

令和 元年 6 月 20 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04946

研究課題名（和文）マルチセンサを用いた天然林の持続的 management のためのモニタリング手法の開発

研究課題名（英文）Development of monitoring method using multi-sensors for sustainable management of natural forest

研究代表者

平田 泰雅（Hirata, Yasumasa）

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・研究ディレクター

研究者番号：50353826

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、UAV搭載センサを用いて単木樹冠の形状や反射スペクトル特性から樹種分布や樹木の健全性をモニタリングする手法を開発するとともに、これらがデジタル空中写真、航空機レーザスキャナデータからどの程度把握できるかを明らかにし、これらのデータを用いて天然林の有用樹種や林相および資源量を高精度で広域把握する手法を開発した。その結果、マルチスペクトルや熱赤外のセンシングによって有用樹種の判別が可能になり、健全性を検出できた。また、これらを航空機データにより景観レベルにスケールアップすることが可能になった。さらに、航空機データから得られる平均樹高等から景観レベルでの天然林の資源量の把握が可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、天然林の持続的 management に必要となる空間情報を単木レベルから林分、景観レベルのマルチスケールで把握するためのモニタリング手法を開発するものであり、従来の地上ベースでの森林情報収集やアナログ空中写真では得られなかった、天然林の持続的 management に必要となる広域かつ高精細の森林空間情報を取得することが可能になった。とりわけ天然林における単木レベルでの樹種や健全性と反射スペクトル特性との関係を明らかにすることにより、天然林の広域モニタリングの精度向上につながる技術を開発した。これにより、天然林の資源量をより正確に推定できることが期待でき、温暖化の緩和策策定に重要な森林の吸収量算定精度の向上につながる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a method for monitoring of distribution of tree species and soundness of trees from crown shape and reflective spectrum characteristics using sensors carried on UAV. We also investigated whether such characteristics can be observed by aerial digital camera and airborne laser scanner, or not. In addition, we developed a method for mapping forest types and estimating forest stand volume from these data. As a result, it became clear that useful tree species can be distinguished and that water stress related to soundness can be detected by multispectral and thermal infrared sensing, and it became possible to scale up them from single tree level to landscape level using laser scanner data and aerial photographs. Furthermore, it became possible to grasp natural forest resources from metrics related to forest height which were derived from aerial data at the landscape level.

研究分野：森林

キーワード：天然林 UAV 航空機レーザスキャナ 資源量 健全性 持続的 management モニタリング 反射スペクトル特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我が国では森林が国土面積の66.4%を占めており、そのうち53.5%が天然林である（国土面積比35.3%）。天然林は、生物多様性保全機能や水源涵養機能、土砂災害防止機能、土壌保全機能、保健・レクリエーション機能、木材を含む物質生産機能など様々な機能を有している。また、近年では、二酸化炭素吸収による地球温暖化の緩和の役割も期待されている。そのため、天然林の持続的な管理が強く望まれが、一方で、持続的な管理に必要な天然林資源の正確な情報が人工林に比べて大きく不足している。

天然林を持続的に管理するためには、林相や資源量などの林分・景観レベルでの森林情報のみならず、有用樹種の分布や樹木の健全性など単木レベルでの情報も必要となる。しかしながら、広域にわたる森林を管理する場合、地上調査による情報収集は実施面での制約があり、効率的に情報を収集する手法の開発が求められる。

人工衛星や航空機を用いた森林観測は、広域モニタリングに対して有効であるため、これまでさまざまな研究がなされてきた。とりわけ、高分解能衛星センサでは単木樹冠を観測することが可能であり、人工林の蓄積推定に有効であることが示されてきた（Hirata, 2008, Hirata et al., 2009）。また、航空機レーザスキャナを用いた計測データからは高さ方向の情報が取得でき、樹高や林分蓄積の推定の向上が図られた（Hirata et al., 2008, 2009, Takahashi et al., 2010）。

