

視野の時間特性の臨床的評価

(6) 受容野特性との関連 (図6)

安間 哲史^{1*}・山崎 淳^{2*}・山本 憲明^{3*}
 長坂 智子^{4*}・村上 京子^{1*}

^{1*}名古屋大学医学部眼科学教室
^{2*}小牧市民病院眼科
^{3*}豊橋市民病院眼科
^{4*}国立名古屋病院眼科

Clinical Application of Time-dependent Perimetry (6)
 Receptive Field Properties

Tetsushi Yasuma^{1*}, Jun Yamazaki^{2*}, Noriaki Yamamoto^{3*}
 Tomoko Nagasaka^{4*} and Kyoko Murakami^{1*}

^{1*} Department of Ophthalmology Nagoya University School of Medicine

^{2*} Komaki City Hospital

^{3*} Toyohashi City Hospital

^{4*} Nagoya National Hospital

要 約

2刺激分解能 (DFR) あるいはフリッカー融合閾 (CFF) を指標として求められた受容野中心の大きさは、視野中心部では約 $1.6 \sim 1.7 \log \text{ min of arc}^2$ 付近であり、Westheimer function として求められた通常の静的な受容野中心の大きさと間に有意な差を認めることはできなかった。一方、3度耳側視野では、DFR ならびに静的な受容野中心の大きさは約 $2.1 \log \text{ min of arc}^2$ であったが、CFF では約 $2.5 \log \text{ min of arc}^2$ と拡大していた。この特性は、3度鼻側、上方、下方視野においても同様に認められた。明るさを等しくした追加実験により、DFR あるいは CFF でみられたこの中心一周辺機構を持つ受容野特性は、視標の明るさの変化によるものではなく、DFR あるいは CFF 自体の特性によるものであることがわかった。視標 (windmill target) の動きによる抑制は DFR, CFF のいずれにもほぼ同等に認められ、その感度低下の度合いは、視野中心部では約 $10 \sim 15 \text{ msec}$ 、3度視野部位では約 $20 \sim 40 \text{ msec}$ であった。この視標の動きによる感度低下も、視標の明るさの低下によるものではなく、DFR, CFF 自体の特性によるものであった。これらのことから、CFF は transient 機能を強く反映するものであり、DFR は sustained 機能と transient 機能とが相互に干渉し合った結果の反映であろうと考えた。(日眼 91:1235-1243, 1987)

キーワード：2刺激分解能，フリッカー融合閾，視野，時間特性，受容野

Abstract

The receptive field properties of double flash resolution (DFR) or the critical flicker fusion frequency (CFF) were measured at central and 3° paracentral visual fields. At the center of the visual field, the area of receptive field center of DFR or CFF was around $1.6 \sim 1.7 \log \text{ min of arc}^2$, which had no differences from one of Westheimer function. At 3° temporal visual field, there was a significant discrepancy between the area of the receptive field center of DFR and one of CFF. That is; the area of receptive field center of DFR or Westheimer function was around $2.1 \log \text{ min of arc}^2$, and one of CFF was around $2.5 \log \text{ min of arc}^2$. The same difference between DFR and CFF was also observed at 3°

刷請先：466 名古屋市昭和区鶴舞町65 名古屋大学医学部眼科学教室 安間 哲史

Reprint requests to: Tetsushi Yasuma, M.D. Dept. of Ophthalmol., Nagoya Univ. School of Med.

65 Tsurumai-cho, showa-ku Nagoya 466, Japan

(昭和62年7月9日受付) (Accepted July 9, 1987)

nasal, 3° superior and 3° inferior visual fields. Additional equal brightness experiments showed these receptive field properties of DFR and CFF to be independent of the Westheimer function. On the other hand, both DFR and CFF were inhibited similarly with the movement of the windmill target; i.e., at the central visual field the decrease of sensitivity of DFR or CFF was about 10~15msec, and at 3° paracentral visual fields that was about 20~40msec. According to the additional equal brightness experiments, these properties of DFR and CFF were again found to be independent of the transient-like function. These results suggest that the CFF strongly reflects the transient function and the DFR reflects interactions between sustained and transient functions. (Acta Soc Ophthalmol Jap 91:1235-1243, 1987)

Key words: Double flash resolution, Flicker fusion frequency, Visual field, Receptive field, Sustained & transient functions

緒 言

われわれはこれまでに、2刺激分解能 (DFR) とフリッカー融合閾 (CFF) を各視野部位において測定し、DFRを用いると、CFFでは捉えることのできない加齢現象、あるいは早期緑内障における視機能異常などが検出できることを報告し、また、中心視野と周辺視野とではその特性が異なっていることを併せて報告した^{1)~7)}。DFRとCFFとの基本的な差は、パルスとして呈示される刺激光の数がDFRの場合は2つであり、CFFの場合は連続した多数のパルスが呈示されるという点だけであるが、心理物理的に両者を比較すると、確立加算の問題だけでは説明のつかない現象が多く見出される。しかし、この両者を生理学的に検討した報告は少なく、両者間にみられる機能差を十分に説明するまでには至っていない。このような、共に時間特性検査でありながら差異の認められるDFRとCFFの生理的特性を考えるためには、網膜内干渉機構を含めた刺激の伝達系を検討する必要がある。網膜内の刺激伝達系の一面を心理物理的に捉える最も簡単な方法のひとつは、その受容野特性を検討することである。

