

AMCoR

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

あたらしい眼科 (2004.) 21巻3号:333～339.

【わかる!使える!最新の眼科診断機器】 走査型レーザー検眼鏡

石子智士, 吉田晃敏

走査型レーザー検眼鏡

Scanning Laser Ophthalmoscope

石子智士* 吉田晃敏*

はじめに

走査レーザー検眼鏡 (Scanning Laser Ophthalmoscope : SLO) は、基本的な原理が発表されて¹⁾から20年以上が経過しているが、最近でもその基本原理を応用した眼科診断機器が登場してきている。本稿では、SLOの基本的原理について解説し、Rodenstock社製のSLOを中心に、この原理を用いた眼科診断機器のいくつかを紹介する。

I SLOの原理と特徴

SLOは、レーザーのごく小さなスポット光を眼底に照射し、高速に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である。これは瞳孔面の同一部位を通過して眼内に入射する、いわゆるMaxwell光学系であり、無散瞳でも検査が可能である。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かぎり避けて検査することが可能である。眼底を検査するために必要な網膜への照射光量は従来のカメラと比べ非常に少なく、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(図1)²⁾。

レーザーを用いていることも特徴の一つである。小さなスポットに十分な光量を照射することができることや白色光と比べ散乱などの影響が少ないことが利点としてあげられるが、用いる波長により特色のある眼底像を得ることができるのも特徴の一つである。また、赤外光領

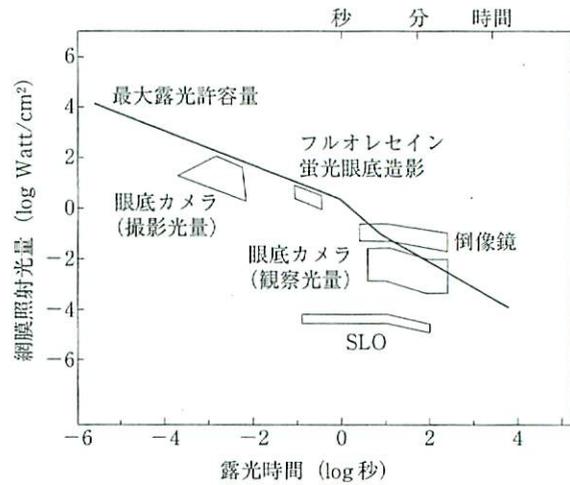


図1 眼底カメラとSLOの網膜照射光量 (文献2より一部改変)

域の波長を有する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。この波長のレーザーを眼底のモニターのために用い、他の波長のレーザー光を併用することで、眼底を観察しながら各種検査が可能になる。

共焦点方式も、SLOの特徴の一つである。これは、眼底からの反射光を捉える検出器の前に小さな孔の開いた板(絞り)を設置し、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断するものである。これにより、焦点面からの反射のみが選択的に検出器に入り、鮮明な画像を得ることができる。

* Satoshi Ishiko & Akitoshi Yoshida : 旭川医科大学眼科学講座
 【別刷請求先】 石子智士 : 〒078-8510 旭川市緑ヶ丘東2条1-1-1 旭川医科大学眼科学講座

II SLO を用いた画像検査

1. 眼底検査

Rodenstock 社製 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いる(表1)。基本的に、短い波長のレーザー光は物質表面からの反射を捉えやすいため硝子体や網膜表面の観察に適しており、散乱の少ない長波長のレーザーは、網膜深層から脈絡膜側の観察に有用である。

絞りには、大きく分けて共焦点絞り (confocal aperture) と輪状絞り (ring aperture) の2つがあり(表2)、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¹⁾。

共焦点絞りは中心に小さな孔の開いた絞りで、焦点面からの反射のみを通し焦点外からの反射を遮る(図2a)。口径が小さいほど焦点面の鮮明な画像が得られるため、起伏の少ない網膜表面や深層の観察には適している。各波長のレーザーと組み合わせると、所見が大きく変化する症例もある(図3a, b, c)。口径の大きな絞りでは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起伏の大きな腫瘍などの所見を捉える場合に有用である(図4)³⁾。

表1 レーザー光源

	波長	最大出力
アルゴンブルー	488 nm	400 μ W
アルゴングリーン	514 nm	400 μ W
ヘリウムネオン	633 nm	120 μ W
ダイオード	780 nm	2 mW

表2 絞り

共焦点絞り	口径	観察深度	
		画角 40°	画角 20°
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	中央遮閉部 (外径 22 mm)		
R1	1 mm		
R2	4 mm		

