

SLD の眼科用光干渉測定応用

SD-OCT の深さ分解能と SLD 光源のスペクトル幅との関係

目次

1	はじめに	2
2	SLD と SD-OCT の概要	2
3	光干渉測定の種類と概要	2
3.1	眼底 OCT	2
3.2	眼軸近視検査器	3
4	眼科検査機器に要求される深さ分解能	3
5	アンリツの SLD 製品	5
6	参考文献	6

1 はじめに

眼科検査機器の分野では、眼底断層の撮像や眼軸長の測定用として、光干渉測定を利用した SD-OCT (Spectral Domain Optical Coherence Tomography) が広く用いられています。これら測定には、検査器に内蔵される SLD 光源の特性が検査結果に大きく影響を及ぼします。中心波長 850 nm 付近の SLD は水による光の吸収率が低いことから、眼科検査機器分野に多く用いられます。本稿では、SLD 光源について簡単に説明した後に、SLD が活用される測定技術である眼底 OCT と実際の検査機器である眼軸近視用検査器を取り上げ、キーデバイスである SLD の要求性能についても説明します。

2 SLD と SD-OCT の概要

SLD は Super Luminescent Diode の略で、レーザダイオード並みの出力、広いスペクトル幅および LED (Light Emitting Diode) の低コヒーレンス性を兼ね備えた光源です。レーザ発振ではなく、LED と同様の自然放出で出力されますが、レーザダイオードと同等の狭い活性層で発光するため、光ファイバとの結合性に優れています。

SD-OCT はこの SLD を光源として使用し、分光器を用いて干渉スペクトルを取得、非侵襲的に物体の内部構造を高解像度に画像化する技術です。

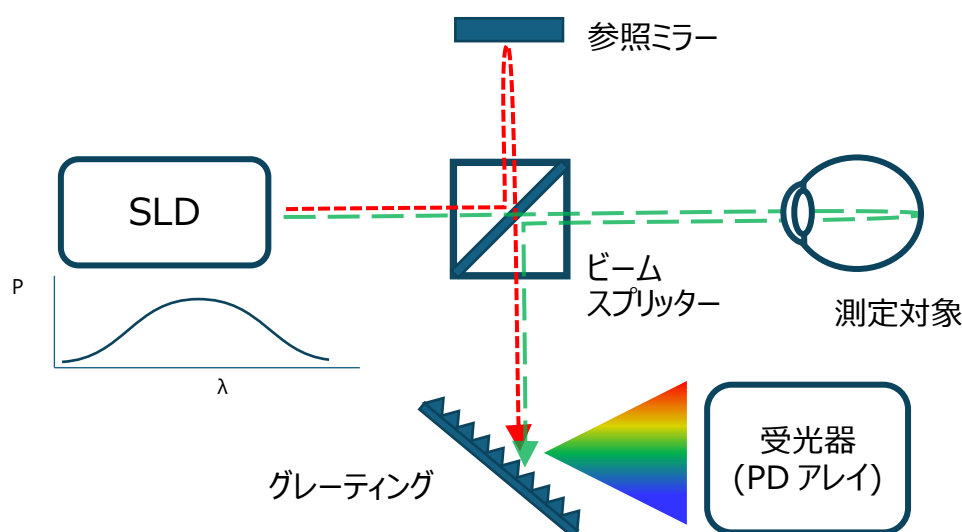


図 2.1 SD-OCT の動作原理

3 光干渉測定の種類と概要

3.1 眼底 OCT

眼底 OCT は、光で眼底の網膜部をスキャンすることで断層画像を取得し、眼底内部を三次元的に観測する技術です。光は眼底の内部にまで透過するため、網膜表面だけでなく断層構造を観測することができます。そのため、一般的な眼底カメラのように二次元的に眼底の写真を撮影するだけではなく、三次元的に眼底部を観測できることが特長です。これにより、広く緑内障や加齢黄斑変性等の検査や診断に使用されています。