刺激に面積効果のあることは、古くはリコーの法則として知られており、その空間的寄せ集め現象の成立する臨界面積内⁸⁾では神経伝達が統合されていると考えられている。また、適切な刺激提示法を用いた場合には、刺激光の面積をさらに大きくすると空間的寄せ集め現象が逆に抑制されることも見出されており (Westheimer function)⁹⁾¹⁰⁾、本来は電気生理的な概念であった中心一周辺機構をもった受容野特性が、心理物理的にも検出できるようになった。この中心一周辺機構は、Dowlingら¹¹⁾¹²⁾の電子顕微鏡を用いた仕事などから、網膜内の神経細胞間のシナプスによって構成

されていると考えられている。

一方、視覚系は以上のような静的刺激に対する反応と、刺激の動きに対する反応とは異なっており、それぞれが統合される網膜内レベルも異なっていると考えられている。Werblin¹³⁾¹⁴⁾は、中央の抜けた風車様視標 (windmill target) を受容野周辺において回転させ、アマクリン細胞の活動性を示す出力を神経節細胞から取り出すことに成功した。EnochはこのWerblinの考案した方法を心理物理検査の一手法として取り入れ、静的刺激に対する受容野特性検査と併用することにより、網膜内各層における反応を心理物理的に分離することに成功した (layer-by-layer perimetry)¹⁵⁾¹⁶⁾。今回報告する研究は、Enochの開発したこの手法を応用し、DFRあるいはCFFが主に網膜内のどのレベルで統合されているかを検討し、両者間でみられる伝達系の差異について考按したものである。

方 法

既に報告した層別量的視野計¹⁷⁾の5インチ白黒モニターテレビ画面を赤色ゼラチンフィルター (Wratten 25) で覆い、その中央に直径1.6mm (視角約3.7分) の円形赤色発光ダイオード (LED: 主波長700nm, 平均輝度約230cd/m², 図1) を装着した。白黒モニターテレビ画面の輝度は赤色フィルターを付けた状態で0.2cd/m²であり、検査室の照度は、モニターテレビの周辺で約80luxである。この層別量的視野計は、モニターテレビ画面の中央に、大きさと輝度を自由に可変できる円形背景光を表示することができ、その円形背景光の中央に、露光時間を166msecに設定された矩形波状のテスト光 (視角約1.8分) を増分することができる。さらに、この円形背景光の周囲に、この背景光と等輝度な面積比1:1の8枚の放線状の羽根を表示すること

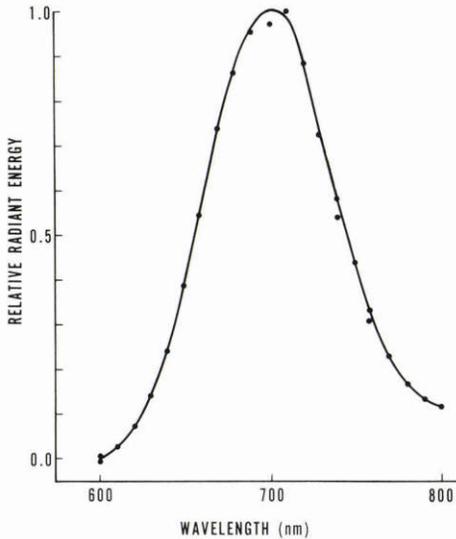


図1 Relative spectral energy distributions of the LED we used.

ができ、羽根の表示された部分と、されていない部分を7.5Hz¹⁸⁾で交互に入替えることができる。

通常受容野(Westheimer function)の大きさを測定する場合には、モニターテレビ上に装着したLEDを外し、モニターテレビ上に映し出される視角約1.8分のテスト光を視標とした。ただし、画面全体を覆った赤色フィルターは外さずにそのまま使用した。測定方法は既報に準じて行ったが¹⁷⁾、テスト光の輝度は、閾値よりも1log 明るい条件に設定した。

2 刺激分解能 (DFR) あるいはフリッカー融合閾 (CFF)を測定する場合には、マイクロコンピュータによってその露光時間ならびに露光間隔をコントロールできる視角約3.7分の、前記したLEDを視標として使用した。すなわち、DFR測定の場合には、露光時間を10msecに定めたLEDを2回連続して点灯させ、この2つのパルスが分離して知覚される時間間隔を、点灯開始から次の点灯開始までの時間(stimulus onset asynchrony)として求め、CFF測定の場合には、LEDを1:1の明暗比で矩形波状に点滅させ、その融合閾値を1周期の時間(periodic time)として求めた¹⁾。このLEDは、モニターテレビ画面上に表示された輝度1.15cd/m²の赤色円形背景光の中央に設置されており、この円形背景光の大きさを変えることによって、背景光がDFRあるいはCFFに与える影響を求めた。

