

相補性解析による効率的な保全に寄与する地域の地図化

角谷 拓^{1,2*}・赤坂 宗光³・竹中 明夫¹

1 国立環境研究所生物・生態系環境研究センター 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

2 ゲルフ大学統合生物学部 50 Stone Road East, Guelph, Ontario, N1G 2W1, Canada

3 東京農工大学大学院農学研究院 〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8

Mapping prioritized areas for conservation based on complementarity analysis

Taku Kadoya^{1,2*}, Munemitsu Akasaka³ and Akio Takenaka¹

¹Center for Environmental Biology and Ecosystem Studies, National Institute for Environmental Studies,
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506 Japan

²Department of Integrative Biology, University of Guelph, 50 Stone Road East,
Guelph, Ontario, N1G 2W1, Canada

³Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology,
3-5-8 Saiwai, Fuchu, Tokyo, 183-8509 Japan

Abstract: To be effective in biodiversity conservation, spatial conservation planning should consider the complementarity among planning units. Complementarity is one of the central concepts in spatial conservation prioritization, and complementarity analysis based on the concept is becoming a major method both in research and in practice dealing with spatial problems in conservation planning. Marxan is the most popular tool to implement the complementarity analysis that can give us the most efficient solutions, a set of prioritized areas, based on conservation features, their spatial distributions and conservation target set to each of them. Efficiency here is defined as a function of size, shape and arrangement of prioritized areas, and conservation cost of selected planning units, and degree to which each of conservation targets has been attained. Recently, complementarity analysis using Marxan was applied to a nation-wide biodiversity mapping project for the first time in Japan. Specifically, it was used to identify the set of candidate areas for the efficient conservation of endangered vascular plants in the county. The number of applications of complementarity analysis to conservation practices is expected to grow rapidly at every taxa and spatial scales from national to local. Practitioners, however, must always keep in mind that results and effectiveness of the analysis can be very sensitive to uncertainty in available information on spatial distribution of conservation features and to adequacy of conservation actions taken in the selected planning units.

Key Words: Marxan, Natural park, National park, Protected area, Systematic conservation planning

要旨：新たに保全地域を設置する場合には、どこを保全候補地域として選定するのが生物多様性の保全の観点からより効率的かという問いに答える必要がある。このような効率性を考えた保全候補地域の優先付けは、それにかかわる概念の整理や手法の開発、さらには実践への適用が近年急速に進展している分野である。特に「相補性」は、保全優先づけを行う上でもっとも重要な概念の一つであり、それにもとづいた相補性解析は保全候補地域の優先付けを行うための手法として中心的な役割を果たすようになっている。相補性解析は、保全地域どうしが相補的に機能するように優先保全候補地域を決める方法であり、多数の分類群や計画ユニットを扱うことのできるツールも実装されている。Marxanはその代表的なものである。Marxanは個々の保全対象(種・分類群や生態系タイプなど)ごとに設定された保全目標を達成するために、保全対象の空間分布データにもとづいて、もっとも効率のよい優先保全候補地域を特定する。「効率のよさ」には、優先保全候補地域の面積や形状、あるいは保全のための費用や労力など、必要に応じて現実的な要素を評価基準として組み込むことができる。Marxanを用いた相補性解析は、環境省・生物多様性評価の地図化事業でも、全国スケールでの絶滅危惧維管束植物の分布にもとづいて効率的な保全に寄与する地域の地図化を行うために活用された。これは、相補性解析を全国規模で実施し、かつその結果が公表されたものとしてはおそらく国内で初めての画期的な事例である。今後、保全のための効

* 連絡先: kadoya@nies.go.jp

受付: 2014年9月30日/受理: 2014年11月27日

率的な戦略を明示的かつ分かりやすく示す地図化の手法が、さまざまな保全対象および国・都道府県・市区町村などのスケールにおいて活用されることが期待される。一方で、相補性解析は、①すべての計画ユニットにおける保全対象となる生物の分布や状態が明らかになっていること、また、②保全対象ごとに設定された保全目標が、実際にその対象の保全を行うのに十分な効果をもっていることを前提としており、それらを満たさない場合の結果の利用には細心の注意が必要である。

キーワード：Marxan, 自然公園, 国立・国定公園, 保護区, 保全計画

はじめに

2010年、愛知県名古屋市で開催された生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）において、生物多様性条約戦略計画2010－2020（通称：愛知目標）が採択された。愛知目標では、生物多様性条約加盟国（192カ国およびヨーロッパ連合）の総意として、2050年までに人と自然が共存する世界を実現する、また、2020年までに生物多様性の損失を止めるための緊急かつ効果的な行動をとることが使命として掲げられた。その中でも特に注目されるのが、陸域と湖沼・河川などの陸水域で17%、沿岸域および海域で10%を保全地域とする、あるいは、人々が生物多様性や生態系からより多くの恵み（生態系サービス）を享受できるようにするために、劣化した生態系の15%以上を再生・回復させるといった数値目標が掲げられた点である。

