



最近の眼底カメラ

築島 謙次*・中島 章**

* 防衛医科大学校眼科 〒359 所沢市並木 3-2

** 順天堂大学医学部眼科 〒113 東京都文京区本郷 2-1-1

(1983年1月7日受理)

Recent Advances in Fundus Camera

Kenji YANASHIMA* and Akira NAKAJIMA**

* Department of Ophthalmology, National Defense Medical College,
3-2, Namiki, Tokorozawa 359, Japan

** Department of Ophthalmology, Juntendo University School of Medicine,
Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

1. はじめに

眼底カメラは瞳孔を通して網膜や視神経乳頭の状態を観察し、撮影する器械で、直接あるいは蛍光造影剤の使用により検眼鏡的に観察困難な血管病変を写し出し、血管豊富な脈絡膜の状態や、動・静脈の状態が診断できる。したがって眼底カメラは眼科はもちろん、内科においても、高血圧症や他の循環器疾患、糖尿病や脳神経疾患等の検査に利用される。また眼底撮影により眼底所見を客観的に記録でき、意見交換や学会・論文発表などにおいて供覧ができることから眼底カメラは急速に普及した。

2. 眼底カメラのあゆみ¹⁾

Helmholtz が1851年検眼鏡を発明して以来、眼底撮影の可能性が Noyes (1862) をはじめ多くの人々によって研究された。1889年 Dimmer は Zeiss 社と共同で臨床的に使用可能な眼底カメラの製作に成功し、はじめて鮮明な眼底写真撮影を行なった。1891年 Gerloff も眼を水に浸す方法で角膜反射を除き、眼底写真撮影に成功した。Dimmer の眼底カメラは照明系と観察・撮影系とが分離したもので、手持ち眼底カメラとしてその考え方は生き残っている。Nordenson (1915~1930) は Gullstrand 固定検眼鏡の原理を応用し、瞳孔周辺部より照明光を眼底に送り、瞳孔中心から観察・撮影光を導き出すという現在の照明系と観察・撮影系が一つの対物レンズを共有する型の眼底カメラを発表し、1925年から Zeiss

社にて製造発売された。その後対物レンズに非球面レンズを採用したり、光源等の改良が加えられ、1950年代半ばまで Zeiss-Nordenson 眼底カメラとして広く使われた。アメリカでも Bausch-Lomb 社から同社製の固定検眼鏡を改造した、炭素アーク灯を光源とするものが発売された。

今日の眼底カメラの普及発達は、1956年 Littman による撮影用光源としてフラッシュ管を導入した新型 Zeiss 眼底カメラの開発から始まっている。同時期に東独 Zeiss 社からも Retinophot (Noteboom, 1956) が発売された。眼底は血管を直接肉眼的に観察できる身体で唯一の場所である。高血圧、糖尿病、腎炎、貧血などの内科疾患に見られる眼底所見の診断的価値は、内科医によっても古くから認められていた。1960年 Novotony²⁾ らによって網膜血管造影法が発表され、詳細な網膜・脈絡膜血管の形態変化がとらえられるようになり、動脈硬化や糖尿病などの全身病における末梢血管の病態検査として、眼底検査の意義が一段と高まった。

わが国においては戦前死亡原因の一位であった結核が戦後抗生物質の発見、検診の普及などにより急激に減少し、脳卒中が死亡原因の第1位となり、その対策が国民健康上の優先課題となった。著者の一人は、1950年頃から世界一脳卒中の死亡率の高い秋田県で脳卒中の健康管理に従事し、眼底所見の有用性を認めた。1960年頃から眼科用のみならず内科における応用も考え、わが国の光学技術をふまえた眼底カメラの開発が始められ、厚生省

の研究費も投ぜられた。1960年代4社で開発された眼底カメラの評価が数度にわたって行なわれ開発に役立った³⁾。1960年頃までは Zeiss 社製の眼底カメラの独壇場であったが、その後日本製品の性能向上、独創性が目立ち、最近の通産省の調査⁴⁾によるとわが国で使用されている眼底カメラの約 95% が国産品である。これは日本だけの傾向でなく、今日では世界の眼底カメラの大部分を日本が供給している状態になった。順天堂大で開発された野寄式手持ち眼底カメラは世界的にも初めてのもので、他国にはない独自の器械であった。しかし撮影に熟練を要する必要もあり特殊用途以外の分野では架台式の大型のものが一般的である。手持ち眼底カメラはベッドから起きられない患者や、動物実験用にコーワ(株)で製造しているものが世界で唯一のものである。1960年代の初めにはマミヤが集団検診用に反射鏡を用いた眼底カメラを開発し、オリンパス、フクダ、トプコン、キャノン、ニコン、コーワ、コーナンなどの各社も開発に参加した。構造はニコン、コーワ、コーナンは手持ちで、その他は照明系と観察・撮影系が同じ対物レンズを使用する Zeiss の系統のものであった。ニコンはその後手持ちから大型に変わり、後になって画角 45° を製品化し⁵⁾、さらに画角 60° コンタクトレンズ法による超広角撮影へと研究を進めている。またキャノンは赤外光を用いる無散瞳眼底カメラ、広角 60°、ズーム変倍などを実用化して発表しており、さらにコンタクトレンズを用いないで画角 90° を可能にした⁶⁾。また、オートフォーカスを世界にさきがけて実用化した。

