

令和元年6月21日現在

機関番号：18001

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12641

研究課題名(和文) 個体ベースモデルと最適化モデルの結合によるコリドー空間配置の最適化

研究課題名(英文) Optimizing corridors by combining an individual based model and a spatially explicit optimization model

研究代表者

木島 真志 (KONOSHIMA, Masashi)

琉球大学・農学部・准教授

研究者番号：10466542

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：近年、分断された生息地を繋ぐコリドーの重要性が広く認識されつつあるが、生物の移動を促すコリドーが実施された例は少ない。このようなコリドーを実現するためには、生物の移動能力・利用環境を把握し、人間と生物の相互作用を考慮した上で、生態的な効果が十分に期待でき、経済的に実現可能なコリドー配置を探索する必要がある。すなわち、コリドー配置において、生物種の利用に適した環境(植生状態)と競合する可能性のある人間の生産・経済活動を考慮する必要がある。本研究では、上記の課題に対して、数理最適化のフレームワークを応用した最適化システムの構築を目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

都市化や道路建設等の土地利用の改変により、生息地の消失、分断、劣化が急速に進む中、分断された保護区や生息地を有機的に繋ぐコリドーの確保は、生物個体群の生息地間の移動を可能にし、遺伝的交流の維持にも繋がるため、生物多様性保全の観点から重要である。本研究では、生産活動と生息地の質の相互作用を捉えることのできる最適化モデル、生物の移動・分散の空間的シミュレーションモデル、そして、移動経路の空間配置最適化モデルの開発を試みた。ここで提案したモデルが適切に組み合わせられ、実際に応用されれば、経済活動と保全の効率的なバランスがとれた最適コリドー空間配置の探索について、有効な情報提供につながると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In recent years, construction of corridor network has gained significance as an important tool for maintaining biodiversity conservation. In the design of network corridors, several studies have explored ecological characteristics, such as "connectivity" and "habitat suitability" to preserve and restore biodiversity. The importance of strengthening ecological network corridors using connectivity and habitat suitability as necessary conditions for biodiversity conservation has been emphasized in several studies. Ecological networks can provide an operational model for conserving biological diversity while reconciling the conflicting demand of natural resource use. In this study we present an optimization system for corridor allocation problems considering economic activities such as timber harvesting and its impact on habitat quality of corridors. We also developed a GIS database and a spatially explicit corridor optimization model based on maximum flow problem.

研究分野：森林資源経済学

キーワード：コリドー配置 空間最適化モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

経済発展に伴う、都市化や道路建設等の土地利用の改変により、生息地の消失、分断、劣化が急速に進んでいる。都市化により引き起こされる生息地の分断は、生物種の生息適地への自由な移動を阻害し、「ストレス」を与え、生物種の絶滅を引き起こす。分断された保護区や生息地を有機的に繋ぐコリドールの確保は、生物個体群の生息地間の移動を可能にし、遺伝的交流の維持にも繋がるため、生物多様性保全の観点から重要である。しかし、分断された生息地を繋ぐコリドール(移動経路)の重要性が広く認識されつつあるものの、生物の移動を促すコリドールが実施された例は多くない。コリドールの整備配置を実現するためには、生物の移動能力・利用環境を把握し、人間と生物の相互作用を考慮した上で、生態的な効果が十分に期待でき、経済的に実現可能なコリドール配置を探索する必要がある。本研究では、効果・効率的なコリドール配置に向けた意思決定サポートを念頭に、生物種の利用に適した環境(植生状態)と競合する可能性のある人間の生産・経済活動を考慮することのできる、数理モデルを応用した最適化システムの構築を目指す。

2. 研究の目的

既往のコリドール配置モデリングに関する研究では、コリドールにおける生物種の利用に適した環境(植生状態)の必要性については様々な知見が蓄積されつつあるが、コリドール配置と競合する可能性のある人間の生産・経済活動が考慮されておらず、生物と人間の相互作用がモデルに反映されていない。このような相互作用をモデルに組み込むためには、自然資源環境とその利用・管理の相互作用を定量的に把握する必要がある。ここでは、まず、森林環境において、間伐や主伐などの管理が森林動態に及ぼす影響を捉えることのできる、森林成長モデルに動的計画法を適用し、間伐や主伐の最適化モデルを構築する。そして、生息地としての質を維持しながら、樹木を効率的に伐採できる間伐・主伐計画の最適化を試みる。また、生物の移動能力・利用環境を把握するために、野生動物の観測データに基づき、相関ランダムウォークモデルなどの様々な行動シミュレーションモデルを構築し、それらのシミュレーション結果と実際の移動軌跡の観測データを比較し、これらモデルの精度を評価し、移動経路を的確に再現できる数値シミュレーションモデルを検討する。さらに、地理情報システム(GIS)を整備し、森林の利用状況の空間配置パターンを把握し、保護地域を明らかにする。そして、これら保護地域を最も効率的に繋ぐことのできるコリドール配置を探索できる離散型最適化モデルを構築する。

