

投稿

ルミエネーションによる恒星の色再現

塩津朱里、木本晴夫（元名古屋市立大学）、松本 桂（大阪教育大学）

1. はじめに

授業や観望会の場などで恒星について説明をするとき、その恒星の「色」について言及することがある。しかし「色」は感覚的なものなので、人によって見え方や色名の認識の相違がある。

例えば、オリオン座のベテルギウスを複数の観察者が見たとする。この観察者にベテルギウスの色について色名のリストから選択してもらくと1人は「赤」、もう1人は「橙」というように違う色名を答えるかもしれない。このように、人が同じ対象物を見ても違う色名を答えるのは、色光を人間の眼が受容器となって感知し、脳で認識する過程が原因で起こる（図1）。

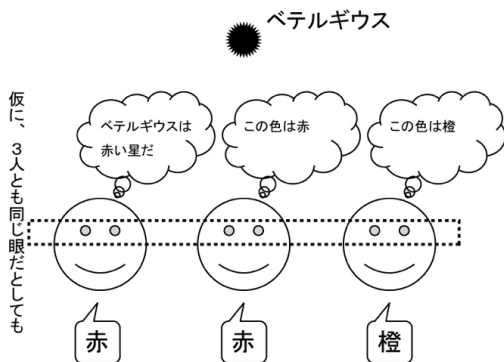


図1 同じものを見ても…

少し丁寧に説明すると、ベテルギウスの発する光が同一の組成（スペクトル）の色光として観察者2人に届いたとする。しかし、観察者の受容器（眼の細胞等）には個体差があるため、同一の組成（スペクトル）の色光を2人が全く同じように受け取れているかは判らない。さらに、仮に2人が同一の受容器を

持っていたとしても、色光が観察者の眼で神経応答に交換され、情報が脳に送られて色の感覚が生まれる過程や色知覚するところに差異があるかもしれない。そして、知覚した色光をどのような色名で呼ぶかは、観測者の学習によって決定される。したがって、他者と同一の色知覚を共有することはほぼ不可能である。つまり、「色」は光の波長成分を基にして脳内で生み出される神経応答である[1]。

しかし、「色」は私たちの生活で重要な役割を果たしている。「色」には物の「弁別」あるいは「検出」、「形の切り出し」、物の「同定」という3つの役割が考えられている[2]。そこで、色彩科学では「標準的な色の示し方」を定めて、それと同一のものを「同じ色」と定義している。このやり方をとれば「同じ色に見える」かどうか如何を問わず「同じ色」を決めることができ、色情報のコミュニケーションが円滑に行えることになる[3]。

そのような「色」を定量的に表すためにさまざまな「表色系」がある。太陽を始め恒星、蛍光灯など自ら光を発するものの光の色である光源色を表す表色系として、CIE（国際照明委員会）が策定したXYZ表色系がよく使用される。XYZ表色系とは、光の三原色（R,G,B）の加法混色による等色実験が土台となって発展した表色系である。XYZ表色系においては、色の3つの属性である色相・彩度・明度のうち、明度を犠牲にし、2次元の情報(xy値)に落とすことができる。その結果が「xy色度図（xy color diagram）」である（図2）[4]。図2において色が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。また、黒体放射の xy 色度図上の軌跡を黒体軌跡とよぶ。恒星は黒体軌跡に近い xy 値をとる。

