

連載

天体色彩学入門【5】

色彩学を用いたサイエンスデザイン 番外編

～月夜は青い？～

芝田 たける・福江 純（大阪教育大学大学院）

1. ことの発端

2008年12月31日、「今年も残りわずからだから、年内に修士論文を書き終えよう」とパソコンにむかっていた。天文教育普及研究会のメーリングリスト“tenkyo”は一日の投稿数は時によって波があるが、多くの方の投稿があり、様々な情報交換でにぎわっている。そんな中、和歌山大学の富田晃彦さんによる教員免許更新講習のシラバス案を紹介する投稿があった。

[tenkyo:02267] 教員免許更新講習

「天文教育」での芝田さんの連載の水準には遠く及びませんが、なんで月夜は青いのか、太陽は何色だっけ、といった色の話も取り上げる予定です。

「あ、私の名前が出ている。月夜は青いって聞いたことはあるけれど、体験をしたことはないな」と思いながら投稿されたメールを読んだ。それからしばらくは、この話題はtenkyoでは現れなかった。

そして、年が明けて2009年となった1月5日に再度、富田さんによる教員免許更新講習のシラバスを紹介する投稿があった。そこで再び「月夜は青い」が登場する。

[tenkyo:02278] Re: 教員免許更新講習

講習の計画

[1] お月さま、お日さまのイロハ：
内容例：どうして月にうさぎがいると言われるのか？ どうして十五夜は満月？ なぜ月夜は青いのか？ ところで太陽は何色か？ 日食はなぜとても珍しいのか？

この内容に対して大阪教育大学の福江がコメントを投稿した。

[tenkyo:02279] Re: 教員免許更新講習

1 月夜は青いのか

これ、難しすぎると思います。

- ・ホントに青いのか
- ・その理屈は？

このMLを読んでいる人で、さくっと答えられる人はどれぐらいいるのでしょうか???

そこで富田さんからのコメントが投稿された。

[tenkyo:02281] Re: 教員免許更新講習

だ～、痛いところをつかれてしまいました!! そのしくみまで詳しく述べるつもりではなく、私も通り一遍のことは話すとしても、説得力を持ってこれ、と話しきる自信はまったくありません。

確かに白くて冷たい感じの満月の光のもと、その弱々しい光に照らされたものは青っぽく見えますよね？

え？ そんな時間帯はまだ仕事で忙しい？ 失礼しました。今度残業で遅くなったら、月の光に照らされた道を通り、ほのかに見える木々や建物（明かりのついていないもの）などを見てみて下さい。

こういう話をして、月、光、夜、空に興味を持ってもらう作戦です。

この授業は少々生活科的な雰囲気を進めるつもりです。

[tenkyo:02282] Re: 教員免許更新講習

うーんとねえ、8時9時に帰宅することが多

いので、月にいっぺんぐらいは満月近くをみますが、京都はあまり青っぽくないんです。水滴やホコリが多いのかもしれませんが。また月のスペクトルは太陽と同じはずなので、青っぽくなるのがいまいち納得できないんですよ。(これは理論屋のクセです、はい)

さらに、その後、以前惑星の眼視観測をしておられたという佐藤 健さんのメールが投稿され、月夜が青い理由についての説明とその現象の名称を問うメールが投稿されたので、さらに話が展開した。

[tenkyo:02284] Re: 教員免許更新講習

「月がとっても青いから——」という歌がありますね。ですが、月自体は青くなく、黄色っぽい(黄色の波長に極大がある連続スペクトル)ですね。青いのは月自身ではなく、月に照らされた地上の景色です。人間の目の網膜の感度は、光の強度が弱い場合は赤(長波長)に対して大きく下がるが、青(短波長)に対してはあまり下がらないという性質があります。したがって、昼に比べて光が弱い月夜の景色は青っぽく感じるというわけです。

(略)

このように、光が不足しているときの網膜の感度が短波長より長波長に対して悪くなる現象を「なんとか現象」だか「なんとか効果」だか呼ぶと広大の学生時代(1950年代後半)に村上忠敬先生の天文の授業で教わりましたが、その「なんだか」がなんだったのか忘れられました。この現象を発見だか研究だかした西洋人の名前(姓)です。ご存知の方はご教示下さい。

