

# 周辺単色光による空間的黒み誘導

篠森 敬三・中野 靖久・内川 恵二

## 研究

## 周辺単色光による空間的黑み誘導

篠森 敬三・中野 靖久・内川 恵二

東京工業大学総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1991年8月29日受付, 1991年11月25日受理)

## Spatial Blackness Induction Induced by Monochromatic Surround Field

Keizo SHINOMORI, Yasuhisa NAKANO and Keiji UCHIKAWA

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

(Received August 29, 1991; Accepted November 25, 1991)

The spatial blackness induction as a function of retinal illuminance of inducing field was measured using color naming method. The stimulus was composed of the white 50' test field surrounded by the monochromatic 2° inducing field. They were presented for 2s simultaneously. Subject estimated the appearance of the test field using three color terms; black, white and chromaticness. The blackness induction as a function of log retinal illuminance of inducing field was approximated using hyperbolic tangent function. By analysing these data, the spectral efficiencies of blackness induction were obtained at three different criterions. All spectral blackness functions agreed better with the luminosity function than with the equal-brightness function, but this was not decisive. To make this point clearer, the spectral blackness function was measured using a method of adjustment, and the results indicated that the blackness induction is determined by the luminance not by the brightness when a test field is white.

## 1. はじめに

黒みの知覚は人間の色知覚の中で重要な役割を果たしている。明るさの知覚、灰や茶等の色知覚、物体色としての認識などがその例である。黒みの知覚は、一般的には刺激光に対して時間的<sup>1)</sup>あるいは空間的<sup>2-8,10-12,16,19)</sup>に隣接して高輝度の周辺光が呈示されたときに生ずるが、その定量的測定方法および発生のメカニズムについてはまだ確立されていない。

黒み誘導量の測定として、黒みがある一定の量になるための刺激条件を求めることが行われてきた。テスト光内に一定量の黒みを作るのに必要な周辺光の強度から、黒み誘導の分光効率を求めること<sup>2-8)</sup>は、white-black チャンネルなどの黒み誘導メカニズムを考える上で重要である。Werner ら<sup>2)</sup>や Cicerone ら<sup>3)</sup>は白色あるいは単色テスト光が周辺色光によって完全な黒となる状態 (complete black) を判断基準とした実験で、黒み誘導は周辺

光の波長によらず輝度で決まるとの結果を得た。これは黒み誘導のための周辺光の強度に加法則が成立する<sup>4)</sup>ことによっても支持される。また Evans<sup>5)</sup>や Mount ら<sup>6)</sup>の黒み検出閾 (just detectable black) は輝度によって決まるという結果もある。

一方 Fuld ら<sup>7)</sup>は周辺白色光と 100 Td のテスト色光を用い、周辺光輝度を変えて見えの白みと黒みを同じにする (black=white) 実験で、黒み誘導の強さは中心光の明るさと周辺光の輝度とで決まる結果を得た。Kulp ら<sup>8)</sup>は、complete black の実験がテスト光とその周りのギャップとの境界の消失という MDB と同じ判断によって行われたために、黒み誘導量が輝度で決まる結果<sup>2,3)</sup>を得たのではないかと考えた。そこで彼らは complete black と境界消失の両方の判断基準で実験を行って結果を比較したが、予想に反して黒みが輝度によるか明るさによるかは判断基準ではなく被験者に依存した。

結果に差が生じた有力な原因の一つとして、判断基準

における黒みレベルが異なるということが掲げられる。Werner ら<sup>2)</sup>や Cicerone ら<sup>3)</sup>の実験では判断基準は黒み 100% であるのに対し、Fuld ら<sup>7)</sup>の判断基準は黒みが 50% かそれ以下の black=white である。Volbrecht ら<sup>4)</sup>は、complete black における黒み誘導は黒み出力のみが関与するため単一の achromatic システムで決まるが、black=white のときは黒みプロセスと白みプロセスの相互作用で決まるとの可能性を述べている。

また黒み誘導に関しては、上のような特定の判断基準についてだけでなく、周辺光の輝度増加による段階的な黒み量変化についても調べる必要がある。しかしその場合、黒みの評価法が問題となる。Huggelund<sup>9,10)</sup>はテスト光と周辺光に白色を用いたときの白黒の見えを、独自の判断基準による 2 変数で表現し、周辺光輝度増加による段階的な変数値の変化を両眼視マッチングによって求めている<sup>10)</sup>が、この 2 変数が黒みを直接表現しているかどうかについて疑問が残る。黒みを見えの観点から直接的に評価する方法として刺激の色見えを答えるカラーネーミング法があり、これを用いて Volbrecht ら<sup>1)</sup>は時間的黑誘導について実験を行っている。Fuld ら<sup>11)</sup>は近接配置した周辺光によって茶色見えが生じることを、また Fuld ら<sup>12)</sup>は周辺白色光の輝度を変化させた時の中心テスト色光に生じる黒みと白み量の変化について調べている。

そこで本研究では、黒み量の評価をカラーネーミング法を用いて行い、周辺光の輝度増加に伴う段階的黒み量変化を測定する。さらに周辺単色光の波長を変えた時の黒み量をそれぞれ測定することで、異なる黒み評価量における分光黒み誘導効率を求める。それによって段階的な黒み量変化の定式化を行い、判断基準での黒みレベルの違いによって分光黒み誘導効率に変化するかどうかの見解を得ることができる。

## 2. 方 法

### 2.1 刺 激

刺激は円形 50' の中心テスト光と円環状で外径 2° の周辺光からなり、中心と周辺の間 7' 幅のギャップを持つ。刺激は中心窩に呈示される。中心テスト光は色温度補正フィルタによってキセノン光源光を補正して作られた色温度 6,650 K の白色光である。周辺光は色温度 6,600 K の白色光または干渉フィルタによって作った主波長 449, 478, 510, 550, 579, 597, 635, 665 nm の単色光の中から選ばれる。各単色光の半値幅は約 10 nm である。

