための犬の頭頸部局所灌流固定法, 特に歯牙および歯牙支持組織の固定について, 歯科学報, 74:419~426.
- 38) Zadok, J., Gedalia, I., Weinman, J. and Daphni, L. (1976): Fluoride uptake by root dentin after immersion in 2% NaF solution with iontophoresis, J. Dent. Res., 55:310.
- 39) 杉山めぐみ (1981): ヒトの象牙質内のフッ素とマグネシウム分布の X線マイクロアナライザーによる観察, 歯基礎医学会誌, 23:790~808.
- 40) Coffey, C. T., Ingram, M. J. and Bjorndal, A. M. (1970): Analysis of human dentinal fluid, Oral. surg., 30:835~837.
- 41) Guyton, A. C. (1986): Textbook of Medical physiology, 382~392, 7th ed, W. B. Saunders Co, Philadelphia.
- 42) 藤島 昭, 相沢益男, 井上 徹 (1985): 電気化学測定法(下)、第1版, 414~420, 技報堂出版, 東京.
- 43) 中村恭子 (1986): 間接歯髄覆罩効果に関する基礎的検討-smear Layer の除去と窩底象牙質の強化について-, 日歯保誌, 29:649~691
- 44) 下岡正八 (1972): 硝酸銀と弗化ジアミン銀溶液の正常歯質微細構造への浸透について, 歯学, 59:534~566.
- 45) 奥山 俊 (1974): フッ化ジアミン銀溶液の乳歯う蝕象牙質への浸透について, 歯学, 61:1048~1071.
- 46) 石川力哉 (1982): フッ化ジアミン銀溶液の象牙質への浸透について, 歯学, 70:57~84.
- 47) 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.
- 48) 木津健夫 (1979): Dead tract 部象牙質細管の走査電顕による観察, 日大歯学, 53:50~55
- 49) Toda, Y., Shirato, M., Tohai, K., Fujii, H., Iesato, S., Takehana, S., and Ito, A. (1980): A scanning electron microscopic study of dentinal tubules in dead tracts, J. Nihon Univ. Sch. dent., 22:1~9.
- 50) 枝 重男 (1983): 年齢増加による象牙質の超微構造の変化, 細胞, 15:369~374
- 51) Takuma, S. and Kurahashi, Y. (1962): Electron microscopy of various zones in a carious lesion in human dentine, Arch. oral Biol., 7:439~453.
- 52) Lester, K. S. and Boyde, A. (1968): Some preliminary observations on caries ("Remineralization") crystals in enamel and dentine by surface electron microscopy, Virchows Arch. Abt. A Path Anat., 344:196~212.
- 53) 萩原 弘 (1975): ヒト象牙質齶蝕病巣の二次的石灰化, X線マイクロアナライザー, 電子顕微鏡および電子回折法による研究, 歯科学報, 75:256~285.
- 54) 横山 健 (1979): ヒト齶蝕象牙質の走査電顕による観察, 日本歯学, 53:770~779.
- 55) Selvig, K. A. (1968): Effect of fluoride on the acid solubility of human dentine, Arch. oral Biol., 13:1297~1310.
- 56) Ehrlich, J., Hochman, N., Gedalia, I. and Tal, M. (1975): Residual fluoride concentrations and scanning electron microscopic examination of root surfaces of human teeth after topical application of fluoride in vivo, J. Dent. Res., 54:897~900.
- 57) Tal, M., Oron, M., Gedalia, I. and Ehrlich, J. (1976): X-ray diffraction and scanning electron microscope investigations of fluoride-treated dentine in man, Arch. oral Biol., 21:285~290.
- 58) Laufer, B., Mayer, I., Gedalia, I., Deutsch, D., Kaufman, H. W. and Tal, M. (1981): Fluoride-uptake and fluoride-residual of fluoride-treated human

- root dentine in vitro determined by chemical, scanning electron microscopy and X-ray diffraction analyses, Arch. oral Biol., 26 : 159~163.
- 59) MacCann, H. G. and Bullock, F. A. (1955) : Reactions of fluoride ion with powdered enamel and dentin, J. Dent. Res., 34 : 59~67.
- 60) Leach, S. A. (1959) : Reactions of fluoride with powdered enamel and dentine, Brit. Dent. J., 106 : 133~142.
- 61) 野村英靱(1971) : フッ化物を配合したテンポラリーストップピングに関する研究(第1編)フッ化物と象牙質との反応について, 日歯材会誌, 25 : 1~14.
- 62) 米林光三(1967) : 象牙質 Apatite に生成された CaF_2 の反応に関する X 線結晶学的研究, 大阪大歯誌, 12 : 79~93
- 63) 内田昭次(1976) : フッ化ジアミン銀塗布後唾液中に露出させた象牙質の微細構造の変化, 大阪大歯誌, 21 : 100~124.
- 64) 覚道幸男(1969) : 歯と口腔の臨床生理, 第1版, 338-375, 永末書店, 京都.
- 65) Jenkins, G. N. (1978) : The Physiology and Biochemistry of the Mouth, 4th ed, 284~318, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- 66) 日本生科学会(1979) : 生化学データブック I, 第1版, 1570~1573, 東京科学同人, 東京.
- 67) 押鐘 篤, 覚道幸男(1986) : 唾液のはなし, 第1版, 195~262, 口腔保健協会, 東京.
- 68) Fearnhead, R. W. (1970) : 歯の知覚に関する私の意見(平井五郎訳), 歯界展望, 35 : 1499~1503.
- 69) Arwill, T. (1967) : Studies on the ultrastructure of dental tissues, Odontol. Revy., 18 : 191~208.
- 70) Frank, R. M. (1968) : Attachment sites between the odontoblast process and the intradentinal nerve fibre, Arch. oral Biol., 13 : 833~835
- 71) Brannstron, M. (1960) : Dentinal and pulpal response. I . Application of reduced pressure to exposed dentine, Acta odontol. Scand., 18 : 1~15
- 72) Brannstron, M. (1960) : Dental and pulpal response. II . Application of an air stream to exposed dentine, Acta odontol Scand., 18 : 17~28.
- 73) Brannstron, M. (1960) : Dentinal and pulpal response. III . Application of an air stream to exposed dentine. Long observation periods, Acta odontol Scand., 18 : 235~252.
- 74) Brannstron, M., Linden, L. A. and Astron, A. (1967) : The hydrodynamics of the dental tubule and of pulp fluid, A Discussion of its significance in relation to dentinal sensitivity, Caries Res., 1 : 310~317
- 75) Brannstron, M., and Johnson, G. (1978) : The sensory mechanism in human dentin as revealed by evaporation and mechanical removal of dentin, J. Dent. Res., 57 : 49~53
- 76) 堀内 博(1973) : 象牙質痛覚の臨床整理, 歯界展望, 42 : 26~33
- 77) 小林茂夫, 伊藤且裕, 郡司位秀(1981) : 歯痛と歯髄神経, 歯界展望, : 57 : 1209~1222
- 78) 郡司位秀, 小林茂夫(1983) : 歯髄の神経と歯牙硬組織の神経支配, 細胞, 15 : 380~386

Makoto MIYAYOSHI : An Experimental study of Ultrastructural Changes Caused in Dentin by
Fluoride Iontophoresis, Shikwa Gakuho, 87 : 575~602, 1987
(Department of Oral Medicine, Tokyo Dental College, Chiba 260, Japan)

Key words : Dentin hypersensitivity — Sodium fluoride — Iontophoresis — Dentinal tubule

Many studies have reported on the effectiveness of fluoride iontophoresis in reducing dentin hypersensitivity, but the mechanism whereby it achieves this effect remains unclear.

The purpose of this study was to gain an understanding of this mechanism and to try to clarify the reason why dentin hypersensitivity is improved by fluoride iontophoresis.

Three groups of tests were performed on the exposed dentin of adult dogs. Fluoride Iontophoresis using a 2% sodium- fluoride solution was performed with an electric current of $500\mu\text{A}$ for 5 minutes once a week a total of 3 times.

For comparison purposes, local applications of 2% sodium- fluoride solution were made for 5 minutes once a week a total of 3 times. Moreover, to investigate electrolytic effects, negative electrolysis using a saline solution was conducted at $500\mu\text{A}$ for 5 minutes once a week a total of 3 times. In each group, an opposing tooth was selected as a control; and no treatment was performed on its exposed dentin. Distribution of chemical elements in the dentin of each group was determined by means of an X-ray microanalyser (XMA), and variations in physical appearance of the dentin were observed through scanning electron microscope (SEM).

