

# 太陽光電池発電施設の設置状況 ～自然生態系も考慮した立地解析～

Location of photovoltaic power generating facilities  
- Siting analysis considering natural ecosystems -

石濱史子<sup>\*1</sup>・Kim Ji Yoon<sup>\*2</sup>

## 1. はじめに

日本政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言している。この目標を達成するためには、エネルギー需給において再生可能エネルギーによる供給比率を現在より大幅に増加させる必要がある。第6次エネルギー基本計画<sup>1)</sup>の2030年度におけるエネルギー需給の野心的な見通しでは、国内の総供給量に占める再生可能エネルギーの比率を、現在の約20%から、36～38%にまで高めるとしており、中でも主力の1つとして期待される太陽光発電による供給を、14～16%とすることとしている。この供給率は2019年度時点での太陽光発電による供給率(6.7%)の2倍以上である。

気候変動緩和の観点では、このような太陽光発電による供給量の大幅増が欠かせない一方で、限られた国土において大規模な発電施設建設を行ってきた結果、必ずしも好適とはいえない広範な立地条件での施設建設が行われるようになり、社会的な問題も生じている。自然生態系への影響、土砂災害リスクとの関連性、景観上の問題など、様々な社会的な課題が指摘されてきた。自然生態系への影響としては、施設建設に伴う土地利用・土地被覆の改変により起こる、生息地の喪失や分断化が主要な影響と考えられている。地表植生の除去そのものによる生息地の喪失のほか、光環境や気温、降水量など微気候条件の変化も生息環境を大きく改変する可能性がある。このような影響を懸念し、日本生態学会も専門家向けガイドラインを出している<sup>2)</sup>。施設周辺部での土砂輸送や水文プロセスの変化は、自然環境だけでなく、災害リスクにも影響を与えうる。平成27年9月関東・東北豪雨の際には、鬼怒川の河畔砂丘を掘削して太陽光発電施設が建設されていた場所から溢

水が生じたとされている<sup>3)</sup>。景観に関しては、影響を懸念して発電施設建設を規制する条例を制定する地方公共団体も多く、例えば静岡県富士宮市の「富士山景観と再生可能エネルギー発電設備設置事業との調和に関する条例」、岩手県遠野市の「遠野市景観資源の保全と再生可能エネルギーの活用との調和に関する条例」などが挙げられる。

世界的にも、太陽光発電施設の立地適正化は注目されている課題である。筆者らが専門とする自然生態系への影響の観点では、Rehbein et al. 2020<sup>4)</sup>が、発電容量10MW以上の大規模な太陽光発電施設および風力発電施設のうち、約12%もの施設が自然保護地域内に建設されていることを指摘している。国際自然保護連合(IUCN)も、太陽光発電施設および風力発電施設による生物多様性への影響を懸念し、影響緩和のためのガイドライン<sup>5)</sup>を出版している。

今後の太陽光発電施設の導入拡大は、社会的な問題を起こさないような適切な立地での建設を誘導するような施策や、影響を緩和する技術・工法などにより、課題を解決しつつ進めていく必要がある。課題解決を効果的に進めるためには、まず、現状での太陽光発電施設の立地の特徴を理解することが欠かせない。

本稿では、現在の国内の太陽光発電施設の設置状況について著者らのグループで統計学的な解析を行った事例<sup>6)</sup>を紹介する。

## 2. 方法

本稿で紹介する解析は、既存の太陽光発電施設の分布データを統計学的モデルにより解析し、施設分布と関連性の高い立地条件を把握するアプローチを

\*1 国立環境研究所 生物多様性領域 主任研究員

\*2 国立群山大学校 生命科学科

取っている。

従来、太陽光発電施設の好適立地の検討には、再生可能エネルギーの存在量や利用性に基づいて算出するポテンシャル値がよく用いられてきた。例えば、世界規模で算出されたものには、DPI (Developmental Potential Index) がある<sup>7)</sup>。国内での代表的な公表値である、環境省の再生可能エネルギー情報提供システム (REPOS)<sup>8)</sup> で提供している導入ポテンシャルは、全再生可能エネルギー量に、技術的な利用可能性や法令・土地用途等の制約、事業性等を考慮して算出したものである。REPOSの導入ポテンシャルでは、利用性等の観点から急傾斜地や林地が算出対象外とされている。

