

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K14493

研究課題名（和文）病虫害拡散予測および制御に関わる順応的最適化システムの構築と社会実装

研究課題名（英文）Construction and social implementation of an adaptive optimization system for pest spread prediction and control

研究代表者

伊高 静 (Itaka, Shizu)

東京理科大学・創域理工学部経営システム工学科・助教

研究者番号：80776336

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：森林資源管理現場で必要とされているのは、被害予測のみならず、拡散制御プランの提案である。本研究は、病虫害拡散予測と、拡散制御に関わるシステムを構築し、現場に制御プランを提案することを目的とした。本研究では、ナラ・コナラが枯死するナラ枯れを対象とした。まずは、無人小型航空機（ドローン）より得られた空撮画像より、深層学習の画像分類の手法を用いて、枯れ樹木を分類する手法を提案した。そして、被害拡散モデル構築のため、気象・地形などを説明変数とし、拡散する要因を機械学習を用いて明らかにし、シミュレーションした。さらに、ナラ枯れ防除手法の一つであるおとり丸太について、その最適な配置を求める解析を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

森林現場では、林業従事者の減少や高齢化により、経験に基づく現場感覚の継承は難しくなっている。現場感覚を科学的方法論に落とし込み、現場で使えるシステムを構築することは、意思決定の支援になると同時に知識の継承にもなる。本研究では、拡散モデルを構築するのみならず、意思決定者にその制御プランを提示できるようなシステムを構築することを目指した。森林現場におけるドローンの導入は進んでいるものの、得られた空撮画像の利用は限定的であるため、シンプルな手法による被害樹木を抽出する手法の提案は現場に寄与できる。ナラ枯れ防除手法の一つであるおとり丸太の最適配置を求めるモデルの提案に関して、このような研究は他に無い。

研究成果の概要（英文）：What is needed in forest resource management is a versatile resource management system that not only predicts damage but also proposes a plan to control the spread of damage. The objective of this study was to construct an adaptive and versatile optimization system for pest spread forecasting and spread control and to propose a control plan for the field. This study focused on oak wilt disease. First, a method for classifying dead trees using a deep learning image classification technique based on aerial images obtained from unmanned aerial vehicle (drone) was proposed. Then, to construct a spread model, a machine learning technique was used to identify the factors that cause the spread, using meteorology and topography as explanatory variables, and conducted simulations. Furthermore, the optimal placement of log pile traps was analyzed, which is one of the methods to control oak wilt disease.

研究分野：森林計画学、社会システム工学

キーワード：被害木抽出 被害予測 拡散モデル 拡散制御 ナラ枯れ 森林病虫害

## 1. 研究開始当初の背景

持続可能な森林資源の利活用において、様々な被害リスクを軽減するための資源利用のあり方を探求することが求められている。既存の研究においては、病害虫や害獣の拡散・移動といった動態メカニズムに関する理論的なモデルに関する研究はあるものの、実データを使った数値実験は展開され始めたばかりであり、時間とともに変化する実被害状況に順応しきれていない。また、実際の森林資源管理現場で必要とされているのは、汎用的な資源管理システムであり、被害予測のみならず、拡散制御プランの提案である。つまり、資源管理の中で対応できる形で、被害の事前・事後制御を提案するシステムの構築が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、病害虫拡散予測と、拡散制御に関わる順応的かつ汎用的な最適化システムを構築し、現場に制御プランを提案することである。時間とともに変化する実際の被害状況に順応できるよう、実データより明らかになった拡散パターンをもとに既存のモデルを拡張する。そして汎用性のあるシステム構築のため、誰もが入手可能なソースデータを使い、柔軟性の高いモデル構築を目指し、さらには誰もが見てわかるレベルの情報として出力・可視化する。具体的には、ナラ・コナラが枯死するナラ枯れを対象に、機械学習手法により(1)被害木抽出モデルを構築し、セルオートマトン法を用いた拡散予測モデルより(2)被害拡散を予測する。さらに、危険にさらされている林地を最小の費用で防除するために、防除法の一つである大量集積型おとり丸太(おとり丸太)について、被害費用および制御コストを最小とする(3)事前・事後制御を考慮した最適な制御プランを探求し、さらに、GIS(地理情報システム)を用いて可視化する。最終的には、事前・事後制御を考慮した管理計画を提案することを目指す。

