

低時間周波数領域における視覚系の非線形性

——減分プローブを用いたマスキング法による検討——

滝 浦 孝 之

(受付 2006年10月10日)

Ives (1922a, 1922b) によるフリッカー融合の研究, また de Lange (1952, 1954, 1958) によるフリッカーに対する時間的コントラスト感受性 (以下コントラスト感受性) の測定以降, 周期的刺激における輝度の変化を検出する視覚系のメカニズムの特性が次々と明らかにされてきた。またそれとともに, これら初期の研究において見出された知見も繰り返し確かめられており, それらの知見は視覚の時間的応答特性の分析を行う際の重要な基礎となっている。

このような初期の研究での知見のうち, 最も大きな意義を有するものは, de Lange (1958) と Kelly (1961) の正弦波フリッカーに対するコントラスト感受性に関するものであると思われる。彼らは様々な周波数の正弦波フリッカーの閾振幅を測定し, コントラスト感受性曲線あるいは時間的変調感受性曲線として今日知られるグラフを得た。その結果, フリッカーの平均輝度が低ければ, フリッカーの周波数が増加するにつれ視覚系のコントラスト感受性は低下するが, 平均輝度が高ければ, 視覚系のコントラスト感受性は中程度の周波数域で最大となり, その前後で低下することを見出した。この結果は, 目の順応水準が低ければ, 視覚系はローパス特性を持ち, 順応水準が高ければバンドパス特性を帯びることを示すものと理解することができる。これは後に多重チャンネルモデルにより, 順応水準が低ければ刺激の低時間周波数成分に選択的に応答する視覚系内の経路群の感受性が相対的に高まり, 順応水準が高ければ中周波数成分に選択的に応答を示す経路群の相対感受性が上昇することを示すものと解釈された。また同様に正弦波フリッカーに対するコントラスト感受性の測定を行った Kelly (1961) は, フリッカーの平均輝度が極端に低くなければ, コントラスト感受性は高時間周波数領域では平均輝度に依存せず, 低周波数領域では平均輝度にはほぼ比例する (すなわち, 閾振幅での輝度増分または輝度減分と平均輝度との間に Weber-Fechner の法則が近似的に成立する) ことを示した。この結果は, 閾における視覚系の応答特性は, 高時間周波数領域では線形であるが, 低時間周波数では非線形となると表現することができる。線形性を示す現象に対しては, 線形システム理論という数学的な分析が可能となるため, 時間・空間の両次元において, その後の視覚研究では, 高周波数領域において観察される現象が多く扱われるようになり, 刺激の高周波数成分に感受性の高い経路の応答特性が

かなり明らかにされてきている。一方で、低周波数領域に感受性の高い経路の特性に関しては、線形システム理論が適用困難という事情もあり、いまだ不明な点も多い。低時間周波数フリッカーに対するコントラスト感受性においてみられる非線形性の原因も明らかではなかった。

フリッカー刺激に正弦波を用いる限り、この低時間周波数領域におけるコントラスト感受性に表れる視覚系の非線形性の解明は容易ではない。しかし、フリッカーの時間的波形を操作した研究により、この問題の少なくとも一部が解決された。

Maruyama (1976) は、矩形波、正弦波、三角波、上昇鋸歯状波、下降鋸歯状波¹⁾の5種類の時間的波形を持つフリッカーに対するコントラスト感受性を測定した。その結果、10 Hz以上の周波数域では、刺激のフーリエ基本波成分の閾振幅は時間的波形にかかわらず一定であったが、それより低い周波数領域では、コントラスト感受性が時間的波形により異なった。この場合、互いにフーリエ成分の等しい上昇鋸歯状波・下降鋸歯状波の2つの波形でもコントラスト感受性に差がみられ、コントラスト感受性は、5 Hz以下の周波数で下降鋸歯状波フリッカーよりも上昇鋸歯状波フリッカーの方で高くなり、2 Hzで矩形波フリッカーと上昇鋸歯状波フリッカーに対して等しくなった。この、超低周波数領域では急激な立ち下がりやを有する刺激に対するコントラスト感受性が立ち上がりの急激な刺激に対するそ上回るという結果は、Bowen, Pokorny, & Smith (1989), Bowen, Pokorny, Smith, & Fowler (1992), DeMarco, Smith, & Pokorny (1994), Frumkes, Lange, Denny, & Beczkowska (1992), Kremers, Lee, Pokorny, & Smith (1993), 滝浦 (2000, 2001)によっても確認されている。Maruyama (1976)はこの結果から、低周波数フリッカーに対するコントラスト感受性は、主として視覚系内のオフ経路の応答の大きさにより決定されると推測した。