自然公園は、日本国内において保全地域としての役割をはたす中心的な存在である。環境省の報告によれば、現在、国土面積に対して自然公園が占める割合は14.4%である。さらに、自然公園のうち開発や生物の採集等に対して比較的強い規制がかかる特別地域の面積が国土面積に対して占める割合は9.26%である（環境省2014: 表1）。例えば、自然公園の面積を愛知目標で掲げられた国土の17%まで増やすことを考えると、特別地域を保全地域として考えた場合には、あと約30,000 km²、自然公園全体を保全地域として考えた場合でも、あと約10,000 km²

の保護区が必要となる計算である。

もちろん自然公園以外にも、保全地域としての機能を果たしうる区域は複数あるため具体的な数字はここでは問題にしないが、いずれにせよ新たに保全地域を設置する場合に重要となるのは、どこを保全候補地域として選定するのが生物多様性の保全の観点からより効率的かという問いに答えることである。このような効率性を考えた空間的な保全戦略の策定（Spatial conservation planning）にかかわる概念の整理や手法の開発は、近年急速に研究や実践が進展している分野である（Moilanen *et al.* 2009b）。

保護区の効率性の基準：得点化と相補性アプローチ

効率的な保全地域の設置を考える場合の基準としては、大きくわけて2つの種類がある。ひとつは、得点方式で優先順位を決める方法（得点化アプローチ）であり、もうひとつは、保全地域どうしが相補的に機能するように考えて候補地域を決める方法（相補性アプローチ）である。仮想的な例を用いてそれぞれのアプローチの考え方を簡単に説明しよう。なお理解を助けるために、ここで話題にする空間（地域など）の名称を図1で定義した。表2には、既存の保全地域Pと4つの計画ユニット（A～D）からなる計画地域が存在している。保全地域と計画ユニットには、それぞれ表2に示したように異なる組成のトンボ種が生息している。ここで、新たに計画ユニットを1つだけ保全地域に編入する場合を考える。得

表1. 自然公園の面積と国土面積に対する比率

種別	面積 (km ²)	国土面積に対	特別地域面積 (km ²)	国土面積に対
		する比率 (%)		する比率 (%)
国立公園	20,996	5.555	15,146	4.01
国定公園	13,592	3.596	12,649	3.35
都道府県立自然公園	19,726	5.219	7,215	1.91
合計	54,313	14.376	35,010	9.26

点化アプローチでは、すべての計画ユニットを一つの指標値によって序列化し、その順に計画ユニットを保全候補地域として選定する。ここでは、最もよくもちいられる指標である種数にもとづいて候補地域を選定する場合を考えてみよう。表2の例では、種数は大きい順に、A、B、C、Dとなり、追加される1ユニットとしては最も順位が高いAがふさわしいと判断される。

一方で、相補性アプローチの場合には、保全地域Pで保全の対象となっていない種（トラフトンボ、コバネアオイトトンボ、ベッコウトンボ）が、より多く含まれる場所（つまり相補性の高い場所）を優先的に選択すると考える。表2の例では、種数の点では最も小さい計画ユニットDが、保全対象となっていない上記3種すべてが生息していることから、

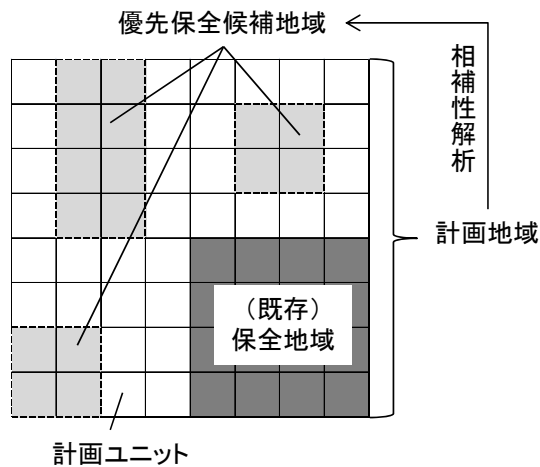


図1. 保全計画を行う際の空間名称の定義

最も優先度の高い保全候補地域として選択される。

得点化アプローチでは、種数の他に、特定の分類群や固有種の種数、あるいは生息・生育条件の悪化の度合いを加味した指標など、さまざまな指標値が用いられる。しかし、表2の例では、種数が最も大きなAを選んだ場合、コバネアオイトトンボとベッコウトンボが保全の対象から外れてしまう。このことから明らかに、多様な保全対象を単一の軸で評価する得点化アプローチは、多くの保全対象をバランスよく選ぶという保全目標のもとで効率的に保全候補地域を選択するための手法としては適していない。

