

色弁別における時間周波数特性のモデル化

高橋 遼・矢口 博久・溝上 陽子

千葉大学大学院 自然科学研究科
〒263-0022 千葉市稲毛区弥生町 1-33

1. 目 的

本研究では刺激の時間特性が色弁別特性に与える影響について検討するテスト刺激を時間的に変化させ閾値を測定し、輝度・赤／緑・黄／青反対色メカニズムの時間周波数特性を考える。その後、閾値の分布の様子を各メカニズムの独立性を仮定した確率的寄せ集めモデルを用いて説明することで、時間特性の関係性を検討する。

2. 弁別閾値測定

実験では2つのメカニズムの関係性をそれぞれ調べることで、総合的に3つのメカニズムの関係性を調べている。

2.1 測定平面

LMS空間中の等エネルギー白色点 (L=23, M=11.5, S=34.5) を原点とし、3本の軸を設置する。L+M軸は刺激のS値とL-2M=0を、L-2M軸はS値とL+M=34.5を維持する軸、S軸はS値のみ変化する軸である。この3本の軸から出来る3つの平面を測定平面とする。例えば、輝度と黄／青反対色メカニズムの関係性はL+M・S平面（輝度・黄／青平面）を用いて評価する。テスト刺激はこれら3つの平面上で背景色からの色度や輝度のコントラスト変化として提示される。コントラスト(ΔC)の計算は(1)に従う。

$$\Delta C = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} \quad (1)$$

2.2 順応刺激

実験は図1のような刺激を用いて行う。順応

刺激は等エネルギー白色で、ギャップは黒で提示される。順応中もギャップは提示されている。

2.3 テスト刺激

テスト刺激は1°の正方形のうちの1つに1秒間提示される。提示位置はランダムに決定される。刺激のコントラストは測定平面上で時間的にSin Gabor関数状に12~20方向に変化させる。周波数は1, 4, 8, 16 Hzの4種類、実験結果は波形の最大振幅の値を用いている。

2.4 実験手順

実験に先立ち、観察者は1分間背景色順応を行う。テスト刺激の提示開始終了はビーブ音で知らされる。観察者は刺激の提示位置を4者強制選択で応答する。正解不正解もビーブ音で伝えられる。実験方法は上下法であり、正誤の繰り返しが10回になるまで試行を繰り返す。1回の実験で4つの変調方向の刺激に対する閾値を測定する。4つの方向はランダムに提示される。閾値は3回測定され、平均したものを結果として使用する。

2.5 被験者

被験者は4名(R. T., H. U., M. O., T. N.)でいずれも色覚正常者である。R. T.は筆者であり、他の3名も心理物理学実験の経験者である。

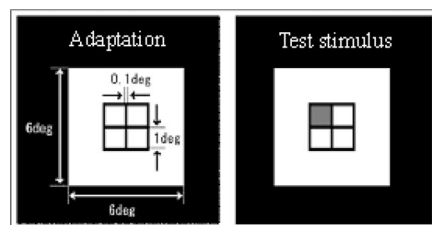


図1 実験刺激。テスト刺激は視覚1度の正方形のうちの1つに1秒間提示される。実験では右図の刺激がディスプレイ中央に表示される。

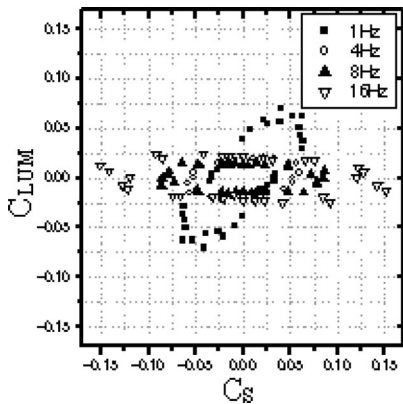


図2 被験者 T. N. の (輝度・黄/青) 平面での測定結果. シンボルの違いはテスト刺激の周波数の違いを表している.

