

# 高コヒーレンス波長掃引光源

中村賢一 Kenichi Nakamura, 腰原 勝 Masaru Koshihara, 齊藤崇記 Takanori Saitoh, 川北浩二 Koji Kawakita

## [要 旨]

これまで光通信の分野で培われてきた光技術が医療をはじめとするさまざまな分野で活用され始めている。なかでも高速かつ高精度に測定対象の位置測定を行うことができる OFDR の応用が注目されている。そのキーデバイスの波長掃引光源では対象物の動的挙動をとらえるために波長掃引の高速化が進められている。しかし、OFDRの測定範囲と測定精度に大きく影響するコヒーレンス長の向上が進んでいない。そこで当社では、これまで高コヒーレンスな(コヒーレンス長の長い)波長掃引光源を実用化してきた。本論文では、当社製波長掃引光源のコヒーレンス長に焦点をあて、OFDR に用いた場合の測長可能範囲を評価した。また波長掃引速度がコヒーレンス長に与える影響について検討を行った。その結果、本光源が距離範囲 10 m から 100 m オーダの OFDR 測定に適用可能であり、微小距離から長距離にわたり高速、高精度かつ同時に測定できることが示唆された。またコヒーレンス長が波長掃引速度に反比例して変化するため、用途に応じて適切な掃引速度を選択することが必要であることもわかった。

## 1 まえがき

近年、レーザ光の可干渉性を利用した光計測法のひとつである OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) がさまざまな分野で応用され始めている。キーデバイスである波長掃引光源の改良が進み、測定対象点の位置を高速かつ高精度に測定できるようになってきたことが主要因である。高精度形状測定、薄膜の膜厚測定、微細構造形状計測など実用化が進んでおり、特に眼科診断領域での進展は著しい。

OFDR で用いる波長掃引光源は測定の対象によって適切なものを選ぶ必要がある。高い位置分解能を得るためには、波長掃引範囲が広い光源を必要とし、高速な運動をする対象物のリアルタイム性の高い計測が求められる場合には波長掃引周波数の高い光源が必要になる。前者は主に波長掃引光源内で用いるゲイン媒体のゲイン帯域により制限され、後者は波長掃引機構の機械的応答性に依存している。

OFDR を行う場合の波長掃引光源の重要な特性としてコヒーレンス長がある。コヒーレンス長が長いほど、測定可能な距離範囲を広げることができる。加えて、OFDR の干渉信号を高い SNR (signal to noise ratio) で測定できるため、位置分解能や確度を向上させることができる。ただし、測定距離がコヒーレンス長に近づくにつれて干渉信号の SNR は急激に低下するため、測定範囲に対して十分に長いコヒーレンス長を有する光源を選択する必要がある。コヒーレンス長の不足を補い測定距離を拡大する方法として、干渉計の参照鏡の位置を可変にする方法もあるが、参照鏡の可動機構が必要になるため干渉計が大型・高価になり、また干渉計の耐振性も低下する恐れがある。

従来から、高コヒーレンスを保証した波長可変光源は、多数市販されている。これらの光源はリットマン(Littman)型あるいはリトロ(Littro)型の共振器で、波長可変の方法として重く堅牢な光学系をモーターで回転させる構造を持つ。波長を繰り返し掃引させるためにはモーターの正転と逆転を繰り返さなければならず、その波長掃引周波数は 1 Hz 程度と極めて低い。

一方、眼科 OCT (Optical Coherence Tomography) などリアルタイム性を重視する分野ではコヒーレンス長の短いマルチモードタイプ的高速掃引型光源が利用されている。この分野では測定範囲が mm オーダの網膜組織厚であり、コヒーレンス長も 10 mm オーダで十分なためである。

高速掃引と比較的長いコヒーレンス長をもつ光源に MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) 技術による可動エタロンフィルタを用いたファブリーペロータイプの波長掃引光源も報告されている<sup>1)</sup>。しかし、ゲイン媒体として用いる VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) のゲイン帯域が 50 nm と狭く波長掃引範囲が限られてしまうという問題がある。また高い光出力を必要とする用途には高価な光アンプを追加しなければならない。

そこで我々は MEMS スキャニングミラーを用いて、kHz オーダの高速波長掃引が可能で、波長掃引幅が広く、高コヒーレンスな波長掃引光源を開発し、実用化してきた。本論文では、当社製波長掃引光源のコヒーレンス長を測定し、適用可能な測定範囲を明らかにした。