Results

1. In the fluoride-iontophoresis group, the greatest concentration of fluoride occurred in the surface of exposed dentin. Fluoride penetration was observed to an average depth of $282\mu\text{m}$ from the surface.
2. In the fluoride-iontophoresis group, fluoride concentration rose significantly in the middle layers of dentin too.
3. In the group receiving local applications of fluoride solution too, maximum fluoride concentration occurred in the surface of exposed dentin. Average depth penetration was $52\mu\text{m}$.
4. Dentinal tubules of the fluoride-iontophoresis group exhibited microglobular structures and contained a high concentration of fluoride, especially in the layer directly beneath the exposed dentin, where the tubules narrowed or obturated.
5. In addition, the fluoride-iontophoresis group exhibited microglobular structures in the peritubular and intertubular dentin, which contained a high concentration of fluoride.
6. The same kind of microglobular structures occurred in the group receiving local applications of fluoride, though in smaller quantities than in the fluoride-iontophoresis group.
7. Structures occurring in the fluoride-iontophoresis group and the group receiving local applications of fluoride solution were believed to be CaF_2 and fluorapatite.

From these results it was concluded that fluoride penetration is enhanced by fluoride iontophoresis and that fluoride iontophoresis results in narrowing or obturating of dentinal tubules.

The effectiveness of fluoride iontophoresis in reducing hypersensitivity is explained by the interruption of outside stimuli.

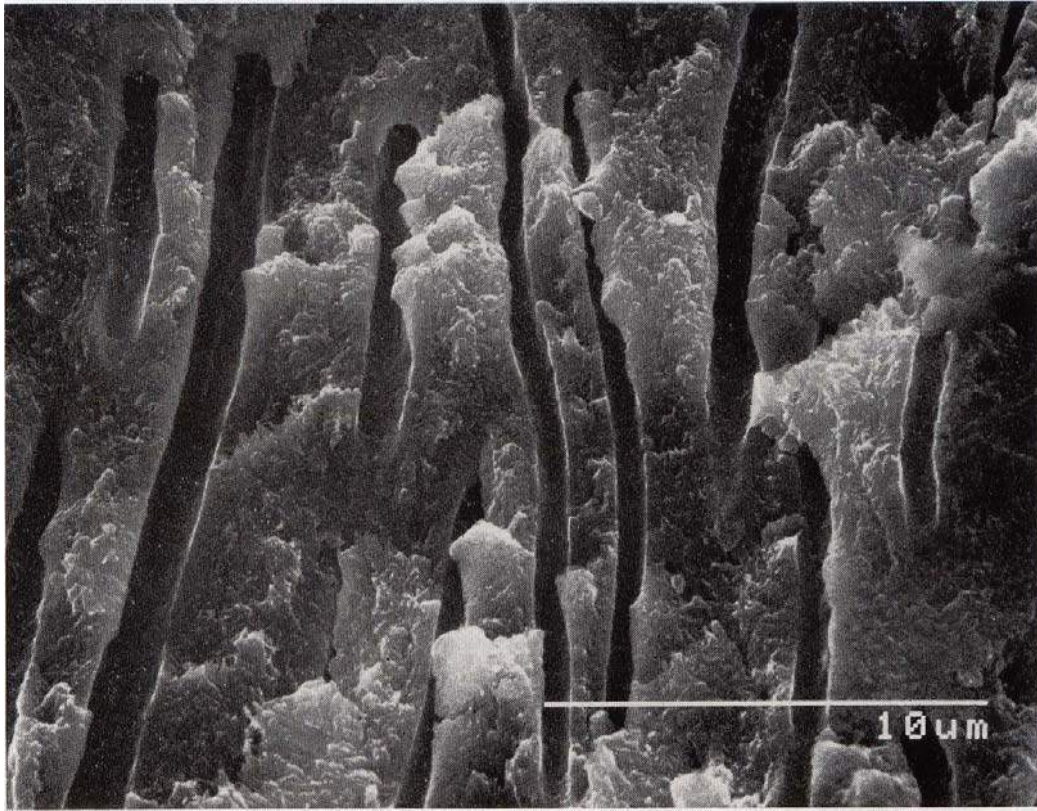


図 17 対象群;露出象牙質最表層の象牙質断面 SEM 像(弱拡大)

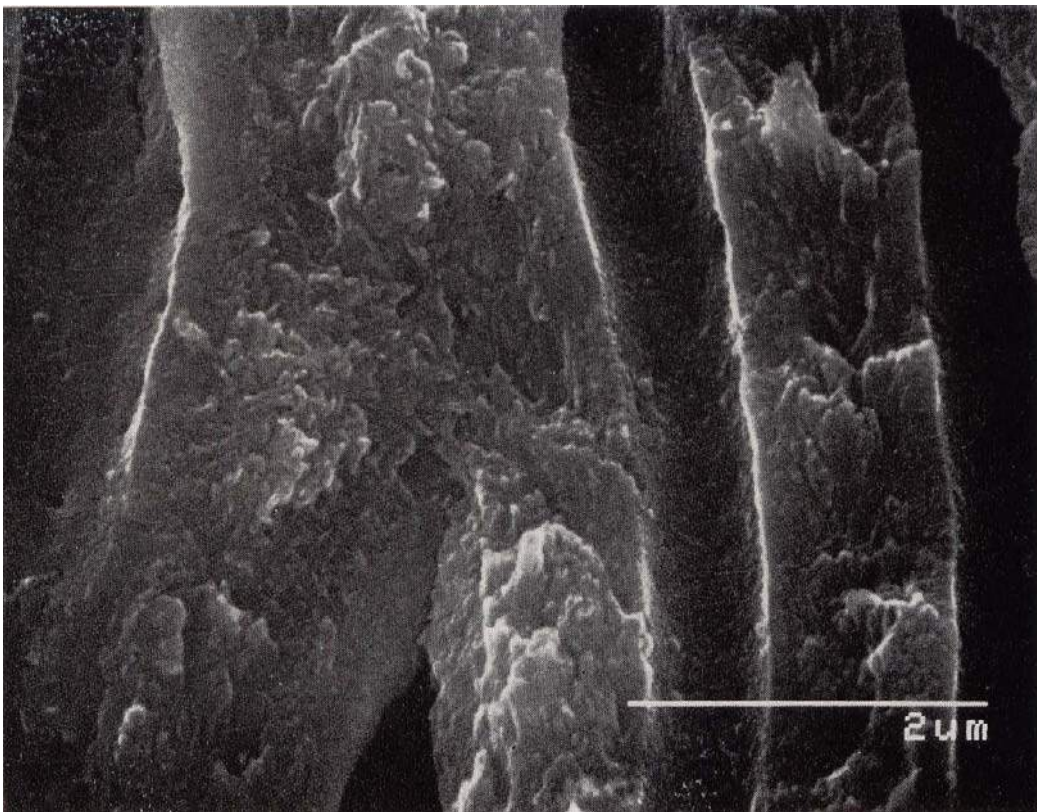


図 18 対象群;露出象牙質最表層の象牙質断面 SEM 像(強拡大)

