

野生動物の保護管理における衛星リモートセンシング技術の適用

誌名	日本生態學會誌
ISSN	00215007
著者名	望月,翔太 村上,拓彦
発行元	日本生態学会暫定事務局
巻/号	64巻3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 253-264
発行年月	2014年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



特集 植生のリモートセンシング

野生動物の保護管理における衛星リモートセンシング技術の適用

望月 翔太¹・村上 拓彦²

¹新潟大学大学院自然科学研究科

²新潟大学農学部

Application of remote sensing techniques in wildlife management

Shota Mochizuki¹ and Takuhiko Murakami²

¹Graduate School of Science and Technology, Niigata University,

²Faculty of Agriculture, Niigata University

要旨：野生動物研究への衛星リモートセンシング技術の適用は、航空機からの動物個体の識別や行動の評価から始まった。現在では、野生動物研究に対する衛星リモートセンシング技術は、野生動物の生息地を評価する目的に使用される事例が多い。野生動物に関係する生息地の指標を作り出す事や、野生動物の分布や行動と、環境要因との関係性を評価する事が求められている。さらに、潜在分布や生息適地を広域に地図化する事で、保全問題や獣害問題に対する効果的なゾーニングが期待されている。本稿では、近年の野生動物の保護管理における衛星リモートセンシング技術の適用例を挙げる。生息地の指標化や、ジャイアントパンダを対象とした生息地の分断化に関して、衛星リモートセンシング技術が果たした役割について述べる。また、生息適地の推定に対する事例研究として、ニホンザル分布域の長期間における変化を紹介する。これは、現地での野生動物の情報と衛星リモートセンシング由来の環境要因から生息適地を抽出し、生息状況の地図化を図った研究である。ここから、衛星リモートセンシング技術を用いた野生動物研究の可能性について考察する。

キーワード：動物分布、生息地指標、分断化、生息適地、土地被覆分類図

Abstract: Application of the satellite remote sensing techniques to wildlife research began from discernment of the individual animal and/or evaluation of animal behavior from the photography experiments. Satellite remote sensing to wildlife research at the present has applied for the purpose of evaluating the animal habitat. Trends in satellite remote sensing for wildlife are evaluating the index of wildlife habitat and estimating relationship with an environmental variables and animal distribution. By mapping whether wildlife is suitable for what kind of environment such as potential habitat and habitat suitability, appropriate wildlife management including zoning becomes possible in animal conservation or human-wildlife conflicts. In this paper, we propose the examples in the adaptation of satellite remote sensing techniques to wildlife problems (conservation and management) in recent years. First, the studies about satellite remote sensing of habitat indicator and habitat fragmentation in giant panda conservation were described. Furthermore, the change in potential distribution of Japanese macaques in the long period is introduced as a case study of habitat suitability research. The objective of this study was to determine changes in habitat suitability by combining satellite remote sensing and habitat model. Finally, we propose the possibility of the wildlife research using satellite remote sensing techniques.

Keywords: animal distribution, habitat indicator, fragmentation, habitat suitability, land-cover map

は じ め に

衛星リモートセンシングは、広域の環境情報を抽出する重要な技術である。この技術は、過去 50 年に渡り、生物多様性や野生動物管理といった生態学分野の新しい学問体系に大きく貢献してきた (Franklin 2010)。衛星や航空機によるリモートセンシングは、対象物から反射、散乱あるいは放射された電磁波を衛星搭載センサーで観測し、これを詳しく解析することによって、対象物の種類や性質を推定する手法である。生物多様性や動物の行動と関係する環境要因が抽出され、生物種ごとの資源選択モデルの構築や広範囲における生物の生息適地推定、個体群動態の予測、生物多様性指標の開発および試験、および種-環境の関係性評価などが提供される。

野生動物研究へのリモートセンシング技術の適用は、航空機を利用した空からの動物個体の識別や行動の評価によって始まった (Altmann and Altmann 2005)。航空機からの目視観測による個体数調査や、足跡などの痕跡を用いて間接的に個体数や活動範囲等を把握するものである。この方法の利点は、素早く動物の分布を地図化できることである (De Leeuw et al. 2002; 大石ほか 2010)。一方で衛星データを使用する場合、その多くは分光反射特性を利用した植生や土地被覆の抽出が主な目的とされた (Robinson 1981)。現在、野生動物研究に対する衛星リモートセンシング技術は、野生動物の生息地を評価する目的に使用される事例が多い。この時、既存の地理空間情報と衛星リモートセンシング由来の植生図や土地被覆図を組み合わせる事で、野生動物の評価 (生息地選択: Johnson 1980; 採餌場選択: Orians and Pearson 1979; 潜在的な分布域: Mochizuki and Murakami 2011 など) に必要な多くの環境要因を抽出する事ができる (Estes 1985)。動物の行動特性は、個体間や種間の相互作用や生息地の物理的な環境に由来するため、衛星リモートセンシング技術は、広域での生息地の物理的特性の把握を担うことが可能である。

近年では、野生動物の潜在的な分布域の推定に注目が集まっている。例えば、野生動物の分布や行動と、環境要因との関係性を評価するだけでなく、生息地や潜在的な分布域を広域に地図化していく必要がある (Franklin 2010)。野生動物の生息地を地図化する事は野生動物管理に大きく貢献するものである。これまで、野生動物にとってどれだけの生息地が存在するのかという研究課題は、欧米を中心に盛んに行われるようになった。最近では、日本国内やアジアでも衛星リモートセンシングや GIS な

どの空間情報科学分野の技術を用いた野生動物管理に対する事例も増えている (表 1)。野生動物の生息地や潜在的な分布域を示した地図によって、保全問題や獣害問題に対するゾーニングを基盤とした野生動物管理を実施する事が可能となる。

生息地指標としての衛星リモートセンシング

衛星リモートセンシングから得られる画像情報 (例えば、土地被覆や土地利用、植生など) を、対象となる野生動物に合わせ、適切に処理することにより、生物の潜在的な生息地を示す地図を作り出す事ができる。この時、リモートセンシング画像から、植生や土壌、水に関する指数や植物の純生産量など、生息地の間接的な指標を抽出する事が期待されている (Environmental Remote Sensing Group 2003)。特に、様々な空間スケールにおいて、生息地の質を地図化する手法が発展している (Weiers et al. 2004; Van Bommel et al. 2006)。

例えば、生息地保全や流域の状況を評価する事を目的とした 11 個の生息地指標が流域スケールで開発されている (Tiner 2004)。この事例では、生物にとっての原生的な環境を、農地や道路、住宅域といった地物を除いた森林や湿地として定義し、リモートセンシング画像から判別している。さらに、抽出した森林や湿地を、道路などによる分断化の程度や、湿地帯の被覆率といった広がり観点から指標化している。この指標は、米国アラバマ州のナンティコーク川流域を対象地として作成され、これらの指標は地図化されて提供されている (National Wetlands Inventory, <http://www.fws.gov/wetlands/index.html>)。この指標は、現在でも生息地のモニタリングに活用されており、流域の保全計画や管理に貢献している (Tiner 2004)。

