

Received May 1, 2002; Revised October 1, 2002; Accepted December 2, 2002

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

河本健一郎*・矢口 博久**・塩 入 諭***

*千葉大学大学院自然科学研究科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

**千葉大学工学部情報画像工学科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

Temporal Frequency Characteristics of Color Discrimination in the (L, M) Plane of Cone Contrast Space

Ken-ichiro KAWAMOTO*, Hirohisa YAGUCHI**, and Satoshi SHIOIRI***

*Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

**Department of Information and Image Sciences, Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

We investigated the influence of the temporal frequency on the color discrimination threshold characteristics. We measured color discrimination threshold in the ($\Delta L/L$, $\Delta M/M$) plane using several temporal modulated stimuli ranging from 1 to 24 Hz. The results are consistent with the prediction by the model assuming probability summation between two detection signals mediated by the red-green opponent and luminance mechanisms. The change of the cone contribution to the both mechanisms which depends on temporal frequency was small. The results from 11 observers showed large individual variation of L- and M-cone contribution to the luminance mechanism, but much less variation of the contribution to the red-green opponent mechanism.

Key words: color discrimination threshold, temporal frequency, red-green opponent mechanism, luminance mechanism

1. はじめに

微少な色の差を検出する能力を示す色弁別特性は視覚特性の中でも最も基本的な特性であり、色弁別特性の解明は色差式や均等空間の検証、構築などの応用においても重要である。色弁別特性は、刺激の時空間特性により変化することが知られている¹⁻⁴⁾。したがって、色差を評価する場合には、評価対象となる色刺激の大きさやその時間変化などの要因を十分に理解する必要がある。

色覚のモデルとして、3つの色覚チャネルを仮定したモデルが広く支持されている⁵⁻⁸⁾。このモデルでは、赤/緑メカニズム (L-M) と黄/青メカニズム (L+M-S) の2つの反対色性メカニズムと、明暗情報に関わる輝度メカニズム (L+M) を仮定している。特に、L, M 錐体の反応が関係する赤/緑反対色と輝度メカニズムについては広く調べられている。時間特性について、これら2つのメカニズム間の興味深い違いが報告されている。時間周波数に依

存して輝度メカニズムへの錐体寄与比は変化するが、赤/緑反対色メカニズムについては変化がみられないことが報告されている⁹⁾。同様に、輝度メカニズムへの錐体の寄与比には個人差が確認されているが、赤/緑反対色メカニズムには個人差はほとんどない^{3,6,8)}。また、輝度メカニズムへの L, M 錐体からの入力の時間遅れあるいは位相差の存在が指摘されているが、赤/緑反対色メカニズムには確認されていない¹⁰⁻¹²⁾。

輝度メカニズムの L, M 錐体からの信号遅れの存在は、時間周波数に依存した見かけ上のメカニズムへの錐体寄与率の変化の原因となる。信号遅れが存在する場合、正弦波入力に対する輝度メカニズムの応答は $L \sin(\omega t) + M \sin(\omega t + \phi)$ (ϕ : 位相) で表される。例えば、位相差 π に相当する時間遅れが存在する場合 $L - M$ となり、その特性は反対色メカニズムに相当する。時間遅れが指摘されている時間周波数¹¹⁾においては、等輝度の色刺激さえも輝

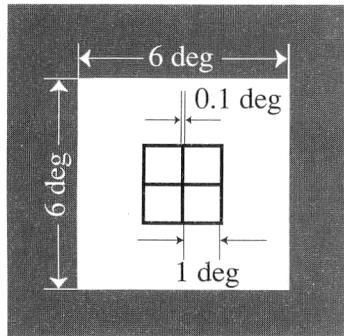


Fig. 1 The spatial arrangement of the stimulus.

度メカニズムによって弁別できる可能性を示すため、色弁別特性を色覚メカニズムの特性から考えるうえで重要な点である。

赤-緑の色度変調と輝度変調のグレーティングの時空間的な検出閾特性については、Kelly^{13,14)}により詳細に調べられている。赤-緑方向は低域通過型から低時間周波数にピークをもつ帯域通過型、輝度方向は8 Hz付近にピークをもつ帯域通過型の時間周波数特性をもつことが報告されているが、色度方向と輝度方向の2方向のみの測定から特性を決定している。また、実地的な応用での使用に際して、等輝度、等色について、時間周波数による特性の変化を考慮しない場合がほとんどである。色覚メカニズムに関するこれらの報告は、色弁別特性はこのような特性のみでは評価できない可能性を示す。

色覚メカニズムの詳細から色弁別特性を検討するためには、色、輝度方向のみだけではなく、多くの色方向に測定を行い解析を行う場合がある^{3,4,6-12)}。特に錐体コントラスト空間を用いた解析は、錐体の反応量に対応した閾値が記述されるため、反対色、輝度それぞれのメカニズムに対する錐体寄与比や弁別におけるメカニズムの相互作用が推定できる。

