三重大学教育学部研究紀要　第 69 巻　自然科学（2018）31－37 頁

熊野市の夜空の明るさ計測

ー夜空の明るさと色の関係ー

伊藤　信成*・越村　真帆*・萩原　拓也*・加藤　明音*

Night Sky Brightness Measurement in Kumano
－Relation between Night Sky Brightness and Sky Color－

Nobunari ITOH, Maho KOSHIMURA, Takuya HAGIHARA, and Akane KATO

Abstract

人工光により夜空が明るくなる現象は光害と呼ばれ、公害の 1 つと認定されている。光害の把握は生活環境改善の為に欠かせない。近年、照明機器として LED の普及が進んでおり、夜空の明るさとともに夜空の色の変化が懸念され、その評価が求められている。夜空の色を評価する取り組みは僅少であり、本研究ではデジタル一眼カメラを用いて、夜空の明るさと色を評価した。主たる評価地点は熊野市近郊とした。その結果、夜空の色を統一的に評価するためには、カメラの色特性を補正する必要があること、熊野近郊の夜空の明るさは天体観測の好適地との比較から良好な環境であること、夜空が明るくなると夜空の色が青くなる傾向があることがわかった。またデジタルカメラ画像から夜空の色を求める手法の確立と測定精度評価ができたと考える。
キーワード：夜空の明るさ、夜空の色、光害、デジタルカメラ、RGB

1. はじめに

人工光により夜空が明るくなる現象は光害と呼ばれている。光害は、単に夜空が明るくなり天体観測に影響を及ぼすだけではなく、街灯から差し込む光により安眠が阻害される等の居住者に対する影響や、まぶしさのためにドライバーが歩行者や標識を見落とすといった交通への影響、出穂や落葉の遅れなどの植物への影響、野生生物の異常行動や生態系への影響など、様々な分野での影響があることが報告されている（環境省，2006）。さらに、光はエネルギーであり、過剰な明るさや不必要な方向に漏れた光はエネルギーの損失につながる。磯部・浜村（2000）は人工衛星の画像から、宇宙空間に放射された不必要な光は CO_2 換算で年間約 20 万 t に相当すると報告している。光害は公害の 1 つと認定されており、その把握は生活環境改善の為に欠かせない。人工衛星から撮影した夜の地表面の様子からは、北米や欧州、日本など先進諸国だけでなく、インドや中国、ブラジルなど近年経済成長が著しい地域の夜空も非常に明るいことがわかる。2016 年に発表された世界の光害状況の調査では、北米では人口の 80%、日本では 70%が天の川が見えない地域に居住していると報告されている（Falchi1, *et al.*, 2016）。

また、天の川の見える夜空は、近年、地域活性化の 1 つとして観光資源化が進んでいる。例えば、長野県阿智村では“日本一の星空ツアー”を実施し、村民の 10 倍の観光客を呼び込むことに成功している（永井, 2016）。このように、これまで見過ごされてきた地域の自然環境を観光資源として活用することも期待できる。三重県南部地域は紀伊山地により名古屋や京都・大阪の大都市圏の都市光が遮られていることもあり、日本国内でも都市光の影響が少ない地域である。中京・近畿圏から比較的容易にアクセスできる地に天文研究に適した環境があることは貴重である。

夜空の明るさの評価方法は後述するように眼視による方法、デジタルカメラによる方法、専用の測定装置による方法に大別できる。これらの方法はいずれも肉眼でみた場合の夜空の明るさを評価するものであるが、一方で夜空の色についてはほとんど評価されてこなかった。夜空の色は、明るさと同様に地域によって変化する可能性が高い。近年、街灯として LED が使われるようになってきている。LED はこれまで街灯として一般的に利用されてきた水銀灯とは分光特性が異なっており、夜空の明るさに対しどの程度の影響を及ぼす

＊三重大学教育学部

か評価する必要がある。

以上のことから、本研究ではデジタル一眼カメラを用いて夜空の明るさと夜空の色を評価する方法を検討した。また、熊野市近郊の夜空について適用を試みたので報告する。

2. 夜空の明るさの測定方法

夜空の明るさの評価方法は眼視による方法、専用の測定装置による方法、デジタルカメラによる方法に大別できる。

眼視による方法は、特定の天域に見える星の数を数えることで眼視可能な最も暗い星の等級を測定し、そこから夜空の明るさを推定する方法が一般的である。特別な機器が不要なため最も実施が容易な方法であるが、星の見え方は個人差があるため、個々の測定結果の精度は高くない。

