

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

地上レーザーを用いた森林域での自然災害評価法の確立 (2RF-1501)

平成27年度～平成29年度

Evaluating Impact Assessment of Forest Disaster Using Terrestrial Laser Scanner

〈研究代表機関〉

国立大学法人千葉大学

平成30年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	11
II- 1 地上レーザーを用いた森林域での自然災害評価法の確立 （国立大学法人千葉大学）	11
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	54

1. 成果の概要

課題名 地上レーザーを用いた森林域での自然災害評価法の確立

課題代表者名 加藤 顕 国立大学法人千葉大学 園芸学研究科 緑地環境学コース 助教)

研究実施期間 平成27~ 29年度

累計予算額 26,860千円 (うち平成29年度: 8,799千円)

予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 森林火災、風倒害、バイオマス、グランドトゥルース、3次元、無人航空機、衛星レーダー、クラウド型解析, MRV, 自然災害保険

研究体制

(1) 地上レーザーを用いた森林域での自然災害評価法の確立 国立大学法人千葉大学)

1. はじめに 研究背景等)

地球の陸地面積の30%を覆っている森林は、地上における二酸化炭素の吸収源であり、炭素貯蔵庫である。しかし、森林火災によって大量の炭素が大気中に放出され、近年地球温暖化に影響を及ぼしている。特に、亜寒帯林は森林面積が熱帯林に次いで2番目に大きく、亜寒帯林で発生している森林火災が地球温暖化に与える影響は大きい。これまでは国際的取り組みとして熱帯林の保全に対するREDD+のような環境政策が世界的に展開している。REDD+ではMeasuring, Reporting, and Verification (MRV) と呼ばれる森林モニタリング手法が確立しているが、森林火災が深刻な亜寒帯林に対する森林モニタリング手法は確立していない。MRVではLandsat衛星画像による時系列解析を主体とした森林モニタリング手法が主に用いられている。

森林域における自然災害（森林災害）として森林火災の頻度、強度、規模は、地球温暖化により影響されるため¹⁾、森林火災をモニタリングすることは今後より重要となる。本研究の対象地であるカナダでは、1960年代~ 1990年代の過去40年間で、森林火災による森林の焼失面積は増加している²⁾。また、対象地内での森林火災の発生回数は、過去およそ50年間で大きな増加は見られない。しかし、年間総焼失面積は増加傾向にあることから、一度に広範囲が焼失する森林火災が増加している³⁾。

森林災害が多発する遠隔地で、森林域におけるモニタリング手法を確立することは、リモートセンシング技術を環境政策に適用する大変重要な課題である。森林災害が生じた場合、より早急に、そして正確に災害状況を把握する必要性は、温暖化の影響を把握する意味で大変重要である。可搬性の優れている地上レーザーセンサーを現地に持ち込み、その森林の詳細な3次元データを短時間（数分）で取得し、データを持ち帰ってオフィスのコンピュータで必要な情報が抽出できれば、最も効率の良い森林測定技術である。さらに、樹木の測定精度（複数回測定した際の誤差分散）が人による計測よりも正確である。広域で取得される3次元データからwall to wall（完全対応）による衛星データと3次元データの直接比較が可能となるため、グランドトゥルースとしては最適な手法である。これらの理由から地上レーザーによる森林災害を評価する手法を本研究では検討した。

2. 研究開発目的

地上レーザーデータを用いて森林災害を評価する手法を確立するために、森林災害が頻繁に生じる場所で3次元データを取得し、衛星画像を用いた解析結果と比較した。森林災害評価法としては、これまで人が目視で行っていた手法から、3次元データを用いた解析手法を確立することを目的としている。森林災害前後の状況から3次元データ上で失われた量を定量的に把握し、衛星データの現地検証（グランドトゥルース）データとして用いることができる。

また、森林生態学の法則を取り入れて、森林状況を評価することも検討した。森林生態学の法則とは、「自己間引きの法則」であり、対象とする森林が最多密度に達しているかどうかを判断する。森林が最多密度に達すると、可燃性バイオマスの蓄積が進むため、森林火災のリスクが高くなる。風の強い場所

では、風倒害が生じやすくなる。森林の密度状況を地上レーザーによって評価した。

本研究では、以下に述べる3つの課題に取り組んだ。

- (1) 地上レーザーによる3次元データを用いて森林災害を評価する手法を確立する。
- (2) 地上レーザーと生態学の法則を用いて林内状況を定量的に解析する手法を確立する。
- (3) 衛星データのグランドトゥルースとして地上レーザーによる3次元データの有効性を検証する。

3. 研究開発の方法

(1) 地上レーザーを用いた森林域での自然災害評価法の確立

森林災害でも、特に「森林火災」と「風倒害」に注目して研究を行っている。研究では、小規模の風倒害に関してはオーストラリア熱帯林で、大規模森林火災に関してはカナダ亜寒帯林で研究を行った。また、カナダと同じ緯度にあるエストニア亜寒帯林でも3次元データの取得を行い、確立した手法の汎用性を検証した。

森林火災の種類は様々であり、Prescribed fire（下層植生のみコントロール可能な延焼）からCrown fire（樹冠に達するほどのコントロール不可能な強力な延焼）まである。本研究ではこのような様々な強度の森林火災に対応する評価手法を地上レーザーから提供することで、森林火災に対する地上レーザーの有効性を示す。風倒害に関しては、倒れることによる森林の垂直分布の変化を3次元データから把握できる手法を確立する。

3- 1. 研究対象地と現地調査

森林災害地、特に熱帯と亜寒帯の森林データを取得するため、熱帯林はオーストラリア ケアンズ近郊にあるRobson`s Creekを対象とした。ケアンズ近郊は台風が頻繁に発生する場所として知られており、高木の樹木による風倒害が頻繁に生じる地域である。また、25m以上の巨木は、25ha内の全立木のわずか10%しか存在しないにも関わらず、全バイオマス量の50%を占めている。数本の巨木が風により倒れることで、全体のバイオマス蓄積量が大きく変化する。

亜寒帯林はカナダ、ノースウェスト準州、ウッドバッフアロー国立公園（北緯60度00時19分、西経111度53時26分付近）を対象地とした。対象地はアルバータ州北東部からノースウェスト準州南部にかけて広がっており、総面積44,807km²もの広域を研究対象地とした。研究対象地内の林分は亜寒帯林であり、主な構成樹種はポプラ(*Populus tremuloides*)、バンクスマツ(*Pinus banksiana*)、トウヒ(*Picea mariana*)などである。過去の研究で、「自己間引き」が生じていることが証明されている場所である⁶⁾。同じ緯度にあるエストニアの亜寒帯林も調査対象地とした。エストニアの亜寒帯林は、カナダのサイトと比較できるようにヨーロッパアカマツ(*Pinus sylvestris*)、ヨーロッパハンノキ(*Alnus glutinosa*)、オウシュウトウヒ(*Picea abies*)の樹種がある場所で調査プロットを設置した。

3- 2. 地上レーザー

本研究で使用した地上レーザーは3種類あり、長距離型レーザーにVZ400（RIEGL社製）を用い、中距離型レーザーにTX5（Trimble社製）を用い、短距離型レーザーにLMS511（SICK社製）を用いた。それぞれのセンサーの特徴は、VZ400は最大照射距離が600mあり、TX5は最大照射距離が120mあり、LMS511は最大照射距離が40mである（表I-1）。森林内でレーザー照射をした場合、幹などの構造物によって遮蔽される。調査地では複数個所でセンサーを設置し、幹などの陰になった場所をデータ補完した。LMS511はVZ400に比べ、値段が1/10以下と各段に安く、どこでも持ち運びができる。

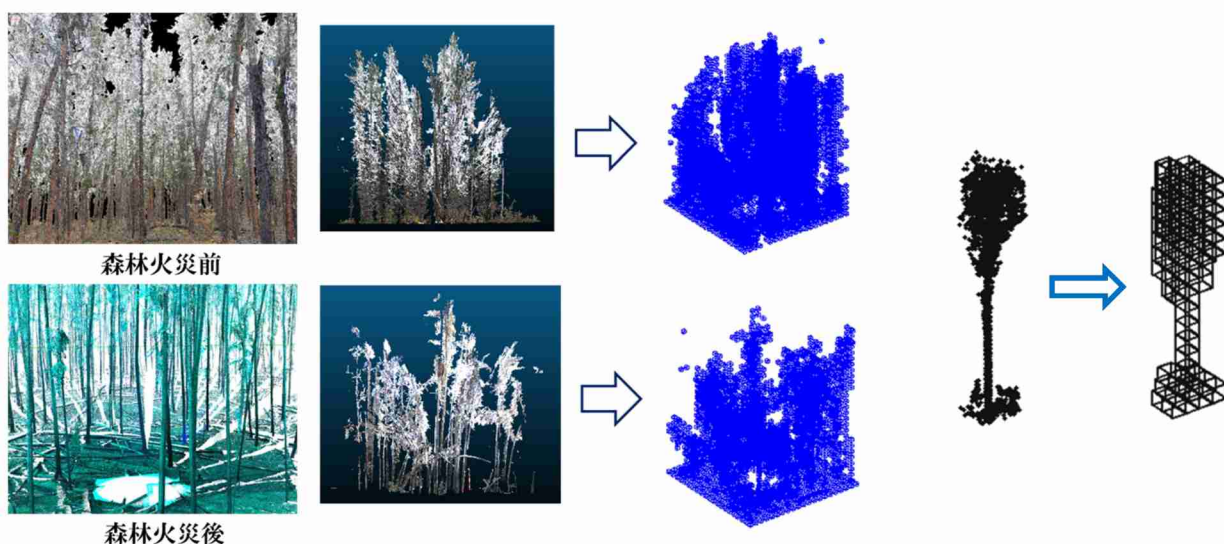
表 I-1. 本研究で主に使用した3種類のレーザーセンサー

センサー名	VZ400（RIEGL社製）	TX5（Trimble社製）	LMS511（SICK社製）
レーザー波長	1550 nm（近赤外域）	905 nm（赤外域）	905 nm（赤外域）
最大照射距離	600 m	120 m	40 m
計測レンジ	水平 360° x 垂直 100°	水平 360° x 垂直 180°	水平 360° x 垂直 150°

3-3. 地上レーザーによる3次元データを用いて森林災害を評価する手法を確立する。

本研究対象であるカナダの森林火災地域において、森林火災前後で地上レーザーによる3次元データを取得した。カナダの森林火災地域は、森林内の可燃性バイオマスの量が蓄積することで、森林火災のリスクが高まる。森林内に可燃性バイオマスの蓄積があると、火が延焼する際に、下層植生から森林上部に火が燃え移り、Crown fireとして大きな森林災害になる。よって、3次元データによる森林構造の把握は、そのリスクを定量的に把握できる最適な手法である。

現地調査では、複数の箇所に設置した地上レーザーセンサーから得られた3次元データを合成することで、1カ所だけでは把握できない樹木形状を補完した3次元データを取得した。ボクセル⁷⁾という手法を用い、3次元空間内で地上レーザーの点が1つでもある場合はボクセルを作成するようにした。その結果、点密度が偏在しない標準化したデータを作成することができた。取得した地上レーザーから森林構造の変化を把握するために、森林火災が生じる前後でデータを取得し、その減少量を把握した(図I-1)。図I-1より、ボクセルで森林火災によって減少した樹木の形状を特定できるようにした。



図I-1 森林火災が生じた場所での3次元可燃性バイオマス量の変化を把握（左図：森林火災前後で地上レーザーによって取得したデータの様子、中央図：同じ場所データを抽出した3次元データの様子、右図：その3次元構造を把握するために、ボクセルによってデータを標準化した結果）

風倒害に関して、25haもの広大な熱帯林を対象に風倒害のあった場所を特定することは容易ではない。そのため、無人航空機によってデータを収集することで風倒害が生じている地域を特定した。熱帯林対象地で2015年11月、2016年11月、2017年11月の3回データ取得し、その表面形状(Digital Surface Model, DSM)の経年的変化から風倒害が生じた場所を把握した。DSMは様々な角度で撮影した空撮画像からStructure from Motion (SfM)と呼ばれる手法を用いることで3次元データを作成した⁸⁾。

本研究では3次元データをボクセルに変換し、森林災害を評価した。ボクセルによって表される3次元データは、その森林の空間占有率であり、森林構造を表すデータである。本研究ではボクセルサイズを0.25mとした。

$$\text{森林災害評価} = (\text{災害前}) \text{ボクセル数} - (\text{災害後}) \text{ボクセル数}$$

特に、森林火災や風倒害に関しては、

$$\text{森林火災評価} = \text{森林火災前後で焼失したボクセル数}$$

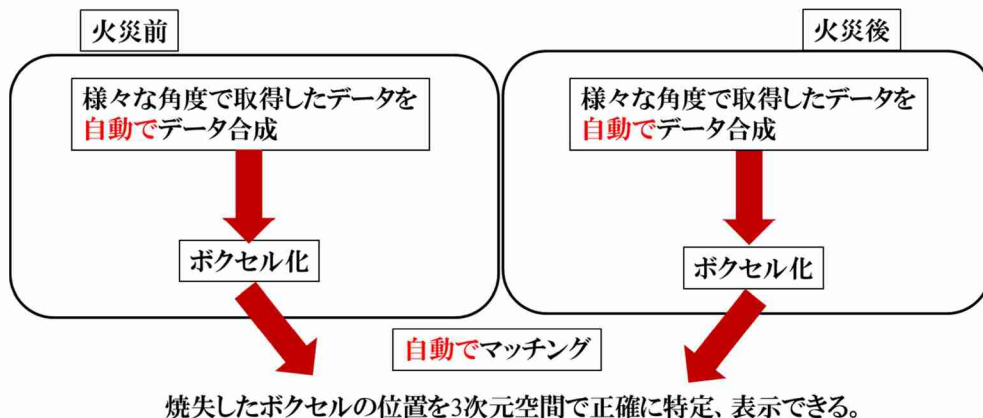
$$\text{風倒害評価} = \text{風倒によって損失、または下層に移動したボクセル数}$$

災害評価を定量的に行うために、災害前後でのボクセル数の変化に注目し、その消失量（または移動

量)を定量化した。災害前後での量の変化は、森林火災の場合は、消失した可燃性バイオマスの量を示しており、風倒の場合は、ボクセルの森林の垂直分布の変化(森林上部から下部へのボクセルが移動する。ボクセルは、森林災害前後の空間体積を定量的に算出できる。

森林災害前後の3次元データの位置合わせは自動で行われる訳ではなく、これまでは手作業で合わせる必要があった。本研究ではその過程を自動化することに成功した。樹冠形状から自動で特徴点を抽出し、樹木形状を森林火災前後で3次元データをマッチングさせるプログラムを作成した。位置情報(GPS情報)を取得していなくても、後にGPS情報を3次元データに自動で付加できるようにした。

従来「タイポイント」と呼ばれるリフレクター(反射鏡や反射板)を調査地内にランダムに設置し、そのタイポイントを共通点として、様々な場所や角度で取得した3次元データを合体しなければならなかった。、現地調査でタイポイントを設置する作業は多大な時間を要した。しかし、本研究で開発したデータ合成手法は、こうした作業もすべて必要がなくなり、現地でのデータ収集時間も短縮でき、さらに、後処理のデータ合成もすべて自動化でき、より効率の良い3次元データの利用が可能となった(図I-2)。



図I-2 森林火災前後でのデータ合成の概念図(ボクセルサイズを0.25mとした)

3-4. 地上レーザーと生態学の法則を用いて林内状況を定量的に解析する手法を確立する。

森林災害を未然に防ぐには、その森林密度が最適か過密かを把握する必要がある。その判断根拠として自己間引きの法則に注目した。自己間引きの法則とは、植物個体群の密度が高くなり、環境収容力に達する前に間引きが起こる現象のことであり、平均個体重と個体群密度の対数値には直線関係が成り立つと言われている。また、その傾きが $-3/2$ に近づくことから $3/2$ 乗則とも呼ばれている。主に林業で使用されている林分密度管理図の最多密度曲線は自己間引きの $3/2$ 乗則が用いられている。自己間引きの法則を検証するために樹冠フラクタル次元を用いた。樹冠フラクタル次元(D)とは、樹冠表面の凹凸の程度を表す指標であり、樹冠表面に葉が集中して分布する場合は平面的になりDが2に近づく。また、葉が樹冠内に均等に分布し、樹冠の表面に凹凸が生じるとDが3に近づく。そのため、樹冠フラクタル次元Dは樹冠内の葉の分布の指標である。フラクタル次元を推定する方法として本研究では異なる2種類の方法で検討した。凸包体を用いて樹冠体積を求める手法とボックスカウンティング法である。樹冠体積と葉量は比例関係にあり、樹冠体積は葉量の $3/D$ 乗に比例する。ボックスカウンティング法とは、対象物を細分化し、対象物の中に含んでいるボックスを数える方法である。対象物がフラクタルであればボックスの寸法を変えてもフラクタル構造が現れることから、ボックスの大きさと総ボックス数を両対数グラフで近似した際、傾きがフラクタル次元となる。樹冠体積からフラクタル次元を推定するために、レーザーデータから樹冠体積と樹冠占有面積を計算するために樹冠凸包体を作成した。

3-5. 衛星データのグランドトゥールースとして地上レーザーによる3次元データの有効性を検証する。

近年クラウドベースによる解析が誰でも出来るようになり、データの準備が必要なくクラウド上で誰でも簡単にデータ解析ができるようになった。その例として、Google Earth Engine(GEE)と呼ばれるGoogleが無料で提供するサービスがあり、無料でGoogleのサーバーと解析プログラムを用いることで、

膨大な衛星画像のアーカイブから変化抽出や解析を容易に行える。本研究対象地はカナダの国立公園であり、44,807km²という非常に広大な地域を研究対象地であるため、短時間で広域を解析できるGEEが最適であった。インターネットがあれば、どこでも解析ができるため、先進国のみならず、途上国でもクラウド型衛星リモートセンシングデータ解析や活用が急速に普及すると考えられる。実際、国連FAOなどがすでにGEEの採用を決めており¹⁰⁾、近い将来世界標準化手法を用いて、様々な組織で利用されると想定し、本研究でもGEEを解析に用いた。Landsat衛星画像の1980年から現在まで用いて森林火災が生じた場所を特定できるようにした。森林火災の場所を特定するために、衛星画像のスペクトル情報から、火災の強度を示す正規化火災指標Normalized Burn Ratio(NBR)と、植物の量や活力を示す正規化植生指標Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)を用いた。

$$\text{NBR} = (\text{band4} - \text{band7}) / (\text{band4} + \text{band7})$$

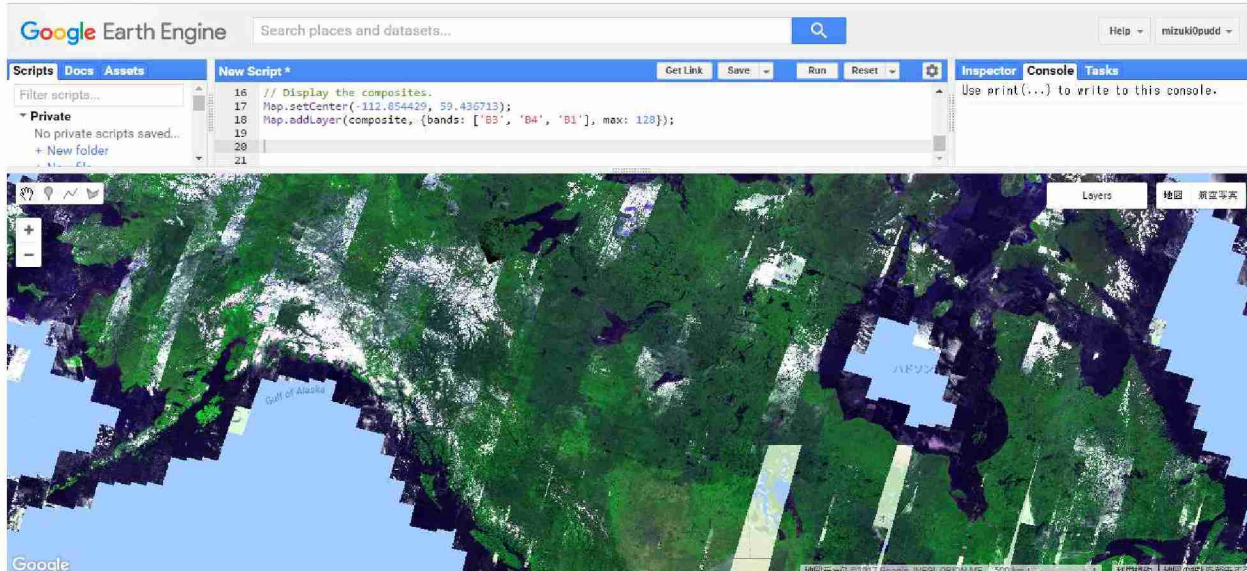
$$\text{NDVI} = (\text{band4} - \text{band3}) / (\text{band4} + \text{band3})$$

NBR値とNDVI値のレンジは-1.0~1.0の範囲である。本研究では火災の強度を判定するために、火災前のNBR値から火災後のNBR値を差し引くことで得られる ΔNBR 値を指標として使用した。

$$\Delta\text{NBR} = \text{NBR}_{\text{prefire}} - \text{NBR}_{\text{postfire}}$$

ΔNBR は値が高いほど強度の高い火災が発生したことを示し、NDVIは値が高いほど植物の量が多いことを示す。解析結果を検証するために、現地調査は2016年9月に行い、研究対象地内の道路沿い10km間隔の計36か所から、位置情報と地上レーザーによる3次元データを取得した(図I-3)。地上レーザーから半径10m以内の樹高の平均値を算出した

カナダ森林管理局が公表している森林火災の焼失場所と焼失年が記載されている地図を基に、5年毎に地図上では焼失したと記載されている場所を40カ所ずつ点としてデータを作成した。次に、作成した点が、解析結果で焼失したと推定された場所といくつ重なるかを検証し、Kappa値を求めた。また、日本の衛星画像であるALOS PALSARやALOS 2による解析を行った。本研究では、後方散乱係数ではなく、



図I-3 Landsat 7号2000年8月~10月の衛星画像から合成した雲を除去した画像 (GEEより転載)

コヒーレンス値に注目して解析を行った。コヒーレンス値とは、レーダー波の相関係数である(図I-4)。同じ場所で異なる2時期に取得されたデータを比較した際、同じ構造からの反射であれば、レーダーの波形が同じとなりコヒーレンス値が高くなる。しかし、構造に変化が生じた場合、コヒーレンス値が低くなり、反射されるレーダー波に変化が生じたことがわかる。検証には、地上レーザーによって把握でき

た森林火災前後での（地上レーザーによって得られた）ボクセルの消失量と（衛星レーダーによって算出される）コヒーレンス値の減少量を比較することで、森林火災が生じた場所で衛星レーダーの検知能力を検証した。

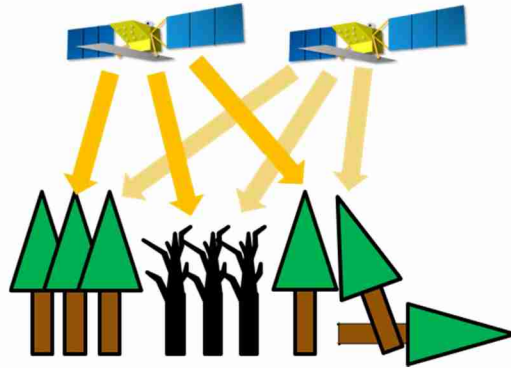


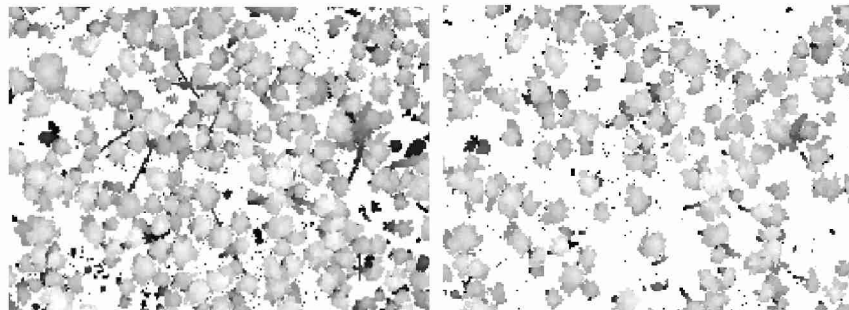
図 I-4 コヒーレンス解析（レーダー波の相関係数）を用いた解析についての模式図（レーダー波の相関係数が2時期間で同じ構造物である場合は高く、異なる場合は低くなる）

4. 結果及び考察

(1) 地上レーザーを用いた森林域での自然災害評価法の確立

4- 1. 地上レーザーによる3次元データを用いて森林災害を評価する手法を確立する。

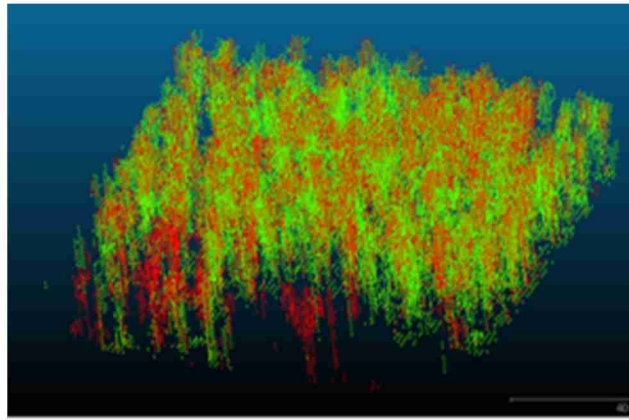
森林火災前後で取得した地上レーザーの3次元データを比較すると、森林火災により焼失量が把握できる。Prescribed fireのような小規模火災では、下層植生が森林火災後に消失する。Crown fireのような大規模火災では、森林火災後に立木密度が減少する（図I-5）。



図I-5 森林火災前後の同じ場所で取得されたDSMデータ（左図：森林火災前、右図：森林火災後）。Crown fireにより、半分以上の樹木が消失していることがわかる。

本研究では、森林火災前後での3次元データを自動でマッチングする技術を確立したため、これまで不可能であったより詳細な3次元データ上での樹木形状の消失場所を特定することができた（図I-6）。以上のデータを使用することで、大面積試験区50m x 50m内で森林火災があった場所で、森林火災前後でのデータを比較することで、正確に消失量を定量的に把握できた。これらのボクセル消失量そのまま森林災害評価として数字で被害度や災害強度を表すことができるため、非常に直接的で、わかりやすい評価手法が構築できた。

