# 視能訓練士協会第17回講演会

# 視野を理解するための視覚生理学

# 松本長太

近畿大学医学部眼科学教室

# Physiology of vision for perimetry

Chota Matsumoto

Department of Ophthalmology, Kinki University School of Medicine

## 要 約

視野検査は、緑内障をはじめとする各種眼疾患の診断、経過観察において欠かすことのできない重要な視機能検査である。近年では、自動視野計の普及により誰でも容易に視野検査が行えるようになった。視野検査は視覚の感度分布を定量的に評価することであり、これには視覚系の様々な生理学的特性が影響する。自動視野計を用いた静的視野測定においても、従来から標準的な測定条件として設定されている視標サイズ、視標呈示時間、背景輝度は、視覚系における様々な生理学的特性を基に視野測定に適していると考えられる条件に設定されている。さらに近年では緑内障などの早期視機能障害を評価するために、Frequency doubling technique (FDT), Flicker perimetry, Blue on yellow perimetryなど従来の明度識別視野とは異なった特殊な検査視標を用いた視野検査法も日常診療に普及しつつある。これら特殊な視野検査法はM-cell 系の評価、K-cell系の評価など視覚情報処理におけるより選択的な機能を評価することを目的としている。日常診療において視野検査を行いその測定結果を判断する場合、単に自動視野計の検査員として検査を進めるのではなく、これら視覚の生理学的特性を十分理解して検査に臨むことは、適切な視野測定の施行、測定結果の正しい評価において大変重要なことである。

別冊請求先(〒589-8511)大阪府大阪狭山市大野東377-2

近畿大学医学部眼科学教室

Tel. 072-366-0221 (内線3335) Fax. 072-368-2559

Key words: visual field, perimetry, background luminance, stimulus size, stimulus duration, receptive field 視野、視野測定、背景輝度、視標サイズ、視標呈示時間、受容野

#### Abstract

Visual field testing is an important examination for the diagnosis and follow up of glaucoma and several kinds of ocular diseases. We are able to quantify the distribution of the sensitivity of visual system by perimetry. Automated perimeter is commonly used for visual field testing and is an easy task for the examiner today. During visual field testing, several kinds of test parameters such as stimulus size, stimulus duration and back ground luminance are adjusted to suitable conditions for evaluating the visual functions. Recently, several kinds of non standard perimetric methods such as frequency doubling perimetry, flicker perimetry and blue on yellow perimetry have also been developed for detecting the early stages of glaucoma. Using these new techniques, we are able to evaluate more selective M-cell and K-cell system functions. It is very important to understand the mechanisms of these basic human visual functions in order to perform perimetry and to evaluate the results of testing.

# I. 緒 言

視野検査は、種々の眼科疾患の診断や経過観察において、欠かすことのできない重要な検査である。今日では、一般眼科診療に自動視野計が広く普及し、誰でも簡単な操作で静的視野検査を行うことができるようになった。しかし、視野検査ならびにそれを行う上で設定されている種々の測定条件は、人の視覚系に関する多くの解剖学的、生理学的な特性に基づいている。これらを十分理解して検査に臨むことは、適切な視野測定の施行、測定結果の正しい評価においても大変重要なことである。ここでは、視野検査を理解するために必要となる視覚生理学について基本的事項を中心に述べる。

# Ⅱ. 視路の解剖

外界の視覚情報は、角膜、水晶体、硝子体を通して網膜面上に投影される。そして、感覚網膜の最外側に位置する錐体、杆体からなる視細胞により初めて光信号が電気信号へ変換される。そしてより内層の双極細胞、アマクリン細胞、網膜神経節細胞へ信号は伝わっていく。網膜神経節細胞からの神経線維走行は網膜内では上方下方で弓状にわかれ、それぞれ視神経乳頭の上極、下極から眼球外へ出て視神経を形成する。その後、視交叉で鼻側網膜からの神経線維は交

