

## 研究

## 周辺白色光によって中心色光に誘導される黒みの測定

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11月26日受付, 1992年2月6日受理)

## The Measurement of Blackness on Chromatic Central Field Induced by Achromatic 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 November 26, 1991; Accepted February 6, 1992)

The blackness induced in a chromatic central field by an achromatic surround field was measured by the haploscopic blackness-matching method. The observer matched the blackness of a test stimulus on the left eye to that of a reference stimulus on the right eye. It was found that the spectral efficiencies of the blackness induction resembled the brightness function rather than the luminance function. However, the efficiency of the blackness induction was not exactly the same as that of the brightness. Therefore, it seems that the blackness induction is not caused only by the brightness mechanism. Furthermore, the results of additional experiment using desaturated test stimuli showed that the reduction of saturation in the central field of the test stimulus enhanced the efficiency of the blackness induction.

## 1. はじめに

刺激光の近傍に高輝度誘導光を呈示した場合に刺激光の見えに黒みが生じる。これが空間的黒み誘導と呼ばれる現象である<sup>1-8)</sup>。黒み誘導現象は色の見えの変化にとって重要な要因の一つであるが<sup>9-12)</sup>、黒み誘導そのものの特性を調べた研究は少なく、また黒み誘導の一般的な特性も明らかになっていない。

過去の研究<sup>1-7)</sup>においては、異なる判断基準や測定方法により黒み誘導の分光特性が求められた。刺激として周辺光に単色光、中心光に白色あるいは単色光を用いた実験<sup>1-4)</sup>では、中心光の見えが完全な黒となる状態 (complete black) での黒み誘導量は、周辺単色光の輝度で決まるという結果が得られている。一方、周辺白色光と中心単色光を用いた実験<sup>5)</sup>では、中心光の見えの白みと黒みが同じになる状態での黒み誘導量は、中心光の明るさで決まるという結果も得られている。また Evansら<sup>6,7)</sup>は、中心色光が灰色の見えを含む状態から黒みが

なくなる蛍光色の見えの状態へと移行する時の、中心色光の輝度  $G_0$  は、純度弁別関数に似た波長依存性を持つことを報告している。

著者ら<sup>8)</sup>は、刺激に周辺単色光と中心白色光を用いて、周辺単色光の輝度を連続的に変化させたときに中心白色光に生じる黒み量を測定し、異なる黒みレベルにおける黒み誘導量の波長依存性を調べた。その結果、中心光が白色の時の黒み量は、黒みレベルによらず周辺光輝度で決まることがわかった。

これらの結果より、黒みが白色光上に誘導される場合は、黒み誘導量は周辺光の輝度で決まるが、黒みが色光上に誘導される場合には、色光の見えが黒み誘導に影響を与え、色光の輝度だけでは黒み誘導量が決まらないことが予想される。そこで本研究では、黒みと色みが同時に知覚されるような黒みレベルにおいて、色光上に誘導される黒み量を詳しく測定し、黒み誘導の特性を明らかにすることを目的とする。

色光上に誘導される黒み量の測定には、これまでいく

つかの異なる判断基準や測定方法が用いられてきた。その中で色光中に黒みと色みが同時に知覚されるような黒みレベルでの測定方法に、色光中に知覚される白み量と黒み量とが等しくなる black=white の判断基準を用いる方法<sup>5)</sup>がある。しかしこの方法には、各色光ごとの彩度が異なる場合、測定された黒み量は色光自体の白み量の影響を受けてしまう欠点がある。カラーネーミング法<sup>8,13,14)</sup>を用いれば、さまざまな黒みレベルにおける黒み量が調べられるが、黒み量は相対的であるため、色光ごとに異なる色み得点の影響を受け、各波長間での黒み量だけの比較が難しくなる。

