

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—

伊高 静, 田中 未来, 斉藤 正一

森林病虫害の一種であるカシノナガキクイムシ（カシナガ）がナラ菌を樹木内に運び込むことによってナラ類等樹木が枯死する現象をナラ枯れという。近年、ナラ枯れによる被害が拡大しており、効率のよい防除法が必要とされている。カシナガの防除法の一つに大量集積型おとり丸太法と呼ばれるものがある。この防除法は、ナラ類等樹木の丸太を積み上げ、フェロモンを用いてカシナガを誘き寄せせるものである。本稿では、おとり丸太の設置場所を決定するための最適化モデルを複数提案する。これらはおとり丸太の有効範囲やおとり丸太設置に伴う副次的な被害のモデル化において差異がある。これらのモデルのうち、現実の感覚に合うモデルを実データを用いた計算機実験による評価を通して選択する。

キーワード：ナラ類集団枯損、森林資源管理、地理情報システム (GIS)、施設配置問題

1. はじめに

われわれが森林から受ける恩恵とは、たとえば、近年注目されている二酸化炭素吸収機能に加え、水源涵養・土砂災害防止・気候緩和・生物多様性保全・景観・レクリエーションの場などさまざまであり、これらは森林生態系サービスとよばれる。近年、このようなサービスを持続的に享受するために、森林におけるさまざまな被害リスクを回避、もしくは軽減するような資源利用のあり方を探求することが求められている。森林被害とは、たとえば、病害や虫害により樹木が枯死に至るもの、そして獣害など動物によって樹木が傷つけられたり、それが元で枯死したりするものなどがある。病虫害の中には、マツ類枯損（マツ枯れ）やナラ類集団枯損（ナラ枯れ）のように、昆虫が病原を樹木内に運び込むことで樹木が枯死に至るものもある。中でもナラ枯れ（図 1）は、被害が広範囲にわたる集団枯損に発展し、景観の損失や倒木による危険性が增大する [1]。

このような病虫害拡散に対して、実用的な防除²法が開発され、成果をあげている。しかしその防除法は、現場の勘に頼った部分が少なからずあり、防除作業未



図 1 ナラ枯れの空撮画像
葉が茶色に変色している樹木がナラ枯れに罹患した樹木で、地域差はあるものの、通常 7 月下旬から 10 月上旬にかけてこのように枯れ始める¹。葉が落ちて枝が白く見えている樹木は、撮影年よりも前に枯死したものである。

経験者への技術継承は困難だと考えられる。そこでわれわれは、広範囲にわたり森林の集団枯損を引き起こすナラ枯れに着目し、拡散を制御するための指針を示す一助となるような手法を模索している。中でも、その被害の面的な防除法である大量集積型おとり丸太法に焦点を当て、その配置を最適化する方法の開発に取り組んでいる。本稿ではその取り組みとこれまでの経過、これからの展望を紹介する。なお本稿は、例外や偶然の多い自然現象を単純化して扱っているため、実際とは異なる部分もある。

いたか しず

東京理科大学理工学部

〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641

shizu@rs.tus.ac.jp

たなか みらい

統計数理研究所数理・推論研究系

〒 190-8562 東京都立川市緑町 10-3

mirai@ism.ac.jp

さいとう しょういち

山形大学農学部

〒 997-8555 山形県鶴岡市若葉町 1-23

saitoshi@tds1.tr.yamagata-u.ac.jp

¹ 残念ながら、モノクロ印刷だと葉の変色がわかりにくい。フルカラー写真が入った電子版 (PDF ファイル) が学会ウェブサイトに掲載されている。

² 防除とは、被害を防ぐために害虫を取り除くなどの駆除や、被害を未然に防ぐための予防のことを指す。

2. ナラ枯れとは

ナラ枯れとは、正式にはブナ科樹木萎凋病といい、随伴菌 (*Raffaelea quercivora*, ナラ菌) をもつカシノナガキクイムシ (*Platypus quercivorus*, 以下カシナガ) がナラ・シイ・カシ類のブナ科樹木 (*Fagaceae*) の幹に入り、ナラ菌によって樹木が通水阻害を起こして枯死するものである [2-4]。地域差もあるが、東北地方では通常 6-8 月頃カシナガが前年の枯死木から羽化して樹木に穿孔し、7 月下旬から 10 月上旬にかけて被害が発生する。ナラ枯れは被害が広範囲に拡散していくため、カシナガを含む穿孔虫類は森林病害虫等防除法 (昭和二十五年法律第五十三号) において法定害虫に指定されている。特に、東北各地の落葉広葉樹林の主要種であるナラ類のミズナラ・コナラを主体とするナラ林における枯死被害は甚大である。

