原

著

歯の電流経路について

沢 田 健 次

東京医科歯科大学歯学部第 3 歯科保存学教室（指導：砂田今男教授）

（1980年 6 月30日 受付）

Pathway and Direction of Electric Current in Teeth

Kenji Sawada

Department of Endodontics, Faculty of Dentistry,
Tokyo Medical and Dental University
(Director: Prof. Imao Sunada)

In order to investigate the current path between the enamel surface and the pulp chamber, the electric potential was measured at the vertical surfaces of the teeth sectioned labiolingually when the potential with a frequency of 400 sine waves per second was maintained at 400 mV_{p-p} on the enamel surfaces, and the enamel and the dentin stained with methylene-blue solution introduced by electrophoresis were observed by grinding away one side of the teeth, using freshly extracted lower incisors of bovine.

The results obtained were as follows:

- 1) Owing to the isoelectric point, it was assumed that the electric current was radiated in the enamel, spread widely at the dentino-enamel junction and flowed towards the pulp in parallel with the dentinal tubules on the whole.

Electrophoresis with methylene-blue solution, however, revealed that the path of direct current was restricted in the enamel, showed a spread at the dentino-enamel junction and flowed along the dentinal tubules concentrically.

- 2) At the pulpal wall of the dentin, current density produced by sine waves was lower than that produced by direct current in electrophoresis.
- 3) As the quantity of electricity was increased in electrophoresis, the stained area with methylene-blue solution was observed widely.

結 言

歯髓疾患の診断および治療には、電気を用いる試みが古くからなされている。現在、保存領域では、電気歯髓診断器、カリエスマーター、電気麻酔器、イオン導入器あるいは根管長測定器など、多くの電気応用機器が、診療効果を上げるために用いられている。これらの機器は、使用目的ある

いは通電部位により、種々の電圧、電流、波形、周波数あるいは電極が用いられている。これらの機器を用いる場合、歯に流れる電流は、大部分がイオン伝導に従う^{1,2)}ことが知られており、歯髓腔からのイオン導入の実験によると、金属イオンの分布状態から、エナメル質および象牙質における電流経路は、それぞれ、エナメル小柱、エナメル叢、エナメル葉板および象牙細管、基質小線維

であろうとの推定³⁾がなされている。また歯の表面に電圧を加えた場合には、人の抜去歯^{4,5)}および石膏モデル⁶⁾での観察で、電流は主として象牙細管を流れ、感覚受容器付近の電流密度が刺激効果に影響を及ぼすとの報告がなされている。しかしながら、まだその詳細は明らかにされておらず、各種診療機器の機能を十分に発揮させるに至っていない。そこで本研究においては、歯質中各部位の電位を測定する方法を工夫し、得られた電位から作図的に求めた等電位分布と、イオン導入法により得られた色素の分布とにより、歯質内の電流分布について比較検討を行った。

実験方法

1. 電位測定用試料の作製

被験歯としては、年齢3歳前後の牛の新鮮抜去下顎左右永久第1切歯を用いた。被験歯を歯根中央部で横断し、その切断面の根管から歯冠歯髄を除去して、室温の生理食塩液に浸し、乾燥を防止した。通電電極は、歯冠部唇側中央部のエナメル質上に設置することとし、表面のセメント質⁷⁾を除去し、その部分に一边3mm厚さ2mmの透明アクリル板をクリアフィルFとシアノアクリレートで接着したのち、アクリル板の中央に直径1mmのエナメル質に達する穴を開け、銀粉と塩化銀粉よりなるAg-AgCl電極を装着し、電極の接触面積を一定になるようにした。次に、その試料を象牙細管の走向に沿い、通電電極の一部を含み唇舌的に、マルトー社製クリスタルカッターで切断し、切断面に厚さ0.5mmの透明アクリル板をクリアフィルSCとシアノアクリレートで接着して断面の電氣的絶縁を行った。図1に示すごとく、アクリル板の表面から、直径1mmの象牙質に達する穴を開け、電位測定点とした。

2. 電位の測定

被験試料の歯髄腔を生理食塩液で満たし、さらにその歯根を歯頸部付近まで生理食塩液のプールに浸漬し、プールの生理食塩液中には、銀板を用いたAg-AgCl電極を入れ、エナメル質上の電極との間に、菊水電子工業社製458Aファンクシ

