

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

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

〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259

(受付：2001年12月3日；改訂稿受付：2002年1月18日；受理：2002年2月5日)

Contrast Sensitivities Measured in the Interocular Suppression Characteristics for Normal and Strabismic Observers

Mieko YANAGISAWA and Keiji UCHIKAWA

(Received 3 December 2001; Received in revised form 18 January 2002; Accepted 5 February 2002)

In the interocular suppression a stimulus presented in one eye is suppressed and a different stimulus in the other eye is perceived for a certain time interval. For strabismic observers the suppression continuously occurs between different retinal images made by the misalignment of eye positions. It was thought, in previous researches, that strabismus suppression was different from binocular rivalry suppression for normal observers. In this research the monocular contrast sensitivity was measured in suppression phase of binocular rivalry in order to investigate the mechanism of interocular suppression. It was obtained, in the 1 degree stimulus condition, that contrast sensitivity was higher in the fusion condition than in the suppression condition for normal observers. On the other hand, for a strabismic observer, contrast sensitivity dropped both in the fusion and in the suppression conditions. In the 15 degree stimulus condition, we obtained a similar tendency in contrast sensitivities between normal and strabismic observers.

1. はじめに

私たちは、外界の多くの情報を視覚から得ている。眼はわずかに水平にずれているため私たちの視覚系は左右の眼から多少異なる像を取り込んでいることになる。通常、取り込まれた2つの異なる像は相関が大きいため統合され、奥行きを伴った1つの知覚像として認識される。

両眼間抑制とは両眼にそれぞれ呈示される像が著しく異なる場合に生じ、一方に呈示された刺激のみが知覚され、もう一方の刺激が抑制されるという現象である¹⁾。両眼に呈示された像の相関が小さいために視覚系が両眼の視覚情報を統合できず、どちらか一方の刺激を選択してし

まうことに起因する。そう考えると、この両眼間抑制は脳内の選択性を反映している現象ともいえるだろう^{2,3)}。

この現象は、日常生活において頻繁に経験するものではない。しかし、斜視という病態においては眼位ずれから絶えず両眼間で抑制を起していると言われている。眼位がずれていることで入力される像の相関が小さく、抑制を引き起こしてしまうのである。つまり、斜視では、眼位ずれから生じる複視や混乱を避けるために、抑制を常に引き起こしていると解釈されている⁴⁾。通常、眼位がずれている眼(斜視眼)が抑制されると考えられている。このことから、斜視の被験者においては、両眼間抑制は視覚認識の上で不

可欠なものであるといえるだろう。

過去の研究では、正常者が引き起こす両眼間抑制と斜視の被験者の抑制が同じメカニズムによるものなのかどうか議論されてきた⁵⁻⁹⁾。

Schor⁸⁾は正常者では、両眼間抑制は両眼に異なる刺激が網膜対応点に入力する時に引き起こされるのに対して、斜視の被験者では、同じ刺激を両眼網膜対応点に入力しても抑制が起こると報告している。一方 Wolfe⁹⁾は左右の眼に呈示される刺激の呈示持続時間が150ms以下なら融合することを発見し、両タイプの被験者で時間特性は類似していると報告している。このように現段階では、斜視が正常とは異なる抑制のメカニズムを持つかどうかは明らかになってはいない。

従来の研究では、視覚刺激を中心視野に呈示している場合が多い。しかし斜視では中心視野でより強い抑制があるという特性⁴⁾を考えると、抑制中の視覚特性を調べる際には、刺激のサイズも重要なパラメータの一つとして考えなければならぬ。

本研究では、正常眼位と斜視の両眼間抑制メカニズムの違いを調べるために刺激サイズをパラメータにとり、両眼間抑制時のコントラスト感度を測定した。本実験は抑制刺激の空間周波数を一定にし、刺激サイズを変化させた主実験と抑制刺激の空間周波数の効果を見るための追加実験からなっている。両眼間抑制の特性を明らかにすることは、斜視の検査方法や治療方法の手助けになる可能性もある。

2. 実験方法

2.1 原理

図1に示すように左右眼にそれぞれあらかじめ刺激を与える。図1の(a)では左眼にコントラスト100%の縦縞Gabor刺激、右眼には輝度が一樣な刺激を与える。このようにすると、左眼の刺激が右眼を抑制して、左眼の刺激のみが知覚される。抑制されている右眼に横縞Gabor刺激を呈示すると、コントラストが低い場合には検出できないが、コントラストを徐々に高くしていくと検出できるようになる。このようにし

て、抑制される側の眼のコントラスト感度を測定する。本実験では、抑制が起こる最小の呈示時間でのコントラスト感度を測定するために、検出刺激の呈示時間を160msに設定した。

