特集「外来種と植生管理」

利根運河堤防部における在来草原性植物群落に対する外来植物の影響評価

相澤章仁^{*1)}・田中愛子²⁾・小林弘和¹⁾・小林達明¹⁾

1) 千葉大学大学院 園芸学研究 Graduate School of Horticulture, Chiba University

2) 千葉大学 園芸学部 Faculty of Horticulture, Chiba University

摘要：外来種を管理・防除するためには、どの外来種が在来生態系に影響を与えているかを評価する必要がある。本研究では千葉県北西部を流れる利根運河の堤防植生を対象として、コドラートを使ったランダムサンプリングによる植生調査を行い、TWINSPANと統計モデリングを用いて外来種の在来生態系への影響評価を行った。TWINSPANの結果、対象地の植生はセイバンモロコシ・セイタカアワダチソウを指標種とした2つの外来植物群落と2つの在来植物群落に分かれ、統計モデリングでもこの外来種2種が在来種の分布に影響を与えていることが示された。影響の度合いはセイバンモロコシの方が強く、個体レベルでの影響(50 cm×50 cm)と個体群レベルでの影響(5 m×10 m)の両方の空間レベルで在来種に影響を与えていた。セイタカアワダチソウは個体レベルでの影響は検出されなかったため、本種の完全排除というよりは、低密度管理を行うことで在来種の回復が望める可能性があることがわかった。現地において防除活動を進める際には本研究の調査方法を用いてモニタリングを進めていくことが有用であると考えられる。

キーワード：ランダムサンプリング、コドラート法、統計モデリング、モニタリング、順応的管理、利根運河

Aizawa Akihito, Tanaka Aiko, Kobayashi Hirokazu and Kobayashi Tatsuaki: **Evaluation of the effect of alien plants on the indigenous grassland community on the river bank of the Tone canal**

Abstract: To evaluate the effect of the alien plants on indigenous grassland ecosystem on the riverbank of the Tone canal, we did vegetation survey using random sampling method and used TWINSPAN and statistical modeling. The TWINSPAN divided the vegetation into two alien communities and two indigenous communities. The result of the statistical modeling showed that an alien indicator species *Solidago altissima* affected on the indigenous species only in population level scale (5 m × 10 m) but not in individual level scale (50 cm × 50 cm), meanwhile another alien indicator species *Sorghum halepense* f. *muticum* showed strong and multi-scale effect on the indigenous species. That means *S. altissima* affect indigenous species in large scale, but inside the population of the *S. altissima*, there can be some indigenous species inside. Thereby, regulation of the density of the *S. altissima* (ex: shifting the mowing season) may lead to the expansion of the indigenous species. To manage alien plants in this riverbank, we must reference to the community types divided by TWINSPAN and make an effort to bring down the density of the *S. altissima* and control expansion of the *S. halepense* f. *muticum*. Additionally, we recommend our survey method to apply monitoring not only for checking alien species reduction but also for confirming the indigenous ecosystem recovery.

Key words: random sampling, quadrat method, statistical modeling, monitoring, adaptive management, Tone canal

1. はじめに

外来種による在来生態系の破壊や産業等への影響の問題は広く認識され始め、「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律」(略称「外来生物法」)に基づいた国レベルでの対策から、各地方における行政・市民レベルでの駆除活動まで様々なレベルでの防除活動が行われている^{12,15)}。外来生物法では予防原則の考え方をもとに特定外来

生物の流通や移動・飼育を制限しているが、既に地域に侵入・定着してしまった外来種に対してどのような対策をとり、管理を行っていくかを具体的に示した法律やガイドラインは日本にはまだない¹⁴⁾。生物多様性条約第8条では「生態系、生息地若しくは種を脅かす外来種の導入を防止し又はそのような外来種を制御し若しくは撲滅すること」が締約国の努力義務として記載されているが、一方で国際自然保護連合(IUCN)が作成した外来生物による生物多様性減少防止のた

めのガイドライン⁸⁾では管理に当たっては外来生物を管理することによる明確な利得を目的として定めることが重要であり、外来生物の減少自体を目的とするべきではないことが明記されている。こうしたことを考慮すると、外来生物の管理を行う際にはまず生態系や人間活動に影響を与えている外来生物をしっかりと評価することが重要であると考えられる。

