

動植物の移植・移設先の選定を目的とした 生物分布推定モデル3種の比較

大城 温¹・長谷川啓一¹・上野裕介²・井上隆司¹

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 道路交通研究部道路環境研究室
(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地) E-mail:do-kan@nilim.go.jp

²正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所防災・メンテナンス基盤研究センター緑化生態研究室
(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地) E-mail: u-ueno92ta@nilim.go.jp

道路事業において、希少な動植物が事業区域内に存在し回避することが困難な場合には、環境保全措置として移植や移設を行うことがある。本研究では、移植・移設に適した候補地を客観的・効率的に抽出する方法を開発することを目的に、分布推定モデルの活用可能性について検討した。そこで全国で多くの移植・移設が行われている植物（キキョウ）および両生類（ニホンアカガエル）を対象に、現地調査結果によって得た対象種の生息情報を基に、3種の分布推定モデル（一般化線型モデル：GLM、最大エントロピー法：MaxEnt、HSIモデル）を試行し、各モデルの推定結果を比較した。その結果、GLMとMaxEntは、ともに予測精度の高い推定結果を示し、得られた予測適地図もよく似ていた。一方でHSIモデルは、対象範囲全域が広く好適地と判定されてしまい、モデルだけでは適地を絞り込むことができなかった。

Key Words : species distribution model, transplantation, Generalized Linear Model, Maximum Entropy Method, Habitat Evaluation Procedure

1. はじめに

道路を新設する事業において、希少な動植物が事業区域内に存在し回避することが困難な場合には、環境保全措置として移植や移設を行うことがある。移植・移設先の選定にあたっては、移設先の生息環境を定量的に評価し、決定することが望ましい。しかしながら、移設候補地を客観的・効率的に抽出する方法は発展途上であり、現状の移植・移設先の検討においては、生育・生息地が定性的に似た環境を選定しているのが実状である。

近年、植生や地形といった環境情報から、対象種の生息環境の質や生息可能性を面的に予測・評価する分布推定モデル（別名：種の分布モデル、ハビタットモデル、生息適地モデル）に注目があつまっている。この分布推定モデルは、動植物種の分布情報と環境要因の関係を統計学や機械学習等の手法を用いて予測する。このため、事前に分布情報が得られない場所（分布情報の空白地）についても、種の生息可能性（ポテンシャル）を定量的に予測することができる¹⁾²⁾。中でも、統計解析の一種である一般化線型モデル（GLM）を用いた事例が多く、例えば、山形県内におけるクマタカ生息適地予測³⁾などがある。また機械学習モデルでは、近年、在データのみを

用いて分布推定が可能な最大エントロピー法(MaxEnt)⁴⁾を活用した事例が国内外で増えている（上野⁵⁾など）。しかし、移植・移設先選定を目的として、詳細スケールで分布推定モデルを活用した事例は見当たらない。

移植・移設先選定を目的に、何らかのモデルによる予測を行う場合、2つの要件を満たす必要がある。第1に、延長が8～10km以上にのぼる道路事業実施区域と同等の空間スケールを対象に、移植・移設先選定を行えること。第2に、事業での意思決定に用いる以上、信頼性を備えた予測であること（あるいは予測の信頼性を評価できること）。一方で、道路事業の環境影響評価においては、事業実施区域周辺の希少動植物の分布は、予め網羅的に調査されている。そのため、区域内の動植物の現地調査データが十分に存在することを前提に分布推定モデルを試行することができる。

そこで本研究では、動植物種の移植・移設先選定に、分布推定モデルが活用できるのか、その可能性と課題を探ることを目的とした。特に、統計解析モデル(GLM)と機械学習(MaxEnt)、加えて、開発事業等におけるハビタット評価手続き(HEP)⁶⁾において利用されるHSIモデルについて同一のデータを用いて試行し、予測精度、活用上の留意点について調べた。

2. 材料と方法

(1) 試行対象種および対象地域

試行する生物種は、道路事業において多くの移植・移設事例のある草本植物と両生類のうち、全国において移植・移設の実績があり、かつレッドリストに掲載されている種から、中国地方のキキョウ *Platycodon grandiflorus* と中部地方のニホンアカガエル *Rana japonica* を選定した。