図1の(b)は両眼に一樣刺激を与える融合条件である。この条件では右眼は抑制されず、両眼の刺激が融合する。

2.2 装置

実験装置の概略図を図2に示す。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)を使用した。また左右眼の網膜上の刺激の対応がずれないように、顎台を使用し、頭部が動かないように固定した。モニターの解像度は1152×870ピクセル(37.5cm×27.5cm)であり、サイズ

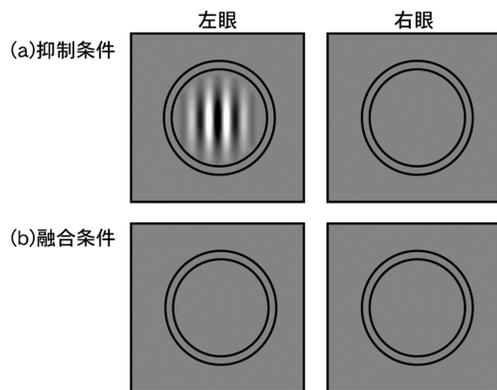


図1 (a)抑制条件と(b)融合条件。右眼が(a)では抑制され、(b)では抑制されない。

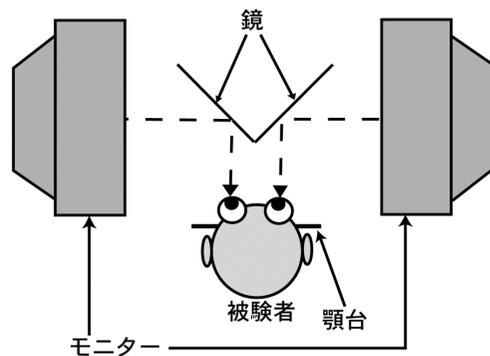


図2 実験装置概略図。2台のモニターと2枚の平面鏡を用いて両眼に異なる刺激を呈示する。

は $52^\circ \times 40^\circ$ である。視距離は 40 cm である。

2.3 刺激

抑制刺激と検出刺激には、Gabor 刺激を使用した。Gabor 刺激は、サイン波にガウス関数をかけた格子縞刺激である。刺激サイズは視角直径 1° と 15° である。検出刺激の空間周波数は 1, 2, 2.5, 3, 4, 6, 8 cpd の 7 種類である。Gabor 刺激の平均輝度は 28 cd/m^2 とした。また背景刺激は、輝度 28 cd/m^2 の $52^\circ \times 40^\circ$ の一様な刺激である。両眼の刺激を融合しやすくするため、融合枠（輝度 0.001 cd/m^2 、幅 0.1° ）を用いた。融合枠の内側の円環は Gabor 刺激の外側から 0.25° 離れたところに、内側と外側の円環は、 0.15° 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、図 3 に示すような融合枠の外側に bar（輝度 0.001 cd/m^2 、幅 0.15° ）を呈示してある。Bar の長さは、刺激サイズ 1° のときは、 1.5° 、刺激サイズが 15° のときは、 2.3° 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。

刺激条件としては、抑制された単眼のコントラスト感度を測定する抑制条件、両眼に一樣刺激を呈示した上で単眼のコントラスト感度を測定する融合条件、片方の眼を覆った状態で、もう

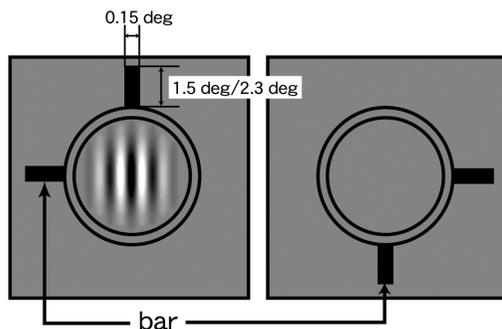


図 3 斜視の被験者が用いた刺激。融合の手がかりに bar を用いた。

一方の単眼のコントラスト感度を測定する単眼条件、両眼に同じ検出刺激を呈示する両眼条件の 4 条件を用いた。

2.4 手続き

2.4.1 主実験

図 4 に示すように、抑制条件では、まず片眼に抑制刺激である縦縞刺激 (2.5 cpd) が呈示され、もう一方の眼に融合枠が呈示される。被験者は、縦縞刺激の安定した知覚を確認した上で手元のキーボードにより、試行を開始する。その後、1~3 s 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。被験者は横縞が検出できたらボタンで応答する。その後また 1~6 s のランダムな間隔において検出刺激が呈示される。

融合条件、単眼条件、両眼条件では一方の眼（図 4 では左眼）に呈示される刺激が異なるが、刺激呈示の時間条件は等しくなっている。

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。検出刺激の空間周波数は 1 回の測定ごとにランダムに変化する。1 つの空間周波数について 20 回の平均をとった。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。

