

課題名 RF-1006 航空レーザー測量及びPALSARを用いた森林整備に伴うバイオマス量変化の把握

課題代表者名 加藤 顕 (千葉大学 大学院園芸学研究所 緑地環境学コース 緑地科学領域 再生生態学研究室 助教)

研究実施期間 平成22～23年度

累計予算額 12,951千円(うち23年度 6,309千円)
予算額は、間接経費を含む。

研究体制

(1)航空レーザー測量及びPALSARを用いた森林整備に伴うバイオマス量変化の把握(千葉大学)

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

リモートセンシングによるバイオマス量変化の把握は、国内外の環境政策で重要な課題となってきた。国内では排出量取引導入に向けての準備段階としてオフセット・クレジット(J-VER)があり、J-VERは第三者機関として化石燃料使用削減を行っているプロジェクトを認証し、排出量の多い事業者との間でカーボンオフセットを認めている。国際的取り組みとしては、REDD (Reduced Emissions from Deforestation and forest Degradation, 森林減少・劣化からの温室効果ガス排出削減)があり、途上国での熱帯林保全でカーボンオフセットできる仕組みがある。REDDでは違法伐採を止めることで熱帯林に蓄積されている炭素量を保つことを目指している。

J-VERは国内林地を対象とするため、小規模林地を対象とした詳細な森林モニタリング手法の確立が望まれており、地域での森林簿・森林計画図の作成が求められている。その一方でREDDに関しては、国・県レベルの広域を対象とするため、広域での土地利用図作成が求められている。森林の現存するバイオマス量を把握する以上に、間伐等の整備による炭素蓄積量をより正確に定量化し、炭素吸収量を「見える化」する必要が出てくる。これらモニタリングには、目的のスケールに応じた様々なセンサーを適応していかなければならない。J-VERに対しては詳細な森林整備状況がモニタリングできるレーザーリモートセンシング技術、REDDに対しては県・国レベルで広域モニタリングできる衛星レーザーリモートセンシング技術が最も適している。

近年衛星レーザーによるモニタリングがより安価で利用可能となり、天候の影響なく土地利用状況を経年的にモニタリングできるようになった。また地域レベルでは、航空機レーザーによる3次元データが取得可能となり、森林構造を3次元で解析可能となった。

本研究タイトルに「航空レーザー測量」という名称を使用した。本報告書内では表記を統一させるために、「航空機レーザー測量」のことを「航空機レーザー」と表記を統一させ、地上レーザーとの取得方法の違いを明確にする。

本研究の目的は最新の航空機レーザー (airborne LiDAR, Light Detection and Ranging) 測量及び衛星レーザー (PALSAR、合成開口レーザー)を用いて森林整備によるバイオマス変化量を把握することである。航空機レーザーデータは地域レベルの森林整備状況を詳細に把握できる。その詳細な結果を広域モニタリングができる衛星レーザーからの解析結果に適応することで、衛星レーザーによる森林整備状況の把握を行う上での問題点を明らかにする。そのために、詳細にデータ取得ができる航空機レーザーデータを取得し、取得した同じ場所で衛星レーザーでのデータを解析する。それらの結果を比較することで、衛星レーザーデータを解析する際の問題点を考察する。また、航空機レーザーデータの限界を補うため、航空機レーザーと同じセンサーで、地上設置型のもの(地上レーザー、terrestrial LiDAR)を用いることで、航空機レーザーでは把握できないより詳細なバイオマス量を地上レーザーデータから把握する。

2. 研究開発目的

本研究はボトムアップアプローチ(図1)により、様々なスケールで異なるセンサーを用いてモニタリング技術の検討を行った。ボトムアップアプローチとは、現地調査で測定したデータを航空機レーザーデータからの結果と比較して地域レベルのバイオマス量へ外挿するモデルを構築する。その結果を衛星レーザーデータからの結果と比較する。また、航空機レーザーでは森林構造を把握する上で限界があり、その限界を補うために地上レーザーデータを導入・取得し、現地検証用データ(グラウンドト

ールース)として地上レーザーを利用する有効性を検討した。本研究では衛星レーダーを森林整備地域のモニタリングを行う上で、問題点を明らかにするために2つの視点で研究を行う。

(1) 衛星レーダーによる森林整備地域の把握

航空機レーザーと衛星レーダー(PALSAR)を用いて、森林整備に伴うバイオマス変化量を把握する。森林整備に伴うバイオマス量変化を把握するために、研究対象地で本研究のために間伐を行い、間伐前後での航空機レーザーデータから詳細な変化を把握し、同じ対象地で衛星レーダーからの解析結果と比較する。研究対象地は国内であるが、衛星レーダーは世界中で取得可能であるため、得られた知見は今後の衛星レーダーを用いたバイオマス量推定の解析等に役立てたい。また、近年航空機レーザーを衛星レーダーのグランドトゥールースとして取得する際の問題点も明らかにする。

(2) 森林整備地域と落葉の関係

航空機レーザーデータより針葉樹林域を対象にデータ解析を行い、その後、落葉広葉樹林域でのデータ取得を行う。経年的モニタリングを行う上で森林整備による変化と落葉による影響の違いを把握しなければならない。落葉による影響を衛星レーダーから把握できるか検討する。

(3) ボトムアップアプローチとして、レーザーデータを利用したグランドトゥールース

レーザーデータの取得方法としては、これまで主に航空機レーザーと地上レーザーとがある。用いるセンサーの種類は同じであるが、データ取得方法に違いがある。レーザーデータは容易に、そして正確に3次元データ取得ができるため、近年衛星レーダーデータのグランドトゥールースとしてデータ取得されるようになってきている。しかし、3次元で取得できるレーザーデータをグランドトゥールースとして用いる際、データ取得方法(航空機からの照射か地上設置による照射)で解析方法も結果も異なるため、本研究では航空機レーザーばかりでなく、地上レーザーも用いてレーザーデータのグランドトゥールースとしての利用を検討した。

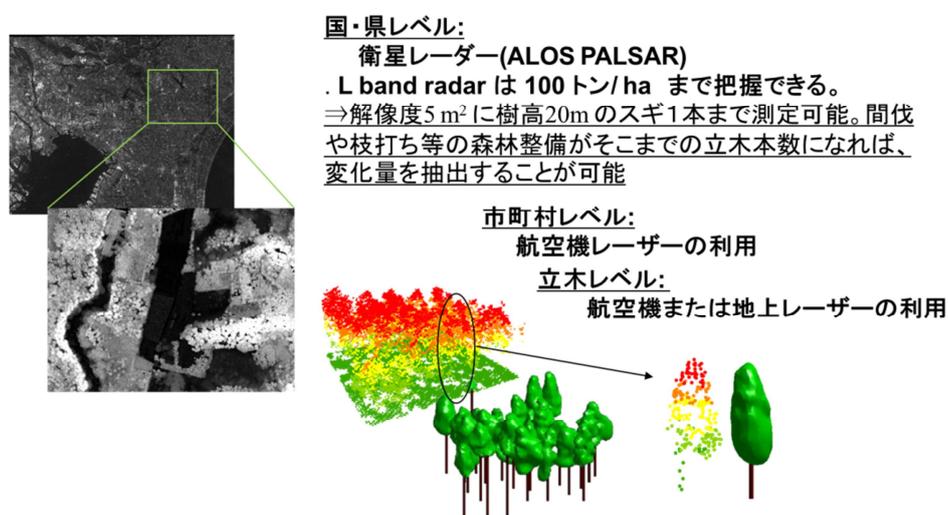


図1 ボトムアップアプローチ

3. 研究開発の方法

(1) 航空レーザー測量及びPALSARを用いた森林整備によるバイオマス量変化の把握

1) データと解析手法

本研究対象地は針葉樹主体の千葉県山武市と落葉広葉樹主体の東京都西部にある東京都公園野山北・六道山公園である。研究対象地として選定した理由は、千葉県山武市では市所有林で山武市との協力の下、間伐等を行うことができ、取得するリモートセンシングデータへの間伐による影響を研究できる研究環境がある。また、野山北・六道山公園は、典型的里山林であり、山武市とは異なり広域に落葉広葉樹林が成立している。森林区域ははっきりと分かれており、斜面にはコナラ・クヌギ等を主体とした落葉広葉樹があり、尾根沿いはアカマツ等を主体とする針葉樹がある。主な樹種が落葉広葉樹であるため、広域に落葉の影響を衛星レーダーデータ上で比較・検討しやすい地域である。

a 現地調査

針葉樹林では平成22年8月～9月に、落葉広葉樹林では平成23年8月～9月に現地調査を行い、樹木状況のデータを取得した。調査方法としては調査区として20m x 20mのプロットを設置し、樹種・樹高・胸高直径・樹冠長・枝下高・樹木位置を、プロット内の2m以上の樹木すべての毎木調査を行った。プロット設置の選定は、対象地で様々な森林状況を把握できるように、計30プロットを対象地全域でランダムに設定した。毎木調査では、樹高、枝下高は測高計（Haglof Vertex III）によって計測、樹木位置は、トータルステーション（Ushikata Teo-Ray130）によって測量し、高精度GPS（Trimble GeoXT）によって取得したGPSの位置を基準に、樹木位置に座標付け（ジオリフェレンス）を行った。針葉樹林対象地では、スギ（*Cryptomeria japonica*）とヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）が優占しており、広葉樹林対象地では、コナラ（*Quercus serrate*）が優占している。毎木調査で得られた樹高と胸高直径を用いて、バイオマス量の基準となるプロットレベルでの幹材積を算出した。

また、航空機レーザーの平成21年8月1回目のレーザー計測後、平成22年7月2回目のレーザー計測までの間に、切り捨て間伐による森林整備を針葉樹対象地（千葉県山武市）で行った。

b 航空機レーザー

針葉樹対象地域で森林整備前の状況を把握するために、森林整備前後の変化を航空機レーザーで把握するため異なる2時期のデータを取得した。平成21年8月14日にすでに1回目の航空機レーザーデータを20点/m²もの高密度で取得し、2回目のデータを平成22年7月18日に取得した。広葉樹対象地域では、平成23年11月5日に航空機レーザーデータを平均15点/m²もの高密度で取得した。

i) DTM, DSM, DCM作成

針葉樹林を対象とした航空機レーザーは、地上からのレーザー反射のみをフィルター処理にて予め選別を行った。分類された地上からのレーザー反射点のみを用い、解像度50cmのDTM(Digital Terrain Model)の作成を行った。しかし広葉樹林を対象とした航空機レーザーデータでは、林床まで到達する点密度が低かったため、正確なDTMを作成ができなかった。マルチグリッドによる空間フィルターを用いることで、レーザーの点を再分類し、地上からのレーザー反射のみを再選別し直した。その結果ノイズの低減したスムーズなDTM表面を作成することができた。また、50cmのメッシュを作成し、各50cm x 50cmグリッド内における点の最大値を樹冠の頂点とし、DSM(Digital Surface Model)を作成した。DSMとDTMの差分からDCM(Digital Canopy Model)を求めた。DCMは樹冠高を表す。

ii) DCMから樹木位置と樹高計測

作成されたDCMから凹凸を自動判別するアルゴリズムを以下の式を用いて作成した。

$$f_{xy}^2 - f_{xx}f_{yy} < 0; f_{xx}, f_{yy} < 0$$

テイラー展開を応用して凸部を判別できるようにしたものである。DCMの表面で凸部を自動で抽出して樹木位置とし、その場所のDCM値を樹高とした。

航空機レーザーデータから解析した樹木位置と樹高を現地調査で設定した20mx20mプロットの位置で抽出し、各調査地での立木本数と平均樹高を算出した。その平均樹高と立木本数を航空機レーザーからの結果と現地調査からの結果と比較し精度を検証した。

iii) 現地調査データを基に幹材積モデル作成

森林域のバイオマス量とは、幹材積と言い換えることができる。バイオマス量は、国内の環境政策であるJ-VERのスキームを基に以下の式から求めることができる。

$$(\text{バイオマス量}) = (\text{幹材積}) \times (\text{樹種別密度係数}) \times (\text{枝葉拡大係数}) \times (\text{根拡大係数})$$

幹材積以外はすべて定数であるため、測定データを取得し、変数として扱えるのは幹材積だけである。各プロットでは、現地調査で樹種、樹高、胸高直径を測定しているため、それらの情報から千葉県地域の幹材積式に当てはめ、樹木単位の幹材積をプロット別に合算した。プロットでの幹材積を目的変数とし、各プロットの立木本数、平均樹高を説明変数として幹材積を算出するモデル式を作成した。

$$SV = a \times H + b \times N + c$$

SVは幹材積、Hは平均樹高、Nは立木本数、a, b, cは係数。

上記式により、樹高と立木本数（立木密度）がわかれば、幹材積（バイオマス量）を推定することが可能となった。よって、HやNの変数に航空機レーザーで判別可能な樹高や立木本数を入力すること

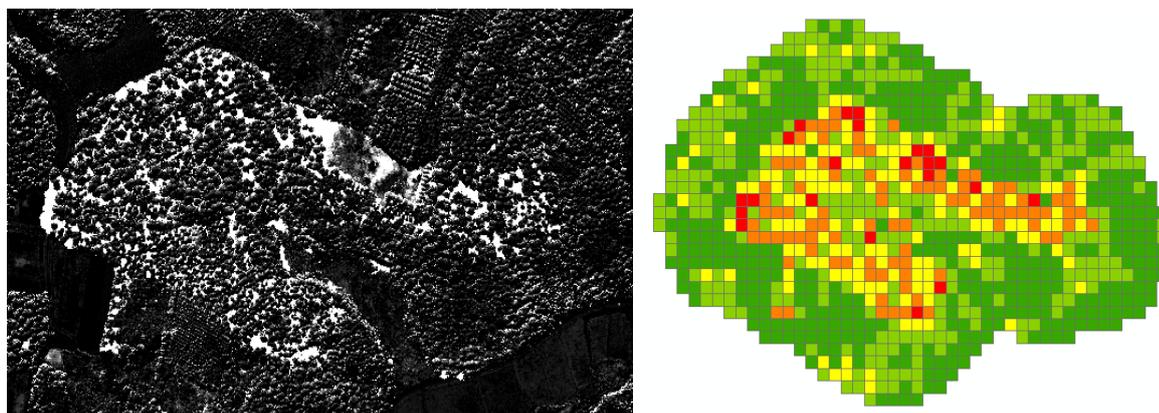


図2 間伐域における間伐割合(左図：2時期からの差分DCM、白色は間伐があった場所、右図：グリッドで表示した間伐割合、緑-黄-赤色の順で間伐割合が高くなっている。)

で、バイオマス量を広域でマッピングすることが可能である。

iv) 間伐割合の算出

2時期のDCMデータの差分から、バイオマス変化した森林域を航空機レーザーから把握できたが、その変化量を定量化するために、間伐割合を算出した(図2)。対象地全域でPALSARのFBD(Fine Beam Double Polarization)モードの15m解像度とPLR(Polarimetry mode)モードの25m解像度に合わせた2種類の解像度のグリッドを派生させた。間伐割合の違いをPALSARデータと合わせるために、グリッドの大きさを衛星データの解像度に合わせた。その一方で間伐前後取得された航空機レーザーから作成されたDCMの差分が大きいところを「間伐の場所」として把握し、派生した各グリッド内で、間伐前後で高さの変化が大きかった場所とその面積を算出した。変化のあった場所の面積をグリッド1つの面積で割ったものを間伐割合とした。

c PALSARデータ

2007年～2011年の間、対象地で取得可能な衛星レーダー(PALSAR)データを取得した。本研究では、航空機レーザーと衛星PALSARとの関係を扱うため、2箇所の対象地で航空機レーザーデータも取得したところと同じ場所である針葉樹林対象地である千葉県山武市地域と広葉樹林対象地である野山北・六道山公園を中心に衛星レーダーデータも取得した。衛星レーダーは2種類のデータがあり、FBDの約15m解像度のHH、HVの2偏波データと、PLRのすべての偏波(HH、HV、VH、VV、4偏波)による約25m解像度のフルポラリメトリデータである。FBDのデータ取得範囲は、PLRのデータ取得範囲より広い。

PALSAR画像の幾何・地形補正をMapReady(Alaska Satellite Facility, ver 2.3, 2010)によって行った。地形補正の際に用いた広域の地形図(DEM, Digital Elevation Model)は、国土地理院基盤地図情報数値標高モデルより10mメッシュデータを用いた。

幾何・地形補正後のPALSARデータの後方散乱係数(σ_0 , dB)も算出し、後方散乱の反射特性を航空機レーザーデータから得られた詳細な結果と比較した。また、間伐割合と衛星レーダーによる間伐前後での後方散乱係数の変化を把握し、比較を行った。

d 地上レーザー

航空機レーザーは上空からのレーザー照射であるため、面的にデータ取得できる一方で、樹冠上部からのレーザー反射が多く、幹部や林内まで計測することができない。高密度でデータを取得しても航空機レーザーでは樹木形状すべて把握するには限界がある。これまでの研究ではモデル式を構築して、航空機レーザーで直接計測できない樹木パラメータを推定しなけりなかつた。そこで本研究では航空機レーザーと同じ特徴を持つ地上設置型レーザーセンサーを用いて樹木を直接計測し、モデル式に頼らない直接計測手法の確立を行った。地上レーザーを用いることで、より詳細な樹木状況を把握することが可能となり、樹木形状を自動で正確に直接計測できるようにした。

取得した地上レーザーデータ全体の点群から単木単位で点群を抽出した。その単木単位の点群から樹木幹部を自動判別し、幹体積(材積)を自動で算出した。幹体積は、50 cm間隔で高さ別に幹部レーザーデータを輪切りにし、輪切りにしたデータから幹直径を自動で判読し、その高さでの面積を算出した。その面積を高さ間隔(0.5cm)で合算して単木単位での幹体積とした。本研究期間中、開発した手法を特許出願することができた(特願2011-227165 三次元測定対象物の形態調査方法)。

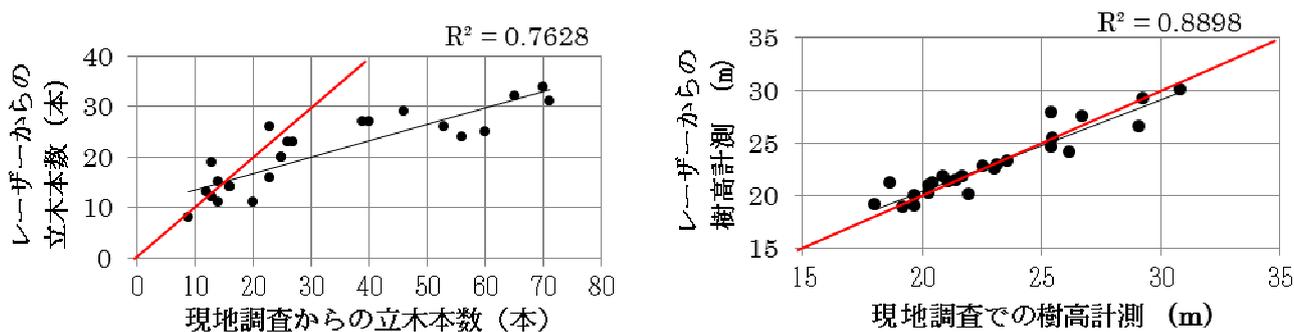


図3 針葉樹林での解析結果（航空機レーザー⇔現地調査、左図：立木密度、右図：樹高）

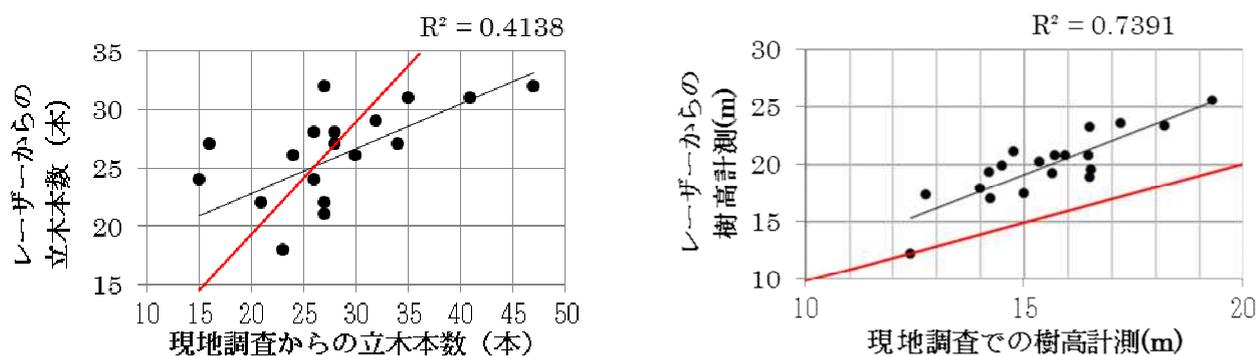


図4 落葉広葉樹林での解析結果（航空機レーザー⇔現地調査、左図：立木密度、右図：樹高）

4. 結果及び考察

(1) 航空レーザー測量及びPALSARを用いた森林整備によるバイオマス量変化の把握

ボトムアップで本研究の結果と考察を示す。1) 現地調査のデータと航空機レーザーから解析した結果を比較し、航空機レーザーの精度の検証を行い、2) 航空機レーザーデータからの結果と衛星レーダー（PALSARデータ）からの結果と比較し、レーダーデータを解析する上での問題点を明らかにし、さらに3) 航空機レーザーでは不足なデータを補うために地上レーザーを用い、その解析結果を現地調査のデータとも比較した。

1) 現地調査との比較（現地調査⇔航空機レーザー）

航空機レーザーデータからの解析結果と現地調査で取得したデータとを比較し、航空機レーザーデータの解析結果を検証した。針葉樹林対象地である千葉県山武市の結果（図3）と落葉広葉樹対象地である野山北・六道山公園（図4）での結果を検証した。図3より、針葉樹では樹高計測が1対1対応線に近く相関係数も高いため、樹高は航空機レーザーで正確に計測可能であることがわかる。立木密度は航空機レーザーの結果では過小評価されるが、高い相関関係があった。その理由は、樹木が密になるとDCM上でアルゴリズムが自動判読可能な凸部ピークが判別しにくくなるためである。その一方で図4から、落葉広葉樹では針葉樹と比較して樹高計測が過大評価してしまい、立木密度では相関係数が低くなることがわかった。相関関係が低くなった理由として、7～8月に行った現地調査と11月に取得した航空機レーザーデータとのデータ取得時期が違うため季節による樹高の違い（落葉の影響等）があったことと、広葉樹は幹が曲がるため、樹木根元と樹高計測箇所（梢端）である樹冠頂点とで場所が異なったためである。レーザーによる樹高計測は、DCMのピーク（樹冠頂点）を判読するため、その樹冠頂点から垂直下にある地面の標高値を参照し樹高と定義している。よって本来の標高値である幹元とは参照する場所が異なってしまふ。本研究対象地のコナラ林は、斜面に対して斜面下方に垂れる様に幹が伸びているため、樹高評価が全体的に過大評価となってしまったと考えられる。針葉樹では幹が真直である個体が多く、樹冠最高点と幹元部の位置がほぼ一緒となるため、このような樹高誤差を生じなかった。

2) 航空機レーザーデータを用いたバイオマス量算出（現地調査⇔航空機レーザー）

樹高と樹木密度を説明変数とする線形モデルを確立することができた。針葉樹林の対象地である千

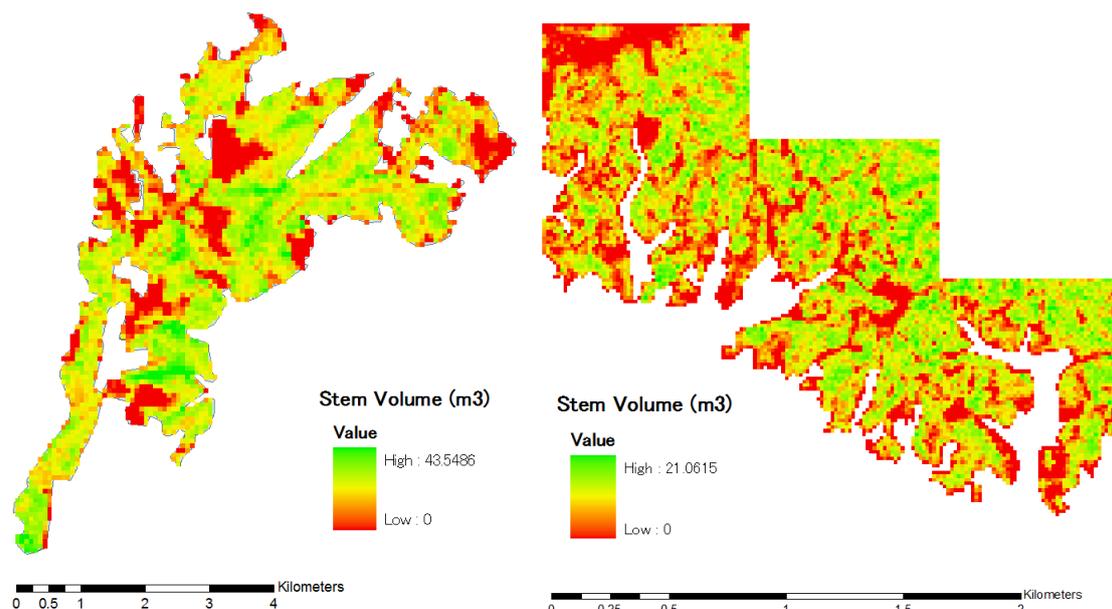


図5 対象地全域での材積 (Stem Volume) 評価 (左図：針葉樹対象地である山武市、右図：広葉樹対象地である野山北・六道山公園)

葉県山武市と広葉樹林の対象地である野山北・六道山公園での対象地全域における材積量の地図を航空機レーザーデータから作成することができた(図5)。これらの結果より現地で胸高直径を計測することなく、航空機レーザーデータのみから得られた樹高と樹木密度で全域での材積量を推定することが可能となった。

3) 航空機レーザーデータとPALSARデータとの比較(航空機レーザー⇔PALSARデータ)

航空機レーザーによって詳細な地域全体の材積量(バイオマス量)を得ることが可能となったため、得られた結果をPALSAR HV偏波の後方散乱係数 (σ_0) と比較した。