ナラ枯れによる継続的な集団枯損は、1980 年代以降日本各地で発生している [5]。その主な原因は、エネルギー革命によりナラ林のような落葉広葉樹林における薪炭材利用が減少したことであるといわれている [6]。薪炭材利用のあった時代は、切り株を残して上部のみを利用する萌芽更新を繰り返していたために、弱った樹木やカシナガが穿入した樹木が適度に取り除かれ、若くて健康な森が維持されていた。しかし薪炭材利用がほぼなくなったことにより樹木の直径が増大し、それに伴ってカシナガの住処も増大し、さらに罹患した樹木が放置されることにより被害が拡散していった。そしてここ数年は被害材積と被害地域がさらに拡大している。2021 年の被害材積は 2020 年のおよそ 3 倍であり、2020 年には北海道で初めて被害が確認された [7]。

ナラ枯れの防除法は多数開発されている。そのうち単木的な防除法は、カシナガの駆除法と健全木に対する予防法の二つに大別される。駆除法としては、殺虫剤の樹幹への注入によりカシナガを殺虫する方法や [8]、罹患した樹木を伐倒し処理する方法などがある。一方、予防法としては、幹をシートで被覆する方法 [9]、粘着剤などにより物理的にカシナガ穿入を妨害する方法 [10, 11]、ナラ枯れに罹患しないために殺菌剤を樹幹に注入してナラ菌を殺菌する方法などがある [12, 13]。いずれにせよ、ナラ枯れ被害の軽減のためには、病原菌であるナラ菌の殺菌、ナラ菌を運ぶカシナガの殺虫、寄主であるナラ類等樹木の伐採のうち少なくとも一つを実施する必要がある [14]。しかし、単木的な防除ではナラ枯れのような勢いで広がる枯死被害を食い止めることは難しい [15]。そのような面的に広がる被害に対応で

きる面的防除法としては、被害発生前に樹木をすべて伐倒撤去してしまう皆伐や、次節で詳述する大量集積型おとり丸太法が有効である。

3. 大量集積型おとり丸太法とは

大量集積型おとり丸太法とは、ナラ類等樹木の丸太を集積し、フェロモンを用いてカシナガを誘引する防除法である。この方法は比較的広範囲にカシナガを誘引できるため、枯死被害の拡散の防止と被害規模の縮小が期待できる。また、集積用の丸太を集めるために伐採を行うので、ナラ林の若返りを促し、森林の健全化にも寄与できる。フェロモンを使用してカシナガを誘引する手法は 20 年ほど前から試行が始まり、試行錯誤の末、現在の手法が確立した。通常、おとり丸太はカシナガが羽化する前の 5-6 月頃から設置し、おとり丸太 20 m³ あたりおよそ 30 万頭のカシナガを誘引する [16]。おとり丸太を同じ場所に 3 年間設置すると、地形などの条件によるものの、設置場所を中心におよそ 300-500 m 以内に枯死木が出現しないことが経験的にわかっている [6, 14]。また、被害の多い場所に設置するとより多くのカシナガを誘引できるため、拡散を広げないためには効率的である。おとり丸太 20 m³ あたりの設置費用は、チップなどの販売収入³を差し引くとおよそ 40 万円で、これは、枯死木の伐倒駆除と比較すると、およそ 90 % のコストダウンとなる [17]。

山形県では、ナラ類の枯死被害状況を把握するために、主要道路や公園などの見晴らしのよい場所でその枯死木の本数を 1991 年から毎年調査している。調査者は、目測で枯死木の樹冠を捉え、その本数を縮尺 5,000 分の 1 の森林基本図に書き込む。枯死被害状況が書き込まれた実際の森林基本図の一部を図 2 に示す。主要道路などから目視できない枯死被害を観測することはできないが、その年の被害状況を把握し、次年度以降の被害制御の対策をするためには有用な情報である。

おとり丸太用のナラ類の丸太は、通常長さ 2 m のものを使用し、約 20 m³ の丸太を、およそ高さ 1 m、幅 8 m、奥行き 2 m に積み上げる (図 3)。設置場所は、丸太を運搬するための 10 t トラックが進入可能な林道沿いである必要があり、丸太を積み上げるための広場や土場、車両の待避所が幅 10 m、奥行き 3 m 以上必要となる。設置場所として適切な立地条件については、齊藤ら [15] が統計的に解析しており、凹凸などの地形条件、適切な丸太の方位角、被害の度合いな

