

連載

天体色彩学入門【3】

色彩学を用いたサイエンスデザイン その3

—連続光天体に拡がりをもたせたときの色—

芝田 たける、福江 純（大阪教育大学大学院）

1. 点源と拡がりをもった天体

本連載の第1回では、色彩科学の基本的なところから sRGB 規格や xy 色度図について説明し、そして前回（第2回）では天体を1点としてみたときの色について調べた結果を紹介した。今回は拡がりをもった天体の色について解析した結果を紹介したい[1][2][3]。

天体は、観測的にその構造が分解できるかどうかという観点から、天体の種別によらずに、構造が分解できない「点源（point source）」と、構造が分解できる「拡がった天体（diffuse source）」とに分けられる。これはもちろん望遠鏡の「空間分解能（spatial resolution）」あるいは「角分解能（angular resolution）」など機器の性能による問題で、小口径の望遠鏡では点源でも大口径だと分解できたり、観測波長でも変わるし、地上観測か衛星観測か、干渉計かどうか、さらに受光器の分解能にも依存する。

かつては、分解できない点源の代表だった星やクエーサーなども、ハッブル宇宙望遠鏡や光学干渉計などで空間的に構造が分解されつつある。たとえば、ハッブル宇宙望遠鏡によって、直接撮像された赤色巨星ベテルギウスは有名だろう。おそらくそれほど知られていない例として、光干渉計によって得られたエリダヌス座 α 星アケルナルの星像を図1に示す[4][5]。アケルナルはB型主系列星だが、300km/s もの速度で高速自転しており、そのために自転軸方向につぶれた回転楕円体にな

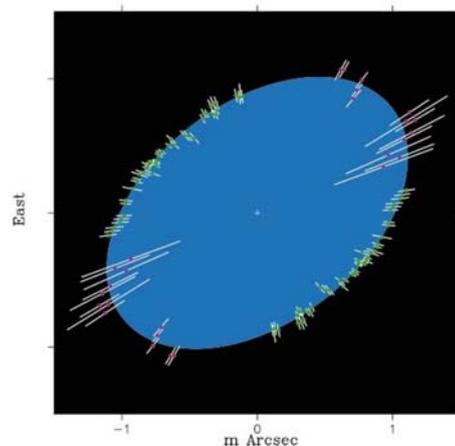


図1 光干渉計によるアケルナルの星像

アケルナルは高速自転によってかなりひしゃげているらしい。

っているようだ(星の極が暗い可能性もある)。

したがって、点源か拡がった天体かという区別は、あくまでも便宜的なものだと考えて欲しい。

さて、点源の色と拡がった天体の色を考えると、点源の場合は天体の各部分から放射された光をすべて足し合わせた光の色をみることになるが、拡がった天体の場合は天体各部分の放射スペクトルの色をみることになる。

拡がりをもった天体の色は、各場所の色を前回の天体を1点としてみたときの色(xy 値、RGB値)と同様の方法で得て、各地点にそれぞれ着色して作成した(図2)。

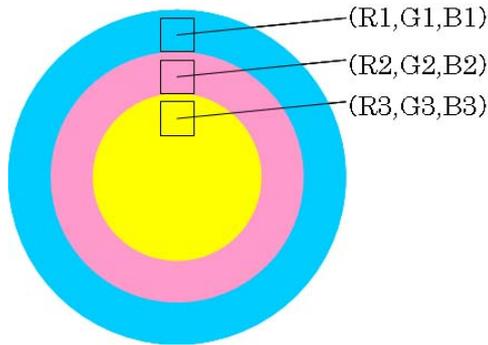


図 2 各場所の色をそれぞれの場所ごとの色を算出して画像にした。

この方法で作成した画像は、普段私たちが目にしている天体の画像の色合いとは大きく異なっていた。今回は太陽と降着円盤の画像について紹介する。

2. 太陽の色

拡がりをもった天体の代表は、もちろん太陽である。ところで“太陽の色”といわれて何色が思い浮かぶのだろうか？ 昼間と夕方では大気の散乱や吸収によって色が違うということもあるが、赤色もしくは橙色と思う方が多いのではないだろうか。たとえば、子どもが描いた太陽の絵は、しばしば真っ赤な太陽になっている。あるいは、インターネット上でよく見かける太陽も赤い色の場合が多い。こういったインターネットの赤（橙）色の画像は、赤外線太陽を撮り、後に画像処理をして赤（橙）色に着色されたものがほとんどだ。これらのことから、太陽は赤（橙）色をしていると思いがちなのではないだろうか。

