

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23390432

研究課題名(和文) 光干渉断層計の歯冠修復への応用

研究課題名(英文) Application of optical coherence tomography in restorative dentistry

研究代表者

田上 順次 (Tagami, Junji)

東京医科歯科大学・医歯学総合研究科・教授

研究者番号：50171567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円、(間接経費) 4,440,000円

研究成果の概要(和文)：光干渉断層計(Optical Coherence Tomography, OCT)は、電離放射線を用いずに、組織の断層画像を、病理組織切片に近い精度で観察できる。中でもSS-OCT(Swept-Source OCT)は、解像度と解析速度が飛躍的に向上しており、歯冠修復領域において有用性が高いことが判明した。う蝕や歯の亀裂の診断、歯の光学的特性の計測、コンポジットレジン修復のギャップの観察、歯髄や根管の位置の把握において、優れた結果が得られた。また、コンポジットレジンの摩耗と亀裂の評価にも有効であった。

研究成果の概要(英文)：Swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) can construct cross-sectional images of biological structures. The purpose of this study was to evaluate the possibility to introduce SS-OCT in restorative dentistry. In operative dentistry, SS-OCT was examined to evaluate the diagnostic accuracy for the detection of caries and tooth crack. Refractive indices of enamel and dentin and attenuation coefficient were measured using SS-OCT. We also establish a method for non-destructive detection of gap and secondary caries beneath composite restorations. In endodontics, SS-OCT was used for the detection of root fracture, imaging the pulp chamber, and detection of second mesiobuccal canal of maxillary molars. In the field of fixed prosthodontics, influence of dentin alteration due to aging on OCT imaging was evaluated. In composite restorations, wear is one critical problem in clinic. Subsurface cracks underneath wear traces were observed.

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：歯学・保存治療系歯学

キーワード：歯学 光干渉断層計 歯冠修復

## 1. 研究開始当初の背景

光干渉断層計 (Optical Coherence Tomography, OCT) は、組織の断層画像を、病理組織切片に近い精度で観察できる。OCT の中でも、近赤外光のレーザーを波長変換し、高速で走査して画像を構築する波長走査型 OCT (Swept-Source OCT, SS-OCT) は、精度の高いリアルタイム断層画像を実現しており、歯科の臨床現場において期待されている。SS-OCT は、単に疾患の評価にとどまらず、修復処置歯のメンテナンス、修復物の辺縁適合性の精査や二次う蝕の検出など、歯冠修復領域において多くの恩恵をもたらすものと予想され、本研究を計画するに至った。

## 2. 研究の目的

近赤外光のレーザー波長を高速で変換し、画像を構築する SS-OCT は、解像度と解析速度が飛躍的に向上しており、歯科臨床における実用性が高いと思われる。SS-OCT の歯科臨床への新規導入を目的とし、保存修復学、歯内療法学、歯冠補綴学、歯科理工学において評価を試みた。

## 3. 研究の方法

### (1) エナメル質と象牙質の屈折率の測定

ヒト抜去歯を用い、エナメル質と象牙質について、SS-OCT 画像上で映し出される歯の厚みと、歯の表面から試料台までの距離を計測した値の相違から、屈折率を計算した。

### (2) エナメル質平滑面う蝕の診断

初期う蝕のみられるヒト抜去歯において、健全部も含めて視診を行い、スコア分類した。次に、同部位において SS-OCT による観察を行い、評価した。その後歯を半切し、レーザー顕微鏡 (CLSM) を用いて実際の病巣の拡がりを確認し、感度、特異度、ROC 曲線から Az 値を求め、比較した。