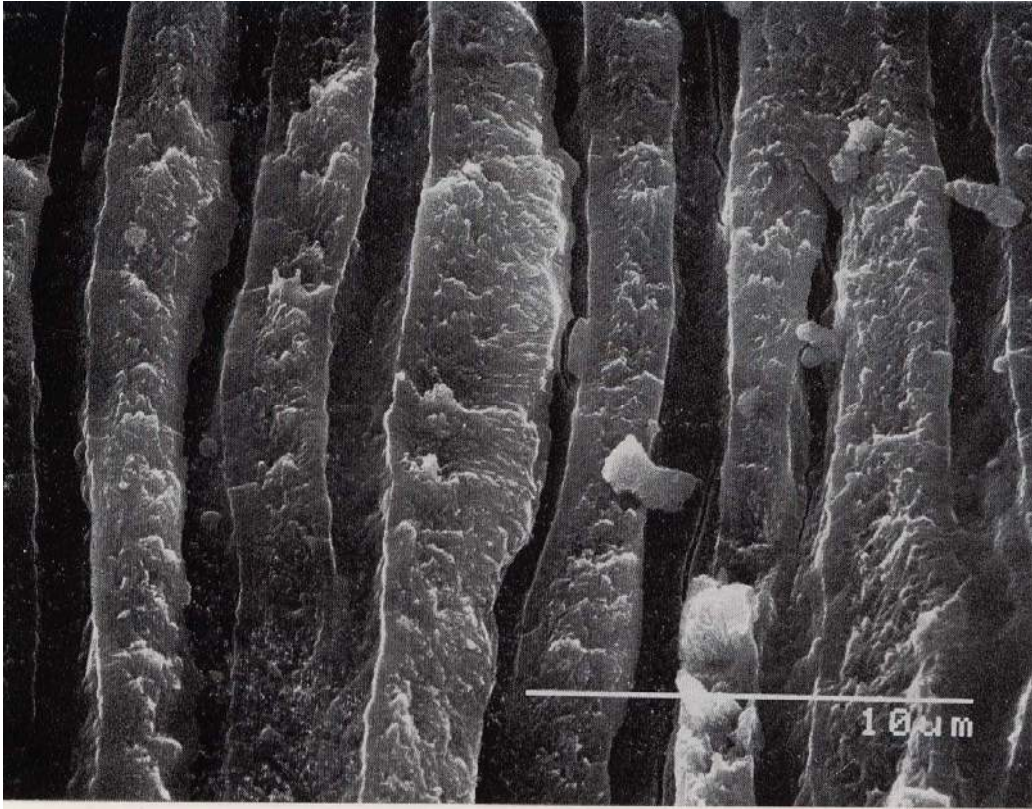
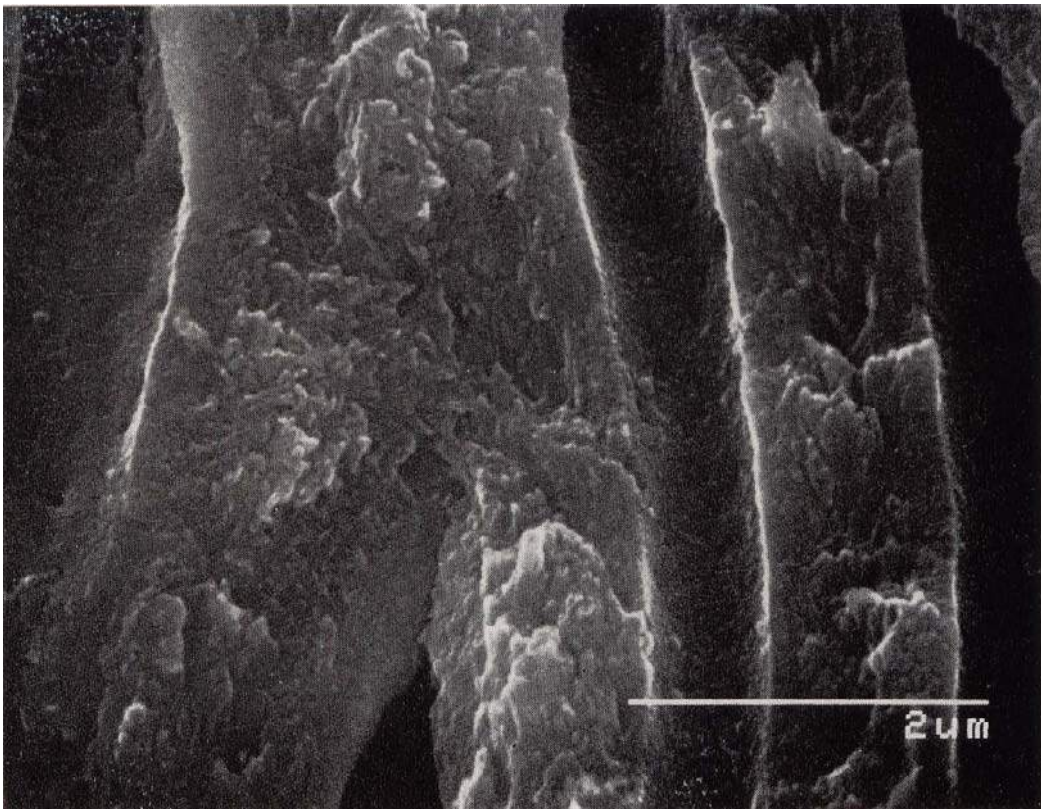


図 19 対象群; 歯髄側の象牙質断面 SEM 像 (弱拡大)



20 対象群; 歯髄側の象牙質断面 SEM 像 (強拡大)

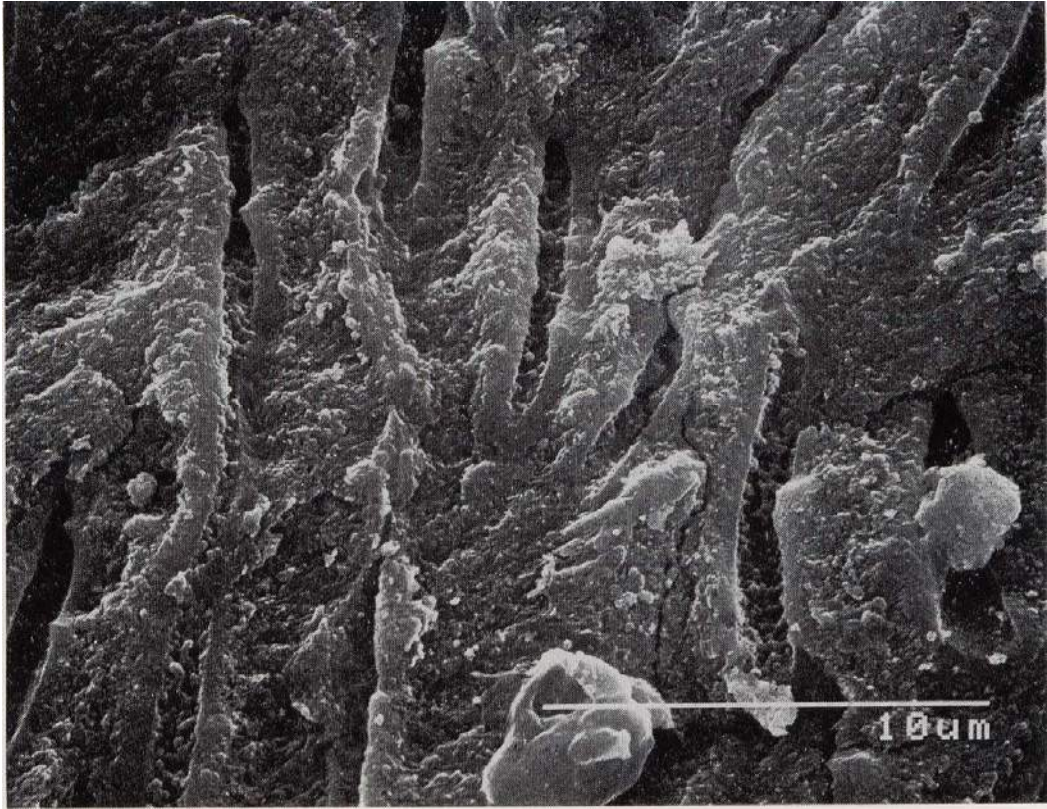


図 21 フッ素イオン導入群; 露出象牙質最表層の象牙質断面 SEM 像(弱拡大)

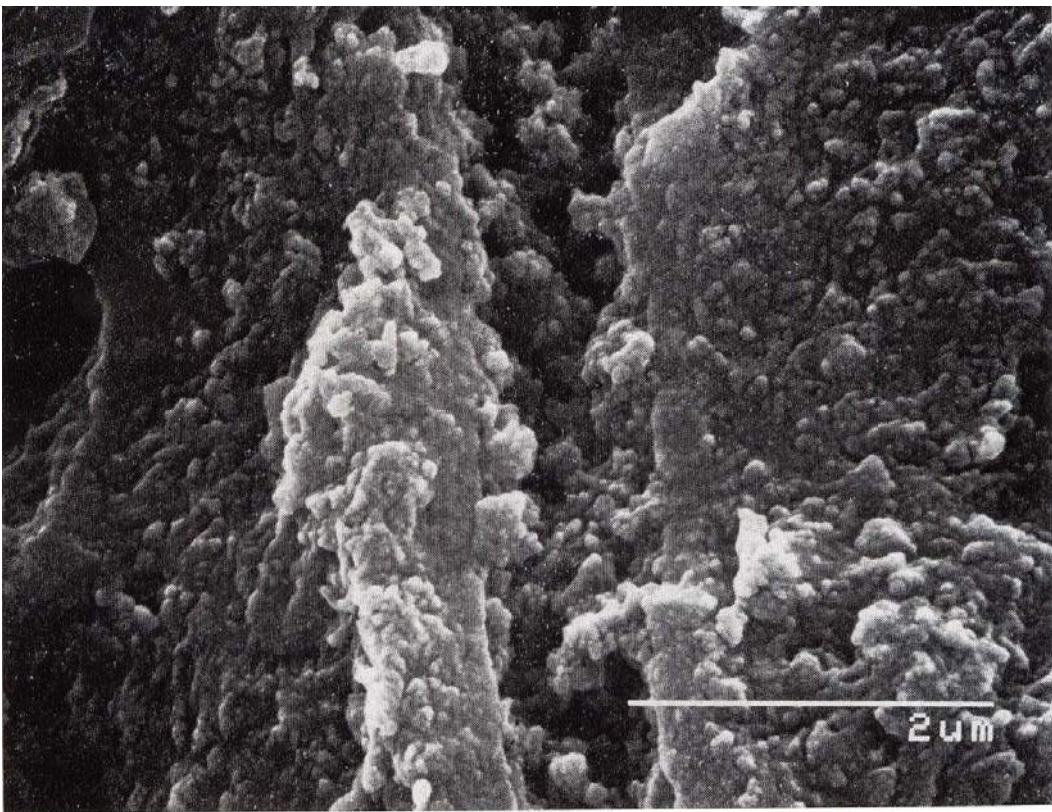


図 22 フッ素イオン導入群; 露出象牙質最表層の象牙質断面 SEM 像(強拡大)

