

# 光で歯の硬さを測る ～新時代の歯科診療の実現に向けて～

大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻

量子エネルギー工学講座 量子ビーム応用工学領域 准教授

間 久直

## 1. はじめに

40歳代以上では歯肉（歯ぐき）が退縮することで歯の付け根部分（根面）の露出が顕著になってくる。根面は硬いエナメル質で覆われておらず、エナメル質で覆われた歯冠部よりう蝕（虫歯）になりやすく、う蝕の進行も速い。2017年の調査によると、日本では70歳代の65%、80歳代の70%が根面う蝕に罹患しており<sup>1</sup>、超高齢化社会においては根面う蝕の管理が重要な課題である。歯冠部のう蝕検査に用いられているX線撮影、レーザー誘起蛍光法、光干渉断層計（optical coherence tomography; OCT）などの手法は根面う蝕には適していない。現状、根面う蝕の診断は視診と触診を基本としているが<sup>2</sup>、初期の根面う蝕では明確な色調変化が無いことや<sup>3</sup>、探針と呼ばれる器具による触診が歯科医師の感覚に依存していることが課題となっている。

歯は常に脱灰と再石灰化を繰り返しており、この脱灰と再石灰化のバランスが崩れて脱灰が進行すると歯が柔らかくなり、う蝕へと進行していく。このため、歯の硬さを測定することができれば歯の健康状態をモニタリングすることが可能であり、歯科医師の感覚に依存しない定量的な診断が可能になると考えられる。歯の硬さの測定で一般的に用いられているビッカース硬さ試験やスラブ硬さ試験は、測定対象に指定した荷重で四角錐の圧子を押し当て、圧子が離れた後に残った圧痕の大きさを測定することで硬さを求めるというものである。しかし、装置が大型で可搬性がなく高価であること、測定対象が平板状に加工されており表面が鏡面研磨されている必要があること、う蝕歯のように弾性変形が大きい試料では圧痕が残らず乾燥させなければ測定できないことなどが課題であった。そこで、筆者らは、光を用いて歯の硬さを簡便に測定できる小型で可搬性のある装置を考案し、英語ではHardness Meter using Indenter with Light for Tooth Monitoring からHAMILTOM、日本語では「トンと触れて歯を診断する」ことから「歯診るトン（はみるとん）」と名付けた。本稿ではHAMILTOM開発の背景となっている生体組織光学に基づいた低侵襲医療の概略と、HAMILTOMの製品化に向けた開発の概要について述べる。

## 2. 生体組織光学に基づいた低侵襲医療

筆者が所属している環境エネルギー工学専攻栗津研究室では生体組織光学（Tissue Optics）、光生物学、レーザー工学などを基礎として、光・レーザーを用いた診断・治療や先端バイオ分析技術への応用に関する医工融合研究を行っており、新しい医療・光技術の産業・医療応用を目指している。医療応用の事例として、病変部では吸収が強く、正常な組織では吸収が弱い波長の光を用いると、病変部のみを選択的に除去することが可能となる原理を利用し、波長6 μm帯の中赤外線レーザーを用いた動脈硬化、う蝕、胆石の選択的治療に関する研究、早期消化管がん（食道がん、胃がん、および大腸がん）の安全かつ低侵襲な治療技術の開発などを行ってきた<sup>4</sup>。また、双積分球光学系と逆モンテカルロ法を用いた光学特性値測定システムの開発を行い、ヒトのがん組織や皮膚、静脈を含む様々な生体組織の光学特性値を測定する手法を確立した<sup>5</sup>。基礎研究に留まらず、医師、および医療機器メーカーとの医工連携、産学連携研究を行っている点が特徴である。

中でも、大阪歯科大学歯科保存学講座の吉川一志准教授とは15年程前から中赤外線レーザーを用いたう蝕の選択的除去に関する共同研究を行ってきた。現在、う蝕のレーザー治療で用いられている波長2.94 μmのマイクロ秒パルスEr:YAGレーザーではう蝕象牙質だけではなく健全象牙質も削られてしまうことが課題になっているが、この共同研究において波長3 μm帯、あるいは6 μm帯の中赤外線ナノ秒パルスレーザーを用いることで健全象牙質を傷付けずにう蝕象牙質のみを選択的に除去できることが示された<sup>6-10</sup>。そして、中赤外線ナノ秒パルスレーザーによるう蝕の選択的除去においては、健全象牙質とう蝕象牙質との硬さの違いが重要な要素であるを見出した<sup>7-9</sup>。

歯の硬さを測定することがレーザーによるう蝕の選択的除去による低侵襲治療の実現のためにも欠かせないことが分かった一方で、歯科診療の現場で簡便に歯の硬さを測定することは困難であった。そこで、吉川先生よりご紹介いただいたものがカリオテスターと呼ばれるシステムである<sup>11</sup>。カリオテスターでは金属製圧子の先端に塗料を塗布し、歯に150 gf（～1.5N）で接触させた後に圧子

