

## 色度および輝度コントラスト刺激が両眼間抑制下の コントラスト感度関数に与える影響

柳澤美衣子・内川恵二

東京工業大学大学院総合理工学研究科 物理情報システム創造専攻

〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259

(受付：2002年3月4日；改訂稿受付：2002年4月18日；受理：2002年4月30日)

### Chromaticity and Luminance Contrast Stimuli Effects Contrast Sensitivities under the Interocular Suppression

Mieko YANAGISAWA and Keiji UCHIKAWA

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8502, Japan

(Received 4 March 2002 ; Received in revised form 18 April 2002 ; Accepted 30 April 2002)

In the interocular suppression an image presented in one eye is suppressed when two images from two eyes are dissimilar. For strabismic observers the suppression continuously occurs due to the misalignment of eye positions. In our previous research, the contrast sensitivity under the interocular suppression was measured for normal and the strabismic observers with luminance grating stimuli. In the 15 deg stimulus size condition, we obtained that contrast sensitivity decreased remarkably for the spatial frequency of 2.5 cpd. In the present research, the contrast sensitivity was measured with chromatic grating stimuli in order to investigate whether similar spatial frequency properties were obtained. When the suppression stimulus was a chromatic grating and the detection stimulus was a luminance grating, the contrast sensitivity showed similar properties to those in our previous results. When both the suppression and the detection stimuli were chromatic gratings, the contrast sensitivity decreased for low spatial frequencies, Whereas the suppression stimulus changed to luminance grating, the contrast sensitivity decreased slightly for all spatial frequencies.

#### 1. はじめに

両眼間抑制とは左右の眼に入る刺激の相関が小さい場合に生じ、一方の刺激が抑制される現象<sup>1)</sup>である。著者らは、両眼間抑制のメカニズムを調べるために、片眼を遮断し、単眼(テスト眼)のみのコントラスト感度を測定する単眼条件と、片眼に輝度変調縦縞 Gabor 刺激を与え、一様な背景刺激を与えられたもう一方の眼(テスト眼)が抑制されるようにした上で、テスト眼に輝度変調横縞 Gabor 刺激を呈示してコントラスト感度を測定する抑制条件を行った<sup>2)</sup>。その結果、

単眼条件と比較すると、コントラスト感度は刺激サイズ視角  $1^\circ$  では、正常者と斜視の被験者ともに空間周波数によらず一様に低下するが、刺激サイズが  $15^\circ$  になると、空間周波数 2.5 cpd 付近で著しく低下するという空間周波数の選択的な傾向がみられた。図1に刺激サイズ  $15^\circ$  のときの単眼条件と抑制条件での log コントラスト感度の差をとったグラフを示す<sup>2)</sup>。シンボルの違いは被験者の違いを表している。抑制刺激の空間周波数は 2.5 cpd (図1 (a)) と 4.0 cpd (図1 (b)) であり、グラフ内に矢印で示されている。感度低下の大きさは異なっているものの空間周波数によらず

どちらも同じ傾向を示していることがわかる。

両眼から入力される視覚情報は視覚系の初期段階で輝度応答と色応答に分離される<sup>3)</sup>。前実験では輝度変調の抑制刺激と輝度変調の検出刺激を用いて両眼間抑制下のコントラスト感度関数を調べたが、色度変調の刺激を用いた場合についても調べる必要がある。そこで本論文では色度 Gabor 刺激を用いて、両眼間抑制下の色度コントラスト感度低下の空間周波数特性を調べることにした。

両眼間抑制下における色と輝度の過去の研究では、Smithらが正常者と斜視の被験者を用いて両眼間抑制下の増分閾値の分光感度を測定している<sup>4,5)</sup>。両眼にそれぞれ縦縞gratingと横縞grating

