

# 1

## 脳科学から見た色



藤田 一郎  
FUJITA Ichiro

大阪大学大学院/生命機能研究科/教授

物体には色があり、誰もがそれを同じように見ていると思いがちだが、実はそうではない。世界に色は付いておらず、私たちの目と脳が作り出す。見ている色は動物により異なり、時に私たち一人ひとりの間で異なる。驚くべきこれらの事実を辿りつつ、色を感じるしくみと謎を紹介する。

### ものを見るには光と目と脳が必要

私たちを取り囲む世界は、色彩、輝き、陰影に満ちている。四季の風景、草木や岩や虫や魚や鳥や獣たち、スーパーに並ぶ食品や食卓の料理、工業製品や建築物、芸術作品や工芸品など、あれもこれも、これもあれも、私たちの視覚世界を豊かなものにする。色が見えることで、私たちの毎日、人生の一瞬一瞬は、どれだけ楽しいものになっていることだろう。

私たちが物体を見ているとき、光が物体に注がれ（投射光）、物体がそれを反射する（反射光、図1）。投射光がどのような波長をどの程度含むかは光源によって異なり、その性質は光源スペクトルと呼ばれる。物体は受けた光をすべて反射するのではなく、ある波長範囲の光はよく

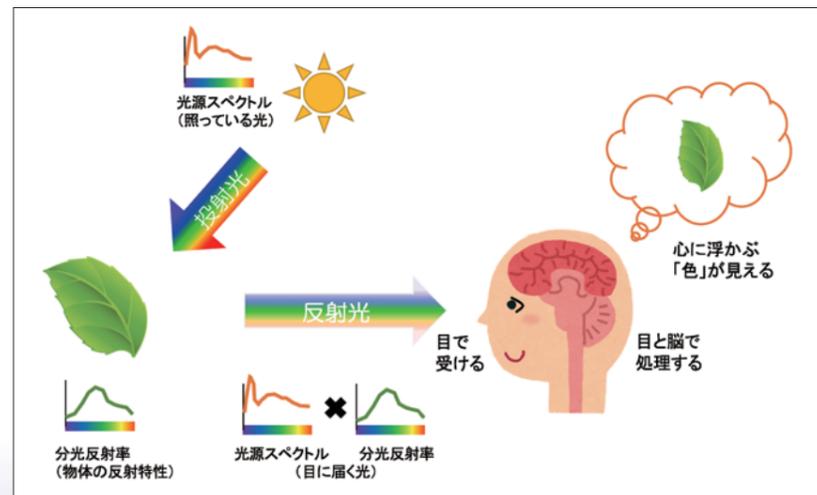


図1 ものを見るには光と目と脳が必要

反射するが、別の波長範囲の光はあまり反射せずに吸収してしまう。この性質は分光反射率と呼ばれる。

目に届く光にどんな波長が含まれているかは、そもそも投射光にどんな波長が含まれているか、物体がそのうちのどの波長をどれだけ反射するかで決まる。つまり、光源スペクトルと分光反射率の掛け算で決まる。その光を網膜の細胞が受け止め、その情報を脳に送り、脳が処理を加えることで、色が見えるという心のできごとが生じる。

### 解けないはずの問題を解く脳

色には、色相、彩度、明度という3つの性質がある。色相は波長に依存した色の種類を指す。彩度は色の鮮やかさを示し、彩度が高い色は鮮やかな色を指し、彩度が低い色は白っぽさが加わった色（例：ピンク）を指す。明度は色の明るさを示す。同じ色相であっても、彩度や明度が違えば、色は異なって感じられる。例えば、色相が黄色と同じであっても、彩度が下がればクリーム色になり、明度が下がれば黄土色や茶色、ついには黒になる。色相、彩度、明度の違いに基づいて、ヒトは少なくとも数万色の色を区別することができる。

