

色彩特性と物理的特性との関係 I

松崎 俊之*

The Relation between Color Properties and Physical Properties I

Toshiyuki MATSUZAKI^{*}

0 序

本稿の中心課題は、そのタイトルが示すように色彩特性と物理的特性との関係の解明にあると言えるが、この課題が位置づけられるより大きな問題地平は、知覚的特性一般と物理的特性との関係ということになる。実はこの問題地平は、私が年来その研究に携わってきた美的特性理論との関連のなかで浮上してきたものである。本論に先立ち、まずはこの問題地平が私のこれまでの美的特性理論に関する研究といかなる関係にあるかという点について簡単に確認しておくことで、色彩特性と物理的特性との関係の解明という本稿の中心課題の位置と方位、さらにはその射程をより明確に定めておくことにしよう。

松崎 [2010] おいて私は、美的特性一般を、物理的特性という非美的特性を基盤としてそこから直接的に創発する「一次的美的特性 (the first-order aesthetic properties)」と、一次的美的特性が当該参照枠のもとに位置づけられることによって成立する「高階美的特性 (the higher-order aesthetic properties)」とに大きく二分して捉える美的特性に関する階層構造理論の基本骨子を呈示したのであるが、そこでは一次的美的特性と知覚的特性との関係について以下の二つのテーゼが示された。

(1)一次的美的特性は対象のもつ物理的特性 (physical properties) を基盤として、そこから直接的に創発する (emerge)。

(2)一次的美的特性は知覚的特性 (perceptual properties) と不可分一如体としてある⁽¹⁾。

この(1)と(2)のテーゼから以下の(3)のテーゼが帰結することになる。

(3)知覚的特性は、対象のもつ物理的特性を基盤と

して、そこから直接的に創発する。

この(3)のテーゼはあくまで松崎 [2010] の段階での知覚的特性と物理的特性との関係についての暫定的な理解にとどまるものであり、美的特性理論の構築にあたって焦眉の課題となるのは、両特性の関係それ自体をあらためて問題として取り上げ、あらたな問題設定のもとにこの問題についてさらに考究を進めることで両特性の関係についての先の暫定的な理解を批判的に超克することにある。

この美的特性理論上の大局的な課題に取り組むためのひとつの端緒として、本稿では知覚的特性のひとつに数えられる色彩特性をとくに取り上げ、この色彩特性と物理的特性との関係をめぐって考察を繰り返すことにする。

色彩特性を知覚的特性のパラダイムケースとして議論を展開するにあたって、本稿では原則として色彩としてはいわゆる「表面色 (surface color)」⁽²⁾に考察の焦点を絞るとともに、色彩知覚の基本機制をまずは明確に捉えることを第一義に、比較的単純な観察条件⁽³⁾を想定することで種々のトップダウン情報処理 (top-down processing)⁽⁴⁾による影響を (可能なかぎり) 除外して考察をおこなうことにする。

1 色彩に関する基本理解

色彩特性と物理的特性との関係について議論を開始するにあたり、最初に本稿における色彩に関する基本理解を示すならば、それは以下の6点にまとめられる。

(1)色彩は内在的特性 (intrinsic properties) である。

「色彩は内在的特性である」とは、色彩は対象

*石巻専修大学人間学部人間文化学科

が他との関係においてではなく、それ自体において具える特性であるということの意味する。したがって、このテーゼは色彩が非関係的特性であるということを含意することになる⁽⁵⁾。

(2)色彩は単一的・モナド的特性 (unitary-monadic properties) である。

「色彩は単一的・モナド的特性である」ということは、これを逆に捉えるならば、色彩は複合的特性ではない、すなわち諸部分からなる全体ではなく、したがって諸部分に分解することはできないということの意味する⁽⁶⁾。

(3)色彩は実在的特性 (real properties) である。

「色彩は実在的特性である」とは、色彩は実在世界に帰属しうる特性としてその構成要素をなす、別言するならば、色彩はわれわれの心 (mind) から独立した存在者 (entity) であるということの意味する。

このことを表面色に即して捉え返すならば、色彩は実在する対象 (物体) の具える実在する特性として実在世界の構成要素をなすということになる⁽⁷⁾。

(4)色彩経験は表象的 (representational) である。

「色彩経験は表象的である」とは、言葉を換えれば、色彩経験は志向的 (intentional) である、すなわち色彩経験は志向性 (intentionality) を具えるということの意味する。

一般にある経験が表象的もしくは志向的であるとは、それが自己以外の (すなわち自己を超えた) 他の何ものかに関する (about) 経験である、別言するならば、それが世界に実在する何ものかについての経験であるということの意味する (cf. フィッシュ [2014]: 10-5)。すなわち、経験が表象的もしくは志向的であるとは、経験が世界のある特定のあり方を表象する (represent) ということに他ならないのである。

それでは、「色彩経験は表象的である」と言うとき、色彩経験は何を表象しているのであろうか。言うまでもなく、色彩経験が表象するのは世界に実在する色彩であり、これを表面色に即して捉えるならば、色彩経験が表象するのは、世界に実在する対象 (物体) がある色彩を帯びているという世界あり方 (事態)、あるいは実在する対象の具える (実在する) 色彩であるということになる。た

えば、赤いトマトが見えるとき、その赤の経験が表象するのは視野の一区画でもなければセンサーデータ⁽⁸⁾でもなく、あくまで実在するトマトの赤さであり、これが赤の経験本来の志向対象となるのである⁽⁹⁾。

(5)色彩経験の中核に位置するのはある種の現象的特性 (phenomenal properties) (クオリア⁽¹⁰⁾) である。

すなわち、ある経験が色彩経験であるための必須要件となるのは、それが色彩と直接的に関連づけられる現象的特性 (クオリア) をともなうことなのである。

ブレントらの報告によれば (Brent, Kennard and Ruddock [1994])、ある種の盲視 (blindsight) 患者は、色彩のクオリアをまったく感受しえないにもかかわらず、対象の色名を高い頻度で正確に言い表すことができるとのことであるが⁽¹¹⁾、仮にそれが事実であったとしても、その患者が色彩経験にとって必須要件となる色彩のクオリアを感受しえない以上、その経験は語の正しい意味での色彩経験とは呼べないことになる。