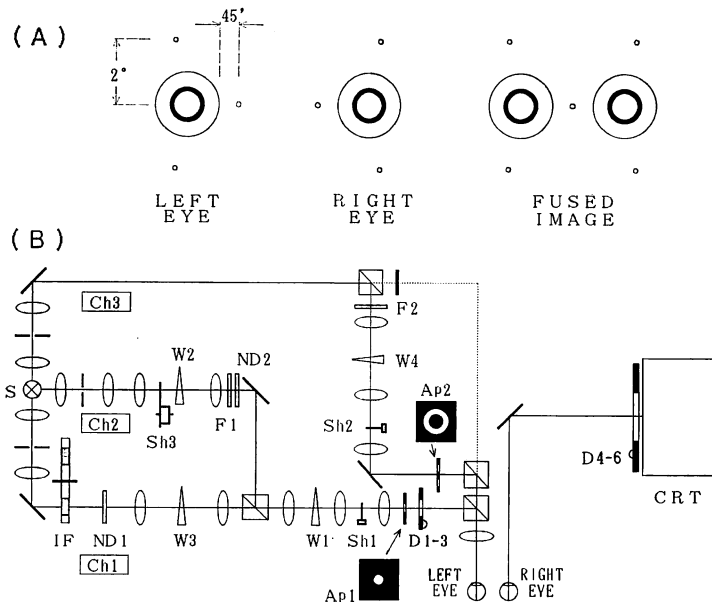
本研究では黒み量が中心色光の白み量に影響を受けないような測定方法として、テスト刺激と参照刺激の黒みをマッチングする方法を用いた。参照刺激を用いているために、単眼に参照刺激とテスト刺激の両方を呈示すると、参照刺激がテスト刺激の見えに影響を及ぼす可能性がある<sup>15,16)</sup>。そこで、別々にテスト刺激と参照刺激を呈示するという両眼隔離法を用いた。

## 2. 方 法

### 2.1 刺 激

Fig. 1(A) に実験に用いた刺激を示す。刺激は左右眼とも同じ形状とサイズで、7' のギャップで隔てられた 50' の円形中心光と外径 2° の円環状周辺光からなる。右眼刺激は中心、周辺とも白色光で参照刺激として用いられ、CRT により作られる。白色光の  $xy$  色度座標は  $x=0.33$ ,  $y=0.33$  である。左眼刺激はマックスウェル視光学系により作られ、テスト刺激となる。周辺白色光の  $xy$  色度座標は  $x=0.30$ ,  $y=0.38$  である。中心光は干渉フィルタによって作られ、主波長 441, 463, 498, 510, 550, 579, 588, 613, 645, 665 nm の各単色光あるいはこれら単色光に白色光を加えた混色光である。各単色光の半値幅は約 10 nm である。刺激呈示持続時間は 4 秒である。

両眼の視野はそれぞれ非対称配置された三つの LED により融像する。被験者は、中央の LED を融像して他の LED が作る正方形を安定させてから刺激呈示開始のボタンを押す。融像中は LED ではなく、左右それぞれ



**Fig. 1** Spatial configuration of the stimuli (A) and scheme of apparatus (B). In (A), outer area of the stimuli is completely dark. The fields on the left eye are the test stimulus and those on the right eye are the reference stimulus. The central field of the test stimuli is chromatic while other fields are all achromatic. Symbols in (B). Ch1, Ch2 and Ch3: optical channels. S: Xenon arc lamp. IF: interference filters. ND1 and ND2: neutral density filters. W1, W2, W3 and W4: neutral density wedges. Sh1, Sh2 and Sh3: electromagnetic shutters. D1-3 and D4-6: LEDs for binocular fusion. F1 and F2: color compensating filters. Ap1 and Ap2: apertures. The configuration of apertures is shown in figure. Dotted line denotes another optical channel that was not used in this research.

の刺激が呈示される位置を固視するよう被験者に指示した。

刺激強度を決定するために予備実験を行った。右眼参照刺激の白色周辺光の輝度をほぼ CRT の出力最大値である  $150 \text{ cd/m}^2$  に設定した。左眼テスト刺激の周辺光網膜照度は、右眼参照刺激の周辺光と等しくなるように決め、 $7,970 \text{ Td}$  とした。同じ輝度コントラストでも被験者により知覚される黒み量は異なる<sup>8)</sup>。そのため参照刺激の中心白色光の輝度は、各被験者ごとにその中心光の見えの白みと黒みが等しくなるように決めた。中心光輝度は、被験者 KS が  $21.2 \text{ cd/m}^2$ 、MS が  $37.1 \text{ cd/m}^2$ 、TM が  $7.39 \text{ cd/m}^2$  となった。