PALSAR HV偏波の後方散乱係数 (σ_0) と材積量とは関係性があり、PALSARのセンサーであるLバンドでは、100 ton/haまでバイオマス量判読が可能であることがこれまでの研究でわかっているが、対象地全域の材積量とPALSARの後方散乱係数には明確な関係性が見られなかった。

15mと25mの異なる解像度の結果を比較すると、解像度15mでは、点の散らばりが材積量の大きさに伴って傾向を示すことがわかった。よって、解像度が上がれば、より詳細な材積量変化を把握できることがわかった。

これら材積量とHV偏波の関係性が明瞭ではない理由としては、後方散乱係数は樹冠反射との関係に原因がある。樹冠構造は材積(幹体積)とはっきりとした関係性がないためである。そのことを明らかにするため、ラッピングを用いて航空機レーザーデータからプロットごとに樹冠体積を算出し、その結果と幹体積を比較したところ、関係性があまり見られなかった。

衛星レーダーのデータ取得角度が斜めのアングルであり、航空機レーザーからの解析結果は垂直方向(オルソ方向)であるため、2つのデータを比較する際、取得角の違いが解析結果に大きく影響していた。斜角で取得された衛星レーダーデータの対象とするエリアは、レーザーの解析結果で対応するセル1つ分を超えた隣接するセルにある森林状況もデータに含んでしまう。よって視点の違いがデータ間の誤差を生じると思われる。レーダーの照射方向を考慮したレーザーの解析が必要であることがわかった。航空機レーザーが取得した森林整備前後のデータ、2009年(間伐前)と2010年(間伐後)各年からDCMを作成し、その差分を求め、間伐率を算出した。また、同じ時期の衛星レーダーから森林整備前後の2時期のHV偏波の差分((間伐前のHV偏波) - (間伐後のHV偏波)) を得て、航空機レーザーから得られた詳細な間伐率と衛星レーダーの解析結果を比較した。バイオマスが減少すると、HV偏波の後方散乱係数は上昇する。結果より間伐割合が大きくなるに従って後方散乱係数が上昇していた(図6)。図6から6割以上の間伐が行われた場合は、PALSARによってバイオマス変化量を把握できることがわかる。

しかし、図6より間伐率が100%でもHV偏波に違いがあまり見られないところがあり、または値が減少する(バイオマスが増加)するところもある。この理由としては、レーダーの斜方向でのデータ取得

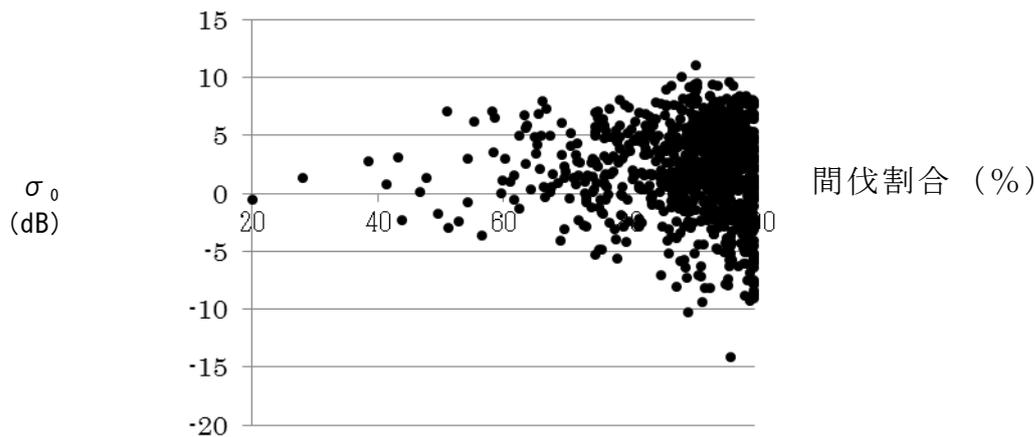


図6 間伐域での後方散乱係数の変化(X軸:間伐割合, Y軸: 間伐前後のデータで後方散乱係数の差分値, 後方散乱係数の間伐による変動量)

が原因と思われる。強間伐の地域が林縁であれば、その林縁からのレーダー反射もデータに含まれる。図6より間伐域では最大10dBもの違いが生じることがわかる。

4) 落葉による後方散乱係数の季節的変動(航空機レーザー⇔PALSARデータ)

森林整備等の人的影響を把握するためには、落葉等の季節的変化による後方散乱係数の変動も比較し、その違いを明らかにしなければならない。多時期で取得したPALSARデータを用いてその変動を解析した。森林整備が行われていないコナラ林域のみを航空機レーザーデータから把握し、その場所でのPALSARデータを抽出し、経年的に変化を比較したところ、落葉の影響でも値が大きく変動することがわかった。しかしこの変動は、25mから15mへと解像度が上がれば少なくなることがわかる(図7)。

この変動量が間伐等による変動量(最大で10 dBの変化量)以上にもなっているため、季節的変化と森林整備等の人的攪乱の違いを把握するには、より解像度の高いデータを多時期で用い、レーダーの照射角度を考慮したデータ解析を行う必要があると考えられる。

5) 地上レーザーを用いたバイオマス量把握(現地調査⇔地上レーザー)

本研究では伐倒試験を行い、伐倒による実測結果と、地上レーザーから自動で算出された幹体積(材積)との比較を行った。従来の材積式を用いた材積算出方法では、伐倒試験による実測値と6.8%の相対誤差があったが、本研究で開発された手法を用いると、1.34%の相対誤差で材積算出(材積実測)が可能であることがわかった。誤差が従来の手法と比べ、地上レーザーを用いることで大幅に改善できた。よって同じレーザーでも航空機レーザーではなく地上レーザーを用いた実測がグランドトゥールースとして有効な手法であることがわかった。また、下草のない1haのスギ林プロットで、地上レーザーセンサーは50m間隔で設置し、広域のデータを地上レーザーにより取得した。地上レーザーデータから樹木位置と胸高直径と樹高を自動で計測した結果と、ランダムに選別した樹木に対して現地で計測した胸高直径と樹高との結果を比較した。この結果、1haという広域なスギ林プロットに対しても正確に胸高直径と樹高が計測できた。

6) 航空機レーザーと地上レーザーとの違い(地上レーザー⇔航空機レーザー)

地上レーザーと現地調査データの違いを明らかにすることができたが、航空機でデータ取得した同じ場所で地上レーザーデータも取得し、判別できる樹木本数の違いを明らかにした。その結果として、航空機レーザーは現地調査での樹木本数と比較して、過大評価してしまうこともあるが、地上レーザーはすべての樹木を把握できた。この結果より、航空機レーザーは、樹冠形状から樹木位置を把握しているため、同じ幹から途中二股になっている様な木があると樹冠の凸部が1つの幹から2つ出来てしまい、判別された樹木本数が過大評価してしまう。その一方で、地上レーザーは幹を直接計測できるため、センサーの設置場所を注意すれば、すべての樹木位置を自動で把握することが可能である。航空機レーザーと地上レーザーの違いとしては、航空機レーザーではアクセスが悪い地域を上空からデータ取得することができ、地上レーザーは現地までいかなければならないというデータ取得の仕方に違いがある。広域でデータを取得するのであれば、航空機レーザーが優れている一方で、計測には多額の費用がかかる。しかし、地上レーザーデータ取得は、航空機レーザーに比べ1/10以下の費用で済み、センサー複数箇所設置して様々角度からデータ補完ができれば、衛星レーダー等の現地検証用データとして確実にデータが取得できる。今後は、様々な樹種に対して解析結果の信頼性を向上させ

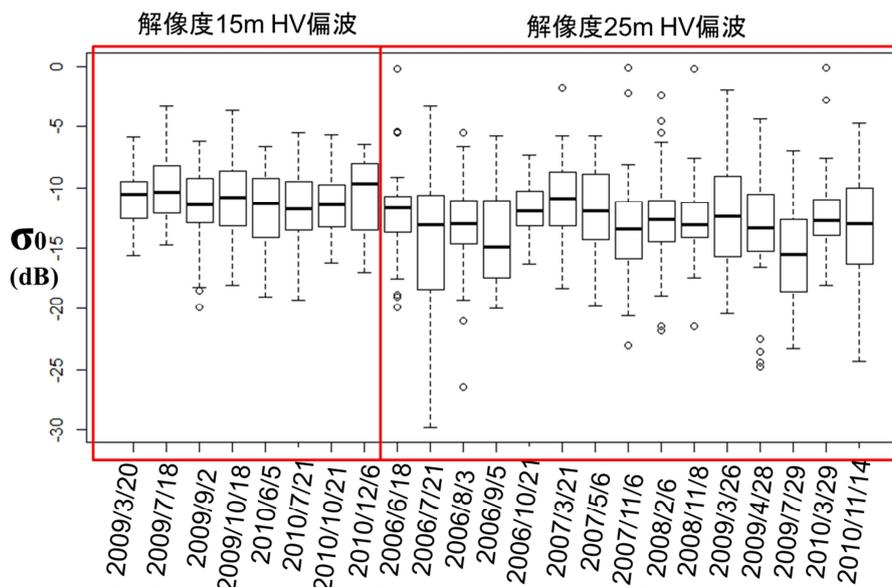


図7 落葉による後方散乱係数の変動

るとともに、最適な地上レーザー設置場所等を検討する必要がある。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

初期の頃の航空機レーザーを用いた解析技術は、単木判読ができるほどの点密度がなかったため、3次元分布を用いたモデル式による材積推定を行っていた。その後、樹高判別や樹木位置の直接計測が可能となり、レーザー技術の発展により詳細な形状を点密度の高いデータで取得可能となった。航空機レーザーは炭素蓄積量を最も正確に把握できる手法であり、森林を3次元で計測可能である。しかし、レーザーセンサー自体は世界中どこでも利用可能ではなく、費用面でも航空機レーザーが取得できる場所には限りがある。そこで、天候に関係なく世界中どこでもデータを取得できる衛星レーザーがより汎用性が高いモニタリング技術である。日本の衛星ALOSが搭載しているPALSARは、L-bandを使用しているため、樹冠内部の体積散乱を得る特徴がある。L-bandは、針葉樹一斉林に対しては100トン/haが飽和値であると言われており、偏波はHV偏波が最もバイオマス量計測に向いている。しかし、より詳細なバイオマス変化量（立木密度の変化）がどのように後方散乱係数に影響しているかわかっていない。本研究で間伐等の森林整備を行い、そのバイオマス変化量を航空機レーザーデータで把握し、航空機レーザーデータ結果をグランドトゥルースとして、衛星PALSARデータの後方散乱係数の変化と比較し、より詳細な解析ができるようにした。

その一方で、地上レーザーは直接計測可能であるため、モデル式に頼らずに取得したデータをそのまま材積算出に使用できる。また、近年のセンサーは半径600mまでデータ取得ができるため、国内での小規模林地に対して航空機レーザーよりも安価にデータ取得ができ、国外ではREDD等のMRV (Measuring, Reporting, and Verification) において検証用データとして、途上国の現地作業員の計測誤差なく、同じ手法で客観的な検証データとして提供できる有効な手法であることがわかった。

レーザーデータを衛星レーザーのためのグランドトゥルースとして使用するには、衛星レーザーの照射角度を考慮した解析を行い、結果を照合しなければ正確に比較検討ができない。これまでの衛星レーザーを用いた研究では、限られた調査プロットでの調査データを衛星レーザーの解析結果と比較することが多かったため、場所のズレや測定範囲が限られていたため、確証性が低かった。しかし、本研究では地域全体のバイオマスと比較した研究ができ、樹冠反射量まで比較し検討することができた。本研究により対象地全体でのバイオマス量を比較することで、問題点を明らかにすることができたことは大変意義のある研究である。

さらに、バイオマス量の基となっている材積量が樹冠体積と関係性がないことが本研究を通して明らかとなったことで、衛星データとバイオマス量を比較検討するためには、樹冠形状と幹体積（材積）との関係性をより明らかにする必要がある。今後森林生態学の研究者とともに、樹木成長に伴う材積増加と樹冠構造の変化を把握し、樹冠体積と幹体積の関係性を明らかにしていきたい。

(2) 環境政策への貢献

本研究の解析技術は国内外における環境政策に貢献できる。国内では、環境省地球温暖化対策法において京都議定書目標達成、国内排出量取引、または森林等における吸収作用の保全が重要視されている。レーザーによる詳細な森林構造は、森林の現存量・成長量・伐採量の把握に有効で、開発した技術及びデータの提供を行うことで、政策推進に大きく貢献できる。海外では、国連が主導しているREDDで、炭素蓄積が多い熱帯林での正確な炭素動態モニタリングが重要な課題となってきた。REDDのモニタリングには、森林伐採による炭素変化量抽出が必要で、国家間で競って新しいリモートセンシングセンサー技術導入やモニタリング手法の確立を行っている。我が国でもこの世界の動きに乗り遅れないために、モニタリング手法開発が急務の課題となっている。本研究では、日本が開発した衛星ALOSを利用する上で、バイオマス量変化量を検証するために何が必要かを明らかにした。今後ALOS 2が打ち上げられれば、1~3mの分解能となり、高解像度レーダー画像の現地検証用データとして3次元レーザーがより有効利用できる。全地球レベルでバイオマス変化量をモニタリングする際、正確で客観的な現地調査データをレーザーにより提供でき、衛星データの解析精度を向上させることができる。よって、本研究を進めることで世界での環境政策に大きく貢献できる。

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) Kato, A., Moskal, L.M., Schiess, P., Swanson, M.E., Calhoun D. (2010) "True Orthophoto Creation Through Fusion of LiDAR Derived Digital Surface Model and Aerial Photos" Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium 2010, p88-93.
- 2) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L.M., Schiess, P., Calhoun D. (2010) "Certification of Carbon Credit Using Airborne LiDAR", Proceedings of Silvilaser 2010, p127-141.
- 3) Kato, A., Watanabe, M., Kobayashi, T., Yamaguchi, Y., Iisaka, J. (2011) "Monitoring Forest Management Activities Using Airborne Lidar and ALOS PALSAR", IEEE IGARSS 2011, p2318-2321
- 4) 加藤 顕、小林達明、福田聖一、有村恒夫 (2011) "法面緑化地での車載レーザー利用のためのシミュレーション開発", 日本緑化工学会誌37 (1), p96-101.
- 5) Kato, A., Moskal, L.M., Kobayashi, T. (2011) "Effect of Scan Coverage on Stem Diameter Measurement Using Terrestrial Lidar", Proceedings of Silvilaser 2011, p171-179.
- 6) Kato, A., Watanabe, M., Yamaguchi, Y., Kobayashi, T. (2012) "Detecting Seasonal Change of deciduous trees using ALOS PALSAR and airborne lidar", IEEE IGARSS 2012, (In Press)
- 7) 根本 光、加藤 顕、小林達明 (2012) "航空機レーザー測量を用いた異なるスケールアプローチでのスギ・ヒノキ林材積の推定", 日本緑化工学会誌38 (1), (In Press)
- 8) 林 敏樹、加藤 顕 (2012) "地上レーザーを用いた外来抽水植物の地図作成技術", 日本緑化工学会誌38 (1), (In Press)
- 9) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L.M. (2012) "Automatic Reconstruction of Tree Stem Using Terrestrial Lidar", Proceedings of Silvilaser 2012, (In Press)

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) Kato, A., Moskal, L.M., Schiess, P., Swanson, M.E., Calhoun D. (2010) "True Orthophoto Creation Through Fusion of LiDAR Derived Digital Surface Model and Aerial Photos" Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium 2010, Vienna, Austria, July 2010
- 2) 加藤 顕、小林達明、根本 光 (2010) "航空機または地上型レーザーによる樹木形状把握", 日本緑化工学会研究交流発表会、第41回日本緑化工学会、2010年9月、岡山大学
- 3) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L.M., Schiess, P., Calhoun D. (2010) "Certification of Carbon Credit Using Airborne LiDAR", Silvilaser 2010, Freiburg, Germany, September 2010
- 4) 加藤 顕 (2011) "排出量取引に向けたレーザー技術による炭素蓄積量把握", 千葉大学 新技術説明会、2011年2月、JSTホール
- 5) 加藤 顕、梅木 清、小林達明 (2011) "地上レーザー計測による樹木パラメータ抽出", 第58回日本生態学会、2011年3月、札幌コンベンションセンター
- 6) 加藤 顕、小林達明 (2011) "航空機及び地上レーザー測量を用いた樹木構造把握", 第122回日本森林学会、2011年3月、静岡大学

- 7) 根本 光、加藤 顕、小林達明 (2011) “航空機レーザーデータを用いたサンブスギ林の材積量の推定”、第122回日本森林学会、2011年3月、静岡大学
- 8) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L. M. (2011) “Evaluating Ecosystem Services of Urban Forest using LiDAR”, AAG Annual Meeting, April 2011, Seattle Convention Center, Seattle USA
- 9) 加藤 顕、小林達明 (2011) “航空機レーザーとハイパースペクトルを用いた病害木判定技術の開発”、平成23年度年次学術講演会、日本写真測量学会、2011年5月 東京大学生産技術研究所
- 10) 加藤 顕、小林達明、福田聖一、有村恒夫 (2011) “車載レーザースキャナーを用いた植生状況把握”、平成23年度年次学術講演会、日本写真測量学会、2011年5月 東京大学生産技術研究所
- 11) Kato, A., Watanabe, M., Kobayashi, T., Yamaguchi, Y., Iisaka, J. (2011) “Monitoring Forest Management Activities Using Airborne Lidar and ALOS PALSAR” IGARSS 2011, July 2011, Vancouver Convention Center, Canada
- 12) 加藤 顕、小林達明、福田聖一、有村恒夫 (2011) “法面緑化地での車載レーザー利用のためのシミュレーション開発”、第42回日本緑化工学会大会、2011年9月 千葉大学
- 13) Kato, A., Moskal, L. M., Kobayashi, T. (2011) “Effect of Scan Coverage on Stem Diameter Measurement Using Terrestrial Lidar”, Silvilaser 2011, October 2011, University of Hobart, Australia
- 14) Kato, A., (2011) “Estimating Aboveground Biomass Using PALSAR and LiDAR”, 2nd International Polarimetric SAR Workshop in Niigata 2011, October 2011, Niigata, Japan
- 15) 加藤 顕、(2012) “レーザーリモートセンシングによる木質バイオマス計測、第14回CEReS環境リモートセンシングシンポジウム、2012年2月 千葉大学けやき会館
- 16) Kato, A., Moskal, L. M., Kobayashi, T. (2012) “Efficient and Accurate Measurement of Stem Volume Using Terrestrial Lidar”, AAG Annual Meeting, March 2012, New York Sheraton Hotel, New York USA
- 17) Kato, A., Kobayashi, T., Umeki, K. (2012) “Quantifying Ecosystem Services Using Laser Remote Sensing”, 日本生態学会第59回大会、第5回東アジア生態学会連合大会2012年3月、龍谷大学
- 18) 加藤 顕 (2012) “地上型3Dレーザースキャナーによる木質バイオマス計測”、第123回日本森林学会、2012年3月、宇都宮大学
- 19) 阿部 航、加藤 顕 (2012) “スギ材積算出における溝腐病の影響について”、第123回日本森林学会、2012年3月、宇都宮大学
- 20) 加藤 顕、小林達明 (2012) “地上レーザーを用いた木質バイオマス計測”、平成24年度年次学術講演会、日本写真測量学会、2012年5月 東京大学生産技術研究所
- 21) 加藤 顕 (2012) 衛星データのグランドトゥルースとしてのレーザーデータ利用、第52回(平成24年度春季)学術講演会、2012年5月 東京大学生産技術研究所
- 22) Kato, A., Watanabe, M., Yamaguchi, Y., Kobayashi, T. (2012) “Detecting Seasonal Change of Deciduous Trees Using ALOS PALSAR and Airborne Lidar”, IEEE IGARSS 2012, August 2012, Munich Germany (アクセプト)
- 23) Kato, A., Watanabe, M., Yamaguchi, Y., Kobayashi, T. (2012) “Monitoring Forest Biomass Change by ALOS PALSAR and Airborne Lidar”, ForestSAT 2012, Sept. 2012, Oregon USA (アクセプト)
- 24) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L. M. (2012) “Automatic Reconstruction of Tree Stem Using Terrestrial Lidar”, Silvilaser 2012, Sept. 2012, Vancouver Canada (アクセプト)

7. 研究者略歴

課題代表者：加藤 顕

米国 ワシントン大学森林資源学部卒業、農学博士、現在千葉大学園芸学部助教

RF-1006 航空レーザー測量及びPALSARを用いた森林整備に伴うバイオマス量変化の把握**(1) 航空レーザー測量及びPALSARを用いた森林整備に伴うバイオマス量変化の把握**

千葉大学 大学院園芸学研究科

緑地環境学コース 緑地科学領域 再生生態学研究室

加藤 顕

平成22～23年度累計予算額：12,951千円

(うち、平成23年度予算額：6,309千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 国内の環境政策である環境省地球温暖化対策法において森林の保全が重要視されている。また国際的な環境政策であるREDD (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries, 森林減少・劣化からの温室効果ガス排出削減) では、熱帯林でのモニタリングを必要としている。これらの政策を推進するためには、現存する森林域のバイオマス量を把握する以上に、間伐等の整備による炭素変化量をより正確に定量化する必要がある。本研究では、航空機レーザー測量及びPALSARを用いた森林整備に伴うバイオマス量変化の把握をボトムアップ・アプローチで行った。衛星レーダーデータ (ALOS PALSAR) による広域 (県全域レベルや市レベル) の解析結果を、航空機レーザーを用いた3次元森林構造解析と比較した。さらに地上レーザーも導入し、正確なバイオマス計測手法を確立した。間伐等の森林整備を研究期間中に行い、現地調査で森林整備に伴うバイオマス量変化を把握した。その変化を航空機レーザーデータで定量化し、PALSARの後方散乱係数の偏波変化と比較した。また広葉樹林を対象に航空機レーザーと衛星レーダーデータを取得し、落葉による影響も考慮した。これらの解析結果より、地上レーザーを用いるだけで単木単位の幹体積が非破壊により自動算出できる手法が確立し、グラントゥルースとして用いることができることを実証した。また、航空機レーザーを樹高ベースでバイオマス量を把握できるモデルを確立し、対象地全域でバイオマス量を推定できるようにした。しかし、航空機レーザーからの結果と衛星レーダーの後方散乱にはあまり相関関係がなかった。その理由として、PALSARの体積散乱に関係がある樹冠量と幹体積 (バイオマス量) には関係性があまりなく、今後、幹体積と樹冠量の関係を明らかにする必要があることがわかった。衛星レーダーは斜角でデータを取得している一方で、航空機レーザーはオルソ角によって解析されているため、取得角度の違いが比較検証する際に結果に影響を及ぼしていることがわかった。

[キーワード] レーダー、レーザー、炭素蓄積、バイオマス量、森林整備

1. はじめに

リモートセンシングによるバイオマス量変化の把握は、国内外の環境政策で重要な課題となってきた。国内では排出量取引導入に向けての準備段階としてオフセット・クレジット (J-VER) があり、J-VERは第三者機関として化石燃料使用削減を行っているプロジェクトを認証し、排出量の多い事業者との間でカーボンオフセットを認めている。J-VERでは、森林域排出削減活動として森林整備を促進しており、森林からのバイオマス利用を促進することで化石燃料消費抑制を目指

している。現存する森林からカーボンクレジットを得るには、京都議定書で森林吸収源（炭素蓄積）として考えられる人為活動に、①新規植林 ②再植林 ③森林経営 が認められているが、国土が狭く森林が既に7割を占めている我が国において、植林よりも森林整備によって炭素蓄積および削減量を補う必要がある。

国際的取り組みとしては、REDD (Reduced Emissions from Deforestation and forest Degradation, 森林減少・劣化からの温室効果ガス排出削減) があり、途上国での熱帯林保全でカーボンオフセットできる仕組みがある。特に違法伐採を止めることで熱帯林に蓄積されている炭素量を保つことを目指している。

国内の環境政策であるJ-VERでは、カーボン算出手法のスキームがすでに確立、公開されており、材積（幹体積）を基に枝葉や根量の拡大係数、また密度係数を掛け合わせることで、樹木の総バイオマス量を算出する。そのバイオマス量に0.5を掛け合わせることで炭素量まで算出できる。J-VERは国内林地を対象とするため、小規模林地を対象とした詳細な森林モニタリング手法の確立が必要であり、地域での森林簿・森林計画図の作成が求められている。その一方でREDDに関しては、国・県レベルの広域を対象とするため、広域での土地利用図作成が求められている。REDDでのスキームは、土地利用図にその土地の平均材積（国レベルで予め決まっている係数）を掛け合わせ、その対象地全域の材積・炭素量を推定している。よって、土地利用図や経年的土地利用変化を広域で把握できるモニタリング技術、そのためのリモートセンシング技術が望まれている。同じカーボンオフセットのための環境政策ではあるが、スケールの違いによって期待されるモニタリング手法が異なってくる。

森林の現存するバイオマス量を把握する以上に、間伐等の整備による炭素蓄積量をより正確に定量化し、炭素吸収量を「見える化」する必要がある。これら国内外の環境政策に対するモニタリングターゲットは、モニタリング対象森林のスケールが異なるものの、共通しているのは森林整備等の人的活動であり、そのためのモニタリング手法の確立が必須である。これらモニタリングには、目的のスケールに応じた様々なセンサーを適応していかなければならない。J-VERに対しては詳細な森林整備状況がモニタリングできるレーザーリモートセンシング技術、REDDに対しては県・国レベルで広域モニタリングできる衛星レーダーリモートセンシング技術が最も適している。

これまでの広域リモートセンシングでは光学センサーとしてLandsat衛星やSPOT衛星が用いられてきた。しかし、光学センサーの欠点として、天候によって対象地が雲に覆われてしまい経年的データの取得が保証できない。特に熱帯林地域のように天候の変化が激しい場所での経年的モニタリングには光学センサーでは限界があった。しかし近年衛星レーダーによるモニタリングがより安価で利用可能となり、天候による影響なく土地利用状況を経年的にモニタリングできるようになった。また地域レベルでは、航空機レーザー (airborne LiDAR, Light Detection and Ranging) による3次元データが取得可能となり、森林構造を3次元で解析可能となった。

