

— 2004 年度 修士論文 —

高空間分解能リモートセンシングを用いた
林分パラメータ推定手法の開発

ESTIMATION OF PHYSICAL PARAMETERS OF FOREST STANDS
USING HIGH SPATIAL RESOLUTION REMOTE SENSING DATA

寺岡 正樹

Teraoka, Masaki

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
環境学専攻 社会文化環境コース

論文要旨

森林調査は、これまで、そしてこれからも重要である。日本の戦後の復興と高度成長の基礎の一つは豊かな森林資源であり、正確で精度の高い森林調査が日本全土における高度な森林管理技術の蓄積と実践を可能にしてきた。一方で 2005 年 2 月に京都議定書が発行したことに伴い、地球温暖化対策の一つとして植林が重要な吸収源増大プロジェクトとして位置づけられ、実際に数千 ha 規模の植林プロジェクトが世界各地で提案され始めている。植林による二酸化炭素吸収量を、広域な面積において正確に把握することは、事業者が得る余剰排出権やその価格に影響を与えると考えられ、これまで以上に正確な森林調査が要求される場面が増えてくる。

しかし現実には、森林調査で広いエリアを正確に把握することは困難である。森林面積が広大であることと、金銭と時間のコストがかかることが、主な原因である。また、採算が取れなければ日本の森のように長年にわたり放置される可能もある。

そこでリモートセンシングの広域性と定量性を活かして森林を調査する試みが行われてきた。1970 年代には、アマゾン川流域で、搬出経路に沿って急速に拡大する魚の骨のような森林減少の様子を可視化し、減少量を定量的に示すことで、世論を動かした実績もある。現在でも、広域なエリアを対象とする焼畑や森林火災のモニタリングにはリモートセンシングは欠かせないツールである。

しかし単木レベルでは、リモートセンシングを用いても、現在の研究では正確さと精度において直接計測に及ばない。たとえ直接計測のコストと誤差を考慮しても、森林を熟知した人間が実際に現地に入り、巻尺や樹高計をもって実際に測る方が、正確な値が得られる。リモートセンシング技術も日進月歩しており、スペクトル分解能と空間解像度は進化の一途をたどっている。衛星写真と航空写真の地上解像度は数十センチメートルとなり、また 3 次元標高データも同等の解像度で得ることができる。それでも、人海戦術による森林の直接計測の信頼性には勝てないのが事実である。

そこで本研究では、現時点で得られる最高レベルの空間分解能を有する航空写真とレーザースキャナを用いて、どれくらい直接計測に迫る正確さで、森林を把握することが可能かを検討した。直接計測を面的に補間することを想定し、林分のタイプによって推定能力がどのように変化するかを分析した。

航空写真は解像度 10 センチメートルの可視画像と近赤外線画像を取得し、レーザースキャナは 15 パルス/ m^2 の高密度を往復計測により取得した。データの処理手法には、それら 2 つを相互補完的に融合する手法を開発した。また我々も森林において直接計測を実際に行い、そこで得た実測値を基に推定値の検証を行った。

その結果、林分単位では $\pm 10\%$ 程度の正確さで材積の推定が可能であることが示された。また単木単位では林冠が閉鎖していないことを条件にすれば $\pm 5\%$ 以内の正確さで、単木の樹高と胸高直径の推定が可能であった。

本研究が、森林調査におけるリモートセンシングの活用と発展、さらには地球温暖化対策としての植林活動の普及や活性化に、少しでも貢献できれば嬉しく思う。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	京都議定書と植林プロジェクト	1
1.1.2	日本の林業	3
1.2	森林調査の大切さと難しさ	4
1.3	研究の目的	6
1.4	研究の独自性	6
1.5	本論文の構成	6
第 2 章	既往研究：直接計測による植生調査とリモートセンシングを用いた植生調査	8
2.1	直接計測による植生調査	8
2.2	リモートセンシングを用いた植生調査	9
2.2.1	リモートセンシングとは	9
2.2.2	光学センサーを用いた植生調査	10
2.2.3	レーザースキャナを用いた植生調査	11
2.3	まとめ	12
第 3 章	使用データ	13
3.1	本研究の分析対象エリア	13
3.2	リモートセンシングにより取得したデータ	16
3.2.1	航空機搭載レーザースキャナ (LiDAR) による 3 次元標高データの取得	16
3.2.2	航空機搭載デジタルカメラ (DMC) によるスペクトルデータの取得	20
3.3	毎木調査による検証用データの取得	23
3.3.1	毎木調査による林分パラメータの計測	23
3.3.2	各林分の特徴	27
3.4	まとめ	30
第 4 章	リモートセンシングを用いた林分パラメータの抽出手法	31
4.1	本研究で用いた基本樹木モデル	31
4.1.1	樹木の視覚的な特徴	31
4.1.2	樹木の形態的な特徴	32
4.1.3	視覚的特徴と形態的特徴の融合	32

4.2	リモートセンシングによる樹冠領域の検出	33
4.2.1	樹木の視覚的特徴と DMC による樹冠候補点の検出	34
4.2.2	樹木の形態的特長と LiDAR 樹冠領域の検出	35
4.3	検出された樹冠領域の樹高と胸高直径の推定	36
4.3.1	樹高の推定	36
4.3.2	胸高直径の推定	36
4.4	実測値と推定値の検証方法	40
4.4.1	林分単位の本数と材積の検証方法	40
4.4.2	単木単位の位置, 樹高, 胸高直径, 材積の検証方法	41
4.5	まとめ	42
第 5 章	リモートセンシングを用いた林分パラメータの抽出結果	43
5.1	林分単位の結果と検証	43
5.2	単木単位の結果検証	44
5.2.1	St.1 における単木単位の結果	45
5.2.2	St.2 における単木単位の結果	48
5.2.3	St.3 における単木単位の結果	51
5.2.4	St.4 における単木単位の結果	54
5.3	考察	58
第 6 章	結論と今後の課題	59
6.1	結論	59
6.2	今後の課題	59
	参考文献	60
	謝辞	63
付録 A	専門用語の定義と解説	i
付録 B	レーザースキャナで得られた点群データによる標高モデルの作成	ii
B.1	Digital Elevation Model(DEM) の作成	ii
B.2	Normalized Digital Surface Model(NDSM) の作成	iii
付録 C	解像度の変化が樹木抽出に与える影響に関する考察	vii
付録 D	各林分の本研究で用いた手法を適用した結果画像	x

目次

1.1	概念図：3つの国際制度から成る京都メカニズム	2
1.2	概念図：直接計測を正確に面的補完する手法としてのリモートセンシング	4
2.1	毎木調査の野外調査表の例	8
2.2	林分材積表の抜粋(青森・岩手・宮城地方, スギ・人工林)	9
2.3	リモートセンシングの概念図	10
3.1	青森県七戸町の位置	13
3.2	2万5千分1地形図(八戸, 十和田, 法量, 北東)上に示した4つの検証用林分の位置	14
3.3	分析対象エリア付近の様子を示した写真	15
3.4	航空レーザ測定の概念図	16
3.5	航空レーザによる3次元標高データ例	16
3.6	ALS50本体と周辺機器	17
3.7	分析対象エリアのデジタル表層モデル画像とデジタル標高モデル画像	19
3.8	DMC本体の写真	20
3.9	分析対象エリアの可視(RGB)画像と近赤外線(NIR)画像	22
3.10	毎木調査の様子(位置, 樹高, 胸高直径, 下草)	24
3.11	St.1の様子を示した写真	26
3.12	St.2の様子を示した写真	26
3.13	St.3の様子を示した写真	26
3.14	St.4の様子を示した写真	26
3.15	4つの林分の樹高(m)の分布を示した箱ヒゲ図	28
3.16	4つの林分の胸高直径(cm)の分布を示した箱ヒゲ図	28
3.17	4つの林分の樹高と胸高直径の散布図(林分による色分け)	29
4.1	樹冠抽出および林分パラメータ推定のサンプル画像 10 x 10 m (100 x 100 pixel)	31
4.2	概念図：視覚的特徴と形態的特長の融合	32
4.3	リモートセンシングデータによる樹冠領域抽出のフロー図	33
4.4	Template Matching法とLocal Maximum法の結果例	34
4.5	Hill Climbing法とWatershed法の結果例	35
4.6	樹冠領域を用いた, 樹高, 胸高直径, 材積の推定のフロー図	36

4.7	St.1, 樹高による胸高直径の推定結果	37
4.8	DBH と樹高, 面積, 局所密度, 樹冠の長径と短径, 周囲長との散布図	38
4.9	樹高と樹冠面積による胸高直径の推定結果	39
5.1	St.1, 実測値と推定値の散布図 (材積, 位置, 樹高, DBH)	45
5.2	St.1, 実測値, 推定値と誤差範囲の折れ線グラフ (樹高昇順)	46
5.3	St.1, 実測位置と推定位置の地図上の差	47
5.4	St.2, 実測値と推定値の散布図 (材積, 位置, 樹高, DBH)	48
5.5	St.2, 実測値, 推定値と誤差範囲の折れ線グラフ (樹高昇順)	49
5.6	St.2, 実測位置と推定位置の地図上の差	50
5.7	St.3, 実測値と推定値の散布図 (材積, 位置, 樹高, DBH)	51
5.8	St.3, 実測値, 推定値と誤差範囲の折れ線グラフ (樹高昇順)	52
5.9	St.3, 実測位置と推定位置の地図上の差	53
5.10	St.4, 実測値と推定値の散布図 (材積, 位置, 樹高, DBH)	54
5.11	St.4, 実測値, 推定値と誤差範囲の折れ線グラフ (樹高昇順)	56
5.12	St.4, 実測位置と推定位置の地図上の差	57
B.1	レーザーキャナで得られる点群データ	ii
B.2	DEM の標高と三角点の標高を比べた散布図	iii
B.3	ランダム点群から正規化表層モデル生成のフローチャート	iv
B.4	双峰性のあるランダム点群のヒストグラム分布	v
B.5	BISE 法による平滑化の効果 (処理前: 青, 処理後: 赤)	vi
C.1	各手法の比較	viii
D.1	St.1, 近赤外線 (NIR) 画像	xi
D.2	St.1, NIR 画像上に表示した Template Matching 法の結果	xi
D.3	St.1, 正規化デジタル標高モデル (NDSM) 画像	xii
D.4	St.1, NDSM 画像上に表示した Hill Climbing 法の結果	xii
D.5	St.2, 近赤外線画像	xiii
D.6	St.2, NIR 画像上に表示した Template Matching 法の結果	xiii
D.7	St.2, 正規化デジタル標高モデル (NDSM) 画像	xiv
D.8	St.2, NDSM 画像上に表示した Hill Climbing 法の結果	xiv
D.9	St.3, 近赤外線画像	xv
D.10	St.3, NIR 画像上に表示した Template Matching 法の結果	xv
D.11	St.3, 正規化デジタル標高モデル (NDSM) 画像	xvi
D.12	St.3, NDSM 画像上に表示した Hill Climbing 法の結果	xvi
D.13	St.4, 近赤外線画像	xvii
D.14	St.4, NIR 画像上に表示した Template Matching 法の結果	xvii
D.15	St.4, 正規化デジタル標高モデル (NDSM) 画像	xviii
D.16	St.4, NDSM 画像上に表示した Hill Climbing 法の結果	xviii

表目次

3.1	レーザースキャナのメーカースペック	18
3.2	飛行計画に基づく LiDAR のデータ仕様	18
3.3	DMC のメーカースペック	21
3.4	飛行計画に基づく DMC のデータ仕様	21
3.5	直接計測による 4 つの検証サイトの林分パラメーター	25
3.6	4 つの林分の樹高と DBH の相関係数	29
4.1	DBH と樹高, 面積, 局所密度, 樹冠の長径と短径, 周囲長との相関係数	38
5.1	林分単位の推定材積の結果	43
5.2	林分単位のマッチング率, 誤検出, 未検出	44
5.3	St.1, 実測値と推定値の平均値, 標準偏差, 2 乗平均誤差 (材積, 樹高, DBH) . . .	45
5.4	St.2, 実測値と推定値の平均値, 標準偏差, 2 乗平均誤差 (材積, 樹高, DBH) . .	48
5.5	St.3, 実測値と推定値の平均値, 標準偏差, 2 乗平均誤差 (材積, 樹高, DBH) . .	51
5.6	St.4, 実測値と推定値の平均値, 標準偏差, 2 乗平均誤差 (材積, 樹高, DBH) . .	54

第1章 序論

本章では研究の背景を述べ、森林調査の大切さと難しさを提示する。そのうえで本研究の目的と意義を明確にする。最後に本論文の構成を記す。

1.1 研究の背景

1.1.1 京都議定書と植林プロジェクト

京都議定書

1997年、気候変動枠組み条約第3回締結国会議 (The 3rd Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change: COP3) において、先進国の温室効果ガス (GHG) 排出の削減目的を定めた京都議定書が採択された (UNFCCC, 1997)。その後アメリカの離脱やロシアの批准の遅延などの紆余曲折を経て、2005年2月16日に発効した。これにより GHG の削減が日本を含め先進国に義務付けられた。

COP3 で定められた京都議定書の中では、市場原理を活用した上で各国の数値目標を達成する仕組みがアメリカ政府を代表するクリントン大統領 (当時) の提案で導入された。地球温暖化の原因となっている GHG 削減 (または吸収量増大) は、地球上どこで行っても同じ効果が得られるので、コストの低いところで実施したほうがより費用対効果が高まるとの考え方に基づいている。

その仕組みは図 1.1 に示すように 3 つの国際制度から成り、それらを総称して京都メカニズムと呼ばれている。

排出量取引 (ET: Emission Trading) 市場メカニズムの中で排出可能量 (排出権) の移転を行い、世界全体の GHG の削減量 (又は吸収量) の増大を最小費用で目指す仕組み。欧州連合 (EU) では、議定書発効に先駆けて 2005 年 1 月 1 日から EU 独自の取引制度が始まった。

共同実施 (JI: Joint Implement) 先進国同士が、共同して温暖化対策の事業を行い、GHG の削減 (又は吸収) を行う。日本は現在、省エネルギー設備の投資に積極的な東欧諸国 (ブルガリアやルーマニア) との活発な動きが見られる^{*1}。

クリーン開発メカニズム (CDM: Clean Development Mechanism) 先進国が途上国で、温暖化対策の事業を行い、GHG を削減 (又は吸収) するとともに、途上国に対し、先進国の進んだ環境対策技術・省エネルギー技術等の移転促進を目指す。排出量を削減する「排出源 CDM」と吸収量を増大する「吸収源 CDM」の 2 種類に大分される。

特に CDM は、先進国にとっては GHG 削減義務達成の手段となる一方で、途上国にとっても技

*1 また、JI に似た形で別にグリーン投資スキーム (GIS: Green Investment Scheme) という手法も提案されている。投資を GHG 排出削減事業等に限定的に提供することで、ホスト国の持つ初期割当等の移転を受ける仕組みである。