を与え、縦縞gratingの中心部にテストプローブを呈示した。被験者はテストプローブが見えたかどうかを応答し、抑制されている眼の分光感度と抑制されていない眼の分光感度を比較した。その結果、正常者では波長に依存した感度低下の傾向を示したのに対して、斜視の被験者では、波長に依存した感度低下の傾向はみられず、輝度情報、色情報に関わらず類似した感度低下の傾向を示すことを発見した。このことからSmithらは両被験者の抑制は異なるメカニズムであると示唆した。また、測定した抑制下の分光感度曲線から抑制は輝度でなく色に選択的であり、色応答より輝度応答の方が抑制が弱いと見解を述べている。

本研究でも、両眼間抑制が色と輝度情報に与える影響を調べるために等輝度の色度変調 Gabor 刺激を用いて両眼間抑制下の色度及び輝度のコントラスト感度関数を測定した。実験は抑制刺激、検出刺激ともに色度 Gabor 刺激を用いた時のコントラスト感度を測定した実験1と抑制刺激に輝度 Gabor 刺激、検出刺激に色度 Gabor 刺激を用いた実験2、抑制刺激に色度 Gabor 刺激、検出刺激に輝度 Gabor 刺激を用いた実験3からなっている。

本実験も前実験と同様に、抑制されているテスト眼のコントラスト感度を測定する抑制条件(図2(a))と片眼を遮断し、テスト眼のみのコントラスト感度を測定する単眼条件(図2(b))とを行った。

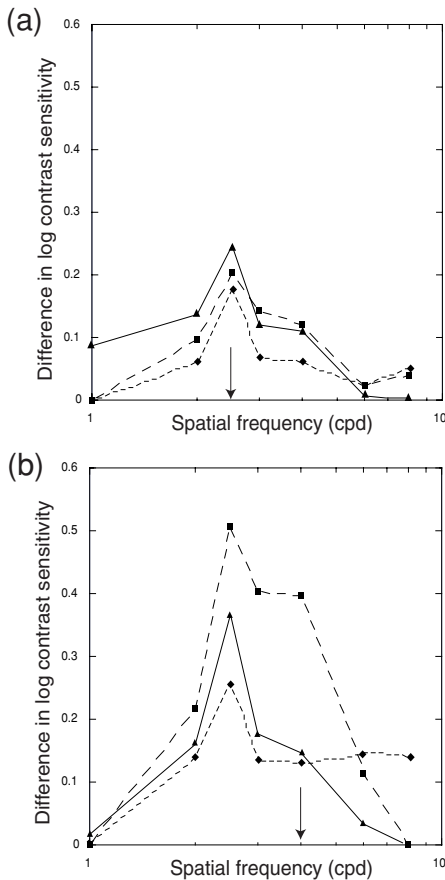


図1 前実験における被験者別の単眼条件と抑制条件のコントラスト感度の差。▲:正常者(TS,左眼), ■:正常者(HM,左眼), ◆:斜視の被験者(MY,斜視眼(右眼)). 矢印は抑制刺激の空間周波数を表している。(a)抑制刺激の空間周波数が2.5 cpdのとき。(b)抑制刺激の空間周波数が4.0 cpdのとき。

