

VCSEL 技術で改善された OCT イメージング

ベンジャミン・ポツェイド、ジェイムズ・チアン、ビージェイセハル・ヤラマン、アレックス・ケーブル、ジェイムズ G. フジモト

垂直共振器面発光レーザ (VCSEL) ベースの光源技術により OCT はロングレンジ撮像、高速性、それに柔軟性を達成できており、生体医学だけでなく他の分野でも新しいアプリケーションが見込まれている。

光干渉断層法 (OCT) は一般に、ミリメートル範囲のイメージング技術であると考えられている。米ソーラボ社のプレビウムリサーチとマサチューセツ

ツ工科大 (MIT) の研究者が先頃発表した VCSEL ベースの新しい OCT 光源によってこのような理解は変わるかもしれない⁽¹⁾。VCSEL ベースの OCT イ

メージングは、長い撮像範囲、動作の高速性と柔軟性を合わせて達成しており、これは生体医学だけでなく、他の分野でも新しいアプリケーションに道を開くものである。

OCT イメージングは超音波の光バージョンのように動作するが、音の代わりに赤外 (IR) 光を用いて組織や臓器の構造を探索し可視化する。超音波は、ミリメートルの 1/10 程度の画像分解能であるが、OCT の分解能はマイクロメートルであり、桁違いの微細分解能が達成可能である。

OCT では、軸分解能は観察に使う光の帯域幅に関係している。光の波長スパンが広ければ広いほど、軸分解能は微細になる。掃引型 OCT (SS-OCT) 技術を使い、研究グループが開発した MEMS ベースの VCSEL は、光の出力波長を広いスペクトル範囲で、時間内に繰り返し掃引することで微細分解能を達成している。この VCSEL を従来の掃引型 OCT 技術と区別しているのは光が掃引される方法である。

VCSEL 構造と動作

この VCSEL は半導体プロセス技術を利用して製造される (図 1)。レーザキャビティは 2 つのミラー (反射鏡) の間に利得材料を置いて形成されており、ミラーの 1 つは固定、もう 1 つは柔軟構造により吊り下げられている。チ