次に専用の測定装置によるものとしては、Sky Quality Meter（SQM）を用いたものが挙げられる。SQMは単素子のフォトダイオードを使用した測定装置で、フォトダイオードの出力を夜空の明るさに変換している。SQMはボタンを押すだけで、その場で夜空の明るさを瞬時に数値として得ることができるため、世界中でその利用が広まっている（Birriel, *et al*., 2010）。一方で、市街地での利用においては必ずしも適していないことが指摘されているとともに（星空公団, 2016）、フォトダイオードの出力から夜空の明るさへの変換については、出力時の較正のみで経時変化についてはほとんど考慮されていないといった課題もある。

最後にデジタルカメラを用いた方法としては、デジタル一眼カメラで撮影したRAW形式の画像を用い、そこに写っている星の明るさと夜空の明るさを比較することで、夜空の明るさを算出する方法が一般的である。この方法は、データ処理が必要となるため、上記2種の方法に比べ夜空の明るさの推定に時間がかかる。一方で、撮影の都度、画像に写る等級既知の星を用いての等級較正を行うことができるため、信頼度の高いデータを提供することができる。また、デジタル一眼カメラはRGBの3色のフィルターを用いて画像を取得し、それを1枚のカラー画像に合成している。このため、眼視やSQMでの観測では得られない異なる波長での夜空の明るさの情報を得ることができる。加えて、デジタル一眼カメラでは、画像をRAW形式で保存することができるため、非可逆圧縮されていない取得を取得できる。

以上のことから、本研究ではデジタル一眼カメラを用いて夜空の明るさを測定することとした。今回使用したカメラの設定および撮影条件を表1に示す。詳細

表1　カメラの設定および撮影条件

カメラ型番	Nikon D5200
ISO感度	1600
出力形式	RAW形式（14bit）
露出時間	10s、20s、30s

は3章で述べるが、カメラ自体が発する人工的な信号（バイアス、ダーク）の影響を除去するため、撮影の際は露出時間の異なる3種の画像を取得した。

3. データの収集と解析

図1aは人工衛星VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) によって得られた三重県周辺での夜間の地表面の明るさ分布を示したものである†。名古屋や大阪の大都市圏は非常に明るく、三重県でも伊勢湾沿岸の地域が明るいことがわかる。一方で三重県南部地域は比較的暗い状況である。図1aには、後の議論で参照する東京大学木曽観測所、日本一の星空を標榜し星空の観光資源化に取り組んでいる長野県阿智村、三重県内との比較のためにデータ収集を行った長野県しらびそ高原の位置も示してある。図1aから、熊野市周辺

