

課題名 2RF-1301 バイオマスモニタリングのための現地サンプリング手法の開発

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 緑地科学領域)

研究実施期間 平成25～26年度

累計予算額 24,096千円(うち26年度12,682千円)  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード REDD+、レーザー、バイオマス、モニタリング、リモートセンシング

## 研究体制

(1)バイオマスモニタリングのための現地サンプリング手法の開発(国立大学法人 千葉大学)

## 研究概要

### 1. はじめに(研究背景等)

国際環境政策であるREDD+(開発途上国における森林の破壊や劣化を回避することで温室効果ガスの排出を削減するプロジェクト)では、森林をモニタリングする技術として、広域でのデータ取得が前提であるため、衛星リモートセンシング技術が利用され、土地利用変化を抽出する手法が確立している。しかし、その結果を検証するための正確性の高い現地データの入手が難しい。クレジットが市場で取引されるため、正確性の高い現地データは必要である。途上国では森林測定に必要な現地調査に必要な機材がない。そういった地域ではマニュアルで測定しているため、得られたデータの質を保証できない。

炭素蓄積量の算出方法に関して、従来は土地被覆図や土地利用図から「森林」と分類されている場所に、森林区分毎に「平均材積」を掛け合わせて、森林域全体の炭素蓄積量を算出している。しかし、平均材積値を地域レベルに一律で適用することは、同じ地域であっても気候、地形、地位、樹種の違いがあるため正確とは言えない。そのため、REDD+プロジェクトに参入する民間企業や各国政府は新たに材積量を調査しなくてはならない状況も出てきている。プロジェクトを推進するためには、正確で簡易な調査手法が、REDD+には望まれている。

本研究は、熱帯林に地上レーザーを導入し、正確な調査手法を確立することを目的としている。熱帯におけるバイオマスモニタリング手法として地上レーザーに注目した理由は、従来の手法に比べて、汎用性、コスト、解析時間、正確性、解像度、すべての項目で地上レーザーによるデータ取得が最適であるためである。(表1)。

表1 従来の手法と地上レーザーによる手法との比較

	人による測定	航空機レーザーによる測定	地上レーザーによる測定
1. 汎用性	×	△	◎
2. コスト	×	×	◎
3. 解析時間	×	○	◎
4. 正確性	×	○	◎
5. 解像度	○	○	◎

### 2. 研究開発目的

本研究は最新の地上レーザーを用いて、長期モニタリングプロットにおいてレーザーデータを取得し、得られた3次元データから自動で毎木調査を行い、バイオマスモニタリング手法の確立をする。地上レーザーデータをGPSと連動させることで、位置座標が付いたデータとしてアーカイブ保存ができ、同じ場所で再度測定できるようにする。その結果、炭素蓄積量や成長量変化を客観的に評価できる。

現地サンプリング手法の開発を行うために、研究期間2年のうち初年度は、市販されている地上レーザーセンサーの中で安価なSICK LMS511を用いた簡易型地上レーザーを用いて、熱帯林でデータ取得を行う。安価なセンサーは途上国でも購入可能な価格となっている(センサー価格は100万円以内)。独立電源である乾電池で動くシステムを構築し、途上国のどの森林でも持ち運べるようにする。最終年度は、その地上レーザーを用いたサンプリングデザインを検討する。安価なセンサーを用いた簡易地上レーザーの設置場所を検討した。そのための新たなサンプリング手法(現地調査方法)を考え、簡易型地上レーザーだけで広域のバイオマスを正確に推定できるようにすることを目的としている。

### 3. 研究開発の方法

本研究は、簡易型地上レーザーを用いて熱帯林のバイオマスを広域に推定する手法を確立することであり、そのためには、以下の3つの視点で結果をまとめたい。

- ①簡易型地上レーザーの性能
- ②簡易型地上レーザーと高精度地上レーザーとの比較
- ③サンプリングデザインの結果と考察

以上の3つ観点から結果と考察を行うために、以下に7つの項目（1）地上レーザー、（2）衛星画像データ、（3）現地調査データ、（4）バイオマス算出方法、（5）地上レーザーデータ解析方法、（6）サンプリングデザイン について以下に説明する。

#### （1）地上レーザー

本研究で用いた地上レーザーは照射距離が短距離型タイプと長距離型タイプの2種類のセンサーを用いた。長距離型センサーは高精度センサーで、3次元データが最も詳細に取得できる一方で、高額で輸出規制品となっている。本研究開発での成果を世界的標準手法にすることであり、安価なセンサーでも正確性の高い現地調査ができるようにしなければならない。

安価なセンサーであるSICK LMS511によるレーザースキャナーは千葉大学 環境リモートセンシング研究センター 梶原康司 講師、本多嘉明 准教授の研究協力により、ラインセンサー型であるSICK LMS511のセンサーの下に回転台を取り付け、360度回転するスキャナーとした（表2, 図1）。

地上レーザーによるデータ取得は、沖縄琉球大学演習林と国頭村の国有林、インドネシア ボゴール植物園、ボゴール農科大学演習林であるHutan Pendidikan Gunung Walat、オーストラリアのRobson`s Creekの熱帯林にてデータ取得を行った（表3）。

#### （2）衛星画像データ

地上レーザーは照射距離に限りがあるため、広域を評価するためには衛星画像等の広域データと併用する必要がある。地図のない途上国熱帯林でも事前に地上レーザーを設置する場所を決めなければならない。比較的低価格の高解像度衛星画像を用いることで、現地の森林状況の把握とレーザーセンサーを設置する場所の状況を知る基礎データとして使用した。使用した衛星画像が、RapidEye衛星画像（解像度5m）と、さらにより高解像度であるGeoEye-1衛星画像（解像度0.5m）を用いた。

#### （3）現地調査データ

本研究で対象とする森林は、国内では沖縄琉球大学与那フィールド科学センターまたは国頭村国有林を調査対象とした。国外では、インドネシア ボゴール植物園の熱帯林、ボゴール農科大学演習林と、オーストラリア オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）のスーパーサイトの一つである

表2 本研究で使用した2種類のレーザーセンサー

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

表 3 本研究で測定した対象地一覧

調査場所		使用した地上レーザーセンサー	データ取得日
沖縄	琉球大学演習林	RIEGL VZ400	2013年8月
	国頭村国有林	SICK LMS511	2014年8月
インドネシア	ボゴール植物園	SICK LMS511	2013年9月
	ボゴール大学演習林		2014年9月
オーストラリア	CSIRO Robson`s Creek	RIEGL VZ400	2014年2月
		SICK LMS511	2014年6月

Robson`s Creekの熱帯林を対象地とした。Robson`s Creekでは2009年～2012年の3年間で25ha内のすべての樹木(23,416本)が毎木調査されており、世界でも希にみる詳細な樹木データの蓄積がある。25haは1ha単位でタイル状に調査区が分かれており、各1ha調査区の中心位置で2014年2月と6月に地上レーザーによる3次元データ取得を行った。Robson`s Creekの25haの広範囲なプロットでは、高精度地上レーザーであるRIEGL VZ400と簡易型地上レーザーであるSICK LMS511の両方のセンサーを現地に持ち込み、データ取得を行った(図2)。

#### (4) バイオマス算出方法

従来のバイオマス算出方法は、材積(幹体積)に密度係数や枝葉及び根の拡大係数を掛け合わせることで簡易的にバイオマスを算出できる。材積算出には、予め作成された材積式に、現地で測定した胸高直径や樹高を代入して算出するが、熱帯林は樹高が高い樹木が樹冠を鬱閉しているため、樹高測定が難しい。よって胸高直径だけから材積を算出する式が作成されており、本研究では胸高直径だけで現地バイオマス量を推定する汎用性の高い式を用いて、現地でのバイオマス推定式とした(式1)。

$$AGB = 21.297 - 6.953 \times DBH + 0.740 \times DBH^2 \text{ (Wet model)}$$

$$AGB = \exp(-2.134 + 2.530 \times \ln(DBH)) \text{ (Moist model)}$$

$$AGB = \exp(-1.996 + 2.32 \times \ln(DBH)) \text{ (Dry model)}$$

(式1)

モデル適用条件:

Wet model は年間降水量4,000mm以上で乾期無し環境条件

Moist modelは年間降水量1,500～4,500mmで乾期無しまたは短い乾期

Dry modelは年間降水量1,500mm未満で数ヶ月の乾期

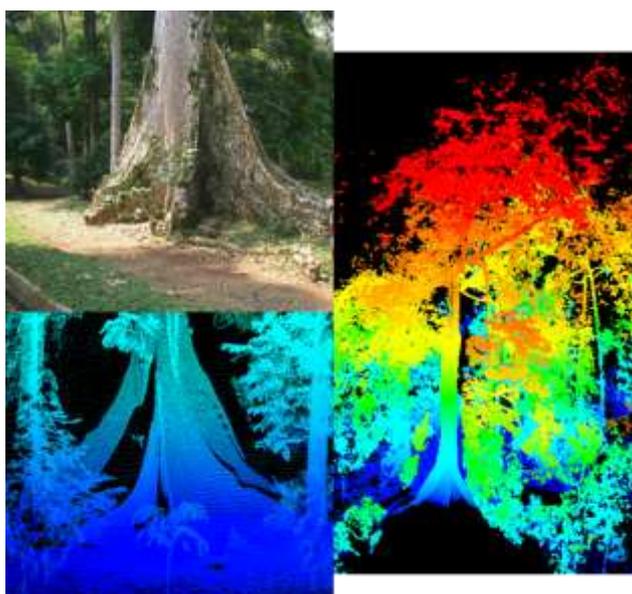


図1 インドネシア ボゴール植物園で測定した単木で切り出した3次元データ(簡易型地上レーザーであるSICK LMS511を用いてデータ取得を行った。簡易型レーザーでもレーザーが樹頂点に十分に届いていることがわかる。また、板根のような複雑な樹形を3次元データで取得できていることがわかる。図中の色は高さによって色づけをしている。)

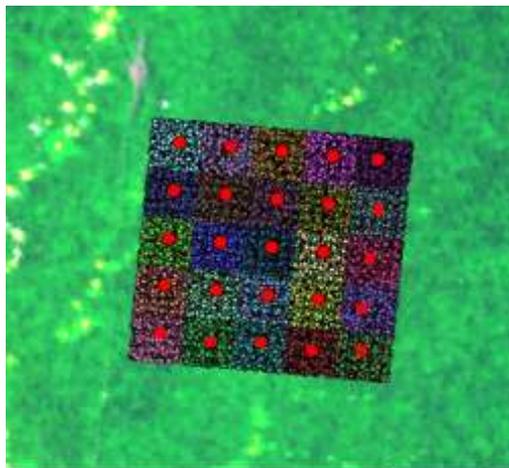


図2 オーストラリア Robson`s Creekの毎木位置図とレーザーを設置した場所（試験地全体で25haあり、1ha毎がタイル状に調査区が分かれており、各1ha内の樹木に異なる色を付けて表示してある。さらに、各1haの中心（赤丸点）がレーザーセンサーを設置した場所、背景：RapidEye画像）。

本研究対象地は、沖縄琉球大学演習林で平均年間降水量が約2,100mm、インドネシア ボゴール植物園では約3,800mm、オーストラリアRobson`s Creekでは約2,300mmであるため、本研究では上記式1のMoist modelをすべての対象地で適用した。

#### （5）地上レーザーデータ解析方法

バイオマス算出方法に基づいて、熱帯林での現地調査で取得したデータからバイオマスを算出するには正確な胸高直径の測定が重要になる。そのため、地上レーザーから熱帯林の胸高直径を測定できるようにした。その解析手順は、以下の手順によりデータを抽出、解析を行った。

正確な計測には幹部の様々な角度から得られた3次元データを取得しなければならない。本研究では調査プロットの大きさを半径10mとしたため、半径10m以内の調査プロットで3箇所地上レーザーを設置し、異なる場所で取得した地上レーザーによる3次元データを1つのデータとして合成した。

3次元データから胸高直径の位置を把握するためには、地形図であるDigital Terrain Model (DTM)を地上レーザーから作成した。正確なDTMを作成後、胸高（1.3m）の位置での幹部レーザーデータを自動で切り出すプログラムを作成した。レーザーデータからパノラマ画像を作成し、作成されたパノラマ画像とDTMから胸高直径の位置を自動的に認識し、胸高直径の樹木位置で3次元データを各樹木に対して切り出し、レーザーデータによる胸高直径を測定できるようにした（図3）。

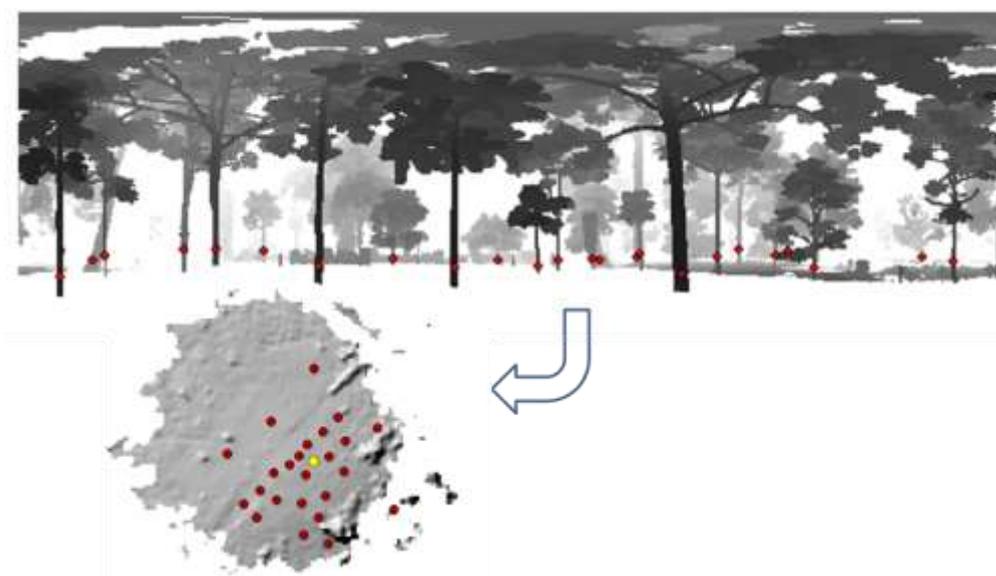


図3 パノラマ画像と胸高直径位置での自動樹木判読結果（上図）と自動で作成された毎木位置図とDTM（下図）。

胸高直径で切り出された3次元データに対し、幹の太さを正確に測定するアルゴリズムを開発した。地上レーザーによって3次元データは正確に幹形状を測定できているにも関わらず、解析手法で単純な円を用いると、大きな誤差が生じる。そのため、正確に得られている3次元データ形状を活かしきれない。本研究で開発した手法を従来の手法と比較するために、伐倒して測定したデータとも比較した(図4)。その結果、本研究による手法は伐倒して測定した結果と比較しわずか2.7%の誤差しかないが、従来のレーザー解析手法である「円による推定」では12.1%もの誤差が生じることがわかった。従来の材積算出式による結果は、伐倒したデータと比較して6%の誤差があることから、本研究で開発された手法(誤差2.7%)が、最も正確な手法であることがわかる。

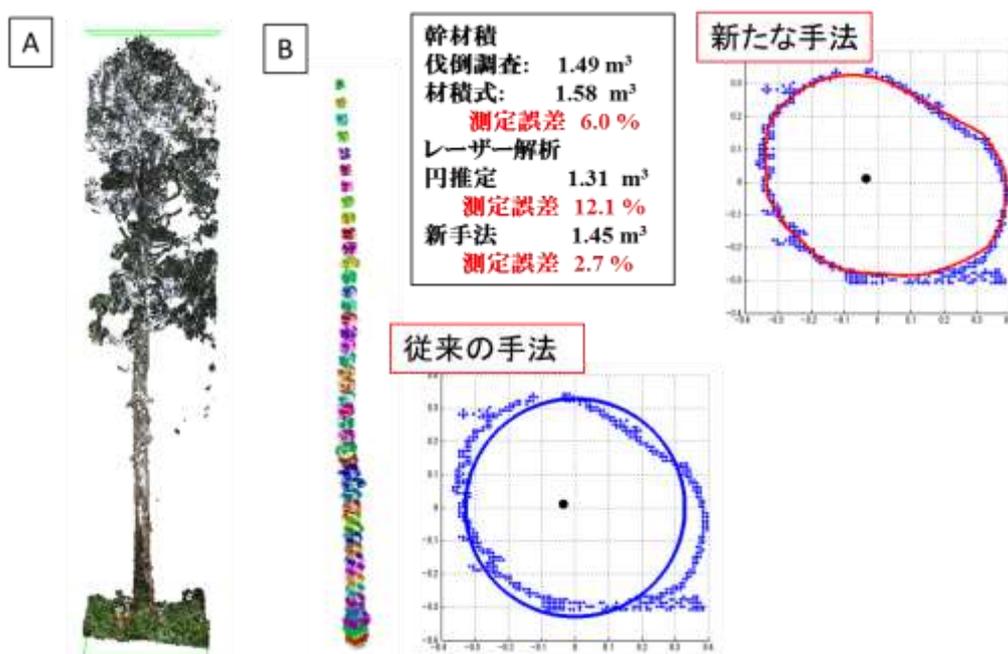


図4 伐倒調査したデータと本研究によって開発した新技術の比較。本研究で開発した手法が最も正確に3次元データが解析できていることがわかる。

#### (6) サンプルデザイン

地上レーザーを現場で導入する際、サンプルデザインを確立しなければならない。レーザーセンサーを設置する場所を検討し、簡易型地上レーザーだけで正確性が高いデータ取得方法を確立する必要がある。実用的サンプル方法(調査区設定方法)として、高木を主体とした層化抽出法によるサンプルデザインを検討した。

## 4. 結果及び考察

本研究の主な目的は、簡易型地上レーザーだけでバイオマスモニタリングを行う技術を確立することであり、そのために必要な装置の開発、熱帯林でのデータ取得実験、サンプル手法の開発を研究期間中に行った。さらに、実用化に向けた展開として、高価な衛星画像を購入しなくても上空から詳細なデータを入手できる方法として、無人飛行機(UAV)によるデータ取得実験も行った。

#### (1) 簡易型地上レーザーの性能

本研究で用いた簡易型地上レーザー(SICK LMS511)は、距離に応じてビーム幅が広がる性質がある。簡易地上レーザーのビーム特性による樹木の測定への影響を検討した(図5)。図5では胸高直径37cmの樹木を対象として、地上レーザーから異なる距離で照射した結果である。レーザーのビーム幅が広がることで、取得できる3次元データの形状も変化してしまう。

ビーム幅の影響による樹木測定への誤差を把握した。計510本の樹木に対し、様々な距離から照射した3次元データの胸高直径と樹高計の測定誤差を得た。ビーム幅の影響で、センサーからの距離10m以内に樹高測定では1mほどの誤差を生じ、胸高直径は4cmほどの誤差が生じることがわかった。

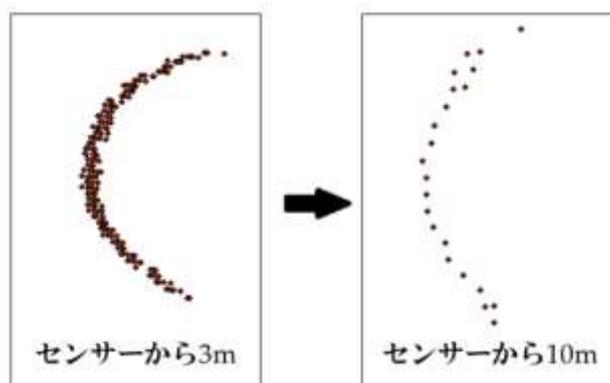


図5 簡易地上レーザーを用いて距離に応じた樹木測定誤差（対象木の胸高直径は37cm）。

## （2）簡易型地上レーザーと高精度地上レーザーとの比較

本研究で使用した簡易型地上レーザー高精度地上レーザーセンサーである RIEGL VZ400 と性能を比較した。オーストラリアの研究対象地で、簡易地上レーザーと高精度地上レーザーを同時に持ち込み、3次元データ取得を行った。同じ条件でデータを取得することにより、精度検証を行うことができた（図6）。図6より高精度地上レーザーである RIEGL VZ400 による樹木判読率は95%であり、SICK LMS511の樹木判読率は65%であった。樹木判読率とは、レーザーで樹高も胸高直径も計測できた樹木本数を調査地内にある樹木本数で割った値である。さらにそれぞれのセンサーの現地調査との誤差は、RIEGLでは、胸高直径では1.14cmで、樹高では2.97mであったのに対し、SICKでは胸高直径2.77cmで、樹高は4.03mであった。人が測定した値と比較しても、どちらのセンサーでも誤差が少なく、実用的に使用できることがわかった。

## （3）サンプリングデザインの結果と考察

センサー特性を考慮し、簡易型地上レーザーは10m以内であれば、レーザーのビーム幅の影響を抑えて樹木測定ができる。そのため、センサーの特性を考慮し、調査プロットを半径10mと設定した。さらに、簡易型地上レーザーと高精度地上レーザーとのセンサー比較から、簡易地上レーザーを設置した1箇所から判読できる樹木判読率が65%であったことから、調査プロット半径10m以内に3箇所地上レーザーを設置し、データを合成する必要があることがわかった。

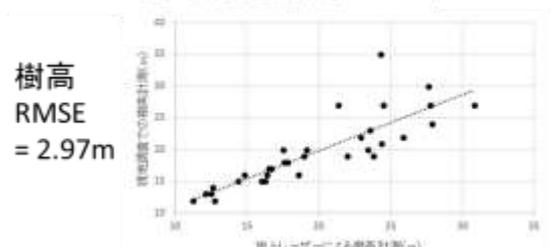
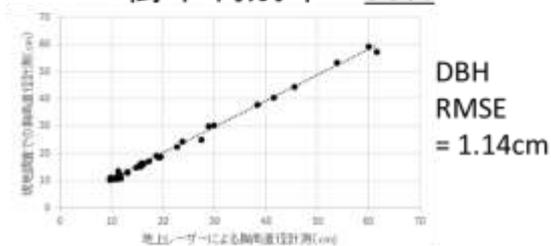
さらに、高木を覆う樹木を特定するため、高解像度衛星画像から樹頂点を抽出し、同じ場所で測定した地上レーザーによる3次元データと比較することで、樹高20m以上の樹木が樹冠を覆うことを予め把握することができた。これらの解析準備を行い、20m以上の樹高を調査プロットの中心としてサンプリングした場合、対象地全域のバイオマスを正確に推定できるかを検討した。シミュレーションの結果、半径10mのプロットが最低30プロットあれば、その対象地の広域のバイオマス全量を誤差5%以内で推定できることがわかった。

これらの結果から、地上レーザーを用いたバイオマスサンプリング手法として、以下の条件で現地調査を行えば、熱帯林の広域のバイオマスを5%以内の誤差で推定できることがわかった（図7）。

- 1) バイオマスモニタリングのために調査プロットを設置する場所は、樹冠を構成する高木を中心とする（本研究では樹高20m以上の樹木）。樹冠を構成する高木は目印となりやすいため、その場所に戻って再度測定できる。さらに、上空から取得する衛星や航空機リモートセンシングデータでも測定できるため、他のリモートセンシングデータによる結果と比較がし易い。
- 2) 簡易型地上レーザーの性能も考慮し、さらには現地でのデータ収集の効率化も考慮して、調査プロットの半径を10mとする。簡易型地上レーザーは、樹木を測定する樹木判読率が65%であるため、センサー性能を考慮し、調査プロット半径10m以内に3箇所レーザーセンサーを設置する。
- 3) 調査プロット数を30プロットとしてランダムに調査地内に調査プロットを設置する。レーザーデータを360度回転して、データを取得する時間は1箇所わずか3分でデータ取得できるが、準備と移動を含めて1箇所15分要する。1プロット3箇所地上レーザーを設置すると、1プロット45分の測定時間が必要となる。1日8時間現地でデータ取得できると想定すると、広域の熱帯林のバイオマス推定に30プロット（90箇所の地上レーザー設置）で、合計3日あれば、データ取得が完了する。

