

## 徳島の星空：定点観測による光害の時間的变化

田村 和之\*, 安藤 徹\*\*

(キーワード：光害, 環境教育, 天文教育)

### I. はじめに

夜の街灯は街中において暗い場所を照らし、我々の安全を守るものである。しかし、その一方で様々な問題も発生しており(池田1996; 村松ら 2001; 福多&田村2008など)、この光による光害を一般的に光害(Light pollution)と呼んでいる(田中2001)。また、環境省は1998年に『光害対策ガイドライン』を策定し、そのなかで「光害」を『良好な「照明環境」の形成が、漏れ光によって阻害されている状況又はそれによる悪影響』と定義しており<sup>1</sup>、同時に狭義には『障害光による悪影響』と定めている。

光害の影響が少ない、都市から離れた遠い山の中など、街灯が近くにほとんどない場所では綺麗な星空を見ることができる。例えば、徳島市近隣では、上勝町や佐那河内村まで行けば、非常にたくさんの星を見ることができる。そして、本当に空気の澄んだ夜であれば、天の川も綺麗に見ることができるだろう。しかし、その一方で、徳島市の中心部など、夜の街で空を見上げると、見える星の数は一気に減ってしまう。徳島市では、まだ明るい星はかろうじて見ることができるかもしれないが、東京や大阪などの大都会では晴れた夜であっても、ほとんどの星を見ることができなくなってしまった。このように、晴れていても星が見えない夜空が光害によって影響されているのである。

光害の原因は、街灯や店舗などで使用されている人工的な光が空中の微細なチリ(エアロゾル)に反射して空が明るくなっているからである(泉浦2012)。これは、都市の上空の雲が夜でも明るく見えるのを思い出すと想像しやすい。本来、夜空の雲は下から照らす光がなければ、地上からは黒く見えるはずである。言い換えれば、夜空に光る星や月が見えないことで初めてその部分に雲があることが分かるのである。しかし、都市部では地上に光が溢れており、場合によっては直接上空に向かって光を発している街灯や照明器具もある。このような照明器具から出た光が、雲を下から照らすことで、都会では夜であっても雲が白く見えるのである。

このように光が溢れてしまっている現状は公害としても認知されており、世界各地で現在調査が行われ、対策がとられている(Quaranta & Cionco 2012; Punら2014など)。日本においては、岡山県美星町(現在の井原市)が1989年に「光害防止条例」を制定し、全国に先駆けて綺麗な夜空を守るための活動を始めた<sup>2</sup>。また、国としては環境省が1998年に一般市民が参加する『全国星空継続観察(スターウォッチング・ネットワーク)<sup>3</sup>』を開始し、同年『光害対策ガイドライン<sup>1,4</sup>』を策定した(梅谷2010)。現在では日本国内で様々な市町村や企業が似たような条例を設けて光害の防止・減少に取り組んでいる<sup>5</sup>。

この光害は大都市圏に限らず、程度は様々であるが、日本国内ではその影響はどこでも観測することができる。例えば、アメリカ航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration: NASA)が公開している宇宙から見た夜景の写真で日本が綺麗に見えている(図1)。言い換えれば、日本の夜空はどこにいても街明かりで大なり小なり汚染されてしまっているのである。

\*鳴門教育大学大学院 現代教育課題総合コース

\*\*徳島県立あすたむらんど



図1. 宇宙から見た日本と韓国の光の分布。都市部に光が集中しており、海岸線や高速道路に沿って光が網の目状に広がっている様子が分かる。また、太平洋や日本海など光源がないところは真っ暗闇となっているのに対して、日本や韓国では山間部であったとしてもうっすらと光が覆っている（夜空で反射した光が山間部の森林をごくわずかが照らしている）様子が見て取れる。（出典：Earth Perspectives: Feature, NASA Earth Observatory, <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/EarthPerspectives/>）

このような光害は徳島県においても例外ではなく、上記もしたが、徳島市内においてはかなり星が見えにくくなっているのが現状である。そこで、本発表では徳島市における光害についての予備調査と、その結果について紹介する。また、今回の調査方法をもとに、今後徳島近隣都市における環境教育プログラムとしての可能性についても簡単に言及する。

## Ⅱ. 光害の測定方法と基準

本節では、夜空の明るさを測る方法について、まずは肉眼での測定方法と、次に本研究で実際に使用した計器を用いた測定方法を紹介する。その中で基準となる星の明るさや夜空の明るさの分類の仕方についても簡単に説明する。

### 2.1. 裸眼測定

特別な器具を使わずとも、我々は晴れた夜に空を見上げれば星を見ることができる。そして、実際に夜空がどれくらい暗いかを調べるために、一番簡単な方法は眼視によってどれくらいの星が見えるかを調べることである。つまり、目で見える一番暗い星を探して、星座早見盤や星図などと見比べて何等級<sup>6</sup>の星まで見えているか（裸眼極限等級：Naked-Eye Limiting Magnitude, 以下 NELM）を調べるのである。

星座早見盤を見てみると、1等星（1等級の星）以上から4等星までが描かれているものや、より詳しいものでは6等星まで描かれているものもある。星の見かけの等級（ $m$ ）は数字が小さくなるほど明るくなる。また、その関係（明るさの比）は対数（Logarithmic）の関係にあり、

$$\text{明るさの比} = 100^{(0.4 * \Delta m)}$$

（ここで  $\Delta m$  は二つの星の等級の差）の式で求めることができる。また、等級を決定する基準はこと座のベガ（英語名： $\alpha$ Lyr（アルファライラ））であり、ベガを0等星とし、ベガより100倍暗い星（明るさが1/100の星）を5等星と定義している（小川ら2016）。例えば、星A（ $m_A = 6.0$ ）と星B（ $m_B = 1.0$ ）の等級差が5.0（ $\Delta m = m_A - m_B = 5.0$ ）である場合、二つの星の見かけ上の明るさは星Bの方が星Aの100倍明るいことになる。つまり、星の明るさが1等級変われば、明るさが約2.5倍（精確には2.512倍）変わることになるのである（谷口2013、

p. 729)。また、もし光害のない夜空において肉眼でかろうじて見ることができる一番くらい星を6等星と定めている（磯崎ら2016）。

しかし、このNELMは個人の視力や体調にも左右されるうえ、個人差が非常に激しいため、客観性に欠けるという弱点が存在する（上田ら2011）。そのため、例えば二人が同時に夜空で一番暗い星をさがしたとしても、A君は5.0等星までしか見えない一方で、Bさんは6.0等星まで見つけているということも有りうるのである。この場合、二人の裸眼測定では結果が異なってしまう、正確性に欠けてしまう。

