

特集「色覚の可塑性」 Special Issue: Plasticity of color vision

加齢と色覚

Age-related changes in colour vision

坂田 勝亮
Katsuaki Sakata

女子美術大学
Joshi University of Art and Design

キーワード：色覚, 加齢, 発達, 色知覚, 視覚

Keywords : colour vision, age-related, development, colour perception, vision

1. はじめに

ほとんどの動物は、誕生から年齢を重ねていくにしたがって身体構造が変化し、これにともなって各種身体機能も変化する。人間の色覚に関しては特に20世紀末になって多くの研究が精力的に行われ、大きな発見が相次ぎ、人間の色覚における加齢の影響がわかってきた。20世紀末から現代に続くこれらの研究を紹介する。

2. 乳幼児の色覚

色覚の発達に関してはこの特集の前半に根岸一平先生がお書きだと思うので詳細はそちらをご参照いただきたいが、ここでは生後すぐの色覚について簡単にふれる。

生まれた直後の人間の色覚はきわめて未成熟であり¹⁾、ほとんど有彩色と無彩色の弁別ができない²⁾。生後1ヶ月くらいでもほとんど色は知覚できないと思われるが³⁾、生後2ヶ月くらいになると低感度と思われる色覚が現れてくる⁴⁾。そして輝度変調格子と等輝度赤緑変調格子の区別ができるようになるが⁵⁾、その感度は成人よりも低い^{6,7)}。2ヶ月児くらいのこのような色覚は2色型の色覚特性を示すため⁸⁾、この頃までにL錐体とM錐体が機能し始めるものと考えられる^{9,10)}。しかしこれらの機能は成人ほど完成されたものではなく、生後3か月になっても仮性同色表のうち赤緑プレートはほとんど認識できないが、視細胞構成に関わらず男児より女児の成績のほうが高いことが報告されている¹¹⁾。またこの頃は成人が見落とすような照明の変化による対象表面の変化を見つけられるが、この能力は5か月児になるとみられなくなることも報告されている¹²⁾。さらに時間コントラスト感度関数の測定結果から、3ヶ月児では色度コントラストと輝度コントラストが同じメカニズムで処理されていると考えられる¹³⁾。

生後4ヶ月以降には色カテゴリが表れることが報告されているが^{14,15)}、刺激の変化を検出する手掛かりとして色の違いだけでは不十分であることも報告されて

いる^{16,17)}。照明が変化しても物体の色の恒常性が成立したり¹⁸⁾、色と物体の関係を把握したりできるようになる¹⁹⁾のは生後6ヶ月以降である。そして網膜中心窩の構成が成人とほぼ同じになるのは45ヶ月まで待たなければならず²⁰⁾、彩度の知覚が成人と同程度になるのは青年期まで待つ必要がある²¹⁾。