本研究では、輝度メカニズム、赤/緑反対色メカニズムへの錐体の寄与変化の時間周波数依存性と個人差の検証を目的とした。これらは弁別特性を考察するうえで重要であると思われるが、解析の方法や使用の立場により考慮されていない場合もあり、影響を検討する必要があると考えられる。刺激の時間周波数を変数として錐体コントラスト空間内の($\Delta L/L, \Delta M/M$)平面における多方向の色弁別閾値を測定し、輝度、反対色メカニズムを仮定した確率的寄せ集めモデルによる閾値特性の予測から、この時間周波数の色弁別への影響を検討した。また、個人差については11名の観察者を用いることによって検討した。

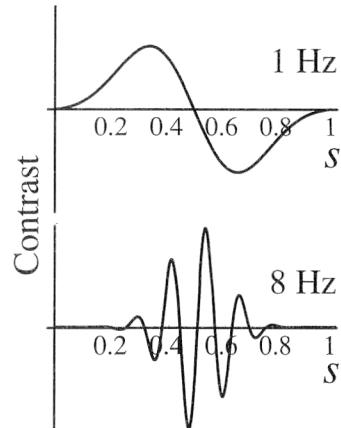


Fig. 2 Examples of the temporal profile of the test color (1 and 8 Hz sine Gabor waveforms).

2. 実験

2.1 実験装置

コンピューターによって制御されたビデオボード(Cambridge Research Systems社製VSG 2/4)により、各原色15ビットの階調でCRTモニター(SONY製GDM-17SE2T)を制御した。モニターは、120 Hzのフレームレートで駆動され、640×480ピクセルの解像度を用いた。CRTモニターは分光放射輝度計(ミノルタCS-1000)と輝度計(Cambridge Research Systems社製OptiCAL)を用いて測色的に補正を行い、刺激を設定した。

2.2 刺激

刺激の空間配置をFig. 1に示す。視角6°の正方形の背景の中心に、視角1°の正方形を2行2列の田の字型に4つ配置した。各正方形間および背景との間は幅0.1°の黒のギャップで仕切られている。各試行において4つのうち、1つの正方形(テスト刺激)の色が変化する。変化する正方形の位置はランダムに決められた。テスト刺激のコントラストは、時間的にGabor関数状に変化させた(Fig. 2)。その中心周波数は1~24 Hzの範囲に設定した。刺激の呈示前後の正方形、および背景の色度はD65白色($x=0.314, y=0.331$)、輝度は69.3 cd/m²とし、テスト刺激のみそこから色を変化させた。

2.3 錐体コントラスト空間

色弁別特性の記述のために錐体コントラスト空間を使用した。この空間は座標系に、各錐体のテスト刺激に対応する反応量と背景色に対応する反応量のコントラストをとる。閾値は空間の原点からの距離で示される。本研究の場合L, M錐体のみの変調を扱うので、錐体コントラスト空間内の($\Delta L/L, \Delta M/M$)平面のみで特性は記述される

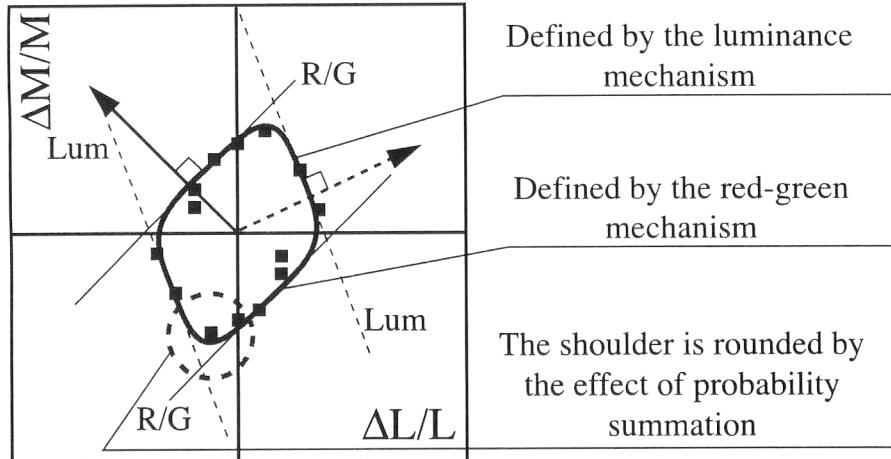


Fig. 3 Schematic draw of an estimation of threshold contour in the ($\Delta L/L$, $\Delta M/M$) plane by a probability summation model with the red-green and luminance mechanisms. Arrows with solid and dashed lines indicate the directions of the red-green and luminance mechanisms, respectively.

