

リン酸三カルシウム配合歯磨剤が象牙質の
脱灰抑制ならびに再石灰化に及ぼす影響

日本大学大学院歯学研究科歯学専攻

若松 賢吾

(指導：宮崎 真至 教授，黒川 弘康 准教授)

概 要

齲蝕の予防を目的として、機能化されたリン酸三カルシウム (functionalized tri-calcium phosphate, fTCP) を配合した歯磨剤が市販されている。しかし、fTCP 配合歯磨剤が根面齲蝕を予防する効果に関しては不明な点が多い。そこで本論文の著者は、ウシの抜去歯を用いて製作した象牙質根面齲蝕モデルに、フッ化物イオンと fTCP を配合した歯磨剤を、異なる条件で適用した際の脱灰抑制ならびに再石灰化に及ぼす影響について、超音波透過法を用いることで検討した。さらに、微小硬さ測定装置を用いてヌープ硬さを測定するとともに、象牙質表層における形態的变化をレーザー顕微鏡 (LSM) および走査電子顕微鏡 (SEM) によって観察した。

fTCP 配合歯磨剤として Clinpro toothpaste 1450 (fTCP (+), 3M ジャパン) を、対照として fTCP 未配合歯磨剤である Check-up standard (fTCP (-), ライオン歯科材) およびサホライド液歯科用 38% (SDF, 東洋製薬化成) を用いた。

ウシ抜去歯歯根部象牙質をブロック状に調整した試片を、0.1 M 乳酸緩衝液 (pH 4.75) に 10 分間浸漬した後に人工唾液に保管した。この操作を 8 時間毎に 1 日 3 回、28 日間行うことで根面齲蝕モデルを製作した。なお、この根面齲蝕モデルを製作する期間を初期脱灰期間 (initial demineralization period, ID period) とした。根面齲蝕モデルを 0.1 M 乳酸緩衝液に 10 分間浸漬した後に人工唾液中に保管する操作を 8 時間毎に 1 日 3 回、28 日間継続した群を未処理群、実験開始時に各歯磨剤を塗布した根面齲蝕モデルを、未処理群と同様の条件で保管した群を O-fTCP (+) 群および O-fTCP (-) 群、各歯磨剤の塗布を 1 日毎に 28 日間行い、未処理群と同様の条件で保管した群を F-fTCP (+) 群および F-fTCP (-) 群、

実験開始時に SDF を塗布した根面齶蝕モデルを未処理群と同様の条件で保管した群を O-SDF 群, SDF の塗布を実験開始から 1 週ごとに 28 日まで行い, 未処理群と同様の条件で保管した群を F-SDF 群とした。なお, 各条件に保管した期間を実験期間 (experimental period, EX period) とした。

超音波測定には, パルサーレシーバ (5900PR, パナメトリクス), 縦波用トランスデューサ (V112, パナメトリクス) およびオシロスコープ (WaveRunner LT584, レクロイ) から構成されるシステムを用いた。また, F-ftTCP (+) 群, F-ftTCP (-) 群および F-SDF 群のスリーブ硬さ測定を行うとともに, ftTCP (+) 群および ftTCP (-) 群で LSM 観察を行った。さらに, 超音波測定に用いた試片と同様の実験環境に保管した試片について SEM 観察を行った。

その結果, ID period における縦波音速は, いずれの群においても乳酸緩衝液浸漬前と比較して, ID period 28 日で有意に低下した。また, 乳酸緩衝液浸漬前の試片の SEM 観察からは, 試片表層がスミヤー層で覆われている像が観察されたのに対して, ID period 28 日では象牙細管の開口とともに管間象牙質においてコラーゲン繊維の露出が認められた。硬組織中を伝播する超音波の縦波音速の変化は, 歯質の石灰化の程度と相関があり, 無機成分の増減に伴って変化することが判明している。ID period 28 日で試片の縦波音速が低下したことは, 乳酸緩衝液への浸漬によって象牙質の無機成分が減少したことを示すものであり, SEM 観察で認められた象牙質表層における形態的变化と一致するものであった。

未処理群の縦波音速は, EX period が経過するのに伴って低下した。一方, O-ftTCP (+) 群, O-ftTCP (-) 群および O-SDF 群の縦波音速は, EX period 7 日まで有意に上昇し, それ

以降で緩やかに低下する傾向を示したのに対し、F-ftTCP (+) 群、F-ftTCP (-) 群およびF-SDF 群の縦波音速は、14 日まで有意に上昇し、その後、音速の低下は認められなかった。

また、EX period 7 日以降の縦波音速は、歯磨剤および SDF の塗布回数にかかわらず、SDF 群で最も大きな値を示し、ftTCP (+) 群、ftTCP (-) 群および未処理群の順であった。

ftTCP (+) 群および ftTCP (-) 群の、EX period 28 日の LSM 像および三次元鳥瞰像からは、O-ftTCP (+) 群および O-ftTCP (-) 群で、象牙質表面にわずかではあるものの析出物が観察され、粗雑な面を呈した。一方、F-ftTCP (+) 群および F-ftTCP (-) 群では、象牙質表面の全体が析出物で覆われ、これに伴って比較的平坦な面を呈した。このように、高濃度フッ化物配合歯磨剤の頻回使用は、歯質表面に析出物による緻密な層を形成し、この層が酸に対する抵抗層として機能することで脱灰抑制効果を発揮するとともに、脱灰象牙質の再石灰化を促進する可能性が示唆された。

ここで、F-ftTCP (+) 群、F-ftTCP (-) 群および F-SDF 群の EX period 28 日の SEM 像を比較すると、いずれの群においても、ID period において開口した象牙細管が、析出物によって狭窄あるいは封鎖されている像が観察された。とくに、象牙細管の封鎖程度は F-SDF 群で著明であり、次いで、F-ftTCP (+) 群および F-ftTCP (-) 群の順であった。ftTCP は、 Ca^{2+} および PO_4^{3-} を安定した状態で供給するとともに、歯磨剤に含有されたフッ化物と化合反応することなく相乗的に作用することで、F⁻ の取り込みを促進するとされている。ftTCP (+) 群では、いずれの歯磨剤の適用条件においても ftTCP (-) 群と比較して有意に大きな縦波音速を示したこと、さらに SEM 像においても象牙質表面での析出物が著明に観察されたことから、ftTCP の配合によって再石灰化がより効果的に促進したものと考えられた。