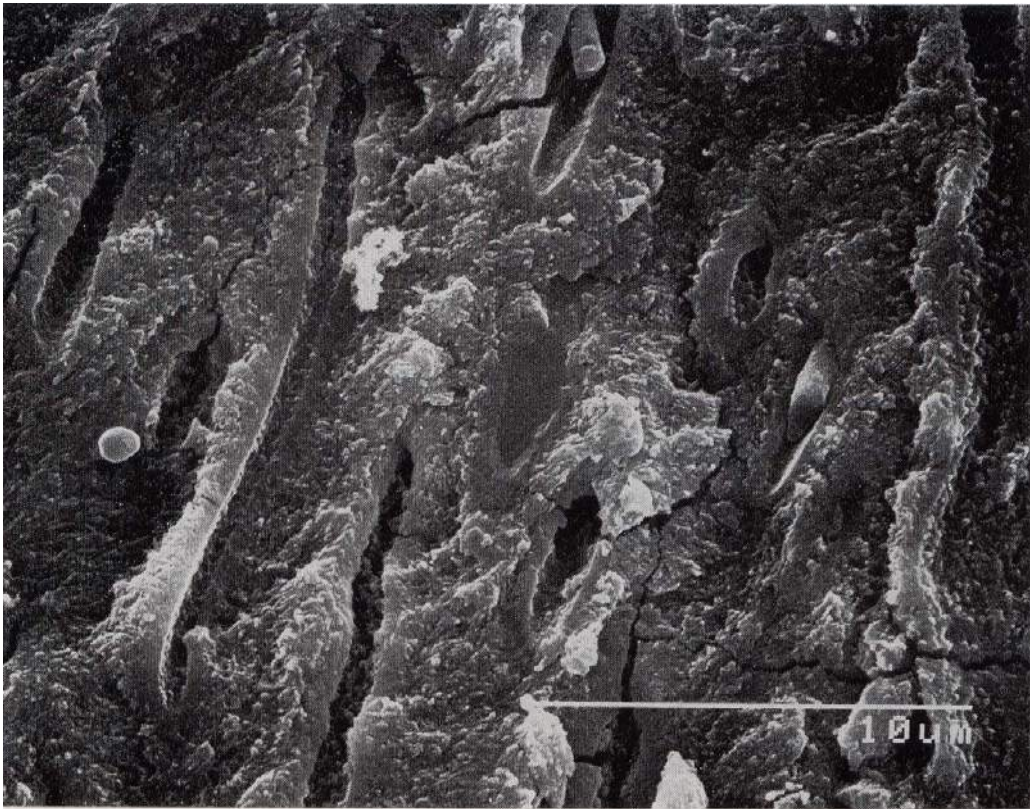


図 23 フッ素イオン導入群; 露出象牙質最表層から約 150 μm 深層の象牙質断面 SEM 像 (弱拡大)

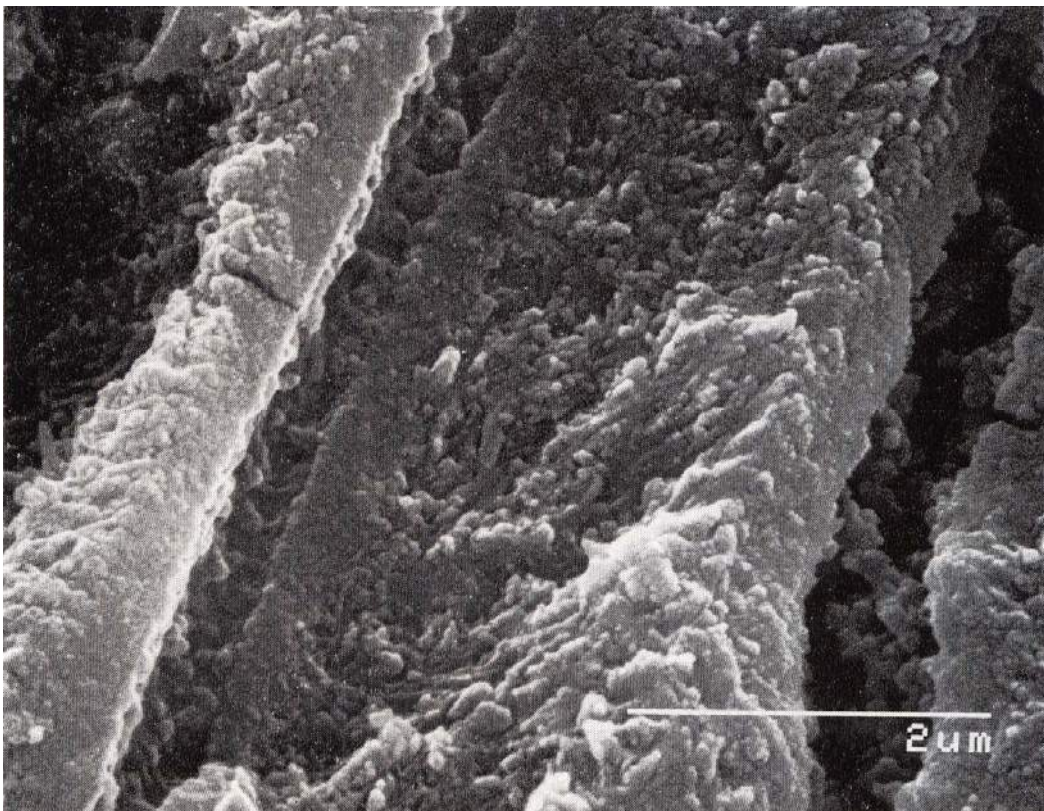


図 24 フッ素イオン導入群; 露出象牙質最表層から約 150 μm 深層の象牙質断面 SEM 像 (強拡大)

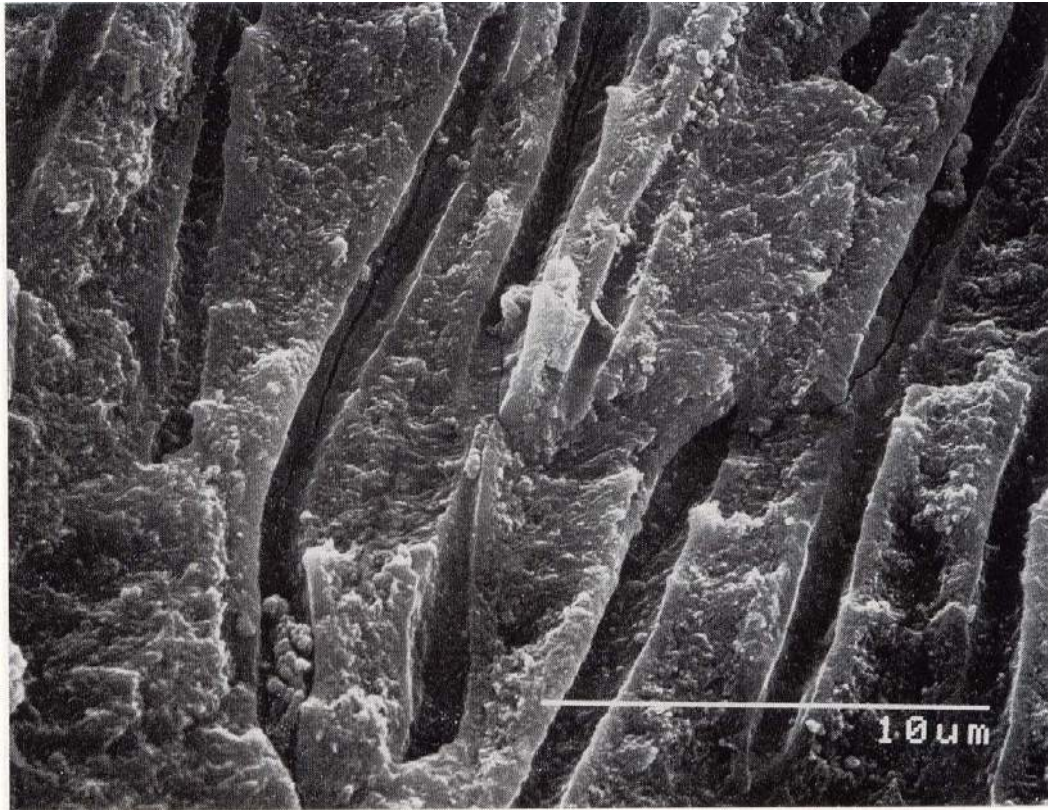


図 25 フッ素イオン導入群; 露出象牙質最表層から約 300 μ m 深層の象牙質断面 SEM 像 (弱拡大)