本研究の目的は最新の航空機レーザー測量及び衛星レーダー (PALSAR、合成開口レーダー) を用いて森林整備によるバイオマス変化量を把握することである。航空機レーザーデータは地域レベルの森林整備状況を詳細に把握できる。その詳細な結果を広域モニタリングができる衛星レーダーからの解析結果に適応することで、衛星レーダーによる森林整備状況の把握を行う上での問題点を明らかにする。そのために、最も詳細にデータ取得ができる航空機レーザーデータを取得

し、取得した同じ場所で衛星レーダーでのデータを解析し、結果を比較することで衛星レーダーデータを解析する際の問題点を考察する。航空機レーザーデータの限界を補うため、航空機レーザーと同じセンサーで、地上設置型のもの（地上レーザーデータ、terrestrial LiDAR）を用いることで、航空機レーザーでは把握できないより詳細なバイオマス量を地上レーザーデータから得たい。

2. 研究開発目的

本研究タイトルに「航空レーザー測量」という名称を使用したか、本報告書内では表記を統一させるために、「航空機レーザー測量」のことを「航空機レーザー」と表記を統一させ、地上レーザーとの取得方法の違いを明確にする。

本研究はボトムアップアプローチ（図(1)-1）により、様々なスケールで異なるセンサーを用いてモニタリング技術の検討を行った。ボトムアップアプローチとは、現地調査で測定したデータを航空機レーザーデータからの結果と比較して地域レベルのバイオマス量へ外挿するモデルを構築する。その結果を衛星レーダーデータからの結果と比較する。また、航空機レーザーでは森林構造を把握する上で限界があり、その限界を補うために地上レーザーデータを導入・取得し、地上レーザーを現地検証用データ（グラントゥルース）として使用する有効性を検討した。本研究では衛星レーダーを森林整備地域のモニタリングを行う上で、問題点を明らかにするために2つの視点で研究を行う。

（1）衛星レーダーによる森林整備地域の把握

航空レーザーと衛星レーダー（PALSAR）を用いて、森林整備に伴うバイオマス変化量を把握する。森林整備に伴うバイオマス量変化を把握するために、研究対象地で本研究のために間伐を行い、間伐前後での航空機レーザーデータから詳細な変化を把握し、同じ対象地で衛星レーダーからの解析結果と比較する。研究対象地は国内であるが、衛星レーダーは世界中で取得可能であるため、得られた知見は今後の衛星レーダーを用いたバイオマス量推定の解析等に役立てたい。また、航空機レーザーを衛星レーダーの現地検証用データとして使用する際の問題点も明らかにする。

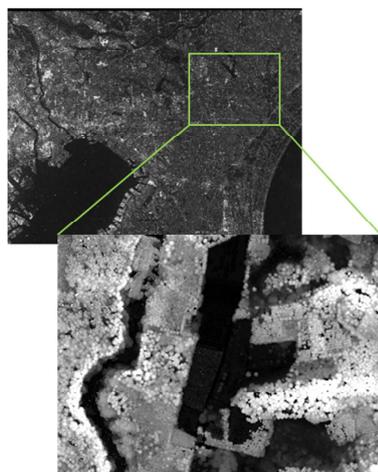
（2）森林整備地域と落葉の関係

航空機レーザーデータより針葉樹林域を対象にデータ解析を行い、その後落葉広葉樹林域でのデータ取得を行う。経年的モニタリングを行う上で森林整備による変化と落葉による影響の違いを把握しなければならない。落葉による影響を衛星レーダーから把握できるか検討する。

（3）ボトムアップアプローチとして、レーザーデータを利用したグラントゥルース

レーザーデータの取得方法としては、これまで主に航空機レーザーと地上レーザーとがある。用いるセンサーの種類は同じであるが、データ取得方法に違いがある。

レーザーデータは容易に、そして正確に3次元データ取得が可能であるため、近年衛星レーダーデータのグラントゥルースとしてデータ取得されるようになってきている。しかし、3次元で取得できるレーザーデータをグラントゥルースとして用いる際、データ取得方法（航空機からの照射か地上設置による照射）で解析方法も結果も異なるため、本研究では航空機レーザーばかりでなく、地上レーザーも用いてレーザーデータのグラントゥルースとしての利用を検討した。



国・県レベル:

衛星レーダー(ALOS PALSAR)

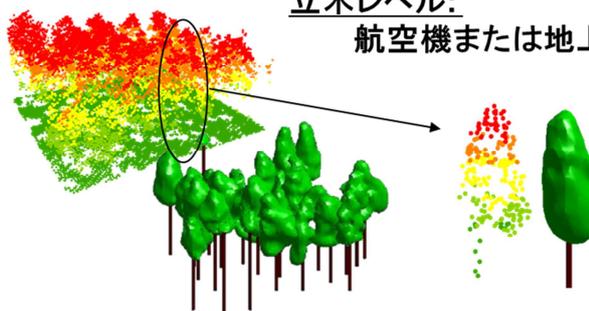
. L band radar は 100トン/ha まで把握できる。
 ⇒解像度5 m² に樹高20m のスギ1本まで測定可能。間伐
 や枝打ち等の森林整備がそこまでの立木本数になれば、
 変化量を抽出することが可能

市町村レベル:

航空機レーザーの利用

立木レベル:

航空機または地上レーザーの利用



図(1)-1 ボトムアップアプローチ。

3. 研究開発方法

(1) データ

本研究対象地は針葉樹主体の千葉県山武市と落葉広葉樹主体の東京都西部にある東京都公園野山北・六道山公園である。研究対象地として選定した理由は、千葉県山武市では市所有林で山武市との協力の下、間伐等を行うことができ、間伐による取得するリモートセンシングデータへの影響を研究できる研究環境がある。また、野山北・六道山公園は、典型的里山林であり、山武市とは異なり広域に落葉広葉樹林が成立している。その森林区域ははっきりと分かれており、斜面にはコナラ・クヌギ等を主体とした落葉広葉樹があり、尾根沿いはアカマツ等を主体とする針葉樹がある。主な樹種が落葉広葉樹であるため、広域に落葉の影響を衛星レーダーデータ上で比較・検討しやすい地域である。

1) 針葉樹林 (千葉県山武市)

千葉県山武市、市の所有林である日向の森を研究対象地とし、高密度データを効率良く取得できる連続波形記録方式 (full waveform) を採用しているRiegl社製センサーを搭載している航空機レーザーによってデータを取得した。日向の森は、全体約9 km²ある。山武市は、銘木サンブスギ (*Cryptomeria japonica*) の生産地であり、林業地であった。しかし長い間管理放棄されたため、非赤枯性溝腐病 (*Phellinus punctatus* (Fries) Pilát) が蔓延している。本プロジェクトは山武市と共同で研究を行っている。

2) 落葉広葉樹林 (東京都公園野山北・六道山公園)

落葉広葉樹が主体の野山北・六道山公園は、全体で約200haある。東京都が定期的の間伐・下刈り等を行っている管理された場所とそのまま自然状態で遷移している場所とがあり、様々な立木密度で森林が構成されている。

(2) 取得したデータ

1) 現地調査

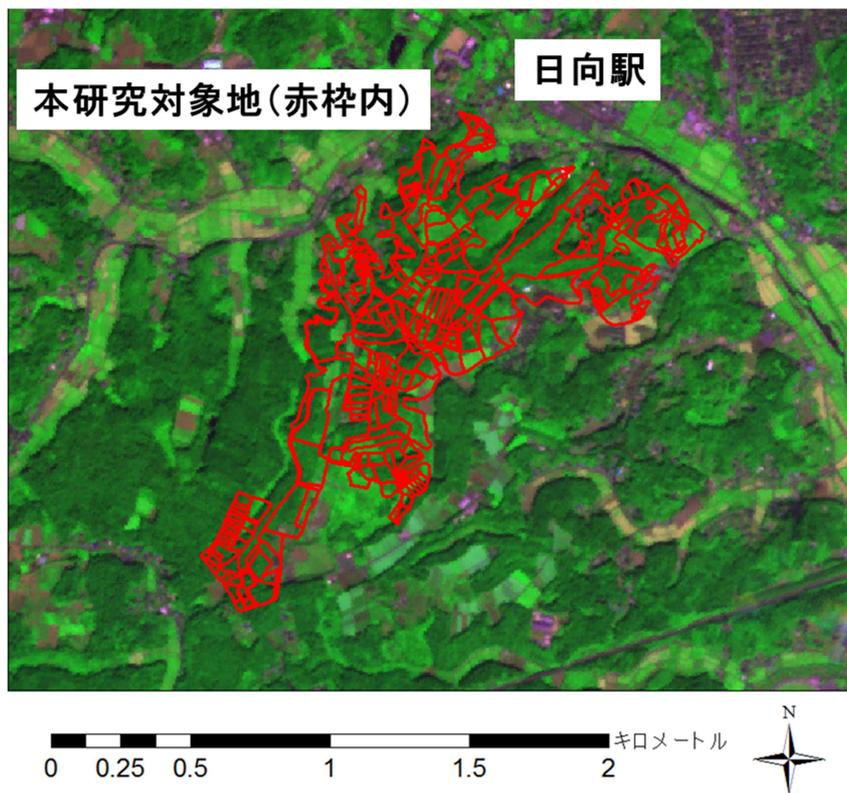
針葉樹林では平成22年8月～9月に、落葉広葉樹林では平成23年8月～9月に現地調査を行い、樹木状況のデータを取得した。調査方法としては調査区として20m x 20mのプロットを設置し、樹種・樹高・胸高直径・樹冠長・枝下高・樹木位置を、2m以上のプロット内樹木すべての毎木調査を行った。プロット設置の選定は、対象地で様々な森林状況を把握できるように、針葉樹対象域では対象地全域で計30プロットをランダムに設定した(図(1)-2)。広葉樹対象域ではアクセスできる場所を中心に30プロット設置した(図(1)-3)。針葉樹林対象域での樹種別割合を表(1)-1に、広葉樹対象域での樹種別割合を表(1)-2にまとめた。毎木調査では、樹高、枝下高は測高計(Haglof Vertex III)によって計測、樹木位置は、トータルステーション(Ushikata Teo-Ray130)によって測量し、高精度GPS(Trimble GeoXT)によって取得したGPSの位置を基準に、樹木位置に座標付け(ジオリフェレンス)を行った(図(1)-4,5)。針葉樹林対象地では、スギ(*Cryptomeria japonica*)とヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)が優占している(表(1)-1)。広葉樹林対象地では、コナラ(*Quercus serrate*)が優占している(表(1)-2)。毎木調査で得られた樹高と胸高直径を用いて、バイオマスの基準となるプロットレベルでの幹材積を算出した¹⁾。

千葉県山武市はかつて銘木サンプスギの産地であったため、計画的植林が行われていた。その影響を把握するため、様々な立木密度の林分で現地プロットを設置・調査した。現地調査で得られたデータから胸高直径と立木密度の関係を把握した(図(1)-6)。針葉樹林では相関が高かったが、広葉樹林では、高い相関関係は見られなかった(図(1)-6)。

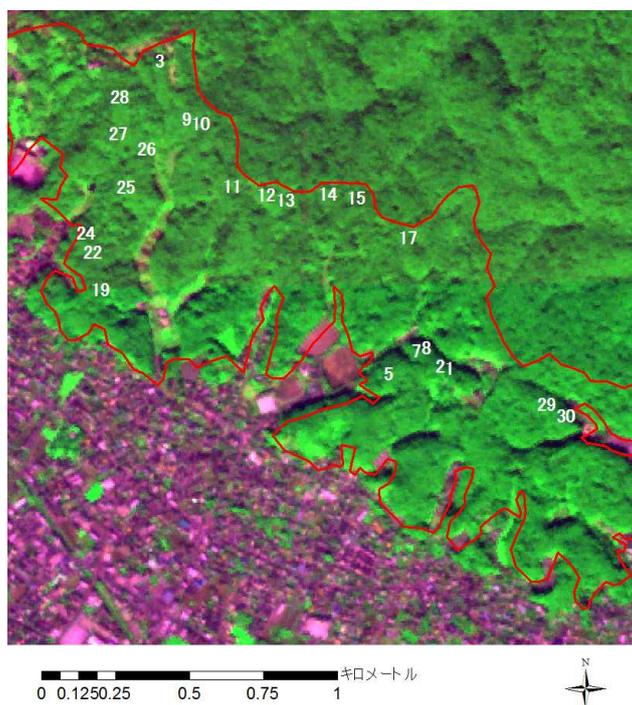
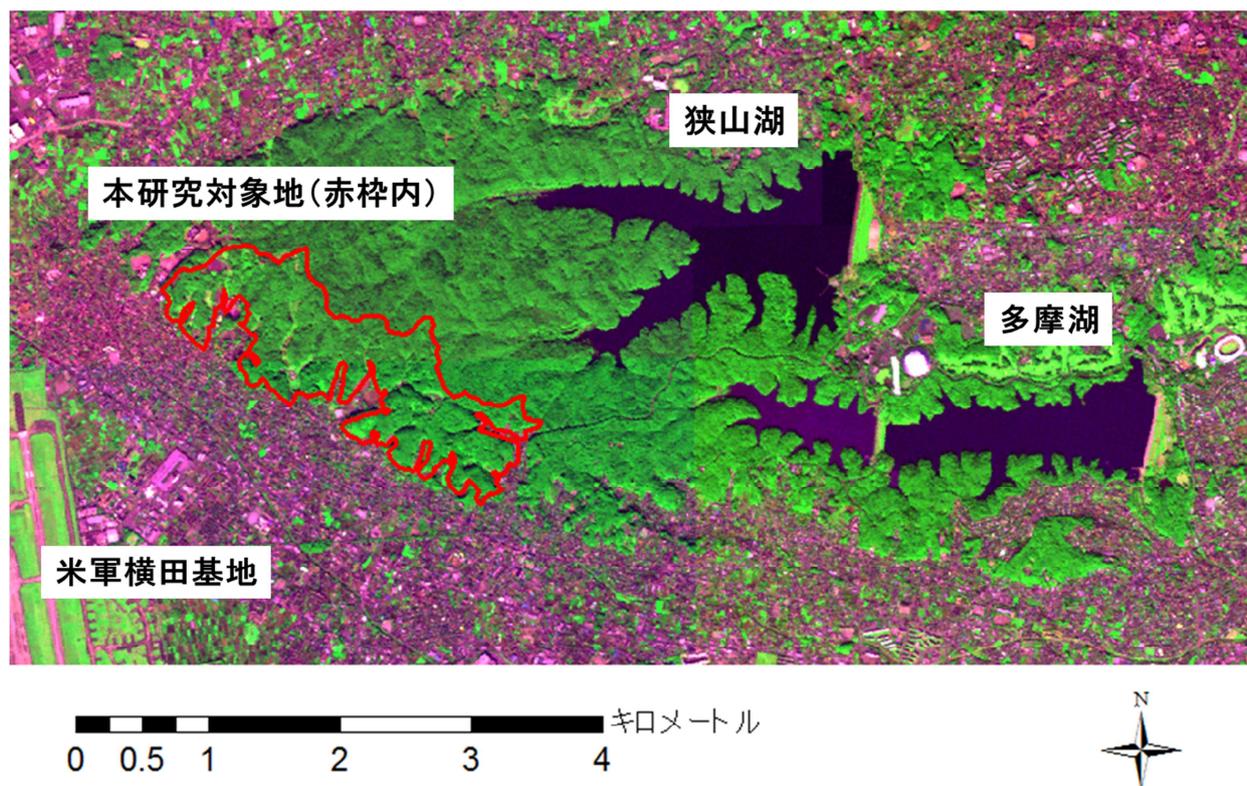
山武市日向の森では、バイオマス計測を行うためには最も詳細な幹体積を把握する必要があり、詳細なデータを取得するためスギ対象木7本に対して、地上レーザーデータを取得した。その解析結果を検証するため、対象木すべて地上レーザーデータ取得後伐倒調査を行った。伐倒後、各対象木の樹高をメジャーで実測し、すべてのサンプル木に対して地上部から頂点まで50cm毎に区切り玉切りした(図(1)-7)。玉切りしたサンプルすべてに対し末口断面を正確に計測し、地上レーザーデータからの解析結果と比較した。

表(1)-1 毎木調査した立木の概要

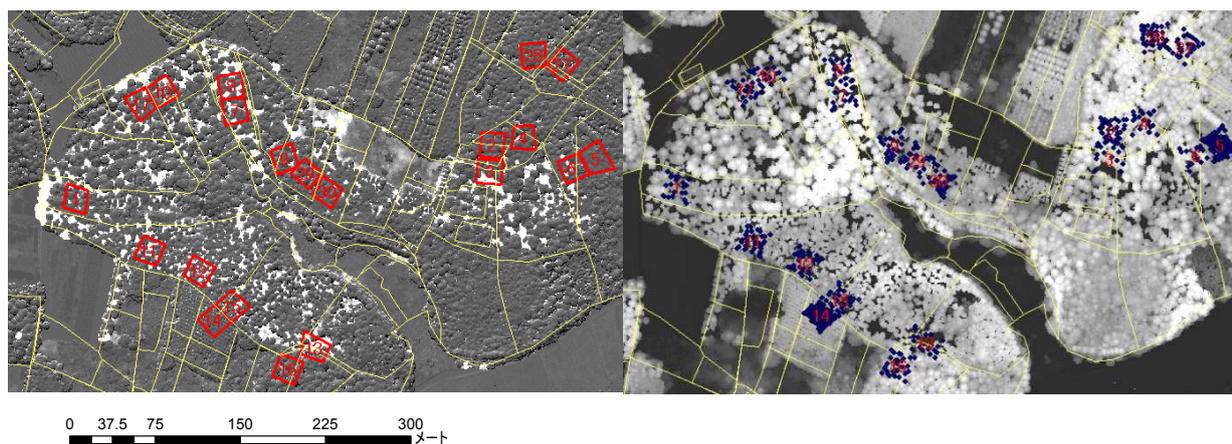
樹種	学名	個体数	胸高直径(DBH, cm)	樹高(m)
スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	718	10.3~69.7	10.4~34.3
ヒノキ	<i>Chamaecyparis obtuse</i>	179	8~72	2.9~31.8
サワラ	<i>Chamaecyparis pisifera</i>	38	17.1~90.7	14.6~34.9
シラカシ	<i>Quercus myrsinaefolia</i>	9	4~67.7	5.9~29.8
コブシ	<i>Magnolia kobus</i>	1	8	6.9
スダジイ	<i>Castanopsis sieboldii</i>	1	26	14.5
アカシデ	<i>Carpinus laxiflora</i>	1	8.7	9.6
タケ	<i>P. heterocycla</i>	425	3~16.2	NA
枯死木	-	23	6.2~61.4	4.9~29.4
合計	-	1395	3~90.7	2.9~34.9



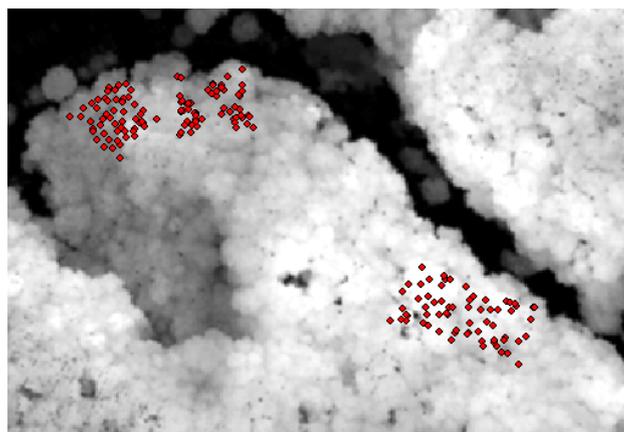
図(1)-2 針葉樹林対象域である千葉県山武市日向の森（上図）と調査プロット設置箇所（下図）。図中のプロット番号の位置がプロット設置場所を示す。背景は5m解像度のRapidEye衛星画像。



図(1)-3 落葉樹林対象域で本研究対象地（上図）と調査プロット設置個所（下図）。図中のプロット番号の位置がプロット設置場所を示す。背景は5m解像度のRapidEye衛星画像。



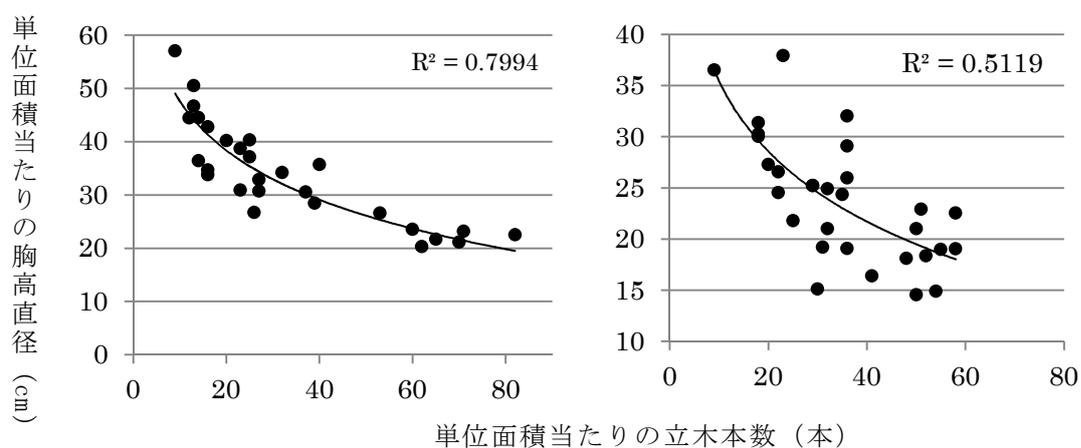
図(1)-4 針葉樹林対象地で、間伐域に設置したプロット位置（左図、赤枠は設置したプロットの場所）。ジオリフェレンスした樹木位置（右図、青色点は現地で測量した樹木位置、背景は航空機レーザーから作成したDCM, Digital Canopy Model）。現地で測量した樹木位置がDCMの樹木位置と正確に一致していることがわかる。



図(1)-5. 広葉樹林対象地でジオリフェレンスした樹木位置。現地で測量した樹木位置がDCMの樹木位置と正確に一致していることがわかる。

表(1)-2 対象地内での毎木調査した樹木概要

樹種	学名	個体数	DBH(cm)	樹高 (m)
コナラ	<i>Quercus serrate</i>	353	6 57.5	5.1 33.7
ヒノキ	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	132	5.2~56.5	3.9~26.9
アオハダ	<i>Ilex macropoda</i>	125	2.7~32.3	3.5~19.3
サクラ	<i>Prunus spp.</i>	114	1.5~55.5	3~26.7
エゴノキ	<i>Styrax japonica</i>	92	2~34	2.4~20.3
イヌシデ	<i>Carpinus tschonoskii</i>	41	2.5~31.8	3.9~24.9
リョウブ	<i>Clethra barbinervis</i>	27	5~13.4	4.7~13.8
ヒサカキ	<i>Eurya japonica Thunb.</i>	26	2.2~8.7	3.1~7.6
マルバアオダモ	<i>Fraxinus sieboldiana</i>	18	4.3~11.9	4.8~13.1
ネジキ	<i>Lyonia ovalifolia ssp.</i>	12	5.2~7.8	4.3~7.4
ミズキ	<i>Swida controversa</i>	10	3.8 16.3	6.1~14
スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	9	17.8 ~ 48.9	12.1~25.3
シラカシ	<i>Quercus myrsinifolia</i>	7	4.4~24.3	6~12.7
ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i>	7	2.8~18.5	3.5~17.7
アカマツ	<i>Pinus densiflora</i>	5	27.8 ~ 49.6	15.9~24
ニセアカシア	<i>Robinia pseudoacacia</i>	5	5.8~24	6.5~21.2
モミ	<i>Abies firma</i>	4	6.4~41.5	4.7~25.2
アラカシ	<i>Quercus glauca</i>	3	2.8~8.6	3.3~7.3
トチノキ	<i>Aesculus turbinata</i>	3	4.9~7.7	4.7~8
その他	-	44		
枯死木	-	20		
合計		1057		



図(1)-6 立木密度（単位面積あたりの立木本数）と平均胸高直径の関係（左図：山武市の針葉樹林、右図：野山北・六道山公園の広葉樹林）。

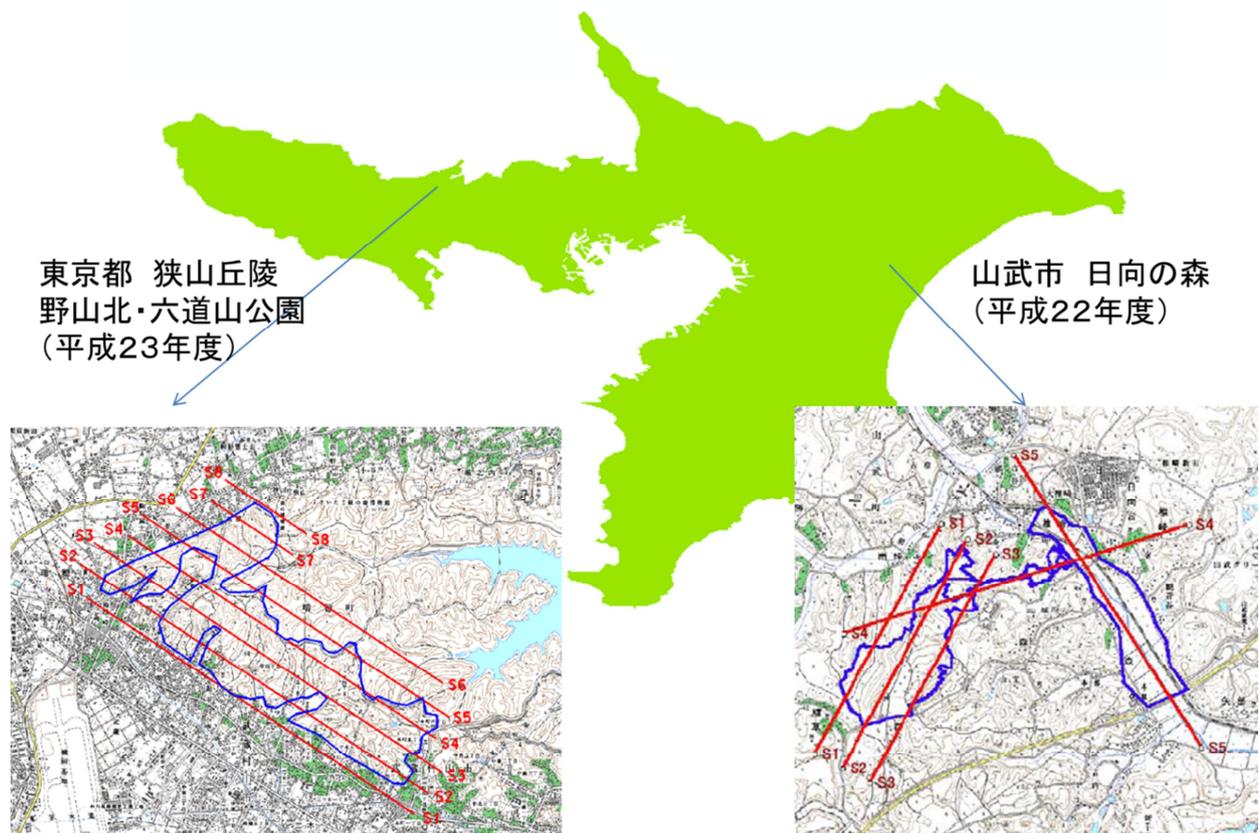


図(1)-7 幹体積計測のために対象木を玉切りにした様子。

2) 航空機レーザーデータ

航空機レーザーデータを取得した対象地と飛行計測コースを図(1)-8に示す。針葉樹対象地域で森林整備前の状況を把握するために、平成21年8月14日にすでに1回目の航空機レーザーデータを20点/m²もの高密度で取得した(表(1)-3)。本研究では、森林整備前後の変化を航空機レーザーで把握するために2回目のデータを平成22年7月18日に取得した。データ取得には、1回目と同じ条件(同じセンサー、同じ点密度、同じ航路設定)でデータ取得を行った。それぞれのデータ取得範囲を図(1)-9に示す。