### RIEGL VZ 400 (600 m)

- 地形解析範囲 半径 30m
- 樹木判別率 95%



### SICK LMS 511 (40 m)

- 地形解析範囲 半径 15m
- 樹木判別率 65%

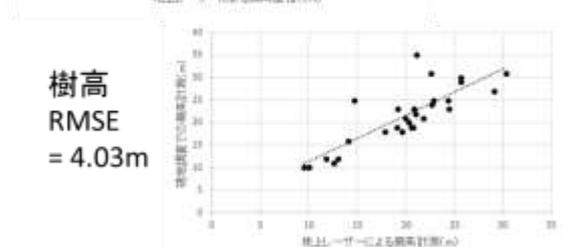
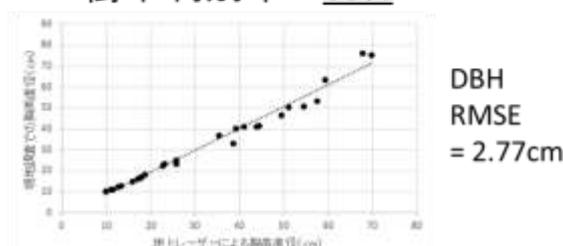
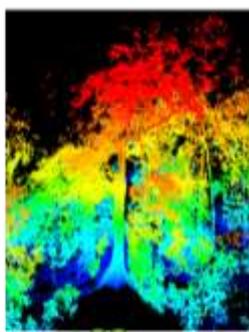


図 6 高精度の地上レーザーセンサーである RIEGL VZ400（左側）と簡易型地上レーザーである SICK LMS511（右側）による熱帯林測定精度の検証。

簡易地上レーザーによるデータ取得は即時性が高いため、頻度も高くデータを取得できる。また、経年的変化を把握する上で、胸高直径が 3~4cm の誤差で測定できるため、樹木生長を待たずにより短期間でモニタリングできる。

図 7 から高解像度衛星画像を入手しなければ、樹冠を覆う樹高の高さがわからない。高解像度衛星画像は高額なこともあり、本研究で目標としている安価なデータ取得方法の中で唯一の欠点となる。その欠点を補うために、安価で購入できる無人飛行機（UAV）による広域の高解像度データを取得する方法を検討した。

0.5 m解像度のGeoEye-1  
衛星画像から樹頂点を抽出



20 m 以上の樹高をもつ木を  
プロットの中心として設定。  
(衛星画像とレーザーを参照)

簡易レーザーを用いてプロット  
内に三角形になるように、3  
箇所センサーを設置してデー  
タを取得、プロット中心から半  
径10 m 以内の樹木をレー  
ザーにより計測

全体で30プロットあれば、  
その地域のバイオマス全量  
に対して誤差が5%以内になる。

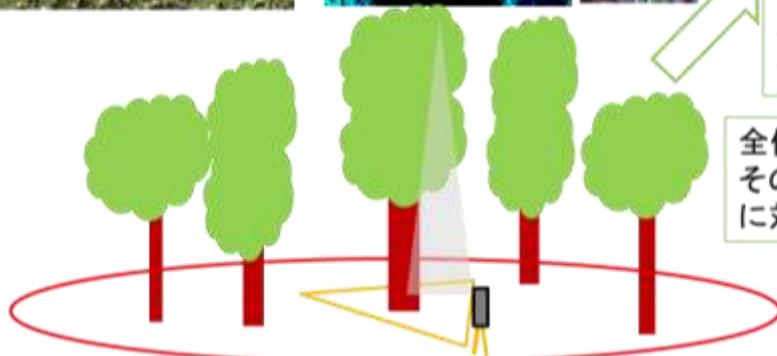


図 7 バイオマスモニタリングのための現地サンプリング手法の確立。本研究で得られた知見をまとめた図。

#### (4) 無人飛行機 (UAV) による広域データ整備

広域を UAV によってデータ整備する手法として、SfM (Structure from Motion) と呼ばれる新たな手法を使用し、上空からデータ取得を行う方法を比較した (図 8)。この方法を森林域で用いることで、上空から広域データを取得し、地上レーザーを設置する場所の空間代表性を検討できる。さらには、その場所で樹冠を覆う樹木の樹高も 3 次元データから測定できる。



図8 単木単位でのデータ比較 (左図: 航空機レーザー、中央: 地上レーザー、右図: UAVから取得した写真画像だけからSfMにより3次元データ化した結果)。

図8より、UAVにより取得されたデータは樹冠上部の状況を詳細に把握できていることがわかる。航空機レーザーによるレーザー反射は樹冠部で多い。UAVで取得した3次元データの方が航空機レーザーに比べ詳細に把握できていることがわかる。しかし、バイオマス算出の根拠となる幹形状データを確実に取得できないため、地上レーザーによるデータ取得がデータの確実性が高いことがわかった。

#### (5) 航空機レーザーデータとの融合

既存のデータとして航空機レーザーデータが利用可能な場合は、航空機レーザーデータとのデータ融合が考えられる。本研究では、沖縄でのデータを使用し、航空機レーザーと地上レーザーデータのデータ融合を行った。航空機レーザーの点密度が低く、大部分が樹冠で反射しているが、地上レーザーはより多くの樹木情報が得られることが図9から明らかである。これまで不可能であった異なるレーザーセンサー、異なる時期に取得したデータをデータ融合ができる。

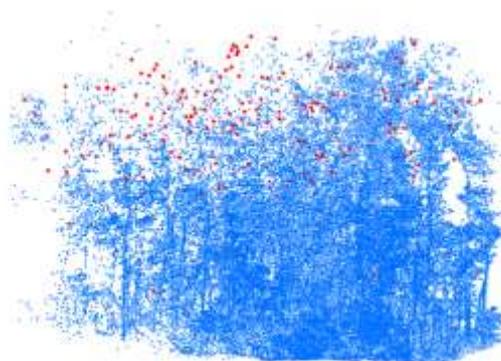


図9 地上レーザーと航空機レーザーのデータ融合 (青点: 地上レーザーデータ、赤点: 航空機レーザーデータ)。本研究で開発したデータ融合技術は位置座標のズレを少なくデータ融合できるため、現場での高精度GPSデータ取得の作業時間を短縮でき、コンピュータ上で位置座標の補正ができる。

### 5. 本研究により得られた主な成果

#### (1) 科学的意義

途上国の熱帯林では、正確な現地調査データを取得が難しく、汎用性が高く正確性も高いデータ取得方法の確立が急務の課題である。本研究では地上レーザーを用いて誰でも簡単に毎木調査ができる自動毎木調査法を確立することを目指した世界初の研究である。

地上レーザーは可搬性に優れ、安価にデータ取得ができ、さらに樹幹形状のデータを高密度に取得できる。さらに、非破壊で森林の3次元構造を測定できるため、毎木調査等で行われている現地調査を飛躍的に効率化できると期待されている。

近年では世界的に小型で簡易型地上レーザーの開発が活発になっており、オーストラリアCSIROで開発された地上レーザーがアメリカ ポストン大学グループで改良され、2波長レーザーとして普及を目指している。また、さらに小型な地上レーザーの開発が、アメリカ ロチェスター工科大学のグループで進められたおり、簡易型地上レーザー開発の競争が激しくなっている。また、イギリス ロンドン大学のグループは本研究で使用したRIEGL VZ400の3次元データからオーストラリア ユーカリ林でのバイオマス量を自動で算出するプログラム開発が進められており、3次元データを解析する手法も研究が進んでいる。よって、簡易型地上レーザーを用いた森林バイオマス測定は世界で注目を集める分野である。その中でも本研究で用いたSICK LMS511の小型センサーはデータ取得効率が高く、わずか3分でデータ取得できる速さは世界的にも最も早くデータを取得できる。

本研究の成果により、形状が複雑なため材積式の作成が困難であった熱帯林に対して地上レーザーによって、汎用性の高い自動毎木調査法が提供できるようになった。さらに、サンプリング手法も検討できたことにより、簡易型地上レーザーを設置する汎用性の高い手法を確立することができた。安価な簡易型地上レーザーだけで、広域の熱帯林バイオマスを推定することが可能となり、環境政策における標準的モニタリング手法として地上レーザーによるモニタリング手法を提案できる。本研究により得られた成果は、実利用でも研究面でも大変有意義である。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

本研究代表者は、東京都と長崎県と共同研究を行っており、地方自治体レベルでは地上レーザーによる詳細な樹木データ整備が積極的に進められている。

東京都では、新たな緑の指標調査に地上レーザーによって「緑の質」を評価する取り組みを行っている。これまでの緑被率が2次元データでしかデータ取得を行って来なかったため、森林遷移に伴う緑地の垂直構造の変化などを把握することは困難であった。そこで階層構造も3次元データから取得できる地上レーザーを導入することで、緑の平面的な量ばかりでなく、垂直的な分布を把握する手法を確立しようとしている。平成25年度に実験的に研究を始め、27年度から2年間、東京都と共同で調査研究を継続する予定があり、地上レーザーによる実験を行う。調査研究によって得られた知見は、環境政策に反映する予定である。

長崎県では、離島である対馬で全島を航空機レーザーによる3次元データを取得し、バイオマス資源量を把握するプロジェクトが行われている。そこで、航空機レーザーによる結果を検証するために、地上レーザーを導入し、航空機レーザーデータの検証用データとして正確な現地データ取得として地上レーザーの活用した共同研究を平成26年度に行った。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

環境省が、来年度から本格的にREDD+のプロジェクトを展開するようになる。対象とする地域は、東南アジア諸国であり、主に途上国熱帯林がプロジェクト対象地となる。その正確なモニタリング手法を検討している段階にある。本研究で確立した手法は、環境省が今後推し進めるREDD+の環境政策を運営する上で、非常に有効なモニタリング手法になり得る。地上レーザーを用いれば、正確性の高いモニタリングを誰でも行えるため、容易で正確なモニタリング手法として現場で普及することができる。環境省自然環境局自然環境計画課において、Forest Partnershipのウェブサイトを立ち上げ、企業等連携してREDD+参加のためのプラットフォームができつつある。

効率良く正確に測定できる地上レーザーが、途上国での森林調査に有効活用できることは明らかで、航空機レーザーよりも費用がかからない。さらに、いつでもどこでもデータが取得できるため、高頻度なデータの取得ができる。その結果、経年変化を把握することも容易である。本研究で開発した簡易型地上レーザーを用いることで、正確で安価にデータが取得できるため、途上国での森林モニタリング手法に改善できる最適な手法である。

本研究は、日本国内の森林管理にも応用もできる。国内林業は作業員の高齢化が進行しているため、毎木調査に簡易型地上レーザーを導入できれば、調査作業を簡略化し、より正確にデータが収集できる。REDD+のためばかりでなく、他分野でも利用価値が非常に高い技術である。

## 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、戸倉千明、小林達明、野田佳慶、有村恒夫、福田聖一：日本緑化工学会誌，39(1)，194-197 (2013).  
「高速道路法面におけるレーザーを用いた葉面積指数の推定」
- 2) 加藤 顕、安藤祐樹、吉田俊也、梶原康司、本多嘉明、小林達明：日本緑化工学会誌，40(1)，136-141 (2014).  
「簡易型地上レーザーを用いた毎木調査法」
- 3) 加藤 顕、石井弘明、榎木 勉、大澤 晃、小林達明、梅木 清、佐々木 剛、松英 恵：日本森林学会誌，96(3)，168-181 (2014).  
「レーザーリモートセンシングの森林生態学への応用」
- 4) 小花和宏之，早川裕式，加藤 顕，ゴメス クリストファー：  
地形，36(2)，87-106 (2015)  
「小型無人航空機および単独測位 GNSS 搭載カメラを用いた簡易的な地形測量手法」

### (2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) A. Kato, J. Morgenroth, D. Kelbe, C. Gomez, J. van Aardt, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Melbourne, Australia, 2013  
“Ground Truth Measurement of Trees using Terrestrial Laser for Satellite Remote Sensing”
- 2) A. Kato, M. Watanabe, J. Morgenroth, C. Gomez, Synthetic Aperture Radar (AP SAR), 2013 Asia-Pacific Conference, September 2013, Tsukuba, Japan, 2013  
“Field tree measurement using terrestrial laser for radar remote sensing”
- 3) 加藤 顕、大萱直花、笹川裕史、小林達明：第125回日本森林学会 (2014)  
「森林計測における様々な地上レーザーセンサーの精度比較」
- 4) 加藤 顕、梶原康司、本多嘉明：日本写真測量学会平成26年度年次講演会 (2014)  
「簡易型地上レーザーを用いた熱帯林計測」
- 5) 加藤 顕、梶原康司、本多嘉明、小林達明：第24回日本熱帯生態学会年次大会 (2014)  
「地上レーザーを用いた複雑な熱帯樹木形状把握」
- 6) A. Kato, K. Kajiwara, Y. Honda, M. Watanabe, T. Enoki, Y. Yamaguchi, T. Kobayashi, IEEE IGARSS 2014: 816-819, Quebec City, Canada, July 2014  
“Efficient Field Data Collection of Tropical Forest using Terrestrial Laser Scanner”
- 7) A. Kato, L. M. Moskal, T. Kobayashi : IUFRO 2014 World Congress, Salt Lake City, USA, Oct. 2014,  
“Full automatic process to create forest inventory using terrestrial lidar”
- 8) A. Kato : Precision Forestry Cooperative, University of Washington, Annual Meeting 2014, Seattle, USA, Oct. 2014  
“Unmanned aerial vehicle and terrestrial laser system based biomass assessment” [招待講演]
- 9) A. Kato, M. Brandford, K. Kajiwara, Y. Honda, M. 2014 ForestSAT conference, Riva del Garda, Italy, 2014  
“Efficient field validation of tropical rainforest biomass using terrestrial laser for satellite remote sensing”
- 10) A. Kato, H. Hayakawa, H. Obanawa, C. Gomez, 2014 ForestSAT conference, Riva del Garda, Italy, 2014  
“Tree structure captured by UAV-SfM and TLS for field validation of satellite remote sensing”
- 11) 加藤 顕、小花和宏之、早川裕式：第126回日本森林学会学術講演会 (2014)  
「UAV-SfMと地上レーザーを用いた森林構造の把握」

## 7. 研究者略歴

課題代表者：加藤 顕

ワシントン大学 森林資源学部 卒業、学術博士、現在、千葉大学 園芸学研究科 助教

## 2RF-1301 バイオマスモニタリングのための現地サンプリング手法の開発

### (1) バイオマスモニタリングのための現地サンプリング手法の開発

千葉大学

園芸学研究科 緑地環境学コース 緑地科学領域

加藤 顕

平成25～26年度累計予算額：24,096千円（うち平成26年度予算額：12,682千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

開発途上国における森林破壊や森林劣化を回避することで、温室効果ガス、特に二酸化炭素の排出を削減しようとする試みである REDD+のプロジェクトが本格的に開始され、現地モニタリング手法に問題が生じている。特に、途上国では独自の現地調査法により炭素蓄積量を算出しているため、データの正確性に問題があり、国家間で炭素蓄積量を容易に比較できない。本研究は、正確性の高い現地調査法を開発するために、地上レーザーに注目した。地上レーザーによって取得できる 3次元データから自動で毎木調査を行い、現地で正確にバイオマスをモニタリングする手法を確立することを目的とした。高精度な地上レーザーである RIEGL VZ400 と安価な簡易型地上レーザー SICK LMS511 を用いて熱帯林でデータ取得を行い、簡易型地上レーザーの特徴を把握した。開発した簡易型地上レーザーは途上国でも購入可能な価格であり、独立電源である乾電池で動くシステムを作成できた。そのため、途上国のどの森林でも容易にセンサーを持ち込むことができる。簡易型地上レーザーを用いて広域のバイオマスを誤差少なく推定するため、レーザーの最適な設置場所と設置数を検討した。簡易型地上レーザーを用いた調査方法として、データ取得する調査場所は目印となる高木を中心とし、地上レーザーの性能を考慮して調査プロットの大きさは半径 10m とする。簡易型地上レーザーは、設置場所から判読できる樹木が 65%であったため、調査プロット半径 10m 以内にレーザーを 3 箇所設置する。合計 30 箇所の調査プロットを設置することで、誤差 5%以内で広域の熱帯林のバイオマス推定ができた。データを取得するためにかかる作業時間は 1 箇所わずか 15 分であるため、合計 3 日あれば広域推定に必要な正確性の高いバイオマスデータを収集できる。本研究によって得られた知見から、熱帯林の広域バイオマス推定に簡易型地上レーザーによる 3次元データが十分活用できることがわかった。そのため、REDD+のために、簡易型地上レーザーによるモニタリングが可能であることが実証された。

#### [キーワード]

REDD+、レーザー、バイオマス、モニタリング、リモートセンシング

### 1. はじめに

国際環境政策である REDD+（開発途上国における森林の破壊や劣化を回避することで温室効果ガスの排出を削減するプロジェクト）では、広域の炭素蓄積量を把握する際、過去に撮影された

衛星画像を使用し、森林をモニタリングしている。過去に撮影された衛星画像を用いて各年での土地利用図を作成する。作成された複数年での土地利用図の経年変化から、森林から他の土地利用に移行した場所を「森林劣化や減少」、新規植林となった場所を「森林回復」と定義する。過去のデータから森林の経年変化の傾向を把握し、その傾向から将来予測を行い、ベースラインを決める。プロジェクト対象地で期間中に森林減少や劣化を防止する活動を行い、予想されたベースラインから森林減少や劣化が防止できれば、防止効果に応じてクレジットが与えられる。クレジットは炭素市場で取引可能であるため、森林伐採という従来の経済活動に対抗する経済的インセンティブを与えることで、REDD+を通して熱帯林を保全しようとする取り組みである。

森林をモニタリングする技術として、広域でのデータ取得が前提であるため、衛星リモートセンシング技術が利用され、光学やレーダーによる衛星画像から土地利用変化を抽出する手法が確立している。しかし、その結果を検証するための正確性の高い現地データを入手することが難しい。クレジットが市場で取引されるため、衛星データからの解析結果を検証する正確性の高い現地データは必要である。途上国では森林測定に必要な現地調査機材がないことも多い。そういった地域ではマニュアルで樹木を計測しているため、得られたデータの質を保証できない。得られたデータを他の途上国のデータと比較し、国際交渉の場で議論するカーボンクレジット量として用いることは難しい。REDD+対象国である途上国では、森林をモニタリングするために国が定める長期モニタリングプロットで、各国が定める森林調査方法に従って現地調査を行う。しかし、途上国では現地調査員の知識や調査経験が未熟なこともあり、正確性が保証されたデータとして取り扱えない問題が生じている。さらに調査場所のサンプリング間隔が広く、REDD+のプロジェクトに必要な場所で現地データがあるとは限らない。データが利用できたとしても古いことも多々ある。特に、REDD+で対象とする森林の規模が小さい場合は、新たに調査する必要も出てくる。よって、現地バイオマスモニタリング手法の開発は環境政策にとって急務の課題である。

調査手法ばかりでなく、炭素蓄積量の算出方法に関して、土地被覆図や土地利用図から「森林」と分類されている場所に、森林区分毎に「平均材積」を掛け合わせて、森林域全体の炭素蓄積量を算出している。しかし、平均材積値を地域レベルに一律に適用することは、同じ地域であっても気候、地形、地位、樹種の違いがあるため正確とは言えない。そのため、REDD+プロジェクトに参入する民間企業や各国政府は新たに材積量を調査しなくてはならない状況も出てくる。実用的で簡易な調査手法は、プロジェクトを推進するために必要であるが、正確で簡易な調査手法が、REDD+には望まれている。

本研究では、熱帯林に地上レーザーを導入し、正確な現地調査手法を確立することを目的としている。熱帯におけるバイオマスモニタリング手法として、地上レーザーに注目した理由は、従来の手法に比べて、汎用性、コスト、解析時間、正確性、解像度、すべての項目で地上レーザーによるデータ取得が優位である（表1）。表1から、地上レーザーと比較する手法として、同様に3次元データが取得できる航空機レーザーと比較した。

解析手法の「汎用性」に関して、航空機レーザーデータは点密度が一様ではないため、プロジェクト対象地で取得したデータの点密度（データの質）が場所によって異なる。異なる点密度で取得されたデータを比較する際、異なる解析手法を用いなければならず、解析結果を比較することが難しい。さらに、航空機レーザーは、地上レーザーに比べて樹冠上部からの反射が多いため、材積の算出に必要な樹木幹部を直接計測することが難しい（図1）。そのため、樹冠の形状から幹

部の材積またはバイオマスを推定するモデル式を新たに作成しなければならない<sup>1,2)</sup>。モデル式を作成する上では、森林タイプ<sup>3)</sup>、航空機の飛行高度<sup>4)</sup>、データを取得した季節<sup>5)</sup>を検証しなければならない。異なる状況に応じて、異なるモデル式を作成する必要がある。航空機レーザーデータを取得した時期や季節に合わせた解析も必要となるため、解析自体容易ではない。その一方で地上レーザーは幹部を直接測定できるため、モデル式を当てはめる必要がなく、直接測定するため、汎用性の高い解析手法である。

「コスト」や「解析時間」に関して、航空機レーザーは、飛行機の調達、パイロットや地上作業員等を雇わなければならないため、地上レーザーに比べてデータ取得が高額である。さらに、データ取得時期は、飛行機の予定や飛行許可日に合わせなければならないため、すぐにデータ取得できない。航空機レーザーは広域を連続したデータとして取得できるため、データ取得の効率は良い。しかし、データ取得費用がかかるため、途上国で容易にデータ取得ができない。地上レーザーは、センサーをどこでも持ち込み、いつでもデータが取得できるため、即時性が高い。さらには高頻度でデータ取得できる。データ取得費用は航空機レーザーに比べかなり安い。しかし、途上国の人が購入できるほどの安さではなかったため、本研究で安価な地上レーザーシステムを開発した。データの解析時間に関しては、航空機レーザーはデータ取得後、正確な位置合わせを行う作業が必要であるため、納品に時間を要する。納品されたデータを用いて、バイオマスを推定するモデル式を作成するために、さらに現地調査で樹木測定し、モデル式を調整する作業が必要となる。途上国の既存の現地調査データでは正確性に問題があるため、新たに現地調査が必要となることもある。地上レーザーは現地でデータ取得をした後に、得られた3次元データを解析する必要がある。地上レーザーは、センサーを設置した場所が固定点であるため、航空機レーザーのように移動体からのデータ取得と異なり、データ処置が容易である。しかし、地上レーザーによる3次元データから直接樹木を測定できる手法がこれまでなかったため、本研究では3次元データから樹木を解析できる手法を開発する。

「正確性」に関して、航空機レーザーでは、バイオマスを推定するためのモデル式を作成し、バイオマス量を推定する。そのモデル式の妥当性を検証するため、現地調査で得られたバイオマス量と比較し、平均二乗誤差 (RMSE) を得る。その誤差がモデル式の妥当性を実証することになる。熱帯林では、林内構造が複雑であるため、航空機レーザーによる樹冠構造を基にしたモデル式では森林内部の複雑な構造を把握しきれない。地上レーザーは林内にセンサーを設置するため、林内構造を航空機レーザーと比較して把握しやすい。また、3次元データから幹部を直接測定できるため、モデル式を作成する必要がない。

「解像度」に関して、図1でも明らかのように、航空機レーザーよりもはるかに詳細に幹部形状を把握できる。これらすべての項目を考慮して、地上レーザーによるデータ取得が優位であることがわかる。

本研究は地上レーザーを用いて、3次元データから自動で毎木調査を行い、バイオマスモニタリングのための手法を確立する。地上レーザーデータは、データをアーカイブとして保存し、過去のデータと容易に比較できるため、経年変化も把握できる。さらに、再度同じ場所で測定が可能であるため、森林の変化を詳細に把握できる。