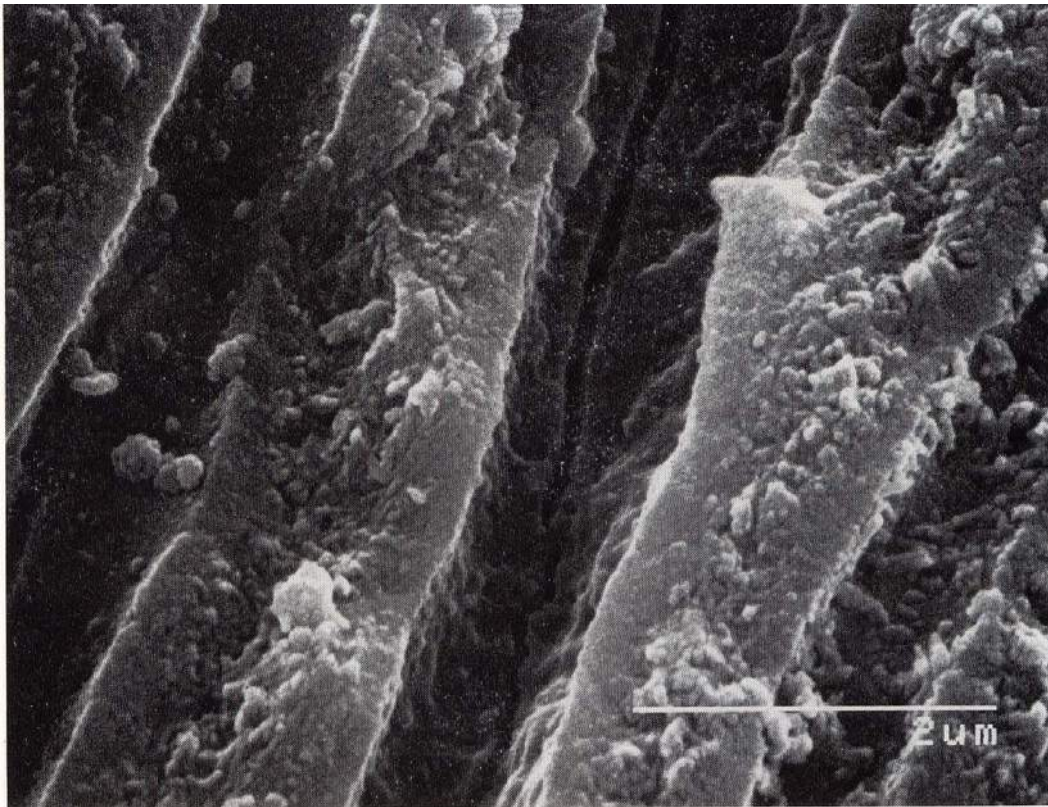


図 26 フッ素イオン導入群; 露出象牙質最表層から約 300 μ m 深層の象牙質断面 SEM 像 (強拡大)

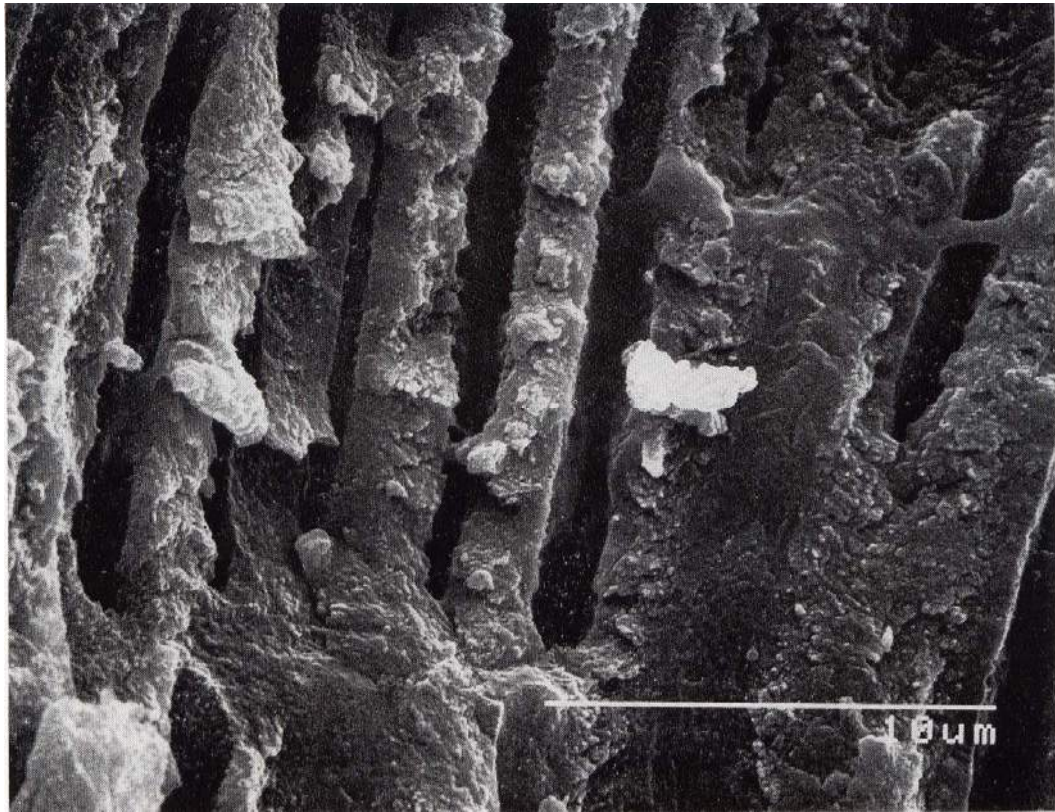


図 27 フッ素イオン導入群; 歯髄側の象牙質断面 SEM 像 (弱拡大)

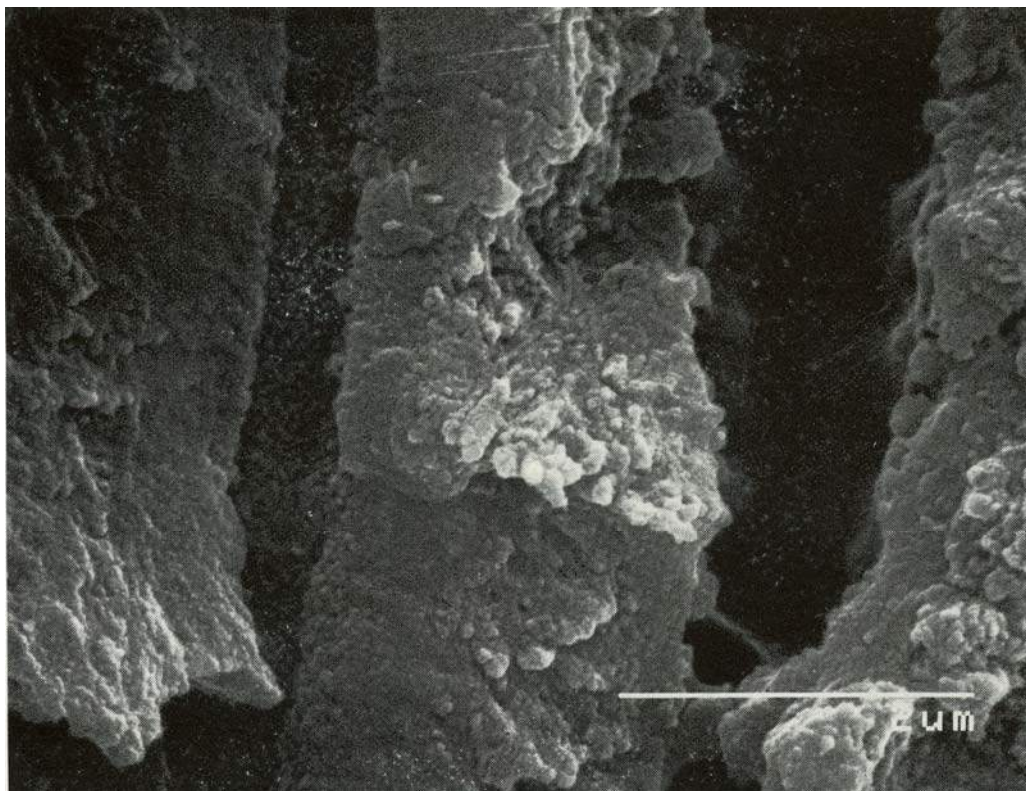


図 28 フッ素イオン導入群; 歯髄側の象牙質断面 SEM 像 (強拡大)

