

博 士 論 文

航空レーザ計測による
単木資源情報の把握に関する研究

大 野 勝 正

目次

第 I 章 序論	1
I-1 森林・林業を取り巻く国内状況と森林リモートセンシングの必要性	2
I-2 森林リモートセンシングに関する既存研究と課題の整理	3
I-2-1 本研究で取り扱う森林資源情報	3
I-2-2 空中写真・衛星画像解析による森林資源把握	4
I-2-3 航空レーザ解析による森林資源把握	5
I-3 本研究の目的と構成	7
第 II 章 研究対象地の林分状況と使用した航空レーザ計測データ	9
II-1 佐賀県のスギ、ヒノキ林の林分特性	10
II-2 使用した航空レーザ計測データ	11
II-2-1 航空レーザ計測諸元	11
II-2-2 地盤高データ作成	16
II-2-3 樹冠表層高データ作成	16
II-2-4 樹冠高データ作成	18
II-3 現地調査データ	19
第 III 章 スギ、ヒノキ林の分布把握を目的としたレーザ林相図の開発	25
III-1 はじめに	26
III-2 使用したデータと方法	27
III-2-1 レーザ林相図に使用した航空レーザ計測データ	27
III-2-2 レーザ林相図の作成方法	28
III-2-3 レーザ林相図の林相区分方法と精度検証方法	32
III-3 レーザ林相図を用いたスギ、ヒノキ林の林相区分結果	34
III-3-1 レーザ林相図の作成	34
III-3-2 スギ、ヒノキ林の林相区分	37
III-4 考察	41
第 IV 章 樹冠形状モデリングおよび単木抽出手法の開発と単木樹高計測	44
IV-1 はじめに	45
IV-1-1 レーザ計測密度による対象立木密度	46
IV-2 使用したデータと方法	47
IV-2-1 単木抽出に使用した尾根谷度と樹冠形状指数の作成方法	48
IV-2-2 単木抽出方法・樹高計測方法と精度検証方法	51

IV-3 樹冠形状モデリングによる単木抽出と樹高計測の結果.....	54
IV-3-1 尾根谷度、樹冠形状指数の作成.....	54
IV-3-2 6種類の樹冠情報と2種類の抽出手法を用いた単木抽出.....	57
IV-3-3 単木抽出による樹高計測.....	72
IV-4 考察.....	76
第V章 樹冠・樹高情報を用いた胸高直径推定手法の開発と単木材積推定.....	80
V-1 はじめに.....	81
V-2 使用したデータと方法.....	82
V-2-1 回帰分析に用いた現地調査データ.....	83
V-2-2 胸高直径推定の回帰式に用いた説明変数.....	83
V-2-3 胸高直径推定のための回帰分析方法及び材積計算方法と精度検証.....	86
V-3 樹冠・樹高情報を用いた胸高直径推定と単木材積推定結果.....	87
V-3-1 胸高直径推定.....	87
V-3-2 単木材積推定.....	105
V-4 考察.....	108
第VI章 航空レーザ計測による広域資源把握.....	111
VI-1 はじめに.....	112
VI-2 使用したデータと方法.....	112
VI-3 航空レーザ計測による広域資源把握の結果.....	114
VI-4 考察.....	121
第VII章 総合考察.....	123
VII-1 航空レーザ計測による単木資源情報の把握に関する考察.....	124
VII-1-1 航空レーザ計測によるスギ・ヒノキ林の把握に関する考察.....	124
VII-1-2 航空レーザ計測による単木抽出・樹高計測に関する考察.....	125
VII-1-3 航空レーザ計測による胸高直径・材積の推定に関する考察.....	128
VII-2 航空レーザ計測による単木資源情報の把握の結論と今後の展望.....	130
謝辞.....	134
図表リスト.....	136
引用文献.....	142

第I章

序論

1-1 森林・林業を取り巻く国内状況と森林リモートセンシングの必要性

我が国の国土の約3分の2は森林であり、このうち約4割に相当する1,029万haが人工林である。これらの人工林の多くは戦後の拡大造成により植林され、林齢40年、9齢級以上の林分が約66%(林野庁, 2016)を占め、伐期を迎えている。しかしながら、拡大造林以後、育成期の森林は十分に利用されず、外材を中心とした木材利用が進んだため、木材自給率は20%台まで低下した。さらに、木材自給率の低下に伴い林業は衰退し、森林を管理する林業従事者は減少し、高齢化した。このような背景の中、伐期を迎えた多くの森林の有効活用、資源循環が課題となっている。

人工林の年間成長量は約8,000万m³、総蓄積量は約30億m³(林野庁, 2016)と推定されており、我が国の年間木材需要量の約7,000万m³と比較して十分な資源が存在していることが分かっている。近年木材自給率は30%を超え、回復傾向にあるが、国内の森林資源が十分活用されているとは言えない。また、国民が森林に期待する9つの役割の中で、木材生産は昭和55年に2位であったが、平成になり急激に順位を落とし、平成11年に9位に下がった。その後、徐々に順位を上げ、平成27年には4位まで回復した(林野庁, 2016)。国内の資源量が充実するにつれて、木材利用に対する期待が高まっていると考えられる。

一方で、海外に目を向けると途上国の森林は急速に減少し、森林減少及び劣化に由来する温室効果ガスの排出量は世界の総排出量の約1割を占めるとされている(IPCC, 2014)。2007年のCOP13以降、途上国の森林減少及び劣化に由来する温室効果ガスの排出の削減に向けた取り組み(REDD+: Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries: and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries)が始まり、COP21では「パリ協定」が採択された。我が国でも間伐などの施業による森林吸収量の確保や途上国の資源利用から国内の資源活用への移行が求められ、森林資源の活用ニーズが高まっている。

さらに、再生可能エネルギーの固定価格買取制度が始まり、木質バイオマスを利用した発電所の建設や稼働が全国に広がっている。稼働準備中を含め50以上のバイオマス発電設備があり、5,000kWの発電施設の場合は年間約10万m³の木材が必要とされ、持続可能なバイオマス発電のために燃料の安定収集は重要な課題となっている。加えて、日本政府は平成27年に「まち・ひと・しごと創生基本方針2015」を閣議決定した。この戦略の基本方針の中には林業の成長産業化の推進が掲げられており、木材需要の創出や需要に応じた安定供給体制の確立が重要とされている。

木材自給率の回復に向け、生産性・生産力の向上、安定供給体制が求められている中、ICT (Information and Communication Technology) 技術を活用した生産性の向上や集約化の促進による生産力の向上が検討されている。情報を活用し、情報伝達速度を上げるICT技術による生産性・生産力の向上には森林資源情報を高精度なデジタル情報として管理す

る必要があるが、これまで利用されている森林資源情報の種類は少なく、精度は高くないため、ICT 技術を活用できる状況とは言えない。林業従事者が減少し、高齢化する中、人為的に高精度な森林資源情報を整備することは時間的にも労力的にも困難であることから、広域に森林資源が把握できる森林リモートセンシングの利用が求められ始めている。特に、森林リモートセンシングの手法によっては wall-to-wall の全域解析が可能となることから、従来の現地調査のサンプル調査による全体推定と異なり、面的に全体の資源量を把握することができることが大きな利点であり、これまでにない新たな森林管理手法の可能性が検討されている。森林リモートセンシングは空中写真の利用から始まり、立体視により地形、樹高、林相区分、樹冠（樹木本数）、林分材積などの情報が取得されてきた。次に、衛星画像の活用により広域の森林資源把握が行われてきた。近年では航空レーザ計測により、地盤高データや樹冠高データといった 3次元情報を詳細に取得できることから、ICT 技術への活用が期待されている。そして、様々なリモートセンシング技術や ICT 技術を活用し、効率的な林業を目指す中で、スマート林業という言葉が生まれ、新しい林業の姿が検討されている。

1-2 森林リモートセンシングに関する既存研究と課題の整理

1-2-1 本研究で取り扱う森林資源情報

森林資源情報は一般的に森林簿で管理されている。資源量の情報更新は収穫予想表と林齢を基にして、機械的に材積量を年々増加させる仕組みで運用していることが多い。しかし、収穫予想表を作成した時期に比べ、現在は高齢級の森林管理となっていることから、当時の収穫予想表が高齢級林分に当てはまりが悪くなり、年を経るにつれ、材積情報の乖離が大きくなるという問題がある。また、植林時から時間が経ち、風雪害などの影響で森林の状況が変化したり、伐採した後に樹種の分布が変わることがあるが、その情報の更新が十分に行われていないなど、情報の更新頻度に課題がある。これらの理由から森林簿を基にして伐採計画を行った場合、現場との乖離が生じ、計画通りに木材生産できない可能性がある。このため、正確な伐採計画を立案するためには現地調査が重要となる。

これまで森林簿の情報や現地調査によるサンプル調査を基に伐採計画が立案されていたことから、本研究においては森林リモートセンシングで扱う森林資源の範囲として現地調査の代替となる情報の取得と設定する。現地調査では単木毎の情報（位置、樹高、胸高直径、材積）を取得しているため、森林リモートセンシング解析でも同様に単木情報を把握することが重要となる。また、ICT 技術を活用した生産性の向上を図るため、GIS で扱えるデジタル地理空間情報であることが求められる。さらに、森林施業の集約化を促進するためには集約化する範囲で森林資源量を把握できることが大切になる。このため、既存の林小班毎に解析結果を集計し、情報をとりまとめられることが重要となる。以上のことか

ら、GIS で使用できる単木情報を作成し、なおかつ、単木毎に樹高、胸高直径や材積などの資源量の情報を属性として与えて、さらに、これらを GIS で集計することを想定し、単木情報を整備する必要がある。よって、本研究では GIS で活用できる単木情報（位置、樹高、胸高直径、材積）を森林リモートセンシングで明らかにする。

1-2-2 空中写真・衛星画像解析による森林資源把握

森林リモートセンシングで従来行われてきた手法として空中写真測量や立体視がある。立体視ではオペレーターが地盤標高と樹頂点の標高を測定し、それらの標高値の差分を計算して樹高を算出する。このとき、地盤面が植生に覆われている場合は地盤標高を測定することは困難であり、樹高の測定誤差が生じる。さらに、この手法は人為的な操作であることから、オペレーターの習熟度や実体視の測標の設置傾向により誤差や個人差が生じることがある。また、樹高計測はサンプル的に行うことが一般的で、広域の森林において全樹木の樹高計測には不向きである。

空中写真判読から得られた平均樹高や平均樹冠直径などを説明変数にした材積量把握手法として航空林分材積表(大隅, 1987)がある。この手法から得られる材積は ha あたりの材積 (m^3/ha) であることから、対象とする林分の分布を識別し(林相区分)、その面積を計測する必要がある。林相区分は空中写真の立体視などで行われてきたが、Landsat など衛星画像が利用されるようになり、空中写真の RGB の 3 波長の画像の目視による林相の識別から、近赤外波長を含む 4 バンド情報を基にした自動分類が行われるようになってきた(Justice, Townshend, 1982; Norwine, Greigor, 1983; Toll, 1985)。空中写真は通常オーバーラップ 60%、サイドラップ 30%で撮影され、立体視などで利用されてきた。一方で、衛星画像はラップ率が小さく、単画像として利用すること、また、観測できる波長帯の情報が多く、空中写真に比べて観測範囲が広いことから、コンピューターを用いた自動分類の研究が進んできた。このようにデータの取得方法やセンサの違いから林相区分方法の違いが生じていると考えられる。さらに、衛星画像のテクスチャを利用した樹冠サイズの推定や材積量の推定(Teuber, 1990; Woodcock *et al.*, 1994)について研究され、樹高情報を使用しなくとも、林分レベルの森林資源量把握が可能となってきた。

その後、1999 年に地上分解能 1m 以下の高分解能衛星画像 IKONOS が打ち上げられ、樹冠を単木レベルで識別できるようになったことから、画像解析により単木の位置情報が取得できるようになった。単木の位置情報の取得については、衛星画像の樹頂点付近の輝度値が最も高くなることを利用して局所最大値フィルタにより単木を抽出する手法(Wulder *et al.*, 2000; 古家, 2014)が一般的に用いられている。このとき、樹種、樹冠の大きさによっては一つの樹冠内に複数の局所最大箇所が存在することがあるため、樹冠サイズに応じたウィンドウサイズを設定することが重要となる。抽出した単木情報を基に森林資源量の把握が検討されているが、このとき資源量を把握するために樹冠領域の情報が重

要となる。単木の樹冠領域を把握する手法として watershed 法(Wang *et al.*, 2004)、valley-following 法(Gougeon, 1995; Leckie *et al.*, 2003b)やテンプレートマッチング法(古家, 2014)などがある。これらの衛星画像の解析では 2 次元の面的な情報となり、資源量の推定に重要な高さ情報を得ることができないため、高さ情報について把握する方法が課題と考えられる。

一方で、近年では Structure from Motion(SfM)ソフトの発展により、空中写真の利用が再注目されている。従来の空中写真のラップ率に比べると 80%と高いラップ率が必要となるが、ソフトが自動でタイポイント（隣接する空中写真の中に存在する同一地点）を設置し、半自動で 3 次元情報の樹冠表層高データ（DCSM : Digital Canopy Surface Model）が取得できる。SfM から作成した 3 次元点群を航空レーザ計測のデータと比較した結果、約 90%の点群が±3m の誤差に入ることが明らかにされている(Wong *et al.*, 2016)。写真から作成した点群の誤差が大きくなる箇所は樹冠の角度が大きい箇所であることが示されており、太陽高度、影の影響で 3 次元点群の精度が異なることが考えられる。SfM ソフトの活用により 3 次元点群が空中写真から利用できるため、航空レーザ解析と同様に点群による森林資源解析の可能性が広がったが、基となる空中写真のみからは地盤高データ（DTM : Digital Terrain Model）が取得できないため、樹高を正確に把握することが課題となっている。

以上のように、衛星画像や空中写真の活用がなされてきたが、特に地盤の高さ情報の取得について課題があると考えられる。

1-2-3 航空レーザ解析による森林資源把握

SfM ソフトにより空中写真から 3 次元点群を生成して高さ情報を得られるようになったものの、空中写真は森林の表層面の情報を取得している。一方で、航空レーザ計測は航空機に搭載されたレーザ測距儀を用いて 3 次元情報を取得するシステムである。照射されたレーザパルスは地表に近づく間にビーム径が広がり、地表物に反射するときには約 30cm 程度のビーム径（フットプリント）になっている。森林域では、フットプリントの一部もしくは全部が樹冠表層で反射してファーストパルスが得られる。次に、林冠にギャップがある場合はこの隙間を通り抜け、フットプリントが亜高木や下層植生に反射して中間パルスが得られる。最後に、林床に光が到達するように、フットプリントは地盤まで到達し、地盤から反射してラストパルスが得られる。植生の間隙の大きさや分布、レーザの植生への進入角度に影響されるもののレーザ計測では一発のレーザ照射には複数の反射パルスがあり、異なる高さ情報を取得して植生の 3 次元構造を把握することが可能である。以上のように、空中写真は地表物の表面的な 2 次元的な高さ情報であるのに対して、レーザ計測では植生の内部を含めた 3 次元的な高さ情報が取得できるという違いがある。特に、空中写真では取得困難な詳細な地盤高の情報を取得できることがレーザ計測の大きな違いで、

地盤高データと樹冠表層高データを基に差分計算し、樹冠高データ (DCHM : Digital Canopy Height Model) が正確に取得できるという特徴を持つ。

1990 年頃から始まった航空レーザを活用した森林資源解析は計測密度が 0.1~0.25 点/m² (測点間隔 : 2~3m) 程度であったことから、単木レベルではなく林分レベルの樹高や材積などの解析が行われていた(Nilsson, 1996; Næsset, 1997a; Næsset, 1997b)。計測密度が高くなく、樹冠頂点付近にフットプリントが当たらないことから、現地調査の樹高と比べて 4m 程度低い、過小計測になる事例もあった。Næsset は過小計測を改善するために、15~30mのグリッドの最大値を樹高とした。その結果、樹高計測は約 1m 程度の誤差まで改善することを報告した。また、Nilsson は材積の推定にパルスの反射割合を含めて材積の推定精度向上に成功している。

その後航空レーザ計測機器の発展に伴い、レーザ照射頻度が 50kHz 以上になり、照射密度は 1 点/m²以上で利用されるようになった。計測密度が向上し、樹冠の大きさよりもフットプリントの間隔が小さくなってきたことから、それまでの樹頂点付近にフットプリントが当たらないという問題が解決し、樹高計測の精度が向上したものの、依然として樹高が過小に計測される傾向があった(Hyyppä, Inkinen, 1999; Leckie *et al.*, 2003a; Maltamo *et al.*, 2004)。

樹高以外の胸高断面積や材積などの森林資源量はレーザ反射パルスの高さの百分位数 (パーセンタイル) を基にした回帰分析が行われている(Lefsky *et al.*, 1999; Holmgren, 2004; Næsset, 2004b; Hollaus, 2006; Maltamo *et al.*, 2006; Ioki *et al.*, 2010)。さらに百分位数を用いた資源把握手法は数十~数百m²レベルで適用され、広域の資源把握が航空レーザ計測で行われるようになった(Næsset, 2004b; Hollaus *et al.*, 2009; Nord-Larsen, Schumacher, 2012)。

2000 年以降は急速にレーザ計測機器が発展し、計測密度が 30 点/m²程度まで取得できるようになった。これに伴い、これまでの林分で解析を行うエリアベースによる森林資源解析から単木ベースの樹高、樹冠の大きさ、胸高直径、材積など森林資源把握手法の開発が進んだ(Hyyppä, Inkinen, 1999; Persson *et al.*, 2002; Brandtberg *et al.*, 2003; Takahashi *et al.*, 2005a; 平田, 2005)。航空レーザ計測の密度を高くすることができるようになった一方で計測費用が高くなるという課題があり、コストも考慮した適切な計測密度を検討する必要があった。この点について、単木ベースの森林資源把握に必要な計測密度について検討した研究では 3~5 点/m²よりも密度が低くなる場合に単木抽出の精度が下がることが報告されている(平田, 2005; 縄村 *et al.*, 2007)。

現在、航空レーザ解析による森林資源把握では、エリアベースと単木ベースの手法が主流になっており、両手法について比較を行い、現地調査の代替としての可能性が検討されている(Latifi *et al.*, 2015)。エリアベースの解析ではレーザ計測から得られる情報を基にした森林資源推定となり、下層木も含めた推定であるが、単木ベースの資源把握では上層を形成している単木を抽出しているため、下層木の把握が困難であり、下層木の資源量が

含まれないという課題がある。また、気象害など森林の変化のモニタリング頻度が高くなってきていることから、航空レーザ解析による森林資源把握はランドスケープレベルでの活用には有効な手法とされ、Hyypä *et al.*,により両手法についての特徴がまとめられている(Hyypä *et al.*, 2008)。エリアベースについては、解析手法が比較的容易であるが、回帰式の作成のために多くのサンプルが必要となる。また、広域に展開する場合、計測密度や計測時期の違いによる植生の変化など計測条件により回帰式の適用範囲を検討する必要がある。一方、単木ベースでは、樹冠の大きさなど取得できる情報量が多くなり、材積の推定精度が高くなる傾向があるが、計測密度が高くなるため、費用が高額となり、また、解析の手法が複雑になる。単木ベースの手法がエリアベースの手法に比べて精度が高くなる要因として、エリアベースでは高さの分布情報を基にしているため、複数の目的変数(例えば、樹高、DBH、材積など)に対して、高さ情報のみを説明変数として回帰することに限界があった。一方で単木ベースでは樹冠の大きさなど高さ以外の情報も加えて目的変数を推定できることができ、推定精度が向上していると考えられる。そして、両手法の最も大きな違いは単木情報の有無である。エリアベースでは一本の樹木の高さ、DBH、材積などの情報を取得することはできないという課題がある。

エリアベースで用いられるレーザ反射パルスの高さの垂直分布情報を基にして樹高や材積などの情報だけでなく、樹冠率や林冠形状など林分構造の把握についても検討されている(Hall S, 2005; Haywood, Stone, 2011; Palace *et al.*, 2015)。さらに、林分構造とレーザパルスの反射強度を用いた樹種分類も検討されている(Holmgren, Persson, 2004; Orka *et al.*, 2009; Suratno *et al.*, 2009)。照射されるレーザの波長は使用機材によって異なるが、一般的には近赤外の1,064nmもしくは1,550nmであることから、反射強度は植生の識別に有効な情報と言える。Holmgrenはトウヒ、マツ、カンバを約9割の精度で分類することに成功している。

その他、近年では航空レーザ計測だけでなく、衛星画像やハイパースペクトル画像と組み合わせることで資源量把握の精度を向上させる研究が進んでいる(Maack *et al.*, 2016; Pham *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2017)。また、枯死木の抽出、モニタリングの手法についても検討されている(Wing *et al.*, 2015)。

1-3 本研究の目的と構成

本研究は我が国の国産材利用を促進するために、森林資源情報の把握を効率的に行う方法として航空レーザ計測データを活用した単木ベースの資源情報の把握を行う。特に林業の効率化、生産性の向上を図るためには本研究の成果が現地調査の代替となる手法として活用されることが重要である。

第Ⅱ章では研究対象とした佐賀県の林分特性と使用した航空レーザ計測データについて整理した。特に、森林資源解析のベース情報となる樹冠表層高データの作成方法では従来

の手法に加えて、従来法では樹冠表層面以外からの反射パルスを含む樹冠表層高データのため、その精度に課題があったことから、樹冠表層面で反射したパルスを機械的に抽出し、樹冠表層高データを効率的に作成する手法を提案した。また、第IV章、第V章で精度検証や回帰分析に使用した現地調査データについて整理した。

第III章ではスギ、ヒノキ人工林の既存分布情報が十分な精度を持っていないことから、スギ、ヒノキ林の把握手法について検討した。これまでは空中写真や衛星画像によりスギ、ヒノキ林などの林相を識別することが一般的であったが、レーザ林相図という空中写真に代わる画像を開発し、この画像を基にオブジェクトベース分類によるスギ、ヒノキ林の樹種区分を行った。

第IV章では、航空レーザ計測データを用いた単木ベースの資源把握のため、樹冠の形状情報を基にして、樹頂点を抽出する手法を開発した。従来法で作成した樹冠高データと本研究で新たに作成した高精細樹冠高データの2種類を用いて単木抽出を行い、樹冠高データが単木抽出に与える影響を検討した。また、これまで局所最大値フィルタ法による単木の抽出が一般的であったが、林分密度に応じたウィンドウサイズの設定が必要であり、また大きな樹冠では小さな凸部が誤抽出されることがあることから、単木を抽出する前に樹冠領域を抽出し、その中から単木の位置を抽出する手法を考案した。単木の位置を抽出した後に樹木位置から樹高を算出し、樹木の位置と樹高の情報を取得した。

第V章では取得した樹木位置情報を基にして、樹冠の大きさ（樹冠投影面積、樹冠表面積、樹冠体積、樹冠長、樹冠長率）と樹高を基に胸高直径を推定する手法を検討した。これまでは検討されてこなかった樹冠体積、樹冠長や樹冠長率などの因子を加え、胸高直径の推定に適した説明変数を検討した。また、佐賀県全域を対象として胸高直径推定の回帰式を検討し、広域での回帰式の適用可能性を明らかにした。さらに、第IV章で得られた樹高と胸高直径を用いて単木材積を算出して、現地調査と同じ手法で森林資源を把握する手法を確立した。

第VI章では第IV章、第V章で開発した手法で単木ベースの森林資源把握を行い、第III章で区分したスギ、ヒノキ林の範囲で森林資源量のとりまとめを行った。一方で、従来用いられている樹種区分として森林簿の樹種区分が存在していることから、森林簿の樹種区分を基にレーザ解析による単木ベースの森林資源量の集計を行った。これら2種類の森林資源量に森林簿の材積を加えて、3種類の森林資源量を比較し、航空レーザ計測による広域の森林資源把握手法についてとりまとめた。

第VII章では各章で得られた知見を基に航空レーザ解析による単木ベースの森林資源把握の課題をまとめた。また、他地域への展開を想定し、技術的な適用範囲、展望について考察を行った。総括として航空レーザ計測が国内の持続可能な森林経営に果たす役割をまとめた。

第II章

研究対象地の林分状況と使用した航空レーザ計測データ

II-1 佐賀県のスギ、ヒノキ林の林分特性

佐賀県は東部に筑後川が位置し、北東部は背振山地（背振山 1,055m、金山 967m など）をもって福岡県と境をなしている。中央部には天山（1,046m）があり、北西部は玄界灘に臨む松浦半島が突出している。南西部から南部にかけては、多良岳山地（経ヶ岳 1,076m、多良岳 996m）や国見山（777m）で長崎県との境をなしている。なお、経ヶ岳 1,076m は佐賀県の最高地点である。

土壌は北部山岳地帯や中央部で花崗岩を母体とした土壌が多く、スギの造林適地が多く分布している。東部の乾燥土壌ではヒノキ林が多く分布している。また、南部は粘土質土壌が広く分布し、ヒノキの適地が多い。東松浦半島は玄武岩溶岩流が台地面に広くあらわれ、土壌は表層土が浅く粘性が強いため、生育環境は良くない。

年平均気温は山間地で約 11℃、平坦地で約 16℃である。年間降水量は北部及び中央部の山間地で 2,000～2,400mm、平坦地で 1,400～1,800mm である。また、西部は山間地、平坦地ともに約 2,000mm で、南部は他地域よりも雨量が多く、山間地で 3,000mm、平坦地で 2,500mm である。佐賀県の平均降水量は約 2,200mm で、全国平均の約 1,800mm よりも多い。佐賀県の森林（5 条森林）面積は約 94,200ha であり、そのうち人工林は約 63,500ha で、人工林率は約 67%と日本で最も高い割合である(佐賀県, 2013; 佐賀県, 2016)。

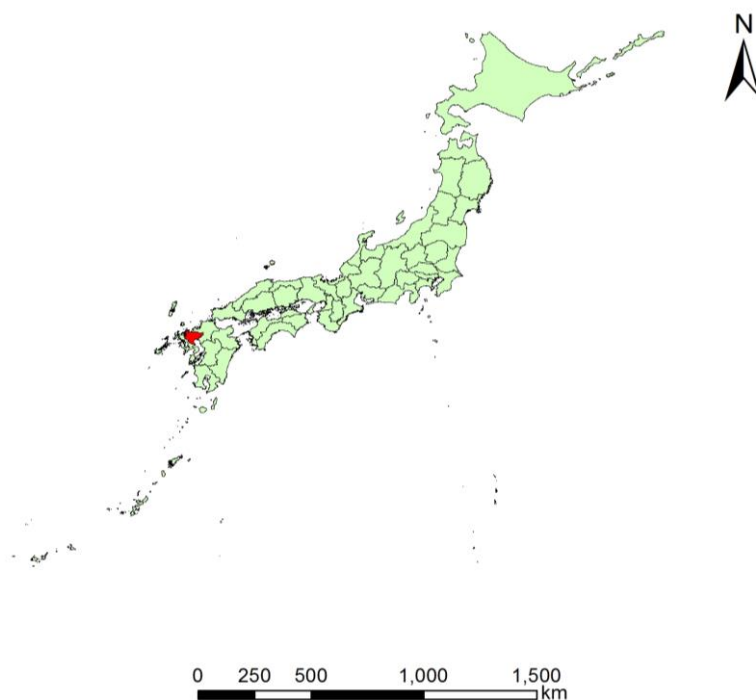


図 II-1 日本国における佐賀県の位置（赤色で表示された箇所）

II-2 使用した航空レーザ計測データ

II-2-1 航空レーザ計測諸元

本研究で使用した航空レーザ計測機器は Leica 社製 ALS50-II 及び ALS60 である。レーザ計測は 2011 年 7 月～11 月に行われ、計測は東部地区と西部地区の 2 地区に分けて計画、実施された。東部地区は 483 コースで、西部地区は 624 コース、合計飛行コースは 1,107 コースとなった。レーザの計測密度は両地区ともに約 4 点/m²で取得された。なお、航空レーザ計測では計測密度 4 点/m²のデータ取得を行う場合、安全率を設定して約 5 点/m²の照射密度でレーザ計測計画を行う。また、計測密度は、対地高度が最も高い箇所を基準面として設計するため、基準面よりも標高が高い箇所（対地高度がより低い箇所）はレーザの計測密度が高くなる。

東部地区は対地高度 800m～1,500m、対地速度 252km/h で飛行し、レーザの照射頻度は 68,000Hz～80,000Hz（1 秒間に 68,000～80,000 発照射）、スキャン頻度は 54Hz～58Hz（1 秒間に 54～58 振幅）、スキャン角は±12° ～±14°、フットプリントサイズは 17～33cm、サイドラップ率は 50%以上であった。飛行コース図を図 II-2 に示す。

西部地区は高度を 2 つ設定し、低高度と高高度計測を行った。低高度ブロックは対地高度 1,000m～1,450m、対地速度 222km/h で飛行し、レーザの照射頻度は 60,000Hz、スキャン頻度は 35.9Hz、スキャン角は±18°、フットプリントサイズは 22～32cm、サイドラップ率は 60%であった。飛行コース図を図 II-3 に示す。

高高度ブロックは対地高度 1,231m～1,981m、対地速度 203km/h で飛行し、レーザの照射頻度は 31,000Hz、スキャン頻度は 46.2Hz、スキャン角は±12.5°、フットプリントサイズは 27～44cm、サイドラップ率は 60%であった。飛行コース図を図 II-4、図 II-5 に示す。

なお、西部地区の高高度計測は計測密度を満たすために、補完的な計測である。

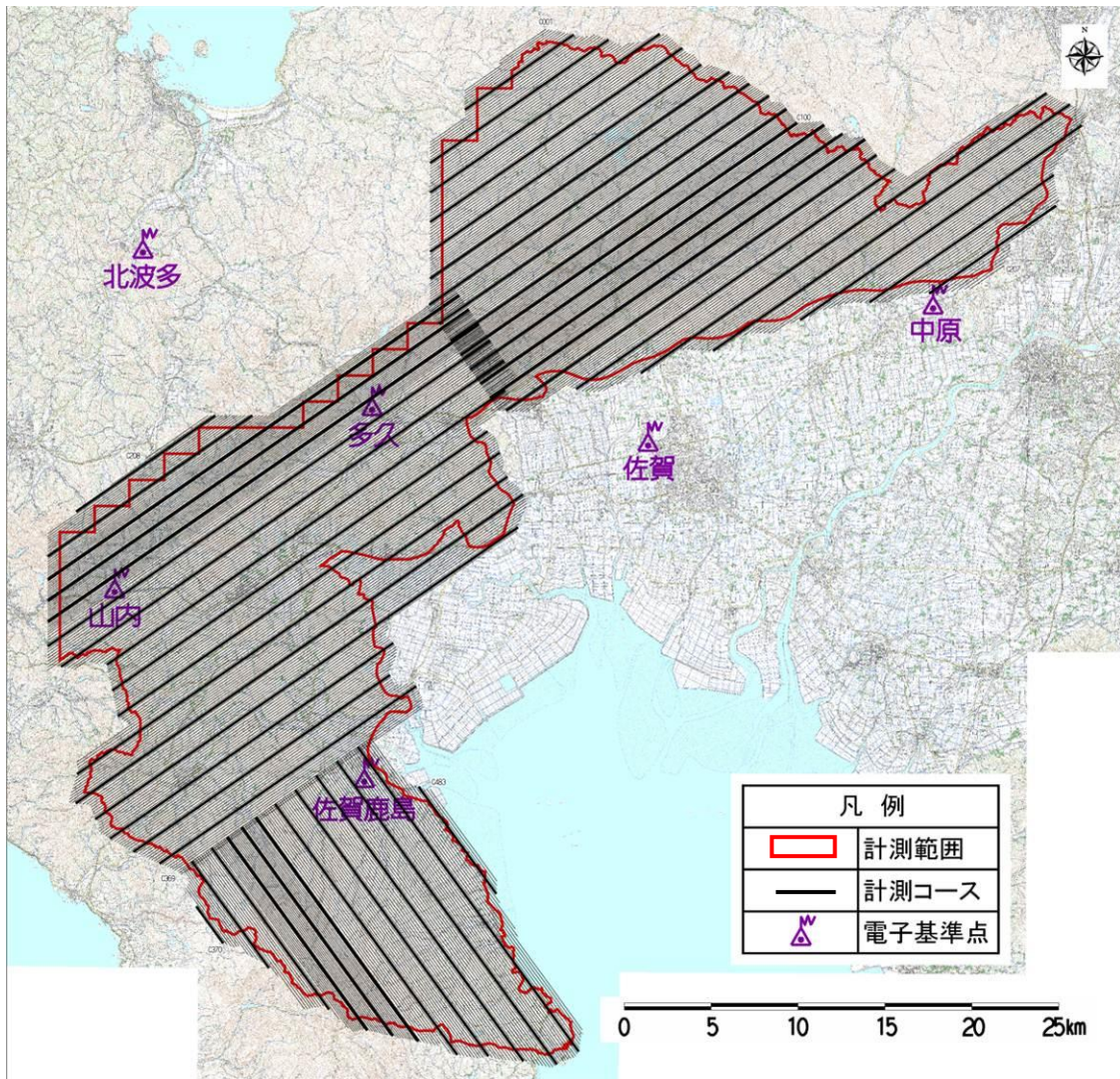


図 II-2 東部地区航空レーザ計測コース図

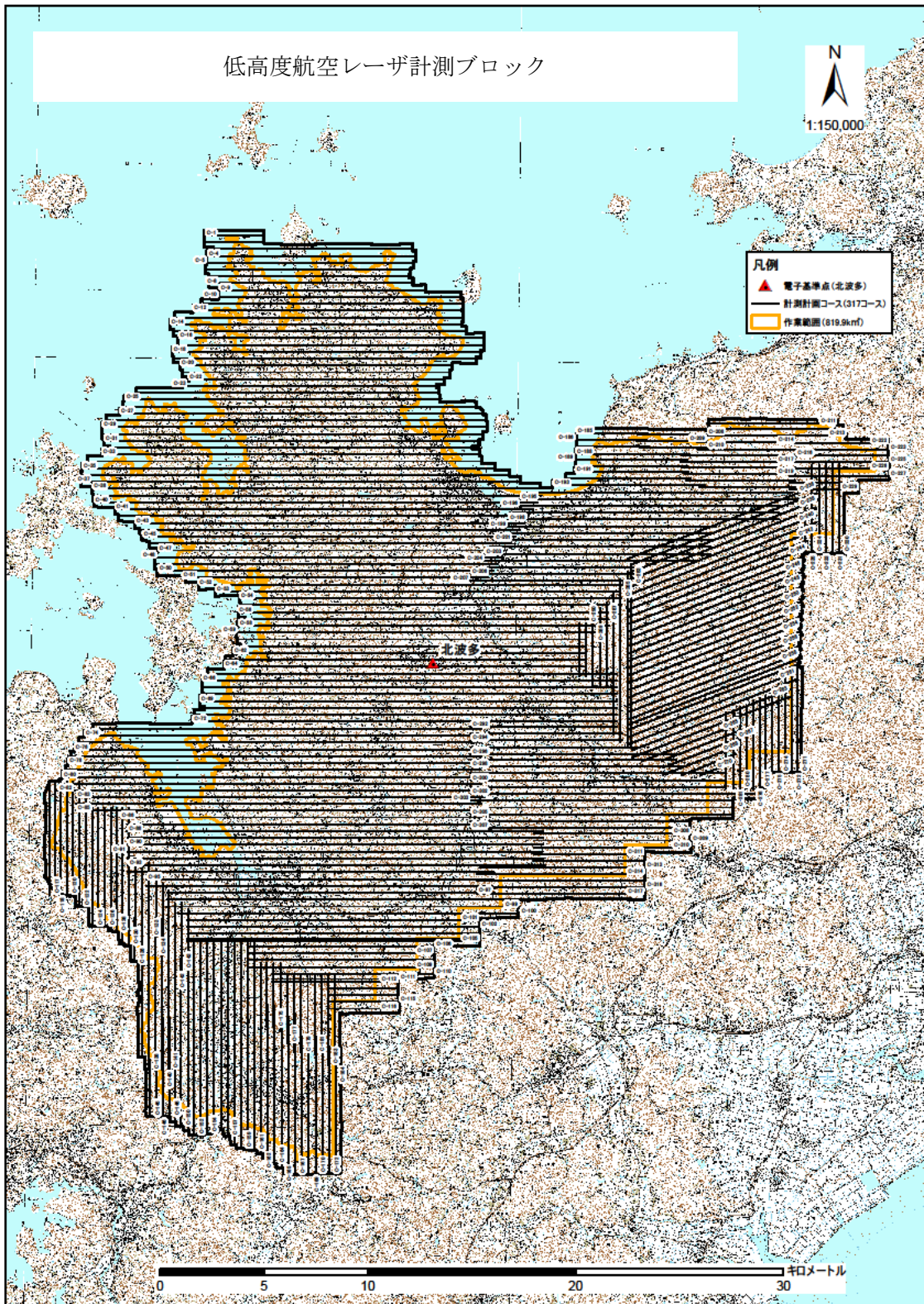


図 II-3 西部地区航空レーザ計測コース図 (低高度ブロック)

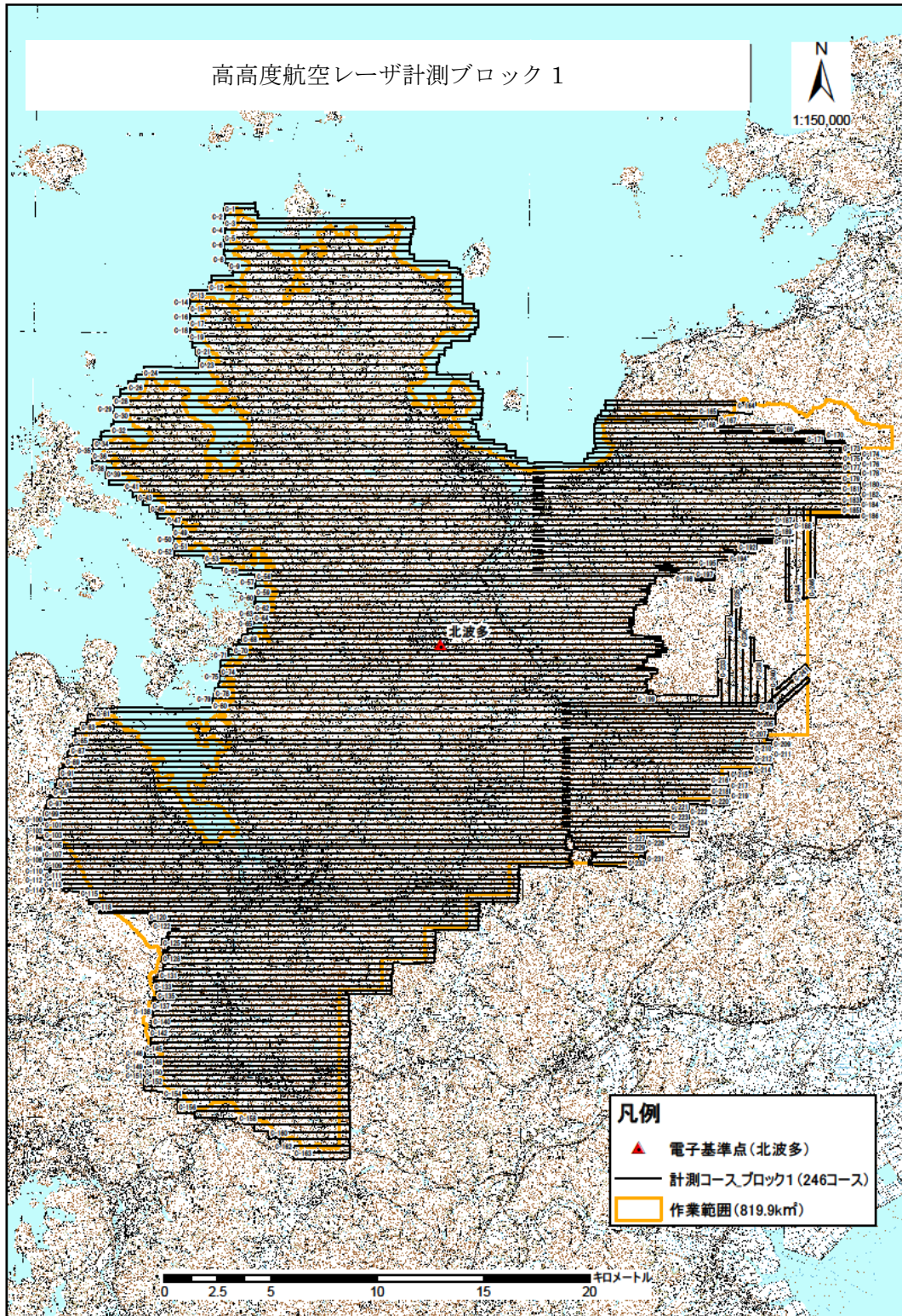


図 II-4 西部地区航空レーザ計測コース図 (高高度ブロック 1)

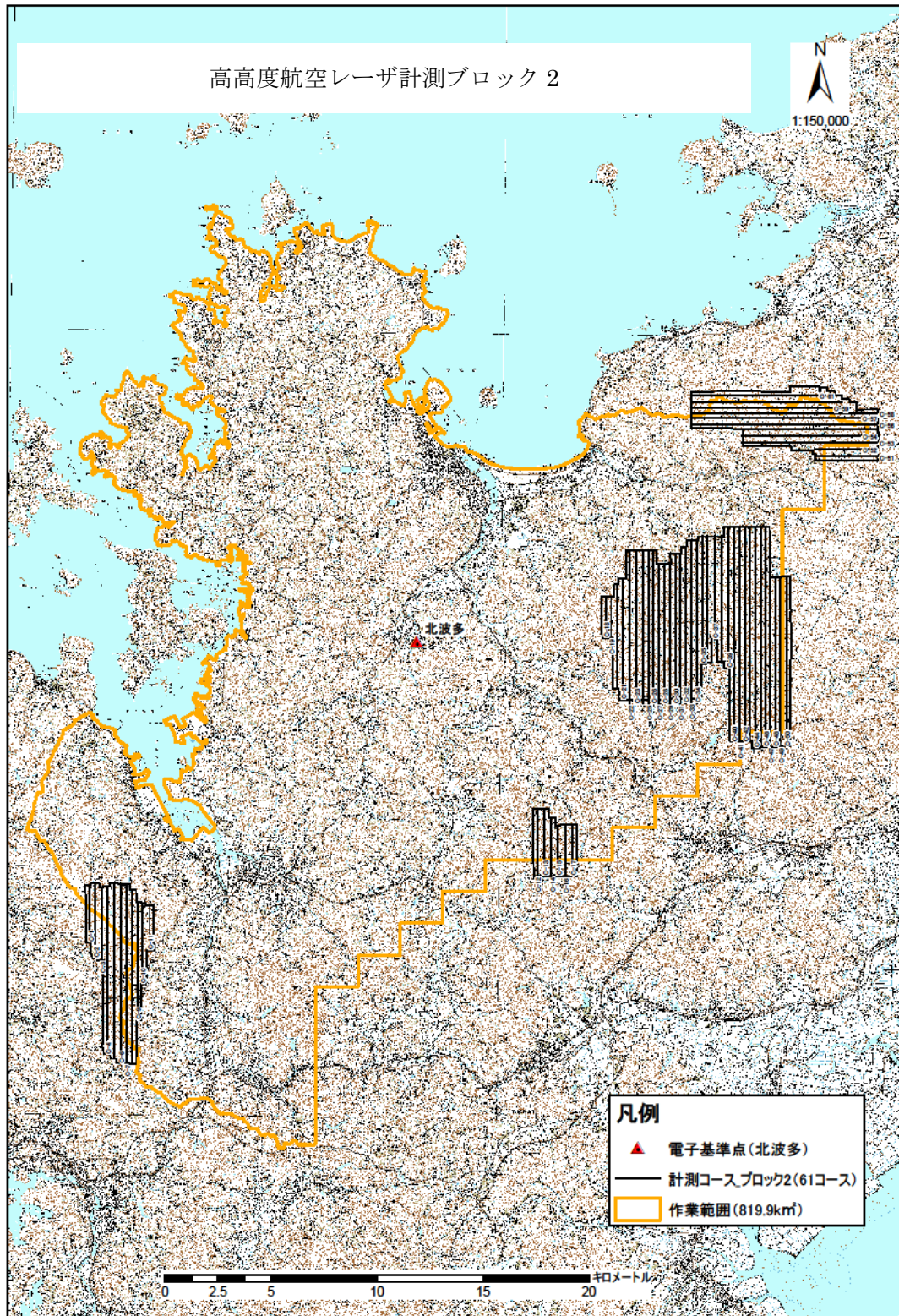


図 II-5 西部地区航空レーザ計測コース図（高高度ブロック 2、補完計測）

II-2-2 地盤高データ作成

航空レーザ計測データは一つの照射パルスから複数の高さからの反射パルスを得ることが可能で、最初に反射したパルスがファーストパルス、最後に反射したパルスがラストパルス、ファーストパルスとラストパルスの間に反射したパルスが中間パルスである。また、裸地などレーザのビームが透過できない地上物では一度の反射となり、この反射をオンリーエコーと呼ぶ。地盤高データの作成にはラストパルスとオンリーエコーのデータを用いた。ラストパルスやオンリーエコーには林床植生やうっ閉した樹冠からの反射パルスも含まれ、必ずしも地盤から反射した情報ではないため、地盤高からのデータを抽出する必要があり、フィルタリングと呼ばれるプロセスを経て地盤高データが作られる。フィルタリングはベントレー・システムズ社のマイクロステーション v8 とマイクロステーション上で動作する terra solid 社の terra scan を用いた。まず、terra scan の自動フィルタリング機能を使い、ラストパルスとオンリーエコーから地盤高データの候補を抽出し、その後陰影図などの地形表現地図を作成して目視で植生などの残存地物を除去した。フィルタリング処理により得られた地盤からの反射パルスは 2 次元空間にランダムに分布した状態であるため、TIN (Triangulated Irregular Network) により内挿補完を行い、0.5m 格子のラスタ型地盤高データ (DTM) を作成した。

II-2-3 樹冠表層高データ作成

樹冠表層高データ (DCSM) は森林資源解析のベースとなる情報であり、DCSM の品質はそれ以降のデータ解析の精度に大きな影響を与えることから、樹冠形状を正確に表現しているデータ作成が解析のために重要となる。樹冠表層高データの作成では一般的にファーストパルスとオンリーエコーが用いられているが、これらのパルスは林床に到達していることがあり、必ずしも樹冠表面で反射していない(Lim *et al.*, 2001)。樹冠表層を透過したパルスは樹冠表層面に比べて低い位置で反射することから樹冠表層面に穴が空いたように見える(Leckie *et al.*, 2003a)。このように樹冠表面を表す情報が正確でない状態の樹冠表層高データを用いて単木抽出を行うと、誤抽出につながることから、樹冠の再現性を高めて抽出精度を向上させる研究が行われている(Brandtberg *et al.*, 2003; Khosravipour *et al.*, 2016)。

樹冠の表現性を高めるために、初めに検討された手法は照射密度に合わせて最大値フィルタを適用することである(Bortolot, Wynne, 2005)。例えば、4 点/m²の計測密度であれば、0.5m 格子のラスタ型 DCSM データが作成できるので、検索範囲を 0.5m×0.5m に設定し、この範囲内の最大値のみを DCSM の作成に用いる。しかしながら、この手法を用いたとしても検索範囲に反射パルスが 1 点しかない場合もあり、樹冠表層面以外からの反射パルスは残ったままになることがわかった。次に、DCSM もしくは樹冠高データをウィンドウ

サイズで平滑化する手法である。ウィンドウサイズ 3×3 (0.5m 格子の場合、1.5m \times 1.5m) に含まれる 9 つの格子データの平均値もしくは重み付け平均値を計算し、中央の格子データに置き換える (Persson *et al.*, 2002; Popescu *et al.*, 2003; Yu *et al.*, 2011)。この手法は樹冠表面の以外からの反射パルスの影響を低減する効果だけでなく、大きい一つの樹冠内にある枝などの小さな凸部を滑らかにする効果もあり、単木の過剰抽出を抑えることができる。しかし、樹冠表面が滑らかになり、樹頂点の位置が不明瞭になることで、過密林分での単木抽出精度が低下する傾向がある。このような問題を解決するために、5 つの高さ区分を設定して、それぞれの高さ区分に含まれる反射パルスから格子データを作成し、これらを組み合わせて樹冠表面の表現性を高くした DCSM を作成する手法が考えられた (Khosravipour *et al.*, 2016)。この手法は①高さの区分、②高さ区分毎の格子データの作成、③格子データの組み合わせによる DCSM 作成という 3 つの工程が必要となり、広域展開には時間を要することから、より簡易に樹冠表層面からの反射パルスを選択する方法を検討した。

本研究では開発した手法を評価するため DCSM を 2 種類作成した。一つは最大値フィルタを用いた最大値 DCSM で、0.5m の最大値フィルタの後反射パルスを TIN によりデータ補完を行い、0.5m 格子データとしたものである。他方は周囲と比較して低い箇所にある反射パルスを除去するため、最大値フィルタの後、以下のフィルタ処理を行った後に反射パルスを TIN によりデータ補完を行った高精細 DCSM である。フィルタ処理はウィンドウサイズ 3×3 に含まれる全ての反射パルスを計算対象として平均値と標準偏差を計算し、平均値から標準偏差を引いた値を閾値とし、閾値よりも標高値が大きい場合に高精細 DCSM を作成に用いる反射パルスとした。

$$A_f(x, y) = \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 h_f(x+n, y+m) / 9 \quad (\text{式 II-1})$$

$$SD_f(x, y) = \sqrt{\sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 (h_f(x+n, y+m) - A_f(x, y))^2 / 9} \quad (\text{式 II-2})$$

$$TH_f(x, y) = A_f(x, y) - SD_f(x, y) \quad (\text{式 II-3})$$

$$h_f(x, y) > TH_f(x, y) \quad (\text{式 II-4})$$

ここで、 x および y はウィンドウサイズの中心座標 (m)、 A_f はウィンドウサイズの平均標高値 (m)、 h_f は任意メッシュ内の反射パルスの標高値 (m)、 SD_f はウィンドウサイズの標準偏差、 TH_f はフィルタの閾値 (m) である。これらの計算には Microsoft 社の Visual C++ 2010 Express を用い、処理プログラムを作成して計算を行った。

ウィンドウサイズに含まれる反射パルスを用いて閾値 TH_f を計算した後に、式 II-4 に示

した式を用いて、再度ウィンドウサイズに含まれる反射パルスを対象として、閾値 TH_r と数値の大小を比較し、値の大きい反射パルス h_r 抽出して TIN によりデータ補完を行って 0.5m 間隔の高精細 DCSM を作成した。

II-2-4 樹冠高データ作成

樹冠高データ (DCHM) は DCSM と DTM の差分計算から得られる。DCSM を 2 種類作成していることから、DCHM についても、最大値フィルタによる最大値 DCHM と高精細 DCHM の 2 種類を作成した。どちらの DCHM も 0.5m 格子データである。二つの DCHM の比較を図 II-6 に示す。左の図に示した最大値フィルタのみのデータでは、最大値であっても林冠内部からの反射パルスが含まれているため、林冠に樹冠高が低いことを示す黒いエリアが点在している。一方、高精細 DCHM は樹冠高の低い箇所がなくなり、樹冠表層をより正確に表現したデータとなっていることがわかる。

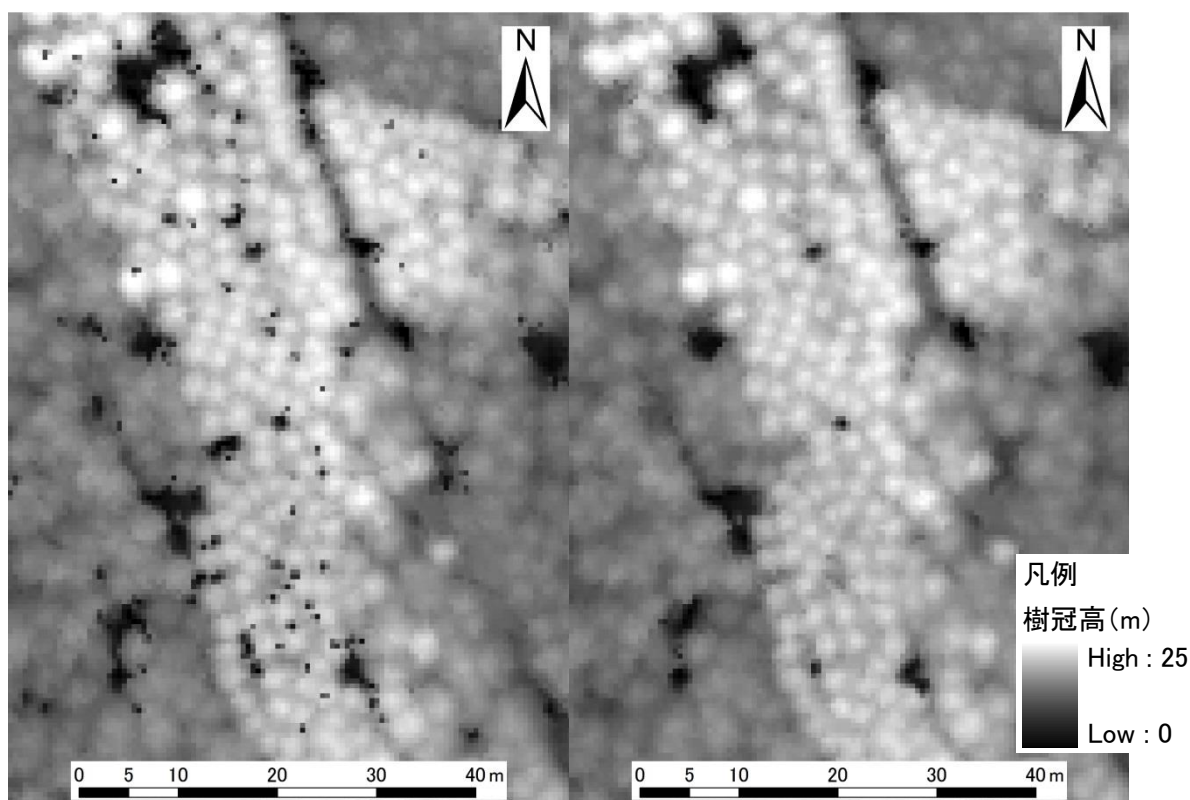


図 II-6 最大値 DCHM (左図) と高精細 DCHM (右図) の比較
(左図：最大値フィルタ、右図：最大値フィルタ+高精細フィルタ)

