総説**REVIEW ARTICLE****歯内療法への OCT の応用**飯野 由子^{1,2}, 海老原 新², 砂川 光宏^{2,3}, 興地 隆史²¹東京医科歯科大学 (TMDU) 歯学部附属病院 維持系診療科 むし歯外来²東京医科歯科大学 (TMDU) 大学院 医歯学総合研究科 医歯学系専攻 口腔機能再構築学講座 歯髄生物学分野³東京医科歯科大学 (TMDU) 歯学部附属病院 総合診療科 クリーンルーム 歯科外来

(平成 30 年 2 月 27 日受理, 平成 30 年 4 月 22 日掲載決定, 平成 30 年 5 月 30 日 J-STAGE 早期公開)

Application of Optical Coherence Tomography in Endodontics Yoshiko Iino^{1,2}, Arata Ebihara², Mitsuhiro Sunakawa^{2,3}, Takashi Okiji²¹*Operative Dentistry and Endodontics, Clinic for Conservation of Oral and Maxillofacial Function, Dental Hospital, Tokyo Medical and Dental University (TMDU)*²*Department of Pulp Biology and Endodontics, Division of Oral Health Sciences, Medical and Dental Sciences, Graduate School of Medical and Dental Sciences, Tokyo Medical and Dental University (TMDU)*³*Clean Room, Clinic for General Dentistry, Dental Hospital, Tokyo Medical and Dental University (TMDU)*

(Received February 27, 2018, Accepted April 22, 2018, Advance Publication released online May 30, 2018)

要 旨

歯内療法とは、歯髄疾患あるいは根尖性歯周疾患に対して、原因となる根管内細菌感染を制御するとともに再感染を防止し、歯を保存する治療方法である。歯内療法を遂行するにあたり、その治療対象である歯髄腔および根管形態の複雑さを三次元的に把握することが必要不可欠である。光干渉断層計 (OCT) は、近赤外光を用いて非侵襲的に組織内部の精密断層像が得られる医療撮像用技術である。本稿では、歯髄腔や根管の検出、根尖切除時の根尖部の観察、垂直性歯根破折の診断など、歯内療法のさまざまな臨床的局面における OCT の応用の可能性について、著者らの基礎的研究結果を中心に概説する。

キーワード: 光干渉断層計, 歯内療法, 根管形態**Abstract**

Endodontic treatment is a procedure performed to preserve a tooth with pulpal and/or periapical diseases by controlling causative bacterial infection within the root canal system and preventing reinfection. Any attempt to perform endodontic treatment must be preceded with a three-dimensional understanding of the morphological complexity of the pulp chamber and the root canal system to be treated. Optical coherence tomography (OCT) is a medical imaging technique that can obtain a precise tomogram inside the tissue non-invasively using near infrared light. In this article, we will give an overview of possible application of OCT to various phases of endodontic treatment, including detection of the pulp chamber and root canal, inspection of the resected root surface during apicoectomy and diagnosis of vertical root fracture, based primarily on our experimental findings.

Key words: optical coherence tomography, endodontic therapy, root canal configuration

1. 歯内療法と歯髓腔・根管形態

歯は硬組織の内部に軟組織が存在するという解剖学的に特異な構造体であり、しかも硬組織として外胚葉性のエナメル質と中胚葉性の象牙質、セメント質が混在している。内部の軟組織である歯髓は、神経および血管が豊富に分布した疎性結合組織である。歯髓が存在する硬組織内の空間を歯髓腔と呼び、特に歯根内の部分を根管という (Fig.1)。

う蝕などが原因で歯髓腔に細菌感染が生じると、容易に歯髓炎が発症する。臨床症状としては、冷水痛、温熱痛、自発痛といった痛みが一般的である。この時点で歯髓除去療法 (抜髄法) が適切に行われれば、患者の感ずる痛みを取り除くことができ、歯を保存してその機能を維持することができる。加療が行われずに歯髓内の細菌感染が進行し、歯髓が壊死に陥ると、根管内は免疫応答が作動しない細菌増殖の温床となり、偏性嫌気性菌を中心とした感染が成立する。さらに、歯根の先端付近に存在する根尖孔を經由して歯周組織に細菌感染の影響が及ぶと、根尖性歯周炎が発症し、咬合痛、根尖部歯肉の腫脹や圧痛、瘻孔形成などの種々の自覚症状がしばしば発現する。また、根尖部の周囲に歯槽骨吸収が生じることから、根尖部エックス線透過像を認めるようになる (Fig. 2a)。

