

論文の内容の要旨

論文題目 1.55 μm 帯半導体レーザーの口腔内組織断層撮影技術への応用に関する研究

氏名 鹿熊秀雄

日本は急速な高齢化社会を向かえようとしている。1950 年における 65 歳以上比率は 4.9% に過ぎなかったが、2006 年には 20.8%、2050 年には 40% に迫る勢いである。これまで最も高かったイタリアを抜き世界第 1 位となった。このような人口状況から特に 65 歳以上の医療費が大幅に増大するようになった。問題は長寿ではない。その結果もたらされる負担である。このような現状に直面して工学の立場から何をすべきか考えた。その結果、早期発見早期治療を可能にする光断層撮影の研究が良いとの結論に達した。

早期発見早期治療のターゲットを口腔内組織の診断に絞ったのは高齢者の残存歯数がいかに重要であるかを認識したからである。80 歳で 20 本の歯が有る者とそうでないものでは健康状態が異なってくるからである。本研究の課題である、1.55 μm 帯半導体レーザーの口腔内組織断層撮影技術への応用は口腔内領域病変の早期発見・早期治療を実現する可能性があり、ここに本研究の意味があると考えられる。

口腔内の組織を非侵襲的に診断する方法としてエックス線が主に用いられてきた。その方法は、4 通り程度あるが、エックス線を使用した診断の場合、患者を特別な部屋に隔離する必要がある。デンタル用のエックス線被爆量はごくわずかであると言われているが法規制が有るためエックス線を使用した診断をオープンスペースで行うことはできない。光を使った診断ではこのようなことはなく、光りをうまく利用すれば診断装置として発展する可能性がある。

本研究は、光を利用した診断方法の一つである光断層撮影 (OCT) をテーマとしている。まず始めに、本研究の基礎である光の干渉をヤングの干渉実験にまで逆のぼり考えた。ニュートンの光の粒子説に加え光の波動的解釈をもたらしたヤングの 2 重スリットの実験は利用価値が非常に高い。歯科用 OCT に必要な機能を見いだすため各種 OCT を比較してそれぞれの特徴を考えた。それらには時間領域 OCT、スペクトル領域 OCT、周波数掃引 OCT、本研究の方式である離散的周波数掃引リフレクトメトリ OCT などがある。スペクトル領域 OCT は時間領域 OCT に比べて移動するレファレンスミラーが不要な点や、S/N 比で優るなどの特徴がある。また、周波数掃引 OCT はスペクトル領域 OCT に比べて分光器や CCD カメラを必要としない優位性がある。筆者の行った研究は周波数掃引 OCT に属するが、波長を連続に掃引するのではなく、波数を階段状に掃引することが特徴的である。光源には可干渉距離の長い SSG-DBR Laser を用い測定可能距離の長い像が得られる。このことを原理的に説明するため式の導出から始め、結論として撮影可能距離 24mm と深さ方向の分解能 28 μm を得、これを実験でも確認した。

各種光源とそれを搭載した OCT の性能について調べ光断層撮影の研究を行う上で光源は非常に重要であることがわかった。それは光源が OCT の奥行き方向や横方向の分解能、撮影可能距離、感度、S/N、画像取得スピードなどおおよそ全てに関わっておりその影響力は非常に大きいからである。光源には、固体レーザー、スーパーluminescent diode、外部共振器型周波数掃引レーザー及び本研究の光源である SSG-DBR レーザーがある。外部共振器型周波数掃引レーザーにはポリゴンミラーを使用するなど機械的回転や回折格子などが必要となるものがあるが臨床の場に持ち込む OCT 装置には不

向きであると思われる。実用的な光源は半導体の製造工程で全て作り込むことが理想的である。このような理由から光源として SSG-DBR laser を選択した。使用した SSG-DBR レーザの波長幅は 40nm であるが、これを C-band と組み合わせると 80nm は可能であり分可能は向上する。今後、組み合わせを行い新しい OCT の開発を行いたい。

口腔内組織の断層撮影を目的として歯牙の構造について調べ、歯牙を失う大きな原因である歯周病について考えた。歯牙は歯冠部と歯根部に分かれ、歯冠部はエナメル質とその下部に象牙質が存在する。歯根部は歯根膜、セメント質、象牙質、歯髄、血管などからなる。このような構造を持つ歯牙に対して齲蝕はどのようにして起きるのか。それは歯垢がたまり、歯垢の中に細菌が乳酸を造るからである。この乳酸は齲蝕を引き起こす。一方歯周病も歯垢が原因である。この歯垢の中には、細菌が棲息し炎症を引き起こす。このような疾患を発見するのに OCT が役立つのではないかと。OCT による断層像から歯垢などの蓄積が発見できるはずである。

