

視野検査とその進歩

松本長太

近畿大学医学部眼科学教室

抄 録

眼球から視中枢までの一連の視覚情報処理の流れが、何らかの原因で障害されると、視野異常が出現する。これを定量的に評価する視野検査は、眼科診療において、原因病巣の探求、疾患の機能面からの経過観察において極めて重要な検査である。視野検査は歴史的に概念ならびに機器の進歩により、その定義は『物の見える範囲』から『視覚の感度分布』へと推移してきた。ヒトの視野は固視点近傍で最も感度の高い感度を呈しており、これは網膜における視細胞、網膜神経節細胞の密度に大きく依存している。さらにこの形状は各種測定条件により変化し、とくに錐体細胞優位の明順応では中心感度が高く、逆に杆体細胞優位の暗順応では中心感度は周囲より低くなる。視野の測定方法には大きく分けて、視標を動かしながら等感度曲線(イソプタ)を描く動的視野測定、ならびに視標の位置を固定して輝度を変化させ、各測定部位での感度を求める静的視野測定がある。近年コンピュータ制御による自動視野計が開発され、この静的視野測定が標準的に用いられるようになった。さらに最近では、各種疾患のより早期診断を目的に、機能的に分化している各種網膜神経節細胞を選択的に評価可能な機能選択的視野検査が可能となり、点滅、動きに関与する M-Cell 系、視力など解像度の高い物体の識別に関与する P-Cell 系、青色など短波長系の光に関与する K-Cell 系を機能的に分離評価できるようになった。さらに従来の視野検査が被検者の応答に頼る自覚検査であったのに対し、他覚的に計測可能な、網膜電位、脳波、瞳孔反応、fMRI、MEG などの生体信号を応用した他覚的視野測定の研究も進められており今後の進歩が期待されている。

Key words: 視野, 視野計, 動的視野検査, 静的視野検査, 自動視野計, 機能選択的視野検査

1. 視野とは

ヒトの視野は、その古典的定義では、『片眼で一点を見つめたときに見える範囲』とされている。そして視野の広がり、概ね上方約60度、下方70度耳側100度、鼻側60度の広がりを持つとされている(図1)。しかしながら、視機能面から視野を考える場合、広がりだけでは、その特徴を十分に把握できない。実際、同じ視野の広がりを持つても、視野内部の見え方によって、その視機能には大きな隔たりがある。

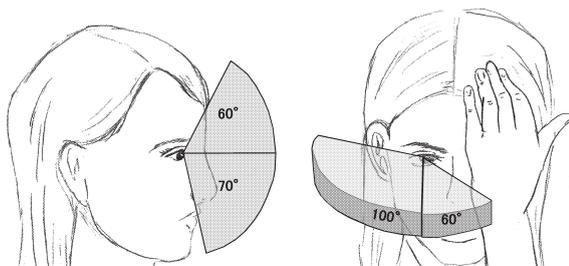


図1 ヒトの視野の広がり
上方60度、下方70度、耳側100度、鼻側60度の広がりがある。

たとえば視野の中心部が見えない場合は、同じ視野の広がりがあっても、日常生活における Quality of Vision (QOV) は大きく悪化する。そのため近年では、視野を評価する場合、見える広がりよりはむしろその内部の感度分布に重点をおいた評価がなされている。そのため現在では視野の定義としては『視覚の感度分布』という表現が適切と考えられている。

眼球を含む視覚系はカメラやビデオカメラの構造に例えられる。そして、光信号を電気信号へ変換する網膜は、フィルムや CCD に対応する。しかしながら、これらの機器と異なる点として、日常生活の環境では、ヒトの網膜の感度分布は固視点近傍で最も高く周辺に向かうにつれ低下する不均一な分布をもっている点である。これは、網膜における光信号を電気信号へ最初に変換する視細胞や網膜内の神経情報を視中枢へ伝える網膜神経節細胞の密度が、固視点近傍の黄斑と呼ばれる部位に高密度に分布するためである。そのため、ヒトの視野は、固視点でもっとも感度が高く、周辺に向かうにつれ感度が低下する丘のような形状を呈している(図2)。これが海外の教科書で視野が hill of vision と記載されている