そのため、多数の保全対象が存在する状況で空間的な保全計画を策定する場合には、相補性アプローチにもとづく方が適切であるという考えが近年では主流になっている。相補性にもとづいた空間保全計画の策定・実施事例としておそらく最も有名なのは2004年にオーストラリアのグレートバリアリーフで実施された、海洋公園内の禁漁区域の設置である(Fernandes *et al.* 2005)。この取り組みでは区域見直し以前の2004年までは海洋公園内の4.5%に満たなかった禁漁区域が33%以上にまで拡大されるという画期的な成果を上げた。そこでは、後で詳しく説明するMarxanとよばれる相補性にもとづいた保全候補地選択を行うためのツールが開発・活用され、社会・経済的要因も考慮しながら70タイプの生物群集タイプをバランスよく（それぞれ少なくとも20%以上の面積を）保全するという目標の下に、17,000に

表2. 保全計画地域における生物分布情報の例

種	保全地域		計画ユニット		
	P	A	B	C	D
アオヤンマ	1	1	1	1	0
ヨツボシトンボ	1	1	0	1	0
トラフトンボ	0	1	1	0	1
オオセスジイトトンボ	1	1	0	1	0
オオキトンボ	1	1	1	0	0
コバネアオイトトンボ	0	0	1	0	1
ベッコウトンボ	0	0	0	0	1
種数	4	5	4	3	3

のぼる計画ユニットから禁漁区域の候補地域を選択する作業が行われた。Marxan は社会的・経済的な要因や禁漁区化によって生じるコストも考慮しながら、客観的で現実的な計画を提示することで、利害関係者の合意にもとづきながら、このような大規模な禁漁区域の設置を可能にすることに役立ったといわれている (Ball *et al.* 2009)。Marxan はその後、改良を重ねながらさまざまな事例で活用され、現在では 100 カ国、1200 以上の組織で、空間的な保全計画の支援ツールとして用いられている (Ball *et al.* 2009)。Marxan の活用事例は松葉ほか (2015) に詳しい。

相補性解析の実例

次に、Marxan を例に相補性にもとづく優先保全候補地域の特定 (相補性解析) の実際について見ていく。相補性解析で最も重要なプロセスは、すべての保全対象ごとに適切な保全目標数値を設定することである。目標はたとえば保全対象が個体群であれば、対象地域全体の個体数の 20% を保全地域に含まれるようにするといったものである。もちろん目標数値は、保全対象 (たとえば生物種) ごとに異なっても構わない。また、保全対象は、利用可能なデータや保全の必要性に応じて、より高次の分類群や群集タイプなどが用いられる場合も多い。

すべての保全対象について保全目標が決まった後、それを効果的に実現できるような計画ユニットのセット (優先保全候補地域) を計画地域から選出すための計算を行う。この際の計算には、保全計画のタイプによって大きく 2 通りある。ひとつは、最小のコストで目標をすべて達成できる候補地域を探すもの (Minimum set coverage problem: コスト最小化問題)、もう一つは、予め決められたコスト内で、できるだけ高い目標を達成することのできる保全候補地域を探すもの (Maximum coverage problem: 目標最大化問題) である (Moilanen *et al.* 2009a)。どちらを用いるのが適切かは保全計画がおかれた状況による。例えば、対象とする分類群の絶滅危惧種をすべて保全するというのが至上命題であるならば、前者を用いるのが適切であろう。また、予算や労力の制約を考えないという理想的な仮定の下で、どのような保全計画が良いかを客観的に示すことも合意形成のプロセスの中で役に立つことがあるだろう。しかし、一方で、保全目標によってはたとえ「最小コスト」

の計画であってもしばしば非現実的なコストになる場合がある。限られた予算・労力内でのという制約が取り払えない場合には、後者を用いるのが適切であろう。Marxan は基本的には、両者のうちコスト最小化選択を行うように設計されたツールである。

一般的に、保全計画の文脈では、コストには優先保全候補地域の面積や費用、保全のための労力などが含まれる。Marxan では、それに加えて、保全目標の達成度や優先保全候補地域の形状なども含む、以下のような関数を定義し (広義のコスト)、この関数を最小化する計画ユニットのセットを見つけ出す計算を行う (Ball *et al.* 2009)。

$$\sum_i^{N_s} x_i c_i + b \sum_i^{N_s} \sum_h^{N_s} x_i (1 - x_h) c v_{ih} \quad (\text{式 1})$$

ここで、最初の項はそれぞれの計画ユニットを保全候補地域にした場合の合計コストを表す。このコストは、優先保全候補地域の面積や費用、労力などが想定される。 c_i は計画ユニット i を保全した場合のコスト、 N_s は総ユニット数、 x_i は計画ユニット i が保全候補地域になった場合には 1 それ以外の場合には 0 をとる。また、2 番目の項は、ユニットをどのくらい空間的にまとめて保全候補地域にするかを定めるもので、保全候補地域の周囲長が大きくなるほど値が大きくなる (コストが大きくなる) ように定義されている。 $c v_{ih}$ は、計画ユニット i とユニット h が共有する境界の距離である。 $c v_{ih}$ は物理的距離とは限らず対象生物の移動分散を考えた連結性 (Kadoya 2009) などを用いることもできる。この項は、計画ユニット h が保全候補地域に含まれない場合にコストが発生するため、強いつながりを持ったユニット同士は保全候補地域内に含まれるような選択を促す。 b は最初の項に対する 2 番目の形状に関するコストの項の相対的な大きさを決める係数である。