オン経路とオフ経路の応答を心理物理学的に記録することを可能にすると考えられている方法にマスクング法がある(滝浦, 2005)。滝浦・高橋・丸山(1994)は、2 Hzの上昇鋸歯状波フリッカーと下降鋸歯状波フリッカーに対するマスクング関数を求めた。その結果、フリッカーの振幅が大きい場合には、下降鋸歯状波フリッカーでは輝度の急激な増加に対してマスクング関数上にオーバーシュートが、また上昇鋸歯状波では輝度の急激な減少に対してマスクング関数にオーバーシュートがみられた。同様の結果はMaruyama & Takahashi (1977)によっても報告されている。一方、フリッカーの振幅が閾近レベルでは、下降鋸歯状波フリッカーに対するマスクング関数のオーバーシュートは消失したが、上昇鋸歯状波に対しては明らかなオーバーシュートが認められた。

1) rapid-on sawtooth と rapid-off sawtooth の定訳がないため、本稿ではこれらを下降鋸歯状波と上昇鋸歯状波とそれぞれ表記した。

持続時間の長い下降鋸歯状波に対しては、オン経路の応答が優勢となり、持続時間の長い上昇鋸歯状波に対してはオフ経路の応答が支配的となると考えられており (Russel & Wheeler, 1983; Stromeyer, Zeevi, & Klein, 1979), またこの考えは神経生理学的にも支持される (Frumkes & Wu, 1990)。従って、この滝浦他 (1994) の結果は、時間周波数の低い刺激に対する視覚系の感受性がオフ経路の応答により決定されるということ、心理物理学的に直接示したものと考えることができる。Takiura (1992) と滝浦他 (1994) はさらに、閾レベルの強度で持続時間が 100 ms 以上の単発矩形波刺激に対しても、輝度の急激な増加時のマスキング関数にはオーバーシュートは認められないが、輝度の急激な減少に対しては、マスキング関数上にオーバーシュートが現れることを見出し、この現象が周期的刺激に特有のものでないことを示した。

しかしこれらのマスキング実験でプローブとして使用された刺激は、全て増分光であった。この場合、マスクの立ち下がりに対するオフ応答は、プローブに対するオン応答との間で生じた複雑なオン経路-オフ経路間相互作用の結果としてマスキング関数の上にとらえられたと考えられ、より単純なオン経路内でのオン-オン間相互作用を通じて記録される、急激な立ち上がりに対する応答との比較は適切でない可能性がある。また DeMarco, Hughes, & Purkiss (2000), Snippe, Poot, & van Hateren (1998), 高橋 (1976a), Takiura (2004), Wolfson & Graham (2001) は、プローブとマスクのコントラスト極性の関係がマスキング関数に影響することを報告している。従って滝浦他 (1994) の結果は、増分プローブとともに減分プローブも用いた実験により確認される必要がある。

目 的

本研究の第一の目的は、急激な立ち上がりと緩やかな立ち下がりとを有する下降鋸歯状波フリッカーと、緩やかな立ち上がりと急激な立ち下がりとを有する上昇鋸歯状波フリッカーに対するコントラスト感受性曲線を求め、非常に低い周波数では後者に対するコントラスト感受性が前者に対するものを上回るという Maruyama (1976) の知見を確認することであった。また第二の目的は、増分光と減分光をプローブとして、閾近傍コントラストでのこれら2種類のフリッカーに対するマスキング関数を求め、非常に低い周波数では下降鋸歯状波フリッカーに対するマスキング関数のピークは消失するが、上昇鋸歯状波フリッカーに対するマスキング関数のピークは残存するという滝浦他 (1994) の実験結果を減分プローブを用いて確認することであった。

方 法

実験参加者 矯正視力の正常な成人男子 2 名が実験に参加した。

装置と刺激 刺激の提示には、緑色 LED (SHARP LE9560E, 主波長 565 nm, 半値幅 12 nm) を光源とする 2 チャネルのマックスウェル視光学系が用いられた。

上昇・下降鋸歯状波フリッカー刺激は直径 1.72° のディスク光であり、その平均網膜照度は 578.4 td (184.2 cd/m^2) であった。フリッカーは 5000 ms の間提示され、その前後では 1.72° , 578.4 td の順応野が提示された。フリッカーの包絡線は、立ち上がり・立ち下がりとも 500 ms の台形波であった。