すべての被験者において単独での見えが白み 100% となる網膜照度 50 Td をパイロット実験によって求め、その値を実験 1 の中心光網膜照度とした。周辺光網膜照度は黒みが 0% から 100% になるような範囲で 0.25 log ステップで変化させたが、場合によっては黒みを 0% や 100% とすることはできなかった。被験者に不快グレアが生じる場合は、網膜照度の上限を 4.45 log Td かそれ以下とした。また、装置上の制限から 480 nm の刺激の上限は 3.45 log Td、665 nm の上限は 4.20 log Td である。実験 2 では、中心光の網膜照度が 1.75 log 低い 0.889 Td であること以外は実験 1 と同じである。実験 2 はすべての被験者とも周辺光 1.20~3.45 log Td で実験を行った。また高網膜照度の時に周辺光が中心光の見えに与える影響を調べるために、中心を呈示せず周辺のみ呈示するコントロール実験を周辺光網膜照度 2.70~4.20 log Td で行った。被験者 KS は中心光が呈示されていないことを知っていたが、他の被験者には“特に暗い中心光”との偽情報を与えて実験を行っている。さらに実験 3 として、中心光網膜照度 50 Td の刺激を用い、中心テスト光の見えが黒み=白みになるように被験者がウエッジを動かして周辺光網膜照度を調整する実験を各周辺単色光について行った。測定は調整法で行い、刺激呈示時間内には網膜照度は変化させず、呈示終了後にウエッジを動かした。被験者は黒み=白み見えになるまで、何度でも刺激呈示と網膜照度調節を行った。

黒み誘導が輝度で決まる結果<sup>2-4)</sup>は刺激呈示時間が 500 ms の場合に得られたものであり、明るさで決まる結果<sup>7)</sup>は呈示時間が 2 秒で得られたものであることから、刺激呈示時間が結果に影響を与えている可能性もある。そこで、黒み誘導に明るさが寄与していた場合に比較的時間のかかる明るさに対する色の寄与<sup>13)</sup>を大きくするために刺激呈示時間を 2 秒とした。

### 2.2 実験装置

装置は典型的な 3 光路マックスウェル視光学系で構成され、1 光路は中心白色光を、残り 2 光路は周辺白色および単色光を作る。単色光用光路に干渉フィルタが、白色光用光路に色温度補正フィルタが装着されている。光源として 1 kW のキセノンランプを用い、光の強度調節は中性濃度ウエッジと中性濃度フィルタによって行った。光路の開閉には電磁シャッターを用い、光路に挿入したアパーチャを用いて刺激形状を作った。赤色 LED を用いて、刺激の外側 2° に十文字状の非常に暗い定常呈示の固視点四つを配置した。また過度の暗順応を避けるため、暗順応の後半と刺激設定変更の間に被験者に輝度

0.07 cd/m<sup>2</sup> に照明された円形 20° の白色板を自然視で呈示した。

被験者の頭部は歯型台を用いて固定される。被験者は暗幕内のスイッチで刺激呈示の開始とウエッジ濃度を制御することができる。干渉フィルタの選択、電磁シャッター、ウエッジ濃度、被験者スイッチはすべてコンピュータ制御され、各設定値は自動的に記録される。

### 2.3 手順

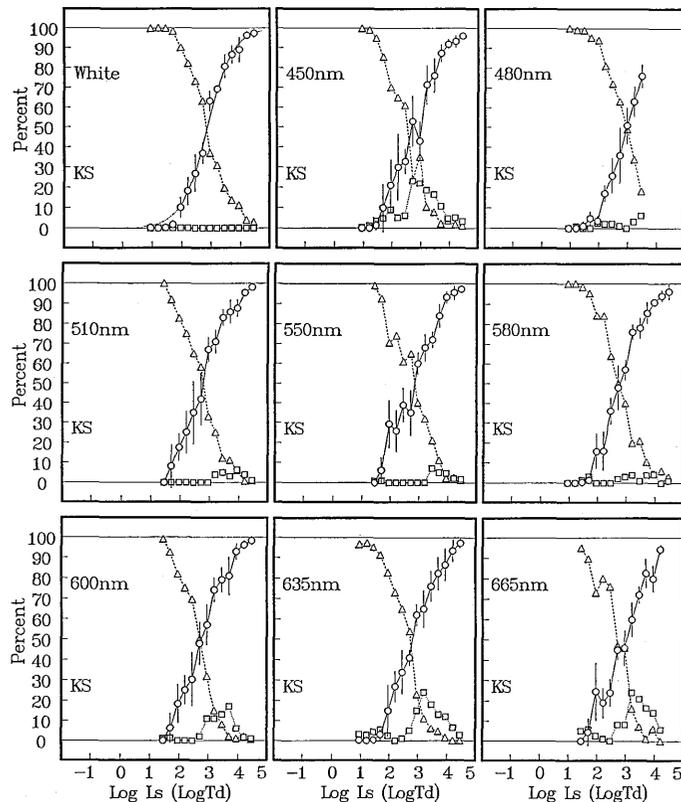
実験開始前に 10 分間の暗順応を行った。被験者のボタン操作で、ランダムな呈示順序で刺激の呈示が開始される。評価すべき実験刺激の前に周辺光なしの中心光のみが 1 秒間呈示され、1 秒間の休止の後に中心光と周辺光が 2 秒間同時に呈示される。

1 秒呈示の白色光の網膜照度は、評価刺激の中心光網膜照度にかかわらず常に 50 Td である。被験者は、実験を進めていく過程で黒み量の多い刺激ばかりを見続け

ると、黒みに順応して徐々に黒み量を低く、白み量が高く評価するようになる。中心光単独呈示はこれを防ぐための白み 100% の基準光を示すために行われる。コントロール実験により、この単独呈示による時間的黒み誘導はないことを確かめた。

刺激呈示終了後に、黒み、白み、色みの合計が 100% になるようにカラーネーミングを行う。刺激条件によっては灰色 (gray) 知覚あるいは暗さ (darkness) 知覚が生じるが、その場合でも見えを黒と白に分割して評価することができる。被験者は評価が決まるまで何度でも同じ刺激を見ることができる。その際の刺激呈示間隔は 3 秒以上で、中心光単独呈示は毎回行われる。被験者が評価した値を口頭で実験者に報告し終了ボタンを押すと、直ちに白色板が 10 秒以上呈示され、干渉フィルタとウエッジは次の刺激のセッティングに変更される。

各被験者ごとの  $V_{\lambda}$  および明るさ分光感度を知るため



**Fig. 1** Color naming responses plotted as a function of log retinal illuminance of the surround field ( $L_s$ ) with the 50 Td white central field for observer KS. The panels show the results for different surround fields. The wavelength of surround field is described on each panel. Circles with solid lines denote black points. Triangles with dashed lines denote white points. Squares with dotted lines denote chromaticness points. Error bars ( $\pm$ SE) are shown only for black points. The solid curve for white surround is fitted to the data using Eqs. (1) (See text in detail).