3. 研究の方法

(1) 生息地の質を考慮に入れた、木材生産と利用の最適化

ここでは、図1に示されるような立木密度、樹高、胸高直径(DBH)の相関がある林分に対して、a)Chapman-Richard成長モデルによる樹高(Ht)成長予測と、b)下記のような樹木の本数密度(Nt)と樹高(Ht)の関数による胸高直径(DBH)成長予測、そして、c)胸高直径(DBH)と樹齢の関数による枯死曲線を組み合わせ、森林成長モデルを構築した。

胸高直径(DBH)成長予測モデル: $DBH(Ht, Nt) = \alpha \times (Ht - 1.3) / \ln(Nt)$

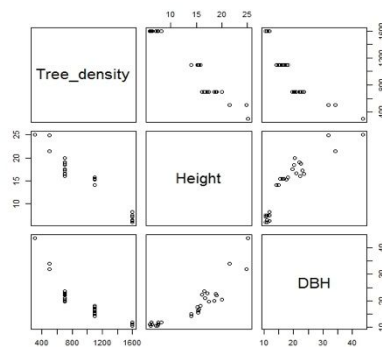


図1. 立木密度、樹高、胸高直径 のペアワイズ散布図

さらに、間伐・主伐等の管理が森林成長に及ぼす影響を定量的に把握し、管理の最適化を可能にする動的計画法を前述の成長モデルに組み合わせた。動的計画法のアルゴリズムは間伐などの管理の影響を長期に捉えることのできる MSPATH アルゴリズム (Yoshimoto et al., 1988) を適用した。そして、木材生産を目的とした管理が生息地の質に及ぼす影響を定量的に把握するため、目的関数を木材生産による経済収益最大化とし、生息地としての質を維持する制約条件を設定した。アルゴリズムの構築には、Cプログラミング言語を用いた。

(2) 野生動物種の移動経路のシミュレーション

ここでは、観測データに基づき野生動物種の行動シミュレーションモデルを構築し、実際のランドスケープにおいて構築したモデルの性能を評価するとともに、高解像度の野生動物種の行動モデル構築に対する課題を明らかにした。具体的には、下記4つの行動シミュレーションモデ

ル(1: ランダムウォークモデル (RWM)、2: 相関ランダムウォークモデル(CRWM)、3: スイッチングモデル、4: コアエリア間移動モデル)を構築した。動物の移動モデルとして、広く用いられているのはシンプルなランダムウォークモデル(RWM)を拡張したものである。しかし、RWMは、移動方向に関して、優先的な方向がないモデルであり、動物の移動軌跡を表現するには単純すぎ、動物が同じ方向に動く傾向があるときの方向性を考慮できない点が課題である。RWMの問題点を補うものとして、近年、研究が進んでいるのが相関ランダムウォークモデル (CRWM)であり、動物の動きに対して、方向性を持たせることができる。しかし、動物は、「餌を探す」、「移動する」などで動きのパターンが変わる場合が多い。たとえば、餌を探す場合、動物の移動距離は短く、角度を頻繁に変えるように動くが、移動する場合、移動距離は長く、角度を比較的一定に保ち移動する(Zollner and Lima, 1999) (図2、3)。単純なCRWMでは、このような動きのパターンの違いを表現することはできない。そこで、この課題を克服するスイッチングモデルが考案された(Grünbaum, 2000, Skalski and Gilliam, 2003)。スイッチングモデルはCRWMをベースにしており、事前に設定された2つ以上の動きのパターンの中から、各タイムステップ t における動きのパターンが、 $t-1$ のパターンにより、確率的に決まるモデルである。よって、採餌行動と移動の繰り返しを表現できる。これら既存のモデルに加えて、ここでは、季節に応じて長距離の移動(越冬地への移動など)を繰り返す動きを考慮した。具体的には、コアエリア間の往復行動を再現するために、コアエリアの地点を記憶し、コアエリア間を移動するときは記憶した地点の一定範囲内に戻る動きを実装した。