ヌープ硬さは、未処理群で EX period の経過に伴って低下したのに対し、F-ftTCP (+) 群、F-ftTCP (-) 群および F-SDF 群では、EX period の経過に伴って上昇し、とくに、F-SDF 群のヌープ硬さは、いずれの測定時期においても、他の群と比較して有意に大きい値を示した。歯の微小硬さの変化は、歯のミネラル含有量と正の相関があることが報告されている。したがって、SDF の塗布によって不溶性のリン酸銀が象牙質表面に付着することで保護層を形成してこれが脱灰を抑制するとともに、フッ化カルシウムがレザボアとして機能することで十分なフッ化物が供給され、再石灰化が促進したものと考えられた。一方、SDF の塗布は、歯質表面を黒褐色に変色させることから、前歯部における SDF の使用に関しては、審美性を考慮した慎重な臨床的判断が求められる。

以上のように、ftTCP 配合歯磨剤の使用は、ftTCP 未配合の歯磨剤と比較して象牙質の表層により多くの析出物を形成することで脱灰抑制効果を発揮するとともに、日常での頻回使用によって、再石灰化の促進に有効であることが示された。さらに、審美的な観点からも歯質を変色することがないところから、ftTCP 配合歯磨剤の頻回使用は、臨床的観点からも根面齲蝕の予防に有効であることが示唆された。

本論文は原著論文 Wakamatsu K, Kurokawa H, Okuwaki T, Takamizawa T, Tsujimoto A, Shiratsuchi K, Ishii R, Miyazaki M. Ultrasonic measurement of dentin remineralization effects of dentifrices and silver diamine fluoride. *Acta Odontol Scand* 2021; 79: 528-535. を基幹論文とし、これに LMS の実験データを新たに加えることによって総括したものである。

緒 言

高齢者において、口腔機能を向上させるとともに歯の喪失を防止することは、全身の健康状態を維持するためにも意義あることである。一方、高齢者における残存歯数の増加は、歯肉退縮に伴う根面齲蝕の発症につながる可能性がある^{1,2)}。根面齲蝕の多くは、歯肉縁に接するセメント質あるいは象牙質に初発し、その進行はセメント-エナメル境に沿って、広く、浅く、時には歯頸部を取り囲むように環状を呈することもある³⁾。また、根面齲蝕では、歯冠部齲蝕に比較して患者が疼痛を訴えることが少なく、自覚症状が乏しいことも特徴のひとつとされている⁴⁾。したがって、根面齲蝕に関しては、その進行をいかにして抑制するかが重要となり、各メーカーから根面齲蝕の予防を目的として、フッ化物を応用した各種製品が市販されている⁵⁻⁷⁾。

一般的に、フッ化ナトリウムなどのフッ化物は、他の元素と強い化学反応性を有するところから、カルシウムとともに配合されると、これらが化合反応することでフッ化物イオンの活性化度が低下してしまう⁸⁾。そこで、フッ化物の歯質への取り込みを向上させることを目的として、機能化されたリン酸三カルシウム (functionalized tri-calcium phosphate, fTCP) を配合した歯磨剤が市販された。fTCP は、フッ化物とともに配合された場合でも、両者間で化合反応することなく共存した状態を保ち⁹⁻¹¹⁾、フッ化物の高い反応性によって¹²⁾ 歯質に効果的に取り込まれるとされている。しかし、fTCP 配合歯磨剤が根面齲蝕を予防する効果に関しては不明な点が多い。

そこで本論文の著者は、ウシの抜去歯を用いて製作した象牙質根面齲蝕モデルに、フッ化物イオンと fTCP を配合した歯磨剤を、異なる条件で適用した際の脱灰抑制ならびに再

石灰化に及ぼす影響について、超音波透過法を用いることで検討した。さらに、微小硬さ測定装置を用いてヌープ硬さを測定するとともに、象牙質表層における形態的变化をレーザー顕微鏡 (LSM) および走査電子顕微鏡 (SEM) によって観察した。

材料および方法

1. 供試材料

fTCP 配合歯磨剤として Clinpro toothpaste 1450 (fTCP (+), 3M ジャパン) を、対照として fTCP 未配合歯磨剤である Check-up standard (fTCP (-), ライオン歯科材) および齲蝕抑制剤のサホライド液歯科用 38% (SDF, 東洋製薬化成) を用いた (Table 1)。

2. 根面齲蝕モデルの製作

根面齲蝕モデルの製作には、ウシ (2~3 歳齢) 下顎前歯の歯根部を用いた。歯根唇側面歯頸部付近の象牙質を、低速精密切断機 (IsoMet 1000, Buehler) を用いてブロックとして切り出した後、ブロック全面を、耐水性シリコンカーバイドペーパー #2,000 まで順次研削して $4 \times 4 \times 1$ mm に調整した。この象牙質ブロックの底面 (歯髓側) および側面をワックスで被覆した試片を、0.1 M 乳酸緩衝液 (pH 4.75) に 10 分間浸漬し、精製水で水洗した後、キムワイプ (日本クレシア) を用いて余剰な水分を拭き取り、人工唾液に保管した。この操作を 8 時間毎に 1 日 3 回、28 日間行うことで根面齲蝕モデルを製作した。なお、この根面齲蝕モデルを製作する期間を初期脱灰期間 (initial demineralization period, ID period) とした。また、人工唾液としては、14.4 mM NaCl, 16.1 mM KCl, 0.3 mM $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, 2.0 mM K_2HPO_4 , 1.0 mM $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ および sodium carboxymethyl cellulose 0.10 g/100 mL を加えて