歯内療法とは、歯髓疾患および根尖性歯周疾患に対して、原因となる細菌感染を制御するとともに再感染を防止し、歯を保存する治療方法である。大多数の症例では、歯髓腔や根管内の細菌の可及的除去を目的として、炎症歯髓や壊死組織などの歯髓腔内容物の除去、根管壁象牙質の切削による感染源の機械的除去 (根管形成)、および化学的な感染源の排除 (根管洗浄) で構成される一連の根管治療が施されたのち、再感染を防止する目的で根管の人工的封鎖 (根管充填) が行われる。その結果、根尖

歯周組織の健康の維持、もしくは根尖性歯周炎の回復が図られ (Fig.2b)、口腔内に歯を保存し、その機能を維持させることが可能となる。

歯内療法における診断ならびに処置の遂行に際して、複雑な三次元的空間である歯髓腔および根管形態の把握が重要である。実際、根管側枝、根管イスムス (二つの根管の間に形成される狭いリボン状の交通路) などの複雑な形態がしばしば存在する。歯科用実体顕微鏡や歯科用コーンビーム CT (CBCT) の歯内療法への応用は、これらの複雑な形態に関する情報を飛躍的に増加させることが可能であるため、病態の診断や処置の精度の向上に大きく貢献している。しかし、歯科用実体顕微鏡では観察可能部位が被観察体の表面に局限しており、また CBCT はエックス線被曝の観点から撮像は最小限にとどめる配慮が必要であるとともに、現時点では画素数の関係から微細構造の検出に限界がある。

他方、1990 年代に近赤外光の干渉を利用し、表層の断層画像を得ることができる画像診断装置として光干渉断層計 (optical coherence tomography; OCT) が開発された¹⁾。OCT は非侵襲的に組織内部の精密断層像が得られる医療撮像用技術である。本稿では、これまでに著者らが得た基礎的研究の成果を中心に、歯内療法のさまざまな臨床的局面における OCT の応用の可能性について概説する。

2. 歯内療法における OCT 応用の可能性

2.1 髓腔開拓への応用

2.1.1 歯髓腔の検出

根管治療を行う際の最初のステップは、歯髓腔に治療用器具を到達させるために、歯冠部の硬組織 (エナメル質および象牙質) を切削し、天蓋と呼ばれる歯髓腔の咬合面側の象牙質を除去する髓腔開拓である。三次元的な

Fig.1 Tooth anatomy. Left: facial view of a permanent maxillary incisor, showing crown (*) and root (**). Right: longitudinal section of the same tooth, showing enamel (E), dentin (D), pulp chamber (P) and cementum (C).

Fig.2 Periapical radiographs taken before (a) and after (b) root canal treatment. (a) Preoperative radiograph of a mandibular left central incisor with a periapical radiolucent area (periapical lesion; arrow). (b) Postoperative radiograph taken two years after root canal filling of the same tooth. The periapical lesion is healing.

歯髓腔の位置は歯の外表面からは認識できないため、一般的には口内法エックス線写真を参考に行われる。しかし、口内法エックス線写真は立体構造を二次元平面に投影した画像であることから、歯髓腔の狭窄や歯軸の頬舌的な傾斜、あるいは歯冠補綴装置の存在等により、歯髓腔の三次元的形態の把握が困難な症例に遭遇することがある。髓腔開拓を誤った方向に進めてしまった場合には歯や根管壁に穿孔を起こし不良な経過を辿る恐れがある。また、穿孔に至らなくても、不必要な切削により健全歯質が失われることになる。現在では髓腔開拓中に歯髓腔の位置を探索するためには、口内法エックス線写真やCBCT²⁾の撮像が行われる。しかしながら、上述のように口内法エックス線写真では三次元的な方向の把握は不可能であり、CBCTでは被曝線量が大きいことから頻回には撮像できず、加えてリアルタイムに撮像できないという欠点がある。

著者らは、OCTによる歯髓腔境界の検出の可能性を検討する目的で、ヒト抜去歯の象牙質内部の歯髓腔の髓角をOCTで検出し、得られた画像上における象牙質残余量の計測値をCBCT画像により得られた数値と比較検討し、それらの相関関係の有無を検討した³⁾。すなわち、事前に根管治療がなされていないこと、大きな修復物がないことを確認したヒト抜去下顎大臼歯を、歯冠の最大豊隆部で歯軸方向と垂直に切断し、Micro CT (Fig.3a) およびCBCT (Fig.3b) で撮像後、三次元画像処理ソフトウェアを用いて三次元構築を行い、基準となる切断面から髓角までの距離を計測し、OCT (Fig.3c) で計測した距離との関連を評価した。その結果、残存象牙質の厚みが2.33 mm 以下の場合、Micro CT で計測した場合と同様