さて、上に示した色彩に関する基本理解の(1)から(5)は、色彩に関してわれわれが抱く素朴実在論 (原始主義) 的な直観の内実をなすものと言える (あらためて言うまでもなく、こうした素朴実在論 [原始主義] 的な直観の内実を形作るにあたってその中核に置かれるのは「色彩は実在的特性である」とする(3)の理解である)⁽¹²⁾。

ここでとくに強調しておきたいのは、こうした内実を具えた色彩に関する素朴実在論 (原始主義) 的な理解とは、現にわれわれがその只中で生きているこの世界において、われわれがいかなる仕方でも色彩と出会っているかという色彩経験当事者としてのわれわれの意識事実を如実に反映したものであるという点である⁽¹³⁾。

(6)色彩は関係的特性⁽¹⁴⁾ である (cf. Cohen [2009])。

関係的特性としての色彩を構成する主たる関係項としては、①色彩知覚対象 O、②色彩知覚条件 PC、③ (主体の具える) 色彩知覚システム S の三種のものが挙げられるが、これらの関係項をもとにここで問題となる関係をより具体的に示すならば、それは「色彩知覚条件 PC のもとである色彩

知覚システム S を具えた主体が対象 O を色彩知覚する」という関係 R (PC, S, O) であるということになる。

したがって、こうした関係主義的理解のもとで色彩一般に関する定義を与えるならば以下のようにになる。

DCRT1 色彩 C = df 色彩知覚条件 PC のもとである色彩知覚システム S を具えた主体が対象 O を色彩知覚する (対象 O の色彩を知覚する) 際に、その対象 O が色彩知覚条件 PC および色彩知覚システム S との関係においてもつ関係的特性 RP (「= df」を挟んでその左辺が被定義項となり、右辺が定義項となる)^{(15), (16)}

* * *

以上、本稿における色彩に関するわれわれの基本理解を 6 点にわたって呈示してきたのであるが、あらためて言うまでもなく、ここでとりわけ問題となるのは、色彩を内在的特性と見なす(1)の理解と(6)の色彩に関する関係主義的理解とが真っ向から対立する点である。というのも、先にも指摘したように、色彩が内在的特性であるということは、それが非関係的特性であることを含意しているからである。

(1)の理解が色彩に関するわれわれの素朴实在論(原始主義)的直観の内実を形作る構成要素のひとつをなすかぎりにおいて、両者の対立は、色彩に関する素朴实在論(原始主義)と関係主義との対立として捉え返すことができるが、色彩に関するこれら二つの立場を調停することははたして可能か、もし可能であるとするならばそれはいかなる方途によってか、これらの点について考究することが本稿にとってひとつの重要な課題となる(この問題については本稿 4 であらためて取り上げ、最終的には 4.2 において両者を調停するためのひとつの試みを示すことになる)。

2 関係的特性としての色彩を構成する関係項

本稿 1 の色彩に関する基本理解の(6)に挙げたように、色彩特性は一種の関係的特性としてであると見なされるのだが、本章では、関係的特性としての色彩を構成する主たる関係項について、色彩現象の成立機序にしたがって、①色彩知覚条件、②

色彩知覚対象、③(主体の具える)色彩知覚システムの順にさらに詳しく見ておくことにしたい。

なおここでは、議論をいたずらに煩雑化することを避け、色彩現象をその基本構制において捉えることを企図して、以下の三つの制約のもとに考察を展開することにする。

(1)色彩は、その現象の様相(見えのモード modes of appearance/Erscheinungsweisen der Farben)の違いに応じてさまざまに分類されるが⁽¹⁷⁾、以下ではとくに「表面色」⁽¹⁸⁾に限定して議論を進めることにする。

(2)種々のトップダウン情報処理が関与するある種の残像(「方位随伴色残効(orientation contingent color aftereffect)」)や「色の恒常性(color constancy)」、あるいは図柄が影響を及ぼすような色彩現象はこれを除外して議論を進めることにする⁽¹⁹⁾。

(3)「色彩対比(color contrast)」、あるいは「色彩同化(color assimilation)」など、複数の色彩の相互作用から生ずる色彩現象はこれを除外して議論を進めることにする⁽²⁰⁾。

2.1 色彩知覚条件

色彩現象の成立機序にしたがうならば、関係的特性としての色彩を構成する第一の関係項をなすのは色彩知覚条件であると言えるが、表面色に関して言うならば、ここでとくに問題となるのは、対象を照らし出す、光源から発せられる「光」とその光が対象(物体)にいたるまでの間に経由する「媒質」である⁽²¹⁾。

2.1.1 光⁽²²⁾

物理学では、光には光粒子(photon)と呼ばれる粒子の流れとしての粒子的性質と電磁波としての波動的性質との二種の性質があると説明されるが、色刺激に必要とされるのは主として後者である。つまり、われわれが光と言っているのは電磁波の一種であり、その波長(λ)がおよそ 380 nm から 780 nm の範囲にある放射光である(この範囲にある放射波は人間の目は感知されうるという意味で、可視光線[visible rays]と呼ばれる)。

光はさまざまな特性からなるが、色刺激にとって重要となるのは「波長(wavelength)」、「強度

(intensity)」、「波長組成 (wavelength composition)」の三つである。

波長は光が伝播する波の長さで、通常ナノメートル (nm) で表される。

各波長の光はさまざまな強度で目を刺激するが、1秒間に単位面に垂直に通過する放射エネルギー量を「放射束 (radiant flux)」と言い、エルグ (erg) / 秒 (sec) で表わす。一方、光源から単位時間あたりに放射される放射束を見た目の明るさで表わしたものを「光束 (luminous flux)」と言い、ルーメン (lm) を単位とする。また、その明るさを「光度 (luminous intensity)」と言う。光度はある方向への単位立体角あたりの光束の密度として与えられ、カンデラ (cd) が単位として用いられる。因みに光度は、照明を当てたときの照射面の明るさを意味する「照度 (illuminance)」⁽²³⁾ や反射体の明るさを意味する「輝度 (luminance)」⁽²⁴⁾ の基本的な単位となっている。