## 2 高コヒーレンス波長掃引光源の原理

当社で開発した高コヒーレンスな波長掃引光源の概略図を **図 1** に示す。

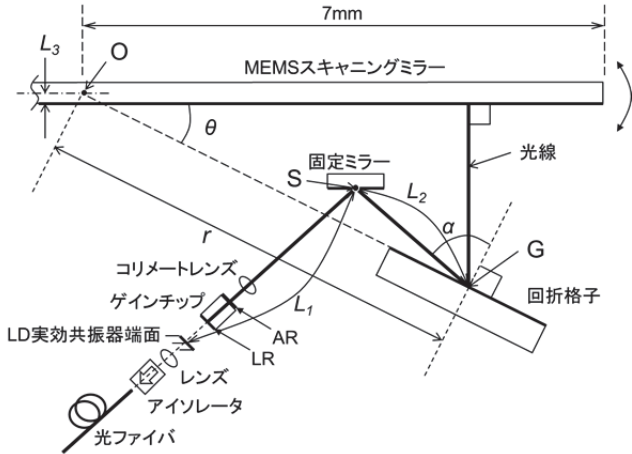


図 1 高コヒーレンス波長掃引光源の概略図

高速な波長掃引を実現する MEMS スキャニングミラーを利用できるように、通常のリットマン配置を独自の光学的配置に改良した<sup>2), 3)</sup>。この光学系では実効共振器端面から MEMS スキャニングミラーの反射面の上に外部共振器が形成される。この共振器長で決まる複数の縦モードのうち、回折格子の波長選択性により 1 つのモードだけが選択され、発振するように構成されている。さらに本光源では、**図 1** に示すように MEMS スキャニングミラーの回転中心 O を回折格子表面の延長線上におき、次式を満足するように光学部品が配置されている<sup>4)</sup>。

$$L1 + L2 + L3 = r \cdot \sin\alpha \quad \dots (1)$$

ここで、L1 はゲインチップの屈折率を考慮した実効共振器端面から固定ミラー上の反射点 S までの実効光路長、L2 は点 S から回折格子表面の入射点 G までの光路長、L3 は回転中心 O と同ミラーの反射面までの距離、r は点 G から点 O までの距離、 $\alpha$  は固定ミラーから回折格子への光線の入射角を表す。

このとき、**図 1** に示すように回折格子表面に対する MEMS スキャニングミラーの回転角を  $\theta$  とすると、外部共振器長で決まる縦モードの波長  $\lambda_{mode}$  の変化率  $d\lambda_{mode}/d\theta$  と、光線の入射角  $\alpha$  と回転角  $\theta$  で決まる回折格子の波長選択性のピーク波長  $\lambda_{filter}$  の変化率  $d\lambda_{filter}/d\theta$  は一致する。このため **図 2** に示すように、MEMS スキャニングミラーを回転させるだけで、単一の狭線幅の縦モードを波長連続かつモードホップを起こすことなく変化させることができる。

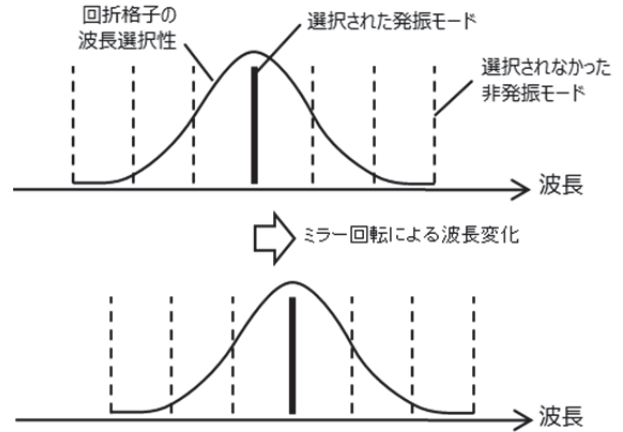


図 2 ミラー回転に伴う回折格子の波長選択性と選択された発振モードの変化の様子

モードホップを抑制したまま波長掃引を行うには、波長を変化させるための回転機構の回転中心位置をサブミクロンオーダーで安定させる必要がある。本光源では中心位置を安定させたまま高速な波長掃引を実現するために MEMS スキャニングミラーを用いている。同ミラーは、ミラー部分とそれを支える直線状に並んだ 1 対の梁が 1 枚の Si 基板からエッチングで切り出された一体構造である。梁を軸とした捩じれ変形によりミラー部分を回転運動させる単純かつ軽量の構造であり、軸ぶれのない高速な回転運動を可能としている。また、MEMS スキャニングミラーを共振点で回転運動させることにより、大きな回転角すなわち広い波長掃引範囲も実現している。