にOCTを用いて髓腔の位置を的確に把握できる可能性が示唆された。先行研究においては、OCTの波長1,280 nmでは象牙質厚み1 mm、850 nmでは0.6 mmで歯髓腔を検出できたと報告されている⁴⁾。著者らの研究では中心波長1,310 nmの波長掃引型のOCTを使用した。OCT装置はリアルタイムかつチェアサイドにおける使用が可能であることから、この装置を用いて象牙質で周囲を囲まれた内部の構造物の正確な把握が可能となれば、髓腔開拓時の穿孔や不必要な歯質切削を回避し、安全かつ適切な髓腔開拓が期待される。

2.1.2 レーザーとOCTによる髓腔開拓

歯の切削は通常、回転切削器具（ダイヤモンドバーやカーバイドバー）をハンドピースに装着して行われるが、切削する際に振動や強い音が生じ、それが患者を不快・不安にさせることも事実である^{5,6)}。各種のレーザーの中でEr:YAGレーザーは、波長が2,940 nmで、水分子を水蒸気爆発させることにより、歯や骨などの硬組織を切削する能力を持つとされている⁷⁾。歯内療法においても、う蝕除去や根管口明示におけるEr:YAGレーザーの有用性がこれまで報告されており、髓腔開拓への応用も期待できる^{8,9)}。Er:YAGレーザー装置は既存の回転切削装置と異なり、切削時に振動が生じず、歯科用実体顕微鏡下でも視野を確保できるという利点がある。しかしながら、回転切削装置を用いた髓腔開拓では、歯髓腔に到達すると象牙質を切削する抵抗感覚がなくなるので、切削感覚の違いにより髓腔に到達したことを把握できることが多いが、レーザー装置による硬組織切削では、この種の切削感覚のフィードバックが得られない^{8,10,11)}。

Fig.3 Detection of a pulpal horn (arrow) of a mandibular molar with (a) three-dimensional micro CT, (b) CBCT and (c) two-dimensional OCT.

そこでEr:YAGレーザーを使用し、OCTで歯髄腔の位置を把握しながら髄腔開拓を行う可能性を検討した¹²⁾。すなわち、ヒト抜去上顎前歯舌側面に、歯科用実体顕微鏡下で、Er:YAGレーザー装置 (Erwin AdvErl, J. Morita MFG, Kyoto, Japan) にプローブチップを装着し 100 mJ, 10 pps の照射条件および注水下 (5 mL/min) で 10 秒間照射後 (Fig.4a), ただちに OCT による窩洞の観察 (Fig.4b) を行い、歯髄腔が露出するまでこれを繰り返した。その結果、象牙質の厚み 0.44–1.69 mm の範囲で OCT により歯髄腔が検出可能であるとともに、すべての試料でレーザー切削により髄腔に到達しえた。本研究の結果より、OCT 装置で歯髄腔と窩洞の位置関係をモニターすることにより、Er:YAG レーザーを用いた髄腔開拓を確実に実行する可能性が示唆された。

2.2 根管の探索

歯内療法では髄腔開拓の次のステップは、根管の探索を行い、根管内を機械的、化学的に清掃し、根管形成を行うことである。根管系の解剖学的形態は複雑で、同一歯種でも個々の歯で多様性に富む構造を示すため、根管の見落としに注意を払う必要がある。根管治療で未処置となった根管には多量の細菌が残存し、歯内治療の予後経過不良の一因となりかねない。特に上顎大臼歯の近心頬側根は二根管性となることがあり (近心頬側第一根管: MB1 と近心頬側第二根管: MB2), MB2 は解剖学的には 36–95% の歯に存在するとされているが^{13,14)}、臨床における MB2 検出率は 17–65% と報告されている^{15,16)}。これは、MB2 が臨床的に検出困難でしばしば未処置にとどまることを示唆するが、その理由として、MB2 が根管口付近でしばしば歯髄腔の石灰化による狭窄した形態を呈し、しかもその存在する位置に個体差があることを挙げることができる。再根管治療では、初回根管治療に比較して MB2 の検出率が有意に高かったという報告¹⁷⁾もあり、未処置の MB2 が根管治療の経過不良の要因となる可能性が指摘されている。MB2 は、歯科用実体顕微鏡や拡大鏡といった拡大視野下で超音波切削装置を使用し的確に切削を加えることにより、その検出率が增加することがこれまでに報告されている^{15,18–20)}。一方、MB2 の探索に

