

色のモード変化と物体・光源認識

岡嶋克典

防衛大学校 応用物理学教室

〒239 横須賀市走水1-10-20

1. はじめに

我々は、見ている色彩光景から外界の物や状況を認識している。その意味で、「色」情報は外界の基本的属性として、極めて重要な判断材料となっている。例えば、「赤い花」を見た時の「赤い」を、花の物理的属性として通常扱っている。しかし、外界にはある分光特性を持つ光があるだけで、「色」そのものは存在しない。「色」は視覚系による心理的産物であり、脳内においてのみ存在する生体独自の情報形態である。言われてみれば納得できるこの事実を、しばしば人は忘れてしまう。視覚系は巧妙に、色が外界に存在しているように見せているのである。この様な、外界のある部分における光の波長分布或いは分光反射率の情報を、色という脳に固有の情報（符号）に変換するシステムが色知覚メカニズムであり、このシステムで変換処理された光情報によって、我々は常に外界の状況を独自の形式で再構築している。この色知覚メカニズムは、網膜の錐体レベルから反対色チャンネル、さらには固有の色に反応する細胞に至るまで、心理及び生理研究の発展とともにその仕組みが徐々に明らかにされつつあるが、色の見えに関するメカニズムについては今でも不明な点が多い。

外界の光操作に関連する測色技術においては、既に測光・測色学が確立されており、物理的測定として広く活用されている。しかし、色とは見えそのものであるにもかかわらず、測色学は実際の色の見えについては何も

述べていない。測色学では、表色系内に色を配置し、等しい呈示状態での等色条件一すなわち錐体レベルで等しい応答を出力させる光の条件を求めることを可能にした。したがって、ある光が常に同じ色に見えるならば、測光値だけで色の見えを一意的に規定できたであろう。しかし実際は、物理的に同じ光でも、呈示状態によってその色は異なって見える。呈示状態を考慮しながら色の見えを定量化するためには、我々の視覚系の色覚メカニズムを知ることが必要不可欠となる。そして、この色の見えの問題は、光源色と物体色の知覚の違いに最も顕著に現れる。

光源色とは自己発光体から放射されているように知覚される色のことである。それに対して、物体色とは照明されている物体表面を知覚させる色のことで、表面色と呼ぶ場合もある。また、光源色を知覚している状態を光源色モードといい、物体色を知覚している状態を物体色モードという。これらの区別は、それが実際に発光しているか否かによらず、人間がある光刺激をどのように知覚するかで決定される。しかし、色再現を問題にする場合には、実際の呈示方式によって両モード（光源色・物体色）を区別する場合もある。本稿では前者の定義で統一している。

両モード間の見えは、物理的な測光値が同じであっても明らかに異なり、それぞれ特徴的な様相を呈する。このモードの差は、刺激の周辺条件などの呈示状態の違いによって生じる。例えば、リダクションスクリーンを通

して物体表面を見ると、光源色（あるいは開口色）に見えることはよく知られていることである。また、これとは逆に、発光方式のCRTやVDTは、物体色を画面上に呈示することができる。呈示状態による物体色と光源色の見えの違いは、視覚系の色知覚メカニズムの特性を反映しており、そのメカニズムを明らかにすることは、新しい色表示システムの確立にも大きく寄与すると考えられる。また、対象色が物体か光源かの判断は、パターン認識の技術等にも応用できることが期待される。

本稿では、モードによる色の見えの変化に関する最近の研究成果を紹介し、物体・光源認識のメカニズムについて考察する。

2. モードによる明るさ知覚の変化¹⁾

ある色光の輝度と明るさの違いの程度を表す量として、色光の白色光に対する明るさ効率 B/L 値がよく用いられる。 B/L は次式で定義されている。

$$B/L = \frac{\text{(参照白色光の輝度)}}{\text{(等明るさ色光の輝度)}}$$

B/L は色光の色味の明るさへの寄与を反映

する量と考えられており、 $B/L > 1$ ならば等輝度の色光の方が白色光よりも明るく、 $B/L = 1$ ならば等輝度で両者は等しい明るさに見えることになる。 B/L 関数は、これまでも各モードにおいて多くのデータが取られている^{2,3)}が、モードによる B/L の差は明らかではない。そこで、物理的に同一な刺激を、同一被験者に対して表面色モードと光源色モードで呈示し、モードの異なる色光の明るさ効率 B/L の変化を調べた結果を以下に紹介する。