なお、火山の大噴火の後などに月そのものが青く見えることがあると聞いています。

すると、すぐに大島 修さん、石井 馨さん、大越 治さん、半田利弘さん、西村昌能さん、木村直人さんからのコメントで、現象の名称

が「プルキニエ現象 (Purkinje effect)」であること、また現象についての説明がなされ、さらには西村昌能さんによる黄砂によって青くなる太陽と月を観察された時の紹介があった。

これらのやりとりは、大学院での研究テーマとして天体色彩学を掲げてきた筆者(芝田)にとっては、大変興味深いものであったので、詳しく調べることにした(図1)。また、天文教育普及研究会の会員でもメーリングリスト“tenkyo”に入っておられない方も多数いると思われるので、ここで番外編として紹介したい。

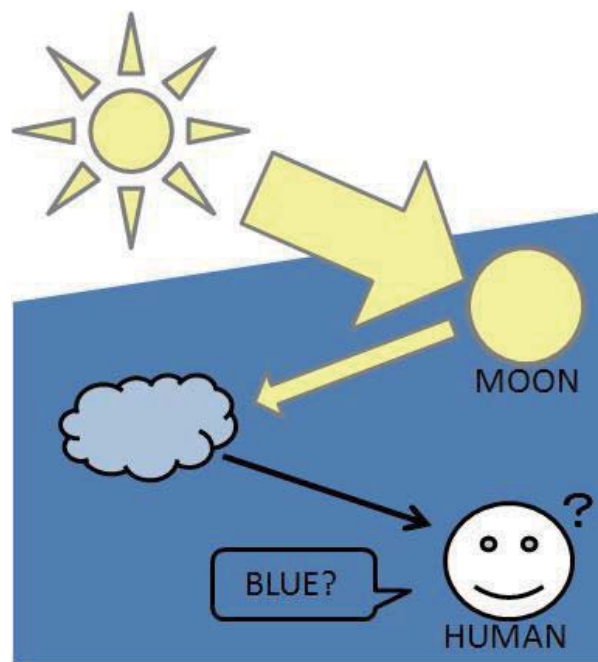


図1 月夜は何色？

2. 原因は月？

「このリンゴは赤色」というように色を認知するとき、そのリンゴの色を赤と決めているのは、リンゴ自身とリンゴを見る私たちの眼の二つに大きな原因がある。リンゴが赤色をしているときというのは、まず、そのリンゴが赤の光を発しているからである。光源色か物体色かで色の種類は変わるが、物体色の場合は光源から発する光の成分と、光の一部

を吸収する物体表面の色素などの性質で決まる[1]。

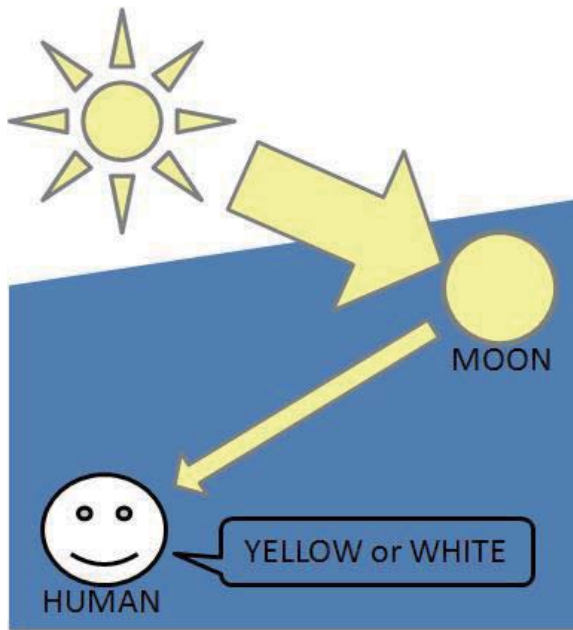


図2 月の見え方



図3 月 (画像提供：大阪教育大学)

今回の話題の中心となっている月は、それ自体は白～黄色に光って見えている(図2、図3)。これは光源となる太陽が物体である月を照らしており、私たちはその反射光を見ているからである。そして、光源である太陽の光がほぼ白色光であり、月の表面のアルベド(反射能)が波長に強く依存しないためである(地球の平均アルベドは37%、月の平均ア