## 2.2 実験装置

Fig. 1 (B)に装置の概略を示す。左眼テスト刺激の呈示装置は、中心光の単色光用 (Ch 1) および白色光用の光路 (Ch 2) と、周辺白色光用の光路 (Ch 3) の3光路からなるマックスウェル視光学系である。1 kW のキセノンランプを光源 S とし、単波長光は干渉フィルタ IF により作られる。光の強度調節は中性濃度ウエッジ W 1 ~ W 4 によって行われる。白色光を使用しないときはシャッタ Sh 3 で Ch 2 を遮蔽する。シャッタ Sh 1, 2 によって刺激呈示持続時間の制御を行っている。光路に挿入したアパーチャ Ap 1, 2 により刺激形状が作られる。右眼参照刺激は Fig. 1 (B)の右側に示すように、CRT 上に呈示される。

両眼の光路中に融像用の赤色 LED 1-3, 4-6 を配置した。また実験を通して被験者の順応レベルを一定に保つため、刺激設定変更時に被験者ブースを低照度で照明している。被験者の頭部は歯型台を用いて固定され、被験者はブース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。干渉フィルタの選択、電磁シャッタ、ウエッジ濃度、被験者スイッチ、CRT 上の刺激呈示はすべてコンピュータにより制御され、各設定値は自動的に記録される。

## 2.3 手順

まず実験前に 10 分間の暗順応を行った。実験 1 では、被験者のボタン操作の後、約 2 秒後にピープ音とともに左右眼の刺激が同時に 4 秒間呈示される。被験者は両眼の刺激を比較する。刺激呈示終了後に、被験者は参照刺激の黒みにテスト刺激の黒みをマッチングするように手元のボタン操作でウエッジを回転させ、色光の網膜照度を変化させる。その後被験者は再びボタン操作により刺激呈示を行い、マッチングが成立するまで繰り返す。刺激呈示間の時間間隔は 5 秒以上である。マッ

グが成立したら終了ボタンを押す。テスト刺激中心光の波長の呈示順序はランダムである。

テスト刺激中心光の明るさと黒み量の比較のため、周辺光が存在する状況下での明るさ分光感度を測定した。刺激は黒みマッチングのものと全く等しくし、被験者のマッチングの判断基準のみを、「黒みではなく明るさを合わせる」ことに変更して実験を行った。

実験 2 では、テスト刺激中心光として彩度の等しい混色光を用いて、黒みマッチングと明るさマッチング実験を行った。このときの等彩度混色光は、各被験者ごとに、彩度-明るさマッチング実験を行って求めた。

彩度-明るさマッチング実験において両眼の刺激とも周辺光は呈示されない。右眼参照刺激として、 $xy$  色度座標が  $x=0.40$ ,  $y=0.51$  で輝度  $23 \text{ cd/m}^2$  の黄色光を CRT 上に呈示した。左眼テスト刺激には単色光と白色光の混色光を呈示した。被験者はまずテスト刺激の中の白色光強度のみを変化させることによって、参照刺激との彩度マッチングを行う。次にテスト刺激全体の強度を変化させることによって明るさマッチングを行う。明るさの変化によって彩度も変化するので再び彩度マッチングを行う。これを繰り返し、テスト刺激の彩度と明るさの両方を同時に参照刺激にマッチングさせる。このようにして実験 2 のテスト刺激中心光を決めた。実験 2 の他の条件はすべて実験 1 と同じである。

黒みマッチングにおいては、黒み量が増加してマッチングしたのか減少してマッチングしたのかで結果に差が生じる<sup>9)</sup>。そこで中心光網膜照度をやや高めに設定し、テスト刺激の黒みが少ない状態からマッチングを開始している。