光が色刺激として有効であるためには、光の強度は一定以上でなければならない。また、波長と強度の組み合わせ、つまり波長組成が色刺激にとって重要な役割を果たす。

これらの光の特性は、色の感覚属性との対応関係にあるが、それぞれの対応関係を箇条書きに示すならば以下ようになる。

- ①色相—主波長 (dominant wavelength)⁽²⁵⁾
- ②明るさ (明度) —輝度
- ③飽和度 (彩度) —輝度純度 (colorimetric purity)⁽²⁶⁾

このように、光の諸特性と色感覚の諸属性とはほぼ1対1の関係で対応するため、光の諸特性は各波長の放射量を測定することによって一義的に与えられることになるが、この波長ごとの放射量は分光組成 (spectral composition) と呼ばれる。また、これをもとにして各波長の放射量の総体を示したものが分光分布 (spectral distribution) である。

2.1.2 媒質⁽²⁷⁾

光は物体に当たると、反射されるか、透過するか、吸収されることになる。通常は、これらの三つの反応が同時に起こるが、その比率は波長によって異なる。

このことは光が経由する媒質 (medium) に含まれる粒子の場合も同断であり、媒質を経由することで光は変質しうることになる。すなわち、媒質中の粒子の大きさが光の波長より数倍大きく、かつその粒子が選択吸収する性質をもたなければ、光のエネルギーは質的な変化を受けず、方向の変化のみが見られることになるが、粒子の大きさが光の波長に等しいか、またはそれより小さい場合は、光のエネルギーは選択吸収されて質的な変化を被ることがありうる。一般に、短波長側のエネルギーは長波長側より散乱されやすい⁽²⁸⁾。

2.2 色彩知覚対象⁽²⁹⁾

色彩現象の成立機序にしたがうならば、関係的特性としての色彩を構成する第二の関係項をなすのは色彩知覚対象である。

対象がある色彩を帯びて現出するとき、その対象のもつ色彩は、対象に対する入射光のうちその対象が吸収した光を除いた光、すなわちその対象が反射する光によって生み出される (ここでは光としては「白色光」を想定している)⁽³⁰⁾。たとえば、赤い対象は赤の補色である青緑の光 (490 nm から 500 nm の間にある波長をもつ光) を吸収することによって、赤く見えることになる。このことから明らかなように、色彩知覚対象において問題となるのは、その対象のもつ吸収・反射特性、すなわち、その対象がいかなる波長の光を吸収し、いかなる波長の光を反射するかという点であると言える。ある対象がいかなる波長の光を吸収するかは、その対象のもつ分子構造に依存する (ただし一原子分子の場合は、その原子構造)。

ある物質の吸収するエネルギーが光のエネルギーに一致すれば、色相環の一部を吸収し、その結果として、その物質には吸収光の補色が色彩として現われることになる。物質の吸収するエネルギーが大きければ、波長の短い光 (青) を吸収することになるため補色は波長の長い赤となり、逆に、吸収するエネルギーが小さければ、波長の長い光 (赤) を吸収することになるため補色は波長の短い青となる⁽³¹⁾。

以上のことから明らかなように、光源から発した光は、物体に当たって、その物体のもつ反射特性、透過特性、吸収特性に応じて各種変容を被

るのであるが、物体から反射されて眼に向かう光に関して言うならば、その色刺激としての物理的特性は、照明光の分光分布と物体の反射特性である分光反射率の積で与えられることになる⁽³²⁾。

2.3 色彩知覚システム⁽³³⁾

色彩現象の成立機序にしたがうならば、関係的特性としての色彩を構成する第三の関係項をなすのは知覚主体の具える色彩知覚システムであると言えるが、この色彩知覚システムは、色彩知覚対象としての物体から反射された、ある特定の分光反射率を具えた光を受け取り、それに一種の情報処理（色彩情報処理）を施すことになる。

人間の色彩知覚システムは大きく、①眼球、②視覚中枢、そしてその間をつなぐ③神経経路の三つからなると言えるが、以下では、「光受容器としての眼」(2.3.1)、「眼から大脳視覚野にいたる視覚路」(2.3.2)、「外側膝状体と大脳の視覚野」(2.3.3)の順に、色彩知覚システムの基本構制について見ておくことにしたい。

2.3.1 光受容器としての眼

眼球は一種の光受容器であると言える。眼球組織は「光学系」と「神経系」とに大きく二分されるが、ここではとくに後者の神経系について論ずることにする⁽³⁴⁾。

外界から発せられた光は、網膜にある視細胞である錐体 (cone) と杆体 (rod) とを刺激する。錐体は直径約 3 μm の大きさで、網膜の中央部に 630 から 680 万個存在する。この感覚細胞は、光に対する感度は高くないものの、色彩を捉えることができる。

錐体には、光の三原色に対応する以下の三種のものが存在する。

- ① L 錐体：長波長光に反応
- ② M 錐体：中波長光に反応
- ③ S 錐体：短波長光に反応

因みに、L 錐体、M 錐体、S 錐体が存在する数の比率は 40 対 20 対 1 である⁽³⁵⁾。

一方杆体は直径約 2 μm の大きさで、網膜の周辺部に 1 億 1000 万から 1 億 2500 万個存在する。杆体は光の明暗には高い反応を示すが、色彩には反応しない。

錐体と杆体という二種の視細胞に光が入射することによって神経興奮が起こり、光電変換された信号となる⁽³⁶⁾。視細胞中で光エネルギーを吸収し、これを神経興奮に変えるにあたって直接関与するのは、「視物質」と呼ばれる感光性の物質である⁽³⁷⁾。視質のうち杆体に含まれるものはロドプシン (rhodopsin、別名「視紅」と)、また錐体に含まれるものはフォトプシン (photopsin、別名「視紫」と呼ばれる。

両者についてさらに詳しく述べるならば、以下のようになる。

①ロドプシン

ロドプシンは脊椎動物の光受容器細胞に存在する色素であるが、この物質は、光に出会うと分解・退色し (ロドプシンは、白色光や 385~650 nm までの波長光によって退色する)、暗所で再生されるが、ロドプシンを分解する光の効果は、光の強さに比例する。

ロドプシンのもつ吸収特性 (その最大吸収波長は 498 nm 付近に位置する) は、眼が暗順応したときの視感度曲線 (luminous efficiency curve: 一定の明るさを得るのに必要なエネルギー量を波長ごとに求めてその逆数で示したもの) にほぼ正確に一致することから、明るさの感覚の第一段階がロドプシンの光化学的反応であることがわかる。

