福井大学リポジトリ
UNIVERSITY OF FUKUI REPOSITORY

SQMで福井の夜空の明るさを測る：測定方法とその問題点

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-12-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山本, 博文, 小林, 暉, 藤井, 純子 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/10288

福井大学地域環境研究教育センター研究紀要
「日本海地域の自然と環境」
No. 24，15 - 26，2017

SQMで福井の夜空の明るさを測る

― 測定方法とその問題点 ―

Measuring the night sky brightness of Fukui, central Japan.
― A proposal of night sky photometric technique with Sky Quality Meter ―

山本　博文 *
（福井大学学術研究院　教育･人文社会系部門
教員養成領域 理数教育講座）
小林　　暉 **
（越前市武生第二中学校）
藤井　純子 *
（福井大学学術研究院　教育･人文社会系部門
教員養成領域 理数教育講座）

1．はじめに

小･中学校理科における天文関係の単元としては, 小学校３年の「太陽の動きを調べよう」, 4 年の「星や月の動き」，６年の「太陽と月の形」，中学３年の「地球と宇宙」がある．この内，小学校の４年および中学校３年の単元の中では，星（星座）や天の川が取り上げられ，観察することが求められている．当然のことながら，昼間の授業時間帯にこれらを観察することは不可能であり,「夜，家で観察してくるように」といった宿題が出されることが多い．しかし実際に夜になって星座や天の川を見ようとしても，福井という地方都市の市街地ですら，街灯などの光が溢れ，星はポツリポツリ程度しか見ることができない．天の川に至っては市街地では全くといっていいほど，見ることはできない．

星空が見にくくなった原因としては，都市化や交通網の発達に伴う屋外照明の増加，照明の過剰な使用が指摘されており，動植物への影響や天体観測をはじめとする人間の諸活動への影響，すなわち「光（ひかり）害」が指摘されている（環境庁，1998 など）．また人工衛星データおよび夜空の輝度測定データから求められた世界の夜空の明るさマップも作成されており，例えば日本では人口の 70.4％は肉眼では天の川が見えないところに住んでいるという（Falchi et. al.，2016）．

光害の程度，すなわち夜空の明るさの測定には，ユニヘドロン社製の「スカイ・クオリティ・メータ」（Sky Quality Meter：SQM）を用いた事例が多く報告されている．SQM は手軽に，小学生でも簡単に夜空の明るさを測ることのできる装置であるが，その測定方法について，またその測定値の有効性についての評価はあまり行われていないのが現状である（星空公団，2016）．

そこで今回, 福井市周辺地域で夜空の明るさを測定するにあたり, SQM を用いた測定方法について, また測定値に影響を及ぼす要因について検討を行った.

2．測定方法の検討

夜空の明るさを測定方法としては，肉眼により星を確認する方法や器具を用いて測定する方法がある．測定器具としては, カメラ, 照度計, SQM 等がある．環境省は 1988 年から毎年夏季と冬季の２回, 光害や大気汚染などのない清澄な大気への関心を高めてもらうことを目的に全国各地で一斉に肉眼やカメラを使った身近な方法による星空観察を行い，夜空の明るさについて継続的なデータを収集して

（キーワード：光害・夜空の明るさ・スカイクオリティメーター（SQM）・測定方法）

*　Hirofumi YAMAMOTO（Division of teacher Education Faculty of Education, University of Fukui, Fukui, 910-8507）
**　Hikari KOBAYASHI（Echizen City Takefu Dai-ni Junior High School，Fukui，915-0844）
*　Junko FUJII（Division of teacher Education Faculty of Education，University of Fukui，Fukui，910-8507）

きた（全国星空継続観察：スターウォッチング・ネットワーク，2013 年 3 月末で休止）．この調査では当初，ポジフィルムを用いて基準星とバックグランドの明るさを比較する方法で夜空の明るさを測定する方法が用いられてきたが，近年，カメラのデジタル化に伴い，デジタルカメラを用いた調査手法が提案されるようになり（桝井，2006，2010；小野間ほか，2009 など），全国星空継続観察でもデジタルカメラを用いた報告が多数なされるようになった（環境省，2013）．

デジタルカメラによる夜空の明るさ調査では，撮影した画像の中の恒星（基準星）の明るさとその周辺の夜空の明るさの比から求めるために，手軽に誰でもその場で夜空の明るさを求めるということは難しい．一方，SQM を用いた夜空の明るさ測定は，測定したい方向にセンサーを向けスイッチを押し，数～数 10 秒で測定値が得られる．このように SQM を用いた測定方法はデジタルカメラを用いる方法よりはるかに手軽であるため, 2005 年以降, SQM を用いた測定が多数報告されるようになってきた．

筆者らが行った福井における夜空の明るさ調査でも，測定には SQM を用いることとした．使用した機種は SQM-L シリーズ（SQM-L，SQM-LU，SQM-LU-DL）である．SQM-L は手持ち測定用であり，ボタンを押すことにより 1 回測定できる機種，SQM-LU はパソコンと USB 接続することにより，一定間隔で連続して測定できる機種，また SQM-LU-DL はバッテリーを接続し，パソコンが無くても一定間隔で連続して測定できる機種である．いずれの機種も測定部の諸性能は同一であり，空の明るさは平方秒角（1"）あたりの等級（mag/arcsec^2）で表示される．カタログ値では，SQM-L シリーズの測定精度は ± 0.1 mag/arcsec^2，光感知角度は 20 度である．

予察的に測定を開始した 2014 年においては，SQM-L を用い，10 ～ 30 分おきに天頂方向の測定を行った．その結果, 1）天文薄明が終わっても, 時間とともに測定値が上昇（明るさが減少）すること，2）深夜～早朝（午前 2 ～ 4 時頃）が最も暗く，かつ測定値が安定していること，3）月・雲・霧等は測定数値に大きく影響すること，4）同じ場所，同じ時間帯でも測定する日によって明るさが異なってくること，5）街灯などの光源に近い場合，光感知角度（20 度）の外に光源があった場合でも，その影響を受けやすいこと，6）測定点が数 100m 離れていても，街灯などの影響が無ければ測定値はあまり変わらないこと等が明らかとなってきた．

1），2）のように，夜空の明るさは時間とともに変化すること，また 3）のように雲・霧等の影響を強く受けることから，1 回のみの測定値ではあまり意味がなく，終夜連続して測定を行い，その変化の把握が不可欠であることが明らかとなった．そこで自動測定可能な SQM-LU（1 台），SQM-LU-DL（6 台）を導入し，複数個所で同時に測定を実施することとした．

2-1．測定ボックスの作成

終夜連続して測定を行うにあたり，SQM-LU-DL を測定点に設置するための測定ボックスを作成した（図 1）．測定ボックス作成では，1）急な降雨対策，2）センサー部の結露（着霜）対策，3）街灯等の遮光対策を施した．