### (3) 歯冠部亀裂の診断

歯冠に亀裂を有すると思われるヒト抜去について、透照診を行い、亀裂の状態をスコア分類した。次に、SS-OCT を用いて断層画

像による亀裂の観察を行い、透照診と同様に評価した。その後歯を半切し、CLSM を用いて実際の亀裂の状態を観察し、それぞれの診断結果と比較した。

### (4) コンポジットレジン修復の辺縁封鎖性・ギャップの定量評価の試み

歯冠部象牙質に形成した 級窩洞にコンポジットレジンを充填し、SS-OCT を用いて辺縁の様相を調査した。撮影した画像にソフトウエアを用い、画像におけるコンポジットレジン辺縁の輝度変換部分をギャップとして判定した。その後、実際に窩洞を半切して CLSM 観察し、画像処理によって得られたギャップの情報が、実際のギャップの位置と一致しているか確認した。

### ・窩壁適合性の 3D 評価

エナメル質に皿状 級窩洞を形成し、コンポジットレジンを充填し SS-OCT を用いて画像情報を高速で取り込み、構築した三次元画像から二次元の断層画像を抽出し、ギャップの有無を観察した。

### (5) OCT を用いた脱灰歯質の定量評価

#### ・エナメル質脱灰の定量評価

牛歯からエナメル質試料を作成し、所定の期間人工脱灰液に浸漬し、エナメル質に生成した脱灰層について OCT 観察を行った。試片を薄切研磨し、TMR 法により脱灰深さとミネラル密度につき評価し、SS-OCT 断層画像における輝度変換とを比較した。

#### ・象牙質脱灰の定量評価

牛歯象牙質を所定の期間脱灰液に浸漬し、生成した脱灰層について SS-OCT 観察を行い、その後試片を薄切研磨し、脱灰の深さとミネラル密度につき TMR 法により評価し、SS-OCT 画像における輝度変換の情報と比較した。

### (6) 脱灰と再石灰化による光の減衰係数の変化

牛エナメル質を脱灰後、再石灰化させ、SS-OCT 画像撮影し、OCT シグナルの減衰

について、ランベルト・ベール の法則から導かれる計算式を利用し、減衰係数パラメータ $\mu_t$ を計測し求めた。

#### (7) 学生実習における修復物適合性の評価

顎模型に装着した右上6番のメラミン歯に齲蝕を想定し、歯学部学生にコンポジットレジン修復を行わせた。終了後、修復を行ったメラミン歯を回収し、コンポジットレジンの適合性をSS-OCTにり評価した。

#### (8) 非う蝕性歯頸部欠損(NCCL)の観察

非う蝕性歯頸部欠損(NCCL)の形状と歯頸部の歯の亀裂、咬合面の残存エナメル質の厚さを、SS-OCTの断層画像から計測した。次に、実際の患者においてNCCLならびに健全歯を、SS-OCTを用いて観察し、咬合面の摩耗と歯頸部における亀裂や脱灰の有無を調査した。

#### (9) 歯根表面の破折線の検出

ヒト抜去歯を用い、まずマイクロCTを用いて観察し、垂直性歯根破折の有無を確認した。次に、視診、歯科用実態顕微鏡(拡大率13.6倍)ならびにOCT画像によって破折線の有無を、3人の評価者が評価した。得られた結果から、マイクロCTの結果を基準として感度・特異度・正答度を計算し、比較した。

#### (10) OCTを用いた歯髄腔の観察

ヒト抜去歯を歯科用コンビームCTで撮影し、歯髄腔までの距離が4mm以下となるように歯冠を切除した。次にマイクロCTならびにOCTを用い、切断面から髄腔までの距離を観察し、比較した。その後、さらに切断面を切削し、それぞれの観察を繰り返し、露髄するまで行った。

#### (11) 上顎大白歯近心頰側第二根管検出

ヒト上顎大白歯近心頰側根(以下「MB2」)を臨床的に検出するには限界がある。MB2をSS-OCTで検出し、その有用性を評価した。

ヒト抜去上顎大白歯の歯冠を、歯軸と垂直に除去した。次に近心頰側根管の歯冠側形成を行った後、マイクロCTで被験歯を撮像、

MB2の有無を判定し、その後SS-OCT,肉眼,歯科用実態顕微鏡下(MS)にてMB2の有無を評価した。

#### (12) 支台歯形成における窩底残存象牙質の計測

まず、歯冠部象牙質の限界測定深度を求めするため、厚さの異なる象牙質切片を用意し、OCTにより撮影した。次に、残存象牙質量0.50mmと1.00mmの象牙質歯髄複合体の切片を用意し、OCTとマイクロCTにて撮影し、OCT画像上の切片表面から象牙質歯髄境までの光学的距離と、マイクロCT上の実測値を比較した。