コントラスト感度関数は 2 種類の刺激サイズ

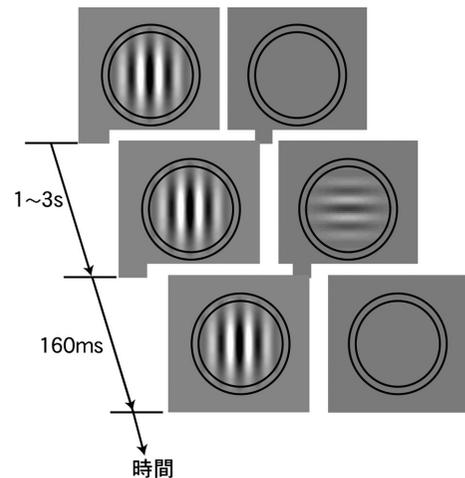


図 4 刺激呈示の時間条件。抑制条件における測定を例として示す。

(1°, 15°), 7種類の空間周波数(1, 2, 2.5, 3, 4, 6, 8cpd), 左右の抑制刺激の呈示眼について測定した。ある1条件で空間周波数7種類に対してコントラスト感度を1回測定し, 1セッションとした。それを20セッション行った。1セッションに要する時間は約30分であった。

2.4.2 追加実験

抑制刺激の空間周波数を4cpdに変化させた。刺激サイズは15°のみで, 正常者の左眼, 斜視の被験者の斜視眼のみを融合条件と抑制条件で測定した。

2.5 被験者

被験者は, 正常者の2名(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3名である。正常者の2名は両眼とも正常視力(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°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3名とも視覚心理物理実験の経験の有する。

3. 主実験の結果と考察

検出刺激のlogコントラスト感度を空間周波数ごとにプロットし, コントラスト感度関数とした。刺激サイズが1°条件のlogコントラスト感度関数を図5-7に示す。図5, 6はそれぞれ正常者TSとHMの右眼の測定結果である。図7(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。刺激サイズが15°条件の結果を図8-10に示す。図8-10の(a), (b)はそれぞれTS, HMとMYの左, 右眼の測定結果である。シンボルは, それぞれ両眼, 単眼, 融合, 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, 6および図8, 9から正常者では, コン

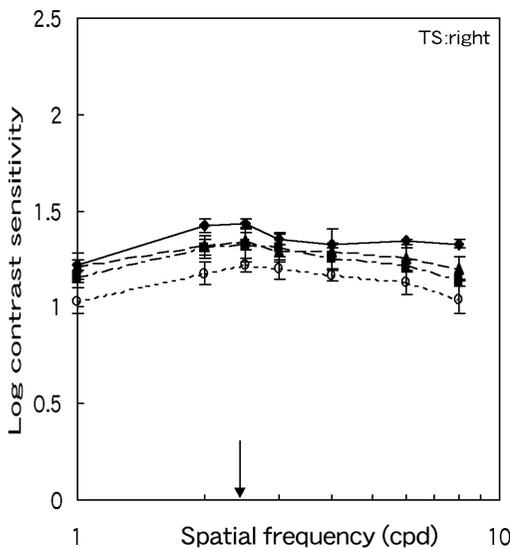


図5 刺激サイズ1°,被験者TSの右眼のコントラスト感度。◆:両眼条件, ■:単眼条件, ▲:融合条件, ○:抑制条件を示している。矢印は抑制刺激の空間周波数を示している。

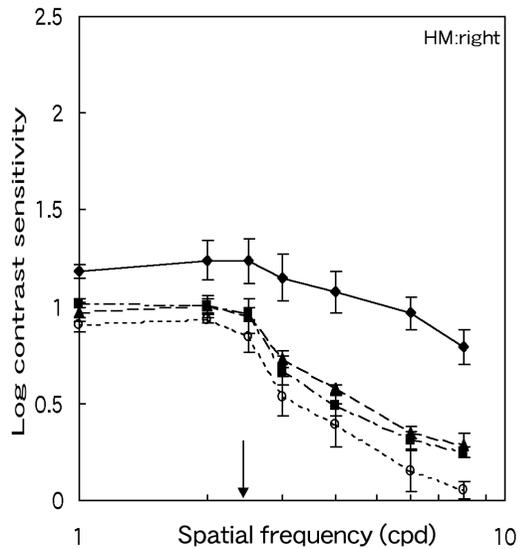


図6 刺激サイズ1°,被験者HMの右眼のコントラスト感度。シンボルは図5と同様である。

トラスト感度は両眼条件で最も高く、抑制条件で最も低くなることからわかる。一方、斜視の被験者では、図7、10より、コントラスト感度は両眼条件で最も高くなっているが、非斜視眼（左眼）では、どの条件もコントラスト感度には差がみられない。斜視眼（右眼）では、融合条件も抑

