

解説

表面色と開口色モード認識と色の見え

内川 恵二

東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1989年5月23日受理)

Surface-Color and Aperture-Color Mode Perception and Color Appearance

Keiji UCHIKAWA

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology Graduate School,
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

1. はじめに

物体の“色”は光源、光源からの光を反射する物体表面、入射した光を色信号に変換する視覚系の三者の組合せで決まる感覚である。したがって、光源、物体表面および視覚系のどの一つが変わっても、色の見えは変化する。同じ表面を見ても光源が変われば表面の色は変化し、また、光源が一定でも色順応などにより視覚系の内部状態が変われば色は変わって見えることになる。

ところが、日常生活でわれわれは色があたかも物体の大きさや形といった物理特性の一つであるように取り扱い、物体表面の色の変化にさほど気づかない。“白い”紙は太陽光のもとでも白熱灯のもとでも“白く”見えるので、その紙を表わすのに“白”という色が使えるわけである。これは、物体表面の色の見えが単純にそこから視覚系に入射する光の分光特性だけでは決まらないことを表わしている。物体を認識するうえでは、その色が環境の照明条件によってなるべく変化しないほうが都合がよい。もし、人間の視覚系が測色器のように機能して色の見えを決めているとすると、物体の色は照明光の変化に忠実に対応して変動し、照明条件が変わると、同一物体の認識がほとんど不可能になるだろう。視覚系が照明光の変化をその高度な機能によって打ち消しているため同一物体は同一色であるという通常の物体認識ができるわけである。

色の見えについては、これまでに刺激の時空間的呈示条件、輝度レベルや観測条件などをさまざまに変えて調べられている¹⁾。しかし、ほとんどの研究では刺激を暗

黒の中に呈示したり、均一な背景中に呈示してなるべく視覚系の“色”に対する特性のみを物体の認識とは切り離して調べるという方法をとっている²⁾。このような方法は、色覚の基本的なメカニズムを理解するうえでは有用であろうが、実際にわれわれがどのように物体の色を見ているかを調べるには不十分なものである。

最近、カラー CRT やカラープリンターなどによるカラー画像の再現技術が進み、異なった媒体間で色の見えを比較する機会が多くなっている。その結果、対象としている面の色の見えが媒体間で必ずしも一致しないという問題が生じている。これは色の見えが測色値だけでは決まらず、対象面がどのように認識されているかに関係した要因がかかわっているためであろう。本論文では、とくに色の見えが物体をどのように認識しているかによって変化する現象を取り上げる。まず、同一表面の色の見えが表面色モードと開口色モードでどのように変化するかについて、つぎに物体認識の側面とも言える色の恒常性について、最後に物体の視空間位置認識が色の見えに及ぼす影響についてそれぞれ一つずつ研究例をあげて解説する。

2. 表面色モードと開口色モード

2.1 刺激配置

われわれが見る色にはおもに二つの見えのモードがある^{3,4)}。一つは表面色（あるいは物体色）モード、もう一つは開口色（あるいは発光色、光源色）モードである。図1に二つの色の見えのモードを与える光源(L)、物体表面(O)と視覚系(S)の配置を示す。図1(a)ではLか

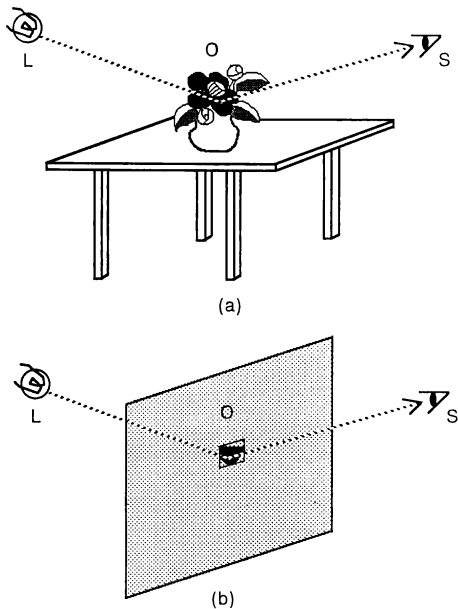


図1 表面色モードの色の見えを与える刺激配置 (a)と開口色モードの色の見えを与える刺激配置 (b)
 L: 光源, O: 物体表面, S: 視覚系. Lからの光がO面で反射してSに入射する. (a)ではO面の周囲もSには見えるが, (b)ではO面の周囲は取り除かれ暗黒となっている.