(Fig. 3). 輝度メカニズムによって決定される閾値は負の傾きをもつ直線で表され、反対色メカニズムの閾値は正の傾きをもつ直線で示される。両者が関連する場合その関連の仕方はモデルによって異なるが、後述する確率的寄せ集めモデルでは、角の丸まった平行四辺形となる。このような閾値を表す線をここでは閾値線(threshold contour)とよぶ。その L 錐体、M 錐体の分光感度は Smith ら¹⁵⁾のものを用いた。

2.4 刺激の変調方向

テスト刺激の変調方向は ($\Delta L/L$, $\Delta M/M$) 平面上で設定した。刺激色は原点を通る直線上の時間変化で定義され、輝度・赤/緑反対色方向の成分が同時に変化し、変調方向によってその比率が変化した。その変化は原点対称に両側に及び (Fig. 2 参照)、変調方向に対して 1 つの閾値が求められるが、結果は同じ値を両側に示す。最初に 15° 間隔の変調方向で測定し、それに加えて、閾値が急激に変化する方向についてはさらに狭い間隔で測定を行った。

2.5 手 順

実験に先立ち、観察者は背景色に 3 分間順応した。ビープ音とともに、1 つの正方形にテスト刺激が 1 秒間呈示される。呈示終了時にはもう一度ビープ音が鳴り、観察者は変化したと判断した正方形の位置を 4 者強制選択法にて応答した。テスト刺激の呈示が終了した後、観察者が応答すると次の刺激が呈示された。観察者の集中力を保つために、観察者の応答に対して正答・誤答のフィードバックをビープ音により与えた。背景と 4 つの正方形は測定中を通して呈示した。テスト刺激のコントラストの変化は上下法に従い、正解、不正解の折り返し 10 回まで試行を繰り返

した。閾値は 5 回以降の折り返しの平均から求めた。

2.6 測定条件、観察者

測定は暗黒下で行った。観察者は、刺激呈示面を 50 cm の距離から両眼視、自然瞳孔で観察した。11 名の観察者が閾値測定を行った。すべての観察者は石原式色覚検査、Farnsworth-Munsell 100-Hue Test により色覚の異常は認められず、視力は裸眼あるいは矯正で 1.0 以上であった。

3. 結 果

3.1 時間周波数に依存した閾値の変化

Fig. 4 に 4 名の結果を示す。ほとんどの条件で閾値は平行四辺形状に分布した。これは、閾値が赤/緑反対色メカニズムと輝度メカニズムで決められているとする考えに一致する。閾値が平行四辺形で表せるとすると、正の傾きをもつ平行線の原点からの距離は赤/緑反対色メカニズムの感度を反映し、負の傾きをもつ平行線の原点からの距離は輝度メカニズムの感度を反映する（距離が長いほど感度が低い）。すべての観察者の結果は、平行四辺形の大きさと形状は時間周波数に依存して変化するが、その変化には比較的大きな個人差が認められた。

1 Hz と 4 Hz の低時間周波数では、すべての観察者について色方向の閾値は輝度方向の閾値より低く、閾値の平行四辺形は $45\text{--}225^\circ$ 方向に伸びた形になった。周波数の増加に伴い、輝度方向の閾値が低下するとともに色方向の閾値は上昇し、両者の差は小さくなった。輝度方向の閾値は 8~15 Hz の間で最小となり、その後上昇した。色方向の閾値は、4 Hz 以上では時間周波数が高くなるにつれて単

