

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12425

研究課題名（和文）移流拡散方程式によるホームレンジ形成プロセスの理解と野生動物管理への応用

研究課題名（英文）Modelling animal home range using advection-diffusion equations and its application to wildlife management

研究代表者

深澤 圭太（Fukasawa, Keita）

国立研究開発法人国立環境研究所・生物多様性領域・主任研究員

研究者番号：90617101

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：野生動物のホームレンジの形状やサイズに影響を与える要因を明らかにすることは、動物の行動の理解のみならず、景観スケールの個体密度分布を知る上でとても重要である。本研究では、野生動物の行動プロセスとの関係が明確なホームレンジ形成のプロセスモデルを実装し、空間標識再捕獲モデルと組み合わせることで、不均一な景観において個体密度、景観の連結性、ホームレンジ中心への回帰の強さとそれに影響を与える要因を同時推定する統計モデルを開発し、知床半島におけるヒグマ標識再捕獲データに適用した。その結果、それぞれの要因に対して地形や土地利用、資源分布の異なる効果が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、野生動物の個体密度と個体レベルでの空間利用を統合的に分析する新たな空間標識再捕獲モデルのアプローチを提案したものであり、これまで世界各地で実施されてきた個体密度推定を目的とした野生動物の標識再捕獲調査データから移流拡散方程式ベースの景観抵抗を推定した初の試みである。本研究で開発した手法により、ゾーニング等の空間構造を明示した野生動物管理のモニタリングにおいて、個体密度だけでなく個体の移動範囲や死亡リスクの空間分布を考慮した分析・評価が可能となる。これまで評価が困難だった空間的な野生動物管理の成否を評価するための方法論として、幅広い活用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Identifying the factors that influence the shape and size of wildlife home ranges is very important not only for understanding animal behavior, but also for understanding landscape-scale population density distributions. In this study, we implemented a process model of home range formation that has a clear relationship with wildlife behavioral processes, and combined it with a spatial mark-recapture model that simultaneously estimates population density, landscape connectivity, the strength of regression to the home range center. We applied the model to brown bear mark-recapture data in the Shiretoko Peninsula. The results revealed different effects of topography, land use, and resource distribution on each factor.

研究分野：生態学

キーワード：野生動物 個体密度推定 標識再捕獲法 ホームレンジ 移流拡散方程式 知床半島 ヒグマ

1. 研究開始当初の背景

一般に、動物個体は定常的な活動範囲であるホームレンジを持つ。ホームレンジの形成、維持には動物が当初利用していた場所に戻ってきやすい性質(Site fidelity)が重要な役割を果たす。そして、地理的な障壁や資源変動など、時空間的な環境の不均一性の影響を受けてホームレンジの形状やサイズは変化する。野生動物管理においては、例えばクマの大量出没は資源状態に伴う Site fidelity の低下とみなすことができ、草刈りなどの生息環境管理や柵の設置は人為的な移動障壁によりホームレンジの形状を変えようとする営みであると言える。このように、ホームレンジの形成要因の理解、そしてモデリングと予測は野生動物管理においても重要な意味を持つ。

しかしながら、これまでホームレンジの解析手法は記述的な方法に偏っており、それが形成プロセスの理解の障壁となっていた。従来、個体の検出地点の凸包をとる Minimum convex polygon 法や二次元カーネル関数をあてはめるカーネル法が一般的に使われてきた²が、動物の行動プロセスや観測プロセスが明示的に扱われておらず、サンプルのばらつきに対して頑強ではないといった推定量の望ましくない性質に加え、資源変化への反応など多くの個体に共通する一般的なルールの推測につなげるのが困難という欠点があった。

2. 研究の目的

本研究課題では、動物行動プロセスに基づく自由度の高いホームレンジの表現手法を開発し、野生動物の標識再捕獲データにそれをあてはめて動物種の移動障壁となる環境要因を明らかにする。具体的には、個体の存在位置の確率分布の時間発展を移流拡散方程式として記述し、平衡状態における数値解を算出することで任意の移動障壁に対して成立するホームレンジの形状を明らかにした。さらに、Site fidelity に相当する移流項とセル間のランダムな行き来に相当する拡散項それぞれに環境条件の関与を明示的に考慮し、空間標識再捕獲モデルに組み込むことで個体密度とホームレンジ形成に關与するパラメータの同時推定を可能とすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究ではまず、biased random walk に対応する Fokker-Planck 方程式により、個体の存在位置の時間発展に関する移流拡散方程式を下記のように導出した。

