

明るさとフリッカー知覚における反対色メカニズム

中野靖久

東工大総理工

〒227 横浜市緑区長津田町4259

1. はじめに

反対色メカニズムは、色の見えにおける観察から Hering がその存在を提案して以来、さまざまな知覚現象に対して応用されてきた。色の知覚だけでなく、明るさ、絶対閾値、増分閾値などの知覚においてもその寄与が認められている。これらの知覚現象に現れる反対色メカニズムは、色の見えに基づいたものではないので「反対色」と呼ぶのは語弊があるが、拮抗性の入力のあるメカニズムという点では同じである。ここでは、明るさの知覚と、フリッカーの知覚において類似の反対色メカニズムが寄与していることを示し、その生理的対応物について考察する。

2. 明るさ知覚における反対色メカニズム

同じ輝度のものの明るさを比べた場合、色の鮮やかな方がより明るく見えるという現象は Helmholtz-Kohlraush 効果として知られるが、これは一般に反対色メカニズムが明るさ知覚に関与しているために生ずると考えられている。この効果をはじめて定式化したのは Guth ら¹⁾であろう。彼らのモデルでは、視覚系には輝度チャンネル、赤-緑 反対色チャンネル、黄-青 反対色チャンネルの3つのチャンネルがあるという考えに基づき、それぞれの出力 A、T、D を CIE の3刺激値 X、Y、Z の線形和で表し、明るさ L^* をそのベクトル和 $L^{*2} = A^2 + T^2 + D^2$ で表した。彼らはこれをベクトル輝度と呼んでいる。

さらに矢口ら²⁾は、明るさ知覚に対する反対色チャンネルの寄与に冪関数的非線形性を導入することにより、Guth らのモデルを改良した。彼らは Guth のモデルと区別するために、赤-緑、黄-青 反対色チャンネルの出力を C_1 、 C_2 と表し、修正ベクトル輝度 L_b を $(A/L_b)^2 + (C_1/L_b)^{2p} + (C_2/L_b)^{2q} = 1$ の解とした。ここで、 p 、 q は反対色チャンネルの寄与の非線形性を表す指数である。 $p=q=1$ ならば Guth のモデルと一致する。この改良モデルは、視覚系の非線形性を導入することの重要性を示唆している。

これら二つのモデルにおける反対色チャンネルは、次の二つの点で色の見えに基づく反対色チャンネルと異なる。第一に、上のモデルでは反対色チャンネルの出力を3刺激値 X、Y、Z の線形和で表しているが、色の見えに基づく反対色チャンネルとくに黄-青 反対色チャンネルはこれらの線形和では表せないという報告がある³⁾⁻⁵⁾。第二に、色の見えにおいては、短波長領域で赤の知覚が現れ、これは一般に青錐体の出力が赤の知覚に寄与しているためと説明されるが、明るさの知覚においてはこの寄与を除外しないと実験データを説明できない。したがって、明るさ知覚に寄与する反対色チャンネルと、色の見えに基づくそれとの整合性は不完全である。

筆者ら⁶⁾は、錐体出力のレベルで対数的非線形性を導入することにより、明るさ知覚のメカニズムの分析を試み、 $\alpha \log R + \beta \log G + \gamma \log B = \text{一定}$ という実験式を提案した。ここで R、G、B

は長波長 (L)、中波長 (M)、短波長 (S) に感度を持つ錐体の刺激値、 α 、 β 、 γ は一定の定数である。彼らは、明るさが一定の刺激光が上の実験式を満たすことを見いだしたが、その係数 α 、 β 、 γ はいくつかの領域で異なり、L 錐体をよく刺激する刺激光に対しては $\alpha > 1$ 、 $\beta < 0$ となり、L-M 型、M 錐体をよく刺激する刺激光に対しては $\alpha < 0$ 、 $\beta > 1$ となり、M-L 型の特性を示す。また、中間領域では、被験者によっては $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ となる M+L 型の特性が現れる場合も見られた。図 1 は実験データの一例で、等明るさになる色光を、横軸に $\log R$ 、縦軸に $\log G$ をとってプロットしたもので、3 名の被験者について示してある。明るさの基準となる参照光のレベルは 100Td である。この図から、等明るさの色光は区分的に直線上に乗るのが見て取れる。このような分析から、明るさ知覚に対しては、L-M 型、M-L 型などの反対色メカニズムが寄与していることが示唆された。図 2 に Guth らのモデルと筆者らのモデルの比較を示す。