さらに近年では、空中写真が高性能デジタルカメラで撮影されるようになり、林冠表面の標高の復元が容易になっている。また、UAV（Unmanned Aerial Vehicle；無人航空機）の操作性の向上やUAVに搭載するマルチスペクトルおよび熱赤外センサの小型・軽量化が図られており、その機動性を活かした森林モニタリングに期待が寄せられている。しかしながら、これまでの研究では、主に人工林や階層が比較的単純な針葉樹天然林での技術開発が中心であり、何層もの階層構造をもつ天然林への応用はあまり見られなかった。加えて、単木レベルでの情報収集には、異なるセンサの組み合わせによる高精細の観測が有効であるが、天然林における単木レベルでのマルチセンサによる観測技術は確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では、UAV搭載センサを用いて単木樹冠の形状や反射スペクトル特性から樹種分布や樹木の健全性をモニタリングする手法を開発するとともに、これらがデジタル空中写真、航空機レーザスキャナデータからどの程度把握できるかを明らかにする。さらに、デジタル空中写真、航空機レーザスキャナデータから、天然林の林相および資源量を高精度で広域把握する手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 研究対象地

本研究の研究対象地は東京大学北海道演習林の天然林である。演習林は北海道中央部の富良野市に位置し、冷温帯の夏緑広葉樹林から亜寒帯の常緑針葉樹林への移行帯である汎針広混交林帯に属する。

(2) 使用したデータ

演習林では、林分施業法に基づく森林管理のための森林資源調査プロット、および、持続的・順応的な森林管理手法の構築に関わる特定の基礎的・応用的研究課題に取り組むための永久測定試験地が設定されており、毎木調査データ、樹幹投影図がデータベース管理システムで管理されている。また伐採対象とされた林分で収穫調査が行われている。本研究ではこれらの調査データを利用した。

マルチセンサデータとしては、航空機レーザスキャナデータ、デジタル空中写真、UAV搭載デジタル写真、マルチスペクトルデータ、熱赤外データを使用した。

(3) 解析方法

① UAV搭載センサによる単木レベルのモニタリング

UAVに搭載したデジタルカメラ、マルチスペクトルカメラ、熱赤外カメラを用いて、個体位置の測量が完了している既存プロットの空撮を実施する。また、地上調査において、立木位置と樹冠位置、階層の関係を確認し、健全性を判定する。さらにUAVに搭載したセンサを用いて地上からの撮影を行い、健全性がどのように構造特性、反射スペクトル特性に影響するかを調べる。また、UAVに搭載した高分解能のデジタルカメラで撮影された画像から樹冠を抽出し、樹種ごとの反射スペクトル特性をマルチスペクトルカメラで撮影された画像から明らかにし、撮影範囲における有用樹種の分布を把握する。

② 単木レベルから林分・景観レベルへのスケールアップ

UAVで抽出された有用樹種の分布や樹木の健全性状況をデジタル空中写真および航空機レーザスキャナデータを用いて広域にスケールアップするために、人工林で単木抽出に用いられている Watershed 法がどのように天然林に適用可能であるかについて検討し、その抽出精度を個体位置の測量が完了しているプロットで検証する。併せて、抽出された樹冠の反射スペクトル

特性や樹冠形の特徴を明らかにする。また、デジタル空中写真から得られる林冠の反射スペクトル特性、樹冠のサイズ構造やギャップの情報、航空機レーザスキャナデータから得られる林冠高の情報を用いてオブジェクトベース分類により林相区分を行う。林相区分においては、森林資源調査により得られた立木密度や林分蓄積、樹種構成、サイズ構造などの調査データと施業に応じた林種区分による林分の境界測量結果を用いて、最適な分類パラメータを決定する。

③航空機搭載センサによる林分・景観レベルでの森林情報の把握

デジタル空中写真から得られる林冠の反射スペクトル特性、樹冠のサイズ構造やギャップの情報、航空機レーザスキャナデータから得られる林冠高の情報を用いてオブジェクトベース分類により林相区分を行う。林相区分においては、森林資源調査により得られた立木密度や林分蓄積、樹種構成、サイズ構造などの調査データと施業に応じた林種区分による林分の境界測量結果を用いて、最適な分類パラメータを決定する。また、UAV 搭載センサにより把握された有用樹種の分布、健全性をデジタル空中写真および航空機レーザスキャナデータに重ね合わせ、それぞれの樹種の分布がデジタル空中写真による反射スペクトル特性および航空機レーザスキャナデータによる構造的な特性からどのように把握できるかを明らかにする。さらに、各林相における航空機レーザスキャナで得られる平均林冠高などの変数と固定プロットデータから算出される林分材積との回帰分析からモデルを作成する。これにより算出された林分材積を用いて、景観レベルでの資源量のマッピングを行う。

