

足羽山の夜空の明るさと色の測定

加藤 英行*・金剛 晴彦*

Night sky brightness and color measurement in Mt. Asuwa

Hideyuki KATO*, Haruhiko KONGOU*

(要旨) 足羽山の夜空の明るさと色をデジタルカメラで得られた夜空の画像から測定した。測定結果から、足羽山の夜空の明るさの分布を示し、足羽山において、星空観察に影響を与える夜空の明るさと色の情報を得ることができた。また、足羽山の明るさの分布から、調査を実施した日において、測定地点の違いで、夜空の明るさ (V 等級) が最大で0.9[mag/arcsec²]の差があったことを示した。足羽山の西側と東側の夜空の明るさを比較すると、西側よりも東側の方が明るくなっている傾向にふれ、夜空の明るさが明るくなるほど、夜空が青くなる傾向について、測定地点の周辺環境が影響している可能性が示唆された。

1. はじめに

足羽山は福井平野の中央に位置する標高116.4mの孤立丘陵である。JR福井駅から徒歩約20分、直線距離で約1.2kmの距離に位置し、中心市街地からアクセスがしやすく手軽に自然を体感できる貴重な場所である。また、足羽山には、福井市自然史博物館をはじめ、様々な文化施設があるだけでなく、四季をとおして、サクラやアジサイ、モミジなど季節の植物も楽しむことができることなどから、福井市民の憩いの山として親しまれている。

さらに、足羽山に関連する事業として、福井市は「足羽山魅力向上プロジェクト」の名称で、「自然を感じられる環境づくりなどにより足羽山の魅力を高め、交流人口の拡大を図ることを目的とする」地域再生計画(福井市, 2018)を作成し、足羽山の魅力向上事業を推進している。また、夜間の足羽山を会場として、福井市自然史博物館では例年「ナイトミュージアムと天体観望会」や「セミの羽化の観察会」、福井市文化振興課が主催する「愛宕坂灯りの回廊」(福井市, 2018)、森のほうかがっこうが主催する「ヒミツの足羽山探検キャンプ」(森のほうかがっこう, 2018)など、夜間のイベントが多く開催され、昼間だけでなく夜間の足羽山での活用が盛んになり、足羽山の魅力となりつつある。

そこで、本稿では夜間に足羽山で開催されるイベント時に、星空を観察しやすい条件を知るための基礎知識として、夜間に星が見えにくくなることについて、星の背景である「夜空の明るさ」が増大することが関係していること(環境庁, 1998)及び、人間の目の感

度は色によって異なること(佐川, 1984)に注目し、星空の観察に影響を与える夜空の明るさと色の情報を得ることを目的として、デジタルカメラを用いた調査を実施したので報告する。

2. 夜空の画像データの取得

夜空の画像データの取得は、月明かりの影響が無く、眼視で天頂付近に雲が無いことが確認できた、2018年11月11日、薄明終了後の18時30分から21時までの時刻を設定した。測定地点は、足羽山の15箇所とし、三脚を使ってデジタルカメラを天頂へ向けて撮影して得られた画像から、夜空の明るさと色を測定した。

図1に足羽山の測定地点15箇所の位置を示す。使用したカメラボディとレンズおよびカメラの設定を表1に示す。カメラの設定は、2018年に環境省が実施した「平成30年度 夏の星空観察 デジタルカメラによる夜空の明るさ調査」で採用された設定(環境省, 2018)に準じた。本システムによる視野角は約40°×27°である。

測定地点は、足羽山全体を覆うように、250m×250m四方の網目状に区切ったとき、網目の中央に近く、アクセスが容易な15箇所を任意に設定した。測定地点は×、測定地点番号を×の上付近に示した。

*〒918-8006 福井県福井市足羽上町147 福井市自然史博物館

*Fukui City Museum of Natural History, 147 Asuwakami-cho, Fukui-shi, Fukui 918-8006, Japan

