

A-0801 グローバルな森林炭素監視システムの開発に関する研究
 (4) マイクロ波による林分構造パラメータ推定に関する研究

独立行政法人国立環境研究所
 地球環境研究センター

小熊宏之

〈研究協力者〉 国立環境研究所 地球環境研究センター

高橋厚裕

平成20～22年度累計予算額：20,300千円（うち、平成22年度予算額：6,300千円）
 予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕 北方林を対象として、PALSARを用いた森林減少・森林劣化検出手法の開発のため、平成20年度はグラウンドトゥルスデータの整備を重点的に行い、LiDARデータを用いて地上バイオマスの面的分布を算出した。森林変化の解析のため、Pi-SARの6シーンを選定し、マイクロ波後方散乱係数 σ^0 への変換とオルソ化を行った。間伐ではHH、HV、VVのすべてにおいて σ^0 は減少を示したが、その大きさは1dB以下と小さかった。 σ^0_{HV} の変化がもっとも大きく、 σ^0_{HH} の変化はもっとも小さかった。風倒では、HHとHVでは σ^0 は減少し、変化は小さかった一方で、VVでは逆に増加し、変化はHH、HVと比べて大きかった。VVだけ異なった変化を示した要因としては、台風による倒木の方向が北向きに偏っていたことがVVの散乱過程に影響したと考えられた。

平成21年度と平成22年度には、森林改変による σ^0 の変化について詳細な解析を行うために、数値シミュレーションを行うための3次元放射伝達モデルを開発した。開発したモデルを用いて地上部バイオマスの変化に対する σ^0 の変化を調べたところ、バイオマスとともに σ^0 は減少を示し、変化傾向は概ね一致した。間伐率が30%の間伐における σ^0 の変化は、観測結果と同様に1dB程度であることがモデルから示された。倒木については、マイクロ波の入射角と倒木の傾斜角の関係で σ^0 が増減し、マイクロ波が幹に垂直に入射する条件のときに σ^0 が最大となることが示された。

平成22年度では、苫小牧国有林における森林改変の数値解析をさらに進め、また北海道胆振東部の道有林を対象に、森林GISデータの整備を行い、PALSARデータ、放射伝達モデルを用いた地上部バイオマス推定の解析を行った。北海道胆振東部の道有林では、 σ^0 に対する入射角（20～50度）の差による影響がみられた。したがって、様々な斜面傾斜角・方位を含んだ領域で平均した場合は、領域内における各斜面の入射角の違いが σ^0 のバラツキの要因となると考えられる。斜面の入射角の差が10度では、 σ^0 は約2dBの差であった。

〔キーワード〕 グラウンドトゥルスデータ、3次元放射伝達モデル、地上部バイオマス、森林構造、森林改変

1. はじめに

PALSARを用いた森林バイオマス変動の手法開発を遂行するにあたり、森林のグラウンドトゥル

ースデータは手法の開発と精度検証の両側面から整備が必要不可欠である。手法に汎用性を持たせるためには対象とする森林の樹種、バイオマス(立木密度、樹高、胸高直径)、斜面方位、傾斜角といった様々な条件でのトゥルースデータセットが必要となる。大学等の演習林においてはプロット調査が実施され、部分的に林分構造が詳細に計測されているが、PALSARの地上分解能を勘案すると十分な広がりを持つプロットは稀である。ここで、精度が確認されているリモートセンシング手法を用いることで、プロット調査地点の情報を広域化したトゥルースデータの作成が可能である。特に近年森林航測分野においても利用される航空機搭載LiDAR (Light Detection and Ranging) は、1回の観測で地盤高と表面高(森林においては樹冠表面高)の面的分布を同時に計測し、更に両者の差分から樹高を算出することも可能であることから、既存のLiDARデータを活用したトゥルースデータセットの整備を平成20年度は重点的に行った。データセット作成対象地の選定においては、本プロジェクト全体で必要とされる森林減少、森林劣化に対応した森林イベント(施業あるいは撓乱)が存在しており、その前後の比較が可能である点を考慮した。サイトは2004年9月に台風18号による撓乱を受けているほか、間伐等の森林施業などが本プロジェクトで検出を目指している森林減少・劣化を模擬し、PALSARによる検出方法の検討に有効であるとされた。

PALSARを用いて森林減少・森林劣化検出手法の開発を行うにあたり、森林のバイオマスと森林構造の変化に対する後方散乱係数(σ^0)の変化のメカニズムを詳細に明らかにする必要がある。既存の研究では、森林バイオマスとL-bandマイクロ波後方散乱係数との間に正の相関が成り立つことが明らかにされてきた¹⁾。森林における σ^0 はバイオマスとともに増加するが、バイオマスがある程度以上大きくなると σ^0 は飽和し、相関量は低下する。飽和に達するときのバイオマスは偏波の種類や森林の構成樹種に依存するが、カラマツ林では50 t ha⁻¹から100 t ha⁻¹とされている¹⁾。バイオマスが同程度であっても、樹種や樹形の違い²⁾ や、間伐によるバイオマスと森林構造の変化³⁾、また風倒によって林冠にできたギャップの大きさと形⁴⁾等によって σ^0 が変化することが報告されている。森林減少・森林劣化の検出を行うためには、このような森林改変に対する σ^0 の変化について、森林内部におけるマイクロ波の散乱過程のメカニズムを詳細に明らかにする必要がある。散乱過程を詳しく解析するツールとして、平成21年度はカラマツ林を対象にした3次元の放射伝達モデルの開発を重点的に行った。これにより、森林バイオマス推定の適用限界と森林改変の検出限界を明らかにすることが可能となる。また、広域の森林改変、地上部バイオマス推定を行うためには、広域のグラウンドトゥルースデータが必要であり、それを活用した推定アルゴリズムの開発が重要である。このために、平成22年度においては、北海道道有林の森林GISデータの整備を行い、平成21年度から開発をしている放射伝達モデルを用いて推定アルゴリズムを作成した。

2. 研究目的

本サブテーマの研究目的は主に3つある。1つめとして、航空機や地上からのレーザ計測を中心とした森林トゥルースデータを整備し、土地の傾斜、森林タイプなど多様な条件下での森林バイオマス、樹冠密度、葉や幹等の三次元分布といったデータセットを作成し、サブテーマ2で行う森林劣化抽出ルールの作成に提供することを目的とした。平成20年度においては、間伐、台風による倒木などの人為的・自然撓乱前後の比較が可能である苫小牧フラックスリサーチサイト、北方における代表的な森林タイプが存在している北海道大学苫小牧研究林の2箇所について既に取り得られている航空機レーザデータ等を本プロジェクトの研究に向けて再処理・解析し、サブテー

マ2へ提供を行った。

本サブテーマの2つめの研究目的は、人為・自然攪乱によって森林バイオマスと森林構造が変化したときに σ^0 がどのように変化するかについて解析を行うための解析用ツールとして、樹木の幹・枝・葉の詳細な3次元構造を考慮した、森林群落の3次元放射伝達モデルの開発を行うことである。また、モデルを開発するにあたり検証データとして必要となる観測データとしては、まず単純な条件として平坦な北方林である北海道苫小牧国有林とした。また、苫小牧国有林は東ユーラシアに広く分布する樹種であるカラマツを優占種とする森林であり、東ユーラシアの広域において森林変化を検出するアルゴリズムを開発するために最適な場所であるといえる。平成20年度に整備を行った森林バイオマスのグラウンドトゥルースデータと航空機搭載合成開口レーダ

(Pi-SAR; Polarimetric and Interferometric Airborne Synthetic Aperture Radar) のデータを用い、中規模な攪乱である間伐と大規模な攪乱である台風による風倒によって森林のバイオマスと構造が変化したときに、 σ^0 でどのように検出されるかについて関係を調べた。

3つめの目的としては、森林改変と地上部バイオマスを広域において推定するアルゴリズムの開発を行うことである。森林GISデータを整備し、PALSARデータを用いて解析を行うことで間伐や皆伐、風倒等による森林改変の検出限界を明らかにし、モデルを用いた推定アルゴリズムに基づいてPALSARによる森林地上部バイオマスの推定精度を明らかにすることを目的とした。

3. 研究方法

(1) 観測地

観測地は、時系列的な現地調査データが存在し、かつ傾斜面を持つ北海道大学苫小牧研究林と、CO₂フラックス計測サイトとして国立環境研が整備した苫小牧フラックスリサーチサイト(国有林)、および北海道胆振東部の道有林の3箇所を選定した。北海道大学苫小牧研究林(42° 44′ N, 141° 31′ E)はミズナラ、アオダモ、カエデ類、カンバ類等の天然林をはじめカラマツ、トドマツ、アカエゾマツ、エゾマツ、チョウセンゴヨウ、ストロブマツ等の針葉樹の造林地が存在し、様々な樹種タイプでの研究が可能である。一方国有林側は主にカラマツの造林地であり、国立環境研究所の微気象観測システムが設置され、CO₂フラックス計測開始とともに詳細な地上調査が実施されてきた。