叉し片眼の耳側網膜からの神経線維とともに視索を形成し外側膝状体でシナプスを介し、視放線、後頭葉の第一次視中枢へと到達する。黄斑部に位置する視野中心部の情報は第一次視中枢ではより広い範囲へ投影されている。1991年のHoltonらの研究では、中心10度内の視野は第一次視中枢の約半分の範囲を占めていることが示されている10。視野という面から考えると外界の像が脳に投影されるこの経路のどの部位に異常が生じても視野に異常が出現する可能性があることになる。

## Ⅲ. 動的視野測定と静的視野測定

我々の視覚系の感度分布は写真フィルムのように均一ではなく、固視点近傍で最も感度が高く、周辺に向かうにつれ感度が低下する。このことは、黄斑部がより視中枢の広い範囲で処理されていることからもわかる。視野とはすなわちこの視覚の感度分布そのものである。視野はすなわちこの視覚の感度分布をして表現するとちょうど島のような形状になるため視野の鳥とも呼ばれる。各種眼疾患により、この視感度の分布に乱れが生じ、いわば視野の島の変形を引き起こす。視野検査の目的はこの視覚の感度分布を定量化することにある。視野検査には大きくわけて動的視野測定と静的視野測定の2通りの方法がある。動的視野測定はGoldmann視野計を代表とする

方法で、検査視標の輝度、面積を一定に保ち、 周辺から中心にむかって視標を動かし、イソプ タとよばれる等感度曲線を描き視感度の分布を 表現する。一方、静的視野測定は、現在広く普 及している自動視野計で用いられている方法で、 検査視標は動かさずに視標輝度を変化させそれ ぞれの測定点における視感度を求める方法であ る。

# Ⅳ. 閾値と視野の変動

視野検査を含めた心理物理学的な検査で得ら れる閾値は,一つの絶対的な値をとることはな く、ある一定の幅を持った値となる。同じ被検 者に自動視野計による視野検査を数回繰り返す と分かるが、閾値が数dB変動していることは日 常的に認められる現象である。閾値は一般に知 覚確率曲線と呼ばれるS字型の心理測定関数を 呈する (図1)。知覚確率曲線とは、視標輝度 をグラフの横軸で示し、各視標輝度において視 標が見えたと判断される確率を縦軸に示した曲 線である。たとえば、非常に暗い視標を呈示し た場合は, この知覚確率曲線の左方の状態にあ たり、ほとんどの場合視標は見えず、知覚確率 は0に近くなる。視標輝度を上げていくと"見 えた"と判断される確率が増えてゆき、 知覚確 率曲線の右方の状態では、ほとんどの視標が見 えるようになり知覚確率は1に近くなる。また閾 値測定においては輝度0の視標、すなわち光を 実際には出していない時にもある一定の確率で 被検者は応答してしまうことが知られており,

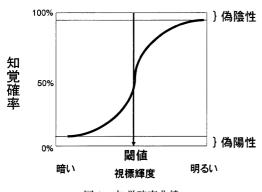


図1. 知覚確率曲線

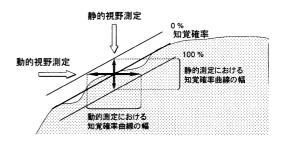


図 2. 動的視野測定、静的視野測定における閾値の 変動

# V. 視野の測定条件

視野を測定する場合、その測定結果は、背景 輝度、視標輝度、視標面積、視標呈示時間など さまざまな測定条件によって変化する。

## 1. 背景輝度と視標輝度

視野検査では、背景輝度を一定に保ち検査が行われる。Goldmann視野計では31.5asb、Humphrey視野計では31.5asb、Octopus視野計では4asbあるいは31.5asbを用いる。視野における視感度の分布は背景輝度に大きく影響を受けることが知られている。一般的に我々が視野検査で用いている背景輝度では、視野の形状は、中心が最も感度が高く、周辺に向かうにつれ感度が低下する山形を呈している。しかし背景輝度をしだいに暗くしていくと、視野はだんだん平坦化し、ついには中心部の視感度が周辺部よ