## 2.2. スカイ・クオリティ・メーター

そこで、本研究では近年、世界中のアマチュア天文家の間で使用され始めているスカイ・クオリティ・メーター（SQM）を使用した。

SQMはカナダのUnihedron社<sup>7</sup>が制作している携帯型測定器の総称であり、日本では国際光器<sup>8</sup>より購入が可能となっている。基本的には夜空の暗度（ダークネスレベル）を測定するための測定器であり、手に持って計測を行う種類（SQMとSQM-L）とコンピューターに繋げて遠隔操作によって計測を行う種類（SQM-LU, SQM-LU-DL, SQM-LE, SQM-LR）がある。

今回は初めての使用であり、将来的には場所を移動しながらも測定ができるように手持ちタイプのSQM-Lを使用した（図2）。手持ちタイプのSQMとSQM-Lの違いは単純に計測視野の違いであり、他の性能や特徴には特に違いは無い。型番の「-L」はwith Lensの意味であり、このレンズのおかげで計測視野が狭まっている。

また、このSQM-Lに付属している説明書によると、以下のような特徴があり、科学的に計測するために十分な信頼性を世界中で得ているとのことである。

- ・可視光のみで計測する。（レンズ部に近赤外線カットフィルターを装着。）
- ・気温などの温度によってセンサーの感度は影響されない。
- ・測定値はアメリカ合衆国のNational Institute of Standards and Technology<sup>9</sup>（NIST）の基準に従う光度測定器を使用して調整されている。そのため、公式的な誤差は $\pm 0.1 \text{ mag arcsec}^{-2}$ 以内（単位についての詳細は下記を参照）とされている。



図2. Unihedron社のスカイ・クオリティ・メーター（SQM-L）。大きさは手のひらに収まる程度で重量も100g程度と非常に軽く持ち運びに便利である。測定するにはSQM-L上部に見えるレンズ部分を測定したい方向に向けて（写真中の親指の下にある）ボタンを数秒押すだけで、夜空の暗度が $\text{mag arcsec}^{-2}$ で表示される。

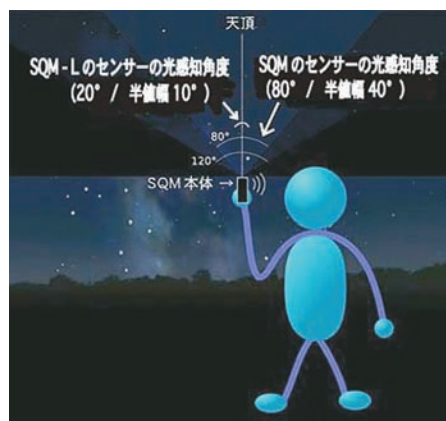


図3. スカイ・クオリティ・メーターの計測視野の違い。SQMは計測方向の周りの半値幅（Full Width at Half Maximum, FWHM）が40度であるのに対し、SQM-Lは半値幅が10度と1/4に狭まっている。このためSQM-Lでは計測場所の周りにある街灯などからの影響を抑えることが可能となっている。（出典：国際光器のウェブページ8）

スカイ・クオリティ・メーターが使用する計測単位は $\text{mag arcsec}^{-2}$ （もしくは $\text{mag/arcsec}^2$ ）が使用され、これは実際の天文学者が研究時に使用する暗度の単位と同じである。この単位の意味は $\text{mag}$ が等級を示すmagnitudeで光の量を示しており、 $\text{arcsec}^2$ は夜空の面積（1 $\text{arcsec}$ は1秒角で、1度の3600分の1の角度）である。つまり、計測範囲内で測定された光の合計量を計測面積で割ることで、空の明るさを1平方秒あたりの等級で表していることになる。

では、実際のどの程度の計測値がどのような空の暗度となるのかを次に簡単に紹介していく。

### 2.3. 暗度と夜空・星空の基準

ここでは SQM で計測した夜空の暗度が実際にどのような夜空・星空と対応しているかを簡単に紹介していく。ちなみに、暗度の単位である  $\text{mag arcsec}^{-2}$  は星と同じように「等級 (magnitude)」を、明るさを示す基本単位として使用しているため、数値が小さい方が明るいという特徴を持っている。なので、暗い空 (星がたくさん見える空) ほど、その計測値は大きくなっていく。

多少の誤差はあるかもしれないが、アメリカ合衆国の一般大衆向けの天文雑誌、Sky and Telescope による記事<sup>10</sup>には、空の暗度は表1のように示される。