3. 眼底カメラにおける光学系

眼底カメラにおける光学系は、照明系と観察・撮影系に分けられる⁷⁾。照明系で重要なことは、一様にムラなく、十分な光量で眼底を照明でき、フレアやゴーストの除去が良好なことで、照明系の光学系の方式には、反射鏡対物レンズと穴あき鏡を使用した反射鏡方式、照明系と観察・撮影系とが分離した Dimmer-Krahn 方式、非球面レンズと穴あき鏡を使用した Zeiss-Nordenson 方式の三つがある⁸⁾。反射鏡方式のマミヤ FR-200 は凹面鏡を含む 3 枚の反射鏡からなる対物系を有し、被検眼内で、照明光路と観察・撮影光路とが分離し、対物レンズ面における妨害反射光が生じない特徴がある⁹⁾。

Dimmer-Krahn 方式の手持ち眼底カメラはわが国で野寄ら(1955—1957)によって開発された。野寄式眼底カメラ I 型は 8 ミリまたは 16 ミリフィルムを使用するもので、35 ミリフィルム用に改良された II 型では、画角は

25° に広げられ実用性を増した。妨害反射光を除くため照明光が被検眼の瞳孔下部から斜め上方に向かって射入する。このためカメラを被検眼の角膜から 7 mm 以内にまで接近させないと良好な写真は撮れない。Zeiss-Nordenson 方式は照明用の白熱電球からこの光がコレクターレンズを通り、撮影用のストロボ管の位置にいったん結像し、リング絞りを通り、穴あき鏡で反射され、対物レンズを通り虹彩面でリング状に集光された後網膜面を照明する。観察・撮影系は穴あき鏡の開孔部を通り焦点板の位置に像を結び、照明系とは完全に分離され、角膜表面で反射された照明光が穴あき鏡の開孔部を通して投影レンズに再入射することがないように工夫されている。観察・撮影系に要求されることは、凹凸のある眼底のどこにでもピントが合うように深度が深いことである。

また被検眼の水晶体、角膜等の表面の反射率は数%で、普通の光学器械ではこの程度の反射はそれほど問題にはならないが、眼底カメラの場合には網膜からの反射光が非常に弱いので、水晶体や角膜表面からの反射光が非常に弱くても、これが観察・撮影系に入ると強いフレアやゴーストを生じ画像を悪くする。眼屈折系からのこれらの反射光はリング照明法によって消去される。

4. 最近の眼底カメラについて

1925 年 Zeiss-Nordenson 眼底カメラが発表され、1960 年に蛍光眼底撮影法が発表され、その必要性が増し、1970 年代に入ると新しい構想を取り入れた眼底カメラの開発が続いた。

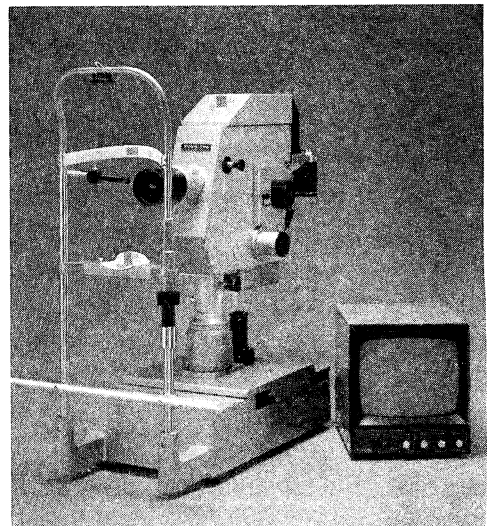


Fig. 1 広角無散瞳眼底カメラ (TRC-NW)

4.1 無散瞳眼底カメラ

従来の眼底カメラは散瞳剤で散瞳させる必要があり、薬品で散瞳できない患者では眼底撮影が困難であった。眼光学系での反射光や散乱光が撮影光学系に混入すると画質が著しく劣化するため照明光束と撮影光束とを分離する必要がある。人間の瞳孔径は明るいところでは2.5~3 mm しかなく、この瞳孔径では両光束を分離することは困難で、とくに画角が広がった場合には不可能である。このため通常の眼底カメラでは散瞳剤で散瞳し、その瞳孔径が7 mm 以上になることを期待して設計してある。明るい場所では小さな瞳孔径も一度暗い場所に移ると数秒から数十秒で自然散瞳し、年齢差や個人差はあるにせよ散瞳剤を点眼した場合と同様な効果が得られ、散大した瞳孔径を得ることができる。赤外光のような非可視光を使って眼底を照明し、撮影位置を決めたり、ピント合せをすることができればよいわけで⁹⁾、著者は1962年ファインダーに赤外光を用いるアイデアを発表した¹⁰⁾。しかし問題は眼底の赤外光に対するコントラストが悪いため、モニターTV上の眼底像によってピント合せをするのは精度が悪く、またモニターTV上ではフレアの識別が難しく、撮影像にフレアが出やすくなる。これらの点を解決するために、楔状スプリット・プリズムを使用したスプリット輝線投影方式が開発された¹¹⁾。光線束を二つに分け、各光束を被検眼瞳孔の上・下部から入射させ、スプリットと眼底が共役でなければ結像面で観察するスプリット像がぼけると同時に中央部でスプリットされて見える。共役になったときのみ鮮明に結像し、かつ1本のスプリット像になる。