本研究で対象とする外来の草本植物に関する防除については、防除方法の検討や実験的に防除を行った時の在来生態系の反応^{4, 5, 15, 17)}に着眼が置かれ研究されることが多いが、防除の事前に外来種の影響を予測した研究はない。外来種の影響予測は在来種に影響を与えやすい外来種を特定できるだけでなく、順応的な防除計画¹¹⁾を作る際の仮説の設定や評価を明確にすることが期待できる。

そこで本研究では千葉県北西部を流れる利根運河の堤防植生を対象として、コドラートを使ったランダムサンプリングによる植生調査を行い、TWINSPAN, 統計モデリングを用いて外来種の在来生態系への影響評価を行うことを目的とし、現地での防除活動に有効となる知見について考察を行った。

2. 方 法

2.1 対象地の概要

対象地の利根運河は、利根川と江戸川を結び、千葉県野田市、柏市、流山市の3市にまたがって流れる流路延長8.5 km (利根川高水敷を含む) の一級河川である。利根川と江戸川を結ぶ舟運が盛んだった時代に航路短縮を目的に人工的に掘削され、明治23年に通水した(図-1)。その堤防は建設された場所や構造に起因して、面積は狭いながらも変化に富んだ自然環境を備えており、100年の歴史の中で、それぞれの環境に適した多様な植物が定着している²⁴⁾。本研究が対象としている堤防表法面は、勾配は約20度、法長はおおよそ6-8 mで、切土法面の場合は天端の上も元の台地の高さまで斜面が続いている状態である。通水当時の植生工などは不明だが、掘削時も、その後の台風被害からの復旧工事でも客土は行っておらず、大規模な植生工の痕跡もみられない。このような場所でインフラ管理として年2-3回ほどの草刈りが行われていることは、非意図的ながら在来の草地性植物に

にとって良好な環境を与えており^{2, 9, 22)}、日本全国スケールで減少が懸念されている半自然草地²²⁾としての価値を持った貴重な生態系を存続させてきた。しかし、市民団体『利根運河の生態系を守る会』の2003年-2005年の調査報告²⁴⁾において“近年工事が行われた堤防ほど外来種が多く、植物相が貧弱である”とコメントされるなど、少なくとも2003年以前から、場所によっては外来種が繁茂し、在来植物の生育に影響を与えている懸念がある。

河川管理者である江戸川河川事務所は、利根運河の生態系を守る会と意見交換をすることで順応的管理を行うことを目指している。また外来種対策においても、インフラ管理のための草刈とは別に、低水敷に繁茂している特定外来生物：アレチウリの駆除イベントを市民参加で行うなど積極的な姿勢が見られる。しかし、外来種各種の在来生態系への影響評価や、草地性植物が生育する堤防表法面に着目した外来種対策やモニタリングは行っておらず、仮説や客観的データに基づいた順応的管理が実施されているとは言えない。

2.2 植生調査・モニタリング

利根運河兩岸の天端に整備されている遊歩道沿いに50 m間隔で調査地点を設置し(図-2)、表法面における対象種の出現状況を調査した。各調査地点では、遊歩道と平行に10 m、法面に沿って5 mの範囲内に50 cm×50 cmのコドラートを無作為に5つ投げて設置した。設置されたコドラートごとに対象種を探し、被度などは考慮せず/不在の情報を記録した。この調査方法はコドラートの設置場所の選定や目視による被度の測定などを行う必要がなく、専門性が低く人為バイアスも少ない。そのためこの調査手法は客観性が必要なモニタリング調査として有用であると言え¹³⁾、市民参加によるモニタリングを行う場合にも使用しやすい。調査は夏季の草刈り(8月-9月)が終わった後の秋季の植生をターゲットとし、2013年の10月および11月に行った。ただし、KP. 2付近からKP. 3付近の間は公園として管理されていたため調査対象から除いた。