術転換や森林面積拡大の機会となる．このため双方にとってメリットを見出せるプロジェクトがさまざまな形で可能である．議定書の発効を前に活発な活動が始まっている．排出減 CDM としてフロンガス破壊や発電所の省エネ化が実現されようとしている．また吸収源 CDM としては大規模な植林 CDM プロジェクトがバイオマスやゴム栽培とからめて提案されている（社団法人海外産業植林センター，2004）．

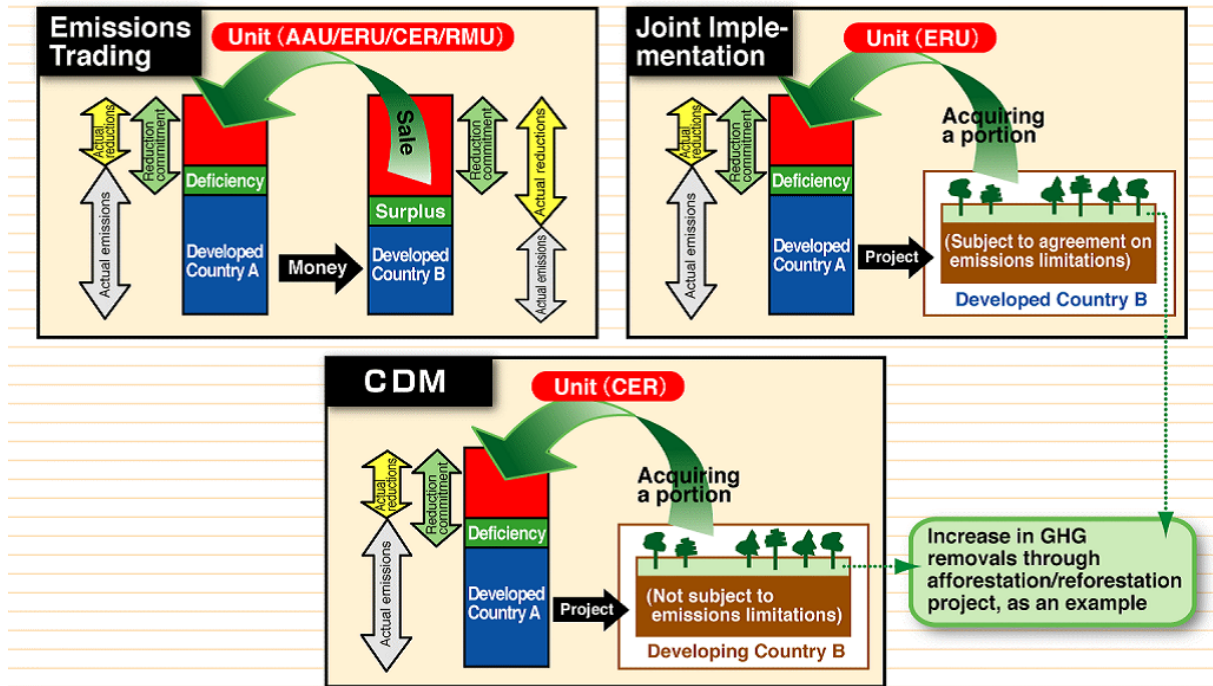


図 1.1. 概念図：3つの国際制度から成る京都メカニズム．

出典：JIFPRO (2005)

植林 CDM プロジェクト

植林 CDM プロジェクトとは，たとえば，投資国（日本）の企業 A がインドネシア（ホスト国）で植林プロジェクトを実施し，10 万炭素（C）トンの CO² が吸収できたとすると，10 万 Ct 分のクレジットが発効される．企業 A はあらかじめ決められた比率でクレジットを分配し，自らの取得分を日本の自社削減量に算入できることになる．また，余剰したクレジットを国際マーケットで売却できる可能性もある．

このようなプロジェクトにおいてクレジットを取得する場合，経年的に植物の成長量を正確に把握する必要があり，その方法に関して活発な議論が国際会議で繰り返し広げられている．次に示すベースラインとモニタリングは，植林 CDM によるクレジット量を左右する重要な項目である．

ベースライン 提案された植林 CDM がいない場合に起こるであろうプロジェクトバウンダリー内の炭素収容力における炭素貯留量の変化の合計を合理的に示すシナリオ．

モニタリング 植林 CDM によるクレジットの検証と認証を受けるために，実施されたプロジェクトによって，担保の森林となるプロジェクトバウンダリー内の GHG 吸収量を計測すること．

モニタリングによって、ベースラインの予測値よりも GHG 吸収量が多い場合にクレジットが発行される。よってこれらを正確に計測することは、植林 CDM の事業性やインセンティブ、さらには売却する炭素の価格にまで影響を与える可能性がある。

植林 CDM は小規模なものを除くと、1,000ha ~ 50,000ha の面積を対象としたプロジェクトが提案されており（環境省, 2004）、そのような広域な面積に対しての一手法としてリモートセンシングが活用され始めている。植林 CDM の中で例を挙げれば、マダガスカルで 王子製紙株式会社（2004）は MODIS 画像（空間解像度 250 メートル）、LANDSAT 画像（同 30 メートル）と ASTER 画像（同 15 メートル）を併用し、取得された年次の違いなどを考慮しながらプロジェクト範囲の定義づけや現況植生の把握した。また、その他にもカンボジアで 丸紅株式会社（2004）が ASTER 画像を用いた例や、インドネシアで 住友林業株式会社（2004）が IKONOS 画像（同 1 メートル）を用いて単木の目視判別を行っている例がある。

時系列を比較する際には、衛星の運用期間の関係から、処理が単純化できない点もあるが、異なる衛星の比較方法が確立されること、データの継続性が確保されることと、過去のデータの蓄積が進むこと、でさらなる利用拡大が期待される。しかしもちろん、リモートセンシングが単体で使われるのではなく、直接計測を行ったうえで面的拡張をする際のツールとして活用を考える必要がある。

1.1.2 日本の林業

日本国内に目を向ければ、日本の林業は戦後の大規模な造林と急激な日本経済の復興による薪炭や建材としての木材需要の増加の後、石油燃料への燃料転換や大量かつ安価な輸入木材などの影響で低迷しはじめ、1990 年代に「林業解体」とまで評されるまでになり、現在でも縮小する市場規模や林業従事者の高齢化・高コスト化に悩まされている（田中, 2002）。日本の人工林蓄積は、3 割が伐採可能な 46 年生以上の資源ととして利用段階に入り、潜在的な供給力は増加してきている。しかし、平成 15 年のスギ立木価格はピークであった昭和 55 年の 5 分の 1 の水準で*²、木材価格の低下により林業の採算性が悪化している（林野庁, 2004）。このため、林家は主伐を控えたり、間伐や枝打ちさえも疎かになってしまう傾向が発生している。

また将来的に日本の林業に影響を与えるであろうと思われる外的要因としては、上述した EU での排出権取引の開始、京都議定書の発効に加え、中国における木材需要の激増、先進諸国での天然林伐採規制の一層の強化、中東欧諸国の世界市場への進出、世界的な規模での人工造林の進展、さらには認証機関・システムの多様化などが挙げられる。

国内の吸収量の排出権モデルを検討する研究は一部で始められている。たとえば、林業経営者が森林の成長に伴い排出権を毎年獲得し、伐採時には相当する排出権を返却する場合と（坂田他, 2001）、返還後に残る余剰分の排出権を政府が買い取る場合と（坂田・木平, 2003）を比較した研究がある。

*² 平成 15 年の都府県平均の利用材積 1m³ 当たり山元立木価格は、杉が 4,407 円、桧が 1 万 3,924 円、松が 2,401 円で、前年に比べ杉が 8.2%、桧が 2.6%、松が 14.9% の低下であった。杉価格は最高であった昭和 55 年（2 万 2,707 円）の 19.4%（昭和 28~30 年の水準）、桧価格は最高であった昭和 55 年（4 万 2,947 円）の 32.4%（昭和 41~42 年の水準）、松価格は最高であった昭和 49 年（1 万 7,54 円）の 20.4%（昭和 27~28 年の水準）までそれぞれ低下したことになる。（資料：日本不動産研究所「山林素地及び山元立木価格調」（平成 16 年 3 月末現在）

変わり行く経営環境の中で、コスト、スピード、正確さなどの面で効率的な森林経営手段が必要とされるのは必至である。基本的な作業は人力に勝るものはないが、定期的なモニタリングや未知な森林の概況の把握には、リモートセンシングが応用できる分野も多く存在する。

1.2 森林調査の大切さと難しさ

1.1.1 や 1.1.2 で示されるように、森林調査は植物による GHG 吸収量を把握したり、日本の大切な資産である森林を管理・経営していく上で欠かすことのできない作業工程である。その難しさは森林調査が広域性と信頼性を両立することが難しいからである。

このセクションでは、現在、主流となっている実測に基づく直接計測と、リモートセンシングなどによる間接計測、を説明する。それぞれの利点や問題点を指摘した上で、図 1.2 の概念図を用いて、直接計測を正確に面的に補完する手法としてのリモートセンシングの可能性を示す。

特に GHG 吸収量の計測に関しては、その評価手法に不確実性がある場合は、確実な量まで割り引くことになっており、GHG 吸収量が最大限評価されるためには、精度よく評価可能な手法を開発する必要がある。

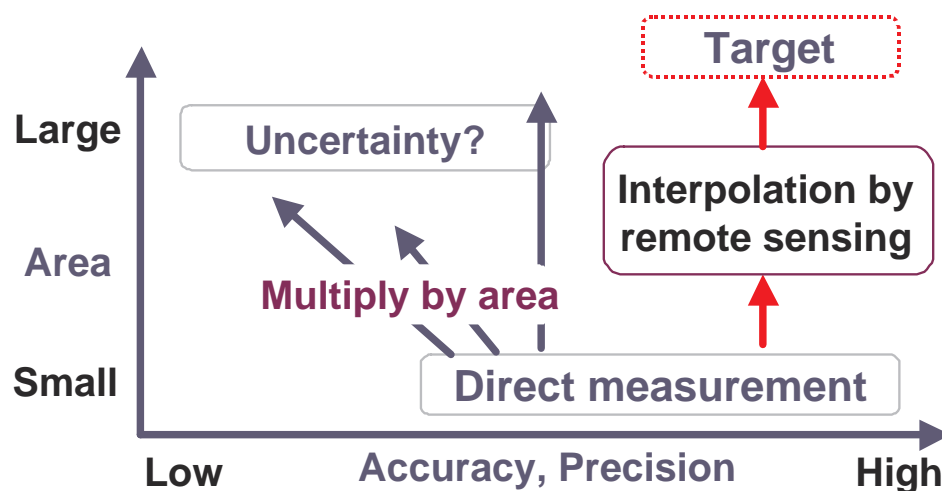


図 1.2. 概念図：直接計測を正確に面的補完する手法としてのリモートセンシング。

実測による森林調査 現在、一番正確に計測ができると考えられている手法は、直接計測による現地調査である (Direct measurement)。森林に熟練した人間が現地に赴き、巻尺や樹高計を用いて直に測ることは、計測誤差を含めても、一番信頼がおかれている。

広域な森林を調査する場合は数十メートルのプロットを設定して毎木調査を行う。この調査結果をもって、面積倍することで面的補間を行う方法が多く採用されている。統計的に有意な数をプロットを設定することが必要である。またこの方法ではせっかく正確に計測した森林の情報を失ってしまう可能性がある。植林地や森林は広大で、局地的に発育の悪い場所やいい場所が存在するからである。また広域な面積をカバーすることを狙って調査プロット数を増やすと時間とコストが増大する。

リモートセンシングを用いた森林調査の試み リモートセンシングは飛行機やヘリコプターのプラットフォームを利用することで上空から地上を俯瞰することができ、広域観測に適した技術である。国レベルでの森林面積の把握や数千 ha 規模の植林 CDM のパイロットプロジェクトの中ではリモートセンシングが活用されている (小熊・山形, 2000; 環境省, 2004)。また、3次元情報を取得することで、森林のバイオマス量を計測する研究も進められている (航空レーザ測量 WG, 2004)。

しかしリモートセンシングでの観測は、単木単位の観測においては影の影響や被圧木の存在により計測が困難場合がある。単木単位では正確さと精度において現地調査が絶対的に有利である。コストをいくらかけても現地調査で簡単に得られる情報を得られないこともある。

実測の正確さと、リモートセンシングの広域性の両立を目指して このように双方にメリットとデメリットはあるが、たとえば、現在困難であるリモートセンシングによる林分単位や単木単位での把握が可能になれば、次のようなことが可能になる。

- 代表的なタイプの林分を現地調査を行い、GHG 吸収量を林分構造ごとに計測する。
- リモートセンシングで広域なエリアの林分構造を把握し分類する。
- 分類されたクラスごとに、GHG 吸収量の算出する。

このような手法で、現地調査の正確さを保ったまま、広域性、定量性を有したモニタリングが可能になると考えられる。本研究はそのような考え方のもとに高空間分解能のリモートセンシングデータを取得し、林分パラメーターの推定を行った。

1.3 研究の目的

本研究は、直接計測による森林調査を、リモートセンシングを用いて正確に面的補間することを念頭に置き、以下の 3 点を目的とする。

まず、第一に高空間分解能の航空写真とレーザースキャナとの融合手法の開発を目的とする。これら 2 つの両方のデータを用いた研究はなく、新規に手法を開発することに意義がある。

次に林分単位での合計本数と合計材積の推定を正確に推定することを目的とする。この指標は林業の現場で一般的に使用されており、その値を正確に出すことで、リモートセンシングの有用性を示すことができる。

第 3 点目に、単木単位での樹高と胸高直径の推定、を行う。これは直接計測によって知りうる情報だが、リモートセンシングによってこれらを推定することを目指す。これら 2 つの変数を推定することで、2 変数を入力値とする林分材積表を活用して、材積を推定できる可能性がある。

1.4 研究の独自性

本研究の独自性は以下の 3 点である。

- 1 高空間分解能 (10 センチメートル) のデータを用いたこと。

これまで、航空写真とレーザースキャナの研究は別々に行われており、同じエリアを同じ解像度で取得した例は少ない。10 センチメートル解像度はどちらの分野でも先行例が少ない。新しいデータの使用によって、従来困難であった単木単位の受講と胸高直径の推定を試みた。

- 2 レーザースキャナと航空写真を相互補完的に融合する手法を提案したこと。

樹木の特徴を考慮した上で性質の 2 つの異なるデータ (航空写真とレーザースキャナ) を融合することで、正確に樹木を抽出できることを示した。データ融合の報告例は少ないが、今後、これらのデータの同時取得が可能になると考えられ、それに先行してデータ融合手法を示した。