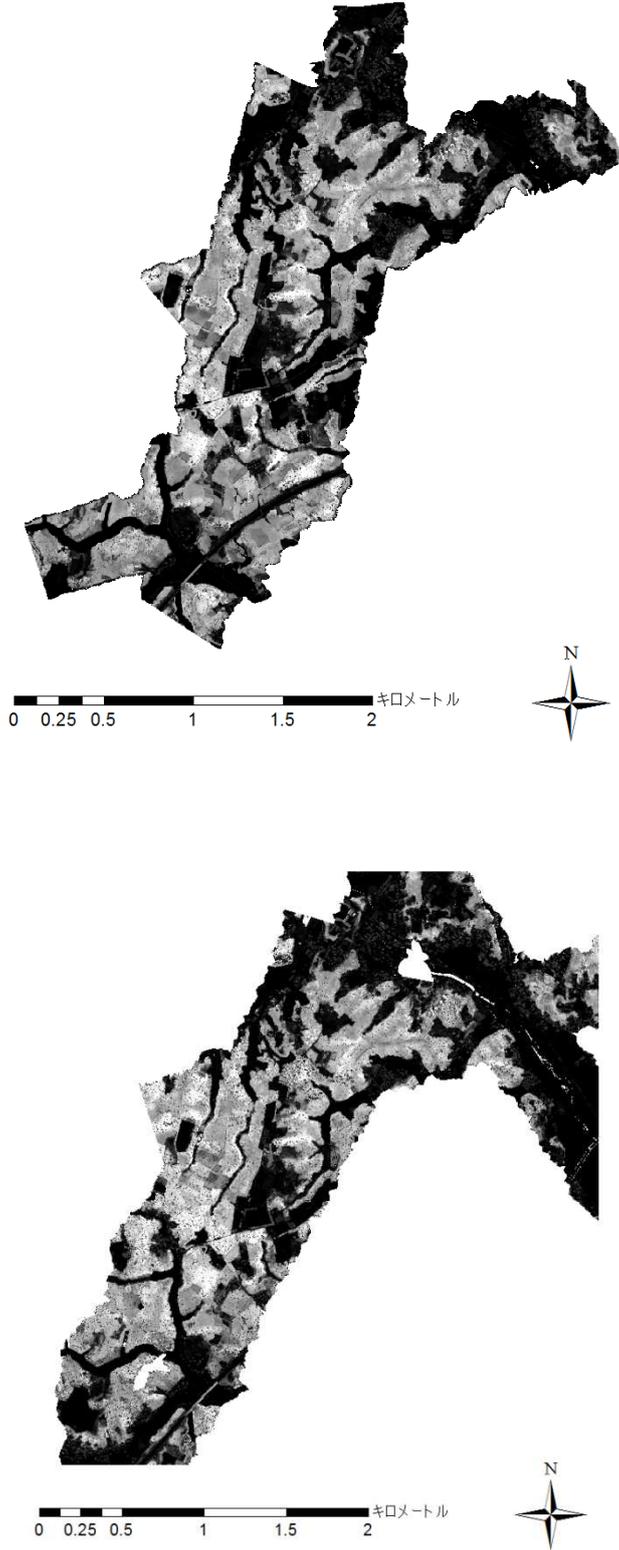
広葉樹対象地域では、平成23年11月5日に航空機レーザーデータを平均15点/m²もの高密度で取得した(表(1)-3)。広葉樹対象地は横田基地に隣接するため航空規制があり、飛行計測した際、高密度データ取得のためにヘリコプターの高度を下げることはできず、高度約1,000メートルからのレーザー照射を行った。そのため、山武市で取得したデータほどの高密度でデータを取得できなかったが、1つのレーザー照射に対して多くのレーザー反射を収集できる連続波形記録方式によるセンサーを用いたため、高密度データを効率良く取得することができた。データ取得範囲を図(1)-10に示す。



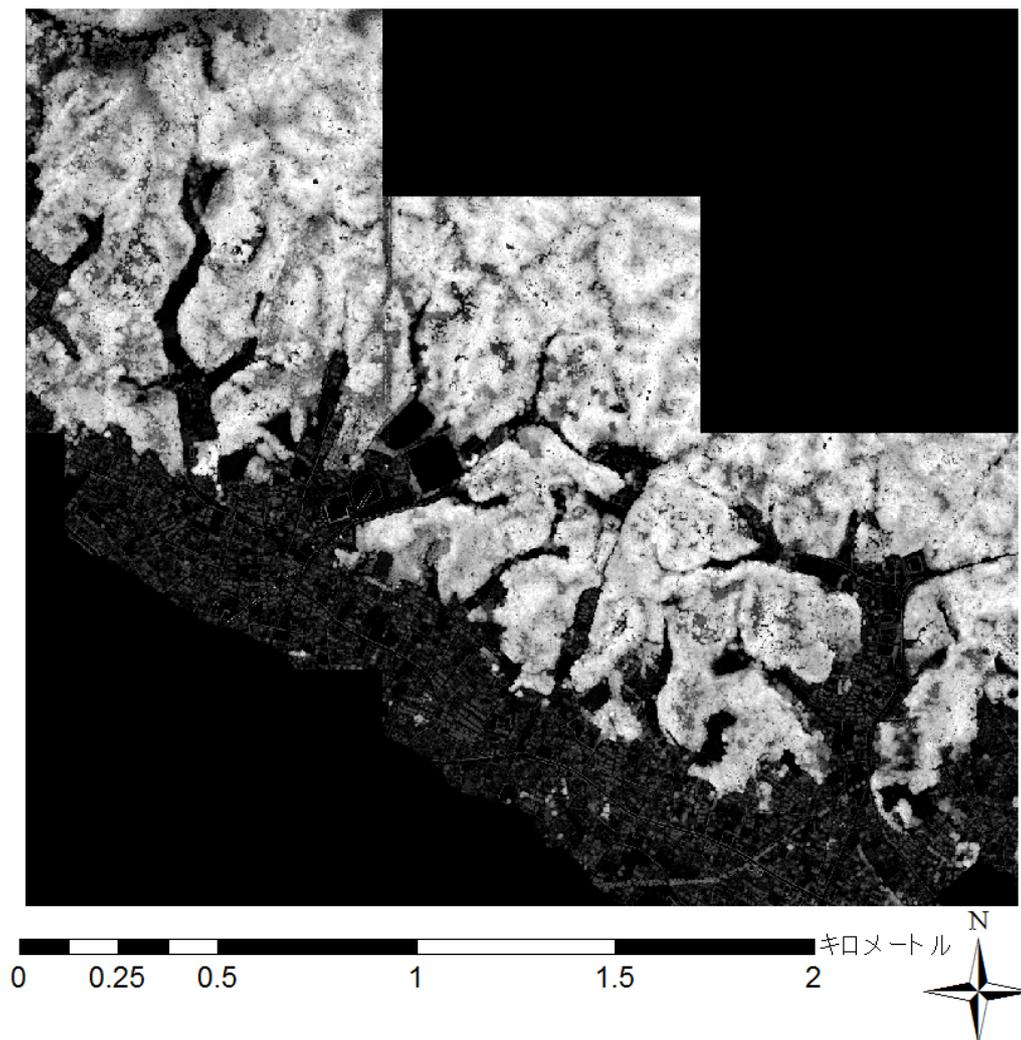
図(1)-8 航空機レーザーを取得した対象地位置と実際の計測コース。背景緑域は東京都と千葉県を表す。

表(1)-3 航空機レーザーセンサー

データ取得日	1回目 2009年8月14日(針葉樹対象地 間伐前) 2回目 2010年7月18日(針葉樹対象地 間伐後) 3回目 2010年11月5日(広葉樹対象地)
センサー	Riegl LMS-Q560
レーザー波長	1,550 nm (近赤外線)
平均点密度	20 点/m ² (針葉樹、1, 2回目) 15 点/m ² (落葉樹、3回目)



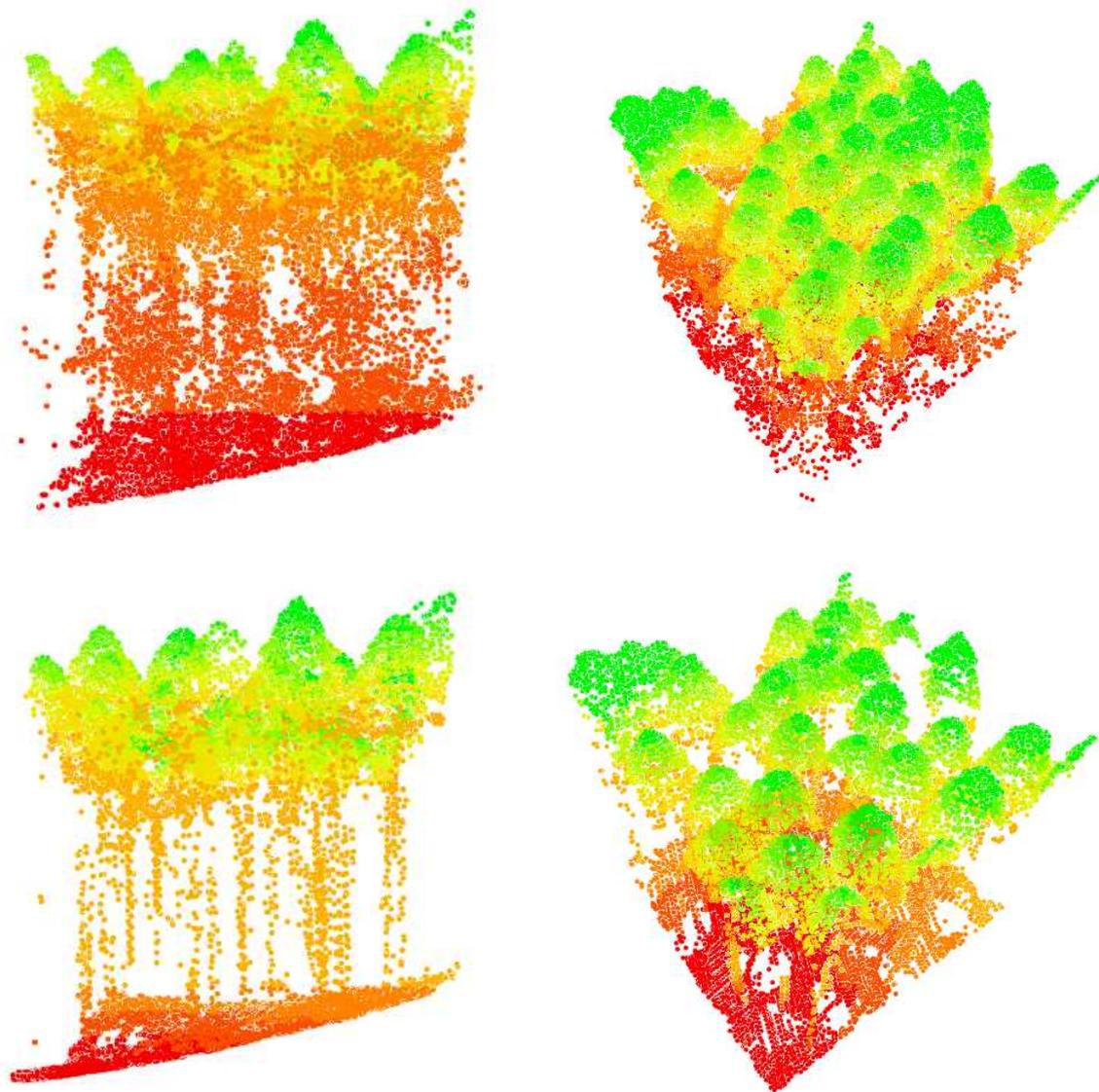
図(1)-9 2009年に航空機レーザーで取得した範囲（上図）と2010年に航空機レーザーで取得した範囲（下図）。計測範囲を航空機レーザーから作成したDCMで表示。



図(1)-10 2011年に航空機レーザーで取得した範囲。計測範囲を航空機レーザーから作成したDCMで表す。

3) 森林整備

本研究はボトムアップアプローチで、詳細に現地の森林状況を取得できる航空機レーザーをランドトゥルースとして、衛星レーダーであるPALSARで変化抽出することを目的としている。航空機レーザーをランドトゥルースとして用いるためには、航空機レーザーデータから森林整備状況を把握できなければならない。針葉樹対象地（千葉県山武市）で平成21年8月に1回目のレーザー取得後、平成22年7月に2回目の航空機レーザーデータ計測までの間に切り捨て間伐による森林整備を行った。森林整備前後による森林状況の違いを高密度で取得された航空機レーザーデータで把握できた（図(1)-11）。



図(1)-11 森林整備前後で取得されたレーザーデータの比較（上図：森林整備前、下図：森林整備後、低～高の高さを赤～黄～緑色の色で表示。森林整備によって間伐した状況を航空機レーザーデータから明確にわかる）。

4) PALSARデータ

2007年～2011年の間、対象地で取得可能な衛星レーダー（PALSAR）データを取得した（表(1)-4, 5, 6, 7, 8）。本研究では、航空機レーザーと衛星PALSARとの関係を扱うため、2箇所の対象域で航空機レーザーデータも取得したところと同じ場所である針葉樹林対象地である千葉県山武市地域（表(1)-5, 6）と広葉樹林対象地である野山北・六道山公園（表(1)-7, 8）を中心に衛星データも取得した。衛星レーダーは2種類のデータがあり、FBD（Fine Beam Double Polarization）の約15m解像度のHH, HVの2偏波データと、PLR(Polarimetry mode)のすべての偏波（HH, HV, VH, VV, 4偏波）による約25m解像度のフルポラリメトリデータである（表(1)-4）。FBDのデータ取得範囲は、PLRのデータ取得範囲より広い。

データの後方散乱係数は、時期や水分条件に影響を受ける。そのためデータのキャリブレーションを行うためにも、2007年～2011年の間、多時期でデータ取得をした（表(1)-5,6）。針葉樹林地域で実際取得した衛星PALSARの図を図(1)-12,13に示す。

広葉樹対象地である野山北・六道山公園で2006年～2010年の間で取得可能な衛星PALSARデータを取得した（表(1)-7,8, 図(1)-14,15）。本研究では、落葉による影響を評価するため、2006年～2010年の様々な季節のデータを使用し、広葉樹林地域での後方散乱係数の変動を把握した。

表(1)-4 衛星PALSARデータのセンサー設定

(RESTECのHP, <http://www.restec.or.jp/>, から引用)

略単語	F B D (2 偏波)	P L R
モード	高分解能	ポラリメトリ
中心周波数	1270MHz (L バンド)	
バンド幅	14MHz	14MHz
偏波	HH+HV	HH+HV+VH+VV
入射角範囲	8～60°	8～30°
地上分解能	14～88m	24～89m
観測幅	40～70km	20～65km

表(1)-5 本研究に用いた2偏波 (FBD) のPALSARデータ

モード	パス	フレーム	データ取得日時
FBD	405	700	2009/7/1 13:08
FBD	404	700	2009/7/30 13:06
FBD	404	700	2009/9/14 13:07
FBD	405	700	2009/10/1 13:09
FBD	404	700	2010/6/17 13:05
FBD	405	700	2010/7/4 13:07
FBD	404	700	2010/9/17 13:04
FBD	405	700	2010/10/4 13:06
FBD	405	700	2010/11/19 13:05

表(1)-6 本研究に用いた4偏波 (PLR) のPALSARデータ

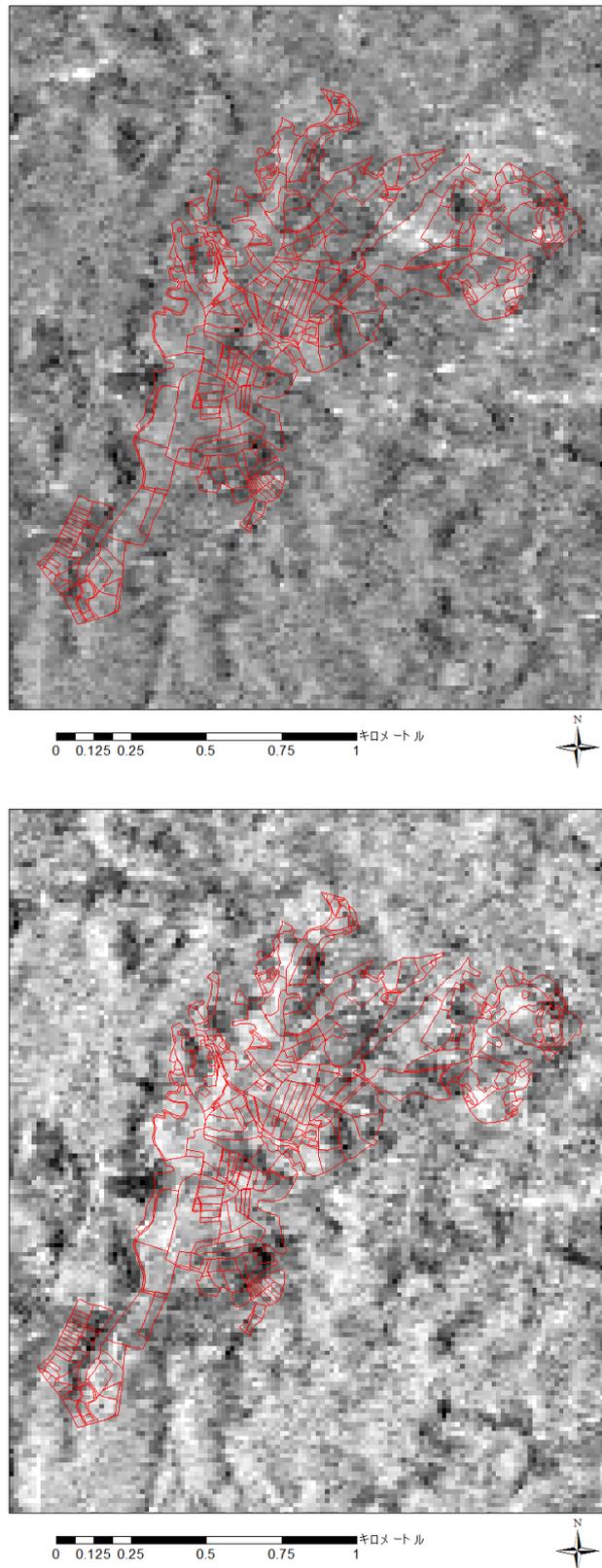
モード	パス	フレーム	データ取得日時
PLR	400	710	2009/5/23 12:57
PLR	400	710	2011/2/26 12:53

表(1)-7 取得した2偏波 (FBD) のPALSARデータ

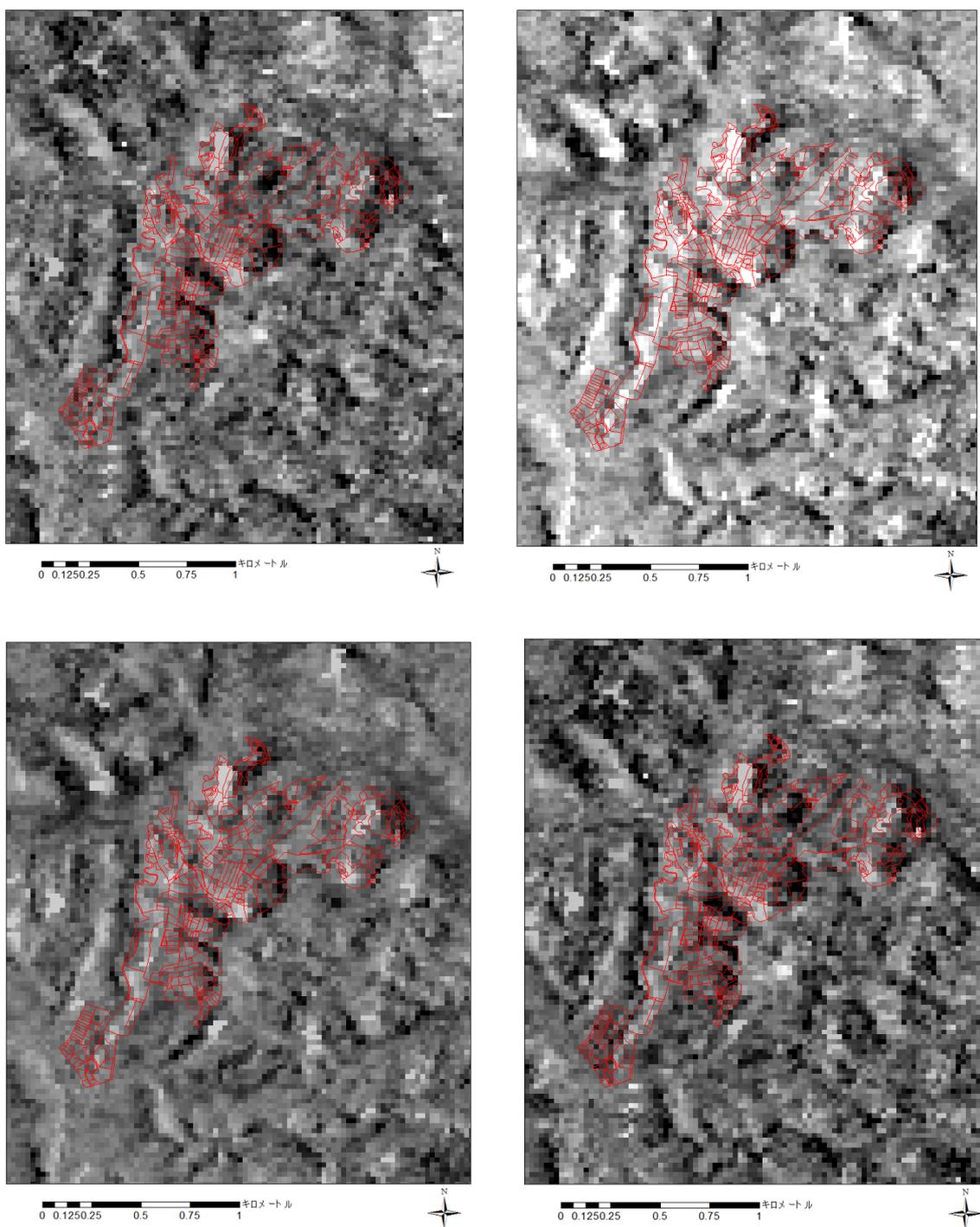
モード	パス	フレーム	データ取得日
FBD	58	2900	2009/3/20 1:13
FBD	406	700	2009/7/18 13:11
FBD	406	700	2009/9/2 13:11
FBD	406	700	2009/10/18 13:11
FBD	406	700	2010/6/5 13:10
FBD	406	700	2010/7/21 13:09
FBD	406	700	2010/10/21 13:08
FBD	406	700	2010/12/6 13:07

