事例研究 Case Study

景観生態学的アプローチにおいて都市化の指標として用いられる人口密度と都市的土地利用の関係とその地域差

斎藤 昌幸^{1)*}・土屋 一彬²⁾・倉島 治³⁾・伊藤 元己³⁾

1) 山形大学農学部 〒997-8555 山形県鶴岡市若葉町 1-23

2) 東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

3) 東京大学大学院総合文化研究科 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

Masayuki U. SAITO^{1)*}, Kazuaki TSUCHIYA²⁾, Osamu KURASHIMA³⁾ and Motomi ITO³⁾: Relationship between human population density and urban land use as an indicator of urbanization in landscape ecological approach and its regional differences in Japan. *Ecol. Civil Eng.* 20(2), 205-212, 2018

1) Faculty of Agriculture, Yamagata University, 1-23 Wakaba-machi, Tsuruoka-shi, Yamagata 997-8555, Japan

2) Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

3) Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

Abstract: We analyzed whether the relationship between population density and urban land use rate differs depending on the region by the third mesh unit. When calculating the number of urban meshes based on population density and land use criteria, the number of urban meshes based on population density criteria was slightly larger than the number based on criteria of land use in many prefectures. However, in Hokkaido, there was a tendency that the number of urban mesh is small with criteria based on population density. Pearson's correlation coefficients between population density and urban land use rate were calculated for each prefecture, and as a result, a high value of 0.82 on average was obtained, but relatively low values of around 0.6 were obtained in Hokkaido and Iwate prefecture. We analyzed whether these differences influence the prediction model of the number of woody plants in Kanto district and Hokkaido. Population density was estimated as a significant variable in the prediction model of Kanto district, but in the Hokkaido the opposite result to the Kanto model was obtained. When population density and urban land use rate are used as an index of urbanization, it will be necessary to recognize that the relationship has regional differences.

Key words: landscape, population density, regional difference, urban, land use

はじめに

都市化は生態系変化を駆動する要因として認識されている (McKinney 2002; 土屋ほか 2013). 景観生態学のような広域スケールを対象として生物の分布や生態系に

対する影響を明らかにする研究アプローチにおいては、都市化を示す指標は重用される要因のひとつである (McDonnell & Hahs 2011). このとき、都市化の程度を定量化するための簡易的な指標には、人口密度や都市的土地利用割合がしばしば用いられる (例えば, Saito & Koike 2013; Saito et al. 2016).

これらの指標は都市域を簡易的に定義する際にもよく

2017 年 8 月 28 日受付, 2017 年 12 月 5 日受理

*e-mail: saito.ume@gmail.com

用いられており、そのためにさまざまな基準値が使用されている（例えば、McIntyre et al. 2000; MacGregor-Fors 2011）。アメリカの国勢調査では、ひとつの地域とする対象範囲が明示されていないものの、少なくとも2500人以上の人口を有する地域（あるいは620人/km²の地域）を都市域であるとしている（McIntyre et al. 2000; <https://www.census.gov/population/censusdata/urdef.txt>）。また、Marzluff (2001) では、建物の占有率が>50%、建物密度が>10個/ha、住民の密度が>10人/haの地域を都市と定義している。このように、研究者やテーマごとに都市域の定義が異なる場合がある。異なる基準を用いて都市域と定義し、それらを用いて都市における生態学的な現象を説明することは、都市化の生態系への影響についての理解を困難にする要因のひとつとなっている（MacGregor-Fors 2011）。例えば、都市域の人口密度基準として日本で使われることのある人口集中地区の4000人/km²は、上記のアメリカの620人/km²と著しく異なる。そのため、同一指標を用いる場合でも、基準の違いによって都市と判断される地域の範囲がどれくらい異なるか把握する必要がある。

都市域を定義する際によく用いられる人口密度と都市的土地利用面積という指標は一般的に相関すると考えられる。しかし、アジア、北アメリカ、ヨーロッパの間で都市景観の特徴は異なることが指摘されており、とくにアジアでは人工構造物が密集した住宅地などの景観パターンが多いことが示されている（Huang et al. 2007）。このとき、人口構造物の密集は、人口密度と都市的土地利用面積の相関関係を崩すわけではないが、都市部と非都市部で人口密度が極端に異なるなど、単純な線形では表現できない関係が生じることが予想される。人口と土地利用パターンの関係が地域によって異なる場合、人口密度と都市的土地利用のどちらを指標として用いるかによって解析結果が異なる可能性がある。