しかし、現実に建設されている太陽光発電施設は、導入ポテンシャルの算出の際には除外されるような好ましくない場所、例えば土砂災害リスクの観点でも自然環境保全の観点でも懸念される急傾斜の林地などにも建設されていることがある。また、ポテンシャル値の算出で用いている利用性・事業性は、比較的単純な仮定に基づいているため、経済性やアクセスのしやすさ、規制条件など、諸要因が複合して形成された現実のパターンとは一致しないことは容易に想定される。実際、DPIは現実の太陽光発電施設の分布との一致精度が低い<sup>9)</sup>。

そこで、本稿で紹介する解析では、既存施設分布データに基づき、統計的に立地条件を解析することにより、土地利用、自然条件、地形、人口や地価等の社会的条件や自然保護区、土砂災害危険箇所等の保全や安全配慮事項に関わる立地条件について、各条件の影響を定量的に評価する。このことにより、より現実的な施設立地条件を把握することが可能となる。

この統計的な立地解析を行う際、施設規模の違いに注目し、大規模施設 (施設容量が10MW以上) と中規模施設 (0.5MW-10MW) に分けて解析を行った。規模を分けて解析したのは、従来の立地に関する研究は多くが大規模施設について行われていること、施設規模によって国の環境アセスメントにおける扱いが異なること、規模によって建設可能な立地が異なるであると想定されるからである。

## 2.1 本解析に用いたデータ

太陽光発電施設の分布データは、2020年時点で登録されている、0.5MW以上の施設容量をもつ国内および韓国の施設の範囲を地図化した<sup>6)</sup>。国内の施設の位置情報は、Electrical Japan (<http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/energy/>)

([electrical-japan/](http://electrical-japan/)) の点情報をもとに、衛星画像 (Google Maps, Planet Explorer, Planet Labs, San Francisco, CA, USA) 上で施設全体の範囲を特定し、デジタル化した。発電容量が10MW以上の施設を大規模施設、それより規模が小さいものを中規模以下とした。

立地条件としては、気候条件として冬季降水量、地形条件として傾斜、標高、丘陵陰影指数、社会的条件として地価、道路密度、人口密度、土地利用、災害に関する条件として、土砂災害危険箇所と河川近接度、自然環境の保全に関する条件として、保護地域であるかどうかを考慮した。冬季降水量はAmeDASから取得した1981-2000年の12-2月の平均値、地形は国土地理院と国土交通省のデジタル標高モデル (DEM)<sup>10)</sup> から、QGISのラスターツールを用いて丘陵陰影指数、平均標高、傾斜を算出した。土砂災害危険箇所であるかどうか (2値)、人口密度、道路密度、地価は国交数値情報<sup>11)</sup> から取得した。土地被覆については、JAXAが提供する衛星画像に基づく高解像度土地利用土地被覆図<sup>12)</sup> と環境省の植生図に基づく土地利用データ<sup>13)</sup> から取得しカテゴリ変数として解析に含めた。洪水リスクの指標として、主要河道<sup>14)</sup> からのユークリッド距離を用いて河川近接度を算出した。最後に、国際保護地域データベース (WDPA)<sup>15)</sup> から取得したデータにもとづき、保護地域として指定されているかどうかを考慮した。WDPAの定義による保護地域には、国立公園、国定公園、国指定鳥獣保護区、都道府県指定鳥獣保護区、保護水面、生息地等保護区、厳正自然環境保全地域、ラムサール条約指定地、都道府県立自然公園、都道府県自然環境保全地域、緑の回廊、共同漁業権区域、沿岸水産資源開発区域、指定海域、UNESCOエコパーク、UNESCO世界遺産、世界自然遺産が含まれる。

## 2.2 統計解析

本解析では、生態系分野で近年、急速に発達した統計解析手法である、生物種分布推定モデルを太陽光発電施設の分布に応用した。

生物種分布モデルは、様々なアルゴリズムの統計モデルを用いて、環境条件と生物種の分布との関係を解析する手法である。一般化線形モデルや一般化加法モデルなどの、古典的な回帰モデルも用いられるほか、ランダムフォレスト、ブースティッド回帰木などの、機械学習モデルも用いられる。