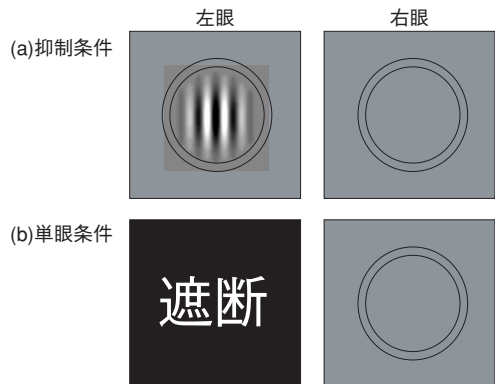


図2 (a)抑制条件と(b)単眼条件。右眼が(a)では抑制され、(b)では抑制されない。

## 2. 実験方法

### 2.1 刺激

実験1の抑制刺激と検出刺激には、等輝度の色度 Gabor 刺激を使用した。色度 Gabor 刺激は等輝度の赤色光 R ( $x=0.622, y=0.341$ )と緑色光 G ( $x=0.275, y=0.611$ )で構成され、サイン波にガウス関数をかけた縞刺激である(図3)。予備実験で交照法により各被験者のRとGの等輝度点を測定し、この等輝度点を用いて等輝度の色度 Gabor 刺激を作製した。色度 Gabor 刺激は刺激を構成しているRとGの成分比がサイン波状に変化する刺激である。このときの色度 Gabor 刺激の輝度は格子縞のどの部分をとっても一定になっている。格子縞の色度がRからGへと一周期内で変化する色度 Gabor 刺激をコントラスト100%とし、RあるいはGのコントラストを色度 Gabor 刺激のコントラストとした。抑制刺激のコントラストは輝度、色度 Gabor ともに100%に設定した。

色度 Gabor 刺激の輝度値は  $17.2 \text{ cd/m}^2$  である。実験2と3で用いた輝度 Gabor 刺激は前述した色度 Gabor 刺激の輝度を平均輝度とした混色光 ( $x=0.512, y=0.431$ )を輝度変調した縞コントラスト刺激である。検出刺激と抑制刺激のサイズはともに視角直径  $15^\circ$  である。検出刺激の空間周波数は 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0 cpd の7種類である。抑制刺激の空間周波数は 2.5 cpd に固定した。

背景刺激は、平均輝度の  $52^\circ \times 40^\circ$  の様な黄

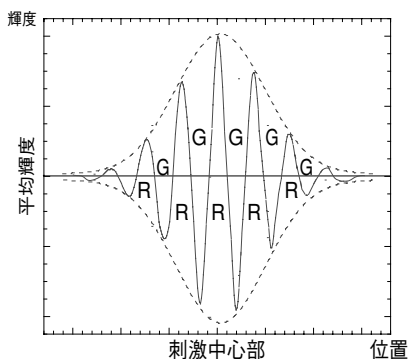


図3 等輝度の色度 Gabor 刺激の構成図。Gは緑、Rは赤を表している。点線はガウス分布を表している。コントラスト100%の場合を例として示す。

色刺激(色度 ( $x=0.512, y=0.431$ ))である。両眼の刺激を融合しやすくするため、2本の円形融合枠(無彩色、幅  $0.1^\circ$ )を用いた。融合枠の内側の円環は Gabor 刺激の外側から  $0.25^\circ$ 、内側と外側の円環は、 $0.15^\circ$  離れている。被験者は左右眼の融合枠が重なるように刺激を見る。

斜視の被験者の場合は眼位ずれに対応させるため、斜視眼に呈示する刺激を、上下左右に動くように設定した。斜視の被験者は、キーボードを用いて左右の刺激が重なるように調節する。またその融合作業の手がかりとして、融合枠の外側に bar (無彩色、幅  $0.15^\circ$ )を呈示してある。Bar の長さは、 $2.3^\circ$  である。斜視の被験者はこの bar 刺激が上下、左右に垂直になるように刺激の位置を調節する。

### 2.2 装置

前実験同様、被験者は暗幕に覆われたブース内で、2台のモニター(Sony GDM-F400)にそれぞれ呈示された刺激を平面鏡を通して左右眼で別々に観察した。実験の制御にはコンピューター(Power Macintosh G3)を使用し、左右眼の網膜上の刺激の対応がずれないように、顎台で頭部を固定した。モニターの解像度は  $1152 \times 870$  ピクセル ( $37.5 \text{ cm} \times 27.5 \text{ cm}$ ) であり、サイズは  $52^\circ \times 40^\circ$  である。視距離は 40 cm である。