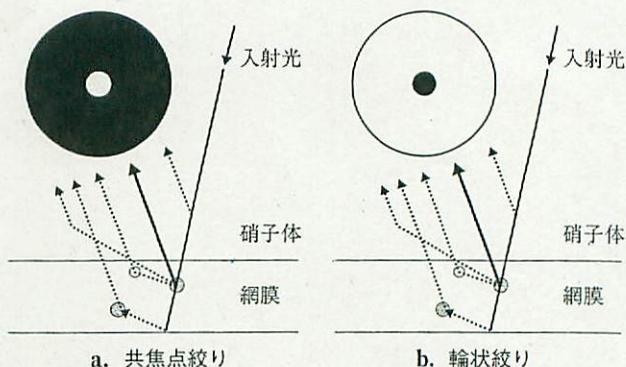


図2 SLOの絞り

実線は焦点面からの反射光, 点線は焦点外からの散乱光を示す。
(文献1より一部改変)

一方、輪状絞りは絞りの中央をブロックし反射光を輪状に通すもので、焦点面からの反射を遮断して散乱光と焦点外からの反射を通過させる(図2b)。このことにより、より深層の所見を得ることができる(図5)⁴⁾。さらに、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三次元的に描出できる(図6)⁵⁾。

2. 蛍光眼底造影検査

SLOでは、臨床的に用いられている2種類の蛍光眼底造影検査ができる。フルオレセインの励起波長は490 nmであるが、その波長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が可能である。このレーザーの波長がフルオレセインの蛍光波長と重ならないことから、コントラストの良い所見が得られる。また、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。造影所見を動画で記録することができ、網膜微小循環評価への応用も試みられている。インドシアニングリーンは励起波長のピークが766 nmであるが、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。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使い、2種類の蛍光造影検査を同時に行うことのできるものもある。また、検査所見をデジタル化し

