

〈研究ノート〉

非周期的輝度変化に対する視覚系の 順応の時間的経過

滝 浦 孝 之

(受付 2004年5月10日)

目 的

ヒトの視覚系の初期明・暗順応の時間的経過は、多くマスキング法により心理物理学的に評価されている (Hood, 1998; Hood & Graham, 1998; Poot, Snippe, & van Hateren, 1997)。マスキング法とは、マスクと呼ばれるディスク光の中央部にプローブと呼ばれるディスク光を短時間提示し、その検出閾を求めるという方法である。マスクとプローブの提示時間差の関数としてプローブの閾値の変化を示したグラフをマスキング関数と呼ぶ。マスキング関数は、視野内の輝度の過渡的变化によって視覚系内に生じた急激な感度低下およびそれに続く感度の急速な回復の時間的経過を示す。これは過渡的な輝度変化により惹起された視覚系の応答の時間的経過を示すものと考えられる (Boynton, 1972)。

最近、マスキング法を用いた、周期的な輝度変化すなわちフリッカーに対する視覚系の感度変化の時間的経過に関する報告が多くなされている。フリッカーの波形としては矩形波以外に正弦波や鋸歯状波も用いられており (DeMarco, Hughes, & Purkiss, 2000; Maruyama & Takahashi, 1977; Snippe, Poot, & van Hateren, 2000; Wolfson & Graham, 2001a, 2001b)、視覚系の感度は各波形に特有の時間的経過を示すことが見出されている。すなわち、正弦波フリッカーでは、10 Hz 程度の高周波数領域においては輝度の減少する位相で視覚系の感度が最低となり、数 Hz 程度の低周波数領域では輝度の増加する位相で感度が最低となり、また輝度の減少する位相において二度目の感度低下が生じる場合もある。正鋸歯状波フリッカー、す

なわち輝度が緩やかに増加した後急激に減少するフリッカーでは、視覚系の感度は輝度の増加中に減少し、一度緩やかに回復した後再び減少し、輝度の急激な減少時に最低となり、その後急激に回復する。また負鋸歯状波、すなわち輝度が急激に増加した後緩やかに減少するフリッカーに対する視覚系の感度は、輝度減少開始直前に急激に低下し、輝度減少開始時に最低となり、その後緩やかに回復するという経過をたどる。また矩形波フリッカーでは、視覚系の感度は輝度変化の直前に急激に低下し、輝度変化時付近で最低となり、その後比較的急激に回復することが明らかとなっている。なおプローブは通常増分光であるが、減分光をプローブとして使用した研究により、プローブの極性がマスク関数の形状に及ぼす影響はわずかではあるものの、系統的なものであることが見出されている (Wolfson & Graham, 2000, 2001a, 2001b)。

一方、増・減分ステップや矩形波状の輝度増・減分などの、輝度の急激な非周期的変化に対する視覚系の感度変化の時間的経過は古くから検討されており、周期的な矩形波フリッカーの場合とはほぼ等しいことが明らかとなっている (Boynton, Bush, & Enoch, 1954; Baker, Doran, & Miller, 1959; Poot, Snippe, & van Hateren, 1997; von Wiegand, Hood, & Graham, 1995)。しかし同時に、非周期的な矩形波刺激と周期的なそれとでは、視覚系の感度変化に明らかに異なる点も存在することが見出され (滝浦・高橋・丸山, 1994)、それは主として両刺激条件での網膜の順応水準の差によるものと考えられた。しかし、矩形波以外の波形の非周期的刺激に対する視覚系の感度変化の時間的経過について調べた研究は見当たらず、矩形波以外の時間的波形の刺激において刺激の周期性あるいは反復提示が視覚系の感度の時間的経過にどのような影響を及ぼすかは不明である。本研究では種々の時間的波形の非周期的刺激に対するマスク関数を求めることによりこの問題に関して検討を行った。

方 法

被 験 者

被験者は24歳の成人男子2名であり、ともに矯正視力は正常であった。両者とも心理物理学的測定の実験を経験を有していた。

装 置

刺激の提示には光変調放電管 (Sylvania, R1131C) を光源とする2チャンネルのマックスウェル視光学系が用いられた。順応野は周波数 200 Hz, 持続時間 0.05 ms の電圧パルス列を光変調放電管に印加することにより提示された。従って順応野は物理的には断続光であるが、その周波数は CFF よりはるかに高いため、視覚的にはその時間的平均輝度と等しい輝度の定常光と等価であった (Gilmer, 1937)。マスクはデジタル入出力ボード (I・O データ機器, PIO-3022) の出力にラダー型抵抗を接続して発生させた電圧波形を V/F コンバータ (NF 回路設計ブロック, FG-113) に入力し、200 Hz の搬送波を周波数変調させ、順応野の輝度を一時的に増減させることにより提示された。この場合、マスクの輝度は Talbot-Plateau の法則に従い、パルス列の周波数に比例して変化した。この提示法を用いることにより、光変調放電管の出力の分光組成を有意に変化させずに複雑な波形のマスクを提示することが可能であった。

