

日本国内における外来植物を扱う研究の現状と求められる課題

赤坂宗光*・斎藤達也*・大澤剛士**・黒川俊二***・水口亜樹****・下野嘉子*****・西田智子**

キーワード: 非在来植物, 生物学的侵入, マクロ生態学, 外来種

Keywords: non-native plants, biological invasion, macroecology, invasive alien species

はじめに

人為的な生物の移動に端を発する生物学的侵入は、農業生態系をはじめほぼ全ての生態系で何らかの問題を引き起こしている (Vilà *et al.* 2010)。これらの問題は、生物の個体群や種の存続、物質循環といった自然生態系に対する影響から、作物の収量低下や、対策費用の高騰といった経済被害や、花粉症などの健康被害まで多岐にわたる (Vilà *et al.* 2010)。欧州では外来種の侵入の被害額・対策額の総額として、少なくとも年 125 億ユーロという推計がなされており、現在明らかにされていない被害を加えるとその額はさらに高額になると考えられている (Pyšek and Richardson 2010)。

我が国においても、これらの問題に対処するため、様々な観点から研究が行われ、その成果に基づいた施策がとられてきた。しかしながら、現状としては新たに侵入が確認された

生物の数は依然として増え続けている (村中 2008)。この外来生物の増加は、対策の根拠となる学術的な知見が得られているにも関わらず、予算や社会経済的な要因等の制約で十分な対応が講じられなかったり、仮に対策が有効であっても効果が現れるまでに時間を要したり (法制度の発効・周知されるまでの時間など) することも一因であるかもしれない。しかし、対策を講じるための根拠となる生物学的侵入に対する学術的な理解の不十分さの他、ニーズに応えられる研究がなされていない、なされていてもコミュニケーションや情報伝達できていないといった、研究と行政・現場間のギャップの存在にも負うところが大きい (大澤・赤坂 2013)。このギャップを埋めるには、両者間のコミュニケーションを促進する必要があり、双方にとって必要な情報を共有し、研究の方向性を話し合いの下に決めていくことが望ましい。そのために、研究側として、生物学的侵入に関するこれまでの研究を整理し、方向性を提案することが必要であろう。しかし、現時点では、体系的に集計された外来植物研究に関する目録は存在せず、これが国内での研究実態の把握、整理の障害となっている。

そこで本稿では、2000 年から 2012 年までの間に国内でなされた研究を定量的にレビューすることで、これまでどのような研究がどの程度なされたかを明らかにし、それに基づき今後の外来植物の規制・管理に向けて求められる応用研究についての筆者らの考えを提示した。生物学的侵入を扱う侵入科学 (Invasion science) は、生態学や雑草学をはじめとした自然科学だけではなく、経済学や社会学、政治学などの社会科学も対象とした学際分野として扱われ急速に進歩し続けている (Richardson 2011)。侵入科学の扱う内容は多岐にわたるものの、本稿では対象とする研究分野を自然科学に限定した。本稿では、i) 国内でなされてきた研究の目録を作成することと、ii) それを基に国内で実施された研究を整理し、世界的な研究動向を参照しながら今後国内での外来植物対策に資する研究のいくつかの方向性について提案を行うこと、の 2 点を目的とした。

方 法

オンライン文献データベースを用いて、国内で実施され、外来雑草植物による生物学的侵入を扱った査読付き研究論文 (以降、論文と呼ぶ) を検索し収集した。査読付きの論文を効率的に収集するために英文雑誌に掲載されている論文の検索には ISI Web of Science (<http://apps.isiknowledge.com>) を

*東京農工大学農学研究院

〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8

muuak@cc.tuat.ac.jp (赤坂宗光)

** (独) 農業環境技術研究所

〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3

*** (独) 農研機構中央農業総合研究センター

〒305-8666 茨城県つくば市観音台 3-1-1

**** 福井県立大学生物資源学部

〒910-1195 福井県吉田郡永平寺町松岡兼定島 4-1-1

***** 京都大学大学院農学研究科

〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町

Munemitsu Akasaka*, Tatsuya I. Saito*, Takeshi Osawa**, Shunji Kurokawa***, Aki Mizuguti****, Yoshiko Shiono***** and Tomoko Nishida**: Researches on non-native plants in Japan: Current state of understanding and forthcoming challenges

*Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwaicho, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan
muuak@cc.tuat.ac.jp (Munemitsu Akasaka)

**National Institute for Agro-Environmental Sciences, 3-1-3 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan

***NARO Agricultural Research Center, 3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8666, Japan

****Faculty of Biotechnology, Fukui Prefectural University, 4-1-1 Kenjojima, Matsuoka, Eihei-cho, Yoshida-gun, Fukui 910-1195, Japan

*****Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Oiwakecho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

(2014 年 5 月 17 日受理)

用いた。この文献データベースは主に査読つき英文論文を対象とし整備されたものであるため、和文雑誌に掲載されている論文の検索には和文を対象としておりアクセスが容易である Google Scholar (<http://scholar.google.co.jp/>) を用いた。英文雑誌に掲載されている論文の検索には、“((invasive OR exotic OR alien OR non-native OR nonnative) AND (plant* OR tree* OR shrub* OR herb* OR grass* OR forb* OR weed*))” をキーワードとし、対象とする国/地域を日本のみに設定し検索結果を絞り込んだ。和文雑誌に掲載されている論文の検索には、“外来植物”, “外来種 植物”, “外来雑草” のキーワードをそれぞれ用いた。和文雑誌に掲載されている和文論文と英文論文を和文としてまとめて扱った。なお、後述のスクリーニングを通過した和文雑誌掲載の英文論文は3本のみであった。英文・和文とも検索対象は2000年から2012年の間に発表された論文とした。なお、帰化 (naturalized) は生物学的侵入と関連する用語であるが、村中 (2009) によると2000年以降、分類群を問わず“帰化”ではなく“外来”を用いる論文の数が圧倒的に多くなっている。このため、“帰化”を用いずとも国内で実施された研究の傾向は十分に把握できると考え“帰化”に関する用語は検索には用いなかった。

検索結果のうち、国内で実施されていないもの、対象外来種が維管束植物ではないもの、外来植物を主な研究対象としないもの(例えば、植生調査などにより偶然記載されたもの)、総説あるいは意見論文は本研究の目的に適合しないため除外した。また、和文については、論文の投稿規定がインターネット上で確認できない雑誌、および査読の存在が確認できない雑誌に掲載された論文は除外した。

以上のスクリーニングを通過した論文を対象として、研究目的や対象とした種、生育地タイプなどについて定性的に分類するリストを作成した(分類項目については第1表)。論文の分類は、論文1本につき著者のうち3人が評価を行い、複数の合意があった内容のみを採用した。なお、複数の選択肢がある分類項目(例えば研究目的や生育地タイプ)については、複数選択を許容した。標準和名は米倉・梶田 (2003) に、学名は The Plant List (2010) に基づき種名を統一した。

結果と考察

今後の効果的な外来種管理を立案する上で必要となる研究

対象とした2000年から2012年までに発表された論文のうち、計152件(和文80件、英文72件)が設定した基準に合致した。研究目的、生育地タイプ、対象種ごとにそれぞれ集計すると、各項目においてカテゴリー間で公表された論文数が異なっていた(対象種ごとの研究目的と生育地タイプについては、電子付録付表1参照)。まず研究目的別に分類された論文数を比べると、外来植物の種特性を扱った論文の数が47編と最も多く、管理手法(36編)、生態影響(36編)、侵

第1表 論文の集計に用いた分類項目

分類項目	カテゴリー
研究目的	侵入経路 侵入されやすい生育地の特性 種特性 生態影響 管理手法 その他
生育地タイプ	河畔 森林 農地 島嶼 草地 都市 陸水域 法面 海岸 高山 その他
侵入ステータス	不特定 特定外来生物 要注意外来生物 未指定種

第2表 各研究目的で行われた論文数

研究目的	論文数
侵入経路	6 (4)
侵入されやすい生育地の特性	32 (12)
種特性	47 (27)
生態影響	36 (28)
管理手法	36 (9)
その他	13 (2)