表(1)-8 取得した4偏波 (PLR) のPALSARデータ

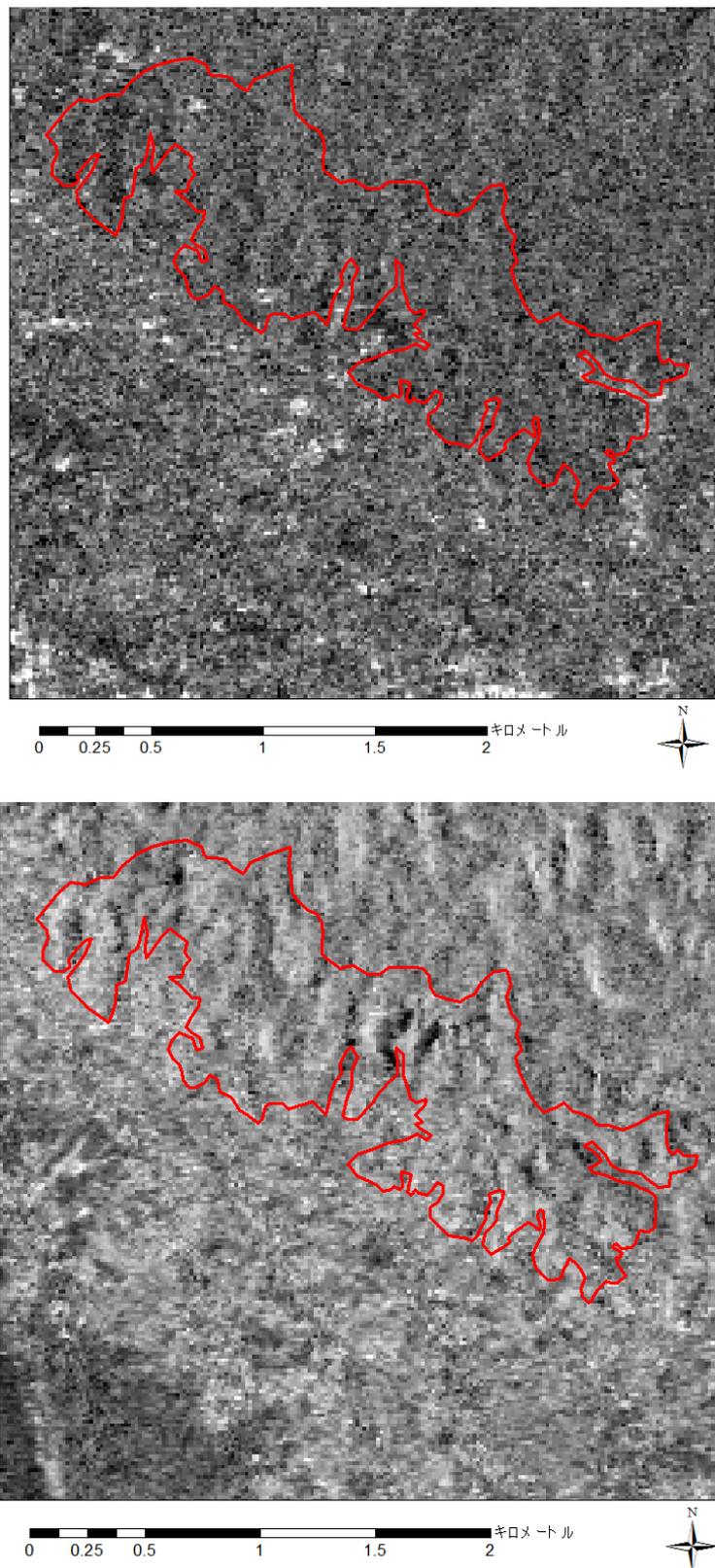
モード	パス	フレーム	データ取得日
PLR	402	710	2006/6/18 12:58
PLR	63	2890	2006/7/21 1:21
PLR	402	710	2006/8/3 12:59
PLR	63	2890	2006/9/5 1:22
PLR	63	2890	2006/10/21 1:22
PLR	402	710	2007/3/21 13:01
PLR	402	710	2007/5/6 13:01
PLR	402	710	2007/11/6 13:00
PLR	402	710	2008/2/6 12:59
PLR	402	710	2008/11/8 12:59
PLR	402	710	2009/3/26 13:01
PLR	63	2890	2009/4/28 1:24
PLR	63	2890	2009/7/29 1:24
PLR	63	2890	2009/9/13 1:25
PLR	402	710	2010/3/29 13:02
PLR	402	710	2010/11/14 12:59



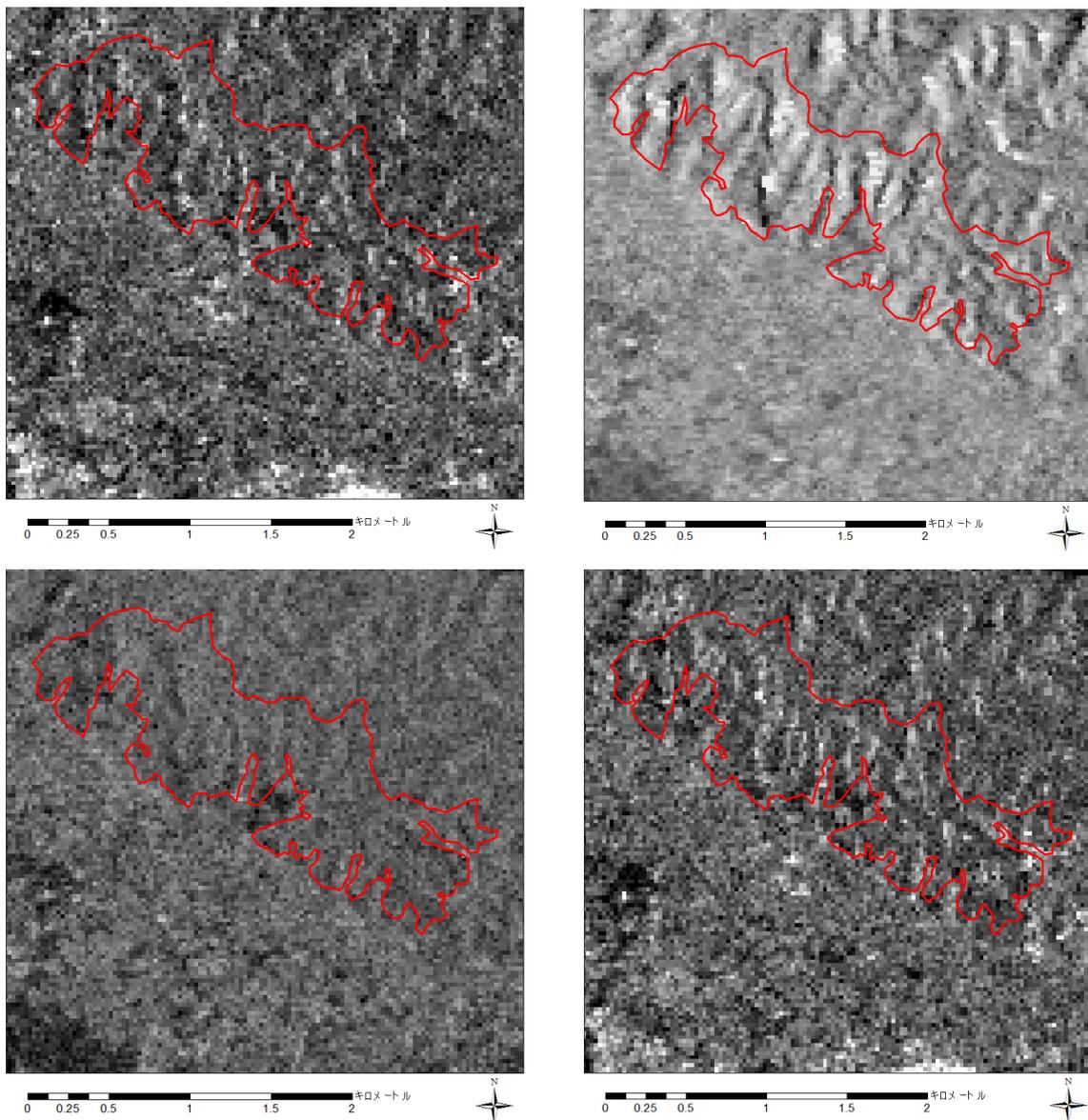
図(1)-12 PALSAR後方散乱係数(σ_0 , dB)の例。HH偏波(上図)とHV偏波(下図)の画像。赤色線は針葉樹対象地での林班界。2偏波モードによる解像度15m画像(2010年9月17日取得のデータ)。



図(1)-13 PALSAR後方散乱係数(σ_0 , dB)の例。HH偏波(左上)、HV偏波(右上)、VH偏波(左下)、VV偏波(右下)の画像。赤色線は針葉樹対象地での林班界。4偏波モードによる解像度25m画像(2011年2月26日取得のデータ)。



図(1)-14 PALSAR後方散乱係数(σ_0 , dB)の例。HH偏波(上図)とHV偏波(下図)の画像。赤色線は広葉樹対象地での林班界。2偏波モードによる解像度15m画像(2010年10月21日取得のデータ)。



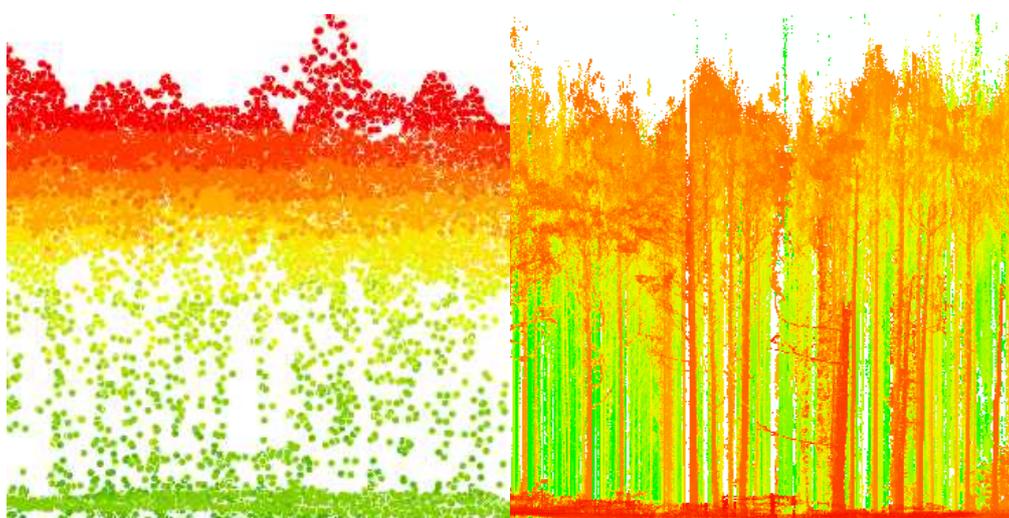
図(1)-15 PALSAR後方散乱係数(σ_0 , dB)の例。HH偏波(左上)、HV偏波(右上)、VH偏波(左下)、VV偏波(右下)の画像。赤色線は広葉樹対象地での林班界。4偏波モードによる解像度25m画像(2011年11月14日取得のデータ)。

5) 地上レーザー

航空機レーザーは上空からのレーザー照射するため、樹冠上部からのレーザー反射が多く、幹部や林内まで計測することができない(図(1)-16)。高密度でデータを取得しても航空機レーザーでは樹木形状を把握するには限界がある。これまでの研究ではモデル式²⁾を構築して、航空機レーザーで計測できない樹木パラメータを推定しなければならなかった。そこで本研究では航空機レーザーと同じ特徴を持つ地上設置型レーザーセンサー(表(1)-9)を用いて樹木を直接計測し、モデル式に頼らない直接計測手法の確立を行った。地上レーザーを用いることで、より詳細な樹木状況を把握することが可能となり(図(1)-17)、樹木形状を自動で正確に直接計測できるようにした。

表(1)-9 地上レーザーセンサー

センサー	Riegl VZ-400
レーザー波長 最大到達距離 (角度)	近赤外域 600 m (360° x 100°)
点密度	125,000 点/秒 (高速モード) 42,000 点/秒 (長距離モード)



図(1)-16 航空機レーザー(左図)と地上レーザー(右図)の違い。航空機レーザーは樹冠上部からの反射が多くなってしない、幹部等を直接計測するには限界があることがわかる。その一方、地上レーザーは幹部まで直接計測できるほど詳細にデータ取得が可能である。



図(1)-17 取得した地上レーザーデータ。

(3) 解析手法

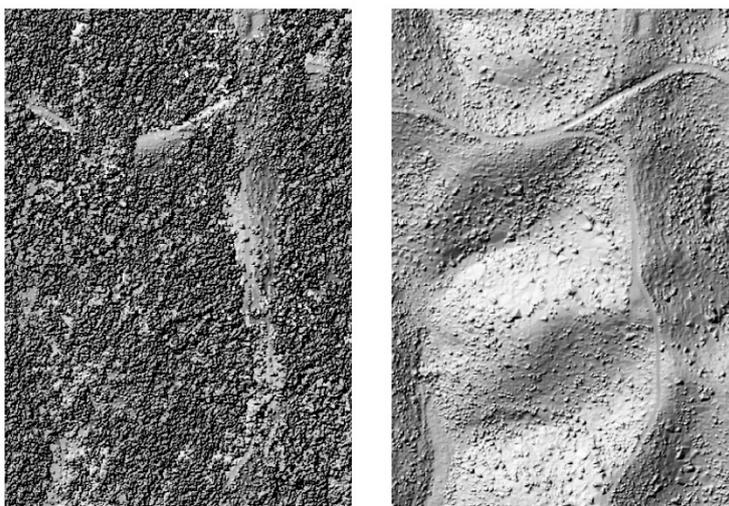
1) 現地調査のデータを用いた解析

現地調査で取得したデータを基に、コンピュータ上で樹木を再現し、航空機レーザーから得られた樹木形状パラメータから再現した樹木との比較を行った。現地調査から再現される樹木形状は楕円体を基本構造とし、樹冠再現の際用いた樹冠幅は、現地調査で計測した東西南北における最大樹冠幅の測定値を適用した。

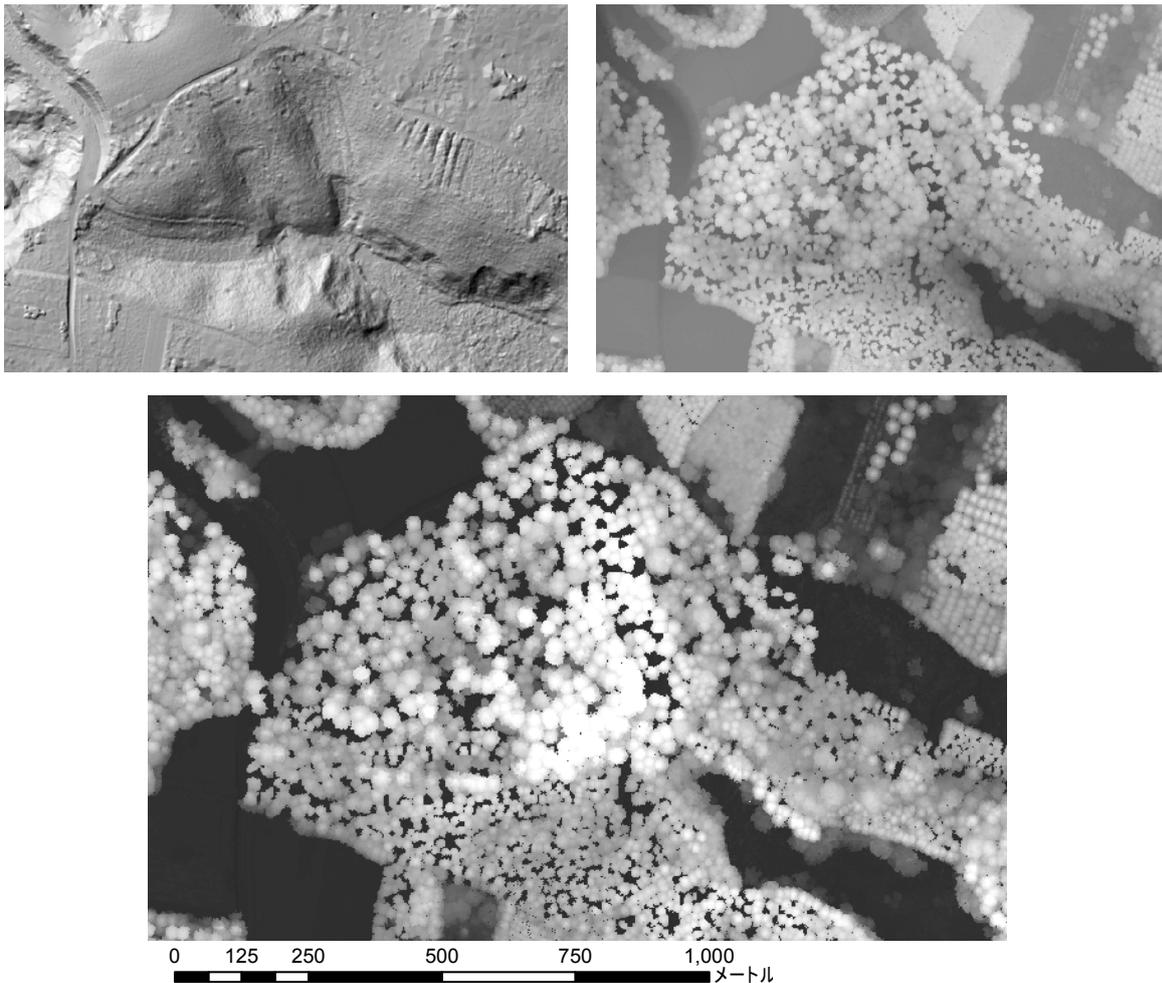
2) 航空機レーザーデータを用いた解析

a) 表面の作成

針葉樹林を対象とした航空機レーザーは、データを取得した中日本航空（株）が航空機レーザーデータ取得後、地上からのレーザー反射のみをフィルター処理にて予め選別した。その分類された地上からのレーザー反射点で解像度50cmの地形図（DTM, Digital Terrain Model）を作成したが、広葉樹林を対象とした航空機レーザーデータは、落葉期（11月）にデータを取得し、また、データ取得高度が高かったため、林床まで到達する点が少なかった。よって、樹木幹部からの反射も地上からの反射と誤分類されたところがあったため、正確なDTMを作成ができなかった（図(1)-18）。そのため、マルチグリッド³⁾による空間フィルターを用いることで、レーザーの点を再分類し、地上からのレーザー反射のみを再選別し直した。その結果ノイズの低減したスムーズなDTM表面を作成することができた（図(1)-18）。マルチグリッドによる空間フィルターとは、様々なサイズのグリッドを作成し、大きめのグリッド内で高さが最低となる点のみを集め、集められた点からDTMを作成する。作成されたDTMでの高さに近い点を再度集め、よりサイズが小さいグリッドを作成し、集めた点から標高値の最低点を集める。その集められた最低点からDTMを作成し、さらに細かいグリッドで同じ作業を繰り返し、最終的に得られた点からより正確な地形図を作成した。



図(1)-18 マルチグリッドによりノイズを低減したDTM(左図:データ提供時のノイズの多いDTM、右図:マルチグリッドによるノイズ除去後のDTM)。



図(1)-19 作成されたDTM(左上図)、DSM(右上図)、DCM(下図)。DCMは地形の影響なしに樹冠の高さのみのデジタル図であるため、DSMより樹木状況がわかりやすい。

また、50cmのメッシュを作成し、各50cm x 50cmグリッド内における点の最大値を樹冠の頂点とし、表層図 (DSM, Digital Surface Model)を作成した。表層図 (DSM)と地形図 (DTM)の差分から樹冠高図 (DCM, Digital Canopy Model)を求めた (図(1)-19)。

b) DCMから樹木位置と樹高計測

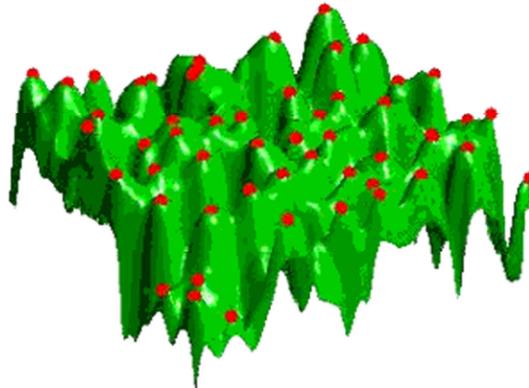
作成されたDCMから凹凸を自動判別するアルゴリズムを下記の式を用いて作成した。

$$f_{xy}^2 - f_{xx}f_{yy} < 0; f_{xx}, f_{yy} < 0$$

上記式はテイラー展開を応用して凸部を判別できるようにしたもの⁴⁾で、レーザーから作成されたDCM用にカスタマイズした⁵⁾。DCMの表面で凸部を自動で抽出して樹木位置とし、その場所のDCM値を樹高とした。

従来のバイオマス算出方法は、樹高と胸高直径から材積式に値を代入して、幹材積を推定している¹⁾。航空機レーザーデータを用いれば、樹高計測は正確に計測可能であるが、材積式を利用するには胸高直径は現地調査で計測する必要がある。本研究では、航空機レーザーデータのみか

ら得られる樹高と立木密度に注目し、樹高と胸高直径ではなく、樹高と立木本数から材積を算出する手法を確立する。その樹木位置と樹高を航空機レーザーデータのみから取得するために、DCM表面の凹凸形状を利用して樹木位置及び樹高計測を行った。DCM表面の凸部ピークを自動で判別し、その凸ピーク部分を樹木位置と定義し、そこでの高さをDCMから自動で読み取り、樹高と定義した（図(1)-20）。航空機レーザーデータから解析した樹木位置と樹高を現地調査で設定した20mx20mプロットの位置で抽出し、各調査地での立木本数と平均樹高を算出した。その平均樹高と立木本数を航空機レーザーからの結果と現地調査からの結果で比較し精度を検証した。



図(1)-20 DCMから自動で凸ピークを抽出した結果（DCMを緑色表面で表示し、樹木位置を自動判別した結果を赤い点で表示している）。

c) ラッピング法

異なる2時期で取得した航空機レーザーを用いてラッピング法⁶⁾を適用し、詳細な樹木形状把握を行った。単木をラッピングしたあと、立木単位での樹冠体積を算出し、プロット別の樹冠体積合計値を求めた。得られたプロット単位での樹冠体積量をプロット単位での幹材積と比較した。

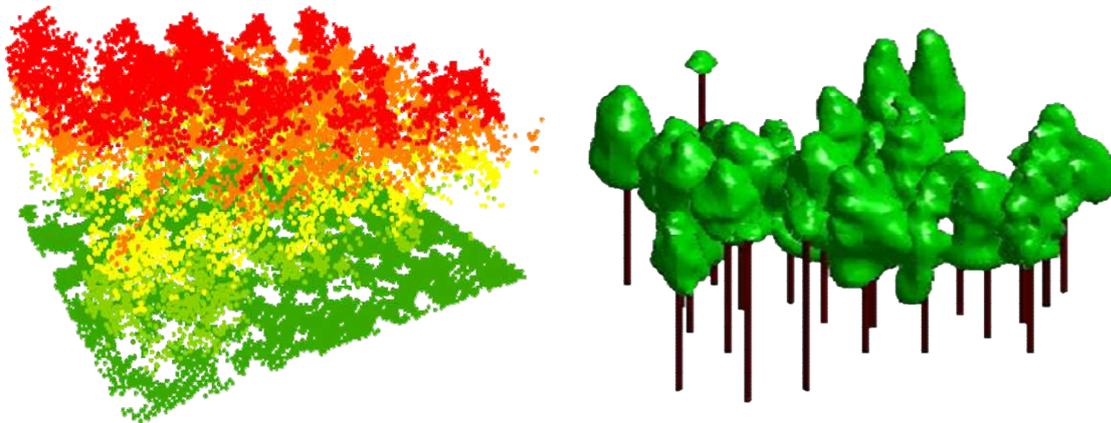
ラッピング法とは、放射基底関数（RBF, Radial Basis Functions）とコンピュータグラフィックの手法である等平面抽出法（Isosurface）を適用して3次元表面を再現する手法である。3次元空間上に点在する点群に対してDCMを作成し、DCMから画像処理フィルタリングのひとつであるモルフロジー演算（Watershed法）を用いて単木単位での樹冠範囲を自動で抽出し、抽出された樹冠内部での点を切り出したものに、ラッピング法で3次元表面を再現する手法である⁶⁾。また作成された表面に発散定理（Divergence Theorem）を適用することで、体積を自動で正確に算出することが可能である（図(1)-21）。

d) 現地調査データを基に幹材積モデル作成

森林域のバイオマス量とは、幹材積と言い換えることができる。バイオマス量は、国内の環境政策であるJ-VERのスキームを基に以下の式から求めることができる。

$$(\text{バイオマス量}) = (\text{幹材積}) \times (\text{樹種別密度係数}) \times (\text{枝葉拡大係数}) \times (\text{根拡大係数})$$

幹材積以外はすべて定数であるため、測定データを取得し、変数として扱えるのは幹材積だけである。そのため本研究では、「バイオマス量＝幹材積」と定義する。調査したプロットで、測定



図(1)-21 ラッピング例。

した樹高、胸高直径を千葉県地域の幹材積式¹⁾に当てはめ、樹木単位の幹材積を求め、プロット別に合算した。プロットでの幹材積を目的変数とし、各プロットの立木本数、平均樹高を説明変数として幹材積の推定値を算出するモデル式を作成した。

$$SV = a \times H + b \times N + c$$

SVは幹材積、Hは平均樹高、Nは立木本数、a, b, cは係数。

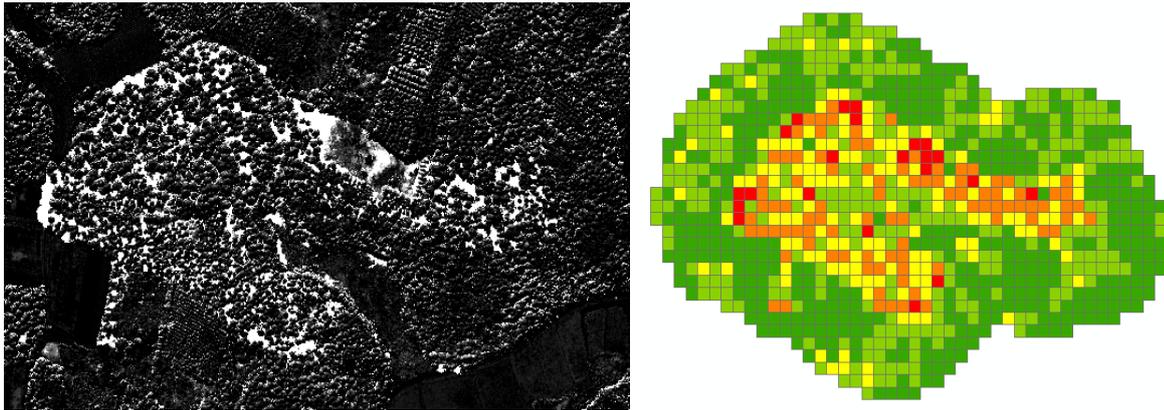
上記式により、樹高と立木本数（立木密度）がわかれば、幹材積（バイオマス量）を推定することが可能となった。よって、HやNの変数に航空機レーザーで判別可能な樹高や立木本数を入力することで、バイオマス量を広域でマッピングすることが可能である。

e) 間伐割合の算出

2時期のDCMデータの差分から、バイオマス変化した森林域を航空機レーザーから把握できたが、その変化量を定量化するために、間伐割合を算出した（図(1)-22）。対象地全域でPALSARのFBDモードの15m解像度とPLRモードの25m解像度の2種類のグリッドを派生させ、間伐割合の違いをPALSARデータの解像度に合わせた。間伐前後のDCMの差分（高さの違い）が大きい場所を「間伐の場所」とし、面積を算出した。変化のあった場所の面積をグリッド1つの面積で割ったものを間伐割合とした。

PALSAR画像の幾何・地形補正をMapReady(Alaska Satellite Facility, ver 2.3, 2010)によって行った。地形補正の際に用いた広域の地形図（DEM, Digital Elevation Model）は、国土地理院基盤地図情報数値標高モデルより10mメッシュデータを用いた。