## 3. 研究の方法

### (1)被害木抽出

無人小型航空機 UAV(ドローン)より得られた空撮画像より、植生らしさの指標となる VARI(Visible Atmospherically Resistant Index)と、深層学習の画像判別の手法を用いて枯れを抽出した。山形県庁が所有する試験林のミズナラ・コナラを主要樹種とし、ナラ枯れの罹患が見られる林地を試験林とし、2018-2019年の8-9月に空撮した画像を用いた。VARIの出力値は、クラスタリングの手法を用いて分類し、枯れた樹木を抽出できるようにした。深層学習については、物体そのものを抽出する物体検出技術の開発・応用が進む一方で、アノテーションや分類などのデータ準備にかかる労力や時間は膨大であり、管理現場での深層学習技術の導入を妨げる要因となっているため、本研究では、森林所有者や意思決定者が管理作業に容易に取り入れることができるように、グリッドカットされた RGB 画像を用いて分類するというシンプルな方法を用いた。分類は、枯れて葉が茶色くなった樹木、葉を落として枝のみになっている樹木、そして緑の葉をつけている樹木の3種類に分類した。

### (2)被害拡散の予測

新潟県・山形県のナラ枯れ被害データおよそ30年分を用いた。この被害データはいずれも、それぞれの県庁が、主要道路から把握できる被害を地図上に記録したものである。被害が初めて発生するときの要因を分析するために、ナラ枯れ被害有無を目的変数、対応する30年分の気象データ(気温・日照時間・降水量・積雪量)、地形データ(標高・傾斜角・方角)、樹種(ミズナラ・コナラ・その他)、送電線までの距離、前年被害メッシュまでの距離を説明変数として、機械学習の手法であるランダムフォレストを実施し、その特徴量の重要度を算出した。そして、実際に観察される要因を解釈しやすい様、その特徴量の重要度が高いものを利用して、機械学習の決定木を実施し、拡散シミュレーションのルールを決定した。拡散シミュレーションにはセルオートマトン法を用いた。さらに、ナラ枯れ防除手法の一つである大量集積型おとり丸太を設置した場合を想定してシミュレーションした。

### (3)制御プランの探求

おとり丸太法を事例に、その設置場所を決定するための最適化モデルを構築した。おとり丸太法とは、ナラ類等樹木の丸太を集積し、フェロモンを用いてナラ枯れをもたらすカシナガキクイムシ(カシナガ)を誘引する手法である。モデル化に際して、ある被害木群から距離500m以内の場所に少なくとも1つおとり丸太が設置されていれば、その被害木群から羽化したカシナガはそれらのおとり丸太のうちいずれかに誘引されて駆除できるものとみなした。このモデル化に基づき、効率よく防除を行なうためのおとり丸太の設置場所を決定する問題を、できるだけ多くの被害木を被覆するようなおとり丸太の配置を求める問題として定式化した。今回は3つのモデルを検討した。設置場所から半径500mはフェロモン効果が一定のモデル S、Gauss カーネルに従って外側へ行くほどその効果が減衰するモデル G、そして区分線形関数的に減衰するという経験則に基づくモデル PL である。これらのモデルのうちどれが妥当であるかについては、山形県の実データを用いた評価実験で判断した。

#### 4. 研究成果

##### (1)被害木抽出

VARI の出力値とクラスタリングにより分類した結果を図-1に示す。葉が黄色くなり枯れかかっている樹木、葉が茶色になり完全に枯れたもの、葉を落として幹と枝のみになっているもの、それら全てを画像上から抽出することができた。しかし、快晴での空撮による画像は、VARI 値が全て同一値になってしまうということがあった。今後は、元の画像になんらかの前処理を施すことにより、その影響を取り除けるかについて検討したい。

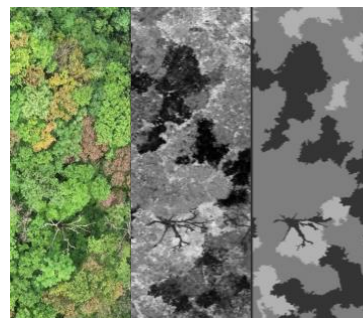


図-1 VARI による枯れ樹木抽出 (左図：元画像、中央図：VARI 出力値をグレースケールで表したもの、右図：クラスタリングにより分類した結果)

一方、深層学習による分類は天候に左右されず、0.96 という高い正解率で、枯れて葉が茶色くなった樹木、葉を落として枝のみになっている樹木、そして緑の葉をつけている樹木の3種類を分類することができた (図-2)。今後は、今回作成した枯れを判別する判別器を、他の林地や他の樹種に適用できるかについて検証したい。