ルベドは約12%である)。

とくに後者に関しては、月の表面は、度重なる隕石の衝突や宇宙線被爆で表層が細かく砕かれ、レゴリスと呼ばれる微細な土に覆われている。このレゴリスは比較的黒っぽい色をしており、太陽光を散乱する。

実際の観測例(図4)では、月の表面の反射能は、240nm(UV)で5%から800nmで28%と、おおむね波長に比例して増加する。ただし、強い波長依存性はないので、極端な色は付かない。

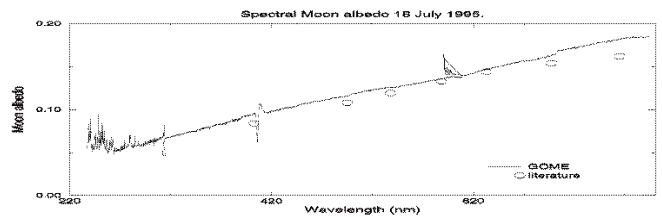


図4 月の反射能

横軸は波長(240nmから800nm)で縦軸は反射能。この範囲では、ほぼ波長に比例して反射能が高くなるが、強い依存性はない。

(出展：<http://esapub.esrin.esa.it/eoq/eoq52/dob52.htm>)

さて、その月の反射光が地上の物体を照らして、私たちはその風景を見ていることになる。したがって、今回は月の光を光源とし、月の光に照らされて反射している地上のもの色が、物体色であると考えることができる。

月を光源としたとき、その光の成分であるスペクトルはどうなっているのだろうか(図5)。月は太陽の光を反射して輝いていることはご存じだろう。月には大気がないので、太陽の光は月の表面で乱反射されている。そのため、月のスペクトルを見てみると、基本的には、太陽のスペクトルに近いものになっている。ただし、反射能に弱い波長依存性があるので、青系統よりは赤系統の光がやや強く散乱され、いくぶん黄みがかった色合いになるだろうと思われる。

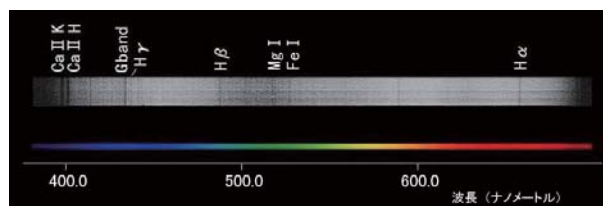


図5 月のスペクトル[3]

しかし、両者の違いは光の強度である。単位面積あたりに照らされる光量である照度を比べてみると、晴天時の太陽はおよそ 10 万ルクス [lx] であるが、満月のときは 0.2 ルクス、三日月のときで 0.01 ルクスと、月ではだいぶ光が弱くなる。

3. 原因は私たち？

続いてもう一つの条件は、人間の眼である。人間の網膜にある視細胞には、色を感じる事ができる錐体細胞と、明るさのみを感じる桿体細胞がある。これらの視細胞は明るい所と暗い所で、どちらがはたらくか決まっている。そこで、この節では視細胞について詳しく紹介したい。

まず、色を感知することができる錐体細胞は、明るい所ではたらく視細胞である。多くの人はこの錐体細胞を 3 種類もっており、この 3 種類の錐体細胞によって私たちは 3 原色で色を見ることができる。一般的な話をしているが、この細胞の話は個人差が大きいものであるため、中には 2 種類もしくは 4 種類、5 種類ももっている人がいるという。

次に、桿体細胞は暗い所ではたらく視細胞で、これは明るさのみを感知する。また、錐体細胞は網膜に 650 万個あるのに対して、桿体細胞は 1 億 1500 万個ある。そして私たちの眼は、これら 2 種類の視細胞をうまく使い分けることが可能である。

私たちは、真昼の強烈な太陽光のもとから、月のない星明かりのもとでも生活しなければならない。つまり、自然環境の照射は 10

万ルクスから 0.0003 ルクスといった広範囲に及んで変化しているの、人間はそういった環境に合わせた眼の作りが必要となった。そこで、2 種類の視細胞を周りの明るさによって使い分けることで、こうした明るさが大きく変化する環境でも生活できるようになっている。

先にも説明したように、明るいところでは錐体細胞のみがはたらく、このときの見え方を「明所視 (photopic vision)」や昼間視といったりする。図 6 にあるように昼間の直射日光下から室内で照明が十分にあるときは明所視である。