### 2.3 手続き

抑制条件では、片眼に抑制刺激である縦縞刺激が呈示され、テスト眼に融合枠が呈示される(図4)。被験者は、縦縞刺激の安定した知覚を確認

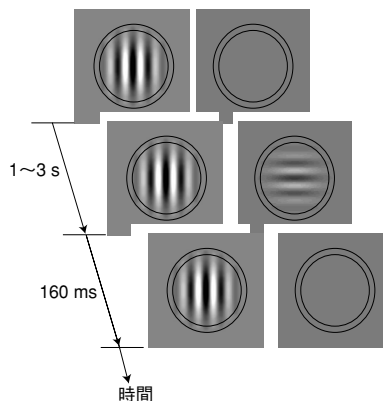


図4 刺激呈示の時間条件。抑制刺激に Gabor 刺激を用いた抑制条件における測定を例として示す。

した上で試行を開始し、その後1～3s間のランダムな間隔において、融合枠内に検出刺激となる横縞刺激が160 ms間呈示される。被験者は横縞刺激が検出できたらボタンで応答する。その後また1～6sのランダムな間隔において次の検出

刺激が呈示される。単眼条件では片眼を遮断し、もう一方の眼のコントラスト感度を測定する。

閾値決定には極限法を用いた。検出刺激のコントラストが徐々に高くなる上昇系列と低くなる下降系列を行い、それを平均して1回のコントラスト閾値とした。1つの空間周波数について20回の試行の平均をとり、この平均コントラスト閾値の逆数をコントラスト感度とした。実験1, 2, 3では単眼条件と抑制条件を1試行間でランダムに行った。

## 2.4 被験者

被験者は正常眼位の3名、YE (男性, 22歳), TS (男性, 23歳) および HM (男性, 26歳) と右眼内斜視の被験者の1名、MY (女性, 25歳) の4名である。実験1, 2, 3では被験者4名が参加し、このうち正常者HMとTSと斜視の被験者MYは抑制刺激、検出刺激ともに輝度Gabor刺激を用いた前実験にも参加している。正常者の3名は両眼とも裸眼視力1.0以上、立体視あり(TNO test)である。斜視の被験者は、非斜視眼における裸眼視力は0.04、矯正視力で1.2(3.0D)の近視と軸170°で-0.75Dの乱視)、斜視眼における裸眼視力は0.07、矯正視力で1.2(6.0D)の近視と軸180°で-1.0Dの乱視)である。斜視角についてはAlternate Prism Cover Test(プリズムを用いて眼位を調べる方法)で測定し、遠方視では約30プリズム、近方視では約35プリズムで、立体視なし(TNO test)である。同時視については視野の中心部の直径約16°(右眼の図形が+8°～+24°)では同時視はできず、交代視がみられた。融像幅は斜視眼が内側24°に偏位していたときを基準に、内側9.4°、外側4.5°である。また4名とも視覚心理物理実験の経験を有する。

## 3. 結果

### 3.1 実験1

検出刺激のlogコントラスト感度関数を図5, 6に示す。図5(a), (b), (c)はそれぞれ正常者HM, TSとYEの左眼の測定結果である。図6(a), (b)はそれぞれ斜視の被験者MYの左眼(非斜視眼)と右眼(斜視眼)の測定結果である。

