優秀発表賞受賞論文

CO₂ レーザー照射とグラスアイオノマーセメントによる象牙質の再石灰化

飯 嶋 雅 弘¹⁾ 伊 藤 修 一²⁾ 川 村 尚 彦¹⁾
斎 藤 隆 史²⁾ 溝 口 到¹⁾

¹⁾ 北海道医療大学歯学部口腔構造・機能発育学系歯科矯正学分野
²⁾ 北海道医療大学歯学部口腔機能修復・再建学系う蝕制御治療学分野
(受付：2016 年 9 月 5 日, 受理：2016 年 12 月 9 日)

Dentin Remineralization by CO₂ Laser Irradiation Combined with Glass Ionomer Cement

Masahiro IJIMA¹⁾, Shuichi ITO²⁾, Naohiko KAWAMURA¹⁾,
Takashi SAITO²⁾ and Itaru MIZOGUCHI¹⁾

¹⁾ Division of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, Department of Oral Growth and Development,
School of Dentistry, Health Sciences University of Hokkaido
²⁾ Division of Clinical Cariology and Endodontology, Department of Oral Rehabilitation,
School of Dentistry, Health Sciences University of Hokkaido

(Received: September 5, 2016, Accepted for Publication: December 9, 2016)

Abstract: We investigated the effects of CO₂ laser irradiation combined with immersion in a solution containing fluoride ions on the remineralization of etched dentin surface. Human premolars were divided randomly into four groups (1, control: NL; 2, immersion in fluoride-ion-containing solution: NLF; 3, laser irradiation: L; 4, laser irradiation plus immersion in fluoride-ion-containing solution: LF). Embedded human dentin blocks were etched with phosphoric acid, fixed on a specimen stage, and then a CO₂ laser (10.6- μ m wavelength) was applied (15 W/cm²), followed by immersion in fluoride-ion-containing solution. Nanoindentation testing was carried out before and after CO₂ laser irradiation and during the immersion period, and then the dentin surfaces were observed by scanning electron microscopy. Phosphoric acid etching markedly decreased the mechanical properties (hardness and elastic modulus) of dentin surfaces. The mechanical properties of the etched dentin specimens subjected to laser irradiation plus immersion in fluoride-ion-containing solution recovered significantly during the immersion period compared to those of the other specimens. After immersion for 1 month in the fluoride-ion-containing solutions (NLF, LF), the wide-open dentinal tubules caused by acid etching were partly filled by a remineralized layer. In conclusion, CO₂ laser irradiation with low output plus immersion in fluoride-ion-containing solution may enhance the remineralizing ability of etched dentin surface.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 27 : 101 ~ 107, 2016 Reprint requests to Dr. IJIMA)

Key words = CO₂ laser, Dentin Mineralization, Fluoride ions

キーワード = CO₂ レーザー, 象牙質再石灰化, フッ化物イオン

緒 言

FDI (国際歯科連盟) は, 2000 年に Minimal Intervention (MI) の概念として, (1) 口腔内細菌層の改善, (2) 患者教育, (3) エナメル質および象牙質のう蝕でまだう窩を形成していないう蝕の再石灰化, (4) う窩を形成したう蝕への再小の侵襲, (5) 欠損のある修復物の補修の 5 つを提唱した¹⁾。従来からの単純に「う蝕の切削」+「填塞」で

はなく, 患者教育, 予防をも含めた切削介入時期の考慮, 再石灰化療法の導入, 切削介入するのであれば, 窩洞の大きさ, う蝕をどこまで除去するかなどが重要となってくる。このような中で, う蝕治療において, 2008 年度より Er:YAG レーザーを用いた切削治療が保険導入され, 臨床に用いられている。