本研究では、これら2つの指標をさまざまな基準で用いた場合に、都市と判断される範囲にどの程度違いが生じるか明らかにする。そして、人口密度と都市的土地利用の関係が地域によって異なるのかどうかを明らかにし、これらの指標の違いが生物多様性評価の影響に及ぼす可能性があるのかどうかについて議論する。

方 法

データセット

本研究では、解析対象範囲を日本全域とし、空間解像

度は3次メッシュ（約1km四方）を使用した。

人口密度のデータを得るために、国勢調査の結果を利用した。国勢調査は総務省統計局がおこなっている調査で、日本に住んでいるすべての人と世帯を対象にした統計調査である。本研究では、3次メッシュごとに集計された2005年の人口総数を使用した。この総数を3次メッシュごとの面積（km²）で除することで、人口密度（人/km²）を算出した。この人口データはe-Stat（<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do>, 2017年2月26日確認）からダウンロードした。

都市的土地利用の抽出には、国土交通省国土政策局によって整備されている国土数値情報土地利用細分メッシュデータ（<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>, 2017年2月26日確認）の2006年のデータを使用した。このデータは3次メッシュ1/10細分区画（約100m四方）で用意された土地利用データである。当該年のデータは、1/25000地形図を背景基図とし、衛星画像（ALOSなど）を用いて作成されたものである。このデータにおける土地利用分類の中から、建物用地、幹線交通用地およびその他の用地と定義されている土地利用を都市的土地利用とした。3次メッシュ内に含まれる都市的土地利用に定義された細分区画数の割合を求めることで、都市的土地利用割合を算出した。なお、細分メッシュは3次メッシュを100個に分割したものであることから、都市的土地利用割合は都市的土地利用と分類された細分区画数を100で除したものである。

基準の違いによる都市メッシュ数

人口密度と都市的土地利用割合を指標として各3次メッシュが都市であるか否かを分類した場合に、それぞれの都市範囲がどの程度異なるのか解析するために、都市として定義するための基準値が整理・提案されているMcIntyre et al. (2000) および MacGregor-Fors (2011) から、それぞれ3つの基準値を抽出し、解析に使用した。人口密度ベースの基準には、1600人/km²、1000/km²、620人/km²を用いた。また、日本では人口集中地区の定義のひとつに4000人/km²が用いられていることから（<http://www.stat.go.jp/data/chiri/1-1.htm>, 2017年4月14日確認）、この値も参考値として一部の解析に使用した。土地利用ベースの都市的土地利用割合を用いた基準には、≥67%、≥50%、≥34%を用いた。MacGregor-Fors (2011) において、この都市的土地利用割合は、建物面積率で表され、最大の都市範囲を示す≥34%は適度に都市化された地域と高度に都市化された地域の両方を意味し、最小の都市範囲を示す≥67%は高度に都市化さ

れた地域のみを意味する。基準値ごとに都市メッシュ数を集計し、日本においてどれくらいの3次メッシュが都市として分類されるのかを比較した。さらに、人口密度ベースの都市メッシュ数と土地利用ベースの都市メッシュ数の関係について、都道府県ごとに比較をおこなった。**都市化指標の違いが生物多様性評価に与える影響**

都市化指標として人口密度と都市的土地利用割合を生物多様性評価などに用いる際に、両者の相関係数が高ければどちらを用いても結果に大きな影響が生じないと考えられるが、相関が小さい場合には結果に影響を及ぼすかもしれない。そこで、都道府県ごとに人口密度と都市的土地利用割合のピアソンの相関係数を求め、地域によってその値に差が見られるか検討した。解析には、R3.2.1 (R Core Team 2015) における `cor` 関数を用いた。

さらに、人口密度と都市的土地利用割合という指標の違いが生物多様性評価に影響を及ぼすのかについて分析をおこなった。生物多様性の事例として、環境省第6・7回自然環境保全基礎調査において2000年から2012年にかけて実施された植生調査で得られた木本種データを用いた。この調査では多くの地点で植生調査が実施されており、広域を対象として解析をおこなうためのデータベースとして充実している。本研究では木本を対象とした解析をおこなった。木本種の分布は気候要因や地形要因の影響を受けやすいことが指摘されているが (Saito et al. 2015), 開発行為などによる森林の分断化・小面積化によって木本の出現種数が減少するという事例も多く報告されている (例えば, Iida & Nakashizuka 1995; 服部・石田 2000; 石田ほか 2002)。また、地域としては都市メッシュ数およびピアソンの相関係数の分析によって他の都府県と異なる傾向が検出された北海道と、世界有数の大きさである東京首都圏を有する関東地方を対象とした。

