

デジタル一眼レフカメラを用いた夜空の明るさ調査手法の提案

小野間 史樹*, 伊藤 絢子, 原田 泰典, 福島 英雄, 香西 洋樹

(2009年4月30日受付; 2009年9月29日受理)

A Proposal of Photometric Technique for Evaluating the Night-Sky Brightness Using Commercially Available Digital Single Lens Reflex Camera

Fumiki ONOMA *, Ayako ITOH, Yasunori HARADA, Hideo FUKUSHIMA and Hiroki KOSAI

Abstract

Night-sky brightness caused by artificial lights has become a serious obstacle to the ground-based astronomical observations. Observational data of night-sky brightness have been reported by the Ministry of Environment of Japan with using photometric technique which compares sky background intensity with that of standard stars both measured with film cameras. Recently, commercially available digital cameras became very popular instead of film cameras. For evaluating the true night-sky brightness, data calibration process fitting to digital-camera data is desired to reject the spurious effect caused by the difference among instruments.

We propose to apply photometric technique to analyze the data obtained with digital cameras. Time variation of night-sky brightness was monitored both with a digital camera and a film camera in the same night. Night-sky brightness obtained with both cameras are consistent within the error of ± 0.36 magnitude per square arc-second.

1. はじめに

夜空の明るさは年々明るくなっていると言われている。これは人間の活動による照明光が主な原因であると考えられており、照明光のうち、人の活動や生物等に悪影響を及ぼすものは光害（ひかりがい）と呼ばれている¹⁾。この光害については、1988年より環境省による「全国星空継続観察」において定量的な調査が行なわれている。この調査ではポジフィルムを用いて基準星とバックグラウンドの明るさを比較する方法が用いられている²⁾。一方、近年では撮像媒体のデジタル化が進んでおり、フィルムカメラおよびフィルムの生産・出荷量が低減している。このため、従来のポジフィルムを用いた測定方法に代わる定量的な夜

空の明るさ測定手法が望まれている。

フィルムに代わる撮像媒体としてはCCDおよびCMOSセンサが有力であり、いずれもデジタル一眼レフカメラに多く用いられている。しかしこれらのセンサには、デバイス間のばらつきが大きい、熱雑音による暗電流が生じる、デバイスサイズおよび画素サイズが統一されていない等の、フィルムとは異なる問題を抱えている。このため、現在のところ夜空の明るさの測定にこれらのセンサはほとんど用いられていない。

我々は、CCDもしくはCMOSセンサを用いたデジタル一眼レフカメラにおいてその特性を補正する手法を開発し、夜空の明るさの測定への適用を検討した。また、フィルムカメラとデジタル一眼レフカメラの同時観測を行なうことで、我々が提案する手法の妥当性を確認した。

* 星空公団

2 調査手法の検討

2.1 撮影レンズ焦点距離の検討

デジタルカメラでは35mmフィルムカメラと異なり撮像デバイスが統一されていない。そこで、撮像デバイスサイズおよび画素サイズから適切な焦点距離を検討した。

a) 撮像デバイスサイズと画素サイズ

35mmフィルムの一コマの大きさは36mm×24mmであり、この大きさは35mmフィルムを用いるカメラにおいて共通である。一方、デジタルカメラでは、その撮像素子の大きさは機種により異なる。デジタル一眼レフカメラの上位機種では35mmフィルムに近い28.1mm×18.7mm、普及用の機種では23.6mm×15.8mm、最も一般的に用いられるレンズ一体型デジタルカメラでは5.7mm×4.3mmと様々である。この撮像デバイスサイズの違いにより、同じレンズを用いても1 pixel当たりの角度および素子全体の画角は異なる。

b) 最小焦点距離

夜空の明るさは、天頂付近をカメラで固定撮影した画像を解析し、恒星のカウント値とそのバックグラウンドのカウント値を測定して求める。ここでは、測定に用いる恒星を“基準星”と呼ぶ。画像を撮影する時の露出時間は80秒が一般的である。天頂付近の恒星が80秒間で移動する角度は約900"である。画像を解析する際に測光範囲が広すぎると、測定対象となる星が周囲の恒星と区別できなくなる。そのため、画像の解析には恒星の80秒間の移動量を満たす1000"程度が適当と考えられる。また、測定において恒星とバックグラウンドを分離するためには、少なくともその1/10である約100"以下の空間分解能(すなわち、単位画素あたりの画角)が必要である。撮影時に用いるレンズもこれを考慮して、焦点距離を決めるべきである。

単位画素あたりの長さ d は、撮像素子の長辺 a 、短辺 b および画素数 P を用いて

$$d = \sqrt{\frac{ab}{P}} \quad (1)$$

と表わすことができる。一方、 d と単位画素あたりの画角 θ の間には

$$\frac{d}{2f} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

なる関係がある。ここで、 f はレンズの焦点距離

である。式(1)を式(2)に代入し、 f について解くと、

$$f = \frac{\sqrt{\frac{ab}{P}}}{2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3)$$

が得られる。一方、ベイヤー配列のデジタルカメラでは図1のように素子が配列されている³⁾。本研究ではG素子のみ用いるため、式(1)で表わされる単位画素当たりの長さ d に対し、見かけの空間分解能が $1/\sqrt{2}$ になる。これを考慮して式(3)を変形すると、

$$f = \frac{\sqrt{\frac{ab}{P}}}{\sqrt{2} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (4)$$

となる。これが最小焦点距離である。

デジタルカメラの撮像素子サイズと画素数は機種により異なるが、例として本研究で使用しているOLYMPUS E500では、 $a = 17.3\text{mm}$ 、 $b = 13.0\text{mm}$ 、 $P = 8 \times 10^6$ であるので、 θ' が100"の時の f は、約15mmである。