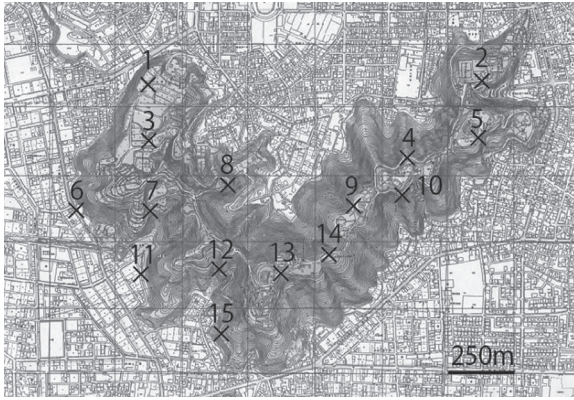


図1：足羽山の測定地点

表1：使用したカメラボディとレンズおよびカメラの設定

カメラボディ	Canon EOS 6D
カメラレンズ	Canon EF 50mm F1.8
ISO感度	800
出力方式	RAW
露出時間	30秒
長時間ノイズ低減	ON
高感度ノイズ低減	OFF
絞り値	5.6

3. 画像解析

デジタルカメラを用いて取得したRAW形式の画像を、画像変換ソフトraw2fits (星空公団, 2019) を使用し、R (赤)・G (緑)・B (青) それぞれの画像へ分解及びFITS形式に変換した。得られたFITS形式の画像から星表Tycho-2 Catalog (Hog, *et al.*, 2000) に記載のある恒星を任意に3つ同定し、同定した恒星のカウント値 C_{star} とその周辺の夜空 (天体が写っていない領域) の1平方秒角あたりのカウント値 I_{bk} をすばる画像解析ソフトのマカリイ (Horaguchi, *et al.*, 2006) の開口測光機能を用いて測光した。そして得られたカウント値を用いて、次式から夜空の1平方秒角あたりの等級 M_{bk} を算出した (小野間, 2017)。

$$M_{bk} = -2.5 \cdot \log_{10} \left(\frac{C_{star}}{I_{bk}} \right) + M_{std}$$

ここで、 M_{std} は星表から得られた等級である。画像から同定する恒星は、画像データが飽和していない4.0~6.0[mag]かつ、B~K型の恒星を選択した。B~K型の恒星とした理由は、本稿では可視領域での夜空の明るさの算出を目的としているため、極端に青い、または赤い恒星を避けたからである。

夜空の明るさのV等級について、デジタルカメラのG画像は、Johnson-Cousins標準測光系 (Bessell, 2005) のVバンドと分光特性が半値幅の範囲でほぼ同様の特性を持つ (小野間ほか, 2009) ことから、デジタルカメラのG画像と星表のV等級を用いて算出し、

地球大気吸収による減光量の補正 (鈴木ほか, 2013) を行った。

夜空の明るさのB等級については、デジタルカメラのB画像は、標準測光系のBバンドの分光特性よりも長波長側にずれていることが示されているため、次の機器等級からJohnson-Cousins標準測光系への変換式を用いて算出した (伊藤ほか, 2018)。

$$B = b + k_{bg} \cdot (b - g) + \kappa_B \cdot \sec z + C_B$$

ここで、 k_{bg} 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)、 κ_B 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、 C_B は等級のゼロ点、 b は機器等級で、B画像の測光から得られた単位時間あたりのカウント値を n_B 、 n_G としたとき、次式で表される。

$$b = -2.5 \cdot \log_{10} n_B$$

$$g = -2.5 \cdot \log_{10} n_G$$

これらの係数は、取得した画像から b 、 g 及び z 、星表から B の値が得られるので、決定することができる。また、本稿では、夜空の色を示す指標として、 $B - V$ 等級を算出した。

4. 結果

各地点の測定結果を表2に示した。参考に、2018年11月2日18時33分、足羽山から約1.2kmの距離に位置するJR福井駅西口恐竜広場で撮影した画像から算出した夜空の明るさを示した。表2から、足羽山の夜空の明るさはB等級では17.64~18.47[mag/arcsec²]の幅があり、最大で0.83[mag/arcsec²]、V等級では17.66~18.56[mag/arcsec²]の幅があり、最大で0.91[mag/arcsec²]の差があることがわかる。また、足羽山とJR福井駅西口恐竜広場の明るさを比較すると、足羽山の方が、B等級で0.55~1.36[mag/arcsec²]、V等級で0.56~1.39[mag/arcsec²]暗いことがわかる。

