

# 天体色彩学を用いたサイエンスデザイン

芝田 たける, 福江 純\*

〈大阪教育大学天文学研究室 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘 4-698-1〉

e-mail: tssdcolor2006@gmail.com

\*e-mail: fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

色の認識は、物理的・生理的・心理的プロセスがからんだ複雑なもので、色を客観的に表現するのは簡単ではない。こういった感覚的な色を理論的に数値化して考えるのが色彩科学である。天体カラー画像は作成者の主観で色づけされていることが多く、誤解を招くことも少なくない。われわれは、国際照明委員会 CIE の策定した RGB/XYZ 表色系と xy 色度図を天体の色へ応用した「天体色彩学」を用いて、星に代表される連続光天体や星雲に代表される輝線天体の正確な色を再現することを試みているので、その結果の一部を紹介する。これらの手法は、天文学（科学）の研究成果を科学的かつ芸術的に表現する「サイエンスデザイン」の一助となるだろう。

## 1. 天体カラー画像と本当の色

天文学の教育普及や研究現場で、天体カラー画像やカラーシミュレーション画像は、視覚的に理解を深めることができる素材として重要な役割を果たしている。実際、電波・赤外線・可視光・紫外線・X線・ガンマ線などさまざまな波長域で撮像されたカラー画像が、学校や科学館、プラネタリウム、専門家による講演会など、教育普及現場ではよく使われている。しかし、これらのカラー画像を使用あるいは鑑賞する際には、注意が必要である。それは画像の色合いだ。

可視光以外の画像やシミュレーション画像は、本来ならば見えないものを強度などの情報で画像作成者が恣意的に着色している。したがって同じ天体でも人によって画像着色の仕方が違うため、その天体の印象を変えているものが多くある。しかし実は、可視光で撮像された画像についても状況は変わらない。その極端な例としてキャッツアイ星雲 (NGC6543) がある。

キャッツアイ星雲はハッブル宇宙望遠鏡 HST

の画像で有名になり、現在は学校教育で使う教科書にも広く紹介されている (図 1)。しかし、この画像の説明をハッブル宇宙望遠鏡のサイトで読んでみると、波長 656.3 nm の H $\alpha$  輝線を赤、波長

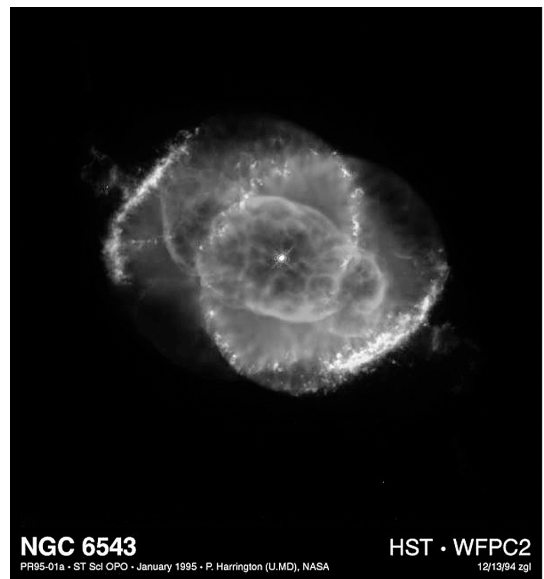


図 1 HST のキャッツアイ星雲 (NASA).



ときに不便なこともある。また実際には、感覚的な3原色 RGB だけでは表せない色も存在する。

### 2.2 XYZ 表色系

そこで器械による測色や表色や目の波長感度特性などを詳しく調べて考え出されたのが「XYZ 表色系 (XYZ color space)」である。現在の XYZ 表色系は、CIE が 1931 年に策定した国際表示法で、CIE-XYZ 表色系ともいう。また XYZ 表色系の等色関数  $xyz$  は、RGB 表色系の等色関数から変換して得られる (図 3)。

図 3 からわかるように、XYZ 表色系の等色関数は、すべて正の値になっている。ただし、RGB では表せないような色も表現するシステムなので、赤が 2 山のピークをもつなど、少し変わった形になっている。