試行に用いた種の分布情報は、道路事業の環境影響評価の中で取得された分布情報を用いた。これは、事業を実施する可能性のある区域および両側のおおよそ100-250m幅にわたって調査範囲を設け、調査範囲内に面的かつ網羅的に調査ルートを設定し、直接観察および採取により動植物の分布等を調査した結果である。キキョウは中国地方において平成19～20年度の春夏秋に各1回調査した結果であり、ニホンアカガエルは中部地方において平成19～20年度の春夏秋に各2回調査した結果である。

(2) 分布推定モデルの選定

既往研究を踏まえ、統計解析モデル、機械学習モデル、HEPから各1種を選定し、現地調査結果をもとに試行することとした。統計解析モデルとしてはGLMの1種であるロジスティック回帰分析を用い、機械学習モデルとしてMaxEnt、従来型のハビタット評価手続き(HEP)に用いるHSIモデルの3種を選定した。

なお解析には、MaxEntはフリーソフトの“MAXENT ver.3.3.3k”，GLMはフリーソフトの“R ver.3.1.2”を使用した。

(3) 解析に用いた空間スケール

a) 植物

空間スケールは、20mメッシュとした。これは、解析に使用した植生図の解像度が、最大20m程度であったためである。

b) 両生類

空間スケールは、50mメッシュとした。これは、既往の研究^{7,8)}から、樹林と水辺を行き来する樹林性両生類の行動圏が、小型サンショウウオ類については成体の生息場所から産卵場所までの移動距離が50m～100m程度、カエル類については50m～200mとされており、これを参照したためである。

(4) 分布推定モデルの構築と推定

a) キキョウ

目的変数には、MaxEntでは対象種の在データを、GLMには対象種の在・不在データを用いた。

在データとは、キキョウが確認された20mメッシュ16地点、不在データとは、実際に調査を行った踏査ルートのうち、生息が確認できなかった23,129メッシュとした。

説明変数とする環境データは、MaxEnt、GLMともに、各メッシュについて、4つの地形要因（標高、傾斜角度、傾斜方位（8方位）、湿性度指数 TWI）と7つの植生要因（林縁までの最短距離、20 mメッシュ内の常緑時広葉樹林、落葉広葉樹林、スギ・ヒノキ植林、乾性草本群落、湿性草本群落、水田の各面積割合）とした。

なお、これらMaxEntとGLMによる分布推定モデルは、実際の踏査ルートと重なるメッシュのみの情報（在、不在データ）から構築することとし、これにより得られたモデルを予測対象範囲（事業の実施可能性のある範囲）に適用した。また、ソフトウェアの設定は基本的にデフォルトを使用したが、MaxEntではオプションの1つであるクロスバリデーション（データをパラメータ推定用と評価用に分け、データセットを入れ替えながらモデル構築と精度の算出を繰り返す手法）を行うこととし、分割数は10とした。GLMでは、不在データ数は在データ数と同等、もしくは3倍～10倍以内が望ましいと考えられることから、不在メッシュからランダムに重複無しで100メッシュ（在メッシュの6.3倍程度）を抽出してモデルを構築することとした。これを10回繰り返し、10モデルについてメッシュ毎の生育確率の平均値を計算し、地図化することとした。

HSIモデルは、キキョウに関する既存のSIモデルがないため、日当たりの良い比較的乾燥した草地に生育する本種の一般的な生態を参考に、地形要因と植生データから算定可能な環境要因に着目し、以下の手順で構築した。まず日射量を左右する地形要因である斜面方位(SI1)は、南側方向のSI値を高くし、北側方向のSI値を低く設定した。また日射量を左右する植生の階層構造(SI2)は、草本群落のSI値を高く、耕作地のSI値を中程度、階層構造の発達した樹林地のSI値は低く設定した。その他の市街地や海岸植生等は0とした。傾斜角と集水面積から水の溜まりやすさの指標となる湿性度指数TWI(SI3)は、実際の生育箇所の状況を勘案し、やや乾燥した場所のSI値が最高となるような一山型の応答を仮定した。