高精細 DCHM により樹冠表層面の表現性が高まることから、第三章、第五章、第六章では高精細 DCHM を用いた。また、第四章では DCHM の違いが単木抽出に与える影響

を評価するために、2種類のDCHMを使用した。

II-3 現地調査データ

スギ、ヒノキ林の現地調査データを第IV章、第V章の精度検証や回帰式の作成に用いるため、スギ129点、ヒノキ126点で行われた既存現地調査結果を利用した。現地調査箇所は林齢や地域的な偏りがないように選点されている。現地調査箇所を図II-7に示す。現地調査は2011年9月28日～10月24日にかけて行い、補足調査を12月20日～22日および2012年2月25日に実施され、航空レーザ計測の時期とほぼ同時期に現地調査は行われた(佐賀県, 2012)。

調査地点を決める際、プロットは単一の樹種で構成され、プロット内の樹高や胸高直径のばらつきが少ない林分が選定されている。また、プロットは尾根を跨がず、均質な斜面となるようにし、植生に大きなギャップを含まないようにされている。各地点の調査は0.04haの円形プロットで行い、円形プロットの境界はVertexIVで水平距離11.3mを測り、中心の座標はGPS測位で観測された。

樹木本数のカウントでは全木本数に加えて、樹冠に到達していない劣勢木の本数もカウントした。力枝の位置を枝下高として、各プロットで上層を形成する代表木10～20本の樹高と枝下高をVertexIVで計測した。代表木以外の樹木の樹高は、代表木の樹高と胸高直径を用いて樹高曲線を作成し、現地調査の胸高直径から樹高を推定した(図II-9～図II-11)。このとき、地質により水分条件や土壌特性が異なり、樹高成長が異なることから、地質区分で分けて樹高曲線を作成した。樹高曲線を分けるために使用した地質区分図を図II-8に示す。また、地質区分毎の樹高曲線は以下の通りである。

$$\text{花崗岩地帯} : H = 9.9777Ln(d) - 14.285 \quad (\text{式 II-5})$$

$$\text{堆積岩地帯} : H = 7.6588Ln(d) - 6.1951 \quad (\text{式 II-6})$$

$$\text{火山岩地帯} : H = 10.314Ln(d) - 14.587 \quad (\text{式 II-7})$$

ここで、 H は樹高(m)、 d は現地調査胸高直径(cm)である。

調査樹木の材積は九州地方の材積式(林野庁, 1970)を用いて、樹高と胸高直径の2変数から算出した。材積式は以下の通りである。

- ・スギ(飼肥、屋久島を除く、昭和37年調整)

$$\log V = -5 + 0.796182 + 1.819629 \log d + 1.025738 \log h \quad (d: 4 \sim 32\text{cm未満})$$

$$\log V = -4 + 0.0754761 + 1.6644424 \log d + 0.9881512 \log h \quad (d: 32\text{cm以上}) \quad (\text{式 II-8})$$

・ヒノキ (昭和 36 年調整)

$$\log V = -5 + 0.87211 + 1.93699 \log d + 0.81243 \log h \quad (d: 4 \sim 12\text{cm未満})$$

$$\log V = -5 + 0.682931 + 1.921617 \log d + 1.016795 \log h \quad (d: 12 \sim 22\text{cm未満}) \quad (\text{式 II-9})$$

$$\log V = -5 + 0.7985347 + 1.7862040 \log d + 1.0696647 \log h \quad (d: 22\text{cm以上})$$

ここで、 V は単木材積 (m^3)、 d は胸高直径 (cm)、 h は樹高 (m) である。

スギ、ヒノキの現地調査結果の一覧を表 II-1 に示す。表中の立木密度、材積はプロット合計値を ha 当たりに換算したものであり、樹高、樹冠長、胸高直径はプロット平均値である。スギ林の立木密度は 400~2,925 (平均 1,220) 本/ha、樹高は 8.4~25.4 (平均 19.1) m、樹冠長は 1~10.1 (平均 3.7) m、胸高直径は 13~39 (平均 25.8) cm、材積は 175~1,026 (平均 585) m^3/ha であった。また、ヒノキ林の立木密度は 450~2,700 (平均 1,323) 本/ha、樹高は 7.9~24.8 (平均 16.2) m、樹冠長は 1~8.9 (平均 3.3) m、胸高直径は 12~37 (平均 22) cm、材積は 111~1,089 (平均 412) m^3/ha であった。立木密度の平均はヒノキが 103 本多く、樹高の平均はスギが 2.9m 高く、胸高直径の平均はスギが 3.8cm 太く、材積の平均はスギが 173 m^3 多くなっている。

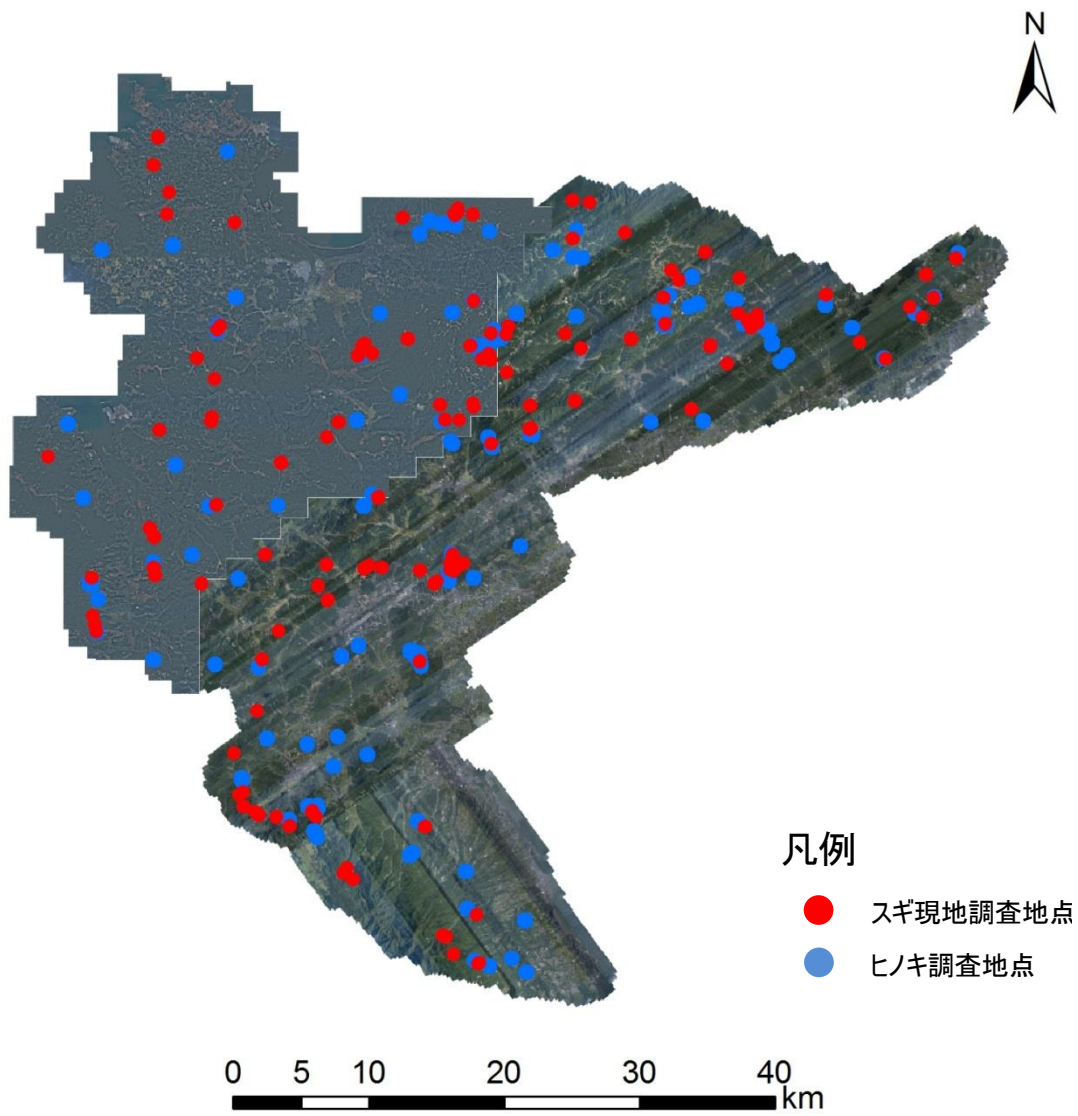


図 II-7 現地調査箇所位置図

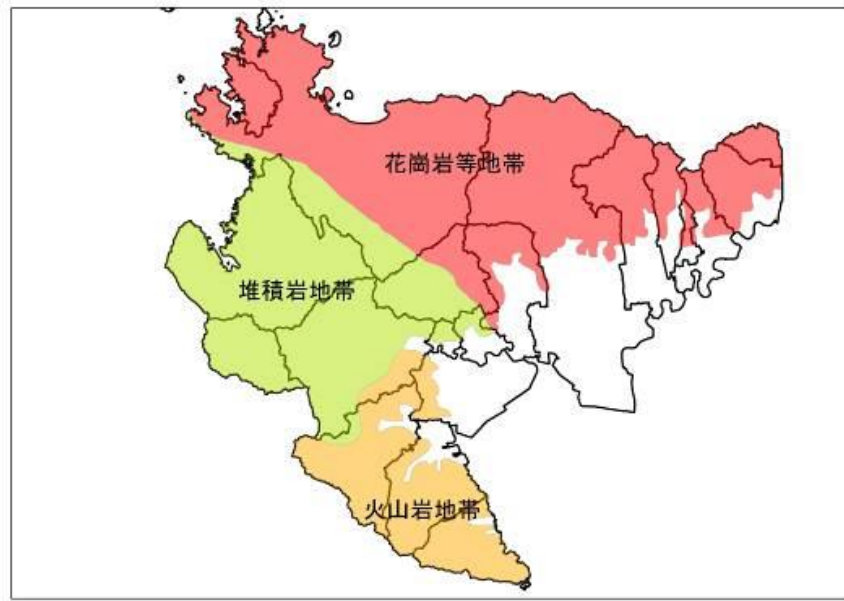


図 II-8 地質区分図

(出典：佐賀の自然をたずねて (佐賀県高等学校教育研究会理科部会))

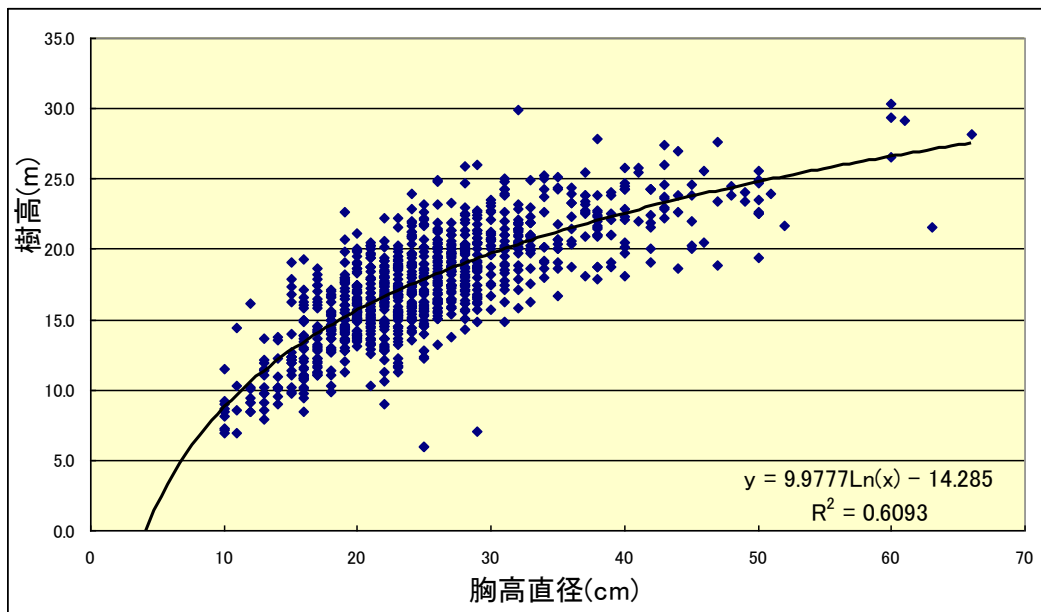


図 II-9 花崗岩地帯の樹高曲線

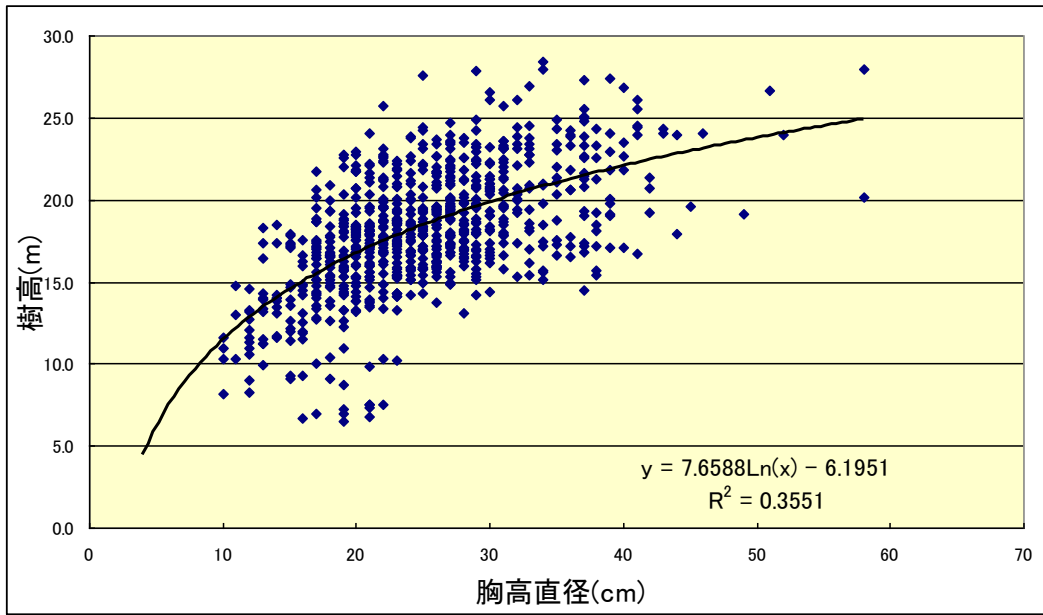


図 II-10 堆積岩地帯の樹高曲線

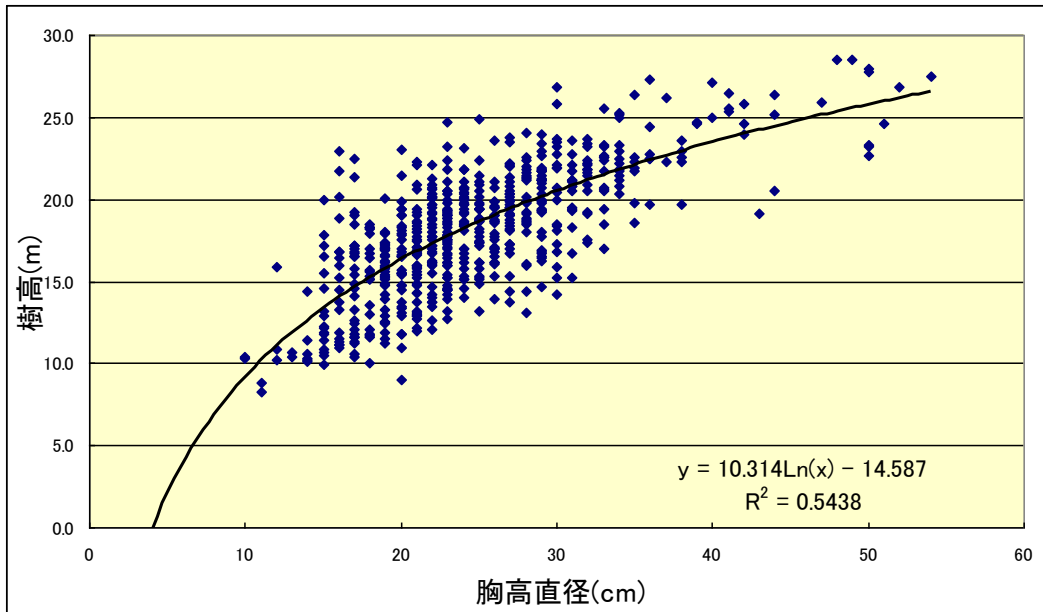


図 II-11 火山岩地帯の樹高曲線

表 II-1 現地調査プロット情報一覧

		スギ	ヒノキ
調査プロット数		129	126
立木密度 (本/ha)	平均	1,220	1,323
	最小	400	450
	最大	2,925	2,700
	標準偏差	411	499
平均樹高 (m)	平均	19.1	16.2
	最小	8.4	7.9
	最大	25.4	24.8
	標準偏差	2.7	3.0
平均樹冠長 (m)	平均	3.7	3.3
	最小	1	1
	最大	10.1	8.9
	標準偏差	2.0	1.7
平均胸高直径 (cm)	平均	25.8	22.0
	最小	13	12
	最大	39	37
	標準偏差	4.3	4.6
材積 (m ³ /ha)	平均	585	412
	最小	175	111
	最大	1,026	1,089
	標準偏差	161	166

第III章

スギ、ヒノキ林の分布把握を目的とした

レーザ林相図の開発

III-1 はじめに

スギ、ヒノキの単木ベースの森林資源を把握するためには、スギ、ヒノキの分布を把握する必要がある。森林簿には植栽時の樹種の情報が残されているが、台風や積雪などの気象害により倒木となり、その後広葉樹など植栽時とは異なる樹種に変遷する場合がある。また、伐採後の更新により樹種が変わることがあるが、森林簿の更新が十分な頻度で行われていない場合、現在のスギ、ヒノキ林の分布を正確に把握することができない。このため、スギ、ヒノキの分布を把握する手法が求められている。

広域の樹種分布の把握には空中写真や衛星画像が用いられてきたが、これらのセンサはパッシブセンサであり、日射量に影響され画質が変化する。例えば、深い谷部であれば、太陽高度によっては影が生じ、暗部ができて樹種の識別が困難になる。また、日向部分と日陰部分、観測日の天候などでコントラストが生じて、自動分類を行うときに誤分類の原因となる。このようにパッシブセンサは太陽光の強度に影響を受けるため、画質の均質性に課題があり、樹種識別の精度を低下させる可能性がある。

一方、航空レーザ計測はアクティブセンサであり、太陽光の影響を受けない。レーザスキャナから地表に向けエネルギーを照射し、照射されたレーザが地表物に反射して戻ってきたエネルギーの強さを記録している。本研究で用いたレーザ計測機器は Leica 社製の ALS シリーズであり、照射されるレーザの波長は樹種の識別に有効な近赤外の波長帯 1,064nm である。また、反射強度は葉の大きさ、角度、密度によって異なる値となる (Korpela *et al.*, 2010b) ことから、反射強度を樹種分類に利用することができる。これまでの研究では航空レーザ計測の反射強度と反射パルスの高さ情報(百分位数など)を用いて、針葉樹の樹種の区分が行われている (Holmgren, Persson, 2004; Orka *et al.*, 2009; Suratno *et al.*, 2009)。さらに、反射強度と反射パルスの高さ情報のヒストグラムの歪度と尖度に注目し、より樹冠の垂直分布を考慮した分類がなされている (Antonarakis *et al.*, 2008)。また、反射強度とウェブフォームによる樹冠の形状推定から熱帯林の樹種分類が行われている (Cao *et al.*, 2016)。これらの分類は反射強度と反射パルスの高さ情報のみを用いて単木ベースで行われており、航空レーザ計測データによる樹種分類の可能性を示している。しかしながら、樹冠サイズが小さい樹木では、その樹冠から反射するパルス数が多くなく、樹冠の形状を推定することが困難になることから、分類精度が低下する。高い精度で分類するためには一つの樹冠に対して 80 点/m²以上の反射パルスがあることが望ましいと報告されている (Holmgren, Persson, 2004; Li *et al.*, 2013)。本研究で使用するレーザ計測の密度は 4 点/m²であり、スギ、ヒノキ林の密度は最多で約 3,000 本で、樹冠サイズは概ね 3.3 m²であることから、一つの樹冠から約 13 点の反射パルスとなり、単木ベースでの分類精度が低下することが予想される。また、反射強度や高さ情報を用いた樹種分類の精度は 100%ではないことから、実際に間伐などの施業を行う場合には再度空中写真などを用いて、分類結果を確認し、樹種の分布状況を把握する必要がある。このとき、空中写

真や衛星画像には影などで樹種の識別が困難になる箇所が生じる可能性があるため、従来の画像に代わる分類結果の確認に有効な情報が必要となる。

上述の研究から航空レーザ計測の反射強度と高さ情報が樹種分類に有効であることがわかった。そこで本章では、反射強度と樹冠高データを基にして、佐賀県の人工林植栽樹種であるスギ林、ヒノキ林の識別が可能で、空中写真の代替となる画像として「レーザ林相図」を開発することを目的とした。さらに、開発したレーザ林相図を用いた画像分類を行い、スギ、ヒノキ、その他広葉樹林の分布把握の可能性を検討することを目的とした。

III-2 使用したデータと方法

III-2-1 レーザ林相図に使用した航空レーザ計測データ

スギ、ヒノキ林を区分するために DCHM に加えて、反射強度データが必要となる。反射強度データは地物の分光反射特性により、同じ地表物から反射したパルスであれば、同様の数値が記録される。例えば、同様の分光反射特性を持つスギ林で反射すれば、どの地域の反射強度であっても同様の値となる。しかしながら、センサから地表物の距離や大気の状態により照射したレーザのエネルギーは減衰し、同じ植生に反射しても同様の値とならない。このため、同様の値となるように反射強度の補正がなされている (Donoghue *et al.*, 2007; Höfle, Pfeifer, 2007; Gatzliolis, 2011)。特に、地表物までの距離が大きく影響し、反射強度の違いとなって表れている。また、同じメーカーのセンサであっても個体差があり、地表物のターゲットで反射強度を調整する研究も行われている (Kaasalainen *et al.*, 2007; Kaasalainen *et al.*, 2011)。これらの研究は Optec 社の ALTM シリーズの Auto Gain Control (AGC) (Korpela *et al.*, 2010a; Vain *et al.*, 2010; Bendjanec, 2011) という対地距離により減衰したエネルギーを増幅する機能がないセンサを利用したものであった。一方で、本研究で用いた Leica 社の ALS シリーズには AGC 機能が備わっており、同じ対象物からの反射強度は対地距離が異なっても同様に揃う。取得される反射強度は 8bit で 0~255 の値が記録される。II-2-3 章で処理した高精細フィルタで樹冠表面層面とした反射パルスの反射強度を TIN で補完し、0.5m 格子データにして、反射強度データを作成した。図 III-1 に使用する反射強度データを示す。左図の空中写真では北西・東南方向に飛行したコース毎に写真の色合いに濃淡が生じ、また、地形の高低差があることが分かるが、右図の反射強度データは AGC 機能が働き、コースや高低差による反射強度の違いが生じていないことが分かる。以上から本章では AGC 以外の反射強度補正を行わずに、反射強度データを利用することとした。

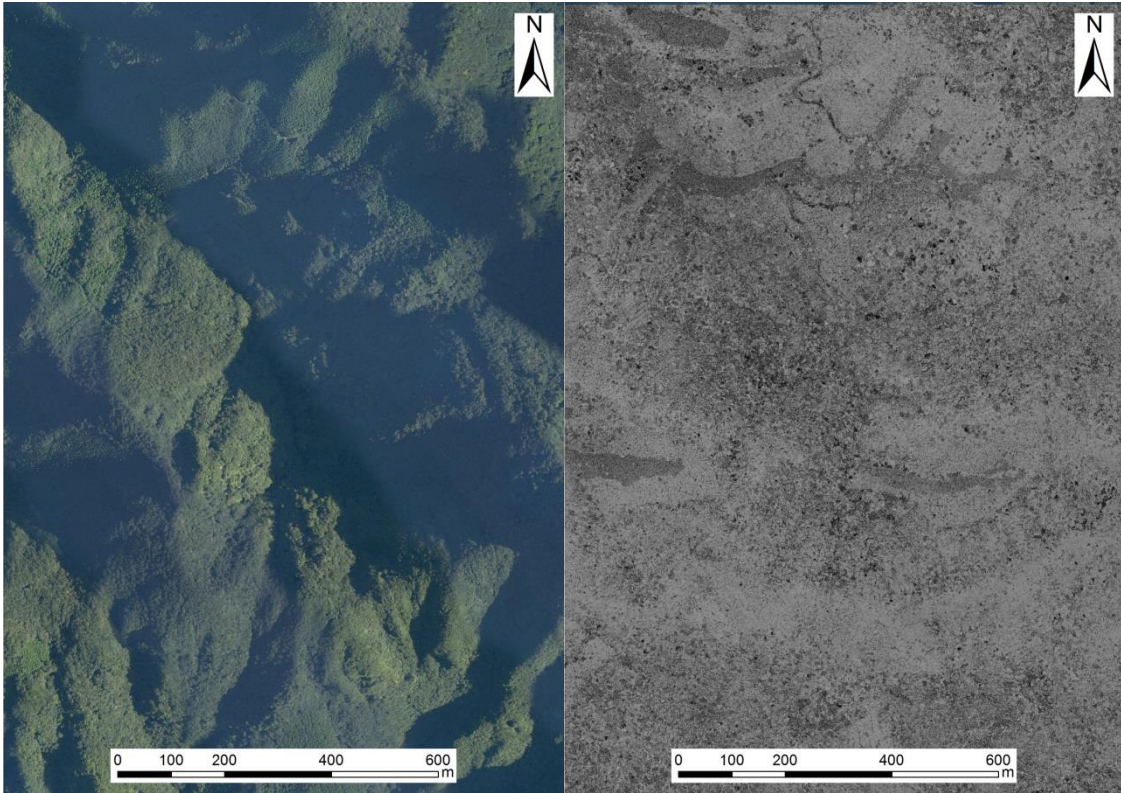


図 III-1 反射強度データの分布
(左図：空中写真、右図：反射強度データ)

III-2-2 レーザ林相図の作成方法

空中写真判読では植生の色合い、樹冠の形状と植生高などを基にしている。本研究で開発したレーザ林相図についても、空中写真判読と同じ判読因子で樹種の識別ができることを目的とした。レーザ林相図は DCHM と反射強度を基に林相の判読に適した画像となるように以下の3種類の画像を構成要素とした(図 III-4~図 III-4)。

- ✓ DCHM 画像
- ✓ DCHM を基に計算した地上開度画像
- ✓ 反射強度画像

DCHM は植生高を、地上開度は樹冠の形状を、反射強度は植生の色合いの違いを表す情報として使用するが、これらの情報は写真判読では重要な判読因子であるため、レーザ林相図ではこの3種類の画像を組み合わせることで樹種の識別に有効な画像が作成できると考えた。

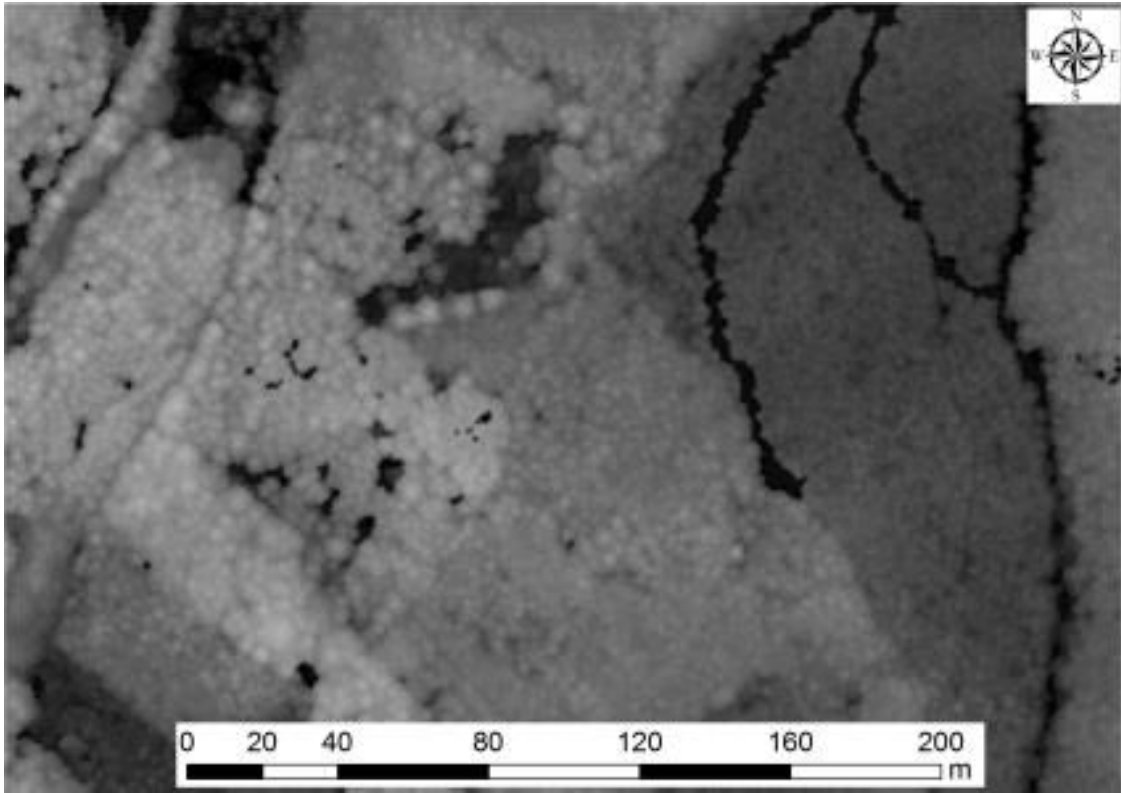


図 III-2 レーザ林相図の構成要素① (DCHM 画像)

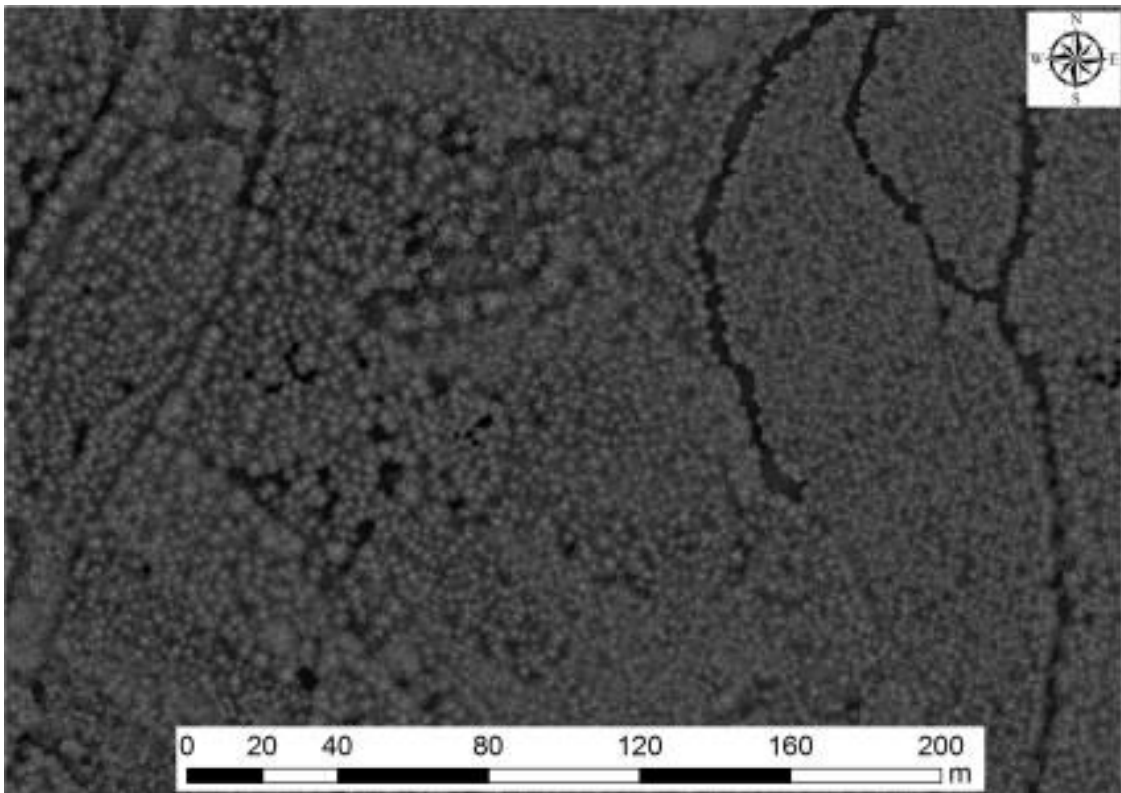


図 III-3 レーザ林相図の構成要素② (地上開度画像)

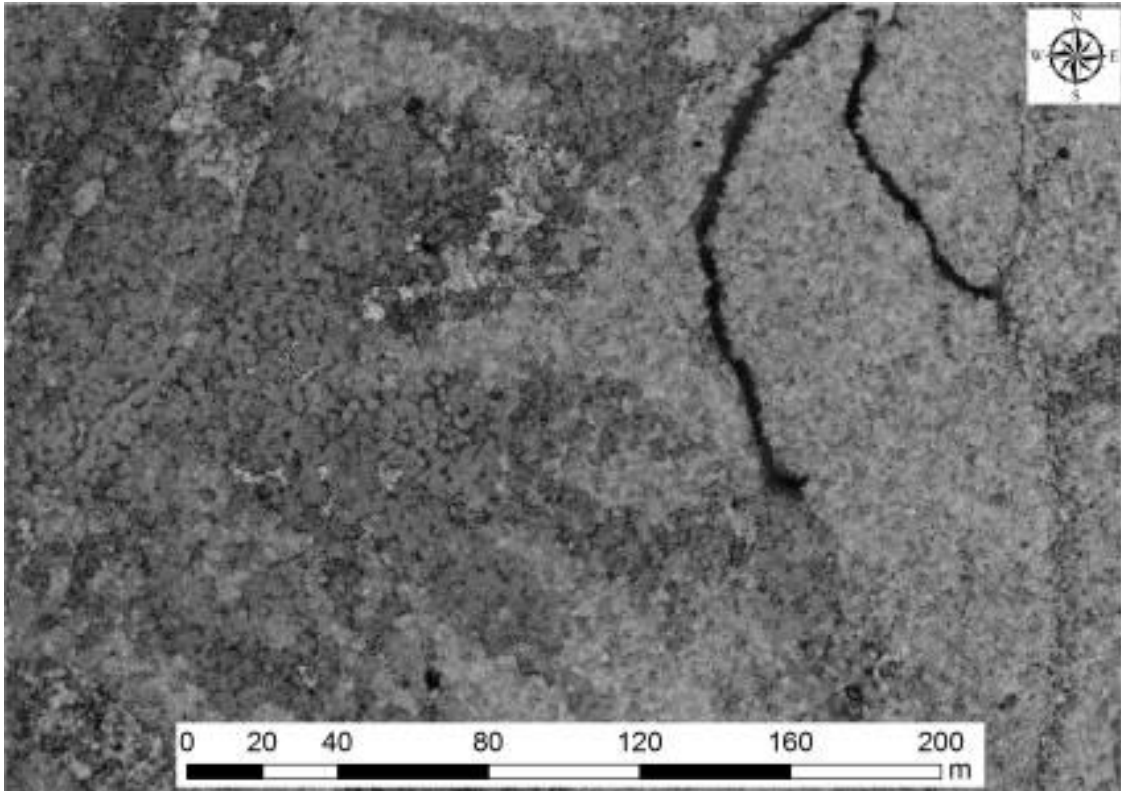


図 III-4 レーザ林相図の構成要素③（反射強度画像）

レーザ林相図の二つ目の構成要素の地上開度は樹冠の凹凸を角度（単位：度）で表す指標であり、DCHM から計算する（図 III-5）。地上開度は以下の 3 つのステップで計算する。

- 1) 図 III-5 に示した任意点の鉛直線と検索範囲内の DCHM との接線で形成される最小角度 ϕ_1 を計算する。
- 2) 同様に角度を任意点の残りの 7 方向で計算する。
- 3) 任意点で計算した 8 方向の ϕ_1 の平均値を地上開度とする。

これらの計算には Microsoft 社の Visual C++ 2010 Express を用い、処理プログラムを作成して計算を行った。

図 III-5 は検索範囲の設定による ϕ_1 の違いを表している。検索範囲が小さい場合、詳細な凹凸を表現できる。逆に検索範囲が大きい場合、大まかな樹冠の形状を表現する。

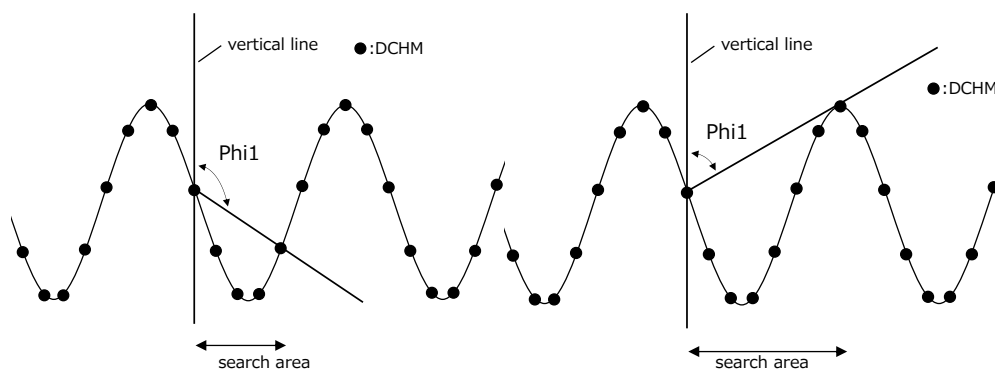


図 III-5 地上開度の概念図

(検索範囲の違いによる接線との角度の違い、左図：検索範囲小、右図：検索範囲大)

検索範囲を 0.5m、5m、50m としたときの地上開度の違いを図 III-6 に示す。検索範囲が 0.5m のときは凹凸の表現が細かすぎ、一つ一つの樹冠形状が把握しにくい。一方、検索範囲が 50m のときは樹冠の一つ一つは認識しやすくなっているが、樹冠の凹凸が滑らかになっており、凸部の情報が損なわれている。そこで本章では、樹冠の形が認識しやすく、凸部の位置がより明瞭に表現できている検索範囲 5m を地上開度の計算に用いた。

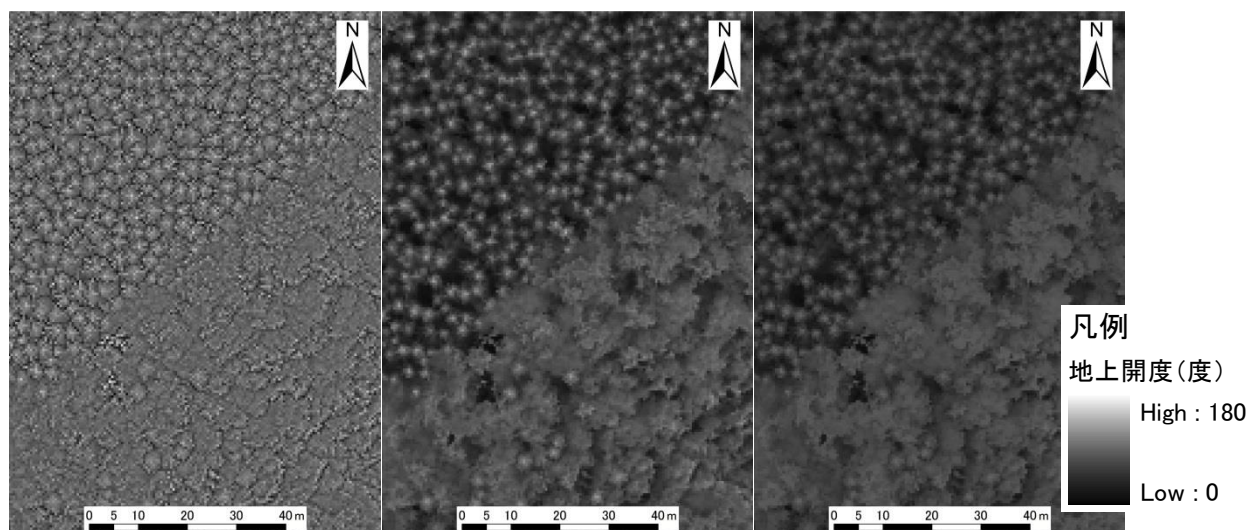


図 III-6 検索範囲の違いによる地上開度の比較

(左図：検索範囲 0.5m、中図：検索範囲 5m、右図：検索範囲 50m)

レーザ林相図の構成要素の 3 つの画像は全て 8bit 階調のデータに変換した。DCHM は 0~40m を 0~255 となるように、地上開度は計算結果の小数点以下を切り捨てて整数値に変換した。これらの画像を Adobe Systems 社の Photoshop CS4 を用いて、Lab カラー

合成により一つの画像に統合した。このとき、DCHM を b バンド、地上開度を L バンド、反射強度を a バンドに割り当てた。最後に、Lab カラー合成画像を RGB カラーに変換し、レーザ林相図を作成した。構成要素の画像は 0.5m の解像度であるが、一つの画素が概ね一つの樹木を表すように、2m の解像度の画像にリサンプリングし、画像分類に用いた。

III-2-3 レーザ林相図の林相区分方法と精度検証方法

レーザ林相図を用いた分類と精度検証のフローを図 III-7 に示す。まず、レーザ計測データから DCHM、地上開度と反射強度画像を作成し、レーザ林相図を作成した。これに樹冠高 3m 未満の範囲は非森林域としてマスクして、樹冠高 3m 以上の箇所を抽出した。レーザ林相図のマスキング画像の RGB カラー画像を分類に用いるデータとした。画像分類には Trimble 社の Definiens Developer ver8 を使用し、オブジェクトベース分類を行った。オブジェクトベースの分類はオブジェクト内の画像データの統計量を利用することができ、ピクセルベースの分類よりも樹冠部位の濃淡の違いに影響されずに高精度に分類を行えるという特徴がある(Hay *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2009a)。また、作成されるオブジェクトの境界線は隣接するオブジェクトとの違いを基に作成されることから、林相判読と同様な特徴を持っている。セグメントの作成では Scale Parameter を 50 と 100 の 2 種類を試し、既存植生図上での面積の大きい区画と同様のサイズとなった 50 を選択した。既存研究を参考にしてバンド間の重み付けは均等にして、shape と color の割合は 0.1 と 0.9、compactness は 0.3 とした。なお、既存植生図は 2008 年から 2009 年にかけて撮影された空中写真を判読し作成されたものである(佐賀県, 2012)。

画像分類の分類項目は、スギ、ヒノキ、その他植生に加えて、樹冠高 3m 以上の構造物などを非森林とした。また、画像解析後に樹冠高 3m 以下の非森林と構造物などの非森林は統合した。画像分類は standard nearest neighbor classifier による教師付分類とした。教師データを選ぶ前に現地調査を行い、空中写真とレーザ林相図を用いて、それぞれの分類項目の画像上での色合いについて確認した。その後、空中写真とレーザ林相図を判読し、分類項目毎に 400 点以上の明確に該当項目と判読できる箇所を教師データとした。分類にはレーザ林相図の RGB カラーを基にオブジェクトの 8 つの特徴量 (brightness、mean of red band、mean of green band、mean of blue band、standard deviation of red band、standard deviation of green band、standard deviation of blue band、max diff) で分類を行った。

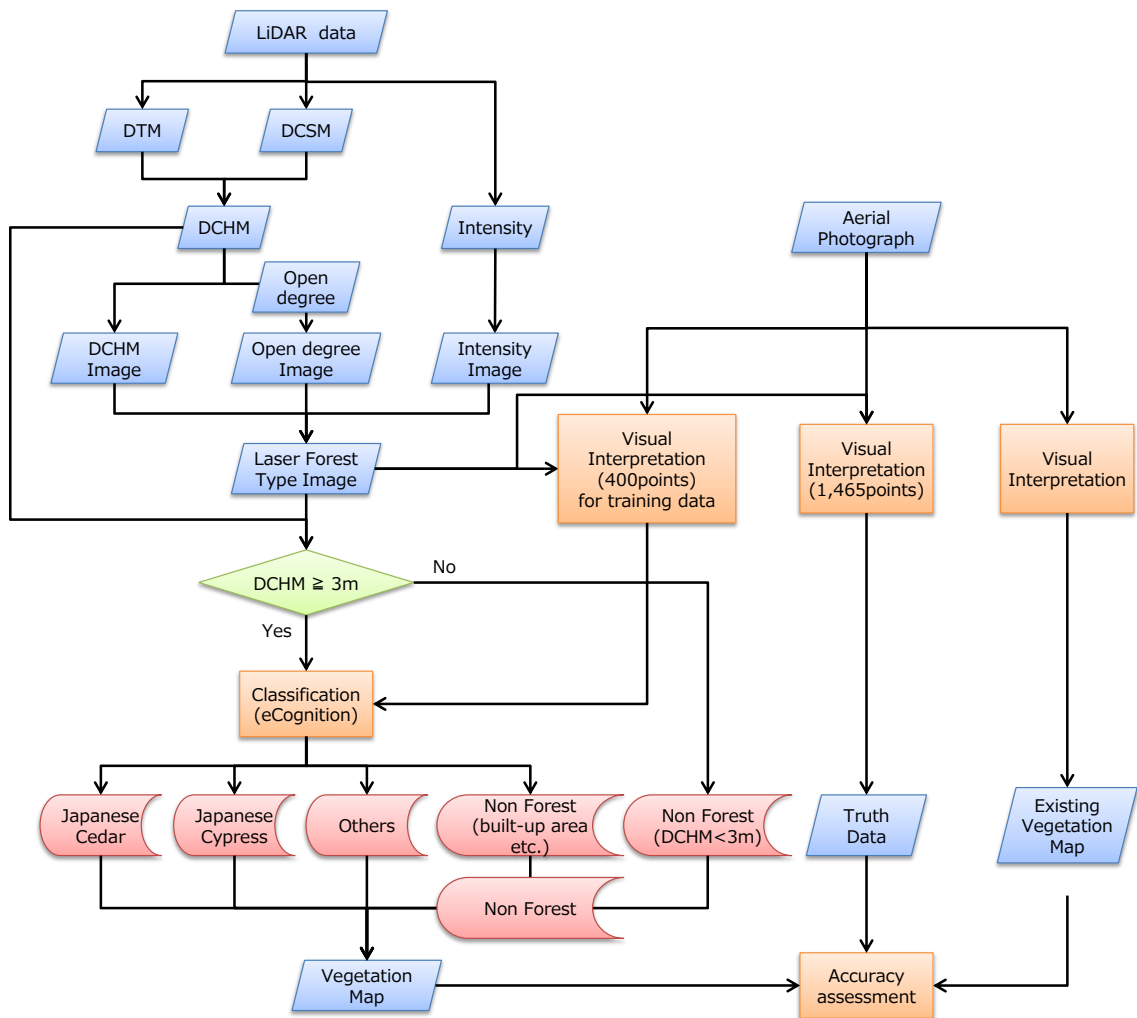


図 III-7 レーザ林相図作成と林相区分解析のフロー

レーザ林相図の林相区分結果の精度検証は既存植生図を用いたシステムティックサンプリングにより行った。サンプリングは 800m 間隔で、既存植生図と重なる範囲で 1,465 点を設けた。この検証点の作成は Esri 社の ArcGIS ver10 を用いた。これらの点を空中写真とレーザ林相図を用いて判読して、トゥルースデータとした。1,465 点の検証点と既存植生図を比較し、既存植生図とレーザ林相図の林相区分結果を比較した。

III-3 レーザ林相図を用いたスギ、ヒノキ林の林相区分結果

III-3-1 レーザ林相図の作成

DCHM、地上開度、反射強度画像を統合して作成したレーザ林相図と同範囲の空中写真の比較を図 III-8～図 III-10 に示す。空中写真では植生域は緑色系の一色で表されるのに対して、レーザ林相図は寒色系から暖色系まで豊かな色調を持つ画像となることがわかる。レーザ林相図では Lab カラーの a バンドに割り振られた反射強度や b バンドに割り振られた樹高の違いによりスギは黄色系で、ヒノキはピンクで、その他植生は複数の色合いが混じり合う混色、もしくは緑色系で表現されていることが多い。DCHM が 3m 未満の非森林は青色系で表現されている。レーザ林相図では色調の違いが認識しやすいことから、空中写真に比べて林相の境界線を認識しやすいことがわかる。また、レーザ林相図では樹冠の一つ一つが認識しやすく、画像の構成要素に樹冠高データが含まれていることから、空中写真では影になって識別しにくいようなギャップの位置や範囲も把握しやすいという特徴もある。

図 III-9～図 III-10 に示した研究対象全域の空中写真とレーザ林相図の比較では、空中写真には飛行コース（ストライプ状）や山間部の地形により斜面方位で日射量が異なり、色調に濃淡があることが分かるが、レーザ林相図では空中写真で日射量の影響があった場所にその影響が見られないことがわかる。レーザ林相図においても対地高度などが影響して反射強度がコースやセンサにより異なる場合、空中写真と同じように縞状の色調の違いが生じる可能性があるが、本研究で作成したレーザ林相図には縞状の色調の違いが見られないことから、コースやセンサに起因する反射強度の違いが生じていないことがわかる。なお、西部地区については色調補正済みのため空中写真に色調の違いがない。

レーザ林相図は植生を多くの色調で表現し、太陽光の影響を受けないことから、空中写真や衛星画像を用いた自動分類で生じる影領域の誤差がなくなることが考えられ、レーザ林相図は自動分類に適した画像と考えられる。

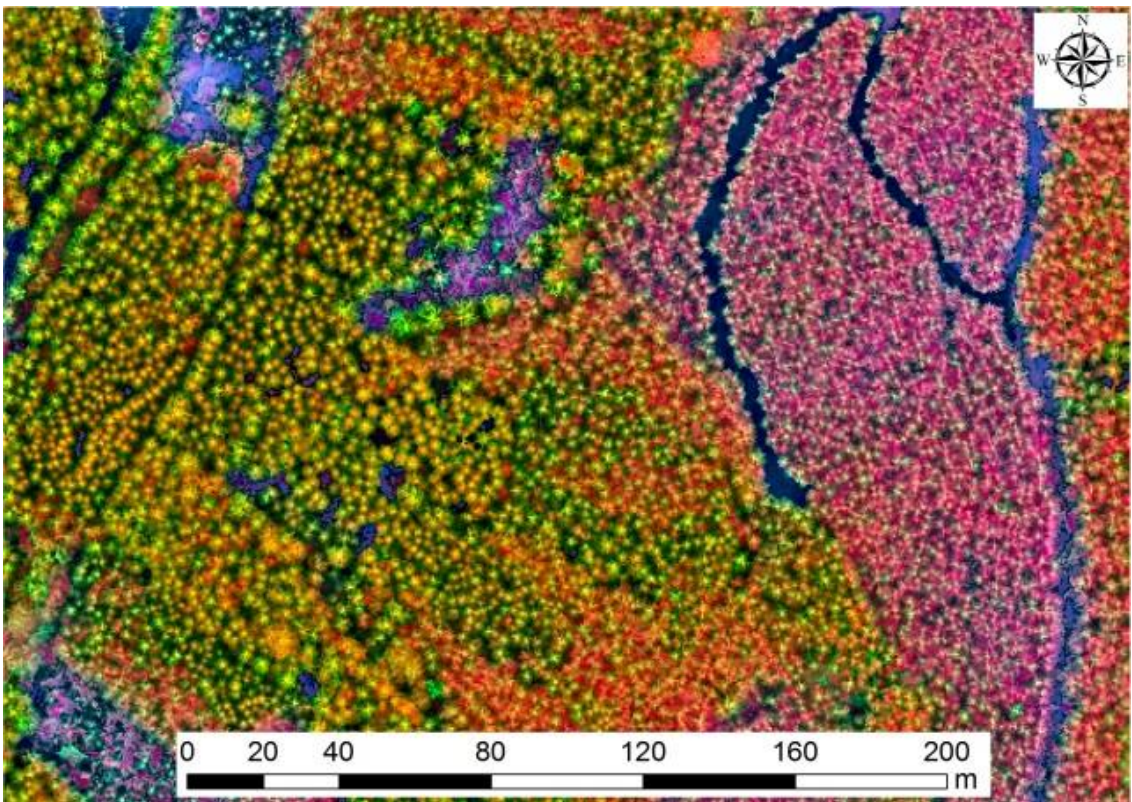
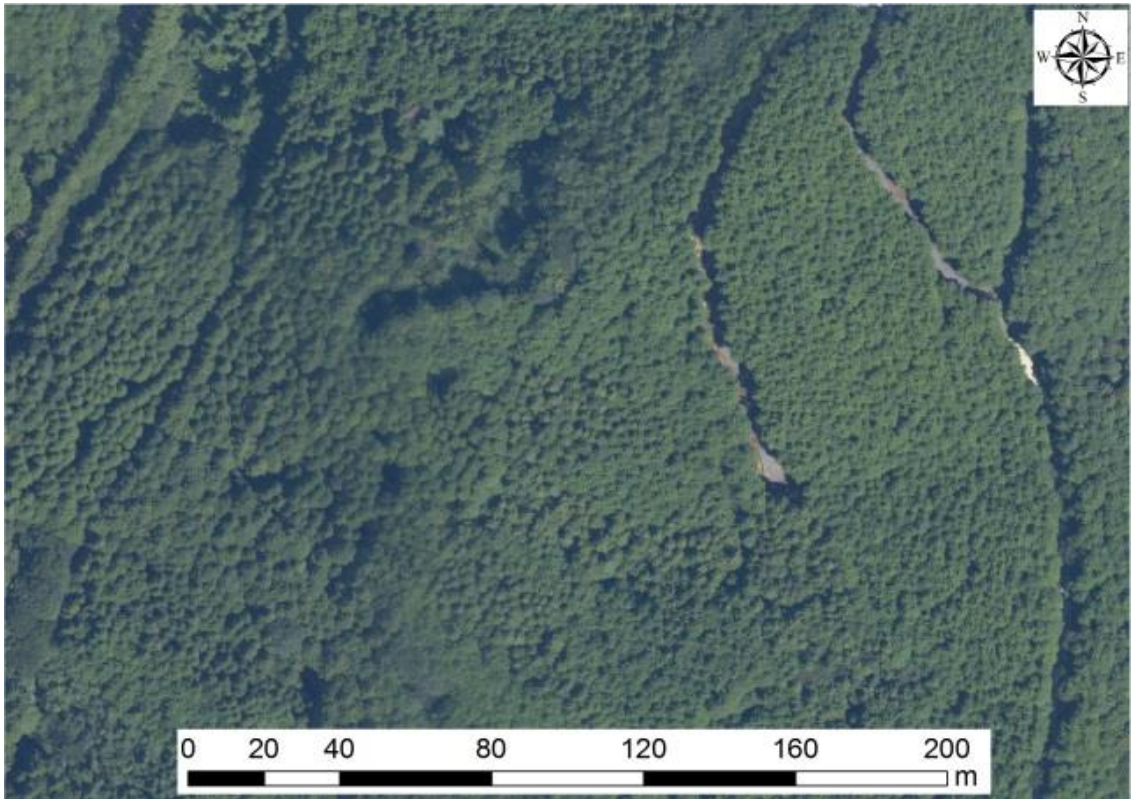