特に近年多用されているのが、Maxent<sup>16)</sup> という機械学習モデルで、これは統計学的には、ポアソン

点過程モデルにL1正則化を加えたモデルであり、在のみデータと呼ばれる、対象生物種の不在情報がないデータに適した統計学的性質を持っていることが大きな特徴である<sup>17)</sup>。また、Maxentは、他の統計モデルに比して、分布推定の精度が最も高い手法の一つである<sup>18)</sup>。

Maxentによる分布推定解析は、大規模施設と中規模以下の施設を分けて行った。施設分布が空間的に偏っている場合、統計解析上の問題を生じることが知られているため<sup>19)</sup>、各太陽光発電施設のセントロイドを取り、半径500mに複数の施設が存在する場合は空間的に間引きした。MAXENTモデルの関数タイプ(feature class)は、線形、二次、およびヒンジを用いた。モデルの精度を、中規模施設のモデルについては5分割クロスバリデーション、大規模太陽光発電モデルについては3分割クロスバリデーションで評価した。最適な正則化乗数は、モデルの精度指標であるAUCおよびAICcに基づいて、最適な値を選択した。解析は統計ソフトウェア

R (R 3.6.1)<sup>20)</sup>のspThinパッケージにより<sup>21)</sup>地点の間引きを、ENMeval<sup>22)</sup>パッケージによりMaxentモデルの最適化および予測を行った。

### 3. 結果

国内でデータ化した施設総数は8,725件であり、そのうち、大規模施設が259件、中規模施設が8,466件であった。面積にして合計229,211 km<sup>2</sup>(日本の国土の0.079%)、そのうちの66.36%が中規模施設であった。

統計解析の結果明らかになった国内の太陽光発電施設の立地の特徴としては、まず、中規模・大規模いずれの規模の施設も、気象・地形や土地利用・社会的条件などの、発電効率や施設建設上の利便性など、経済性に関わる要因の影響が強く、土砂災害危険箇所、河川近接度、保護地域などの安全性や自然保護への配慮に関する要因の効果はごくわずかしかない(図1)。

地形条件としては、大規模施設は傾斜、中規模施設は丘陵陰影指数(日当たり)の効果が大きい。大規模施設はより安定的な地形条件を、中規模施設は発電効率を重視した立地となっていると言える。冬季降水量はいずれの規模でも中程度の影響がある。

社会的条件については、いずれの規模でも、土地被覆と人口の影響が大きい。人口に対する応答は、中規模施設と大規模施設で異なり、大規模施設は人口密度が高いほど建設確率が低下するが(図2(a))、小規模施設は中程度の人口密度で最も建設確率が高い。中規模施設は、大規模施設に比して、より人口密度の高い地域に多く分布しているといえる。これは、需要地への供給のしやすさと土地取得のしやすさとのバランスによるものと考えられる。大規模施設は、土地取得の困難さがより大きく影響すると考えられ、土地被覆の影響が中規模施設より大きくなっている。

土地被覆のうち、特に二次草原、自然裸地、人口裸地での建設確率が高い傾向は、いずれの規模の発電施設でも共通している(図3)。大規模施設は特にこれらの土地利用に集中する傾向が顕著であり、そのことが土地被覆の効果の大きさに現れている(図1)。中規模施設は大規模施設より幅広い土地被覆において建設されており、農耕地(田、畑地)や二次林・人工林においても高い確率で建設されている。二次草原や農耕地、二次林は典型的な里地環境である。人口減少に伴う里地の管理放棄が生物多様性の第2の危機として生物多様性国家戦略に挙げら