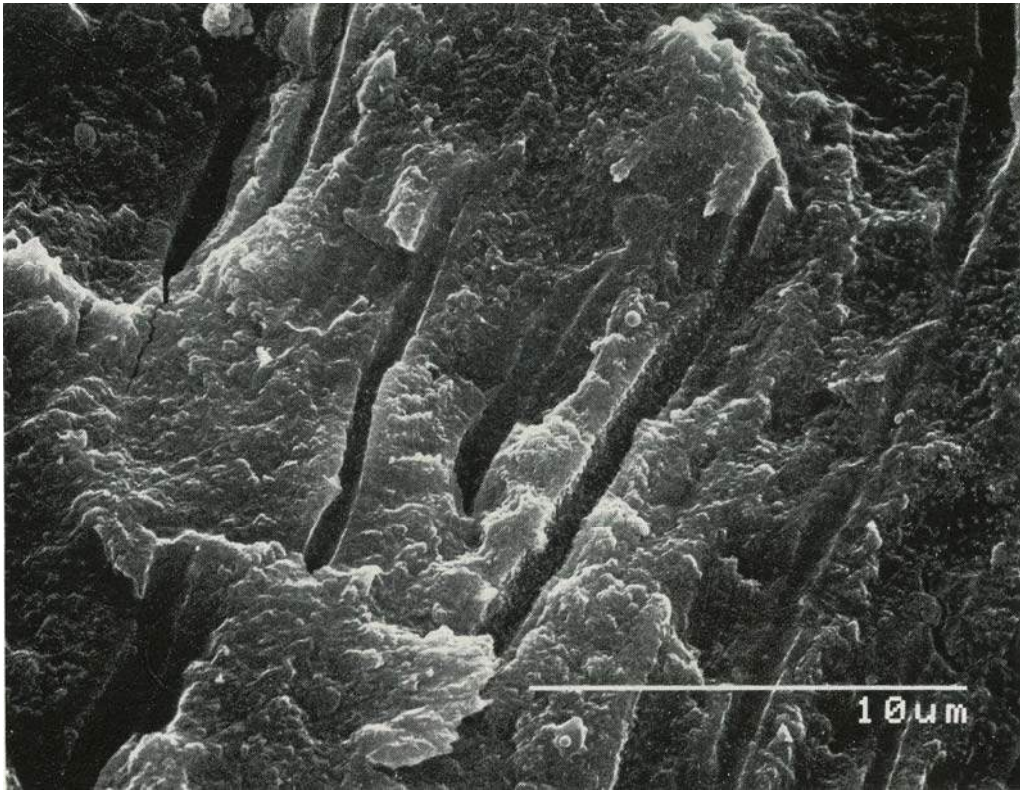


図 29 フッ素局所塗布群;露出象牙質最表層の象牙質断面 SEM 像(弱拡大)

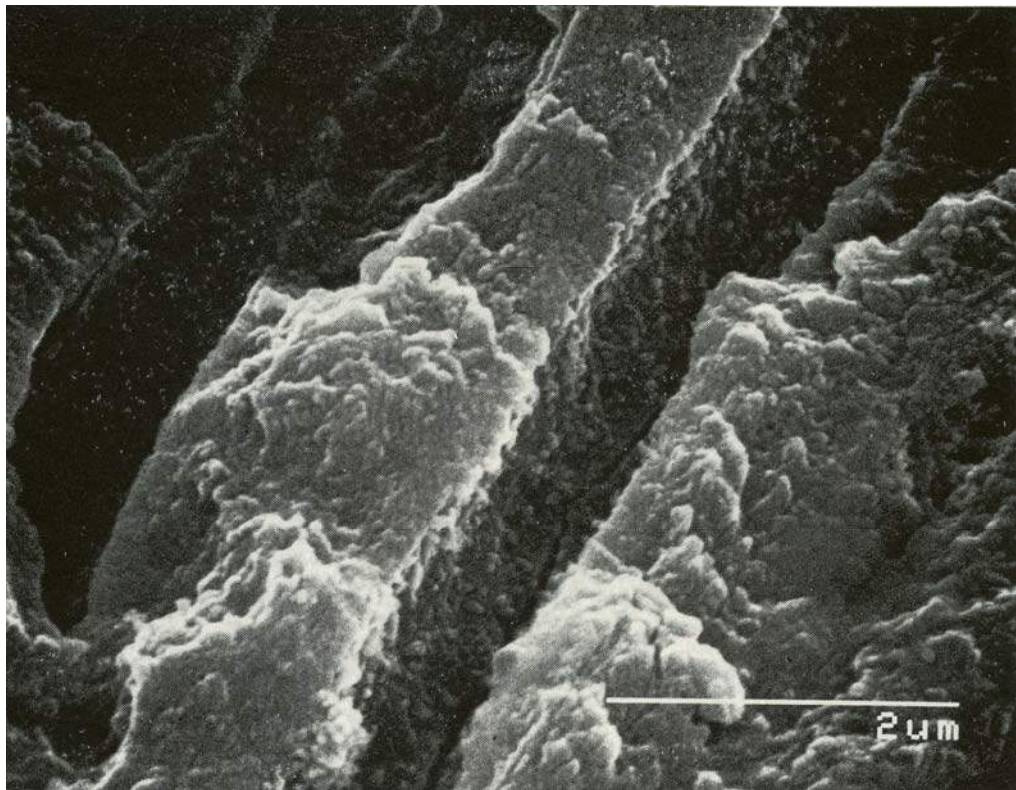


図 30 フッ素局所塗布群;露出象牙質最表層の象牙質断面 SEM 像(強拡大)

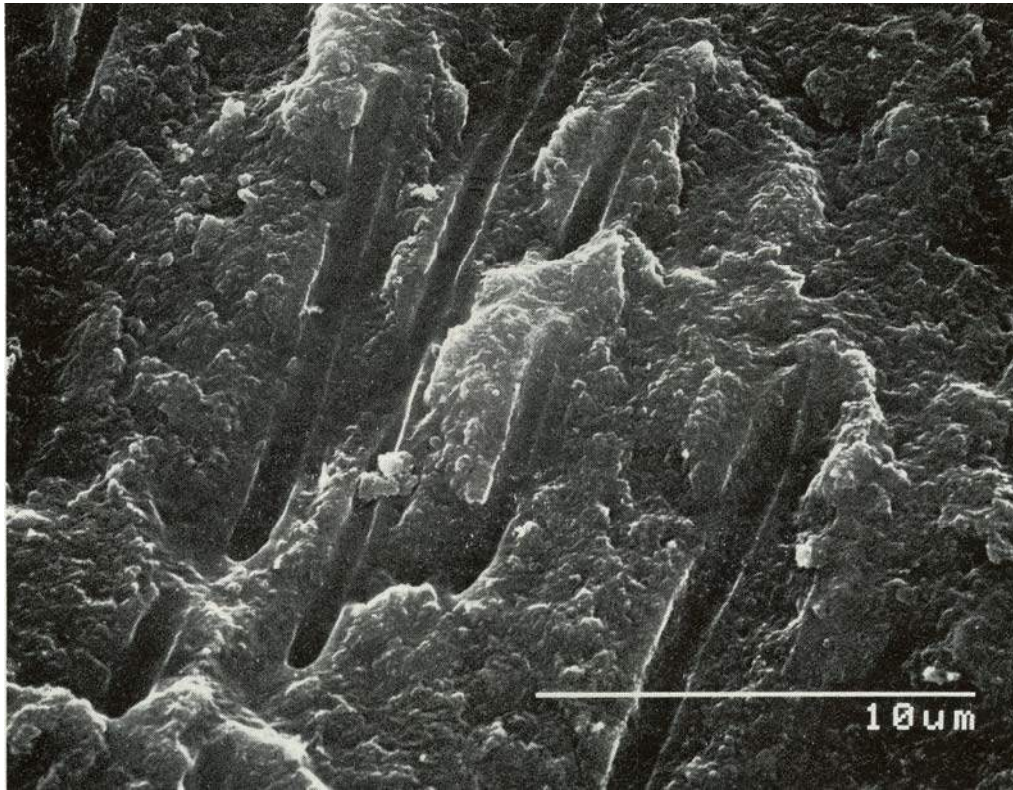


図 31 フッ素局所塗布群; 露出象牙質最表層から約 300 μm 深層の象牙質断面 SEM 像(弱拡大)