4.2 広角眼底カメラ

Zeiss 眼底カメラに代表される1960年代の眼底カメラは、撮影画角30°、イメージ・サークル22φ というものが標準とされてきた。これは視神経乳頭と黄斑部を含む眼底後極部が記録でき、光学系とくに対物レンズの制約から一般化されたものであった。眼底カメラの広角化は二つの方向からなされ、一つは接触型といわれるもので、特殊なコンタクトレンズにオプティカルファイバーを応用し眼底を照明するもので^{12,13)}、眼底から逆反射して観察・撮影系に入る光の反射がなく、水晶体や硝子体の混濁に対しても光透過性が良好である。Equator-plus camera (EPC) は瞳孔径が2 mm でも超広角眼底撮影が可能で、最大画角は148°であり、クリニテックス社製超広角眼底カメラでは画角100°まで撮れる。他の方法は従来の眼底カメラと同様なリング照明光を用いた非接触型といわれるもので^{14,15)}、広角化に伴い対物レ

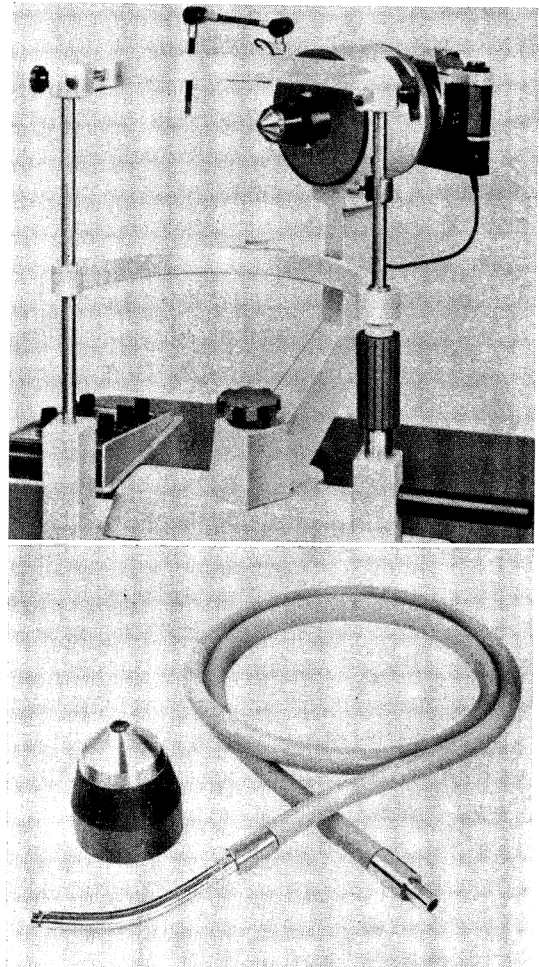


Fig. 2 超広角眼底カメラ EPC (上図)
トランスイルミネーションレンズ (下図)

ンズを射出する照明光束の開口数は増加する。被検眼側に凸のベンディングをもつ対物レンズではいかに非球面を用いようとも収差が補正できず、虹彩面に投影されるリングスプリット像の球面収差やコマ収差も増大し、像の周辺部がぼやけ、フレアが生じやすくなる。そのため広角対物レンズは30°程度の標準型対物レンズより厳しい収差補正が要求され、種々のタイプが開発されている。画角30°の場合の対物レンズは1群メニスカスで前面を凸の非球面で、後面は穴あき鏡と共心の凹面で構成されている。画角が45°になるとメニスカスでは収差補正が困難となり、両凸レンズの対物レンズが開発された。またメニスカスの前に両凸レンズを付加した2群対物レンズも開発されている。画角が60°になると2面の屈折面では収差補正が困難となり、コンセントリックな両凸レンズの前にアブラナチックレンズを付加し、2群

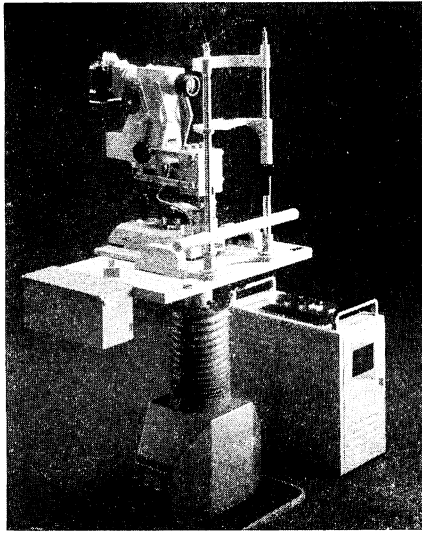


Fig. 3 広角眼底カメラ (レチナパン 45-II)

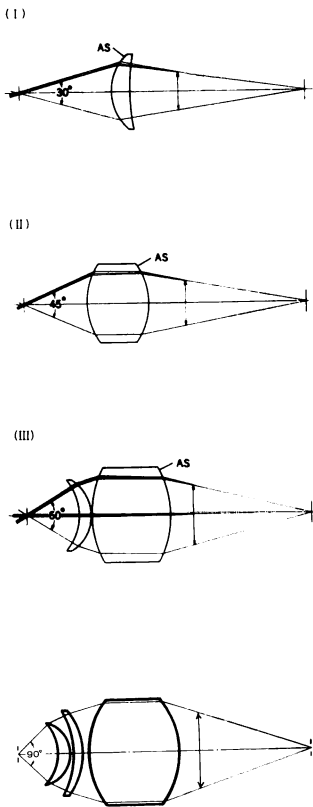


Fig. 4 広角化に伴う対物レンズの改良

3屈折面構成の対物レンズが設計された。アプラナチックレンズのため照明系の収差は自動的に補正される。前面は穴あき鏡と共心にし、両凸レンズ前後面に対し1個、アプラナチック後面に対し1個の計2個の黒点を設けて