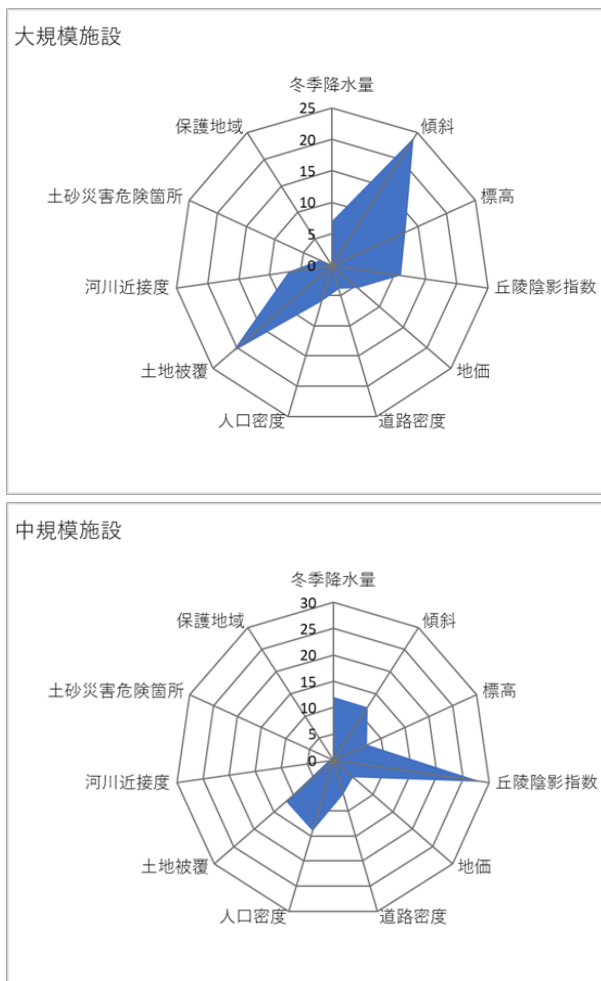


図1 太陽光発電施設の分布に対する各要因の寄与率 (Kim et al. 2021 より改変)



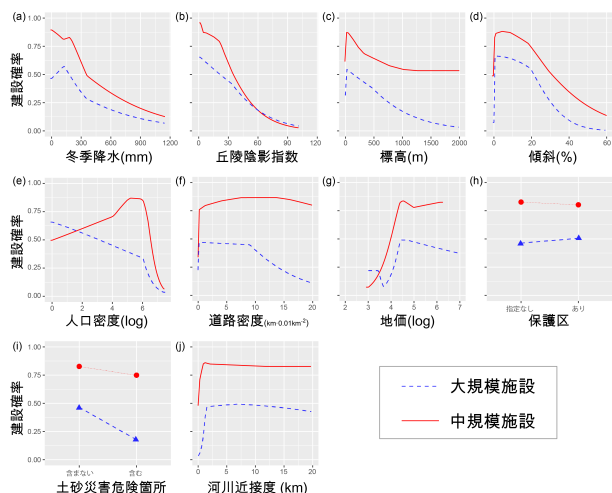


図2 各要因に対する太陽光発電施設の建設確率の応答関数 (Kim et al. 2021 より改変)

れているが、太陽光発電施設建設による開発影響が追い打ちをかけている状況とも言える。さらに、保護地域であるかどうかは建設確率にほとんど影響しておらず (図1)、多くの施設が保護地域内にも建設されている (図4, 5)。その総件数は1,027件にものぼり、特に中規模施設の件数が多い。現状での太陽光発電施設の立地は、残念ながら自然環境の保全にはあまり配慮されていないと言えるだろう。法令による規制の観点では、例えば国立、国定公園、都道府県立自然公園の特別保護地区、特別地域では工作物の建設に許可申請が必要であるものの、普通地域では届出が一定規模以上のものに課されているのみであるなど、保護地域であっても開発が強く規制されていない区域も多いため、十分な抑止力となっていないと考えられる。建設時の環境アセスメントに関して、環境影響評価法によるアセスメントの対象は、第一種事業が4万kW以上、第二種事業3万kW以上と大規模なものに限られており、今回の分析での中規模施設は多くが対象外であり、より自然環境への配慮がなされにくいと言える。地方公共団体の条例は、より規模の小さいものを規制していることもあるが、景観重視であることが多い。

災害に関する配慮についても、河川近接度および土砂災害危険箇所であるかどうかは、建設確率にほとんど影響しておらず、少なくとも現在までに建設された太陽光発電施設の立地は、水害や土砂災害に関しても配慮があまりされていないと言える。河川近接度のみが大規模施設で中程度の影響があり (図1)、極端に河川に近い立地では建設されにくい (図2)。土砂災害危険箇所については、大規模施設の場合にわずかに建設確率が低下する傾向がみられるの