を取り外して顕微鏡に取り付け、塗料が消失した部分の長さを測定する。歯の硬さと塗料が消失した部分の長さに相関があることから歯科診療の現場で歯の硬さを測定できることが示されている反面、測定の手順が煩雑であったため、歯科医師が臨床で日常的に使用することは困難であった。

### 3. 光学式歯質硬度計 HAMILTOM

図1にHAMILTOMの概略図と試作機の写真を示す。透明で頂角90°の円錐形ガラス製圧子にLEDの光を入射し、反射してきた光をビームスプリッターでカメラの方へ反射させ、レンズで圧子先端を拡大してカメラに結像させる。圧子に何も触れていなければ圧子と空気の境界で全反射が起きて圧子が明るく写るが、圧子に歯が触れるとガラスと歯の屈折率が共に約1.5と近いために全反射が起こらなくなり、反射率が顕著に低下する。圧子先端にかかる荷重を測定しながら圧子を歯に接触させ、荷重が指定した値に達した時点でカメラで撮影すると、図2のように接触した部分が暗く写る。接触させる荷重が一定であれば、健全な硬い歯では接触する部分が小さく、暗くなる面積が小さいが、柔らかい歯では接触する部分が大きくなり、暗くなる面積も増加する。したがって、この暗くなる部分の面積を測定すれば硬さを測定することができる。手持ち型の小型装置で測定を行うため、加工さ

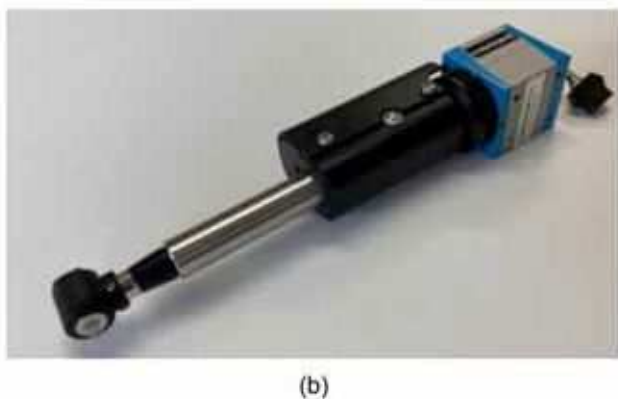
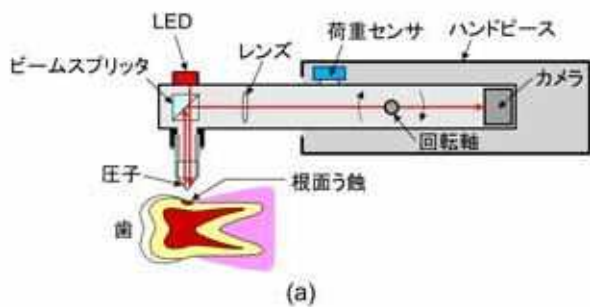


図1 根面う蝕の診断に向けて開発した光学式歯質硬度計 HAMILTOMの (a) 概略図および (b) 試作機の写真

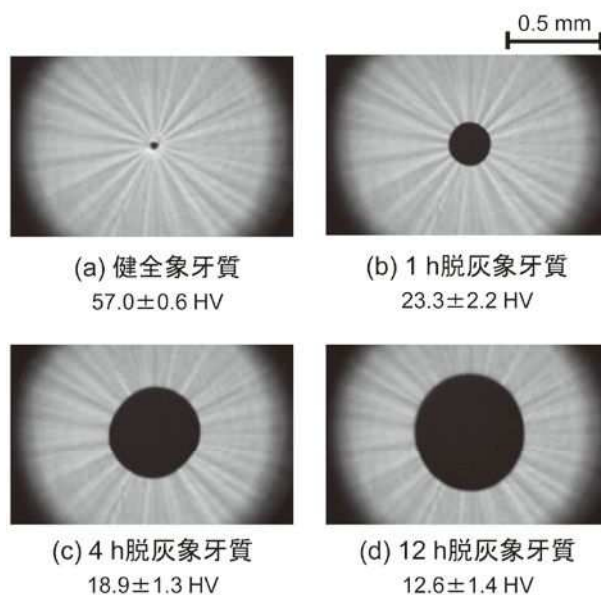


図2 (a) ウシ健全象牙質、および0.1 M乳酸水溶液中で (b) 1 h、(c) 4 h、(d) 12 h脱灰させたウシ象牙質(う蝕モデル)の硬さをHAMILTOMで測定した際の圧子からの反射光の映像と、それぞれの象牙質の硬さをビッカース硬さ試験機(HMV-G 30S, Shimadzu)で測定した結果。