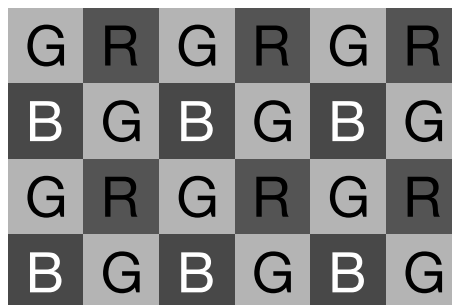


図1 ベイヤー配列

c) 最大焦点距離

本研究において、夜空の明るさは5個以上の恒星の明るさとの比較から計測している。すなわち、撮影データには最低5個の測定対象となる恒星があればよい。図2に基準星としている5.2等級以上の星の分布

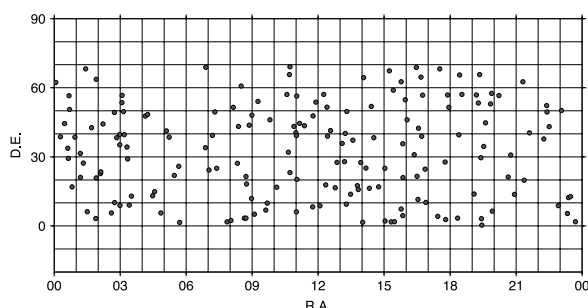


図2 基準星としている5.2等級以上の星の分布

上の恒星の分布を示す。この分布から、任意の時刻において天頂付近を向けたカメラの視野に5個以上の基準星が常に入るような画角を計算した。計算の結果、 35° 以上の画角があれば、カメラの視野内に基準星が常に5個以上存在することがわかった。

撮像素子の長辺 a と焦点距離 f とは、

$$\frac{a}{2f} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

の関係にある。よって、 $\theta = 35^\circ$ とすると、式 (5) より

$$f = \frac{a}{2 \tan\left(\frac{35^\circ}{2}\right)} \quad (6)$$

である。本研究において使用している OLYMPUS E500 の場合では、 $f = 27\text{mm}$ 以下となる。

d) まとめ

撮影する画像の解像度は、単位画素あたり $100''$ 以下が必要である。画像全体の画角は、 35° 以上が必要である。撮影に用いるレンズは、撮像素子のサイズと画角から求められる、これらの条件を満たす焦点距離のものを用いるべきである。例として、OLYMPUS E500 の場合には、 $15\text{mm} \leq f \leq 27\text{mm}$ である。本調査では、この範囲にあり比較的入手しやすい 24mm を使用した。

2.2 撮像デバイスのダイナミックレンジとビット数に関する検討

固定撮影による撮像デバイス上の星像の強度は図3のような2次元分布をしている。星像強度の断面は赤経方向には変化していないため、ここでは図4に示すように平均0、分散 σ^2 の1次元ガウス分布が奥行き l ["] を持っているとして取り扱う。

単位画素あたりの角度を θ [arcsec]、星像の中心画素のカウント値を C とし、バックグラウンド

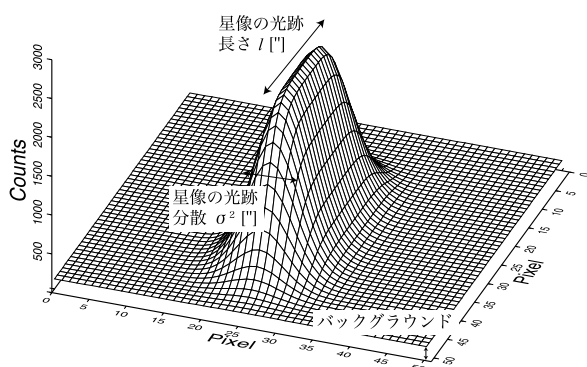


図3 撮像デバイス上の星像強度

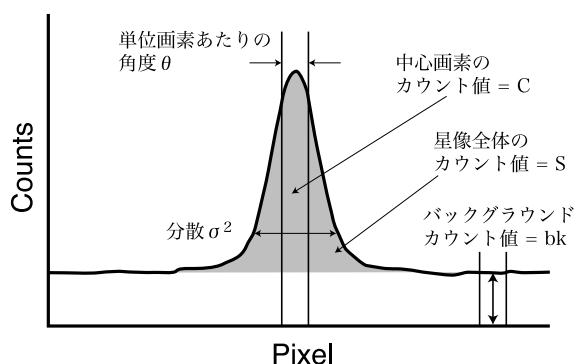


図4 一次元化した星像強度

のカウント値を bk とする。

このとき、カウント値のダイナミックレンジ DR は、

$$DR = \frac{C + bk}{bk} = \frac{C}{bk} + 1 \quad (7)$$

と表わされる。

また、基準星の等級を M_{ref} [mag]、バックグラウンドの等級を M_{bk} [mag arcsec $^{-2}$] とすると、

$$M_{bk} = M_{ref} + 2.5 \log\left(\frac{S \cdot \theta^2}{bk}\right) \quad (8)$$

なる関係が成り立つ。ここで、 $\Delta m = M_{bk} - M_{ref}$ とおくと、式 (8) より

$$\frac{1}{bk} = \frac{1}{S \cdot \theta^2} \cdot 10^{\frac{\Delta m}{2.5}} \quad (9)$$

が得られる。

さらに、星像の中心の幅 $\pm \frac{\theta}{2}$ 、奥行き θ を持つ単位画素のカウント値 C と星像の全カウント値 S との比は、平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布 $N(x, \mu, \sigma^2)$ を用いて表わすと、

$$\begin{aligned} \frac{C}{S} &= \frac{\theta}{l} \int_{-\frac{\theta}{2}}^{\frac{\theta}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \\ &= \frac{2\theta}{l} \int_0^{\frac{\theta}{2}} N(x, 0, \sigma^2) dx \\ &= \frac{2\theta}{l} \int_0^{\frac{\theta}{2\sigma}} N(x, 0, 1) dx \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