国民の歯科保健状況を把握する調査の一つとして, 歯科疾患実態調査がある²⁾。平成 23 年度の歯科疾患実態調査

によると、1人平均現在歯数は、65～69歳で21.2本、80～84歳で12.2本である。現在歯におけるう蝕有病者率は、若年者では年々減少している。1987年と2011年のデータを比較すると、25～44歳の年齢層ではほぼ横ばいであるものの、10～14歳の年齢層においては90.4%から34.7%と55.7%も減少している。一方、45歳以上の年齢層では、その下の年齢層とは対照的に上昇しており、75歳から84歳の年齢層では、46.9%から84.1%へと37.2%も上昇している。65歳以上の年代においても上昇率は著明である。若年層においてはう蝕の罹患率が低下しており、高齢者においてはう蝕の罹患率が上昇していることを示している。このような社会変化の中で、MIの概念の中での「う蝕予防」や「再石灰化」という治療法が重要になってくる。

これまで、エナメル質の脱灰抑制のためのCO₂レーザー照射に関する研究が活発に行われてきており³⁻⁸⁾、特にレーザーの波長、パルス幅およびパルスエネルギー等の照射条件や^{5,8)}、照射時のエナメル質における温度変化⁶⁾、エナメル質の組成および結晶構造に及ぼすレーザー照射の影響^{6,7)}について、検討されてきた。Featherstoneら⁵⁾は、レーザー照射によりエナメル質の温度が900℃以上に達した場合、炭酸塩の消失、表層部の溶解および再結晶化が生じ、エナメル質内の反応性が低下することを報告した。一方、Hsuら⁷⁾は、CO₂レーザー照射による400℃までのエナメル質の温度上昇が、エナメル質中の有機質分解とともに結晶内および結晶間のスペースを閉塞することによりイオンの拡散を制御し、エナメル質の脱灰を抑制することを報告した。

フッ化物の適用が、エナメル質のハイドロキシアパタイトをフルオロアパタイトに変化させることにより耐酸性を向上させることが知られており⁹⁻¹¹⁾、フッ化物を含有する歯磨剤、マウスリンス、シーラント材料およびコンポジットレジン等が幅広く臨床に活用されている¹²⁻¹⁴⁾。フッ化物とCO₂レーザー照射を併用したエナメル質の脱灰抑制についての研究結果も報告されている¹⁵⁻¹⁷⁾。象牙質に対するCO₂レーザー照射では、その脱灰抑制効果については統一見解が得られていない^{17,18)}。一方、象牙質に対してフッ化物とCO₂レーザー照射を併用した場合は、ある程度の脱灰抑制効果があることが報告されている^{19,20)}。しかしながら、その科学的根拠は十分に検討がされていない。

本研究の目的は、CO₂レーザー照射とフッ化物の併用効果が象牙質の機械的特性と再石灰化に及ぼす影響について詳細に調べることである。

対象と方法

1. 試料の準備、CO₂レーザー照射およびフッ化物イオン含有セメント溶出液中への浸漬

北海道医療大学倫理審査委員会の承認のもと (No. 64)、

矯正治療により抜去された健全小白歯33本を使用した。抜去小白歯の選択においては、実体顕微鏡 (SMZ 1500, ニコン, 東京) を用いて頬側面を観察し、脱灰部分や亀裂がないことを確認した。

抜去歯は、ダイヤモンドディスク (Isomet, Buehler, Lake Bluff, Illinois, USA) を用いて根を切断し、歯冠を近心と遠心部分に分割してブロック状に切り出し、エポキシ樹脂 (Epofix, Struers, Copenhagen, Denmark) に包埋した。樹脂が硬化した後に (24時間後)、耐水研磨紙 (1200-grit) を用いて包埋した歯の象牙質が露出するまで研削し、ダイヤモンドサスペンション (粒径0.25μm) を用いて鏡面に研磨した。露出した象牙質のサイズは、およそ3mm×3mmであった。本試料を用いてナノインデンテーション試験を実施した。

試料を (1) レーザー未照射群 (NL グループ)、(2) レーザー未照射+フッ化物イオン含有溶液浸漬群 (NLF グループ)、(3) レーザー照射群 (L グループ)、(4) レーザー照射+フッ化物イオン含有溶液浸漬群 (LF グループ) の4群に分類した。

