

光害の数値化について

2016h28.2.6.

$$\text{LPI-S} = \frac{Pr}{b}$$

(Light Pollution Index of Sky) b [人/(km²・h)]

$$\left(\begin{array}{l} P = ph \times 10^3 \\ \text{ただし } 1 \leq h \leq 10 \end{array} \right)$$

LPI-S = 光害指数

r = 経時変化率(mag/□"/h)

P = 人口密度(人/km²)

b = 夜空の明るさ(mag/□")

p = 人口密度(万人/km²)

h = 住宅率



学校法人 東筑紫学園

東筑紫学園高等学校



理科部

THE SCIENCE GROUP

はじめに

この研究は、2000年の九州高等学校生徒理科(物理・地学)研究発表会で、先輩が発表した「昼間に見える星」というテーマを受け継いだものである。山間部などの光源が少ない場所では星を綺麗に見ることができるが、市街地では夜になっても星を綺麗に見ることができない。この“光害”に関心を持ち、現在、市販のスカイクォリティーメーター(SQM)を用いて「夜空の明るさ」の観測を行っている。



図1. 夜の地球の衛星写真

図1は、人工衛星から撮影した世界の写真で、これは全て夜の状態で合成されたものである。この中で、日本列島はその姿形をはっきりと浮かびあがらせていることがわかる。私達は、光があるおかげで、暗い夜も昼間と同じように生活することができる。光とはとても便利なものである。しかし、日本がこんなに浮かび上がるほどの光が本当に必要なのだろうか。

14年にわたる観測の結果、「夜空の明るさ」は様々な気象状態や、SPM・光化学オキシダントなどの目に見えない環境汚染物質に強く影響されることを証明した。このことが評価され、2010年に「星空の街・あおぞらの街」全国大会で、“環境大臣賞”を受賞した。そして、2008年から北九州市周辺の「夜空の明るさ」を可視化した等光度曲線地図製作を開始し、2011年、ついに北九州全域の1/5万等光度曲線地図を完成させた。その研究は、2012年の全国高等学校総合文化祭富山大会 自然科学部門において、第2位の「文化庁長官賞」をいただいた。また、2013年「星空の街・あおぞらの街」全国大会では高円宮妃殿下、環境省副大臣、福岡県知事、北九州市長のご臨席のもと発表を行った。さらに2015年8月には全国高等学校総合文化祭滋賀大会で発表を行った。2010年の福島総文祭で自然科学部門が創設されてから、理科部としては、その全ての5年連続の出場となる。

今年度は光害の数値化を行った。光害は、人工の光による悪影響全体のことをいい、影響が大きい小さいという曖昧な表現でしかない。これを具体的に数値化することで、その影響を定量的に評価することができる。そのために、これまで14年間の研究結果を基にして自分たちで公式を考案し、光害指数(LPI-S)を定義した。そして、光害指数と、それによって起こる光害の影響について比較を行った。



図2. 観測中の風景

目 次

はじめに

目次

1. 夜空の明るさと光害・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P. 3
 - 1-1 光害とは
 - 1-2 ミー散乱・レイリー散乱
 - 1-3 夜空の明るさと、さまざまな気象条件および環境指標（2003年～2013年）
 - ① 夜空の明るさと湿度
 - ② 夜空の明るさと気温
 - ③ 夜空の明るさと雲量
 - ④ 夜空の明るさと水蒸気量
 - ⑤ 夜空の明るさと風速
 - ⑥ 夜空の明るさとSPM
 - ⑦ 夜空の明るさと光化学オキシダント
 - ⑧ 夜空の明るさと黄砂
 - ⑨ まとめ
 - 1-4 夜空の明るさの垂直変化（2006年～2014年）
 - 1-5 夜空の明るさの水平変化（2009年～2011年）
 - 1-6 北九州1/5万等光度曲線地図の製作・完成（2008年～2012年）
2. 観測機器について・・・・・・・・・・・・・・・・ P. 9
 - 2-1 自作機器
 - 2-2 スカイクォリティーメーター（SQM）
3. 光害の数値化公式・・・・・・・・・・・・・・・・ P. 11
 - 3-1. 夜空の明るさの経時変化率
 - ① 自動車の交通量と夜空の明るさ
 - ② マンションの明かりの増減と夜空の明るさ
 - 3-2. 日本全国における経時変化率
 - ① 月光と雲量の影響について
 - ② 光害の影響について
 - ③ 地域ごとの人口と経時変化率の比較について
 - ④ 経時変化率を用いた光害の数値化に向けて
 - 3-3. 光害公式の作成
 - 3-4. 人口密度(P)と住宅率(h)
 - ① 人口密度(P)によるLPI-Sの変化
 - ② 住宅率(h)を用いた人口密度の補正
4. 光害指数(LPI-S)の実用性・・・・・・・・ P. 19
 - 4-1 北九州市内各地のLPI-S
 - 4-2 全国でのLPI-S
 - 4-3 まとめ

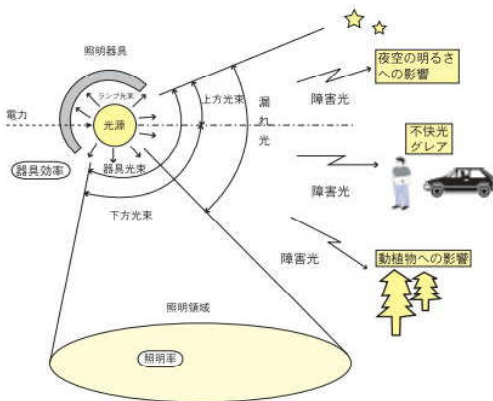
参考文献

おわりに

1. 夜空の明るさと光害

1-1. 光害（ひかりがい）とは

街灯などの照明は、私たちが夜道を歩いている時も昼間と同じように照らしてくれ、夜間の生活を助けてくれる。しかし、一方では多くの照明はまぶしさの原因になり、視認性を阻害し、星がよく見えなくなる。例えば、コンビニエンスストアの明かりにカナブン等の虫が来て、本来死ななくてよい虫が死んでしまう。また、産まれたばかりのウミガメが市街地の光を満月の光と勘違いし、海でなく市街地の方へ行き、車に轢かれて死んでしまう(M.Nicholas; 2001)。他にも朝や昼など、ある一定の時間にしか咲かない花、例えばアサガオなどが夜中になっても咲いているなど、動植物へ影響が出る。さらに夜型の人間が増えるなど、私達の生活にも大きく影響を与えている。このような悪影響全体を光害という。



環境省 地域照明環境計画策定マニュアルより
図3. 光害が及ぼす環境への影響

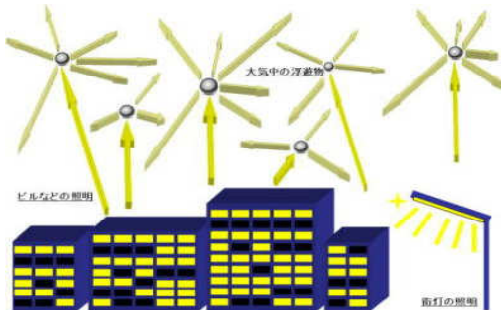


図4. 夜空に関する光害の様子

図3は、「主な照明用語とその関係」（環境庁大気保全局 地域照明環境計画策定マニュアル：平成12年6月）である。これは、照明からの漏れ光が、夜空の明るさの増大や人に対するグレア、動植物の生育に影響を与えている様子を簡単に図示したものである。つまり、国として光害の対策を行っており、平成10年3月には『光害対策ガイドライン』が策定されている。

光害の中でも、夜空の明るさに関する光害は、過剰な照明やパチンコ店のネオンなどの膨大な量の光が、図4のように空気中の分子や塵によって散乱・反射することにより、本来必要な地上ではなく、夜空に光が向けられる。最も影響があるのは、水平方向から上に約5度の角度で出る光とされている。まっすぐ上に向かう光の3倍～4倍、大気で散乱または反射され、夜空が明るくなる原因になる。つまり、横方向の光を無くさない限り、光害の改善は難しい。これらの影響で夜空の明るさが増し、星空観察が困難になる。これが夜空に関する光害である。大気中の浮遊物質が多いほど光の散乱・反射が多く起こり、夜空が明るくなる。詳しくは、“1-3 夜空の明るさと、さまざまな気象条件および環境指標”で改めて記載する。

私たちは、2013年に「星空の街、あおぞらの街」全国大会で“環境大臣賞”を受賞した際、北九州市長にその報告をした。その折に皿倉山山頂（北九州市八幡西区）にある頭上からの照明を足下照明にすべきだと提言した。せっかく目を暗順応させたのに、街灯が目に入ると、「新日本三大夜景」と言われる程のキレイな夜景を見ることができないためである。



図5. 黄砂によって夜空の明るさが増幅されている様子
(北九州若松区)

1-2. ミー散乱・レイリー散乱

ミー散乱 (Mie-Streuung) とは、光の波長程度以上 (360nm~830nm) の大きさの球形の粒子による光の散乱現象のことをいう。雲が白く見えるのはこれが原因である。雲を構成している雲粒の半径が数 μm ~数十

μm以下の大きさのため、ミー散乱が生じ白く見えるのである。ちなみに、SPMは粒子の大きさが10μm以下、そして最近、中国で問題視されているPM2.5は2.5μm以下、黄砂が4μm程度である。

レイリー散乱 (Rayleigh Scattering) とは、光の波長よりも小さい分子レベルの粒子による光の散乱のことをいう。波長の短い青は赤よりも多く散乱することになる。日の出、日没直後は、光が太陽と観測者との間の大気中を通過する距離が日中と比べて長くなる。このとき、散乱を受けにくい赤色のみが届くことで「夕焼け」「朝焼け」が起こる。一方で、日中は波長の短い青が散乱することにより、空全体が青く見えている。

よって、散乱物質 (SPM、黄砂など) が多い時の夕焼けは、異常に赤い空になることを記憶している方も多いであろう。

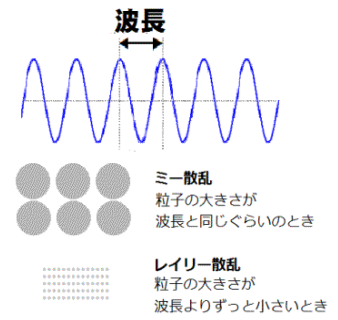


図6. ミー散乱とレイリー散乱
(光の散乱 < <http://optica.cocolog-nifty.com> >より)

1-3. 夜空の明るさと、さまざまな気象条件および環境指標 (2003年~2013年)

観測した夜空の明るさと、湿度、気温、雲量、水蒸気量、風速などの気象条件がどのように関係しているか。また環境指標として、SPMや光化学オキシダント、黄砂と夜空の明るさがどのような関係があるのか考察する。サンプルとして北九州市小倉南区下吉田[2003年 4月 7日~ 5月 1日]、福岡県田川郡香春町[2003年 5月 7日~ 5月25日]、北九州市八幡東区景勝町[2004年 8月 1日~ 8月16日]、小倉北区黒原[2007年 4月 7日~ 4月12日]、小倉南区重住[2008年 4月29日~ 5月23日]は自作機器 (2-1 参照)。小倉北区清水[2012年 4月 4日~ 4月28日]、八幡西区本城[2012年 1月27日~ 2月29日]はSQM (2-2 参照)を用いて観測したデータを元に検討した。