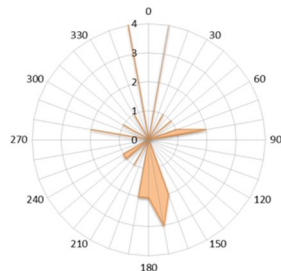


図2. 採餌行動時における各個体の平均角度

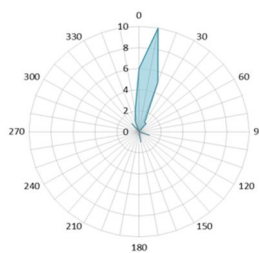


図3. 移動時における各個体の平均角度

さらに、これらのモデルにおいて、生息地の選好性を考慮できるように、地形や植生状態を把握し、モデルを実装した。具体的には、GISを用いて対象地の傾斜角と植生状態の情報を格納したグリッドベースのデータに動物の移動軌跡のポイントデータを重ね合わせ、重なった部分の傾斜角及び植生状態を抽出した。そして、移動軌跡上にはない傾斜角や植生状態を明らかにした。なお、これら4つの行動シミュレーションモデルはCプログラミング言語により構築した。

(3) コリドー配置最適化モデル

コリドー空間配置の最適化については、連続性など複雑な空間構造を扱えるように、ネットワーク最適化における最大流量問題の定式化を実装した (Yoshimoto and Asante, 2018)。この方法では、森林管理ユニットをノード、管理ユニット(ノード)間の連結をアークとして扱った上で、スーパーノードというものを導入する。アークは、境界線を共有する2つの森林管理ユニットを連結するものであり、森林管理ユニットの面積を各ノードに入ってスーパーノードから出てくる「流量(flow)」と考える。すなわち、コリドー空間配置の最適化を、スーパーノードにまで繋がるノードを連結した最適流量チャンネルを探索する、最大流量の問題と解釈した。

4. 研究成果

(1) 生息地の質を考慮に入れた、木材生産と利用の最適化

ここでは、ベトナム北部の *Pinus kesiya* 林分データに対して、森林成長モデルを構築し、MSPATH アルゴリズムによる動的計画法を組み合わせた最適化モデルを構築した。モデル構築については、5林分のデータを用いた。使用したデータの樹齢は6~31、平均胸高直径は11.1~43.6cm、平均樹高は6.9~25.1m、立木密度は300~1600/haであった。研究対象とした森林は、Vietnamese Greenfinch といった鳥類の生息地としても重要な役割を果たしているため (Davidson, 2016)、Vu (2006)がベトナム北部の鳥類の多様性を評価した際に用いた指標を応用し、最適化モデルの制約式に組み込んだ。目的関数の評価については、木材伐採からの収益による土地期望価(Soil Expectation Value: SEV)を用いた。尚、最適化モデルでは、1期5年として最大計画期間は10期(50年)とした。

まず、生息地の質に対して制約がない場合の間伐・主伐の最適化を行った。SEVを最大にする伐期は樹齢30であることがわかった(図4)。また、その際の最適間伐時期・頻度・程度の組み合わせは、樹齢10で450本/ha、樹齢15で600本/ha、樹齢20で350本/ha、樹齢25で1000本/haとなることがわかった。

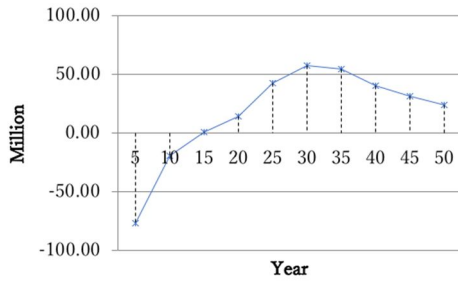


図 4. 木材生産のみの SEV

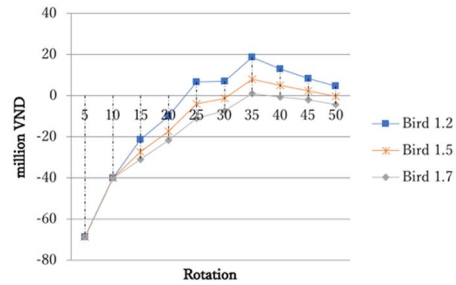


図 5. 鳥類の多様性を考慮した場合の SEV

これに対して、鳥類の多様性指標の値が計画期間を通して、ある一定値を下回らないといった制約を加えた場合、制約のない場合と比較して、土地期望価が 56%から 87%減少することが示された(図 5)。また、制約のない場合と比較して、間伐の頻度・程度ともに低下することが示された。このように、ここで示したケーススタディでは、木材伐採と鳥類の多様性の間には、トレードオフが存在し、その定量評価を行うことができた。