刺激は、パーソナルコンピュータ (NEC PC-9801US) に装着されたパラレル入出力ボード (CONTEC PIO-16/16B (98)) の出力にラダー抵抗を接続して構成された D/A 変換装置の出力を電圧-周波数変換器 (NF 回路設計ブロック FG-113) に入力させ、 $3 \mu\text{s}$ 幅の 20 kHz のパルス列の周波数を変化させることにより作成された。フリッカーの周波数は、コントラスト感受性測定では 2, 4, 10, 20 Hz であり、マスキング関数測定では 2, 4, 10 Hz であった。マスキング関数測定では、フリッカーの変調度は閾上レベルとして 0.22, また閾近傍レベルとしてコントラスト閾の 2 倍の値が採用された。またこの場合、直径 1.43° , 持続時間 12.5 ms の増・減分プローブが、フリッカー提示期間の中央付近でフリッカーに重畳して提示された。本実験では、マスクとしてのフリッカーとプローブとが同じ大きさであり、プローブの検出には空間的な手がかりを用いることができず、プローブの検出はもっぱら時間的なコントラストの差に基づいて行われた。Kitterle & Leguire (1975, 1980) は、本実験と同様にマスクとプローブの輪郭が重なる場合でも、マスキング関数の特徴は、マスクとプローブの輪郭が十分離れている場合のものと本質的に等しいことを報告している。

刺激は単眼中心視で観察された。また、自動運動の発生を防ぎ、順応野およびフリッカーが提示される網膜上の領域の周囲の暗順応した杆体からの抑制性信号の流入 (Coletta & Adams, 1986; Lange, Denny, & Frumkes, 1997) を防ぐため、順応野の周囲に、内径 1.72° , 外径 5.00° , 網膜照度 12.6 td の環状刺激が定常的に提示された。

手続き コントラスト感受性は極限法下降系列により求められた。セッションは 2 つのブロックからなり、上昇鋸歯状波フリッカーと下降鋸歯状波フリッカーに対する測定は異なるブロックで行われた。同一ブロック内では 4 種類の周波数に対する測定が行われた。周波数のテスト順序はランダムであり、1 つの周波数で閾値は 5 個連続して測定された。セッションは実験参加者ごとに 2 回繰り返された。

マスキング関数測定では、プローブの閾値は極限法下降系列により求められた。周波数-

時間的波形プロープの極性の組み合わせごとに異なるセッションが設けられた。1つのセッションでは、予め設定されたプロープの立ち上がりフリッカー周期中の急激な輝度変化との時間差が全てテストされた。時間差のテスト順序はランダムであり、1つの時間差において、プロープの閾値は連続して5個求められた。セッションは2回繰り返された。

結 果

コントラスト感受性 コントラスト感受性曲線を Figure 1 に示す。Figure 1 の横軸はフリッカーの周波数を、また縦軸はコントラスト感受性として、閾での振幅変調度の逆数がそれぞれ示されている。

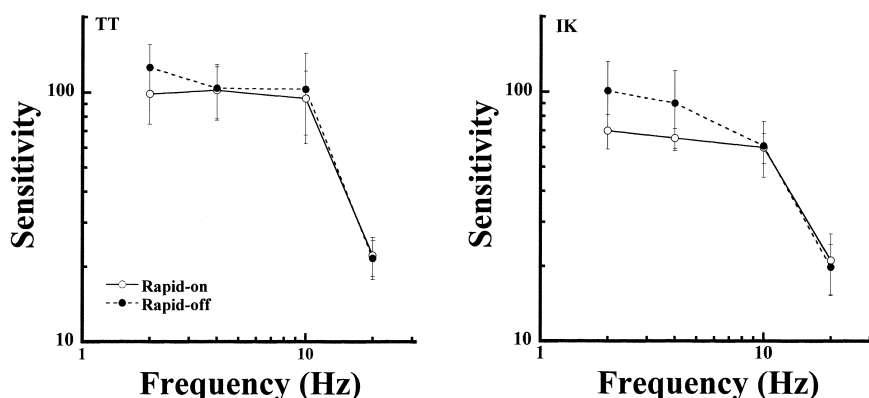


Figure 1. Temporal contrast sensitivity functions for the rapid-on and rapid-off sawteeth. The frequencies of the flicker were 2, 4, 10 and 20 Hz.