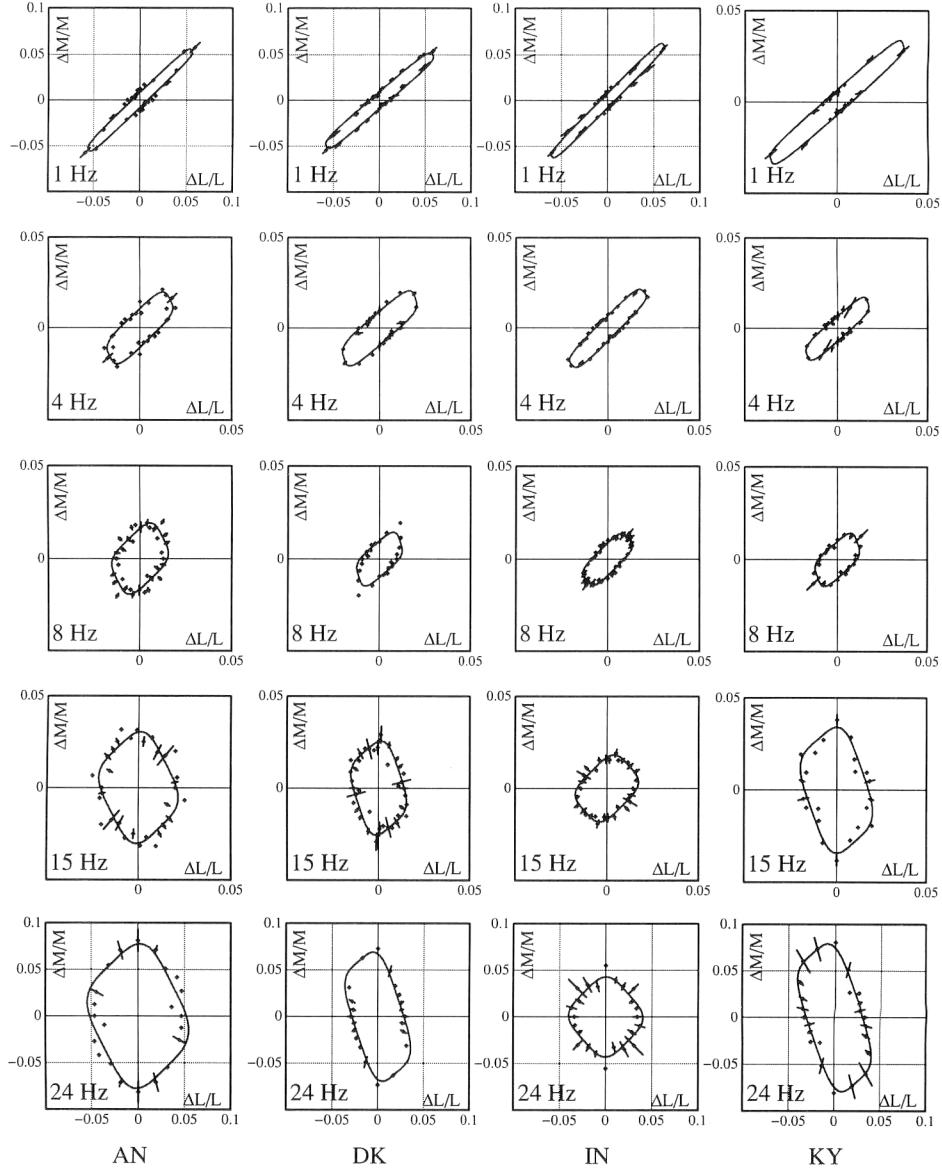


Fig. 4 The measured threshold for several temporal conditions for four observers. The error bars correspond to ± 1 standard error. Solid lines indicate threshold contours fitted by the probability summation model by a least mean square method.

調に上昇した。なお、15 Hz を超える条件では弁別感度が低く、用いた実験装置では弁別閾が測定できなかった観察者が3名みられた (KK, MN, YN)。

4. 考 察

4.1 弁別閾値線形状の予測モデル

ここでは色弁別の時間周波数特性を検討するため、赤/緑反対色メカニズムと輝度メカニズムの時間特性の確率的寄せ集めモデルで説明を試みる。モデルは、色覚メカニズムに基づいた解析ができることと、応用の見地から単純であることを考慮した。まず、弁別閾値は独立に働く赤/緑反対色と輝度の2つのメカニズムで決定されると仮定す

る。独立に働くメカニズムを考える場合、両者の感度が近い場合には、両者ともある確率で刺激の検出にかかわるため、閾値は単独のメカニズムで検出される場合よりも低くなる。その程度を予測するモデルが確率的寄せ集めモデルである。ここでは、それぞれのメカニズムの感度は時間周波数により変化するが、その分光感度を決める錐体寄与比は一定とした。これはモデルの単純化を試みると同時に、 $(\Delta L/L, \Delta M/M)$ 平面上で輝度メカニズムによって決定される閾値の領域が低時間周波数条件のように少なく、輝度メカニズムへの錐体寄与比を特定できない場合や、分散が大きな測定値から計算される精度が低いと考えられる寄与比の使用を避けるためにおいた仮定である。また、実地

的な等色、等輝度の使用において、時間周波数に依存した分光感度の変化はほとんど考慮されておらず、その妥当性の考察も可能である。弁別閾値線形状がほぼ平行四辺形で表せることから、メカニズムへの L, M 錐体からの入力には時間的な遅れや位相差の影響は小さいと考え、考慮していない。

弁別閾値線は以下の式によりモデル化した⁷⁾。

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

ここで、 T はそれぞれのメカニズムの感度を決める係数、 W はそれぞれのメカニズムへの錐体寄与の程度を表し、L 錐体の寄与を W_L , M 錐体の寄与を W_M 、また赤/緑反対色メカニズムは RG、輝度メカニズムは LUM の添字の変数で表す。各方向での閾値は次のように表される。

