

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04922

研究課題名（和文）周期可変回折格子を用いた高速広帯域波長走査光源の構築とOCTへの展開

研究課題名（英文）High-speed and wide-range swept source using acousto-optic deflector as tunable grating and its application on OCT

研究代表者

鈴木 孝昌（Suzuki, Takamasa）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：40206496

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：音響光学（AO）デバイスを周期可変の回折格子として用いる波長走査光源（SS）を構築し、その動特性およびOCTの光源としての性能を明らかにした。構築したSSの波長帯域は、840nm、1060nm、1310nmの3つの帯域で、840nmおよび1310nmの帯域で、理論計算と一致する波長走査特性を確認した。ただし、1060nm帯では、キーデバイスであるAOデバイスの放熱がうまくいかず、詳細な特性の評価ができなかった。1310nmの帯域で動作するSSを使ったOCT計測では、所望の断面構造を精度よく計測できることを確認した。研究の成果を国際会議1編、学術論文2編で発表するとともに、特許1件を出願した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

眼や皮膚などに光を当てて非接触かつ非侵襲で計測し、医療診断を行う光コヒーレンストモグラフィ（OCT）と呼ばれる装置がある。OCTの光源としてよく用いられるのが波長を時間的に変化させる波長走査光源（SS）である。

これまでSSの構築には、波長選択と光偏向を行う光学素子をセットで用いることが当然と考えられてきたが、本研究では、その両方を1つの素子で実現する手法を提案し、その優位性を明らかにした（学術的意義）。本研究で提案したSSは、コンパクトかつ安価であり、波長の走査速度も速い。また、イメージングに必要な信号処理も高速に行えるため、高速かつ高精度なOCT装置を実現することが可能となる（社会的意義）。

研究成果の概要（英文）：A wavelength scanning light sources (SSs) using an acousto-optic (AO) device as tunable grating were constructed. Additionally, its characteristics and performance as an OCT light source were examined. The SSs were assembled in three wavelength bands: 840nm, 1060nm, and 1310nm. We confirmed that the wavelength scanning characteristics in the 840nm and 1310nm bands agreed with the theoretical calculations. However, in the 1060nm band, we could not make detailed characteristics evaluations because of the heat-dissipation problem at the AO device. Further, we confirmed that the OCT equipped with our SS operating at the 1310 nm band can accurately measure the cross-sectional structure of the object.

All results of the research were presented at one international conference and two academic papers, and one patent application was filed.

研究分野：光計測

キーワード：波長走査光源 OCT 音響光学デバイス 周期可変回折格子

1. 研究開始当初の背景

(1) 光による体光計測の試みは、1990年代初頭のタイムドメイン (TD-) オプティカルコヒーレンストモグラフィ (OCT) [1]の提案以降、活発な研究が続いている。OCTは、光源および信号処理の方法によって大きく3つに分類されるが、中でも波長走査光源 (SS) を用いる SS-OCTは、高性能であることが知られている。一方、SS-OCTの性能向上は光源に負うところが大きいことから、SSの研究開発が精力的に行われてきた。初期のSSには、回折格子と回転ミラーを用いたリットマン型、回折格子そのものを回転させるリトロ型がある。たとえばリットマン型では780nmにおいて20nm^[2]、リトロ型では1550nmにおいて50nm^[3]の波長走査が可能であった。しかし、これらは外部ミラーあるいは回折格子を機械的に駆動する必要があり、走査速度を上げることは非常に困難であった。

(2) これに対し我々は2011年、リットマン型の構成で外部ミラーを固定し、音響光学偏向器 (AOD) によって波長走査を実現する新しいSSを提案した^[4]。この構成によれば、機械的走査が不要であるため高速走査が可能となり、波長走査幅15nm、3dB走査周波数100kHzの波長走査を実現した。さらに2019年には、無反射コーティング半導体レーザ (AR-LD) にリトロ型の共振器構造を組み合わせ、AODによって同様に波長走査を実現する光源を提案した^[5]。リトロ型は外部ミラーが不要なため、フィードバック光の強度が大きく良好な光共振が可能となり、波長走査幅65nm、3dB走査周波数100kHzの波長走査を実現した。SS-OCTの計測性能をさらに向上させ、より汎用性の高い生体計測に用いるためには、計測の深さ方向分解能を左右する波長走査幅のさらなる拡大が重要であるが、これまで例に挙げたAODと回折格子を用いるSSは、波長走査幅に理論的な限界があった。