表1. 空の暗度とその概要

暗度 ( $\text{mag arcsec}^{-2}$ )	概 要
7.0	日没直後、または日の出直前の天頂の明るさ。
13.0	常用薄明が終わる頃の天頂の明るさ。常用薄明は太陽が沈んだ後約30分続く。この明るさであれば、まだ人工的な照明 (街灯など) がなくても屋外の活動が可能 <sup>11</sup> 。
17.0	ニューヨークや東京などの大都会の中心部における夜空の明るさ (暗さ)。
18.0	都市郊外の住宅街における夜空の暗さ。または、農村部 (街灯が少ない住宅街) において満月が出ている時の夜空の暗さ。天の川は全く見ることができない。
19.0	閑散とした住宅街における夜空の暗さ。または農村部において天文薄明が終わる頃の暗さ。天文薄明は常用薄明の後、太陽が地平線から12度下にまでにある状態で、天文薄明が続いている間は太陽光が夜空に多少の影響を与えているとされている。天文薄明は日没後30分から、だいたい1時間半を過ぎた頃まで続く。天文薄明を過ぎれば夜空には太陽光の影響は無いものとされている。
20.0	大都市圏の外部にある農村部の夜空の暗さ。天の川の明るい部分が辛うじて見えるが大部分はまだ見えない。
21.0	大都市からある程度離れた農村部、または山間部の夜空の暗さ。天の川の大部分は見ることができる。
22.0	人工光が全く無い、新月の夜の天頂の暗さ。地球上で最も暗い自然条件で計測できる一番暗い暗度が22.1 $\text{mag arcsec}^{-2}$ だとされている <sup>12</sup> 。

また、数値的な基準ではなく、質的な (光害) 基準としてアマチュア天文家であるジョン・E・ボートルが自分名前を冠したボートル・スケール (The Bortle Dark-Sky Scale<sup>13</sup>) を2001年に発表した。この基準は世界中でも使用されており (ボガード2016, p. 16)、表2のように定められている。

表2. ボートル・スケール (The Bortle Dark-Sky Scale)

クラス	タイトル	NELM	描 写
1	光害が一切無い素晴らしい土地 Excellent dark-sky site	7.6-8.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>・色彩豊かな黄道光や対日照が見える</li> <li>・天の川の光で明確な影ができる</li> <li>・通常は肉眼では見えない M33銀河が目視可能</li> <li>・木星や金星が出ていれば非常に眩しく見える</li> </ul>
2	真に空が暗い典型的な土地 Typical truly dark site	7.1-7.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地平線上の空がうっすらと明るく感じられる</li> <li>・雲は真っ暗 (目視不可) で星が隠れていることで存在を知ることができる</li> <li>・天の川の細かい構造を見ることができる</li> <li>・多くのメシエ天体と星団が肉眼で見える</li> <li>・M33銀河がなんと肉眼で見える</li> </ul>

次ページへ続く...

表 2. (続き)

3	田舎の空 Rural sky	6.6-7.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地平線上に多少の光害を見ることができる</li> <li>・地平線近くの雲はうっすらと白く確認することができる</li> <li>・天の川の構造はだいたい見ることができる</li> <li>・M33銀河は直視では見えないが、そらし目を使えば、かろうじて捉えることができる。</li> <li>・Mシエ天体のうち、暗いものは見えなくなってしまう</li> </ul>
4	田舎と郊外の境 Rural/suburban transition	6.1-6.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>・町の方向にはうっすらと光害を確認することができる</li> <li>・町の方向にある雲は白く確認することができる</li> <li>・天の川の構造はほとんど確認できなくなる</li> <li>・周辺の様子をある程度確認することができる</li> <li>・M33銀河は天頂近くにならないとそらし目でも確認できない</li> </ul>
5	郊外の空 Suburban sky	5.6-6.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光害がほとんどの方向で確認できる</li> <li>・天の川は地平線近くではほとんど見えない</li> <li>・雲がある程度見える</li> </ul>
6	明るい郊外の空 Bright suburban sky	5.1-5.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光害によって地平線から35°くらいまでの空はうっすらと灰白色に見える</li> <li>・どこにある雲でも形を認識することができる</li> <li>・天の川は天頂方向にしか目視できない</li> <li>・周囲の様子は困らない程度に確認することができる</li> <li>・M33銀河は全く見ることができず、M31銀河(アンドロメダ銀河)はうっすらと見ることができる</li> </ul>
7	郊外と都市部の境 Suburban/Urban transition	4.6-5.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光害によって空全体がうっすらと灰白色になっている</li> <li>・どの方向にも眩しい光源を確認することができる</li> <li>・雲がはっきりと見える</li> <li>・天の川は全く見えない</li> <li>・アンドロメダ銀河の中心部分だけをうっすらと見ることができる</li> </ul>
8	都市部の空 City sky	4.1-4.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光害によって、空が灰色、またはオレンジ色になっている</li> <li>・新聞の見出しなど、他の灯りがなくても読むことができる</li> <li>・経験者であればアンドロメダ銀河をなんとか見つけることができる</li> <li>・一部の星座の星でさえも見えなくなるほど空が明るい</li> </ul>
9	都心部の空 Inner-city sky	<4.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光害によって空が非常に明るい、天頂でも同様</li> <li>・星座を作っているほとんどの星を見ることができない</li> <li>・望遠鏡を使用したとしても、月・惑星・幾つかの明るい星団くらいしか見ることができない</li> </ul>

### Ⅲ. 徳島市郊外での計測

ここまでは光害について基礎的な知識をまとめてきた。本章からはいよいよ本格的に徳島市郊外における計測と、その結果について述べていく。まず、光害の計測を行う日は幾つかの条件が満たされる必要がある。具体的には、月が計測時に天頂近くになく、天候が晴れ、もしくは雲がほとんどない（雲量<3）ことが条件となる。

#### 3.1. 計測日時と場所

計測を行った2016年4月11日と同年4月15日はそれぞれ月齢が3.7日と7.7日であり、ともに日没直後はまだ月が出ていたが、夜中前後には月が沈む日を選択した。また、夜空の暗度を計測している間（日没直後から夜中過ぎまで）はそれぞれの日においてほぼ快晴で、雲量はともに0~1程度であった。また、視認できる雲があったとしてもどちらかという地平線近くに見えている程度で、天頂近くは常にほとんど雲がない状態であった。

次に計測場所は徳島市の中心部ではなく、JR徳島駅から8kmほど西にある徳島市国府町の住宅街の中で行った。この辺りは住宅地とはいえ、近隣には田畑が多く、計測場所の南北ともに畑、もしくは空き地であった。また、一番近い建物までは最低でも10m以上は離れており、街灯も近隣にはほとんどない場所であった（図4&5）。