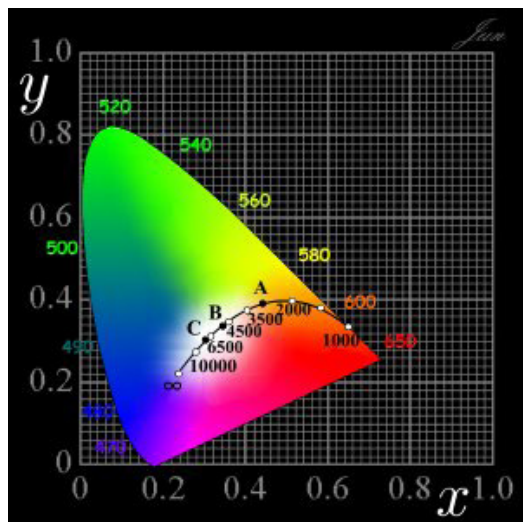


図2 xy 色度図と黒体軌跡

2. 恒星の色

それでは、恒星の色はどのように扱われているのだろうか。本会では、過去に本紙にて「天体色彩学」として天体の色を定性・定量的に再現する方法が紹介された[5]。さらに2012年月3月頃MLにて「太陽の色は何色か? 恒星の色は何色か?」と意見が交わされたことがあった。そこで、恒星や天体を見たとき何色(色名)と表現するのか調査する必要性があるとされている[6]。しかし、本物の天体を使用して色の見え方について精度の高い調査を行おうとすると、気象条件や被験者に既成概念をもっている可能性が高いため難しい。

さらに色には光源色と物体色があるが、同じ色(色度)でも光源色と物体色という違いによって人が知覚する明るさや色味の量が異なることがわかっている[7]。これを恒星の色の話でいうと、恒星の色(色度)を正確に紙面上に印刷して再現しても、見る人によって

は夜空で輝く恒星の色とは異なる色だと感じる。

現行の小学校4年理科の学習指導要領に『夜空の星を観察することによって、・・・星には青白い色や赤い色など色の違いがあることをとらえるようにする。』と記載されており、この記述から天体(特に恒星)の色を何色かと示すことを避けられないと捉えることができる[8]。しかし、小学校の教科書6社分を調査したところ、教科書によって色の提示の仕方が違った(2015年4月調査時)。

そのため、恒星の色の違いを学習するときには色名や教科書などの写真で提示するのではなく、正確に恒星の色を光源で再現できる装置があれば、学習者に恒星の色を示すことができるのではないかと考えた。

そこで、光源として様々な色を発することのできるルミネーションという装置で、恒星の色を再現できるかを検証した。

3. 恒星の色を再現する方法

3.1 使用機材と検証環境

(1) ルミネーション

今回、恒星の色を再現するために「ルミネーション」木本・トラフィックシム社(2008)を使用した(図3)。

本装置はフルカラーLEDが内蔵された40個ほどのLEDモジュール(図3:中央)とルミネーションコントローラ(図3:左下)、制御するためのアプリケーションがインストールされたPC(図3:右下)で構成されている。ルミネーションコントローラを接続したPCから、①LEDモジュール(フルカラーLED)を赤(R)、緑(G)、青(B)を0~254の値で指定すること(RGB値が0~255ではないのは、各コマンドの先頭データであることを表すデータとして利用しているためである)、②LEDモジュールを発光させる時間を指定

することができる。なお、40個のLEDモジュールそれぞれに色と発光時間を指定することができる。

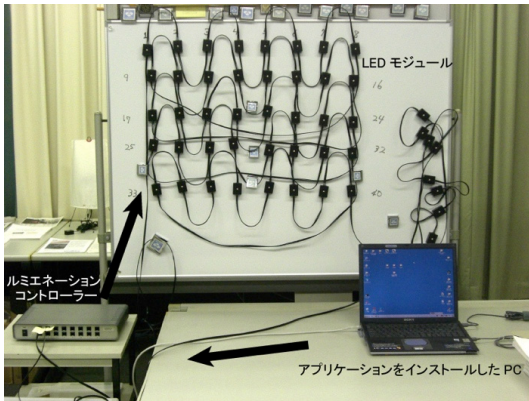


図3 ルミネーション

ルミネーションのLEDモジュールにはフルカラーLED（日亜化学NSSM016C）が使用されている（図4）。

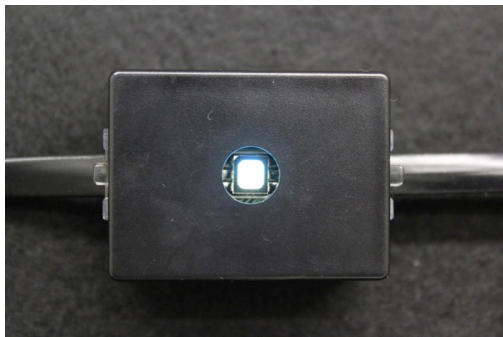


図4 フルカラーLED

本フルカラーLEDは、赤・緑・青の3色の発光ダイオードのチップを用いており、3色で1つの発光源としている（図5）。3色の明るさをそれぞれ制御することによって、発光部を様々な色に変化させることができる[9]。