幾何・地形補正後のPALSARデータの後方散乱係数（ σ_0 , dB）も算出し、後方散乱の反射特性を航空機レーザーデータから得られた詳細な結果と比較した。また、間伐割合と衛星レーダーによる間伐前後での後方散乱係数の変化を把握し、比較を行った。

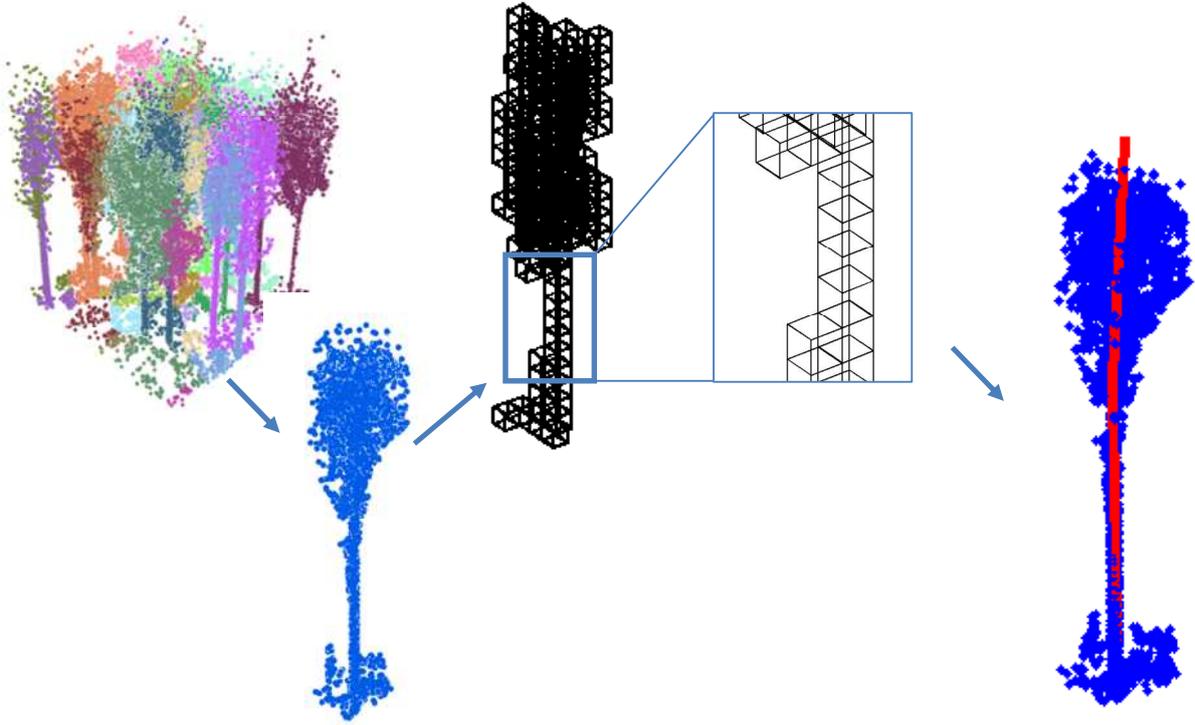


図(1)-22 間伐域における間伐割合(左図:2時期からの差分DCM、白色は間伐があった場所、右図:グリッドで表示した間伐割合、緑-黄-赤色の順で間伐割合が高くなっている)。

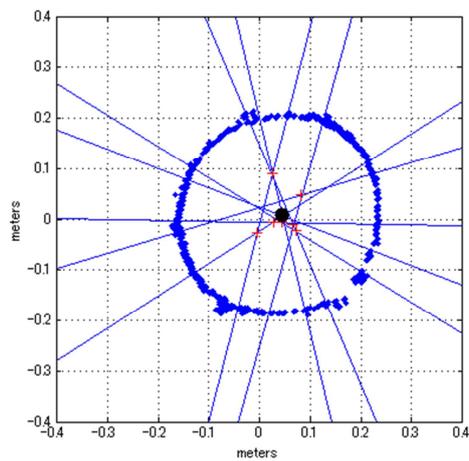
取得した地上レーザーデータ全体の点群から単木単位で点群を抽出した。その単木単位の点群から樹木幹部を自動判別し(図(1)-23)、幹体積(材積)を自動で算出した。幹体積は、50 cm間隔で高さ別に幹部レーザーデータを輪切りにし、輪切りにしたデータから幹直径を自動で算出した(図(1)-24)。その算出した面積を0.5 cm間隔で合算することで樹木1本の幹体積とした。本研究期間中、開発した手法を特許出願することができた(特願2011-227165 三次元測定対象物の形態調査方法)。

地上レーザーから得られた点群は、地表面からのレーザー反射点を予め分類していない。そのためマルチグリッド法³⁾を適用し、地表面からの反射点のみを分類することができた。その点からDTMを作成し、作成されたDTMを利用してDCMを作成した。Watershed法を適用し、単木単位での樹冠範囲を自動で判別し、点群を抽出した。抽出された点群に対して、Voxel法⁷⁾を適用して、幹構造を単純化し、単純化された樹木構造から自動経路探索法(Depth First Algorithm)⁸⁾を用いて幹の位置を把握した。把握された幹部の点群を抽出すると様々な高さで点を抽出することが可能となった。

また、抽出した幹部分のレーザーデータから、幹直径を自動で計測するアルゴリズムを作成した。各高さで輪切りにした幹の点群を、一定の角度で区切り、区切られた場所の点から法線ベクトルを作成し、その交点を幹の中心とした。得られた幹の中心からの距離を幹の半径として、幹直径を推定した。これら一連の解析手法を上記特許出願済である。



図(1)-23 地上レーザーの解析の流れ（左から、レーザーデータを単木単位で分類し、分類された点群にVoxel法を適用し、その後最短経路を自動散策法によって探索した結果を表示している）。



図(1)-24 法線ベクトルを用いた幹中心部の自動判別と幹直径計測。

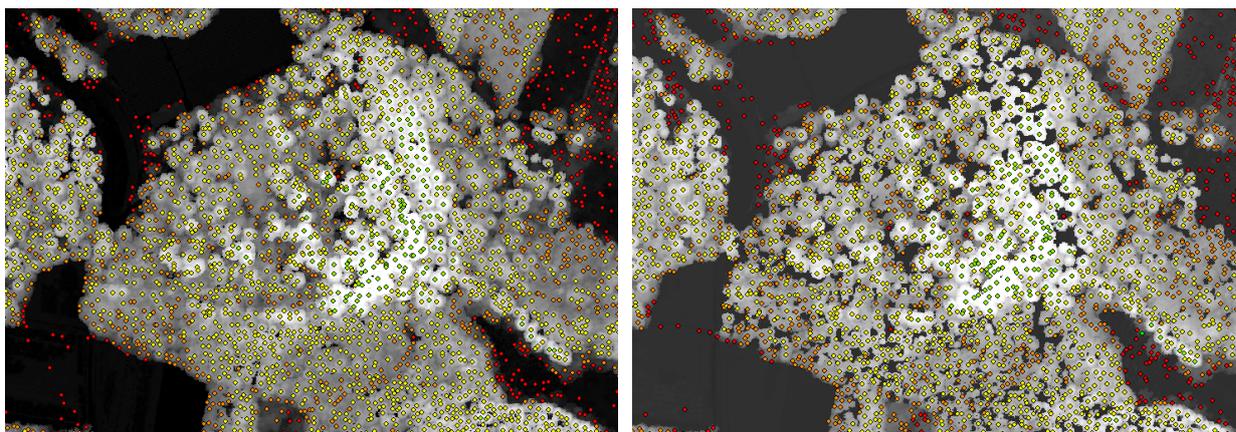
4. 結果及び考察

結果と考察をレーザーによる結果を基に衛星レーダーによる結果と比較する手順で行う。1) 現地調査のデータと航空機レーザーから解析した結果を比較し、航空機レーザーの精度の検証を行い、2) 航空機レーザーデータからの結果と衛星レーダー（PALSARデータ）からの結果と比較し、レーダーデータを解析する上での問題点を明らかにし、さらに3) 航空機レーザーでは不足なデータを補うために地上レーザーを用い、その解析結果を現地調査のデータとも比較した。

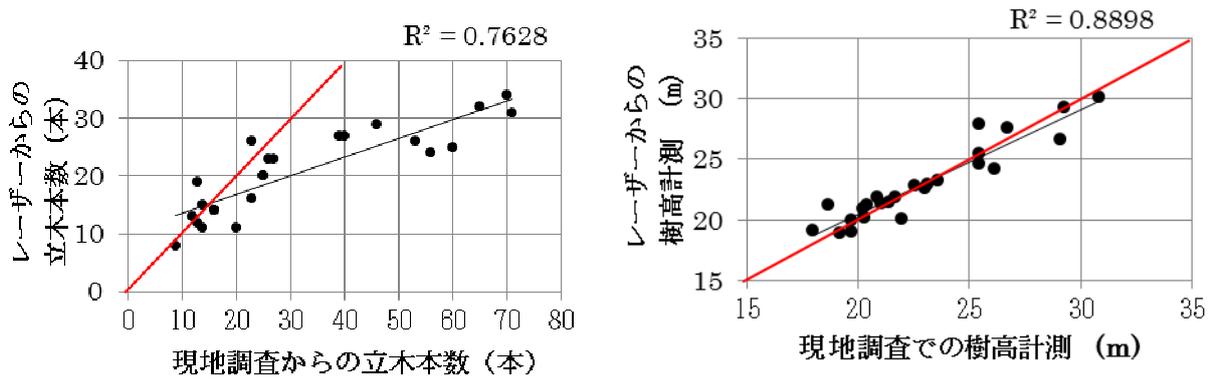
(1) 航空機レーザーからの結果を現地調査によって検証

航空機レーザーデータからの解析結果と現地調査で取得したデータとを比較し、航空機レーザーデータの解析結果を検証した。針葉樹林対象地である千葉県山武市の結果（図(1)-25, -26）と落葉広葉樹対象地である野山北・六道山公園（図(1)-27, 28）での結果を検証した。図(1)-26より、針葉樹では樹高計測が1対1対応線に近く、相関係数も高いため、樹高は航空機レーザーで正確に計測可能であることがわかる。航空機レーザーで判別できる立木密度は過小評価されるが、相関関係は高かった。その理由は、樹木が密になるとDCM上でアルゴリズムが凸部ピークを自動判読しにくくなるためである。

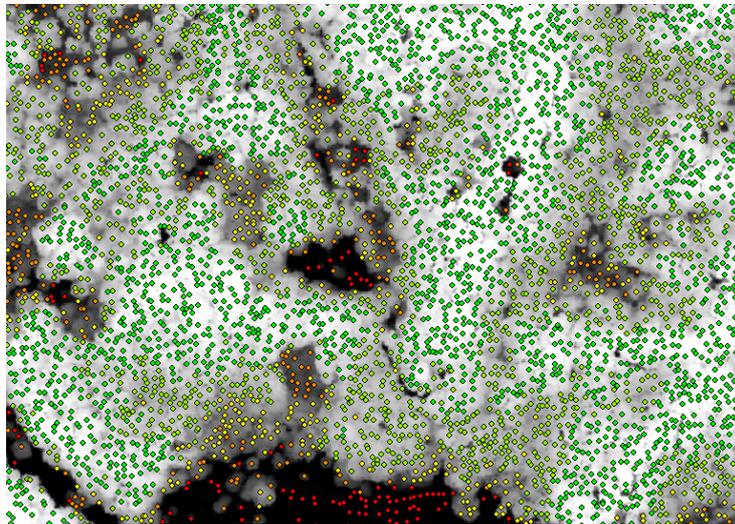
その一方で図(1)-28から、落葉広葉樹では針葉樹と比較して樹高計測を過大評価してしまい、立木密度では相関係数が低くなることがわかった。相関関係が低くなった理由として、7～8月に行った現地調査と11月に取得した航空機レーザーデータとのデータ取得時期が違うため季節による樹高の違い（落葉の影響等）があり、広葉樹は幹が曲がるため樹木根元と樹高計測箇所（梢端）である樹冠頂点とで場所が異なるためである。レーザーによる樹高計測は、DCMのピーク（樹冠頂点）を判読し、その樹冠頂点の直下にある地表標高値を参照し、樹高計測している。よって本来の標高値である幹元とは参照する場所が異なってしまう。本研究対象地のコナラ林は、斜面に対して斜面下方に垂れる様に幹が伸びているため、樹高評価が全体的に過大評価となってしまった。針葉樹では幹が真直である個体が多く、樹冠最高点と幹元部の位置がほぼ一緒となるため、このような樹高誤差を生じなかった。



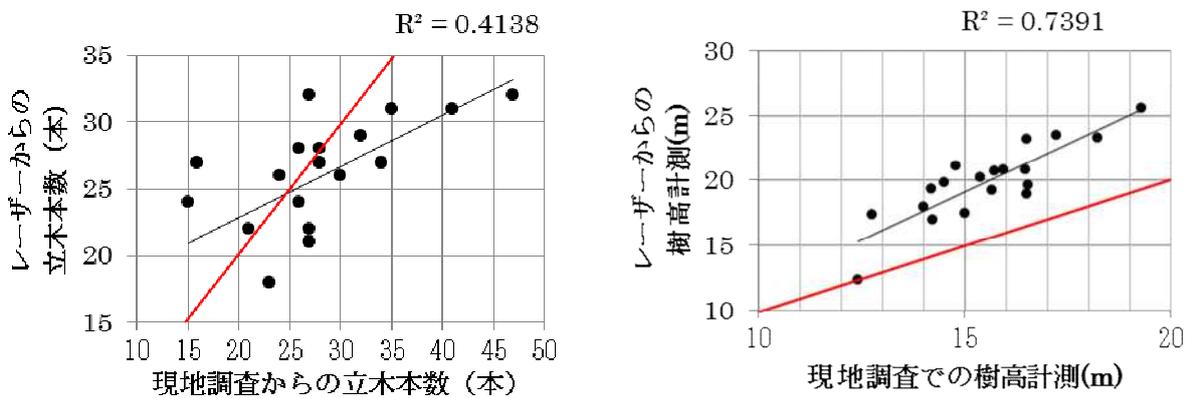
図(1)-25 DCMの凸部を自動判読するアルゴリズムによって、樹木位置を自動判別した結果（左図：間伐前、右図：間伐後）。



図(1)-26 針葉樹林での解析結果（航空機レーザー⇔現地調査、左図：立木密度、右図：樹高）。



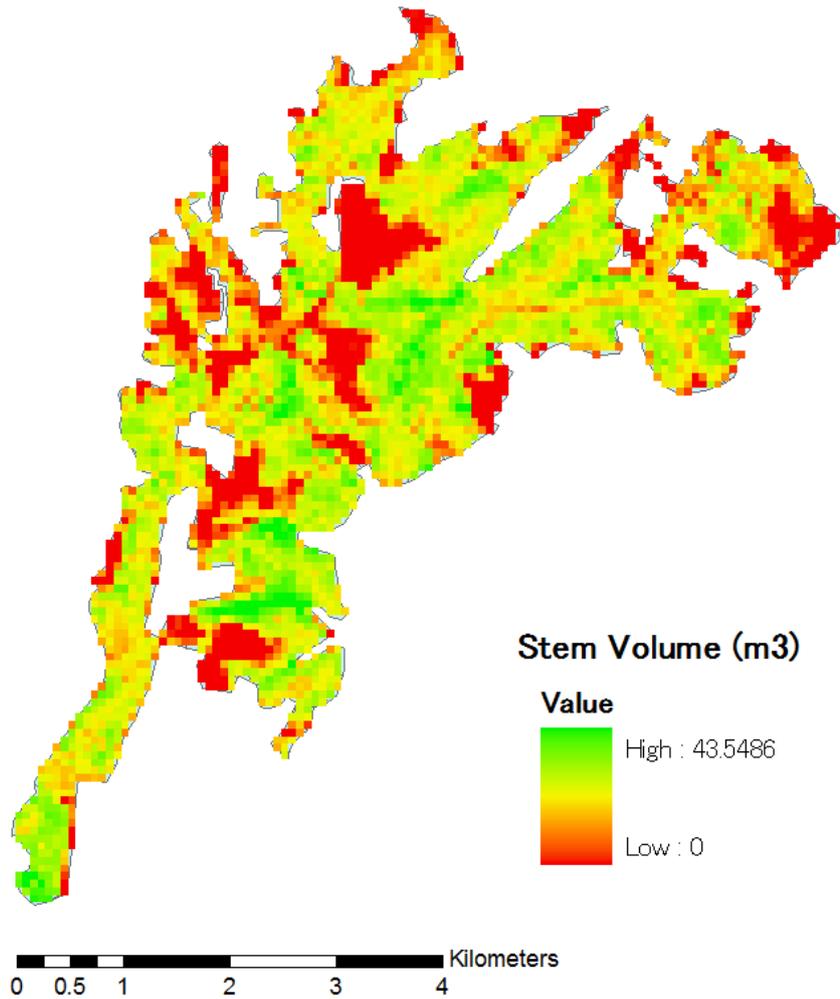
図(1)-27 レーザーデータから作成した落葉樹林での樹木位置図と樹高計測（背景はDCM）。



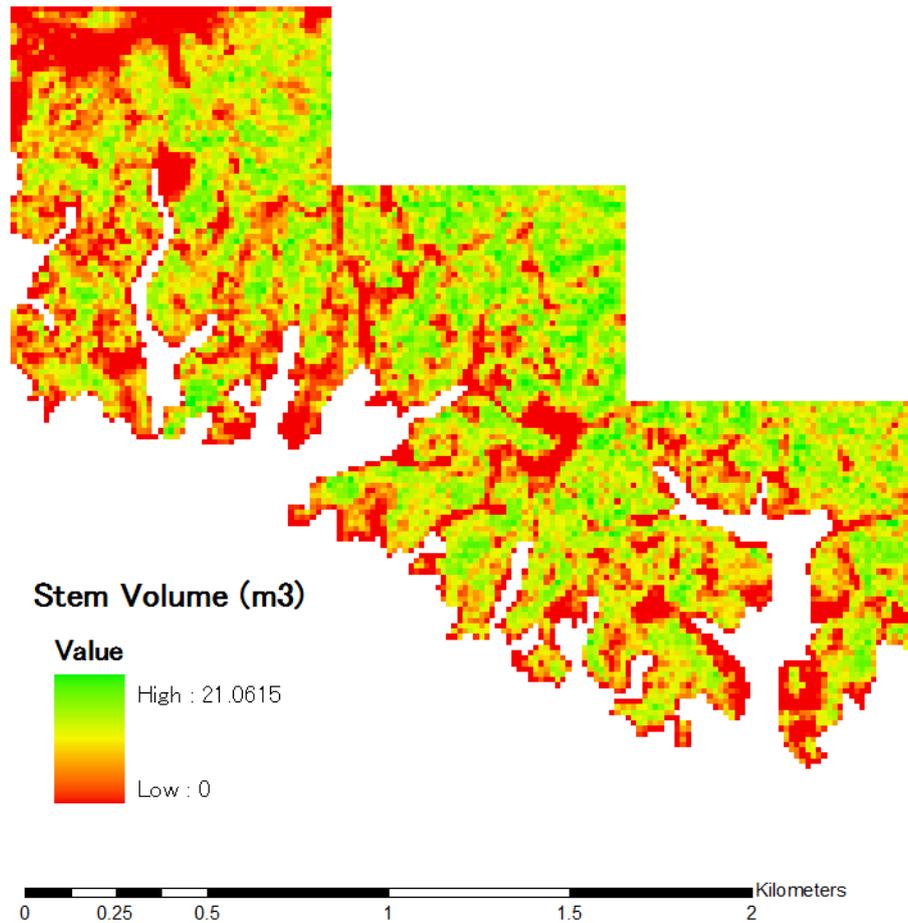
図(1)-28 落葉広葉樹林での解析結果（航空機レーザー⇔現地調査、左図：立木密度、右図：樹高）。

(2) 航空機レーザーデータを用いたバイオマス量算出

樹高と樹木密度を説明変数とする線形モデルを確立することができた。針葉樹林の対象地である千葉県山武市と広葉樹林の対象地である野山北・六道山公園での対象地全域における材積量の地図を航空機レーザーデータから作成することができた(図(1)-29, 30)。これらの結果より現地で胸高直径を計測することなく、航空機レーザーデータのみから得られた樹高と樹木密度で全域での材積量を推定することが可能となった。



図(1)-29 千葉県山武市対象地全域での材積 (Stem Volume) の評価。



図(1)-30 野山北・六道山公園対象地全域での材積評価。

図(1)-29、 図(1)-30のそれぞれの材積評価式は、

千葉県山武市： $SV = 1.87 * H + 0.58 * N - 28.04$

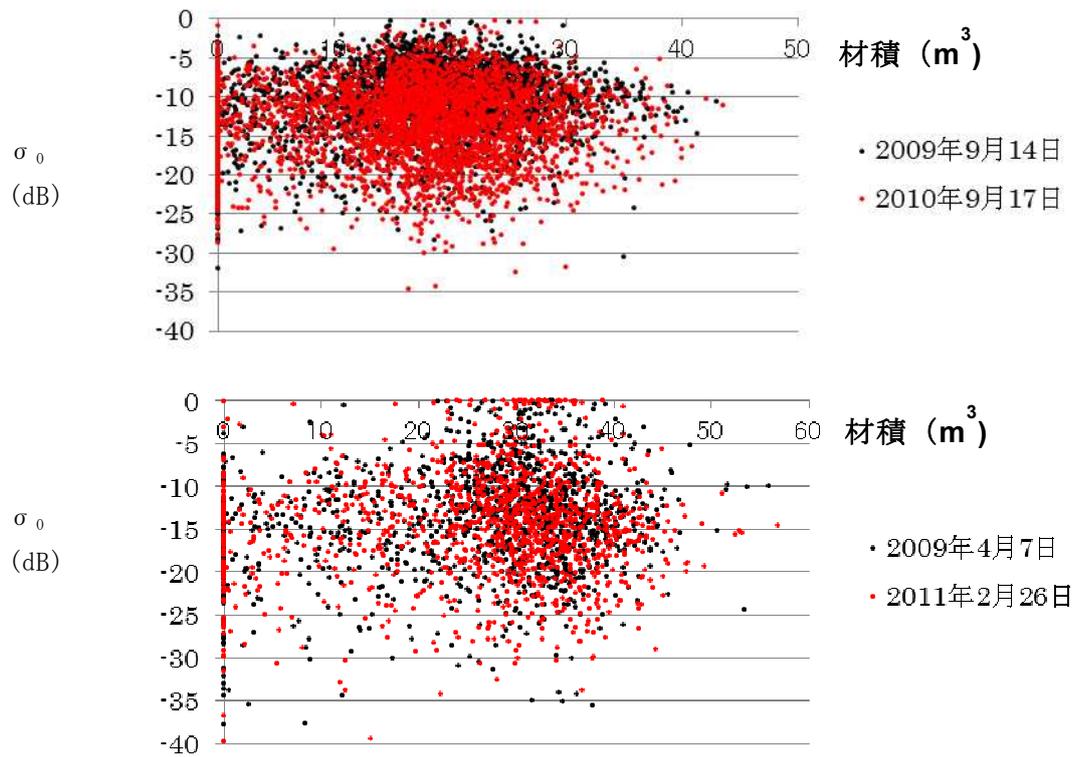
野山北・六道山公園： $SV = 1.13 * H + 0.52 * N - 20.65$

SVは幹材積量を表し、Hは各グリッド内の平均樹高、Nは核グリッド内での立木密度を表す。

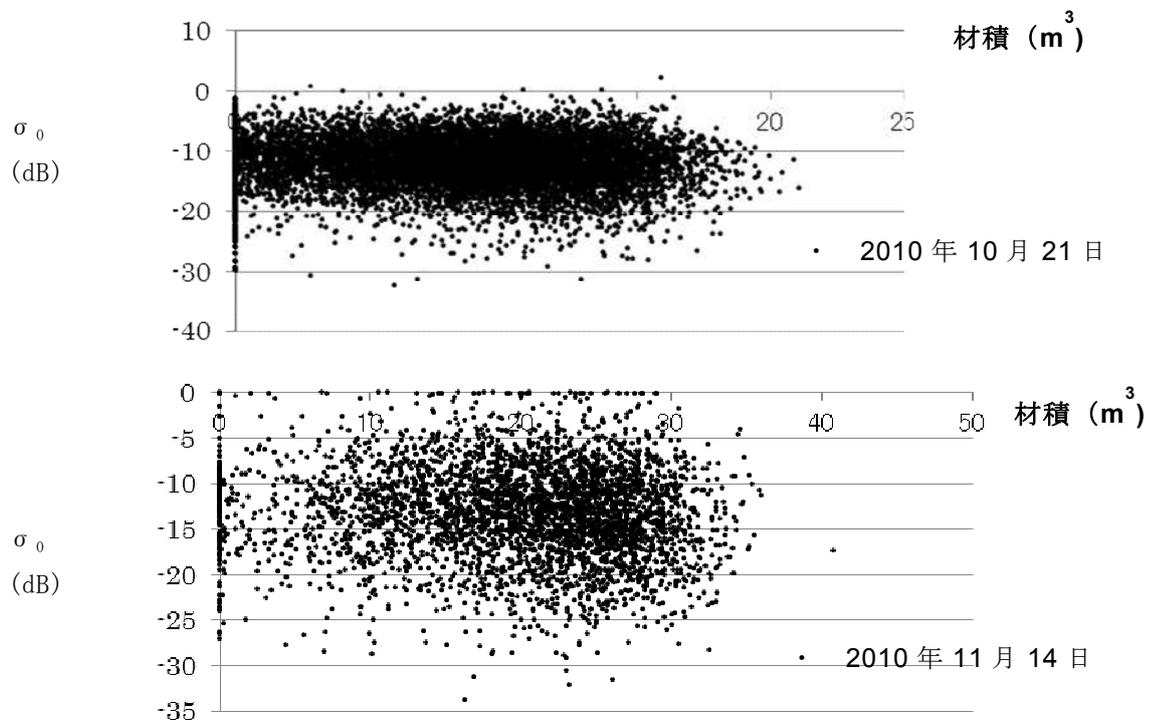
(3) 航空機レーザーデータとPALSARデータとの比較

航空機レーザーによって詳細な地域全体の材積量（バイオマス量）を得ることができたため、得られた結果をPALSAR HV偏波の後方散乱係数（ σ_0 ）と比較した（図(1)-31, 32）。