さらに、Marxan では、下記の式ですべての保全対象 j について定義される保全目標をすべて満たすという制約の下で式 1 を最小化する。

$$\sum_i^{N_s} x_i r_{ij} \geq T_j \quad (\text{式 2})$$

ここで、 r_{ij} は保全対象 j がどのくらいユニット i にいるか (個体数、出現の有無など)、 T_j は、保全対象 j の目標レベルである。

式 1 を最小化する計画ユニットの組み合わせは、

ユニットの総数がごく少なければ、とりうるすべての組み合わせごとに、保全目標の達成度合いを計算することで特定できる。しかし、ユニットの組み合わせ数は、2のユニット数乗になるので、対象保全ユニットが増加するにしたがって、必要な計算量が指数関数的に増加していく。実際の保全計画では、対象ユニット数が数千～数万になることは普通であるため、前述のようにすべての計画ユニットの組み合わせについて計算をして、効率的な保全候補地域を特定するのは困難になる。そこで Marxan では、焼きなまし法 (Simulated annealing) とよばれる計算アルゴリズムを用いることで保全目標の達成度合いをすべての計画ユニットの組み合わせごと計算することなく、最適に近い解をみつけることを可能にしている。なお、ここでは Marxan の基本的な構造について説明したが、他にもいくつかのオプションが用意されている。Marxan の具体的な使い方については、Marxan のウェブページ (<http://www.uq.edu.au/marxan/> 2014 年 9 月 19 日確認) からアプリケーションと利用マニュアルが自由にダウンロードできるので参照してほしい。

日本の絶滅危惧維管束植物への適用

2011 年度から行われた環境省・生物多様性評価の地図化事業では、既存の科学的、客観的な情報等を空間的に分析・評価することによって、国土全体の生物多様性の状況をくまなく評価し、その結果を地図化するという目標のもと、さまざまな生物多様性にかかわる地図が作成された (名取ほか 2014)。これらの成果は、現在環境省のウェブページにおいて公開されている (環境省 2012a)。この事業の中で、日本の絶滅危惧維管束植物を対象として、相補性解析の結果にもとづいて効率的な保全に寄与する地域の地図化が行われた。相補性解析を全国規模で実施し、かつその結果が公表されたものとしてはおそらく国内で初めての画期的な事例である。ここではその概要について紹介する。

この分析には、日本植物分類学会絶滅危惧種問題専門委員会から許可を得て提供された、絶滅危惧維管束植物のデータがもちいられた。このデータは、植物分類学会が維管束植物レッドリストを策定するための基盤情報として、多くの植物学者の協力の下に 5~10 年に一度の頻度で調査を行い、その結果を集積しているものである (矢原 2002)。今回の分析

では、そのデータの一部である 2005 年の 1219 種についての分布情報を用いた。このデータは標準 2 次メッシュ (約 10 km 四方) を単位として調査されたものであり、1219 種の中の 1 種以上が分布しているメッシュの数は 2466 メッシュにのぼる (日本全体 4473 メッシュの約 55%に相当)。

このデータを対象に、Marxan による相補性解析を実施した。すなわち、計画ユニットを 2466 メッシュ、保全対象を 1219 種とした解析である。保全目標については、個々の種の個体群が存続するために必要な保全地域面積に関する知見が不十分であったため、ここでは試行的に、最低限必要な保全目標に相当する「全ての種が少なくとも 1 ヶ所で保全される」という目標を設定した。また、計画ユニットが比較的大きいことから、式 1 の第 2 項、保全候補地域の形状に関する項は考慮しなかった ($b=0$ とした)。また、純粋に生物側からみたときの保全の必要性に焦点をあてるため、すべての計画ユニットの保全にかかるコスト (式 1 中の c_i) は等しいと仮定した。式 1 から明らかなように、種ごとに必要な保全地域面積の特定や保全コストとその空間情報の整備が進めば、より現実的な解析結果を得るためにそれらの情報を反映した相補性解析を行うことが可能になる。これらの情報整備は今後の重要な課題の一つであるといえるだろう。

相補性解析の結果、保全目標を満たす最小の計画ユニットのセット (Minimum set coverage) は、375 メッシュであることが明らかになった。これは、全計画ユニットの 15% (375/2466 メッシュ)、全国メッシュの 8.4% (375/4473 メッシュ) に相当する。愛知目標の陸域保全地域面積の目標値は 17%であった。もしこの 17%に相当する面積の保全地域が今回の相補性解析の結果に沿って効率的に国内に配置されるのであれば、この解析で設定した、すべての種を最低 1 ヶ所で保全するという目標は十分達成可能なものであることがわかる。

