

## 星空環境の都市政策による改善可能性

—夜空の明るさと都市の物的環境の関係に注目して—

Enhancing the Starry Sky Visibility through Urban Policy:

The Relationship between Night Sky Brightness and the Urban Physical Environment

利田有輝人 \*・西颯人 \*\*・貞広幸雄 \*\*\*・樋野公宏 \*\*\*\*・長谷川大輔 \*\*\*\*  
Yukito Toshida \*, Hayato Nishi \*\*, Yukio Sadahiro \*\*\*, Kimihiro Hino \*\*\*\*, Daisuke Hasegawa \*\*\*\*

Anthropogenic light emissions and atmospheric aerosols significantly reduce star visibility in urban areas, necessitating a clear understanding of their relationship with the built environment to inform effective dark-sky policies. This study employs multiscale geographically weighted regression (MGWR) to model the association between starry sky quality and urban environmental factors, including land use patterns and population density. The results indicate that human activity-related variables degrade night sky visibility, whereas natural land use and policy interventions can contribute to its improvement. Furthermore, simulation analyses are conducted to assess the impact of strategic urban policy measures, identifying locations with high potential for enhancing starry sky quality.

**Keywords:** Light Pollution, Urban Physical Environment, Multiscale Geographically Weighted Regression

光害、都市の物的環境、マルチスケール地理的加重回帰

### 1. はじめに

現代の都市生活において星空は日常のものではなくなってしまっている。Falchi et al. (2016)<sup>1)</sup>によれば、全世界人口の60%以上が天の川が見えない状態で暮らしている。Falchi et al. (2011)<sup>2)</sup>では、人間活動由来の夜間光放射が夜空を明るくして星空の視認性を下げていることが示されており、都市の夜間光すなわち Artificial Light at Night により引き起こされる諸問題は光害と呼ばれる。光害は他にもエネルギーの浪費<sup>3)</sup>や生体への悪影響<sup>4)5)</sup>をもたらす。

一方で星空の価値は様々な分野の研究から示唆されている。Font (2000)<sup>6)</sup>では旅行者が観光地付近の自然環境の保全に対して支払い意思を持つことが示されており、星空も観光資源として経済効果をもたらすことが期待される。例えば地域を挙げて星空観光を行っている石垣島では、卯田・磯野 (2019)<sup>8)</sup>が指摘するように「星まつり」というイベントを通して星空の価値が共有され、観光事業者にも星空が集客装置の一つとして認識されるまでに至った。また、宇宙リズム推進協議会が2018年に行った調査<sup>9)</sup>は星空鑑賞やプラネタリアムの参加者は全国に850万人、今後の希望者は4000万人いると推計しており、星空関連の大きな観光需要を示唆している。日本をはじめ多くの先進国が人口減少局面に入っていくなか、自然資源を活用した地域振興のあり方として星空の美しさが有力な選択肢になりうる。

実際に星空環境を地域振興の手段としていくためには、都市化と星空の美しさの関係を明らかにすること、良好な星空環境を創出し保全するための政策的アプローチを適切に実行することの2点が必要である。前者に関しては光害と都市の社会経済活動の関係性を分析した Gallaway et al. (2010)<sup>3)</sup>や Cheon, Kim (2020)<sup>10)</sup>、Kuechly et al. (2012)<sup>11)</sup>がある

が、これらは光害の指標として夜間光の放射輝度を目的変数としており星空の美しさに対する説明を与えていない。また説明変数の設定において、物理学分野の関連研究<sup>12)13)14)</sup>に示される夜間光の特性や自然地理的環境の光害への影響を十分に考慮できておらず改良の余地がある。

後者では、環境省が定める「光害対策ガイドライン」<sup>15)</sup>において地域特性に応じたゾーニングとして「光環境類型」と類型ごとの照明設計指針が示されている。しかし類型設定の定量的基準は示されておらず実際に類型指定を行った自治体もまだない。またいくつかの自治体では「星空保全条例・光害防止条例」を定めており、星空保全を政策目標として宣言し、場合によっては投光器の使用規制や罰則規定を定めているが、越智 (2021)<sup>16)</sup>は、これらは照明設計に対して上方光束比の数値的規制を設けるなどの詳細な規定を行なっている海外の類似制度と比べて目的と手段ともに限定的であると指摘している。

すなわち現行の星空環境改善を目的とした光害対策には、光害と星空環境の関係分析において物理的性質を考慮した学術的知見が不足していると同時に、実践面で都市政策へ応用するにあたっての定量的指針が不十分である。本研究ではこれらの課題を改善するため、星空の美しさを夜間光伝播による光害の物理的性質の影響を考慮して定義した説明変数を導入した上で、星空の美しさを規定する要因を把握する。またその結果を用いて、星空環境を改善するための政策シミュレーションを定量的に例示して都市政策へ応用可能性を検討することを目的とする。

### 2. 分析手法

#### 2-1. 回帰分析の手法

\*学生会員 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 (Department of Urban Engineering, the University of Tokyo)

\*\*正会員 一橋大学ソーシャル・データサイエンス研究科 (Hitotsubashi University, Graduate School of Social Data Science)

\*\*\*正会員 東京大学空間情報科学研究センター (Center for Spatial Information Science, the University of Tokyo)

\*\*\*\*正会員 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 (Department of Urban Engineering, the University of Tokyo)

