



## サッケードに伴う増分閾分光感度の変化

佐藤 雅之・内川 恵二

東京工業大学総合理工学研究所 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1992年3月9日受付, 1992年4月20日受理)

### Variation of Increment-Threshold Spectral Sensitivity Caused by Saccades

Masayuki SATO and Keiji UCHIKAWA

Department of Intelligence Science, Tokyo Institute of Technology Graduate School, 4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

(Received March 9, 1992; Accepted April 20, 1992)

Spectral sensitivity functions were measured by the increment threshold method during fixation, during saccades and just after saccades in order to clarify the effects of saccades on the luminance and the chromatic responses. We found that the increment threshold values during saccades were greater than those during fixation by 0.2-1 log unit, and that three peaks at about 440, 530 and 600 nm of the spectral sensitivity functions became more prominent during saccades than fixation. These results suggest that the luminance response is more strongly suppressed than the chromatic response during saccades.

#### 1. はじめに

サッケード (saccade, 跳躍眼球運動) に伴い外界の像は網膜上で高速で流れるが, 普通そのような流れた像は知覚されない。サッケード時には視覚系に特別な抑制が働くからであると考えられる。サッケード時の視覚については古くから議論がなされているが, 1960年代以後には心理物理学的手法を用いた定量的研究が数多く行われるようになった<sup>1)</sup>。たとえば, サッケード時には短時間呈示の光点刺激の閾値が固視時に比べ上昇するが, 閾値の上昇はサッケードの数十 ms 前からすでに始まり, サッケードが完了した後までしばらく続くこと<sup>2)</sup>, 閾値の上昇量は条件によって異なり, 背景光の強度やサッケードの大きさに依存することなどが明らかにされている<sup>3,4)</sup>。また, サッケード時には低周波のグレーティングの感度が高周波に比べ相対的に大きく低下することも知られている<sup>5)</sup>。

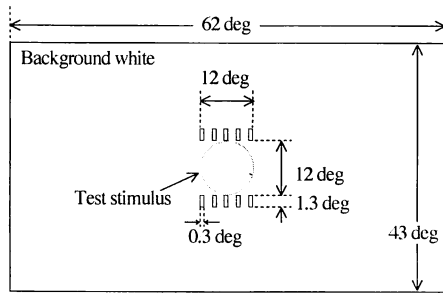
しかし, これまでに, サッケード時の抑制が刺激の色, 輝度応答に等しく作用するか, あるいは選択的に作用するかについての研究は少ない。色, 輝度チャンネルは物体知覚において基本的な経路であることが多くの研究によって示されているので<sup>6)</sup>, サッケード時の抑制の色,

輝度応答への効果を調べることは興味深い。そこで本研究では増分閾値による分光感度関数をサッケード時に測定し, それを固視時のものと比較した。増分閾値が輝度応答によって決められるときには分光感度関数は交照法で求められる比視感度関数  $V(\lambda)$  型となるが, 色応答によって決められるときには, 440, 530 および 600 nm 付近にピークを持つ三つ山型となる<sup>7)</sup>。ここでは, サッケード時と固視時の分光感度関数の形状からそれぞれの条件でテスト刺激の検出に色, 輝度応答がどのように寄与するかを調べ, サッケード時の抑制が刺激の色応答に強く作用するのか, 輝度応答に強く作用するのか, あるいは両方に等しく働くのかを調べることを目的とした。

#### 2. 方法

##### 2.1 刺激および装置

刺激の呈示には 300 W のキセノン・ランプを光源とする 3 光路の光学系を用いた。背景光は 2 光路の白色光でリア・スクリーンを照明することにより作られ, Fig. 1 に示すように, 縦 43 deg, 横 62 deg の長方形, 輝度は 110 cd/m<sup>2</sup>,  $xy$  色度座標は (0.36, 0.36) である。テスト刺激は直径 12 deg の円形で, リア・スクリーンの中央に, 1 光路の単色光を背景光上に重ねて投影する



**Fig. 1** Test and background stimulus fields projected on a rear screen. The background field was white and subtended 43 deg×62 deg. Its luminance was 110 cd/m<sup>2</sup>. A circular test stimulus of 12 deg diameter, shown by a dotted area, was presented at center of the field for 10 ms. Ten small low-contrast markers pasted on the screen were used to show fixation positions.

