

実空間刺激による色恒常性の脳神経機構に関する研究

栗木 一郎^{1,2}・斎藤 真広²・内川 恵二²・宮内 哲³
仲泊 聡^{4,5}・武内 弘明^{4,5}・神立 敦⁵・北原 健二⁵

¹ 東京大学大学院 工学系研究科 計数工学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

² 東京工業大学 工学部 像情報工学研究施設

〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259

³ 郵政省 通信総合研究所

〒651-2492 神戸市西区岩岡町岩岡 588-2

⁴ 神奈川リハビリテーション病院

〒243-0121 厚木市七沢 516

⁵ 東京慈恵会医科大学

〒105-8461 東京都港区西新橋 3-25-8

1. はじめに

色恒常性とは、照明光の変化に関わらず物体表面から安定した色を知覚する現象である¹⁾。しかし、照明光の変化に伴う物理的な変化に着目すると、照明光変化に伴って物体表面で反射された光も変化している。しかし、色恒常性メカニズムはこの視野の色度の変化を「照明光の変化にともなう現象」として知覚し、「物体そのものの色の変化」と識別することを可能としている。Craven and Foster²⁾によると、この変化を識別するのに必要な時間は最短で0.025 s程度であり、順応によって見えが変化するのに必要な時間が数十秒³⁾であるのに対して非常に短い。従って、視覚系の初期の情報処理機構の中に、色度変化から「照明光変化」と「物体色変化」を抽出するメカニズムが存在している可能性が考えられる。

一方、白熱電球などの白色でない照明光の下では必ずしも物体の色と見た目の色が一致しない現象がある⁴⁾。注意深く観察すると例えば「白い物体が白く見えない」という現象に気がつくはずである。これは色知覚の多重性に基づくもので、この例は見た目の色知覚 (apparent-color) と、物体の属性としての色知覚 (surface-color) が違っていることを示している。この色知覚の多重性は非白色の照明の下で特に顕著に知覚される。Kuriki and Uchikawa¹⁾ は異なる照明光の下でのカラーマッチングにおいて apparent-color と surface-color の2種類の色の見えを区別して用いるように被験者に教示したところ、被験者はこの二つの判断基準を使い分けることができた。

見かけの色知覚 (apparent-color) の変化は照明光変化と物体の色変化のいずれの場合にも生じるが、物体の属性としての色知覚

(surface-color) の変化は照明光変化の場合には生じない。つまり、surface-color は照明光の変化か否かの情報を必要とする。従って、照明光変化に着目した場合と物体の色変化に着目した場合で脳活動の差を比較すると、視野の色度変化から照明光変化と物体色変化との識別に必要な部位が浮かび上がる事が予測される。

2. 方法

色恒常性のような日常的な現象に使われている神経機構を調べようとする場合、刺激画像も日常的な情景 (scene) であることが望ましい。そこで、本研究では実空間画像を刺激として呈示した。今回は Kuriki and Uchikawa⁴⁾ が用いた全室照明型実験装置の照明設定を変えた室内をデジタルカメラに収めた画像を実空間刺激として用いた。デジタルカメラを用いた理由は、刺激呈示までに経由する媒体の数を少しでも減らし、画像が不自然に劣化するのを防ぐことにある。デジタルカメラ

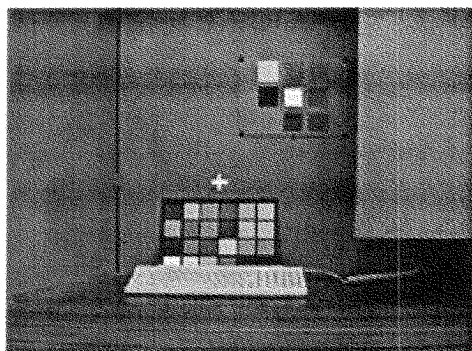


図1 刺激画像模式図。固視十字線の下にあるのが MacBeth color chart.