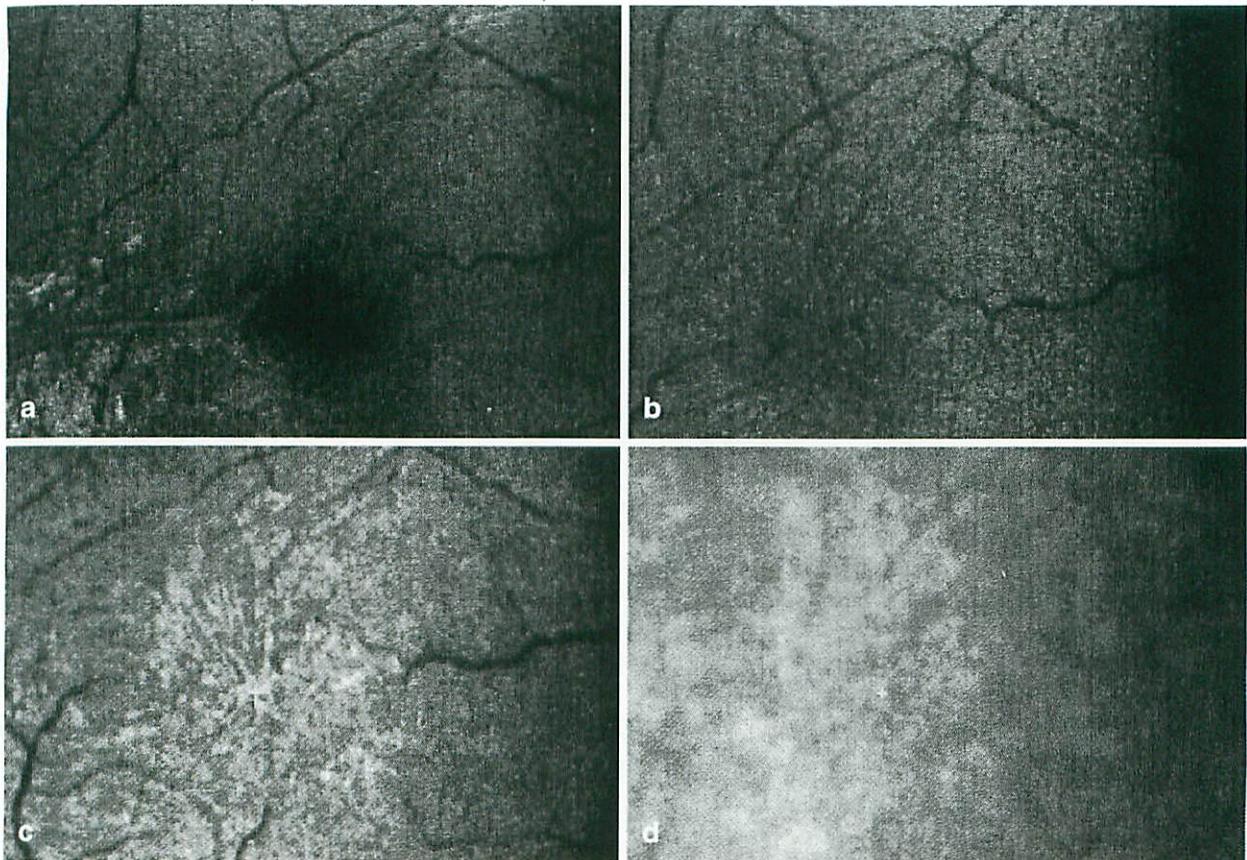


図 3 網膜前膜の所見

- a : アルゴンレーザーと共焦点絞りをを用いた所見. 網膜前膜からの反射と表面の fold が明らかである.
- b : ヘリウムネオンレーザーと共焦点絞りをを用いた所見. 網膜前膜は見えなくなり, わずかな表面の fold の様子が描出されている.
- c : ダイオードレーザーと共焦点絞りをを用いた所見. 網膜内の所見では中心窩を中心に不整な形状になっているのが描出されている.
- d : ダイオードレーザーと輪状絞りをを用いた所見. 網膜血管も透過し, 網膜深層から脈絡膜では, 形状の変化を認めない.

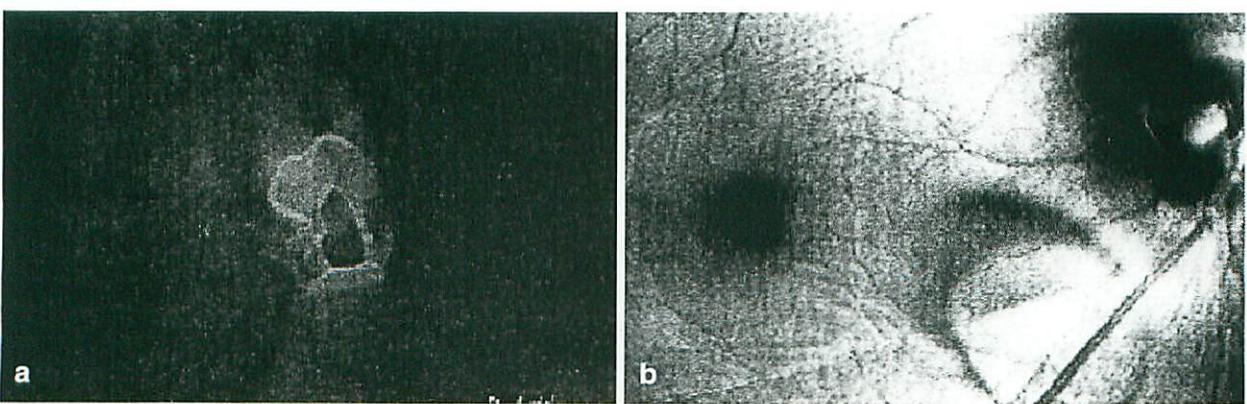


図 4 硝子体混濁

- a : Weiss ring の症例. Weiss ring に焦点を合わせるとその形状が明るく描出され, 後方にはぼんやりと視神経乳頭が写っている.
- b : 眼底に焦点を合わせると, Weiss ring と硝子体混濁が暗く写っている.



図 5 ドルーゼンの症例

輪状紋りとダイオードレーザーを用いると、ドルーゼンが鮮明に、立体的に描出される。



図 6 黄斑円孔の症例

輪状紋りとダイオードレーザーを用いると、黄斑円孔周囲のfoldの様子が、立体的に描出される。この症例では、すぐ下方にoperculumも写っている。

て、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。

III SLO を用いた機能検査

SLO ではダイオードレーザーを眼底のモニターのために用い、ヘリウムネオンレーザーで背景光と任意の形の刺激光を眼底に投影することで、眼底を観察しながら各種の視機能検査が可能である。SLO ではMaxwell光学系を用いているため、瞳孔径にかかわらず眼内に入射する光量を調節することができる。また、混濁を避けて網膜機能検査ができること、検査に用いられている光が長波長であり白色光と比べ散乱などの影響も少ないことから、より詳細な網膜の機能評価が可能である。これはすなわち、中間透光体の混濁などが取り除かれた場合の網膜機能を評価していることを意味するが、同時に、患者が現在どのように見えているかを反映しているものではない場合があることを念頭において評価する必要がある。ここでは、Rodenstock社のプログラムについて説明する。