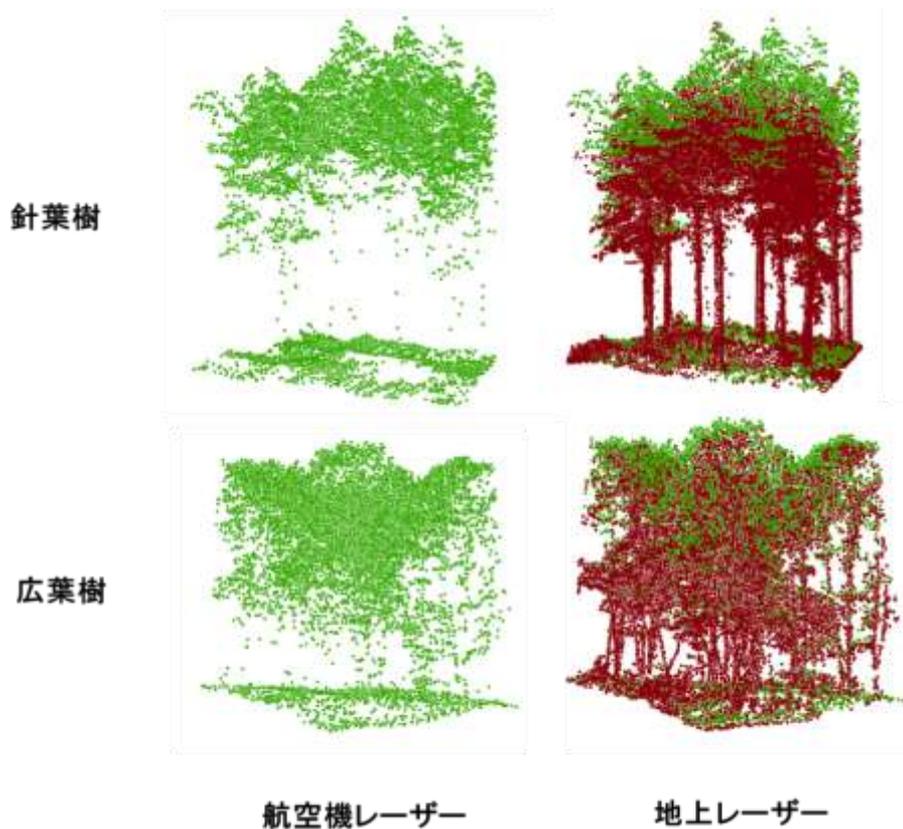


図1 航空機レーザーと地上レーザーとのデータ取得状況の違い。航空機レーザーは樹冠での反射が多くなり、幹部を直接測定できないが、地上レーザーは幹部を直接測定できる。

表1 従来の手法と地上レーザーによる手法との比較

	人による測定	航空機レーザーによる測定	地上レーザーによる測定
1. 汎用性	×	△	◎
2. コスト	×	×	◎
3. 解析時間	×	○	◎
4. 正確性	×	○	◎
5. 解像度	○	○	◎

地上レーザーで取得した3次元データから自動で毎木調査に必要な胸高直径や樹高を測定でき、正確な森林調査データとして提供できる。地上レーザーによる手法は、伐倒する必要がないため、樹木形状からバイオマス量を正確に把握できる。よって、地上レーザーを用いれば、バイオマス量または炭素蓄積量を保証する信頼性の高い現地データとして現地調査を効率化できる。

本研究では、途上国で地上レーザーを使用することを想定し、安価な地上レーザーシステムの開発を行った。さらに、簡易型地上レーザーを熱帯林に導入する上で問題となる課題であるセンサーの性能とサンプリング手法に注目し、簡易型地上レーザーでも十分に正確な現地調査データが提供できるか実証実験を行った。バイオマス資源は、途上国での地域エネルギー資源としても

重要であり、木質バイオマスを持続的管理する上で、正確に資源量を測定できる手法でもある。本研究では、地上レーザーを熱帯林に導入し、どこでも3次元データ取得できるようにし、さらには、得られた3次元データから正確な森林調査ができる手法を確立することが目的である。

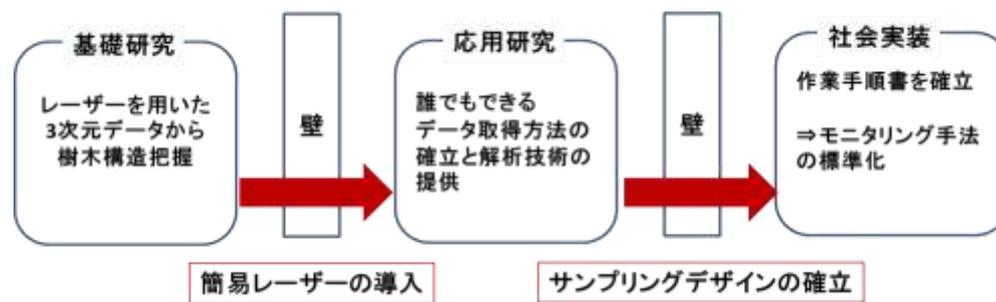
## 2. 研究開発目的

REDD+のプロジェクトが本格的に開始され、運用面で様々な問題が生じている。本研究は、地上レーザーを用いた自動毎木調査法を確立することで、REDD+で対象とする熱帯林における炭素蓄積量を簡易で正確に評価する手法を確立することを目的としている。これまで REDD+のための現地調査方法は、調査対象地の最大樹高に対して、プロットの大きさを設定し、その大きさでのプロット内で、樹種、胸高直径、樹高から、樹種別材積式を用いて炭素蓄積量のために材積量を算出してきた。現地調査に多大な労力や時間を要し、材積式が整備されていない樹種に対しては、多数の樹木を伐倒して材積式を新たに作成しなければならなかった。

また、途上国では森林測定に必要な現地調査機材（樹高機、GPS 等）が導入されていないところも多い。そういった地域で現地調査員によって測定されたデータの正確性に問題がある。さらに、途上国で使用されている GPS の精度が悪く、長期モニタリングプロットの位置の特定が難しく、再度訪問できないこともある。こういったデータを衛星画像と合わせて解析することは非常に難しい。

本研究は最新の地上レーザーを用いて、長期モニタリングプロットにおいてレーザーデータを取得し、得られた 3 次元データから自動で毎木調査を行い、バイオマスモニタリング手法の確立をする。地上レーザーデータを最新の GPS と連動させることで、位置座標が付いたデータとしてアーカイブ保存ができ、同じ場所で再度測定もできる。その結果、炭素蓄積量や成長量変化を客観的に評価できる。

現地サンプリング手法の開発を行うために、研究期間 2 年のうち初年度は、市販されている地上レーザーセンサーの中で高精度な地上レーザーである RIEGL VZ400 と安価な SICK LMS511 を用いた簡易型地上レーザーを用いて、熱帯林で 3 次元データ取得を行う。高精度センサー（センサー価格が 2,000 万円以上）に比べ、安価なセンサーは途上国でも購入可能な価格となっている（センサー価格は 100 万円以内）。独立電源である乾電池で動くシステムを構築し、途上国のどの森林でも持ち運べるように開発する。最終年度は、その地上レーザーを用いたサンプリングデザインを検討する。安価なセンサーを用いた簡易地上レーザーの設置場所（どの場所にどのように設置したら、正確で効率良くバイオマスモニタリングができるか）を検討した。そのための新たなサンプリング手法（現地調査方法）を考え、簡易型地上レーザーだけで広域のバイオマスを正確に推定できるようにすることを本研究の目的としている（図 2）。サンプリング手法を確立する上で、安価な地上レーザーの性能を知らなければならない。簡易型地上レーザーによってレーザーが届く距離（3 次元データが取得できる範囲）に限りがあるため、高精度地上レーザー（RIEGL VZ400）と比べ、その性能を把握した。さらに、簡易型地上レーザーの性能を考慮し、シミュレーションにより最適なサンプリング手法（地上レーザーの設置場所や設置数）を確立する。その結果、高額なセンサーを用いなくても、簡易型地上レーザーだけで途上国でバイオマスモニタリングできるようにし、REDD+のモニタリング技術として簡易型地上レーザーが導入できるようにすることが本研究の目的である。



**地上レーザーがあれば、誰でも同じ様にデータ取得、解析ができ、客観的データとして他の地域でのデータと比較可能となる。**

図2 研究全体の概念図。2年の研究期間の初年度は、途上国熱帯林でも3次元データが取得できる簡易型地上レーザーシステムの開発を行い、そのための基礎研究を中心に行う。最終年度は、簡易地上レーザーを用いたサンプリング手法を確立することで、実用的技術としての普及できるようにする。

### 3. 研究開発方法

本研究は、簡易型地上レーザーを用いて熱帯林のバイオマスを広域に推定する手法を確立することであり、主に3つの視点で結果をまとめたい。

- ① 簡易型地上レーザーの性能
- ② 簡易型地上レーザーと高精度地上レーザーとの比較
- ③ サンプリングデザインの結果と考察

以上の3つ観点から結果と考察を行うために、以下に7つの項目（1）地上レーザー、（2）衛星画像データ、（3）現地調査データ、（4）バイオマス算出方法、（5）地上レーザーデータ解析方法、（6）サンプリングデザイン について以下に説明する。

#### （1）地上レーザー

本研究で用いた地上レーザーは照射距離が短距離型タイプと長距離型タイプの2種類のセンサーを用いた。長距離型センサーは高精度センサーで、3次元データが最も詳細に取得できる一方で、高額で輸出規制品となっている。そのため、高額なセンサーを途上国どこにでも持ち出し、使用できる訳ではない。しかし、短距離型レーザーは安価で、輸出規制品ではない。よって、安価なセンサーを用いれば、世界中どこにでも地上レーザーを持ち出すことができる。最終目標は、本研究開発の成果が世界標準手法になることであり、そのためにも安価なセンサーで正確性の高い現地調査手法にしなければならない。

市販で購入可能なレーザーセンサー一覧（表2）から半径600mまで照射可能なRIEGL VZ400（長距離型レーザー）と半径40mまで照射可能なSICK LMS511（短距離レーザー）を本研究では使用した。RIEGL VZ400は長距離型であり、3次元データの取得効率が非常に良いが、センサー価格が高額であるため、治安が悪い地域に持ち込むことが難しい。その一方でSICK LMS511は短

距離型であるが比較的安価なため、容易にどこにでも持ち出すことができる。また、SICK LMS511 はセンサーの重さも軽く、長距離型に比べて可搬性に優れている。

表 2 よりセンサーの価格は、そのセンサーが照射できるレーザーの最長距離とビーム幅によって変わる。長距離レーザーを照射でき、ビーム幅 (mrad) が小さければ価格が高くなる。1mrad は 100m レーザーが到達する際に 10cm ビームが広がることを意味するため、本研究で用いた RIEGL VZ400 は 3.5cm、LMS511 は 47cm がレーザービームの大きさに関係する。ビーム幅の影響とは、距離によって広がるビームに対して、そのビーム幅以上の物に当たるとレーザーが反射され、反射された場所までの距離を計測できる。そのため、距離に応じてビーム幅が広がると、解像度が距離に応じて悪くなる。

SICK LMS511 によるレーザースカナーは千葉大学 環境リモートセンシング研究センター 梶原康司 講師、本多嘉明 准教授の研究協力により、ラインセンサー型である SICK LMS511 のセンサーの下に回転台を取り付け、360 度回転するスカナーとした (表 3)。表 3 より高精度の RIEGL センサーは垂直角度のレンジが 100° (水平より上が 60°、水平より下が 40°) であるが、SICK センサーは上下 150° (水平より上が 90°、水平より下が 60°) であるため、垂直角度でのレンジが SICK センサーの方が広い。そのため RIEGL センサーによって天頂を取得するためには、最低 30° センサーを傾ける必要がある。

地上レーザーによるデータ取得は、2013 年 8 月と 2014 年 8 月に沖縄琉球大学演習林と国頭村の国有林で行った。国頭村の国有林では、平成 22 年度に林野庁によってデジタル空間情報利用技術開発事業で取得された航空機レーザーデータが公開されており、使用可能である。日本林業技術協会から航空機レーザーデータの提供を受けた。国頭村で地上レーザーデータを取得した理由は、亜熱帯林に対して航空機レーザーと地上レーザーとのデータ比較ができるためである。海外途上国の熱帯林であるインドネシア ボゴール植物園では、2013 年 9 月と 2014 年 9 月にデータ取得を行った。さらに、2014 年 9 月にボゴール農科大学演習林である Hutan Pendidikan Gunung Walat で簡易型地上レーザーを現地に持ち込み、データ取得実験を行った。異なるレーザーセンサーの比較を行うために、オーストラリアの Robson's Creek の熱帯林にて 2014 年 2 月と 2014 年 6 月にデータ取得を行った (表 4)。

## (2) 衛星画像データ

地上レーザーは照射距離に限りがあるため、広域を評価するためには、衛星画像等の広域データを併用する必要がある。本研究では、比較的低価格の高解像度衛星画像に注目した。本研究で使用した衛星画像データ一覧を表 5 に示す。衛星画像を用いる理由は、地図のない途上国熱帯林でも事前に地上レーザーを設置する場所を決めなければならない。比較的低価格の高解像度衛星画像を用いることで、現地の森林状況の把握とレーザーセンサーを設置する場所の状況を知る基礎データとして使用した。使用した衛星画像が、RapidEye 衛星画像 (解像度 5m) と、さらにより高解像度である GeoEye-1 衛星画像 (解像度 0.5m) を用いた。これらの衛星画像から森林の判読状況を検討した (図 3, 4)。RapidEye 画像は、安価で高解像度 (解像度 5m) であることが知られており、これまで様々な REDD+プロジェクトで、林班単位の現地状況を把握するために用いられてきた。一方 GeoEye-1 は RapidEye に比べ価格は高いが、解像度が 0.5m と RapidEye に比べ高く、樹木を単木単位で判読可能である。本研究の対象地である、沖縄県、インドネシア、オーストラリ

アの3箇所で衛星データを用いた（表5）。

表2 市販されている購入可能なレーザーセンサー一覧

メーカー	型番	参考価格	最長距離	レーザー波長	ビーム幅 (mrad)	重さ
SICK	LMS511	¥800,000	40m	905nm（赤外）	4.70	3.7
SICK	LD-LRS	¥1,900,000	120m	905nm（赤外）	4.70	4.1
FARO	Focus S	¥5,000,000	153m	905nm（赤外）	0.19	5.0
Leica	Scan Station C5	¥7,800,000	300m	532nm（緑）	0.20	14.0
Leica	Scan Station C10	¥16,800,000	300m	532nm（緑）	0.20	13.0
Leica	Scan Station P20	¥14,800,000	120m	808nm/658nm	0.20	14.0
TOPCON	GLS-1500	¥12,600,000	550m	1535nm（近赤外）	0.16	16.0
RIEGL	VZ-400	¥20,320,000	600m	1550nm（近赤外）	0.35	9.6
RIEGL	VZ-1000	¥25,320,000	1400m	1550nm（近赤外）	0.30	9.8
RIEGL	VZ-4000	¥35,320,000	4000m	1550nm（近赤外）	0.14	14.5

注意）参考価格は、2013年6月にホームページに掲載されていた情報、またはメーカーに電話にて問い合わせ得られた情報である。輸入品の多くが為替の変動により価格が変更するため、現在の価格とは異なる。

表 3 本研究で使用した 2 種類のレーザーセンサー

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

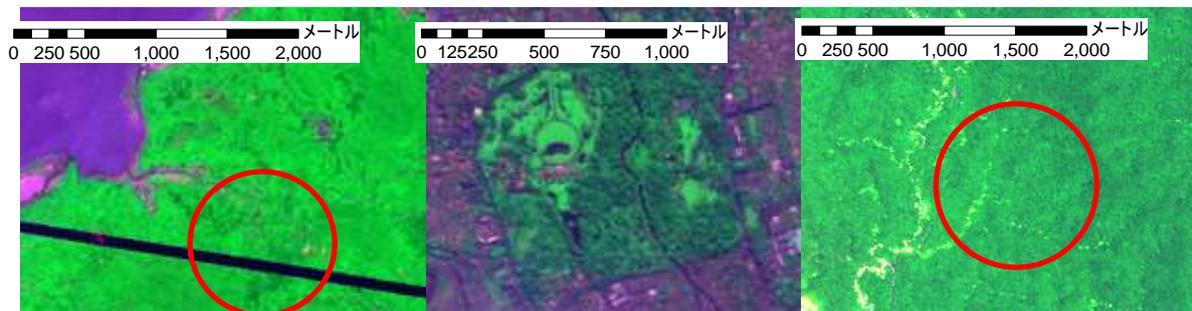


図 3 RapidEye 画像による調査対象地の様子（左図：沖縄 赤枠が調査対象地、中央図：インドネシア ボゴール植物園、右図：オーストラリア 赤枠が調査対象地）。

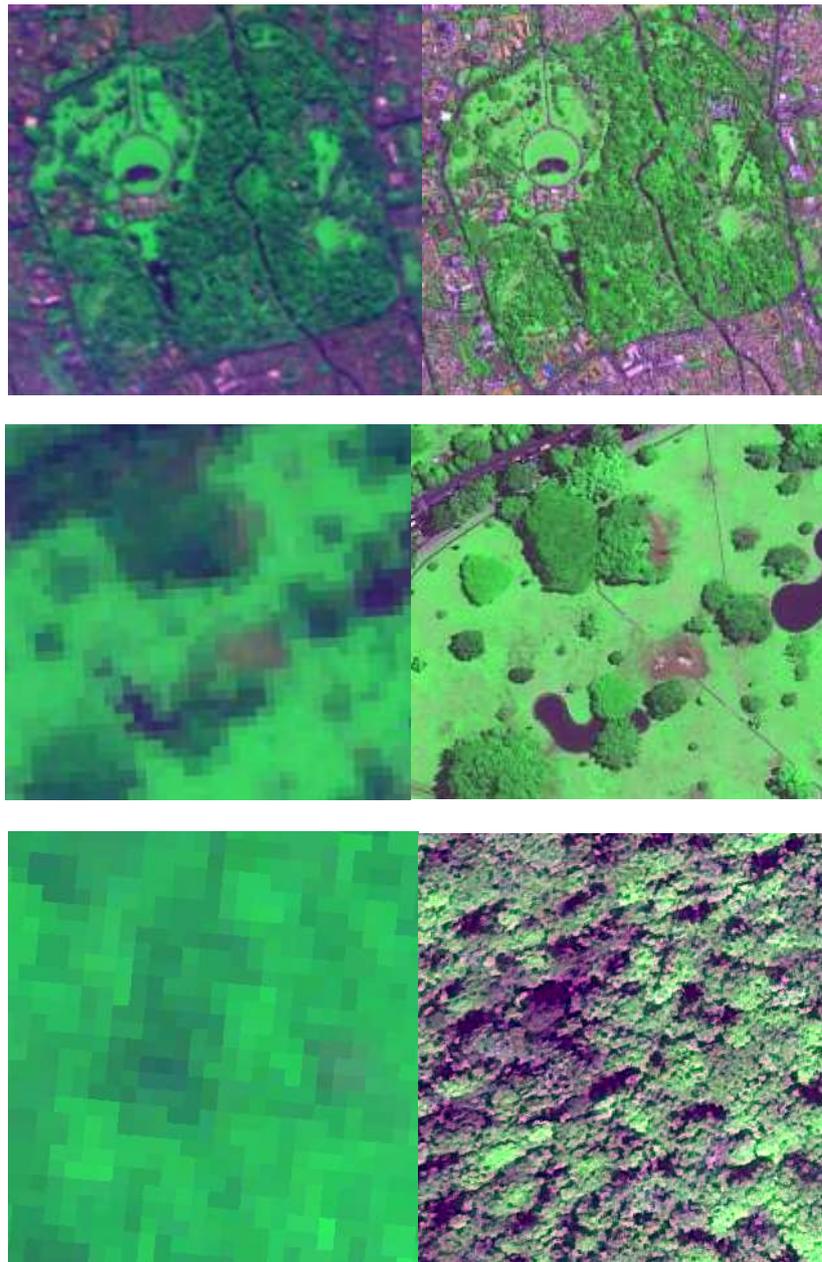


図4 GeoEye-1 画像（上段と中央：インドネシア ボゴール植物園での画像 下段：オーストラリア Robson`s Creek、左図：5m 解像度の RapidEye 衛星画像。右図：0.5m 解像度の GeoEye-1 衛星画像）解像度が 0.5m になると詳細な樹木構造が判別できる。地上レーザー設置場所を選定するために、詳細な衛星画像を用いれば、森林状況を事前に把握することができる。

表 4 本研究で測定した対象地一覧

調査場所		使用した地上レーザーセンサー	データ取得日
沖縄	琉球大学演習林	RIEGL VZ400	2013年8月
	国頭村国有林	SICK LMS511	2014年8月
インドネシア	ボゴール植物園	SICK LMS511	2013年9月
	ボゴール大学演習林		2014年9月
オーストラリア	CSIRO Robson`s Creek	RIEGL VZ400	2014年2月
		SICK LMS511	2014年6月

表 5 本研究で使用した衛星データ一覧

衛星名	場所		衛星データ撮影日	使用可能なバンド	解像度
RapidEye	沖縄	琉球大学演習林 与那フィールド 科学センター	2012年5月6日	R, G, B, RE, NIR	5m
	インドネシア	ボゴール植物園	2012年6月25日	R, G, B, RE, NIR	5m
	オーストラリア	CSIRO Robson`s Creek	2013年11月9日	R, G, B, RE, NIR	5m
GeoEye-1	インドネシア	ボゴール植物園	2012年9月12日	R, G, B, NIR	0.5m
	オーストラリア	CSIRO Robson`s Creek	2013年1月28日	R, G, B, NIR	0.5m

注) 表中の RE は赤外画像、NIR は近赤外画像を表す。

### (3) 現地調査データ

本研究で対象とする森林は、熱帯林のような複雑な樹形であるため、国内では沖縄琉球大学与那フィールド科学センターまたは国頭村国有林を調査対象として、現地調査を行った。国外では、インドネシア ボゴール植物園の熱帯林、ボゴール農科大学演習林と、オーストラリア オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) のスーパーサイトの一つである Robson`s Creek の熱帯林を対象地とした。

オーストラリア政府は国内の様々な場所で TERN(the Terrestrial Ecosystem Research Network)による長期モニタリング大規模サイトを 2009 年に設立し、スーパーサイトと呼ばれる大規模研究調査を行っている。本研究で用いた Robson`s Creek は、オーストラリアの長期モニタリングサイトのうちの熱帯林をモニタリングするサイトである。

#### 1) 沖縄 調査地

国内でのデータ取得実験を行うために、琉球大学与那フィールド科学センターの森林 (図 5) と国頭村にある国有林 (図 6) を対象地とした。与那フィールド科学センターは沖縄本島北部国頭村に位置している (図 5, 6)。琉球大学演習林では合計 611 個体の樹木の毎木調査を行った (表 6)。調査サイトでは 20m x 20m の調査プロットを設けて、プロット内の樹木をすべて調査した。調査プロットでの樹種一覧を表 6 に示し、林内の状況を表す 3 次元データを図 7 に示す。

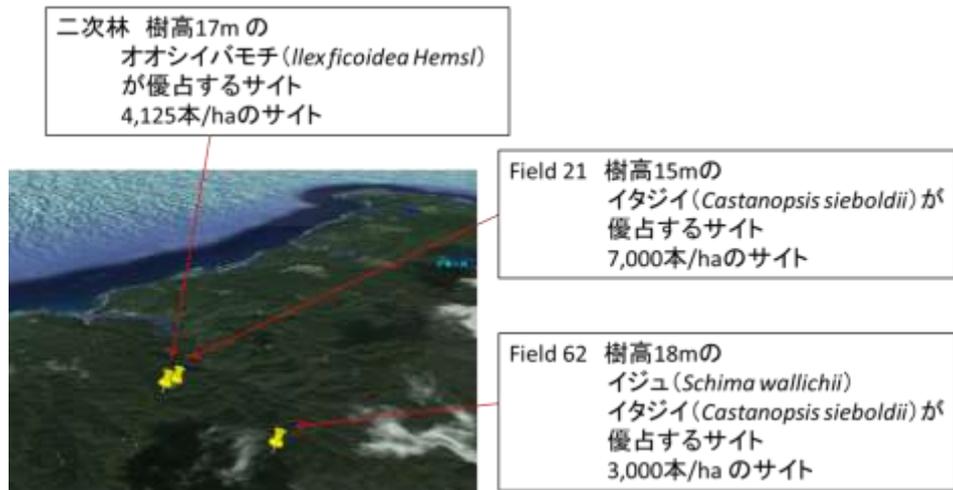


図5 琉球大学与那フィールド科学センターの調査場所。



図6 沖縄にある国頭村国有林内で航空機レーザーデータが取得されている範囲と現地で地上レーザーによって取得した場所。航空機レーザーが過去に取得されていた場所は、沖縄本島北側の赤枠内（左図）、さらに国有林で調査許可が出た場所（右図、黄色ピン留めした場所）で地上レーザーと毎木調査データを取得した。