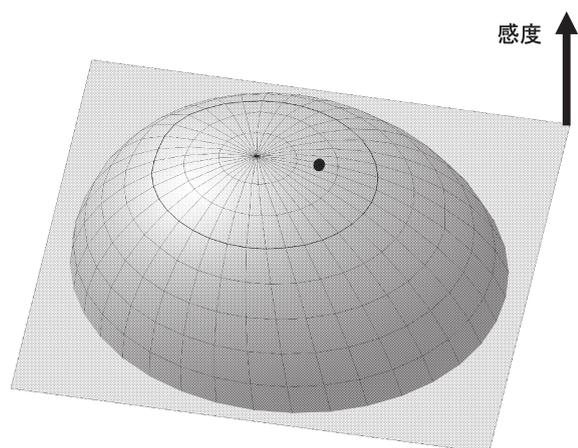


図2 視覚の感度分布
ヒトの視野は、固視点でもっとも感度が高く、
周辺に向かうにつれ感度が低下する。

由来である。また固視点から鼻側約15度付近には、盲点と呼ばれる生理的暗点が存在する。これは、眼球内の網膜神経線維や血管の出口である視神経乳頭に対応する部位で、この部位には視細胞がないため光を感じることはできない。

2. 視野検査の歴史

視野に関する歴史的記述は古く、BC 5世紀にすでに Hippocrates により半盲の存在が示されている。視野測定に関する記述は、Optics の著者である Ptolemy (AC 約85年～約165年) が初めて水平方向と垂直方向の視野の広がりについて詳しく述べたとする記載がある。その後、1668年 Mariotte によりはじめて、盲点の存在が発見された。1800年には Young により、はじめて正確な視野測定が行われた¹⁻³。1856年には von Graefe により臨床的な平面視野測定法が考案され、はじめて進行期の緑内障例の視野が報告された⁴⁻⁵。1862年には Aubert と Förster が半弓状視野計を開発し周辺視野の測定に貢献した⁶。一方、1889年 Bjerrum は彼の診察室のドアの裏に設置した2mの平面視野計を用い、中心視野を測定することで弓状暗点など多くの緑内障性視野変化を早く捉えることができることを示した⁷。さらにその弟子であった Rønne により鼻側階段が発見され、動的視野測定におけるイソプタ(等感度曲線)の概念が確立した⁸。1945年には Goldmann により Goldmann 視野計が開発され、半世紀にわたり視野検査の標準器として世界中で広く用いられた(図3A)⁹。この動的視野測定に対し、Sloan らは初めて視野の静的視野測定的重要性について指摘した¹⁰。そしてこの静的視野測定は Harmus と Aulhorn により開発された Tübinger 視野計により多くの基礎研