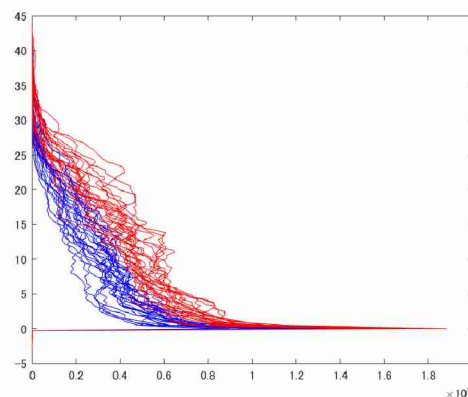
オーストラリア熱帯林の風倒害地域では、森林域で効率良くサンプリング場所（空間代表性がある場所）を把握するためにUAVによるデータから代表的なサンプリング場所を特定した。25haの試験区を100m x 100m（1ha）単位で25個に小分割された中心位置で風倒害がない場所をリファレンスとし、現地調査で25haの森林を詳細に踏査し、風倒害の場所を見つけ、ドローンによって風倒害と判別した場所と比較したところ、ほぼ場所が一致した（図I-7）。



図I-6 森林火災前後でボクセルが消失してなくなった場所を3次元上で表示した結果（赤色箇所が森林火災で焼失したボクセル位置、緑色箇所が火災前後で変化のなかった火災で焼失しなかった位置）。

リファレンスデータとして、風倒害が起きていない地域(25カ所)と風倒害が生じた地域(20カ所)の垂直分布の違いを比較した(図I-7)。その結果、風倒害が生じた場所では、調査対象区内でのボクセルの数が下方(森林下部)に移動し、ボクセルの垂直分布の形状が明らかに異なることがわかる。よって、地上レーザーによって、熱帯林における風倒害が生じた場所の判別が可能であった。人の目視による判別ではなく、3次元データとしてボクセルの垂直分布から判別でき、データをアーカイブとして残すこともできるため、風倒害を評価するにはより確実な手法である。ボクセルと材積には高い相関関係がある訳ではない。より正確な材積に変換するためには、幹枝葉のボクセルに分けて、密度が異なる樹木部位に異なる係数を掛け合わせ、バイオマス量を見積もる必要がある。環境政策での森林域での炭素蓄積量にはバイオマスの計算が必要なため、バイオマスと衛星データを比較することが多い。しかし、衛星画像はバイオマスよりもそこにある構造物との関係に深く関係している。特に衛星レーダーは、構造物を捉えることに適している。そうした特徴を考えると、森林災害評価には、構造を捉える衛星レーダーと、現地で詳細な森林構造を測定できる地上レーザーによる組み合わせが最も適している。ボクセルからバイオマスには1つの係数を掛け合わせることで、バイオマスに変換するような計算方法を環境政策で利用することを提案したい。

これまでの胸高直径や樹高を用いた材積計算よりも、ボクセルから算出した方が、より現実的なバイオマス算出方法になり得る。その理由としては、ボクセルを用いた手法は構造から直接計算するため、樹冠の広がりなど個体差を考慮している。特に広葉樹などの不定形樹木に対しては大変有効である。その一方で材積式からのバイオマス計算は、個体差が考慮されず一定となる。よって、個体差を反映されるボクセルによるバイオマス計算が、より現実的なバイオマスを算出できると考えられる。



図I-7 ボクセルの垂直分布。(高さ別のボクセル数のヒストグラム、青色：リファレンスのサイトで風倒害が生じていない場所、赤色：風倒害が生じた場所、有意差有 ($p < 0.05$)

4- 2. 地上レーザーと生態学の法則を用いて林内状況を定量的に解析する手法を確立する。

カナダの亜寒帯林における天然林調査によるバンクスマツ、アスペン各3調査地で計測された平均樹冠体積と個体群密度を両対数グラフで表し、近似線と R^2 （決定係数）を示した。また、 $-\gamma$ の値を推定し自然分布を想定した95%信頼区間(CI, Confidence Interval)を求めた。バンクスマツでは $-\gamma = 1.68$ (95% CI: $0.71 < -\gamma < 2.65$)、アスペンでは $-\gamma = 1.07$ (95% CI: $0 < -\gamma < 5.07$)と推定することができた(図I-8)。バンクスマツでは、傾きが1.68となり、1.5に近い値で推定することができた。一方、アスペンでは $-\gamma = 1.07$ となり、想定していた値よりも低い値を得た。この原因として、アスピンの調査地の一部で風倒害により林冠を構成する高木の密度が減少したため、個体群密度が減少した。本手法を用いることで、自己間引きが生じている場所や風倒害が生じる場所を正確に把握できるため、森林災害を評価できると考えられる。また、得られた結果の汎用性を確認するために、エストニアで取得した樹種で自己間引きの法則が成り立つか地上レーザーによって解析した結果、ヨーロッパアカマツではべき乗係数の値が1.52、ヨーロッパハンノキのべき乗係数の値が1.42、オウシュウトウヒではべき乗係数の値が1.53となりそれぞれ自己間引きの1.5に近い値を得た。

本研究で対象とした樹種(ヨーロッパアカマツ、オウシュウトウヒ、ヨーロッパハンノキ)で、自己間引きのべき乗係数から樹冠フラクタル次元Dを計算した結果、値が2に近づいた(ヨーロッパアカマツ1.97、オウシュウトウヒ1.95、ヨーロッパハンノキ2.1)。ボックスカウンティング法を用いてそれぞれの樹種について求めたフラクタル次元D(ヨーロッパアカマツ2.03、オウシュウトウヒ1.92、ヨーロッパハンノキ1.85)と近い値であったことから、葉が樹冠の周辺に遍在すると考えられる。

4- 3. 衛星データのグラントゥルースとして地上レーザーによる3次元データの有効性を検証する。

衛星データとして、GEEによるLandsat衛星の経年的データ解析を行い、さらに衛星レーダーによるALOS PALSARまたはALOS 2による解析で、森林火災が生じている場所を特定した。

GEEによる解析結果では、1986年~2015年の各5年間における推定火災焼失場所を比較すると、2011年から2015年の5年間で焼失した場所は、過去30年間で最も多いことが分かった。また、衛星画像から抽出した推定火災焼失場所の正確性は、Landsat5の衛星画像を用いた解析結果よりも、Landsat7,8の衛星画像を用いた結果の方が高いことがわかった(表I-2)。近年打ち上げられた観測衛星のセンサーは、スペクトル値のキャリブレーションが改善されているためである。森林履歴がLandsatの時系列解析から把握できたため、その森林履歴箇所地上レーザーによる3次元データを取得し、平均樹高を得た。地上レーザーによる現地計測結果とNBR値とを比較することで、森林火災後の植生回復状況を検証した。NBR値だけでは、相関が見られなかったが、NDVI値を加えて比較すると、NDVI値0.3付近で樹高とNBR値の傾向が2つグループに分かれた(図I-9)。よって、NBR値と平均樹高の間には、NDVI値が0.3以上の場合に正の傾向があった。

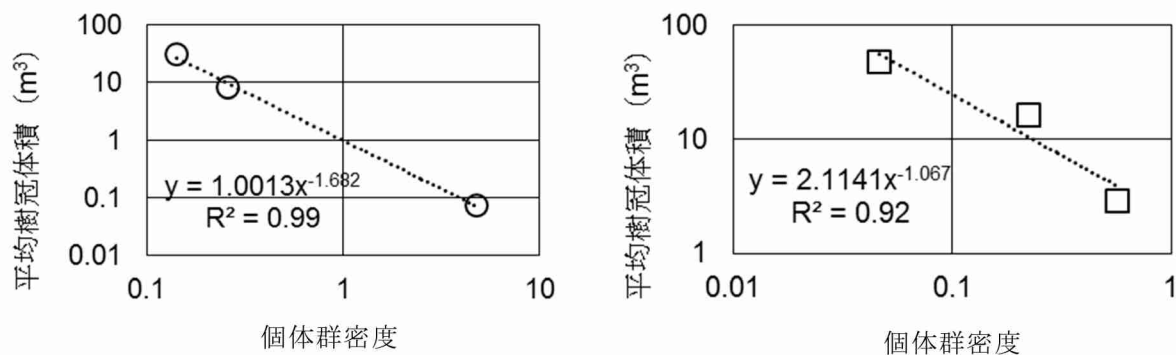
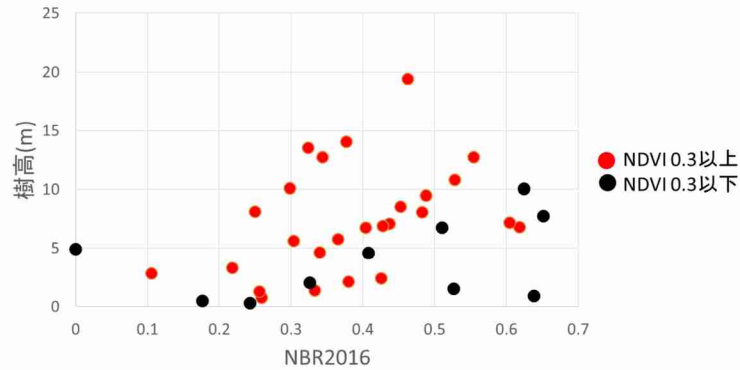
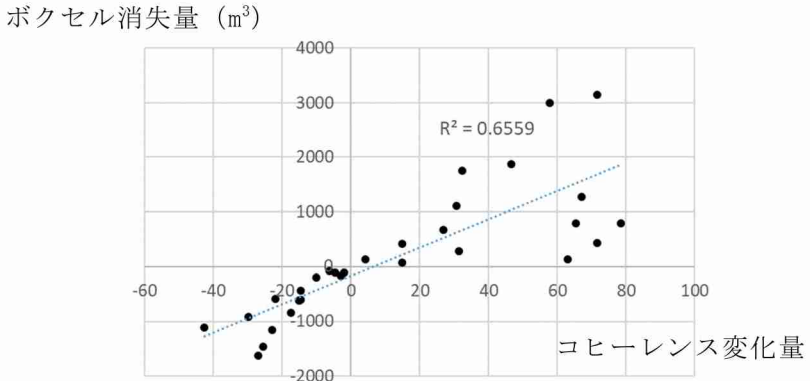


図 I-8 自己間引きの法則を地上レーザーによって把握した結果(左: バンクスマツ、右: アスペン) 図中の各点は、調査地での平均値であり、各調査地 10 本の対象木を解析し、平均化した結果である。



図I-9 3次元データより現地で測定した平均樹高とNBR値との関係

地上レーザerによって把握した森林火災によるボクセル消失量と衛星レーダーによるコヒーレンス値の減少量を比較したところ、高い相関関係を得ることができた ($R^2=0.66$, 図I-10)。



図I-10 森林火災前後でのボクセルの消失量（体積）とコヒーレンス変化量（本来-1~ 1のレンジであるが、-255~ 255の8ビットレンジで表示）

この結果より、コヒーレンス値の減少（以前あった構造物がなくなった指標）と3次元データによって測定したボクセル消失量には関係あり、地上レーザerを用いた3次元データ解析が衛星レーダーの地上検証用に有効であることがわかった。

表I-2. 1986年から2015年におけるConfusion matrixによる正誤表

解析期間	1986~ 1990	1991~ 1995	1996~ 2000	2001~ 2005	2006~ 2010	2011~ 2015
抽出結果 :焼失 実測値 :焼失	1	12	10	17	14	18
抽出結果 :焼失 実測値 :非焼失	1	0	0	1	0	0
抽出結果 :非焼失 実測値 :焼失	19	8	10	3	6	2
抽出結果 :非焼失 実測値 :非焼失	19	20	20	19	20	20
総ポイント数	40	40	40	40	40	40
Kappa値	0	0.6	0.5	0.8	0.7	0.9
使用した衛星	Landsat 5	Landsat 5	Landsat 5,7	Landsat 5,7	Landsat 7	Landsat 8

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

生態学の現象を地上レーザーによって定量的に把握した研究はこれまでになく、世界初の研究と言える。また、カナダや同じ緯度にあるエストニアの森林状況でも確認したところ、自己間引きの法則が地上レーザーだけで評価でき、森林が最適な密度状態に保たれているかどうかを評価できるようになった。これらの解析手法は3次元データを用いた世界初の試みであり、独創性や汎用性が高い手法である。ボクセルを用いることで、災害前後の消失量を直接的に算出できた。さらに、フラクタル次元（自己間引きの法則）の解析もボクセルだけで行える。3次元データから得られるボクセル量が火災のリスクを表現でき、リスクが高い場所がどこかを判断できる技術が確立できた。

また、ボクセルを用いたバイオマス算出方法を提案ができた。これまでの材積主体のバイオマス計算ではなく、ボクセルを主体としたバイオマス計算を行うことにより、計測効率を飛躍的に向上できる。特に、森林災害前後で3次元データを自動で詳細にマッチングした技術（誤差5cm以下によるマッチング）を用いれば、地上レーザーによって現地で取得される作業効率を劇的に改善でき、バイオマス算出手法を容易となり、すぐにでも社会実装できる。

また、クラウド型解析をいち早く取り入れて衛星データの解析を行った。クラウド型解析には、主観が入りにくい共通のプラットフォームによるデータ解析が可能であるため、信頼性が保証される。国際環境政策を進める上で、森林の増減を客観的に評価するには、クラウド型解析技術を用いることが最も有効な手法である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

東京都では2012年5月に生物多様性地域戦略である「緑施策の新展開」を公表した。この施策では、緑の量を確保する取り組みだけでなく、生物多様性の保全に向けた緑の質を高める視点を重視している。その新たな緑指標の開発に、本研究で用いた地上レーザーによるデータ取得手法と本研究で開発された解析手法が新技術として採用を検討している。東京都が新たな植生図を2019年度に作成する上で、新技術を導入することを検討しており、その試験研究として2016年度と2017年度に地上レーザーを用いた試験研究を東京都と共同で行っている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

気候変動の適用策を検討する際、森林モニタリング手法（MRV）は非常に重要である。森林災害による変化量を3次元データより把握できると、MRVに対するデータ取得方法を大幅に改善できる。地上レーザーがそのために、最も効率の良い現地データ取得方法であることを実証できた。地上レーザーを用いて森林の最適密度を自動で指標化でき、森林火災前後での変化量を正確に把握できた。行政にすぐにも活用できる技術を提供できる。使用したレーザーセンサーも価格が安く、データ取得、解析のためのデータ準備（データ合成）、解析結果の解釈まですべて自動化できるため、地上レーザーをすぐに森林災害評価やモニタリング技術に活用できる。

地上レーザーを用いれば、人による計測誤差がないため、より詳細な成長量が計測できる。これまでのモニタリング期間を大幅に短縮できる。炭素吸収が多い森林をより早期に検知でき、病害や枯死した樹木をかなり早い段階で検知できる。森林構造変化を正確に把握できるため、炭素蓄積変化を確実に証明できる技術である。社会実装として、これらの正確な変化量の把握は森林災害に対する保険業務の事前評価もしくは事後被害度調査に大変有効である。自然災害保険に対して被害度を正確に把握できる最適な調査手法である。

クラウド型衛星データ解析であるGoogle Earth Engine（GEE）は、国際的環境政策を推進する共通プラットフォームとしてFood Agriculture Organization of the United Nations（FAO）が公式に認めた¹⁰⁾。FAOはGoogleとパートナー契約を結び、GEEを標準的に用い、Landsat衛星による経年的データから世界での森林増減をモニタリングしている。本研究で示したクラウド型解析ツールも環境政策へ貢献度が高い技術であり、その解析結果の現場検証用に地上レーザーと本解析手法を用いれば、効率が良く正確なモニタリングが行える。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 加藤 顕、沖津優麻、常松展充、本條 毅、小林達明、市橋 新：日本緑化工学会 41, 1, 169-174(2015), 森林の樹冠構造がヒートアイランド現象緩和機能に及ぼす影響」
- 2) 田村太壱、加藤 顕、小花和宏之、吉田俊也：日本緑化工学会 41, 1, 163-168(2015), 小型UAVによる空撮とSfMを用いた樹高計測
- 3) 加藤 顕：レーザー研究, 44, 5, 320-325(2016), 森林計測における3次元レーザー利用
- 4) A. KATO, H. OBANAWA, Y. HAYAKAWA, M. WATANABE, Y. YAMAGUCHI, and T. ENOKI: IGARSS IEEE International 2015, 2642-2645(2015), Fusion Between UAV-SfM and Terrestrial Laser Scanner for Field Validation of Satellite Remote Sensing
- 5) A. KATO, H. WAKABAYASHI, M. BRADFORD, M. WATANABE, and Y. YAMAGUCHI: IEEE IGARSS 2017, 2883-2886(2017), Tropical Forest Disaster Monitoring with Multi-scale Sensors from Terrestrial Laser, UAV, to satellite radar
- 6) JTS. SUMANTYO, N. IMURA, S. OISHI, T. YASAKA, RH. TRIHARJANTO, K. ITO, S. GAO, K. KAMBA, N. HATTORI, F. YAMAZAKI, C. HONGO, A. KATO, L. PERISSIN: IEEE IGARSS 2017, 5382-5385(2017)), L Band Circularly Polarized SAR Onboard Microsatellite
- 7) C. GOMEZ, K. KATAOKA, A. SAPUTRA, P. WASSMER, A. URABE, J. MORGENROTH, and A. KATO: Forum Geografi 31(1), 16-27(2017), Photogrammetry-based Texture Analysis of a Volcaniclastic Outcrop-peel: Low-cost Alternative to TLS and Automation Potentialities using Haar Wavelet and Spatial-Analysis Algorithms

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) A. KATO, M. BRADFORD, L. M. MOSKAL, K. KAJIAWARA, and Y. HONDA: Proceedings of Silvilaser 2015, 325-327(2015), Low Cost and Accurate Forest Monitoring Technology using a Portable Terrestrial Laser Scanner
- 2) 加藤 顕：森林科学 74, 20-24(2015), 地上レーザーを用いた正確なバイオマス測定
- 3) 加藤 顕、小花和宏之、早川裕式：第 26 回 日本熱帯生態学会年次大会講演集、19(2016), 無人航空機 (UAV) と地上レーザーを用いた熱帯林モニタリング
- 4) 加藤 顕、早川裕式、小花和宏之：日本写真測量学会平成28年度年次学術講演会発表論文集、45-46(2016), 無人航空機とレーザーを用いた自然災害地評価」
- 5) A. KATO, M. WATANABE, and H. WAKABAYASHI: Proceedings of 3rd EARSeL Workshop SIG on Forestry, 44(2016), Monitoring forest disaster from high precision UAV-SfM and TLS technologies
- 6) 田村太壱、加藤 顕：第128回日本森林学会要旨集、199(2017), 3次元点群データを用いた森林構造の把握
- 7) 多賀瑞希、加藤 顕：第128回日本森林学会要旨集、235(2017), Google Earth Engine を用いた亜寒帯林における森林火災モニタリング
- 8) 加藤 顕、陶山健一郎、南藤和也、田原美穂、八島大三：第128回日本森林学会要旨集、202(2017), 無人航空機と地上レーザーによる大規模森林モニタリング
- 9) 加藤 顕、若林裕之、早川裕式、小花和宏之、JTS. Sumantyo: 平成29年次学術講演会要旨集, (2017) Google Earth Engineと地上レーザーによる森林災害モニタリング
- 10) A. KATO, N. EGUCHI, and L. M. MOSKAL: Proceedings of Symposium on Systems Analysis in Forest Resources, (2017), Monitoring Deer Damage Loss using 3D data from UAV-SfM and Terrestrial Laser Scanner
- 11) 加藤 顕、第一回 千葉大学・若手植物科学の会要旨集 (2017)、無人航空機や3Dレーザーを用いた植物形態把握～ Bio Detectorとしての植物の環境応答能力～
- 12) A. KATO, A. OSAWA, A. T. HUDAK, C. A. SILVA, L. M. MOSKAL: Proceedings of Silvilaser 2017 (2017), Fractal dimension of trees using a terrestrial laser scanner

- 13) C. A. SILVA, A. T. HUDAK, L. VIERLING, C. KLAUBERG, A. KATO, A. CARDIL, and A. WEISKITTEL:
Proceedings of Silvilar 2017 (2017), Estimating individual tree aboveground carbon in a fast-growing Eucalyptus spp. forest plantation from airborne lidar data using a mixed-effects model
- 14) A. KATO, Proceedings of CU-MU Joint Symposium 2018 Toward the Research & Innovations for Food and Global Health, (2018), Estimating Ecosystem Services using 3D Remote Sensing Data
- 15) 加藤 顕、若林裕之、第129回日本森林学会大会要旨集 (2018)、地上レーザーによる森林災害評価法
- 16) 黒宮健佑、加藤 顕、江口則和、石田 朗、高知 (国内) 第129回日本森林学会大会要旨集 (2018)、地上レーザーによる立木密度の材積への影響評価
- 17) 神宏樹、加藤 顕、第129回日本森林学会大会要旨集 (2018)、地上レーザー測量による 3 次元データを用いた競争指数の開発
- 18) 浅見晟吾、加藤 顕、市橋 新、第129回日本森林学会大会要旨集 (2018)、全方位画像を用いた森林内構造の把握

(2) 主な口頭発表 学会等)

- 1) 加藤 顕、梶原康司、本多嘉明、第25回日本熱帯生態学会年次大会、京都大学 (2015)
「地上レーザーによる3次元データを用いた森林バイオマス推定」
- 2) A. KATO, H. OBANAWA, Y. HAYAKAWA, M. WATANABE, Y. YAMAGUCHI, and T. ENOKI: IEEE IGARSS 2015, Milan, Italy, 2015
“Fusion Between UAV-SfM and Terrestrial Laser Scanner for Field Validation of Satellite Remote Sensing”
- 3) A. KATO, M. BRADFORD, L. M. MOSKAL, K. KAJIWARA, and Y. HONDA: Silvilar 2015, La Grande Motte, France, 2015
“Low Cost and Accurate Forest Monitoring Technology using a Portable Terrestrial Laser Scanner”
- 4) 加藤 顕：第127回日本森林学会大会、日本大学生物資源科学部 (2016)
「地上レーザーとUAVを用いた森林災害モニタリング」
- 5) 三浦翔太、加藤 顕、大澤 晃：第127回日本森林学会大会、日本大学生物資源科学部 (2016)
「地上レーザーを用いた自己間引きに関わる樹形計測」
- 6) 田村太壱、加藤 顕、市橋 新、常松展充：第127回日本森林学会大会、日本大学生物資源科学部 (2016)
「地上レーザーと小型UAV を用いた森林の階層構造の評価」
- 7) 桐枝佑輔、加藤 顕、黒岩康博、田嶋幸一：第127回日本森林学会大会、日本大学生物資源科学部 (2016)
「UAVを用いたヤブツバキ林管理」
- 8) 加藤 顕、早川裕式、小花和宏之：平成28年度年次学術講演会、東京大学生産技術研究所 (2016)
「無人航空機とレーザーを用いた自然災害地評価」
- 9) 加藤 顕、小花和宏之、早川裕式：第 26 回 日本熱帯生態学会年次大会、つくば (2016)
「無人航空機 (UAV) と地上レーザーを用いた熱帯林モニタリング」
- 10) 加藤 顕、早川裕式、小花和宏之：日本写真測量学会平成28年度年次学術講演会、東京 (2016)
「無人航空機とレーザーを用いた自然災害地評価」
- 11) A. KATO, M. WATANABE, H. WAKABAYASHI: Proceedings of 3rd EARSeL Workshop SIG on Forestry, Krakov, Poland (2016)
“Monitoring forest disaster from high precision UAV-SfM and TLS technologies”
- 12) A. KATO, Google Geo for Good User Summit 2016, Mountain View, California (2016)

- “The power of 3D data to save the world forest resources”
- 13) A. KATO, The 7th The Indonesia Japan Joint Scientific Symposium, Chiba, Japan (2016)
“Forest Disaster Monitoring using Google Earth Engine, UAVSfM, and Terrestrial Laser Scanner”
 - 14) A. KATO, WWF Webinar (招待講演), <http://bit.ly/2lzKfPW> (2016)
“Forest Monitoring using 3D data from UAV-SfM technology”
 - 15) 田村太壱、加藤 顕：第128回日本森林学会、鹿児島 (2017)
「3次元点群データを用いた森林構造の把握」
 - 16) 多賀瑞希、加藤 顕：第128回日本森林学会、鹿児島 (2017)
「Google Earth Engine を用いた亜寒帯林における森林火災モニタリング」
 - 17) 加藤 顕、陶山健一郎、南藤和也、田原美穂、八島大三：第128回日本森林学会、鹿児島 (2017)
「無人航空機と地上レーザーによる大規模森林モニタリング」
 - 18) 加藤 顕、市橋 新：第13回 GISコミュニティフォーラム、東京 (2017)
「生態系調査効率化への挑戦 (ArcGIS onlineと全天球カメラを用いた市民参加型調査の試み)」
 - 19) 加藤 顕、若林裕之、早川裕弐、小花和宏之、JTS. Sumantyo：日本写真測量学会 平成29年次学術講演会、東京 (2017)
「Google Earth Engineと地上レーザーによる森林災害モニタリング」
 - 20) A. KATO: Sunnyvale, CA, USA, Google Earth Engine User Summit 2017 (2017)
“Forest Disaster Monitoring using Google Earth Engine”
 - 21) A. KATO, T. ALLOUIS, T. URUSHISAKI, and M. KOIKE: Montpellier France, Yellowscan International User Forum (招待講演), (2017)
“Tree Growth Detection Power using Yellowscan UAV Laser”
 - 22) A. KATO, H. WAKABAYASHI, M. BRADFORD, M. WATANABE, and Y. YAMAGUCHI: Fort Worth, TX, USA, 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (2017)
“Tropical Forest Disaster Monitoring with Multi-scale Sensors from Terrestrial Laser, UAV, to satellite radar”
 - 23) JTS. SUMANTYO, N. IMURA, S. ONISHI, T. YASAKA, RH. TRIHARJANTO, K. ITO, S. GAO, K. NAMBA, N. HATTORI, F. YAMAZAKI, C. HONGO, A. KATO, L. PERISSIN, Fort Worth, TX, USA, 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (2017)
“L Band Circularly Polarized SAR Onboard Microsatellite”
 - 24) A. T. HUDAK, B. C. BRIGHT, A. KATO, L. M. MOSKAL, and R. OTTMAR: Squamish, WA, USA, Symposium on Systems Analysis in Forest Resources (2017)
“Spatially explicit estimation of fuel consumption from pre- and post-fire traditional and point cloud measurements of fuels”
 - 25) A. KATO, N. EGUCHI, and L. M. MOSKAL, Squamish, WA, USA, Symposium on Systems Analysis in Forest Resources (2017)
“Monitoring Deer Damage Loss using 3D data from UAV-SfM and Terrestrial Laser Scanner”
 - 26) 加藤 顕：松戸、千葉大学新産業プロデュース活動 第25回TL0フリートーキング (2017)
「無人航空機とAIによる植物モニタリングシステムの確立」
 - 27) 加藤 顕：亥鼻、第一回 千葉大学・若手植物科学の会 (2017)
「無人航空機や3Dレーザーを用いた植物形態把握~ Bio Detectorとしての植物の環境応答能力~」
 - 28) A. KATO: Sunnyvale, CA, USA, Geo for Good User Summit 2017 (2017)
“Efficient Forest Monitoring using GEE, i-Tree, and 360 camera Theta”
 - 29) A. KATO, A. OSAWA, A. T. HUDAK, C. A. SILVA, L. M. MOSKAL, VA, USA, Silvilaser 2017 (2017),
“Fractal dimension of trees using a terrestrial laser scanner”
 - 30) C. A. SILVA, A. T. HUDAK, L. VIERLING, C. KLAUBERG, A. KATO, A. CARDIL, A. WEISKITTEL, Blacksburg,