- 3 これまで困難であった単木単位での樹高と胸高直径の推定を可能にしたこと。

既往研究はリモートセンシングで得られた情報から直接材積を推定する例が多いが、本研究では樹高と胸高直径を推定する。これにより林分材積を活用することが可能になる。

1.5 本論文の構成

本論文は全 6 章で構成される。

第 1 章では、本研究の背景である森林調査の大切さと難しさを踏まえ、本研究の目的と独自性を示した。

第 2 章では、森林調査を直接計測と間接計測 (リモートセンシング) に分けて説明する。特に間接計測に関して光学センサーを用いた計測とレーザースキャナを用いた計測を先行研究例を交えて説明し、本研究の位置付けと目標とする数値目標を明確にする。具体的には、樹高で 1 メートル以内、胸高直径で 2 センチメートル以内の正確さを目標とする。

第 3 章では、本研究で使⽤したデータについて論述する。対象エリアを示し、航空写真とレーザースキャナの詳細を示す。また検証データ取得のために行った植⽣調査について説明する。

第 4 章では、第 3 章で説明したデータをどのように解析したかを詳述する。レーザースキャナと航空写真から、林分パラメータを推定する手法を、順を追って説明する。また推定されたパラメータをどのように検証を行ったかも示す。

第 5 章には、本研究で提案したデータ融合手法による結果と検証を示した。検証は林分単位と単木検証の 2 つの視点から行った。林齢順に検証を行った。

第 6 章では、本論文で得られた結果と知見をまとめ、考察を記した。また考えられる今後の課題を示した。

また、本文とは別に 5 つの付録を添付した。付録 A では、論文内でも⽤いた専門用語の定義と解説し、付録 B ではレーザースキャナで得られた点群データによる標高モデルの作成手法を詳述した。また付録 C に解像度の変化が樹木抽出に与える影響に関する考察と、付録 D に各林分における近赤外線画像 (NIR) と Template Matching 法の結果画像、正規化標高モデル (NDSM) と Hill Climbing 法の結果画像を示した。

参考文献は日英混合アルファベット順で列挙した。

第2章 既往研究：直接計測による植生調査とリモートセンシングを用いた植生調査

この章では植生調査について述べる。自然科学の分野で発展し実務で使用されている実測に基づいた植生調査と、リモートセンシングの分野から工学的な方法で植生調査を試みる、2つのアプローチについて説明する。

2.1 直接計測による植生調査

植生調査の基本は実測である。測定対象林分のすべての樹木の樹高や胸高直径を一本一本測定することを、毎木調査と呼ぶ。この結果を基にして、材積表法、標準木法、標本木法などのさまざまな手法で林分材積が推定される。

毎木調査の実作業 毎木調査は樹木の樹種、樹高、胸高直径など必要な測定値をを一本一本測定し、記録する、単純作業である。通常は1人の記帳者と2人の測定者を1組とする。測定者が2人必要なのは、胸高直径が大きすぎて測れない場合や、梢端が見えない樹木の樹高測定の際に、補助が必要になるからである。測定者は計測した値を読み取り、それを記帳者に伝える。記録者は図2.1のような野外調査表に伝えられた値を正確に書き込む。必要な測定値や活約単位は、その後の林分材積表において用いられることを考慮して、目的に応じて選択する。

崩落幹

区画 0-10 1-11	番号	目録	種名	直径 DBH	高さ Height						
	0001			2.10	22.6						3の萌芽
	0002	✓	アサギ	2.30	26.6						"
	0003	2024.7.25		2.25	36.8					主幹	
	4	✓	アサギ	4.23	46.2						
	5	✓	アサギ	3.15	36.1						
	6	1/1	アサギ	2.00	23.5						3の萌芽
	7	✓	アサギ	4.55	42.3					主幹	
	8	✓	アサギ	3.90	39.2						"
	9	✓	アサギ	3.80	32.8						"
	0010	✓	アサギ	2.66	29.0						

図 2.1. 毎木調査の野外調査表の例。

毎木調査の作業量 標準的な作業量は、日本のような傾斜の多い山岳林の場合、記帳者1人と測定者2人の3人1組で、1日2000~3000本、面積で2~5ha、とされる(大隈, 2001)が、記帳者

や測定者の熟練度，林分の構成，下草の状態，地形，天候などによって，その作業量は異なる*1。

林分材積表による林分材積の推定 日本では一般的には，林野庁が発行している林分材積表が用いられる。林分材積表は，樹木の樹高と胸高直径から材積を求めたための早見表であり，地域別，樹種別，人工林・天然林別に整理されている。林野庁は1955年に従来各営林局がそれぞれの立場から調製し使用していた材積表を見直し，大部分について新たに材積表を調製する必要のあることと判断した。その後，主要樹種立木材積表調製要綱を定め，これに基づいて林業試験場および各営林（支）局が調製に従事し約15年かけて整備を完了したものが，現在主に使用されているものである。立木材積表は，森林の材積測定手段として欠くことのできないものであり，森林の売買価格を簡便かつ正確に推定できるようになったことが，日本の林業を支えたことも事実である。

胸高直径 cm	69.1	75.4	81.7	88.0	94.2	100.5	106.8	113.1	119.4	125.7	胸高直径 cm
6	0.11	0.12	0.14	0.16	0.19						6
7	0.13	0.15	0.17	0.19	0.22	0.25	0.27	0.30	0.33	0.36	7
8	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.35	0.38	0.42	8
9	0.17	0.19	0.22	0.25	0.29	0.32	0.36	0.40	0.44	0.48	9
10	0.19	0.22	0.25	0.29	0.32	0.36	0.40	0.45	0.49	0.54	10
11	0.21	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40	0.45	0.49	0.54	0.60	11
12	0.23	0.26	0.30	0.35	0.39	0.44	0.49	0.54	0.60	0.65	12
13	0.25	0.29	0.33	0.38	0.43	0.48	0.54	0.59	0.65	0.71	13
14	0.27	0.31	0.36	0.41	0.46	0.52	0.58	0.64	0.71	0.77	14
15	0.29	0.34	0.39	0.44	0.50	0.56	0.63	0.69	0.76	0.83	15
16	0.31	0.36	0.42	0.47	0.54	0.60	0.67	0.74	0.82	0.89	16
17	0.33	0.39	0.44	0.51	0.57	0.64	0.72	0.79	0.87	0.96	17
18	0.35	0.41	0.47	0.54	0.61	0.68	0.76	0.84	0.93	1.02	18
19	0.37	0.44	0.50	0.57	0.65	0.73	0.81	0.89	0.98	1.08	19
20	0.39	0.46	0.53	0.60	0.68	0.77	0.85	0.95	1.04	1.14	20
21	0.42	0.49	0.56	0.64	0.72	0.81	0.90	1.00	1.10	1.20	21
22	0.44	0.51	0.59	0.67	0.76	0.85	0.95	1.05	1.15	1.25	22
23	0.46	0.54	0.62	0.70	0.80	0.89	0.99	1.10	1.21	1.33	23
24	0.48	0.56	0.65	0.74	0.83	0.93	1.04	1.15	1.27	1.39	24
25	0.50	0.59	0.68	0.77	0.87	0.98	1.09	1.20	1.33	1.45	25
26	0.52	0.61	0.71	0.80	0.91	1.02	1.14	1.26	1.38	1.52	26
27	0.55	0.64	0.73	0.84	0.95	1.06	1.18	1.31	1.44	1.58	27
28	0.57	0.66	0.76	0.87	0.99	1.11	1.23	1.36	1.50	1.64	28
29	0.59	0.69	0.79	0.91	1.02	1.15	1.28	1.42	1.56	1.71	29
30	0.61	0.71	0.82	0.94	1.06	1.19	1.33	1.47	1.62	1.77	30
31	0.97	1.10	1.23	1.37	1.52	1.68	1.84	2.01	2.19	2.38	31
32	1.01	1.14	1.28	1.42	1.58	1.73	1.90	2.08	2.27	2.47	32
33	1.04	1.18	1.32	1.47	1.63	1.79	1.96	2.15	2.34	2.54	33
34	1.08	1.22	1.36	1.52	1.68	1.85	2.03	2.22	2.41	2.61	34
35	1.11	1.26	1.41	1.57	1.74	1.91	2.09	2.28	2.47	2.67	35

図 2.2. 林分材積表の抜粋 (青森・岩手・宮城地方，スギ・人工林。)

出典：林野庁計画課 (1970)

2.2 リモートセンシングを用いた植生調査

2.2.1 リモートセンシングとは

リモートセンシングとは，離れた対象物に直接触れることなく，対象物の形状や性質を調べる技術である (日本リモートセンシング研究会, 2001)。物体が反射や放射している固有の電磁波を感知することで，対象物の形状や性質を把握することができる。

起源はアメリカ南北戦争の時に気球にカメラを備え付け撮影したものとされ，18世紀には鳩にカメラをつけた試みもあった。その後，航空機，ヘリコプター，人工衛星とそのプラットフォームの幅を広げ，目的に合わせて，さまざまな範囲で情報を得ることが可能になっている。また空間解

*1 本研究で行った実測植生調査は，基本的に4~5人1組，2日間で40メートル四方のプロットを5つ，合計約0.8haの調査を行った。本数換算では合計約650本である。参考文献と比して作業量が少ないのは，熟練者に比べれば習熟度が低いのに加え，GPSなどによる計測を行ったことで，上述のような機材の設定やデータの入力に時間を取られたからであろう。しかし計測時にほぼ全ての数値を入力したため後工程の作業量は少ない。

像度も1990年代前半には30メートルが最高であったのに対して、21世紀を迎える頃になると0.6メートルの商用衛星が利用可能になった。

観測できる電磁波もセンサーの発展とともに、赤、緑、青などの可視領域に加え、近赤外線、熱赤外線、マイクロはなども感知することが可能になった。加えてレーザーパルスを利用することで、上空から地表面の高度を精密に計測することも可能になった。これは、視覚の拡張に他ならない。人間には見えなかったものを見えるようにすることで、地面や森林による起伏、植生の活性度や水質の汚濁度を把握することが可能になった。

このようリモートセンシングは、広域性、定量性、という特徴を持ち、客観的に地球を観察する手法として広く研究されている。中でも植生に対する研究は、光学センサーを用いたものと、レーザースキャナを用いたものに大分される。

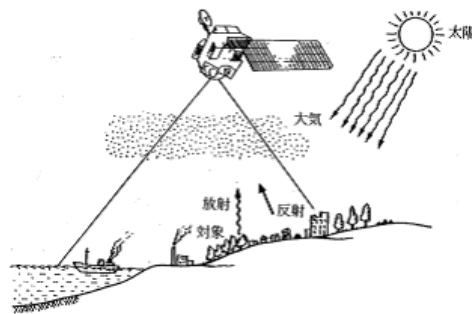


図 2.3. リモートセンシングの概念図。

出典：日本リモートセンシング研究会 (2001)

2.2.2 光学センサーを用いた植生調査

航空写真による植生調査への応用例 日本国内の航空写真は1935年頃に日本軍が撮影したものに始まり、終戦直後の1945年頃にアメリカ軍が撮影したものや、国土地理院によって5年もしくは10年ごとに全土をカバーするものなどがある。森林分野での航空写真の利用が活発になったのは戦後であり、1960年代には、立木販売業務のために地形、林相や伐採状況の確認を行うために航空写真が活用されている(原田, 1966; 千葉, 1966)。また、地形、樹種群落、疎密度、樹高、樹冠直径の判読(樋渡, 1974)や、コンピュータを用いた、立木本数、林分材積などの管理(西沢, 1971)が行われるようになってきた。ここでの立木本数や林分材積などは、航空写真に対して樹冠疎密度板や樹冠直径測定板を用いて目視によって判定したものであり、自動で抽出したものではない。

その後、日本では単木や小さな林分を対象とした研究は多く報告されていないが、海外では、カナダやスウェーデンをはじめとする林業の盛んな国々で、航空写真を用いた森林管理の研究が報告されている。樹冠によって形成される影の部分を活用して、樹冠を抽出する Valley-Following 法(Gougeon, 1995)や、針葉樹のような尖った樹冠において梢端部で輝度値が高くなることに着目し、対象画素を中心としてある大きさのウィンドウを設定し、この時に対象画素の輝度値が最大であれば樹冠と判断する Local-Maximum Filtering 法(例えば Wulder et al. (2000))は、多くの研究で高い精度と正確さが報告されている。また、樹冠の形状や大きさ、樹冠での反射特性をモデル化し、作成もしくは選択したテンプレートを利用して、相関係数を計算する Template Matching

法も2次元モデルや3次元の樹木モデルからテンプレートを作成して、高い精度で単木を抽出することが出来る (Sheng et al., 2001) . また、航空写真の高分解能化 (70~30センチメートル) に伴い、それまではスペクトル情報の欠如や影の影響で航空写真の適用が困難であった疎な広葉樹林 (Leckie et al., 2005) に対しても、スペクトル情報のみで単木抽出が可能になりつつある .

衛星写真による植生調査への応用例 その後、衛星写真の空間分解能とスペクトル分解能の向上し、森林の分野でも衛星写真を利用する研究も行われ始めた。空間分解能 1m の衛星写真を用いて、単木判読の可能性を比較した研究 (加藤, 2002) では、衛星写真からも疎密度区分の判読や災害の被害把握が可能であることが示されている。

オブジェクトベース分類による単木解析 色調情報 (ピクセルの標準偏差) および形状情報を基に領域成長を行うアルゴリズムを適用する研究も増えている。航空写真および衛星写真の高分解能化が進み、一つ一つのピクセルを分析対象とするのではなく、周辺ピクセルとの類似度や相違度を領域成長の判断基準としている。例えば、小村他 (2003) は樹冠が形成する円を「似ている色を有する領」として近似色円を探索する方法も提案した。また、またオブジェクトベース分類機能を有した eCognition^{*2}を活用した事例も報告数が増えており (臼田他, 2003; 米他, 2003; Kosaka et al., 2004; 坂上他, 2004) , 発展途上ではあるが今後が期待される手法のひとつである。

2.2.3 レーザースキャナを用いた植生調査

レーザースキャナを用いた森林分野での研究は 1990 年ごろから行われ、単木レベルでの抽出は針葉樹高木に対して行われ、上空から目視できる樹木は精度よく抽出することが示された (Nelson, 1997) . この頃から樹高と樹冠幅は 1メートル以下の精度で推定されている。

マクロなスケールでの利用も考えられている。20m x 20m のタイルごとに集計し、平均樹高を用いて地上部バイオマスの推定する研究は (Patenaude et al., 2004) 高い精度と信頼性を示している。さらに NASA では、宇宙から Vegetation Canopy LiDAR と Bidirectional Reflectance Distribution Function を同時に計測することで、陸域の炭素固定量を全体的に把握しようというプロジェクト (Hese et al., 2004) も推し進められている。

さらにレーザースキャナのハードウェア面での発展を受けて、単木単位で材積を求める研究も進められるようになった (Hyyppa et al., 2001; Persson et al., 2002; Heurich et al., 2004) . これらの研究はおおむね 1 パルス/m² を用いて、3次元の形状に注目して樹木が形成する円形のキャップを検出する方法 (Andersen et al., 2001) や、樹冠に対してパラボラ形状を近似させる方法 (Heurich et al., 2004) , 樹冠面を分水嶺 (Watershed) にみたくて領域分割する手法 (米他, 2002) , クラスタ分析を応用する手法 (Riano et al., 2004) などが報告されている。

これらの研究における材積推定の問題点は、主に下草植生量の過少推定であり、複合樹冠や被圧木が原因で過小評価であるという報告は多い (平田, 2004) . これに対して、高密度なデータ (約 10 パルス/m²) 下層植生の予測モデルを導入して、林分材積を推定した例もある (Maltamo et al., 2004) . 1m² 当たりのパルス数を増やすことで、樹冠形状の詳細な把握や森林の内部構造を推定する試みもされている (平田・鷲尾, 2004) .