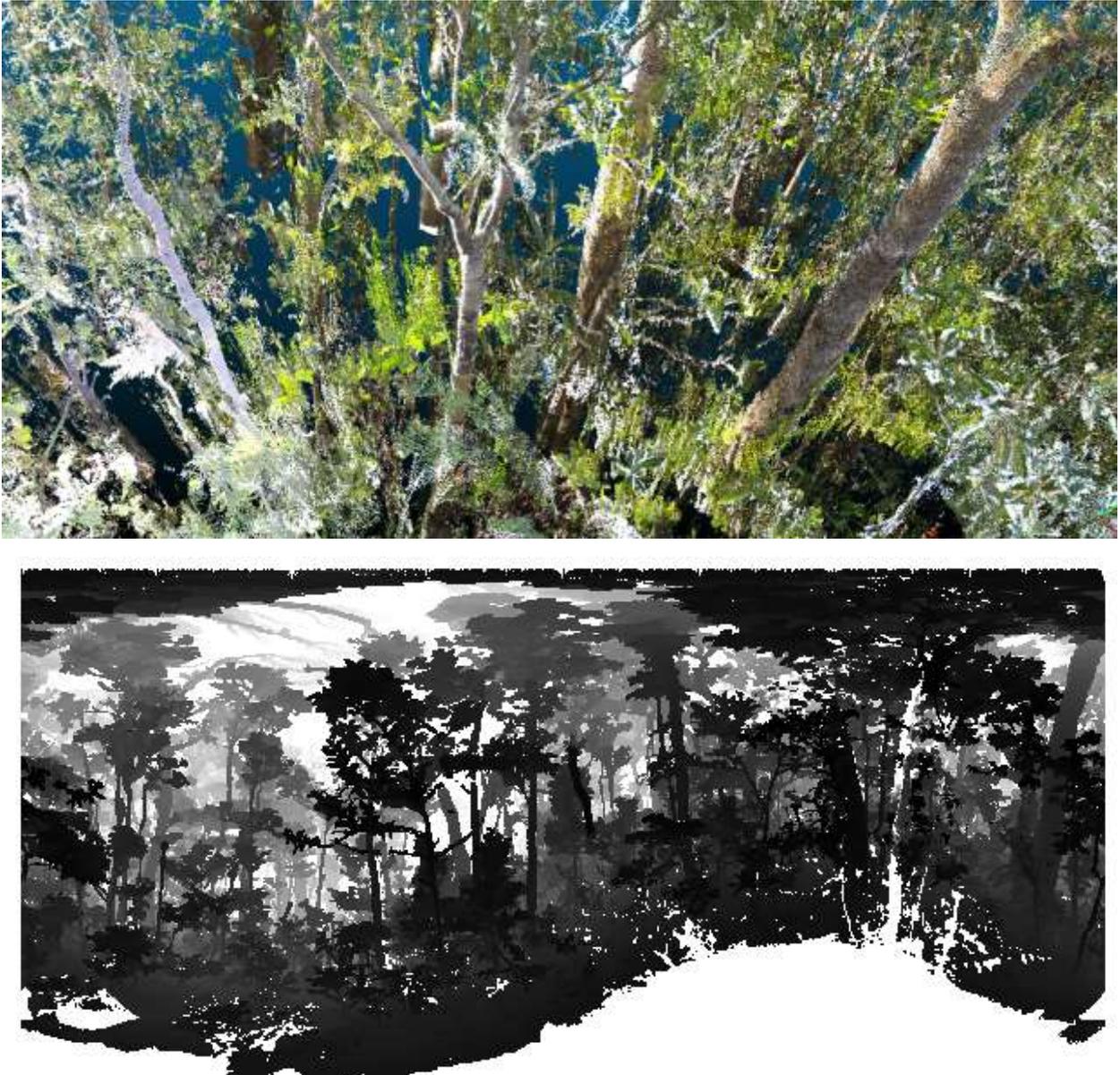


図7 沖縄での地上レーザーによる3次元データ（上図、色はカメラから取得された色データを3次元データに付けて表示している。）とレーザーデータで取得した調査地概況のパノラマ図（下図）。

表 6 琉球大学演習林の調査地概要

樹種	学名	個体数	DBH 最小値 cm	DBH 最大値 cm	樹高 最小値 m	樹高 最大値 m
イスノキ	<i>Distylium racemosum</i>	78	1.62	26.55	1.72	12.00
イタジイ	<i>Castanopsis sieboldii</i>	69	2.48	78.08	3.56	19.00
タイミンタチ バナ	<i>Myrsine seguinii</i> H.Lév.	55	0.80	15.92	1.20	13.00
シロミミズ	<i>Diplospora dubia</i> (Lindl.) Masam.	50	1.59	24.92	2.96	27.40
ツゲモチ	<i>Ilex goshiensis</i>	35	0.64	25.78	3.40	15.20
イジュ	<i>Schima liukuensis</i> Nakai	33	2.39	34.79	3.26	18.40
リュウキュウ モチ	<i>Ilex liukuensis</i>	27	1.75	28.07	2.53	17.50
オオシイバモ チ	<i>Ilex warburgii</i>	25	1.66	32.79	2.64	17.00
コバンモチ	<i>Elaeocarpus japonicus</i> Sieb. & Zucc.	25	2.23	18.94	3.00	12.90
フカノキ	<i>Schefflera octophylla</i> Harms	25	1.27	21.01	3.19	10.95
アデク	<i>Syzygiumbuxifolium</i> Hook. & Am.	21	2.07	9.71	3.01	10.70
その他		168				
合計		611				

## 2) インドネシア 調査地

REDD+プロジェクト対象地であるインドネシアで、様々な樹形の樹木を調査するため、インドネシア ボゴール植物園を対象地として選んだ。ボゴール植物園は、インドネシア ボゴール市の中心に位置し、熱帯植物の見本園である。植物園全体を対象地として、樹木の大きさ別に 3 つの分類区分 (Big, Medium, Small) に分け、各カテゴリーに 10 箇所ずつ半径 10m の調査プロットを設けた (図 8, 9)。調査プロットである半径 10m 内のすべての樹木を毎木調査した (表 7)。合計 585 個体の樹木を毎木調査した。ボゴール農科大学演習林である Hutan Pendidikan Gunung Walat でも簡易型地上レーザーを現地に持ち込み、データ取得実験を行った (図 10)。簡易型地上レーザーによる 3 次元データの取得状況をしめすため、図 11 では Small に区分したプロットでのデータ取得状況、図 12 では Medium に区分したプロットでのデータ取得状況、図 13 では Big に区分したプロットでのデータ取得状況を示す。さらに、板根が発達した高木に対する 3 次元データ取得状況を図 14 に示す。図 14 より、レーザーの最大到達距離が 40m であるセンサーを用いても十分に熱帯樹木の 3 次元データが取得できることがわかる。レーザーが樹冠部まで到達しているため、簡易型地上レーザーでも十分に樹木計測ができる。

表7 インドネシア ボゴール植物園の調査地概要

学名	個体数	DBH 最小値 cm	DBH 最大値 cm	樹高 最小値 m	樹高 最大値 m
<i>Ananas comosus (L) Merry (Brom)</i>	105	3.18	6.69	3.38	6.39
<i>Hoya latifolia G.Don (Asclep)</i>	25	2.23	29.30	6.57	14.01
<i>Aglaia sp</i>	24	2.55	73.25	5.20	23.00
<i>Duranta repens</i>	20	1.91	27.07	2.92	6.67
<i>Pinus merkusii</i>	17	22.77	94.90	3.10	47.50
<i>Garcinia sp</i>	16	1.27	14.65	2.24	7.98
<i>Canarium sp</i>	15	2.55	143.31	3.64	30.10
<i>Clerodendrum sp</i>	11	1.27	32.80	2.58	8.52
<i>Cryptocarya nifens</i>	11	4.46	81.85	5.59	8.89
<i>Syzygium sp</i>	11	1.27	35.03	1.00	18.60
<i>Syzygium racemosum</i>	10	6.02	13.38	1.00	11.91
その他	320				
合計	585				

Big (B)

Medium (M)

Small (S)



図8 インドネシアで測定した各調査プロットの様子。



図9 インドネシア ボゴール植物園内の調査場所（赤色点である計30箇所に調査プロットを設置した）。

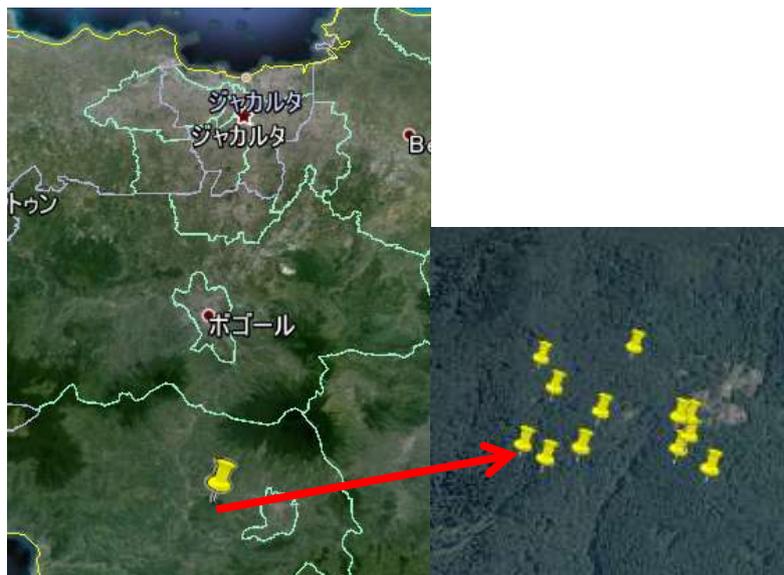


図10 インドネシア ボゴール大学演習林である Hutan Pendidikan Gunung Walat で測定した場所。ボゴールから35km南に位置する。山側森林がすべて演習林であり、その中で黄色ピン留めしてある12箇所で調査プロットを設置した。



図 11 インドネシアでの Small プロットでの地上レーザーによる 3 次元データ（上図、色は反射強度の値を使い、センサーからの距離で赤～緑～青のカラーランプで色づけしている。）と、レーザーデータで取得した調査地概況のパノラマ図（下図）。



図 12 インドネシアでの Medium プロットでの地上レーザーによる 3 次元データ（上図、色は反射強度の値を使い、センサーからの距離で赤～緑～青のカラーランプで色づけしている。）と、レーザーデータで取得した調査地概況のパノラマ図（下図）。

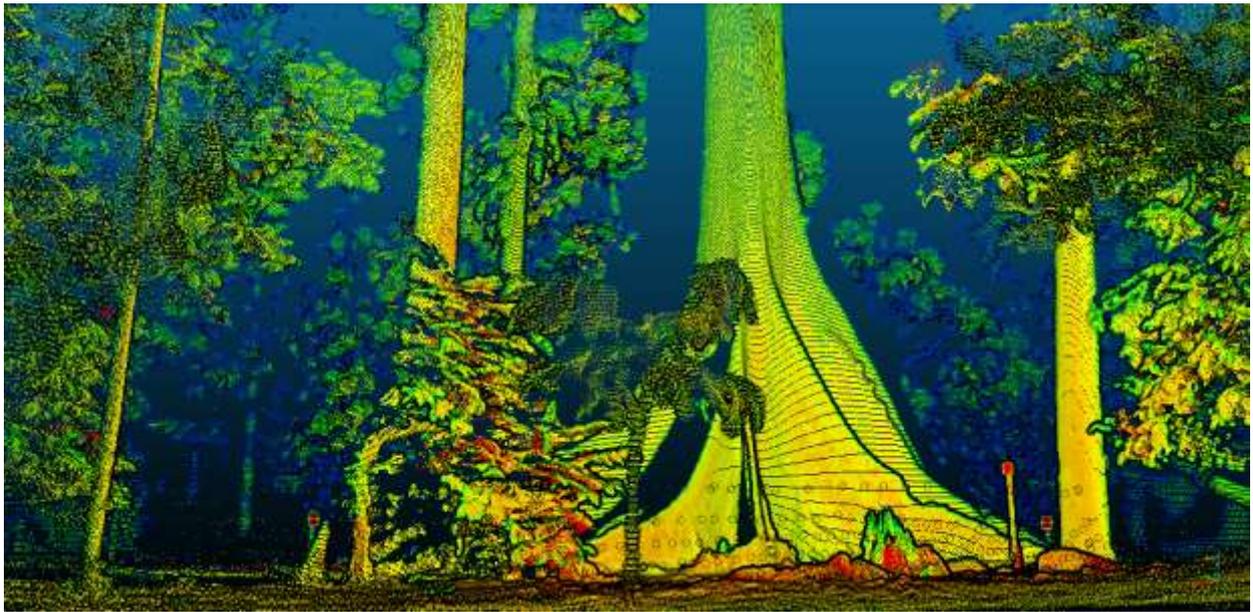


図13 インドネシアでの Big プロットでの地上レーザーによる3次元データ（上図、色は反射強度の値を使い、センサーからの距離で赤～緑～青のカラーランプで色づけしている。）と、レーザーデータで取得した調査地概況のパノラマ図（下図）。

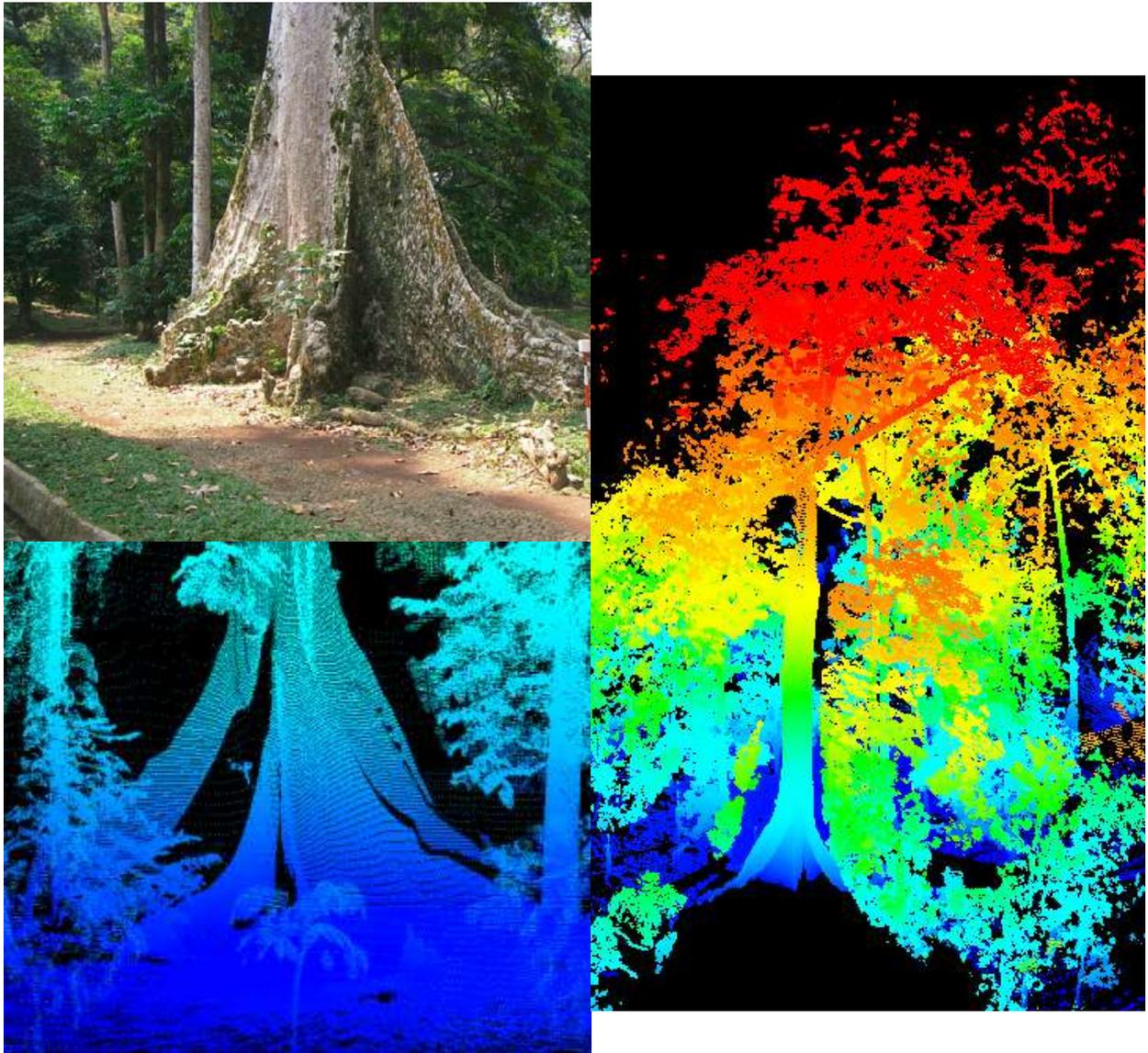


図 14 インドネシア ボゴール植物園で測定した単木で切り出した 3 次元データ（簡易型地上レーザーである SICK LMS511 を用いてデータ取得を行った。簡易型レーザーでもレーザーが樹頂点に十分に届いていることがわかる。また、板根のような複雑な樹形を 3 次元データで取得できていることがわかる。図中の色は高さによって色づけをしている。）。

### 3) オーストラリア 調査地

インドネシアでは植物園を対象地としたが、より自然林に近い調査地でデータ取得するために、オーストラリア Robson's Creek にある熱帯自然林を対象地とした。Robson's Creek はケアンズ近郊の Atherton という街から車で 1 時間ほど北西にある。Robson's Creek では 2009 年～2012 年の 3 年間で 25ha 内のすべての樹木（23,416 本）が毎木調査されており(表 8)、世界でも希にみる詳細な樹木データの蓄積がある。25ha は 1ha 単位でタイル状に調査区が分かれており、各 1ha 調査区の中心位置で 2014 年 2 月と 6 月に地上レーザーによる 3 次元データ取得を行った(図 15)。Robson's Creek の 25ha の広範囲なプロットでは、高精度地上レーザーである RIEGL VZ400 と簡易型地上レ

レーザーである SICK LMS511 の両方のセンサーを現地に持ち込み、データ取得を行った(図 16, 17)。

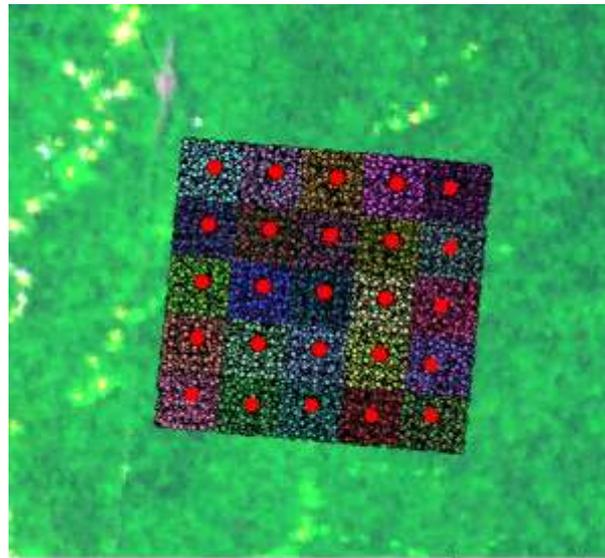


図 15 オーストラリア Robson`s Creek の毎木位置図とレーザーを設置した場所（試験地全体で 25ha あり、1ha 毎がタイル状に調査区が分かれており、各 1ha 内の樹木に異なる色を付けて表示してある。さらに、各 1ha の中心（赤丸点）がレーザーセンサーを設置した場所、背景：RapidEye 画像）。

表 8 オーストラリア Robson`s Creek の調査地概要

学名	個体数	DBH 最小値 cm	DBH 最大値 cm	樹高 最小値 m	樹高 最大値 m
<i>Litsea leefeana</i>	1837	10	55.3	3	36
<i>Cardwellia sublimis</i>	1540	10	113.9	4	38
<i>Flindersia bourjotiana</i>	1322	10	101.9	6	41
<i>Elaeocarpus largiflorens subsp. largiflorens</i>	953	10	49.1	3	33
<i>Alphitonia whitei</i>	851	10	59.3	4	33
<i>Flindersia pimenteliana</i>	774	10	115.2	3	41
<i>Daphnandra repandula</i>	716	10	43.6	4	29
<i>Darlingia darlingiana</i>	687	10	80	2	40
<i>Doryphora aromatic</i>	596	10	87.3	3	41
<i>Sloanea australis subsp. parviflora</i>	507	10.1	70.9	6	38
<i>Sloanea langii</i>	504	10	84	4	33
その他	13129				
合計	23416				



図 16 オーストラリアでの高精度 RIEGL VZ400 地上レーザーによる 3 次元データ（上図、色はカメラで撮影された色データを 3 次元データと表示している。）と、レーザーデータで取得した調査地概況のパノラマ図（下図）。

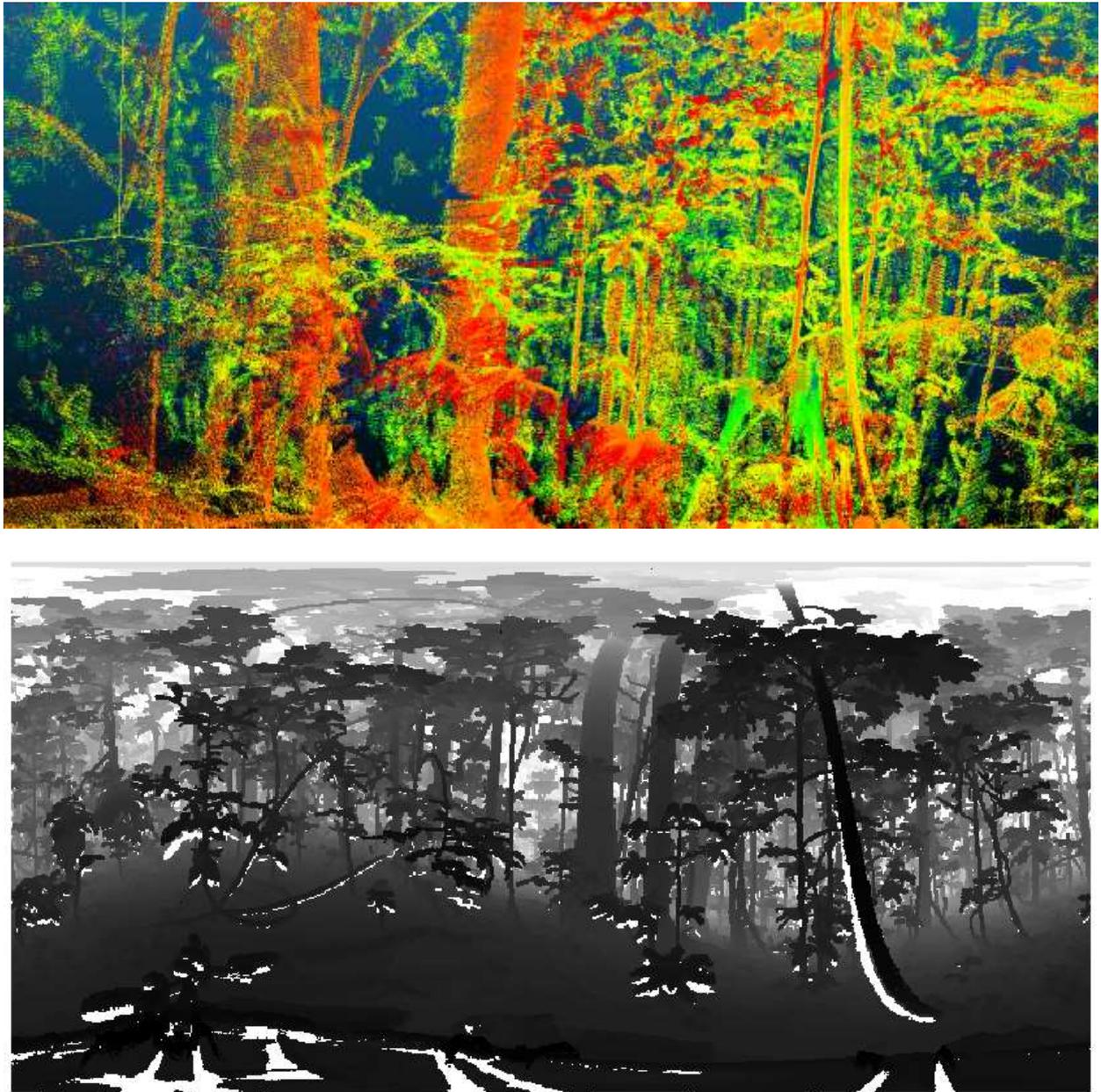


図 17 オーストラリアでの SICK LMS511 簡易型地上レーザーによる 3 次元データ（上図、色は反射強度の値を使い、センサーからの距離で赤～緑～青のカラーランプで色づけしている。）と、レーザーデータで取得した調査地概況のパノラマ図（下図）。

