

GPS-アルゴス首輪を用いたニホンジカの行動特性の評価

江口則和・石田 朗・山下 昇（愛知県森林・林業技術センター）
高橋 啓（特定NPO法人穂の国森林探偵事務所）
鈴木千秋・佐藤亮介（株式会社マップクエスト）

愛知県東部～長野県南部地域を対象に、ニホンジカ（以下、シカ）の行動特性を明らかにすることを目的とした。11 個体に GPS 首輪を装着し、日中(7:00-17:00)と夜間(19:00-5:00)の位置情報を 1 カ月以上取得した。また、追跡したシカが生息している地域を 250m メッシュに区分し、各メッシュでの GPS 首輪の測位数及び地形植生情報を調べ、階層ベイズモデルを用いてシカの存在に与える各種環境要因の影響を解析した。その結果、日中のシカの存在確率は森林の割合が多いほど高くなり、夜間では水田や牧草地の割合が多いほど高くなった。このようにシカは昼夜で利用する場所を変えることから、両者をつなぐ獣道にくくりワナ等のワナを設置すれば、効果的にシカの捕獲できる可能性があると考えられた。

キーワード：階層ベイズモデル、250m メッシュ、GIS、GPS-アルゴス首輪、土地利用特性

I はじめに

深刻化するニホンジカ (*Cervus nippon*, 以下、シカ) による被害対策のためには、現状のシカ個体数を把握して捕獲駆除（以下、捕獲）を行うことが必要不可欠である (17)。個体数の把握について、従来は費用面・労力面ともにコストが大きかったが、近年は階層ベイズモデルで構成した状態空間モデル (1,4,15) を活用することにより、低コストで高精度な個体数推定が可能となってきた。愛知県内のシカ密度についても、この手法により推定することができた (2)。

この推定は、5km メッシュ単位の行政データを利用するため、個体数の推定も 5km メッシュ単位のものになる。そのため、広域レベルでの管理を実施している公的機関等にとっては有益な情報となるのだが、狩猟者にとっては、5km メッシュ単位の情報は広すぎるため、例えばどこにワナを設置すれば捕まえやすいかなどの実用的な情報として扱うことができない。

実際の狩猟に役立つ情報とするためには、より細かい単位でシカがどこに出やすいかという「ハザードマップ」を作成するのがよいと考えられる。ここでハザードマップ作成のためには、シカの行動特性をマップに組み込めるよう数値化（モデル化）することが必要である。そこで本研究では、国土交通省からフリーで利用できる地形 GIS「国土数値情報・標高傾斜度 5 次メッシュ(250m メッシュ)」を単位として、GPS 首輪を用いて調べたシカの行動特性をモデル化し、ハザードマップ作成のための基礎情報を得ることを目的とした。

II 材料と方法

1. 対象地とシカ行動特性の調査

対象地はシカ被害が深刻化している愛知県東部～

長野県南部地域の里山地域とした。シカの行動特性の把握するため、GPS 首輪を利用した行動調査を行った。愛知県新城市 (N:34.99°, E:137.50°) および豊根村 (N:35.12°, E:137.71°) において、2013 年 12 月～2015 年 7 月にかけて、全方位解放型のオリ付囲いワナ（名称、おりべえ）で推定 1-2 歳のシカ 11 頭を捕獲した。新城では S1-6 の 6 個体を、豊根では T1-5 の 5 個体を捕獲し、GPS 首輪 (Tellus1D, Followit, AB, Lindesberg, Sweden) を 2 個体 (S1,2) に、GPS-アルゴス首輪 (TGW-4583-3 GPS/ARGOS, Tellonics Inc., AZ, USA) を 9 個体 (S3-5, T1-6) に装着させ、放獣後に測位間隔 2 時間で GPS データを取得した。調査期間は少なくとも 1 ヶ月以上とし、詳細については表-1 にまとめた。なお、GPS-アルゴス首輪とは、測位した GPS データをアルゴス衛星に送信して、衛星経由によりデータ回収できるものである (13, 16)。本研究でのアルゴス衛星へのデータ送信間隔と送信時間は、3 日に 1 回 6 時間とした。予備調査の結果、アルゴス非対応 GPS 首輪と対応 GPS 首輪間でデータ取得率は両者ともに

