

AMCoR

Asahikawa Medical College Repository <http://amcor.asahikawa-med.ac.jp/>

眼科 (2007.09) 49巻10号:1427~1433.

【日常診療に役立つ眼科検査機器とその利用法】眼底画像解析 走査レーザー検眼鏡(SLO)

石子智士

9. 走査レーザー検眼鏡(SLO)

Scanning laser ophthalmoscope

石 子 智 士*

はじめに

走査レーザー検眼鏡(scanning laser ophthalmoscope, SLO)は、1980年代に米国スケベンス眼研究所で開発された装置で¹⁾、わが国では1990年に入ってから Rodenstock 社製の SLO が用いられるようになった。当初、主に画像検査機器として用いられていたが、その後、微小暗点および固視の評価が可能な Microperimetry²⁾、局所視力の評価が可能な Visumetry³⁾などのプログラムを搭載し、網膜機能検査機器としての応用もなされるようになった。

近年、Rodenstock 社製の SLO とは別に、蛍光眼底造影検査を行う Heidelberg Retina Angiograph (HRA)、網膜、視神経乳頭部の組織血流を評価する Heidelberg Retina Flowmeter (HRF)、網膜や視神経乳頭の形状を定量的に評価する GDx System、Heidelberg Retina Tomograph (HRT) など、SLO の基本原理である走査方式と共焦点方式を応用した、新しい眼科検査機器が開発されてきた⁴⁾。さらに、波面光学を応用し視細胞レベルの単位で観察できる超高解像度の adaptive optics scanning laser ophthalmoscope (AO-SLO)⁵⁾、SLO と optical coherence tomography (OCT) とを組み合わせ

網膜断層像を立体的に評価できる 3D-OCT/SLO⁶⁾なども開発されてきている。

したがって、SLO の基本原理を理解することは、これらの装置の特徴を理解するうえでも重要である。ここでは主に Rodenstock 社製の SLO に関して、その基本的な原理および各種設定と実際の眼底画像解析について解説する。

I. SLO の原理と特徴

1. 原 理

SLO は、「レーザー」を用いてスポット光を眼底に照射し、このレーザースポットを移動させながらそれぞれの反射光を再構築して全体像を得るいわゆる「走査」方式による画像技術を用いた「検眼鏡」である。スポット光は、ポリゴンミラーを用いて水平方向に、ガルバノメーターミラーを用いて垂直方向に高速移動する。レーザーを用いることで、白色光と比べ散乱の影響が少なく、また小さなスポットに十分な光量を照射することができる。スポット径が小さいほど解像度が上がるが、画角 40 度で検査を行う場合眼底上で約 30 μm となるスポット径を採用している。眼底を検査するために必要な網膜への照射光量は非常に少なく画像記録時のフラッシュも不要である。従来のカメラと比べると、観察光量で約 100 分の 1 から 1,000 分の 1、撮影光量の約 10 万分の 1 である⁷⁾。得られた画像は、

* Satoshi ISHIKO 旭川医科大学眼科学講座

Key words: 走査レーザー検眼鏡, scanning laser ophthalmoscope

日本においては、走査線 525 本、毎秒 30 フレームのフル動画として観察・記録することができる。

2. 特 徴

1) レーザー光源

SLO の光源として、アルゴンレーザー、ヘリウムネオンレーザー、ダイオードレーザーが装備されており、目的に応じて選択することができる。眼底検査では、用いるレーザーの波長により、それぞれ特色のある眼底像を得ることができる⁸⁾。基本的には、硝子体や網膜表面などの観察には物質表面からの反射を捉えやすい短波長のレーザーが適しており、網膜深層から脈絡膜側の観察には散乱の少ない長波長のレーザーが有用である。また、赤外光領域の波長を有するダイオードレーザーを用いると、被検者に羞明感を与えることなく眼底検査が可能である。このダイオードレーザーを眼底のモニターのために用い、可視領域波長のレーザー光を用いて光刺激を眼底に呈示することで、眼底を観察しながらの視機能検査が可能である。