① 夜空の明るさと湿度

図7は、夜空の明るさと湿度をグラフ化したものである。このグラフにおいて、湿度が上がるとそれに応じて夜空の明るさも明るくなり、逆に湿度が下がると夜空の明るさも暗くなる傾向が認められる。これは空気中の水分に光が当たり、乱反射したためと考えられる。

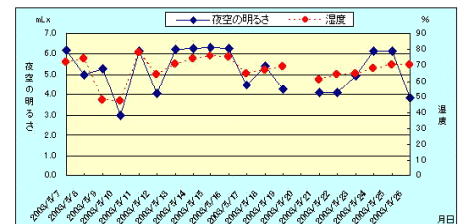


図7. 夜空の明るさと湿度

② 夜空の明るさと気温

図8は、夜空の明るさと気温をグラフ化したものである。このグラフの傾向として、気温が上がると夜空の明るさは暗くなり、逆に気温が下がると夜空の明るさは明るくなっている。これは気温と湿度の関係で、気温が上がると湿度は下がり、気温が下がると湿度は上がるためだと考えられる。

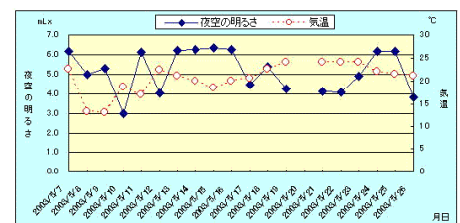


図8. 夜空の明るさと気温

③ 夜空の明るさと雲量

図9は夜空の明るさと雲量のデータをグラフ化したものである。このグラフにおいて、雲量が多くなると夜空の明るさも明るくなり、逆に雲量が少なくなると夜空の明るさも暗くなっている。これは光が雲に当たり乱反射するためであると考えられる。

雲量は相対的な数値であるが、夜空の明るさと非常に強い相関が認められ、データとしてきわめて重要である。もし夜空の明るさを純粋に求めるなら、雲量の多い時は観測を避けたほうが良い。

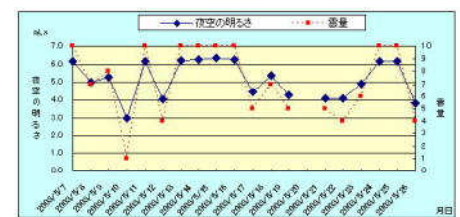


図9. 夜空の明るさと雲量

④ 夜空の明るさと水蒸気量

図10は夜空の明るさと水蒸気量のデータをグラフ化したものである。水蒸気量は気温と湿度のデータから計算した。傾向として、水蒸気量が上がると夜空の明るさも明るくなり、逆に水蒸気量が下がると夜空の明るさは暗くなっている。これは空気中の水蒸気に光が当たり、乱反射したためと考えられる。

なお、8月13日、15日に夜空が明るいのは雲量によるもので、水蒸気量よりも雲量の方が、夜空の明るさに大きく影響を与えることがわかる。

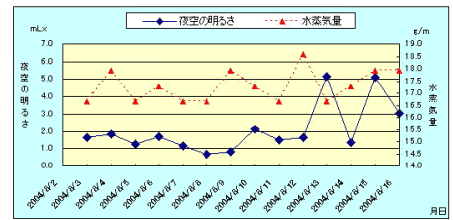


図10. 夜空の明るさと水蒸気量

⑤ 夜空の明るさと風速

図11は夜空の明るさと風速をグラフ化したものである。5月10日のように風速が遅いと夜空の明るさも暗い時や、5月12日のように風速が速いと夜空の明るさが明るい時が存在する。

これは、風が空気中の光を乱反射させる物質を飛ばしたり、舞い上げたりすることと関係していると考えられる。よってデータ項目として風速は、風向とともに考える必要がある。風向によって工場からの煙などの原因を考察することが可能となるためである。

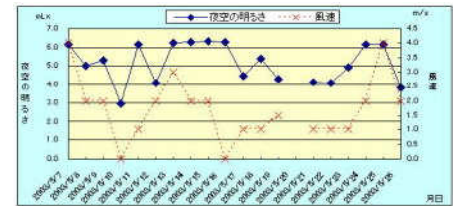


図11. 夜空の明るさと風速

⑥ 夜空の明るさとSPM

図12は夜空の明るさとSPMの値をグラフ化したものである。

SPM (Suspended Particulate Matter) とは、大気中に存在する直径10 μ m未満の浮遊粒子状物質のことである。最近よく耳にするようになった、PM2.5もSPMに含まれる。

全体的な傾向として、SPMの値が高くなると夜空の明るさも明るくなっている。これは、SPMが多いと光の散乱・反射が多くなり、夜空が明るくなるためである。なお、SPMは風が吹いていたり、近くで焚き火などがあるだけでも急な変動をするため、このようなケースの時は例外としている。このSPMの中には黄砂の小さな粒も含まれる。

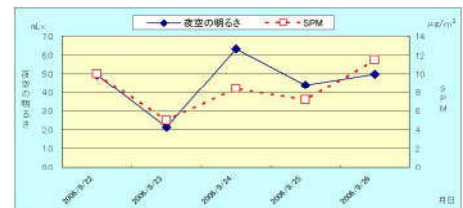


図12. 夜空の明るさとSPM

⑦ 夜空の明るさと光化学オキシダント

図13は夜空の明るさと光化学オキシダント(O_x)のデータをグラフ化したものである。

光化学オキシダントは、光化学スモッグの原因物質である。この物質もSPMと同様に、北九州市によって毎時間ごとに連続して観測されている。私達は当初、光化学オキシダントは紫外線があたることにより発生するため、昼にしか存在しえないと考えていた。しかし、環境局の人から中国から飛来してきているために、夜になっても光化学スモッグ注意報が解除できないと聞いた。そこで、光化学オキシダントの濃度が自作機器に反映されているかを検討した。

グラフを見ると、光化学オキシダントの濃度が高くなると夜空の明るさも明るくなり、逆に濃度が下がると暗くなっている。これは、大気中の光化学オキシダントの濃度が高いと、光の反射・散乱が多くなり、これによって夜空が明るくなったと考えられる。

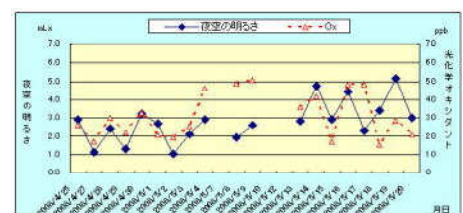


図13. 夜空の明るさと光化学Ox

⑧ 夜空の明るさと黄砂

図14は、2012年に夜空の明るさ（北九州市小倉南区）と黄砂のデータをグラフ化し、1日ごとに夜空の明るさと比較したものである。黄砂のデータは長崎県大村市で観測されている国立環境研究所のものである。黄砂の値が上昇するとともに夜空の明るさの値が上昇しており、黄砂の値が下降するとともに夜空の明るさの値も下降している。つまり“黄砂は夜空の明るさに影響を及ぼしている”ということが分かった。

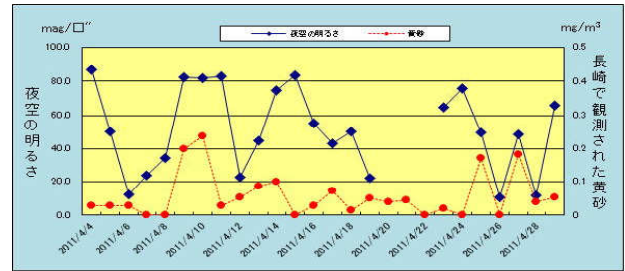


図14. 長崎県大村市の黄砂と北九州市で観測された夜空の明るさの比較
(2012年4月4日～28日)

図15は、2012年2月25日のデータを15分ごとに比較したものである。黄砂の量が大きく変化をしている特徴的な2ヶ所（21:00と0:45）に注目し考察を行った。そうすると、黄砂のデータをCase Iは30分、Case IIは45分ずらすと相関がみられた（図16）。これは最初北西方向だった風が、北方向に変わったため西のベクトル量が小さくなり、15分のズレが生じたと考えられる。

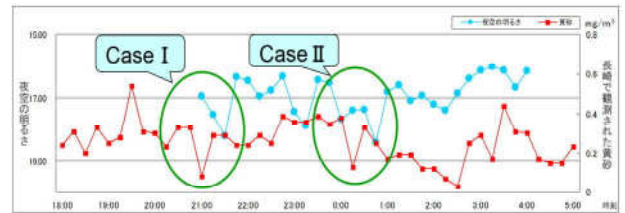


図15. 長崎県大村市の黄砂と北九州市で観測した夜空の明るさの比較
(2012年2月25日)

さらに、その地点で今までで最も明るい夜空が観測されるなど、黄砂は夜空の明るさに非常に大きな影響を与える環境指標である。

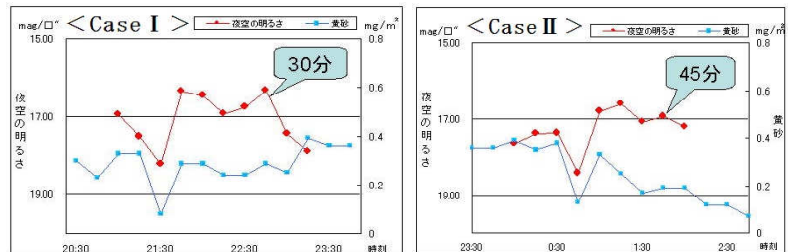


図15. 黄砂のグラフをずらすことで見えた相関

⑨ まとめ

以上のことより、北九州市において夜空の明るさは、月齢の次に

- ① 雲量 ② 黄砂 ③ 光化学オキシダント ④ SPM ⑤ 水蒸気量（気温、湿度）

の順に大きく影響され、光化学オキシダントやSPM、水蒸気量の値が高くなることで光の散乱・反射する量が多くなり、夜空の明るさに反映されていると考えられる。私達の自作機器は目に見えないこれらの物質を感知する能力があり、自作機器を使用して夜空の明るさを観測することで、大気汚染の状況を知ることができること証明された。また、スカイクオリティメーター(SQM)でも同じ事がいえる。

なお、北九州市環境局環境対策課から提供された資料に基づいて考察したが、私達の観測地点にできるだけ近い地点で観測されたSPM、光化学オキシダントのデータを用いた。さらに、我々が観測した時間帯に近い、21時～0時までの4時間の数値を平均し、SPM、光化学オキシダントの値とした。