³ 誘引後の丸太はチップ化して燃料や製紙用に販売することで収入に換えることができる。

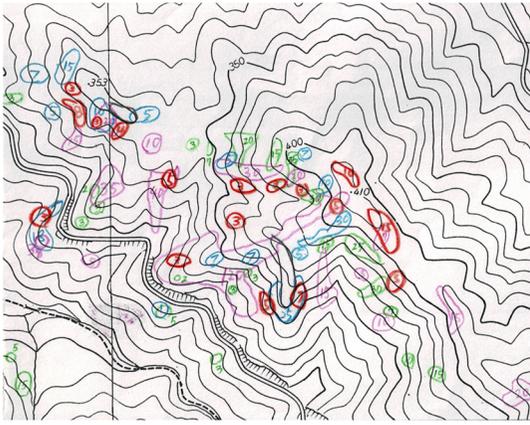


図2 枯死被害状況が書き込まれた森林基本図の一部
手描きの閉曲線で囲まれた領域が枯死被害のおよその位置と形状を表し、中に書かれている数字は枯死木の推定本数を表す。被害が観測された年度によって異なる色で記録されている。

どのいくつかの条件とカシナガ誘引数との関係が明らかになっている。さらに、送電線が設置されている場所など林内の開けた場所に近い樹木は罹患しやすいこともわかっている [18]。また、林地に隣接した半日陰が適していることや、逆に農地に挟まれた場所やコンクリートの上など乾燥する場所は適していないことなどが経験的にわかっている。しかしながら、これらの条件は、長年害虫駆除に従事してきたエキスパートの感覚によるところが大きい。たとえば、一言で凹地といってもその定義は簡単ではない⁴。

実際の現場でおとり丸太の設置場所を選定する際は、前述した枯死被害状況が書き込まれた森林基本図を参考に、被害が多い林分を視察しつつ決定する。その際、統計的に明らかになっている適切な立地条件に加え、経験的にわかっている事項や現場感覚を加味して、エキスパートが総合的に判断する。そしてそのエキスパートの関与が、カシナガ誘引数に大きく関わってくる。そこで、大量集積型おとり丸太法を簡便に導入できるようにするためには、現場の勘を定量化したうえで、どのようにおとり丸太を設置するかを決定する科学的な方法論が重要となる。本稿ではそのような方法論の一つとして、おとり丸太の設置場所を決定するための最適化モデルを提案する。

4. 大量集積型おとり丸太の最適配置モデル

本節ではおとり丸太の設置場所を決定する問題を最

⁴ 解析学的には凹性はヘッセ行列の半負定値性に対応するが、この文脈における凹性はそれとは異なる地形の雰囲気を表す。



図3 林道脇の待避所に設置してある大量集積型おとり丸太

適化問題としてモデル化する。目的は効率よくカシナガを誘引してナラ枯れを防除することである。もしおとり丸太を配置する時点におけるカシナガの空間分布が既知であれば、それをできるだけ被覆するようなおとり丸太の配置を求める問題を考えればよい。ところが、カシナガの行動は天候の不確実性の影響を受けるうえ、いまだに解明されていないところも多く、カシナガの空間分布の推定は容易ではない。一方、ナラ枯れを観測した時点におけるカシナガの空間分布は被害木の空間分布として近似的に観測できる。そこで以下では、ナラ枯れを観測してからおとり丸太を設置するまでの時間が十分短い、すなわち、カシナガの空間分布と枯死被害の空間分布が十分近いことを仮定する。実際、東北地方でカシナガが大量羽化するの6-8月でおとり丸太の設置はそれ以前に行うため、この仮定は現実に即したものとなっている。この仮定のもとでは、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を解けば目的は達成される。

最適化モデルに現れる集合と定数を記号で表す。まず、被害木を適当に集約して得られる被害木群の集合を I とし、各被害木群 $i \in I$ について、その代表点の座標を \mathbf{x}_i 、群内の被害木の本数を D_i で表す。また、適当に選定したおとり丸太の設置場所候補の集合を J とし、各設置場所候補 $j \in J$ について、その代表点の座標を \mathbf{y}_j で表す。さらに、2 地点 \mathbf{x} 、 \mathbf{y} の間の距離を $\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ で表す⁵。また、おとり丸太の最大設置個数を N で表す⁶。

おとり丸太のカシナガに対する誘引効果をモデル化

⁵ Euclid 空間上の問題であれば $\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2$ とすればよい。ここでは \mathbf{x} と \mathbf{y} がそれぞれ緯度と経度の組によって与えられており、それらの間の球面上の距離を用いることを想定している。