2) 共焦点絞り

SLO では眼底からの反射光を捉える検出器の前に特徴ある絞りが設置されている。これには 2 種類の絞り、すなわち共焦点絞り (confocal aperture) と輪状絞り (ring aperture) があり、これらの選択により得られる画像が大きく異なってくる⁹⁾。通常眼底検査においては共焦点絞りを用いている。これは、眼底からの反射光を捉える検出器の前に中心に小さな孔の開いた絞りを設置するもので、点光源と共役な関係にある反射を捉えるとともに焦点外からの反射や散乱光を遮る。これにより、焦点面からの反射のみを選択的に検出器に通すことができ、コントラストの高い鮮明な画像を得ることができる。

3) 光学系

SLO では Maxwell 光学系となっている。眼

内に照射されるレーザー光は、瞳孔面の同一部位を通して眼内に入射するため、無散瞳あるいは瞳孔径 2.5 mm 程度で眼底検査が可能である。したがって、通常眼底カメラでは困難な瞳孔癒着例の眼底画像解析が可能である。光の入射位置を自由に設定できるため、中間透光体の混濁を可能な限り避けて眼底検査をすることができる。さらに、眼内に照射する光量を瞳孔径に左右されることなく調節することができるため、正確な網膜視機能評価をすることが可能である。

II. SLO を用いた画像検査

1. 眼底検査

1) 検査手順

眼底検査にあたり、SLO ではレーザーの種類とパワー、絞り、屈折度、画角、Gain の設定が必要である (図 1)。

① レーザーの選択

SLO には、アルゴンブルー (波長 488 nm)、アルゴングリーン (514 nm)、ヘリウムネオンレーザー (633 nm)、ダイオードレーザー (780 nm) が搭載されており、観察する目的部位に応じてレーザーを選択する。波長の短いレーザーを用いると、硝子体や網膜表面の変化を詳細に捉えることができ^{10) 11)}、赤外光を用いると、可視光による観察ではブロックされてしまう網膜色素上皮を通り抜けることができるため、最も波長の長いダイオードレーザーでは網膜深層から脈絡膜側の所見を得ることが可能である¹²⁾。

検査を始めるにあたっては、羞明感の少ない長波長のダイオードレーザーで焦点合わせを行い、その後目的に応じて波長を変えると患者の協力が得られやすい。ただし、波長を変えて検査を行う場合わずかに焦点が変化することもある。

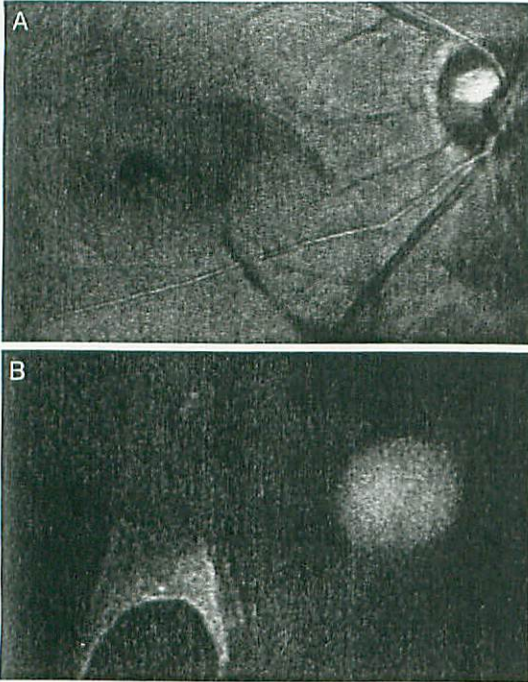


図1 硝子体混濁

A : Weiss ring の症例。眼底に焦点を合わせると、Weiss ring が暗く写っている。

B : Weiss ring に焦点を合わせるとその表面の構造およびそれに連なる後部硝子体膜や硝子体混濁の一部が明るく描出される。後方にぼんやりと視神経乳頭が写っている。