フッ化物イオン含有溶液は、グラスアイオノマーセメント (Fuji IX GP, ジーシー, 東京) から生成した。Fuji IX GPの成分としては、粉末がフルオロアルミシリケートガラスとポリアクリル酸を含有し、液はポリアクリル酸、蒸留水、および多塩基性カルボン酸を含んでいる (添付文章参照)。セメントをメーカーの指示通りに練和後、ゴム棒に填入し、ガラス練板にて圧接して硬化後に15mm×15mm×1mmのサイズにセメントディスク試料の調製を行った。その後、超純水30mlに37℃で2週間浸漬を行い、セメントディスク試料を取りだしフッ化物イオン含有溶液とした。フッ化物イオン含有溶液の元素分析について、プラズマ発光分析 (ICP-AES: ICPS-8000, 島津製作所, 京都) とフッ化物イオン電極 (Model 720A, Orion Research, Beverly, Massachusetts, USA) を用いて分析を行った。その結果、溶液中から14.7ppmのフッ素イオン、0.52ppmのカルシウムイオン、0.29ppmのアルミニウムイオン、0.43ppmのケイ素が検出された。

各試料の表面は、35%リン酸ゲル (Transbond XT Etching Gel, 3M Unitek, Monrovia, California, USA) を用いてエッチング処理を15秒間行い、スリーウェイシリンジで10秒間水洗し、乾燥をした。LグループとLFグループについては、波長10.6μm、パルス幅10μs、ビーム径2.03mmのCO₂レーザー (Nanolaser GL-III, ジーシー, 東京) を頬側象牙質表面から10mm離れた位置から出力0.5W (15W/cm²) で5秒間照射した。NLグループとLグループの試料は10ml超純水中に、NLFグループとLFグループの試料は、10mlのフッ化物イオン含有溶液中に1ヶ月間浸漬した。浸漬溶液の温度は37℃に保ち、1週間

ごとに新しいものに交換した。

2. ナノインデンテーション試験を用いた機械的特性の解析

エッチング前後と浸漬中の試料について、ナノインデンテーションによる機械的特性の解析を行った ($n = 15$)。ナノインデンテーション試験には、超微小押し込み硬さ試験機 (ENT-1100a, エリオニクス社, 東京) を使用し、最大押し込み荷重 10mN と 100mN の 2 条件で、28℃の温度下でバーコビッチ圧子を用いて計測を行った。硬さと弾性係数の算出は、装置付属のソフトウェアを用いて計算した。弾性係数については、最大試験荷重の 95%～70% のリニアフィッティング法により求めた (ISO Standard 14577)。

3. 走査電子顕微鏡を用いた試料の観察

ナノインデンテーション試験後の浸漬試料は、乾燥後に金蒸着を行い、走査電子顕微鏡 (SSX-550, 島津製作所, 京都) を用いて観察した。比較のために、未浸漬の試料とエッチングのみを施した試料についても観察を行った。

4. 統計処理

ナノインデンテーション試験の結果は、統計解析ソフト

ウェア (PASW software ver. 18.0J for Windows, IBM, Armonk, USA) を用いて比較した。硬さと弾性係数の平均値の比較について、二元配置分散分析により統計処理を行った ($P < 0.05$)。各独立要因 (試料グループ, 時間) については、一元配置分散分析と Tukey 検定により比較を行った ($P < 0.05$)。

結 果

二元配置分散分析の結果、10mN と 100mN の押し込み荷重により得られた硬さ値と弾性係数は、試料グループ (浸漬溶液の違いとレーザー照射の有無) と時間 (エッチングの前後, レーザー照射, フッ化物溶液中への浸漬) 因子ともに有意差が認められ、10mN の押し込み荷重により得られた硬さ値 ($P = 0.438$) を除き、両因子間における交互作用が認められた。

図 1 にナノインデンテーション試験により得られた硬さ値と弾性係数の変化, 表 1～4 にはその統計的な比較結果を示す。全てのグループにおいて、エッチング処理により象牙質の機械的特性 (硬さ値と弾性係数) は著しく低下し