^{*2} 販売元: DEFINIENS IMAGING. URL: <http://www.definiens-imaging.com/>.

また単木単位の抽出は疎林で行われており、日本の植林地のように密に植えられた場所での先行例は少ない。

2.3 まとめ

2.2.2 で紹介した航空写真のみによる研究では、植生の有無や健康状態の把握が行われてきた。しかし単木の位置を検出することは可能であっても、林分を把握する上で重要となる 3 次元の情報を得ることは難しく、材積の推定は困難である。これらは高さ情報が不足していることに起因している。

2.2.3 で紹介したレーザースキャナによる研究では、材積の推定精度は主にレーザーパルスの密度に依存することが示されているが、いまだ決定的な手法がなく、試行錯誤が続いている。また単木単位の抽出は主に疎林で行われており針葉樹の植林地での研究はない。

本研究では、同一エリアで両方のデータを得ることができたので、これらを融合する手法を開発することで、単独使用よりも高い正確さと精度が期待される。また疎林以外の林分でも同様の手法を試すことで、その応用可能性を検討する。

本研究は、リモートセンシングによる正確な面的補間を目的としている。よって直接計測によって実現されている正確さを目標とする。

直接計測による測定にも、系統誤差や偶然誤差、機械誤差が含まれ、樹高に関してはこれらを含めても ± 50 センチメートルの誤差範囲が存在する、とされている。また林分材積表の活約は 1 メートルである。

胸高直径は巻尺で計測するが、樹高同様に偶然誤差や機械誤差が含まれる。巻尺がたるんでい、水平が保たれない、規定の高さ（本研究では 1.2 メートル）が計測者によってばらつくなどの誤差が考えられる。また林分材積表の活約は 2 センチメートルである。

よって、本研究が目標とするリモートセンシングによる測定の正確さは、それぞれの二乗平均誤差が樹高 1 メートル以内、胸高直径で 2 センチメートル以内、とする。

以下では、これらの目的と目標を達成するために使用したデータを説明する。

第3章 使用データ

この章では、まず分析対象のエリアを示し、その上で林分パラメーターの推定に使用される2種類のリモートセンシングデータと、推定結果の検証に用いられる植生調査について説明する。

3.1 本研究の分析対象エリア

分析対象エリアは青森県七戸町で北緯 40°39'，東経 141°5' *¹，標高約 200 メートルに位置する。図 3.1 に青森県七戸町の位置を示した。ここの山林地域には株式会社三菱製紙が所有する植林地が生息しており、その中から林齢や生育条件の異なるサイトを4つ選び、それらを検証サイトとした。これらのサイトを選んだ理由は、また日本の代表的な植林樹種であるスギ (*Cryptomeria Japonica*) であること、4つを比較することで、林齢の違い、間伐による影響の違いを考察できること、である。林分は林齢順に、St.1, St.2, St.3, St.4 と称する。

図 3.2 に2万5千分1地形図上((八戸, 十和田, 法量, 北東))に4つの検証サイトを示した。これらの詳細は3.3で詳しく説明する。また図 3.3 に分析対象エリアの様子を示した写真を示す。

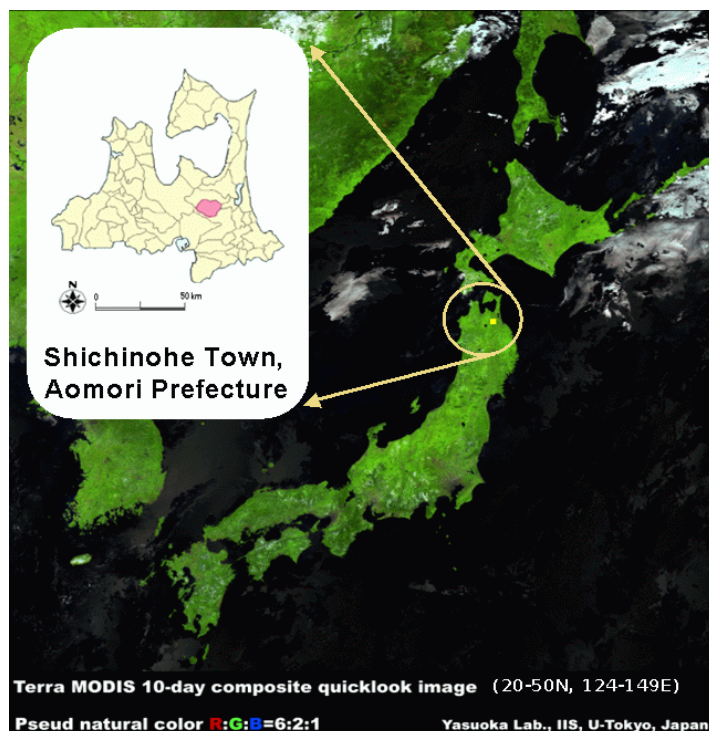


図 3.1. 青森県七戸町の位置。

提供：東京大学生産技術研究所・安岡善文研究室*²

*¹ 本研究で位置座標を表現する場合は、WGS84 に基づいた緯度経度もしくは日本平面直角座標系 (世界測地系) の第 X 系 (基準点: 140 度 50 分 0 秒 0000, 40 度 0 分 0 秒 0000) を用いる。

*² WebMODIS MODIS Data Service Center, URL: <http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/>. (竹内・安岡, 2004)

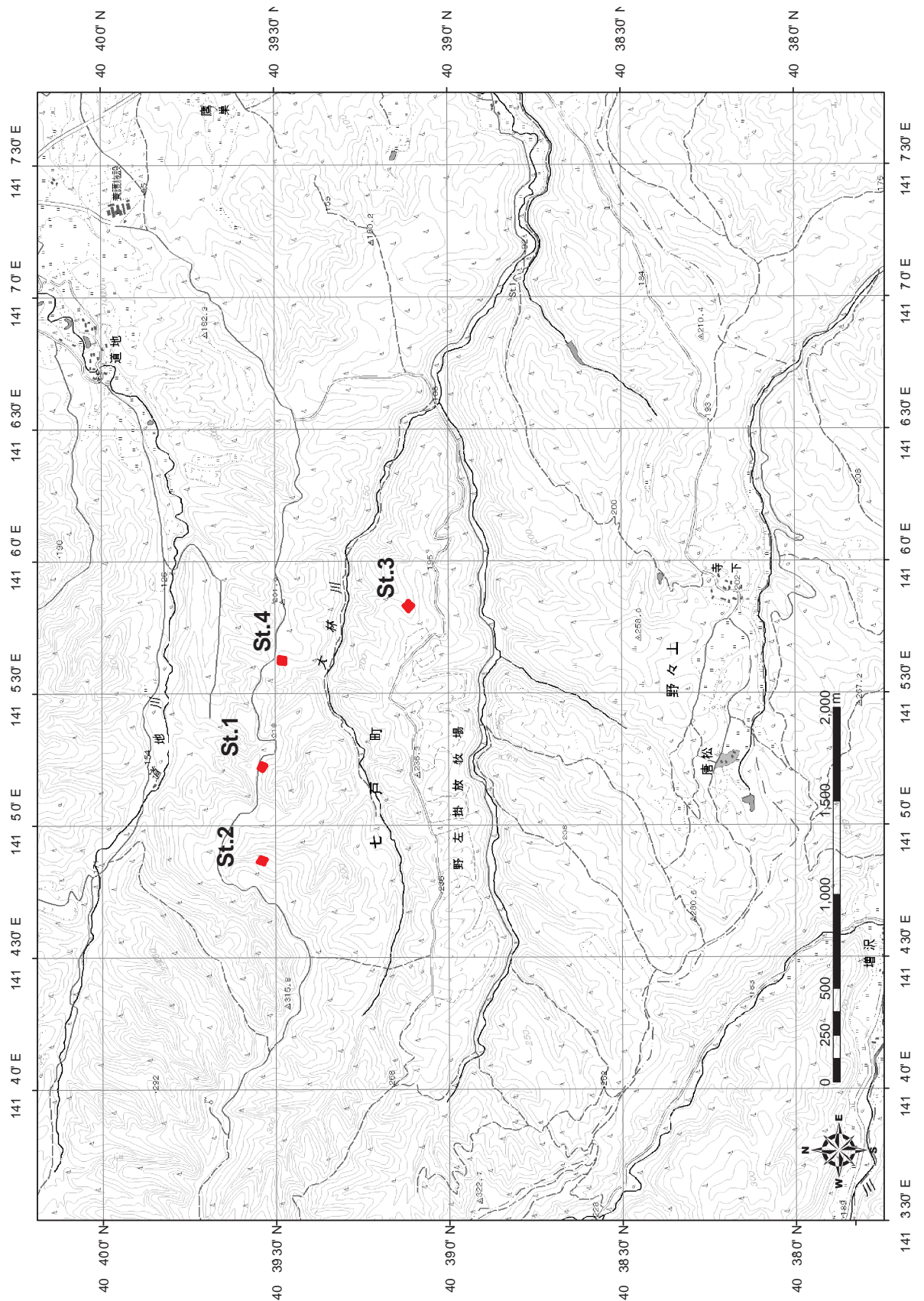


図 3.2. 2万5千分1地形図(八戸,十和田,法量,北東)上に示した4つの検証用林分の位置.



図 3.3. 分析対象エリア付近の様子を示した写真 .

3.2 リモートセンシングにより取得したデータ

3.1 で示した分析対象エリアにおいて、リモートセンシングによって取得したデータは、2 種類である。それらのデータ取得方法、システムのスペック、本研究での条件設定値、取得されたデータの特徴を順を追って説明する。また対象エリアの画像を示す。

3.2.1 航空機搭載レーザースキャナー (LiDAR) による 3 次元標高データの取得

Light Detection and Ranging (LiDAR) は、プラットフォーム (飛行機やヘリコプター) から地上に向けてレーザーパルスを発射し、反射パルスが地表面や地物で反射して戻ってくるまでの時間を計測し、3 次元デジタルデータを取得する技術である ((政春, 2002))。航空レーザ測量の概念図と取得可能な 3 次元データ例をそれぞれ図 3.4 と図 3.5 に示す。

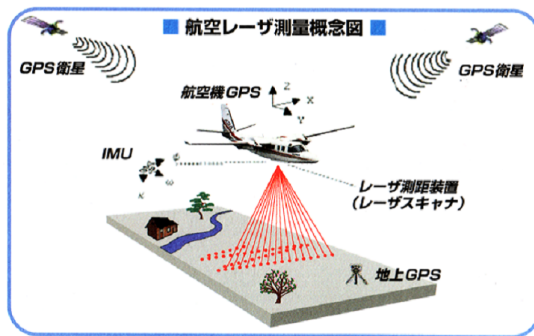


図 3.4. 航空レーザ測量の概念図。
(出典：航空レーザ測量 WG (2004))

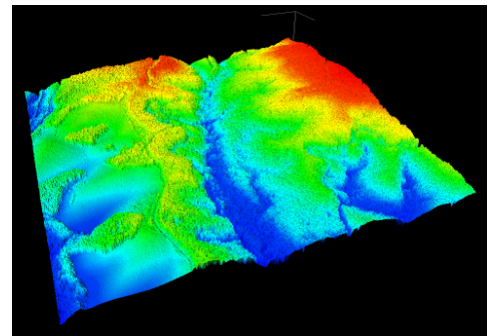


図 3.5. 航空レーザによる 3 次元標高データ例。

全体のシステムは Global Positioning System (GPS), Inertial Measurement Unit (IMU), レーザースキャナーの 3 つから構成される。

GPS は上空約 2 万キロメートルを周回する 24 個の GPS 衛星のうち 4 つ以上の GPS 衛星からの距離を同時に知ることにより、自分の位置を決定することができるシステムである。GPS 衛星は精密な時刻を刻む原子時計を搭載しており、GPS 衛星から発信された電波が受信機に届く時間を計算することで、GPS 衛星からの距離を知ることができる。高速で移動するプラットフォームの位置を精度よく求めるためには地上 GPS を用いて補正を行う。今回は検証サイトにもっとも近い三等三角点 (小館^{*3}) を使用した。

IMU は、プラットフォームの姿勢と加速度を求める装置であり、3 軸のジャイロと加速度計から構成される。GPS のデータは 1 秒ごとに地上とプラットフォーム上で取得されるが、航空機などは 1 秒間に数 10 メートル進むため、IMU はその間のデータをさらに 1/200 秒間隔で補間する。同時にプラットフォームの 3 軸姿勢 (ロール・ピッチ・ヘディング) に対する補正情報も提供する。

図 3.6 に本体と周辺機器の写真を示す。レーザースキャナーはプラットフォーム上に設置され、

*3 基準点コード：6041-70-8801 種別：四等三角点 冠字番号：K 栄 1 1 緯度：40° 39' 28.7101 経度：141° 5' 51.0664 標高：200.95m 座標系：10 系 X：73088.431m Y：22339.543m 縮尺係数：0.999906 ジオイド高：37.69m 行政名：青森県上北郡七戸町所在地：字野左掛 7 9 - 1

レーザーパルスの発射及び反射パルスの受信を行うシステムである。

表 3.1 に今回の計測で使用した Leica Geosystems 社製^{*4}の ALS50 のシステムスペックを示す。また表 3.2 に計測計画に基づくデータ仕様を表す。今回の LiDAR データは国際航業株式会社が運用する航空機から撮影され、データの提供を頂いた。

今回の計測は 2004 年 8 月 11 日午前 9 時から 11 時と 12 日午前 8 時から 10 時の 2 回のフライトのデータを融合したものである。どちらも飛行高度は平均 1829m、飛行速度は約 110kt である。パルスレートとはレーザーキャナが一秒間に発射するパルスの数であり、スキャンレートとはスキャン用反射ミラーが一秒間に往復する回数である。今回の計測条件の設定は、それぞれ 46kHz と 39Hz に設定した。計測したパルスは、1st, 2nd, 3rd, ラストを区別して記録したが、本研究ではすべてを合わせてランダム点群と称し、分析に使用した。ランダム点群の平均密度は 1 平方メートルあたり 10-15 となる。

図 3.7 に LiDAR により取得された Digital Elevatin Model(DEM) と Digital Surface Model(DSM) を示す。これらのデータの作成方法は、付録 B に示した。

本研究の独自性の一つは、LiDAR データの高い密度であり、他の研究と比しても 1 平方メートル当たり 1~3 点という研究が多い中 (Andersen et al., 2001; Persson et al., 2002; Heurich et al., 2004; Patenaude et al., 2004)、本研究と同等のパルス密度は Maltamo et al. (2004) や Riano et al. (2004) などのみであり報告は少ない。また、パルスのフットプリントが小さいほど、樹冠を透過する割合が多いこと (岡崎他, 2003) から、地盤高の推定も高い精度でできると期待される。



図 3.6. ALS50 本体と周辺機器

^{*4} Leica Geosystems 社 . URL: <http://gis.leica-geosystems.com/products/als50/>.