プローブは 2 ms の電圧パルスを光変調放電管に印加することにより提示された。プローブの輝度は光学系の光路に挿入された車輪型 ND ウェッジにより変化させられた。実験の制御はパーソナルコンピュータ (SHARP, MZ-2000) により行われた。

刺 激

順応野とマスクはともに直径 1.72° のディスク光であり、空間的に重畳して提示された。順応野の網膜照度は 200 td (63.7 cd/m^2) であり、マス

クの頂点網膜照度は 1007 td (320.7 cd/m^2) であった。マスクの時間的波形は、矩形波、正弦波 1 周期相当 ($-90^\circ \leq \theta \leq +270^\circ$, ガウス分布に類似の時間的輝度分布), 正鋸歯状波 (緩やかな立ち上がりと急峻な立ち下がりを含む鋸歯状波), 負鋸歯状波 (立ち上がりが急峻で立ち下がりが緩やかな鋸歯状波) の 4 種類であり, その持続時間は 100 ms と 250 ms であった。プローブは 0.86° , 2 ms のディスク光であり, マスクの立ち上がりと様々な立ち上がり時間差 (SOA) でマスクの中央部に提示された。刺激の観察は右眼中心視で行われた。注視を容易にするために, 順応野を十字に横切る 2 本の細い線分が定常的に提示された。

手 続 き

被験者は 10 分間の暗順応の後, 顎台と額当て, および噛み板により頭部を固定し, 直径 2 mm の人口瞳孔を通して順応野に 5 分間順応した。その後, 様々な SOA でプローブに対する閾値が調整法により測定された。閾値を 1 個求めるたびに, ウェッジはランダムな角度で回転させられた。SOA の設定順序はランダムであった。閾値は 1 つの SOA につき 2 個連続して求められた。マスクとプローブは 3 s に 1 回提示された。

1 つのセッションでは, 1 種類のマスクに対して全ての SOA での測定が行われた。セッションは日を変えて 3 回繰り返された。

結 果

マスクの持続時間が 100 ms の場合の結果を Figure 1 に, また 250 ms の場合の結果を Figure 2 にそれぞれ示す。これらの図では横軸がマスクとプローブの SOA を, 縦軸がプローブの閾値の対数値を示している。

Figure 1 より, マスクの持続時間が 100 ms の場合の結果は下のようによまとめられる。

- (1) 矩形波マスクの場合, SOA が負の領域では, SOA が 0 に近づくにつれグラフは急激に上昇し, 0 ms 付近で最大となり, その後 100 ms まで比

