

色：最近の研究動向

日比野 治雄

千葉大学 工学部 工業意匠学科 デザイン視覚研究室

〒263 千葉市稲毛区弥生町1-33

1. はじめに

人間の視覚は、光刺激を基にして外界に関する情報を受容するシステムである。したがって、視覚について考察する場合には、光刺激という物理的側面とその光刺激によって生じる知覚という人間の内的側面との二面性に留意しなければならない。光刺激の特性は、適切な測定器があれば、客観的に容易に特定することができる。これは、光刺激が物理的ドメインの事象であるからである。それに対して、その光刺激によって生起する視覚系の反応は、心理的ドメインの事象ということになる。この物理的ドメインの事象と心理的ドメインの事象との関係を探究するところに成立しているのが、心理物理学である。

このようなことは心理物理学の基本であるから、改めていうまでもないことのように思われるが、「色」に関してということになると、上記のような事実を忘れてしまう人が意外なほど多い。ついうっかりと「色」自体が物理的に存在すると考えてしまいがちなのである。Newton¹⁾の有名な言葉 "The Rays are not coloured..." が端的に示すように、「色」は光の有する物理的な属性ではなく、光によって人間の知覚過程に生じる生理的な現象なのである。換言すれば、「色」は知覚現象である、ということである。確かに、「その青い服」とか「この黄色いりボン」いえば、ほとんどだれにでも間違いなく意図を伝えられるので、このような色彩体験は万人で同一のものであると思いがちなのは無理もないことかもしれない。しかし、等色実験のような心理物理的測定を行ってみれば

即座に明らかになることであるが、各個人の色知覚能力には非常に大きな差異が存在するのである。これは物理的に同一の色刺激でも、それを観察したときに生じる心理的な色体験は異なる場合があることを示している。

2. 色知覚の個人差と個体内差

このように考えると、色を客観的な尺度で数値化しようとするときに障害となってくるのは、正に上記のような個人差の問題であることがわかる。この問題を、国際照明委員会 (CIE) は、「標準観測者」(standard observer: CIE 1931 標準観測者²⁾) という概念を導入することによって解決したのである(というよりはむしろ、無視したとの方がよいかもしれないが...)。つまり、上記のような理由から、色知覚に関しては万人に共通の客観的尺度を構成することが不可能であるので、標準観測者という架空の(もちろん、平均的であることは間違いないが)視覚特性を持った観測者を設定し、この標準観測者の視覚特性をもって色を数値化したわけである。現在の色彩科学の基礎となっている等色関数や色度図などは、全てこの標準観測者に基づいた体系である。したがって、同じ色刺激を観察しても、観察者によってその色知覚は異なる可能性がある(しかも、その可能性が高い)のであるから、このような体系は刺激を客観的に記述する基準とはなっても、個々の観察者の色知覚の基準とはなりえないということになる。

さらに事態を複雑にするのは、刺激の大きさによって色の見えが変化するということであ

る。これは、上記の標準観測者に、2°視野（CIE 1931 標準観測者²⁾）と10°視野（CIE 1964 補助標準観測者²⁾）との2つがあるという事実によく現れている。つまり、個人差どころか、一個人（特定の観察者）においてすら、色刺激を受容する網膜部位によって色知覚が変化するのである（関連事項のレビューについては Hibino³⁾を参照）。色知覚には、個人差と同時に個体内差も存在するわけである。したがって、これは人間の色覚メカニズムを考察する際に非常に大きな障害となる。たとえば、中心視のデータを基に構築した色覚モデルが、周辺視では（たとえ、ある特定の同じ被験者であっても）成立しないということが起きてくるからである。逆にいえば、もしも中心視と周辺視の色覚を統一的に記述することのできるような色覚モデルを構築することができれば、色覚研究に大きな寄与をすることになると考えられる（関連事項のレビューについては Hibino⁴⁾を参照）。