さらに、円形背景光の周囲に放射状の羽根を表示し、その羽根が静止している場合と、7.5Hzでフリッカー

している場合とで、閾値がどの程度違うかについて、DFRとCFFそれぞれにおいて検討した(transient-like function)。この場合は、円形背景光の大きさをDFR、CFFそれぞれの場合での受容野中心の大きさとし¹⁹⁾、羽根の大きさは表示できる最大の大きさ(視角約1度)とした。ただし、この場合の円形背景光ならびに羽根の輝度は0.5cd/m²に設定した。被験者は、裸眼視力1.5の、心理物理測定に熟練した正常者1名(37歳)である。

結果

視野中心部でのDFR、CFFの値を、様々な大きさの赤色円形背景光(輝度:1.15cd/m²)の中央で測定した結果を、赤色小視標を用いて測定したWestheimer functionと共に図2に示した。縦軸は、DFRあるいはCFFの場合には刺激光の点灯から点灯までの時間(msec)であり、Westheimer functionの場合には、赤色背景光の輝度(log cd/m²)である。横軸はいつれの場合も背景光の大きさ(log min of arc²)を示している。同様の測定を3度耳側視野で行った結果を図3に示した。

視標とした赤色LEDの大きさは約3.7分であり、それよりも小さな赤色円形背景光で実験する事ができな

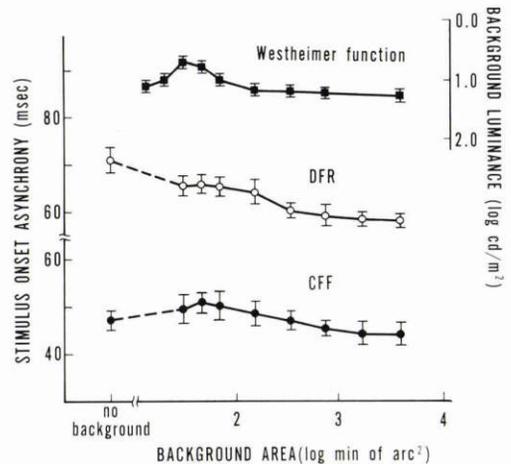


図2 Receptive field properties of DFR and CFF measured at center of visual field were displayed with the Westheimer function. The luminance of the red background in DFR and CFF experiments was 1.15cd/m². Abscissa: background area by log min of arc², ordinate: stimulus onset asynchrony (msec) in DFR and CFF, background luminance by log cd/m² in Westheimer function.

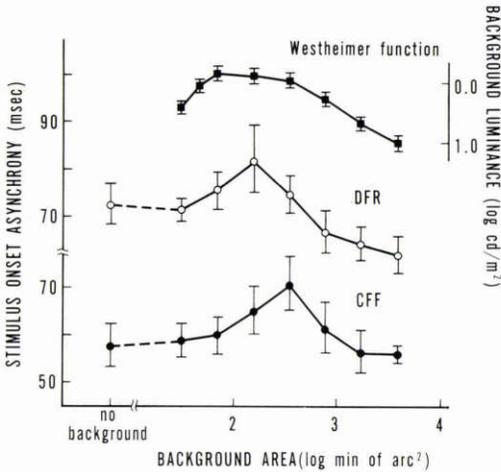


図3 Receptive field properties of DFR and CFF measured at 3° temporal visual field were displayed with the Westheimer function. Other details are the same as Figure 2.

かったため、視野中心部では受容野中心の大きさを正確に測定することは困難であったが、DFRとCFFはいずれもその受容野中心の大きさは約1.6~1.7log min of arc²付近であった。一方、Westheimer functionの受容野中心の大きさは約1.5log min of arc²であった(図2)。この視野中心部の所見で最も興味深かった点は、いかなる大きさの背景光をつけた場合でも、DFRの値は背景光のない時よりも小さい、つまり、感度が上昇していることであった。

3度耳側視野で測定した受容野特性では、DFRの受容野中心の大きさは約2.1log min of arc²、CFFのそれは約2.5log min of arc²であり、Westheimer functionでは約2.1log min of arc²であった。つまり、DFRの受容野中心の大きさは、通常の静的な受容野中心の大きさ(Westheimer function)とほぼ等しかったが、CFFの受容野中心の大きさは、静的な受容野中心よりも大きいことが分かった(図3)。円形背景光の輝度を0.6 cd/m²に低下させて同様の機能を測定した結果を図4A(DFR)、図4B(CFF)に示した。円形背景光の輝度が低下すれば受容野の中心一周辺機構は現われにくくなったが、その特性には大きな影響のないことがわかった。