関東地方および北海道のそれぞれに位置する1153地点、1490地点を対象に、木本種数を人口密度と都市的土地利用割合で説明したときに、どのような違いが生じるか評価した。このとき、都市化指標以外に木本種数に影響を与える要因として気候要因および地形要因も考慮した。気候要因として、年平均気温、夏季 (5月～9月) 降水量、冬季 (12月～3月) 降水量を用いた。これらの算出には、WorldClim v1.4 (Hijmans et al. 2005) を使用した。地形要因として、地形的湿潤指数 (TWI) と地形区分を用いた。TWIは斜面位置によって生じる土壤水分傾度を数量的に表した指数である (Moore et al. 1993; Sørensen et al. 2006)。地形区分については、若松

ほか (2005) における地形区分を低地、丘陵地、山地に再分類したものを使用した。

関東地方および北海道において、木本種数を前述の説明変数で説明するポアソン回帰分析をおこない、都市化指標の違いによって回帰係数の統計的有意性 (Wald 検定) および赤池情報量規準 (AIC) に基づくモデルの当てはまりが異なるのか比較した。また、植生調査面積が地点によって異なることから、オフセット項として $\ln$ (調査面積) を用いた。それぞれのポアソン回帰分析における説明変数間の多重共線性を考慮するために、事前に VIF 値を算出した。その結果、すべての VIF 値が5未満であったことから、本解析では多重共線性によって大きな問題は生じないと判断した。解析には、R3.2.1 (R Core Team 2015) における `glm` 関数および `vif` 関数を用いた。

結果と考察

人口密度および土地利用ベースの基準を用いて日本全体における都市メッシュ数を算出した結果、 >620 人/ km^2 のときに最も多くの3次メッシュ (33,761 メッシュ) が都市として抽出された (図1)。一方で、都市的土地利用割合 $\geq 67\%$ のときに都市と抽出された3次メッシュは最も少なく (12,463 メッシュ)、 >620 人/ km^2 と比較して2倍以上の差が見られた (図1)。また、人口集中地区に用いられる 4000 人/ km^2 は上述の $\geq 67\%$ よりもさらに少ない都市メッシュ数 (8,097 メッシュ) を示した (図2)。これらの結果は、用いる指標とその基準によって都市域の範囲が大きく異なることを示している。

都道府県ごとに最小都市メッシュ数および最大都市メッシュ数の範囲を示したところ (図2)、多くの都道府県で人口密度ベースの定義による都市メッシュ数のほうが土地利用ベースのメッシュ数よりやや多くなる傾向があったが、北海道においては人口密度ベースの定義では都市メッシュ数が少なかった (図2)。この結果は、北海道には人口密度の低い都市域が多く存在していることを示唆している。関東地方と北海道で人口密度ベースと土地利用ベースで都市域を定義した場合のギャップを空間的に明示したところ、関東地方では郊外部で人口密度によって定義できる都市域が広く存在することが示されたが、北海道ではそのような傾向はあまり見られず、むしろ土地利用による定義で都市域が広く分布することが示された (図3)。すなわち、人口密度あるいは土地利

図1 人口密度ベースと土地利用ベースの基準によって都市として定義された3次メッシュ数. 参考値 (*) として, 人口集中地区の定義に用いられている値 (4000 人 / km²) も示した.

図2 人口密度ベースと土地利用ベースの基準によって都市に定義された3次メッシュ数の範囲の都道府県ごとの比較.

図3 関東地方と北海道の一部を例とした、人口密度ベースと土地利用ベースの基準によって都市に定義される場所のギャップ。

用ベースの基準を用いて、広範囲で一律に都市を定義しようとする、地域差によって異なる傾向の都市景観パターンが含まれてしまうと考えられる。

都道府県ごとに人口密度と都市的土地利用割合のピアソンの相関係数を算出したところ、平均0.82という高い値が得られ、多くの都府県で0.8前後の値が示された

(図4)。しかし、北海道や岩手県では0.6前後という比較的低い値が得られた。つまり、日本全体としては人口密度と都市的土地利用割合の関係は高い相関を有するが、地域ごとに見た場合は必ずしも高い相関を有しない場合があり、地域差が生じていることが示された。

このような違いが木本種数に影響を及ぼすのか関東地

図4 各都道府県における人口密度と都市的土地利用割合の間のピアソンの相関係数.