2.6 測定結果

2.6.1 (輝度・黄/青) 平面

図2に被験者 T. N. の結果を示す. 横軸が C_s , 縦軸が C_{LUM} の値を示している. プロット点が測定結果, シンボルの違いが周波数の違いを表している.

プロット点に関する注意であるが, テスト刺激の変調方向は 0° 以上 180° 未満である. よって直接得られるプロット点は図の上半分のものであるが, テスト刺激が背景色を中心として対称に広がっているため, 1つの変調方向の結果に対して2つのプロット点を表示している.

全ての周波数の結果で閾値点は平行四辺形状に分布していることが見て取れる. 時間周波数変化による形状の変化から, 横幅が黄/青反対色メカニズムで, 縦幅が輝度メカニズムで決められていると考えられる.

次にその四辺の傾きの変化を見てみると, 黄/青反対色メカニズムの感度を反映していると考えられる2辺 (正の傾き) は全周波数の結果においてほぼ変化が見られない. それに対して輝度メカニズムの感度を反映していると考えられる2辺は 1Hz とそれ以外とで大きく傾きが異なる. この事からゆっくりとした輝度変化を知覚する際には S 錐体の応答も寄与し, 速くなると寄与しない, つまり時間周波数の変化により知覚される輝度が異なるのではないかと考えられる.

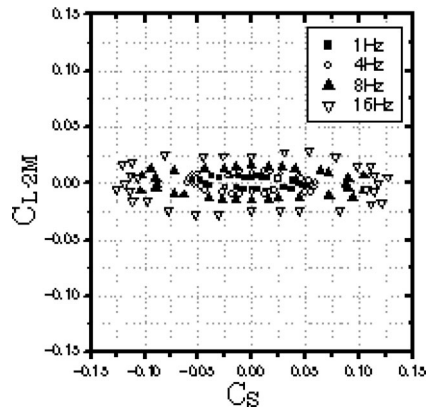


図3 被験者 H. U. の (赤/緑・黄/青) 平面での測定結果.

最後に個人差だが, 1Hz 時の輝度メカニズムの感度を反映していると考えられる2辺の傾きに大きな違いが見られたが, それ以外の傾き, 及び変化の傾向に大きな違いは見られなかった.

2.6.2 (赤/緑・黄/青) 平面

被験者 H. U. の結果を図3に示す. 横軸が C_s , 縦軸が C_{L-2M} の値を示している.

先ほどの結果と同様に閾値点は平行四辺形状に分布しており, その縦幅が赤/緑反対色メカニズムで, 横幅が黄/青反対色メカニズムで決められていることが考えられる.

傾きの変化の様子を見てみると, 黄/青反対色メカニズムの感度を反映していると考えられる2辺に時間周波数に依存した変化が見られる. また, その変化の様子には大きな個人差も見られる.

2.6.3 (輝度・赤/緑) 平面

被験者 M. O. の結果を図4に示す. C_{LUM} 軸と C_{L-2M} 軸が直交していないため, 他の2つの平面とは異なり図の横軸が $(\Delta L/L)$, 縦軸が $(\Delta M/M)$ の値を示している.

今までの平面と同様に閾値点は平行四辺形状に分布をしている. また, 輝度と赤/緑反対色の各メカニズムの感度を反映していると考えられる2辺に刺激の時間周波数変化に依存した大きな傾きの変化は見られない. ただし, 輝度メカニズムの感度を反映していると考えられる2辺の傾きには多少の個人差が見られた.

2.6.4 まとめ

全平面で、弁別閾値点が平行四辺形状に分布することから、どの平面でも2つのメカニズムのみが独立して働きその平面上の色に対する弁別閾値を決定していると考えることが出来る。

3. モデルによる弁別閾値予測線

各平面上に存在する2つのメカニズムの時間特性の独立性を仮定した確率的寄せ集めモデルを用い、弁別閾値予測線を作成し測定結果の説明を試みる。測定結果より弁別閾値の分布がほぼ平行四辺形状に表せることから、各メカニズムへの錐体からの入力的时间的な遅れや位相差の影響は小さいと考えられ、考慮に入れていない。