MEMS スキャニングミラーの静止時の回転角が  $\theta_0$ 、共振周波数が  $f_{res}$ 、回転角の範囲が  $\Delta\theta \times 2$  の場合、その回転角は **図 3** に示すように正弦波状に変化する。本光源で用いる回転角範囲では回転角に対する発振モード波長はほぼ線形に変化するため、光源からの出力波長も正弦波状に掃引される。このため、波長掃引速度が最大となるのは、回転角の変化速度が最大となる回転角  $\theta_0$  付近であり、その速度は回転角の範囲、つまり波長掃引範囲に比例して大きくなる。

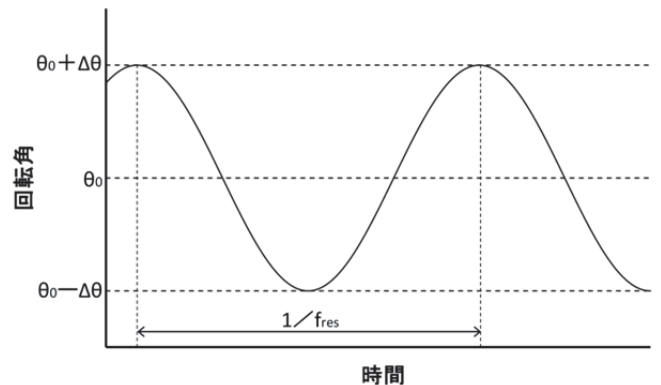


図 3 MEMS スキャニングミラーの回転角の時間的变化

### 3 コヒーレンス長の評価

#### 3.1 測定方法

図4に波長掃引光源出力光のコヒーレンス長の評価系を示す。

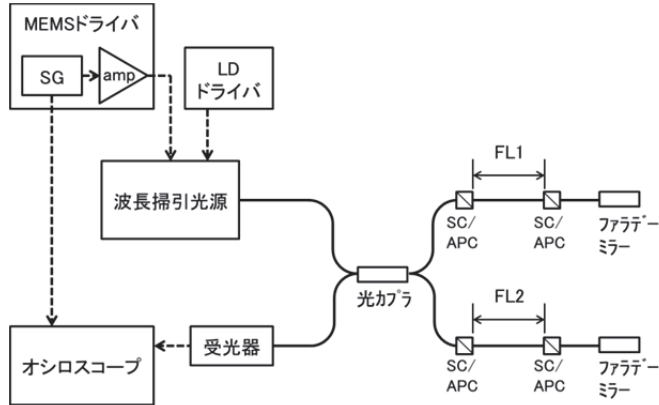


図4 コヒーレンス長の評価系

LDドライバ(ILX Lightwave, LDC-3724B)により波長掃引光源の温度を 25°C一定に調節し、ゲインチップに一定の電流を供給した。また、信号発生器 SG (KEYSIGHT, 33210A)から MEMS スキャニングミラーの共振周波数に等しい 146.14 Hz の正弦波信号を出力し、これをアンプ amp で増幅して MEMS スキャニングミラーの駆動信号として用いた。

光源からの光出力はシングルモードファイバを経由して出力され、光カプラで 50:50 に 2 分岐される。分岐された光は、それぞれ長さ FL1, FL2 のファイバを伝搬して、ファラデーミラーで反射される。その反射光はふたたびファイバを伝搬し、光カプラで合波されて光干渉を生じる。この干渉した光は受光器(New Focus, Model 1611 Photoreciever)で電気信号に変換され、干渉計の光路差に応じた干渉信号としてオシロスコープ(KEYSIGHT, DSOX4154A)で観測される。

ここでは FL1 を 520 mm 固定とし、FL2 の長さを変えることでファイバ長差(|FL1-FL2|×2)を 0.2 m から 100 m の間で変化させ、各ファイバ長差に対する干渉信号を測定した。光ファイバの群屈折率 1.47 を考慮した光路長差(|FL1-FL2|×2)×1.47 では 0.29 m から 147 m に相当する。

オシロスコープの FFT 機能を用いて同信号のスペクトラム強度を測定し、光路長差が 0.29 m のときに得られるスペクトラムのピークパワーを基準とし、ピークパワーが 6 dB 減衰するときの光路長差をコヒーレンス長 L<sub>CH</sub>とした。また、測定には MEMS スキャニングミラーの波長掃引速度が最大となる回転角 θ 0 付近の波長範囲を用い、窓関数としてハンギング窓を掛けた。