本研究では空間スケールを階層的なレベルに分ける設定¹⁶⁾

図-1 利根運河の位置

Fig. 1 Location of the Tone canal

図-2 利根運河の地形と調査デザイン

Fig. 2 Topography of Tone Canal and Survey design of this study

表-1 調査対象種

Table 1 Target species of this study

種 名	学 名	対象種を草原性植物 の指標としている文献		
		金子ほか (2009)	小柳ほか (2009)	山田・根本 (2013)
【草原性植物種】				
ノハラアザミ	<i>Cirsium oligophyllum</i> (Franch. et Sav.) Matsum.	—	—	○
ツリガネニンジン	<i>Adenophora triphylla</i> var. <i>japonica</i> (Regel) H. Hara	○	○	○
アキノタムラソウ	<i>Salvia japonica</i> Thunb.	○	—	○
ナンテンハギ	<i>Vicia unijuga</i> A. Braun	○	○	○
ワレモコウ	<i>Sanguisorba officinalis</i> L.	—	○	—
アキカラマツ	<i>Thalictrum minus</i> var. <i>hypoleucum</i> (Siebold et Zucc.) Miq.	○	—	○
センニンソウ	<i>Clematis terniflora</i> DC.	○	—	—
ツルボ	<i>Barnardia japonica</i> (Thunb.) Schult. et Schult. f.	○	—	—
【類出在来種】				
ユウガギク	<i>Aster iinunae</i> Kitam.	—	—	—
カントウヨメナ	<i>Aster yomena</i> var. <i>dentatus</i> (Kitam.) H. Hara	—	—	—
クサフジ	<i>Vicia cracca</i> L.	—	—	—
【外来種】				
ハルジオン	<i>Erigeron philadelphicus</i> L.	—	—	—
セイトカアワダチソウ	<i>Solidago altissima</i> L.	—	—	—
ワルナスビ	<i>Solanum carolinense</i> L.	—	—	—
アレチウリ	<i>Sicyos angulatus</i> L.	—	—	—
セイバンモロコシ	<i>Sorghum halepense</i> f. <i>muticum</i> (Hack.) C.E. Hubb.	—	—	—

を取り入れており、コドラート、調査地点という2つの空間レベルが設定されている。コドラートレベル（50 cm×50 cm）は草本植物の個体同士が日照や空間を直接奪い合うレベルであると考えられ、外来種と在来種の個体間の影響が現れる空間レベルであると解釈した。調査地点レベル（10 m×5 m）は単一種が群生することにより、他種を減少させるなど、個体群レベルでの影響が検出される空間レベルであると解釈した。

調査対象種は利根運河堤防に秋季によくみられる草本植物16種（在来種11種、外来種5種）とした（表-1）。在来種には、主に既往研究で半自然草地の構成種として扱われている草原性植物種、および対象地におけるこれまでの市民調査²⁴⁾において、利根運河堤防部の複数の区域に出現することが確認されている在来頻出種（カントウヨメナ、ユウガギク、クサフジ）を選定した。このうち草原性植物種については、個別の評価に加え、それらのうち一種でもコドラート内に出現した場合を『在』として扱ったものを『草原性植物種群』として以降の解析で用いた。外来種については対象地で多く見られるものや、草地で繁茂する恐れのある5種を選定した。

2.3 解析方法

2.3.1 TWINSPLANによる群落の分類

管理対象となる植生タイプの分布を把握するため、TWINSPLAN²⁾を用いて対象地の群落を分類した。群落の単位は調査地点とし、各対象種が調査地点内に設置した5つのコドラートのうちいくつに出現したかを6段階で示したものを調査地点の植生データとし、群落の分類に用いた。解析にはWinTWINS ver. 2.3を用い、分割は2段階で止め、各分岐における指標種も特定した。分類した群落の配置を地図

上に表し、次節に示す統計モデリングで在来種に影響を及ぼすと判断された外来種の対策を行う場所を検討した。

2.3.2 各外来種の在来種への影響評価

各外来種が個体レベルあるいは個体群レベルで在来種の出現に影響を与えているかを評価するため、草原性植物種群と在来種の種ごとに2つの空間レベルを対象とした統計モデル（一般化線形混合モデル、一般化線形モデル）を構築し、ベイズ推定を用いてモデルのパラメータを推定した。ベイズ推定では、観測を行ったパラメータ以外の場所差や個体差といった統制の難しい効果を推定することができる^{3, 10)}うえ、モデルのコーディングの自由度が高く推定結果やその診断等を精査できるという利点がある。