pH 7.0 に調整したものをを用いた¹³⁾。

3. 保管条件

根面齲蝕モデルは、以下に示す各条件に保管した。なお、この保管期間を実験期間 (experimental period, EX period) とした。

- 1) 未処理群：根面齲蝕モデルを 0.1 M 乳酸緩衝液に 10 分間浸漬し、水洗、乾燥した後に人工唾液中に保管した。この操作を 8 時間毎に 1 日 3 回、28 日間継続した。
- 2) O-fTCP (+) 群, O-fTCP (-) 群：マイクロモーターハンドピース (トルクテック CA-DC, モリタ製作所) に歯面研磨用ブラシ (メルサーージュブラシソフト, 松風) を装着し、fTCP (+) あるいは fTCP (-) を根面齲蝕モデルの唇側面に 10 秒間塗布した後、水洗した。この操作を実験開始時のみ行い、未処理群と同様の条件で保管した。
- 3) F-fTCP (+) 群, F-fTCP (-) 群：マイクロモーターハンドピースに装着した歯面研磨用ブラシを用いて、fTCP (+) あるいは fTCP (-) を根面齲蝕モデルの唇側面に 10 秒間塗布した後、水洗した。この操作を 1 日毎に 28 日間行い、未処理群と同様の条件で保管した。
- 4) O-SDF 群：マイクロブラシ (松風) を用いて、SDF を根面齲蝕モデルの唇側面に塗布して 3 分間経過後、水洗した。この操作を実験開始時のみ行い、未処理群と同様の条件で保管した。
- 5) F-SDF 群：マイクロブラシを用いて、SDF を根面齲蝕モデルの唇側面に塗布して 3 分間経過後、水洗した。この操作を実験開始から 1 週ごとに 28 日まで行い、未処理群と同様の条件で保管した。

なお、歯磨剤の塗布は、マイクロモーターハンドピースの回転数を無荷重の状態では 1,000 rpm とし、荷重 0.1 N の条件で行った。

4. 超音波測定

超音波測定装置として、パルサーレシーバ (5900PR, パナメトリクス), 縦波用トランスデューサ (V112, パナメトリクス) およびオシロスコープ (WaveRunnerLT584, レクロイ) から構成されるシステムを用いた。

超音波測定では、パルサーレシーバを出力 16 μ J に設定し、高周波電圧をトランスデューサ内部の水晶振動子に送ることによって超音波を発生させた。探触子を試片に接触させ、試片内を伝播する超音波の変化を、オシロスコープを用いて電氣的に増幅することによって波形を検出した。次いで、この波形から 1 ns 単位で試片を透過する超音波の伝播時間を求め、試片の厚さとの関係から縦波音速を求めた。なお、超音波の測定時期としては根面齶蝕モデル製作時である ID period 0 および 28 日, EX period 7, 14, 21 および 28 日とし、試片の数は各条件について 10 個とした。

5. ヌープ硬さ測定

F-ftCP (+) 群, F-ftCP (-) 群および F-SDF 群で、超音波測定に用いた試片のヌープ硬さの測定を、微小硬さ測定装置 (DMH-2, 松沢) を用いて、荷重 0.25 N, 荷重保持時間 30 秒の条件で行った。なお、試片の数は各条件について 10 個とした。また、ヌープ硬さの測定部位は、試片の中央部付近 3 点とし、その平均値を試片の各測定時期におけるヌープ硬さとした。

6. LSM 観察

fTCP (+) 群および fTCP (-) 群で、超音波測定に用いた試片について、形状解析 LSM (VK-9710, キーエンス) を用いて観察した。

7. SEM 観察

SEM 観察に際して、超音波測定に用いた試片と同様の実験環境に保管した試片について、通法に従って *tert*-ブタノール濃度上昇系列に順次浸漬した後、凍結乾燥 (Model ID-3, エリオニクス) を行った。次いで、イオンコーター (Quick Coater Type SC-701, サンヨー電子) で金蒸着を行った後、フィールドエミッション SEM (ERA-8800 FE, エリオニクス) を用いて加速電圧 10 kV の条件で観察した。

8. 統計処理

同一保管条件内および各保管条件間での縦波音速ならびにヌープ硬さについて、等分散性を確認した後、分散分析および Tukey's honestly significant difference test を用いて有意水準 5% の条件で統計学的検定を行った。

成 績

未処理群, O-fTCP (+) 群, O-fTCP (-) 群および O-SDF 群の縦波音速の経時的変化を Table 2 に示した。根面齶蝕モデル製作時, すなわち ID period における縦波音速は, 乳酸緩衝液浸漬前 (3,816~3,952 m/s) と比較して同液に浸漬 28 日で有意に低下した (2,989~3,034 m/s)。一方, EX period における未処理群の縦波音速は, 実験期間の経過に伴って低下したのに対して, O-fTCP (+), O-fTCP (-) および O-SDF 群の縦波音速は, 実験開始 7 日

まで上昇し、それ以降で低下する傾向を示した。また、実験開始7日以降の縦波音速は、O-SDF群、O-ftTCP (+)群、O-ftTCP (-)群および未処理群の順で大きい値を示した。

未処理群、F-ftTCP (+)群、F-ftTCP (-)群およびF-SDF群の縦波音速の経時的変化をTable 3に示した。ID periodで低下した縦波音速は、F-ftTCP (+)、F-ftTCP (-)およびF-SDF群のいずれにおいても、EX periodの経過に伴って上昇した。また、実験開始7日以降の縦波音速は、F-SDF群で最も大きな値を示し、F-ftTCP (+)群、F-ftTCP (-)群および未処理群の順であった。

未処理群、F-ftTCP (+)群、F-ftTCP (-)群およびF-SDF群のヌープ硬さの経時的変化をTable 4に示した。ID periodにおけるヌープ硬さは、いずれの群においても乳酸緩衝液浸漬前(54.3~55.4)と比較して同液に浸漬28日で有意に低下した(29.5~31.0)。一方、EX periodにおける未処理群のヌープ硬さは、実験期間の経過に伴って低下したのに対して、F-ftTCP (+)、F-ftTCP (-)およびF-SDF群のヌープ硬さは有意に上昇し、F-SDF群で最も大きな値を示し、F-ftTCP (+)群、F-ftTCP (-)群および未処理群の順であった。

ftTCP (+)群およびftTCP (-)群で、超音波測定およびヌープ硬さ測定に供した試片について、それらの代表的なLSM像および三次元鳥瞰像をFig. 1に示した。いずれの群においても、EX period 1日では、象牙質表面に塗布された歯磨剤の残留物が観察されるとともに、比較的平坦な面を呈した。一方、EX period 28日では、O-ftTCP (+)群およびO-ftTCP (-)群で、象牙質表面にわずかではあるが析出物が認められ、粗糙面を呈していた。これに対して、F-ftTCP (+)群およびF-ftTCP (-)群では、象牙質表層が析出物で覆われ、比較的平坦な面として観察された。