複数の研究目的に分類された論文を含むため、合計は評価論文総数と一致しない。括弧内の数値は英文論文の数を示す。

入されやすい生育地の特性(32編)、その他(13編)と続き、侵入経路を扱った論文が6編と最も少なかった(第2表)。以降、それぞれの研究目的について主に関わる侵入段階の順に、参考となる国内外の事例を紹介しつつ今後求められる研究について考察した。

侵入経路

外来植物の侵入防止は効果が大きく管理コストが低い場合、最も優先されるべき防除手法である(Simberloff *et al.* 2013)。侵入防止の有効性はニュージーランドに見ることができる。ニュージーランドでは、19世紀の100年間は定着した外来哺乳類の種数が約0.3種/年の速度で増加し続けていた。しかし20世紀に入り公共認識が変化しバイオセキュリティが強化された後は、外来哺乳類の種数の増加が止ま

Box. 1 Hulme *et al.* (2008) に基づく侵入経路の区分と WTO/SPS 協定

放逐 (release)：放逐を目的とし意図的に導入される場合をさす。例としては生物的防除資材が挙げられる。

逸出 (escape)：ある区域に意図的に導入された種が、人間の管理下から非意図的に逸出するケースをさす。逸出させた当事者の意図の程度は問わない。例えば、管理下にある池から隣接する河川への逸出は、予期せぬ洪水による流出から、池内の除草後に生じる廃棄物の河川への投棄によるものまでを含む。

混入 (contaminant)：意図的に導入される特定の商品（農産物など）に混入することで、非意図的に外来種が持ち込まれるケースをさす。穀物に混入する雑草種子が典型例である。商品に関する情報から混入する種やその特性をある程度予測することができる。

密航 (stowaway)：人間の移動により外来種が直接持ち込まれるケースをさす。例えば、車両や海上輸送コンテナに土壌と共に付着し持ち込まれる種子がこれにあたる。特定の商品の移動によるものでない点が混入と異なる。

人間の設置した通路（道路や運河など）を経た自立的な分散 (corridor)：本来は自立的な分散が困難であった区域に、人間がトンネルや運河、橋などのインフラを設置したことで、地理的障壁が取り除かれ、その後、生物が自立的に分布を拡大し新たに侵入した場合をさす。

侵入地からの自立的な分散 (unaided)：人為（上記5つの侵入経路のいずれか）を介して自然分布域外に定着した種が、その定着域から自立的に分散する場合をさす。

WTO/SPS 協定：WTO (World Trade Organization:世界貿易機関) は、自由貿易の維持・拡大を目的に 1995 年に設立された。SPS 協定 (Sanitary and Phytosanitary Measures Agreement: 衛生植物検疫措置の適用に関する協定) は、食品安全と動植物（家畜・栽培植物と野生動植物の双方を含む）の保全のために、輸入品の国内での流通を制限する SPS 措置（衛生植物検疫措置）の基準を定めた協定である。この協定は SPS 措置が、本来の目的と異なり、国内産業保護のために使われることのないよう、輸入制限などを行うには、その措置が国際基準に準じ、科学的根拠に基づくという正当性を示すことを求めている。

り、減少に転じている (Simberloff *et al.* 2013)。また、オーストラリアでは、検疫によって侵略的となりうる外来種の侵入を阻止することで、その導入によってもたらされうる利益を差し引いても、50 年間で 16.7 億米ドルの出費を節約している (Keller *et al.* 2007)。このように侵入を防止する施策をとることは経済的な効果も大きく非常に有効であるといえる。しかし、このような施策をとる際の科学的な根拠となりうるにもかかわらず、侵入経路の特定を研究目的としていると分類された論文の件数は最も少なく（6 件；第 2 表）、早急かつ重点的に研究を進めるべき課題であることが明らかとなった。

本稿で対象とした国内事例のうち、外来種の侵入経路の特定を目的とした論文は、海外から国内への侵入経路に注目したものと、国内での侵入地域から未侵入地域への侵入経路に注目したものが含まれていた。前者に該当する論文としては、Kurokawa *et al.* (2004, 2011)、浅井ら (2007, 2009) が該当していた。これらは、対象外来種の遺伝構造を解析し日本国内への侵入経路を系統ごとに推定したもの (Kurokawa *et al.* 2004, 2011) と、輸入した農産物中に混入し持ち込まれた外来種種子の種組成を手作業により明らかにするもの (浅井ら 2007, 2009) に大別された。また、本稿の検索でキーワードの不一致により抽出されなかったが Shimono and Konuma (2008) は、日本国内に輸入された春コムギ穀粒内に混入しやすい外来種の種子の特性を、輸出国であるカナダのコムギ畑における各

種の発生量や、カナダでの混入種子の除去方法を検討した上で明らかにしている。

一方、国内での侵入地域から未侵入地域への侵入経路を扱った研究については、対象外来種の地域個体群間における遺伝構造の相違から侵入経路を推定した、Imaizumi *et al.* (2006) および Kurokawa *et al.* (2009) が該当した。以降は主に国境を越える持ち込みについて扱うが、国内での県境などの境界を越える持ち込みについても同様に考える必要がある。

Hulme *et al.* (2008) は、欧州の事例を示しつつ、侵入経路を放逐 (release)、逸出 (escape)、混入 (contaminant)、密航 (stowaway)、人間の設置した通路（道路や運河など）を経た自立的な分散 (corridor)、侵入地からの自立的な分散 (unaided) に大別することを提案している。日本国内では、これまで定着した外来種についての侵入経路が包括的に整理されていないため、国内の現状を理解するためにはその整理が必要とらるう（それぞれの侵入経路の説明については Box 1 参照）。また既に持ち込まれているものの侵入経路を特定できていない種に対しては、効率的・効果的にその経路を特定するしくみを検討する必要がある。侵入経路の特定には、DNA バーコードライブラリに登録された塩基配列を参照し、対象サンプルの種名を塩基配列から同定する DNA バーコーディングなどの技術が有効かもしれない (井鷲・陶山 2013)。さらに、侵入経路に関する知見を蓄積するデータベースを構築し、解析することで、貿易相手国や取引品目の組み合わせから、持ち

込まれやすい種を特定することも可能となるかもしれない。侵入経路に関する研究は、他国との協同により効果的に推進することが可能となる。他国との協同のためにも、まず国内での現状把握、情報整理が求められる。

侵入されやすい生育地の特性

本稿で研究目的が外来種に侵入されやすい生育地の特性の把握と分類された論文は、農地や森林といった特定の生育地タイプ内における侵入されやすさと関連した環境条件を現地調査により明らかにしたものと、外来種の分布と生育環境条件の情報に基づき分布予測統計モデルを構築し侵入可能性が高い区域を広域スケールで明らかにしたものの2つに大別された。

国内への侵入防止や、国内での管理の失敗により、外来種が管理外の環境に定着した場合、早い段階で定着個体を発見し、根絶することが効果的かつ経済的な対策となる (Simberloff *et al.* 2013)。早期の定着個体を効率的に発見するには、重点的に見回すべき場所を絞り込むことが有効である (Pyšek and Richardson 2010)。発見すべき種が定まっておらず、かつ比較的少数の種であるため個別の対応が可能な場合は、種の分布モデル (対象種の分布と生育環境条件の関係を定式化したモデル; 詳しい説明は角谷 2010 を参照) 等を用いて侵入可能性が高い区域を予測することにより、重点的に見回すべき地域を絞り込むことができる (Pyšek and Richardson 2010)。モデルの構築は、発見すべき種に自然分布域外に定着した履歴がない場合については、天然分布域でのその種の分布と生育環境の関係のみを用いて行うことになる。しかし、天然分布域外に侵入した履歴がある場合は、天然分布域と侵入域での分布と生育環境の情報を併せて用いることにより予測精度を高めることができる (Broennimann and Guisan 2008)。また、将来的な対策に向けて、頑強な予測を得るには、対象とする種の分布予測を複数のアルゴリズム (例えば、一般化線形モデル、ランダムフォレストモデル、Maxent など) により求め、それらを平均化するという手法も提案されている (アンサンブルモデル; この手法の是非については Buisson *et al.* 2010)。また、種子生産量や散布距離、実生の定着率といった生活史パラメータを用いて、対象種の動態を計算機上で再現するモデルであるプロセスモデル (例えば、Fukasawa *et al.* 2009; 水口 2011) も対象種の侵入域を予測する有効なモデルである。頑強な予測を得るには、種の分布モデルとプロセスモデルの双方で定着確率を予測し、一貫して定着率が高いと判断された区域を把握するというアプローチも有効だろう。