に、50 Td の白色参照光を用いて 8.6 Hz でのフリッカ一法による測定 (HFP) と明るさマッチング法による測定 (HBM) を 2° 円形視野で行った。

すべての実験において、1セッションでは同一の刺激は1度あるいは2度ずつ呈示され、いずれの実験データも5回以上の測定の平均により求めた。すべてのセッションが終了するまでは、著者も含めて結果は知らされない。

### 2.4 被験者

被験者は色覚正常な3人の男子大学院生で年齢は26~27歳である。一人は著者 KS で、他の二人は心理物理実験についてある程度の経験を持つ TM, TY である。実験3は KS と TM のみで行った。

## 3. 結 果

Fig. 1 は被験者 KS の実験1の結果である。横軸は周辺光の対数網膜照度、縦軸はカラーネーミングした黒み、白み、色みの得点で、○は黒み量、△は白み量、□は色み量を表す。図中の縦線は標準誤差範囲で、黒みの場合のみ示した。周辺光波長をグラフの左上に表示した。周辺が白色光の時の図中の曲線は、実験式より導か

れた近似曲線で、これについては考察で述べる。

横軸を対数網膜照度にとった場合の結果は、黒み量が小さいときには黒みは徐々に増加し、黒み量が50%付近の時に増加量が最大となり、黒み量が大きくなっていくに従い増加量が減少していく傾向を示している。全体として被験者 KS では周辺光波長の変化による黒み誘導量への影響はほとんど見られない。ただし、被験者 KS では周辺光の波長が450, 600, 635, 665 nm の場合、網膜照度が3 log Td を越えたあたりにピークを持つ色み量上昇が見られる。一方他の波長の場合には色みはほとんど知覚されていない。

黒みの評価にカラーネーミング法を用いているため、色み上昇によって黒み量を正確に測定できない可能性があり、この原因について考える必要がある。本実験では色みをさらに赤、緑、黄色、青の4色を用いてカラーネーミングすることは行っていないが、周辺光が635 nm の時の3人の被験者の内観として、周辺が低網膜照度(約2.5 log Td 以下)のときに色みとして知覚されるのは青系の色である。これは周辺光の補色に近い色であることから、この網膜照度付近では周辺光による色誘導が発生していると思われる。一方高網膜照度のときに知覚

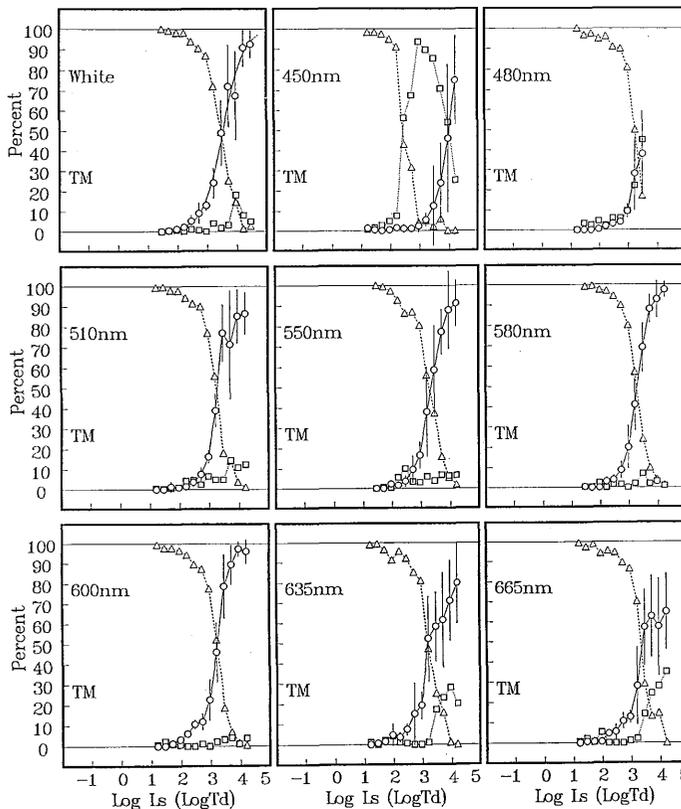


Fig. 2 The same as Fig. 1 except for observer TM.

される色みは周辺光と同じ赤系の色であり、これより周辺光による散乱が知覚されている可能性が考えられる。そこで高網膜照度周辺光の見えに対する影響を確かめるために、中心を呈示せずに見えを評価するコントロール実験を行っている。色み上昇の原因については散乱光だけではなく他の要因についても考えられるが、これについては考察において述べる。

他の二人の被験者 TM と TY の結果が Fig. 2, 3 である。被験者 TM では周辺光 450 nm の時に周辺散乱光などの影響によって中心部の見えが著しく変化していると思われる。そのため結果の解析には 450 nm の時のデータを含めなかった。この点については、コントロール実験の結果のところで再び述べる。被験者 TM の場合には網膜照度が 2.5 log Td の付近までは黒みの上昇は比較的穏やかであるが、それを越えるあたりから急激に黒みが増加した。TY では周辺光が低網膜照度でも黒みが知覚され、同程度の黒み量が 1 log Td 付近まで持続する特徴が見られる。1 log Td 以上での黒み増加の傾向は他の被験者と同様であるが、増加量は小さい。被験者による結果の違いの一つは、周辺光網膜照度増加に伴う黒み増加量である。被験者 TM は 3 log 程度の狭い網膜照度範囲で、黒みが 0% から 100% 近くにまで変

化するのに対し、被験者 TY の範囲は 6 log にもわたっている。

被験者 TM, TY でも色み量の上昇が見られる。TM の場合は 480, 635, 665 nm で 3 log Td あたりから色みが顕著になり、その影響で黒みの増加量が明らかに減っている。色みの上昇傾向は KS と異なり、最後まで減少せず増加し続けている。TY の場合も同様に 450, 580, 600, 635, 665 nm で、高網膜照度での色み量の上昇が見られる。

実験 1 では高網膜照度での色み増加により、すべての波長で黒み量を 100% にまで上昇できなかった。そこで中心光網膜照度を下げることによって黒み 100% を作ることを試み、網膜照度を  $-1.75 \log$  減少させた 0.889 Td の中心光で実験 1 と同様に実験 2 を行った。また高網膜照度周辺光の影響を確かめるために、中心を呈示せずに見えを評価するコントロール実験を行った。Fig. 4, 5, 6 は被験者 KS, TM, TY の実験 2 とコントロール実験の結果を示す。グラフにおいて  $\circ$ ,  $\triangle$ ,  $\square$  はそれぞれ実験 2 の黒み、白み、色み量を表す。周辺光が白色の時の  $\blacktriangle$  はコントロール実験における白み量、単色光の時の  $\blacksquare$  は色み量を表す。縦棒は標準誤差範囲を示す。周辺光波長をグラフの左上に表示した。