図 III-8 空中写真とレーザ林相図の比較
(レーザ林相図ではスギは黄色系で、ヒノキはピンク色系で表現される)

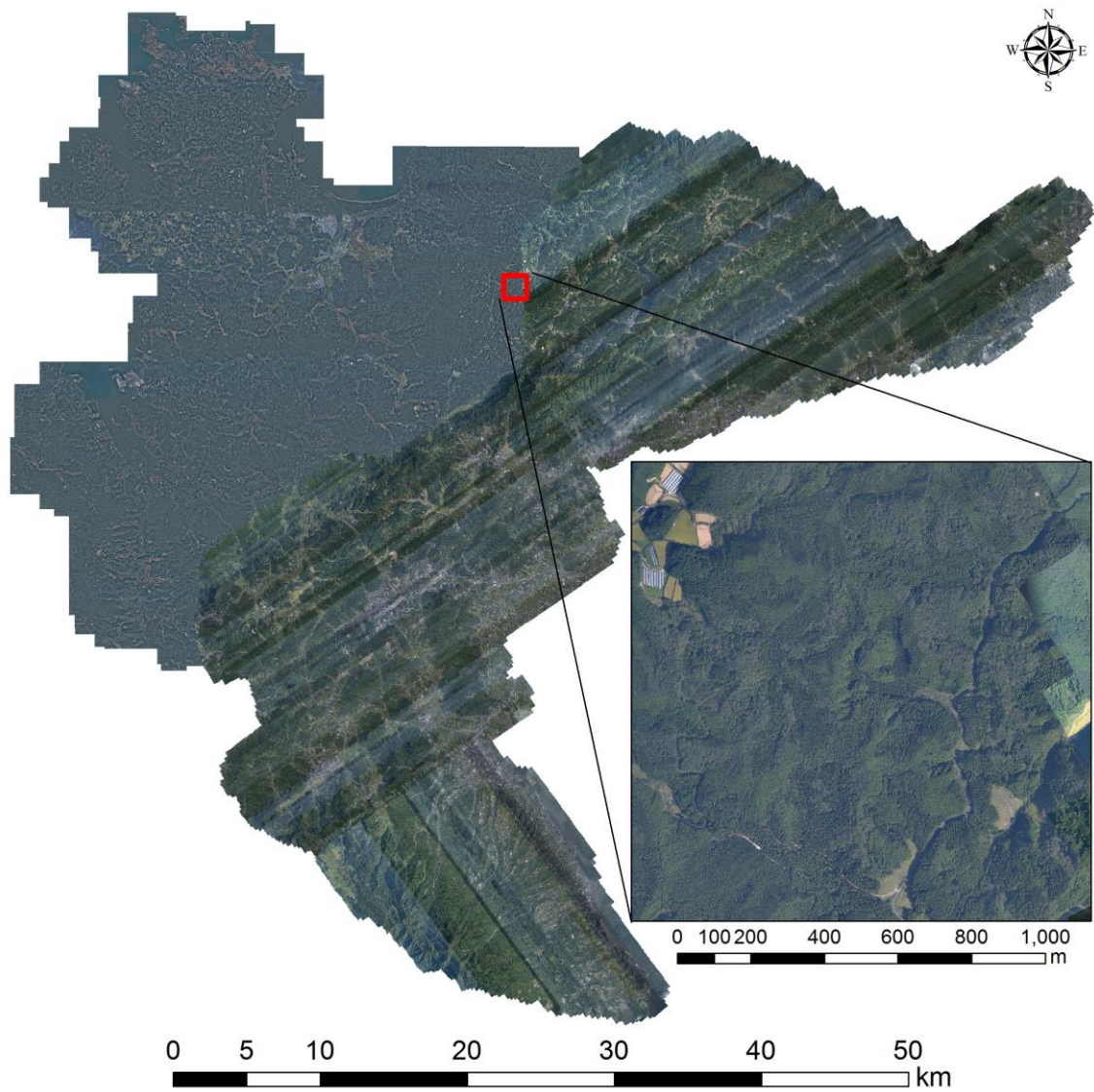


図 III-9 研究対象地の空中写真（右下は一部を拡大）

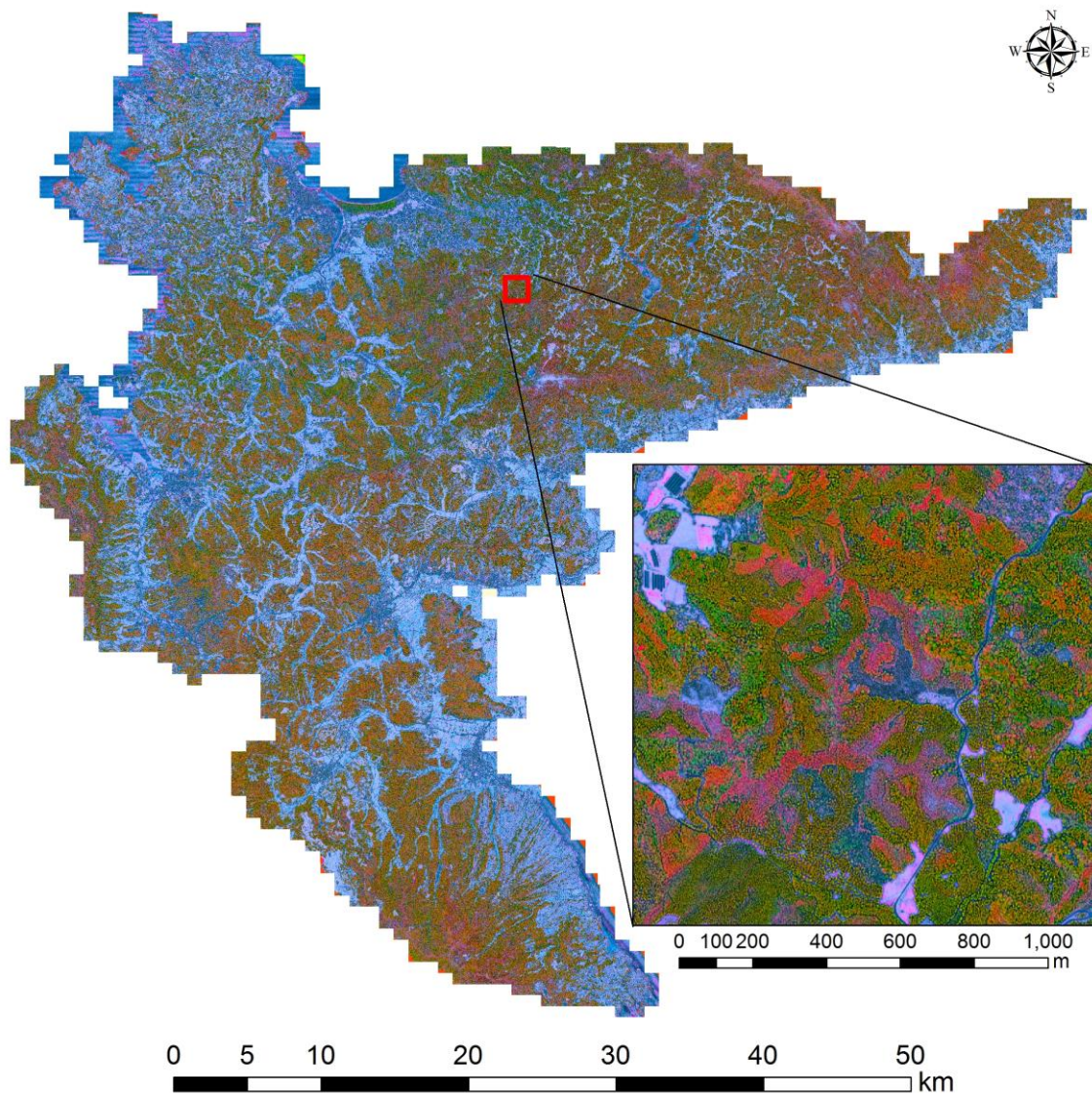


図 III-10 分類に用いたレーザ林相図

III-3-2 スギ、ヒノキ林の林相区分

レーザ林相図を用いてオブジェクト分類でスギ、ヒノキ林を区分した結果を図 III-11 に示す。一つのセグメントの最大面積は 252ha であり、既存植生図の最大林相ポリゴン面積 265ha と同等の広さとなっている。佐賀県東部、中央部、南部にスギ、ヒノキが多く、北西部はその他植生が多く分布する結果となった。また、森林と市街地の境界に多くの非森林（構造物）が分布している。レーザ林相図の林相区分と比較する既存植生図を図 III-12 に示す。既存植生図は私有林範囲を対象に判読が行われているため、レーザ林相図の林相区分では区分されている国有林や非森林（構造物）の範囲のデータは存在しない。

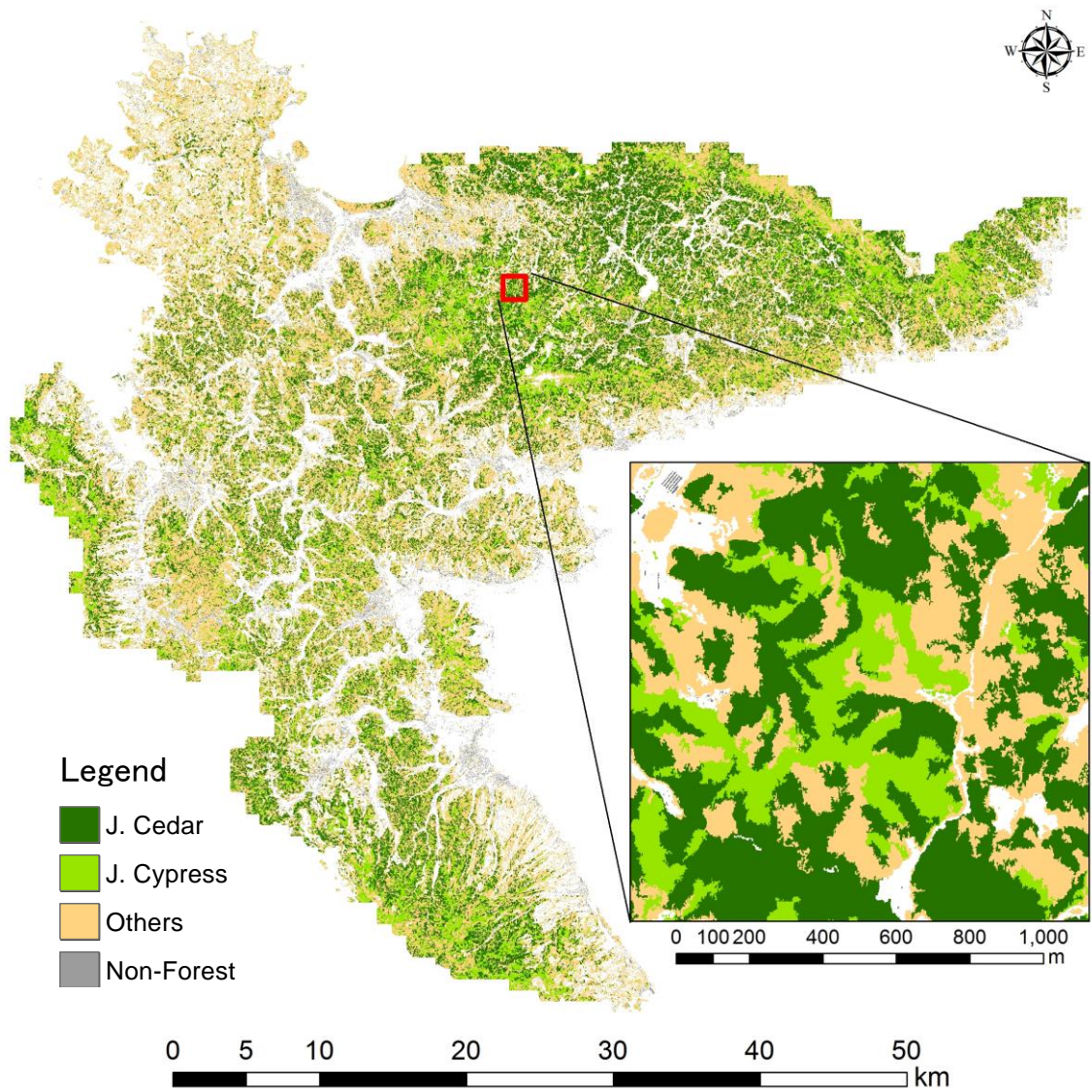


図 III-11 レーザ林相図の林相区分結果

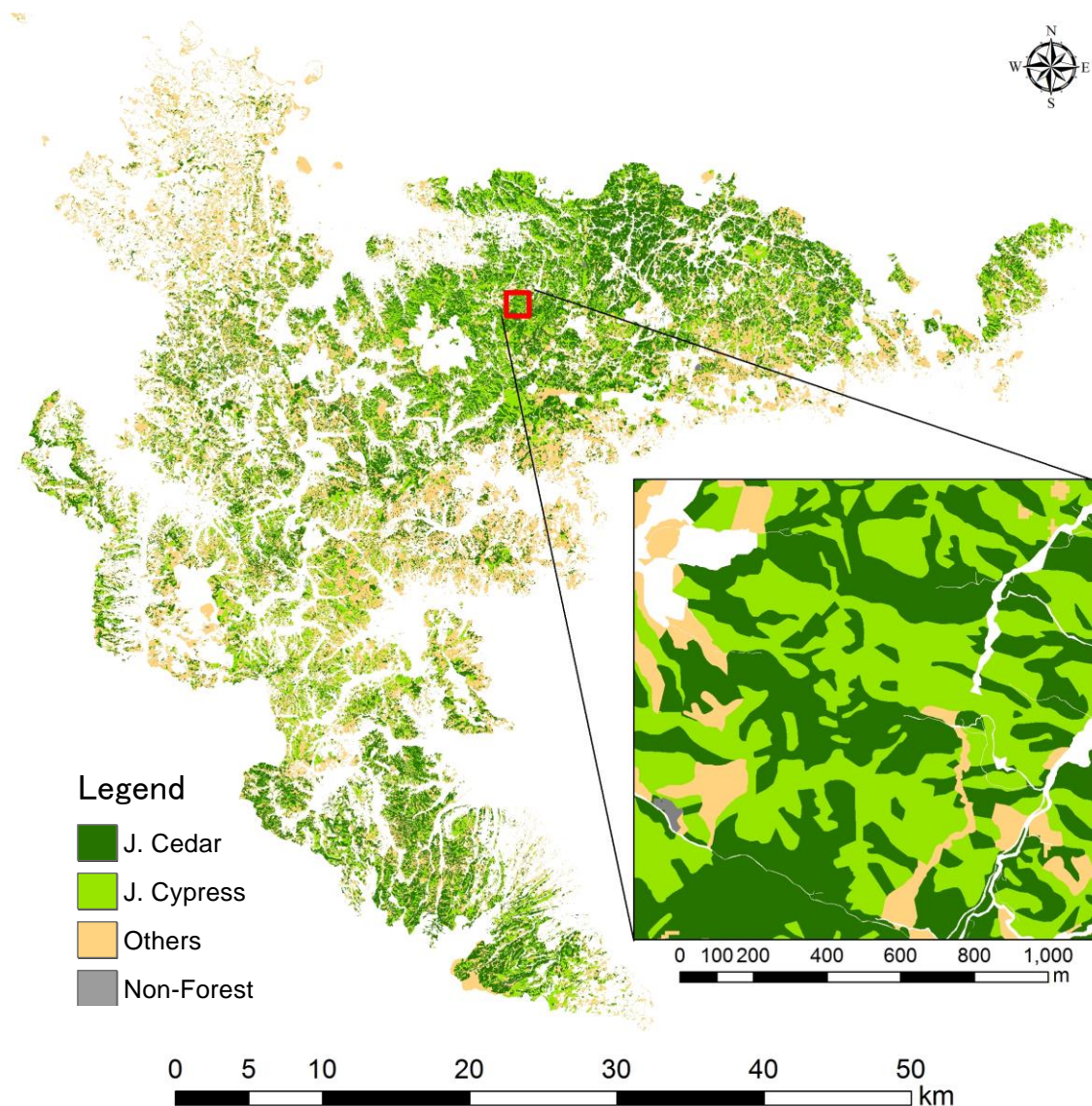


図 III-12 既存植生図の林相区分（判読対象は私有林のみ）

レーザ林相図の林相区分結果とトゥルース判読点 1,465 点との比較を行った結果を表 III-1 に示す。User's Accuracy は 70~90%、Producer's Accuracy は 62~99%、Overall Accuracy は 75% となった。スギとその他植生の誤分類数はそれぞれ 94 点と 101 点で、ヒノキとその他植生の誤分類数は 61 点と 59 点でほぼ同数であったが、スギとヒノキでは 36 点と 6 点であり、ヒノキが過小推定傾向にあることがわかる。

表中の括弧は合計点数 1,465 に対する各項目の点数の割合を示している。この割合を分類結果とトゥルース判読点で比較すると、分類結果のスギが判読点よりも 1.5% 多く、ヒノキが 1.9% 少ないが、各項目ほとんど同じ割合であることがわかる。

表 III-1 レーザ林相図の林相区分精度

		Visual Interpretation				Total	User's Accuracy
		Japanese Cedar	Japanese Cypress	Others	Non Forest		
Classification Result	Japanese Cedar	328	36	94	0	458 (31.3%)	72%
	Japanese Cypress	6	158	61	0	225 (15.4%)	70%
	Others	101	59	541	1	702 (47.9%)	77%
	Non Forest	2	0	6	72	80 (5.5%)	90%
Total		437 (29.8%)	253 (17.3%)	702 (47.9%)	73 (5.0%)	1465	-
Producer's Accuracy		75%	62%	77%	99%	-	-
OverAll Accuracy							75%

レーザ林相図と既存植生図を比較する前に、既存植生図の林相区分精度を把握するため、トゥルス判読点との比較を行った(表 III-2)。User's Accuracy は 45~79%、Producer's Accuracy は 4~69%、Overall Accuracy は 65%となった。ヒノキの User's Accuracy が 45%と低いことから、植生図のヒノキは判読点に比べて過大に判読された傾向があるとわかる。既存植生図とトゥルス判読結果を比較すると、括弧で示した各項目の割合では、スギは概ね同様の割合であるが、既存植生図のヒノキが判読点に比べて 128 点、8.7%も多くなっている。また、その他植生が 95 点、6.5%、非森林が 69 点、4.7%少なくなっている。

表 III-2 既存植生図の林相区分精度

		Visual Interpretation				Total	User's Accuracy
		Japanese Cedar	Japanese Cypress	Others	Non Forest		
existing vegetation map	Japanese Cedar	299	60	108	6	473 (32.3%)	63%
	Japanese Cypress	94	173	112	2	381 (26.0%)	45%
	Others	43	20	482	62	607 (41.4%)	79%
	Non Forest	1	0	0	3	4 (0.3%)	75%
Total		437 (29.8%)	253 (17.3%)	702 (47.9%)	73 (5.0%)	1465	-
Producer's Accuracy		68%	68%	69%	4%	-	-
OverAll Accuracy							65%

既存植生図とレーザ林相図の各項目の面積を比較した結果を表 III-3 に示す。スギはほぼ同面積であるが、レーザ林相図のヒノキは植生図よりも 9.8%狭くなっている。また、その他植生は 6.7%、非森林は 4.9%広がっている。

表 III-3 既存植生図とレーザ林相図の林相区分結果の面積比較

Category	Existing vegetation map		Classification map	
	area (ha)	percentage	area (ha)	percentage
Japanese Cedar	32,133	34.4%	30,464	32.6%
Japanese Cypress	23,254	24.9%	14,084	15.1%
Others	37,885	40.5%	44,130	47.2%
Non forest	181	0.2%	4,773	5.1%
total	93,452		93,451	

III-4 考察

レーザ林相図の作成では3つの構成要素を用いて Lab カラー合成により色調の違いを表現している。Lab カラーの色彩空間を図 III-13 に示す。スギはヒノキに比べて反射強度が低い、樹高は高くなる傾向がある。これを Lab カラーの色彩空間にあてはめるとスギは a (反射強度) が緑色と赤色の間にあり、b (DCHM) が黄色の近くにあるため、黄色系で表現される。また、ヒノキは a が赤色の近くにあり、b が青色と黄色の間にあるため、ピンク系で表現される。その他植生については、針葉樹に比べて落葉広葉樹は反射強度が低い傾向があるため、緑色系で表現されることが多く、また、複数の樹種で構成されることが多いため、複数色で構成される。

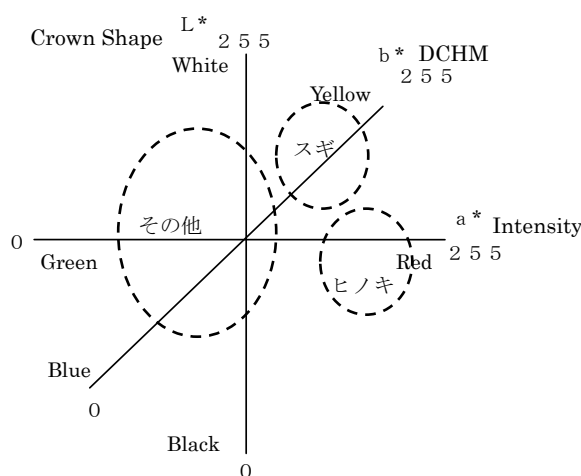


図 III-13 Lab カラーの色彩空間 (L : 地上開度、a : 反射強度、b : DCHM)

このように反射強度と DCHM を用いたレーザ林相図はスギ、ヒノキ、その他の樹種の特性を色調の違いとして表現することができていることから、空中写真に比べて林相の識別に有効な画像と考えられる。また、画像の構成要素が全てレーザ計測データから作成されているため、空中写真で問題となる樹木や地形の倒れ込みがないという利点がある。さらに、レーザスキャナはアクティブセンサであることから、太陽光の影響がないことも大きな特徴であり、同じ植生タイプであれば、同様の色調で表現できる。以上のことから、レーザ林相図は目視判読だけでなく、自動分類にも適した画像であり、空中写真の代替となる新たな植生表現技法と考えられる。自動分類では誤差が生じる可能性があり、精度を高めるために目視判読により修正することがあるが、空中写真だけでなく、太陽光の影響がなく、色調の違いが明瞭なレーザ林相図を用いることで、修正作業をより効率的に行うことができると考えられる。

これまでの研究で、反射強度と反射パルスの高さ分布を基にした樹種分類では、2~3種類の分類項目に対して、73~78%の分類精度と報告されている(Kim *et al.*, 2009b; Vauhkonen *et al.*, 2010)。本研究では手法は異なるものの、反射強度と高さ情報を同様に用いており、表 III-1 に示したように Overall Accuracy が 75%とこれまでの研究の精度のレンジにあることを確認した。レーザ林相図の誤分類には大きく 2つの原因がある。一つは、竹林やケヤキ林は黄色系で表現され、これらの樹種が単一樹種で構成される林分である場合、スギ林と誤分類となる。もう一つは、更新したばかりの 2次林など樹高が低く、樹冠がうっ閉している場合、ピンク色系で表現され、ヒノキ林との誤分類となった。これらの誤分類の原因として、教師付分類でレーザ林相図の色調をベースに区分していることが考えられる。しかしながら、スギ林とケヤキ林や竹林を比較すると、円錐形と球面形や細い形状など樹冠の形状が全く異なるので、色調は同様であっても、樹冠形状から樹種の違いを識別することが可能である。このように樹冠の形状の違いも含めた分類手法を検討することが今後の課題である。

既存植生図は 2008~2009 年の空中写真を基に作成されたため、トゥルース判読点に用いた画像の 2011 年と 2~3 年の時期の違いがあった。このため、既存植生図では植生であった箇所が伐採により非森林になっていた箇所があったが、このような伐採跡地は多くはなかった。既存植生図の判読ポリゴン数が約 20 万、平均面積が 0.47ha に対して、分類のセグメント数は約 85 万、平均面積が 0.11ha であることから小面積の区画が既存植生図では作成されていないことがわかる。

レーザ林相図の検証結果の表 III-1 の林相区分項目割合と表 III-3 の林相図全体の面積割合を比較するとスギが約 32%、ヒノキが約 15%、その他植生が約 47%、非森林が約 5%と同様の割合である。また、表 III-2 の既存植生図の項目割合についてはスギが約 34%、ヒノキが約 25%、その他植生が約 40%、非森林が約 0.2%と同様の割合である。以上のことから、検証用ポイントのシステムティックサンプリングの箇所に偏りがなく、適切な割合で配置されていることがわかる。既存植生図との比較では、表 III-3 に示したようにヒ

ノキ林の面積が少なくなったが、表 III-2 でヒノキ林の User's Accuracy の割合が低くなっていることと表 III-2、表 III-3 の割合分布を併せて考えると既存植生図の面積が過大になっていることが考えられる。図 III-10 のレーザ林相図の拡大図の東部で緑色系が混じり広葉樹が分布し、図 III-11 で広葉樹と区分されているが、図 III-12 ではヒノキ林の分布となっている。このことから既存植生図のヒノキ林の面積が過大になっていると考えられる。空中写真判読では、緑色系のみで表現される画像を識別するため、ヒノキ林の識別が困難であったことが考えられるが、レーザ林相図のヒノキ林はピンク系の色調で表現され、緑色系が混じる広葉樹との区分が容易であり、誤分類が少なくなったと考えられる。これらのことは表 III-2 のヒノキの過大分類数 206 点 (94+112) に対して、表 III-1 のヒノキの誤分類数 67 点 (6+61) との比較からも伺える。

本章ではレーザ計測データから得られる DCHM と反射強度を基に Lab カラー合成したレーザ林相図が空中写真よりも多くの色調情報を持ち、スギ林やヒノキ林の樹種の識別に有効な画像であることを示した。また、レーザ林相図はアクティブセンサであるレーザ計測のデータのみで作成できることから、太陽光の影響がなく、同一樹種は同様の色調で表現され、自動判読に適した画像と考えられる。レーザ林相図を用いたオブジェクトベースによる林相区分は、空中写真の目視による植生分類に比べて高い精度でスギ林、ヒノキ林を区分できることを示した。本章で開発したレーザ林相図を用いて自動分類によりスギ林、ヒノキ林の識別が可能になったことから、効率的に林相区分図を作成されることが期待できる。自動分類の精度を向上させ、更なる効率化を進めるため、AI なども活用した分類手法を検討することが今後の課題である。

第IV章

樹冠形状モデリングおよび単木抽出手法の開発と

単木樹高計測

IV-1 はじめに

日本の森林は斜面地に分布し、路網などの整備も十分ではなく現地調査対象地までのアクセスに時間がかかることから、効率的に森林資源情報を取得するために一般的な現地調査で取得する樹木の位置、樹高、胸高直径、材積などの情報をリモートセンシング技術により取得することが検討されている。現地調査の代替としてリモートセンシング技術の活用が研究され、現地調査の森林資源情報に近い情報が得られる航空レーザ計測による単木ベースの森林資源把握の研究が行われている(Hyyppä, Inkinen, 1999; Persson *et al.*, 2002; Brandtberg *et al.*, 2003; Takahashi *et al.*, 2005a; 平田, 2005)。レーザ計測データを用いた単木抽出では、対象とする樹冠の凹凸情報を基に樹頂点を抽出することから、樹冠の凹凸形状表現及び単木情報の抽出精度に影響を及ぼすレーザ計測密度を検討することが重要となる。平田(2005)や縄村ら(2007)は計測密度が3~5点/m²よりも少なくなると単木抽出の精度が低下することを報告している。

単木ベースの森林資源解析はDCHMを用いて、局所最大値フィルタで単木抽出する方法が一般的である(Hyyppä, 2001; Persson *et al.*, 2002; Takahashi *et al.*, 2005b; 平田, 2005)。局所最大値フィルタ法は任意のウィンドウサイズ(例えば、3×3や5×5ウィンドウサイズ)をDCHMに適用し、ウィンドウサイズ内で中央値が最も高い値である場合に樹頂点として抽出する手法である。この手法の一つの課題として、樹冠のサイズにウィンドウサイズの大きさを合わせる必要があり、大きな樹冠に対して小さなウィンドウサイズを適用した場合、樹木本数が過剰となる。逆に、小さな樹冠に対して大きなウィンドウサイズを適用した場合、樹木本数が過小になる。この問題を解決するため、樹高からウィンドウサイズの大きさを決める手法が提案されている(Popescu *et al.*, 2002; Popescu, Wynne, 2004; Cao *et al.*, 2016)。しかしながら、我が国に適した樹高とウィンドウサイズの大きさの関係は明らかになっていない。樹高とウィンドウサイズを検討することに近い関係として密度管理図が考えられる。密度管理図を利用することで樹高に対する最多密度が計算でき、最多密度から得られる樹冠の大きさは最小の樹冠の大きさとなる。最小の樹冠の大きさを想定したウィンドウサイズを適用した場合、林分によっては実際には大きな樹冠に対して小さなウィンドウサイズを適用することになるため、樹木本数が過剰となる可能性がある。また、局所最大値フィルタ法にはウィンドウサイズよりも小さい樹冠を抽出できないという課題がある。例えば、過密林分では1m程度の小さな樹冠もあり、このような林分では過小抽出となる可能性がある。

また、単木抽出に用いるデータにより、抽出精度が変わることが報告されている(Brandtberg *et al.*, 2003; Khosravipour *et al.*, 2016)。Khosravipour *et al.*は2種類の0.5m間隔のDCHMを作成し、単木抽出を行った結果、抽出精度が32%違うことを示した。このことから単木抽出する手法だけでなく、DCHMの樹冠表層面の表現性についても検討することが重要である。

単木抽出手法や DCHM について検討する前に、本研究では計測密度 4 点/m²のデータを使用していることから、この計測密度で抽出ができる立木密度の範囲を研究の前提として明らかにした。次に単木抽出手法に関して、局所最大値フィルタでは課題となっている大きな樹冠に複数の頂点が抽出される過剰抽出をなくし、ウィンドウサイズよりも小さい樹冠の頂点も抽出することを目的として、直接 DCHM から樹頂点を抽出するのではなく、樹冠部を特定した後樹頂点を抽出して単木を抽出する新たな手法「樹冠部抽出法」を開発した。樹冠部抽出法では樹冠部抽出するために統計学の知見を使用しているため、DCHM ではなく、DCHM から尾根谷度と樹冠形状指数という 2 種類の角度情報を作成し、樹冠部抽出法で使用した。この樹冠部抽出法の効果を把握するため、同じ DCHM データに対し局所最大値フィルタ法も適用し、2 種類の単木抽出法を比較した。さらに、DCHM の再現性を比較するため、II-2-3、II-2-4 で作成した最大値 DCHM と高精細 DCHM の 2 種類を用いた。なお、DCHM が 2 種類あり、それぞれ尾根谷度と樹冠形状指数を作成することから、樹冠形状を表現するデータは 2 種類の DCHM と 4 種類の角度情報となる。本章では、単木抽出手法として局所最大値フィルタ法と樹冠部抽出法の 2 種類を複数の樹冠形状情報に適用し、使用する樹冠形状情報と抽出手法が与える影響について検討し、開発した単木抽出手法の有効性を評価することを目的とした。

IV-1-1 レーザ計測密度による対象立木密度

レーザ計測の密度により抽出が可能と想定できる立木密度について検討を行った。始めに樹頂点を通る断面を想定し、一つの樹冠に 2 点の DCHM (格子のポイントデータ) がある状態が図 IV-1 である。左の図では実線で表されている樹冠形状の一番高い箇所と低い箇所に DCHM が存在していることから、DCHM の高さで樹冠の凹凸を捉えることができる。しかし、DCHM の位置が左図から半格子間隔移動した場合、右図のように DCHM の高さが同じになり、DCHM からは樹冠の凹凸を把握することができない。次ぎに、同じように断面上の一つの樹冠に 3 点の DCHM がある状態を想定する (図 IV-2)。この場合、一つの樹冠に 3 つの DCHM があることから、どのように DCHM が位置しても図 IV-1 の右図のように DCHM が水平関係になることはなく、DCHM の高さの関係性が変わるものの樹冠の凹凸を表現することができることがわかる。

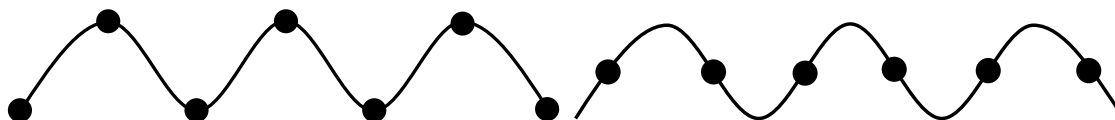


図 IV-1 樹冠形状と DCHM の位置の関係 1 (一つの樹冠に 2 点の DCHM の場合)
(左図と右図で DCHM (黒点) を半格子間隔移動した)

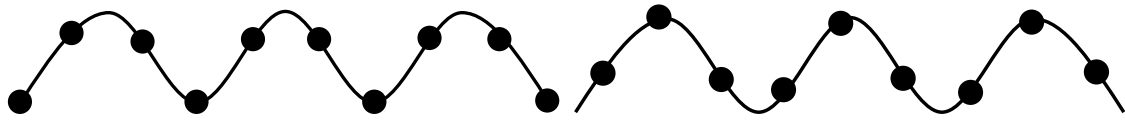


図 IV-2 樹冠形状と DCHM の位置の関係 2 (一つの樹冠に 3 点の DCHM の場合)
(左図と右図は DCHM (黒点) を半格子間隔移動した)

図 IV-2 のように一つの樹冠に対して断面上 3 点の DCHM がある状態を格子状の平面図にすると図 IV-3 のようになり、黄色で示した箇所が樹頂点として分布する形となる。このように樹頂点が分布していることを想定すると格子間隔から、抽出可能な最多立木密度が計算できる。例えば、格子間隔が 0.5m の場合は、樹木間隔が 1.5m となり、約 4,444 本/ha まで抽出可能となり、格子間隔が 1.0m の場合は、樹木間隔が 3m となり、約 1,111 本/ha までしか抽出できないことになる。スギ、ヒノキの立木密度は最多で約 3,000 本/ha 程度 (通常植栽密度は 3,000 本/ha) であることから、格子間隔が 1.0m では立木密度のデータレンジをカバーできないことになる。このため、既存の研究にもあるように、1 点/m² 以下の計測密度では単木抽出の精度が低下すると考えられる。本研究では 4 点/m² の計測密度のデータを使用し、通常の植栽密度に相当する立木密度が把握できる下限に近い計測密度であることから、使用するレーザ計測データの計測密度は十分であると考えられる。なお、実際の森林では図 IV-3 のように等間隔で樹木が分布していることは少ないため、0.5m の格子間隔で抽出できる立木密度は 4,444 本/ha よりも少ないと考えられる。また、過密林分では 1.5m よりも小さい樹冠があるため、断面上で一つの樹冠に 3 点未満の DCHM となり樹頂点の位置が抽出できず、既存研究からは過密林分の抽出精度が低下することが予想される。

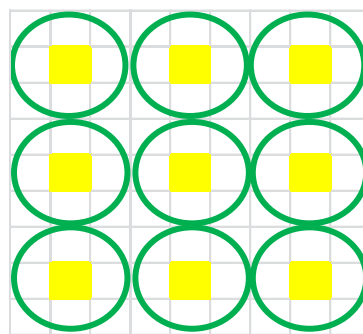


図 IV-3 一つの樹冠に断面上 3 点のレーザ計測密度の場合の樹頂点の分布例
(図中の黄色箇所が樹頂点位置、緑丸は樹冠サイズ)

IV-2 使用したデータと方法

単木抽出解析に使用したデータの作成と単木抽出の手法・樹高計測のフローを図 IV-4

に示す。II-2-3、II-2-4で作成した2種類のDCHMからそれぞれ尾根谷度と樹冠形状指数を計算した。DCHM、尾根谷度、樹冠形状指数はそれぞれ2種類あり、単木抽出に使用した樹冠形状を表現するデータは合計6種類である。単木抽出には局所最大値フィルタ法と樹冠部抽出法の2種類を用いた。局所最大値フィルタ法には最大値DCHMと高精細DCHMを使用し、ウィンドウサイズを2パターン(3×3、5×5)適用して、4種類の単木抽出を行った。また、樹冠部抽出法には尾根谷度、高精細尾根谷度、樹冠形状指数、高精細樹冠形状指数を使用して、4種類の単木抽出を行った。一つの樹種について8種類の単木抽出を行い、スギ、ヒノキで合計16種類の単木抽出結果を得た。さらに、その16種類の単木位置について樹高計測を行い、樹木本数と樹高計測値を現地調査結果と比較して精度検証を行った。

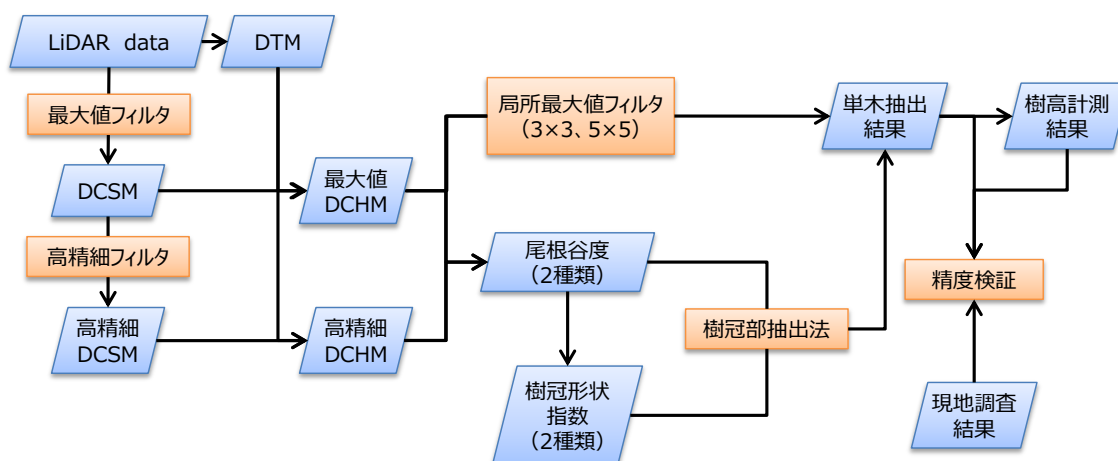


図 IV-4 使用したデータの作成方法と単木抽出、樹高計測のフロー

IV-2-1 単木抽出に使用した尾根谷度と樹冠形状指数の作成方法

地形の凹凸を表現する手法に尾根谷度があり(千葉 *et al.*, 2007)、地形形状を角度情報として表現することができる。樹冠の形状も地形のように凹凸があることから、尾根谷度の計算方法を利用して、DCHMから尾根谷度(図 IV-5のPhi3を8方位計算し、平均した角度)を計算した。尾根谷度の計算方法は以下の通りである。

- 1) 任意の検索範囲内のDCHMにおいて地上開度Phi1を計算する。
- 2) 地上開度と同様に地下開度Phi2を計算する。
- 3) Phi1とPhi2に挟まれる角度を2等分し、水平線からの角度Phi3を計算する。このとき、水平線よりも下方向をプラス、上方向をマイナスとする。
- 4) Phi3を8方向計算して、それらの平均値を尾根谷度とする。

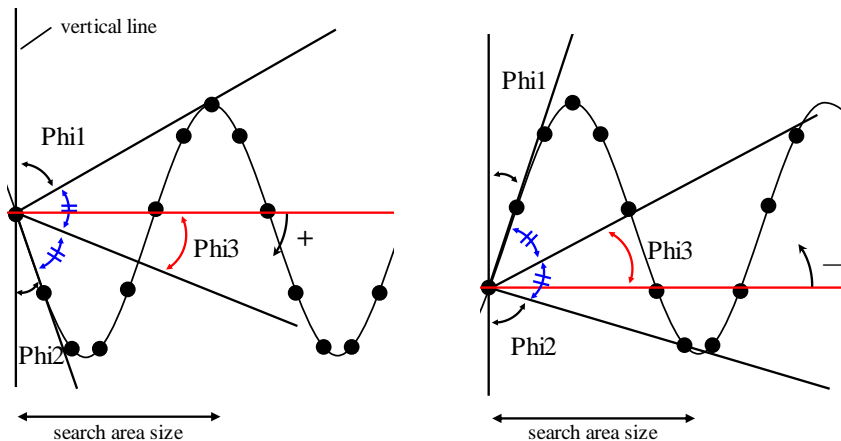


図 IV-5 尾根谷度の計算方法模式図

尾根谷度の計算では一つ一つの樹冠形状を表現するため、検索範囲の設定が重要となる。検索範囲が小さく、大きな樹冠に適用する場合、樹冠の形状ではなく、枝などの微細な凸部が表れ、誤抽出につながる。逆に検索範囲が大きい場合、小さな樹冠の凸部が滑らかになり、抽出漏れとなる。このため、一つの樹冠の形状を表現するためには樹木間隔程度の検索範囲が望ましい。そこで、樹木間隔を特定するため、仮の単木抽出と任意点周囲 100 m²内の立木密度の算出を行った。仮の樹頂点抽出は DCHM に応じてウィンドウサイズを変える局所最大値フィルタ法とした。ウィンドウサイズ (N_w) は以下に示す九州地方のスギ、ヒノキの最多密度曲線式 (式IV-1、2) を用いて式IV-3 のように設定した。

$$\log N_{Rfs} = 5.3083 - 1.4672 \log H \quad (\text{式 IV-1})$$

$$\log N_{Rfh} = 5.9582 - 2.055953 \log H \quad (\text{式 IV-2})$$

$$N_w = 100 / \sqrt{N_{Rfs} \text{ (or } N_{Rfh})} / 0.5 \quad (\text{式 IV-3})$$

ここで、 N_{Rfs} はスギの最多密度における ha 当たり本数、 N_{Rfh} はヒノキの最多密度における ha 当たり本数、 H は DCHM (m) である。なお、式IV-3 は格子間隔の 0.5m で割り、ウィンドウサイズとした。

ウィンドウサイズ (N_w) で局所最大値フィルタを用いて仮の単木抽出を行い、格子点全てについて周囲 100 m²内に含まれる樹木本数をカウントした。さらに、100 m²での立木密度を算出し、樹木間隔を計算した。ここで得られた樹木間隔から式IV-4 のように検索範囲 (SAS) を決定した。

$$SAS = 100 / \sqrt{N_{temp}} / 0.01 / 0.5 \quad (\text{式 IV-4})$$

ここで、 N_{temp} は周囲 100 m²に含まれる樹木本数である。なお式IV-4についても格子間隔の 0.5m で割り、検索範囲のウィンドウサイズとした。

尾根谷度により樹冠の形状を角度で表現できるが、ヒノキはスギに比べて樹冠の頂点付近と樹冠端部の樹冠高の差が小さいため、角度の数値が小さくなり後述する樹冠部抽出法で樹冠の抽出が困難な場合がある。また、樹冠部抽出法で使用する閾値は統計学の知見を利用して決めていることから、樹冠形状を表すデータは正規分布することが望ましい。そこで、尾根谷度の計算に使う地上・地下開度を基に樹冠の凹凸を強調した樹冠形状指数を作成した。樹冠形状指数は地上・地下開度の数値を置き換えて、尾根谷度では樹冠形状が小さな凹凸形状で表現される箇所であっても大きな凹凸として形状を表すようにできる指標である。地上・地下開度 (Phi1、Phi2) を以下の 5 項目の条件に従って数字を置き換えて、尾根谷度と同じように 8 方向の Phi3 を計算して、平均した値を樹冠形状指数とした (図 IV-6)。

- 1 項 $160 \leq \text{Phi}1 \Rightarrow \text{Phi}1=20$ 、 $\text{Phi}2 \leq 20 \Rightarrow \text{Phi}2=160$
- 2 項 $90 \leq \text{Phi}1 < 160 \Rightarrow \text{Phi}1=160$ 、 $20 < \text{Phi}2 \leq 90 \Rightarrow \text{Phi}2=20$
- 3 項 $20 \leq \text{Phi}1 < 90 \Rightarrow \text{Phi}1=20$ 、 $90 < \text{Phi}2 \leq 160 \Rightarrow \text{Phi}2=160$
- 4 項 $\text{Phi}1 < 20 \Rightarrow \text{Phi}1 = \text{Phi}1$ 、 $160 < \text{Phi}2 \Rightarrow \text{Phi}2 = \text{Phi}2$
- 5 項 隣接する 8 方位全てが中心 DCHM より低く、1 項に該当しない場合は Phi 1 を 179.9、Phi 2 を 0.1 とする

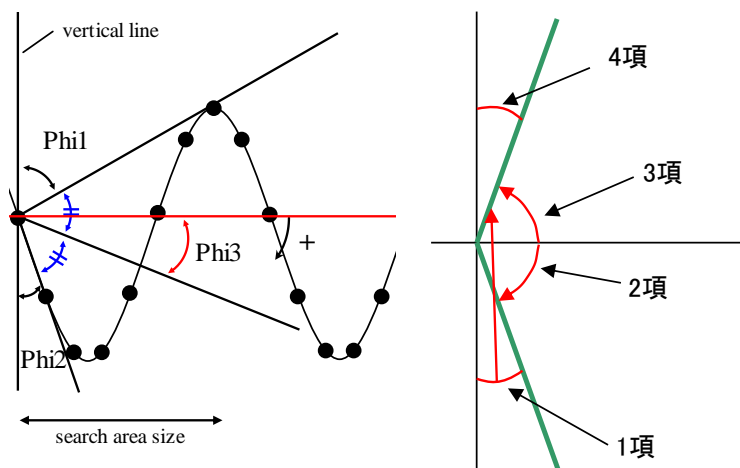


図 IV-6 地上・地下開度の書き換え条件

(右図は Phi3 を置き換える 1~4 項の条件の角度を示し、赤矢印により置き換え先の方角、緑線で置き換える角度 20 度と 160 度を示す)

置き換え処理により地上開度 $\Phi 1$ の値は 0~20、160、179.9、地下開度 $\Phi 2$ の値は 0.1、20、160~180 のいずれかになる。値の設定において、現地調査でスギの形状が概ね 70 度であったこと、ヒノキは 70 度よりも小さい値となることから、水平からの角度 70 度を基準に置き換え条件を設定した。また、1 項について、例えば地上開度 $\Phi 1$ が 160 度以上のときはギャップなどに隣接する樹冠端部と考えられ、樹冠形状指数が大きくなるため、ギャップに隣接していたとしても隣接木に接しているときと同じ角度となるように 20 度としてモデル化を行った。さらに、樹頂点の位置を明瞭にするため、5 項を設定し、角度を強調して樹冠形状指数が 89.9 となるようにした。

これらの計算には Microsoft 社の Visual C++ 2010 Express を用い、処理プログラムを作成して計算を行った。

IV-2-2 単木抽出方法・樹高計測方法と精度検証方法

単木抽出には局所最大値フィルタ法と樹冠部抽出法の 2 種類の方法を用いた。局所最大値フィルタは 3×3 と 5×5 の 2 つのウィンドウサイズを用いた。樹冠部抽出法は樹頂点ではなく、樹冠部を抽出し、抽出した樹冠部内から樹頂点位置を特定する手法で、以下の手順により樹頂点の位置が得られる。なお、樹冠部抽出法では抽出した樹冠部の数が樹木本数となる。

- 1) 格子点周囲 100 m²内の仮の樹頂点数を基に樹冠領域を決める。
- 2) 樹冠領域範囲で計算した閾値により樹冠部を抽出する。
- 3) 抽出した樹冠部内で最高値の DCHM を持つ格子位置を樹頂点候補とする。
- 4) 樹頂点候補が周囲の 8 つの格子点と比較して高い DCHM であるときに樹頂点とする。また、樹頂点候補が斜めに隣接する場合は、樹頂点候補以外の周囲の格子点と比較して高い DCHM の場合は、どちらも樹頂点とする。

樹冠領域は式IV-4 で求めた各格子点の検索範囲 (*SAS*) とした。樹冠部は隣接する樹木の樹冠部と接することなく、独立して抽出できるように樹冠領域の半分程度の幅として抽出した (図 IV-7)。

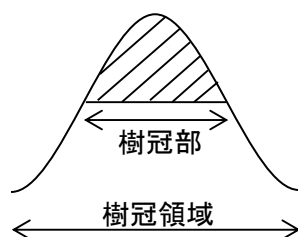


図 IV-7 樹冠部抽出法で用いる樹冠部と樹冠領域の関係

樹冠部は樹冠領域の半分程度の幅で抽出することから、樹冠領域に応じて表 IV-1 のように樹冠部の大きさを決めることができる。樹冠領域を 3×3 から 9×9 とすると、樹冠部は 1×1 から 4×4 となり、樹冠部の割合の平均は 16.3%となる。

表 IV-1 樹冠部抽出法の樹冠部サイズ（上段：ウィンドウサイズ、下段：メッシュ数）

樹冠部	1×1	2×2	3×3	4×4
	1	4	9	16
樹冠領域	3×3	5×5	7×7	9×9
	9	25	49	81
樹冠部率	11.1%	16.0%	18.4%	19.8%
平均	16.3%			

樹冠領域の中から 16%程度の樹冠部を抽出するため、正規分布における標準偏差 (σ) の出現頻度の確率分布を利用した。正規分布している情報に対して、平均値 (μ) から 1 標準偏差以内に約 68%の情報が含まれていることから、 $\mu + \sigma$ 以上は全体の約 16%となる (図 IV-8)。

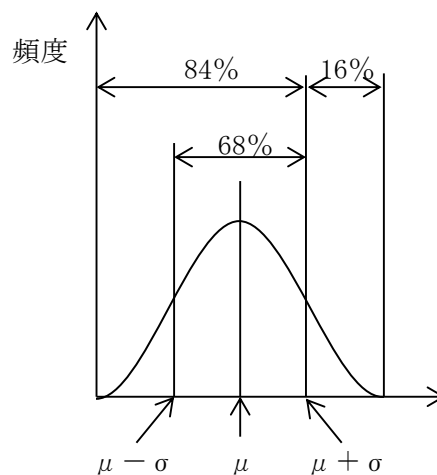


図 IV-8 正規分布の頻度分布

樹冠を表す情報として尾根谷度と樹冠形状指数を使用し、樹冠領域内で平均値と標準偏差を計算し、 $\mu + \sigma$ を閾値として、閾値以上の数値を持つ格子点を樹冠部として抽出した。樹冠部抽出は以下の方法で行った。

$$CR = SAS / 2$$

(式 IV-5)

$$A_{CR}(x, y) = \sum_{n=-CR}^{CR} \sum_{m=-CR}^{CR} CS_{CR}(x+n, y+m) / (CR \times 2 + 1)^2 \quad (\text{式 IV-6})$$

$$SD_{CR}(x, y) = \sqrt{\sum_{n=-CR}^{CR} \sum_{m=-CR}^{CR} (CS_{CR}(x+n, y+m) - A_{CR}(x, y))^2 / (CR \times 2 + 1)^2} \quad (\text{式 IV-7})$$

$$TH_{CR}(x, y) = A_{CR}(x, y) + SD_{CR}(x, y) \quad (\text{式 IV-8})$$

$$CS_{CR}(x, y) > TH_{CR}(x, y) \quad (\text{式 IV-9})$$

ここで、 x 、 y は任意の格子点の位置、 CR は樹冠領域の半径程度となる格子数、 A_{CR} は樹冠領域範囲の平均値（度）、 CS_{CR} は樹冠形状を表す情報（尾根谷度もしくは樹冠形状指数）、 SD_{CR} は樹冠領域範囲の標準偏差、 TH_{CR} は樹冠部を抽出する閾値（度）である。なお、 SAS が奇数の場合は小数点以下を切り捨て、整数とし、0になる場合は1とした。