1. 微小視野検査 (microperimetry)

SLO を用いた microperimetry は、いくつかの研究所で独自のプログラムを用いて行われている。一般的に用いられている Scotometry は Rodenstock 社のプログラムである (表 3)⁶⁾。このプログラムでは、動的微小視野検査と静的微小視野検査の両方ができる。眼底を直接観

表 3 Scotometry の測定条件

画 角	20°・40°
視標提示時間	100 msec (静的微小視野検査時)
背景輝度	1 cd/m ² , 10 cd/m ² , inverse
視標サイズ	Goldmann 視野計の I~V イソプター相当 または、任意の大きさ
視標輝度	0 dB からほぼ 1 dB 間隔で 30 段階
固視標	中心固視用視標 (中央 1 カ所) 傍中心固視用視標 (上下 4 カ所)

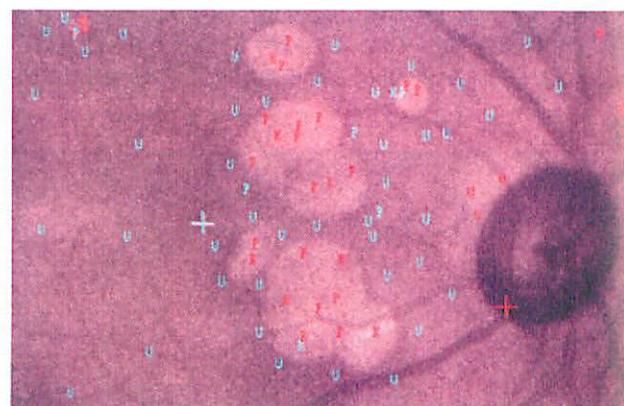


図 7 Microperimetry

目的とした領域の網膜感度を評価することができる。

察しながら、任意の大きさ・輝度の刺激視標を眼底に投影することが可能であり、限局した疾患あるいは入り組んだ領域の網膜感度の評価に有用である (図 7)。さら

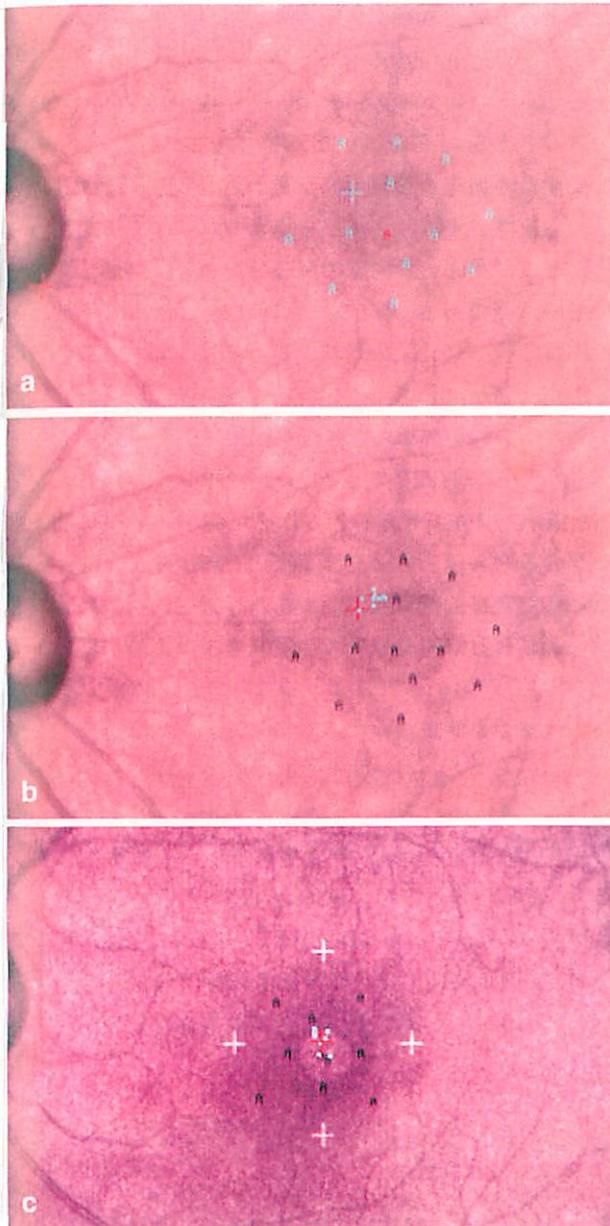


図 8 Fixation point

- a : 黄斑円孔の症例に中心固視標を用いて行った網膜感度検査の結果表示。円孔部はdense scotomaとなっている。
- b : 同じ検査結果の固視表示。固視は円孔縁の上鼻側領域で動揺している。
- c : 黄斑円孔の症例に傍中心固視標を用いて行ったmicroperimetryの固視表示。上下左右4カ所に固視標が写っており、円孔内部に仮の固視点が集まっている。