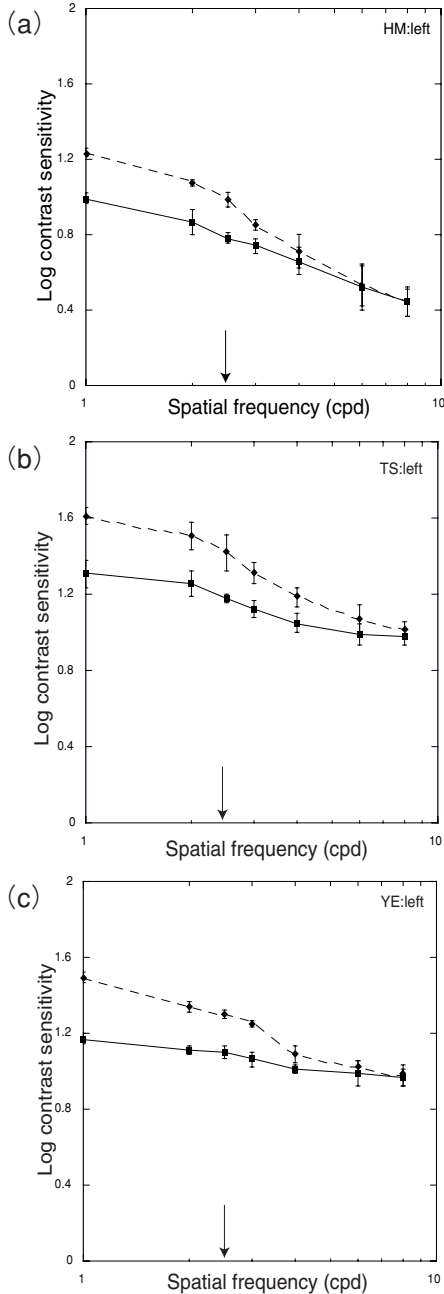


図5 正常者3名の左眼のコントラスト感度。◆: 単眼条件, ■: 抑制条件を示している。矢印は抑制刺激の空間周波数を示している。(a) HMの左眼。(b) TSの左眼。(c) YEの左眼。

◆シンボルは単眼条件を表し、■シンボルは抑制条件を表す。誤差棒は標準偏差である。グラフ内の矢印は抑制刺激の空間周波数を示す。

図5から、正常者では色度 Gabor 刺激を用いた場合でもコントラスト感度は単眼条件よりも抑制条件で低くなっていることがわかる。一方、斜視の被験者では、図6(a)より、非斜視眼(左眼)では前実験と同様にコントラスト感度にはほとんど差がみられないが、図6(b)より、斜視眼(右眼)では正常者と同様に単眼条件よりも抑制条件で低くなっていることがわかる。また非斜視眼では、正常者よりも高いコントラスト感度が得られたが、この原因が正常者と斜視の被験者における違いによるものなのか、単に個人差によるものなのかはより詳しく調べる必要があるだろう。

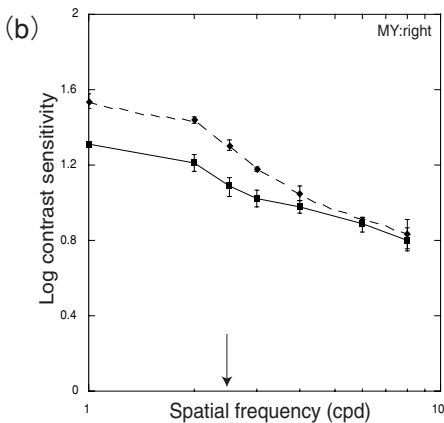
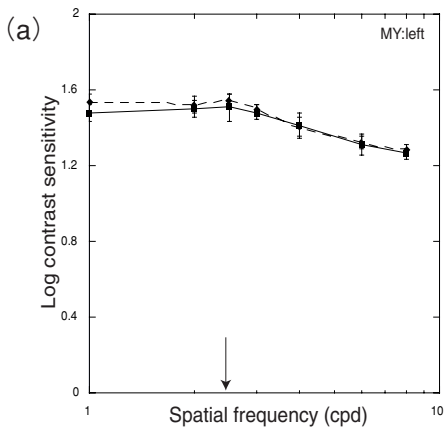


図6 斜視の被験者MYのコントラスト感度。シンボルは図5と同様である。(a)非斜視眼(左眼)。(b)斜視眼(右眼)。

図7に正常者の左眼と斜視の被験者の斜視眼の単眼条件と抑制条件でのlogコントラスト感度の差を示す。シンボルの違いは被験者の違いを表し、グラフ内の矢印は、抑制刺激の空間周波数を示している。空間周波数1.0 cpdで最も感度差が大きく、空間周波数が高くなるにつれて感度の差が小さくなっていることがわかる。空間周波数8.0 cpdでは感度差がほとんどなくなっている。また空間周波数1.0 cpdでのコントラスト感度の差は平均0.27である。