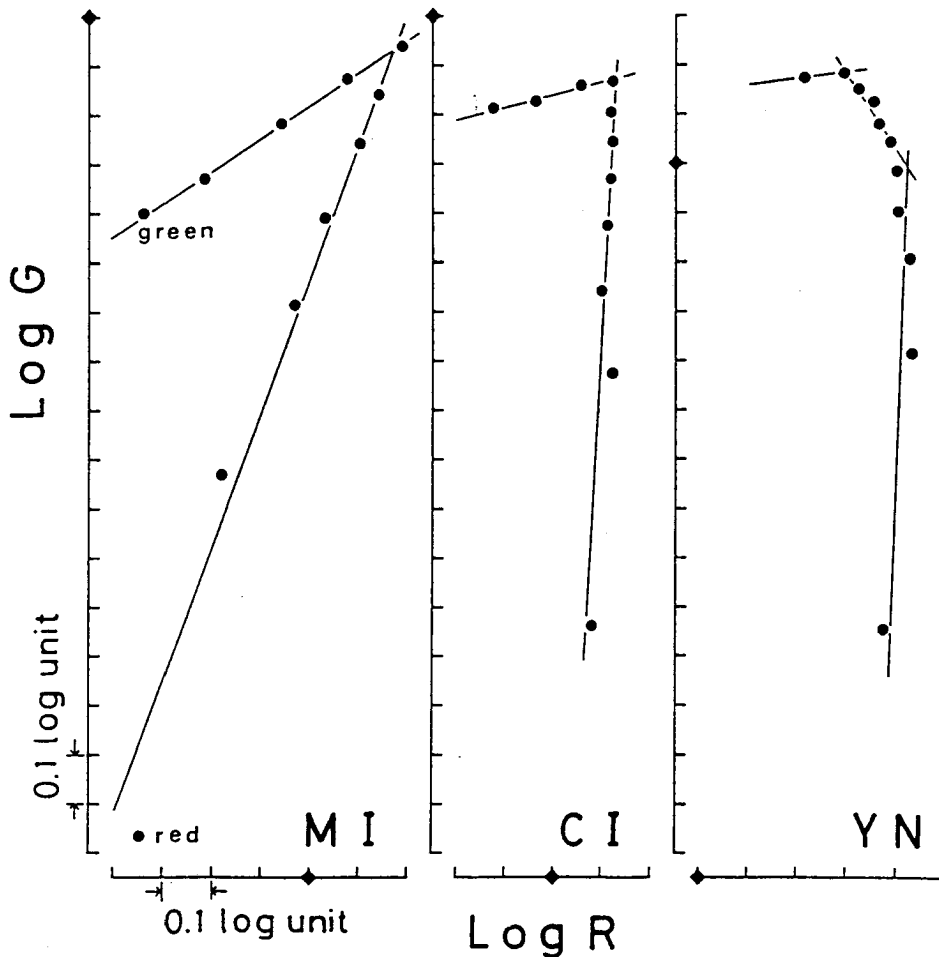


図 1 100Td の基準白色参照光と明るさマッチングしたテスト色光の L 錐体刺激 R と M 錐体刺激値 G の対数プロット。3 名の被験者の結果。

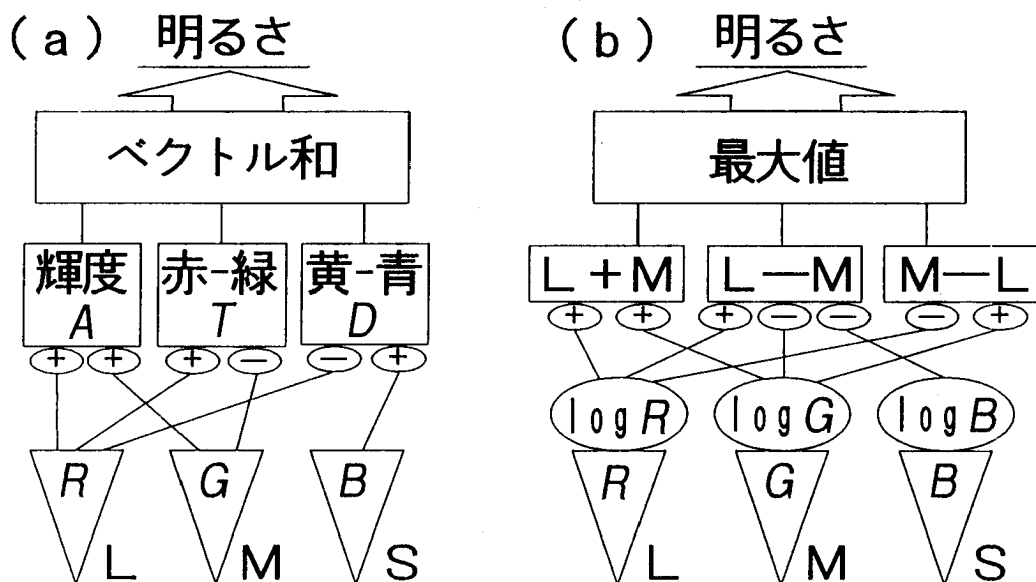


図2 明るさ知覚における Guth らのモデル(a) と Nakano らのモデル(b) の比較。

3. フリッカー検出閾値における反対色メカニズム

後者のモデルに見られる L-M 型や M-L 型といったメカニズムは、猿の神経節細胞や LGN に見られる opponent 型の細胞の特性に類似するものがあるように思われる⁷⁾⁻⁸⁾。また、心理物理のデータにおいても、増分閾値決定において同様のメカニズムが見いだされている⁹⁾⁻¹⁰⁾。このような観点から、ここに現れる反対色メカニズムは、かなり末端レベルのメカニズムを反映しているように推測される。