3.1 (輝度・黄/青) 平面

(2) がモデル式である。

$$\left[\frac{1}{T_{LUM}} (W_{LUM,S} * C_S + W_{LUM,LUM} * C_{LUM}) \right]^\beta + \left[\frac{1}{T_{YB}} (W_{YB,S} * C_S + W_{YB,LUM} * C_{LUM}) \right]^\beta = 1 \quad (2)$$

左辺の第1項は輝度メカニズムの閾値を、第2項が黄/青反対色メカニズムの閾値を表している。

T は各メカニズムの感度を定める係数で、 T が変化すると閾値予測線の幅が変化する。 W は各メカニズムへの錐体応答の寄与の程度を表しており、 W が変化すると閾値予測線の傾きが変化する。輝度メカニズムはLUMの添え字で、黄/青反対色メカニズムはYBの添え字で C_{LUM} 方向の錐体応答の寄与を W_{L+M} とし、 C_S 方向を W_S で表している。

β は確率的寄せ集めの程度を示している。(輝度・黄/青)平面での結果では一般的に用いられている $4^{1,2)}$ を用いている。 β が2の場合、閾値予測線は楕円形となり、 β が大きくなるにつれて平行四辺形の角の丸みが小さくなる。

図5に弁別閾値予測線の一例を示す。フィッティングは T を自由変数として行う。また W の値はモデルの簡略化のため傾きに大きな変化の

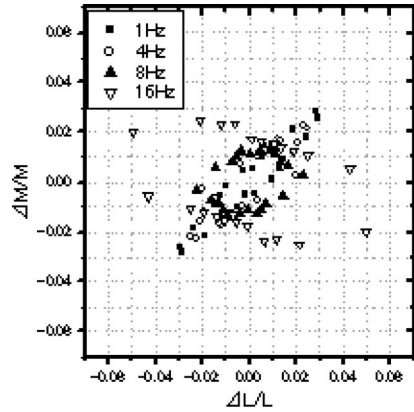


図4 被験者 M. O. の (輝度・赤/緑) 平面での測定結果。

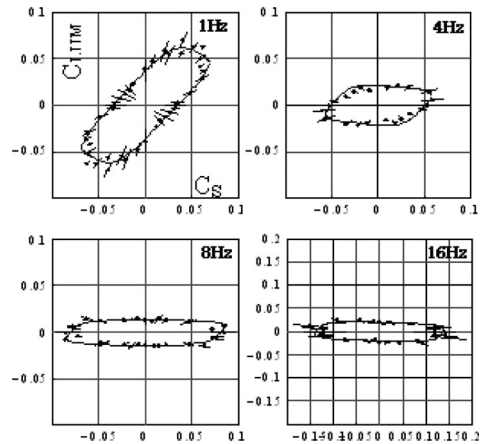


図5 (輝度・黄/青)平面での T. N. の測定閾値 (●) に対するモデルによる弁別閾値予測線 (実線)。

ある W_{LUM} のみ周波数ごとに算出し、 W_{YB} に関しては 1Hz の結果より算出している。

弁別閾値予測線 (実線) と測定閾値 (●) は良好なフィッティングを見せており、このことから輝度メカニズムと黄/青反対色メカニズムの時間特性は独立であることが考えられる。誤差棒は測定閾値の標準偏差を表している。

3.2 (赤/緑・黄/青) 平面

(3) がモデル式である。

$$\left(\frac{C_{L-2M}}{T_{RG}} \right)^\beta + \left[\frac{1}{T_{YB}} (W_{YB,S} * C_S + W_{YB,L-2M} * C_{L-2M}) \right]^\beta = 1 \quad (3)$$