超音波測定およびヌープ硬さ測定に供した試片と同一の条件で保管した試片について、それらの代表的な SEM 像を Fig. 2 に示した。乳酸緩衝液浸漬前では、象牙質表面がスマイヤ一層で覆われている像が観察された。これに対して、ID period 28 日では、象牙細管の開口とともに管間象牙質においてコラーゲン繊維の露出が観察された。O-fTCP (+) 群および O-fTCP (-) 群の EX period 28 日の SEM 像では、いずれの群においても象牙質表層に析出物が認められ、開口した象牙細管が狭窄する像が観察されたが、その程度は O-fTCP (+) 群で著明であった。一方、O-SDF 群の EX period 28 日の SEM 像では、開口した象牙細管内に析出物の沈着が観察され、O-fTCP (+) 群および O-fTCP (-) 群とは異なる像が観察された。F-fTCP (+) 群および F-fTCP (-) 群の EX period 28 日の SEM 像では、象牙質表層が析出物で覆われている像が観察され、O-fTCP (+) 群および O-fTCP (-) 群と比較して象牙細管の狭窄は著明であった。一方、F-SDF 群の EX period 28 日の SEM 像では、象牙質表層が析出物で覆われることで象牙細管が封鎖されるとともに、緻密な面を呈していた。

考 察

根面齲蝕は慢性の経過をたどることから、自覚症状がないまま歯頸部を囲むように進行し、発症部位によっては修復処置が困難となる場合もある。また、高齢者においては、全身的な問題などから歯科治療に制限を受けることも少なくない¹⁴⁾。そこで、根面齲蝕の対応としては、実質欠損を生じる以前の初期段階において、再石灰化療法を積極的に行うことで齲蝕の進行を予防することが重要となる¹⁵⁻¹⁷⁾。再石灰化療法としては、フッ化物の応用が一般的に行われており、日常生活におけるセルフケアとしてフッ化物含有歯磨剤が使

用されている^{12,18)}。最近では、フッ化物の歯質への取り込みを向上させることを目的として fTCP 配合の歯磨剤が市販されている¹⁹⁾。しかし、fTCP 配合歯磨剤の応用によって、表層が脱灰した象牙質にどのような影響が生じるかについては不明な点が多い。そこで、ウシ抜去歯の象牙質を用いて製作した根面齲蝕モデルに、fTCP 配合歯磨剤を応用した際の脱灰抑制ならびに再石灰化促進効果について検討した。さらに、fTCP 未配合歯磨剤とともに、高齢者における根面齲蝕の予防に効果があるとされている SDF²⁰⁻²²⁾を用いてその効果を比較した。

本研究では、各保管条件における根面齲蝕モデルの状態変化の観察に、超音波透過法を応用した。超音波透過法は、歯質中を伝播する送信波が、無機分量の異なる構造の境界で、その一部が反射することで超音波の減衰が生じ、これによって歯質の表層から深部にかけての構造変化を数値化することを可能としている²³⁾。さらに、この測定法は、同一試片を非破壊的に観察することが可能なところから、同一試片の経時的変化を把握するためのモダリティとして有益とされている²⁴⁾。

根面齲蝕モデル製作時 (ID period) における縦波音速は、いずれの群においても乳酸緩衝液浸漬前と比較して、ID period 28 日で有意に低下した。また、乳酸緩衝液浸漬前の試片の SEM 観察からは、試片表層がスマヤー層で覆われている像が観察されたのに対して、ID period 28 日では象牙細管の開口とともに管間象牙質においてコラーゲン繊維の露出が認められた。硬組織中を伝播する超音波の縦波音速の変化は、歯質の石灰化の程度と相関があり、無機成分の増減に伴って変化することが判明している²⁵⁻²⁷⁾。すなわち、ID period 28 日で試片の縦波音速が低下したことは、乳酸緩衝液への浸漬によって象牙質の無機成分

が減少したことを示すものであり、この結果は SEM 観察で認められた象牙質表層における形態的变化と一致するものであった。

未処理群の縦波音速は、EX period が経過するのに伴って低下した。一方、O-ftTCP (+) 群、O-ftTCP (-) 群および O-SDF 群の縦波音速は、EX period 7 日まで有意に上昇し、それ以降で緩やかに低下する傾向を示したのに対し、F-ftTCP (+) 群、F-ftTCP (-) 群および F-SDF 群の縦波音速は、14 日まで有意に上昇し、それ以降、音速の低下は認められなかった。また、EX period 7 日以降の縦波音速は、歯磨剤および SDF の塗布回数にかかわらず、SDF 群で最も大きな値を示し、ftTCP (+) 群、ftTCP (-) 群および未処理群の順であった。

ftTCP (+) 群および ftTCP (-) 群の、EX period 28 日の LSM 像および三次元鳥瞰像からは、O-ftTCP (+) 群および O-ftTCP (-) 群で、象牙質表面にわずかではあるものの析出物が観察され、粗雑な面を呈した。一方、F-ftTCP (+) 群および F-ftTCP (-) 群では、象牙質表面の全体が析出物で覆われ、これに伴って比較的平坦な面を呈した。このように、高濃度フッ化物配合歯磨剤の頻回使用は、歯質表面に析出物による緻密な層を形成し、この層が酸に対する抵抗層として機能することで脱灰抑制効果を発揮するとともに、脱灰象牙質の再石灰化を促進する可能性が示唆された。

ここで、F-ftTCP (+) 群、F-ftTCP (-) 群および F-SDF 群の EX period 28 日の SEM 像を比較すると、いずれの群においても、ID period において開口した象牙細管が、析出物によって狭窄あるいは封鎖されている像が観察された。とくに、象牙細管の封鎖程度は F-SDF 群で著明であり、次いで、F-ftTCP (+) 群および F-ftTCP (-) 群の順であった。ftTCP は、 Ca^{2+} および PO_4^{3-} を安定した状態で供給するとともに、歯磨剤に含有されたフッ化物と化合