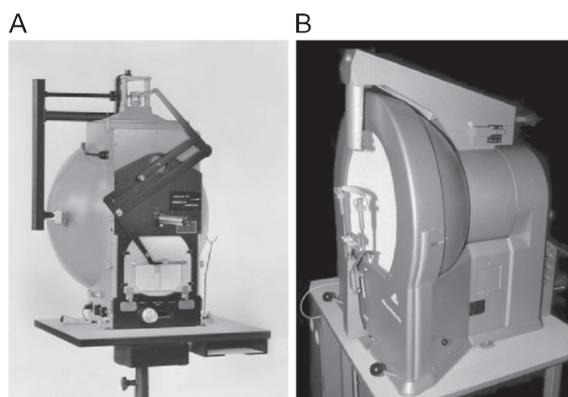


図3 A. Goldmann 視野計
B. Tübinger 視野計



図4 自動視野計 Octopus 201

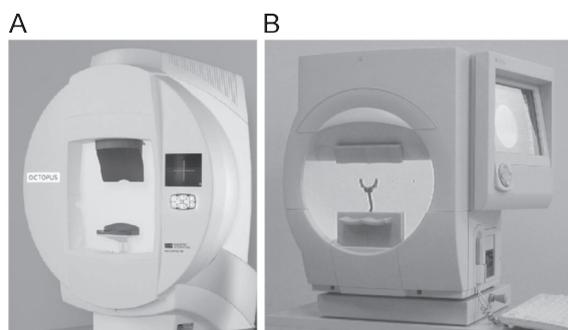


図5 A. 自動視野計 Octopus 900
B. Humphrey 700 シリーズ

究がなされた(図3B)¹¹。その後、60年代の後半からは、コンピュータを用いた視野検査の自動化の研究が進められ、70年代に入り Fankhauser らによる投影式の完全自動視野計 Octopus 201 の開発により視野測定の自動化は確立した(図4)¹²。Octopus 視野計はその後モデルチェンジを繰り返し、最近では小型の Octopus 900 シリーズへと進化していった(図5A)。また Octopus と同じく投影式を採用した Humphrey Field Analyzer が開発され、多くの

統計解析パッケージを搭載し、広く普及するにいたった(図5B)¹³。

3. 視野の形状に影響をおよぼす諸因子

視覚の感度分布は、その測定条件によって大きく変化する。われわれの視覚系は、暗い環境(暗順応)と明るい環境(明順応)で異なった反応を示すことが知られている。視野検査では、視野計の背景輝度がこれにあたる。視覚の感度分布は、明順応状態では固視点にピークを有する山形の感度分布になる。一方、暗順応状態では逆に中心部の感度が周囲より低下する。たとえば、天体観測で、暗い星や星雲を観測する際に、見たいところを注視するより、少し視線をずらすことでより対象物をより鮮明に観察できることは古くからよく知られている。これは、網膜における視細胞には、明順応で優位に機能する黄斑部に密度の高い錐体と、暗順応で優位に機能するそのやや周辺部に密度のピークを有する桿体が存在することに起因する。

また、検査で用いる視標の大きさが小さいほど、中心部での感度が周辺部に比べ相対的に上昇する。これは、網膜の中心部と周辺部で受容野と呼ばれる一つの網膜神経節細胞が受け持つ視細胞の数が異なることに起因する。網膜では中心部では錐体と網膜神経節細胞はほぼ1対1となっているが、周辺部に行くにつれ一つの網膜神経節細胞が受け持つ視細胞の数が増加し、解像度より感度を高める工夫がなされている。

このように、われわれの視野は測定条件により異なった性状を示す。そのため、臨床的には視野計にて測定条件を厳格に一定にした条件下で、定量的評価が行われている。

4. 視野の測定方法

次に、視野の測定方法について見ていきたい。視覚の感度分布を測定する場合、大きく分けて2つの手法がある。ひとつの方法は動的視野測定と呼ばれる手法である。被検者に片眼で1点を見ておいてもらい、明るさや大きさを一定にした視標を用意し、これを視野の周辺部から中心部へ動かし、視標が見えた部位を記録していく方法である。この方法では、同じ感度を持つ部位が順に記録されていき、これを線で結ぶことで、地図の等高線のような等感度曲線(イソプタ)を描くことができる。刺激強度の強い視標(大きい視標, 明るい視標)から弱い視標(小さな視標, 暗い視標)を順に用い、それぞれのイソプタを描き、視野の全体像を把握していく。この方法は、測定中に検査視標を動かしながら測定するため