制条件とほぼ等しく、最もコントラスト感が低くなっている。

空間周波数特性をみると、まず刺激サイズ 1° では、正常者TS、斜視の被験者MYの関数の形状はほとんどフラットであるが、正常者HMの形状は、右下がりになっている。刺激サイズ 15°

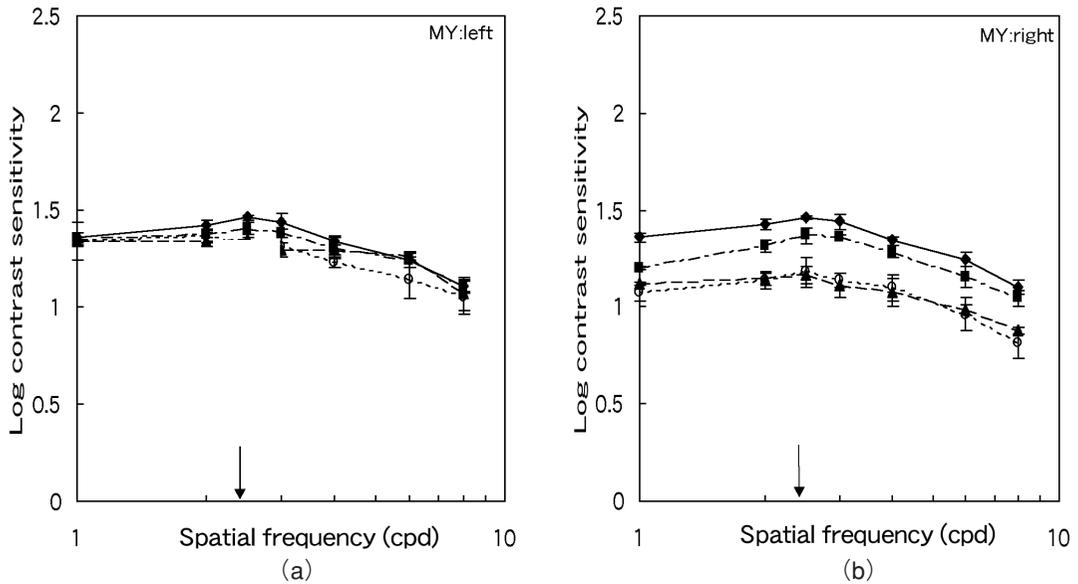


図7 (a) 刺激サイズ 1° 、被験者MYの非斜視眼（左眼）のコントラスト感度。シンボルは図5と同様である。
(b) 刺激サイズ 1° 、被験者MYの斜視眼（右眼）のコントラスト感度。シンボルは図5と同様である。

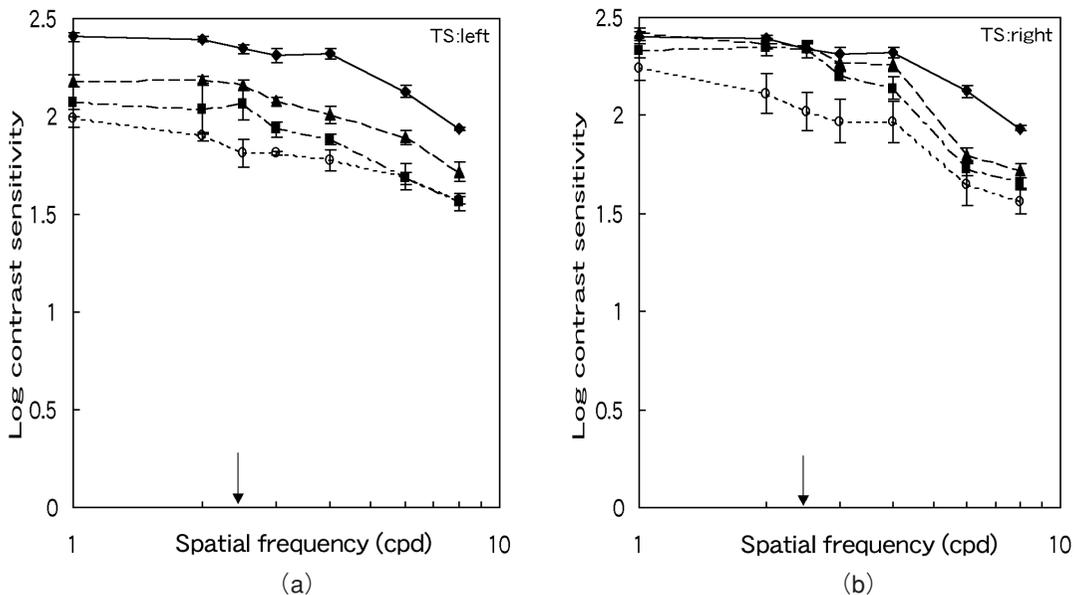
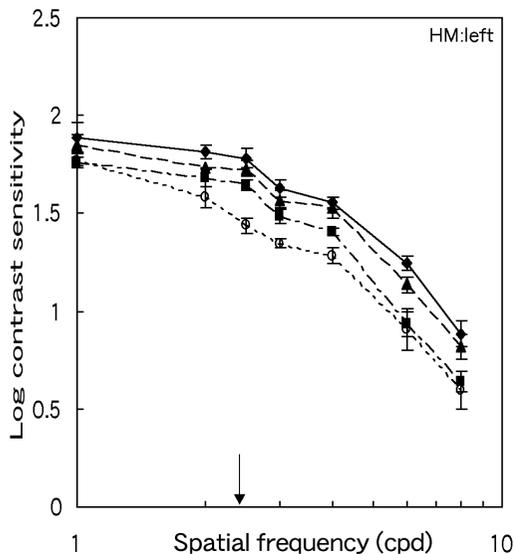