すべての実験において、1 セッション中に 1 回あるいは 2 回ずつ全種類の刺激を呈示した。実験データは 4 回以上の試行の平均により求めた。

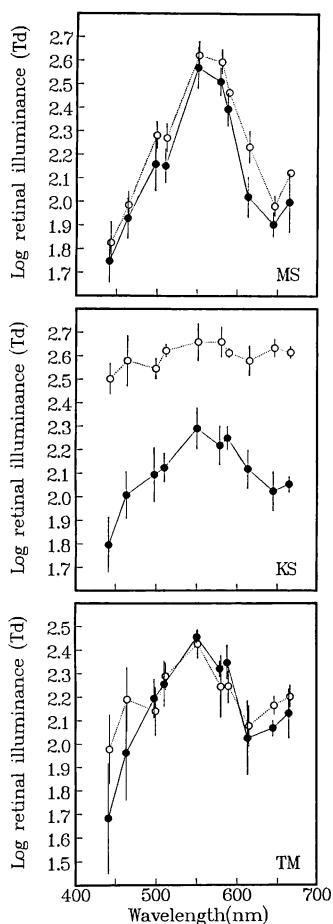
## 2.4 被験者

被験者は年齢が 24~27 歳の男子大学院生 3 人で、いずれも色覚正常で心理物理実験についてある程度の経験を持っている。被験者の一人は著者 KS で、他の二人はこの実験の目的に対してナイーブな MS, TM である。

## 3. 結果

### 3.1 実験 1 の結果

Fig. 2 は、3 人の被験者の黒みマッチング (●) と明るさマッチング (○) の結果である。横軸はテスト刺激中心光の波長、縦軸はマッチングが成立した時のテスト刺激中心光の対数網膜照度である。周辺光網膜照度が



**Fig. 2** Log retinal illuminance of the monochromatic central field of the test stimulus at blackness match and at brightness match to the reference field as a function of the wavelength. The reference stimulus for these matching is set at blackness=whiteness. Filled circles with solid lines denote equi-blackness retinal illuminance. Open circles with dotted lines denote equi-brightness retinal illuminance. Error bars denote  $\pm$ SD. The results of brightness match are shifted +1.5 nm to the right on the abscissa for clear presentation. Observers: MS (top panel), KS (middle panel) and TM (bottom panel).

7,970 Td (=3.90 log Td) であるため、黒みマッチングでは縦軸の等黒み網膜照度値が大きいかほどテスト刺激は低コントラストで参照刺激と等価な黒みが生じていることになり、黒み誘導効率が良いことを示す。逆に値が小さければ効率が悪いことになる。

3人の被験者の結果はいずれも、等黒み網膜照度値が中心波長によって大きく変化することを示している。

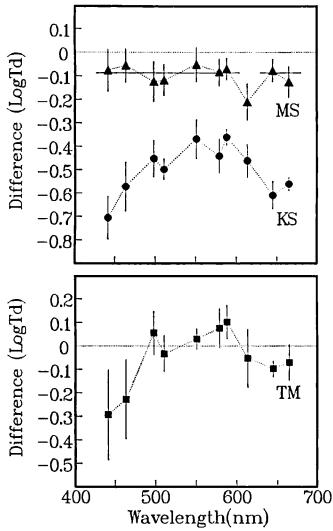
被験者 MS の結果は黒みと明るさの結果の関数形状がほぼ等しく、周辺光網膜照度が一定の時の相対的な黒み誘導効率は、ほぼテスト刺激中心色光の明るさ効率で決まる傾向を示す。これは過去の研究結果<sup>5)</sup>と一致するものである。しかし等明るさ網膜照度値の絶対値は、すべての波長において等黒み網膜照度値よりも高くなっている。また被験者 TM の場合には、両者の結果は中波長ではほぼ一致しているが、短波長および長波長では、等明るさ網膜照度値のほうが高くなっている。このような両者の結果の違いは、被験者 KS ではより顕著であり、等明るさ網膜照度値の方が 0.3 log 以上の高い値となっている。被験者 KS では等明るさ網膜照度値に波長依存性がほとんど見られないのに対し、等黒み網膜照度値は波長間で最大約 0.5 log 近い変動が生じている。

以上の結果は黒み誘導効率と明るさ効率が異なることを示しているが、さらに被験者の内観においても明るさと黒みに対する判断は異なっている。被験者 KS は、参照刺激と等明るさが成立しているテスト刺激上には黒みはあまり知覚されず、黒みをマッチングするためにはテスト刺激の明るさを参照刺激に比べて暗くしなければならないという報告をしている。MS からも同様の内観を得ている。また TM の内観は、中波長では両者が同時にマッチングしているが、短、長波長では明るさと黒みは異なるというものであった。