しかしながら、太陽の表面温度は約 6000K であり、6000K の黒体放射は、黄色というより、ほとんど白に近い。実際、朝日や夕日は別にして、昼間みえる太陽は、ほとんど白である。

また、太陽の画像を作成するときに考慮しなければならないのは、天球に投影した太陽の画像——太陽円盤 (solar disk) ——は、中心部分が明るく外縁部が暗くみえるという

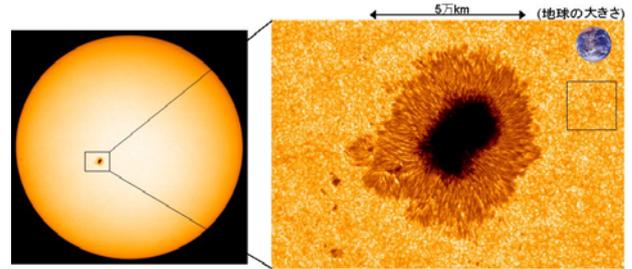


図 3 ひので衛星の撮影した太陽円盤（左）と黒点の拡大画像（右）（画像提供：JAXA）
おそらくフィルターか何かで減光しており、この画像の色も実際の色とは異なるが、周縁減光効果はよく見て取れる。

「周縁減光効果 (limb darkening)」の影響を受けることである (図 3)。

周縁減光効果は、太陽がガス球であることと、太陽の内部ほど温度が高いという理由で生じる現象である。すなわち、太陽円盤の中心では深い部分の温度が高いガスから発した光をみている一方、太陽円盤の周縁付近は浅いところの温度が低いガスから放射された光をみることになる (図 4)。

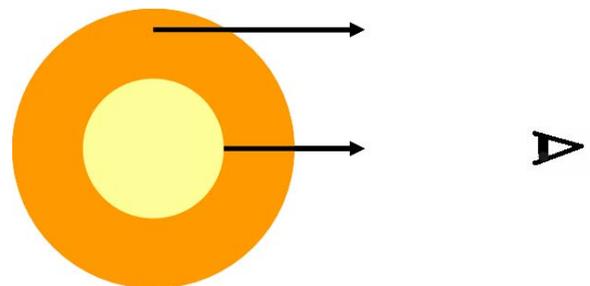


図 4 太陽の周縁減光効果の説明

逆に、完全に一様に輝いている金属球などだと、周縁減光効果は起こらない。それに近いのが月面だ。月面は太陽光線を散乱するだけなので、縁までほとんど同じ強度で明るくみえる。あるいは、周縁減光効果の逆バージョンが、地球大気における、昼間の太陽と夕日の違いだ。天頂付近の大気は光学的厚みが小さいので、太陽光はあまり減光されずに明るくみえる。しかし、地平線方向は大気的光学的厚みが大きくなり、朝日や夕日はかなり

減光され（さらに青色光の散乱を受け）、暗く赤くみえることになる。

ガス体の中を光線が伝播するときの伝わり方を調べる「輻射輸送 (radiative transfer)」の理論によって、太陽大気における周縁減光効果については、簡単な式で表されることがわかっている。すなわち、太陽円盤の中央を 0° 、周縁を 90° とする角度 θ を用いると、太陽面の平均輝度 I_0 と実際の輝度 I の比は、

$$\frac{I}{I_0} = \frac{3}{4} \left(\cos \theta + \frac{2}{3} \right)$$

という簡単な式で表すことができる。グラフにすると図 5 および図 6 のようになる。

ただし、今回、太陽の画像を作成するにあたって、地球から太陽を見たときにある大気吸収は考慮しなかった（太陽はほぼ天頂にあると考えればよい）。そして、周縁減光効果のみを考慮して作成した。また、正確には周縁減光効果は波長に依存するのだが、そこまでは考慮しなかった。