3. 高齢者の色覚

高齢者の色覚に関してはすでに篠森敬三先生が本誌27巻に詳細な記事を書かれているので²²⁾、そちらを参照されたい。ここではこれを補うよう説明を追加していく。

よく知られているように、眼光学系は加齢により黄色みを帯びるようになる。Artigasらは41歳から77

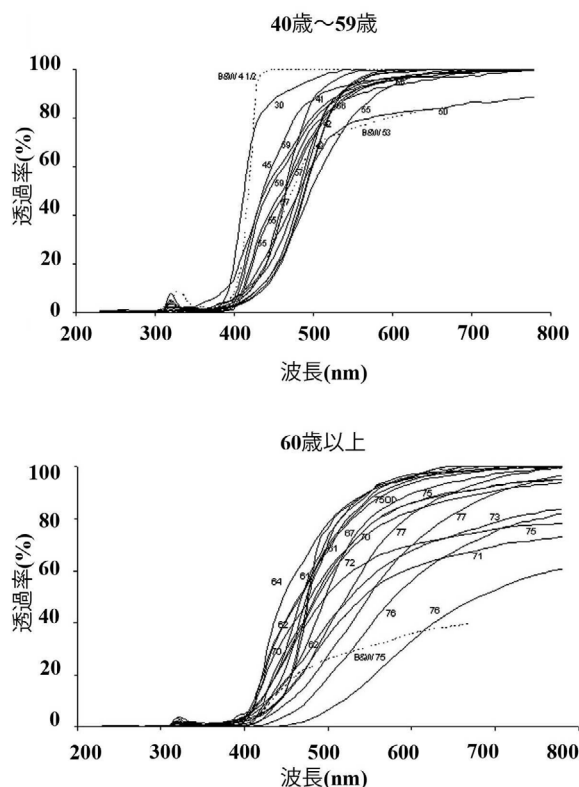


図1 眼球レンズの分光透過率 (Artigas, et al., 2012)

歳にわたる 32 眼のレンズの分光透過率を測定した結果、加齢とともに中長波長よりも短波長の光がとりにくくなり、70 歳を越えると全波長に渡り透過率が低下すること、この加齢による透過率への影響は 60 歳から大きく増大することなどを報告している²³⁾ (図 1)。しかし黄斑色素の濃度は加齢による有意な変化を示さず²⁴⁾、視細胞に達する光は黄色みを強くすると考えられるにもかかわらず、Cambridge Color Test の結果では Deutan 軸に沿った識別低下は 40 歳代で始まるのに対し、Tritan 軸の識別低下は他の 2 軸に沿った識別低下とは異なることが示唆されている²⁵⁾。このように眼光学系が黄変しても我々の色覚がその影響を受けにくいことはよく知られており^{26,27,28)}、このことは視細胞以降の高次神経系に黄青系の補正メカニズムが存在していることを示唆している^{29,30)}。

Delahunt らは白内障による手術前後の色の見えを比較して、手術直後には無彩色点が大きく黄色方向へシフトするが、その後少しずつ日光下の白色点に戻ってくることを報告している³¹⁾。このことは人間には長期間の色順応に対する補正メカニズムが存在していることを示唆している。

4. 加齢による無彩色点の推移

Tregillus らは実験参加者に黄変した水晶体を模したレンズを装着させ、無彩色点の推移を測定した³²⁾。レンズを外すと無彩色点は急速に白色光下の位置に戻ったため、彼女らは高齢者の補正メカニズムと色順応の類似性を指摘している。また Werner と Scheffrin は加齢による無彩色点への影響を調べた結果、有意な変化は見いだせず高次神経系における補正メカニズムが生涯にわたって無彩色点を維持していると結論付けており³³⁾、また Shinomori らは S 錐体経路への加齢による影響が少ないことから³⁴⁾、Tritan 線に沿って補正するメカニズムを提案している³⁵⁾。

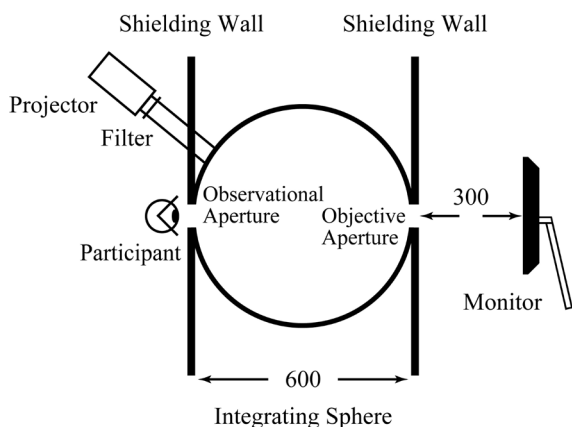


図2 実験装置の配置 (Shimakura & Sakata, 2022)

Shimakura と Sakata はこの補正メカニズムの時間特性を明らかにするため、周辺視野順応を用いて色順応進行中の補正メカニズムの働きを調べた³⁶⁾。接眼孔と対物孔を開けた積分球を用いて網膜周辺視野に黄色順応光を提示し、中心窩に提示される 2 度のテスト刺激に感じられる色みが黄みか青みかの 2 肢強制選択法によって無彩色点の位置が測定された (図 2)。