反応することなく相乗的に作用することで、Fの取り込みを促進するとされている²⁸⁻³⁰⁾。

本実験の結果からも、fTCP (+) 群では、いずれの歯磨剤の適用条件においても fTCP (-) 群と比較して有意に大きな縦波音速を示したこと、さらに SEM 像においても象牙質表面での析出物が著明に観察されたことから、fTCP の配合によって再石灰化がより効果的に促進したものと考えられた。

ヌープ硬さは、未処理群で EX period の経過に伴って低下したのに対し、F-fTCP (+) 群、F-fTCP (-) 群および F-SDF 群では、EX period の経過に伴って上昇し、とくに、F-SDF 群のヌープ硬さは、いずれの測定時期においても、他の群と比較して有意に大きい値を示した。歯の微小硬さの変化は、歯のミネラル含有量と正の相関があることが報告されていることから³¹⁾、SDF の塗布によって不溶性のリン酸銀が象牙質表面に付着することで保護層を形成してこれが脱灰を抑制するとともに、フッ化カルシウムがレザボアとして機能することで十分なフッ化物が供給され、再石灰化が促進したものと考えられた^{32,33)}。一方、SDF の歯面への塗布は、歯質表面に黒褐色の変色を生じるころから、審美性に劣ることが知られている³⁴⁾。とくに、前歯部における SDF の使用に関しては、再石灰化効果が高いものの、審美性を考慮した慎重な臨床的判断が求められる。

以上のように、fTCP 配合歯磨剤の使用は、fTCP 未配合の歯磨剤と比較して象牙質の表層により多くの析出物を形成することで脱灰抑制効果を発揮するとともに、日常での頻回使用によって再石灰化の促進に有効であることが示された。さらに、審美的な観点からも歯質を変色することがないころから、fTCP 配合歯磨剤の頻回使用は、臨床的観点からも根面齲蝕の予防に有効であることが示唆された。

結 論

ウシ歯象牙質を用いて製作した根面齲蝕モデルに、fTCP 配合歯磨剤を適用した際の脱灰抑制ならびに再石灰化に及ぼす影響を検討した結果、以下の結論を得た。

1. 未処理群における縦波音速は、EX period の経過に伴って低下した。一方、O-fTCP (+) 群、O-fTCP (-) 群および O-SDF 群の縦波音速は、EX period 7 日まで上昇し、それ以降で低下したものの、F-fTCP (+) 群、F-fTCP (-) 群および F-SDF 群では上昇する傾向を示した。
2. 未処理群におけるヌープ硬さは、EX period の経過に伴って低下したのに対し、F-fTCP (+) 群、F-fTCP (-) 群および F-SDF 群では上昇する傾向を示した。
3. fTCP (+) 群および fTCP (-) 群の LSM 観察からは、象牙質表面を析出物が覆う像が観察されたが、その程度は F-fTCP (+) 群で著明であった。
4. fTCP (+) 群、fTCP (-) 群および SDF 群の SEM 観察からは、象牙質表面を析出物が覆う像が観察されたが、その程度は F-SDF 群で著明であり、次いで F-fTCP (+) 群、F-fTCP (-) 群の順であった。

文 献

- 1) Gavriilidou NN, Belibasakis GN, Belibasakis. Root caries: The intersection between periodontal disease and dental caries in the course of ageing. *Br Dent J* 2019; 227: 1063-1067.
- 2) Chan AKY, Tamrakar M, Jiang CM, Lo ECM, Leung KCM, Chu CH. A systematic review on caries status of older adults. *Int J Environ Res Public Health* 2021; 18: 10662.
- 3) Bignozzi I, Crea A, Capri D, Littarru C, Lajolo C, Tatakis DN. Root caries: A periodontal perspective. *J Periodontal Res* 2014; 49: 143-163.
- 4) Nyvad B, Fejerskov O. Assessing the stage of caries lesion activity on the basis of clinical and microbiological examination. *Community Dent Oral Epidemiol* 1997; 25: 69-75.
- 5) Ekstrand KR, Poulsen JE, Hede B, Twetman S, Qvist V, Ellwood RP. A randomized clinical trial of the anti-caries efficacy of 5,000 compared to 1,450 ppm fluoridated toothpaste on root caries lesions in elderly disabled nursing home residents. *Caries Res* 2013; 47: 391-398.
- 6) Yeung CA. Some beneficial effect on root caries from use of higher concentration fluoride toothpaste (5000 ppm F). *Evid Based Dent* 2014; 15: 8-9.
- 7) Chen H, Hill R, Baysan A. The effect of different concentrations of fluoride in toothpastes with or without bioactive glass on artificial root caries. *J Dent* 2023; 133: 104499.
- 8) Bezerra SJC, João-Souza SH, Aoki IV, Borges AB, Hara AT, Scaramucci T. Anti-erosive effect of solutions containing sodium fluoride, stannous chloride, and selected film-forming polymers. *Caries Res* 2019; 53: 305-313.
- 9) Scaramucci T, Borges AB, Lippert F, Frank NE, Hara AT. Sodium fluoride effect on erosion-

- abrasion under hyposalivatory simulating conditions. *Arch Oral Biol* 2013; 58: 1457-1463.
- 10) Viana ÍEL, Lopes RM, Silva FRO, Lima NB, Aranha ACC, Feitosa S, Scaramucci T. Novel fluoride and stannous -functionalized β -tricalcium phosphate nanoparticles for the management of dental erosion. *J Dent* 2020; 92: 103263.
 - 11) Ly TK, Kieu TQ, Huynh NCN, Ngo LTQ. Fluoride and functionalized β -tricalcium phosphate (fTCP) fluoride toothpaste affect the primary dentin caries surface: A comparison by estimation statistics. *Arch Orofac Sci* 2021; 16: 47-55.
 - 12) Ten Cate JM. Contemporary perspective on the use of fluoride products in caries prevention. *Br Dent J* 2013; 214: 161-167.
 - 13) Adair SM, Whitford GM, McKnight-Hanes C. Effect of artificial saliva and calcium on fluoride output of controlled-release devices. *Caries Res* 1994; 28: 28-34.
 - 14) Chan AKY, Tamrakar M, Jiang CM, Lo ECM, Leung KCM, Chu CH. Common medical and dental problems of older adults: A narrative review. *Geriatrics* 2021; 6: 76.
 - 15) Wierichs RJ, Meyer-Lueckel H. Systematic review on noninvasive treatment of root caries lesions. *J Dent Res* 2015; 94: 261-271.
 - 16) Al Qranei MS, Balhaddad AA, Melo MAS. The burden of root caries: Updated perspectives and advances on management strategies. *Gerodontology* 2021; 38: 136-153.
 - 17) Qutieshat A, Salem A, Aouididi R, Delatorre Bronzato J, Al-Waeli H, Abufadallah M, Shaikh S, Yassir Y, Mhanni A, Vasantavada P, Amer H. Perspective and practice of root caries management: A multicountry study - Part I. *J Conserv Dent* 2021; 24: 141-147.