テスト色票には修正マンセル色票を8枚使用している(表1)。刺激のサイズは視角 $2.9^\circ \times 2.9^\circ$ で、周辺刺激のサイズは視角 $8.0^\circ \times 8.0^\circ$ である。

明るさマッチングに先立ち、表1に示されている4種の周辺刺激と周辺刺激なしの5種類の呈示条件で、8枚のテスト色票が「光源色」に見えるか、「物体色」に見えるかを判断し、合計10点になるように得点を割り当てる実験を行い、その結果を図1に示す。横軸はテスト刺激の色票名、縦軸は各色票の「光源色」の得点の平均値を表す。シンボルの違いは周辺条件の違いを表しており、○は周辺刺激なし、△はN0.25、▽はN3、□はN6、◇はN9の各周辺条件を示している。縦軸の0は

表1 使用した色票と測光値			
マンセル色票	色度座標		輝度(cd/m ²)
	x	y	
TEST			
7B6/6	0.3160	0.3814	1291.0
10G6/6	0.3268	0.4507	1371.0
2G5/8	0.3307	0.5173	906.9
5Y5/8	0.5031	0.4719	1103.0
7YR4/9	0.5570	0.4236	722.9
10RP4/1	0.5929	0.3250	731.8
2RP4/1	0.4748	0.3420	1064.0
5PB5/8	0.3144	0.3345	862.5
SURROUNDINGS			
N0.25/	0.4400	0.4268	10.9
N3/	0.3996	0.4009	330.4
N6/	0.4046	0.4044	1496.0
N9/	0.4148	0.4083	3860.0

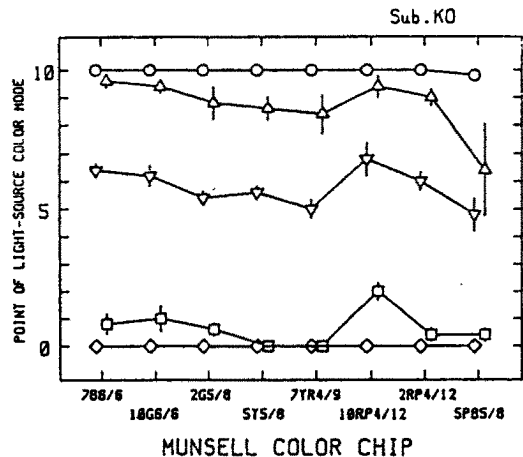


図1 色票のモード変化

物体色の得点10に相当する。周辺刺激がない条件では、刺激色票はほぼ完全に「光源色」の見えを呈しているが、周辺刺激の明るが高くなるにつれて刺激の見えは「物体色」の見え方に移行していくことを示している。周辺刺激がN6の条件になると「光源色」の見えはほとんどなくなり、色票本来の「物体表面」的な見えとなる。刺激が光源色モードで見える時の被験者の内観は、スリガラス状の発光体が輝いているような見えを呈したということであり、これは後節で述べる透過色知覚と関連する。

次に、同じテスト色票と周辺刺激を用いて、各周辺条件における明るさ効率 B/L を測定した結果を図2に示す。横軸はテスト刺

激、縦軸は B/L の対数値、シンボルの違いは周辺条件の違いを表している。この結果は、周辺刺激の輝度が上がるにつれて、色光の明るさ効率 B/L は増大することを示しており、見えの結果(図1)も併せて考えると、光源色モードから物体色モードになるにつれて、徐々に色光の明るさ効率は増加することを表す。また、周辺刺激がN6とN9の条件は、共に物体色モードであるが、周辺刺激N9の時のの方が周辺刺激N6の時よりも明るさ効率の値は大きい。したがって、物体色モードであっても色光の明るさ効率は一定ではなく、周辺条件によって変化することもわかる。これらのことから、同じ被験者であっても異なる見えのモードによって、色光の明るさ効率は大きく異なるということが示された。