上記の手順で得られる閾値は格子毎に立木密度（樹冠領域）に応じて計算する領域が変わり、樹冠形状情報によって異なる値となる動的な閾値である。閾値よりも高い樹冠形状情報を抽出し、周囲4方向で隣接する場合は一つの樹冠部として扱い、樹冠部が斜めに位置する場合は異なる樹冠部とした。そして、樹冠部内の最大DCHMの格子位置を樹頂点候補として抽出した。最後に、樹頂点候補のDCHMが周囲のDCHMより高い場合に樹頂点とした。また、樹頂点候補が斜めに隣接する場合は、どちらかの樹頂点候補のDCHMが周囲のDCHMよりも高い場合にどちらも樹頂点とした。これは過密林分などでは樹頂点が隣接する可能性があるためであり、この処理により局所最大値フィルタ法では抽出できない樹頂点が抽出可能となる。抽出した樹頂点の位置のDCHMを樹高とした。

既存の研究から航空レーザ解析による単木抽出では上層を形成する樹木を抽出しており、劣勢木は抽出できないことがわかっている(Persson *et al.*, 2002; Reitberger *et al.*, 2008; Reitberger *et al.*, 2009; Yao *et al.*, 2012)。そこで、精度検証では現地調査の全木本数と劣勢木を除く上層木本数の2種類の本数情報を用いて精度検証を行った。また、樹高については現地調査の上層樹高との比較を行った。

なお、精度検証の指標とした誤差率と平均誤差率は以下の式で計算した。

$$ERi = |(Nfi - Nli) / Nfi| / 100 \quad (\text{式 IV-10})$$

$$AER = \sum_{i=1}^n ERi / n \quad (\text{式 IV-11})$$

ここで、 ERi は現地調査プロット*i*の誤差率（%）、 Nfi は現地調査本数、 Nli はレーザ解析樹木本数、 AER は平均誤差率（%）、 n は調査プロット数である。

これらの計算にはMicrosoft社のVisual C++ 2010 Expressを用い、処理プログラムを

作成して計算を行った。

IV-3 樹冠形状モデリングによる単木抽出と樹高計測の結果

IV-3-1 尾根谷度、樹冠形状指数の作成

最大値 DCHM から作成した尾根谷度画像と樹冠形状指数画像を図 IV-9 に示す。最大値 DCHM には林床からの反射パルスが含まれているために樹冠に樹冠高が低いことを表す黒い箇所が点在し、尾根谷度、樹冠形状指数にも同様に数値が低く凹部を表す箇所が点在する。

高精細 DCHM から作成した尾根谷度画像と樹冠形状指数画像を図 IV-10 に示す。高精細 DCHM には林床からの反射パルスを示す黒色で表示される DCHM が白色で表示されている樹冠領域になく、樹冠表層を正確に表現でき、最大値 DCHM から作成した尾根谷度、樹冠形状指数に比べて樹冠表層の形状の再現性が高くなっていることが分かる。

DCHM 画像では林齢や植生タイプが異なる範囲で樹冠高が異なり、樹高が高い中央部分は白く、樹高が低い東西の範囲では灰色となっている。一方で、角度で樹冠の形状を表現している尾根谷度と樹冠形状指数は DCHM 画像に確認できた DCHM の違いによる色合いの違いはなく、中央部と東西部が同様の濃淡で樹冠形状を表現できている。さらに、尾根谷度と樹冠形状指数を比較すると、樹冠形状指数は尾根谷度に比べて樹冠一つ一つが識別しやすく、樹頂点の位置が白く強調されて明瞭になっている。

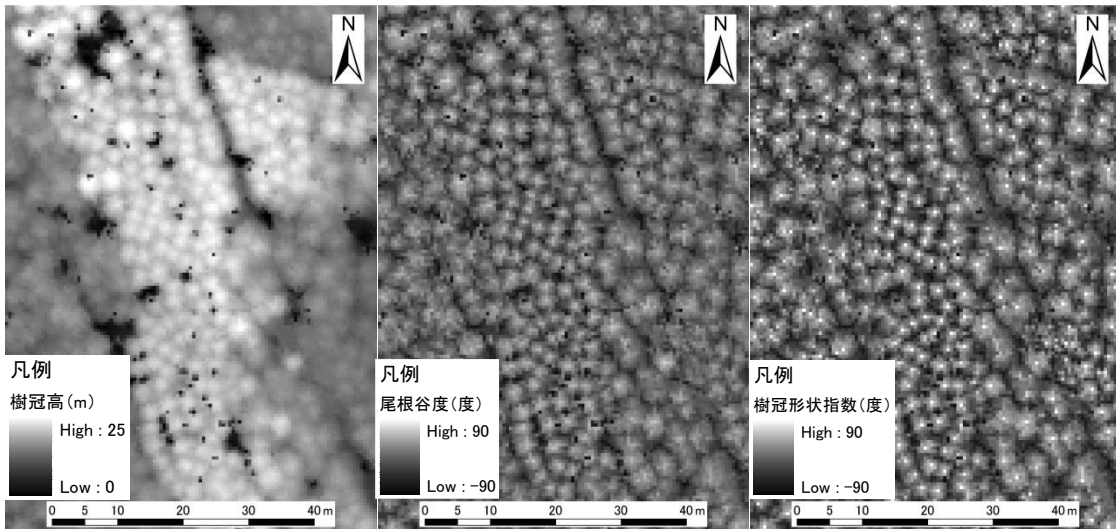


図 IV-9 最大値 DCHM と最大値 DCHM を用いた尾根谷度・樹冠形状指数の比較
(左図：DCHM、中図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数)

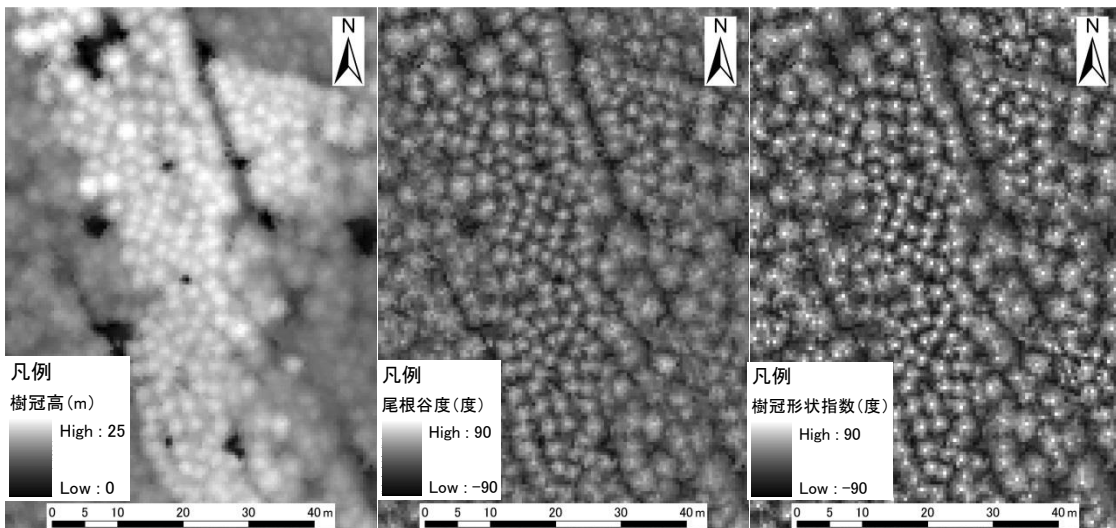


図 IV-10 高精細 DCHM と高精細 DCHM を用いた尾根谷度・樹冠形状指数の比較
(左図：DCHM、中図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数)

高精細 DCHM とそれを用いて作成した尾根谷度、樹冠形状指数のヒストグラムは図 IV-11～図 IV-13 のようになり、高精細 DCHM は正規分布していないため、樹冠部抽出法に適していないことが分かる。一方、角度情報に変換したことで、樹冠形状を一定の数値内で表現できる波形情報とした尾根谷度、樹冠形状指数は正規分布に近づき、特に樹冠形状指数は尾根谷度に比べて左右対象のグラフとなった。このことから、尾根谷度と樹冠形状指数は樹冠部抽出法に用いることができると判断した。

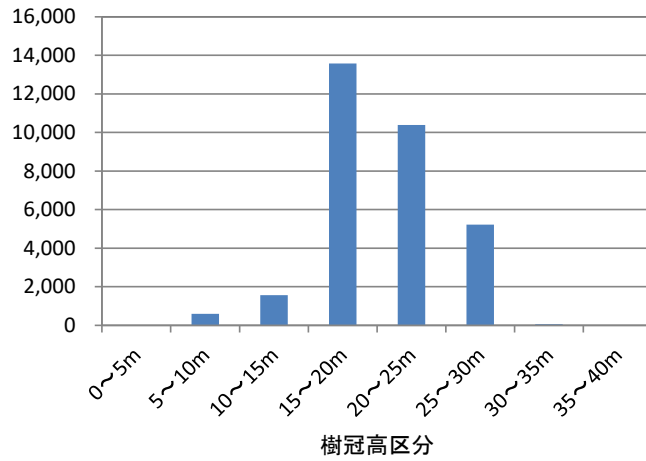


図 IV-11 高精細 DCHM のヒストグラム例

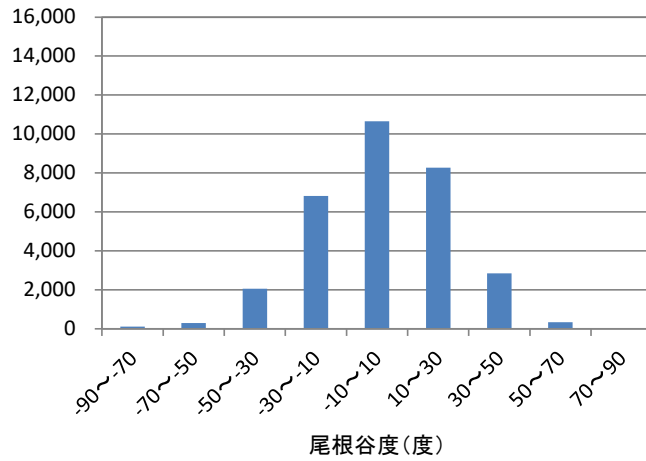


図 IV-12 尾根谷度のヒストグラム例

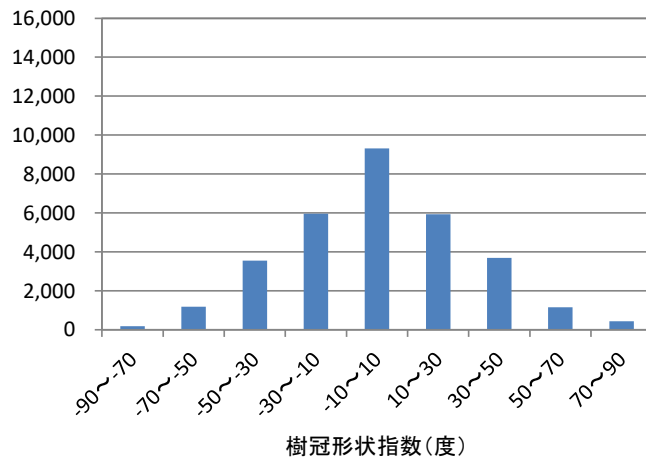


図 IV-13 樹冠形状指数のヒストグラム例

IV-3-2 6種類の樹冠情報と2種類の抽出手法を用いた単木抽出

単木抽出に有効な樹冠情報と単木抽出手法を検討するため、6種類の樹冠情報と2種類の単木抽出手法（局所最大値フィルタ法は2種類のウィンドウサイズの設定）を用いて単木抽出を行った。単木抽出は表 IV-2 に示す白丸の組み合わせの8パターンで行い、スギ、ヒノキ林、併せて16パターンの結果が得られた。

表 IV-2 単木抽出を行った樹冠情報と単木抽出手法の関係

			単木抽出手法		
			局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法
			3×3	5×5	
樹冠情報	最大値 DCHM	尾根谷度	○	○	—
		樹冠形状指数	—	—	○
			—	—	○
	高精細 DCHM		○	○	—
		尾根谷度	—	—	○
		樹冠形状指数	—	—	○

最大値 DCHM と高精細 DCHM を用いて、それぞれ計算した尾根谷度と樹冠形状指数から樹冠部抽出法の樹冠部を抽出した結果を図 IV-14～図 IV-17 に示す。図 IV-14、図 IV-15 はヒノキの疎林で、図 IV-16、図 IV-17 はスギの密林である。また、図 IV-14、図 IV-16 は最大値 DCHM から、図 IV-15、図 IV-17 は高精細 DCHM から作成した尾根谷度と樹冠形状指数である。図 IV-14 の最大値 DCHM には林床からの反射パルスが含まれているため、尾根谷度と樹冠形状指数の樹冠表層面に凹部が生じ、樹冠部として抽出されるべき箇所が抽出漏れとなっていたり、凹部が樹冠部抽出の閾値に使われる平均値を下げるために樹冠部が凹部周辺で抽出されたりする傾向がある。図 IV-15 の樹冠部は図 IV-14 と比べて樹冠中央部にまとまって抽出されていることから、高精細 DCHM の方が良い精度で単木抽出できることがわかる。また、尾根谷度と樹冠形状指数の樹冠部を比較すると樹冠端部で抽出される樹冠部が樹冠形状指数の方が少なく、数値を置き換えた効果が確認できる。図 IV-16 の最大値 DCHM には林床から反射したパルスの影響は疎林ほどなく、うっ閉した密林は樹冠層表面からの反射パルスが多くなることが分かった。樹冠形状指数は樹頂点位置が強調されていることから、樹冠部抽出の閾値が高くなり、尾根谷度に比べて樹冠部の抽出箇所が少なくなっている。

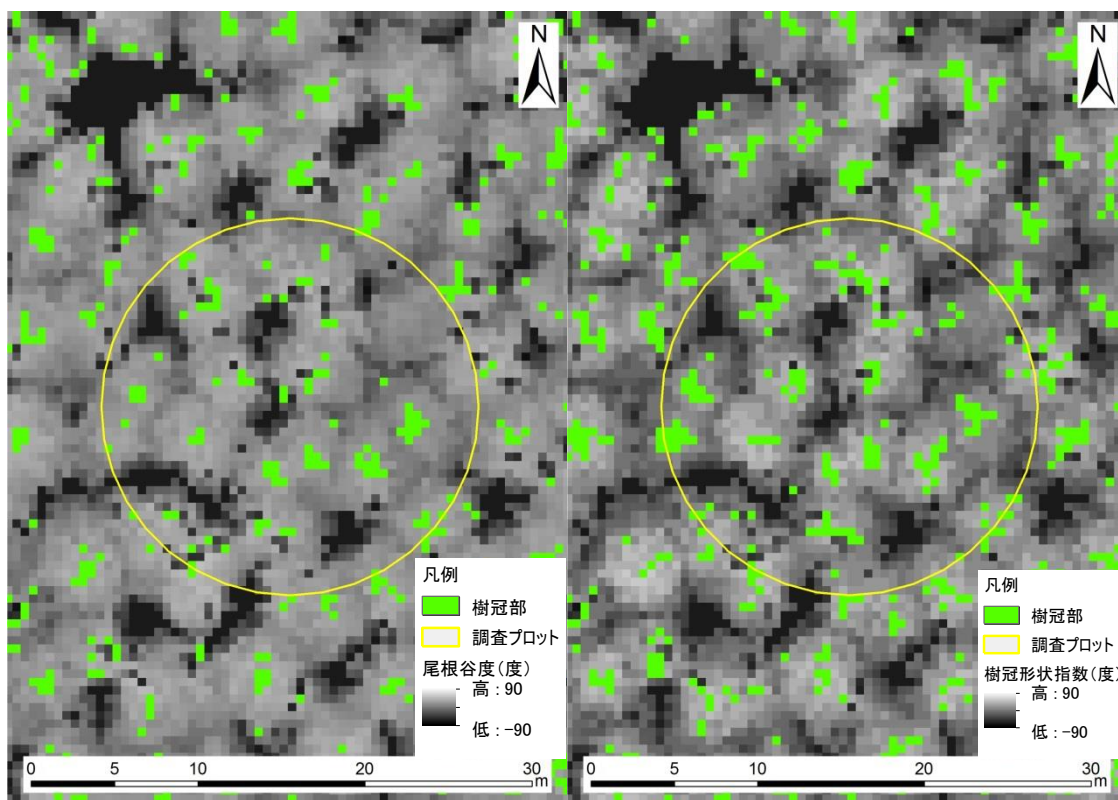


図 IV-14 樹冠部抽出結果（疎林、最大値 DCHM 左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数）

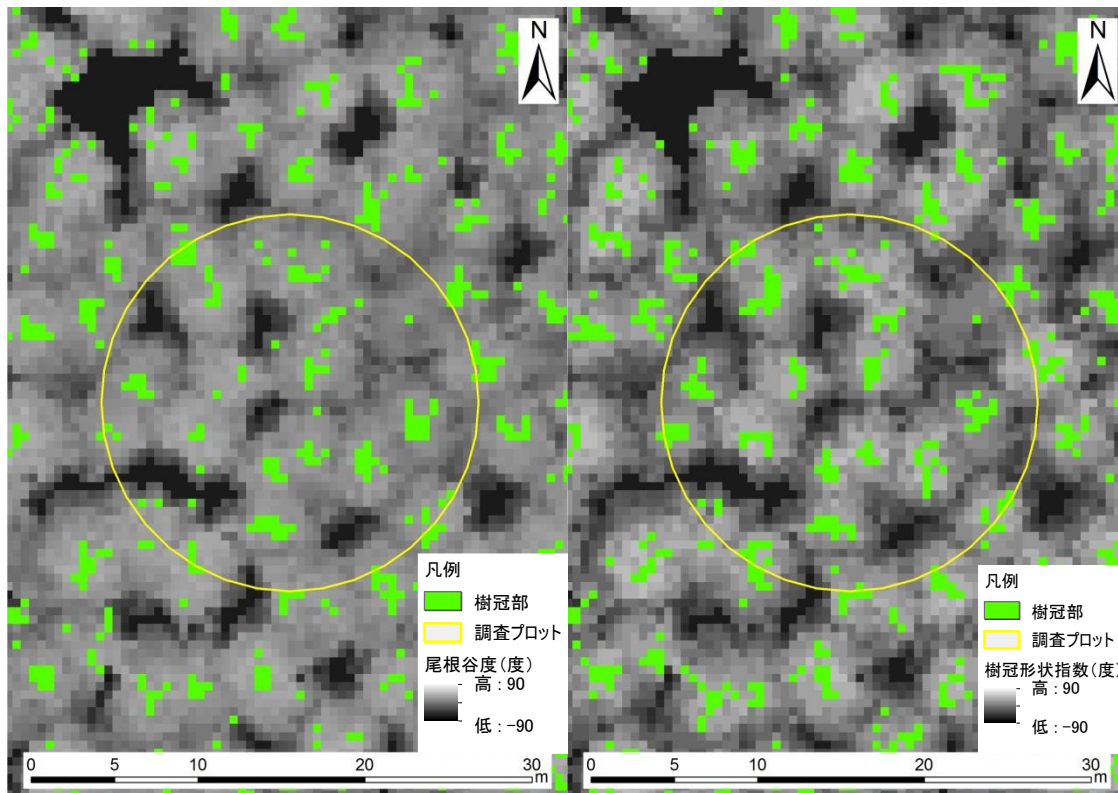


図 IV-15 樹冠部抽出結果（疎林、高精細 DCHM 左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数）

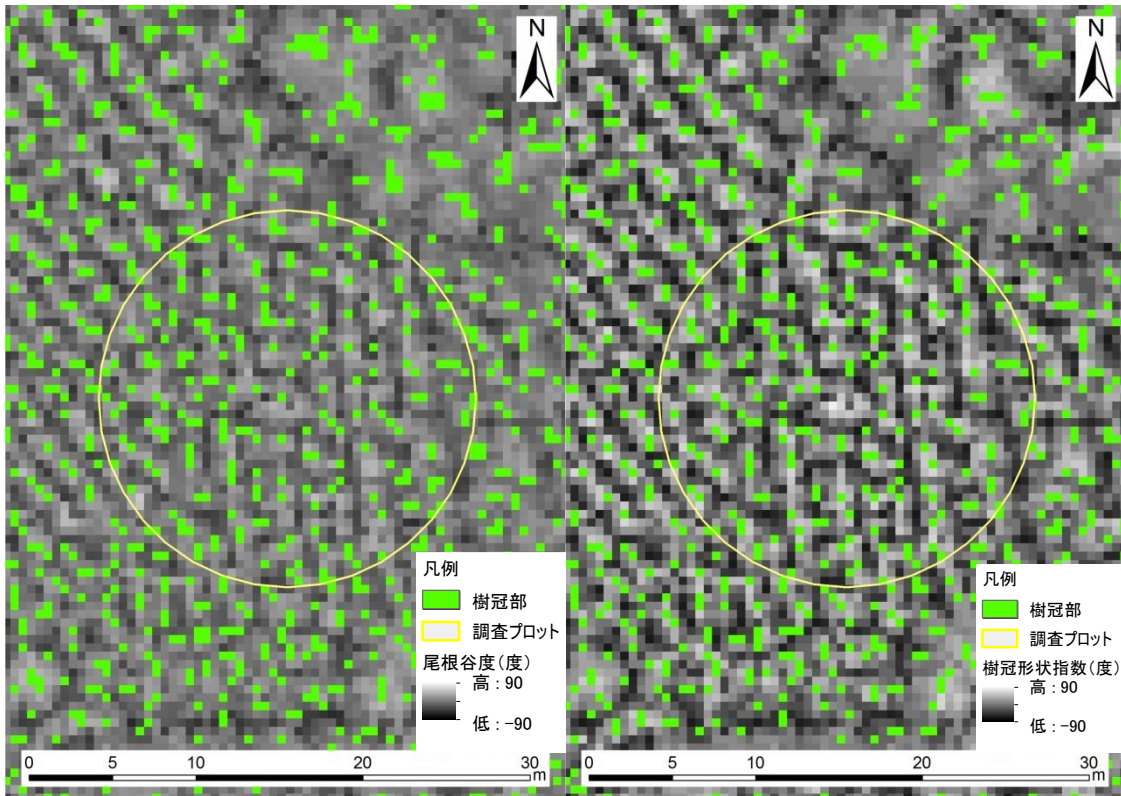


図 IV-16 樹冠部抽出結果 (密林、最大値 DCHM 左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数)

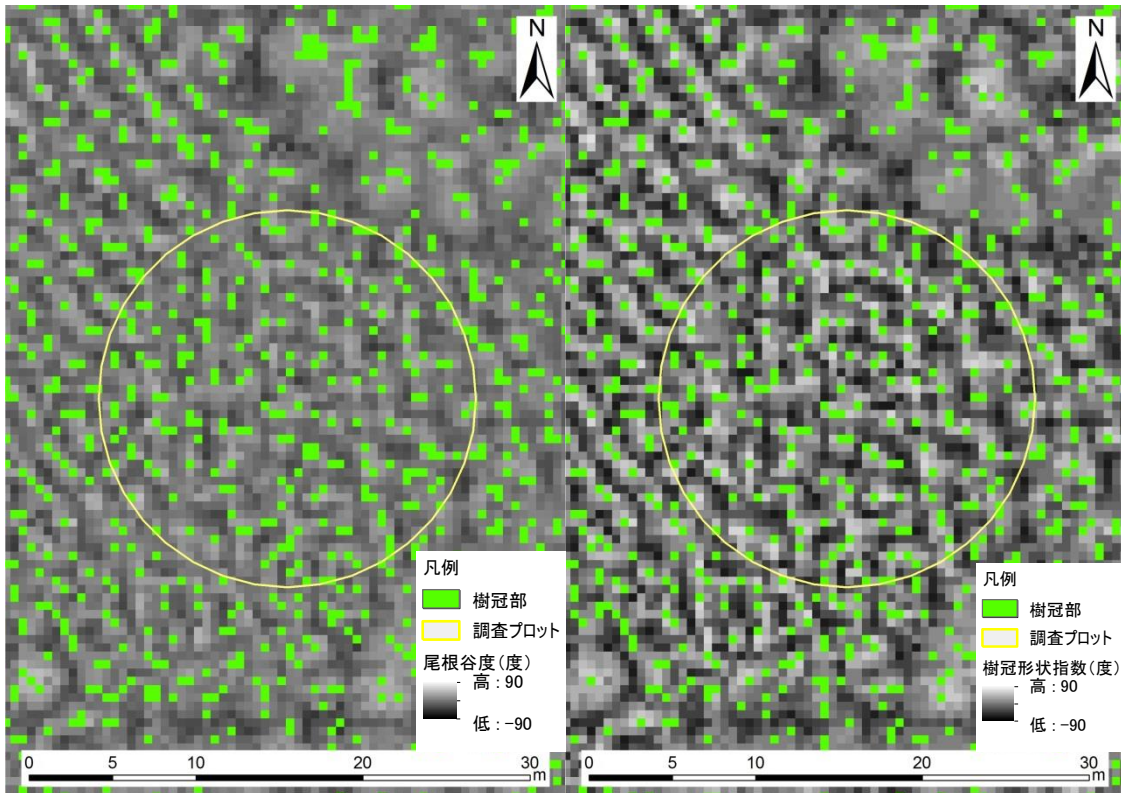


図 IV-17 樹冠部抽出結果 (密林、高精細 DCHM 左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数)

6種類の樹冠情報と2種類の単木抽出法により得られた8パターンの単木抽出結果を図IV-18～図IV-25及び表IV-3に示す。図IV-18、図IV-19の最大値DCHMを用いたヒノキ疎林（現地調査結果では18本）の単木抽出結果では、林床からの反射パルスが影響して凹部周辺に樹頂点が誤抽出され、ウィンドウサイズ3×3では過剰抽出となっている。一方、図IV-20、図IV-21の高精細DCHMの単木抽出では樹冠表層の再現性が高く、最大値DCHMでは誤抽出となった樹頂点は抽出されず、ウィンドウサイズ3×3では現地調査本数と同数になった。図IV-18、図IV-20の局所最大値フィルタ法では、ウィンドウサイズ3×3で一つの樹冠に二つの樹頂点など過剰に抽出されている場合があり、ウィンドウサイズ5×5で抽出漏れがある場合がある。一方で、図IV-19、図IV-21の樹冠部抽出法では過密林分に対応するための斜めに隣接する樹頂点が誤抽出となっている場合があった。

スギ密林（現地調査全本数では117本）の単木抽出結果では、図IV-22、図IV-23の最大値DCHMと図IV-24、図IV-25の高精細DCHMでは疎林で明らかに確認できた林床からの反射パルスはなく、DCHMの違いは少ないが、高精細DCHMの単木抽出結果（3×3：102本、5×5：54本、尾根谷度：113本、樹冠形状指数：116本）の方が最大値DCHMの抽出結果（3×3：96本、5×5：56本、尾根谷度：110本、樹冠形状指数：115本）に比べて樹木本数が多くなった。図IV-22、図IV-24の局所最大値フィルタ法と図IV-23、図IV-25の樹冠部抽出法の比較では、樹冠部抽出法は斜めに隣接する樹頂点が抽出され、局所最大値フィルタ法に比べて多くの樹木が抽出できた。

表 IV-3 ヒノキ疎林とスギ密林の単木抽出結果

	現地調査 全木本数	使用DCHM: 最大値DCHM				使用DCHM: 高精細DCHM			
		局所最大値 フィルタ法		樹冠部抽出法		局所最大値 フィルタ法		樹冠部抽出法	
		局所 領域 3×3	局所 領域 5×5	尾根 谷度	樹冠 形状 指数	局所 領域 3×3	局所 領域 5×5	尾根 谷度	樹冠 形状 指数
ヒノキ疎林	18	23	14	18	24	18	13	19	19
スギ密林	117	96	56	110	115	102	54	113	116

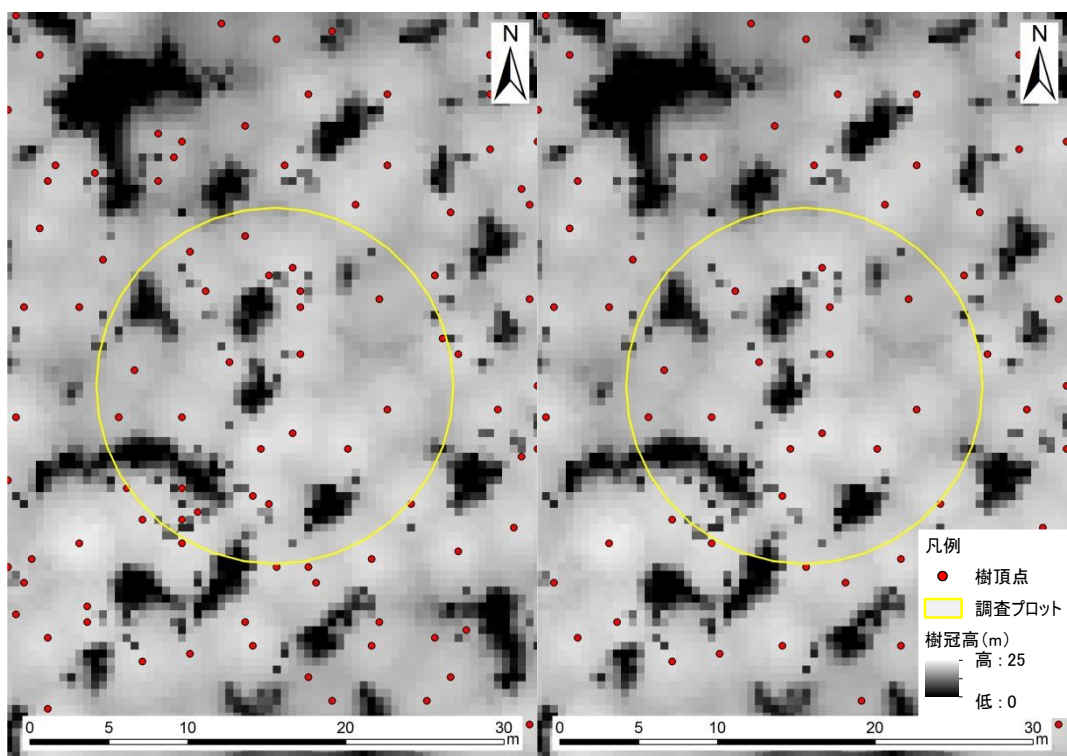


図 IV-18 樹頂点抽出結果（ヒノキ疎林、局所最大値フィルタ法）
 （最大値 DCHM、左図：ウィンドウサイズ 3×3、右図：ウィンドウサイズ 5×5）

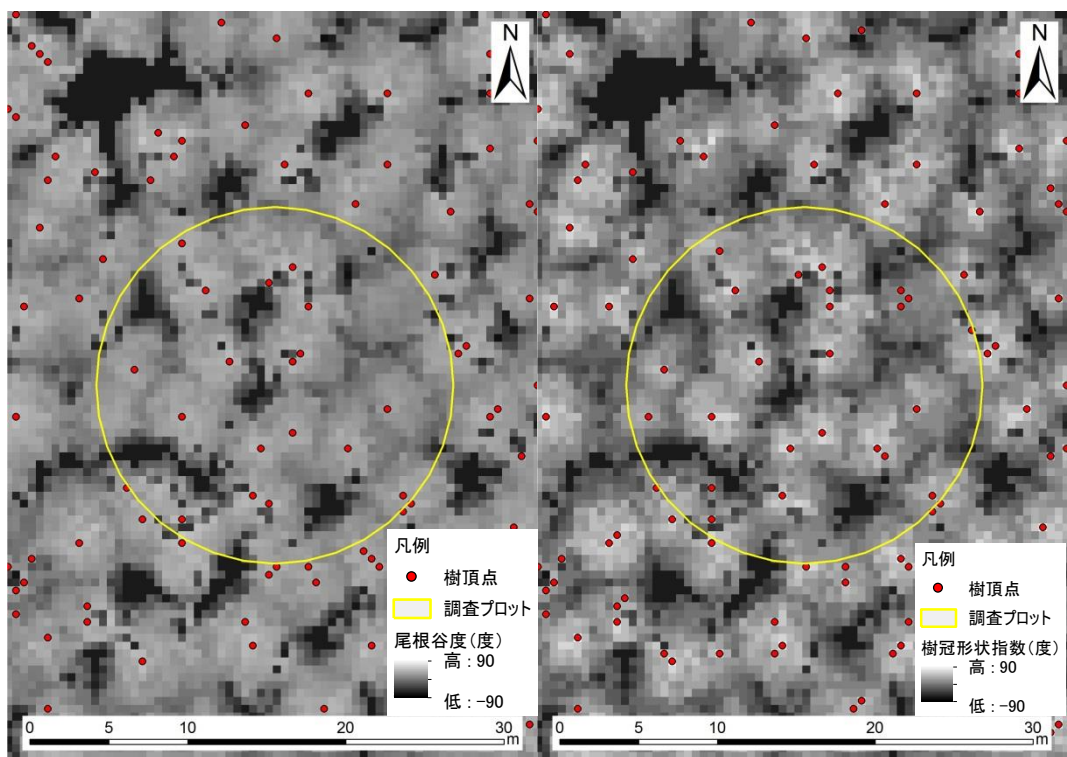


図 IV-19 樹頂点抽出結果（ヒノキ疎林、樹冠部抽出法）
 （最大値 DCHM、左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数）

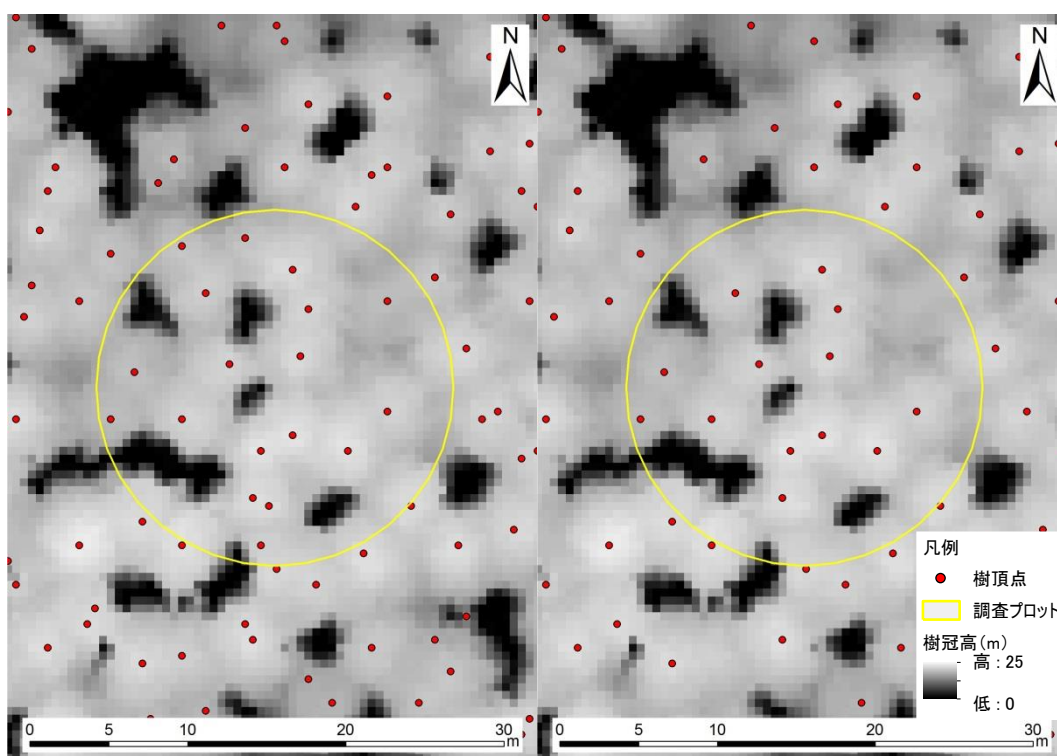


図 IV-20 樹頂点抽出結果（ヒノキ疎林、局所最大値フィルタ法）
 （高精細 DCHM、左図：ウィンドウサイズ 3×3、右図：ウィンドウサイズ 5×5）

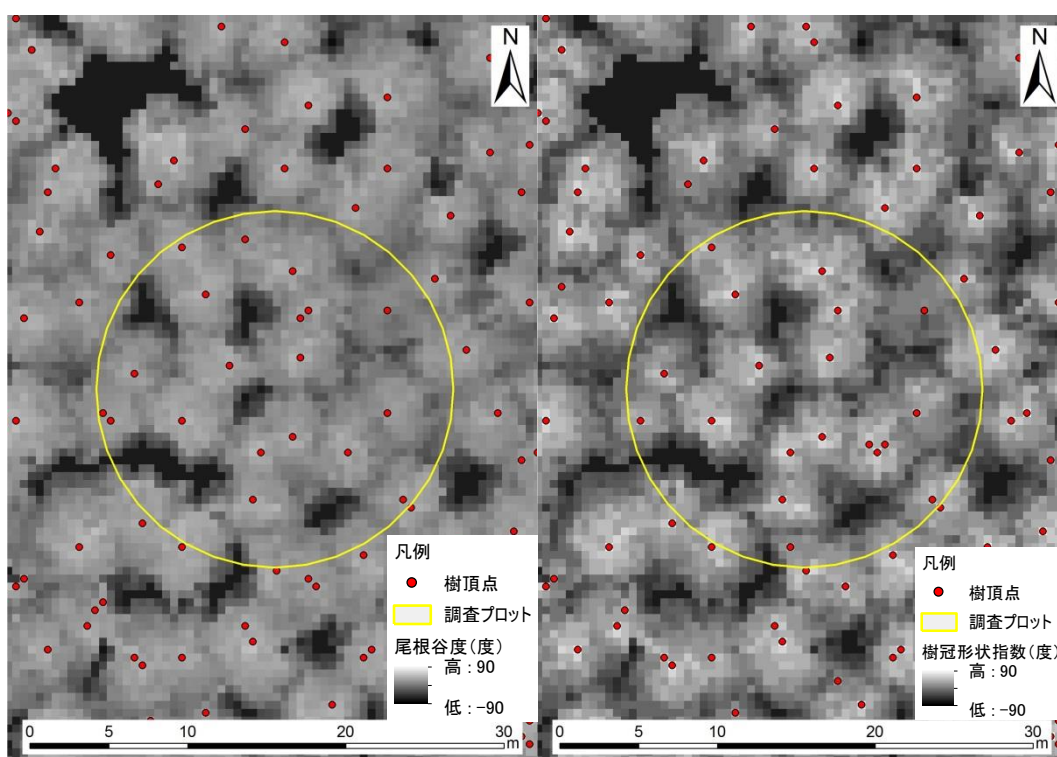


図 IV-21 樹頂点抽出結果（ヒノキ疎林、樹冠部抽出法）
 （高精細 DCHM、左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数）

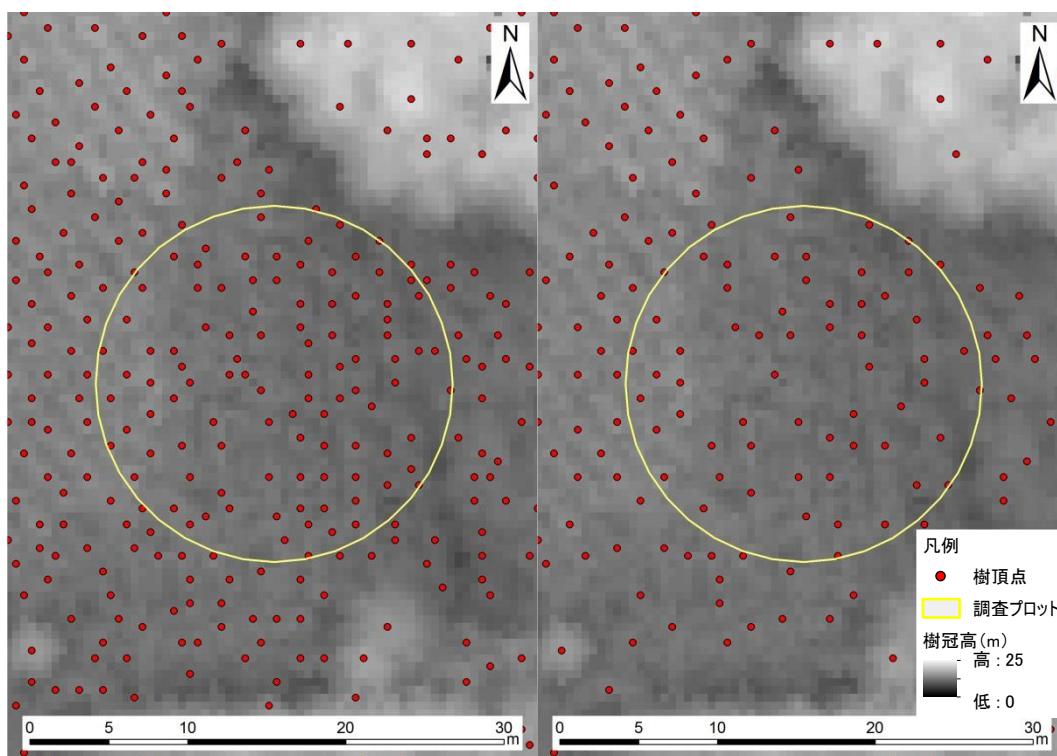


図 IV-22 樹頂点抽出結果 (スギ密林、局所最大値フィルタ法)
 (最大値 DCHM、左図：ウィンドウサイズ 3×3、右図：ウィンドウサイズ 5×5)

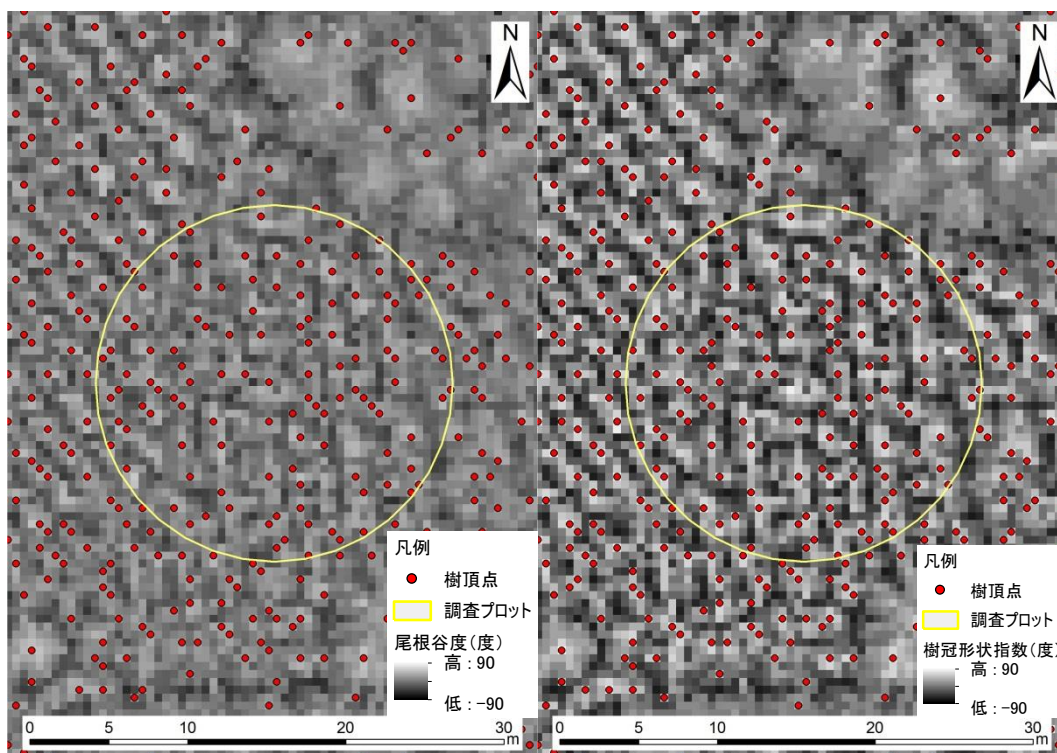


図 IV-23 樹頂点抽出結果 (スギ密林、樹冠部抽出法)
 (最大値 DCHM、左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数)

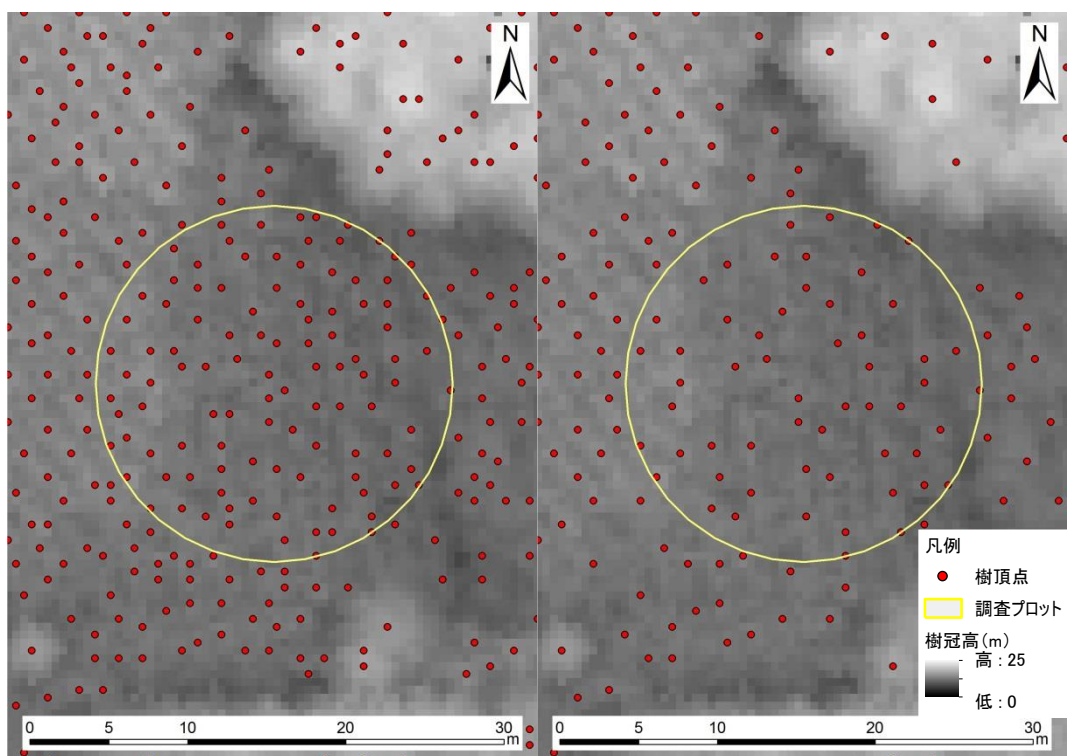


図 IV-24 樹頂点抽出結果 (スギ密林、局所最大値フィルタ法)
(高精細 DCHM、左図：ウィンドウサイズ 3×3、右図：ウィンドウサイズ 5×5)

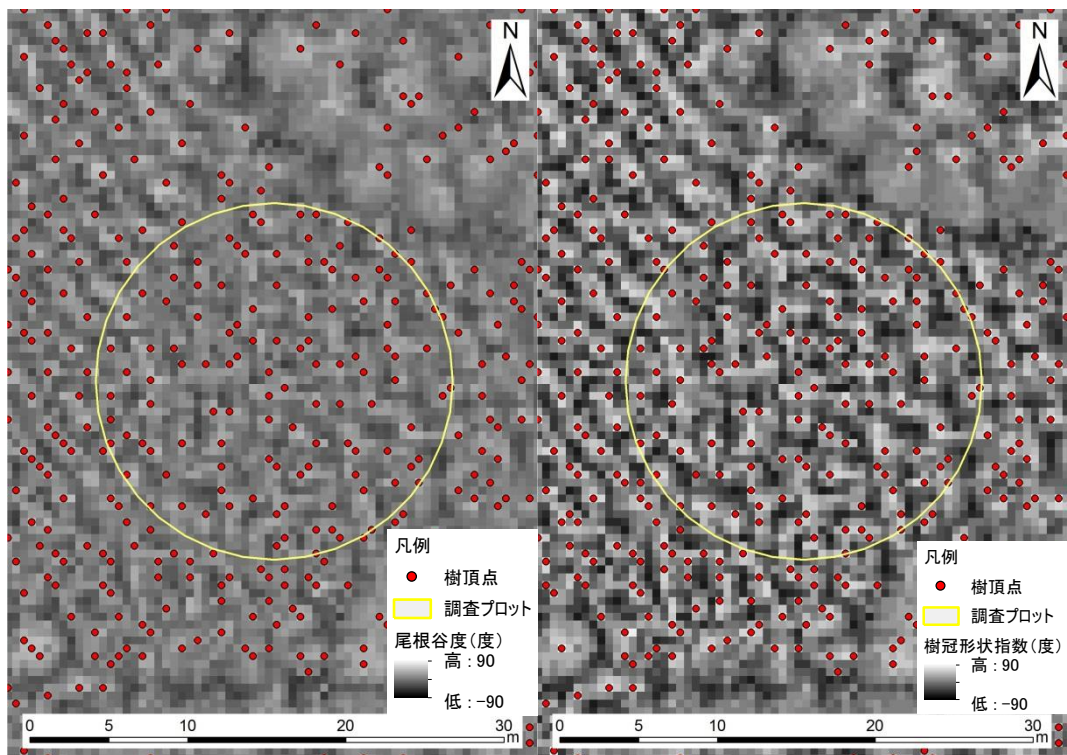


図 IV-25 樹頂点抽出結果 (スギ密林、樹冠部抽出法)
(高精細 DCHM、左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数)

現地調査結果と 8 パターンの単木抽出結果を図 IV-26～図 IV-29 及び表 IV-4～表 IV-11 に示す。航空レーザ計測の単木抽出では劣勢木の識別が困難であることから、全数木（図中左側のグラフ）と上層木（図中右側のグラフ）で比較した。全木本数と上層木の単木抽出結果の比較では、図中の近似線からのばらつきが上層木の方が小さく、また、表から相関係数が向上し、平均誤差率や二乗平均平方根誤差（RMSE）が減少していることがわかる。最大値 DCHM と高精細 DCHM の比較では、局所最大値フィルタ法のウィンドウサイズ 5×5 を除き、樹種、単木抽出手法に関わらず、高精細 DCHM の方が図中の近似線からのばらつきが小さく、相関係数が高く、平均誤差率や RMSE が小さい。

単木抽出手法の比較では、局所最大値フィルタ法のウィンドウサイズ 5×5 は樹木本数の増加に伴い、樹冠のサイズとウィンドウサイズの大きさが合わなくなり、抽出最大樹木本数は現地調査の本数の約半分程度となっている。他の手法の平均誤差率は 20%以下であるが、ウィンドウサイズ 5×5 では 30%以上であり、5×5 は全域に適用するウィンドウサイズとしては適していないことがわかる。ウィンドウサイズ 3×3 では高い相関係数で単木抽出ができていたが、樹冠部抽出法に比べて、抽出できる樹木本数がスギ、ヒノキ林ともに少なく、過密林分では過小抽出になっている。高精細 DCHM の抽出結果である図 IV-27、図 IV-29 のウィンドウサイズ 3×3 のグラフから概ね 40 本（1,000 本/ha）程度の林分までは現地調査結果と 1 対 1 の関係であり、それ以上では徐々に過小抽出になる傾向がある。一方で、図 IV-27、図 IV-29 の樹冠部抽出法は尾根谷度、樹冠形状指数ともにスギ林では 80 本（2,000 本/ha）程度、ヒノキ林では 60 本（1,500 本/ha）程度の林分まで 1 対 1 の関係である。また、表全般に示したように樹冠部抽出法では局所最大値フィルタ法の最大本数よりも 10 本以上多く抽出され、過密林分への適用性が高いことがわかる。さらに、表 IV-7、表 IV-11 から局所最大値フィルタ法のウィンドウサイズ 3×3 に比べて樹冠部抽出法は、RMSE がスギ林で 7.4 から 6.2（尾根谷度）、5.7（樹冠形状指数）に、ヒノキ林で 11.5 から 10.1（尾根谷度）、9.9（樹冠形状指数）に減少した。

樹冠部抽出法の尾根谷度と樹冠形状指数の比較では、スギ林において表 IV-7 に示すように相関係数が 0.93 から 0.94 に若干向上し、平均誤差率、RMSE がそれぞれ 9.3%から 8.2%、6.2 から 5.7 に減少して精度が向上した。一方で、ヒノキ林では表 IV-11 に示すように相関係数は 0.87 から 0.89、RMSE は 10.1 から 9.9 になっているが、平均誤差率は 11.8%から 12.7%に増え、大きな精度向上は確認できなかった。