1）の降雨対策としては，直径 7.5cm，長さ 30 ～ 35cm のプラスチック製の円筒を用意し，その先端にカメラ用のレンズ保護フィルター（フィルター径 77mm）を取り付け, SQM のセンサーはこのフィルター直下になるようにした．また筒の中に SQM-LU-DL を作動させるための乾電池バッティーボックスも収納した（図 1 左）．実際，夜間測定中に 1 時間降水量 2mm 程の降雨に見舞われたこともあったが，SQM は問題なく作動していた．

2）の結露（着霜）対策としては，筒先端部のフィルターの周囲に夜露防止ヒーター（ヒーターのよこた製, タイプ 6M）を巻き付けた．ヒーターの電源としては, 容量 10,000mAh の USB モバイルバッテリーを使用した．モバイルバッテリーはプラスチック製の小箱の中に入れ，降雨･結露対策とした．これにより，フィルターの結露（着霜）は朝の回収時においてもほとんど見られなかった．

3）の街灯等の斜めからの光の影響を防ぐために，フィルターの外枠に円筒状のフードを取り付けることとした（フードの効果等については後述）．

このSQMを組み込んだプラスチック製の筒を野外に設置するために，プラスチック製のボックス（縦，横，高さとも約25cm）を用意した（図１右）．ボックスの中に発泡スチロールをはめ込み，筒をその隙間に差し込むだけで，筒が固定できるようにした．また水準器でボックス上面が水平位になるように設置すれば，筒が天頂方向に向くようにした．以上のSQM-LU-DLを組み込んだ測定ボックスを６セット（No.6 ～ 11）作成した．測定間隔は雲等の影響の有無が読み取れるよう，５分間隔とした．

2-2. 測定ボックス間の測定値のばらつき

SQM-LU-DLを組み込んだ測定ボックス間で，測定値にばらつきがあるかどうか確かめるために，同一地点に測定ボックスならべ，測定値の比較を行った．

2015年３月26日にNo.6 ～ 10を福井大学教育系１号館６階屋上に並べ，終夜測定を行った．測定点は市街地に位置しているが，６階屋上に設置したことから，少なくとも周囲100m以内の街灯等の光は直接，測定点からは見えていない．この日の月齢は5.7で月の入りは0：25であることから，月没後の1:00から薄明開始約30分前の4:00までの37測定値（平均19.3 mag/arcsec^2）の比較を行った．その結果，装置間の平均値は ± 0.02 mag/arcsec^2 の範囲に，１回毎の測定値も ± 0.03 mag/arcsec^2 の範囲に収まっていた（図２）．

また2015年７月10日には，福井大学の南西約13kmにある福井市笹谷町のSSTランドでNo.6，7，8，10，11の測定ボックスを用い，同様の測定を行った．深夜から曇りがちとなったため，夜空の明るさが安定していた22:30から1:00の31測定値（平均20.9 mag/arcsec^2）で比較を行うこととした．測定点の周囲には街灯は見えず，月齢は24.5，月の出は0：46であるが，測定点東側は丘に遮られており，1：00の時点では月は見えていない．比較を行った装置間の平均値は ± 0.02 mag/arcsec^2 の範囲に，１回毎の測定値も ± 0.04 mag/arcsec^2 の範囲に収まっていた．さらには福井市近郊住宅地の福２丁目においても同様の測定を行い，1：45 ～ 3：45の25測定値（平均19.7 mag/arcsec^2）において，装置間の平均値は ± 0.02 mag/arcsec^2 の範囲に，一回毎の測定値も ± 0.03 mag/arcsec^2 の範囲に収まっていた．以上のように，各装置間の測定値のばらつきは，SQM-Lシリ - ズの測定精度である ± 0.1 mag/arcsec^2 に比べ十分小さく，ばらつきはほとんどないといえる．

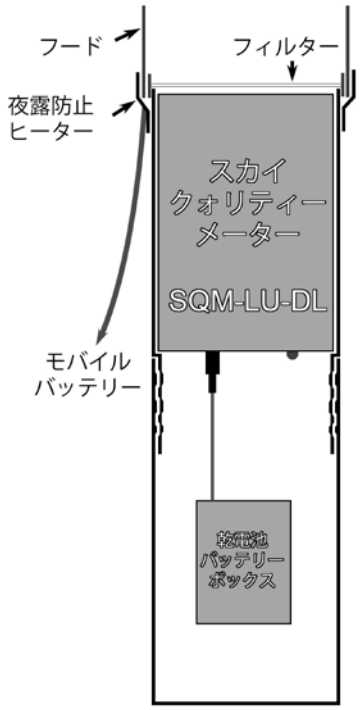

図１．SQM-LU-DL用の測定ボックス．

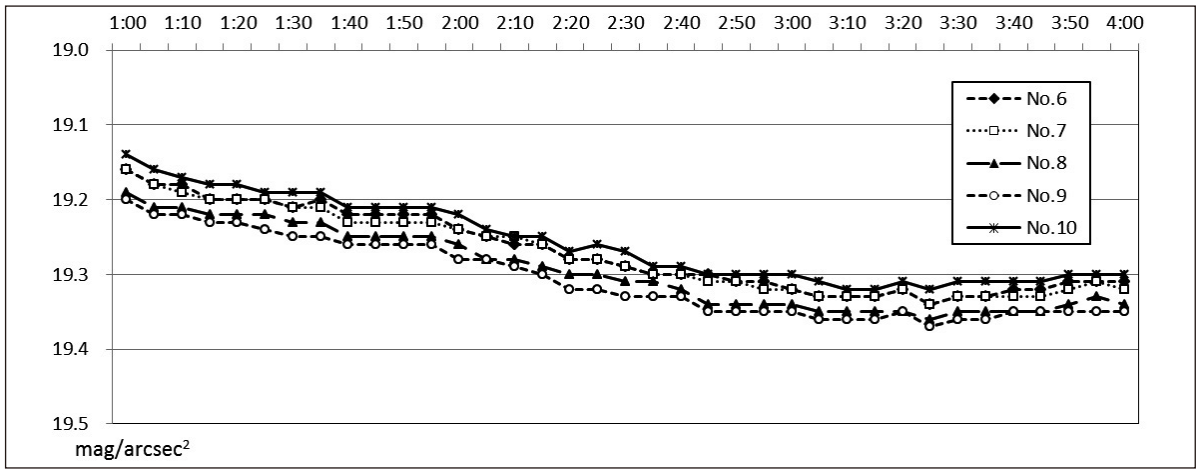

図２．福井大学教育系１号館屋上における測定ボックス間の測定値の比較（測定日：2015 年３月 26 日）

2-3. 街灯による測定値への影響とフードの効果

SQM-L の光感知角度は 20 度（測定方向からの半値幅は 10 度：カタログ値）となっている．Cinzano（2007）は SQM-L の感度の視野角依存性について測定を行っており，最高感度の 50％以上を有する範囲は測定方向からの半値幅で 10 度，10％以上の感度を有する範囲は 19 度，また 1％以上の感度を有する範囲は 40 度であると報告している．また星空公団（2016）も同様に SQM-L の感度の視野角依存性の測定をしており，周囲の街灯などの照明の影響を避けることができる，感度が 1000 分の 1 以下となるのは，測定方向から約 80 度であり，本装置は街灯などの斜め上方からの光に弱いことを指摘している．さらに星空公団（2016）は標準的な街灯（高さ 5 m）からの距離と測定値の比較を行い，夜空の明るさが 18 mag/arcsec^2 の環境において，街灯の影響が 0.1 mag/arcsec^2 以下となるためには，15 m 以上離れる必要があるとしている．