滝浦：非周期的輝度変化に対する視覚系の順応の時間的経過

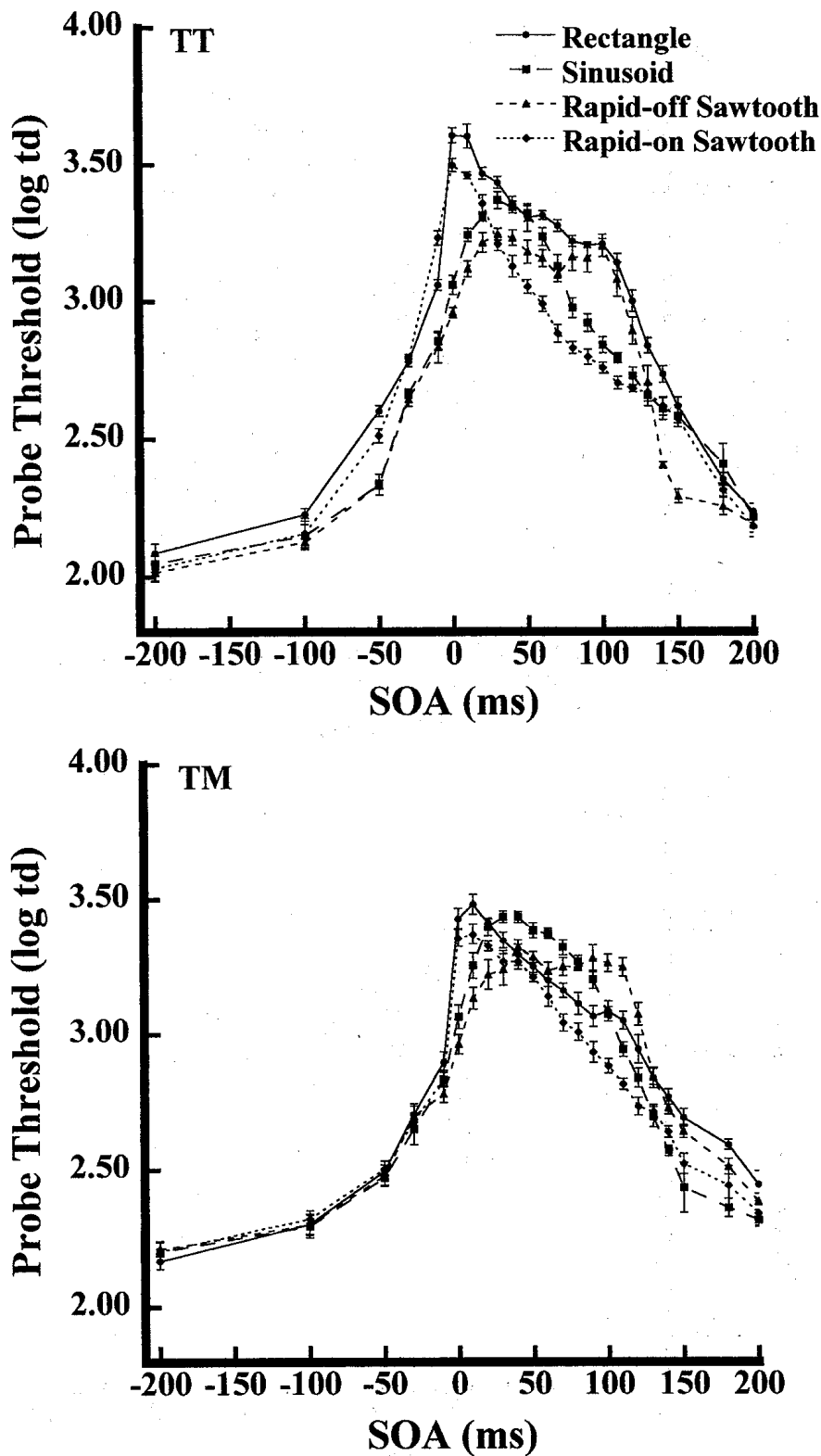


Figure 1. Masking curves for the masks of 100 ms in duration with four temporal luminance waveforms for two observers. Each panel shows the result with rectangular (circles), one cycle sinusoidal (squares), rapid-off sawtooth (triangles) and rapid-on sawtooth (diamonds) masks.