#### （4）バイオマス算出方法

従来のバイオマス算出方法は、材積（幹体積）に密度係数や枝葉及び根の拡大係数を掛け合わせることで簡易的にバイオマスを算出できる。材積算出には、予め作成された材積式に、現地で測定した胸高直径や樹高を代入して算出するが、熱帯林は樹高が高い樹木が樹冠を鬱閉しているため、樹高測定が難しい。よって胸高直径だけから材積を算出する式が作成されており、本研究では胸高直径だけで現地バイオマス量を推定する汎用性の高い式を用いて、現地でのバイオマス推定式とした<sup>6)</sup>（式 1）。

$$AGB = 21.297 - 6.953 \times DBH + 0.740 \times DBH^2 \text{ (Wet model)}$$

$$AGB = \exp(-2.134 + 2.530 \times \ln(DBH)) \text{ (Moist model)} \quad (\text{式 1})$$

$$AGB = \exp(-1.996 + 2.32 \times \ln(DBH)) \text{ (Dry model)}$$

モデル適用条件：

Wet model は年間降水量 4,000mm 以上で乾期無し of 環境条件

Moist model は年間降水量 1,500~4,500mm で乾期無しまたは短い乾期

Dry model は年間降水量 1,500mm 未満で数ヶ月の乾期

本研究対象地は、沖縄琉球大学演習林で平均年間降水量が約 2,100mm、インドネシア ボゴール 植物園では約 3,800mm、オーストラリア Robson's Creek では約 2,300mm であるため、本研究では上記式 1 の Moist model をすべての対象地で適用した。

### (5) 地上レーザーデータ解析方法

バイオマス算出方法に基づいて、熱帯林での現地調査で取得したデータからバイオマスを算出するために、正確な胸高直径の測定が重要になる。よって、地上レーザーから熱帯林の胸高直径を測定できるようにした。その解析手順は、以下の手順によりデータを抽出、解析を行った。

地上レーザーからの正確な測定には、幹部の様々な角度から得られたデータを取得しなければならない。本研究では調査プロットの大きさを半径 10m としたため、半径 10m 以内の調査プロットで 3 箇所地上レーザーを設置し、異なる場所で取得した地上レーザーによる 3 次元データを 1 つのデータとして合成した (図 18)。

現地で地上レーザーによって 3 次元データを取得する際、タイポイントと呼ばれるリフレクターを林内で 3 箇所設置し、センサーを設置した場所からリフレクターの位置を認識し、認識されたリフレクターの位置を基準に 3 次元データを 1 つに合成する (図 18)。データ合成に必要なリフレクターは少なくとも 3 箇所以上必要である。また、胸高直径を測定するためには、可能な限り幹の両側から 3 次元データを取得するため、1 つの調査プロットに対して、地上レーザーを設置する場所は、2 箇所以上とした。

3 次元データから胸高直径の位置を把握するためには、地形図である Digital Terrain Model (DTM) を地上レーザーから作成しなければならない。従来の手法では航空機レーザーデータから DTM を取得する方法が主流であった。航空機レーザーデータは地上からの反射点を、データ取得時に予め分類されるため、DTM を容易に作成できる。しかし、地上レーザーでは地上からの反射とそれ以外の反射を分類されない。よって、本研究ではグリッドを対象地全域に派生し、各グリッド内でレーザーの 3 次元点群からの最小の高さの点群だけを集め、初期の DTM を作成した。初期の DTM は、地形以外に樹木幹部の下部からの反射がノイズとして生じるため、地形の凹凸が各所で見られた。そのノイズを除去することで正確で滑らかな DTM を作成した (図 19)。

正確な DTM を作成後、胸高 (1.3m) の位置での幹部レーザーデータを自動で切り出すプログラムを作成した。レーザーデータから DTM から胸高直径の位置を自動的に認識し、胸高直径の位置で 3 次元データを各樹木に対して切り出し、レーザーデータによる胸高直径を測定できるようにした (図 20)。本研究では、最大照射距離 40m である SICK LMS511 を用いた簡易型地上レーザーを用いたサンプリング手法を開発するために、照射距離 600m の高精度地上レーザーセンサーである

RIEGL VZ400 と性能の比較を行った（図 21）。図 21 より高精度地上レーザーでは、樹皮の表面凹凸や樹皮に付いているツル性植物の状況まで詳細に把握できる。一方簡易レーザーは樹皮の凹凸までは把握できていないが、幹を正確に 3 次元データで取得できていることがわかる。高精度センサーを利用することで、樹種判別に必要な樹皮の状況までも取得できるため、樹種判別の可能性がある。

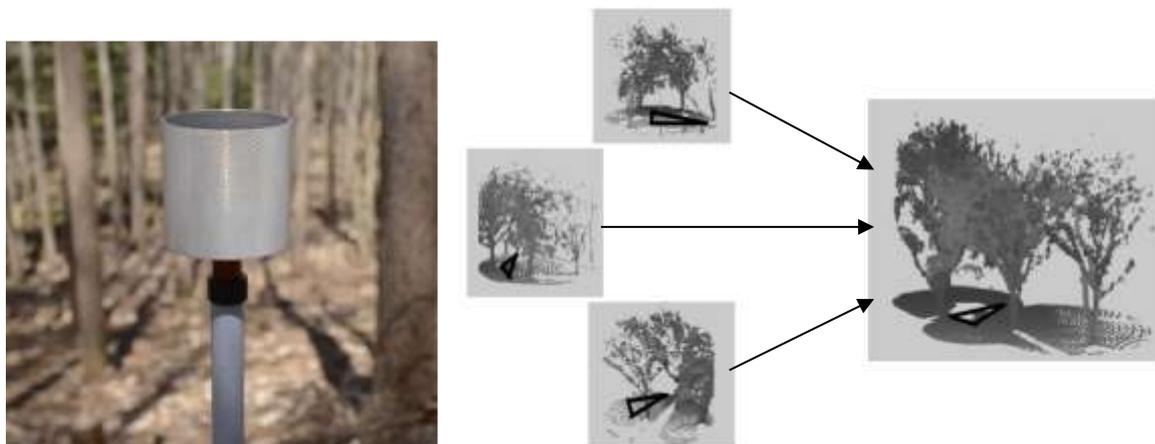


図 18 リフレクター（左図）とリフレクターを基準にデータを合成した結果（右図）。

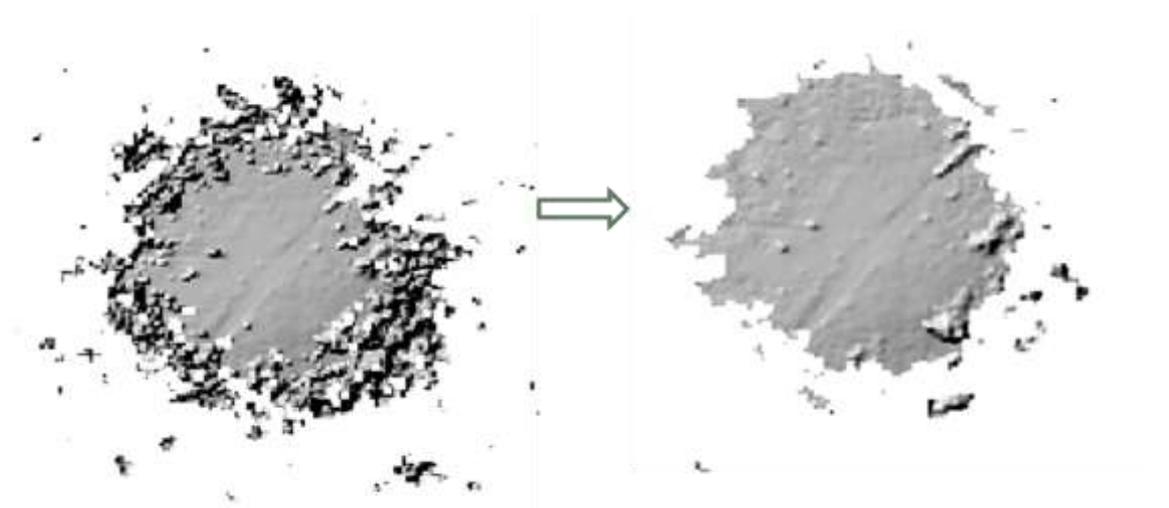


図 19 初期の DTM（左図）とノイズ除去後の DTM（右図）。

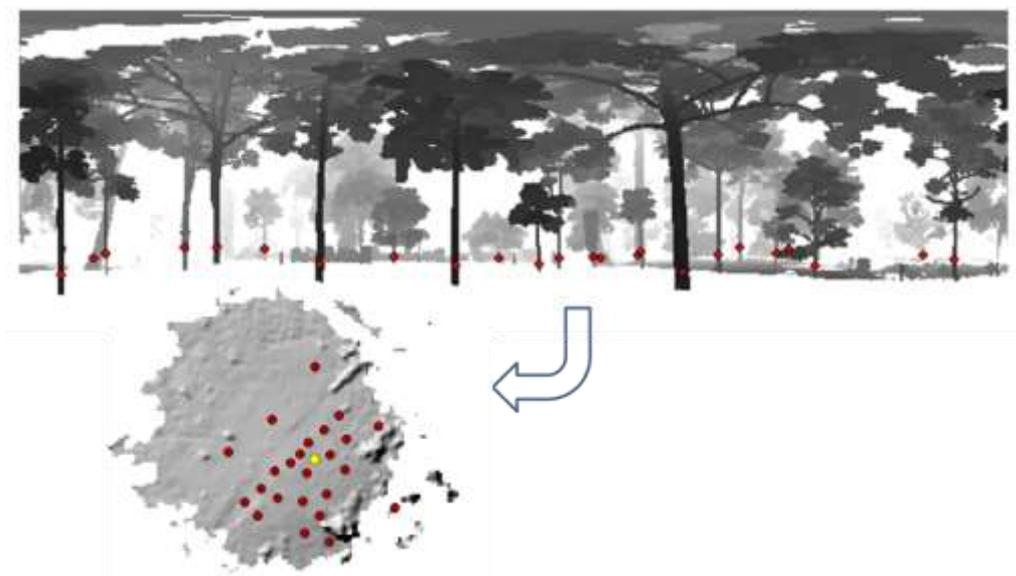


図 20 パノラマ画像と胸高直径位置での自動樹木判読結果（上図）と自動で作成された毎木位置図と DTM（下図）。

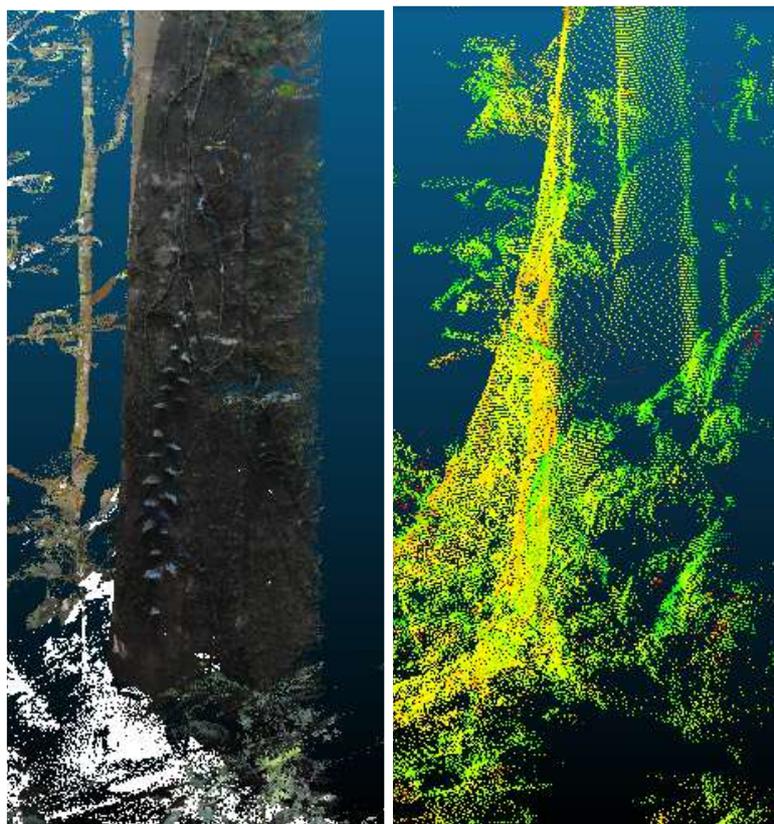


図 21 異なるセンサーによる 3 次元データの比較（左図：高精度地上レーザーである RIEGL VZ400 による 3 次元データ、右図：簡易型地上レーザーである SICK LMS511 による 3 次元データ、右図の色情報は 3 次元データ取得時に、カメラによって撮影した画像を用いており、色情報を 3 次元データと表示している。簡易地上レーザーは反射強度で色づけをしてある。）。

胸高直径で切り出された 3 次元データに対し、幹の太さを正確に測定するアルゴリズムを開発した。複雑な樹木構造を表す点群に対し、ニューラルネットワークの手法である **Radial Basis Function** を用いて点群をラッピングし、幹周形状を正確に把握した。これまで 3 次元の樹冠形状を正確に把握するために開発した解析手法<sup>7)</sup>を応用し、2 次元の胸高直径の位置で幹をスライスしたデータに適用した。その結果、従来の手法より測定精度を大幅に改善することができた。これまでの手法では、複雑な形状に対して「円」を当てはめるしかなかったが、複雑な幹形状の幹周を、自動で正確にその周長を測定できるようにした (図 22)。幹周を  $\pi$  で割ることにより、直径を算出できる。

地上レーザーによって 3 次元データは正確に幹形状を測定できているにも関わらず、解析手法で単純な「円」を当てはめると、正確性が劣り、大きな誤差が生じる。そのため、正確に得られている 3 次元データ形状を活かしきれない。本研究で開発した手法を従来の手法と比較するために、伐倒して測定したデータとも比較した (図 23)。

国内の対象地で、スギの樹木を伐倒し、伐倒したサンプルから 1m 間隔で幹周を測定した。さらに地上レーザーによる 3 次元データもコンピュータ上 1m 間隔で輪切りにし、伐倒調査で測定した場所と同じ幹周を計測した。1m 間隔で測定した幹断面を用いて区分求積法により樹木全体の材積を算出した。その結果、本研究による手法は伐倒して測定した結果と比較しわずか 2.7% の誤差しかないが、従来のレーザー解析手法である「円による推定」では 12.1% もの誤差が生じることがわかった。胸高直径と樹高測定による簡易な材積式を用いた材積算出結果は、伐倒したデータと比較して 6% の誤差があることから、本研究で開発された手法 (誤差 2.7%) が、最も正確な解析手法であることがわかる。

本研究で、熱帯林全体に対しても 1m 間隔ですべての幹周を測定できれば良いが、伐倒調査が熱帯林研究対象地では認められなく、検証に必要な伐倒データが得られなかった。そのため、本研究では、地上レーザーから解析する測定対象を胸高直径と樹高に限定した。また、解析手法にも改良が必要で、熱帯の複雑な樹形の幹部全体を自動で判別する手法が確立していないため、今後解析手法を改良し、幹部すべてを自動で測定できるように解析手法を更新する予定である。

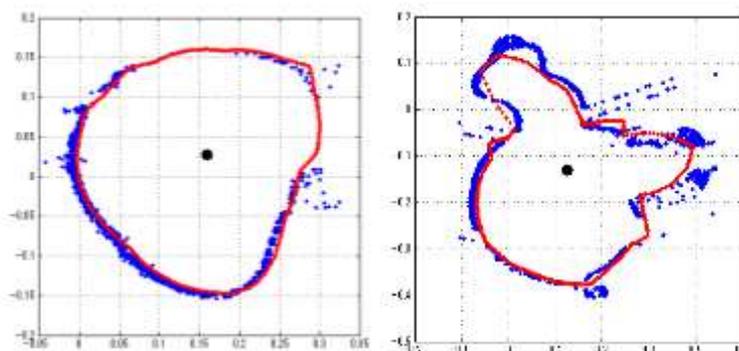


図 22 本研究によって開発された幹周を自動で測定する手法 (青色点：胸高直径の位置で切り出した 3 次元データからの幹の断面。赤色点：本解析手法により幹を自動で把握した結果。赤色線が断面を正確に把握できていることがわかる。)

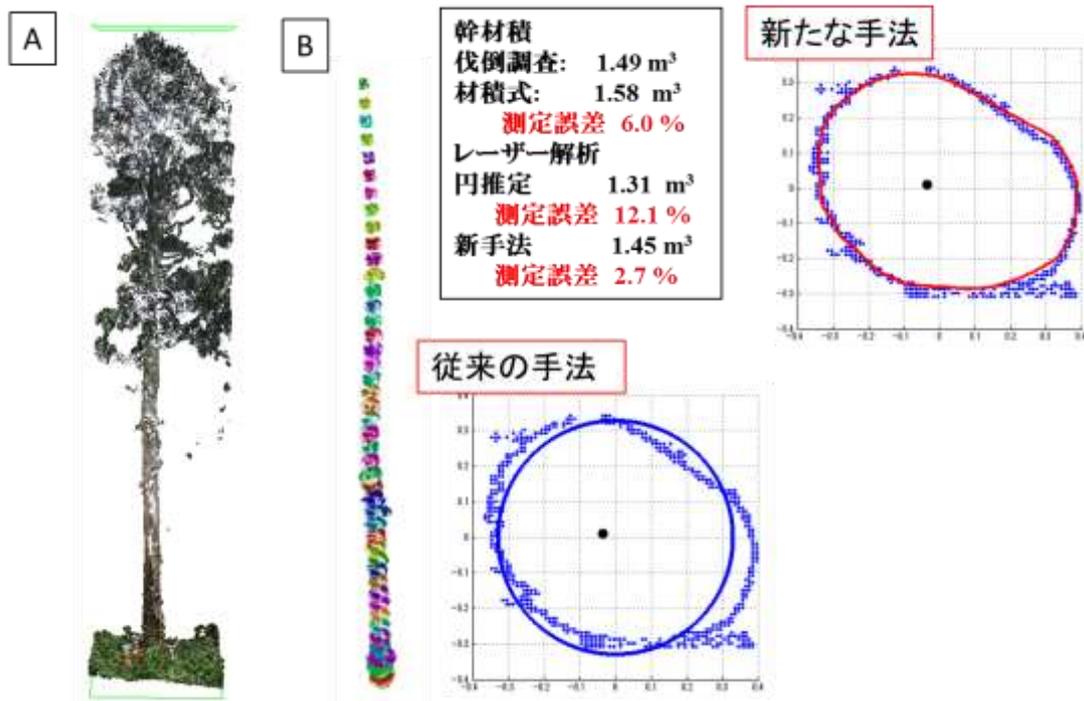


図 23 伐倒調査して測定した結果と本研究による 3 次元データを解析した結果を比較。本研究による手法が最も正確に幹の形状を把握している。

#### (6) サンプルデザイン

地上レーザーを現場で導入する際、サンプリングデザインを確立しなければならない。レーザーセンサーを設置する場所を検討し、簡易型地上レーザーだけで正確性が高いデータ取得方法を確立する必要がある。そのためのサンプリング手法に、ランダムサンプリング、系統サンプリング、層化抽出法と 3 つの手法が考えられる。ランダムサンプルが一番簡易なサンプリング手法であるが、調査した場所に再度戻ることができない欠点がある。系統サンプリングは、調査対象地をグリッド状に区切り、一定間隔で調査地を設ける手法である。系統サンプリングの欠点は等間隔に調査地を設定するため、各調査場所が離れている場合はその場所へ行って測定することが大変である。そこで層化抽出法によるサンプリングデザインを本研究では検討した。

層化抽出法とは、上空からのリモートセンシングデータを活用し、森林タイプを予め分類し、分類した森林タイプ毎にランダムに調査場所を設定し、調査する手法である。従来の手法では、森林タイプ毎に調査場所を設定してきたが、本研究では高木に注目し、サンプリングデザインを検討した。その理由として、樹冠に到達する高木は幹も太く目印となりやすいため、調査で指定した場所に戻りやすいためである。さらに、樹高の高い樹木は、その対象地で個体数は少ないが、その森林全体のバイオマス量を占める割合は高い。バイオマス量が高い場所を優先的に調査できるため、対象地での代表的調査場所となりやすい。

実用的サンプリング方法（調査場所）として、高木を主体としたサンプリングデザインを検討したが、仮説として考えたサンプリング手法を実証しなければ、有効な手法であると言えない。そこで、本研究ではオーストラリア熱帯林の対象地で 25ha を全ての樹木を調査した全木データを用いることで、ランダムサンプリング、系統サンプリング、高木を主体とした層化抽出法の 3 つ

のサンプリング手法をシミュレーションし、そのサンプリング結果を比較した。シミュレーションを行う上で、半径 10m の調査プロットを用いることとし、どこに何カ所置けば、25ha 以上の広域熱帯林のバイオマスをより正確に推定できるか検討した。シミュレーションでは、ランダムに調査区を設置した場合、系統的にサンプルを設置した場合、そして高木を中心に調査区を設置した場合に分けた。半径 10m の調査区を何カ所設置すれば、全体のバイオマスに対する推定誤差が収束するかシミュレーションを行った。対象地全域において、全木調査で得られた正確なバイオマス全量に対し、シミュレーションで推定したバイオマス全量と比較し、その推定値と真値との誤差を計算した。許容できる誤差を全体に対する 5%以内とし、設置する調査プロット数が増加することで、誤差が収束する状況をシミュレーションし、誤差が 5%以内となる最小限必要なプロット数を把握した。

層化抽出法では、上空から得られるデータから森林区分を決めるため、本研究では樹冠を覆う高木を現場へ行く前に知る必要があった。そのために、高解像度衛星画像GeoEye-1を用い、樹冠に到達する樹木を判別した。GeoEye-1は0.5mの近赤外画像が利用可能である。高解像度近赤外画像を用いることで、画像上で近赤外画像の反射値が高い場所からlocal maximumを自動で判読し、その場所を樹頂点の場所を把握した<sup>8)</sup>。同じ場所において地上レーザーで3次元データを取得し、データを比較した。その結果、樹高20m以上の高木が近赤外画像から得られた樹頂点とほぼ同じ場所にあることがわかった。そのため、本研究では樹高20m以上が樹冠を覆う高木と定義し、樹高20m以上の高木を中心として調査地を設置することを考え、層化抽出法によるシミュレーションを行った(図24)。

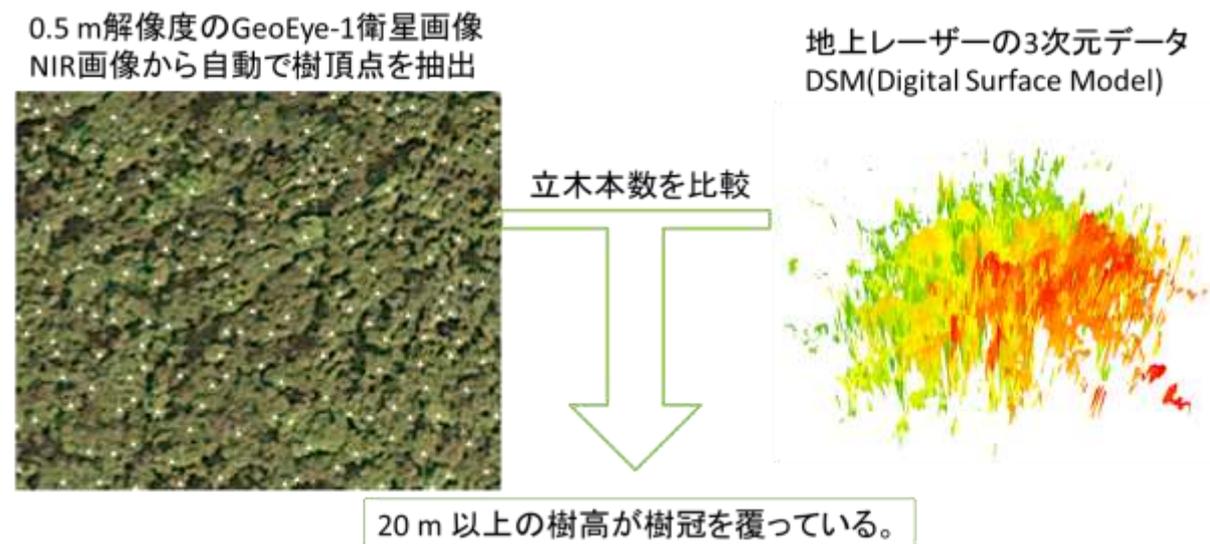


図 24 樹冠を覆うような樹高を見つけるために衛星データから樹頂点を読み取り、その場所を地上レーザーと比較し、20m 以上の樹木が樹冠を覆っていることがわかった。

