

色彩学を用いたサイエンスデザイン その2

—連続光天体を点源として見たときの色—

芝田 たける、福江 純（大阪教育大学大学院）

1. 承前：xy色度図上のsRGB領域

前回は、色彩科学の基本的なところから xy 色度図、sRGB 規格について紹介した。パソコンのディスプレイに色を表示するとき他の機器との互換性をもつための規格を sRGB 規格とあったが、この sRGB を xy 色度図の上で表すと図 1 のような三角形の領域になる。またこの xy 色度図に表した sRGB 領域で、パソコンのディスプレイが表示する R (赤)・G (緑)・B (青) はそれぞれ三角形の頂点の位置にあたる。また、同様に C (シアン)・Y (イエロー)・M (マゼンタ) はそれぞれ三角形をつくる辺上にある。さらに、補色関係にある R と C、G と M、B と Y を結ぶ交点に W (ホワイト) が位置する。

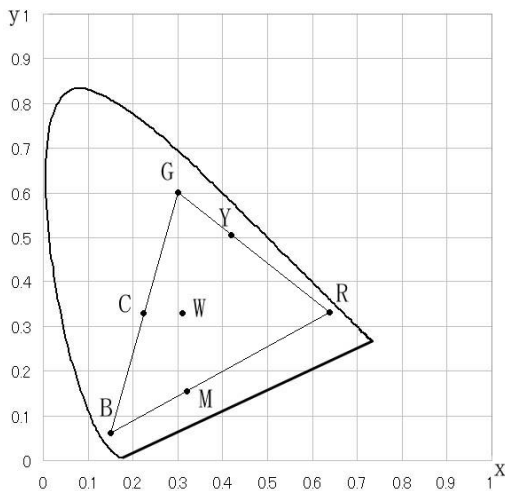


図1 sRGB上のRGBとCYMの位置
Wは白の位置を表す。

表1 基本色のXYZ値、xy値、RGB値

色	XYZ 値	xy 値	RGB 値
W (白)	0.9505	0.3127 0.3290	255
	1		255
	1.089		255
BK (黒)	0		0
	0		0
	0		0
R (赤)	0.4124	0.6401 0.3300	255
	0.2126		0
	0.0193		0
G (緑)	0.3576	0.3 0.6	0
	0.7152		255
	0.1192		0
B (青)	0.1805	0.1500 0.0600	0
	0.0722		0
	0.9505		255
C (青緑)	0.5381	0.2247 0.3287	0
	0.7874		255
	1.0697		255
M (赤紫)	0.5929	0.3209 0.1542	255
	0.2848		0
	0.9698		255
Y (黄)	0.77	0.4193 0.5053	255
	0.9278		255
	0.1385		0

参考までにいくつかの特定点の色値を表 1 に示しておく。表 1 の RGB 値を見ると、R

と C、G と M、B と Y を足すと W になる（補色関係）ことがよくわかる。

さて、いわゆる XYZ 表色系では xy 色度図上のさまざまな色が表現できるのだが、さらに、この三角形の領域内の色は sRGB で表現できる、言い換えればパソコンのディスプレイで表せることを意味する。逆に、この三角形の領域外の色は、XYZ 表色系では表現できても、パソコンのディスプレイでは表現できない。たとえば、xy 色度図の境界の曲線は、単色光（純色）を表す曲線だが、どんなに頑張っても、sRGB 表色系では純色を再現できないことになる。

以上のような XYZ 表色系と RGB 表色系の包含関係を考えると、星のような連続光を発する天体は、以下述べるように、黒体放射に近い混合色なので、sRGB 表色系でほぼ正しく色表現ができる。しかし、星雲のような輝線天体でかつ広がっていて空間分解できる天体の場合、部分的に純色になっていたりすると、sRGB 表色系では正しく色表現できないだろうと推測される。

輝線天体については、現在まだ研究中だが、今回と次回では、連続光（混合色）を発する天体について、空間分解できない点源の場合（天体全体の色情報を同時に受ける）と、空間分解できる広がった天体の場合（場所ごとの色情報を測定できる）にわけて、天体の定量的な色表現について考えてみたい。