表-1. 対象としたシカと調査期間

シカID	場所	性別	調査期間
S1	新城	オス	2013.12.3 - 2014.2.15
S2	新城	メス	2014. 6.9 - 2014.10.14
S3	新城	メス	2015. 2.20 - 2015.8.2
S4	新城	メス	2015. 3.5 - 2015.8.2
S5	新城	メス	2015. 3.10 - 2015.6.27
S6	新城	オス	2015. 5.1 - 2015.8.2
T1	豊根	メス	2015. 3.30 - 2015.8.3
T2	豊根	オス	2015. 5.22 - 2015.6.26
T3	豊根	メス	2015. 5.22 - 2015.8.3
T4	豊根	メス	2015. 6.24 - 2015.8.2
T5	豊根	オス	2015. 7.2 - 2015.8.2

EGUCHI Norikazu, ISHIDA Akira, YAMASHITA Noboru (Aichi Pref. For. Res. Inst.), TAKAHASHI Akira (NPO Honokuni Moritan), SUZUKI Chiaki, SATO Ryousuke (Map Quest), norikazu_eguchi@pref.aichi.lg.jp

Behavioral characteristic of sika deer evaluated by GPS-Argos system

おおよそ 70%であった（江口ら投稿中）。

2. モデル解析

シカの行動パターンを評価するため、得られた GPS 首輪データからシカ存在比率を算出し、さらに各種環境データと重ね合わせることで、行動特性のモデル化を行った。

(1) モデル構築のためのデータ

シカ存在比率 (ExistRate) は

$$\text{ExistRate}[i,S] = \text{Count}[i,S] / \text{TotalCount}[S] \quad \dots (1)$$

と定義した。ここで、 i はメッシュ番号、 S はシカ ID、 $\text{Count}[i,S]$ はシカ S のメッシュ i 内での測位数、 $\text{TotalCount}[S]$ は調査期間内でのシカ S の全測位数を示す。ただし、解析には $\text{ExistRate}[i,S] > 0$ のものを用い、シカの測位情報がなかったメッシュは解析から除いた。また、日中と夜間でシカの行動パターンは異なる可能性があるため (14)、 ExistRate は日中 (7:00-17:00) と夜間 (19:00-5:00) で区分して算出した。

シカ存在比率をモデル化するための環境データとして地形及び植生を用いた。地形データは、メッシュ内の最大標高(m)、最低標高(m)、最大傾斜(degree)、最低傾斜(degree)とし、「国土数値情報・標高傾斜度 5 次メッシュ」(8) の GIS データを利用した。植生データは、メッシュ内のスギヒノキ林率(%), その他森林率(%), 河川率(%), 水田(休耕地含)率(%), 畑地(休耕地含)率(%), 牧草地率(%), 「自然環境情報 GIS 提供システム・植生調査 (1/50,000 縮尺)」(7) の GIS データを利用した。GIS データは QGIS ver2.6 (11) を用いて数値化した。

(2) モデルの構築

本研究での個体数推定は、階層ベイズモデルとして構築し、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (以下、MCMC 法) で事後分布を推定する手法を用いた。なお、式中の「=」は不確実性のない決定論的過程を示し、「~」は確率分布からの確率論的過程(無作為抽出)を示す。

$$\text{Count}[i,S] \sim \text{Poisson}(\lambda \text{Count}[i,S]) \quad \dots (2)$$

$\text{Count}[i,S]$ は、 $\lambda \text{Count}[i,S]$ を平均とするポアソン分布からの抽出。

$$\ln(\lambda \text{Count}[i,S]) = \ln(\text{TotalCount}[S]) + A + \text{EnvironF}[i] + r\text{Sika}[S] + \text{error}[i] \quad \dots (3)$$