発見すべき種が多数であり個別の対応が難しい場合や種が特定できていない場合には、外来種に侵入されやすい条件を持つ生育地が優先的な見回りの対象となるだろう。本稿で、侵入されやすい生育地の特性を把握することが研究目的と判断された論文は、1つの生育地タイプに侵入した1種の外来

種を対象としたものが大半であり、侵入されやすい生育地の条件を一般化した事例は見られなかった。生育地タイプ間の侵入されやすさの違いが生じる原因を解明することは、侵入されやすい生育地の一般的な条件を理解し、外来種管理に有益な知見をもたらすことが期待される。生育地タイプ間の侵入されやすさの違いは、1) 国内に定着した外来種のうち各生育地タイプに定着しうる種数と2) 各種の散布体を持ち込まれた回数と一回の持ち込みあたりの各種の散布体量、3) 実際に各生育地タイプに定着した種数を把握することで、評価が可能となると考えられる。これらの要因の内、2) と3) を考慮した事例 (Chytrý *et al.* 2008a) はあるが、1) を含めて考慮したものは見られず、今後の研究課題の1つといえる。1) ~3) に関する情報の収集には多大な時間と労力が必要と考えられる。このため、まずは地域スケールでの生物目録等を活用し、各生育地タイプに定着した種のリストを作成するところから始めるのが良いだろう。

現地調査より得られた、侵入されやすさを左右する要因についての知見は、上述の分布モデルに用いる変数の選択と結果の解釈だけではなく、生育地の侵入されやすさを決定する機構の理解にも重要である。ある生育地の侵入されやすさは、外来種の散布体の導入回数と導入1回あたりの散布体量 (散布体圧)、気温・土壌養分・水分などの侵入成功を妨げる非生物環境の厳しさ (非生物的抵抗)、そして、その群集の構成種との競争や捕食、病気の感染といった生物間相互作用の強さ (生物的抵抗) に影響されると考えられている (赤坂・五箇 2012)。国内で実施された現地調査に基づくこれまでの研究では、散布体圧、非生物的抵抗、生物的抵抗のそれぞれと関連のある変数 (例えば、種子供給源からの距離、生育地の物理環境、植生高など) と外来種の分布との相関関係は調べられてはいるが (例えば、平館ら 2008; Hata *et al.* 2010b; 宮脇・鷲谷 2010a)、これらの機構の相対的な重要性を検証した研究はない。今後、散布耐圧や生物的抵抗に注目した研究が進展し、侵入されやすい条件を機構から理解することで、外来種の早期発見や侵入されにくさを高める管理方策の確立への貢献が期待できる。

種特性

ある外来種の侵略性の高さや生態影響の大きさと関係する種の特性を理解することは、意図的な導入の可否の判断に重要な科学的な根拠を与える (赤坂・五箇 2012)。また、留意すべき種の社会的な特性 (例えば、用途など) を把握することは、意思決定者に外来種の賢明な利用への糸口を提供することにつながる。種特性の評価を目的とした47本の論文のうち300を越える種を扱った論文も見られるものの (第3表)、42本が個別もしくは6種以下の種の評価を行っていた。これら論文で、侵入する外来種の特性として頻繁に評価されていた種特性は、生長および種子発芽・シードバンクの特性であった

第3表 各研究目的に区分された1論文で扱われた外来植物の種数の最頻値、最小値、最大値

論文のタイプ	侵入経路	侵入されやすい 生育地の特性	種特性	生態影響	管理手法	その他
全論文	1 (1, 92)	1 (1, 139)	1 (1, 15081)	1 (1, 114)	1 (1, 5547)	1 (1, 97)
英文論文	1 (1, 1)	1 (1, 139)	1 (1, 316)	1 (1, 18)	1 (1, 8)	10.5 (1, 20)
和文論文	77 (62, 92)	1 (1, 53)	1 (1, 15081)	1 (1, 114)	1 (1, 5547)	1 (1, 97)

括弧内の数値は、それぞれ最小値、最大値を示す。

(例えば、石川ら 2003; 本田ら 2004; Ichihara *et al.* 2009)。この他、評価された種特性には、種子形態 (Shimono and Konuma 2008)、種子散布特性 (Nakayama *et al.* 2007)、葉の生理学的特性 (Yamashita *et al.* 2000)、葉のフェノロジー (村上ら 2008)、クローン繁殖能力 (Akasaka *et al.* 2012)、微環境に対する実生の形態的可塑性 (Akasaka and Tsuyuzaki 2005)、アレロパシー活性 (服部ら 2004)、菌根菌との共生関係の効果 (Funatsu *et al.* 2005) などがあった。外来種を効率的に管理する上で、高い侵略性や大きい生態影響を持つ種を対象として、個別に侵略性や生態影響の大きさと深く関わる外来種の特性について理解を深めることは欠かせない。しかし、日本国内に侵入する外来植物の種数は増加する一方であるため、全ての種について個別の評価を行うことは現実的ではない。また、種特性と侵略性や生態影響の大きさの関係性を明らかにするには、複数の在来種もしくは外来種の間での比較が必要になる (研究目的により比較対象が異なる点には注意が必要: 赤坂 2010)。これらの状況を踏まえると、特に深刻な影響が見込まれる一部の種を除き、今後、種の特性を把握する目的で行う研究では、個別の種を扱うのではなく、多種の比較を行うことが有効であろう。日本国内で多種を比較し、侵略性と関係ある形質を明らかにした事例としては、例えば、Akasaka *et al.* (2012) と宮脇・鷺谷 (2010b) が挙げられる (同様のアプローチを用いた国外の研究事例については赤坂 2010 を参照)。Akasaka *et al.* (2012) は、北海道で定着が確認された 316 種の外来植物を対象に解析を行い、種子が小さい、クローン繁殖をする能力を持つ、緑化や飼料として利用される、侵入してからの期間が長いという特性が侵略性の高さに関係することを示している。一方、宮脇・鷺谷 (2010b) は、米国を原産地を含む維管束植物 15081 種を対象に解析を行い、日本の河川域への侵入状態は、農耕地における雑草ステータス、分布範囲、湿地選好性、意図的導入の有無と関係することを示している。紹介した 2 論文は、系統を限定しない 300 種以上を対象としていたが、対象種数が少なくても、同じ科や属の複数種の特性を現地調査で把握し比較することで重要な知見を得ることができるだろう (Pyšek and Richardson 2007)。加えて、これまで日本国内で実施された種の特性の評価は、先述の宮脇・鷺谷 (2010b) ともう一例 (Phartyal *et al.* 2012)

を除いて既に国内に侵入した種を対象に行われていた。しかし、現時点では侵入していない種であっても、今後、国内へ侵入し脅威となる可能性のある種に対しては、事前に国内への定着可能性の評価を行うことが侵入防止対象種を選定する上で重要となる。

これらの研究によって得られる侵略性や生態影響の大きさと関連する特性についての知見は外来種の導入前に実施されるリスク評価システムの評価基準に採用されることが期待される。日本国内で提案されている外来植物のリスク評価システムとしては、オーストラリアのシステムである Australian weed risk assessment system (AWRA) を、日本国内での状況に合うように調整したものがある (Nishida *et al.* 2009)。このシステムは、国内で既に定着している害のある種 (weeds) とそうでない種 (non-weeds) を高い精度で正しく区分している。しかし、weeds の判別精度と比べると、non-weeds の判別精度は充分とはいえない。さらに、評価に用いた外来種は概ね国内に定着してから 40 年以上が経過した種であったため、侵入してからの期間が短い種を対象とした場合における判別精度は明らかではない。また、別の課題として、世界各地で “sleeper weeds” (帰化した後 50 年以上を経て急激に分布拡大する雑草; Groves 2006) が問題となっているが、現行の AWRA では sleeper weeds を十分に検出することができない。近年、外来植物に関するデータの整備や、AWRA の検証および新たな雑草リスク評価方法の開発は進んでおり (例えば、Aikio *et al.* 2010; McGregor *et al.* 2012; Morin *et al.* 2013)、新たに得られた知見を取り入れた上で雑草リスク評価手法の精度を向上させる必要がある。また、外来種の侵入成功に影響する種の特性は、侵入の初期段階では散布体圧や侵入後経過期間 (residence time) などの社会経済的な特性がより重要であり、侵入段階が進むにつれ、相対的に生物学的な特性が重要となる (Pyšek *et al.* 2009)。そのため、生物学的なアプローチと同時に社会経済的な特性も考慮したリスク評価基準の検討も必要となる。