黒みと明るさの差をより明確にするために、等黒み網膜照度値から等明るさ網膜照度値を引いた差を、**Fig. 3** に示す。被験者 MS の場合は、610 nm での結果を除いて波長依存性がほとんど見られないが、両者の差はゼロではなく、図中の実線で示すように平均値  $-0.087$  log Td ではほぼ一定となっている。一方 KS, TM の場合は差の絶対値は異なるが、類似の波長依存性が存在しており、中波長で黒み誘導効率が良く、短、長波長で悪くなっている。これはテスト刺激の中心光を等明るさにした場合においても、短、長波長での色光には黒みが入りにくいことを示している。

これらの結果から、中心光が色光の場合には、黒み誘導量は中心光の輝度で決まるのではなく中心光の波長に依存することが明らかとなった。被験者数が3人であるため、この実験結果だけでは一般的な特性は得られないが、刺激に対する明るさと黒みは異なる知覚現象であるといえる。

Fig. 2 で示した3人の被験者の等黒み網膜照度値の関数形状は単波長光における彩度関数<sup>17-19)</sup>の逆数に類似しており、黒み誘導効率と中心光の彩度に何らかの相関



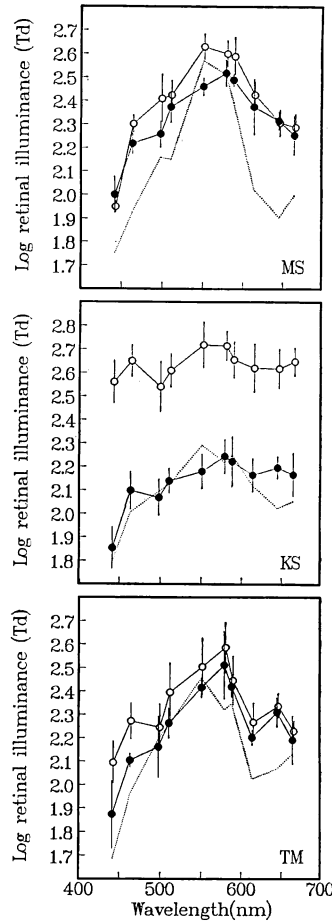
**Fig. 3** The difference between the log retinal illuminance of equi-blackness and that of equi-brightness as a function of the wavelength. The data of blackness match and brightness match are from Fig. 2. Different symbols denote different observers: MS (filled triangles), KS (filled circles) and TM (filled squares). Error bars denote  $\pm$ SD. The horizontal solid line on MS data is the average line of the data except 613 nm and the constant value of it is  $-0.087 \log Td$ .

があることが予想される。そこで中心色光の彩度による黒み誘導量への影響を調べるために、彩度を変化させた刺激を用いて実験2を行った。

**3.2 実験2の結果**

**Fig. 4** は、中彩度混色光をテスト刺激中心光とした時の、黒みマッチング(●)と明るさマッチング(○)の結果である。比較のために、点線で実験1で用いた単色光による黒みマッチングの結果も示した。どの被験者においても、波長による等黒み網膜照度値の変化は、単色光での実験結果に比べて小さくなっている。さらに中波長では等黒み網膜照度値があまり変わらないかやや減少しているのに対し、短波長や長波長では上昇する傾向が見られる。これは、中彩度刺激を用いた場合は中波長領域での黒み誘導効率はあまり変化しないが、短、長波長領域では誘導効率が良くなることを示している。