$\lambda \text{Count}[i,S]$ はリンク関数を \ln とし、オフセット項 $\ln(\text{TotalCount}[S])$ 、変換係数 A 、メッシュごとの環境要因 $\text{EnvironF}[i]$ 、シカ ID 毎のランダム項 $r\text{Sika}[S]$ 、メッシュごとの正規誤差 $\text{error}[i]$ からなる関数。正規誤差 $\text{error}[i]$ を導入したのは、ポアソン分布での解析において観測データの持つバラつきを考慮しきれないためである。

$$A \sim \text{Normal}(0, 100) \quad \dots (4)$$

A は平均 0、標準偏差 100 の正規分布からの抽出。

$$\text{EnvironF}[i] \sim \text{Normal}(\mu \text{EnvironF}[i], \sigma \text{EnvironF}) \quad \dots (5)$$

$\text{EnvironF}[i]$ は平均 $\mu \text{EnvironF}[i]$ 、標準偏差 $\sigma \text{EnvironF}$

の正規分布からの抽出。

$$\mu \text{EnvironF}[i] = a_0 + a_1 * \text{スギヒノキ林率}[i] + a_2 * \text{その他森林率}[i] + a_3 * \text{河川率}[i] + a_4 * \text{水田率}[i] + a_5 * \text{畑地率}[i] + a_6 * \text{牧草地率}[i] + a_7 * \text{最大標高}[i] + a_8 * \text{最低標高}[i] + a_9 * \text{最大傾斜}[i] + a_{10} * \text{最低傾斜}[i] \quad \dots (6)$$

$\mu \text{EnvironF}[i]$ は植生及び地形 GIS データからなる関数。

$$a_0 \sim a_{10} \sim \text{Normal}(0, 100) \quad \dots (7)$$

$a_0 \sim a_{10}$ は、それぞれ平均 0、標準偏差 100 の正規分布からの抽出。

$$\sigma \text{EnvironF} \sim \text{Uniform}(0, 100) \quad \dots (8)$$

$\sigma \text{EnvironF}$ は 0-100 の一様分布から抽出し、幅の広い超事前分布を設定。

$$r\text{Sika}[S] \sim \text{Normal}(0, \sigma r\text{Sika}) \quad \dots (9)$$

$r\text{Sika}[S]$ は平均 0、標準偏差 $\sigma r\text{Sika}$ の正規分布からの抽出。

$$\sigma r\text{Sika} \sim \text{Uniform}(0, 100) \quad \dots (10)$$

$\sigma r\text{Sika}$ は 0-100 の一様分布から抽出し、幅の広い超事前分布を設定。

$$\text{error}[i] \sim \text{Normal}(0, \sigma \text{error}) \quad \dots (11)$$

$\text{error}[i]$ は平均 0、標準偏差 σerror の正規分布からの抽出。

$$\sigma \text{error} \sim \text{Uniform}(0, 100) \quad \dots (12)$$

σerror は 0-100 の一様分布から抽出し、幅の広い超事前分布を設定。

(3) MCMC 法による推定と収束診断

パラメータ推定のためのソフトウェアとして JAGS3.4.0 (10) を用い、統計ソフト R3.1.0 (12) 内で計算した。初期値の影響や自己相関を避けるため (9)、最初の 20 万回の試行データを切り捨て、以後 20 万回の試行データから 100 回毎にサンプルを抽出した。推定は異なる初期値を用いて 3 連鎖計算を行い、 $R\text{-hat}$ 値が 1.1 未満となっているときに連鎖が定常状態に収束していると判断した (3)。また、各係数の効果について、推定値の 95% 信用区間下限が 0 以上ならば正の効果、95% 信用区間上限が 0 以下ならば負の効果があると判断した。