上記の各SIモデルを、以下に示す乗法統合式(1)に代入し、メッシュ毎にHSI値を算出し、結果を地図化した。

$$HSI = (SI1 \times SI2 \times SI3)^{1/3} \quad (1)$$

b) ニホンアカガエル

目的変数には、前述のキキョウと同様に、MaxEntでは対象種の在データを、GLMには対象種の在・不在データを用いた。在データは、ニホンアカガエルが確認された50mメッシュ68地点、不在データは、実際に調査を行った踏査ルートのうち、生息が確認できなかった

3.207メッシュとした。

説明変数は、MaxEnt、GLMともに、各メッシュについて、4つの地形要因（標高、傾斜角度、傾斜方位（8方位）、湿性度指数 TWI）と5つの植生要因（森林と水田の境界線までの最短距離、50 mメッシュ内の森林、水田、乾性草本群落、湿性草本群落の各面積割合）とした。

なお、MaxEntとGLMにおける予測方法は、上述のキキョウの場合と同様とした。

HSIモデルは、ニホンアカガエルの生態及びSIモデルに関する既存の検討事例を参考に、繁殖期及び非繁殖期の植生及び両者の空間的位置関係に着目し、以下の手順で構築した。まず、ニホンアカガエルの繁殖場所(SI1)として、確認実績の高い水田のSI値を最高の1.0とし、開放水域や湿性群落等に段階的に低いSI値を設定、その他の植生はSI値を0とした。また非繁殖期には、繁殖場所周辺の草原や樹林に分散する特性(SI2)を持つことから、森林と草地にも段階的にSI値を設定し、自然裸地と市街地はSI値を0とした。さらに、ニホンアカガエルの生態的特性から、繁殖空間と非繁殖期の生息空間が近接していることが理想的な条件と考えられることから、森林までの距離(SI3)に近いほどSI値を高く、200m以上は0となるよう、漸減的にSI値を設定した(1.0~0)。

上記の各SIモデルを、以下に示す式(2)に代入し、メッシュ毎にHSIを算出し、結果を地図化した。

$$HSI = ((SI1 + SI2) / 2) \times SI3 \quad (2)$$

(5) 分布推定モデルの精度評価

分布推定モデルの精度の評価には、在・不在の正答率およびReceiver Operating Characteristic (ROC)曲線から得られるArea Under the Curve (AUC)を用いた。ここでいう「正答率」とは、全データに対して在／不在を正しく予測できた割合と定義し、これを精度評価指標の1つとした。

なお、モデルの予測値（生息確率）からメッシュ毎の在／不在を判定する閾値については、感度と特異度の和を最大化する値を、閾値として採用した。ここで、「感度」とは、実際の動植物の分布状況とモデルによる在／不在の予測結果を比較し、実際の在地点を在地点と正しく予測する確率であり、「特異度」とは、実際の不在地点を不在地点と正しく予測する確率である。

3. 分布推定モデルの試行結果

(1) キキョウ

a) MaxEnt

AUCは0.774、正答率は82.9%であり、まずまずの予測精度であった（表-1）。各説明変数の寄与率は、傾斜方位、林縁までの距離、傾斜角度の順に高かった（表-2）。

また応答曲線の傾向から、比較的乾燥した南側斜面の下部が生育適地として予測されており、キキョウの生態特性と整合していた。

b) GLM

得られた10モデルのAUCの平均値は0.90、正答率の平均値は79.3%であり、高い予測精度で示した（表-3）。AICが上位3位のモデルは、いずれも傾斜角度及びTWIの1次項は正の影響を、傾斜角度及びTWIの2次項及び林縁

