

## 超高速等輝度運動の可視性

村上 郁也\*・川瀬 健太\*\*

\* 東京大学大学院 総合文化研究科  
〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

\*\* 東京大学 教養学部  
〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

### 1. 背景

#### 1.1 はじめに

眼が動いたときだけ見える画像というものは作れるだろうか？ サッカードに関していえば、眼球静止中は一次元画像だが直交方向へのサッカードによって網膜上で二次元画像に展開するような技法が有名である<sup>1)</sup>。それでは、一般的なコンピュータ画面を用いて、眼球静止時は視認できないが滑動性追従眼球運動 (smooth pursuit eye movement; SPEM) が生じたときに知覚されるような画像は、はたして作れるだろうか？

#### 1.2 超高速等輝度運動

このためには、眼球静止時には視認の刺激頂 (見えるための最大閾値) を超えており、眼球運動時には可視範囲に入るような刺激を作ればよい。そこで、臨界ちらつき頻度 (CFF) の低い等輝度刺激の時間変調を用いてみる。輝度変

調の CFF が 50~60 Hz であるのに対し、等輝度刺激の時間変調の CFF は、広範な空間周波数帯域にわたって時間周波数およそ 15 Hz であることが知られている<sup>2)</sup>。したがって、画面上で 25 Hz の時間変調をかければ、眼球静止時には刺激が見えなくなってしまう。そしてこの時間周波数で縞模様を流動させるならば、流動方向と同方向に SPEM を生じさせ、網膜上で時間変調が CFF を下回ったときに、縞模様パターンが可視となるはずである。

25 Hz の変調のかかった流動縞模様は、リフレッシュレート 100 frames/s に追従できる安価な CRT モニタで、4 frames を 1 周期とする変調で実現できる。

#### 1.3 予測

図 1 に、上述の関係を模式的に描いた。刺激は赤緑等輝度で、右方向に時間周波数 25 Hz で常に流動しているものとする。追跡標的を与えたとして、左方向に逆走する SPEM を起こした

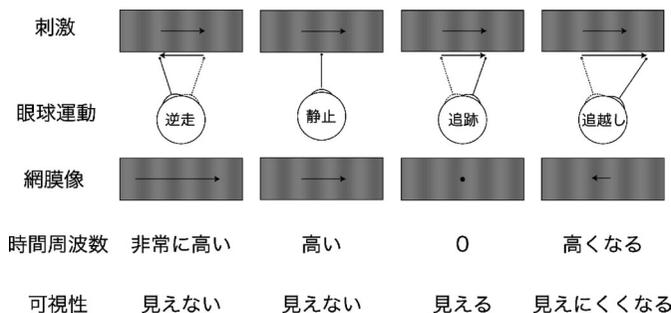


図 1 刺激・SPEM・網膜像・可視性の関係。

ならば、網膜上の時間周波数は25Hzをさらに超え、縞模様は見えない。眼球が静止しているときも、25Hzは等輝度CFFを上回るので、依然として見えない。ところが、右方向にSPEMが生じると、眼球運動速度の上昇に伴い網膜上の時間周波数は直線的に低下し、CFFを下回った時点で可視となる。眼球が縞模様の特徴点を完全追従した特別な場合には、網膜上では刺激が静止するので、完全に可視となる。だが、右方向の眼球運動速度がさらに速くなると、網膜上の時間周波数は再び上昇するので、徐々に見えにくくなるはずである。

実際の知覚がこの関係に従うのかどうかは、過去まったく検討されていない。そこで本研究ではこれらの関係を定量的に調べるため、25Hzで流動する超高速等輝度運動刺激をSPEM中に観察してもらい、評定法を用いてさまざまな眼球運動速度における刺激の可視性を被験者に評価させた。また統制実験においては、眼球固視させた状態で、縞模様をさまざまな速度で流動させ、可視性の評価を行った。

## 2. 方法

### 2.1 被験者

正常な視力もしくは矯正視力をもつ男女4名(22-23歳)が参加した。(内1名についてはSPEM標的速度から実際のSPEMが顕著に逸脱し、速い標的をまったく追従できなかったため、実験の要件を満たさないので除外して、データ解析は3名分の被験者に関して行った。)

### 2.2 装置

暗室内で、コンピュータ(Apple PowerMac G5)で生成した刺激をCRTモニター(22型、三菱電機RDF233H、100frames/s)に呈示した。実験中、ビデオ式アイトラッカー(SR Research EyeLinkII、250samples/s)を用いて眼球運動を計測した。左眼単眼視で、観察距離は52cm。