図4. 徳島郊外における光害の計測場所の昼の様子（左）と夜の様子（右）。実際の計測場所は駐車してある一番奥の車の助手席側のタイヤの前で行った。右写真では手前の家からのスポットライトが点灯しているが、計測にはスポットライトが消えた状態で行った（図5）。一番近い建物は写真手前にあるスポットライトのある家で約10m、次に近いのは写真中央に見えている建物で約15m（ただし、住宅ではないため、計測時には室内灯も消えている状態）、写真の左右は畑と空き地であり、その向こうの一番近い家までの距離は15~20mとなっている。近隣にある一番明るい光源（スポットライトを除く）は自動販売機であるが、距離は約40m離れており、手前に写真に写っている物置小屋があるため、計測装置に直接の影響はなかった。（写真は後日撮影。）



図5. 計測値（図4と同じ場所）のスポットライトが消えたときの様子。手前にある建物の玄関の常夜灯がうっすらとついているために地面がオレンジ色に写っているが、計測値までは光が届いていない上、計測装置の計測範囲のはるか外に位置しているため計測自体には影響がほとんどない。また、この写真は東向き（JR徳島駅・徳島市中心部向き）に撮影したため、近隣住宅の上に見えている空がうっすらと灰白色に写っており、表1のボトル・スケールのクラス4に相当することが確認できる。（写真は後日撮影。）

### 3.2. 計測の実施

まず、計測の実施にあたって、当日に夜空の暗度の計測を行うかどうかを当日の日没前に空の様子を確認することで決定した。日没時にまずは月の位置と雲の量を調べ、また雲の流れる方向やその夜、夜中まで雲が少ないと思われる日を選択した。その後、日没時間と天文薄明の時間を近畿大学の星岳彦教授が公開しているウェブページ「日の出と日の入りの計算<sup>14)</sup>」を参照して確認した。本ホームページで計算される日没時刻と天文薄明の時刻は単純に日付だけではなく、緯度・経度、・高を指定することで、実際に計測を行う場所での正確な時刻を計算できるという利点がある。緯度・経度・標高の情報は手動で入力することも可能であるが、Google Mapが連動されており、地図上で実際の居場所をクリックするだけで3つの情報が自動的に挿入されるようになっているため、非常に信頼度が高くなっている。

次に、実際に計測する方法であるが、SQM-Lは三脚などには固定が難しいため、SQM-Lを手に持ち、目線の高さで天頂にセンサーを向けて計測を行った。そのため、毎回の計測において確実に直上に向かって計測が出来ているわけではないが、計測範囲のFWHMがセンサーの中心線から10度ということもあり、計測値自体には大きな影響がないものとした。

#### 3.2.1. 第一回（2016年4月11日）の計測について

2016年4月11日（月齢3.7日）の計測は初めての計測であり、実際に計測機が正常に機能しているかを確認するのが主目的であったため、一回の計測時に複数回の計測を行うのを失念してしまい、10分おきに1回の計測を行っただけであった。ただし、前回の計測値からあまりにも計測値がずれてしまった場合( $\Delta > 0.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$ )は2回目の計測を行った。また、上記の計測値では1回の計測であったが、西側に約30mほど移動した場所でも（毎回ではないが）複数回計測を行い、同様の値が得られることを確認した。ただし、西側の場所は近くの建物のキッチンやリビングの窓があり、多少の光が漏れていたため、その後は使用しないことにした。この結果、図4で説明した計測場所が一番近隣住宅からの影響が少ない場所であることとなり、2016年4月11日を含め今後、計測するための場所として固定することとした。

計測場所において、この日の日没は18時32分で天文薄明終了は19時59分であった。また、計測は19時5分から開始し、夜中0時25分まで継続した。詳しい観測結果は表3と図6（赤い正方形のデータポイント）にまとめた。

表3. 天頂の暗度（2016年4月11日）

時刻	天頂の暗度 (mag arcsec <sup>-2</sup> )	時刻	天頂の暗度 (mag arcsec <sup>-2</sup> )
19:05*	15.08	22:05	19.04
19:15	17.36	22:15	18.99
19:25	18.14	22:25	19.23
19:35	18.34	22:35	19.26
19:45	18.55	22:45	19.30
19:55	18.63	22:55	19.22
20:05**	18.70	23:05	19.26
20:15	18.71	23:15	19.36
20:25	18.70	23:25	19.49
20:35	18.73	23:35	19.61
20:45	18.78	23:45	19.64
20:55	18.79	23:55	19.73
21:05	18.84	24:05	19.89
21:15	18.88	24:15	19.91
21:25	18.91	24:25	19.95
21:35	18.86	---	---
21:45	18.84	---	---
21:55	18.98	---	---

\*常用薄明終了直後

\*\*天文薄明終了直後

表3と図6を見ると、日没後30分（常用薄明が終わった後）頃には急速に天頂付近が暗くなっている（暗度の数値が大きくなっている）ことが分かる。4月11日に行った最初の計測が日没後33分であるが、その後の10分で暗度が急速に上がっていることから、日没時には表1で示された $13.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$ に近いことが予想される。ちなみに、後述される4月15日のデータではほぼ $13 \text{ mag arcsec}^{-2}$ となっている。また、天文薄明が終わる19時59分近くまでは暗度が $18 \text{ mag arcsec}^{-2}$ 台で徐々に上がっているが、20時05分の計測以降は数値の上昇の仕方が減速している様子が見て取れる。このことから、まず、日没と天文薄明を算出するのに使用したウェブページ「日の出と日の入りの計算」が信頼できることがわかった。