位置 (x,y) における個体の存在確率 p を記述する移流拡散方程式
 $(\mu_x, \mu_y$: 個体のホームレンジ中心)

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -c \left((\mu_x - x) \frac{\partial p}{\partial x} + (\mu_y - y) \frac{\partial p}{\partial y} \right) + D(x, y) \frac{\partial^2 p}{\partial x^2 \partial y^2}$$

移流項：ホームレンジ中心への引力

拡散項：グリッド間のランダムウォークに伴う拡散

そして、差分法により移流拡散方程式から各時点の個体の存在確率を算出するプログラムを C++ により構築した。プログラムの実行にあたっては、対象空間を任意のサイズのグリッドセルに分割し、以下の情報を入力すると指定した時点における各グリッドセルごとの個体の存在確率が出力される。

- ・時刻 $t=0$ における個体の位置
- ・経過時間
- ・個体の初期位置
- ・個体のホームレンジ中心の位置
- ・各グリッドセルの座標値
- ・各グリッドセルにおける拡散係数 (上記式の $D(x, y)$ の値)
- ・移流係数 (上記式の c の値)
- ・ x, y それぞれの近傍行列 (2つのグリッドセルが近傍であれば 1, それ以外は 0 とした各グリッドセル総当たりの疎行列)
- ・ x, y それぞれのセル解像度
- ・(その他、計算精度に関する設定パラメータ)

得られたセルごとの確率で多項分布に従う乱数を発生させることで、個体位置の実現値を得ることができる。

さらに、領域全体の積分が 1 となる制約条件付きで $p|_{t=0}$ の平衡解 \bar{p} を解くと、ホームレンジに相当する個体の存在確率分布を得ることができる。その際、 c と $D(x, y)$ がキャンセルされるため、時系列のシミュレーションとは異なりそれらの相対値のみが意味を持つことになる。時系列の個体の存在確率の算出と同様に、C++ で平衡解における個体の存在確率プログラムも作成した。

標識再捕獲調査データから c や D の環境依存性を推定するため、空間標識再捕獲モデル (Borchers & Efford 2008) に上記の個体の存在確率分布の平衡解を組み込んだ新たな統計モデルを開発した。移流拡散方程式で計算された場所 s における個体の存在確率は、個体のホームレンジ中心 $\mathbf{m} = (\mu_x, \mu_y)$ の条件付確率 $p(s | \mathbf{m})$ とすれば個体が努力量 $E(s)$ で検出される回数の期待値 $= g_0 E(s) p(s | \mathbf{m})$ と表すことができる。ヘアトラップのように、ある期間に何度個体が訪問しても 1 回のオケージョンでは在不在データが得られる場合、検出率は $1 - \exp(-)$ となる。空間標識再捕獲モデルの尤度は、調査全体での検出個体数が n である確率と各検出個体の検出履歴が得られる多項確率の積で表される。検出個体数の期待値は個体の行動圏中心が (不均一) ポアソン過程に従うことを前提に、下記のようにあらわされる

$$\int_{\Omega} d(\mathbf{m}) p_*(\mathbf{m}) d\mathbf{m}$$

ここで、 $d(\mathbf{m})$ は \mathbf{m} をホームレンジ中心とする個体密度、 $p_*(\mathbf{m})$ は \mathbf{m} をホームレンジ中心とする 1 個体がすべての調査努力の下で少なくとも 1 回検出される確率である。また、個体の検出履歴の多項尤度は、ホームレンジ中心 \mathbf{m} が与えられた下での条件付尤度を「検出個体における \mathbf{m} の相対頻度」で混合した周辺確率として得られる。

$$\frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_c!} \prod_{i=1}^n \int_{\Omega} p(\omega_i | \mathbf{m}) \frac{d(\mathbf{m})}{\int_{\Omega} d(\mathbf{m}) p_*(\mathbf{m}) d\mathbf{m}} d\mathbf{m}$$

ただし、 $p(\omega_i | \mathbf{m})$ は \mathbf{m} に条件づけられた個体 i の検出履歴の尤度、 n_1, n_2, \dots, n_c は各検出履歴ごとの個体数である。