式 (7)、式 (9) および式 (10) より、

$$DR = \frac{2 \int_0^{\frac{\theta}{2\sigma}} N(x, 0, 1) dx \cdot 10^{\frac{\Delta m}{2.5}}}{l \cdot \theta} + 1 \quad (11)$$

となる。ここまでは、長さの単位を角度で取り扱っていた。以降では、光学系の焦点距離を用いて

デバイスのサイズに置き換える。

まず、星像の広がり σ ["] は、撮像デバイス上の広がり d [μm] と画素サイズ a [μm] および単位画素当たりの角度 θ ["] によって

$$\sigma = \frac{\theta d}{a} \quad (12)$$

で表わされる。よって式 (11) より、

$$DR = \frac{2 \int_0^{\frac{\sigma}{2a}} N(x, 0, 1) dx \cdot 10^{\frac{\Delta m}{2.5}}}{l \cdot \theta} + 1 \quad (13)$$

となる。また、光学系の焦点距離 f [mm] と画素サイズ a [μm] および単位画素当たりの角度 θ ["] には

$$\frac{a \times 10^{-3}}{2f} = \tan\left(\frac{\theta}{2} \cdot \frac{1}{3600}\right) \quad (14)$$

なる関係が成り立つ。よって、単位画素当たりの角度 θ ["] は光学系の焦点距離 f [mm] に置き換えることができ、

$$DR = \frac{\int_0^{\frac{\sigma}{2a}} N(x, 0, 1) dx \cdot 10^{\frac{\Delta m}{2.5}}}{3600 \cdot l \cdot \tan^{-1}\left(\frac{a \times 10^{-3}}{2f}\right)} + 1 \quad (15)$$

が得られる。なお、星像の光跡の長さ l ["] は露光時間 t [秒] および恒星の赤緯 σ_s [°] を用いて

$$l = \sin^{-1}\left[\sin\left(\frac{t}{240}\right) \cos \sigma_s\right] \quad (16)$$

と求められる。

以上がダイナミックレンジについての検討である。次に、測定時に必要なビット数を求める。

バックグラウンド測定時の誤差を Δbk [mag arcsec⁻²] 以下にするためには、最も低いバックグラウンドの測定値について、

$$2.5 \log \frac{2^n - 1}{2^n} \geq -\Delta bk \quad (17)$$

なる条件を満たすビット数 n が必要である。これを n について解くと、

$$n \geq -\log_2\left(1 - 10^{-\frac{\Delta bk}{2.5}}\right) \quad (18)$$

であり、測定に必要なビット数 Res は

$$Res = \log_2 \left[\frac{\int_0^{\frac{\sigma}{2a}} N(x, 0, 1) dx \cdot 10^{\frac{\Delta m}{2.5}}}{3600 \cdot l \cdot \tan^{-1}\left(\frac{a \times 10^{-3}}{2f}\right)} + 1 \right] + n \quad (19)$$

である。

例として、基準星 $M_{ref} = 4.0$ [mag]、バックグラウンド等級 $M_{bk} = 23.0$ [mag arcsec⁻²]、焦点距離 $f = 25$ [mm]、星像の広がり $d = 25$ [μm]、画素サイズ $a = 5$ [μm]、露光時間 $t = 60$ [秒]、恒星の赤緯 $\sigma_s = +35.0$ [°] バックグラウンド測定時の誤差 $\Delta bk = 0.1$ [mag arcsec⁻²] とすると、

$$\begin{aligned} l &= \sin^{-1}\left[\sin\left(\frac{t}{240}\right) \cos \sigma_s\right] \\ &= \sin^{-1}\left[\sin\left(\frac{60}{240}\right) \cos 35.0\right] \\ &= 0.205 \text{ [}^\circ\text{]} \\ &= 737 \text{ [}''\text{]} \end{aligned} \quad (20)$$

であり、

$$\begin{aligned} n &= -\log_2\left(1 - 10^{-\frac{\Delta bk}{2.5}}\right) \\ &= -\log_2\left(1 - 10^{-\frac{0.1}{2.5}}\right) \\ &= 3.51 \end{aligned} \quad (21)$$

であるので、測定に必要なビット数 Res は、

$$\begin{aligned} Res &= \log_2 \left[\frac{\int_0^{\frac{\sigma}{2 \times 25}} N(x, 0, 1) dx \cdot 10^{\frac{19.0}{2.5}}}{3600 \times 737 \times \tan^{-1}\left(\frac{5 \times 10^{-3}}{2 \times 25}\right)} + 1 \right] + n \\ &= \log_2 \left(\frac{0.03983 \times 10^{7.6}}{15202} + 1 \right) + 3.51 \\ &= 6.72 + 3.51 \\ &= 10.23 \text{ [bit]} \end{aligned} \quad (22)$$

となる。

図 5 に、焦点距離 f と、基準星の等級を M_{ref} [mag] とバックグラウンドの等級を M_{bk} [mag arcsec⁻²] との差 Δm を変化させたときのダイナミックレンジを示す。

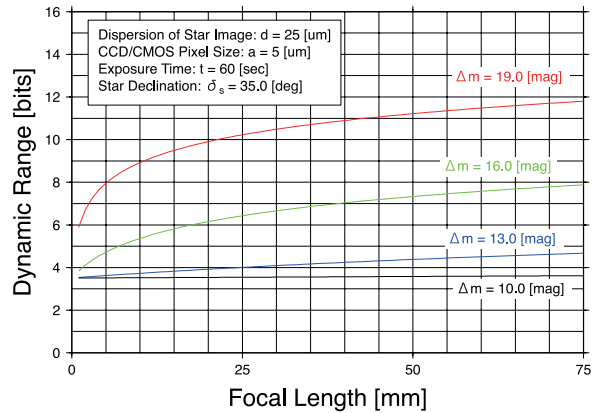


図 5 焦点距離と、基準星の等級とバックグラウンド等級との差を変化させたときのダイナミックレンジ

2.3 撮像素子の波長特性

図6にデジタル一眼レフカメラ（OLYMPUS E500）のGチャンネル分光特性の測定結果とJohnson Vフィルタ特性の比較結果を示す。デジタル一眼レフカメラのGチャンネルとJohnson Vフィルタはいずれも530nm付近にピークを持っており、半値幅100nm程度である。長波長側において若干特性に差異は見られるものの、半値幅の範囲においてはほぼ同様の分光特性を持っていることが確認された。本調査では基準星の等級の値としてJohnson V等級を用いることとする。