周辺視野での順応の進行中に中心窩で測定した無彩色点は、最初順応光である黄の補色方向に推移した。これは高次過程も黄色光に順応していることを示している。両眼融合後の高次神経過程が色光に対して順応することは既に報告されており³⁷⁾、この研究においても黄色光に対する順応が予測どおり進行していたと考えられる。しかし 20 ~ 30 分すると、周辺視野での順応光暴露が継続しているにもかかわらず、無彩色点は白色順応時の位置に戻り始め、順応開始後 1 時間程度で安定する傾向を見せた (図 3)。これは高齢者の眼光

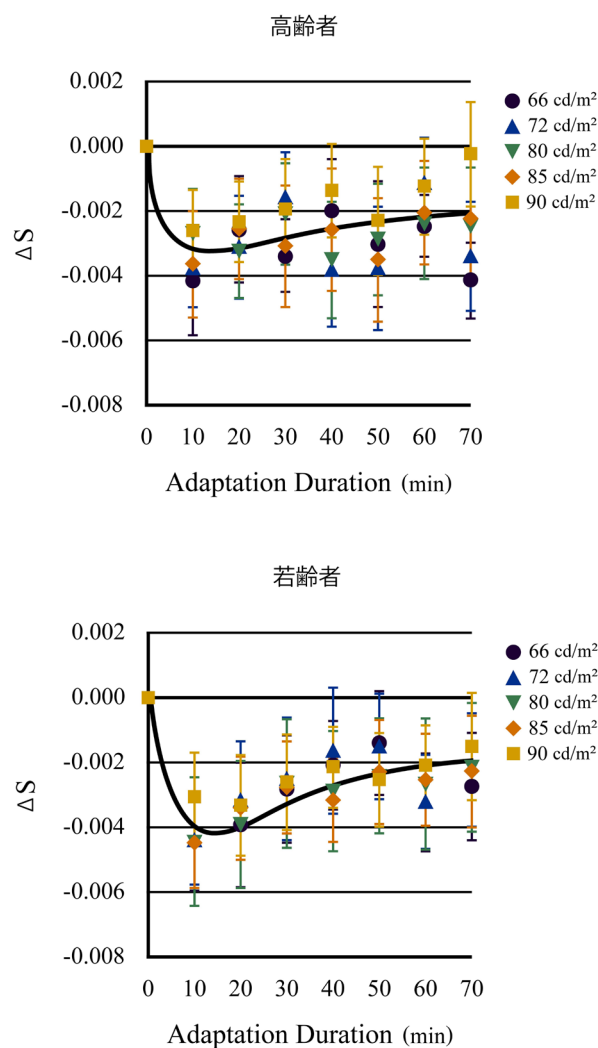


図3 順応中の無彩色点の推移。横軸は順応開始後の経過時間、縦軸は青方向への推移距離 (Shimakura & Sakata, 2022)

学系が黄変することによる順応過程とその補正をシミュレートしていると考えられ、錐体の感度低下に伴いS錐体経路の補正がおこなわれていることを示唆している。

さらに驚くべきことにこの結果は55歳以上の高齢者だけではなく、20代の若齢者参加者においても基本的に同様の無彩色点推移傾向がみられた。このことはこの補正メカニズムが加齢にともなう眼光学系の黄変によって生じる無彩色点の推移を補正するために機能するのではなく、若いうちから備えられている色順応に対する補正メカニズムと同じであることを示唆している。我々は照明や太陽光の色温度変化やサングラスなどの装着によって日常的に色順応を繰り返しているが、短時間でこれらの残効を補正するメカニズムが高次神経過程に備わっていると考えられる。この補正は太陽光下の白色点に戻るように機能し、黄変によって順応した状態でも、時間が経つにつれて自動的に昼光色下の白色点に戻ると考えられる。色弁別閾を Tritan 線に沿って測定すると、 D_{65} から離れるにしたがって弁別閾が増大するという報告³⁸⁾からも、我々の色覚メカニズムはその一部が昼光に基づいていると考えられる。