コントラスト感受性は4–10 Hz 以下ではほとんど変化しないが、20 Hz では大きく低下し、ローパス特性を示している。高周波数領域では上昇鋸歯状波フリッカーに対するコントラスト感受性と下降鋸歯状波フリッカーに対するコントラスト感受性は等しかったが、TT では2 Hz で、また IK では4 Hz 以下で、上昇鋸歯状波に対するコントラスト感受性の方が高くなった。これらは統計的にも確認された。すなわち、実験参加者ごとの分散分析の結果、TT ではフリッカー周波数の主効果が有意であり ($F(3,27) = 64.49$, $p < .01$)、時間的波形の主効果 ($F(1,9) = 3.74$, $p < .1$) と両者の交互作用 ($F(3,27) = 2.72$, $p < .1$) は有意傾向であった。時間的波形の単純主効果は、フリッカー周波数が2 Hz の場合にのみ有意となった ($F(1,9) = 6.58$, $p < .05$)。また IK では、フリッカー周波数の主効果 ($F(3,27) = 69.26$, $p < .01$)、時間的波形の主効果 ($F(1,9) = 18.32$, $p < .01$)、両者の交互作用 ($F(3,27) = 8.58$, $p < .01$) のいずれも有意であり、時間的波形の単純主効果は、フリッカー周波数が

2 Hz の場合 ($F(1,9) = 14.15$, $p < .01$) と 4 Hz の場合 ($F(1,9) = 9.56$, $p < .05$) に有意であった。

本実験で求められた上昇・下降両鋸歯状波フリッカーに対するコントラスト感受性曲線の形状は、先行知見のものとおおむね一致した (Bowen, Pokorny, & Smith, 1989; Bowen, Pokorny, Smith, & Fowler, 1992; DeMarco, Smith, & Pokorny, 1994; Frumkes, Lange, Denny, & Beczkowska, 1992; Kremers, Lee, Pokorny, & Smith, 1993; Maruyama, 1976; 滝浦, 2000, 2001)。

マスク関数 フリッカーの振幅が閾上レベルの場合のマスク関数を Figure 2 に、また閾近傍レベルの振幅の場合のマスク関数を Figure 3 にそれぞれ示す。これらの図の横軸では、下降鋸歯状波フリッカー一周期中の輝度の急激な上昇とプローブの立ち上がりとの時間差が SOA, また、上昇鋸歯状波フリッカー一周期中の輝度の急激な下降とプローブの立ち上がりとの時間差が ISI とそれぞれ表記されている。また縦軸には通常のマスク関数とは異なり、プローブの閾値の対数値ではなく閾値がそのまま示されている。

フリッカーの振幅が閾上レベルの場合、マスク関数の形状には、フリッカー周波数とプローブの極性による違いが認められた。フリッカー周波数が高ければ、マスク関数の形状はプローブの極性により大きく異なった。しかし上昇鋸歯状波フリッカー、下降鋸歯状波フリッカーのいずれに対しても、フリッカーの輝度が急激に変化する時点付近において、フリッカーの周波数・プローブの極性にかかわらずマスク関数上に明瞭なオーバーシュートが観察された。それぞれの周波数で、オーバーシュートの高さはプローブの極性からほぼ独立であった。

フリッカーの振幅が閾近傍の場合、フリッカー周波数が 2 Hz では、下降鋸歯状波フリッカーに対するマスク関数は、プローブの極性にかかわらずフリッカーの全ての位相に対して平坦となった。一方、上昇鋸歯状波フリッカーでは、プローブの極性にかかわらず、フリッカーの輝度の急激な減少時点付近においてマスク関数上にオーバーシュートが出現した。オーバーシュートの高さはプローブの極性の影響を受けなかった。フリッカーの周波数が 10 Hz では、マスク関数はプローブの極性にかかわらず平坦となり、急激な輝度変化時付近でのオーバーシュートは消失した。

フリッカーの振幅が閾上レベル・閾近傍レベルのいずれにおいても、増分プローブが用いられた場合の本実験の結果は、Maruyama & Takahashi (1977) と滝浦他 (1994) の結果と合致するものであった。