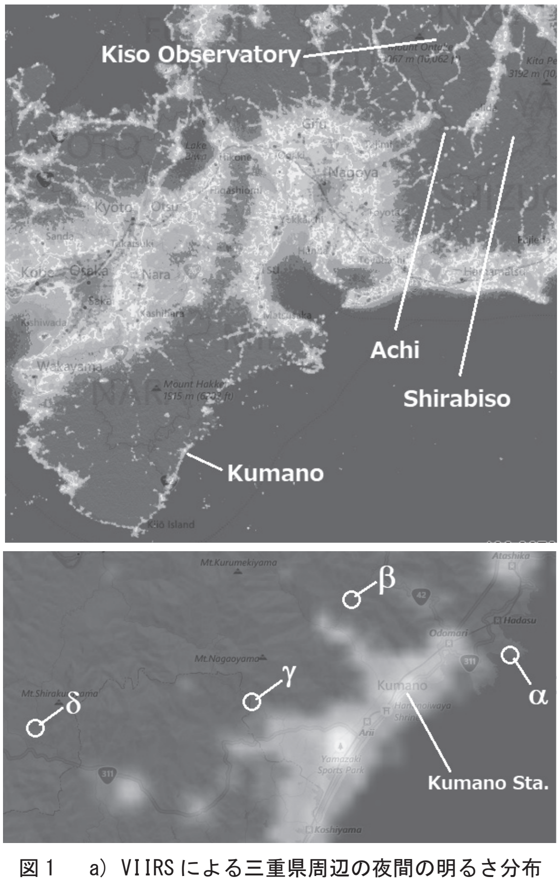

図1　a）VIIRSによる三重県周辺の夜間の明るさ分布
b）熊野市周辺の夜間の明るさ分布と観測地点

†https://www.lightpollutionmap.info/

は、天文研究施設である東京大学木曽観測所や阿智村と同程度の夜空の暗さであると予測される。ただし、図 1a のもとになった VIIRS の Day/Night Band は中心波長 0.7 μm で、0.5～0.9 μm に感度を持っており（Miller, *et al.*, 2013）、0.55 μm に最大感度を持つヒトの目とは分光感度特性が異なる。したがって、ヒトの目で見た場合と明るさ分布が異なる可能性があり、確認の必要がある。

図 1b は熊野市周辺の衛星画像である。熊野市域で最も明るい地点は熊野市駅周辺であり、市街地は概ね明るいが、市街地を外れると暗い地域が広がっている。そこで、衛星画像を参考に 4 ヶ所の測定地点を設定した。測定地点の一覧を表 2 に示す。比較のために三重大学教育学部屋上、長野県の東京大学木曽観測所、天体写真撮影の好地として知られる長野県しらびそ高原でも撮影を行った。なお、撮影は天文薄明終了後月の出前の時間帯で行い、しらびそ高原ではおおぐま座を、それ以外の地点ではペガスス座を中心とした領域を撮影した。

表 2　夜空の明るさの測定地点

測定地点	経度	緯度	測定日
α　井内浦農業公園	136.14°	33.90°	2016/11/17
β　大馬集会所	136.08°	33.92°	2016/11/17
χ　少年自然の家	136.05°	33.88°	2016/11/17
δ　丸山千枚田	135.96°	33.88°	2016/11/17
三重大学	136.52°	34.75°	2016/12/01
木曽観測所	137.63°	35.80°	2017/08/19
しらびそ高原	138.43°	35.43°	2017/05/20

画像の解析は①取得画像の 3 色分解、②等級既知の星の測光、③星が写っていない領域（以降、SKY 領域）の測光、④夜空の明るさの算出、の 4 段階から成る。

まず①については、RAW 形式から天文研究分野で一般的に利用されている FITS 形式に変換する過程と合わせて実施した。画像変換には星空公団が開発したフリーソフト raw2fits‡ を用いた。このソフトは画像形式の変換とともに、カラー画像を R、G、B の単色画像に分離する機能を有しているので、画像形式の変換と 3 色分離が同時に行える。

次に②の星の測光について述べる。本研究は星ではなく SKY 領域の明るさの測定が目的である。そのためには等級既知の星の測光が不可欠となる。星の測光のためには、画像内に写っている星と星表記載の星との比較による同定が必要であり、今回は星表として Tycho-2 Catalog（Hog, *et al.*, 2000）を用いて同定を行った。同定した星は天体画像処理ソフトのマカリィ（Horaguchi, *et al.*, 2006）で開口測光を行った。測光の結果を等級に変換する際には幾つかの補正が必要である。いま、測光から得られた R、G、B の 3 色での星の単位時間当たりの測光値を n_R, n_G, n_B とし、

$$b = -2.5\log_{10} n_B \quad \cdots (1)$$
$$g = -2.5\log_{10} n_G \quad \cdots (2)$$
$$r = -2.5\log_{10} n_R \quad \cdots (3)$$

とおく。この b, g, r は機器等級と呼ばれる量である。この機器等級を天文研究分野で広く使われている Johnson-Cousins 標準測光系の 3 種のバンド（B, V, R_C バンド）の等級に変換する。ここで B バンドは有効波長 436 nm、V バンドは 549 nm、R_C バンドは 641 nm の波長帯である（Bessell、2005）。この変換により様々な地点での結果を統一的に比較できるようになる。機器等級から Johnson-Cousins 標準測光系への変換式を式（4）～（6）に示す。

$$B = b + k_{bg}\cdot(b-v) + \kappa_B \cdot \sec z + C_B \quad \cdots (4)$$
$$V = g + k_{gr}\cdot(g-r) + \kappa_V \cdot \sec z + C_V \quad \cdots (5)$$
$$R_C = r + k'_{gr}\cdot(g-r) + \kappa_{R_C} \sec z + C_{R_C} \quad \cdots (6)$$