(2) 野生動物種の移動経路のシミュレーション

ここでは、栃木県日光市西部の一部を対象とし、GIS(地理情報システム)を用いて対象地の地形と植生情報を属性として持つデータベースを作成した(図 6、7)。そして、環境省の H25 年度ニホンジカ移動状況把握調査業務により収集された移動軌跡データをもとにシカの行動を分析し、4つの行動シミュレーションモデル(1: ランダムウォークモデル(RWM)、2: 相関ランダムウォークモデル(CRWM)、3: スイッチングモデル、4: コアエリア間移動モデル)を構築した。

移動軌跡のシミュレーション結果をそれぞれ図 8~11 に示す。対象地域における可視化されたシカの行動パターン(観測データ)は、コアエリア間移動モデルによる移動軌跡に近いことが分かった(図 12)。表 1 に移動軌跡の類似度比較の結果を示す(この指標は値が小さいほど観測データに類似していることを示す)。これらの結果から、コアエリア間移動モデルが最も観測データに類似することが分かった。そして、コアエリア間移動モデルをシカの生息地選好性を考慮したモデルに拡張した結果、より現実に近いシカの行動を再現することができた。



図 6. 対象地の平均傾斜データ

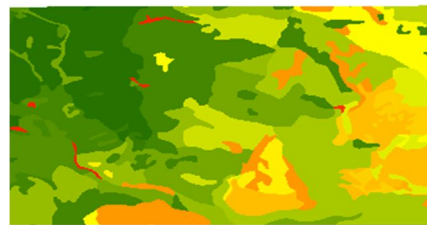


図 7. 対象地の植生調査 3 次メッシュデータ

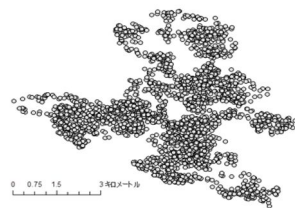


図 8. RWM のシミュレーション

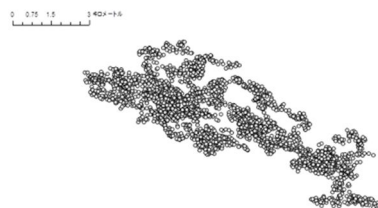


図 9. CRWM のシミュレーション

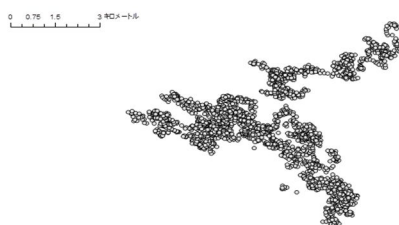


図 10. スイッチングモデルのシミュレーション

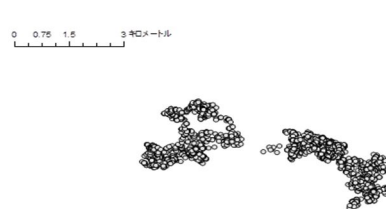


図 11. コアエリア間モデルのシミュレーション

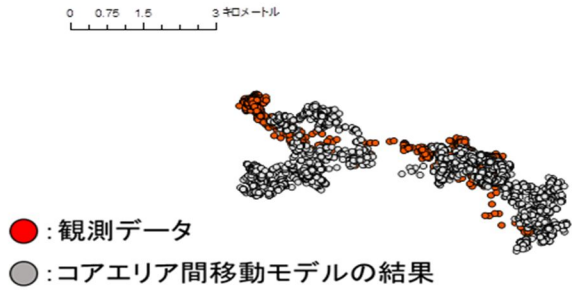


図 12. 観測データとコアエリア間移動モデルのシミュレーション結果の比較

表 1. 個体 No.1、6、8 の移動軌跡に対する類似度指標の比較結果

No.1	50回試行の平均	No.6	10回試行の平均	No.8	10回試行の平均
RWM	0.1078	RWM	0.0345	RWM	0.0948
CRWM	0.0846	CRWM	0.0185	CRWM	0.0533
スイッチングモデル	0.0926	スイッチングモデル	0.0192	スイッチングモデル	0.0560
コアエリア間移動モデル	0.0588	コアエリア間移動モデル	0.0152	コアエリア間移動モデル	0.0361