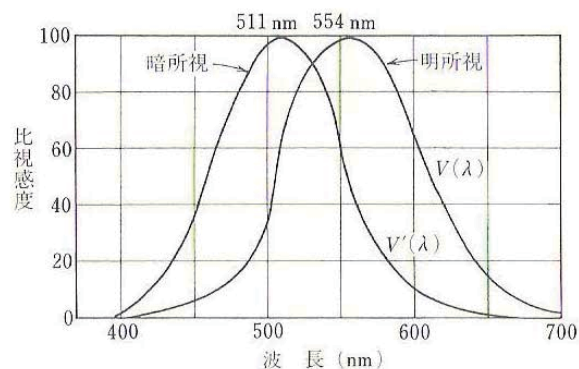


図6 暗所視と明所視の視感度関数[4]

横軸は波長で縦軸は相対的な視感度を表す。

一方で、月明かりも少なく、また星明かりだけのもとでは桿体細胞のみがはたらく、このときの見え方を「暗所視 (scotopic vision)」や暗夜視と言ったりする (図 6)。また桿体細胞は色を感じず、明るさだけを感じているので、このとき見える景色は明暗だけの世界となる。

さて、明るいと暗いの間である薄暗いときには、明所視と暗所視の間には「薄明視 (mesopic vision)」や黄昏視と呼ばれる見え方をする (図 7)。このときが、今回話題となった月夜のときの見え方である。薄明視のときには、錐体細胞と桿体細胞が両方はいっているため、色もなんとなく認識できるよう

になっている。しかし、そのときの見る景色は、明所視の時とは違い、青みがかった世界となる。なぜ青みがかってみえるのかを次節で紹介する。

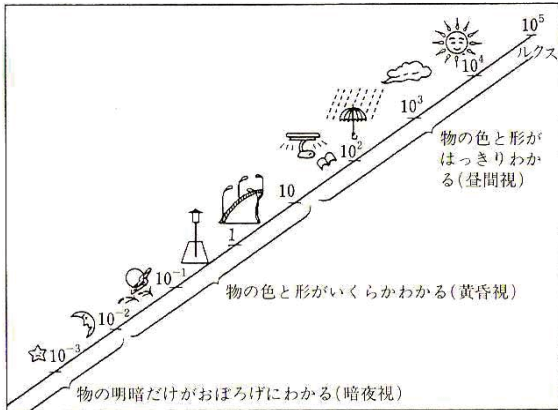


図7 暗所視、薄明視、明所視の目安[4]

4. 原因は両方！

以上みたように、月夜のときの見え方は、月の明るさが不十分であることと、視細胞の性質の両方に依存していることがわかる。このようなことを解明したのが、ボヘミアの生理学者ヤン・エヴァンゲリスタ・プルキニエ（1787～1869、図8）で、薄明視において青色を強く感じる現象をプルキニエ現象と呼ぶ。



図8 プルキニエ

明所視と暗所視の時では、はたらく細胞も違うことから、一番感度をよく感じる波長(ス

ペクトル視感度)も異なってくる。明所視では554nm、暗所視では511nmに視感度のピークがあり、明所視から暗所視に移るとこのピークも移動する(これを「プルキニエ・シフト」という)。暗所視では明所視に比べて、短波長のほうが感度がよいため青系統が明るくなるのだ。

この明所視から暗所視へ移動していくときの様子をもう少し詳しく紹介しよう。まず、明るいときに赤から紫色のスペクトル全域が見えていたとする。全体に徐々に暗くしていくと、まずは視感度の弱い赤が見えにくくなるが、錐体細胞がはたらいている間は黄や緑は見える。もっと暗くすると視機能が桿体細胞に移り、スペクトルは見えなくなって、最高視感度510nm付近を残して、それもついに消えるという過程をとる。このとき青は錐体細胞がなくなれば色も消えるが、明るさは比較的長く残る。