VA, USA, Silvilaser 2017 (2017)

“Estimating individual tree aboveground carbon in a fast-growing Eucalyptus spp. forest plantation from airborne lidar data using a mixed-effects model”

- 31) A. KATO, 南京, 中国, Urban Ecosystem Services Workshop: Progress of 3-D Urban Ecology & Environment Using Advanced LiDAR Technology (招待講演), (2017)

“Forest Disaster Monitoring using multi scale and multi-platform technology”

- 32) A. KATO, 東京, 地球観測ミッション合同PIワークショップ(2017)

“Forest disaster monitoring using ALOS 2 and Terrestrial Laser Scanner”

- 33) A. KATO, Bangkok, Thailand, CU-MU Joint Symposium 2018 Toward the Research & Innovations for Food and Global Health (2018)

“Estimating Ecosystem Services using 3D Remote Sensing Data”

- 34) A. KATO, 東京, Google Earth Engine Mini Summit 2018 in Tokyo (招待講演), (2018)

“Forest Disaster Monitoring using GEE and 3D data”

- 35) 加藤 顕、若林裕之、高知

第129回日本森林学会大会 (2018)、地上レーザーによる森林災害評価法

- 36) 黒宮健佑、加藤 顕、江口則和、石田 朗、高知 (国内) 第129回日本森林学会大会 (2018)、
「地上レーザーによる立木密度の材積への影響評価」

- 37) 神宏樹、加藤 顕、高知 (国内) 第129回日本森林学会大会 (2018)

「地上レーザー測量による 3 次元データを用いた競争指数の開発」

<ポスター発表>

- 1) 加藤沙季、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「機械学習を用いた樹木成長量の要因分析」

- 2) 田中絢子、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「無人航空機を用いた樹高成長量の測定」

- 3) 真野一樹、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「3次元データを用いた植物簡易モニタリング手法の確立」

- 4) 浅見 晟吾、加藤 顕、市橋 新、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム(2018)

「全方位画像を用いた森林構造把握」

- 5) 黒宮 健佑、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「地上レーザーによる簡易的樹幹測定」

- 6) 神 宏樹、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「地上レーザーを用いた樹冠フラクタル次元の測定」

- 7) 浅見晟吾、加藤 顕、市橋 新、高知、第129回日本森林学会大会 (2018)

「全方位画像を用いた森林内構造の把握」

7. 研究者略歴

研究代表者

加藤 顕

ワシントン大学 (University of Washington, USA) 森林資源学科 (College of Forest Resources、現College of the Environment) 卒業、Ph.D.、現在 千葉大学 園芸学研究科 助教

II. 成果の詳細

II- 1 地上レーザーを用いた森林域での自然災害評価法の確立

国立大学法人千葉大学

園芸学研究科

緑地環境学コース

加藤 顕

平成27～29年度累計予算額：26,860千円（うち平成29年度：8,799千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

地球の陸地面積の30%を覆っている森林は、地上における二酸化炭素の吸収源であり、炭素貯蔵庫である。しかし、森林火災によって大量の炭素が大気中に放出され、近年地球温暖化に影響を及ぼしている。地上レーザーデータを用いて森林災害を評価する手法を確立するために、森林災害が頻繁に生じる場所で3次元データを取得した。森林災害評価法としては、これまで人が目視で行っていた手法から、3次元データを用いた解析手法を確立することを目的としている。森林災害が多発する遠隔地で、森林域におけるモニタリング手法を確立することは、リモートセンシング技術を環境政策に適用する大変重要な課題である。森林災害でも、特に「森林火災」と「風倒害」に注目して研究を行っている。研究では、小規模の風倒害に関してはオーストラリア熱帯林で、大規模森林火災に関してはカナダ亜寒帯林で研究を行った。また、カナダと同じ緯度にあるエストニア亜寒帯林でも3次元データの取得を行い、確立した手法の汎用性を検証した。ボクセルという手法を用い、森林火災の場合は、災害前後のデータより消失した可燃性バイオマスの量を算出し、風倒害の場合は、ボクセルの垂直分布変化を用いて判別できることが実証できた。さらに、正確な自動3次元データ合成解析手法を開発し、より効率の良い3次元データの利用が可能となった。森林災害を未然に防ぐには、森林密度が過密となり、バイオマス蓄積が進むことを把握する必要がある。その判断根拠として自己間引きの法則に注目した。自己間引きの法則が地上レーザーだけで評価でき、森林が最適な密度状態に保たれているか評価できるようにした。衛星データからの解析と比較するために、クラウドベースによる解析を用いて広域の対象地に対し、1980年から現在までのLandsat衛星画像から森林火災が生じた場所を特定した。また、衛星レーダー解析にはコヒーレンス変化量に注目して森林火災場所を特定した。結果の検証には、地上レーザーによって把握できた森林火災前後でのボクセルの消失量を用いた。その結果、衛星レーダーによるコヒーレンス値の変化量と高い相関関係あった。これらの結果より、地上レーザーは現場検証データとして大変有効な手法であることを実証できた。ボクセルと従来の材積算出結果には高い相関関係がある訳ではない。しかし、ボクセルを用いた構造から直接バイオマス計算ができるため、樹冠の広がりなど個体差を考慮でき、広葉樹などの不定形樹木に対しては大変有効である。また、これらの変化量抽出手法は、森林災害に対する保険業務の事前評価もしくは事後被害度調査に大変有効な手法である。

[キーワード]

森林火災、風倒害、バイオマス、グランドトゥルース、3次元、無人航空機、衛星レーダー、クラウド型解析、MRV、自然災害保険

1. はじめに

地球の陸地面積の30%を覆っている森林は、地上における二酸化炭素の吸収源であり、炭素貯蔵庫である。しかし、森林火災によって大量の炭素が大気中に放出され、近年地球温暖化に影響を及ぼしている。特に、亜寒帯林は森林面積が熱帯林に次いで2番目に大きく、亜寒帯林で発生している森林火災が地球温暖化に与える影響は大きい。これまでは国際的取り組みとして熱帯林の保全に対するREDD+のような環境政策が世界的に展開している。REDD+ではMeasuring, Reporting, and Verification(MRV)と呼ばれる森林モニタリング手法が確立しているが、森林火災が深刻な亜寒帯林に対する森林モニタリング手法

は確立していない。MRVではLandsat衛星画像による時系列解析を主体とした森林モニタリング手法が主に用いられている。

森林域における自然災害（森林災害）として森林火災の頻度、強度、規模は、地球温暖化により影響されるため¹⁾、森林火災をモニタリングすることは今後より重要となる。本研究の対象地であるカナダでは、1960年代～1990年代の過去40年間で、森林火災による森林の焼失面積は増加している²⁾。また対象地内での森林火災の発生回数は、過去およそ50年間で大きな増加は見られない。しかし、年間総焼失面積は増加傾向にあることから、一度に広範囲が焼失する森林火災が増加している³⁾。

森林災害が多発する遠隔地で、森林域におけるモニタリング手法を確立することは、リモートセンシング技術を環境政策に適用する大変重要な課題である。森林災害が生じた場合、より早急に、そして正確に災害状況を把握する必要性は、温暖化の影響を把握するためには大変重要である。また、森林災害は広域に及びこともあるため、州や国レベルのモニタリング手法も同時に確立しなければならない。そこで本研究では、広範囲モニタリングに、Google Earth Engine (GEE)⁴⁾によるクラウドベース解析を採用し、短時間での広域モニタリングができることを示せた。また、光学衛星では取得できない構造変化を、日本の衛星であるALOS PALSAR及び、ALOS 2のレーダー画像を用いた。衛星レーダーのための地上検証用データ収集に地上レーザーを用い、その有効性を検証した。

リモートセンシングデータの環境行政への活用は、解析結果を効率良く提供できるかどうかが重要である（図Ⅱ-1）。そのためには、「即応的」にデータが取得でき、「経年的」にデータをアーカイブでき、そして「正確性」の高い結果を提供する必要がある。その点において本研究で用いる地上レーザーによる3次元データの活用は、3つの目的に見合う技術であると考えられる。森林災害というテーマは、最もその効果が発揮できる分野の1つである。これまでの手法の課題として、現地検証には目視判断などの簡易的な手法しかなく、森林災害に対する定量的な評価手法が確立されていない。そのため、より正確で効率の良い現地調査手法が望まれている。従来の航空機レーザーや、人の手による現地調査では、広域を調査するには、どちらも多大なコストや時間がかかる。そのため、衛星データ（特に衛星レーダーなどの森林構造を把握できる技術）に十分な現地検証データが提供できない（図Ⅱ-2）。特に、遠隔地では従来の人による調査では、定期的にモニタリングができない。そこで、可搬性の優れている地上レーザーセンサーを現地に持ち込み、その森林の詳細な3次元データを短時間（数分）で取得し、データを持ち帰ってオフィスのコンピュータで必要な情報が抽出できれば、最も効率の良い森林測定技術である。近年の新たなセンサー（例：VZ400）は半径600m以上の3次元データが取得できる。いつでも、どこでもデータ収集が可能であるため、高頻度データの取得が可能である。さらに、樹木の測定精度（複数回測定した際の誤差分散）が人による計測よりも正確である。広域で取得される3次元データからwall to wall（完全対応）による衛星データと3次元データの直接比較が可能となるため、グランドトゥールースとしては最適な手法である。これらの理由から地上レーザーによる森林災害を評価する手法を本研究では検討した。

2. 研究開発目的

地上レーザーデータを用いて森林災害を評価する手法を確立するために、森林災害が頻繁に生じる場所で3次元データを取得し、衛星画像を用いた解析結果と比較した。森林災害評価法としては、これまで人が目視で行っていた手法から、3次元データを用いた解析手法を確立することを目的としている。森林災害前後の状況から3次元データ上で失われた量を定量的に把握し、衛星データの現地検証（グランドトゥールース）データとして用いることを目指す。

また、森林生態学の法則を取り入れて、森林状況を評価することも検討した。森林生態学の法則とは、「自己間引きの法則」であり、対象とする森林が最多密度に達しているかどうかを判断する。森林が最多密度に達すると、可燃性バイオマスの蓄積が進むため、森林火災のリスクが高くなる。風の強い場所では、風倒害が生じやすくなる。森林の密度状況を地上レーザーによって評価した。

本研究では、3つの解析スケールを考慮した（図Ⅱ-3）。1つ目は詳細なスケールとして、地上レーザーによって得られた3次元データから、単木単位でフラクタル次元による樹形解析を行い、自己間引

リモートセンシングデータを用いた即応性の高いデータを提供

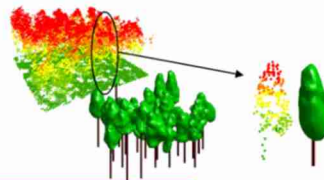
これまでの問題と背景

- 人間活動に対する地球環境の反応
⇒「治癒可能」or「機能不全」
- 環境問題の越境問題
⇒広範囲な地球環境データ利用
- 「マクロ」と「ミクロ」を繋ぐ環境モデル
生態系利用の強度を現実的に評価



正確性:

「今」起きていることを正確に把握
生態系モデルへ詳細なデータを
提供



リモートセンシングデータの高度利用

「見える」データから即応性の高い「使える」データへ

1. 即応性
災害等の情報をすぐにデータを取得し、提供する。
2. 経年性
データのアーカイブ化により、「変化」を抽出。
3. 正確性
モデルの予測ばかりでなく実データを活用

図 II-1 環境政策のためのリモートセンシングデータの利用

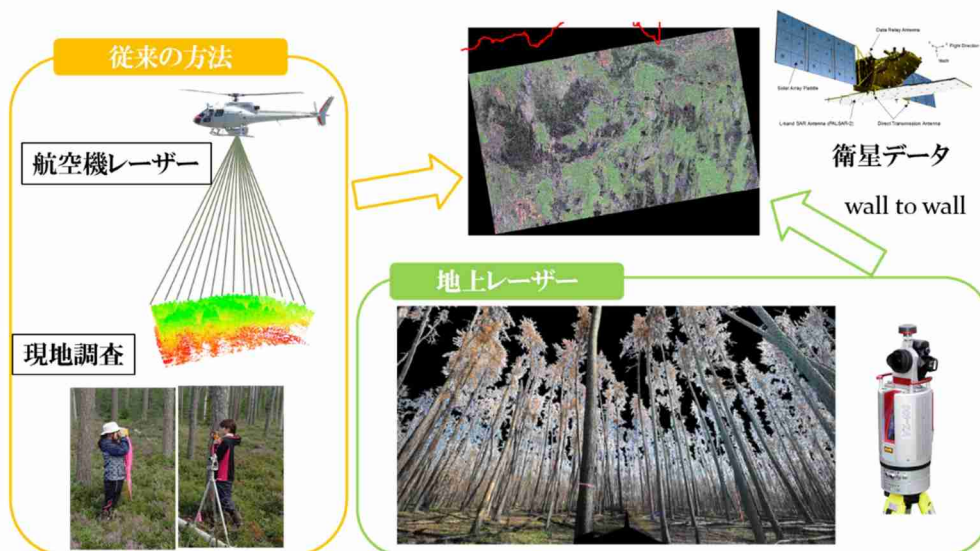
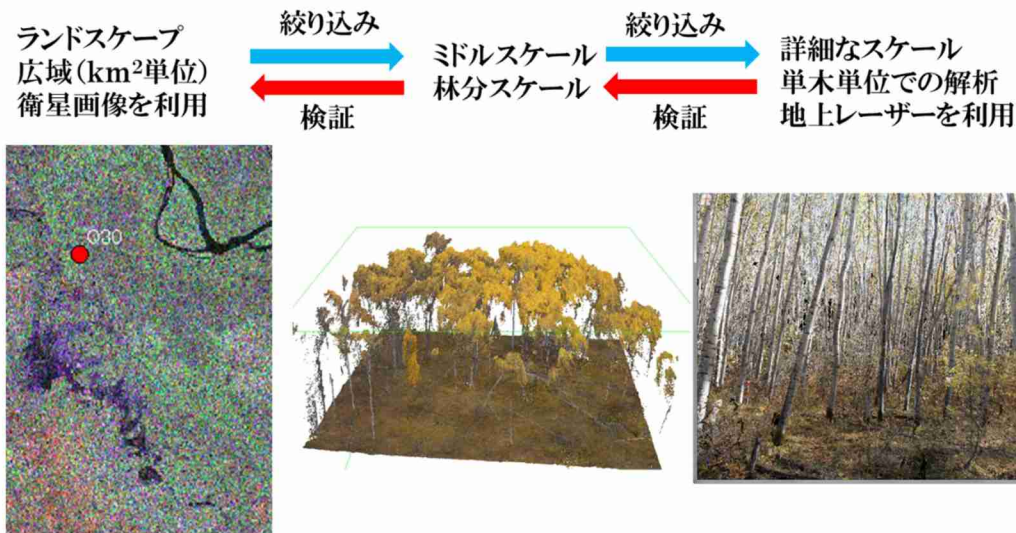


図 II-2 衛星データに対する現地検証用データとしての地上レーザーの活用

きの線を自動で作成できるようにした。2つ目は、単木ではなく、まとまった林分単位（森林）単位として、ボクセルによる解析を行い、災害による消失した空間体積を自動で算出し、森林災害を評価できるようにした。3つ目は、広域スケールとして、衛星画像による森林災害地の把握と地上レーザーによる現地検証能力を検証した。

森林災害評価で重要な点は、災害前後の変化を正確に把握することである。森林内部での変化は、衛星データでは把握が難しいため、地上レーザーを用いて樹冠内部の構造を把握しなければならない。地上レーザーを用いることで、森林の空間占有率（バイオマス量の変化量）を正確に把握できるため、最も効率的なグラントゥールズデータが提供できる。例えば、日本の衛星であるALOS-2は、これまでよりも高解像度のLバンドレーダーを搭載しており、森林構造の変化をより正確に把握できる。これまで不可能であった詳細な森林火災の消失量を3次元データから算出し、衛星レーダーによる結果と比較できるようにすることで、現地モニタリング手法ができる大変重要な研究課題である。これら最新の技

広範囲を詳細にモニタリング



図Ⅱ-3 地上レーザーとレーダー画像を比較し、広範囲を詳細にモニタリング

術を用いて、森林災害を評価することが本研究課題の目標である。

本研究では、以下に述べる3つの課題に取り組んだ。

- (1) 地上レーザーによる3次元データを用いて森林災害を評価する手法を確立する。
- (2) 地上レーザーと生態学の法則を用いて林内状況を定量的に解析する手法を確立する。
- (3) 衛星データのグラントゥルースとして地上レーザーによる3次元データの有効性を検証する。

3. 研究開発方法

森林災害でも、特に「森林火災」と「風倒害」に注目して研究を行っている。研究では、小規模の風倒害に関してはオーストラリア熱帯林で、大規模森林火災に関してはカナダ亜寒帯林で研究を行った。また、カナダと同じ緯度にあるエストニア亜寒帯林でも3次元データの取得を行い、確立した手法の汎用性を検証した。

森林火災に関しては、森林火災前後で焼失したバイオマス量を計測する必要がある。これまでの研究では、森林火災には、気象条件、地形、バイオマス蓄積が直接関係しており⁵⁾、特に地形とバイオマス蓄積量は3次元データから得ることができる。森林火災の種類は様々であり、Prescribed fire（下層植生のみのコントロール可能な延焼）からCrown fire（樹冠に達するほどのコントロール不可能な強力な延焼）までである。本研究ではこのような様々な強度の森林火災に対応する評価手法を地上レーザーから提供することで、森林火災に対する地上レーザーの有効性を示す。風倒害に関しては、倒れることによる森林の垂直分布の変化を3次元データから把握できる手法を確立する。

3-1. 研究対象地と現地調査

森林災害地、特に熱帯と亜寒帯の森林データを取得するため、熱帯林はオーストラリア ケアンズ近郊にある Robson`s Creek を対象とした（図Ⅱ-4）。Robson`s Creek はスーパーサイトとして、オーストラリア政府が定める熱帯林研究のための調査場所である。長期間の計測データが行われている。また、ケアンズ近郊は台風が頻繁に発生する場所として知られており、高木の樹木による風倒害が頻繁に生じる地域である。また、25m以上の巨木は、25ha内の全立木のわずか10%しか存在しないにも関わらず、全バイオマス量の50%を占めている。数本の巨木が風により倒されることで、全体のバイオマス蓄積量が大きく変化する。

亜寒帯林はカナダ、ノースウェスト準州、ウッドバッファロー国立公園（北緯60度00時19分、西経111度53時26分付近）を対象地とした（図Ⅱ-5）。対象地はアルバータ州北東部からノースウェスト準州南

部にかけて広がっており、総面積44,807km²もの広域を研究対象地とした。研究対象地内の林分は亜寒帯林であり、主な構成樹種はポプラ (*Populus tremuloides*)、バンクスマツ (*Pinus banksiana*)、トウヒ (*Picea mariana*) などである。トウヒは、林冠で種子を保持し、火災直後に多くの種子を散布し発芽する特徴的な樹種である。最寒月1月と最暖月7月の日別平均気温はそれぞれ約-24℃、約16度、年降水量は約250mm、年降雪量は約1500mmである。単一樹齢の一斉林であり、過去の研究で、「自己間引き」が生じていることが証明されている場所である⁶⁾。アスペン林の一部の調査地では風倒害によって高木の個体群密度が減少している。また、バンクスマツの調査地では2015年の森林火災により多くの個体が燃えており、森林火災後によって調査地内では急激に個体密度が減少している。

カナダでは2種類の地上レーザーを用いて実験をしており、広範囲を取得できる長距離型地上レーザーを用いたデータ取得場所では、複数個所に地上レーザーを設置し、データを補完し、バンクスマツのサイトに50m x 50mの調査区を2カ所設置し、3次元データを森林火災前後でデータ取得ができた。さらに、中距離型地上レーザーによる簡易なデータ取得方法を検討するために、公園の道路沿い10kmおきに半径10mの円形データ取得し、合計36か所の3次元データ取得した。また、最適密度かどうかを検証するために、バンクスマツ林、アスペン林で各3か所ずつ調査地 (各20m x 20m) を設置した。本研究対象地では、森林火災が2015年に大規模に生じており、本研究は2012年に以前に長距離型地上レーザーによりすでに取得しているデータを利用し、森林火災前のデータとし、森林火災後のデータは2015年にデータを取得した。

同じ緯度にあるエストニアの亜寒帯林も調査対象地とした (図Ⅱ-6)。エストニアの亜寒帯林は、カナダのサイトと比較できるようにヨーロッパアカマツ (*Pinus sylvestris*)、ヨーロッパハンノキ (*Alnus glutinosa*)、オウシュウトウヒ (*Picea abies*) の樹種がある場所で調査プロットを設置した。エストニアのHiiumaa島で6プロット、Jumindaで7プロット、10m x 10mの調査区を設定し、短距離型地上レーザーによる3次元データを取得した。

地上レーザーと同じ場所で、人の手による森林計測も行い、半径5mの円形調査区を設置した。平均樹高が5m以下のプロットは半径1mの調査区とした。プロット内で樹高が1.3m以上の個体の樹高、枝下高、胸高直径、中心からの距離、北を基準とした水平角を計測した。樹高はVertexIV (Haglof社) を用い計測を行い、立木位置図を作成するために牛方式トラコン (牛方商会社) を使用した。2015年~2017年の3カ年以内で、各年8月にエストニア、8月~9月にカナダ、11月にオーストラリアで現地調査し、地上レーザーによるデータ取得とともに、毎木調査も行った。

3-2. 地上レーザー

本研究で使用した地上レーザーは3種類あり、長距離型レーザーにVZ400 (RIEGL社製) を用い、中距離型レーザーにTX5 (Trimble社製) を用い、短距離型レーザーにLMS511 (SICK社製) を用いた。それぞれのセンサーの特徴は、VZ400は最大照射距離が600mあり、TX5は最大照射距離が120mあり、LMS511は最大照射距離が40mである (表Ⅱ-1)。森林内でレーザー照射をした場合、幹などの構造物によって遮蔽される。調査地では複数個所でセンサーを設置し、幹などの陰になった場所をデータ補完した。3種類のレーザーを使用した理由として、VZ400は1箇所取得できるデータ量が多く、市販されている地上レーザーセンサーの中ではトップクラスであり、最も詳細な現地検証用データを取得できる。本研究では富士設計株式会社所有のVZ400 (RIEGL社製) を使用した。広範囲でのデータ取得が可能であるため、カナダでの50m x 50mの大面积プロット (図Ⅱ-7) やオーストラリアの熱帯林での半径10mのプロット (図Ⅱ-8) で利用した。TX5は、中距離センサーとして、短時間で効率よく道路沿いの森林火災現場での3次元データの収集に用いた。LMS511はVZ400に比べ、値段が1/10以下と各段に安く、どこでも持ち運びができるため、エストニアの調査地で用いた。