こだわるあまり、この過程で歯質の過剰な切削や穿孔を引き起こす危険性も指摘されている^{21,22)}。

著者らは、ヒト抜去上顎大臼歯を用いて、MB2 の検出における OCT の有用性を検討した²³⁾。すなわち、ヒト抜去上顎大臼歯を肉眼、歯科用実体顕微鏡、OCT で観察し、MB2 検出の有無を評価した。それぞれの評価結果を Micro CT による Gold standard と比較し、MB2 の検出精度を比較した。その結果、検出感度については歯科用実体顕微鏡 (0.947)、検出特異度については OCT (0.714) が最も高値を示した。さらに OCT を用いた場合、根管口が髄床底に出現する MB2 だけでなく、根管中央付近で分岐しており臨床的に検出が困難と思われる MB2 も検出可能であった (Fig.5a, b)。この結果から、歯科用実体顕微鏡と OCT を併用することで、より安全かつ正確な MB2 探索を行えると考えられた。

2.3 外科的歯内療法における根尖部の観察

複雑な根管形態を呈する症例では根管内の機械的、化学的清掃で根管内細菌を完全に除去することは困難であり、また根尖孔外にバイオフィルムが形成されているなどの理由から、通常の根管治療では良好な経過が得られない場合がある²⁴⁾。また、根管治療は通常補綴装置の除去を要するが、これが困難もしくは不可能な症例も存在する。これらの症例では歯の保存の最終的手段として外科的歯内療法 (歯根尖切除および逆根管充填) が行われる場合がある。すなわち、歯肉を剥離翻転後、根尖部硬組織を切除し (Fig.6a, b)、歯根切断面から逆根管充填用窩洞形成を行い (Fig.6c)、逆根管充填を行う (Fig.6d)²⁵⁾。現在では歯科用実体顕微鏡、CBCT、および超音波器具の発展により、外科的歯内療法の予知性向上が図られている^{25–27)}。とりわけ、術中に歯科用実体顕微鏡下で根尖の切断面を観察することにより (Fig.6a, b)、根管側枝、イスマス、亀裂などの治癒不全にかかわる因子²⁸⁾の検出がしばしば可能となる。しかし、前述した通り歯科用実体顕微鏡で観察できる範囲は切断面表面に限られ、深部の評価は困難である。

これに対して、OCT は高解像度で象牙質内の構造物を観察でき、放射線被曝も無いために術中に複数回リアル

Fig.4 Cavity preparation by Er:YAG laser irradiation. (a) Macroscopic view during laser irradiation, (b) An OCT image showing the cavity prepared by laser irradiation (yellow arrow) and the pulp chamber (red arrow).

Fig.5 Images of the mesiobuccal canal of a maxillary molar. (a) Three-dimensional image by micro CT, showing bifurcation of the mesiobuccal canal (arrow). (b) A cross sectional OCT image of the same tooth, which was three-dimensionally scanned from the coronal side. MB2 is clearly observed (arrow). <B>, buccal side; <P>, palatal side.

Fig.6 Apical microsurgery (apicoectomy and retrograde root-end filling) of a maxillary left lateral incisor. (a) Apical dentin defect was observed (arrow) after a part of the apical portion of the root was resected. (b) After additional resection, endodontic sealer cement in the lateral canal (arrow) was observed. (c) Root-end cavity preparation with an ultrasonic device. (d) Root-end filling with Super EBA cement shown at high magnification. Block arrows show images of the resected root surface on a micromirror placed inside the surgical cavity. (e) The surgical area at low magnification immediately before suturing. (f) Periapical radiograph taken just after the surgery. (g) Periapical radiograph taken at fifteen months after the surgery, showing periapical bone healing.

タイムで撮像できることから、歯根の切断面の観察に応用できる可能性がある。そこで著者らは、OCTを用いてヒト抜去上顎小白歯根尖切断面の観察を行い、その根管数の検出精度をCBCT、歯科用実体顕微鏡と比較した²⁹⁾。すなわち、ヒト抜去上顎小白歯の根尖部をMicro CTで撮像したものをGold Standardとし (Fig.7a, b), CBCTで撮像後 (Fig.7c), 根尖部を切除した。その切断面に対してOCTで根尖側から三次元撮像を行い、水平断層画像を観

察するとともに (Fig.7d), 歯科用実体顕微鏡で観察し (Fig.7e), 根尖側の微細な根管数の検出精度を比較した。その結果、OCT, CBCT, 歯科用実体顕微鏡による根管数の検出精度に有意差を認めなかったが、CBCTで検出できなかった微細な根管を、OCTにより検出することができた。最近では、根管治療により発生した根尖部の亀裂をOCTにより検出できたとの報告もなされている³⁰⁾。今後、根尖部外科手術を想定した亀裂やイスマスの検出

Fig.7 (a) A three-dimensional micro CT image of the apical portion of a maxillary premolar with apical ramification. (b–d) Cross sectional images of root canals (arrows) taken with micro CT (b), CBCT (c) and OCT (d). (e) A dental operating microscopic image of the resected surface of the root.