また、Unihedron社より公式に発表されているSQM-Lの計測誤差が $\pm 0.1 \text{ mag arcsec}^{-2}$ であるが、10分間隔の計測値を見てみると、一部で上下はあるものの（予想される理由は後述）、夜が深まるにつれて $0.1 \text{ mag arcsec}^{-2}$ 以下のステップで徐々に数値が上昇していることから、SQM-Lの精度についても信頼できるものであると結論付けることができる。

ただし、SQM-Lの計測で表示される値には計測機の誤差だけではなく、他の要因による誤差（詳しくは§3.2.2と表4を参照）などがあるため、実際には計測機器の $\pm 0.1 \text{ mag arcsec}^{-2}$ よりも多少大きくなることが予想される。そこで、図6では計測値の誤差を公式に発表されている $\pm 0.1 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ではなく、 $\pm 0.2 \text{ mag arcsec}^{-2}$ とした。また、図6では日没直後の計測値（ $< 16.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ）は直接光害に関係がなく、これらのデータを含めるとその後の暗度の変化がほぼ平坦となってしまう、微妙な変化がわからなくなってしまうために図の範囲からは除外した。

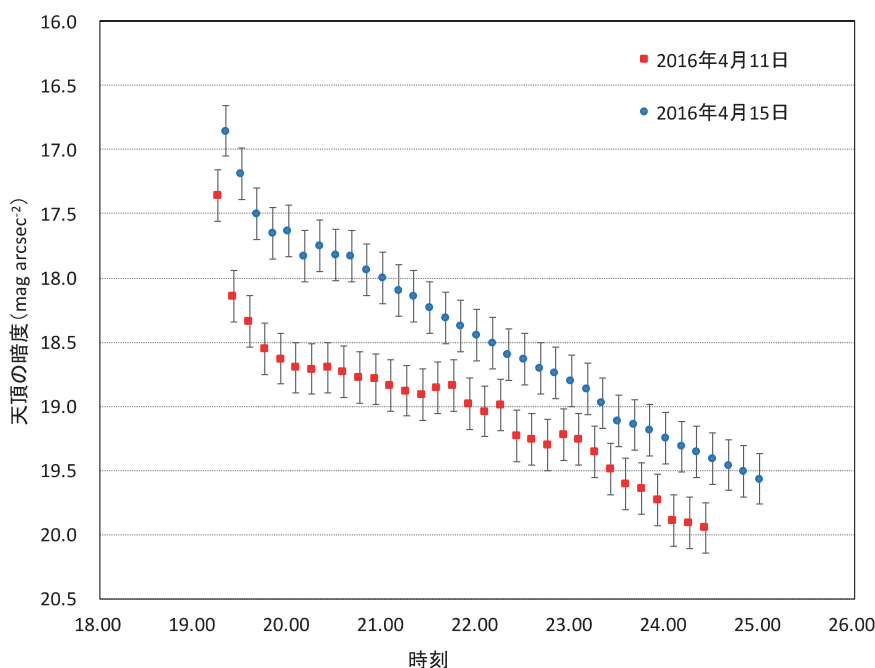


図6. 2016年4月11日（赤い正方形のデータポイント）と15日（青い丸のデータポイント）の夜空の暗度の変化。時間が経つにつれて徐々に夜空が暗く（数値が大きくなる）ようになっていく様子がうかがえる。11日と比較して15日の方が全体的に明るくなっており、特に22時以前に15日の方が明るいのは月が南中付近にあったためである。

図6から、天頂における夜空の暗度は時間が経つにつれて徐々に暗くなっていることが分かる。また、21時半前後と23時前には天頂の暗度が多少明るくなってしまっているが、これは近隣住宅の明かりが増えたり、薄い雲が上空を覆っていたためだと考えられる。

また、午後23時以降になると急速に天頂の暗度が暗くなっているが、これはちょうど計測場所の近隣にあったスーパーやドラッグストアなどの商店の電気が徐々に消されていったためだと考えられる。実際、計測場所の南約500mの場所には大きなスーパーや車のディーラーがあり、毎日だいたい夜10時～11時ごろに消灯されている。



## 3.2.2. 第二回（2016年4月15日）の計測について

初回の計測から4日後の2016年4月15日に第二回の計測を行った。この日は月齢が7.7日で、ちょうど上弦の月となっており、日没後には月が南の空の高いところにあった。しかし、天気は良好であり、雲もほとんどない状態であったので、計測を行った。また、月光がどれくらい夜空を明るくするかのデータも取るのにも役立つので多少の影響はあるものの計測を実行した。計測の場所や方法は11日と全く同じ場所・同じ方法で行った。

前回と同様に「日の出と日の入りの計算」のウェブページによると、この日の日没は18時35分、天文薄明終了は20時03分であった。また、この日の計測は常用薄明がだいたい終了する18時50分から開始し、夜中1時00分(25時00分)まで継続した。詳しい計測結果は表4と図6（青い丸のデータポイント）にまとめた。

表4. 天頂の暗度（2016年4月15日）

時刻	天頂の暗度 (mag arcsec <sup>-2</sup> )			
	計測1	計測2	計測3	平均値
18:50	10.96	11.01	11.07	11.01
19:00*	13.15	13.22	13.25	13.21
19:10	15.56	15.65	15.67	15.63
19:20	16.82	16.85	16.89	16.85
19:30	17.18	17.18	17.21	17.19
19:40	17.51	17.50	17.49	17.50
19:50	17.68	17.68	17.59	17.65
20:00	17.61	17.68	17.61	17.63
20:10**	17.83	17.86	17.80	17.83
20:20	17.79	17.76	17.71	17.75
20:30	17.79	17.78	17.90	17.82
20:40	17.80	17.80	17.89	17.83
20:50	17.89	17.99	17.93	17.94
21:00	17.96	18.01	18.02	18.00
21:10	18.05	18.10	18.14	18.10
21:20	18.16	18.13	18.14	18.14
21:30	18.20	18.24	18.25	18.23
21:40	18.30	18.32	18.32	18.31
21:50	18.37	18.39	18.37	18.38
22:00	18.42	18.46	18.45	18.44
22:10	18.49	18.54	18.50	18.51
22:20	18.60	18.60	18.60	18.60
22:30	18.63	18.62	18.66	18.64
22:40	18.72	18.71	18.68	18.70
22:50	18.75	18.75	18.72	18.74
23:00	18.78	18.83	18.79	18.80
23:10	18.87	18.87	18.85	18.86
23:20	18.96	18.98	18.99	18.98
23:30	19.11	19.13	19.11	19.12
23:40	19.13	19.17	19.14	19.15
23:50	19.21	19.16	19.19	19.19
24:00	19.26	19.26	19.22	19.25
24:10	19.34	19.32	19.29	19.32
24:20	19.37	19.37	19.33	19.36
24:30	19.42	19.39	19.42	19.41
24:40	19.45	19.47	19.46	19.46
24:50	19.51	19.50	19.51	19.51
25:00	19.56	19.56	19.58	19.57

