

歯科用光干渉断層計（OCT）の開発と臨床への導入

島田康史

東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科う蝕制御学分野

1 歯科用光干渉断層計の開発

1) 光干渉断層計(OCT)の開発

光干渉断層計（Optical Coherence Tomography, OCT）は光のエコーを用いて組織や生体材料の断層を非破壊で観察するイメージング技術である。OCTの基本原理は1990年に山形大学の丹野らが提案し[1]、その後Fujimotoらマサチューセッツ工科大学（MIT）とTufts大学眼科医の連携プロジェクトによって開発が進められた[2]。

放射線を用いずに非侵襲で生体の断層画像が得られるOCTは医療用機器として画期的であり、眼底疾患を診断するための画像診断機器として臨床に普及している。歯科では1998年にColstonらが歯の画像を撮像する装置として論文報告を行ったが[3]、当時のTime domain（TD）方式のOCTは画像解像度に限界があり、一画像の撮影に要するのスキアン時間も45秒間と長かったことから、実用化には至らなかった。また組織の偏光変化の計測を可能にしたPolarization-sensitive（PS）OCTを用いた研究も行われ、特に初期脱灰の評価において成果が得られている[4]。しかしながら当初はTD方式を採用していたため、実用化に必要な解像度の改善とスキアン時間の短縮化も得られなかった。

OCTの画像処理技術において、光シグナルの波長を周波数にフーリエ変換し周波数領域で計測するFourier domain（FD）方式が開発され、これを契機に画像解像度の飛躍的な向上が得られた。その後、広帯域波長を分光して計測を行うSpectral domain（SD）OCTの商品化によって多くの医学領域における導入と開発競争が展開されるようになった。

2) SS-OCTの開発と歯科領域への導入

SD-OCTが医学領域に広まりを見せる中で、光源波長を高速で切り替えて発振しFD方式で画像構築を行うSwept-source（SS-）OCTが開発された。SS-OCTは光源波長が長く高深達性が得られることから、我が国の歯学領域において世界に先行する形で臨床導入に向けた研究が進められた[5]。2010年にSS-OCTの咬合面齲蝕に対する診断の有用性が報告され[6]、また2015年には臼歯隣接面齲蝕に対する臨床評価が行われた[7]。一連の研究成果から、SS-OCTは初期の脱灰から象牙質齲蝕に対する感度と特異度が高く、齲蝕の進行度を正確に診断できる可能性が示唆され[6-8]、歯学領域においてOCT研究が加速することとなった。現在、他の医学領域においてもSS-OCTの優位性が認識され、SS-OCTはSD-OCTに代わる次世代のOCTとして開発が進められている。またPS-OCTにおいてもSS-OCTが採用されるようになり、画像解像度の向上が得られている。