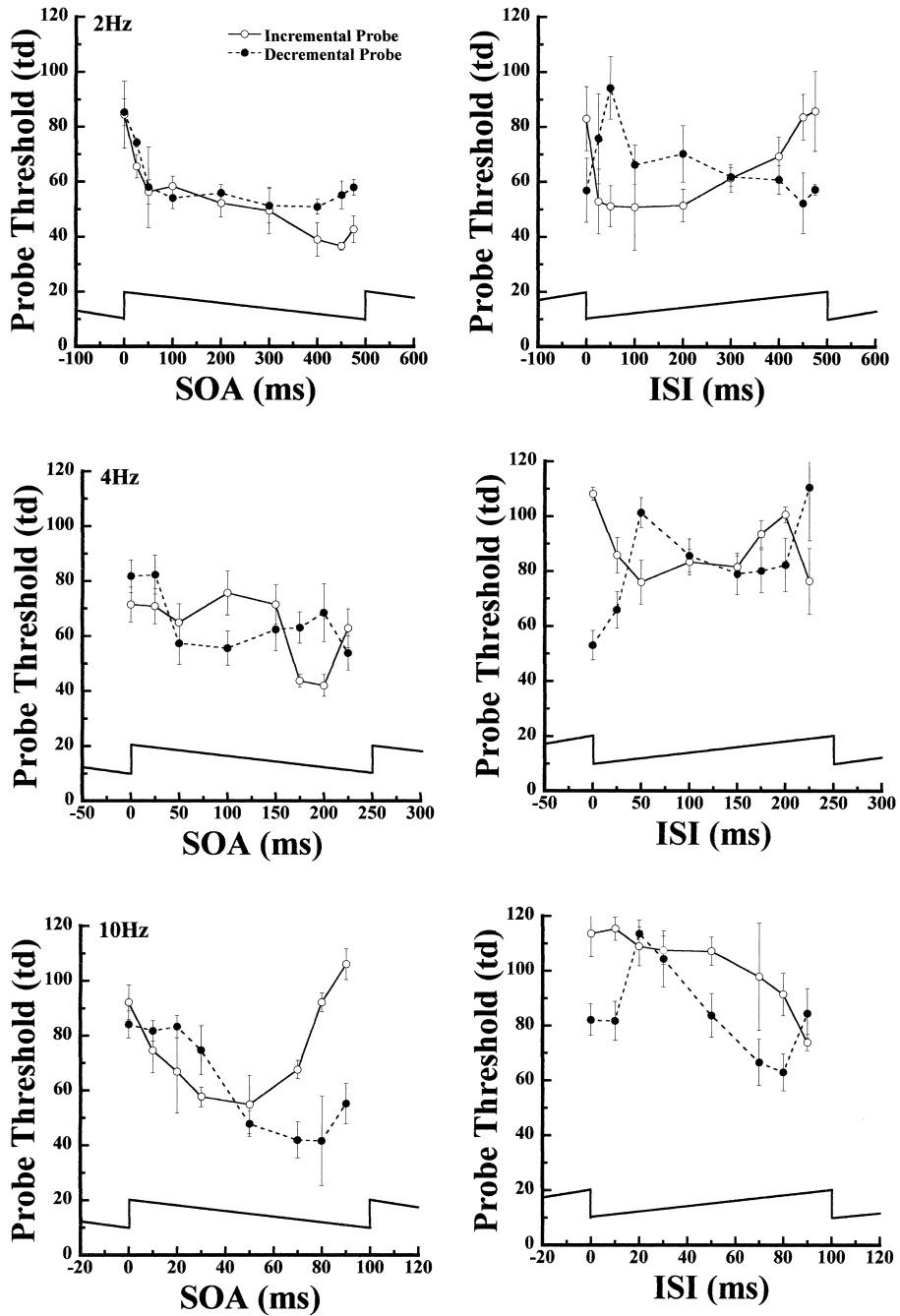


Figure 2. Masking functions for the supraliminal rapid-on and rapid-off sawteeth with the incremental or decremental probe. The left panels give the results for rapid-on sawtooth, and the right ones for rapid-off sawtooth. The top panels show the results at 2 Hz, the middle ones at 4 Hz, and the bottom ones at 10 Hz.