生態影響

生物学的侵入の影響を理解し、被害を最小限にする対策を講じるには、外来種の生態影響についての実態把握とその影響を与える機構の理解が欠かせない (Levine *et al.* 2003)。対

第4表 全評価論文のうち各研究目的の1論文で対象とした生育地タイプ数

対象とした生育地 タイプ数	侵入経路	侵入されやすい 生育地の特性	種特性	生態影響	管理手法	その他
1	6 (4)	15 (5)	34 (18)	25 (19)	33 (8)	10 (1)
2	0 (0)	13 (4)	8 (7)	11 (9)	3 (1)	1 (0)
3	0 (0)	2 (2)	2 (1)	0 (0)	1 (0)	2 (1)
4	0 (0)	1 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
5	0 (0)	1 (1)	1 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
6	0 (0)	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
計	6 (4)	32 (12)	47 (27)	36 (28)	37 (9)	13 (2)

括弧内の数値は英文論文の数を示す。

象事例のうち、両者を含め生態影響について明らかにすることを目的とした論文は、他の研究目的と比べて比較的多く36編が発表されていた。その内の11編は、在来植物に対する被陰や空間を巡る競争について言及していた。外来種との光や空間の競合は在来植物群集へ影響を与えるが（例えば、Akasaka and Tsuyuzaki 2009; Muranaka 2012）、外来種からのアレロパシー物質や落葉落枝の供給も在来植物の実生更新や被度を大きく減少させる機構である（例えば、Hata *et al.* 2010a; Saito and Tsuyuzaki 2012）。アレロパシー物質や落葉落枝が在来植物の個体群や群集に影響を与えている場合、外来植物の植物体を除去しても影響はその場に残留し続ける。このため、個体群や群集を侵入前の状態に戻そうとするのであれば、別の対策が必要となることがある（Pyšek and Richardson 2010）。また、外来植物は在来植物だけではなく、複数の生態系要素にも影響を及ぼす（Vilà *et al.* 2011）。例えば、シナダレスズメガヤ（*Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees）は、河原に固有な植物の光合成や更新を妨げるだけでなく（Matsumoto *et al.* 2000; Muranaka 2012）、土砂堆積の促進（中坪 1997）やバツタ類の分布の改変も引き起こす（Yoshioka *et al.* 2010）。外来種の生態影響についての評価結果を解釈する際にまず注意したい点として、評価する観点によって、影響の程度が全く異なる場合があることが挙げられる。例えば、ロイルツリフネソウ（*Impatiens glandulifera* Royle）の場合、侵入に伴う空間の競合は、必ずしも侵入先の植物群集の種多様性に深刻な影響を及ぼさないが（Hejda *et al.* 2009）、この種は訪花昆虫を強く惹きつけるため、周囲の在来植物種の種子形成に対して大きな影響を及ぼしている（Chittka and Schürkens 2001）。また外来植物の影響は状況依存であることが多い点も留意したい（Vilà *et al.* 2011）。例えば、植物群集に対するキナノキ（*Cinchona*）属の種の影響は生育地タイプによって変化し、固有種数を減らす場合も増やす場合もある（Fischer *et al.* 2009）。本稿で対象とした研究事例の大半は単一の生育地タイプのみを対象としていたが（第4表）、外来植物の生態影響を包括的に理解する上では、注目する影響を受ける対象や生育地を広げるこ

とも時には必要となる。本稿で対象とした国内事例のうち生態影響に注目した論文のほとんどはその影響を追跡した期間が2、3年以内と短く、それ以上の期間にわたって生態影響を継続的に追跡した事例はAkasaka and Tsuyuzaki (2009)とChiba (2010)のみであった（本稿の検索では抽出されなかったが、他に村中・鷺谷 2001）。外来植物の影響は、必ずしも侵入後直ちに顕著になるとは限らず、継続的な調査により初めて明らかとなる場合もある（Pyšek and Richardson 2010）。外来種の生態影響に対しては、その生態影響は侵入後の時間と共に強まるのか、またその影響が急激に変化するポイントは存在するのかといった疑問が、今後駆除・管理を行う上で明らかにすべき課題として残されている（Blossey 1999; Strayer *et al.* 2006）。これらを明らかにする上で、長期的な継続調査は不可欠である。

管理手法

生態影響を目的とした事例と同様に、管理手法が目的と分類された研究でも、対象とした生育地タイプがほとんどの場合1論文で1つであり（第4表）、実験期間も5年未満と短期的なものであった。管理に対する外来植物の応答は生育地タイプにより異なるため、効果的・効率的な管理方策は生育地タイプに依存する（Luken and Mattimiro 1991; Saito and Okubo 2012）。また、埋土種子や栄養繁殖器官の寿命が長い種を管理の対象とする場合、駆除により地上に植物体が見られなくなっても、その後の攪乱などをきっかけとして再び地上に植物体が現れる可能性がある。そのため、管理の成功を確認するには長期的な経過観察が必要となる。

管理手法を検討した論文のほとんどにおいて対象とした外来植物は1種であった（第3表）。特定の外来植物1種のみ注目しての駆除手法を検討した場合、その種が駆除されても、他の外来種が優占し（畠瀬ら 2009; 橋本 2010; Saito and Tsuyuzaki 2012）、皮肉なことに、同じ場所で持続的に外来植物の駆除活動をつづけることになりかねない（Reid *et al.* 2009）。そのため、同じ生育地タイプに侵入する複数の種を同時に扱う管理手法の検討は今後欠かせない。さらに、引き

抜き（例えば、大澤・赤坂 2009）、刈り取り（橋本 2010）、表土剥ぎ取り（小栗ら 2012）、薬剤の利用（藤沼ら 2008）、土壌の改質（田中ら 2011）、天敵利用（Ichihara *et al.* 2012）等、複数の管理方法が検討されているが、方法間で管理効果・効率を比較した事例は僅少である（大澤・赤坂 2009）。管理に用いる方法によって再生する植物群集の組成や構造は異なっており、目的に応じて必要な手段やその組み合わせを検討する必要がある（Flory and Clay 2009）。外来種管理の本来の目的は外来種を駆除すること自体ではなく、外来種の影響を抑え本来の生態系のバランスを取り戻すことにある。このため、管理目標は理想的には外来種の根絶であるものの、根絶が難しい場合には、生態影響が問題とならない程度の密度や、その密度を保つための管理手法についての検討も必要となる（Gooden *et al.* 2009）。

駆除や抑制などの管理は、外来種の分布が拡大し、生態影響が顕在化した場合の外来種管理における最終手段である（Simberloff *et al.* 2013）。上述のような状況下では、管理は時間や労力、費用を必要とするため、根絶に向けた効率が悪く、また根絶達成の見込みが不明確なことも多い。管理手法は必ずしも万能ではなく、実施には留意点がある場合もある。研究によりある程度有効性を確立できた手法については、その手法の不確実性や留意点、失敗例を示しつつ公開し、その有効性や限界を共有し、それに基づいて研究を推進することが、より広範な状況に対応できる手法を確立するには有効と考えられる。取り返しのつかない失敗を広範囲で招くことを防ぐため、手法およびその使用事例の公開を徐々に進めるべきであろう。