色が見えることは、私たちが思っている以上に複雑である。例えば「エーデルマンのチェッカーボード」と呼ばれる錯視図形を見てみよう

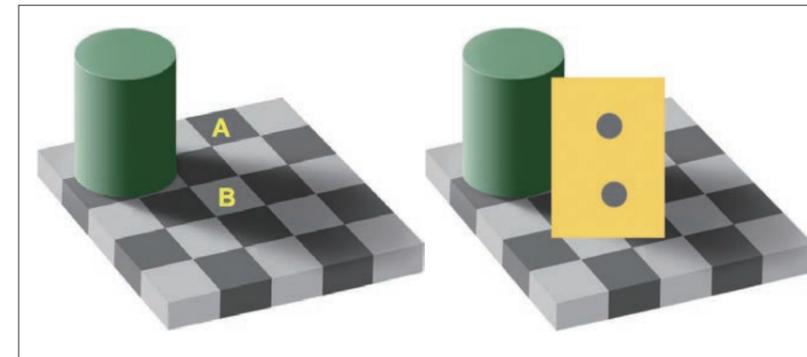


図2 エーデルマンのチェッカーボード錯視

（図2左）。白黒のタイルが互い違いに配置されたボードに円筒が乗っている。Aとラベルしたところは黒タイル、Bとラベルしたところは白タイルであるように見える。しかし、周りを覆ってみると驚くべきことがわかる（図2右）。この2枚のタイルは全く同一の灰色で描かれている！

2枚のタイルが同じ灰色ということは、反射している光量が同じということだ。この量（z）は、先に述べたように、投射光（x）とタイルの反射率（y）の掛け算で決まる。式に書けば  $z = xy$  である。zは網膜細胞により検出され、脳がその情報を受けてxとyの2つを推定する。yが小さければ光をあまり反射しない黒タイルであり、大きければ光をよく反射する白タイルだと知覚する。

単純なようで、これは難しい仕事である。なぜなら、例えば網膜から「zは4である」という情報が送られてきたとき、脳は  $4 = xy$  という方程式を解かねばならない。しかし、 $4 = 1 \times 4$  かも知れないし、 $4 = 2 \times 2$  かも知れないし、 $4 = 4 \times 1$  かも知れない。xとyが小数や無理数でもよいならば、その組み合わせは無限にある。脳は一体どうやって答えを一つに決めるのだろうか。

その秘密は、タイルからの反射光だけでなく、状況全体の光の分布から個々のタイルへの投射光の量xを脳が推定し、その推定に基づいてタイルの反射特性yを決定していることにある。「円筒の陰の外にあるタイルAは光がたくさん当たっている（xが大きい）のでyは小さいはず、つまり反射率の低い黒タイルである。タイルBは円筒の陰になっているので、投射光は弱く（xが小さく）、したがってyは大きい、すなわち白タイルである」という計算を行なっている。これが、同じグレーなのに、タイルAが黒く、タイルBが白く見える理由である。



図3 ドレス錯視

### 世界に色はついていない

2015年、英国の女性カトリン・マクニールさんがブログに載せたドレスの写真がどんな色に見えるかの議論が、インターネット上で沸騰したことがあった（図3左）。このドレスをどんな色と感じるかは人によって異なる。青と黒の縞に見える人、白と金の縞に見える人、その中間であると感じる人など、様々である。

どうして人によって違った色に見えるのかは、先に述べた理屈の延長で説明できる。この写真では周りの状況がトリミングされているため、ドレスへの投射光量xを決める手がかりが乏しい。そのため脳は、投射光量を推定できず勝手に決め、それに基づきドレスの反射率yを決定する。

xが大きい（ドレスに光がたくさんあたっている）と推定した人はyを小さく見積もり、ドレスは光を反射しない暗い色、すなわち青と黒だと知覚する。一方、xが小さい（ドレスに光があまりあたっていない）と推定した人は、yが大きく見積もられ、ドレスは光を反射する明るい色、すなわち白と金と知覚する。図3右に示す異なる背景に置かれた2枚のドレスの右半分は同一の印刷が施してあるが、色が違って見えることがその証明である。このように、同じ1枚の写真を見ながら、人によって違った色に見えるのだ。この現象はドレス錯視と呼ばれる。