入射光の放射強度を  $I(\lambda)$  とすると、光源色の XYZ 刺激値は、放射強度  $I$  を XYZ 表色系の等色関数  $xyz$  でたたみ込み積分して得られる。

$$X = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

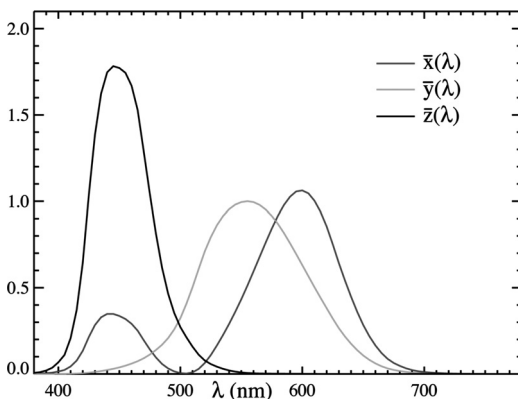


図 3 XYZ 表色系の等色関数。左の高いピークが青 X, 中央が緑 Y, 左の低いピークと右が赤 Z の関数。等色関数はすべて正の値をとっている。

$$Z = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

実用的には、放射強度  $P_\lambda$  と等色関数  $xyz$  を、共に細かい波長刻みで離散的に与えておいて、それらの積の和として、3 刺激値 XYZ を得る。

$$X = k \sum_{\lambda} P_{\lambda} \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Y = k \sum_{\lambda} P_{\lambda} \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Z = k \sum_{\lambda} P_{\lambda} \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda$$

ただしここで、和記号の前の  $k$  は正規化のための定数である。

なお、RGB 値から XYZ 値への変換は、次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{2}{0.17697} \begin{bmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.20 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

### 2.3 xy 色度図

また、色には色相・彩度・明度という 3 属性があるが、光源色の明度は可変的なため、光源色を色相と彩度 (飽和度) のみの属性で表すこともある。XYZ 表色系において、明度を犠牲にし、3 次元の XYZ 色空間を 2 次元の xy 色平面に落としたものが「xy 色度図 (xy color diagram)」である (図 4)。この xy 色度図も、1931 年に CIE が策定したもので、CIE システムとか CIE 色度図ともいう。

この xy 色度図では、XYZ 表色系の 3 刺激値 XYZ の比率と同じ比率の  $xyz$  (ただし  $x+y+z=1$  とする) で表す。

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y$$

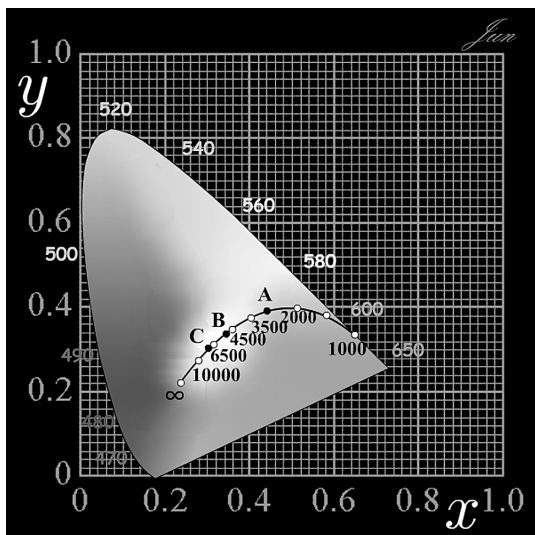


図4 xy 色度図と色温度軌跡. 色のついている領域の外側の軌跡をスペクトル軌跡, 底辺部の直線を赤紫線(純紫軌跡)という. 原図では左方が青, 上部が緑, 右方が赤の領域になっている.

この xy 色度図上で周囲の釣鐘状の曲線を描いている軌跡を「スペクトル軌跡」といい, その名のおりスペクトルの xy 値を連続して曲線で示したものになる. 底辺部の直線は「赤紫線/純紫軌跡」という. また, いろいろな温度の黒体放射の xy 値を xy 色度図にプロットすると, 図4に描いたような滑らかな曲線になるが, これを「色温度軌跡 (Planckian locus)」という. 色温度軌跡を見

るとわかるように, 黒体放射の色値は, 比較的低温ではほぼ純色の赤だが, 温度が高くなるにつれて, 橙から黄味がかっていき, 5,000 K から 8,000 K ぐらいではほぼ白に近い. そして, もっと温度が上がると少し青みがかかるが, 無限大の温度になってもそれほど先には進まない. 参考までに具体的な値を表1に示しておく.