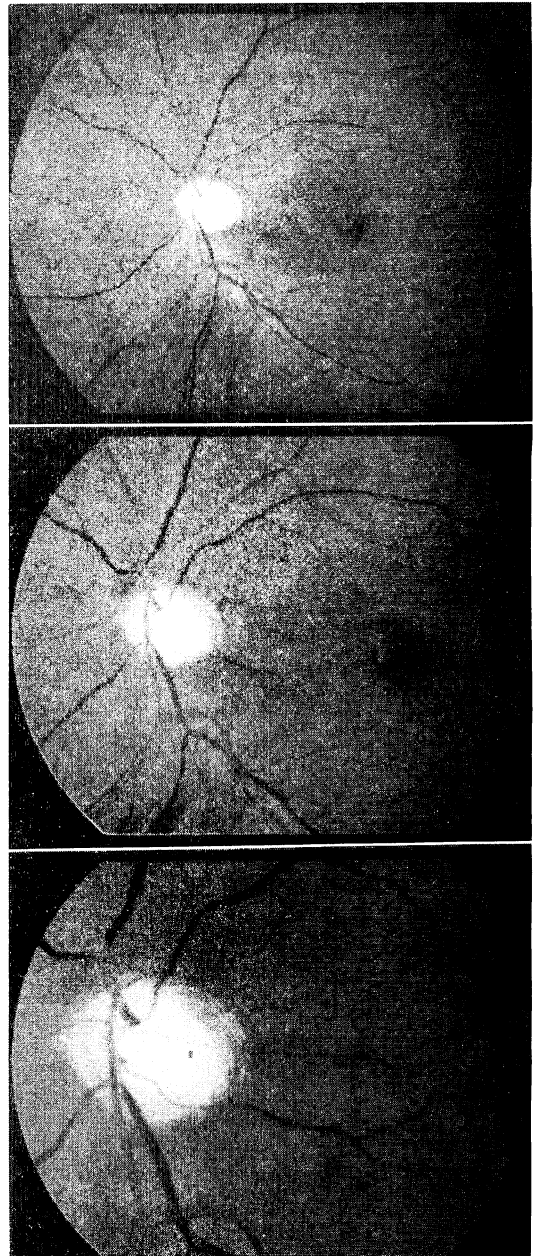


Fig. 5 60°ズーム眼底カメラ CF-60Z (Canon) で撮った眼底写真

反射を除去しているものがある。他に 60° 対物レンズとしてメニスカスの前に両凸レンズを加えたタイプのももあり、屈折面は3面で最後面は共心で他面は2個の黒点で反射を除去している。キャノンが開発した画角 90° の場合は、コンセントリックな両凸レンズの前に2枚のアプラナチックレンズを付加した対物レンズが使用され、各アプラナチックレンズの前面は共心になってお

り、各後面は反射点を合わせて、2個の黒点で反射を除去している。最近野寄ら¹⁶⁾は通常の眼底カメラを用い、特殊広角コンタクトレンズを角膜にのせ、45°眼底カメラで画角60°、60°眼底カメラで90°の画角が得られるコンタクトレンズを開発した。

角膜や水晶体の散乱によるフレアの観察・撮影系への影響を防止するためには、照明光束と観察・撮影光束が通るそれぞれの領域が角膜から水晶体後面に至る間で互いに重なり合わないようにする必要がある。両光束の重なりは眼底カメラが広角化するほど問題となる。このためリングスリット像の直径を大きくするか、穴あき鏡の開孔部の直径を小さくすればよいわけで、広角眼底カメラでは、穴あき鏡の後方に絞りを置き、リングスリットのやや前方に遮光円板を置き両光束の領域が重ならないようにしてあるものもある。

4.3 変倍式広角眼底カメラ

広角眼底撮影が可能となった後、臨床面から広角撮影と部分的拡大撮影の機能を有する眼底カメラが要求された。観察・撮影系中の合焦レンズ部を変換する方法(ターレット方式)では、画角を45°、30°、20°と換えることができ、倍率はそれぞれ1.7倍、2.4倍、3.7倍となる。また変倍を連続的に行なう眼底カメラも発表された。これは撮影系レンズにズームを採用し、画角を60°から20°まで、35mmフィルム上で1.7倍から5.0倍まで連続的に変えられ、観察光量と撮影光量は自動的に調光され、変倍に連動して照明光量を変化する。また変倍によりF数も自動的に変化するようになっているものもある。

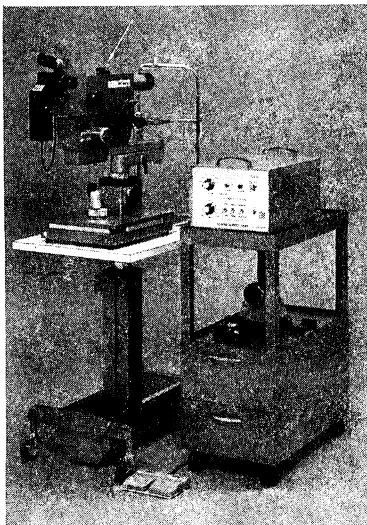


Fig. 6 変倍式広角眼底カメラ (RC-WFV)