本研究による手法は、現地で地図がない場所でもプロットを中心となる場所を予め高解像度衛星画像から把握できるため、調査場所を選定するには大変有効な手法である。

#### 4. 結果及び考察

本研究の主な目的は、簡易地上レーザーだけでバイオマスモニタリングを行う技術を確立することであり、そのために必要な装置の開発、熱帯林でのデータ取得実験、サンプリング手法の開発を研究期間中に行った。これらの研究成果について、特に3つの項目（1）簡易型地上レーザーの性能、（2）簡易型地上レーザーと高精度地上レーザーとの比較、（3）サンプリングデザインの結果と考察 について以下にまとめた。以下の本研究による成果から簡易型地上レーザーを用いた森林モニタリングの実用性を実証する。

層化抽出法のサンプリングデザインを採用したが、高木を判定するために、高解像度衛星画像を購入して、用いられなければならない。さらなる実用化に向けた展開として、高価な衛星画像を購入しなくても上空から詳細なデータを入手できる方法として、無人飛行機（UAV）によるデータ取得実験も行った。UAVによる研究成果を本項目で紹介し、費用面で衛星画像が入手困難な状況でも途上国で地上レーザーとUAVにより熱帯林のモニタリングができる手法を紹介する。

##### （1）簡易型地上レーザーの性能

本研究で用いた簡易型地上レーザー（SICK LMS511）は、距離に応じてビーム幅が広がる性質がある。表2で示した mrad がそのビーム幅を決めるセンサー特性である。簡易地上レーザーのビーム特性による樹木の測定への影響を検討した（図25）。図25では胸高直径37cmの樹木を対象として、地上レーザーから異なる距離で照射した結果である。レーザーのビーム幅が広がることで、取得できる3次元データの形状も変化してしまう。

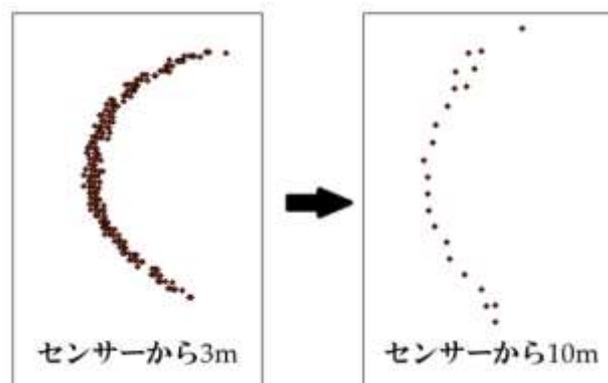


図25 簡易地上レーザーを用いて距離に応じた樹木測定誤差（対象木の胸高直径は37cm）。

対象木とセンサーとの距離が離れると、ビーム幅の影響で得られる3次元データの形状が変形する。ビーム幅の影響による樹木測定への誤差を把握した。計510本の樹木に対し、様々な距離から照射した3次元データから胸高直径と樹高計の測定誤差を図26で示す。図26では、対象木からレーザーセンサーまでの距離と、その対象木の平均二乗誤差（RMSE）を示している。図26より、ビーム幅の影響で、センサーからの距離10m以内に樹高測定では1mほどの誤差を生じ、胸高直径は4cmほどの誤差が生じることがわかった。

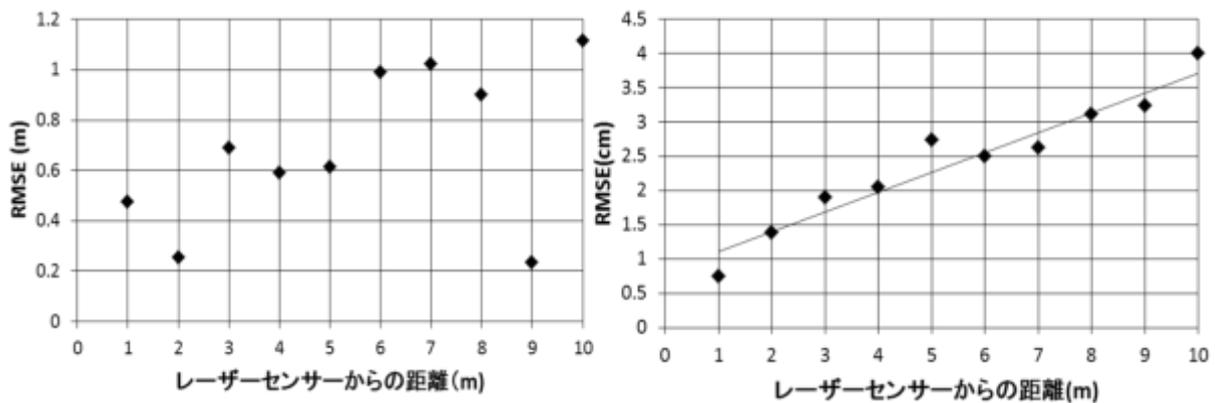


図 26 簡易地上レーザーを用いた際のセンサーから対象木までの距離と測定誤差の関係（左図：樹高測定誤差、右図：胸高直径測定誤差）。

## （2）簡易型地上レーザーと高精度地上レーザーとの比較

簡易型地上レーザーによる樹木測定に関して、インドネシアとオーストラリアでの実験結果を示し、簡易型地上レーザーの性能を把握する。

インドネシアでは、ボゴール植物園で、熱帯標本木である複雑な樹木形状に対して、簡易型地上レーザーのみで3次元データを取得した。地上レーザーから得られた3次元データから測定した樹高と胸高直径の測定値を現地調査で取得した結果と比較した（図 27）。

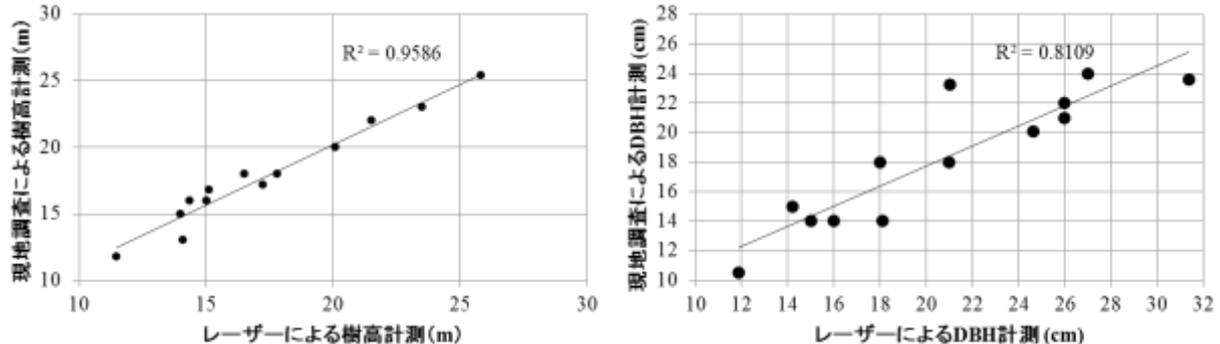


図 27 レーザーによる測定結果を現地データによる結果検証（左図：樹高測定結果検証、右図：胸高直径測定結果検証）。

図 27 よりレーザーによる樹高測定と現地で検証用に人が測定した樹高測定には高い相関関係があり、RMSE が 94cm あった。過去の研究から、高密度航空機レーザーを用いたデータ取得でも樹高測定で RMSE が 50cm～1m であったため、簡易型地上レーザーは航空機レーザーに劣らず正確に樹高が測定できる。さらに、人が測定する場合でも樹高測定は 1m ほどの誤差を生じるため、地上レーザーによる樹高測定は人による測定と同じ精度を保証していると言える。胸高直径は RMSE が 3.61cm あった。現地で人が測定する場合と比べ、同じ精度で測定ができていることがわかる。図 27 では、様々な樹種に対して簡易レーザーによって正確に樹木測定ができているため、汎用性の高い解析結果であることがわかる。

さらに、本研究で使用した簡易型地上レーザー高精度地上レーザーセンサーである RIEGL VZ400 と性能を比較した。オーストラリアの研究対象地で、簡易地上レーザーと高精度地上レーザーを同時に持ち込み、3次元データ取得を行った。同じ条件でデータを取得することにより、精度検証を行うことができ、その結果を図 28 に示す。オーストラリアの熱帯林は、上記のインドネシア ボゴール植物園よりも自然林であるため立木密度が高く、3次元計測が難しい状況にあった。オーストラリアの対象地が実際の REDD+対象国での熱帯林の状況に近い。図 28 より高精度地上レーザーである RIEGL VZ400 による樹木判読率は 95%であり、SICK LMS511 の樹木判別率は 65%であった。樹木判読率とは、レーザーで樹高も胸高直径も計測できた樹木本数を調査地内にある樹木本数で割った値である。さらにそれぞれのセンサーの現地調査との誤差は、RIEGL では、胸高直径では 1.14cm で、樹高では 2.97m であったのに対し、SICK では胸高直径 2.77cm で、樹高は 4.03m であった。人が測定した値と比較しても、どちらのセンサーでも誤差が少なく、実用的に使用できることがわかった。オーストラリアの熱帯林は自然林であり、立木密度が高密度であるため、インドネシアに比べ樹高測定精度が悪く、樹高測定で 1m 以上の計測誤差が生じた。インドネシアの植物園の見本林は、立木密度が低く、樹高測定に必要な樹木梢端部が地上レーザーセンサーを設置した場所から見えやすいため、樹高測定の誤差が小さかった。地上レーザーの現場で作業効率化を優先するため、センサーの設置箇所はプロット内でランダムに置く。そのため、敢えて樹木梢端部が見える場所を捜さない。そのため、地上レーザーを用いた樹高測定による誤差は回避できない。人が測定する現地調査でも樹頂点が見えない場合が多いため、樹高が高くなるほど人が測定する値に誤差が生じやすい。レーザーも地上に近い樹木の幹部で樹木梢端部が遮られるため、樹高測定に必要な梢端周辺が測定できないことがある。よって、本研究でもバイオマス

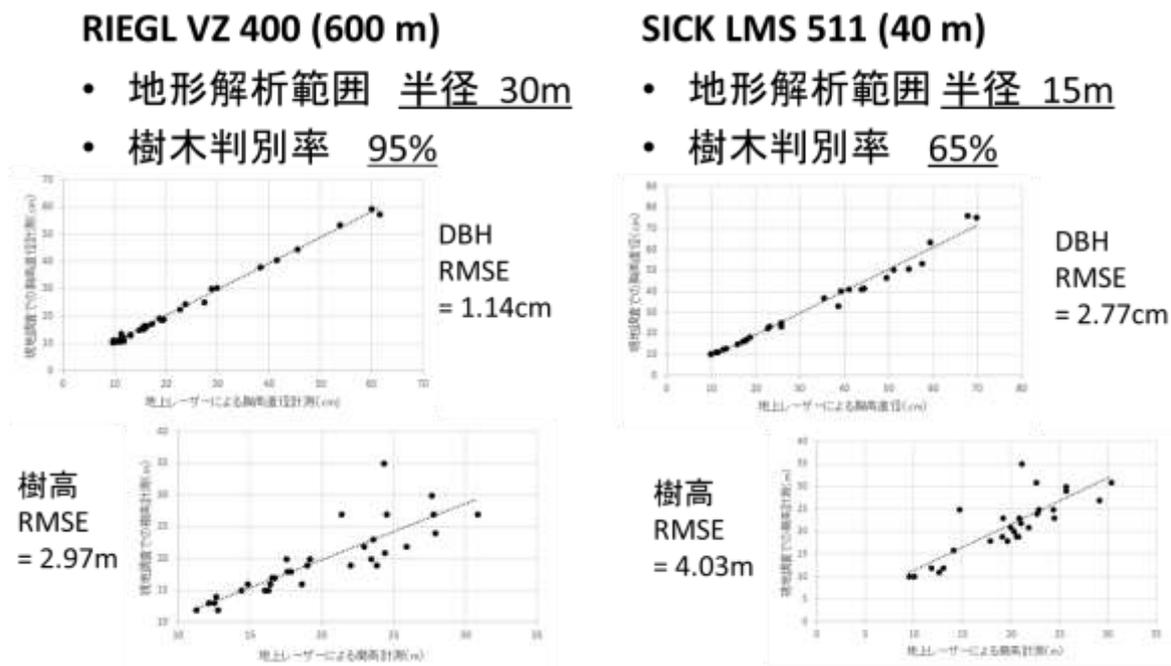


図 28 高精度の地上レーザーセンサーである RIEGL VZ400（左側）と簡易型地上レーザーである SICK LMS511（右側）による熱帯林測定精度の検証。

推定式（式 1）は樹高を入力値としない式を用いる。胸高直径は、地上レーザーから最も正確に測定可能であるため、胸高直径の情報から樹高を推定する解析手法を検討が必要である。

### （3）サンプリングデザインの結果と考察

ここまでの結果と考察により、簡易型地上レーザーのセンサー性能と、樹木測定における測定誤差を把握することができた。これらのセンサーの性能を考慮し、シミュレーションを行う上での前提条件を把握した。

4.（1）のセンサー特性を考慮し、簡易型地上レーザーは 10m 以内であれば、レーザーのビーム幅の影響を抑えて樹木測定ができる。そのため、調査プロットを半径 10m と設定した。さらに、4.（2）の簡易型地上レーザーと高精度地上レーザーとのセンサー比較から、簡易地上レーザーを設置した 1 箇所から判読できる樹木判読率が 65%であったことから、調査プロット半径 10m 以内に 3 箇所地上レーザーを設置し、データを合成する必要があることがわかった。地上レーザー 1 箇所から取得できる樹木数に限界があったとしても、3 箇所地上レーザーを設置し、取得されるデータを合成することで、樹木判読率を向上させることができる。さらに、異なる場所から取得されるデータを合成すれば、幹の両側面のデータを取得することができるため、複数箇所のデータ合成は必要である。

以上のセンサーの性能を考慮し、サンプリングデザインを検討した。熱帯林で実利用をする上で、地上レーザーをどこにどのように設置すれば、より正確に広域のバイオマスを推定できるか検討した。オーストラリアの熱帯林調査地は、25ha もの広域の熱帯林を全木調査したデータが利用可能であったため、そのデータを利用し、シミュレーションにより様々なサンプリングデザインを検討した。サンプリングデザインとしては、ランダムサンプリング、システムティック（系統）サンプリング、層化抽出法によるサンプリングである。層化抽出法によるサンプリングでは、樹冠を覆う高木（樹高 20m 以上の樹木）をプロットの中心とするというサンプリング手法を検討した。高木を覆う樹木を特定するため、高解像度衛星画像から樹頂点を抽出し、同じ場所で測定した地上レーザーによる 3 次元データと比較することで、樹高 20m 以上の樹木が樹冠を覆うことを予め把握することができた。これらの解析準備を行い、20m 以上の樹高を調査プロットを中心としてサンプリングした場合、対象地全域のバイオマスを正確に推定できるかを検討した（図 29）。

シミュレーションの結果、図 29 よりどのサンプリング手法でも調査プロットを設置する数（サンプル数）が増加すれば、サンプルした場所から全域バイオマスを推定した値と真値との間で生じる誤差が収束する傾向があった。25ha 全木調査したデータを用いたシミュレーション結果から、半径 10m のプロットが最低 30 プロットあれば、その対象地の広域のバイオマス全量を誤差 5%以内で推定できることがわかった。

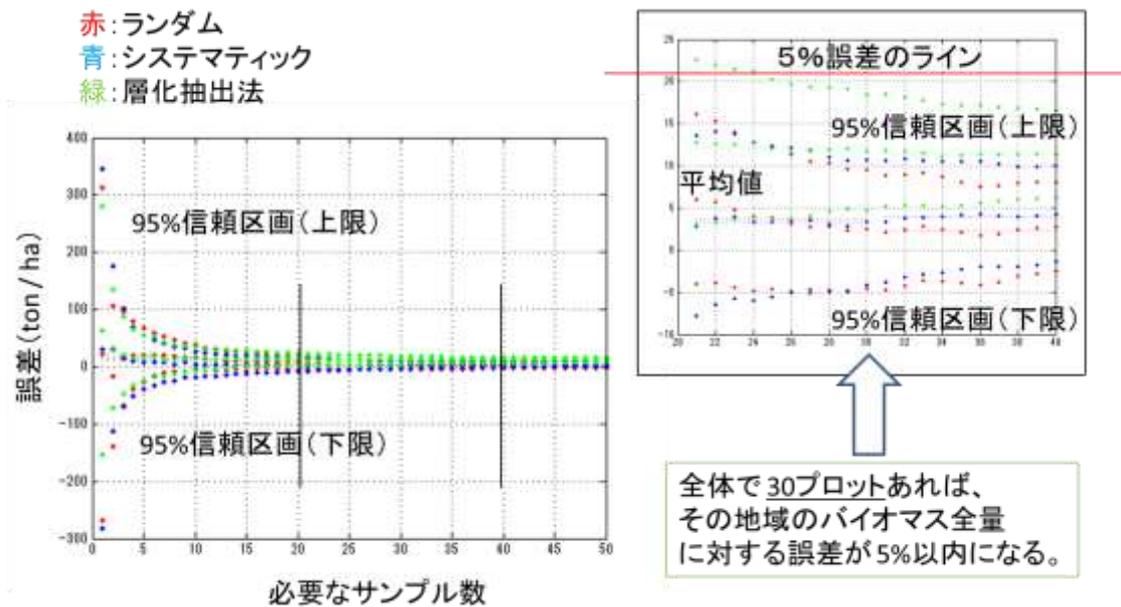


図 29 ランダム、システマティック（系統分類）、層化抽出法（20m 以上の樹木がプロットの中心とするサンプリング手法）を用いて最適な調査プロット数をシミュレーションによって確定した。

これらの結果から、地上レーザーを用いたバイオマスサンプリング手法として、以下の条件で現地調査を行えば、熱帯林の広域のバイオマスを 5%以内の誤差で推定できることがわかった（図 30）。

- 1) バイオマスモニタリングのために調査プロットを設置する場所は、樹冠を構成する高木を中心とする（本研究では樹高 20m 以上の樹木）。樹冠を構成する高木は目印となりやすいため、その場所に戻って再度測定できる。さらに、上空から取得する衛星や航空機リモートセンシングデータでも測定できるため、他のリモートセンシングデータによる結果と比較がし易い。
- 2) 簡易型地上レーザーの性能も考慮し、さらには現地でのデータ収集の効率化も考慮して、調査プロットの半径を 10m とする。
- 3) 簡易型地上レーザーは、樹木を測定する樹木判読率が 65%であるため、センサー性能を考慮し、調査プロット半径 10m 以内に 3 箇所レーザーセンサーを設置する。
- 4) 調査プロット数を 30 プロットとしてランダムに調査地内に調査プロットを設置する。レーザーデータを 360 度回転して、データを取得する時間は 1 箇所わずか 3 分でデータ取得できるが、準備と移動を含めて 1 箇所 15 分要する。1 プロット 3 箇所地上レーザーを設置すると、1 プロット 45 分の測定時間が必要となる。1 日 8 時間、現地でデータ取得できると想定すると、広域の熱帯林のバイオマス推定に 30 プロット（90 箇所の地上レーザー設置）で、合計 3 日あれば、データ取得が完了する。

簡易地上レーザーによるデータ取得は即時性が高いため、頻度も高くデータを取得できる。また、経年的変化を把握する上で、胸高直径が 3~4cm の誤差で測定できるため、より短期間でモニタリングできる。

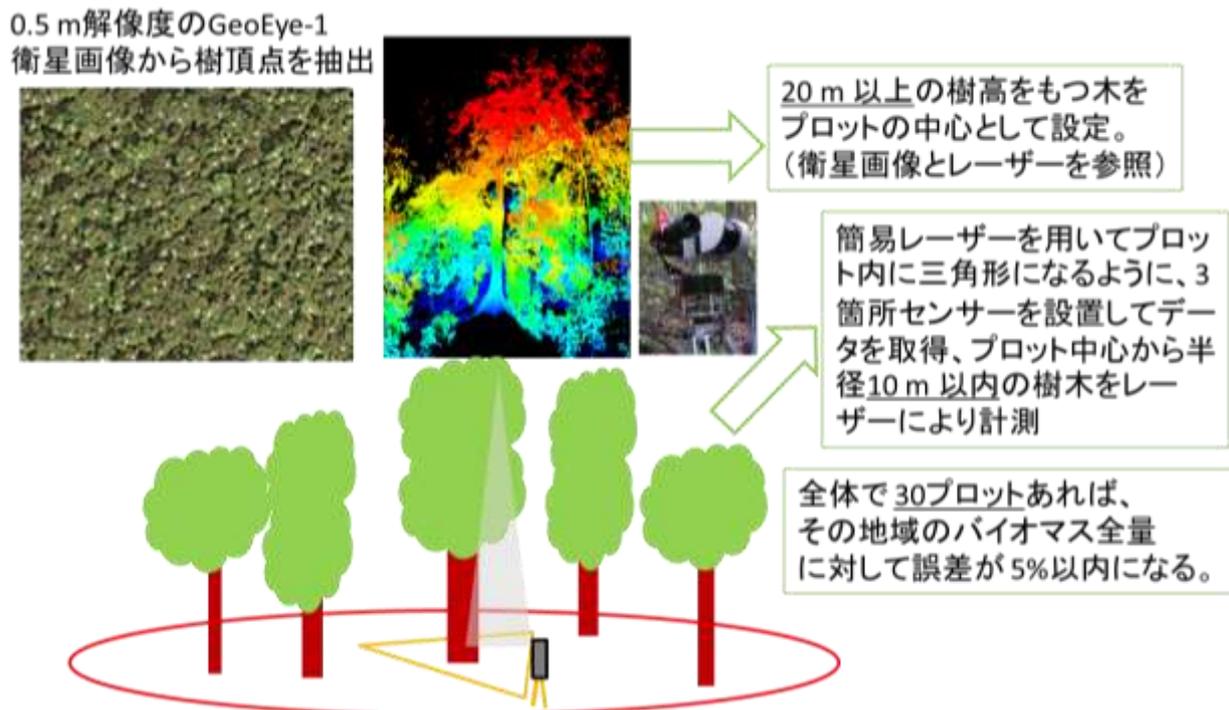


図 30 バイオマスモニタリングのための現地サンプリング手法の確立。本研究で得られた知見をまとめた図。

図 30 から高解像度衛星画像を入手しなければ、樹冠を覆う樹高の高さがわからない。高解像度衛星画像は高額なこともあり、本研究で目標としている安価なデータ取得方法の中で唯一の欠点となる。その欠点を補うために、安価で購入できる無人飛行機（UAV）による広域の高解像度データを取得する方法を検討した。

#### （４）無人飛行機（UAV）による広域データ整備

写真画像だけから 3 次元データを作成する手法として、Structure from Motion(SfM)と呼ばれる新たな手法を使用し、UAV によって上空からデータ取得を行う方法を検討した。SfM とは、マルチビューステレオ画像によって従来の写真測量技術を応用した技術を用いることで 3 次元データを作成する技術である。連続して撮影された写真だけから 3 次元データを作成できる。

この方法を森林域で用いることで、上空から広域データを取得し、地上レーザーを設置する場所の空間代表性を検討できる。さらには、その場所にある樹木を 3 次元データから測定できる。