$$1/T (W_L \Delta L/L + W_M \Delta M/M) = 1 \quad (2)$$

(W_L , W_M) はそれぞれのメカニズムの方向を表すベクトルであり、方向ベクトルの長さを 1 に規格化すると、

$$W_L^2 + W_M^2 = 1 \quad (3)$$

と示すことができる。式(2), $\Delta L/L = TW_L$, $\Delta M/M = TW_M$ の関係から、

$$T = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2} \quad (4)$$

となり、原点からの距離が各方向でのコントラスト感度閾値となる。式(1)の左辺の第 1 項は赤/緑反対色メカニズムの閾値を表し、単独で閾値が決定される場合は、 $W_{RG,L} (\Delta L/L) + W_{RG,M} (\Delta M/M) = \text{一定}$ ($W_{RG,L} < 0$, $W_{RG,M} > 0$ あるいは $W_{RG,L} > 0$, $W_{RG,M} < 0$) で表され、正の傾きをもった平行線対となる。第 2 項は輝度メカニズムの閾値を表し、単独の場合は $W_{LUM,L} (\Delta L/L) + W_{LUM,M} (\Delta M/M) = \text{一定}$ ($W_{LUM,L}, W_{LUM,M} > 0$) で表され、負の傾きをもった平行線対となる。 β は赤/緑反対色メカニズムと輝度メカニズムの確率的寄せ集めの程度を示し、ここでは一般的に用いられている値 4 を用いた。 β が 2 のとき、閾値線は橢円となり、結果が示す角の丸まった平行四辺形を表現するために 3 以上 10 未満が適当である^{6,7)}。データへの回帰は T_{RG} と T_{LUM} を自由変数として行った。

赤/緑反対色メカニズムの錐体寄与比は 1 Hz で、輝度メカニズムの錐体寄与比は各観察者で測定できた最大の時間周波数の結果に基づき、各観察者ごとに決定した。これは、赤/緑反対色方向は時間特性に関して低域通過型に近い感度特性を示し、輝度方向は帯域通過型の感度特性を示すとされており^{13,14)}、低時間周波数においては赤/緑反対

色方向の感度は輝度方向より高く、反対に輝度方向の感度は高時間周波数において赤/緑反対色方向より高くなることを考慮したためである。輝度方向の感度は 8 Hz 付近で最大となるが、輝度メカニズムへの錐体入力の位相差の存在が 4~12 Hz で指摘されている¹¹⁾。また、本実験の結果は、15 Hz を超える周波数では反対色方向の感度が輝度方向に比べ相対的に 8 Hz より低下しており、輝度メカニズムで決定される閾値の領域がより広がることから、この感度が最大となる時間周波数での輝度メカニズムに対する錐体寄与比の分離を行わなかった。それぞれの時間周波数条件で、赤/緑反対色メカニズムについては正の傾きの直線にて近似できるデータを、輝度メカニズムについては負の傾きの直線にて近似できるデータを目視で定め、それらに最小二乗法によって直線を近似することから、それぞれの錐体寄与率を求めた。各観察者の錐体寄与率とメカニズムの方向を Table 1 に示す。赤/緑反対色メカニズムの方向に対する錐体寄与比 $W_{RG,L}/W_{RG,M}$ は -0.80 から -1.01 の範囲に分布し、平均値 -0.92 分散 0.06 となった。この結果は、多く報告されている値 ($L:M=(-1:1)^{3,6-8})$ とほぼ一致する。これに対し、輝度メカニズムの寄与比には観察者間の差がみられ、 $W_{LUM,L}/W_{LUM,M}$ は 0.1 から 1 と広範囲に分布した。求められた錐体寄与比を用いて、それぞれの時間周波数での閾値線の変化を実験結果より推定した。

4.2 実験結果のモデルによる予測

モデルによる閾値の予測を Fig. 4 に閾値線で示す。4 Hzまでの低時間周波数では、モデルによる弁別閾値線形状の近似はすべての観察者について測定値とよい一致を示した。また、4 Hz を超える高時間周波数に対しても、一部の条件を除いてモデルは実験結果をよく予測している。予測は赤/緑反対色メカニズムと輝度メカニズムによって閾値が決定されていることを支持し、同様の実験に基づく解析結果^{3,6-8)}と一致する。モデルでは、時間周波数に依存した各メカニズムへの錐体寄与比の変化を考慮していないが、広い周波数で実験結果をよく予測している。これは、時間周波数に依存した錐体寄与比の変化が小さいことを示す。本研究では広い周波数で同一の結論が得られたことから、このモデルの適用範囲を広げたともいえる。

輝度メカニズムへの錐体入力の時間遅れの影響は認められなかった。輝度メカニズムの錐体入力への時間遅れは、順応背景色が $L:M=2:1$ を与える等エネルギー白色ではほとんどないことが報告されている¹¹⁾。本研究の刺激の条件では、順応に用いる背景色における L, M 錐体反応量がこの比率に近いことから、影響が出なかつたものと考えられる。

Table 1 The cone contributions to the red-green and luminance mechanisms for the 11 observers.