個体レベルでの影響評価では、1コドラート内での草原性植物種群および各在来種の在/不在データを応答変数とし、コドラートにおける4種の外来種（ハルジオン、セイトカアワダチソウ、ワルナスビ、セイバンモロコシ）の在/不在と、環境要因（傾斜方位、堤防の工法）を固定効果の説明変数、調査地点を変量効果の説明変数とする統計モデルを構築した。環境要因は日当たりの指標として、5 m メッシュ数値標高モデル（国土交通省国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービス；<http://fgd.gsi.go.jp/download/>）から計算した東西方向（東向き斜面が正、西向き斜面が負）・南北方向（北向き斜面が正、南向き斜面が負）の斜面方位²¹⁾を標準化したもの、および堤防の工法として、図-2において台地と接している調査地点を切土法面、それ以外の地点を盛土法面とする2値のカテゴリ変数（以降切土と示す）を用意した。

コドラートレベルにおける在来種 i の在/不在 Y_i は、(1)式に示すようにベルヌーイ分布に従う。

$$Y_i \sim \text{Bernoulli}(p_i) \quad (1)$$

在来種 i が出現する、すなわち“在”である時の確率 p_i は、(2)式で決定できる。

$$\text{logit}(p_i) = \cdot_i + \beta_i \times X_i + \varepsilon_{ik} \quad (2)$$

$\cdot_i$ は切片のベクトル、 X_i は7個（東西方位、南北方位、切土/盛土、ハルジオン、セイトカアワダチソウ、ワルナスビ、セイバンモロコシ）の固定効果ベクトル、 β_i は回帰係数ベクトル、 ε_{ik} は k 個の調査地点から変量効果（調査地点由来の差異）を表す。ベイズ推定では事前分布を用いて経験等に基づく情報を予測に反映することができる¹⁾が、今回は未知のものとして無情報事前分布を用いた。固定効果の事前分布は平均0、精度 10^{-4} の正規分布を設定し、変量効果は平均0、精度は0から 10^4 までの一様分布から抽出された分散の逆数を持つ正規分布に従うよう設定した。

調査地点レベルにおける在来種 i の在/不在頻度 Y_i は、(3)式に示す二項分布に従う。

$$Z_i \sim \text{Binomial}(q_i, 5) \quad (3)$$

q_i は5個のコドラートにおける在来種 i が出現する確率である。二項分布はベルヌーイ試行の繰り返しからなり、 q_i の決定はベルヌーイ分布と同じlogit変換で行うことができる（(4)式）。

$$\text{logit}(q_i) = \cdot_i + \beta_i \times X_i \quad (4)$$

・ β_i , X_i はコドラートレベルの解析と同様の内容を示す。固定効果の事前分布もコドラートレベルと同様に平均0, 精度 10^{-4} の無情報事前分布を設定した。

以上の設定の下で繰り返しを10万回~50万回に設定して各係数の値が収束するまで (Rhat<1.1を基準とした) マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法による各パラメータのサンプリングを行った。各変数の係数の95%サンプリング区間に0が入るか否かを確認し, 0が入らない場合はその変数が在来種の分布に影響を与えている要因であると判断した。

個別の種の解析では, 統計モデルを組めるサンプル数を考慮して出現調査地点数が10箇所以上ある種のみを用いた。斜面方位の計算には QGIS 2.2.0¹⁹⁾を, MCMC 法によるサンプリングは R ver. 3.0.2²⁰⁾を通して JAGS ver. 3.4.0¹⁸⁾で行った。

3. 結 果

3.1 植生調査の結果

植生調査では対象とした種のうちアレチウリ以外のすべての種が確認された。出現した調査地点数 (n=237) が多かったのはセイタカアワダチソウが134地点と全調査地点の半分以上で確認されており, ハルジオン (74地点), セイバンモロコシ (69地点) と外来種が続いた。在来種ではワレモコウ (63地点), カントウヨメナ (52地点), ツルボ (38地点) の順に出現数が多かった。コドラート数 (n=1185) は多い順に, セイタカアワダチソウ (380コドラート), セイバンモロコシ (234コドラート), ワレモコウ (143コドラート), ハルジオン (135コドラート), カントウヨメナ (115コドラート), ツルボ (84コドラート), であり, ワレモコウとハルジオンが入れ替わった以外は同様の順位であった。

3.2 TWINSPLAN による群落の分類

TWINSPLAN によって, 調査地の堤防表法面の群落は4つの植生タイプに分けられた (図-3)。第1分岐ではセイタカアワダチソウ・セイバンモロコシを指標種とした外来種を中心としたタイプと, ノハラアザミ・ツリガネニンジン・ワレモコウ・ツルボ・カントウヨメナを指標種とした在来種を中心としたタイプの二つに分かれた。第2分岐ではセイバンモロコシとセイタカアワダチソウが指標種となって分かれたため, それぞれをセイバンモロコシ群落, セイタカアワダチ