する方法はいくつか考えられる．ここではまず簡単のため，おとり丸太の設置場所を中心とする半径 R の円盤状の領域に含まれる枯死被害木群に対しておとり丸太が一律に有効であると仮定する．言いかえれば，ある被害木群から距離 R 以内の場所に少なくとも一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す．このモデル化の下，できるだけ多くの被害木をそれらの有効範囲で被覆するようなおとり丸太の配置を求める問題を考える．まず，おとり丸太を設置場所候補 $j \in J$ に設置するときに 1，設置しないときに 0 をとる 0-1 整数変数を z_j とする．さらに，枯死木群 $i \in I$ が少なくとも一つのおとり丸太の有効範囲内にあるときに 1，いずれのおとり丸太の有効範囲内にもないときに 0 をとる 0-1 整数変数を w_i とする．これらの決定変数を用いると，おとり丸太の有効範囲で被覆される被害木の本数を最大化する問題は次のような整数最適化問題として書ける：

$$\begin{aligned}
& \text{最大化} && \sum_{i \in I} D_i w_i \\
& \text{制約条件} && \sum_{j \in J} z_j \leq N, \\
& && w_i \leq \sum_{\substack{j \in J \\ \text{dist}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) \leq R}} z_j \quad (i \in I), \\
& && z_j \in \{0, 1\} \quad (j \in J), \\
& && w_i \in \{0, 1\} \quad (i \in I).
\end{aligned} \tag{1}$$

次に，カシナガの誘引による副次的な被害を考慮したモデルを考える．おとり丸太を設置するとその周辺にカシナガが誘引されるため，周辺にミズナラ・コナラが存在する場合，これらが誘引されたカシナガから副次的な被害を受ける [6]．このような副次的な被害をモデル化して罰則項として目的関数に組み込むことを考える．設置場所候補 $j \in J$ におとり丸太が設置されたとき，その周辺に発生する副次的な被害はおとり丸太の有効範囲内にある被害木の本数 $\sum_{i \in I: \text{dist}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) \leq R} D_i$ とおとり丸太周辺に存在する未被害のミズナラ・コナラの本数に比例すると考えられる．しかしながら，未被害木の本数は被害木の本数に比べて圧倒的に多く，計数が難しい．そこで，立木密度が一定であると仮定する．この仮定の下ではおとり丸太周辺に存在する未

被害のミズナラ・コナラの本数がおとり丸太周辺で植生区分がミズナラ・コナラであるような林地の面積に比例する．植生区分ごとの林地の面積は既存のデータから比較的容易に計算できる．いま，おとり丸太の設置場所を中心とする半径 r の円盤状の領域に含まれる未被害のミズナラ・コナラが副次的な被害を受けるものとする．設置場所候補 $j \in J$ から半径 r の円盤状領域に含まれる植生区分がミズナラ・コナラである林地の面積を S_j とし，比例定数を α とすると，副次的な被害を目的関数から差し引いたモデルは次のように書ける：

$$\begin{aligned}
& \text{最大化} && \sum_{i \in I} D_i w_i - \alpha \sum_{j \in J} S_j \left(\sum_{\substack{i \in I \\ \text{dist}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) \leq R}} D_i \right) z_j \\
& \text{制約条件} && \sum_{j \in J} z_j \leq N, \\
& && w_i \leq \sum_{\substack{j \in J \\ \text{dist}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) \leq R}} z_j \quad (i \in I), \\
& && z_j \in \{0, 1\} \quad (j \in J), \\
& && w_i \in \{0, 1\} \quad (i \in I).
\end{aligned} \tag{2}$$

これは依然として整数最適化問題である．

ここまでのモデル (1), (2) ではおとり丸太の設置場所からの距離が R を超えるとその効果が非連続的になくなるものとしている．これは現実的ではないかもしれない．そこで以下では問題 (2) を一般化することでおとり丸太の効果が設置場所からの距離に依存して連続的に減衰するモデルに変更する．いま，関数 κ_S を

$$\kappa_S(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & (\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq R), \\ 0 & (\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) > R) \end{cases}$$

と定める．このとき問題 (2) は次の最適化問題において $\kappa = \kappa_S$ としたものと等価である：

$$\begin{aligned}
& \text{最大化} && \sum_{i \in I} D_i w_i - \alpha \sum_{j \in J} S_j \left(\sum_{i \in I} D_i \kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) \right) z_j \\
& \text{制約条件} && \sum_{j \in J} z_j \leq N, \\
& && w_i \leq \sum_{j \in J} \kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) z_j \quad (i \in I), \\
& && z_j \in \{0, 1\} \quad (j \in J), \\
& && 0 \leq w_i \leq 1 \quad (i \in I).
\end{aligned} \tag{3}$$