次に、前と同様の明るい背景光(輝度: 1.15cd/m²)のもとで、視野中心部と3度の耳側視野部位の他に、3度の鼻側、下方ならびに上方視野部位において、背景光の大きさを2種ないしは3種に固定して測定した

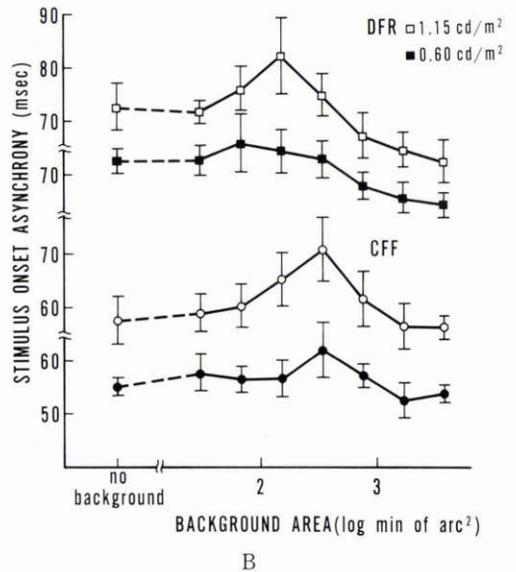
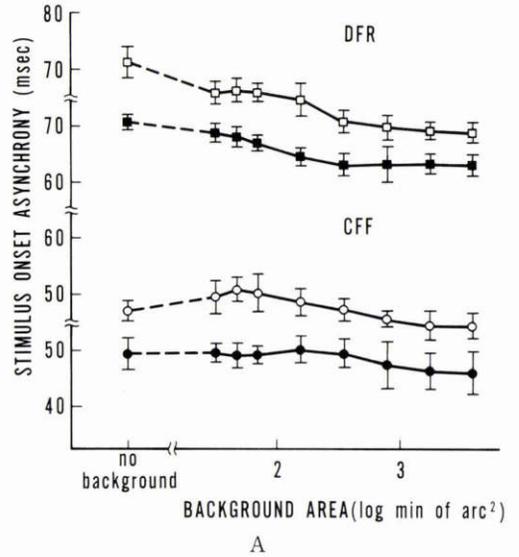


図4 Receptive field properties of DFR and CFF measured at center (A) and 3° temporal visual field (B) under two different background luminance: 1.15cd/m² by open symbols, 0.60cd/m² by closed symbols.

結果を図5A(DFR)、図5B(CFF)に示した。DFRでもCFFでも、固視点から3度の視野部位間の受容野特性にはほとんど差が認められないことがわかった。

DFRあるいはCFF測定においても、通常の静的な受容野特性検査の時と同じく、視標であるLEDの輝

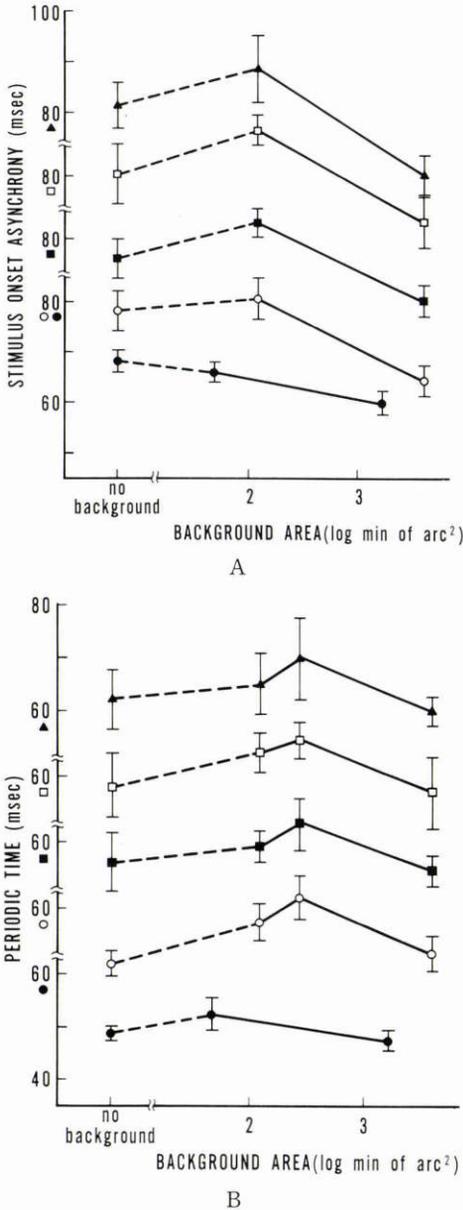


図5 Receptive field properties of DFR (A) and CFF (B) measured at center and four 3° para-central visual fields; i.e., ●; center, ○; nasal, ■; temporal, □; inferior and ▲; superior visual field. The luminance of the red background was 1.15cd/m².