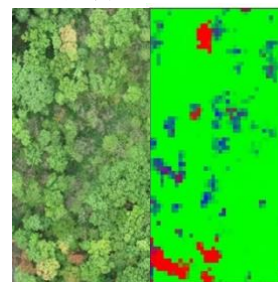


図-2 深層学習による分類結果 (左図：元画像、右図：赤色；茶色い葉を付けた枯れ樹木、青色；葉を落とした樹木、緑色；緑の葉をつけた樹木、赤と青は結果の確信度をヒートマップで表示)

##### (2)被害拡散の予測

今回の手法により解析をすると、結果に地域差が見られることがわかった。ここでは結果の一部を示す。限定したある地域においてランダムフォレストを実施し、算出した特徴量の重要度が高かったのは、前年度被害メッシュまでの距離、前年2月の日照時間、当年2月と6月の日照時間の順であった。これら4つを説明変数として決定木を実行し、その結果をもとにセルオートマトンのシミュレーションルールを決定した。2004年の実際の被害地を起点としてシミュレーションしたところ、2005-2006年は変化なし、2007年から被害の広がりを見せ、実際の被害地は2011年に全てのメッシュに被害が広がったが、シミュレーションでは2012年に全てのメッシュに被害が広がる、という結果となった (図-3)。次に、被害を抑えるための措置として、「おとり丸太」を、被害を囲む様に設置した場合を同様にシミュレーションした (図-3)。2004年の実際の被害地を起点としてシミュレーションしたところ、2005-2006年は変化なし、2007年から被害の広がりを見せ、図-2 とほぼ同じ様に被害が拡散するという結果となった。

解析結果より、ほぼ前年の被害メッシュまでの距離で説明できることがわかった。距離のみで説明できるわけではないが、その他の説明変数の影響は、地域ごとに少しずつ異なることがわかった。また、被害を広域に軽減させる方法であるおとり丸太を設置した場合のその被害の広がりをシミュレーションしたが (図-4)、おとり丸太の有効範囲は500mであるため、被害を隙間なく完全に囲まない限りおとり丸太で被害拡散を防ぐことはできないことがわかるが、それは現実的ではない。実際に現場では、被害を無くすためではなく、被害を軽減する措置としておとり丸太を設置している。さらに、今回の解析は、被害有無の2値を扱ったが、2値ではその広がりを捉えることができるのみであるため、今後は被害度でその広がりをシミュレーションすることで、現場でその被害度に応じた対応が可能になると考える。

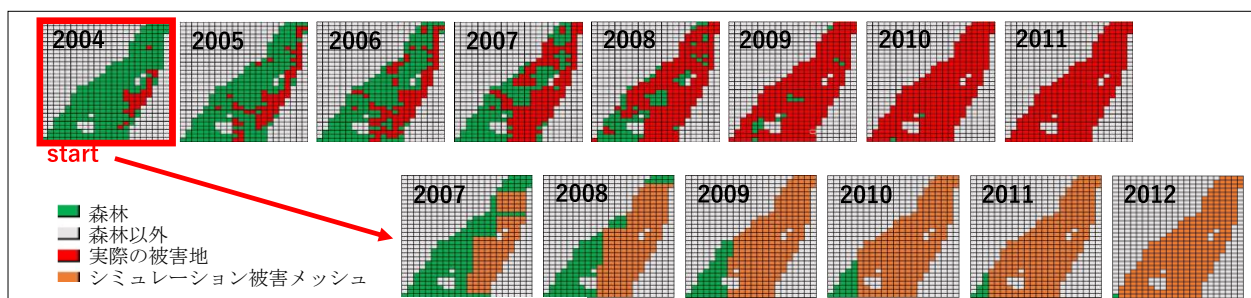


図-3 セルオートマトンシミュレーション結果

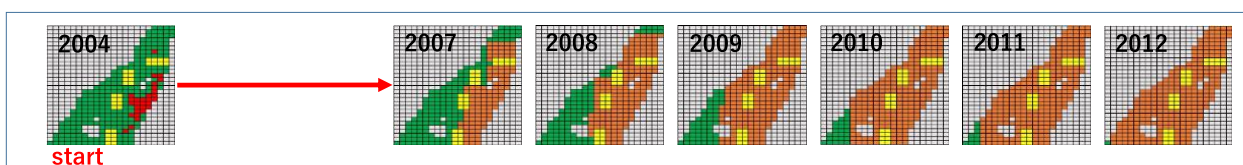


図-4 おとり丸太 (黄色箇所) を置いた場合のセルオートマトンシミュレーション結果 (凡例は図-3 と同じ)

