

光干渉断層計の眼科応用

岸 章 治

外界の光は角膜、前房、水晶体、硝子体をへて網膜に達する。網膜の最外層にある錐体・杆体に光が入射すると、光は電気信号に変換される。これが視神経を伝わって脳に運ばれて、視力になる。眼球は網膜に至るまで透明な組織からなっている。このため眼科医は、検眼鏡や細隙灯顕微鏡により、中間透光体と眼底を日常臨床で生体顕微鏡レベルで観察することができる。眼科ではレーザーによる治療がさかんに行われているが、これはレーザー光を非侵襲的に眼底に導入できるからである。糖尿病網膜症をはじめとする網膜血管病変では、レーザーによる網膜光凝固は基本的な治療法になっている。

眼底は10 μm の精度で観察ができる器官である。蛍光眼底造影では毛細血管が鮮明に写るし、血流のうっ滞があれば、血管の中を移動する赤血球を直像鏡で見ることができ、眼科医が眼底病変と組織学の対応に興味をもつのは自然のなりゆきである。しかし、眼底ほど病理所見を得にくい器官はない。眼底は生検の対象にならないし、よほどの理由がなければ眼球摘出もできないからである。

光干渉断層計 (optical coherence tomography: OCT) は、弱い赤外線を眼底に導入することで、網膜の断面を光学組織切片を見るかのように画像化する革命的な診断装置である^{1,2)}。検査は非侵襲的で簡便である。OCTにより眼底の「生体組織学」というべき新分野が開拓されつつある³⁾。

1. OCTの原理 (図1)

光干渉断層計 (OCT) はひとくちに言えば、赤外線を用いた超音波断層装置である。OCTの観察光はスーパーミネセンスダイオードから発振した「近赤外線低干渉ビー

ム」である。低干渉ビームはビームスプリッターで二分され、ひとつは参照鏡に向かい反射して戻ってくる。これが参照光 (コントロール波) である。もうひとつは測定光として眼内に入り、眼底の各層で反射して、それぞれ時間の遅れを伴った異なる強度の反射光として戻ってくる。反射光と参照光はビームスプリッターで再び合流し、検知器に入る。低干渉ビームは波であるので、反射光と参照光が重なると干渉現象が起こる。これにより反射光の強度と時間的ずれが測定される。これを空間的位置関係に換算することで、眼底の断層像が得られる。

OCTの測定光は低干渉ビームであり、レーザーとは異なる。レーザーは完全に位相のそろったサインカーブを描く光波であり、2つの波が重なると干渉現象がおこる。OCTでは、参照光と反射光の干渉現象により、物体間の距離を測定するのだが、レーザーを測定光にすると、干渉現象があちこちで起こるため、かえって混乱を招く。一方、干渉性のない光は、光を重ねても干渉現象が起こらないため、測定光として使えない。スーパーミネセンスダイオードから発振する光は干渉性が低いため、干渉現象を混乱なしに抽出できるのである。さらに、この光は850 μm の近赤外光であるため、眼底の深部に到達することができる。

2. 画像の解釈

1) 画像の情報源：眼内に入った測定光は、透過、吸収あるいは散乱する。吸収はヘモグロビン、メラニンなどの色素でおこる。吸収された光は熱に変換され測定光から除去される。散乱は光が不均一な組織を通過するとき起こる現象である。OCTは不規則な散乱光のなかで、測定光と同軸に反射して戻ってくる光のみを検知する。

2) 疑似カラー表示：OCTでは各組織での反射強度が疑似カラーで表示される。高反射域は暖色系に、低反射域

群馬大学眼科学教室 (〒371-8511 前橋市昭和町 3-39-15)
E-mail: kishi@akagi.sb.gunma-u.ac.jp

は寒色系に表される(図2)。眼底では、神経線維層、内網状層、外網状層が高反射となる。色素上皮と脈絡毛細管板は、最も反射の高い一体化した帯となり、赤から白で表現される。一方、神経節細胞層、内顆粒層、外顆粒層は、OCTでは低反射の暗い寒色層に表示される。色素上皮で測定光の多くが反射もしくは吸収されるため、脈絡膜の構造ははっきりしない。脈絡膜大血管と思われる空洞状の低反射域がしばしば観察される。