ここで、k_{bg}, k_{gr}, k'_{gr} はカメラの観測波長と星表の観測波長の相違を補正するための係数（カラー補正係数）、$\kappa_B, \kappa_V, \kappa_{R_C}$ は地球大気による光の減光を補正する係数（大気補正係数）、z は天頂から星までの角度（天頂距離）である。また、C_B, C_V, C_{R_C} は等級のゼロ点である。観測結果から b, g, r および z がわかり、星表から B, V, R_C の値を得ることができるので、それぞれの値を式（4）～（6）に代入することで、未知数であるカラー補正係数、大気補正係数、および等級のゼロ点を決定することができる。これらの係数は、これ以降の SKY 領域の明るさの推定にも利用する。なお、各係数は観測条件によって変化するので、観測日毎に計算を行う。ただし、今回の測定では天頂距離 z がほぼ同じ領域を撮影したため、大気の影響を一定とみなすことができる。そこで以降の解析では大気補正項を定数として扱い、等級ゼロ点に含めて扱うこととした。なお、今回用いた Tycho-2 Catalog には R_C の等級の記述がないので、Natali *et al.*（1994）の手法を用いて、R_C 等級を算出し利用した。

次に③では、SKY 領域の測光を行う。夜空の明るさは 1 平方秒（1 arcsec^2）あたりの明るさを等級で評価し、単位は[$\mathrm{mag\,arcsec^{-2}}$]となる。一方で、画像から直接得られるのは 1 画素当たりの信号量（単位は[$\mathrm{DN\,pixel^{-1}}$]）であるので、1 arcsec^2 あたりの値に変換する必要がある。そこで、星表に記載された恒星位置から 2 星間の角距離を求め、画素数との対応から 1 画素の

‡ https://www.kodan.jp/?p=products

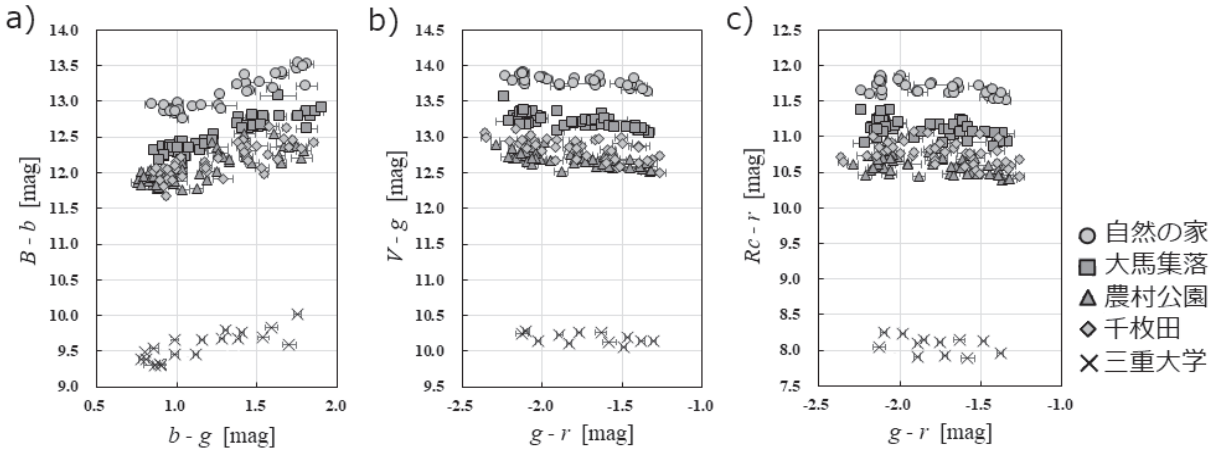

図 2　機器等級の色指数と標準測光系と機器等級の差の関係
a) B 等級での関係，b) V 等級での関係，c) R_C 等級での関係

視野を算出した。以上により、1arcsec^2 あたりの信号量η [DN arcsec^{-2}]を算出することができる。

最後に④については、③で求めた各色のηを式（1）～（6）に代入することで、SKY 領域の明るさを推定することができる。

4. 結果

4.1.　各係数の算出

まず、上記の式（4）～（6）の妥当性を検証するため、機器等級の色指数と標準測光系と機器等級との差の関係を評価した結果を図 2a～c に示す。各図で測定点毎の結果が縦軸方向にずれているのは、観測条件の違いによりゼロ点が変化しているためである。