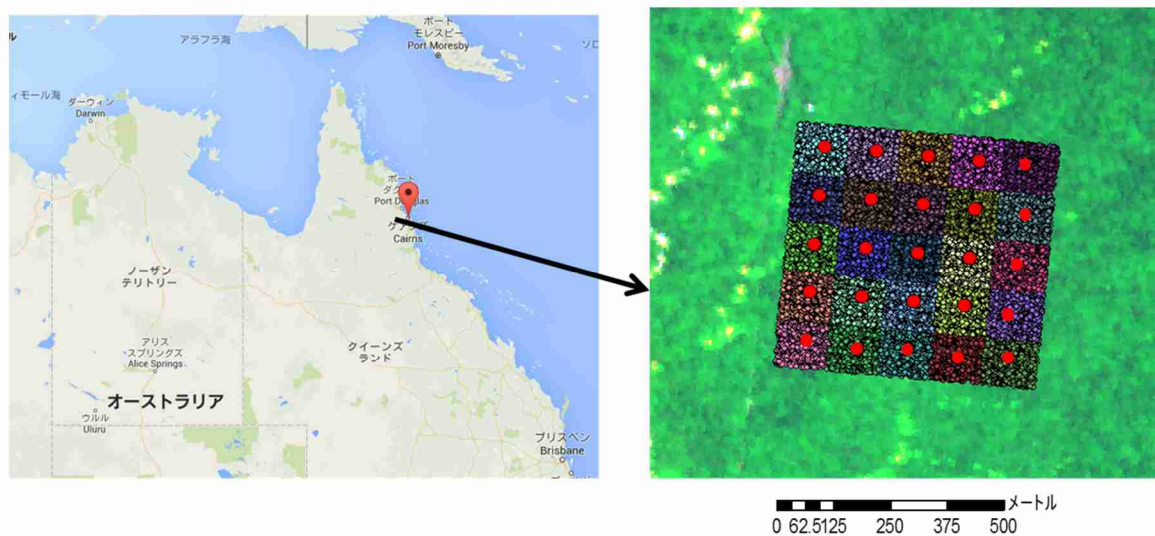


図 II-4 熱帯林調査地であるオーストラリア Robson`s Creek

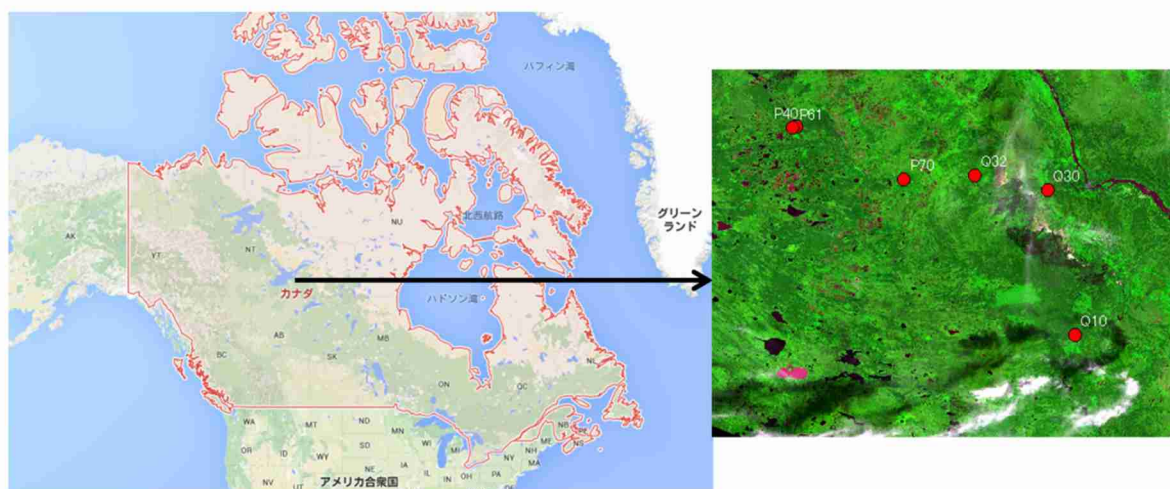


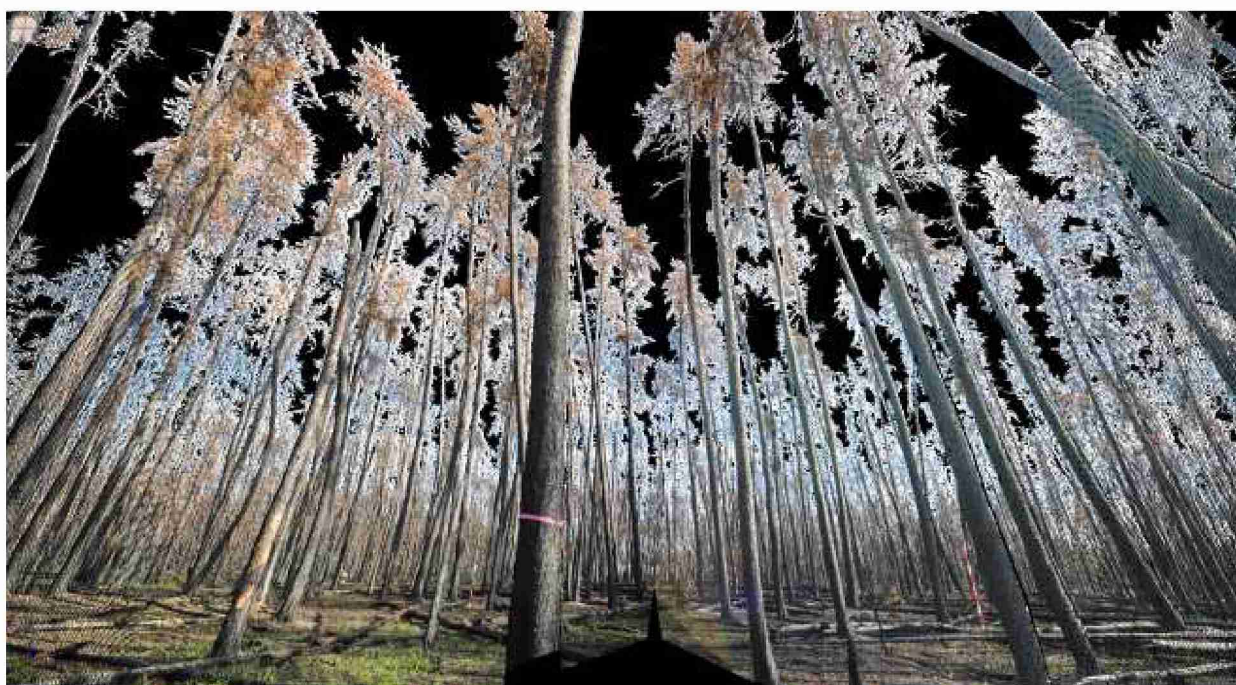
図 II-5 亜寒帯林調査地であるカナダ ウッドバッファロー国立公園



図 II-6 亜寒帯林調査地であるエストニアでの調査地

表Ⅱ-1. 本研究で主に使用した3種類のレーザーセンサー

センサー名	VZ400 (RIEGL 社製)	TX5 (Trimble 社製)	LMS511 (SICK 社製)
レーザー波長 最大照射距離 計測レンジ	1550 nm (近赤外域) 600 m 水平 360° x 垂直 100°	905 nm (赤外域) 120 m 水平 360° x 垂直 180°	905 nm (赤外域) 40 m 水平 360° x 垂直 150°
	長距離型 	中距離型 	短距離型 



図Ⅱ-7 カナダで取得した地上レーザーによる森林火災後の3次元データ。高密度点群データにカメラから取得した色を付けている。二次元の写真画像に見えるが、カメラによる写真撮影と同期してレーザー照射を行っているため、点群に色が付いた3次元データである。

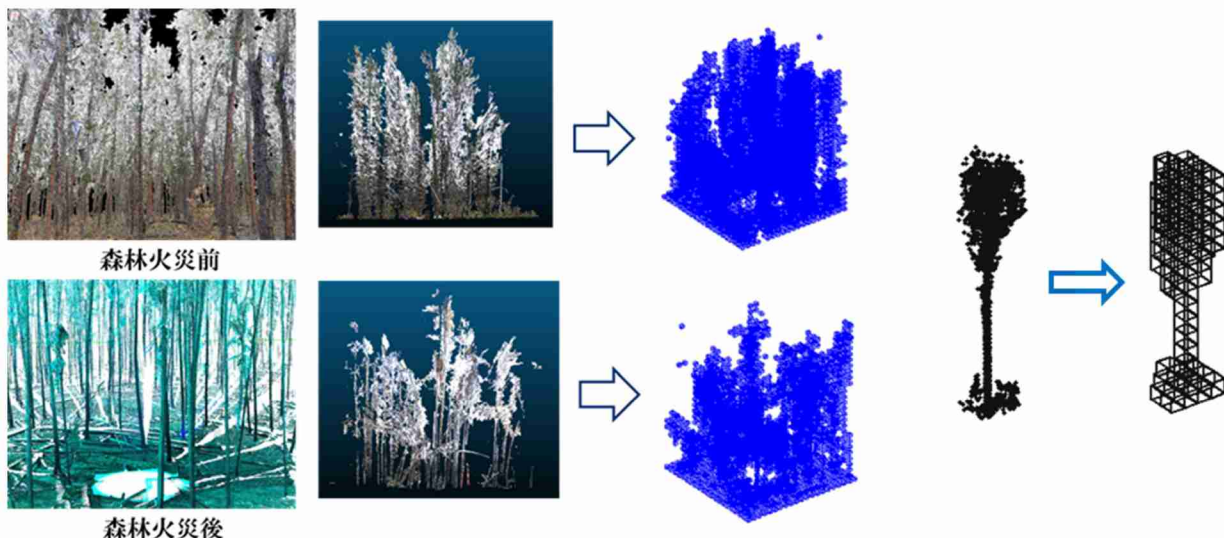


図Ⅱ-8 オーストラリアで取得した地上レーザーによる風倒木のサイトでの3次元データ。高密度点群データにカメラから取得した色を付けている。二次元の写真画像に見えるが、カメラによる写真撮影と同期してレーザー照射を行っているため、点群に色が付いた3次元データである。

3- 3. 地上レーザーによる3次元データを用いて森林災害を評価する手法を確立する。

本研究対象であるカナダの森林火災地域において、森林火災前後で地上レーザーによる3次元データを取得した。カナダの森林火災地域は、森林内の可燃性バイオマスの量が蓄積することで、森林火災のリスクが高まる。森林内に可燃性バイオマスの蓄積があると、火が延焼する際に、下層植生から森林上部に火が燃え移り、Crown fireとして一切コントロールができない大規模森林災害となる。よって、3次元データを活用して森林構造を把握することは、そのリスクを事前に把握できる。

現地調査では、複数の箇所に設置した地上レーザーセンサーから得られた3次元データを合成することで、1カ所だけでは把握できない樹木形状を補完した3次元データを取得した。地上レーザーによる3次元データは、センサー周辺でデータ密度が一番高く、センサーから離れるほど密度が低くなるため、データを均一化する必要があった。ボクセル⁷⁾という手法を用い、3次元空間内で地上レーザーの点が1つでもある場合はボクセルを作成するようにした。その結果、点密度が偏在しない標準化したデータを作成することができた。また、レーザーの照射位置による点密度の影響を最小化することができた。取得した地上レーザーから森林構造の変化を把握するために、森林火災が生じる前後でデータを取得し、その減少量を把握した(図Ⅱ-9)。図Ⅱ-9より、ボクセルで森林火災によって減少した樹木の形状を特定できるようにした。森林火災前のデータがない場合は、森林火災が生じた場所の近隣の火災で燃えなかった森林を「火災前のリファレンスデータ」として取得し、森林火災による災害強度を計測するようにした。



図Ⅱ-9 森林火災が生じた場所での3次元可燃性バイオマス量の変化を把握（左図：森林火災前後で地上レーザによって取得したデータの様子、中央図：同じ場所データを抽出した3次元データの様子、右図：その3次元構造を把握するために、ボクセル法によってデータを標準化した結果）

風倒害に関して、オーストラリアの25haもの広大な熱帯林を対象に風倒害のあった場所を特定することは容易ではない。そのため、無人航空機によってデータを収集することで風倒害が生じている地域を特定した。熱帯林対象地で2015年11月、2016年11月、2017年11月の3回データ取得し、その表面形状

(Digital Surface Model, DSM) の標高値の変化から風倒害による樹形変化を把握した。使用した無人航空機はPhantom 2, 3, 4 (DJI社製) であり、ドローンと呼ばれるマルチコプターを使用した。本研究で用いたドローンは安価に購入できるものであり、途上国でもデータ取得が可能である。ドローンに搭載されたカメラを使用し (Phantom 2ではニコン製デジタルカメラを別途搭載し、Phantom 3と4では搭載済のDJI社製カメラを使用した)、ドローンを飛行させながら1~2秒間隔でインターバル撮影をした。その結果、異なる角度で空撮した画像を得ることができた。様々な角度で撮影したデータからStructure from Motion (SfM) と呼ばれる手法を用いることで写真画像から3次元データを作成した⁸⁾。SfMとは、従来のステレオ画像による3次元可視化の際に用いる写真測量の技術を自動化したものであり、写真画像だけから3次元点群データが作成できる。様々な角度から撮影された写真画像があれば、対象物の3次元データを自動で作成できる。作成された3次元データよりDSMを作成した。

地上レーザはセンサーから細かいレーザ光が多数照射され、物体から跳ね返った場所を特定する技術である。レーザ光の直径が小さい場合は、レーザ光に波形解析を用いることでより高密度に点群データを取得できる。航空機および地上レーザでは、森林下層の状況も3次元データとして取得できる。その一方で、UAVによる空撮写真画像からSfMによって作成した3次元データは、写真に写されたものしか3次元化ができないため、空撮画像から森林内部のデータを取得することは難しい。しかし、樹冠表面形状だけであれば、広域をドローンで効率良く取得できるため、安価で3次元データ作成できる。SfMの3次元化処理は、Photoscan Professional (Agisoft社製) を使用し、ドローンによって空撮した画像データだけから、3次元データを作成した。ドローンによる空撮画像から3次元点群データ、DSM、オルソフォトなどを自動で作成する (図Ⅱ-10)。



図 II-10 ドローン（Phantom 4, 左）とドローンによる空撮画像から作成した3次元データ（中央：色付きDSM, 右：DSM）

本研究では3次元データをボクセルに変換し、森林災害を評価した。ボクセルによって表される3次元データは、その森林の空間占有率であり、森林の地上部構造データである。ボクセルに注目した理由として、広域のモニタリングのためには衛星レーダー画像を用いることができ、森林の構造変化を把握することが可能である。ボクセルの空間分布は衛星レーダー画像解析には必要な詳細なグランドトゥールースデータとなる。これまでの研究では、地上測定データとしてバイオマス（重さ）に注目していたが、バイオマスは森林構造（森林形状）と必ずしも一致しない。そのため、バイオマスだけでは災害評価を表現するには限界があった。より正確な森林状況を衛星データと比較する上で、空間占有率を定量化するボクセルを用いた森林災害評価法を確立した。

$$\text{森林災害評価} = (\text{災害前}) \text{ボクセル数} - (\text{災害後}) \text{ボクセル数}$$

特に、森林火災や風倒害に関しては、

$$\text{森林火災評価} = \text{森林火災前後で焼失したボクセル数}$$

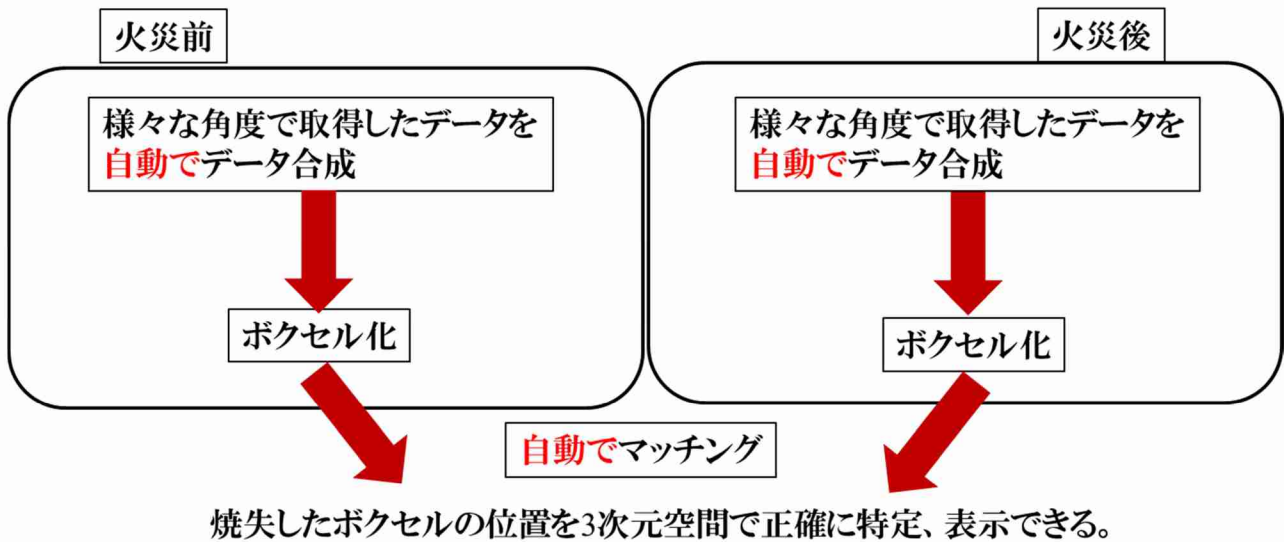
$$\text{風倒害評価} = \text{風倒によって損失、または下層に移動したボクセル数}$$

災害評価を定量的に行うために、災害前後でのボクセル数の変化に注目し、その消失量（または移動量）を定量化した。火災リスクは地上部森林構造物の量に関係があるため、その量に注目して解析を行った。森林火災前後でボクセルの減少量は、火災によって消失した可燃性バイオマスの量であり、森林災害評価の指標として利用できる。また、風倒害については、ボクセルの垂直分布変化であり、森林上部から下部への森林構造の変化量である。広域での森林災害をより正確に把握するには、衛星もしくは航空機データと併用し、森林火災場所を特定し、現地検証として地上レーザースエンサーを導入し、短時間で森林災害の強度をボクセルの消失量（変化量）を取得できる。ボクセルサイズを0.25mとした。

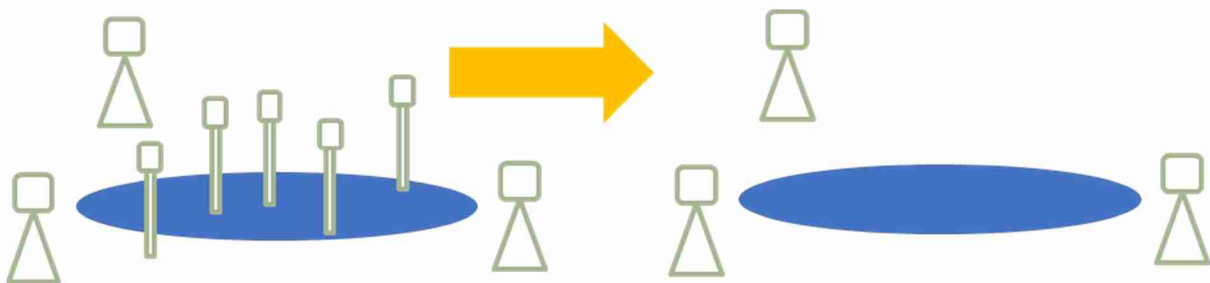
ボクセルによって、森林災害前後の空間体積を定量的に算出できるが、これまでの地上レーザースは位置合わせが自動で行われる訳ではなく、作業で3次元データを合わせる必要があった。特に、森林災害前後のデータでは、同じ樹木形状をしていない。そこで、樹冠形状から自動で特徴点を抽出し、樹木形状を森林火災前後で3次元データをマッチングさせるプログラムを作成した。3次元データを取得し時に、位置情報（GPS情報）を入力していなくて、GPS情報が3次元データに対応していれば、自動で付加できるようにした。さらに、森林火災前後での3次元データも自動で合体できるようにした（図 II-11）。

従来「タイポイント」と呼ばれるリフレクター（反射鏡や反射板）を調査地内にランダムに設置し、そのタイポイントを共通点として、様々な場所や角度で取得した3次元データを合体しなければならなかった。本研究ではタイポイントを用いて手作業でデータを合体する後処理をすべて自動化することができた。これらの一連のプロセスを自動化することで、後処理にかかる時間を大幅に短縮することができた。また、現地でタイポイントを設置する作業も多大な時間を要した。3つ以上のタイポイントなしには、後処理で3次元データを正確に合成することができなかったため、3次元データを取得時に、センサーを

設置するすべての位置からタイポイントの位置を見える位置に移動して置かなければならなかった。しかし、本研究で開発したデータ合成手法は、こうした作業もすべて必要がなくなったため、現地でのデータ収集時間も短縮でき、より効率の良いデータ取得方法が確立できた（図Ⅱ-12）。



図Ⅱ-11 森林火災前後でのデータ合成の概念図（ボクセルサイズを0.25mとした）



図Ⅱ-12 タイポイントなしに様々な場所で取得された3次元データを合成可能

データ合成の際、樹木形状からの特徴点抽出には、樹頂点を含むデータの合成点をあらかじめ用意し、2時期で取得したDSMデータを比較し、その候補点が一致する場所を共通点として利用し、データ合成を行った。結果的に正確性は5cm以内でデータを合成できた。正確性の検証には、自動合成後のデータから、現地で設置したタイポイントの位置を確認し、データ合成による誤差の検証を行った。その結果、使用したすべてのデータで5cm以内の誤差でデータ合成ができた。

地上レーザーデータは本来位置座標が付いていないため、GPSであるGeoXT（Trimble社製）を使用し、地上レーザーから作成されたDTMデータ上でGPSの位置を捜し、GPSの位置座標を与えることで、3次元データ全体に位置座標を与えた。使用したGPS（外部アンテナ付）は森林内では50cm以内の誤差でデータ取得ができる。その結果、地上レーザーは50cm以内の誤差で衛星画像などの他に位置情報があるデータと重ねることが可能となり、比較できるようになった。

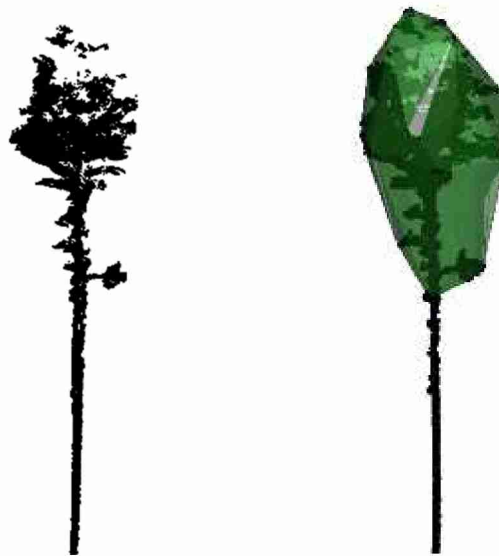
3-4. 地上レーザーと生態学の法則を用いて林内状況を定量的に解析する手法を確立する。

森林災害を未然に防ぐには、その森林密度が最適かどうかを把握できれば、森林管理が容易になる。本研究ではその判断する根拠として自己間引きの法則に注目した。自己間引きの法則とは、植物個体群の密度が高くなり、環境収容力に達する前に間引きが起こる現象のことであり、平均個体重と個体群密度の対数値には直線関係が成り立つと言われている。また、その傾きが $-3/2$ に近づくことから $3/2$ 乗則と

も呼ばれている。主に林業で使用されている林分密度管理図の最多密度曲線は自己間引きの $3/2$ 乗則が用いられている。過去の研究では樹木を伐倒して得た個体重のデータと樹冠フラクタル次元⁹⁾を用いて自己間引きが成り立つかどうかを4種の樹種で検証した⁶⁾。その結果、ニホンスギ(*Cyptomeria japonica*)、アカマツ(*Pinus densiflora*)の2種の樹種を用いて自己間引きを検証されており、それぞれ直線の傾きが-1.56と-1.49という結果を得ている。自己間引きの関係を調べるためには個体重を測る必要があり、樹木を伐倒しなければならないため、計測が困難な場合がある。本研究では地上レーザーを用いて3次元データを解析することで、 $3/2$ 乗の関係となるか検討した。本研究対象地であるカナダの国立公園は人の手が入っていない天然林であり、異なる樹齢の一斉林がある。また、カナダとエストニアの二か国は同じ緯度であり、異なる場所(国)においても自己間引きを検証することで、地上レーザーによって汎用性のある解析ができることを検証した。

各プロットにおいて地上レーザーによるデータ収集を行い、3次元点群データを取得した。取得した点群データから樹冠表面を表すDigital Surface Model (DSM)を作成し、地面高の表面を表すDigital Terrain Model (DTM)を作成した。さらに、DSMからDTMを引くことで地形の影響のない樹冠だけの高さを表すDigital Canopy Model (DCM)を作成した。作成したDCMから樹頂点の位置と樹高を自動で抽出した。

自己間引きの法則を検証するために樹冠フラクタル次元を用いた。樹冠フラクタル次元(D)とは、樹冠表面の凹凸の程度を表す指標であり、樹冠表面に葉が集中して分布する場合は平面的になりDが2に近づく。また、葉が樹冠内に均等に分布し、樹冠の表面に凹凸が生じるとDが3に近づく。そのため、樹冠フラクタル次元Dは樹冠内の葉の分布の指標である。フラクタル次元を推定する方法として本研究では異なる2種類の方法で検討した。凸包体を用いて樹冠体積を求める手法とボックスカウンティング法である。樹冠体積を本研究で注目した理由は、樹冠体積が個体群密度の $-3/D$ 乗に比例していたためである。樹冠体積と葉量は比例関係にあり、樹冠体積は葉量の $3/D$ 乗に比例する。べき乗係数 $3/D$ と自己間引きの法則は密接に関係している。個体群密度は葉量の $-3/D$ 乗に比例する。その理由として、林冠が閉鎖している場所では立木密度に関わらず単位面積あたりの葉量は一定と考えられる。樹冠体積と葉量の関係、葉量と個体群密度の関係から樹冠体積は個体群密度の $-3/D$ 乗に比例すると考えられている。よって平均樹冠体積と個体群密度の関係を把握した。その一方で、ボックスカウンティング法とは、対象物をボックスに細分化し、対象物を中に含んでいるボックスを数える方法である。対象物がフラクタルであればボックスの寸法を変えてもフラクタル構造が現れることから、ボックスの大きさと総ボックス数を両対数グラフで近似した際、傾きがフラクタル次元とすることができる。ボックスカウンティング法を樹冠の形状から解析することにより、樹冠フラクタル次元を推定できる。樹冠体積からフラクタル次元を推定するために、レーザーデータから樹冠体積と樹冠占有面積を計算するために樹冠凸包体を作成した(図II-13)。ヨーロッパアカマツでは76個体、ヨーロッパハンノキでは46個体、オウシュウトウヒでは73個体から樹冠凸包体を得た。さらに、ボックスカウンティング法を用いて樹冠フラクタル次元をレーザーデータから推定した。22mのヨーロッパアカマツ、21mのオウシュウトウヒ、23mのヨーロッパハンノキを各調査区から10個体ずつ抽出し、解析を行った。ボックスカウンティング法では様々なボックスを用いなければならないため、本研究ではそのサイズを0.25m、0.5m、0.75m、1mとした。樹冠形状を詳細に把握するために点群データから統計ソフトRのパッケージrLiDARを用いて葉の付いている樹冠部分に凸包体を作成し、凸包内部で囲まれた体積を樹冠体積(m^3)として算出した。



図Ⅱ-13 レーザで抽出した木(左)と樹冠の凸包体(右)

本研究では、地上レーザーセンサーを現地に持ち込んでデータを取得しているが、立木密度が高い地域や風倒害が生じている場所では、地上からのレーザー照射が樹冠まで到達しているか確認する必要がある。本研究で使用した VZ400 の高精度センサーは、最大照射距離が 600m まで到達するため、樹冠形状を把握することは性能上全く問題ないが、レーザー照射方向によっては幹によって遮断される場合も生じる。そのような影になる場所を補完するために、複数箇所センサーを設置し、データを補完するようにデータを取得した。