そこで今回作成した測定ボックスでは，街灯などの斜めからの光対策として，筒先端のフィルターの周囲に，フィルター面からの高さが 4cm の黒画用紙製の円筒状フードを設置した．SQM-LU-DL ではセンサー部は本体の中心からややずれた位置にあるため，センサー中央部からフードまでの距離は近いところで約 3cm，離れた側で約 5cm となっている（SQM-LU ではセンサーは中央部に位置しており，フードからセンサ―中央部まで約 4cm である）．よってこのフードによって遮られる光の範囲は，測定方向から 37 ～ 51 度（SQM-LU では 45 度）より外側である．測定方向から 40 度離れた方向の感度は，測定中心方向に比べ約 1/100 と低く（Cinzano，2007），フード設置に伴う，測定値への影響はほとんどないと考えられる．また SQM の前面に設置したフィルター（ケンコー･トキナー製の PRO1D プロテクター（W））の光透過率は，カタログ値では 99％と記されており，フィルター設置に伴う観測値への影響もほとんどないと推測される．

そこでこの測定ボックスを用いた場合の測定値への影響を明らかにするため，また街灯の影響およびフードの効果を明らかにするために，福井市笹谷町の河成段丘面上において天頂方向の測定を行った．段丘面上には水田が広がっており，農道交差点には街灯が設置されている．街灯は高さ約 5m であり，地上から約 0.5m の高さで測定した街灯方向の明るさは，街灯直下では 8.6 ルクス，10m 離れた地点で 1.2 ルクス，20m 地点で 0.28 ルクス，40m 地点で 0.07 ルクスであった．この街灯の周囲には別の街灯や民家の明かりは無く，北東～北～西方に 170 ～ 220m 離れた 6 基の街灯および民家の明かりが目視できたのみである．これらの街灯の明るさは，街灯から約 10m 離れた地点で 0.1 ～ 0.6 ルクスであった．

まず，街灯の影響および黒画用紙で作成したフードの効果およびを調べるために，“フードあり”，および“フードなし”の測定ボックスを用意し，台車に乗せて街灯から 120m，80m，60m，40m，30m，20m，15m，10m，7m 地点へと移動し測定を行った．台車に乗せた際の SQM の地面からの高

さは約 0.5m である．また夜空の明るさは時間とともに徐々に変化してゆくことから，120m 地点に固定点として“フードあり”の測定ボックスを置いた．測定は 30 秒間隔で 10 回行い，その平均値で比較した．

測定開始時における 120m 地点での固定用の測定ボックスと移動用の“フードあり“および“フードなし”の測定ボックスの測定値を比べると，フードあり／なしにかかわらず，ばらつきは± 0.01 mag/arcsec^2 以内と，その値にほとんど違いが認められなかった．また観測時間内（22：15 ～ 23：20）に 120m 固定点での測定値は 20.18 から 20.41 mag/arcsec^2 へと緩やかに上昇していった．

観測結果を図 3 に示す．120m 地点から移動用の測定ボックスを街灯へ近づけてゆくと，40m 地点までは固定点と移動点で測定値の差はほとんど認められなかったが，20m 地点では“フードあり”，“フードなし”ともに固定点の値より 0.14 ～ 0.15mag/arcsec^2 低くなった．15m ではフード付は 0.32，なしは 0.44，10m ではフード付は 0.76，なしは 1.29 mag/arcsec^2 低く測定され，特に“フードなし”は固定点より大幅に低い値となった．

最後に，120m 地点に戻り，“フードなし”の測定ボックスのフィルターを取り外し，フィルター設置に伴う影響評価を行った．その結果，フィルターを取り外し後の測定値は取り外し前の値に比べ + 0.02 mag/arcsec^2 の変化あったのに対し，同時に測定したフィルターを装着したままの他の 2 つの測定ボックスでは + 0.03，+ 0.01 mag/arcsec^2 の変化あり，フィルターの影響はほとんどないといえる．以上の結果からすると，今回の 20 mag/arcsec^2 台の環境では，1）天頂方向の測定の場合，測定ボックスにおけるフィルターおよびフードの装着は測定値にほとんど影響を与えていないこと，2）街灯の影響を無くすためには，街灯から 30 ～ 40m 離れる必要があることが示唆された．しかしフードの効果についてはこの測定ではあまりはっきりしなかった．

そこで，街灯の光が直接，測定ボックスに当たっている場合と，当たらない場合の比較を行うこととした．測定ボックスに街灯の光が直接当たらないようにするために，SQM センサー部から約 40cm 離れた場所に，センサー部より 40cm 高い位置まで黒布を張って遮光した．このようにして遮光した台車に前回と同様に“フードあり”と“フードなし”の測定ボックスを載せ，比較のため前回と同様に遮光していない台車に“フードあり”と“フードなし”の測定ボックスを載せ，各測定点で 30 秒間隔 10 回の測定を行った．前回の測定では 40m 地点までは 120m 固定点と移動点の測定値にほとんど差が認められなかったことから，今回は 60m 地点を固定点として“フードあり”の測定ボックスを置き，2 台の台車は街灯から 60m，50m，40m，35m，30m，25m，20m，15m，10m，7m 地点へと移動し，測定を行った．

測定の結果を図 4 に示す．街灯側を遮光した場合，“フードあり”と“フードなし”ではほとんど測定値に差はなかった．60m 地点の固定点の値と比べると，20m 地点までは固定点との差は 0.02 mag/arcsec^2 以下と小さく，15m，10m 地点でも 0.04 ～ 0.06，7m 地点でも 0.11 ～ 0.12 mag/arcsec^2 低く測定される程度であった．次に街灯側の“遮光なし”の場合と比較してみると，30m 地点までは遮光のあり／なし，およびフードのあり／なしで測定値に違いはほとんどなく，固定点の値ともほとんど差は認められなかった．25m 地点では“フードなし・遮光なし”の値が，それ以外の値に比べ 0.04 ～ 0.05 mag/arcsec^2 低い値を示し，20m 地点では“フードなし・遮光なし”の値は“フードあり・遮光なし”に比べ 0.13，遮光ありや固定点に比べ 0.15 ～ 0.17 mag/arcsec^2 低い値を示した．さらには 15m 地点では“フードなし・遮光なし”の値は“フードあり・遮光なし”の値に比べ 0.26，遮光ありに比べ 0.34 ～ 0.35，固定点に比べ 0.39 mag/arcsec^2 低い値を示した．