②フォトプシン

フォトプシンはロドプシンとアミノ酸がわずかに異なり、最大吸収波長も異なる視物質であるが、これらの色素は網膜にある L 錐体、M 錐体、S 錐体という異なるタイプの錐体細胞に見られ、色覚のもとになる。

ヒトの場合、ロドプシンの他に最大吸収波長がそれぞれ 420 nm、534 nm、564 nm 付近に位置する三種のフォトプシンをもち、それらの応答が統合されることにより、色覚が生じる。

さて、錐体と杆体は網膜を構成する第二の層である双極細胞に結合されるが、その結合の仕方は網膜の場所によって異なる。すなわち、中心窩では各錐体は概ねひとつの双極細胞と連結し、それが第三層の神経節細胞と結合するのに対し、周辺部では、杆体と神経節細胞との結合比は約 100 対 1 に過ぎず、中心から周辺に移行するにつれ錐体優位から杆体優位へと移行し、同時に 1 対 1 結合

から混合型結合へと移行することになる（千々岩 [2001]: 34）。

視細胞、双極細胞、神経節細胞といったこれら三種のニューロン群以外にも網膜には連合細胞（水平細胞およびアマクリン細胞）が存在し、いわゆる「側抑制（lateral inhibition）」効果（明るさの対比、色彩対比）に関与しているとされる（千々岩 [2001]: 34-5）。

錐体と杆体という二種の視細胞で光電変換された信号は、水平細胞、双極細胞、アマクリン細胞を経て、最終的には神経節細胞で統合されて視神経繊維へとつながり、視神経乳頭（盲点）を通過して眼から出て頭蓋内に入ってゆくことになる⁽³⁸⁾。

2.3.2 眼から大脳視覚野にいたる視覚路⁽³⁹⁾

視細胞で電気信号に変換された情報は、視細胞→視神経→視交叉→外側膝状体→視放線→大脳皮質後頭葉（一次視覚野→高次視覚野〔視覚連合野〕）という経路をたどって大脳の視覚野に達することになるが、この視覚路について順を追って述べるならば以下のようになる。

左右の眼球から発した視神経は、大脳基底の視束交叉部でX字状に交叉する（因みに、「視束」とは視神経の束を意味する）。その後左右の視索（optic tract）となって第一視覚中枢である外側膝状体（lateral geniculate nucleus = LGN）に達する。

視束交叉では半交叉がおこなわれ、両眼の右半分からの神経繊維は右外側膝状体と、また左半分からの神経繊維は左外側膝状体とつながる。

視索は、外側膝状体の樹状突起とシナプス結合し、その軸索は大脳皮質の後頭葉へ達する（この神経線維は「視放線（optic radiation）」と呼ばれる）。

2.3.3 外側膝状体と大脳の視覚野

視細胞で電気信号に変換された色情報がその後たどることになる中枢視覚経路に関して、ここでは小松 [2015] をもとに、その概要を押さえておくことにしたい

色情報は、網膜の特定のタイプの神経節細胞を経て外側膝状体⁽⁴⁰⁾に伝えられ、さらに外側膝状体では小細胞層（P層）と顆粒細胞層（K層）で中

継され、大脳皮質一次視覚野（V1と略称される）に伝えられる。

視覚系には機能分化があり、異なる種類の視覚情報に関して、異なった場所にある別種の細胞がそれぞれその処理を担当している。網膜からV1にいたる色情報の流れはその一例と言える。大脳皮質の視覚関連領域には多数の領野が区別されているが、これらの視覚領野はV1を起点として大きく以下の二つの経路に位置づけられる。

- ① V1から頭頂葉に向かう背側経路：空間知覚や動きの情報処理に関わる
- ② V1から下頭側皮質に向かう腹側経路：物体認知に関わる

腹側経路はV1からV2野、V4野を経て下頭側皮質に向かう経路であるが、色情報はもっぱらこの経路で処理されている。

2.3.3.1 外側膝状体

外側膝状体で視覚情報を中継するニューロンは三種に分類される。いずれも円形の受容野をもつが、錐体から信号を受ける様式はそれぞれ異なっている。これらのうち二種のニューロンが色情報を伝えることになる⁽⁴¹⁾。

第一の種類ニューロンは、同心円状の受容野をもち、中心部と周辺部で異なる錐体から入力を受けるものである。これらのニューロンの受容野の各部分に特定の錐体のみを活動させる視覚刺激を呈示すると、中心部ではL錐体刺激またはM錐体刺激の一方で応答し、周辺部はそれとは別の錐体の刺激で逆の極性の応答を示す（錐体刺激は特定の錐体にもみ応答を引き起こす刺激であり、たとえば明るい赤と暗い緑が交代する刺激であるL錐体刺激はM錐体とS錐体の応答に変化を引き起こさない）。外側膝状体の小細胞層（P層）に存在するこのタイプのニューロンは、赤の波長領域の光と緑の波長領域の光の一方に興奮性の応答を示し他方に抑制性の応答を示すことから、「赤—緑反対色細胞」と呼ばれる（赤—緑反対色細胞は色情報に加えて輝度情報も伝える）。

色情報を伝える第二の種類ニューロンは、中心と周辺との明確な区別をもたず、S錐体刺激でオン応答を示し、L錐体刺激とM錐体刺激でオフ応答を示す。外側膝状体の顆粒細胞層（K層）

に存在するこのタイプのニューロンは、青と黄の波長領域の光に相反的な活動を示すことから、「青—黄反対色細胞」と呼ばれる（青—黄反対色細胞は色情報のみを伝える）。

外側膝状体にある第三の種類ニューロンは大細胞層（M層）に存在する広帯域細胞で、同心円状の受容野の中心部にL錐体とM錐体から同じ極性（たとえばいずれも興奮）の入力を受け、周辺部はそれと逆の極性（L、Mとも抑制）の入力を受ける。このタイプのニューロンは輝度の信号のみを伝える。

このように外側膝状体では色空間は以下の三つの軸に対応するニューロンの活動で表現されると見なすことができる。

- ① L錐体の信号とM錐体の信号の差分（L-MまたはM-L）を表現する軸であり、赤—緑反対色細胞が表現する。
- ② S錐体の信号を表現する軸であり、青—黄反対色細胞が表現する。
- ③ 輝度を表す軸であり、大細胞層のニューロンが表現する。