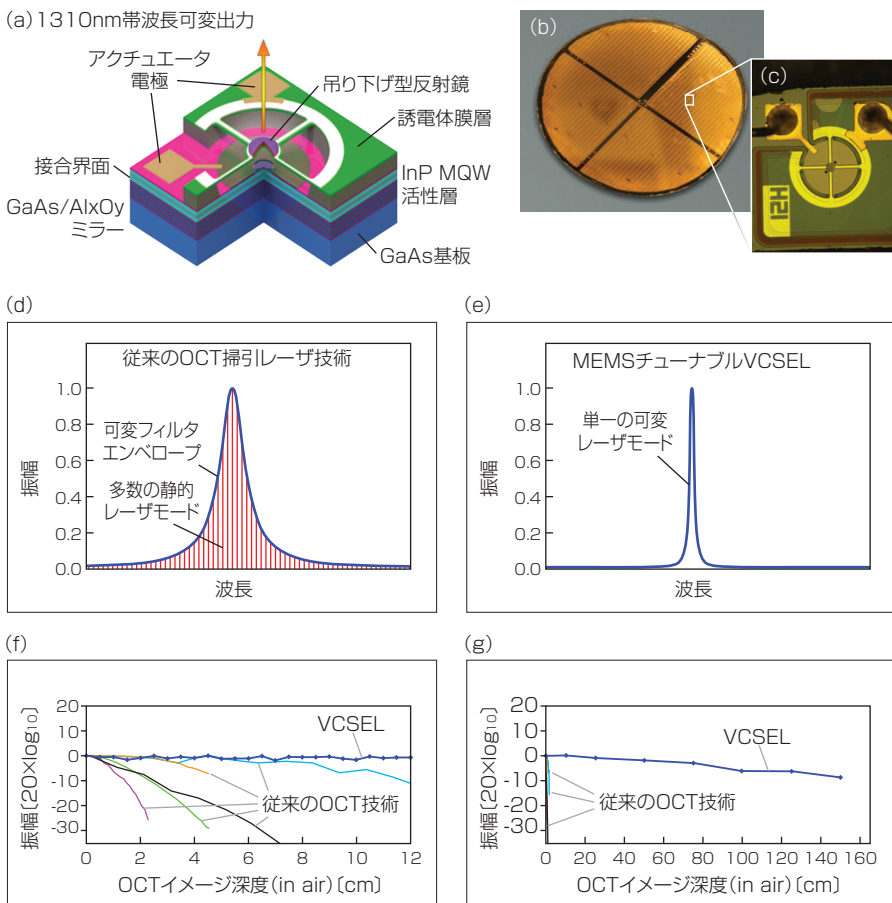


図 1 (a) VCSEL は半導体プロセス技術で製造され (b) ウエハ上に多くの個別 VCSEL デバイス (c) が形成されている。(d) 従来の OCT 掃引光源技術では、チューナブルフィルタエンベロープ下には多くのレーザモードがチューニングされている。(e) VCSEL と従来技術との違いは、VCSEL が 1 個の縦モードをチューニングする点にある。(F) OCT 技術の比較から分かるように、VCSEL は 12mm のイメージング範囲にわたり良好なイメージング感度を失わないが、従来技術ではわずか数ミリメートルで感度が大幅に失われている。(g) VCSEL の動作は高速で、1.5m OCT イメージング範囲を達成しており、これは従来の OCT 技術よりも遙かに長い。

チューニングされた出力波長がミラーの距離に比例するように、これらのミラーはファブリペローフィルタを形成している。電圧を印加すると、静電MEMSアクチュエータが上方のミラーを引き下げ、それによってキャビティ長が短くなって出力波長が短波長化する。これはモノリシック設計で、マイクロスケールのキャビティ長であり、これによってVCSELは真のシングルモード発振をし、モードホップフリーでチューニングできるようになる。

これまで実証されているOCT掃引光源は、数センチメートルから数メートルの長さの比較的長いレーザ外部キャビティで構成されていた。チューナブル内部キャビティ、またはチューナブル波長選択ミラーで波長チューニングしたが、これは必然的にモードの固まり(クラスタ)を選択することになり、マルチモードチューニング動作となった。このような設計でキャビティ長を短くすると、選択するモード数が少なくなってしまう、非連続のモードホップ動作になる。VCSELは新たな動作形態を提供するものとなる。VCSELでは数マイクロメートル長のファブリペローキャビティがレーザキャビティ全体となり、自由スペクトル領域(FSR)は100nmを超え、このFSR全体でモードホップフリーのシングルモードチューニングが可能になる。その結果、VCSELはこれまでのOCT掃引光源よりも遙かに長いコヒーレンス長となり、これによりVCSELでは独自のロングレンジOCTイメージングが可能となる⁽²⁾。

ロングレンジイメージング

現行世代のOCT技術は数ミリメートルレンジが限界なので、眼科病院は3つの個別のOCT装置を使って、①網膜のイメージング、②前眼部のイメー

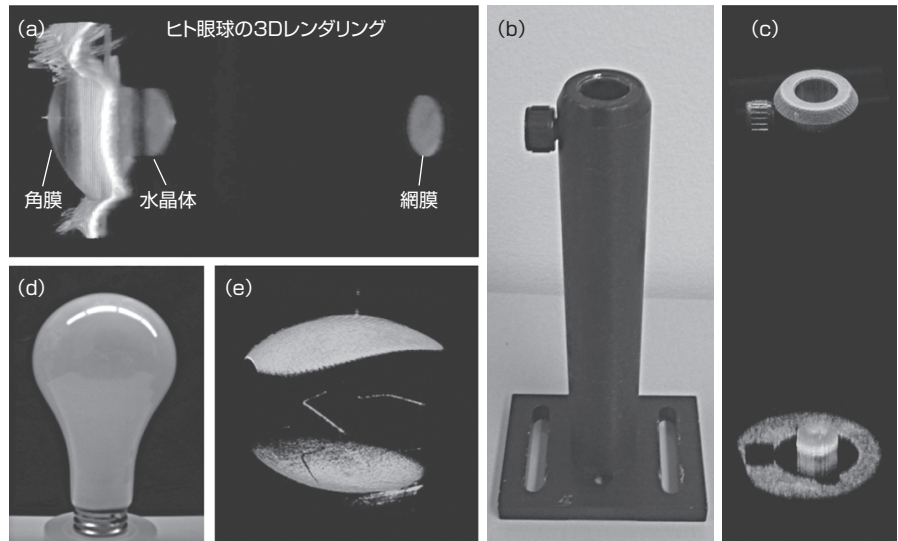


図2 1060nm VCSELを用いたOCTイメージング、(a)前眼部の3D表示。網膜まで眼軸長を計測している。(b)非医療応用は、このOCTイメージング適用範囲が広いことを示している。(c) VCSELで可能になった光学マウントホルダのイメージングおよびOCTボリュームレンダリング処理で、深い掘削孔の深さを計測。(d)同様にして、OCTボリュームレンダリング処理をした電球は、(e) VCSEL技術が非破壊で長尺撮像できることを示している。