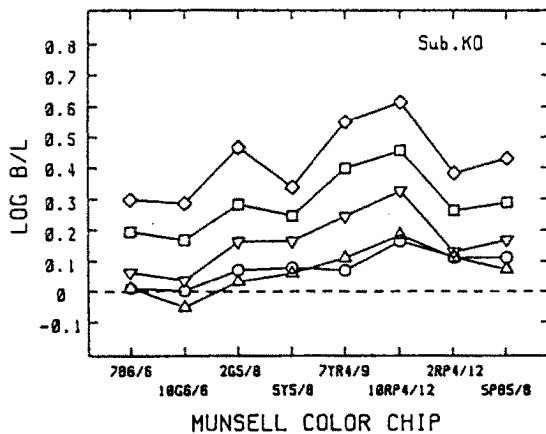


図2 色票の呈示条件による B/L の変化

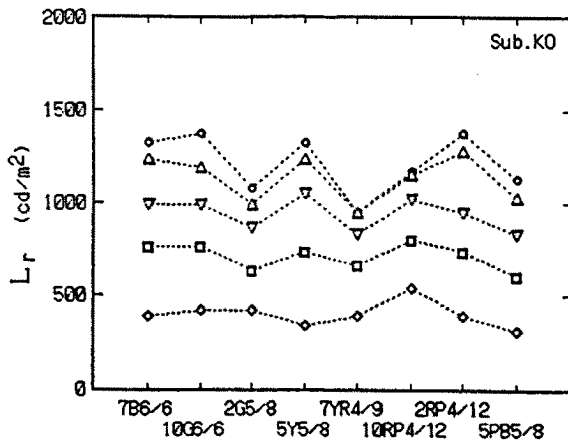


図3 呈示条件による絶対明るさの変化

図3は、全ての周辺条件における色票の明るさを、周辺なしのグレースケールのバリューで示したものである。横軸は色票を、縦軸は等明るさの周辺なしのグレースケールのバリュー(等価バリュー)である。この図から、周辺強度が増加するにつれて暗い等価バリューと明るさマッチングしており、物体色モードになるにつれて絶対明るさそのものは減少していることが分かる^{4,5)}。したがって、周辺条件による B/L の差は、周辺強度による白色と有彩色の絶対明るさの減少量の違いによって説明できると結論できる。このような絶対的明るさの変化を定量化することによって、モード変化に対応した明るさ測光システムも実現できると思われる。

3. モード間の対応色の関係⁶⁾

物体色と光源色は、XYZ表色系などの測光値によって対応させ

ることはできるが、測光値だけでは物体色と光源色の関係を明確に記述することはできない。測光値が同じでも、物体色と光源色では色の見えが異なるからである。物体色と光源色を統一して取扱うためには、実際の知覚に基づく物体色と光源色の対応関係を定量化しておく必要がある。そこで、等明るさ光源色モードの色光とそれに対応する物体色モードの色光をx y色度図上にプロットした結果が図4である。

シンボル●は参照色光、シンボル▲はそれとカラーマッチングした色光を示し、対応する両色光のシンボルは実線で結んでいる。また、シンボル□はマッチング刺激の白色周辺光を示している。2人の結果は共に、光源色の参照色光(●)に色度図内部に位置する物体色のテスト色光(▲)が等色していることを示している。このことは、物体色と光源色の見えを単純に色度図上で比較できないことを示しており、物体色は測光値が同じ光源色よりも色度図上で彩度が高い色として知覚されることがわかる。図4内の点線の三角形は、CRTのRGB各発光体のx y色度点を結んだものであるが、テスト色光はこの三角形を越えた領域の光源色と等色しており、実際のCRTの色再現範囲は色度図上で見るよりもか

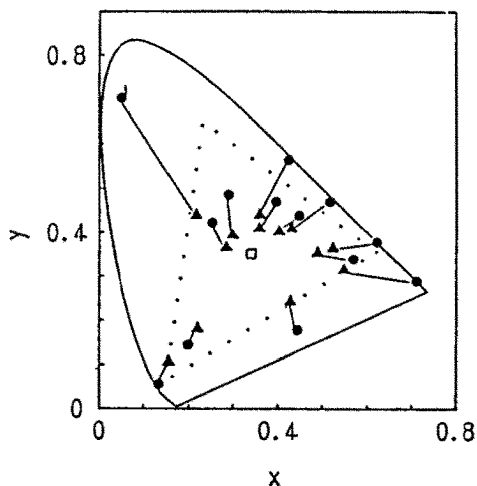


図4 対応色の xy 色度図表示

なり広いことを示唆している。この結果を反対色メカニズムの観点から考察すると、両色はカラーマッチングしているので、色チャンネル出力量は互いに等しくなっているはずである。しかし、物体色の色チャンネルへの入力量は彩度が低い分小さい。したがって、物体色の色チャンネル出力は周辺白色光によって増大されて、光源色と等しくなったと考えることができる。