(NIKON, E950) の絞り、露光時間、ホワイトバランスを固定した状態で、照明光を白 (D65)、青、オレンジ、緑、紫に変化させ実験装置内を撮影した。室内には MacBeth color chart を置き、同時に撮影した (図1)。

刺激は5種類の色度の照明光に照明された実験室の写真とそれを加工したものである。各照明光の色度 (CIE 1931 xy) は、実験装置内での測光値で白: (x, y) = (0.312, 0.317), 青: (0.210, 0.213), オレンジ: (0.404, 0.387), 緑: (0.279, 0.424), 紫: (0.355, 0.228) であった。各照明光下での刺激画像において、(1) 原画像と (2) 加工画像 (別の照明下の画像から MacBeth chart の部分を copy-paste) の2種類を用意した。刺激は以下の手順で呈示した。照明光の変化は白→青→オレンジ→緑→紫の順に呈示し、それぞれの照明条件の中で原画像→加工画像の順で提示し、合計10枚を2秒間隔で切り替えて呈示した。加工画像における MacBeth chart の部分は、次に提示される照明条件下での画像から copy したものである。すなわち、各照明条件内の2枚の画像の間では MacBeth chart の部分の色が変化し、照明条件の変化を挟む2枚の画像の間では MacBeth chart の見た目の色変化がなく、照明光が変化することになる (図2)。刺激は液晶プロジェクター (Panasonic, TH-L550) によって、シールドルーム内に設置されたスクリーン (アクリル板) に磁気遮蔽窓を通して投影した。被験者は MRI 撮像装置のガントリー内に仰臥し、ヘッドコイルに取り付けたミラーを介して刺激を観察した。刺激視野は 16 deg ×

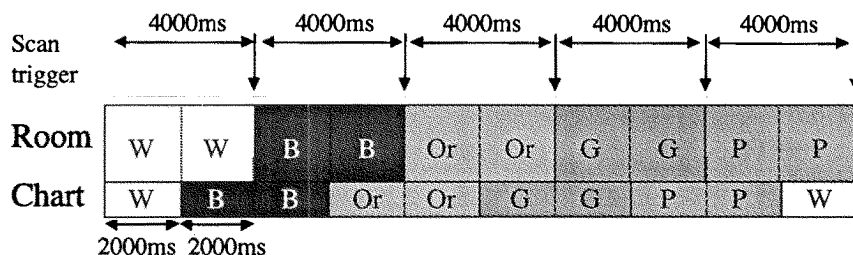


図2 刺激呈示およびトリガ時間経過。W, B, Or, G, P はそれぞれ照明光の色の見え、すなわち白色、青、オレンジ、緑、紫に対応。刺激構成の詳細は本文を参照。

12 deg である。

被験者に与えた教示は以下の3つの観察条件を切り替えることである。

- (1) 部屋の照明の変化に着目 (照明光 attended)
- (2) 色票の色の变化に着目 (色票 attended)
- (3) 特に注意せずに観察 (passive viewing)

各観察条件の中で同じ10枚の画像(5照明条件×2)の画像を繰り返し呈示し、観察条件の切り替えは音声によって指示した。従って、各観察条件間で与えられている刺激画像は共通であり、視覚野の中で視野の光の分布に直接反応する部位には有意な変化が起こらず、判断基準に直接関連した個所のみ変化が現れることが期待される。また、注意の切り替えをより確実にするため、着目している変化の瞬間にボタン押しをするつもりで観察するように指示した。

撮像装置は Siemens Magnetom Vision Plus (1.5 T) を用いた。BOLD 画像の撮像シーケンスは以下の通りである⁵⁾。

- ・ Single shot gradient Echo Planar Imaging
- ・ T2* 強調画像 : TR = 4000ms, TE = 55.24 ms, flip angle = 90 °
- ・ FoV: 192 mm x 192 mm; 64 x 64 pixels, 36 slices (3×3×4 mm voxels)
- ・ 撮像面 : AC-PC line に平行
- ・ 120 scan / session

結果は Magnetom Calculator 2 (自主開発 fMRI 解析ソフト; 以下 MagCalc2 と略記) および SPM 97 にて解析した。各ソフトウェアでの解析方法は以下の通りである。