本論文では、色知覚の個人差の問題には触れないで、中心視と周辺視における色知覚の問題に焦点を絞って解説することにしよう。

3. 中心視と周辺視の色知覚

中心視と周辺視における色知覚を比較する際に、最も大きな問題となるのは黄斑色素である。この黄斑色素は、網膜の中心領域（直径10°～17°⁵⁾）に存在し、選択的に短波長光を吸収するという性質がある。その光学濃度は均一ではなく、中心窩で最も高く、中心窩から離れるにつれて低くなるので、錐体に達する短波長光の量は、中心窩から離れるにつれて増加する。実際、中心窩から周辺部位まで短波長領域の視感度（輝度チャンネルの感度）を測定してみると、角膜レベル（提示刺激を基にすれば）では中心窩の感度が最も低くなることが知られている⁶⁾。この中心窩付近の感度の低下は、黄斑色素の影響なのである。錐体まで達する短波長光の量が、黄斑色素の影響によって、中心窩においては周辺部位よりも少なくなるので、角

膜レベルでは中心窩の感度が低く査定されてしまうのである。黄斑色素の影響を考慮して、正味の（「錐体レベル以降の」という意味、以下、本論文では、この「正味の」という語は、この意味で用いる。）感度を計算すれば、視感度は中心窩でも周辺部位でもほぼ同じになるのである^{6,7)}。

また、黄斑色素の濃度には著しい個人差があることが知られている⁸⁻¹⁰⁾。そのため、この黄斑色素は、前記のような色知覚の個人差および個体内差の大きな要因の一つであると考えられる。したがって、中心視と周辺視における色知覚を比較する場合には、黄斑色素の影響を除いた正味の色知覚特性を明らかにしなければならないのである。

この点に関して、筆者（Hibino^{11,12)}）は、色相打ち消し法（hue cancellation¹³⁾）を用いて、黄斑色素が網膜の中心窩から周辺までの部位における反対色過程にどのような影響を及ぼすかについて検討を加えた。上記のように、視感度（輝度チャンネルの感度）の場合には、黄斑色素の影響を考慮すれば（つまり、正味の感度は）、中心窩から周辺網膜部位まで、同一被験者ではほぼ同じであることが知られている⁶⁾ので、正味の反対色過程の感度の場合も、どの網膜部位においてもほぼ同じであろうと、実験前には、筆者は予想していた。つまり、同量の短波長光を提示した場合には、中心窩付近の受容器に到達する短波長光の量は、黄斑色素の影響で、周辺部位よりも少なくなるのであるから、角膜レベルでは、短波長光によって生じる色反応も中心窩付近の方が周辺部位よりも小さくなるであろうと考えたのである。特に、短波長光に高い感度をもつ y-b（黄-青）反対色チャンネルの反応は、黄斑色素の影響を大きく受けるので、周辺部位に比べて中心窩において小さくなると予想していたのである。

ところが、実際に測定してみると、角膜レベルの感度は、y-b チャンネルにおいては、測定した網膜のどの部位においても（中心窩から31°まで）、ほぼ一定であることが判明したの

である(図1参照)。しかも、これは実験を行った2名の被験者の黄斑色素濃度に大きな個人差が存在するにもかかわらず、ほぼ一定であるという結果が得られたのである。また、正味の感度を計算してみると、中心窩から離れるにつれてy-bチャンネルの感度は低下するという結果であった(図2参照)。これは、上記の視感度の場合とは全く異なる結果である。

以上のような結果から、筆者は、y-bチャンネルには、各被験者固有の黄斑色素濃度に対する補正機構が存在するという結論に到達したのである^{11,12)}。一方、r-gチャンネルには、そのような補正機構は認められなかった¹²⁾。

4. 周辺視色覚のモデル

標準観測者に、2°視野(CIE 1931標準観測者²⁾)と10°視野(CIE 1964補助標準観測者²⁾)との2つがあるのは上記の通りであるが、その2つの標準観測者の特性の相違と色覚モデルとの関連については研究例があまりないのが実状である。そこで、本研究では、上記のような筆者自身の周辺視色覚の実験によって得られた知見を基に、2°視野と10°視野の両方の標準観