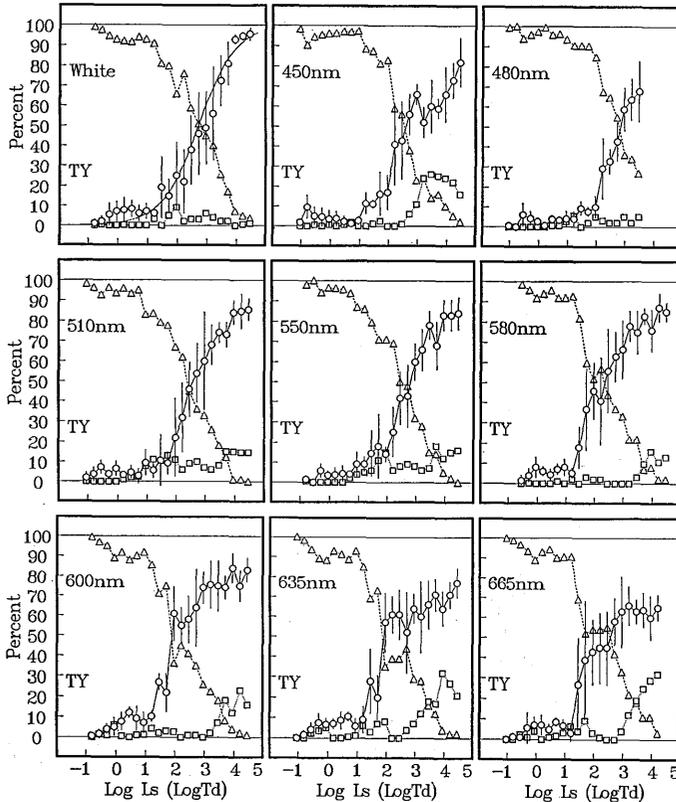
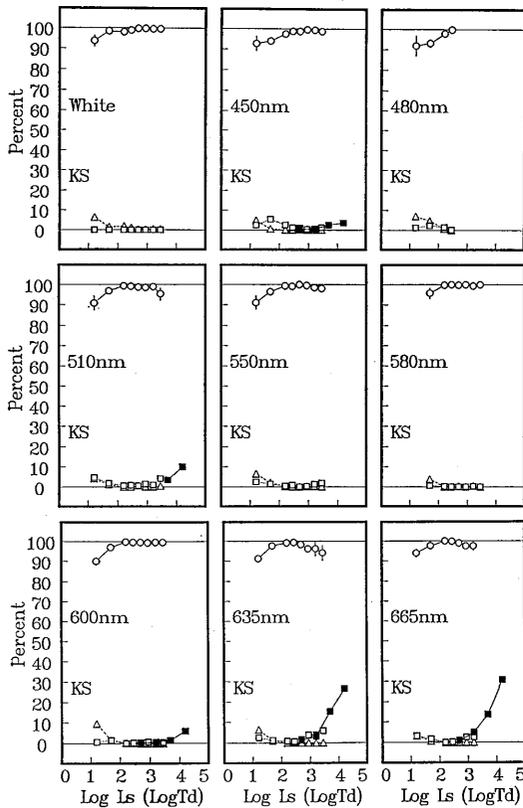


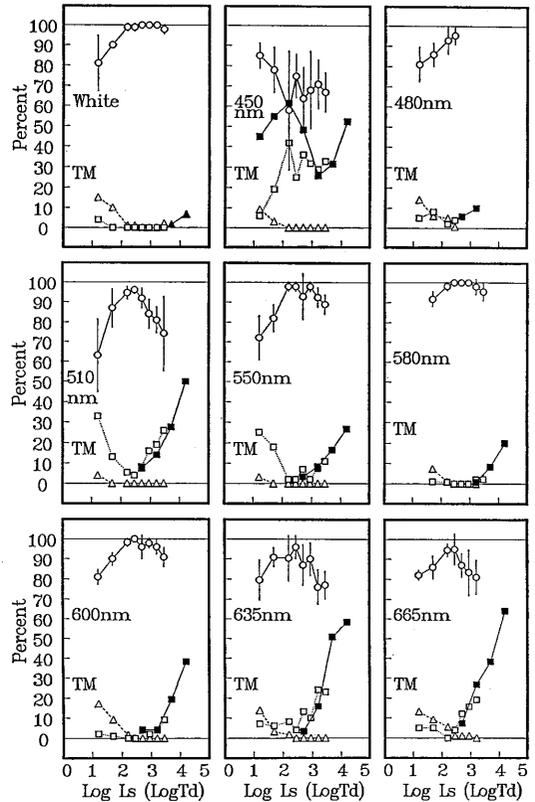
Fig. 3 The same as Fig. 1 except for observer TY.

周辺が白色光の時には黒みが増加して 100% になるとほぼその値を維持しているが、周辺光が単色光の時には被験者 KS の結果の一部を除いては高網膜照度で色みの上昇が始まり、それに伴って一度上昇した黒み量が逆に減少している。実験 2 の色み量がコントロール実験の色み量に連続的につながることから、この高網膜照度での急激な色み上昇は周辺色光の散乱などの影響によるものと考えられる。実際にはコントロール実験は、実験 2 で色みの上昇が見られた波長でのみ行っている。

周辺が白色光の時にも、周辺光による散乱などの影響が色み量ではなく白み量を上昇させる可能性があり、コントロール実験の結果においても周辺白色光による影響



**Fig. 4** Color naming responses plotted as a function of  $\log L_s$  for observer KS with the 0.889 Td white central field (experiment 2) and without the central field (control experiment). The wavelength of surround field is described on each panel. Open symbols denote the results in experiment 2. Circles with solid lines denote black points. Triangles with dashed lines denote white points. Open squares with dotted lines denote chromaticness points. Filled squares with solid lines denote chromaticness points in control experiment. Only chromaticness points of the results in control experiment are shown. Error bars ( $\pm$ SE) are shown only for black points.



**Fig. 5** The same as Fig. 4 except for observer TM and white points of results in control experiment for white surround field are shown. Filled triangles with solid lines denote white points in control experiments.