3. 観察対象

OCTの観察領域は眼底カメラにおける画角60°の撮影範囲と思えばよい。焦点を前方に移せば角膜、虹彩と水晶体の前面を観察できる。輪部では測定光の透過が悪いため、隅角と毛様体は写らない⁴⁾。眼底の深達度は脈絡膜の浅層までである。OCTの解像力は垂直10~20 μ mである。検査は非侵襲的で、1回の走査に1.3秒かかる。

4. OCTによる網膜断層像

1) 黄斑浮腫：黄斑浮腫は臨床的にはび慢性と嚢胞様浮腫に分けられ、それぞれがさまざまな程度に硬性白斑を伴う。OCTでは、黄斑浮腫を構成する要素は、スポンジ様の網膜膨化、嚢胞形成、さらに漿液性網膜剥離であることがわかった(図3, 4)⁵⁾。OCTを用いると、治療効果を組織学レベルで評価することができる。浮腫の吸収に伴い、網膜の膨化、嚢胞、または硝子体皮質により挙上された膨化網膜が平坦化する過程を観察できる⁶⁾。

2) 黄斑円孔：黄斑円孔の初期病変は嚢胞とする説⁷⁾と、網膜剥離とする説⁸⁾があった。OCTの断層像からは、嚢胞であることがわかった⁹⁾。円孔周囲は検眼鏡では網膜剥離に見えるが、OCTでは網膜の層間分離もしくは嚢胞を伴った肥厚である。完成した円孔では、蓋がわずかに前方に浮いている(図5)。これは硝子体皮質により支持されていると考えられていた。OCTは皮質の存在を直接証明した。偽黄斑円孔は、網膜前膜の収縮により、中心窩の陥凹が円筒形になるためにおこる現象であるといわれていた。OCTはそれを直接証明した(図6)。

3) 黄斑前膜：黄斑前膜が収縮すると、網膜にしわがよる。この一見、平面的な病態はOCTで見ると、意外に網膜の肥厚を伴っていることがわかる¹⁰⁾。手術で膜を剥離すると、網膜の肥厚が徐々に減り、最終的に中心窩の陥凹が復活する。

4) 中心性漿液性脈絡網膜症：OCTは剥離した網膜の外境界面を鋭敏にとらえるので、剥離の消退がよくわかる¹¹⁾(図7)。

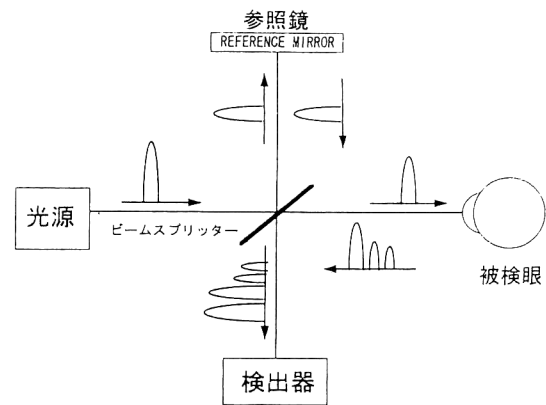


図1 OCTの原理：観察光はスーパーluminescenceダイオードから発振する近赤外線低干渉ビーム(850nm)である。低干渉ビームはビームスプリッターで2つに分かれる。ひとつは参照鏡に向かい、参照光として戻ってくる。もうひとつは測定光として眼内に進入し、眼底の各層で反射して戻ってくる。両者はビームスプリッターで合流し、検出器に入る。2つの光波の干渉現象により、反射光の強度と時間的ずれが測定され、これが空間的位置関係に換算され、網膜の断層像が得られる。