\*常用薄明終了直後

\*\*天文薄明終了直後

注：計測中、19:00~20:30の間は上弦の月が南中付近にあり、天頂付近でも多少の月光の拡散が目視でも確認することができた。ただし、この時間は日没後30分過ぎということもあり、常用薄明の影響の方が月光の影響よりも大きいことが予想される。

この日（4月15日）は前日（4月11日）と違い、計測機の誤差の信頼性の確認の目的もあり、各時刻における計測を3回行った。ただ、3回の内、他の2回と明らかに計測値がずれてしまった場合（e.g.,  $\Delta > 0.10 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ）は確認のために4回目の計測を行い、計測値がずれた数値は記録から削除した。特に、計測は機器を手持ちで行うため、20時30分以前では計測する方向がわずかに数度ずれただけでも月の光を直接計測してしまう可能性がある。そのため、月が南中付近にある時は、時々4回目の計測を行う必要があった。そのため、ここではまず、月光の影響について検証してみる。

月光の影響について、まずは当時の月の位置をウェブ上にある「月の位置計算<sup>15)</sup>」で確認した。このウェブページでは任意の都市または緯度・経度と年月日を入力すれば、該当地におけるその日に見える月の位置（各時刻に見える月の方角と高度）を表と図で示してくれる。位置計算には、地点「四国・徳島」（または経度134.573・緯度34.067）を使用した。その結果、この日の月の南中は19時半となっており19時から21時頃まで高度が60度以上となっている（図7）。

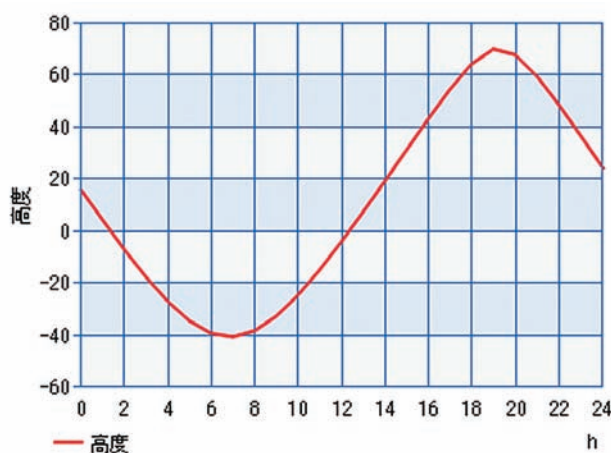


図7. 徳島市における2016年4月15日の月の高度の変化（図はCASIOによる「月の位置計算」で作成されたものを引用）。高度がプラスの時は地平線より上に、またマイナスの時は月が沈んでいることを示している。計測開始時である18時50分から21時頃までは月の高度が60度以上にある。

また、月がSQM-Lの計測方向から20度以内にある場合は、月光による影響が大きいものの、20度以上離れていれば、月光の影響がほとんどないことが分かっている（森ら2013）。また、2016年4月15日の月の南中が19時直前であり、最大高度が約70度であることを考えると、今回の計測（天頂方向）では月光によるSQM-Lへの影響は最小限にとどめられていると思われる。しかも、20時には月の高度は70度以下まで下がっており、実際の計測値については月光の影響よりも、常用薄明（19時頃終了）と天文薄明（20時03分終了）、そして純粹に月光の拡散による光害が影響していると思われる。

実際、図6で11日と15日の夜空の暗度を見比べてみると、15日の方が常に $1.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$ から $0.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$ 前後明るいことが確認できる。現段階では、この差が全て月光による光害だとは単純に結論付けることができないが、月が南中付近にある時は $1.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$ 、そして月が沈む頃に $0.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$ の差となっていることから、この差の大部分は月光による影響（光害）だと仮定できると思われる。

さらに、15日の日没直後から22時頃までの暗度の上昇率が11日と比較して急になっている。これは、19時から22時までの3時間で月が約45度動き、SQM-Lの計測範囲から徐々に遠ざかっている結果だと思われる。つまり、これらの計測結果を考慮すれば、やはり天文薄明が終わる20時頃の15日の天頂の暗度が、11日と比較して $1.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ほど明るくなっているということは月光による光害の影響でだと思われる。ただし、このことについては今後、より詳細な計測を行い、月光の影響を解明していく必要があるだろう。

#### IV. 考察

本稿では、徳島市郊外部における夜空の暗度の計測を日没後から夜中過ぎまで、同一地点において継続的に計測してきた。先行研究の多くは時間的な継続観察よりも、広域に及ぶ二次元的な計測を行った調査（塩尻星の会2009；梅谷2010；越智2010ab など）が主流であり、本稿のような時間的な変化を分析した研究（森ら2013）はほとんど見られなかった。しかも、森らの計測時間は中学校の部活動ということもあり、夕方18時半前で計測が終了してしまい、夜中までは継続されていない。また、梅谷（2010）も高松市内の3地点で30分ごとに定点観測を行っているが、細かい変化を分析するというよりは、3地点の基本的な光害を計測することが目的のようである。実際、梅谷の論文は定点における光害の変化よりは高松市内の広域の光害の方を中心的に論じている。