歯科では長い間エックス線による撮影が行われてきた。エックス線撮影はこの分野に多くの恩恵をもたらしたが、エックス線を使用する場合は患者を特別な部屋に隔離する必要が有ること、分解能の点で劣ること、初期齲蝕の発見が困難であるなどの短所も持ち合わせている。そこで、光による診断が考えられる。光による単純撮影には光源に 1300 nm 帯の SLD を用い齲蝕の早期発見を試みた報告があるが、透過光を利用するため像が不鮮明であり断層撮影はできない。

本研究では口腔内組織の断層撮影を行うため、SSG-DBR レーザを光源とする OCT 干渉計を構築した。光源については、波数の調整が非常に重要であるため調整方法を工夫して波数と出力を安定させた。波数の乱れは感度、分解能、撮影可能距離に大きく影響するからである。その結果、歯牙を in-vitro 及び in-vivo の両面から撮影して結果を得ることができた。

in-vitro の実験では C-band 領域でスキャンスピードを $10 \mu\text{s}/\text{step}$ から $0.5 \mu\text{s}/\text{step}$ とスキャンスピードを 20 倍にしても画像の劣化がみられず良好な画像を得ることができた。上顎 4 番（犬歯）の実験では正面に 4 本のクラックが縦方向に走っている。このクラックは表面からは本数のみ確認できるが、機械的に切断しないかぎり深さ方向の様子はわからない。ところが断層像をみると深さ方向に少なくとも 2mm 以上の亀裂が鮮明に写っている。このように非侵襲で内部が観察できるのは断層撮影の優れた機能であり臨床への応用が期待できる。さらに in-vitro の実験では、歯牙を切断して切片を作製し実際の断面と断層像を比較した。エナメル質、クラック、セメント質などは実物と良く対応しているが、厳密な比較はスキヤナの振り角や光の入射角及び屈折率を考慮して画像を補正することが必要である。実際のサンプルの表面は入射光に対してさまざまな角度を持っているため、コンピューターでプログラムを走らせて複雑な補正を行わなくてはならない。これは今後の課題である。

in-vivo の実験では上顎の前歯 1 番及び 2 番の撮影は眼科用のスリットランプを使用して撮影した。前歯はスリットランプを通して比較的簡単に撮影できるが範囲が限られる。そこで、口腔内プローブを作製して歯牙を真上から撮影できるようにした。その結果、白歯の断層像を撮影することができた。臨床で使用する口腔内プローブはあらゆる使用状況を考慮して作製する必要がある。プローブを試作してわかったことはその使いかたの悪さである。なかなか目的の部位を撮影できない。その原因の一つに構成部品が大きいことが上げられる。特にガルバノミラーは口腔内プローブには不向きである。今後小型の MEMS ミラーの検討を行い、もし既存のものが無いようなら MEMS ミラーそのものから作製しなくてはならない。

撮影可能距離 24mm は本研究が達成した顕著な成果の一つである。in-vitr の実験としてファントムを用い歯牙を 4 本近く同時に撮影することができた。このことはプローブを口腔奥まで挿入しなくても撮影できることを意味しており顎関節症などで口の開かない患者に対しては強力な機能となる。in-vivo の実験としては、歯牙の代わりに親指を撮影して確認を行った。その結果、24mm 付近まで鮮明な画像が得られ撮影可能距離 24mm が確認された。24mm という撮影可能距離は単に複数の歯牙を同時に撮影するという事に留まらず他の応用も考えられる。例えば、1 本の歯牙を撮影する場合でも断層像を 3 次元まで拡張すると撮影可能距離が 3mm から 4mm では不十分である。また口腔内に限定せず耳鼻咽喉科などでの使用を考える場合、細いプローブを作製しても目的部位に到達することは難しいと思われる。このような場合でも 24mm という撮影可能距離は重要な意味を持つ。

口腔内組織の断層撮影を目的とした装置は未だ市販されていない。もし OCT 装置が臨床の場で頻繁に利用され、疾患の早期発見につながるならば口腔医療の方法も変わってゆくだらうと思われる。それには、研究中の光断層撮影装置を実用に耐えうるものにしなくてはならない。1.55 μ m 帯半導体レーザーの口腔内組織断層撮影技術への応用に関する研究は早期の実用化が望まれる。