により白み量が増加している。しかし、その増加量は周辺単色光の色み増加量の場合と比べて微小である。

以上の結果から実験 1, 2 の高周辺光網膜照度での色み増加とそれに伴う黒みの減少は周辺色光の誘導効果以外の影響によるものであるといえる。このため色み量が高くなっている周辺光網膜照度での黒みのデータは正確さに問題があると思われる。また被験者 TM の 450 nm におけるコントロール実験の結果において、測定範囲すべてにわたって非常に高い散乱光によると思われる色みの上昇が生じている。このため実験 1, 2 の考察において TM の周辺光 450 nm の結果は除外した。また TM では実験 3 の周辺光 450 nm の時の測定は行っていない。

実験 3 の結果については考察で述べる。

#### 4. 考察

##### 4.1 黒み誘導関数

カラーネーミングされた黒み量のグラフの形状からみて、対数網膜照度を変数とする hyperbolic tangent 型

の関数を用いて、黒み量に対する良好な近似を可能とする実験式が得られると考えられる。評価された黒み量 ( $B_p$ ) が hyperbolic tangent 型関数で表されることは次の(1)式のように表される。

$$B_p = [1/2 + (1/2) \tanh \{a(\log L_s - b)\}] * 100(\%) \quad (1)$$

ただし、 $a$ ,  $b$  は定数、 $L_s$  は周辺光網膜照度である。(1)より

$$\log \{B_p/(100 - B_p)\} = a' \log L_s - b' \quad (a', b' \text{ は定数}) \quad (2)$$

を得る。したがって、もし(1)式が成立するならば(2)式より横軸に対数網膜照度、縦軸に  $\log \{B_p/(100 - B_p)\}$  を取った時のデータは直線になるはずである。

Fig. 7 は、実験1のデータから  $\log \{B_p/(100 - B_p)\}$  を計算した結果を被験者ごとにプロットしたものである。コントロール実験の結果から見て、実験1の結果は周辺色光による色み上昇の影響を受けている。そこで周辺が白色光の場合と被験者 KS の場合とを除いたデータについては、色の影響を除去した黒み評価量

$$B_p' = B_p / (B_p + W_p) * 100(\%) \quad (3)$$

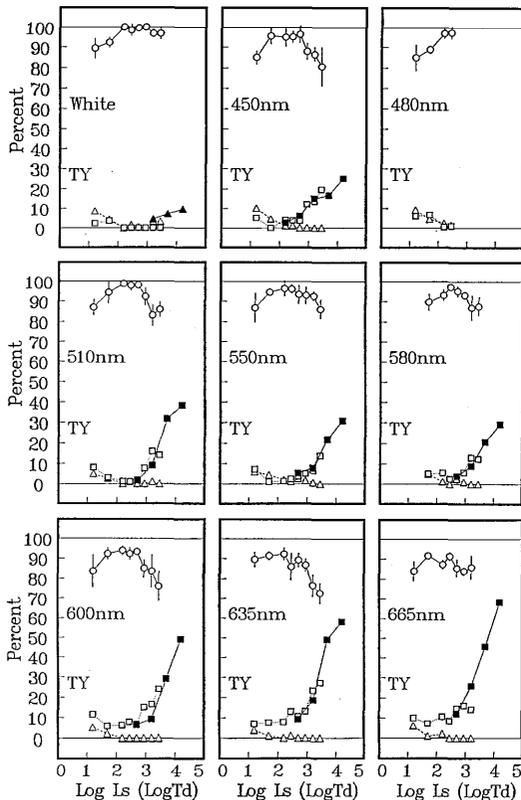


Fig. 6 The same as Fig. 5 except for observer TY.

を用いてプロットした。ただし、 $W_p$  は評価された白み量である。水平破線は黒み量が 1, 99% を、水平点線は 5, 10, 95% の時の値を示す。5~10% < 黒み < 99% となるような網膜照度レベルで KS, TM について、グラフを直線近似することが可能である。TY も網膜照度 1 log Td 以下の部分を除いて、比較的良好な直線近似が行える。

ここで周辺光の波長の影響について考える。波長変化によって黒み誘導のメカニズム自体は影響を受けないものと仮定すると、波長の変化は周辺光の実効網膜照度  $L_{s, \text{effect}}$  を導入することによって取り扱うことができる。黒みが明るさ等で決まるなら、 $L_s$  に波長依存性を持つ係数をかけて

$$L_{s, \text{effect}} = L_s * k(\lambda) \quad (\lambda = \text{周辺光波長}) \quad (4)$$

となる。輝度で決まるなら  $\lambda$  によらず  $k(\lambda) = 1$  である。これを(2)式に代入して、

$$\log \{B_p/(100 - B_p)\} = a' \log L_s + a' \log k(\lambda) - b' \quad (5)$$

すなわち、黒み誘導メカニズムが変化しないとの仮定が

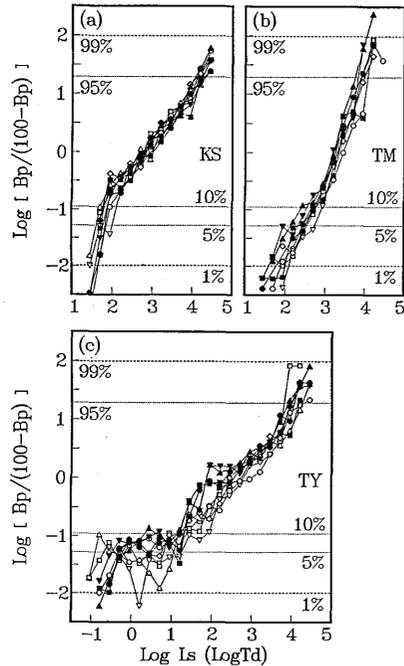


Fig. 7  $\log \{B_p/(100 - B_p)\}$  plotted as a function of  $\log L_s$  with the 50 Td central field (See text in detail). Horizontal lines assigned to 1%, 5%, 10%, 95% and 99% of color naming responses of black. Different symbols denote different surround fields: white ( $\circ$ ), 450 nm ( $\Delta$ ), 480 nm ( $\nabla$ ), 510 nm ( $\square$ ), 550 nm ( $\diamond$ ), 580 nm ( $\bullet$ ), 600 nm ( $\blacktriangle$ ), 635 nm ( $\blacktriangledown$ ), 665 nm ( $\blacksquare$ ). Observers: KS (a), TM (b) and TY (c).