次に波長掃引速度がコヒーレンス長に与える影響を調べた。2章で述べたように、波長掃引速度の最大値は波長掃引幅に比例する。そこで、波長掃引範囲を 25 nm, 50 nm, 75 nm と変化させ、波長掃引速度が 2 倍, 3 倍となった場合のコヒーレンス長を測定した。

また、波長掃引速度は、振幅中心から遠ざかる程低下する。そこで、MEMS スキャニングミラーの振幅中心から 1/12 周期, 1/6 周期ずらした波長範囲での評価も行った。MEMS スキャニングミラーの回転角は図3に示すように正弦波状に変化するため、振幅中心の回転速度に対する 1/12 周期, 1/6 周期ずれた時刻での速度の比は次式で与えられる。

$$1/12 \text{ 周期ずれた時刻: } \cos(2\pi/12) / \cos(0) = 0.87 \quad \dots(2)$$

$$1/6 \text{ 周期ずれた時刻: } \cos(2\pi/6) / \cos(0) = 0.5 \quad \dots(3)$$

ここで、回転角と光源の発振モード波長にはほぼ線形な関係があるため、各時刻での波長掃引速度も 0.87 倍, 0.5 倍となる。

#### 3.2 測定結果と考察

一例として、波長掃引周波数 146.14 Hz, 波長掃引範囲 50 nm, 光路長差 19.2 m の場合の干渉信号の FFT スペクトラムを図5に示す。ただし、測定には波長掃引速度が最大となる振幅中心の波長範囲を用いた。本測定では光路長差 0.29 m のときに得られる FFT スペクトラムのピークパワーを基準とし、光路長差の変化とともに同パワーが変化する様子を調べた。

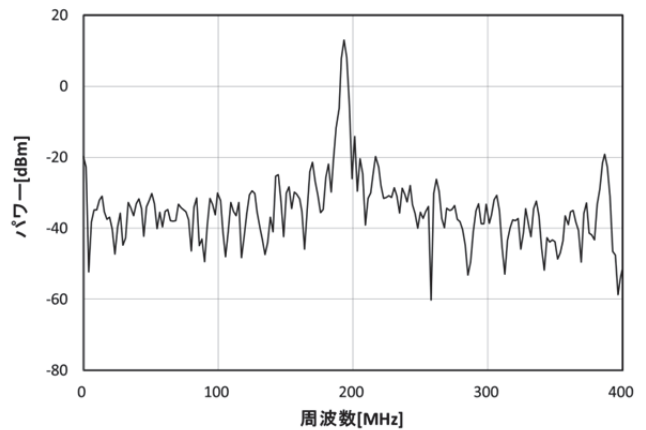
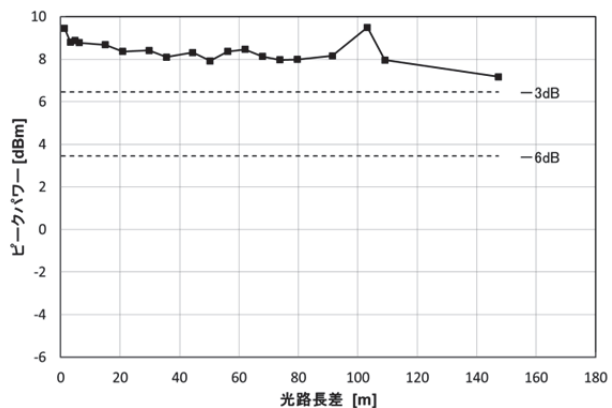
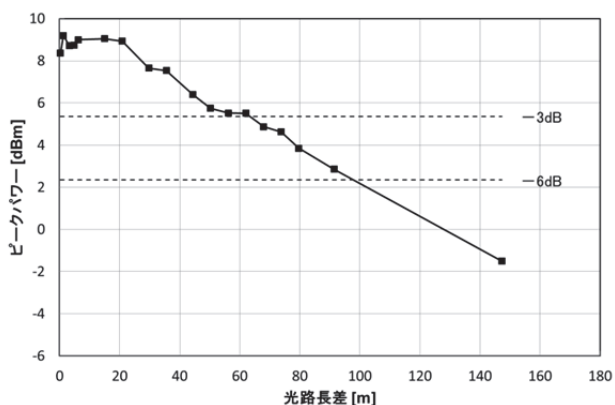