方と北海道を事例に解析したところ、いずれの地域においても都市化指標によって結果が異なることが示された(表1). 関東地方においては、都市化指標として人口密度を使用したモデルでは、人口密度は有意な変数($p < 0.01$)として推定されたが、都市的土地利用割合を使用したモデルではこの都市的土地利用割合の有意性は検出

されなかった. また、AICについても人口密度を用いたモデルのほうが低い値が得られた($\Delta AIC = 7.3$). 北海道においては都市化指標のそちらの変数からも有意性が検出されたが、関東地方と反対の結果が得られており、人口密度を用いた場合($p < 0.05$)よりも、都市的土地利用割合を用いた方($p < 0.001$)がより高い有意水準を満たした. AICについても北海道では都市的土地利用割合を用いたほうが低い値が得られた($\Delta AIC = 13.7$). これらの結果は、都市化指標としてどの変数を用いるかによって結果の解釈が異なることを示している. 今回は広域における詳細なデータを利用する都合上、気候要因と地形要因の影響を受けやすい本種を対象に解析をおこなったため(Saito et al. 2015)、検出できた違いはあまり大きくないかもしれない. しかし、関東地方における結果では、どちらの変数を用いるかによって重要か重要でないかの判断が変わってしまう恐れがあることが示されたことから、都市化指標の選択には注意が必要であろう.

本研究の結果は、広域解析における人為的な駆動要因の考慮に対して示唆を与える. つまり、同じ指標を使っていたとしても、地域によって意味が異なる可能性があるということである. 広域を対象に解析をおこなう場合、北海道のような傾向の異なる地域が含まれる可能性を考慮して、人口密度と都市的土地利用のどちら(あるいは両方)を解析に用いるかよく検討する必要があるだろう. また、地域間で比較をおこなう際には結果の解釈に注意が必要である. 人口密度と都市的土地利用割合には高い相関があるものの、どちらを用いるかによって解析結果は異なる可能性が示された. 今回の解析では本種を用いたが、他の分類群でも違いが見られる可能性があることから、今後確認していくことが必要だろう.

本研究では比較的単純な人口密度および土地利用ベースの指標を比較したが、近年では、両者を統合するような指標の開発も進められている(McDonnell and Hahs 2008). 加えて、社会的要因と生態系の関係を解析する事例も増えてきており、例えば、世帯収入と植物の種多様性(Hope et al. 2003)や哺乳類の移入・絶滅プロセスの関係(Magle et al. 2016)などが指摘されている. 都市化の指標を用いて解析をおこなう際には、どのようなメカニズムを想定してその指標を用いるのか注意深く検討する必要があるだろう. 広域解析が容易に実施できるようになった今日において、人為的な影響として用いる駆動要因の意味を考えることはますます重要になると考えられる.

表1 関東地方と北海道における、都市化指標ごとにおこなったポアソン回帰分析の結果。***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, ns: 有意差なし

説明変数	関東地方（植生調査地点数：1490）				北海道（植生調査地点数：1153）			
	人口密度		都市的土地利用割合		人口密度		都市的土地利用割合	
	係数	有意性	係数	有意性	係数	有意性	係数	有意性
定数項	-3.98	***	-3.96	***	-4.07	***	-4.04	***
人口密度	-1.17×10^{-5}	**	—	—	9.37×10^{-5}	*	—	—
都市的土地利用割合	—	—	-6.18×10^{-2}	ns	—	—	4.77×10^{-1}	***
年平均気温	7.35×10^{-2}	***	7.24×10^{-2}	***	3.22×10^{-2}	***	2.85×10^{-2}	***
夏季降水量	9.62×10^{-4}	***	9.48×10^{-4}	***	7.39×10^{-4}	***	7.45×10^{-4}	***
冬季降水量	1.49×10^{-4}	ns	1.49×10^{-4}	ns	1.22×10^{-3}	***	1.20×10^{-3}	***
TWI	-3.79×10^{-2}	***	-3.71×10^{-2}	***	-6.59×10^{-3}	ns	-9.48×10^{-3}	ns
地形区分 - 低地	-6.33×10^{-2}	**	-6.67×10^{-2}	**	-4.76×10^{-2}	ns	-5.41×10^{-2}	ns
地形区分 - 山地	-6.52×10^{-3}	ns	-5.97×10^{-4}	ns	5.17×10^{-3}	ns	9.48×10^{-3}	ns
AIC	20049.4		20056.7		9896.4		9882.7	