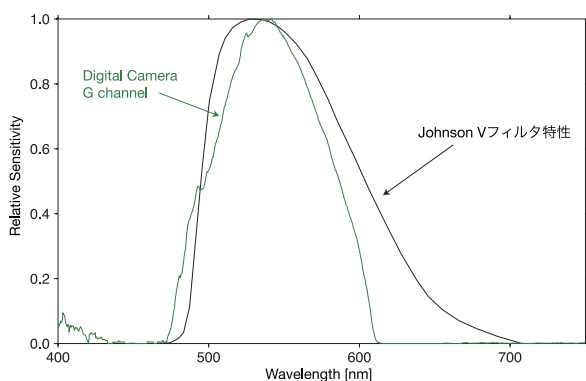


図6 デジタル一眼レフカメラ（OLYMPUS E500）のGチャンネル分光特性とJohnson Vフィルタ特性の比較

2.4 素子特性の補正

a) 一次処理

CCDおよびCMOSセンサには暗電流によるオフセットと素子間のゲインばらつきが存在する。一般には、一次処理として、撮影したオブジェクトフレームに対して、ダークフレームを減算することでオフセットを取り除き、フラットフィールドで除算することでゲインばらつきを補正している⁴⁾。図7にレンズ（開放F3.5）のF4.0におけるダークフレームおよびフラットフィールドの測定例を示す。図7のダークフレームは平均74カウント、最大2596カウントであり、フラットフィールドは、 24865 ± 487 カウントであった。また、測光時には9～31ピクセル程度の狭い範囲の測定を行なうため、フラットフィールドについては31ピクセルの移動平均を差し引いたものについても評価した。移動平均を差し引いたフラットフィールドは、 0 ± 229 カウントであった。

夜空の明るさの測定においては、バックグラウンドのカウント値を評価しており、そのカウント

値はおおよそ1000から5000カウントであることから、オフセットが測定結果に与える影響は大きいと考えられる。一方ゲインばらつきは、移動平均を差し引いたフラットフィールドから分かるように $\pm 1.0\%$ 以下であり、測定結果に与える影響は $\pm 0.01[\text{mag arcsec}^{-2}]$ 以下と小さい。よって、夜空の明るさの測定時にゲインばらつきの補正は省略できると考えられる。

以上から、提案する手法ではダークフレームの減算は行なうが、フラットフィールドによる除算は行なわないこととする。また測定時のF値は4.0とする。

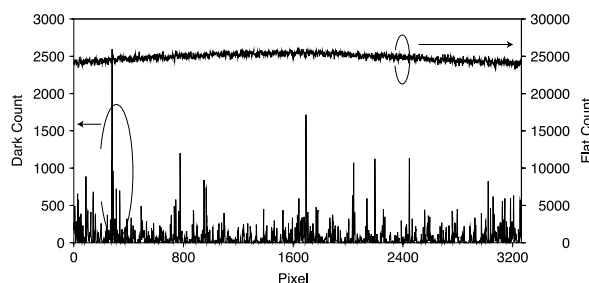


図7 ダークフレームおよびフラットフィールドの測定例（F4.0）

b) 感度特性曲線

カメラのイメージセンサないしはフィルムに入力される光量を変化させ、その応答を測定することでそれぞれの感度特性を求めた。光源として、光量が様な平面光源と透過率が段階的に変化している透過型濃度ステップウェッジを組み合わせたものを用いた。デジタル一眼レフカメラの場合は、光源を撮影したRAWデータをAdobe Camera Rawを用いてラスタ画像に変換し、RGBチャンネルのうちGチャンネルのカウント値を測定した。RAWデータをラスタ画像に変換する際にはホワイトバランスを4,000Kとし、色深度はRGBの各チャンネルとも16bitとした。フィルムの場合は、光源を撮影したポジフィルムを標準現像し、フィルムスキャナを用いてラスタ画像に変換し、デジタル一眼レフカメラと同様にGチャンネルのカウント値を測定した。いずれの場合も、ISO400、絞りF16.0、シャッタースピード1/4秒とし、デジタル一眼レフカメラおよびフィルムカメラの撮影条件を揃えている。図8にCMOSイメージセンサを採用しているNIKON D70, D40X,

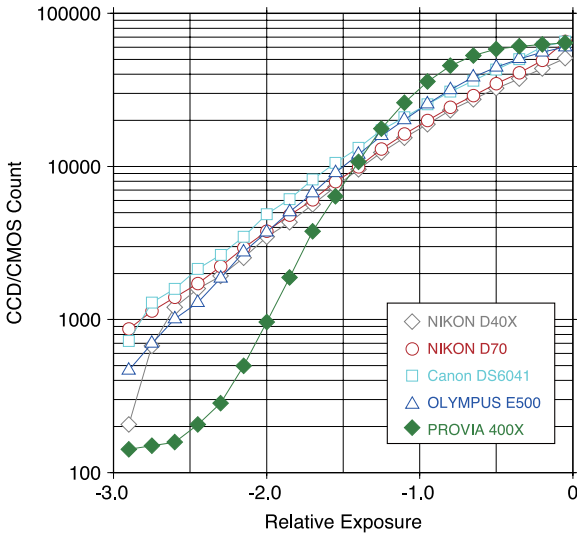


図8 デジタル一眼レフカメラの感度特性曲線測定結果

Canon DS6041, およびCCDイメージセンサを採用しているOLYMPUSのE500の感度特性曲線を, ポジフィルムPROVIA 400Xとともに示す. 横軸は相対露光量であり, 縦軸はカウント値である. ここで相対露光量とは, 平面光源の光量を基準として, 露光量を10を底とする対数で示したものである. 図8より, 撮像デバイスによってその感度特性が異なることがわかる. 特にフィルムの感度特性曲線と比較した場合, CCDおよびCMOSセンサのいずれも露光量が小さい領域での立ち上がりが早く, 低照度での感度が高いことがわかる.