1-4. 夜空の明るさの垂直変化（2006年～2014年）

2002年～2005年の間の研究より、次の2つのことが分かっている。

- ◎ 私達が測っている湿度は“地表付近のものなのに”、湿度に比例して夜空の明るさが変化している
- ◎ 私達が得ているSPMのデータは“地表付近のものなのに”、SPMに比例して夜空の明るさが変化している

以上のことから「夜空の明るさ」は地表に近い所で決まるのではないかと仮説を立てた。そこで垂直方向のみの変化を求めため、晴れの日の下関市の海峡ゆめタワーで観測を行った。その結果が、図17である。地上0mから屋上150mで夜空の明るさは半分となっている。以上より「夜空の明るさ」は、はるか上空で決まっているのではなく、『地上から数百m以内で決まっている』と考えられる。しかし、これまでの研究では2点だけの値を用いた垂直変化率しか求めることができていない。その2点間の値はどのように変化するのだろうか。2点以上の多くの値を用いた垂直変化率を求めるためには、垂直移動のみの連続したデータが必要である。

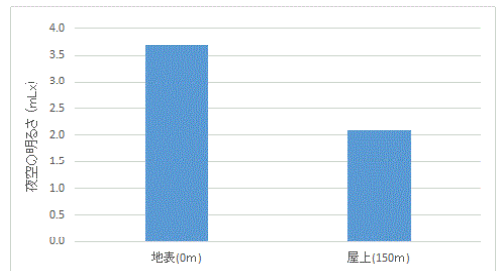


図17. 下関海峡ゆめタワーでの夜空の明るさの高低差

では、その2点間の値はどのように変化するのだろうか。2点以上の多くの値を用いた垂直変化率を求めるために、2013年に北九州工業高等専門学校との共同研究で、気球を使った垂直連続観測を行った。図18は、450m

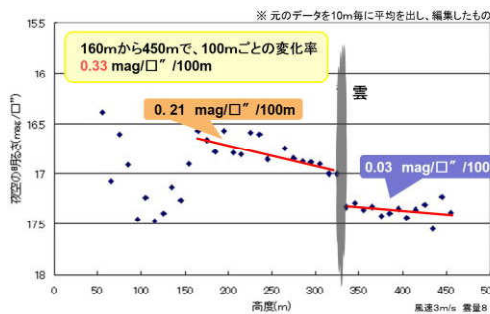


図18. 上空480mまでの観測 (H26. 7. 29. 北九州高専グラウンド)



図19. 気球から空撮した市街地の光

まで気球を上げたときのグラフである。グラフ上の点は、高度10m毎に平均した値を用いた。高度100m前後で急激に暗くなっているのは、気球が山間部の方に流されてしまったためである。これにより、高度160mから450m間での垂直変化率は0.33 mag/□"であった。なお、高度330m付近で急激に暗くなっている。この高度には雲があり、気球が雲を抜けたことで地表の光が遮断された。雲の下の変化率は0.21 mag/□"、雲の上では0.03 mag/□"となっており、雲の上では市街地の明かりが遮断されていることを証明したのは、日本で初めてかもしれない。

このように、高さ方向において夜空の明るさがだんだん暗くなっていることを証明した。

1-5. 夜空の明るさの水平変化 (2006年~2011年)

2010年、特定の強い光源が夜空の明るさに対して、水平方向にどれほど影響与えているかについて研究を行った。プロ野球の試合が開催される北九州市民球場や田舎にある築上郡の椎田サンスポーツグラウンドを中心に、グラウンドから離れながらナイター照明の消灯前後で観測を行った。気温、湿度及びスカイクォリティーメーター(SQM)を用いて夜空の明るさの値をデータとして得た。



図20. 椎田サンスポーツグラウンドの場所



図21. 椎田サンスポーツグラウンド

図22は椎田サンスポーツグラウンドでの観測結果である。ナイター照明がついている時のグラウンドでの夜空の明るさは15.46 mag/□"だったが、1,973m地点では19.82 mag/□"と、4.36 mag/□"小さくなっている。この時の水平変化率は0.24 mag/□"/100mであった。

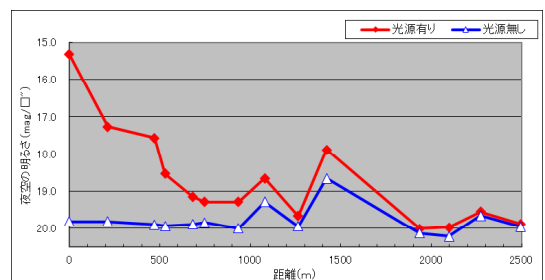


図22. 椎田サンスポーツグラウンドの結果

以上のことから、特定の強い光源は夜空の明るさに約2kmまで影響することが分かった。

1-6. 『北九州1/5万等光度曲線地図』の製作・完成（2008年～2012年）

2008年～2012年にかけて、夜空の明るさの「可視化」のため「北九州1/5万等光度曲線地図」を製作した。夜空の明るさは、第1に月の明るさ、第2に雲量が影響するため、各地同日観測の日程は、新月に近く、雲量が少ない日を選び観測を行っている。そのような条件の中で、4年間で合計1,021箇所もの地点で観測を行った。また、観測点のうち約35%の重複点を比較して、観測した日によって生じた差の平均値を基準とし、観測値の差を補正した。重複点数が300箇所近くあるため、より精密な等光度曲線地図を作ることができたと考えている。

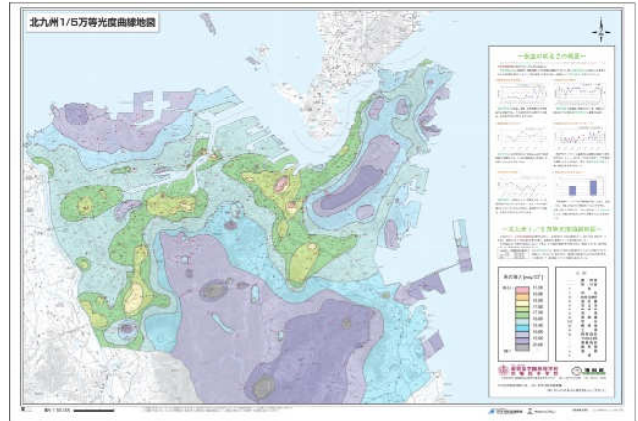


図23. 北九州1/5万等光度曲線地図

さらに、観測中の時間差による夜空の明るさの変化について補正を加えた。この夜空の明るさの時間変化である経時変化率については、3-1で詳しく述べる。表1は、明るさの違う場所における、10分ごとの経時変化率である。これらの変化率を用いて、21時を基準として観測点1箇所ずつ計算し、補正を行った。そして、補正した観測データを1/5万地形図にプロットし、夜空の明るさの等光線をひいた。

表1. 10分ごとの経時変化率

夜空の明るさ (mag/□")	経時変化率 (mag/□"/10min)
～17.50	0.04
17.50～19.00	0.03
19.00～	0.02

完成させた「北九州1/5万等光度曲線地図」(図23)により、21時を基準とした北九州市内における最も明るい所、暗い所が簡単に見てとれるようになった。

最も明るい所は光源の多い市街地の中心である小倉駅周辺の15.35 mag/□"であった。北九州市内で最も暗い所は、山間部である小倉南区平尾台南部の20.92 mag/□"であった。

この完成した北九州1/5万等光度曲線地図は、(独)科学技術振興機構と、(株)ゼンリンのご支援のもと10色以上のカラー印刷をしていただいた。なお、地図上のデータは費用軽減のため(株)ゼンリンのCADに部員が直接入力したものである。改めて、(独)科学技術振興機構、(株)ゼンリンに感謝いたします。

※最小二乗法

地図の補正に用いた経時変化率は、定点連続観測で得られたデータから、最小二乗法を用いて算出している。最小二乗法とは、散布図上の全ての観測値を使って近似直線を求める方法である。図24を見ると、点が (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) の4点あり、直線が一本引いてある。点から直線までの距離を d とし、それぞれ d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 とおく。この直線は、全ての点からの距離を二乗したものの和が最も小さくなるように定める。

つまりこの直線は

$$S = d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2$$

が最も小さくなる直線というわけである。そして、この直線が観測値から得られる近似直線である。距離を二乗しているのは二次関数より最小値を求めるためであり、このように直線の傾きとY切片を求める方法を最小二乗法という。今回は求めた直線の傾きを経時変化率とした。

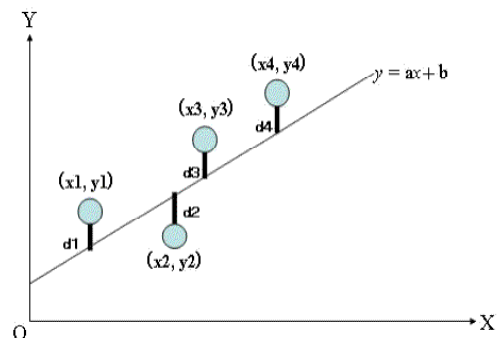


図24. 最小二乗法

2. 観測機器について

2002年、LEDを使った自作機器の制作から、夜空の明るさの研究はスタートした。2008年からはスカイクォリティーメーター(SQM)の使用を開始し、さらに2012年からは自動で観測を行うことができるスカイクォリティーメーターLE(SQM-LE)による定点連続観測も並行して行っている。

2-1 自作機器

この研究が開始された2002年当初は、夜空の明るさを数値化する機器がなかった。そこで、先輩は図25の自作機器を作り、初めて夜空の明るさを数値化することに成功した。この自作機器は大きく分けて3つの部分(①LED電流調節部 ②観測パイプ ③電流測定部)から構成されている。自作機器は、¥2,000で材料が購入できる。また、視野角が7°と非常に狭いのが利点である。観測方法はLED電流調節部の中にある可変抵抗の大きさを変えて電流量を変化させ、観測パイプの中のLEDの明るさと夜空の明るさを比色法で合わせる。その時の電流値(mA)をmLxに変換している。しかし、個人差があり経験が必要となる。実際、私たちが自作機器の製作方法を教えた宮城教育大学が各地同時観測を行おうとしたが、個人差によりデータがばらついてしまい、データは使いものにならなかったらしい。また、1回観測する際に30分程度の時間がかかってしまう。さらに、全国スターウォッチングネットワークの夜空の明るさ(単位: mag/□")と比較することができないというものだった。



図25. 自作機器

2-2 スカイクォリティーメーター(SQM)

2006年春、スカイクォリティーメーター(SQM)という機器が販売された。これは夜空のバックグラウンドレベル(背景の暗度)を測定するための機器である。また、アメリカのUnihedron社が制作、国際光器が輸入、販売しており¥19,800で購入でき、この機器で夜空の明るさを数値化する事ができる。