成立するときには周辺光の波長が変わっても直線の傾き  $a'$  は不変で、グラフは(5)式の右辺の第2項により縦方向のみシフトする特徴を持つはずである。

このことを確かめるため、Fig. 7 の実験データに対し、 $B_p$  がおよそ 10%~95% となるような範囲において各波長ごとに最小二乗近似を行って近似直線を求めた。この時の直線の傾き  $a'$  の全波長についての平均値と標準偏差は、被験者 KS の場合で  $1.04 \pm 0.11$  であり、TM では  $1.54 \pm 0.22$ 、TY では  $0.689 \pm 0.036$  となる。標準偏差の大きさから考えて被験者ごとの傾き  $a'$  は波長によらずほぼ一定と考えてよく、この点で(5)式で示される特徴と良く一致している。同様に、近似直線の式から黒み誘導の分光感度に等価な値  $\log k(\lambda)$  を求めることができる。その平均値と標準偏差は被験者 KS では  $0.66 \pm 0.15$ 、TM では  $-0.21 \pm 0.15$ 、TY では  $0.13 \pm 0.20$  となる。標準偏差が大きいことから、 $\log k(\lambda)$  が波長依存性を持つ可能性もあるが、各波長における  $\log k(\lambda)$  の値の変化にシステムチックな傾向は見られない。黒み誘導の分光感度については次節で詳しく述べる。

各被験者の周辺が白色光の場合において、(2)式の直線近似を行って各定数係数を求め、(1)式より計算した  $B_p$  を Fig. 1, 2, 3 中の周辺光が白色の時に近似曲線として示した。曲線の実線部分の範囲のデータに対して最小二乗法で直線近似を行っている。この範囲は周辺光が単色光の場合には色みの上昇が見られるような高網膜照度領域を含むが、コントロール実験の結果より周辺が白色光の場合には白み量の増加はごく微少であり、黒み量はほぼ正確に測定されていると考えてよい。近似範囲での  $B_p$  の計算値と実験結果の相関係数は、KS では 0.996、TM では 0.992、TY では 0.986 と良い値を示し、グラフでも良好なフィッティングを示す。周辺が単色光の場合でも、(3)式より求めた  $B_p'$  を用いれば高周辺光網膜照度領域を含む範囲において同様なフィッティングを行うことができる。この時の実験式は、周辺光による色み量の上昇がないとしたときに得られるであろう黒み量に対する近似となる。

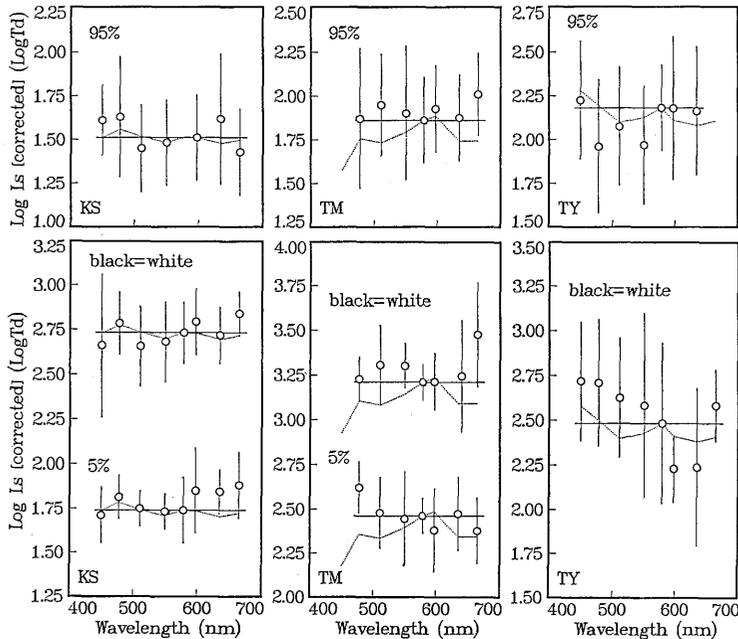
ただしこの実験式(1)は黒み量が 0% および 100% に近いところでは良い近似とはならない。これは実際の黒み量がある網膜照度で必ず 0% や 100% になるのに対して、実験式として 0% や 100% に漸近していく関数型を取ったためであると思われる。このような場合についてはさらに検討する必要があるが、(1)式は実験式として、全体的にデータを良くフィットできるといえる。

## 4.2 黒み誘導の分光感度

過去の研究では、complete black, just detectable black, black=white を与える刺激から黒み誘導の分光特性を求めた<sup>2-8)</sup>。カラーネーミング実験の結果から黒み誘導の分光特性を求める場合に、上にあげた基準(criterion)はそれぞれ黒み 100%、黒み 0%、黒み量=白み量となる。実際には黒み 100% や 0% を取ると誤差が大きくなるので、黒みが 95% や 5% のときの分光特性を見る。

Fig. 8 は黒み誘導の分光特性を示し、黒み 5%、黒み=白みは実験 1、黒み 95% は実験 2 のデータから求めた。横軸は波長である。縦軸の網膜照度は各被験者ごとの HFP の結果に基づいて決め、グラフにおいて各被験者の等輝度線は水平な直線となる。また図中の点線は、HBM によって決定された各波長での等明るさとなる網膜照度を表しており、 $B/L$  比の逆数となっている。水平等輝度線および等明るさ線は、580 nm のデータを通るように引いた。黒みが輝度で決まれば波長によらずデータ点は水平になり、明るさで決まれば点線に乗るデータとなる。データ点は、実験 1, 2 の各セッションにおける個々の測定データから導出したもので、例えば黒み 5% の場合には被験者の黒み評価量が 5% あるいは 5% 近傍の値となる 5 個以上のデータから、その時の  $\log L_v$  の囲値を平均して求めている。縦棒は標準偏差の 2 倍の範囲(約 95% の信頼区間)を示す。ただし実験 2 では色散乱光など周辺光の影響によって一度上昇した黒みが減少し再び黒み 95% 付近の値となる場合があるが、そのようなデータは平均には加えていない。また、95% 付近の値をほとんど持たない波長の場合にはデータを求めなかった。

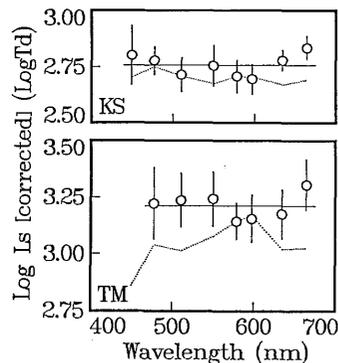
多少のばらつきはあるが、標準誤差から考えて被験者 KS の結果は等輝度線上にのっていると考えられる。しかし KS は明るさ分光感度もほぼ輝度と等しくなっており、黒み誘導が明るさで決まるか輝度で決まるかはこの被験者の結果からはわからない。被験者 TM では一部のデータ点で網膜照度値が高くなっているが、全体的には等輝度線上にのっている。TM の明るさと輝度との違いから考えて、黒みは輝度で決まる傾向を示しているが、データのばらつきや標準誤差の大きさを考えると輝度で決まるとは言い切れない。被験者 TY の場合は非常に広い周辺光網膜照度範囲で 5% 近傍の値をとるため、黒み 5% のデータは示さなかった。TY については明るさと輝度の差に比べてデータのばらつきおよび標準誤差範囲が非常に大きいので、どちらかといえば黒みは輝度で決



**Fig. 8** Mean surround retinal illuminance for black=95% (top panel), black=white and black=5% (bottom panel) obtained by color naming responses for monochromatic surround fields with the 50 Td (black=white and black=5%) or 0.889 Td (black=95%) central field. Error bars denote  $\pm 2$  SE. Solid lines and dotted lines show equal-luminance functions and equal-brightness functions. Observers: KS (left panels), TM (center panels) and TY (right panels).