(4) モデルの当てはまり評価

実測値であるシカ存在比率 ($\text{ExistRate}[i,S]$) と、推定パラメータを用いて算出される環境要因 ($\text{EnvironF}[i]$) との関係を評価した。各メッシュの $\text{EnvironF}[i]$ は、効果の認められた係数 $a_0 \sim a_{10}$ の中央値を用いて 6 式により算出した (効果の認められなかった係数は 0 とした)。式 1.3 より、存在確率の自然対数値「 $\ln(\text{ExistRate}[i,S])$ 」と「 $\text{EnvironF}[i]$ 」とで線形関係が考えられるため、ピアソンの積率相関係数の無相関検定を用いて、両者の相関関係を調べた。解析には統計ソフト R3.1.0 (12) を用い、有意水準 (p 値) が 0.05 未満で両者の間に有意な関係ありとし、相関係数 (R) を算出した。

表-2. 昼モデルの各変数の係数

(昼モデル)	95%信用 区間下限	中央値	95%信用 区間上限	変数の 効果
切片 a ₀	-15.317	-12.949	-10.206	-
スギヒノキ率 a ₁	0.002	0.014	0.026	+
その他森林率 a ₂	0.002	0.016	0.030	+
河川率 a ₃	-0.139	-0.051	0.038	
水田(休耕地含)率 a ₄	-0.008	0.017	0.042	
畑地(休耕地含)率 a ₅	-0.105	-0.041	0.022	
牧草地率 a ₆	-0.006	0.015	0.036	
最大標高 a ₇	-0.007	0.002	0.013	
最低標高 a ₈	-0.014	-0.003	0.007	
最大傾斜 a ₉	-0.080	-0.026	0.028	
最低傾斜 a ₁₀	-0.077	-0.028	0.021	

表-3. 夜モデルの各変数の係数

(夜モデル)	95%信用 区間下限	中央値	95%信用 区間上限	変数の 効果
切片 a ₀	-14.229	-12.053	-8.360	-
スギヒノキ率 a ₁	0.003	0.013	0.022	+
その他森林率 a ₂	-0.004	0.008	0.021	
河川率 a ₃	-0.071	-0.009	0.054	
水田(休耕地含)率 a ₄	0.015	0.033	0.052	+
畑地(休耕地含)率 a ₅	-0.108	-0.043	0.020	
牧草地率 a ₆	0.011	0.031	0.049	+
最大標高 a ₇	-0.013	-0.006	0.003	
最低標高 a ₈	-0.004	0.005	0.012	
最大傾斜 a ₉	-0.073	-0.024	0.018	
最低傾斜 a ₁₀	-0.032	0.013	0.059	

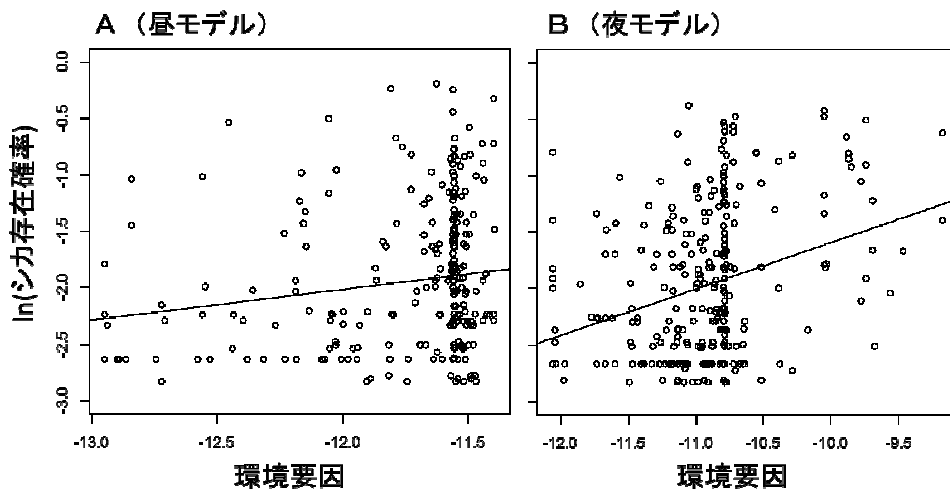


図-1. シカ存在比率と推定した環境要因の値との関係 (A: 昼モデル, n=281, B: 夜モデル, n=311)