3- 5. 衛星データのグランドトゥールースとして地上レーザーによる3次元データの有効性を検証する。

単木単位での最適密度を把握する手法を確立し、さらに林分単位ではボクセル法を提案し、自然災害を評価する手法を提案した。広域スケールで手法では、地上レーザーの有効性を検証するために、長期間アーカイブ化されている Landsat 衛星画像に注目し、Landsat による衛星データだけで森林火災がモニタリングできるかどうかを検討した。従来、広域を対象に衛星データ解析を行った場合は、データを準備するためには、膨大なデータをダウンロードして使用するため、多大な時間がかかる(図Ⅱ-14)。しかし、近年クラウドベースによる解析が誰でも出来るようになり、データの準備が必要なくクラウド上で誰でも簡単にデータ解析ができるようになった。

その例として、Google Earth Engine(GEE)と呼ばれる Google が無料で提供するサービスがあり、無料で Google のサーバーと解析プログラムを用いることで、膨大なアーカイブから変化抽出や解析を容易に行える。本研究対象地はカナダの国立公園であり、44,807km² という非常に広大な地域を研究対象地であるため、短時間で広域を解析できる GEE が最適であった。インターネットがあれば、どこでも解析ができるため、先進国のみならず、途上国でもクラウド型衛星リモートセンシングデータ解析や活用が急速に普及すると考えられる。実際、国連 FAO などがすでに GEE の採用を決めており¹⁰⁾、近い将来世界標準化手法を用いて、様々な組織で利用されると想定し、本研究でも GEE を解析に用いた。

森林火災の場所を特定するために、衛星画像のスペクトル情報から、火災の強度を示す正規化火災指標 Normalized Burn Ratio (NBR) と、植物の量や活力を示す正規化植生指標 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) を用いた。1986 年～ 2015 年の 30 年間の衛星画像を GEE で取得した。1986 年～ 1998 年までは Landsat 5 号、1999 年～ 2012 年までは Landsat 7 号、2013 年～ 2015 年までは Landsat 8 号のデータを取得した。なお、Landsat 7 号は 2003 年 5 月～ 9 月まで故障していたため、2003 年のデータは Landsat 5 号から取得した。森林火災は夏季に発生することから、8 月から 10 月にかけて撮影された衛星画像を使用した。また、衛星画像に雲が写ると誤差が生じることから、GEE のアルゴリズムを用いて上記の期間の雲を取り除いた画像を各年で作成した。作成した画像上で、近赤外を示す波長帯 band4

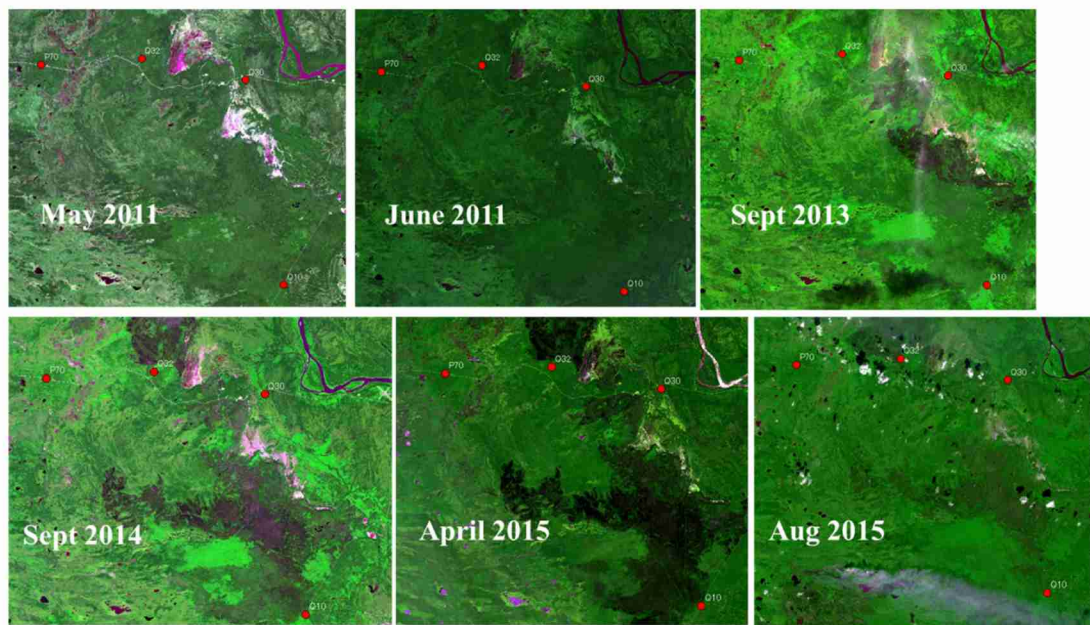


図 II -14 Landsat衛星画像による経年的変化による森林火災履歴。クラウド型解析を用いなければ膨大なデータをダウンロードしなければならず、データ準備に多大な時間を要した。

と中間赤外を示す波長帯band7から正規化火災指標であるNBRを、赤を示す波長帯band3と近赤外を示す波長帯band4から正規化植生指標であるNDVIを算出した。

$$\text{NBR} = (\text{band4} - \text{band7}) / (\text{band4} + \text{band7})$$

$$\text{NDVI} = (\text{band4} - \text{band3}) / (\text{band4} + \text{band3})$$

NBR値とNDVI値のレンジは - 1.0~ 1.0の範囲である。本研究では火災の強度を判定するために、火災前のNBR値から火災後のNBR値を差し引くことで得られる ΔNBR 値を指標として使用した。

$$\Delta \text{NBR} = \text{NBR}_{\text{prefire}} - \text{NBR}_{\text{postfire}}$$

ΔNBR は値が高いほど強度の高い火災が発生したことを示し、NDVIは値が高いほど植物の量が多いことを示す。GEEを用いて表示したLandsat7号の衛星画像、雲を除去した合成画像、NBR、NDVIを示す（図 II -15, 図 II -16, 図 II -17）。

GEEを用いて取得したデータから5年ごとの推定火災焼失場所を抽出した。火災により焼失した場所は、 ΔNBR 値が高く、NDVI値が低くなる傾向にある。そのため、 ΔNBR 値で0.6以上または0.4以上を閾値と設定し、NDVI値は0.1以下を閾値と設定することで、推定火災焼失場所を抽出した。ArcGIS上で、設定した閾値を基に火災焼失場所を抽出し、より精度を向上させるために ΔNBR とNDVIの抽出結果を組み合わせた。得られた結果には、衛星画像に写った雲によるノイズがあるため、ノイズを除去することが必要である。そのため、得られた結果にMorphological filter¹¹⁾を適用した。適用した結果の正確性を検証するため、Confusion matrix¹²⁾によるKappa値¹³⁾を求めた。

解析結果を検証するために、現地調査は2016年9月に行い、研究対象地内の道路沿い10km間隔の計36か所から、位置情報と3次元データを取得した（図 II -18）。位置情報は、GPSであるMontana600 (Garmin社製)を用いて取得した。GPSによる位置情報の取得を行った場所で、地上レーザーによる3次元データの取得を行った。使用したレーザーは、TX5 (Trimble社製)である。地上レーザーによって得られた3次元点群データの反射点からDTMとDSMを作成した。DSMからDTMを差し引くことにより作成したDigital Canopy Model (DCM)から樹頂点を抽出し、樹頂点の標高値を樹高とした。半径10m以内の樹高の平均値を算出した。解像度はそれぞれ0.25mである。DCMから求めた樹高と、Landsat衛星画像の経年的データ

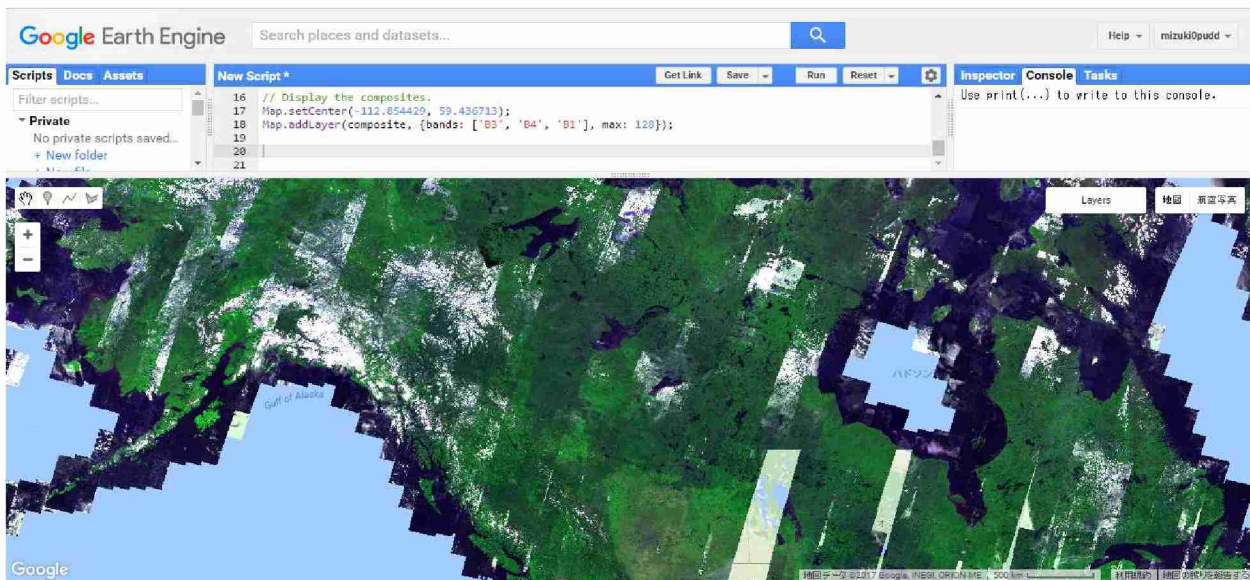


図 II-15 Landsat 7号2000年8月～10月の衛星画像から合成した雲を除去した画像（GEEより転載）

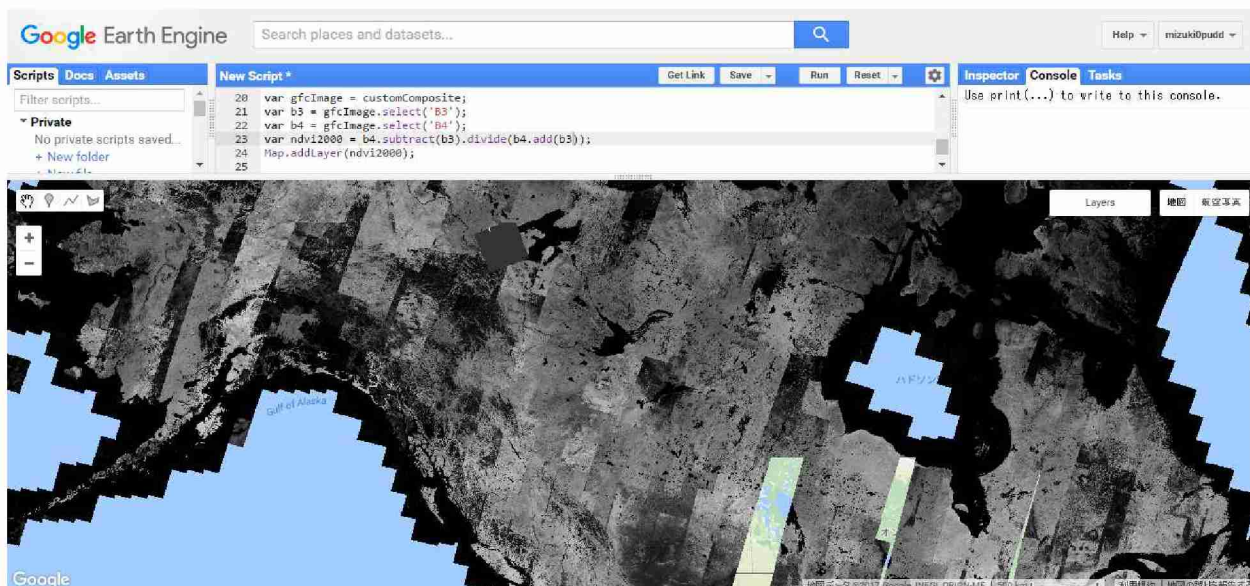


図 II-16 雲なし画像から算出したNBR画像（GEEより転載）

で解析した結果から得られるNBR値を合わせることで、火災後の植生回復状況を検証した。地上レーザーからのレーザーが樹木上部まで到達しているか確認するために、毎木調査による樹木計測データと地上レーザーによる樹高計測データを比較した。また、高精度GPSであるGeoXT（Trimble社製）による位置情報を利用し、現地調査で計測した樹木位置と地上レーザーから得られた樹木位置を合わせてデータを比較した。また、Landsat衛星画像の時系列による森林火災域の特定には、カナダ森林管理局が発行している過去の森林履歴を記録した地図（図 II-19）を用いて、1980年から各5年おきに森林火災が生じた場所に、各5年単位で40カ所ずつ、地図上で検証点を設け、Landsat衛星画像による解析結果と比較し、その正確性を検証した。次に、検証点が、解析結果で焼失したと推定された場所と合致する個数を求め、Kappa値を求めた。Kappa値とは正確性を表す指標であり、値が1に近いほど正確性が高い。正確性として、0.01～0.20はSlight agreement、0.21～0.40はFair agreement、0.41～0.60はModerate agreement、0.61～0.81はSubstantial agreement、0.81～0.99はAlmost perfect agreementを示す。

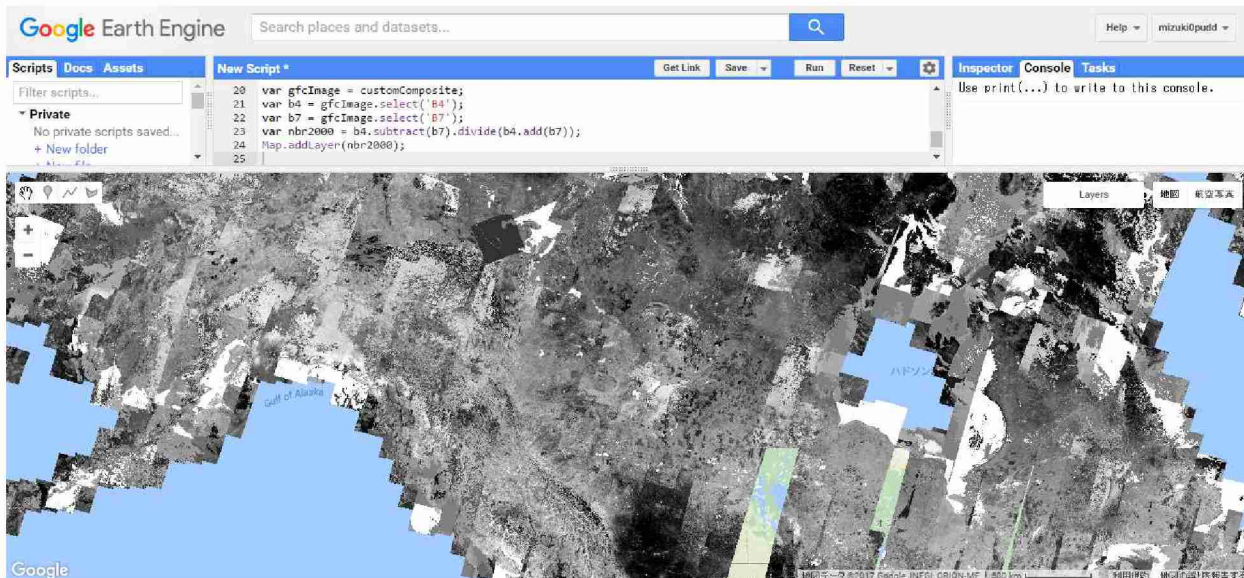


図 II-17 雲なし画像から算出したNDVI画像（GEEより転載）

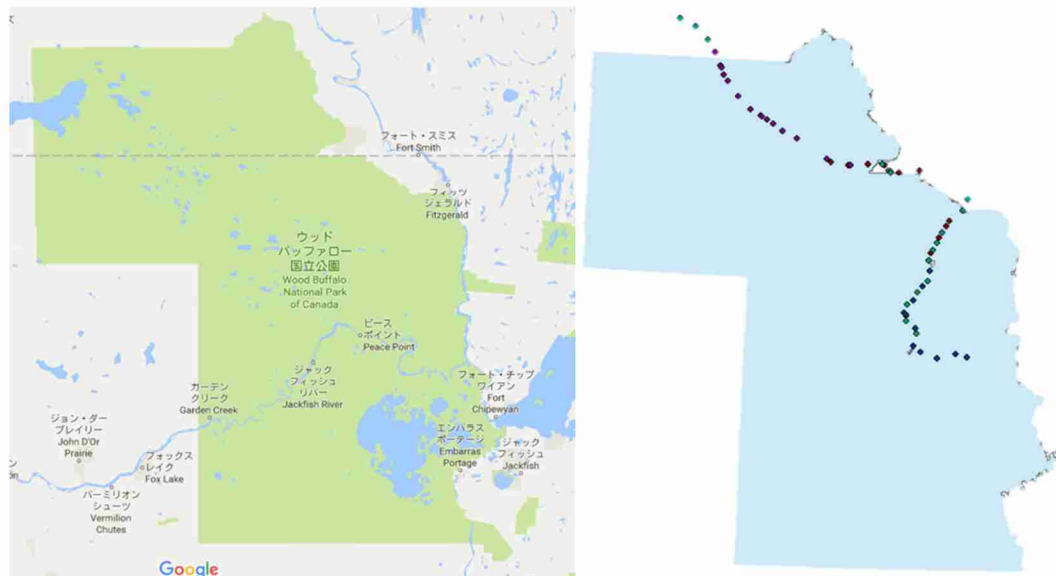
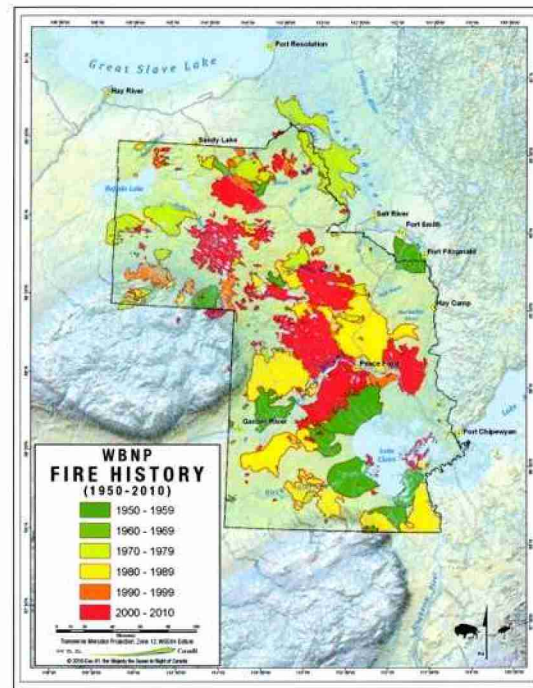


図 II-18 研究対象地であるウッド・バッファロー国立公園の全体（左図、Google Mapより転記）と現地調査で地上レーザーによるデータ取得を行った場所（右図、図中の点が地上レーザーで調査した場所）

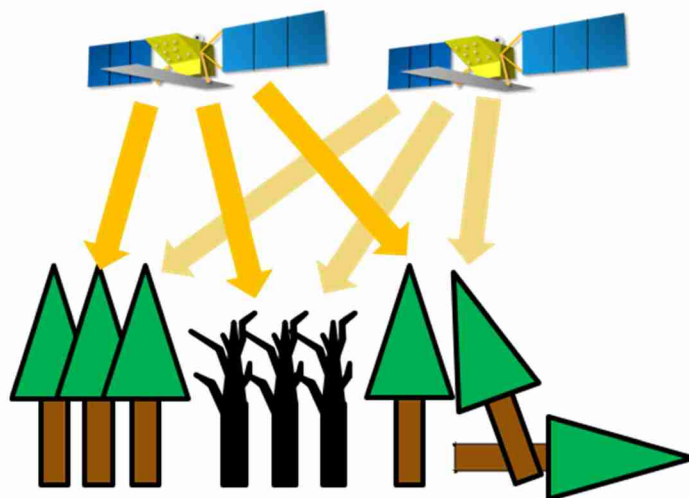
Landsat衛星は、1980年代からのデータアーカイブを持ち、時系列変化を長期間把握する意味では唯一の衛星データであるが、光学衛星であるため雲や影の影響があり、さらにNDVI値等の植生指数は樹高がある程度高くなると値が飽和することが知られている。そのため、日本の衛星画像であるALOS PALSARやALOS-2による解析を行った。衛星レーダー（Lバンド波）は、バイオマスが100トン/haまで検知できることが現地調査との結果と比較した結果わかっている¹⁴⁾。これまでの研究では後方散乱係数を用いて、輝度値のようなレーダー反射強度との関係を比較検討した研究がされてきた¹⁵⁾。しかし、後方散乱係数は、誘電率との関係があり、水分状態の影響を受ける。データ観測時の雲の有無とは関係がないが、雨が降った後の地面が濡れた状態か乾いた状態かで、後方散乱係数が10dBほど簡単に変化することは知られている¹⁶⁾。樹木地域でバイオマス把握におけるdB変化が度の偏波でも10dBの範囲であるため¹⁵⁾、雨などの地面の水分状態がバイオマス量の検知力に大きく影響すると考えられる。



図Ⅱ-19 カナダ森林管理局が発行している過去の森林履歴を記録した地図と凡例

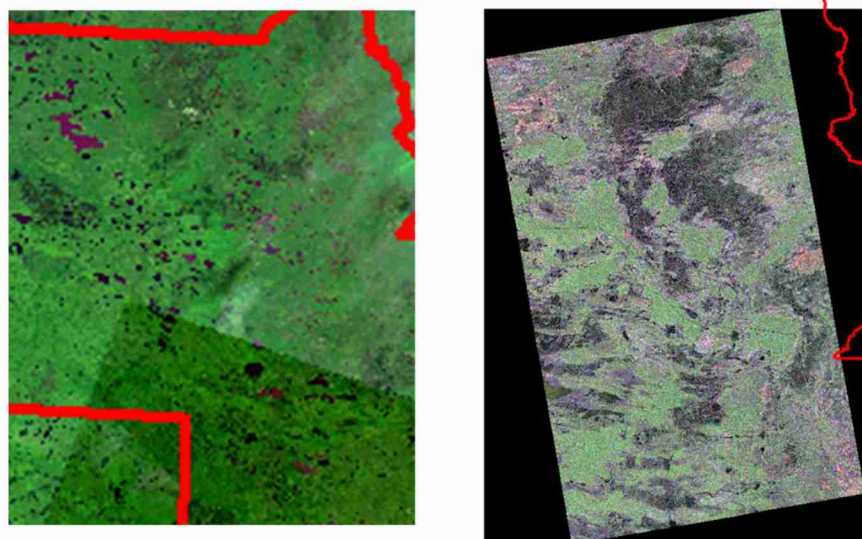
そこで本研究では、後方散乱係数ではなく、コヒーレンス値に注目して解析を行った。コヒーレンス値とは、レーダー波の相関係数である（図Ⅱ-20）。同じ場所で異なる2時期に取得されたデータを比較した際、同じ構造から反射であれば、レーダーの波形が同じとなりコヒーレンス値が高くなる。しかし、構造に変化が生じた場合、コヒーレンス値が低くなり、反射されるレーダー波に変化があることがわかる。もともと森林域は人工構造物に比べ、コヒーレンス値が低くなることは知られている¹⁷⁾。本研究では、時系列変化におけるコヒーレンス変化量をバイオマス変化量として使用した。検証には、地上レーザによって把握できた森林火災前後でのボクセルの消失量とコヒーレンス変化量を比較することで、森林火災が生じた場所で衛星レーダーの検知能力を検証した。カナダの森林火災は大規模になることが多いため、ALOS PALSAR、ALOS-2の解像度（6.25mの解像度を本研究では使用）以上の構造変化を検証する最適な場所である。その一方で、オーストラリア熱帯林の風倒害地域では、巨木1本の風倒害範囲は、ALOS-2の6.25m解像度より小さいことが多いため、より解像度の高い衛星レーダーとの比較検証が必要のため、他の解析手法（森林の垂直分布変化）による検証を行った。

衛星レーダーには様々な観測モードがあり、フルポラリメトリモード（HH、HV、VH、VVの4偏波）によるデータ取得がすべての偏波を含むため、森林火災後の異なる状況を表すには適している（図Ⅱ-21）。フルポラリメトリの特性を活かした解析手法の開発も進んでいる¹⁸⁾。しかし、本研究対象地では、フルポラリメトリモードでの衛星観測が12月などの冬の凍結期間に集中しており、観測された範囲は公園全体をカバーできず、公園の一部の地域に限られる。そこで、本研究ではHHとHVの2偏波高解像度モードによるデータを使用した。2偏波高解像モードは、フルポラリメトリよりも高頻度で観測され、対象地域全体をカバーできる広範囲を観測したデータである（図Ⅱ-22）。森林火災前後の夏期だけで異なる2時期を使用し、森林火災が生じた場所のコヒーレンス解析を行った。ALOS2を用いたコヒーレンス解析は、軌道補正が向上したことにより、より正確な値が算出できると期待できる。また、コヒーレンス解析は後方散乱係数の値のように、dB値を直接扱う訳ではないため、安定した指標として変化抽出ができる。結果の検証として、森林火災によるコヒーレンス値減少量は、森林火災前後で地上レーザによって取得された3次元データからボクセル消失量と比較し、地上レーザから把握できた現地検証能力を検証した。

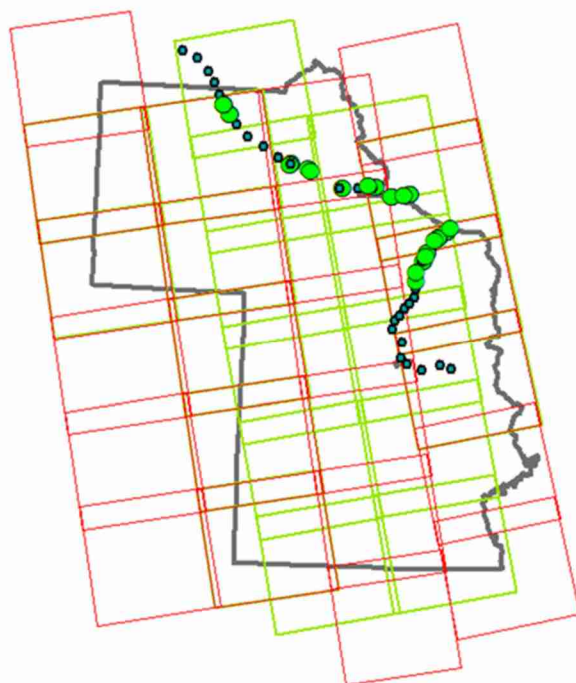


図Ⅱ-20 コヒーレンス解析（レーダー波の相関係数）を用いた解析についての模式図（レーダー波の相関係数が２時期間で同じ構造物である場合は高く、異なる場合は低くなる）