らの光がO面で反射されSに入射するという通常の表面色モードの場合を示すがSはO面の周囲も見ることが出来る. このような刺激配置では視覚系はO面を物体表面として正しく認識すると同時にその色を物体の一属性として知覚する.

図1 (b)では図1 (a)のO面の一部を切り取り, その他の周囲部分と光源を被験者の眼から遮蔽してしまうような刺激配置を示す. 視覚系はO面で反射したLの光を見るという点では(a)の場合と等しい. しかし, この場合はO面は暗黒中に孤立し, O面に対応した空間領域から光が発しているように見え, その色は開口色モードになる.

日常生活ではわれわれはほとんどの場合, 表面色を見ているが, 測光や測色学の基になっているデータは開口色によるものである¹⁾. ある対象から眼に入射する光の分光組成が等しくても, その対象が表面色モードで見えるか, 開口色モードで見えるかによって, 対象の色の見えは全く異なってくる.

2.2 色の見えの測定

図2に色票を用いて表面色モードと開口色モードの色の見えを作り出すための装置の一例を示す⁵⁾. 図2 (a)

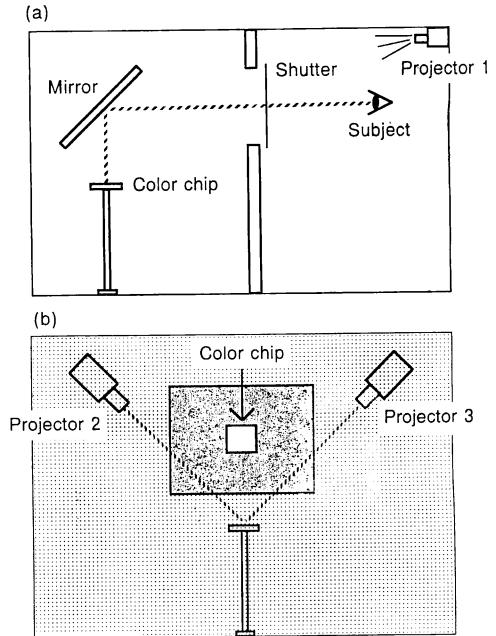


図2 色票を表面色モードと開口色モードで観察するための装置
 (a)側面図, (b)被験者側からテスト色票を見た図. 色票は2台のプロジェクターで斜上方から照明されている. プロジェクター1は被験者ブース内を照明する.

は装置の側面図, 図2 (b)は被験者側から装置を見た図である. テスト色票は細いパイプの上に置かれ, 斜上方から2台のプロジェクター2, 3によって照明される. 色票から外れたプロジェクターの光は床面で吸収され, 被験者には見えないようになっている. 被験者は色票を反射鏡を通して観察する. このような配置では図2 (b)で示すように色票は暗黒中に浮いているように見える. テスト色票をテスト色票よりも大きい灰色の周辺刺激の上にせて呈示することもできる. 適当な大きさの周辺刺激があれば色票は通常表面色モードの見えとなり, また, 周辺刺激がない場合はテスト色票は完全に開口色モードの見えとなる. したがって, 周辺刺激の有無で表面色と開口色モードの両方を作ることができる. プロジェクター1は被験者ブース内を薄暗く照明し, 被験者が完全に暗順応をしないようにしている. 被験者はシャッターが開いたときに色票を観察する.