ここでは一般化の都合上， w_i ($i \in I$) は連続変数とした（これは被害木群 i から羽化したカシナガのうちお

⁶ 本稿で検討するモデルでは N は定数とする．現実の意思決定では N の値をも決定したいということもありうる．その場合は複数の N の値についてそれぞれ最適化モデルを解き，最適値や最適解から設置効果を定量化し，設置費用とのトレードオフを評価すればよい．

とり丸太で誘引できるものの割合を表す変数と解釈できる). いま, 問題 (3) における関数 κ を適当な関数で置き換える (どのような置き換えをしても問題 (3) は混合整数最適化問題にすぎない). これによっておとり丸太の効果の減衰をモデルに組み込むことができる. たとえば, 設置場所から離れるにつれておとり丸太の効果が滑らかに減衰するモデルにしたければ, 適当なパラメータ σ を用いた Gauss カーネル関数

$$\kappa_G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \exp\left(-\frac{\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y})^2}{2\sigma^2}\right)$$

を κ として用いることが考えられる. あるいは, おとり丸太の効果は設置場所から距離 R_{in} までは効果が一定で, 距離 R_{in} から R_{out} までの間で効果が減衰し, それより離れると効果がみられなくなるという経験則に基づいて

$$\kappa_{\text{PL}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & (\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in [0, R_{\text{in}})), \\ \frac{R_{\text{out}} - \text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{R_{\text{out}} - R_{\text{in}}} & (\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in [R_{\text{in}}, R_{\text{out}})), \\ 0 & (\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in [R_{\text{out}}, \infty)) \end{cases}$$

を κ として用いることも考えられる. これらのモデルのうちどれが妥当であるかについては実データを用いた評価実験で判断する.

5. 実データを用いた評価実験

本研究では, 実データを用いた評価実験を行い, 得られた最適解を観察することで最適化モデルを評価した. ここではその結果の一部を示す.

5.1 データ設計

データ設計にあたり, 地理情報システム (GIS) を基盤にさまざまなデータを地図情報として関連付けた. その際, ソフトウェア ArcGIS pro (version 2.9, Esri 社) を用いた. まず, 山形県旧朝日村・旧櫛引町 (現鶴岡市) において 2000 年から 2003 年まで実施された調査の際に枯死被害状況が書き込まれた森林基本図 (図 2 はその一部である) 上の被害木群 (図 2 におけるそれぞれの閉曲線で囲まれた領域) を GIS 上に入力した. それぞれの年ごとにひとまとまりとなっている被害木群それぞれに対して ID を割り当て⁷, その集合を I とした. 各被害木群 $i \in I$ について, 中心点の緯度・経度を取得してその組を \mathbf{x}_i とし, 森林基本図に記載

されている枯死被害本数を年別に入力して D_i とした.

次に, おとり丸太の設置場所候補を列挙するために, 道路情報と標高のデータを国土地理院ホームページ [19] からダウンロードした. さらに, 国土地理院の道路情報に反映されていない森林基本図に示されている林道の道路情報を手作業で追加した. 標高データからは当該地域の傾斜角を計算した. 具体的には, 当該地域の 5 m 標高メッシュから ArcGIS pro の Geoprocessing ツールの slope 機能を用いて算出した. また, 植生データとして環境省自然環境保全基礎調査 (自然環境情報 GIS) [20] を使用し, 近藤ら [21] の方法を参考にして当該地域の植生図を作成した. 具体的には, まずミズナラ・コナラが存在する群落・群衆を「ミズナラ・コナラ」と分類し, 次にブナが存在したら「ブナ」, そして針葉樹が存在したら「針葉樹」と分類し, それ以外は「その他」とした. そして, 各林道沿いにおよそ 100 m 間隔でおとり丸太設置場所候補を設定し, それぞれの設置場所候補に ID を割り当て, その集合を J とした. その際, 10 t トラックが進入不可能な傾斜角 35 度以上の急傾斜地点は除外した. また, 日陰のない箇所は設置場所としては不適であるため, 植生図と Google マップ (Google 社) を用いて, 林縁でない, つまり住宅や農地に挟まれていると判断できる地点も除外した. さらに, 対象林地の現況を考慮して, 車両が進入できない道路, 谷間, 農地, 除外しきれなかった急傾斜地も削除した. また, 上述した植生の分類に基づいて各設置場所候補 $j \in J$ から半径 r 以内の植生がミズナラ・コナラである林地の面積を計算して S_j とした. なお, 山形県森林研究研修センターによるガイドライン [6] に基づいて $r = 80$ m とした. さらに 3 節の記述をもとに, κ_G と κ_{PL} の定義に現れるパラメータはそれぞれ $R = 500$, $R_{\text{in}} = 300$, $R_{\text{out}} = 500$ とし, κ_G の定義に現れるパラメータ σ は, $\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 500$ m のとき $\kappa_G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 10^{-1}$ となるように設定した.