MagCalc2

- ・ Gaussian フィルタ ($r=2$ pixels) を掛けた後、2つの観察条件間において、Box Car paradigm との間の相関検定を行った。
- ・ 結果は $p < 1.0 \times 10^{-4}$ (0.01%) の部分のみを抽出。
- ・ さらに $p < 1.0 \times 10^{-6}$ の部分を抽出して表示。

SPM 97

- ・ Head motion correction & Gaussian smoothing filter ($r=8$ mm) を適用

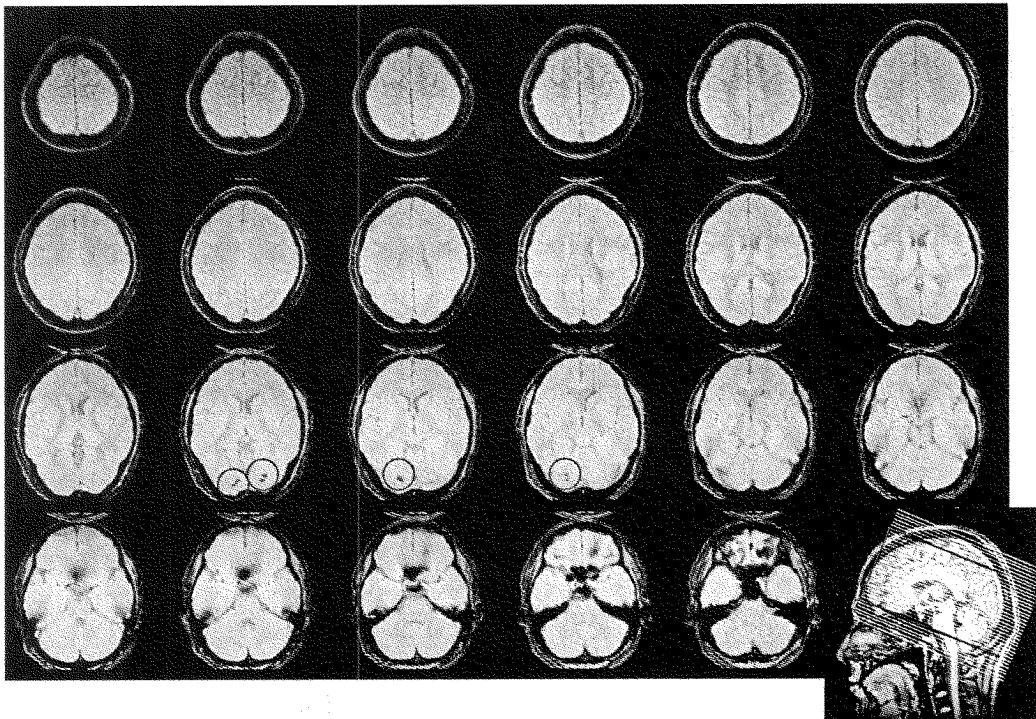


図3 被験者 MS, MagCalc2 による解析結果。照明光 attended - 色票 attended 条件間 $p < 1.0 \times 10^{-4}$ (円内は $p < 1.0 \times 10^{-6}$)。

- ・ t-検定 (Zスコア), $p < 1.0 \times 10^{-6}$ の部位のみ抽出。
 - ・ 標準脳への normalize と, 被験者間 (n=6) 平均による検討は行っていない。
- 現時点での被験者数は6名である。

3. 結果

3.1 照明光 attended 条件 vs. 色票 attended 条件

図3は被験者 MS の MagCalc2 による照明光 attended - 色票 attended 条件間での比較の解析結果を示している。図3は、優位水準 1×10^{-4} 以下の部位について抽出した部分を冠状断の構造画像 (T1 強調画像) と重ね、頭頂から下へむかって順に表示しており、右下の画像は矢状断画像における各断面の位置を示している。顕著な反応の差 (1×10^{-6} 以下; ○印) は後頭部に集中しており、前頭、頭頂部には反応の差が見られない。さらに後頭部につい