以上の測定結果からすると，20 mag/arcsec^2 台の環境では街灯の影響を 0.10 mag/arcsec^2 未満（カッコ内は 0.05 未満）とするためには，黒画用紙で作成したフードでは，20m（25m）以上，また遮光幕では 10m（15 ないし 20m）以上，離れる必要があり，遮光幕がより有効であることが明らかとなった．

しかしセンサーから 40cm 離れたところに遮光幕を設置した場合，測定ボックス自体が大型化し，持ち運びや設置上の問題点も多くなる．そこでフードを黒画用紙製からより光の反射率が低い黒色の短起毛紙に替えることにより，その効果を高めることを試みた．

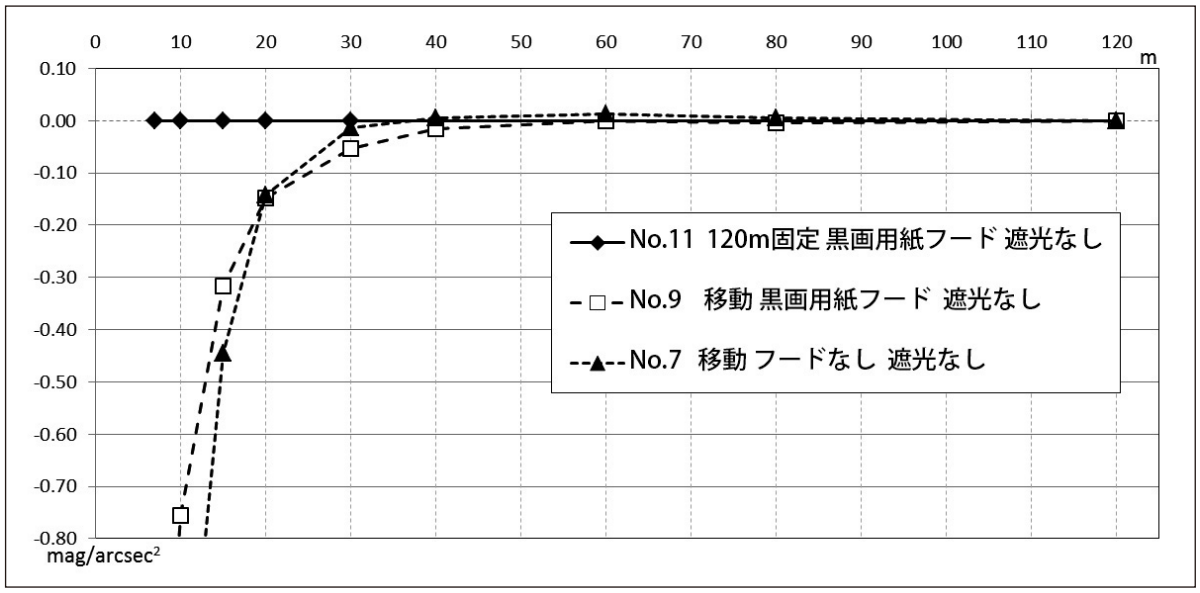

図３．福井市笹谷町における街灯の影響調査結果．横軸は街灯からの距離（m），縦軸は各地点における測定値と同時刻における 120m 固定点測点における測定値との差（mag/arcsec^2）．なお，120m 地点で同時に測定した際の測定ボックス間の差を補正した．測定時間中の固定点の値平均は 20.5 mag/arcsec^2.

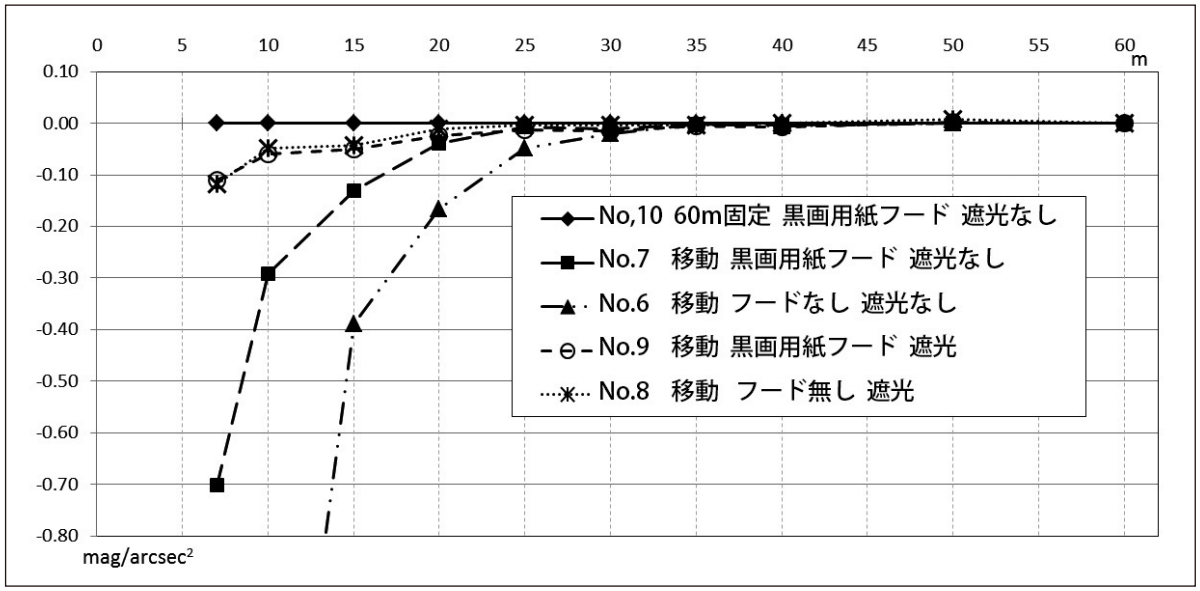

図４．福井市笹谷町における街灯の影響調査結果．横軸は街灯からの距離（m），縦軸は各地点における測定値と同時刻における 60m 固定点測点における測定値との差（mag/arcsec^2）．なお，60m 地点で同時に測定した際の測定ボックス間の差を補正した．測定時間中の固定点の値平均は 20.6 mag/arcsec^2.