次に、等色時における各色光の対応輝度の関係を図5に示す。左の数値は参照色光のxy色度値で、黒塗りの棒が参照色光の輝度の値を示している。これを見ると、参照色光に対応するテスト色光の輝度は、参照色光の輝度に比べて非常に高いことがわかる。すなわち、光源色に対応する物体色の輝度は、光源色よりも高くする必要があることを意味している。以上の結果から、物体色は色度図上で高彩度・低輝度の光源色とカラーマッチングすることが示されたが、今回無視した黒み⁷⁾が、色の見えに対してどう影響するのかを定量的に調べることも必要であろう。

また、色度図上の変化だけではなく、カテゴリカルなカラーネーミングの結果⁸⁾からも物体色と光源色の違いが明らかにされており、

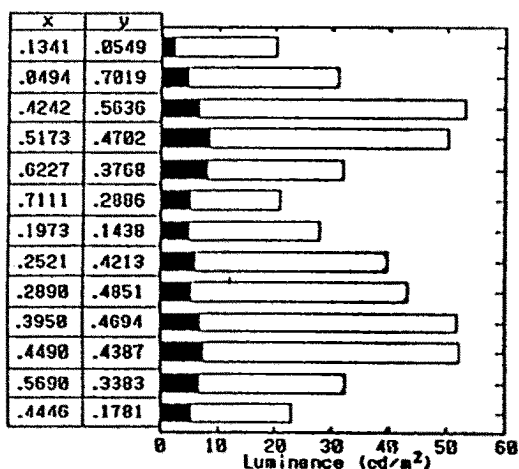


図5 対応色の輝度関係

物体色と光源色の脳内色知覚空間及びその特性の相違に関する研究も注目されている。

4. 見えのモード変化⁹⁾と物体・光源認識¹⁰⁾

色票は、物体色の代表として視覚実験でよく用いられるが、呈示条件によって光源色の見えになることは先にも示した。そこで、周

辺条件を変えた場合のグレースケールの見えの変化を詳しく求めた結果が図6である。被験者は呈示されたテスト刺激の光源色に見える割合と物体色に見える割合をそれぞれ評価し、それぞれの評価に対して合計が10点になるように得点を割り当てた。例えば、刺激が完全に光源色に見える時は「光源色10」、物体の表面としてしか見えない時は「物体色10」、光源色にも物体色にも見えて区別できない時は「光源色5、物体色5」と応答した。

図6の横軸はテスト刺激の輝度値 L_t 、縦軸はそのテスト刺激に対して応答した光源色の得点 P_1 の平均値、データ点の縦棒は標準偏差を示し、シンボルの違いは周辺刺激の輝度 L_b の違いを表している。結果は、テスト刺激の輝度が増加するにつれて、テスト刺激の見えが非線形的に物体色から光源色に移行し、色票であっても輝度が高いと光源色の見えになることを示している。また、周辺条件によってテスト刺激の輝度による見えの変化が異なり、周辺の輝度を上げるとテスト刺激の輝度もそれに応じて高くしなければ光源色にならないこともわかる。横軸を $\log(L_t+1)$ に変換し、縦軸に $0.5 \leq P_1 \leq 9.5$ の範囲のシンボルのみリプロットしたものが図7である。