(3) 上記の問題を解決するため、発想を転換し、AODを単なる光偏向器としてではなく、周期可変の回折格子として用いる新規のSSを考案した (図1)。この構成では、AR-LDから出射された広帯域の光がAODで回折され、ミラーで垂直反射された光のみがAR-LDに戻る。AODの駆動周波数を変えると周期可変回折格子 (AOD) での回折角が変わり、別波長の光がミラーで垂直反射される。AODが周期可変の回折格子として働き、波長走査が実現できる。理論計算の結果、波長走査幅は新提案の構成の方が従来型に比べて4倍程度大きくなることが予想された (図2)。

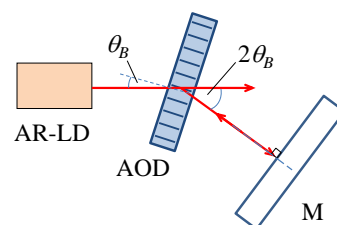


図1 新規SSの構成

2. 研究の目的

(1) 新規のSSは、これまで報告例がなかったため、①本当にそれほど大きな波長走査を実現できるのか、②実現できない場合、性能を抑制する要因は何であるか、③波長を広帯域に走査した場合、AODでのブラッグ回折条件が成立しなくなることも考えられるが、その場合の対処方法をどうするか、といった光源の基本性能に関する事項を明らかにすること。

(2) 新規のSSをOCTの光源として使用した場合、①再現性や安定性など計測上の問題点は何か、②測定精度や計測時間は、従来のSSを用いた場合に比べてどう変わるのか、といった計測に関わる事項を明らかにすること。
上記2点が大きな目的であった。

3. 研究の方法

上述した2つの目的を達成すべく、①新規のSSを構成し、②波長走査幅の上限と波長走査範囲を制限する要因を見出したのち、③実際にOCTの光源として実装し、計測系の性能を検証するという手順で研究を進めた。

①外乱の影響を排除し、機械的安定度を高めるため、専用のアルミ筐体を設計し、新提案のSSを構築する。②AODの駆動周波数を制御し、波長走査幅を測定する。理論値とのずれが大きい場合、あるいは走査幅が狭い場合は、ブラッグ回折条件を中心に原因の特定を行う。さらに反射ミラーの位置制御によって光路長を変化させ、共振状態を制御して波長走査幅と安定度への影響を検証する。③最後に新規SSをOCTの光源として実装し、フォトダイオードで時間信号を取得して波長走査速度の検証、ビデオカメラで空間信号を取得し、物体の2次元断層構造計測を行う。以上一連の実験をまずこれまで使用実績のある840nm帯のAR-LDを用いて行った後、より広帯域の波長走査幅が期待できる1060nm帯のAR-LDを用いて行うこととした。

4. 研究成果

(1) 840nm帯のAR-LDを用いた実験

まず、①専用のアルミ筐体を設計し、そこに図1で示す光学系を構成するとともに、2光束型の

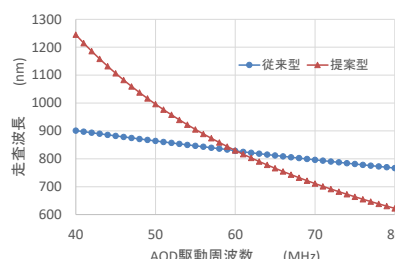


図2 波長走査幅の比較

OCT 光学系を設置した。実験装置の構成を図3に示す。②AOD の駆動周波数 f_a を制御して、波長走査特性を測定した結果を図4に示す。実験結果は理論曲線と極めてよく一致し、理論通りの動作をすることが確認できた。波長走査幅は中心波長 816nm において約 60nm であり、これは使用した AR-LD の規格値 80nm を考慮すると妥当な値であると言える。

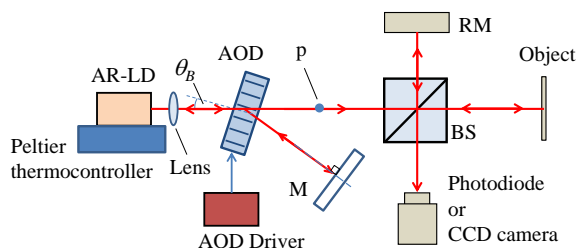


図3 実験装置の構成 (840nm 帯)