本研究では、目的変数に星空の美しさ、説明変数に既往研究で星空の美しさに関連があると言及された要因を採用して回帰分析を行った。ただし各説明変数が目的変数に及ぼす影響を表す回帰係数の値は都市化の進行度合いや自然環境の違いなどから地域性を持つことが考えられるため、最小二乗法推定(OLS)による重回帰分析に加えて地理的加重回帰 (Geographically Weighted Regression、以下 GWR)とマルチスケール GWR<sup>17)</sup> (Multiscale GWR、以下 MGWR)を実行した。回帰分析ではダミー変数以外を標準化し、GWR と MGWR ではガウシアンカーネルを用いてバンド幅と回帰係数の推定をした。最終的には AIC や誤差項の空間的自己相関の検定結果をもとに MGWR を採用し、得られた回帰式に対して各説明変数の目安の値を代入することで星空の改善可能性 (ポテンシャル) を定義し、実現可能な地点を抽出して提示した。

また、分析環境・ツールは以下のものを利用した。

Mac OS

Google Colaboratory Python 3.12.12

QGIS 3.28 Firenze

R 4.3.3 / RStudio 2024.04.1+748

## 2-2. 採用した変数

目的変数には環境省の「令和 2 年度 夏の星空観察結果」<sup>18)</sup> で測定された「星空の等級」(単位: マグニチュード毎平方秒角[mag/arcsec<sup>2</sup>]) という夜空の明るさを示す指標を用いた。等級は値が大きいほど夜空が暗く星空が美しい状態を示し、等級 19 以上が天の川が見える目安とされる。観測データは緯度経度を付与されたポイントデータとして csv 形式で公表されており、投稿された有効データ 590 件のうち欠損値除去と同一地点の平均値集約を行った 473 件を対象地点とした。

説明変数は、表 1 に一覧として示すように、光害要因・自然環境要因・都市活動要因・制度ダミーと交差項にカテゴリ分けして導入した。ただし目的変数がポイントデータであるのに対して、各説明変数は「周辺総光量 ( $x_1$ )」を除いて対象地点を含む 3 次メッシュを集計単位として作成した。

光害要因は、都市上空に放射された光が大気中粒子によって散乱されることで夜空が明るくなるスカイグローという光害現象の影響を考慮するカテゴリである。Falchi et al. (2011)<sup>2)</sup> や Kyba et al. (2015)<sup>25)</sup> では夜間光によって夜空が明るくなることが示されており、Kocifaj, Barentine (2021)<sup>12)</sup> はエアロゾルを削減することで夜空の明るさが低下することを明らかにしている。本研究においては「周辺総光量 ( $x_1$ )」は夜間光放射を、「PM2.5 濃度 ( $x_2$ )」は大気汚染による散乱の影響を表している。

ただし、Cinzano, Falchi (2012)<sup>26)</sup> では夜間光源によるスカイグローの影響距離範囲を 120km としてモデル計算を行っており、夜間光は少なくとも 100km 程度の広域スケールで影響するとされている。これを踏まえて「周辺総光量 ( $x_1$ )」は 3 次メッシュを集計単位とせず、Earth Observation Group<sup>19)</sup> が提供する JPSS 衛星の可視近赤外線放射計群 (VIIRS) によるノイズ処理済み夜間光バンド「Annual VNL V2.2(2022)」の Geotiff データを用いて、観測地点から 100km 以内の夜間光輝度の総和を用いた。逆に、エアロゾルはスカイグローに及ぼす影響の局所性が指摘されているため<sup>12)</sup>、観測地点での PM2.5 濃度<sup>1)</sup>を国立環境研究所が提供する大気汚染予測システム VENUS<sup>20)</sup>の Geotiff データから、環境省の星空観測期間である 2020 年の 08/10~08/23 の平均値を観測地点にポイントデータとして付与した。

自然環境要因は、スカイグローの規定要因である夜間光とエアロゾルの挙動に対する非人工的環境の影響を表す。Cinzano, Falchi (2012)<sup>26)</sup>などの光害の伝播をモデル化する研究では Garstang 式をはじめとして大気密度の鉛直分布が光の散乱特性に影響することが仮定されている。また都市内土地利用の光害への寄与を調査した Kuechly (2012)<sup>11)</sup>では自然地の光害寄与が少ないことを明らかにしており、これらの影響を考慮するために「標高( $x_3$ )」「森林面積( $x_4$ )」を導入した。なお、「森林面積( $x_4$ )」は国土数値情報「土地利用 3 次メッシュ」における「森林」のデータを用いて作成した。

都市活動要因は Gallaway et al. (2010)<sup>3)</sup>や Cheon, Kim (2020)<sup>10)</sup>において人口や土地利用現況が都市上空への夜間光放射量の説明変数として有意な結果を報告したことを踏まえて

表 1 回帰分析の変数と出典

| カテゴリ   | 説明変数                                                                                      | 出典                                                                                                                                                |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 目的変数   | 星空の等級 [mag/arcsec <sup>2</sup> ]                                                          | 環境省「令和 2 年度夏の星空観察結果」 <sup>18)</sup>                                                                                                               |
| 光害要因   | 周辺総光量( $x_1$ ) [nW/cm <sup>2</sup> /sr]<br>PM2.5 濃度( $x_2$ ) [μg/m <sup>3</sup> ]         | Earth Observation Group「Annual VNL V2.2(2022)」 <sup>19)</sup><br>国立環境研究所「VENUS 画像データ(2020)」 <sup>20)</sup>                                        |
| 自然環境要因 | 標高( $x_3$ ) [m]<br>森林面積( $x_4$ ) [km <sup>2</sup> ]                                       | 国土数値情報「標高・傾斜度 3 次メッシュデータ(2011)」 <sup>21)</sup><br>国土数値情報「土地利用 3 次メッシュデータ(2021)」 <sup>22)</sup>                                                    |
| 都市活動   | 人口( $x_5$ ) [人]<br>農地面積( $x_6$ ) [km <sup>2</sup> ]<br>交通用地面積( $x_7$ ) [km <sup>2</sup> ] | e-Stat「国勢調査(2020) JGD2011 第一次地域区画」 <sup>23)</sup><br>国土数値情報「土地利用 3 次メッシュデータ(2021)」 <sup>22)</sup><br>国土数値情報「土地利用 3 次メッシュデータ(2021)」 <sup>22)</sup> |
| 制度     | CASBEE (d)                                                                                | 住宅・建築 SDGs 推進センター <sup>24)</sup>                                                                                                                  |
| 交差項    | 人口×CASBEE( $x_5 \times d$ )                                                               | ---                                                                                                                                               |