表-1 MaxEntによる予測の混同行列（キキョウ）

実 測	予 測		正答率
	在	不在	
	在	不在	感 度 : 87.5%
	不在		特異度 : 82.9%
全体正答率			82.9%

※感度と特異度の和を最大化する閾値：0.3586

表-2 MaxEntの結果概要（キキョウ）

説明変数	寄与率
標高	0.8
傾斜角度*	13.3
傾斜方位*	37.8
湿性度指数 (TWI)	9.4
常緑広葉樹林の面積	7.7
落葉広葉樹林の面積	0.5
スギ・ヒノキ植林の面積	0.1
乾性草本群落の面積	0.9
湿性草本群落の面積	1.2
水田の面積	1.8
林縁までの距離*	26.3

*寄与率 10%以上

表-3 GLMの結果概要（キキョウ）

変数	AIC上位3モデル		
	Model 1 ±オッズ比	Model 2 ±オッズ比	Model 3 ±オッズ比
標高		+ 1.134	+ 1.090
標高 ²		+ 0.999	+ 0.999
傾斜角度	+ 3.823 *	+ 25.610 *	+ 3.206 *
傾斜角度 ²	- 0.961 *	- 0.915 *	- 0.969 *
傾斜方位			
南東	+ 8.793	+ 38.436	
南	+ 2.055	+ 20.045	
南西	+ 1.567	+ 10.237	
西	- 0.000	- 0.000	
北西	- 0.796	+ >100 *	
北	- 0.000	- 0.000	
北東	- 0.000	- 0.000	
平地	+ >100	+ >100	
東			
TWI	+ 19.95	+ 47.229	+ 11.235
TWI ²	- 0.637	- 0.55	- 0.709
落葉広葉樹林面積割合		+ 1.040	
常緑広葉樹林面積割合	+ 1.030	+ 1.054	
スギ・ヒノキ植林面積割合			
水田面積割合		+ 1.122	
乾性草本群落面積割合			
湿性草本群落面積割合	- 0.805		
林縁までの距離	- 0.953 *	- 0.951 *	- 0.968 *
AIC	65.4	67.7	68.1

※ AUC (平均値) : 0.90, 正答率 : 79.3%

* P<0.01, ** P<0.05 であることを示す

までの距離は負の影響を示した（表-3）．傾斜方位を見ると、南側斜面の選好性が高いことが示され（表-3），概ねMaxEntと同様の結果となった．

10モデルの予測値の平均を図化したところ、MaxEntと同様に南側斜面の下部が生育適地として選定され、適地がまとまって分布する結果となった（図-1）．

c) HSI

地図化の結果、SI値の設定時に高く評価することとした、南側斜面の山麓部、草地や樹園地・畑地が連続する場所が多い本調査地では、予測対象地全域で生息適地としての評価が高くなった（図-1）．この評価の高い場所には、実際に生息が確認された地点が含まれていたものの、生息が確認されなかった地点も多く含まれていた．なお、SI値の設定時にいずれの値を与えるかによって予測結果は大きく変わり、設定方法も参照する文献と作成者の経験に依存して異なる．

(2) ニホンアカガエル

a) MaxEnt

AUCは0.89、正答率は89.8%であり、高い予測精度を示した（表-4）．説明変数の寄与率は、標高、森林と水田の接線までの距離、水田面積の順に高かった（表-5）．応答曲線の傾向から、低地の開けた水田環境よりも、森林と水田の距離が近い谷津田のような環境の選好性が高いことが予測された（図-2）．

b) GLM

得られた10モデルのAUCの平均値は0.91、正答率の平均値は78.3%であり、高い予測精度を示した（表-6）．AICによるモデル選択の結果、ベストモデルに含まれる説明変数は、標高の2次項、傾斜方位、TWI、加えて森林、水田、乾生草本群落、湿性草本群落の各面積割合が正の影響を示した一方で、標高、TWIの2次項、森林と水田の接線までの距離は負の影響を示した（表-6）．傾斜角度及びTWIは1次の項が正、2次の項が負の係数となっており、これらが中程度の時に生息確率も最大となる山型の傾向を示すことがわかった．

10モデルの予測値の平均値を基に地図化したところ、MaxEntと同様に森林と水田の距離が近く、ある程度の標高の場所が生育適地として選定され、適地がまとまって分布する結果となった（図-2）．

c) HSI

図化の結果、SI値の設定時に高く評価することとした、繁殖空間である水田・湿地と、非繁殖期の生息空間である森林・草地等との距離が近接する場所が多い本調査地では、予測対象地全域で生息適地としての評価が高くな