本研究では、大規模森林火災が 2015 年 6 月に発生したため、森林火災前のコヒーレンス計算には 2010 年 9 月に観測された ALOS PALSAR レーダーの HV 偏波データを使用し、森林火災後のデータは 2015 年 9 月の ALOS-2 レーダーの HV 偏波データを使用した。本研究対象地では、ALOS PALSAR は 2011 年に衛星が観測を終了しており、ALOS-2 は対象地では 2015 年以降しかデータ観測を開始していなかったため、森林火災前後の 2 時期データ間にギャップがあるが、ALOS PALSAR と ALOS 2 の両方を用いてコヒーレンス変化を把握した。



図Ⅱ-21 Landsat の光学衛星画像と ALOS 2 のレーダー画像との比較（左図：Landsat の光学衛星画像、右図：ALOS 2 衛星データによるフル ポーラリメトリの後方散乱係数をカラーによって表示、フルポーラリメトリによって森林火災履歴が異なる偏波パターンで表現できることがわかる。）



図Ⅱ-22 2 偏波高解像度モードによる観測範囲、地上レーザーデータ取得場所の比較。VZ400（RIEGL 社製）は緑大点の場所で、TX5（Trimble 社製）は緑小点の場所で計測を行った。黒枠は国立公園の境界を表す。

4. 結果及び考察

（1）地上レーザーによる3次元データを用いて森林災害を評価する手法を確立する。

地上レーザーが樹冠上部までデータが取得できているか確認するために、バンクスマツのプロットである P40、P61、P70 とアスペンのプロットである Q10、Q30、Q32 の調査区内に調査プロットを設けて、調査プロット内にある樹木すべてを測定した。最大樹高はそれぞれ 20.7、14.5、5、27.1、19.2、9.1 m であった（表Ⅱ-2）。また、平均樹高はそれぞれ 15.2、6.8、2.6、7.3、13.3、5.2 m であった。P40 では 2014 年に森林火災があり、ほぼすべての樹木が焼けていたが、幹部だけが黒く変色し、残っている状況であった。さらに、地上レーザーによる樹高計測結果と毎木調査による樹高計測結果を比較した（図Ⅱ-23）。

表Ⅱ-2 毎木調査結果、最大樹高と平均樹高、樹高毎の個体数

調査地名		P40	P61	P70	Q10	Q30	Q32
樹高(m)	Max	20.7	14.5	5	27.1	19.2	9.1
	Average	15.2	6.8	2.6	7.3	13.3	5.2
個体数	H>20	1			9		
	20≥H>15	16				13	
	15≥H>10	3	7			5	
	10≥H>5	2	13	1			45
	H≥5	2	13	11	34	5	51
	計	24	33	12	43	23	96

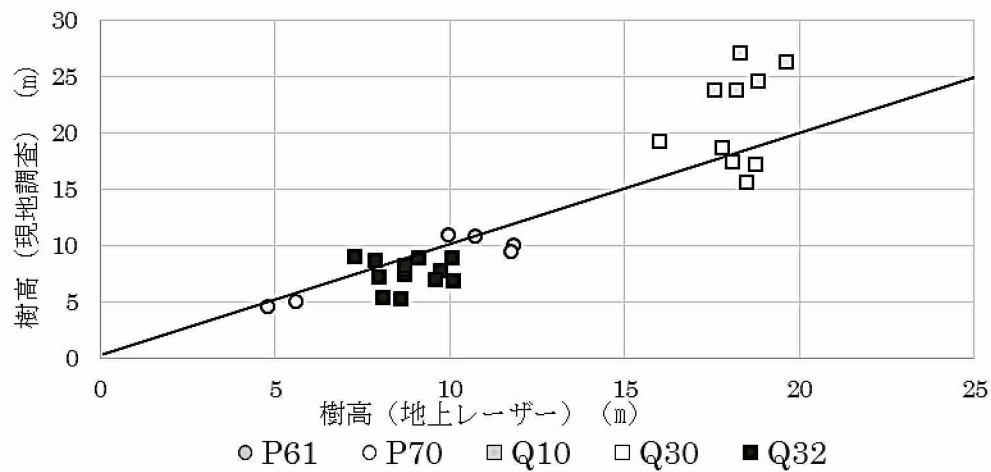


図 II-23 地上レーザーと毎木調査による樹高計測結果の比較（図中の線は 1 対 1 対応線）

図 II-23 より本研究に使用した地上レーザーでも十分に樹高が計測できる（樹木上部まで十分にレーザーデータが取得できている）と考えられる。図 II-23 の右上での現地計測結果がレーザーによる計測よりも過大に大きくなってしまった理由は、広葉樹であるアスペンの樹冠形状が丸く、人による計測では頂点を見つけるのが困難であったと考えられる。

森林火災前後で取得した地上レーザーの3次元データを比較すると、森林火災により焼失量が把握できる。Prescribed fireのような小規模火災では、下層植生が森林火災後に消失していることがわかる（図 II-24）。Crown fireのような大規模火災では、森林火災後に全体の立木密度が減少していることがわかる（図 II-25）。



図 II-24 Prescribed fireによる森林火災前後での3次元データ（左：森林火災前、右：森林火災後）

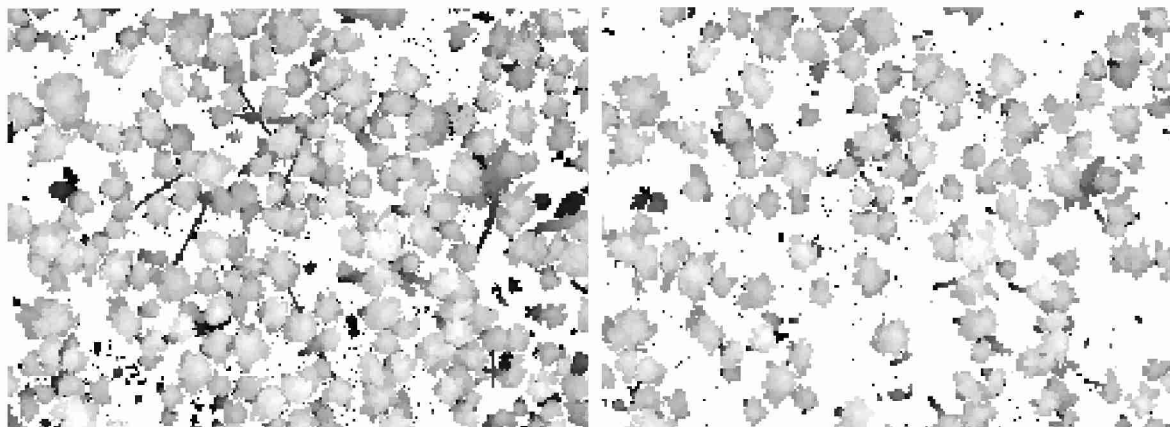
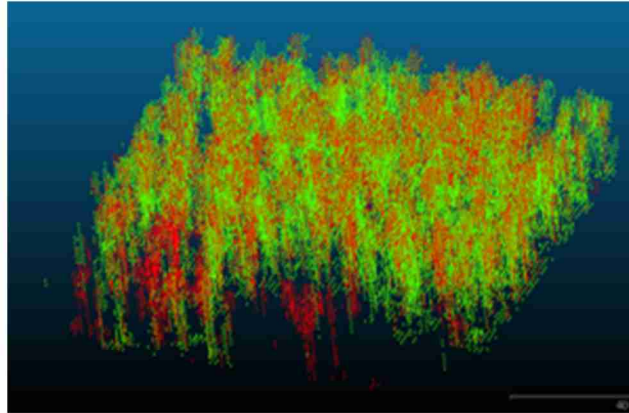


図 II-25 森林火災前後の同じ場所で取得されたDSMデータ（左図：森林火災前、右図：森林火災後）。Crown fireにより、半分以上の樹木が消失していることがわかる。

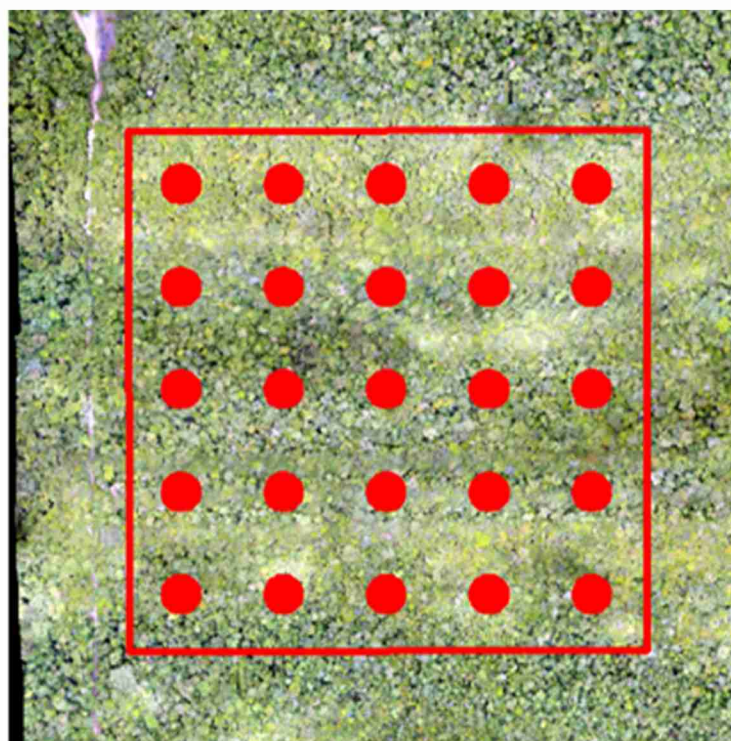
本研究では、森林火災前後での3次元データを自動でマッチングする技術確立のため、これまで不可能であったより詳細な3次元データ上での樹木形状の消失場所を特定することができた(図Ⅱ-26)。



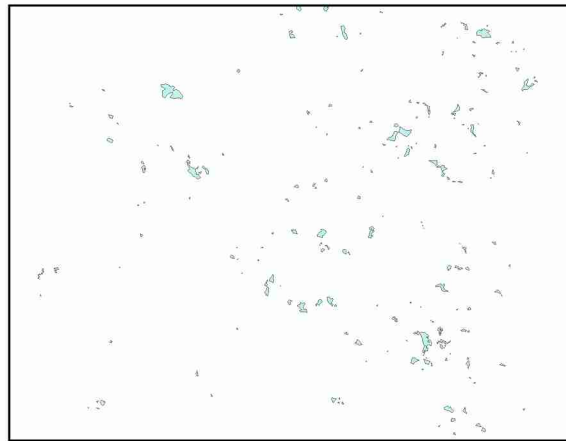
図Ⅱ-26 森林火災前後でボクセルが消失してなくなった場所を3次元上で表示した結果（赤色箇所が森林火災で焼失したボクセル位置、緑色箇所が火災前後で変化のなかった火災で焼失しなかった位置）。

以上のデータを使用することで、大面積試験区50m x 50m内で森林火災があった場所で、森林火災前後でのデータを比較することで消失量を定量的に把握することができた(図Ⅱ-26)。これらのボクセル消失量そのまま森林災害評価として数字で被害度や災害強度を表すことができるため、非常に直接的で、わかりやすい解析手法が構築できたと言える。

オーストラリア熱帯林の風倒害地域では、広域を地上レーザーによって3次元データを取得することは現実的ではなく、地上レーザーセンサーを必要以上に設置しすぎることは、データ取得費用がかかる。そのため、森林域で効率良くサンプリング場所（空間代表性がある場所）を把握するためにUAVによるデータから代表的なサンプリング場所を特定した(図Ⅱ-27)。図Ⅱ-27より、赤色点は25haの試験区を100m x 100m (1ha)単位で25個に小分割された中心位置を表す。風倒害があった場所を2時期のDSMの差分から把握した(図Ⅱ-28)。ドローンによる2時期DSMからの森林モニタリングは、低価格のドローンによる空撮画像だけから3次元データを作成できるため、容易に風倒害または違法伐採場所を特定できる。ドローンによる空撮画像からSfMによる3次元データを作成した結果であるため、3次元データ自体に確実性はない。補助データとしておおまかな場所を把握するためにじは役立つが、正確性が保証されていない。

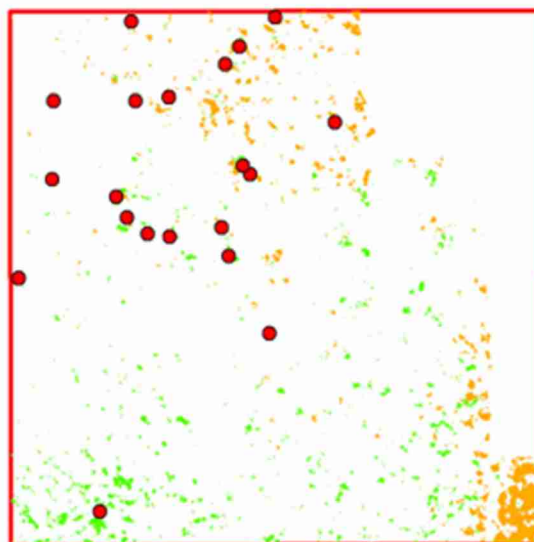


図Ⅱ-27 UAVによって得られた3次元データ（背景）を使用し、地上レーザーセンサーを設置した場所の空間代表性を確認した（背景：RGB付UAVによる3次元データ、手前：赤点がレーザーセンサーを設置した場所、赤枠が25ha、2.5km x 2.5kmの対象地範囲）



図Ⅱ-28 風倒害があった場所を、2時期のドローンによる空撮画像から作成したDSMの差分で得た結果（25ha対象地の一部でのデータを例示）

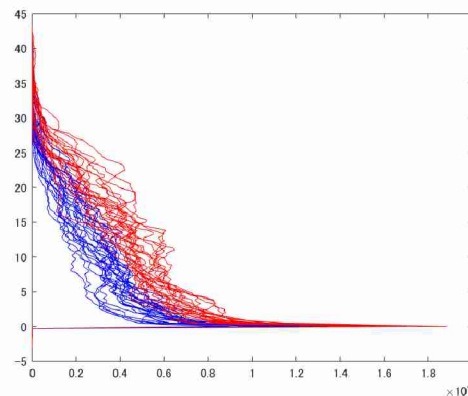
今回、25haの森林を詳細に踏査し、この時期の風倒害の場所を見つけ、ドローンによって風倒害と確認した場所と比較したところ、ほぼ場所が一致はしていた（図Ⅱ-29）。2時期間の比較とは、2015年11月～2016年11月、2016年11月～2017年11月での2時期間でのドローンによって作成されたDSM差分である。図Ⅱ-29より、ドローンによるDSM差分だけでは、判別結果が過大評価されていることがわかる。ドローンによって風倒害候補地を得ることは、大変有効な手段であるが、空撮画像だけから3次元データを作成した場合、2時期のDSM差分だけから風倒害地を確実に特定するには、信頼性が確保できない。



図Ⅱ-29 ドローンによって取得された2時期間でのDSM差分が大きかった箇所（背景）と実際現地森林調査で風倒害を確認し、地上レーザーによって3次元データを取得した場所（赤色点）。（赤枠は、熱帯林

対象地25haの範囲、オレンジ色は2015年11月～2016年11月にDSMに変化があった場所で、風倒害候補地、緑色は2016年11月～2017年11月にDSMに変化があった場所で、風倒害候補地。

リファレンスとして、風倒害が起きていない地域（図Ⅱ-27 赤丸点）と風倒害が生じた地域（図Ⅱ-29 赤丸点）の垂直分布の違いを比較した（図Ⅱ-30）。その結果、風倒害が生じた場所では、調査対象区内でのボクセルの数が森林下部に移動し、ボクセルの垂直分布の形状に変化があった。よって、地上レーザーによって、熱帯林における風倒害が生じた場所の判別は可能である。人の目視による判別ではなく、3次元データとしてボクセルの垂直分布の変化量から判別でき、データをアーカイブとして残すこともできるため、風倒害を評価するにはより確実な手法である。



図Ⅱ-30 ボクセルの垂直分布。（高さ別のボクセル数のヒストグラフ、青色：リファレンスのサイトで風倒害が生じていない場所、赤色：風倒害が生じた場所、有意差有（ $p < 0.05$ ）

ボクセル数と従来の材積算出方法による材積との関係を図Ⅱ-31で表す。ボクセルと材積には高い相関関係がある訳ではない。従来の材積計算方法とは、胸高直径と樹高から材積式に当てはめて材積を計算する方法である。より正確な材積に変換するためには、幹枝葉のボクセルに分けて、密度が異なる樹木部位に対する異なる係数を掛け合わせ、見積もる必要がある。

環境政策に必要な炭素蓄積量を求めるにはバイオマスの計算が必要で、バイオマスと衛星データを比較することが多い。しかし、衛星画像はそこにある構造物の量との関係に深く関係しており、特に衛星レーダーは、構造物を捉えることに適している。そうした特徴を考えると、森林災害評価には、構造を捉える衛星レーダーと、現地で詳細な森林構造を測定できる地上レーザーによる組み合わせが最も適している。構造変化を捉えられていることに重点を置いて衛星レーダーを利用し、最終的にボクセルからバイオマスには1つの係数を掛けることで、全体の材積量に変換するような計算方法を今後の環境政策で使用することを提案したい。本手法により、人の手で胸高直径や樹高を測らなくても、地上レーザーで3次元データ取得後、ボクセルに変換し全体に係数をかけるだけで、その地域全体のバイオマス量が測定できるため、大変簡易で有効な手法である。

これまでの胸高直径や樹高を用いた材積計算よりも、ボクセルから算出した方が、より現実的なバイオマス算出方法になり得る。その理由としては、ボクセルを用いた手法は構造から直接計算するため、樹冠の広がりなど個体差を考慮しやすい。一方で材積式からのバイオマス計算では、樹冠の広がりや樹種や樹齢に対して一定となり、個体差を考慮されない。特に広葉樹のような不定形樹木に対してはボクセルからのバイオマス計算がより現実的であると考えられる。

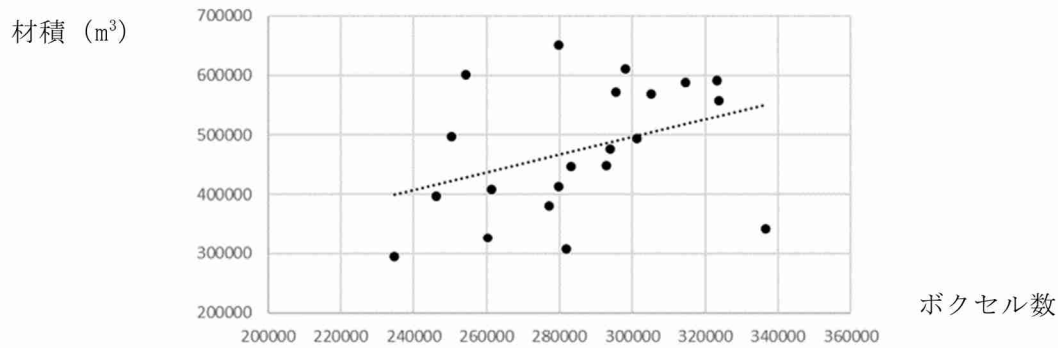


図 II-31 ボクセル数と従来の計算方法による材積（バイオマス算出根拠となる幹体積）との関係

(2) 地上レーザーと生態学の法則を用いて林内状況を定量的に解析する手法を確立する。

カナダの亜寒帯林における天然林調査によるバンクスマツ、アスペン各 3 調査地で計測された平均樹冠体積と個体群密度を両対数グラフで表し、近似線と R^2 （決定係数）を示した。また、 $-\gamma$ の値を推定し自然分布を想定した 95% 信頼区間 (CI, Confidence Interval) を求めた。バンクスマツでは $-\gamma = 1.68$ (95% CI: $0.71 < -\gamma < 2.65$)、アスペンでは $-\gamma = 1.07$ (95% CI: $0 < -\gamma < 5.07$) と推定することができた (図 II-32)。

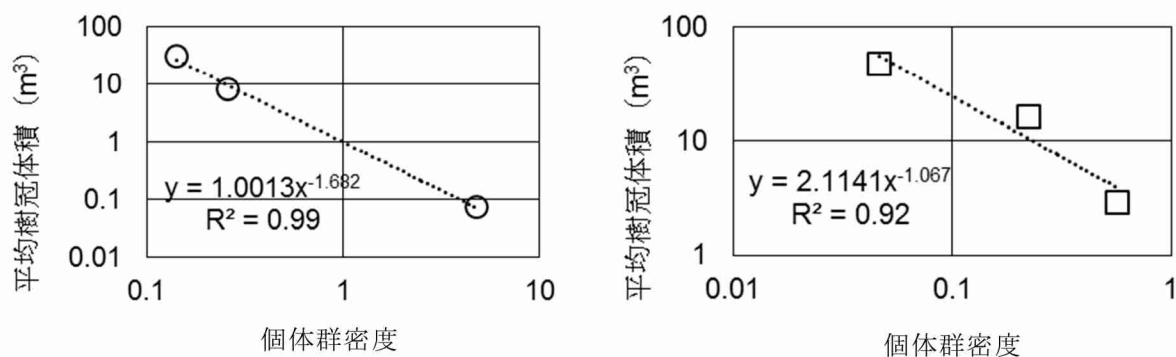


図 II-32 自己間引きの法則を地上レーザーによって把握した結果（左：バンクスマツ、右：アスペン）。図中の各点は、調査地での平均値であり、各調査地 10 本の対象木を解析し、平均化した結果である。

バンクスマツでは、傾きが 1.68 となり、1.5 に近い値で推定することができた。一方、アスペンでは $-\gamma = 1.07$ となり、想定していた値よりも低い値を得た。この原因として、アスペンの調査地の一部で風倒害により林冠を構成する高木の密度が減少したため、個体群密度が減少していると考えられる (図 II-33)。本手法を用いることで、自己間引きが生じている場所や風倒害が生じる場所を正確に把握できるため、森林災害を評価できると考えられる。地上レーザーを利用した樹冠体積計測により自己間引き係数 $-\gamma$ を推定することができた。地上レーザーを用いることで正確な樹冠体積を計測することができるため、樹冠体積の計測が必要な自己間引きの法則に対し、地上レーザーデータを適用することができた。

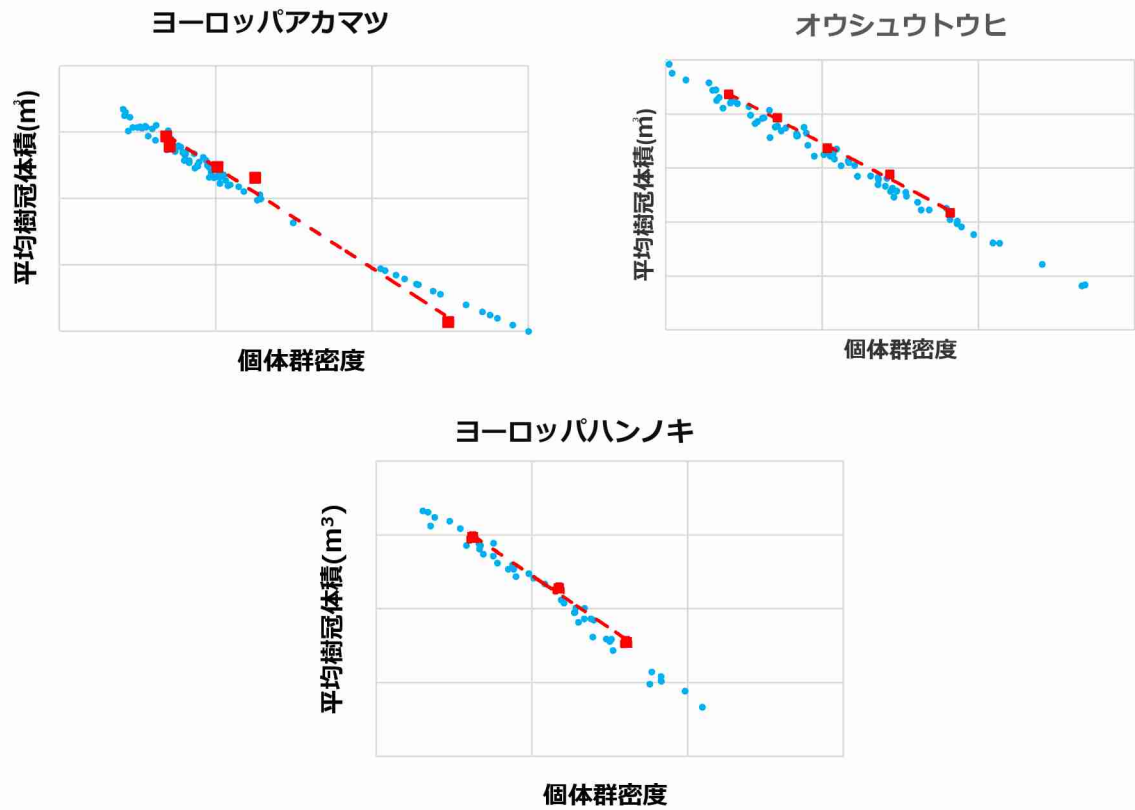


図Ⅱ-33 風倒害のあった調査地状況

また、得られた結果の汎用性を確認するために、エストニアで取得した樹種で自己間引きの法則が成り立つか地上レーザーによって解析した結果、ヨーロッパアカマツではべき乗係数の値が-1.52、ヨーロッパハンノキのべき乗係数の値が-1.42、オウシュウトウヒではべき乗係数の値が-1.53となりそれぞれ-3/2に近い値を得た(図Ⅱ-34)。