表 3.1. レーザースキャナのメーカー仕様 .

Laser system	ALS 50 (Leica Geosystems)
Laser type	Near-Infrared, Class4
Pulse rate	Maximum 83 kHz
Scan angle	Maximum 75°
Scan width	200 m - 4000 m AGL
Horizontal accuracy	± 0.30 m
Vertical accuracy	± 0.15 m

表 3.2. 飛行計画に基づく LiDAR のデータ仕様 .

Observed data	2004 August 11-12
Flight height	1829 m
Flight speed	110 kt
Pulse rate	46 kHz
Scan rate	39 Hz
Scan angle	20°
Scan width	average 647 m
Footprint size	0.47 m
Pulse density	10-15 pulse/m ²

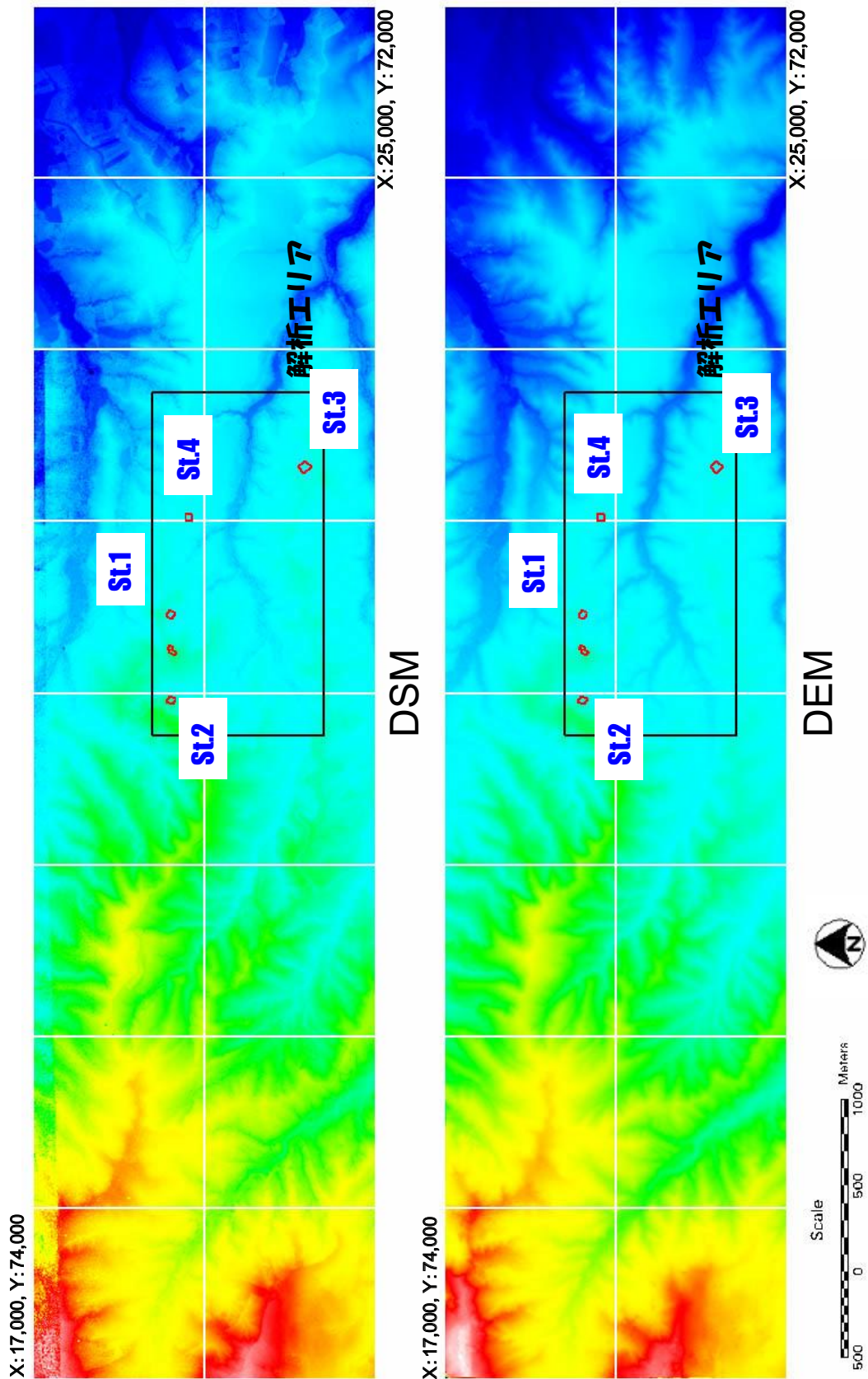


図 3.7. 分析対象エリアのデジタル表面モデル画像とデジタル標高モデル画像 .

3.2.2 航空機搭載デジタルカメラ (DMC) によるスペクトルデータの取得

DMC は、インターグラフとカールツェイスとの合併会社である Z/I Imaging 社^{*5}の製品であり、本研究ではその DMC を所有・運用する国際航業株式会社よりデータ提供の協力を頂いた。DMC は同時稼働の 8 個の CCD カメラで構成され、Charge Coupled Device (CCD) カメラをアレイ (配列) で配置することで、高精度のデジタル画像をが可能にしている。4 つの CCD はマルチスペクトル画像を生成し、残りの 4 つの CCD で得られたパンクロ画像はデジタル方式でモザイク処理され、一枚の高解像度画像を出力する。DMC のカメラヘッドの大きさはこれまでのフィルムベースの航空カメラと同一である。また LiDAR と同様、取得画像の補正のため GPS と IMU が搭載されており、カメラフレーム内に頑強に装着されている。記憶容量は 840GB の 3 つの RAID ユニットで構成され、2000 枚以上の 12 ビット画像を一回の飛行で撮影することができる (堀江, 2002)。

業務上の利点としては、これまでのデジタルカメラは画像精度が低いため、測量用としては使うことができなかったが、DMC では精密測量用にすべての画像歪が補正されており、かつ地上解像度 5 cm と極めて高精細な画像を取得できるため、大縮尺 (例えば、 $S=1/500$) での航空写真測量が初めて可能となった。また DMC は、フルデジタルのため、航空写真のスキャンやフィルム現像処理が不要となり、時間とコストを大幅に圧縮できる。取得画像についても、3次元の中心座標とその傾きを同時計測する Position and Orientation System の搭載によって、航空写真測量で必要な幾何補正が大幅に軽減されている。



図 3.8. DMC 本体の写真。

図 3.3 にメーカー公表のスペックを示し、3.4 に計測計画に基づくデータ仕様を示す。今回の計測は、2004 年 8 月 11 日の午前中に、飛行高度平均 1000 メートル、飛行速度約 110kt で航行する飛行機から撮影を行った。画像は 60% のサイドラッピングが施されている。地上部での空間解像度は 0.1 メートルである。

本研究では、LiDAR データより作成した DEM を使用して簡易オルソ画像を生成し、1km ごとのタイルに分けた。取得した画像は赤 (R)、緑 (G)、青 (B)、近赤外 (NIR) の 4 種類であり、空間

^{*5} Z/I Imaging 社。URL:<http://imgs.intergraph.com/dmc/>。

解像度は0.1メートルに設定した。データはもともと12ビット画像であったが、さまざまなソフトウェアで汎用的に処理することを目的に16ビット画像に変換した。その際、データの劣化が発生しないよう、数値の正規化やストレッチは行っていない。

図3.9に取得したRGB画像とNIR画像を示す。

本研究の独自性はDMCの高い空間解像度にも位置づけることができる。これまでは、30-50センチメートル解像度のデータが主流であったが (Wulder et al., 2000; Leckie et al., 2005), 本研究では10センチメートル解像度の画像を使用した。高分解能になると、一つの樹木から得られる情報量は増えるが、たとえば材積とNDVI相関kが飽和するなど (Touminen and Pekkarinen, 2005) 必ずしも、推定精度が改善されるとは限らない。今回取得した高解像度画像を生かせる手法を採用もしくは開発する必要がある。

また、LiDARとDMCが正確かつ精度のいい地理座標処理が施されている、0.1メートル解像度においても重ねあわせが正確に行われている。

表3.3. DMCののメーカースペック

Camera System	DMC (Z/I Imaging)
Sensor Channels	Blue(400-580nm), Green(500-650), Red(590-675), Near-Infrared(675-850)
Field of View	74° x 44°
Image Resolution	12 bit

表3.4. 飛行計画に基づくDMCのデータ仕様

Observation Data	2004 August 11
Flight Height	Average 1000 m
Flight Speed	Average 110 kt
Side Rapping	60 %
Spatial Resolution	0.1 m

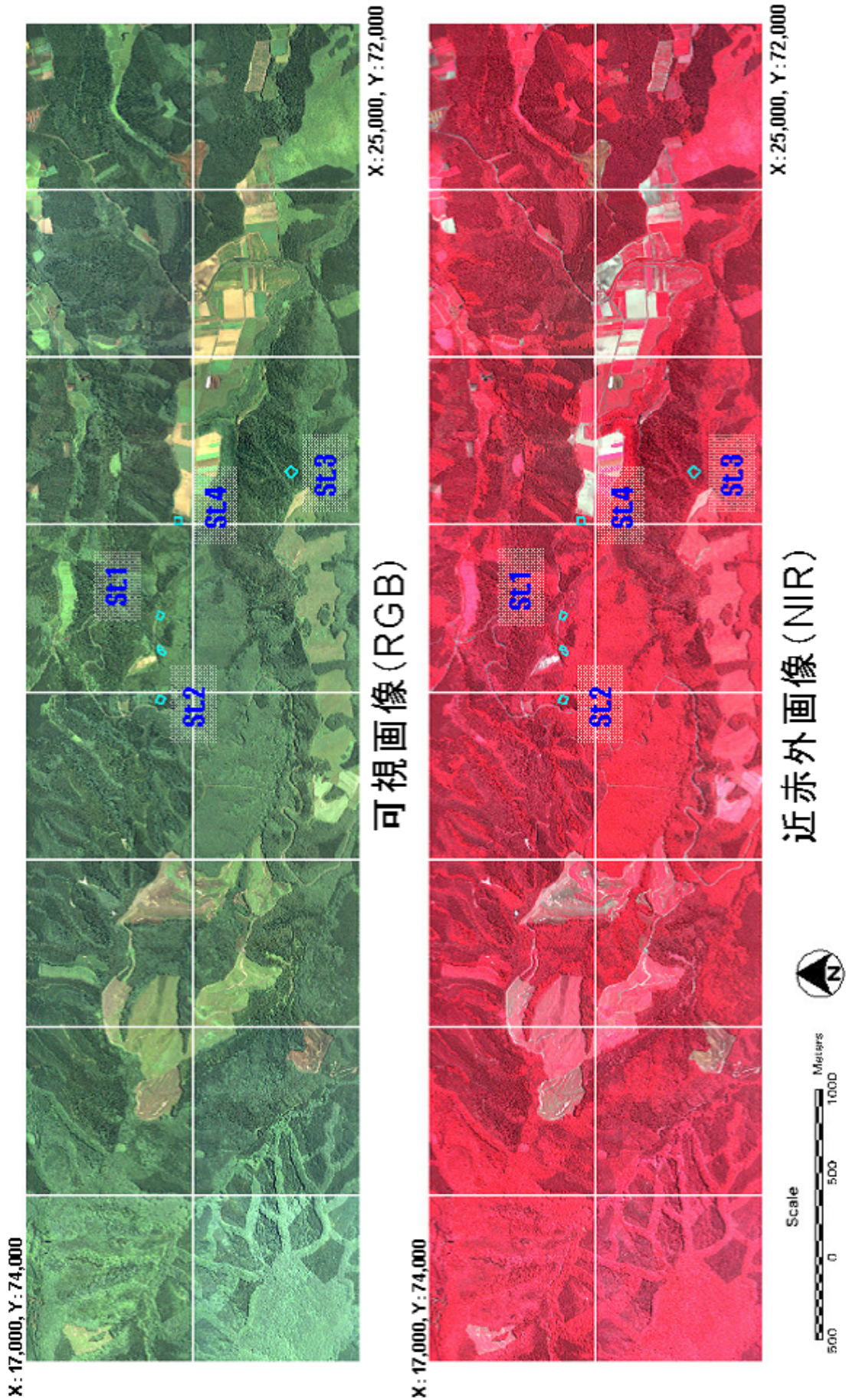


図 3.9. 分析対象エリアの可視 (RGB) 画像と近赤外線 (NIR) 画像 .

3.3 毎木調査による検証用データの取得

3.2.1 と 3.2.2 で説明した両データを用いて推定する林分パラメータの精度検証を目的として、検証サイトにおいて直接計測による植生調査を実施した。以下には、直接計測を実施した項目と測定方法を説明する。

3.3.1 毎木調査による林分パラメータの計測

図 3.10 に毎木調査の様子を示し、また表 3.5 に毎木調査の結果を表にまとめた。毎木調査によって取得する林分パラメータは、5 つである。これは単木位置、樹高、胸高直径 (Diameter at breast height: DBH)、下草植生の 4 点に加え、計測された樹高と DBH を基に日本国内で常用されている林分材積表を用いて立木材積を推定し、これを真値と想定した。以下に順を追って説明する。

植生調査領域の選択に際しては、林縁効果を避けるために、林道や林分の境界線からは 5 メートル程度の距離をとった。調査領域の決定には巻尺を用いてなるべく約 40 メートル四方になるように 4 本の木を選択し、それらをビニールテープで結んだ。調査対象樹木はそのビニールテープで囲われた範囲内に存在しかつ DBH が 5 センチメートル以上の樹木である。植生はそのほかに高木層にアカマツ、カラマツ、ミズナラ、桜、低木層にササや複数のシダ植物が確認できた。枯損木と樹頂が 2 つ以上ある樹木に関してはコメント欄に状態を記録した。また目視で上空からの可視判定を行い記録した。

立木位置 (X・Y) 位置の計測には GPS Pathfinder Pro/XR(Trimble 社製) を用いて、Differential GPS (DGPS) によって、X と Y 座標を日本平面直角座標系第 X 系で計測し記録した。水平方向の計測誤差は、最小衛星数 5、PDOP が 6 以下、かつビーコン信号を受信した場合には 1 メートル以内とされている。毎朝、林分内での計測前に付近の三等三角点 (小館^{*6}もしくは柳沢^{*7}) で系統誤差の計測を行い、X 方向と Y 方向への補正を行った。一日を通して系統誤差は普遍と仮定した。位置の計測を始める際には、調査プロット内で放射器械点を固定のうえ GPS 測位を行い、その点から毎木について LaserAce300(MDL 社製) と反射板を用いて、放射器械点から毎木への距離と角度を計測することで、地理座標上の絶対位置を記録した。水平角 (方位角) は $\pm 1^\circ$ の精度で 0.1° 分解能にて $0^\circ \sim 360^\circ$ の計測が可能である。偏光フィルターを装着することでレーザー計測の際に障害となりうる低木の影響を低減した。データの記録には Psion(サイオン) を使用した。

樹高 (Z) 計測には LaserAce300 を使用した。ある地点から対称木の 1.2 メートル高までの距離と、同地点から計測する根元と樹頂の角度により樹高を推定する。測定可能距離は 0 ~ 300 メートル、距離精度は ± 10 センチメートルで、最小単位はセンチメートルである。鉛直角は、 ± 0.3 度の精度で 0.1° 分解能にて $\pm 80^\circ$ の計測が可能である。位置の計測同様、偏光フィル

*6 基準点コード：6041-70-8801 種別：四等三角点 冠字番号：K栄11 緯度：40° 39' 28.7101 経度：141° 5' 51.0664 標高：200.95m 座標系：10 系 X：73088.431m Y：22339.543m 縮尺係数：0.999906 ジオイド高：37.69m 行政名：青森県上北郡七戸町 所在地：字野左掛 7 9 - 1

*7 基準点コード：6041-70-8601 種別：四等三角点 冠字番号：K栄12 緯度：40° 39' 27.7129 経度：141° 4' 19.2151 標高：315.84m 座標系：10 系 X：73051.505m Y：20182.134m 縮尺係数：0.999905 ジオイド高：37.83m 行政名：青森県上北郡七戸町 所在地：字道地 7 1 番地



図 3.10: 毎木調査の様子 (左上: DGPS と反射板による位置計測 (右上: 樹高計測, 左下: DBH 計測, 右下: 下草調査)) .