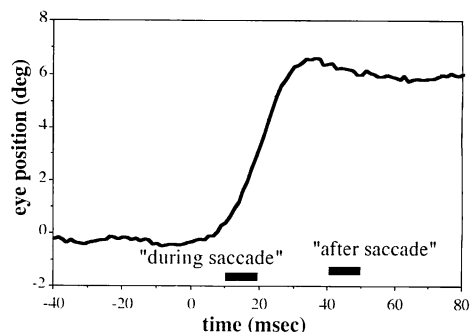
ことにより作られる。この単色光は半値幅約 11 nm の干渉フィルターにより作られる。スクリーン上には固視位置を示すために 1.2% の低コントラストのマークが上下に 5 個ずつ計 10 個はりつけてある。サッケード時に視野の中心を固視点が横切るのを防ぐために、被験者はサッケード前後で、対応している上下 2 個のマークの中間位置を固視するようにした。眼球運動の測定にはリンバス・トラッカー法を用いた<sup>9)</sup>。1 個の赤外 LED と 2 個のフォトトランジスタからなる検出器を被験者の左眼に当てる。フォトトランジスタの出力を差分増幅し、さらにその信号を微分することによって眼球運動の速度が得られる。速度がある閾値を越える点を検出し、その信号をテスト刺激呈示のためのシャッターを制御するタイマーの入力とした。閾値とタイマーの設定を変えることによりサッケードに対するテスト刺激呈示のタイミングを調整することができる。左眼にはおおいをつけ刺激が見えないようにした。被験者は右眼で刺激を観察した。

## 2.2 手続き

“固視中”、“サッケード中”および“サッケード直後”の 3 条件を設けた。1 セッション内では 1 条件の試行を行う。“固視中”のセッションでは、被験者はまず、左側から 3 番目の上下二つの固視マークの中間を固視する。実験者は被験者の準備ができたなら、合図をし、テスト刺激を 10 ms 間呈示する。“サッケード中”のセッションでは、被験者は左から 2 番目の固視マークの中間位置から、4 番目の固視マークの中間位置まで 6 deg のサッケードを行う。**Fig. 2** に示すようにサッケード開始 10 ms 後にテスト刺激を 10 ms 間呈示す

る。実験者はオシロスコープによりサッケードに対してテスト刺激が正しいタイミングで呈示されたことを確認する。“サッケード直後”のセッションでは、被験者は 1 番左の固視マークの中間位置から 3 番目の固視マークの中間位置へサッケードを行う。**Fig. 2** に示すように約 40 ms 続くサッケードが終了した直後にテスト刺激が呈示されるようにタイマーを設定する。サッケードの開始と終了はオシロスコープ上の **Fig. 2** のような波形から各試行ごとに実験者が観察し、確認する。サッケードの継続時間が 45 ms 以上あるいは 35 ms 以下の試行は失敗とし、取り除いた。ただし、失敗はほとんどなかった。テスト刺激は常に 3 番目の固視マークの中間位置が中心となるように呈示されるので、このように固視位置を選ぶことでテスト刺激が常に被験者の網膜のほぼ中央に呈示されるようになる。

閾値は極限法で決めた。テスト刺激の波長を固定し、閾上から約 0.008 log きざみでテスト刺激の強度を下げ、試行を繰り返す。被験者は背景上になんらかの変化を知覚したら“yes”, 知覚しなかったら“no”と応答する。“no”が 2 回続いたときの 2 番目の試行におけるテスト刺激の強度を下降系列の閾値とする。次に閾下から約 0.008 log きざみでテスト刺激の強度を上げていき、上昇系列の閾値を同様に求める。次にテスト刺激の波長を変えて試行を繰り返す。この作業を 418, 441, 461, 479, 504, 526, 542, 558, 567, 580, 597, 621, 642 および 665 nm の 14 波長についてランダムな順序で行い、1 セッションとした。1 条件で 3 セッションずつ実験を行い、上昇 3 回、下降 3 回、計 6 回の試行での平均をとり閾値を決めた。被験者は HK (男, 27 歳), MS (男, 23 歳) の 2 名である。



**Fig. 2** A time course of a saccadic eye movement and timing of test stimulus presentation. Horizontal bars indicate temporal positions and a duration of presenting a test stimulus either in “during saccade” or in “after saccade.”

### 3. 結果と考察

各波長で求めた増分閾値の逆数を取り分光感度関数とした。Fig. 3(a)は被験者 HK, (b)は MS の分光感度関数で、3条件の関数が同時にプロットしてある。白丸が固視中、黒四角がサッケード直後、白四角がサッケード中の条件を示す。Fig. 3 より固視中に比べサッケード中では、対数感度が HK では最大 0.57, 最小 0.15, MS では最大 0.98, 最小 0.27 低下することがわかる。サッケード直後では感度はほとんどの波長で固視中とサッケード中の中間の値を示した。このサッケード中の感度の低下の大きさ、また感度の低下がサッケード後まで持続するということがこれまでの報告とよく一致している<sup>1,2)</sup>。また、両被験者ともに固視中よりもサッケード中の方が分光感度関数の中波長、長波長でのピークが顕著に表れることが示されている。