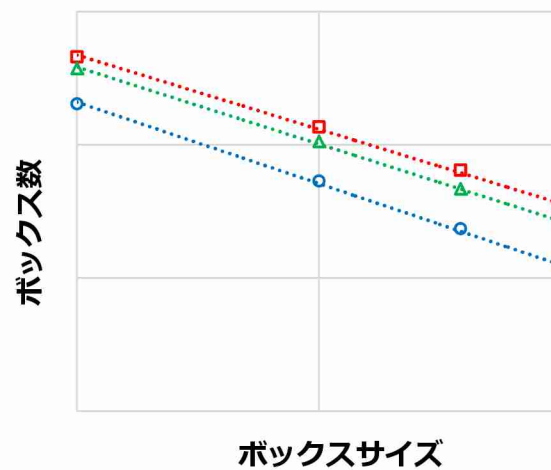
本研究の結果を検証するためにヨーロッパアカマツと過去の研究のマツのデータを比較した。Osawa(1995)では実際に伐倒して得たデータから自己間引き指数を予測しており⁶⁾、アカマツの値が-1.49(95%信頼区間:-1.52~ -1.39)であった。また、Oosawa&Kurachi(2004)では手作業で葉の付き方を調べ、自己間引き指数を推定している¹⁹⁾。その結果バンクスマツ(*Pinus banksiana*)の値が-1.53(95%信頼区間:-1.66~ -1.42)であった。本研究で得たヨーロッパアカマツの値-1.52はどちらの種の95%信頼区間にも含まれることから、自己間引きが成り立っている。

本研究で対象とした樹種(ヨーロッパアカマツ、オウシュウトウヒ、ヨーロッパハンノキ)で、自己間引きのべき乗係数から樹冠フラクタル次元Dを計算した結果、値が2に近づいた(ヨーロッパアカマツ1.97、オウシュウトウヒ1.95、ヨーロッパハンノキ2.1)。ボックスカウンティング法を用いてそれぞれの樹種について求めたフラクタル次元D(図Ⅱ-35)(ヨーロッパアカマツ2.03、オウシュウトウヒ1.92、ヨーロッパハンノキ1.85)と近い値であったことから、葉が樹冠の周辺に遍在すると考えられる。表3よりどちらの手法でもD=2になる樹種は葉が樹冠の表面に分布することから、汎用性の高い手法であることがわかる。さらに、この結果から注目すべき点として、カナダではRIEGL社製のハイスペックのセンサーを利用して3次元データを取得し、解析結果を出しているが、エストニアではSICK社製の低価格のセンサーで同様に解析結果を得ている点である。低価格のセンサーでも同じように解析結果を得ることができることも実証できた。Dが2に近づくことは陽葉に多いとこれまでの研究で報告されている。今回使用したオウシュウトウヒが陰樹であることから、樹形による解析がより有効であることがわかる。今回使用した樹種は円錐型もしくは尖頭型の樹形であるため、樹種はDが2に近づいたと考えられる。本研究の結果から、地上レーザーを用いることにより、これまでは計測が困難であった高木の樹冠形状を基に解析でき、樹種よりも樹形と関係するより汎用性の高い解析技術が確立できたと考えられる。



青色・○:ヨーロッパアカマツ $y=0.8963x^{-1.522}$
 緑色・△:オウシュウトウヒ $y=0.8568x^{-1.531}$
 赤色・□:ヨーロッパハンノキ $y=1.0557x^{-1.426}$

図Ⅱ-34 各樹種の個体群密度と平均樹冠体積



青色・○:ヨーロッパアカマツ $y=124.85x^{-2.03}$
 緑色・△:オウシュウトウヒ $y=266.96x^{-1.92}$
 赤色・□:ヨーロッパハンノキ $y=360.99x^{-1.853}$

図Ⅱ-35 各樹種のボックスサイズと総ボックス数

表Ⅱ-3 樹冠フラクタル次元の比較

	ヨーロッパアカマツ	ヨーロッパハンノキ	オウシュウトウヒ
ボックスD	2.03	1.853	1.92
自己間引きD	1.97	2.1	1.95

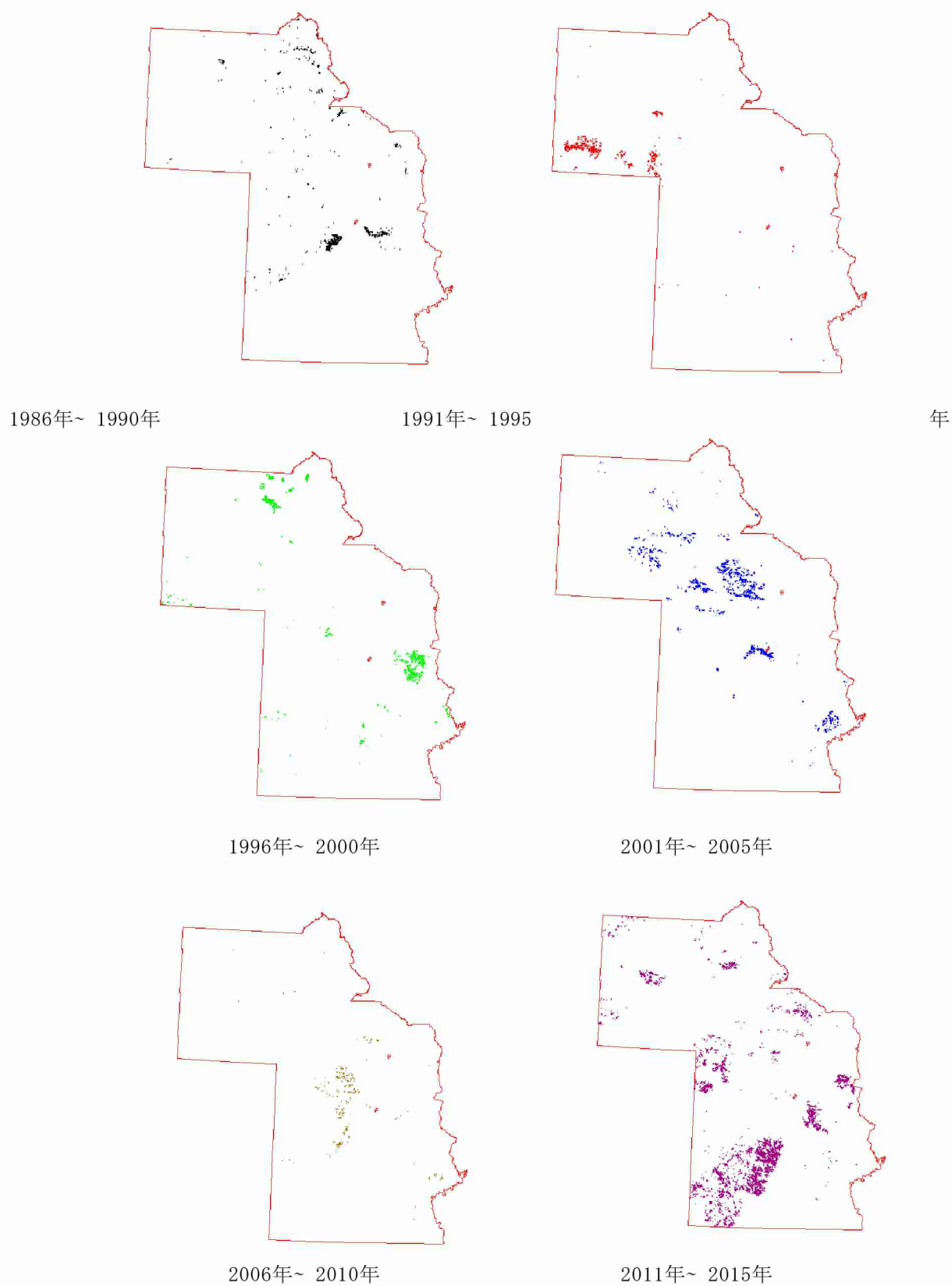
(3) 衛星データのグラントゥルースとして地上レーザーによる3次元データの有効性を検証する。

衛星データとして、GEEによるLandsat衛星の経年的データを利用し、さらに衛星レーダーによるALOS PALSARまたはALOS-2による解析で、森林火災が生じている場所を特定した。GEEによる解析結果では、1986年～2015年の各5年間に於ける推定火災焼失場所を比較すると、2011年から2015年の5年間で焼失した場所は、過去30年間で最も多いことが分かった（図Ⅱ-36）。また、Confusion matrixにより得られた各5年間のKappa値を比較すると（表Ⅱ-4）、Kappa値が最も低くなったのは1986年～1990年の5年間であり、その他の各5年間の平均Kappa値は0.7となった。1986年～1990年の5年間のKappa値が最も低くなった原因は、この5年間に撮影された衛星画像には雲が多く、雲を完全に除去した画像を合成できなかったためと考えられる。衛星画像上で雲が写っている部分では、センサーの誤認識が生じることから、解析結果に誤差が生じる。

また、衛星画像から抽出した推定火災焼失場所の正確性は、Landsat5の衛星画像を用いた解析結果よりも、Landsat7,8の衛星画像を用いた結果の方が高いことがわかった。近年のデータを用いた方がスペクトル値のキャリブレーションが改善されており、より正確に火災焼失場所を把握できることがわかった。

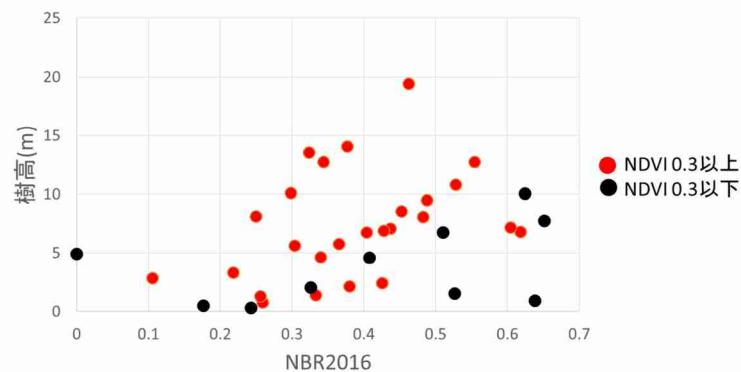
表Ⅱ-4. 1986年から2015年におけるConfusion matrixによる正誤表

解析期間	1986~ 1990	1991~ 1995	1996~ 2000	2001~ 2005	2006~ 2010	2011~ 2015
抽出結果：焼失 実測値：焼失	1	12	10	17	14	18
抽出結果：焼失 実測値：非焼失	1	0	0	1	0	0
抽出結果：非焼失 実測値：焼失	19	8	10	3	6	2
抽出結果：非焼失 実測値：非焼失	19	20	20	19	20	20
総ポイント数	40	40	40	40	40	40
Kappa値	0	0.6	0.5	0.8	0.7	0.9
使用した衛星	Landsat 5	Landsat 5	Landsat 5, 7	Landsat 5, 7	Landsat 7	Landsat 8



図Ⅱ-36 1986年~ 2015年の各5年間における火災焼失場所の推定結果

図Ⅱ-36より、森林履歴がLandsatの時系列解析から把握できたため、その森林履歴箇所、現地で地上レーザによる3次元データを取得し、平均樹高を得た。地上レーザによる現地計測結果とNBR値とを比較することで、森林火災後の植生回復状況を検証した。NBR値だけでは、相関が見られなかったが、NDVI値を加えて比較すると、NDVI値0.3付近で樹高とNBR値の傾向が2つグループに分かれた(図Ⅱ-37)。よって、NBR値と平均樹高計測には、NDVI値が0.3以上の場合に正の傾向があった。これらの結果より、NDVI値0.3以上まで植生が回復した場合、衛星画像の解析から得られるNBR値によって、火災後の植生回復状況が把握可能であると考えられる。また、地上レーザはこうした森林災害後の植生回復状況を評価できるデータを提供できると考えられる。NBR値と平均樹高に強い相関関係がなかった理由としては、森林火災後に枯死した樹木が残っている場合は、NBR値が低くとも平均樹高が高くなる傾向があり、枯死か生きているかの判別は、1時期だけのデータでは困難である。しかし、2時期のデータを用いることで、枯死した樹木は成長しないが、生きている個体は成長をするため、2時期の3次元データを取得することで、枯死しているかどうかの判別を地上レーザで行うことは可能である。

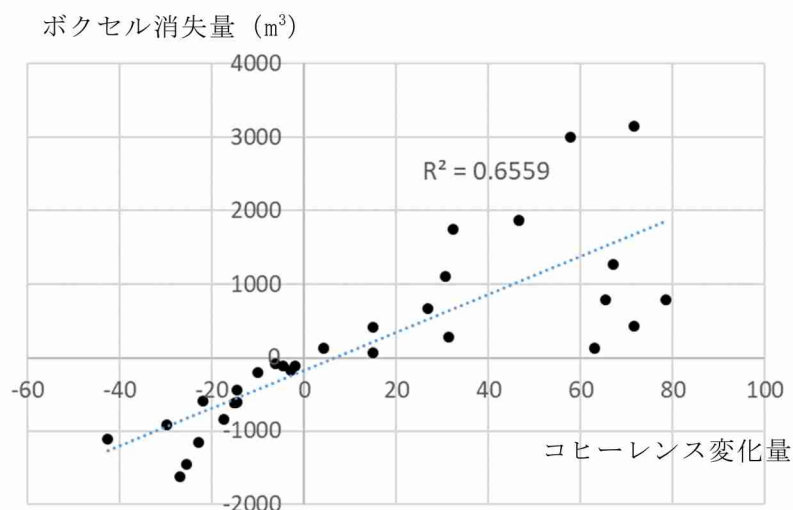


図Ⅱ-37. 2016年に3次元データより測定した樹高と2016年の衛星データからNBRを解析した結果との関係

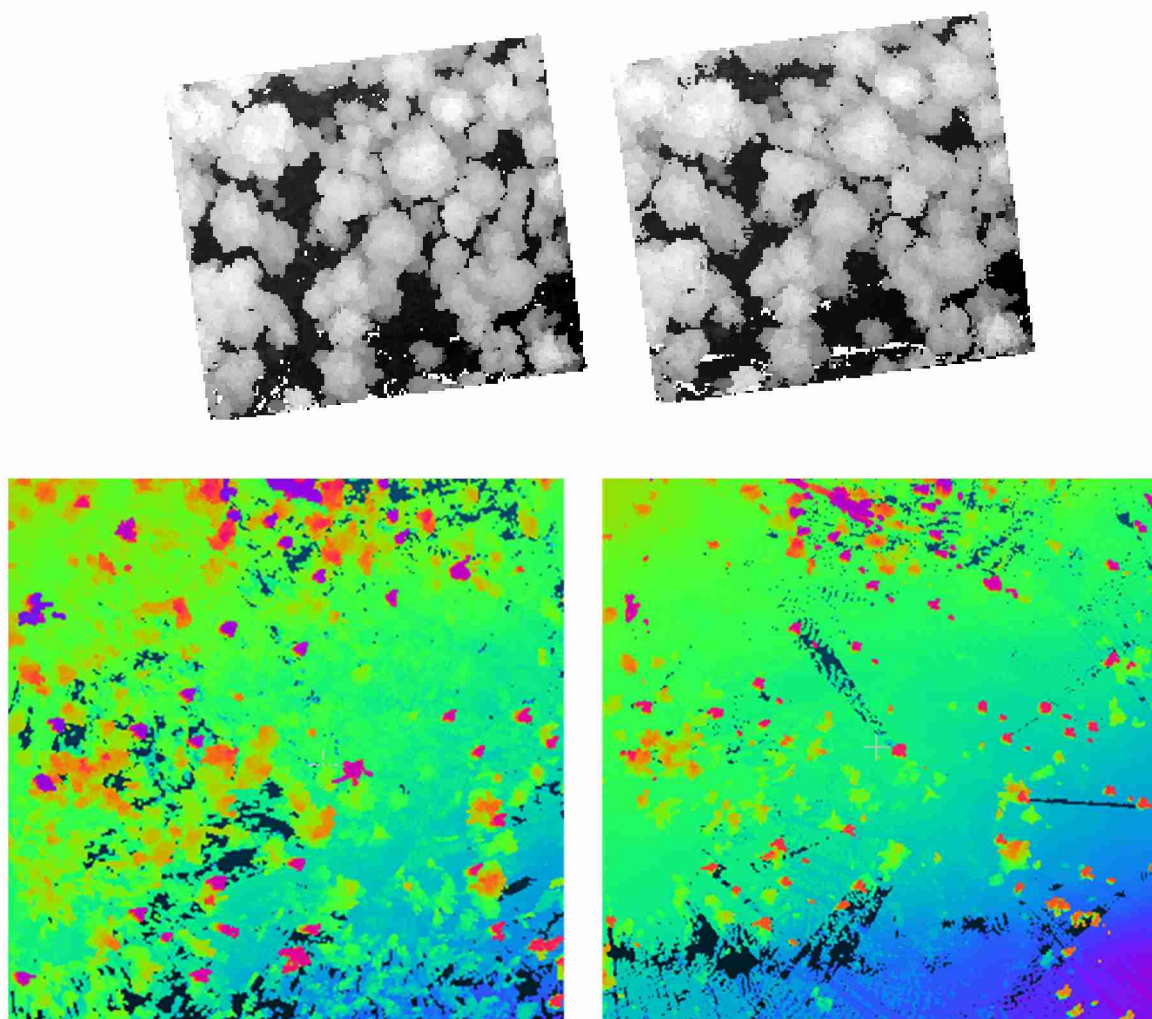
本研究では、地上レーザを現地調査に取り入れ、効率的な樹高測定を行った。地上レーザを用いることで、1箇所あたり約10分の測定時間で3次元データを取得できた。また、地上レーザは広範囲の3次元データの取得も可能であるため、複数箇所センサーを設置することでより広範囲の樹高を測定し、解像度30mの衛星画像と比較することで、検証精度を向上できると考えられる。

地上レーザによって把握した森林火災によるボクセル消失量と衛星レーダーによるコヒーレンス値の減少量を比較したところ、高い相関関係を得ることができた($R^2=0.66$, 図Ⅱ-38)。この結果より、コヒーレンス値の減少(以前あった構造物がなくなった指標)と3次元データによって測定したボクセル消失量には関係あり、地上レーザを用いた3次元データ解析が衛星レーダーの地上検証用に有効であることがわかった。

さらに、森林火災を未然に防ぐために、Prescribed Fireと呼ばれる火災処置を事前に行うことがる。Prescribed fireとは、コントロールできる火を放ち、下層植生および林床のバイオマス蓄積(枯れた枝葉の蓄積など)を燃やすことで、燃えるものを減らす実験を国際共同研究の一環によって実施した(「国際共同研究の状況」を参照、図Ⅱ-39)。その際に取得したデータから、地上レーザ3次元データから、下層植生だけを抽出した手法を確立した²⁰⁾。図28より、森林上部では森林火災前後でDSM形状が変わらないことがわかるが、下層植生の分布は、森林火災前後で大きく変わっていることがわかる。異なる種類や規模の森林火災に対して地上レーザの3次元データが役立つことを実証できた。



図Ⅱ-38 森林火災前後でのボクセルの消失量（体積）とコヒーレンス変化量（本来-1~ 1のレンジであるが、-255~ 255の8ビットレンジで表示）



図Ⅱ-39 Prescribed fireを行った場所で、森林火災前後での樹冠形状の変化（上部）と下層植生分布の変化（下部）を3次元データから示すことができた（左上：火災前の樹冠状態、右上：火災後の樹冠状態、左下：火災前の下層植生分布、右下：火災後の下層植生分布）。様々森林火災に対応した3次元データの提供が可能である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、森林生態学の法則を用いて自然災害評価手法を確立するために、3つの解析スケールを提案している。1つ目は、地上レーザーによって得られた3次元データから単木データを抽出して詳細な解析を行う。2つ目は、まとまった林分単位（森林単位）として、ボクセルによって解析を行う。3つ目は、広域スケールとして、衛星データ解析結果と地上レーザーによって得られる3次元樹木形状を比較する。単木単位の解析については、森林生態学の自己間引きの法則を用いて、森林が最多密度に達しているかどうかを判別でき、森林災害評価ができた。生態学の現象を地上レーザーによって定量的に把握した研究はこれまでになく、世界初の研究と言える。また、カナダや同じ緯度にあるエストニアの森林状況でも確認したところ、自己間引きの法則が地上レーザーだけでも評価でき、森林が最適な密度状態に保たれているかどうかを評価できるようになった。これらの解析手法は3次元データを用いた世界初の試みであり、独創性や汎用性が高い手法である。

林分単位の解析については、ボクセルを用いることで、災害前後の消失量を直接的に算出することができた。最も大きな科学的意義としては、ボクセルを用いることで、消失した量を計算できるとともに、フラクタル次元の解析も同時に行えることにある。森林火災では、樹冠部に火が到達すると大規模火災になるため、3次元データから得られる量が火災のリスクを表している。リスクが高い場所では、森林火災が頻発している地域において可燃性バイオマスを除去することで、火災を事前に防ぐことができる。または除去できなくても、災害の広がりを予め把握することも可能である。地上レーザーを設置するだけで、森林の災害に対するリスク評価をすぐに行うことができるため、大変有意義な研究である。

本研究の成果はリモートセンシングデータによる解析技術進歩にも貢献できる。衛星データは常に上空から撮影されるため、樹木の幹部を直接計測することが難しい。森林バイオマスは幹部の体積（材積）と関係するため、衛星データによって直接計測することは（幹部が計測できないため）難しい。本研究ではボクセルを用いたことにより、バイオマスの計測方法を変える提案ができた。これまでの算出方法である胸高直径と樹高による材積式主体のバイオマス計算ではなく、ボクセルを主体とした3次元データを活用したバイオマス計算を行うことにより、現地での計測効率を飛躍的に向上できる。特に、森林災害前後で3次元データの位置を自動で詳細にマッチングした技術（誤差5cm以下によるマッチング）は、地上レーザーによって現地で取得される作業効率を劇的に改善でき、ボクセルからバイオマス算出を行う手法を容易に社会実装できる。

また、本研究ではクラウド型解析をいち早く取り入れて衛星データの解析を行った。広域を研究対象とする際に、これまでのような大量のデータをダウンロードするなどのデータ準備に多大な労力をかける必要がなく、クラウド上で高速で大規模な解析が誰でも可能である。こうしたクラウド型解析には、主観が入らない共通のプラットフォームによるデータ解析となるため、信頼性が保証される。炭素蓄積量の算出において、対象とする国や地域で、様々な種類の衛星画像を用い、様々な解析手法からの結果を比較すると、結果が大きく異なるため、モニタリング自体の信用ができない。学術分野での成果を環境政策へ反映するには、解析するプラットフォームを統一する必要がある。共通のプラットフォームと成り得るGoogle Earth Engine (GEE) を用いた衛星画像解析は、画像分類ツールやサーバーが無料で提供されるため、広域の衛星画像解析を短時間で解析できる。近年ではGlobal Forest Watchというサイトを通してGoogle Earth Engineで解析した結果を公開しており、その結果はScienceに論文に掲載されている²¹⁾ほど、学術的にも大きく注目を集めている。

さらに、こうした汎用性の高いクラウド型衛星画像解析、または、森林構造変化から森林災害をより確実に捉えることができる衛星レーダー画像解析のための現地検証方法を地上レーザーによってできれば、科学的貢献度が非常に高い解析手法を提供できる。そして、正確で効率的な森林火災の現地モニタリングデータを提供できると考えられる。

近年注目されている無人航空機を併用することで、広域を調査（本研究では風倒害による倒木個体を特定）する最も安価なデータ取得技術であることを実証できた。無人航空機を用いた研究は、人が入れないような場所でもデータ取得が可能であるため、今後のさらに発展する研究領域である。しかし、無

人航空機によって取得される3次元データは、データ取得の確実性が安定していないため、無人航空機だけに頼ることなく、地上レーザーを現地検証として活用し、結果の正確性を保証する必要がある。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

東京都では2012年5月に生物多様性地域戦略である「緑施策の新展開」を公表した。この施策では、緑の量を確保する取り組みだけでなく、生物多様性の保全に向けた緑の質を高める視点を重視している。その新たな緑指標の開発に、本研究で用いた地上レーザーによるデータ取得手法と本研究で開発された解析手法が新技術として採用を検討している。東京都が新たな植生図を2019年度に作成する上で、新技術を導入することを検討しており、その試験研究として2016年度と2017年度に地上レーザーを用いた試験研究を東京都と共同で行っている。

これまで、東京都全域で取得された空中写真を用いて緑のある場所「みどり率」として面積を把握し、緑づくりの政策指標としてきた。しかしながら、緑の平面的な数値は、生物多様性保全や防災等、緑の多面的機能を持つ緑の「質」を評価できない。より質の高い緑の保全と創出を考慮する上で、これまでのみどり率としての面的把握（量）に加え、3次元データを用いて質を評価できる指標の導入を試みている。3次元データを取得する際、航空機レーザーデータではなく地上レーザーに注目される理由として、航空機レーザーよりも非常に安価で、さらに森林の垂直構造である階層構造や森林内部の状況を正確に計測できるためである。地上レーザーを用いれば、高頻度に計測することも可能である。地上レーザーは、森林構造ばかりでなく、緑の質とそこに住む動物の生息域空間を把握する基盤データとして行政の政策に活かされる予定がある。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

気候変動の適用策を検討する際、森林モニタリング手法（MRV）が非常に重要である。バイオマス変化量を3次元データにより詳細に把握できれば、MRVの正確性を大幅に改善できる。そのための技術として、地上レーザーが最も効率の良い現地データ取得方法であることを本研究では実証できた。しかし、これまで地上レーザーが活用されなかった理由として、地上レーザーセンサー自体が高額であったことと、解析技術が複雑で汎用性がなかった。科学研究に特化した解析手法しかなく、実践的ではなかった。本研究では安価なデータを用いることで森林の最適密度を自動で指標でき、森林火災前後での変化量を正確に把握できた。さらに、注目すべき点として、解析するためのデータ準備をすべて自動化できたところにある。特に、データを災害前後で正確に、自動で位置合わせできる技術を確立したことが、行政にすぐにでも活用できる技術を提供できる。使用したレーザーセンサーも価格が安く、データ取得、解析のためのデータ準備（データ合成）、解析結果の解釈まですべて自動化できるため、地上レーザーをすぐに森林災害評価やモニタリング技術に即活用できると考えられる。

