

視覚系の順応と非対称等色

栗 木 一 郎

Chromatic Adaptation of the Visual System and Asymmetric Color Matching

Ichiro KURIKI

Human visual system perceives two classes of color from an object, especially under chromatic illuminant. They are the color perception as object surface property (surface-color perception) and as a light from the surface (apparent-color perception). The former exhibits almost perfect color constancy while the latter exhibits partial color constancy. In a unique-white adjustment, we also observed partial chromatic adaptation to the ambient illuminant. We applied relative weightings of each cone responses as a scale of the degree of chromatic adaptation to the result of asymmetric color matching. As a result, we succeeded in achieving almost complete coincidence between predicted color and the observers' matching results. We would speculate that cone response based signal processing system generates the apparent-color response. We would like to explore our study on color constancy into surface-color mechanisms in the future studies, after taking various factors into consideration.

Key words: color vision, color constancy, adaptation, asymmetric matching

人間の視覚には、照明光が変化しても物体表面から知覚される色が変わらないという現象がある。これを「色恒常性 (color constancy)」という。この現象の背景にはさまざまな視覚情報処理機構が関与していると考えられているが、そのうちのひとつが照明光に対する順応であると考えられている。

色度の異なる照明光への順応は、色の見えに違いを生じることが指摘されてきた。その現象は、照明光が変化すると同じ色の見えを生じる光の色度は何か、という対応色研究という形で研究されていたが、どのくらい色の見えが保たれるのか、という形での研究は少なかった。本稿では、これまでに筆者が行ってきた色恒常性と色順応の関係についての研究の概略を紹介し、その結果から推察されることを考察する。個別の実験の詳細はそれぞれの論文を参照していただきたい。また、別の視点からこれまでの色恒常性研究をまとめた解説記事もあるので、興味のある方は参考にさせていただきたい¹⁾。

1. 非対称等色実験 1

「(視感) 等色」とは、複数 (通常 2 つ) の光の色の見えを合わせることをいう。このとき、呈示刺激の中で等色すべき光以外の部分についてまったく同じ条件で等色することを「条件等色」という。ところが、色恒常性実験では、例えば色票を異なった光で照明し、色票の色の見えがどのように変化したかを等色によって答えさせる。このとき、問題となる色票以外の部分はまったく異なる色の様相を呈しており、このような等色を「非対称等色」とよぶ。これまでの色恒常性の研究の中では非対称等色が数多く用いられてきた。そこで最初の実験として、色恒常性を視野に入れた非対称等色がどのような傾向を示すかの基礎データを収集するための実験を行った²⁾。

この実験では主に 2 つのことが明らかになった。1 つは、有彩色照明光の下では、物体に対して 2 種類の色知覚が存在し、被験者がそれらを使い分けられることができるということである。2 種類の色知覚とは、物体の表面の属性として