これら三つの軸から構成される色空間はDKL色空間⁽⁴²⁾と呼ばれる。

2.3.3.2 大脳皮質一次視覚野

外側膝状体からの信号は視放線を経て大脳皮質のもっとも後部に位置する大脳皮質一次視覚野（V1）に伝えられる。V1では外側膝状体では見られないさまざまな情報処理がおこなわれるが、色選択性に関する顕著な処理としては二重反対色細胞（double opponent cell）によるものが挙げられる。

二重反対色細胞では、受容野の一部の領域で異なる種類の錐体信号に逆の極性で応答し（たとえばL錐体信号でオン応答、M錐体信号でオフ応答）、また別の領域ではそれとは反対の仕方で応答する（L錐体信号でオフ応答、M錐体信号でオン応答）。

これらの受容野内の領域は、同心円状に配置されるものや隣接して配置されるものなどさまざまなパターンを示す。二重反対色細胞は同じ錐体の信号に対して隣接する領域で逆の極性の応答を示すため、等輝度の刺激でも色コントラストの検出

をおこなうことができ、方位選択性を示すものは、色の違いによる境界の検出に役立つと考えられる。また二重反対色細胞は、同時色対比の知覚や、照明光の波長成分を差し引いて物体表面固有の色を検出する色の恒常性にも寄与する可能性がある。

V1で見られる色選択性のもうひとつの顕著な特性は、色空間のさまざまな方向にチューニング（選択応答性）をもつニューロンが見られることである。

外側膝状体の色選択細胞では、チューニングはDKL色空間の等輝度平面の2つの軸（L-M、S）のいずれかの方向に対応する色をもつ刺激にもっとも強い応答を示す、すなわち、チューニングがこれら2つの軸に局限されているのに対し、V1ではさまざまな方向に最大の応答を示すニューロンが見られる。色空間の方向によって色相が変化するため、V1の細胞はさまざまな色相に選択性をもつことになる。大脳腹側視覚経路の各領野ではさまざまな色相に選択的に応答するニューロンが共通して見られるが、そのような反応特性の形成はV1の段階で始まるものと考えられる。

2.3.3.3 視覚前野と下側頭皮質

V1で処理された色情報は、大脳視覚野の腹側経路を構成するV2野、V4野を経て、下頭側皮質に伝えられるが、これらのいずれの領野においても特定の範囲の色相に選択的に反応するニューロンが見られる。それぞれの領野で、色選択性細胞は特定の小領域に多く存在することが報告されており、V2野ではチトクロムオキシダーゼ（CO）染色で濃く染まる細い縞（thin stripe）の領域内に多く見られる。また特定の色相に選択的に反応する300 μm 程の大きさの領域が、色相の順序に従って整然と配置していることが光計測実験で示されている。またV4野と下頭側皮質では、色刺激に強く応答する数ミリ程度のサイズの領域が複数存在することが機能的磁気共鳴画像法（fMRI）を用いた研究で示されている。

ヒトでは「大脳性色覚異常」と呼ばれる、腹側後頭葉皮質の紡錘状回付近の損傷による色知覚上の重篤な障害が知られているが、この症状は腹側高次視覚野が色知覚にきわめて重要な役割を果た

すことを示唆している。一方サルでは、下側頭皮質を両側に広い範囲で摘除することで色弁別が永続的に障害を受けることが指摘されている。

下側頭皮質には特定の色相に鋭い選択性を示すニューロンが多数存在し、カテゴリカルな色知覚との対応が指摘されている⁽⁴³⁾。また下側頭皮質前部の色選択性細胞の一部は、サルを用いた実験から、色情報を用いた行動の選択に関与する可能性が示唆されている。

* * *

以上、関係的特性としての色彩に関与する主たる関係項である色彩知覚条件、色彩知覚対象、(主体の具える)色彩知覚システムについてそれぞれ見てきたのであるが、ここでとくに指摘しておきたいのは、これらの関係項を構成する諸契機が具える特性はそのいずれも、それ自体が物理的特性であるか、あるいは(少なくとも原理的には)物理的特性に還元可能な特性であるという点である⁽⁴⁴⁾。

この点について、各関係項を構成する個々の契機に即してさらに詳しく述べるならば、以下のようになる。

- (1)色彩知覚条件に関して言うならば、色彩知覚条件をなす光と媒質が具える特性は、あらためて言うまでもなく、それ自体が物理的特性であると言える。
- (2)色彩知覚対象としての物体のもつ吸収・反射特性はその物体を構成する分子構造に依存するが、この分子構造が具える特性は物理的特性に還元可能であると見なされる。
- (3) (主体の具える)色彩知覚システムは、大きく①眼球、②視覚中枢、そして両者の間をつなぐ③神経経路という三つの契機からなるが、③の神経経路に関して言うならば、神経細胞内での膜電位変化にもとづく電気的情報伝達メカニズムとシナプスでの神経伝達物質による化学的情報伝達メカニズムとは、そのいずれもが(少なくとも原理的には)最終的に物理的特性に還元可能であると見なされ、②の視覚中枢に関しても、それぞれの部位における各種色彩情報処理のメカニズムは(少なくとも原理的には)最終的に物理的特性に還元可能であると見なされる。また、①の眼球について

言うならば、その光学系の具える特性が物理的特性に還元可能であることは論を俟たないが、その神経系に関しても、視物質のもつ光化学的反応特性とそれにもとづく視細胞における光電変換という電気化学的反応特性をはじめとする、水平細胞、双極細胞、神経節細胞等における各種色彩情報処理のメカニズムは、そのいずれもが、(少なくとも原理的には)最終的に物理的特性に還元可能であると見なされることになる。

註

(1) (1)と(2)のテーゼはあくまで松崎 [2010] の段階での暫定的な理解にとどまる。とくに(2)のテーゼについては、その後松崎 [2013], [2015] において、一次的美的特性と知覚的特性との関係についてさらに考察を深めることであらたな理解が示されることになるのであるが、この点については本稿5の「結」においてあらためて取り上げることにする。

