歯の硬組織に対するレーザー治療の現状と今後の展開

富士谷 盛興 青山 剛大 成橋 昌剛
山田 三良 佐藤 かおり 千田 彰

愛知学院大学歯学部保存修復学講座

(受付 : 2010 年 10 月 14 日, 受理 : 2011 年 2 月 19 日)

Current Status and Future Development of Laser Dentistry for Dental Hard Tissue

Morioki FUJITANI, Goudai AOYAMA, Masayoshi NARUHASHI,

Mitsuyoshi YAMADA, Kaori SATOH and Akira SENDA

Department of Operative Dentistry, School of Dentistry, Aichi Gakuin University

(Received: October 14, 2010, Accepted for Publication: February 19, 2011)

Abstract: In the last twenty years, treatments and care for dental caries by using various lasers have been established. Lasers can offer pain relief and/or faster healing not possible with ordinary treatment, and thus various high-quality treatments and services can be provided to the public. Laser dentistry is expected to continue to develop.

The present paper reviews the following topics on the basis of a series of studies by the authors on laser dentistry: laser application in the examination and diagnosis of dental caries, preventive cure for the modification of tooth structures such as enhancing acid resistance, uptake of fluorides, and fusing nano-apatite crystals, and surgical intervention for removing dental caries and subsequent adhesive restorative treatment. The paper describes the current status and future development of laser dentistry for dental hard tissue.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 22 : 10 ~ 15, 2011 Reprint requests to Dr. FUJITANI)

Key words = Laser treatment, Dental hard tissue, Preventive cure, Adhesive restorative treatment

キーワード=レーザー治療, 歯の硬組織, 予防介入, 接着修復

はじめに

最近, 頻出している「MI」という用語は, 2000 年に Tyas¹⁾ によって提唱され, 2002 年 10 月に FDI の Policy Statement²⁾ として採択された「Minimal Intervention in the Management of Dental Caries」に由来する。MI の理念は, 文字通り「う蝕のマネジメント」であり, またそれに関する科学的根拠の蓄積により, 従来の「Drill & Fill」に代表されるう蝕の介入方法が, 近年大幅に見直されるようになった。すなわち, 最小限の侵襲による接着修復治療のみならず, 患者教育はもちろんのこと, 予防を含めた管理型の介入によりう蝕の発症や進行を制御することが重要視されており, これからの歯科医療の中心になるものと確信される。

このような観点から著者らは, 歯の硬組織に有用なレーザーの効果を最大限に活かした新しいう蝕治療の確立を指向して, う蝕の検査や診断, 歯質への耐酸性付与, フッ化物の歯質取り込み促進, アパタイトの歯面への熔着と歯質の強化, あるいは歯質の切削とその後の接着修復などについての一連の基礎的研究を鋭意遂行してきた。そして, 先端機器のレーザーを歯の硬組織に対しどのように活用すればよいかを探索してきた。

ところが, レーザーを用いたう蝕治療は, 2008 年度より保険収載されるに至ったが, その内容を鑑みるに, レーザー機器が既存の治療法における治療機器のひとつ, あるいは代替としか捉えられていない。したがって, レーザーだからこそできる効果を最大限に活かし, う蝕の診断とそれにより決定された管理型介入から外科的な介入まで含む

「レーザーを用いた新しいう蝕治療」の構築とその実践は、急務の課題として取り組む必要がある。

本稿では、著者らのこれまでの一連の研究の中で、レーザーを用いたう蝕の検査と診断、予防を含めた管理型介入、および外科的介入としてレーザーで切削された象牙質面に対する安定した接着に関する基礎的研究成果と今後の展開について、先に報告した内容³⁾に新たな成果を加えて紹介したい。

う蝕の検査と診断の新たな展開

—DIAGNOdent penTMと隣接面プローブの活用

DIAGNOdentTM（ダイアグノデント）は、蛍光強度を測定することにより健全歯質とう蝕罹患歯質を非侵襲的に識別でき、さらにそれは感度と特異度の両面で優れているという特長を有する機器⁴⁻⁶⁾であり、本邦においても一定の普及をみた。しかし、本機器のプローブは、小窩裂溝用と平滑面用しか装備されておらず、隣接面う蝕に対する検査、診断が困難であった。また、ハンドピースと本体が別個にあり、さらにそれらは光源用と反射光用の導光ファイバーで接続されているため、操作の簡易性、簡便性に若干問題があった。