色の見えを測定するときに測定のために用いる他の刺激を視野内に呈示してテスト色票の色の見えのモードを変えてしまうことはできない. したがって, 絶対評価法であるカラーネーミング法⁵⁾か継時マッチング法⁶⁾が考えられる. カラーネーミング法では表面色と開口色の両

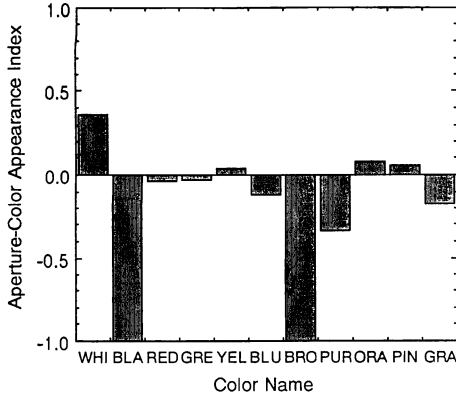


図3 各基本色に対する開口色の色の見えの係数
 カテゴリカルカラーネーミング法による。係数の定義は本文参照。横軸は左から白、黒、赤、緑、黄、青、茶、紫、橙、ピンク、灰を表わす。被験者6名の平均値

方に適用できる色名を用いることが必要である。

図3に215枚のOSAの均等色尺度色票⁷⁾を用い、カテゴリカルカラーネーミング法⁸⁻¹⁰⁾によって、表面色と開口色モードの色の見えの違いを6人の被験者に対して測定した⁵⁾結果を示す。カテゴリカルカラーネーミング法では、被験者は表示された色票に対して、単一な色名を用いて応答する。図3の横軸は被験者の用いた色名のなかから、11の基本色¹¹⁾である白、黒、赤、緑、黄、青、茶、紫、橙、ピンク、灰を示し、縦軸は二つのモードで各色名が用いられた応答数の変化の割合 $= (N_o - N_s) / (N_s + N_o)$ (ここではこの割合を“開口色の見えの係数”と呼ぶことにする)を表わす。ただし、 N_s :表面色モードで、ある一つの色名が用いられた応答数、 N_o :開口色モードで同じ色名が用いられた応答数を示す。係数=0ならば二つのモードで用いる色名の応答数に差はなく、係数>0ならば開口色モードで、<0ならば表面色モードでその色名をより多く用いることを示している。とくに、係数=+1または-1のときはその色名は一つのモードでしか用いられない色名となる。図3より、黒と茶は表面色モードでしか現われない特徴的な色感覚であることがわかる。開口色モードでは黒は灰に茶は橙にカテゴリカルな変化を生じてしまい、さらに、青、紫、灰といった色感覚が少なくなって、代わりに白、ピンク、橙の色感覚が増大している。

図4には各基本色のOSA空間内の平均位置がj軸(黄青軸)、g軸(緑赤軸)、L軸(明度軸)の座標によって示されている。白四角が表面色モード、黒四角が開口色モードの場合を示す。1名の被験者の結果である。

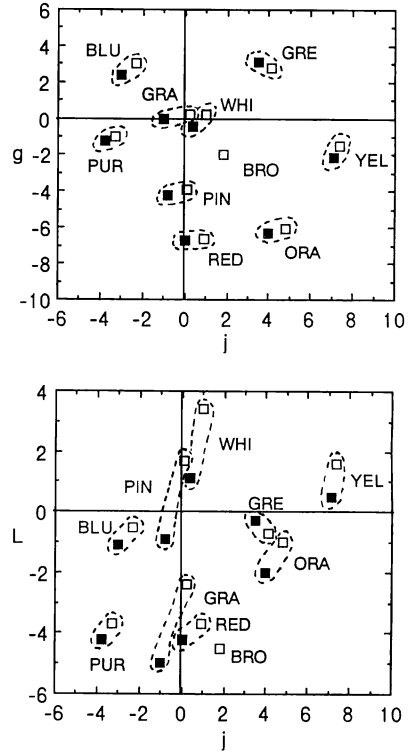


図4 各基本色のOSA空間内の平均位置
 □:表面色モード, ■:開口色モード. カテゴリカルカラーネーミング法による。被験者1名

モードの違いにより各基本色のj, g軸方向の変化はほとんどないが、L軸では開口色モードで負の方向に一致した大きなシフトが見られる。これは表面色モードから開口色モードに変わっても、黒、茶以外の色は質的にさほど大きな変化は起こらないが、明るさはかなり大きく増大することを示している。