#### 2.4 sRGB 表色系

さて, これらの色を再現するためのパソコンディスプレイなどは, 色を RGB 値に分け, 肉眼では識別可能な限界である 1,677 万 7,216 色の表現が可能になっている. しかし過去には, 数値が同じであっても, 表示する機器が異なると, 色が違って見えてしまうという問題があった.

そこでさまざまな機器の色再現域を統一する目的で, 「標準色空間 sRGB (standard RGB)」という規格が考え出された (図5). sRGB 規格は 1996 年に Hewlett-Packard と Microsoft が共同で考案し, 1999 年に国際電気標準会議の色空間国際規格に採用された. 一般的なモニターなどは, この規格に準拠しているため, 現在では機器が違っててもほぼ同じ色を得られるようになっている. XYZ 値などから sRGB 値への変換は, 詳しくは参考文献の 1 や 2 を参照していただきたい.

ただし, RGB と同様, sRGB 領域が示せる色というのは, xy 色度図上の限られた領域である. つまり, sRGB 領域はスペクトル軌跡の内側にあ

表1 さまざまな温度の黒体放射の色値.

温度 [K]	X	Y	Z	x	y	R	G	B
1,000	2.34E-02	1.24E-02	1.00E-04	0.652725	0.344486	255	29	-153
3,000	150263	138965	54672.1	0.436939	0.404085	255	184	111
5,000	4.14E+06	4.22E+06	3.64E+06	0.345121	0.351648	255	230	208
7,000	1.83E+07	1.89E+07	2.25E+07	0.306401	0.316576	244	242	255
10,000	5.94E+07	6.10E+07	9.11E+07	0.280666	0.288373	205	218	255
30,000	5.62E+08	5.59E+08	1.13E+09	0.250108	0.248913	163	188	255
100,000	2.66E+09	2.61E+09	5.69E+09	0.242621	0.238159	154	181	255

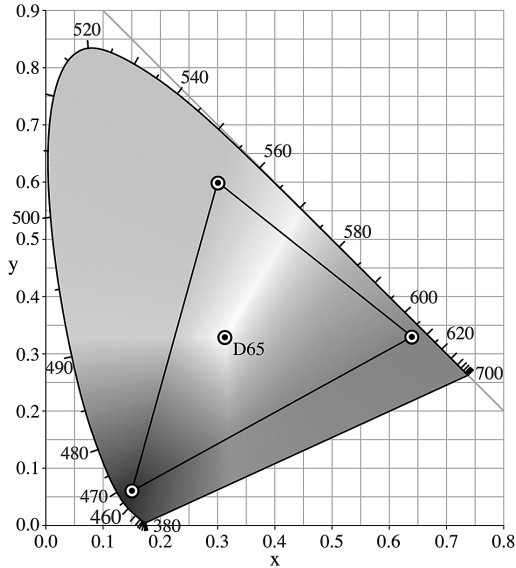


図5  $xy$  色度図上の sRGB 領域 (三角形部分)。

り、領域外の色は表現することができない。したがって、パソコンのディスプレイ上で“本物のスペクトルの色”を表現することは、原理的に不可能である。

こういった注意点もあるが、この色彩科学の理論を用いて天体の色について考えることができる。以下では色彩科学の手法を天体に応用した「天体色彩学 (astronomical chromology)」を用いて、科学的に導出した天体の色を紹介する。

### 3. 恒星の色—連続光天体

まず、実際の恒星のスペクトルデータを用いて、恒星の色の  $xy$  値と  $RGB$  値を計算し、恒星の色について定量的に求めてみよう。

具体的な恒星のスペクトルデータについては、今回は The Indo-U.S. Library of Coudé Feed Stellar Spectra (NOAO) で公開されているものから、いくつかの恒星のデータをテキスト形式でダウンロードした。先に述べた手順で具体的に計算した結果を表2に示す（詳しくは参考文献3を参照して欲しい）。

また現在では、従来は点源として分解できなかった恒星も、空間分解できつつある。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見ることになるが、広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見ることになる。広がりをもった連続光天体の代表例として、まずは太陽について考えてみた。

われわれが「太陽の色」といって思い浮かべる色は何色だろうか。現在使われている太陽画像のほとんどが赤や黄で描かれているため、赤や黄と思っている人が多いのではないだろうか。