このような問題を解決すべく、隣接面検査用プローブが小窩裂溝／平滑面検査用プローブとともに装備され、また筐体の形状もコンパクトかつコードレス化されたDIAGNOdent penTM（ダイアグノデントペン）が開発された。新しい隣接面用プローブは、従来のプローブに比し先端が細く、さらにレーザー光が約100度に屈折することで隣接部の深部まで光が到達するので、前歯部はもちろんのこと臼歯部も容易に隣接面う蝕の検査が可能となった（図1）。

そこで著者らは、ダイアグノデントペンのう蝕診断の信頼性と隣接面プローブの信頼性と有用性について検討した^{7,8)}。その結果、ダイアグノデントペンのエナメル質う蝕、あるいは象牙質う蝕に対する検査、診断能力は、従来のダイアグノデントと同等であることが明らかとなり、また、隣接面プローブも、隣在歯が存在しう蝕の検知が難しい環境下においても、その検出能力は非常に高く、隣接面う蝕の検査、診断に有用であることが判明した。

このようにダイアグノデントペンは、従来のダイアグノデントと比較して、小型化により操作がより簡便になり、隣接面う蝕の検査、診断も容易にできるようになった。したがって、チェアーサイドでは、う蝕の検出や診断のみならず、う蝕の進行状況の評価、予防処置効果の評価、あるいはう蝕の感染歯質除去の判断基準などに対して活用することが可能である。また、フィールドにおいても、学校や施設での歯科検診や訪問診療などの公衆衛生活動に活用可能である。このように、隣接面プローブを装備したハン

図1 DIAGNOdent penTM（KaVo）の本体および隣接面プローブ
隣接面用プローブは、隣接部に容易にアクセスできるよう細長く、かつ先端でレーザー光が約100度屈折する。

ディータイプのダイアグノデントペンは、幅広い分野での展開活用が期待できる有用な機器といえる。

予防を含めた管理型の介入

—歯質強化および耐酸性獲得を指向した新たな展開

1. エナメル質の強化および耐酸性の獲得と新たな展開
レーザー照射によるエナメル質の強化および耐酸性の獲得は、フッ化物塗布とNd:YAGレーザー^{9,10)}、あるいはCO₂レーザー¹¹⁾を併用した研究が比較的多くある。

著者らは、リン酸酸性フッ化物溶液（APF）を塗布したエナメル質面にEr:YAGレーザー照射を行うことにより、エナメル質の耐酸性を獲得する研究を行った¹²⁾。その結果、エナメル質を蒸散しない程度の低エネルギー照射（先端出力50mJ、繰返し速度1pps）でも、APFを併用することで耐酸性の層が生成されることが判明した。とくに、APF塗布→レーザー照射→APF塗布とレーザー照射前後にAPFを塗布すると、エナメル質表層に加え深部にも耐酸性層の獲得できることが明らかにされた（図2）。これは、エナメル質の強化、およびその耐酸性を高めるための新たな展開を示唆するものである。

2. 象牙質の強化および耐酸性の獲得

レーザー照射による象牙質の強化および耐酸性の獲得に関して、著者らはCO₂レーザー照射による象牙質の構造

変化や、硬さや耐酸性の向上などの改質効果について検討してきた。現在までに、CO₂ レーザーをう蝕象牙質に高出力照射すると、有機成分は炭化あるいは消失し、深部の象牙細管は無機成分が凝固して閉鎖すること¹³⁾ や、照射部直下の象牙質の硬さが上昇すること¹⁴⁾ などが明らかにされている。また、照射出力 3 W (0.5sec) および 5 W (0.5sec) で照射された象牙質は、表層に結晶性の高いハイドロキシアパタイトが生成され、耐酸性が向上することも判明している¹⁵⁾。

図 2 Er:YAG レーザー (50mJ, 1pps) と APF (リン酸酸性フッ化物水溶液) 処理されたエナメル質表層の光学顕微鏡像 (研磨切片, ヘマトキシリン染色)
レーザー照射前後に APF 処理を施すと、表層下に透明な層が生成され、これが耐酸性向上に関与すると思われる。

これらのことは、う蝕罹患象牙質を高出力 CO₂ レーザー照射により除去すると、周囲の象牙質の耐酸性が向上することにより二次う蝕防止等に寄与できることを示唆するとともに、咬耗・摩耗症や酸蝕症などう蝕以外の歯の硬組織疾患や根面う蝕の予防や治療においても展開できる成果として評価している。