った（図-2）．この評価の高い場所には、実際に生息が確認された地点が含まれていたものの、生息が確認されなかった地点も多く含まれていた．

4. 考察

(1) 各モデルの適用性と課題

MaxEntとGLMによる予測適地図は、キキョウ、ニホンアカガエルともに、よく似た傾向を示した（図-1,2）．ただしMaxEntでは、在データ（確認位置）が空間的に集中分布する場合、GLMに比べて生息適地がより在地

表-4 MaxEntによる予測の混同行列（ニホンアカガエル）

		予 測		正答率
		在	不在	
実 測	在	60	10	感 度：85.7%
	不在	801	7053	特異度：89.8%
全体正答率				89.8%

※感度と特異度の和を最大化する閾値：0.1634

表-5 MaxEntの結果概要（ニホンアカガエル）

説明変数	寄与率
標高*	37.6
傾斜角度	0.1
傾斜方位	4.0
湿性度指数 (TWI)	2.3
森林の面積	3.0
水田の面積*	10.7
乾生草本群落の面積	0.4
湿性草本群落の面積	5.4
森林と水田の接線までの距離*	36.6

*寄与率 10%以上

表-6 GLMの結果概要（ニホンアカガエル）

変数	AIC上位3モデル		
	Model 1 土オッズ比	Model 2 土オッズ比	Model 3 土オッズ比
標高			
標高 ²	+ 1.000 **	+ 1.000 **	+ 1.000 **
傾斜角度			
傾斜角度 ²	- 0.433		
傾斜方位			
北東	+ 1.476		
東	+ 3.873 *		
南東	- 0.283		
南	- 0.406		
南西	- 0.221 *		
西	- 0.421		
北西			
北			
TWI		+ 108.5 *	
TWI ²		- 0.700 *	
森林面積割合	+ 1.040 **	+ 1.034 **	+ 1.035 **
水田面積割合	+ 1.077 **	+ 1.056 **	+ 1.061 **
乾生草本群落面積割合	+ 1.030	+ 1.023	+ 1.043 *
湿生草本群落面積割合	+ 1.117 **	+ 1.094 **	+ 1.078 **
森林と水田の接線までの距離	- 0.991 **	- 0.993 **	- 0.991 **
AIC	211.3	221.6	223.7

※ AUC（平均値）：0.91、正答率：78.3%

* P<0.01, ** P<0.05 であることを示す

点付近に集中する傾向があった。これは、両者の予測方式の違いによるものであろう。すなわち在データのみを用いて予測を行うMaxEntは、在・不在データを用いて予測を行うGLMに比べて、在データの空間分布により敏感である。また機械学習の手法を用いるMaxEntは、説明変数に対する生物の分布（在データ）の非線形な応答をモデル化することが可能であり、GLMに比べて元のデータの分布を反映した柔軟かつ複雑な予測を行いやすい。他方でMaxEntは、計算過程が複雑であるため、GLMに比べて各環境要因の効果を定量的に理解することが難しい。このため、用いるデータの種類や予測結果の利用目的にあわせて、いずれのモデルを利用するのか検討する必要がある。

HSIについては、キキョウ、ニホンアカガエルともに、解析範囲全体に予測適地が分布する結果となった（図1,2）。このため、移植・移設適地の絞り込みができなかった。またHSIでは、SI値の設定方法に応じて結果が大きく変わるが、SI値の妥当性を定量的に検証することも困難であった。なぜならHSIでは、対象種の在・不在を確率として予測することができず、MaxEntやGLMで行った正答率やAUC、感度、特異度といった指標を用いた予測精度の検証を行うことができないからである。このため、移植・移設候補先の選定には用いづらい。