② 絞りの選択

通常の眼底検査においては共焦点絞りをを用いる。中央の小孔の口径により4種類あるが、口径が小さいほど焦点外からの反射や散乱光を遮り焦点面のより鮮明な画像が得られるため、比較的平坦な網膜表面の観察に適している。口径の大きな絞りで、口径の大きなものほどより深い領域までの多くの情報が検知器に入力されるため焦点深度が深くなり、硝子体混濁などの動きのある所見や隆起性病変などの所見を捉える場合に有用である(表)。比較的固視の良好な患者で焦点合わせを行う場合には小口径の絞りをを用い、固視動揺の大きな症例では比較的大きめの絞りをを用いると合わせやすい。なお、中間透光体の混濁が強い症例では、小口径の絞りで

表 絞りの種類

共焦点絞り	口径	解像度(深度)	
		画角 40 度	画角 20 度
C1	1 mm	300 μ m	50 μ m
C2	2 mm	1.2 mm	100 μ m
C3	4 mm	4.8 mm	200 μ m
C4	10 mm	30 mm	500 μ m
輪状絞り	中央遮蔽部(外径 22 mm)		
R1	1 mm		
R2	4 mm		

は画像が暗くなってしまうため、多少焦点が甘くなくても大きな口径を用いたほうが良い場合がある。

一方、輪状絞りは絞りの中央に遮蔽板を設け反射光を輪状に通すもので、暗視野(dark-field)撮影とよばれる方法に用いられる。焦点面からの反射を遮断するためより深層の所見が得やすくなる。さらに、散乱光と焦点外からの反射を通過させるため、光の入射を調節すると、位相差法のように網膜内の構造を擬似3次元的に描出できる。

③ 屈折度の調節

屈折異常が高度な場合、屈折度0の初期設定のままでは眼底からの反射が捉えにくい。そのため、おおまかに本人の屈折度数に合わせてから焦点合わせを行うとよい。

④ 画角の選択

SLOによる検査の画角は40度あるいは20度が基本であるが、アダプターを用いると60度の広角で検査が可能である。通常40度で検査を行い、目的に応じて画角を変える。筆者らは、焦点合わせの際は40度の画角でおおまかに焦点合わせを行い、20度で微調整を行っている。

⑤ Gain の設定

初期設定ではAutoに設定されている。通常は問題ないが、反射の強い病変が画角内にあった場合、その他の領域が暗くなり所見がわかり

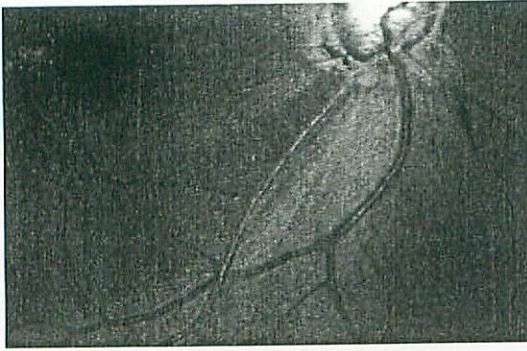


図2 緑内障患者
神経線維層の欠損が明らかである。

にくくなる場合がある。そのような場合、Gainをマニュアルで調節するか反射の強い病変が画角外となるよう検査領域を変えるとよい。

2) SLO 眼底画像解析の実際

① 硝子体の観察

SLOを用いると、硝子体混濁と眼底を同時に捉えることが可能である。眼底に焦点を合わせると混濁が暗い影として観察され、硝子体混濁に焦点を合わせると混濁は明るく映し出される(図1)。このような眼底検査を行う場合には波長の長いレーザーが有用であり、この際、口径の大きな共焦点絞りをを用いると焦点深度がより深くなるため、混濁の動的な観察にも有用である。混濁自体をより詳細に観察するためには、口径を絞って短い波長のアルゴンレーザーを用いると良いことがある。

② 網膜表面の観察

動的な観察を必要としない神経線維層の欠損、網膜前膜など網膜表面の観察には、アルゴンレーザーと口径の小さな共焦点絞りをを用いた観察が有用である(図2および3A, B)。同じ条件を用いた撮影でもわずかな反射の加減で見えかたが大きく異なってくるため、検査時にはSLO本体を動かしてその画像変化を確認し、必要な情報を見逃さない注意が必要である。さらに、網膜前膜を通してその下の網膜皺襞を観察する場