5. まとめ

これまでみてきたように我々の色覚は青年期に達する頃にほぼ完成し、30歳前後にその機能は最大値に達し、その後徐々に低下することになる³⁹⁾。その変化は決して単一のメカニズムの成長と衰退ではなく、メカニズムどうしが補い合うような協調的な仕組みになっていることが徐々に明らかになってきている。

参考文献

- Adams, R. J., & Courage, M. L. Human newborn color vision: measurement with chromatic stimuli varying in excitation purity. *Journal of experimental child psychology*, 1998, 68(1), pp.22-34.
- Adams R. J. Further exploration of human neonatal chromatic-achromatic discrimination. *Journal of experimental child psychology*, 1995, 60(3), pp.344-360.
- Teller, D. Y., & Palmer, J. Infant color vision: motion nulls for red/green vs luminance-modulated stimuli in infants and adults. *Vision research*, 1996, 36(7), pp.955-974.
- Peeles, D. R., & Teller, D. Y. Color vision and brightness discrimination in two-month-old human infants. *Science*(New York, N.Y.), 1975, 189(4208), pp.1102-1103.
- Teller, D. Y., & Palmer, J. Infant color vision: motion nulls for red/green vs luminance-modulated stimuli in infants and adults. *Vision research*, 1996, 36(7), pp.955-974.
- Teller D. Y. Spatial and temporal aspects of infant color vision. *Vision research*, 1998, 38(21), pp.3275-3282.
- Peterzell, D. H., Chang, S. K., & Teller, D. Y. Spatial frequency tuned covariance channels for red-green and luminance-modulated gratings: psychophysical data from human infants. *Vision research*, 2000, 40(4), pp.431-444.
- Teller D. Y. Scotopic vision, color vision, and stereopsis in infants. *Current eye research*, 1982, 2(3), pp.199-210.
- Brown, A. M., & Lindsey, D. T. Infant color vision and color preferences: a tribute to Davida Teller. *Visual neuroscience*, 2013, 30(5-6), pp.243-250.
- Brown A. M. Development of visual sensitivity to light and color vision in human infants: a critical review. *Vision research*, 1990, 30(8), pp.1159-1188.
- Mercer, M. E., Drodge, S. C., Courage, M. L., & Adams, R. J. A pseudoisochromatic test of color vision for human infants. *Vision research*, 2014, 100, pp.72-77.
- Yang, J., Kanazawa, S., Yamaguchi, M. K., & Motoyoshi, I. Pre-constancy vision in infants. *Current Biology*, 2015, 25(24), pp.3209-3212.
- Dobkins, K. R., Lia, B., & Teller, D. Y. Infant color vision: temporal contrast sensitivity functions for chromatic (red/green) stimuli in 3-month-olds. *Vision research*, 1997, 37(19), pp.2699-2716.
- Bornstein, M. H., Kessen, W., & Weiskopf, S. Color vision and hue categorization in young human infants. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 1976, 2(1), pp.115-129.
- Yang, J., Kanazawa, S., Yamaguchi, M. K., & Kuriki, I. Cortical response to categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(9), pp.2370-2375.
- Bremner, J. G., Slater, A. M., Mason, U. C., Spring, J., & Johnson, S. P. Trajectory perception and object continuity: effects of shape and color change on 4-month-olds' perception of object identity. *Developmental psychology*, 2013, 49