度は受容野中心としての円形背景光によって抑制されている筈であり (Westheimer function), この効果が DFR あるいは CFF の結果に影響している可能性がある。このため、この抑制された視標の輝度を補正する

ための補助実験を行った。すなわち、赤色円形背景光の輝度を、今回使用した条件である1.15cd/m²に設定し、中央部への抑制効果が最大に出る条件に背景光の大きさを合せた場合(視野中心部: DFR, CFF ともに1.6log min of arc², 3度耳側視野部: DFR では2.1 log min of arc², CFF では2.5log min of arc²)と、背景光が大きくなり抑制効果が消滅するのに十分な大きさにした場合(いずれも3.6log min of arc²)との間で、中央に提示された視標の明るさに対する感度差を測定した。その結果、中央部にある視標に対する受容野中心からの抑制効果は、視野中心部では約0.15log, 3度耳側視野部位では約0.7~0.8log あることがわかった。このため、抑制効果が消失するのに十分な大きさ(3.6log min of arc²)とした背景光の輝度を1.15 cd/m²に保ち、視標である LED の輝度を低下させて DFR あるいは CFF の感度低下を求めてみた。その結果は、視野中心部では、LED の輝度を0.2log 低下させても、DFR や CFF にはいずれも有意な感度低下を認めず、3度耳側視野部位では、LED の輝度を0.8log 低下させた場合にも、DFR と CFF は共に約5msec 程度の感度低下を認めるにすぎなかった。

次に、輝度が0.5cd/m²に固定された背景光に付けられた羽根が静止している場合と、動いている場合との差を DFR, CFF それぞれで測定し、その結果を図 6A (DFR), 図 6B (CFF) に示した。視野中心部では、いずれも10~15msec の感度低下があり、固視点から3度の視野部位では、羽根の動きによりいずれも20~40 msec の感度低下を認めた。また、CFF の方が DFR よりも感度低下はやや大きい傾向があった。

この場合も、視標である LED の輝度自体が、羽根の動きによって抑制されている筈であり (transient-like function), この視標輝度を補正するための補助実験を行った。すなわち、赤色円形背景光ならびに羽根の輝度を、今回使用した条件である0.5cd/m²に設定し、中央部への抑制効果が最大に出る条件に円形背景光の大きさを合せ (視野中心部: DFR, CFF ともに1.6log min of arc², 3度耳側視野部: DFR では2.1log min of arc², CFF では2.5log min of arc²), 羽根の大きさをいずれも3.6log min of arc²として、羽根を動かした時の中央部に対する抑制効果の大きさを測定した。その結果、視野中心部では約0.1log, 固視点から3度の視野部位では約0.4log 程度の抑制効果が現われることがわかった。

考 按

1. 受容野特性について

2刺激分解能 (DFR) とフリッカー融合閾 (CFF) は、いずれも中央部への抑制効果のある受容野中心と、その抑制からの開放効果のある受容野周辺を持っており、この点では Westheimer function と類似した受容野特性を持っていた。その理由の1つとして、適切な大きさの背景光が点灯することによって、その中央部に表示される LED の明るさが抑制され、そのために DFR あるいは CFF の感度が低下していた点があげられる。もし、DFR あるいは CFF の感度低下が視標である LED の明るさの低下だけで説明されるならば、今回測定したものは DFR あるいは CFF の受容野特性ではなく、単なる視標の明るさに対する DFR, CFF の感度を測定したにすぎなくなる。

この点を補助実験を行って確認したところ、視野中心部では約 $0.15 \log$ 、3度耳側視野部位では約 $0.7 \sim 0.8 \log$ の視標に対する明るさの抑制効果が発現していることがわかった。しかし、この程度の明るさの低下では、視野中心部では DFR あるいは CFF には殆ど影響せず、3度耳側視野部位でも、DFR と CFF は共に約 5msec の感度低下を認めるにすぎず、3度耳側視野部位での 20msec もの感度低下を説明することはできなかった。

また、図 2, 3 から明らかなように、DFR の持つ受容野中心の大きさと Westheimer function の持つ受容野中心の大きさがほぼ一致していたことは、DFR という時間分解能を規定する因子に影響する背景光の大きさが、明るさの寄せ集め機能が働く背景光の大きさと同じであったことを意味する。一方、CFF の持つ受容野中心の大きさは、Westheimer function として求められる受容野中心よりも大きく、この点が DFR と CFF との間に見られた根本的な相違であった。

今回使用した LED 視標は視角約 3.7 分であり、視標自体からの抑制反応がでるための大きさである $12 \sim 13$ 分よりも十分に小さく^{20)~23)}、視標自体のもつ抑制反応は今回の結果を考按する上では除外できると考えた。また、使用した LED の波長特性は、図 1 に示したごとく、600nm 以下の波長光は発生しない主波長 700nm のバンドパス型のものであり、背景光として用いた Wratten 25 フィルターは約 585nm 以下の波長光を遮断するシャープカットフィルターであるため、両者の色度ならびに彩度はやや異なっているものの、赤緑の