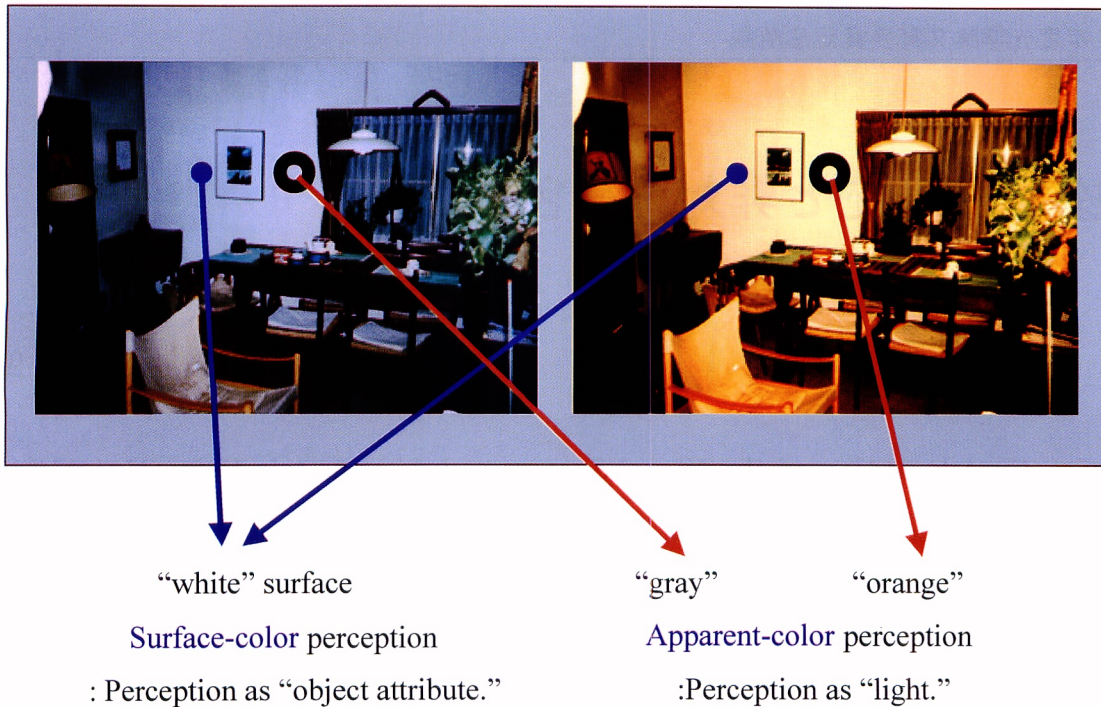


図1 同じ部屋を2つの照明で照らした例.

の色知覚 (surface color perception : 以下, 物体色知覚と表記) と, 光としての色知覚 (apparent color perception : 以下, 色光色知覚と表記) である. この2つは例えば図1のように異なる色の光で照明された同じ物体を見たときに, その物体は「白い」という知覚 (物体色知覚) と一方の見た目の色は「灰色」でもう一方は「オレンジ」という色を知覚 (色光色知覚) できる, ということである. 物体色知覚, 色光色知覚のいずれも色恒常性の成立する方向に色知覚が生じる. これまでの心理物理的研究は, これら2種類の色知覚を区別せずに調べられていた.

もう1つは, 物体色知覚は順応状態や周辺の呈示刺激などの環境的要因による影響をあまり受けず, 物理的に予測される色恒常性に近いのに対し, 色光色知覚は環境的要因の影響を強く受け, 不完全な色恒常性を示すということである. 特に, 色光色知覚はS-錐体が感度をもっている色変化の方向に選択的な誤差を大きく生じることがわかった. もし, 色光色知覚に相当する神経信号が生成されている部位が物体色知覚を生じている脳内部位よりも低次レベルにあった場合, まず色光色知覚の特性を調べておく必要があると考えられる. そこで, 人間の視覚系がどの程度環境光

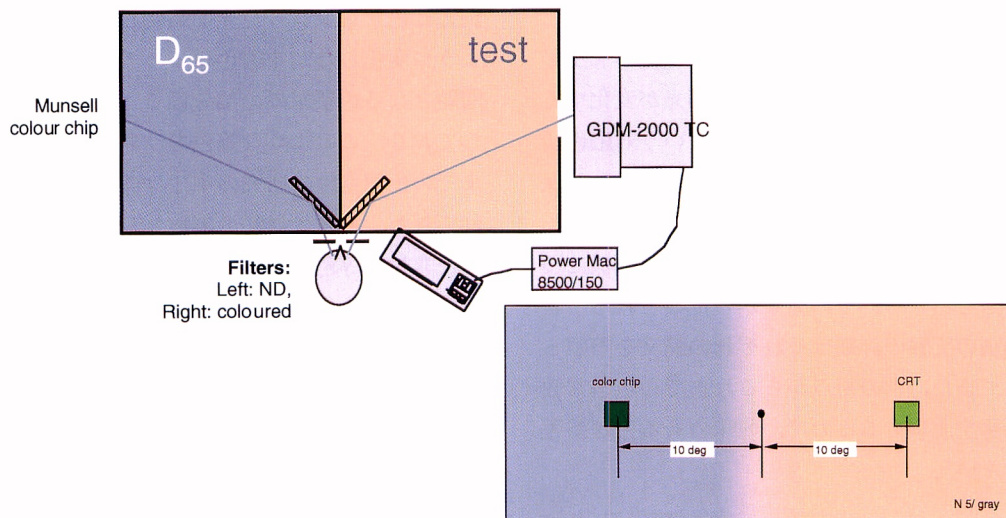


図4 非対称等色実験装置の模式図. 装置全体の上面図と, 被験者から見た様子.

に対して順応するのかを調べた。

2. 色順応実験

これまでの色順応の実験は、光学系を使った刺激視野の小さなもの (~40 deg) か、あるいは両眼隔壁等色法という不自然な観察方法で行われてきた。そこで、この実験では被験者が環境の変化を十分に認識できる実験ブースを作成し、呈示した光が被験者にとって白色に見えるように調整してもらった³⁾。これはユニーク白色調整といい、各被験者に固有の、まったく色みを感じない白色を被験者によって調整して作り出してもらう方法であり、光として見たときの色を評価してもらっているの、判断基準には色光色知覚が用いられていることになる。