3. 色の恒常性

3.1 現象

図1(a)で光源Lを異なった光源に変えて物体表面Oを照明してもO面の色の見えは変わらないことを色の恒常性と呼んでいる。この現象は視覚系が眼に入射する光の放射分光強度Iから光源だけの分光強度成分Lを差し引いて物体表面の分光反射率Oだけを取り出していることになる。IはLとOの積であるから、Lを知らずに、IからOを求めるのは本来不可能なことである。しかし、視覚系は光源Lの効果を何らかの方法によって推測しO面の色を一定に保ち、物体認識に役立てていると考えられる。

これまでの研究では色の恒常性を得るためには二つのメカニズムが考えられている。一つは順応効果、もう一つは複数個の色の効果である。前者は von Kries の色順応効果で代表されるメカニズムによって、照明光の効果を打ち消してしまうという考え方、後者は視野内に分布する複数個の色から照明光と物体表面の分光成分を分離してしまうという考え方である。両者の考え方とも、これまではおもに計算理論的なアプローチが多く¹²⁻¹⁵⁾、実験的に仮説を検証したものは少なかった。しかし、最近いくつかの実験的な研究が行なわれているので、ここでは二つの効果についてそれぞれ調べた研究を示す。

3.2 順応効果

図2に示すような装置を用いると、色票から開口色モードの見えを作り出すことができる。開口色モードでは、対象の色の見えが変化しても光源の分光強度 L が変わったか、物体の分光反射率 O が変わったかを色の見えの変化だけから判断するのは不可能であるから、色の恒常性は成り立たないことになる。しかし、 L をもつ別のプロジェクターで被験者を順応させることができるので、周辺に他の刺激が全くない条件、つまり、複数個の色の効果を取り除いた条件で色順応効果だけによる色の見えの変化を調べることができる。

実験¹⁶⁾は順応光用プロジェクター1と色票照明用プロジェクター2、3を同じ白色にした順応白照明白条件 (AP. W-IL. W) を参照条件とし、プロジェクター1を白色、プロジェクター2、3を赤色にした順応白照明赤条件 (AP. W-IL. R)、プロジェクター1、2、3をすべて赤色にした順応赤照明赤条件 (AP. R-IL. R) で色の見えを測定し、順応白照明赤条件でシフトした色の見えが順応赤照明赤条件でもとに戻るかどうかを調べたものである。この色の見えの回復の程度で色の恒常性に及ぼす色順応効果の程度が測定できることになる。

図5はカテゴリカルカラーネーミングで色の見えを測定した結果である。順応白照明赤条件と順応赤照明赤条件で11の基本色名を用いた応答数の参照条件の場合の応答数との差を表わしている。たとえば、赤は順応白照明赤の条件では応答数が増大するが、順応赤照明赤の条件では応答数の増大の程度が小さくなり参照条件に近づいている。また、緑でも順応白照明赤の条件では応答数が減少するが、順応赤照明赤の条件ではやはり参照条件の場合に近づいている。このような応答数の回復は他の色にも見られ、色順応が色の見えの回復に効果があることが示されている。しかし縦軸0の位置までもどっていないので、回復は完全ではなく部分的なものであるとい