導入する。本研究では「人口( $x_5$ )」に加えて、人間活動由来の自然的土地利用も光害への寄与が小さいこと<sup>1)</sup>を見込んで「農地面積( $x_6$ )」、道路利用が光害に最も寄与をしたという Kuechly(2012)<sup>1)</sup>を踏まえて「交通用地面積( $x_7$ )」を採用する。ただし同研究では道路広告や街路灯、車両のライトなどの交通関連の夜間光放射の寄与の大きさを示しているが、本研究ではデータの制約からこれらの真の要因の代理変数として「交通用地面積( $x_7$ )」を定義した。<sup>2)</sup>両者とも国土数値情報「土地利用3次メッシュ」を出典とし、「農地面積( $x_6$ )」は「田」+「その他農用地」、「交通用地面積( $x_7$ )」は「道路」+「鉄道」から作成した。

制度は、星空保全や光害防止の政策的アプローチの効果を考慮するための項目で、一定規模以上の建築に対して課される環境計画に CASBEE(建築)の評価書を添付することを求めている自治体を 1 とするダミー変数として「CASBEE ダミー( $d$ )」を導入した。他にも自治体が定める星空保全条例・光害防止条例や、自動車 NOx・PM 法で定められた車種規制なども星空保全に関連する政策として考えられるが、前者は観測地点における制定事例が極めて少ないこと、後者は他の説明変数との多重共線性が懸念されることから、回帰モデルの安定性を確保するために導入しなかった。また、一定規模以上の建築行為が成立し CASBEE を要求する動機がある自治体は都市部に限られるが、これらの自治体では人口密度が高くなる傾向にあることを考慮して「人口×CASBEE( $x_5 \times d$ )」の交差項を導入した。

### 2-3. ポテンシャルの定義

各観測地点の MGWR 回帰式に対して、説明変数のうち政策により変動可能な変数に理想とする値を代入して得られた値は、それぞれが政策を達成した場合に実現する星空の等級を予測した値である。実際に都市政策として星空の美しさの改善を目指す場合には、さまざまな要素間の制約条件を満たしながら多元的に回帰式の説明変数を改善して星空の美しさを向上させる努力が求められる。ここでは政策決定の目安になる定量的な定義として、変動可能な説明変数を望ましい値に設定して回帰式に投入したときに得られる値を星空の美しさの「ポテンシャル」と定義する。

地点  $i$  におけるダミー変数以外の標準化済み説明変数を格納したベクトル  $x_i$  と標準偏回帰係数を格納したベクトル  $\beta_i$  を以下のように表す。

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}, x_{i7})^T$$

$$\beta_i = (\beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3}, \beta_{i4}, \beta_{i5}, \beta_{i6}, \beta_{i7})^T$$

このとき地点  $i$  における目的変数の回帰式  $y_i \cong f(x_i)$  は以下のように表される。

$$f(x_i) = \beta_{i0} + \beta_i^T x_i + \beta_{i8} d + \beta_{i9} x_{i5} d_i$$

本研究では、「周辺総光量( $x_1$ )」「PM2.5 濃度( $x_2$ )」「農地面積( $x_6$ )」「交通用地面積( $x_7$ )」の四つを変動可能であるとする。ただし、 $x_7$  は交通関連の夜間光放射量の代理変数であるため、交通用地面積そのものを変動させるのではなく街路灯や道路広告、車両のヘッドライトなどの交通関連の

夜間光放射量の削減を意味する。星空の美しさと都市規模はトレードオフにあると考えられるが、研究の目的として星空による地域振興を挙げていることを踏まえ、都市規模を縮小せずに実現するポテンシャルを明らかにするため「人口( $x_5$ )」は固定してシミュレーションを行うこととする。これらの説明変数に対して代入する目標値には全サンプル地点の平均値を使用した。ここで四つの変動可能な標準化済み説明変数に対して平均値 0 を代入した  $x_i^{Mean}$

$$x_i^{Mean} = (0, 0, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, 0, 0)^T$$

を用いて地点  $i$  の星空の「ポテンシャル」を下の式で定義する。

$$potential_i = f(x_i^{Mean})$$

$potential_i$  は各観測地点において、説明変数を全観測地点の平均的な都市環境を目標値として変動させたときに実現する星空の等級を示す値である。投稿データの特徴上この目標値は日本全国の平均ではなく、星空環境に改善の余地がある地域の間で目標値として現実的な値と解釈でき、 $potential_i$  もそれらの地域を対象にした概念である。これ以降はシミュレーションを「平均値変化」とし、目的変数である星空の等級の実測値を  $real_i$ 、平均値変化によって得られたポテンシャルの値を  $potential_i$  として区別することとする。