III 結果

1. 収束診断

構築したモデルについて、MCMC法を実施した結果、推定パラメータの *R-hat* 値はすべて 1.1 未満であり、推定値はすべて収束していた。

2. 行動圏とパラメータの評価

シカ存在比率に及ぼす環境要因の影響について、まず日中 (7:00-17:00) の行動パターンを示す昼モデルでは、「スギヒノキ率」及び「その他森林率」に正の効果が認められた (表-2)。また、夜間 (19:00-5:00) の行動パターンを示す夜モデルでは、「スギヒノキ率」、「水田 (休耕地含) 率」、「牧草地率」に正の効果が認められた (表-3)。推定パラメータの中央値を利用してメッシュ *i* の環境要因の値を示すと、

昼モデル:

$$\text{環境要因}[i] = -12.949 + 0.013 * \text{スギヒノキ率}[i] + 0.016 * \text{その他森林率}[i] \quad \dots (13)$$

夜モデル:

$$\text{環境要因}[i] = -12.053 + 0.013 * \text{スギヒノキ率}[i] + 0.033 * \text{水田率}[i] + 0.031 * \text{牧草地率}[i] \quad \dots (14)$$

となった。

3. モデルの当てはまり評価

シカ存在比率と、推定した環境要因の値 (式 13, 14) との関係を図-1 に示す。両者の関係はばらついたものの、昼モデル、夜モデルともに両者の間に有意な正の相関関係が認められた (昼モデル: $p < 0.05, R = 0.15$, 夜モデル $p < 0.001, R = 0.31$)。

IV 考察

GPS首輪をつけてシカの行動パターンを調べた結果、里山地域でのシカの行動圏には、人間の生活圏も含まれていることが明確になった。また van Doormaal (2015) (14) の指摘のとおり、行動パターンに日中と夜間で明確な違いが認められた。

まず日中の行動について、農地や牧草地よりも主に森林内で行動していた (表-2)。次に夜間の行動について、日中にも確認できたスギヒノキ林だけでなく、日中にはあまり確認できなかった人間の生活圏内 (水田や牧草地) で行動する割合も高くなった (表-3)。このように夜に農地に来るといった行動パターンは、例えば大阪でも報告されている (6)。また、本研究を実施した地域で行ったライトセンサスの結果 (5) とも一致する。すなわち、本調査地のような里山地域でのシ

カの行動特性は、日中は森林内に留まり、夜間は人間の生活圏にも潜り込むといったパターンが生じやすいと考えられた。

上述のパターンを説明しているモデル式 (式 13,14) は、実際のシカ出現確率と正の相関関係があったため (図-1), これらの式をシカハザードマップの作成に利用することも可能だと考えられた。しかしながら、出現確率データとの当てはまりはそれほど高いものではなかった (図-1)。本モデルでのシカ出現確率の推定は、この環境要因の値のみだけでなく、シカ ID 毎のランダム項や、メッシュごとの誤差項で補正しているため (式 13), データとの当てはまりは改善されているのだが、今後ハザードマップを作成していくためには、環境要因のみとの当てはまりを向上させていく必要がある。ところで、5km メッシュのシカ密度を状態空間モデル (15) によって推定する場合は、複数の観測データ (区画法データ, 糞塊法データ, 目撃効率 (SPUE) データなど) で推定精度を高めていく (4)。この状態空間モデルの手法をとれば、本モデルの精度も向上しうるのではないだろうか。すなわち、現在のモデルは GPS 首輪データのみから構築しているが、昼モデルについては区画法データを追加する、夜モデルについてはライトセンサデータを追加する、といった手法でモデルを改善できる可能性がある。今後は、モデルの当てはまりを向上させるのと同時に、自動撮影カメラなどによりモデル推定の確率が正しいかどうか検証することも必要である。