動的視野測定

静的視野測定

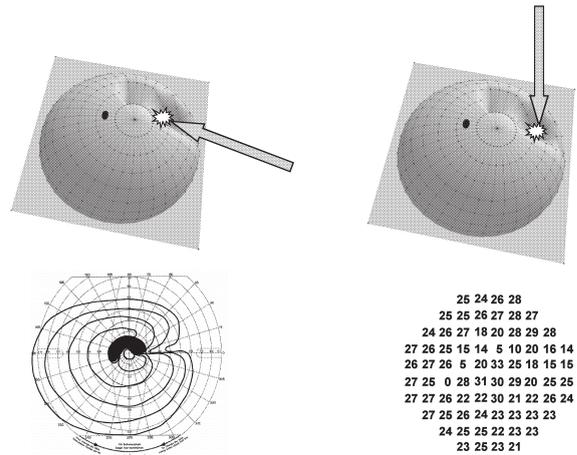


図6 動的視野測定と静的視野測定

動的視野測定(右)では検査視標を動かしながら等感度曲線(イソプタ)を描く。静的視野測定(左)では測定点の輝度を変化させ、各点での感度を数値で求める。

動的視野測定と呼ばれている(図6)。

もう一つの方法に静的視野測定と呼ばれる手法がある。感度を測定したい網膜上(対応する視野上)にさまざまな明るさの視標を順次呈示し、その部位における見えるか見えないかのぎりぎりの明るさ(閾値)を決定していく方法である。これを視野の複数個所で行い、視野全体の感度分布像をマッピングしていくわけである。個々の測定点で視標輝度のみを変かさせて計測が行われるため静的視野測定と呼ばれる(図6)。この方法は、現在最も普及しているコンピュータ化された自動視野計に採用されている。

5. 視野測定の自動化

ここで、視野検査の自動化について少し考えていきたい。視野検査では、検査者が何らかの刺激強度を有する検査視標を呈示し、被検者がそれに対し見えたか見えなかったかをボタンで応答していく作業がその基本となる。すなわち、視野検査は被検者の応答にたよる自覚検査である。視野計の自動化は、おもにこの検査者の作業をコンピュータにより効率化することにある。さらに、被検者は必ずしも生理実験のように検査に熟練したものばかりではなく、さまざまな臨床的な患者を対象としなければならない。多くの70歳以上の高齢者も対象となっている。現在の自動視野計は、このような自覚検査に対し、いかに精度を保ちながら、しかも効率よく測定を行うかについての多くの技術が導入されている。

まず、視野検査は被検者が正確な固視を維持しな

ければ成立しない。自動視野計では、これを自動的に監視するため、さまざまな固視監視システムが導入されている。赤外線ビデオカメラ、角膜反射像、定期的に盲点に視標を出し、被検者の応答がないか確認する Heijl-Krakau 法（もし固視がずれていたら、相対的にマリオット盲点の位置がずれるため、視標が見えてしまう。）、などが用いられてきた。近年では患者の頭位ずれを自動的に視野計が補正する技術、固視を追従するオートトラッキング技術も導入されている。

また、被検者の応答に対する信頼性を評価するために、定期的に必ず見える視標を呈示し、応答を確認したり（偽陰性応答）、視標が呈示されていないのに応答していないか（偽陽性応答）の確認を行っている。さらに、検査時間を短縮し、疲労の影響を軽減するために、ベイズ推定などをはじめとするさまざまな推計学的な閾値測定法を導入し、片眼約10分以内で検査が可能になるように配慮されている。また、現在の自動視野計には、数百人におよぶ年齢別正常値や緑内障症例より得られたデータベースが内蔵されており、測定結果のさまざまな統計学的解析に用いられている。

6. 眼科診療における視野検査の役割

では次に、これら視野検査の眼科診療での役割について見ていきたい。眼球から視中枢までの一連の視覚情報処理の流れが、何らかの原因で障害されると、視野異常が出現する。まず、外界の像と1対1で対応している網膜面に障害があると、視野にはその範囲に一致した上下反対の変化が生ずる。たとえば下方網膜に網膜剝離が出現すると患者は上方の視野に欠損を自覚する。これは、外界の像は網膜面では倒像として投影されているためである(図7)。次に視神経乳頭で網膜神経線維が障害され、逆行性に網膜神経節細胞が脱落する緑内障では、解剖学的な網膜神経線維走行に準拠した特有のパターンの視野欠損を生じる(図8)。視神経の炎症性変化では、多くは視神経の中心部の黄斑部に対応する線維が最初に障害されるため中心暗点を呈する。また、左右の視神経が半交叉する視交叉部で交叉線維が腫瘍などで圧迫されると、左右の耳側半視野が同時に障害される両耳側半盲を呈する。さらに視交叉より後方において脳梗塞、脳出血をはじめとする病変により左右いずれかの視路が障害されると、左右眼とも障害部位と反対側の半視野が同時に障害される同名半盲を生じる。さらに、解離性障害(ヒステリー)では、器質的な原因がないにもかかわらず視野狭窄を呈したり、Goldmann 視野計で右回り、あるいは左回りに