2. 黒体放射と色温度軌跡

星の光はおおざっぱには星の表面温度のガスから放射される「黒体放射（blackbody radiation）」に近い（恒星大気での吸収などがあるため、完全な黒体放射ではない）。また高密度天体周辺の降着円盤からの光は、さまざまな温度の黒体放射を足し合わせた「円盤黒体放射（disk blackbody）」と呼ばれるもので近似される（降着円盤の場合も、吸収線や輝線、さらに電子散乱などのため、黒体放射からは、少しずれてくる）。そこで、まず、純粋の黒体放射の xy 値を計算してみよう。

具体的には、前回紹介した XYZ 値を計算する(1)式の $P(\lambda)$ に、黒体放射の式（プランクの式 $B(\lambda)$ ）——(2)式——を代入すれば、さまざまな温度の黒体放射の XYZ 値が得られる。

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

$$Y = k \sum_{\lambda} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \tag{1}$$

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

$$B_{\lambda}(T) d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \tag{2}$$

ここで T は黒体温度、 λ は波長、 h はプランク定数、 c は光速、 k はボルツマン定数である。

さまざまな温度の黒体放射の色値を表 2 に、xy 色度図上での位置を図 2 に示す。

表 2 さまざまな温度の黒体放射の XYZ 値、xy 値、RGB 値
1000K のときは sRGB 領域からはみ出るため、B の値が負になる。

温度[K]	X	Y	Z	x	y	R	G	B
1000	2.34E-02	1.24E-02	1.00E-04	0.652725	0.344486	255	29	-153
3000	150263	138965	54672.1	0.436939	0.404085	255	184	111
5000	4.14E+06	4.22E+06	3.64E+06	0.345121	0.351648	255	230	208
7000	1.83E+07	1.89E+07	2.25E+07	0.306401	0.316576	244	242	255
10000	5.94E+07	6.10E+07	9.11E+07	0.280666	0.288373	205	218	255
30000	5.62E+08	5.59E+08	1.13E+09	0.250108	0.248913	163	188	255
100000	2.66E+09	2.61E+09	5.69E+09	0.242621	0.238159	154	181	255

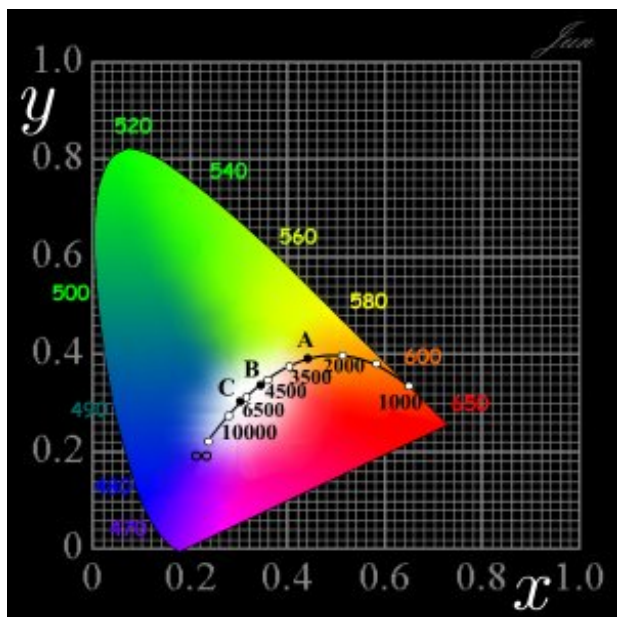


図2 xy 色度図の上の色温度軌跡[2]

この色温度軌跡の上で、点Aはタングステン電球の光（色温度 2865K）、点Bは太陽の光、点Cは青空からの光（色温度 6774K）で、これらの光は国際照明委員会 CIE が標準の光として定めたものである。

さて、いろいろな温度の黒体放射の xy 値を計算して、それを xy 色度図にプロットすると、図2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。図2の色温度軌跡をみるとわかるように、黒体放射の色値は、比較的低温ではほぼ純色の赤Rだが、温度が高くなるにつれて、橙から黄味がかっていき、5000Kから8000K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。

国際照明委員会（CIE：International Commission on Illumination）の xy 色度図では、6500 K の黒体放射の色を“白”と定義している。この“白”の xy 値は、

$$W(x,y) = (0.3127, 0.3290)$$

である（表1参照）。

ただ、ここで注意をしたいのは、ある温度の黒体放射は色温度軌跡の上に乗るが、その

逆は必ずしも成り立たないという点だ。すなわち、一般の光源は黒体放射をしているわけではないが、スペクトルから計算した xy 値が色温度軌跡の上に乗ってしまうことはあるだろう。しかし、色温度軌跡の上に乗ったからといって、その点に対応する黒体放射をしているとは限らないということである。その意味では、生のスペクトルデータに比べると、色値の情報は相当に縮退していることを注意しておく（具体的には、スペクトルデータが380~780nmの間を1nmごとに得られていたとしたら、 xy 値にした段階で、情報量は約200分の1に減っている）。