3. 象牙質の強化、耐酸性獲得における新たな展開

さらに積極的に象牙質を強化する試みとして、著者らは、各種リン酸カルシウム塩の塗布、あるいは噴射された象牙質面を CO₂ レーザー照射することにより、新たな歯質強化層の獲得と結晶性の高い歯質への改質を図る一連の研究を行っている¹⁶⁻¹⁸⁾。

各種リン酸カルシウム塩 (ハイドロキシアパタイト、リン酸 8 カルシウム、 α -リン酸 3 カルシウム、 β -リン酸 3 カルシウム) の粉末を象牙質に噴射した後 CO₂ レーザー照射 (先端出力 3 W, 繰返し速度 3 pps) すると、結晶構造が変化し結晶性の向上したリン酸カルシウム塩が象牙質面に一層熔着し、その層はある程度の耐久性を有することを明らかにしている (図 3)^{16, 17)}。

しかしながら、この照射エネルギーでは歯質の亀裂や炭化層の形成などの問題点があり、そのまま臨床応用するのは難しい。そこで、結晶粒径がナノレベルのハイドロキシアパタイト (ナノアパタイト) と CO₂ レーザー照射を併用する方法に着目し、検討を試みた¹⁸⁾。ナノアパタイトは、象牙細管径より小さいため容易に侵入する可能性や、ナノサイズになることで熔融性、結晶性など物質そのもの

図 3 CO₂ レーザー照射 (3 W, 3 pps) と各種リン酸カルシウム塩粉末噴射を併用した象牙質面の SEM 像
構造が変化し、結晶性の向上したリン酸カルシウム塩が熔着している。

図 4 CO₂ レーザー照射 (2 W, 24.2J/cm²) とナノハイドロキシアパタイトを併用した象牙質面の SEM 像
クラックや炭化層は形成されず、ナノアパタイトが一層熔着している (a, b)。30 分間超音波洗浄を施しても、熔
着アパタイトは象牙細管内に固着して細管を封鎖しており、また管間象牙質にも一部残存している (c)。

の挙動が異なる可能性が期待できる。また、酸性環境下では象牙質のマトリックス部分に浸透する可能性もあるということ検討の対象とした。

その結果、ナノアパタイト塗布後に CO₂ レーザー照射 (先端出力 2 W, エネルギー密度 24.2J/cm²) すると、歯質に亀裂を形成することなくナノアパタイトが象牙質面に一層熔着し、超音波洗浄を 30 分行っても脱落しない程度の耐久性を有する層が生成されることが判明した (図 4)。また、結晶性はハイドロキシアパタイトと同一であるため、従来からハイドロキシアパタイトに期待できる歯質の強化と同様の効果をナノアパタイトにも期待できるものと考えている。

現在、照射時間、ピーク出力値を変え、あるいはハイドロキシアパタイトの吸収帯により近い波長を有する CO₂ レーザーを使用する等を試みており、象牙質への熱影響が極力少なく、かつナノアパタイトも十分熔融可能な至適照射条件を探索中である。いずれにしても、ナノアパタイトと CO₂ レーザーの併用は、露出歯根面や象牙質面をアパタイトコーティングすることにより、それらの強化と耐酸性の向上のための新たな展開を示唆するものである。ちなみに、その試みを「ウルトラスーパートゥースの獲得」と

いうことで鋭意研究を遂行しているところである。

外科的な介入

—レーザー照射象牙質に対する安定した レジン接着獲得を指向した展開

1. レジンの接着性低下を抑制する照射方法における新たな展開—フィニッシング照射の効果

Er:YAG レーザーにより照射された象牙質面は、象牙細管が開口し、スミヤー層の生成されていない層状構造を呈する。そのため、あたかも酸エッチングしたような像が認められるので、レーザーエッチングという言葉が登場した。しかし、前処理なしでレジン接着させても、プライマーにみられるような接着促進効果は期待できない^{19, 20)}。その理由のひとつとして、前述してきたようにレーザー照射の歯質に対する効果は改質効果であり、脱灰効果ではないからである。ちなみに、著者らは、レーザーエッチングではなく、レーザーコンディショニングという用語の方が適当であると考えている。