り低下し、我々が普段みている視野とはまった く異なる形状となる。これは夜間に星を観察す る時、暗い星を直接観察するより、その視線の 少し横に注意を移すと星が見えてくることから も経験的にわかる。これは網膜の基本的な解剖 学的構造に基づく現象である。すなわち、視細 胞のうち主に明順応下で優位になる錐体が網膜 の中心部に多く分布し、暗順応下で優位となる 杆体は、中心よりやや周辺部に多く分布する。 順応状態によりこれらの2つの視細胞の優位が 変化するため結果として視野の形状に変化をも たらすことになる。実際の視野測定では、特に 動的測定では検査視標を周辺から中心に向かっ て移動させイソプタを描く関係上、中心部が凸 の形状が検査に適しており、静的視野ではでき るだけ均一なフラットな視野の形状が測定上有 利となる。またあまり暗い背景輝度で測定する と検査条件に順応させるためにより多くの時間 がかかることにもなる。以上の理由で多くの視 野計では31.5asb付近の背景輝度が採用されてい る。

一方、我々の視覚系は対象物をその絶対的な輝度で判断しているのではなく、常にその視標と背景の明るさのコントラストによって判別している。すなわち、閾値決定の上、もっとも影響している要因は、視標の絶対輝度ではなくて、背景輝度との比として表されるコントラストが重要になる。例えば、夜、星を観察しており、夜明けとともに星は徐々に消えていく。これは星が暗くなっていくのではなくて、背景である空が明るくなるために、コントラストが下がり星がみえなくなったためである。

一般的に背景と視標コントラストの関係を表現する法則としてWeberの法則がある(表1)。この法則は、背景輝度と増分閾値(その背景光の上にいくら視標の輝度をのせると閾値に達するかという値:視野検査では閾値における視標輝

表1. Weberの法則

⊿L/L= 一定

L:背景輝度、△L:増分閾値

度)の比はいつも一定であるというもので、主に明順応下で成立する。たとえば、ゴールドマン視野計では、背景と視標がひとつの電球から照明されている。この機構は何らかの原因で電球が暗くなっても、背景輝度、視標輝度ともに暗くなるため、視標のコントラストとしては大きな変化がなく、結果には影響を与えにくいという長所がある。

# 2. 視標呈示時間と時間的寄せ集め

視標輝度と視標呈示時間の関係には時間的寄せ集めと呼ばれる現象が存在する³¹。視標呈示時間が100msec以内では、視標呈示時間が2倍になると、閾値に到達するのに必要な視標輝度は半分でよく、視標呈示時間と閾値における視標輝度の積は一定を保つ。これはBlochの法則とよばれ、約100msecまで成立することが知られている(表2)。それより長い呈示時間、たとえば1秒以上になると、視標が長く点灯しているという感覚は生じても、輝度の感覚にはあまり影響しない。

表 2. Blochの法則

 $I \times t = -$ 定

I: 閾値における視標輝度、t:呈示時間

一方、視野測定において検査中の固視の状態は測定精度を考える上でも重要となる。視野検査中に、周辺に視標呈示を行っていると、しばしば視標を追ってしまい視標の方に視線を動かしてしまうことがある。一般に周辺視野に視標が呈示されてから、その方向にサッカードと呼ばれる眼球運動が生じるまでの潜時は、約200msecと言われる。

視野検査を行う上で、時間的寄せ集めの影響をできるだけ少なくするためには、視標呈示時間は100msecより長いほうがよく、固視に関する眼球運動の潜時の面から考えると視標呈示時間は200msec以下が望ましい。これらの理由から、自動視野計においてはハンフリー視野計では200msec、オクトパス視野計では100msecの視標呈示時間を採用している。

### 3. 視標面積と空間的寄せ集め

一般的に視野検査で用いられる視標面積の大きさは、Goldmann視野計でのサイズ 0 から5までが基準となっている。Goldmann視野計では視角1.7度のサイズ 5 と視角0.1度であるサイズ 1 が主に標準で用いられている。多くの自動視野計では、視角0.43度であるサイズ 3 が用いられている。ちなみにこのサイズ 3 を我々の日常生活に当てはめるとほぼ満月の大きさとなる。