図-4 TWINSPLAN で分類された群落タイプによる調査地点の区分

Fig. 4 The map of Community types calculated by TWINSPLAN

ソウ群落と定義した。第3分岐はノハラアザミ・ツリガネニンジン・ワレモコウ・ツルボ・セイタカアワダチソウを指標種とする群落と, カントウヨメナ・クサフジを指標種とする群落の二つに分かれ, 前者を草原性群落, 後者を在来群落と定義した。

それぞれの群落の配置を図-4に示す。右岸はほとんどがセイバンモロコシ群落とセイタカアワダチソウ群落となっていたが, KP. 3とKP. 4の間に保全価値が高いと考えられる草原性群落が連続して存在していた。左岸は江戸川沿いからKP. 4手前付近まではセイタカアワダチソウ群落が多く存在し, KP. 4からKP. 5までは在来群落, KP. 5から利根川沿いまでは草原性群落が多くなっていた。

3.3 各外来種の在来種への影響評価

コドラートレベルでの各種群・種の在/不在を応答変数とした階層ベイズモデルでは, 草原性植物種群にセイバンモロコシが負の影響を与えていた (表-2)。個別の種に対しては, セイタカアワダチソウがカントウヨメナに, セイバンモロコシがワレモコウに負の影響を, ハルジオンがワレモコウに正の影響を与えていた (表-2)。調査地点レベルでの各種群・種のコドラート数を応答変数とした結果では, 草原性植物種

図-3 TWINSPLAN による群落タイプの分類

Fig. 3 Community types of the study area calculated by TWINSPLAN

表-2 コドラートレベルでの階層ベイズモデルによって推定された変数の係数の中央値

Table 2 Median coefficient values of the variables estimated by hierarchical Bayesian model in individual level

	東西 傾斜	南北 傾斜	切土 オン	ハルジ オン	セイタカア ワダチソウ	ワルナ スピ	セイバン モロコシ
草原性植物種群	-7.40	—	2.06	—	—	—	-1.84
ノハラアザミ	-1.02	—	-1.84	—	—	—	—
ツリガネニンジン	-6.60	—	2.07	—	—	—	—
ワレモコウ	-7.01	—	—	1.02	—	—	-2.85
ツルボ	-1.59	-1.34	-1.10	—	—	—	—
カントウヨメナ	—	1.43	-0.63	—	-0.96	—	—

ナンテンハギ, ユウガギク, クサフジはパラメータの収束が悪かったため, 解析から除いた。
—は95%サンプリング区間に0が入っており有効でない変数と判断されたもの。

表-3 調査地点レベルでの階層ベイズモデルによって推定された変数の係数の中央値

Table 3 Median coefficient values of the variables estimated by hierarchical Bayesian model in population level

	東西 傾斜	南北 傾斜	切土	ハルジ オン	セイタカア ワダチソウ	ワルナ スビ	セイバン モロコシ
草原性植物種群	-0.52	-0.46	0.49	0.22	-0.32	—	-0.54
ツリガネニンジン	-0.73	—	0.63	—	-0.65	—	-0.74
ナンテンハギ	—	-0.75	0.51	—	—	0.27	—
ワレモコウ	-0.61	—	0.29	—	-0.31	—	-0.92
ツルボ	-0.72	-0.62	0.60	—	—	—	—
カントウヨメナ	—	0.60	0.28	—	-1.09	—	—

ノハラアザミ、ユウガギク、クサフジはパラメーターの収束が悪かったため、解析から除いた。
—は95% サンプルング区間に0が入っており有効でない変数と判断されたもの。

群にはセイタカアワダチソウとセイバンモロコシが負の影響を、ハルジオンが正の影響を与えていた(表-3)。個別の種に対してはセイタカアワダチソウがツリガネニンジン、ワレモコウ、カントウヨメナに、セイバンモロコシがツリガネニンジン、ワレモコウに負の影響を、ワルナスビがナンテンハギに正の影響を与えていた(表-3)。

コドラートレベルにおけるナンテンハギ、ユウガギク、クサフジ、調査地点レベルにおけるノハラアザミ、ユウガギク、クサフジは繰り返しを50万回に設定してもパラメーターが収束しなかったため、解析対象から除いた。