### 3.2 実験2

全被験者とも同様な傾向を示したため正常者HMのlogコントラスト感度関数のみを図8に示

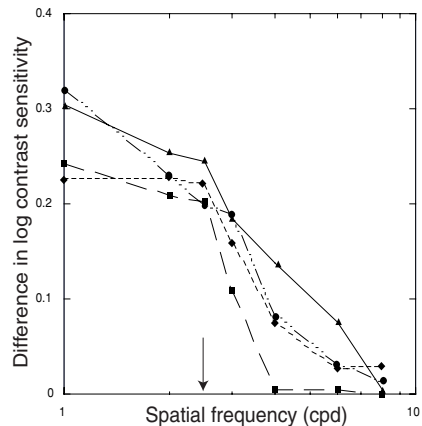


図7 被験者別の単眼条件と抑制条件のコントラスト感度の差。▲:正常者(TS,左眼),■:正常者(HM,左眼),●:正常者(YE,左眼),◆:斜視の被験者(MY,斜視眼(右眼))。矢印は抑制刺激の空間周波数を表している。

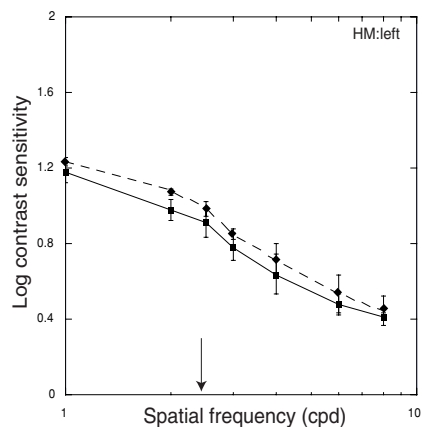


図8 正常者HMの左眼のコントラスト感度。◆:単眼条件,■:抑制条件を示している。矢印は抑制刺激の空間周波数を示している。

す。◆シンボルは単眼条件を表し、■シンボルは抑制条件を表す。全被験者の単眼条件と抑制条件でのlogコントラスト感度の差をとったグラフを図9に示す。シンボルの違いは被験者の違いを表し、グラフ内の矢印は、抑制刺激の空間周波数である。

図9より、コントラスト感度低下にシステムティックな違いはないことがわかる。ある特定の空間周波数で感度が著しく低下するような空間周波数選択性は得られなかった。また単眼条件と抑制条件のコントラスト感度の差の平均は0.087であり、抑制が小さいことがわかった。

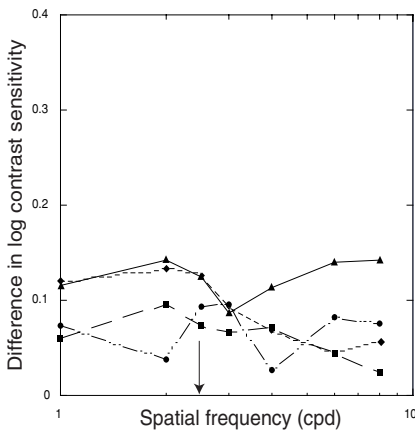


図9 被験者別の単眼条件と抑制条件のコントラスト感度の差。▲：正常者 (TS, 左眼), ■:正常者 (HM, 左眼), ●：正常者 (YE, 左眼), ◆：斜視の被験者 (MY, 斜視眼 (右眼))。矢印は抑制刺激の空間周波数を表している。