図5 FFT スペクトラムの測定結果の一例

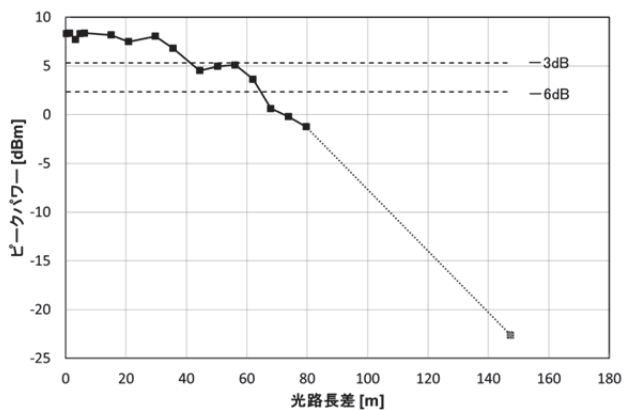
図6 (a), (b), (c)に波長掃引範囲を 25 nm, 50 nm, 75 nm と変化させたときの光路長差に対するスペクトラムのピークパワーの測定結果を示す。図中の破線は光路長差 0.29 m での同ピークパワーに対して -3 dB および -6 dB となるレベルを表す。



(a) 波長掃引幅 25 nm



(b) 波長掃引幅 50 nm

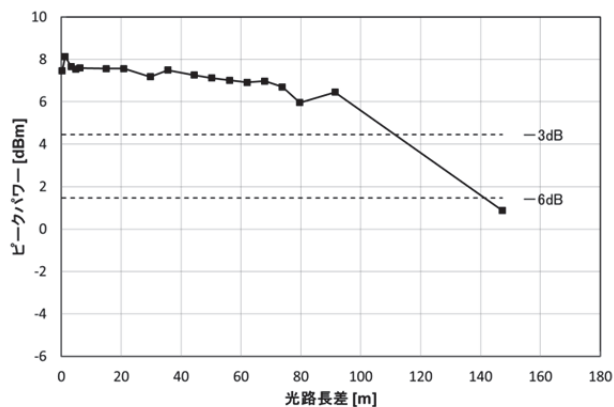


(c) 波長掃引幅 75 nm

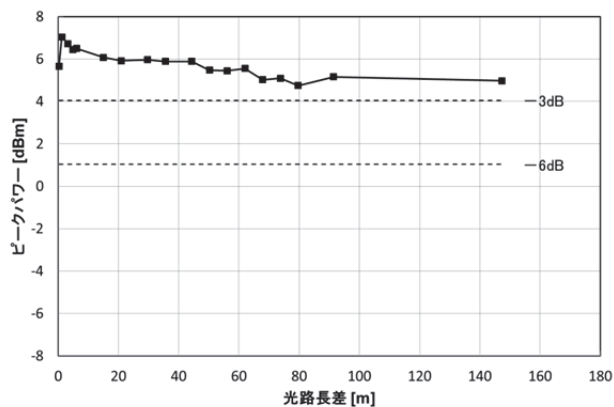
図 6 光路長差に対するスペクトラムのピークパワー

この結果から、波長掃引幅が 25 nm の場合には、光路長差が 147 m であってもピークパワーは 3 dB まで減衰しないことがわかった。また、波長掃引幅が 50 nm, 75 nm のとき、ピークパワーが 6 dB 減衰する光路長差であるコヒーレンス長  $L_{CH}$  はそれぞれ 100 m, 64.7 m であることがわかった。これらの結果から、当社の光源が 10 m から 100 m オーダの OFDR 測定に適用可能であり、微小距離から長距離に渡り高速、高精度かつ同時に測定できることがわかった。

次に波長掃引幅を 50 nm とし、コヒーレンス長を測定する波長範囲を MEMS スキャニングミラーの振幅中心から 1/12 周期、1/6 周期ずらしたときの測定結果を図 7 (a), (b) それぞれに示す。掃引中心からのずれが 1/6 周期のとき、式(3)に示したように波長の掃引速度が 0.5 倍となり、光路長差に対するピークパワーは 147 m であっても -3 dB まで減衰しないことが分かった。



(a) 1/12 周期



(b) 1/6 周期

図 7 スペクトラムピークパワーの測定波長範囲依存性

また、図 6 (a)と図 6 (b)および図 7 (b)を比較した結果、波長掃引幅を 50 nm から 25 nm に変えて掃引速度を半減させても、測定波長範囲を MEMS スキャニングミラーの振幅中心付近から 1/6 周期ずれた時刻に変えて掃引速度を半減させても式(3)、ピークパワーの減衰の仕方がほぼ同じであることがわかった。これはコヒーレンス長が主に波長掃引速度に依存していることを示唆している。