図26. SQM-L

冷却CCDカメラと比較して、こんなに安くて正確な値が得られるのか不安であったが、私達の自作機器とSQMの性能比較を行い信頼性を確認している。発売された当初のSQMは、視野角40°をスキャンして光子数をカウントし、これを平方秒角あたりの等級で数値化するというものであった。現在、私たちが研究に用いているSQM-L(図26)はスキャンされる視野角が20°に狭まり、従来のものより周辺の光の影響を受けにくくなっている。また、この機器の一番の特徴は、ボタンを押すだけで夜空の明るさの値が数秒で測定できることである。自作機器と比べると、観測にかかる時間が格段に短くなった。この機器の出現によって1/5万等光度曲線地図が作れたといえる。

図27はスカイクォリティーメーターLE(SQM-LE)である。これはパソコンに接続することで、24時間、5分おきに定点連続観測をすることができる。



図27. SQM-LE

2012年1月より学校の屋上に設置しており、2011年から黄砂や経時変化率の研究に用いている。昨年度は北九州工業高等専門学校制作の気球に取り付けることで、高度変化の観測に用いた。私達の先輩が見つけないだ全国ネットワーク参加団体、全国15カ所でSQM-LEを使用し、連続観測を行っている。

観測する際に個体差があると比較が行えないため、2014年に改めて調査をした。また、測定するSQMに“壺号”、“式号”、“参号”と名付け、それぞれの個体差の調査を行った。



図28. SQM-Lの個体差確認

学校倉庫内で明るさを変えながら、観測条件を同じにするために3台同時に測定を行った。明るさは17, 20, 23 mag/□"程度の3種類で変化させている。表2のように、明るさを変えて行きたいいずれの観測でも個体差は小数点以下でしか見られず、個体差はないものと確認できた。

表2：SQMの個体差の確認〔単位 mag/□"〕

	番号	式号	番号
学校倉庫①	17.60	17.60	17.67
学校倉庫②	20.02	20.05	20.11
学校倉庫③	23.00	23.06	23.12

スカイクオリティメーターは世界中で使用されており、観測された値を世界規模で取りまとめているのが“Globe at Night”というプログラムである。これは市民参加型の、夜空の明るさ世界同時観測キャンペーンである。そして、このプログラムを主催しているのが、国際ダークスカイ協会（International Dark-Sky Association）である。ここには世界103ヶ国、合計20,910ヶ所（2014年時点）の観測結果が集まっており、光害に対する国民の意識を高め、啓発するために活動している。私たちは、2014年にパシフィコ横浜で行われた日本地球惑星科学連合と同時開催された、夜空の明るさ研究会（第2回光害シンポジウム）の際に、IDA東京支部の支部長である越智先生（東洋大学）を通じてこのプログラムを知った。もしかすると、私たちのためにIDA東京支部の高校生セッションを特設していただけるかもしれない。

今回私たちが考えた公式は、SQMでの観測結果を使用しており、SQMは世界で使用されている。これは、自分たちの作った光害公式にたくさんのデータを実際に当てはめていけば、世界においても光害を数値化できる可能性を持っているということである。つまり、日本だけでなく世界中での光害の啓発につながるのではないかと考えている。



図29. Globe at Night ホームページ〔参照日：2015年11月9日〕

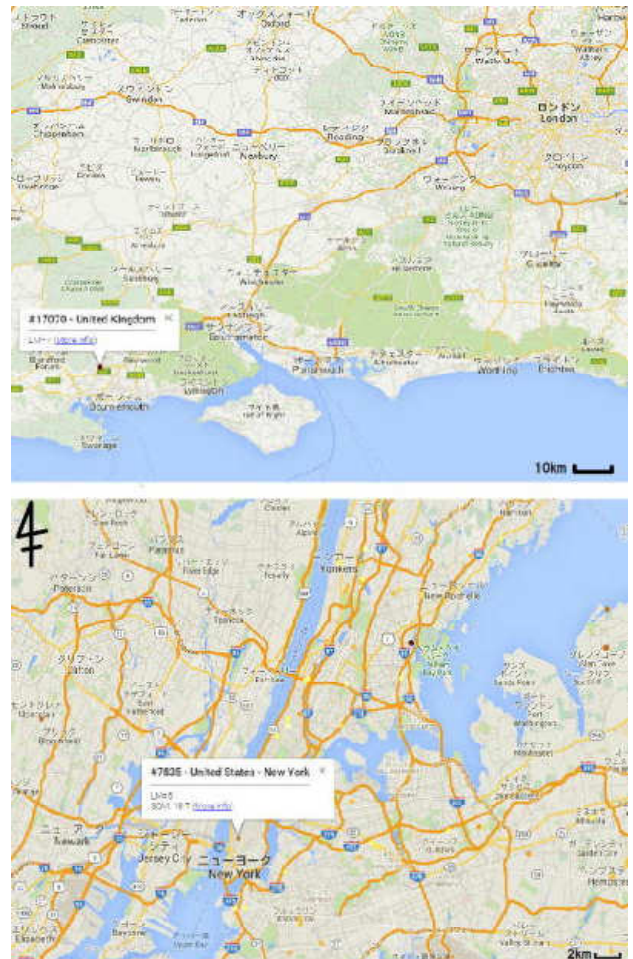


図30. Globe at Night データベースの参照例〔Google map〕

3. 光害の数値化公式

2008年、広島大学での天文学会の折、先輩が「夜空の明るさ全国ネットワーク」を発足させた。そして2013年、埼玉大学で行われた第1回光害シンポジウムの際には、私たちはネットワークを通じて全国の13ヶ所から送られてくる、SQM-LEの連続観測データを取りまとめる担当になった。そして、2014年の夜空の明るさ研究会(第2回光害シンポジウム)では、全国の経時変化率を算出し、その結果を発表した。そこで全国各地において、観測した場所によって経時変化率がそれぞれ特徴的に異なっていることに気がついた。すなわち、経時変化率を使えば、各地域の光害の数値化ができるかもしれないと考えた。

3-1 夜空の明るさの経時変化率

“1-6. 北九州1/5万等光度曲線地図の製作・完成”で述べたとおり、今までの観測結果から20時から2時にかけて徐々に夜空の明るさが減少していることが分かっている。夜空の明るさの経時変化は、人間の活動量に影響されているのであろう。

2011年に、各地域の経時変化率を調査するため、北九州市内の各地で徹夜観測を行った。人工的な光源の多い市街地と、少ない山間部では人工的な光源の数が全く違う。人工的な光源の数に比例して経時変化率も大きくなると推測した。観測は新月かつ雲量0の日に、それぞれ明るさの違う7か所で観測を行った(図31)。また、観測地名と21時のスカイクォリティーメーターの値を表3に示す。平尾台は山間部、一方熊本は近くにプロ野球の試合なども行われる北九州市民球場などがあり、街頭も多いため非常に明るい地域である。

図32より、夜空が明るい地域ほど経時変化率が大きくなること、場所によって経時変化率が異なることが分かった。そしてその原因は人間の活動量であり、夜間において活動量は時間が経つにつれ減少するはずである。そこで、国道を通る自動車の台数と、部員の住む付近のマンションの部屋の明かりを徹夜観測し、人工的な光源の変化を調査した。

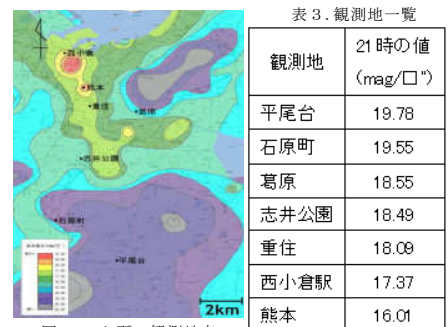


図31. 7か所の観測地点

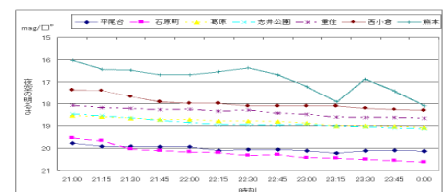


図32. 21時から0時までの夜空の明るさの観測結果

① 自動車の交通量と夜空の明るさ

図33は、北九州市役所建築都市局都市交通政策課が持つ1時間ごとの自動車交通量のデータをグラフ化したものである。2007年のある平日と休日で、場所は北九州市役所付近の北九州市小倉北区室町の国道199号の交通量である。

このグラフから20時頃の交通量の変化は平日が976台で休日は937台、2時頃の交通量は平日が214台で休日は144台と、20時頃から2時までの交通量は次第に減少することが分かる。また、2時から5時までの平日の交通量の平均は136台

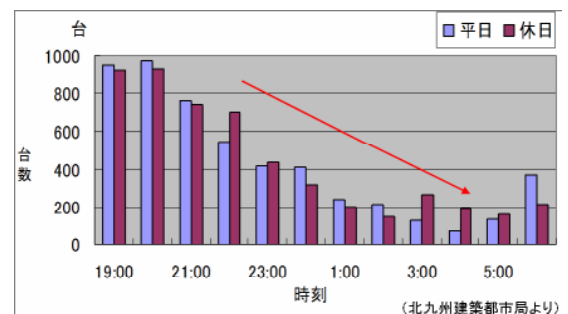


図33. 自動車の交通量(国道199号線)の変化 (北九州建築都市局より)

で、休日の平均191台であるので、2時から5時までの交通量は全体的に低くほぼ一定であることが分かる。この傾向は、観測結果によって分かった夜空の明るさの経時変化の傾向とほぼ重なっている。

② マンションの明かりの増減と夜空の明るさ

図34のグラフは、理科部員が近くのマンションの明かりが付いている部屋の数を、1時間毎に数えたものである。

2009年10月の休日前の金曜日に、北九州市小倉南区朽網西、小倉南区重住、小倉北区真鶴の3地点で調べた。図34より、21時から4時までのマンションの明かりは、当然のことではあるが、すべての地点で減少傾向にある。交通量の結果と同様に、マンションの明るさの減少し、夜空の明るさの経時変化の傾向とほぼ重なっている。

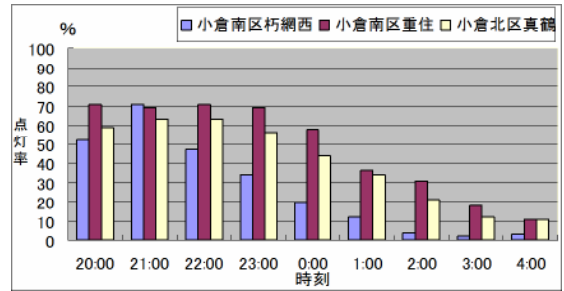


図34. マンションの明かりの変化

以上の事から、夜空の明るさは、自動車の交通量や、マンションや街頭による市街地の明かりによる、光害に影響されている事が分かった。また最近では24時間営業の飲食店やコンビニも増えている。このような人工的な光源が人間の活動する時間帯によって増減することにより、夜空の明るさは変化していると考えられる。