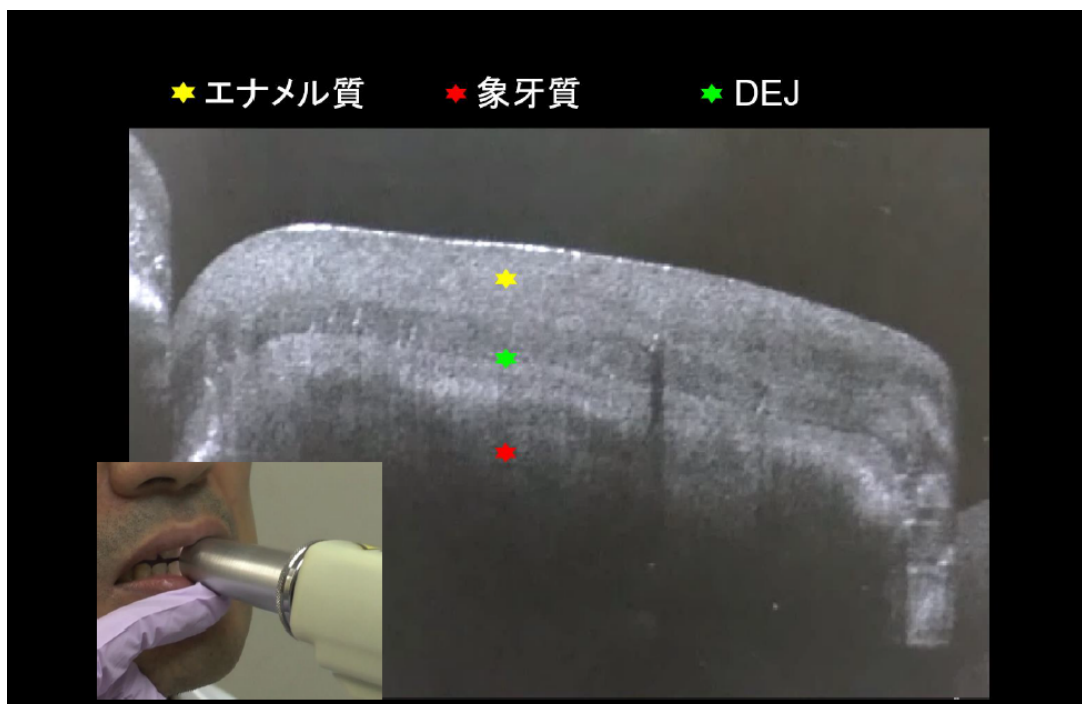


図1．歯科用として開発されたプロトタイプ SS-OCT を用い、下顎前歯を水平断方向に観察した（左下）。光透過性の高いエナメル質は全層が表示され（黄星）、またその下層に位置する象牙質も観察することができる（赤星）。エナメル質と象牙質の境界には DEJ が表示されている（緑星）。（文献9 より）

2 OCT を用いた齲蝕の診断

1) OCT の歯科臨床における有用性

ミニマルインターベンションの理念に基づいた齲蝕治療を実践するためには、進行した齲蝕のみならず初期の齲蝕に対しても精度の高い診断を行う必要がある。特に初期齲蝕に対して高い感度と特異度を示す OCT は、侵襲の少ない齲蝕治療に対する社会的要求に応える性能を具備している。その一方で、光を用いる OCT の画像深度は観察対象の光透過性の影響を強く受けるため、画像機器としての限界を理解する必要がある。しかし放射線を用いない OCT は被曝リスクを伴わず、妊婦や小児に対しても安心して繰り返し使用できる大きな利点を有している[5]。したがって、観察対象歯から複数の画像を撮影し、豊富な情報を得て診断精度を高めることも可能になる。OCT は、患者や術者の安全性を担保した医療技術といえることができる。このような観点から、我が国において産学官連携で歯科用 OCT の開発と実用化が進められ[9, 10]、2020 年には歯科用医療機器として世界初の認可が得られている。

2) 齲蝕診断における OCT 画像の解析と 3D 評価

OCT を用いた齲蝕の診断法について、科学的根拠の解明に向けた研究も本邦にて先端的に行われている。マイクロラジオグラフィーを用いた解析実験から、OCT 画像における齲蝕の輝度の上昇は歯のミネラル密度の低下と相関がみられること[11, 12]、また脱灰と再石灰化を行ったエナメル質および象牙質の屈折率の計測から、歯のミネラル密度と屈折率の変化に相関がみられることが報告されている[13]。さらに脱灰したエナメル質や象牙質に再石灰化を行うと、屈折率や減衰係数は健全歯質に近い値に回復し OCT 画像の輝度の上昇も低下する結果が得られている[13, 14]。

齲蝕診断における OCT の画像技術は進歩し、特に SS-OCT は画像処理速度が速くスキャン画像の集層により短時間での立体画像構築が可能なことから、三次元画像を取り

入れた齲蝕診断の評価も行われている[10, 12]。また歯の内部に生じた微小な亀裂や僅かな欠陥も3D画像で検知できる可能性が示唆され[15]、齲蝕の先制的な治療の開発に期待が高まっている。