ジング、③目の軸方向の長さを計測する。最近の論文でVCSEL独自のロングレンジOCTイメージング能力が実証されており、これによって初めて前眼部のイメージングと、角膜から網膜まで目全体の長さの計測が1回のOCT動作で同時に撮像できるようになった(図2)⁽³⁾。これは3つを1つにまとめた眼科装置への第一歩であり、コストとスペース節約を可能にし、院内の患者の流れを合理化する。

このようにロングレンジ撮像できる能力は、多くの非医療アプリケーションにとっても有望である。最近の実証例には、電球内の非破壊イメージング、深さ15.2cmでアスペクト比が高い光学マウントホルダ掘削孔の正確な撮像がある。このような大きな対象物の高速3D OCTイメージングは、これまでのOCT技術では考えられなかった。深さの範囲に限界があったからである。迅速かつ非破壊に3Dで撮像する、また数十センチメートルにわたり高解像度で表面プロファイルを画像化する能

力は、製造工程や品質確認で役に立つと断言できる。

高速キャプチャー

現行世代の市販OCTイメージングシステムは、軸スキャンレート25~100kHzで動作する。VCSELはレーザキャビティが短く、MEMSアクチュエータが高速であるので、最高軸スキャンレート1.2MHzの速度でイメージングできる。これは現在の技術よりも10~50倍速い。

高速イメージングの恩恵を受けるアプリケーションには、動きがあるもの、大面積を撮像する必要があるものが含まれる。例えば、人の網膜を1.2MHz軸スキャンレートでイメージングすると横方向に高い画素密度で網膜全体をカバーすることができる(図3)。400kHz軸スキャンレートで取り込んだ網膜スキャンは、4回の体積測定から動きを補正し、平均化処理することができる。ガンのイメージングや診断では、広い範囲全体をカバーするには、また横方向に高分解能でイメージングする

には高速性が必須となる。小型内視鏡を使い、MITの研究チームと臨床協力者たちは、1MHz軸スキャンレートを使ってウサギの胃の生体画像を撮った。これは人体用内視鏡実証への橋渡しとして行われた⁽⁴⁾。

精密動態測定

ドップラーOCTによって、試料中の動く粒子の速さを入射ビームの方向で計測できるようになっている。人の目の血流の動きを精密に計測することは眼病の早期発見を改善する可能性がある。目では、血液は視神経頭から出入りする。VCSELによって可能になった高速イメージングと優れた位相安定性で、視神経頭の速い血流の測定ができるようになっている(図4)。さらに、高速になったことで、目へ出入りする血液の時間履歴を包括的に生成するために3Dボリュームを多重反復収集することが容易になっている⁽⁵⁾。各ボリュームからのデータをプロットすると、目の中の拍動性を観察することができる。

ドップラーなどの位相ベースOCT法は一般に、強度法よりも動きに対して遙かに感度がよく、ピコメートルの移動や微小共振器構造の計測に使われる。VCSELは動的な現象の測定に役立つ可能性がある。例えば物質を伝わる衝撃波、マクロ構造およびミクロ構造のダイナミックな動きなどの計測である。

アメリカ国立衛生研究所下の癌研究所、眼病研究所(NCI助成金 R44CA 101067およびNEI助成金 1R44EY 022864-01)の支援を受けてMITとプレビウムは、VCSELベースの試作機を病院に導入しようとしている。またソーラボ社は、完全なOCTイメージングシステム、ベンチトップレーザ、OEMシステム組込用掃引光源として、MEMS-VCSEL技術を商品化し提供していく。