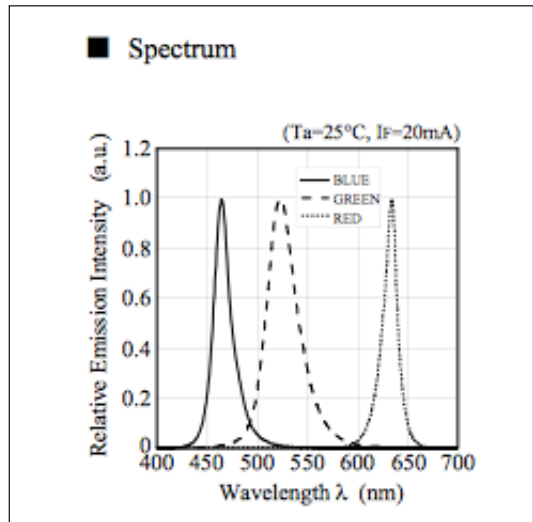


図5 フルカラーLEDに使用されている3色LEDのスペクトル

(2) 色彩輝度計

色の計測には、色彩輝度計（コニカミノルタCS-100A）を使用した（図6）。色彩輝度計では、発光面もしくは反射面の測定ポイント面積内の平均輝度（cd/m²）と色度（XYZ表色系のxy値）を測定することができる。



図6 色彩輝度計

(3) 検証環境

検証環境として、以下のように機材等を設置した(図7)。

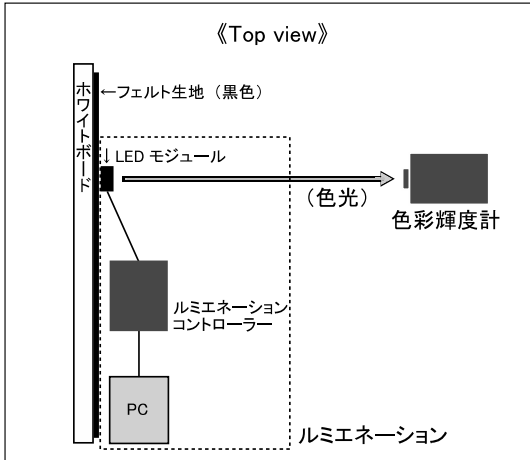


図7 設置図

ホワイトボードに黒色のフェルト生地を貼り、その上にルミエネーションのLEDモジュールを1個だけ設置した。これは色光の散乱を防ぐためである。LEDモジュールの発光部分と色彩輝度計の位置が水平になるよう設置した。

(4) ルミエネーションの色域

まず、今回使用するルミエネーションの色域について色彩輝度計で計測して調べxy色度図上に示した。その結果、色域はパソコンのディスプレイなどの共通色域であるsRGB領域とは異なることがわかった(図8)。

図8において、sRGB領域の三角形は人の感じる色域よりもかなり小さい。これはsRGBの規格では表現できない色が多いということになる。ルミエネーションの色域は人の感じる色域より小さいものの、sRGBの色域に比べて広いので、ルミエネーションの方が表現できる色が多い。

また、ルミエネーションの色域とsRGBの色域の違いから、ルミエネーションでRGB値を(254, 254, 254)と指定し、LEDモジュールを発光させても、そのxy値はsRGB規格でRGB値(254, 254, 254)と指定して再現されるxy値が異なる。xy値が異なるということは、違う色を発するということになる。このことから、今回はルミエネーションに指定したRGB値については、 $R_iG_iB_i$ 値と呼ぶことにしたい。

さらに、ルミエネーションの色域を計測してみると、LEDモジュールによって色域に違いがあった。そのため、同一型番のフルカラーLEDが使用されているLEDモジュールでも個体が違えば、同一の色域をもつとは限らないということになる。したがって、今回のようにフルカラーLEDなどで色再現を試みる場合は、使用前にそれぞれの色域を計測し、補正値を割り出しておく必要がある。