図8 (a) 刺激サイズ 15° 、被験者TSの左眼のコントラスト感度。◆：両眼条件，■：単眼条件，▲：融合条件，○：抑制条件を示している。矢印は抑制刺激の空間周波数を示している。(b) 刺激サイズ 15° 、被験者TSの右眼のコントラスト感度。シンボルは図8(a)と同様である。

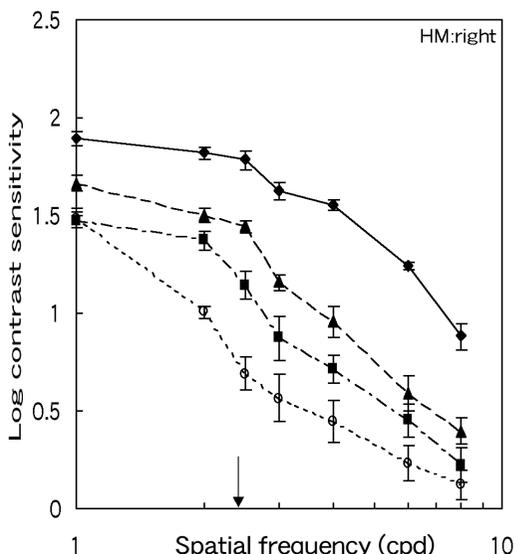
では、どの被験者も右下がりのコントラスト感度関数を示した。また正常者のHMは左右の眼のコントラスト感度関数が大きく異なっていた。この違いは、本実験では裸眼視力1.0以上の場合には屈折の測定をせず、また矯正もしていないため測定時の屈折の条件に左右差によるものな

のか、あるいは本来的に網膜における感度の差によるものか本実験からはわからない。

非斜視眼において条件間でコントラスト感度の差がないという特性は、非斜視眼が抑制されにくいことを示している。つまり、常に抑制されている斜視眼が普段抑制されていない非斜視眼

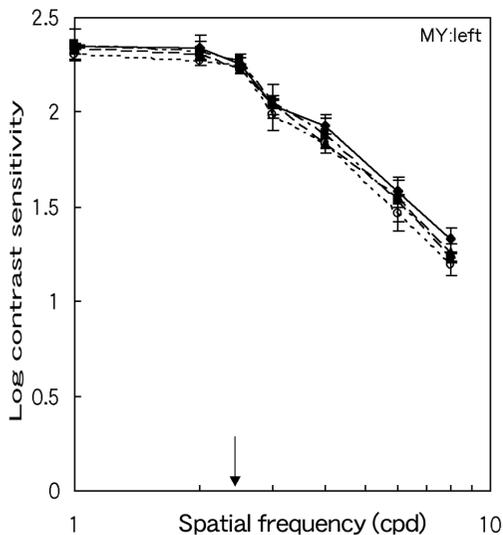


(a)

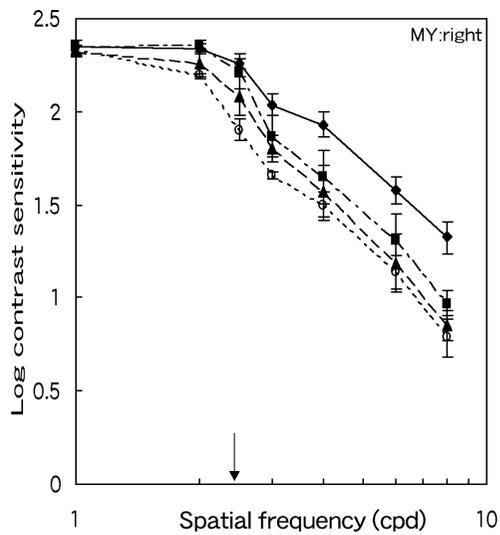


(b)