3-2 日本全国における経時変化率

2008年「夜空の明るさ全国ネットワーク」が発足した時の参加校は6校であった。2012年には全国に広がり、参加校は27校にまで増加した。私たちの先輩が2013年の第1回光害シンポジウムでは実行委員として司会をし、基調発表を行った。そこで、私たちが制作した「北九州1/5万等光度曲線地図」のノウハウを活かし、全国版の等光度曲線地図を作りたいと提言した。しかし、地図を作る際には時間による明るさの変化を補正するために経時変化率が必要であり、これを算出するためにはSQMの連続観測データが必要である。私たちだけでは全国での連続観測は行えないため、各地で新月かつ雲量0の日に観測していただき、全国13ヶ所から送られてくるSQM-LEの連続観測データを取りまとめる担当になった。また、日本地球惑星科学連合2014年大会と同時開催された、横浜ワールドポーターズで行われた夜空の明るさ研究会の折、その提供されたデータの経時変化率を算出し発表した。



図35. 全国ネットワークのデータ集積

① 月光と雲量の影響について

図36は、東筑紫学園で観測した新月の日の経時変化の様子である。時間が経つにつれ夜空の明るさが暗くなっている。図37は満月の結果で、夜空の明るさは山なりに変化している。SQMは天頂付近を測定しているため、月が天頂に近づくと夜空の明るさは明るくなり、遠ざかると暗くなる。このことから、月光は夜空の明るさに大きな影響を及ぼしている。

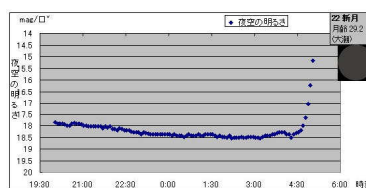


図36. 新月(4/22)で雲量0の日

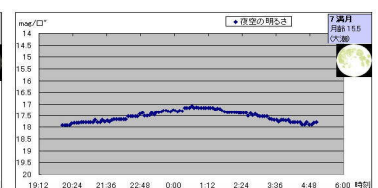


図37. 満月(4/7)で雲量0の日

図38、39は共に新月の日に観測したものだが、雲量による影響の有無によりデータのばらつき具合が異なる。富山県の富山市天文台の観測データ(図38)はばらついていて、これは雲量などの環境要因によって引き起こされる。例えば、スカイクォリティーメーターの視野角に雲が入ってしまうと、光が反射され明るくなってしまふ。このように、雲量の影響があると、データがばらついてしまい、経時変化率を算出することができず、使えないデータになってしまう。

一方、群馬県の前橋女子高校の観測データ(図39)のように、ばらつきがないものは、雲量の影響が無く理想的なデータだといえる。ゆえに経時変化率を求める際には「新月かつ雲量0」である必要がある。

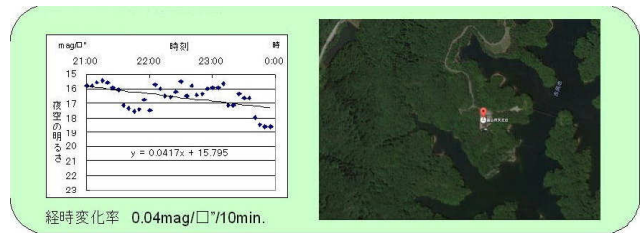


図38. 富山市天文台(2013/6/7)の観測データと周辺地図

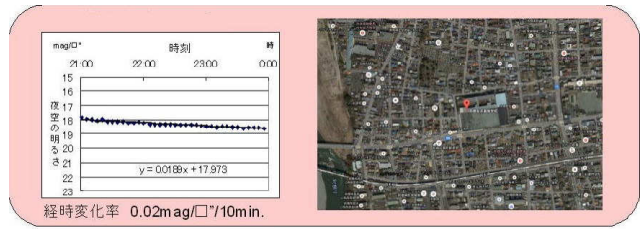


図39. 前橋女子高校(2013/5/9)の観測データと周辺地図

②光害の影響について

神奈川県横浜サイエンスフロンティア高校(図40)は横浜の市街地に位置している。21時に観測された夜空の明るさは17.88 mag/arcsec²、経時変化率は0.02 mag/arcsec² /10min.となった。市街地に位置しており、人間の活動の影響が大きく、光害が大きいといえる。

それとは逆に、岩手県ひろのまきば天文台(図41)は周りを山に囲まれた夜空の暗い場所に位置している。ここでの夜空の明るさは21.45 mag/arcsec²、経時変化率は0.002 mag/arcsec² /10min.で、極端に小さい値が得られた。さすが天文台だけあって人間の活動の影響が小さい場所、つまり“光害”の小さいところにあるのだろう。

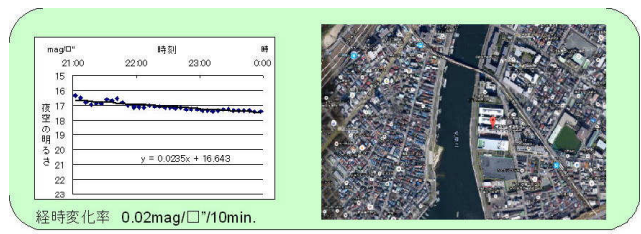


図40. 横浜サイエンスフロンティア高校(2013/1/11)の観測データと周辺地図

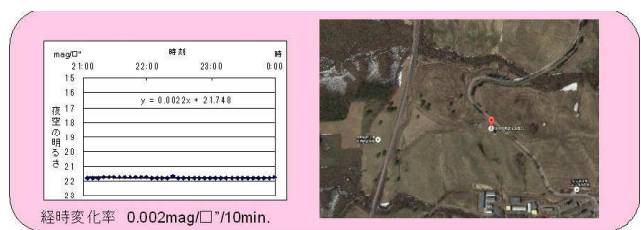


図41. ひろのまきば天文台(2013/6/8)観測データと周辺地図

③地域ごとの人口と経時変化率の比較について

兵庫県の三田祥雲館高校周辺(図42)の21時に観測された夜空の明るさは18.31 mag/arcsec²、三重県の津高校周辺(図43)の夜空の明るさは18.08 mag/arcsec²と同程度だった。しかし経時変化率はそれぞれ0.03 mag/arcsec² /10min.および0.05 mag/arcsec² /10min.と0.02も違う結果が得られた。これは津市の人口が30万人なのに対し、三田市の人口は10万人と、人口に20万人の差があることが影響していると考えられる。つまり夜空の明るさが同じであっても、市街地の規模などによって、経時変化率は地域ごとに異なっていることが分かる。

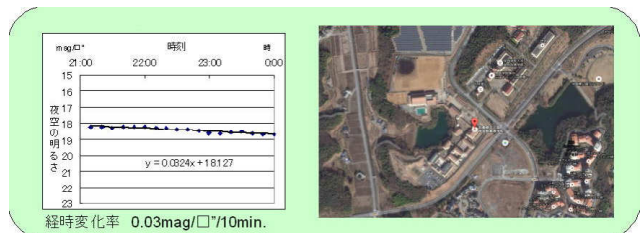


図42. 三田祥雲館高校(2013/6/8)の観測データと周辺地図

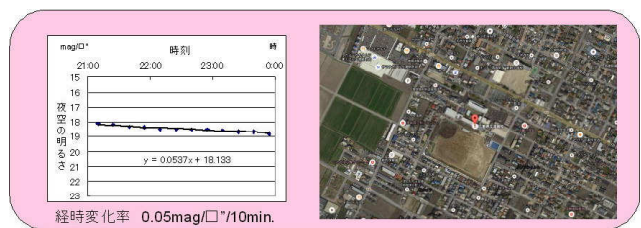


図43. 津高校(2013/6/8)の観測データと周辺地図

④経時変化率を用いた光害の数値化に向けて

北九州市版においては、小倉南区にある平尾台のように市街地の影響が少ない地域では、経時変化率も小さくなる傾向があった。一方全国版の中には、東京都新宿区にある海城高校のように、一晩中明るい街が暗くならず、光害の影響が大きいのに、経時変化率が小さいままという地域があった。山間部にある平尾台(20.92 mag/□")と市街地にある海城高校(17.88 mag/□")では立地条件が全く異なるのだが、経時変化率は0.02 mag/□"/10min.と同値である。つまり、地域によって環境が全く異なっているため、全国で統一された経時変化率を求めることは無理だと言える。

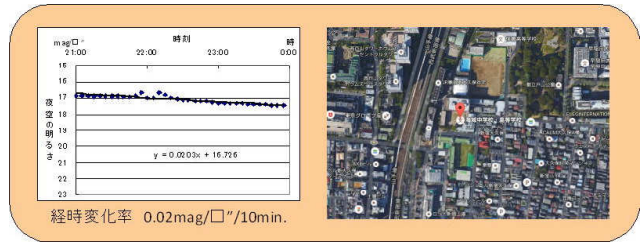


図44. 海城高校(2013/6/8)の観測データと周辺地図

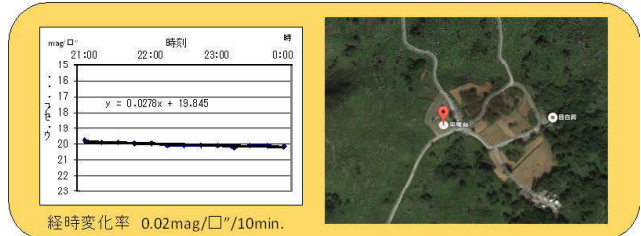


図45. 平尾台(2009/8/29)の観測データと周辺地図

しかし、海城高校のように特異な地域があるものの、全体的な傾向として、光害の影響が大きい場所では経時変化率は大きくなり、光害の影響が小さい場所では経時変化率も小さくなっていった。改めて経時変化率は人間の活動に大きく影響されるといえる。なお、“1-3. 夜空の明るさと、さまざまな気象条件および環境指標”で述べたとおり、夜空の明るさはエアロゾルが増えることで明るくなる。すなわち、経時変化率は、人的要因だけでなく、環境要因の影響も含んだ夜空の明るさの指標だといえる。そこで、経時変化率を用いて光害の数値化をしようと考えた。

3-3 光害公式の作成

光害は夜空を明るくする原因になるだけでなく、生態系への影響や、人間への影響なども引き起こす。私たちが研究している「夜空の明るさに影響する光害」は様々な要因から影響を受けている。その大きさを光害指数として表現するべく、光害指数をL P I-S (Light Pollution Index of Sky)として光害公式を作成した。これまで、J. Bortle(2001)や、S. Albers(2001)などが、星空を綺麗に見ることを目的として、「暗い夜空」を数値化するモデルを作成している。ただし今回目指すのは、光害によって「明るくなった夜空」を数値化することである。このように「明るい夜空」を数値化する公式は、これまでになかったものだといえる。

夜空の明るさの光害には、人的要因(人口、交通量、昼夜間人口比率など)や、環境要因(月光や雲量、エアロゾルの飛来量、降雪量など)、立地条件(臨海部か内陸部か、市街地か山間部か)が影響する。光害はこれらの要因が複雑に絡み合っているため、それをどう表現するかが問題であった。専門的な知識の少ない高校生が公式を作成するのは、大変に困難であったが、本研究チームの14年間の研究結果などを参考にしながら、研究メンバーが自力で考案した。公式の作成には次のものをパラメータとし、下のA~Qの公式を考案した。