5) 加齢黄斑変性：OCTは色素上皮剥離を鋭敏に描出する¹²⁾(図8)。そしてそれが漿液性なのか、剥離した色素上皮の下に充実性の組織があるかを鑑別しうる¹³⁾。円板状病変が形成されると、脈絡膜新生血管が色素上皮なのか、網膜下なのかは判定しがたい(図9)。両者ともブランク状の高反射領域に含まれてしまうからである。色素上皮の後方では測定光が減衰するため、充実性の組織があっても空洞のように暗く表現される。

6) 原田病：後極部に生じる漿液性網膜剥離は、しばしば分節的である。蛍光色素の貯留も隣接しながらも、癒合しないことがある。OCTでは漿液性網膜剥離とされていた病変が、しばしば網膜外層の液体貯留であることが明らかになった¹⁴⁾(図10)。

5. OCTのアーティファクト

OCT画像は光学組織切片に類似しているが、これはあくまで、エコー情報から合成されたものである。代表的なアーティファクトには以下のものがある。

1) 高反射物質による後方のブロック：網膜表面に厚い出血があったり(図11)、網膜内に凝集した硬性白斑がある(図12)と、測定光はそこで高反射を示すため、赤く表現される。その一方で高反射物質の後方では測定光が減衰するため、暗くなるか、画像が欠損する。

2) 測定光と物質との角度：測定光に対して物体が直角ならば、反射光も同じ方向に戻る。しかし物体が傾斜していると、反射光の方向が測定光とずれるため、検出器に到達する光量が減少する(図13)。このため、OCT画像では