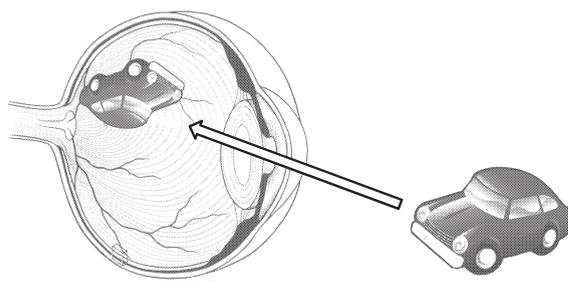


図7 外界の像と網膜面の投影
網膜面では外界の象は上下左右反転して投影されている。

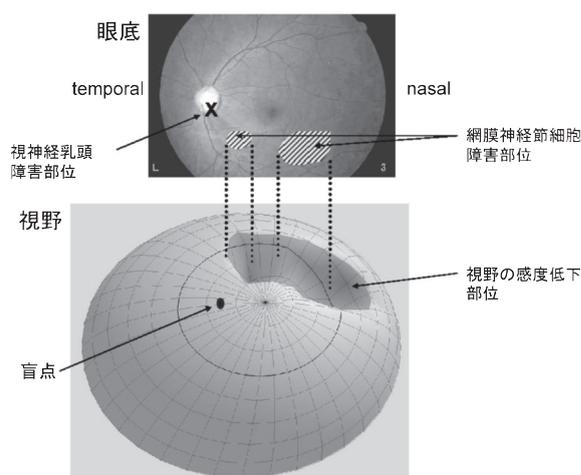


図8 緑内障の眼底病変とその視野障害
視神経乳頭に生じた病変により、そこを通過する網膜神経節細胞の軸索が障害され、対応する網膜神経節細胞のアポトーシスが生じる。この部位の網膜では感度が低下するため、対応する視野に異常が出現する。

イソプタを測定すると、検査が進むにつれ視野が求心的に狭窄するらせん状視野を呈する。

このように、眼科診療において視野検査は、視覚系に影響を及ぼすさまざまな疾患の診断ならびに経過観察に有用であり、欠かすことのできない検査となっている。

7. 現在の視野検査の問題点と将来

近年の自動視野計の進歩により、どの施設においても一定のクオリティを有する視野測定が可能となった。しかしながら、現状の視野検査には、まだ多くの課題が存在する。たとえば、国民の40歳以上の約5%が罹患しているといわれる緑内障を例にとってみると、現在の標準的な視野検査において異常が検出された時期には、すでに約50%の視神経が障害を受けているとの報告がある¹⁴。言い換えれば、われわれの視覚系は、障害に対し非常に高い機能的余剰性を持っているとも言える。しかしながら、この

高い余剰性は裏を返せば、疾患の早期発見，早期治療のタイミングを遅らせる大きな問題点ともなっている。

われわれの網膜神経節細胞は，網膜内ですでに機能分化しており，視力など細かい解像度の識別に関与するP細胞系，ちらつき，動きなど時間的変化を鋭敏に捉えるM細胞系，青色に関する反応につかさどるK細胞系などいくつかの種類が存在する．これらの網膜神経節細胞は，網膜内では混在しているが外側膝状体レベルではすでにM細胞層，P細胞層，K細胞層に分かれている(図9)．この中でもM細胞系，K細胞系など，相対的に密度の少ない細胞を選択的に測定することで，機能的な余剰性を排除した，より異常検出感度の高い視野検査が可能と考えられている．そして，それぞれの網膜神経節細胞の機能を選択的に評価する機能選択的視野検査法が開発，臨床導入されている．