画像を作成する手順を簡単に説明すると、まず太陽のスペクトルは表面温度の黒体放射だと仮定し、場所によって周縁減光効果を受けているとして、等色関数を用いて、太陽円盤各地点の RGB 値を F-BASIC で計算する。

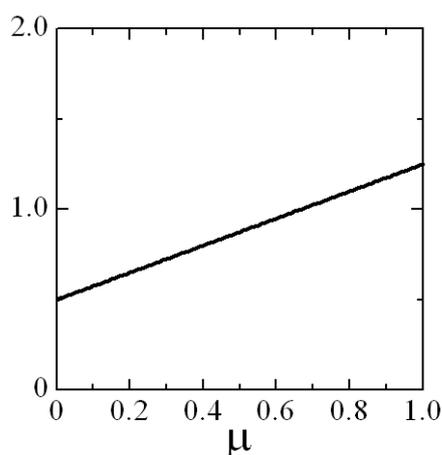


図 5 横軸を $\cos \theta$ とした周縁減光効果のグラフ

この図では右端が太陽円盤の中央で左端が周縁になる。

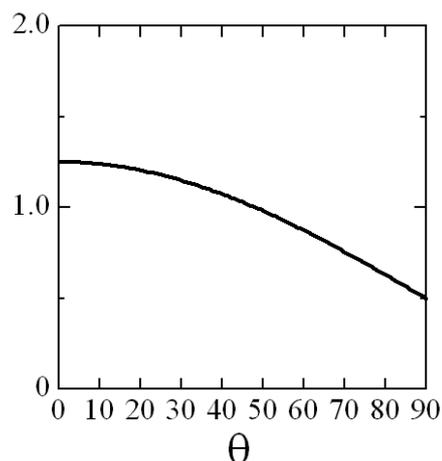


図 6 横軸を θ とした周縁減光効果のグラフ
この図では左端が太陽円盤の中央で右端が周縁。

次に processing [<http://processing.org/>] という画像作成プログラムを使用し、先に得られた RGB 値をもとに画像に着色した。さらに着色した色の境界線をぼかすのに、Adobe Photoshop を用いた。そうして得られた太陽の画像を図 7 に示す。



図 7 周縁減光効果を考慮して作成した太陽の画像

この太陽の画像を作成する際に用いた値は、

太陽の表面温度 = 5780 K

で、計算して得られた RGB 値は、

太陽円盤中央の RGB 値 = (240, 230, 229)

太陽円盤端での RGB 値 = (102, 91, 81)

であった。

今回作成した図 7 の太陽画像は、多くの入

が想像するような赤や橙色をしていない。しかし、これは実は減光フィルターを用いて可視光で撮影した写真とよく似た色合いをしていることが見てわかる（図 8）。

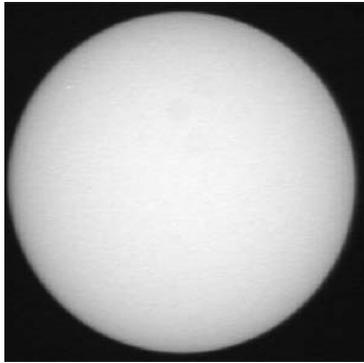


図 8 横浜こども科学館ホームページに掲載されている太陽画像

これは太陽を可視光で撮影したもので、可視光では太陽は白っぽくなる。

(<http://astro.ysc.go.jp/kinoko-sun.html>)

ここで太陽以外の恒星の色についても考えてみたい。

まず、おおいぬ座 α 星シリウスに代表されるような太陽よりも温度の高い A 型星について、太陽画像と同じ要領で計算した結果を図 9 に示す。

表面温度 = 10000K

中央付近の RGB 値 = (201, 215, 255)

周縁付近の RGB 値 = (83, 86, 96)