地上レーザーの特徴としては、反復計測での誤差分散が小さいことにある。人による計測では、機械の誤差と人の誤差の誤差伝播が起きてしまう。しかし、地上レーザーだけでは機械誤差だけで済むため、より詳細な成長量が計測できる。そのため、これまでのモニタリング期間を大幅に短縮できる。樹木の成長量が人の計測誤差を超えるまで、モニタリングのインターバル期間を長く設ける必要があったが、その誤差が小さくなれば、モニタリングのインターバル期間を短縮でき、炭素吸収が多い森林をより早期に検知できる。もしくは、病害や枯死している場所をかなり早い段階で検知できる。森林火災前後の変化量から、大気中に放出された炭素量（消失量）を見積もることや風倒害によって倒木が生じた場合、森林構造変化を正確に把握できるため、炭素蓄積変化を確実に証明できる技術であると考えられる。

社会実装として、これらの正確な変化量の把握は、森林災害に対する保険業務の事前評価もしくは事後被害度調査に大変有効である。自然災害保険に対しては、被害度を正確に把握できる最適な調査手法である。環境政策をより公平に推進する意味でも大変意義のある成果である。

地上レーザーを活用し、「即応性」、「経年性」、「正確性」のあるデータ解析ができた。「即応性」として現地調査の効率化、「経年性」として、森林災害前後のデータ解析のモニタリング精度向上ができ、「正確性」として正確なグランドトゥールースデータを提供できた。

さらに、本研究で地上レーザーとともに用いた解析手法は今後汎用性が高まるリモートセンシング手

法であり、クラウド型衛星データ解析、衛星レーダー、無人航空機も利用して研究を推進した。

クラウド型衛星データ解析であるGoogle Earth Engine (GEE) は、国際的環境政策を推進する共通プラットフォームデータとしてFood Agriculture Organization of the United Nations (FAO)が公式に認められている¹⁰⁾。FAOはGoogleとパートナー契約を結び、森林域での解析にGEEを標準的に用い、Landsat衛星による経年的データから森林の増減を把握している。途上国でのキャパシティービルディングでも用いている。今後の環境政策は、クラウド上で共通の条件によって解析された結果を用いて行うため、無料で衛星データを活用する機会は増える。クラウド型解析ツールの利用は、環境政策へ貢献度が高い。

無人航空機 (UAV) は、地上レーザーのようなデータ確実性がまだ確保できていないが、本研究で用いた手法であるSfMによる3次元データ化は価格が安く、広域を取得できるため、補助技術としては大変有効である。今後UAVにレーザーを搭載したUAVレーザーが様々な場所で利用拡大されると思われる、UAVにレーザーを搭載した場合は、人が現地にセンサーを運ばなくても、人が入れない場所を上空から高密度に3次元レーザーデータの取得ができるようになる。より効率良く森林の基盤データを作成できるため、貢献が高い技術になり得る。今後間違いなく発展する技術分野であると言える。

衛星レーダーは、ヨーロッパ宇宙局がSentinel-1という衛星を2014年に打ち上げ、無料で公開している。GEEでもLandsat衛星だけでなくSentinel-1のデータが利用できる。しかし、2014年に打ち上げられたため、経年的データアーカイブの蓄積が少なく、レーダーによる森林災害の解析手法の確立が課題となっている。2006年からデータを取得しているALOS PALSARの衛星がGEE上で利用できる可能性が高く、ALOS PALSARの利用者が急激に増えると予想される。本研究でも森林災害による変化抽出をALOS PALSARにより行っているため、将来の展開に貢献できる。また、JAXAもJJ-FASTというGEEのJAXAバージョンのクラウド型解析プラットフォームを2016年末から公開し始めており²²⁾、本研究の知見が衛星レーダー利用拡大へ貢献できる。国内の情勢として、森林税の導入に伴い、多くの県ではクラウド型データ管理を開始している。本研究で用いたGEEのようなクラウド型森林モニタリングは今後一層需要が高まると考えられる。GEEの利用は、非営利のみに限定しており、国際的な非営利団体や学術組織がGEEを用いて環境政策に貢献できるため、環境政策へのGEEの利用は今後さらに拡大すると考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

本研究で開発しているモニタリング技術は日本のみならず、アメリカでも非常に関心の高い研究テーマであり、アメリカの研究者と共同で研究費を獲得し、国際共同研究を2016年3月から開始した。アメリカ森林局との連名で競争的資金を獲得した。平成28年度から4年間、森林火災をテーマに国際共同研究を行っている。共同研究資金名はStrategic Environmental Research and Development Program (16 RC02-002)、共同研究者はAndrew Hudak, Ph.D. (アメリカ森林局)、L. Monika Moskal, Ph.D. (ワシントン大学環境学部)である。本研究で使用した3次元データ取得を行う技術は、森林内の可燃性バイオマスの配置を明らかにできるため、大規模森林火災を未然に防ぐ処置 (林床に蓄積している可燃性バイオマスの除去や間伐) を実施する場所を特定できる。森林災害を未然に防ぐための3次元データを、地上レーザーによって低価格で容易に取得できるため、世界各地で適用される可能性が非常に高い技術である。本研究では、こうした世界で適用できる技術を開発したため、国際的にも環境政策への貢献度が高い研究として注目されている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 加藤 顕、沖津優麻、常松展充、本條 毅、小林達明、市橋 新：日本緑化工学会 41, 1, 169-174(2015), 森林の樹冠構造がヒートアイランド現象緩和機能に及ぼす影響
- 2) 田村太壱、加藤 顕、小花和宏之、吉田俊也：日本緑化工学会 41, 1, 163-168(2015), 小型UAVによる空撮とSfMを用いた樹高計測
- 3) 加藤 顕：レーザー研究, 44, 5, 320-325(2016), 森林計測における3次元レーザー利用

- 4) A. KATO, H. OBANAWA, Y. HAYAKAWA, M. WATANABE, Y. YAMAGUCHI, and T. ENOKI: IGARSS IEEE International 2015, 2642-2645 (2015), Fusion Between UAV-SfM and Terrestrial Laser Scanner for Field Validation of Satellite Remote Sensing
- 5) A. KATO, H. WAKABAYASHI, M. BRADFORD, M. WATANABE, and Y. YAMAGUCHI: IEEE IGARSS 2017, 2883-2886 (2017), Tropical Forest Disaster Monitoring with Multi-scale Sensors from Terrestrial Laser, UAV, to satellite radar
- 6) JTS. SUMANTYO, N. IMURA, S. OISHI, T. YASAKA, RH. TRIHARJANTO, K. ITO, S. GAO, K. KAMBA, N. HATTORI, F. YAMAZAKI, C. HONGO, A. KATO, L. PERISSIN: IEEE IGARSS 2017, 5382-5385 (2017), L Band Circularly Polarized SAR Onboard Microsatellite
- 7) C. GOMEZ, K. KATAOKA, A. SAPUTRA, P. WASSMER, A. URABE, J. MORGENROTH, and A. KATO: Forum Geografi 31(1), 16-27 (2017), Photogrammetry-based Texture Analysis of a Volcaniclastic Outcrop-peel: Low-cost Alternative to TLS and Automation Potentialities using Haar Wavelet and Spatial-Analysis Algorithms

<その他誌上発表（査読なし）>

- 19) A. KATO, M. BRADFORD, L. M. MOSKAL, K. KAJIAWARA, and Y. HONDA: Proceedings of Silvilaser 2015, 325-327 (2015), Low Cost and Accurate Forest Monitoring Technology using a Portable Terrestrial Laser Scanner
- 20) 加藤 顕：森林科学 74, 20-24 (2015), 地上レーザーを用いた正確なバイオマス測定
- 21) 加藤 顕、小花和宏之、早川裕弐：第 26 回 日本熱帯生態学会年次大会講演集、19 (2016), 無人航空機 (UAV) と地上レーザーを用いた熱帯林モニタリング
- 22) 加藤 顕、早川裕弐、小花和宏之：日本写真測量学会平成28年度年次学術講演会発表論文集、45-46 (2016), 無人航空機とレーザーを用いた自然災害地評価
- 23) A. KATO, M. WATANABE, and H. WAKABAYASHI: Proceedings of 3rd EARSeL Workshop SIG on Forestry, 44 (2016), Monitoring forest disaster from high precision UAV-SfM and TLS technologies
- 24) 田村太壱、加藤 顕：第128回日本森林学会要旨集、199 (2017), 3次元点群データを用いた森林構造の把握
- 25) 多賀瑞希、加藤 顕：第128回日本森林学会要旨集、235 (2017), Google Earth Engine を用いた亜寒帯林における森林火災モニタリング
- 26) 加藤 顕、陶山健一郎、南藤和也、田原美穂、八島大三：第128回日本森林学会要旨集、202 (2017), 無人航空機と地上レーザーによる大規模森林モニタリング
- 27) 加藤 顕、若林裕之、早川裕弐、小花和宏之、JTS. Sumantyo: 平成29年次学術講演会要旨集、(2017) Google Earth Engineと地上レーザーによる森林災害モニタリング
- 28) A. KATO, N. EGUCHI, and L. M. MOSKAL: Proceedings of Symposium on Systems Analysis in Forest Resources, (2017), Monitoring Deer Damage Loss using 3D data from UAV-SfM and Terrestrial Laser Scanner
- 29) 加藤 顕、第一回 千葉大学・若手植物科学の会要旨集 (2017)、無人航空機や3Dレーザーを用いた植物形態把握~ Bio Detectorとしての植物の環境応答能力~
- 30) A. KATO, A. OSAWA, A. T. HUDAK, C. A. SILVA, L. M. MOSKAL: Proceedings of Silvilaser 2017 (2017), Fractal dimension of trees using a terrestrial laser scanner
- 31) C. A. SILVA, A. T. HUDAK, L. VIERLING, C. KLAUBERG, A. KATO, A. CARDIL, and A. WEISKITTEL: Proceedings of Silvilaser 2017 (2017), Estimating individual tree aboveground carbon in a fast-growing Eucalyptus spp. forest plantation from airborne lidar data using a mixed-effects model
- 32) A. KATO, Proceedings of CU-MU Joint Symposium 2018 Toward the Research & Innovations for Food and Global Health, (2018), Estimating Ecosystem Services using 3D Remote Sensing Data
- 33) 加藤 顕、若林裕之、第129回日本森林学会大会要旨集 (2018)、地上レーザーによる森林災害評価

法

- 34) 黒宮健佑、加藤 顕、江口則和、石田 朗、高知（国内）第129回日本森林学会大会要旨集（2018）、地上レーザーによる立木密度の材積への影響評価
- 35) 神宏樹、加藤 顕、第129回日本森林学会大会要旨集（2018）、地上レーザー測量による 3 次元データをを用いた競争指数の開発
- 36) 浅見晟吾、加藤 顕、市橋 新、第129回日本森林学会大会要旨集（2018）、全方位画像を用いた森林内構造の把握

（2）口頭発表（学会等）

- 38) 加藤 顕、梶原康司、本多嘉明、第25回日本熱帯生態学会年次大会、京都大学（2015）
「地上レーザーによる3次元データを用いた森林バイオマス推定」
- 39) A. KATO, H. OBANAWA, Y. HAYAKAWA, M. WATANABE, Y. YAMAGUCHI, and T. ENOKI: IEEE IGARSS 2015, Milan, Italy, 2015
“Fusion Between UAV-SfM and Terrestrial Laser Scanner for Field Validation of Satellite Remote Sensing”
- 40) A. KATO, M. BRADFORD, L. M. MOSKAL, K. KAJIWARA, and Y. HONDA: Silvilaser 2015, La Grande Motte, France, 2015
“Low Cost and Accurate Forest Monitoring Technology using a Portable Terrestrial Laser Scanner”
- 41) 加藤 顕：第127回日本森林学会大会、日本大学生物資源科学部（2016）
「地上レーザーとUAVを用いた森林災害モニタリング」
- 42) 三浦翔太、加藤 顕、大澤 晃：第127回日本森林学会大会、日本大学生物資源科学部（2016）
「地上レーザーを用いた自己間引きに関わる樹形計測」
- 43) 田村太壱、加藤 顕、市橋 新、常松展充：第127回日本森林学会大会、日本大学生物資源科学部（2016）
「地上レーザーと小型UAV を用いた森林の階層構造の評価」
- 44) 桐枝佑輔、加藤 顕、黒岩康博、田嶋幸一：第127回日本森林学会大会、日本大学生物資源科学部（2016）
「UAVを用いたヤブツバキ林管理」
- 45) 加藤 顕、早川裕弐、小花和宏之：平成28年度年次学術講演会、東京大学生産技術研究所（2016）
「無人航空機とレーザーを用いた自然災害地評価」
- 46) 加藤 顕、小花和宏之、早川裕弐：第 26 回 日本熱帯生態学会年次大会、つくば（2016）
「無人航空機（UAV）と地上レーザーを用いた熱帯林モニタリング」
- 47) 加藤 顕、早川裕弐、小花和宏之：日本写真測量学会平成28年度年次学術講演会、東京（2016）
「無人航空機とレーザーを用いた自然災害地評価」
- 48) A. KATO, M. WATANABE, H. WAKABAYASHI: Proceedings of 3rd EARSeL Workshop SIG on Forestry, Krakov, Poland (2016)
“Monitoring forest disaster from high precision UAV-SfM and TLS technologies”
- 49) A. KATO, Google Geo for Good User Summit 2016, Mountain View, California (2016)
“The power of 3D data to save the world forest resources”
- 50) A. KATO, The 7th The Indonesia Japan Joint Scientific Symposium, Chiba, Japan (2016)
“Forest Disaster Monitoring using Google Earth Engine, UAVSfM, and Terrestrial Laser Scanner”
- 51) A. KATO, WWF Webinar (招待講演), <http://bit.ly/2lzKfPW> (2016)
“Forest Monitoring using 3D data from UAV-SfM technology”
- 52) 田村太壱、加藤 顕：第128回日本森林学会、鹿児島（2017）

- 「3次元点群データを用いた森林構造の把握」
- 53) 多賀瑞希、加藤 顕：第128回日本森林学会、鹿児島（2017）
「Google Earth Engine を用いた亜寒帯林における森林火災モニタリング」
- 54) 加藤 顕、陶山健一郎、南藤和也、田原美穂、八島大三：第128回日本森林学会、鹿児島（2017）
「無人航空機と地上レーザーによる大規模森林モニタリング」
- 55) 加藤 顕、市橋 新：第13回 GISコミュニティフォーラム、東京（2017）
「生態系調査効率化への挑戦（ArcGIS onlineと全天球カメラを用いた市民参加型調査の試み）」
- 56) 加藤 顕、若林裕之、早川裕弐、小花和宏之、JTS. Sumantyo：日本写真測量学会 平成29年次学術講演会、東京（2017）
「Google Earth Engineと地上レーザーによる森林災害モニタリング」
- 57) A. KATO: Sunnyvale, CA, USA, Google Earth Engine User Summit 2017（2017）
“Forest Disaster Monitoring using Google Earth Engine”
- 58) A. KATO, T. ALLOUIS, T. URUSHISAKI, and M. KOIKE: Montpellier France, Yellowscan International User Forum（招待講演）,（2017）
“Tree Growth Detection Power using Yellowscan UAV Laser”
- 59) A. KATO, H. WAKABAYASHI, M. BRADFORD, M. WATANABE, and Y. YAMAGUCHI: Fort Worth, TX, USA, 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium（2017）
“Tropical Forest Disaster Monitoring with Multi-scale Sensors from Terrestrial Laser, UAV, to satellite radar”
- 60) JTS. SUMANTYO, N. IMURA, S. ONISHI, T. YASAKA, RH. TRIHARJANTO, K. ITO, S. GAO, K. NAMBA, N. HATTORI, F. YAMAZAKI, C. HONGO, A. KATO, L. PERISSIN, Fort Worth, TX, USA, 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium（2017）
“L Band Circularly Polarized SAR Onboard Microsatellite”
- 61) A. T. HUDAK, B. C. BRIGHT, A. KATO, L. M. MOSKAL, and R. OTTMAR: Squamish, WA, USA, Symposium on Systems Analysis in Forest Resources（2017）
“Spatially explicit estimation of fuel consumption from pre- and post-fire traditional and point cloud measurements of fuels”
- 62) A. KATO, N. EGUCHI, and L. M. MOSKAL, Squamish, WA, USA, Symposium on Systems Analysis in Forest Resources（2017）
“Monitoring Deer Damage Loss using 3D data from UAV-SfM and Terrestrial Laser Scanner”
- 63) 加藤 顕：松戸、千葉大学新産業プロデュース活動 第25回TLOフリートーキング（2017）
「無人航空機とAIによる植物モニタリングシステムの確立」
- 64) 加藤 顕：亥鼻、第一回 千葉大学・若手植物科学の会（2017）
「無人航空機や3Dレーザーを用いた植物形態把握～ Bio Detectorとしての植物の環境応答能力～」
- 65) A. KATO: Sunnyvale, CA, USA, Geo for Good User Summit 2017（2017）
“Efficient Forest Monitoring using GEE, i-Tree, and 360 camera Theta”
- 66) A. KATO, A. OSAWA, A. T. HUDAK, C. A. SILVA, L. M. MOSKAL, VA, USA, Silvilaser 2017（2017）,
“Fractal dimension of trees using a terrestrial laser scanner”
- 67) C. A. SILVA, A. T. HUDAK, L. VIERLING, C. KLAUBERG, A. KATO, A. CARDIL, A. WEISKITTEL, Blacksburg, VA, USA, Silvilaser 2017（2017）
“Estimating individual tree aboveground carbon in a fast-growing Eucalyptus spp. forest plantation from airborne lidar data using a mixed-effects model”
- 68) A. KATO, 南京, 中国, Urban Ecosystem Services Workshop: Progress of 3-D Urban Ecology & Environment Using Advanced LiDAR Technology（招待講演）,（2017）
“Forest Disaster Monitoring using multi scale and multi-platform technology”
- 69) A. KATO, 東京, 地球観測ミッション合同PIワークショップ（2017）

“Forest disaster monitoring using ALOS 2 and Terrestrial Laser Scanner”

- 70) A.KATO, Bangkok, Thailand, CU-MU Joint Symposium 2018 Toward the Research & Innovations for Food and Global Health (2018)

“Estimating Ecosystem Services using 3D Remote Sensing Data”

- 71) A.KATO, 東京, Google Earth Engine Mini Summit 2018 in Tokyo (招待講演), (2018)

“Forest Disaster Monitoring using GEE and 3D data”

- 72) 加藤 顕、若林裕之、高知

第129回日本森林学会大会 (2018)、地上レーザーによる森林災害評価法

- 73) 黒宮健佑、加藤 顕、江口則和、石田 朗、高知 (国内) 第129回日本森林学会大会 (2018)、
「地上レーザーによる立木密度の材積への影響評価」

- 74) 神宏樹、加藤 顕、高知 (国内) 第129回日本森林学会大会 (2018)

「地上レーザー測量による 3 次元データを用いた競争指数の開発」

<ポスター発表>

- 8) 加藤沙季、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「機械学習を用いた樹木成長量の要因分析」

- 9) 田中絢子、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「無人航空機を用いた樹高成長量の測定」

- 10) 真野一樹、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「3次元データを用いた植物簡易モニタリング手法の確立」

- 11) 浅見 晟吾、加藤 顕、市橋 新、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「全方位画像を用いた森林構造把握」

- 12) 黒宮 健佑、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「地上レーザーによる簡易的樹幹測定」

- 13) 神 宏樹、加藤 顕、西千葉、千葉大学Future Earthシンポジウム (2018)

「地上レーザーを用いた樹冠フラクタル次元の測定」

- 14) 浅見晟吾、加藤 顕、市橋 新、高知、第129回日本森林学会大会 (2018)

「全方位画像を用いた森林内構造の把握」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 2nd International Workshop of LiDAR tools for Forest Application (2015年11月10日、千葉大学園芸学部 戸定ホール、観客85名)
- 2) 3rd International Workshop of LiDAR tools for Forest Application (2015年12月3日、千葉大学園芸学部 戸定ホール、観客75名)
- 3) Google Earth Engine Workshop (H29年3月2日、千葉大学けやき会館2階会議室、観客50名)
- 4) GIS, リモートセンシングセミナー(森林災害に対するリモートセンシングの活用)、(2018年3月5日、千葉大学園芸学部D棟112教室、観客30名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

千葉大学長賞、優秀賞、千葉エリア産学官連携オープンフォーラム2016 (2016)

「無人航空機と地上レーザーを用いた森林モニタリング」

8. 引用文献

- 1) Roy, D. P., Boschetti, L., Trigg, S. N. : (2006) Remote Sensing of Fire Severity: Assessing the Performance of the Normalized Burn Ratio, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 3(1), pp. 113-114
- 2) Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P., Ayres, M. P., Flannigan, M. D., Hanson, P. J., Irland, L. C., Lugo, A. E., Peterson, C. J., Simberloff, D., Swanson, F. J., Stocks, B. J., Wotton, B. M. : (2001) Climate Change and Forest Disturbances, BioScience 51(9), pp. 725
- 3) Campos-Ruiz, R., Parisien, M.-A., and Flannigan, M. D. : (2018) Temporal Patterns of Wildfire Activity in Areas of Contrasting Human Influence in the Canadian Boreal Forest, Forests 2018 9(4), pp. 159-178
- 4) Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. : (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale Geospatial Analysis for Everyone, Remote Sensing of Environment 202, pp. 18-27
- 5) Agee, J. K. : (1996) Fire Ecology of Pacific Northwest Forests, Island Press
- 6) Osawa, A. : (1995) Inverse relationship of crown fractal dimension to self-thinning exponent of tree populations: a hypothesis, Canadian Journal of Forest Research 25(10), pp. 1608-1617
- 7) Popescu, S. C., and Zhao, K. : (2008) A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees, Remote Sensing of Environment 112, pp. 767-781.
- 8) Szeliski, R. : (2010) Computer Vision: Algorithms and Applications (Texts in Computer Science), Springer
- 9) Zeid, B. and Pfeifer, P. : (1991) A Method for Estimation of Fractal Dimension of Tree Crowns, Forest Science 37 (5), pp. 1253-1265
- 10) FAO HP <http://www.fao.org/news/story/en/item/350761/icode/> (最終閲覧日2018年3月30日)
- 11) Mohamed, R. : (2006) Comparative Study of Edge Detection Algorithms Applying on the Grayscale Noisy Image Using Morphological Filter, Graphics Vision and Image Processing 6(4), pp. 19-23
- 12) Townsend, J. T. : (1971) Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix, Attention, Perception, & Psychophysics 9(1), pp. 40-50
- 13) Viera, A. J., Garrett, J. M. : (2005) Understanding interobserver agreement: the kappa statistic, Family Medicine 37(5), pp. 360-363.
- 14) Dobson, M. C., Ulaby, F. T., LeToan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E. S., Christensen, N. : (1992) Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 30 (2), pp. 412-415
- 15) Watanabe, M., Shimada, M., Rosenqvist, A., Tadono, T., Matsuoka, M., Romshoo, S. A., Ohta, K., Furuta, R., Nakamura, K., and Moriyama, T. : (2006) Forest Structure Dependency of the Relation Between L-Band σ_0 and Biophysical Parameters, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 44(11), pp. 3154-3165
- 16) Zyl, J. V. and Kim, Y. : (2011) Synthetic Aperture Radar Polarimetry (JPL Space Science and Technology Series), Wiley
- 17) Lee, J.-S. and Pottier, E. : (2009) Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications (Optical Science and Engineering), CRC Press
- 18) 山口芳雄 : (2008) レーダポーラリメトリの基礎と応用—偏波を用いたレーダリモートセンシング, 電子情報通信学会
- 19) Osawa, A. and Kurachi N. : (2004) Spatial leaf distribution and self-thinning exponent of *Pinus banksiana* and *Populus tremuloides*, Trees 18 (3), pp. 327-338
- 20) Hudak, A., Kato, A., et al., Towards spatially explicit quantification of pre- and post-fire

fuels and fuel consumption from traditional and point cloud measurement (In review)

- 21) Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., Townshend, J. R. G., : “High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change” , Science 15 342(6160), pp. 850–853 DOI: 10.1126/science.1244693
- 22) JAXA HP http://www.jaxa.jp/press/2016/11/20161114_jjfast_j.html (最終閲覧日2018年3月30日)

III. 英文Abstract

Evaluating Impact Assessment of Forest Disaster Using Terrestrial Laser Scanner

Principal Investigator: Akira KATO

Institution: Chiba University
 Graduate School of Horticulture
 6498 Matsudo Matsudo, Chiba, 2710092, JAPAN
 Tel: +81-47-308-8892 / Fax: +81-47-308-8892
 E-mail: akiran@faculty.chiba-u.jp

[Abstract]

Key Words: Forest fire, Windthrow, Biomass, Ground truth, 3D, UAV, Satellite radar, Cloud-based analysis, MRV, Natural disaster insurance

Thirty percent of the total land on earth is covered by forest. But increasing forest fire releases the carbon to the air and accelerates global warming. To establish an evaluation method of the impact assessment for forest disaster, Terrestrial Laser Scanner (TLS) is utilized for this study. As the impact assessment method, this study introduces three-dimensional data analysis from TLS instead of the conventional and simple visual inspection in the field.

It is very critical for remote sensing technology to monitor forest in remote areas where frequent forest fire happens. In this study, forest fire and windthrow are the main focus as forest disaster. Our study site is tropical forest for the topic of windthrow detection in Australia and boreal forest for the topic of forest fire detection in Canada and Estonia.

As a method to analyze the three-dimensional data, voxel is introduced. For forest fire, the amount of biomass loss is estimated using missing voxels between pre and post forest fire. For windthrow, vertical voxel change is detected from the upper to the lower part of the forest. The multi-temporal TLS data is accurately matched through the algorithm established for this study. To prevent severe forest fire event, fuel accumulation under the forest floor of dense tree density should be detected. To achieve this, self-thinning rule is evaluated from three-dimensional data to get the optimized stand density.

To validate satellite-based result using TLS, cloud-based analysis is used to cover large forest fire area. Landsat images from 1980 to the current are used to identify forest fire cycle and history from time-series analysis. And satellite radar (ALOS and ALOS-2) is also used to detect forest fire by coherent change analysis. To validate the satellite-based result, the lost voxels between pre and post fire are identified.

As a result, there is high correlation between the coherent change and the lost voxles from forest fire. TLS is the best way to get the field data using 3D. Voxel representation is not necessarily related with the conventional estimation of stem volume. The conventional stem volume estimation cannot count the variation of stands while voxel can capture the variation, especially good for deciduous trees which have more irregular shapes. And the method for this change detection is very useful and applicable to insurance for disaster in evaluating pre-fire risk and measuring damage intensity of post-fire condition.