3. 星の xy 値

これまでは色彩科学の内容について大まかに説明してきた。さて、ここからはいよいよ、この色彩科学を用いた天体色彩表現について、とくに xy 値、RGB 値を中心に考えていきたい。

まず、実際の星のスペクトルデータを用いて、星の xy 値と RGB 値を計算し、星の色について定量的に知ることができる内容を紹介しよう。

具体的な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、いくつかの星のデータをテキスト形式でダウンロードした。もとのデータは波長が 0.04nm ごとになっているが、一方の色度座標の計算に用いる等色関数は 1nm ごとで与えられている。よって、等色関数のデータを Excel で 0.04nm ごとのデータに変換し、0.04nm ごとの等色関数の値に換算して使用した。

用いた NOAO データの一例について図3~図5に示す。

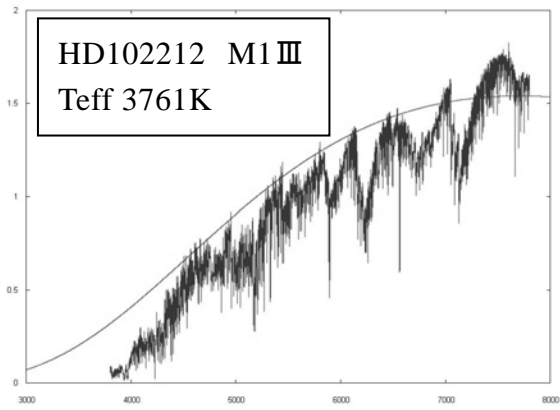


図 3 星 (HD102212) のスペクトルデータと星の有効温度 3761K の黒体放射の波長ごとの強度を表したグラフ

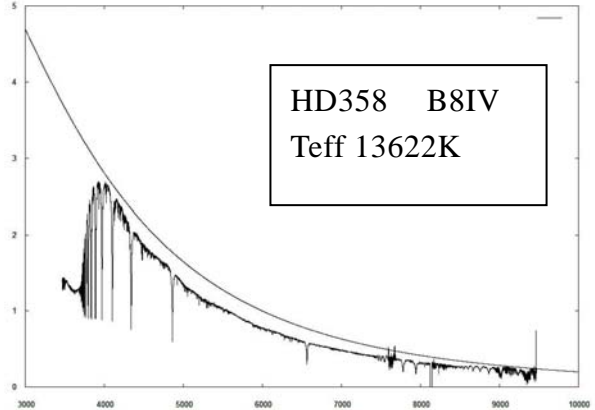


図 5 星 (HD358) のスペクトルデータと星の有効温度 13622K の黒体放射の波長ごとの強度を表したグラフ

黒体放射と異なり、スペクトルデータには輝線や暗線がある。

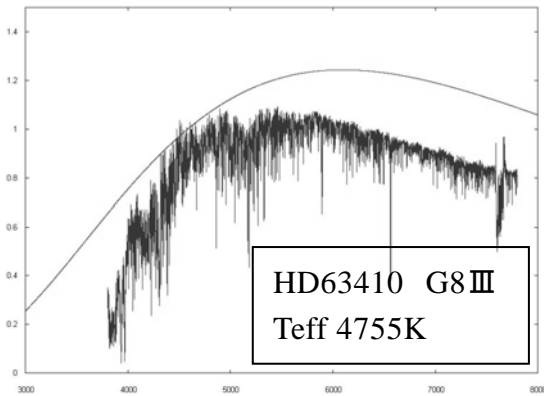


図 4 星 (HD63410) のスペクトルデータと星の有効温度 4755K の黒体放射の波長ごとの強度を表したグラフ

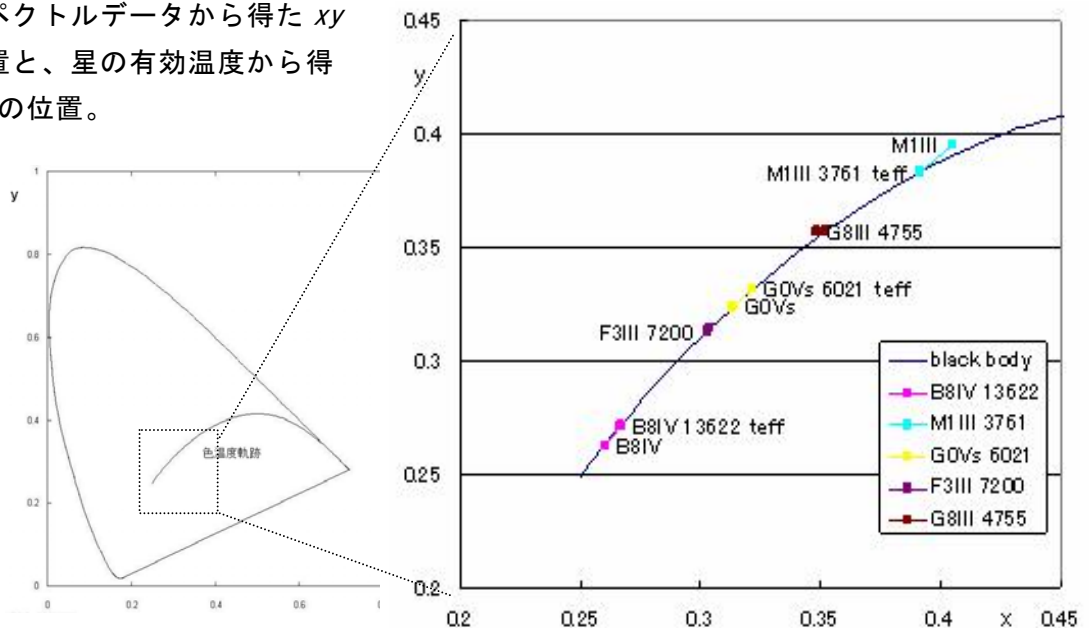
このようなデータを式(1)の P_λ に入れると、星の XYZ 値が得られる。