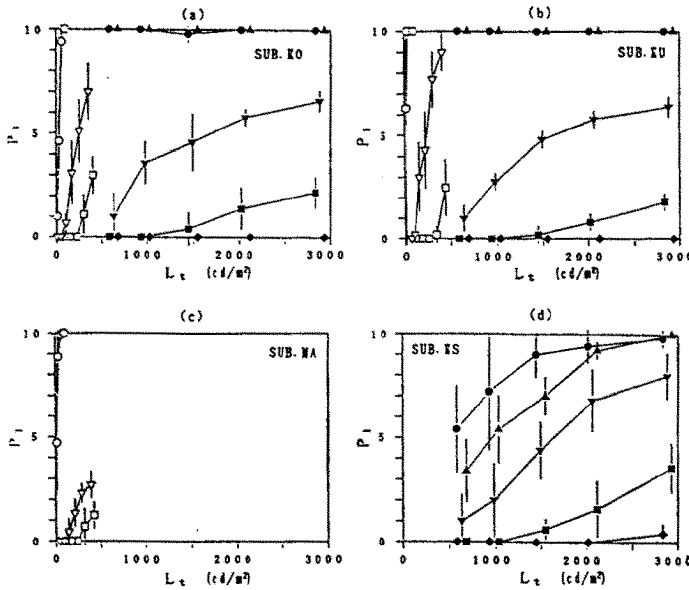


図6 グレースケールの見えのモード変化

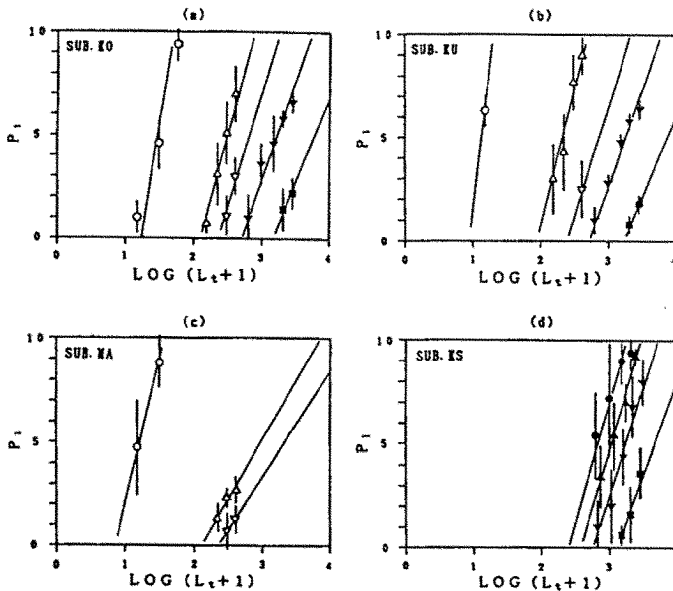


図7 図6のリプロット

これを見ると、光源色の得点は横軸の値に対してほぼ線形に増加していることがわかる。そこで、テスト刺激の輝度に対応する視覚系の非線形出力関数を考え、その正規化出力が0以下の時は完全に物体色に見え、10以上になると完全に光源色に見えるかと仮定する。

$$Q_t = k*(L_b) \log(L_t + 1) - Q_0 \quad (1)$$

Q_t は、 $0 \leq Q_t \leq 10$ においては光源色の得点 P_1 に対応し、 $Q_t \leq 0$ なら $P_1 = 0$ 、 $Q_t \geq 10$ なら $P_1 = 10$ と考えるのである。 $k*(L_b)$ は $k(L_b)$ の定数倍であり、 $-Q_0$ は各被験者で決まる正規化定

数である。周辺刺激の輝度の関数 $k*(L_b)$ を次の様におく。

$$1/k*(L_b) = a \log(L_b + b) \quad (2)$$

各被験者における a 、 b 、 Q_0 の値を表2に示した。

式(2)を式(1)に代入すれば、

$$Q_t = \frac{\log(L_t + 1)}{a \log(L_b + b)} - Q_0 \quad (3)$$

が得られる。

図7の実線は、式(3)に表1の定数を代入してプロットしたものである。これを見ると、シンボルと実線はよく合っており、式(4)が今回用いた白黒刺激の見えを決定する状態方程式となる。

図8は式(3)の概念をモデル図で示したものである。テスト刺激の輝度 L_t は視覚系内で非線形変換され、その出力の効果(倍率)は周辺輝度 L_b の非線形出力によってコントロールされていると考えることができる。このような輝度の見えに対する非線形性の存在は、CRTで表示した色の輝度を反射率に線形に換算してプリンターに印刷しても、CRT画面と印刷画面の輝度レベルが異なると望みの色が得られないという事態を生じさせるであろう。モードが異なると、色