→ 図 9 Visumetry

任意の大きさのLandolt環を、目的とする領域に投影することで、網膜局所の視力を測定することができる。

に、固視の動揺を補正しながら検査を行うため、固視の動揺がある症例でも測定が可能である。通常は中心固視標を眼底に投影して検査を行うが、中心部領域の感度測定の際には上下左右4カ所に傍中心固視標を投影して、その中心を見るようにさせながら検査を行う。

2. 固視の評価

SLOには固視評価のためのプログラムがあり、固視標を眼底に投影することができる。静的微小視野検査の際に検査中の固視の位置が記録されるため、通常は静的微小視野検査の結果から固視評価を行うことが多い。静的微小視野検査の感度の結果を表示した場合、固視の位置が十字で表示されるがこれは検査の最後の固視をあらわすにすぎない(図8a)。中心固視を障害された場合固視は広い範囲で動揺がみられることがあり、検査中のすべての固視の位置をあらわす固視表示で評価する必要がある(図8b)。また、中心部の感度測定のため傍中心固視標を用いると、結果を表示する際、上下左右の傍中心固視標の中央に仮の固視が表示される(図8c)。これを固視と勘違いしないようにする必要がある。さらに、中心暗点を有する患者において、中央で物を見ようと眼を動かすため固視点表示が中央部に集まり、あたかも視機能のない領域で物を見ているかのような結果となることもある。このような偽中心固視の可能性も念頭におき、固視を評価する必要がある。

3. 局所視力の評価

SLOでは、任意の形の視標を眼底に投影する Visume-



try というプログラムがある⁷⁾。これを用いて Landolt 環を投影することで、任意の領域の視力を評価することができる(図9)。このプログラムでは、0.2程度の視力までしか検査できないため、おもに黄斑部を障害された患者の中心外視力の評価に用いられるが、1.0程度までの視力を評価できるプログラムを独自に開発して用いている施設もある。また、文字列を投影することで、読みの評価・訓練も可能で、ロービジョンエイドへの応用が試みられている。

IV SLOの原理を用いた眼科診断機器

Rodenstock社製のSLOとは別に、SLOの基本原理解である走査方式と共焦点方式を応用した、新しい眼科診断機器が開発されてきている。

蛍光眼底造影検査を行う装置としては、Heidelberg Retina Angiograph (HRA) や Angio Scan などがある。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と眼底からの自然蛍光の評価が可能となったSLOである。フルオレセインとインドシアニングリーンの同時蛍光眼底造影検査が可能であり、また、画像上の長さ、面積を評価するソフトがある。詳細は前項にゆずる。

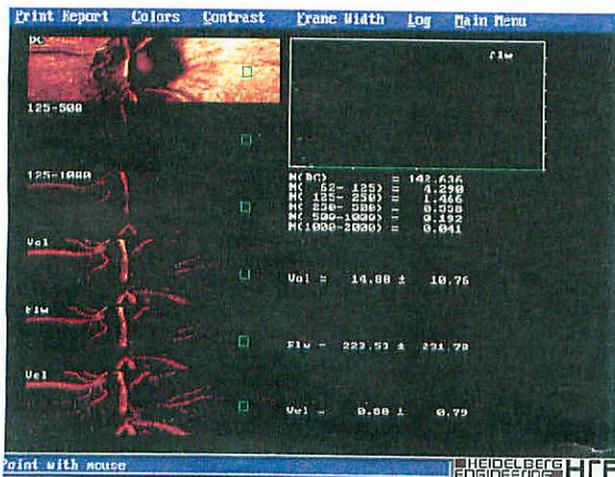


図10 HRF

カーソルの部位における各測定結果を示す。Volumeは測定部位における赤血球の総数に比例する値、Flowは赤血球が単位時間に移動した距離、Volumeは赤血球の平均速度を表す。