図 1 ナノインデンテーション試験による機械的特性の解析結果

上段：平均硬さ値の推移 (押し込み荷重 10, 100mN)。

下段：平均弾性係数の推移 (押し込み荷重 10, 100mN)。

NL, レーザー未照射群; NLF, レーザー未照射+フッ化物イオン含有溶液浸漬群; L, レーザー照射群; LF, レーザー照射+フッ化物イオン含有溶液浸漬群。BE, エッチング前; E, エッチング後; LI, レーザー照射後; 1day, 浸漬 1 日経過後; 1W, 浸漬 1 週間経過後; 2W, 浸漬 2 週間経過後; 1M, 浸漬 1 ヶ月経過後。

表 1 象牙質表面の平均硬さ (GPa)

グループ 1: 押し込み荷重 10mN

	エッチング後		レーザー照射後		浸漬 1 日		浸漬 1 週間		浸漬 2 週間		浸漬 1 か月		p value
	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	
NL	0.31	0.13			0.31	0.11	0.30	0.08	0.29	0.10	0.31	0.03	0.969
NLF	0.30	0.09			0.32	0.08	0.33	0.10	0.35	0.07	0.33	0.04	0.614
L	0.31	0.06	0.29	0.16	0.30	0.04	0.30	0.09	0.30	0.10	0.29	0.04	0.989
LF	0.30	0.12	0.32	0.13	0.31	0.11	0.34	0.17	0.37	0.15	0.41	0.05	0.082

グループ 2: 押し込み荷重 100mN

	エッチング後		レーザー照射後		浸漬 1 日		浸漬 1 週間		浸漬 2 週間		浸漬 1 か月		p value
	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	
NL	0.49	0.12			0.50	0.08	0.50	0.08	0.49	0.07	0.51	0.03	1.000
NLF	0.49 ^a	0.14			0.49 ^{a, b}	0.09	0.52 ^{a, b}	0.07	0.53 ^c	0.05	0.51 ^{a, b}	0.05	0.013
L	0.50	0.11	0.49	0.17	0.49	0.05	0.48	0.06	0.49	0.06	0.49	0.04	0.966
LF	0.50 ^a	0.12	0.50 ^a	0.23	0.51 ^{a, b}	0.08	0.59 ^{b, c}	0.11	0.60 ^c	0.12	0.62 ^c	0.06	0.000

異符号間は 5%水準で有意差を示す

表 2 象牙質表面の平均弾性係数 (GPa)

グループ 1: 押し込み荷重 10mN

	エッチング後		レーザー照射後		浸漬 1 日		浸漬 1 週間		浸漬 2 週間		浸漬 1 か月		p value
	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	
NL	12.33	3.65			12.31	3.28	12.45	3.13	12.37	2.47	12.21	2.55	0.986
NLF	12.72	2.45			13.07	2.28	14.14	3.15	15.29	2.33	15.25	2.12	0.573
L	12.28	2.11	12.34	2.46	12.70	2.64	12.94	2.62	12.37	1.70	12.47	1.97	0.999
LF	12.59 ^a	2.97	12.15 ^c	3.72	14.46 ^{a, b}	4.09	16.81 ^{a, b, c}	4.15	18.24 ^{a, b, c}	2.74	19.20 ^{b, c}	1.16	0.000

グループ 2: 押し込み荷重 100mN

	エッチング後		レーザー照射後		浸漬 1 日		浸漬 1 週間		浸漬 2 週間		浸漬 1 か月		p value
	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	
NL	18.11	1.35			18.44	1.27	18.11	0.67	18.07	1.07	18.30	1.09	0.867
NLF	17.94	0.91			17.82	1.28	17.59	1.38	17.97	1.45	17.81	0.76	0.919
L	17.99	1.45	17.66	3.81	17.79	1.23	18.58	1.34	18.63	1.40	18.33	1.20	0.648
LF	17.91 ^a	1.81	17.75 ^a	3.79	18.88 ^{a, b}	2.48	19.18 ^{a, b}	1.33	20.73 ^b	2.03	21.02 ^b	1.54	0.000