(2) 「光を反射または透過する物体の色を物体色 (non-luminous object color) と呼ぶ。そして、物体色の中で、光を拡散反射する不透明物体の色は特に表面色 (surface color) と呼ばれる」(日本色彩学会編 [2011]: 67)。

(3) その典型例となるのは、CIE (国際照明委員会 Commission Internationale de l'Éclairage) の定めた観察条件である。とくに表面色の観察に関わる条件としては以下のものが挙げられる (千々岩 [2001]: 53-4)。

- ①明順応状態で見ること。
- ②視野の大きさは視角2° (1931) または10° (1964) であること。
- ③視野内の光の分布は、空間的にも時間的にも一様であること。
- ④周辺視野は暗黒 (dark) であること。
- ⑤物体の色を見るときは、物体表面に対して直角の位置から見るようにし、照明光は45°方向から当たるようにすること。

なおCIEの定める観察条件、および基本的にそれに準拠する日本工業規格 (JIS Z 8722, 8723) に規定された観察条件について詳しくは、日本色彩学会編 [2011]: 109, 111-2を参照されたい。

(4) トップダウン情報処理に関与する色彩現象としては、たとえば①色彩残像の一種である「方位随伴色残効 (orientation contingent color aftereffect)」、②「色の恒常性 (color constancy)」、③「色彩対比 (color contrast)」

(とくに対比的場面での色彩の見え方)、④「色彩同化 (color assimilation)」といったものが挙げられる。なお、これらの色彩現象について詳しくは、千々岩 [2001]: 108-10, 116-7, 123-8, 日本色彩学会編 [2011]: 472-8, 大山他 [1994]: 476-84, 486-98 を参照されたい。

(5) 多くの論者が内在的特性と関係的特性とを対立的に捉えるのに対し、ウェザーソンとマーシャルはこうした理解は誤りであるとしてそれを斥け (Weatherson and Marshall [2012]: 9)、すべての内在的特性が非関係的特性であるわけではなく、内在的特性のうちには同時に関係的特性であるものも存在すると主張する。しかしながら、少なくとも色彩はこの種の特性ではないと考えられる。というのも、ウェザーソンとマーシャルが内在的であると同時に関係的でもある特性の例として挙げる「固有の部分をもつ (having a proper part)」という特性においては、その特性を帯びる対象とその対象自体に内在する要素との関係が問題となるのに対し、本文以下に示す色彩に関する基本理解(2)にあるように、そもそも色彩は部分をもたない単一的・モナド的特性であり、かてて加えて色彩においては、基本理解(6)に関するコメントにあるように、その色彩を帯びる色彩知覚対象と、この色彩知覚対象にとってあくまで外在的な契機にとどまる色彩知覚条件および色彩知覚システムという三者間の関係が問題となるからである。

(6) 周知のとおり、複数の色を混ぜ合わせることによってあらたな色が生み出される(いわゆる「混色 (color mixture)」。たとえば、「減法混色 (subtractive color mixture)」において、マゼンタとイエローを混ぜ合わせることによって赤が生み出され、イエローとシアンを混ぜ合わせることによって緑が生み出されることになるが、そうした場合でも、混色の結果として生み出された赤や緑は、二色からなる複合的特性としてではなく、あくまで単一的・モナド的な特性として現出するという点は銘記しておく必要がある(詳説は避けるが、この点に関しては、いわゆる「中間混色」「継時混色」(たとえば、表面を二つの異なった色で塗り分けられた円盤を高速で回転させることで生ずる混色) および「並置混色」(それぞれ色を異にした小片をひとつの全体として遠くから見た際に生ずる混色)) の場合も同断であると言える)。なお混色一般について詳しくは、日本色彩学会編 [2011]: 650-64 を参照されたい。

(7) 色彩を実在的特性と見なす理解のもとで、色彩に関する「錯覚」と「幻覚」の問題が浮上してくることになる。

「錯覚 (illusion)」とは一般に、対象は見られているものの、しかし不正確に、あるいは「実際のあり方とは違う仕方で見られている状態を意味するが、こと色彩上の錯覚に関して言うならば、たとえば「青い対象が緑に見える」といったように、対象への色彩帰属を誤る、別言するならば、実在する対象へ実在しない色彩を帰属することを指す。

一方、「幻覚 (hallucination)」とは一般に、何かを見ているように主体には思われるものの、実際には見られているものが何もない状況を意味するが、こと色彩上の幻覚に関して言うならば、たとえば「白いベガサスが見える」といったように、実際には対象は実在しないにもかかわらず、ある色彩特性をもった対象が実在すると見えず、別言するならば、実在しない対象に実在しない色彩を帰属することを指す。

なお錯覚と幻覚一般に関して詳しくはフィッシュ [2014]: 4-5 を参照されたい。

(8) 「センスデータ」の概念一般、およびセンスデータのもつさまざまな問題については、Huemer [2011] およびフィッシュ [2014]: 17-48 を参照されたい。

(9) 色彩経験を表象的もしくは志向的なものと見なす理解のもとで、色彩経験におけるいわゆる「誤表象 (misrepresentation)」の問題が浮上してくることになる (cf. フィッシュ [2014]: 11-2)。たとえば赤いトマトを見て緑の経験を得たとするならば、その緑の経験は、実在するトマトの赤さ、もしくは赤いトマトが実在するという世界のあり方(事態)を誤って表象することになるのである。

(10) 「クオリア」に関する定義的理解と、この概念をめぐるさまざまな論争点については、Tye [2015] を参照されたい。

(11) Brent, Kennard and Ruddock [1994] では、「強制選択実験 (forced choice experiments)」をとおして、左後頭皮質の外傷性障害によって右視野を欠損した患者が、その見えない右視野に提示された色刺激を高い頻度で(意識的知覚なしに)言語的に同定可能であることが確認された、との報告がなされている。

(12) 色彩に関する素朴実在論はときに「原始主義 (primitivism)」とも呼ばれるが、モーンはこの原始主義を「自然のうちに色彩が存在する」と見なす立場であると一般的に捉えたうえで、原始主義の主張として以下の4項目を挙げる (Maund [2012]: 36)。