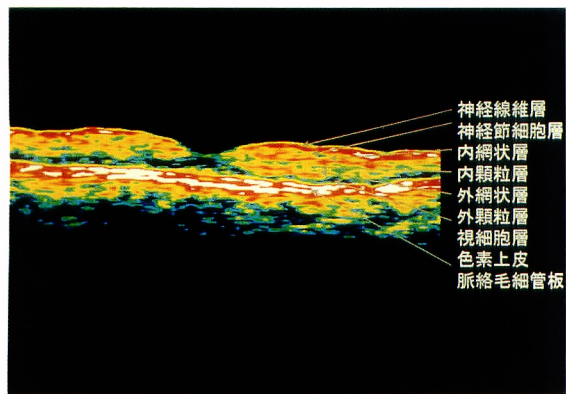


図 2

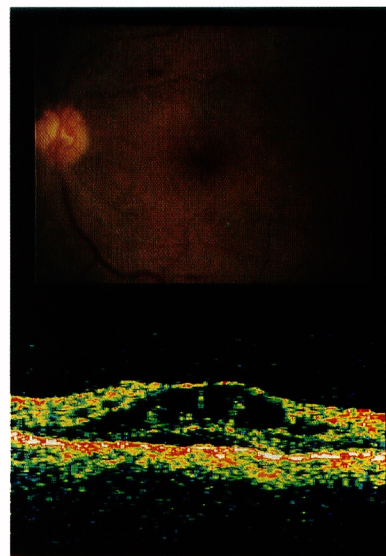


図 3

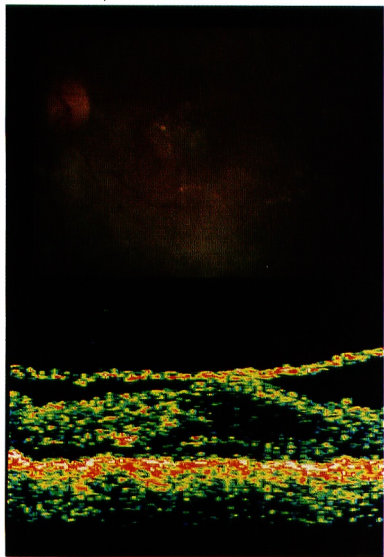


図 4

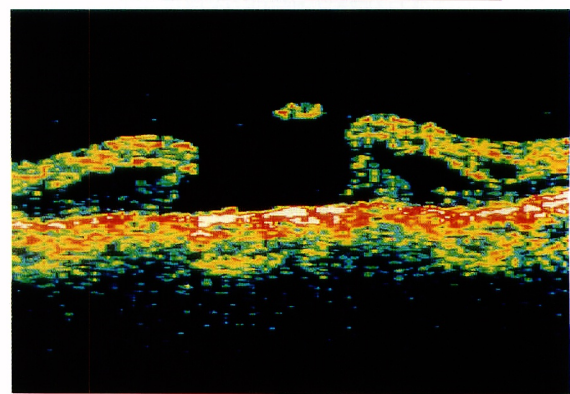


図 5

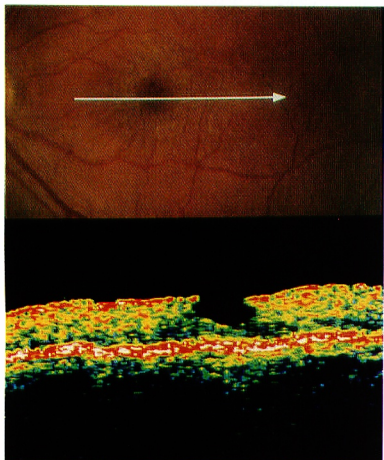


図 6

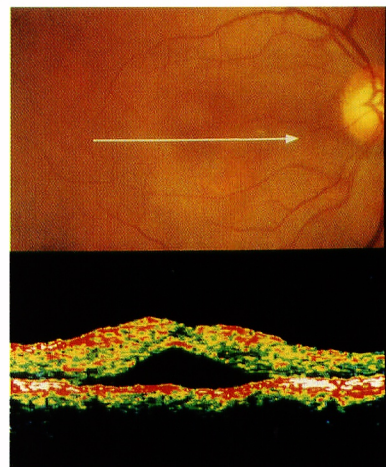


図 7

- 図 2 黄斑部の正常断層像：神経線維層，内外網状層は高反射を示し，暖色で表現されている。色素上皮と脈絡毛細管板は反射が最も強く，赤から白で表示されている。神経節細胞層，内外顆粒層は反射が弱く，寒色系で表現される。
- 図 3 糖尿病黄斑浮腫の断層像。嚢胞様黄斑浮腫がある。断層像では中心窩の陥凹がなく，網膜内の嚢胞により中心窩は膨隆している。
- 図 4 糖尿病網膜症黄斑浮腫。黄斑にトランポリン様の薄い硝子体剝離があり，中心窩が持ち上がっている。網膜は牽引により前方凸となり，網膜内に浮腫がある。
- 図 5 第 3 期黄斑円孔。黄斑嚢胞の前壁が蓋となり全層円孔となった。
- 図 6 偽黄斑円孔。網膜前膜の収縮により，中心窩の陥凹の外縁が求心性に引き寄せられ，陥凹は円筒形に深くなっている。
- 図 7 中心性漿液性脈絡網膜症。黄斑網膜は中心窩の陥凹を伴ったまま色素上皮から剝離している。