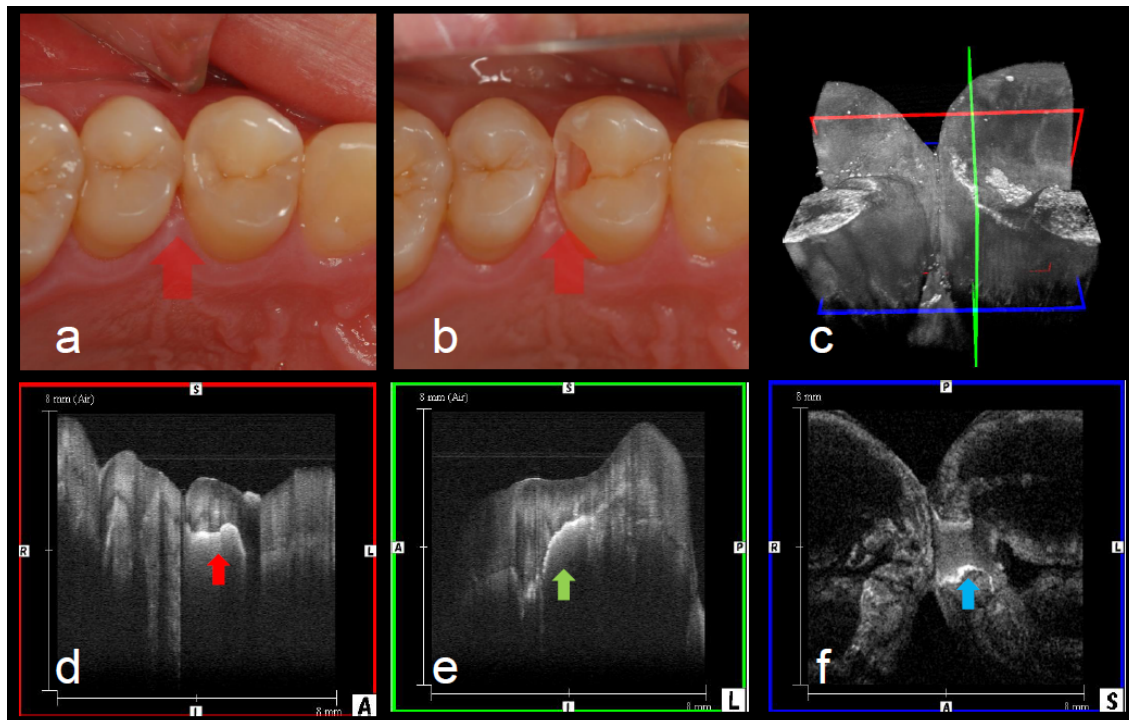


図2. SS-OCTの3D画像を用い、上顎第1、第2小臼歯隣接面における齲蝕の診断を行った(a)。SS-OCTを用いて3D画像を構築、3D画像の赤線、緑線、青線に沿って断層画像を抽出した(c)。(文献9より)

咬合面歯列方向(赤線)から得られた画像では(d)、第1小臼歯遠心に白線状の変化が表示されている(赤矢印)。同部位に齲窩が形成、齲窩の壁面から強いシグナルが得られている。

第1小臼歯遠心の頬舌方向(緑線)から得られた画像では(e)、齲窩の壁面から得られる白線状の変化が確認できる(緑矢印)。

水平断方向(青線)から得られた画像では(f)、第1小臼歯遠心に象牙質に達する齲蝕が確認できる(青矢印)。一方、第2小臼歯の近心隣接面には齲蝕を疑う変化はみられない。

臨床では、第1小臼歯のみ齲蝕治療を行った。また第2小臼歯には齲蝕による変化は認められず、健全であることを確認した(b)。

3 歯科用OCTの臨床展開

有歯列の高齢者では、歯を長期にわたり保存して機能させる上で歯の亀裂や摩耗、咬耗による影響が顕在化しており、これらの疾患の早期発見と適切な対応が望まれる。Imaiらは歯の亀裂に対してOCTを用いて診断を行い、部位と深さの正確な診断を行える可能性を報告している[16]。OCTを用いると、エナメル質に限局した亀裂と、象牙質内部に侵入した亀裂を識別することができる。

歯の摩耗に対しては、OCTを用いれば残存エナメル質の厚さを計測し、歯の摩耗の状態を客観的に評価することができる。また象牙質の露出や露髄の有無も画像表示できることが示されている[17-19]。いずれも従来の画像診断技術では得られない結果といえることができる。

さらにOCTの非破壊断層画像の特性を活用し、接着性修復物の窩洞内面の適合性を評価する試みも我が国において先行的に行われ、OCT画像の優れた検出精度が報告されている[20]。3D画像を用いた窩壁適合性の評価も行われ[21]、齲蝕治療の信頼性を高める試みが継続している。我が国の研究機関を拠点とした国際共同研究が行われ、OCTは歯科疾患の診断や接着修復材料の評価において、新たな展開が期待される。