M細胞系を評価する代表的な視野計に，当教室で開発が進められてきたフリッカー視野がある．フリッカー視野では，視野の各部位でフリッカー光の周波数を変えて，ちらつきが感じられるぎりぎりの周波数(フリッカー融合頻度 Critical Fusion Frequency : CFF)を測定する^{15,16}．また Frequency Doubling Technology (FDT) では，Frequency Doubling Illusion と呼ばれる錯視を利用してM細胞系の機能を評価している¹⁷．1 cycle/degree 以下の正弦波パターンを15 Hz 以上の早い周波数で反転すると，平均輝度の灰色にはならず2倍の周波数の縞として見える．この現象は，Frequency Doubling Illusion と呼び，網膜神経節細胞のM細胞系がこの現象に関与すると考えられている．FDTはこの錯視を視野検査に応用したもので，実際の測定では，視角5度の0.25 cycle/degree の低周波数正弦波パターンを25 Hz で中心視野20度以内の17カ所に呈示し Frequency Doubling Illusion を作成し，縞のコントラストを変え，コントラスト感度を測定する．また，Short-Wavelength Automated Perimetry (Blue on Yellow Perimetry) では，選択的色順応法と呼ばれる手法を用い短波長(青)錐体系からのK細胞系の機能を選択的に測定している¹⁸．これは高輝度の黄色背景を用いることで，本来視感度の高い中波長(緑)，長波長(赤)系の錐体機能を抑制した条件下で，短波長(青)視標を呈示しK細胞系の機能を評価する方法で，早期の緑内障性視野障害の検出に有用と考えられている．

また，視野検査のもつ本質的な問題点として，患者応答にたよる自覚検査であることが上げられる．近年，視野検査を他覚的に測定する取り組みも進め

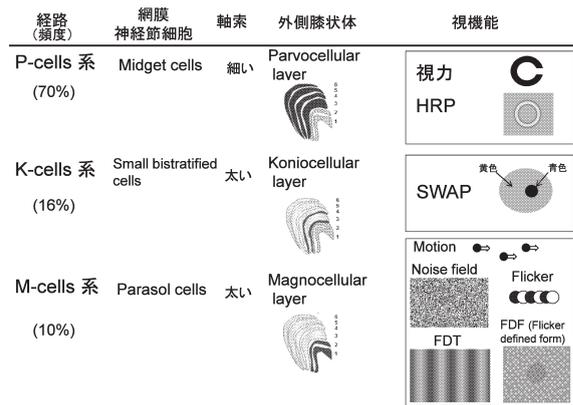


図9 網膜神経節細胞の種類とその機能

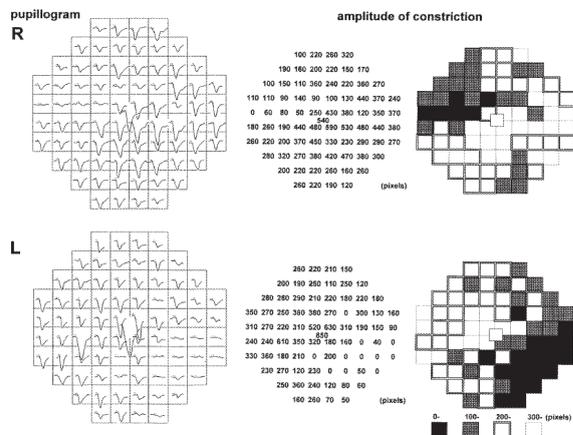


図10 瞳孔反応を用いた他覚的瞳孔視野検査¹⁹⁾

図は緑内障例における，光刺激による各測定点の瞳孔面積の変化(左)，その振幅(中)グレイスケール(右)を示す．自覚応答によらない対光反射を利用することで他覚的視野検査を行うことができる．