各図の分布の傾きが k_{bg}, k_{gr}, k'_{gr} に相当する。図 2a では、(*b-g*) と (*B-b*) に正の相関があることがわかる。それぞれの観測点でデータのバラツキはあるものの、同じカメラで撮影しているので、傾きは誤差の範囲で一致し有意さは検出されなかった。一方で、図 2b、2c では測定結果の分布に負の相関がみられ、B 等級とはカラー補正の傾向が異なっていることがわかる。また傾きの絶対値は各々B 等級に比べて小さくなっている。

それぞれの観測波長において、測定値から求めた傾きは以下のようになった。

$$k_{bg} = \frac{\Delta(B-b)}{\Delta(b-g)} = 0.59 \pm 0.08 \quad \cdots(7)$$

$$k_{gr} = \frac{\Delta(V-g)}{\Delta(v-r)} = -0.24 \pm 0.08 \quad \cdots(8)$$

$$k'_{gr} = \frac{\Delta(R_C-r)}{\Delta(v-r)} = -0.20 \pm 0.14 \quad \cdots(9)$$

この結果から、単にゼロ点の補正のみでカラー補正を行わなかった場合には、天体によって B 等級では 0.6 mag 程度、V および R_C 等級では 0.2 mag 程度の系統的なズレが生じる可能性がある。この値は後述する等級の推定精度よりも大きく、無視することはできない。なお、上記（7）～（9）の値はカメラ毎に違う可能性があるので、使用するカメラ毎に評価を行う必要がある。

次に、カラー補正係数に関連し、機器等級から求めた恒星の色と標準測光系での星の色の比較を図 3a、b に示す。図 3a は（$B - V$）、図 3b は（$V - R_C$）に対する結果である。カメラの R、G、B の波長特性が標準測光系と同じであれば、図 3a、b での測定値分布の傾きは 1 となる。図 3a の (*b-g*) と (*B-V*) の相関を見ると、傾きが 1.80 であり、1 と比べ 2 倍近い値となっている。この結果は、標準測光系に比べ今回用いた D5200 では青い波長域での色の変化が約 1/2 に圧縮されるため、天体の色の変化が検出しにくくなる可能性を示唆している。一方で、図 3b での傾きは 0.94 と 1 に近い結果となっており、(*g-r*) の方が (*b-g*) に比べれば、標準測光系との差が小さく、カメラの色特性の影響を受けにくいことがわかる。

さらに、式（4）～（6）に求めた係数を適用し、機器等級から推定した標準測光系での等級と星表記載の等級との残差の分布を図 4a～4c に示す。各観測地点での結果を重ね合わせてある。各バンドとも星の等級に