Pi-SARを用いた解析では国有林を対象とした。解析を行った林班は、北西から南東方向に並んだ長方形の3つの林班であり、図1に示した1196林班(28.36 ha)、1197林班(27.80 ha)、1198林班(34.64 ha)を対象に解析を行った。地形はほぼ平坦であり、各林班における優占樹種はカラマツである。間伐は2003年12月から2004年1月にかけて1196林班と1197林班において行われ、本数間伐率は約26%であり、地上部バイオマスとしては22%の減少であった。これに対し、1198林班では間伐は行われなかった。また2004年9月8日に台風18号が北海道に接近し、道内では森林被害面積が約37,000haに及んだ⁵⁾。このうち、特に本観測地を含む苫小牧では被害面積が約7,400haと極めて被害が大きく、上記の各林班においても多くの倒木が生じた。上層木は根から倒木しているのがほとんどで幹折れは少なく、これに対し中層木の被害は少ないのが特徴であった⁶⁾。

1) Pi-SARデータ

用いたデータは、2003年8月(間伐前)、2004年8月(間伐後)、2004年11月(台風襲来後)のPi-SAR-Lによる σ^0 データと、平成20年度に整備した間伐前と間伐後におけるバイオマスの面的分布データ⁷⁾で

ある。林班における27本の伐倒調査によりアロメトリ式を作成し、毎木調査を行った領域におけるバイオマスの面的分布を算出した。航空機レーザーによる林冠高の測定データを毎木調査エリアにおけるバイオマス分布と比較し、変換式を作成することによって、林班全体のバイオマス分布を算出した。なお、台風後の2004年11月の解析では倒木処理はまだ行われていないためバイオマスは変化していないとした。

各林班の領域を9つの小領域に分割し（図 1）、それぞれの小領域においてSARの各偏波（HH, HV, VV）の σ^0 とバイオマスを求め、平均値を求めた。これを2002年11月（間伐前）、2003年8月（間伐前）、2004年8月（間伐後）、2004年11月（間伐後+台風後）の4つの時期について行い、バイオマスと森林構造の変化に伴う σ^0 の変化について調べた。2003年8月と2004年8月の地温と土壌水分量には大きな差はなかった。

平成20年度の解析では考慮しなかった補正を新たに行った。2003年8月と2004年8月の σ^0 のデータ間には、系統的であると思われる誤差がみられ、near range（南側）からfar range（北側）に向かって σ^0 が減少する度合いが2003年8月のデータの方が少し大きかった。このため、間伐を行っていないにもかかわらず1198林班において σ^0 の変化が各偏波成分でみられ、その変化量（増加）は間伐を行った他林班よりも大きかった。本研究では、1198林班における各偏波の σ^0 の変化がゼロ（植物の成長量（1年で2～3 t C /ha）は考慮していない）となるように2003年8月のデータを補正した。同様の補正操作を他林班の各偏波に対しても行った。各偏波の補正量は、HHが+0.28 dB、HVが+0.46 dB、VVが+0.86dBであった。

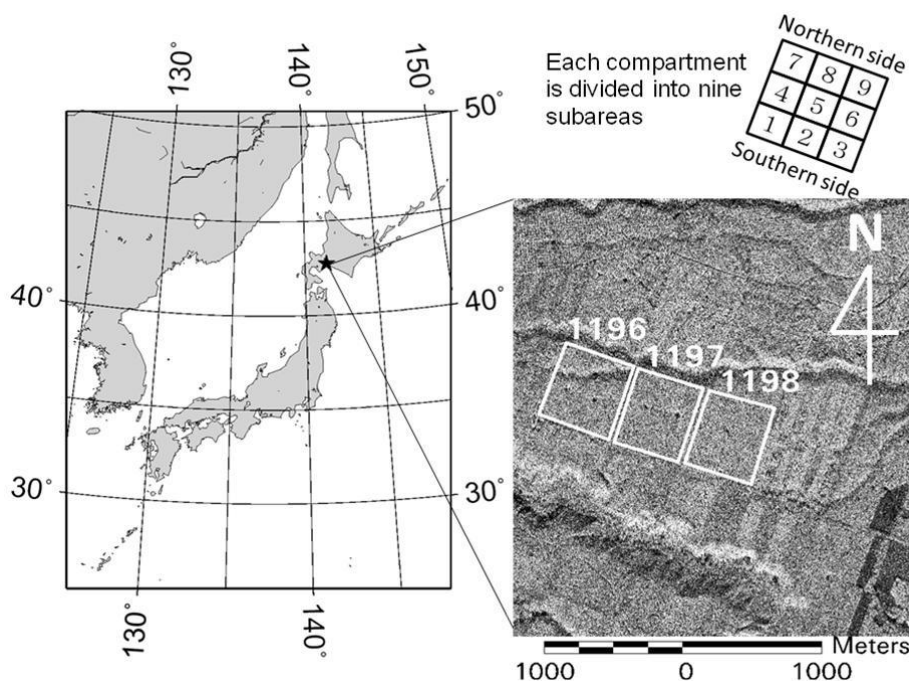


図1: 観測地である苫小牧国有林と研究対象にした林班の位置。右下図内の数字（1196, 1197, 1198）は林班の番号を示す。右上図は σ^0 を求めるさいの各林班における小領域の分割のしかたを示す。

表1. 処理対象PiSARシーン.

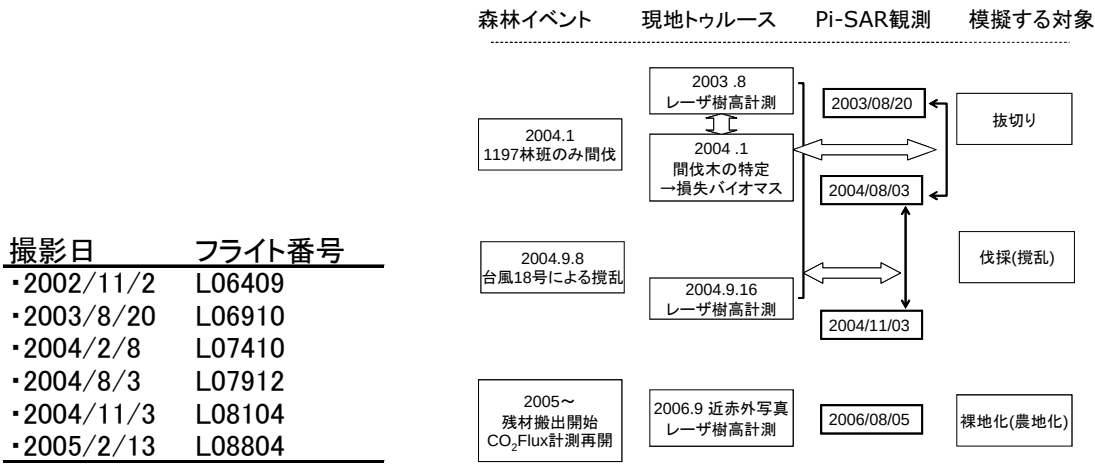


図2: 苫小牧国有林における観測データと森林変化との対応.

2) PALSARデータ

道有林内の各林班における地上部バイオマスを算出し、PALSARによる σ^0 の観測データ（2006年8月）を用いて、地上部バイオマスの推定における山地斜面勾配の影響と森林改変（間伐）の検出について調べた。

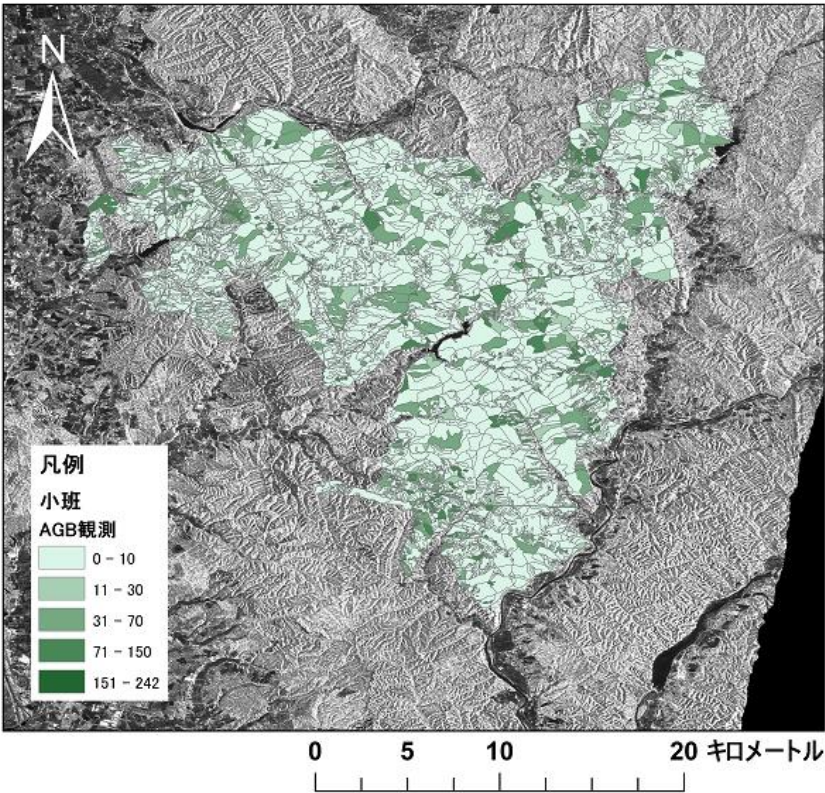


図3: 北海道胆振東部の道有林の森林GISデータをALOS PALSAR画像（観測日：2006年8月26日）上に重ねた図. 凡例は地上部バイオマスの値を示す. 単位はt/ha.