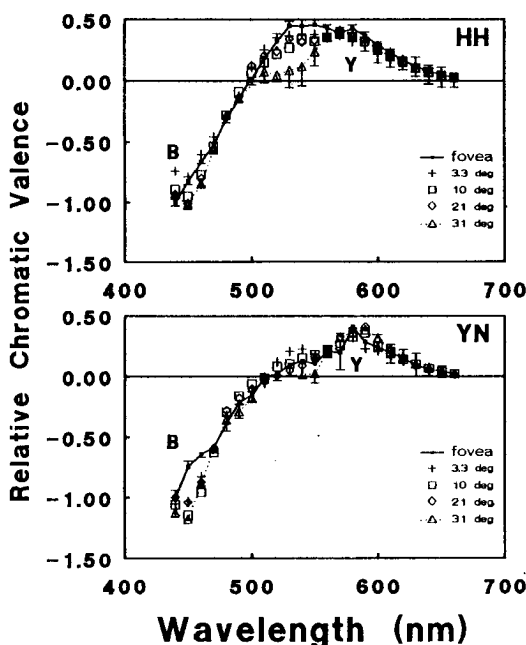


図1 角膜レベルでの(黄斑色素の補正をしていない)y-bクロマティック・バレンス関数。

測者の色覚特性を統一的に説明しうる色覚モデルの構築を試みることにする。ただし、ここで用いる2°視野の等色関数は、CIE 1931標準観測者²⁾のものではなく、Vos¹⁵⁾の改良したJudd¹⁶⁾の修正等色関数 $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ とする。

色覚モデル構築の前に、まず、そのために必要な次のような2つの前提条件を設定する。

- i) 3種の錐体の正味の分光感度特性は網膜位置にかかわらず不変である¹⁴⁾(つまり、網膜部位にかかわらず、黄斑色素の影響を除外すれば、錐体分光感度曲線の形状に変化はない)。ただし、3種の錐体の相対的な感度は不変であるとは限らない。
- ii) 正味のS錐体の反応は、その位置する網膜の部位の黄斑色素濃度の低下に応じて、低くなる。

錐体感光色素の分光特性が、網膜位置によって変化するとは考えにくいから、i)は妥当な仮定であるといえよう。また、ii)は、上記のHibino¹²⁾の結果を基に設定した仮説である。

錐体分光感度 $S_L(\lambda)$, $S_M(\lambda)$, $S_S(\lambda)$ は、次のSmithとPokorny⁷⁾の式(1)によるものを採用する。

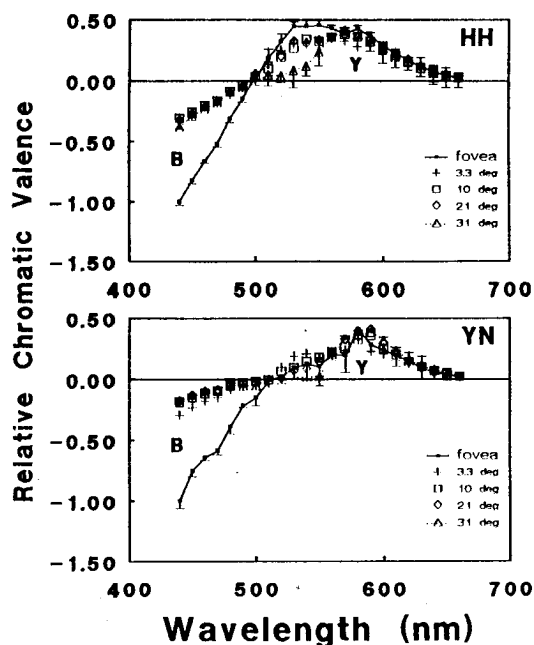


図2 正味の(錐体レベルでの)y-bクロマティック・バレンス関数。

$$\begin{aligned}
 S_L(\lambda) &= 0.15514x'(\lambda) + 0.54312y'(\lambda) & + 0.21181S_S(\lambda), \\
 &\quad - 0.03286z'(\lambda), & y'(\lambda) = S_L(\lambda) + S_M(\lambda), \\
 S_M(\lambda) &= -0.15514x'(\lambda) + 0.45684y'(\lambda) & z'(\lambda) = S_S(\lambda) \quad (2) \\
 &\quad + 0.03286z'(\lambda), \\
 S_S(\lambda) &= z'(\lambda). \quad (1) \\
 x'(\lambda) &= 2.9449S_L(\lambda) - 3.5008S_M(\lambda)
 \end{aligned}$$

となる。上記の錐体分光感度 $S_L(\lambda)$, $S_M(\lambda)$, $S_S(\lambda)$ は角膜レベルの値であるので、周辺視野の場合には、黄斑色素の影響を除外しなければならない。2° 視野の錐体分光感度を $S(\lambda)$, 2°