Marxan は焼きなまし法とよばれるアルゴリズムを用いて、最適解の近似を出力するため、初期値の設定などに依存して多少異なる結果を返す。そこで、解析対象と目標は同じ設定で、相補性解析を 100 回試行したうち、当該メッシュが保全対象地として選ばれる割合を算出した (図 2: 環境省 (2012b)) この値は、どの試行においても効率的な保全候補地域をつくるために必要とされる計画ユニットでは 1.0 に近くなる (非代替性が高い; 非代替性については赤

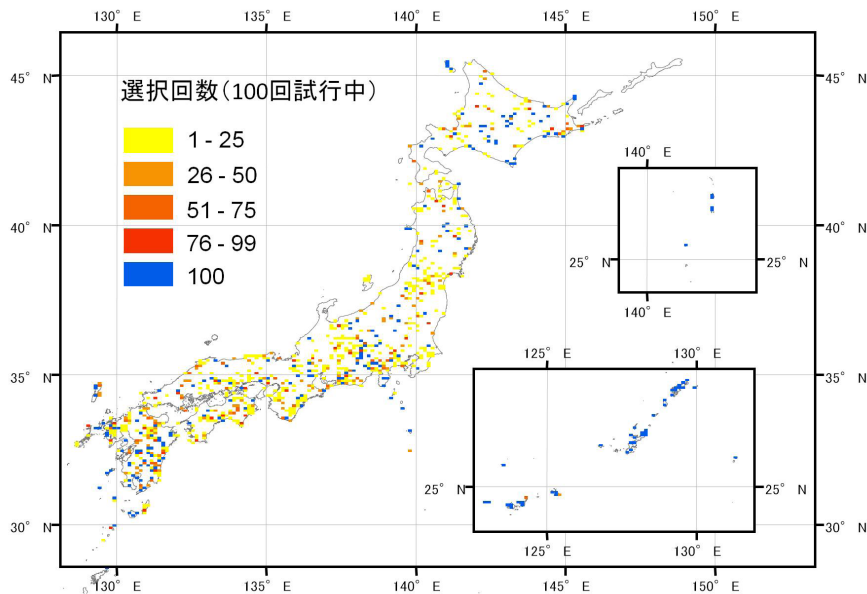


図 2. 絶滅危惧維管束植物の効率的な保全に寄与する地域. 選択回数は、対象とした維管束植物 1219 分類群すべてを最低 1 ヶ所の 2 次メッシュで保全するという目標の下で相補性解析を 100 回試行した結果、優先保全候補地域として選ばれた回数を表す. 環境省 (2012b) を改変.

坂・森 (2012) を参照). 一方で、試行によって保全候補地域に入ったり、入らなかったりする計画ユニットではより低い値となる (非代替性が低い).

100 回の試行で選択された、もっとも非代替性の高い地域は、屋久島から与那国島までの南西諸島の各島、小笠原諸島・伊豆諸島、対馬や甕島、利尻島や礼文島といった離島の島々である. これらの島々は島ごとに特徴的な種が多数みられるため、非代替性が高い地域となっている. また、北海道では大雪山、夕張、日高山脈、本州では早池峰山、月山、鳥海山、白馬岳、八ヶ岳、南アルプスや富士山周辺、伊吹山、鈴鹿、大台ヶ原周辺、九州では阿蘇、霧島等のそれぞれの地域の山岳部が選択されている. また、知床、襟裳岬、男鹿半島、伊豆半島、長崎等の半島部、釧路湿原や尾瀬、日光といった湿原、東海や瀬戸内、九州各地等に見られる湧水や湖沼・ため池に伴う湿地等の特徴的な生態系を持った地域が広く選択されている. これらの地域も離島と同様にそれぞれの環境に特徴的な種が分布するため、優先度が高い地域と考えられる. これらの地域は、絶滅危惧種となっている維管束植物を保全する上で効率的な地域であることを、今後の地域計画等に反映できるとよいだろう.

事例紹介の冒頭でも述べたように、本解析は全国規模の相補性解析を実施し、結果を示したものとしては国内で最初の事例であると思われる. そのため画期的な事例であると同時に、種ごとの保全目標の精緻化、保全にかかるコストの定量化と考慮などま

だ多くの課題を抱えているのも事実である. 次に、現在進行中の最新の研究事例の紹介とともに、相補性の考え方にもとづく保全計画手法の、今後の課題や展望について述べたい.

今後の課題と展望

相補性解析では、①すべての計画ユニットにおける保全対象となる生物の分布や状態が明らかになっていること、また、②保全対象ごとに設定された保全目標が、実際にその対象の保全を行うのに十分な効果をもっていることを前提として、優先保全候補地域を選定する.