V等級の夜空の明るさは、B等級と比べ、可視光波長のピークに近い波長を測定しており、実際の星空の見え方の参考になると考え、足羽山の地図上に、V等級の夜空の明るさをプロットし、図2に示した。図2から、足羽山の西側と東側の夜空の明るさを比較すると、東側の方が明るく、西側が暗い傾向があることがわかる。

表2：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等級	V等級	B-V等級	
足羽山	1	18.23	18.24	-0.01
	2	17.66	17.64	0.02
	3	18.35	18.34	0.01
	4	17.92	17.90	0.02
	5	17.68	17.60	0.08
	6	18.21	18.22	-0.01
	7	18.48	18.45	0.03
	8	18.43	18.47	-0.04
	9	18.06	18.05	0.01
	10	18.04	17.94	0.10
	11	18.30	18.17	0.13
	12	18.47	18.32	0.15
	13	18.44	18.39	0.05
	14	18.34	18.32	0.02
	15	18.56	18.39	0.17
JR福井駅西口 恐竜広場	17.10	17.08	0.02	

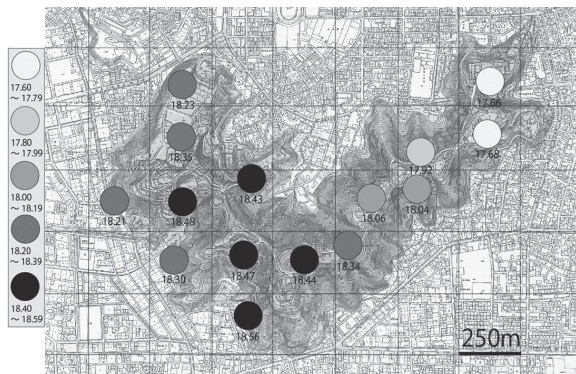


図2：夜空の明るさの分布 (V等級)

5. 考察

5-1 変換式を用いた標準測光系の等級推定の妥当性

機器等級から変換式を用いて推定した標準測光系の等級推定の妥当性を検証するため、推定した等級と星表記載の等級との残差の分布を図3に示した。残差の標準偏差 σ は0.07[mag]であり、恒星の等級によるばらつきの違いは顕著に見られなかった。

5-2 夜空の明るさの傾向

足羽山の西側と東側の夜空の明るさを比較すると、東側が明るく、西側が暗い傾向がある理由について、以下の3つの要因が考えられる。

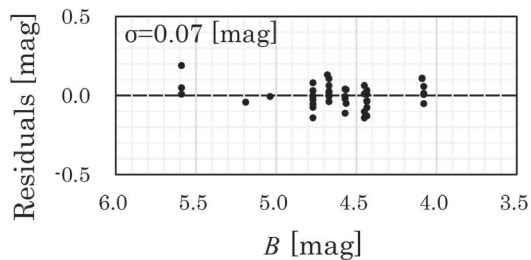


図3：等級残差分布

1つ目は、周辺の自然環境による影響である。比較的暗いという結果が出た足羽山の西側に位置する測定地点7, 8, 12, 13, 15周辺の環境を確認すると、天頂付近以外は、空を覆い隠すほど、樹木が枝葉を伸ばしていた。周辺市街地からの光を樹木の枝葉が遮ることで、夜空を暗くしていると考えられる。

2つ目は、足羽山の東側に、文化施設等が偏っていることの影響である。足羽山の中央付近にあたる測定地点14を境に、東西の文化施設等の数を比較する。本稿では、ポータルサイト「足羽山へ行こう」(福井市, 2018)に掲載され、かつ図1の足羽山の地図上に点在する文化施設等の数を東と西側に分けてカウントしたところ、同ポータルサイトに紹介されている28の文化施設等の内、足羽山の東側に全体の89%にあたる25か所が点在していることがわかる(表3)。従って、文化施設等の利用のために、街灯が整備されることで、足羽山の東側の夜空を明るくしていると考えられる。