4. 研究成果

① UAV 搭載センサによる単木レベルのモニタリング

取得した樹種ごとの紅葉・落葉期の多時期観測データから、針葉樹と落葉広葉樹の判別は容易であり、多時期モニタリングにより樹種ごとの紅葉・落葉時期の違いも明瞭に観測された。さらに、UAV 空撮画像上で、虫害による葉の食害が確認されるとともに、梢端部の先枯れなどの状況等を確認することができた。

UAV リモートセンシングによる樹木の水分ストレスの評価・検出するため、20年生のブナ植栽地において環状剥皮処理を行い、同時に、マルチスペクトルカメラ (MicaSense 社 RedEdge3 ほか) または熱赤外カメラ (FLIR 社 Zenmuse XT) を搭載した UAV により空中撮影を行った。その結果、サンプル木にひずみゲージを設置して樹幹直径の日変化パターンから水分状態をモニタリングした。その結果、環状剥皮当年には著しい水分状態の低下は認められなかったが、剥皮木には 9 月末に早期黄葉が観察された。剥皮翌年には、樹幹直径の日変化パターンから 7~8 月に一部の剥皮木で顕著な水不足の発生が推察される一方で、生育期を通じてほとんどの剥皮木で葉色に帯黄が認められた。このため、クロロシスの影響も受けたものの、帯黄の顕著でなかった 7~8 月に、レッドエッジ領域の反射率の増大に伴う NDRE (正規化レッドエッジ指数) の低下が認められた。また、熱赤外画像より樹冠温度の上昇が認められ、蒸散速度の低下が窺えた。これらのことから、マルチスペクトルや熱赤外のセンシングによって水分ストレスを検出できることが明らかになった (図 1)。

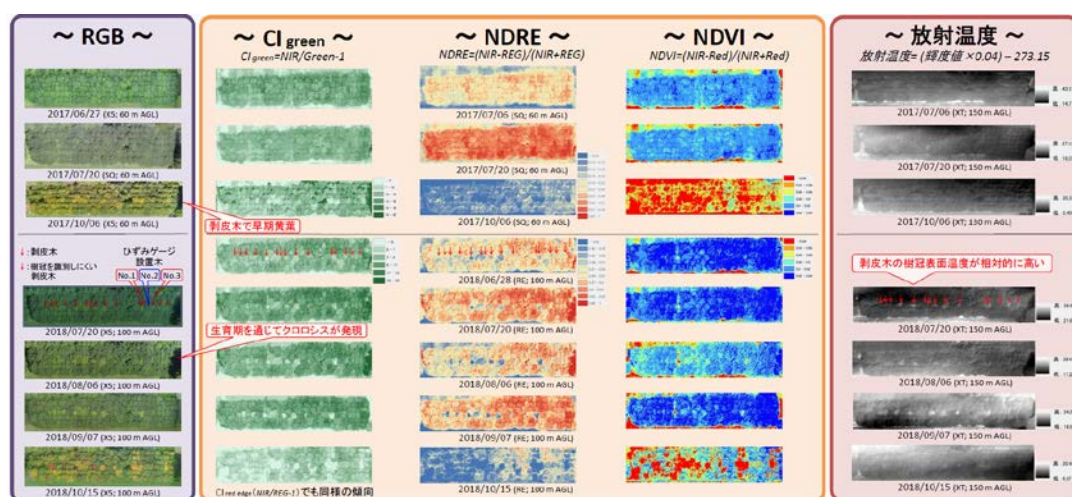


図 1. ブナ林の環状剥皮処理区における反射特性の変化

UAV による針広混交林天然林における樹種判別や衰退・腐朽木、病虫害被害木判別を目的として、UAV に熱赤外センサ、マルチスペクトルセンサ、RGB カメラを搭載して多時期・マルチセンサ観測を実施した。着葉期および紅葉期にそれぞれ複数回の多時期観測を実施し、北方天然林構成樹種のフェノロジーを観測した。主要樹種の樹種間の着落葉時期の違いや色調の違いを

明らかにした(図2)。次に、UAVによる針広混交天然林の資源量把握として、固定標準地において、着葉期と落葉期の2回の集中観測を実施した。次に挙げる最新の航空機レーザスキャナデータより取得された地盤高データと比較し、表層を捉えるUAVによる着葉期および落葉期観測による地形モデリングの制約を明らかにした。また、最新の地上計測により作成された樹木位置図と対応付け、針広混交林天然林における針葉樹単木材積推定に有効なUAV観測パラメータを明らかにした。