Gouras and Zrenner¹¹⁾は、猿の神経節細胞における single cell recording において、低時間周波数のフリッカー追従の分光感度は opponent 型になるのに対して、高時間周波数のフリッカー追従は nonopponent 型になると報告している。もしこれが心理物理的応答にも反映されるのならば、いろいろな時間周波数でフリッカー検出閾値を測定することにより、opponent 型から nonopponent 型への遷移がとらえられるかも知れない。また、このときに見いだされる反対色メカニズムと明るさ知覚における反対色メカニズムとの関係が明確になれば、これらの心理物理現象に現れる反対色メカニズムと生理的に見いだされるそれとの架け橋となるだろう。このような動機から、次に筆者らはフリッカー検出閾値の周波数依存性を測定した。

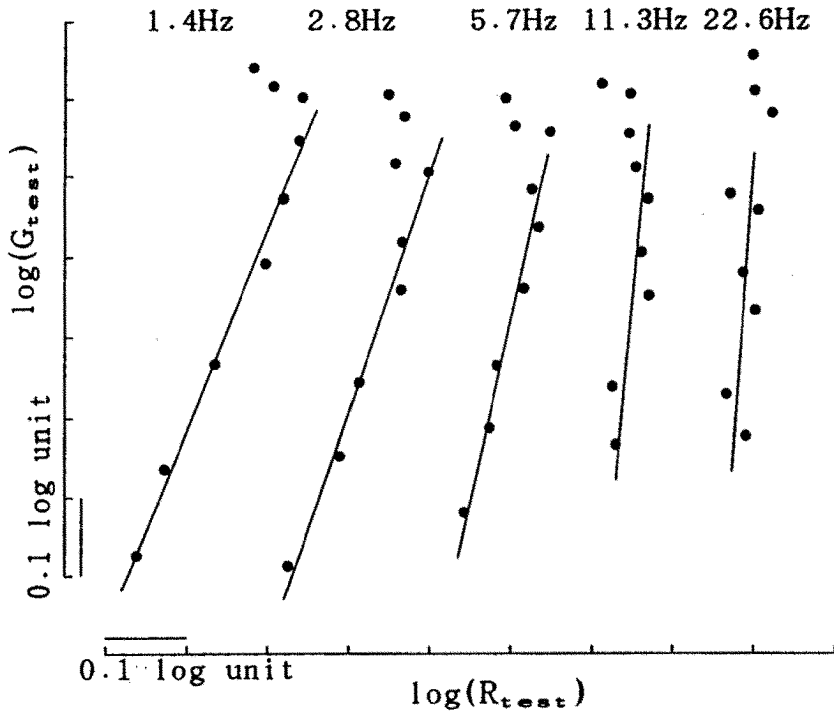


図3 フリッカー検出閾値におけるテスト色光のL錐体刺激値 R_{test} とM錐刺激値 G_{test} の対数プロット。背景強度は 10cd/m^2 、フリッカー周波数は1.4, 2.8, 5.7, 11.3, 22.6Hzの5種類。各周波数の曲線は、重ならないように適当にずらしてある。4名の被験者の結果の平均。

