

47P LED調光器で恒星の色を再現する

ハートピア安八天文台ジュニア天文倶楽部：

古方 伶旺（中1）【岐阜東中学校】、尾崎 由基（中3）【安八郡安八町立登龍中学校】、
曾我部 文麗（小6）【岐阜市立合渡小学校】、小林 美琴（小5）【津島市立南小学校】、
高賀 寧子（小4）【岐阜市立長良小学校】

要旨

モノクロCMOSカメラにジョンソン光電測光フィルターBVRを付け、撮影した恒星をマカリで測光し、各色のカウント値の比を3色LED調光器（以下、LED調光器）に光度として指定し恒星の色の再現を試みた。結果、青から白の星の再現性は見られたが、黄から橙の星はピンク味を帯び再現性は低かった。そこで、3色LEDの白色再現でのRGBの比を参考に補正を加えると、ピンク味が薄れ見た目の恒星の色に近づけることができた。

1. 目的

LED調光器で恒星の色を再現する。

2. 観測方法

a) LED調光器の撮影

図1は、PICマイコン装着のLED調光器で赤、緑、青のLEDチップをPWM制御で0から255の光度を指定し（以下、指定光度）、3色LEDで任意の光の色を表現できる装置である。

また、21個の1等星と任意で30個のRGB値を記録できる。なお、LED調光器の作成は、科学普及支援団体てんもんぶの樋谷則夫先生に依頼した。そのLED調光器の指定光度を、50から250まで50ずつ変化させて、赤、緑、青の各色をタカハシFS-60望遠鏡（以下、望遠鏡）に図2のようにNDフィルター（ND4+ND8）とZWO ASI120MM Mini（以下、CMOSカメラ）を装着した。そして、測光値が飽和しないようにし、約25m離れて撮影した。

b) 恒星の撮影

望遠鏡の対物側に、ジョンソン光電測光フィルターBVR（以下、3色フィルター）を装着しCMOSカメラで測光値が飽和しないようアークトゥルス、デネブ、ベガを撮影した。図3は恒星撮影の様子。そして、恒星・LEDともに、約10枚撮影した画像データを加算平均し一次処理を行った。その画像データをマカリで開口測光し、得られたカウント値（光度）をもとに光度特性を調べた。

3. 結果

a) LEDの測光結果

図4は、LED調光器の光度特性を示したグラフである。各色のLED光度は、ほぼ比例関係となり直線性を確認できた。ただし、このグラフのy切片は原点(0,0)を通らない。これは、LEDとPWM調光の相性（特性）が原因で、指定光度255の約10%に当たる指定光度30未満での誤差が大きいことに起因する。

測光結果は、同じ指定光度でも、青や緑に比べ、赤が上回っている。これは、CMOSカメラの感度特性によると考えられる。図5は赤、緑、青の指定光度を全て100にしたものである。しかし、白に見えず、ピンクを帯びた白になった。そこで、白に見えるよう赤：緑：青の指定光度を調整し、約100：125：85の比を得た。

b) 恒星の測光結果

3色フィルターを用い撮影したアークトゥルス、デネブ、ベガの測光結果を表1に示す。測光値の比をLED調光器で明るさの指定ができるよう測光結果（カウント値）の比をそのままに光度特性を調べた30から250までに収まるよう以下の計算で、表1の8ビット整数比の数値で表した。

ベガの8ビット整数値の計算例

$$(B) \frac{8,226,309}{\text{Bのカウント値}} \div \frac{(8,226,309 \div 250)}{\text{カウント値の最大値}} = 250$$

$$(V) \frac{5,771,483}{\text{Vのカウント値}} \div \frac{(8,226,309 \div 250)}{\text{カウント値の最大値}} = 175$$

$$(R) \frac{5,392,071}{\text{Rのカウント値}} \div \frac{(8,226,309 \div 250)}{\text{カウント値の最大値}} = 164$$