今回、徳島市郊外において重点的に定点観測を行った結果、天頂の暗度は天文薄明が終わった後でも継続的に変化していることが分かった。また、その変化の度合いについても、実に $1.5\text{mag arcsec}^{-2}$ から $2.0\text{mag arcsec}^{-2}$ もあり、単純に「多少の」変化とは言い難い。確かに、都市部やその郊外部において、広域的な光害調査を行うことは重要であるが、今回の定点観測を行った結果、同一地点においても時間的な光害の変化（夜空の暗度の変化）も無視できないことが分かってきた。しかも、今回は4日間の間をあけた観測を行うことで月の光が夜空の暗度にどのような影響を与えるかを垣間見ることができた。

これらの先行研究や今回の計測の結果、SQM-Lを使用した広域かつ時間的な光害の計測が重要であると考えられる。実際、SQM-Lは本体を手にとってボタンを押すだけで夜空の暗度を計測することが可能であり、児童・生徒でも簡単に調査に参加することが可能である。今後は環境教育活動の一環として中学生などを中心にSQM-Lを用いて広域を同時観測して行くことが期待できる。

#### V. おわりに

都市や町では人口が増えていくにつれ、夜の安全を守るために街灯がたくさん設置されている。また、商店やショッピングモールなど、夜になっても煌々とライトアップされる店舗が増えている。その結果、街灯や住宅・商店の光が夜空に漏れ出し、本来であれば、綺麗に見える星空が光害に汚染され、都心部では本当に明るい星しか見えなくなってしまい、場所によっては星座を形作る星ですら見えなくなってしまっている。

そこで、本稿ではまず、夜空の暗度を裸眼で見える星の等級を使用して測定する方法を紹介した。しかし、この方法には個人差があること、また同一人物であってもその日の体調によって差が出ることを紹介した。そして、より信頼できる方法としてスカイ・クオリティー・メーター with Lens (SQM-L) を紹介した。次にどれくらいの夜空の暗度がどういう状態にあるのかということを紹介した。SQM-Lもそうであるが、暗度の数値は1平方秒面積あたりの等級 ( $\text{mag arcsec}^{-2}$ ) で表され、これは天文学者・宇宙物理学者も使用するものである。しかし、この数値は専門的な測定器がないと計測できないため、より現実に沿った、実際の状況から判定でき、現在、世界中のアマチュア天文家に使用されているボートル・スケール (Bortle Dark-Sky Scale) を紹介した。

徳島市郊外における夜空の暗度の変化を調べるため、まず2016年4月11日に予備調査的に日没後から夜中過ぎまで、10分おきにSQM-Lを使用して計測を行った。その結果、日没後は計測値が時々上下しているが、夜中過ぎまで継続的に上昇している（天頂の空が暗くなっている）ことが分かった。この計測の結果、SQM-Lが十分信用できることが分かったため、15日にさらなる計測を行った。この時は誤差を減らすために3回の計測を行ってその平均値を計算した。事実、11日との変化を見比べてみるとよりスムーズに変化している様子が見て取れた。また、15日は上弦の月が出ており、日没後に計測を開始した時に月が南中しており、月光を直接計測していなかったとはいえ、月による光害の増加が確認できた。今後は、より月の光がどのように光害に影響を与えるのか、より詳しい計測を行い、調査していく必要があることが分かった。

また、SQM-Lを使用した夜空の暗度の調査・光害の調査は非常に簡単であり、小学生や中学生でも簡単に計測できることが分かった。そこで、今後は環境教育の一環として中学生などを中心として広域的な二次元観測を行うことができ、より詳しい徳島の光害を調査することができる可能性があることが分かった。

## 参考文献

- PUN Chun Shing Jason·SO Chu Wing·LEUNG Wai Yan·WONG Chung Fai, ‘Contributions of artificial lighting sources on light pollution in Hong Kong measured through a night sky brightness monitoring network’, “Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer”, Vol. 139, 2014, pp. 90–108.
- QUARANTA Nancy·CIONCO Rodolfo Gustavo, ‘Light Pollution as Part of the Environmental Problems’, arXiv.org, 1208.3344 (<https://arxiv.org/abs/1208.3344>)
- 磯崎行雄・川勝均・佐藤薫・ほか12名, 『基礎地学改訂版』, 啓林館, 240pp.
- 池田和広, 「環境行政における光害の取り組み」, 『照明学会誌』, 80巻, 10号, 1996, pp. 730–732.
- 泉浦秀行, 「天体観測と光害の影響」, 『照明学会誌』, 96巻, 7号, 2012, pp. 408–709.
- 上田晴彦・成田堅悦・毛利春治, 「『星空ビデオカメラ』を利用した光害教育の実践とその教育的効果の研究」, 『秋田大学教育文化部教育実践研究紀要』, 33号, 2011, pp. 167–176.
- 梅谷知数, 「スカイ・クオリティ・メーターを使った高松市における光害の調査」, 『香川県立五色台少年自然センター自然科学館研究報告』, 35巻, 2010年, pp. 51–62.
- 小川勇二郎・浅野俊雄・磯村恭明・ほか10名, 『基礎地学』, 数研出版, 2016, 224pp.
- 越智信彰, 「スカイクオリティメーターによる夜空の明るさの長距離測定」, 2010a,  
[http://hikarigai.net/oldsite/rep/20100601SQML\\_biseiyonago.pdf](http://hikarigai.net/oldsite/rep/20100601SQML_biseiyonago.pdf) (光害.net)
- 越智信彰, 「スカイクオリティメーターによる夜空の明るさの長距離測定－岡山県美星町～鳥取県米子市(その2)－」, 2010b, [http://hikarigai.net/oldsite/rep/20100823SQML\\_biseiyonago2.pdf](http://hikarigai.net/oldsite/rep/20100823SQML_biseiyonago2.pdf) (光害.net)
- 塩尻星の会, 「光害調査におけるスカイ・クオリティ・メーターの実用性について」, 2009,  
[http://ssc01.jp/hikarigai/sqm\\_rep09.pdf](http://ssc01.jp/hikarigai/sqm_rep09.pdf) (塩尻星の会：<http://ssc01.jp/>).
- 田中哲治, 「光害（ひかりがい）とは」, 『照明学会誌』, 85巻, 6号, 2001, pp. 421–422.
- 谷口義明（監修）, 『新天文学事典』, 講談社, 2013, 768pp.
- 福多佳子・田村明弘, 「夜間照明の公共性に着目した地域住民と自治体の意識－横浜市を事例対象とする地域照明環境計画の指針策定に向けた研究調査 その1－」, 『日本建築学会計画系論文集』, 73巻, 629号, 2008, pp.1547–1554.
- ポール・ボガード（著）, 上原直子（訳）, 『本当の夜をさがして』, 白揚社, 2016, 413pp.
- 村松陸雄・中村芳樹・高野雅彦, 「光害（ひかりがい）に関する経済的価値－CVMによる評価－」, 『環境照明学会誌』, 85巻, 2号, 2001, pp. 141–145.
- 森雪絵・橋口紗瑛・原田遼子・倉田蓉子（三鷹市立第七中学校天文部）, 「三鷹七中天文部も夜空の明るさ観測の予備調査」, 『日本天文学会2013春季年会ジュニアセッション講演要旨』, 2013.  
([http://www.asj.or.jp/jsession/2013haru/73\\_jsession2013.pdf](http://www.asj.or.jp/jsession/2013haru/73_jsession2013.pdf)).