視標面積と視標輝度の間には空間的寄せ集め と呼ばれる現象が存在する。視標面積が大きく なると、それに伴い閾値に達するのに必要な視 標輝度は徐々に下がってくる。この関係はある 範囲までは、直線関係を保っており、視標面積 と閾値における視標輝度の積はつねに一定とな る。これはRiccoの法則とよばれ、この状態を別 の表現で空間的な寄せ集めが完全であるとも言 う。また網膜の位置によっては視標面積と視標 輝度の1/2乗との積が一定となる。これをPiper の法則という。一般的に網膜の中心からの距離、 正常部位、異常部位でも空間的寄せ集めの関係 が変化するため、一般則として視標輝度と視標 面積のk乗との積が一定とし、このkを空間的 寄せ集めの係数として評価することもある(表 3)。いずれにしても視標面積を大きくしてい くと最終的には単に面積が大きくなったと自覚 されるだけで視標輝度としての補完はできなく なる。この状態で空間的寄せ集めは認められな

このように視標面積を大きくしていくと空間 的寄せ集めがある時点から消失する。これは網 膜神経節細胞の受容野の大きさに深く関与して いる。一般的にひとつの神経節細胞が受け持つ 網膜上の空間的な範囲を受容野と言う。最終的 に視覚の解像度はこの受容野の大きさで規定さ

表 3. 空間的寄せ集め

Ricco の法則 I×A=一定

Piper の法則 I×A<sup>1/2</sup>=一定

#### 一般則 I×Ak=一定

I: 閾値における視標輝度、A: 視標面積、k: 空間的寄せ集めの係数

れることになる。視標面積がこの受容野の大きさより小さい範囲では、視標面積の大きさが大きくなっても、視中枢へは視標が大きくなったという情報は伝えることはできず、単に輝度の変化として伝わる。そのため完全な空間的寄せ集めが成立する(図3a,3b)。一方視標面積が受容野の大きさを越えると、輝度の増加ではなく面積が大きくなるという情報が伝わる。このような状態では空間的寄せ集めは成立しない(図3c)。実際の網膜では受容野の抑制部位、興奮部位が重なり合うため単純ではないが、概念的にはこのようになると考えられる。

一方、臨床的に使用されている視標サイズ3はすでに受容野の大きさより十分大きく、一回の刺激で複数の神経節細胞を刺激することになる。たとえば緑内障では、明度識別視野に異常が出現した段階ではすでに半数におよぶ多数の視神経に障害がおよんでいることが知られている4-60。このように受容野より大きい面積の視標で検査を行っていると、ひとつの神経節細胞が障害されていても同じ視標面積内に含まれる他の神経節細胞の機能が保たれていると異常として検出されにくく(図3d)。サイズ1などの

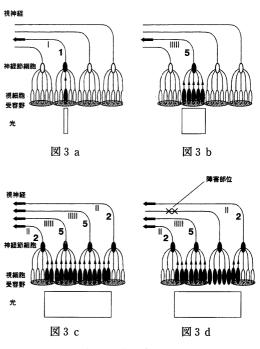


図3. 視標面積と受容野の関係

より小さな視標サイズを用いると、視野のダイナミックレンジは下がるがより異常を検出しやすいことも報告されている<sup>7.87</sup>。

# VI. 網膜神経節細胞の種類とその機 能

人の視覚系には大きく分けてP-cell系、K-cell系、M-cell系の3種類の経路があり、それぞれ異なった外側膝状体の層に投影することが知られている(表4)。P-cell系はネコのX細胞に対

表 4. 網膜神経節細胞の種類とその機能

網膜神経節細胞	軸索	外側膝状体	視機能
P-cells (70%) (midget cell)	細い	Parvocellular layer	視力 HRP
K-cells (16%) (small bistratified cell)	太い	Koniocellular layer	Blue on yellow
M-cells (10%) (parasol cell)	太い	Magnocellular layer	Flicker Mortion Frequency doubling