まる傾向を示すものの、明るさか輝度かを定めることはできない。

以上のようにデータがばらついたり標準誤差が大きくなる原因は、黒みの測定にカラーネーミング法を用いたことよりも、周辺光網膜照度を 0.25 log ステップで変化させた測定結果からデータ点を求めていることに問題があると考えられる。これは前節で行った  $\log k(\lambda)$  の導出の場合にも当てはまる。そこで各周辺光波長について黒み=白みとなるような周辺光網膜照度を調整法で求めたのが実験3である。Fig. 9 は実験3の結果を Fig. 8 と同様に表示したものであり、Fig. 8 と比較してデータのばらつきと標準誤差が減少している。データに対する最小二乗法により等輝度線を引いているが、KS の 665 nm のデータを除けば各データは等輝度線上に存在しており、B/L 比の大きい被験者 TM の場合については等明るさ線とデータ点がはっきりと分離している。縦棒は  $\pm 2$  SE であるから、等明るさ線が誤差範囲と分離していることは、両者の間に 5% (正確には 4.6%) 有意水準で差があることを示している。したがって一人の被験者の結果のみではあるが、黒み=白みとなるとき黒み量は明るさではなく輝度で決まっていることがわか



**Fig. 9** Mean surround retinal illuminance for black=white obtained by method of adjustment for monochromatic surround fields with the 50 Td central field. Error bars denote  $\pm 2$  SE. Solid lines and dotted lines show equal-luminance functions and equal-brightness functions. Observers: KS (top panel) and TM (bottom panel).

る。

以上の結果に過去の輝度で決まるとの研究結果<sup>2-6)</sup>を加味すると、中心光が白色の時の黒み誘導量は、その時の黒みレベルにかかわらず周辺光輝度で決まると考えられる。過去の研究結果<sup>2-6)</sup> 同士の比較から、黒み誘導の

分光特性は、測定時の判断基準によって明るさか輝度かわる可能性がある。しかし今回の実験では Fuldら<sup>7)</sup>とは異なり、黒み=白みの判断基準での測定においても、黒みは輝度で決まるとの結果を得た。また刺激呈示時間の黒み分光特性に対する影響であるが、刺激の見え自体は呈示時間によって影響を受ける。2秒呈示中における被験者の内観として、刺激呈示当初は中心部は明るく黒み量も少ないが、ゆっくりとした誘導が起こって2秒終了付近では暗く、黒みも大きくなるという現象が観察された。しかし実験結果より、2秒呈示でも分光黒み誘導効率は輝度で決まる結果となったので、それ以下の呈示時間の場合に明るさで決まる可能性は考えにくい。

一方、一定の黒みを誘導するのに必要な網膜照度には波長依存性が存在するとの考え方を支持する研究もある。Fuld<sup>14)</sup>は、彩度の理論推定値と実験データとの比較において、彩度計算式に対しては白黒チャンネルの寄与分として  $V_{\lambda}$  よりも明るさ分光感度のほうが結果に良く一致することを報告している。また Oyama<sup>15)</sup>らは周辺高輝度光による明るさ減少の実験で、中心部単色光の明るさをもっとも減少させるのはその波長に近い周辺光を用いたときであると報告している。また黒み発生については Shevell<sup>16)</sup>が両眼視マッチングで調べたところ、黒みは高次レベルでの両眼視情報処理の影響を受けており、網膜レベルにおいて単純に輝度で決まっているわけではないことを報告している。

以上のことから考えて、結果の相違が生じた要因の一つとして、中心テスト光が白色で周辺誘導光が色光の刺激を用いた場合と、テストが色光で誘導光が白色の刺激を用いた場合とでは結果が異なるという可能性が考えられる。Cicerone<sup>3)</sup>らは、テストと周辺の両方に単色光を用いた実験で黒みは輝度で決まるとの結論を得ているが、この時の判断基準は complete black であり、Fuldら<sup>7)</sup>のように black=white を判断基準とした場合には異なる結果が出る可能性もある。しかし相対的出力を測るカラーネーミング法を用いた測定の場合、中心を色光とした実験では色み知覚が非常に顕著となり、異なる中心光波長間でこれをどう取り扱うかという問題が生じる。このような刺激を用いた実験では、両眼視マッチング法<sup>10,16)</sup>や周辺光の加法則<sup>4)</sup>を調べるなどの方法を用いるのも有効であろうと思われる。

#### 4.3 高網膜照度周辺光による色み評価量の上昇

実験1, 2の結果において、周辺単色光の網膜照度が高いときに色みの上昇が見られる。この原因にはいくつ

か考えられるが、ひとつには周辺からの散乱光が網膜上において中心テストに重なり、それによって色みが評価されたためであると考えられる。実験2とコントロール実験における色み量は、周辺光網膜照度の上昇にともなう単調に増加しており、このことは散乱光によって色み上昇が起こることを示唆している。

しかし実験1の被験者KSの結果では、周辺光網膜照度の増加とともに一度上昇した色みが  $3 \log Td$  付近をピークに再び減少する傾向が見られる。この時の被験者KSの内観では、中心光がはっきりとわかる周辺光網膜照度の時には、散乱光自体は知覚されずテスト光に色がついているように見えるが、テスト光が暗い場合には、中心部に周辺からの散乱光が入ってくるのが知覚される。

その場合には、テスト光についていると知覚される色みのみを評価し散乱光の色みを評価しないため、色み量が減少する。これはKSの実験2やコントロール実験での色み量が他の被験者に比べて低いことにも当てはまる。したがってKSの結果は、散乱光が原因であるとする考えに必ずしも矛盾しない。

測定方法にカラーネーミング法を用いたことによる色みの過大評価も、高網膜照度での色み上昇の原因として考えられる。例えば、同じ周辺光網膜照度におけるコントロール実験や実験2の色み量と実験1での色み量は一致しないが、これは中心部分が暗いときには少しの色みでも全体に対する色みの量が多くなるために、色み得点が上昇してしまうことによると思われる。同様に実験1においては、テストが徐々に暗くなっていくにつれて、散乱光による色みの発生量以上に、色み評価量が上昇していることが考えられる。