生息地の分断化

野生動物の保護管理における衛星リモートセンシング技術の適用例として、近年盛んに研究が進んでいるものが、生息地の分断化の評価である。これまで、生息地の分断化が野生動物に与える影響は非常に大きい事が報告されており (Fahrig 2003)、中国のジャイアントパンダ (*Ailuropoda melanoleuca*) の保全問題はその一例である。

パンダは、世界的に絶滅が危惧されている動物種の一つである。Mackinnon and De Wulf (1994) の研究は、パンダの保全に対し、衛星リモートセンシング技術を用い

表 1. 日本国内、及びアジア地域における衛星リモートセンシングと空間情報科学分野の技術を用いた野生動物研究。

対象種	場所	衛星データ	主要な結果	引用
イノシシ (<i>Sus scrofa</i>)	日本	Landsat/ETM+ Google Earth	水稻被害発生要因 分布域推定	Saito et al. 2011, 清水ほか 2013
ツキノワグマ (<i>Ursus thibetanus</i>)	日本	Landsat/ETM + ALOS/AVNIR-2	分布域推定 資源選択機構	坂田・三谷 2002, 土光ほか 2009, Doko et al. 2011, Takahata et al. 2014
ニホンザル (<i>Macaca fuscata</i>)	日本	Landsat/MSS ALOS/AVNIR-2	分布域推定 生息地選択	Mochizuki and Murakami 2011, Enari and Sakamaki-Enari 2013.
ニホンジカ (<i>Cervus nippon</i>)	日本	Landsat/ETM +	個体群動態 新植地被害発生要因	村上・小泉 2003, 奥村ほか 2009, Iijima et al. 2013
ニホンカモシカ (<i>Naemorhedus crispus</i>)	日本	Landsat/ETM+	分布域推定 生息地選択	Doko and Chen 2013
ウンピョウ (<i>Neofelis nebulosa</i>)	タイ	SPOT-2	生息適地 分布域推定	Grassman et al. 2005
モウコガゼル (<i>Procapra gutturosa</i>)	モンゴル	Terra/MODIS	長距離移動の季節性 生息地の分断化	Ito et al. 2005, Ito, et al., 2006
ヒョウ (<i>Panthera pardus</i>)	西アジア 中央アジア	SPOT/Vegetation Terra/MODIS	生息適地 分布域推定	Gavashelishvili and Lukarevskiy 2008
ジャイアントパンダ (<i>Ailuropoda melanoleuca</i>)	中国	Landsat/TM	生息適地 景観の分断化評価	Mackinnon and De Wulf 1994, Liu et al. 2001, Xu et al. 2006
トキ (<i>Nipponia nippon</i>)	中国	Landsat/TM	生息地の減少 営巣適地推定	Li et al. 2006, Li et al. 2009

て土地利用を評価し、パンダの行動特性を明らかにした初めての事例である。Mackinnon and De Wulf (1994) の研究以降、資源の変化や人間活動がパンダに与える影響に関して、衛星リモートセンシング技術を活用した研究が進められている (Li et al. 2010; Wang et al. 2010)。

中国四川省西部に位置するキョウライ山脈は 6 つの自然保護区を含んでおり、野生のパンダの個体数全体の約 30% を含んでいる (Hu 2001)。この地域において、衛星リモートセンシングを用いてパンダ生息地の空間分布が調査された (Xu et al. 2006)。Xu et al. (2006) の研究において、以下のような知見が得られている。Landsat/TM 画像から森林域を分類し、標高などの地形要因を加え、パンダの生息適地が推定された結果、パンダの好適な生息地は森林地帯で、竹林が豊富に分布し、起伏に富んだ区域だった。一方、道路や住宅域、農地などは、パンダの生息地を劣化させる要因だった。特に、パンダの保全には、人間活動の少ない区域で、且つ、道路などによって分断されていないことが重要である事が示唆された。さらに、餌資源である竹林のマッピング (Linderman et al. 2005) や森林減少の影響評価 (Liu et al. 2001) など、衛星リモートセンシングを用いた空間情報科学の視点からパンダの生息地保全が盛んに行われている。衛星リモートセン

シング技術は、パンダの保護管理に必要な 3 つの視点、「生息地の分断化と連結性」、「生息適地」、「人間活動の影響」を空間的に評価する事に役立ち、生息地の分断化がパンダ個体数の減少に繋がったことがわかった。同時に、今後の自然保護区をどのように連結させていくか (Viña et al. 2007) という保護管理計画に大きな役割を果たした。これらの研究は、衛星リモートセンシング由来の空間情報から、様々な側面でパンダの生息地を評価する事で、具体的な保護管理計画に結びついた事例である。

29 年間におけるニホンザル分布域の変化

具体的な事例研究 (生息適地推定) として、Mochizuki and Murakami (2011) が行ったニホンザル分布域の長期間における変化を紹介する。なお、本論では Mochizuki and Murakami (2011) では使用しなかったデータセットを加え、再解析を行った。ニホンザルは、人を除く霊長類の中で最も高緯度 (分布範囲 30°21' N ~ 41°08' N) まで分布し、積雪地域にも分布している事から環境への適応能力が高い (Wada and Tokida 1981)。しかし、近年では全国的に農作物被害が深刻化しており、有効な管理手法の検討が求められている (鈴木 2003; 大井 2005)。