ンジェネレータ（出力インピーダンス600Ω）により、400Hz 400mV_{p-p}の正弦波電圧を加えた。各測定点の電位の測定には、直径0.1mmの銀線を束ねて作ったAg-AgCl電極を用い、測定操作による影響を少なくするため、通電電極からはなれた測定点から菊水電子工業社製5515型オシロスコープにより、テクトロニクス社製P6006型10:1プローブを接続して電位測定を行った(図2)。

3. イオン導入用試料の作製

被験歯としては、電位測定の場合と同様、年齢3歳前後の牛の新鮮抜去下顎左右永久第1切歯を用いた。歯根の横断および歯冠歯髄の除去を行っ

図1 電位測定点

図2 電位測定法

た後、電位測定用試料の通電電極とほぼ同様に、歯冠部唇側中央部のエナメル質に直径1mmの穴で接するアクリル管を接着し、管内にメチレンブルー溶液をみたして直流電源の陽極につなぎ、歯髄腔に生理食塩液をみたして陰極につなぎ、イオン導入を行った。なお、イオン導入にもAg-AgCl電極を用いた。通電終了後ただちにマルトー社製クリスタルカッターでイオン導入を施した部分を含めて被験歯を縦断し、断面の色素の分布状態を観察し、写真撮影を行い記録した。

結 果

1. 測定電位

30個の試料について図1の測定点で得られた電位の平均値は、表1に示すとおりである。

エナメル質内の電位は、通電電極直下に相当する測定点E₃において、最も高い値150mV_{p-p}を示した。電極から離れた切縁側に隣接する測定点E₂においては45mV_{p-p}、歯頸側に隣接する測定点E₄では42mV_{p-p}と、E₃の約30%に低下し、さらにE₁、E₅においては、電位はE₃の約13%、それぞれ20mV_{p-p}および19mV_{p-p}に低下していた。通電電極直下E₃から切縁側E₂、E₁へ向かっての電位減少率と、歯頸側E₄、E₅への電位減少率はほとんど差がなく、距離と電位の関係はE₃を中心に対称性であった(図3)。

表1 各測定点での電位

測定点No.	1	2	3	4	5	6
測定点部位						
ENAMEL	20	45	150	42	19	
E. D. J	12	19	34	30	18	9
DENTIN	3.8	6.1	9.7	12	9	5.8

単位 mV_{p-p}

図3 距離と電位の関係（エナメル質）

図4 距離と電位の関係（エナメル象牙境）

図5 距離と電位の関係 (象牙質)

図6 等電位分布

エナメル象牙境においては、エナメル質におけると同様、通電電極直下に相当する測定点J₃が最も高い電位 34mV_{p-p}を示し、歯頸側に隣接する測定点J₄もほぼ同程度の値 30mV_{p-p}を示していた。さらに切縁側のJ₂や歯頸側のJ₅は、J₃、J₄の約60%の値、それぞれ 19mV_{p-p}および 18mV_{p-p}を示し、距離と電位の減少率はエナメル質の減少率よりも低下した(図4)。

象牙質においては、最も高い電位を示した測定点はD₄であり、12mV_{p-p}の値が得られた。隣接する測定点D₃、D₅の電位は、D₄の75~80%の値、それぞれ9.7mV_{p-p}および9mV_{p-p}であり、距離と電位の減少率はエナメル象牙境の電位減少率よりもさらに低下した(図5)。

2. 等電位線

エナメル質表面の通電電極の電位 400mV_{p-p}を基準とし、各測定点で得られた電位の平均値をもとに、エナメル質内および象牙質内の等電位点を算出し、等電位線を描くと図6に示すとおりである。

エナメル質内においては、通電電極を中心とした同心円状の等電位線が得られた。エナメル象牙境付近では、通電電極直下に相当する位置よりも歯頸側に直線的な等電位線が現れ、その直線部は通電電極直下のエナメル質の等電位線よりも長かった。象牙質内での等電位線は、歯頸側歯髄腔に向かい、ゆるやかにふくらんだカーブを示していた。