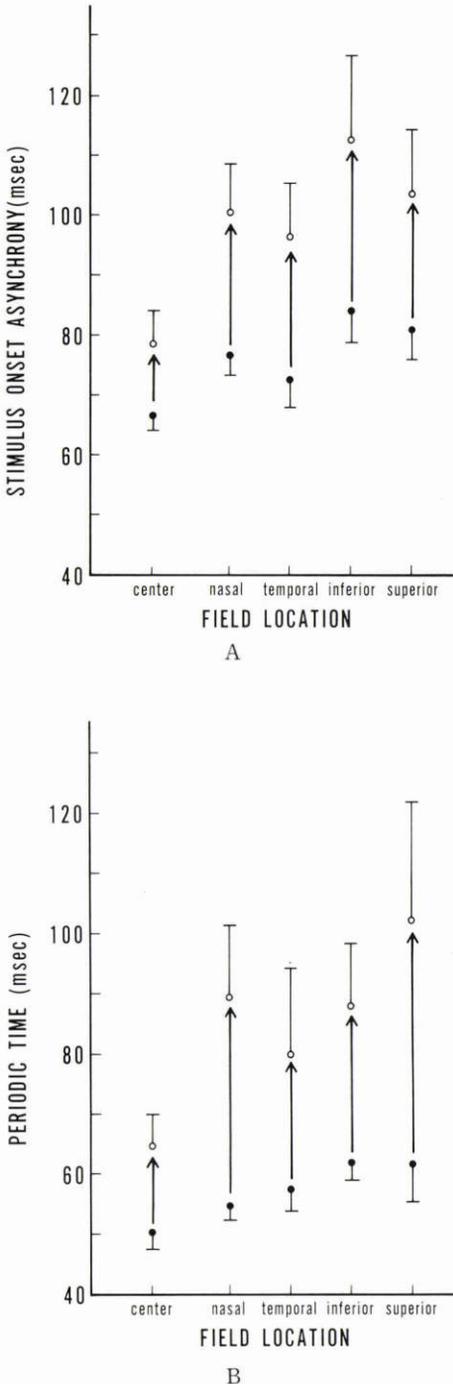


図6 Transient-like function of DFR (A) and CFF (B) measured at center and four 3° para-central visual fields. Closed circles represent the static thresholds and open circles represent the kinetic thresholds. The luminance of the windmill target was 0.5cd/m^2 .

反応色応答からみれば同じものであると考えられ、今回求めた受容野特性に色の関与はないと考えられる^{24)~26)}。以上のことから、DFRとCFFとは同じ時間分解能を現わすものであるにも拘らず、異なる層の網膜内部位において統合されている可能性が強く示唆された。

DFRとCFFとの間の受容野中心の大きさの違いを説明するためには、DFRとCFFとが異なった伝達経路を介していると考えるのが自然である。中心野と周辺野をもった受容野特性は網膜内ですでに構成されており、しかも、網膜神経節細胞には小さな受容野を持った1群(sustained type)と、大きな受容野を持った1群(transient type)の2つの群が存在することが知られている²⁷⁾。また、King-Smithら²⁸⁾は、subthreshold summationの手法を用いて、フリッカーの認知に関与する細胞は大きな受容野を持っていることを見出している。これらのことから、小さな受容野を持った神経節細胞(sustained type)によって主に仲介されるのがDFRであり、大きな受容野を持った神経節細胞(transient type)によって主に仲介されるのがCFFであるとも可能であろう。一般にtransient系では明らかな周辺野が見出せず²⁷⁾、受容野中心と受容野周辺が完全に重なり合っているとされている²⁹⁾³⁰⁾。しかし、今回われわれの得た結果では、受容野中心による感度の抑制と、受容野周辺による抑制からの開放とが、CFFでもDFRと同じ程度におこっていたことから、CFFもsustained系の影響をかなり受けていることが推察された。

視野中心部で、いかなる大きさの背景光であってもそれをつけたことによりDFRの感度が上昇したことは興味深いことであった。なぜなら、背景光をつけたということは、背景光の部分のモニターテレビ画面の輝度を上昇させることであり、その中央に表示されるLEDの増分は少なくなる、つまり、LEDの輝度を低下させたのと同じ効果があると考えられたからである。しかし、予想とは反対に、背景光をつけたことによってDFRの感度は上昇した。このようなDFRのみでみられた感度上昇は、視野中心部で著明であったが、固視点から3度の視野部位でも、背景光が大きくなってくると現われてきた。この特性は、CFFでは見られないDFRの大きな特徴であった。