実験は、直径 3° 、 10cd/m^2 の白色背景光の上に、直径 1° の緑から赤にかけての9種類のテスト色光を正弦波状にフリッカーさせて被験者に提示し、被験者がその振幅を調節してフリッカー検出の閾値を求めることにより行われた。フリッカーの周波数は1.4Hzから22.6Hzまでの5段階を調べた。4名の被験者の平均の実験結果を図3に示す。等明さのデータを分析するのに有効であった $\log R - \log G$ プロットをここでも用いている。この場合、フリッカー閾値に達したときのテスト光の振幅から、L錐体及びM錐体に対する刺激値 R_{test} 、 G_{test} を計算し、それらの対数値をプロットしている。各周波数内でのデータ点は、上端が緑、下端が赤のテスト光でその間はそれらの混合光である。周波数に対する曲線の形状の変化を見るために、各周波数の曲線は、重ならないように適当にずらしてある。まず、1.4Hzのデータを見てみると、赤側のテスト光7点はよく直線上に乗っており、この部分ではL-M型の反対色メカニズムが閾値を決めていることが示される。そして、周波数が上がっていても、この部分のデータは常に直線上に乗っているが、その傾きがしだいに急になって行くのが見られる。このことは、低時間周波領域ではL-M型の特性を示していたものが、周波数が上がるにつれてその opponency が減少し、しだいにL錐体のみで閾値が決まるようになってくることを示している。

4. まとめ

以上のように、低時間周波数領域でのフリッカー検出閾値の決定メカニズムは、明るさ知覚メカニズムと非常に強い類似性がみられた。また、フリッカー検出閾値メカニズムの時間周波数特性は、電気生理的に得られる opponent 型の神経節細胞の特性とよく一致した。これらのことから、視覚系の初期のレベルでは L-M 型、M-L 型といった反対色メカニズムが働いており、赤-緑、黄-青チャンネルのような反対色メカニズムは、さらに高次のレベルで形成されるのではないかと考えられる。

参考文献

- 1) Guth, S. L. and Lodge, H. R. (1973) Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new color model. *J. Opt. Soc. Am.* 63, 450-462.
- 2) 矢口 博久、池田 光男 (1980) 明るさ感覚における反対色チャンネルの非線形的介入. 光学 9, 44-51.
- 3) Larimer, J., Krantz, D. H. and Cicerone, C. M. (1975) Opponent-process additivity II: Yellow/blue equilibria and nonlinear model. *Vision Res.* 15, 1127-1140.
- 4) Werner, J. S. and Wooten, B. R. (1979) Opponent chromatic mechanisms: Relation to photopigments and hue naming. *J. Opt. Soc. Am.* 69, 422-434.
- 5) Ikeda, M. and Ayama, M. (1980) Additivity of opponent chromatic valence. *Vision Res.* 20, 995-999.
- 6) Nakano, Y., Ikeda, M. and Kaiser, P. K. (1988) Contributions of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear models. *Vision Res.* 28, 799-810.
- 7) Gouras, P. and Zrenner, E. (1982) The neural organization of primate color vision. *Color Res. Appl.* 7, 205-208.
- 8) Valberg, A., Lee, B. B. and Tryti, J. (1987) Simulation of responses of spectrally-opponent neurones in the macaque lateral geniculate nucleus to chromatic and achromatic light stimuli. *Vision Res.* 27, 867-882.
- 9) Sperling, H. G. and Harwerth, R. S. (1971) Red-green cone interactions in the increment-threshold spectral sensitivity of primates. *Science, N. Y.* 172, 180-184.
- 10) Kranda, K. and King-Smith, P. E. (1979) Detection of coloured stimuli by independent linear systems. *Vision Res.* 19, 733-745.
- 11) Gouras, P. and Zrenner, E. (1979) Enhancement of luminance flicker by color-opponent mechanisms. *Science* 205, 587-589.