#### (13) コンポジットレジンの摩耗の評価

6種類のコンポジットレジンに対し、ジルコニア圧子を50N負荷して斜め上方より圧接滑走させて10,000回の摩耗試験を行った。摩耗面を、SS-OCTにて観察した。

### 4. 研究成果

#### (1) エナメル質と象牙質の屈折率の測定

ヒト抜去歯を用い、エナメル質と象牙質の屈折率を測定したところ、エナメル質ならびに象牙質の屈折率の平均値は、それぞれ1.63と1.55であった。エナメル質の屈折率はエナメル小柱の走向による影響をあまり受けなかったが、象牙質の屈折率は象牙細管の走向によって異なっていた。

#### (2) エナメル質平滑面う蝕の診断

平滑面う蝕の観察をSS-OCTを用いて行い、エナメル質に局限した病変と象牙質まで到達したう蝕とを比較すると、エナメル質う蝕の感度、特異度、Az値は、視診との間にほとんど差はなく、臨床経験9年以上の歯科医師のほうが経験3年の歯科医師よりも高い値となった。しかしながら象牙質う蝕の場合、SS-OCTのSE、Az値は視診よりも高く、またその傾向は経験9年以上の歯科医師において顕著であった。

#### (3) 歯冠部亀裂の診断

視診では深さの判別できない亀裂も、

SS-OCT を用いることにより、明瞭に確認することができた。亀裂の検知に関しては感度 0.95、特異度 0.75、Az0.85 であり、すべて視診より上回っていた。また、亀裂の深さの検知に関しても高い感度を示し、感度 0.90、Az0.77 であった。

#### (4) コンポジットレジン修復の辺縁封鎖性・ギャップの定量評価の試み

SS-OCT を用いることにより、コンポジットレジン修復物の内部の辺縁の状態を非破壊的に観察することができ、特に画像処理によってギャップの抽出は容易になった。SS-OCT における輝度変換の長さは、CLSM における実際のギャップの長さと同様に相関がみられ、ほぼ一致していた。その一方で、輝度変換の幅とギャップの幅との間に相関はみられなかった。

#### ・窩壁適合性の 3D 評価

三次元画像構築により、窩洞の外形ならびに充填されたコンポジットレジンの様相を立体的に再現することができた。また、三次元画像構築の任意の部位から得られた二次元断層画像において、窩洞周囲にみられる輝度変換は、接着界面に発生したギャップであることが確認できた。したがって、コンポジットレジン修復の窩洞内部の適合状態を、SS-OCT の三次元画像構築から非破壊的に調査できる可能性が示唆された。

#### (5) OCT を用いた脱灰歯質の定量評価

##### ・エナメル質脱灰の定量評価

脱灰したエナメル質を SS-OCT にて観察したところ、湿潤状態のシグナルと乾燥状態のシグナルのそれぞれの曲線の交点を、脱灰エナメル質の深さの閾値とした場合、その値は TMR により得られたエナメル質の脱灰深さとほぼ一致していた。したがって、SS-OCT から得られた閾値は、エナメル質脱灰病変の定量的評価に用いることが可能と思われた。

##### ・象牙質脱灰の定量評価

TMR より得られた脱灰深さと SS-OCT の境

界までの深さには相関がみられ、( $r^2=0.963$ )、また TMR における Z と SS-OCT におけるシグナルの積分にも相関がみられた ( $r^2=0.652$ )。したがって、SS-OCT から得られた情報から、象牙質の脱灰病変を定量的に評価できる可能性が示唆された。