ここで効率的な管理に向けて必須であるのにも関わらず、国内での検討が不十分な研究課題として、定着後の外来植物に対するリスク管理手法（post-border weed risk management）についても触れておく。外来植物の管理に用いることができる資源（経費・時間・人手）は有限であり、多くの場合は潤沢とはいえない。そのため、有限な資源で管理の成果を最大化するためには管理すべき種あるいは場所に対しては優先順位を付ける必要がある。この種・場所に対する管理優先順位付けは、侵入初期の外来種に対する根絶や分布封じ込めといった対策と、既に広範に分布した外来種を対象とした被害緩和対策の両方で有効であろう。しかし、実際には、外来種の定着により生じうる被害と防除に要するコスト、根絶の成功確率を勘案することが欠かせないという認識はあるものの、日本国内において広く適用できる手法は確立されていない。これは、各外来種の個体群動態や、管理に対する応答、管理自体により生じうる生態影響、そしてそれらの環境条件による違いを考慮した予測が必要となること、そして、場合により生育地間での価値比較が求められることに一因がある。しかしながら、世界的には実績が積み重ねられており

第5表 各生育地タイプを対象とした論文数

生育地タイプ	論文数
河畔	41 (14)
森林	37 (24)
農地	33 (12)
島嶼	28 (19)
草地	9 (5)
都市	8 (2)
陸水域	8 (2)
法面	7 (0)
海岸	6 (4)
高山	0 (0)
その他	10 (7)
不特定	21 (13)

（Auld 2012; Downey 2010; Oreska and Aldridge 2011）、それらを参考にしながら日本で広範に適用できる方法を検討していく必要がある。

生育地タイプ

生育地タイプごとに発表論文数を比較すると、河畔で最も研究が多く実施され（41 編）、森林（37 編）、農地（33 編）、島嶼（28 編）では 20 編以上の論文が公表されていた（第5表）。一方で、陸水域、草地、都市、海岸、法面を対象とした研究は 10 件以下と少なく、高山を扱った論文はなかった。研究例が少ない生育地の中でも、陸水域と海岸は現在、人間活動による生態系の劣化が著しく（Vitousek *et al.* 1997）、その上外来種に侵入されやすい（Chytrý *et al.* 2008b; Hussner 2012）。日本国内の陸水域においても、多くの外来水生植物の侵入が生物多様性保全上の脅威として認識されている（Kadono 2004）。日本国内において高山での研究事例は設定した条件で検索した範囲においてなかったが、登山客の増加に伴い、高山へ侵入する外来植物が増加することや、将来的な気候変動により定着可能性が高まることで、その生態影響が深刻化することが懸念される（Pauchard *et al.* 2009）。これらの生育地タイプにおいては特に積極的な研究実施が求められる。

各生育地タイプで実施された研究のほとんどにおいて、一編の論文で 3 種以下を対象としていた（第6表）。前述したように、多種を同時に扱う研究は、侵略的な種や侵入されやすい生育地の一般的な特徴を明らかにし、また複数の外来種が混在する生育地の管理手法を構築するために重要となる。このため、今後、各生育地タイプにおいて対象とする外来種の種数を増やすことも求められる研究の方向性の 1 つであろう。

本稿で分析対象とした国内事例の約 72% の事例（110 編）において、明示的に扱った生育地タイプは 1 つであり、4 タイプ以上を扱った論文は 3 編のみであった（第4表）（ただし、生育地タイプを特定しないとしている研究が 21 件あることにも注意）。しかし、複数の生育地タイプに侵入可能な外来

第6表 各生育地タイプに区分された1論文で扱われた外来植物の種数の最頻値、最小値、最大値

論文のタイプ	河畔	森林	農地	島嶼	草地	都市	陸水域	法面	海岸	高山	その他	不特定
全論文	1 (1, 15081)	1 (1, 139)	1 (1, 139)	1 (1, 20)	3 (1, 139)	1.5 (1, 97)	1.5 (1, 83)	1 (1, 3)	3 (1, 6)	0 (0, 0)	1 (1, 3)	1 (1, 5547)
英文論文	1 (1, 8)	1 (1, 139)	1 (1, 139)	1 (1, 20)	1 (1, 139)	1.5 (1, 2)	1.5 (1, 2)	0 (0, 0)	2 (1, 6)	0 (0, 0)	1 (1, 1)	1 (1, 316)
和文論文	1 (1, 15081)	1 (1, 53)	3 (1, 97)	1 (1, 6)	3 (1, 4)	2.5 (1, 97)	2 (1, 83)	1 (1, 3)	5 (4, 6)	0 (0, 0)	1 (1, 3)	77 (2, 5547)

括弧内の数値は、それぞれ最小値、最大値を示す。

第7表 各研究目的に区分された論文での各侵入ステータスの種の取り扱い回数

侵入ステータス	侵入経路	侵入されやすい 生育地の特性	種特性	生態影響	管理手法	その他
全論文						
特定外来生物	1	11	2	11	6	5
要注意外来生物	9	39	31	53	41	8
未指定種	119	33	126	85	78	28
英文論文						
特定外来生物	1	2	0	1	2	0
要注意外来生物	2	5	12	12	8	4
未指定種	0	3	13	22	5	17
和文論文						
特定外来生物	0	11	2	11	6	5
要注意外来生物	8	39	26	52	39	4
未指定種	119	31	116	68	76	11

種を特定しない論文は集計から除外した。

種も少なくない。複数の生育地タイプを包括的に扱う必要性は、例えば、耕地での外来種の被害を予防するには、耕地で問題となる種を駆除・根絶するだけでなく、周囲からの散布体の供給を防ぐことが重要であることを想像すると理解しやすい。注目する外来種の動態を理解するには、流域や景観といった広域を扱う視点で現象を捉えることが有効であると考えられる。

侵入ステータスに応じた研究実施の必要性

本研究で対象とした152編の研究論文において、計407種が対象とされていた。本稿は、2000年以降に発表された研究論文を対象としたため、それ以前に発表されたものは含まれていない。このため、国内で研究対象とされた外来植物の総種数の評価としては過小評価となっているかもしれない。しかし、村中(2009)によると1945年以降から2008年に発表された論文のうち、「外来」を表題に含む論文の約90%以上が2000年以降に発表されていた。このことから、我々が示した研究対象となった外来植物の種数は、国内の傾向を概ね示しているといえる。

次に研究対象となった種数を侵入ステータス(特定外来生物とされている種、要注意外来生物とされている種、未指定種)ごとに比べてみる。研究対象とされた未指定種は332種

であり、これは日本国内の総外来種数2237種(村中2008)の2割に満たない(個別の種が研究対象とされた回数については電子付録付表2参照)。このことから、国内に定着した外来種の大半は、研究対象になっておらず、防除・駆除対策を検討する上で重要な科学的検証に耐えうる生態情報を種レベルで利用可能なケースは極めて限定的であることがわかる。一方、要注意外来生物とされている種は65種、特定外来生物とされている種は11種が研究対象とされており、それぞれのリストに含まれる種の77%(全部で84種群)、92%(12種)にあたる。特定外来生物に指定された種のうち、研究対象とされていなかった種は、国内に未だ侵入していないスパルティナ・アングリカ(*Spartina anglica* C. E. Hubb.)1種のみであった。つまり、特定外来生物に指定され日本国内に既に定着し対策が急がれる全ての植物種が何らかの研究の対象となっていた。しかし、各研究目的で対象となった種数を侵入ステータスごとに比べると、管理手法や侵入経路といった実地での対策に必要な知見は必ずしも十分に得られていないことが読み取れる(第7表)。特定外来生物に指定され国内に侵入している11種では生態影響と侵入されやすい生育地特性に関しては研究が行われているものの、管理手法が検討されているのは6種であり、侵入経路について研究対象とされたものは1種のみ(アレチウリ(*Sicyos angulatus* L.);

Kurokawa *et al.* 2009) であった。要注意外来生物リストに掲載されている種のうち、そのおよそ半数の種が、種特性、侵入されやすい生育地の特性、生態影響、管理手法を目的とした研究でそれぞれ研究対象とされていた。しかし、特定外来生物の場合と同様に、侵入経路に関しては研究事例が少なく、対象とされたのは9種のみであった。特定外来生物および要注意外来生物において生態影響を目的として研究された種が多い理由は、外来生物法によりリストされた種であるから選択的に研究対象とされたこと (Ohsawa and Osawa 2014)、および逆に研究対象とされていたため外来生物法でリストされたことの双方がありうる。いずれにせよ、これらの種については、管理方策をとる上で必要となる該当種の生態影響について、何らかの手がかりが得られる可能性が高いことを示唆している。先述したが、国内の各生育地タイプにそれぞれ侵入・定着した、特定外来生物および要注意外来生物を含む外来植物の種数について、定量的かつ包括的な情報はない。そのため、各生育地タイプでの定着した外来植物種数に応じた十分な研究がなされているか現時点では評価することができない。この理由から、今回は生育地タイプごとに集計した各侵入ステータスの種の取り扱い回数を示していない。今後、基盤情報として、各生育地タイプに侵入定着した種を網羅的に整理した後に、各侵入ステータスの種と生育地タイプの関係性を評価することで、生育地タイプごとに優先的に研究すべき種や課題を明らかにすることが求められる。