1. 分布情報が不完全な場合の相補性解析

前提の①については、生物の分布調査に投資できる時間・資源が限られていること、またアクセスが容易な場所などに調査が偏り易いことなどから、十分に満たされないことがほとんどである. 特に、調査データの偏りは、精度を低下させるデータ不足以上に、Marxan による保全候補地域の選択結果の効率性を低下させることが知られている (Grand *et al.* 2007). したがって、完全に分布を把握することが難しい場合でも、調査手法の標準化や、偏りのない調査場所の選定に注意することで、比較的良好な情報を得られる可能性がある.

また、生物分布推定モデルを用いて、生物分布データの不足やバイアスの補正を行うことも対策の一つ

である。しかし、推定値には必ず不確実性が伴う。しかも、データが不完全であるほど、推定モデルの精度も低下せざるを得ない。したがって推定値にもとづいて保全優先地域を選ぶ場合でも効率性の低下は避けられない (Hermoso *et al.* 2013)。そのため、もともとのデータが不完全なことに起因する効率性の低下と推定モデルを用いることに起因する効率性の低下を天秤にかけ、不完全でも観測データのまま計画に用いるのか、モデルにもとづいた推定値を計画に用いるのかを判断する必要がある。両者の関係は、対象生物の分布パターンやデータの質・量などに応じて変わるため、わかりやすい判断基準を明らかにすることは今後の課題である (Ishihama *et al.* 未発表)。さらに、不完全データであっても、完全な分布情報からのサンプリングととらえることができる。そのサンプルがどれだけ母集団を代表しているか、代表性はサンプルの量やサンプルの選び方とどのように関係しているかなどを検討することで、限られた調査努力を効率よく使うことが可能となる。筆者らによるこれまでの解析では、普通種のみ注目したデータによる保護区選択は適当ではないが、希少種をある程度含むデータセットであれば、数割程度の種に注目するだけで、かなり有効な保護区を選択できることが明らかになりつつある (Takenaka and Ishihama 未発表)。

2. 絶滅リスクを考慮した相補性解析

前提の②についても、目標レベルでの保全地域の

設置が対象種の個体群の長期的な存続性を担保するかどうかは、通常長期にわたる個体数モニタリングデータや詳細な生態学的情報がないと判断できない。さらに、保全計画の実施以降、環境条件が大きく変化する場合もある。さらに、ある時点で選定された保全候補地域を、すべて一度に、保全地域にすることは難しい場合が多く、その場合には順次保全地域へ編入することになる。そのため、全ての保全地域の設置が終わる前に保全対象の分布等が変化してしまう可能性がある。このように考えると、ほとんどの場合において前提は満たされないと考えられる。したがって、選定した保全候補地域のセットが効率的に目標を達成できているかをモニタリングし、必要に応じて計画を再検討するなどの対応が必要になる (赤坂・森 2012)。

筆者らは、このような問題に対応するため、個々の対象生物の個体群存続性分析にもとづいて絶滅確率の低減そのものを目的関数にする保全優先付け手法：SPERS (Spatial Prioritizer based on Extinction Risks) を開発した (Kadoya *et al.* 2014)。この手法は、Marxan のコスト関数 (式 1) に相当する部分を、全種の絶滅リスクの低減 (RER: Reduction in Extinction Risk) として下記のように定義する。

$$RER = \sum_{s=1}^S \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{s-p}} \right) \quad (\text{式 3})$$

ここで、 S は対象とする種数、 T_s は種 s の期待存続時間、 T_{s-p} は保全候補地域の選択後の種 s の期待

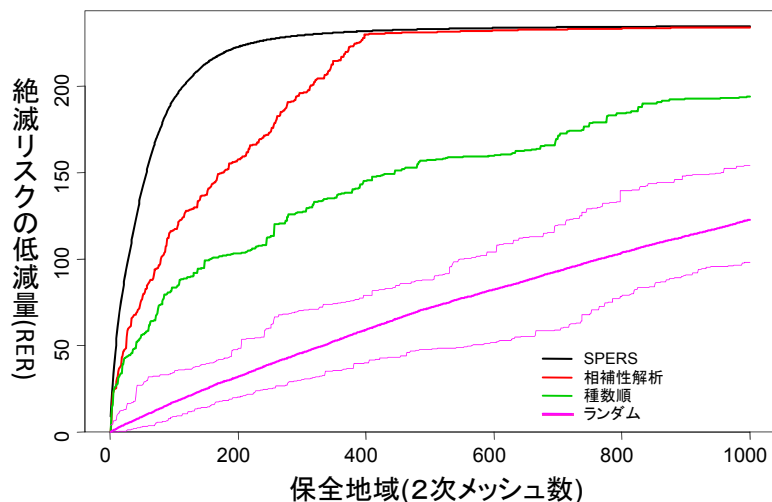


図 3. 保全地域の追加による維管束植物の絶滅リスク低減量の手法間比較。SPERS: 維管束植物の個体数変化データを対象にし、Spatial Prioritizer of Extinction Risks によって決定された優先順で保全地域を追加した場合の結果。相補性解析: 前述の維管束植物データを分布データに変換し、そのデータを対象とした相補性解析によって決定された優先順で保全地域を追加した場合の結果。種数順: 種数の多い順で保全地域を追加した場合の結果。ランダム: 追加する保全地域をランダムに選んだ場合の結果。ここでの計画ユニットは 2 次メッシュ (約 10 km × 10 km) である。Kadoya *et al.* (2014) を改変。