PALSAR HV偏波の後方散乱係数（ σ_0 ）と材積量とは関係性があり⁹⁾、PALSARのセンサーであるLバンドでは、100 トン/haまでバイオマス量判読が可能であることがこれまでの研究でわかっている^{10)、11)}。しかし、対象地全域の材積量とPALSARの後方散乱係数を比較したところ、明確な関係が見られなかった。図(1)-31と図(1)-32より15mと25mの異なる解像度の結果を比較すると、点の散らばりが、25mの結果では真中に集中するような形となるが、解像度が上がった15mでは、点の散らばりが材積量の大きさに伴って横に散らばるような傾向になることがわかる。よって、解像度



図(1)-31. 千葉県山武市（針葉樹林）での比較結果(上図：解像度15mのFBDモード，下図：解像度25mのPLRモード)。

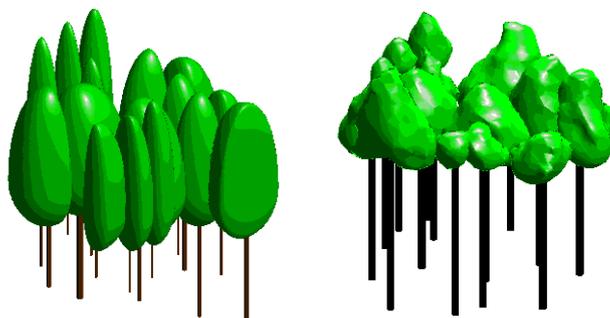


図(1)-32 野山北・六道山公園（広葉樹林）での比較結果(上図：解像度15mのFBDモード，下図：解像度25mのPLRモード)。

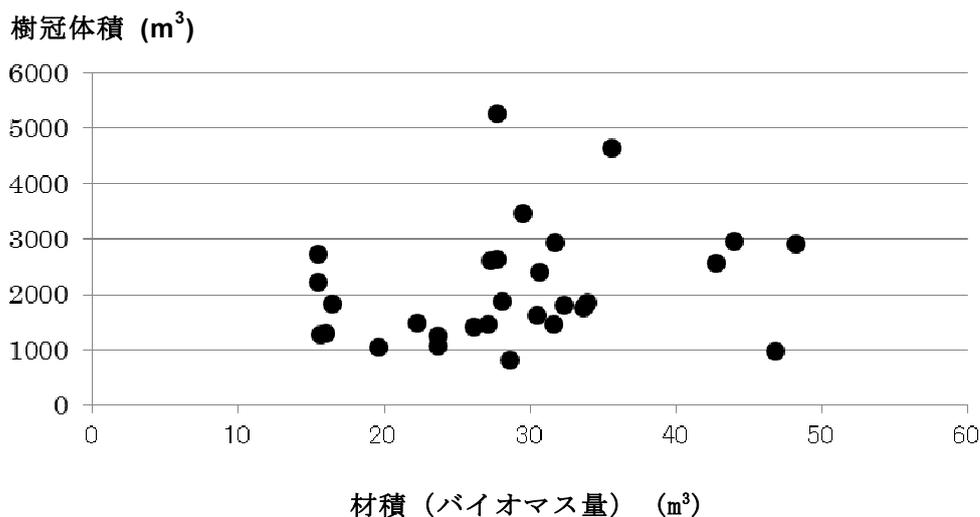
が上げれば、より詳細な材積量変化を把握できることがわかった。

これら材積量とHV偏波の関係が明瞭ではない理由として、後方散乱係数が樹冠量との関係があることに原因がある。樹冠量は材積（幹体積）とはっきりとした関係がない。そのことを明らかにするため、ラッピング法⁶⁾を用いて樹冠体積と材積の関係を解析した（図(1)-33）。ラッピングを用いて、航空機レーザーデータからプロットごとに樹冠体積を算出し、その結果と幹体積を比較したところ、関係性があまり見られなかった（図(1)-34）。

衛星レーダーのデータ取得角度が斜角であり、航空機レーザーからの解析結果は垂直方向（オルソ方向）であるため、2つのデータを比較する際、データを取得した角度の違いが解析結果に大きく影響していた。斜角で取得されたレーダーデータの対象とするエリアは、レーザーの解析結果で対応するセル1つ分を超えた隣接するセルにある森林状況もデータに含んでしまう。よって視点の違いがデータ間の誤差を生んだと思われる。レーダーの照射方向を考慮したレーザーの解析が必要であることがわかった。



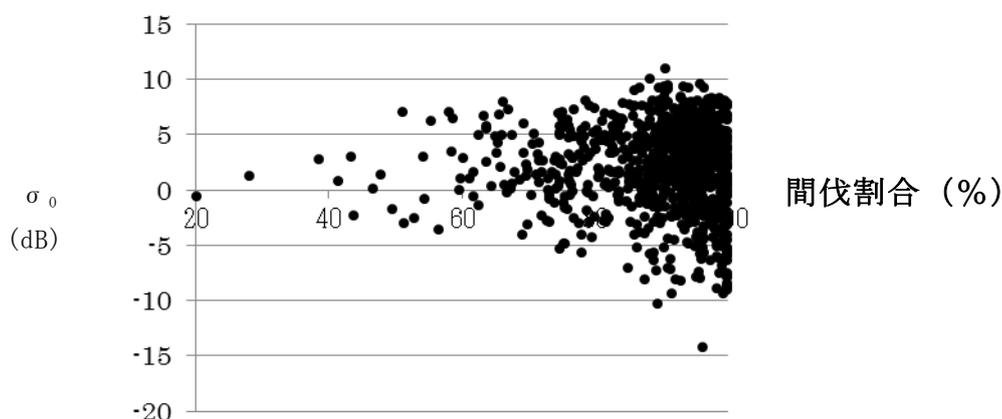
図(1)-33 航空機レーザーデータをラッピングした樹冠形状再現（左図：現地調査データから再現した樹冠形状、右図：航空機レーザーデータから再現した樹冠形状）。



図(1)-34 材積と樹冠体積との関係。

(4) 間伐域でのバイオマス変化量の把握

航空機レーザーで取得した森林整備前後のデータ、2009年（間伐前）と2010年（間伐後）各年からDCMを作成し、その差分を求め、間伐率を算出した。また、同じ時期の衛星レーダーから森林整備前後の2時期のHV偏波の差分（（間伐前のHV偏波）－（間伐後のHV偏波））を求めて、航空機レーザーから得られた詳細な間伐率と衛星レーダーの解析結果を比較した。バイオマスが減少すると、HV偏波の後方散乱係数は上昇すると予想され、実際の結果は間伐割合が大きくなるに従って後方散乱係数が上昇していた（図(1)-35）。図(1)-35の結果から6割以上の間伐が行われた場合は、PALSARによってバイオマス変化量を把握できることがわかる。



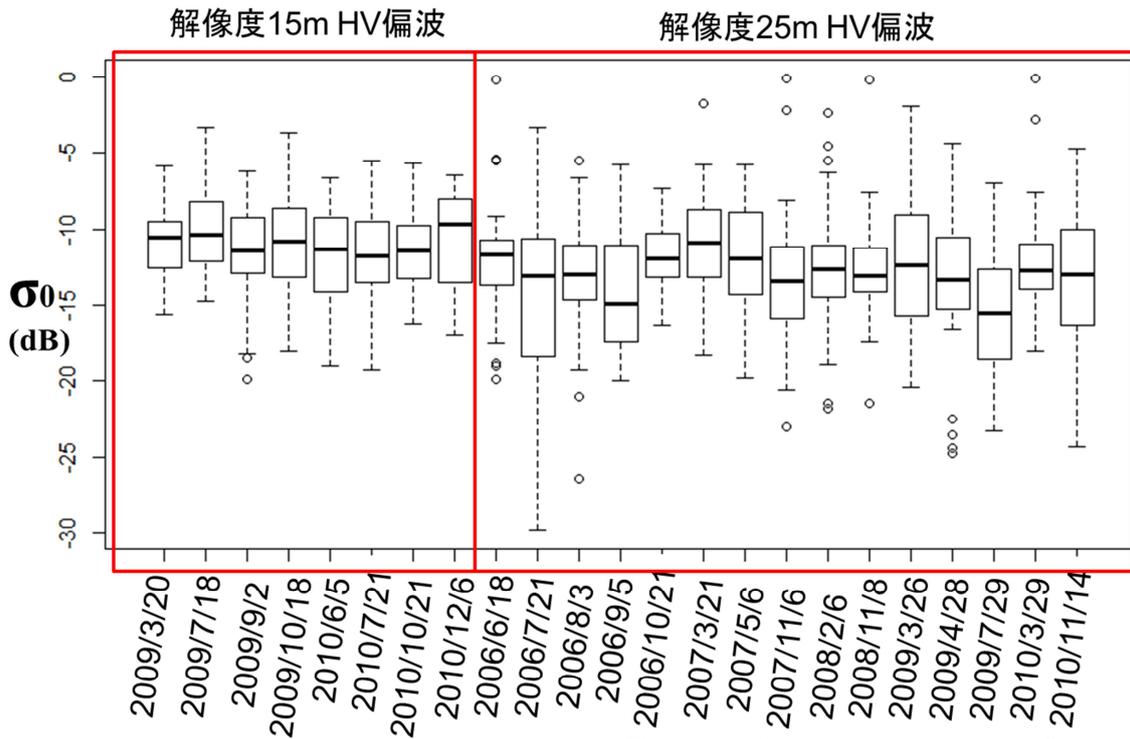
図(1)-35 間伐域での後方散乱係数の変化(X軸：間伐割合, Y軸：間伐前後のデータで後方散乱係数の差分量, 後方散乱係数の間伐による変動量)。

しかし、図(1)-35より間伐率が100%でもHV偏波にあまり変化が見られないところがあり、また減少する（バイオマスが増加）するところもある。この理由としては、レーダーの斜方向でのデータ取得が原因と思われる。間伐域が林縁であれば、林縁からのレーダー反射もデータに含まれる。図(1)-35より間伐域では最大10dBもの違いが生じることがわかった。

(5) 落葉による後方散乱係数の季節的変動

森林整備等の人的影響を把握するためには、落葉等の季節的变化による後方散乱係数の変動も比較し、その違いを明らかにしなければならない。多時期で取得したPALSARデータを用いてその変動を解析した。森林整備が行われていないコナラ林域のみを航空機レーザーデータから把握し、その場所でのPALSARデータを抽出し、経年的に変化を比較したところ、落葉の影響でも値が大きく変動することがわかった。しかしこの変動は、25mから15mへと解像度が上がれば少なくなることがわかった（図(1)-36）。

この変動量が間伐等による変動量（最大で10 dBの変化量）以上にもなっているため、季節的变化と森林整備等の人的攪乱の違いを把握するには、より解像度の高いデータを多時期で用い、レーダーの照射角度を考慮したデータ解析を行う必要があると考えられる。



図(1)-36 落葉による後方散乱係数の変動。

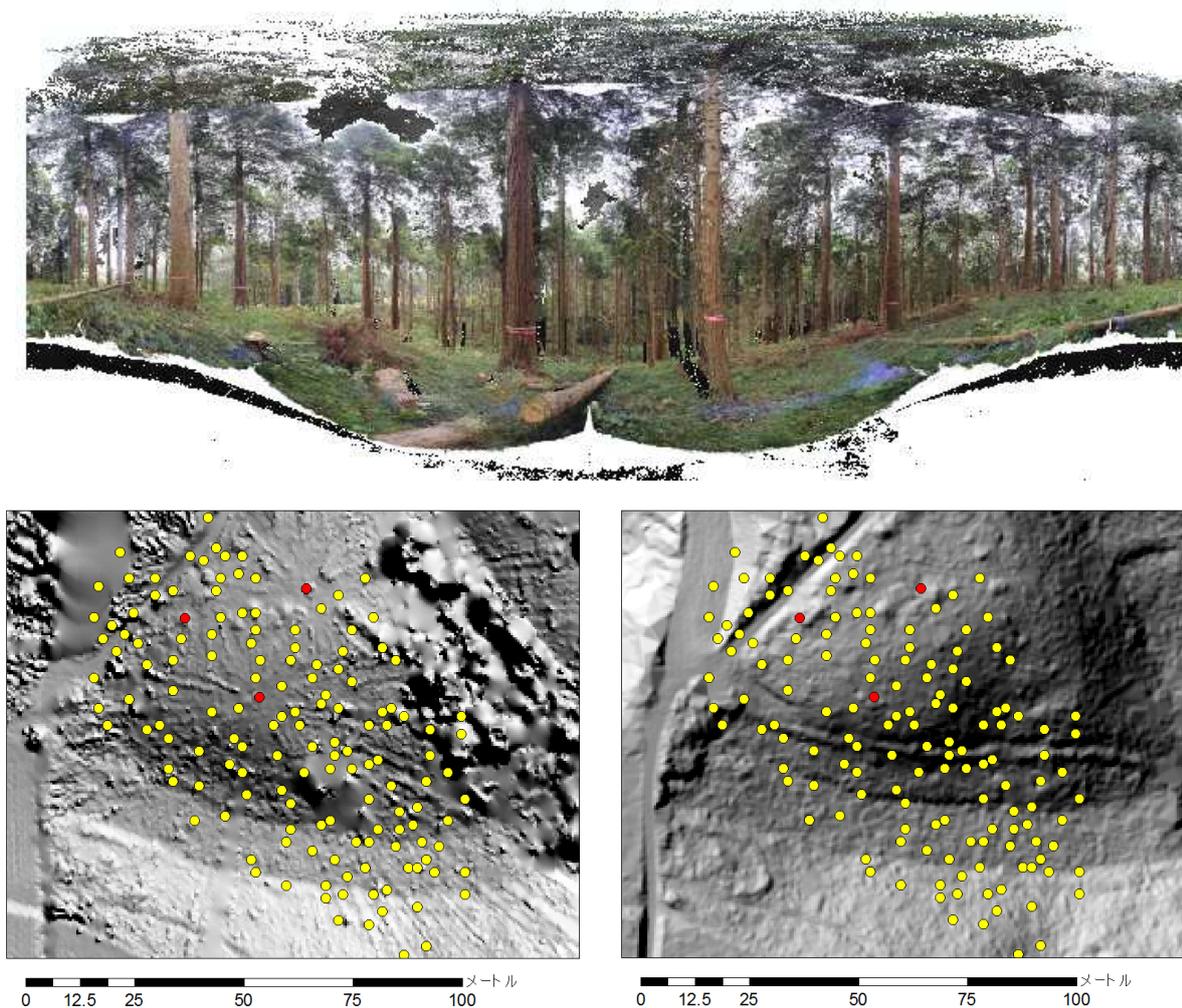
(6) 地上レーザーを用いたバイオマス量把握(現地調査⇄地上レーザー)

本研究では伐倒試験を行い、伐倒による実測結果と、地上レーザーから自動で算出された幹体積(材積)との比較を行った。

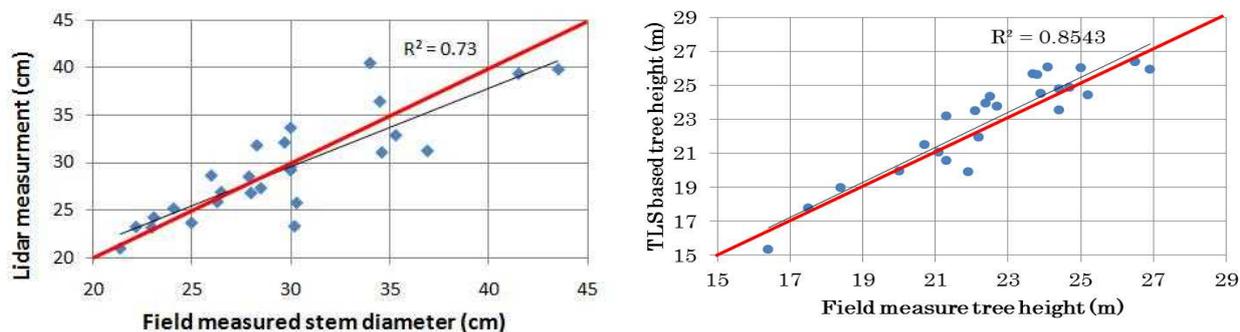


図(1)-37 地上レーザーによる単木当たりの詳細スキャン(右図)と自動で幹部を抽出した結果(左図)。

従来の材積式を用いた材積算出方法では、伐倒試験による実測値と6.8%の相対誤差があったが、本研究で開発された手法を用いると、1.34%の相対誤差で材積算出（材積実測）が可能であることがわかった（図(1)-37）。誤差が従来の手法と比べ、地上レーザーを用いることで大幅に改善できた。よって同じレーザーでも航空機レーザーではなく地上レーザーを用いた実測がグランドトゥールズとして有効な手法であることがわかった。また、下草のない1haのスギ林プロットで、地上レーザーセンサーは50m間隔で設置し、広域のデータを地上レーザーにより取得した。本研究で開発されたアルゴリズムにより、プロット内すべての樹木に対して、その樹木位置（図(1)-38）と胸高直径と樹高を自動で計測した。その結果を現地で計測した胸高直径と樹高との結果と比較した（図(1)-39）。これらの結果より、胸高直径も樹高計測もほぼ1対1対応曲線に近いことがわかる。よって単木単位だけでなく1haという広域なスギ林プロットに対しても正確に胸高直径と樹高が計測可能であることがわかった。図(1)-38より地上レーザーだけでも航空機レーザーで作成された50cm解像度と同質の地形図(DTM)を作成することができた。

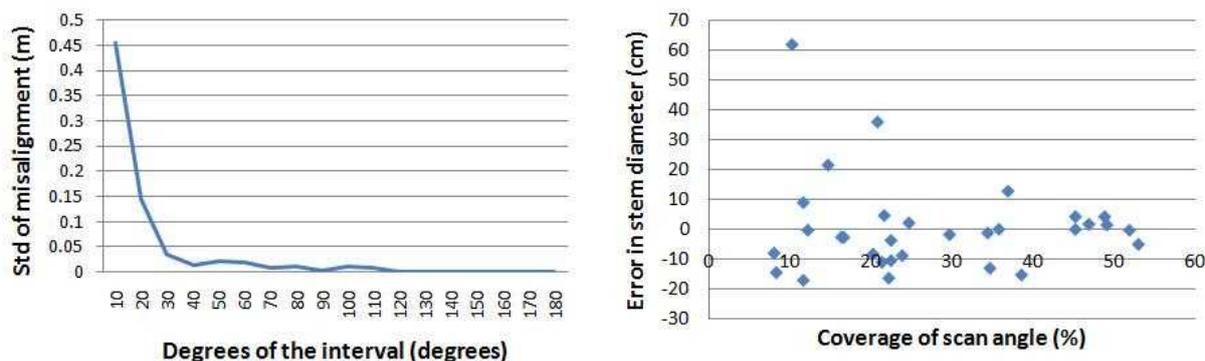


図(1)-38 地上レーザーから作成された対象地の林内を表す360°展開写真（上図）と自動判別された樹木位置図（鳥瞰図、左図背景は地上レーザーによって作成されたDTMであり、右図背景は航空機レーザーによって作成されたDTM。赤丸点はレーザーセンサーの位置、黄丸点は樹木位置）。



図(1)-39 地上レーザーによる胸高直径計測（左図）と樹高計測（右図）の結果を現地計測結果と比較・検証した結果（赤線は1対1対応線）。

幹直径計測では、胸高（1.3m）で幹周を把握できる十分な点データが必要である。幹周を表すレーザーデータが欠損しても、幹直径が把握できるか検討した（図(1)-40）。



図(1)-40 幹直径計測の考察。法線ベクトルを決める角度について（左図）と自動計測に必要な幹周データの割合（%）（右図）。

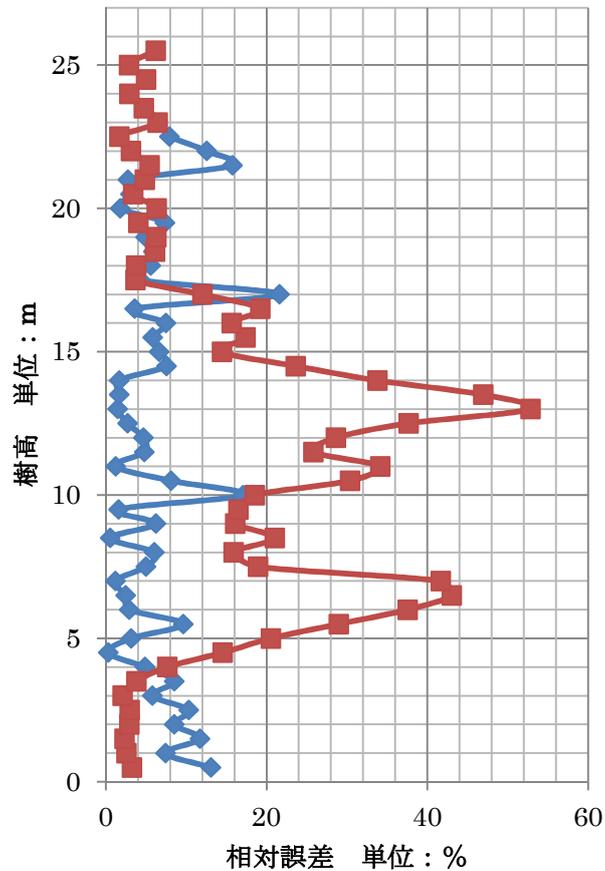
図(1)-40左図では、10度ずつ幹周データを欠損させ、最低何度あれば幹中心を得るための法線ベクトルが安定するか検討した。幹周が40度以上あれば法線ベクトルが幹中心を通ることがわかった。また、図(1)-40右図では、幹周データが全体の30%以上（約100度以上）あれば、5cm以内の誤差で幹直径が計測可能であることがわかった。

さらに、地上レーザーの詳細幹形状把握における実用性を検討するために複雑な幹形状でも対応可能であることを実証実験した。本研究対象地の山武市日向の森では非赤枯性溝腐病という病気が蔓延している。溝腐病とは、チャナタケモドキ (*Phellinus punctatus*) というキノコの一様である病原菌が、枯れ枝等から侵入して、3~5年の潜伏期間を経た後、上下に菌糸を広げて形成層や辺材部を腐らせてしまう。その結果、被害部分の肥大成長が停止して溝が形成され、幹部にねじれが起き、最終的には枯れてしまう。病害度に対応した複雑な幹形状の関係を図(1)-41に示す。



図(1)-41 病害判定と幹形状の関係（被害判定：A 健全木、B 多少溝が生じている木、C くぼみが深くなっている木、D ねじれをおこしている に分類）。

これまでの材積を評価する手法では、現地調査で計測した胸高直径と樹高から材積式を用いて単木単位での材積を推定できた。しかし、材積式を主に作成していた1950～1960年代では予期できなかった病害等が現在は生じており、その病害により幹形状が劇的に変化することもあり、それらが材積式からの評価との誤差を引き起こしている。その違いを明らかにするために、単木で取得した地上レーザーデータから高さ別に断面積を算出し、同じ対象木を伐倒調査し、実測した断面積との相対誤差を把握した（図(1)-42）。本研究では特に被害のひどい、病害度D判定の樹木を用い、伐倒調査した際に胸高直径テープを幹に巻いて計測した場合と、レーザーによって計測した場合とを比較した。その結果、レーザーから計測した場合が伐倒で胸高直径テープを用いた場合に比べて相対誤差が低く、地上レーザーによる詳細計測が実用的であることが実証できた。特に対象木は高さ5m～15mでねじれがひどく、その病害部の複雑な形状をレーザーの方がより正確に定量化できることがわかった。レーザーによる計測で相対誤差が大きい高さ（10m, 17m, 21.5m）は、枝等により幹部が隠れ、幹部データが欠損したところがあり、欠損したデータにより正確に把握できなかった場所である。本実証実験から、伐倒する必要なく、地上レーザーによって非破壊で幹形状を詳細に定量化できた。



図(1)-42 伐倒調査による幹直径の実測値と高さ別相対誤差、青色線はレーザーからの幹直径計測との相対誤差、赤色線は伐倒調査の際直径テープを用いた計測との相対誤差。

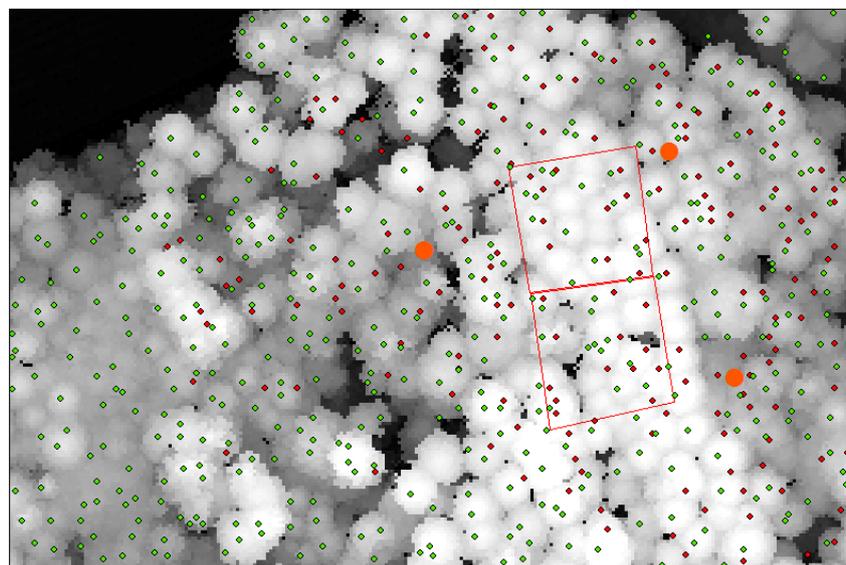
本研究では、地上レーザーによって単木で材積を算出し、1haもの広域調査でも地上レーザーを用いた解析を行った。さらには、病害で複雑な形状となる幹形状においてもレーザーデータを用い、その実用性を検証した。本研究結果により、地上レーザーでも広域調査が可能であり、詳細な樹冠形状や樹高計測ができる。さらに航空機レーザーよりも詳細な林内状況が把握できるため、衛星データのグランドトゥルースとしての地上レーザーがより利用されると思われる。