異符号間は 5%水準で有意差を示す

た。フッ化物イオン含有溶液中に浸漬した試料の機械的特性は、時間経過に伴い増加し、CO₂ レーザーを照射した LF グループでは、統計的に有意な増加を示した。LF グループでは、1 ヶ月間のフッ化物イオン含有溶液への浸漬により、硬さが約 24 ~ 37%、弾性係数が約 17 ~ 53% の増加を示し、これらの値は NLF グループ（硬さが約 4 ~ 10%、弾性係数が 0 ~ 20% の増加）と比較して有意に高かった。超純水中に浸漬した試料（L グループ、NL グループ）では、浸漬時間の経過に伴う機械的特性の顕著な変化は認められなかった。

図 2 に象牙質表面の走査電子顕微鏡像を示す。エッチン

グにより、象牙細管の拡大が認められた。フッ化物イオン含有溶液に浸漬した試料（NLF グループ、LF グループ）では、1 ヶ月間の浸漬によりエッチングにより開口した象牙細管が再石灰化様構造物により塞がれているのが観察された。一方、NL グループと L グループでは、表層に再石灰化様構造物が認められたものの、象牙細管は観察された。

考 察

近年、再石灰化療法が注目を浴びている。しかしながら、どのような手法を用いて再石灰化療法を行っていくかを判断するのは難しい。中嶋ら²¹⁾は、どのような方法で診

表 3 象牙質表面の平均硬さ (GPa)

グループ 1: 押し込み荷重 10mN

	NL		NLF		L		LF		<i>p</i> value
	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	
エッチング前	1.10	0.10	1.04	0.12	1.12	0.09	1.09	0.13	0.258
エッチング後	0.31	0.13	0.30	0.09	0.31	0.06	0.30	0.12	0.986
レーザー照射後					0.29 ^a	0.16	0.32 ^b	0.13	0.063
浸漬 1 日	0.31	0.11	0.32	0.08	0.30	0.04	0.31	0.11	0.938
浸漬 1 週間	0.30	0.08	0.33	0.10	0.30	0.09	0.34	0.17	0.740
浸漬 2 週間	0.29	0.10	0.35	0.07	0.30	0.10	0.37	0.15	0.150
浸漬 1 か月	0.31 ^{a, b}	0.03	0.33 ^a	0.04	0.29 ^b	0.04	0.41 ^c	0.05	0.000

グループ 2: 押し込み荷重 100mN

	NL		NLF		L		LF		<i>p</i> value
	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	
エッチング前	1.01	0.08	1.01	0.08	1.01	0.05	1.00	0.07	0.997
エッチング後	0.49	0.12	0.49	0.14	0.50	0.11	0.50	0.12	0.993
レーザー照射後					0.49	0.17	0.50	0.23	0.003
浸漬 1 日	0.50	0.08	0.49	0.09	0.49	0.05	0.51	0.08	0.918
浸漬 1 週間	0.50 ^a	0.08	0.52 ^{a, b}	0.07	0.48 ^a	0.06	0.59 ^b	0.11	0.007
浸漬 2 週間	0.49 ^a	0.07	0.53 ^{a, b}	0.05	0.49 ^a	0.06	0.60 ^b	0.12	0.001
浸漬 1 か月	0.51 ^a	0.03	0.51 ^a	0.05	0.49 ^a	0.04	0.62 ^b	0.06	0.000

異符号間には 5% 水準で有意差を示す

表 4 象牙質表面の平均弾性係数 (GPa)

グループ 1: 押し込み荷重 10mN

	NL		NLF		L		LF		<i>p</i> value
	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	
エッチング前	24.50	1.08	24.31	1.99	24.87	1.69	24.19	1.52	0.675
エッチング後	12.33	3.65	12.72	2.45	12.28	2.11	12.59	2.97	0.968
レーザー照射後					12.34	2.46	12.15	3.72	0.870
浸漬 1 日	12.31	3.28	13.07	2.28	12.70	2.64	14.46	4.09	0.279
浸漬 1 週間	12.45 ^a	3.13	14.14 ^{a, b}	3.15	12.94 ^a	2.62	16.81 ^b	4.15	0.003
浸漬 2 週間	12.37 ^a	2.47	15.29 ^b	2.33	12.37 ^a	1.70	18.24 ^c	2.74	0.000
浸漬 1 か月	12.21 ^a	2.55	15.25 ^b	2.12	12.47 ^a	1.97	19.20 ^c	1.16	0.000