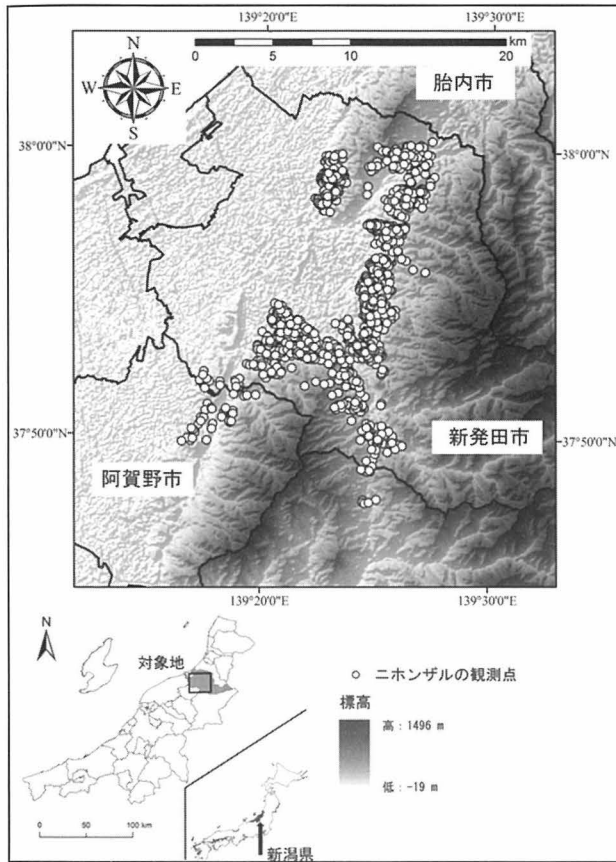


図1. ニホンザル研究の対象地 (Mochizuki and Murakami 2011 を改訂)。

一般的な被害対策としては、各地域における捕獲駆除や防護柵などが行われてきたが、その効果は限定的であった (江口ほか 2002)。そのため、対症療法的な被害対策だけでなく、被害の予防や保護管理の場面において、長期的で、且つ広域スケールでの個体群管理や生息地の管理が求められている (村上・大井 2007)。野生動物の保全や被害管理を行う際、どのような環境要因が人間と野生動物との軋轢に関係するかを評価することが有効である (Gibson et al. 2004)。また、野生動物の分布に対して、土地利用の変化による影響や、人間活動がもたらす影響を考慮する事で、人間と野生動物との潜在的な軋轢の予測が可能となる (Johnson et al. 2004)。さらに、生息適地モデルを過去の植生や土地被覆に外挿することにより、森林伐採や開発による生息地の変化が野生動物の分布域や生息地利用に及ぼす影響 (Saunders et al. 1991; Hansen et al. 2001) を評価することが可能となる。野生動物が生息地の変化に対し、どのように反応したかという情報は野生動物の保全や被害管理の指針を考える際に有益なも

のである (Liu et al. 1999)。生息状況を把握することにより、保全や被害管理を優先的に行う範囲のゾーニングが可能となる。

本論文で紹介するニホンザル分布域の変化に関する研究の対象地域は、新潟県新発田市である (37° 57' N、139° 19' E、532 km²、図 1)。標高は海拔 -19 m から 1496 m であり、64% が森林に覆われている。広葉樹ではブナ (*Fagus crenata* Blume) やミズナラ (*Quercus crispula* Blume) が多く分布し、針葉樹ではスギ (*Chamaecyparis obtusa*)、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*)、サワラ (*Chamaecyparis pisifera*) が多く分布している (環境省 1999)。新発田市での野生ザルによる農作物被害は 1983 年ごろから発生し、徐々に被害地域が拡大してきた。市の調査によると、出没する群れは 14 ~ 17 群ほどで、個体数は 700 ~ 800 頭になる。被害状況が深刻な地域では、農作物被害のほかに集落内への出没や家屋内への侵入などの生活被害も発生している。主な被害作物は水稻、大豆、

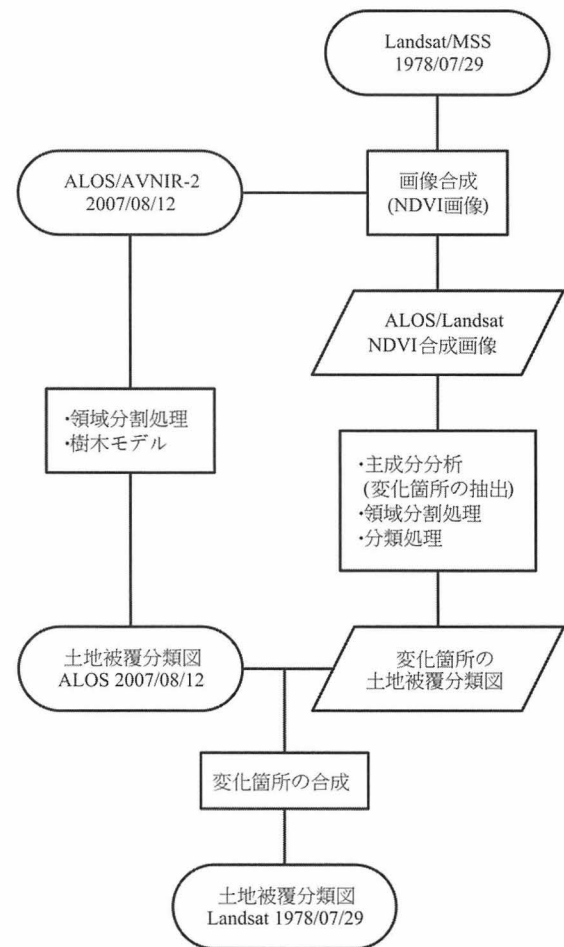


図2. 衛星画像の処理に関するフローチャート。

バレイショ、トウモロコシである。

ここでは、サル分布域が限定されていた1970年代と個体数増加や分布域の拡大により被害が顕著になった2000年代の2時期に着目した。1978年のLANDSAT/MSSデータ（以下、MSSデータ）と2007年のALOS/AVNIR-2データ（以下、AVNIR-2データ）を用いて、2時期のニホンザル生息適地地図を構築し、29年間における変化を評価することを目的とした。特に、植生や土地被覆の変化からサルの潜在的な分布域の変化を予測し、現在の分布状況に至った過程を考察した。

使用したデータ

ニホンザルの位置データ

本研究では12の野生サル群を対象にした。このデータは2005～2007年にVHF-ラジオテレメトリー法により得られた位置情報である。VHF-ラジオテレメトリー法とは、野生動物に発信機を装着し、指向性の強い八木アンテナと受信器を使って、対象とする動物の位置を知るものである。取得された位置データの総数は1989点である。調査はサルによる被害が起こる6月から11月に行われた。各群れから1日に1～7点の位置を取得した。1日における取得間隔は1時間以上とし、調査日の間隔は不規則である。位置は三角測量法により群れの位置を推定した後、直接群れに近づき、GPSでその地点を記録した。

衛星データ

衛星データを用いた2時期の土地被覆分類図作成の流れを図2に示す。Landsat/MSSデータは1978年7月29日に撮影され、空間分解能は80m×80mである。ALOS/AVNIR-2データは2007年8月12日に撮影され、空間分解能は10m×10mである。MSSデータはAVNIR-2データの10m×10mに空間解像度のサイズを合わせた。

土地被覆の分類には、観測波長帯におけるDigital Number（以下、DN）と植物の量を示す正規化差植生指数（Normalized Difference Vegetation Index: NDVI (Asrar1989)）を用いた。NDVIの算出は(1)式を用いた。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

ここで、NIRは近赤外域の観測波長帯、REDは可視域の赤の観測波長帯である。

2000年代の土地被覆を分類するため、2007年8月のAVNIR-2データに対し、画像分類を行った。ここでは、

複数のピクセルをまとめて評価するオブジェクトベース画像分類（Definiens Imaging 2004；Benz et al. 2004）とClassification and Regression Tree（CART: Breiman et al. 1984）を組み合わせで分類した。分類クラスを広葉樹、針葉樹、草地、農地、住宅地、裸地、水域の7クラスとした。この分類クラス数は、AVNIR-2センサを用いた他の画像分類の事例（伊藤ほか 2007；Takahata et al. 2014）と同程度であり、妥当と判断した。分類に使用する特徴量として、各オブジェクトにおけるDNの平均値と標準偏差を用いた。これらの処理により作成された画像を、2000年代の土地被覆分類図として扱った。