4. 解析考察

補正前の8ビット整数値でLED調光器を点灯させると、デネブは薄い白青、ベガは白青で、観測した恒星と似た色になった。しかし、アークトゥルスはピンクを帯びた赤になった。また、LED調光器の3色を同じ比で光度を指定しても、数値の強弱で色合いが違って感じ、数値が大きくと明るく白っぽく色が変化してしまっ

た。そこで、簡易分光器を使いLED調光器の光の特徴を調べた。白色光を分光したものを図6、黄色光を分光したものを図7に示した。ともに黄のスペクトルが欠落した単色光を示し、黄自体を発光する星の連続光との特性の違いにより、黄から橙の再現性



図1 LED調光器



図2 LED調光器を撮影した機材



図3 恒星撮影の様子

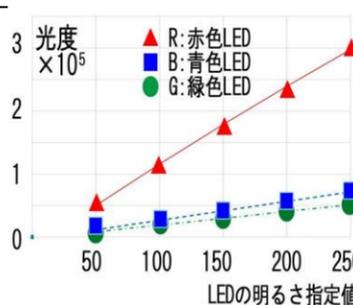


図4 明るさ指定したLED調光器の測光結果



図5 RGB指定光度各100でピンクを帯びたLED光

表1 恒星の3色測光結果とxy色度図のBVR値

フィルター	測光結果	8ビット整数値	補正後値	白色補正	xy色度図 (4,195K)
青 B	3,649,492	111	50	46	109
緑 V	4,197,335	128	126	151	174
赤 R	6,422,655	195	180	180	255

デネブ(500ms) A2型 淡青白 8,600K

フィルター	測光結果	8ビット整数値	補正後値	白色補正	xy色度図 (8,590K)
青 B	2,771,433	84	71	60	255
緑 V	3,539,494	108	91	114	194
赤 R	3,229,497	98	84	84	180

ベガ(500ms) A0型 青白 9,500K

フィルター	測光結果	8ビット整数値	補正後値	白色補正	xy色度図 (9,400K)
青 B	8,226,309	250	189	161	255
緑 V	5,771,483	175	111	139	182
赤 R	5,392,071	164	140	140	163



図6 LED白を分光した様子



図7 LED黄を分光した様子

がピンクに寄ったと考えた。緑と青を赤同様の光量にするには補正が必要で、図8のカラーセンサを使って赤・緑・青LED、それぞれの単色光を測った結果、赤LED単色光には緑成分や青成分があり、緑や青LED単色光も同様に他色が混ざっていた。この互いに含まれる色の光度が無視できない値となり、色合いがうまく再現できない原因と考え、各LEDの他色の割合を表2にまとめた。その割合を用いて、下の式のように各色LEDとそのLEDが含む他色の光度を合算すると、8ビット整数値とは異なるRGB値（比）になることが分かった。そこで、光度合算後の値が8ビット整数値になるような指定光度を逆算して、表1の補正後値とした。

光度指定値と実際の色別光度計算 ベガの例

(BB)	$250 \times \frac{1.00}{\text{Bに含まれるBの割合}}$	250.0	340.1
(BV)	$250 \times \frac{0.30}{\text{Bに含まれるVの割合}}$	75.0	258.2
(BR)	$250 \times \frac{0.05}{\text{Bに含まれるRの割合}}$	12.5	201.0
(VB)	$175 \times \frac{0.43}{\text{Gに含まれるVの割合}}$	75.3	
(VV)	$175 \times \frac{1.00}{\text{Vに含まれるVの割合}}$	175.0	
(VR)	$175 \times \frac{0.14}{\text{Gに含まれるRの割合}}$	24.5	
(RB)	$164 \times \frac{0.09}{\text{Rに含まれるBの割合}}$	14.8	
(RV)	$164 \times \frac{0.05}{\text{Rに含まれるVの割合}}$	8.2	
(RR)	$164 \times \frac{1.00}{\text{Rに含まれるRの割合}}$	164.0	