(3) コリドー配置最適化モデル

ここでは、ベトナム北西部の Mường Lát District の森林地帯のコリドー形成を試みた。まず、対象地の地理情報システム(GIS)を用いて(図 14、図 15) 最適化モデルに必要な隣接情報を整備した。対象地は、道路などにより、物理的に3つに分けることができる。そこで、ここでは、南の地域(図 16)について、分断されている保護区をコリドーで連結する。図 16 に示されるように、この地域の保護区は、それぞれ灰色、赤、青、ピンク、茶色、黄色、紫で示されるポリゴン群である。ピンク、青、茶色、灰色は繋がっているように見えるが実際は道路などで分断されている。そこで、接続箇所の和が最小になるように、それぞれの保護区であるポリゴン群がコリドーで連結されるように目的関数を設定し、最適コリドー配置を探索した。その結果を図 17 に示す。水色で示されたポリゴンが最適コリドーである。このように、隣接情報を基に最大流量問題の定式化を実装することで、目的関数の設定に応じた最適コリドー配置が探索できた。

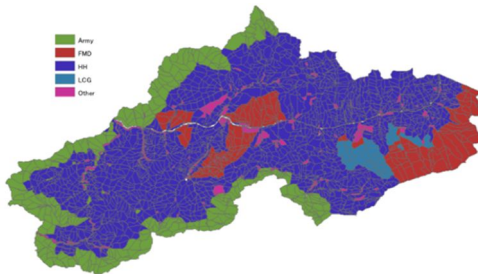


図 14. Mường Lát District における所有者

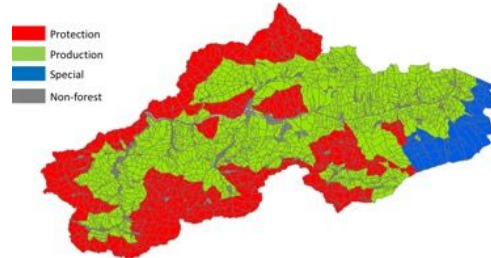


図 15. Mường Lát District に森林利用形態



図 16. 最適化シミュレーション対象地



図 17. コリドー最適配置

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Tamaki, Y., Konoshima, M. (2019) Application of Terrestrial Close-Range Photogrammetry for Estimating Stem Volume of Tree Species in Subtropical Forest in

Okinawa, Japan, FORMATH,18, <https://doi.org/10.15684/formath.004>

Yoshimoto,A., Surový,P., Konoshima,M., Surová, D. (2018)Optimal Trail Routing for Recreational Management Through Visual Quality Values, FORMATH 17, <https://doi.org/10.15684/formath.17.005>

〔学会発表〕(計4件)

Konoshima,M. Commitment from Okinawa, International Seminar on Research Consortium for Asian Agri-Forest Resource Management -A2gFReM Research Consortium-, 2019, 3月6日, Tokyo, Japan.

T. Ha Le, Konoshima, M., Yoshimoto, A., Optimizing the management of pinus kesiya forest stands in Vietnam, FORMATH FUKUOKA 2018, 2018 March 17. 九州大学 IMI Conference room

Nishimori, Y., T. Ha Le, Konoshima, M., Modeling movement behaviors of deer based on telemetry data, FORMATH HIROSHIMA 2017, 2017年3月16日、県立広島大学サテライトキャンパス

Nishimori, Y., T. Ha Le, Konoshima, M., Modeling Deer Movement for Projecting and Controlling Deer Browse Damage, IUFRO International Symposium FORCOM/SFEM/2016 三重大学, 2016年8月30日(火)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：吉本 敦

ローマ字氏名：(YOSHIMOTO, atsushi)

所属研究機関名：統計数理研究所

部局名：数理・推論研究系

職名：教授

研究者番号(8桁)：10264350

(2)研究分担者

研究分担者氏名：加茂 憲一

ローマ字氏名：(KAMO, ken-ichi)

所属研究機関名：札幌医科大学

部局名：医療人育成センター

職名：准教授

研究者番号(8桁)：10404740

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。