1970年代の土地被覆分類図作成における注意点として、AVNIR-2（10m×10m）とMSS（80m×80m）の空間分解能の違いがある。MSSは空間分解能が80m×80mであるため、分類の際、細い河川や小さなパッチを捉えることができない（Hansen et al. 2001）。そのため、AVNIR-2とMSSの単純な比較は2時期における土地被覆の変化を誤って抽出する可能性がある。そこで、この分解能の差による誤分類を極力抑えるため、1978年と2007年で変化が生じた部分のみを分類し、2007年の土地被覆に変化箇所を反映させる手法を適用した。これにより、変化していない箇所はALOS由来の土地被覆となるため、誤分類を抑える事が出来る。まず、AVNIR-2とMSSのNDVI合成画像を作成する。このNDVI合成画像に対し、主成

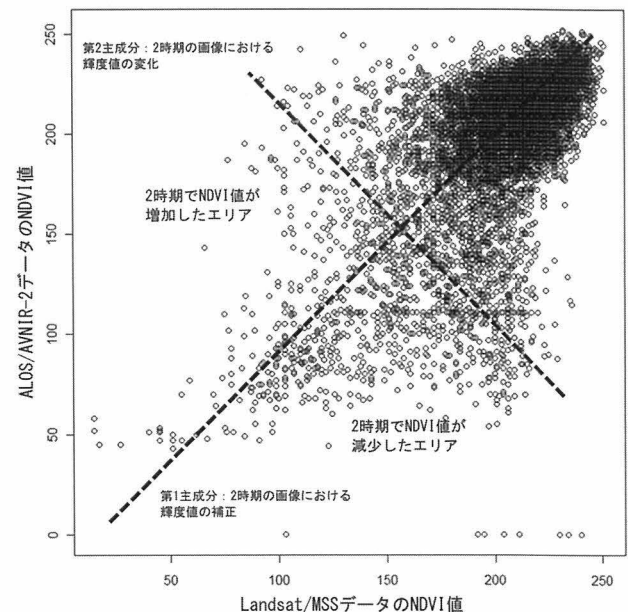


図3. 主成分分析を用いた変化抽出手法の概念図（Mochizuki and Murakami 2011 を改訂）。

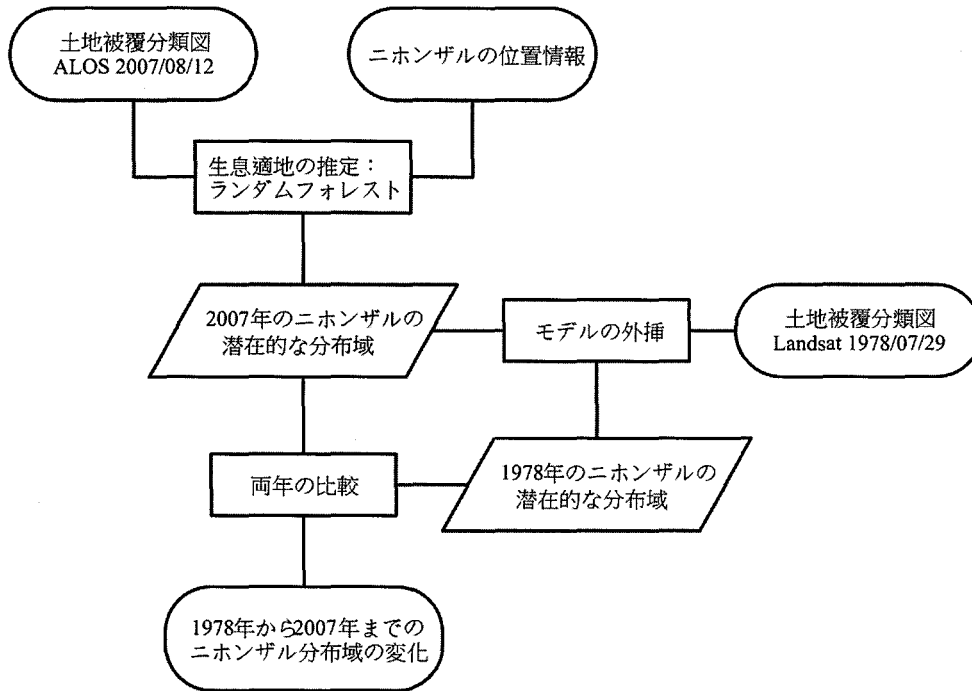


図4. 生息適地の推定に関するフローチャート。

分分析を適用することにより、輝度補正および2時期の変化を抽出した(栗屋・田中 2003; Rogan et al. 2003)。主成分分析において、2時期の画像から同一主成分で散布図を作成した場合、第1主成分軸は、画像間の輝度補正手法の1つである回帰分析(DN マッチング: 栗屋・田中 1999)と同じ意味を持つ。さらに、第1主成分の軸に直角である第2主成分は、2時期における変化を表す(図3)。

作成された第2主成分画像に対し、最尤法により閾値を決定し、1978年から2007年の間で変化あった箇所と変化がなかった箇所の2値画像に分類した。その後、MSS データに対し、変化があったところのみを抽出し、オブジェクトベース分類を適用した。分類クラスは、2007年と同様に広葉樹、針葉樹、草地、農地、住宅地、裸地、水域の7クラスとした。以上のように、変化のある部分のみを分類することにより、衛星データ間における空間分解能の差による誤分類を抑えた。これらの処理により作成された画像を、サルによる被害が少ない1970年代の土地被覆分類図として扱った。

2007年と1978年の分類精度の検証には、空中写真を用いた。空中写真は2006年と1975年に撮影されたものである。精度検証用のグランドトゥルースは、空中写真上で地物が明瞭な箇所をレギュラーサンプリングした計

550点を使用した。分類結果と空中写真から分類別データの一致程度を示す Kappa 係数を算出した。2007年の土地被覆分類図は、Kappa 係数: 0.92 で、1978年の土地被覆分類図は 0.84 と高い分類精度だった。

これら一連の処理には、ERDAS IMAGINE 9.3 (Leica Geosystems 社) と eCognition 3.3 (Definiens Imaging 社)、ArcGIS 9.3 (ESRI 社)、R2.8.1 (R Development Core Team 2008) を使用した。

統計処理

ニホンザルの生息適地推定の手順を図4に示す。ニホンザルの生息適地を分析するため、サルが利用した場所を用いて在/不在情報のモデルを構築した(Boyce et al. 2002)。観測地点は、VHF-ラジオテレメトリー法とGPSによる捕捉を組み合わせで得られた位置情報である。Mochizuki and Murakami (2011) では、農地に出没したポイントを除外していたが、本論では、農地も含めて生息地に必要な資源セットと仮定し、全ての位置情報(N=1989)を使用した。サルが利用しない場所に関しては、100%最外郭法により定義したサルの行動圏内に、位置情報と同数の点をランダムに発生させる事で、偽の不在情