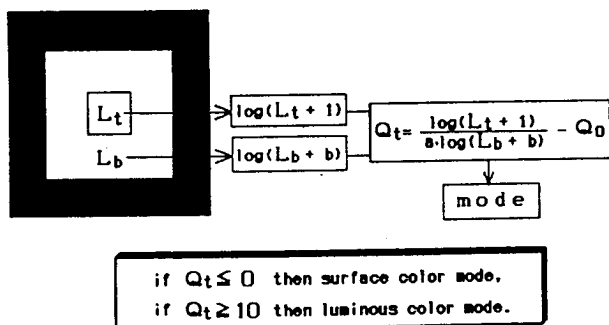


図8 モード知覚のモデル図

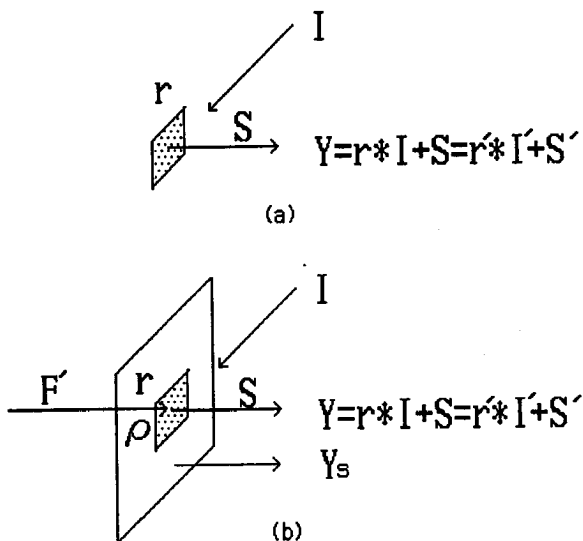


図9 光の物理的構成と心理的知覚値

表2 各被験者での各定数

被験者	a	b	Q_0
K O	0.0390	70	26.0
K U	0.0405	30	25.9
M A	0.1000	70	10.0
K S	0.0330	400	28.7

の見えも大きく異なるからである。

以上の結果から物体・光源認識について考察するために、一様な表面反射率 r を持つ光源体（光源強度 S ）が照明強度 I で照明されている場合を考える（図9(a)）。この時、眼に入射される強度 Y は変数（ r, S, I ）で記述でき、

$$Y = r * I + S$$

と表される。一方、この光を見た時に知覚される表面反射率を r' 、照明強度を I' 、光源強度を S' とすると、（記号 ' は知覚値を表す）

$$Y = r * I + S = r' * I' + S'$$

となるが、心理値（ r', S', I' ）は物理値（ r, S, I ）に等しいとは限らない。上式の拘束の下、視覚系は唯一の解（ r', S', I' ）を決定する。先の実験結果は、周辺刺激がなく、 $Y \ll I$ でなければ $S' = Y$ すなわち、実際の r や S によらず、それを光源体として認識することを示している。周辺刺激（周辺強度 Y_0 ）が存在する場合（図9(b)）は、 S' は Y_0 から推測される。 $Y \ll Y_0$ ならば $S' = 0$ の判断されて、完全に物体色と知覚される。 $I' \geq Y_0$ より、