ターを装着することでレーザー計測の際に障害となりうる低木の影響を低減した。樹高の計測単位はメートルで小数点第一位まで記録した。

胸高直径 (DBH) 樹木の山側に立ち地上高 1.2m の位置で、巻尺を用いてミリメートル活約にて測定した。林分材積表で 2 センチメートル活約であるが、後述する DBH の推定を考慮して、計測単位はセンチメートルで小数点第一位まで記録した。

下草調査 サイト内の 5 箇所 (4 隅と中央) で、1 メートル四方の区画をビニールテープで作り、その中に含まれる下草植生の高さと同被度を記録した (図 3.10 右下参照)。高さは巻尺もしくは、

GPS アンテナのポール (20 センチメートル刻み) を使用した。被度に関しては、目視で判断した。調査領域内の下草植生被度は 5 箇所 の平均値と定義した。

立木幹材積 (V) 樹高と DBH より幹材積表 (林野庁計画課, 1970) の「青森. 岩手. 宮城地方」の換算表を参照して求めた。ここでの「材積」とは樹木から枝条をとり去った樹幹の体積。計測単位は立方メートルである。小数点第 3 位まで記録した。本研究で「材積」とは断りが無い限り「樹幹材積」を指す。使用した推定式を抜粋して下記に示す。

スギ (人工林)(昭和 33 年調製)

$$\log V = 5.823858 + 1.930072 \log DBH + 0.890582 \log Z \quad (DBH = 4 \sim 10) \quad (3.1)$$

$$\log V = 5.729796 + 1.933985 \log DBH + 0.974995 \log Z \quad (DBH = 12 \sim 20) \quad (3.2)$$

$$\log V = 5.794481 + 1.778137 \log DBH + 1.086571 \log Z \quad (DBH = 22 \sim 40) \quad (3.3)$$

$$\log V = 4.145934 + 1.616131 \log DBH + 1.026974 \log Z \quad (DBH = 40 \sim) \quad (3.4)$$

表 3.5 に、以上の方法によって直接計測された毎木調査の結果をまとめた表を示す。また図 3.13 から図 3.14 に、各サイトの写真を示す。

表 3.5. 直接計測による 4 つの検証サイトの林分パラメーター。

St.No.	1	2	3	4
Area	0.124	0.155	0.200	0.161
Y.O.P.	1986	1960	1960	1955
Age	19	45	45	50
Species	Ceder(87%) Pine(13%)	Ceder(100%)	Ceder(100%)	Ceder(75%) Pine(25%)
aveZ(sd)	6.6(1.4)	22.3(2.3)	25.7(1.4)	21.0(3.0)
aveDBH(sd)	10.6(3.0)	28.5(4.8)	33.8(3.5)	26.5(5.8)
N	171	110	77	118
N/ha	1202	710	385	732
V	5.21	74.39	81.21	68.31
V/ha	42.02	479.94	406.05	424.29
gvZ	1.3	0.2	0.6	0.6
gvC	90	26	42	51
Sloping	South	South west	West	South
Last pruning	1993	1996	2004	1997

Y.O.P. = Year of plantation, Area = Area of a plot[ha], Age = Age at 2004, Species = Name of species and percentages in the number of trees, aveZ [m]= Average height, aveDBH [cm] = Average diameter at breast height, N = Number of trees in a plot, N/ha = Number of trees in a hectare, V = Stand volume [m³], V/ha = Stand volume in a hectare [m³]/ha, gvZ = Ground vegetation height [m], gvD = Ground vegetation cover [%], sd = Standard deviation.



図 3.11. St.1 の様子を示した写真 .



図 3.12. St.2 の様子を示した写真 .



図 3.13. St.3 の様子を示した写真 .



図 3.14. St.4 の様子を示した写真 .

3.3.2 各林分の特徴

ここでは各林分の特徴を樹高や DBH の分布から把握する．ここでの考察を，のちに推定結果としてでてくるパラメータの精度や誤差の要因と照らし合わせていく．

図 3.15 に 4 つの林分の樹高と DBH の分布を示したヒストグラムと箱ヒゲ図を示す．箱ヒゲ図の箱の両側は 25%と 75%点を示し，箱の中央線は中央値である．またひし形は平均値と 95%信頼区間を示す．箱に並行する赤括弧は，サンプルの 50%を含む最短領域を示し，密度が高い部分を表している．上下に大きく外れた黒点ははずれ値である．

すべての林分を対象とした樹高と DBH に関する考察 樹高，DBH ともに平均値は St.3 が一番高くかつ分散も小さいことが分布から見て取れる．St.4 は一番林齢が高いにも関わらず，平均樹高は下から 2 番目であり，分散も大きい．St.1 と St.3 は平均樹高こそ大きく異なるものの，分布や分散の様子が似ている．

St.1 この林分は林齢が 19 年であり，平均樹高は 6.6 メートル，平均 DBH は 10.6 センチメートルである．下草刈や間伐が行われていなかったこと，傾斜が大きいこと，土壌条件が悪いことなどの条件により成長は悪く，カラマツや下草が無秩序に交じり合ううっそうとした林分となっている．下草も地上 1 メートル以上までは他の樹木に巻きつく形で成長しており，歩くことさえ困難な場所もある．

St.2 この林分は林齢が 45 年，平均樹高 22.3 メートル，平均 DBH 28.5 センチメートルである．1996 年に間伐が行われてから 8 年が経ち林冠が閉鎖している．下草植生はもっとも少なく低い．このサイトの樹高と DBH の成長は，同齢のサイト 3 と比べると成長が遅いが，5 年林齢の多いサイト 4 と比べると早い．それぞれ間伐と地位の影響だと考えられる．

St.3 4 つの林分の中でもっとも成熟した林分といえる．平均 Z と平均 DBH は，それぞれ 25.7 メートルと 33.8 センチメートルとなる．樹高，DBH の分散はともに，林齢 45 年を超えるサイトとして最も少ないが，一方で樹高と DBH の相関係数は 4 つのサイトの中で一番低い．つまり，人為的な間伐行われたことで，低い樹木でも太い DBH を得ることができたと考えられる．

St.4 ここは林齢が一番高いにもかかわらず，樹高と DBH は St.2 に劣る．間伐が St.2 の一年後に行われたことと，地位の違いによるものだと思われる．林冠は閉鎖しているが下草植生にはシダが多く確認できた．また水分量も多いエリアである．

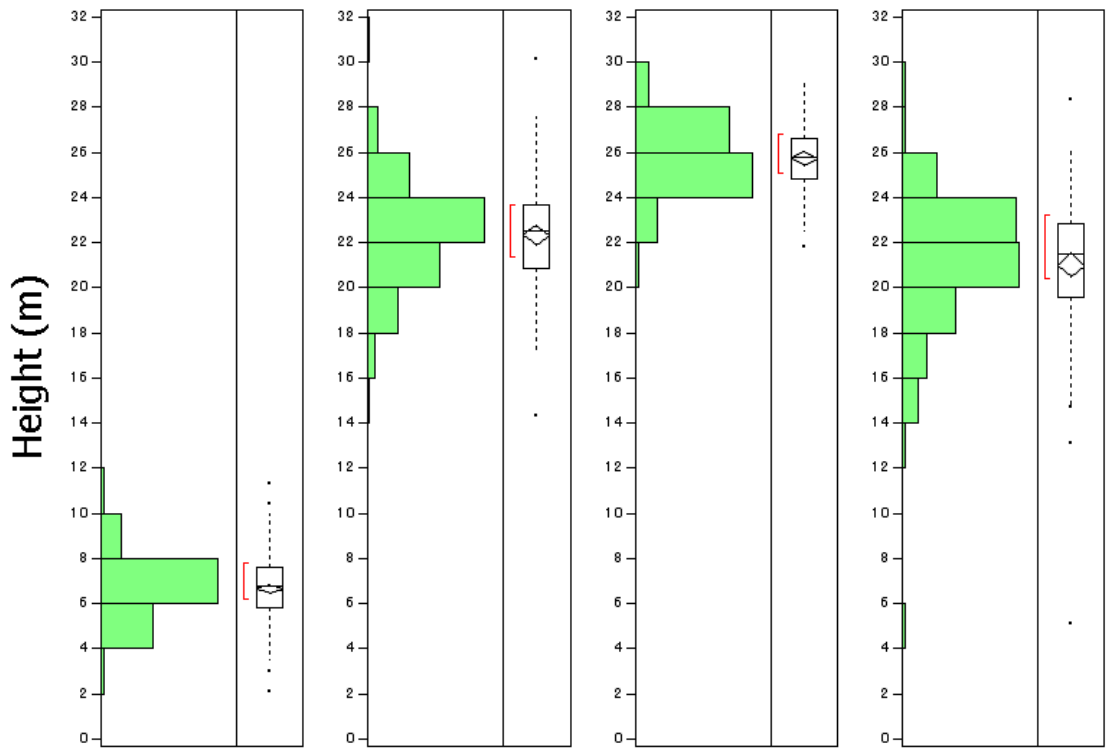


図 3.15. 4 つの林分の樹高 (m) の分布を示した箱ヒゲ図

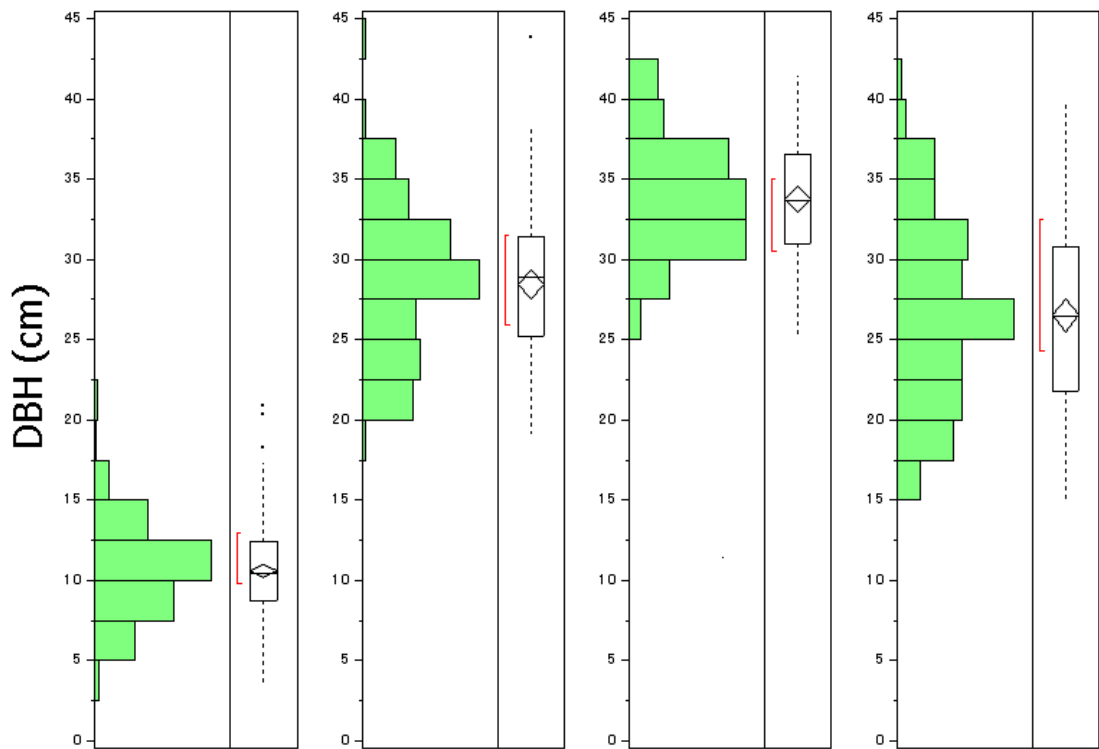


図 3.16. 4 つの林分の DBH(cm) の分布を示した箱ヒゲ図 .