次に、図 6 (b), (c)および図 7 (a)から求まるコヒーレンス長と波長掃引速度の関係を調べた。ここで、掃引幅 50 nm の振幅中心における波長掃引速度で規格化した相対波長掃引速度の逆数を用いた。図 6 (b), (c)、図 7 (a)の場合の相対波長掃引速度の逆数 0.67, 1, 1.28 それぞれに対するコヒーレンス長 64.7 m, 100 m,

144 m をプロットすると図 8 のようになった。同図から、本測定の高波長掃引速度の範囲においては、コヒーレンス長が掃引速度におおよそ反比例することがわかる。

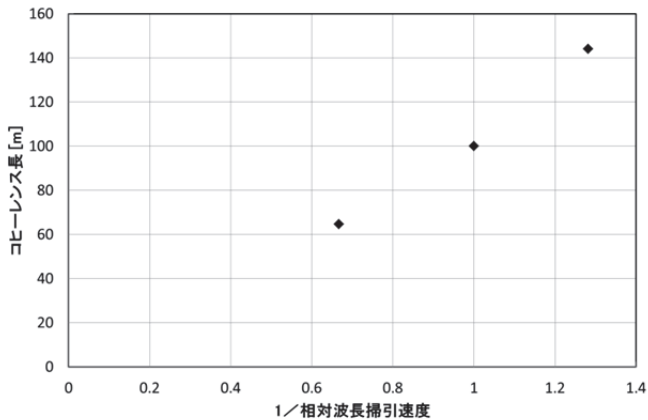


図 8 相対波長掃引速度とコヒーレンス長の関係

これは線幅が掃引速度に依存することが原因だと考えられる。

図 1 に示す外部共振器での発振モードの線幅は、共振器内部に閉じ込められ共振器端面で反射を繰り返す光同士の干渉回数が多いほど狭くなる。しかし波長掃引光源の場合、時間とともに波長が変わりそれに応じて光の位相がずれてしまうため、同相に近い光同士の干渉回数が限られてしまう。掃引速度に反比例して干渉回数は減少するため、それに応じて線幅の狭帯化も制限されることになる。このため、掃引速度の増大に伴い、線幅に反比例の関係にあるコヒーレンス長が短くなると考えられる。このように波長掃引速度とコヒーレンス長はトレードオフの関係にあるため、測定対象物に合わせて掃引速度を選択することが必要であることがわかった。

#### 4 まとめ

MEMS スキャニングミラーを用いた当社製波長掃引光源のコヒーレンス長を評価した。測定には掃引周波数 146.14 Hz の 1.55  $\mu\text{m}$  帯波長掃引光源を用いた。評価の結果、波長掃引範囲が 50 nm, 75 nm のときのコヒーレンス長はそれぞれ 100 m, 64.7 m であった。また、25 nm の場合には 147 m を超えることがわかった。当社製波長掃引光源は 10 m から 100 m オーダの OFDR 測定に適用可能であり、参照鏡の可動機構を追加することなく、短距離測定から長距離測定までを高速、高精度かつ同時に行える。

また、コヒーレンス長と掃引速度の関係を評価した結果、両者はほぼ反比例することがわかった。波長掃引速度とコヒーレンス長はトレードオフの関係にあるため、測定対象物に合わせて掃引速度を選択することが必要である。

#### 参考文献

- 1) N. Kanbara, S. Tezuka, and T. Watanabe, "MEMS VCSEL with concave mirror using the selective polishing method," in Proc. Optical MEMS Conf., 2006, pp.9-10
- 2) M. G. Littman and H. J. Metcalf, "Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander," Appl. Opt., vol.17, pp.2224-2227, Jul. 1978.
- 3) K. Nakamura, S. Morimoto, and T. Nakayama, "Single-Mode and Mode-Hop-Free Wavelength Sweep Light Source with Range of Over 160 nm and High Swept Frequency," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, No. 19, Oct. 2010.
- 4) T. Tanimoto, S. Mattori, H. Kameyama, F. Otagaki, and H. Otateme, "Wavelength tunable laser," Japanese Patent No. 3069643

#### 執筆者



中村 賢一  
事業創発センター



腰原 勝  
事業創発センター



斉藤 崇記  
事業創発センター



川北 浩二  
事業創発センター

公知