次に感度の低下の波長依存性について見る。Fig. 4 に白、黒の四角シンボルで固視中と他の条件の対数感度値の差を被験者別に示す。Fig. 4 より感度の低下の大きさは明らかにテスト刺激の波長に依存し、2人の被験者で共通の傾向を示すことがわかる。サッケード中には短波長、長波長よりも 570 nm 付近の中波長領域で感度

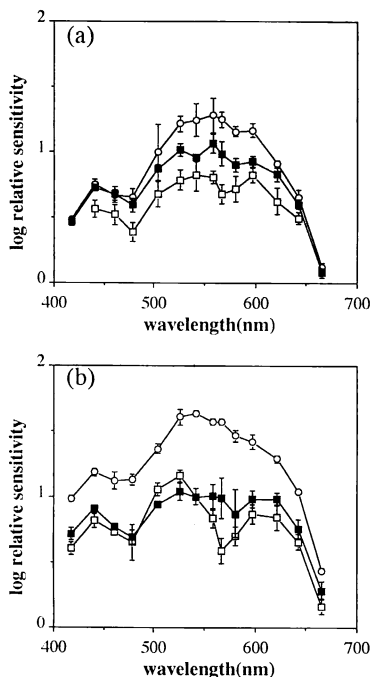


Fig. 3 Spectral sensitivity functions obtained in three experimental conditions. O, during fixation; ■, after saccade; □, during saccade. Vertical bars of each point show standard deviations. (a) Observer HK, (b) Observer MS.

が大きく低下している。これらの差の関数の形状は 480 nm 以上については単波長光の彩度関数とよく類似している<sup>9)</sup>。Fig. 4 下の実線は彩度マッチングによる彩度関数、破線は彩度弁別による彩度関数であるが、どちらも 570 nm で最小値をとり、長波長、短波長側にいくにつれて増大している。ただし、本実験で求めた分光感度関数は 480 nm 以下では条件によらず色応答の特性が反映している形状を示すことから、Fig. 4 上の差の関数と彩度関数との間には違いがでている。このサッケード時の抑制効果の波長依存性は Richards (1969)<sup>10)</sup>の結果と類似している。Richards は直径 11 deg の円形で輝度 3 cd/m<sup>2</sup> の背景光上に一辺 1 deg の正方形の単色光刺激を 2 ms 呈示する条件で増分閾を測定し、本実験と同様に 575 nm で感度低下が最大となることを報告している。しかし、彼の結果は 480 nm 以下でも彩度関数に似た波長依存性を示し、この点では本実験の結果とは異なっている。

以上の結果からテスト刺激の検出においてサッケード時には刺激の色応答の寄与が相対的に大きくなること、すなわち、サッケード時の抑制は刺激の輝度応答に選択的に強く作用することが示唆される。サッケード時の抑制の要因として主に次の三つの効果がこれまでに考えられている<sup>11)</sup>。(a)テスト刺激の網膜像が流れる効果、(b)メタコントラストなどのマスキング効果、(c)眼球駆動信号に伴う高次中枢レベルでの抑制効果であ

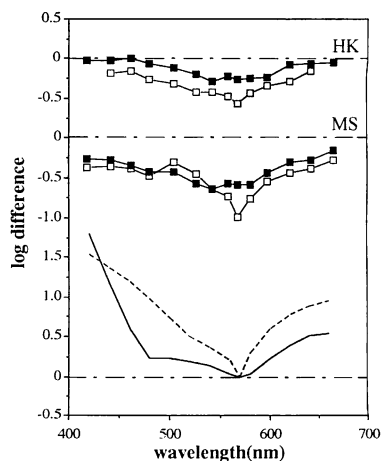


Fig. 4 Log difference of sensitivity values of "after saccade" (■) and "during saccade" (□) from that of "during fixation" for two observers HK and MS. Two curves, shown at the bottom of the figure, indicate saturation functions obtained by two different methods; saturation matching (—) and saturation discrimination (---).<sup>9)</sup>

る。本実験では“サッケード中”の条件ではテスト刺激の網膜像が刺激呈示中に動くので(a)の効果も考えられるが、サッケードの幅の6 deg に対してテスト刺激の直径が12 deg と比較的大きく、またサッケードの継続時間の約40 ms に対してテスト刺激の呈示時間が10 ms と短いため、テスト刺激はサッケード中に直径の8分の1程度ずれるにすぎず、(a)の効果はあまり大きくないと考えられる。さらに、“サッケード直後”の条件では(a)の効果は全くないが感度の低下が見られるということからも(a)だけで現象を説明することはできないことは明らかである。また、スクリーン上のテスト刺激のエッジはややぼやけており、そのことも(a)の効果を弱める方へ働くと考えられる。