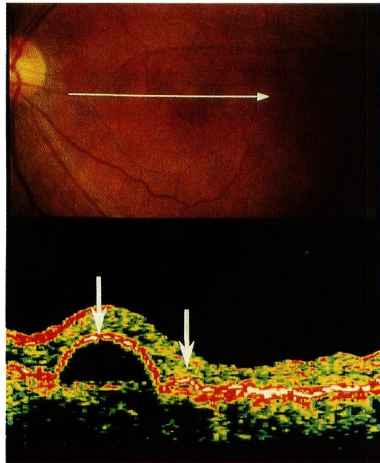


図 8

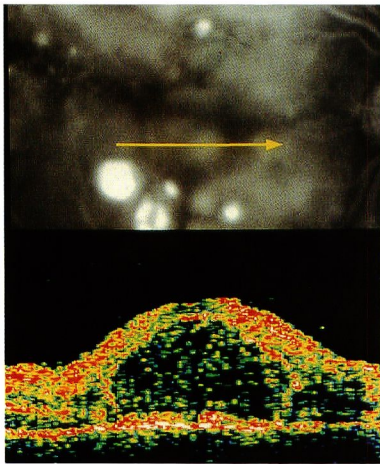


図 10

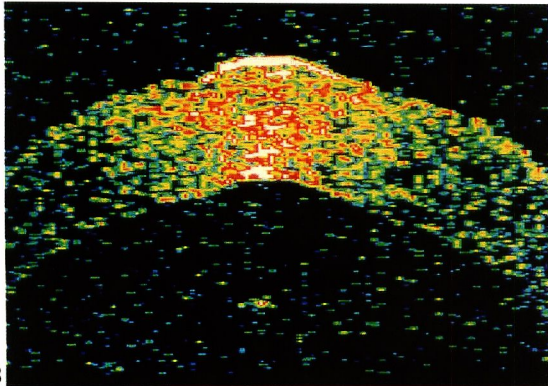


図 13

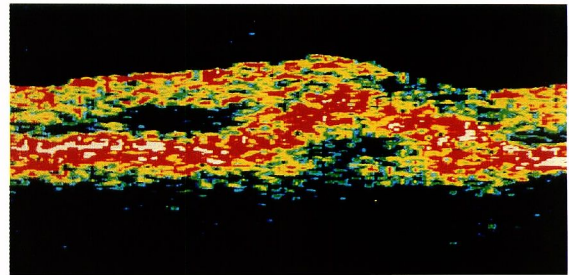


図 9

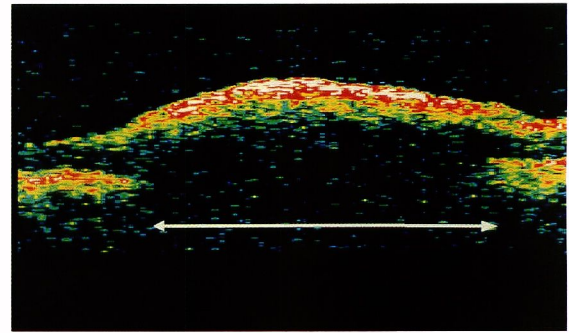


図 11

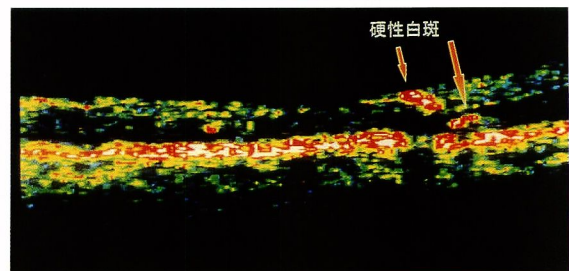


図 12

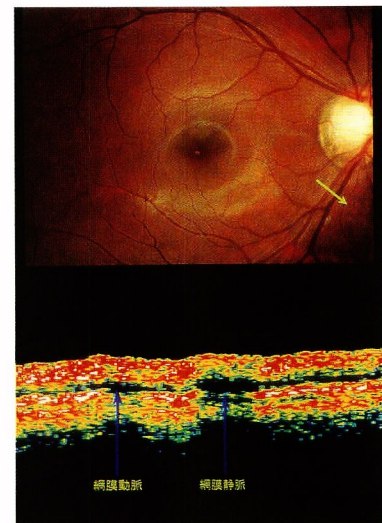


図 14

図 8 漿液性色素上皮剝離。左に大きい色素上皮剝離があり、その右に隣接して小さいのがある。色素上皮下は暗い空間になっている。

図 9 加齢黄斑変性。円板病巣はドーム状の高反射帯の隆起として表現される。隆起した高反射帯の後方には暗い低反射域があるが、これは測定光が高反射域で反射するため、測定光の減弱をまねいたものである。