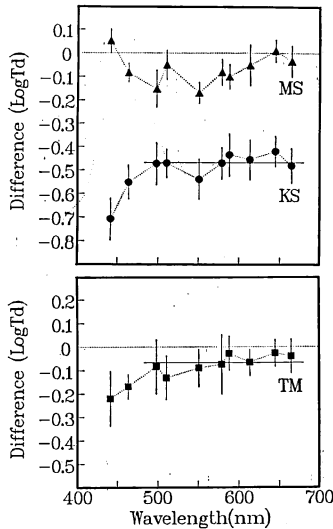
実験1と同様に、等明るさと等黒みの網膜照度値の差を取ったのが **Fig. 5** である。被験者 KS, TM では短波長光の場合を除いて波長依存性がほとんど見られず、図中実線で示すようにそれぞれ平均値  $-0.468 \log Td$  と  $-0.067 \log Td$  を取る。また短波長光と他の波長光との間の差も実験1より減少している。一方、MS では



**Fig. 4** Log retinal illuminance of the central field of the test stimulus at blackness match and at brightness match to the reference as a function of the dominant wavelength. These fields are mixture of monochromatic light and achromatic light. The reference stimulus for these matching is set at blackness=whiteness. The results of blackness match in experiment 1 are shown for comparison by dotted lines. Filled circles with solid lines denote equi-blackness retinal illuminance. Open circles with solid lines denote equi-brightness retinal illuminance. Error bars denote  $\pm$ SD. The results of brightness match are shifted  $+1.5 \text{ nm}$  to the right on the abscissa for clear presentation. Observers: MS (top panel), KS (middle panel) and TM (bottom panel).

実験1とは異なり波長依存性が生じている。Fig. 3 と Fig. 5 の結果から、同じ主波長を持つ等明るさの刺激でも彩度が異なると必ずしも黒み誘導量は等しくならな

いことがわかる。



**Fig. 5** Same as Fig. 3 except that the data of blackness match and brightness match are from Fig. 4. Different symbols denote different observers: MS (filled triangles), KS (filled circles) and TM (filled squares). The horizontal solid lines on KS and TM data are average lines of each data except 441, 463 nm and the constant values of them are  $-0.468 \log Td$  (KS) and  $-0.067 \log Td$  (TM).

#### 4. 考 察

今回の実験結果はいずれの被験者の場合も、黒み誘導量は中心光の輝度のみで決まるのではなく、中心光の波長に依存することを示している。このことから、中心光の色みが黒み誘導量に影響を与え、黒み誘導メカニズムには、輝度チャンネルのほかに色チャンネルの寄与<sup>20-22)</sup>があると考えられる。

黒み誘導量に対する色みの影響は、刺激の構成と関係がある。周辺光が色光の場合には、周辺光の色みは黒み誘導量には影響せず<sup>8)</sup>、中心光が色光の場合にのみ色みが影響する。このような刺激構成による黒み誘導の変化は、周辺光からは輝度チャンネルのみが寄与し、中心光では輝度チャンネルのほかに色チャンネルの寄与があると考え、定性的に説明することが可能であろう。

黒み誘導は明るさの減少によっても単純には説明できない。黒み誘導が、中心光に関しては明るさのみでその効率が決まるのであれば、たとえ網膜照度値の絶対値において、明るさと黒みの間に差があっても、その差は波長によらず一定となるはずである。しかし実験結果は、ほとんどの場合、両者の差に波長依存性があることを示している。したがって、黒み誘導は、明るさと関連性は

持っている可能性はあるものの、それのみで決まるのではないと思われる。

実験2の結果は中心光の色み量が減少することによって黒み誘導効率が上昇することを示している。ここで、実験1で求めた単色光  $\lambda$  の等黒み網膜照度値  $L_\lambda$  で中心光が白色光のときの等黒み網膜照度値  $L_w$  を割った比  $S_l(\lambda)$  を単色光  $\lambda$  の黒み誘導効果と定義する。 $S_l(\lambda)$  が小さいほど黒み誘導効率が低いことを示す。

$$S_l(\lambda) = L_w / L_\lambda \quad (1)$$

中心光が白色光のみの場合は中心光の網膜照度そのまま黒み誘導に反映されるが、単色光の場合はこれに  $S_l$  を乗じたものが黒み誘導に寄与すると考える。刺激光が単色光と白色光の混色光の場合には、(1)式は次のように変化する。