実験ブースには、標準の白色光源である D₆₅ を模擬した蛍光灯とフィルターを組み合わせた特殊な照明を備え付け、白→青、白→オレンジ、白→紫、白→緑の4種類の方向に連続的に照明光の色が変化できるようにした。被験者に刺激を呈示したディスプレイは、照明光の管面反射を避けるように設置した。実験結果は筆者らが新たに考案した尺度で評価した。

視覚系の色順応に対する最もシンプルなモデルとして von Kries のモデル⁴⁾ が挙げられる。概略は下記の通りである。

$$\begin{aligned} L' &= k_L L \\ M' &= k_M M \\ S' &= k_S S \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $\{L, M, S\}$ は3錐体のゲイン調整前の応答、 $\{L', M', S'\}$ はゲイン調整後の各錐体の応答、 $k_{L,M,S}$ は各錐体に対するゲインを表している。von Kries は $k_{L,M,S}$ が感度調整前の各錐体応答の逆数 $\{L^{-1}, M^{-1}, S^{-1}\}$ に比例するというモデルを提案したが実験結果には一致せず、ゲイン

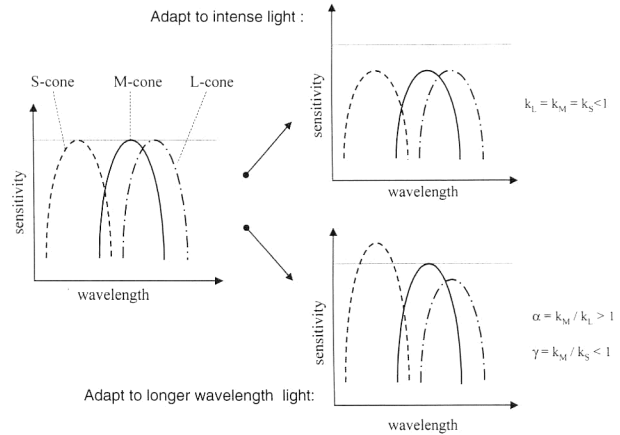


図2 感度変化の模式図。強い光に順応するとすべての錐体のゲインがいっせいに下がる。例えば長波長の成分の多い光に順応すると、L-錐体のゲインは相対的に下がり、S-錐体のゲインは相対的に上がる。

の算定法については後に多くのモデルが提唱された。ただ、3錐体が個別にゲイン調整するという形は今でも多くの順応モデルで用いられている。

このゲインについて考えてみる。時空間的な光の変化に対するダイナミックレンジを確保するために、例えば、強い光に対して順応する場合にはすべての錐体のゲインをいっせいに下げ、一方、特定の波長に多くのエネルギーをもった光に対して順応する場合、その波長に最も感度の高い錐体のゲインを相対的に大きく下げよう調整すると考えられる(図2)。つまりゲインの絶対値は光の強度に対する調整量の情報も含むため、色に対する順応を評価する場合には冗長である。そこで、ゲインの相対的な変化量、すなわち錐体間の感度バランスをモニターすれば、視覚系の色に対する順応が評価できると考えた⁵⁾。その尺度を $\alpha = (M\text{-錐体のゲイン}) / (L\text{-錐体のゲイン})$ 、ならびに $\gamma = (M\text{-錐体のゲイン}) / (S\text{-錐体のゲイン})$ とし、横軸に 100% 順応

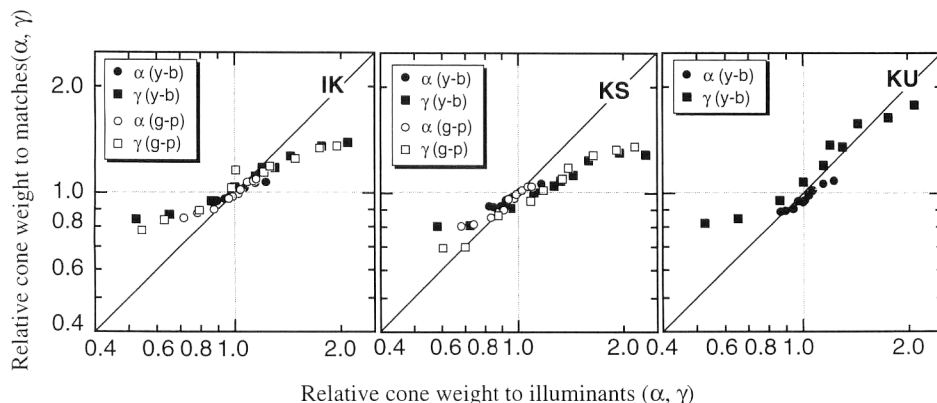


図3 相対錐体荷重による色順応度の変化。浅いS字型の曲線は、彩度の高い照明光ほど順応度が低い不完全順応を示している。被験者3名。

時のゲイン変化、縦軸に実験結果をプロットしたのが図3である。実験結果から、 α , γ の原点にとった基底順応状態 (cone plateau) のユニーク白色付近では、ほぼ線形にゲイン変化が追従するのに対し、照明光の彩度が上がると感度の追従が不完全になってくることがわかった。これは何を意味するかというと、白色に近い照明光の下では、ほぼ完全に照明光の変化による影響を除去するようにゲイン変化が生じ、白色から離れるに従ってゲインが追従せず、いつまでも照明光の色味が残って感じられる不完全な順応状態になる、ということである。