図 10 原田病急性期：蛍光造影で網膜下の蛍光の貯留があるが、分節的で癒合しない（上図）。OCT では網膜剝離ではなく、網膜外層の液体貯留であることがわかる。

図 11 網膜細動脈瘤の破裂による網膜前血腫。測定光は血腫で強く反射、もしくは吸収されるため、後方では測定光が減衰して、暗い影となる。

図 12 糖尿病網膜症。硬性白斑では測定光が強く反射され、赤く表示される。その後方は測定光のブロックにより暗い影となる。

図 13 角膜の断層像。角膜中央では実質の膠原線維が測定光に直角に配列するため、高反射になるが、周辺部では斜めになるため、測定光と同軸の反射光が減る。このため画像では低反射になる。

図 14 乳頭近くの耳側動静脈の断層像。走査部位（上図）。本来、網膜表層にある血管は、OCT では網膜外層から色素上皮にかけての暗い低反射領域として表現される。

物体は低反射，すなわち低密度に表現されてしまう。

3) 網膜の表層大血管は，OCT 画像では網膜深層から色素上皮レベルの暗い空洞として写る(図 14)¹⁵⁾。血流の通る血管腔は反射が弱く，反射波の速度が遅いため，実際より深部にあるように換算されるためと考えられる。

文 献

- 1) 丹野直弘，ほか：光波反射像測定装置。日本特許第 2010042 号(出願 1990 年 11 月 6 日)。
- 2) C. A. Puliafito, M. R. Hee, J. S. Schuman and J. G. Fujimoto: *Optical Coherence Tomography of Ocular Diseases* (SLACK Incorporated, Thorofare NJ, 1996)。
- 3) 岸 章治：“OCT の臨床応用”，臨床眼科，**52** (1998) 991-995。
- 4) 秋山英雄，木村保孝，青柳康二，磯野博明，萩原直也，岸 章治：“光学的干涉断層計 OCT による前眼部の観察所見”，臨床眼科，**52** (1998) 829-832。
- 5) 大谷倫裕，丸山泰弘，岸 章治：“黄斑浮腫の光学的干涉断層計所見”，臨床眼科，**52** (1998) 27-33。
- 6) 大谷倫裕，丸山泰弘，岸 章治：“黄斑浮腫の経過と網膜断層像”，臨床眼科，**52** (1998) 1483-1488。
- 7) S. Kishi, Y. Kamei and K. Shimizu: “Tractional elevation of Henle's fiber layer in idiopathic macular holes,” *Am. J. Ophthalmol.*, **120** (1995) 486-496。
- 8) J. D. M. Gass: “Idiopathic senile macular hole: Its early stages and pathogenesis,” *Arch. Ophthalmol.*, **106** (1988) 629-639。
- 9) 岸 章治，高橋秀人：“特発性黄斑円孔の三次元的観察”，臨床眼科，**52** (1998) 1463-1467。
- 10) 丸山泰弘，大谷倫裕，岸 章治：“光学的干涉断層計による網膜前黄斑線維症の観察”，臨床眼科，**52** (1998) 1468-1470。
- 11) 飯田知弘：“中心性漿液性網脈絡膜症の網膜断層像”，臨床眼科，**52** (1998) 1471-1474。
- 12) 高橋寛二：“網膜色素上皮剝離，網膜色素上皮裂孔の OCT 所見”，臨床眼科，**52** (1998) 1489-1493。
- 13) 福島伊知郎：“加齢黄斑変性の OCT 所見”，臨床眼科，**52** (1998) 1501-1509。
- 14) 丸山泰弘，大谷倫裕，岸 章治：“Vogt-小柳-原田病の急性期の OCT 所見”，臨床眼科，**52** (1998) 1563-1566。
- 15) 萩村徳一：“正常眼の光学的干涉断層計 OCT 像所見”，臨床眼科，**52** (1998) 1459-1462。

(1998 年 11 月 25 日受理)