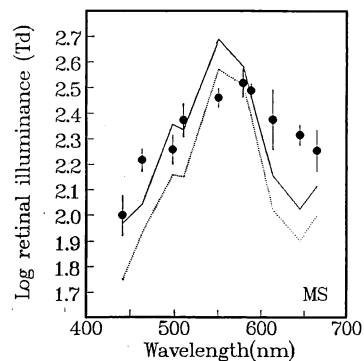
$$S_l(\lambda) * L_{\lambda, \text{mix}} + L_{w, \text{mix}} = L_w \quad (2)$$

ただし、 $L_{\lambda, \text{mix}}$ 、 $L_{w, \text{mix}}$ は、混色光の等黒み網膜照度値の単色光成分と白色光成分である。その和  $L_{\text{mix}} = L_{\lambda, \text{mix}} + L_{w, \text{mix}}$  は実験2の結果に相当する。(1)、(2)式から同じ主波長を持つ任意の混色光について  $L_{\text{mix}}$  を計算することができ、

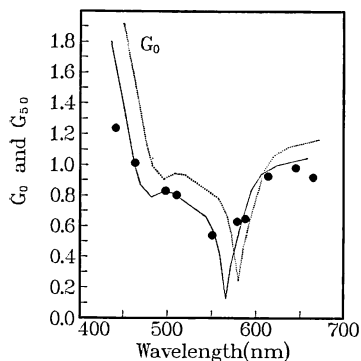
$$L_{\text{mix}} = [S_l(\lambda)] / [S_l(\lambda) * P_c - P_c + 1] * L_\lambda \quad (3)$$

となる。ここで  $P_c$  は混色光の輝度純度であり、全体の強度  $L_{\text{mix}}$  に依存しない量である。

(3)式が成立すれば、黒み誘導の効果が単色光成分と白色光成分の単純な線形形で表されることになる。被験者 MS の場合に(3)式による計算値と実験2の結果を



**Fig. 6** The theoretical values of blackness match calculated by Eqs. (3) and the results of blackness match in experiment 1 and 2 as a function of the dominant wavelength. (See text in detail). Solid lines denote the theoretical values. Dotted lines denote the result of blackness match in experiment 1. Filled circles denote the result of blackness match in experiment 2. Error bars denote  $\pm SD$ . For observer MS.



**Fig. 7**  $G_0$  and  $G_{50}$  as a function of the dominant wavelength. The  $G_0$  function is from ref. (7) and the  $G_{50}$  data points are calculated using the results in experiment 1. (See text in detail). The data of the  $G_{50}$  is the average of all observers. Filled circles denote the  $G_{50}$  data. Dotted curve denotes the original  $G_0$  function. Solid curve denotes  $G_0$  function arbitrary shifted  $-14$  nm on the abscissa and  $-0.12 \log$  on the ordinate.

比較したのが **Fig. 6** であり、点線が実験 1 の結果、実線が計算値、黒丸が実験 2 の結果を示す。短波長領域および  $580$  nm 付近では計算値に近くなるが、 $550$  nm 付近の中波長領域および長波長領域では合わない。これは他の 2 人の被験者にも共通の傾向である。これから本研究において測定された黒みレベルでは、黒み誘導の効果を単色光成分と白色光成分の単純な線形和によって説明することはできないのがわかる。黒み誘導に対する色みの寄与についてはさらに検討することが必要である。

Evans ら<sup>6,7)</sup>は  $G_0$  を色みの強さ (chromatic strength) すなわち黒みの入りにくさを表す指標として考えており、この値が大きければ黒みレベルが  $0\%$  の時に黒み誘導効率が低いことになる。彼らは中心光の輝度を変化させたときに生じる灰色の量は、 $G_0$  と中心光輝度との差を取ることによって説明できるとしている。また本研究結果の等黒み網膜照度値は、黒みレベルが  $50\%$  付近の時の黒み誘導効率を示している。両方の結果を比較することにより、黒み誘導効率の波長依存性が、黒みレベルの変化によって影響を受けるかどうかかわかる。そこで  $G_0$  関数を **Fig. 7** 中に点線で示した\*1。中波長で誘導効率が良く、短、長波長で悪い結果は本研究の結果と一致する。ここで黒みレベルが  $50\%$  付近の時の、色みの強さを  $G_{50} = \log(S_i)$  と定義し、本実験結果から求めた 3 人の被験者の  $G_{50}$  の平均値を **Fig. 7** 中に黒丸で示