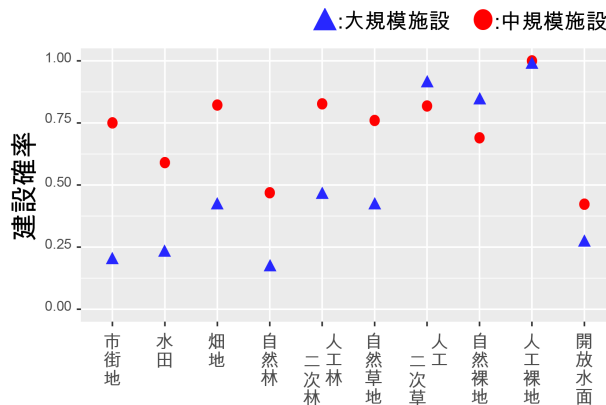


図3 土地被覆ごとの太陽光発電施設の建設確率 (Kim et al. 2021 より改変)

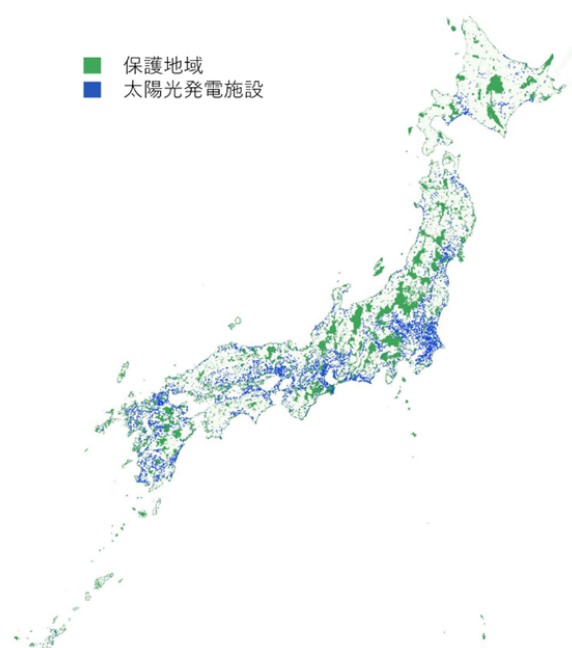


図4 保護地域と太陽光発電施設の分布

みである。地図上での分布パターンを見てみると、山裾の地域で土砂災害危険箇所と発電施設の分布とが重なっているケースが多いことが見て取れる (図6)。

#### 4. 考察

統計的な立地解析により、発電施設規模ごとの立地特性、特に影響を大きく受ける生態系や、防災上の課題を把握することができた。土砂災害に関しては、改正地球温暖化対策推進法 (令和4年4月施行) において努力義務となった、地方公共団体の実行計画での再エネ建設の促進区域の設定に際しては、急傾斜地崩壊危険区域等が考慮が必要な区域とされるようになったが、十分な配慮内容となっているかどうか今後も注視が必要であろう。

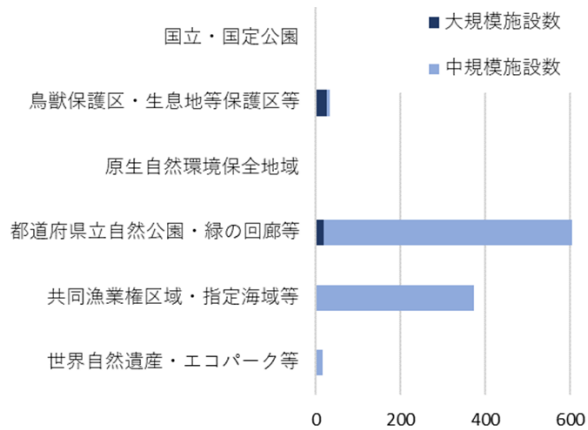


図5 各保護地域に建設された太陽光発電施設の件数 (Kim et al. 2021 に基づき作成)