応する小型の網膜神経節細胞であるmidget cell が外側膝状体のparvoceller laverへ投影する系 で、主に視力や解像度などに関与する<sup>9)</sup>。K-cell は青錐体S-coneからの信号を受ける大型の網膜 神経節細胞であるsmall bistratified cell が外側膝 状体のkonioceller layerへ投影する系で、主に 青錐体系の機能に関与し、視野検査ではBlue on vellow perimetryが対応する。M-cell系はネコ のY細胞に対応する大型の網膜神経節細胞であ るparasol cellが外側膝状体のmagnoceller layer へ投影する系で、主にフリッカーや、動きの知 覚に関与する。視野計では、Flicker perimetry<sup>10-12)</sup>, Frequency doubling perimetry, Motion perimetryなどが対応する。それぞれの 神経節細胞の網膜における割合をみると、 midget cell\$\dagger{1}70\%, small bistratified cell\$\dagger{1}16\%, parasol cellは10%となっている。神経線維の大 きさを見ると、midget cell が最も細くsmall bistratified cell、parasol cellは太い。

緑内障の早期診断においてFrequency dou-

bling technology (FDT), Flicker perimetryなど M-cell系を選択的に測定する視野計、Blue on yellow perimetryなどK-cell系を選択的に測定する視野計でより早期に異常を検出できることが知られている。この理由として、緑内障では太い神経線維が障害を受けやすい、あるいはもともと余剰性が少ない、数の少ない細胞を選択的に測定すると異常を検出しやすいなどの説が述べられている $^{13-14}$ 。

# Ⅷ. 最後に

以上、視野検査に関する基本的な視覚の解剖、 生理学的特性について述べてきた。このように 単に視野検査と言っても実にさまざまな要因が その背景に存在することが理解できたと思う。 視野検査は日常診療においてさまざまな疾患の 診断、経過観察に用いられている基本的な検査 法である。しかし単に決められたマニュアル通 りに測定するのみではなく、その原理や意義、 背景に存在する視覚の解剖学的、生理学的特性 を十分に把握した上で検査を施行しその測定結 果を評価することは、視野検査にたずさわるも のとしてきわめて重要であると考える。そして さらに、日々の診療で実際に施行されている視 野検査を通して生じるさまざまな疑問、問題点 をその基本的な背景を踏まえて考え直すことが、 今後のより優れた視野検査法の発展へつながる ものと信じている。

#### 参考文献

- Horton JC et al: The representation of the visual field in human striate cortex. A revision of the classic Holmes map. Arch Ophthalmol 109: 816-824, 1991
- 2) 松本長太: 最近の視野検査の動向 自動視野 計における閾値測定について.あたらしい眼科 14: 829 - 835, 1997
- 3) 奥山幸子: 中心30°内静的視野測定における 視標呈示時間の閾値に及ぼす影響 近畿大医誌 19: 167-183, 1994
- 4) Quigley HA et al: 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, 1982
- 5) Quigley HA et al: Retinal ganglion cell atrophy correlated with automated perimetry in human eyes with glaucoma. Am J Ophthalmol 107: 453-464, 1989
- 6) Harwerth RS et al: Ganglion cell losses underlying visual field defects from experimental glaucoma. Invest Ophthalmol Vis Sci 40: 2242-2250, 1999
- 7) 松本長太: 自動視野計Octopusの中心視野測定 における視標サイズ、背景輝度の影響につい て. 近畿大医誌 14: 1-17, 1989
- 8) 宇山孝司: 正常眼および緑内障眼の中心静的 視野測定における視標サイズの影響. 近畿大 医誌17: 527-545, 1992
- 9) Iwagaki A: Development of a new resolution

- perimeter. Acta Medica Kinki Univ. 22: 87-95, 1997
- 10) 宇山令司: 静的フリッカー視野測定の早期緑 内障の診断への応用について. 近畿大医誌12: 577-592, 1987
- 11) Matsumoto C. et al: Automated flicker perimetry using octopus 1-2-3. Mills RP (ed): Perimetry Update 1992/93, 435-440, Kugler Publ, Amsterdam/New York, 1993
- 12) Matsumoto C. et al: Automated flicker perimetry in glaucoma. Mills RP, Wall M (eds): Perimetry Update 1994/95, 141-146, Kugler Publ, Amsterdam/New York, 1995
- 13) Quigley HA et al: Chronic glaucoma selectively damages large optic nerve fibers. Invest Ophthalmol Vis Sci 28: 913-920, 1987
- 14) Johnson CA: The Glenn A. Fry Award Lecture. Early losses of visual function in glaucoma. Optom Vis Sci 72: 359-370, 1995