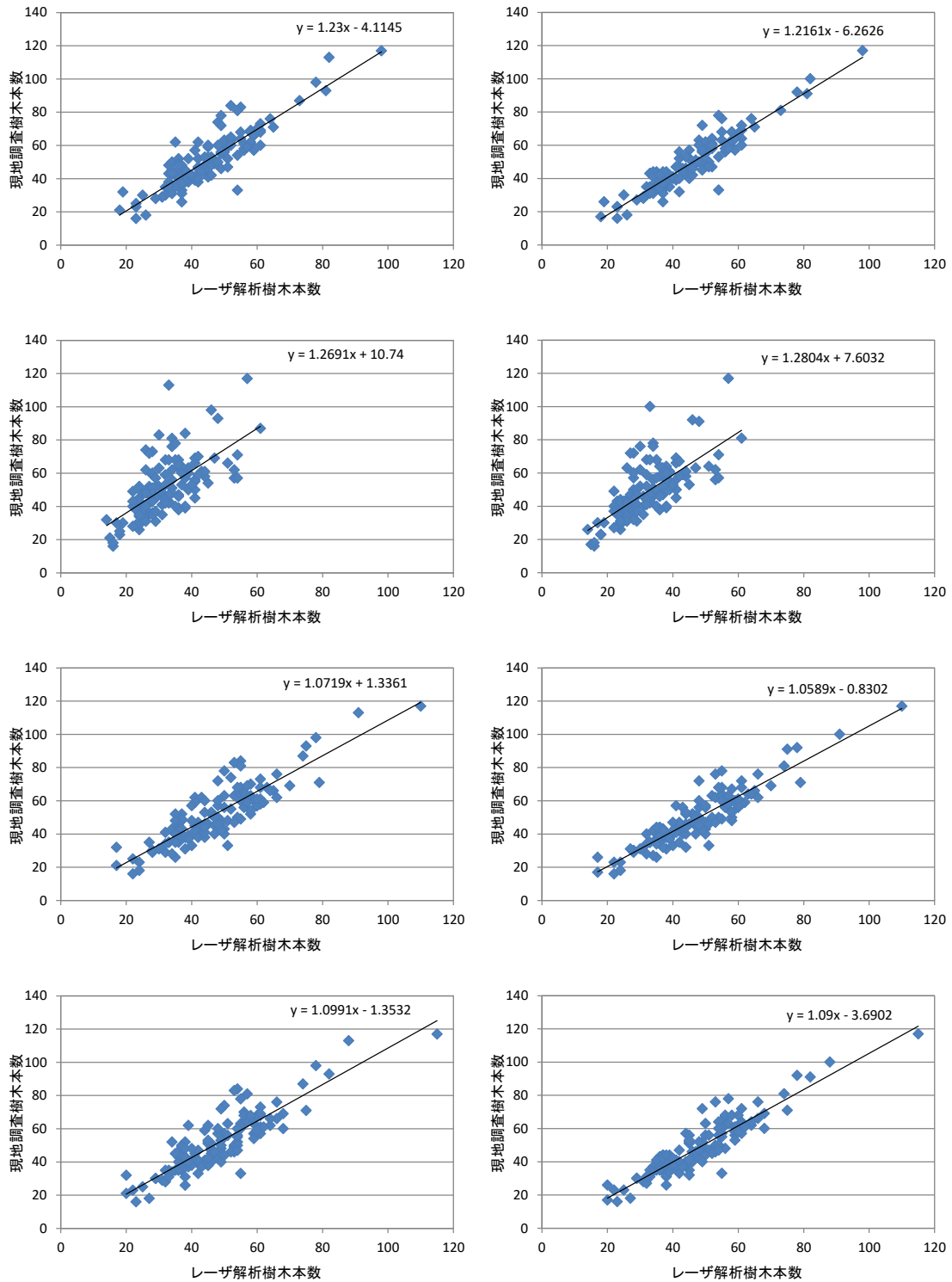


図 IV-26 単木抽出結果 (スギ、最大値 DCHM (n: 129 プロット))
 (上から順に局所最大値フィルタ法: 3×3、5×5、樹冠部抽出法: 尾根谷度、
 樹冠形状指数、左図: 劣勢木含む全木本数、右図: 劣勢木除く上層木)

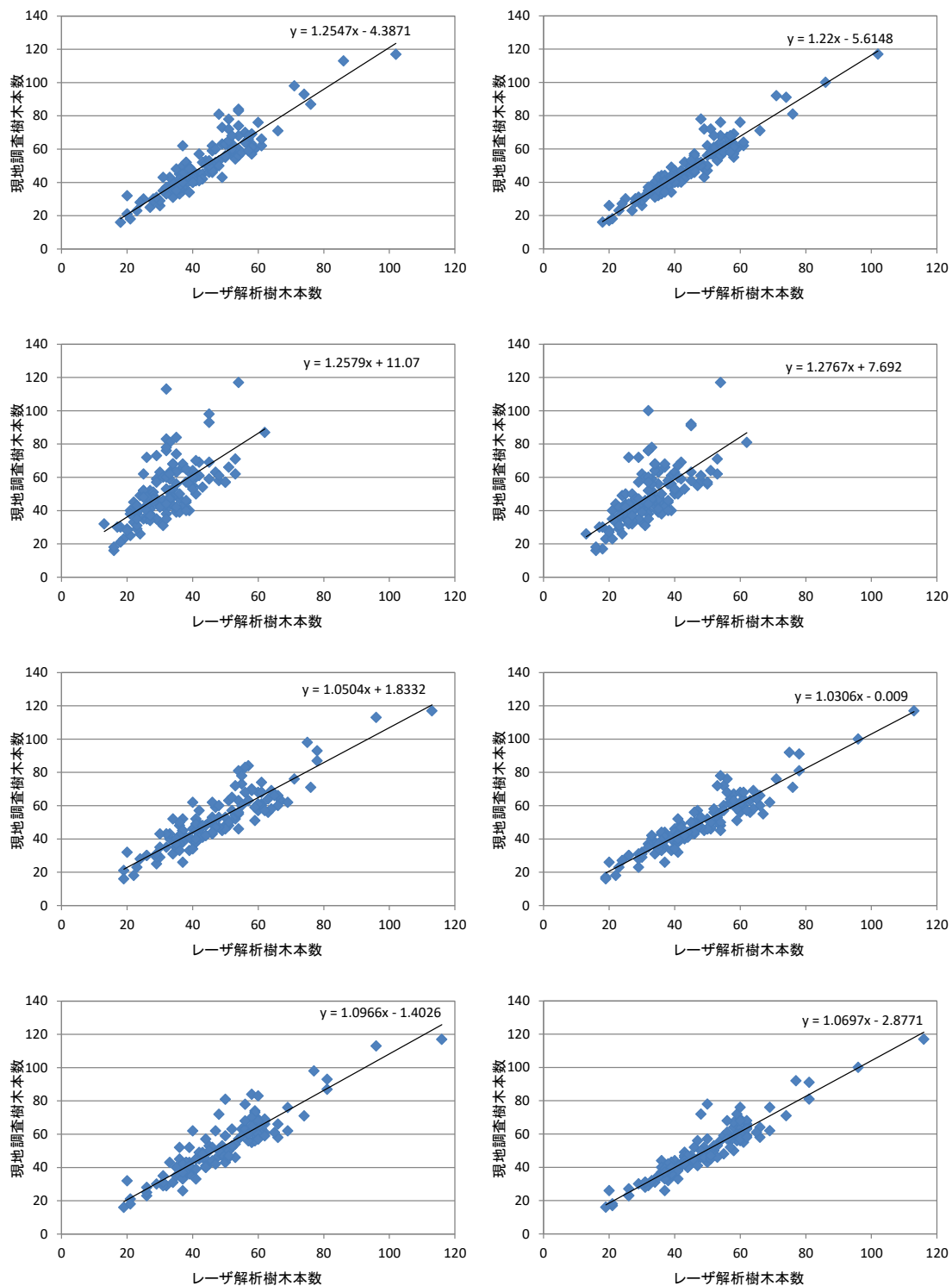


図 IV-27 単木抽出結果 (スギ、高精細 DCHM (n: 129 プロット))
 (上から順に局所最大値フィルタ法: 3×3、5×5、樹冠部抽出法: 尾根谷度、
 樹冠形状指数、左図: 劣勢木含む全木本数、右図: 劣勢木除く上層木)

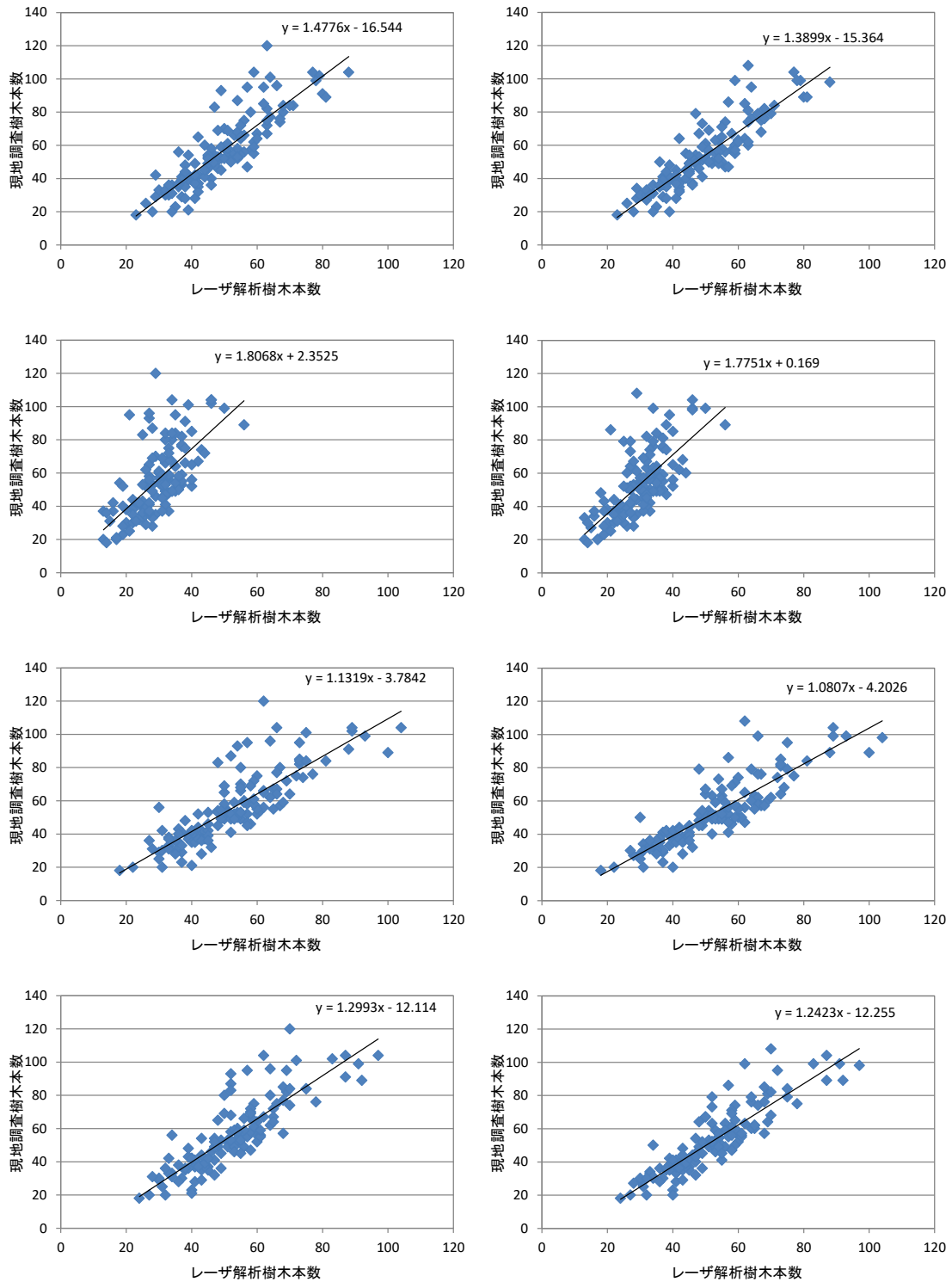


図 IV-28 単木抽出結果 (ヒノキ、最大値 DCHM (n : 126 プロット))
 (上から順に局所最大値フィルタ法 : 3×3、5×5、樹冠部抽出法 : 尾根谷度、
 樹冠形状指数、左図 : 劣勢木含む全木本数、右図 : 劣勢木除く上層木)

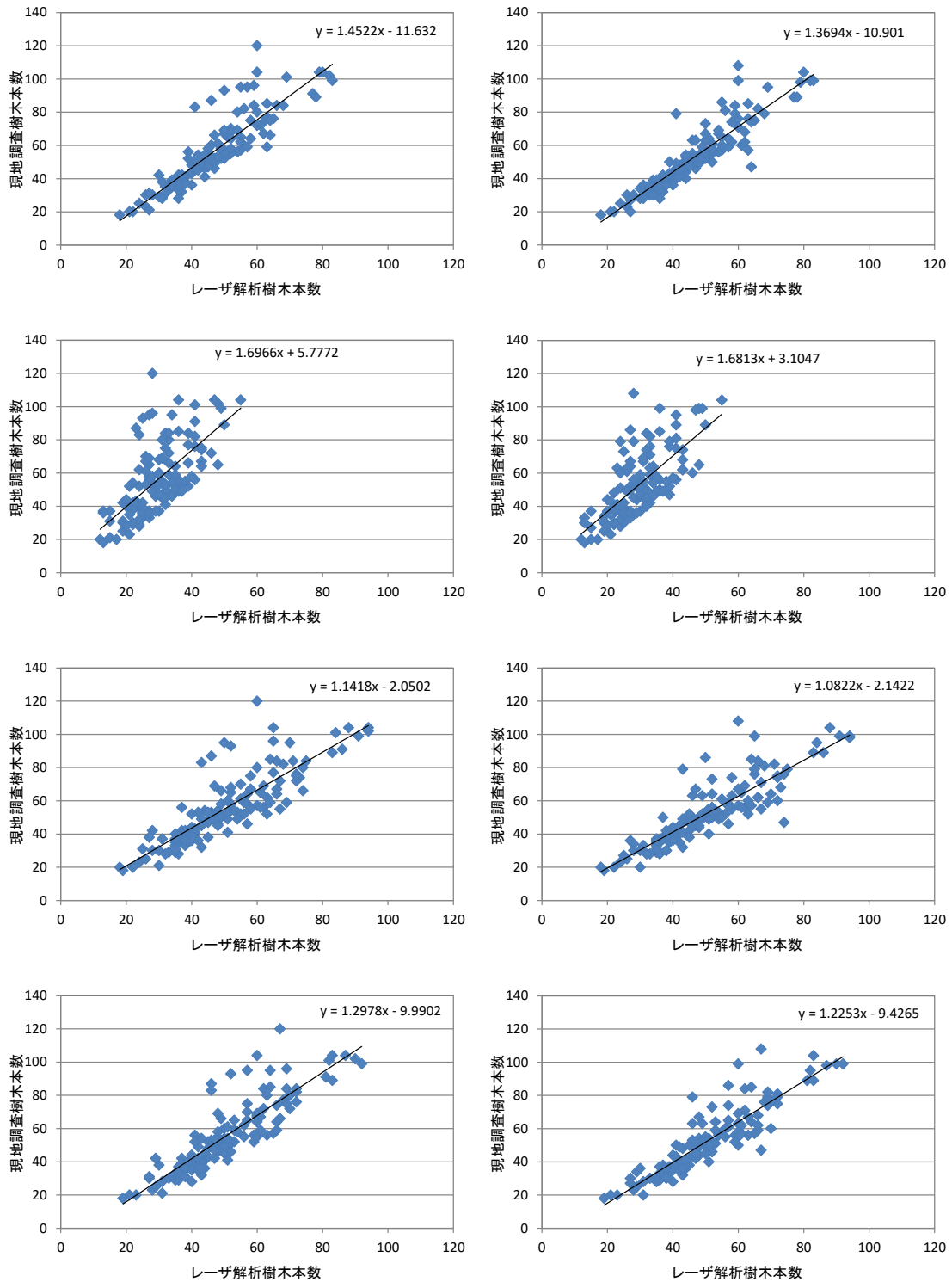


図 IV-29 単木抽出結果 (ヒノキ、高精細 DCHM (n : 126 プロット))
 (上から順に局所最大値フィルタ法 : 3×3、5×5、樹冠部抽出法 : 尾根谷度、
 樹冠形状指数、左図 : 劣勢木含む全木本数、右図 : 劣勢木除く上層木)

表 IV-4 単木抽出結果集計（スギ、最大値 DCHM、全木本数）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(本)	52	45	32	47	48
最小	16	18	14	17	20
最大	117	98	61	110	115
標準偏差	17.5	12.6	9.0	14.1	13.8
平均誤差率	-	14.3%	34.7%	14.0%	13.2%
相関係数	-	0.89	0.65	0.87	0.87
RMSE	-	10.6	23.6	9.9	9.4

表 IV-5 単木抽出結果集計（スギ、高精細 DCHM、全木本数）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(本)	52	45	32	47	48
最小	16	18	13	19	19
最大	117	102	62	113	116
標準偏差	17.5	12.8	8.9	14.9	14.5
平均誤差率	-	13.1%	34.5%	11.9%	10.2%
相関係数	-	0.92	0.64	0.90	0.91
RMSE	-	10.4	23.7	8.9	8.1

表 IV-6 単木抽出結果集計（スギ、最大値 DCHM、上層木）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(本)	49	45	32	47	48
最小	16	18	14	17	20
最大	117	98	61	110	115
標準偏差	16.5	12.6	9.0	14.1	13.8
平均誤差率	-	11.2%	31.3%	11.3%	11.4%
相関係数	-	0.93	0.70	0.91	0.91
RMSE	-	7.5	20.5	7.2	6.9

表 IV-7 単木抽出結果集計（スギ、高精細 DCHM、上層木）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(本)	49	45	32	47	48
最小	16	18	13	19	19
最大	117	102	62	113	116
標準偏差	16.5	12.8	8.9	14.9	14.5
平均誤差率	-	9.7%	31.3%	9.3%	8.2%
相関係数	-	0.94	0.69	0.93	0.94
RMSE	-	7.4	20.6	6.2	5.7

表 IV-8 単木抽出結果集計（ヒノキ、最大値 DCHM、全木本数）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(本)	56	49	30	53	52
最小	18	23	13	18	24
最大	120	88	56	104	97
標準偏差	21.8	12.7	7.9	16.0	14.2
平均誤差率	-	16.5%	42.7%	15.0%	15.6%
相関係数	-	0.86	0.65	0.83	0.84
RMSE	-	14.4	31.7	12.7	12.9

表 IV-9 単木抽出結果集計（ヒノキ、高精細 DCHM、全木本数）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(本)	56	47	30	51	51
最小	18	18	12	18	19
最大	120	83	55	94	92
標準偏差	21.8	13.3	8.5	16.1	14.6
平均誤差率	-	15.3%	43.3%	13.3%	14.1%
相関係数	-	0.89	0.66	0.84	0.87
RMSE	-	15.0	31.6	13.0	12.8

表 IV-10 単木抽出結果集計（ヒノキ、最大値 DCHM、上層木）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(本)	53	49	30	53	52
最小	18	23	13	18	24
最大	108	88	56	104	97
標準偏差	20.0	12.7	7.9	16.0	14.2
平均誤差率	-	14.4%	40.0%	14.4%	14.7%
相関係数	-	0.88	0.70	0.86	0.88
RMSE	-	11.3	27.9	10.1	10.1

表 IV-11 単木抽出結果集計（ヒノキ、高精細 DCHM、上層木）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(本)	53	47	30	51	51
最小	18	18	12	18	19
最大	108	83	55	94	92
標準偏差	20.0	13.3	8.5	16.1	14.6
平均誤差率	-	12.5%	40.6%	11.8%	12.7%
相関係数	-	0.91	0.72	0.87	0.89
RMSE	-	11.5	27.7	10.1	9.9

IV-3-3 単木抽出による樹高計測

単木抽出から得られた樹頂点位置の DCHM セル値を単木の樹高として計測した結果を図 IV-30、図 IV-31 及び表 IV-12～表 IV-15 に示す。図 IV-30、図 IV-31 から樹冠形状の情報や単木抽出手法に関わらず、スギ、ヒノキ林ともグラフの近似線の傾きと切片は同様であり、大きな違いは認められない。また、表 IV-12～表 IV-15 に示した局所最大値フィルタ法のウィンドウサイズ 5×5 の平均樹高はスギ林で 19.5m、ヒノキ林で 16.0m であり、他の手法の平均樹高（スギ林：19.1m、ヒノキ林：15.7m）に比べて数十 cm 高くなっている。また、最小値や最大値も他手法に比べて高くなっているが、その他の値については、樹冠形状の情報や単木抽出手法に関わらず、ほとんど同じ値となっている。

レーザ計測の平均樹高はスギ林で 19.1m、ヒノキ林で 15.7m が多く、現地調査の平均樹高（スギ林：19.1m、ヒノキ林：16.2m）と比較して、スギ林では違いがなく、ヒノキ林で樹高がやや低くなった。最大値についてはレーザ計測の樹高の方がスギ林で 4m 程度、ヒノキ林では 1m 程度高くなった。

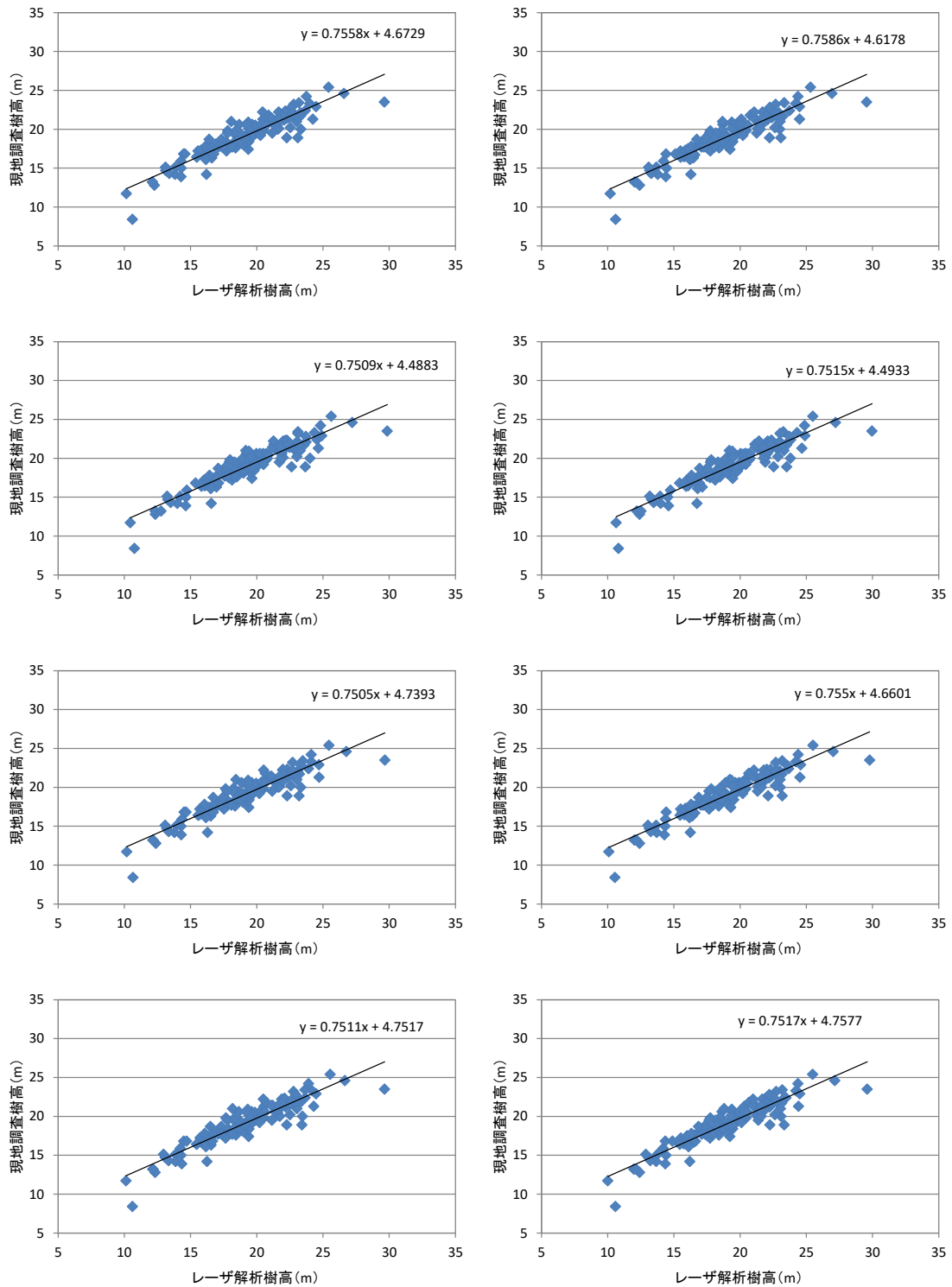


図 IV-30 樹高計測結果 (スギ (n : 129 プロット))
 (上から順に局所最大値フィルタ法 : 3×3、5×5、樹冠部抽出法 : 尾根谷度、
 樹冠形状指数、左図 : 最大値 DCHM、右図 : 高精細 DCHM)

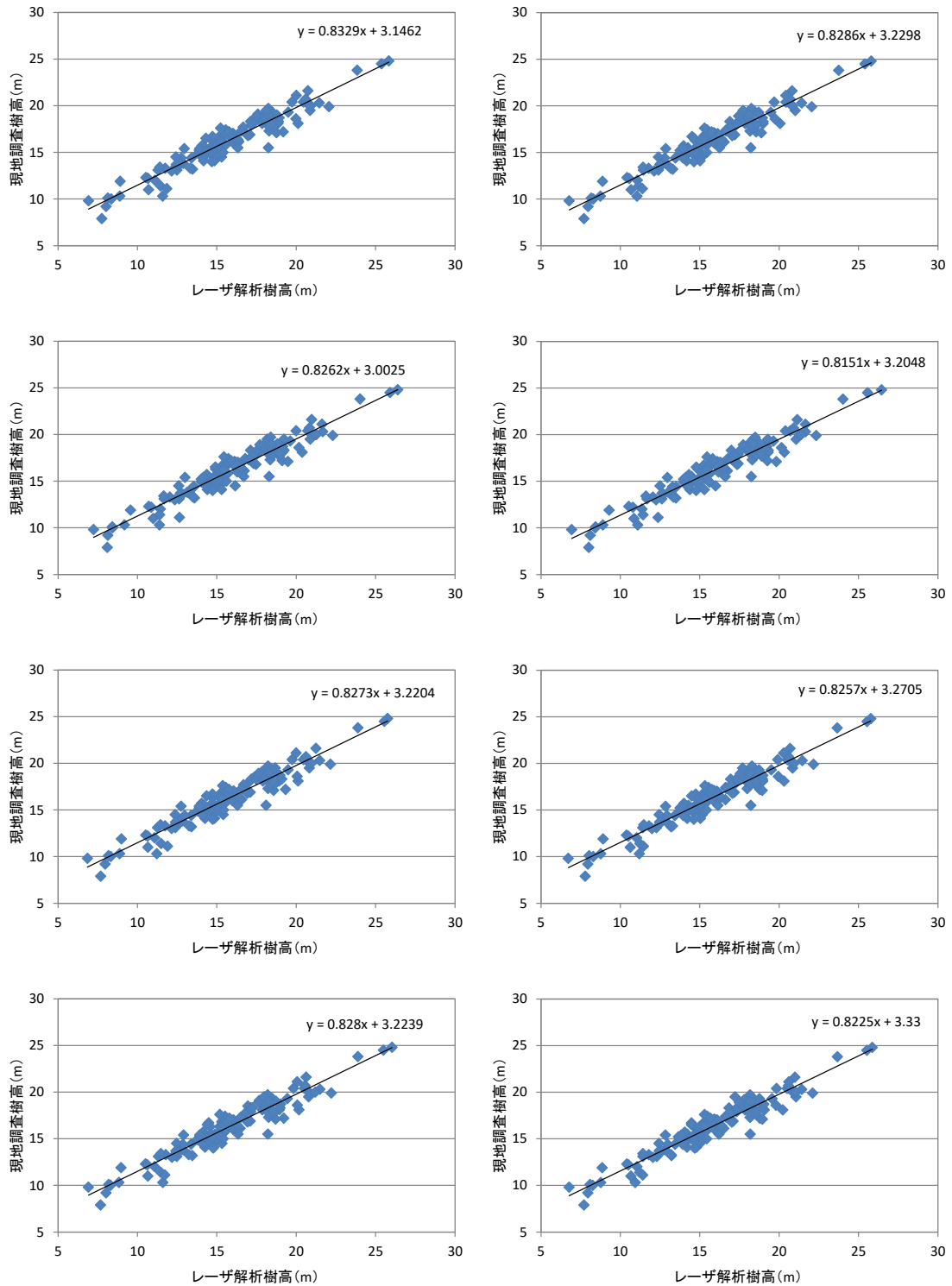


図 IV-31 樹高計測結果 (ヒノキ (n: 126 プロット))
 (上から順に局所最大値フィルタ法: 3×3、5×5、樹冠部抽出法: 尾根谷度、
 樹冠形状指数、左図: 最大値 DCHM、右図: 高精細 DCHM)

表 IV-12 樹高計測結果集計（スギ、最大値 DCHM）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(m)	19.1	19.1	19.5	19.2	19.1
最小	8.4	10.1	10.4	10.2	10.1
最大	25.4	29.6	29.9	29.7	29.7
標準偏差	2.7	3.3	3.4	3.4	3.4
平均誤差率	-	5.4%	5.4%	5.4%	5.5%
相関係数	-	0.92	0.92	0.92	0.92
RMSE	-	1.3	1.4	1.4	1.4

表 IV-13 樹高計測結果集計（スギ、高精細 DCHM）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(m)	19.1	19.1	19.5	19.2	19.1
最小	8.4	10.2	10.6	10.1	10.0
最大	25.4	29.6	30.0	29.8	29.6
標準偏差	2.7	3.3	3.4	3.4	3.4
平均誤差率	-	5.4%	5.4%	5.3%	5.5%
相関係数	-	0.92	0.92	0.93	0.92
RMSE	-	1.3	1.4	1.3	1.3

表 IV-14 樹高計測結果集計（ヒノキ、最大値 DCHM）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(m)	16.2	15.7	16.0	15.7	15.7
最小	7.9	6.9	7.2	6.9	6.9
最大	24.8	25.8	26.4	25.8	26.0
標準偏差	3.0	3.5	3.5	3.5	3.5
平均誤差率	-	6.5%	5.8%	6.5%	6.6%
相関係数	-	0.96	0.96	0.96	0.95
RMSE	-	1.2	1.1	1.2	1.2

表 IV-15 樹高計測結果集計（ヒノキ、高精細 DCHM）

	現地調査 結果	局所最大値フィルタ法		樹冠部抽出法	
		3×3	5×5	尾根谷度	樹冠形状指数
平均(m)	16.2	15.7	16.0	15.7	15.7
最小	7.9	6.8	6.9	6.7	6.8
最大	24.8	25.8	26.5	25.8	25.9
標準偏差	3.0	3.5	3.6	3.5	3.5
平均誤差率	-	6.4%	6.0%	6.5%	6.5%
相関係数	-	0.96	0.96	0.96	0.96
RMSE	-	1.2	1.1	1.2	1.2

IV-4 考察

単木抽出に一般的に用いられる DCHM に加えて、単木抽出の精度を向上させるために角度情報の尾根谷度と樹冠形状指数も単木抽出に利用した。DCHM は林齢などで異なる値となり、15~25m といった一部のレンジにデータが偏ってしまうが、尾根谷度と樹冠形状指数は角度情報で樹冠形状を表現することから、DCHM のレンジが異なる値であったとしても樹冠の凹凸を一定のデータレンジで表現でき、レンジの幅を広げる効果があることがわかった。例えば、2つの樹木の樹高が 15m や 25m と異なる値であっても相似形の樹冠形状であれば、角度情報に変換することで、どちらも 80 度など同じような値で表現できることが尾根谷度や樹冠形状指数の特徴である。また、レンジについては-90 度から 90 度まで使って幅広く樹冠の形状を表現できることから、レンジの小さい DCHM に比べて尾根谷度や樹冠形状指数は閾値を使用して情報を抽出する指標として有効と考えられる。

尾根谷度は DCHM に比べて正規分布に近くなることを示したが、DCHM を基に計算していることから、樹種によって樹冠形状が異なり樹頂点付近と樹冠端部の高さの差が大きい（鋭角）ときと小さい（鈍角）ときとでは樹冠形状の凹凸を表す角度情報が異なる。このため、図 IV-12 のようにやや左右非対称な数値分布となる。一方、樹冠形状指数は樹冠の起伏（尾根谷度）の大小に関わらず、一部の角度区間を除きほとんどの地上・地下開度（図 IV-6）を置き換えることで一定の大きさの凹凸の樹冠が分布しているように表して左右対称な正規分布の情報にすることができる。樹冠形状指数が正規分布になる理由は、図 IV-32 に示す樹冠形状指数の断面例を用いて説明できる。左図の平面図の断面 A は樹頂点を通る断面であり、断面 B は樹頂点と樹頂点の間を通る断面である。これらの樹冠形状指数の断面は右図のようになり、同一断面は同じような振幅を繰り返すことが分かる。断面 A と断面 B の間の断面を考えても高さは異なるものの同じような振幅を繰り返す断面となる。以上のように、同じような振幅を繰り返す情報の集合体であることから、樹冠形状指数は正規分布となることが説明できる。なお、樹冠と樹冠の間の高さについてはレーザパルスが林床から反射するほどのギャップがない場合、樹冠端部と同じ高さになり、断面 B のように平坦な断面となる。また、樹冠形状指数は樹頂点位置を強調する処理を入れ、樹頂点の抽出漏れを防ぐようにしていることも大きな特徴と考える。

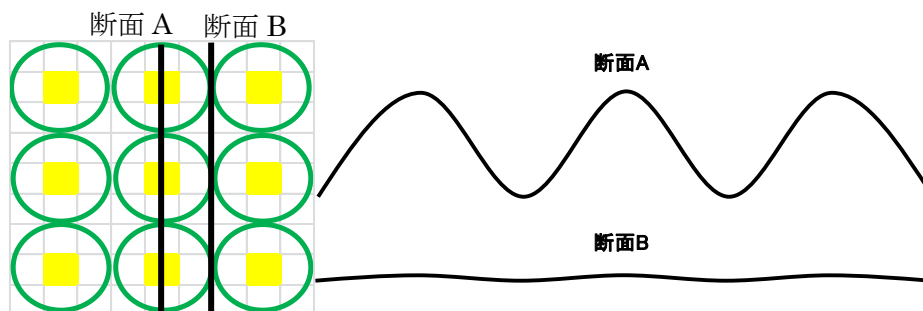


図 IV-32 樹冠形状の断面例

尾根谷度や樹冠形状指数の基となる DCHM は最大値 DCHM と高精細 DCHM の 2 種類があり、最大値 DCHM と高精細 DCHM からそれぞれ尾根谷度と樹冠形状指数を作成し、6 種類の樹冠形状情報を単木抽出に用いた。単木抽出手法だけでなく、DCHM の樹冠形状の再現性の違いにより単木抽出に及ぼす影響について検討したことが本研究の一つの特徴である。単木抽出手法は広く利用されている局所最大値フィルタ法と樹頂点を抽出する前に樹冠部を抽出して、誤抽出を抑える樹冠部抽出法を使用した。

単木抽出の精度検証では調査プロットの全木本数と劣勢木を除く上層木の 2 種類を用いて検証した。表 IV-4～表 IV-11 に示すように全木本数と上層木との比較では平均誤差率で 1～3%、相関係数で 0.02～0.06、RMSE で 2～4 程度、上層木の抽出精度が向上した。このことから、既存の研究でも示唆されているように航空レーザ計測の単木抽出手法は上層木の樹木本数把握に適した手法と考えられる。間伐施業などでは本数情報を基に間伐計画を立案することがあるため、劣勢木も含めた本数把握が必要となる場合がある。劣勢木は過密林分になるほど多くなる傾向があるため、単木抽出結果などを基にして疎密情報から劣勢木の本数を推定する手法を検討することが今後の課題である。

最大値 DCHM と高精細 DCHM の比較では、図 IV-26～図 IV-29 に示すように、局所最大値フィルタ法のウィンドウサイズ 5×5 を除き、高精細 DCHM のグラフでは最大値 DCHM よりも回帰直線の近くに推定結果が分布している。また、表 IV-6、表 IV-7 のスギ上層木では相関係数が 0.01～0.03、表 IV-10、表 IV-11 のヒノキ上層木でも 0.01～0.03（ウィンドウサイズ 5×5 は除く）向上している。平均誤差率もスギ上層木で 1.5～3.2%、ヒノキ上層木で 1.9～2.6%減少していることから、高精細 DCHM を使用することで単木抽出の精度を向上させることができると考えられる。さらに、スギ上層木では樹冠部抽出法の RMSE が尾根谷度で 1.0、樹冠形状指数で 1.2 減少していることから、高精細 DCHM はスギ林で特に適用に有効と考えられる。これは、一般にスギ林はヒノキ林に比べてうっ閉度が低く、樹冠が接することなく独立した樹冠配置で、樹冠間に空間があることから、スギ林の方がファーストパルスが多く林床まで透過し、樹冠表面に凹部として表れることが影響していると考えられる。これは高精細 DCHM が樹冠形状を再現するために一定の効果があることを示しており、このことから、同じ計測密度のレーザデータであっても DCHM の作成方法が単木抽出の精度に影響を与えることを意味している。このため、樹冠形状を高精細に再現する他の手法についても検討し、単木抽出の精度を向上させることが今後の課題となる。なお、局所最大値フィルタ法のウィンドウサイズ 5×5 では最大値 DCHM と高精細 DCHM に大きな違いがなかったが、これは林床から反射するパルスが凹部として表現される格子の数がウィンドウサイズに比べて少なく、影響がなかったためと考えられる。例えば、ウィンドウサイズ 3×3 では本来の高さよりも低くなった凹部が 2、3 点あるだけでも中心が最大 DCHM となり誤抽出されることがあるが、5×5 のウィンドウサイズでは数点の凹部の影響は少なく、誤抽出されることが少なくなると考えられる。

単木抽出手法については、スギ上層木で局所最大値フィルタのウィンドウサイズ 3×3、樹冠部抽出法の尾根谷度、樹冠形状指数の順で、平均誤差率と RMSE は減少し、抽出精度は向上した（表 IV-7）。一方で、ヒノキ上層木では、平均誤差率は樹冠部抽出法の尾根谷度で減少したが、局所最大値フィルタ法のウィンドウサイズ 3×3 と樹冠部抽出法の樹冠形状指数は同様の平均誤差率となった（表 IV-11）。しかしながら、局所最大値フィルタ法に比べて樹冠部抽出法の尾根谷度と樹冠形状指数の RMSE は小さくなった。局所最大値フィルタ法と樹冠部抽出法を比べるとスギ、ヒノキ林ともに最大抽出樹木本数が 10 本以上増え、標準偏差も大きくなり、RMSE が小さくなっていることから、樹冠部抽出法は局所最大値フィルタ法に比べて過密林分でも優れた手法と考えられる。樹冠部抽出法は局所最大値フィルタ法では抽出できない隣接した樹木も抽出できることが大きな特徴であるが、一方で、2 本以上が大きな一つの樹冠に誤抽出されていたことから、樹冠サイズや樹高などの情報を活用して誤抽出を避ける方法を検討することが今後の課題である。

樹冠部抽出法の尾根谷度と樹冠形状指数の比較においては、表 IV-7 からスギ上層木で抽出精度の向上が確認できるが、表 IV-11 のヒノキ上層木では精度の向上は確認できない。しかしながら、図 IV-29 の尾根谷度と樹冠形状指数のグラフを比較すると、現地調査樹木本数が 60 本程度までの抽出結果では樹冠形状指数の樹木本数が現地本数に近く、過大抽出が少なくなっている。このことから、ヒノキ林においても樹冠形状指数を用いることで単木抽出の精度が向上する可能性があることがわかる。

上記のことから、スギ、ヒノキ林において高精細 DCHM から樹冠形状指数を作成し、樹冠部抽出法を用いることで、平均誤差率約 1 割で、現地調査と同様に樹木本数を測定できる可能性があることが示された。平均値、最小値、最大値は現地調査本数と同様の値となったが、標準偏差が現地調査に比べて小さくなっているため、単木抽出法の精度向上のために過密林分での精度向上について検討を進めることが今後の課題である。

航空レーザ計測が上層木の抽出に適した手法であることから、樹高の検証においては現地調査で計測した上層木の樹高と比較した。局所最大値フィルタ法のウィンドウサイズ 5×5 に関しては、抽出樹木本数が少なく、林分内のより高い樹木を抽出しているため、他の手法に比べて平均樹高が高くなったが、その他の 3 つの手法については最大値 DCHM と高精細 DCHM にも、単木抽出手法にも大きな違いはなく、比較した項目全てにおいて同様の値となった。レーザ計測の樹高は現地調査と比べて、スギ林で平均樹高がやや高くなり、ヒノキ林で若干低くなった。平均誤差率は 5.3～6.6%、RMSE は 1.1～1.4m であり、レーザ計測により高精度で樹高が計測できることがわかった（表 IV-12～表 IV-15）。

本章では現地調査の代替として、計測密度 4 点/m²の航空レーザ計測のデータを活用し、単木の抽出と抽出位置に基づく樹高計測が高い精度で行えることを示した。また、樹冠形状を表す情報の作成手法や単木抽出の手法を検討することで、同じ密度の計測データであっても単木抽出精度が向上することがわかった。そして、本章で開発した樹冠形状指数や樹冠部抽出法が従来手法に比べて優位性を持つことを示すことができた。より高密度のレ

レーザ計測を行うことで、詳細な情報を取得し単木抽出精度を上げることは可能であるが、計測費用が高くなり、費用対効果が低くなることから、現行のレーザ計測の標準的な4点/m²程度の密度データを用いたより高精度の単木抽出手法を検討することが今後の課題である。

第V章

樹冠・樹高情報を用いた胸高直径推定手法の 開発と単木材積推定

V-1 はじめに

航空レーザ計測データを用いて単木抽出し、単木の材積を把握する手法が確立されてきている(Hyyppä, Inkinen, 1999; Persson *et al.*, 2002; Brandtberg *et al.*, 2003; Takahashi *et al.*, 2005a; 平田, 2005)ことから、航空レーザ解析から得られる情報を現地調査の代替として活用するためには、単木抽出結果を基に単木の胸高直径と材積の推定が次の課題となる。胸高直径と樹冠直径には相関があることが報告されており(Bechtold, 2004; Hemery *et al.*, 2005)、リモートセンシングで得られる情報を基に間接的に胸高直径を推定することが可能と考えられる。例えば、空中写真を用いた胸高直径の推定では、樹冠直径や樹高など1~2変数を用いた事例がとりまとめられ(Hall *et al.*, 1989)、12種類のモデル式を比較し、樹冠面積と樹高の2変数を用いることで高い胸高直径が推定できることが示されている。国内ではスギ、ヒノキなど主要な植林樹種を対象に空中写真から得られる樹高や疎密度などの森林情報と傾斜や標高などの地形情報からヘクタールあたりの平均胸高直径を推定する手法が報告されている(中島, 1973)。また、スギ林において、空中写真から得られる樹冠直径と樹木本数から胸高直径を推定した事例(梶原, 重松, 2008)もある。航空レーザ計測を用いた胸高直径の推定では、閾値以上の高さのDCHMを基に単木の樹冠表面積を計算して、樹冠表面積から胸高直径を推定している(松英 *et al.*, 2006)。また、樹冠投影面積や樹冠長などの樹冠の大きさに関する指標と樹高を組み合わせることで回帰式を作成して胸高直径が推定されている(Yao *et al.*, 2012; Verma *et al.*, 2014)。さらに、太陽光が当たる陽樹冠の表面積と胸高直径の関係についても説明されている(梶原, 2008)。航空レーザは空中から照射されて樹冠表層面でその多くが反射し、一部がギャップなどの間隙を抜けて林床へ届く。このようなレーザの林冠の透過特性は太陽光の直達光と同様であり、航空レーザ計測で得られるDCHMは陽樹冠を表現に適した情報と考えられる。

上述のような研究事例から、樹冠投影面積、樹冠表面積、樹高など複数の説明変数を用いた回帰式により胸高直径を推定できる可能性があるものの、スギ、ヒノキに適した説明変数は明らかになっていない。また、胸高直径の推定に用いる回帰式が県全域といった広域な研究対象地域で利用できる一般的な式としての汎用性について検討された事例は少なく、課題と考えられる。

森林資源の持続的管理で重要となる材積の推定について、航空レーザ計測による材積推定は大きく2種類の方法に分けられる。一つは任意の一定面積内に含まれる樹高や樹冠投影面積などの指標を用いて回帰分析を行って材積を推定する手法(エリアベース法)である(Heurich *et al.*, 2004; Takahashi *et al.*, 2008; Yao *et al.*, 2012)。もう一つは単木抽出で得られた樹高とレーザ解析から得られた胸高直径推定結果を既存の材積式に適用し、材積を計算する手法(単木ベース法)である(Persson *et al.*, 2002; Heurich *et al.*, 2004; Hyyppä *et al.*, 2005)。従来行われている現地調査の代替として航空レーザ計測を利用することを想定すると、単木の材積を得ることができる現地調査に対して、エリアベース法では単木の

材積を把握できないという課題がある。

上述した課題に対して、本章ではスギ、ヒノキの胸高直径の推定に適した回帰式を検討し、その回帰式の県単位といった広域での利用について検討することを目的として、航空レーザ解析から取得される樹冠サイズなどの複数の説明変数を用いた回帰分析を行い、胸高直径の推定に適した説明変数について検討した。また、単木ベースで材積を計算し、航空レーザ解析による資源把握の現地調査代替手法としての可能性を検討した。さらに、胸高直径の回帰分析から得られた複数の胸高直径の推定結果が材積の推定結果に及ぼす影響について検討し、材積の推定に適した胸高直径推定の説明変数を明らかにした。

V-2 使用したデータと方法

胸高直径と単木材積の推定に使ったデータと研究フローを図 V-1 に示す。第 IV 章で抽出した単木位置を基に樹冠形状指数を用いて Watershed アルゴリズム(Soille, 2013)で領域分割を行い、得られた樹冠領域を樹冠投影面積とした。さらに、樹冠長、樹冠長率、樹冠表面積、樹冠体積を計算し、樹高と併せて 6 つの指標を胸高直径推定の説明変数として用意した。現地調査結果をスギ、ヒノキそれぞれ 10 分割して、9 つのグループを用いて胸高直径推定のための回帰分析を行い、残るグループで制度を検証した。このとき、胸高直径推定に適した説明変数を把握するため、胸高直径を推定する回帰式は 6 つの指標から 1 ~3 つの指標を選択して 10 パターンの組み合わせで検討した。10 パターンの回帰式を作成し、10 分割交差検証を行って、合計 100 通りの回帰式を作成した。検討結果からそれぞれ得られた最も決定係数の高かった回帰式を用いて胸高直径を計算した。次に、既存の材積式を用いて単木樹高と胸高直径から単木材積を計算し、精度検証を行った。

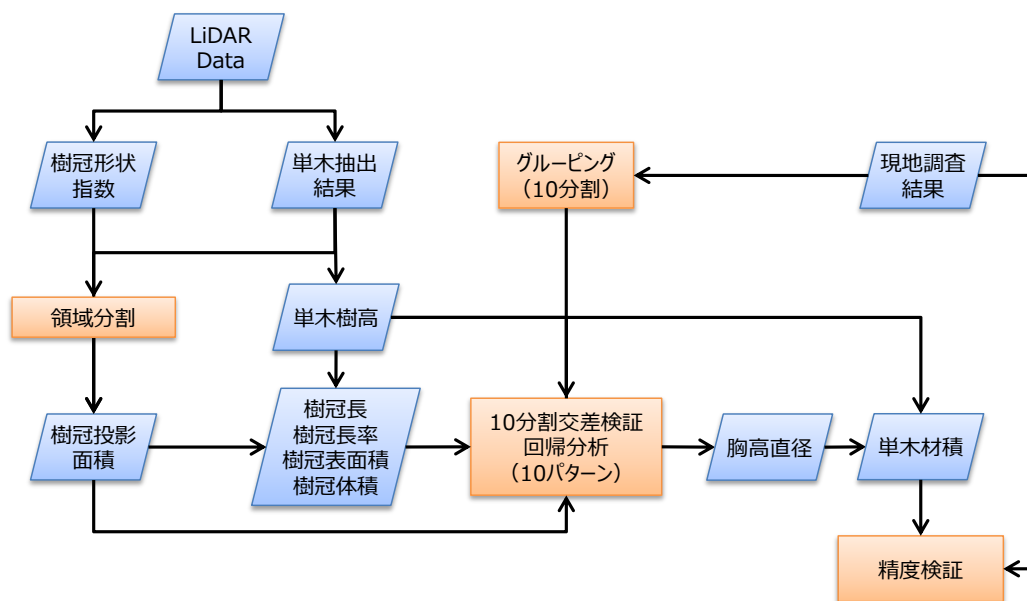


図 V-1 データの作成方法と胸高直径・単木材積の推定フロー

V-2-1 回帰分析に用いた現地調査データ

スギ林で行われた現地調査点 129 点とヒノキ林の 126 点を 10 グループに分割して各グループあたり 12~13 点に割り振り、回帰分析と交差検証に使用した。各グループの現地調査情報を表 V-1 に示す。回帰分析で目的変数となる胸高直径はスギ林で各グループの平均胸高直径が 24.6~27.3cm、ヒノキ林で 20.2~23.5cm で 3cm 程度の幅となっている。また、標準偏差はスギ林で 3.0~5.6、ヒノキ林で 3.7~5.4 であり、各グループに大きな偏りがなく、均等に分割されていることから、同様の条件で回帰式の検討を行うことができると考える。

表 V-1 10 分割現地調査プロット情報

		スギ				ヒノキ			
		平均	最小	最大	標準偏差	平均	最小	最大	標準偏差
立木密度 (本/ha)	平均	1,219	1,085	1,344	82	1,324	1,108	1,490	121
	最小	618	400	850	153	640	450	825	125
	最大	2,018	1,525	2,925	420	2,285	1,550	2,700	332
	標準偏差	400	250	620	121	498	320	591	87
樹高 (m)	平均	19.1	18.5	19.6	0.3	16.2	15.8	16.7	0.2
	最小	13.1	8.4	14.7	1.8	10.1	7.9	11.4	1.0
	最大	23.6	22.4	25.4	0.9	21.8	20.0	24.8	1.8
	標準偏差	2.8	2.2	3.7	0.4	3.1	2.6	3.6	0.4
樹冠長 (m)	平均	3.6	2.8	4.7	0.6	3.3	2.9	3.8	0.2
	最小	1.2	1.0	2.0	0.4	1.2	1.0	2.0	0.4
	最大	8.1	4.7	10.1	2.0	7.1	5.5	8.9	1.0
	標準偏差	1.9	1.0	2.8	0.5	1.7	1.4	2.4	0.3
胸高直径 (cm)	平均	25.8	24.6	27.3	0.8	22.0	20.2	23.5	0.9
	最小	18.6	13.0	22.0	3.0	14.2	12.0	16.0	1.2
	最大	34.3	30.0	39.0	2.5	30.6	24.0	37.0	3.8
	標準偏差	4.3	3.0	5.6	0.8	4.6	3.7	5.4	0.6
材積 (m ³ /ha)	平均	584	514	650	39	412	364	445	23
	最小	312	175	400	82	164	111	242	40
	最大	877	767	1,026	86	751	558	1,089	171
	標準偏差	159	127	236	29	167	120	249	37

V-2-2 胸高直径推定の回帰式に用いた説明変数

胸高直径推定の回帰式には樹高と樹冠の大きさ情報として樹冠投影面積、樹冠表面積、樹冠体積、樹冠長、樹冠長率の合計 6 種類の説明変数を用意した。樹高 h (m) については第 IV 章で抽出した単木の樹高を使用した。樹冠投影面積 Ca (m²) は単木抽出結果から樹冠形状指数を反転させ、樹頂点を樹冠内部で最下点にして、Watershed アルゴリズムにより樹冠領域分割を行って抽出した。領域分割の実行例を図 V-2 に示した。

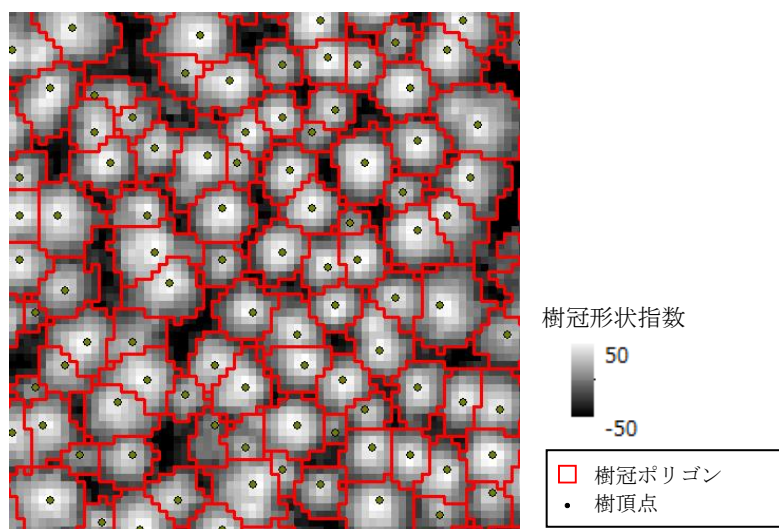


図 V-2 Watershed アルゴリズムによる樹冠領域分割結果の例 (1pixel:50cm)