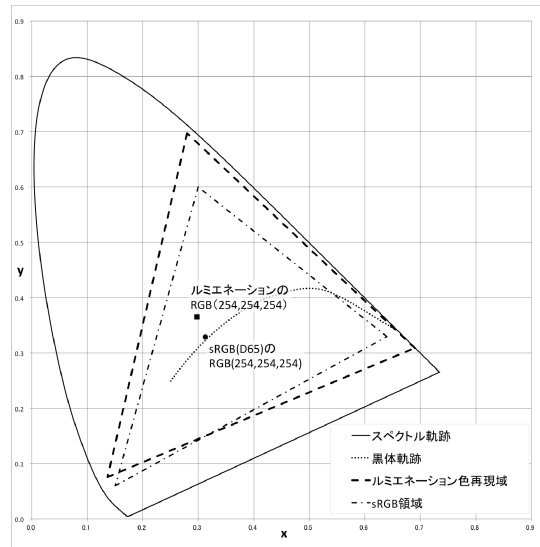


図8 sRGB領域とルミエネーションの色域

(5) 色再現の目標

色再現をするときの目標について、ハントにより6種類に分類されている(表1)。被写

体と再現画像の照明光が分光分布とその輝度レベルも異なるとき、被写体と再現画像の三刺激値が異なっている、見えが一致する色再現を「等価な色再現」という[10]。

表 1 色再現の目標

1	分光の色再現
2	測色の色再現
3	正確な色再現
4	等価な色再現
5	対応の色再現
6	好ましい色再現

今回は、恒星のスペクトルとルミエネーション(フルカラーLED)のスペクトルは異なるが、ルミエネーションの発する色を恒星の xy 値と一致させることを目標としているので、「等価な色再現」をすることになる。

3.2 手順

恒星の色をルミエネーションで再現した手順は、次に紹介する(1)~(3)の3ステップからなる。

(1) 恒星の XYZ 表色系の xy 値を求める

日本工業規格に記載されている XYZ 表色系における光源色の三刺激値 X、Y、Z を求める方法で、恒星の三刺激値 X、Y、Z を求めた。今回はそれぞれの恒星の光量が十分にあると仮定して、計算に使用する等色関数には CIE1931 測色標準観測者の等色関数を用いた。また、光源の放射量の相対分光分布として観測で得た恒星のスペクトルデータを使用した。このデータは2008年4月11日、2009年12月13日に美星天文台(岡山県井原市)にて、分光観測で取得したものである。表2に示した13個の恒星について380nmから780nmで1nm間隔のデータを得た。そして各

天体の輝度の情報を落とした xy 値を計算した。

(2) ルミエネーションで色再現

今回は、ルミエネーションの LED モジュールを1個だけ作動させて使用した。また、実験室内については、実験開始前に色彩照度計で光がない状態であることを確認した。こうした実験環境でルミエネーションを作動させ、各天体の xy 値を再現する R_iG_iB_i 値を探した。

表 2 観測した恒星と xy 値

恒星名	観測年	x	y
α Vir	2008	0.256	0.260
α Leo	2008	0.259	0.263
α Lyr	2008	0.298	0.318
α Boo	2008	0.375	0.376
β Gem	2008	0.376	0.377
α Sco	2008	0.440	0.418
α Cma	2009	0.266	0.272
β Ori	2009	0.268	0.275
ε Aur	2009	0.298	0.307
α Cmi	2009	0.342	0.354
α Aur	2009	0.408	0.398
α Tau	2009	0.428	0.415
R Lep	2009	0.590	0.405

(3) 再現した色を計測

(2) で再現した色の xy 値を色彩輝度計で計測した。計測した xy 値が(1)で求めた天体の xy 値と同一値になるまで、R_iG_iB_i 値を変化させて計測する作業を繰り返した。このとき、天体の xy 値と同一の xy 値をとる R_iG_iB_i 値の組み合わせは複数あると予想されたが、今回はなるべく輝度が高い組み合わせを探した。