{	b : 夜空の明るさ (mag / □")	r : 経時変化率 (mag / □" / h)	e : 標高 (m)
	p : 人口密度 (万人 / km ²)	w : 水蒸気量 (mg / m ³)	c : 雲量
	x : バスの停車数 (回 / 日)	y : バス停の数 (個 / km ²)	a : 月齢
	p' : 人口密度 (人 / km ²)	T : 気温 (°C)	H : 湿度 (%)

とはいえ、光害公式を用いたLPI-Sの算出から光害の啓発につなげていくためには、式に用いるパラメータは観測が簡単なもの、もしくはデータの入手が容易である必要がある。そのうえ、式自体も単純明快でなくてはならない。また、東京都新宿区にあって光害の影響が大きいはずの海城高校はLPI-S = 0.8というように、全く逆の相関を示すものもあった。やはり、様々なアイデアを出したものの、高校生が実用的な公式を考えるのは難しいと実感した。

パラメータに関しては、光害の小さい場所で小さくなり、光害の大きい場所で大きくなる指標を入れるようにした。ただ月齢や雲量、温湿度などは時間によって変化するため、その地域の光害の大きさという時間によって変化しない指標を表現するためには、意味を成さない。また、当初、標高と夜空の明るさは関係があると考えていた。2014年の研究から、夜空の明るさは高度が上がるほど暗くなることが分かっているためである。しかし、世界でこの公式を活用することを考えると、ボリビアの首都ラパス(標高4,012 m)などの高地に光害の根源となる大都市があるようなところでは、標高のパラメータに意味がなくなってしまう。

高校生が公式を考案することに紆余曲折しながら、天文学会や日本地球惑星科学連合でアドバイスを頂き、式を再考察した。その結果、次の式を光害公式とした。

$$LPI-S = \frac{Pr}{b}$$

(Light Pollution Index of Sky) [人/(km²・h)]

LPI-S = 光害指数
r = 経時変化率 (mag/□"/h)
P = 人口密度 (人/km²)
b = 夜空の明るさ (mag/□")
p = 人口密度 (万人/km²)
h = 住宅率

$$\left(\begin{array}{l} P = ph \times 10^3 \\ \text{ただし } 1 \leq h \leq 10 \end{array} \right)$$

この光害指数LPI-Sは経時変化率[*r*]、人口密度[P]、夜空の明るさ[*b*]の3つをパラメータとして、光害を数値化している。そして光害指数が大きいと光害の影響が大きい事を示している。“3-1 夜空の明るさと経時変化率”で述べたように、経時変化率は値が大きくなると光害の影響が大きいことが分かっているため、光害指数は大きくなる。また、人口密度が増加すると、使われる電気や街灯の数が増えるため光害指数は大きくなる。ここでは、単に人口の大きさではなく、単位面積あたりで比較をするために人口密度を用いた。それに対して、夜空の明るさが明るくなる、つまり値が小さくなると光害指数は反比例して大きくなる。地域性を表現するための要素であるPの算出方法と住宅率については後記する。

改めて、この公式を用いてLPI-Sを算出した。光害の小さいひろのまきば天文台では、LPI-S = 0.02と小さく、光害の大きい海城高校は、LPI-S = 78.4と格段に大きくなっている。

表5. 主な各観測地におけるLPI-Sの変化

	日付 (2014)	夜空の明るさ (mag/□")	経時変化率 (mag/□"/h)	人口密度 (万人/km ²)	光害指数(LPIS)
ひろのまきば 天文台	6月9日	21.41	0.01	0.005	0.002
	6月10日	21.75	0.01	0.005	0.002
	6月11日	21.83	0.01	0.005	0.002
東筑紫学園	1月23日	17.51	0.35	1.981	39.6
	1月24日	17.82	0.35	1.981	38.9
	1月25日	18.77	0.35	1.981	36.9
海城高校	6月8日	16.84	0.12	18.636	132.8
	6月9日	15.73	0.12	18.636	142.2
	6月10日	14.39	0.12	18.636	155.4

3-4 人口密度(P)と住宅率(h)

行政区分の人口密度を用いて計算を行った場合、表現したい光害の地域性がうまく表現できない。もし観測地が光害の大きい市街地にあっても、同じ行政区分の中に山間部が含まれていれば光害の小さい部分の面積が広がるため、人口密度を過小評価し、その分だけ表現される光害指数は小さくなってしまう。逆に観測地が光害が小さい山間部にあった場合、同様に光害の大きい部分の面積が広がるため、人口密度を過大評価し、それだけ光害指数は大きくなる。このように行政区分の人口密度では、区町村内に均一に人が住んでいる条件となってしまう。よって、よりの確に光害の大きさを表現するために、人口密度の算出方法を考え直す必要がある。そこで、観測地を中心として半径を変えて有効面積を変えながら人口密度を出し、その中の居住区でない部分は後で述べる住宅率を用いて補正した。

① 人口密度(ρ)によるLPI-Sの変化

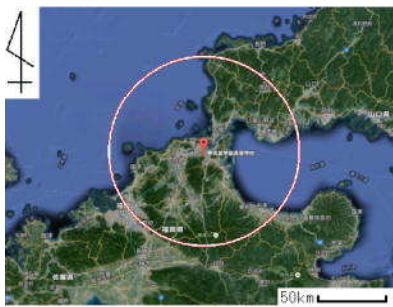


図46. 東筑紫学園高校中心の半径 50km 圏内

2014年に英彦山で観測した際に市街地全体の光は50km先まで、2012年の観測でナイター照明などの特定の強い光源は最大2km先の夜空にまで影響を与えることが分かっている。よって半径50km、10km圏内の人口密度および、半径2km圏内の人口密度を算出した。

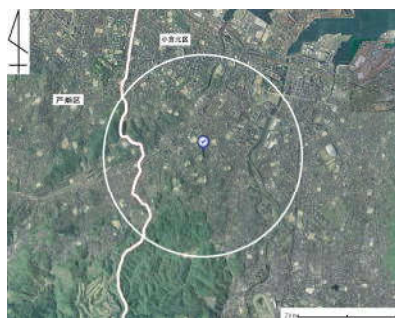


図47. 東筑紫学園高校中心の半径 2km 圏内

人口密度を算出する際には、google map の衛星写真をキャプチャーし、その縮尺を元に画像編集ソフト GIMP を用いて図46、図47のように円を描いた。有効圏内に1つの都市(区町村)しか含まれない場合は、その人口密度をそのまま用いることができる。ただし、有効圏内に都市の一部のみが含まれている場合には、有効圏内に含まれている割合を都市の人口密度に掛けて補正をした。たとえば、東筑紫学園の場合は、半径2km圏内(図47)の約2割が北九州市戸畑区(人口密度：0.37万人/km²)で、約8割は北九州市小倉北区(人口密度：0.46万人/km²)になる。そのため、東筑紫学園の2km圏内の人口密度は

$$p = 0.37 \times 0.2 + 0.46 \times 0.8 = 0.44 \text{ 万人/km}^2 \quad \text{となる。}$$

表4の全国ネットワークのデータを元に、各観測地の人口密度とLPI-Sを算出し、比較した。

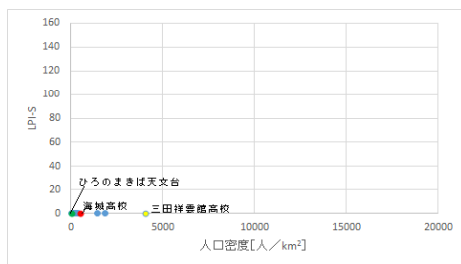


図48. 有効半径50kmのときの人口密度とLPI-S

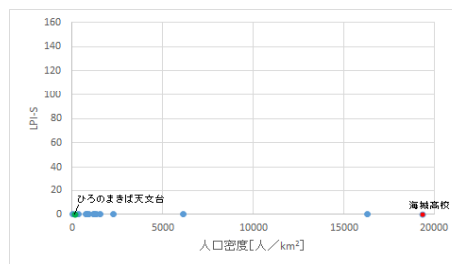


図49. 有効半径10kmのときの人口密度とLPI-S

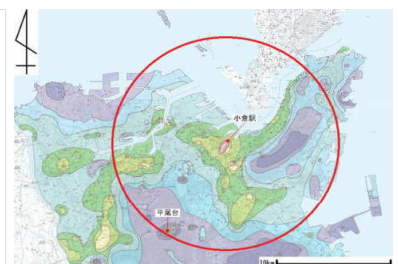


図50. 小倉駅を中心とした半径 10km 圏内

図48は半径50km圏内の人口密度とLPI-Sの変化を示したグラフで、図49は10km圏内の人口密度とLPI-Sの変化を示したグラフである。どちらのグラフもLPI-Sの変化幅が小さすぎるため使い物にならない。また、福岡県北九州市の小倉駅を中心として半径10kmを見ると、北九州市内で夜空の明るさが最も明るい小倉駅前(15.43 mag/□")と、最も暗い北九州市平尾台(20.79 mag/□")と一緒に含まれている(図50)。このような状況が1つの指標で表現されてしまえば、的確にその地域の光害の様子を数値化しているとはいえず、光害を明確に表現するためには、より有効半径を狭めることにした。

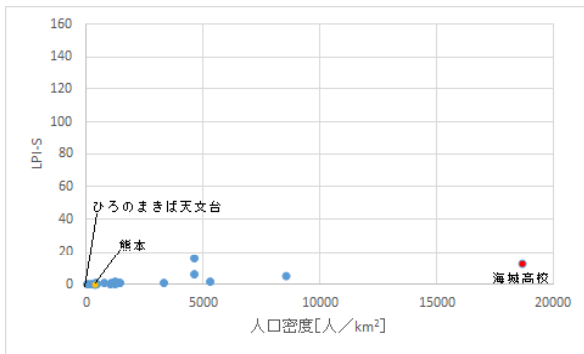


図51. 有効半径 2 km のときの人口密度と LPI-S

2012年、私たちの先輩が特定の強い光源は最大で 2 km 先の夜空まで影響することを報告している(1-5 夜空の明るさの水平変化)。それを根拠に、2 km 圏内の人口密度と LPI-S の変化を示したのが図51のグラフである。

最大値は熊本[P = 4637.6]の LPI-S = 15.6、最小値はひろのまきば天文台[P = 4.7]の LPI-S = 0.003である。小倉駅を中心とした場合に半径 2 km 圏内で最も夜空が明るい場所は 15.43 mag/□"、最も暗い場所は東筑紫学園付近の 17.90 mag/□"であった。学校付近には国道 3 号線があり、深夜まで交通量も多く、光害は大きいと

考えられる。このことから、この地域の光害は同程度であるといえ、ある程度地域の光害の様子を数値化できたと考えた。

これらの結果から、範囲が広すぎると他の市街地の影響を受けてしまったり、暗く光害の小さい場所を含んでしまったりすることで、光害の大きさを正しく表現することはできないことが分かる。よって、的確に光害の大きさを表現するために、2 km 圏内とした。