図9 (a) 刺激サイズ15°, 被験者HMの左眼のコントラスト感度。シンボルは図8(a)と同様である。
(b) 刺激サイズ15°, 被験者HMの右眼のコントラスト感度。シンボルは図8(a)と同様である。



(a)



(b)

図10 (a) 刺激サイズ15°, 被験者MYの非斜視眼(左眼)のコントラスト感度。シンボルは図8(a)と同様である。
(b) 刺激サイズ15°, 被験者MYの斜視眼(右眼)のコントラスト感度。シンボルは図8(a)と同様である。

を抑制することは難しいためであろう。また刺激サイズ 1° で顕著にみられるように、斜視眼での融合条件と抑制条件のコントラスト感度にはほとんど差がないのは、本来両眼間融合機能が停止していると考えられる斜視において同じ刺激が両眼に入力されたとしても抑制が起こったためと考えられる。つまり斜視では日常生活において外界の物体が実験刺激のように眼位ずれを考慮した両眼網膜対応点に投影されることは考えられない。そのため正常の両眼網膜対応点に刺激を入力しても抑制してしまう可能性が考えられる。そう考えると斜視における融合条件は抑制条件と同等である。

刺激サイズ 15° での単眼条件と抑制条件のコントラスト感度の差をみると、正常者の左右眼と斜視の被験者の斜視眼で同様に空間周波数2.5 cpd付近で差が大きくなっていることがわかる。図11に刺激サイズ 15° での正常者の左眼と斜視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。どの被験者でも空間周波数2.5 cpdで最も感度の差が大きくなっている。この傾向は刺激サイズ 1° では見られなかった。

主実験では抑制刺激の空間周波数を2.5 cpdに

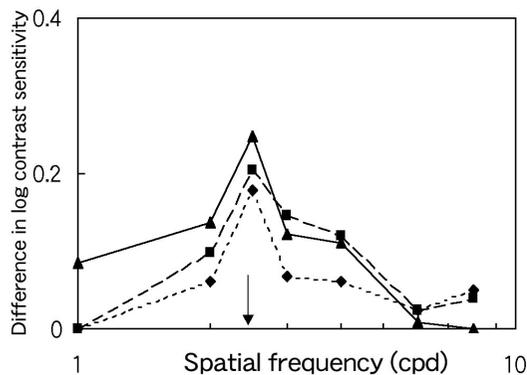


図11 被験者別の単眼条件と抑制条件のコントラスト感度の差。▲：正常者 (TS, 左眼), ■：正常者 (HM, 左眼), ◆：斜視の被験者 (MY, 斜視眼 (右眼))。矢印は抑制刺激の空間周波数を表している。

設定した。そのため検出刺激の空間周波数が2.5 cpdで両眼間抑制が強くなっていたとも考えられる。そこで、そのことを調べるため抑制刺激の空間周波数を変えて追加実験を行った。