3. イオン導入

図7は、メチレンブルーを約 300mA 分イオン導入し、イオン導入部で薄切した標本である。エナメル質においては、色素接触面に脱灰がみられ、その狭い範囲内においてエナメル小柱に沿って輸送されることが観察された。次に、象牙質内における色素の移動を観察しやすくするため通電電気量を約 1,000mA 分に増すと、図8に示すように、象牙質内においては、色素が象牙細管の走向に沿って輸送され、歯髄に向かって収束している状態が観察された。通電電気量の多い図8では、図7と比べ、エナメル質、エナメル象牙境の

図7 イオン導入（メチレンブルー、300mA 分）

図8 イオン導入（メチレンブルー、1,000mA 分）

部分に色素のひろがりが見えられた。

図9は、アンモニア銀のイオン導入を約1,000 mA 分行った試料の研磨標本である。標本作製中にエナメル質は破折脱離しており、エナメル質内の銀粒子の分布は不明であるが、エナメル象牙境に近接した象牙質に高濃度に銀粒子の沈着が認められ、更に象牙細管に沿って銀が輸送されてい

図9 イオン導入（アンモニア銀、1,000mA 分）
エナメル質は破折脱離している

図10 図9の強拡大

た。図9の一部をさらに強拡大してみると、図10に示すように、エナメル象牙境では、象牙細管の末梢が網目状に連結しており、この部分に高濃度の銀粒子の塊が認められ、さらに象牙細管に沿って銀が送り込まれていた。しかし、象牙細管内においては、銀は細管の長軸方向に均一に送り込まれてはいなかった。

考 察

エナメル質表面から歯髄に向けて通電した場合の電流経路に関しては、従来、主としてイオン導入法により研究されてきたが、今回、歯質内の電

位を測定する方法を考案し、イオン導入法によるものとの比較検討を行った。

1) 歯質内、任意の部位の電位測定実験に牛の切歯縦断面を用いたのは、電流の漏洩を防ぎつつ多くの測定点が得られる大きな歯を必要としたためである。

牛の歯における電流経路をそのまま人の歯に当てはめることはできないが、肉眼的および組織学的に構造がよく似ているので、この結果から人の歯における電流の流れについての推定は可能であると考えられる。

2) コンポジットレジン(クリアフィル)は、生理食塩液中に長時間浸漬しておくと、インピーダンスは徐々に変化する。これはフィラーの電気伝導性によるものではなく、接着の際に微細な気泡が含まれ、その中へ浸透した生理食塩液の伝導性によるものであろう。そこで、流動性の良いクリアフィル SC を選び、強く圧接して、可能な限りレジンの厚みを小さくし、含有気泡の量を少なくするようにして実験を行った。歯の構造からみても歯の縦断面内における電流の漏洩を完全に防止することは不可能であるが、このような試料作製法により、また各電位測定点の間の距離を適当にとることにより、電流の漏洩が抑制され、かなり正確な電位が得られたものと考えられる。

3) 等電位分布より電流経路を求めると、通電電極を出た電流は、エナメル象牙境に向けてやや放射状にひろがり、エナメル象牙境を越え象牙質

内に入ると、電流は歯頸側方向に傾き、広い範囲を歯髄に向かって流れるものと考えられる(図11)。

イオン導入の結果、得られた電流経路(図7, 8)は、エナメル質では狭い範囲を流れ、エナメル象牙境を越えるとひろがり、象牙質内ではほぼ象牙細管の走向に沿うことなど、等電位線により求めた電流経路とは若干の相違が認められた。特に、電気量を増すと、エナメル質表面においては、色素との接触面よりも広範囲に色素が輸送され、象牙質では色素の輸送された部分は、明らかに歯髄に向かい収束していた。

歯に電圧を加えた場合、歯質内において各種イオンの移動が起こるはずであるが、イオン導入法においては、比較的大きな銀あるいはメチレンブルーのイオンは、その移動が象牙細管内にのみ限られ、肉眼あるいは顕微鏡で観察される所見からは、電流は、象牙細管に沿って流れるものとみなされ、電位測定法によって得られる結果と異なる一つの原因と考えられる。