についてもさらなる検討を行いたい。ただし、口腔内で OCT を根尖部外科手術に応用するには、より小型で精密な画像検索が可能なプローブの開発が必要となる。

2.4 歯根破折の検出

歯根破折は歯に過大な外力が加わることで生じ、破折面の方向により垂直性歯根破折と水平性歯根破折に大別される。両者の治療方法は大きく異なり、水平性歯根破折であれば保存的治療の可能性もあるが^{31,32)}、垂直性歯根破折では歯軸方向に破折面が発生し、改善困難な歯周組織の破壊が生じることから、治療方法としては抜歯が第一選択である³³⁾。抜歯に至った既根管治療歯の 11% に垂直性歯根破折が生じていたと報告されている³⁴⁾。また、徹底した口腔ケアが行われた患者における歯の喪失原因を 30 年間追跡調査した結果、う蝕や歯周病はそれぞれ 7%、5% 以下であったが、垂直性歯根破折は 62% であり、最多数であったとの報告もみられる³⁵⁾。医療技術の進歩や口腔ケアに対する患者の意識の向上に伴い、う蝕や歯周病による歯の喪失は減少傾向にあると考えられるが、一方で歯根破折による歯の喪失の頻度が増加し、その的確な診断の重要性が増している。垂直性歯根破折の特徴的な所見としては、口内法エックス線写真では歯根を取り囲む暈状のエックス線透過像や、限局性の深い歯周ポケットの出現が挙げられる。歯根破折の症状は、根尖性歯周炎や辺縁性歯周炎の症状と類似しているが³⁶⁾、治療方法が大きく異なるため、鑑別診断が重要となる。CBCT における骨欠損形態の解析により通常の根尖性歯周炎と歯根破折の鑑別診断が可能との報告もみられるが³⁷⁾、微細な破折の検出は臨床的にしばしば困難である

ことが臨床上の大きい問題点となっている。歯根破折の確定診断には破折線の検出が不可欠であり、肉眼、拡大鏡、歯科用実体顕微鏡による外科的あるいは非外科的な視診が用いられる。しかし、それらの方法はいずれも歯根表面に視認可能な幅、長さの破折線が出現したときに初めて有用となる。

著者らはヒト抜去歯を用いて OCT による歯根表面の破折線の検出精度について検討した³⁸⁾。すなわち、ヒト抜去下顎大臼歯を用いて、Micro CT による観察で得られた破折線の有無を Gold Standard とし (Fig.8a)、各観察者が肉眼、歯科用実体顕微鏡、並びに OCT の 3 種類の方法で各根の破折の有無の判定を行い、それぞれの検出精度を評価した。その結果、OCT の歯根破折の検出能力は肉眼よりも優れており、歯科用実体顕微鏡と同程度であることが示唆された。OCT では歯根表面から内部へ伸展している破折線の拡がり (Fig.8b) や、歯根表面に達していない内部からの破折線を評価できる可能性があると考えられる。破折線の検出に関しては、歯冠部のエナメル質亀裂の検出に OCT が有用であったと報告されているほか^{39,40)}、根管内部から OCT で破折線を検出できる可能性についても示されている⁴¹⁾。今回の研究結果からさらに臨床的な応用領域が広がり、歯肉退縮により露出した歯根面、あるいは歯周外科治療や外科的歯内療法の際の歯根面の観察に OCT を応用することで、歯根破折の検出頻度向上が図られる可能性がある。

3. 今後の基礎研究と臨床応用の発展

OCT は、装置がコンパクトでありチェアサイドに設置可能である。また、瞬時に断層画像が得られ、非侵襲性

Fig.8 (a) A cross-sectional micro CT image of a tooth root, showing a crack line (arrows). (b) A cross sectional OCT image, showing the same crack (arrows). The light source was projected onto the root surface and scanned.