グループ 2: 押し込み荷重 100mN

	NL		NLF		L		LF		<i>p</i> value
	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	平均値	SD	
エッチング前	24.52	1.00	24.20	1.28	24.72	1.54	24.49	0.61	0.675
エッチング後	18.11	1.35	17.94	0.91	17.99	1.45	17.91	1.81	0.980
レーザー照射後					17.66	3.81	17.75	3.79	0.950
浸漬 1 日	18.44	1.27	17.82	1.28	17.79	1.23	18.88	2.48	0.214
浸漬 1 週間	18.11 ^{a, b}	0.67	17.59 ^a	1.38	18.58 ^{a, b}	1.34	19.18 ^b	1.33	0.006
浸漬 2 週間	18.07 ^a	1.07	17.97 ^a	1.45	18.63 ^a	1.40	20.73 ^c	2.03	0.000
浸漬 1 か月	18.30 ^a	1.09	17.81 ^a	0.76	18.33 ^a	1.20	21.02 ^c	1.54	0.000

異符号間には 5% 水準で有意差を示す

図 2 象牙質表面の走査電子顕微鏡像 (右下のスケールバーは全て5 μ m)
Control, エッチング前; E, エッチング後; NL, レーザー未照射群; NLF, レーザー未照射+フッ化物イオン含有溶液浸漬群; L, レーザー照射群; LF, レーザー照射+フッ化物イオン含有溶液浸漬群。

査し、どのような結果が得られたら有効であるのかの判断基準を検討したが、これらの判断は、病変の部位、侵襲程度、および患者の背景によって異なり、明確な判断基準の設定は、かなり難しいと述べている。一方で、超高齢社会を迎えて、根面う蝕が急増している²⁾。「う蝕治療ガイドライン」においても、根面う蝕の再石灰化治療の有効性についてのエビデンスが示され、積極的な適用が推奨されている²²⁾。今里²³⁾は、根面う蝕に対して、フッ化物の応用がその再石灰化に有効であることを示したが、初期エナメル質う蝕に対するフッ化物の適用ほどは、広く導入されておらず、再石灰化促進は、全てのライフステージにおいて有用であることを理解し、活用すべきと報告している。そこで、本研究においては、象牙質にCO₂レーザー照射することにより、グラスアイオノマーセメントより溶出したフッ化物イオン含有溶液を用いて、象牙質の再石灰化に与える影響について評価を行った。

これまで、エナメル質の脱灰抑制におけるCO₂レーザー照射に関する研究が多数報告されてきたが³⁻⁸⁾、CO₂レーザー照射の象牙質脱灰抑制効果に関する研究報告はまだ少ない。象牙質において、CO₂レーザー単独照射による脱灰抑制効果については、統一見解が得られていないものの^{17,18)}、フッ化物とCO₂レーザー照射を併用した場合、ある程度の脱灰抑制効果があることが報告されている^{19,20)}。象牙質の脱灰に伴う物理的特性の劣化を理解することは、臨床的に重要である。本研究では、脱灰象牙質の再石灰化挙動を調べる実験系において一般的に用いられる乳酸系溶液やポリアクリル酸溶液よりも強い脱灰力を発揮す

るリン酸溶液を使用し、強い脱灰が施された象牙質試料を作製し、CO₂レーザー照射とグラスアイオノマーセメントから得られたフッ化物含有溶出溶液中への浸漬における、象牙質の機械的特性(硬さ、弾性係数)の変化を調べた。