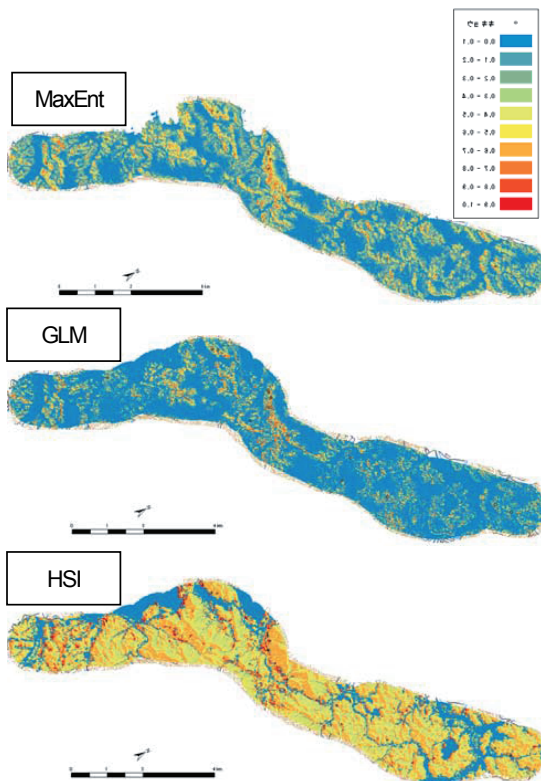


図-1 モデルによる分布推定結果の比較（キキョウ）

(2) 生物種ごとの適用性と課題

キキョウ、ニホンアカガエルともに、MaxEntとGLMは、移植・移設適地を絞り込むことができていたが、課題もあった。特にキキョウにおいて、野外での実際の確認位置は草地であるにもかかわらず、植生図では森林植生とされており、既存の植生図の精度では不十分であることが示唆された。植物のように移動能力の低い生物は、生育地点のマイクロハビタット（例：微気候、植生（森林ギャップ、畦の草地等）、土壌）の影響をより強く受ける。分布推定モデルによって移植・移設候補地のスクリーニングを行った後に、現地で確認を行うことが不可欠である。