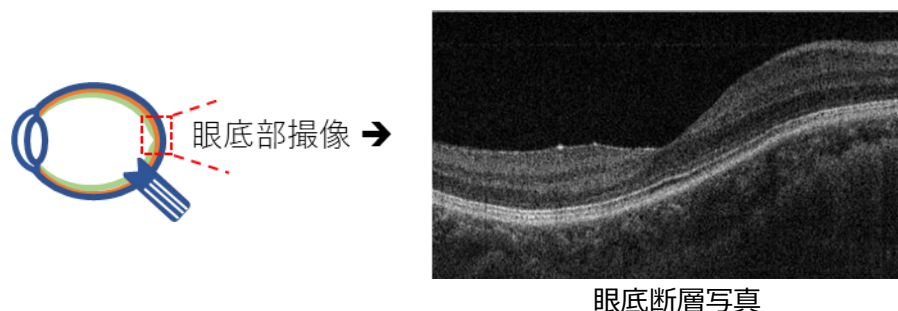


図 3.1 OCT による眼底部撮像例

3.2 眼軸近視検査器

近視の原因の一つは、眼球の前後方向の大きさが伸びることで、眼に入った光が網膜上にピントを合わせられなくなることです。図 3.2 に正視と近視状態の眼球の様子を示します。ここで、眼の表面から奥の網膜までの距離を“眼軸長”といいます。この眼軸長を測定することで、近視の進行状況を検査する測定器が眼軸近視検査器です。

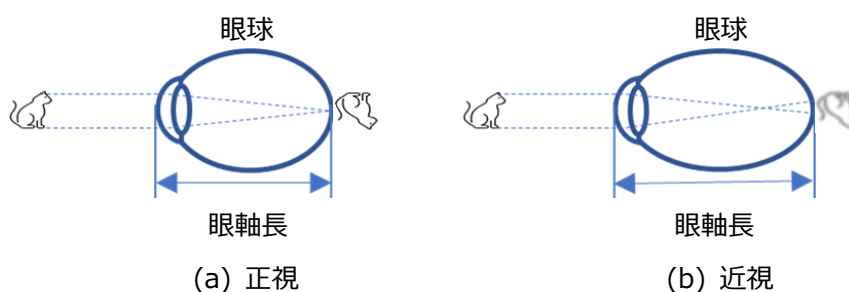


図 3.2 正視と近視

2021 年に文部科学省が実施した「児童生徒の近視実態調査」報告書 1)の中では、近視人口は世界的に増加傾向で、2050 年には 48 億人に増加する、との記載があります。諸説ありますが、近視は遺伝的要因やスマートフォン、パソコン等を近距離で長時間見続けることによって発症したり進行の原因になったりすると言われています。

4 眼科検査機器に要求される深さ分解能

眼底断層写真は、細胞層を分離して表示していることが重要です。ここでは、図 4.1 の眼底断層写真を用いて、眼底 OCT に要求される深さ分解能を考察します。各細胞層の厚さと比較するために、2 mm, 1 mm, 100 μ m, 10 μ m のスケールを示しています。スケールと比較すると、眼底断層写真で最も薄い細胞層を認識するためには 10 μ m 程度の深さ分解能が必要です。

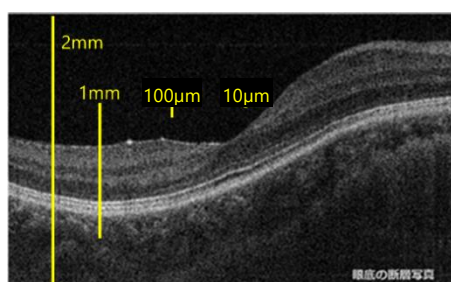


図 4.1 眼底断層写真

眼軸近視検査では、眼軸長を測定し近視状態を検査します。眼軸近視検査器ではどの程度の深さ分解能が求められるのでしょうか。眼軸長と近視の関係について記載された論文は複数あります^{2),3)}。各論文で数値が完全に一致するわけではありませんが、ここではその中から「1 mm の眼軸長伸長が-2.00 D から-2.50 D の変化量に相当する」という数値を元に考えることにします。D はディオプターの略で、一般的に 0.25 刻みで眼鏡やコンタクトレンズの度数を表す単位です。ディオプター(D 値)と視力の目安は表 4.1 のような関係になります。

表 4.1 ディオプターと視力目安

D	視力目安
-0.25	0.9
-0.50	0.8
-0.75	0.7
-1.00	0.6
-1.25	0.5
-1.50	0.4
-1.75	0.3
-2.00	0.2
-2.25 to -4.00	0.1
-4.25	0.05