3. 非対称等色実験2

筆者らは、前章の実験で明らかになった色順応の不完全性が色光色知覚の不完全な色恒常性と関連があるのではないか、という仮説を立て、それを検証するためにさらなる非対称等色実験を行った。

日常的な色恒常性の情報処理は、視覚情報が豊富に与えられた条件下で行われている。それは、実験室的に抽象化された視覚刺激ではなく、物体の影や照明光の強度の傾斜など、さまざまな視覚情報が与えられた中で情報処理が行われているということを示している。したがって実験刺激は、観察箱の中にある暗幕や背景、色票の影などをすべて見せるように作成されている。ただ、異なる照明光の下で色の見えを比較するには、被験者に同時に2種類の照明環境を呈示しなければならず、なおかつ、2つの照明環境に対する順応の効果が混在してはならない、という問題を抱えている。

その解決方法のひとつは、色順応の測定に用いた実験室の壁面に窓を設け、その奥に別の照明環境を呈示するという方法である。この窓が被験者の順応状態に影響を与えない範囲で十分に小さく、窓の奥の手掛かりを得るのに十分な大きさをもっていればよいと考えられる。実際、筆者らはこのような実験装置でも非対称等色実験を行っているが、今回はもうひとつの方法を紹介する。ちなみに、その2つの実験結果の傾向については本質的な違いを示さなかった⁶⁾。

もうひとつの解決法は、両眼隔壁等色を行う方法である⁷⁾。これは隔壁の両側に別々の照明光で照明したブースを用意し、被験者は隔壁に鼻を当てた状態で、左右の視野に個別に呈示された刺激の色の見えを合わせるという方法である。ただし、被験者に両方の視野に出された色票が同時に観察できないようにし、色の見えを評価するときには、必ず片方の視野の色票だけが中心視野に入るようにした。両方の色票が同時に見える、被験者は立体視の要領で2

つの色票を重ねて観察するか、あるいは近づけて色の見えを評価しようとする。これは明らかに実験の目的に反するため、わざと両方の色票間の距離が視角約20度の距離を保つように設置し、片方の色票を見るときはもう一方は十分に周辺視野に見える状態になり、2つの色票の詳細な色を同時に比較できないようにした(図4)。結果として、被験者が一方の刺激に注目したときには他方の刺激には注意を払うことができず、両視野間の照明光の違いを同時に意識せざるにすむようになった。この方法は同時に、被験者の順応状態を2つの照明条件に対してほぼ独立に保つことができるという利点を備えている。つまり、前章で紹介した順応度の測定のようにそれぞれの視野が十分に照明環境に暴露され、しかも両者への順応の影響が混合しにくい、順応による色光色知覚のシフトの様子を評価することに適した実験条件であるといえる。

実験装置の様子は図4の通りである。被験者は左眼でD₆₅ 蛍光灯に照明されたブース内に呈示された色票(20枚のマンセル色票のうち1枚)を観察し、右眼で8種類の照明光の環境に呈示されたCRT画面を見る。CRT画面は、被験者に対して正面の壁面に開けられた視角2 deg×2 degの穴を通してその背後に設置された状態で観察するため、見た目は色票とまったく変わらず、しかもブース内を照明している照明光の管面反射の影響をまったく受けることがない。被験者は手元のキーボードを操作して、色票とまったく同じ色光色を知覚するようにCRT画面の色を調整するよう指示された。

8種類の照明条件において、まず5分間の予備順応を行い、左右眼の順応状態が十分になったところで実験を開始した。各色票に対して5回以上のマッチングを行い、その結果をMacLeod-Boynton色度図上に表記した⁸⁾。MacLeod-Boynton色度図はCIE色度図と同様に等輝度面で、横軸と縦軸が錐体応答を反映した座標系になっているため、今回のような錐体応答による色の見えの変化の予測、という問題においては適切な座標系であるといえる。