黒画用紙と同じサイズのフードを短起毛紙により作成し，同様に 60m 地点を固定点とし，起毛フード付きの測定ボックスを置いた．また前回と同様に街灯側を遮光した台車と遮光なしの台車を用意し，遮光なしの台車には，黒画用紙フード付，短起毛紙フード付，およびフードなしの測定ボックスを，遮光ありの台車には短起毛紙フード付とフードなしの測定ボックスを載せ，街灯から 60m，50m，40m，35m，30m，25m，20m，15m，10m，7m 地点へと移動，同様に各測定点で 30 秒間隔 10 回の測定を行った．

測定結果を図５に示す．遮光ありの場合，短起毛紙フードとフードなしでは測定値にほとんど違いはなく，15m 地点まで固定点とほぼ同じ値となったが，10m 地点では 0.05，7m 地点では 0.07 ～ 0.08 mag/arcsec^2 低い値となった．また街灯側を遮光しない短起毛紙フード付きの場合，20m 地点までは固定点とほぼ同じ値を示し，15m 地点では遮光ありに比べ 0.02（固定点に比べ 0.03），10m 地点で遮光ありと比べ 0.02（同 0.07），7m 地点では遮光ありと比べ 0.08 ～ 0.09（同 0.16）mag/arcsec^2 低い値を示した．

以上のことからすると，短起毛紙のフードは遮光幕とほぼ同様の効果があり，街灯による測定値への影響を 0.10 mag/arcsec^2 未満（カッコ内は 0.05 未満）とするためには，短起毛紙フード付測定ボックスの場合，街灯から 10m（15m）以上離して設置する必要があることになる．

3. 夜空の明るさに影響を与える要因の検討

夜空の明るさは場所によって，時間によって，また日によって異なっている．天文薄明が終わった後の夜空の明るさは，黄道および天の川から離れたもっとも暗い地点では，光害等の影響を受けなければ 22.1 mag/arcsec^2 程度になるという（環境庁，1998）．しかし福井市周辺で実際に夜空の明るさを測定すると，この値よりはるかに低く，夜空は何らかの光の影響を受けていると推測される．夜空を明るくしている要因としては，街灯や車のヘッドライトなどの人工的な要因，および雲や霞などの気象的要因などが考えられる．以下，それぞれについて述べる．

3-1. 人工的な光の影響

街灯や車のヘッドライト等の人工的な光が夜の街にあふれ，夜空を明るく照らしている．市街地やその周辺地域での測定では，薄明が終わった後も徐々に明るさが減少し，深夜～早朝ではごく緩やかに明るさが減少し，明け方，薄明が始まる直前が最も暗くなっている．この変化は人々の活動が深夜になるにつれて低くなってゆくことと調和的であり，一般に人工的な光の影響の低下を示していると考えられている．

そこで人工的な光が夜空の明るさに与えている影響を捉えるために，まず福井大学の 13 階屋上ヘリポートにおいて測定を行った．この建物では，側壁上端部にある看板を照らすために，隣の 3 階屋

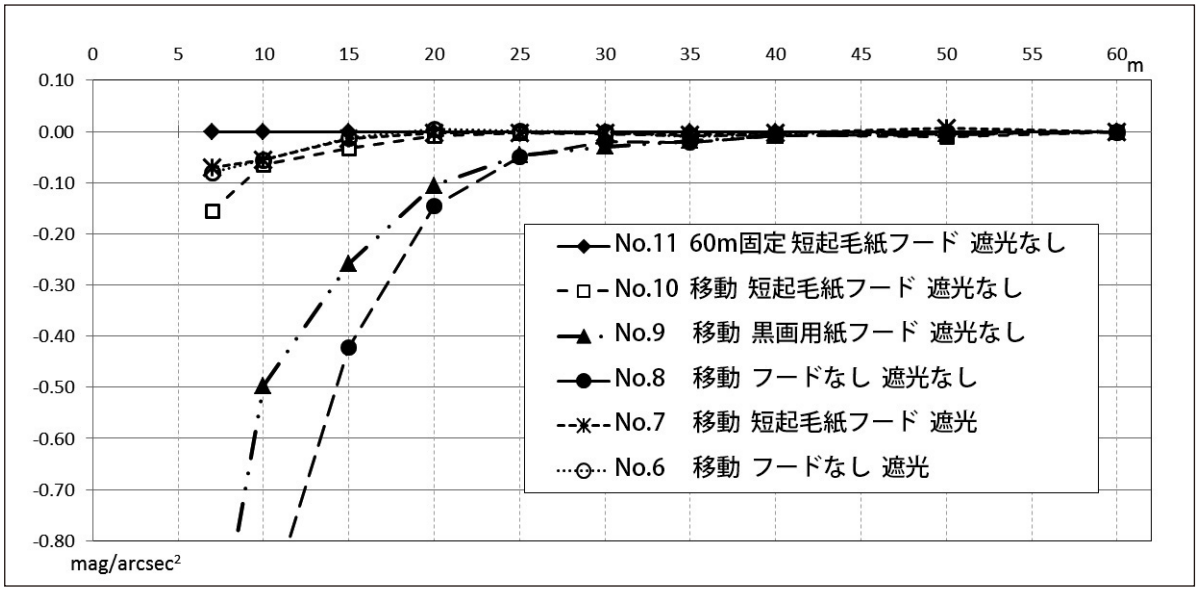

図５．福井市笹谷町における街灯の影響調査結果．横軸は街灯からの距離（m），縦軸は各地点における測定値と同時刻における 60m 固定点測点における測定値との差（mag/arcsec^2）．なお，60m 地点で同時に測定した際の測定ボックス間の差を補正した．測定時間中の固定点の値平均は 20.6 mag/arcsec^2.

上より斜め上方に照明が向けられており，その一部は測定点上方へ漏れ出している．測定点は照明の位置より水平距離で約 40m 離れており，周囲を高さ 3m 程の壁に囲まれているため，この壁面照明や周囲の街の明かりは一切見えていない．

測定を行った 2014 年 9 月 22 日の記録を図 6 に示す．この日は月齢 28.0（輝面比 0.02），月の入は 16：39，月の出は翌日の 4：34，天文薄明の終わりは 19：19，始まりは 4：18 となっている．測定値を見ると，天文薄明が終わる直前の 19：15 の値は 18.15，その直後の値は 17.95 と 0.20 mag/arcsec^2 低下した．この時間に照明が点灯された（施設担当者によれば，この日は点灯用のタイマーが狂っていたために，やや遅い時間での点灯となったとのこと）．その後，値は徐々に上昇し，0：30 には 18.86 となったが，消灯に伴い，その直後には 19.30 と 0.44 mag/arcsec^2 上昇した．

また越前町朝日の古墳公園では，西側 500m にグランドがあり，測定点からはこの照明を直接見ることはできないものの，測定ボックス設置時には照明が点灯していた．測定値（図 6）をみると，21：10 では 19.33 であったが，その直後には 20.11 と 0.78 mag/arcsec^2 上昇した．

これらの測定結果は，強い光源では光源が直接見えなくても，また数 10 ～数 100m 離れていたとしても，観測値に大きな影響を与えていることを示している．そこでどのくらいの距離まで影響が及ぶのかを調べるために，深夜 0：30 まで営業しているゴルフ練習場照明の影響がどこまで及んでいるかを調べることとした．調査を行ったゴルフ練習場は，福井市街地の北に位置し，北～北北西方に照明が向けられている．ゴルフ練習場の北方は水田地帯となっており，集落はさほど多くない．