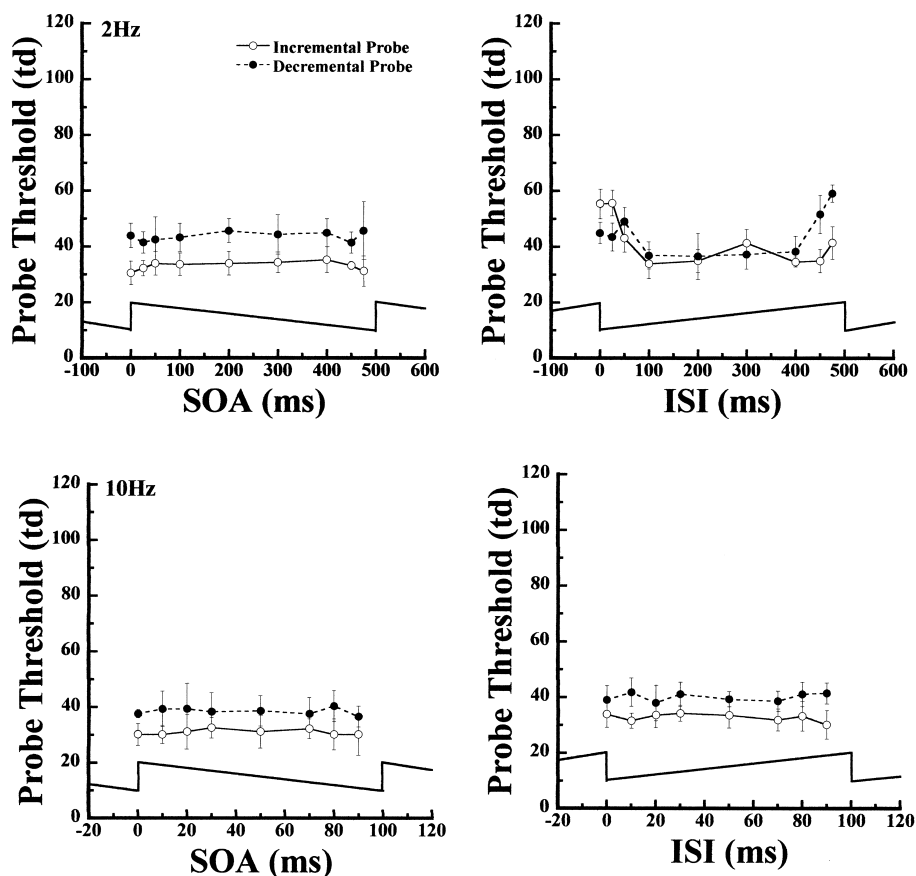


Figure 3. Masking functions for the rapid-on and rapid-off sawteeth with the liminal amplitude with the incremental or decremental probe. The left panels give the results for rapid-on sawtooth, and the right ones for rapid-off sawtooth. The top panels show the results at 2 Hz, and the bottom ones at 10 Hz.

考 察

本研究では、高時間周波数域では、上昇鋸歯状波フリッカーに対するコントラスト感受性と下降鋸歯状波フリッカーに対するコントラスト感受性は等しいが、低時間周波数領域では前者が後者より高くなるという Maruyama (1976) の知見をまず確認した。そしてこの低時間周波数領域における視覚系の非線形性が、この領域での輝度の増減に対するオン経路の感度とオフ経路の感度の非対称性に起因するものであることを、増・減分プローブを用いたマスキング法により心理物理学的に明らかにした。この知見は、増分プローブを用いたマスキング法を用いた滝浦他 (1994) の結論を支持するものだった。またフリッカーが閾近傍振幅

の場合に、マスキング関数の形状がプローブの極性からほぼ独立であったという事実は、オン経路とオフ経路という2つの視覚系路において、閾近傍レベルの2つの刺激に対する応答の相互作用の大きさと時間経過は、経路内・経路間でほぼ等しくなることを強く示唆する。経路間相互作用の生理学的基礎としては、例えば相補的側抑制 (Singer & Creutzfeldt, 1970; Singer & Phillips, 1974), すなわちオン経路の受容野とオフ経路の受容野が網膜上で重なり合い、互いに抑制し合っていることなどが考えられる。

一方、閾上振幅でのマスキング関数はプローブの極性により大きく異なった。これは、閾上レベルでは、オン経路とオフ経路の応答の相互作用の大きさと時間経過が、経路内と経路間とで大きく異なっているためと推測される。上昇鋸歯状波に対してはオフ経路が応答し、下降鋸歯状波に対してはオン経路が応答するといわれるが、これは厳密には正しくない。実際には、上昇鋸歯状波に対してはオフ経路が、また下降鋸歯状波に対してはオン経路の感度が他方の経路より相対的に高いにすぎず、いずれの時間的波形の刺激に対しても、一方の経路のみが応答するわけではない。さらに、相補的側抑制により、2つの経路の間には相互抑制が生じる。この場合、オン経路とオフ経路とでは応答の時定数が異なるため、オン経路からオフ経路という方向と、オフ経路からオン経路という方向とでは、抑制の時間的経過が異なる可能性がある。Bornschein (1962) と Enroth-Cugell and Robson (1963) は、ランプ状の輝度変化に対するネコの網膜神経節細胞の応答パターンは、オン中心型細胞とオフ中心型細胞とで相補的ではなく、オフ経路の方が応答の時定数が長いことを報告している。