眼軸長 1 mm の差が 2.00 D の差に相当とすると、眼軸長が 1 mm 伸びることにより、-0.25 D の視力目安 0.9 が、-2.25 D の視力目安 0.1 に変化することを意味します。つまり、眼軸長 1 mm の変化で D は 8 段階変化することになり、1 mm の 1/10 以下、100 μm 以下の分解能で、眼軸長の延伸による近視状態を測定する必要があります。これは眼軸長の変化によりどの程度視力が変化するか、を検査する目的の場合で、白内障等で水晶体を眼内レンズに交換するような場合には、より正確に眼軸長を測定する必要があります。

ここで眼底 OCT や眼軸近視検査器の測定手法である OCT の深さ分解能を決めるパラメータについて記載します。一例として、ガウス分布のスペクトルをもつ光源を使用した場合の OCT 深さ分解能 Δz は次の式で表されます⁴⁾。

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_c^2}{n \Delta \lambda}$$

λ_c は光源の中心波長、 $\Delta \lambda$ は光源のスペクトル半値全幅(以下、スペクトル幅)です。n は屈折率を表し、眼球内はほぼ水分であるため、水の屈折率と等価の約 1.3 と考えられます。この式より、スペクトル幅が広がると、深さ分解能 Δz が向上することがわかります。この式を用いて、SLD にどの程度のスペクトル幅が必要になるか計算してみます。

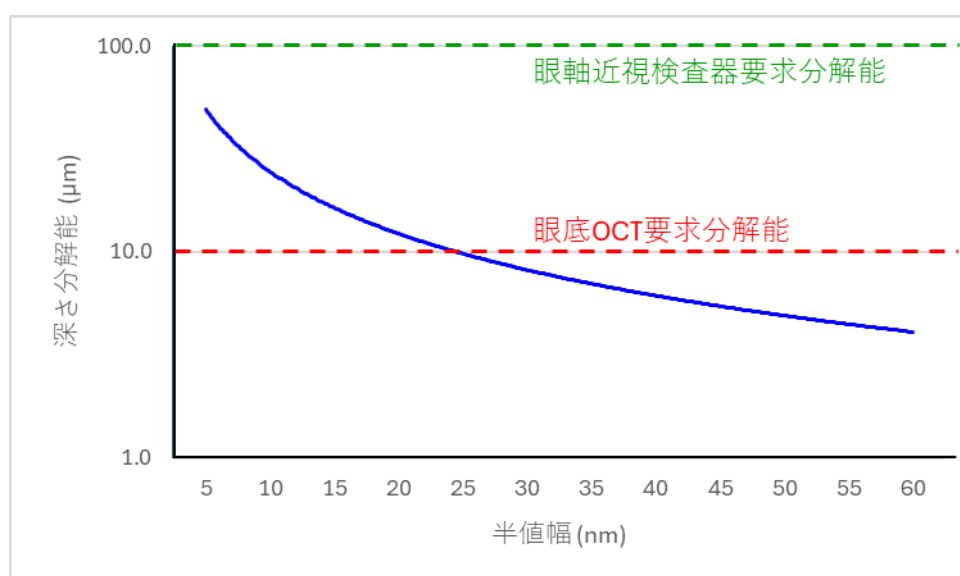


図 4.2 深さ分解能のスペクトル幅依存性

眼底 OCT では、10 μm 程度の深さ分解能が必要と考察しました。中心波長 $\lambda_c = 850 \text{ nm}$ の場合、およそ 25nm のスペクトル幅が必要と算出されます。また、50nm のスペクトル幅があれば、深さ分解能 4.9 μm となり、より高い分解能の測定が可能となります。

眼軸近視検査器で要求される深さ分解能 100 μm を実現するためには、2.5nm のスペクトル幅が必要と算出されます。15 nm 程度あれば、深さ分解能は 16.3 μm となり、要求分解能以上の測定精度を得ることができます。

表 4.2 眼科検査機器に必要な分解能と SLD 光源のスペクトル幅

眼科検査機器	要求深さ分解能	スペクトル幅
眼軸近視検査器	100 μm	$\geq 2.5 \text{ nm}$
眼底 OCT	10 μm	$\geq 25 \text{ nm}$