さらに、レジンの接着性低下の理由として、臨床的に痛みを感じない低出力で Er:YAG レーザー照射された象牙質表層には、構造欠陥や熱変性層が形成されて象牙質

図5 Er:YAGレーザー照射された象牙質面のTEM像

- a. 低出力照射 (50mJ)。マトリックスコラーゲンが破壊され、境界明瞭で無構造な変性層 (☆) が形成されている。
- b. 低出力照射 (50mJ) 後、フィニッシング照射 (150mJ)。変性層は蒸散除去され、コラーゲン線維が引きちぎられたような像が認められるが、正常な象牙質とほとんど差異がない。

マトリックスが破壊され (図5a)、レジン接着が阻害される^{19,20)}。臨床的にレジンは早期に脱落するようなレベルではないが、回転切削器具を使用したときと同等の長期耐久性を期待するには問題がある。

そこで、Er:YAGレーザーによる低出力照射象牙質に対する安定したレジ接着の獲得を指向して、著者らは既に薬剤により除去する方法 (リン酸30秒処理後、次亜塩素酸90秒処理) を確立した¹⁹⁾ が、処理時間だけでも120秒と長く、さらにレジ接着の前には、次亜塩素酸ナトリウム処理面を還元剤 (例えば、アスコルビン酸やスルフィン酸ナトリウム) で処理しなければ安定した接着性は得られないので、臨床的には受け入れ難い。そこで、形成された構造欠陥や熱変性層をレーザーのみで除去する照射方法を検索したところ、低出力照射 (50mJ) 後、中出力 (150mJ) で追加照射 (フィニッシング照射) すると、低下していたレジ接着が有意に回復することを見出した²⁰⁾。これは、低出力照射により生成された構造欠陥や変性層がフィニッシング照射により蒸散され (図5b)、レジ接着性の回復に繋がったものと考えている。このフィニッシング照射は、レーザー処理象牙質におけるレジ接着の安定した接着性を獲得するための方策として新たな展開を示唆するものである。

2. レーザー専用の接着システムの開発

フィニッシング照射によりレジ接着性は有意に回復するが、レーザー照射を全くしていない面に対する接着強

さよりは低い²⁰⁾。これは、現用の接着システムはスマーヤー層の処理を前提に開発されているため、スマーヤー層の生じないレーザー処理面には安定した接着効果は得られないからである。したがって、バーやポイント切削面とは異質のレーザー処理面に対する専用の新規接着材の開発は急務の課題である。

レーザー処理象牙質に対するレジ接着に関する研究は、基本的にはハイブリッド層に頼るレジ系接着材に関するものがほとんどで、現在のところ歯面処理剤や機能性モノマーの工夫に留まっている研究が多いのが現状である。ところが、著者らは、レーザー照射面に対するレジモディファイドグラスアイオノマーセメントの接着性は、照射エネルギーにあまり影響されず安定していることを見出し^{21,22)}、現在、ハイブリッド層とは異なった接着機構を有するグラスアイオノマーセメントの概念を発展させ、ポリ酸系モノマーを導入したレーザー専用の接着材を開発すべく鋭意準備中である。すなわち、先に述べたフィニッシング照射された歯面に対するポリ酸モディファイドレジ系接着システムの開発は、レーザー処理象牙質におけるレジ接着の安定した接着性を獲得するための方策として新たな展開を示唆するものである。

おわりに

レーザー歯科治療は、この20年で様々な臨床で定着しつつある。2008年度にはレーザーによるう蝕治療、2010

年度にはレーザーによる歯石除去が保険収載された。レーザーを用いると、既存の治療では不可能な痛みの軽減、治癒促進などの効果も期待でき、国民に対し質の高い医療の提供が可能となるので、レーザー歯科治療の今後の発展が期待される。

ところが、一般臨床においては、レーザー機器が既存の治療法における治療器具のひとつ、あるいは代替として捉えられる傾向であることは否めない。う蝕の治療におけるレーザーの位置付けも、単なる回転切削器具の代替であり、本稿で述べたような歯の硬組織に対するレーザー照射の効果を、「新しい歯科医療」として理解、認知されるまでには残念ながら至っていない。

このような現状に対し、今こそこれを払拭し、先端機器であるレーザーだからこそできる効果を探求し、「レーザー歯科医療」という新たな分野の確立とその展開を図るべきであると考えている。

本内容の一部は、第 21 回日本レーザー歯学会総会・学術大会シンポジウム I「歯科治療の各領域におけるレーザーのエビデンスと効果」(2009 年 11 月 22 日、福岡)で発表した。