①色彩は単純な内在的特性 (simple intrinsic properties) である。

②色彩は非関係的特性 (non-relational properties) である。

③色彩は還元不可能な特性 (non-reducible properties) である。

④色彩は質的特性 (qualitative properties) である。

これらの4項目と色彩に関する基本理解(1)から(5)との対応関係を考えるならば、以下ようになる。

①に関して言うならば、①は実質的に基本理解の(1)と(2)を複合したものの言えることから、(1)と(2)に直接対応するものと見なされる。

②に関して言うならば、本文においても指摘したように、基本理解(1)は色彩が非関係的特性であるということを含意することから、②は基本理解の(1)に間接的に対応するものと解される。

④に関して言うならば、④における「質的特性」が具体的には現象的特性を指していると解するならば、④は基本理解の(4)に直接対応するものと見なされる。

問題は③である。③に直接対応するものは基本理解の(1)から(5)に見当たらないが、仮にクオリアを物理的特性に還元することはできないとするクオリアに関する非還元主義の立場を採るとするならば、③は(5)の基本理解に対応すると解されることになる(ただしここでの還元はあくまで物理的特性への還元に限定される)。

(13) 色彩に関する素朴実在論(原始主義)的な理解と もっとも高い親和性を示す知覚理論は「選言説(disjunctivism)」であると言える。なお、選言説についてはフィッシュ [2014]: 129-67, Soteriou [2014] を、また「直接実在論(direct realism)」、および選言説が直接実在論の一種として捉えられる点については、BonJour and Lyons [2013]: 30-7をそれぞれ参照されたい。

(14) 「関係概念」に関する一般的理解と「関係概念」をめぐる主たる論争点に関しては Heil [2009], Armstrong [2010], Swyer and Orilia [2011]: 43-6, Weatherston and Marshall [2012]: 7-8, 9, 29-33, MacBride [2016] を参照されたい。なお、関係概念に関する概念的な研究としては Brower [2014] が、またそうした概念的な研究から得られた知見を今日的な問題視座のもとに捉え返す試みとしては Brower [2016] がある。

(15) 関係主義的理解のもとでの色彩一般に関する定義としては、DCRT1 はいまだ暫定的なものに過ぎない点は注意を要する。因みに本稿 4.2.1 の当該の註では、ここで問題となる関係的特性の内実を明示するかたちで DCRT1 を再定式化した定義 DCRT2 が呈示さ

れる。

(16) 因みにアレンは、色彩に関する関係的理解を「対象 O は、(色彩知覚) 条件 Cのもとで色彩知覚システム S を具えた主体に対して色彩 X としてある」という定式のもとに捉えている (Allen [2012]: 2)。

(17) Cf. 千々岩 [2001]: 13-4, 大山他 [1994]: 493-4, 山中 [1997]: 6-8, 城編 [2009]: 30-1, 内川 [1998]: 142-9.

(18) 「表面色 (surface color)」については、上掲註(2) (日本色彩学会編 [2011]: 67) を参照のこと。

(19) これらの色彩現象について詳しくは、千々岩 [2001]: 108-10, 116-7, 125-6, 日本色彩学会編 [2011]: 472-4, 大山他 [1994]: 480-4, 488-9 を参照のこと。

(20) これらの色彩現象について詳しくは、千々岩 [2001]: 123-5, 126-8, 日本色彩学会編 [2011]: 475-8, 大山他 [1994]: 476-80 を参照のこと。

(21) あらためて言うまでもなく、対象(物体)の選択反射した光が眼にとどくまで間に經由する媒質もまた問題となるが、その特性は光源から発せられる光が対象(物体)にいたるまでの間に經由する媒質と基本的に同一のものと見なされることから、ここでは後者の媒質に限定して議論を進めることにする。

(22) 千々岩 [2001]: 19-21, cf. 日本色彩学会 [2011]: 4-10.

(23) 「照度」は、光がある面に当たったときの単位面積当たりの入射光束の密度を指し、ルクス (lx) (=ルーメン毎平方メートル [lm/m^2]) を単位とする。

(24) 「輝度」は、光源の輝きの強さ、すなわち、ある方向から見たとき、その方向に放出される光の強さを意味し、カンデラ毎平方メートル (cd/m^2) を単位とする。

(25) 「主波長」とは、単一波長光と白色光との適当な混合によって他の色刺激と等しい色を作り出せるような単一波長の刺激を意味する。

(26) 「輝度純度」は、単一波長光の輝度と、この光と白色光との混合によって得られる輝度との比で表わされる。一般には、白色点からの隔たりを表わす量と言える。

(27) 千々岩 [2001]: 27.

(28) 因みに、空が青く見えるのは、太陽光の短波長成分が空中の微粒子によって散乱されるためである(レイリー散乱(Rayleigh scattering))。cf. 城編 [2009]: 26-7.

(29) 齋藤 [2010]: 92-102. cf. 千々岩 [2001]: 25-30, 日本色彩学会 [1998]: 537.

(30) 本稿2の冒頭にも記したように、本章で取り上げ

る色彩は「表面色」であることから、色彩知覚対象となりうる物体は、たとえばワインのような透過物体ではなく、あくまで反射物体であるということになる。

(31) 対象の色は、いかなる波長の色をどの程度反射するか(反射率)を示した分光分布図によって示される。因みに、分光分布図上に表わされた光の波長の示す曲線を「分光反射率曲線」と言う。cf. 城編 [2009]: 20-1.

(32) 人間の色彩感覚は、視角(物体の見た目の大きさ)の違いによっても異なる。そのため、色彩を測定する際には人間の色感覚を規制することが必要となり、CIE(国際照明委員会)やJIS(日本工業規格)では2°視野と10°視野の分光感度を定めている(たとえば、観察者が50cmの距離から直径1.7cmの試料を観察する場合は2°視野であるのに対し、同じ距離から直径8.8cmの試料を観察する場合は10°視野となる)。cf. 大山他 [1994]: 410-1.

(33) Cf. 日本色彩学会編 [2011]: 338-45, 358-71, 日本色彩学会編 [1998]: 437-65, 大山他 [1994]: 287-317.

(34) 眼球組織の光学系については日本色彩学会編 [2011]: 338-41 を参照されたい。

(35) ただし、L錐体、M錐体、S錐体が存在する数の比率については、色覚が正常な被験者の間でも、個人差が非常に大きいことがわかっている。cf. 日本色彩学会編 [2011]: 342.

(36) 光電変換のメカニズムについて詳しくは、齋藤 [2010]: 59-60 を参照されたい。cf. 大山他 [1994]: 379-80.