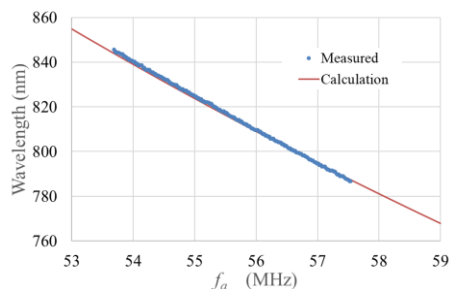


図4 波長走査特性

③最後に OCT 光学系の信号をフォトダイオードで時間信号として検出し、波長走査速度の検証を行った。図5(a)–(c)が実験結果、図5(d)–(f)が計算結果である。AOD ドライバに三角波状 50kHz の制御電圧を印加し、波長を三角波状に走査した(図5(a))。三角波の直線部分で干渉信号(図5(b))が正弦波状に変化しており、波長走査が行えていることを確認した。干渉信号の周波数を連続ウェーブレット変換で時間周波数解析すると、約 300kHz 一定の周波数で干渉信号が変化していることがわかった。図5(f)に示す数値計算結果とほぼ一致することから、50 kHz までは、新規 SS が制御信号に追従できていることがわかった。三角波の周波数を 50kHz より大きくすると数値計算結果とずれてくること、また三角波の半周期の時間応答を考慮すると、新規 SS の応答周波数は 100kHz であると思積ることができる。ただし、計測に使用するビームを調べてみると、AOD を通過することで、波面が乱れることがわかった。この問題に関しては、光共振器を構成する出射面と測定光を取り出す出射面が異なる LD を用いることで解決できるものと考えた。初年度の成果は、学術雑誌に発表するとともに特許出願を行った。

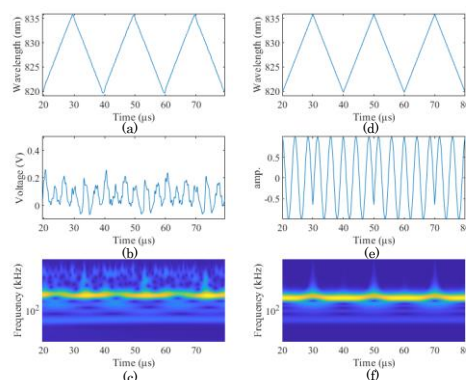


図5 周波数応答の比較

(2) 1060nm 帯の AR-LD を用いた実験

当初の計画通り、①チューニングレンジ 140nm の AR-LD (1060nm 帯) を用いて図1に示す光学系を構成し、②波長走査の実験を行った。結果として得られた波長走査範囲は 35nm で、予想されるチューニングレンジの約 1/4 であった。実験がうまくいかなかった原因は、AOD のドライバおよび AOD 本体の発熱である。放熱グリスの検討や大型放熱器への交換等、種々手を尽くしたが十分な放熱効果を得ることができず、長時間での実験を行うことが困難であった。1060nm 帯に関しては、実施期間 (3年) 以内に所望の結果を得ることはできなかったが、今年度 (令和6年度) 発熱の少ない AOM を用意し、研究を継続中である。

(3) 1310nm 帯のファイバー出射型 SAF 利得チップを用いた実験

①840nm 帯の AR-LD を用いた実験結果より、波面の乱れのないレーザ光を得ることが必要と考え、当初の計画にはなかったが、1310nm 帯のファイバー出射型 SAF (片面角度付き) 利得チップ (チューニングレンジ 130nm) を使い、SS を構築した (図6(a)および図7)。

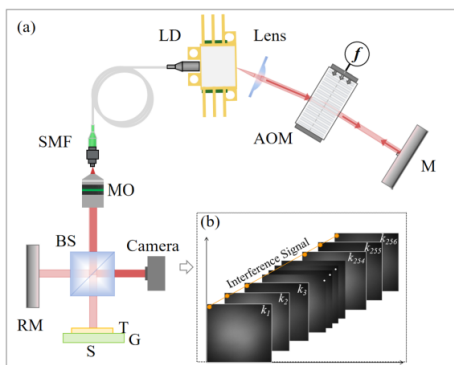


図6 実験装置の構成 (1310nm 帯)