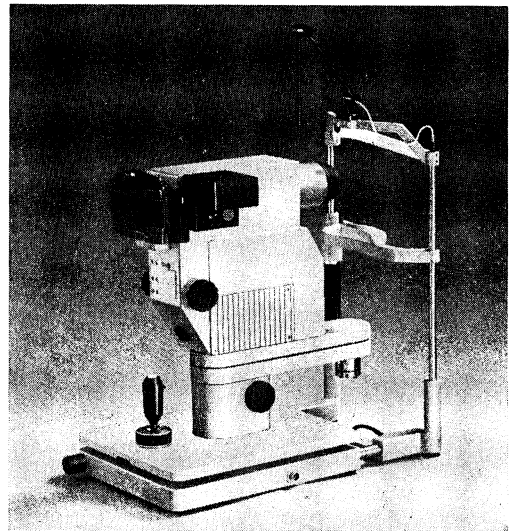


Fig. 7 自動焦点眼底カメラ (CF-60 AF)

4.4 眼底カメラの自動焦点合せ

眼底カメラにおいては被検眼が撮影光学系の一部を構成し、被検眼の調節や動きのため、さらに眼底像が暗く低コントラストであるため焦点調整は通常のカメラに比べて難しい。焦点検知方式には大別して、三角測量方式¹⁷⁾とぼけ検出方式¹⁸⁾とがある。三角測量方式は眼底に瞳孔周辺部より輝線を投影し、その眼底反射像のうち二つのアパーチャーを通過した像の相対位置関係を測定することにより焦点検知を行なう方法で、最新の電子技術が生かされている。ぼけ検出方式は、フォーカスが合っていないときには眼底像は低コントラストで、フォーカスが合っているときには多少高コントラストで、このコントラストの違いをフーリエ変換により検出するものである。幅の狭い微動線が眼底に映し出され、その線のフィルム面上の像のコントラスト変化がフーリエ変換により解析され、自動的に焦点合せが行なわれる。

4.5 立体眼底撮影

眼底の立体撮影の試みはかなり古くから行なわれていたが大きく分けて2通りの方法がある。一つは2枚の35mmフィルムを使うもので、Thorner (1909) によって発表された、被検眼の固視を動かさずにカメラを動かす方法と、他にカメラを固定して被検眼の視線を変えさせる Wessely 法がある。Wessely 法は後に Weber (1957) によって改良され、東独 Zeiss 社製 Retinophot に付属する固視装置が作られた。Thorner の方法は Allen ら (1966)¹⁹⁾により改良され、corneal induced parallax method といわれ、1枚のガラス板で光軸を含む面に対称となる二つの斜め位置に向きを変えられ、ガラス

板の回転に伴う入射瞳のずれに応じてステレオ・ベースを 2.25 mm から 3.5 mm の間に変えられるようになっている (ステレオ・セパレータ)。撮影の際の角度により立体角が異なり、同時撮影ではないので蛍光眼底写真のように時間的変化のある場合には使えない。この方法は在来の眼底カメラで撮れるため多くの人々によって使われた。もう一つの方法は 1 枚の 35 mm フィルムに 2 枚の写真を撮るもので、1930 年 Nordenson が特注の Zeiss-Nordenson 眼底カメラの前に小さな 1 対のプリズムを置き、同時に撮れる立体眼底カメラを発表した²⁰⁾。1953 年 Norton²¹⁾ も Bausch-Lomb 社製双眼倒像鏡を利用して立体眼底写真を撮った。1965 年 Donaldson²²⁾ は照明系と観察・撮影系とが独立した 2 光路光学系からなる同時立体眼底カメラを開発した。

1974 年松井ら²³⁾も立体的に連続蛍光眼底撮影のできる同時立体眼底カメラを発表した。1 枚の 35 mm フィルムに収められた 2 枚の写真は single frame stereoscopic viewer によって立体的に見ることができる。

4.6 単色光眼底撮影

眼底検査に単色光を使用することは、1911 年 Gines-tous の発表以来で、1913 年 A. Vogt が実際に使用し報告している。写真による発表は 1934 年 Kugelberg が最初で、近年の眼底カメラおよび干渉フィルターの進歩に伴い単色光眼底写真の報告が多数みられた。Potts (1965)²⁴⁾ の monochromatic ophthalmoscopy (489, 533, 650 nm および白色光を使用)、著者ら (1965)²⁵⁾ および Behrendt & Wilson (1965)²⁶⁾ の spectral reflectance photography がそれである。本法の目的は単色光の各波長により網膜、脈絡膜の透過性が異なり、得られた眼底写真により病変の深さおよび拡がりかわかり、白色光では観察が困難な脈絡膜病変の分析を目的としている^{27, 28)}。網膜は白色光に対して透過性があり、無赤色光では神経線維層は白色線として見える。眼底から得られる光の吸収と反射の微妙な階調を一目瞭然とした形に仕上げるためには波長をできるだけ限定し、撮影したフィルムを写真処理、または画像処理し目的の部位を際立たせる必要がある。短波長光では反射光量が少なく、比色感度が低いため良いフィルムを得るのは容易でない。Frisén²⁹⁾ は masking 法を導入し、フィルム面での露光量の差が大きいと、細部の描出が困難となるため薄いポジフィルムを重ね焼きすることで神経線維および乳頭上の細小血管を良く描出した。ほかに densitometry を導入し、computer 処理を行なう方法もある³⁰⁾。