本実験では、マスキング関数測定において、同様の測定を行った Maruyama & Takahashi (1977) や滝浦他 (1994) に比べ、プローブの閾値の変動が小さかった。これは本実験ではこれらの実験に比べ、フリッカーの平均輝度が高かったことに加え、プローブの持続時間が12.5 ms と比較的長かったためかもしれない。しかし Donchin (1967) と Stecher (1971) は、逆向マスキング事態において、プローブの持続時間はマスキング関数の形状に実質的な影響を与えないことを示している。また高橋 (1976b) は、プローブの持続時間がマスキング関数のピーク位置に若干の影響を与えることを見出したが、その場合でもマスキング関数のオーバーシュート全体がその形状を変えずに時間軸上を移動した。従って本研究で用いられたプローブの持続時間がマスキング関数の形状に対して本質的な影響を与えていた可能性は低いといえる。

引用文献

- Bornschein, H. (1962). Der Einfluß zeitlicher Reizgradienten auf die Impulsaktivität retinaler Neurone der Katze. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, **275**, 478–494.
Bowen, R. W., Pokorny, J., & Smith, V. C. (1989). Sawtooth contrast sensitivity: Decrements have the edge.

- Vision Research*, **29**, 1501–1509.
- Bowen, R. W., Pokorny, J., Smith, V. C., & Fowler, M. A. (1992). Sawtooth contrast sensitivity: effects of mean illuminance and low temporal frequencies. *Vision Research*, **32**, 1239–1247.
- Coletta, N. J., & Adams, A. J. (1986). Spatial extent of rod-cone and cone-rod interactions for flicker detection. *Vision Research*, **26**, 917–925.
- de Lange, H. (1952). Experiments on flicker and some calculations or electrical analogue of the foveal systems. *Physica*, **18**, 935–950.
- de Lange, H. (1954). Relationship between critical flicker-frequency and a set of low-frequency characteristics of the eye. *Journal of the Optical Society of America*, **44**, 380–389.
- de Lange, H. (1958). Research into the dynamic nature of the human fovea → cortex systems with intermittent and modulated light. I. Attenuation characteristics with white and colored light. *Journal of the Optical Society of America*, **48**, 777–784.
- DeMarco, P. J., Jr., Hughes, A., & Purkiss, T. J. (2000). Increment and decrement detection on temporally modulated fields. *Vision Research*, **40**, 1907–1919.
- DeMarco, P. J. Jr., Smith, V. C., & Pokorny, J. (1994). Effect of sawtooth polarity on chromatic and luminance detection. *Visual Neuroscience*, **11**, 491–499.
- Donchin, E. (1967). Retroactive visual masking: effects of test flash duration on the masking interval. *Vision Research*, **7**, 79–87.
- Enroth-Cugell, C., & Jones, R. W. (1963). Responses of cat retinal ganglion cells to exponentially changing light intensities. *Journal of Neurophysiology*, **26**, 894–907.
- Frumkes, T. E., Lange, G., Denny, N., & Beczkowska, I. (1992). Influence of rod adaptation upon cone responses to light offset in humans: I. Results in normal observers. *Visual Neuroscience*, **8**, 83–89.
- Frumkes, T. E., & Wu, S. M. (1990). Independent influences of rod adaptation on cone-mediated responses to light onset and offset in distal retinal neurons. *Journal of Neurophysiology*, **64**, 1043–1054.
- Ives, H. E. (1922a). Critical frequency relations in scotopic vision. *Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments*, **6**, 254–268.
- Ives, H. E. (1922b). A theory of intermittent vision. *Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments*, **6**, 343–361.
- Kelly, D. H. (1961). Visual responses to time-dependent stimuli. I. Amplitude sensitivity measurements. *Journal of the Optical Society of America*, **51**, 422–429.
- Kitterle, F. L., & Leguire, L. E. (1975). The effect of borders and contours on threshold during early dark adaptation. *Vision Research*, **15**, 1217–1224.
- Kitterle, F. L., & Leguire, L. E. (1980). The effect of adapting and test field size upon threshold during early dark adaptation. *Bulletin of the Psychonomic Society*, **16**, 394–396.
- Kremers, J., Lee, B. B., Pokorny, J., & Smith, V. C. (1993). Responses of macaque ganglion cells and human observers to compound periodic waveforms. *Vision Research*, **33**, 1997–2011.
- Lange, G., Denny, N., & Frumkes, T. E. (1997). Suppressive rod-cone interactions: evidence for separate retinal (temporal) and extraretinal (spatial) mechanisms in achromatic vision. *Journal of the Optical Society of America, Series A*, **14**, 2487–2498.
- Maruyama, K. (1976). Stimulus wave form and modulation sensitivity curve. *Tohoku Psychologica Folia*, **35**, 122–1209.
- Maruyama, K., & Takahashi, M. (1977). Wave form of flickering stimulus and visual masking function. *Tohoku Psychologica Folia*, **36**, 120–133.
- Russell, P. W., & Wheeler, T. G. (1983). Scotopic sensitivity to ON and OFF stimulus transients. *Vision Research*, **23**, 525–528.
- Singer, W., & Creutzfeldt, O. D. (1970). Reciprocal lateral inhibition of on- and off-center neurones in the lateral geniculate body of the cat. *Experimental Brain Research*, **10**, 311–330.
- Singer, W., & Phillips, W. A. (1974). Function and interaction of on and off transients in vision. II. Neurophysiology. *Experimental Brain Research*, **19**, 507–521.
- Snippe, H. P., Poot, L., & van Hateren, J. H. (2000). A temporal model for early vision that explains detection