3) 森林GISデータ

北海道胆振東部の道有林における2000年、2001年、2003年、2006年、2007年、2008年、2009年の森林GISデータの整備を行った。小班ごとに森林資源データ（構成樹種、本数、樹高、平均直径、面積、蓄積、方位、傾斜等）が記録されており、森林作業履歴（間伐の実行年度、間伐率等）が記録されている。

地上部バイオマスの算出は、森林GISデータの蓄積(m^3)に体積密度(0.4)⁸⁾をかけることで行った。各小班におけるPALSARからのマイクロ波の入射角は、森林GISデータにおける方位と傾斜角のデータを用い、これにPALSARのオフナディア角 34.3 度、軌道角度 8.16 度を用いて算出した。マイクロ波のビームのひろがりには考慮していない。各小班における σ^0 の算出には、GISソフトウェアIMAGINE(ERDAS社、米)を用いた。小班のポリゴン内においてPALSARデータのカウント数(DN)のアンサンブル平均を行い、 $\sigma^0 = 10 \log_{10}(\text{DN}) - 83$ により算出した。図3は森林GISデータをALOS PALSAR画像上に重ねた図である。

(2) マイクロ波散乱モデル

開発したモデルは、単木における幹・枝・葉の3次元的な形状と森林群落における樹木の分布を詳細に設定し、マイクロ波の散乱過程について数値計算を行うものである。開発したモデルでは森林の不均一な3次元構造を考慮している。計算領域の面積は $50\text{m} \times 50\text{m}$ とした。計算では立木密度や胸高直径については国有林で2000年、2001年、2003年に行われた毎木調査で得られたデータに基づいて設定を行った。枝・葉の構造は簡単な構造に設定した。さらに、研究対象にしている林班の優占種であるカラマツの3次元的な樹形を詳細に再現した上で、可視・近赤外域とマイクロ波についての散乱過程の数値実験を行う。

開発した放射伝達モデルの波長領域はマイクロ波と可視・近赤外域であり、マイクロ波に関してはHH、HV、VH、VVの各偏波についての計算も行う。樹形は、個体ごとの枝・幹・葉の形状と大きさを考慮し、計算条件として地表面上に樹木を一本一本配置する。森林の不均一な3次元構造を考慮して樹形の効果をより詳細に取り扱うことを目的に、可視・近赤外域とマイクロ波のそれぞれについての放射伝達過程をMonte Carlo法に基づいて計算を行う^{9), 10)}。Monte Carlo法は、放射を多数のモデル光子として取り扱い、一つ一つのモデル光子が森林内で散乱により強度や方向が変化する過程を追跡し、最終的に林外へ出てきたモデル光子を積算することで、森林群落全体における可視・近赤外域の反射率やマイクロ波の後方散乱係数を求める方法である。可視・近赤外域とマイクロ波のそれぞれについての計算過程は以下のとおりである。

1) 可視・近赤外域

可視・近赤外域における放射伝達計算では、反射率・透過率の分光スペクトル測定データを入力として計算を行う。計算結果は森林の群落スケールにおける反射率の分光スペクトルデータと比較することでモデルの再現精度の検証を行う。葉の分光スペクトルの測定データを入力としているが、葉のクロロフィル量を変数とした葉内放射伝達モデル^{11), 12)}を組み込めば、葉の分光スペクトルも出力データとした解析が可能である。

2) マイクロ波

マイクロ波の散乱の計算においても、樹形の効果をより詳細に取り扱うために樹木の幹、枝、葉の構造を考慮し、計算空間内にモデル化した複数の樹木を配置して森林の詳細な3次元構造を考慮し

た。森林内におけるマイクロ波の散乱過程の計算においては、幹、枝、葉はそれぞれ単純な円柱形として近似的に表現した。樹木の各部の誘電率については水分量等の関数として与えている。Pi-SAR（またはPALSAR）から森林に向かって照射されたマイクロ波を想定し、多数のモデル光子を上方からある入射角をもって森林に入射させ、幹、枝、葉の各部分に衝突したときに散乱として計算する。幹・枝・葉に衝突した光子は、そこで散乱行列¹³⁾として表される散乱特性にしたがって散乱を計算する。モデル光子は幹・枝・葉において散乱を繰り返し行い、最終的に後方に散乱されたモデル光子を積算し、H、V各偏波方向の信号の強度を求める。土壌面の散乱過程の計算には、Fresnelモデルを用いた⁹⁾。幹・枝・葉の各部分における衝突を区別し、表面散乱やdouble bounceを取り扱った。

樹木の計算領域内における配置は、縦横の両方向に同間隔とした。数値実験における間伐による森林攪乱の取り扱い方法としては、計算領域内においてランダムに抽出した樹木を間伐率に相当する本数だけ取り去るという操作を行った。また、台風による攪乱については、計算領域内の樹木の幹をある角度で傾けるという操作を行った。そのさい、倒木の方角角と傾斜角を設定して計算を行った。方位角は0度から360度の間で10通りに設定し、各方位角に対し傾斜角を0度から90度の間で10通りに設定して計算を行った。

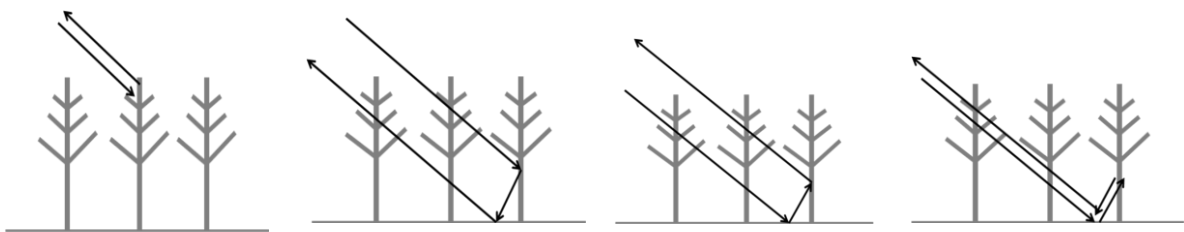


図4: モデルで計算する散乱過程. 左から、表面散乱, double bounce (木→土), double bounce (土→木), 3回散乱 (土→木→土). 木における散乱箇所は幹、枝、葉である。

樹形は次のようにモデル化を行った。幹と枝を円柱で表現し、25本の枝を1本の幹の周辺に配置した。ここで、幹の長さは15.2m、直径は19.8cmであり、枝の直径は幹直径の0.2倍とした。枝の長さは、下方では長く、上方で短く設定を行い、針葉樹の樹形を模擬的に表現した。さらに、各枝の周辺には円柱空間を配置し、その空間内に葉が多数存在するとして、小さいサイズの円柱（直径0.2cm、長さ4cm）を用いて葉の散乱を考慮した。

幹、枝の傾斜角度ごとの計算は以下のように行った。幹については、垂直に立っている場合と倒木の場合の計算を行った。倒木は、倒木方向と垂直な状態からの傾斜角度を様々に設定して計算を行った。各枝については、傾斜角はすべての枝で同じであるが、幹の周囲に別々の方位角で配置されている。それぞれの方位角と傾斜角に応じて散乱角度の計算を行った。

計算領域は1haである。領域内に存在する立木数は25本から2500本までの10通りの計算を行った。それぞれは、25本、100本、225本、400本、625本、900本、1225本、1600本、2025本、2500本である。

マイクロ波は散乱体に衝突すると、振動方向と位相が変化する。したがって、計算領域内の散乱体の配置と散乱経路に応じて、後方散乱された波の位相の強め合いや弱め合いが決まる。送受信を行うセンサと散乱体の距離、および森林内における散乱経路の距離を対象領域内の散乱体ごとに求めて重ね合わせることで、位相の情報を含めた後方散乱の算出を行った。また、減衰の効