5.2 最適化計算

本研究における評価実験では, N と α の値を変化させながら問題 (2) (以下, モデル S) および問題 (3) において $\kappa = \kappa_G, \kappa_{\text{PL}}$ としたモデル (以下, モデル G とモデル PL) の三つを解いた⁸. 2000 年から 2003 年のそれぞれについて $|I| = 596, 238, 557, 508$ で, $|J| = 756$ だった. 計算は基本的にはいずれも数秒程度だったが,

⁸ 最適化計算に用いた計算機環境は以下のとおり. OS: Ubuntu 20.04.4 LTS. CPU: Intel Xeon Gold 5220R CPU @ 2.20 GHz (24 コア 48 スレッド). メモリ: 100 GB. プログラミング言語: Python 2.7.18. 最適化ソルバ: Gurobi Optimizer version 8.1.1 (Gurobi Optimization 社).

⁷ 地図をメッシュ化して被害のあるセル一つ一つに ID を割り当てても構わない. 原理的には枯死被害木 1 本に対して一つの ID を割り当ててもできる.

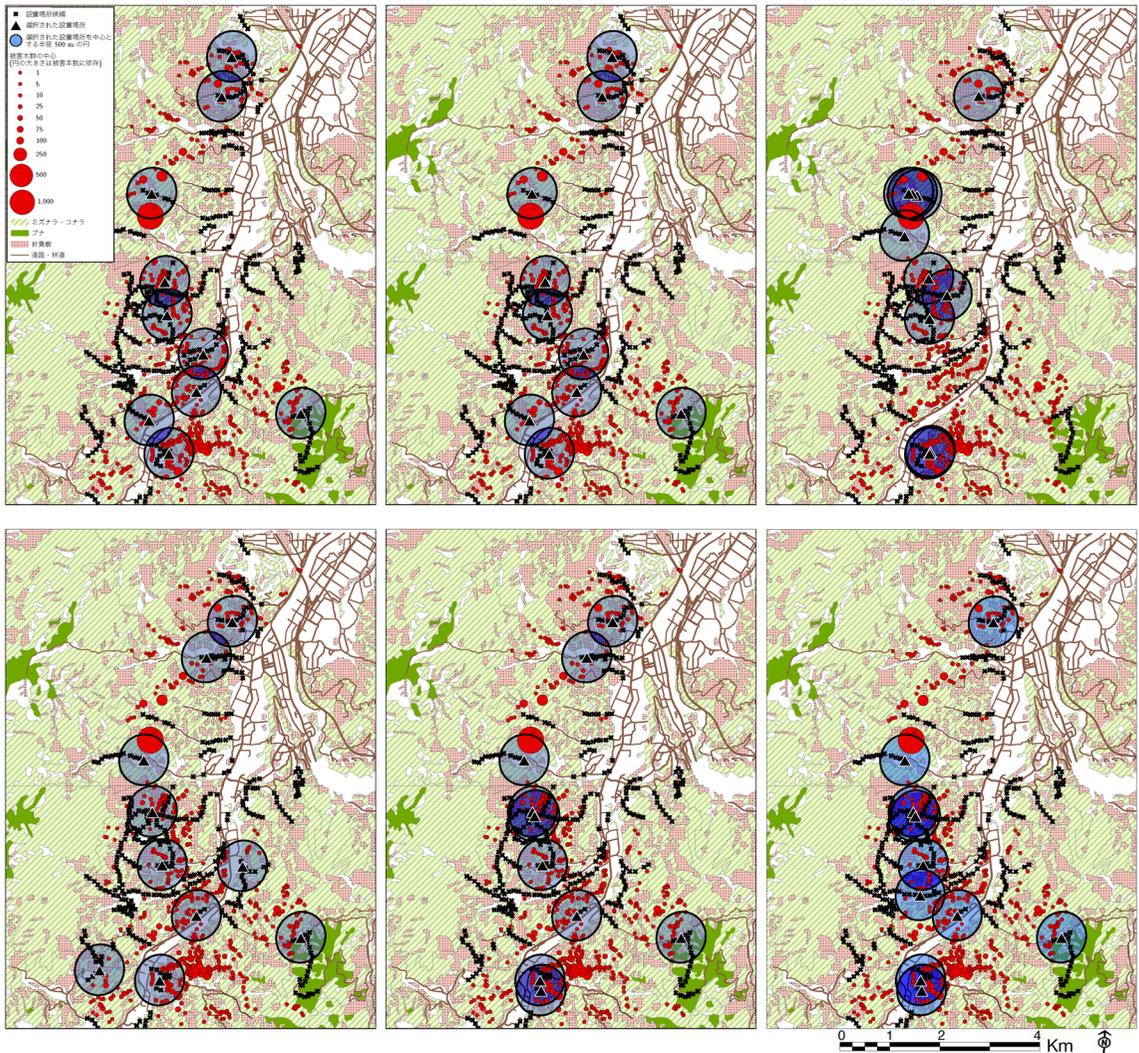


図4 おとり丸太の最適配置と有効範囲
 左列はモデル S, 中央列はモデル PL, 右列はモデル G の結果。
 上段は $\alpha = 0$, 下段は $\alpha = 10^{-3}$ としたときの結果。

モデル G は N が大きいときに計算時間が数分にわたることがあった。これは各おとり丸太が全体に影響を及ぼすため、係数行列が密になるためかもしれない。

5.3 結果と評価

2000 年のデータを用いた最適化計算によって得られた最適なおとり丸太の配置の一部を図 4 に示す。いずれ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。また、 $\alpha = 0$ としたときに比べて $\alpha = 10^{-3}$ としたときは周囲にミズナラ・コナラが少

ない設置場所候補が選択された。 $\alpha = 10^{-3}$ としたとき、モデル PL とモデル G の結果に大きな差は見られないものの、モデル G では選択されていた南部の候補の代わりにモデル PL では北部の候補を選択した。この結果を現場の感覚と照らし合わせることで、著者らはモデル PL で $\alpha = 10^{-3}$ としたときの結果が最も現実的であると評価した。

6. おわりに

自然の現況を把握して自然現象の要因を解析し、それを考慮して資源管理計画を立てることは容易ではない。それは、はかりきれない要因が無数に存在し、それらが複雑に影響しあっているからだろう。現場に精