このDFRの特性は、背景光をつけることによって、最近のパルスが2番目のパルスに与える抑制効果が減弱し、2番目のパルスがより認知されやすくなったと

考えることもできる。視野中心部および固視点から5度、10度、20度のDFRを測定すると、若年者では5度あるいは10度の視野部位の感度の方が視野中心部よりも高いことが見出されており⁹⁾、また、Tolhurst³¹⁾は4 msec露光される様々な周波数の縞視標の見え方を、視標と同一周波数の閾値下の縞背景光の下で測定したところ、sustained系が優位に働く³²⁾³³⁾とされている高周波数領域では、背景光が点灯している間、感度上昇があったことを報告している。われわれの用いた視標は小さなものであるため高周波成分が優位であり、しかも、この効果は中心から3度の視野部位よりも視野中心部で大きかったことから、背景光をつけることによって感度が上昇するというDFRに見られた特性には、視野中心部に多く分布しているsustained系の機能が大きく関与していると考えた。

2. transient-like function について

DFRを用いてtransient-like functionを測定した結果と、CFFを用いて測定した結果はよく類似していた。つまり、刺激光の動きによる受容野周辺からのDFRあるいはCFFに対する抑制は、視野中心部では両者とも余り強く現われていなかったが、中心から3度の視野部位では上、下、耳、鼻側を問わず、両者ともに強く現われる事が分った。羽根の動きによる中央部への抑制効果は、視野中心部から周辺部にいくにつれて大きくなることが知られており¹⁹⁾、今回の結果はそれと一致するものであった。しかし、補助実験で明らかにされたごとく、今回の実験条件下においては、羽根を動かしたことによる中央部への明るさ抑制効果は、視野中心部で約0.1log、固視点から3度の視野部位では約0.4log程度であったことから、視野中心部で10~15msec、中心から3度の視野部位で20~40msecも見られたDFRやCFFの感度低下は、LEDの明るさが抑制されたとするだけでは説明できず、DFRあるいはCFFに対する受容野周辺からの能動的な抑制効果が示唆された。

神経節細胞には、水平細胞が主に関与し、定常光に反応するsustained typeと、アマクリン細胞が主に関与し、光の変化に反応するtransient typeの2種のタイプがあることが明らかにされており^{34)~36)}、ここで求められたtransient-like functionの結果のみから考えると、DFRとCFFはいずれも、transient typeの神経節細胞を介して出力されているかのごとく考えられるが、すでに述べたごとく、受容野中心の大きさが両者で異なっており、DFRとCFFとは異なった側干渉系

を介していることも明らかである。

Sustained系とtransient系とは相互に干渉し合っているため^{37)~40)}、心理物理的な所見のみから様々な視機能を sustained系のものとtransient系のものとははっきりと区別することはできないが、今回我々が得た成績は、時間分解能のうちのCFFはtransient機能を強く反映するものであり、DFRはsustained機能とtransient機能とが相互に干渉しあった結果が反映するものであることを示唆するものであった。

御校閣頂いた栗屋忍教授に感謝いたします。なお、本論文は、昭和62年5月、第91回日本眼科学会総会(京都)において発表したものと、昭和62年10月、第41回日本臨床眼科学会視野GD(福岡)において発表したものをまとめたものである。