測定は，まずゴルフ練習場の北～北北西方 0.4km，1.4km，2.6km，4.5km，7.7km 地点に測定ボックスを設置し，終夜測定を行った．0.4km 地点はゴルフ練習場の照明に照らされ，ゴルフ練習場方向の明るさは 5.0 ルクス前後であった．一方，1.4km 地点以遠の測定点では，この照明を確認することはできなかった．ゴルフ練習場消灯前後の測定値の変化（図 7）を見ると，0:25 と 0:30 の間で 0.4km 地点では 0.53 mag/arcsec^2 の上昇（消灯前後それぞれ 2 回の測定平均値の差：以下同じ）が認められた．また同じ時間帯に，1.4km 地点では 0.23，2.6km 地点では 0.13，4.5km 地点では 0.08 mag/arcsec^2 の上昇が認められ，少なくとも 4.5km 地点までは影響が及んでいることが確認された（7.7km 地点では雲の影響があったためか，同時刻における値の変動を読み取ることができなかった）．そこで測定地点を 0.4km，4.5km，5.2km，6.6km，7.7km，9.3km とし，再度測定を行った．測定の結果，0：25 と 0：30 の間ですべての地点で計測値の上昇が認められ，その変化量は 0.4km 地点では 0.66，4.5km 地点では 0.08，5.2km 地点では 0.07，6.6km 地点では 0.06，7.7km 地点では 0.05，9.3km 地点では 0.04

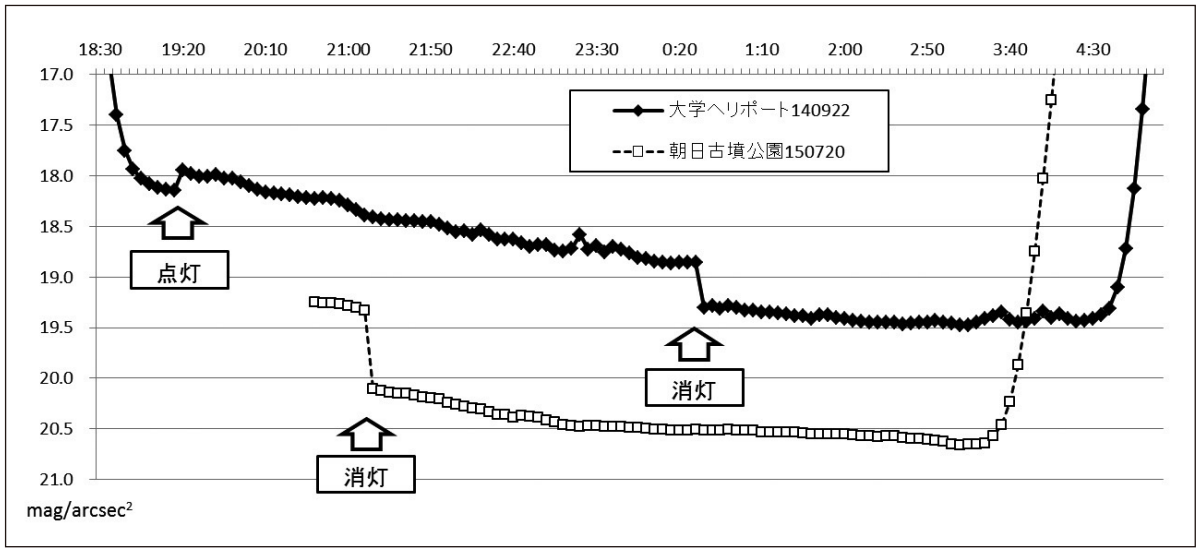

図６．強力な人工光源による測定値の変化．大学へリポートでは，約 40m 離れた地点より，斜め上方に看板を照らすためのライトを，また朝日古墳公園では約 400m 離れたグランドで照明の影響を観測した．

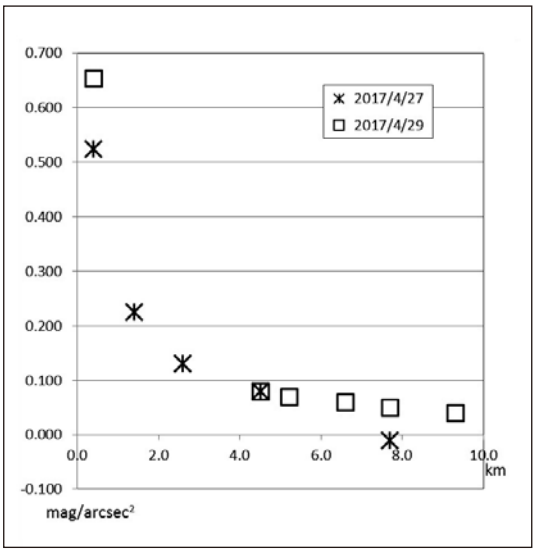

図７．ゴルフ練習場からの距離と照明消灯時の変化量．
なお消灯直後の測定値は，0.4km 地点では 19.5，4.5km 地点以降では 20.1 ～ 20.4 mag/arcsec^2 であった．

mag/arcsec^2 であった．即ちゴルフ練習場のような強い人工光の影響は，少なくとも 10km 近い地点まで達しているといえる．

3-2．雲等による影響

街中では雲は街明かりに照らされて，明るく光って見える．このため雲が少しでもあれば，夜空の明るさを正しく測ることができない．図 8 に福 2 丁目の観測点で行った 2014 年 10 月 23 日，11 月 20 日，2016 年 8 月 1 日の観測例を示す．なお，11 月 20 日は終夜快晴の雲の全くない良い条件で測定ができた例である．

2014 年 10 月 23 日は秋空が広がったが，ところどころに積雲が認められた．19 時台及び 23 時～翌日の 2 時にかけて，観測値が 1 ～ 2，最大で 2.5 mag/arcsec^2 急激に低下し，不安定な状態となっているが，それ以外の時間帯は 11 月 20 日の測定値に近い，安定した値となっている．この不安定で急激な値の低下は，積雲が天頂部にさしかかったためと考えられる．

一方，高層の薄雲は，特に夜間は目視だけでは分からないことも多い．2016 年 8 月 1 日の夕方は僅かに巻雲ないし巻層雲が認められたが，薄明が終わった以降，22：40 頃までの夜空は，やや星が見にくいという感じであったが肉眼では雲は確認できていない．全天周魚眼レンズを使い，夜空の撮影を行ったところ，写真では僅かに薄雲が確認できるときもあるといった程度であり，星は薄雲越しに写っていた（図 9）．測定値をみると，天文薄明終了～ 22：45 までは 11 月 20 日の観測値に比べ 0.5 mag/arcsec^2 程明るく，やや不安定な値を示していた．22：50 以降，観測値は 1 ～ 2 mag/arcsec^2 急激に低下し，不安定な値を記録した．この時間帯では，肉眼でも雲に覆われてきたことをはっきり確認できた（図 9）．

雲や霧などがあると，必ずしも測定値が低くなるとは限らない．図 10 は 2014 年 10 月 24 日および 11 月 22 日の大野市下山での測定結果である．両日とも夕方は快晴であり，また月齢は 0.2 および 0.1 と月の影響が全くない観測条件であった．11 月 22 日では 2：00 頃より測定値が不安定となり，5：05 に 22.24 mag/arcsec^2 という非常に暗い値を測定した．測定を行った大野市下山付近では，翌朝回収時に霧が発生しており，明け方にかけての不安定な測定値はこの霧の影響と考えられる．市街地で霧が発生した場合，街明かりを反射し，明るくなると推測されるが，測定を行った下山では 150m 西側に国道 158 号線が通っているものの，夜間の交通量はほとんどなく，霧により夜天光や人工光が遮られ，より暗くなったものと推定される．また 10 月 24 日では 20：30 頃より測定値が不安定となり，2：05 に 22.07 mag/arcsec^2 という非常に暗い値を測定しているが，同様のケースと推察される．