## 3. 回帰分析の結果

### 3-1. OLS による重回帰分析の結果

各要因の説明変数を投入した重回帰分析の結果を以下の表 2 に示す。MGWR の回帰係数と挙動が類似するため詳細は後述するが、光害要因の二変数や都市活動を表す説明変数は星空の美しさに負の影響をもたらしており、天文学や大気光学の分野の先行研究<sup>2) 12) 18) 19)</sup>の知見に整合する。交差項の標準偏回帰係数が正であることから政策による星空環境の改善可能性が示唆された。ただし、CASBEE ダミーの標準偏回帰係数の値が負であるのは制度の導入によって星空環境が悪化しているのではなく、夜空が明るい場所ほど一定規模以上の建築に対して環境配慮を求める CASBEE を導入する動機があるためであると考えられる。

表-2 重回帰分析の結果(標準化済み)

| 説明変数                                   | 標準偏回帰係数 | p 値    |
|----------------------------------------|---------|--------|
| 切片                                     | 20.2    | <0.001 |
| 周辺総光量( $x_1$ )                         | -0.32   | <0.001 |
| PM2.5 濃度( $x_2$ )                      | -0.09   | 0.008  |
| 標高( $x_3$ )                            | 0.10    | 0.005  |
| 森林面積( $x_4$ )                          | 0.46    | <0.001 |
| 人口( $x_5$ )                            | -0.46   | <0.001 |
| 農地面積( $x_6$ )                          | 0.09    | 0.02   |
| 交通用地面積( $x_7$ )                        | -0.11   | 0.002  |
| CASBEE ( $d$ )                         | -1.72   | <0.001 |
| 人口×CASBEE ( $x_5 \times d$ )           | 0.48    | <0.001 |
| 調整済み決定係数 (adjusted $R^2$ ): 0.775      |         |        |
| 誤差項の Moran's I 値: 0.05 ( $p < 0.001$ ) |         |        |
| AIC: 904.1                             |         |        |

回帰結果の解釈としては $d=1$ の場合に回帰式の定数項、すなわち星空環境のベースラインが低くなっている。

### 3-2. MGWR による重回帰分析の結果

GWR は説明変数で共通のバンド幅推定を行うが、MGWR ではバンド幅を説明変数ごとに設定して繰り返し推定を行うため、地域による説明変数の効果の差を明示的に検出することができる。MGWR の推定結果は以下の表3に示す。同一のセットで行った GWR と AIC を比較すると GWR は 702.9、MGWR は 591.4 と改善しており MGWR の導入は妥当である。直接比較はできないが、誤差項の空間的自己相関を表す Moran's I も目安として減少している。バンド幅が 100km 以下のスケールになった「人口( $x_5$ )」「農地面積( $x_6$ )」「人口×CASBEE( $x_5 \times d$ )」の三つの説明変数で局所回帰が行われる。

地域差を考慮しない回帰係数の挙動は OLS と同様に解釈できる。標準偏回帰係数の値がすべて正であったのは「標高( $x_3$ )」「森林面積( $x_4$ )」「農地面積( $x_6$ )」「人口×CASBEE( $x_5 \times d$ )」であり、自然環境的要因と大都市での政策的介入が星空の美しさにポジティブな影響をもたらすと解釈できる。一方で「周辺総光量( $x_1$ )」「PM2.5 濃度( $x_2$ )」「人口( $x_5$ )」「交通用地面積( $x_7$ )」「CASBEE ダミー( $d$ )」の標準偏回帰係数の値が負であったことから、都市化の進展度合いが星空環境に悪影響を与えている。

回帰係数の挙動に地域差が検出されたのは局所回帰が行われた「人口( $x_5$ )」「農地面積( $x_6$ )」「人口×CASBEE( $x_5 \times d$ )」の三つであった。「人口( $x_5$ )」の標準偏回帰係数の値の分布から、説明変数の中で最も大きい負の影響を及ぼしており、人口密度が星空環境に大きな影響を与えている。それぞれの標準偏回帰係数の値の空間分布図 1、2、3 に示す。

「人口( $x_5$ )」の標準偏回帰係数の値は全地点で負をとる。関東や関西など人口規模が大きい地点において絶対値が小さく、人口増加が星空環境に与える負の影響が人口規模の拡大に応じて逓減している。「農地面積( $x_6$ )」は西の地点ほど標準偏回帰係数が大きくなっており、西日本の方が農的土地利用を1単位分だけ増加させたときの星空の等級の改善効果が大きい。「人口×CASBEE( $x_5 \times d$ )」の標準偏回帰係数は全ての地点で正の値を取るため、CASBEE

が導入されることで「人口」が及ぼす負の影響を緩和する効果を持つ。回帰係数の値は総じて関西の方が関東の地点より大きい、一般財団法人住宅・建築SDGs 推進センターHPの「自治体によるCASBEEの活用」<sup>24)</sup>に示されているCASBEEの制定自治体一覧を参照すると、関東より関西の自治体の方が早く導入が進んでおり、関西の届出件数が多いことが関係していると考えられる。