表 2. 生息適地推定に用いた変数リスト。

環境要因	説明	レンジ
地形・気象要因		
標高 ^(a)	ニホンザル観測点の標高値 (m)	8.3 ~ 66.1
最大積雪深 ^(b)	最大積雪深 (m)	0.6 ~ 2.1
平均気温 ^(b)	冬の時期の平均気温 (℃)	-2.2 ~ -10.5
河川からの距離 ^(a)	河川からのユークリッド最短距離 (m)	0.0 ~ 1346.2
植生要因		
広葉樹林面積割合 ^(c)	半径 1000m バッファ内の広葉樹林の面積割合	0.0 ~ 100.0
針葉樹林面積割合 ^(c)	半径 1000m バッファ内の針葉樹林の面積割合	0.1 ~ 99.2
草地面積割合 ^(c)	半径 1000m バッファ内の草地の面積割合	0.1 ~ 99.5
草地からの距離 ^(c)	草地からのユークリッド最短距離 (m)	0.0 ~ 2366.8
森林 - 農地の接線長 ^(c)	森林と農地の接する線分の長さ (m)	0.0 ~ 5528.7
人為的影響の要因		
農地面積割合 ^(c)	半径 1000 m バッファ内の農地の面積割合	0.0 ~ 93.5
住宅域面積割合 ^(c)	半径 1000 m バッファ内の住宅域の面積割合	0.0 ~ 82.5
農地からの距離 ^(c)	農地からのユークリッド最短距離 (m)	0.0 ~ 2620.1
住宅域からの距離 ^(c)	住宅域からのユークリッド最短距離 (m)	0.0 ~ 3041.1
道路からの距離 ^(d)	幅員 5 m 以上の道路からのユークリッド最短距離 (m)	0.3 ~ 3808.2

^(a) 数値標高モデル (DEM) 10 m メッシュ (標高): 国土地理院^(b) メッシュ気候値 2000 年: 気象庁^(c) ALOS/AVNIR-2: 2007 年 8 月 12 日取得^(d) 数値地図 25000 (空間データ基盤): 国土地理院

報を作成した。この時、住宅地が行動圏に含まれている場合は、これに重ならないようにポイントを発生させた。これをサルが利用しない場所の位置情報とした。

既存の研究や知見 (例えば, Imaki et al. 2006; Hanya 2010) から、サルの生息適地と関係する環境因子を演繹的に選択した (表 2)。地形・気象由来の環境要因は、標高、最大積雪深、平均気温、河川からの距離である。植生由来の環境要因は、広葉樹林と針葉樹林、草地の面積割合、草地からの距離、広葉樹林と農地との接線長を選択した。人為的影響の要因としては、農地と住宅地の面積割合と農地・住宅地・道路からの距離を選択した。植生や人為的影響の面積割合は、2007 年土地被覆分類図において、在 / 不在情報の各地点から、半径 1000m の円を発生させその範囲を集計した。半径 1000 m は、ニホンザルの資源選択において、最も説明力のある空間スケールである。群れによって差はあるものの、Mochizuki and Murakami (2013) では、半径 1000 m という空間スケールを群れの行動圏と関連づけている。距離変数は、各地点と環境との最短距離とした。

サルの生息適地推定には、集団学習の一種であるランダムフォレスト (Random Forest: RF (Breiman 2001)) を使用した。ここでは、ブートストラップから 500 個のサブサンプルを作成し、14 個の環境要因からランダムに 4 個を選び、個々の決定木を作成した。また、変数の重要性和予測と各変数の関係性を明らかにした。ここで作成した予測モデルを、2007 年及び 1978 年の土地被覆分類図を用いて外挿する事により、2 時期のニホンザル生息適地を推定した。

結果と考察

ニホンザルの生息適地推定に対する変数の重要度では、半径 1000 m 内の針葉樹林の面積割合が最も推定に寄与した。次いで、農地からの最短距離と半径 1000 m 内の農地の面積割合、最大積雪深が寄与した。また、それぞれの環境要因が、推定にどのように寄与したかを評価した反応曲線を図 5 に示す。針葉樹林の面積割合が高くなるほど、ニホンザルはその環境を忌避することがわかった。