一つの樹冠領域内の DCHM の最大値と最小値の差分により単木の樹冠長 Cl (m) を計算した。樹冠長の算出事例を図 V-3 に示す。さらに、樹高 h と樹冠長 Cl から樹冠長率 Cr (%) は式V-1 を用いて計算した。

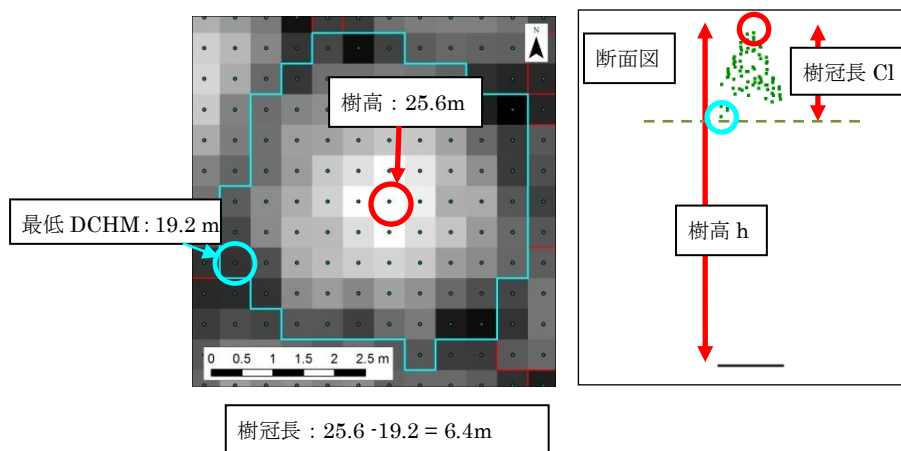


図 V-3 単木樹冠長の抽出事例

(左図のポイントは DCHM であり、右図の樹冠高を示す断面図のポイントと一致する)

$$Cr = \frac{Cl}{h} \times 100 \quad \text{(式 V-1)}$$

本章では、樹冠を円錐と仮定して樹冠表面積 Csa (m^2) (式V-2) と樹冠体積 Cv (m^3) (式V-3) を計算した。樹冠表面積は図 V-4 の考え方により式V-2 を用いて樹冠投影面積と樹冠長から計算できる。また、樹冠体積は式V-3 を用いて計算した。これらの計算に

は Microsoft 社の Visual C++ 2010 Express を使い、処理プログラムを作成して計算を行った。

$$2\pi R \frac{\theta}{360} = 2\pi r \quad \text{より} \quad \frac{\theta}{360} = \frac{r}{R}$$

$$Ca = \pi r^2 \quad \text{より} \quad r = \sqrt{\frac{Ca}{\pi}}$$

$$r^2 + Cl^2 = R^2 \quad \text{より} \quad R = \sqrt{r^2 + Cl^2} = \sqrt{\frac{Ca}{\pi} + Cl^2} = \sqrt{\frac{Ca + \pi Cl^2}{\pi}}$$

$$\begin{aligned} Csa &= \frac{\theta}{360} \pi R^2 \\ &= \pi R r \\ &= \pi \sqrt{\frac{Ca}{\pi}} \sqrt{\frac{Ca + \pi Cl^2}{\pi}} \\ &= \sqrt{Ca(Ca + \pi Cl^2)} \end{aligned} \quad \text{(式 V-2)}$$

ここで、 θ は樹冠表面を形成する円の中心角(度)、 R は樹冠表面を形成する円の半径(m)、 r は樹冠投影面積を真円と仮定したときの半径(m)である。

$$Cv = \frac{Ca \times Cl}{3} \quad \text{(式 V-3)}$$

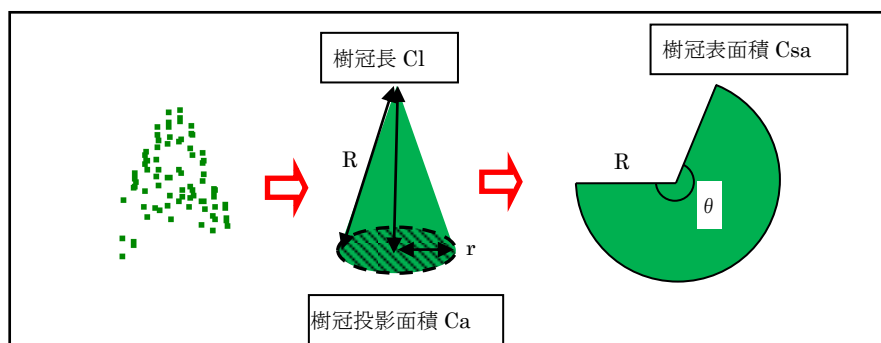


図 V-4 樹冠表面積の計算方法

V-2-3 胸高直径推定のための回帰分析方法及び材積計算方法と精度検証

10 分割交差検証により回帰式の検討を 10 回行い、その都度 10 パターンの回帰式を作成した。この検討により合計 100 通りの回帰式を作成した。このとき、10 グループから 9 グループの現地調査点（スギ林：116～117 点、ヒノキ林：113～114 点）を回帰式の調整に使用し、残りの 1 グループは精度検証に使用した。回帰式は既存研究で用いられているアロメトリ式(Nielsen *et al.*, 1979; Ketterings *et al.*, 2001)を基に式 V-4 を使用した。

$$DBH = \alpha X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} X_3^{\beta_3} \quad (\text{式 V-4})$$

ここで、 X は説明変数を表している。胸高直径の推定に適していると考えられる 1～3 つ説明変数を使用して 10 パターンの回帰式を検討した。なお、1 つの説明変数の場合は X_2 、 X_3 は使用していない。

回帰式の検討に使用した 10 パターンの説明変数の組み合わせは表 V-2 の通りである。説明変数の組み合わせは、まず樹冠の大きさ情報を基にして、次に樹高を組み合わせ、さらに、樹冠投影面積をベースにして、樹高、樹冠長や樹冠長率など樹冠の高さの情報を組み合わせた。

表 V-2 回帰式の検討に用いた説明変数の組み合わせ

回帰式	説明変数の組合せ
1	X_1 樹冠投影面積
2	X_1 樹冠表面積
3	X_1 樹冠体積
4	X_1 樹冠投影面積 X_2 樹高
5	X_1 樹冠表面積 X_2 樹高
6	X_1 樹冠体積 X_2 樹高
7	X_1 樹冠投影面積 X_2 樹冠長
8	X_1 樹冠投影面積 X_2 樹冠長率
9	X_1 樹冠投影面積 X_2 樹高 X_3 樹冠長
10	X_1 樹冠投影面積 X_2 樹高 X_3 樹冠長率

回帰式の目的変数の胸高直径には現地調査プロットの平均値を用いて、同様に説明変数の樹冠投影面積などもレーザ解析で得られた単木樹冠投影面積をプロット毎に平均値を算出し、調査プロットの平均値を用いて回帰分析を行った。そして、最も決定係数の高かった回帰式に精度検証用に残したグループの説明変数を代入して単木の胸高直径を計算し、プロットの平均胸高直径を求めて精度検証を行った。この検討を通して 100 通りの回帰式から 10 通りの回帰式が得られた。

単木の材積については九州地方の材積式(林野庁, 1970)を用いて、航空レーザ解析から得られた単木樹高と推定胸高直径の 2 変数から算出した。材積式は以下の通りである。材積の検証では調査プロットの平均単木材積 (m³) を計算して、現地調査結果とレーザ解析の単木材積との比較を行った。

- ・スギ (飢肥、屋久島を除く、昭和 37 年調整)

$$\begin{aligned} \log V &= -5 + 0.796182 + 1.819629 \log d + 1.025738 \log h \quad (d: 4 \sim 32\text{cm未満}) \\ \log V &= -4 + 0.0754761 + 1.6644424 \log d + 0.9881512 \log h \quad (d: 32\text{cm以上}) \end{aligned} \quad (\text{式 V-5})$$

- ・ヒノキ (昭和 36 年調整)

$$\begin{aligned} \log V &= -5 + 0.87211 + 1.93699 \log d + 0.81243 \log h \quad (d: 4 \sim 12\text{cm未満}) \\ \log V &= -5 + 0.682931 + 1.921617 \log d + 1.016795 \log h \quad (d: 12 \sim 22\text{cm未満}) \quad (\text{式 V-6}) \\ \log V &= -5 + 0.7985347 + 1.7862040 \log d + 1.0696647 \log h \quad (d: 22\text{cm以上}) \end{aligned}$$

ここで、 V は単木材積 (m³)、 d は胸高直径 (cm)、 h は樹高 (m) である。

材積の検証では調査プロットの平均単木材積 (m³) を計算して、現地調査結果とレーザ解析の単木材積との比較を行った。

V-3 樹冠・樹高情報を用いた胸高直径推定と単木材積推定結果

V-3-1 胸高直径推定

スギ、ヒノキを対象に 10 分割交差検証で 10 パターンの回帰分析を行った結果を表 V-3 ~ 表 V-22 に示す。また、回帰分析を行った結果をとりまとめた一覧にした結果を表 V-23、表 V-24 に示す。スギ、ヒノキとも一つの説明変数による回帰式の作成では、樹冠表面積、樹冠体積、樹冠投影面積の順に高い決定係数 (補正 R²) となった。これらに樹高を加えた回帰式 4~6 では決定係数が全て上昇し、一つの説明変数のときの回帰式 1~3 のように決定係数の違いが大きくなり、0.7 程度の決定係数になった。一方で、樹冠投影面積に樹冠長を加えた回帰式 7 は樹冠投影面積のみの回帰式 1 と比較して決定係数の向上はなく、同

様の値であり、スギ、ヒノキともに樹冠長のべき乗 β_2 の p 値が 0.05 よりも大きくなった。また、樹冠投影面積に樹冠長率を加えた回帰式 8 は回帰式 1 と比べ、スギで決定係数の向上はなく、樹冠長率のべき乗 β_2 の p 値が 0.05 よりも大きくなったが、ヒノキでは樹高を加えたときほどではないものの決定係数の向上が確認できた。さらに樹冠投影面積、樹高（回帰式 4）に樹冠長や樹冠長率を加えた回帰式 9、10 では、スギ、ヒノキともに回帰式 4 に比べて決定係数が向上したが、ヒノキでは樹冠長や樹冠長率のべき乗 β_3 の p 値が 0.05 よりも大きくなった。

10 分割交差検証の回帰式検討で全ての p 値が 0.05 未満となった回帰式は、スギでは回帰式 1~6、9~10 の 8 つの回帰式で、樹冠投影面積、樹高、樹冠長率の組み合わせの回帰式 10 が最も高い決定係数となった。また、係数 α 、樹冠投影面積のべき乗 β_1 、樹高のべき乗 β_2 の p 値は全て 0.001 未満であった。また、樹冠長率のべき乗 β_3 の p 値は 0.05 未満が 5 回、0.01 未満が 4 回、0.001 未満が 1 回であった。

一方、ヒノキでは回帰式 1~6、8 が全ての p 値が 0.05 未満となり、樹冠投影面積と樹高の組み合わせの回帰式 4 が最も高い決定係数となった。係数 α 、 β_1 、 β_2 の p 値は全て 0.001 未満であった。

表 V-3 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割1を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	9.677 ***	0.460 ***			0.627
2	X ₁ 樹冠表面積	12.861 ***	0.206 ***			0.433
3	X ₁ 樹冠体積	15.982 ***	0.170 ***			0.491
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	4.703 ***	0.369 ***	0.311 ***		0.716
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.738 ***	0.169 ***	0.463 ***		0.674
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	4.990 ***	0.137 ***	0.428 ***		0.689
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	9.781 ***	0.444 ***	0.015		0.625
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	10.173 ***	0.485 ***	-0.032		0.631
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	4.498 ***	0.293 ***	0.349 ***	0.060 *	0.729
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.397 ***	0.292 ***	0.410 ***	0.061 *	0.730

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-4 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割2を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	9.874 ***	0.452 ***			0.631
2	X ₁ 樹冠表面積	13.034 ***	0.203 ***			0.438
3	X ₁ 樹冠体積	16.201 ***	0.166 ***			0.491
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	5.051 ***	0.378 ***	0.281 ***		0.704
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.934 ***	0.174 ***	0.440 ***		0.652
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	5.302 ***	0.140 ***	0.405 ***		0.666
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	9.921 ***	0.445 ***	0.006		0.628
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	10.383 ***	0.482 ***	-0.035		0.636
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	4.817 ***	0.308 ***	0.318 ***	0.054 *	0.713
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.750 ***	0.308 ***	0.373 ***	0.054 *	0.713

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-5 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 3 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	9.490 ***	0.468 ***			0.648
2	X ₁ 樹冠表面積	12.417 ***	0.217 ***			0.478
3	X ₁ 樹冠体積	15.722 ***	0.176 ***			0.527
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	4.475 ***	0.380 ***	0.319 ***		0.729
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.552 ***	0.177 ***	0.471 ***		0.690
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	4.781 ***	0.142 ***	0.437 ***		0.704
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	9.646 ***	0.445 ***	0.020		0.646
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	9.890 ***	0.492 ***	-0.029		0.650
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	4.304 ***	0.298 ***	0.357 ***	0.064 *	0.742
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.197 ***	0.296 ***	0.422 ***	0.065 **	0.742

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-6 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 4 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	9.511 ***	0.466 ***			0.652
2	X ₁ 樹冠表面積	12.619 ***	0.212 ***			0.465
3	X ₁ 樹冠体積	15.834 ***	0.173 ***			0.521
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	4.730 ***	0.372 ***	0.305 ***		0.734
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.788 ***	0.169 ***	0.458 ***		0.693
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	5.057 ***	0.137 ***	0.422 ***		0.707
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	9.639 ***	0.447 ***	0.017		0.651
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	9.951 ***	0.490 ***	-0.030		0.655
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	4.565 ***	0.296 ***	0.341 ***	0.059 *	0.747
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.477 ***	0.295 ***	0.400 ***	0.059 *	0.747

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-7 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 5 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	9.126 ***	0.489 ***			0.615
2	X ₁ 樹冠表面積	12.797 ***	0.207 ***			0.395
3	X ₁ 樹冠体積	15.789 ***	0.174 ***			0.453
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	4.569 ***	0.397 ***	0.302 ***		0.701
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.645 ***	0.174 ***	0.465 ***		0.645
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	4.849 ***	0.143 ***	0.431 ***		0.662
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	9.170 ***	0.481 ***	0.007		0.611
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	9.703 ***	0.518 ***	-0.038 †		0.621
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	4.363 ***	0.326 ***	0.338 ***	0.056 *	0.711
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.366 ***	0.325 ***	0.395 ***	0.056 *	0.711

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-8 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 6 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	10.219 ***	0.437 ***			0.651
2	X ₁ 樹冠表面積	13.341 ***	0.197 ***			0.438
3	X ₁ 樹冠体積	16.487 ***	0.161 ***			0.494
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	5.584 ***	0.370 ***	0.254 ***		0.721
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	4.312 ***	0.172 ***	0.413 ***		0.660
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	5.778 ***	0.137 ***	0.379 ***		0.676
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	10.243 ***	0.433 ***	0.003		0.648
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	10.769 ***	0.465 ***	-0.034 †		0.657
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	5.299 ***	0.305 ***	0.291 ***	0.052 *	0.730
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	4.167 ***	0.304 ***	0.343 ***	0.052 *	0.730

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-9 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 7 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	9.422 ***	0.471 ***			0.634
2	X ₁ 樹冠表面積	12.516 ***	0.214 ***			0.450
3	X ₁ 樹冠体積	15.675 ***	0.177 ***			0.506
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	4.641 ***	0.383 ***	0.305 ***		0.715
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.670 ***	0.177 ***	0.460 ***		0.675
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	4.969 ***	0.144 ***	0.423 ***		0.690
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	9.576 ***	0.446 ***	0.023		0.633
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	9.807 ***	0.491 ***	-0.026		0.635
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	4.428 ***	0.301 ***	0.345 ***	0.066 **	0.731
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.264 ***	0.300 ***	0.412 ***	0.066 **	0.732

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-10 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 8 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	9.947 ***	0.448 ***			0.588
2	X ₁ 樹冠表面積	13.349 ***	0.197 ***			0.411
3	X ₁ 樹冠体積	16.438 ***	0.162 ***			0.467
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	4.879 ***	0.357 ***	0.309 ***		0.688
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.844 ***	0.168 ***	0.457 ***		0.680
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	5.123 ***	0.135 ***	0.423 ***		0.692
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	10.137 ***	0.421 ***	0.025		0.587
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	10.347 ***	0.469 ***	-0.026		0.589
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	4.523 ***	0.250 ***	0.368 ***	0.082 ***	0.717
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.102 ***	0.250 ***	0.450 ***	0.082 ***	0.717

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-11 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 9 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	9.262 ***	0.480 ***			0.646
2	X ₁ 樹冠表面積	12.699 ***	0.210 ***			0.432
3	X ₁ 樹冠体積	15.819 ***	0.174 ***			0.489
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	4.642 ***	0.394 ***	0.298 ***		0.729
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.561 ***	0.179 ***	0.469 ***		0.683
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	4.810 ***	0.145 ***	0.434 ***		0.698
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	9.319 ***	0.471 ***	0.009		0.643
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	9.773 ***	0.508 ***	-0.035 †		0.651
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	4.375 ***	0.314 ***	0.343 ***	0.062 *	0.742
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.287 ***	0.313 ***	0.405 ***	0.062 **	0.742

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-12 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 10 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	9.564 ***	0.463 ***			0.632
2	X ₁ 樹冠表面積	12.655 ***	0.209 ***			0.459
3	X ₁ 樹冠体積	15.866 ***	0.170 ***			0.508
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	4.594 ***	0.379 ***	0.310 ***		0.721
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.750 ***	0.175 ***	0.453 ***		0.684
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	5.010 ***	0.141 ***	0.421 ***		0.697
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	9.721 ***	0.440 ***	0.020		0.631
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	9.987 ***	0.489 ***	-0.031		0.635
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	4.425 ***	0.296 ***	0.348 ***	0.064 **	0.736
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.289 ***	0.295 ***	0.413 ***	0.065 **	0.736

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-13 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 1 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.897 ***	0.565 ***			0.553
2	X ₁ 樹冠表面積	10.707 ***	0.246 ***			0.359
3	X ₁ 樹冠体積	14.271 ***	0.191 ***			0.396
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.236 ***	0.322 ***	0.458 ***		0.715
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.068 ***	0.141 ***	0.569 ***		0.704
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.781 ***	0.109 ***	0.552 ***		0.711
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	6.285 ***	0.646 ***	-0.066		0.558
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	8.359 ***	0.652 ***	-0.125 ***		0.612
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.288 ***	0.251 **	0.487 ***	0.045	0.717
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	2.649 ***	0.248 **	0.535 ***	0.047	0.717

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-14 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 2 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.940 ***	0.561 ***			0.521
2	X ₁ 樹冠表面積	10.955 ***	0.236 ***			0.297
3	X ₁ 樹冠体積	14.343 ***	0.185 ***			0.335
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.126 ***	0.314 ***	0.475 ***		0.716
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	2.932 ***	0.138 ***	0.586 ***		0.698
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.589 ***	0.107 ***	0.571 ***		0.704
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	6.302 ***	0.652 ***	-0.082 †		0.532
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	8.853 ***	0.645 ***	-0.140 ***		0.601
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.142 ***	0.265 ***	0.496 ***	0.034	0.715
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	2.663 ***	0.263 ***	0.533 ***	0.036	0.716

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-15 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 3 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.653 ***	0.582 ***			0.572
2	X ₁ 樹冠表面積	10.064 ***	0.267 ***			0.358
3	X ₁ 樹冠体積	13.854 ***	0.203 ***			0.394
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.028 ***	0.334 ***	0.471 ***		0.744
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	2.816 ***	0.149 ***	0.588 ***		0.722
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.512 ***	0.114 ***	0.573 ***		0.728
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	6.021 ***	0.677 ***	-0.086 †		0.582
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	8.650 ***	0.668 ***	-0.149 ***		0.647
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.048 ***	0.296 ***	0.486 ***	0.027	0.743
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	2.680 ***	0.294 ***	0.515 ***	0.028	0.743

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-16 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 4 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.438 ***	0.595 ***			0.581
2	X ₁ 樹冠表面積	10.402 ***	0.251 ***			0.355
3	X ₁ 樹冠体積	13.909 ***	0.196 ***			0.393
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	2.982 ***	0.358 ***	0.457 ***		0.756
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	2.814 ***	0.154 ***	0.582 ***		0.734
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.515 ***	0.119 ***	0.566 ***		0.742
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	5.884 ***	0.677 ***	-0.070 †		0.589
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	7.924 ***	0.679 ***	-0.127 ***		0.647
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.009 ***	0.298 ***	0.483 ***	0.040	0.757
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	2.486 ***	0.296 ***	0.525 ***	0.042	0.757

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-17 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 5 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.652 ***	0.582 ***			0.569
2	X ₁ 樹冠表面積	10.187 ***	0.261 ***			0.377
3	X ₁ 樹冠体積	13.905 ***	0.200 ***			0.407
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.090 ***	0.345 ***	0.457 ***		0.733
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	2.942 ***	0.153 ***	0.569 ***		0.716
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.669 ***	0.117 ***	0.555 ***		0.721
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	6.175 ***	0.649 ***	-0.057		0.572
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	8.162 ***	0.667 ***	-0.127 ***		0.627
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.144 ***	0.282 ***	0.479 ***	0.043	0.734
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	2.571 ***	0.281 ***	0.524 ***	0.044	0.735

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-18 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 6 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.599 ***	0.585 ***			0.583
2	X ₁ 樹冠表面積	10.482 ***	0.250 ***			0.350
3	X ₁ 樹冠体積	14.025 ***	0.195 ***			0.388
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.084 ***	0.323 ***	0.473 ***		0.761
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	2.900 ***	0.135 ***	0.592 ***		0.741
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.538 ***	0.105 ***	0.577 ***		0.747
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	5.945 ***	0.681 ***	-0.082 *		0.595
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	8.325 ***	0.669 ***	-0.136 ***		0.656
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.107 ***	0.277 ***	0.492 ***	0.030	0.760
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	2.692 ***	0.275 ***	0.524 ***	0.031	0.760

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-19 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 7 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.468 ***	0.594 ***			0.606
2	X ₁ 樹冠表面積	10.218 ***	0.260 ***			0.385
3	X ₁ 樹冠体積	13.874 ***	0.200 ***			0.420
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.264 ***	0.350 ***	0.432 ***		0.755
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.066 ***	0.149 ***	0.558 ***		0.737
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.813 ***	0.115 ***	0.543 ***		0.742
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	6.008 ***	0.662 ***	-0.058		0.610
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	7.915 ***	0.665 ***	-0.116 ***		0.659
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.305 ***	0.284 ***	0.459 ***	0.044	0.757
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	2.714 ***	0.285 ***	0.502 ***	0.043	0.757

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-20 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 8 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.639 ***	0.585 ***			0.574
2	X ₁ 樹冠表面積	10.567 ***	0.249 ***			0.333
3	X ₁ 樹冠体積	14.115 ***	0.193 ***			0.371
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.218 ***	0.336 ***	0.450 ***		0.746
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.049 ***	0.139 ***	0.572 ***		0.716
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.736 ***	0.108 ***	0.557 ***		0.723
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	5.934 ***	0.692 ***	-0.094 *		0.589
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	8.606 ***	0.669 ***	-0.144 ***		0.655
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.228 ***	0.317 ***	0.458 ***	0.013	0.744
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	3.020 ***	0.315 ***	0.473 ***	0.015	0.744

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-21 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 9 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.378 ***	0.601 ***			0.593
2	X ₁ 樹冠表面積	10.280 ***	0.256 ***			0.361
3	X ₁ 樹冠体積	13.808 ***	0.200 ***			0.403
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.129 ***	0.349 ***	0.448 ***		0.761
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	2.940 ***	0.149 ***	0.571 ***		0.744
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.659 ***	0.117 ***	0.554 ***		0.752
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	5.793 ***	0.690 ***	-0.076 †		0.603
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	7.980 ***	0.678 ***	-0.128 ***		0.660
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.157 ***	0.285 ***	0.475 ***	0.041	0.762
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	2.589 ***	0.282 ***	0.519 ***	0.043	0.763

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-22 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 10 を除く）

回帰式	説明変数の組合せ	α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正R ²
1	X ₁ 樹冠投影面積	6.647 ***	0.584 ***			0.567
2	X ₁ 樹冠表面積	10.291 ***	0.258 ***			0.354
3	X ₁ 樹冠体積	13.905 ***	0.201 ***			0.392
4	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高	3.176 ***	0.326 ***	0.462 ***		0.741
5	X ₁ 樹冠表面積 X ₂ 樹高	3.003 ***	0.143 ***	0.574 ***		0.725
6	X ₁ 樹冠体積 X ₂ 樹高	3.706 ***	0.111 ***	0.558 ***		0.731
7	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長	6.075 ***	0.668 ***	-0.074 †		0.575
8	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹冠長率	8.481 ***	0.663 ***	-0.137 ***		0.636
9	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長	3.210 ***	0.273 ***	0.483 ***	0.036	0.741
10	X ₁ 樹冠投影面積 X ₂ 樹高 X ₃ 樹冠長率	2.702 ***	0.271 ***	0.521 ***	0.038	0.742

† p値<0.1 * p値<0.05 ** p値<0.01 *** p値<0.001

表 V-23 胸高直径推定のための回帰分析結果まとめ (スギ)

	説明変数の組合せ		α	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	補正 R^2
回帰式1	X_1 :樹冠投影面積	平均値	9.6092	0.4632			0.6324
		最小値	9.1265	0.4367			0.5875
		最大値	10.2193	0.4888			0.6524
		標準偏差	0.3124	0.0145			0.0188
回帰式2	X_1 :樹冠表面積	平均値	12.8289	0.2071			0.4399
		最小値	12.4174	0.1967			0.3949
		最大値	13.3491	0.2165			0.4777
		標準偏差	0.3059	0.0063			0.0235
回帰式3	X_1 :樹冠体積	平均値	15.9813	0.1704			0.4946
		最小値	15.6750	0.1608			0.4529
		最大値	16.4873	0.1766			0.5272
		標準偏差	0.2779	0.0052			0.0215
回帰式4	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹高	平均値	4.7868	0.3779	0.2992		0.7158
		最小値	4.4752	0.3569	0.2538		0.6883
		最大値	5.5837	0.3967	0.3186		0.7343
		標準偏差	0.3078	0.0113	0.0179		0.0137
回帰式5	X_1 :樹冠表面積 X_2 :樹高	平均値	3.7795	0.1734	0.4549		0.6737
		最小値	3.5521	0.1685	0.4133		0.6450
		最大値	4.3115	0.1791	0.4706		0.6930
		標準偏差	0.2105	0.0037	0.0162		0.0154
回帰式6	X_1 :樹冠体積 X_2 :樹高	平均値	5.0669	0.1399	0.4203		0.6880
		最小値	4.7812	0.1347	0.3794		0.6617
		最大値	5.7777	0.1448	0.4365		0.7072
		標準偏差	0.2789	0.0033	0.0160		0.0147
回帰式7	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹冠長※	平均値	9.7154	0.4472	0.0146		0.6304
		最小値	9.1699	0.4206	0.0034		0.5872
		最大値	10.2433	0.4813	0.0254		0.6507
		標準偏差	0.3143	0.0164	0.0074		0.0185
回帰式8	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹冠長率※	平均値	10.0781	0.4889	-0.0316		0.6362
		最小値	9.7027	0.4645	-0.0379		0.5891
		最大値	10.7685	0.5181	-0.0256		0.6572
		標準偏差	0.3191	0.0152	0.0039		0.0192
回帰式9	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹高 X_3 :樹冠長	平均値	4.5598	0.2987	0.3397	0.0619	0.7296
		最小値	4.3045	0.2501	0.2906	0.0515	0.7105
		最大値	5.2995	0.3259	0.3679	0.0822	0.7465
		標準偏差	0.2815	0.0188	0.0204	0.0081	0.0120
回帰式10	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹高 X_3 :樹冠長率	平均値	3.4295	0.2978	0.4024	0.0623	0.7301
		最小値	3.1015	0.2497	0.3434	0.0521	0.7111
		最大値	4.1671	0.3246	0.4502	0.0821	0.7469
		標準偏差	0.2973	0.0186	0.0271	0.0080	0.0120

※: p値が5%以上で有意ではない

表 V-24 胸高直径推定のための回帰分析結果まとめ（ヒノキ）

	説明変数の組合せ		α	β_1	β_2	β_3	補正 R^2
回帰式1	X_1 :樹冠投影面積	平均値	6.6312	0.5834			0.5719
		最小値	6.3783	0.5605			0.5206
		最大値	6.9403	0.6007			0.6060
		標準偏差	0.1721	0.0119			0.0221
回帰式2	X_1 :樹冠表面積	平均値	10.4153	0.2534			0.3528
		最小値	10.0644	0.2356			0.2967
		最大値	10.9553	0.2669			0.3854
		標準偏差	0.2553	0.0084			0.0231
回帰式3	X_1 :樹冠体積	平均値	14.0008	0.1964			0.3899
		最小値	13.8079	0.1851			0.3346
		最大値	14.3428	0.2030			0.4204
		標準偏差	0.1747	0.0051			0.0221
回帰式4	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹高	平均値	3.1333	0.3357	0.4583		0.7428
		最小値	2.9819	0.3145	0.4321		0.7154
		最大値	3.2636	0.3582	0.4747		0.7611
		標準偏差	0.0866	0.0138	0.0124		0.0160
回帰式5	X_1 :樹冠表面積 X_2 :樹高	平均値	2.9530	0.1450	0.5761		0.7236
		最小値	2.8141	0.1354	0.5579		0.6981
		最大値	3.0678	0.1536	0.5922		0.7440
		標準偏差	0.0891	0.0064	0.0101		0.0147
回帰式6	X_1 :樹冠体積 X_2 :樹高	平均値	3.6518	0.1121	0.5606		0.7301
		最小値	3.5121	0.1053	0.5427		0.7040
		最大値	3.8132	0.1195	0.5770		0.7524
		標準偏差	0.1041	0.0046	0.0102		0.0151
回帰式7	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹冠長※	平均値	6.0423	0.6694	-0.0746		0.5805
		最小値	5.7933	0.6460	-0.0944		0.5317
		最大値	6.3018	0.6922	-0.0569		0.6101
		標準偏差	0.1597	0.0158	0.0115		0.0217
回帰式8	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹冠長率	平均値	8.3255	0.6655	-0.1330		0.6399
		最小値	7.9146	0.6451	-0.1490		0.6005
		最大値	8.8529	0.6791	-0.1162		0.6598
		標準偏差	0.3106	0.0099	0.0094		0.0197
回帰式9	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹高 X_3 :樹冠長※	平均値	3.1638	0.2829	0.4798	0.0354	0.7431
		最小値	3.0087	0.2508	0.4576	0.0129	0.7153
		最大値	3.3055	0.3174	0.4957	0.0453	0.7622
		標準偏差	0.0914	0.0175	0.0121	0.0094	0.0161
回帰式10	X_1 :樹冠投影面積 X_2 :樹高 X_3 :樹冠長率※	平均値	2.6764	0.2809	0.5171	0.0367	0.7433
		最小値	2.4865	0.2476	0.4732	0.0146	0.7156
		最大値	3.0199	0.3149	0.5352	0.0472	0.7626
		標準偏差	0.1327	0.0177	0.0171	0.0093	0.0160

※: p値が5%以上で有意ではない

10 分割交差検証で現地調査と胸高直径の推定結果との比較をまとめた結果が表 V-25、表 V-26 である。10 分割したグループの内、検証に使った 1 グループの平均値、最小値、最大値、標準偏差を計算し、現地調査結果と比較して、平均誤差率（現地調査との差分（絶対値）を現地調査の結果で除算し、平均した結果）、相関係数 R、RMSE を計算した。さらに、上記の 10 分割交差検証の平均値、最小値、最大値、標準偏差、平均誤差率、相関係数、RMSE の平均値、最小値、最大値、標準偏差を表にとりまとめた。スギの胸高直径

推定では p 値が 5%未満となった回帰式 1~6、9、10 の中で比較した場合、樹冠投影面積、樹高、樹冠長率を説明変数とする回帰式 10 が最も高い決定係数となったが（表 V-23）、10 分割交差検証で得られた最小、最大、平均胸高直径、標準偏差は回帰式 9 と同様の値となった（表 V-25）。また、平均誤差率、相関係数、RMSE についても回帰式 9 とほとんど変わらない結果となり、平均誤差率の平均は 7.3%、相関係数の平均は 0.877、RMSE の平均は 2.40cm 程度となった。

一方、ヒノキの胸高直径推定では p 値が 5%未満となった回帰式 1~6、8 の中で比較した場合、樹冠投影面積、樹高を説明変数とする回帰式 4 が最も高い決定係数であった（表 V-24）。回帰式 4 から得られた 10 分割交差検証が最も良い結果となり、平均誤差率の平均は 8.44%、相関係数の平均は 0.866、RMSE は 2.428cm となった（表 V-26）。

平均胸高直径の平均はスギで 24.8cm であり、現地調査の 25.8cm と比べて 1cm 小さく、ヒノキでは 21.1cm に対して現地調査は 22.0cm で、0.9cm 小さく、スギ、ヒノキともにやや過小に胸高直径が計算されていることが分かった。

表 V-25 胸高直径、10 分割交差検証一覧表 (スギ)

		平均胸高直径(Gm)	最小胸高直径	最大胸高直径	標準偏差	平均誤差率	相関係数	RMSE
現地調査	平均値	25.8	18.6	34.3	4.1			
	最小値	24.6	13.0	30.0	2.9			
	最大値	27.3	22.0	39.0	5.4			
	標準偏差	0.8	3.0	2.5	0.8			
回帰式1	平均値	24.8	19.8	32.3	3.3	8.73%	0.825	2.731
	最小値	23.6	15.8	27.3	2.2	6.10%	0.633	1.760
	最大値	26.1	22.2	40.7	5.6	11.37%	0.942	3.805
	標準偏差	0.7	1.8	3.6	1.1	1.76%	0.086	0.572
回帰式2	平均値	24.5	20.7	30.3	2.6	10.83%	0.656	3.357
	最小値	23.6	18.0	27.6	1.8	8.54%	0.129	2.632
	最大値	25.3	22.0	34.0	3.7	13.31%	0.898	4.377
	標準偏差	0.6	1.2	1.9	0.6	1.82%	0.206	0.648
回帰式3	平均値	23.9	19.9	30.2	2.8	11.25%	0.697	3.489
	最小値	22.9	16.7	26.8	1.9	9.12%	0.215	2.421
	最大値	24.7	21.4	34.0	4.2	13.67%	0.908	4.593
	標準偏差	0.6	1.4	2.2	0.7	1.73%	0.186	0.679
回帰式4	平均値	24.9	18.9	31.8	3.4	7.37%	0.870	2.420
	最小値	23.8	15.1	28.5	2.5	5.59%	0.786	1.659
	最大値	25.9	21.8	36.5	5.0	9.51%	0.953	3.740
	標準偏差	0.7	1.8	2.4	0.7	1.41%	0.057	0.597
回帰式5	平均値	24.7	19.2	31.1	3.2	7.82%	0.842	2.631
	最小値	23.7	15.4	28.2	2.3	5.19%	0.689	1.854
	最大値	25.8	21.4	33.5	4.2	10.30%	0.955	3.967
	標準偏差	0.7	1.7	1.6	0.6	1.52%	0.078	0.638
回帰式6	平均値	24.2	18.8	30.6	3.2	8.30%	0.855	2.779
	最小値	23.3	14.8	27.4	2.3	5.57%	0.707	2.034
	最大値	25.2	21.1	32.7	4.3	11.70%	0.961	4.146
	標準偏差	0.7	1.7	1.6	0.7	1.60%	0.073	0.674
回帰式7	平均値	24.8	19.9	32.3	3.3	8.84%	0.822	2.753
	最小値	23.5	15.8	27.3	2.2	6.22%	0.616	1.780
	最大値	26.0	22.1	40.6	5.6	11.43%	0.940	3.811
	標準偏差	0.7	1.8	3.7	1.1	1.75%	0.090	0.572
回帰式8	平均値	24.8	19.8	32.1	3.3	8.59%	0.831	2.696
	最小値	23.6	15.9	27.4	2.4	5.68%	0.673	1.720
	最大値	26.3	22.2	40.5	5.5	11.90%	0.947	3.791
	標準偏差	0.8	1.7	3.5	1.0	1.87%	0.077	0.575
回帰式9	平均値	24.8	18.9	31.8	3.4	7.32%	0.877	2.402
	最小値	23.8	14.8	28.2	2.5	5.53%	0.776	1.651
	最大値	25.5	21.6	35.5	4.9	9.32%	0.948	3.659
	標準偏差	0.7	1.8	2.2	0.8	1.31%	0.059	0.595
回帰式10	平均値	24.8	18.9	31.8	3.4	7.31%	0.877	2.404
	最小値	23.7	14.8	28.1	2.5	5.52%	0.776	1.636
	最大値	25.5	21.6	35.5	4.9	9.14%	0.948	3.702
	標準偏差	0.7	1.8	2.2	0.8	1.30%	0.059	0.602

表 V-26 胸高直径、10 分割交差検証一覧表（ヒノキ）

		平均胸高直径(Gm)	最小胸高直径	最大胸高直径	標準偏差	平均誤差率	相関係数	RMSE
現地調査	平均値	22.0	14.2	30.6	4.4			
	最小値	20.2	12.0	24.0	3.5			
	最大値	23.5	16.0	37.0	5.2			
	標準偏差	0.9	1.2	3.8	0.6			
回帰式1	平均値	21.0	15.1	28.1	3.5	9.19%	0.856	2.554
	最小値	19.6	12.4	23.8	2.1	6.28%	0.765	1.660
	最大値	22.1	17.9	32.0	4.3	11.92%	0.977	3.392
	標準偏差	0.7	1.8	2.6	0.7	1.93%	0.066	0.593
回帰式2	平均値	20.6	17.6	26.3	2.5	13.85%	0.581	3.848
	最小値	19.7	15.9	21.6	1.4	10.72%	0.097	3.001
	最大値	22.2	18.6	33.5	3.9	16.50%	0.896	4.927
	標準偏差	0.7	0.9	3.3	0.7	2.00%	0.220	0.697
回帰式3	平均値	20.0	16.7	25.7	2.5	14.53%	0.601	4.004
	最小値	19.0	14.8	21.1	1.5	10.50%	0.131	2.987
	最大値	21.5	17.9	32.4	3.7	17.81%	0.902	5.163
	標準偏差	0.7	1.0	3.1	0.6	2.25%	0.211	0.748
回帰式4	平均値	21.1	14.6	28.1	3.6	8.44%	0.866	2.428
	最小値	20.0	12.4	23.3	2.1	3.74%	0.765	0.979
	最大値	22.1	17.9	32.0	4.4	11.92%	0.973	3.392
	標準偏差	0.7	1.9	2.7	0.7	2.58%	0.071	0.761
回帰式5	平均値	21.1	14.6	27.6	3.5	8.77%	0.860	2.509
	最小値	20.3	12.4	23.9	2.0	5.44%	0.767	1.285
	最大値	22.1	17.3	32.8	4.6	12.45%	0.946	3.550
	標準偏差	0.6	1.8	2.7	0.7	2.39%	0.064	0.688
回帰式6	平均値	20.8	14.4	27.2	3.5	9.01%	0.864	2.602
	最小値	20.0	12.0	23.0	2.0	5.12%	0.766	1.206
	最大値	21.7	17.1	32.2	4.4	13.12%	0.957	3.653
	標準偏差	0.6	1.8	2.7	0.7	2.68%	0.066	0.778
回帰式7	平均値	21.1	16.1	28.0	3.4	10.89%	0.755	3.026
	最小値	19.6	14.5	23.7	2.3	6.06%	0.460	1.972
	最大値	22.3	18.3	32.6	4.1	13.97%	0.977	3.954
	標準偏差	0.8	1.2	2.7	0.5	2.45%	0.131	0.727
回帰式8	平均値	21.1	15.7	28.3	3.5	9.91%	0.798	2.821
	最小値	19.6	13.9	23.5	2.3	6.53%	0.599	1.634
	最大値	22.3	18.7	31.5	4.1	13.04%	0.961	3.647
	標準偏差	0.8	1.6	2.6	0.5	2.27%	0.103	0.713
回帰式9	平均値	21.1	14.6	28.0	3.6	8.41%	0.867	2.424
	最小値	20.1	12.4	23.3	2.1	3.95%	0.765	0.960
	最大値	22.1	17.8	32.5	4.5	11.94%	0.975	3.396
	標準偏差	0.6	1.9	2.7	0.7	2.56%	0.070	0.764
回帰式10	平均値	21.1	14.6	28.0	3.6	8.40%	0.867	2.420
	最小値	20.1	12.4	23.3	2.1	3.97%	0.766	0.963
	最大値	22.1	17.8	32.5	4.5	11.99%	0.975	3.404
	標準偏差	0.6	1.9	2.7	0.7	2.56%	0.070	0.767

最も決定係数の高かった回帰式 10（スギ）と回帰式 4（ヒノキ）の 10 分割交差検証の回帰式検討で得られた係数の平均値（算術平均）を用いて、胸高直径推定の回帰式を作成した結果が式 V-7 と式 V-8 であり、平均係数回帰式として単木の材積を推定するための回帰式とする。

$$DBHs = 3.430 \times Ca^{0.298} \times h^{0.402} \times Cr^{0.062} \quad (\text{式 V-7})$$

$$DBHh = 3.133 \times Ca^{0.336} \times h^{0.458} \quad (\text{式 V-8})$$

ここで、DBHs はスギの胸高直径（cm）、DBHh はヒノキの胸高直径（cm）である。

平均係数回帰式（式V-7、V-8）を用いて、単木レベルで胸高直径を算出し、調査プロットの平均胸高直径を算出して、プロット毎に得られた平均胸高直径の最小値、最大値、平均値、標準偏差と現地調査結果との比較から得られた相関係数、平均誤差率、RMSEを計算した結果が表V-27である。また、現地調査の平均胸高直径とレーザ解析の平均胸高直径を比較したグラフが図V-5である。スギでは現地調査の平均値25.8cmに対して、レーザ解析が24.8cm、ヒノキでは22.0cmに対して、レーザ解析では21.1cmとなり、10分割交差検証で得られた結果と同様に現地調査に比べて小さく推定されることが分かった。また、相関係数はスギ、ヒノキともに0.86、平均誤差率はスギで6.9%、ヒノキで8.3%、RMSEはスギで2.38cm、ヒノキで2.51cmと高い精度で胸高直径を推定できていることが分かる。一方で、レーザ解析で得られた平均胸高直径の最大値が現地調査結果に比べてスギでは4.2cm、ヒノキでは5cm小さくなっている。図V-5からは散布図から得られる近似式の係数はスギで1.0174、ヒノキで1.0498であり、レーザ解析で得られる胸高直径は現地調査と比較して、ほぼ1対1の関係であり、図からも推定結果に高い相関があることが分かる。

表 V-27 平均係数回帰式（式V-7、V-8）を用いて算出した胸高直径

	スギ		ヒノキ	
	現地調査	レーザ解析	現地調査	レーザ解析
平均胸高直径 (cm)	25.8	24.8	22.0	21.1
最小値	13.0	15.1	12.0	12.6
最大値	39.0	34.8	37.0	32.0
標準偏差	4.3	3.6	4.6	3.8
相関係数		0.86		0.86
平均誤差率		6.9%		8.3%
RMSE		2.38		2.51

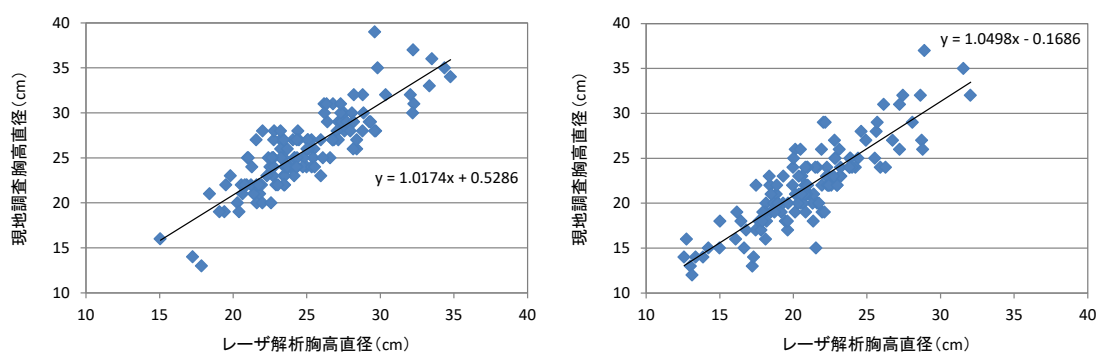


図 V-5 平均係数回帰式の胸高直径算出結果

(左図：スギ (n : 129 プロット)、右図：ヒノキ (n : 126 プロット))

レーザ解析では4.2~5cmほど胸高直径の最大値が小さくなったが、平均係数回帰式は現地調査プロットの平均胸高直径を用いていることから、現地調査で得られる個々の胸高

直径のサイズに比べて、胸高直径のデータレンジが狭くなることが影響していると考えられる。このため、現地調査の毎木胸高直径と平均係数回帰式で計算した毎木胸高直径のヒストグラムを作成した（図 V-6、図 V-7）。図から全体的には現地調査とレーザ解析の樹高分布は同様になっているが、現地調査に比べて小さい胸高直径が多く、大きい胸高直径が少なく推定されていることが分かった。

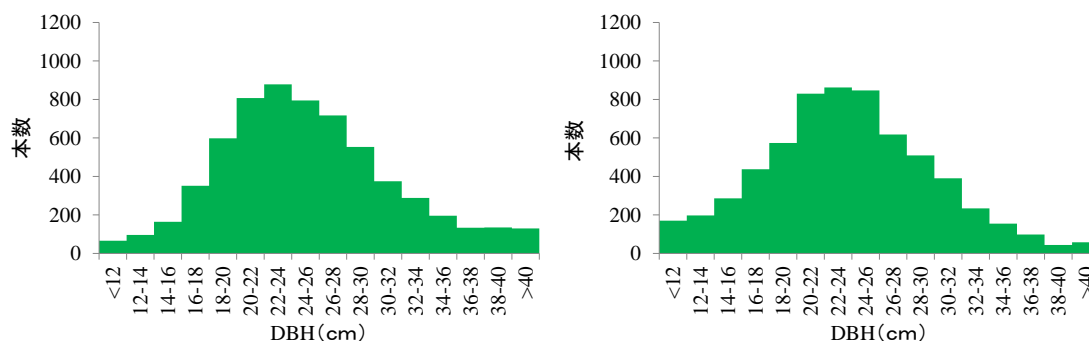


図 V-6 現地調査とレーザ解析の DBH 分布

(スギ、左図：現地調査 (n : 6,282 本)、右図：レーザ解析 (n : 6,309 本))

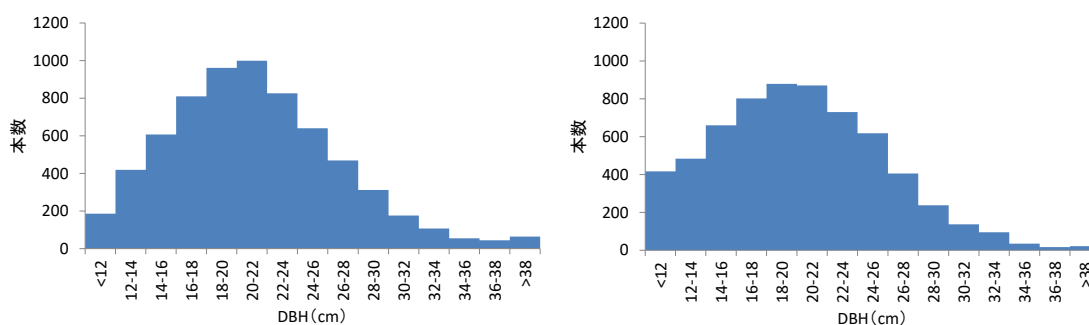


図 V-7 現地調査とレーザ解析の DBH 分布

(ヒノキ、左図：現地調査 (n : 6,675 本)、右図：レーザ解析 (n : 6,412 本))

V-3-2 単木材積推定

レーザ解析から得られた単木樹高と 10 分割交差検証で得られたそれぞれの回帰式から計算した胸高直径を材積式に適用して算出した調査プロットの平均単木材積を現地調査と比較した結果が表 V-28、表 V-29 である。スギの胸高直径推定には回帰式 10 が最も高い決定係数となったが、平均単木材積の計算結果を比較すると回帰式 4、9、10 はほとんど同様の値となった。回帰式 10 を基にした平均単木材積はスギで 0.48 m^3 であり、現地調査の 0.53 m^3 と比較して 0.05 m^3 小さく、現地調査のデータレンジとレーザ解析のデータレン

ジを比較すると 0.10~1.20 m³の現地調査に比べて、レーザ解析では 0.11~1.12 m³となり、同じようなデータレンジで平均単木材積が計算できていることが分かった。また、回帰式 10 の平均誤差率は 14.91%、相関係数は 0.905、RMSE は 0.102 であった。一方、ヒノキでは回帰式 4 が最も高い決定係数となり、p 値が 5%未満となった回帰式 1~6、8 の中で比較した場合、回帰式 4 で得られた胸高直径を用いた平均単木材積が最も高い精度であった。平均単木材積はスギで 0.31 m³であり、現地調査の 0.36 m³と比較して 0.05 m³小さく、現地調査のデータレンジとレーザ解析のデータレンジを比較すると 0.06~1.30 m³の現地調査に比べて、レーザ解析では 0.05~1.00 m³となり、高い材積の推定が小さくなっていることが分かった。また、回帰式 4 の平均誤差率は 19.11%、相関係数は 0.911、RMSE は 0.091 であり、スギに比べて平均誤差率が高くなった。

表 V-28 単木材積、10 分割交差検証一覧表 (スギ)

		平均単木材積(m ³)	最小単木材積	最大単木材積	標準偏差	平均誤差率	相関係数	RMSE
現地調査	平均値	0.53	0.20	0.94	0.20			
	最小値	0.47	0.10	0.78	0.15			
	最大値	0.59	0.28	1.20	0.25			
	標準偏差	0.04	0.07	0.12	0.03			
回帰式1	平均値	0.48	0.23	0.84	0.17	15.80%	0.907	0.101
	最小値	0.43	0.13	0.68	0.12	9.53%	0.842	0.056
	最大値	0.54	0.32	1.02	0.22	22.19%	0.983	0.170
	標準偏差	0.03	0.05	0.12	0.03	4.30%	0.039	0.032
回帰式2	平均値	0.45	0.25	0.74	0.13	18.80%	0.879	0.128
	最小値	0.42	0.16	0.59	0.10	14.91%	0.734	0.088
	最大値	0.50	0.32	0.87	0.17	23.83%	0.967	0.198
	標準偏差	0.03	0.05	0.08	0.02	3.10%	0.068	0.037
回帰式3	平均値	0.44	0.24	0.73	0.13	19.54%	0.889	0.134
	最小値	0.40	0.14	0.57	0.10	15.77%	0.765	0.087
	最大値	0.48	0.31	0.86	0.17	25.03%	0.966	0.206
	標準偏差	0.03	0.05	0.08	0.03	3.37%	0.060	0.038
回帰式4	平均値	0.49	0.20	0.88	0.18	14.89%	0.901	0.103
	最小値	0.44	0.12	0.73	0.14	9.29%	0.825	0.057
	最大値	0.53	0.27	1.13	0.23	19.83%	0.965	0.173
	標準偏差	0.03	0.05	0.13	0.03	3.02%	0.042	0.031
回帰式5	平均値	0.47	0.19	0.87	0.18	15.83%	0.897	0.105
	最小値	0.43	0.12	0.68	0.13	12.64%	0.813	0.086
	最大値	0.54	0.28	1.10	0.21	20.54%	0.954	0.151
	標準偏差	0.03	0.05	0.14	0.02	2.52%	0.038	0.018
回帰式6	平均値	0.46	0.19	0.84	0.17	17.18%	0.892	0.118
	最小値	0.42	0.11	0.67	0.13	13.48%	0.789	0.090
	最大値	0.52	0.27	1.06	0.21	22.45%	0.964	0.193
	標準偏差	0.03	0.05	0.14	0.03	2.88%	0.051	0.032
回帰式7	平均値	0.48	0.23	0.84	0.17	15.91%	0.908	0.102
	最小値	0.43	0.13	0.67	0.12	9.79%	0.842	0.052
	最大値	0.53	0.32	1.02	0.22	22.33%	0.983	0.170
	標準偏差	0.03	0.05	0.12	0.03	4.26%	0.039	0.033
回帰式8	平均値	0.49	0.22	0.85	0.17	15.87%	0.902	0.102
	最小値	0.44	0.13	0.70	0.13	9.24%	0.841	0.060
	最大値	0.54	0.31	1.04	0.22	22.24%	0.980	0.169
	標準偏差	0.03	0.05	0.12	0.03	4.28%	0.040	0.031
回帰式9	平均値	0.49	0.20	0.89	0.19	14.90%	0.905	0.102
	最小値	0.44	0.11	0.71	0.14	9.46%	0.825	0.054
	最大値	0.54	0.28	1.12	0.23	19.50%	0.971	0.172
	標準偏差	0.03	0.05	0.14	0.03	2.57%	0.042	0.031
回帰式10	平均値	0.48	0.20	0.88	0.19	14.91%	0.905	0.102
	最小値	0.43	0.11	0.70	0.14	9.50%	0.825	0.054
	最大値	0.54	0.28	1.12	0.23	19.81%	0.971	0.174
	標準偏差	0.03	0.05	0.14	0.03	2.59%	0.042	0.031