脱灰した歯の機械的特性を定量的に評価する方法としては、歯の横断試料に対するヌープ硬さ試験が一般的であり、エナメル質の微小部硬さとミネラル量の間に強い相関($R^2=0.84-0.92$)を示すことが、マイクロラジオグラフィを用いたう蝕歯の研究で報告されている^{24,25)}。ヌープ硬さ試験における圧痕のサイズは、象牙細管等の構造と比較すると数倍から数十倍に相当し、その大きな圧痕形成は深部へ影響を及ぼすことが考えられる。一方、ナノインデンテーション試験では、ナノメートルからマイクロメートルサイズの微小な圧痕を利用することに加え、硬さと弾性係数の同時計測を可能とする^{28,29)}。本研究では、モニター上で象牙細管の位置を避けて計測を行った。また、2種類の押し込み荷重を用いることにより異なる層(深さ)の機械的特性を調べた。その分析深さは、10mNの押し込み荷重では約0.5 μ m、0.5mNでは約3 μ mであった。いずれの分析深さにおいてもリン酸エッチングにより機械的特性は著しく低下した。フッ化物イオン含有溶液中に浸漬した試料の機械的特性は、時間経過に伴い増加し、CO₂レーザーをしたLFグループでは、統計的に有意な増加を示した。増加率については、硬さが約4~37%、弾性係数が約0~53%であった。CO₂レーザー照射とフッ化物イオン含有溶液浸漬を併用したグループLFより得られた硬さの値は、レーザー照射を行っていないグループNL、

レーザー照射を行わずにその後にフッ化物イオン含有溶液へ浸漬したグループ NLF より得られた値より高い値を示した。弾性係数においても、LF は NL と NLF よりも高い値を示した。本研究においてグラスアイオノマーセメントの溶出液により、象牙質表面に残った微量のフッ化物が、レーザー照射により象牙質の結晶構造を改質するのに寄与した可能性が考えられた³⁰⁾。

弾性係数が硬さよりも大きな増加を示した理由として、ナノインデンテーション試験の原理として、硬さは圧子の押し込み深さから計算されるのに対し、弾性係数は押し込み徐荷曲線のリニアフィッティングから求めるので、分析層（深さ方向）における構造の不均一に対して、弾性係数がより影響を受けたことが考えられた。しかしながら、本仮説の検証には、さらなる研究が必要である。また、弱酸を利用した脱灰試料を用いた実験やフッ化物適用後の CO₂ レーザー照射（異なるレーザー照射のタイミング）についても今後の検討課題と考えられる。