であることから、治療中に何度も撮像することができる。歯内療法において、OCTは歯科用実体顕微鏡やCBCTといった既存の画像診断装置と組み合わせて使用することで、それぞれの弱点を補完し、さらに精度の高い根管治療を遂行できる可能性がある。著者らが行ったOCTの有用性に関するこれまで基礎研究の結果は上述の通りであるが、今後はそれらの知見を基にした臨床研究が望まれる。OCTでは象牙質内部への光到達深度に限界があり、その向上が必要であるという課題があるものの、今後の更なる発展に期待するところである。

謝辞

本稿を終えるに当たり、研究に御協力いただいた東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科口腔機能再構築学講座歯髓生物学分野の諸先生各位ならびに共同研究者の国立長寿医療研究センター歯科口腔先進医療開発センターの角保徳先生に深く感謝申し上げます。

利益相反の開示

開示すべき利益相反なし。

参考文献

- Huang D, Swanson EA, Lin CP, Schuman JS, Stinson WG, Chang W, Hee MR, Flotte T, Gregory K, Puliafito CA, Fujimoto JG. Optical coherence tomography. *Science*. 1991; 254: 1178-1181.
- Krastl G, Zehnder MS, Connert T, Weiger R, Kuhl S. Guided endodontics: a novel treatment approach for teeth with pulp canal calcification and apical pathology. *Dent Traumatol*. 2016; 32: 240-246.
- Iino Y, Yoshioka T, Hanada T, Ebihara A, Sunakawa M, Sumi Y, Suda H. Observation of the pulp horn by swept source optical coherence tomography and cone beam computed tomography. *Proc of SPIE*. 2015; 9306: 93060I-1-93060I-5.
- Fonsêca DDD, Kyotoku BBC, Maia AMA, Gomes ASL. In vitro imaging of remaining dentin and pulp chamber by optical coherence tomography: comparison between 850 and 1280 nm. *J Biomed Opt*. 2009; 14: 024009-024009-024005.
- Keller U, Hibst R, Geurtsen W, Schilke R, Heidemann D, Klaiber B, Raab WH. Erbium:YAG laser application in caries therapy. Evaluation of patient perception and acceptance. *J Dent*. 1998; 26: 649-656.
- Liu JF, Lai YL, Shu WY, Lee SY. Acceptance and efficiency of Er:YAG laser for cavity preparation in children. *Photomed Laser Surg*. 2006; 24: 489-493.
- De Moor RJ, Delme KI. Laser-assisted cavity preparation and adhesion to erbium-lased tooth structure: part 1. Laser-assisted cavity preparation. *J Adhes Dent*. 2009; 11: 427-438.
- Aoki A, Ishikawa I, Yamada T, Otsuki M, Watanabe H, Tagami J, Ando Y, Yamamoto H. Comparison between Er:YAG laser and conventional technique for root caries treatment in vitro. *J Dent Res*. 1998; 77: 1404-1414.
- Mazeki K, Kimura Y, Yokoyama K, Matsumoto K. Preparation of root canal orifices by Er:YAG laser irradiation: in vitro and clinical observations. *J Clin Laser Med Surg*. 2003; 21: 85-91.
- Dommisch H, Peus K, Kneist S, Krause F, Braun A, Hedderich J, Jepsen S, Eberhard J. Fluorescence-controlled Er:YAG laser for caries removal in permanent teeth: a randomized clinical trial. *Eur J Oral Sci*. 2008; 116: 170-176.
- Schwass DR, Leichter JW, Purton DG, Swain MV. Evaluating the efficiency of caries removal using an Er:YAG laser driven by fluorescence feedback control. *Arch Oral Biol*. 2013; 58: 603-610.
- Ding J, Ebihara A, Watanabe S, Iino Y, Kokuzawa C, Anjo T, Suda H, Sumi Y. Application of optical coherence tomography to identify pulp exposure during access cavity preparation using an Er:YAG laser. *Photomed Laser Surg*. 2014; 32: 356-359.
- Pecora JD, Woelfel JB, Sousa Neto MD, Issa EP.