通している人の勘は、その複雑な要因を無意識下で関連付けているように思われる。本稿で取り上げた森林病害虫防除においても、エキスパートは害虫の増減や害虫が好む環境などを予測・察知し、その感覚に基づいて対策に取り組んでいる。しかし、林業従事者の減少や高齢化によって、そのような感覚の継承は今後難しくなる。このような暗黙知を定量化して OR 的方法論を構築することは、現場における意思決定の支援になると同時に知識の継承にもなるのではないだろうか。

本稿で紹介したモデルは試行レベルのものであり、今後は風・地形・人工的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。また、今回は主要道路からの観測に基づくデータを用いたが、衛星画像・航空写真・ドローン画像などを使って広範囲にわたる被害状況を定量化すれば、よりよい配置が得られる可能性がある。しかしながら、広範囲にわたる画像の取得や画像処理にはコストがかかる。また、Kondoh et al. [22] が開発したナラ枯れ発生予測システムと組み合わせた管理計画ツールの開発なども有用だろう。

最後に、今回われわれが取り組む中で感じた難しさの一つに、入手できるデータの少なさがある。つまり、土場や車両の待避場所など林地の詳細な地図データが利用可能な形で存在しないため、現地に精通した人の協力なしにデータを設計することが難しい⁹。林地の詳細な地図は災害時や林内での事故の際には有用である。今後、林業従事者の減少により現場に精通した人材も少なくなるであろう。そのような中、林地のさまざまなデータが地図上に紐付けられ、誰でも手軽に利用できるようになれば、効率的かつ安全に森林資源を管理するために役立つと考えている。

謝辞 本稿を執筆する機会を与えてくださった蓮池隆氏に感謝いたします。なお、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 18K14493JP の助成を受けている。

参考文献

[1] 齊藤正一, 柴田鏡江, “山形県におけるナラ枯れ被害林分での森林構造と枯死木の動態,” 日本森林学会誌, **94**, pp. 223–228, 2012.

[2] 伊藤進一郎, 窪野高徳, 佐橋憲生, 山田利博, “ナラ類集団枯損被害に関する菌類,” 日本森林学会誌, **80**, pp. 170–175, 1998.

[3] T. Kubono and S. Ito, “*Raffaelea quercivora* sp. nov. associated with mass mortality of Japanese oak, and

the ambrosia beetle (*Platypus quercivorus*),” *Mycoscience*, **43**, pp. 255–260, 2002.