チェッカーボード錯視やドレス錯視は、私たちが色と呼ぶものが実は物体の性質ではないことを教えてくれる。個々の物体は、光をどう反射するかという固有の性質（分光反射率）は持つけれども、固有の色を持っているわけではない。色は見る人の目と脳が作りだすのだ。

## 世界は見る者の数だけ多様性を持つ

色の情報処理は網膜で始まる。網膜で光を受け止める細胞は2つのグループからなる。明るいところで働く錐体細胞と暗いところで働く桿体細胞である。色の知覚に関わるのは錐体細胞だ。ヒトの網膜には、長波長、中波長、短波長それぞれに感受性を持つL錐体、M錐体、S錐体の3種類の錐体細胞がある。

網膜の細胞が反応できる波長範囲(可視領域)は動物種により異なる。例えば、昆虫や鳥の網膜には紫外線に感受性を持つ細胞がある。その結果、彼らが見る世界は私たちが見る世界とは異なっている。例えば、モンシロチョウのオスとメスは、私たちが見ると両者とも白く見える(図4上)。私たちの可視領域における羽の分光反射率がオスとメスの間で大差ないのである。しかし、紫外線領域の波長においては、メスの羽は光をよく反射し、オスの羽は吸収する。従って、紫外線を見ることのできるモンシロチョウにとっては、オスの羽(右)はメスの羽(左)よりずっと暗く見えている(図4下)。

また、ある種の植物の花びらは私たちに無地に見えるが、紫外線領域を見ることが出来る動物にとっては模様が見える。動物によって、色や物体や世界の見え方は異なるのだ。さらに、網膜細胞の種類の違いだけでなく、目からの情報を脳がどう処理するかも、動物の種類によって異なる。ドレス錯視の例で明らかのように、同じ人間であっても、見える色は人により違うのである。

の初期段階については、色情報の処理内容もよく理解されている。例えば、L錐体とM錐体の出力の間では引き算が行われる(図6)。さらに、L錐体とM錐体の出力の和から、S錐体の出力を引き算する過程がある。これらの計算結果は、視床において、赤と緑の対比、青と黄の対比を表現する信号となる。

V1野から奥に進むと、赤や緑といった純色ではなく、シアンやピンクといった彩度の低い色だけに反応する細胞や、青とオレンジといった随分と異なる色に反応する細胞などが出てきて、多様な色の表現がなされている(図7)。

## 残されたジ・ハード・プロブレム

このように、網膜で受けた光の情報を、脳が処理していく様子が解明されつつあるが、これらの色情報を伝えている神経細胞の活動は、本当に「色が見える」という心のできごとの原因となっているだろうか。

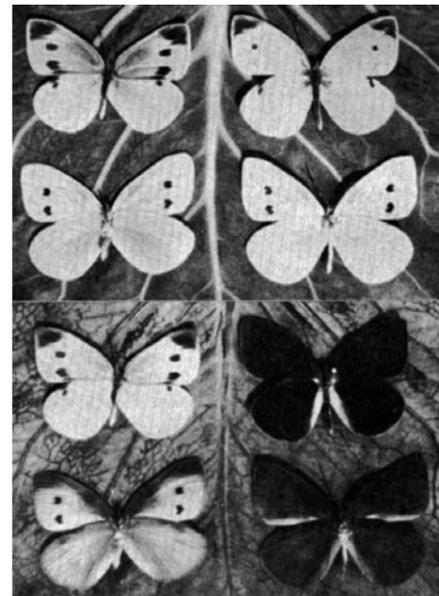


図4 モンシロチョウの目から見たモンシロチョウ

## 目の奥では何が起きているか

目で受けた光の情報が脳に向かう経路は4つある。そのうち、視床を介して大脳皮質に向かう経路だけが色の情報を伝える。大脳皮質での最初の到着点は一次視覚野(V1野)である。V1野から先は、頭のでっぺんにある頭頂葉へ向かう背側経路と耳の奥あたりにある側頭葉へ向かう腹側経路の2つの経路に別れる(図5)。