表 V-29 単木材積、10 分割交差検証一覧表 (ヒノキ)

		平均単木材積 (m ³)	最小単木材積	最大単木材積	標準偏差	平均誤差率	相関係数	RMSE
現地調査	平均値	0.36	0.09	0.82	0.19			
	最小値	0.31	0.06	0.46	0.12			
	最大値	0.43	0.15	1.30	0.29			
	標準偏差	0.03	0.03	0.28	0.06			
回帰式1	平均値	0.31	0.10	0.67	0.16	19.23%	0.917	0.090
	最小値	0.26	0.05	0.37	0.09	10.05%	0.808	0.047
	最大値	0.36	0.16	1.00	0.22	27.89%	0.977	0.160
	標準偏差	0.03	0.04	0.18	0.04	5.28%	0.048	0.031
回帰式2	平均値	0.28	0.13	0.53	0.11	25.28%	0.849	0.137
	最小値	0.25	0.09	0.34	0.05	19.88%	0.684	0.070
	最大値	0.33	0.18	0.88	0.18	39.85%	0.953	0.247
	標準偏差	0.02	0.03	0.15	0.04	6.06%	0.079	0.055
回帰式3	平均値	0.27	0.12	0.51	0.11	26.34%	0.855	0.144
	最小値	0.24	0.08	0.32	0.05	20.19%	0.677	0.081
	最大値	0.31	0.17	0.83	0.17	41.72%	0.959	0.251
	標準偏差	0.02	0.03	0.14	0.03	6.70%	0.080	0.053
回帰式4	平均値	0.31	0.09	0.67	0.16	19.11%	0.911	0.091
	最小値	0.27	0.05	0.40	0.09	10.05%	0.808	0.047
	最大値	0.36	0.16	1.00	0.22	27.89%	0.955	0.160
	標準偏差	0.03	0.04	0.17	0.04	5.15%	0.044	0.031
回帰式5	平均値	0.31	0.09	0.65	0.15	19.98%	0.903	0.097
	最小値	0.28	0.05	0.47	0.09	11.26%	0.774	0.051
	最大値	0.36	0.15	0.94	0.21	29.68%	0.958	0.176
	標準偏差	0.02	0.04	0.16	0.04	5.89%	0.052	0.034
回帰式6	平均値	0.30	0.09	0.63	0.15	20.58%	0.906	0.101
	最小値	0.27	0.04	0.44	0.09	11.89%	0.778	0.054
	最大値	0.35	0.15	0.93	0.21	30.45%	0.962	0.183
	標準偏差	0.02	0.04	0.16	0.04	6.13%	0.051	0.035
回帰式7	平均値	0.32	0.12	0.66	0.15	20.21%	0.886	0.100
	最小値	0.26	0.08	0.40	0.08	11.19%	0.724	0.061
	最大値	0.37	0.20	0.91	0.18	32.57%	0.974	0.178
	標準偏差	0.03	0.04	0.16	0.03	6.05%	0.066	0.034
回帰式8	平均値	0.32	0.11	0.68	0.16	19.84%	0.892	0.096
	最小値	0.27	0.06	0.42	0.09	12.29%	0.777	0.061
	最大値	0.37	0.19	0.97	0.21	29.00%	0.957	0.161
	標準偏差	0.03	0.04	0.16	0.04	5.03%	0.053	0.029
回帰式9	平均値	0.31	0.09	0.67	0.16	19.18%	0.912	0.092
	最小値	0.27	0.05	0.41	0.09	9.81%	0.800	0.046
	最大値	0.36	0.15	1.00	0.22	28.38%	0.959	0.162
	標準偏差	0.03	0.04	0.17	0.04	5.28%	0.046	0.031
回帰式10	平均値	0.31	0.09	0.67	0.16	19.16%	0.912	0.092
	最小値	0.27	0.05	0.41	0.09	9.82%	0.800	0.046
	最大値	0.36	0.15	0.99	0.22	28.28%	0.960	0.162
	標準偏差	0.03	0.04	0.17	0.04	5.29%	0.046	0.032

平均係数回帰式 (式V-7、V-8) で算出した胸高直径を基に調査プロットに含まれる樹木の平均単木材積を計算し、平均単木材積の最小値、最大値、平均値、標準偏差を計算した結果が表 V-30 である。また、現地調査結果との比較により、相関係数、平均誤差率、RMSE を計算した。現地調査に比べて平均単木材積の平均値ではスギで 0.04 m³、ヒノキで 0.05 m³、最大値ではスギで 0.08 m³、ヒノキで 0.29 m³過小に推定され、10 分割交差検証結果と同様にスギ、ヒノキともに過小になった。ヒノキの平均誤差率は 18.9%となり、スギよりも大きくなったが、相関係数はスギで 0.88、ヒノキで 0.91、RMSE はともに 0.10 m³となった。また、現地調査の平均単木材積とレーザ解析の平均単木材積を比較したグラフが図 V-8 である。散布図から得られる近似式の係数はスギで 0.9438、ヒノキで 1.1011

であり、ややヒノキで過小に推定される傾向が読み取れるものの、レーザ解析の材積計算結果と現地平均単木材積に高い相関があることが分かる。

表 V-30 平均係数回帰式（式V-7、V-8）の胸高直径から算出した単木材積

	スギ		ヒノキ	
	現地調査	レーザ解析	現地調査	レーザ解析
平均単木材積(m ³)	0.53	0.49	0.36	0.31
最小値	0.10	0.11	0.06	0.05
最大値	1.20	1.12	1.30	1.01
標準偏差	0.20	0.19	0.20	0.17
相関係数		0.88		0.91
平均誤差率		14.4%		18.9%
RMSE		0.10		0.10

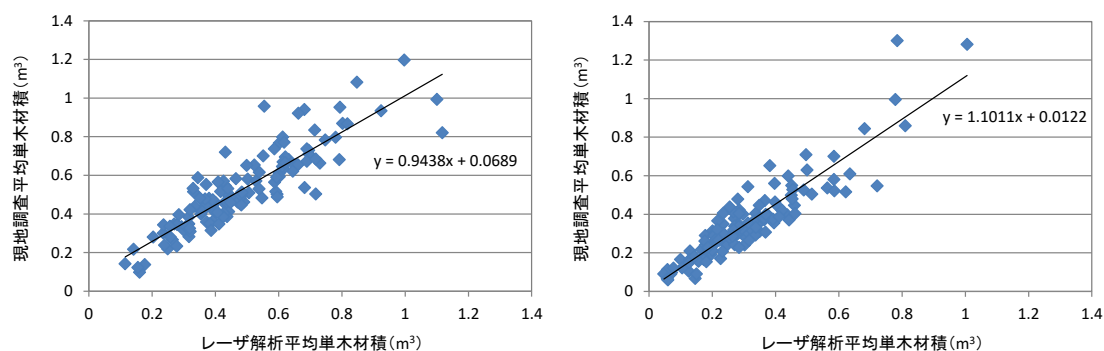


図 V-8 平均係数回帰式による単木材積計算結果

(左図：スギ (n : 129 プロット)、右図：ヒノキ (n : 126 プロット))

V-4 考察

現地調査に代わる調査方法を検討するため、単木抽出結果を活用して、胸高直径の推定に有効な回帰式の検討を 10 分割交差検証により実施した。また、胸高直径を推定する回帰式を 1~3 つの説明変数を組み合わせて 10 パターンの回帰式で試行した。さらに、得られた胸高直径と樹高から単木の材積を推定し、現地調査との比較を行った。

胸高直径の推定では、胸高直径の推定に用いる回帰式は説明変数が多くなるにつれ、決定係数が向上する傾向があり、特に樹高を加えることで推定精度が向上することが分かった。樹冠投影面積に比べて樹冠表面積や樹冠体積を用いた回帰式の決定係数が小さくなった要因として、樹冠表面積や樹冠体積の計算方法が考えられる。本研究では樹冠形状を円錐と仮定して、樹冠表面積や樹冠体積を計算しているため、実際の樹冠表面積や樹冠体積と比較すると違いが生じたことが影響したと考えられる。特に、樹冠長は傾斜地では尾根側が短く、谷側が長くなっていることから、円錐として樹冠表面積や樹冠体積を計算する

ことで誤差が大きくなると考えられる。スギの回帰式については回帰式 7、8、ヒノキでは回帰式 7、9、10 の p 値が 5%未満にならなかったが、共通していることは樹冠長もしくは樹冠長率の p 値が 5%未満にならなかったことであり、このため回帰式の候補から除外した。また、表 V-23、表 V-24 より樹冠投影面積だけを説明変数とした回帰式 1 と樹冠投影面積に樹冠長、樹冠長率を加えた回帰式 7、8 の決定係数を比較すると大きな違いがないことから、樹冠長や樹冠長率が胸高直径の推定に樹高ほど大きく寄与していないと考えられる。しかしながら、樹冠表面積や樹冠体積を正確に計測することで、樹冠長や樹冠長率の値も変わってくる考えられるため、樹冠の形状を正確に把握し、説明変数としての寄与を検討することが今後の課題である。

胸高直径推定の説明変数の組合せでは、スギで樹冠投影面積、樹高、樹冠長率のパターンが、ヒノキで樹冠投影面積、樹高のパターンが最も決定係数が高くなった。スギとヒノキで使用する説明変数に違いがあったが、表 II-1 の樹冠長ではスギはヒノキに比べて平均値で 0.4m、最大樹冠長で 1.2m、標準偏差で 0.3 大きく、樹冠長が大きく、また、値にばらつきがあることが影響していると考えられる。

本章で得られた平均係数回帰式を用いて現地調査との比較を行った結果、スギで現地プロット 13~39cm（平均胸高直径 25.8cm）の胸高直径に対して RMSE が 2.38cm、誤差率 9.2%、ヒノキで 12~37cm（平均胸高直径 22cm）の胸高直径に対して RMSE が 2.51cm、誤差率 11.4%であった。10~70cm の胸高直径に対して誤差 4.6cm、誤差率 10%(Yao *et al.*, 2012)、28~84cm の胸高直径に対して誤差 13cm、誤差率 17%(Verma *et al.*, 2014) といった既存研究と比較して、対象としている樹種や胸高直径のデータレンジが異なるものの同様もしくはやや小さい誤差で推定できていることが分かった。

回帰分析では目的変数と説明変数に調査プロットの平均値を使用しているため、最小胸高直径の値が単木の値に比べて大きくなり、最大胸高直径の値が小さくなる。このため、胸高直径を推定する回帰式の適用範囲のデータレンジが小さくなり、回帰式を単木レベルの推定に用いたときに、最小胸高直径や最大胸高直径の推定精度が低下することが考えられる。図 V-6、図 V-7 に示したように現地調査と比べてレーザ解析の胸高直径は値が小さくなると本数が多くなり、胸高直径の値が大きくなると本数が少なくなる傾向が確認できた。現地調査で毎木の位置を把握することは困難であったが、近年地上レーザ計測技術が発展し、樹木の位置情報を GIS 上で展開することが容易になってきた。この技術を活用し、調査プロットの平均値ではなく、単木の胸高直径を用いて航空レーザ解析から回帰式を検討して、胸高直径の適用範囲を向上させることが今後の課題である。

平均単木材積の計算では p 値が 5%未満だった回帰式を対象として、スギでは回帰式 4、9、10 が同様の材積計算結果となった。また、ヒノキでは回帰式 4 が最も高い精度で材積の計算ができることが分かった。さらに、平均単木材積の比較では、平均誤差率についてスギで 14.4%、ヒノキで 18.9%の誤差となった。また、胸高直径が全体的に過小に計算されていることから、両樹種共に現地調査結果と比較して平均単木材積が 0.05 m³程度過小に

なった。スギに比べてヒノキの誤差が大きくなった要因として樹冠の形状が影響していると考えられる。スギは一つ一つの樹冠が独立しているが、ヒノキは隣接する樹冠が重なるため、樹冠の形状把握がスギに比べて困難であり、胸高直径の推定精度に影響していると考えられる。さらに、単木抽出精度にも樹冠形状は影響し、IV章で用いた単木抽出の平均誤差率はスギで8.2%、ヒノキで12.7%であったことから、平均単木材積を計算するときにヒノキの方が誤差が大きくなる可能性がある。このため、単木抽出の精度を向上させることも単木材積を推定する上で重要な課題となる。

本章では佐賀県全域に適用できる胸高直径推定の回帰式を検討し、胸高直径推定結果と材積推定結果から胸高直径推定に用いる回帰式の説明変数としては樹冠投影面積、樹高が有効であることが分かった。また、航空レーザ解析を通して、スギ、ヒノキともに一つの回帰式から3cm未満の誤差で胸高直径を推定できる可能性を示した。さらに、単木の樹高と胸高直径を用いて材積を計算し、2割弱の精度で材積を推定できること可能性を示した。本研究で示した手法により毎木の資源量が把握可能となったことから、今後はレーザ解析の単木情報を現地調査の代替として活用して、持続可能な森林経営や施業立案などデータ活用について検討されることが期待できる。

第VI章

航空レーザ計測による広域資源把握

VI-1 はじめに

佐賀県では 2011 年に民有林全域を対象に 4 点/m²の密度で航空レーザ計測を行っているため、第IVおよびV章で検討した単木抽出手法や胸高直径推定の回帰式を使用して民有林全域の単木ベースの資源量が把握できる。これは民有林を毎木全数調査すること意味し、従来行われてきたサンプル調査による資源量の推定とは明らかに異なる手法での資源把握となることから、森林簿の情報更新に有用な手法となる可能性がある。

サンプル調査では全体の資源量を推定するために、統計的に十分な数のサンプルを取得する必要があり、森林資源情報、特に材積はばらつきが大きいことから、サンプル数は多くなり、サンプル調査の費用と時間が多大となることが課題である。一方で、航空機レーザ計測を活用した資源把握は機械的な作業となることから、現地調査よりも効率的に実施することが可能である。しかしながら、既存研究での広域資源把握はエリアベースの解析であり(Hollaus *et al.*, 2009; Maack *et al.*, 2016)、単木ベースで広域の資源把握は行われていないため、広域に単木ベースの解析手法を適用する効果は未知数である。

本章では、第III章で開発したレーザ林相図の林相区分と従来から用いられている森林簿の2種類の樹種分布情報を基にしてスギ、ヒノキの範囲を決定し、それぞれのスギ、ヒノキの範囲内の単木情報を取得し、単木ベースの資源量把握を試みた。また、既存の地域森林計画書の資源量と比較して、広域資源把握に関する航空レーザ解析の有効性を評価した。

VI-2 使用したデータと方法

広域資源把握に使用したデータを表 VI-1 に示す。航空レーザ計測データは 4 点/m²の密度で 2011 年 7 月～11 月に計測された。また、スギ、ヒノキの分布を把握する情報として、第 III 章で得られた林相区分 (図 III-11) と既存森林簿の樹種情報の 2 種類を用いた。

表 VI-1 広域資源把握に使用したデータ

	備考
航空レーザ計測データ	計測時期：2011年7月～11月 計測密度：4点/m ²
林相区分図	レーザ林相図の林相区分 スギ林：30,460ha ヒノキ林：14,086ha ※対象範囲は森林簿の範囲とした
森林簿樹種区分図	既存森林簿の樹種情報 スギ林：45,334ha ヒノキ林：18,461ha

単木抽出は、第 IV 章で比較した手法の中で最も抽出精度の高かった樹冠形状指数を用いて、樹冠部抽出法により実施した。単木抽出結果を用いて樹冠の領域分割を行い、得られた樹冠投影面積 Ca (m²)、樹高 h (m) と樹冠長率 Cr (%) と第 V 章で得た回帰式から胸高直径の推定を行った。胸高直径の推定に使用した回帰式を以下に示す。

$$DBHs = 3.430 \times Ca^{0.298} \times h^{0.402} \times Cr^{0.062} \quad (\text{式 VI-1})$$

$$DBHh = 3.133 \times Ca^{0.336} \times h^{0.4588} \quad (\text{式 VI-2})$$

さらに、単木抽出で得られた単木樹高と上記回帰式から得られた単木胸高直径を材積式に適用して、単木の材積を計算した。材積計算に使用した材積式は以下の通りである。

・スギ（飼肥、屋久島を除く、昭和 37 年調整）

$$\log V = -5 + 0.796182 + 1.819629 \log d + 1.025738 \log h \quad (d: 4 \sim 32\text{cm未満}) \quad (\text{式 VI-3})$$

$$\log V = -4 + 0.0754761 + 1.6644424 \log d + 0.9881512 \log h \quad (d: 32\text{cm以上})$$

・ヒノキ（昭和 36 年調整）

$$\log V = -5 + 0.87211 + 1.93699 \log d + 0.81243 \log h \quad (d: 4 \sim 12\text{cm未満})$$

$$\log V = -5 + 0.682931 + 1.921617 \log d + 1.016795 \log h \quad (d: 12 \sim 22\text{cm未満}) \quad (\text{式 VI-4})$$

$$\log V = -5 + 0.7985347 + 1.7862040 \log d + 1.0696647 \log h \quad (d: 22\text{cm以上})$$

ここで、 V は単木材積 (m³)、 d は胸高直径 (cm)、 h は樹高 (m) である。

最後に林相区分図と森林簿樹種区分を用いて、それぞれ単木情報を集計して、立木密度、

平均樹高、平均胸高直径、ha 材積の計算を行った。

2 種類の樹種区分に基づき集計した森林情報をそれぞれ比較し、また、地域森林計画書(佐賀県, 2013; 佐賀県, 2016)にまとめられている市町毎の森林資源量との比較を行った。

VI-3 航空レーザ計測による広域資源把握の結果

レーザ林相図の林相区分結果から得られたスギ、ヒノキの区分と森林簿の樹種区分のスギ、ヒノキの区分を用いて単木ベースの森林資源量を集計した結果を図 VI-1～図 VI-4 に示す。森林簿樹種区分から作成した森林資源分布図(平均樹高、平均胸高直径、林分材積)には資源量の少ない区分を表す青色が多く分布している。これらの範囲には広葉樹が混じっていることが多く、そのため資源量が少なくなっている箇所が存在している。

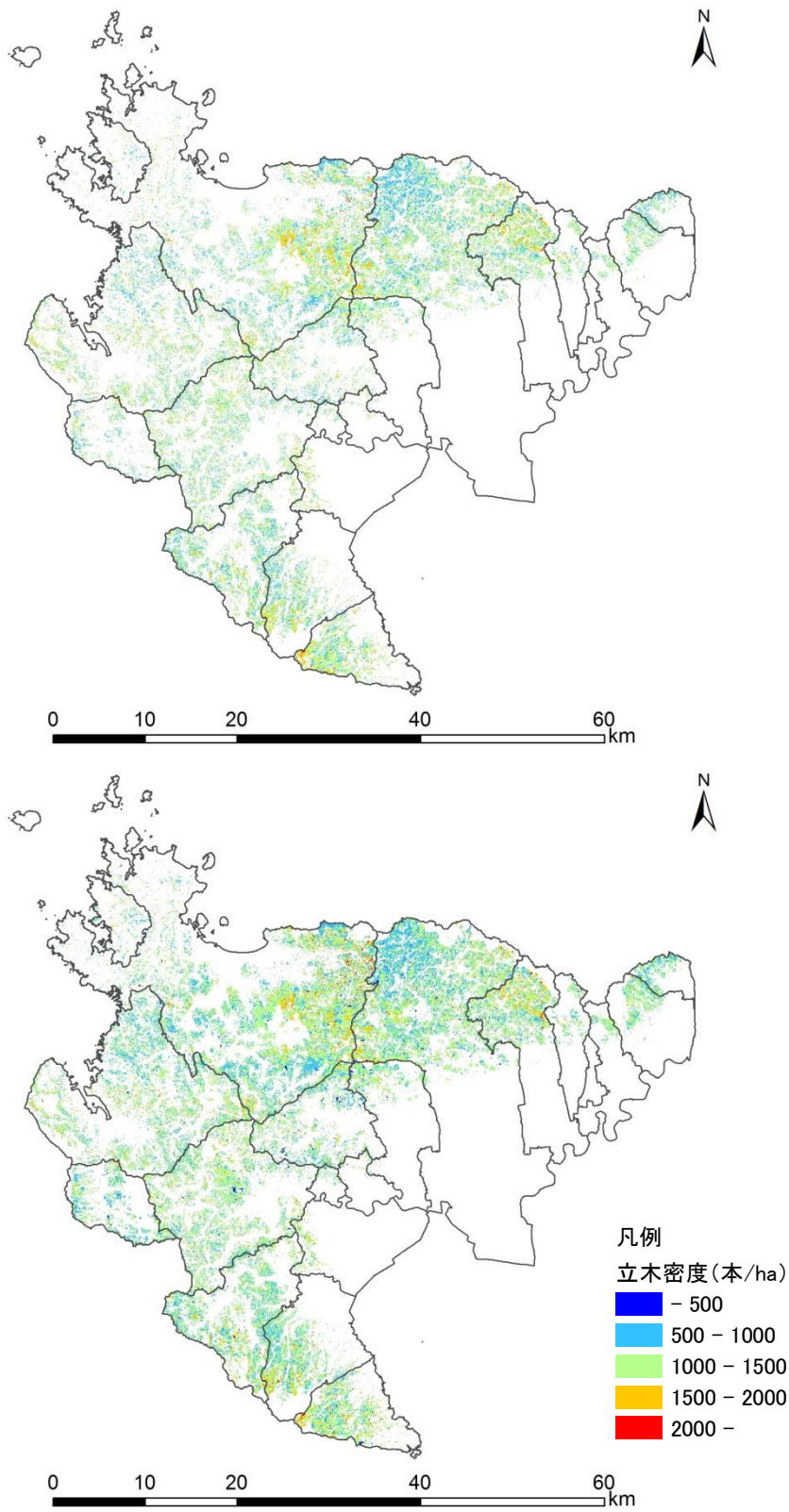


図 VI-1 立木密度分布図

(上図：レーザ林相図の林相区分、下図：森林簿の樹種区分)

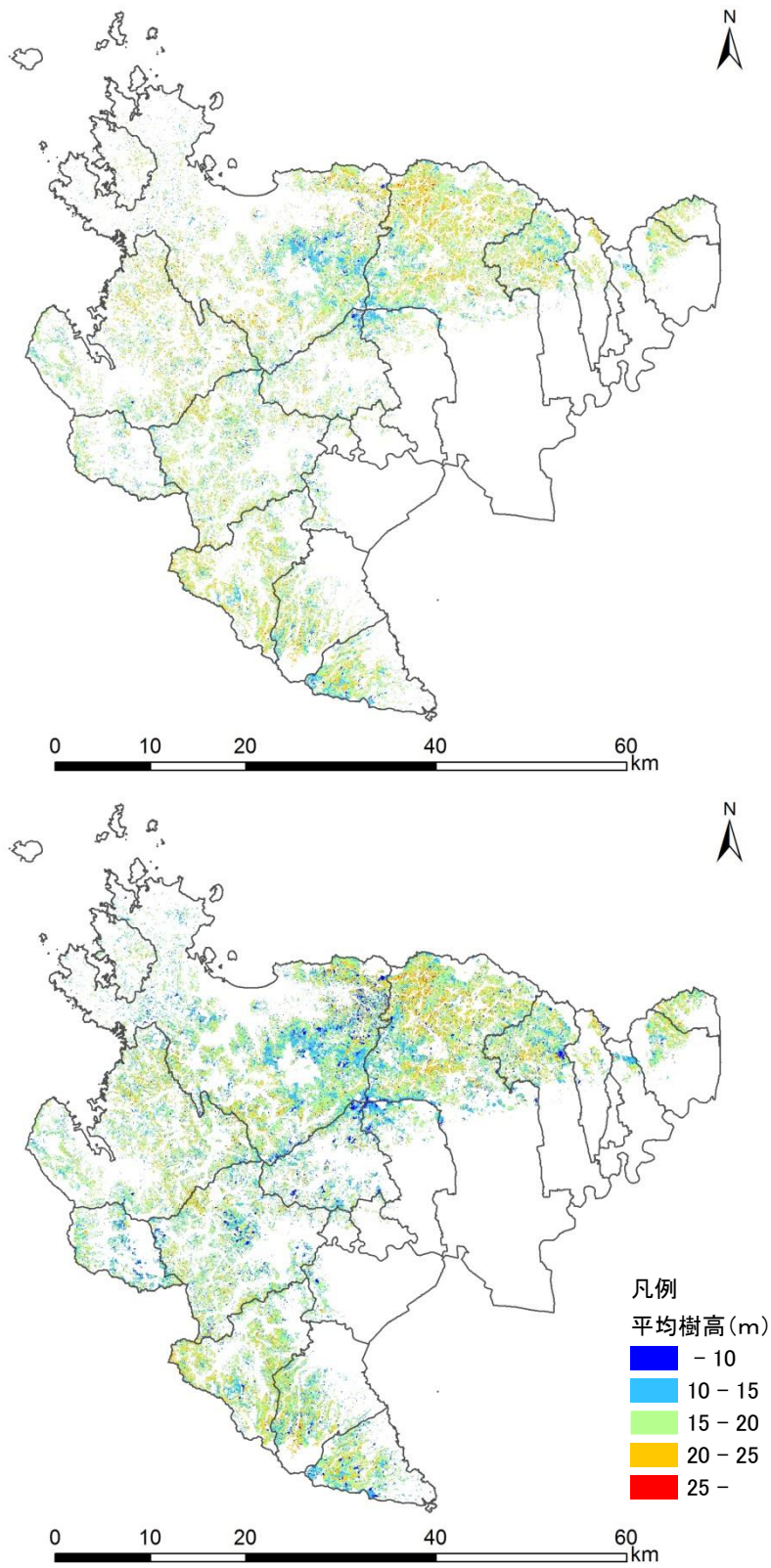


図 VI-2 平均樹高分布図

(上図：レーザ林相図の林相区分、下図：森林簿の樹種区分)

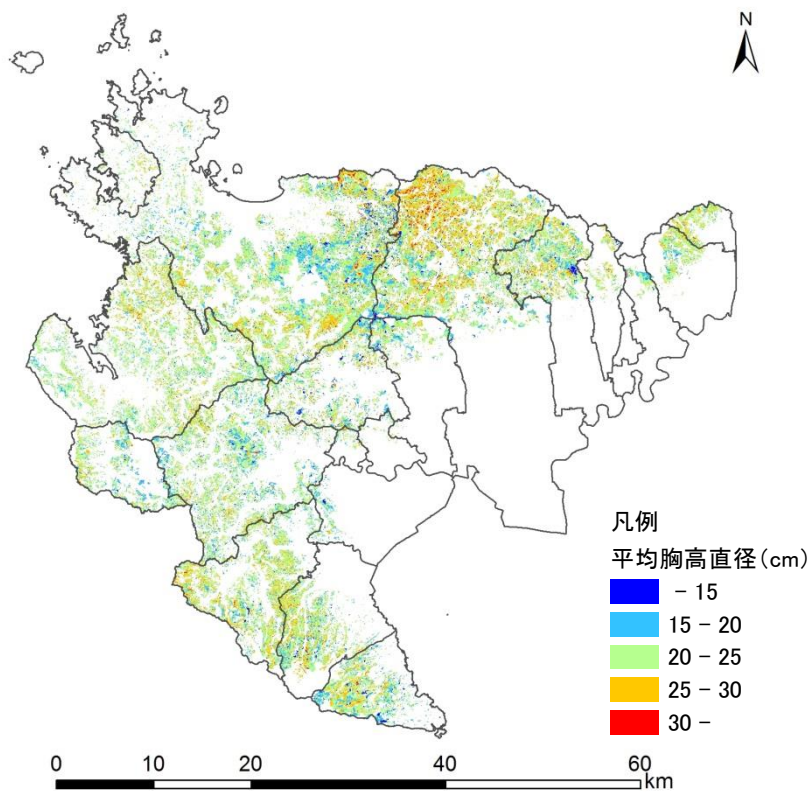
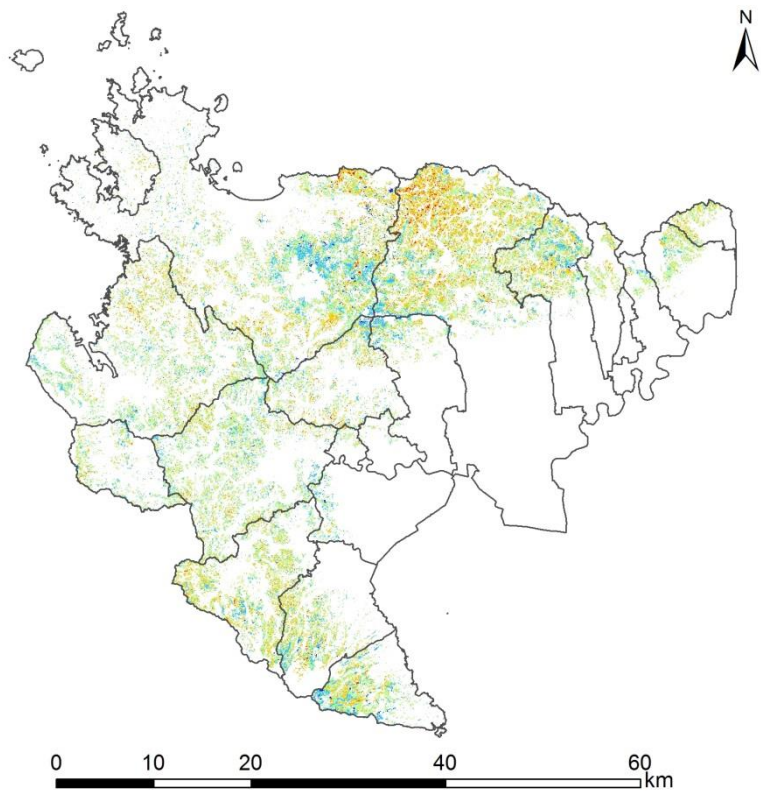


図 VI-3 平均胸高直径分布図

(上図：レーザ林相図の林相区分、下図：森林簿の樹種区分)

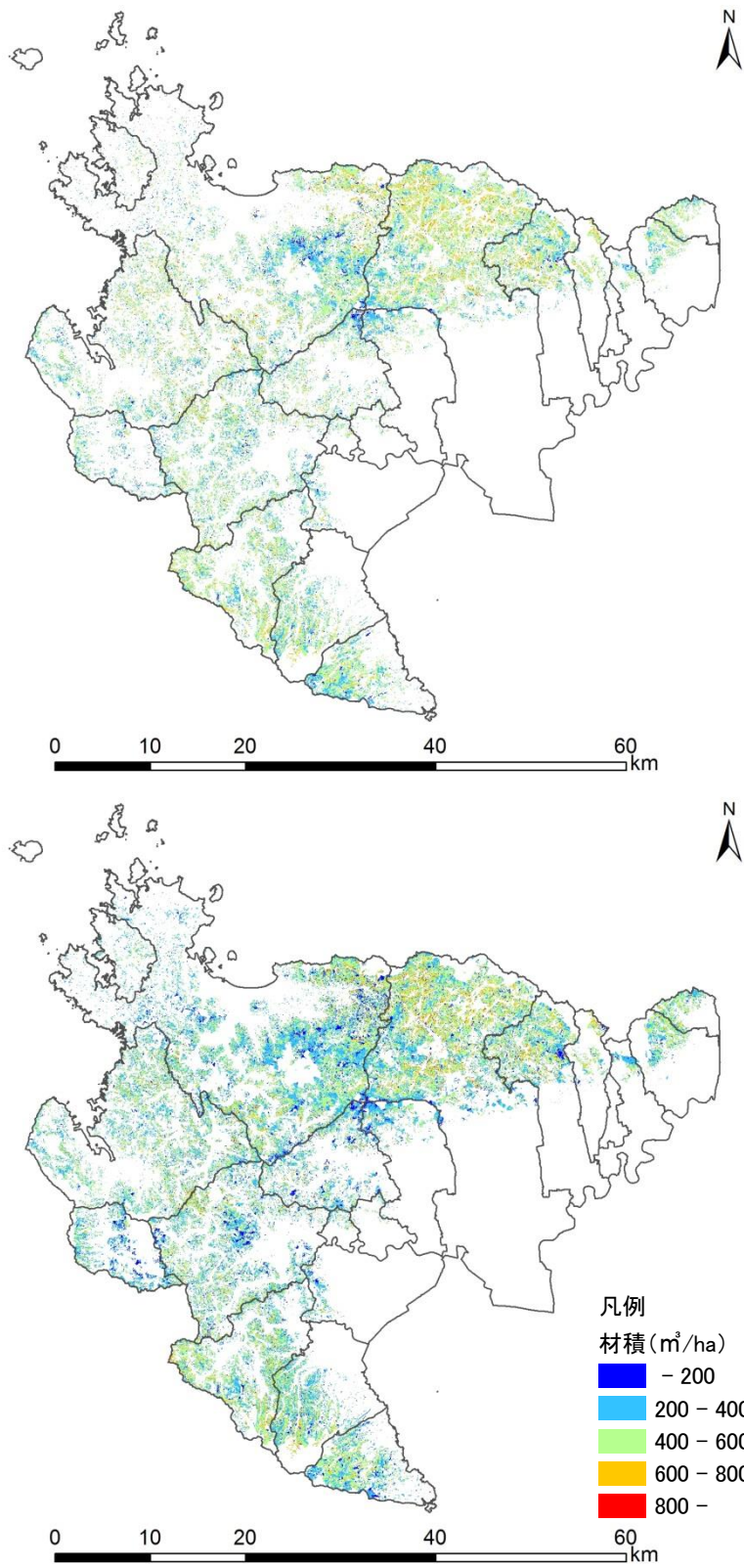


図 VI-4 材積分布図

(上図：レーザ林相図の林相区分、下図：森林簿の樹種区分)

単木資源量を市町毎、樹種区分毎に取りまとめた結果を表 VI-2 に示す。レーザ林相図を用いたスギ、ヒノキの分布把握では合計面積が 44,547ha であったのに対して森林簿の樹種区分のスギ、ヒノキ面積は合計で 63,794ha であり、レーザ林相図の林相区分のスギ、ヒノキに比べて 1.43 倍程度となっている。スギ、ヒノキの面積が森林簿では多いことから、合計立木本数や合計材積について森林簿樹種区分の方がレーザ林相図の林相区分に比べて多くなっている。立木本数についてはレーザ林相図の林相区分に比べて森林簿樹種区分の方が 1.41 倍ほど多いが、合計材積については 1.32 倍であり、森林簿では材積の少ない林分が分布していることが分かる。平均立木密度、平均樹高、平均胸高直径、平均 ha 材積については、スギとヒノキの値の較差がレーザ林相図の林相区分に比べて森林簿樹種の方が小さいことが分かる。例えば、佐賀県全域の立木密度について、林相区分のスギでは 1,084 本/ha、ヒノキでは 1,381 本/ha でその差は 297 本/ha である。一方で、森林簿樹種のスギでは 1,214 本/ha、ヒノキでは 1,240 本/ha でその差は 26 本/ha であり、その差が小さくなっている。このような関係性は市町単位や平均樹高、平均胸高直径、平均 ha 材積でも同様に確認できる。

市町毎に人工林（スギ、ヒノキの合計）の材積をレーザ林相図の林相区分、森林簿樹種区分、地域森林計画書の材積と比較した結果を表 VI-3 に示す。レーザ林相図の林相区分と森林簿樹種区分についてはレーザ解析で得られた単木ベースの合計材積であり、地域森林計画書の材積は森林簿の合計材積である。森林簿の借用が 2011 年であったことから、2013 年、2016 年に作成された地域森林計画書のスギ、ヒノキの合計面積と異なり、1,439ha 少なくなっていた。佐賀県全域で森林簿樹種面積と地域森林計画書の人工林は同様の面積であるが、森林簿樹種の材積は 26,477 千 m^3 であるのに対して、地域森林計画書の材積は 23,951 千 m^3 であることから、航空レーザ計測データを解析した単木ベースの資源情報は、地域森林計画書で用いられた森林簿材積に比べて高い値となっていることが分かる。また、レーザ林相図の林相区分の材積については森林面積が森林簿樹種区分や地域森林計画書の合計面積と比べて小さいことから、合計材積も少なく 19,955 千 m^3 となっている。3 種類の材積を ha 材積で比較するとレーザ林相図の林相区分 (448 m^3 /ha)、森林簿樹種 (415 m^3 /ha)、地域森林計画書 (384 m^3 /ha) の順に小さくなることが分かった。

表 VI-2 林相区分と森林簿樹種による森林資源量の比較

		面積 (ha)		立木本数 (本)		平均立木密度 (本/ha)		平均樹高 (m)		平均胸高直径 (cm)		合計材積 (m³)		平均ha材積 (m³/ha)	
		レーザー林相区分	森林簿樹種	レーザー林相区分	森林簿樹種	レーザー林相区分	森林簿樹種	レーザー林相区分	森林簿樹種	レーザー林相区分	森林簿樹種	レーザー林相区分	森林簿樹種	レーザー林相区分	森林簿樹種
佐賀市	スギ	6,979	9,707	7,332,268	10,684,330	1,043	1,187	19.2	16.5	25.9	24.0	3,662,541	4,600,714	523.8	463.8
	ヒノキ	1,847	1,746	2,584,849	2,141,737	1,425	1,321	15.5	13.8	21.2	19.9	644,704	626,556	440.1	332.1
唐津市	スギ	6,756	12,476	7,509,510	14,499,300	1,104	1,227	18.0	15.3	24.5	22.8	3,337,477	5,148,777	470.0	399.5
	ヒノキ	2,768	3,333	3,865,248	3,986,906	1,421	1,237	11.5	14.2	18.6	20.6	746,972	1,103,484	257.3	321.8
鳥栖市	スギ	404	529	420,487	591,487	1,050	1,177	18.5	16.4	24.7	23.6	191,562	235,881	461.2	434.8
	ヒノキ	313	447	403,705	530,021	1,291	1,229	16.9	15.9	22.4	21.5	128,476	182,190	468.9	391.5
多久市	スギ	1,304	2,084	1,405,021	2,306,798	1,090	1,331	17.7	13.3	24.6	21.9	621,084	794,977	461.9	351.2
	ヒノキ	541	507	713,350	592,433	1,453	1,446	12.9	11.5	19.6	18.5	156,417	151,628	316.7	255.6
伊万里市	スギ	3,527	6,012	3,948,879	6,861,763	1,108	1,186	18.3	16.5	24.3	23.3	1,754,483	2,542,447	471.8	432.2
	ヒノキ	1,367	1,460	1,769,513	1,677,367	1,355	1,153	13.4	16.7	20.2	22.5	426,546	593,797	328.3	401.6
武雄市	スギ	2,591	2,548	2,826,161	2,980,069	1,076	1,223	18.2	16.3	24.4	23.2	1,257,483	1,101,568	459.8	442.4
	ヒノキ	2,005	3,742	2,633,532	4,445,225	1,335	1,206	15.8	15.6	21.6	21.5	745,593	1,420,119	424.3	382.3
鹿島市	スギ	1,382	2,174	1,459,510	2,487,825	1,054	1,203	18.5	16.5	24.9	23.7	688,808	982,755	474.6	452.9
	ヒノキ	818	975	1,126,309	1,205,001	1,387	1,272	15.4	14.7	21.3	20.9	291,126	354,920	421.7	347.5
小城市	スギ	484	880	528,015	984,787	1,141	1,322	17.7	13.8	24.3	21.9	220,710	320,570	471.1	368.4
	ヒノキ	352	246	454,530	301,101	1,377	1,441	14.7	12.0	20.9	18.6	106,140	74,206	390.6	274.3
嬉野市	スギ	2,298	3,093	2,439,431	3,518,316	1,049	1,180	18.8	17.2	24.9	24.1	1,169,607	1,449,569	481.9	481.6
	ヒノキ	1,166	1,692	1,579,426	2,032,649	1,357	1,207	16.1	15.7	21.9	21.8	441,658	669,013	447.4	386.3
神埼市	スギ	1,808	2,387	2,020,432	2,868,701	1,093	1,255	18.6	16.1	25.0	23.6	940,810	1,107,975	506.6	467.2
	ヒノキ	943	953	1,360,547	1,202,952	1,422	1,402	15.6	13.0	21.3	19.3	331,878	344,934	442.7	302.0
吉野ヶ里町	スギ	331	388	378,752	438,239	1,112	1,276	18.9	15.0	24.7	22.5	174,368	184,226	501.4	400.1
	ヒノキ	74	33	96,283	39,930	1,335	1,228	16.8	14.4	22.5	20.5	33,494	11,232	483.9	329.0
基山町	スギ	322	419	316,120	443,137	965	1,101	18.7	17.0	25.1	24.0	151,912	189,843	451.6	444.2
	ヒノキ	141	254	175,279	276,138	1,264	1,141	16.9	15.7	22.6	21.8	60,200	106,277	473.1	377.3
上峰町	スギ	10	1	12,328	1,476	1,222	1,539	16.9	12.6	22.9	19.2	4,389	425	431.9	314.7
	ヒノキ	4	2	4,952	2,795	1,255	1,421	13.4	15.1	19.6	19.7	1,009	648	286.1	366.4
みやき町	スギ	111	118	115,804	134,059	1,000	1,215	17.8	14.3	24.1	21.4	50,918	44,190	418.3	365.0
	ヒノキ	91	158	114,873	182,258	1,333	1,223	16.5	14.5	22.0	20.5	32,071	55,879	477.2	344.6
玄海町	スギ	158	323	177,779	359,507	1,180	1,128	17.8	16.0	23.9	23.2	76,784	127,177	467.2	392.2
	ヒノキ	61	77	72,073	91,743	1,319	1,193	10.7	15.0	18.3	21.2	14,902	27,312	212.3	341.1
有田町	スギ	540	577	566,446	648,046	1,057	1,199	17.7	15.7	24.2	23.3	245,502	229,478	432.6	417.0
	ヒノキ	408	1,179	515,161	1,280,528	1,316	1,159	13.1	14.4	20.2	21.3	127,827	390,245	313.7	328.3
大町町	スギ	75	69	83,702	77,226	1,146	1,189	17.6	17.2	23.9	24.6	36,096	30,251	455.2	495.2
	ヒノキ	42	80	51,404	92,062	1,289	1,223	14.7	15.5	20.9	21.5	14,056	29,413	353.1	366.3
江北町	スギ	64	41	78,297	47,789	1,228	1,271	17.8	15.1	23.1	22.1	30,012	16,799	466.2	404.1
	ヒノキ	17	38	22,700	45,421	1,487	1,328	14.8	14.2	20.3	19.8	5,598	13,731	405.2	337.6
白石町	スギ	162	104	203,273	124,411	1,289	1,334	16.6	15.3	22.1	22.2	74,410	45,146	419.4	405.3
	ヒノキ	179	278	242,457	360,580	1,376	1,268	14.5	14.7	19.8	20.2	58,746	91,953	336.3	329.0
太良町	スギ	1,157	1,404	1,300,555	1,688,028	1,133	1,302	17.9	14.6	24.0	22.3	574,420	619,292	460.8	388.5
	ヒノキ	949	1,261	1,374,732	1,618,989	1,401	1,332	15.1	13.7	20.8	20.0	324,486	457,636	399.0	316.9
佐賀県	スギ	30,460	45,334	33,122,770	51,745,294	1,084	1,214	18.4	16.0	24.7	23.3	15,263,377	19,772,063	479.3	430.9
	ヒノキ	14,086	18,461	19,160,923	22,105,836	1,381	1,240	14.1	14.8	20.4	21.0	4,691,898	6,705,176	362.5	353.1
	合計	44,547	63,794	52,283,693	73,851,130	1,183	1,222	16.9	15.6	23.3	22.6	19,955,275	26,477,239	440.1	408.6

表 VI-3 航空レーザ計測の解析結果と地域森林計画の森林資源比較

	面積 (ha)			合計材積 (千 m ³)			ha材積 (m ³ /ha)		
	レーザ林相図 林相区分	森林簿樹種	地域森林計画	レーザ林相図 林相区分	森林簿樹種	地域森林計画	レーザ林相図 林相区分	森林簿樹種	地域森林計画
佐賀市	8,826	11,453	11,364	4,307	5,227	5,327	488	456	469
唐津市	9,524	15,810	15,024	4,084	6,252	5,511	429	395	367
鳥栖市	717	976	961	320	418	379	446	429	394
多久市	1,845	2,591	2,317	778	947	929	421	365	401
伊万里市	4,894	7,472	7,748	2,181	3,136	2,584	446	420	334
武雄市	4,596	6,289	6,079	2,003	2,522	1,944	436	401	320
鹿島市	2,200	3,149	3,079	980	1,338	1,159	445	425	376
小城市	836	1,126	1,099	327	395	389	391	351	354
嬉野市	3,464	4,784	4,898	1,611	2,119	2,097	465	443	428
神埼市	2,750	3,340	3,281	1,273	1,453	1,088	463	435	332
吉野ヶ里町	406	421	395	208	195	213	512	464	539
基山町	462	673	651	212	296	305	459	440	469
上峰町	14	3	2	5	1	1	398	347	500
みやき町	201	276	261	83	100	113	413	363	433
玄海町	219	400	344	92	154	115	419	386	334
有田町	948	1,756	1,607	373	620	520	394	353	324
大町町	117	149	111	50	60	37	430	400	333
江北町	81	79	71	36	31	28	438	388	394
白石町	340	382	349	133	137	103	391	359	295
太良町	2,106	2,665	2,714	899	1,077	1,109	427	404	409
佐賀県	44,547	63,794	62,355	19,955	26,477	23,951	448	415	384

VI-4 考察

本章では佐賀県全域の航空レーザ計測を用いて単木抽出を行い、単木ベースの資源量の把握を行った。また、2種類のスギ、ヒノキ分布情報を用いて、それぞれの森林資源情報をとりまとめて比較を行った。使用したスギ、ヒノキ分布図はレーザ林相図の林相区分と森林簿の樹種区分であり、両者には4割程度の面積の違いがあった。第III章のシステムティックサンプリングによる精度検証ではレーザ林相図の林相区分の自動分類精度は75%であり、レーザ林相図の林相区分のスギ、ヒノキの面積は一定の精度で推定されていることが示されている。また、一般的に立木密度はスギに比べて密にヒノキは管理されているため、スギとヒノキでは立木密度が異なることが想定できる。しかしながら、表VI-2の平均立木密度ではレーザ林相図の林相区分のスギで1,084本/ha、ヒノキで1,381本/haであり、両者には297本/haの違いがあるが、森林簿のスギで1,214本/ha、ヒノキで1,240本/haであり、その違いは26本/haとなっている。樹種の違いによる立木密度の違いが森林簿樹種ではほとんどないことから、スギ、ヒノキが正確に区分されていない可能性がある。また、森林簿のスギとヒノキの合計面積がレーザ林相図の林相区分のスギ、ヒノキの合計面積よりも大きいことから広葉樹がスギやヒノキに区分され、森林簿のスギ、ヒノキの樹種面積が過大になっている可能性があると考えられる。

地域森林計画書に記載されている森林簿のha材積とレーザ林相図の林相区分のha材積の比較では、地域森林計画の森林簿材積384 m³/haに対して、レーザ林相図の林相区分の材積は448 m³/haであり、その差は64 m³/haであった。表V-30で示した現地調査との検証結果ではレーザ解析の単木材積は現地調査結果よりも少なくなっていたことと上述した通り地域森林計画の材積が64 m³/ha少ないことを考慮すると、地域森林計画の森林簿材積

が過小に評価されている可能性がある。

レーザ林相図の林相区分によるスギ、ヒノキの合計立木本数は 52,283,693 本であり、森林簿の樹種区分では 73,851,130 本であった。このように広域の資源把握を単木ベースで行った事例はなく、従来のサンプル調査では得られない全数の調査結果が取得できることが大きな特徴と考えられる。また、サンプル調査では標準地の設置箇所によって誤差が生じ、十分なサンプルが取得できない場合は全体推定で大きな誤差になる可能性がある。これに対してレーザ解析による単木ベースの資源把握は全数調査であることから上記の誤差の影響なく広域の資源量を把握できる。また、サンプル調査に比べて調査の労力や時間が大幅に削減できることがもう一つの特徴と考えられる。

森林簿の材積は収穫予想表を基にしているが、収穫予想表を作成したときに比べて現在は高齢級の林分が多くなり、また、森林簿の材積の更新を繰り返すうちに実際の材積との乖離が大きくなってきたことが、森林簿の材積が過小に評価されている要因の一つと考えられる。航空レーザ解析により民有林全域の森林資源量が把握できたことから、森林簿の林齢と単木ベースの森林資源情報を利用して、新たに収穫予想表を作成することが可能になり、森林資源量情報の更新や予測に有効な情報になると考えられる。そして、正確に森林資源量情報を更新するためには地位の設定が重要となるが、航空レーザ計測により樹高だけでなく地形情報が得られることから、より詳細に地位の設定が可能になると考えられる。しかしながら、森林簿の林齢については伐採、植林後に林齢を 0 年に戻すなどの情報更新が十分ではないことがあり、林齢と樹高などの関係性を調べても高い相関が得られない可能性がある。このため、5 年後や 10 年後に 2 時期目の航空レーザ計測を実施して単木ベースの資源量把握を同様に行い、2 時期の差分から年間成長量を把握することが有効となる。林齢が不明であっても、地位や 1 時期目の樹高などの情報と年間成長量の関係性を、将来予測を行う対象林分に適用することで成長予測が可能になると考えられる。

本章では第Ⅲ～Ⅴ章で開発した手法を佐賀県全域の民有林に適用し、単木ベースの森林資源情報の把握を行った。そして、既存の森林簿樹種の面積が過大に評価されている可能性や地域森林計画で使用している材積量が過小に評価されている可能性を示した。また、これまで林小班単位での森林管理が一般的であったが、本章の検討から広域における単木情報に基づく森林管理が検討できるようになったと考えられる。この膨大な情報を活用し、収穫予想表を改定するなど樹木の生態的な特徴を明らかにし、森林簿の情報更新などに役立てていくことが今後の課題である。

第VII章

総合考察

VII-1 航空レーザ計測による単木資源情報の把握に関する考察

本研究を通して航空機レーザ計測データを使用して、スギ、ヒノキの分布把握、さらに単木ベースの森林資源情報（本数、樹高、胸高直径、材積）を取得する手法の検討を行い、現地調査の代替となる手法の開発を行った。これまでの森林調査は現地でのサンプル調査を基にして全域の資源量を推定する手法が一般的であったが、サンプル調査地点の箇所によっては林分の代表的な箇所となっておらず、推定結果の誤差要因となることがあった。また、サンプル調査の設計によっては必要となる林分の構成（林齢、立木密度、材積など）に対して十分なサンプル調査点数がなく、全体推定の誤差要因となることがあった。このように従来のサンプル調査には調査地点に関する課題があったが、本研究で示した手法は全数調査であることから、上記の課題を考慮する必要がないと考えられる。また、広域の森林を毎木調査する手法であり、新たな森林調査手法としての可能性を示したと考えられる。本章では各章で得られた結果と課題についてとりまとめ、他地域への展開を見据えた考察を行った。

VII-1-1 航空レーザ計測によるスギ・ヒノキ林の把握に関する考察

第 III 章では航空機レーザ計測で取得された樹冠高データと反射強度を基にレーザ林相図という空中写真に代わる樹種の識別に有効な画像の作成手法を開発した。レーザ林相図は空中写真では緑色系で表現される植生を青色から赤色まで豊かな色調で表現でき、また、空中写真では影になるような植生の識別困難箇所であってもアクティブセンサの利点を活かし、樹種識別が容易に行えるという特徴がある。さらに、空中写真では写真の倒れ込みがあり、樹冠の分布に関して位置精度が低くなるが、レーザ林相図はレーザ点群から作成されているため、樹冠の分布に高い位置精度を持ち、林相区分などの境界線の位置精度が高くなる。このような特徴からレーザ林相図は空中写真よりも自動分類に適した画像であり、オブジェクトベースの分類により 75%の精度でスギ、ヒノキ、広葉樹、その他（非森林）を分類することができた。また、既存の林相判読図に比べて Overall Accuracy で 10% 分類精度が高かった。空中写真を用いた林相判読ではヒノキ林を広葉樹としている事例が認められたが、空中写真では識別しにくい箇所であってもレーザ林相図ではヒノキ林と広葉樹林が異なる色調となっていることから空中写真判読よりも高い精度で分類できたと考えられる。しかしながら、スギ林に関してはケヤキや竹林の単層林と、ヒノキ林に関しては低木の 2 次林と、レーザ林相図の色調では同様な色合いになることがあり、色調のみの情報から分類することに限界があった。このため、樹冠の形状などテクスチャの情報を加味した分類手法について検討することが今後の課題である。また、分類精度を向上させる方法として空中写真の画像情報を加えた事例(Holmgren *et al.*, 2008)が報告されていることから、レーザ計測時に撮影された画像情報の活用について検討することも考えられる。