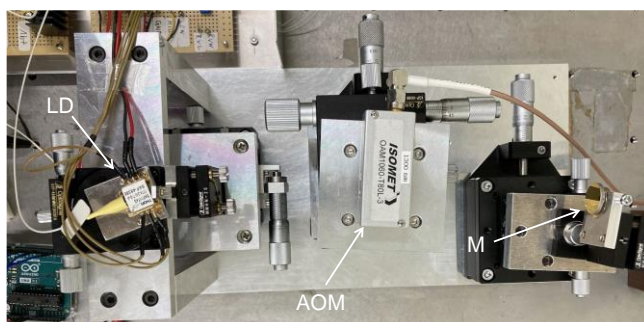


図7 SS 光源の外観

②波長走査実験における一連の結果を図8に示す。図8(a)は、AOMの駆動周波数 f_a に対する波長の変化を示したもので、図4の結果同様、理論値とよく一致している。波長走査範囲は131.7nmと、期待値を上回る走査範囲が得られた。図8(b)は、図8(a)を波数でプロットし直したものである。研究の過程において波長走査の理論式は

$$\lambda = \frac{f_0}{f_a} \lambda_0$$

で与えられ、駆動周波数 f_a に対して波数が線形に変化することがわかっていた。それが実験的にも確認された。ただし、AOMドライバの出力周波数は制御電圧に対して若干非線形に応答したため、マイコンにより線形補正を施した。そのため走査周波数はマイコンの動作速度で制限を受け、280Hzであった。図8(c)は、スペクトル線幅を確認するためにシングルスペクトルを観測したものである。線幅はFWHMで約0.6nmであり、予想に反してかなり広いことも確認された。新提案のSSでは、波長選択素子がAOMであり、従来型のSSが固定の回折格子を使っているのに対して波長の選択性が低いのではないかと考えられた。以上の結果より、波長走査周波数とスペクトル線幅の改善が今後の課題であると言える。

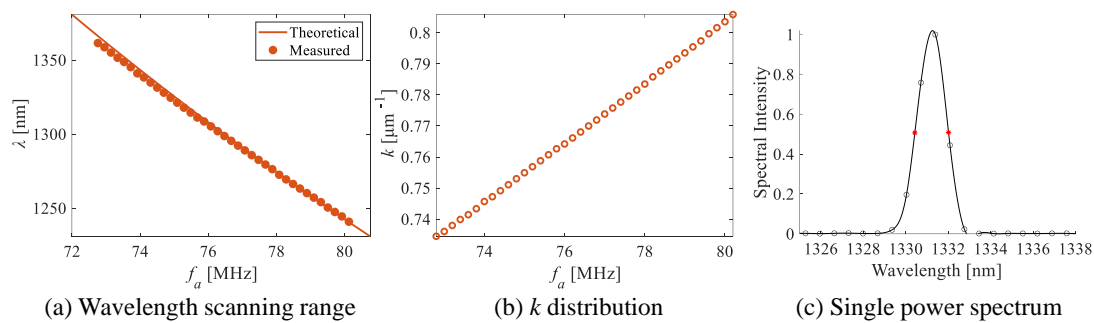


図8 波長走査特性: (a) 走査波長、(b) 走査波数、(c) スペクトル線幅

③波長の走査特性確認後、OCT測定を試みた。測定対象は、図6(a)中”s”で示されたサンプルで、約150 μm のカバーガラス(G)に約50 μm 厚のテープ(T)を貼りつけたものである。波長を走査しながら、図6(b)のようにビデオカメラで干渉画像を取得し、同一画素の輝度の時間変化をとらえたデータを図9(a)、これをFFT解析した結果を図9(b)示す。この1次元でのOCT測定結果から、反射面の位置に応じたピークが得られ、それぞれのピークからサンプルの深さ方向の位置が正確に求められていることを確認した(表1)。