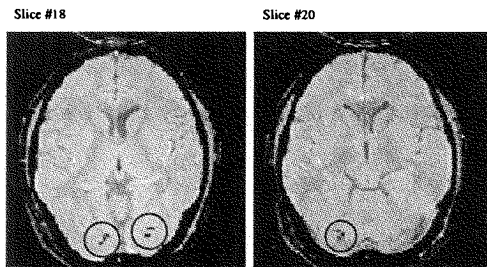


図4 被験者 MS, MagCalc2 による解析結果。照明光 attended - 色票 attended 条件間, $p < 1.0 \times 10^{-6}$ 。

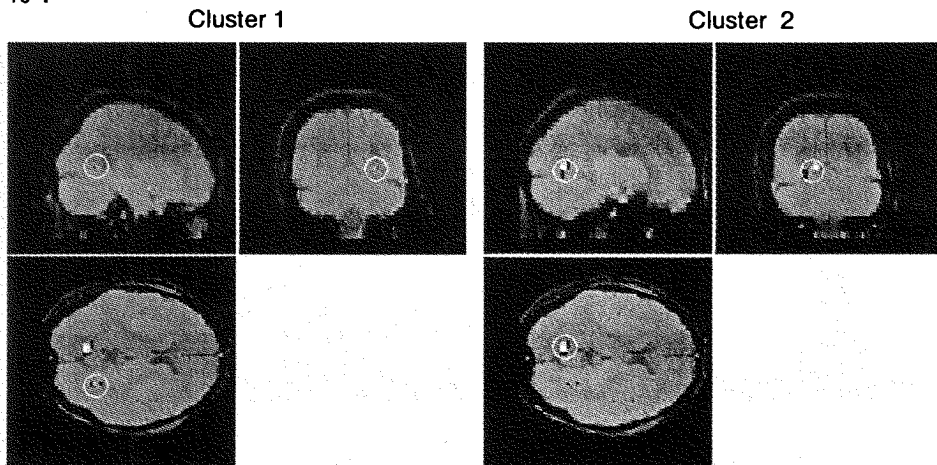


図5 被験者 MS, SPM による解析結果。照明光 attended - 色票 attended 条件間 ($p < 1.0 \times 10^{-6}$)。

て反応の大きな断面 (slices # 18, # 20) に着目して見ると (図4), 脳底部の反応は側副溝付近に見られ、いわゆる V4 と考えられる領野に見ることができる^{7,8)}。図5は SPM による解析結果を示しており、同様に側副溝付近において有意な活動の差が見られる。今回の結果で V4 と見られる部位は R/G チェッカーボード反転においても反応が確認された。同様の傾向は他の被験者の結果においても観察された。

3.2 対 passive viewing 条件

照明光 attended - passive viewing, 色票 attended - passive viewing の間で比較したときの MagCalc2 での解析結果が図6である。○印は、優位水準 1×10^{-5} 以下の部位を示している。他の被験者でも同様の傾向が見られたが、照明光 attended - passive viewing よりも色票 attended - passive viewing の条件間での差が顕著に見られた。これは、passive viewing の状態での脳活動が照明光 attended の脳活動に近いという事を示しており、逆に照明光の変化を無視して色票の色の変化のみに注目するというのは不自然なタスクであるということが明らかになったと考えられる。