また、イオン導入に用いられる直流電流は、イオンが象牙細管中を流れる伝導電流であるが、等電位分布の測定には 400 Hz の正弦波が用いられているので、象牙質においては、伝導電流の他に変位電流の影響も無視できず、象牙質基質と象牙細管内容物との界面分極によって生ずる変位電流⁸⁾も象牙質内での電流経路に変化を生ずる一因となっていると考えられる。

したがって、電気歯髄診断器、カリエスメーターなど交流を用いる場合よりも、電気麻酔器、イオン導入器など直流を用いる場合の方が、象牙質と歯髄との界面における電流密度が大きくなることが考えられ、临床上これらの機器を用いる場合若干の考慮が必要であろう。

4) イオン導入において、通電電気量が少ない場合には、エナメル質の電極直下にのみ高密度に色素の沈着がみられ、象牙質への色素の沈着は明瞭ではない。通電電気量を増すとエナメル質では広範囲に色素沈着が認められ、象牙質への色素の沈着も明瞭となる。この現象は、通電電気量を増したことにより、通電部直下の電流密度の高い部

図11 等電位分布より求めた主な電流経路

分のみでなく、通電部周囲の電流密度の低い部分にも色素が輸送されたとも考えられるが、藤正⁹⁾の述べている、『溶媒和の機構』がエナメル質中においても生じ、電極直下の電流通路がまず閉塞され、周囲に電流が流れ、色素の沈着部位が拡大したとも考えられる。したがって、イオン導入による結果のみで電流経路を論じることは不適當であり、電位分布などと合わせて総合的に判断する必要があろう。

結 論

エナメル質表面に電圧を加えた際の、エナメル質表面から歯髄までの電流の流れ方を知るために、牛の下顎切歯の縦断面の電位分布を測定して電流経路を求め、イオン導入による色素の輸送状態から求めた電流経路と比較検討し、以下の結論を得た。

1. 等電位分布より求めた電流は、エナメル質においては、通電電極を中心として同心円状にひろがり、エナメル象牙境付近において放射状のひろがりを示し、象牙質においては歯頸側方向に傾き広い範囲を歯髄に向かって流れると考えられた。イオン導入より求めた電流は、エナメル質においては狭い範囲を流れ、エナメル象牙境を越えるとひろがり、象牙質においては、ほぼ象牙細管の走向に沿い、歯髄に向かって収束した流れを示した。

2. 等電位分布を求めるために用いた交流(400 Hz)とイオン導入で用いた直流とでは、象牙質と歯髄との界面における電流密度に差がみられ、前者の方が低い値を示した。

3. イオン導入の際、通電電氣量を増加させると、色素の輸送される範囲が拡大した。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始ご懇篤なるご指導とご校閲とを賜りました砂田今男教授に心からの感謝を捧げます。また本研究に対し多大なご援助を下された矢崎国博講師ならびに第三歯科保存学教室の各位に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 野村浩道, 坂田三弥, 伊藤秀三郎: 歯の電氣伝導能についての一・二の知見. 歯科学報, 64: 433-437, 1964.
- 2) 川口叔宏, 照井道夫, 後藤良之: 抜去歯の電氣抵抗の経時的変化について. 日歯保誌, 18: 268-273, 1975.
- 3) 鈴木賢策: Iontophorese に関する実験的研究. 口病誌, 16: 411-429, 1942.
- 4) Mumford, J. M.: Path of direct current in electric pulp-testing. Using one coronal electrode. Brit. Dent. J., 106: 23-26, 1959.
- 5) Mumford, J. M.: Path of direct current in electric pulp-testing. Using two coronal electrodes. Brit. Dent. J., 106: 243-245, 1959.
- 6) Newton, A. V. & Mumford, J. M.: Current paths through analogues of human teeth. Archs oral Biol., 14: 699-705, 1969.
- 7) Glimcher, M. J., Friberg, U. A. & Levine, P. T.: The identification and characterization of a calcified layer of coronal cementum in erupted bovine teeth. J. Ultrastructure Research, 10: 76-88, 1964.
- 8) 矢崎国博: 口腔領域の電氣現象について. 口病誌, 42: 488-489, 1975.
- 9) 藤正敬夫: イオン導入による象牙質内金属イオンの濃度分布について. 口病誌, 45: 74-89, 1978.