したがって、

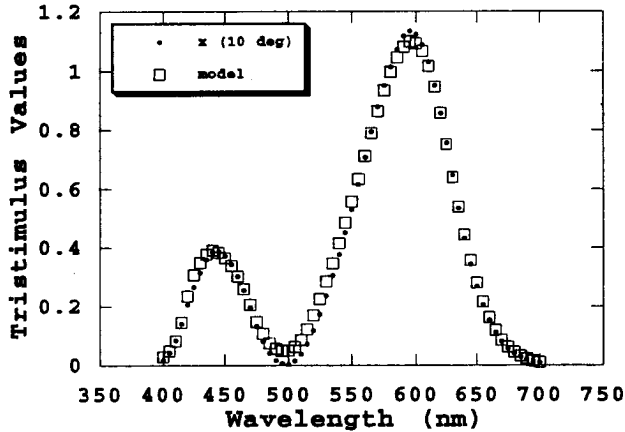


図3 10° 視野の等色関数 $x_{10}(\lambda)$ (図中の・) とモデルによる予測値 (図中の□)。

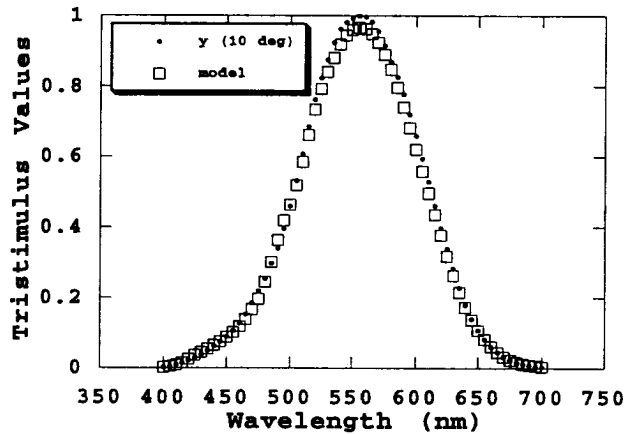


図4 10° 視野の等色関数 $y_{10}(\lambda)$ (図中の・) とモデルによる予測値 (図中の□)。

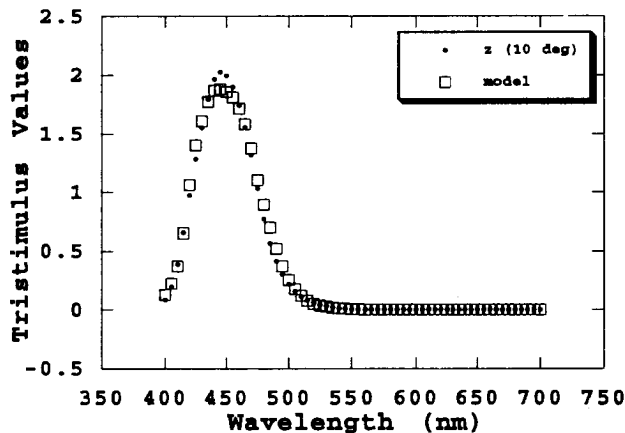


図5 10° 視野の等色関数 $z_{10}(\lambda)$ (図中の・) とモデルによる予測値 (図中の□)。

視野と 10° 視野の場合の黄斑色素の光学濃度（黄斑色素の光学濃度と波長の関係については、文献2）の p. 112, Table 2 (2.4.6) 参照）の差を $\Delta(\lambda)$ とすると、10° 視野の正味の錐体分光感度 $S(\lambda)_{10}$ は、上記 i) から、

$$S_{10}(\lambda) = k \cdot 10^{\Delta(\lambda)} \cdot S(\lambda) \quad (3)$$

となる（ただし、 k は定数）。したがって、10° 視野の等色関数 $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$, $z_{10}(\lambda)$ においても、2° 視野の場合と同様の関係が成立するとすると、

$$x_{10}(\lambda) = 2.9449 \{k_L \cdot 10^{\Delta(\lambda)} \cdot S_L(\lambda)\} \\ - 3.5008 \{k_M \cdot 10^{\Delta(\lambda)} \cdot S_M(\lambda)\} \\ + 0.21181 \{k_S \cdot 10^{\Delta(\lambda)} \cdot S_S(\lambda)\}, \quad (4)$$

$$y_{10}(\lambda) = k_L \cdot 10^{\Delta(\lambda)} \cdot S_L(\lambda) \\ + k_M \cdot 10^{\Delta(\lambda)} \cdot S_M(\lambda), \quad (5)$$

$$z_{10}(\lambda) = k_S \cdot 10^{\Delta(\lambda)} \cdot S_S(\lambda) \quad (6)$$