自然環境保全の観点では、典型的な里地生態系が影響を受けやすいことが明らかになった。農地での規制緩和や保護区であっても規制のかからない範囲などが課題となりうる。

累積影響という観点では、合計面積の大きさから、中規模施設は大規模施設以上の影響を及ぼしている。個別事業ごとに行われる環境アセスメントでは、累積影響のコントロールは難しく、より早期に建設立地をコントロールする、戦略アセスメントによるゾーニングが有効である。上記の改正温暖化対策法での促進区域の設定は、このゾーニングに相当し、法アセスの対象外の規模の施設立地を適切にコントロールするための重要な政策の1つとなりうるだろう。今回の解析で得られた、発電施設の立地解析の結果は、このようなゾーニングを適切に行うための参考情報としても有用と考えられる。

また、地方公共団体によっては、法アセスより規模の小さい太陽光発電施設の建設を規制する条例を制定している場合もある。今後は、地方公共団体ごとの規制内容と発電施設立地との関係などを解析することにより、規制の効果を検証することで、より効果的な施策を明らかにすることも必要と考えられる。今回収集した発電施設の位置情報は、このような解析にも活用することが可能だろう。

さらに、本解析で構築した統計モデルは、将来の土地利用や人口等の条件を与えれば、将来の太陽光発電施設の建設確率を推定することにも応用可能である。今後、将来シナリオに基づく建設確率推定を行うことで、将来の影響予測などの研究も可能と考えられる。このような発展的な研究により、立地解析の成果が、今後の太陽光発電施設の立地適性化に貢献することを期待する。

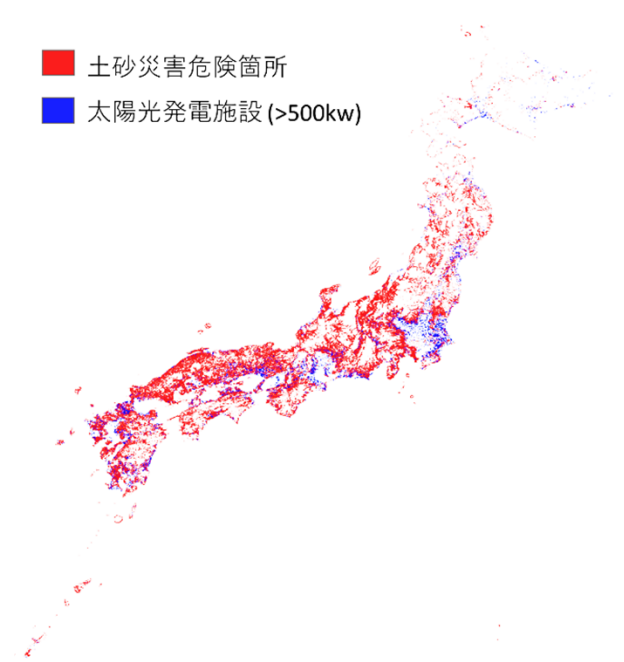


図6 土砂災害危険箇所（国土数値情報）と太陽光発電施設の分布

#### 参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁, 第6次エネルギー基本計画 (accessed Aug. 22 2022), [https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/)
- 2) 日本生態学会 再生可能エネルギータスクフォース, 再生可能エネルギーの推進と生態系・生物多様性保全に関するガイドライン(第1版) (2022) [http://www.esj.ne.jp/esj/message/no0709\\_Ver1.pdf](http://www.esj.ne.jp/esj/message/no0709_Ver1.pdf)
- 3) 応用生態工学会会長特命鬼怒川調査団 平成27年9月関東・東北豪雨鬼怒川災害調査報告書, (2016), [https://www.ecesj.com/contents/guidance/report/2017\\_Kinugawa\\_Disaster\\_Report.pdf](https://www.ecesj.com/contents/guidance/report/2017_Kinugawa_Disaster_Report.pdf)
- 4) J. A. Rehbein, J. E. M. Watson, J. L. Lane, L. J. Sonter, O. Venter, S. C. Atkinson, J. R. Allan, Renewable energy development threatens many globally important biodiversity areas, *Global Change Biology*, **26** (5), 3040–3051 (2020).
- 5) IUCN, Mitigating biodiversity impacts associated with solar and wind energy development (accessed Aug. 22 2022), <https://portals.iucn.org/library/node/49283>
- 6) J. Y. Kim, D. Koide, F. Ishihama, T. Kadoya, J.