した。 $G_0$  と  $G_{50}$  のデータ点は直接的には一致しないが、これを両者の実験条件の差などによるものと考えて<sup>7)</sup>、 $G_0$  のグラフを任意量 (横軸  $-14$  nm, 縦軸  $-0.12 \log$ ) シフトすると、 $G_0$  と  $G_{50}$  は良く一致する。したがって黒み誘導メカニズムに対する色みの寄与は、黒みレベルが  $0\%$  の時も黒みレベルが  $50\%$  付近の時も同様の波長依存性を持っていることがわかる。

## 5. 結 論

両眼隔離黒みマッチング法を用いて、周辺白色光によって中心色光に誘導される黒み量を測定した。黒み誘導量には波長依存性が存在したが、この波長依存性は明るさ効率の波長依存性とは必ずしも一致しなかった。

テスト刺激中心光を単色光から中彩度光へ変えたときの結果の変化から、いずれの被験者でも彩度の変化が黒み誘導量に影響を与えていることがわかった。本研究の結果と過去の研究結果を合せると、黒み誘導を発生するメカニズムは、周辺光からは輝度チャンネルのみから入力を受け、中心光からは輝度チャンネルおよび色チャンネルの入力を受けていると考えられる。

## 文 献

- 1) J.S. Werner, C.M. Cicerone, R. Kliegl and D. DellaRosa: "Spectral efficiency of blackness induction," *J. Opt. Soc. Am. A*, **1** (1984) 981-986.
- 2) 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.
- 3) T.D. Kulp and K. Fuld: "Black spectral responsivity," *J. Opt. Soc. Am. A*, **6** (1989) 1233-1238.
- 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) 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.
- 6) R.M. Evans and B.K. Swenholt: "Chromatic strength of colors: Dominant wavelength and purity," *J. Opt. Soc. Am.*, **57** (1967) 1319-1324.
- 7) R.M. Evans and B.K. Swenholt: "Chromatic strength of colors, III. Chromatic surrounds and discussion," *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (1969) 628-634.
- 8) 篠森敬三, 中野靖久, 内川恵二: "周辺単色光による空間的黒み誘導," *光学*, **21** (1992) 102-112.
- 9) 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.
- 10) K. Fuld, J.S. Werner and B.R. Wooten: "The possible element nature of brown," *Vision Res.*, **23** (1983) 631-637.
- 11) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R.M. Boynton: "Influence of achromatic surrounds on categorical perception of surface colors," *Vision Res.*, **29** (1989)

\*1 この  $G_0$  関数は文献 7) の **Fig. 7** から直接読みとったものであり、必ずしも元の関数とは一致しない。

- 881-890.
- 12) 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** (1991) 363-368.
  - 13) 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.
  - 14) V. J. Volbrecht, J. S. Werner and B. R. Wooten: “Temporal induction of blackness—I. Color appearance,” Vision Res., **29** (1989) 1425-1436.
  - 15) S. K. Shevell: “On neural signals that mediate induced blackness,” Vision Res., **29** (1989) 891-900.
  - 16) P. Heggelund: “Achromatic color vision—I: Perceptive variables of achromatic colors,” Vision Res., **14** (1974) 1071-1079.
  - 17) P. K. Kaiser, J. P. Comerford and D. M. Bodinger: “Saturation of spectral lights,” J. Opt. Soc. Am., **66** (1976) 818-826.
  - 18) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P. K. Kaiser: “Equating colors for saturation and brightness: the relationship to luminance,” J. Opt. Soc. Am., **72** (1982) 1219-1224.
  - 19) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P. K. Kaiser: “Luminance and saturation of equally bright colors,” Color Res. Appl., **9** (1984) 5-14.
  - 20) Y. Nakano, M. Ikeda and P. K. Kaiser: “Contributions of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear models,” Vision Res., **28** (1988) 799-810.
  - 21) 内川恵二: “色覚のメカニズム: 心理学的な立場から”, 光学, **15** (1986) 368-375.
  - 22) 内川恵二: “視覚系の色チャンネルと明るさチャンネル”, 光学, **16** (1987) 426-431.