4. 考 察

今回の調査結果から、利根運河の堤防植生ではセイタカアワダチソウ・セイバンモロコシをはじめとする外来種が多く繁茂していることが定量的に示された。TWINSPLANの結果では、群落タイプが第1分岐でセイバンモロコシ・セイタカアワダチソウと数種の在来種を指標として分岐した上、半数以上の調査地点がそれらの群落に属していた(図-4)。このことは、これらの外来種2種が利根運河河川敷の広い範囲で群落を作っていることを示している。統計モデリングによる各外来種の影響評価でも、この2種は草原性植物種群をはじめ多くの在来種に影響を与えていた。セイタカアワダチソウとセイバンモロコシの推定された係数の中央値を比べてみると、全体的にセイバンモロコシの方がより係数が大きく、セイタカアワダチソウよりも大きな影響を在来種に与えていることがわかった。

また、これら2種が影響する空間スケールに着目しながら統計モデリングの結果(表-2, 3)を見ると、セイタカアワダチソウから個体群レベルでのみ影響を受け、個体レベルでは影響を受けない在来種が多くみられた。これはセイタカアワダチソウが個体群として広がる中に在来種が混在して存在している状況にあると考えられる。セイタカアワダチソウは一度定着すると地下茎によって急速に広がり、高茎によって在来種を駆逐することが知られているが⁶⁾本研究の対象地ではそうした状況にないことがわかった。これは利根運河において、河川管理の一環として頻繁に草刈りが行われてきたことがセイタカアワダチソウの密度抑制につながった可能性がある⁵⁾。このことから、在来種の回復のためにセイタカア

ワダチソウを管理する場合には、セイタカアワダチソウを低密度に抑えて在来種が生育できる場所を局所的に確保することが肝要であり、必ずしもセイタカアワダチソウの根絶を目指す必要はないと考えられる。セイタカアワダチソウは頻繁な草刈りによって被度や草丈が抑制されることや⁵⁾、地下部へのバイオマス分配が顕著に大きくなる8月以前に地上部を刈り取ることによって繁茂が抑制されること²³⁾なども報告されており、バイオマス配分などの季節変化に合わせた草刈の時期の検討も有効であろう。

一方で、セイバンモロコシではコドラートレベル・調査地点レベルの両方で影響を及ぼしており、個体・個体群の両レベルで在来種を排除している状況にあると考えられる。セイバンモロコシの防除に関する既往研究は少ないため、効果的な防除方法は不明であるが、現在残されている在来生態系への侵入拡大を防ぐことが最も重要であると考えられる。

ワルナスビとハルジオンは在来種に対して負の影響を与えることは確認されなかった。ワルナスビは出現地点数が少ないため、その効果を十分検出することができなかったと考えられる。ワルナスビは出現範囲が狭いため当面は対策を練る必要がないと思われるが、今回出現が見られなかったアレチウリと共に、堤防法面において分布が広がっていくかどうかをモニタリングしていく必要がある。ハルジオンについては出現地点数が多いにもかかわらず、在来種に対して負の影響を与えることはなかった。今回調査を行った10月から11月ではハルジオンは開花期が終わりロゼット期へと移行している状態であるが、ロゼット期と開花期で分布は変化しないものと考えられるので、ハルジオンが開花期に対象とした秋季植物の芽生えに影響を与えて個体数を減らすといった作用もないものと考えられる。利根運河堤防部の秋季の在来植物保全のためには、ハルジオンは外来種防除の対象とする必要性は低い種類であると言える。ただし、現在は在来種に影響を与えていない種でも、大きな影響を与えている種を防除したときなどに意図しない効果^{25, 28)}を生態系に影響を与え始める恐れがあるため、モニタリングは続けていく必要がある。また、ワルナスビとハルジオンについては一部の種・種群に正の影響を与えていることがわかったが、生態系エンジニアとしてこれらの種が機能するという報告はないため、対象種・種群の生育を促進したと考えるより、これらと同所的に存在することができる種であると考えの方が妥当である。

今回用いた環境要因では、東西傾斜が多くの種に負の影響を与え、南北傾斜がいくつかの種に負の影響を与えていた。これは西側斜面、南側斜面に今回対象とした種が多く存在することを示している。南側斜面は日当たりの良さを表していると考えられるが、これは草原性植物が明環境を好むという先行研究と一致する結果である²⁶⁾。西側斜面の影響についてはなんらかの要因が関係している可能性があるが、詳細のメカニズムについては今後調べていく必要がある。また、切土も多くの種に正の影響を与えていた。利根運河は谷津地形を利用して作られた運河であり、切土斜面では所々に湧水がしみ出している場所が見られ、湿潤な環境となっている²⁴⁾。セ