② 住宅率(h)を用いた人口密度の補正

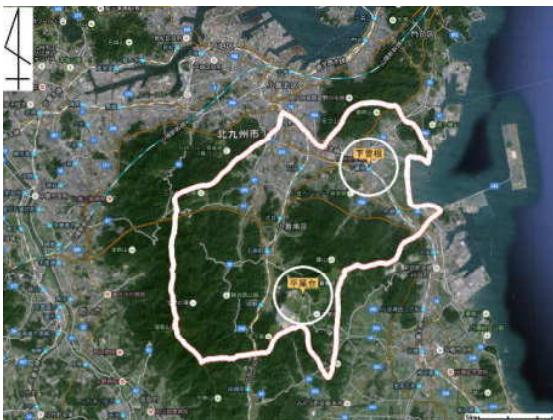


図52. 同じ小倉南区にある下曾根と平尾台を中心とした半径 2km 圏内

人口密度の算出のための有効半径をどれだけ狭めても、森林や河川、海などの人の住んでいない地域はどうしても含まれる。街灯などの強い光源が光害の原因になるため、より正確に LPI-S によって光害の大きさを表現するためには、人の住んでない地域の分を補正する必要がある。

例えば、図52のように同じ区町村の中でも、小倉南区下曾根駅周辺の市街地と平尾台の山間部では、単位面積あたりの人口が同じはずがない。そこで山間部にある平尾台の人口を補正する必要がある。よって、半径 2 km 圏内の人口を住宅率[h]を用いて、

$$(\text{人口密度} : P) = (\text{人口密度} : p) \times (\text{住宅率} : h) \times 10^3$$

の式により補正を行った。住宅率とは有効圏内の“人が住んでいる部分の割合”を 1~10 で表現したものである。住宅率は雲量の指標を参考に、有効圏内の居住部分を目視で確認する。これを用いると、下曾根駅周辺の人口密度は住宅率 $h = 10$ より、 $h = 10$ を代入して、 $P = 12,000$ 人/km²、一方、平尾台は住宅率 $h = 1$ より $P = 1.2 \times 1 \times 10^3 = 1,200$ 人/km² と計算される。

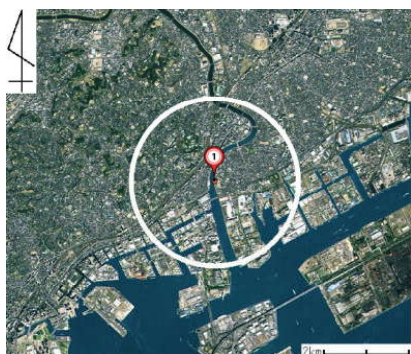


図53. 横浜サイエンスフロンティア高校中心の 2 km 圏内

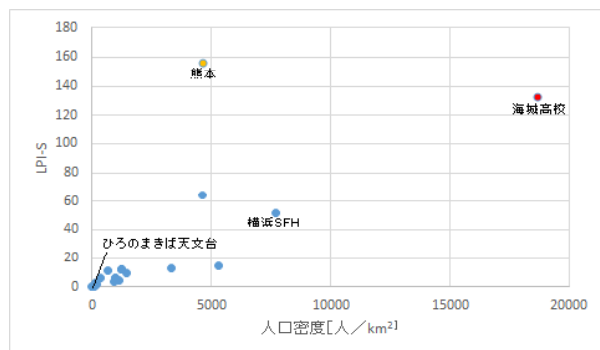


図54. 住宅率補正済の人口密度(有効半径 2 km)と LPI-S

図53は神奈川県横浜サイエンスフロンティア高校の航空写真[google map]である。学校のすぐ西を流れる鶴見川は、半径 2 km 圏内でその 1 割ほどを占めるため、住宅率 $h = 9$ となる。

図54は住宅率補正後の2 km圏内の人口密度とL P I - Sを比較したものとなっており、最大値は海城高校[P = 18, 636. 1]のL P I - S = 132. 8、最小値はひろのまきば天文台[P = 4. 7]のL P I - S = 0. 003となっており人口密度とL P I - Sに正の相関が見られる。熊本[P = 4637. 6]のL P I - S = 156. 4という値は、近くにある北九州市民球場のナイター照明が光源となり、その影響で経時変化率が0. 54 mag/□"/hという大きな値になったためだと考えられる。このように、光害の影響が大きい場所ではL P I - Sが大きくなり、光害の影響が小さい場所ではL P I - Sが小さくなっていることから、より明確に光害の様子を表現できるようになったと考えた。また、レンジが150程度と大きな値になっておりメリハリのある式だと言える。

3-4 経時変化率(r)の必要性について

12月5日に東洋大学で行われた第3回光害シンポジウムにて、経時変化率(r)の必要性について質問を受けた。そこで、改めてその必要性について考察を行った。

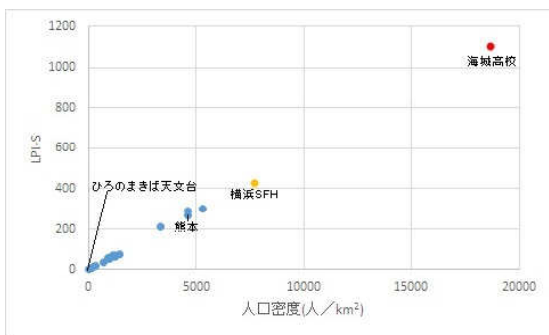


図55. 住宅率補正済の人口密度(有効半径2 km)とLPI-S ※ $r = 1.0$ で計算

図55は住宅率補正後の2 km圏内の人口密度とL P I - Sを比較したもので、経時変化率(r) = 1.0として計算したものである。最大値は図54と同様に、海城高校[P = 18, 636. 1]のL P I - S = 1106. 7、最小値はひろのまきば天文台[P = 4. 7]のL P I - S = 0. 2となっている。図54では、熊本の人口密度は比較的小さいもののナイター照明の影響で熊本のL P I - Sは大きくなっていった。しかし、図55ではL P I - S = 289. 7と単純に人口密度に比例しており、その地域特有の影響が全く見えない。つまり局地的な光源によって起こる光害の大きさを表現するには人口密度(P)のみでは不十分である。

人口密度(P)だけでは、気象条件やエアロゾルによる影響だけでなく、ナイター照明や街灯の多さなど地域特有の原因を表現することができなかった。逆に、経時変化率(r)のみでは、都市部や山間部といった立地条件を表現することができなかった。つまり、人口密度(P)と経時変化率は相補的な関係で地域性を表現している。よって、この公式に経時変化率(r)を用いるのは妥当である。

4. 光害指数(L P I - S)の実用性

夜空の明るさ全国ネットワークのデータを元に光害の数値化公式を作成し、光害指数L P I - Sを定義した。そして次に、このL P I - Sが日本全国においてどの程度の実用性があるのかを調査した。そのために、2012年に「北九州1 / 5万等光度曲線地図」の補正のために経時変化率を求めた各地点と、パチンコ店の影響があるなど、特徴のある市内7ヶ所で新たに観測を行った。また、夜空の明るさ全国ネットワーク参加団体にアンケートを行い、全国での光害指数の実用性について調べた。

4-1 北九州市内各地のL P I - S

L P I - Sを全国で考察する前に、まず北九州市内でこの光害公式が有効かどうかを調べた。そのために、2012年に観測を行った7ヶ所に加え、2015年に新たに市内7ヶ所で観測を行った。しかし、新しく観測した各地点については、せっかくの新月の日に雲が出てしまったりして、予定したデータが手に入らなかったのが残念である。

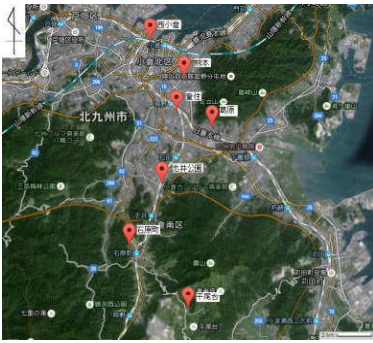


図56. LPI-Sを算出した市内5ヵ所

図56は2012年に観測を行った市内7ヵ所である。各地点をLPI-Sの大きい順に並べた表6を見ると、それら地点の21時の夜空の明るさ $[b]$ 、人口密度 $[P]$ 、経時変化率 $[r]$ は異なっている。平尾台は、周囲2km圏内全てが山となっており、光害の影響の少ない場所にあるのでLPI-S=0.8と小さくなっている。逆に、市街地の中心にあり光害の影響が大きい西小倉では、LPI-S=64.0と比較的大きくなっている。プロ野球の試合が行われることもある北九州市民球場前で観測した北九州市熊本は、そのナイター照明など市街地の影響で、LPI-S=156.4と最も大きくなっている。また、重住・志井公園・葛原の3ヶ所を比べると、経時変化率はどれも同じだが、北九州市小倉の中心街に近い重住のLPI-Sが最も大きくなっている。

表6. 北九州各地のLPI-S

	夜空の明るさ (mag/□°)	人口密度 (万人/km ²)	経時変化率 (mag/□°/h)	LPI-S
熊本	16.01	4.64	0.54	156.4
西小倉	17.37	4.63	0.24	64.0
重住	18.09	1.00	0.18	9.9
志井公園	18.49	0.87	0.18	8.5
葛原	18.55	0.75	0.18	7.3
石原町	19.55	0.12	0.30	1.9
平尾台	19.78	0.12	0.12	0.8

合が行われることもある北九州市民球場前で観測した北九州市熊本は、そのナイター照明など市街地の影響で、LPI-S=156.4と最も大きくなっている。また、重住・志井公園・葛原の3ヶ所を比べると、経時変化率はどれも同じだが、北九州市小倉の中心街に近い重住のLPI-Sが最も大きくなっている。

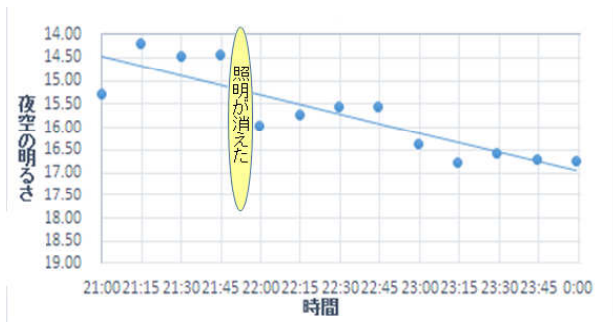


図57. 門司での観測結果(2015. 11. 12.)