果については、計算領域内に含まれる幹、枝、葉の密度と林内におけるマイクロ波の伝播距離から、減衰量を求めた。

4. 結果・考察

(1) 苫小牧国有林における森林攪乱データセット開発（平成20年度）

国有林の1197林班においては、2003年12月～2004年4月にかけて間伐作業が行われ、作業後の2004年4月にフィールド調査が行われた（図5）。したがって、2004年4月のフィールドデータには間伐木のデータは含まれない。そこで、米¹⁴⁾の方法に従い、間伐前の2003年12月のフィールドデータの推定を行った。次に、2000年9月・2001年8月・2003年10月に行われた現存量調査データから作成された胸高直径・樹高との関係式を用いてフィールドデータから乾重量を求めた。2003年9月に国立環境研究所によって行われたLiDARデータを用い、Digital Surface Model: DSM・Digital Terrain Model: DTMを作成した。さらに差分をもとめることで、樹冠高であるDigital Canopy Height Model: DCHMを作成した。調査地を10mGridに区分（図5）し、Grid毎のDCHM体積と地上部乾重量（枝＋幹）との相関式を求め、LiDARデータを10m毎に高さを平均し、10mGridのDCHMを作成した。作成した、DCHMの体積に相関式を適用することで、面的な乾重量を求めた（図6）。

間伐後の2004年はLiDARデータが存在していないことから乾重量を推定する必要がある。間伐時には定量的に間伐が行われたと考えられることから、図1の10mGrid毎に間伐前後の地上部乾重量（幹＋枝）の変化をフィールドデータから求めた。間伐前後の乾重量に直線的な関係が見られたため、2003年間伐前のバイオマス推定値（図6）に対し、間伐が行われた1197林班内のみについての関係から、間伐後のバイオマスを推定した。図7に結果を示す。なお、1197林班の乾重量の平均値は、間伐前の2003年が約107t/ha、間伐後の2004年は84t/haであった。また、台風直後（2004年9月）に撮影されたLiDARデータとマルチスペクトラル画像を用いて、台風後のバイオマスの推定を行った。航空写真とDCHM、NDVIを対比して、台風の被害木として特徴的であったのは、「倒木部分では、DCHMが小さい」「倒木部分でも倒木同士が重なりあって、数mの層を成している部分が見られた。そのような場所ではNDVIが低かった。」「比較的中層木が多く残存していた。中層木が残存している場所ではNDVIが高かった。」ということがあげられた。そこで、条件式を作成し、この条件に従って倒木部分と残存木部分に分類した。さらに残存木部分について、間伐前（2003年）と同じ方法でバイオマスを推定した（図8）。

ALOS運用前に苫小牧地区で発生した森林イベントに対応するSARデータとして国有林と北海道大学演習林を観測したPiSARデータの整備を行った。JAXAから提供されたPi-SARデータは、JAXA/EORC公表¹⁵⁾の校正係数（CF1）に基づいた σ^0 への変換を行い、北海道地図発行の10mメッシュのDEMを用いたオルソ化を施した。

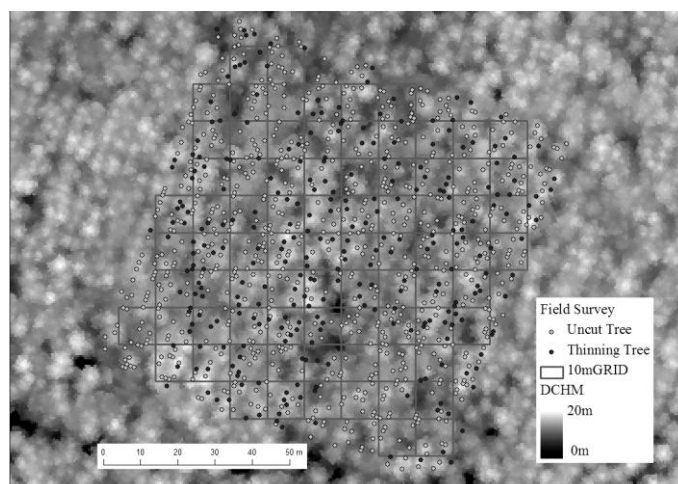


図5：間伐が行われた1197林班におけるフィールド調査データと集計のためのグリッド。



図6：間伐前のバイオマス推定値（2003年）。図7：間伐後のバイオマス推定値（2004年）。



図8：台風後のバイオマス推定値(2004年)。

（2）北海道苫小牧国有林における森林改変の検出（平成20年度、平成21年度）

1）観測結果

北海道苫小牧国有林を対象に、航空機搭載型のPi-SAR（L-band）による σ^0 の観測データ（2003年8月、2004年8月）を用いて、間伐による地上部バイオマスの変化について調べた。Pi-SARで観測

された σ^0 と地上部バイオマスとの関係を図9に示す。3つの図はそれぞれ各偏波（HH偏波、HV偏波、VV偏波）について σ^0 と地上部バイオマスとの関係を示している。図中において丸印は1196林班、三角印は1197林班、四角印は1198林班を示す。また時期の違いを各シンボルの大きさで区別している。大きい白抜き印は2003年8月（間伐前）、小さい白抜き印は2004年8月（間伐後）、小さい黒抜き印は2004年11月（台風襲来後）、大きい黒抜き印は2002年11月を示す。図中の点線は、本研究の観測サイトを一部に含む広い領域において行われた解析により得られた経験式に基づき描いた曲線である¹⁾。図からわかるように、間伐による変化の傾向（2003年8月から2004年8月の変化）は概ね曲線に沿った変化を示しており、間伐による地上部バイオマスの減少とともに σ^0 はHH、HV、VVの各偏波において減少した。その変化の大きさはいずれにおいても1dB以下であったが、その中でHV偏波がもっとも変化が大きく、HH偏波がもっとも小さかった（表2）。

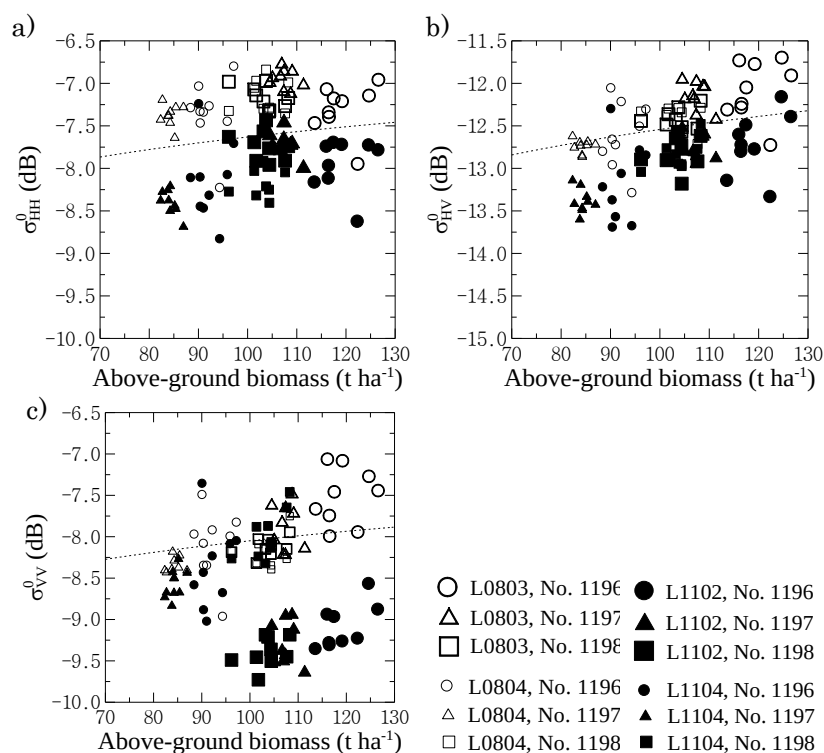


図9: Pi-SARで観測された σ^0 と地上部バイオマスとの関係。

表2: 間伐による σ^0 の変化。

Po1	No.	L0803	L0804	Differenc
HH	1196	- 7.30	- 7.36	- 0.06
	1197	- 6.93	- 7.36	- 0.43
HV	1196	- 12.0	- 12.6	- 0.53
	1197	- 12.1	- 12.7	- 0.60
VV	1196	- 7.51	- 8.10	- 0.59
	1197	- 7.86	- 8.34	- 0.48

表3: 風倒による σ^0 の変化.