となるはずである。ここで、 $k_L = 1$ としてみよう。すると、 $k_M = 0.91$, $k_S = 0.64$, 2° 視野と 10° 視野の $\Delta(\lambda)$ のピークの差が 0.32 の場合に、式 (4), (5), (6) は、それぞれ、図 3, 4, 5 に示すようになる。実際の 10° 視野の等色関数²⁾ $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$, $z_{10}(\lambda)$ も、それぞれの図に示されているが、かなりよい一致をみていることがわかるであろう。

5. おわりに

2° 視野と 10° 視野の等色関数は、これまで、その成立の由来などからもわかるように、それぞれが別個に考えられることがほとんどであった。したがって、この二者の関連を何らかの統一的な概念で橋渡しをしようとする試みも少なかったのである。しかし、上記のような極めて簡単な仮定 i) および ii) を導入することによって、かなり正確に 2° 視野の等色関数から 10° 視野の等色関数を予測することができたのである。特に、ii) の仮定は、これまでにはなかった考え方であるが、この仮定が正確な予測に対して極めて有効だったのである。

謝辞 本研究は、平成 5 年度文部省科学研究費（奨励研究・研究代表者：日比野治雄）、平成

5・6 年度文部省科学研究費（一般研究 C・研究代表者：上村保子）、平成 4～6 年度文部省科学研究費（総合研究 A・研究代表者：二木宏明）および原子力安全システム研究所研究費（色彩の心理学的研究ワークショップ・代表者：大山 正）の補助を受けた。

お詫び 本論文は、1995 年 1 月 26 日に視覚学会で発表の予定であったが、筆者の急病のため、発表中止のやむなきに至った。多くの方々に御迷惑をおかけしたことと思う。この場を借りて、お詫びさせて頂く。

文 献

- 1) I. Newton: Opticks: or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light. William Innys, London, 1730.
- 2) G. Wyszecki and W. S. Stiles: Color Science. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- 3) H. Hibino: Peripheral vision: Its photopic aspects of recent developments. *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, 10, 21-33, 1991.
- 4) H. Hibino: To what extent is the zone theory of color vision substantiated? *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, 9, 27-45, 1990.
- 5) S. L. Polyak: The Retina. University of Chicago Press, Chicago, 1941.
- 6) J. A. van Esch, E. E. Koldenhof, A. J. van Doorn and J. Koenderink: Spectral sensitivity and wavelength discrimination of the human peripheral visual field. *Journal of the Optical Society of America A*, 1, 443-450, 1984.
- 7) V. C. Smith and J. Pokorny: Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments and between 400 and 500 nm. *Vision Research*, 15, 161-171, 1975.
- 8) R. A. Bone and J. M. B. Sparrock: Comparison of macular pigment densities in human eyes. *Vision Research*, 11, 1057-1064, 1971.
- 9) R. A. Bone, J. T. Landrum and A. Cains: Optical density spectra of the macular pigment *in vivo* and *in vitro*. *Vision Research*, 32, 105-110, 1992.
- 10) P. L. Pease, A. J. Adams and E. Nuccio: Optical density of human macular pigment. *Vision Research*, 27, 705-710, 1992.
- 11) H. Hibino: Counterbalancing mechanism of yellow-blue opponent-color system against macular pigment.

Japanese Psychological Research, 34, 93-99, 1992.

- 12) H. Hibino: Red-green and yellow-blue opponent-color responses as a function of retinal eccentricity. *Vision Research*, 32, 1955-1964, 1992.
- 13) D. Jameson and L. M. Hurvich: Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation. *Journal of the Optical Society of America*, 45, 546-552, 1955.
- 14) B. R. Wooten and G. Wald: Color-vision mechanisms in the peripheral retinas of normal and dichromatic observers. *The Journal of General Physiology*, 61, 125-145, 1973.
- 15) J. J. Vos: Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer. *Color Research and Application*, 3, 125-128, 1978.
- 16) D. B. Judd: Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight. *CIE Proceedings*, 1 (part 7), 11, 1951.