謝 辞

環境省生物多様性センターには、第6・7回自然環境保全基礎調査における植生調査データの使用許可をいただいた。本研究の一部はJSPS 科研費 15J08830 および文部科学省大学発グリーンイノベーション創出事業グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス環境情報分野 (GRENE-ei)「生物多様性・生態情報の環境情報への統合化および統合情報を利用した生物多様性影響評価法開発」から資金援助を受けた。

摘 要

本研究では、人口密度と都市的土地利用割合の関係が都道府県によって異なるのかどうかを3次メッシュ単位で解析した。まず、既存の人口密度と土地利用による基準値を用いて都市メッシュ数を算出したところ、多くの都府県で都市的土地利用より人口密度による基準で都市メッシュ数がやや多くなる傾向にあったが、北海道では人口密度による基準値のほうで都市メッシュ数が少なかった。都道府県ごとに人口密度と都市的土地利用割合のピアソンの相関係数を算出したところ、平均0.82という高い値が得られたが、北海道や岩手県では0.6前後という比較的低い値が得られた。このような違いが本本種数の予測モデルに影響を及ぼすのか関東地方と北海道を事例に解析したところ、関東地方においては人口密度が有意な変数として推定されたが、北海道においては関東地方と反対の結果が得られた。都市化の指標として人口

密度や都市的土地利用割合を用いる際には、それぞれの指標には高い相関があるものの、その関係に地域差が存在することを認識する必要があるだろう。

引用文献

- 服部 保・石田弘明 (2000) 宮崎県中部における照葉樹林の樹林面積と種多様性、種組成の関係。日本生態学会誌 **50**: 221-234.
- Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, **25**: 1965-1-78.
- Hope D., Gries C., Zhu W., Fagan W.F., Redman C.L., Grimm N.B., Nelson A.L., Martin C., Kinzig A. (2003) Socioeconomics drive urban plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **100**: 8788-8792.
- Iida S., Nakashizuka T. (1995) Forest fragmentation and its effect on species diversity in sub-urban coppice forests in Japan. *Forest Ecology and Management* **73**: 197-210.
- 石田弘明・戸井可名子・武田義明・服部 保 (2002) 大阪府千里丘陵一帯に残存する孤立二次林の樹林面積と種多様性、種組成の関係。植生学会誌 **19**: 83-94.
- MacGregor-Fors I. (2011) Misconceptions or misunderstandings? on the standardization of basic terms and definitions in urban ecology. *Landscape and Urban Planning* **100**: 347-349.
- Magle S.B., Lehrer E.W., Fidino M. (2016) Urban mesopredator distribution: examining the relative effects of landscape and socioeconomic factors. *Animal Conservation* **19**: 163-175.
- Marzluff J.M., Bowman R., Donnelly R. (2001) A historical perspective on urban birdresearch: trends, terms, and approaches. In: *Avian Conservation and Ecology in an Urbanizing World* (eds. J.M. Marzluff, R. Bowman, R. Donnelly), pp. 1-17. KluwerAcademic, Boston.
- McDonnell M.J. & Hahs A.K. (2008) The use of gradient analysis studies in advancing our understanding of the ecology of

- urbanizing landscapes: current status and future directions. *Landscape Ecology* **23**: 1143–1155.
- McIntyre N.E., Knowles-Yáñez K., Hope D. (2000) Urban ecology as an interdisciplinary field: differences in the use of “urban” between the social and natural sciences. *Urban Ecosystems* **4**: 5–24.
- McKinney M.L. (2002) Urbanization, biodiversity, and conservation. *BioScience* **52**: 883–890.
- Moore I.D., Norton T.W., Williams J.E. (1993) Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes. *Journal of Hydrology*, **150**: 717–747.
- R Core Team. (2015) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- Saito M. & Koike F. (2013) Distribution of wild mammal assemblages along an urban-rural-forest landscape gradient in warm-temperate East Asia. *PLoS ONE* **8**: e65464.
- Saito M.U., Momose H., Inoue S., Kurashima O., Matsuda H. (2016) Range-expanding wildlife: modelling the distribution of large mammals in Japan, with management implications. *International Journal of Geographical Information Science* **30**: 20–35.
- Saito M.U., Kurashima O., Ito M. (2015) Disentangling the effects of environmental factors on the distribution of vascular plants in Japan: the importance of land use for common species on a macroscale. *Plant Ecology & Diversity*, **8**: 529–536.
- Sørensen R., Zinko U., Seibert J. (2006) On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, **10**: 101–112.
- 土屋一彬・斎藤昌幸・弘中 豊 (2013) 都市生態学序説：「まち」の社会生態プロセスを理解する. *日本生態学会誌* **63**: 179–192.