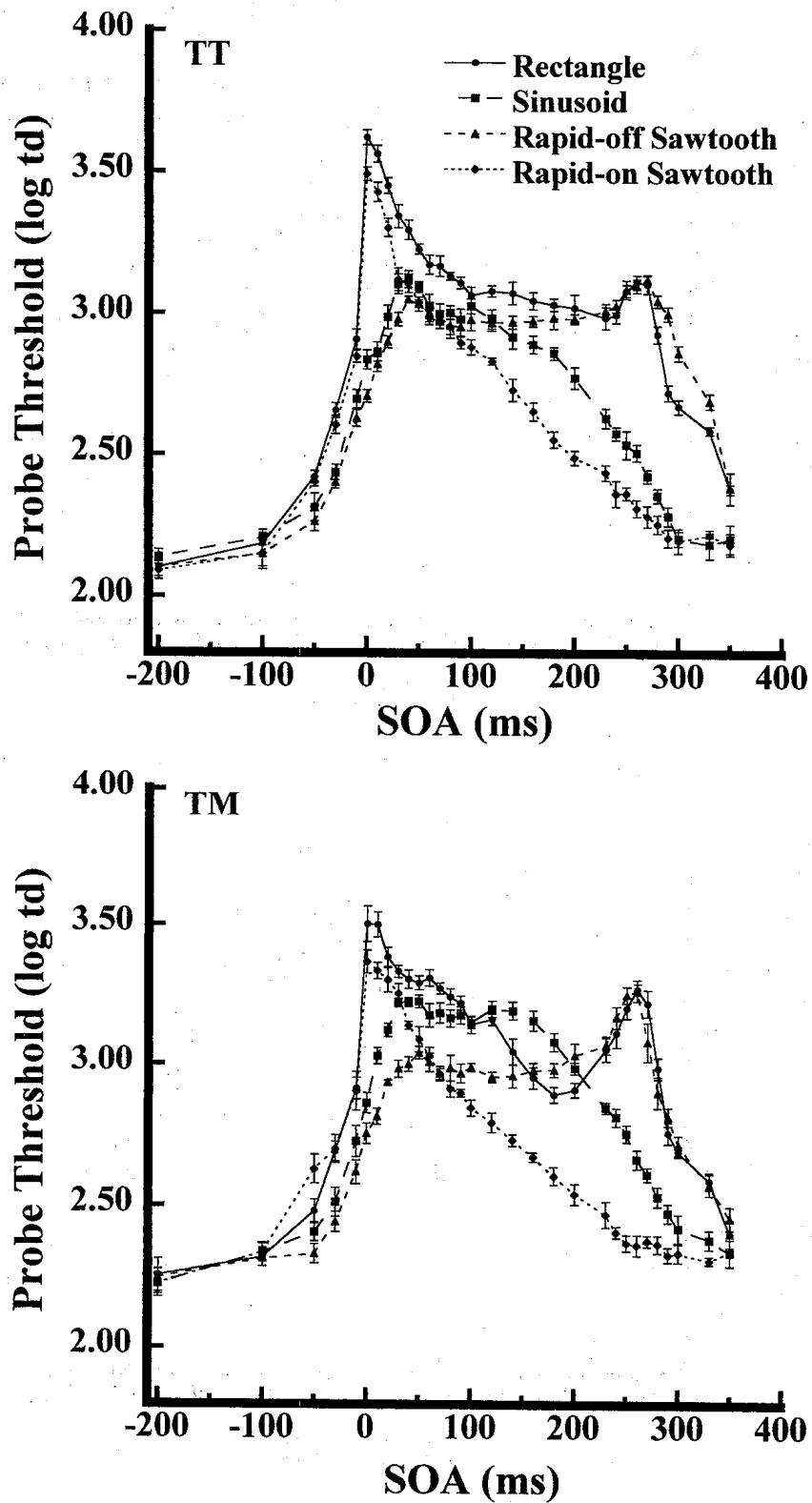


Figure 2. Masking curves for the masks of 250 ms in duration with four temporal luminance waveforms for two observers. Presentation is the same as Figure 1.

較的緩やかに下降し、100 ms 以上で急激に下降した。

- (2) 正弦波1周期相当マスクの場合、グラフは SOA が増加するにつれ急激に上昇し、SOA が 30–40 ms で最大となった後、比較的緩やかに下降した。
- (3) 正鋸歯状波マスクの場合、グラフは SOA が 30–40 ms でピークとなり、60–70 ms まで低下した後 90–100 ms 付近で再びピークを形成し、その後急激に下降した。2つのピークの高さはほぼ等しかった。
- (4) 負鋸歯状波マスクの場合、SOA が 0 ms までグラフは急激に上昇し、その後比較的緩やかに下降した。SOA が 0 ms 以下では閾値の変化は矩形波マスクの場合とよく似ていたが、ピークは矩形波マスクに対するグラフより低かった。

グラフのピークはマスクが矩形波の場合に最も高く、正鋸歯状波の場合に最も低い傾向があった。正弦波1周期相当と負鋸歯状波では、ピーク値の大小は被験者により異なった。

また Figure 2 より、マスクの持続時間が 250 ms の場合の結果は下のよう

- (1) 矩形波マスクの場合、SOA が 0 ms までグラフは急激に上昇し、その後下降するが、180–230 ms 付近で再び上昇に転じ、260 ms 付近でピークを形成した。最初のピークは第2のピークよりも高かった。なお被験者 TM では、SOA = 120 ms 付近で double-flash illusion (Bowen, Mallow, & Harder, 1987) を思わせるような閾上強度のプロープのちらつきが観察された。
- (2) 正弦波1周期相当マスクの場合、2名の被験者のうち1名 (TM) では、SOA が 50 ms と 140 ms 付近にピークを持つ双峰性のグラフとなったが、もう1名 (TT) では第2のピークの出現ははっきりしなかった。
- (3) 正鋸歯状波マスクの場合、SOA が 40–60 ms と 260 ms 付近でグラフにピークが出現した。第2のピークの高さは矩形波マスクの場合と同じであった。また一方の被験者 (TM) では第1のピークよりも第2のピー