### 2.3 刺激

CRTモニターのR、G蛍光体を逆相変調し加算した赤緑等輝度(最小運動法<sup>3)</sup>にて被験者毎に較正)で、空間周波数0.7c/degの正弦波縞模

様を縦5.25deg×横44.8degの矩形領域に呈示した。10ms毎に位相を90°ずらすことで、左または右に時間周波数25Hzで運動させた(速度17.5deg/s)。SPEM標的は刺激中心から上方方向に7deg離し、さまざまな速度で左または右に等速運動させた。また統制条件では、標的を固定し、縞模様をさまざまな速度で左または右に等速運動させた。

### 2.4 手続き

被験者はあご台による頭部固定状態で、運動標的を追跡しながら(統制条件では静止標的を固視しながら)縞模様を観察した。標的が画面中央付近に近づくと、縞模様刺激が0.5s呈示された。刺激観察後に被験者に刺激の可視性を9件法(1点:全く見えない、9点:はっきり見えた)で評価させた。各被験者は各観察条件で10試行を繰り返した。

### 2.5 眼球運動速度の解析

SPEM標的の速度にもよるが、実際のSPEMにおける追従ゲインは通常1未満であり、標的より遅いSPEMとキャッチアップ・サッカードとが交互に出現する。このため、全時間の平均速度はSPEM標的速度に匹敵するが、瞬間SPEM速度だけみると通常これを下回る。眼球運動中の視覚パタンの可視性を問題とする本研究においては、真のSPEM期間の眼球運動速度を計算するのが妥当とみなし、サッカード成分を除去した。瞬間速度が刺激呈示中の眼球運動の平均速度 $\pm 3$ 標準偏差の範囲から逸脱している区間中における速度の極大点の時刻 $\pm 20$ msを除外した。その後で当該試行の刺激観察中の眼球運動速度を平均し、対応する網膜上の時間周波数を求めた。可視性の定量化にあたっては、網膜像の時間周波数を3.5Hzごとの区間に区切り、その区間内の評定値の平均を取った。データ数が5以下の区間については信頼性が低いため欠損値として扱った。

統制実験における眼球固視の条件では、これらの操作を行わず、呈示した縞模様の各速度内で評定値の平均を求めた。

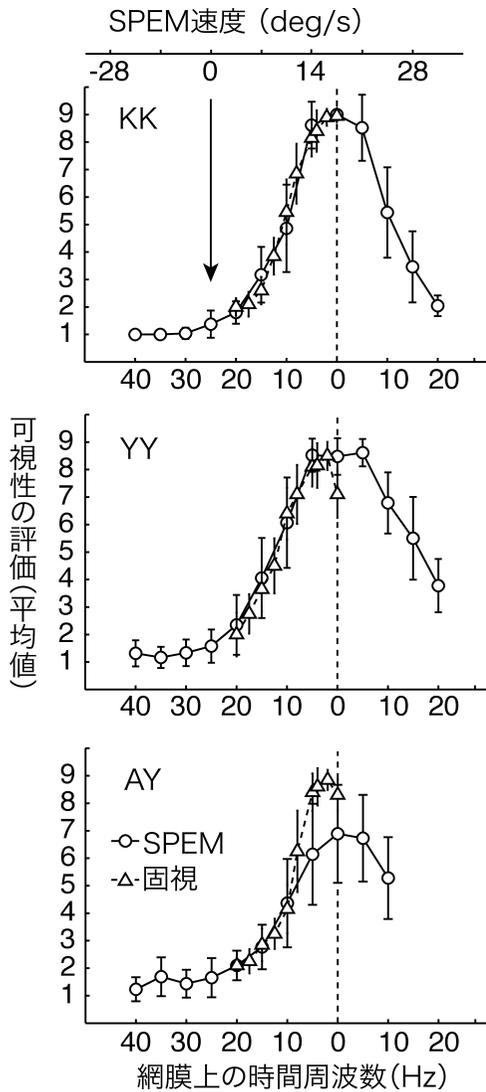


図2 実験結果. 各パネルに被験者別のデータを示す.