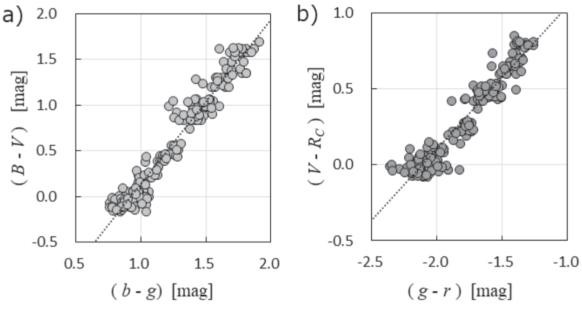

図 3　機器等級と標準測光系での色指数の比較
a) (b-g) と (B-V) の関係、b) (g-r) と (V-RC) の関係

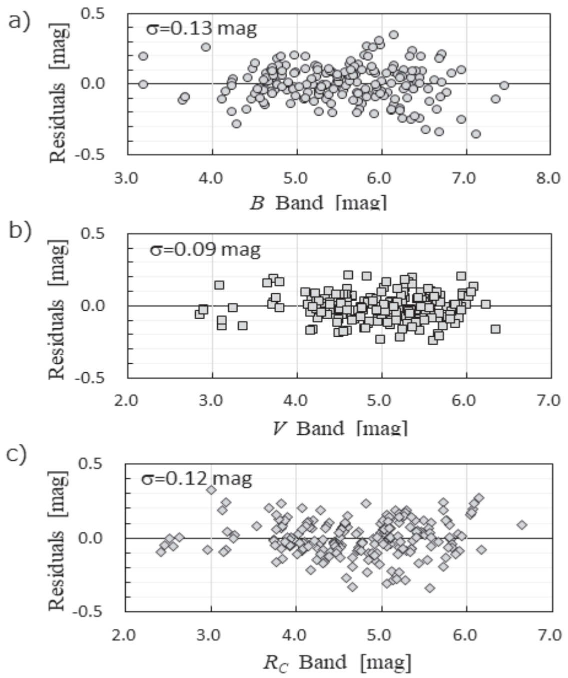

図 4　等級残差分布
a) *B* バンド、b) *V* バンド、c) R_C バンド

よるσの変動は顕著には見られず、観測地点間の系統的な変化もなかった。残差の標準偏差σは概ね 0.1 mag であり、この値を星の測光精度とみなすことができる。

4.2.　各観測地点での夜空の明るさ

これまでの結果をもとに、各測定地点での夜空の明るさの算出値を表 3 に示す。参考に多数の大型望遠が建設されているハワイ島マウナケア山頂[1]および名古屋市内[2]での値を示す。夜空の明るさは数値が大きいほど暗いことを表しており、1 mag の等級差は $10^{2/5}$ 倍（～2.5 倍）に相当する。肉眼での見え方に最も近い *V* バンドで観測地点の空の明るさを比較すると、熊野地域は三重大学での明るさに比べ 2.2～2.5 mag、すなわち 1/7.6～1/10 の明るさになっており、名古屋市内の明るさと比べると 1/40 の明るさになっている。一方で、マウナケアでの明るさと比較すると 0.6～0.9 mag の違いがあり、約 2 倍の明るさとなっている。また、熊野市近郊の 4 地点間でも最大 0.3 mag の違いがあった。これは 30%の明るさの違いに相当する。*B* バンドでも同様の明るさの違いとなっている。一方で R_C バンドでの熊野の明るさはマウナケアと 0.2～0.5 mag の差となっている。この等級差は明るさでは 20～60%の違いに相当し、B、V バンドに比べマウナケアとの明るさの差が縮小している。

表 3　夜空の明るさの測定結果

測定地点		夜空の明るさ [mag arcsec^{-2}]		
		B	*V*	R_C
α	農業公園	21.5	20.7	20.3
β	大馬集会所	21.3	20.5	20.0
χ	少年自然の家	21.3	20.5	20.0
δ	丸山千枚田	20.9	20.4	20.0
	三重大学	18.6	18.2	17.6
	木曽観測所	21.8	20.9	20.4
	しらびそ高原	22.7	21.6	20.8
	マウナケア	22.1	21.3	20.4
	名古屋	―	16.4	―

5. 考察

5.1.　カメラの色指数

4.1 節の図 2 で示したように（*g-r*）と（*V-R*$_C$）の変化率が比較的等しく、（*b-g*）の変化が（*B-V*）の変化に比べて小さいことから、D5200 での R、G、B の 3 色の波長特性において、R と G の波長特性は標準測光系の *V* と R_C の波長特性に近く、B の波長特性は標準測光系の *B* の波長よりも長波長側にシフトしていることが予測される。Sigernes, *et al*.（2009）は Nikon 社製のデジタル一眼カメラ D300 の波長特性を調べている。彼らの結果から R、G、B の有効波長はそれぞれ 608 nm、529 nm、465 nm と算出される。Sigernes, *et al*. の測定したカメラは我々の使用した D5200 とは異なるが、同じ Nikon 社製であり、類似の波長特性を有していると仮定すると、B 画像の有効波長は *B* バンドに対し 30 nm 長波長側に、G 画像は *V* バンドに対し 20 nm 短波長側に、R 画像は R_C バンドに対し 33 nm 短波長側にずれている。この結果、*V* バンドと R_C バンドの波長差 92 nm に対し、G と R 画像の波長差は 79 nm となる。一方で、*B* バンドと *V* バンドの波長差 113 nm に対し、B と G 画像の波長差は 64 nm とほぼ半分の波長差になっている。先の 4.1.節で（*g-r*）の方が（*b-g*）に比べれば標準測光系との差が小さいと述べたが、この結果はカメラ各色の波長差から定性的には説明することができる。