4. 考察・まとめ

個々の物体からの光の色度変化は色票の変化、照明光の変化のいずれの場合でも生じて

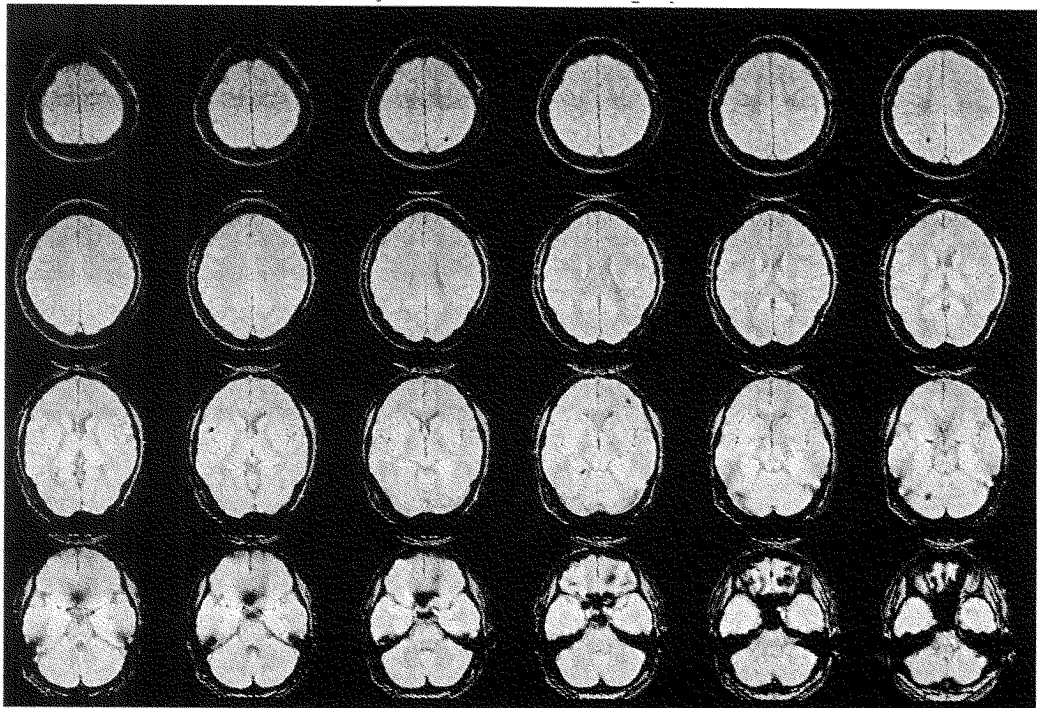
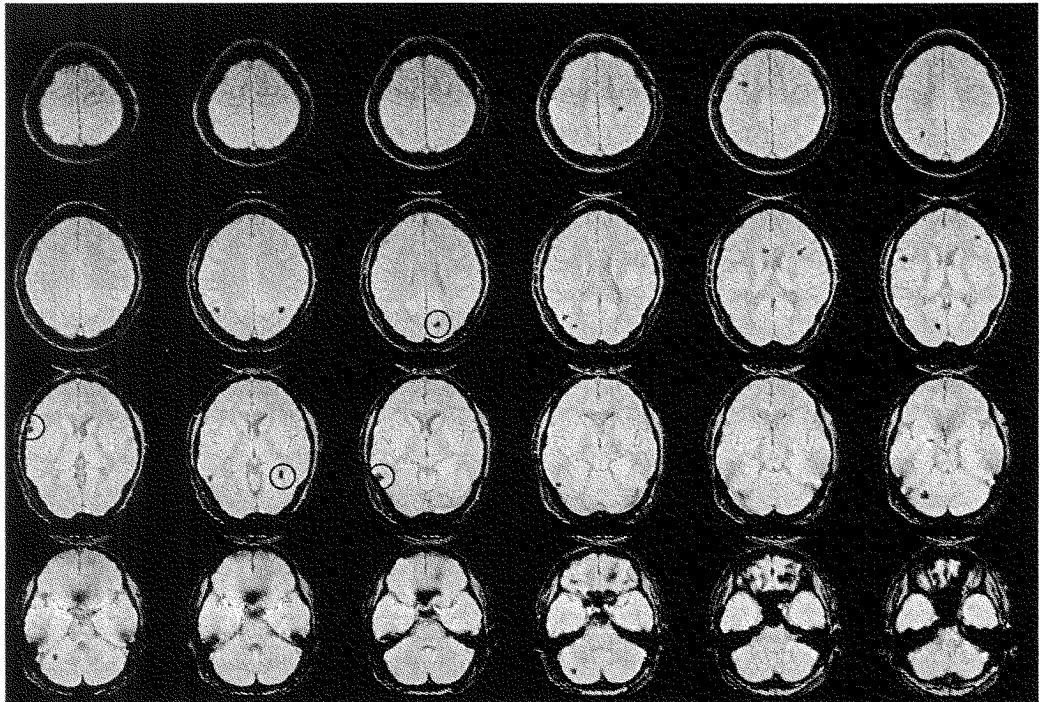


図6 被験者 MS, MagCalc2 による解析結果. 上 : 色票 attended vs. passive viewing, 下 : 照明光 attended vs. passive viewing 条件間の比較.