図5はその代表的な例を示したものである。今回実験で用いられた20枚のうち、明度(value)=5に対応する10枚の結果を示している。星型に結ばれたシンボルは、10枚の色票のD₆₅照明(左眼)下の測色値、テスト照明(右眼)下の測色値、被験者のマッチング結果の色度を結んだものである。マッチング結果が完全に物理的に予測可能な色恒常性を示した場合、被験者のマッチング結果がテスト照明下の色度と一致するはずである。しかし、実験結果は左眼に呈示された色票の色度と、完全な色恒常性の色度の中間のところに位置している。

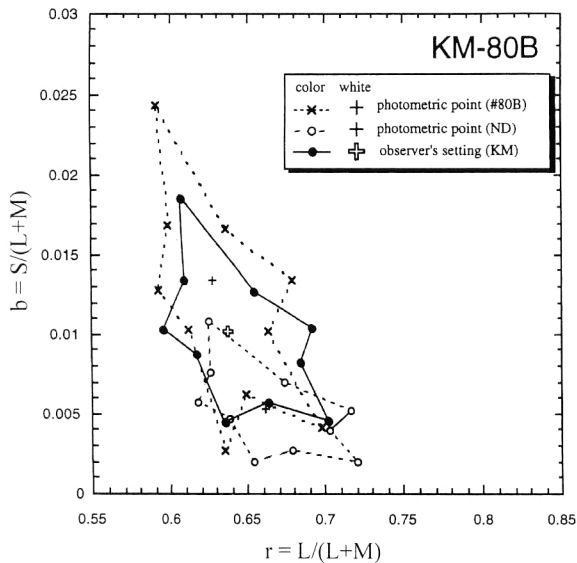


図5 代表的な結果 (被験者 KM, 照明光: D₆₅ コダックフィルター #80 B).

この図で星型の図形の中心にある十字のシンボルは、それぞれの照明下の N5/色票 (中明度の灰色) の測色値ならびに被験者のユニーク白色調整の結果を示している。ユニーク白色調整は前章の順応度の測定実験で用いられた方法であり、被験者にとってどの色の光が白色に知覚されるかを測定することによって各錐体のゲインという形で順応度の指標を求めることができる。そこで、今回も前章同様に各照明条件において右視野のみにおいてユニーク白色調整を行った。

その結果をもとに、以下に示すような計算を行った。

$$\begin{aligned} k_{L-X, D65} &= L_{W-X} / L_{W-D65} \\ k_{M-X, D65} &= M_{W-X} / M_{W-D65} \\ k_{S-X, D65} &= S_{W-X} / S_{W-D65} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\{L, M, S\}_{W-X}$, $\{L, M, S\}_{W-D65}$ は照明光 X ならびに D₆₅ 照明下でのユニーク白色光に対する 3 錐体の応答を示している。この結果得られた $k_{\{L, M, S\}-X, D65}$ は D₆₅ 照明光下と照明光 X の間の相対錐体荷重を示しており、この係数を用いて以下のような変換を行った。

$$\begin{aligned} L'_{C-X} &= k_{L-X, D65} L_{C-D65} \\ M'_{C-X} &= k_{M-X, D65} M_{C-D65} \\ S'_{C-X} &= k_{S-X, D65} S_{C-D65} \end{aligned} \quad (3)$$

$\{L, M, S\}_{C-D65}$ は D₆₅ 照明下における色票 C に対する錐体応答、 $\{L', M', S'\}_{C-X}$ は照明光 X の下における色票 C に対する錐体応答の予測値を示している。

これは、色の見え (コントロール実験結果) を、ユニーク白色点の移動にあわせて錐体応答のゲイン調整と同じ原理で変換したものである。つまり、白色点 (+シンボル)

が重なるように各錐体のゲインを算出し、その値をすべての色票に対して適用することによって、色の見えのシフトを予測することを行ったのである。この変換結果を実験結果と重ね合わせてプロットしたのが図6である。この図で破線が実験結果、実線が計算結果を示している。この図の計算値と実験結果を横軸・縦軸に取ってプロットしたのが図7である。ほぼ傾き 1 の線の上に乗る形で一致が見られる。

以上の一連の結果から、照明光の色度の変化に伴う色光色知覚のシフトは、ユニーク白色調整によって求められる錐体ゲインの変化から予測可能であることが示された。

本稿で示した結果は色光色知覚に関する結果が主であった。しかし、その後に行った一連の色恒常性実験の中でも、物体色知覚は高い色恒常性を示し、順応による感度のシフトによる影響をあまり受けなかった。

われわれが日常感じている「物体の色があまり変化して見えない」という現象は、どちらかという物体色知覚に基づくものであり、よく研究されている色光色知覚はあまり普段意識することがない知覚である。例えば洋服の色について、買う前に店で見たときと買ってから外で見たときに微妙に色が違って見える経験をされたことはないだろうか。これが色光色の知覚であり、厳密に見た目の色を評価すると完全には色恒常性が成立しないことは経験的にも納得していただけることと思う。