補正後値でLED調光器を点灯させるとデネブは白青、ベガは青白となり、見た目の恒星の色に近くなった。しかし、アークトゥルスはまだピンク味を帯び、さらに補正が必要と考えた。

そこで、白色を再現した際のRGBの比率(100:125:85)を考慮し、GとBの指定光度をそれぞれ125%、85%とする白色補正を加えると、ピンク味が薄れアークトゥルスらしい明るい橙に近づけることができた。さらに、色の再現性を比較するため、xy色度図(図9)に着目した。そこには、黒体軌跡が示されており、恒星の表面温度からRGB値を求められると考えた。そこで、アプリケーション(*1)を使い恒星の表面温度からxyz(RGB)値を求め表1のxy色度図の値とした。その値でLEDを点灯させると、指定光度が大きいため白味を帯びた橙であった。以上の考察により導き出した8ビット整数値と、その補正後値、白色を考慮して補正した値、アプリケーションより導き出した値をLED調光器に入力し撮影したものを図10にまとめた。ベガは青白、デネブは白青と比較的見た目の恒星に近い色が再現できた。暖色系のアークトゥルスは、ピンク味が薄れ、より見た目の恒星の色に近づけることができた。

5. 結論と課題

恒星の測光結果を「LEDが含む他色の色の割合」で補正し、LED調光器を点灯させると、青系色のベガとデネブは概ね色を再現できた。しかし、暖色系のアークトゥルスは、さらに「白色補正の比」で補正することが必要で、この補正によりピンク味が薄れ、橙の見た目の恒星の色に近づいた。以上より、3色LEDでは、恒星のように連続したスペクトルが得られないため、測光結果から導いたRGBの指定光度では、青系色の恒星は再現できるが、暖色系の恒星の再現は難しく、更なる補正(青の輝度を90%に下げ、緑の輝度を120%に上げるなど)が必要である。しかし、この補正係数など定量的研究は入口段階で今後の課題である。また、輝度調整のため乳白色フィルターやRGBW、RGBWWなども視野に入れ、連続スペクトルを意識した色の再現に挑戦したい。そして、恒星のスペクトル型(B-V等級)に応じたいわゆる1等星21個の恒星の色を再現したい。

6. 参考文献等

- ルミエーションによる恒星の色再現
天文教育28(6),P.50-56、2016年11月、日本天文教育普及研究会
音と色と数の散歩道 黒体と色温度(*1)
<http://k-ichikawa.blog.enjoy.jp/etc/HP/js/CIEXYZ2/cie6.html>
- LEDの色度図(色度座標)とその見方
https://my-craft.jp/html/aboutled/led_shikidozu.html
- あなたもできるデジカメ天文学
鈴木文二・洞口俊博 編、2015年11月15日、恒星社厚生閣
- 【謝辞】科学普及支援団体てんもんぶ 樋谷則夫先生にLED調光器を作成していただきました。また、ハートピア安八天文台台長 船越浩海先生には研究の様々な場面でご指導・ご助言をいただきました。ありがとうございました。



図8 カラーセンサ(TCS34725)基盤とマイコンボード

表2 各色LEDが含む他色の割合

3色LED成分	赤LED 赤1.00	緑LED 緑1.00	青LED 青1.00
色成分	緑 青 赤	赤 青 赤	赤 緑
割合	0.05 0.09 0.14	0.43 0.05 0.30	

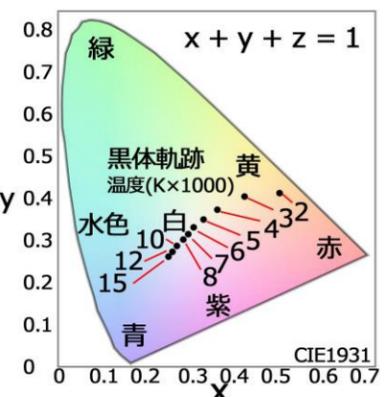


図9 XY色度図上の黒体軌跡



図10 各数値での星の再現色