具体的には、F-BASIC を用いて、星のスペクトルデータと等色関数から XYZ 値、 xy 値、 RGB 値などを計算するプログラムを組んで算出した。また、一方、星の有効温度と同じ温度をもつ黒体放射の xy 値も算出した。

NOAO で公開されているいくつかの星について、実際のスペクトルデータから計算し

図 6 xy 色度図

実際の星のスペクトルデータから得た xy 色度図上の位置と、星の有効温度から得た xy 色度図上の位置。



た xy 値と、有効温度から黒体放射として計算した xy 値を図 6 に示す。

図 6 からわかるようにそれぞれの xy 値は、比較的近い値にはなっているが、多少のずれが見られることがわかった。このずれの原因は、実際の星のスペクトルには、黒体放射と異なり、輝線や暗線が存在するため、その影響によるものだと考えられる。たとえば、図 5 および図 6 の B8IV で表されている HD358

(B 型 IV) のような高温の早期型星では、364.6nm のバルマー端より短波長側で吸収が強いことが影響しているだろう。

興味深い点は、実際のスペクトルは黒体放射とずれているにもかかわらず、ほぼ色温度軌跡の上に乗ったことである。

また一般によく知られているような一等星は、NOAO では数個しかデータが公開されていないため、一等星のデータを取得するにあたっては藤井貢氏にもご協力いただき、そのデータからも星の xy 値を得ることにした。ただし、色彩科学で波長ごとのデータを扱う際には 380~780nm の波長範囲でのデー

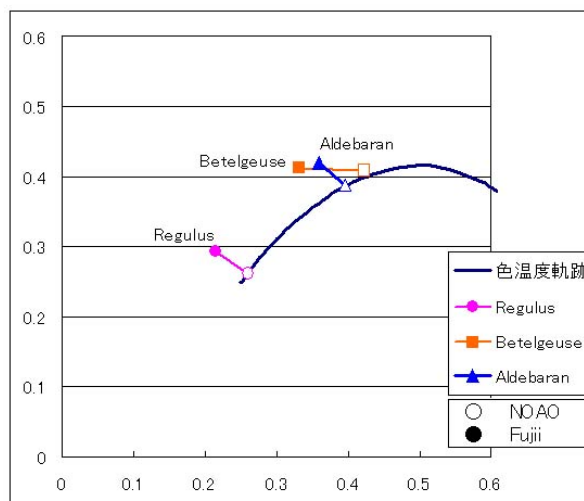


図 7 NOAO データによる xy 色度図の位置と藤井氏のデータによる位置の比較

タが必要となるが、藤井氏のデータは波長域が 400~700nm ほどだったので、結果に少し影響が出た。

NOAO のデータから計算した一等星の XYZ 値、 xy 値、RGB 値を表 3 に、藤井氏のデータから計算したものを表 4 に示す。また共通した星について xy 図を図 7 に示す。