次に表 3.6 に各林分での樹高と DBH の相関係数を、図 3.17 に樹高と DBH の散布図を示す。

相関係数はそれぞれ 0.87, 0.71, 0.67, 0.80 であった。すべての林分で高い相関を示しているが、興味深いのは St.3 において、相関係数が一番低いことである。自然対数による相関係数も計算したが、これらを超える相関は、今回の分析対象林分では確認できなかった。

散布図において、St.1 が黒、St.2 が赤、St.3 が緑、St.4 が青であり、楕円は 95% 信頼率による確率楕円である。St.1 が強い相関を示しており、他の 3 つと比べると明らかに異なる関係性を有している。DBH の推定の際には、St.1 と他のサイトは異なる推定式を用いることが検討される。St.3 は狭い範囲で分布しているが、St.2 と St.4 は広がりを持って分布している。この分布の違いが、相関係数にも現れていると考えられる。

表 3.6. 4 つの林分の樹高と DBH の相関係数

St.No.	1	2	3	4
Correlation coefficient	0.87	0.71	0.67	0.80

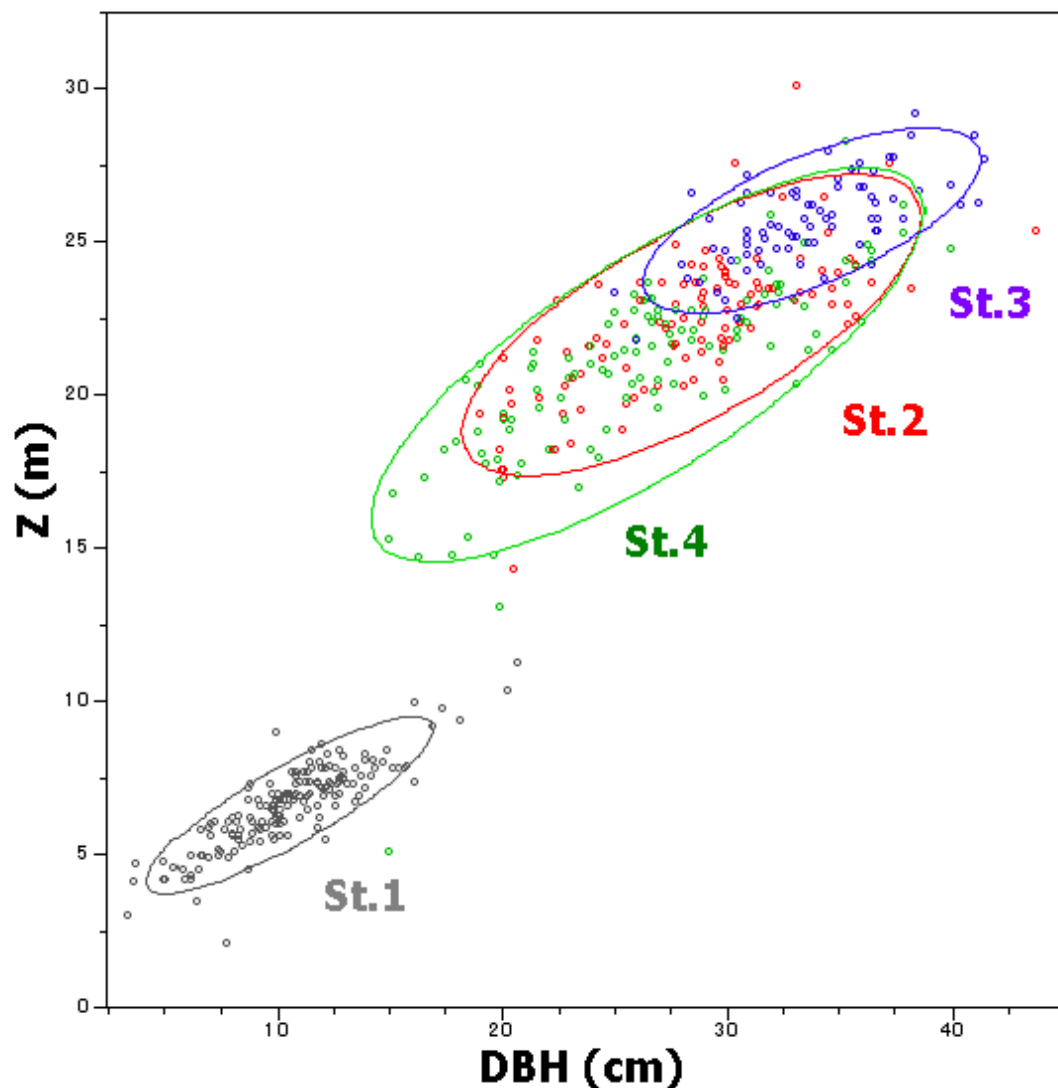


図 3.17. 4 つの林分の樹高と DBH の散布図 (林分による色分け)。

3.4 まとめ

本章では以下の 4 点を示した。

- 青森県七戸町の植林地を対象に LiDAR と DMC のデータを取得した。ほぼ同じ日時に両データを取得したことと、正確な座標を有することで、それぞれの比較や重ねあわせに適切なデータである。
- 両データの特徴は高空間分解能 (LiDAR : 10 パルス/m², DMC : 10 センチメートル) である。このレベルの解像度での先行研究は少なく、本研究の独自性と位置づけることができる。
- 推定値の検証のため毎木調査を行い、樹高、DBH を直接計測し、材積を林分材積表を用いて求めた。これらのデータをリモートセンシングからの推定値と比較することで、推定値がどれくらいの正確さとどれくらいの精度を有しているかが検討できる。
- 毎木調査の樹高と DBH の分析結果によると、各林分は林齢と人為的な要因により成長状態が異なるため、それらの要因とリモートセンシングによる推定結果を考察することが可能である。

第 4 章では、LiDAR と DMC の 2 種類のデータをどのように使用することで、林分パラメータを推定するかを説明する。また推定結果を、どのように植生調査と照らし合わせ、正確さと精度を計算するかを明らかにする。

第4章 リモートセンシングを用いた林分パラメータの抽出手法

ここでは LiDAR と DMC の 2 種類のデータをどのように使用することで、林分パラメータを推定するかを示す。

まず基本樹木モデルを説明し、つぎに LiDAR と DMC によって得られたデータとモデルを用いてどのように樹冠領域を検出するかを示す。さらに抽出された樹冠領域から樹高と胸高直径の推定方法を行う。以下に順を追って説明をしていく。

最後に、これらの推定された単木を、植生調査で得た実測値とどのようにマッチングを行うかも説明する。

4.1 本研究で用いた基本樹木モデル

ここでは樹木の視覚的な特徴と形態的な特徴を考慮した基本樹木モデルを説明する。基本樹木モデルはスギ人工林を想定する。対象エリアが林業経営を目的とした人工林であり、優占種がスギであることが主な理由である。

図 4.1 にサンプルエリアの近赤外線画像、NDSM 画像、2 つを重ね合わせた 3 次元表現の画像を示す。画像は一辺が 10 メートルあり、10 センチメートル解像度のため一辺が 100 ピクセルある。現地調査に基づくと、このエリアには 5 本のスギが存在する。

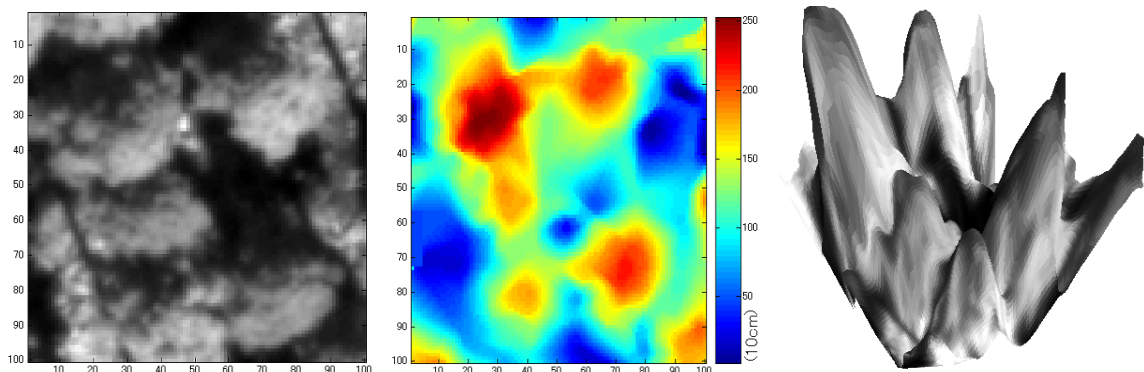


図 4.1: サンプル画像 10 x10 m (100 x 100 pixel) ; 近赤外線画像 (左), NDSM(中央), 近赤外線画像を NDSM 上に重ね合わせ 3 次元表現したもの (右) .

4.1.1 樹木の視覚的な特徴

スギ人工林の視覚的な特徴 (Visual characteristics) を説明する。図 4.1 を見ると、5 本のスギがある程度の類似性を持って並んでいることが目視できる。画像に記録されるスギの視覚的特徴は、

太陽高度，対象地の斜面，密度，重なり具合，混交率によって異なるが，林分は樹種および林齢が区分された区域であるため，瞬時に撮影された画像が持つスギの視覚的特徴がほぼ均一であると考えられる（大隈，2001）．よって本研究では，スギは「上空から見ると1本のスギらしく見える」と想定した．よってそのような見え方をしている場所を指定し，それを雛形（テンプレート）とした．

4.1.2 樹木の形態的な特徴

次にスギ人工林の形態的な特徴（Morphological characteristics）を説明する．スギは成熟木になると高さ25メートルを超える常緑針葉高木であり（アレン，1994），図4.1においても5本のスギが，18-25メートルの樹高を有していることが見て取れる．よってLiDARによって計測された場合，スギが存在する場合，樹頂を頂点とし，樹冠面と樹冠幅を境界とする凸面体（a convex object, convexity）を形成する．もちろんすべての凸面体がスギではないが，スギであることの凸面体を形成することは一条件である．

4.1.3 視覚的特徴と形態的特徴の融合

ここでは，上記の視覚的特徴と形態的特徴を融合する必要性を図4.2を用いて説明する．

上空から撮影された画像を視覚的特長から分類をすると，スギらしく見えてもアカマツやヒノキの可能性もある．また芝地や下草植生が，偶然にスギらしく見えている可能性もある．一方でNDSMに対して形態的特長からスギの検出を試みても，山小屋や鉄塔など，凸面体を形成しうる地物である可能性も否定はできない．

そこで，それら2つの条件を融合することで，スギである可能性を高めることができると考えた．芝地や下草植生は視覚的特長がスギと似ているが，形態的特長においては高低差が少なく凸面体を形成しない．また人工地物は高低差によって凸面体を形成するが，上空からみてスギらしく見えるものは少ないと考えられる．

対象地には，スギと視覚的特長が極似しているヒノキやヒバなどは確認されなかったが，スギ以外の針葉樹（アカマツやカラマツ）が確認されている．本研究ではこれらの樹木も検出された場合は，スギとして樹高やDBHの推定を行った．近赤外線画像や可視画像を用いることでこれらの混交樹木を分離することは可能であったが，本研究は同一種の人工林をターゲットとしているので，それらの分離処理は含めなかった．

以上をまとめると，本研究の基本樹木モデルは1) 上空から見た場合にスギらしく見える，かつ2) 凸面体を形成している，ものとする．よって以下ではリモートセンシングデータを用いて，どのようにこの2点の特徴をとらえ，樹木を検出するかを説明する．

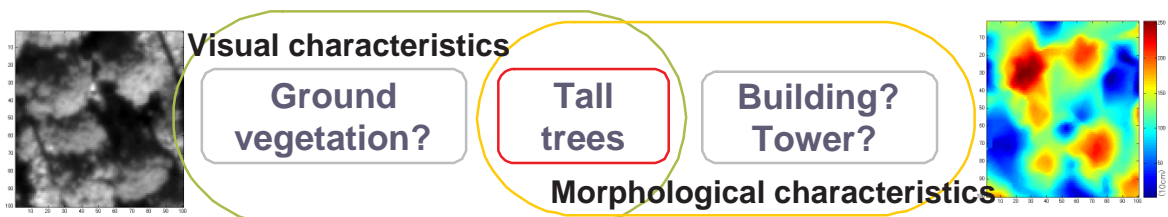


図 4.2. 概念図：視覚的特徴と形態的特長の融合．

4.2 リモートセンシングによる樹冠領域の検出

ここでは、4.1 で説明した基本樹冠モデルを基に、リモートセンシングを用いて樹木の抽出を行う方法を説明する。図 4.3 に、近赤外線 (NIR) 画像と正規化デジタル標高モデル (NDSM) を用いた樹冠領域の検出までのフロー図を示した。

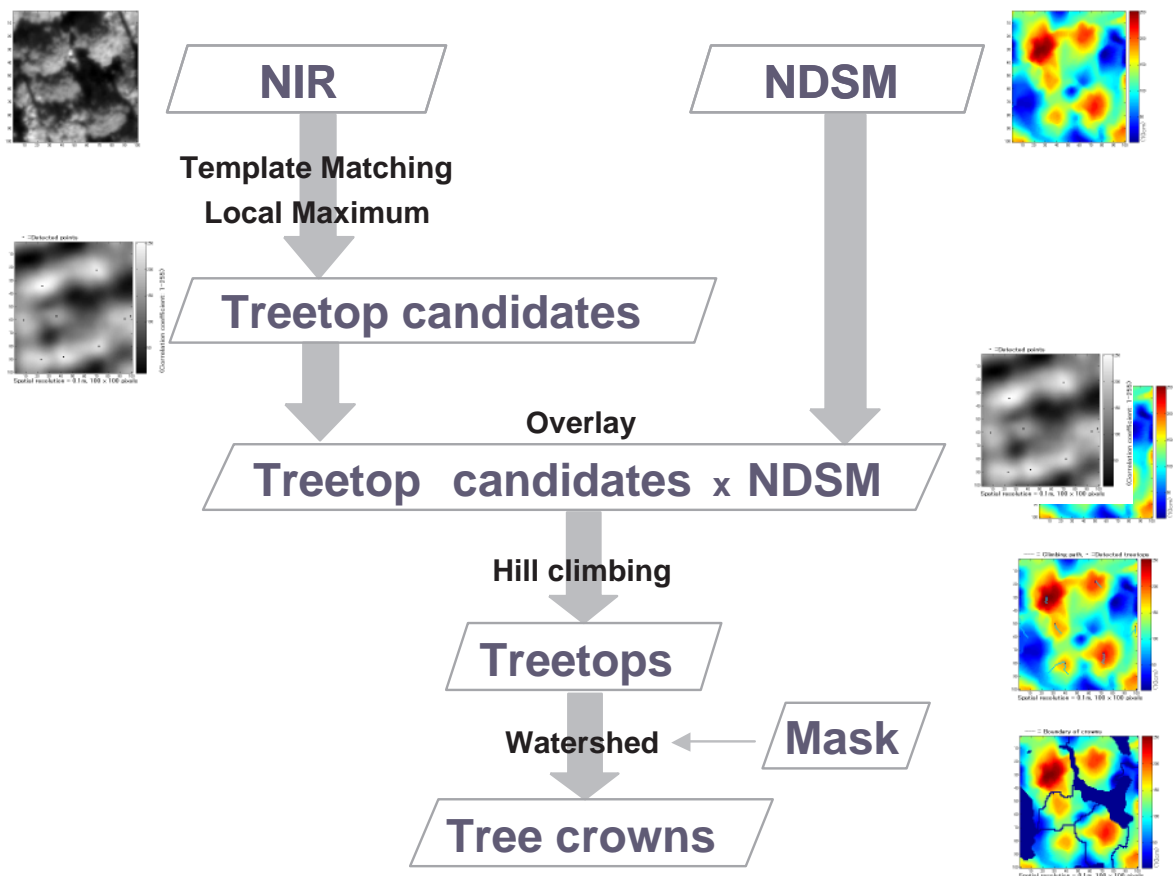


図 4.3. リモートセンシングデータによる樹冠領域抽出のフロー図。

まず、4.1.1 で説明した視覚的特長を捉えるために、DMC の近赤外線画像 (NIR) を使用した。近赤外線画像が植物の特性を十分に反映していることに加え、今回の画像の中では可視域のバンド画像と比べてノイズが少なかったからである。