- 18) León S, González K, Hugo FN, Gambetta-Tessini K, Giacaman RA. High fluoride dentifrice for preventing and arresting root caries in community-dwelling older adults: A randomized controlled clinical trial. *J Dent* 2019; 86: 110-117.
- 19) González-Cabezas C, Fernández CE. Recent advances in remineralization therapies for caries lesions. *Adv Dent Res* 2018; 29: 55-59.
- 20) Seifo N, Cassie H, Radford JR, Innes NPT. Silver diamine fluoride for managing carious lesions: An umbrella review. *BMC Oral Health* 2019; 19: 145.
- 21) Mitchell C, Gross AJ, Milgrom P, Mancl L, Prince DB. Silver diamine fluoride treatment of active root caries lesions in older adults: A case series. *J Dent* 2021; 105: 103561.
- 22) Hiraishi N, Sayed M, Takahashi M, Nikaido T, Tagami J. Clinical and primary evidence of silver diamine fluoride on root caries management. *Jpn Dent Sci Rev* 2022; 58: 1-8.
- 23) Rodriguez-Sendra J, Torres I, Jimenez N, Sauro S, Camarena F. Ultrasonic monitoring of dentin demineralization. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 2021; 68: 570-578.
- 24) Shoji M, Kurokawa H, Takahashi N, Sugimura R, Takamizawa T, Iwase K, Katsuki S, Miyazaki M. Evaluation of the effect of a glass ionomer cement containing fluoro-zinc-silicate glass on dentin remineralization using the ultrasonic pulse-echo method. *Dent Mater J* 2022; 41: 560-566.
- 25) Peck SD, Rowe JM, Briggs GA. Studies on sound and carious enamel with the quantitative acoustic microscope. *J Dent Res* 1989; 68: 107-112.
- 26) Yamaguchi K, Miyazaki M, Takamizawa T, Inage H, Kurokawa H. Ultrasonic determination of the effect of casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate paste on the demineralization

- of bovine dentin. *Caries Res* 2007; 41: 204-207.
- 27) Murayama R, Furuichi T, Yokokawa M, Takahashi F, Kawamoto R, Takamizawa T, Kurokawa H, Miyazaki M. Ultrasonic investigation of the effect of S-PRG filler-containing coating material on bovine tooth demineralization. *Dent Mater J* 2012; 31: 954-959.
- 28) Karlinsey RL, Mackey AC, Walker ER, Frederick KE. Surfactant-modified β -TCP: Structure, properties, and in vitro remineralization of subsurface enamel lesions. *J Mater Sci Mater Med* 2010; 21: 2009-2020.
- 29) Karlinsey RL, Pfarrer AM. Fluoride plus functionalized β -TCP: A promising combination for robust remineralization. *Adv Dent Res* 2012; 24: 48-52.
- 30) Hamba H, Nakamura K, Nikaido T, Tagami J, Muramatsu T. Remineralization of enamel subsurface lesions using toothpaste containing tricalcium phosphate and fluoride: An in vitro μ CT analysis. *BMC Oral Health* 2020; 20: 292.
- 31) Chu CH, Lo EC. Microhardness of dentine in primary teeth after topical fluoride applications. *J Dent* 2008; 36: 387-391.
- 32) Shah S, Bhaskar V, Venkatraghavan K, Choudhary P, Ganesh M., Trivedi K. Silver diamine fluoride: A review and current applications. *J Adv Oral Res* 2014; 5: 25-35.
- 33) Zhao IS, Gao SS, Hiraishi N, Burrow MF, Duangthip D, Mei ML, Lo EC, Chu CH. Mechanisms of silver diamine fluoride on arresting caries: A literature review. *Int Dent J* 2018; 68: 67-76.
- 34) Li R, Lo ECM, Liu BY, Wong MCM, Chu CH. Randomized clinical trial on preventing root caries among community-dwelling elders. *JDR Clin Trans Res* 2017; 2: 66-72.

表 および 図

Table 1 Material used and their main components

Dentifrice and solution	Code	Main component	Manufacturer	Lot No.
Clinpro toothpaste 1450	fTCP (+)	1,450 ppm sodium fluoride, fTCP, CPC, IPMP, dipotassium glycyrrhizinate sorbitol, concentrated glycerine, hydrated silica, tricalcium phosphate, carboxymethyl cellulose sodium, polyoxyethylene hydrogenated castor oil, sodium lauryl sulphate, titanium dioxide, sodium saccharin	3M Japan	2102BA
Check-up standard	fTCP (-)	1,450 ppm sodium fluoride sorbitol, propylene glycol xylitol, sodium saccharin hydrated silica, sodium polyacrylate, sodium lauryl sulphate, xanthan gum, titanium dioxide, paraben	Lion Dental Products	180927A1
Saforide	SDF	38% SDF	Toyo Seiyaku Kasei	808RA

CPC: cetylpyridinium chloride; fTCP: functionalized tri-calcium phosphate; IPMP: isopropyl methylphenol
SDF: silver diamine fluoride

Table 2 Influence of one-off application of fTCP (+) , fTCP (-) and SDF on ultrasonic velocity of bovine dentin

Group	ID period		EX period			
	0-day	28-day	7-day	14-day	21-day	28-day
Non-surface treated	3,938 (124) aA	3,000 (61) bA	2,871 (66) cA	2,742 (49) dA	2,708 (49) dA	2,684 (49) dA
O-fTCP (+)	3,952 (53) aA	3,002 (129) bA	3,349 (120) cB	3,312 (137) cB	3,265 (118) cB	3,219 (118) cB
O-fTCP (-)	3,816 (170) aA	2,989 (59) bA	3,160 (70) cC	3,137 (55) cC	3,109 (47) cC	3,054 (69) bcC
O-SDF	3,828 (167) aA	3,034 (110) bA	3,816 (44) aD	3,719 (73) acD	3,678 (61) cD	3,593 (60) cD

unit: m/s, n = 10, values in parenthesis indicate standard deviations.