まとめとして、本地域でのシカは昼に森林内に、夜に水田の多い場所や牧場にやってくる傾向があることが分かった。すなわち、両者をつなぐ獣道上にワナを設置すると、捕獲効率を高めることができると考えられる。今後は、GPS 首輪データだけでなく、他の調査データもモデルに含めることで推定式の精度を高め、シカハザードマップの開発につなげていく。

謝辞

本研究の一部は、農研機構生物系特定産業技術研究支援センターの「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業 (うち産学の英知を結集した革新的な技術体系の確立)」及び JSPS 科学研究費補助金 (No.26450221) の支援を受けて実施しました。

引用文献

- (1) 浅田正彦・長田譲・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: 53-72
- (2) 江口則和・石田朗・山下昇・高橋啓・鈴木千秋・岡田良平・佐藤亮介 (2015) 愛知県東部地域におけるニホンジカの個体数指標の推定. 中森研 63:

21-26

- (3) Gelman A, Carlin JB, Stern HS, Rubin DB (2004) Bayesian data analysis. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida, USA
- (4) Iijima H, Nagaike T, Honda T (2013) Estimation of deer population dynamics using a bayesian state-space model with multiple abundance indices. J Wildlife Manage 77: 1038-1047
- (5) 石田朗・江口則和・山下昇・高橋啓 (2015) 愛知県三河山間地におけるニホンジカのライトセンサ一秋と春の調査結果から一. 中部森林研究 63:19-20
- (6) 石塚謙・川井裕史・大谷新太郎・石井亘・山本隆彦・丈幸太郎・片山敦司・松下美郎 (2007) 季節、時刻および植生が大阪のニホンジカ (*Cervus nippon*) の行動圏に及ぼす影響. 哺乳類科学 47:1-9
- (7) 環境省自然環境局生物多様性センター 自然環境情報 GIS 提供システム 植生調査(1/50,000 縮尺) <http://www.biodic.go.jp/trialSystem/shpddl.html> (2014/4/1 アクセス)
- (8) 国土交通省 国土数値情報 標高・傾斜度細分メッシュデータ <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-G04-b.html> (2014/4/1 アクセス)
- (9) 久保拓哉 (2012) データ解析のための統計モデリング入門. 岩波書店
- (10) Plummer M (2013) <http://www.mcmc-jags.sourceforge.net> (2014/4/1 アクセス)
- (11) QGIS Development Team (2013) <http://www.qgis.org/ja/site/> (2013/12/1 アクセス)
- (12) R Development Core Team (2014) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing
- (13) Tomkiewicz SM, Fuller MR, Kie JG, Bates KK (2010) Global positioning system and associated technologies in animal behavior and ecological research. Phil. Trans. Roy. Soc. B 365: 2163-2176
- (14) van Doormaal N, Ohashi H, Koike S, Kaji K (2015) Influence of human activities on the activity patterns of Japanese sika deer (*Cervus nippon*) and wild boar (*Sus scrofa*) in Central Japan. Eur. J. Wildlife Res. 61: 517-527
- (15) Yamamura K, Matsuda H, Yokomizo H, Kaji K, Uno H, Tamada K, Hirakawa H (2008) Harvest-based Bayesian estimation of sika deer populations using state-space models. Pop Ecol 50: 131-144
- (16) 弥富秀文 (2013) シリーズ アルゴスとデータ伝送: 第1回 アルゴスとは. 日本バイオロギング研究会会報 90:2-3
- (17) 八代田千鶴 (2011) シカの個体数管理体制の現状と今後の展望. 九州の森と林業 98: 1-4