クの方が高かったが、もう一方の被験者 (TT) では2つのピークの高さはほぼ等しかった。

- (4) 負鋸歯状波マスクの場合、グラフの特徴はマスクが 100 ms の場合と同じであった。

マスクの持続時間が 100 ms の場合と比較して、矩形波マスクと負鋸歯状波マスクではグラフのピークの高さはほぼ等しかったが、他の波形のマスクでは、250 ms のマスクに対する方がピークが高かった。

本研究では、周期的な輝度変化を有するマスクの場合と同様に、非周期的なマスクでも、その時間的波形が異なれば、刺激提示中の視覚系の応答の感度の時間的経過も異なることが明らかにされた。別な見方をすれば、視覚系は周期的刺激のみならず非周期的刺激に対しても、刺激輝度の時間的な分布に応じた応答を生じさせることが明らかとなった。

考 察

本研究の目的は、刺激の周期性が視覚系の感度の時間的経過にどのような影響を及ぼすか検討することであった。以下では非周期的刺激を用いた本研究での結果を、周期的刺激であるフリッカーを用いた先行研究の結果と比較する。

(1) 矩形波マスク

持続時間が 100 ms と 250 ms の矩形波マスクは、5 Hz と 2 Hz の矩形波フリッカーマスクの明相にそれぞれ等しい。1 - 10 Hz 程度の低周波数矩形波フリッカーを用いた研究では、フリッカーの明相に対するマスク関数が、本研究での非周期的矩形波マスクに対するものとよく似た形状となっている。この場合、刺激の輝度が低ければマスク関数のピークが明相の立ち上がり時より 25 ms 程度遅れて位置するが (Maruyama & Takahashi, 1977; 滝浦・高橋・丸山, 1994), 本研究での刺激事態と比較できるような輝度の高い刺激では、ピークは明相の立ち上がり時に位置している

(Takiura, 1999)。このことから、低周波数領域での矩形波フリッカーに対する視覚系の感度変化の時間的経過は、非周期的矩形波刺激に対するそれから十分に予測し得ると考えられる。このことは、フリッカーの周波数が低ければ、明相に先立つ暗相の持続時間が、輝度の急激な増加により低下した視覚系の感度を回復させるに十分なものであることを示す。10 Hz 以上の矩形波フリッカーでは、輝度にかかわらずマスク関数のピークは明相のほぼ中央に位置し (Boynton, Sturr & Ikeda, 1961), 30 Hz 程度では、マスク関数はフリッカーと同相の正弦波状となる (Boynton, Sturr & Ikeda, 1961; Ikeda & Boynton, 1965)。これは高周波数領域のフリッカーに対する視覚系の応答が線形となるという事実 (de Lange, 1958; Kelly, 1961) に合致しているように思われる。

(2) 正弦波 1 周期相当マスク

持続時間が 100 ms と 250 ms の正弦波 1 周期相当マスクは、それぞれ 10 Hz と 4 Hz の正弦波フリッカーマスクの 1 周期分にそれぞれ等しい。フリッカーの位相が -90° の場合を $SOA = 0$ ms とすると、10 Hz 程度の正弦波フリッカーに対するマスク関数のピークは、 SOA が 30–40 ms に位置し (Hood, Graham, von Wiegand, & Chase, 1997; Maruyama & Takahashi, 1977; Shickman, 1970; Snippe, Poot, & van Hateren, 2000; Wolfson & Graham, 2001a), また一部のデータでは第 2 のピークが 80–100 ms 付近に位置しているようにも思われる (Maruyama & Takahashi, 1977)。第 1 のピークの位置に関しては、本研究での 100 ms の正弦波 1 周期分マスクの場合とほぼ一致しており、これが刺激の周期性の有無あるいは順応水準により有意な影響を受けないことが示されている。本研究ではマスク関数上に第 2 のピークは現れなかったが、フリッカーを用いた実験でマスク関数上に第 2 のピークを認めている研究では、平均輝度が低く (34.1 td), また変調度も小さく (28.6%), 輝度の増加に対する応答の振幅が小さいために (Boynton, Sturr, & Ikeda, 1961), 輝度の減少により惹起さ

れる応答がグラフ上で第2のピークとして分離されたのかもしれない。なお数十 Hz といった高い周波数の正弦波フリッカーに対しては、マスク関数は刺激と同相で正弦波状に変化することが明らかにされている (Snippe, Poot, & van Hateren, 2000; Wu, Burns, Elsner, Eskew, & He, 1997) が、このことも矩形波フリッカーの場合と同様に、高周波数領域での視覚系の線形性を示すものと考えられる。