また周辺が高網膜照度の時には、刺激に対する固視が問題となる。呈示時間が2秒と比較的長いので、この間に眼球運動によってテスト光の網膜部位が周辺光の照射を受けると、残像の影響によって色み量が増大することが考えられる。被験者の内観報告から考えて正の残像が起こっている可能性があり、周辺光網膜照度が高いほど残像の大きさも上昇するはずであるが、これは実験結果と同じ傾向である。

以上のように高網膜照度周辺光による色み上昇の原因は複数考えられる。しかし今回のコントロール実験の結果からは、色みへの影響が生じている周辺光網膜照度レベルを知ることはできるが、色み上昇の原因の特定はできない。ただここで掲げたいずれの要因によって色みが上昇するにせよ、4.1節の(3)式によって、周辺色光の影響がないとした時の黒み量を求めることは妥当である

と考えられる。

#### 4.4 刺激形状

今回の実験では中心光網膜照度 50 Td の場合は、周辺光が高網膜照度となるため周辺光の影響により黒み 100% を作り出すことはできなかった。結局データの黒み 0% から 100% への連続性を諦めて低網膜照度の中心光で黒み 100% を求めた。黒み量を増大させる方法として中心光網膜照度を下げるほかに、中心光と周辺光のギャップをなくす方法も考えられる。しかしその場合、特に中心光と周辺光が等輝度のあたりで色誘導が顕著となる<sup>17,18)</sup>。これは黒み量の測定という目的からすれば望ましくなく、そのためギャップを配置した<sup>19,20)</sup>。Ejima<sup>20)</sup>は、本研究とは刺激形状が異なるが、ギャップサイズによる誘導効果の変化について実験式を得ており、それに従えばギャップ 7' の色誘導効果は 0' の場合の 0.2~0.4 倍となる。しかしギャップを持つ場合、周辺光によりギャップ部分がより黒くなるためコントラスト効果が生じ、黒みが 100% 近くに達していない周辺光網膜照度領域域での中心部の黒み評価に影響を与えている可能性もある。今後は黒み測定において刺激形状も考慮する必要がある。

#### 5. ま と め

中心に白色光、周辺に白色および単色光の刺激を用いたときの空間的な黒み誘導量をカラーネーミング法を用いて測定した。これは特定の基準を満たす場合を調べるよりも、黒み自体の見えが重要であると考えたためである。周辺光が高網膜照度のときに周辺光による色み量への影響が生じたが、実験結果から周辺光網膜照度上昇による黒み量の変化を表す実験式を導出し、良好な近似が得られた。

また周辺単色光での実験より黒み誘導の分光特性を求めた。黒み 5%, 黒み=白み, 黒み 95% のいずれの黒みレベルでも、カラーネーミング法による実験結果から導出した黒みの誘導量は明るさではなく輝度で決まるという傾向を示した。これを確認するために、各波長について調整法を用いて黒み=白みとなる周辺光網膜照度を求める実験を行い、 $B/L$  比が比較的大きな被験者の場合でも本研究の実験条件では黒み誘導量は輝度で決まるとの結果を得た。今後は中心テスト光が白色の場合だけでなく色光の場合についても黒み誘導量を調べる必要があると思われる。

#### 文 献

- 1) V. J. Volbrecht, J. S. Werner and B. R. Wooten: "Temporal induction of blackness—I. Color appearance," *Vision Res.*, **29** (1989) 1425-1436.
- 2) J. S. Werner, C. M. Cicerone, R. Kliegl and D. Della Rosa: "Spectral efficiency of blackness induction," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1984) 981-986.
- 3) C. M. Cicerone, V. J. Volbrecht, S. K. Donnelly and J. S. Werner: "Perception of blackness," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 432-436.
- 4) V. J. Volbrecht, J. S. Werner and C. M. Cicerone: "Additivity of spatial induced blackness," *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (1990) 106-112.
- 5) R. M. Evans: "Luminance and induced colors from adaptation to 100-millilambert monochromatic light," *J. Opt. Soc. Am.*, **57** (1967) 279-281.
- 6) G. E. Mount and J. P. Thomas: "Relation of spatially induced brightness changes to test and inducing wavelengths," *J. Opt. Soc. Am.*, **58** (1968) 23-27.
- 7) K. Fuld, T. A. Otto and C. W. Slade: "Spectral responsivity of the white-black channel," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 1182-1188.
- 8) T. D. Kulp and K. Fuld: "Black spectral responsivity," *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1989) 1233-1238.
- 9) P. Heggelund: "Achromatic color vision—I: Perceptive variables of achromatic colors," *Vision Res.*, **14** (1974) 1071-1079.
- 10) P. Heggelund: "Achromatic color vision—II: Measurement of simultaneous achromatic contrast within a bidimensional system," *Vision Res.*, **14** (1974) 1081-1088.
- 11) K. Fuld, J. S. Werner and B. R. Wooten: "The possible element nature of brown," *Vision Res.*, **23** (1983) 631-637.
- 12) K. Fuld and T. A. Otto: "Colors of monochromatic lights that vary in contrast-induced brightness," *J. Opt. Soc. Am. A*, **2** (1985) 76-83.
- 13) T. Tamura, M. Ikeda and K. Uchikawa: "The effect of stimulus duration on the luminous efficiency functions for brightness," *Color Res. Appl.*, **13** (1988) 363-368.
- 14) K. Fuld: "The contribution of chromatic and achromatic valence to spectral saturation," *Vision Res.*, **31** (1991) 237-246.
- 15) T. Oyama and M. Mitsuboshi: "Wavelength-specific brightness contrast as a function of surround luminance," *Vision Res.*, **20** (1980) 127-136.
- 16) S. K. Shevell: "On neural signals that mediate induced blackness," *Vision Res.*, **29** (1989) 891-900.
- 17) P. R. Kinneary: "The effects of colored surrounds on color naming and luminosity," *Vision Res.*, **19** (1979) 1381-1387.
- 18) C. Ware and W. B. Cowan: "Changes in perceived color due to chromatic interactions," *Vision Res.*, **22** (1982) 1353-1362.
- 19) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boyton: "Influence of achromatic surrounds on categorical perception of surface colors," *Vision Res.*, **29** (1989) 881-890.
- 20) Y. Ejima and S. Takahashi: "Relationship between chromatic induction and spatial variables: an integrated explanation in terms of element contribution function," *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 203-207.