Mechanisms	Red-Green			Luminance		
	Observer	Weight		Direction [deg]	Weight	
		L-cone	M-cone		L-cone	M-cone
AM	-0.664	0.747	131.6	0.783	0.622	38.5
AN	-0.698	0.716	134.3	0.891	0.454	27.0
DK	-0.651	0.759	130.6	0.945	0.326	19.0
IN	-0.711	0.703	135.4	0.746	0.666	41.8
KK	-0.696	0.718	134.1	0.994	0.112	6.4
KY	-0.664	0.748	131.6	0.940	0.340	19.9
MO	-0.623	0.782	128.5	0.680	0.734	47.2
NM	-0.687	0.727	133.4	0.866	0.501	30.0
TI	-0.678	0.735	132.7	0.820	0.573	34.9
YN	-0.687	0.727	133.4	0.929	0.370	21.7
YT	-0.668	0.744	131.9	0.836	0.549	33.3
Average	-0.674	0.738	132.4	0.862	0.463	28.3
SD	0.026	0.024	2.0	0.103	0.194	12.7

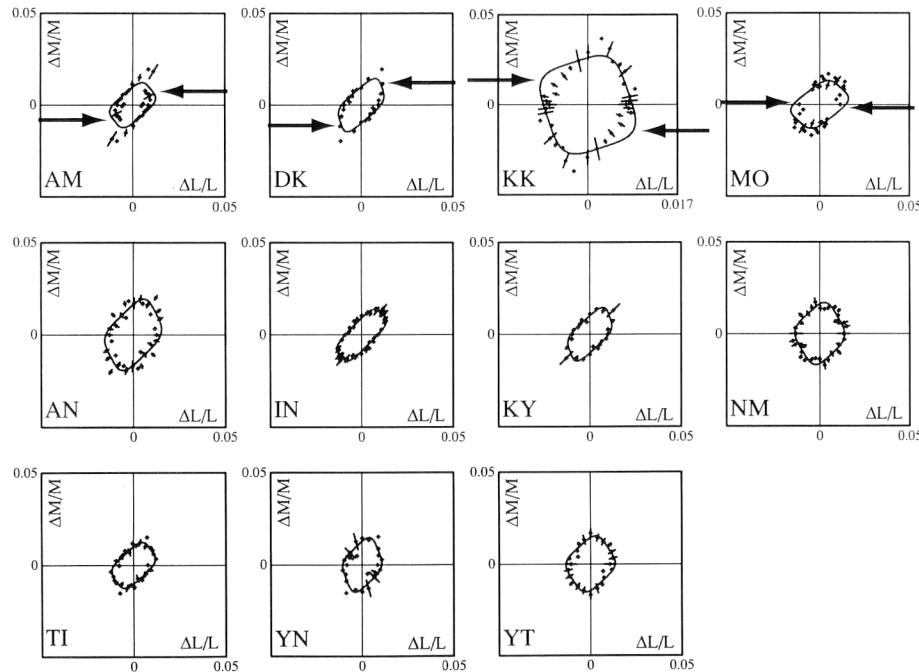


Fig. 5 The measured threshold for all observers at 8 Hz. The results of four observers (AM, DK, KK, MO; on the upper row) show systematical deviation from the prediction by the model around the regions pointed by arrows. Note that the L-cone axis (abscissa) for KK is scaled differently from others to show the details.

8 Hz と 15 Hz で、一部の観察者にモデルと実験結果の間の系統的な差がみられた。最も差がみられた観察者が多かった 8 Hz の条件では、4 名の結果がモデルの予測とは顕著に異なった形状となっている (AM, DK, KK, MO: 15 Hz では KK 1 名のみ)。Fig. 5 に全観察者の 8 Hz の結果を示す。上段は系統的な差がみられた 4 名の結果である。矢印で示した部分で、実際の閾値はモデルの予測より顕著に低い。また、赤/緑反対色メカニズムに相当する正の傾きをもつ弁別閾値線の予測は測定された閾値線と一致

しない。この結果はモデルが完全ではないことを意味し、今後の検討課題である。

4.3 赤/緑反対色メカニズム、輝度メカニズムの時間周波数特性

上述のモデルから、各時間周波数条件での赤/緑反対色メカニズムと輝度メカニズムのコントラスト感度を求めることができる。通常これらは等輝度および等色度方向の刺激を用いて測定されるが、設定した等輝度、等色度方向が常に輝度メカニズム、反対色メカニズムで検出されると

限らない。本実験の方法では、閾値線の形状から等輝度、等色方向の確認ができる点でより高い信頼性をもつといえ、その結果は重要である。

モデルはおおむね閾値を予測しており、等輝度、等色方向の時間周波数に依存した変化は小さいことが確認できる。モデルにより反対色方向の閾値を予測できなかった条件が、一部の観察者について 8 Hz と 15 Hz の条件でみられた。これらのデータは等色方向の確認が行えないため、解析では除外した。