一方、4 Hz 前後のフリッカーに対するマスク関数のピークは、輝度に関わりなく、ほぼ 80–120 ms と 160–240 ms 付近に位置している (Hood, Graham, von Wiegand, & Chase, 1997; Shickman, 1970; Snippe, Poot, & van Hateren, 2000; Wolfson & Graham, 2001a)。しかし、本研究での持続時間 250 ms の正弦波 1 周期相当マスクに対するマスク関数のピークの出現は、これらフリッカーマスクに対するものと比較して、第1のピークに関してはやや早く (40–60 ms)、逆に第2のピークに関してはやや遅い (260 ms 付近) 傾向があった。第1のピーク位置の違いは、両刺激条件での順応水準の違いにもとづく単純な説明は困難であるが、第2のピーク位置の違いについては、順応水準の違いを考えることで説明できるかもしれない。すなわち、フリッカーの場合、非周期的刺激の場合よりも第2のピークの出現が早いのは、刺激の反復提示により網膜の順応水準が上がり、応答の時間的経過が速くなり、輝度の減少に対する応答が輝度の増加に対する応答から短い時間間隔で分離されたためとかもしれない。

以上から、矩形波動的な輝度変化の場合と異なり、正弦波状の輝度変化では、フリッカーにより生じた視覚系の感度変化を非周期的刺激により生じた感度変化に基づいて予測することは困難であると言わざるを得ない。順応水準の上昇以外の、刺激の周期性あるいは刺激の反復提示に特有の効果が、両刺激条件での結果に差異を生じさせているものと推測される。

(3) 鋸歯状波マスク

10 Hz の鋸歯状波フリッカーに対するマスク関数を求めた研究には

Maruyama & Takahashi (1977) がある。彼らのグラフは変動がかなり大きい。正鋸歯状波フリッカーでは 5-10 ms 付近と 60-70 ms 付近とに、また負鋸歯状波では 10-20 ms 付近と 60-80 ms 近辺とにそれぞれピークが位置しているように思われる。第 1 のピークと第 2 のピークの大小は被験者間で異なっている。Takahashi & Maruyama (1977) のブランク・フリック実験の結果から、正鋸歯状波フリッカーでのグラフの第 1 のピークは輝度の減少に、また第 2 のピークは輝度の上昇により惹起された応答にそれぞれ対応し、負鋸歯状波フリッカーではこの逆となると判断される。従って本研究での非周期的正鋸歯状波マスクに対するマスキング関数の第 1 のピークと第 2 のピークは、正鋸歯状波フリッカーに対するマスキング関数の第 2 のピークと第 1 のピークにそれぞれ対応する。

10 Hz フリッカーに対するマスキング関数のピークは、本研究での持続時間 100 ms の非周期的刺激に対するそれより 30 ms 程度早かった。矩形波フリッカーの輝度が低ければ、輝度が高い場合に比べマスキング関数のピークが 25 ms 程度遅延することと、輝度が高ければフリッカーと非周期的刺激とでマスキング関数のピーク位置が等しいことを考えれば、このピーク位置の違いは理解可能である。また負鋸歯状波フリッカーで観察された第 2 のピークは、輝度の低い刺激の場合に特有のものである可能性がある。すなわち、刺激の輝度が高ければ、輝度の急激な増加により引き起こされた感度低下により、輝度の緩やかな減少により生じた感度低下がグラフ上覆い隠されてしまうのかもしれない。Matsumura (1976) と Takiura (2002, 2003) は、輝度の緩やかな減少により惹起された感度低下は、輝度の急激かつ大幅な増加により生じた感度低下よりもはるかに小さいことを報告している。

持続時間 250 ms の非周期的鋸歯状波マスクに対するマスキング関数と比較可能な 4 Hz 程度の周波数のフリッカーに対するマスキング関数のデータはなく、2 Hz でのデータが報告されているのみである (Maruyama & Takahashi, 1977; Takahashi & Maruyama, 1977; 滝浦・丸山・高橋, 1994)。