次に(b)の効果について考える。サッケード中の視野の動きを模倣して縦43 deg, 横45 deg の比較的大きな背景を15 deg 横へ動かすと、被験者は固視しているにもかかわらず、15 deg のサッケード時と同程度に直径2 deg のテスト刺激に対する感度が低下するという報告がある<sup>3)</sup>。しかし、もしメタコントラストが要因であれば、これまでの研究結果からは輝度応答でなくむしろ色応答が抑制されることが予想され<sup>12)</sup>、本実験結果と矛盾する。この(b)の効果については全視野一様の背景を用いることでメタコントラストを取り除くなどして、今後さらに検討する必要があると考えられる。

(c)の効果は、サッケード時の高次レベルでの抑制が輝度応答に相対的により強く働くというもので、この考えはこれまでの研究結果とも矛盾しないものである。輝度応答は時空間特性にすぐれ<sup>13)</sup>、刺激の形や動きあるいは奥行き知覚には輝度応答が用いられているとされている<sup>14)</sup>。そこで視覚系はサッケードをはきんでサッケード分だけずれた網膜像からの情報を足し合わせ、安定した視野を得るためにも、刺激の輝度応答を用いていると考える。すると、その時邪魔になるサッケード時の流れ像を消す必要が生じ、そのために輝度応答がより強く抑制されるのではないであろうか。このように考えると本研究の結果の意味が理解できる。

#### 4. おわりに

サッケード時と固視時の増分閾値による分光感度関数の変化からサッケード時には輝度応答がより強く抑制されることが示された。サッケード時の抑制とマスキングは本質的に同じものであるという一般の見方があるが、これまでの研究によればマスキングは過渡的(transient)なシステムが持続的(sustained)なシステムを抑制する

現象であると考えられ<sup>12)</sup>、サッケード時の抑制がマスキングであるとするれば、サッケード時にはむしろ持続的な色チャンネルの感度が下がることが予想される。本研究の結果はこの予想に反するものであり、サッケード時の抑制が先に挙げたマスキングの理論だけでは説明がつかないことを示している。本実験ではサッケード中と直後のみの分光感度関数を測定したにとどまっているので、さらに、サッケード前も含めて細かい時間間隔で分光感度関数の変化を調べることににより、ここで得られた結果がマスキングと同じ現象であるのかどうかを検討していくことが今後必要であると考えられる。また、閾値決定の色覚モデルを仮定し、サッケード時の感度低下を色、輝度応答の相対的な強さの変化で定量的に説明するという解析も行いたい。

#### 文 献

- 1) F. C. Volkman: "Human visual suppression," *Vision Res.*, **26** (1986) 1401-1416.
- 2) F. C. Volkman, A. M. L. Schick and L. A. Riggs: "Time course of visual inhibition during voluntary saccades," *J. Opt. Soc. Am.*, **58** (1968) 562-569.
- 3) B. A. Brooks, D. M. Impelman and J. T. Lum: "Influence of background luminance on visual sensitivity during saccadic eye movements," *Exp. Brain Res.*, **40** (1980) 322-329.
- 4) S. B. Stevenson, F. C. Volkman, J. P. Kelly and L. A. Riggs: "Dependence of visual suppression on the amplitudes of saccades and blinks," *Vision Res.*, **26** (1986) 1815-1824.
- 5) F. C. Volkman, L. A. Riggs, K. D. White and R. K. Moore: "Contrast sensitivity during saccadic eye movements," *Vision Res.*, **18** (1978) 1193-1199.
- 6) 内川恵二, 鈴木修二, 池田光男: "主観的輪郭知覚に基づく分光視感効率", *光学*, **19** (1990) 833-837.
- 7) P. E. King-Smith and D. Carden: "Luminance and opponent-color contributions to visual detection and adaptation and to temporal and spatial integration," *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976) 709-717.
- 8) C. B. Blakemore and R. H. S. Carpenter: "A very simple device to measure human eye movements," *J. Physiol.*, **210** (1970) 75-77.
- 9) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P. K. Kaiser: "Equating colors for saturation and brightness: The relationship to luminance," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 1219-1224.
- 10) W. Richards: "Saccadic suppression," *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (1969) 617-623.
- 11) E. Matin: "Saccadic suppression: A review and an analysis," *Psychol. Bull.*, **81** (1974) 899-917.
- 12) B. G. Breitmeyer and L. Ganz: "Implications of sustained and transient channels for theories of visual pattern masking, saccadic suppression, and information processing," *Psychol. Rev.*, **83** (1976) 1-36.
- 13) K. Uchikawa and M. Ikeda: "Temporal integration of chromatic double pulses for detection of equal-luminance wavelength changes," *J. Opt. Soc. Am.*, **3** (1986) 2109-2115.
- 14) M. Livingstone and D. Hubel: "Segregation of form, color, movement, and depth: Anatomy, physiology, and perception," *Science*, **240** (1988) 740-749.