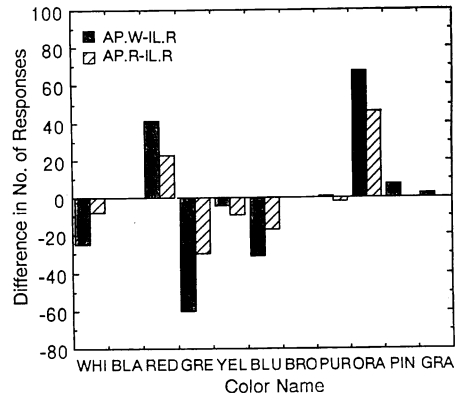


図5 順応白照明赤 (AP. W-IL. R) 条件と順応赤照明赤 (AP. R-IL. R) 条件での各基本色名を用いた応答数と参照条件 (順応白照明白) での応答数の差。カテゴリカルカラーネーミング法による。被験者1名。

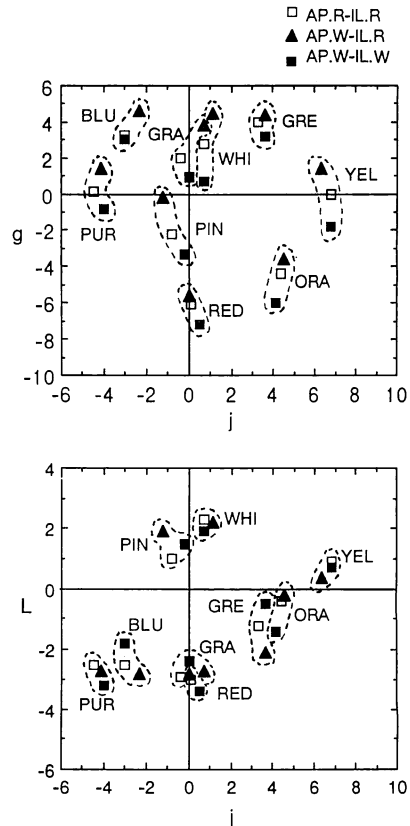


図6 各基本色の OSA 空間内の平均位置。□: 順応赤照明赤 (AP. R-IL. R), ▲: 順応白照明赤 (AP. W-IL. R), ■: 順応白照明白 (AP. W-IL. W) (参照条件)。カテゴリカルカラーネーミング法による。被験者1名。

える。

図6に OSA 空間内の基本色の見えるシフトを示す。参照条件に比べて順応白照明赤条件では各色名点が q の正方向にシフトし、赤の領域が増大していることがわかる。順応赤照明赤条件では参照条件の点の方向にこのシフトがおよそ中間点まで回復しているが、完全でないことがわかる。図5, 6では色の恒常性にとって色順応メカニズムは部分的には効果があるが、これだけでは色の恒常性は完全に説明できないことが示されている。

3.3 複数個の色の効果

図7はいわゆるモンドリアン図形と呼ばれている複数個の色票を並べた図形である。図中、色票の色はマンセル記号で表わしてある。このような図形では複数個の色の同時呈示効果が色の恒常性に役立っていることが知られている¹⁷⁾。このモンドリアン図形を刺激として用いると、色順応がなくても、異なった光源下の色票を参照光源下の同じ色票とマッチングすることができることが報告されている¹⁸⁾。

図8の白丸は図7の太線で囲まれたテスト色票を6500 Kの参照光源で照明したときの x, y 色度座標を表わしている。白四角、白三角はそれぞれ4000 K, 10000 Kの光源で照明した場合の位置を示している。黒三角、黒四角はそれぞれ4000 K, 10000 Kの参照光源で照明したテスト色票を、6500 Kで照明した同じテスト色票とマッチングした結果である。もしこれを開口色モードでマッチングすれば、黒四角、黒三角は測色値の等しい白丸と一致するはずであるが、実際はそれぞれ白四角と白三角の位置に近い結果が得られている。これはテスト色票を4000 Kと10000 Kの異なった光源で照明しても、被験者は光源の効果を取り除いた色票の色の

見えでマッチングでき、色の恒常性の要因として、複数個の色の効果が大いことを示している。

4. 物体認識と色の見え

物体表面の色の見えは表面が3次元視空間内でどこに位置しているように見えるかによって影響を受ける¹⁹⁾。図9(a)のテスト色票(T)を(b)図に示すように四角形にし、ピンホール(P)から観察すると、テスト色票は手前の面にあるように見える。しかし、(c)図に示すように左上と右下に切れ目を入れて呈示すると、テスト色票は後方の面上にあるように見える。手前の面は暗く、後方の面は明るく照明されているが、どちらの面を照明する光源も被験者には見えないようになっている。テスト