- Morphologic study of the maxillary molars. Part II: Internal anatomy. *Braz Dent J*. 1992; 3: 53-57.
- 14) Kulild JC, Peters DD. Incidence and configuration of canal systems in the mesiobuccal root of maxillary first and second molars. *J Endod*. 1990; 16: 311-317.
  - 15) Stropko JJ. Canal morphology of maxillary molars: clinical observations of canal configurations. *J Endod*. 1999; 25: 446-450.
  - 16) Hartwell G, Bellizzi R. Clinical investigation of in vivo endodontically treated mandibular and maxillary molars. *J Endod*. 1982; 8: 555-557.
  - 17) Wolcott J, Ishley D, Kennedy W, Johnson S, Minnich S, Meyers J. A 5 Yr Clinical investigation of second mesiobuccal canals in endodontically treated and retreated maxillary molars. *J Endod*. 2005; 31: 262-264.
  - 18) Yoshioka T, Kikuchi I, Fukumoto Y, Kobayashi C, Suda H. Detection of the second mesiobuccal canal in mesiobuccal roots of maxillary molar teeth ex vivo. *Int Endod J*. 2005; 38: 124-128.
  - 19) Buhrey LJ, Barrows MJ, BeGole EA, Wenckus CS. Effect of magnification on locating the MB2 canal in maxillary molars. *J Endod*. 2002; 28: 324-327.
  - 20) Gorduysus MO, Gorduysus M, Friedman S. Operating microscope improves negotiation of second mesiobuccal canals in maxillary molars. *J Endod*. 2001; 27: 683-686.
  - 21) Seidberg BH, Altman M, Guttuso J, Suson M. Frequency of two mesiobuccal root canals in maxillary permanent first molars. *J Am Dent Assoc*. 1973; 87: 852-856.
  - 22) Pomeranz HH, Fishelberg G. The secondary mesiobuccal canal of maxillary molars. *J Am Dent Assoc*. 1974; 88: 119-124.
  - 23) Iino Y, Ebihara A, Yoshioka T, Kawamura J, Watanabe S, Hanada T, Nakano K, Sumi Y, Suda H. Detection of a second mesiobuccal canal in maxillary molars by swept-source optical coherence tomography. *J Endod*. 2014; 40: 1865-1868.
  - 24) Song M, Kim HC, Lee W, Kim E. Analysis of the cause of failure in nonsurgical endodontic treatment by microscopic inspection during endodontic microsurgery. *J Endod*. 2011; 37: 1516-1519.
  - 25) Kim S, Kratchman S. Modern endodontic surgery concepts and practice: A review. *J Endod*. 2006; 32: 601-623.
  - 26) Caliskan MK, Tekin U, Kaval ME, Solmaz MC. The outcome of apical microsurgery using MTA as the root-end filling material: 2- to 6-year follow-up study. *Int Endod J*. 2016; 49: 245-254.
  - 27) Saunders WP. A prospective clinical study of periradicular surgery using mineral trioxide aggregate as a root-end filling. *J Endod*. 2008; 34: 660-665.
  - 28) Song M, Shin SJ, Kim E. Outcomes of endodontic micro-surgery: a prospective clinical study. *J Endod*. 2011; 37: 316-320.
  - 29) Ebihara A, Iino Y, Yoshioka T, Hanada T, Sunakawa M, Sumi Y, Suda H. Apices of maxillary premolars observed by swept source optical coherence tomography. *Proc of SPIE*. 2015; 9306: 93060J-1-93060J-5.
  - 30) de Oliveira BP, Camara AC, Duarte DA, Gomes ASL, Heck RJ, Antonino ACD, Aguiar CM. Detection of apical root cracks using spectral domain and swept-source optical coherence tomography. *J Endod*. 2017; 43: 1148-1151.
  - 31) Diangelis AJ, Andreasen JO, Ebeleseder KA, Kenny DJ, Trope M, Sigurdsson A, Andersson L, Bourguignon C, Flores MT, Hicks ML, Lenzi AR, Malmgren B, Moule AJ, Pohl Y, Tsukiboshi M, International Association of Dental Traumatology. International association of dental traumatology guidelines for the management of traumatic dental injuries: 1. fractures and luxations of permanent teeth. *Dent Traumatol*. 2012; 28: 2-12.
  - 32) May JJ, Cohenca N, Peters OA. Contemporary management of horizontal root fractures to the permanent dentition: diagnosis—radiologic assessment to include cone-beam computed tomography. *J Endod*. 2013; 39: S20-S25.
  - 33) Tamse A, Fuss Z, Lustig J, Kaplavi J. An evaluation of endodontically treated vertically fractured teeth. *J Endod*. 1999; 25: 506-508.
  - 34) Fuss Z, Lustig J, Tamse A. Prevalence of vertical root fractures in extracted endodontically treated teeth. *Int Endod J*. 1999; 32: 283-286.
  - 35) Axelsson P, Nystrom B, Lindhe J. The long-term effect of a plaque control program on tooth mortality, caries and periodontal disease in adults. Results after 30 years of maintenance. *J Clin Periodontol*. 2004; 31: 749-757.
  - 36) Tsesis I, Rosen E, Tamse A, Taschieri S, Kfir A. Diagnosis of vertical root fractures in endodontically treated teeth based on clinical and radiographic indices: a systematic review. *J Endod*. 2010; 36: 1455-1458.
  - 37) Komatsu K, Abe Y, Yoshioka T, Ishimura H, Ebihara A, Suda H. Differential diagnosis of vertical root fractures using reconstructed three-dimensional models of bone defects. *Dentomaxillofac Radiol*. 2014; 43: 20140256.
  - 38) Yoshioka T, Sakaue H, Ishimura H, Ebihara A, Suda H, Sumi Y. Detection of root surface fractures with swept-source optical coherence tomography (SS-OCT). *Photomed Laser Surg*. 2013; 31: 23-27.
  - 39) Imai K, Shimada Y, Sadr A, Sumi Y, Tagami J. Noninvasive cross-sectional visualization of enamel cracks by optical coherence tomography in vitro. *J Endod*. 2012; 38: 1269-1274.
  - 40) Nakajima Y, Shimada Y, Miyashin M, Takagi Y, Tagami J, Sumi Y. Noninvasive cross-sectional imaging of incomplete crown fractures (cracks) using swept-source optical coherence tomography. *Int Endod J*. 2012; 45: 933-941.
  - 41) Shemesh H, van Soest G, Wu MK, Wesselink PR. Diagnosis of vertical root fractures with optical coherence tomography. *J Endod*. 2008; 34: 739-742.