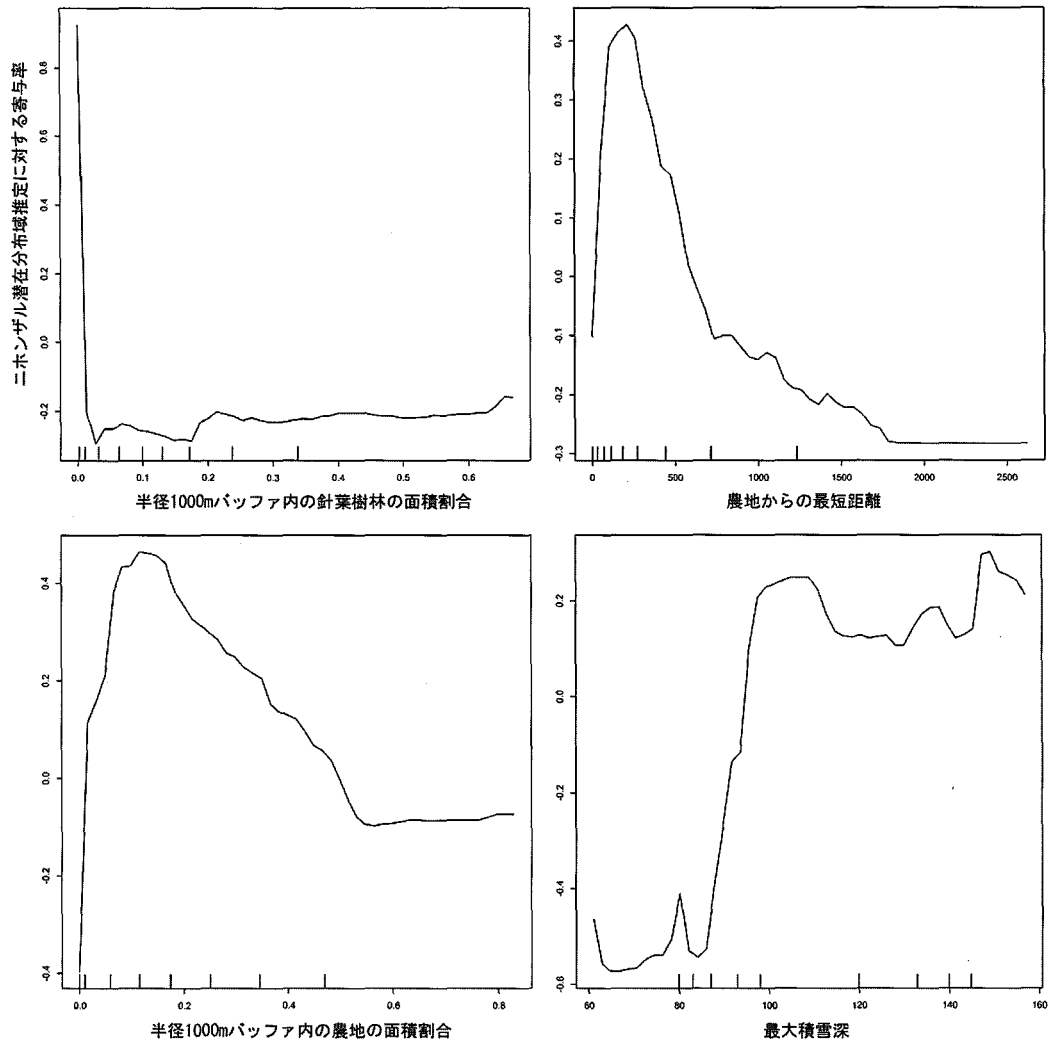


図5. 生息適地推定に寄与する変数上位4つの反応曲線。

また、農地から500 m以内で、1000 m円周内に農地が20%程度占める区域を好んでいた。また、ある程度、積雪が深い区域を好んでいた。

サルは、エサ資源の乏しさから針葉樹林を好まないことが報告されている（永田ほか 2007）。また、針葉樹林は移動経路として利用されるという指摘もある（Imaki et al. 2006）。本結果からも、同様にサルが大規模な針葉樹林パッチを好まないという事が推察された。一方で、最近針葉樹林の価値が見直される報告も存在する（Sakamaki and Enari 2012）。サルが針葉樹林をどのように利用するかについては、地域差なども考慮して検証する必要がある。また、本研究から、農地が多いオープンな環境は好まないこともわかった。農作物に依存しているため、農地からの距離が短い、林縁付近を主な生活場所

としているが、人間活動のある場所は嫌う傾向があった。つまり、ニホンザルの生息空間は、農地だけで構成された単一の景観構造ではなく、農地と森林が混じった景観構造であると考えられる。森林内においても、農作物という良好なエサ資源を得るためのリスクを考慮して、生息場所を選択している可能性が示唆された。また、積雪がリスク要因ではなかったことは、ニホンザルが寒さや積雪など、他の動物にとってリスクとなる要因に適応できていることを示唆した。

ニホンザルの生息適地推定モデルを、2007年と1978年の土地被覆分類図全域に外挿した結果を図6(a), (b)に示す。ここでは、森林内と林縁の外側300 mにおいて、ニホンザルの生息に適した範囲を抽出した。また、この2つの地図から、29年間ににおけるニホンザル好適分布範

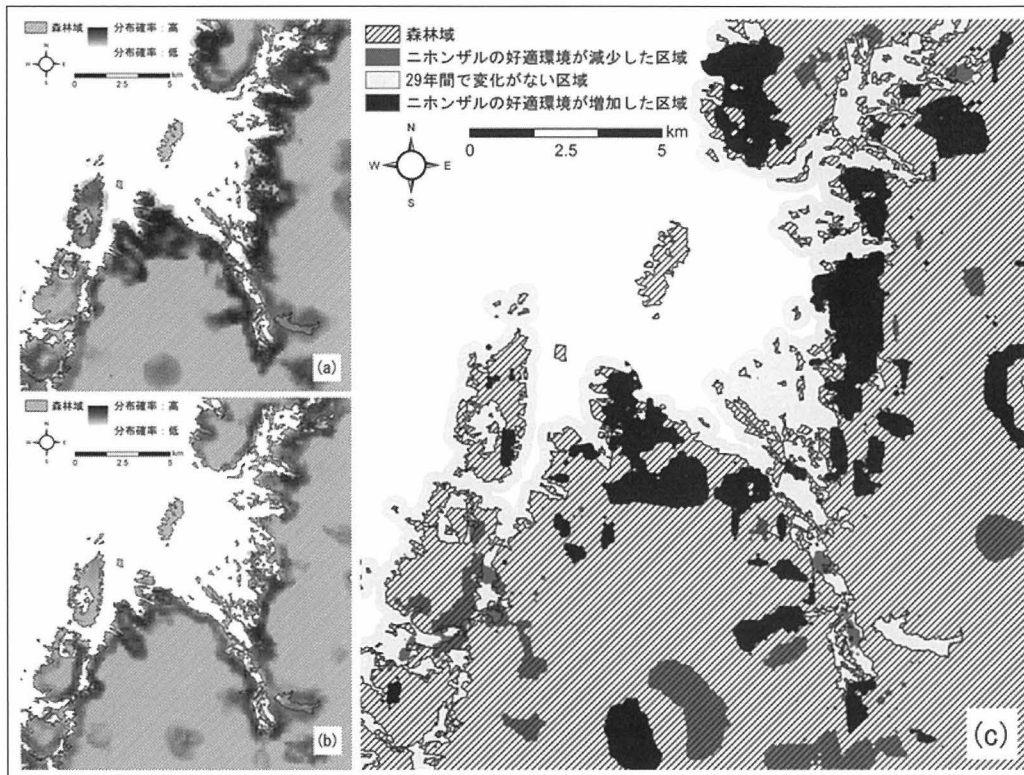


図6 ニホンザルの潜在的な分布域とその変化。(a) 2007年の潜在的な分布域、(b) 1978年の潜在的な分布域、(c) 29年間のニホンザルの潜在的な分布域の変化状況を示した区域。

図の変化を評価した(図6(c))。29年の間に、ニホンザルにとって好適な環境が増加したことがわかる。これは、戦後の拡大造林により植林されたスギ林が放棄され、現在では針広混交林となっているためである(Mochizuki and Murakami 2011)。ニホンザルの生息地としては不適であった針葉樹林(ここではスギ・アカマツ林)の変化が、現在の分布拡大の一因となっている可能性がある。今後、この地図をベースとして、近年増加した好適なエリアと、対象となる群れの加害レベルの低い群れを重ねる事で、人数を掛けて追い払いを行うエリアをゾーニングできる。つまり、優先的に被害管理を実施する範囲や生息地の管理を行う範囲の区分が可能になる。

まとめ

衛星リモートセンシング技術は、野生動物の保護管理と非常に親和性が高い。特に、生息地の評価は、野生動物の保護管理を進めていく上で必須である。この時、空中写真や衛星画像は様々な時空間スケールのもとで地表面を捉える事ができる。生息地の質を表す指標や、分断化・