② 単木レベルから林分・景観レベルへのスケールアップ

広域にスケールアップする手法の検討のために、UAVによる詳細(マイクロ)観測に対応した最新の航空機レーザスキャナデータを取得した。取得された航空機レーザスキャナの三次元点群データから林冠高モデルを作成した。人工林での単木抽出に利用されているWatershed法の適用を検討し、針広混交天然林を構成する主要な針葉樹であるトドマツ、アカエゾマツ等の単木樹冠抽出に有効であることを明らかにした。Watershed法の適用には、個々の樹冠の形状を平滑・平準化する空間フィルタリングの事前適用が有効であった。一方、広葉樹樹冠については、抽出樹冠ポリゴンの樹冠形状および色調情報を用いた統合処理が必要であった。

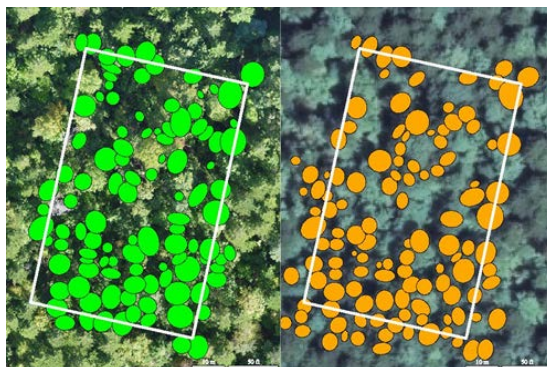


図2. ドローン空撮とデジタル空中写真での針葉樹樹冠抽出結果の比較

(林冠木抽出には、ドローン空撮とデジタル空中写真の大きな違いは見られない。林冠を構成する胸高直径20-30cm以上の樹冠が上空から捉えられる。ドローン空撮では、落葉期の撮影を実施することで、広葉樹林冠構成木下の中下層針葉樹が捉えられる。)

以上を踏まえ、デジタル空中写真および航空機レーザスキャナデータから得られる林冠の反射スペクトル特性、樹冠のサイズ構造やギャップの情報、林冠高の情報を用いてオブジェクトベース分類手法を適用し、地上での調査および踏査によって作成された林種区分図に対応するような林相区分図を作成できた。

③ 航空機搭載センサによる林分・景観レベルでの森林情報の把握

まず、有用樹種のトドマツの林分単位での材積推定には、樹高を説明変数とした単木材積推定の積み上げが有効であることを明らかにした。次に、樹木の健全度(衰退・腐朽・病虫害被害の有無)の判定では、固定標準地内のトドマツの定期的な地上計測に基づく近年の胸高直径成長の違いによる樹木の健全度が、UAV搭載のマルチスペクトルセンサによって計測される近赤外とレッドエッジの波長帯の反射率から算出される指数であるNDREの違いとして区分できることを明らかにした(図3)。これに対し、航空機の可視域デジタルカメラでは近赤外のデータが利用できないため良好な結果が得られなかった。さらに、各林相における航空機レーザスキャナで得られる平均林冠高などの変数と固定プロットデータから算出される林分材積との回帰分析からモデルを作成し($R^2=0.94$)、景観レベルでの資源量のマッピングを行うことが可能になった(図4)。

天然林択伐施業において、健全木判定は伐採木選定の重要な要素であり、UAVによる非破壊の単独調査によって判定できることは、実際の施業でも適用できる実用的な成果である。また、本研究で開発した航空機レーザスキャナデータからの林分材積推定モデルによる天然林の資源量のマッピング技術は、天然林の広域資源管理に貢献するものである。

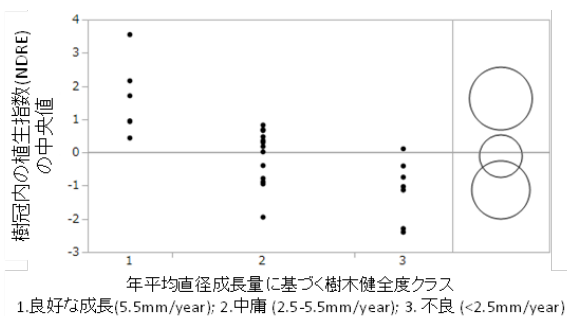
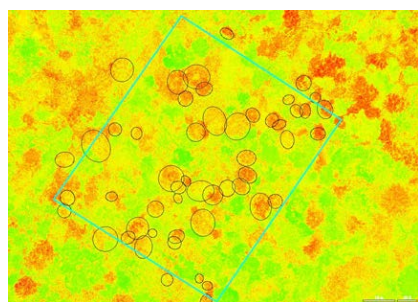