著者紹介

飯野 由子 (Yoshiko Iino)

2011年3月 東京医科歯科大学歯学部 卒業。2016年3月 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科 修了。2016年4月 東京医科歯科大学歯学部 附属病院 医員。

日本歯科保存学会会員，日本歯内療法

学会会員

海老原 新 (Arata Ebihara)

1986年3月 東京医科歯科大学歯学部卒業. 1990年3月 東京医科歯科大学大学院歯学研究科博士課程修了. 1990年4月 東京医科歯科大学歯学部附属病院 医員. 1991年4月 日本学術振興会特別研究員. 1993年4月 東京医

科歯科大学歯学部歯科保存学第三講座 助手. 1999年4月 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科歯髓生物学 助手. 1999年10月~2001年2月 文部省在外研究員 (米国カリフォルニア大学アーバイン校ベックマンレーザー研究所 留学). 2007年4月 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科歯髓生物学 助教.

日本歯科保存学会 (評議員, 専門医, 指導医), 日本レーザー歯学会 (評議員, 専門医, 指導医)

砂川 光宏 (Mitsuhiro Sunakawa)

1981年3月 東京医科歯科大学歯学部卒業 歯学士. 1985年3月 東京医科歯科大学大学院歯学研究科 修了 歯学博士号 取得. 1985年4月 東京医科歯科大学歯学部第三歯科保存学講座 助手. 1992年4月 東京医科

歯科大学歯学部第三歯科保存学講座 講師. 1992年8月 Toronto 大学 (Canada) 歯学部口腔生理学講座 Visiting Assistant Professor (~1993年11月). 2000年4月 東京医科歯科大学大学院歯髓生物学分野 講師. 2001年4月 東京医科歯科大学歯学部附属病院総合診療科 助教授. 同 大学院歯髓生物学分野 助教授 (兼務). 2007年4月 国立大学法人東京医科歯科大学歯学部附属病院総合診療科 准教授. 同 大学院歯髓生物学分野准教授 (兼務). 現在に至る.

日本歯科保存学会 (評議員, 専門医, 指導医), 日本歯内療法学会 (代議員, 専門医), 口腔病学会 (評議員, 監事), International Association for Dental Research (IADR), International Association for the Study of Pain (IASP)

興地 隆史 (Takashi Okiji)

1984年 東京医科歯科大学歯学部卒業. 1988年 東京医科歯科大学大学院歯学研究科修了. 2001年 新潟大学歯学部附属病院教授. 2003年 新潟大学大学院医歯学総合研究科教授. 2015年 東京医科歯科大学大学院医歯学総

合研究科教授. 2017年 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科長・歯学部長.

日本歯科保存学会 (前理事長, 指導医), 日本歯内療法学会 (理事, 指導医), 日本歯科医学教育学会 (理事), 日本口腔科学会 (指導医), 日本外傷歯学会 (理事, 指導医), 日本歯科理工学会 (Dental Material Senior Advisor), 口腔病学会 (会長), 日本顕微鏡歯科学会 (理事, 認定指導医)