無人飛行機を用いる手法は、GPS 付きカメラを無人飛行機に搭載し、上空から連続で写真撮影をし、その写真画像だけから Photoscan Professional (Agisoft 社)のソフトを用いることで、3 次元データへ変換する（図 31）。変換した 3 次元データは、簡易 GPS による座標付きデータである。SfM により航空機レーザーのように点群データを作成することも可能である。さらに、本研究では上空から得られたデータと地上レーザーデータをマッチングする技術を開発し、本研究機関中に特許を出願した（特願 2014-197627）。この手法により、座標が付いた上空からのデータに、地上で取得した座標がない 3 次元データをデータ融合できるようにした。そのため、調査地で取得するデータとリモートセンシングデータとの位置座標のズレが補正できるようになった（図 32）。

本研究では、さらに、SfMによるデータ取得方法を検証するために、地上レーザーによって取得されたデータとUAVによって取得されたデータを比較し、SfMによる3次元データの取得状況を検証した。本研究のデータは千葉県山武市における日向の森で行い、2014年2月にUAVによるデータ取得を行った。比較に用いた参照データは、2010年8月に取得した航空機レーザーと2010年9月に取得した地上レーザーである。データを正確に重ね合わせた後、単木でデータを切り出し、3次元データの取得状況を比較した（図33）。

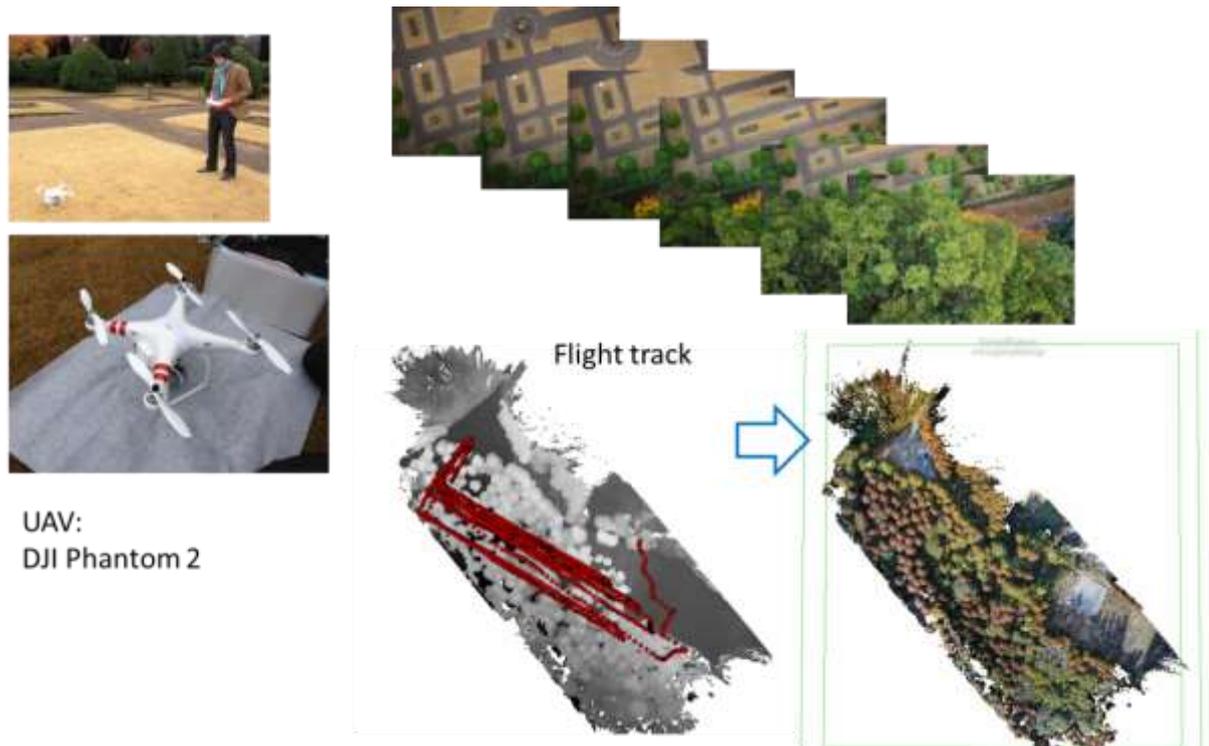


図 31 無人飛行機（UAV）によるデータ取得、SfM を用いることで UAV から撮影した写真データだけから 3 次元データが作成でき、さらに GPS を搭載することで座標が付きデータとすることができる。

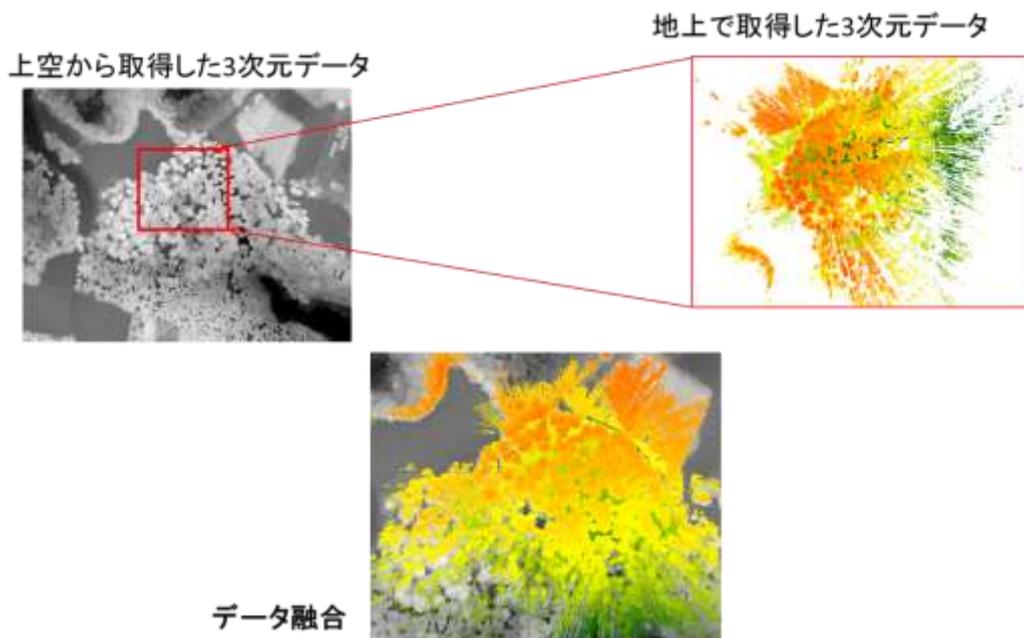


図 32 UAV により上空から得られたデータに地上で取得した 3 次元データをデータ融合した結果。



図33 単木単位でのデータ比較（左図：航空機レーザー、中央：地上レーザー、右図：UAVから取得した3次元データ）。

図33より、UAVにより取得されたデータは樹冠上部の状況を詳細に把握できていることがわかる。また、UAVで取得したデータの方が航空機レーザーに比べ、樹冠構造を詳細に把握できている。UAVによる写真画像だけから作成した3次元データは、上空から撮影した画像だけで作成されているため、幹部の把握ができない。よって、UAVだけでは幹部形状を把握できず、地上レーザーデータとのデータ融合または地上レーザーによるデータの補足が必要なが明らかである。よって、写真測量の技術が進歩し、写真画像だけから3次元データを作成できたとしても、バイオマス算出の根拠となる幹形状データを確実に取得できない。よって、地上レーザーによるデータ取得方法が確実であることがわかった。

さらに、同じ単木データで、高さ別の頻度（データの質）を比較した（図34）。図34より、図33において目視で認識した結果を直接データ比較することができた。

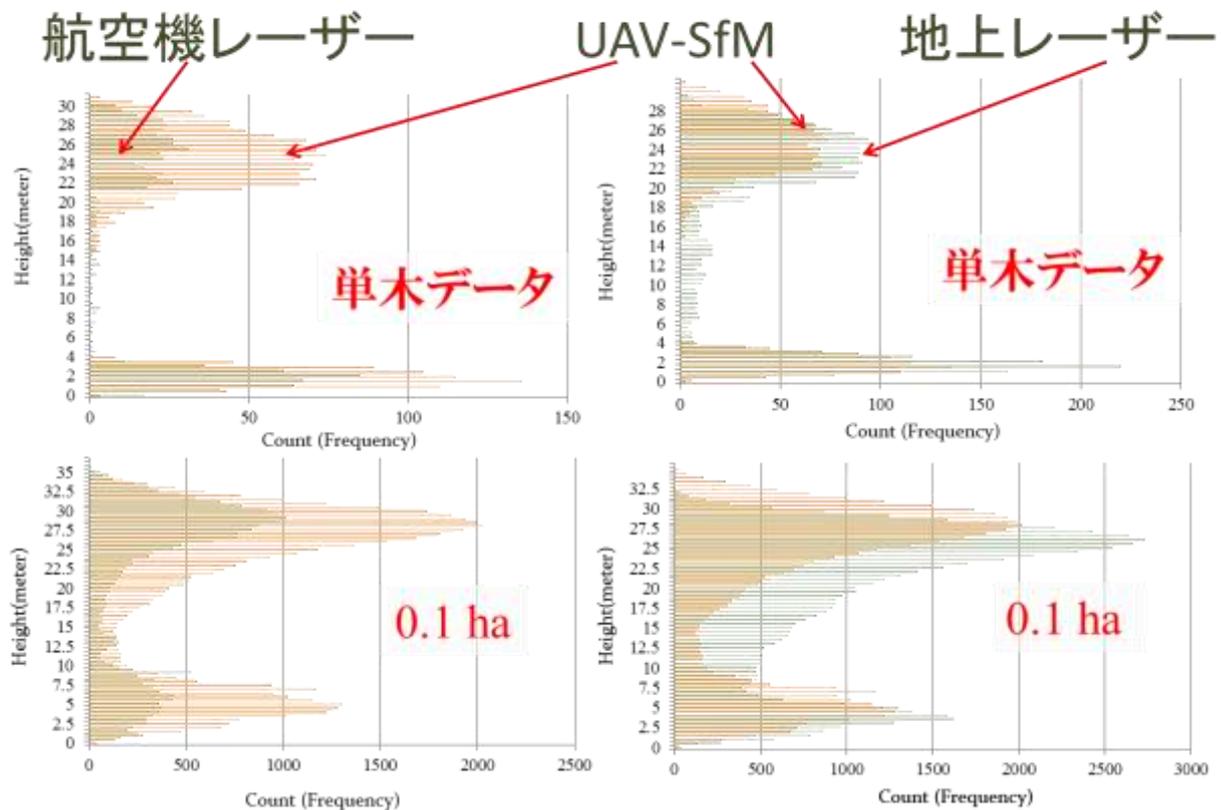


図34 異なるデータ取得方法による3次元データの比較。

図34より単木データでは、UAVによる写真測量技術（UAV-SfM）による3次元データが航空機レーザーよりも詳細にデータ取得できており、地上レーザーよりはデータ密度が劣ることがわかる。0.1haのプロットで切り出した結果でもデータ量が地上レーザーによって取得した方が多くの森林情報を得ていることがわかる。UAV-SfMによる森林測定は写真画像だけから3次元データに変換するため、樹木表面の形状しか3次元データ化していない。その一方で航空機レーザーは、樹木内部からレーザー反射も記録しており、地上レーザーはさらに細かい幹形状を把握できている。これらの結果より、簡易に取得できる手法が開発されたとしても地上レーザーによるデータ取得の優

位性は明らかである。しかし、地上レーザーでは、センサーの性能の違いによりデータ取得できる範囲に限りがある。よって地上レーザーを取得する場所の代表性を検証しなければならない。広域データと比較する場合、3次元データはこれまで航空機レーザーでしか得ることが出来なかったが、航空機レーザーは高額のため、容易にデータ取得ができない。その点、UAV-SfMを用いれば、地上レーザーデータを取得する場所の周辺状況を上空から広域にデータ取得することができ、空間代表性を検証できる。異なる森林タイプをUAVによって取得された3次元データで区分し、代表的な場所に地上レーザーを設置することが最も有効な手法であると言える。広域データをUAV-SfMによりデータを取得し、地上レーザーデータの設置が必要な場所を特定することが実用的技術としては優位性が高い。地上レーザーを持ち込めないような湿地帯などアクセス困難な場所では、UAV-SfMによって上空から3次元データを取得できる。地面が不安定で地上レーザーが持ち込めないような場所ではUAV-SfMによって3次元データを取得する方法が最適と考えられる。

#### (5) 航空機レーザーデータとの融合

既存のデータとして航空機レーザーデータが利用可能な場合は、航空機レーザーデータとのデータ融合が考えられる。本研究では、沖縄でのデータを使用し、航空機レーザーと地上レーザーデータのデータ融合を行った。沖縄の国有林で平成22年に航空機レーザーによって広域の3次元データが取得している(図35)。航空機レーザーの点密度が低く、大部分が樹冠で反射しているが、地上レーザーはより多くの樹木情報が得られることが図36から明らかである。本研究では、地上レーザーと航空機レーザーをデータ融合する技術を確立できたため、これまで不可能であった異なるレーザーセンサー、異なる時期に取得したデータをデータ融合ができる。

従来、航空機レーザーデータと地上レーザーデータを合成するためには、高精度GPSを用いて位置座標を合わせなければならなかった。高精度GPSを林内に設置し、正確な位置座標を取得するには長時間GPSデータ取得しなければならなかった。高精度GPSを林内に設置しても、数cm～数mの位置座標のズレが生じる。得られたGPS情報を基に地上レーザーによるデータを航空機レーザーのデータに重ね合わせても結果的にズレが生じる。より正確な位置座標を把握するためには、より長時間GPSデータを取得しなければならなかった。

本研究で開発したデータ融合技術は、3次元データ同士をコンピュータ上でデータ融合できるため、現地で長時間GPSによる位置座標の取得する必要がない。ある程度正確な位置座標があれば場所を特定できるため、データ融合には十分な位置情報である。誤差の大きいハンディなGPSによる位置座標で十分に地上レーザーを取得した場所を特定でき、コンピュータ上でさらに正確なデータ融合ができる。データ融合技術により現地調査でのGPSのデータ取得時間を大幅に短縮できる。さらに、地上レーザーによる3次元データを航空機レーザーの検証用データとして用いる際、正確にデータ間を比較できる。

現地調査で正確な樹木位置を得た後、航空機レーザーデータと比較した際、プロットの範囲に問題が生じる。特に、調査プロットの境界線上にある樹木が解析対象に入るか入らないかといったわずかなズレが、航空機レーザーからの解析結果を検証する際に問題となる。地上レーザーから取得される3次元データを直接航空機レーザーにデータ融合すれば、データ間の比較が容易になり、地上観測と上空からの解析結果の対応関係が改善される(図36)。

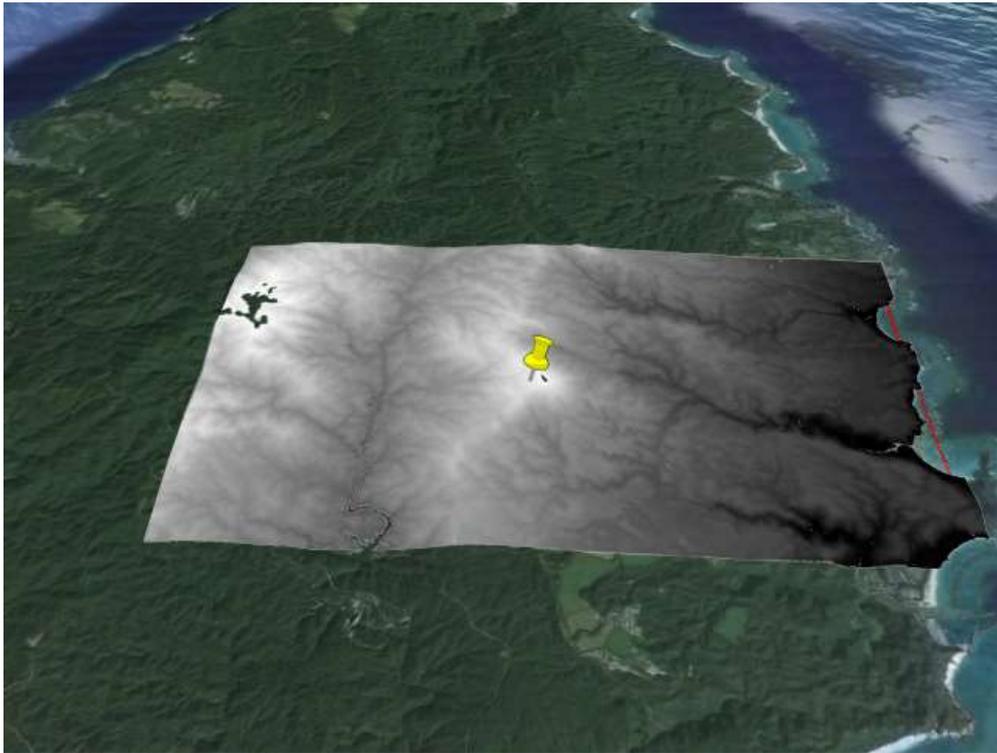


図35 航空機レーザーによって沖縄県国頭村国有林で取得されているデータの範囲（航空機レーザーから作成されたDSMによって航空機レーザーが取得されている範囲を図中に表示してある。図中黄色のピンがある場所で、地上レーザーによる測定を現地で行っており、その場所のデータを用いて図36でデータ融合を行った。）。

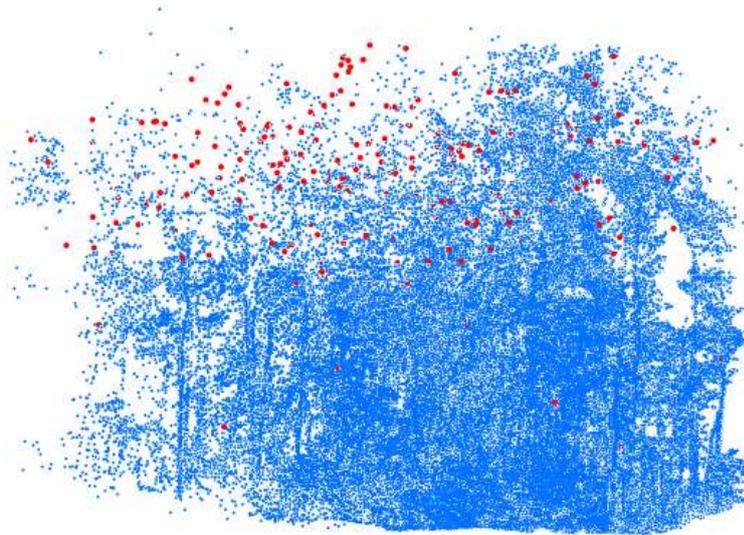


図36 地上レーザーと航空機レーザーのデータ融合（青点：地上レーザーデータ、赤点：航空機レーザーデータ）。本研究で開発したデータ融合技術は位置座標のズレを少なくデータ融合できるため、GPSデータ取得の作業時間を短縮化でき、コンピュータ上で位置座標の補正ができる。

図36から、地上レーザーが航空機レーザーに比べ、詳細に樹木データを取得できていることがわかる。本研究により開発されたデータ融合技術は、異なるデータをマッチングした後、3次元データを直接比較できる。

## (6) まとめ

地上レーザーに関する使用状況として、高額なセンサーと低価格センサーとあり、高額センサーを所有する測量会社に外注してデータ取得することができる。さらに、日本から高額なセンサーを国外へ持ち出すこともできるため、以前より輸出入許可が取れやすくなってきている。しかし、国によっては治安が悪い場所もあり、高額なセンサーを途上国へ持ち込むことが難しい場所もある。そのような場所では、低価格のセンサーを現地へ持ち込み 3次元データを取得することができる。さらに、地上レーザーセンサーも持ち込めないような場所では、最近注目を集めている技術である SfM により、写真画像だけから 3次元データを取得できる。これらの最新の技術を用いて熱帯林のある途上国で 3次元データを取得できる（図 37）。

森林計測に 3次元データを活用する最大の利点は、3次元データから絶対値（誤差が少ない測定値）を取得できることにある。熱帯途上国で 3次元データを取得する計画を立てる際、日本のように熱帯林の対象地で航空機レーザーがすでに取得されていれば、そのデータを基準にモニタリング手法を確立することが効率的である。しかし、前述のように航空機レーザーは上空からレーザーを照射するため、樹冠からの反射が多く、林床までデータが届いていない場合が多い（図 1）。そのため、林内の状況を取得できる地上レーザーを現場に導入することで、上空からのデータを補完し、より正確に広域推定を行うことが最適である。航空機レーザーデータが熱帯林をどこまで測定できるかは、地上レーザーとデータ融合すれば、そのデータの確実性を検証できる。本研究では、沖縄県の国有林ですでに取得されている航空機データとデータ融合し、データを比較した。

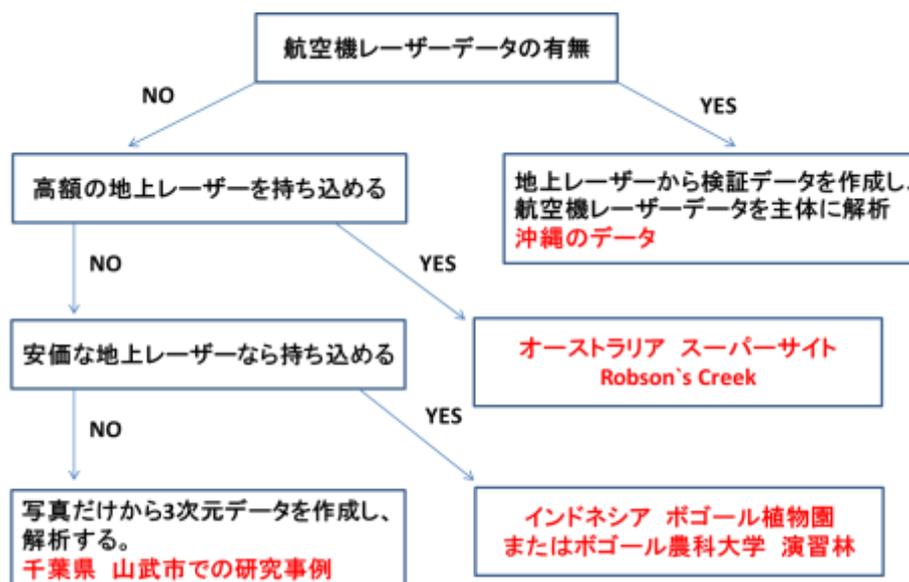


図 37 地上レーザーを実利用で用いる場合の適用範囲。

高額な地上レーザーを REDD+プロジェクト対象国に持ち込める場合は、高額なセンサーを現地に持ち込み、森林測定することで効率良く 3 次元データを取得できる。森林域で高精度なセンサーとして RIEGL VZ400 による地上レーザーがあり、センサー設置箇所から半径 600 の範囲でデータ取得ができる。この実証実験として、本研究対象地であるオーストラリアの Robson's Creek という長期モニタリングサイト（スーパーサイト）でデータ取得を行うことができた。さらに、SICK LMS511 を用いた簡易地上レーザーによっても同時に 3 次元データを取得し、センサーの違いによるデータ取得状況を比較することができた。

高額な地上レーザー（価格が 1,000 万円から 3,000 万円）に比べて安価な地上レーザーシステム（100 万円から 200 万円）が普及すれば、より容易に 3 次元データを途上国で取得できる。本研究では、低価格な SICK LMS511 の簡易型地上レーザーを用いてインドネシアのボゴール植物園またはボゴール農科大学演習林でデータ取得することができた。

低価格な地上レーザーセンサーさえ持ち込めない場合は、写真測量の技術を応用した SfM の技術を用い、連続に撮影された写真から 3 次元データに変換することができる。その 3 次元データの有効性を検証し、本研究では、SfM によるデータ取得を千葉県山武市で行い、簡易な技術の利点と欠点を考察することができた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

途上国の熱帯林では、正確な現地調査データを取得が難しく、汎用性が高く正確性も高いデータ取得方法の確立が急務の課題である。本研究では地上レーザーを用いて誰でも簡単に毎木調査ができる自動毎木調査法を確立することを目指した世界初の研究である。