### 3. 結 果

図2に結果を示す。まず、SPEMを行いなから25Hzの流動縞模様を観察したときの可視性の平均評定値を○で示した。眼球運動速度を上の方軸に示し、対応する網膜上の時間周波数を下の横軸に示している。わかりやすさのために、SPEM速度が0deg/sの場合を下矢印で、また網膜上の時間周波数が0Hzの場合を破線で表した。

全被験者において、25Hzで運動する等輝度

刺激を固視しながら観察すると、予測通り刺激はほとんど見えない状態にあることがわかる(下矢印)。また、予測通り網膜上の時間周波数が±15Hz以内の範囲で山型となり、0Hz付近でピークを迎える可視性曲線が得られた(破線)。ただし、被験者AYではピーク時の可視性の評価が7程度となっていた。網膜上の時間周波数が可視性におよぼす効果は高度に有意だった(クラスカル・ワリスの検定,  $p \ll 0.001$ )。

次に、統制実験において眼球固視させながらモニタ上でさまざまな速度で流動する縞模様を観察したときの可視性の平均評定値を△で示した。SPEMは生じないので上の横軸はあてはまらず、下の横軸すなわち網膜上の時間周波数(モニタ上の時間周波数に等しい)の関数として、可視性をプロットしている。

全被験者において、時間周波数20Hzではほとんど見えず、周波数の低下に伴い可視性が向上し、0~2Hzでもっとも見えやすいという結果が得られた(クラスカル・ワリスの検定,  $p \ll 0.001$ )。これは、CFE推定に関する時間周波数軸上のコントラスト感度曲線を調べた先行研究からの予測と一致する<sup>1)</sup>。

さらに、SPEMを生じた条件と、眼球固視させた条件との間を比較したとき、網膜上の時間周波数という軸上でのデータの振る舞いがほとんど同じであることがわかる(被験者AYでは若干統制実験データの方が高めだが、SPEM条件でのデータの誤差範囲内ともいえる)。すなわち、眼球運動とモニタ上の変調とのどちらを原因とするかによらず、網膜上の時間周波数に依存して、CFEを下回れば可視性が回復し、0Hz近辺まで低下するに従って可視性が滑らかに向上するといえる。

### 4. 考 察

運動刺激を注意追跡すると何らかの意味でより見えやすくなる<sup>4)</sup>。このことから、網膜上で等価であってもSPEMにより刺激を追従する方が眼球固視しながら刺激を観察する場合よりも見えやすくなることも考えられる。しかし本研

究では、眼球運動の有無で可視性が変化することは認められなかった。したがって、少なくとも被験者が本刺激の可視性を評定する課題においては、能動観察の効果はみられなかった。可視性のすべては、網膜上の時間変調で記述できるのかもしれない。この考えの妥当性は、コントラスト閾測定などで今後詳細に検討することができる。あるいは、内発的注意のかかわる課題成績に関してのみ、SPEMによる能動観察時の方が成績が高いというようなことがあるかもしれない。本研究では赤緑縞の見えやすさを数字で答える簡単な課題を用いたので、注意資源を過大に要するとは考えにくい。これを調べるには別種の実験パラダイムが検討されるべきであろう。

本刺激が興味深いのは、SPEM程度の速度で眼球運動が生じたときにはじめて縞模様ボタンが見えるという点である。これは広い意味での錯視図形として面白いだけでなく、随意・不随意にかかわらず通常は自覚されない眼球運動様態を、縞模様ボタンの可視性という尺度で自覚的にモニタできるという意味で、将来に向けてさまざまな応用可能性が考えられる<sup>5)</sup>。

## 5. 結 論

時間周波数が臨界ちらつき頻度を越えた正弦波縞模様は、眼球運動しないと見えず、完全追従時にもっともはっきり見えることを、心理物理学の実験にて認めた。

## 文 献

- 1) J. Watanabe, H. Ando, T. Maeda and S. Tachi: Gaze-contingent visual presentation based on remote saccade detection. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, **16**, 224-234, 2007.
- 2) 坂田晴夫：視覚の色度時空間周波数特性—色差弁別閾。電子通信学会論文誌, **J63-A**, 855-861, 1980.
- 3) P. Cavanagh, D. I. A. MacLeod and S. M. Anstis: Equiluminance: spatial and temporal factors and the contribution of the blue-sensitive cones. *Journal of the Optical Society of America A*, **4**, 1428-1438, 1987.
- 4) P. Cavanagh: Attention-based motion perception. *Science*, **257**, 1563-1565, 1992.
- 5) 村上郁也：特願, 2006-294056, 2006.