ID period: initial demineralization period, EX period: experimental period

Within groups, means with the same lowercase letter, are not significantly different.

Between groups at the same periods, means with the same uppercase letter, are not significantly different ($p > 0.05$).

Table 3 Influence of frequent application of fTCP (+), fTCP (-) and SDF on ultrasonic velocity of bovine dentin

Group	ID period		EX period			
	0-day	28-day	7-day	14-day	21-day	28-day
Non-surface treated	3,938 (124) aA	3,000 (61) bA	2,871 (66) cA	2,742 (49) dA	2,708 (49) dA	2,684 (49) dA
F-fTCP (+)	3,958 (161) aA	3,037 (137) bA	3,416 (60) cB	3,631 (71) dB	3,704 (66) dB	3,731 (65) dB
F-fTCP (-)	3,815 (150) aA	3,034 (91) bA	3,209 (49) cC	3,370 (91) dC	3,410 (84) dC	3,437 (94) dC
F-SDF	3,898 (71) aA	3,038 (58) bA	3,881 (111) aD	4,080 (116) cD	4,100 (108) cD	4,121 (102) cD

unit: m/s, n = 10, values in parenthesis indicate standard deviations.

ID period: initial demineralization period, EX period: experimental period

Within groups, means with the same lowercase letter, are not significantly different.

Between groups at the same periods, means with the same uppercase letter, are not significantly different ($p > 0.05$).

Table 4 Influence of frequent application of fTCP (+), fTCP (-) and SDF on Knoop hardness number of bovine dentin

Group	ID period		EX period			
	0-day	28-day	7-day	14-day	21-day	28-day
Non-surface treated	55.3 (2.1) aA	29.5 (1.9) bA	28.9 (2.3) bcA	27.1 (1.8) bcA	26.6 (1.5) cA	26.6 (1.5) cA
F-fTCP (+)	54.3 (2.3) aA	29.5 (2.5) bA	35.6 (2.5) cB	41.8 (2.4) dB	42.3 (1.0) dB	43.3 (1.0) dB
F-fTCP (-)	55.4 (2.0) aA	30.7 (2.3) bA	36.1 (0.7) cB	38.2 (2.2) cC	40.7 (1.6) dB	42.9 (2.1) dB
F-SDF	54.9 (2.8) aA	31.0 (3.3) bA	46.4 (1.2) cC	47.3 (2.8) cD	47.4 (3.9) cC	47.4 (2.2) cC

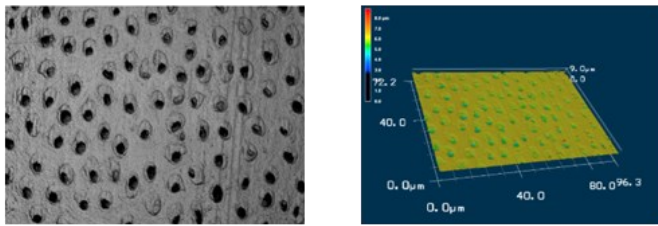
n = 10, values in parenthesis indicate standard deviations.

ID period: initial demineralization period, EX period: experimental period

Within groups, means with the same lowercase letter, are not significantly different.

Between groups at the same periods, means with the same uppercase letter, are not significantly different ($p > 0.05$).

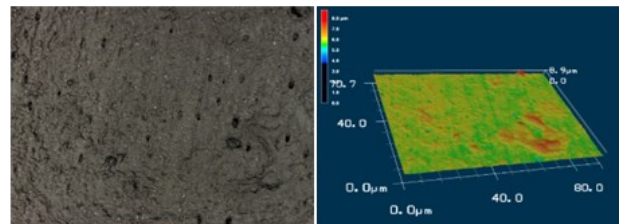
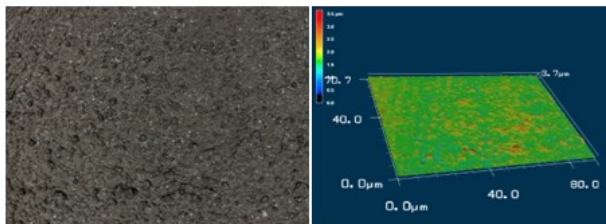
ID period 28-day



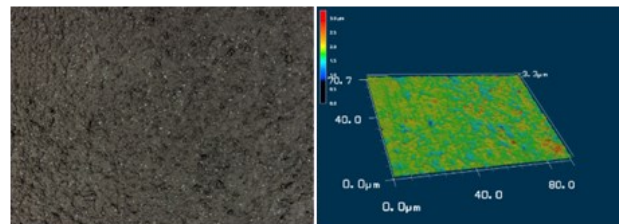
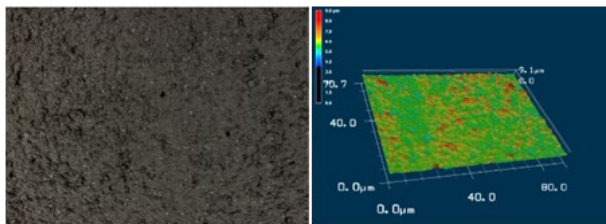
EX period 1-day

EX period 28-day

O-fTCP (+)