図 9 表面温度 10000K の恒星の画像

また、さそり座 α 星アンタレスに代表されるような太陽よりも温度の低い M 型星について、太陽画像と同じ要領で計算した結果を図 10 に示す。

表面温度 = 3000K

中央付近の RGB 値 = (235, 175, 112)

周縁付近の RGB 値 = (102, 67, 31)



図 10 表面温度 3000K の恒星の画像

なお、表面温度が 15000K 程度の T 型星（褐色矮星）なども計算してみたのだが、RGB 値などに負の値が出てしまった。おそらく RGB 表現できる範囲外になっているのだと思われる（連載第 2 回：『天文教育』2008 年 3 月号参照）。

3. 青空の色と夕焼けの色

太陽の色がわかれば、次に調べてみたくなるのは空の色ではないだろうか。今回は青空の色と夕焼け空の色について、太陽温度からレイリー散乱について考慮してその色を考えたい[6]。

大気中に入射してきた太陽光は、大部分は大気を素通りするが、その一部は大気中の空気分子や水蒸気や小さな塵（ちり）など、微小な粒子に当たって散乱する。そのとき、雨滴や氷晶のように、粒子のサイズが光の波長よりも十分に大きければ、あらゆる波長の光をまんべんなく散らすので、散乱光には色は着かない。その結果、水滴や氷晶を含む雲は白っぽくみえている。また、埃（ほこり）な

どによる散乱も同じである。

一方、空気分子のように、光の波長よりもはるかに微小な粒子による散乱では、散乱される度合いは波長によって異なることが知られている。そして、そのような散乱を調べたレイリー卿（通称）にちなんで「レイリー散乱 (Rayleigh scattering)」と呼ばれている。そのレイリー散乱の理論によれば、光の散乱量は光の波長の4乗に反比例する。赤い光の波長は青い光の波長の2倍くらいあるのだが、波長の“4乗”に反比例するため、青い光の方が赤い光よりも、約16倍もたくさん散乱されることになるのだ。

このレイリー散乱の結果、散乱の度合いが非常に大きくたくさん散乱された青い光が、（太陽の方向とは異なる）あちこちの方向から到来することになるので、空は青くみえるのである。

この、散乱の強度は波長の4乗に逆比例するというレイリー散乱を利用して、まず青空の色については、太陽温度の波長ごとの強度をから、青空の波長ごとの強度を得た。そして、前回の星の色を求めたときと同様に RGB 値を計算し、その色を Adobe Photoshop で再現した。

一方、夕焼け空の色は、散乱されなかった透過光をみることになるので、青空の波長ごとの強度の値を太陽温度の波長ごとの強度から引くことで、その波長ごとの強度が得られると考えた。そして、その後の作業は青空の色を求めると同じである。

以上のようにして得られた画像を図11に示す。また得られた RGB 値は、

青空の RGB 値 = (147, 183, 255)

夕焼けの RGB 値 = (255, 241, 235)

となった。

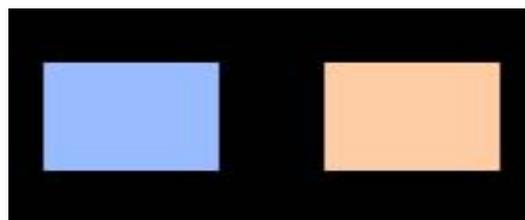


図11 左側の青色が青空の色、右側の橙色が夕焼けの色

4. 降着円盤の色

最後に、連続光を放射している広がった天体の例として、降着円盤の色について紹介する[7][8]。

降着円盤はその中心温度や形態によってかなり違った様相になり、場所によって温度が異なるので、表面温度が一定の星とは違ってやや複雑である。

幸い標準的な降着円盤のモデルでは、表面温度の変化の仕方がわかっている。すなわち、中心近傍のある半径 r_n における表面温度を T_n とすると、一般の半径 r における表面温度 $T(r)$ は半径の関数として、

$$T(r) = T_{in} \left(\frac{r_{in}}{r} \right)^{\frac{3}{4}} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

と表される。

今回は中心温度が 35000K の標準円盤の画像を作成することにした。手順は太陽の画像を作成したときとほぼ同じで、F-BASIC、processing を使用し、画像を得た。今回作成した中心温度 35000K の降着円盤の見え方は図12のようになっている（図13と図14も参照）。