おり、刺激全体の色度変化の傾向を総合的に判断することによって初めて照明光の変化を検出することができると考えられる。従って、本研究における照明光 attended と色票 attended の観察条件間において脳活動の変化が生じた部位は視野変化の情報を総合的に判断している部位に相当すると考えることができる。

被験者によっては、照明光 attended と色票 attended の条件の間での脳活動の変化は色覚関連の情報処理をしていると考えられている V4 だけではなく鳥距溝付近 (V1 もしくは V2) においても見ることができた。V4 については R/G 反転刺激に対する応答を示した部位と比較することによって機能的に特定できる。しかし、retinotopy 検査⁹⁾等の方法による大脳皮質領野の境界を確認していないため確たる結論をすることはできないが、V4 以外の領野も照明光の色度変化の判断に寄与している可能性が示唆される。V1/V2 と見られる部位において活動の変化が見られた部位は、被験者に注意を modulate させていた色票の視野位置に対応している可能性も考えられ、retinotopy を測定することによって確認する必要があると考えられる。

また、本研究において照明光の変化として与えていた画像は視野全体の色度の変化を伴っており、照明光 attended と色票 attended の条件の間で活動に有意な差が見られた部位は、総合的な情報による照明光の判断ではなく単に視野の global な色度変化に応答していた可能性も考えられる。これに対しては、視野の平均色度が変化する画像などを用いてその反応個所と今回の結果の対比を行う必要があると考えられる。

今回の結果では、被験者に与える刺激画像を変化させず、被験者内部の判断基準の変化のみによって脳活動に有意な差をみることができた。Watanabe ら¹⁰⁾は運動刺激を使って global な運動方向と local な運動方向に着目した場合で脳活動に差が生じることを示している。同様に注意の向け方によって活動が変化

するという報告は他にも見られるが、今回の結果は、色覚においても同一刺激に対する知覚の多重性 (surface-color and apparent-color) が存在し、それらを注意によって切り替えることが可能であることが生理学的に裏付けられたと考えられる。

文 献

- 1) I. Kuriki and K. Uchikawa: Limitations of surface-color and apparent-color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 13, 1622-1636, 1996.
- 2) B. J. Craven and D. H. Foster: An operational approach to color constancy. *Vision Research*, 32, 1359-1366, 1992.
- 3) I. Kuriki and D. I. A. MacLeod: Chromatic adaptation aftereffect on luminance- and chromatic-channels. *C. M. Dickinson, I. J. Murray and D. Carden (eds): John Dalton's Colour Vision Legacy*. Taylor and Francis, London, 73-82, 1997.
- 4) I. Kuriki and K. Uchikawa: Adaptive shift of visual sensitivity balance under ambient illuminant change. *Journal of the Optical Society of America A*, 15, 2263-2274, 1998.
- 5) 例えば、岡本 淳: MRI の原理: 画像再構成から fMRI まで. *VISION*, 11, 25-31, 1999.
- 6) S. Ogawa, T.-M. Lee, S. Nayak and P. Glynn: Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magnetic Resonance in Medicine*, 14, 68-78, 1990.
- 7) D. J. McKeefry and S. Zeki: The position and topography of the human colour centre as revealed by functional magnetic resonance imaging. *Brain*, 120, 229-2242, 1997.
- 8) S. Zeki and L. Marini: Three cortical stages of colour processing in the human brain. *Brain*, 121, 1669-1685, 1998.
- 9) R. B. H. Tootell, J. D. Mendola, N. K. Hadjikhani, P. J. Ledden, A. K. Liu, J. B. Reppas, M. I. Sereno and A. M. Dale: Functional analysis of V3A and related areas in human visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 17, 7060-7078, 1997.
- 10) T. Watanabe, A. M. Harner, S. Miyauchi, Y. Sasaki, M. Nielsen, D. Palomo and I. Mukai: Task-dependent influences of attention on the activation of human primary visual cortex. *Proceedings of National Academy of Science, U.S.A.*, 95, 11489-11492, 1998.