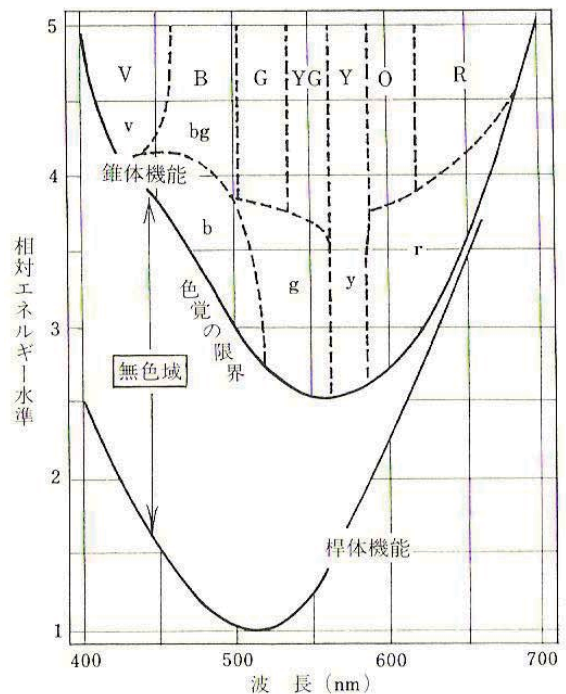


図9 スペクトルが暗くなると順に色が消える[4]

長波長域には無色域がなく、赤色光消えるまで赤として見える。

ちなみに赤というのは、暗所視では見ることができない色であるが、錐体細胞がはたつきつづける限り赤として見える。他の色は、とくに短波長側には無色域がある。交通信号などの警告危険信号が赤というのは、この意味で適している。

5. まとめ

今回の「月夜は青い」の理由は、月夜の下での光の強度が弱いことと、私たちの目の視細胞が原因となっている。よって、月が青い光を放射し、景色を照らしているから青いわけではなく、私たちの眼の都合上、青くみえているだけ、なのである。

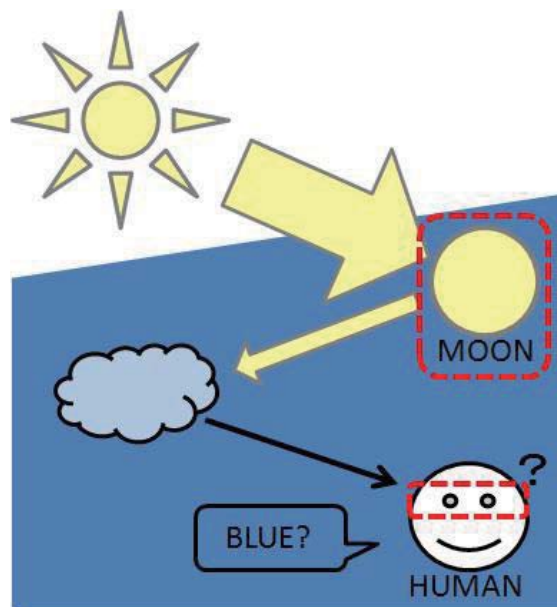


図 10 原因は月と私たちの両者にある

なお、2月7日（土）の夜、京都は晴天でほぼ満月だったので、実際感覚をじっくり確かめてみた。月は白っぽいものの、完全な白ではなく、黄みがかかった白、黄白色に見える。これは月の表面のアルベドの弱い波長依存性によると思うが、暗所視のせいもあるのかもしれない。また、昼間灰色のブロック塀などはやや青みがかって見えるような気がするが、街灯が多く、薄明視にまではなっていないかもしれない。

もう一つ気になったのは、夜空の色である。完全な黒ではなく、どうみても青黒くみえた。8時半過ぎていたので、薄明終わりのターコイズブルーなどの名残ではない。もしかしたら、月光のレイリー散乱もあるのかもしれない。ここらへんは、まだもう少し定量的に調べる必要もあるだろう。

また、西村昌能さんから紹介があったように、黄砂の影響によって太陽や月が青く観察できる現象があるという[5][6]。こちらについては、ぜひ、西村さんに詳しく紹介していただきたいな、と希望していたりする（笑）。

参考文献

- [1] 芝田たける・福江 純(2008)天文教育, **20**, No 1, 25
- [2] 榎 究(2006)『カラーデザインのための色彩学』, 実践女子学園
- [3] 栗野諭美ほか(2001)『宇宙スペクトル博物館<可視光編> 天空からの虹色の便り』, 裳華房
- [4] 金子隆芳(1995)『色の科学』, 朝倉書店
- [5] <http://www.kcat.zaq.ne.jp/aaagq805/meteo/bluemoon.pdf>
- [6] <http://www.kcat.zaq.ne.jp/aaagq805/meteo/kousa/kousa060407.htm>