Po1	No.	L1102	L1104	Difference
HH	1196	- 7.95	- 8.15	- 0.20
	1197	- 7.69	- 8.38	- 0.69
	1198	- 7.73	- 8.12	- 0.39
HV	1196	- 12.71	- 13.17	- 0.46
	1197	- 12.74	- 13.37	- 0.63
	1198	- 12.82	- 12.85	- 0.03
VV	1196	- 9.09	- 8.37	+0.72
	1197	- 9.26	- 8.56	+0.70
	1198	- 9.39	- 7.98	+1.41

風倒による変化については、2004年9月の台風18号による風倒前後の σ^0 の観測データ（2002年11月、2004年11月）を比較した。変化の傾向（2002年11月から2004年11月の変化）は、HH偏波とHV偏波では曲線に沿った変化を示しており、変化の大きさは1dB以下であったが、VV偏波だけ増加しており、変化の大きさもHH偏波、HV偏波に比べて大きかった（表3）。VV偏波のみ増加した原因としては、倒木の方向が関係していると考えられた¹⁶⁾。観測地では多くの樹木が根返りの状態で倒木の状態となった。倒木方向については、風倒後に撮影された1197林班の航空写真を用いて解析を行った（図10）。台風による風は南風または南西風であり、ほとんどの樹木は、樹冠が北東、根が南西になる方向で根から倒れた状態となった。Pi-SARは西から東に向けて飛行し、マイクロ波の照射方向がほぼ北向きであったことから、幹の方向とマイクロ波のV偏波の方向が一致した個体が多く存在したことが一因となっていると推察された。マイクロ波の入射方向と散乱強度との関係についてモデルを用いて解析を行った結果については後述する。

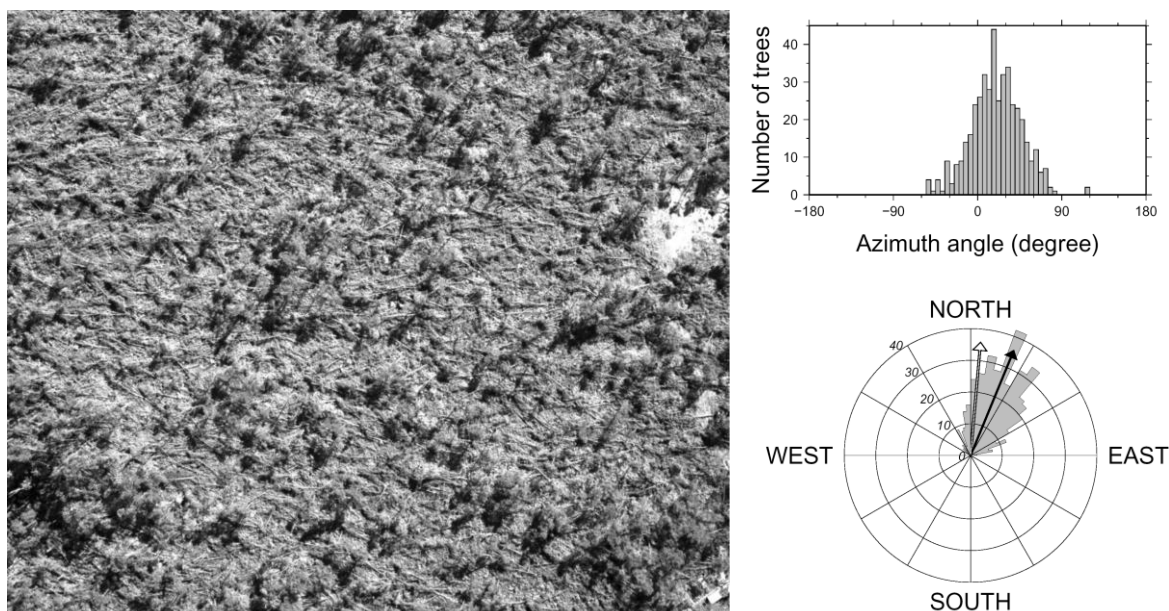


図10: 台風18号による1197林班の森林倒壊後のようすを撮影した航空写真（左）とこの航空写真をもとに判別した倒木の方位の分布（右）。

2) モデル計算結果

モデルを用いた数値解析を行うにあたり、平成20年度に整備を行った、カラマツを優占種とする北方林における森林バイオマスのグラウンドトゥルースデータとPi-SARのLバンド σ^0 のデータについて解析を行った。中規模な森林攪乱である間伐と大規模な森林攪乱である台風による風倒について、バイオマス・森林構造の変化に対する σ^0 の変化について解析を行った。

上述した間伐と台風によるPi-SAR σ^0 の変化の要因について明らかにするためには、散乱過程を詳細に解析する必要がある。苦小牧における森林攪乱の σ^0 に対する影響を調べるために、計算領域内に設定されている樹木数を減少させていき、 σ^0 がどのように変化するかについて数値実験を行った。結果を図11に実線で示した。Pi-SARのデータが8月に観測されたものなので、夏季（気温25℃）の設定条件にしている。 σ^0_{HH} 、 σ^0_{VV} 、 σ^0_{HV} が地上部バイオマスとともに減少するようすが再現されている。HHが飽和に達するのが最も早く、ついでVV、HVとなる。HVは200 t/ha付近でも増加をつづける。Pi-SARによる観測データとモデルによる計算結果が示すように、間伐のような中規模攪乱では σ^0 の変化が小さいためにSARデータによって森林バイオマスの定量評価を行うことはむずかしいと考えられるが、変化がもっとも顕著に表れていたHV偏波がもっとも有効であると考えられる。

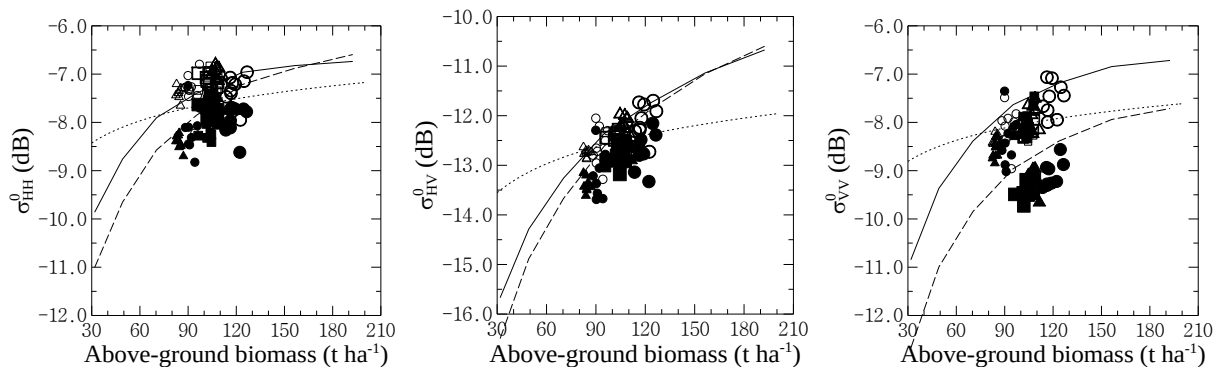


図11: 間伐・台風前後のPi-SARの観測データ（シンボルと点線の意味は図8と同じ）とモデル計算結果（実線（夏季）と破線（秋季））の比較。

台風による大規模な森林攪乱の σ^0 に対する影響に関する数値実験では、木が根元から地面に横倒しになった状態を計算条件として設定し、マイクロ波が照射されたときに σ^0 がどのように変化するかについて計算を行った。単木の場合では、倒木の方法や角度が σ^0 に大きく影響を与えることが確認された（図12）。図12に示されているように、マイクロ波が単木（円柱）に対し直角に、V偏波が円柱の軸に沿うように入射した場合は、VVの散乱強度が大きい。円柱を傾けていくにしたがい、VVは小さくなり、逆にHHが大きくなる。単木（円柱）が水平になった状態ではHHの方がVVよりも大きい。このように、樹木から散乱されるマイクロ波は入射角によってHHとVVの大きさが異なる。森林群落では、散乱方向が様々であるので、その積算としての群落全体の散乱強度は単純ではない。そこで、次に3次元放射伝達モデルを用いて森林群落全体における散乱強度について計算した結果を示す（図13）。HHとHVは減少し、VVは増加した。これにより、群落全体においても倒木の影響でVVが増加することがモデルによって示された。