連結性の評価が可能となり、野生動物の分布や行動と、環境要因との関係性を評価できる。さらに、そこで得られた知見(生息適地モデルや分布推定モデルなど)を広域に展開する事で、保護管理する際のゾーニングに必要な情報が集まる。今後は、野生動物の生息地を2次元的に捉えるだけでなく、レーザ光によるLidarなどを用いて、3次元的に捉える研究が発展していくと考えられる(Goetz et al. 2010)。特に、森林の構造を立体的に捉える事により、林冠ギャップなどを詳細に抽出できるかもしれない。これまでの衛星画像では、森林内の下層植生などは全く考慮できなかったが、森林の階層構造を生息地解析に取り込む事も可能になる。衛星リモートセンシング技術は、野生動物の保護管理に対しますます有用なツールとして活躍するであろう。

謝辞

本稿のニホンザルに関する情報は、新潟県新発田市の猟友会より提供して頂きました。またニホンザルの課題は、JSPS 科研費 23・5907 の助成を受けました。最後に、

本特集を企画者ならびに校閲者の方々、そして本特集の基になった企画集会の講演者諸氏に感謝致します。

引用文献

- Altmann SA, Altmann J (2005) The transformation of behavior field studies. In: Lucas JR, Simmons LW (ed), Essays in Animal Behavior, 57-79. Elsevier Academic Press, Burlington
- Asrar G (1989) Theory and Applications of Optical Remote Sensing. Wiley, New York
- 栗屋 善雄, 田中 伸彦 (1999) 冷温帯森林の反射スペクトルの季節変化の特徴: ランドサットTMデータを利用した解析. 写真測量とリモートセンシング, 38:35-46
- 栗屋 善雄, 田中 邦宏 (2003) ランドサットTMデータを用いた森林変化モニタリング指標の検討: スギ林の伐採と成長のモニタリング. 写真測量とリモートセンシング, 42:60-70
- Benz U, Hofmann P, Willhauck G, Lingenfelder L, Heynen M (2004) Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58:239-258
- Boyce MS, Pierre RV, Scott EN, Fiona KAS (2002) Evaluating resource selection functions. Ecological Modelling, 157:281-300
- Breiman L (2001) Random forests. Machine Learning, 45:5-32.
- Breiman L, Freedman J, Olshen R (1984) Classification and Regression Trees. Chapman and Hall, New York
- De Leeuw J, Ottichilo WK, Toxopeus AG, Prins HHT (2002) Application of remote sensing and geographic information systems in wildlife mapping and modeling. In: Skidmore A (ed), Environmental Modeling with GIS and Remote Sensing, 121-141. Taylor and Francis, London
- Definiens Imaging (2004) eCognition USER GUIDE 4. Definiens Imaging GmbH, Munchen, Germany
- 土光 智子, 福井 弘道, 大澤 啓志, 一ノ瀬 友博 (2009) ロジスティック回帰モデルを用いた環境指標によるツキノワグマ (*Ursus thibetanus japonicus*) の生息確率予測モデル. 環境情報科学論文集, 23:107-112
- Doko T, Fukui H, Kooiman A, Toxopeus AG, Ichinose T, Chen W, Skidmore AK (2011) Identifying habitat patches and potential ecological corridors for remnant Asiatic black bear (*Ursus thibetanus japonicus*) populations in Japan. Ecological Modelling, 222:748-761
- Doko T, Chen W (2013) The geographical distribution and habitat use of Japanese serow (*Naemorhedus crispus*) in the Fuji-Tanzawa region, Japan. Journal of Environmental Information Science, 41:53-62
- 江口 裕輔, 三浦 慎悟, 藤岡 正博 (2002) 鳥獣害対策の手引き2002. 社団法人日本植物防疫協会, 東京
- Enari H, Sakamaki-Enari H (2013) Resource use of Japanese macaques in heavy snowfall areas: implications for habitat management. Primates, 54:259-269
- Environmental Remote Sensing Group (2003) Determination of SRA habitat indicators by remote sensing. CSIRO Land and Water Technical Report 28/03, Canberra
- Estes JE (1985) The need for improved information systems. Canadian Journal of Remote Sensing, 13:3045-3054
- Fahrig L (2003) Effects on habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics, 34:487-515
- Franklin SE (2010) Remote sensing for biodiversity and wildlife management. : Synthesis and Applications. McGraw-Hill Companies, Inc., USA
- Gavashelishvili A, Lukarevskiy V (2008) Modeling the habitat requirements of leopard *Panthera pardus* in west and central Asia. Journal of Applied Ecology, 45:579-588
- Gibson LA, Wilson BA, Aberton JG (2004) Landscape characteristics associated with species richness and occurrence of small native mammals inhabiting a coastal heath land: a spatial modelling approach. Biological Conservation, 120:75-89
- Goetz SJ, Steinberg D, Retts MG, Holmes RT, Doran PJ, Dubayah R, Hofton M (2010) Lidar remote sensing variables predict breeding habitat of a Neotropical migrant bird. Ecology, 91:1569-1576
- Grassman LI, Tewes ME, Silvy NJ, Kreetiyutanont K (2005) Ecology of three sympatric felids in mixed evergreen forest in north-central Thailand. Journal of Mammalogy, 25:480-487
- Hansen MJ, Franklin SE, Woudsma CG, Peterson M (2001) Caribou habitat mapping and fragmentation analysis using Landsat Mss, TM, and GIS data in the North Columbia Mountains, British Columbia, Canada. Remote Sensing of Environment, 77:50-65
- Hanya G (2010) Ecological adaptations of temperate primates: population density of Japanese macaques. In: Nakagawa N, Nakamichi M, Sugiura H (ed), The Japanese macaques, 79-97. Springer, Tokyo
- Hu J (2001) Research on the Giant Panda. Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu
- Iijima H, Nagaike T, Honda T (2013) Estimation of deer population dynamics using a bayesian state-space model with multiple abundance indices. The Journal of Wildlife Management, 77:1038-1047
- Imaki H, Koganezawa M, Maruyama N (2006) Habitat selection and forest edge use by Japanese monkeys in the Nikko and Imaichi area, central Honshu, Japan. Biosphere Conservation, 7:87-96
- Ito TY, Miura N, Lhagvasuren B, Enkhbileg D, Takatsuki S, Tsunekawa A, Jiang Z (2006) Satellite tracking of Mongolian gazelles (*Procapra gutturosa*) and habitat shifts in their seasonal ranges. Journal of Zoology, 269:291-298
- Ito TY, Miura N, Lhagvasuren B, Enkhbileg D, Takatsuki S, Tsunekawa A, Jiang Z (2005). Preliminary evidence of a barrier effect of a railroad on the migration of Mongolian gazelles. Conservation Biology, 19:945-948