- (6), pp.1021-1026.
- 17) Beckner, A. G., Cantrell, L. M., DeBolt, M. C., Martinez, M., Luck, S. J., & Oakes, L. M. Visual short-term memory for overtly attended objects during infancy. *Infancy : the official journal of the International Society on Infant Studies*, 2020, 25(3), pp.347-370.
 - 18) Skelton, A. E., Maule, J., & Franklin, A. Infant color perception: Insight into perceptual development. *Child development perspectives*, 2022, 16(2), pp.90-95.
 - 19) Kimura, A., Wada, Y., Yang, J., Otsuka, Y., Dan, I., Masuda, T., Kanazawa, S., & Yamaguchi, M. K. Infants' recognition of objects using canonical color. *Journal of experimental child psychology*, 2010, 105(3), pp.256-263.
 - 20) Yuodelis, C., & Hendrickson, A. A qualitative and quantitative analysis of the human fovea during development. *Vision research*, 1986, 26(6), pp.847-855.
 - 21) Knoblauch, K., Vital-Durand, F., & Barbur, J. L. Variation of chromatic sensitivity across the life span. *Vision research*, 2001, 41(1), pp.23-36.
 - 22) 篠森敬三.色覚の加齢効果. *日本色彩学会誌*, 2003, 27(3), pp.216-223.
 - 23) Artigas, J. M., Felipe, A., Navea, A., Fandiño, A., & Artigas, C. Spectral transmission of the human crystalline lens in adult and elderly persons: color and total transmission of visible light. *Investigative ophthalmology & visual science*, 2012, 53(7), pp.4076-4084.
 - 24) Murray, I. J., Hassanali, B., & Carden, D. Macular pigment in ophthalmic practice; a survey. *Graefes' archive for clinical and experimental ophthalmology, Albrecht von Graefes Archiv fur klinische und experimentelle Ophthalmologie*, 2013, 251(10), pp.2355-2362.
 - 25) Paramei G. V. Color discrimination across four life decades assessed by the Cambridge Colour Test. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 2012, 29(2), pp.A290-A297.
 - 26) Werner, J. S., Schelble, K. A., & Bieber, M. L. Age-related increases in photopic increment thresholds are not due to an elevation in intrinsic noise. *Color research and application*, 2000, 26(51), pp.S48-S52.
 - 27) Werner, J. S., Delahunt, P. B., & Hardy, J. L. Chromatic-spatial vision of the aging eye. *Optical review*, 2004, 11(4), pp.226-234.
 - 28) Delahunt, P. B., Webster, M. A., Ma, L., & Werner, J. S. Long-term renormalization of chromatic mechanisms following cataract surgery. *Visual neuroscience*, 2004, 21(3), pp.301-307.
 - 29) Wuerger S. Colour constancy across the life span: evidence for compensatory mechanisms. *PloS one*, 2013, 8(5), e63921.
 - 30) Werner J. S. The Verriest Lecture: Short-wave-sensitive cone pathways across the life span. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 2016, 33(3), pp.A104-A122.
 - 31) Delahunt, P. B., Webster, M. A., Ma, L., & Werner, J. S. Long-term renormalization of chromatic mechanisms following cataract surgery. *Visual neuroscience*, 2004, 21(3), pp.301-307.
 - 32) Tregillus, K. E., Werner, J. S., & Webster, M. A. Adjusting to a sudden "aging" of the lens. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 2016, 33(3), pp.A129-A136.
 - 33) Werner, J. S., & Scheffrin, B. E. Loci of achromatic points throughout the life span. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and image science*, 1993, 10(7), pp.1509-1516.
 - 34) Shinomori, K., Scheffrin, B. E., & Werner, J. S. Age-related changes in wavelength discrimination. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 2001, 18(2), pp.310-318.
 - 35) Shinomori, K., Panorgias, A., & Werner, J. S. Discrimination thresholds of normal and anomalous trichromats: Model of senescent changes in ocular media density on the Cambridge Colour Test. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 2016, 33(3), pp.A65-A76.
 - 36) Shimakura, H., & Sakata, K. Color compensatory mechanism of chromatic adaptation at the cortical level. *i-Perception*, 2022, 13(3), 20416695221105538.
 - 37) Shimakura, H., & Sakata, K., Evidence for a central component in adaptation to chromatic light. *Vision research*, 2019, 159, pp.42-47.
 - 38) Danilova, M. V., & Mollon, J. D. Symmetries and asymmetries in chromatic discrimination. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 2014, 31(4), pp.A247-A253.
 - 39) Paramei, G. V., & Oakley, B. Variation of color discrimination across the life span. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 2014, 31(4), pp.A375-A384.