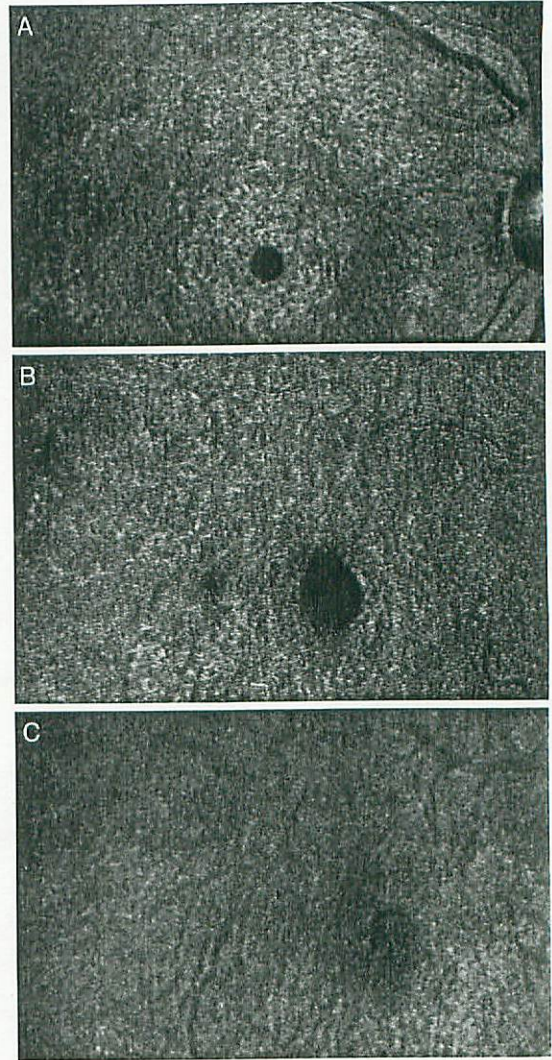


図3 網膜前膜、偽黄斑円孔の症例

A: 画角40度。アルゴンレーザーを用いると網膜前膜からの明るい直接反射が認められる。

B: 画角20度。Aの拡大画像。

C: 画角20度。同じ部位をヘリウムネオンレーザーで観察すると、前膜下の網膜に生じた皺襞の所見を得ることができる。

合にはヘリウムネオンレーザーが有用である(図3C)。

③ 網膜深部の観察

網膜深層から脈絡膜の検査には、長波長のレーザーが適している。ダイオードレーザーに共焦点絞りをを用いて眼底を観察すると、ドルー

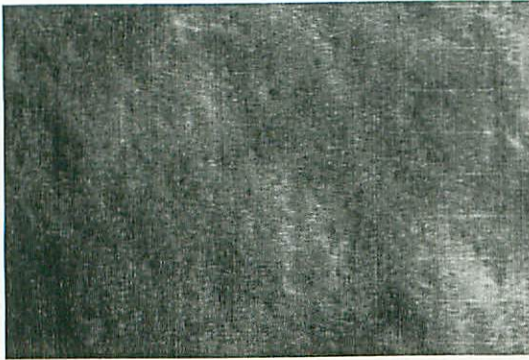


図4 ドルーゼン

波長の長いダイオードレーザーと輪状絞りで観察すると、ドルーゼンが鮮明に浮き上がり観察しやすくなる。

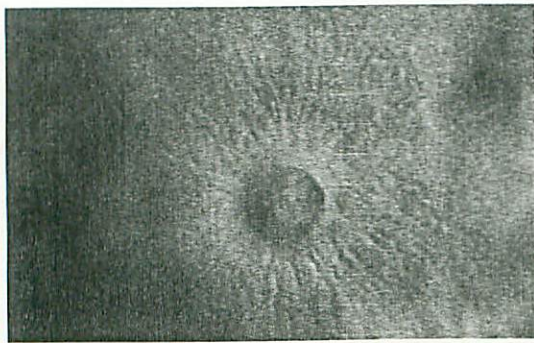


図5 黄斑円孔

波長の長いダイオードレーザーと輪状絞りをういて観察すると、黄斑円孔のカフの盛り上がりや放射状に広がる fold の状態が立体的に観察される。

ゼンなど網膜下の沈着物は、隆起した円形(あるいは粒状)の明るい反射として認められる。これを輪状絞りをういて観察すると、わずかな隆起性の変化も立体的にそして鮮明に捉えることができる¹³⁾。したがって輪状絞りをういると通常の眼底写真や共焦点絞りで観察に比べて網膜深層の変化を認めやすくなる(図4)。さらに、黄斑円孔周囲の網膜皺襞や嚢胞様黄斑浮腫などの所見が、レリーフ像のように浮き上がって見える(図5)¹⁴⁾。この場合、光の反射によって見えかたが大きく異なるため検査中の注意が必要である。基本的に、滲出物や増殖膜など充実性の

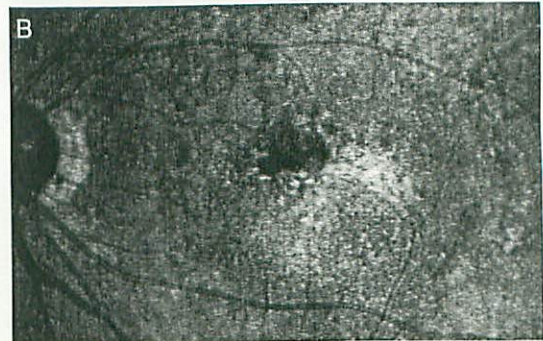


図6 加齢黄斑変性

A: インドシアニングリーン蛍光眼底造影を行うと、脈絡膜新生血管が認められた。

B: 脈絡膜新生血管に一致する部位は暗く、その周辺は明るい反射で囲まれている所見が得られた。