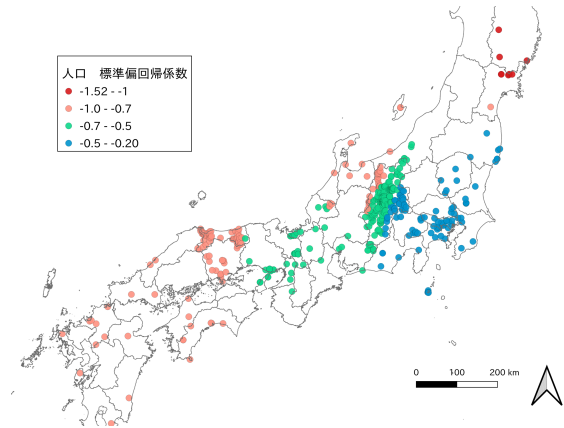


図-1 人口の標準偏回帰係数の分布

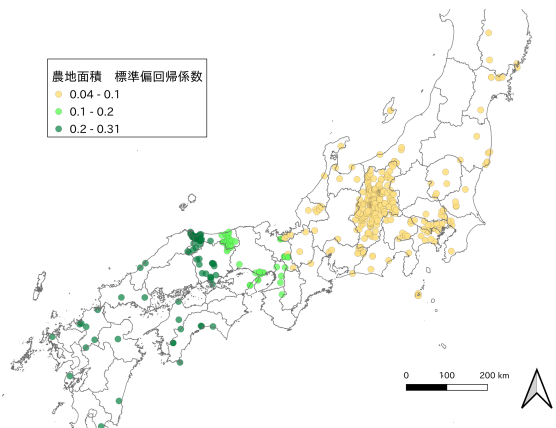


図-2 農地面積の標準偏回帰係数の分布

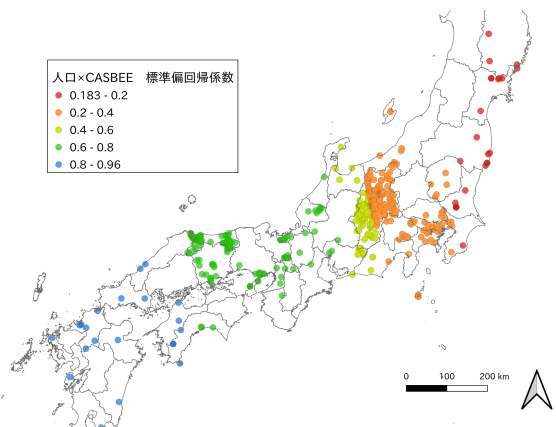


図-3 人口×CASBEE の標準偏回帰係数の分布

表-3 MGWR の結果

| 説明変数      | バンド幅<br>[km] | 最小値   | 中央値   | 最大値   |
|-----------|--------------|-------|-------|-------|
| 切片        | 15           | 17.98 | 20.02 | 21.67 |
| 周辺総光量     | 1461         | -0.11 | -0.11 | -0.11 |
| PM2.5 濃度  | 1460         | -0.07 | -0.07 | -0.07 |
| 標高        | 1460         | 0.37  | 0.37  | 0.37  |
| 森林面積      | 1460         | 0.23  | 0.24  | 0.24  |
| 人口        | 62           | -1.52 | -0.66 | -0.20 |
| 農地面積      | 164          | 0.04  | 0.05  | 0.31  |
| 交通用地面積    | 1455         | -0.08 | -0.08 | -0.08 |
| CASBEE    | 1460         | -1.68 | -1.68 | -1.68 |
| 人口×CASBEE | 135          | 0.18  | 0.40  | 0.96  |

調整済み決定係数 (adjusted  $R^2$ ): 0.871  
誤差項の Moran's I 値: 0.03 ( $p < 0.001$ )  
AIC: 591.4

## 4. 星空のポテンシャルの実現可能性の検証

### 4-1. potential<sub>i</sub>によるサンプル地点のカテゴリー分け

星空の等級は先述したように 19 以上が天の川が見える目安とされている。本研究では「星空が美しい」という状態を「天の川が見える」と考え、等級が 19 以上である場所を星空が美しい場所と定義する。2-3 で言及した real<sub>i</sub> と potential<sub>i</sub> を比較することで平均値変化による星空環境の変化を予測でき、potential<sub>i</sub> が 19 を超えて改善した場合、その地点は美しい星空を創出することに成功することになる。全サンプル地点における real<sub>i</sub> と potential<sub>i</sub> の散布図と、各カテゴリーの定義を示したのが図 4 である。

「天の川ポテンシャル地域」では平均値変化によって天の川が見える「美しい星空」を新たに創出できる可能性が示唆される。「改善ポテンシャル地域」は天の川は見えなくても星空環境の改善が見込まれ、工夫により「天の川ポテンシャル地域」に移行しうる。「星空資源地域」はすでに良好な星空環境を有している地域、「現状維持地域」は平均値変化が星空環境の改善につながらない地域である。「天の川ポテンシャル地域」と「改善ポテンシャル地域」に区分された地点を示したのが図 5 である。前者は山間部や臨海部に多く立地するが、大都市圏の遠郊外にもいくつか存在する可能性がある。後者は郊外にも多く立地しており、都市化が進んだ地域でも星空環境が改善されうること示している。