5.2.　夜空の明るさと星の見え方

上記表 3 で示した結果をもとに、各地の星の見え方を比較してみる。両眼視での星の検出限界等級 m_s[mag] と V バンドでの夜空の明るさ m_{sky}[mag arcsec^{-2}]の間には次式（10）、（11）の関係が知られている（Schaefer, 1990）。

$$m_d = 8.32 - 5\log_{10}\left(1 + 0.158 B_S^{0.5}\right) \quad \cdots(10)$$

$$B_S = 34.08 \exp\left(20.7233 - 0.92104 m_{sky}\right) \cdots(11)$$

式（10）、（11）に表 3 の値を代入し星の検出限界等級

1　Gemini Observatory：http://www.gemini.edu/sciops/telescopes-and-sites/observing-condition-constraints/optical-sky-background

2　デジカメ星空診断：https://dcdock.kodan.jp/map.html

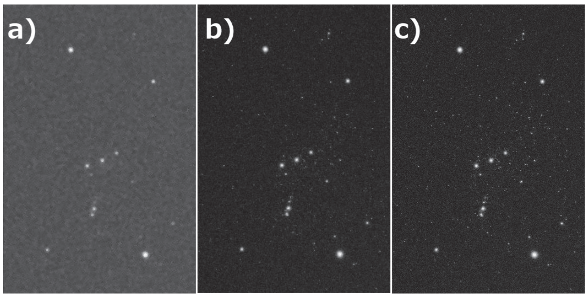

図 5　星の検出限界の違いによるオリオン座の見え方
検出限界 a) 3.9 mag、 b) 5.9 mag、 c) 6.3 mag

を算出すると、農村公園・少年自然の家・三重大学・木曽観測所・しらびそ高原・マウナケアで、それぞれ 5.9、5.7、3.9、6.0、6.4、6.3 mag となる。図 5a～5c は星の検出限界等級が 3.9 mag、5.9 mag、6.3 mag の場合のオリオン座付近の星の見え方をシミュレーションしたものである。検出限界が 3.9 mag の場合は明らかに星の数が少ない。一方、検出限界が 5.9 mag と 6.3 mag では、よく見ると 5.9 mag の方が星数が少なくなっているが、見え方に大きな違いはないことがわかる。

5.3. 夜空の明るさと夜空の色

次に、夜空の明るさと色の関係について検討する。図 6 は今回の結果から求めた値をプロットしたものである。夜空が明るくなると（*B-V*）の値が小さくなる、すなわち夜空の色が青くなる傾向が顕著に見えている。図中の破線は最小二乗フィットの結果を示しており、その傾きは

$$\Delta(B-V)/\Delta V = 0.19 \quad \cdots(11)$$

となった。

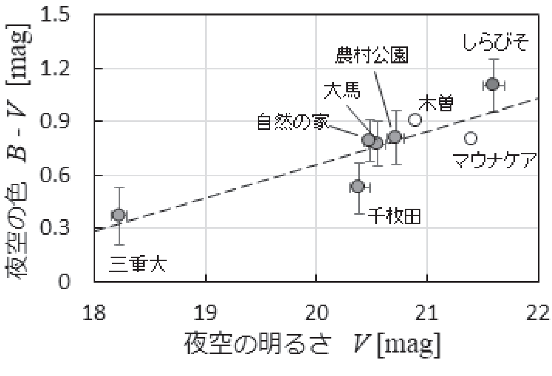

図 6　夜空の明るさと夜空の色の関係

夜空が明るくなると色が青くなる傾向を示す要因として、街灯の影響を検討する。LED 街灯が普及してきてはいるが、街灯として一般的なものは水銀灯と蛍光灯であり、これらの光源からは水銀の輝線が放射されている。図 7 は水銀灯の輝線スペクトル[3]と *B*、*V* バンドの透過特性[4]を重ねたものである。水銀の輝線は *B*、*V* の双方バンドに存在するが、*B* バンド波長域に輝線強度の強い輝線が多数あることがわかる。図 6 をもとに水銀灯の（*B-V*）を算出すると、－0.83 mag という非常に青い色指数となる。人工光源がない環境下での（*B-V*）を+0.9 mag とし、三重大周辺および熊野近郊の（*B-V*）の値（～0.3、0.8 mag）を再現するように、自然光と水銀灯に起因する人工光の積算割合を計算してみると、自然光に対する人工光の相対輝度は、三重大周辺が約 23%、熊野近郊が 2.5%となった。三重大周辺の方が熊野に比べ人工光の寄与が約 9 倍高いことになる。この値は 4.2 節で示した三重大周辺の夜空の明るさが熊野近郊の 8～10 倍であることと一致する。以上より、夜空の色の変化は街灯の影響であることが示唆される。