また、網膜、視神経乳頭部の組織血流を評価する装置として Heidelberg Retina Flowmeter (HRF) がある。HRFは、SLOの原理とレーザー・ドップラー・フロメトリーとを組み合わせた装置である。この装置では、移動する赤血球から反射した光の周波数が変化する光学的なドップラー効果の検出を異なる部位から複数回行うことで、移動中の赤血球の量と速度の非侵襲的、定量的評価が可能である(図10)⁸⁾。

網膜や視神経乳頭の形状を定量的に評価する装置として、Topographic Scanning System (TopSS) や別項で詳細に解説されているGDx System, Heidelberg Retina Tomograph (HRT) などがある。HRTは眼底の三次元解析を行うSLOである。これを用いると、立体的イメージのみならず、たとえば黄斑円孔の面積、体積、高さといった定量的解析も可能である。最近、おもに緑内障の患者に対して視神経乳頭の形状をより簡便に評価できるHRT IIが用いられるようになってきたが、これについては他項の解説にゆずる。

現在のところ一般に市販されていないが、波面光学を応用したadaptive optics scanning laser ophthalmoscope (AOSLO) という超高解像度のSLOも発表されている⁹⁾。さらに最近では、SLOとOCTとを組み合わせて断層像を評価できる3D・OCT/SLOも開発されてきた¹⁰⁾。従来のOCTは、奥行き方向への測定を横方向に動かしながらくり返し行うことで断層像を構築するもの

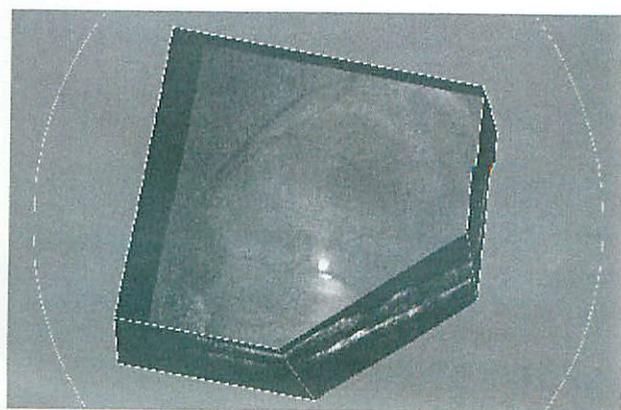


図11 3D・OCT/SLO

検査結果を三次元的に再構築すると、任意の場所での断面図を得ることができる。

であるが、3D・OCT/SLOはOCTの測定をSLOのように水平方向にスキャンすることで同一平面でのごく薄いOCT像を作り上げ、これを深さ方向にくり返し行うものである。平面のスキャンを線状に行うことで、従来のOCT画像と同様の断層像を得ることもできるが、平面のスキャンを重ね合わせ、三次元の画像を得ることもできる。一度測定すると任意の断面像を得ることが可能である(図11)。

おわりに

以上解説してきたように、SLOは古くて新しい装置であり、SLOの原理を応用した眼科診断機器が新たに開発されてきている。さらに、画像診断装置、機能検査装置としてのSLOのほか、治療への応用も試みられてきている。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が期待される。

文 献

- 1) Webb RH, Hughes GW, Pomerantzeff O : Flying spot TV ophthalmoscope. *Applied Optics* 19 : 2991-2997, 1980
- 2) Mainster MA, Ham WT, Delori FC : Potential retinal hazards. Instrument and environmental light sources. *Ophthalmology* 90 : 927-932, 1983
- 3) Kakehashi A, Ishiko S, Konno S et al : Observing the posterior vitreous by means of the scanning laser ophthalmoscope. *Arch Ophthalmol* 113 : 558-560, 1995
- 4) Ishiko S, Akiba J, Horikawa Y, Yoshida A : Detection of drusen in the fellow eye of Japanese patients with age-related macular degeneration using scanning laser ophthalmoscopy. *Ophthalmology* 109 : 2165-2169, 2002
- 5) 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. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol* 236 : 445-450, 1998
- 6) 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
- 7) 石子智士, 吉田晃敏, 長岡泰司, 北谷智彦, 水本博之 : 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
- 8) 藤尾直樹, 吉田晃敏, 小笠原博宣, 籠川浩幸 : Heidelberg Retina Flowmetry (HRF) の有用性. *眼紀* 47 : 655-658, 1996
- 9) 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
- 10) Yoshida A, Ishiko S, Horikawa Y : Clinical application of a combined optical coherence tomography (OCT) and scanning laser ophthalmoscope (SLO) system for patients with age-related maculopathy (ARM). ARVO S555, 2003