もちろん、同じ太陽でも朝日と夕日は赤や橙、黄といった色をしているように見えるが、これは太陽光が空気分子によって散乱されて残った長波長の光だけが届くからである。しかし昼間の太陽の色は赤でも黄でもなく、白っぽい色をしている。実際、可視光全域で光量を下げる ND フィルターを通して太陽を見ても、赤や黄には見えず、やはり白っぽく見える。これは個人差もあるのだが一般的に人間の視細胞が昼光を白色に感じるようにできているためである。よって「太陽の色は何色か」と聞かれたときは「白っぽい色」と答えるべきである。

表2 1等星 (NOAO) の XYZ 値,  $xy$  値, RGB 値。

固有名	有効温度 [K]	X	Y	Z	x	y	R	G	B
Betelgeuse	3,540	2,722	2,629	1,079	0.4234	0.4088	255	199	124
Aldebaran	3,850	2,654	2,601	1,458	0.3954	0.3875	255	208	154
Regulus	15,400	2,627	2,644	4,829	0.2601	0.2618	180	199	255
Spica	18,500	2,767	2,707	5,826	0.2449	0.2396	161	184	255



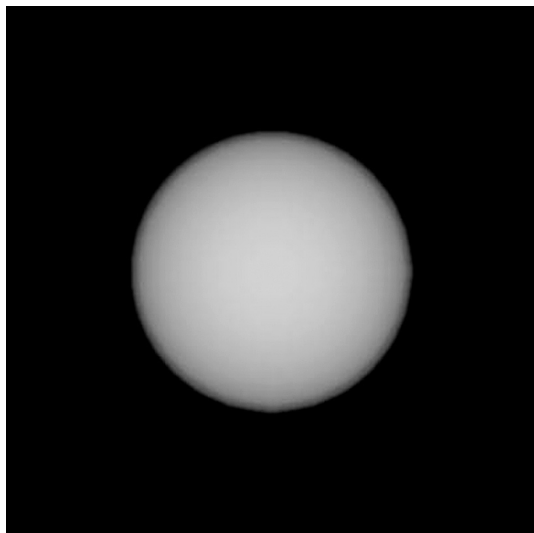


図6 太陽の“カラー画像”。ほんのりピンクがかったぐらいで、ほとんど色は付かない。太陽面の中央部に比べて周縁は暗く見える。

実際に周縁減光効果などを考慮して太陽面の色を計算すると図6のようになる（詳しくは参考文献4を参照）。

この画像を作成する際に用いた値は、太陽の表面温度=5,780 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)

である。中央・端ともに数値的に見ると $R > G > B$ となっているので、数値的には赤み・黄みがかっている。しかし、実際にこの値をパソコンなどで再現すると、むしろ白に近い。

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 $\alpha$ 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は、

表面温度=10,000 K

中央付近のRGB値=(201, 215, 255)

周縁付近のRGB値=(83, 86, 96)

となった。また、さそり座 $\alpha$ 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

いては、

表面温度=3,000 K

中央付近のRGB値=(235, 175, 112)

周縁付近のRGB値=(102, 67, 31)

となった。

なお、表面温度が1,500 K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。

#### 4. 星雲の色—輝線天体

続いて、まだ解析途上だが、輝線天体についてサイエンスデザインした画像を紹介する。ここでは輝線天体の代表としてM57こと座リング星雲を例に考える。

こと座のリング星雲は学校の教科書にもよく紹介されている。そのときよく使われる画像は、やはりHSTが撮像した画像である（図7）。

HSTのホームページにはこの画像は、波長658

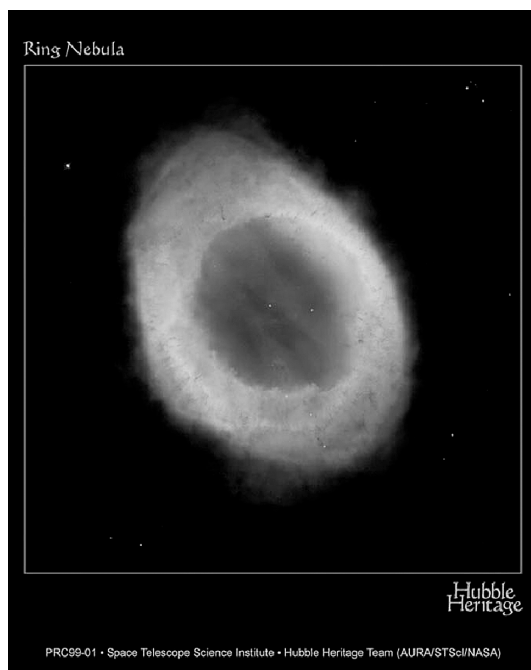


図7 ハッブル宇宙望遠鏡のM57 (NASA)。

表3 波長ごとのRGB値.