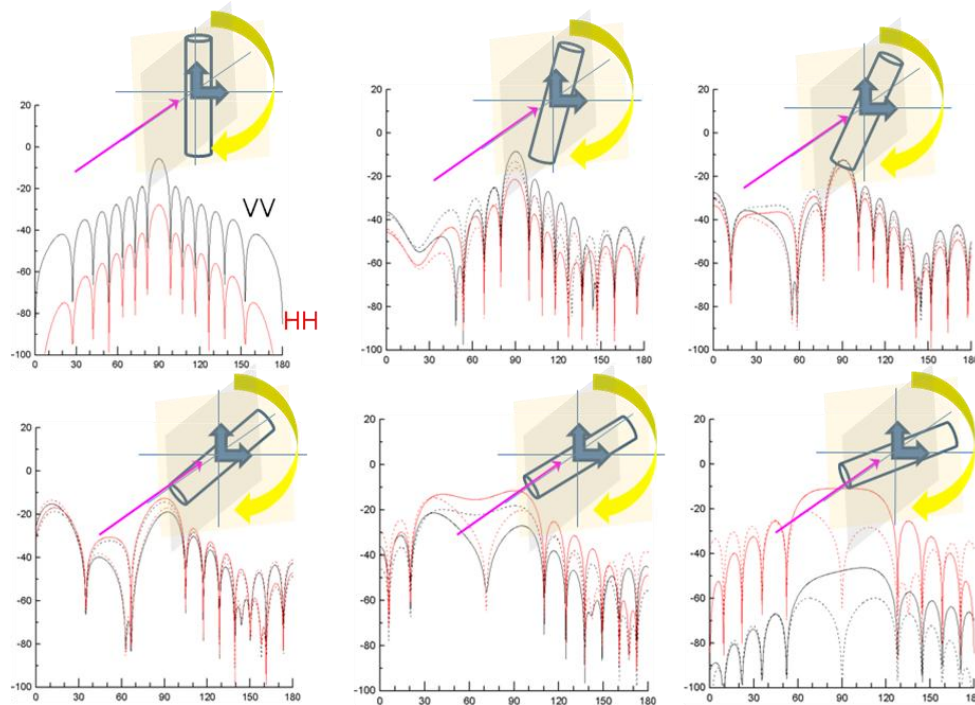


図12: 倒木によるマイクロ波の散乱強度の変化についての数値計算例. 円柱に対するマイクロ波の入射角、散乱角と σ^0 の関係を示している。円柱の絵の中に描かれている矢印は、入射するマイクロ波の偏波の方向を表し、上向きがV偏波を、横向きがH偏波の方向を表す。横軸は散乱角、縦軸は後方散乱係数(dB)を表す。いちばん左上は円柱が鉛直にたっている状態であり、その右は円柱を15度傾けた状態を表す。いちばん右下では円柱が水平な状態である。ピンク色の矢印は、円柱に対するマイクロ波の入射方向を表している。

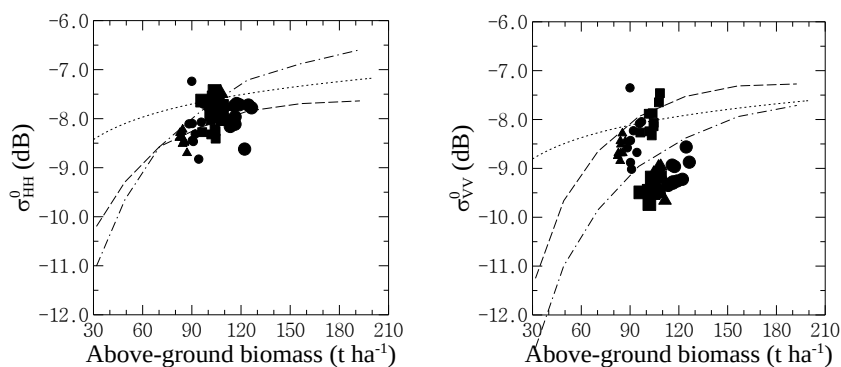


図13: 台風前後のPi-SARの観測データ（シンボルと点線の意味は図8と同じ）とモデル計算結果（点破線（台風前）と破線（台風後の風倒状態））の比較。

（3）北海道胆振東部における森林改変の検出と地上部バイオマスの推定

1）観測結果

a) 間伐の検出

2007年に行われた間伐を対象とし、2006年8月と2008年8月のPALSARデータから σ^0_{HH} の変化量を求めた。間伐が行われた小班では、間伐の強度はおおむね30%であった。 σ^0_{HH} の変化量と入射角

度との関係を調べたところ、明確な関係は見出されなかった。苫小牧国有林の間伐において同程度の間伐の強度において σ^0_{HH} の変化量は1dB以下であったことや、既存の文献において間伐による σ^0_{HH} の変化量はせいぜい1dB程度であることが報告されているのに対し、胆振東部では斜面と地上部バイオマスが様々であることによる σ^0_{HH} の変動が大きいために、間伐による変化量を σ^0 の変化から検出することはむずかしいと考えられる。間伐等による森林改変の検出は、 σ^0 のみからではむずかしく、精度向上のためには、まず平坦な地形において干渉解析を行うなど、他の手法を組み合わせた解析を行う必要があると考えられる。

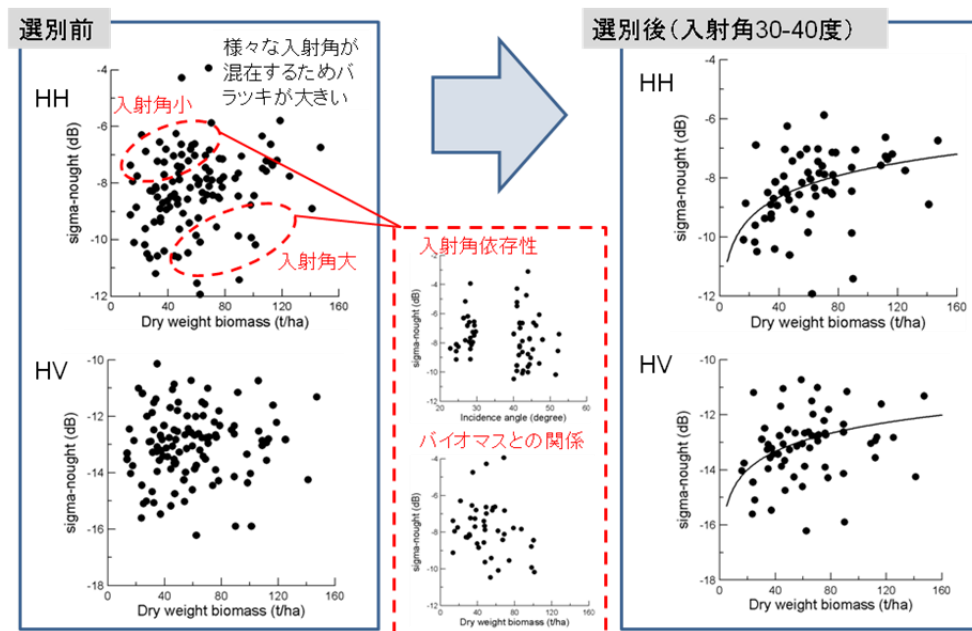


図14: 北海道胆振東部地方の道有林におけるPALSARの σ^0 データと地上部バイオマスの関係。入射角によるデータの選別前における関係を左図に、選別後における関係と右図に示す。真ん中に示した図（四角の点線内）は選別によって取り除かれたデータにおける σ^0 と入射角の関係、 σ^0 と地上部バイオマスの関係である。右図で図中に描かれている曲線は、回帰曲線である。

b) 地上部バイオマスの推定

北海道胆振東部の道有林の森林GISデータから地上部バイオマスの算出を行い、PALSARの σ^0 との対応関係を調べた。小班の面積は0.5～26.5haと様々であり、小班ごとに解析を行った。対象エリアの小班は標高50～300mに分布している。結果を図14に示す。図14において左の2つの図に示したように、HHとHVのいずれにおいても地上部バイオマスと σ^0 には明瞭な関係はみられなかった。これには、小班に対する入射角の違いが影響している。HHの図において赤い丸枠で示した箇所は、入射角が小さいために σ^0 が過大であるデータと入射角が大きいために σ^0 が過小になっているデータである。これらのデータを抜き出し、入射角と地上部バイオマスとの関係について示した図が、真ん中の2つの図である。いずれの関係においても負の相関となっている。斜面における入射角に10度の違いがある場合では、 σ^0 は約2dBの差となっている。これらのデータを取り除いた後の σ^0 と地上部バイオマスとの関係を示したのが右の2つの図である。入射角の影響を受けたデータを取り除く前に比較して、地上部バイオマスとともに σ^0 が増加するようすがみられる。この結果か

ら、様々な斜面傾斜角・方位を含んだ領域で平均した場合は、領域内における各斜面の入射角の違いが σ^0 のパラツキの要因となると考えられる。山地における地上部バイオマスの広域評価においては、林班単位で入射角ごとに求めることで、推定精度を向上する必要があると考えられる。

また、既述のように、苫小牧国有林における解析では30%程度の間伐による1dB程度の σ^0_{HH} の変化量が検出できないことから、80 t /haから100 t /haの範囲における地上部バイオマスの推定では、少なくとも30%程度の誤差があると推察される。さらに地上部バイオマスが大きい範囲では σ^0_{HH} の感度が鈍くなるために、さらに誤差が大きくなると考えられる。

2) モデル計算結果

σ^0_{HH} について小班単位における観測値とモデル計算値を比較した結果を図15に示す。モデル計算においては、条件の設定は苫小牧国有林の場合と同じで胸高直径が19.8cm、樹高が15.19mと設定した。観測値は、この設定値に近い値のデータを選び、平均胸高直径が10cmから20cm、平均樹高が10mから19m、入射角が30度から40度の範囲である小班のデータを用いた。図に示されているように、地上部バイオマスの増加とともに σ^0 が増加していくようすが、モデルによっておおむね良好に再現されている。したがって、同様な気候条件下において、樹木のサイズが似ている林班であれば、 σ^0 によって地上部バイオマスを推定することが可能と考えられる。また、既述したように、入射角が30度よりも小さい場合や40度よりも大きい場合は、データのばらつきが大きくなり、 σ^0 と地上部バイオマスの関係は明瞭ではなくなる。

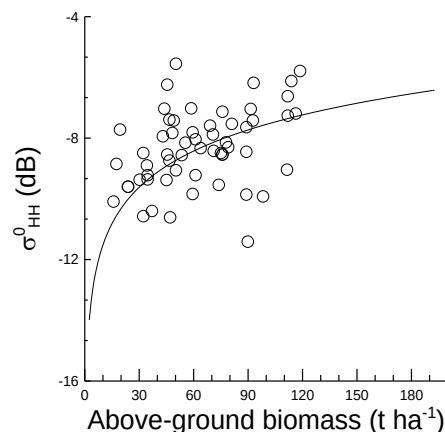


図15: σ^0 と地上部バイオマスの関係. 丸印がPALSARによる2006年8月26日における観測値，実線がモデル計算を表す.