(7) 航空機レーザーと地上レーザーとの違い

地上レーザーと現地調査データの違いを明らかにすることができたが、航空機でデータ取得した同じ場所で地上レーザーデータも取得し、判別できる樹木本数の違いを明らかにした。データを取得した場所を図(1)-43に示す。現地調査、地上レーザー、航空機レーザーによるそれぞれの樹木本数の結果を比較した(表(1)-10)。

表(1)-10 地上レーザーと航空機レーザーでの樹木自動判読率の違い

センサー	地上レーザー	航空機レーザー
自動樹木判読率	100% (25本/25本)	112% (28本/25本)



0 12.5 25 50 75 100メートル

図(1)-43 航空機レーザーと地上レーザーを取得した地域（緑点は航空機レーザーから自動判読した樹木位置、赤点は地上レーザーから自動判読した樹木位置、オレンジ色は地上レーザーセンサー設置箇所、赤枠は現地調査した場所）。

表(1)-10より、間伐して疎林となっている対象地であったが、航空機レーザーは現地調査での樹木本数と比較して、過大評価してしまい、地上レーザーはすべての樹木を把握することができた。この結果より、航空機レーザーからの解析は、樹冠形状から樹木位置を把握しているため、同じ幹から途中二股になっている木があると1つの幹から2つの樹冠凸部が出来てしまい、判読本数を過大評価してしまう。一方で地上レーザーは、幹を直接計測できるため、注意してセンサーを設置すれば、すべての樹木位置を自動で把握できる。

航空機レーザーと地上レーザーの違いとしては、航空機レーザーではアクセスが悪い地域を上空からデータ取得することができ、地上レーザーは現地に行かなければならないというデータ取得の仕方に違いがある。広域でデータを取得するのであれば、航空機レーザーが優れている一方で、計測には多額の費用がかかる。地上レーザーは費用が航空機レーザーよりも1/10以下で、また1箇所から陰になる場所を、他の箇所に設置してデータを補完できれば、地上レーザーの方が衛星レーザー等のグラントゥルースとして確実なデータが提供できる。今後は、様々な樹種に対する解析結果の信頼性を向上させるとともに、最適な地上レーザー設置場所等を検討する必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

初期の頃の航空機レーザーを用いた解析技術は、単木判読ができるほどの点密度がなかったため、点の3次元分布を用いたモデル式による材積推定を行っていた²⁾。その後樹高判別や樹木位置の直接計測が可能となり¹²⁾、レーザー技術の発展により詳細な形状を点密度の高いデータで取得可能となった。航空機レーザーは炭素蓄積量を最も正確に把握できる手法であり¹³⁾、森林を3次元で計測可能である。しかし、レーザーセンサー自体は世界中どこでも利用可能ではなく、航空機レーザーが取得できる場所には限りがある。天候に関係なく世界中どこでもデータを取得できる衛星レーダーの方がより汎用性が高い。衛星レーダーは照射される波長によって、把握できる情報が異なる。これまでの研究では、航空機GeoSARのX-bandとL-bandの差分を用いて樹冠高を測定し、航空機レーザーより精度良い測定ができた研究¹⁴⁾、航空機InSARを用いて熱帯林のバイオマス計測を行った研究¹⁵⁾等があるが、未だ精度が不確実である。日本の衛星ALOSが搭載しているPALSARは、L-bandを使用しているため、樹冠内部からの体積散乱を得る特徴がある。体積散乱は樹冠内部からのレーダー反射を受け止めるため、バイオマス量測定に向いている⁹⁾。しかし、L-bandは、バイオマス量40トン/ha¹¹⁾で飽和値に達し、針葉樹一斉林に対しては100トン/ha¹⁰⁾が飽和すると言われている。偏波に関しては、HV偏波が最もバイオマス量計測に向いており¹⁰⁾、衛星PALSARデータを多時期で用いて皆伐域を判別した研究事例もある¹⁶⁾。しかし、より詳細なバイオマス変化量（立木密度の変化）がどのように後方散乱係数に影響しているかわかっていない。本研究で間伐等の森林整備を行い、そのバイオマス変化量を航空機レーザーデータで把握し、航空機レーザーデータ結果をグラントゥールスとして、衛星PALSARデータの後方散乱係数の変化を詳細に把握した。航空機レーザーにより様々な森林構造が把握でき、その構造に対し体積散乱が衛星レーダーの反射特性に与える影響を詳細な解析ができるレーザーデータを参照することでできるようになった。

ボトムアップアプローチとして衛星レーダーデータのためにレーザーデータをグラントゥールスとして利用する可能性を検討した。航空機レーザーは広域を3次元でデータ取得できるが、本研究で用いた最新の高精度センサーを用いて高密度でデータを取得しても樹冠上部からの反射が多く、林内や幹部の森林状況を把握するには限界があった。また航空機レーザーでは現地調査から得られたデータ（限られたサンプルデータ）からのバイオマス量（材積）を広域で外挿する際、モデル式を構築しなければならない。モデル式を作成するには、十分な現地調査サンプルが必要となるため、現場作業を効率化できない。また、現地での計測には計測エラー等が含まれることがあるため得られるデータの客観性に問題がある。

その一方で、地上レーザーは直接計測可能であるため、モデル式に頼らずに取得したデータをそのまま材積算出に使用できる。また、近年のセンサーは半径600 mまでデータ取得ができるため、国内での小規模林地に対して航空機レーザーよりも安価にデータ取得ができ、国外ではREDD等のMRV (Measuring, Reporting, and Verification) において検証用データとして、途上国の現地作業員の計測誤差なしに、客観的な検証データとして提供できる有効な手法であることがわかった。

レーザーデータをグラントゥールスとして使用するには、衛星レーダーの照射角度を考慮した解析を行い、結果を照合しなければ正確に比較検討ができない。これまでの衛星レーダーを用いた研究では、限られた調査プロットで計測した調査データを衛星レーダーからの解析結果と比較

することが多かったため、場所のズレや測定範囲が限られており、確証性が低かった。しかし、本研究では地域全体のバイオマスと比較した研究ができた。本研究により対象地全体でのバイオマス量を比較することで、問題点を明らかにすることができたことは大変意義のある研究である。

さらに、バイオマス量の基となっている材積量が樹冠体積と関係性がないことが本研究を通して明かとなったことで、衛星データとバイオマス量を比較検討するためには、樹冠形状と幹体積（材積）との関係性をより明らかにする必要があることがわかった。今後森林生態学の研究者とともに、樹木成長に伴う材積増加と樹冠構造の変化を把握し、樹冠体積と幹体積の関係性を明らかにしていきたい。

（2）環境政策への貢献

本研究の解析技術は国内外における環境政策に貢献できる。国内では、環境省地球温暖化対策法において京都議定書目標達成、国内排出量取引、または森林等における吸収作用の保全が重要視されている。レーザーによる詳細な森林構造は、森林の現存量・成長量・伐採量の把握に有効で、開発した技術及びデータの提供を行うことで、政策推進に大きく貢献できる。海外では、国連が主導しているREDDで、炭素蓄積が多い熱帯林での正確な炭素動態モニタリングが重要な課題となってきた。REDDのモニタリングには、森林伐採による炭素変化量抽出が必要で、国家間で競って新しいリモートセンシングセンサー技術導入やモニタリング手法の確立を行っている。我が国でもこの世界の動きに乗り遅れないために、モニタリング手法開発が急務の課題となっている。本研究では、日本が開発した衛星ALOSを利用する上で、バイオマス量変化量を検証するために何が必要かを明らかにした。今後ALOS 2が打ち上げられれば、1~3mの分解能となり、高解像度レーダー画像の現地検証用データとして3次元レーザーがより有効利用できる。全地球レベルでバイオマス変化量をモニタリングする際、正確で客観的な現地調査データをレーザーにより提供でき、衛星データの解析精度を向上させることができる。よって、本研究を進めることで世界での環境政策に大きく貢献できる。

6. 国際共同研究等の状況

千葉大学若手研究者インターナショナルトレーニングプログラム（環境植物科学コンソーシアムによる若手研究者育成プログラム）、REN（Restoration Ecology Network, 再生生態ネットワーク）による共同研究体制構築を行った。

共同研究先として、自然再生分野では、Dr. Kern Ewing・Center for Urban Horticulture, School of Forest Resources, College of the Environment, University of Washington・USA、精密林業の分野では Dr. L. Monika Moskal・Precision Forestry Cooperatives, School of Forest Resources, College of the Environment, University of Washington・USA

本研究代表者が所属する千葉大学園芸学研究科は、ワシントン大学と部局間交流を行っており、その交流事業で自然再生手法や精密林業という新しい分野でのレーザー利用に関して国際的ネットワークを構築し、研究交流を行っている。本研究もその交流事業の一環として、ワシントン大学環境学部森林資源学部にあるPrecision Forestry Cooperativeに所属する教員や研究者と、森林リモートセンシング技術（航空機レーザー・地上レーザーデータ解析技術）開発や発展のために共同研究を行っている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Kato, A., Moskal, L. M., Schiess, P., Swanson, M. E., Calhoun D. (2010) “True Orthophoto Creation Through Fusion of LiDAR Derived Digital Surface Model and Aerial Photos” Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium 2010, p88-93.
- 2) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L. M., Schiess, P., Calhoun D. (2010) “Certification of Carbon Credit Using Airborne LiDAR”, Proceedings of Silvilaser 2010, p127-141.
- 3) Kato, A., Watanabe, M., Kobayashi, T., Yamaguchi, Y., Iisaka, J. (2011) “Monitoring Forest Management Activities Using Airborne Lidar and ALOS PALSAR”, IEEE IGARSS 2011, p2318-2321
- 4) 加藤 顕、小林達明、福田聖一、有村恒夫 (2011) “法面緑化地での車載レーザー利用のためのシミュレーション開発”, 日本緑化工学会誌37 (1), p96-101.
- 5) Kato, A., Moskal, L. M., Kobayashi, T. (2011) “Effect of Scan Coverage on Stem Diameter Measurement Using Terrestrial Lidar”, Proceedings of Silvilaser 2011, p171-179.
- 6) Kato, A., Watanabe, M., Yamaguchi, Y., Kobayashi, T. (2012) “Detecting Seasonal Change of deciduous trees using ALOS PALSAR and airborne lidar”, IEEE IGARSS 2012, (In Press)
- 7) 根本 光、加藤 顕、小林達明 (2012) “航空機レーザー測量を用いた異なるスケールアプローチでのスギ・ヒノキ林材積の推定”、日本緑化工学会誌38 (1), (In Press)
- 8) 林 敏樹、加藤 顕 (2012) “地上レーザーを用いた外来抽水植物の地図作成技術”, 日本緑化工学会誌38 (1), (In Press)
- 9) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L. M. (2012) “Automatic Reconstruction of Tree Stem Using Terrestrial Lidar”, Proceedings of Silvilaser 2012, (In Press)

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Kato, A., Moskal, L. M., Schiess, P., Swanson, M. E., Calhoun D. (2010) “True Orthophoto Creation Through Fusion of LiDAR Derived Digital Surface Model and Aerial Photos” Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium 2010, Vienna, Austria, July 2010
- 2) 加藤 顕、小林達明、根本 光 (2010) “航空機または地上型レーザーによる樹木形状把握”、日本緑化工学会研究交流発表会、第41回日本緑化工学会、2010年9月、岡山大学
- 3) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L. M., Schiess, P., Calhoun D. (2010) “Certification of Carbon Credit Using Airborne LiDAR”, Silvilaser 2010, Freiburg, Germany, September 2010
- 4) 加藤 顕 (2011) “排出量取引に向けたレーザー技術による炭素蓄積量把握”、千葉大学 新技術説明会、2011年2月、JSTホール
- 5) 加藤 顕、梅木 清、小林達明 (2011) “地上レーザー計測による樹木パラメータ抽出”、第58回日本生態学会、2011年3月、札幌コンベンションセンター
- 6) 加藤 顕、小林達明 (2011) “航空機及び地上レーザー測量を用いた樹木構造把握”、第122回日本森林学会、2011年3月、静岡大学
- 7) 根本 光、加藤 顕、小林達明 (2011) “航空機レーザーデータを用いたサンプスギ林の材積量の推定”、第122回日本森林学会、2011年3月、静岡大学

- 8) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L.M. (2011) “Evaluating Ecosystem Services of Urban Forest using LiDAR”, AAG Annual Meeting, April 2011, Seattle Convention Center, Seattle USA
- 9) 加藤 顕、小林達明 (2011) “航空機レーザーとハイパースペクトルを用いた病害木判定技術の開発”、平成 23 年度年次学術講演会、日本写真測量学会、2011 年 5 月 東京大学生産技術研究所
- 10) 加藤 顕、小林達明、福田聖一、有村恒夫 (2011) “車載レーザースキャナーを用いた植生状況把握”、平成23年度年次学術講演会、日本写真測量学会、2011年5月 東京大学生産技術研究所
- 11) Kato, A., Watanabe, M., Kobayashi, T., Yamaguchi, Y., Iisaka, J. (2011) “Monitoring Forest Management Activities Using Airborne Lidar and ALOS PALSAR” IGARSS 2011, July 2011, Vancouver Convention Center, Canada
- 12) 加藤 顕、小林達明、福田聖一、有村恒夫 (2011) “法面緑化地での車載レーザー利用のためのシミュレーション開発”、第42回日本緑化工学会大会、2011年9月 千葉大学
- 13) Kato, A., Moskal, L.M., Kobayashi, T. (2011) “Effect of Scan Coverage on Stem Diameter Measurement Using Terrestrial Lidar”, Silvilaser 2011, October 2011, University of Hobart, Australia
- 14) Kato, A., (2011) “Estimating Aboveground Biomass Using PALSAR and LiDAR”, 2nd International Polarimetric SAR Workshop in Niigata 2011, October 2011, Niigata, Japan
- 15) 加藤 顕、(2012) “レーザーリモートセンシングによる木質バイオマス計測、第14回CEReS 環境リモートセンシングシンポジウム、2012年2月 千葉大学けやき会館
- 16) Kato, A., Moskal, L.M., Kobayashi, T. (2012) “Efficient and Accurate Measurement of Stem Volume Using Terrestrial Lidar”, AAG Annual Meeting, March 2012, New York Sheraton Hotel, New York USA
- 17) Kato, A., Kobayashi, T., Umeki, K. (2012) “Quantifying Ecosystem Services Using Laser Remote Sensing”, 日本生態学会第59回大会、第5回東アジア生態学会連合大会2012年3月、龍谷大学
- 18) 加藤 顕 (2012) “地上型3Dレーザースキャナーによる木質バイオマス計測”、第123回日本森林学会、2012年3月、宇都宮大学
- 19) 阿部 航、加藤 顕 (2012) “スギ材積算出における溝腐病の影響について”、第123回日本森林学会、2012年3月、宇都宮大学
- 20) 加藤 顕、小林達明 (2012) “地上レーザーを用いた木質バイオマス計測”、平成24年度年次学術講演会、日本写真測量学会、2012年5月 東京大学生産技術研究所
- 21) 加藤 顕 (2012) 衛星データのグラントゥルースとしてのレーザーデータ利用、第52回 (平成24年度春季) 学術講演会、2012年5月 東京大学生産技術研究所
- 22) Kato, A., Watanabe, M., Yamaguchi, Y., Kobayashi, T. (2012) “Detecting Seasonal Change of Deciduous Trees Using ALOS PALSAR and Airborne Lidar”, IEEE IGARSS 2012, August 2012, Munich Germany (アクセプト)
- 23) Kato, A., Watanabe, M., Yamaguchi, Y., Kobayashi, T. (2012) “Monitoring Forest Biomass Change by ALOS PALSAR and Airborne Lidar”, ForestSAT 2012, Sept. 2012, Oregon USA (ア

クセプト)

25) Kato, A., Kobayashi, T., Moskal, L.M. (2012) “Automatic Reconstruction of Tree Stem Using Terrestrial Lidar”, *Silvilaser 2012*, Sept. 2012, Vancouver Canada (アクセプト)

(3) 出願特許

1) 加藤 顕：富士設計株式会社；「三次元測定対象物の形態調査方法」、特願平23-227165, 平成23年10月14日出願

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

1) 第123回日本森林学会テーマ別シンポジウム「はかれないものを測る～レーザーを用いた森林構造計測」（平成24年3月28日、宇都宮大学、観客100名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) 日本経済新聞（平成23年8月3日、千葉県地方経済面あすを拓く「森のCO₂吸収量を測定」、1頁）

(6) その他

第41回日本緑化工学会 研究交流発表会 ポスター賞 受賞
平成23年度 双葉電子記念財団 なのはな賞
平成23年度 千葉銀行 ひまわり賞

8. 引用文献

- 1) 日本林業調査会(1970)立木幹材積表 東日本編
- 2) Næsset, E. and Økrand, T. (2002). Estimating tree heights and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve, *Remote Sensing of Environment*, 79(1), 105-115
- 3) Clark, M.L., Clark, D.B., and Roberts, D.A. (2004). Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape, *Remote Sensing of Environment*, 91, 68-69
- 4) Bloomenthal, J., Bajaj, C., Blinn, J., Cani-Gauscuel, M., Rockwood, A., Wyvill, B. and Wyvill, G. (1997) Introduction to implicit surfaces. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, CA
- 5) Kato, A., Watanabe, M., Kobayashi, T., Yamaguchi, Y., Iisaka, J., Monitoring forest management activities using airborne lidar and ALOS PALSAR, *IEEE IGARSS 2011 Vancouver, Canada* (CD-ROM)
- 6) Kato, A., Moskal, L.M., Schiess, P., Swanson, M.E., Calhoun, D., and Stuetzle, W., (2009). Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data, *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 1148-1162.]
- 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, 767-781
- 8) Schilling A., Schmidt, A., and Maas, H-G, Tree topology representation from TLS point clouds using depth-first search in voxel space, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(4), 383-392

- 9) Lucas, R.M., Cronin, N., Lee A., Moghaddam, M., Witte C., and Tickle, P. (2006). Empirical relationships between AIRSAR backscatter and lidar-derived forest biomass, Queensland, Australia. *Remote Sensing of Environment* 100: 407-425.
- 10) Dobson, M.C., Ulbay, F.T., Le Toan, T. Beaudoin, A., Kaischke, E.S., and Christensen, N. (1992). Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33: 8877-8895.
- 11) Imhoff, M. L. (1995). Radar Backscatter and Biomass Saturation: Ramifications for Global Biomass Inventory. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 33: 511-518.
- 12) Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C., and Gerard, P.D. (2003). Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LIDAR. *Remote Sensing of Environment*, 87, 171-182
- 13) Patenaude G., Milne R., and Dawson T.P. (2005). Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation: reporting to the Kyoto Protocol, *Environmental Science & Policy*: 161-178.
- 14) Sexton, J.O., Bax, Tyler, Siqueira, P., Swenson, J.J., and Hensley, S. (2009). A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern north america. *Forest Ecology and Management* 257: 1136-1147.
- 15) Neeff, T., Dutra, L.V., Santos, J.R., Freitas, C.C., and Araujo, L.S. (2005). Tropical forest measurement by interferometric height modeling and P-band radar backscatter. *Forest Science* 51(6):585-594.
- 16) Santoro, M., Fransson, J.E.S., Eriksson, L.E.B., and Ulander, L.M.H. (2010) Clear-cut detection in swedish boreal forest using multi-temporal ALOS PALSAR backscatter data, *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, 3(4): 618-631.

Quantifying the Change in Aboveground Carbon Stocks by Forest Management Using Airborne LiDAR and PALSAR

Principal Investigator: Akira KATO

Institution: Graduate School of Horticulture, Chiba University
648 Matsudo, Matsudo-shi, Chiba, 271-8510, Japan.
Tel: +81-47-308-8892 / Fax: +81-47-308-8893
E-mail: akiran@faculty.chiba-u.jp

[Abstract]

Key Words : Radar, LiDAR, Biomass, Carbon stocks, Forest management

International policy making in the field of REDD (Reduced Emissions from Deforestation and forest Degradation) requires to monitor forest management activities in developing countries. To quantify the effects of these activities, highly reliable monitoring system is needed. Conventionally, aboveground biomass has been estimated from stem volume, which varies depending on tree species. Therefore, stem volume is monitored by active remote sensing technologies to estimate the amount of forest biomass in this study.

The active remote sensing technologies such as ALOS PALSAR and lidar (Light Detection and Ranging) should be used for the monitoring technologies, because their data is not influenced by weather condition. Satellite base monitoring using radar is becoming more popular for a wide range monitoring, but the backscattering coefficients of radar have limitation to quantify forest biomass. The previous studies show that 100 tons/ha is the upper limit to detect aboveground biomass from L-band radar. ALOS PALSAR is L-band radar, but it has yet to be clarified how canopy structures are related with backscattering of radar. This study aims to compare backscattering coefficients of L-band ALOS PALSAR with 3D forest structure quantified from airborne and terrestrial lidar to understand the volume scattering.

A bottom-up approach has been taken to validate results of different sensors from local fine scale using lidar to a wide scale using ALOS PALSAR. There are three steps for the validation process. Firstly, tree parameters obtained from terrestrial lidar are compared with the field measurements. Secondly, measurement of airborne lidar is compared with that of terrestrial lidar. Lastly, backscattering coefficients of ALOS PALSAR are compared with the estimation from the airborne lidar.

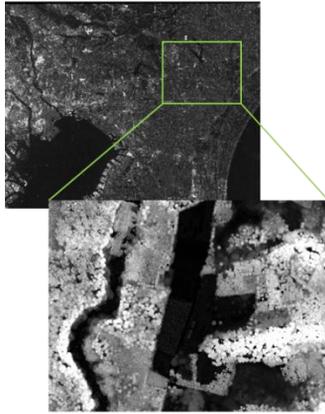
As a result, there is high correlation and the lower RMSE error between field and terrestrial lidar measurement and underestimation in the number of stems counted by airborne lidar. Airborne lidar is more useful for a wide range coarse sampling of 3D forest structure and to indirectly estimate forest biomass while terrestrial lidar can directly measure them. There is not high correlation between canopy volume estimated from lidar and stem volume estimated from

field measurement. Further research is needed to find the relationship between stem volume related with biomass estimation and canopy structures related with satellite based biomass detection. Another reason of unclear trend between PALSAR backscattering and lidar based biomass estimation is the difference in angle to capture the data of forest structure.

グローバルモニタリングにおいて衛星レーダー(ALOS PALSAR Lバンド)を用いて、森林域でのモニタリングへ利用が拡大している。

1. 森林域での森林整備によるバイオマス変化量とレーダーデータからの解析結果との関係性を明らかにする。
2. 衛星レーダーの解析結果を検証するレーザーデータの利用可能性を検討した。

ボトムアップ アプローチ (異なるスケールで異なるセンサー利用)



国・県レベル:

衛星レーダー(ALOS PALSAR)

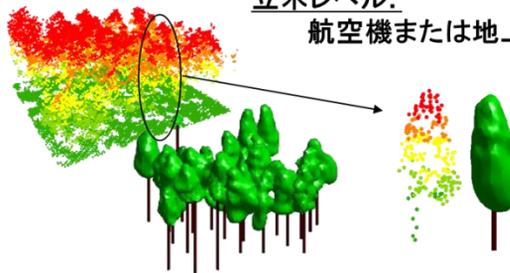
L band radar は 100トン/ha まで把握できる。
⇒解像度5m²に樹高20mのスギ1本まで測定可能。間伐や枝打ち等の森林整備がそこまでの立木本数になれば、変化量を抽出することが可能

市町村レベル:

航空機レーザーの利用

立木レベル:

航空機または地上レーザーの利用

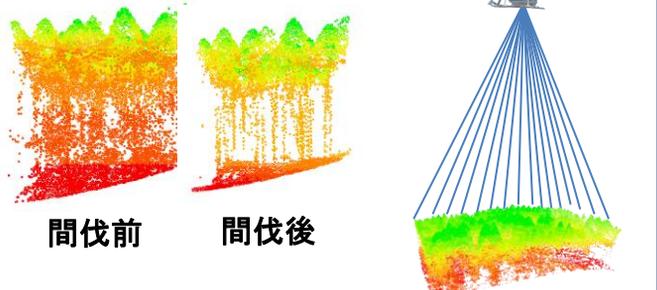


現地調査から得られる限られたサンプルデータから、航空機レーザーを用いて地区レベルまで推定し、その結果をより広域の衛星データと比較する。

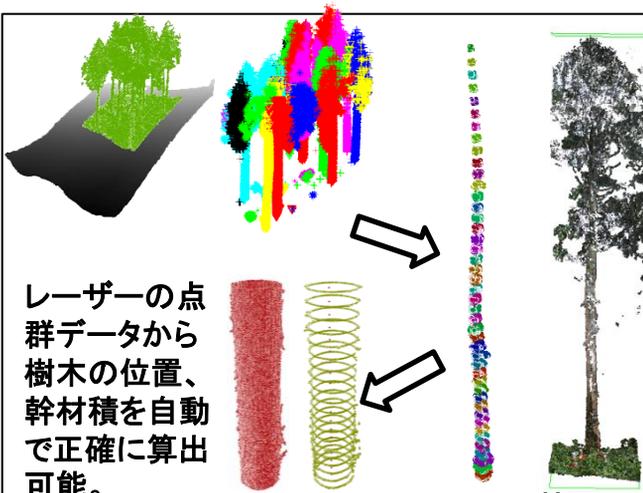
ALOS PALSAR

1. Lバンドでのバイオマス変化量には、6割以上の間伐がなければ変化抽出できない。
2. 森林整備による間伐域での変化と落葉による季節変化を比較した。今後の衛星レーダーデータ利用には、植物の季節変化にも注目し、森林整備によるバイオマス変化と季節変化との違いを考慮しなければならない。

航空機レーザー



森林整備前後での変化を詳細に把握可能。



レーザーの点群データから樹木の位置、幹材積を自動で正確に算出可能。

地上レーザー

航空機レーザーデータは上空から計測するため、樹冠下部や幹部のデータ取得に限界がある。より詳細に森林構造を把握できる地上レーザーに注目する必要がある。

地上レーザーによる直接計測によって客観的で正確なバイオマス計測が可能となったため、衛星データからの解析結果を検証する有効な手段であることがわかった。