図3. マルチスペクトル観測によるNDRE指数の分布(左)と樹木健全度によるNDREの違い(右)

NDREは高い値(赤色)が健全な樹木を表し、低い値(黄色)が近年の成長が衰えた不健全な樹木である。

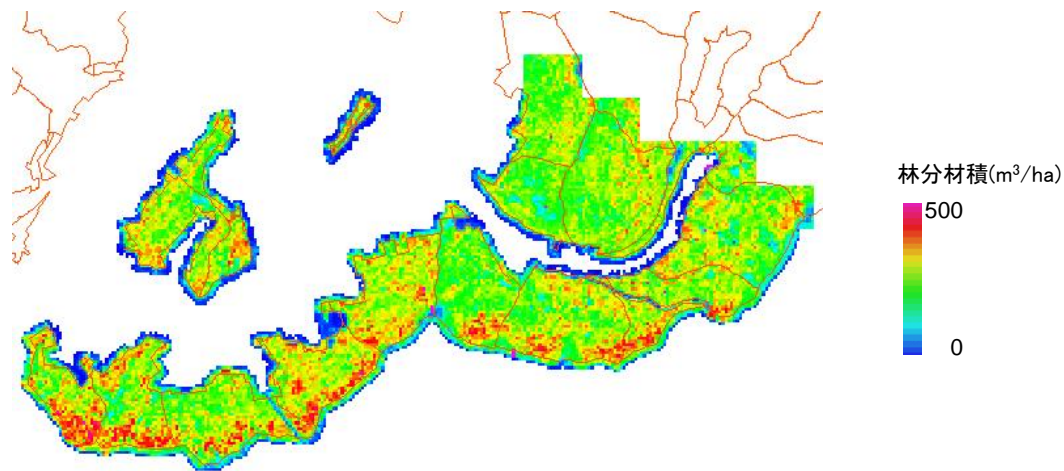


図4. 航空機レーザスキャナデータからの林分材積推定モデルによる天然林の資源量のマッピング

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S., Digital aerial photogrammetry for uneven-aged forest management: Assessing the potential to reconstruct canopy structure and estimate living biomass. *Remote Sensing*, 査読有, 11(3), 2019, 338, DOI:10.3390/rs11030338
- ② Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S., The use of fixed-wing UAV photogrammetry with LiDAR DTM to estimate merchantable volume and carbon stock in living biomass over a mixed conifer-broadleaf forest. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 査読有, 73, 2018, 767-777. DOI: 10.1016/j.jag.2018.08.017
- ③ Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S., Evaluating the performance of photogrammetric products using fixed-wing UAV imagery over a mixed conifer-broadleaf forest: Comparison with airborne laser scanning. *Remote Sensing*, 査読有, 10(2), 2018, 187. DOI: 10.3390/rs10020187
- ④ 犬飼慎也、遠國正樹、中川雄治、Sadeepa Jayathunga、古家直行、尾張敏章、低価格固定翼 UAV を用いた林分現況把握の試み. *北方森林研究*, 査読有、66, 2018, 93-96.

〔学会発表〕(計 19 件)