変化は明るい反射として、色素上皮剝離の領域や液性変化・血管性の変化は暗い反射として観察される。脈絡膜新生血管やポリープ状脈絡膜血管症などにおいて、血管周囲の線維性増殖のある部分では強い反射が生じるため、SLO 所見では隆起した明るい反射として観察されるが、血管自体の変化あるいは出血そのものでは、ヘモグロビンにより光が吸収されてしまい暗く描出される¹⁵⁾。そのため、脈絡膜新生血管などでは、しばしば暗い中央を有するリング状の明るい反射として観察される(図6)。

2. 蛍光眼底造影検査

SLOでは、フルオレセインの励起波長490 nmにほぼ一致するアルゴンブルーレーザー(488 nm)を用いることでフルオレセイン蛍光眼底造影検査が、インドシアニングレインの励

起波長のピーク 766 nm に近いダイオードレーザー (780 nm) を用いることでインドシアニングリーン蛍光眼底造影検査が可能である。SLO では散瞳が不十分な症例でも造影検査ができる。高感度の検出器を用いているためフラッシュは不要であり、従来のカメラに比べはるかに少ない光量で造影検査が可能である。また、焦点深度が深いことから、隆起の大きな腫瘍性病変の造影検査にも有用である。SLO の有するこのような特徴から、従来の眼底カメラでは造影検査が困難であった症例でも可能なものがある。また、造影初期像の解析にすぐれており、新生血管の描出などに有用である。SLO の内部に検出器を 2 つ搭載して 2 種類のレーザーを同時に用い、2 種類の蛍光造影検査を同時に行うことのできる仕様のもので、造影画像の平均加算などの処理を容易に行うことのできるプログラムもある。なお HRA は、従来の SLO に比べより高出力のレーザーとより高感度の検出器を搭載し、共焦点絞りの口径も小さくして解像度を高め、より鮮明な蛍光眼底検査が可能となった SLO であり、フルオレセインとインドシアニンググリーンの同時蛍光眼底造影検査も可能である。共焦点画像のため焦点面前後からの画像は制限されており、網膜表面から深層まですべての蛍光像の重ねあわせである眼底カメラによって得られた画像とは所見が異なることがあるため、その解析には注意が必要である。HRA ではさらに、眼底からの自然蛍光の評価も可能である。蛍光眼底造影検査に関する詳細は他項にゆずる。