3つ目は、JR福井駅から測定地点までの距離と夜空の明るさを調べたところ、図4に示すように、JR福井駅に近づくに連れて、夜空が明るくなる傾向があることから、足羽山から東方向にJR福井駅があり、商店などが集中するエリアが位置することで、街灯やビル、商店などから夜空へ漏れ出る光が多くなり、夜空を明るくしていると考えられる。

表3：足羽山を東西に分けたときの文化施設等の数

	足羽山の東側	足羽山の西側
文化施設	4	1
史跡スポット	13	2
飲食施設	8	0
計	25 (89%)	3 (11%)

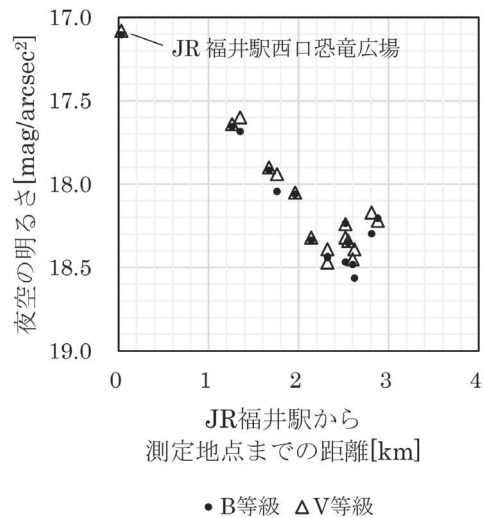


図4：JR福井駅からの距離と夜空の明るさの関係

5-3 夜空の色と明るさ

夜空の色と明るさの関係を伊藤ほか (2018) の結果と共に図5に示す。図5から、夜空が明るくなるほど、夜空の色が青くなる傾向があるとした伊藤ほか (2018) と同様の結果がみられる。

要因として、夜空が明るい場所では、*B*バンド波長域 (有効波長436nm) の光を強く出す照明の影響が考えられる。

例えば、近年広く普及が進んでいる白色LED照明について、竹下 (2015) では、市販されている青色LEDと黄色に発光する蛍光体を組み合わせた白色LEDは、449nmと565nmに、発光ピーク波長があるとしている。すなわち、白色LED照明の短波長側のピークは、*B*バンド波長域に含まれ、夜空を青くする要因の一つと考えられる。

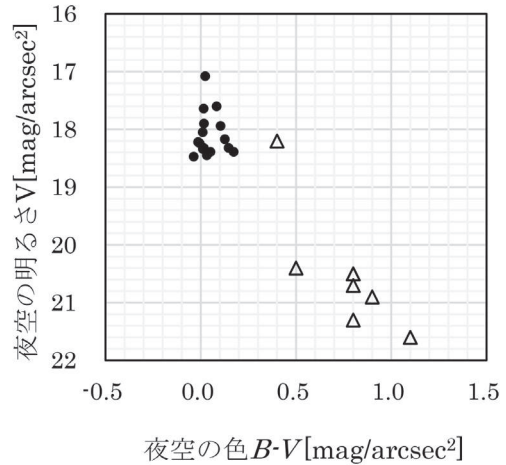
また、3波長領域発光形蛍光ランプは、水銀輝線を含む連続光であるとしている。水銀の輝線は、国立天文台 (2017) よると、436nm, 408nm, 405nmに特に強い輝線を含むことが表記されていることから、蛍光ランプ、水銀灯も夜空を青くする要因であると考えられる。

しかし、本研究で調査をした足羽山の例では、最も夜空が明るい測定地点2で*B-V*等級は0.02[mag/arcsec²]、最も暗い測定地点8で-0.04[mag/arcsec²]であり、暗い場所の方が青くなっている。

この要因は、測定地点2の周辺が、文化施設や史跡スポットが数多く点在する地域であることの影響が考えられる。測定地点2の周辺の照明環境を確認したところ、景観に配慮した暖色系の照明が整備されていた。すなわち、暖色系の照明が夜空を赤く照らすことで、相対的に*B-V*等級が大きくなったことが考えられる。