文 献

- 1) 安間哲史, 寺崎浩子, 横山健二郎, 宮川典子, 青山昭夫, 山崎 淳: 視野の時間特性の臨床的評価。(1) 装置の試作と正常者の特性。日眼 90: 535—541, 1986.
- 2) 宮川典子, 安間哲史, 山崎 淳: 視野の時間特性の臨床的評価。(2) 網膜視機能の不均一性。日眼 90: 1044—1048, 1986.
- 3) 宮川典子, 安間哲史: 視野の時間特性の臨床的評価。(3) 網膜視機能の加齢について。日眼 90: 1550—1556, 1986.
- 4) 山崎 淳, 安間哲史: 視野の時間特性の臨床的評価。(4) 上下視野における非線形性。日眼 90: 1557—1563, 1986.
- 5) 安間哲史, 山崎 淳, 山本憲明: 視野の時間特性の臨床的評価。(5) 極早期緑内障における視機能異常の検出。日眼 91: 277—285, 1987.
- 6) 山本憲明, 安間哲史: 視野の時間特性の臨床的評価。(8) 中心部と傍中心部の加齢の相違について。日眼 投稿中.
- 7) Yasuma T, Miyakawa N, Yamazaki J: Clinical application of time-dependent perimetry. 1. Results in normal subjects. Jpn J Ophthalmol 30: 330—337, 1986.
- 8) Inui T, Mimura O, Kani K: Retinal sensitivity and spatial summation in the foveal and parafoveal regions. J Opt Soc Amer 71: 151—154, 1981.
- 9) Westheimer G: Spatial interaction in the human retina during scotopic vision. J Physiol 181: 881—894, 1965.
- 10) Westheimer G: Spatial interaction in human cone vision. J Physiol 190: 139—154, 1967.
- 11) Dowling JE, Boycott BB: Organization of the primate retina: Electron microscopy. Proc Roy Soc Lond Ser B 166: 80—111, 1966.
- 12) Dowling JE, Werblin FS: Organization of retina of the mudpuppy, *Necturus maculosus*. I. Synaptic structure. J Neurophysiol 32: 315—338, 1969.
- 13) Werblin FS: Lateral interactions at inner plexiform layer of vertebrate retina: Antagonistic responses to change. Science 175: 1008—1010, 1972.
- 14) Werblin FS: Functional organization of a vertebrate retina: Sharpening up in space and intensity. Ann NY Acad Sci 193: 75—85, 1972.
- 15) Enoch JM: Quantitative layer-by-layer perimetry. Invest Ophthalmol Visual Sci 17: 208—257, 1978.
- 16) Enoch JM, Fitzgerald CR, Campos EC: Quantitative layer-by-layer perimetry. New York, Grune and Stratton, Inc, 1981.
- 17) 市川 宏, 安間哲史, 寺崎浩子: 層別量的視野計の試作。(市川 宏教授退官記念誌)。眼臨 79: 1140—1143, 1985.
- 18) Johnson CA, Enoch JM: Human psychophysical analysis of receptive field-like properties. IV. Further examination and specification of the psychophysical transient-like function. Doc Ophthalmol 41: 329—345, 1976.
- 19) Enoch JM, Lazarus J, Johnson CA: Human psychophysical analysis of receptive field-like properties. I. A new transient-like visual response using a moving windmill (Werblin-type) target. Sensory Processes 1: 14—32, 1976.
- 20) Ikeda M: Temporal summation of positive and negative flashes in the visual system. J Opt Soc Amer 55: 1527—1534, 1965.
- 21) Meijer JG, Wildt GJ van der, Brink G van den: Twin-flash response as a function of flash diameter. Vision Res 18: 1111—1116, 1978.
- 22) Ohmi M, Ikeda M: Spatial summation properties on background field and in dark inferred by summation index. J Light Visual Env 6: 83—87, 1982.
- 23) Ikeda M: Temporal impulse response. Vision Res 26: 1431—1440, 1986.
- 24) 御手洗玄洋: 網膜の色覚生理—その神経機構。市川 宏編, 眼科 Mook 16, 東京, 金原出版, 37—50, 1982.
- 25) 市川 宏, 安間哲史: 色覚の生理。市川 宏編, 新臨床眼科全書, 第2巻A, 眼機能学1, 東京, 金原出版, 252—299, 1985.
- 26) 横山 実: 色覚の電気生理。市川 宏編, 新臨床眼科全書, 第2巻A, 眼機能学1, 東京, 金原出版, 299—322, 1985.

- 27) **Cleland BG, Levick WR, Sanderson KJ**: Properties of sustained and transient ganglion cells in the cat retina. *J Physiol* 228: 649—680, 1973.
- 28) **King-Smith PE, Kulikowski JJ**: Pattern and flicker detection analysed by subthreshold summation. *J Physiol* 249: 519—548, 1975.
- 29) **Ikeda H, Wright MJ**: Receptive field organization of 'sustained' and 'transient' retinal ganglion cells which subserve different functional roles. *J Physiol* 227: 769—800, 1972.
- 30) **Hickey TL, Winters RW, Pollack JG**: Center-surround interactions in two types of on-center retinal ganglion cells in the cat. *Vision Res* 13: 1511—1526, 1973.
- 31) **Tolhurst DJ**: Sustained and transient channels in human vision. *Vision Res* 15: 1151—1155, 1975.
- 32) **Tolhurst DJ**: Separate channels for the analysis of the shape and the movement of a moving visual stimulus. *J Physiol* 231: 385—402, 1973.
- 33) **Kulikowski JJ, Tolhurst DJ**: Psychophysical evidence for sustained and transient detectors in human vision. *J Physiol* 232: 149—162, 1973.
- 34) **Werblin FS**: Control of retinal sensitivity II. Lateral interactions at the outer plexiform layer. *J Gen Physiol* 63: 52—87, 1974.
- 35) **Werblin FS, Copenhagen DR**: Control of retinal sensitivity III. Lateral interactions at the inner plexiform layer. *J Gen Physiol* 63: 88—110, 1974.
- 36) **Stone J**: Parallel processing in the visual system. The classification of retinal ganglion cells and its impact on the neurobiology of vision. New York, Plenum Press, 1983.
- 37) **Singer W, Bedworth N**: Inhibitory interaction between X and Y units in the cat lateral geniculate nucleus. *Brain Res* 49: 291—307, 1973.
- 38) **Grunau MW von**: Interaction between sustained and transient channels: from inhibits motion in the human visual system. *Vision Res* 18: 197—201, 1978.
- 39) **Breitmeyer BG**: Disinhibition in metacontrast masking of vernier acuity targets: sustained channels inhibit transient channels. *Vision Res* 18: 1401—1405, 1978.
- 40) **Breitmeyer BG**: Metacontrast with black and white stimuli: Evidence for inhibition of on- and off-sustained activity by either on- or off- transient activity. *Vision Res* 18: 1443—1448, 1978.

(第91回日眼総会原著)