繰り返しになるが、外来植物は、その侵入段階により優先すべき対策が異なることが指摘されている (Pyšek and Richardson 2010; Blackburn *et al.* 2011)。このことは、各種の侵入段階、あるいは侵入ステータスにより、その種を管理する上で当面必要な研究が異なることを意味している。すなわち、生態系への深刻な影響が認められる、あるいは予測される種 (例えば、特定外来生物、要注意外来生物) については、管理手法や優先的に対処すべき場の把握、影響が特に顕著となる条件について特に優先的に明らかにする必要がある。また、未侵入あるいは侵入初期の種については、侵入経路の特定と特に警戒すべき生育地タイプの把握や生態影響の評価が必要である。それ以外の種に関しては、一般的に侵略性や生態影響の大きさと関連する種の特性を用いた評価を実施し、必要に応じ個別に対策をとるとするのが現実的だろう。特に未侵入であっても気候条件の近い他国で侵入が確認されている種は、国内で侵略性を示す可能性が高いため (Kumschick and Richardson 2013)、慎重な取り扱いが求められる。

使用言語

これまでの議論において、英文・和文の区別については言及していなかったが、研究成果をいずれの言語で公表するかは、外来生物の管理を行う上で重要な意味を持つ。国内で実

際に管理に携わる実務者にとって英文論文の解読はしばしば困難となる。一方、特に海外からの輸入規制を伴う外来種管理には、WTO/SPS 協定のため、相手国も判断可能な科学的な根拠、つまり英文で書かれた学術論文が強く求められる (赤坂・五箇 2012; WTO/SPS 協定については Box 1 参照)。このことから英文論文での公表を欠かすことができない。そこで、研究成果を社会へ効果的に還元するには、侵入経路、生態影響や種特性を明らかにする研究については、特に優先的に英文での論文公表を行うことが求められよう。一方、管理方法に関する研究については、英文での論文公表を進めつつも、和文での普及記事の執筆も積極的に進めることが望まれる (例えば、発表年が前後しているが赤坂 2010 と Akasaka *et al.* 2012)。

おわりに

これまで示したように、今後の外来植物研究には、研究対象の拡張と絞込みの双方が必要になると考えられる。研究対象の拡張は、次の2つの観点で行う必要がある。第一に求められるものは、対象とする生育地や影響を受ける生態系要素、検討する種特性や生態影響、管理手法の拡張である。これにより対象とする外来種の生物学的侵入の進行やそれに起因する影響についての理解の深化が見込まれる。雑草学における具体案としては、生物学的な特性に加え、地域、作目、栽培体系、雑草種ごとに、発生状況と被害程度に関するリストを作成・解析することにより、慣行農法において被害を示す雑草種に関する情報を整理し理解を促進することが可能になる。第二に求められるものは、1つの研究で対象とする外来種数の拡張である。これにより生物学的侵入に関わる生態現象の一般則の導出、生物学的侵入についての理解およびその体系化、そして外来種対策の学術的な根拠の確立が期待できる。この拡張は多くの外来種に関する情報を収集し解析するマクロ生態学的アプローチ (例えば、宮脇・鷲谷 2010b; Akasaka *et al.* 2012) と、複数の研究の結果を統合して統一的な理解を試みるメタ解析を用いたアプローチ (例えば、Vilà *et al.* 2011) を適用することで実現が可能である。一方、研究対象の絞込みは、実地で活用できる管理技術を確立する上で特に必要であると考えられる。現状の学術的理解を応用することで、管理方策の大まかな方向性の提示は可能であろう。しかし、現状の学術的理解は、様々な条件下での外来種管理に対し、有効な情報を常に提示できるほど進んではない。このため、特に問題となる種や環境条件に焦点を合わせた絞込みを行った上で研究を遂行することは、実用上不可欠であり、またそのような個別事例の蓄積は体系的な理解を進めるもう1つの推進力となることが期待される。生物学的侵入に関する体系的な理解が十分に進み、条件依存的な外来種の振る舞いに対応した個別具体的な管理手法の提案が可能となるには一層の研究の進展が求められる。今後、グローバル化が

進むことで、人や物の国際的な移動はさらに頻繁になり、侵入する外来種の量や機会が増加すると予測される (Bradley *et al.* 2012)。さらに、これまで交流が少なかった国との取引によって、これまで日本に持ち込まれたことのない新たなタイプの外来種が侵入する可能性もある (Bradley *et al.* 2012)。加えて、これまで国内に持ち込まれたものの気候条件の不一致により定着できなかった種の中には、気候変動によって将来的に定着が可能となる種が含まれていると考えられる (Bradley *et al.* 2012)。このような、これまで経験したことのない状況に対応していくには、経験に基づくパターンを外挿に頼らず、生物学的侵入の機構の理解に基づく対策が不可欠になる。生物学的侵入による将来的な被害を抑制するために、その機構の理解を進める基礎分野と、機構の理解に基づいて対応策を検討する応用分野の、双方のバランスの取れた発展が望まれる。