- thresholds for light pulses on flickering backgrounds. *Visual Neuroscience*, **17**, 449–462.
- Stecher, S. (1971). Retroactive masking without spatial transients. *Journal of Experimental Psychology*, **91**, 34–42.
- Stromeyer, C. F. III., Zeevi, Y. Y., & Kline, S. (1979). Response of visual mechanisms to stimulus onsets and offsets. *Journal of the Optical Society of America*, **69**, 1350–1354.
- 高橋 誠 (1976a). Visual responses to time-dependent stimuli 増分閾法, および減分閾法による視覚マスキング 東北心理学研究, **26**, 34–35.
- 高橋 誠 (1976b). 視覚の時間特性と視覚マスキング 東北大学文学部修士論文 (未公開)
- Takiura, T. (1992). On- and off-responses in visual masking functions: effects of intensity and duration of the conditioning flash. *Tohoku Psychologica Folia*, **51**, 10–21.
- 滝浦孝之 (2000). 正負鋸歯状波フリッカーに対するコントラスト感度差 —— 杆体-錐体相互作用による可能性 —— 基礎心理学研究, **19**, 131.
- 滝浦孝之 (2001). 中心視での時間的コントラスト感度に及ぼす杆体-錐体相互作用の効果 —— 視覚マスキング法による検討 —— 日本心理学会第65回大会発表論文集, 108.
- Takiura, T. (2004). Visual response to decremental luminance ramp estimated by the masking technique with the decremental probe. *Tohoku Psychologica Folia*, **63**, 103–111.
- 滝浦孝之 (2005). 一様光によるマスキング —— オン効果, オフ効果に及ぼす刺激諸変数の効果 —— 広島修大論集 人文編, **46-1**, 131–214.
- 滝浦孝之・高橋 誠・丸山欣哉 (1994). 低周波数フリッカー刺激に対する視覚系の非線形応答についての研究 心理学研究, **65**, 190–196.
- Wolfson, S. S., & Graham, N. (2001). Comparing increment and decrement probes in the probed-sinewave paradigm. *Vision Research*, **41**, 1119–1131.

Summary

Nonlinearity for the Human Visual System in the Lower Temporal Frequency Domain

Takayuki Takiura

The temporal contrast sensitivity to a flickering, rapid-off sawtooth waveform is known to be higher than that to a flickering, rapid-on sawtooth with such the lower temporal frequency as 2 Hz. To make the origin of this nonlinearity of the human visual system in the lower frequency domain clear, we obtained the masking curves for the rapid-on and rapid-off sawteeth of the near-threshold amplitude with the incremental or decremental luminance probe. The overshoots appeared in the masking curve at and around the abrupt luminance decrease for the rapid-off sawtooth. The overshoots, however, disappeared for the rapid-on sawtooth at and around the abrupt luminance increase. These results suggest that the human visual sensitivity at low temporal frequencies is determined mainly by the sensitivity of the off-channel.