イタカアワダチソウは乾燥に対する抵抗力が強いとされており⁶⁾、牧草由来であるセイバンモロコシもこれに準ずる性質を持っていると考えられるが、湿潤な切土法面ではこれらの外来種の在来種への影響が緩和されたり、外来種が初期侵入しにくい状態となっていたなどの可能性が考えられる。このメカニズムについても推察の域を超えないので、別途検証を行う必要がある。

5. まとめ

本研究ではコドラートを使ったランダムサンプリングを行い、TWINSPAN および統計モデリングを使用することにより、利根運河の堤防植生を事例とした外来草本植物の在来植物への影響評価を行うことができた。

今後この評価をもとに利根運河の堤防において秋季の在来生態系の回復を目標とした防除活動を行っていく場合はセイバンモロコシ・セイタカアワダチソウをターゲットとし、セイバンモロコシは新たな場所への侵入や分布拡大を防ぐ管理を、セイタカアワダチソウは草刈り時期の調節などを行って低密度に抑える管理を実施することが有効であろう。

防除活動を重点的に行っていく場所を設定する場合は、TWINSPAN によって分類された群落の配置 (図-4) を参照しながら、西側・南側斜面で切土である場所を優先的に管理していくことで、より多くの在来種を保全することが可能になるだろう。例えば TWINSPAN の結果右岸で唯一草原性群落が固まって存在している KP. 3 から KP. 4 の間は西側斜面で切土であり、セイバンモロコシ群落・セイタカアワダチソウ群落と隣接している。これらの草原性群落に、隣接する外来種群落から外来種が侵入して、草原性在来種を脅かす可能性があるため、この部分を防除強化区間として集中的な管理を実施することが必要であろう。なお、本研究では調査対象種が限定されていること、秋季のみにしか調査を行っていないため、調査対象外となった希少種の保全や他の季節の植生への影響なども別途並行して対策などを考える必要がある。

外来種防除を行う際にはモニタリングを行いながらどのような管理が良い結果をもたらすかを検討していく順応的管理を行うことが望まれる¹¹⁾。今回用いたコドラートを投げてランダムサンプリングを行う方法は、市民参加型のモニタリング方法としても有効なものである^{13, 27)}。こうした簡易でかつ高度な解析に耐えうるモニタリング方法の開発・提案も、外来種の管理においては重要な課題であると考えられる。

謝辞: 本研究を進めるにあたり利根運河の生態系を守る会のみなさまには調査方法の検討、対象植物の選定・同定などにおいてご意見・ご指導をいただいた。国土交通省江戸川河川事務所調査課のみなさまには、利根運河堤防部の管理方法などについて詳細をご教示いただいた。また、千葉大学大学院園芸学研究科の梅木清准教授、水崎大二郎氏には階層ベイズモデルに関する様々な知見をいただいた。北海道大学理学部の仲岡雅裕教授には、ランダムサンプリングに関する適切なアドバイスをいただいた。最後に、編集委員と匿名の2名