(37) Cf. 松山、七田 [2013].

(38) 水平細胞、双極細胞、神経節細胞それぞれにおける色彩情報処理作用の詳細については、大山他 [1994]: 380-2, 不破 [1986]: 378-80 を参照されたい。

(39) 千々岩 [2001]: 35-6, 日本色彩学会編 [1998]: 440.

(40) 外側膝状体は間脳の一部をなす視床に位置する器官であるが、これは6層の組織によって構成されており、うち2層が大細胞層(M層)、残りの4層が小細胞層(P層)とよばれる。なお、大細胞層と小細胞層の間には、非常に小さな顆粒細胞からなる顆粒細胞層(K層)が存在している。cf. 日本色彩学会編 [2011]: 342.

(41) Cf. 日本色彩学会編 [2011]: 342-3, 大山他編 [1994]: 382-4.

(42) 因みに、“DKL”という名称は、Derrington, Krauskopf, Lennie という三人の色覚研究者の名前の頭文字から取ったものである。

(43) Cf. 日本色彩学会編 [2011]: 345.

(44) 還元概念一般および科学的還元主義の基本構制については、Ney [2016], Van Riel and Van Gulick [2014] を参照されたい。

参考文献

Allen, Keith. [2012]. “Colour Relationalism, Contextualism, and Self-Locating Contents”. *Croatian Journal of Philosophy* 36: 331-50.

Armstrong, David. [2010]. “Relations”. In: Chapter 3 of his *Sketch for a Systematic Metaphysics*. Oxford: Oxford University Press, pp.22-5.

BonJour, Laurence and Lyons, Jack. [2013]. “Epistemological Problems of Perception”. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2013 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2013/entries/perception-episprob/>>.

Brent, P.J., Kennard, C. and Ruddock, K.H. [1994]. “Residual Colour Vision in a Human Hemianope: Spectral Responses and Colour Discrimination”. *Proceedings of the Royal Society of London: Biological Sciences* 256 (1347): 219-25.

Brower, Jeffrey. [2014]. “Medieval Theories of Relations”. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/relations-medieval/>>.

———. [2016]. “Aristotelian vs. Contemporary Perspectives on Relations”. In: Anna Marmodoro and David Yates (eds.). *The Metaphysics of Relations*. Oxford University Press, pp.36-54.

Cohen, Jonathan. [2009]. *The Red and Real: An Essay on Color Ontology*. Oxford / New York: Oxford University Press.

Heil, John. [2009]. “Relations”. In: *The Routledge Companion to Metaphysics*. Edited by Robin Le Poidevin, Peter Simons, Andrew McGonigal and Ross P. Cameron. London / New York: Routledge, pp.310-21.

Huemer, Michael [2011]. “Sense-Data”. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2011 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2011/entries/sense-data/>>.

MacBride, Fraser. [2016]. “Relations”. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2016 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2016/entries/relations/>>.

- edu/archives/spr2016/entries/relations/>.
- Maund, Barry. [2012]. "Color". *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2012 ed.). Edward N. Zalta (ed.), URL = < <http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/color/>>.
- Ney, Alyssa. [2016]. "Reductionism". *The Internet Encyclopedia of Philosophy*, James Fieser and Bradley Dowden (general eds.), ISSN 2161-0002, URL = < <http://www.iep.utm.edu/red-ism/>> (accessed September 3, 2016).
- Soteriou, Matthew. [2014]. "The Disjunctive Theory of Perception". *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = < <http://plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/perception-disjunctive/>>.
- Swoyer, Chris and Orilia, Francesco. [2011]. "Properties". *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = < <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/properties/>>.
- Tye, Michael. [2015]. "Qualia". *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2015 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = < <http://plato.stanford.edu/archives/fall2015/entries/qualia/>>.
- Van Riel, Raphael and Van Gulick, Robert. [2014]. "Scientific Reduction". *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = < <http://plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/scientific-reduction/>>.
- Weatherson, Brian and Marshall, Dan. [2012]. "Intrinsic vs. Extrinsic Properties". *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2014 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = < <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/intrinsic-extrinsic/>>.
- 内川恵二. [1998]. 『色覚のメカニズム—色を見る仕組み』朝倉書店。
- 大山正、今井省吾、和氣典二編. [1994]. 『新編 感覚・知覚心理学ハンドブック』誠信書房。
- 小松英彦. [2015]. 「色選択性細胞」、林康紀編『脳科学辞典』、URL = < <http://bsd.neuroinf.jp/wiki/%E8%89%B2%E9%81%B8%E6%8A%9E%E6%80%A7%E7%B4%B0%E8%83%9E>>。
- 齋藤勝裕. [2010]. 『光と色彩の科学—発色の原理から色の見える仕組みまで』講談社。
- 城一夫編. [2009]. 『徹底図解 色のしくみ』新星出版社。
- 千々岩英彰. [2001]. 『色彩学概論』東京大学出版会。
- 日本色彩学会編. [1998]. 『新編 色彩科学ハンドブック』第2版、東京大学出版会。
- . [2011]. 『新編 色彩科学ハンドブック』第3版、東京大学出版会。
- フィッシュ、ウィリアム. [2014] 『知覚の哲学入門』山田圭一監訳 (原著 2010年)、勁草書房。
- 不破正宏. [1986]. 「視覚受容の生理学的メカニズム」、『光学』第15巻第5号、376-81頁。
- 松崎俊之. [2010]. 「美的特性に関する階層構造理論」、『芸術文化』第15号、11-32頁。
- . [2013]. 「知覚的特性と美的特性との関係に関する一考察」、『石巻専修大学 研究紀要』第24号、105-25頁。
- . [2015]. 「知覚的特性、感覚的特性、美的特性—N. ハンフリーの進化心理学的仮説に依拠して」、『芸術文化』第19号、2015年3月、69-87頁。
- 松山 オジョス 武、七田 芳則. [2013]. 「ロドプシン」、林康紀編『脳科学辞典』。URL = < <http://bsd.neuroinf.jp/wiki/%E3%83%AD%E3%83%89%E3%83%97%E3%82%B7%E3%83%B3>>。
- 山中俊夫. [1997]. 『色彩学の基礎』文化書房博文社。