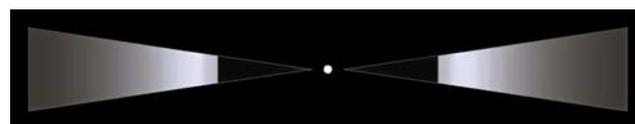


図12 中心温度 35000K の降着円盤の見え方
中心天体（ブラックホール）の近傍は、重力が強すぎて標準円盤は存在できない。

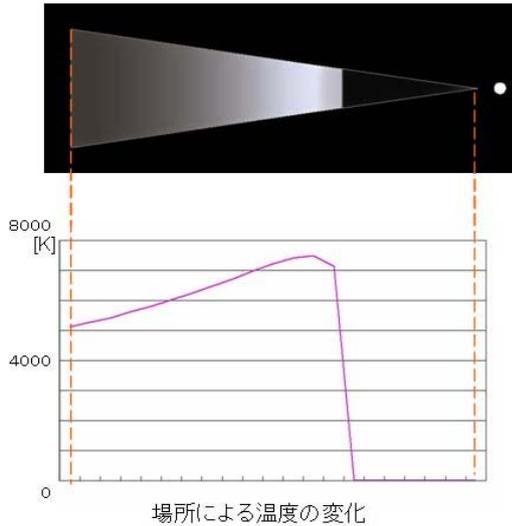


図 13 降着円盤の各場所における温度変化
右側が円盤の中心天体。境界条件のため、 r_{in} で温度が0になる。

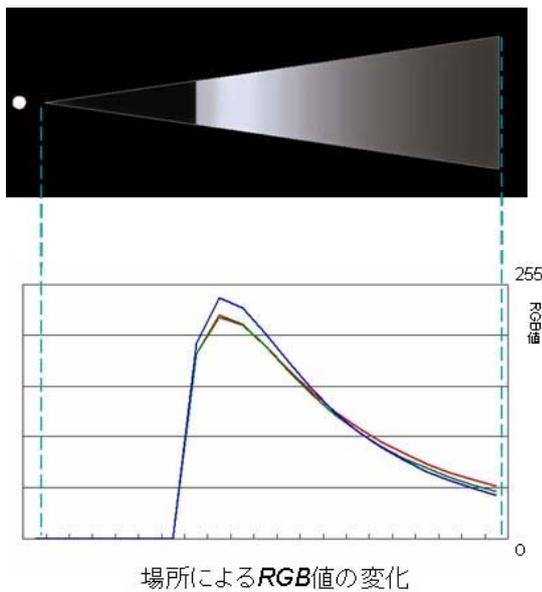


図 14 降着円盤の各場所における RGB 値変化
左側が円盤の中心天体。明るいところでは B (青) が強く、右端に行くにつれて R (赤) が強くなっている。

降着円盤の場合、場所によって温度が変わる。温度が変われば、もちろん対応する色合いも変わるのだが、一方、ステファン-ボルツマンの法則から、放射の強さは温度の4乗に比例するため、温度が変わると明るさも大きく変わる。その結果、色の変化よりもむしろ、明るさの変化の方が目立つ結果になってしまった。

ここで、本論とは別の話だが、長年気になっていることを思い出したので、高校地学におけるステファン-ボルツマンの法則について、一言書いておく。高校地学の教科書では、ずっと昔から現在に至るまで、ステファン-ボルツマンの法則は、

$$E = \sigma T^4$$

と書かれているが、正しくは、

$$F = \sigma T^4$$

と書くべきである。たんなる記号だから、 E でも F でもいいだろうと思うかもしれないが、これは科学的センスの問題なのだ。エネルギー（単位は J）と毎秒流れるエネルギー（単位は $W = J/s$ ）とは物理的に異なる概念だ。そして E は、 $E = mc^2$ などでも有名なように通常はエネルギーに当てられる変数なので、ステファン-ボルツマンの法則で E を用いるのは非常に気持ちの悪いことなのである。閑話休題。