図15で示したのは胸高直径と樹高を固定した上でモデル計算を行い、PALSARの σ^0 と比較を行ったが、以下では、逆に σ^0 から地上部バイオマスを推定した場合の誤差について示す。逆推定では、モデル計算により地上部バイオマスと σ^0 の対応付けを表す表(LUT)を作成し、もっとも条件に合致する値をみつけることで、 σ^0 から地上部バイオマスの推定を行う。

まず、入射角を考慮しないLUTを用いて推定した場合の結果について示す。すなわち、実際の観測データには様々な入射角のデータが入っているが、ここではモデル計算により作成したLUTでは入射角を固定(35度)して推定を行う。図16には斜面傾斜角が10度以下の場合について示した。ここではさらに3つの場合に分けて示している。左端は林班面積が10ha未満の場合、中央が10ha以上

20ha未満の場合、そして右端が20ha以上の場合を示している。ここで、面積10haは約900pixelに相当する。いずれの場合においても、入射角が推定誤差へ与える影響は小さい結果であった。誤差は林班の面積が10ha（約900pixel）以下の場合で大きく、これに比較すると10ha（約900pixel）以上では顕著に小さくなっている。

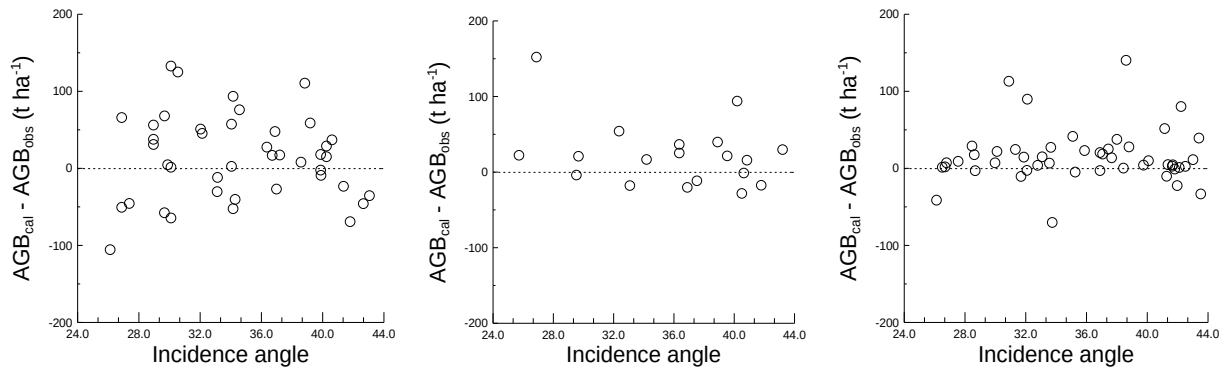


図16: 斜面傾斜角が10度以下の場合に対して、林班の面積が10ha未満（左端）、10ha以上20ha未満（中央）、20ha以上（右端）の場合の推定誤差と入射角の関係。

斜面傾斜角が10度以上の場合について図17に示す。林班面積が10ha（約900pixel）以下において入射角が推定誤差へ与える影響が現れている。また、誤差の大きさは林班の面積が増加するにしたがい減少する傾向があるが、斜面傾斜角が10度以下の場合に比べると誤差は大きい。

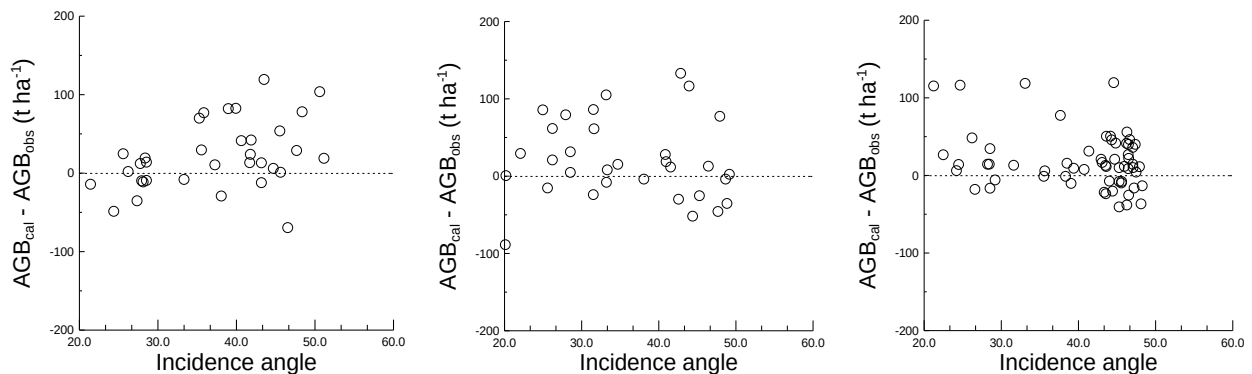


図17: 斜面傾斜角が10度以上の場合に対して、林班の面積が10ha未満（左端）、10ha以上20ha未満（中央）、20ha以上（右端）の場合の推定誤差と入射角の関係。

次に、斜面傾斜角が10度以上の場合に対し、入射角を考慮した計算を行った結果を以下に示す。すなわち、ここでは、モデル計算により入射角の違いを考慮して作成したLUTを用いる。結果を図18に示した。林班面積が10ha（約900pixel）以下においては、入射角が推定誤差へ与える影響がなくなっていることがわかる。一方で、10ha（約900pixel）以上の場合において、推定誤差の入射角に対する依存性が大きくなってしまっており、モデル計算が入射角の影響を過大評価する結果となった。これを改善するためには、斜面傾斜角も考慮した計算を行うことが必要と考えられる。すなわち、斜面の方位角と入射角の関係も考慮する必要があると考えられる。

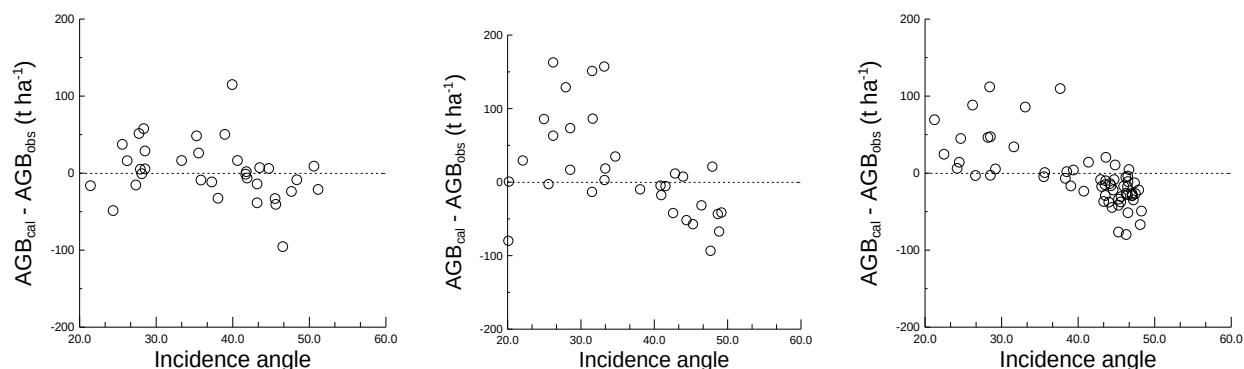


図18: 斜面傾斜角が10度以上の場合に対して, 林班の面積が10ha未満 (左端), 10ha以上20ha未満 (中央), 20ha以上 (右端) の場合の, 推定誤差と入射角の関係. 計算値は入射角を考慮している.