c) 露光時間の検討

夜空の明るさの測定時には低照度のバックグラウンドの測光を行なう. 図8よりわかるように, CCDおよびCMOSセンサではポジフィルムと比較して低照度における感度が高い. 固定撮影時にフィルムに写る基準星同士の干渉を防ぎ, かつ測定時に最良のダイナミックレンジを得るために, 露出時間の短縮を検討した.

環境省による「全国星空継続観察」において行なわれている測定では, ISO感度400のポジフィルムを用いた80秒露光を基本としている. 比較的良好に測定される郊外での夜空の明るさは, この条件下でおおよそ3000から5000カウントである. 同等の明るさをデジタル一眼レフカメラで測定した場合のカウント値はポジフィルムに比べて2倍程度大きくなることが図8から読み取られる. また, ポジフィルムと同等のカウント値を得るため

には露光量を $10^{-0.2}$ から $10^{-0.3}$ 程度減らす必要がある. 提案する手法では光学系を変えることなく露光量を減らすために露光時間を60秒に短縮した.

d) 感度特性補正

図8に示した感度特性曲線を用いて, 撮像素子の感度特性を補正する. 撮像データの各画素のカウント値に対して以下に述べる補正を行なった. まず, 図8に示した感度特性曲線を関数Sを用いて

$$C = S(I) \tag{23}$$

と表わす. ここで, I は相対露光量, C はカウント値である. 次に, 測定で得られた各画素のカウント値を C_{obs} として, 対応する相対露光量 I_{obs} を

$$I_{obs} = S^{-1}(C_{obs}) \tag{24}$$

なる関係から求める. S^{-1} はSの逆関数であり, 実際には図8を用いて求める. 求めた相対露光量から, 補正後のカウント値 C_{corr} を

$$C_{corr} = C_{sat} \cdot 10^{I_{obs}} \tag{25}$$

を用いて求める. ここで定数 C_{sat} は撮像素子が飽和するカウント値である. 式(24)および式(25)の補正をまとめると,

$$C_{corr} = C_0 \cdot 10^{S^{-1}(C_{obs})} \tag{26}$$

となる. 式(26)の補正を各画素について行なうことで, デジタル一眼レフカメラの感度特性を補正することが可能である. 撮像素子によってその感度が異なることを考慮すると, 式(24)によって求めた相対露光量 I_{obs} と絶対露光量 I_{abs} の間には, 比例係数 α を持った

$$10^{I_{abs}} = \alpha 10^{I_{obs}} \tag{27}$$

なる関係があると考えられる. バックグラウンドの明るさを求める際には, 式(8)に示すように星像全体のカウント値Sとバックグラウンドのカウント値 bk の比が分かればよい. カウント値Sと bk はそれぞれ絶対露光量に比例するため, カウント値Sと bk との比を求めるには星像全体とバックグラウンドの絶対露光量の比を求めれば良いことになる. 一方, 式(27)より絶対露光量は相対露光量に比例することから, 相対露光量の比が分かれば絶対露光量の比を求めることができ, バックグラウンドの明るさを求めることが可能で

ある。よって、本手法では絶対露光量によらない感度特性の補正が可能である。

3 観測結果

3.1 基準星の選定と観測

式 (8) を用いて夜空の明るさを求めるためには基準星が一つあればよいが、基準星の天頂角や撮影データ上の位置によるばらつきを評価するため、本調査では複数の基準星を選定した。星表として“The Hipparcos and Tycho Catalogues”⁵⁾を用い、以下の条件をすべて満たす恒星を抽出した。

- 赤緯 + 15° から + 55° の範囲であること
- 5.2 等級以上であること
- その恒星の ± 0.6° 以内に、8.0 等級以上の恒星がないこと
- 変光星でないこと
- スペクトル型が B, A, F, G, K であること

この条件を満たす恒星のうち、気象条件により測定に用いることができた基準星は表 3 の通りである。これらの基準星のうち、調査時刻において天頂角が 25° 以下のものを測定に用いた。

夜空の明るさの測定には、表 3 に示した基準星を含む 0.3° 程度の領域を切り出し、基準星のカウント値とバックグラウンドのカウント値を求めた。バックグラウンドのカウント値として基準星のすぐ近傍の夜空の値を測定しているため、レンズの周辺減光の寄与を避けることができる。

3.2 観測条件

夜空の明るさの時間変化を調査するため、2008 年 3 月 8 日から 9 日にかけて静岡県浜松市においてキャンペーン観測を行なった。観測は市内外の 4 カ所で行なった。図 9 に観測地点を示す。このうち、市街地の観測地点 A において、ポジフィルムとデジタル一眼レフカメラの同時観測を行ない、測定結果の比較を行なった。

観測時間は 8 日 20 時から 9 日 5 時までであり、測定は 1 時間ごとに行なった。ポジフィルムカメラは 90 秒露光にて、デジタル一眼レフカメラは 60 秒露光にて天頂方向を撮影した。撮影条件を表 1 に示す。

まず、観測結果より基準星を測定したカウント値を確認した。基準星のカウント値 N_{nom} を式 (28) を用いて正規化した値 N_{norm} を図 10 に示す。