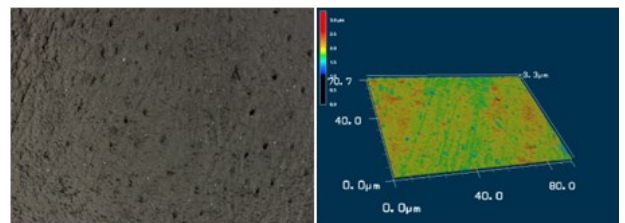
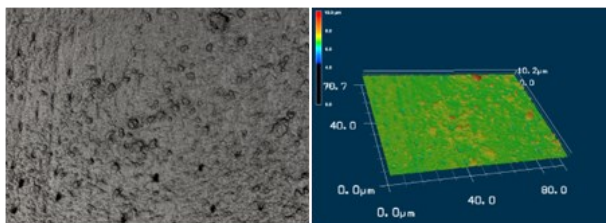
F-fTCP (+)



EX period 1-day

EX period 28-day

O-fTCP (-)



F-fTCP (-)

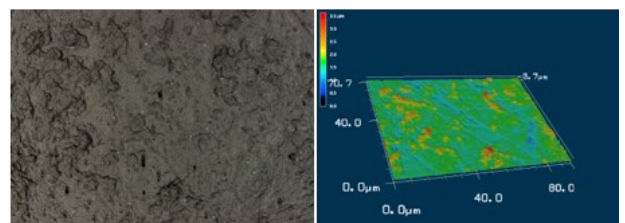
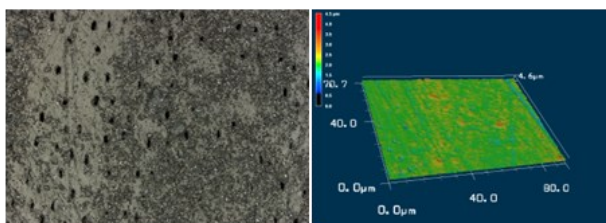


Fig. 1 Representative LSM images of the dentin surface of each group. During the initial demineralization period, the smear layer was removed, and dentin tubules were clearly observed. At EX period 28-day, the morphological changes on the dentin surface were more pronounced in the fTCP (+) group than in the fTCP (-) group; the dentinal tubules were completely occluded in the fTCP (+) group, and the dentin surface presented the smooth surface.

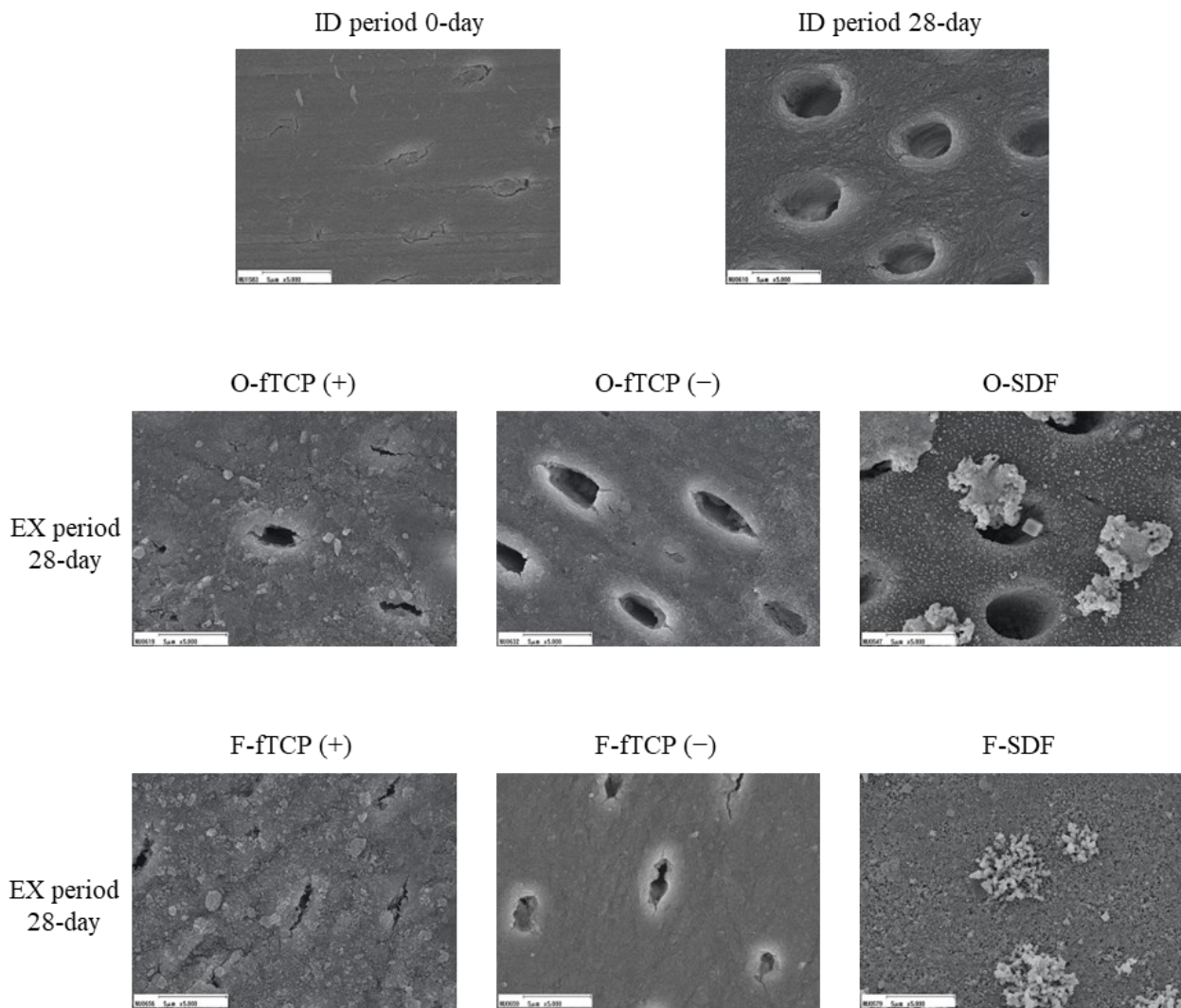


Fig. 2 Representative SEM images of the dentin surface of each group (5,000 \times magnification). The initial treatment removed the smear layer on the specimen surface, and dentinal tubule openings were observed. Morphological changes on the dentin surfaces were noticeably observed at EX period 28-day in the frequent treatment groups compared with the once-off treatment groups. The dentinal tubules were totally occluded, and some precipitates were observed in the frequently treated SDF group.