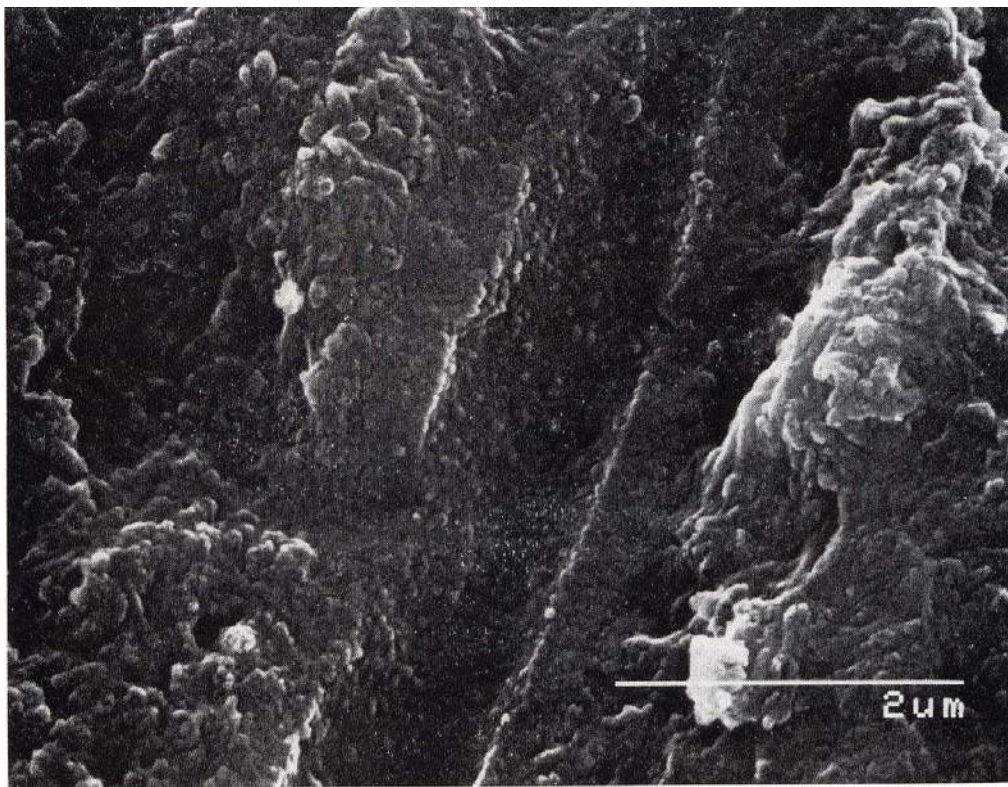


図 32 フッ素局所塗布群; 露出象牙質最表層から約 300 μm 深層の象牙質断面 SEM 像(強拡大)

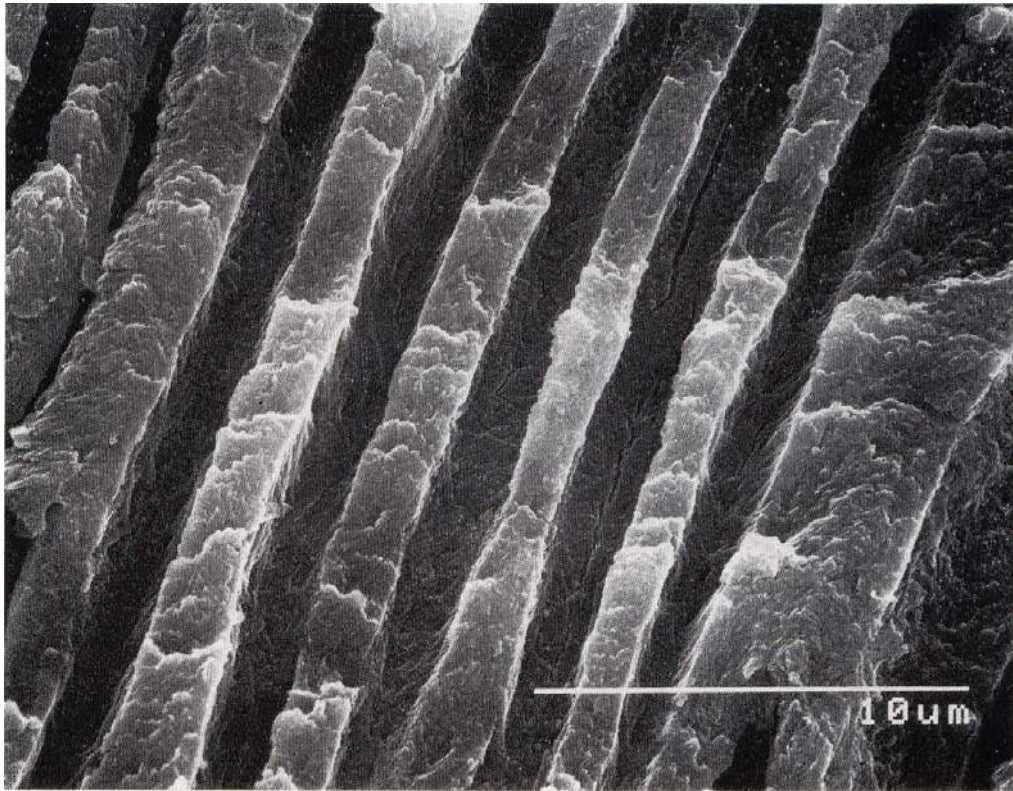


図 33 フッ素局所塗布群; 歯髄側の象牙質断面 SEM 像 (弱拡大)

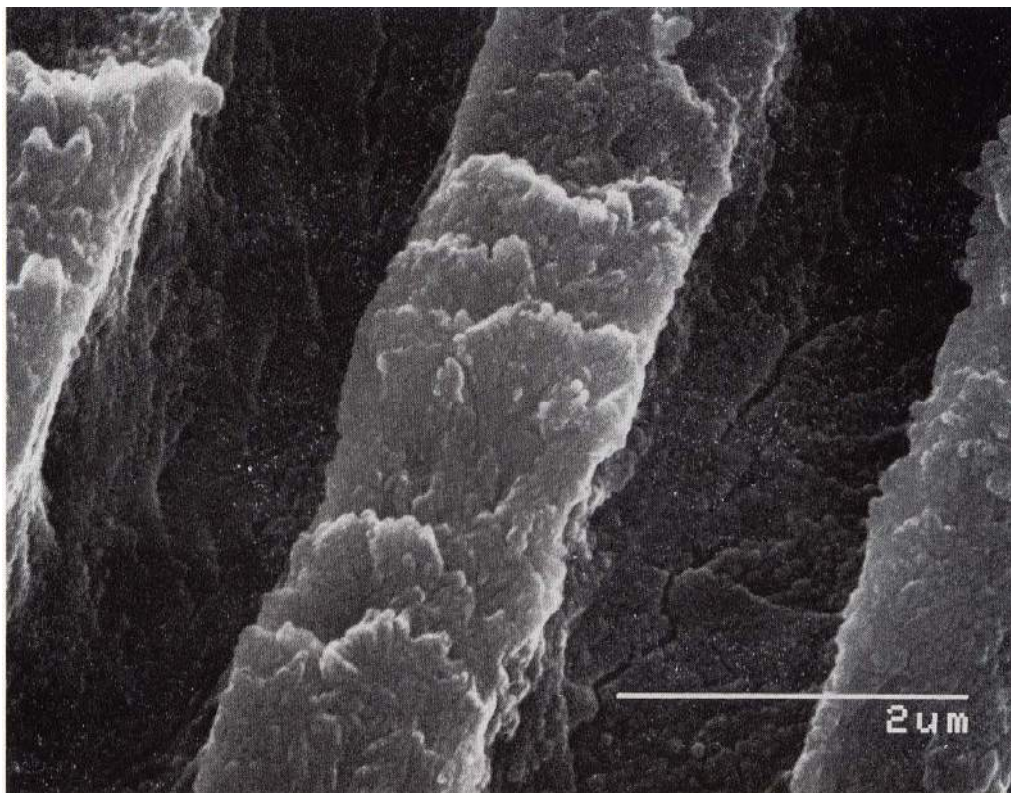


図 33 フッ素局所塗布群; 歯髄側の象牙質断面 SEM 像 (強拡大)

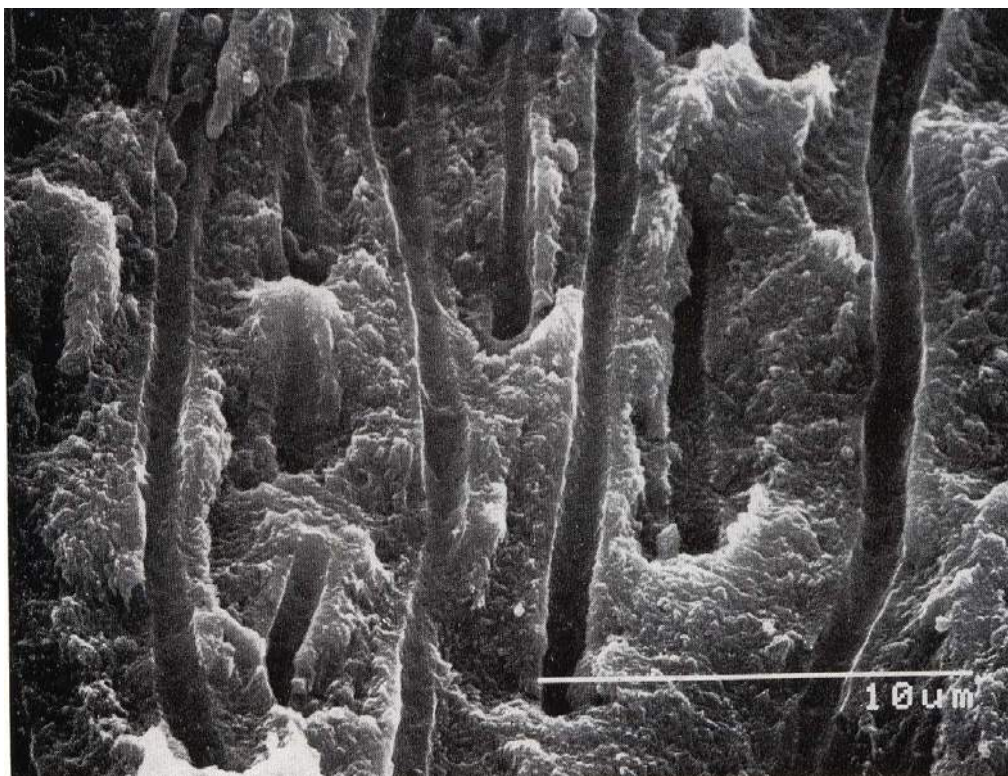


図 35 生理食塩水通電群；露出象牙質最表層の象牙質割断面 SEM 像(弱拡大)