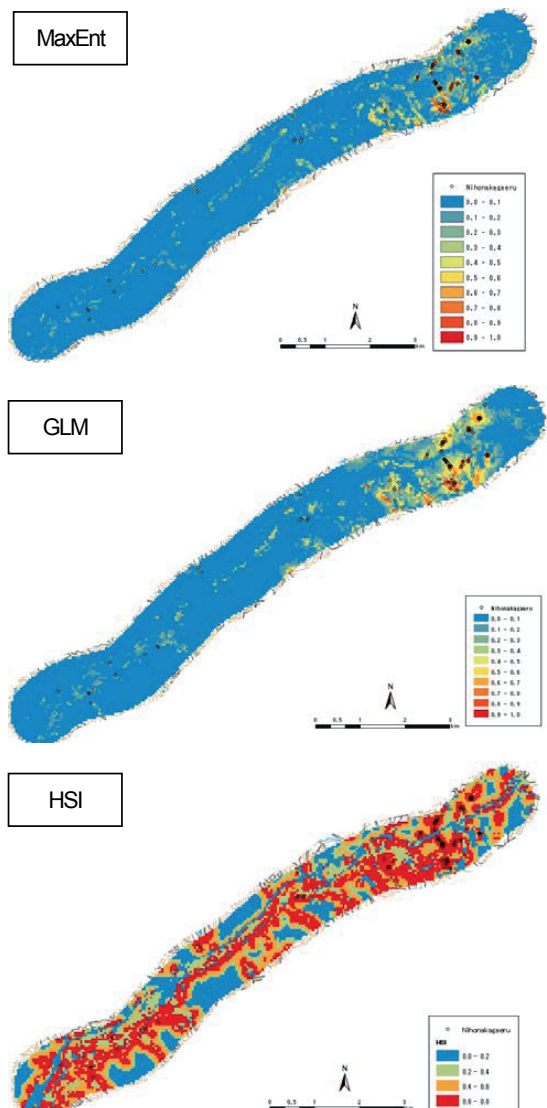


図-2 モデルによる分布推定結果の比較（ニホンアカガエル）

5. まとめと今後の課題

本稿では、3種の分布推定モデルを植物（キキョウ）と両生類（ニホンアカガエル）を対象に試行し、結果を比較した。その結果、道路事業における環境影響評価のように、現地の生物分布情報（在・不在データ）がある場合は、MaxEntやGLMを活用することにより、定量的に移植・移設候補地を絞り込めることがわかった。一方で、利用可能な地理情報（植生図など）や生物の分布情報の精度、使用する分析手法によっては、絞り込みがうまくできない、または誤った結果を導く可能性がある²⁾。また同じ種であっても、ある地域で作られた予測モデルを他地域に当てはめると、環境を過少推定あるいは過大推定することがある⁵⁾。それゆえ分布推定モデルによる予測を行う際には、生物だけでなく、解析に詳しい専門家に助言をおおぐべきであろう^{2,5)}。

本研究の結果、分布推定モデルは、従来、現地調査結果と調査者の経験を基に、生育・生息地が定性的に似た環境を選定していた動植物の移植・移設において、事業地域全体を対象に定量・客観的に候補地を絞り込む、スクリーニングを行えることがわかった。一方、全てを予測に頼るのではなく、モデルによって候補地のスクリーニングを行った後に、複数の候補地の中から現地で最適な場所を選ぶ必要があることもわかった。

謝辞：本稿における比較を行うにあたり、鳥取大学の日置佳之教授、東邦大学の西廣淳准教授、ならびに国立環

境研究所の石濱史子主任研究員から貴重な助言をいただいた。この場を借りて感謝の意を表したい。また、モデル構築に用いた調査データを提供していただいた各地方整備局等に御礼申し上げたい。

参考文献

- 1) Franklin, J. : Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction, Cambridge University Press, Cambridge, 320pp, 2010.
- 2) 上野裕介, 栗原正夫 : GIS と生息適地モデルによる広域スケールでの生物の生息環境の評価と地図化の試み, 土木技術資料, 56巻 11号 pp.22-25, 2014.
- 3) 杉山智治, 須崎純一, 田村正行 : 山形県におけるクマタカ生息適地推定モデルの構築, 景観生態学 13 巻 1&2 号, pp.71-85, 2009.
- 4) 鷲谷いづみ, 宮下直, 西廣淳, 角谷拓編 : 保全生態学の技法, 東京大学出版会, pp.146-148, 2010.
- 5) 上野裕介, 栗原正夫 : 広域スケールでのオオタカの生息適地予測の有効性と空間的汎用性・地域性の課題, ランドスケープ研究, Vol.78, No.5, pp.647-650, 2015.
- 6) 田中章 : HEP 入門 “ハビタット評価手続き” マニュアル 新装版, 266pp, 2011.
- 7) 佐藤正孝, 新里達也 : 野生生物保全技術 第 2 版, 海游舎, 426pp, 2007.
- 8) 大澤啓志, 勝野武彦 : 樹林性両生類の繁殖期における非樹林地への移動距離の推定～棚田地域におけるトウキョウサンショウウオの事例から～, 農村計画学会誌, Vol.25 Special Issue, pp.287-292, 2006.

(2015. 7. 16 受付)

Comparison of species distribution models for screening transplantation sites

Nodoka OSHIRO, Keiichi Hasegawa, Yusuke UENO and Ryuji INOUE

In road construction projects, rare plants and animals are sometimes transplanted to avoid habitat loss by the projects as one of the environmental conservation measures, when it is difficult to protect their habitats. In this study, we evaluated the applicability of the species distribution models to develop more objective and efficient methods for screening candidate transplantation sites. We tested the prediction accuracy of three species distribution models (i.e., Generalized Linear Model: GLM, Maximum Entropy method: MaxEnt, and HSI model) through the comparison of the predictive distributions of plant (balloon flower *Platycodon grandiflorus*) and amphibians (Japanese brown frog *Rana japonica*) using each models. In the result, both GLM and MaxEnt showed high accuracy and the analogous suitable-site maps for transplantation. On the other hand, HSI model was not able to predict the suitable transplantation sites accurately, and to narrow the range of candidate transplant sites.