

	グエンハトラング
氏名	NGUYEN HA TRANG
本籍（国籍）	ベトナム社会主義共和国
学位の種類	博士（農学）
学位記番号	連研第810号
学位授与年月日	令和4年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当課程博士
研究科及び専攻	連合農学研究科 生物生産科学専攻
学位論文題目	Evaluation and identification of bark beetle-induced forest degradation using RGB-acquired UAV images and machine learning techniques (無人航空機の RGB 画像と機械学習技術を用いたキクイムシによる樹木の劣化の識別と評価)
学位審査委員	主査 山形大学教授 長谷 修 副査 山形大学教授 Lopez Caceres Maximo Larry 副査 弘前大学助教 鄒 青穎 副査 岩手大学准教授 齋藤 仁志 副査 山形大学准教授 佐藤 智

## 論文の内容の要旨

Recent increases in air temperature, high variability in precipitation, earlier springs and especially warmer winters, appear to be responsible for the increase in the frequency and virulence of insect outbreaks in forest ecosystems. Such a case has occurred in Zao Mountains between the prefectures of Yamagata and Miyagi in northeastern Japan, where an outbreak of bark beetle, that started in 2013, had by the year 2016, completely decimated fir (*Abies mariessi*) forest stands in areas close to the tree line and has slowly but steadily moved down the mountains to lower altitudes showing different degrees of infestation. The total area affected extends to hundreds of hectares that is impossible to evaluate in its entirety by field surveys. Satellite images provide an overview of the damage but because of its coarse resolution, it is not possible to observe in detail the infestation of single trees or the infestation patterns within the forest, hindering the understanding of insect outbreak spread within the forest, their rate of infestation and in general the evaluation of the spatial health status of forests within elevational gradients. However, with the recent advances in Unmanned Aerial Vehicles (UAV), it is now possible to obtain very high resolution of few centimeters, capable of detecting the shape of leaves or different levels of defoliation of branches of a single tree. Thus, based on the data collected from this new technology, this study is composed of two parts: tree health spatial evaluation using Random Forest technique and tree health identification using Deep Learning techniques.

In the first part, the impacts of terrain on the spread of bark beetles were evaluated using Random Forest technique to predict the occurrence of bark beetles and different health classes (healthy, sick, and dead) based on elevation, slope and aspect. Two predictive models were made: the first

model was used to predict two classes “healthy” and “infested” (“infested” includes sick fir and dead fir trees) to evaluate how the terrain characteristics can impact the spread of bark beetles in fir forests and the second model was used to predict three classes “healthy”, “sick” and “dead” in order to evaluate how the terrain affects sickness and mortality rate. The predictors from these models obtained high overall accuracy of 75% and 71% respectively, by considering only the terrain factors. This indicates that the terrain regulates the mountainous climate, and as such has strong influence on the emergence of bark beetle. The results illustrate that elevation which affects 60% of the accuracy of the predictive model is the most important factor that impacts the spread of bark beetles and leads to the mortality of trees. Slope and aspect were equally responsible for 20% each on the model accuracy. High elevation (1600 – 1700 m), steep slope (21.8° – 90°), especially those facing west present the highest percentage of bark beetle infestation and faster mortality rate. This finding contributes to understanding the biological interaction between the host, the bark beetles and the habitat which may give some clues on future habitat selection of the host trees as a strategy to mitigate the impact of bark beetle infestation.

In the second part of the study, an automatic system was developed to classify all the fir trees in the forest into two classes, healthy and sick fir, based on UAV-acquired data and Deep Learning analysis. Considering detection alone, the results showed 85.70% success, while in terms of detection and classification, we were able to detect/classify correctly 78.59% of all tree classes (39.64% for sick fir). However, with data augmentation, detection/classification percentage of the sick fir class rose to 73.01% at the cost of the result accuracy of all tree classes that dropped 63.57%. Finally, the results of this study showed that the implementation of UAV, computer vision and DL techniques has the potential to significantly contribute to the development of a new approach to evaluate the impact of insect outbreaks in forest. The methodologies and results from this study provide enhanced approach and opportunities for forest disturbance assessment which until now have been mainly based on field work and satellite images.

(日本語)

近年の気温上昇、降水量の変動、春の始まりの早さ、とりわけ暖冬は森林生態系における昆虫の発生の頻度や病原性の増加の要因となっている。このような事例は日本北東部、山形県と宮城県の間位置する蔵王山でも起こった。蔵王山では2013年から続いたキクイムシの発生により、2016年までに樹木限界付近におけるアオモリトドマツ(学名: *Abies mariessi*)が完全に枯死した。それ以来、昆虫のまん延度合いは異なるものの、ゆっくりだが着実に標高が低い位置まで影響が及んだ。影響が観察されたエリアの総面積は何百ヘクタールにも達し、全体を現地調査するのは不可能となっている。衛星画像は被害の概観を捉えることができる。しかし、その解像度は粗いことから、森林内や個体における被害状況を詳細に観察し解析するのは不可能で、昆虫の発生や被害の割合、標高における森林の空間的健康状態の全体評価を妨げている。しかし、近年無人航空機(UAV)により、センチメートル単位での高い解像度の画像を入手することが可能となった。それにより、葉の形状や各個体の落葉度合いを知ることができる。本研究論文は、この新しい技術により得られた情報に基づいて、①Random Forest 技術を用いた木の健康状態の空間的評価、②ディープラーニング技術を用いた木の健康状態の同定、の2つの章を主体に構成された。これらは UAV から得られる RGB 画像を用いて行った。