存続時間である。SPERS は、式 3 を最大化することで「全種の絶滅リスクの低減」という基準から最も効率的な保全候補地域のセットを選択する。Kadoya *et al.* (2014) では、SPERS を先述の維管束植物のデータセットに適用した。その際、個体群の分布地と個体群サイズだけではなく、個体群サイズの変化率の情報も用いて絶滅確率の推定を行った。その結果、SPERS は従来型の相補性解析に比べて、対象生物群の絶滅リスクの低減という点で効率的な保全候補地域を特定することができることが明らかになった(図 3)。特に、保全地域に編入できる候補地域の面積が限られている条件(保全地域面積 < 400 メッシュ)では、従来型の手法との差が大きくなることが示された(図 3)。筆者らは他にも、不確実性をもっとも悪い方向に作用した場合を考えた保全対象地域の優先付け手法の開発(Yokomizo and Kadoya 未発表)なども進めている。

さらに、仮想的なデータセットを用いれば、事前に想定されうる不確実性の大きさや、その不確実性が選択された保全地域の効率性をどのくらい低下させる可能性があるかを定量的に把握した上で、現場への適用に望むことも可能である(Langford *et al.* 2011)。このような感度分析的なアプローチを相補性解析のために体系化することは今後の重要な課題である。

おわりに

Marxan をはじめとする相補性解析のアプリケーションは、保全地域選定の“支援”ツールである。上に述べたように、相補性解析の結果として得られる保全候補地域は、保全目標の設定や用いる保全対象の分布情報の量・質により大きく変わりうる。これらのアプリケーションを用いた相補解析の結果は、唯一の保全地域のセットを選定するために用いるのではなく、透明性の高い基準で複数の保全候補地域のセットを示し、利害関係者間での合意形成を促す道具の一つとして用いることで、実効性のある効率的な保全計画の策定に力を発揮することができる(Ball *et al.* 2009)。また、多くの場合、完全な情報が利用できないという現実を踏まえ、解析に用いた保全目標や仮定を結果と合わせて明示することで、結果を誤解のないように伝えることも必要不可欠である。

また、相補性解析は、保全候補地域全体でみたときに効率が高くなるように優先付けを行う。そのため個々の計画ユニットをみただけでは、なぜそのユニッ

トが選択されたのかどうかのわかりにくい。しかし、具体的な保全の実践においては、個々の計画ユニットごとに、そのユニットが選択された理由や留意すべき保全対象などを、わかりやすい形で伝えることは、様々な場面で必要となる。目標対象として生物の分布情報や、保全対象と既存の保全地域のギャップを示しながら(ギャップ分析: Jennings 2000; Rodrigues *et al.* 2004)、それぞれの保全候補地域の意義付けをわかりやすく示す工夫をする努力が必要である。

最後に、国内において、実効性のある広域的な保全計画を可能にするための、生物多様性情報の拡充の必要性について述べたい。日本の維管束植物への適用例では、標準 2 次メッシュを計画ユニットとした。しかし、実際の保全計画ユニットとしては、より細かなユニット(例えば大字のスケール)での計画が現実的であろう。少なくとも、都道府県あるいは市町村レベルで、実際の保全計画を行うためには、このような解像度で生物分布などの生物多様性情報の整備が必要となる。さらに、最近では、Marxan の発展版である Marxan with Zones というツールなどを持ちいて、単に保全する / しないの 2 択ではなく、効率的なゾーニング計画(どこで、どのような保全対策を行うかの計画)を行うことも可能になっている(Watts *et al.* 2009; Klein *et al.* 2010)。この場合には、特に保全対策ごとのコストに関する情報が重要になるが、国内では保全に関するコストについての広域的・定量的な情報は十分に整備されていない。生態学的な観点だけでなく、社会的・経済学的な観点も含めた幅広い分野の情報の整備が進み、相補性解析の手法が活用されることで、様々な空間スケールにおいて効率的な保全計画の策定と実効性のある保全地域の設置が進むことが期待される。

謝辞

本報告は「環境省環境研究総合推進費 S-9 アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究」の援助を受けた。また、二人の校閲者からは有益な助言をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