しかし、色光色が恒常性成立の方向にシフトするのに必要な色順応は数分の時間を要することが知られており⁹⁾、一方で、瞬間的に照明光を変化させても色の見えが変化しないという現象も存在することが心理物理学的に明らかにされている¹⁰⁾。瞬時的に色恒常性を言及するときには物体色の知覚を問題にしているものであり、やはり物体色知覚の成立を研究する必要が大いにあると考えられる。

色光色知覚が時間的な特性をもつ順応の影響を強く受けるということは、時間的構造に対する感受性のあるシステムだということができる。一方で、順応の影響をまったく受けない物体色知覚は空間的な構造に対して感受性のあるシステムだと考えることができる。

色味を伴わない明度知覚においても恒常性の研究がさまざまに行われているが、照明環境をどのように理解するかによって大きく結果が変わることが以前から知られている¹¹⁾。物体色知覚はそのような照明環境と物体の配置のような情報を軸にしている可能性が高く、その成立機序を調べることは容易ではない。

ただ、例えば、刺激を抽象化して色票をコンピューター

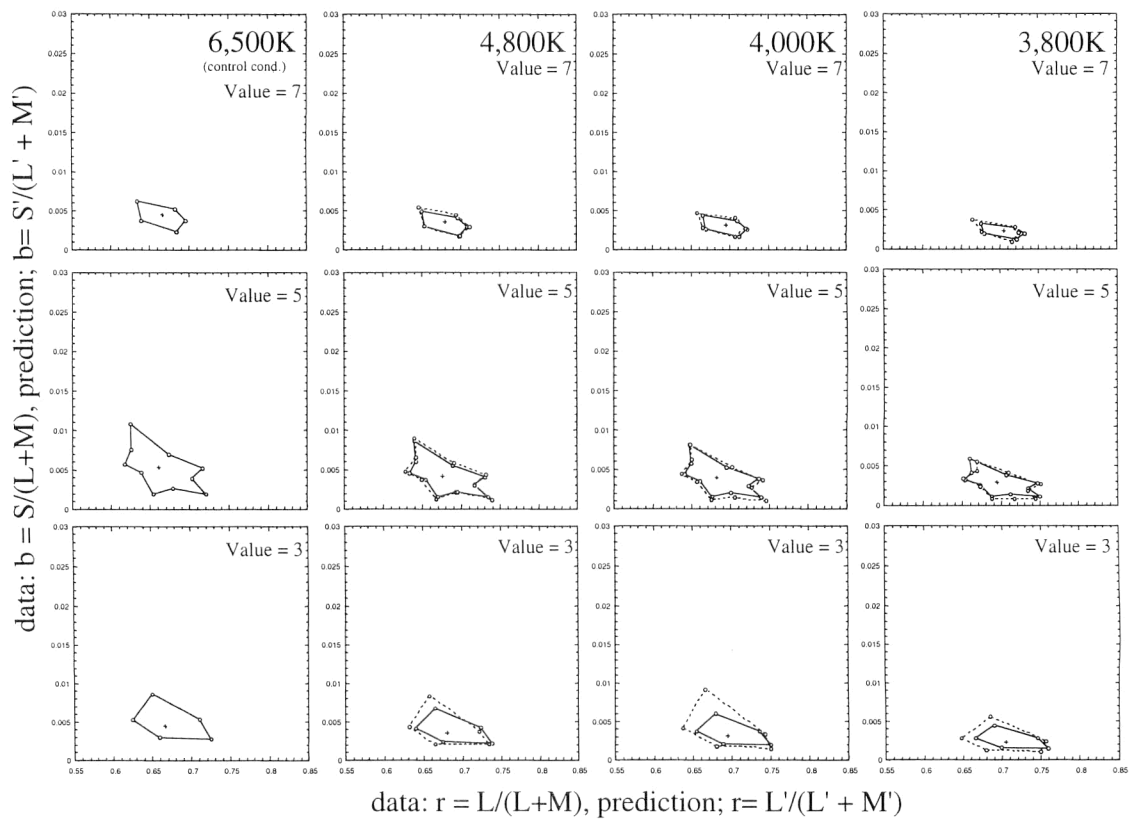
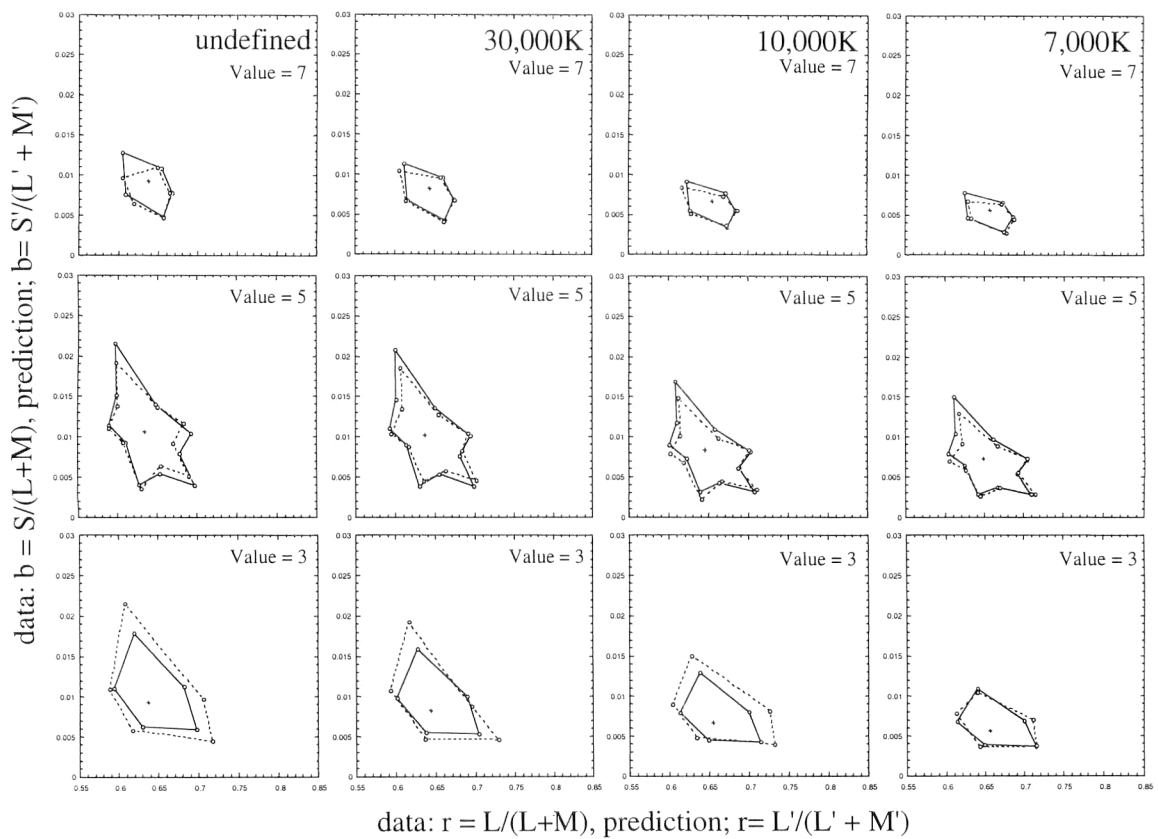