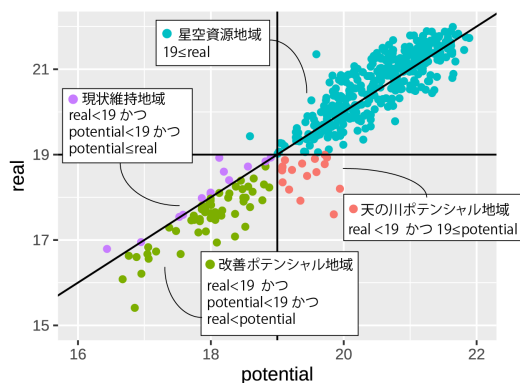


図-4 実測値(real<sub>i</sub>)と変化値(potential<sub>i</sub>)の散布図

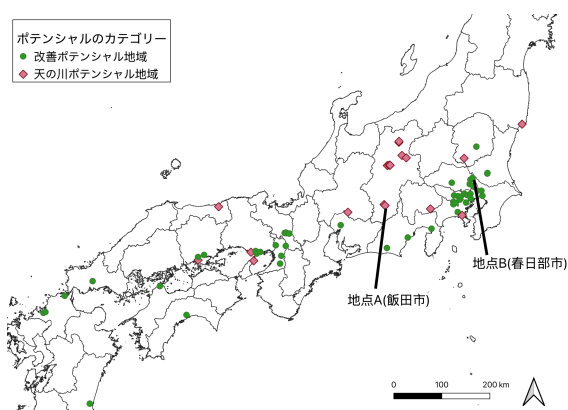


図-5 potential<sub>i</sub>が改善しうる地点の分布

### 4-2. 実現可能性のケーススタディ

「天の川ポテンシャル地域」において potential<sub>i</sub> を実現するためには、政策介入対象となる説明変数  $x_1, x_2, x_6, x_7$  を表 4 の一行目に示した平均値  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_6, \bar{x}_7$  まで改善する必要がある。先述した通りこれは各説明変数の値を観測した全観測地点の平均的な値にまで変動させることと解釈できる。なお、「交通用地面積( $x_7$ )」に対する変動は交通用地面積そのものではなく、交通関連の夜間光放射を全国平均レベルにまで変化させることを意味する。これらの値に近い都市を目安として例示したのが表 4 の二行目で、地方の中小都市がモデルケースとして当てはまる。ただし「農地面積( $x_6$ )」は 3 次メッシュ内の面積を表すローカルな変数であるため自治体単位でなくローカルな 3 次メッシュ単位で参照を行った。

「天の川ポテンシャル地域」と「改善ポテンシャル地域」においてこれらと同水準まで  $x_1, x_2, x_6, x_7$  を変化させる実現可能性の条件は以下のように設定する。

「周辺総光量( $x_1$ )」:  $x_1 < 4\bar{x}_1$

「PM2.5 濃度( $x_2$ )」:  $x_2 < \bar{x}_2$

「農地面積( $x_6$ )」:  $x_6 > \bar{x}_6$

「交通用地面積( $x_7$ )」:  $x_7 < 4\bar{x}_7$

「周辺総光量( $x_1$ )」に関して、Falchi et al. (2011)<sup>2)</sup> では夜空の明るさの 75% が照明器具由来であるとしているため、上方への光束を完全に遮断するように設計された照明を導入することで夜空の放射輝度を約 75% 削減することができると考えられる。「天の川ポテンシャル地域」や「改善ポテンシャル地域」が中小規模の地方都市や都市圏の郊外に立地しており、改良しなければならない光源の数が大都市ほど多くないことを踏まえると、周辺総光量が  $\bar{x}_1$  の 4 倍を超えない程度の地点であれば適切な照明設計を行うことによって  $x_1 = \bar{x}_1$  の水準にまで改善できる。

続いて「PM2.5 濃度( $x_2$ )」の条件は平均値  $\bar{x}_2$  を現状で超えていないこととする。これは「1 年平均値が 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下かつ 1 日平均値が 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 」という環境省の現行の環境基準<sup>2)</sup>に上乗せする形になるが、「天の川ポテンシャル地域」や「改善ポテンシャル地域」と類似する地方都市の岐阜市と同水準の大気環境を実現することと言い換えられ十分実現可能である。「農地面積( $x_6$ )」に関しては農の担い手不足や維持管理の問題も踏まえると農地面積の劇的な増加は見込めず、現状で  $x_6 > \bar{x}_6$  をすでに満たしていることを条件とするのが現実的である。「交通用地面積( $x_7$ )」は「周辺総光量( $x_1$ )」と同様に  $x_7 < 4\bar{x}_7$  を条件として設定する。<sup>3)</sup>

これらの条件と現状を比較するケーススタディとして「天の川ポテンシャル地域」の例に長野県飯田市内の地点 A、「改善ポテンシャル地域」の例に埼玉県春日部市内の地点 B を取り上げる。<sup>4)</sup> 両者の  $x_1, x_2, x_6, x_7$  の値を以下の表 4 の三、四行目に示す。これらの地点では「農地面積( $x_6$ )」は現状値がすでに平均値  $\bar{x}_6$  を上回っている。むしろ土地利用政策よりも夜間光の上空への放射を防ぐ政策に注力す

表-4 変動可能な説明変数の平均値とモデル地点の現状値比較

|                                      | 周辺総光量( $x_1$ )<br>[nW/cm <sup>2</sup> /sr] | PM2.5 濃度( $x_2$ )<br>[μg/m <sup>3</sup> ] | 農地面積( $x_6$ )<br>[km <sup>2</sup> ] | 交通用地面積( $x_7$ )<br>[km <sup>2</sup> ] |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 平均値 $\bar{x}_j$ ( $j = 1, 2, 6, 7$ ) | $2.6 \times 10^5$                          | 8.4                                       | 0.22                                | 0.16                                  |
| 類似自治体の例                              | 飯田市                                        | 岐阜市 <sup>28)</sup>                        | 富士吉田市平野部                            | —                                     |
| 地点Aの現状値(飯田市)                         | $3.3 \times 10^5$                          | 7.0                                       | 0.42                                | 0                                     |
| 地点Bの現状値(春日部市)                        | $9.7 \times 10^5$                          | 10.0                                      | 0.72                                | 0.03                                  |