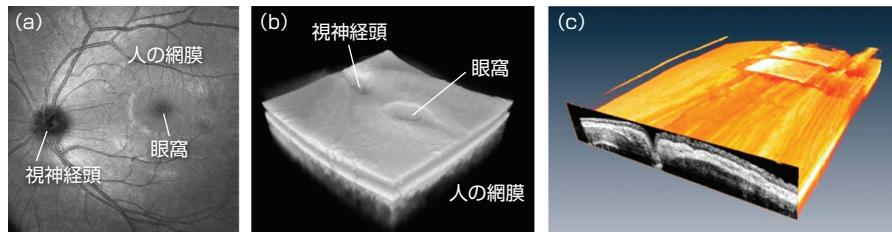


図3 (a) 1.2MHz軸スキャンレートで撮ったOCT眼底像。これは、1050nm VCSELで取得した人の網膜の大規模生体内データ。(b) 1050nm VCSEL、400kHz軸スキャンレートで撮った人の生体内網膜3次元体積画像。(c) 生体内ウサギの胃の1MHz軸スキャンレート3次元体積は、1310nm VCSELを用いた小型内視鏡プローブで取得。

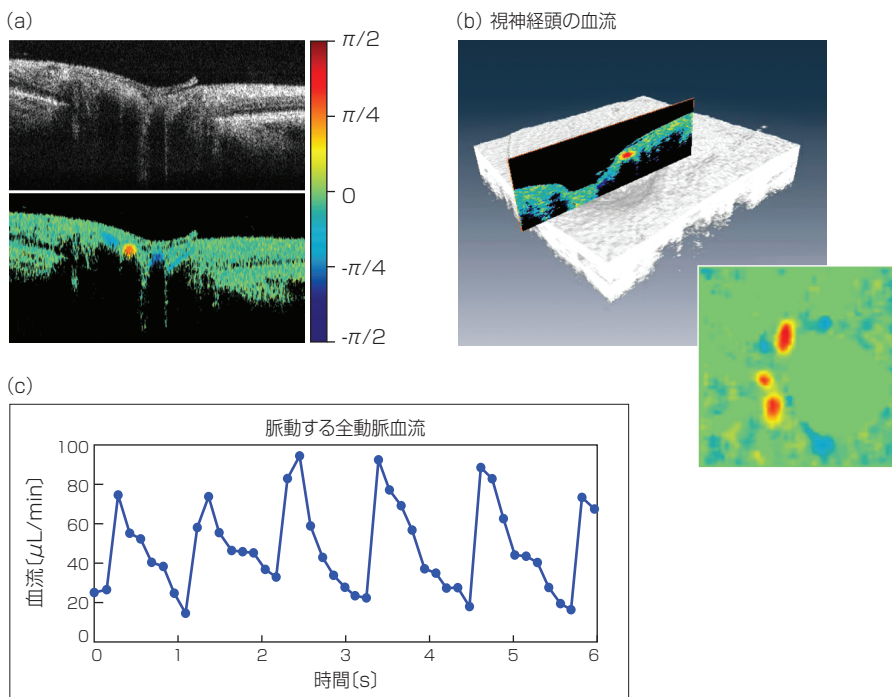


図4 OCTイメージングアプローチの比較で、(a) OCT強度画像と、400kHz軸スキャンレートで撮った網膜の視神経頭の対応するOCTドップラー画像との比較。(b)一連のOCTボリュームの高速取得から視神経頭の典型的3Dボリュームにより、血流の定量的計測ができる。(c)視神経頭の多重反復3Dドップラーボリュームの解析で目への拍動血流をプロット。

参考文献

- (1) V. Jayaraman et al., "OCT imaging up to 760 kHz axial scan rate using single-mode 1310 nm MEMS-tunable VCSELs with >100 nm tuning range," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), PDPB2(2011).
- (2) B. Potsaid et al., "MEMS tunable VCSEL light source for ultrahigh speed 60 kHz-1 MHz axial scan rate and long range centimeter class OCT imaging," Proc. SPIE, 8213, 82130M-8 (2012).
- (3) I. Grulkowski et al., Opt. Lett., 38, 673-675(2013).
- (4) T-H Tsai et al., "Ultrahigh speed endoscopic optical coherence tomography using micro-motor imaging catheter and VCSEL technology" Proc. SPIE, 8571, 85710N(2013).
- (5) W. Choi et al., Opt. Lett., 38, 338-340(2013).

著者紹介

ベンジャミン・ボツェイド Ph.D.はソーラボ社の研究員及びマサチューセッツ工科大(MIT)の電子研究所客員研究員、ジェイムズ・チアン Ph.D.はソーラボOCT研究長、ピジェイセハル・ヤラマン Ph.D.はプレビウム研究所創設者、アレックス・ケープルはソーラボ社の創始者で社長。ジェイムズ G. フジモト Ph.D.はマサチューセッツ工科大(MIT)電気工学教授。
e-mail: Dr. Potsaid at ben.potsaid@gmail.com.