の査読者には有益なコメントをいただいた。以上の方々に心から御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 浅田正彦・長田穰・深澤圭太・落合啓二 (2014) 状態空間モデルを用いた階層ベイズ推定法によるキョン (*Muntiacus reevesi*) の個体数推定, 哺乳類科学, 54(1): 53-72.
- 2) 浅見佳世・服部保・赤松弘治 (1995) 河川堤防植生の刈り取り管理に関する研究, ランドスケープ研究, 58(5): 125-128.
- 3) 深澤圭太・角谷拓 (2009) 始めよう! ベイズ推定によるデータ解析, 日本生態学会誌, 59(2): 167-170.
- 4) 畠瀬頼子・小栗ひとみ・藤原宣夫・宇津木栄津子・戸井可名子・井本郁子・松江正彦 (2009) 木曾川におけるオオキンケイギク優占群落での礫河原植生復元のための植生管理の効果, ランドスケープ研究, 72(5): 537-542.
- 5) 服部保・赤松弘治・浅見佳世・武田義明 (1993) 河川草地群落の生態学的研究, セイタカアワダチソウ群落の発達および種類組成に及ぼす刈り取りの影響, 人と自然 (2): 105-118.
- 6) 服部保 (2002) セイタカアワダチソウ, 日本生態学会編, 外来種ハンドブック, 地人書館, 東京, pp. 196.
- 7) Hill, M.O. (1979) TWINSPAN-A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes. Cornell University, Ithaca.
- 8) IUCN (2000) IUCN guidelines for the prevention of biodiversity loss caused by alien invasive species.
- 9) 小柳知代・楠本良延・山本勝利・武内和彦 (2009) 年二回の草刈りによって成立する道路沿い林縁部刈取草地における草原生植物の生育状況, ランドスケープ研究, 72(5): 507-510.
- 10) 久保拓弥 (2012) データ解析のための統計モデリング入門, 岩波書店.
- 11) 松田裕之・矢原徹一・竹門康弘・波田善夫・長谷川真理子・日鷹一雅・ホーテスシュテファン・角野康郎・鎌田磨人・神田房行・加藤真・國井秀伸・向井宏・村上興正・中越信和・中村太士・中根周歩・西廣美穂・西廣淳・佐藤利幸・嶋田正和・塩坂比奈子・高村典子・田村典子・立川賢一・椿宜高・津田智・鷺谷いづみ (2005) 自然再生事業指針, 保全生態学研究, 10: 63-75.
- 12) 村中孝司・石井潤・宮脇成生・鷺谷いづみ (2005) 特定外来生物に指定すべき外来植物種とその優先度に関する保全生態学的視点からの検討, 保全生態学研究, 10(1): 19-33.
- 13) 仲岡雅裕・渡辺健太郎 (2011) アマモ場の生物多様性・生態系モニタリング, 海洋と生物, 33(4): 315-322.
- 14) 日本生態学会 (2002) 外来種ハンドブック, 地人書館, 東京, pp. 39-46.
- 15) 西廣淳・西口有紀・西廣美穂・鷺谷いづみ (2007) 湿地再生における外来植物対策: 霞ヶ浦の湖岸植生帯再生地における市民参加型管理の試み, 地球環境, 12(1): 65-80.
- 16) Noda, T. (2004) Spatial hierarchical approach in community ecology: a way beyond high context-dependency and low predictability in local phenomena. Population Ecology, 46(2), 105-117.
- 17) 大澤剛士・赤坂宗光 (2009) 特定外来生物オオハングソウの管理方法: 引き抜きの有効性の検討, 保全生態学研究, 14(1): 37-43.

- 18) Plummer (2003) JAGS: A program for analysis of Bayesian graphical models using Gibbs sampling.
- 19) QGIS Development Team (2014) QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, <http://qgis.osgeo.org/>
- 20) R Core Team (2013) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <http://www.R-project.org/>
- 21) Stage, A.R. (1976) Notes: An expression for the effect of aspect, slope, and habitat type on tree growth. *Forest Science*, 22(4): 457-460.
- 22) 高橋佳孝 (2004) 半自然草地の植生持続をはかる修復・管理法, *日本草地学会誌*, 50(1): 99-106.
- 23) 富沢美和・鷺谷いづみ (1998) フジバカマとセイタカアワダチソウの夏季における地上部喪失に対する反応: 復元植生の管理計画を立てるために, *保全生態学研究*, 3(1): 57-67.
- 24) 利根運河の生態系を守る会 (2006) 利根運河の花ごよみ, 利根運河の生態系を守る会.
- 25) 亘悠哉 (2011) 外来種を減らせても生態系が回復しないとき: 意図せぬ結果に潜むプロセスと対処法を整理する, *哺乳類科学*, 51(1): 27-38.
- 26) 山田晋・大久保悟・北川淑子・武内和彦 (2005) 丘陵地谷底水田に接する下部谷壁斜面下端の刈り取り草原における植物種組成と環境要因との対応, *ランドスケープ研究*, 68(5): 675-678.
- 27) 吉田正人・河内直子・仲岡雅裕 (2007) 市民参加型モニタリングとリモートセンシングとの統合的利用による海草藻場の空間動態の解析, *保全生態学研究*, 12(1): 10-19.
- 28) Zavaleta, E.S., Hobbs, R.J., & Mooney, H.A. (2001) Viewing invasive species removal in a whole-ecosystem context. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(8): 454-459.

(2015. 5. 1 受理)