色に関する情報処理は腹側経路で行われる。腹側経路の中には、V1、V2、V4、ITなどの複数の領野があり、また、そのそれぞれの中にサブ領野がある。色の情報がそのどこを通過して処理されているかは、ほぼ完全に明らかになっている。

網膜からV1野に至るまで

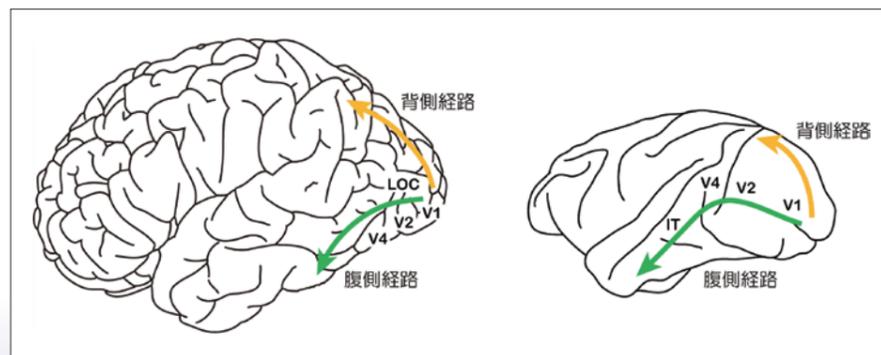


図5 ヒトの脳(左)とサル(右)における視覚経路

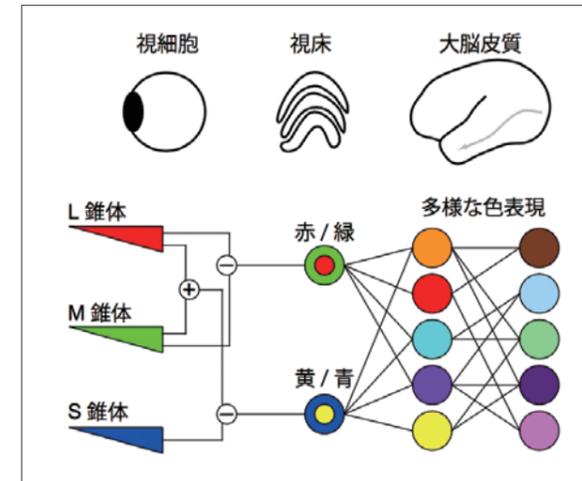


図6 網膜から大脳皮質に向けて進む色の情報処理

近年、V4野に、診断目的で留置した電極(先端だけ電気を通す細い金属針)を使って微弱な電流を与え、その場所の神経細胞の活動を上昇させたところ、患者が「青い色が見える」と報告したという研究成果が発表された。電気刺激を与えたこの場所には、おそらく、青色に反応する細胞があり、その細胞が活動することで、青色が見えるという心のできごとを引き起こしたと解釈できる。この結果は、腹側経路の神経細胞の活動が、色が見えるという心のできごとの原因になっていることの強い証拠であり、色の知覚の脳メカニズムの理解への重要な一歩である。