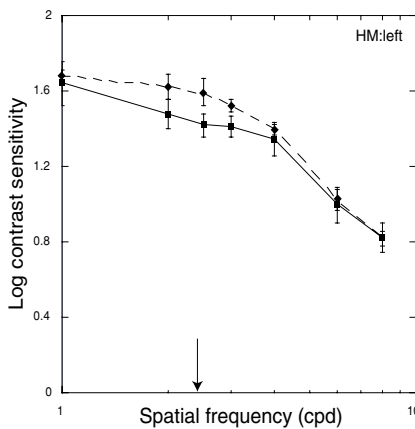


図10 正常者HMの左眼のコントラスト感度。◆：単眼条件, ■：抑制条件を示している。矢印は抑制刺激の空間周波数を示している。

### 3.3 実験3

実験2と同様、正常者HMのlogコントラスト感度関数のみを図10に示し、単眼条件と抑制条件でのlogコントラスト感度の差をとったグラフを図11に示す。

図11より、前実験と同様に空間周波数2.5 cpd付近でコントラスト感度の差が大きく、空間周波数1cpdと高空間周波数でコントラスト感度の差が比較的小さくなる傾向が示された。斜視の被験者MYのみは抑制刺激の空間周波数を4.0 cpdに変えて実験を行ったが、同様に空間周波数2.5 cpd付近での選択的な感度低下が見られた。この傾向が抑制刺激の特定の空間周波数によるものではないことを確認した。空間周波数2.5 cpdでのコントラスト感度の差の平均は0.25であった。

## 4. 考察

本研究より、正常者と斜視の被験者の斜視眼では、色度 Gabor 刺激を用いた場合でもコントラスト感度は単眼条件よりも抑制条件で低くなった。一方斜視の被験者の非斜視眼では、どの条件でもコントラスト感度にほとんど差が見られないことが再確認できた。おそらくどのような刺激を用いようと普段抑制されている斜視眼が非斜視眼を抑制することは難しいためであると考えられる。

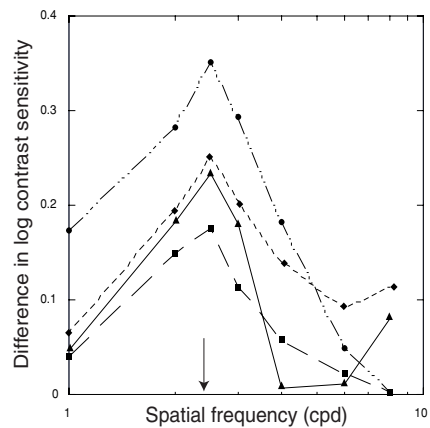


図11 被験者別の単眼条件と抑制条件のコントラスト感度の差。▲：正常者 (TS, 左眼), ■:正常者 (HM, 左眼), ●：正常者 (YE, 左眼), ◆：斜視の被験者 (MY, 斜視眼 (右眼))。矢印は抑制刺激の空間周波数を表している。

検出刺激に色度 Gabor 刺激を用いた実験 1, 2 では前実験で得られたような空間周波数 2.5 cpd 付近で感度が著しく低下する選択的な傾向はみられず、一貫した傾向も示さなかった。しかし検出刺激に輝度 Gabor 刺激を用いた実験 3 では前実験と同様な空間周波数の選択的な傾向が得られた。抑制刺激が輝度変調でも色度変調でも検出刺激が輝度 Gabor 刺激ならば、空間周波数 2.5 cpd 付近で選択的にコントラスト感度を著しく低下させることがわかった。

本実験から正常と斜視の被験者の斜視眼における輝度および色度コントラスト感度関数は類似した傾向を示した。これは Smith ら<sup>4,5)</sup> が主張している正常者では両眼間抑制による感度低下は輝度応答よりも色応答の方が強い傾向を示すのに対して、斜視の被験者では感度低下は色応答と輝度応答で変わらないといった見解とは異なる結果であった。また、検出刺激に色度 Gabor 刺激を用いた実験 3 では単眼条件と抑制条件でのコントラスト感度の差が 0.087 となり、色応答の抑制は小さかった。この結果も色応答の方が強く抑制されるといった Smith らの見解とは異なった。本実験からは正常者と斜視の被験者における抑制のメカニズムの違いを示唆するような結果は得られなかった。

この原因として本実験では検出刺激として等輝度の Gabor 刺激を用いたが、Smith らはテストプローブを用いて増分閾値を測定したことが考えられる。また Smith らの結果と異なった原因のもう一つに検出刺激のサイズも考えられる。著者らの前実験では空間周波数の選択性は刺激サイズ 1° のときには得られず、刺激サイズ 15° のときに得られた。これより両眼間抑制を調べる上で刺激サイズは重要な要因であることがわかる。斜視では中心視野でより強い抑制があるという特性<sup>9)</sup> を考えると、Smith らが用いた検出刺激は 2° 以下の小さい刺激のために正常者と斜視の被験者で異なった結果が得られた可能性がある。