4.7 明暗順応下眼底撮影

Rushton により眼底の反射率測定法が開発され、人眼底における Rhodopsin 等の感光物質が証明された。黄斑部においてもこの方法にて 2 種類の感光物質が証明され、その量や色覚異常との関係が調べられた。著者ら⁹⁾ は写真によって網膜感光物質を証明した。強い白色光を眼底に照射し、強い明順応下で眼底撮影を行ない、またフィルム感度を極端に上げ、Rhodopsin に対する影響の少ない赤外光を用い感光物質の分解が抑えられる条件下で眼底撮影を行ない、小口氏病眼における明暗順応下の眼底反射率の差が証明できた。

4.8 高解像力眼底撮影

現在の眼底撮影は、一方ではできるだけ眼底の広い範囲を 1 枚のフィルムに収め、眼底変化の位置関係を記録し、他方では個々の変化の詳細な所見の記録という、高解像力、高倍率撮影へと進んでいる³¹⁾。

高解像力眼底撮影を実現するため著者らは 1973 年 optical fiber を使った眼底カメラを発表した。optical fiber により照明光をコンタクトレンズ面に導き、眼底を照射する。照明部と被検眼の間に空気層がなく角膜の反射光はほとんどなく、観察開口への影響はない。試作された眼底カメラは、開口の直径 6 mm, N. A. (numerical aperture)=0.18, 計算上の解像力は 544 本/mm である。著者らはまた、細隙灯顕微鏡を応用した高解像力眼底撮影法を発表した³²⁻³⁴⁾。Haag-Streit 900 型細隙灯顕微鏡の光源にニコンフォトリット用フラッシュ管を取り付け、一眼レフのボディを組み合わせで眼底を撮影する。細隙灯顕微鏡の光学系の解像力は、Haag-Streit 900 の $\times 1.6$ で $3.5 \mu\text{m}$ 、Zeiss のものもほぼ同程度と考えられる。眼底カメラの解像力は約 $10 \mu\text{m}$ 程度であるから、眼底カメラより解像力はすぐれている。外眼部や従来眼底撮影と異なり、細隙灯顕微鏡撮影では被写体からカメラに入る光量が条件により、組織によって大差を生ずる。フィルム上の光量は倍率の自乗に反比例し、スリット幅によっても変化する。また撮影レンズの開口数が大きいと解像力が良くなり、露出光量も増加する。しかし焦点深度は浅くなる。したがって細隙灯顕微鏡撮影の場合、低倍 (1~3 \times) で部位のオリエンテーションをつけ、個々の所見の詳細は高倍率で記録すればよく、そのときには開口数の大きい明るいレンズを用いる必要がある。

4.9 Fundus perimetry

視野計測は眼底および視路疾患の診断に欠くことのできない検査法であり、計測された視野が網膜のどの部位

に相当するかを知ることは、きわめて重要である。Trantas (1955)³⁵⁾ は Oculus 製検眼鏡に黒点視標を用い被検眼網膜に投影できるようにして暗点計測を行なった。Meyer (1959) は Visuscope を用いて、栗屋ら (1971)³⁶⁾ も Neitz 製 Euthyscope を用い眼底直視下で視野測定を行なった。1967年稲富³⁷⁾ は眼底カメラの鏡筒内の眼底像と共役な位置に視標を入れ、視標を動かすことにより眼底直視下で中心視野を測る方法を発表した。可見 (1977)³⁸⁾ は赤外線テレビカメラによって眼底を観察し、各部位の感度を精密に測定できるものを発表した。太田ら (1979)^{39,40)} もモニター TV により眼底を観察し、視野計測を行なった後、眼底を撮影し被験者の網膜感度をイソプターとしてフィルム上に記録する方法を考案した。測定可能範囲は約 25°, 視標の視角は約 19 分, 0.75~76.36cd/m² まで輝度を連続的に変化させることが可能である。

4.10 Fundus Haploscope

視機能を検査する場合にその機能と眼底での部位の関係を確認することは非常に重要なことで、このためには眼底直視下で検査することが最も正確な手段である。稲富は⁴¹⁾ 視標と被験者の眼底が検査者に同時に観察することのできる大型弱視鏡を開発し、Fundus Haploscope と名づけた。眼底直視下での両眼視機能を検査しようとする試みは以前からあり、Cüppers (1961) の Binocular Visuscope test は有名で、寺門・川村 (1970) は Two Visuscope test を発表し、鈴木 (1972)⁴²⁾ は1台の眼底カメラで両眼同時撮影装置を開発し、神前 (1974) はこれを応用して両眼視機能を観察、1979年稲富らは2台の眼底カメラにより両眼同時眼底撮影装置を試作した^{43,44)}。装置は2台の眼底カメラの対物レンズの前に反射鏡を置き、カメラ本体は眼球回旋点を軸にして外よせ、内よせ側に回転する。カメラ内に視標を組み込み、視標は大型弱視鏡と同様に同時視用、融像用、立体視用などを用い、これらを交換することによりそれぞれの機能が検査でき、大型弱視鏡のすべての機能を有している。眼底の観察系は照明に赤外線を用い、赤外線テレビカメラによって眼底像をモニターし、眼底像と視標とが共役な点になっているので眼底像と視標はモニター TV に重なって写る。結果は VTR に記録され、多くの人々が同時に見ることができる。眼科的に網膜対応や両眼固視状態がより正確に観察でき、抑制の網膜部位がはっきりとつかめ、融像については感覚性と運動性が分離できるようになった。