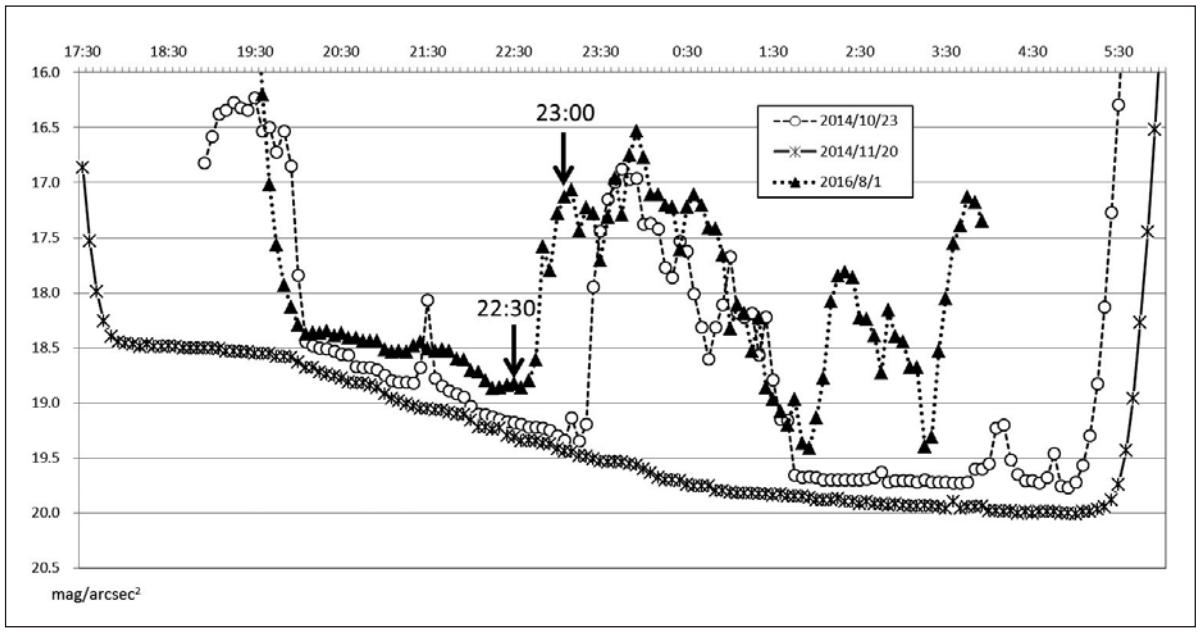

図８．雲による観測値への影響．2014/10/23 では積雲が天頂付近にさしかかると，観測値が 2 mag/arcsec^2 以上，低くなることもあった．2016/8/1 では 22:45 ごろまでは肉眼では雲は全く確認できなかったが，写真では僅かに薄雲が写っており（22:30；図９左），やや不安定で若干低い値が測定された．22:50 以降は肉眼でも雲が確認でき，1mag/arcsec^2 を越えて低い値が測定された．

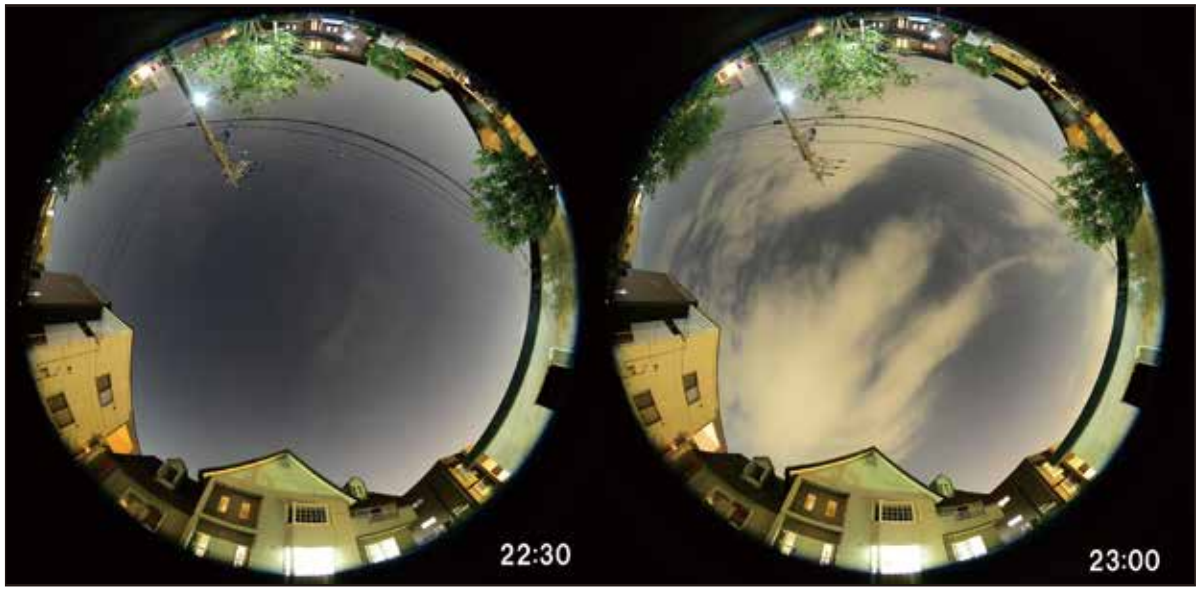

図９．雲による測定データへの影響．左（22：30）では肉眼では薄雲は確認できないが，全天周画像では僅かに薄雲の存在が認識できた．右（23：00）では肉眼でも雲の存在が確認できる状態となった．

4. 同一測定点における測定日による明るさの違い

同一の地点で測定した場合，測定日によって値にどの程度のはらつきがあるのかを明らかにするために，福井大学の教育系１号館屋上および福２丁目で観測した異なる日のデータの比較を行うこととした．

図 11 に 2015 年に大学屋上で測定した，雲や霧の影響および月の影響のない 10 日分の 2：00 ～ 3：25 のデータを示す．2：00 ～ 3：25 の測定値の平均を見ると，最大は 9 月 13 日の 19.67，最少は 4 月

17 日の 18.99 であり，0.68 mag/arcsec^2 の違いがみられた．同様に 2014 年度の福 2 丁目測定点における 10 日分の測定データを見ても 0.28 mag/arcsec^2 の差が認められた．

これらの測定日による違いは，明らかに測定精度以上の差となっている．環境庁（1998）は「夜空の明るさ」は，その時点の気象に大きく影響を受けるとしており，これらのばらつきも気象的要因が大きいと思われる．測定日による違いをどのように補正するかは，今後の検討課題である．