波長	RGB値
465	(0, 85, 255)
468~510	(0, 255, 255)
530	(0, 255, 217)
550	(0, 255, 0)
570	(250, 255, 0)
590	(255, 125, 0)
620~740	(255, 0, 0)

nm の [N II] 輝線を (255, 0, 0), 波長 500 nm の [O III] 輝線を (0, 255, 0), 波長 469 nm の [He II] 輝線を (0, 0, 255) とし、画像を作成したと紹介している。もちろんこれも冒頭のキャッツアイ星雲と同じように、星雲の構造をわかりやすく、そして美しく表現するためにこのような色づけをしている。しかし、教科書などには着色の説明がなく、画像だけが載せられている場合が多い。

今回はこういった輝線星雲をサイエンスデザインに基づいて、なるべく見た目に近い色合いに着色した画像を作成した。

画像の作成方法を紹介する前に一つ注意すべきことがある。輝線星雲は名前のおり数種類の輝線を出していることから、可視光域内のスペクトルに対する RGB 値を知る必要があるのだが、2節で述べたとおり、現在の sRGB 規格ではスペクトルの色を表現することができない。そこで今回は波長ごとの近似的な RGB 値を算出した(表3)。

可視光域が 380-780 nm なのに対し、sRGB 規格で表現できる波長域は、計算によると 465-740 nm となる。また輝線星雲で出す主な輝線である 486 nm の Hβ 線は青緑色 (0, 255, 255) で、501 nm の O III 線も青緑色 (0, 255, 255)、656 nm の Hα 線は赤色 (255, 0, 0) となることがわかった。

それでは輝線星雲の画像を作成する方法を M57 を例として紹介する。まず撮る星雲のスペクトルデータを入手する。そしてデータより目立つ輝線をいくつか選択し、その輝線を波長域とする狭帯域フェイルターで撮像する。M57 の場合は図

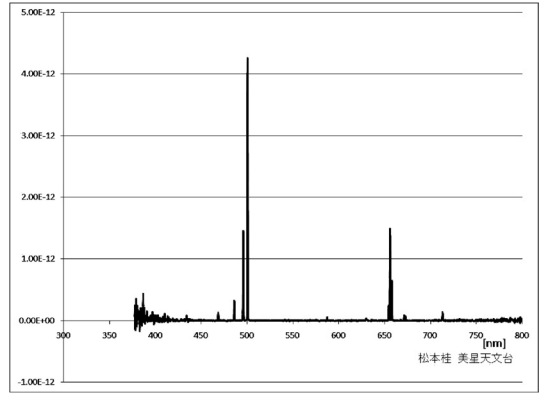


図8 M57のスペクトルデータ(美星天文台).

8からわかるように 500 nm と 656 nm 付近にピークがあるので、O III 線フィルターと Hα 線フィルターで撮像を行った(解析中)。

つづいて、それぞれのフィルターで撮像した画像に着色する色を決める。500 nm は (0, 255, 255)、656 nm は (255, 0, 0) であるが、500 nm と