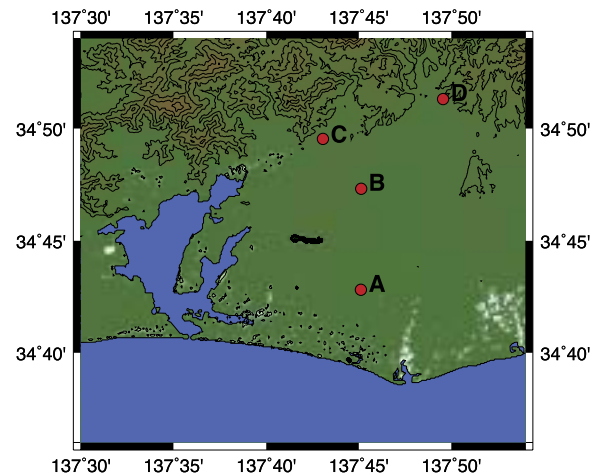


図 9 観測地点

表 1 撮影条件

	フィルム	デジタルカメラ
撮像素子	PROVIA 400X	OLYMPUS E500
デバイスサイズ	36 mm × 24 mm	17.3 mm × 13.0 mm
F ナンバー	F4.0	F4.0
焦点距離	50 mm	24 mm
露光時間	90 秒	60 秒

$$N_{nom} = 2.5 \log \frac{C_{obj}}{65536} + M_{ref} \quad (28)$$

ここで、 C_{obj} は測定された基準星のカウント値、 M_{ref} は基準星の等級である。図 10 では、同一時刻における値を 1 本の線で表わし、すべての観測時刻における測定結果を重ね書きしている。理想的な観測条件下では、天頂角 z の基準星の場合、等級および $1/\cos z$ に比例したカウントが得られる。天頂角による変動は、0° から 20° の範囲では 0.07 等程度であるが、図 10 を見ると明らかのように、観測結果には最大で ± 0.5 等程度のばらつきが見られる。このばらつきは、デジタル一眼レフカメラを用いた観測結果だけではなく、フィルムカメラを用いた観測結果にも生じている。よって、デジタル一眼レフカメラ固有のばらつきであるとは考えにくく、基準星の光度変動であると考えるのが妥当である。この光度変動は、薄雲の影響によって生じる基準星光度の場所による違いや時間変化などによるものであると考えられる。本検討においては、デジタル一眼レフカメラを用いた測定結果およびフィルムカメラを用いた測定結果のいずれにも、観測対象の光度変動によるものと思われるばらつきが、最大で ± 0.5 等程度あ

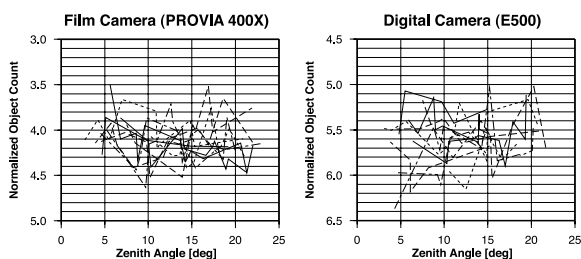


図10 基準星のカウント値の天頂角依存性

ることを念頭に置いて、両手法の比較を行なうこととする。

4 データ処理と観測結果

4.1 基準星の大気減光補正

可視光に対する大気の大減光係数 $a(h)$ は、天頂角が 0° のときに、

$$a(h) = 0.1451 \exp\left(-\frac{h}{7.996}\right) + 0.156 \exp\left(-\frac{h}{1.5}\right) + 0.016 \quad (29)$$

と表わされる⁶⁾。ただし、 h は観測点の高度[km]である。また、大気の大減光は光が大気外から観測点まで到達する大気量によって異なり、天頂角 0° に対する比 $F(z)$ で表わすことができる。この $F(z)$ は

$$F(z) = \frac{1}{\cos z + 0.025 \exp\left(-\frac{11}{\cos z}\right)} \quad (30)$$

によって与えられる。式 (29), (30) より大気の大減光による基準星の等級の補正值 Δm は、

$$\Delta m = a(h)F(z) \quad (31)$$

となる。恒星の光度を測定するにはこの大気の大減光を補正して解析を行なった。

4.2 観測結果

本観測では1時間ごとに複数の基準星を用いた測定を行なった。測定時刻と測定できた基準星の数を表2に示す。

この測定データから、観測時刻における測定値の平均および標準偏差を求めた結果を図11に示す。図11において、横軸は観測時刻を、縦軸は夜空の明るさを単位立体角あたりのバックグラウンドの等級を表わす。

観測開始の20時より夜空の明るさは単調に減少し、観測終了の5時まで大きく増加することはなかった。また、明るさの変化量は夜半前に大き

表2 測定時刻と測定できた基準星の数

フィルム撮影時刻	測定数	デジタルカメラ測定時刻	測定数
20:00	5	20:00	5
21:02	9	21:00	9
22:03	6	22:00	10
23:03	6	23:00	11
00:02	9	00:00	13
01:02	7	01:00	9
02:02	11	02:00	10
03:02	11	03:00	12
04:02	19	04:00	11
05:02	6	05:00	8

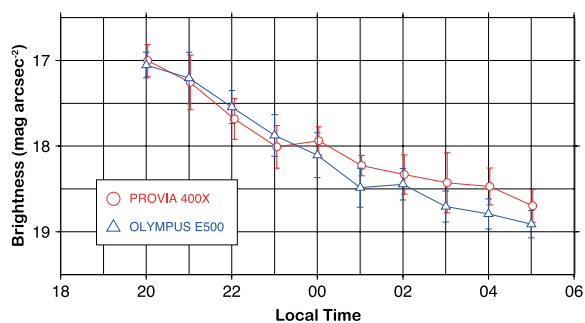


図11 各観測時刻における測定値の平均および標準偏差

く、夜半後には変化量が緩やかになっている。これらの変化はPROVIA 400XおよびOLYMPUS E500で共通である。一方、各時刻における測定値のばらつきは、図11からOLYMPUS E500においては $\pm 0.15 \sim \pm 0.30$ [mag arcsec⁻²]程度であり、PROVIA 400Xによる $\pm 0.12 \sim \pm 0.35$ [mag arcsec⁻²]であることがわかる。