#### (6) 脱灰と再石灰化による光の減衰係数の変化

エナメル質表層からの反射シグナルは、脱灰によって増加し、再石灰化によって減少していた。ランベルト・ベールの法則から導いた  $\mu_t$  は健全エナメル質において最も小さく、脱灰エナメル質では最も大きかった。

#### (7) 学生実習における修復物適合性の評価

SS-OCT を用いることにより、メラミン歯に修復したコンポジットレジンの内部の状態を観察することができた。SS-OCT の断層画像の結果を学生と供覧することによって、コンポジットレジン修復における充填操作の重要性を指摘することができた。

#### (8) 非う蝕性歯頸部欠損 (NCCL) の観察

SS-OCT 画像と歯の半切面から得られた CLSM 画像を比較した結果、歯頸部にみられる亀裂は SS-OCT 画像上で明らかな白線となって観察することができ、咬合面の残存エナメル質の厚さと歯頸部の亀裂の有無との間に有意な相関がみられた。

#### (9) 歯根表面の破折線の検出

視診、歯科用実態顕微鏡ならびに OCT 画像によって破折線の有無を評価した結果、視診、実態顕微鏡、OCT による感度は、それぞれ 0.49、0.86、0.90 であった。特異度は、0.92、0.88、0.88 であった。また正答率は、0.49、0.86、0.90 であった。

#### (10) OCT を用いた歯髓腔の観察

OCT を用いて歯髓腔を観察することができた歯は、髓腔までの距離が 2mm 以上では 33 本中 3 本のみであり、また、1mm 以上 2mm 未満では 25 本中 14 本、1mm 未満では 30 本の歯すべてを観察することができた。したがって、

露髄のリスクの高まる深い窩洞では、OCT を用いて歯髄の位置を確認できる可能性が示唆された。

#### ( 1 1 ) 上顎大白歯近心頬側第二根管検出

MB 2 を検出する感度は、NS が SS-OCT に比較し有意に高かった。特異度は、SS-OCT が MS に比較し有意に高かった。

#### ( 1 2 ) 支台歯形成における窩底残存象牙質の計測

象牙質切片を用意し OCT により撮影した結果、厚さ 1.00mm 以下の象牙質切片は全て切片底辺まで OCT 画像を取得できた。また、残存象牙質量 0.50mm と 1.00mm の象牙質歯髄複合体の切片について、OCT 画像上の歯髄までの光学的距離とマイクロ CT 上の実測値を比較した結果、0.50mm 残存象牙質量の切片の OCT 画像長さ変化割合は 1.00mm のものより有意に低かった。

#### ( 1 3 ) コンポジットレジン of 摩耗の評価

SS-OCT 観察により、研磨条痕下に存在する表面化亀裂を観察することができ、摩耗条痕を亀裂の発生程度により分類することが可能であった。

### 5 . 主な発表論文等

( 研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線 )

[ 雑誌論文 ] ( 計 1 4 件 )

1. Makishi P, Shimada Y, Sadr A, Tagami J, Sumi Y. Non-destructive 3D imaging of composite restorations using optical coherence tomography: marginal adaptation of self-etch adhesives. Journal of Dentistry 39: 316-25, 2011.
2. Natsume Y, Nakashima S, Sadr A, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Estimation of lesion process in artificial root caries by swept source optical coherence tomography in comparison to transverse microradiography. Journal of Biomedical Optics 16: 071408, 2011.
3. Bakhsh TA, Sadr A, Shimada Y, Tagami J,

Sumi Y. Non-invasive quantification of resin-dentin interfacial gaps using optical coherence tomography: validation against confocal microscopy. Dental materials 27: 915-25, 2011.