一般的に炭素蓄積量の根拠となる材積を算出するには、現地調査で樹高と胸高直径を測定し、すでに作成された材積式に当てはめる必要がある。従来の手法である航空機レーザーでの測定では、上空からレーザーを照射するため、高木層までしかデータ取得ができなく、複雑な熱帯林では森林の垂直分布構造を把握するには限界があった。また、航空機レーザーはデータ取得費用が高額であるため、途上国の熱帯林に機材がない場合も多い。

その一方で地上レーザーは可搬性に優れ、安価にデータ取得ができ、さらに樹幹形状のデータを高密度に取得できる。さらに、非破壊で森林の 3 次元構造を測定できるため、毎木調査等で行われている現地調査を飛躍的に効率化できると期待されている。これまでも毎木調査の調査項目を地上レーザーによって測定した研究が行われており、樹高<sup>9)</sup>、胸高直径<sup>10)</sup>、毎木位置図<sup>10)</sup>を地上レーザーから正確に測定できることが研究で示されている。最近の研究事例では、細かな点群をそのまま扱うのではなく 3 次元グリッドを用いたボクセル法<sup>11)</sup>による骨格再現法<sup>12)</sup> (skeleton reconstruction)などの手法を用いて樹木構造を正確に再現する研究が行われてきた。さらに、詳細なデータを活かして葉の角度の測定<sup>13)</sup>や樹木一個体の樹幹形状復元<sup>14)</sup>までできるようになってきている。本研究代表者はラッピング法によりレーザーによる 3 次元点群データから直接、複雑な形状を測定する技術を確立しており<sup>7)</sup>、本研究ではその技術を応用して胸高直径の正確な測定をできるようにした。

さらに、近年では世界的に小型で簡易型地上レーザーの開発が活発になっており、オーストラリア CSIRO で開発された地上レーザーがアメリカ ボストン大学グループで改良され、2 波長レ

レーザーとして普及を目指している<sup>15)</sup>。また、さらに小型な地上レーザーの開発が、アメリカ ロチェスター工科大学のグループで進められたおり<sup>16)</sup>、簡易型地上レーザー開発の競争が激しくなっている。レーザーの開発自体はさらに発展しており、ハイパースペクトルを使用した地上レーザーも開発が始まっているが、まだ実用段階にはなっていない<sup>17)</sup>。多波長のレーザーを使用することで、データ取得時に葉と幹の構造を自動判別する試みが試されている<sup>17)</sup>。また、イギリス ロンドン大学のグループは本研究で使用した RIEGL VZ400 の 3 次元データからオーストラリア ユーカリ林でのバイオマス量を自動で算出するプログラム開発が進められており<sup>18)</sup>、3 次元データを解析する手法も研究が進んでいる。よって、簡易型地上レーザーを用いた森林バイオマス測定は世界で注目を集める分野である。その中でも本研究で用いた SICK LMS511 の小型センサーはデータ取得効率が良く、わずか 3 分でデータ取得できる速さは世界で最も早くデータを取得できる。上記のアメリカ ボストン大学で開発が進められているセンサーは通常 1 箇所センサーを 360 度回すのに 40~60 分かかることを考えても、本研究で開発したシステムが世界でも最も効率良くデータ取得ができることは明らかである。また取得した 3 次元データの幹形状の解析も円錐による推定<sup>18)</sup>しか手法が完成されていないため、本研究による幹形状の自動に把握する手法が、最新の研究と比較しても最も正確に測定できる。よって、本研究による成果は、世界の地上レーザーの研究の中で最も進んでいる研究と言える。本研究による成果を国際誌に投稿中で、審査中である。短い研究期間中にアクセプトはされていないため、本研究の成果の欄には記載できなかったが、国際誌でも発表できる新規性や独創性が非常に高い研究内容である。

本研究の成果により、形状が複雑なため材積式の作成が困難であった熱帯林に対して地上レーザーによって、汎用性の高い自動毎木調査法が提供できるようになった。さらに、サンプリング手法も検討できたことにより、簡易型地上レーザーを設置する汎用性の高い手法を確立することができた。安価な簡易型地上レーザーだけで、広域の熱帯林バイオマスを推定することが可能となり、環境政策における標準的モニタリング手法として地上レーザーを用いたモニタリング手法が提案できるようになった。本研究により得られた成果は、実利用でも研究面でも大変有意義である。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

本研究代表者は、東京都と長崎県と共同研究を行っており、地方自治体レベルでは地上レーザーによる詳細な樹木データ整備が積極的に進められている。

東京都では、新たな緑の指標調査に地上レーザーによって「緑の質」を評価する取り組みを行っている。これまでの緑被率が 2 次元データでしかデータ取得を行って来なかったため、森林遷移に伴う緑地の垂直構造の変化などを把握することは困難であった。そこで階層構造も 3 次元データから取得できる地上レーザーを導入することで、緑の平面的な量ばかりでなく、垂直的な分布を把握する手法を確立しようとしている。平成 25 年度に実験的に研究を始め、27 年度から 2 年間、東京都と共同で調査研究を継続する予定があり、地上レーザーによる実験を行う。調査研究によって得られた知見は、環境政策に反映する予定である。

長崎県では、離島である対馬で全島を航空機レーザーによる 3 次元データを取得し、バイオマス資源量を把握するプロジェクトが行われている。そこで、航空機レーザーによる結果を検証す

るために、地上レーザーを導入し、航空機レーザーデータの検証用データとして正確な現地データ取得として地上レーザーの活用した共同研究を平成 26 年度に行った。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

環境省が、来年度から本格的に REDD+ のプロジェクトを展開するようになる。対象とする地域は、東南アジア諸国であり、主に途上国熱帯林がプロジェクト対象地となる。その正確なモニタリング手法を検討している段階にある。本研究で確立した手法は、環境省が今後推し進める REDD+ の環境政策を運営する上で、非常に有効なモニタリング手法になり得る。地上レーザーを用いれば、正確性の高いモニタリングを誰でも行えるため、容易で正確なモニタリング手法として現場で普及することができる。環境省自然環境局自然環境計画課において、Forest Partnership のウェブサイトを立ち上げ、企業等連携して REDD+ 参加のためのプラットフォームができつつある。すでに JICA や林野庁でも REDD+ のプラットフォームが運営されている。

これまでのモニタリング手法では、衛星画像を用いた広域なモニタリング手法しか行われていない。よって個々のプロジェクトに対して、モニタリング結果の正確性は十分に検証されていない。本研究による手法は、これまでのモニタリング手法を大幅に改善でき、より正確なデータを提供できる。そのため、今後のプロジェクト認証ですぐに適用可能な手法である。

REDD+ の国際的取組みでは認証制度として MRV 手法があり、衛星リモートセンシングによる手法を推進している。特にアメリカ地質調査所 (USGS) や Google Engine が無料公開しているランドサットのアーカイブを用いて、経年的モニタリング手法を確立しようとしている。国や県レベルでの広域を効率良くモニタリングするために、広域で取得されている衛星画像を活用することは有効な手法である。しかし、ランドサットは光学センサーであり、雲による影響で、必要な対象地で確実にデータが取得できている訳ではない。さらに NDVI 等の植生指標で植生の相対的变化、経年的面積増減しか得られない。よって、実際の現場データを確実に取得する方法が必要とされている。さらに、Google Engine のフィルター機能を用いてランドサット画像から雲を除去した画像が入手でき、衛星レーダー画像によって雲の影響がないデータを取得できたとしても、衛星画像から森林の垂直的な分布や樹高を正確に測定できないため、画像だけから森林調査を行うことはできない。

効率良く正確に測定できる地上レーザーが、途上国での森林調査に有効活用できることは明らかで、航空機レーザーよりも費用がかからない。さらに、いつでもどこでもデータが取得できるため、高頻度なデータの取得ができる。その結果、経年変化を把握することも容易である。本研究で開発した簡易型地上レーザーを用いることで、正確で安価にデータが取得できるため、途上国での森林モニタリング手法に改善できる最適な手法である。

さらに、危険地域や熱帯地域のような気温が高い現場で長時間作業できない場所では、地上レーザーによる測定技術が有効活用できる。レーザーによって詳細な 3次元形状を短時間で収集し、データを持ち帰ってオフィスで解析できるため、作業効率を向上させることができる。本研究では最も安価な簡易型地上レーザーを用い、現地に導入してデータを収集し、地上レーザーの有効性を実証した。さらに本研究で開発するサンプリングデザインを用いることで、簡易型地上レーザーだけで広域のバイオマスを推定できるようになった。

本研究の主目的は REDD+ のための森林形状把握であるが、日本国内の森林管理にも応用もできる。国内林業は作業員の高齢化が進行しているため、毎木調査に簡易型地上レーザーを導入でき

れば、調査作業を簡略化し、より正確にデータが収集できる。さらに、危険地域のひとつである高線量の場所でも同じ解析手法で森林調査を行うことができる。福島県における原発事故があった場所での樹木調査に人手をかけずに安全に行うこともできる。よって本研究で開発される手法は、REDD+のためばかりでなく、他分野でも利用価値が非常に高い技術である。

## 6. 国際共同研究等の状況

本研究では、様々国際的機関や組織と共同で研究を行った。地上レーザーを活用した研究領域は世界で拡大しており、様々な分野の研究者と国際共同研究が盛んに行われている。共同研究利用、Matt Bradford・オーストラリア連邦政府産業機構・オーストラリア、大学間交流協定 Syartinilia Wijaya助教、Lilik Budi Prasetyo教授・ボゴール農科大学・インドネシア、大学間交流協定 L.Monika Moskal準教授・ワシントン大学 環境学部・アメリカ 様々な国の組織と国際共同研究協定を結び、研究を遂行してきた。国際共同研究の枠組みの中では、調査場所の提供と解析技術の共同開発を行ってきた。

## 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、戸倉千明、小林達明、野田佳慶、有村恒夫、福田聖一：日本緑化工学会誌, 39(1), 194-197 (2013)  
「高速道路法面におけるレーザーを用いた葉面積指数の推定」
- 2) 加藤 顕、安藤祐樹、吉田俊也、梶原康司、本多嘉明、小林達明：日本緑化工学会誌, 40(1), 136-141 (2014)  
「簡易型地上レーザーを用いた毎木調査法」
- 3) 加藤 顕、石井弘明、榎木 勉、大澤 晃、小林達明、梅木 清、佐々木 剛、松英 恵：日本森林学会誌, 96(3), 168-181 (2014)  
「レーザーリモートセンシングの森林生態学への応用」
- 4) 小花和宏之、早川裕弐、加藤 顕、ゴメス クリストファー：地形, 36(2), 87-106 (2015)  
「小型無人航空機および単独測位 GNSS 搭載カメラを用いた簡易的な地形測量手法」

#### <その他誌上発表(査読なし)>

- 1) A. Kato, J. Morgenroth, D. Kelbe, C. Gomez, J. van Aardt, Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2013: 2106 - 2109, (2013)  
“Ground Truth Measurement of Trees using Terrestrial Laser for Satellite Remote Sensing”
- 2) A. Kato, M. Watanabe, J. Morgenroth, C. Gomez, Proceedings of Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2013 Asia-Pacific Conference: 119-121, (2013)  
”Field tree measurement using terrestrial laser for radar remote sensing”
- 3) 加藤 顕、森林技術 (日本林業技術協会) No.862, 12,(2014)  
「緑のキーワード：ラッピング法」

- 4) 加藤 顕、梶原康司、本多嘉明：日本写真測量学会平成26年度年次学術講演集（2014）  
「簡易型地上レーザーを用いた熱帯林計測」
- 5) 加藤 顕、梶原康司、本多嘉明、小林達明：第24回日本熱帯生態学会学術講演集（2014）  
「地上レーザーを用いた複雑な熱帯樹木形状把握」
- 6) A. Kato, K. Kajiwara, Y. Honda, M. Watanabe, T. Enoki, Y. Yamaguchi, T. Kobayashi, Proceedings of IEEE IGARSS 2014: 816-819, Quebec City, Canada, July 2014  
“Efficient Field Data Collection of Tropical Forest using Terrestrial Laser Scanner”
- 7) A. Kato, L. M. Moskal, T. Kobayashi, Proceedings of IUFRO 2014 World Congress, Salt Lake City, USA, Oct. 2014,  
“Full automatic process to create forest inventory using terrestrial lidar”
- 8) A. Kato, M. Brandford, K. Kajiwara, Y. Honda, Proceedings of 2014 ForestSAT conference, Riva del Garda, Italy, 2014  
“Efficient field validation of tropical rainforest biomass using terrestrial laser for satellite remote sensing”
- 9) A. Kato, H. Hayakawa, H. Obanawa, C. Gomez, Proceedings of 2014 ForestSAT conference, Riva del Garda, Italy, 2014  
“Tree structure captured by UAV-SfM and TLS for field validation of satellite remote sensing”
- 10) 加藤 顕、小花和宏之、早川裕弐：第126回日本森林学会学術講演集（2014）  
「UAV-SfMと地上レーザーを用いた森林構造の把握」
- 11) 蝦名益仁、加藤 顕：第126回日本森林学会学術講演集（2014）  
「地上レーザーを用いた熱帯林におけるバイオマス測定」
- 12) 田村太壱、加藤 顕、小花和宏之、吉田俊也：第126回日本森林学会学術講演集（2014）  
「小型UAVによる空撮とSfMを用いた樹高計測」
- 13) 加藤 顕：森林技術、No.867, 24-27（2014）  
「技術者コーナー ラッピング法 —現地計測から室内作業まで—」
- 14) 加藤 顕、森林リモートセンシング 第4版（加藤正人編）144-145（2014）  
「第8章7.木質バイオマス」
- 15) 加藤 顕、現代林業3月号 14-23（2014）  
「3次元レーザーが切り開く林業の新しい世界」

## （2）口頭発表（学会等）

- 1) Kato, J. Morgenroth, D. Kelbe, C. Gomez, J. van Aardt, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Melbourne, Australia, 2013  
“Ground Truth Measurement of Trees using Terrestrial Laser for Satellite Remote Sensing”
- 2) A. Kato, M. Watanabe, J. Morgenroth, C. Gomez, Synthetic Aperture Radar (AP SAR), 2013 Asia-Pacific Conference, September 2013, Tsukuba, Japan, 2013  
”Field tree measurement using terrestrial laser for radar remote sensing”
- 3) 加藤 顕、戸倉千明、小林達明、野田佳慶、有村恒夫、福田聖一：第44回日本緑化工学会（2013）  
「高速道路法面におけるレーザーを用いた葉面積指数の推定」

- 4) 加藤 顕、大萱直花、笹川裕史、小林達明：第125回日本森林学会（2014）  
「森林計測における様々な地上レーザーセンサーの精度比較」
- 5) 安藤祐樹、加藤 顕、吉田俊也、梶原康司：第125回日本森林学会（2014）  
「簡易型地上レーザーを用いた毎木調査法」
- 6) 秋元瞬也、加藤 顕、前田 一：第125回日本森林学会（2014）  
「地上レーザーによるツバキ林調査手法の確立」
- 7) 加藤 顕、梶原康司、本多嘉明：日本写真測量学会平成26年度年次講演会（2014）  
「簡易型地上レーザーを用いた熱帯林計測」
- 8) 加藤 顕、梶原康司、本多嘉明、小林達明：第24回日本熱帯生態学会年次大会（2014）  
「地上レーザーを用いた複雑な熱帯樹木形状把握」
- 9) A. Kato, K. Kajiwara, Y. Honda, M. Watanabe, T. Enoki, Y. Yamaguchi, T. Kobayashi, IEEE  
IGARSS 2014: 816-819, Quebec City, Canada, July 2014  
“Efficient Field Data Collection of Tropical Forest using Terrestrial Laser Scanner”
- 10) 加藤 顕、安藤祐樹、吉田俊也、梶原康司、本多嘉明、小林達明：第 45 回日本緑化工学会大会  
「簡易型地上レーザーを用いた毎木調査法」
- 11) A. Kato, L. M. Moskal, T. Kobayashi : IUFRO 2014 World Congress, Salt Lake City, USA, Oct. 2014,  
“Full automatic process to create forest inventory using terrestrial lidar”
- 12) A. Kato : Precision Forestry Cooperative, University of Washington, Annual Meeting 2014, Seattle,  
USA, Oct. 2014  
“Unmanned aerial vehicle and terrestrial laser system based biomass assessment” [招待講演]
- 13) A. Kato, M. Brandford, K. Kajiwara, Y. Honda, M. 2014 ForestSAT conference, Riva del Garda, Italy,  
2014  
“Efficient field validation of tropical rainforest biomass using terrestrial laser for satellite remote  
sensing”
- 14) A.Kato, H. Hayakawa, H. Obanawa, C. Gomez, 2014 ForestSAT conference, Riva del Garda, Italy,  
2014  
“Tree structure captured by UAV-SfM and TLS for field validation of satellite remote sensing”
- 15) 加藤 顕、小花和宏之、早川裕弐：第 126 回日本森林学会学術講演会（2014）  
「UAV-SfMと地上レーザーを用いた森林構造の把握」
- 16) 蝦名益仁、加藤 顕：第 126 回日本森林学会学術講演会（2014）  
「地上レーザーを用いた熱帯林におけるバイオマス測定」
- 17) 田村太巻、加藤 顕、小花和宏之、吉田俊也：第 126 回日本森林学会学術講演会（2014）  
「小型UAVによる空撮とSfMを用いた樹高計測」

### （3）出願特許

- 1) 加藤 顕：千葉大学；「データ重ね合わせプログラム及びデータ重ね合わせ方法」、特願  
2014-197627、平成26年9月26日

#### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) イノベーション・ジャパン2014（2014年9月11日～12日、参加者約100名）にて成果紹介
- 2) 千葉エリア産学官連携オープンフォーラム2014（2014年9月16日、参加者約100名）にて成果紹介
- 3) 一般公開講演会「緑地科学セミナー：緑地環境における3次元データの活用」（主催：千葉大学 園芸学研究科 緑地科学領域、2014年9月17日、百周年記念会館、観客約50名）にて講演
- 4) 招待講演、XVII Brazilian Remote Sensing Symposium：ワークショップ 航空機レーザーと地上レーザーのデータ融合による森林構造把握（2015年4月25日～26日、参加者約50名）にて解析技術を講義

<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/cursos.html>

#### (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

1. 千葉エリア産学連携 オープンフォーラム 2013 学長賞（平成25年11月25日 受賞）  
(<http://www.chiba-u.ac.jp/others/topics/article2013/20131125gakutyoushou.html>)
2. 平成25年度 千葉大学産学連携機構 優秀発明賞（平成26年2月10日 授賞）  
(<http://www.chiba-u.ac.jp/others/topics/article2013/20140212hatumei.html>)

#### 8. 引用文献

- 1) E. Næsset, Remote Sensing of Environment, 61(2):246-253, 1997  
“Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data”
- 2) E. Næsset, K-O, Bjerknes, Remote Sensing of Environment 78:328-340, 2001,  
“Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data”
- 3) E. Næsset, Remote Sensing of Environment 80:88-99, 2002,  
“Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data”
- 4) E. Næsset, Remote Sensing of Environment 91:243-255, 2004,  
“Effects of different flying altitudes on biophysical stand properties estimated from canopy height and density measured with a small-footprint airborne scanning laser”
- 5) E. Næsset, Remote Sensing of Environment 98:356-370, 2005,  
“Assessing sensor effects and effects of leaf-off and leaf-on canopy conditions on biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data”
- 6) S. Brown, a primer. FAO Forestry Paper 134, 1997,  
“Estimating biomass and biomass change of tropical forests”
- 7) A. Kato, LM. Moskal, P. Schiess, ME. Swanson, D. Calhoun, W. Stuetzle, Remote Sensing of

- Environment 113:1148-1162, 2009,  
 “Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data”
- 8) M. Wulder, K.O. Niemann, D.G. Goodenough, *Remote Sensing of Environment* 73(1):103-114, 2000,  
 “Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery”
  - 9) C. Hopkinson, L. Chasmer, C. Young-Po, P. Treitz, *Canadian Journal of Forest Research* 34:573-583, 2004,  
 “Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar.”
  - 10) K. Tansey, N. Selmes, A. Anstee, N.J. Tate, A. Denniss, *International Journal of Remote Sensing* 30:5195-5209, 2009,  
 “Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data”
  - 11) F. Hosoi, K. Omasa, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44:3610-3618, 2006,  
 “Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar”
  - 12) A. Bucksch, S. Fleck, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 77, 229-240, 2011,  
 “Automated detection of branch dimensions in woody skeletons of fruit tree canopies”
  - 13) J.U.H. Eitel, L.A. Vierling, D.S. Long, *Remote Sensing of Environment* 114:2229-2237, 2010,  
 “Simultaneous measurements of plant structure and chlorophyll content in broadleaf saplings with a terrestrial laser scanner.”
  - 14) J-F. Côté, J-L. Widlowski, R.A. Fournier, M.M. Verstraete, *Remote Sensing of Environment* 113:1067-1081, 2009,  
 “The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar.”
  - 15) X. Yang, A. Strahler, C.B. Schaaf, D.L.B. Jupp, T. Yao, F. Zhao, Z. Wang, D.S. Culvenor, G.J. Newnham, J.L. Lovell, R.O. Dubayah, C.E. Woodcock, W. Ni-Meister, *Remote Sensing of Environment* 135, 36-51, 2013,  
 “Three-dimensional forest reconstruction and structural parameter retrievals using a terrestrial full-waveform lidar instrument (Echidna)”
  - 16) D. Kelbe, P. Romanczyk, J. van Aardt, *Proceedings of 12th International conference on LiDAR applications for assessing forest ecosystems Silvilaser*, 2012,  
 “Automatic extraction of tree stem models from single terrestrial lidar scans in structurally heterogeneous forest environments”
  - 17) A. Jaakkola, J. Hyypä, A. Kukko, X. Yu, H. Kaartinen, M. Lehtomäki, Y. Lin, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(6), 514-522, 2010  
 “A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements.”
  - 18) K. Calders, G. Newnham, A. Burt, S. Murphy, P. Raunonen, M. Herold, D. Culvenor, V. Avitabile, M. Disney, J. Armston, M. Kaasalainen, *Methods in Ecology and Evolution* 6: 198-208, 2015,  
 “Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning.”

## **Development of Field Sampling Techniques for Biomass Monitoring**

Principal Investigator: Akira KATO

Institution: Graduate School of Horticulture, Chiba University  
648 Matsudo, Matsudo-City, Chiba, 142-0041, JAPAN  
Tel: +81-47-308-8892 / Fax: +81-47-308-8892  
E-mail: akiran@faculty.chiba-u.jp

[Abstract]

Key Words: REDD+, Laser, Biomass, Monitoring, Remote Sensing

Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation plus (REDD+) project requires low cost and accurate monitoring technology. In developing countries, forest inventory data has been collected by their local rule and the data cannot be accurate enough to share with data from the other regions. Most error comes from the inaccurate manual measurement of local foresters without any equipment such as high precision GPS and digital clinometer. To reduce the manual error to monitor forest, a portable terrestrial laser scanner using SICK LMS511 has been developed and introduced to tropical forest in this study. The terrestrial laser is set at forest floor and can capture tree structure in 3 dimensional data. The goal of this study is to obtain forest inventory data derived automatically from the 3 dimensional data and to establish an accurate way to monitor forest from the low cost portable laser. The sensor characteristics of the portable sensor are identified for tree measurement. And the optimum sensor location and the minimum number of sensor setting are obtained to estimate large scale tropical forest biomass. To achieve this, field tree measurement data collected for 25 ha tropical forest was used and different sampling designs (random, systematic, and stratified sampling) were applied and simulated using the field data to find the feasible sampling technique for large scale estimation.

As a result, the portable laser system was made using small batteries as independent power source and makes it possible to use in any forest of developing countries. For diameter at breadth height (d.b.h) measurement, the portable sensor has 2.77 cm Root Mean Square Error (RMSE) within 10 m radius plot. Therefore, the portable sensor can provide good quality biomass estimation derived from the d.b.h. measurement. The portable sensor can only cover 65% of stems. Therefore, three laser scanning positions are required for one 10 radius plot. Simulation result to get the optimum number of establishing plots showed that the big trees are good locations to be plot centers. And 30 plots are enough to produce less than 5% error of biomass estimation in large scale tropical forest. It only takes 15 minutes for one laser scanning and the total three days

field campaign is enough to cover large scale biomass estimation with the portable sensor. This study showed the feasibility of the portable laser in large scale tropical forest biomass monitoring for REDD+ projects.