モデルによる実験結果の予測より求めた、時間周波数に依存したそれぞれのメカニズムの感度変化を Fig. 6 に示す。メカニズムの方向ベクトルの長さを規格化する際のメカニズムの感度を決める係数 T の逆数をとることで、各条件でのコントラスト感度が決められる。輝度メカニズムは 8 Hz 付近に感度のピークをもつ帯域通過型の特性を示し、赤/緑反対色メカニズムは低域通過型か弱い帯域通過型の特性を示した。最大感度は赤/緑反対色メカニズムのほうが高くなる傾向がみられ、赤/緑反対色メカニズムで 200 度であるのに対し、輝度メカニズムでは 70 度となった。低時間周波数では、赤/緑反対色メカニズムの感度が高く、刺激が高時間周波数になるにつれて相対的に輝度メカニズムの感度が上昇する。この周波数特性は、グレーティングの検出閾を測定した Kelly の結果^{13,14)} とほぼ一致する。この報告では、赤/緑色度方向の感度特性は低域通過型から 2 Hz 程度にピークをもつ帯域通過型であり、無彩色方向の感度特性は 5~10 Hz にピークをもつ帯域通過型とされている。色方向の感度に関しては、網膜照度が低い場合に低域通過型であるという報告もあるが¹⁶⁾、筆者の結果は 11 名中 7 名が弱い帯域通過型の特性を示し、うち 5 名が t 検定の結果、統計的に有意であった ($p < 0.05$)。

4.4 錐体寄与比の個人差

Table 1 に示すように、輝度メカニズムに対する錐体寄与比には比較的大きな個人差がみられるが、赤/緑反対色メカニズムではそれほど大きくない。もし錐体寄与率が錐体の感度の関数であれば、両者には強い正の相関がみられるはずであるが、本実験が示す輝度に対する各錐体の寄与率と色に対する寄与率の間での相関は低い ($W_{L,LUM}$ と $W_{L,RG}$ の間で -0.22, $W_{M,LUM}$ と $W_{M,RG}$ の間で 0.10)。これは、赤/緑反対色メカニズムと輝度メカニズムへの各錐体の寄与率がそれぞれ独立に決められていることを意味する。この考えは、色相の知覚が錐体の感度変化の影響を直接受けず、むしろ環境の影響によって決まるという考え方と一致する^{17,18)}。また、色相の知覚は加齢に伴う分光感度変化を反映せず安定していること^{19,20)} とも一致し、色恒常性

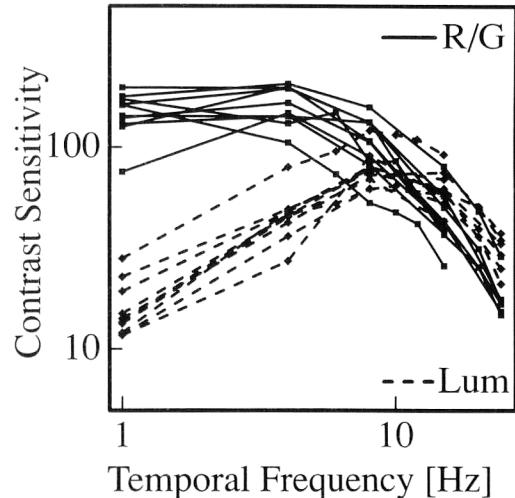


Fig. 6 Contrast sensitivity as a function of temporal frequency for the red-green and luminance mechanisms.

に関連した機能と考えられる。本実験では測定時の順応効果は全観察者に対して一定であったが、数日にわたる視環境変化による色順応も知られている。測定時におけるこの長期の順応状態の個人差の影響も考えられるが、得られた赤/緑反対色メカニズムへの錐体寄与率は個人差の少ないものであった。したがって、もし眼光学系や錐体の個人差があるとすると、反対色メカニズムへの錐体寄与比の個人差は、反対色メカニズムがそれぞれの個人差に依存した順応をすることにより、結果的に低減されていることになる。反対色メカニズムは順応によって、個人差の少ない錐体寄与比を得られていると推測できる。

4.5 本研究の結果と応用の結びつき

本研究は、実地的な色の利用とも無関係ではない。例えば現在でも、弁別閾がすべての方向で一定となるような完全な均等色空間は存在せず、これらの構築のためには多くの評価が必要である。色弁別特性は、時空間特性、順応に用いる背景色などで変化し、考えるすべての条件でこれらの評価を行うことは不可能と考えられる。この場合、本実験のように、色弁別閾を決定するメカニズムについて考え、より広範囲の条件を同一のメカニズムで説明することが可能であれば、少なくとも測定を行った条件ではこれらのメカニズムの特性を考慮することにより、より汎用的に色弁別特性を扱うことができる。色覚メカニズムに基づいた色弁別特性の解明が進み、より広い条件で色弁別特性が扱えるようになれば、より均等な色空間の構築にその結果を反映させられると考えられる。