表 3 一等星 (NOAO) の XYZ 値、 xy 値、RGB 値

固有名	X	Y	Z	x	y	R	G	B
Aldebaran	2653.78	2600.98	1457.58	0.395359	0.387491	255	208	154
Betelgeuse	2722.42	2628.75	1078.53	0.423413	0.408845	255	199	124
Regulus	2626.74	2643.99	4829.25	0.260074	0.261781	180	199	255
Spica	2767.33	2707.02	5825.64	0.244897	0.239559	161	184	255

表 4 一等星 (Fujii) の XYZ 値、 xy 値、RGB 値

固有名	X	Y	Z	x	y	R	G	B
Aldebaran	1.17E+06	1.37E+06	722531	0.359615	0.41889	246	255	170
Altair	3.12E+06	4.37E+06	4.95E+06	0.250792	0.351394	122	255	237
Arcturus	1.45E+06	1.82E+06	1.49E+06	0.304021	0.383628	198	255	208
Betelgeuse	1.72E+06	2.15E+06	1.33E+06	0.33146	0.412793	216	255	181
Capella	1.04E+06	1.36E+06	1.12E+06	0.295463	0.388253	182	255	206
Deneb	2.77E+06	3.69E+06	4.85E+06	0.245363	0.326402	130	253	255
Fomalhaut	1.86E+06	2.63E+06	3.71E+06	0.22641	0.321103	62	249	255
Regulus	2.85E+06	3.90E+06	6.52E+06	0.214977	0.293814	8	229	255
Rigel	2.55E+06	3.44E+06	5.01E+06	0.231455	0.313035	96	243	255

NOAO データと藤井氏のデータで系統的な差が生じたのは、波長域が少し狭く、とくに長波長側で足りないためだと思われる。すなわち赤い光が少し足りないために、やや青い方向へシフトしたと考えられる。

天文教育や普及のためには、一等星など有名な星について、色彩科学で必要とされる波長域の完全なスペクトルデータが欲しい。しかしながら今のところ、色彩科学を念頭に置いて取得公開されているデータはないようで、公開天文台など大きな機関における今後の課題といえるだろう。

4. 降着円盤を点源としてみたときの xy 値

星のつぎに、星と並んで高温天体の代表である降着円盤についても、天体色彩学を実施してみた。ただし、星と異なり、降着円盤に関しては、可視光領域での（降着円盤だけの）完全なデータがないので、理論モデルを用いて計算した。さらに今回は、降着円盤を 1 点としてみたときの xy 値を求めた。これによって円盤を遠くから見たときに見えるだろう円盤の色（xy 値）が得られる。

標準降着円盤は光学的に厚いので、円盤の

局所的な放射は黒体放射スペクトルを示す。したがって、円盤のスペクトルは様々な温度の黒体放射スペクトルの重ね合わせで（円盤黒体放射と呼ばれる）、そのスペクトルの式は以下のようにになっている。

$$S_\nu = \frac{4\pi h r_{in}^2}{c^2 p} \left(\frac{k_B T_{in}}{h\nu} \right)^{2/p} \nu^3 \int_{x_{in}}^{x_{out}} \frac{x^{(2/p)-1}}{e^x - 1} dx \tag{3}$$

また、このとき

$$x_{in} = \frac{h\nu}{k_B T_{in}}, \quad x_{out} = \frac{h\nu}{k_B T_{out}} \left(\frac{r_{in}}{r_{out}} \right)^p$$

である。 T_{in} は円盤の中心温度、 p は圧力、 ν は振動数、 k_B はボルツマン定数である。まず、上の式 (3) を用いて降着円盤の可視域（380～780nm）におけるスペクトルデータを得るためのプログラミングをF-BASICで行った。このとき振動数 $\nu \rightarrow$ 波長 λ に変換した。次に、円盤の外縁温度 (T_{out}) を固定して、円盤の中心温度 (T_{in}) を変化させて計算し、それぞれの xy 値を得た。計算に用いた値は次の通りである。