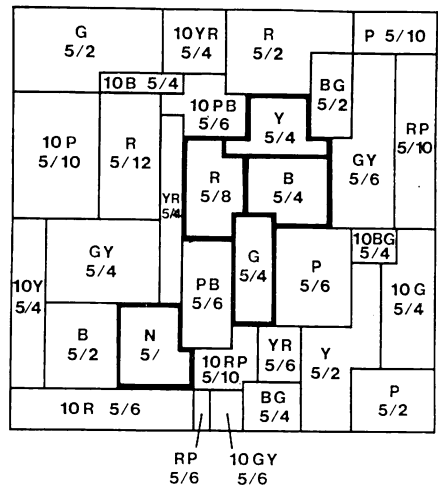


図7 モンドリアン図形
図中の各四角形の色はマンセル記号で示されている¹⁸⁾。

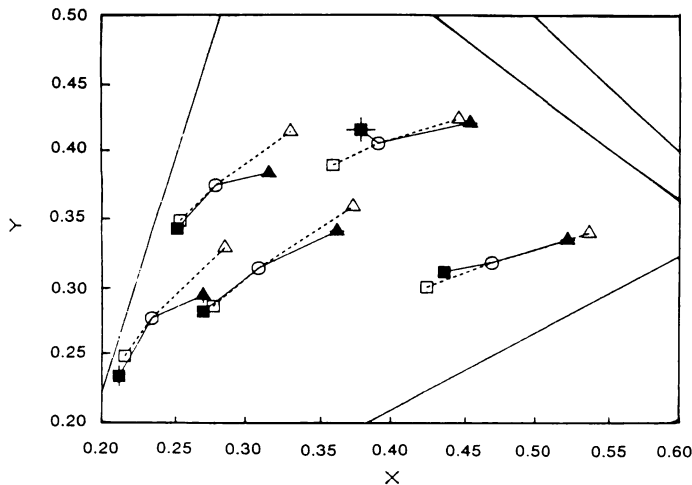


図8 異種光源化での色票の色の見えのマッチング

○: 図7中のテスト色票(太線内)を6500 Kの光源で照明したときの色度点, △: 4000 K, □: 10000 Kで同じテスト色票を照明したときの色度点, ▲: テスト色票を4000 Kで照明し, これと同じ色票を6500 Kで照明して, 両者をマッチングしたときのテスト色票の色度点, △に良く一致している. ■: テスト色票を10000 Kで照明し, これと同じ色票を6500 Kで照明して, 両者をマッチングしたときのテスト色票の色度点. □に良く一致している.

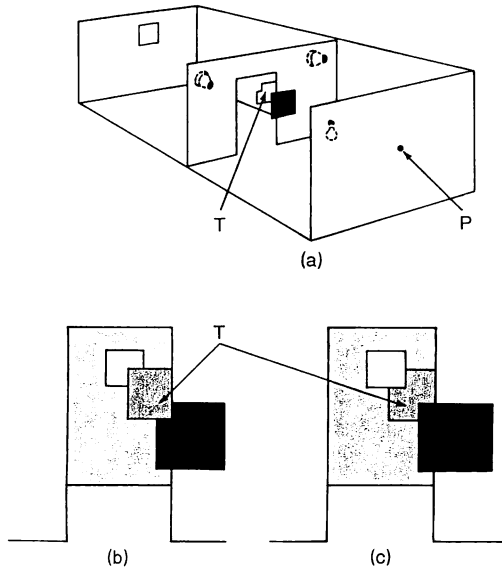


図 9 Gilchrist の実験¹⁹⁾

(a) 刺激色票の呈示装置。(b) テスト色票 (T) は手前の面上に見える。(c) テスト色票 (T) は後方の面上に見える。テスト色票 (T) は (b) では白, (c) では黒に見える。