われており，光刺激に対し他覚的に計測可能な生体反応として，網膜電位，脳波，瞳孔反応，fMRI，MEGなどの生体信号を用いた他覚的視野測定の研究が進められている(図10)¹⁹．これら他覚的視野測定の精度は，まだ現在の自覚的な応答による自動視野検査にはおよばないが，今後の技術進歩が期待される．

文 献

1. Dubois-Poulsen A. Le champ visuel. Paris : Masson & Cie, 1952
2. Drance SM (1985) The evolution of perimetry. In : Whalen WR, Spaeth GL (eds) : Computerized visual fields. What they are and how to use them. Thorofare, SLACK, pp5-9
3. 松尾治亘 (1993) 視野. 市川 宏 編 : 新臨床眼科全書. 東京，金原出版株式会社，pp1-3
4. von Graefe A (1856) Über die Untersuchung des Gesichtsfeldes bei amblyopischen Affectionen. Albrecht

- Von Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol 2 : 258-298
5. von Graefe A (1869) Beiträge zur Pathologie und Therapie des Glaucoms. Albrecht Von Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol 15 : 108-152
 6. Aubert H, Förster R (1857) Beiträge zur Kenntnis des indirekten Sehens. Albrecht Von Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol 3 : 1-37
 7. Bjerrum J (1889) Om en tilføjelse til den sædvanlige synsfeltundersøgelse samt om synsfeltet ved glaukom. Nordisk Ophthalmol Tidsskr 2 : 141-185
 8. Rönne H (1909) Über das Gesichtsfeld beim Glaukom. Klin Monatsbl Augenheilkd 47 : 12-33
 9. Goldmann H (1945) Ein selbstregistrierendes Projektionskugelperimeter. Ophthalmologica 71-79
 10. Ferec CE, Rand G, Sloan LL (1933) Selected cases showing the advantages of a combined tangent screen and perimeter. Arch Ophthalmol 10 : 166-184
 11. Harmus H, Aulhorn E (1959) Vergleichende Untersuchungen über den Wert der quantitativen Perimetrie, Skiaskotometrie und Verschmelzungsfrequenz für die Erkennung beginnender Gesichtsfeldstörungen beim Glaukom. Doc Ophthalmol 13 : 303-332
 12. Fankhauser F, Koch P, Roulier A (1972) On automation of perimetry. Albrecht Von Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol 184 : 126-150
 13. Heijl A (1985) The Humphrey field analyzer, construction and concept. Doc Ophthalmol Proc Ser 42 : 77-84
 14. Quigley HA, Addicks EM, Green WR (1982) Optic nerve damage in human glaucoma. III. Quantitative correlation of nerve fiber loss and visual field defect in glaucoma, ischemic neuropathy, papilledema, and toxic neuropathy. Arch Ophthalmol 100 : 135-146
 15. Matsumoto C, Uyama K, Okuyama S, et al. (1993) Automated flicker perimetry using the Octopus 1-2-3. In Mills RP (ed) : Perimetry Update 1992/93. Amsterdam and New York, Kugler, pp435-440
 16. Matsumoto C, Takada S, Okuyama S, et al. (2006) Automated flicker perimetry in glaucoma using Octopus 311 : a comparative study with the Humphrey Matrix. Acta Ophthalmology Scandinavica 84 : 210-215
 17. Johnson CA, Samuels SJ (1997) Screening for glaucomatous visual field loss with frequency-doubling perimetry. Invest Ophthalmol Vis Sci 38 : 413-425
 18. Johnson CA, Adams AJ, Casson EJ, et al. (1993) Progression of early glaucomatous visual field loss as detected by blue-on-yellow and standard white-on-white automated perimetry. Arch Ophthalmol 111 : 651-656
 19. Okuyama S, Matsumoto C, et al. (1997) Pupil perimetry with the Octopus 123. Perimetry Update 1996/1997. Amsterdam and New York, Kugler, pp51-58