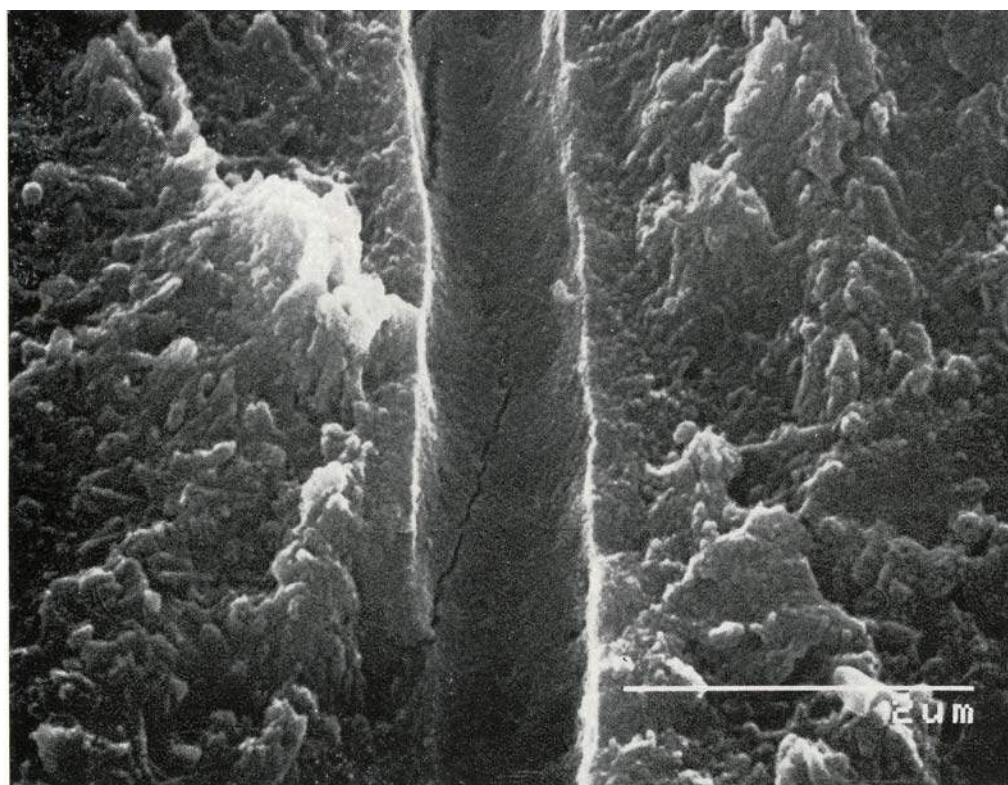


図 36 生理食塩水通電群；露出象牙質最表層の象牙質割断面 SEM 像(強拡大)

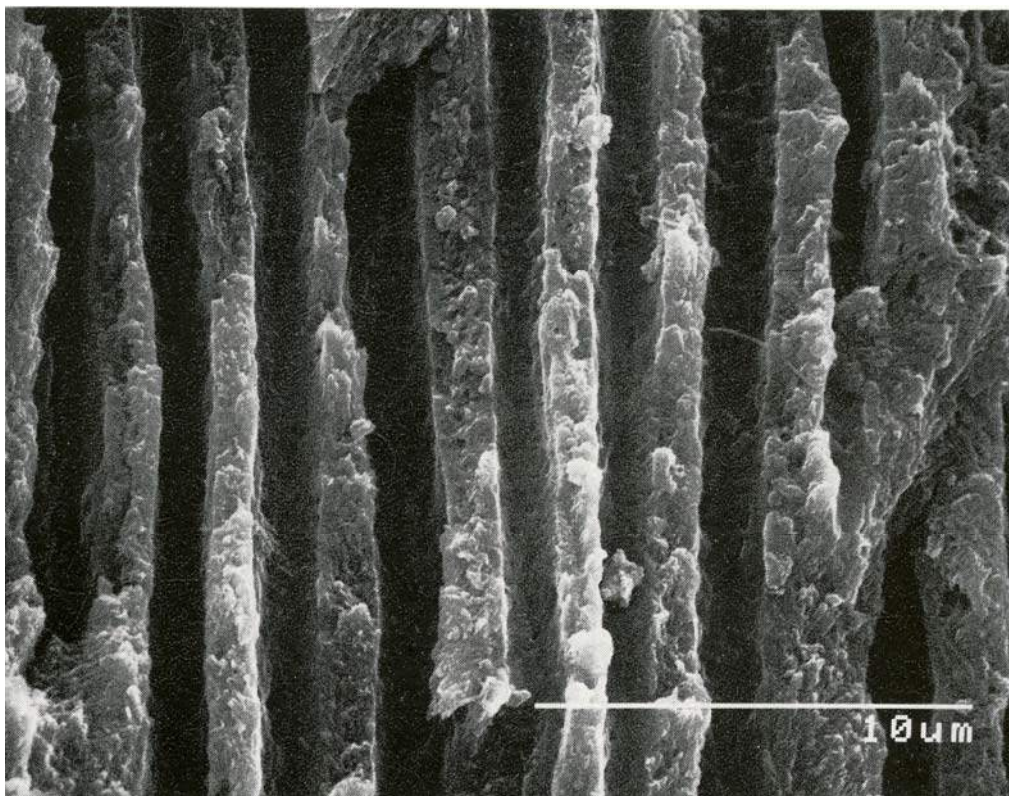


図 37 生理食塩水通電群; 歯髄側の象牙質断面 SEM 像 (弱拡大)

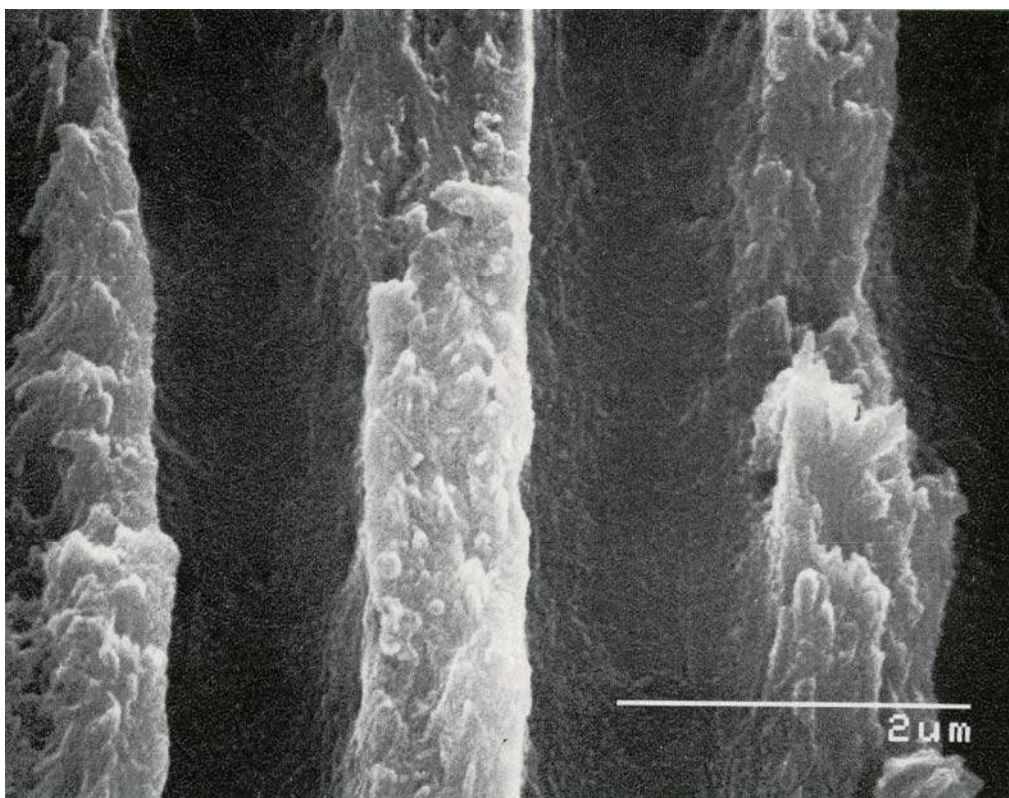


図 38 生理食塩水通電群; 歯髄側の象牙質断面 SEM 像 (強拡大)