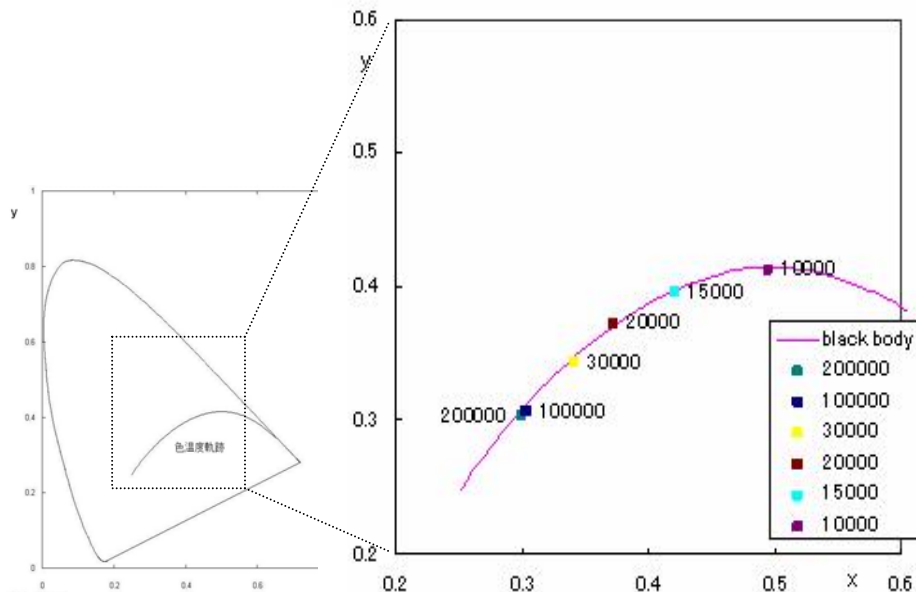


図 8 降着円盤を 1 点としてみたときの xy 値

さまざまな中心温度に対する降着円盤スペクトルの xy 値は色温度軌跡の上に乗る。

表5 さまざまな中心温度に対する円盤黒体放射の XYZ 値、xy 値、RGB 値

中心温度[K]	X	Y	Z	x	y	R	G	B
10000	7.06E+28	6.23E+28	1.44E+28	0.479092	0.422915	255	172	74
15000	1.87E+30	1.83E+30	8.75E+29	0.408581	0.400125	255	205	139
20000	1.07E+31	1.08E+31	7.34E+30	0.369452	0.376029	255	223	180
30000	7.20E+31	7.49E+31	6.99E+31	0.33215	0.345456	255	242	226
50000	4.62E+32	4.82E+32	5.57E+32	0.30777	0.321091	247	247	255
100000	3.67E+33	3.81E+33	4.92E+33	0.295811	0.307642	229	235	255

$T_{out} : 107.9\text{K}$ $p : 3/4$ $r_{in} : 6\text{AU}$

$T_{in} : 10000 \sim 200000\text{K}$

中心温度を変化させたときの xy 値を図 8 と表 5 に示す。

先に述べたように、降着円盤のスペクトルはさまざまな単一温度スペクトルの重ね合わせだが、その降着円盤の xy 値が単一温度スペクトルの xy 値から得た色温度軌跡上にのることはなぜだかわからない。これについては今度の課題にしようと思っている。

今回の報告をまとめるにあたり、快くデータを提供していただいた藤井貢さんに感謝いたします。

2006 『61 色彩』、日本規格協会

[6]加藤正二ほか、1998、“BLACK-HOLE ACCRETION DISKS”、京都大学学術出版会

[7]The International Color Consortium
2007 年 10 月 1 日、<http://www.color.org/>

[8] National Optical Astronomy
Observatory (NOAO) 2007 年 10 月 1 日、
<http://www.noao.edu/cflib/>

芝田 たける

j079335@ex.osaka-kyoiku.ac.jp

福江 純

fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

参考文献

- [1] 福江 純、2004、『最新天文小事典』、東京書籍
- [2] 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
- [3] 金子隆芳、1989、『色彩の科学』、岩波書店
- [4] 池田光男、1980、『色彩工学の基礎』、朝倉書店
- [5] 日本規格協会、2006、『JIS ハンドブック

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/kaiho91.html>