検出刺激に輝度 Gabor 刺激を用いたときのコントラスト感度関数の形状をみると抑制時では空間周波数 2.5 cpd 付近で極小値をもつ関数とな

る (図 10)。これは選択的に空間周波数 2.5 cpd 付近の空間周波数を選択処理する空間周波数チャンネル<sup>6-8)</sup> に強く抑制が働いていることを示唆する。この傾向は全ての被験者でみられた傾向であった。

全実験条件で高空間周波数側で単眼条件と抑制条件のコントラスト感度の差は比較的小さくなっている。これは高空間周波数成分の刺激は両眼間抑制を受けにくいことを示している。しかし検出刺激に輝度 Gabor 刺激を用いた前実験と実験 3 に関しては、空間周波数 1.0 cpd でもコントラスト感度の差が小さくなっていた。検出刺激に輝度 Gabor 刺激を用いた場合、空間周波数 2.5 cpd 付近で選択的に抑制が強くなるため、それ以外の空間周波数に関しては相対的に抑制を受けにくくなっているのではないかと考えられる。

本実験から検出刺激に輝度 Gabor 刺激を用いた条件では抑制刺激の特性によらず 2.5 cpd 付近での空間周波数選択性が得られたが、この選択性の原因はまだ不明である。検出刺激に輝度 Gabor 刺激を用いた実験において、抑制条件では空間周波数 2.5 cpd で一番検出しにくく、単眼条件では逆に空間周波数 2.5 cpd が一番検出しやすいといった被験者の内観が得られた。実際の単眼条件でのコントラスト感度関数の結果では必ずしも空間周波数 2.5 cpd で感度が最大とはなっていないが、被験者が最も検出しやすいと感じる空間周波数が選択的に抑制されているといえる。前実験の結果から空間周波数選択性が刺激サイズ 1° のときにはみられず、刺激サイズが 15° になるとみられたことからこの空間周波数選択性を解明する上で刺激サイズは重要な要因であるといえる。

今後は検出刺激が横縞輝度 Gabor 刺激であったことの影響、刺激サイズの影響、さらに抑制刺激のパターンの影響についても調べ、この空間周波数の選択性についてさらなる解明を目指していきたい。

本研究の遂行にあたり、杏林アイセンターの田中恵津子さん、西脇友紀さんには斜視に関するアドバイスを頂きました。深く感謝致します。

## 文 献

- 1) R. Blake: Binocular rivalry and perceptual inference. *Perception and psychophysics*, **29**, 77-78, 1981.
- 2) 柳澤美衣子, 内川恵二: 両眼間抑制中のコントラスト感度特性, 正常眼位と斜視の特性. *VISION*, **14**, 68-76, 2002.
- 3) R. M. Boynton: Human Color Vision. Optical Society of America, 1992.
- 4) E. Smith, D. Levi, R. Manny, R. Harwerth and J. White: The relationship between binocular rivalry and strabismic suppression. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **26**, 80-87, 1985.
- 5) E. Smith, D. Levi, R. Harwerth and J. White: Color vision is altered during the suppression phase of binocular rivalry. *Journal of Psychology*, **218**, 802-804, 1982.
- 6) C. Blakemore and F. W. Campbell: On the existence of neurons in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images. *Journal of Physiology*, **203**, 237-260, 1969.
- 7) H. R. Wilson, D. K. McFarlane and G. C. Phillips: Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking. *Vision Research*, **23**, 873-882, 1983.
- 8) H. R. Wilson and D. J. Gelb: Modified line-element theory for spatial-frequency and width discrimination. *Journal of the Optical Society of America A*, **1**, 124-131, 1984.
- 9) N. W. Daw: Visual development. Plenum Press, New York and London, pp.95-100, 1995.