図6 被験者のマッチング結果と予測値の比較。マッチング結果が破線、予測値が実線で示されている。

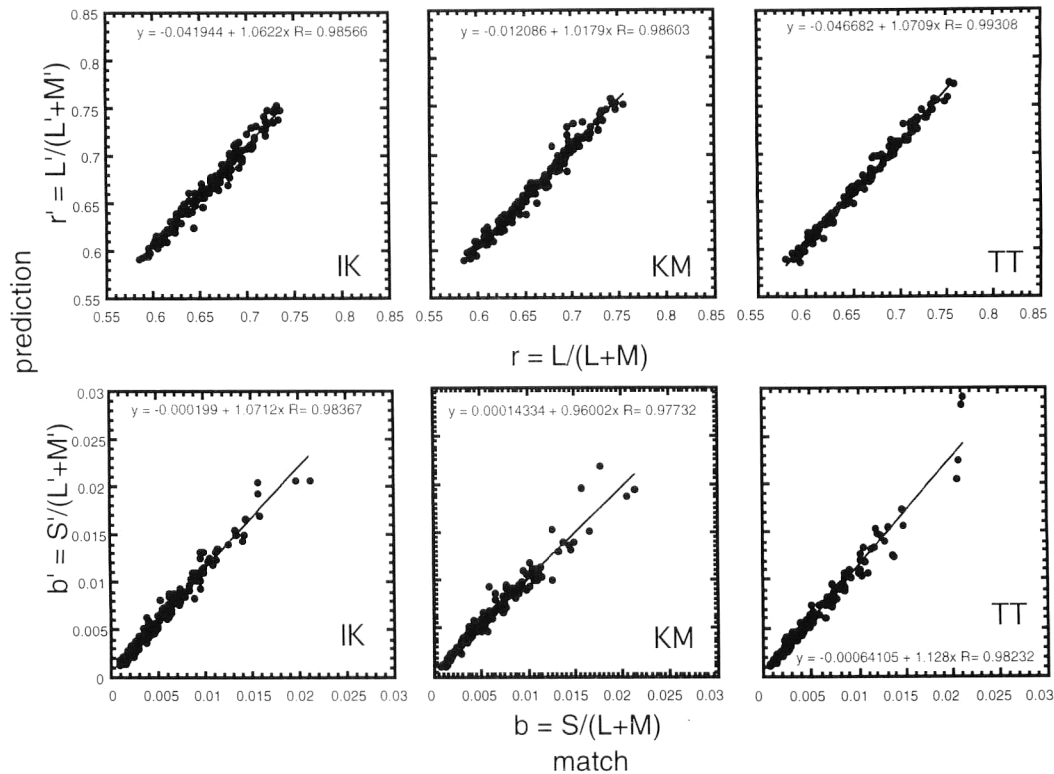


図7 図6の横軸 (r, r') と縦軸 (b, b') について、マッチング結果と予測値を横軸・縦軸に取ってプロットしたもの、いずれも傾き1の直線によくフィットしている。

画面上で模擬したものを呈示しても色恒常性が成立しにくいという俗説は、刺激から照明光と物体の位置関係といった情報を抜いてしまったことによる影響ではないかと思われる。これまでの視覚研究では、視覚情報処理を要素に分解し、要素ごとの機能を抽象化された視覚刺激を用いて調べていたが、その研究結果が有用なのは、あくまで要素間の相互作用がなく線形な足し合わせに近い外挿が可能な場合に限られる。しかし、あるレベル以上の視覚情報処理機構では線形性は保証されない。

同じコンピューター画面上でも、自然画像を呈示すれば、平面的な色票模擬画像とは大きく違った、より現実的な色知覚を生じる。人間が日常的に用いている視覚情報処理について研究する場合には、科学性を失わないように細心の注意を払いつつ、現実的に使われている神経機構を刺激し、その特性を調べる必要があると思われる。

われわれが日常的に経験する視覚世界は非常に多くの視覚情報にあふれており、それらがどのような形で寄与しているかを調べることは、現時点では非常に困難であるように思われるが、今後物体色知覚をはじめとした高次の視覚神経機構を解明するのに大きな鍵を握っていると考えられる。

一連の研究に関しては、受賞論文の共著者でもある内川恵二教授をはじめ、多くの方々に有益なご助言・ご指導をいただいた。光学論文賞受賞にあたり、この誌面を拝借して皆様への感謝の気持ちを申し上げ、結びの言葉とさせていただきます。

文 献

- 1) 栗木一郎：“色恒常性の神経計算理論”，光学，28 (1999) 232-241.
- 2) I. Kuriki and K. Uchikawa: “Limitations of surface-color and apparent-color constancy,” J. Opt. Soc. Am. A, 13 (1996) 1622-1636.
- 3) I. Kuriki and K. Uchikawa: “Adaptive shift of visual sensitivity balance under ambient illuminant change,” J. Opt. Soc. Am. A, 15 (1998) 2263-2274.
- 4) J. von Kries: “Die Gesichtsempfindungen,” *Handbuch der Physiologie des Menschen*, ed. W. Nagel (1905) pp. 109-282.
- 5) 栗木一郎，山重真紀夫，内川恵二：“錐体応答荷重モデルによる色恒常性メカニズムの検討”，日本印刷学会第102回春期研究発表会講演予稿集 (1999) pp. 84-87.
- 6) I. Kuriki and K. Uchikawa: “Physical- and subjective-color constancy observed in asymmetric color matches,” Invest. Ophthalmol. Vision Sci., 39 (1998) S154.
- 7) I. Kuriki, Y. Oguma and K. Uchikawa: “Dynamics of asymmetric color matching,” Opt. Rev., 7 (2000) 249-259.
- 8) D. I. A. MacLeod and R. M. Boynton: “Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal lumi-

- nance," J. Opt. Soc. Am., **69** (1979) 1183-1186.
- 9) I. Kuriki and D. I. A. MacLeod: "Chromatic adaptation aftereffects on luminance and chromatic channels," *John Dalton's Colour Vision Legacy*, eds. C. M. Dickinson, I. J. Murray and D. Carden (Taylor and Francis, London, 1997) 73-82.
- 10) B. J. Craven and D. H. Foster: "An operational approach to colour constancy," *Vision Res.*, **32** (1992) 1359-1366.
- 11) A. Gilchrist: "Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement," *Science*, **195** (1977) 185-187.

(2001年4月18日受理)