ることで効果的に星空環境を改善できると見込まれる。

$x_7$ は交通関連の夜間光放射量の代理変数であるため、交通用地面積そのものを変動させるのではなく街路灯や道路広告、車両のヘッドライトなどの交通関連の夜間光放射量の削減を意味する。ゆえに平均値変化において「森林面積( $x_4$ )」「交通用地面積( $x_7$ )」は定数であるが、「農地面積( $x_6$ )」には平均値  $\bar{x}_6$  が代入される。なおこの変動に際しては各地点の全土地利用用途面積の合計は3次メッシュ単位で一定で、MGWR モデルに含まれていない他の土地利用も含めた制約条件が存在する。変動するモデル外変数として「建物用地面積( $b$ )」があり、これは回帰分析において多重共線性の問題で除外した変数であるが、制約条件より「農地面積( $x_6$ )」の増減に応じて変動する。具体的には、 $x_6$ を増加(減少)させると、建物用地面積が減少(増加)することになる。

先に示した地点A, Bは、土地利用に関して唯一変動可能である「農地面積( $x_6$ )」が現状ですでに平均値を上回っているため、土地利用面積の配分を変化させる必要がなく、従って建物用地面積に対する介入も必要ない。しかし地点によっては  $\text{potential}_i$  を実現するために農地面積を増加させなければならない可能性があり、その場合は先ほど示した制約条件によって建物用地面積の上限値も自動的に決定される。このような地点においては「周辺総光量( $x_1$ )」「PM2.5 濃度( $x_2$ )」「農地面積( $x_6$ )」「交通用地面積( $x_7$ )」に加えて「建物用地面積( $b$ )」の改善も行うことで平均値変化が実現する。

## 5. おわりに

星空の美しさは都市化によって失われていく一方であり、星空環境を保全・回復していくためには星空の美しさと都市環境の関係性を定量的に明らかにすることが重要である。本研究では、MGWR を用いて地域差を考慮しながら両者の関係性を統計的にモデリングし、自然環境に關係する説明変数が星空の美しさにポジティブな影響を与える一方で都市活動の活発さを表す説明変数はネガティブに作用することを示した。さらにこれらの影響の度合いに空間的な偏りがあり、人口や農地の存在が星空に与える影響に地域差があることも明らかになった。

こうした分析結果を踏まえて、人口を維持するという条件のもとで各種の都市環境を表す説明変数の一部を全国の平均的な値にまで変動させたときに、いくつかの地点では天の川が見える状態にまで星空環境が改善すると予測された。すなわち、これらの地点では本研究における MGWR

モデルに基づいて星空環境を改善させることができる可能性が示唆されたことになる。

今後の課題として、1 つ目に空間モデリングの統計的妥当性がある。本研究で用いた環境省の星空観測は全国の有志によって投稿された観測結果を取りまとめて公表しているため、観測データを概観すると星空の等級が高い長野県などでは投稿数が多く、大都市圏などのサンプルは少なくなっており、preferential sampling<sup>29)</sup>の影響でデータの収集に傾向が出てしまっている。本研究では星空環境が地域資源になりうる場所での改善を対象としており、全国規模での普遍性が高いシミュレーションは目的の範囲を超えるため、バイアスの補正を行わなかった。一方でバイアスを改善するためには今後は空間的、数値的双方の分布の観点でより網羅的で偏りのない観測データの収集が望まれる。

2 つ目には説明変数の定義の理論的根拠の拡充がある。例えば本研究では夜間光の伝播による広域的影響を観測地点から半径 100km 以内で単純に足し合わせているが、光の減衰を考慮した重み付けの関数を定義することでより厳密な設定が行える。このためには大気光学や天文学などの他分野領域の理論に関する理解が求められ、より学際的な研究が求められていくだろう。

3 つ目に発展可能性として、成長から well-being へと価値観が移行していく現代において本研究の成果は地域振興として星空環境を活用する際に客観的な意思決定を行う理論的な根拠になりうる。特に少子高齢化や過疎化が進行する地域では、人口減少により星空環境が改善して新たな地域資源を獲得できる可能性がある。星空の美しさの経済価値が明らかになれば地域の意思決定を後押しすることになるだろう。

## 【補注】

- (1)エアロゾルの光散乱の影響を表す物理量として一般的なものにエアロゾル光学的厚さ(AOD)があるが、説明変数としては既に環境基準に採用されており改善の取り組みの目標としてわかりやすいため、本研究では AOD ではなく PM2.5 濃度を用いることとする。
- (2)道路や鉄道に關連する夜間光排出源の交通用地面積あたりの密度は地域差があり、都会であるほど密で、山間部では疎になっていく。交通関連の夜間光が星空環境に及ぼす影響を表す代理変数として、交通用地面積(道路+鉄道用地)が妥当であるとする理由はこの性質があるためである。
- (3)本研究では交通関連の夜間光を周辺の総光量と同様に削減できるということを仮定している。この仮定には既往研究に基づく根拠はなく、街路灯や広告の他に通行車両のヘッドライトなど様々な交通関連の夜間光放射の要素を考慮できていない。この点につ

いては今後更なる検討が必要となる。

(4)これらの地点は、表-4 で示した変動可能な説明変数の平均値に近い値を持つ類似自治体の例として地方都市が該当したことを踏まえて、地方都市から選定した。加えて、地点 A については改善が比較的容易な山間部ではなく平野も含んだ地点であること、地点 B については大都市圏郊外で星空改善に重要な役割を占める農地が多い場所であることから選定した。