ひとつ目の章では、キクイムシの広がりに対する地形の影響を Random Forest 技術を用いて評価し、標高、傾斜、方位に基づき、キクイムシの発生と木の健康状態(健全・病気・枯死)を予測した。予測モデルを二つ作成し、一つ目のモデルは地形の特徴がどのようにアオモリトドマツの木におけるキクイムシの広がりに影響を与えるかを評価するために「健全木」と「被害木」(病気と枯死を含む。)の二つのクラスで予測した。二つ目のモデルは、地形がどのように昆虫の侵入割合と枯死率に影響を与えるのかを評価するために「健全」「病気」「枯死」の三つのクラスを予測するモデルを構成した。これらのモデルからの予測は地形要因だけを考慮して、各75%、71%の高い正確さを得ることができた。これは地形が山の天候を左右し、キクイムシの発生に強い影響を与えることを示唆する。これらの結果はキクイムシの広がりには標高が最も大きな要因であることを示し、また、これが木の枯死率を導き、予測モデルの正確性に60%寄与していることを示した。傾斜と方位はともに20%ずつ予想モデルに影響した。高い標高(1600-1700 m)で急な斜面(21.8°-90°)、特にこれらが西向きに面している場合においてキクイムシの被害が高く、枯死に至るまでのスピードが速い。この発見はキクイムシとその生息地との間の生物学的相互関係の解明に貢献する。これはキクイムシの被害を和らげる戦略として、今後のキクイムシの生息地の選択に何かしらのヒントを与えるかもしれない。

ふたつ目の章では、無人航空機により得られた情報とディープラーニングに基づき、森林内にある全てのアオモリトドマツの木を発見し、健全と病気の二つに分類分けするための自動システムが開発された。発見のみの正確性は87.50%であったが、発見と分類の正確性は78.59%で全ての木を発見して分類することができた(病気の木に対しては39.64%)。しかしながら、データ量が増加すると病気の木の見つけと分類の正確性は73.01%に上昇するものの、全ての木に対する分類の精度は63.57%にまで下がった。最終的にこの研究結果は、無人航空機技術とコンピュータ画像、ディープラーニング技術の導入は、森林における昆虫の発生による被害を評価するための新しい手法の確立に非常に大きく貢献することを示している。この研究結果は、今日まで主に現地調査と衛星画像によって行われている森林分布の伝統的評価手法を詳細さという観点において超えた。

## 論文審査の結果の要旨

Nguyen HA TRANG は、山形と宮城の蔵王山に生息するアオモリトドマツの立枯れを対象とした研究を行った。本病はキクイムシの発生が原因で、2013年から2016年までに地帯全体に枯死が拡大した深刻な問題に発展している。影響を受けた総面積は数百 ha の広大な範囲に及ぶため、現地調査で全体を評価することは不可能で、衛星画像による解析は被害の概要を確認できるが解像度は粗いため個体レベルでの状態や森林内の蔓延パターンを詳細に観察することはできず、発生状況を正確に理解することが困難であった。本研究では、この広大な範囲を空間的に詳細に解析・評価することを目的に、無人航空機(UAV)を駆使した高解像度の画像を取得し、深層学習(DL)による解析・評価・予測を行い新規の知見を見出した。本研究では、対象林以外の広葉樹が共存する森林地帯から対象のアオモリトドマツの健康状態を評価するため、RGBカメラを装着したUAVを用いて画像を取得し解析する方法論を提案した。この手法はピクセルあたり約2cm<sup>2</sup>の高解像度の画像を得られるのに加えて低コストである。そのため、数千本を短時間で高精度に個体の状態を評価することを可能にし、最小限の労力で実施できる新しいアプローチである。本研究では、画像の解析とフィールド調査により樹木の健康状態(健

全、罹病、枯死)を確認し、個々の健康状態を自動的に認識できる DL モデルを開発した。この詳細な分析により、蔵王のアオモリトドマツの健康状態の分布をマッピングし、立枯れの侵入分布のパターンを理解することを可能にした。また、ランダムフォレスト手法により、地形要因(標高、傾斜、方位)や他の要因が昆虫の発生拡大や対象林の状態に与える影響を解析し、予測した。予測は2つの予測モデルを作成して行った。一つ目のモデルは、「健全木」と「被害木」(「被害木」には罹病と枯死の両木を含む)の2つのクラスを予測し、地形が立枯の拡大にどのように影響するかを評価した。2つ目のモデルは、「健全」、「罹病」、「枯死」の3つのクラスを予測して地形が被害木の罹病率と枯死率にどのように影響するかを評価した。

これらの予測モデルは、地形要因を採用することで高い精度が得られ、昆虫の発生と樹木の枯死に最も影響を与えることを示した。特に標高は精度の60%、傾斜と方位は20%寄与し、具体的に、標高が高く(1600~1700 m)、急な斜面(21.8°~90.0°)、西向きの斜面で昆虫の発生率と枯死率が最も高くことを示した。これらの成果は、宿主、キクイムシ、および生息地間の生物学的相互作用を理解するのに重要な知見であり、キクイムシの侵入の影響を管理するための戦略として、対象木の将来的な生息地選択に関する手がかりを提供できると考えられる。また、青森から岐阜に至る他地域のアオモリトドマツ林の評価にも活用できることが期待される。

以上から本審査委員会は、「岩手大学大学院連合農学研究科博士学位論文審査基準」に則り審査した結果、本論文を博士(農学)の学位論文として十分価値のあるものと認めた。

#### 学位論文の基礎となる学術論文

Nguyen H. T., Lopez C. M. L., Moritake K., Kentsch S., Shu H., Diez Y., 2021. Individual Sick Fir Tree (*Abies mariesii*) Identification in Insect Infested Forests by Means of UAV Images and Deep Learning. Remote Sensing doi.org/10.3390/rs13020260.