これらの研究では、正鋸歯状波フリッカーに対するマスク関数は 25 ms と 200-350 ms 付近にピークを持ち、また負鋸歯状波フリッカーでは 25 ms 近辺にマスク関数のピークが位置していた。10 Hz の鋸歯状波フリッカーの場合と同様に、この場合も正鋸歯状波フリッカーマスクに対するマスク関数の第 1 のピークと第 2 のピークは、非周期的正鋸歯状波マスクの場合の第 2 のピークと第 1 のピークにそれぞれ対応する。正鋸歯状波フリッカーマスクに対する第 1 のピークと負鋸歯状波フリッカーマスクに対するピークは、低輝度・小振幅の刺激では、高輝度・大振幅の刺激に比べ、マスク関数のピークが 25 ms 程度遅延するという矩形波フリッカーでの結果を考えると、本研究での 250 ms の非周期的負鋸歯状波マスクに対するピーク位置と 2 Hz の負鋸歯状波マスクに対するピーク位置はよく似ているといえる。また同様に 250 ms の非周期的正鋸歯状波マスクに対するマスク関数の第 2 のピークと、2 Hz の正鋸歯状波フリッカーに対する第 1 のピークの位置も類似している。しかし正鋸歯状波フリッカーに対する第 2 のピークは、同じ波形の非周期的刺激に対する第 1 のピークに比べ、およそ 50-100 ms も遅れて現れており、刺激の持続時間の違いを考えると比較には限界がある。詳細な結果の比較を行うためには、フリッカーのデータと直接比較できる非周期的刺激でのデータ、あるいはその逆のデータが必要である。しかし Figure 2 に示された 250 ms の非周期的正鋸歯状波に対するマスク関数では、矩形波フリッカーマスクの場合と同様に 2 つのピークがかなりはっきりと分離されており、矩形波刺激の場合のように、非周期的マスクに対するマスク関数からフリッカーに対するそれをかなりよく予想しうることも期待される。この点は今後の検討課題である。

宗宮 (1967) は、持続時間 500 ms の非周期的な正鋸歯状波刺激と負鋸歯状波刺激とを用いて測定された光覚閾は、それぞれもっぱら輝度の減少に対する応答と輝度の増加に対する応答によって決定されるとの推測を行っている。しかし本実験での結果から示されるように、閾上レベルにおいて

は、数百 ms 程度の持続時間の負鋸歯状波刺激により生じた視覚系の感度の時間的変化は、刺激の輝度の増加に対する応答の時間的経過のみでかなりの程度説明できるものの、正鋸歯状波刺激での感度変化には輝度の増加と減少の両方に対する応答が関与している。

以上のように、10 Hz のフリッカーの提示中における視覚系の感度の時間的変化は、フリッカーと同じ時間的波形を有する非周期的刺激に対する感度変化から予想可能であるが、フリッカー周波数が 4 Hz となると、特に緩やかな輝度変化をする相に関しては、単発刺激に対するデータからは十分に予想できず、フリッカーの場合は、視感度の変化に刺激の反復提示あるいは周期性による順応水準の上昇以外の要因が作用していることが考えられる。

引用文献

- Baker, H. D., Doran, M. D., & Miller, K. E. (1959). Early dark adaptation to dim luminances. *Journal of the Optical Society of America*, 49, 1065-1070.
- Bowen, R. W., Mallow, J. V., & Harder, P. J. (1987). Some properties of the double-flash illusion. *Journal of the Optical Society of America, Series A*, 4, 746-755.
- Boynton, R. M. (1972). Discrimination of homogeneous double pulses of light. In D. Jameson, & L. M. Hurvich (Eds.) *Handbook of sensory physiology. Volume VII/4. Visual psychophysics* (pp. 202-232). New York: Springer.
- Boynton, R. M., Bush, W. R., & Enoch, J. M. (1954). Rapid changes in foveal sensitivity resulting from direct and indirect adapting stimuli. *Journal of the Optical Society of America*, 44, 56-60.
- Boynton, R. M., Sturr, J. F., & Ikeda, M. (1961). Study of flicker by increment threshold technique. *Journal of the Optical Society of America*, 51, 196-201.
- 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.