そこで、斜面上の森林におけるマイクロ波散乱についてモデルを用いて調べ、平坦地形上の森林におけるマイクロ波散乱との違いについて考察を行った。斜面上の森林の場合、樹木はおおむね鉛直方向に成長するので、土壌面に対し傾いた状態になる (図19)。

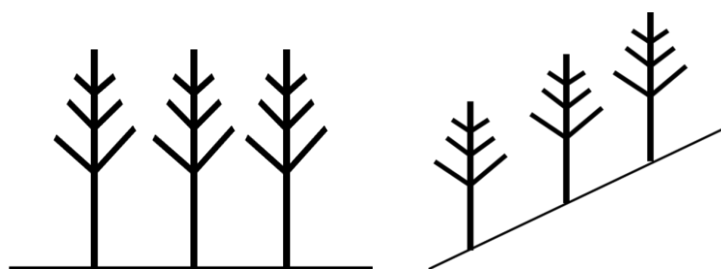


図19: 平坦地形上の森林 (左) と斜面上の森林 (右)。

図20に、方位角も考慮したモデル計算により作成したLUTを用いて行った推定結果について示す。林班面積が10ha (約900pixel) 以上においては入射角への依存性が小さくなり、誤差の大きさも図17と図18の結果よりもやや小さくなっているが、10ha (約900pixel) 以下において入射角依存性が増加する結果となった。また、どの場合においても計算値はやや過小評価となっている。この過小評価の要因としては、キャノピー層内の減衰過程を過大に評価していることで、後方散乱が過小評価されていることが考えられるが、これについては今後の改良点としたい。

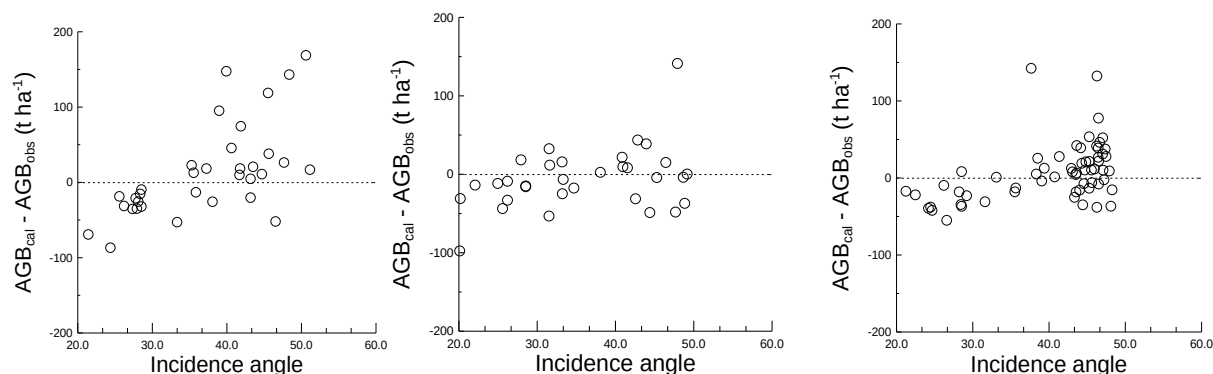


図20: 斜面傾斜角が10度以上の場合に対して, 林班の面積が10ha未満 (左端), 10ha以上20ha未満 (中央), 20ha以上 (右端) の場合の, 推定誤差と入射角の関係. 計算では入射角と斜面傾斜角, 方位を考慮している.

以上より、PALSARデータを用いた地上部バイオマスの推定では、平坦地、傾斜面のいずれにおいても少なくとも10ha（約900pixel）以上の面積において推定を行うことで誤差を低減することができると考えられる。また、傾斜角が10度程度以上の傾斜面では、傾斜角と入射角の両方について考慮したモデル計算を行うことで、角度依存性が低減できることが示唆された。しかしながら、角度を考慮した推定結果と角度を考慮しない推定結果と比較すると、誤差の違いは小さく、大きく改善されたとはいえない。角度依存性よりも、面積が10ha（約900pixel）を閾値としてそれよりも大きい小さいかの影響が大きいといえる。10ha（約900pixel）より大きい林班では角度による違いが明瞭でなかった。本研究が対象とした地域では、斜面傾斜角が平均で11度であり、ほとんどの斜面が20度以下であったことも一因であると考えられる。傾斜角度と入射角の影響をさらに明らかにするためには、より傾斜角の大きい森林での研究が必要であると考えられる。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

合成開口レーダを始め、リモートセンシングによる北方林タイプの研究において広域のバイオマス変遷のデータセットを完成した。森林改変の検出限界を明らかにした。地上部バイオマス推定における傾斜角の影響を明らかにした。

（2）環境政策への貢献

今後学会等や地球観測の関連委員会等を通じ、成果の広報・普及に努めるとともに、北方林バイオマスデータセットとしての利用推進を図る。また、開発した放射伝達モデルを用いた解析アルゴリズムを、広域を対象とするSARデータ解析としての利用推進を図る。

6. 引用文献

- 1) Watanabe, M., Shimada, M., Rosenqvist, A., Tadono, T., Matsuoka, M., Romshoo, S. A., Ohta, K., Furuta, R., Nakamura K. & Moriyama, T. (2006) Forest structure dependency of the relation between L-band σ^0 and biophysical parameters, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 44, 11, 3154-3164.
- 2) Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Pierce, L. E., Sharik, T. L., Bergen, K. M., Kellndorfer, J., Kendra, J. R., Li, E., Lin, Y. C., Nashashibi, A., Sarabandi, K. & Siqueira P. (1995) Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 33, 877-895.
- 3) Champion, I. D., Guyon, Riom, J., Le Toan, T. & Beaudoin A. (1998) Effect of forest thinning on the radar backscattering coefficient at L-band, International Journal of Remote Sensing, 19, 2233-2238.
- 4) Green R. M. (1998) The sensitivity of SAR backscatter to forest windthrow gaps, International Journal of Remote Sensing, 19, 2419-2425,
- 5) 北海道立林業試験場：光珠内季報(2004)「2004年台風18号被害に関する調査速報」No. 137, 1-12.
- 6) 米康充、小熊宏之、藤沼康実(2005)「航空計測を用いた2004年台風18号による森林被害の把握」

日本森林学会北海道支部論文集、53、123-125.

- 7) Yone, Y., Oguma, H., Yamagata, Y. & Fujinuma, Y. (2005) Development of measurement system for evaluating forest ecosystems: measurement method of aboveground biomass growth by using airborne laser survey, *Phyton*, 45, 517-524.
- 8) 温室効果ガスインベントリオフィス(GIO)編 (環境省地球環境局地球温暖化対策課監修) : CGER-REPORT, 2010
「第7章 土地利用、土地利用変化及び林業分野 (CRF分野5)」
- 9) Kobayashi, H. & Iwabuchi, H. (2008) A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape, *Remote Sensing of Environment*, 112, 173-185.
- 10) Wang, L. F. (2007) Monte Carlo simulation model for electromagnetic scattering from vegetation and inversion of vegetation parameters, Ph. D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- 11) Jacquemond, S. & Baret, F. (1990) PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra, *Remote Sensing of Environment*, 34, 75-91.
- 12) Dawson, T. P., Curran, P. J., & Plummer, S. E. (1998) LIBERTY-Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra, *Remote Sensing of Environment*, 65, 50-60.
- 13) Mueller, D. W. & Crosbie, (1997) Three-dimensional radiative transfer with polarization in a multiple scattering medium exposed to spatially varying radiation, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 57, 81-105.
- 14) 米 康充、福士亮太、平田竜一、小熊宏之、藤沼康実(2006) 「カラマツ林NPP算出値の検証－毎木調査・航空機レーザ計測・微気象学的手法－」日本森林学会北海道支部論文集、54、p.81-84.
- 15) 宇宙航空研究開発機構「校正係数および後方散乱係数への変換 (係数および変換式)」
http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/Pi-SAR/cal_valt.html
- 16) 渡辺学、島田政信、田殿武雄、大内和夫、中村和樹 (2006) 「Lバンド後方散乱係数を用いた森林の研究」Pi-SAR研究公募成果報告書、p.213-222.

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

＜その他誌上発表（査読なし）＞

特に記載すべき事項はない

（２）口頭発表（学会等）

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

（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) Takahashi, A., Oguma, H., Yone, Y. & Saigusa N. “Influence of thinning on microwave backscattering using the airborne synthetic aperture radar at a larch forest in Tomakomai, Japan” AsiaFlux Workshop 2009, ポスター発表、札幌市、2009年11月.
- 2) 高橋厚裕、小熊宏之、島田政信、渡邊学、米康充、三枝信子「北海道苫小牧カラマツ林における航空機搭載L-band SARを用いた森林バイオマス・構造変化に関する研究」第48回日本リモートセンシング学会、ポスター発表、つくば市、2010年5月.
- 3) Takahashi, A., Oguma, H., Shimada, M., Watanabe, M., Yone, Y. & Saigusa N. “Influence of thinning and wind throw on backscatter of the airborne L-band synthetic aperture radar at a larch forest in northern Japan” ESA iLEAPS EGU joint Conference, ESRIN, ポスター発表, Rome, Italy, 2010年11月.
- 4) Takahashi, A., Oguma, H., Shimada, M., Watanabe, M., Yone, Y. & Saigusa, N. Influence of thinning and wind throw on backscatter of the airborne L-band synthetic aperture radar at a larch forest in northern Japan. Hydrological Research Letters. (投稿中).