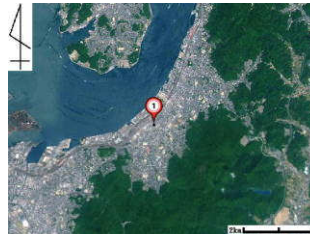


図58. 観測値周辺の航空写真



図59. パチンコ店のネオン看板

なお、雲量の影響を受けたデータの中でも、門司での観測データにはパチンコ店のネオン看板による光害の影響がはっきりと現れた。図57はその結果である。21時45分と22時のデータの間に1.5 mag/□°程の差がある。これは近くにあったパチンコ店が22時前に閉店し、ネオン看板が消えたためである。やはりネオン看板の生み出す光害への影響は大きいことが分かる。また、22時45分と23時の間でも1.0 mag/□°程度変化しているが、これは、観測時の雲量が2から8が変化したためだと考えられる。

今後は、市内各所で観測を行って、具体的にどのようなものが、どの程度光害に対して影響を与えているのか、調査していきたい。

4-2 全国でのLPI-S

北九州市だけでなく全国各地の光害の様子を調査するため、夜空の明るさ全国ネットワークの参加校にアンケート調査を行った。アンケートでは、以下の5項目を尋ねた。

- ① 星の見え方(何等星ほどの星が見えるのか、どのような星を観測することができるのか)
- ② 半径2km以内に山や川があるか。
- ③ 「夜空の明るさの光害」という観点で「光害」の影響について感じることはあるか。
(例：特に北九州市では夜空の明るさが15等級程度と明るい、など)
- ④ 「夜空の明るさ以外の光害」という観点で「光害」の影響があるな、と感じることはあるか
(例：夜遅くまでセミの鳴き声がしていた／交通量が多く、車のライトがよく目に入る、など)
- ⑤ 夜空の明るさおよび光害に影響する、その地域で特有の要因があるか
(例：黄砂が飛来してくることで夜空が明るくなっている／街灯が多いことで夜景がキレイ、など)

このアンケートの内容は、環境省の地域照明環境計画策定マニュアル(1-1光害とは)をベースにアレンジしたものである。

表7. アンケートの結果から分かる光害の様子

学校名	LPI-S	みられる光害の様子
熊本 (福岡県北九州市)	156.4	・ ナイター照明点灯時の観測値 → 夜空に与える影響が大きい、...
海城高校 (東京都新宿区)	132.8	・ 肉眼で見える星は、1等星が限界 → 仕方がない、東京は新宿だ、...!
東筑紫学園 (福岡県北九州市)	38.9	・ 黄砂などが中国から飛来し、夜空を明るくする
一宮高校 (愛知県一宮市)	12.8	・ 北極星(2等星)を見つけることが困難なことがある ・ 市内のホテルが、都市開発のため、...
遺愛女子高校 (北海道函館市)	6.4	・ 見えるときには、4等級程度まで肉眼で見える → さすが函館、夜景が売りなだけある、...
三本松高校 (香川県東かがわ市)	2.4	・ 早い時間からでも3.5等星が肉眼で見える ・ 夜遅くまでセミが鳴いていたことがあった
平尾台 (福岡県北九州市)	0.8	・ 天の川が見える
富山市天文台 (富山県富山市)	0.4	・ 住宅率 $h = 3$ 、経時変化率 $r = 0.06$ なので、 $LPI-S = 0.4$ → さすが天文台、光害がない!!
ひろのまきば天文台 (岩手県九戸郡)	0.003	・ 住宅率 $h = 1$ 、経時変化率 $r = 0.012$ なので、 $LPI-S = 0.003$ → さすが天文台、光害がない!!

表7はその結果をまとめ、LPI-Sが大きい順に並べたものである。

東京都新宿区海城高校は都心にあるだけあって、1等星しか見えないほど光害が大きく、LPI-Sの値も132.8と大きくなっている。一方、経時変化率が同じ0.02である愛知県一宮市一宮高校は、LPI-S=12.8で、2等星まではかろうじて見えるようだ。このように、光害指数を用いることで、経時変化率だけでは表現できなかった光害の様子を表すことができた。さらに、北九州市民球場の近くにあり光害が非常に大きいと考えられる熊本は、LPI-S=156.4と新宿よりも大きな値になっている。やはり、プロ

野球の試合が行われるような強力な照明による光害は大きいようだ。

なお、雲量の影響があり参考程度ではあるが、ネオン看板の影響の見られた門司ではLPI-S=73.0であった。やはりネオンの影響は大きいことが分かる。

また光害の影響が小さい場所に建てられるはずの天文台は、どちらもLPI-Sが0台になっている。さすが天文台である。以上より、経時変化率だけで評価できなかった光害の大きさを、この光害公式で適切に表現できるようになったといえる。

4-3 まとめ

これまでの、J. Bortle(2001)や S. Albers(2001)などが行った「暗い夜空」を数値化した研究に対し、私たちの考案した光害指数(LPI-S)は「明るくなった夜空」を数値化したものである。

曖昧な指標である夜空の明るさの光害を、人的要因・環境要因の影響を含んだ経時変化率を中心として公式化し、数値化した。さらに、人口密度によって地域性をより明確にすべく、半径2km以内の人口密度を算出し住宅率を用いて補正した。また、全国ネットワークへのアンケート結果を基に、LPI-Sが適切に光害の大きさを表現できていることを確認した。

黄砂や雪など、様々な要因が観測地毎の夜空の明るさの地域性を生み出している。しかし、光害指数に地域性がどのように表れるのかを詳細に調査するには、さらに多くのデータが必要である。今後、国際ダークスカイ協会が運営している“Globe at Night”など、海外での研究結果とLPI-Sの値を比較することで、生態系への影響や、不快光グレアなどの人間への影響を表現した式にしたい。

参考文献

- Alex McConahay (2010): Cheap Observer's Report- Fight Light Pollution, RAM, 5pp.
- CPRE (2015): Shedding Light- A survey of local authority approaches to lighting in England, Campaign to Protect Rural England, 32pp.
- Dark-Sky-Association <www.darksky.org> (参照日:2015年11月20日)
- E.Marcoら (2012): Light Pollution in Valencian Natural Park: where light not only annoys astronomers, sea-astronomia, 981p.~986p.
- Fairfax Country (2009): Noise, Light pollution and visual pollution
<<http://www.fairfaxcounty.gov/>> (参照日:2015年11月20日)
- F.Walkerら (1977): The Effects of Urban Lighting on the Brightness of the Night Sky, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 405p.~409p.
- GLOBE at Night (2006~2013) <<http://idatokyo.org/gan/>> (参照日:2014年11月14日)
- Hertsdirect (2003): Report of the street lightning topic group
<<http://www.hertsdirect.org/>> (参照日:2015年11月20日)
- 東筑紫学園高校・照曜館中学校理科部: 第22回「星空の街・あおぞらの街」全国大会(2010) 環境大臣賞記念号 77pp.
- IDA (2009): Light Pollution a Serious Threat to Biodiversity and Dark Sky as Natural Heritage, Visnjan Observatory, 4pp.
- J.Bortle (2001): The Bortle Dark-Sky Scale, Issue of Sky & Telescope, 126p.~129p.
- 株式会社文理 <<http://optica.cocolog-nifty.com/blog/2010/06/post-cdff.html>> (参照日:2010年6月7日)
- 気象庁 <<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>> (参照日:2014年9月30日)
- 北九州市環境局環境対策課(2003~2012): 未発表資料 (SPM値、光化学オキシダント値)
建築都市局都市交通政策課(2007): 未発表資料(自動車交通量)
企画文化局文化スポーツ部スポーツ振興課(2009): 未発表資料(北九州市民球場照明)
- L.K.Forkenら (2009): Influence of Light at Night on Murine Anxiety- and Depressive-like Responses
<www.ncbi.nlm.nih.gov> (参照日:2015年11月20日)
- M.Nicholas(2001): Light Pollution and Marine Turtle Hatchlings, The George Wright Forum, 77p.~82p.
- R.L.Berry (1976): Light Pollution in Southern Ontario,
The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, 97p.~115p.
- S.Albers (2001): Modeling Light Pollution from Population Data and Implications for National Park Service Lands,
The George Wright Forum, 56p.~58p.
- Sky Brightness Monogram <<http://www.darkskiesawareness.org>> (参照日:2015年11月20日)
- S.Lockeら(2014): Oilfield Lightning Can Coexist With Dark Skies, McDonald Observatory, 6pp.
- スターウォッチング・ネットワーク(2005~2011): 全国星空継続観察の実施結果報告書, 環境省水・大気環境局

おわりに

この14年間にわたって「夜空の明るさ」の研究をしてきたことで、「物事を研究するというのは、どうということなのか」を学んだ。誰もやったことのないことを自分達で研究し、さらに発表するという形で、他の人々に伝えるという経験は、普段のどんな授業よりも重要かつ貴重な経験であった。

幸い、11回にわたる九州大会での発表や、計7回にわたる春季天文学会ジュニアセッションでの発表で、いろいろな先生方からアドバイス、そして高い評価をいただいた。さらには、2007年夏の全国高等学校総合文化祭では、地学部門において上位3校の内の1校に選ばれたこと、2010年10月に「星空の街・あおぞらの街」全国協議会から環境大臣賞をいただいたこと、また2012年夏の全国高等学校総合文化祭では、自然科学部門において全国第2位の「文化庁長官賞」をいただいたこと、さらに2015年8月の全国高等学校総合文化祭に、理科部として5年連続の全国大会出場を果たしたことは、この14年に及ぶ「夜空の明るさ」の研究が認められたもので、私達にとって最高の名誉だと思う。

2013年の「星空の町・あおぞらの街」全国大会において、高円宮妃殿下、福岡県知事、北九州市長の前で発表できたことも、これまで研究をしてきた先輩方のおかげである。

今年度は、地球惑星科学連合2014、2015年会、および2度の光害シンポジウム、夜空の明るさに関する課題研究発表会などでの発表を通して、「光害の数値化」についてのアドバイスをいただくことができた。また、第2回光害シンポジウムの際には、私たちの提案で国際ダークスカイ協会東京支部に高校生部門を新設していただけるかもしれないということになった。さらに12月5日には、第3回光害シンポジウムで基調発表を行い、地学以外の分野の専門家からのアドバイスをいただいた。今回の光害公式を様々な場で発表し、またさらなるアドバイスをいただければと思っている。このような、さまざまな人との交流を通じて、これからも「夜空の明るさ」の研究を発展させていきたい。

謝辞

北九州市環境局には様々な環境指標のデータをいただき、たくさんのサポートをしていただいた。また、「星空の街・あおぞらの街」全国大会の際、貴重な体験ができました。改めて北九州市環境局に感謝いたします。

そして、第1回光害シンポジウムを開催するにあたって私達を共催メンバーに加えて下さり、本研究に多大なご助言をいただいている星空公団の小野間さんに感謝いたします。最後に、このように思う存分研究ができるのも、(独)科学技術振興機構の「中高生の科学研究実践活動推進プログラム」によるご支援のおかげと思っています。

第45回 九州高等学校生徒理科研究発表大会

光害の数値化について [夜空の明るさXIII]

発行日：2016年2月6日(土)

編集者：本田 陸人[夜空リーダー]、藤井 悠野、西村 江梨花

発行：東筑紫学園高等学校・照曜館中学校 理科部

〒803-0841 北九州市 小倉北区 清水 4-10-1
Tel. 093-571-0488

Fax. 093-571-0487