したがって、足羽山のような狭い範囲で、夜空の色を比較する場合は、一般的な白色LEDや蛍光ランプが使用されるだけでなく、景観に配慮するなどした暖色系の照明の影響が考えられ、夜空が明るくなるほど、夜空の色が青くなる傾向がみられないことがあるといえるだろう。

なお、本稿で示した測定結果は、測定した時刻が異なるため、夜空の明るさ及び、色の時間変化の影響を考慮すると変わる可能性がある。したがって、今後の課題として、時間変化の傾向を把握し、測定時刻が異なった場合の補正方法の検討があげられる。



● 本研究の結果 △ 伊藤ほか (2018) の結果

図5：夜空の色と明るさの関係

謝辞

本稿をまとめるにあたり、本稿をお読みいただき有益なご助言をいただいた平塚市博物館の塚田健氏、研究を進めるにあたり有益なご助言をいただいた福井市自然史博物館の梅村信哉氏並びに、出口翔大氏、すばる画像解析ソフトマカリの開発者の皆様、画像変換処理ソフトrow2fits開発者である星空公団の小野間史樹氏には、ここに厚くお礼を申し上げます。

引用文献

- Bessell, M. S. (2005), Standard Photometry System, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 43, 293-336.
- 福井市, 2018/12/24, 地域再生計画.
https://www.city.fukui.lg.jp/kurasi/tax/furusato/kigyoubanfurusatouzei_d/fil/tiikisaiseikeikaku2.pdf, P2
- 福井市, 2018, 愛宕坂灯の回廊. 市政広報ふくい, (1512), P7.
- 福井市 商工労働部 おもてなし観光推進課, 2018/12/24, 「足羽山へ行こう」足羽山と周辺エリアのポータルサイト.
<http://asuwayama.fukuicity-navi.com/>
- Hog E., Fabricius C., Makarov V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenc A., 2000, The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 million brightest stars, Astronomy and Astrophysics, 355, 27-30.
- Horaguchi, T., Furusho, R., Agata, H., & Paofits Wg., 2006, FITS Image Analysis Software for Education : Makali'i. ASP Conference Series, 351, 544-547.
- 星空公団, 2018/12/24, 開発製品 (ソフトウェア).
 Raw2fits. <http://www.kodan.jp/?p=products>.
- 伊藤信成・越村真帆・萩原拓也・加藤明音, 2018, 熊野市の夜空の明るさ計測-夜空の明るさと色の関係-. 三重大学教育学部研究紀要, 69, 33-37.
- 環境庁, 1998, 光害対策ガイドライン～良好な照明環境のために～.

- http://www.env.go.jp/air/life/hikari_g/full.pdf, P19.
- 環境省, 2018/12/21, 平成30年度 夏の星空観察 デジタルカメラによる夜空の明るさ調査の結果について.
<https://www.env.go.jp/press/106269.html>
- 国立天文台編, 2017, 理科年表平成30年, 丸善出版, 物P90 (454)
- 森のほうかがっこう, 2018/12/24, 8月4日(土)~5日(日) ヒミツの足羽山探検キャンプ募集中! .
<http://rakuraku2000.com/notice/2548/>
- 小野間史樹, 2017, デジカメ星空診断ハンドブック.
www.env.go.jp/air/life/light_poll/star_h29_2/04_ref3-1_handbook.pdf, P36.
- 小野間史樹, 伊藤絢子, 原田泰典, 福島英雄, 香西洋樹, 2009, デジタル一眼レフカメラを用いた夜空の明るさ調査方法の提案. 国立天文台報, 12, P97.
- 佐川賢, 1984, 比視感度と測光システム. 光学, 13 (4), 262-263.
- 鈴木文二・秋澤宏樹・菅原賢, 2013, 地球大気吸収による減光量の補正, 彗星の科学. 恒星社厚生閣, 95-96.
- 竹下秀, 2015, LED照明とブルーライト, 電気設備学会誌, 35 (1), 31-32.