- 伊藤 史彦, 喜多 晃平, 長澤良太 (2007) 相観植生図作成における ALOS AVNIR-2 画像の利用可能性 (特集 リモートセンシング・GIS を用いた植生図の作成手法 (2) その課題と応用の可能性). 景観生態学, 11:125-132
- Johnson CJ, Nielsen SE, Merrill EH, McDonald TL, Boyce MS (2004) Resource selection functions based on use-availability data: theoretical motivation and evaluation and methods. *Journal of Wildlife Management*, 70:347-357
- Johnson DH (1980) The comparison of usage and availability measurements for evaluating resource preference. *Ecology*, 61:65-71
- 環境省 (1999) 第5回自然環境保全基礎調査, 植生調査報告書. 環境省
- Li H, Li D, Li T, Qiao Q, Yang J, Zhang H (2010) Application of least-cost path model to identify a giant panda dispersal corridor network after the Wenchuan earthquake – Case study of Wolong Nature Reserve in China. *Ecological Modelling*, 221:944-952
- Li X, Li D, Ma Z, Schneider DC (2006) Nest site use by crested ibis: dependence of a multifactor model on spatial scale. *Landscape Ecology*, 21:1207-1216
- Li X, Tian H, Li D (2009) Why the crested ibis declined in the middle twentieth century. *Biodiversity and Conservation*, 18:2165-2172
- Linderman M, Bearer S, An L, Tan Y, Ouyang Z, Liu J (2005) The effects of understory bamboo on broad-scale estimates of giant panda habitat. *Biological Conservation*, 121:383-390
- Liu J, Linderman M, Ouyang Z, An L, Yang J, Zhang H (2001) Ecological degradation in protected areas: the case of Wolong Nature Reserve for giant pandas. *Science*, 292:98-101
- Liu J, Ouyang Z, Taylor WW, Groop R, Tan Y, Zhang H (1999) A framework for evaluating the effects of human factors on wildlife habitat: the case of giant pandas. *Conservation Biology*, 13:1360-1370
- Mackinnon J, De Wulf R (1994) Designing protected areas for giant pandas in China. In: Miller RI (ed), *Mapping the Diversity of Nature*, 127-142. Chapman and Hall, London
- Mochizuki S, Murakami T (2011) Change in habitat selection by Japanese macaques (*Macaca fuscata*) and habitat fragmentation analysis using temporal remotely sensed data in Niigata Prefecture, Japan. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13:562-571
- Mochizuki S, Murakami T (2013) Scale dependent effects in resource selection by crop-raiding Japanese macaques in Niigata Prefecture, Japan. *Applied Geography*, 42:13-22
- 村上 興正, 大井 徹 (2007) 特定鳥獣保護管理計画の現状と課題. 哺乳類科学, 47:127-130
- 村上 拓彦, 小泉 透 (2003) 広域空間スケールで捉えた伐採地の出現動向とシカによる新植地被害分布. 九州森林研究, 53:101-104
- 永田 幸志, 佐伯 真美, 滝井 暁子, 吉本 千恵美, 村上 友和, 山内 琴美 (2007) 丹沢山麓におけるニホンザルの行動域と環境利用. 丹沢大山連合調査学術報告書, 138-145
- 大石 優, 松永 恒雄, 中杉 修身 (2010) 航空機リモートセンシング画像に写った雪の上の野生動物の足跡の自動抽出とその利用. 日本リモートセンシング学会誌, 30:19-30
- 大井 徹 (2005) ニホンザルによる農業被害の総合的防除に向けて (特集 共生をめざした鳥獣対策). 農林水産技術研究ジャーナル, 28:20-24
- 奥村 忠誠, 清水 庸, 大政 謙次 (2009) ニホンジカ (*Cervus Nippon*) の分布拡大に影響を与える要因. 環境科学会誌, 22:379-390
- Orians GH, Pearson NE (1979) On the theory of central place foraging. In: Horn DJ, Stairs GR, Mitchell RD (ed), *Analysis of Ecological Systems*, 155-177. Ohio State University Press, Columbus
- R Development Core Team (2008) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna
- Robinson CJ (1981) The logic of multispectral classification and mapping of land. *Remote Sensing of Environment* 11, 231-244
- Rogan J, Miller J, Stow D, Franklin J, Levien L, Fischer C (2003) Land-cover change monitoring with classification trees using Landsat TM and ancillary data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69:793-804
- Saito M, Momose H, Mihira T (2011) Both environmental factors and countermeasures affect wild boar damage to rice paddies in Boso Peninsula, Japan. *Crop Protection*, 30:1048-1054
- Sakamaki H, Enari H (2012) Activity-specific evaluation of winter habitat use by Japanese macaques in snow areas, northern Japan: Implications for conifer plantation management. *Forest Ecology and Management*, 270:19-24
- 坂田 宏志, 三谷 雅純 (2002) 人間の影響下での野生動物の生息状況を予測する (特集2 地理情報システム:GIS--生態系保全への新しいアプローチ). 生物の科学 遺伝, 56:59-64
- Saunders DA, Hobbs RJ, Margules CR (1991) Biological consequences of ecosystem fragmentation: A review. *Conservation Biology*, 5:18-32
- 清水 晶平, 望月 翔太, 山本 麻希 (2013) イノシシ (*Sus scrofa*) の分布拡大時における水稻被害の地理的発生要因. 景観生態学, 18:173-182
- 鈴木 克哉 (2003) 下北半島北西部の野生ニホンザルによる夏期の農地利用. 野生生物保護, 8:49-61
- Takahata C, Nielsen SE, Takii A, Izumiyama S (2014) Habitat selection of a large carnivore along human-wildlife boundaries in a highly modified landscape. *PloS one*, 9:e86181
- Tiner RW (2004) Remotely sensed indicators for monitoring the general condition of "natural habitat" in watersheds: an application for Delaware's Nanticoke River watershed. *Ecological Indicators*, 4:227-243
- Van Bommel FPJ, Heitk nig IMA, Epema GF, Ringrose S, Bonyongo CD, Veenendaal EM (2006) Remotely sensed habitat indicators for predicting distribution of *Impatiens* in the Okavango Delta, Botswana.

- Journal of Tropic Ecology, 22:101-110
- Viña A, Bearer S, Chen X, He G, Linderman M, An L, Zhang H, Ouyang Z, Liu J (2007) Temporal changes in giant panda habitat connectivity across boundaries of Wolong Nature Reserve, China. *Ecological Applications*, 17:1019-1030
- Wada K, Tokida E (1981) Habitat utilization by wintering Japanese monkeys (*Macaca fuscata fuscata*) in the Shiga Heights. *Primates*, 22:330-348
- Wang T, Ye X, Skidmore AK, Toxopeus AG (2010) Characterizing the spatial distribution of giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) in fragmented forest landscapes. *Journal of biogeography*, 37:865-878
- Weiers S, Bock M, Wissen M, Rossner G (2004) Mapping and indicator approaches for the assessment of habitats at different scales using remote sensing and GIS methods. *Landscape and Urban Planning*, 67:43-65
- Xu W, Ouyang Z, Viña A, Zheng H, Liu J, Xiao Y (2006) Designing a conservation plan for protecting the habitat for giant pandas in the Qionglai mountain range, China. *Diversity and Distribution*, 12:610-619