5. まとめ

今回、この研究をもとに得た xy 値や RGB 値から、連続光（とくに黒体放射）を放射する拡がった天体に適用し、定量的に天体の色を表現することができることがわかった。さらにこの考え方は、降着円盤のような理論的な天体にも扱うことができる。

今回は連続光として黒体放射のみを考えたが、熱制動放射やシンクロトン放射あるいはコンプトン散乱など、他のタイプの連続光を放射している天体もある。それらの天体についても計算してみることも可能だろう。ただし、黒体放射はある波長でピークをもつスペクトルなので、なにがしかの色を帯びることがあるが、他のタイプの連続放射はたいていピークのないのっぺりしたスペクトルなの

で、あまり色づかないと予想される。

さらに、今後は輝線を放射する星雲や銀河の色についても考えていきたいと思っている。

天文教育の際には、もちろん見た目にも美しく印象深い画像を作成し、多くの人に天文に興味をもってもらうことも必要だと考えている。しかし、定量的に色合成をしてなるべく人間の目で見たときと同じような色画像を作成し使用することも、科学的な見地からは重要なことではないかと、われわれは考えている。

参考文献

- [1] 福江 純、2004、『最新天文小事典』、東京書籍
- [2] 日本規格協会、2006、『JIS ハンドブック 2006 61 色彩』、日本規格協会
- [3] The International Color Consortium
2007年10月1日、<http://www.color.org/>
- [4] Domiciano, A. *et al.*, 2003, *A&A* **407**, L47
- [5] 福江 純編、2005、『宇宙旅行ガイド』、丸善

[6] 柴田清孝、2005、『光の気象学』、朝倉書店

[7] 福江 純、2007、『輝くブラックホール降着円盤』、プレアデス出版

[8] Kato, S., Fukue, J., Mineshige, S., 2008, “Black-Hole Accretion Disks - Towards a New Paradigm”, Kyoto University Press

[9] Lacour, S., 2008, astro-ph 0804.0192v1

芝田 たける

j079335@ex.osaka-kyoiku.ac.jp

福江 純

fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

6. おまけ

本文の推敲をだいたい終えた日に、奇しくも、奇しくも、光干渉計でアークトゥルス星の周縁減光効果を観測したという論文が、astro-ph に投稿された[9]。結果の図だけ追加しておく（図 15）。

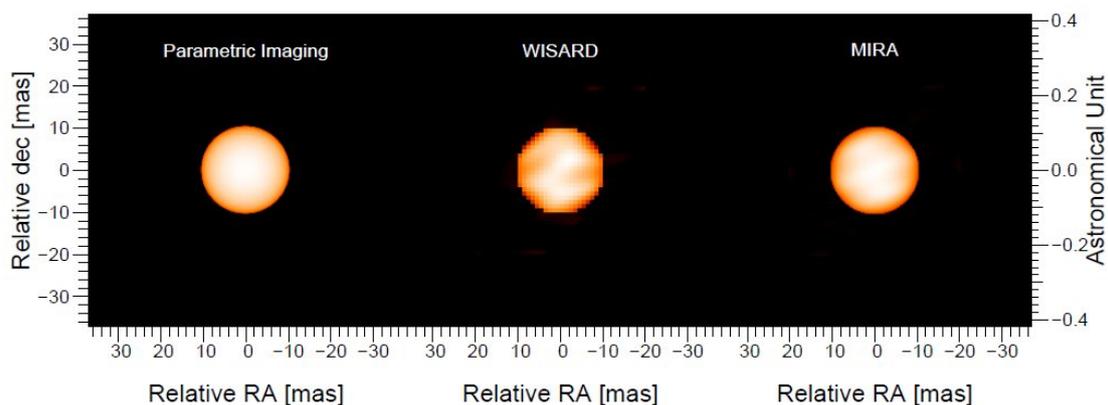


図 15 光干渉計によるアークトゥルス星の星像。いくつかの異なる処理で得られている。

編集部註：カラー画像を掲載した原稿を『天文教育』の Web サイトに掲載してあります。

<http://tenkyo.net/kaiho/kaiho92.html>