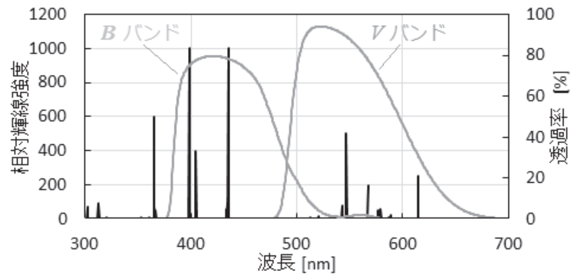

図 7　水銀の輝線と *B*、*V* バンド透過特性

6. まとめ

人工光により夜空が明るくなる現象は光害と呼ばれ公害の 1 つと認定されており。その把握は生活環境改善の為に欠かせない。これまでもデジタルカメラを用いて夜空の明るさを評価する活動は行われてきたが、本研究では明るさとともに夜空の色の評価も試みた。

その結果、以下の項目が明らかになった。

- デジタルカメラの RGB 画像と標準測光系での観測バンドでは波長特性が異なるので、デジタルカメラで求めた等級を標準測光系に変換する際には補正が必要。
- 熊野市近郊での夜空の明るさは、*V* バンドではマウナケアでの夜空の明るさに比べ約 2 倍の明るさになっており、星の観望には良好な環境となっている。この傾向は R_C バンドでより顕著である。
- 夜空が明るくなると夜空の色が青くなる傾向が

[3] NIST Atomic Spectra Database：https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
[4] http://www.aip.de/en/research/facilities/stella/instruments / data/johnson-ubvri-filter-curves

ある。この原因として、街灯として使われている水銀灯や蛍光灯の可能性がある。

なお、本研究では各観測地点で撮影日時が異なっているため、結果に季節変化の影響が出ている可能性がある。そのため、今後の課題としては、撮影時期を限定してのデータ収集の必要性が挙げられる。加えて、街灯が夜空の色に及ぼす影響が示唆されたため、撮影地点周囲の外灯調査等、周辺環境の把握も必要である。

謝辞　本研究の一部は科学研究費補助金（基盤（C）、課題番号 26350193）によった。

引用文献

Bessell, M. S. (2005), Standard Photometry System, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, **43**, 293-336.

Birriel, J., Wheatley, J., and McMichael, C. (2010) : Documenting Local Night Sky Brightness Using Sky Quality Meters: An Interdisciplinary College Capstone Project and a First Step Toward Reducing Light Pollution, Journal of the American Association of Variable Star Observers, **38**, 132-138.

Falchi1, Cinzano1, Duriscoe, Kyba, Elvidge, Baugh, Portnov, Rybnikova, and Furgon (2016), The new world atlas of artificial night sky brightness, Science Advanced, **2**(6) , e1600377.

Hog E., Fabricius C., Makarov V.V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A. (2000), The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars, Astronomy & Astrophysics, **355**, L27-L30.

Horaguchi, T.; Furusho, R.; Agata, H.; Paofits WG. (2006), FITS Image Analysis Software for Education: Makali`I, ASP Conference Series, **351**, 544-547.

Miller, Straka, Mills, Elvidge, Lee, Solbrig, Walther, Heidinger and Weiss (2013), Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band, Remote Sensing, **5**(12), 6717-6766.

Natali F., Natali G., Pompei E., Pedichini F., (1994), The use of the (B-I) color index and applications of the (B-I) versus (B-V) relationship, Astronomy & Astrophysics, **289**, 756-762.

Schaefer, B. E. (1990), Telescopic limiting magnitudes, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **102**, 212-229.

Sigernes, F., Dryland, M., Peter, N., Lorentzen, D. A., SvenØe, T., Heia, K., Chernouss, S., Deehr, C. S., and Kosch, M., The absolute sensitivity of digital colour cameras, Optics Express, **17**(22), 20211-20220.

磯部琇三・浜村しおみ（2000）, 光害とエネルギー損失, 国立天文台年次報告, **13**, 28.

環境省 (2006), 光害対策ガイドライン, http://www.env.go.jp/air/life/hikari_g/index.html

永井孝尚（2016）, そうだ, 星を売ろう「売れない時代」の新しいビジネスモデル, KADOKAWA, 東京.

星空公団（2016）, 【研究報告】Sky Quality Meter の有効性, https://www.kodan.jp/