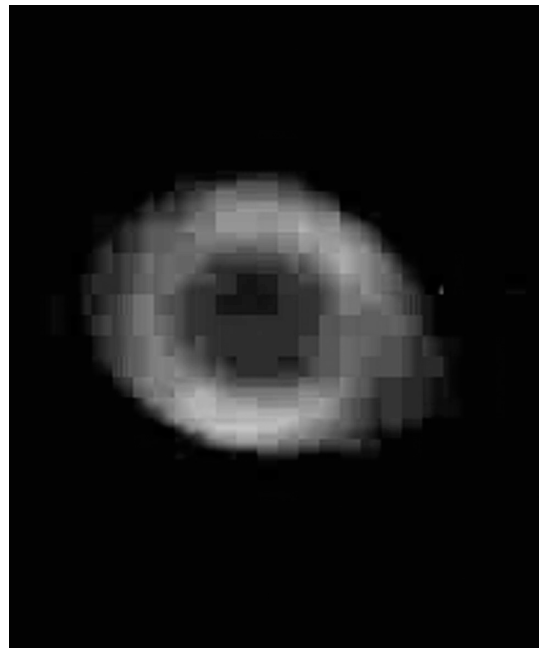


図9 サイエンスデザインされたM57画像。印刷が白黒であることを考慮して今回は明度を高くしてあるが、実際の画像はもっと暗い。

656 nmの波長では強度がおよそ2:1である(図8).  
よって 500 nm は (0, 255, 255) を, 656 nm は (125, 0, 0) で着色した.

そして最後に, 星雲のそばに写っている星を頼りにそれぞれの画像を合成する. M57 の合成後の画像は図9 のようになる.

輪の内側の明るい部分は (9, 14, 17), 輪の外側の明るい部分は (25, 9, 6) となった. 画像自体はたいへん暗くわかりづらいものとなったが, 実際に M57 を望遠鏡でのぞいたときに見える色合いと似た天体の姿になったのではないだろうか.

## 5. 今後の課題

本稿では, 肉眼では天体がどのように見えるかということを知るために, できるだけ定量的・科学的に天体の色を算出する方法や画像の作成方法を紹介してきた.

天体色彩学に基づいた天体カラー画像の重要性を主張しているからといって, HST のキャッツアイ星雲のような美しい天体画像を教育普及活動において使用してはいけないと考えているわけではない. そうではなく, 美しい天体画像も有効だと考えている. なぜならば, こういった画像の美しさにひかれることも, 天文学に興味をもつきっかけの一つとしてありうるからだ. ただし, 美しい天体画像を使って教育普及活動を行う際には, その画像がなぜそのような色合いをしているのか, また肉眼ではどのように見えるのかということ, 教育普及する立場の人間は知っておくべきだし, 必要に応じて説明すべきだろう. またそのときには今回紹介したような定量的な表現した画像があれば, 誤解を生むことなくその天体について興味がいっそう増すのではないだろうか.

今後の課題として, 以下の三つのことがあると考えている. まずは1等星のスペクトルデータを

そろえて, 1等星の色のリストを作成する必要があると考えている. 次にスペクトルのように sRGB 領域では原理的に再現できない色をどう表現するかという問題がある. 今の段階ではどうしても sRGB 領域範囲外の色は近似値でしか表すことができない. しかしこれは情報機器の色再現領域が発展すれば, いずれは解消される問題だと考えている. そして三つ目にバリアフリーの問題がある. 2節で述べたとおり「色」の認識にはさまざまな条件が影響してくるため, 人によっては見えにくい画像が作成されることもある. しかしこれについては色彩学を応用すれば, 見え方の個性に合わせた天体画像を作成することも可能になると考えている.

最後に, 教育普及の場ではさまざまな方法で天文学を伝えることができ, その中でも視覚的教材として天体カラー画像を使用する機会が多々あるだろう. そのときには天文学(科学)の研究成果を科学的かつ芸術的に表現する「サイエンスデザイン」に則った説明を行うよう提唱したい.

## 参考文献

- 1) The International Color Consortium, 2007, <http://www.color.org/>
- 2) 芝田たける, 福江 純, 2008, 天文教育 20(1), 25
- 3) 芝田たける, 福江 純, 2008, 天文教育 20(2), 15
- 4) 芝田たける, 福江 純, 2008, 天文教育 20(3), 38
- 5) 金子隆芳, 1988, 『色彩の科学』岩波書店
- 6) 金子隆芳, 1990, 『色彩の心理学』岩波書店
- 7) 日本規格協会, 2006, 『JISハンドブック 2006 61 色彩』, 日本規格協会
- 8) 粟野諭美, 田島由起子, 田鍋和仁, 乗本祐慈, 福江 純, 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
- 9) 福江 純, 2007, 『光と色の宇宙』京都大学学術出版会
- 10) 福江 純, 粟野諭美, 田島由紀子, 2008, 『カラー図解でわかる光と色のしくみ』ソフトバンククリエイティブ