[4] H. Kinuura, “Relative dominance of the mold fungus, *Raffaelea* sp., in the mycelium and proventriculus in relation to adult stages of the oak platypodid beetle, *Platypus quercivorus* (Coleoptera; Platypodidae),” *Journal of Forest Research*, **7**, pp. 7–12, 2002.

[5] 伊藤進一郎, 山田利博, “ナラ類集団枯損被害の分布と拡大,” 日本森林学会誌, **80**, pp. 229–232, 1998.

[6] 山形県森林研究研修センター, 『伐って・防いで・使って若返らせるナラ枯れ対策一駆除・利用・更新三者一体の防除法「おとり丸太法」一 (改定 3 版)』, 山形県森林研究研修センター, 2015.

[7] 林政ニュース編集部, 『林政ニュース第 645 号』, 日本林業調査会, 2021.

[8] 齊藤正一, 中村人史, 三浦直美, 小野瀬浩司, “ナラ類集団枯損被害立木への NCS 注入によるカシノナガキクイムシとナラ菌の防除法の改良,” 林業と薬剤, **152**, pp. 1–11, 2000.

[9] 小林正秀, 萩田実, “カシノナガキクイムシのビニールシート被覆による防除法,” 森林防疫, **52**, pp. 137–147, 2003.

[10] 齊藤正一, 中村人史, 三浦直美, “薬剤と接着剤によるナラ類集団枯損被害における枯死木の新たな防除の試み (1),” 林業と薬剤, **166**, pp. 18–24, 2003.

[11] 齊藤正一, 中村人史, 三浦直美, “薬剤と接着剤によるナラ類集団枯損被害における枯死木の新たな防除の試み (2),” 林業と薬剤, **167**, pp. 8–11, 2004.

[12] 齊藤正一, 中村人史, 岡田光弘, 本間航介, “殺菌剤ベノミル水和剤の樹幹注入によるナラ類集団枯損被害に対する予防効果,” 日本農薬学会誌, **39**, pp. 10–17, 2014.

[13] 齊藤正一, 岡田光弘, 鶴田英人, 猪野正明, “高濃度トリホリン乳剤の樹幹注入によるナラ枯れの予防,” 東北森林科学学会誌, **19**, pp. 12–17, 2014.

[14] 齊藤正一, 『大量集積型おとり丸太によるナラ枯れ防除の研究』, 新潟大学大学院自然科学研究科環境科学専攻博士論文, 2016.

[15] 齊藤正一, 箕口秀夫, 加賀谷悦子, “丸太の大量集積によるカシノナガキクイムシの誘引効果,” 日本森林学会誌, **97**, pp. 100–106, 2015.

[16] 齊藤正一, 岡田光弘, 箕口秀夫, “大量集積型おとり丸太によるナラ枯れ防除法,” 森林防疫, **63**, pp. 25–31, 2014.

[17] 所雅彦, 北島博, 加賀谷悦子, 衣浦晴生, 後藤秀章, 近藤洋史, 齊藤正一, 岡田充弘, 栗生剛, 大谷栄徳, 山中武彦, 吉濱健, “大量のおとり丸太でナラ枯れ対策,” 森林総合研究所平成 27 年版研究成果選集, pp. 52–53, 2015.

[18] 野堀嘉裕, 高橋教夫, 佐藤明, 齊藤正一, “GIS を用いたナラ類集団枯損被害の予測,” 森林防疫, **56**, pp. 48–53, 2007.

[19] 国土交通省国土地理院, 『基盤地図情報サイト』, <https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html> (2022 年 8 月 11 日閲覧)

[20] 環境省自然環境局生物多様性センター, 『自然環境保全基礎調査』, https://www.biodic.go.jp/kiso/fnd_list_h.html (2022 年 8 月 11 日閲覧)

[21] 近藤洋史, 齊藤正一, 衣浦晴生, 加藤徹, 布川耕市, 岡田充弘, 大橋章博, 福井修二, 壽田智久, 蛭田利秀, 山中武彦, 加賀谷悦子, 牧野俊一, “ナラ類集団枯損対策のための森林資源分布図の作成,” 森林資源管理と数理モデル: FORMATH Tachikawa 2010, pp. 309–318, 2011.

[22] H. Kondoh, T. Yamanaka, S. Saito, E. Shoda-Kagaya and S. Makino, “Development of a hazard map for oak wilt disease in Japan,” *Agricultural and Forest Entomology*, **17**, pp. 205–213, 2015.

⁹ 本稿第 3 著者は山形県のナラ枯れ防除に長年携わってきたエキスパートである。