レーザー林相図に関して最も重要なことは植生の識別に有効な近赤外波長の反射強度情報を活用するという点であり、これまで反射強度の扱い方について研究事例が多くないことから、植生の区分に適したデータ作成について検討が必要である。対地高度の違いによる影響を受けて反射強度の値が変わる事例があることから、反射強度の補正が必要となる。Leica 社製の ALS シリーズは AGC により反射強度の補正が行われているが、更に反射強度を補正して分類精度を向上させた研究もある(Yan *et al.*, 2012)。また、Optec 社の反射強度は AGC がない機器もあることから、反射強度の補正が必要となる。本研究では AGC 機能のある Leica 社製のみを使用してレーザー林相図を作成したが、AGC 機能がないセンサの反射強度を活用してレーザー林相図を作成することが今後の課題である。また、Leica 社製や Optec 社製のセンサから照射されるレーザーの波長は 1,064nm であるが、RIEGL 社製など一部のセンサは 1,550nm の波長帯のレーザーを使用している。このため、樹種の識別に用いる反射強度の情報が波長により異なることが考えられ、レーザー林相図の色調にも違いが生じる可能性がある。さらに、色調が異なることで、樹種分類の結果に影響を与えることが考えられるため、1,550nm の波長のセンサを用いてレーザー林相図を作成し、樹種分類の精度について研究することも今後の課題となる。以上のような研究を通してレーザーセンサの種類に関わらずレーザー林相図の作成が可能になることで、従来の空中写真判読に比べて林相図作成が容易にできるようになると考えられる。

レーザー計測と同時に空中写真を撮影することが日本では一般的であるが、海外では空中写真を撮影しないことがあるため、反射強度から画像を作成して計測対象物の状況を把握することがある。ここでは反射強度画像により道路、建物、河川や植生などの識別を想定したものであったが、反射強度情報を用いた樹種分類の可能性は広がりつつあり、反射強度とレーザーの地盤到達率といった点群の高さ情報を組み合わせた分類が検討されている(朱 *et al.*, 2016)。また、多波長レーザーと呼ばれる 3 波長 (532nm、1,064nm、1,550nm) を持つセンサが開発されていることから、正規化植生指数 (NDVI) に近いような指標を用いた樹種分類についての研究が今後進んでいくことが考えられる。以上のように空中写真だけでなく、レーザーの反射強度を活用した樹種分類について研究を進め、資源量の分布を正確に把握するために、より効率的な樹種分類方法を検討していくことが期待される。

VII-1-2 航空レーザー計測による単木抽出・樹高計測に関する考察

第IV章ではまず、航空レーザー計測の密度により単木抽出ができる林分密度が変わることから、樹冠の凹凸形状とレーザー計測間隔からスギ、ヒノキ人工林で必要となる計測密度を検討した。等間隔に同じ樹冠の大きさの樹木が分布していると仮定した場合、レーザー計測密度を 1 点/m²にすると約 1,111 本/ha、4 点/m²にすると約 4,444 本/ha までの単木抽出が理論的に行えることを示した。また、4 点/m²のレーザー計測密度であっても 1.5m よりも小さい樹冠径の樹木は樹冠の凹凸が計測できず、単木抽出できない可能性があることを示した

が、3,000 本/ha が人工林の標準的な植栽本数であることから、4 点/m²のレーザ計測密度がコストパフォーマンスを考えた場合、単木抽出に適していると考えられる。

航空レーザ計測による単木抽出はこれまで樹冠高データを用いて、局所最大値フィルタを用いる手法をベースに行われ、樹高などのパラメータを組み合わせることで精度を向上させる研究が一般的であった。本研究においては抽出する手法を検討する前に、ベースとなる樹冠高データの作成方法を検討して、最大値フィルタと高精細フィルタによる2種類の樹冠高データを作成した。高精細フィルタでは簡易的に閾値を決めて、閾値以下の高さの林冠を透過したと考えられる林内からの反射パルスを除き、林冠部からの反射パルスを抽出した。さらに、これらの樹冠高データから樹冠長点と樹冠端部の高さに違いが小さい樹冠形状をより明瞭に表現できる情報として尾根谷度、樹冠形状指数を検討し、これらの情報を利用して新たな単木抽出手法である樹冠部抽出法を開発した。樹冠高データを基にして異なる樹冠形状と単木抽出法を組み合わせることで8通りの単木抽出を行い、精度検証を行った結果、樹冠形状指数と樹冠部抽出法の組み合わせにより高い精度で単木抽出が可能になった。単木抽出法に関して、局所最大値フィルタ法では樹冠サイズに応じたウィンドウサイズを設定することが課題であり、スギのような樹冠の形状が明瞭な場合には誤差は少ないが、ヒノキのように個々の樹冠の形状が不明瞭で樹冠中央と端部で高さの違いが小さい林分では誤抽出が多くなる傾向があった。一方で、樹冠部抽出法は始めに樹冠部を抽出することから、樹冠端部に生じる誤抽出や大きい樹冠から複数の樹頂点が抽出される過剰抽出を減らす効果があると考えられる。また、局所最大値フィルタ法ではウィンドウサイズ内に複数の樹頂点が存在する場合でも一つの樹頂点しか抽出されないが、樹冠部抽出法ではウィンドウサイズに関わらず、樹冠部を抽出できることから、ウィンドウサイズ内の複数の樹頂点を抽出することができた。これらの特徴から、本研究で提案した樹冠形状指数と樹冠部抽出法により、局所最大値フィルタ法に比べて、疎林では過剰抽出を、密林では過小抽出を減らすことで、抽出できる立木密度のデータレンジを広げ、0.04haの調査プロットで平均誤差率がスギで8.2%、ヒノキで12.7%、RMSEがスギで5.7本、ヒノキで9.9本であった。上記の検討から、航空レーザ計測の密度が同じ4点/m²であっても樹冠高データのフィルタリングを含む作成方法、樹冠形状表現方法や単木抽出方法を検討することで単木抽出の精度が向上することが明らかになった。このことから、本研究ではデータの作成方法や抽出手法の検討により精度向上が可能であることを示したことに意義があり、更なる検討を進めることが今後の課題である。

単木抽出により1割程度の誤差で毎木調査が実施できることを示したが、航空レーザ計測は林冠表層面の形状を捉えていることから、単木抽出の結果は林冠を形成する上層木のみを抽出していると考えられる。このため、上層を形成していない亜高木層や低木層の樹木の抽出ができないという課題がある。本研究では全木本数を対象に精度検証を行った場合、上層木のみを対象にした検証に比べて、スギ、ヒノキともに平均誤差率が2%程度低下した。過密な林分ほど上層を形成しない樹木の本数が増えることが考えられる

ため、収量比数や相対幹距比などを参考に全木本数を推定する手法を検討することも今後の課題である。

樹高計測について、樹冠高データ、樹冠形状表現、単木抽出方法に関わらず、ほぼ同様の樹高計測結果となった。平均誤差率はスギで 5.3~5.5%、ヒノキで 5.8~6.6%、RMSE はスギで 1.3~1.4m、ヒノキで 1.1~1.2m であった。ヒノキが現地調査結果と比べて平均樹高が 0.5m ほど低く計測されたが、スギの平均樹高は現地とほぼ同じであった。このことから、樹高については手法によらず、航空レーザ計測により高い精度で計測できると考えられる。

樹高計測についてはこれまでの研究事例から過小になる傾向があるが、樹高が過小計測となる原因としては以下のことが考えられる。

- ① 反射パルスのフットプリントサイズ
- ② 樹冠表層高データの作成アルゴリズム
- ③ 林床植生の繁茂状況
- ④ 地盤からの反射パルスの密度、地盤高データ作成アルゴリズムと傾斜

航空レーザ計測では、反射パルスのフットプリントは地表面では約 30cm 程度の直径になることが一般的であり、フットプリントは一定の面積の物体に反射して、反射位置を記録するため、仮に樹頂点にフットプリントが当たったとしても、反射物体としては樹頂点の先端は面積が小さいことから、樹頂点の先端で反射せず、先端から低い箇所でも反射すると考えられ、計測される樹高が低くなる可能性が高い。また、計測高度が異なることでフットプリントのサイズが変わるが、この影響を調べた研究(Næsset, 2004a; Goodwin *et al.*, 2006; Keränen *et al.*, 2016) から、フットプリントが約 60cm までについては樹高の計測精度に大きな違いがないことが報告されている。国内では高高度でレーザ計測する事例はほとんどなく、フットプリントが 60cm まで大きくなることはないことから、飛行高度による樹高計測の影響は小さいと考えられる。

樹冠表層高データはランダムな位置で反射したパルスを基に TIN (Triangular Irregular Network) によりデータを補完し、格子点の座標と高さで構成されるデータである。格子点と樹頂点が近く、格子点の座標に近い箇所でも反射したフットプリントが存在する場合は、樹高の計測精度は高くなる。しかし、格子点と樹頂点が近くても、格子点周囲にフットプリントがない場合は、樹頂点よりも離れた箇所でも反射した複数のフットプリントを基に補完した高さデータが樹高となり、樹高の計測精度が低くなる可能性がある。また、格子点付近に樹頂点がなく、樹頂点にフットプリントがある場合も、周囲の格子点の高さを基に樹高が計測されるために、樹高の計測精度が低くなると考えられる。

林床植生がうっ閉し、かつ林床植生が高い箇所(例えば、北海道のササなど)では樹冠を透過したレーザは林床植生の表層で反射する。このため、地盤高を正確に取得することができず、林床植生の表層が地盤面として扱われ、林床植生の高さ分だけ樹高が低くなる。

うっ閉した森林では林床に到達するレーザは照射パルスの 1 割以下であり(大野 *et al.*, 2015)、間伐後のスギ林でも 3 割弱(平田, 2005)であることから、反射パルスの間隔が広くなる。地盤高データについても樹冠表層高データと同じように TIN による補完で作成されるため、地盤からの反射パルスが近傍になく補完した箇所に格子点が存在する場合は実際の地盤高と差異が生じる可能性があり、樹冠表層高データと地盤高データの差分計算したときに樹高の計測誤差となることが考えられる。また、航空レーザ計測の樹高は樹頂点位置とその直下の地盤との差分で計算されることから、斜面地で樹木が山側に傾いていると樹高は低くなる。

一方で、樹高が過大になる場合もある。斜面地で樹木が谷側に傾いていると樹高は実際よりも高く計測される。さらに、Khosravipour *et al.*によると樹木が谷側に倒れ込み、水平に広がる大きな樹冠の場合、傾斜により水平方向、鉛直方向ともに最大約 1.8m の差異が生じることが報告されている(Khosravipour *et al.*, 2015)。谷部に分布する樹木の場合、傾斜や浸食などで樹木根元に比べて地盤が低くなっていることがあり、樹木が傾き、樹頂点位置が樹木根元に比べて地盤の低い箇所に抽出された場合は数 m 以上過大に樹高が計測されることがあるため、レーザ計測の樹高を扱う場合、微地形表現地図など地形情報を確認しながら利用することが重要である。

VII-1-3 航空レーザ計測による胸高直径・材積の推定に関する考察

森林管理や林業で行っている現地調査の代替としてリモートセンシングを利用するためには、最終的には材積の把握が必要であり、そのためには樹高だけでなく胸高直径の把握も必要となる。航空レーザ計測が行われる前は空中写真を活用した胸高直径の推定が行われてきたが、空中写真から樹冠サイズを計測する必要があり、オペレーターによる目視作業であったため多くの労力を必要としていた。一方で、航空レーザ計測では機械的に樹冠面積を把握することができるため、効率的に胸高直径の推定が可能となった。また、写真では倒れ込みなどで正確に樹冠のサイズを計測することが困難な場合があるが、レーザ計測では高い位置精度の情報であることから正確に樹冠のサイズを把握することができる。このような特徴を活かし、レーザ解析から得られた樹冠投影面積、樹冠表面積、樹冠体積、樹冠長、樹冠長率、樹高の 6 つの説明変数から 1~3 つの変数を組み合わせて、10 通りの胸高直径推定の回帰式の検討を行った。その結果、スギで樹冠投影面積、樹冠長率、樹高を用いた回帰式で RMSE が 2.40cm、ヒノキで樹冠投影面積、樹高を用いた回帰式で RMSE が 2.43cm であった。佐賀県という広域な範囲であっても航空レーザ計測の解析結果から得られる 2~3 種類の情報から一つの回帰式を作成して、スギ、ヒノキともに 3cm 以下の RMSE で胸高直径が推定できたことが大きな成果である。北海道から九州までのスギ、ヒノキ、カラマツ、アカマツについて同様に回帰式の検討を行った事例(大野, 2016)では、樹冠投影面積と樹高を説明変数に用いることで、RMSE が 3cm 以下になることが報告され

ている。森林航測では空中写真から平均樹冠直径や平均樹高を基に材積を算出する回帰式を整備(今永, 1968)していたこともあり、全国的に同様の検討事例を増やし、地域に応じてリモートセンシング技術を活用した胸高直径推定の回帰式を整備することで、回帰式作成のために行っている現地調査が不要になり、効率的に単木ベースの解析が実施できるようになると考えられる。このような胸高直径推定の回帰式の整備は航空レーザ計測だけでなく、近年研究が進んでいる UAV 写真を使用した SfM 解析による樹冠高データにも役立つものと考えられる。特に、UAV 写真は撮影範囲が広くないことから、多様な林分が含まれず、撮影範囲内の林分だけで作成した回帰式の汎用性は高くないため、本研究のように広域に回帰式を整備することが重要になると考えられる。

本研究では胸高直径推定の回帰式の作成にあたり、200 点を超える現地調査箇所を対象として、全ての立木位置図を作成することが困難であったことから、現地調査の平均胸高直径と航空レーザ計測の平均樹冠投影面積などプロットの平均値を用いた。このため、回帰式の作成に使われる平均胸高直径のデータレンジが小さくなり、データレンジから外れる小さい径や大きい径の胸高直径の推定精度が低下すると考えられる。そこで、回帰式の精度を向上させるために、地上レーザ計測を活用して立木位置図を作成して、平均値ではなく単木レベルの回帰式を作成することが考えられる。この手法により一箇所当たりの調査で数十～百数十点の樹木情報が得られることから、本研究で示したような 100 点を超えるような現地調査地点がなくとも回帰式が精度良く作成できる可能性がある。しかしながら、この場合、対象地の林分の林齢、立木密度、胸高直径の構成を網羅する調査地点数の検討が必要となる。さらに、地上レーザ計測は相対的な樹木の配置は正確に把握できるものの、GNSS の精度の問題で絶対的な位置精度は高くなく、航空レーザ計測の単木抽出結果との対応を取ることが難しい。また、地上レーザ計測では根元の位置を抽出するが、航空レーザ計測では樹頂点の位置を抽出するため、配置が一致しないことが考えられる。上記のように課題があるものの、胸高直径の推定の精度を向上させるために単木レベルでの回帰式の検討が今後の課題と考える。

第 V 章で作成した胸高直径推定の回帰式に使われる樹冠投影面積は DCHM によって決まり、林冠の凹凸形状の表現が最大値 DCHM と高精細 DCHM では異なることから、使用する DCHM によって異なる樹冠サイズになることが考えられる。単木抽出精度を高めるためだけでなく、胸高直径を高い精度で推定するためにも樹冠表層を正確に再現する手法が重要になる。また、本研究では 0.5m 間隔の格子データであり、樹冠投影面積の最小単位は 0.25 m²であるが、例えば計測密度を上げ、0.1m 間隔の格子データであれば、最小単位は 0.01 m²となり、解像度が向上して胸高直径の推定精度が向上する可能性があるため、胸高直径推定に適した格子間隔について検討することが今後の課題となる。

単木材積の推定は現地調査と同じように材積式を用いて行い、単木抽出結果の樹高と最も推定結果が良かった胸高直径の値を適用した。その結果、スギで平均誤差率 14.4%、RMSE0.1 m³、ヒノキで平均誤差率 18.9%、RMSE0.1 m³であった。単木材積は調査地点の

合計本数で除算していることから、樹高や胸高直径の精度だけでなく、現地調査本数の精度も影響し、これらの3つの要素の誤差が累積する形で平均誤差率がそれぞれの平均誤差率に比べて大きくなったと考えられる。本研究では材積式を用いて材積を計算したが、材積の推定精度を向上させるために、胸高直径の推定と同様に、樹冠投影面積や樹高などを用いて材積を直接推定する手法が考えられる。材積式を使う方法では、樹高は胸高直径の推定と材積式にそれぞれ使われ、材積算出までに2回使用することになるが、直接材積を推定する手法では樹高は1回の使用となり、樹高誤差の累積による精度低下を少なくできる。

航空レーザ計測による単木抽出は上空から取得した情報を基に行うことから、被圧木や低木などを識別することは困難であり、上層木の本数の抽出となる。このため、過密な林分になるほど本数の誤差が大きくなる傾向があり、この本数の誤差が材積の誤差につながるもの考えられる。航空レーザ計測による単木抽出では上記のように被圧木などが抽出できず、材積は過少になる傾向があると言える。但し、被圧木や低木の材積は上層木の材積に比べると小さいことから、材積の算出にあたり樹高計測や胸高直径の推定に起因する誤差に比べて、大きな誤差につながることはないと考えられる。

以上のように、精度向上に向けた課題を明らかにしつつ、航空レーザ計測による単木レベルでの森林調査手法を開発することができた。また、佐賀県全域を対象として樹木本数、樹高、胸高直径は1割程度、材積で2割以下の誤差で単木レベルの資源量の把握ができたことから、サンプル調査で全体を推定していた従来の現地調査の代替として活用できる可能性があり、今後様々な樹種や地域を対象に航空レーザ計測の解析事例を増やしていくことが重要と考える。

VII-2 航空レーザ計測による単木資源情報の把握の結論と今後の展望

本研究は近年利活用が進む航空レーザ計測を用いて、資源の利用循環を検討するスギ、ヒノキ人工林の分布範囲を明らかにするため、樹種の識別をより容易に行うことができるレーザ林相図の開発およびレーザ林相図による自動分類の優位性を明らかにした。また、現地調査の代替として利用できる森林資源情報を取得することを目的として、広域に分布するスギ、ヒノキ林への単木解析の適用性を明らかにした。重要な点として、これまで航空レーザ計測は等高線図や微地形表現地図の作成など地形情報の取得が大きな目的であったが、本研究を通して樹冠高データの作成方法や反射強度の活用など新たな視点から計測データの活用方法を提示し、これらの情報を活用した森林資源把握の方法を示すことができたと考える。また、森林航測では標準地調査などサンプル調査が一般的であったが、本研究により全数調査が可能となり、森林調査の新たな手法の一つになる可能性につながると考えられる。さらに、全数の単木情報が取得できることから、小班などのポリゴン単位での森林資源管理から、単木情報によるポイント単位での森林管理が可能になると考えら

れる。

国内に分布している約 1,000 万 ha の人工林は主伐期を迎え、その森林資源は充実している一方で、木材自給率は 40%以下であることから、充実した資源を有効活用した森林資源の循環利用が求められている。そして、林業の成長産業化のために森林経営管理の集約化などを進める「新たな森林管理システム」の構築が始まっている。新たな森林管理システムでは林業経営に適した森林を意欲と能力のある林業経営者に任せ、一方で、林業経営が成り立たない森林については複層林化や広葉樹林化を行い、国土保全や水源涵養などの公益的機能の効果を高めることが検討されている。人工林の約 2/3 は林業経営に適した森林として区分する必要があるが、航空レーザ計測を用いた森林調査により広域の全数調査が行えることから、地形情報と組み合わせる客観的な評価が行え、効率的に林業経営に適した森林を選択できるものと考えられる。また、山村部（林地）の地籍調査の進捗率は 45%程度であり、集約化を検討する上で、所有境界の明確化が重要な課題となっている。この問題に対して国交省では現地の立ち会いによる一筆地調査の代わりに、集会所などで筆界案を確認し、地積測定を行う新たな地籍調査の取組を進め、「リモートセンシング技術を用いた山村部地籍調査マニュアル」を作成した。このマニュアルでは航空レーザ計測のデータを活用し、さらに、レーザ計測の反射強度データを活用した林相図についても使用できることが記載されていることから、今後本研究の手法が役立つものと考えられる。

森林所有者やその境界を管理する情報として林地台帳や林地台帳地図の整備が進められている。航空レーザ計測による単木情報と林地台帳地図などを活用して地権者毎の資源量の把握が容易にできることから、所有者の森林施策に対する意向の判断材量が増え、集約化の促進が期待される。すでに航空レーザ計測データを利用している森林組合があり(農林中央金庫, 2016)、実利用を通じて単木情報を活用した森林管理の可能性を検討していくことが今後非常に重要である。

航空レーザ計測で整備された情報は森林経営管理だけでなく、ICT や IoT 技術を活用したオフィスと現地作業との情報連携による効率化での利用が検討されている。タブレットアプリケーションソフトを利用して、オフィスの GIS で確認した情報や航空レーザ計測の情報を現地でも閲覧できるようになってきた。このときに利用者の位置の表示はタブレット端末の GNSS 受信機能を利用しており、衛星の信号が樹冠に遮られる林内では位置を正確に計測することが難しい。このため、位置精度は 5~10m 程度となり、現在の位置とは異なる位置がタブレット上に表示される可能性がある。例えば、単木情報や林地台帳地図を表示させていても、画面上に表示された対象の位置を正確に把握することが難しい場合が生じる。日本独自の測位衛星として「みちびき」が打ち上がり、将来的には cm 級の位置精度で測位できることが期待されているが、「みちびき」により林内でも高い測位精度となれば、航空レーザ計測データなどの GIS データと GNSS を活用したナビゲーションによる施策の効率化が促進されると考えられる。

航空レーザ計測は数千~数万 ha のような広域の情報取得に有効であり、本研究では佐

賀県全域という広域に適用できる手法を検討した。また、新たな森林管理システムの構築ではサプライチェーンの再構築にあたり、川上の情報の整備に航空レーザ計測の活用でき、現地調査の負担軽減が検討されている。このため、実務レベルでの航空レーザ計測が進められることが考えられるが、航空レーザ計測データを県レベルの広域で取得した事例は佐賀県の他、長野県と岐阜県のみであり、計測方法と効率的な利用方法についての検討が必要となる。広域に計測する場合、計測コース数が多くなることから、計測期間が長くなる。日本の南部であれば、常緑針葉樹のスギやヒノキが対象になるので、計測時期が秋や冬でも着葉しているため、樹冠高データの作成に問題はないが、中部から以北では落葉針葉樹のカラマツが分布域を広げるため、紅葉による反射強度情報の変化や落葉による樹冠高データの精度低下につながる。このため、他地域に展開する場合は計測時期を考慮する必要がある。特に東北や北海道、標高の高い地域ではカラマツの展葉が5月であり、紅葉が10月中旬であることから、5ヶ月程度が計測に適した時期と言える。しかし、この5ヶ月の間には梅雨や台風の襲来があることから、計測機会は多くなく、数十万 ha を対象にする場合には複数のレーザ計測機器を調達することが求められる。

リモートセンシング技術を森林経営管理に活用して行く上で重要なことは今後の情報の更新である。これまでは空中写真が定期的に撮影され、GISの背景情報として活用されることがあったが、今後レーザ計測を一般的な技術として利用していく上で、森林経営管理に対する位置付けを明らかにしていくことが必要である。そして、5年後、10年後に繰り返しレーザ計測し、効率的に情報を更新するためには、最初に計測した情報を有効に活用できる技術が求められる。林相区分や地形情報の整備では全域を対象に情報を更新するのではなく、変化抽出により該当箇所のみでの最低限の情報更新にしてコストを抑えることが重要になると考えられる。また、単木情報の整備では地域毎、樹種毎に胸高直径推定の回帰式を整備し、現地調査を不要にすることが効率化につながる。一方、航空レーザ計測では高頻度の計測実施は費用面で困難であることから、間伐や皆伐箇所のモニタリングに UAV を活用することが考えられる。UAV は現在、その飛行時間の制約から数百 ha 程度が適用範囲の限界であるが、対象地を高頻度に計測や撮影することができるという特徴がある。また、航空機に比べて低高度で飛行することから、高精細な情報を取得することができ、航空レーザでは識別できない情報を取得できる可能性がある。近年、様々なリモートセンシング技術が利用されるようになってきたことから、管理する森林の施業頻度などに合わせて、森林情報の更新方法を検討していくことが必要であると考えられる。

リモートセンシング技術を多時期の情報として扱う場合は時系列情報として、それぞれの情報を比較することが求められるが、同時期に情報を取得して情報を高度化することも検討されている。例えば、航空レーザ計測と地上レーザ計測の情報を統合するような研究が考えられている。航空レーザ計測では取得できない詳細な林内情報が地上レーザから取得できる一方で、地上レーザでは計測が不十分となる上空からの情報を組み合わせ、より精緻な3次元情報と森林資源情報の取得を行うことが可能となる。このように、複数の

センサにより取得された情報を統合し、新たな情報の取得につなげることが今後の課題になると考えられる。

本研究では航空レーザ計測により森林調査の代替となる手法について検討した結果をまとめてきたが、生産人口が減少する日本では資源把握、経営計画などの森林計画の策定から森林施業の効率化など林業での幅広い活用も含め、リモートセンシング技術の活用が重要な課題になっていくと考えられる。そして、様々なリモートセンシング技術を活用した空間的な広がりだけでなく、時間的な広がりも考慮した統合的な技術体系の構築が明るい日本の森林経営管理と林業の国際化に向けた今後取り組むべき重要な課題と考えられる。

謝辭

博士課程に進むことを決めた当時は（現在もだが）英語が得意でなかったために、入学試験結果をハラハラ緊張し、インターネットで確認したことを今でも鮮明に思い出せる。そこから私の社会人博士課程が始まった。長いようであつという間に過ぎたこの間、投稿論文など遅々として進まず、最後の最後まで時間を要していた私の研究を温かい目で見守ってくださり、卒業に向けて進捗を気に掛けてくださった主査の露木聡教授に深い感謝を申し上げる。

学生生活を始めたばかりの頃、大学のことを何も分からない私に色々と教えてくれた社会人博士課程の同級生の高橋健太郎さんに感謝申し上げる。一緒に社会人博士を目指す仲間がいたことは私にとって大きな励みになった。また、ゼミでは現森林経理学研究室の中島助教、現マレーシアサバ大学の伊尾木慶子博士、ルスタムさん、アリさん、青柳さん、星元さんと色々と議論できたことも論文執筆に役立つ思い出の時間となった。

また、教育研究センター/森林流域管理学研究室の三浦直子助教には、同じ測量会社で勤めた経験があることから、空間情報を活用した論文の作成について知見をいただき、博士取得についての経験を教えていただき、また励ましの言葉もいただいたことに感謝を申し上げる。

鹿児島大学の寺岡行雄博士、加治佐剛博士には博士論文について助言していただき、また、論文作成を応援いただいた。ここに記し感謝を申し上げる。

林業先進国のレーザセンシング技術を学ぶため情報交換をさせてもらったスウェーデン農科大学の Håkan Olsson 教授にはスウェーデンでも日本でも会う機会があり、博士課程の進捗を気に掛けていただいた。また、Johan Holmgren 博士には航空レーザ計測による北欧での研究事例を共有してもらい、本研究の方向性を決める上で参考になった。ここに記し感謝を申し上げる。

社会人博士であったことから、職場の理解も必要であった。博士課程に進むことを相談したときに反対せずに背中を押してくださった斉藤和也さん、沼田洋一さんに感謝申し上げたい。斉藤さんの退職前に博士を取得し、報告できなかつたのが心残りである。また、磯部孝雄さん、大西満信さん、矢部三雄さんには社内で何度も励ましの言葉をいただき、応援していただいた。博士取得を心待ちにしてくださる方々がいることが励みになり、仕事との両立を自分なりにできたと思う。皆さんに感謝を伝えたい。

最後に、研究のために家族と過ごす時間が少なくなりましたが、このことに関して理解を示してくれただけでなく、博士取得をいつも応援し、励ましてくれた家族に感謝したい。

なお、本研究は佐賀県の「佐賀東部地区航空レーザ測量業務委託」、「佐賀西部地区航空レーザ測量業務委託」、「佐賀県森林情報解析業務委託」で得られた計測データや現地調査結果を使用している。上記業務のデータだけでなく、森林簿情報についても借用の手続きを対応してくださった佐賀県農林水産部林業課の吉良孝広さんに感謝申し上げる。

図表リスト

図リスト

第II章

- 図 II-1 日本国における佐賀県の位置（赤色で表示された箇所）
- 図 II-2 東部地区航空レーザ計測コース図
- 図 II-3 西部地区航空レーザ計測コース図（低高度ブロック）
- 図 II-4 西部地区航空レーザ計測コース図（高高度ブロック 1）
- 図 II-5 西部地区航空レーザ計測コース図（高高度ブロック 2、補完計測）
- 図 II-6 最大値 DCHM（左図）と高精細 DCHM（右図）の比較
- 図 II-7 現地調査箇所位置図
- 図 II-8 地質区分図
（出典：佐賀の自然をたずねて（佐賀県高等学校教育研究会理科部会））
- 図 II-9 花崗岩地帯の樹高曲線
- 図 II-10 堆積岩地帯の樹高曲線
- 図 II-11 火山岩地帯の樹高曲線

第III章

- 図 III-1 反射強度データの分布
- 図 III-2 レーザ林相図の構成要素①（DCHM 画像）
- 図 III-3 レーザ林相図の構成要素②（地上開度画像）
- 図 III-4 レーザ林相図の構成要素③（反射強度画像）
- 図 III-5 地上開度の概念図
- 図 III-6 検索範囲の違いによる地上開度の比較
- 図 III-7 レーザ林相図作成と林相区分解析のフロー
- 図 III-8 空中写真とレーザ林相図の比較
- 図 III-9 研究対象地の空中写真（右下は一部を拡大）
- 図 III-10 分類に用いたレーザ林相図
- 図 III-11 レーザ林相図の林相区分結果
- 図 III-12 既存植生図の林相
- 図 III-13 Lab カラーの色彩空間（L：地上開度、a：反射強度、b：DCHM）

第IV章

- 図 IV-1 樹冠形状と DCHM の位置の関係 1（一つの樹冠に 2 点の DCHM の場合）
- 図 IV-2 樹冠形状と DCHM の位置の関係 2（一つの樹冠に 3 点の DCHM の場合）
- 図 IV-3 一つの樹冠に断面上 3 点のレーザ計測密度の場合の樹頂点の分布例
- 図 IV-4 使用したデータの作成方法と単木抽出、樹高計測のフロー

- 図 IV-5 尾根谷度の計算方法模式図
- 図 IV-6 地上・地下開度の書き換え条件
- 図 IV-7 樹冠部抽出法で用いる樹冠部と樹冠領域の関係
- 図 IV-8 正規分布の頻度分布
- 図 IV-9 最大値 DCHM と最大値 DCHM を用いた尾根谷度・樹冠形状指数
- 図 IV-10 高精細 DCHM と高精細 DCHM を用いた尾根谷度・樹冠形状指数
- 図 IV-11 高精細 DCHM のヒストグラム例
- 図 IV-12 尾根谷度のヒストグラム例
- 図 IV-13 樹冠形状指数のヒストグラム例
- 図 IV-14 樹冠部抽出結果（疎林、最大値 DCHM 左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数）
- 図 IV-15 樹冠部抽出結果（疎林、高精細 DCHM 左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数）
- 図 IV-16 樹冠部抽出結果（密林、最大値 DCHM 左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数）
- 図 IV-17 樹冠部抽出結果（密林、高精細 DCHM 左図：尾根谷度、右図：樹冠形状指数）
- 図 IV-18 樹頂点抽出結果（ヒノキ疎林、局所最大値フィルタ法）
- 図 IV-19 樹頂点抽出結果（ヒノキ疎林、樹冠部抽出法）
- 図 IV-20 樹頂点抽出結果（ヒノキ疎林、局所最大値フィルタ法）
- 図 IV-21 樹頂点抽出結果（ヒノキ疎林、樹冠部抽出法）
- 図 IV-22 樹頂点抽出結果（スギ密林、局所最大値フィルタ法）
- 図 IV-23 樹頂点抽出結果（スギ密林、樹冠部抽出法）
- 図 IV-24 樹頂点抽出結果（スギ密林、局所最大値フィルタ法）
- 図 IV-25 樹頂点抽出結果（スギ密林、樹冠部抽出法）
- 図 IV-26 単木抽出結果（スギ、最大値 DCHM（n：129プロット））
- 図 IV-27 単木抽出結果（スギ、高精細 DCHM（n：129プロット））
- 図 IV-28 単木抽出結果（ヒノキ、最大値 DCHM（n：126プロット））
- 図 IV-29 単木抽出結果（ヒノキ、高精細 DCHM（n：126プロット））
- 図 IV-30 樹高計測結果（スギ（n：129プロット））
- 図 IV-31 樹高計測結果（ヒノキ（n：126プロット））
- 図 IV-32 樹冠形状の断面例

第V章

- 図 V-1 データの作成方法と胸高直径・単木材積の推定フロー
- 図 V-2 Watershed アルゴリズムによる樹冠領域分割結果の例
- 図 V-3 単木樹冠長の抽出事例
- 図 V-4 樹冠表面積の計算方法
- 図 V-5 平均係数回帰式の胸高直径算出結果
- 図 V-6 現地調査とレーザ解析の DBH 分布

- 図 V-7 現地調査とレーザ解析の DBH 分布
- 図 V-8 平均係数回帰式による単木材積計算結果

第VI章

- 図 VI-1 立木密度分布図
- 図 VI-2 平均樹高分布図
- 図 VI-3 平均胸高直径分布図
- 図 VI-4 材積分布図

表リスト

第Ⅱ章

表 II-1 現地調査プロット情報一覧

第Ⅲ章

表 III-1 レーザ林相図の林相区分精度

表 III-2 既存植生図の林相区分精度

表 III-3 既存植生図とレーザ林相図の林相区分結果の面積比較

第Ⅳ章

表 IV-1 樹冠部抽出法の樹冠部サイズ

表 IV-2 単木抽出を行った樹冠情報と単木抽出手法の関係

表 IV-3 ヒノキ疎林とスギ密林の単木抽出結果

表 IV-4 単木抽出結果集計（スギ、最大値 DCHM、全木本数）

表 IV-5 単木抽出結果集計（スギ、高精細 DCHM、全木本数）

表 IV-6 単木抽出結果集計（スギ、最大値 DCHM、上層木）

表 IV-7 単木抽出結果集計（スギ、高精細 DCHM、上層木）

表 IV-8 単木抽出結果集計（ヒノキ、最大値 DCHM、全木本数）

表 IV-9 単木抽出結果集計（ヒノキ、高精細 DCHM、全木本数）

表 IV-10 単木抽出結果集計（ヒノキ、最大値 DCHM、上層木）

表 IV-11 単木抽出結果集計（ヒノキ、高精細 DCHM、上層木）

表 IV-12 樹高計測結果集計（スギ、最大値 DCHM）

表 IV-13 樹高計測結果集計（スギ、高精細 DCHM）

表 IV-14 樹高計測結果集計（ヒノキ、最大値 DCHM）

表 IV-15 樹高計測結果集計（ヒノキ、高精細 DCHM）

第Ⅴ章

表 V-1 10 分割現地調査

表 V-2 回帰式の検討に用いた説明変数の組み合わせ

表 V-3 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 1 を除く）

表 V-4 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 2 を除く）

表 V-5 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 3 を除く）

表 V-6 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 4 を除く）

表 V-7 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 5 を除く）

表 V-8 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 6 を除く）

- 表 V-9 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 7 を除く）
- 表 V-10 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 8 を除く）
- 表 V-11 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 9 を除く）
- 表 V-12 胸高直径推定のための回帰分析結果（スギ、分割 10 を除く）
- 表 V-13 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 1 を除く）
- 表 V-14 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 2 を除く）
- 表 V-15 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 3 を除く）
- 表 V-16 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 4 を除く）
- 表 V-17 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 5 を除く）
- 表 V-18 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 6 を除く）
- 表 V-19 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 7 を除く）
- 表 V-20 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 8 を除く）
- 表 V-21 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 9 を除く）
- 表 V-22 胸高直径推定のための回帰分析結果（ヒノキ、分割 10 を除く）
- 表 V-23 胸高直径推定のための回帰分析結果まとめ（スギ）
- 表 V-24 胸高直径推定のための回帰分析結果まとめ（ヒノキ）
- 表 V-25 胸高直径、10 分割交差検証一覧表（スギ）
- 表 V-26 胸高直径、10 分割交差検証一覧表（ヒノキ）
- 表 V-27 平均係数回帰式（式 V-7、V-8）を用いて算出した胸高直径
- 表 V-28 単木材積、10 分割交差検証一覧表（スギ）
- 表 V-29 単木材積、10 分割交差検証一覧表（ヒノキ）
- 表 V-30 平均係数回帰式（式 V-7、V-8）の胸高直径から算出した単木材積

第VI章

- 表 VI-1 広域資源把握に使用したデータ
- 表 VI-2 林相区分と森林簿樹種による森林資源量の比較
- 表 VI-3 航空レーザ計測の解析結果と地域森林計画の森林資源比較

引用文献

- Antonarakis AS, Richards Keith S, Brasington James, (2008). Object-based land cover classification using airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 112(6): 2988-2998.
- Bechtold William A, (2004). Largest-crown-width prediction models for 53 species in the western United States. *Western Journal of Applied Forestry*, 19(4): 245-251.
- Bendjanec Martina, (2011). Calibration of ALS Intensity Data, Master's of Science Thesis in Geodesy. School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology.
- Bortolot Z. J., Wynne R. H., (2005). Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(6): 342-360.
- Brandtberg Tomas, Warner Timothy A., Landenberger Rick E., McGraw James B., (2003). Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 290-303.
- Cao Lin, Coops Nicholas C., Innes John L., Dai Jinsong, Ruan Honghua, She Guanghui, (2016). Tree species classification in subtropical forests using small-footprint full-waveform LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 49: 39-51.
- Donoghue Daniel N. M., Watt Peter J., Cox Nicholas J., Wilson Jimmy, (2007). Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 110(4): 509-522.
- Gatziolis Demetrios, (2011). Dynamic range-based intensity normalization for airborne, discrete return lidar data of forest canopies. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77(3): 251-259.
- Goodwin Nicholas R., Coops Nicholas C., Culvenor Darius S., (2006). Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sensing of Environment*, 103(2): 140-152.
- Gougeon François A., (1995). A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21(3): 274-284.
- Höfle Bernhard, Pfeifer Norbert, (2007). Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(6): 415-433.
- Hall RJ, Morton RT, Nesby RN, (1989). A comparison of existing models for DBH

- estimation from large-scale photos. *The Forestry Chronicle*, 65(2): 114-120.
- Hall S A., (2005). Estimating stand structure using discrete-return lidar : an example from low density, fire prone ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management*, 208(1): 189-209.
- Hay Geoffrey J., Castilla Guillermo, Wulder Michael A., Ruiz Jose R., (2005). An automated object-based approach for the multiscale image segmentation of forest scenes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(4): 339-359.
- Haywood Andrew, Stone Christine, (2011). Using airborne laser scanning data to estimate structural attributes of natural eucalypt regrowth forests. *Australian Forestry*, 74(1): 4-12.
- Hemery G. E., Savill P. S., Pryor S. N., (2005). Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. *Forest Ecology and Management*, 215(1–3): 285-294.
- Heurich M, Persson A, Holmgren J, Kennel E, (2004). Detecting and measuring individual trees with laser scanning in mixed mountain forest of central Europe using an algorithm developed for Swedish boreal forest conditions. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36: 307-312.
- Hollaus M., (2006). Large scale applications of airborne laser scanning for a complex mountaineous environment, Dr. Ing. thesis. Vienna University of Technology, pp. 111.
- Hollaus M., Dorigo W., Wagner W., Schadauer K., Höfle B., Maier B., (2009). Operational wide-area stem volume estimation based on airborne laser scanning and national forest inventory data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(19): 5159-5175.
- Holmgren J, Persson Å, Söderman U, (2008). Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi - spectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1537-1552.
- Holmgren J., (2004). Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6): 543-553.
- Holmgren Johan, Persson Åsa, (2004). Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90(4): 415-423.
- Hyyppä J., (2001). A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-d tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 969-975.
- Hyyppä J., Hyyppä H., Leckie D., Gougeon F., Yu X., Maltamo M., (2008). Review of

- methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1339-1366.
- Hyyppä Juha, Inkinen Mikko, (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The photogrammetric journal of Finland*, 16(2): 27-42.
- Hyyppä Juha, Mielonen Teemu, Hyyppä Hannu, Maltamo Matti, Yu Xiaowei, Honkavaara Eija, Kaartinen Harri, (2005). Using individual tree crown approach for forest volume extraction with aerial images and laser point clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3): W19.
- Ioki Keiko, Imanishi Junichi, Sasaki Takeshi, Morimoto Yukihiro, Kitada Katsunori, (2010). Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. *Landscape and Ecological Engineering*, 6(1): 29-36.
- IPCC, (2014). *IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014: Synthesis Report*. 88 pp.
- Justice Chris, Townshend John, (1982). A comparison of unsupervised classification procedures on Landsat MSS data for an area of complex surface conditions in Basilicata, Southern Italy. *Remote Sensing of Environment*, 12(5): 407-420.
- Kaasalainen S, Hyyppä J, Litkey P, Hyyppä H, Ahokas E, Kukko A, Kaartinen H, (2007). Radiometric calibration of ALS intensity. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens*, 36: 201-205.
- Kaasalainen Sanna, Pyysalo Ulla, Krooks Anssi, Vain Ants, Kukko Antero, Hyyppä Juha, Kaasalainen Mikko, (2011). Absolute radiometric calibration of ALS intensity data: Effects on accuracy and target classification. *Sensors*, 11(11): 10586-10602.
- Keränen Juha, Maltamo Matti, Packalen Petteri, (2016). Effect of flying altitude, scanning angle and scanning mode on the accuracy of ALS based forest inventory. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52: 349-360.
- Ketterings Quirine M., Coe Richard, van Noordwijk Meine, Ambagau' Yakub, Palm Cheryl A., (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1-3): 199-209.
- Khosravipour Anahita, Skidmore Andrew K., Isenburg Martin, (2016). Generating spike-free digital surface models using LiDAR raw point clouds: A new approach for forestry applications. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52: 104-114.
- Khosravipour Anahita, Skidmore Andrew K., Wang Tiejun, Isenburg Martin, Khoshelham

- Kourosh, (2015). Effect of slope on treetop detection using a LiDAR Canopy Height Model. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104: 44-52.
- Kim Minho, Madden Marguerite, Warner Timothy A., (2009a). Forest Type Mapping using Object-specific Texture Measures from Multispectral Ikonos Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(7): 819-829.
- Kim Sooyoung, McGaughey Robert J., Andersen Hans-Erik, Schreuder Gerard, (2009b). Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 113(8): 1575-1586.
- Korpela Ilkka, Ørka Hans Ole, Hyyppä Juha, Heikkinen Ville, Tokola Timo, (2010a). Range and AGC normalization in airborne discrete-return LiDAR intensity data for forest canopies. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(4): 369-379.
- Korpela Ilkka, Orka Hans Ole, Maltamo Matti, Tokola Timo, Hyyppä Juha, (2010b). Tree Species Classification Using AirborneLiDAR – Effects of Stand and Tree Parameters, Downsizing of Training Set, Intensity Normalization, and Sensor Type. *Silva Fennica*, 44(2): 319-339.
- Latifi Hooman, Fassnacht Fabian E., Müller Jörg, Tharani Agalya, Dech Stefan, Heurich Marco, (2015). Forest inventories by LiDAR data: A comparison of single tree segmentation and metric-based methods for inventories of a heterogeneous temperate forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42: 162-174.
- Leckie Don, Gougeon François, Hill David, Quinn Rick, Armstrong Lynne, Shreenan Roger, (2003a). Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5): 633-649.
- Leckie Donald G., Gougeon François A., Walsworth Nicholas, Paradine Dennis, (2003b). Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 355-369.
- Lefsky M. A., Cohen W. B., Acker S. A., Parker G. G., Spies T. A., Harding D., (1999). Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70(3): 339-361.
- Li Jili, Hu Baoxin, Noland Thomas L., (2013). Classification of tree species based on structural features derived from high density LiDAR data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171–172: 104-114.
- Lim K, Treitz P, Groot A, St-Onge B, (2001). Estimation of individual tree heights using LIDAR remote sensing. *Proceedings of the Twenty-Third Annual Canadian Symposium on Remote Sensing*, Quebec, QC.
- Luo Shezhou, Wang Cheng, Xi Xiaohuan, Pan Feifei, Peng Dailiang, Zou Jie, Nie Sheng,

- Qin Haiming, (2017). Fusion of airborne LiDAR data and hyperspectral imagery for aboveground and belowground forest biomass estimation. *Ecological Indicators*, 73: 378-387.
- Maack Joachim, Lingenfelder Marcus, Weinacker Holger, Koch Barbara, (2016). Modelling the standing timber volume of Baden-Württemberg—A large-scale approach using a fusion of Landsat, airborne LiDAR and National Forest Inventory data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 49: 107-116.
- Maltamo M., Malinen J., Packalén P., Suvanto A., Kangas J., (2006). Nonparametric estimation of stem volume using airborne laser scanning, aerial photography, and stand-register data. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(2): 426-436.
- Maltamo M., Mustonen K., Hyyppä J., Pitkänen J., Yu X., (2004). The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(9): 1791-1801.
- Næsset Erik, (1997a). Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J. Photogramm Remote Sens.*, 52: 49-56.
- Næsset Erik, (1997b). Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 61(2): 246-253.
- Næsset Erik, (2004a). Effects of different flying altitudes on biophysical stand properties estimated from canopy height and density measured with a small-footprint airborne scanning laser. *Remote Sensing of Environment*, 91(2): 243-255.
- Næsset Erik, (2004b). Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(2): 164-179.
- Nielsen U, Aldred AH, MacLeod DA, (1979). A forest inventory in the Yukon using large scale photo sampling techniques. Information Report. Forest Management Institute (Canada). no. FMR-X-121.
- Nilsson Mats, (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, 56(1): 1-7.
- Nord-Larsen Thomas, Schumacher Johannes, (2012). Estimation of forest resources from a country wide laser scanning survey and national forest inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 119: 148-157.
- Norwine J., Greeger D. H., (1983). Vegetation classification based on advanced very high resolution radiometer (AVHRR) satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 13(1): 69-87.
- Orka Hans Ole, Naeset Erik, Bollandsas Ole Martin, (2009). Classifying species of individual trees by intensity and structure features derived from airborne laser

- scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 113(6): 1163-1174.
- Palace Michael W., Sullivan Franklin B., Ducey Mark J., Treuhaft Robert N., Herrick Christina, Shimbo Julia Z., Mota-E-Silva Jonas, (2015). Estimating forest structure in a tropical forest using field measurements, a synthetic model and discrete return lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 161: 1-11.
- Persson Åsa, Holmgren Johan, Söderman U., (2002). Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(9): 925-932.
- Pham Lien T. H., Brabyn Lars, Ashraf Salman, (2016). Combining QuickBird, LiDAR, and GIS topography indices to identify a single native tree species in a complex landscape using an object-based classification approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50: 187-197.
- Popescu S. C., Wynne R. H., Nelson R. F., (2002). Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3): 71-95.
- Popescu Sorin C, Wynne Randolph H, (2004). Seeing the trees in the forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(5): 589-604.
- Popescu Sorin C., Wynne Randolph H., Nelson Ross F., (2003). Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5): 564-577.
- Reitberger J, Krzystek P, Stilla U, (2008). 3D segmentation and classification of single trees with full waveform LiDAR data. *Proceedings of SilviLaser*, 8: 216-226.
- Reitberger Josef, Schnörr Cl, Krzystek Peter, Stilla Uwe, (2009). 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6): 561-574.
- Soille Pierre, (2013). *Morphological image analysis: principles and applications*, Springer Science & Business Media.
- Suratno Agus, Seielstad Carl, Queen Lloyd, (2009). Tree species identification in mixed coniferous forest using airborne laser scanning. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6): 683-693.
- Takahashi T., Yamamoto K., Senda Y., Tsuzuku M., (2005a). Predicting individual stem volumes of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR. *Journal of Forest Research*, 10(4): 305-312.
- Takahashi Tomoaki , Yamamoto Kazukiyo , Senda Yoshimichi , Tsuzuku Masashi (2005b). Estimating individual tree heights of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR. *Journal of*

- Forest Research, 10(2): 135-142.
- Takahashi Tomoaki, Awaya Yoshio, Hirata Yasumasa, Furuya Naoyuki, Sakai Toru, Sakai Atsushi, (2008). Estimation of stand volume by fusing low laser-sampling density LiDAR data with QuickBird panchromatic imagery in closed-canopy Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations, Proceedings of SilviLaser 2008, 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, 17-19 September, 2008. SilviLaser 2008 Organizing Committee, pp 86-94.
- Teuber Kurt B., (1990). use of AVHRR imagery for large-scale forest inventories. *Forest Ecology and Management*, 33–34: 621-631.
- Toll David L., (1985). Effect of Landsat thematic mapper sensor parameters on land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 17(2): 129-140.
- Vain Ants, Yu Xiaowei, Kaasalainen Sanna, Hyyppa Juha, (2010). Correcting airborne laser scanning intensity data for automatic gain control effect. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(3): 511-514.
- Vauhkonen Jari, Korpela Ilkka, Maltamo Matti, Tokola Timo, (2010). Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity, and alpha shape metrics. *Remote Sensing of Environment*, 114(6): 1263-1276.
- Verma Niva Kiran, Lamb David W., Reid Nick, Wilson Brian, (2014). An allometric model for estimating DBH of isolated and clustered Eucalyptus trees from measurements of crown projection area. *Forest Ecology and Management*, 326: 125-132.
- Wang Le, Gong Peng, Biging Gregory S., (2004). Individual Tree-Crown Delineation and Treetop Detection in High-Spatial-Resolution Aerial Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3): 351-357.
- Wing Brian M., Ritchie Martin W., Boston Kevin, Cohen Warren B., Olsen Michael J., (2015). Individual snag detection using neighborhood attribute filtered airborne lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 163: 165-179.
- Wong Wilson Vun Chiong, Tsuyuki Satoshi, Phua Mui-How, Ioki Keiko, Takao Gen, (2016). Performance of a photogrammetric digital elevation model in a tropical montane forest environment. *Journal of Forest Planning*, 21: 39-52.
- Woodcock Curtis E., Collins John B., Gopal Sucharita, Jakabhazy Vida D., Li Xiaowen, Macomber Scott, Ryherd Soren, Judson Harward V., Levitan Jack, Wu Yecheng, Warbington Ralph, (1994). Mapping forest vegetation using Landsat TM imagery and a canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 50(3): 240-254.
- Wulder Mike, Niemann K. Olaf, Goodenough David G., (2000). Local Maximum Filtering for the Extraction of Tree Locations and Basal Area from High Spatial Resolution

- Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 73(1): 103-114.
- Yan Wai Yeung, Shaker Ahmed, Habib Ayman, Kersting Ana Paula, (2012). Improving classification accuracy of airborne LiDAR intensity data by geometric calibration and radiometric correction. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67: 35-44.
- Yao Wei, Krzystek Peter, Heurich Marco, (2012). Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne full-waveform LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 123: 368-380.
- Yu Xiaowei, Hyyppa Juha, Vastaranta Mikko, Holopainen Markus, Viitala Risto, (2011). Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(1): 28-37.
- 梶原 幹弘, (2008). 究極の森林. 104 pp, 京都大学学術出版会, 京都府.
- 梶原 領太, 重松 敏則, (2008). 航空写真を用いたスギ人工林の胸高直径と低木層植被率の推定. 環境情報科学論文集, ceis22: 535-540.
- 古家 直行, (2014). 森林リモートセンシング 第4版 (加藤正人) . 266-269 pp, 日本林業調査会, 東京.
- 今永 正明, (1968). スギ人工林に対する航空林分材積式の検討 京都市雲ヶ畑地区における民有林の例. 京都府立大学農学部演習林報告(12): 1-5.
- 佐賀県, (2012). 森林計画 第7311016-006号 佐賀県森林情報解析業務委託, pp. 2-14+2-95.
- 佐賀県, (2013). 佐賀西部地域森林計画書. 佐賀県, pp. 52.
- 佐賀県, (2016). 佐賀東部地域森林計画書. 佐賀県, pp. 53.
- 朱 林, スバス チャタクリ, 島村 秀樹, (2016). 航空レーザ計測データによる林相分類手法の研究. 写真測量とリモートセンシング, 55(5): 303-313.
- 松英 恵吾, 伊藤 拓弥, 内藤 健司, (2006). 航空機 LiDAR による森林資源量推定—密度の異なるスギ・ヒノキの林分パラメータ推定—. 写真測量とリモートセンシング, 45(1): 4-13.
- 千葉 達朗, 鈴木 雄介, 平松 孝晋, (2007). 地形表現が生み出す地図の可能性 地形表現手法の諸問題と赤色立体地図. 地図, 45(1): 27-36.
- 大隅 眞一, (1987). 森林計測学講義. 215 pp, 養賢堂, 東京.
- 大野 勝正, (2016). 航空レーザデータを利用した胸高直径推定手法の検討. 日本森林学会大会発表データベース, 127: 61.
- 大野 勝正, 近藤 大将, 北林 拓, (2015). 航空レーザ計測の計測高度が森林解析に及ぼす影響評価. 平成27年度秋季学術講演会発表論文集: 119-120.
- 中島 巖, (1973). 空中写真利用による森林調査法に関する研究. 林業試験場研究報告, 251: 1-253.

- 縄村 達矢, 遠藤 貴宏, 安岡 善文, (2007). 研究速報「スギ人工林における LiDAR を用いた樹木抽出の最適観測密度に関する考察」. 生産研究, 59(3): 71-73.
- 農林中央金庫, (2016). 公益信託 農林中金森林再生基金 第 1 回事業発表会. 農林中央金庫 全国森林組合連合会, pp. 51-72+125-141.
- 平田 泰雅, (2005). 航空機レーザースキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響. 森林計画学会誌, 39(2): 81-95.
- 林野庁, (1970). 立木幹材積表 西日本編. 197-198 pp, 日本林業調査会, 東京都.
- 林野庁, (2016). 平成 28 年度版森林・林業白書. 10+40+42 pp, 全国林業改良普及協会, 東京.