次に、各時刻における測定データから、異なる撮像デバイスで同時刻に同一基準星を用いて測定した値を比較した結果を図12に示す。横軸はPROVIA 400Xを用いて測定した夜空の明るさであり、縦軸はOLYMPUS E500を用いて測定した夜空の明るさである。測定時に基準星として4.8等級以上の明るい恒星を用いた結果と、4.8等級よりも暗い恒星を用いた結果を区別して示している。PROVIA 400Xを用いた測定結果とOLYMPUS E500を用いた測定結果の差は、0.36 [mag arcsec⁻²]程度のばらつきを持って一致することがわかる。このばらつきは、同一基準星を同時に異なる撮像デバイスで測定したときに生じる誤

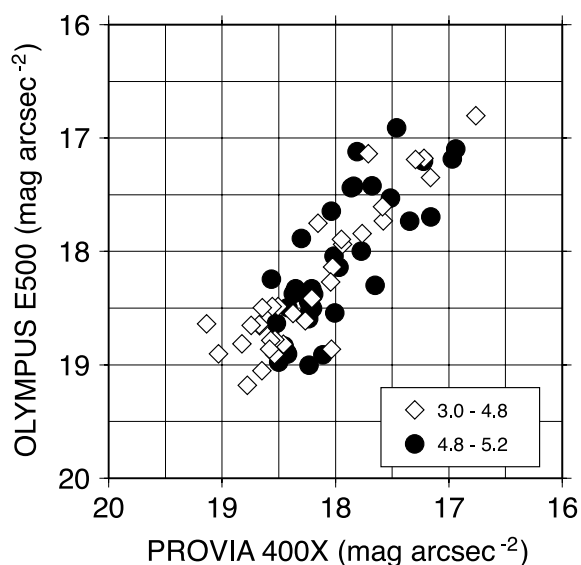


図12 PROVIA 400XとOLYMPUS E500で同一基準星を用いて測定した値の比較

差を表わしている。図12より、特に4.8等級より暗い恒星を基準星として用いた場合に誤差が大きくなっている。また、4.8等級以上の明るい恒星を基準星として用いた場合でも、バックグラウンドが18.5[mag arcsec⁻²]以下の暗い条件では同様に誤差が大きくなっている。また、図11よりバックグラウンドの低い条件では、PROVIA 400Xを用いた測定値の方がOLYMPUS E500を用いた測定結果に比べて明るめの結果になっている。

5 観測誤差

気象条件による基準星の光度変動以外の誤差要因について検討した。誤差要因として、基準星の色温度とフィルターとの関係によるものや、光学系の周辺減光によるものが考えられる。

まず基準星の色温度による測定値のばらつきについて検討した。基準星のスペクトル型と夜空の明るさの測定値の比較から、夜空の明るさの測定値には $\pm 0.2 \sim \pm 0.3$ [mag arcsec⁻²]程度のばらつきがあるものの、明らかなスペクトル型依存性は見られなかった。これは、図6に示すように測定に用いた撮像デバイスの波長特性と、基準星を測光したフィルタの特性がほぼ一致しており、基準星の色温度に対する撮像デバイスの応答が再現できているためであると考えられる。

次に周辺減光による測定値のばらつきについての検討を行なった。画像の中心からの角度と夜空の明るさの測定値の比較から、夜空の明るさの測

定値には $\pm 0.2 \sim \pm 0.3$ [mag arcsec⁻²]程度のばらつきがあるものの、明らかな角度依存性は見られなかった。本手法では、式(8)に示すようにバックグラウンドの明るさを求める際には、星像全体のカウント値 S とバックグラウンドのカウント値 bk の比を求める。 bk は基準星の周囲の画像データを用いて求めるため、周辺減光は星像全体のカウント値 S とバックグラウンドのカウント値 bk のいずれにも同程度生じる。よってカウント値 S と bk の比は周辺減光の影響を受けにくい。このため、測定値に撮像デバイスの中心からの距離による影響は見られないと考えられる。

以上より、基準星の色温度とフィルターとの関係による誤差や、光学系の周辺減光に起因する誤差は比較的小さく、本観測における測定ばらつきの原因として、気象条件による基準星の光度変動が支配的であることが確認された。

6 観測結果の解釈

図12からわかるように、ポジフィルムの測定結果と今回使用したデジタル一眼レフカメラの測定結果とは、正の相関があり、その残差は0.36[mag arcsec⁻²]程度であった。また、図10に示すように気象条件による基準星の光度変動は ± 0.5 [mag arcsec⁻²]程度であった。この光度変動は、提案する測定手法と従来のポジフィルムを用いた測定手法との測定値の差を議論するには大きく、気象条件の良い状態でのさらなる観測が必要である。

一方、これまでにポジフィルムを用いて測定されている夜空の明るさの測定誤差は $\pm 0.3 \sim 0.5$ [mag arcsec⁻²]程度である。提案する測定手法と従来の測定手法を用いた結果はこの誤差の範囲内には収まっており、提案する測定手法によって従来の手法を置き換えることが可能であることを示している。

また、図12よりバックグラウンドの低い条件では、PROVIA 400Xを用いた測定値の方がOLYMPUS E500を用いた測定結果に比べて明るめの結果になっている。これは、図8に見られるようにPROVIA 400Xの感度曲線が低照度において底打ちとなっているため、バックグラウンドの低い条件では実際よりも明るめに測定されているためであると考えられる。デジタル一眼レフカメラの感度特性の直線性がフィルムに比べて良いことを考慮すると、これまでのフィルムによる夜空