- Nishihiro, Current site planning of medium to large solar power systems accelerates the loss of the remaining semi-natural and agricultural habitats. *Science of the Total Environment*, **779**, 146475, (2021).
- 7) J. R. Oakleaf, C. M. Kennedy, S. Baruch-Mordo, J. S. Gerber, P. C. West, J. A. Johnson, J. Kiesecker, Mapping global development potential for renewable energy, fossil fuels, mining and agriculture sectors. *Scientific Data* **6**, 101 (2019).
  - 8) 環境省 再生可能エネルギー情報提供システム (accessed Aug. 22 2022), <https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/>
  - 9) S. Dunnet, R. A. Holland, G. Taylor, Predicted wind and solar energy expansion has minimal overlap with multiple conservation priorities across global regions, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119** (6), e2104764119 (2022).
  - 10) 国土地理院 基盤地図情報ダウンロードサービス (accessed Aug. 22 2022), <https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab = dem>
  - 11) 国土交通省国土数値情報ダウンロードサイト (accessed Aug. 22 2022), <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
  - 12) Hashimoto, S., Tadono, T., Onosato, M., Hori, M., Shiomi, K., A new method to derive precise land-use and land-cover maps using multi-temporal optical data. *J. Remote Sens. (Japan)*. **34** (2), 102-112, (2014). <https://doi.org/10.11440/rssj.34.102>.
  - 13) M. Ogawa, A. Takenaka, T. Kadoya, F. Ishihama, H. Yamano, M. Akasaka, Land-use classification and mapping at a whole scale of Japan based on a national vegetation map. *Japanese Journal of Conservation Ecology* **18**, 69-76, (2013).
  - 14) 国土地理院 基盤地図情報ダウンロードサービス 河川データ (accessed Aug. 22 2022), <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-W05.html>
  - 15) UNEP-WCMC and IUCN, Protected Planet, The World Database on Protected Areas (WDPA) (accessed Aug. 22 2022), [www.protectedplanet.net/en/thematic-areas/wdpa?tab = WDPA](https://www.protectedplanet.net/en/thematic-areas/wdpa?tab = WDPA)
  - 16) S. J. Phillips R. P., Anderson, M. Dudik, R. E. Schapire, M. E. Blair, Opening the black box : an open-source release of Maxent. *Ecography* **40** (7), 887-893, (2017).
  - 17) I.W. Renner, D.I. Warton, Equivalence of MAXENT and Poisson point process models for species distribution modeling in ecology. *Biometrics* **69** (1), 274-281 (2013).
  - 18) J. Elith, C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudik, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L.G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, N. E. Zimmermann, Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* **29** (2), 129-151, (2006).
  - 19) C. F. Dormann, J. M. McPherson, M. B. Araújo, R. Bivand, J. Bolliger, G. Carl, R. G. Davies, A. Hirzel, W. Jetz, W. D. Kissling, I. Kühn, R. Ohlemüller, P. R. Peres-Neto, B. Reineking, B. Schröder, F. M. Schurr, R. Wilson, Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data : a review. *Ecography*, **30**, 609-628, (2007).
  - 20) R Core Team, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, R : A language and environment for statistical computing. R, (2020).
  - 21) M. E. Aiello - Lammens, R.A. Boria, A. Radosavljevic, B. Vilela, R.P. Anderson, spThin : an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography* **38** (5), 541-545, (2015).
  - 22) R. Muscarella, P. J. Galante, M. Soley-Guardia, R. A. Boria, J. M. Kass, M. Uriarte, R. P. Anderson, ENMeval : An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution*, **5**, 1198-1205, (2014)

## 著者略歴



石濱史子（イシハマ フミコ）

2004年3月東京大学大学院総合文化研究科博士課程修了，2004年4月より日本学術振興会特別研究員PD（東京大学農学生命科学研究科 保全生態学研究室），2005年4月より現職。植物生態学・保全生態学・保全遺伝学を専門とする。



Kim Ji Yoon（キム ジ ユン）

2016年2月 釜山大学校生命科学学科博士課程修了，同年3月より National Research Foundation of Korea にてポスドク研究員，2017年10月より東邦大学にて日本学術振興会海外特別研究員PD，2019年4月より国立研究開発法人国立環境研究所 特別研究員，2020年より現職。生態学・湖沼学を専門とする。