おわりに

Rodenstock 社製の SLO は、これまで述べた検査画像の利点はあったものの装置自体が大きく、広い設置面積が必要であったこと、いろいろな条件設定が可能であった反面操作が煩雑で

あったこと、装置の動きが遅く被検眼を捉えるために熟練を要したことなど、装置自体の問題もあり残念ながら既に生産が中止となった。したがって、現時点でこの装置を持っている施設でしかこれらの検査を行うことはできない。しかしながら、従来の装置の問題を解決した小型の国産 SLO (F-10, Nidek 社製) が開発された。さらに、冒頭で述べたようにこの装置の原理を応用した眼科検査機器が新たに開発され、それぞれの特長を生かし目的に応じて利用されている。今後、これらの装置を用いることで網膜硝子体疾患の新しい知見が得られることを期待したい。

文 献

- 1) Webb RH, Hughes GW, Pomerantzeff O : Flying spot TV ophthalmoscope. *App Opt* 19 : 2991-2997, 1980
- 2) 石子智士, 吉田晃敏, 小笠原博宣 : SLO を用いた Microperimetry. *眼紀* 47 : 355-362, 1996
- 3) 石子智士, 吉田晃敏, 長岡泰司ほか : 走査レーザー検眼鏡 visumetry を用いた正常人の局所視力. *臨眼* 51 : 259-261, 1997
- 4) 石子智士, 吉田晃敏 : 網膜疾患の走査レーザー検眼鏡 (SLO) による画像診断. *レーザー研究* 29 : 421-426, 2001
- 5) Vankateswaran K, Roorda A, Romero-Borja F : Theoretical modeling and evaluation of the axial resolution of the adaptive optics scanning laser ophthalmoscope. *J Biomed Opt* 9 : 132-138, 2004
- 6) Yannuzzi LA, Ober MD, Slakter JS et al : Ophthalmic fundus imaging. Today and beyond. *Am J Ophthalmol* 137 : 511-524, 2004
- 7) Mainster MA, Ham WT, Delori FC : Potential retinal hazards. Instrument and environmental light sources. *Ophthalmology* 90 : 927-932, 1983

- 8) 石子智士, 吉田晃敏 : 走査型レーザー検眼鏡. あたらしい眼科 21 : 333-339, 2004
- 9) Webb RH, Hughes GW, Delori FC : Confocal scanning laser ophthalmoscope. Appl Opt 26 : 1492-1499, 1987
- 10) Kakehashi A, Ishiko S : Part I Examination of patients. Chapter 2 Documentation of vitreous examination. In ; Schepens CL et al (eds) : Atlas of vitreous biomicroscopy, Butterworth-Heinemann, Boston, 13-23, 1999
- 11) Akiba J, Ishiko S, Hikichi T et al : Imaging of epiretinal membranes in macular holes by scanning laser ophthalmoscopy. Am J Ophthalmol 121 : 177-180, 1996
- 12) Elsner AE, Burns SA, Weiter JJ et al : Infrared imaging of sub-retinal structures in the human ocular fundus. Vision Res 36 : 191-205, 1996
- 13) Ishiko S, Akiba J, Horikawa Y et al : Detection of drusen in the fellow eye of Japanese patients with age-related macular degeneration using scanning laser ophthalmoscopy. Ophthalmology 109 : 2165-2169, 2002
- 14) Yoshida A, Ishiko S, Akiba J et al : Radiating retinal folds detected by scanning laser ophthalmoscopy using a diode laser in a dark-field mode in idiopathic macular holes. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 236 : 445-450, 1998
- 15) Hartnett ME, Elsner AE : Characteristics of exudative age-related macular degeneration in vivo with confocal and indirect infrared imaging. Ophthalmology 103 : 58-71, 1996

*

*