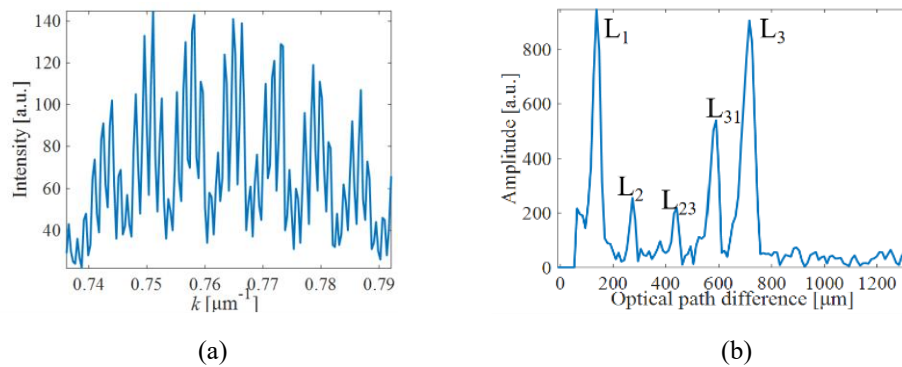


図9 1次元 OCT 測定結果

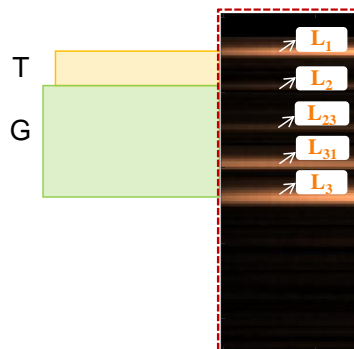


図10 2次元 OCT 測定結果

表1 厚み測定結果

	Setting	Calculation	Error
Tape(t_1)	50	45.6	4.4
Glass(t_2)	148	146.3	1.7

同様の測定を 2 次元的に行った結果を図 10 に示す。物体の断層像が捉えられている様子がわかる。表 1 は、各層の厚みを示したもので、既知の厚みと極めてよく一致した。

以上の結果は、最終年度（令和 5 年度）、国際会議（OIE' 23）と学術雑誌（Optics Express）に発表済みである。

動作原理がこれまで提案されてきたものと異なる新規提案の SS が、予想通り機能し、OCT 計測にも十分使用可能なことを実験的に示すことができた。特徴として、1) 装置の構成が簡単になる、2) 波長走査中も AOM への入射光角度（ブラッグ角）が変わらないため AOM での回折効率が最大となる、3) 波数線形での波長走査が容易に行えるため OCT の光源に適している、など従来型の SS に比べて有利な点が多く、今後国内外における SS の新たな方式の一つとして有望視される。スペクトル線幅の狭窄化が課題として残っているが、空間フィルタリングによるスペクトル選択機構を導入するなどして解決を図ることができるのではないかと思われる。また本 SS に関し、現時点で企業との共同研究を開始し、実用化を目指している。

<引用文献>

- [1] D. Huang, et. al., Science, 254, 1178 (1991).
- [2] K. C. Harvey, et. al., Opt. Lett., 16 (12), 910 (1991).
- [3] M. de Labachellerie, et. al, Opt. Lett., 20 (6), 572 (1995).
- [4] T. Suzuki, et. al., Opt. Commun., 284 (19), 4615 (2011).
- [5] T. Suzuki, et. al., Opt. Eng., 58 (11), 104108 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suzuki Takamasa, Kaneko Yuzuki, Choi Samuel, Sasaki Osami	4. 巻 47
2. 論文標題 External-cavity laser diode using acousto-optic deflector as tunable grating	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 1871~1871
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.454021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xuanxuan Ji, Takamasa Suzuki, Samuel Choi, Osami Sasaki, Jixiong Pu	4. 巻 31
2. 論文標題 Linear-wavenumber swept source based on an acousto-optic device for optical coherence tomography	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 44611-44621
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.509217	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 金子 優月, 鈴木 孝昌, 崔 森悦
2. 発表標題 周期可変回折格子を用いた高速広帯域波長走査光源の構築
3. 学会等名 令和3年（第31回）電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子 優月, 鈴木 孝昌, 崔 森悦
2. 発表標題 周期可変回折格子を用いた高速広帯域波長走査光源の開発
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xuanxuan Ji, Takamasa Suzuki, Samuel Choi, and Osami Sasak
2. 発表標題 Optical coherence tomography based on a linear wavenumber swept-source
3. 学会等名 The 14th Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE '23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 レーザー装置	発明者 鈴木孝昌	権利者 国立大学法人新潟大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-102910	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	崔 森悦 (Choi Samuel) (60568418)	新潟大学・自然科学系・准教授 (13101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------