結 語

低出力条件（15W/cm²）の CO₂ レーザー照射は、フッ化物と併用した場合、象牙質の再石灰化を促進させる可能性がある。

引用文献

- 1) Tyas M, Anusavice KJ, Frencken JE, et al: Minimal intervention dentistry-a review. *Int Dent J*, 50 : 1-12, 2000.
- 2) 平成 23 年歯科疾患実態調査報告 日本口腔衛生学会編
- 3) Borggreven JMPA, van Dijk JWE, Driessens FCM: Effect of laser irradiation on the permeability of bovine dental enamel. *Arch Oral Biol*, 25 : 831-832, 1980.
- 4) Fowler BO, Kuroda S: Change in heated and in laser-irradiated human tooth and their probable effects on solubility. *Calcif Tissue Int*, 38 : 197-208, 1986.
- 5) Featherstone JDB, Barrett-Vespe NA, Fried D, et al: CO₂ laser inhibition of artificial caries-like lesion progression in dental enamel. *J Dent Res*, 77 : 1397-1403, 1988.
- 6) Oho T, Morioka T: A possible mechanism of acquired acid resistance of human dental enamel by laser irradiation. *Caries Res*, 24 : 86-92, 1990.
- 7) Hsu CYS, Jordan TH, Dederich DN, et al: Effects of low-energy CO₂ laser irradiation and the organic matrix on inhibition of enamel demineralization. *J Dent Res*, 79 : 1725-1730, 2000.
- 8) Esteves-Oliveira M, Zezell DM, Meister J, et al: CO₂ laser (10.6 μm) parameters for caries prevention in dental enamel. *Caries Res*, 43 : 261-268, 2009.
- 9) Featherstone JDB, Shields CP, Khademazad B, et al: Acid reactivity of carbonated apatite with strontium and fluoride substitutions. *J Dent Res*, 62 : 1049-1053, 1983.
- 10) Iijima Y, Koulourides T: Fluoride incorporation into and retention in remineralized enamel. *J Dent Res*, 68 : 1289-1292, 1989.
- 11) Zero DT, Espeland J, Fu MA, et al: Comparison of fluoride concentration in unstimulated whole saliva following the use of a fluoride dentifrice and fluoride rinse. *J Dent Res*, 67 : 1257-1262, 1988.
- 12) Shimazu K, Ogata K, Karibe H: Caries-preventive effect of fissure sealants containing surface reaction-type pre-reacted glass ionomer filler and bonded by self-etching primer. *J Clin Pediatr Dent*, 36 : 343-348, 2012.
- 13) Sudjalim TR, Woods MG, Manton DJ, et al: Prevention of demineralization around orthodontic brackets in vitro. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 131 : 705. e1-9, 2007.
- 14) Kohda N, Iijima M, Brantley WA, et al: Effects of bonding materials on the mechanical properties of enamel around orthodontic brackets. *Angle Orthod*, 82 : 187-195, 2012.
- 15) Rodrigues LKA, Nobre dos Santos M, Featherstone JDB: In situ mineral loss inhibition by CO₂ laser and fluoride. *J Dent Res*, 85 : 617-621, 2006.
- 16) Tagliaferro EPS, Rodrigues LKA, Nobre dos Santos M, et al: Combined effects of carbon dioxide laser and fluoride on demineralized primary enamel: An in vitro study. *Caries Res*, 41 : 74-76, 2007.
- 17) Hossain M, Nakamura Y, Kimura Y, et al: Acquired acid resistance of dental hard tissues by CO₂ laser irradiation. *J Clin Laser Med Surg*, 17 : 223-226, 1999.
- 18) Featherstone JDB, Le CQ, Hsu D, et al: Changes in acid resistance of dentin irradiated by a CW 10.6 μm CO₂ laser. Rechmann P, Fried D (Eds.), *Lasers in Dentistry XIV*, San Jose, CA, USA, 2008, SPIE, p.684305.
- 19) Gao XL, Pan JS, Hsu CY: Laser-fluoride effect on root demineralization. *J Dent Res*, 85 : 919-923, 2006.
- 20) Esteves-Oliveira M, Zezell DM, Ana PA, et al: Dentine caries inhibition through CO₂ laser (10.6 μm) irradiation and fluoride application, in vitro. *Arch Oral Biol*, 56 : 533-539, 2011.
- 21) 中嶋省志：エナメル質初期う蝕再石灰化のメカニズムとフッ化物の応用。日本歯科理工学会誌, 31 : 201-204, 2012.
- 22) 第Ⅳ部根面う蝕への非切削および切削での対応、う蝕治療のガイドライン、日本歯科保存学会編、第2版、東京、2015、永末書店、111-123.
- 23) 今里 聡：根面う蝕の再石灰化。日本歯科理工学会誌, 31 : 217-220, 2012.
- 24) Featherstone JD, ten Cate JM, Shariati M, et al: Comparison of artificial caries-like lesions by quantitative microradiography and microhardness profiles. *Caries Res*, 17 : 385-391, 1983.
- 25) Kielbassa AM, Wrbas KT, Schulte-Mönting J, et al: Correlation of transversal microradiography and microhardness on in situ-induced demineralization in irradiated and nonirradiated human dental enamel. *Arch Oral Biol*, 44 : 243-251, 1999.
- 26) Oliver WC, Pharr GM: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J Mater Res*, 7 : 1564-1583, 1992.
- 27) Rho JY, Pharr GM: Nanoindentation testing of bone. In: An YH, Draughn RA (eds): *Mechanical Testing of Bone and the Bone-Implant Interface*, Boca Raton, 1999, CRC Press, 257-269.
- 28) Buchalla W, Imfeld T, Attin T, et al: Relationship between nanohardness and mineral content of artificial carious enamel lesions. *Caries Res*, 42 : 157-163, 2008.
- 29) Seong WJ, Kim UK, Swift JQ, et al: Elastic properties and apparent density of human edentulous maxilla and mandible. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 38 : 1088-1093, 2009.
- 30) Meurman JH, Hemmerle J, Voegel JC, et al: Transformation of hydroxyapatite to fluorapatite by irradiation with high-energy CO₂ laser. *Caries Res*, 31 : 397-400, 1997.