4.11 Fundus holography

1966年 Van Ligten ら⁴⁵⁾ によって眼底の撮影にホログラフィーを応用しようという考えが発表された。従来の眼底カメラは2次元の撮像を記録するにすぎなかったが、ホログラムは3次元記録ができ、理論的には角膜から眼底までが1枚のホログラムで記録できる。また理論解像力もほぼ従来の写真と同じなので400枚の眼底写真に匹敵する情報量が1枚のホログラムに収められることになる。Ohzu⁴⁶⁾ は猫の眼を使って実際にホログラムを撮影した。平凹のコンタクトレンズで角膜のパワーを消し、コンタクトレンズの周辺からグラスファイバーで照射し、角膜反射を除去し、100 mW のアルゴン-イオンレーザーで記録した。

眼底カメラに比して focus の心配はないが、スペクトル・ノイズや被写体の動きが問題となる。Tokuda ら⁴⁷⁾ も生体人眼で瞳孔から眼底まで記録されたホログラムを撮影した。生体眼の場合、とくに動きが問題となるが、シャープな像が得られるように電気機械シャッターを用いた。またコヒーレンシーを十分とるためエタロンを用い単一モードにし、撮影光と参照光を90°偏光させ、拡散反射光のみ記録した。照射パワーは 0.492 μJ/cm² で、再生は顕微鏡か TV を使う。TV を光軸方向のスケールにそって移動させることにより深さ方向の計測も可能で、空間的分解能は 10~20 μm の精度で角膜から網膜までを記録した。

4.12 眼底カメラを使ったレーザー・ドップラー法による眼底血流速度の測定

網膜血流速度測定には、血液中の色素粒子の速度を計測する蛍光色素注入法と、超音波を利用した超音波ドップラー法とがある。蛍光色素注入法は血漿速度に近似しているが粒子が小さいためランダムな運動となり測定精度は低く、超音波ドップラー法は計測する対象が不明で、得られる値は相対的脈波である。レーザー・ドップラー法は眼底カメラにて眼底直視下で目的とする血管にレーザー光をあて計測するため、血管の同定が容易で測定部位の血流を乱すことがない。またレーザーの波長が一定であるため測定精度が高く、非接触で絶対速度の測定が可能である利点を有する。岡本⁴⁸⁾ はトプコン眼底カメラを改造し、レーザー光として眼組織の透過性の良い、ヘモグロビンによる吸収率の低い、633 nm の波長を有する He-Ne レーザー光を2本用い differential heterodyne 法にて血流を測定した。血管内で2本のレーザー光を交差し、レーザー光の波長と交差角により決定される間隔をもつ干渉縞ができ、この部分を通る赤血球

の流速に応じドップラーシフトされた周波数を持つ散乱光が出現, この周波数を測定することによって赤血球の流速が求められる。

4.13 Flying spot TV ophthalmoscope (FSTVO)

FSTVO⁴⁹⁾ はレーザーとテレビ技術を応用した検眼鏡である。照明にレーザー光線を使用, 可動鏡で反射させ, 網膜上をスキャンし, それによって網膜上のごくわずかの面(点)を照明する。瞳孔傾を通りこの点から戻ってくる光は photomultiplier によって集められ, 増幅されてモニター TV に眼底像が撮し出される。網膜全体を一時に照明する必要がなく, $2\mu\text{W}$ とわずかである。従来の眼底検査や眼底写真において使用される照明の1%以下である。蛍光眼底撮影においては励起光は 502nm で通常の蛍光造影剤投与量 500 mg に比して 1/10 の 50 mg で十分写真が撮れる。眼底像が量子化されていて, コンピュータとの結合も容易で, 画像処理プログラムの応用により瞬時に自動的に眼底の所見が判読されることも夢ではない。

5. 今後の課題

医師が医用光学機器を使用する際には, 性能, 操作性, 耐久性等を要求する。これらの面から眼底カメラの今後を考えると, 操作性に関して期待されるのは誰でもがシャープな眼底写真を撮れるための小さい瞳孔でも撮影可能な光学系とピント合せの自動化である。性能の面からは非接触型で更なる広角眼底撮影のできる対物レンズの開発, と同時に眼底周辺部を収差なしに撮れる眼底カメラも期待される。照明光の方向により, 眼底の見え方が異なるし, 眼底像の解像力の向上も必要と思われる。細隙灯顕微鏡を使用する眼底撮影は, 眼底周辺部撮影や高解像力眼底撮影からも有望である。その際には露出の自動化が問題となる。FSTVO や自動焦点化にも応用されているエレクトロニクス技術と光学技術の結合により, たんに光学像のみならず画像処理システムとの組合せへの研究も期待される。エレクトロニクスの応用は弱い照明光で眼底像を電気的に変換・増幅しモニター TV に写し出すことを可能にする。これにより蛍光眼底撮影の際の初期像を高速度撮影することもでき, 漏れの正確な部位が決められる。エレクトロニクスやコンピュータの眼底カメラへの応用は今後ますます増加すると考えられる。