#### 【参考文献】

- 1) Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science advances*, 2(6), e1600377.
- 2) Falchi, F. (2011). Campaign of sky brightness and extinction measurements using a portable CCD camera. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412(1), 33-48.
- 3) Gallaway, T., Olsen, R. N., & Mitchell, D. M. (2010). The economics of global light pollution. *Ecological economics*, 69(3), 658-665.
- 4) Cao, M., Xu, T., & Yin, D. (2023). Understanding light pollution: Recent advances on its health threats and regulations. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 589-602.
- 5) Schirmer, A. E., Gallemler, C., Liu, T., Magle, S., DiNello, E., Ahmed, H., & Gilday, T. (2019). Mapping behaviorally relevant light pollution levels to improve urban habitat planning. *Scientific Reports*, 9(1), 11925.
- 6) Pauwels, J., Le Viol, I., Azzam, C., Valet, N., Julien, J. F., Bas, Y., ... & Kerbirou, C. (2019). Accounting for artificial light impact on bat activity for a biodiversity-friendly urban planning. *Landscape and Urban planning*, 183, 12-25.
- 7) Font, A. R. (2000). Mass tourism and the demand for protected natural areas: a travel cost approach. *Journal of environmental economics and management*, 39(1), 97-116.
- 8) 卯田卓矢, & 磯野巧. (2019). 観光資源としての星空の構築 沖縄県石垣島における星空ツーリズムの発展を通して. *地理空間*, 12(3), 277-294.
- 9) 宙ツーリズム推進協議会. “宙ツーリズムマーケティング調査”. 2019. [https://soratourism.com/assets/pdf/soratourism\\_press.pdf](https://soratourism.com/assets/pdf/soratourism_press.pdf), (最終閲覧日: 2026-01-04).
- 10) Cheon, S., & Kim, J. A. (2020). Quantifying the influence of urban sources on night light emissions. *Landscape and Urban Planning*, 204, 103936.
- 11) Kuechly, H. U., Kyba, C. C., Ruhtz, T., Lindemann, C., Wolter, C., Fischer, J., & Höcker, F. (2012). Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany. *Remote Sensing of Environment*, 126, 39-50.
- 12) Kocifaj, M., & Barentine, J. C. (2021). Air pollution mitigation can reduce the brightness of the night sky in and near cities. *Scientific reports*, 11(1), 14622.
- 13) Kocifaj, M. (2010). Modelling the spectral behaviour of night skylight close to artificial light sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403(4), 2105-2110.
- 14) Kocifaj, M., & Kómar, L. (2016). A role of aerosol particles in forming urban skyglow and skyglow from distant cities. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458(1), 438-448.
- 15) 環境省. “光害対策ガイドライン”. 2021. <https://www.env.go.jp/content/900517233.pdf>, (最終閲覧日: 2025-12-25).
- 16) 越智信彰. (2021). 自治体による屋外照明規制の現状調査-光害抑制の視点から. 東洋大学紀要 自然科学篇, 65, 1-10.
- 17) Fotheringham, A. S., Yang, W., & Kang, W. (2017). Multiscale geographically weighted regression (MGWR). *Annals of the American Association of Geographers*, 107(6), 1247-1265.
- 18) 環境省. “令和2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”. 環境省. 2021. <https://www.env.go.jp/press/108687.html>, (最終閲覧日: 2026-01-09).
- 19) Earth Observation Group. Viirs nighttime light. <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>. (最終閲覧日: 2026-01-09).
- 20) 国立環境研究所. “Venus 画像ファイル (過去分) | 環境gis | 環境展望台”. 国立環境研究所環境情報メディア. <https://tenbou.nies.go.jp/gis/realtime/venus/geotiff/PM25/2020/08/>. (最終閲覧日: 2026-01-11).
- 21) 国土交通省. “国土数値情報| 標高・傾斜度3 次メッシュデータ”. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-a.html>. (最終閲覧日: 2026-01-31).
- 22) 国土交通省. “国土数値情報| 土地利用3 次メッシュデータ”. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-a-2021.html>. (最終閲覧日: 2026-01-31).
- 23) 総務省統計局. “統計地理情報システムデータダウンロード | 政府統計の総合窓口”. <https://www.e-stat.go.jp/gis/>. (最終閲覧日: 2026-01-31).
- 24) 一般財団法人住宅・建築SDGs 推進センター. “自治体によるCASBEEの活用”. [https://www.ibecs.or.jp/CASBEE/CASBEE\\_outline/local\\_cas.html](https://www.ibecs.or.jp/CASBEE/CASBEE_outline/local_cas.html). (最終閲覧日: 2026-01-30).
- 25) Kyba, C. C., Tong, K. P., Bennie, J., Birriel, I., Birriel, J. J., Cool, A., ... & Gaston, K. J. (2015). Worldwide variations in artificial skyglow. *Scientific reports*, 5(1), 8409.
- 26) Cinzano, P., & Falchi, F. (2012). The propagation of light pollution in the atmosphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(4), 3337-3357.
- 27) 環境省. “微小粒子状物質による大気汚染に係る環境基準について”. 環境省. 2009. <https://www.env.go.jp/kijun/taiki4.html>, (最終閲覧日: 2026-02-01).
- 28) 国立環境研究所. “大気汚染常時監視データ | 環境展望台”. 国立環境研究所環境情報メディア. <https://tenbou.nies.go.jp/download/>. (最終閲覧日: 2026-01-31).
- 29) Diggle, P. J., Menezes, R., & Su, T. L. (2010). Geostatistical inference under preferential sampling. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 59(2), 191-232.