### (3)制御プランの探求

モデル S、G、PL ともなるべく規模の大きい被害群に近い設置場所候補を選ぶということは共通するが、モデル S からは有効範囲の重複を回避して多くの被害群を被覆する配置、モデル G からは重複を許容して規模の大きい被害群を複数で被覆する配置、モデル PL からはこれらの中間的な配置を得た (図-5)。そして、モデル PL の結果が最も現実的であると評価した。このモデルは試行レベルのものであり、今後は風・地形・人工構造物の影響などを考慮したモデルを検討する予定である。今回は主要道路からの観測に基づくデータを用いたが、より現場を捉えた衛星画像やドローン画像を用いて被害状況を定量化すれば、より良い配置が得られる可能性がある。さらにはこれまで取り組んできた拡散モデル、設置コストや被害コストを考慮した、一貫した病害虫制御システムの構築を目指したい。

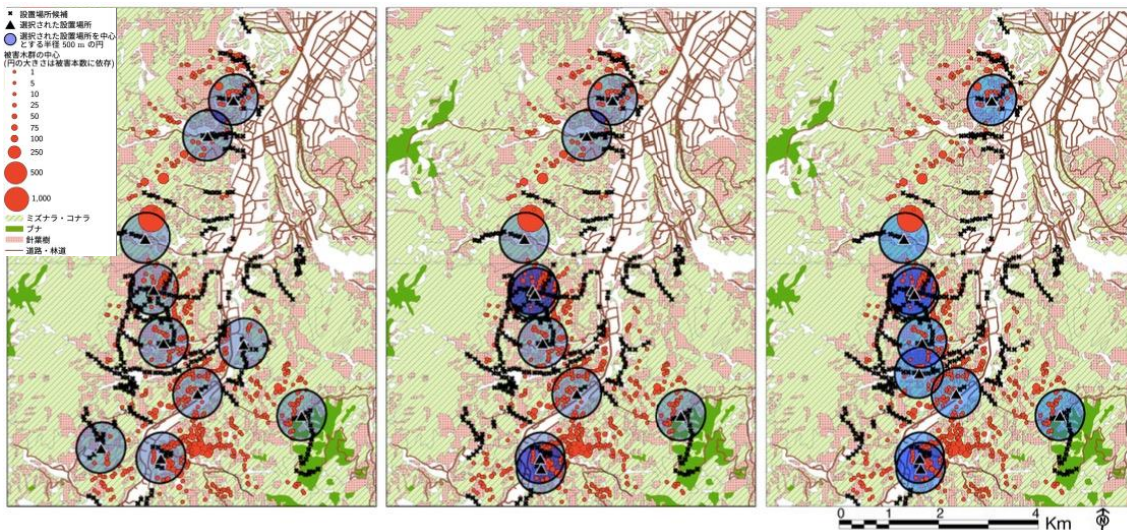


図-5 おとり丸太の最適配置と有効範囲 (左図: モデル S、中央図: モデル PL、右図: モデル G)

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 伊高静, 田中未来, 斉藤正一	4. 巻 67
2. 論文標題 森林病虫害防除のための OR 的アプローチ ナラ枯れ防除用大量集積型おとり丸太の最適配置	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 オペレーションズ・リサーチ	6. 最初と最後の頁 594, 600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊高 静
2. 発表標題 森林における病虫害の拡散制御
3. 学会等名 第133回日本林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊高 静
2. 発表標題 森林における病虫害の拡散とその制御
3. 学会等名 2021年度第2回統計数理研究所共同研究集会「世界メッシュコード研究会」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊高静
2. 発表標題 病虫害拡散モデルの構築
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 伊高静、上野満、斎藤正一
2. 発表標題 小型無人飛行機によるナラ枯れ被害抽出
3. 学会等名 第130回日本森林学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊高静, 田中未来, 斎藤正一
2. 発表標題 ナラ枯れ防除用大量集積型おとり丸太の最適配置
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊高静
2. 発表標題 ナラ枯れ拡散とその制御
3. 学会等名 2022年度統計数理研究所重点型研究テーマ3「地図・メッシュ・位置情報データのデータベース作成・統合と高度利用」公開研究集会
4. 発表年 2023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
---------	---------