文 献

- 1) 大塚 任, 鹿野信一(編): 臨床眼科全書, 第7巻(金原出版, 1969) p. 64.
- 2) H. R. Novotony and D. L. Alvis: *Circulation*, **24** 82 (1961).
- 3) A. Nakajima and H. Arai: 5th European Congress of Ophthalmol. (Hamburg, 1976) p. 500.
- 4) 通産省機械安全化・無公害化委員会医療用光学機械分科会: 医療用光学機械の安全化に関する報告書 (1982. 3).
- 5) 野寄喜美春, 馬場賢一, 加藤尚臣, 田島弘和, 田屋森郎: *臨眼*, **25** (1971) 2193.
- 6) 霜島 正: *応用物理*, **51** (1982) 526.
- 7) 早水良定, 山下仲夫, 井場陽一: *光学*, **10** (1981) 314.
- 8) 布川和夫: *光学技術コンタクト*, **19** (1981) 17.
- 9) 小林萬伸, 松村 勲: *医用電子と生体工学*, **15** (1977) 371.
- 10) 中島 章: *日眼*, **66** (1962) 1585.
- 11) 小早川 嘉, 松村 勲, 馬立治久: *臨眼*, **31**(1977)1511.
- 12) 納田晶雄, 長谷川 弘, 高橋千代治, 中島 章, 杉町剛美: *臨眼*, **29** (1975) 1263.
- 13) O. Pomerantzeff: *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.*, **19** (1980) 973.
- 14) Y. Itoh, T. Masuda, J. Takahashi, K. Kobayashi and Y. Kobayakawa: *日本眼科学学会誌*, **3** (1982) 30.
- 15) 伊藤勇二, 高橋純一, 馬立治久, 松村 勲, 小林万信, 小早川 嘉: *日本眼科学学会誌*, **1** (1980) 73.
- 16) 野寄喜美春, 千野久久, 出口達也, 天野清範: *眼科*, **24** (1982) 481.
- 17) 坂根敏夫, 高橋純一, 伊藤勇二: 第 18 回日本眼科学学会予稿集 (1982) 20.
- 18) M. L. Wolbrast, M. Bessler and D. Hickingbotham: *International Symposium on Ophthalmological Optics* (Tokyo, May 1978) p. 111.
- 19) L. Allen, W. M. Kirkendall, W. B. Snyder and O. Frazier: *Arch. Ophthalmol.*, **75** (1966) 192.
- 20) J. W. Nordenson: *Uppsala Laekarefoerem. Foerh.*, **35** (1930) 217.
- 21) H. J. Norton: *Trans. Am. Acad. Ophthalmol. Otolaryngol.*, **57** (1953) 612.
- 22) D. D. Donaldson: *Trans. Am. Ophthalmol. Soc.*, **62** (1964) 429.
- 23) 松井瑞夫, 伊藤研一, 神谷 稔, 田辺 章, 滝沢志郎: *臨眼*, **28** (1974) 1253.
- 24) A. M. Potts: *Trans. Am. Ophthalmol. Soc.*, **63** (1965) 276.
- 25) A. Nakajima, H. Kaneko, T. Sugimachi, K. Abe and T. Shimojima: *Trans. Ophthalmol. Soc. N. Z.*, **17** (1965) 85.
- 26) T. Behrendt and L. A. Wilson: *Am. J. Ophthalmol.*, **59** (1965) 1079.
- 27) 新美勝彦: *眼科*, **24** (1982) 45.
- 28) 小島 克, 渡辺郁緒, 新美勝彦: *日眼*, **72** (1968) 808.
- 29) L. Frisén and W. F. Hoyt: *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.*, **12** (1973) 461.

- 30) 難波克彦, 岩田和雄: 第85回日眼総会 (1981).
- 31) 中島 章: 臨床成人病, **4** (1974) 213.
- 32) A. Nakajima: in *A method of Slit Lamp Photography Contemporary Ophthalmology*, ed. J.G. Bellows (The Williams & Wilkins Company, Baltimore, 1972) p. 512.
- 33) 中島 章, 赤松恒彦, 山崎守成, 高橋禎二, 藤田邦彦, 川村 緑, 牧田紀子, 長谷川弘: 臨眼, **25** (1971) 2275.
- 34) 中島 章: 臨眼, **21** (1967) 1235.
- 35) N. G. Trantas: Bull. Soc. Ophthalmol. Fr., **55** (1955) 499.
- 36) 粟屋 忍, 大橋武昭, 浅野俊樹: 日眼, **75** (1971) 1155.
- 37) 稲富昭太: 臨眼, **21** (1967) 1109.
- 38) 可児一孝, 絵野尚子: 臨眼, **71** (1977) 524.
- 39) 太田安雄, 宮本 正, 原沢佳代子: 眼紀, **30** (1979) 148.
- 40) 太田安雄: 眼科, **22** (1980) 1217.
- 41) 稲富昭太: 臨眼, **74** (1980) 1513.
- 42) 鈴木羊三, 久富 湖: 眼紀, **23** (1972) 239.
- 43) 寺尾真道, 望月知恵子, 稲富昭太: 日本弱視斜視学会会報, **17** (1979) 7.
- 44) 稲富昭太, 寺尾真道, 可児一孝, 阿部国臣, 大野 隆: 臨眼, **34** (1980) 815.
- 45) R. F. Van Ligten, B. Grolman and K. Lawton: Am. J. Optom., **43** (1966) 351.
- 46) H. Ohzu: in *USA-Japan Seminar Proceedings on Holography (1969) Application of Holography*, ed. Barraket, *et al.* (Plenum Press, New York, 1971) p. 365.
- 47) A. R., Tokuda, D.C. Auth and A. P. Bruckner: Appl. Opt., **19** (1980) 2219.
- 48) 岡本新生郎: 日眼, **83** (1979) 759.
- 49) R. H. Webb, G. W. Hughes and O. Pomerantzeff: Appl. Opt., **19** (1980) 2991.