謝 辞

本稿の執筆に当たり、丸山香里氏には、文献の情報の整理や入力にご協力いただいた。ここに心からの謝意を表す。

引用文献

- Aikio, S., R. P. Duncan and P. E. Hulme 2010. Lag-phases in alien plant invasions: separating the facts from the artefacts. *Oikos* 119, 370–378.
- 赤坂宗光 2010. 外来生物の侵略性に関わる形質の解明に向けて. *日本生態学会誌* 60, 207–215.
- 赤坂宗光・五箇公一 2012. 外来種のマネジメント—侵略的種による影響の予防と抑制. 森章編「エコシステムマネジメント—包括的な生態系の保全と管理へ—」, 共立出版, 東京, pp. 98–123.
- Akasaka, M., M. Takada, R. Kitagawa and H. Igarashi 2012. Invasive non-native species attributes and invasion extent: examining the importance of grain size. *Journal of Vegetation Science* 23, 33–40.
- Akasaka, M. and S. Tsuyuzaki 2005. Tree seedling performance in microhabitats along an elevational gradient on Mount Koma, Japan. *Journal of Vegetation Science* 16, 647–654.
- Akasaka, M. and S. Tsuyuzaki 2009. Comparisons of recruitment, survival, and growth in invasive and native saplings on a volcano. *Plant Ecology* 202, 235–245.
- 浅井元朗・黒川俊二・清水矩宏・榎本敬 2007. 1990年代の輸入冬作物中の混入雑草種子とその種組成. *雑草研究* 52, 1–10.
- 浅井元朗・黒川俊二・清水矩宏・榎本敬 2009. 1995年に輸入された乾草中に混入していた雑草種子. *雑草研究* 54, 219–225.
- Auld, B. 2012. An overview of pre-border weed risk assessment and post-border weed risk management protocols. *Plant Protection Quarterly* 27, 105–111.
- Blackburn, T. M., P. Pyšek, S. Bacher, J. T. Carlton, R. P. Duncan, V. Jarošík, J. R. U. Wilson and D. M. Richardson 2011. A proposed unified framework for biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution* 26, 333–339.
- Blossey, B. 1999. Before, during and after: the need for long-term monitoring in invasive plant species management. *Biological Invasions* 1, 301–311.
- Bradley, B. A., D. M. Blumenthal, R. Early, E. D. Grosholz, J. J. Lawler, L. P. Miller, C. J. Sorte, C. M. D'Antonio, J. M. Diez, J. S. Dukes, I. Ibanez and J. D. Olden 2012. Global change, global trade, and the next wave of plant invasions. *Frontiers in Ecology and the Environment* 10, 20–28.
- Broennimann, O. and A. Guisan 2008. Predicting current and future biological invasions: both native and invaded ranges matter. *Biology Letters* 4, 585–589.
- Buisson, L., W. Thuiller, N. Casajus, S. Lek and G. Grenouillet 2010. Uncertainty in ensemble forecasting of species distribution. *Global Change Biology* 16, 1145–1157.
- Chiba, S. 2010. Invasive non-native species' provision of refugia for endangered native species. *Conservation Biology* 24, 1141–1147.
- Chittka, L. and S. Schürkens 2001. Successful invasion of a floral market. *Nature* 411, 653.
- Chytrý, M., V. Jarošík, P. Pyšek and O. Hajek 2008a. Separating habitat invasibility by alien plants from the actual level of invasion. *Ecology* 89, 1541–1553.
- Chytrý, M., L. C. Maskell, J. Pino, P. Pyšek, M. Vilà, X. Font and S. M. Smart 2008b. Habitat invasions by alien plants: a quantitative comparison among Mediterranean, subcontinental and oceanic regions of Europe. *Journal of Applied Ecology* 45, 448–458.
- Downey, P. O. 2010. Managing widespread alien plant species to ensure biodiversity conservation: a case study using an 11-step planning process. *Invasive Plant Science and Management* 3, 451–461.
- Fischer, L. K., M. von der Lippe and I. Kowarik 2009. Tree invasion in managed tropical forests facilitates endemic species. *Journal of Biogeography* 36, 2251–2263.
- Flory, S. L. and K. Clay 2009. Invasive plant removal method determines native plant community responses. *Journal of Applied Ecology* 46, 434–442.
- 藤沼潤一・畑憲治・可知直毅 2008. 小笠原諸島における外来木本種モクマオウの薬剤による枯殺実験. *小笠原研究年報* 31, 19–29.
- Fukasawa, K., F. Koike, N. Tanaka and K. Otsu 2009. Predicting future invasion of an invasive alien tree in a Japanese oceanic island by process-based statistical models using recent distribution maps. *Ecological Research* 24, 965–975.
- Funatsu, Y., T. Nakatsubo, O. Yamaguchi and T. Horikoshi 2005. Effects of arbuscular mycorrhizae on the establishment of the alien plant *Oenothera laciniata* (Onagraceae) on a Japanese coastal sand dune. *Journal of Coastal Research* 215, 1054–1061.
- Gooden, B., K. French, P. J. Turner and P. O. Downey 2009. Impact threshold for an alien plant invader, *Lantana camara* L., on native plant communities. *Biological Conservation* 142, 2631–2641.
- Groves, R. H. 2006. Are some weeds sleeping? Some concepts and reasons. *Euphytica* 148, 111–120.
- 橋本佳延 2010. 都市河川におけるアレチウリ群落での刈り取りが種組成・種多様性に与える影響. *ランドスケープ研究 (オンライン論文集)* 3, 32–38.
- Hata, K., H. Kato and N. Kachi 2010a. Litter of an alien tree, *Casuarina equisetifolia*, inhibits seed germination and initial growth of a native tree on the Ogasawara Islands (subtropical oceanic islands). *Journal of Forest Research* 15, 384–390.
- Hata, K., J. I. Suzuki and N. Kachi 2010b. Fine-scale spatial distribution of seedling establishment of the invasive plant, *Leucaena leucocephala*, on an oceanic island after feral goat extermination. *Weed Research* 50, 472–480.

- 島瀬頼子・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. 木曽川におけるオオキケ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, 537–542.
- 服部真幸・平館俊太郎・荒谷博・西原英治・藤井義晴 2004. 主要な在来・帰化およびブラジル産雑草のアレロパシー活性のプラントボックス法による検定. 雑草研究 49, 169–183.
- Hejda, M., P. Pyšek and V. Jarošík 2009. Impact of invasive plants on the species richness, diversity and composition of invaded communities. *Journal of Ecology* 97, 393–403.
- 平館俊太郎・森田沙綾香・楠本良延 2008. 外来植物と在来植物との住み分け～これからの植生制御に向けて～. 関東雑草研究会報 19, 23–33.
- 本田裕紀郎・伊藤浩二・加藤和弘 2004. 種子の永続性に着目した我が国への植物の帰化可能性. 日本緑化工学会誌 30, 9–14.
- Hulme, P. E., S. Bacher, M. Kenis, S. Klotz, I. Kühn, D. Minchin, W. Nentwig, S. Olenin, V. Panov, J. Pergl, P. Pyšek, A. Roques, D. Sol, W. Solarz and M. Vilà 2008. Grasping at the routes of biological invasions: a framework for integrating pathways into policy. *Journal of Applied Ecology* 45, 403–414.
- Hussner, A. 2012. Alien aquatic plant species in European countries. *Weed Research* 52, 297–306.
- Ichihara, M., H. Inagaki, K. Matsuno, C. Saiki, M. Yamashita and H. Sawada 2012. Postdispersal seed predation by *Teleogryllus emma* (Orthoptera: Gryllidae) reduces the seedling emergence of a non-native grass weed, Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*). *Weed Biology and Management* 12, 131–135.
- Ichihara, M., M. Yamashita, H. Sawada, Y. Kida and M. Asai 2009. Influence of after-ripening environments on the germination characteristics and seed fate of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*). *Weed Biology and Management* 9, 217–224.
- Imazumi, T., S. Kurokawa and M. Ito 2006. Population structure of *Solanum carolinense* along the Takano River in Kyoto, Japan as determined by amplified fragment length polymorphism analysis. *Weed Research* 46, 219–225.
- 井鷲裕司・陶山佳久 2013. 「生態学者が書いた DNA の本ーメンデルの法則から遺伝情報の読み方まで」. 文一総合出版, 東京.
- 石川真一・高橋和雄・吉井弘昭 2003. 利根川中流域における外来植物オオブタクサ (*Ambrosia trifida* L.) の分布状況と発芽・生長特性. 保全生態学研究 8, 11–24.
- Kadono, Y. 2004. Alien aquatic plants naturalized in Japan: history and present status. *Global Environmental Research* 8, 163–169.
- 角谷拓 2010. 広域スケールでの生物空間分布解析法. 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, 東京, pp. 131–155.
- Keller, R. P., D. M. Lodge and D. C. Finnoff 2007. Risk assessment for invasive species produces net bioeconomic benefits. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, 203–207.
- Kumschick, S. and D. M. Richardson 2013. Species-based risk assessments for biological invasions: advances and challenges. *Diversity and Distributions* 19, 1095–1105.
- Kurokawa, S., H. Kobayashi and T. Senda 2009. Genetic diversity of *Sicyos angulatus* in central and north-eastern Japan by inter-simple sequence repeat analysis. *Weed Research* 49, 365–372.
- Kurokawa, S., H. Shibaike, H. Akiyama and Y. Yoshimura 2004. Molecular and morphological differentiation between the crop and weedy types in velvetleaf (*Abutilon theophrasti* Medik.) using a chloroplast DNA marker: seed source of the present invasive velvetleaf in Japan. *Heredity* 93, 603–609.
- Kurokawa, S., H. Shibaike and Y. Yoshimura 2011. Estimation of the process invaded by accidentally introduced strains of *Abutilon theophrasti* into Japan: temporal change of chloroplast DNA haplotype frequencies across a century. *Japan Agricultural Research Quarterly* 45, 203–210.
- Levine, J. M., M. Vilà, C. M. D'Antonio, J. S. Dukes, K. Grigulis and S. Lavorel 2003. Mechanisms underlying the impacts of exotic plant invasions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 270, 775–781.
- Luken, J. and D. Mattimiro 1991. Habitat-specific resilience of the invasive shrub Amur honeysuckle (*Lonicera maackii*) during repeated clipping. *Ecological Applications* 1, 104–109.
- Matsumoto, J., H. Muraoka and I. Washitani 2000. Whole plant carbon gain of an endangered herbaceous species *Aster kantoensis* and the influence of shading by an alien grass *Eragrostis curvula* in its gravelly floodplain habitat. *Annals of Botany* 86, 787–797.
- McGregor, K. F., M. S. Watt, P. E. Hulme and R. P. Duncan 2012. How robust is the Australian Weed Risk Assessment protocol? A test using pine invasions in the Northern and Southern hemispheres. *Biological Invasions* 14, 987–998.
- 宮脇成生・鷲谷いづみ 2010a. 千曲川における侵略的外来植物 4 種の侵入範囲予測. 保全生態学研究 15, 17–28.
- 宮脇成生・鷲谷いづみ 2010b. 原産地における分布特性が日本の河川域における外来植物の侵略性に与える影響. 日本生態学会誌 60, 217–225.
- 水口亜樹 2011. 遺伝子組換えダイズとナタネの生態リスク評価に関する基礎的研究. 雑草研究 56, 100–103.
- Morin, L., D. R. Paini and R. P. Randall 2013. Can global weed assemblages be used to predict future weeds? *PLoS ONE* 8, e55547.
- 村上健太郎・堀川真弘・森本幸裕・松井理恵 2008. 都市域へ移入・分布拡大したイヌケホシダ (*Thelypteris dentata* (Forssk.) E. P. St. John) のリーフフェノロジー. 日本緑化工学会誌 34, 261–264.
- 村中孝司 2008. 外来植物の侵入年代・原産地とその用途との関連性. 保全生態学研究 13, 89–101.
- 村中孝司 2009. 外来種問題における, 外来生物の定義に関する資料的検討. 教養・文化論集 4, 65–74.
- Muranaka, T. 2012. Influences of vegetation status on seedling survival of a river-endemic plant *Aster kantoensis* in the floodplain. *Landscape and Ecological Engineering* 8, 197–205.
- 村中孝司・鷲谷いづみ 2001. 鬼怒川砂礫質河原における外来牧草シナダレスズメガヤの侵入と河原固有植物の急激な減少: 緊急対策の必要性. 保全生態学研究 6, 111–122.
- 中坪孝之 1997. 河川氾濫原におけるイネ科帰化草本の定着とその影響. 保全生態学研究 2, 179–187.
- Nakayama, N., J. Nishihira, Y. Kayaba, T. Muranaka and I. Washitani 2007. Seed deposition of *Eragrostis curvula*, an invasive alien plant on a river floodplain. *Ecological Research* 22, 696–701.
- Nishida, T., N. Yamashita, M. Asai, S. Kurokawa, T. Enomoto, P. C. Pheloung and R. H. Groves 2009. Developing a pre-entry weed risk assessment system for use in Japan. *Biological Invasions* 11, 1319–1333.
- 小栗ひとみ・島瀬頼子・松江正彦 2012. 礫河原におけるオオキケンケイギク埋土種子の表土はざりによる除去効果. ランドスケープ研究 75, 441–444.