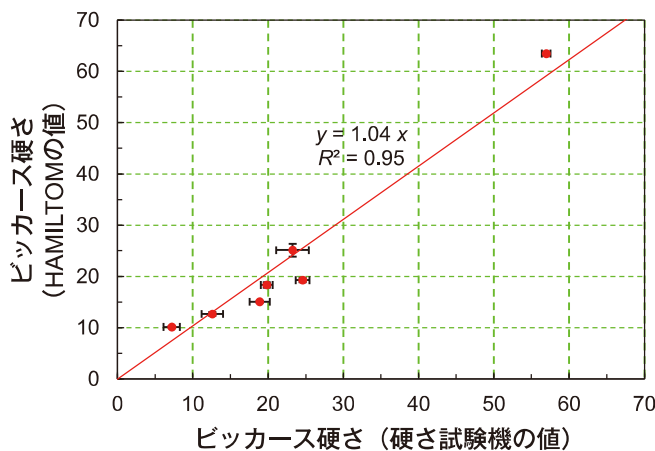


図3 健全および脱灰ウシ象牙質の硬さをビッカース硬さ試験機 (HMV-G 30S, Shimadzu)で測定した結果とHAMILTOMで測定した結果の相関

れていない生きたままの歯の硬さを測定することが可能となる。これまで、歯の硬さを測定するためには、歯を抜いて平板状に加工し、表面を鏡面研磨しなければならなかったため、歯科診療の現場で硬さ測定は考えられてこなかった。本装置によって、臨床の現場で、生きたままの歯の硬さを測定できるようになり、その経時的な変化をも測定できるようになることで、う蝕の発生や進行と、う蝕の治療に伴う再石灰化による硬さの変化を捉えることが可能となり、う蝕の進行や治療の機序について、物理、化学的な観点からの理解が一層進むと期待される。さらにその知見を基に、科学的なエビデンスに基づいた低侵襲な歯科診療の発展が期待できる。

2018年8月から2019年11月にかけて大阪大学 Innovation Bridge グラント【起業シーズ育成グラント】の支援により図1 (b) に示すHAMILTOM試作機を開発した。図3に示すとおり、HAMILTOM試作機によるウシ象牙質の硬さ測定結果と、同試料の硬さを従来のビッカース硬さ試験機 (HMV-G 30S, Shimadzu) で測定した結果との間に高い相関が得られることが示されている。2020年12月からは大阪大学 Innovation Bridge グラント【起業プロジェクト育成グラント】の支援を受け、大学発ベンチャーの起業を目指して歯科医師が使用できるレベルの装置の開発を進めている。

#### 4. おわりに

HAMILTOM開発の発端は、カリオテスターを発案された兵庫医科大学の清水明彦先生に粟津研究室へお越しいただき、カリオテスターを紹介していただいた後に学内の食堂で昼食をとっていた際の会話である。先述のとおりカリオテスターでは測定手順が煩雑であり、歯科医師が臨床で使用することは困難であった。そこで、カリオテスターと同様の測定を光で実現できないかという話からHAMILTOMの構想が生まれたが、実際に硬さを測定できるようになるまでには多くの試行錯誤を要し、学生の研究テーマにできる段階でもなかったため、筆者が休日や夜間を利用して水面下で検討を進めてきた。清水先生はオーディオがお好きとのことで、カリオテスターの圧子はレコードの針を参考にして製作されたとのことである。一方で筆者の父は生前、レコードなど音響関係の技術者であったため、清水先生と筆者の父との間に共通の知人がおられたという奇妙な偶然も後日明らかとなった。現在、粟津研究室のメンバーだけではなく大阪歯科大学、大阪大学の歯学研究科および共創機構、大阪大

学ベンチャーキャピタル、試作装置の製作を引き受けていただいている企業など様々な方々の協力を得ながらHAMILTOMの開発を進めている。さらに、粟津研究室の複数の卒業生がHAMILTOMに興味を持ち、それぞれ本業を別に持ちながらHAMILTOMの実用化に向けて協力してくれている。今後も多くの方々の協力を得ながらHAMILTOMによる新時代の歯科診療を実現したいと考えている。また、HAMILTOMの原理は歯の硬さの測定だけではなく様々な用途に利用できるため、ご興味のある方には是非ご活用いただきたい。

#### 謝辞

ビッカース硬さ試験機をお貸しいただいた環境エネルギー工学専攻の牟田浩明教授、大石佑治准教授に深く感謝いたします。

#### 参考文献

1. 小峰陽比古 他: 第147回日本歯科保存学会学術大会プログラム・抄録集, p. 207 (2017).
2. 日本歯科保存学会編: う蝕治療ガイドライン 第3版 根面う蝕の診療ガイドライン, 永末書店 (2020).
3. 福島正義: 日歯保存誌 **62**, 92-98 (2019).
4. 間久直 他: レーザー研究 **48**, 296-300 (2020).
5. 本多典広 他: 日レ医誌 **32**, 421-428 (2012).
6. 佐伯将之 他: 日レ歯誌 **22**, 16-20 (2011).
7. 北哲也 他: 日レ歯誌 **25**, 2-7 (2014).
8. K. Ishii *et al.*: J. Biomed. Opt. **20**, 051023 (2015).
9. T. Kita *et al.*: Lasers Med. Sci. **30**, 961-967 (2015).
10. 清水公太 他: レーザー研究 **44**, 182-186 (2016).
11. A. Shimizu *et al.*: Dent. Mater. J. **32**, 643-647 (2013).

(静岡大学 光電機械工学 平成8年卒

東京理科大学 電気工学 10年修士 13年後期)