赤坂宗光・森章. 2012. 自然保全区のマネジメント—設置の計画から管理のあり方まで。エコシステ

- ムマネジメントー包括的な生態系の保全と管理へ
— (森章編), 39-48. 共立出版, 東京.
- Ball, I.R., Possingham, H.P. and Watts, M.E. 2009. Marxan and relatives: software for spatial conservation prioritization, In *Spatial conservation prioritization: quantitative methods and computational tools* (Moilanen, A., Wilson, K.A., Possingham, K.A. eds), Oxford University Press, Oxford.
- Fernandes, L., Day, J., Lewis, A., Slegers, S., Kerrigan, B., Breen, D., Cameron, D., Jago, B., Hall, J., Lowe, D., Innes, J., Tanzer, J., Chadwick, V., Thompson, L., Gorman, K., Simmons, M., Barnett, B., Sampson, K., De'ath, G., Mapstone, B., Marsh, H., Possingham, H., Ball, I., Ward, T., Dobbs, K., Aumend, J., Slater, D. and Stapleton, K. 2005. Establishing representative no-take areas in the Great Barrier Reef: Large-scale implementation of theory on marine protected areas. *Conservation Biology* 19: 1733-1744.
- Grand, J., Cummings, M.P., Rebelo, T.G., Ricketts, T.H. and Neel, M.C. 2007. Biased data reduce efficiency and effectiveness of conservation reserve networks. *Ecology Letters* 10: 364-374.
- Hermoso, V., Kennard, M.J. and Linke, S. 2013. Data Acquisition for Conservation Assessments: Is the Effort Worth It? *PLoS ONE* 8: e59662.
- Jennings, M.D. 2000. Gap analysis: concepts, methods, and recent results. *Landscape Ecology* 15: 5-20.
- Kadoya, T. 2009. Assessing functional connectivity using empirical data. *Population Ecology* 51: 5-15.
- Klein, C.J., Steinback, C., Watts, M., Scholz, A.J., Possingham, P.H. 2010. Spatial marine zoning for fisheries and conservation. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8: 349-353.
- 環境省. 2012a. 生物多様性評価の地図化. <http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/map/index.html>
- 環境省. 2012b. 生物多様性評価の地図化. 地図 19 全ての絶滅危惧種 (維管束植物) の効率的な保全に寄与する地域. <http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/map/map19/index.html>
- 環境省. 2014. 自然公園面積総括表. <http://www.env.go.jp/park/doc/data/>
- Kadoya, T., Takenaka, A., Ishihama, F., Fujita, T., Ogawa, M., Katsuyama, T., Kadono, Y., Kawakubo, N., Serizawa, S., Takahashi, H., Takamiya, M., Fujii, S., Matsuda, H., Muneda, K., Yokota, M., Yonekura, K., and Yahara, T. 2014. Crisis of Japanese Vascular Flora Shown By Quantifying Extinction Risks for 1618 Taxa. *PLoS ONE* 9: e98954.
- Langford, W.T., Gordon, A., Bastin, L., Bekessy, S.A., White, M.D., and Newell, G. 2011. Raising the bar for systematic conservation planning. *Trends In Ecology & Evolution* 26: 634-640.
- 松葉史紗子・赤坂宗光・宮下直. 2015. Marxan による効率的な保全計画: その原理と適用事例. 保全生態学研究 (印刷中).
- Moilanen, A., Possingham, H.P., and Polasky, S. 2009a. A mathematical classification of conservation prioritization problems, In *Spatial conservation prioritization: quantitative methods and computational tools* (Moilanen, A., Wilson, K.A., Possingham, K.A. eds), Oxford University Press, Oxford.
- Moilanen, A., Wilson, K.A., Possingham, H.P. eds., 2009b. *Spatial conservation prioritization Quantitative methods and computational tools*. Oxford University Press, Oxford.
- 名取睦・杉村尚・須藤健二・岩城光・戸田光彦・笹刈紘平. 2014. 野生生物の分布の地図化とその問題点. *景観生態学* 19: 105-109.
- Rodrigues, A.S.L., Akcakaya, H.R., Andelman, S.J., Bakarr, M.I., Boitani, L., Brooks, T.M., Chanson, J.S., Fishpool, L.D.C., Da, Fonseca, G.A.B., Gaston, K.J., Hoffmann, M., Marquet, P.A., Pilgrim, J.D., Pressey, R.L., Schipper, J., Sechrest, W., Stuart, S.N., Underhill, L.G., Waller, R.W., Watts, M.E. J., and Yan, X. 2004. Global gap analysis: Priority regions for expanding the global protected-area network. *Bioscience* 54: 1092-1100.
- Watts, M.E., Ball, I.R., Stewart, R.R., Klein, C.J., Wilson, K., Steinback, C., Lourival, R., Kircher, L., and Possingham, H.P. 2009. Marxan with Zones: software for optimal conservation based land- and sea-use zoning. *Environmental Modelling & Software* 24: 1513-1521.
- 矢原徹一. 2002. 植物レッドデータブックにおける絶滅リスク評価とその応用. 保全と復元の生物学 (矢原徹一・川窪伸光編), 59-93. 文一総合出版, 東京.