- Ohsawa, T. and T. Osawa 2014. Quantifying effects of legal and non-legal designations of alien plant species on their control and profile. *Biological Invasions*. DOI 10.1007/s10530-014-0695-0.
- Oreska, M. P. J. and D. C. Aldridge 2011. Estimating the economic costs of invasive alien species as a tool for prioritization. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 6, 049, 1–12.
- 大澤剛士・赤坂宗光 2009. 特定外来生物オオハンゴンソウの管理方法—引き抜きの有効性の検討—. *保全生態学研究* 14, 37–43.
- 大澤剛士・赤坂宗光 2013. 現場で使える研究成果とは? 研究成果を現場に届けるために必要なことを考える. *雑草研究* 58, 22–28.
- Pauchard, A., C. Kueffer, H. Dietz, C. C. Daehler, J. Alexander, P. J. Edwards, J. R. Arévalo, L. A. Cavieres, A. Guisan, S. Haider, G. Jakobs, K. McDougall, C. I. Millar, B. J. Naylor, C. G. Parks, L. J. Rew and T. Seipel 2009. Ain't no mountain high enough: plant invasions reaching new elevations. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7, 479–486.
- Phartyal, S. S., T. Kondo, C. C. Baskin and J. M. Baskin 2012. Seed dormancy and germination in the giant Himalayan lily (*Cardiocrinum giganteum* var. *giganteum*): an assessment of its potential for naturalization in northern Japan. *Ecological Research* 27, 677–690.
- Pyšek, P., M. Krivánek and V. Jarošík 2009. Planting intensity, residence time, and species traits determine invasion success of alien woody species. *Ecology* 90, 2734–2744.
- Pyšek, P. and D. M. Richardson 2007. Traits associated with invasiveness in alien plants: where do we stand? In "Biological Invasions" ed. by W. Nentwig, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 97–125.
- Pyšek, P. and D. M. Richardson 2010. Invasive species, environmental change and management, and health. *Annual Review of Environment and Resources* 35, 25–55.
- Reid, A. M., L. Morin, P. O. Downey, K. French and J. G. Virtue 2009. Does invasive plant management aid the restoration of natural ecosystems? *Biological Conservation* 142, 2342–2349.
- Richardson, D. M. 2011. Invasion science: the roads travelled and the roads ahead. In "Fifty Years of Invasion Ecology—the Legacy of Charles Elton" ed. by D. M. Richardson, Blackwell Publishing, Oxford, pp. 397–401.
- Saito, T. I. and K. Okubo 2012. Effects of vegetation cutting on the invasive plant *Coreopsis lanceolata* vary with vegetation type. *Landscape and Ecological Engineering* 8, 207–214.
- Saito, T. I. and S. Tsuyuzaki 2012. Response of riparian vegetation to the removal of the invasive forb, *Solidago gigantea*, and its litter layer. *Weed Biology and Management* 12, 63–70.
- Shimono, Y. and A. Konuma 2008. Effects of human-mediated processes on weed species composition in internationally traded grain commodities. *Weed Research* 48, 10–18.
- Simberloff, D., J. L. Martin, P. Genovesi, V. Maris, D. A. Wardle, J. Aronson, F. Courchamp, B. Galil, E. Garcia-Berthou, M. Pascal, P. Pyšek, R. Sousa, E. Tabacchi and M. Vilà 2013. Impacts of biological invasions: what's what and the way forward. *Trends in Ecology & Evolution* 28, 58–66.
- Strayer, D. L., V. T. Eviner, J. M. Jeschke and M. L. Pace 2006. Understanding the long-term effects of species invasions. *Trends in Ecology & Evolution* 21, 645–651.
- 田中淳・瀬藤裕美・大藪崇司・藤原道郎・田中賢治・朝日伸彦・杉浦弘毅 2011. 土壌化学性の違いによるナルトサワギク、セイタカアワダチソウの防除技術の開発. *日本緑化工学会誌* 37, 139–142.
- The Plant List 2010. Version 1. <http://www.theplantlist.org/> (2013年12月24日確認).
- Vilà, M., C. Basnou, P. Pyšek, M. Josefsson, P. Genovesi, S. Gollasch, W. Nentwig, S. Olenin, A. Roques, D. Roy and P. E. Hulme 2010. How well do we understand the impacts of alien species on ecosystem services? A pan-European, cross-taxa assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8, 135–144.
- Vilà, M., J. L. Espinar, M. Hejda, P. E. Hulme, V. Jarošík, J. L. Maron, J. Pergl, U. Schaffner, Y. Sun and P. Pyšek 2011. Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters* 14, 702–708.
- Vitousek, P., H. Mooney, J. Lubchenco and J. Melillo 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277, 494–499.
- 米倉浩司・梶田忠 2003. BG Plants 和名—学名インデックス (YList). http://bean.bio.chiba-u.jp/bgplants/ylist_main.html (2013年12月24日確認).
- Yamashita, N., A. Ishida, H. Kushima and N. Tanaka 2000. Acclimation to sudden increase in light favoring an invasive over native trees in subtropical islands, Japan. *Oecologia* 125, 412–419.
- Yoshioka, A., T. Kadoya, S. Suda and I. Washitani 2010. Impacts of weeping lovegrass (*Eragrostis curvula*) invasion on native grasshoppers: responses of habitat generalist and specialist species. *Biological Invasions* 12, 531–539.

電子付録

(https://www.jstage.jst.go.jp/browse/weed/59/2/_contents/-char/ja/にて公開)

付表 1. 各研究対象種と研究目的, 生育地タイプ

付表 2. 集計対象とした論文一覧