5 アンリツの SLD 製品

アンリツでは SD-OCT 等で使用される広帯域な SLD 光源を提供し、医用機器市場に貢献しています。我々の SLD は円筒、CAN、バタフライ、ドライブ回路付き等各種形状が選択可能で、波長は 0.8、1.31、1.55、1.65 μm 帯に対応しています。眼科用には水分吸収の少ない 0.8 μm 帯が使用されます。0.8 μm 帯ではスペクトル幅 14~50 nm と幅広いラインナップを取り揃えています。形状は眼底 OCT 用に使われるバタフライモジュール、眼軸近視検査用の CAN, 円筒モジュール等用途に合わせて対応できます。光出力、中心波長、スペクトル幅も各種選択可能です。

SLD は本稿で紹介した眼科 OCT だけでなく、加工品の表面粗さ、傷の確認や薄膜厚さの測定等、広く産業用 OCT としても採用されています。これら各種用途に 1.31~1.65 μm の各種 SLD も対応できますので、お問い合わせください。

表 5.1 アンリツ製 0.8 μm 帯 SLD ラインアップ

主な アプリケーション	形名	形状	光出力 (mW)	中心波長 (nm)	スペクトル幅 (nm)
眼軸近視検査	AS8K215GY30M	CAN	5	830	15
眼軸近視検査	AS8E210GP30M	円筒	1	830	15
眼軸近視検査	AS8B115GT30M	バタフライ	5	830	14
眼底 OCT	AS8B115LT40MA	バタフライ	5	840	50
眼底 OCT	AM8P4005SL45C	ドライブ回路付	5.5	840	45
眼底 OCT	AM8P8006SL45G	ドライブ回路付	7	880	50

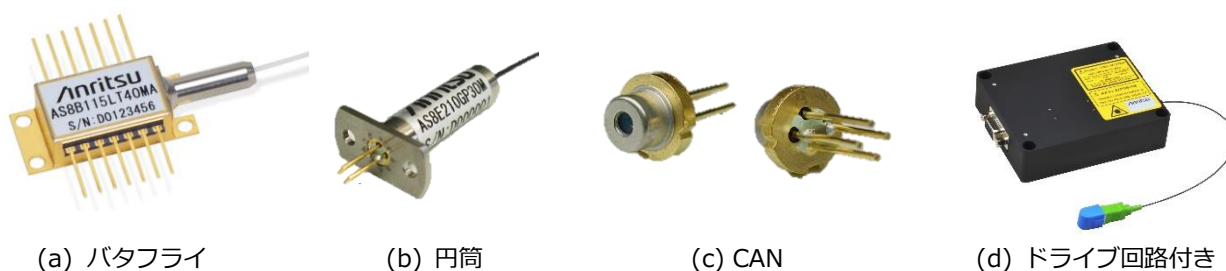


図 5.1 アンリツ製 SLD の形状ラインアップ

アンリツは今後とも眼科医用他、様々な分野で活用いただける各種光源を提供していきます。

6 参考文献

- 1) 令和 3 年度 児童生徒の近視実態調査 調査結果報告書 (文部科学省)
- 2) Thomas Naduvilath, "How to Interpret Axial Length Measurement", Review of Myopia Management (2022)
- 3) <https://reviewofmm.com/how-to-interpret-axial-length-measurements/>
- 4) Lhingkhohat Haokip, Jawaharlal Nehru, K.Sorojini Devi, Jawaharlal Nehru, K.Sorojini Devi, "Relationship of Axial length of the Eye and IOL power in indigenous people of North East India", IOSR Journal of Dental and Medical Sciences (IOSR-JDMS) e-ISSN: 2279-0853, p-ISSN: 2279-0861. Volume 18, Issue 3 Ser. I (March 2019), PP 73-76
- 5) S.H. Yun, G.J. Tearney, J.F. de Boer, N.Iftimia and B.E. Bouma, "High-speed optical frequency-domain imaging", Optics Express Vol.11, Issue 22, pp.2953-2963 (2003)



アンリツ株式会社

センシング&デバイスカンパニー 営業部
<https://www.anritsu.com/sensing-devices>

〒243-8555 神奈川県厚木市恩名5-1-1
TEL 046-296-6783 FAX 046-225-8390



お問合せURL
<https://www.anritsu.com/ja-jp/sensing-devices/contact-us>



ご使用前に「光デバイス取扱い上の注意点」をお読みください。
<https://www.anritsu.com/ja-jp/sensing-devices/guide/optdevices-handling>



■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要になる場合があります。また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。

■記載事項はお断りなしに変更することがあります。