4. 追加実験の結果と考察

主実験同様、検出刺激のlogコントラスト感度を空間周波数ごとにプロットし、コントラスト

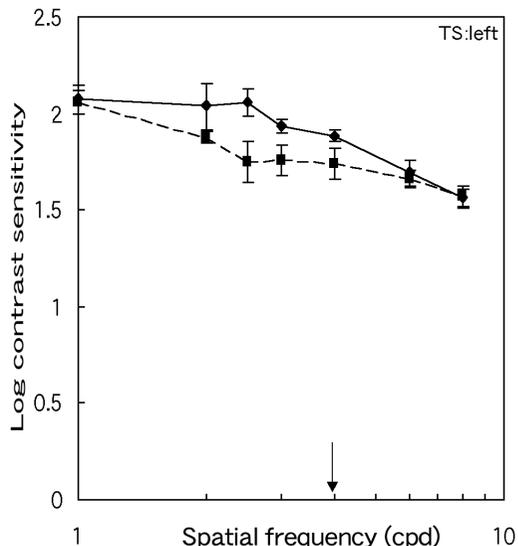


図12 刺激サイズ 15° 、被験者TSの左眼のコントラスト感度。◆：単眼条件, ■：抑制条件。矢印は抑制刺激の空間周波数を示している。

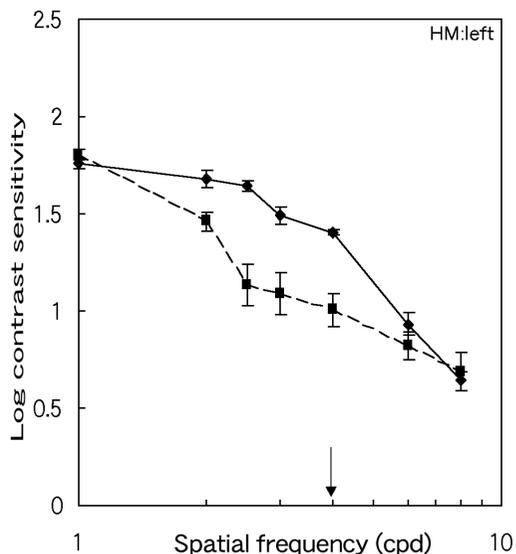


図13 刺激サイズ 15° 、被験者HMの左眼のコントラスト感度。シンボルの違いは図12と同様である。

感度関数とした。正常者TSとHMの左眼の結果を図12、図13に示す。斜視の被験者MYの斜視眼の結果を図14に示す。また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15に示す。グラフ内の矢印は、抑制刺激の空間周波数である。

図15より抑制刺激の空間周波数が4 cpdに変わったにもかかわらず、コントラスト感度の差の

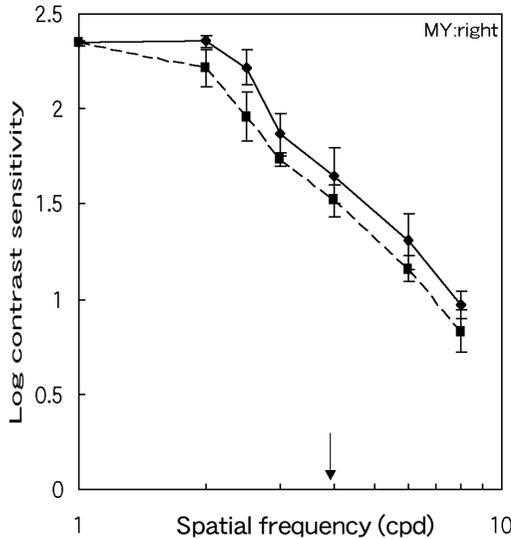


図14 刺激サイズ15°, 被験者MYの斜視眼のコントラスト感度。シンボルは図12と同様である。

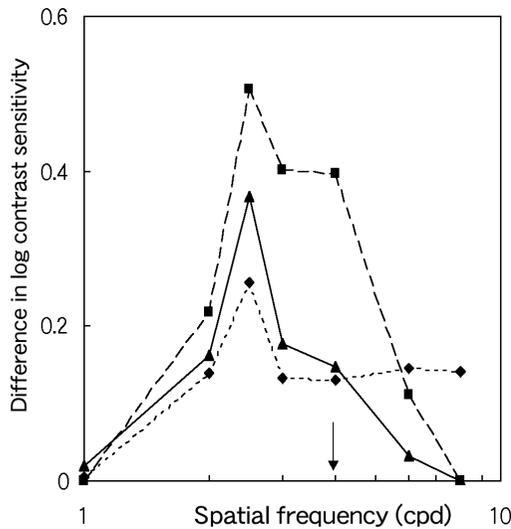


図15 被験者別の単眼条件と抑制条件のコントラスト感度の差。▲:正常者(TS,左眼), ■:正常者(HM,左眼), ◆:斜視の被験者(MY,斜視眼(右眼))。矢印は抑制刺激の空間周波数を示している。

最も大きかった周波数は2.5 cpd付近となった。これより、抑制刺激の空間周波数によらず、2.5 cpd付近で抑制が最も強くなることが示された。

5. 総合考察

本研究で、正常者では、コントラスト感度は両眼条件で最も高く、次に融合条件と単眼条件が続く、抑制条件では最も低くなることがわかった。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もわかった。また斜視眼では融合条件と抑制条件のコントラスト感度の差がほとんどなかった。特に刺激サイズ1°では、融合条件と抑制条件でコントラスト感度関数が一致した。このような結果は、斜視は同じ刺激を網膜対応点に入力しても抑制が起きるというSchor⁸⁾の報告を支持しているようにみえる。

しかし、斜視の被験者でも刺激サイズが15°になると若干ではあるが正常者のように融合条件と抑制条件に差がみられた。したがって、斜視の場合、抑制メカニズムが刺激サイズの小さい時には特に強く働くと考えられる。つまり、刺激サイズが小さいときには、両眼に異なる刺激を入力しようが、同じ刺激を入力しようがコントラスト感度を下げる抑制メカニズムが働く。そのため、融合条件と抑制条件でコントラスト感度に差がほとんどでない。