しかし、ここには科学上の大きな問題が横たわっている。図7で示すように、V4野の中には、赤に反応する

細胞やオレンジ色に反応する細胞が存在する。それらを活動させると、おそらく今度は、赤い色が見えたり、オレンジ色が見えたりするのだろう。しかし、突き詰めて考えると、神経細胞の活動とは、ナトリウムイオンやカルシウムイオンが細胞の外から中へ短時間だけ流入して起きる電気パルスである。どの細胞も同じメカニズムで電気パルスを発生させているのに、どうして、ある細胞が活動した時には青が見え、別の細胞が活動した時にはオレンジが見えるのだろうか。さらに言えば、どうして、聴覚野の細胞の活動は、色が見えることではなく音が聞こえることに結びつくのだろうか。

神経細胞における物理化学現象がどうやって、色が見えたり、音が聞こえたり、幸せな気分になったりという心のできごとと結びつくのか。今日の科学では、この問いに筋の通った説明をすることができない。物質の塊であるはずの脳から、どうやって心が生まれ、私たちの精神世界が形成されるのか。この問題は、哲学の世界でthe hard problemと呼ばれる。難しい問題(hard problem)に定冠詞のtheをつけ、おまけにそれをイタリック体で表示し、ザではなくジと読ませる。最も難しい科学上の問題というわけだ。

### <図出典>

- 図2 藤田一郎(2007)「『見る』とはどういうことか〜脳と心の間を探る」(化学同人)
- 図3 (左) Katlin McNeill氏のブログより(右) ぶどう茶@budoucha 2015年制 <https://twitter.com/budoucha/status/571276627843223553>
- 図4 Obara Y & Hidaka T (1968) Proc. Jpn.Acad.44:829-832.
- 図5 藤田一郎、池添貴司、稲垣未来男(2012) Clin.Neurosci.30:883-886
- 図6 稲垣未来男、藤田一郎(2016) BRAIN and NERVE 68:1363-1370.
- 図7 Kotake Y, Morimoto H, Okazaki Y, Fujita I, Tamura H (2009) J. Neurophysiol., 102: 15-27より改変

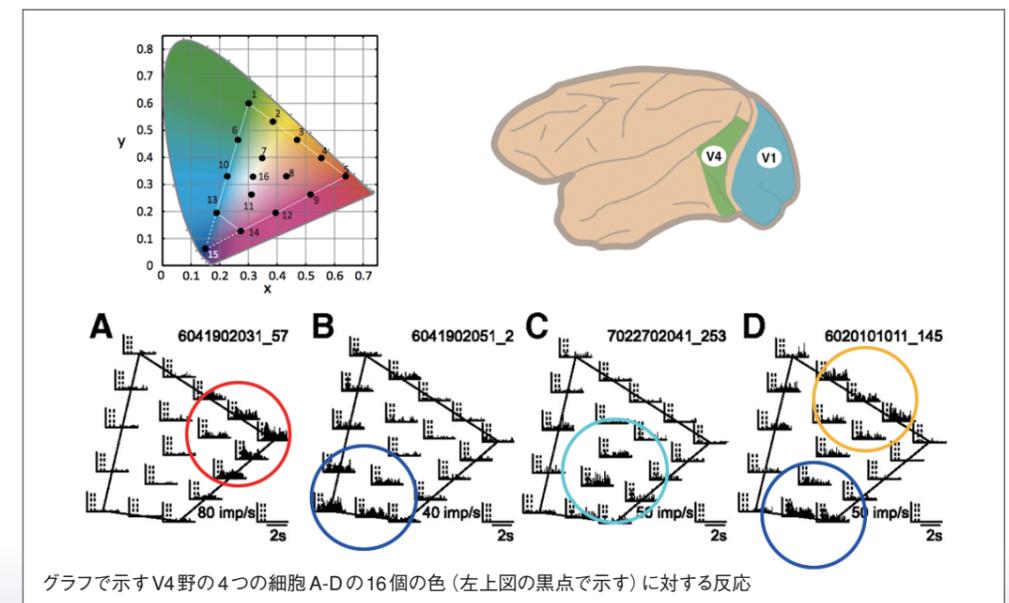


図7 サルのV4野の神経細胞の色に対する反応