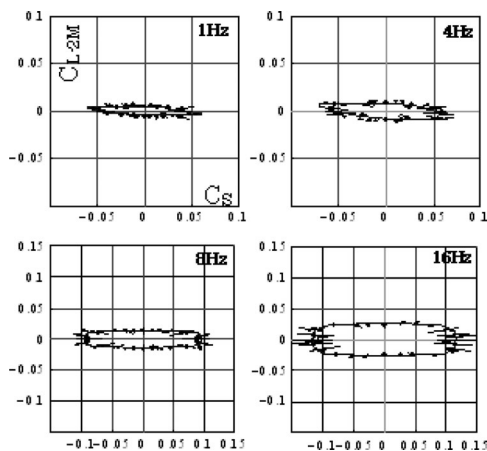


図6 (赤/緑・黄/青)平面でのH. U.の測定閾値(●)に対するモデルによる弁別閾値予測線(実線).

左辺の第1項が赤/緑反対色メカニズムの第2項が黄/青反対色メカニズムの閾値を表している。測定結果より赤み緑みの知覚にはS錐体からの入力との関与がほぼ無いと考えられたため、第1項を簡略化している。

図6に弁別閾値予測線の一例を示す。今回は W_{YB} の値を周波数毎に算出している。 β を4としている。

フィッティングは良好であり、赤/緑反対色メカニズムと黄/青反対色メカニズムの時間特性は独立であると考えられる。

3.3 (輝度・赤/緑)平面

(4)がモデル式である。

$$\left[\frac{1}{T_{LUM}} \left(W_{LUM,L} * \frac{\Delta L}{L} + W_{LUM,M} * \frac{\Delta M}{M} \right) \right]^\beta + \left[\frac{1}{T_{RG}} \left(W_{RG,L} * \frac{\Delta L}{L} + W_{RG,M} * \frac{\Delta M}{M} \right) \right]^\beta = 1 \quad (4)$$

左辺の第1項が輝度メカニズムの、第2項が赤/緑反対色メカニズムの閾値を表している。

図7に弁別閾値予測線の一例を示す。 W_{LUM} は16Hzの結果から、 W_{RG} は1Hzの結果から算出している。 β の値であるが、4Hzの結果では2となっている。ただしこれは、他の条件よりも独立性が弱いと考えるより、閾値が共に小さ

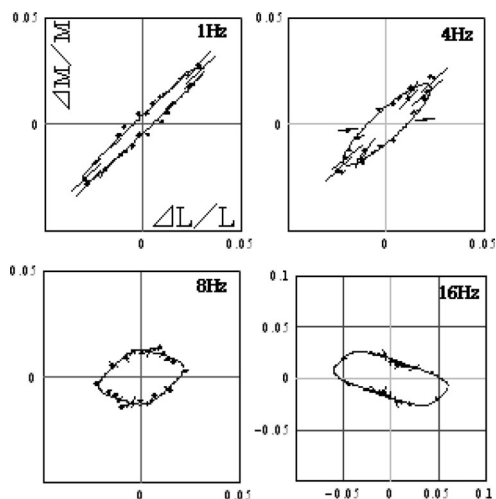


図7 (輝度・赤/緑)平面でのM. O.の測定閾値(●)に対するモデルによる弁別閾値予測線(実線).

くかつ値が近いいため各メカニズム単独で閾値が決められる幅が狭いことが原因ではないかと考えられる。それ以外の条件では4としている。

フィッティングは良好であり、輝度メカニズムと赤/緑反対色メカニズムの時間特性は独立であると考えられる。

4. おわりに

各平面で、弁別閾値線予測線と測定閾値のフィッティングが良好であったため、その平面上に存在する2つのメカニズムの時間特性は独立していると考えられる。3つの平面からそれぞれのメカニズムの時間特性が独立であることがいえたため、輝度メカニズムと赤/緑反対色メカニズム、黄/青反対色メカニズムの時間特性は互いに独立であると考えられる。

文 献

- 1) G. R. Cople, T. Hine and W. McIlhagga: Detection mechanisms in L-, M-, and S-cone contrast space. *Journal of the Optical Society of America A*, **10**, 38-51, 1993.
- 2) 河本健一郎: L, M錐体コントラスト平面における色弁別の時間周波数特性. *光学*, **32**, 105-112, 2003.