しかし、刺激サイズを大きくし、周辺視野にも刺激が呈示されると抑制メカニズムが弱まり、正常者に近いコントラスト感度関数になると考えられる。

Smith⁷⁾は増分閾値の波長特性に関して、正常者では抑制の間、短波長感度で著しい低下が見られたのに対して、斜視ではこのような選択的短波長感度の低下は見られなかったという報告をしている。このSmith⁷⁾も前述したSchor⁸⁾も正常眼位の抑制と斜視の抑制は異なるという見解を述べているが、彼らが用いた刺激のサイズはどちらも6°以下の小さいサイズの刺激であった。そのため斜視の両眼視の程度によってはどんな刺激を呈示しようとも抑制が働いている条

件となりうる。たとえそれが同じ刺激であっても抑制は起きていることになる。その結果、両タイプの抑制は異なる結論づけたと考えられる。こう考えると斜視の抑制を調べる重要な変数として特に刺激サイズが挙げられるだろう。その他にも、刺激呈示の網膜位置や抑制刺激の空間周波数も検討すべき変数として考えられる。

本研究では、正常者と斜視の被験者ともに刺激サイズを大きくすると、低空間周波数で感度が上昇し、ある特定の空間周波数に対してのみ抑制が強くなることが示された。これにより、コントラスト感度に抑制が与える効果は、両タイプの被験者で同じ傾向であるといえる。本実験では、過去の研究で言われている正常眼位の抑制と斜視の抑制メカニズムが異なるという報告を裏付けるような結果は得られなかった。

ある特定の空間周波数に対してのみ抑制が強くなる特性を空間周波数チャンネル^{10,11)}を仮定して検討してみた。視覚系の空間周波数チャンネルはいくつかあり、最大感度の空間周波数が異なっている^{12,13)}。Wilsonら^{12,13)}が用いた空間周波数の範囲(0.25～32 cpd)では、6つの空間周波数チャンネルが存在し、それぞれ0.8, 1.7, 2.8, 4.0, 8.0, 16.0 cpdで最大感度を持つと報告されている。この結果を仮定すると、本実験では抑制する刺激の空間周波数に関係なく、2.8 cpdに最大感度を持つ空間周波数チャンネルが選択的に抑制されたと考えられる。今回用いた空間周波数範囲に最大感度を持ついくつかの空間周波数チャンネルのうち、なぜこの2.8 cpdに最大感度を持つ空間周波数チャンネルだけが選択的に抑制されるかは残念ながら本実験では不明である。今後、広範囲の空間周波数で測定するなどさらに抑制効果を究明していくことが必要であろう。

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。また本論文をまとめるにあたり、ご指導いただいた査読者の方に心より感謝致します。

文 献

- 1) R. Blake: Binocular rivalry and perceptual inference. *Perception and Psychophysics*, **29**, 77-78, 1981.
- 2) Y. Bonnef, D. Sagi and A. Karni: A transition between eye, object rivalry determined by stimulus coherence. *Vision Research*, **41**, 981-989, 2001.
- 3) R. Blake and R. Fox: Binocular rivalry suppression: insensitive to spatial frequency and orientation change. *Vision Research*, **14**, 687-692, 1973.
- 4) N. W. Daw: Visual Development Amblyopia and the effects of visual deprivation, Modifications to visual input that lead to nervous system changes, Strabismus. Plenum Press, New York and London, 95-100, 1995.
- 5) A. W. Freeman and N. Jolly: Visual loss during interocular suppression in normal and strabismic subjects. *Vision Research*, **34**, 2043-2050, 1994.
- 6) S. de Belsunce and R. Sireteanu: The time course of interocular suppression in normal and Amblyopic subjects. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **32**, 2645-2652, 1991.
- 7) E. L. Smith 3rd, D. M. Levi, R. E. Manny, R. S. Harwerth and J. M. White: The relationship between binocular rivalry and strabismic suppression. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **26**, 80-87, 1985.
- 8) C. Schor: Visual stimuli for strabismic suppression. *Perception*, **6**, 583-593, 1977.
- 9) J. M. Wolfe: Briefly presented stimuli can disrupt constant suppression and binocular rivalry suppression. *Percepton*, **15**, 413, 1986.
- 10) A. Pantle and R. Sekuler: Size-detecting mechanisms in human vision, *Science*, **162**, 1146-1148, 1968.
- 11) 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.
- 12) 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.

13) 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.

14) H. F. Norman, J. F. Norman and J. Bilotta: The temporal course of suppression during binocular rivalry. *Perception*, **29**, 831-841, 2000.