- Gilmer, T. E. (1937). The integrating power of the eye for short flashes of light. *Journal of the Optical Society of America*, 27, 386-388.
- Hood, D. C. (1998). Lower-level visual processing and models of light adaptation. *Annual Review of Psychology*, 49, 503-535.
- Hood, D. C., & Graham, N. (1998). Threshold fluctuation on temporally modulated backgrounds: a possible physiological explanation based upon a recent computational model. *Visual Neuroscience*, 15, 957-967.
- Hood, D. C., Graham, N., von Wiegand, T. E., & Chase, V. M. (1997). Probed-sine-wave paradigm: a test of models of light-adaptation dynamics. *Vision Research*, 37, 1177-1191.
- Ikeda, M., & Boynton, R. M. (1965). Negative flashes, positive flashes, and flicker examined by increment threshold technique. *Journal of the Optical Society of America*, 55, 560-566.
- Kelly, D. H. (1961). Visual responses to time-dependent stimuli. I. Amplitude sensitivity measurements. *Journal of the Optical Society of America*, 51, 422-429.
- Maruyama, K., & Takahashi, M. (1977). Wave form of flickering stimulus and visual masking function. *Tohoku Psychologica Folia*, 36, 120-133.
- Matsumura, M. (1976). Visual masking by luminance increment and decrement: effects of rise time and decay time. *Tohoku Psychologica Folia*, 35, 104-114.
- Poot, L., Snippe, H. P., & van Hateren, J. H. (1997). Dynamics of adaptation at high luminances: Adaptation is faster after luminance decrements than after luminance increments. *Journal of the Optical Society of America, Series A*, 14, 2499-2508.
- Shickman, G. M. (1970). Visual masking by low-frequency sinusoidally modulated light. *Journal of the Optical Society of America*, 60, 107-117.
- 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.
- 宗宮 保 (1967). 精神物理的方法によるヒトの中心窩の On・Off 反応の測定—光覚閾と CFF で測定された光感性の矛盾の解明— 心理学研究, 67, 1-13.
- (Somiya, T. (1967). Measurements of on- and off-responses in the human fovea by means of psychophysical technique. — An explanation for some contradictions between sensitivities measured in terms of light threshold and of CFF —. *Japanese Journal of Psychology*, 38, 1-13.)
- Takahashi, M., & Maruyama, K. (1977). Visual masking function to flickering

- stimulus in "blank-flick" experiment. *Tohoku Psychologica Folia*, **36**, 134–137.
- Takiura, T. (1999). Brightness enhancement for flicker is due to both flash duration and frequency. *Tohoku Psychologica Folia*, **58**, 78–90.
- Takiura, T. (2002). Dependence of the visual response estimated by the masking technique on the stimulus temporal luminance gradient. I. Effects of the stimulus spatial extent and luminance. *Tohoku Psychologica Folia*, **61**, 29–47.
- Takiura, T. (2003). Dependence of the visual response estimated by the masking technique on the stimulus temporal luminance gradient. II. Effects of the background luminance and direct comparison of the effects between the temporal luminance gradient and the luminance. *Tohoku Psychologica Folia*, **62**, 24–47.
- 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.
- (Takiura, T., Takahashi, M., & Maruyama, K. (1994). A study on nonlinearity of the visual system in response to the flickering stimuli in the low temporal frequency domain. *Japanese Journal of Psychology*, **65**, 190–196.)
- von Wiegand, T. E., Hood, D. C., & Graham, N. (1995). Testing a computational model of light-adaptation dynamics. *Vision Research*, **35**, 3037–3051.
- Wolfson, S. S., & Graham, N. (2000). Exploring the dynamics of light adaptation: the effects of varying the flickering background's duration in the probed-sine-wave paradigm. *Vision Research*, **40**, 2277–2289.
- Wolfson, S. S., & Graham, N. (2001a). Comparing increment and decrement probes in the probed-sinewave paradigm. *Vision Research*, **41**, 1119–1131.
- Wolfson, S. S., & Graham, N. (2001b). Processing in the probed-sinewave paradigm is likely retinal. *Visual Neuroscience*, **18**, 1003–1010.
- Wu, S., Burns, S. A., Elsner, A. E., Eskew, R. T. Jr., He, J. (1997). Rapid sensitivity changes on flickering backgrounds: tests of models of light adaptation. *Journal of the Optical Society of America, Series A*, **14**, 2367–2378.

Summary

Sensitivity changes introduced by the aperiodic luminance change with various waveforms

Takayuki TAKIURA

To test the possibility of prediction for sensitivity change on the flickering background with four kinds of temporal waveform from that yielded by the aperiodical luminance change with the same waveform as the flicker, masking curves were obtained for the aperiodical stimulus with rectangular, one cycle sine ($-90^\circ \leq \theta \leq +270^\circ$), and rapid-off or rapid-on sawtooth waveform of 100 or 250 ms in duration. By the comparison between the masking curve obtained here and those of the studies with flicker, we found that the sensitivity change on the flickering background with the middle frequency as 10 Hz is predictable from the single stimulus data. The prediction was, however, unsuccessful for the lower flicker, especially for the one with the slow phase.