## 注 釈

- 1 光害対策ガイドライン（環境省, 平成10年3月, 2017年8月28日参照）：  
[http://www.env.go.jp/air/life/hikari\\_g/](http://www.env.go.jp/air/life/hikari_g/)
- 2 岡山県美星町「光害防止条例」（Astro Photo Club, 2017年8月28日参照）：  
<http://www.astrophotoclub.com/biseityou/biseityou.htm>
- 3 全国星空継続観察（環境省, 2017年8月29日参照）：<https://www.env.go.jp/kids/star.html>
- 4 光害対策ガイドライン（環境省, 平成18年12月改定, 2017年8月29日参照）：  
[http://www.env.go.jp/air/life/hikari\\_g\\_h18/](http://www.env.go.jp/air/life/hikari_g_h18/)
- 5 環境への配慮光害対策（岩崎電気株式会社, 2017年8月29日参照）：  
<https://www.iwasaki.co.jp/lighting/sports/point/environment/light-pollution.html>
- 6 星の「等級」には, その星の見かけの等級 ( $m$ ) と絶対等級 ( $M$ ) の二つがあるが, 本稿では見かけの等級のみについて扱うこととする。
- 7 Unihedron 社（2017年8月29日参照）：<http://www.unihedron.com/index.php>

- 8 国際光器 (2017年8月29日参照) : <http://www.kkohki.com/products/sqm.html>
- 9 アメリカ国立標準技術研究所 (NIST, 2017年8月29日参照) : <https://www.nist.gov/>
- 10 Rate Your Skyglow (by Tony Flanders, Sky and Telescope (online article), 2008年12月5日掲載, 2017年8月29日参照) :  
<http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/rate-your-skyglow/>
- 11 質問1-2) どうなったときに「日の出」「日の入り」? もう真っ暗? (国立天文台, 2017年8月29日参照) :  
<https://www.nao.ac.jp/faq/a0102.html>
- 12 越智信彰, 「スカイクオリティメーターによる夜空の明るさの長距離測定」, 光害.net (2010年6月1日掲載, 2017年8月29日参照) :  
[http://hikarigai.net/oldsite/rep/20100601SQML\\_biseiyonago.pdf](http://hikarigai.net/oldsite/rep/20100601SQML_biseiyonago.pdf)
- 13 Gauging Light Pollution: The Bortle Dark-Sky Scale  
(by John E. Bortle, Sky and Telescope (online article), 2006年7月18日掲載, 2017年8月28日参照) :  
<http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/light-pollution-and-astronomy-the-bortle-dark-sky-scale/>
- 14 日の出と日の入りの計算 (近畿大学星岳彦教授作成) : <http://www.hoshi-lab.info/env/solar-j.html>
- 15 月の位置計算 (Ke!san by CASIO, 2017年8月30日参照) : <http://keisan.casio.jp/exec/system/1239785915>

# Night Sky of Tokushima: Time Variation of Light Pollution at a Fixed Location

TAMURA Kazuyuki\* and ANDO Toru\*\*

(Keywords : Light Pollution, Environmental Education, Astronomy Education)

In these days, streets of cities and towns are flooded with various lights. These lights provide convenience and security to night time activities. On the other hand, these lights also cause a problem called “light pollution,” by washing away dimmer stars in the sky. As a result, it is difficult to observe even some well-known constellations in the midst of a huge city. In this paper, we first summarized how to measure the sky brightness by naked eye and using a special tool, Sky Quality Meter (with Lens ; SQM-L) and what kind of standards are used world-wide. Then, we measured the actual sky brightness in the April of 2016 at a suburb of Tokushima city from sundown till after midnight. We found the SQM-L is very easy to use for people at any age. By observing two nights with 4 days apart, we also found the effect of light from the Moon is somewhat significant. But for both days, we found the sky brightness changes about  $1.5-2.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$  during our observations. In the future, we would like to propose further observation to figure out how moonlight affects the “light pollution” as well as the two-dimensional spread of it across Tokushima city, which can be conducted as a part of Environmental Education for primary and junior high school in this area.

---

\*Basic Human Science for Integrated Studies, Naruto University of Education

\*\*Planetarium, Asutamuland Tokushima