開発したモデルを知床半島のヒグマを対象とした DNA 標識再捕獲データ (2019 年、2020 年) に適用し、個体密度を推定するとともに、個体密度分布やホームレンジのサイズ・形状に影響を与える景観の連結性 (拡散項)・ホームレンジ中心への引力 (移流項) に対する環境要因の効果を明らかにした。推定には、補足情報として各個体の雌雄、ヒグマ出没対応時の糞サンプル回収記録や、有害駆除等による人為死亡個体の照合データも組み込んだ。個体密度分布に相当するホームレンジ中心の密度には $\ln(\text{森林} \cdot \text{草地面積})$ をオフセット項として標高・サケマス遡上河川からの距離・人為的土地被覆 (農地・市街地) からの距離、景観の連結性には傾斜角・人為的土地被覆面積、ホームレンジ中心への引力には個体密度と同じく標高・人為的土地被覆からの距離・サケマス遡上河川からの距離、をそれぞれ説明変数とした。パラメータの最尤推定には準ニュートン法の一つである BFGS 法を用いた。

4. 研究成果

推定の結果、知床半島 3 町 (斜里町・羅臼町・標津町) にホームレンジの中心を有する個体数は 2019 年で 472 個体 (95%CI: 393, 550)、2020 年で 399 個体 (95%CI: 342, 457) であった。2019 年と 2020 年で個体数推定値に大きな差があったが、2019 年に比較的多くの捕殺数 (47 頭) があったことや、資源状態の違いにより潜在的に観測可能な個体数に差があった可能性が考えられる。ホームレンジ中心の密度に対しては、河川からの距離の負の効果、人為的土地被覆からの距離の正の効果が検出された (図 1)。景観の連結性には傾斜角の負の効果が検出され、物理的障壁の重要性が示唆されたが、人為的土地被覆の効果は明瞭ではなかった (図 2)。ホームレンジ中心の引力には標高の負の効果、河川からの距離の正の効果と人為的土地被覆の正の効果が検出された。

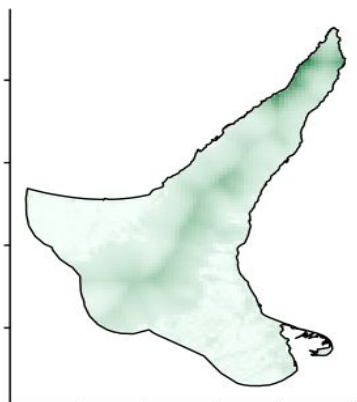


図 1 ホームレンジ中心の密度

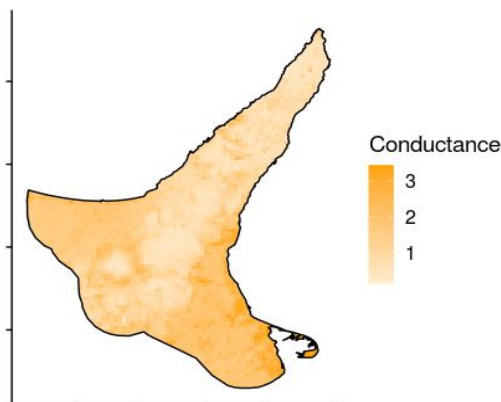


図 2 景観の連結性の分布

本研究は、ホームレンジを形成する動物の行動モデルに基づいて不均一な景観における個体密度・移動障壁・ホームレンジ中心への引力を同時に推定した初の試みであり、野生動物保護管理におけるゾーニング管理の評価等への応用が見込まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fukasawa Keita, Akasaka Takumi	4. 巻 9
2. 論文標題 Long-lasting effects of historical land use on the current distribution of mammals revealed by ecological and archaeological patterns	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10697
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-46809-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 深澤圭太
2. 発表標題 景観抵抗性を考慮した空間明示型標識回収法による個体密度と捕獲率の推定
3. 学会等名 日本生態学会第68回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川本朋慶, 諸澤崇裕, 橋本琢磨, 青木正成, 菅野貴久, 川口敏典, 荒谷友美, 須藤哲平, 田中英輝, 大久保慶信, 芳賀友洋, 深澤圭太
2. 発表標題 カメラトラップ調査と捕獲情報からイノシシの個体数を推定する 福島県での試行
3. 学会等名 日本哺乳類学会2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深澤圭太, 川本朋慶, 諸澤崇裕, 松田維, 橋本琢磨, 阿部慎太郎
2. 発表標題 階層モデルが駆動する研究と事業の相互作用系：奄美大島マングース防除事業を例に.
3. 学会等名 日本生態学会第67回全国大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------