$$Y \geq r' * Y_0$$

ゆえに

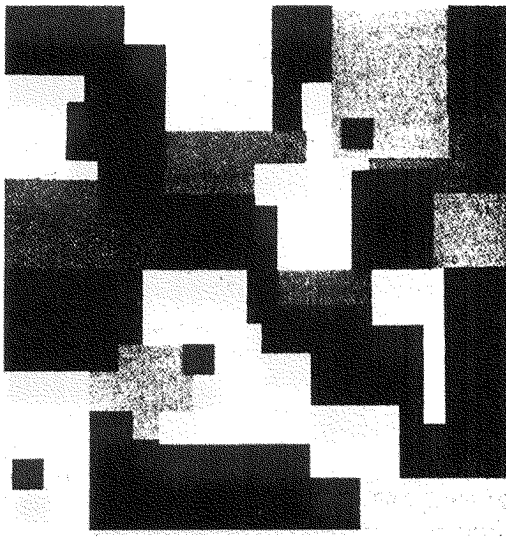


図10 光源検出実験のモンドリアン刺激

$$r' \leq Y / Y_0$$

となることが予想される。確定される r' は I' の知覚とも関連しており、その決定アルゴリズムは今回の実験結果からは不明であるが、何らかの平衡条件から決定されていると考えられる。また、 $Y \gg Y_0$ ならば、光源色の知覚（ S' ）が生じ、 $S' = Y$ となる。また、 $S' > 0$ であるが $S' \neq Y$ 、すなわち $r' * I' > 0$ の時には、光源色と物体色の見えが同時に存在するものと考えられる。さらに、光源色は透過った面を通した光（透過色）と知覚される場合もあり、この場合は透過面も知覚されていると考えられる。この時、透過率を ρ' 、背後の光源強度を F' とすると、

$$r' > 0 \text{ かつ } S' = \rho' * F'$$

と記述することができる。

また、複雑刺激の代表格であるモンドリアン刺激（図10）による光源検出実験の結果¹¹⁾では、最も高い強度、高い絶対強度、平均より高い強度、高コントラスト、強度勾配が光源検出において重要な役割を果たしていることを示唆している。

5. おわりに

見えのモードによって、色の絶対的明るさは変化し、その結果 B/L 値も異なるという結果は、明るさの実験を行う際のモードの重要性を示すと同時に、知覚に忠実な明るさ測光システムの開発にモードの効果を反映させる必要性を強調する。また、物体色と光源色の対応色が測光値の上で大きく異なるという結果は、色再現問題における色覚メカニズム考慮の重要性を示しており、色の見えを記述する心理物理学的表色システム確立のための基礎的データになるものと思われる。さらに、視覚系の物体・光源認識メカニズムを考察し、外界の光情報と面知覚の関係について述べた。

モード変化と対比現象は密接に関係しており、両現象を分離して考えることは容易ではない。むしろ、この2つの現象を別扱いせず

に、統一的に解釈していく必要があると思われる。また、物体色の明度知覚における3次元的空间配置の影響も示唆¹²⁾されており、視覚系の空間認識メカニズムとの関連も注目される場所である。色の見えを配慮した表色・測光システムを確立し、物体・光源認識メカニズムを明らかにするには、視覚系の色覚認識メカニズムに対する総合的研究が今後必要であるが、それは単に色覚の問題に留らず、視覚系の認識システム全体に関する理解に発展していくものと思われる。

文 献

- 1) 岡嶋克典, 阿山みよし, 内川恵二, 池田光男: 光源色モードと物体色モードにおける明るさ効率の比較. *光学*, 17, 582-592, 1988.
- 2) C. L. Sanders and G. Wyszecki: Correlate for lightness in terms of CIE-tristimulus values. Part 1. *Journal of the Optical Society of America*, 47, 398-404, 1957.
- 3) C. Ware and W. B. Cowan: Specification of heterochromatic brightness matches: A conversion factor for calculating luminances of stimuli which are equal in brightness. *NRC Report*, 1984.
- 4) K. Fuld and T. A. Otto: Colors of monochromatic lights that vary in contrast-induced brightness. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 76-83, 1985.
- 5) T. Oyama and M. Mitsuboshi: Wavelength-specific brightness contrast as a function of surround luminance. *Vision Research*, 20, 127-136, 1980.
- 6) 岡嶋克典, 池田光男: 表面色モードと光源色モードにおける対応色の関係. *光学*, 20, 363-368, 1991.
- 7) K. Fuld, J. S. Werner and B. R. Wooten: The possible elemental nature of brown. *Vision Research*, 23, 631-637, 1983.
- 8) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boynton: Influence of achromatic surround on categorical perception of isolated surface colors. *Vision Research*, 29, 881-890, 1989.
- 9) 岡嶋克典, 池田光男: 白色光における輝面色モ

ードと表面色モードの見えの定式化. *光学*, 18, 558-564, 1989.

- 10) P. Heggelund: Achromatic color vision: Perceptive variables of achromatic colors. *Vision Research*, 14, 1071-1079, 1974.
- 11) S. Ullman: On visual detection of light sources. *Biological Cybernetics*, 21, 205-212, 1976.
- 12) A. L. Gilchrist: Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement. *Science*, 195, 185-187, 1977.