4. Hariri I, Sadr A, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Effects of structural orientation of enamel and dentin on light attenuation and local refractive index: an optical coherence tomography study. J Dent 40:387-96, 2012.
5. Imai K, Shimada Y, Sadr A, Tagami J, Sumi Y. Noninvasive cross-sectional visualization of enamel cracks by optical coherence tomography. Journal of Endodontics 38(9): 1269-74, 2012.
6. Shimada Y, Sadr A, Nazari A, Nakagawa H, Otsuki M, Tagami J, Sumi Y. 3D evaluation of composite resin restoration at practical training using swept-source optical coherence tomography (SS-OCT). Dent Mater J 31(3); 409-17, 2012.
7. Bista B, Sadr A, Nanazri A, Shimada Y, Sumi Y, Tagami J. Non-destructive assessment of current one-step self-etch dental adhesives using optical coherence tomography. Journal of Biomedical Optics 18(7): 076020, 2013
8. Bakhsh TA, Sadr A, Shimada Y, Mandurah MM, Hariri I, Alsayed EZ, Tagami J, Sumi Y. Concurrent evaluation of composite internal adaptation and bond strength in a class-I cavity. Journal of Dentistry 41(1): 60-70, 2013.
9. Hariri I, Sadr A, Nakashima S, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Estimation of the enamel and dentin mineral content from the refractive index. Caries Research 47(1): 18-26, 2013.
10. Mandurah MM, Sadr A, Shimada Y, Kitasako Y, Nakashima S, Bakhsh TA,

- Tagami J, Sumi Y. Monitoring remineralization of enamel subsurface lesions by optical coherence tomography. *Journal of Biomedical Optics* 18(4):046006, 2013.
11. Nakagawa H, Sadr A, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Validation of swept source optical coherence tomography (SS-OCT) for the diagnosis of smooth surface caries in vitro. *Journal of Dentistry* 41(1): 80-9, 2013.
  12. Nazari A, Sadr A, Campillo-Funoller M, Nakashima S, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Effect of hydration on assessment of early enamel lesion using swept-source optical coherence tomography. *Journal of Biophotonics* 6(2): 171-7, 2013.
  13. Nazari A, Sadr A, Saghiri MA, Campillo-Funollet M, Hamba H, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Non-destructive characterization of voids in six flowable composites using swept-source optical coherence tomography. *Dental Materials* 29(3): 278-86, 2013.
  14. Shimada Y, Nakagawa H, Sadr A, Wada I, Nakajima M, Nikaido T, Otsuki M, Tagami J, Sumi Y. Noninvasive cross-sectional imaging of proximal caries using swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) in vivo. *Journal of Biophotonics* 2013 Epub2013/3/1.

[学会発表](計20件)

1. Natsume Y, Nakashima S, Shimada Y, Sadr A, Tagami J, Sumi Y. SS-OCT estimation of lesion depth in artificial root carious lesions. IADR general session, March 16-19, 2011, San Diego, USA
2. Bakhsh TA, Sadr A, Shimada Y, Mandurah M, Alsayed EZ, Tagami J, Sumi Y. Non-destructive evaluation of internal cavity

adaptation in class II resin composite. IADR general session, Seattle, 2013.

3. Mandurah M, Sadr A, Nakashima S, Bakhsh T, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Enamel lesion remineralization evaluated by nanoindentation and optical coherence tomography. IADR general session, Seattle, 2013.
4. Shimada Y, Nakagawa H, Sadr A, Nakajima M, Nikaido T, Otsuki M, Tagami J, Sumi Y. Non-invasive cross-sectional imaging of proximal caries using SS-OCT in vivo. IADR general session, Seattle, 2013.
5. Wada I, Shimada Y, Sadr A, Nakashima S, Tagami J, Sumi Y. Assessment of non-carious cervical lesions using optical coherence tomography. IADR general session, Seattle, 3 2013.

6. 研究組織

(1)研究代表者

田上 順次 (TAGAMI, Junji)  
東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・教授  
研究者番号：50171567

(2)研究分担者

島田 康史 (SHIMADA, Yasushi)  
東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・助教  
研究者番号：60282761

駒田 亘 (KOMADA, Wataru)  
東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・講師  
研究者番号：10447493

海老原 新 (EBIHARA, Arata)  
東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・助教  
研究者番号：60251534

高橋 英和 (TAKAHASHI, Hidekazu)  
東京医科歯科大学・歯学部・教授  
研究者番号：90175430