の明るさの測定結果はやや明るめに評価していた可能性があることも明らかになった。

7 まとめ

CCDもしくはCMOSセンサを用いたデジタル一眼レフカメラにおいてその特性を補正する手法を開発し、夜空の明るさの測定への適用を検討した。また、フィルムカメラとデジタル一眼レフカメラの同時観測を行なうことで、我々の提案する手法の妥当性を確認した。その結果、従来のポジフィルムを用いた測定手法による観測結果との差が $\pm 0.36[\text{mag arcsec}^{-2}]$ であり、気象条件の良い状態でのさらなる観測が必要であるものの、従来の手法を置き換えることが可能であることが分かった。

8 謝辞

本手法の開発にあたり、フィルムカメラとデジタル一眼レフカメラの同時観測にご協力いただいた西遠女子学園天文地理学部の関係諸氏に深くお礼申し上げます。なお、キャンペーン観測については浜松市天文協会夜空の明るさ調査グループの活動として行なわれております。また、富士フィルム株式会社には調査用のフィルムのご提供をいただいております。この場をお借りしてお礼申し上げます。

9 参考文献

- (1) 環境庁大気保全局. 光害対策ガイドライン, pp.10(1998).
- (2) S. Isobe, and H. Kosai: Star watching observations to measure night sky brightness, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, **139**, 175–184, (1998).
- (3) Bryce E. Bayer: Color Imaging Array, US pat. 3,971,065, (1976).
- (4) 福島英雄. 天文アマチュアのための冷却 CCD 入門, 文堂新光社, pp.111(1996).
- (5) E. Hog, C. Fabricius, V.V. Makarov, et al.: The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 million brightest stars, *A&A*, 355, (2000).
- (6) Daniel W. E. Green. Magnitude Corrections for Atmospheric Extinction, *International Comet Quarterly*, **14**, 55–59, (1992).

表 2 測定時刻と測定できた基準星の数

HIP 番号	V 等級	赤経	赤緯	スペクトル型
33018	3.60	6h52m47.3s	33° 57' 40.9"	A3
33927	5.20	7h2m24.8s	24° 12' 55.6"	G5
34752	4.91	7h11m39.3s	39° 19' 14.0"	K4
35846	5.04	7h23m28.6s	25° 3' 2.2"	G8
39847	4.78	8h8m27.5s	51° 30' 24.0"	A2
40843	5.13	8h20m3.9s	27° 13' 7.0"	F6
41075	4.25	8h22m50.1s	43° 11' 18.1"	K5
42806	4.66	8h43m17.2s	21° 28' 6.9"	A1
42911	3.94	8h44m41.1s	18° 9' 17.5"	K0
43531	5.15	8h51m56.8s	43° 43' 35.4"	K0
43834	5.23	8h55m39.7s	27° 55' 39.2"	G8
44127	3.12	8h59m12.8s	48° 2' 32.5"	A7
45493	4.80	9h16m11.3s	54° 1' 18.2"	A5
48113	5.08	9h48m35.2s	46° 1' 16.4"	G2
49583	3.48	10h7m20.0s	16° 45' 45.6"	A0
52098	4.68	10h38m43.2s	31° 58' 34.4"	G0
52457	5.08	10h43m25.0s	23° 11' 18.2"	A3
53295	4.66	10h53m58.7s	43° 11' 24.1"	A1
53721	5.03	10h59m28.2s	40° 25' 48.4"	G0
53838	5.06	11h0m50.5s	39° 12' 43.7"	Am
53910	2.34	11h1m50.4s	56° 22' 56.4"	A1
53954	4.42	11h2m19.8s	20° 10' 47.1"	A1
54539	3.00	11h9m39.9s	44° 29' 54.8"	K1
55560	4.99	11h22m49.6s	43° 28' 57.9"	G8
57399	3.69	11h46m3.1s	47° 46' 45.6"	K0
60202	4.72	12h20m43.1s	17° 47' 33.6"	G8
60485	4.76	12h24m1.5s	51° 33' 44.0"	G7
60646	5.01	12h25m51.0s	39° 1' 7.3"	G8
61317	4.24	12h33m45.1s	41° 21' 24.4"	G0
62763	4.93	12h51m41.9s	27° 32' 26.6"	G0
63901	5.20	13h5m44.5s	35° 47' 55.9"	B9
64394	4.23	13h11m52.9s	27° 52' 33.7"	G0
64540	4.94	13h13m43.0s	40° 9' 10.3"	K0
64906	5.14	13h18m14.5s	49° 40' 55.3"	A0
66257	4.91	13h34m47.7s	37° 10' 56.8"	F2
67275	4.50	13h47m16.0s	17° 27' 24.4"	F7
67459	4.05	13h49m28.7s	15° 47' 52.1"	K5
68103	5.02	13h56m34.2s	27° 29' 31.9"	K3
69226	4.82	14h10m23.9s	25° 5' 30.6"	F9
70497	4.04	14h25m12.0s	51° 51' 6.2"	F7
71075	3.04	14h32m4.8s	38° 18' 28.4"	A7
72125	4.60	14h45m14.5s	16° 57' 51.9"	K0
73568	4.80	15h2m6.5s	25° 0' 29.7"	K4
77655	4.79	15h51m13.9s	35° 39' 29.6"	K0
77661	4.74	15h51m15.9s	20° 58' 40.4"	K5
78180	4.96	15h57m47.6s	54° 44' 58.2"	F0
78592	4.72	16h2m47.9s	46° 2' 12.7"	B9
80181	4.86	16h22m5.9s	30° 53' 30.2"	K0
80816	2.78	16h30m13.3s	21° 29' 22.7"	G8
81126	4.20	16h34m6.2s	42° 26' 12.8"	B9
81833	3.48	16h42m53.7s	38° 55' 20.9"	G8
82504	5.03	16h51m45.3s	24° 39' 23.1"	K2