- ① 平田泰雅、古家直行、坂上大翼、尾張敏章、鎌田直人、航空機レーザスキャナデータの天然林管理への応用. 第 130 回日本森林学会大会、2019.
- ② 古家直行、平田泰雅、尾張敏章、坂上大翼、中川雄治、遠國正樹、天然林持続的管理のためのマルチセンサを用いた森林モニタリング. 第 130 回日本森林学会大会、2019.
- ③ 坂上大翼、古家直行、マルチスペクトル・熱赤外センサによるブナ環状剥皮木の水ストレス検出. 第 130 回日本森林学会大会、2019.
- ④ Moe, K.T., OWARI, T., Jayathunga, S., Furuya, N., Hiroshima, T., Quantifying individual tree parameters of large-sized high-value trees using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery in mixed conifer-broadleaf forest in Northern Japan. 第 130 回日本森林学会大会、2019.
- ⑤ Moe, K.T., OWARI, T., Jayathunga, S., Furuya, N., Hiroshima, T., Discriminating High-value Broadleaf Trees from UAV(Unmanned Aerial Vehicle) Imagery in the University of Tokyo Hokkaido Forest, Japan. 8th Symposium of Asian University Forests Consortium, 2018.
- ⑥ Furuya, N., Hirata, Y., Owari, T., Sakaue, D., Inukai, S., Nakagawa, Y., Tohkuni, M., Assessment of sustainable forest management of a mixed conifer-broadleaf forest by combinations of airborne Lidar and UAV observation. *ForestSat2018*, 2018.
- ⑦ 平田泰雅・古家直行・尾張敏章・坂上大翼・鎌田直人、航空機レーザスキャナを用いた天然林の林分特性把握. 第 129 回日本森林学会大会、2018.
- ⑧ 古家直行、平田泰雅、尾張敏章、坂上大翼、犬飼慎也、中川雄治、遠國正樹、針広混交天然林における UAV 空撮画像による地形モデリング. 第 129 回日本森林学会大会、2018.
- ⑨ 坂上大翼、古家直行、マルチスペクトル・熱赤外センサによる樹木水分生理状態の検出特性. 第 129 回日本森林学会大会、2018.
- ⑩ Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S., Changes in forest structural complexity followed by selection cutting: An analysis using multi-temporal UAV imagery. 129

- 回日本森林学会大会, 2018.
- ⑪ 花岡創、古家直行, トドマツの樹冠反射スペクトルを用いた生理学的特性のクローン間変動評価の可能性. 第6回森林遺伝育種学会大会, 2017.
 - ⑫ 犬飼慎也、遠國正樹、中川雄治、Sadeepa Jayathunga、古家直行、尾張敏章, 低価格固定翼 UAV を用いた林分現況把握の試み. 第66回北方森林学会大会, 2017.
 - ⑬ Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S., Application of image-based point clouds for forest inventory and management: Study in a mixed conifer broadleaved forest in Northern Japan. IUFRO 125th Anniversary Congress 2017, 2017.
 - ⑭ Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S., Quantifying structural complexity as an indicator of biodiversity in heterogeneous forests: Potential of ALS and UAV system. IUFRO 125th Anniversary Congress 2017, 2017.
 - ⑮ Jayathunga, S. Remote sensing of forest structural complexity indices. 森林 GIS フォーラム, 2017.
 - ⑯ Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S., Fixed-wing UAV imagery for forest structure classification and mapping: A study in a mixed conifer-broadleaved forest. 第128回日本森林学会大会, 2017.
 - ⑰ 平田泰雅、古家直行、尾張敏章、坂上大翼、鎌田直人、天然林の成長予測への航空機リモートセンシングの応用. 第128回日本森林学会大会, 2017.
 - ⑱ 古家直行・平田泰雅・尾張敏章・坂上大翼・中川雄治・遠國正樹, UAV・空中写真による針広混交天然林の針葉樹資源量推定. 第25回生研フォーラム, 2017.
 - ⑲ Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S., Forest biophysical parameter estimation using UAV imagery and airborneLiDAR data:a study in a mixed conifer-broadleaved forest. 7th International Symposium of the Asian University Forests Consortium, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：古家 直行
ローマ字氏名：(FURUYA, Naoyuki)
所属研究機関名：国立研究開発法人森林研究・整備機構
部局名：森林総合研究所
職名：グループ長
研究者番号 (8 桁)：50391181

研究分担者氏名：鎌田 直人
ローマ字氏名：(KAMATA, Naoto)
所属研究機関名：東京大学
部局名：農学生命科学研究科
職名：教授
研究者番号 (8 桁)：90303255

研究分担者氏名：尾張 敏章
ローマ字氏名：(OWARI, Toshiaki)
所属研究機関名：東京大学
部局名：農学生命科学研究科
職名：准教授
研究者番号 (8 桁)：00292003

研究分担者氏名：坂上 大翼
ローマ字氏名：(SAKAUE, Daisuke)
所属研究機関名：東京大学
部局名：農学生命科学研究科
職名：助教
研究者番号 (8 桁)：90313080

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：JAYATHUNGA, Sadeepa
ローマ字氏名：JAYATHUNGA, Sadeepa