5. まとめ

夜空を見上げた時，19.0 mag/arcsec^2 を超えると，空が暗く，星がたくさん輝いていると感じられるようになる．天の川は 21.0 mag/arcsec^2 を越えれば明瞭にみることができる．この夜空の明るさを測る手法として，手軽であることから多くの学校現場で SQM が取り入れられている．しかし測定手法の検討，また明るさに影響を与える要因の分析は，測定値の比較・解釈上必要であり，さらには

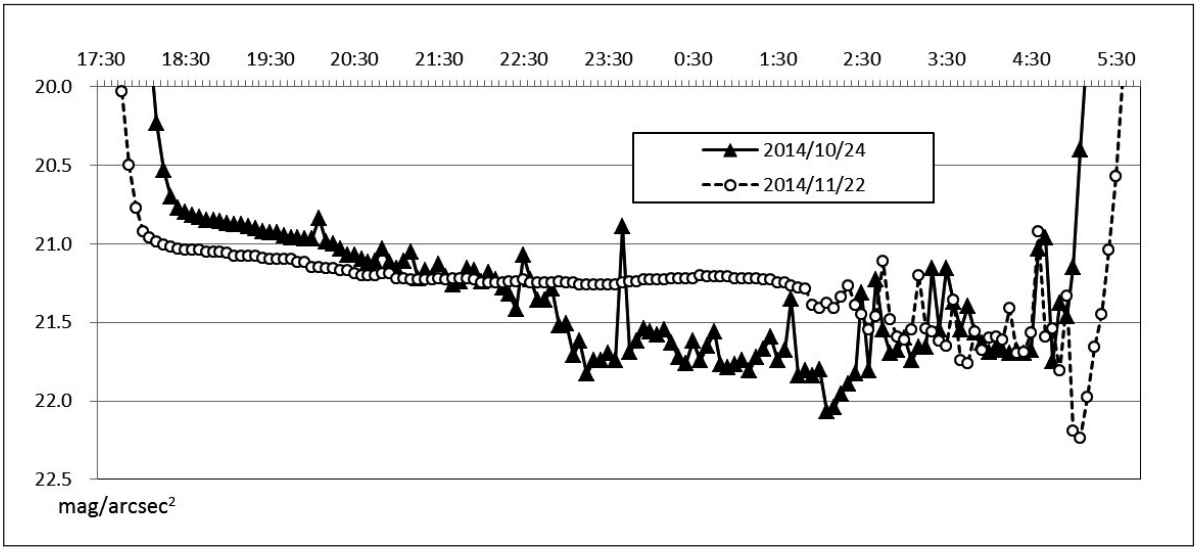

図 10．大野市下山における測定記録の一例．22.0 mag/arcsec^2 を超える非常に暗い値が一時期，測定されている．しかしその前後の測定値を見ると，値は一定しておらず，雲ないし霧の影響により，夜天光や人工的な光が遮られたためと推測される．

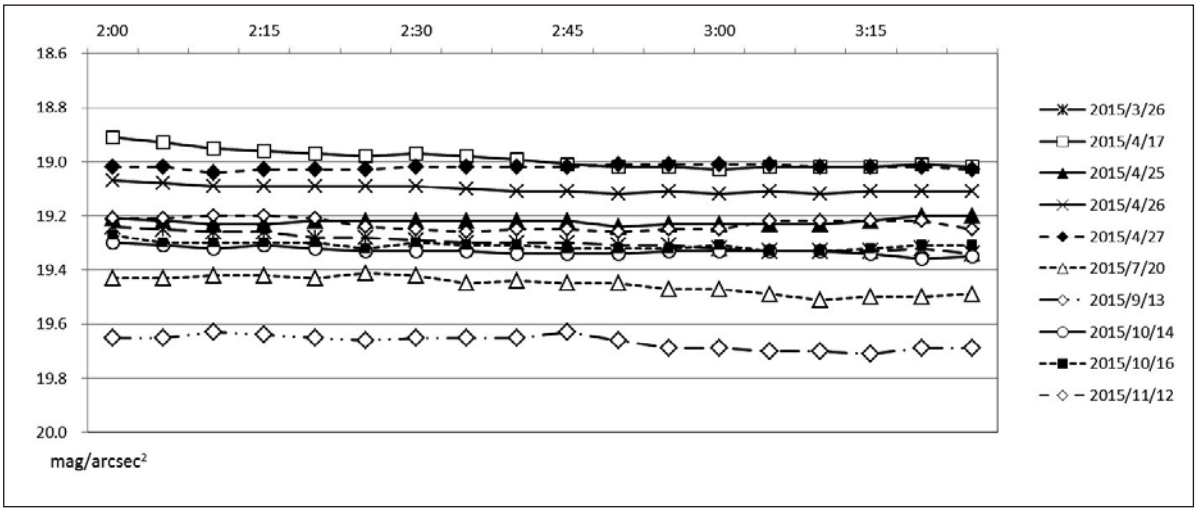

図 11．大学屋上での観測例．何れも月は出ておらず，また雲の影響もなかったと考えられる測定値である．同じ場所での測定であるが，± 0.4 mag/arcsec^2 程のばらつきが認められる．

計測地点の星空の見え方を評価する上で不可欠である．今回，SQM を使った夜空の明るさの測定方法について検討を行ったところ，測定方法として，1）連続して測定を行うこと，2）街灯などの明かり（特にグランド照明などの強力な光源）から十分離れた場所で測定を行うこと，3）薄雲もない快晴の日に測定を行うことがよい記録を取るうえで不可欠であることが明らかとなった．また夜空の明るさは，同じ場所・同じ時間帯でも測定する日によって異なっており，異なる日の異なる場所での測定値をいかに比較するのか，さらに検討を行っていく必要がある．

謝　辞

福井大学地学教室の山川史織さん，武田 樹さんには測定を手伝っていただいた．福井工業大学の中城智之さん，福井市自然史博物館の加藤英行さんには夜空の測定に関し，多くのアドバイスを頂いた．記してお礼申し上げる．

引用文献

Cinzano（2007）Report on Sky Quality Meter, version L. Tech. Rep. ISTIL. http：//unihedron.com/projects/sqm-l/sqmreport2.pdf

Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A. and Furgoni1, R.（2016）The new world atlas of artificial night sky brightness. Science Advances 2016; 2：e1600377 .

星空公団（2016）Sky Quality Meter の有効性．http：//www.kodan.jp/?p=sqm

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/

環境省（2013）スターウォッチング・ネットワーク 平成 24 年度 冬季 全国星空継続観察の実施結果報告書．https：//www.env.go.jp/kids/star/attach/rep_h24-winter.pdf

桝井俊彦（2010）デジタル一眼レフカメラによる光害調査．大阪と科学教育，no.21，p.11-18.

桝井俊彦（2006）デジタル一眼レフカメラを使った簡単な光害調査方法．第 20 回天文教育研究会（2006 年年会）集録，p.153-158.

小野間史樹・伊藤絢子・原田泰典・福島英雄，・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手法の提案．国立天文台報，vol.12，p.93-102.