色票は白, 手前の面でテスト色票の横についている色票は黒, 後方の面でテスト色票の横に見える色票は白である。このような二つの奥行き知覚でテスト色票の明度を測定すると, マンセルバリューが (b) 図の場合では 9.0, (c) 図の場合では 3.5 となり, 手前の面に見えるときは白, 後方の面に見えるときは黒となる。物体の表面が視空間内でどこに見えるかによって, 表面の明度が白から黒まで変化してしまうことは, 色の見えが物体を認識する視覚系の働きと強く結びついていることを明らかにしている。

5. おわりに

表面色モードでは見る対象は物体の表面という認識があるが, 開口色モードでは対象はもはや物体ではなく, 光を発している空間領域として知覚される。同一物体の色は光源が異なっても同一に見えるという色の恒常性は複数個の色が同時に視野内に存在することが大きな要因になっている。また, 表面色の色の見えはその面を視覚系が視空間内のどこに認識しているかによって強く影響される。以上本論文で述べたことは, いずれの場合も, 色覚も物体を認識するという視覚系の高次な機能と強く相互作用しあっていることを示していると考えられる。

この色の見えと物体認識の関係は色の見えを基礎においた将来の測光, 測色学を確立するうえで, まず, 第一に考えなければならない問題であろう。しかし, 逆に色の見え方がロボットなどの人工知能機械による物体認識に応用される可能性も示唆しているといえる。

文 献

- 1) 池田光男: 色彩工学の基礎 (朝倉書店, 東京, 1979).
- 2) G. Wyszecki and W.S. Stiles: *Color Science*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1982).
- 3) R. M. Boynton: *Human Color Vision* (Holt, Rinehart & Winston, New York, 1979).
- 4) R. M. Evans: *The Perception of Color* (Wiley, New York, 1974).
- 5) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boynton: "Influence of achromatic surrounds on categorical perception of surface colors," *Vision Res.*, **29** (1989) 881-890.
- 6) 岡嶋克典, 阿山みよし, 内川恵二, 池田光男: "光源色モードと表面色モードにおける明るさ効率の比較", *光学*, **17** (1988) 582-592.
- 7) D. Nickerson: "OSA Uniform Color Scales samples: A unique set," *Color Res. Appl.*, **6** (1981) 7-33.
- 8) R. M. Boynton and C. X. Olson: "Locating colors in the OSA space," *Color Res. Appl.*, **12** (1987) 94-105.
- 9) K. Uchikawa and R. M. Boynton: "Categorical color perception of Japanese observers: comparison with of Americans," *Vision Res.*, **27** (1987) 1825-1833.
- 10) 内川恵二: "表面色のカテゴリカル知覚", *光学*, **17** (1988) 661-669.
- 11) B. Berlin and P. Kay: *Basic Color Terms: Their Universality and Evolution* (University of California Press, Berkeley, 1969).
- 12) L. T. Maloney and B. A. Wandell: "Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 29-33.
- 13) L. T. Maloney: "Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 1673-1683.
- 14) M. H. Brill and G. West: "Chromatic adaptation and color constancy: A possible dichotomy," *Color Res. Appl.*, **11** (1986) 196-204.
- 15) J. A. Worthey: "Limitations of color constancy," *J. Opt. Soc. Am. A*, **2** (1985) 1014-1026.
- 16) K. Uchikawa, H. Uchikawa and R. M. Boynton: "Partial color constancy of isolated surface colors examined by a color naming method," *Perception*, **18** (1989) 83-91.
- 17) E. H. Land and J. J. McCann: "Lightness and retinex theory," *J. Opt. Soc. Am.*, **61** (1971) 1-11.
- 18) L. Arend and A. Reeves: "Simultaneous color constancy," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 1743-1751.
- 19) A. L. Gilchrist: "Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement," *Science*, **195** (1977) 185-187.