4. 色再現した結果

色再現した13の恒星のxy値はLEDモジュール（フルカラーLED）の色域内にあったため、ルミエネーションで13の恒星の色再現が可能であった。また、R Lepのxy値はsRGB領域外なのでパソコンのディスプレイなどでは正しく色再現できないが、ルミエネーションでは色再現可能であることがわかった（図9）。

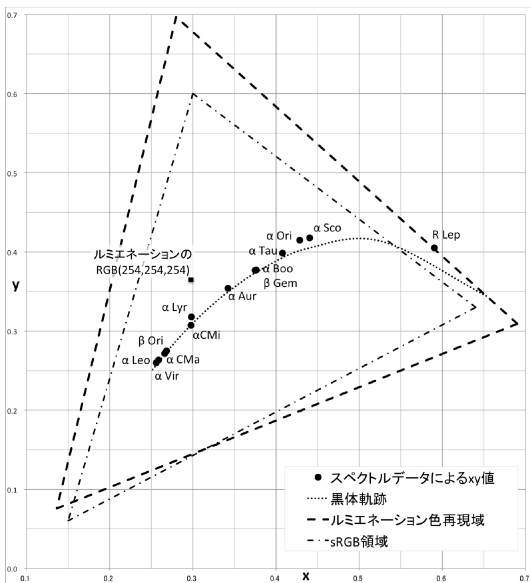


図9 xy色度図上における恒星のxy値とLEDモジュール（フルカラーLED）の色域

なお、計測誤差についても考察した。LEDモジュール（フルカラーLED）と計測器によって生じる誤差と設置位置によって生じる誤差についてそれぞれ考慮した結果、LEDモジュールと計測器からなる誤差は再現性があるといえた。また、数日にわたって計測を行うと各日の平均値の違いが見られたが、これは設置位置によるものではないかと考えられた。なお、LEDモジュールの設置位置によって

xy値にずれが生じることを実験により確認できたため、恒星のxy値にも同様のことがいえると考えられる。

5. 考察

LEDモジュールの設置位置によるxy値のずれは、恒星の色を見せる際に、観察者が見る位置によって、見える色が違ってくるといことになる。LEDモジュールを観察者に見せる際には、正しい位置で見ることが必要となる。しかし、色の見えの違いは、恒星の色として取りうるxy値の範囲内なのか、それともヒトが恒星の色を見分けるけられる程度のものなのか、は先行研究が少ないためわからない。これらについては今後調査して定量的に示す必要があると考えている。

6. 今後の課題と展望

恒星のスペクトルデータ（380-780nm）のデータを使用してXYZ表色系のxy値を得ることで、ルミエネーションを使用して等価な色再現をすることができた。

しかし、ルミエネーションは教材として普及するには高価である。したがって、より安価な素材でフルカラーLEDを制御するなど工夫をすれば、恒星の色を光源で再現して提示することができる教材として、今後活用できると考えている。

謝辞

本研究を遂行するにあたりご助言をくださった名古屋市立大学の原田先生、大阪教育大学の福江先生に感謝いたします。

文献

- [1]内川恵二（1998）『色覚のメカニズム』、朝倉書店、pp.1-5
- [2]Mollon, J. D（1989）‘Tho’ she kneled’d in

- that place where they grew...’、The uses and origins of primate colour vision. J. exp. Biol. 146, 21-38.
- [3] 鈴木卓治 (2014) 「色を測る」、日本色彩学会誌、Vol.38、No.2、pp.65-70
- [4] 栗野諭美、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
- [5] 芝田たける・福江 純 (2008) 「天体色彩学入門」、天文教育、Vol.20、No.2、pp.15-21
- [6] 福江 純、他 (2012) 「太陽の色・星々の色」、天文教育、Vol.24、No.2、pp.28-39
- [7] 篠田博之・藤枝一郎 (2007) 『色彩工学入門』、森北出版、pp.59-62
- [8] 文部科学省 (2008) 『小学校学習指導要領解説-理科編-』、大日本図書
- [9] SPECIFICATIONS FOR NICHIA CHIP TYPE FULL COLOR LED DataSheet
- [10] 嶋野法之 (2009) 『色彩工学の基礎と応用』、コロナ社、pp.120-123

塩津 朱里

* * * * *