5. まとめ

($\Delta L/L, \Delta M/M$) 平面における弁別特性を時間周波数

について測定し、赤/緑反対色メカニズムと輝度メカニズムの2つのメカニズムを仮定するモデルにより、全時間周波数で弁別特性をほぼ説明できることを示した。モデルは時間周波数に依存した各メカニズムの錐体寄与比の変化を考慮していなかったが、実験結果をよく予測したことから、時間周波数に依存した各メカニズムへの錐体寄与比の変化は小さいものと考えられる。また、輝度メカニズムの錐体寄与比に比較的大きな個人差があるのに対し、赤/緑反対色メカニズムでは個人差が小さいことを確認した。

本実験を進めるにあたり助言をしてくださった、辻村誠一氏(現、ドイツ Max Planck Institute for Brain Research)に感謝いたします。

文 献

- 1) J. Krauskopf and K. Gegenfurtner: "Color discrimination and adaptation," *Vision Res.*, **32** (1992) 2165-2175.
- 2) V. C. Smith, J. Pokorny and H. Sun: "Chromatic contrast discrimination: Data and prediction for stimuli varying in L, and M cone excitation," *Color Res. Appl.*, **25** (2000) 105-115.
- 3) M. J. Sankeralli and K. T. Mullen: "Estimation of the L, M- and S-cone weights of the postreceptoral detection mechanisms," *J. Opt. Soc. Am. A*, **13** (1996) 906-915.
- 4) H. Yaguchi, Y. Mohri, M. Ishiwata and S. Shioiri: "Temporal characteristics of colour discrimination," *John Dalton's Colour Vision Legacy*, eds. C. Dickinson, I. Murray and D. Carden (Taylor & Francis, Ltd., London 1997) pp. 173-177.
- 5) R. M. Boynton and N. Kambe: "Chromatic difference steps of moderate size measured along theoretically critical axes," *Color Res. Appl.*, **5** (1980) 13-23.
- 6) G. R. Cole, T. Hine and W. McIlhagga: "Detection mechanisms in L-, M-, and S-cone contrast space," *J. Opt. Soc. Am. A*, **10** (1993) 38-51.
- 7) F. Giulianini and R. T. Eskew Jr.: "Chromatic masking in the ($\Delta L/L$, $\Delta M/M$) plane of cone-contrast space reveals only two detection mechanisms," *Vision Res.*, **38** (1998) 3913-3926.
- 8) C. F. Stromeier III, R. Thabat, A. Chaparro and R. E. Kronauer: "Spatial masking does not reveal mechanisms selective to combined luminance and red-green color," *Vision Res.*, **39** (1999) 2099-2112.
- 9) K. R. Gegenfurtner and M. J. Hawken: "Temporal and chromatic properties of motion mechanisms," *Vision Res.*, **35** (1995) 1547-1563.
- 10) C. F. Stromeier III, G. R. Cole and R. E. Kronauer: "Chromatic suppression of cone inputs to the luminance flicker mechanism," *Vision Res.*, **27** (1987) 1113-1137.
- 11) C. F. Stromeier III, A. Chaparro, A. S. Tolias and R. E. Kronauer: "Colour adaptation modifies the long-wave versus middle-wave cone weights and temporal phases in human luminance (but not red-green) mechanism," *J. Physiol.*, **499** (1997) 227-254.
- 12) S. Tsujimura, S. Shioiri, Y. Hirai and H. Yaguchi: "Selective cone suppression by the L-M- and M-L-cone-opponent mechanisms in the luminance pathway," *J. Opt. Soc. Am. A*, **16** (1999) 1217-1228.
- 13) D. H. Kelly: "Spatiotemporal variation of chromatic and achromatic contrast thresholds," *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 742-750.
- 14) D. H. Kelly: "Opponent-color receptive-field profiles determined from large-area psychophysical measurements," *J. Opt. Soc. Am. A*, **6** (1989) 1784-1793.
- 15) V. C. Smith and J. Pokorny: "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm," *Vision Res.*, **15** (1975) 161-171.
- 16) G. J. C. van der Horst: "Chromatic flicker," *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (1969) 1213-1217.
- 17) 山内泰樹: "網膜のフロントエンド", *光学*, **31** (2002) 106-112.
- 18) Y. Yamauchi, D. R. Williams, J. Carroll, J. Neitz and M. Neit: "Chromatic adaptation can cause long-term shifts in color appearance that arise in binocular visual pathway," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, **42** (2001) S720.
- 19) B. E. Schefrin and J. S. Werner: "Age-related changes in the color appearance of broadband surfaces," *Color Res. Appl.*, **18** (1993) 380-389.
- 20) J. S. Werner and B. E. Schefrin: "Loci of achromatic points throughout the life span," *J. Opt. Soc. Am. A*, **18** (1993) 1509-1516.