利益相反 有 吉田製作所 委任経理金（共同研究費）

参考文献

- [1] 丹野直弘他. 光反射像測定装置. 日本特許第 2010042 号（出願 1990）.
- [2] Huang D et al. Optical coherence tomography. *Science* 254: 1178-1181, 1991.
- [3] Colston B et al. Dental OCT. *Optics Express* 3: 230-238, 1998.
- [4] Fried D et al. Imaging caries lesions and lesion progression with polarization sensitive optical coherence tomography. *Journal of Biomedical Optics* 7: 618-627.
- [5] 角保徳他. 光干渉断層画像診断法の歯科臨床への応用 口腔用 OCT 器機開発と歯牙齲蝕への応用. *日本歯科医師会雑誌* 60: 6-18, 2008.
- [6] Shimada Y et al. Validation of swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) for the diagnosis of occlusal caries. *Journal of Dentistry* 38: 655-665, 2010. (IF:4.991, 被引用回数 107)
- [7] Shimada Y et al. Noninvasive cross-sectional imaging of proximal caries using swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) in vivo. *Journal of Biophotonics* 7: 506-513, 2014. (IF: 3.390, 被引用回数 59)
- [8] Nakagawa H et al. Validation of swept source optical coherence tomography (SS-OCT) for the diagnosis of smooth surface caries in vitro. *Journal of Dentistry* 41: 80-89, 2013. (IF:4.991, 被引用回数 60)
- [9] 島田康史他. 光干渉断層計（OCT）による歯の疾患と加齢的变化の診断. *日本歯科医師会雑誌* 72: 19-28, 2019.
- [10] Shimada Y, Burrow MF, Araki K, Zhou Y, Hosaka K, Sadr A, Yoshiyama M, Miyazaki T, Sumi Y, Tagami J. 3D imaging of proximal caries in posterior teeth using optical coherence tomography. *Scientific Reports* 10: 15754, 2020. (IF:4.996)
- [11] Natsume Y et al. Estimation of lesion progress in artificial root caries by swept source optical coherence tomography in comparison to transverse microradiography. *Journal of Biomedical Optics* 16: 071408, 2011. (IF: 3.758, 被引用回数 57)
- [12] Ueno T et al. Optical analysis of enamel and dentin caries in relation to mineral density using swept-source optical coherence tomography. *Journal of Medical Imaging (Bellingham)* 3: 035507, 2016.
- [13] Hariri I et al. Estimation of the enamel and dentin mineral content from the refractive index. *Caries Research* 47: 18-26, 2013. (IF:3.916, 被引用回数 51)
- [14] Mandurah M et al. Monitoring remineralization of enamel subsurface lesions by optical coherence tomography. *Journal of Biomedical Optics* 18: 046006, 2013. (IF:3.758, 被引用回数 57)
- [15] Ei TZ et al. Three-dimensional assessment of proximal contact enamel using optical coherence tomography. *Dental Materials* 35: e74-e82, 2019. (IF; 5.687)
- [16] Imai K et al. Noninvasive cross-sectional visualization of enamel cracks by optical coherence tomography in vitro. *Journal of Endodontics* 38: 1269-1274, 2012. (IF:4.422, 被引用回数 83)
- [17] Kashiwa M et al. Diagnosis of occlusal tooth wear using 3D imaging of optical coherence

tomography ex vivo. *Sensors (Basel)* 20: 6016, 2020.

- [18] Wada I et al. Clinical assessment of non carious cervical lesion using swept-source optical coherence tomography. *Journal of Biophotonics* 8: 846-854, 2015. (IF:3.390, 被引用回数 40)
- [19] Ding J et al. Application of optical coherence tomography to identify pulp exposure during access cavity preparation using an Er:YAG laser. *Photomedicine and Laser Surgery* 32: 356-359, 2014.
- [20] Bakhsh TA et al. Non-invasive quantification of resin-dentin interfacial gaps using optical coherence tomography: validation against confocal microscopy. *Dental Materials* 27: 915-925, 2011. (IF:5.687, 被引用回数 114)
- [21] Hayashi J et al. *Journal of Dental Research* 96: 992-998, 2017. (IF: 8.924, 被引用回数 24)