文 献

- 1) Tyas MJ, Anusavice KJ, Frencken JE, et al: Minimal intervention dentistry — a review. FDI Commission Project 1-97. Int Dent J, 50 : 1-12, 2000.
- 2) <http://www.fdiworldental.org/sites/default/files/statements/English/Minimal-intervention-in-the-management-of-dental-caries-2002.pdf> (Accessed 2011.2.27)
- 3) 山田三良, 富士谷盛興, 佐藤かおり, 他: MI の理念に基づいた歯の硬組織に対するレーザー治療の発展的展開 —QOL の向上を目指したう蝕の診査・診断から予防まで—. 日レ歯誌, 20 : 165-173, 2009.
- 4) Lussi A, Hibst R, Paulus R: DIAGNOdent — An optical method for caries detection. J Dent Res, 83 : 80-83, 2004.
- 5) 高橋亨典, 須崎 明, 佐久間恵子, 他: DIAGNOdent に関する基礎的研究 —コラゲナーゼ処理した象牙質に対する反応—. 日歯保存誌, 43 : 200-207, 2000.
- 6) 佐久間恵子, 高橋亨典, 須崎 明, 他: DIAGNOdent に関する基礎的研究 —エナメル質の厚さがう蝕の測定値に及ぼす影響—. 日歯保存誌, 45 : 1-8, 2002.
- 7) 青山剛大, 中野健二郎, 成橋昌剛, 他: DIAGNOdent pen の隣接面う蝕検出能に関する *in vitro* 研究. 第 131 回日本歯科保存学会抄録集 : 27, 2009.
- 8) 千田 彰, 富士谷盛興: ダイアグノデント ペンを活かす. Dental Magazine, 134 : 14-17, 2010.
- 9) 白須賀哲也: APF 併用レーザー照射による歯質耐酸性付与効果に関する研究. 日歯保存誌, 31 : 283-293, 1988.
- 10) 山田恵子, 桜井 聡, 神山紀久男: 人工的初期脱灰エナメル質へのレーザー照射とフッ化物塗布併用による齲蝕抑制効果に関する実験的研究. 小児歯誌, 26 : 732-741, 1988.
- 11) 深澤正幹: 炭酸ガスレーザーと試作フッ素含有ペースト併用による歯質耐酸性効果. 日歯保存誌, 43 : 583-591, 2000.
- 12) 高橋亨典: Er:YAG レーザー照射及び APF 塗布で処理したエナメル質の耐酸性と組織学的変化. 愛院大歯誌, 39 : 19-31, 2001.
- 13) 五味明良, 入野田美穂, 松井 治, 他: 炭酸ガスレーザー照射による象牙質の性状の変化. 愛院大歯誌, 32 : 229-236, 1994.
- 14) Senda A, Matsui O, Katada H, et al: Characteristic changes of lased dentin. SPIE Proceedings Series, 1984 : 149-154, 1995.
- 15) 須崎 明: CO₂ レーザー照射による象牙質耐酸性向上に関する研究. 日歯保存誌, 42 : 860-877, 1999.
- 16) 山田三良: CO₂ レーザー照射とリン酸カルシウム塩を用いた象牙質の処理. 愛院大歯誌, 40 : 1-11, 2002.
- 17) 山田三良, 劉 利恵, 長谷川哲也, 他: CO₂ レーザー照射とリン酸カルシウム塩の噴射を用いた象牙質強化. 第 17 回日本レーザー歯学会講演抄録集 : 69, 2005.
- 18) 成橋昌剛: ナノハイドロキシアパタイトと CO₂ レーザー照射を用いた歯根象牙質のアパタイトコーティングに関する基礎的研究. 日歯保存誌, 53 : 627-643, 2010.
- 19) Fujitani M, Harima T, Shintani H: Does Er:YAG or CO₂ laser ablation of dentin affect the adhesive properties of resin bonding systems? International Congress Series, 1248 : 161-166, 2003.
- 20) 富士谷盛興: Er:YAG および CO₂ レーザー照射象牙質面に対するレジンの接着性 —レーザー照射象牙質面に対しレジンは本来の接着性能を発揮できるか?—. 日レ歯誌, 17 : 74-80, 2006.
- 21) 成橋昌則, 森田有香, 青山剛大, 他: 炭酸ガスレーザー照射された象牙質における接着性セメントの接着性能について. 第 129 回日本歯科保存学会抄録集 : 176, 2008.
- 22) 成橋昌剛, 福田秀光, 山田三良, 他: 炭酸ガスレーザー照射された象牙質における各種レジン系セメントの接着性能について. 日レ歯誌, 21 : 50, 2010.