NIR に対して視覚的特長を定量化する Template Matching 法を適用し樹頂候補点 (Treetop candidates) を検出し、4.1.2 で説明した形態的特長を加味するために LiDAR の標高データと重ね合わせた。ここでの標高データは、建物などの地物の高さを含んだ数値表層モデルから地盤高を差し引いた、正規化数値表層モデル (Normalized Digital Surface Model: NDSM) を使用した。

さらに形態的特長を踏まえ、樹頂候補点を NDSM 上を Hill climbing 方により各凸面体の頂点に収束させ、樹頂点 (Treetops) を決定した。この樹頂点を始点として、Watershed 法を用いて最終的に樹冠領域 (Tree crowns) を推定した。その際には、LiDAR パルスの樹冠面からの反射率に基づいたマスク画像 (Mask) を使用した。

以下では、ひとつひとつの手法を、サンプル画像を示しながら詳しく説明する。

4.2.1 樹木の視覚的特徴と DMC による樹冠候補点の検出

視覚的特徴を用いて樹頂候補点を検出することを目的に、DMC 画像を用いた処理を行った。以下では Template Matching 法を用いた視覚的特徴の定量化と、Local-Maximum 法による樹冠候補点の検出の処理を説明する。

Template Matching(TM) 法を用いた視覚的特徴の定量化 TM 法は、樹冠の形状や大きさ、樹冠での反射特性をモデル化し、作成もしくは選択したテンプレートを利用して、テンプレート画像と対象画像の 2 次元的な相関係数を計算し、視覚的特長を定量化する。

図 4.4 左に近赤外線画像と、赤い四角で囲ったテンプレートを示した。テンプレートは手動で選択した。このテンプレートと元画像との 2 次元的な相関係数を計算すると図 4.4 中央の結果が算出される(表示画像は 0~255 の値で正規化処理したもの)。相関係数を算出することで視覚的特長が定量化された。TM 法ではある閾値を設定して対象物の有無を判断する方法もある。しかし解像度が高い本研究のデータの場合は過剰検出となってしまうため、次に説明する手法を説明した。

Local Maximum (LM) 法による樹頂候補点の検出 LM 法は、対象画素を中心としたある大きさのウィンドウを設定し、対象画素の輝度値が最大であれば、その点を局所最大値として記録する。

樹冠が現地計測でも確かに存在する点では、テンプレートとの相関係数が大きくなる。TM 法の結果画像に対して、LM 法を適用するのは、そのような視覚的特長が局所的に最大値になる点を検出することで、樹冠があるであろう点を候補として抽出するためである。図 4.4 中央の黒点が LM 法によって検出された樹冠候補点である。

図 4.4 右では、元の近赤外線画像と重ね合わせ、TM 法と LM 法の組み合わせによりほぼ正確に樹冠候補点を検出できていることが確認できる。しかし、左下の 2 点は芝地に対する過剰抽出であり、また中央右側の 2 点は 1 つの樹冠に対する過剰抽出である。

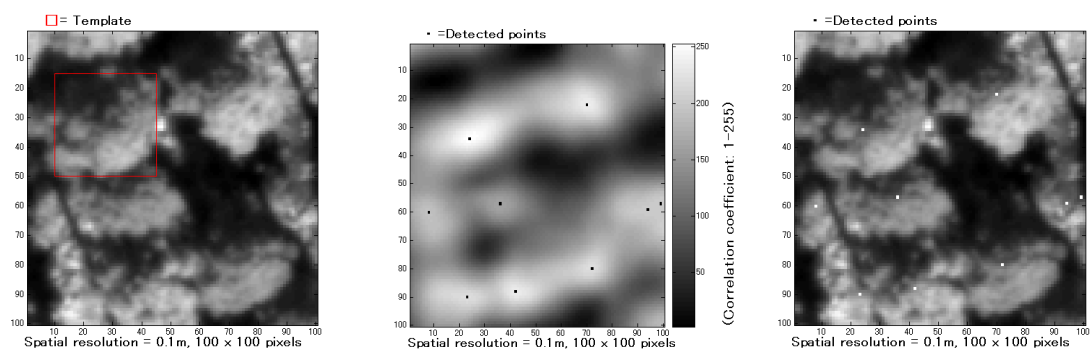


図 4.4: Template Matching 法と Local Maximum 法の結果例例 (左: 近赤外線画像とテンプレート, 中央: TM 法の結果画像と LM 法の結果画像, 右: 元画像と LM 法の結果画像)。

4.2.2 樹木の形態的特長と LiDAR 樹冠領域の検出

次に形態的特長を用いて樹頂候補点から樹頂点を検出し、その樹頂点を始点として樹冠領域を検出することを目的に処理を行った。以下では、NDSM を用いて Hill-climbing を行い樹頂点を検出し、その樹頂点を始点とした Watershed 法による樹冠領域の決定方法を説明する。

NDSM に対して Hill Climbing(HC) 法を用いた樹頂点の決定 4.2.1 で抽出された樹頂候補点と、付録 B.2 で作成した NDSM を重ね合わせ、HC 法による樹頂点の探索を行った。

これは樹頂候補点群を始点として、あるウィンドウサイズの中で標高の高いほう常に探すアルゴリズムであり、標高の低い点に存在する下草部分や同一樹冠内で過剰抽出された樹冠候補点を除去することを目的としている。最終結果はすべての点群が、凸面体の頂点へと導かれていく。移動式 LM 法とも解釈することができる。図 4.5 左に、HC 法の結果例を示す。図中、標高が高い地点に存在する青点が、HC 法によって決定された樹頂点である。水色の線は、始点から樹頂点への経路を示す。中には複数の始点から、一つの樹頂点へ向かっている様子も確認できる。

Watershed(WS) 法による樹冠領域の決定 WS 法はある頂点(梢端と思われる点)から始まり、勾配に沿って周囲に領域を拡大していき、同様に拡大してくる隣接する領域との関係において樹冠の境界を設定することで樹冠を抽出する。この手法は一般的には高さのデータを持つ地形データから流域分割や分水嶺を算出するアルゴリズムとして開発されてきた手法であるが、NDSM の標高の大小を反転させることで樹冠を抽出する目的で利用されている。

この手法を採用した理由は、樹頂点から樹冠領域を決定する際、樹頂点間の距離だけでなく樹冠面の形状も考慮に入れるためである。本研究では HC 法の結果画像を頂点とし、NDSM を標高データとして用いる。

図 4.5 中央は WS 法に用いたマスク画像である。これは LiDAR のパルスの割合によって、林冠の存在の有無を判断したマスク画像である(詳細は付録 B.2)。白いエリアが林冠部分を示す。これを WS 法に用いることにより、林冠部分のみを用いて、個別の樹冠に分割することができる。

図 4.5 右は WS 法の結果画像である。樹冠の中心を HC 法の結果を用いたので、樹冠の数は HC 法で決定された樹頂点の数に等しい。このように HC 法と WS 法をあわせることで、樹頂点の数を定めた上で、標高に基づいた樹冠の分割が可能であった。

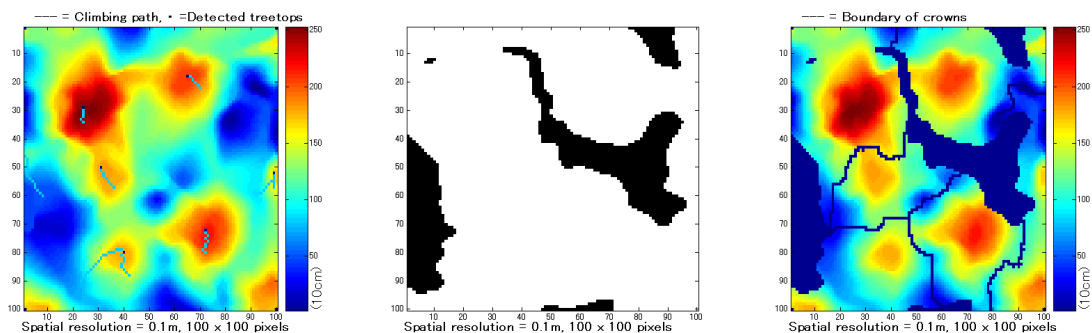


図 4.5: Hill Climbing 法と Watershed 法の結果例 (左: NDSM 画像と HC 法の結果画像, 中央: WS 法に用いたマスク画像, 右: WS 法の結果画像)。

4.3 検出された樹冠領域の樹高と胸高直径の推定

4.2 では、基本樹木モデルを想定し、リモートセンシングを用いて、樹冠領域を決定することを説明した。ここからは、その樹冠領域から、その下に存在すると考えられる樹木の樹高と DBH の推定方法を説明する。図 4.6 に、樹冠領域による樹高、DBH、材積の推定までのフロー図を示す。

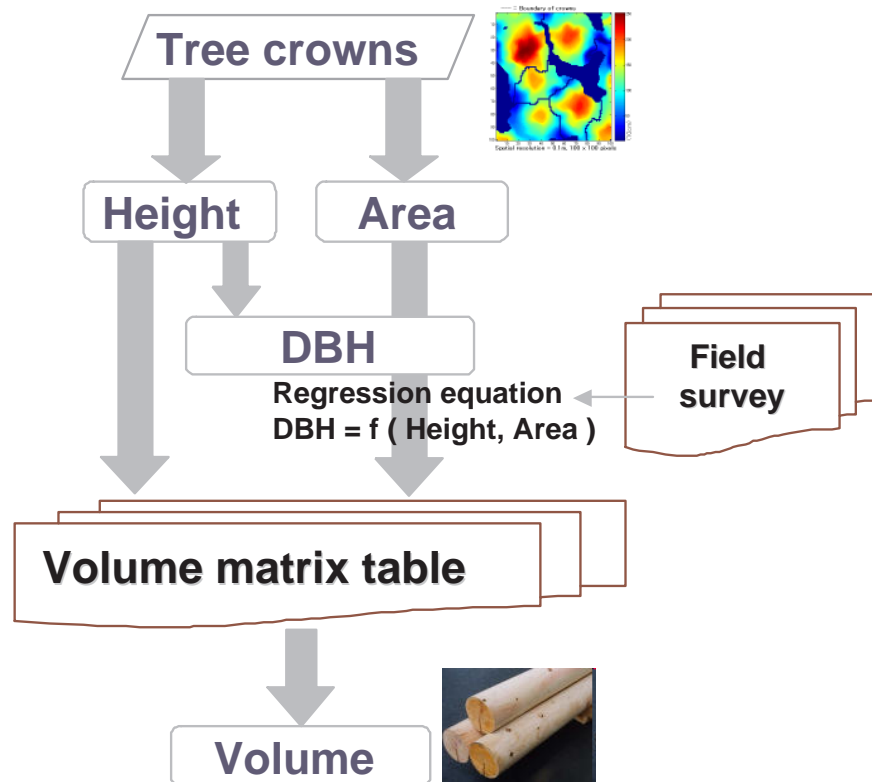


図 4.6. 樹冠領域を用いた、樹高、DBH、材積の推定のフロー図。

4.3.1 樹高の推定

まず、樹高の推定方法を説明する。

植生調査で樹高を計測する場合は、根元から梢端までの距離を計測する。よって樹頂は樹冠内で一番高い点であると考え、樹高として記録した。

4.3.2 胸高直径の推定

胸高直径 (DBH) の推定は、まず先行研究を参考に関連する変数を検討し、St.1 とそれ以外に区別して推定方法を検討した。これは両者は林齢と間伐履歴が大きく異なるため、まったく異なる関係式が考えられるからである。

林学分野での先行研究 DBH の推定に関して、リモートセンシングの観点から推定する研究は行われていないが、林学の分野では樹冠や林分密度に注目して、それらと DBH の関係が研究され

ている。

吉田 (1991) は、樹冠体積の期間成長量を用いて、ある林分のある期間における単木単位の直径成長量を推定した。高齢林分で直径の推定値にばらつきが小さくうまく推定できなかったが、直径推定において高齢木の推定が難しくなることは竹下 (1985) でも指摘されている。また Fujimori et al. (1984) は、林分密度が上がると定直径高*¹が下がることを示した。つまり、DBH は樹冠に関するパラメータや林分密度に左右されることが分かる。

本分析対象エリアにおける、DBH とそのほかの変数の関係 そこで、毎木調査結果を用いて、DBH とそれらの変数の関係性を検証する。3.3 の各林分の考察により St.1 とそれ以外の林分は、樹高と DBH の関係が著しく異なるので、DBH の推定において、St.1 とそれ以外の林分は別の方法を採用した。

St.1 における樹高による DBH の単回帰分析 3.3 で示したように、St.1 は、樹高と DBH の関係が他の林分と著しく異なるので、DBH の推定において樹高と樹冠面積による重回帰モデルを導入することは統計的に有意でなかった。そこで St.1 は DBH との相関が非常に高い樹高のみによる単回帰分析を行った。毎木調査をした 170 本すべてを対象とし、推定された式を示す。図 4.7 に、St.1 における DBH 推定結果を示す。赤の破線は信頼区間である。

$$DBH = -2.781 + 2.005Z \quad (4.1)$$

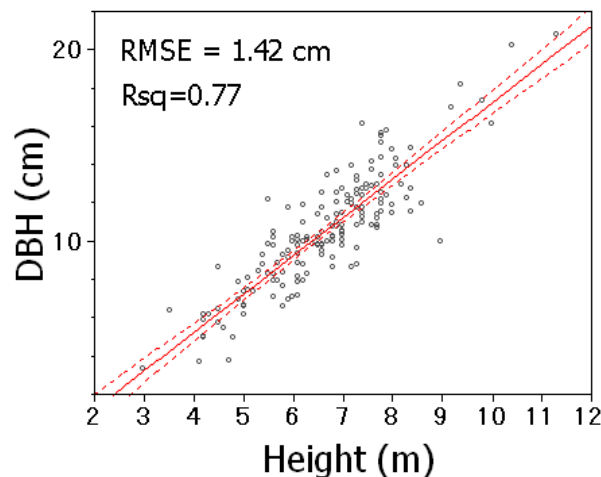


図 4.7. St.1, 樹高による DBH の推定結果。

決定係数 (R^2) は 0.77 であり、定数と Z の t 値はそれぞれ -4.88, 23.93 と統計的に傾きがゼロである可能性は否定できる。また p 値は 1% の信頼区間で有意であった。よってこのモデルが、統計的に有意であると結論付けることができるので、St.1 に関して、この単回帰式を用いる。2 乗平均誤差は 1.42 センチメートルであった。

*¹ 一定の直径を設定し、対象樹木においてその直径と一致する樹高位置を計測する。「定直径高が下がる」とは「胸高直径が細る」とほぼ同意と考えられる。

St.2-4における樹高によるDBHの重回帰分析 次にSt.2, St.3, St.4のDBHの推定について説明する．これらの林分は林齢が近く，また間伐も履歴も大きな違いはないので，同一の回帰式が採用できると判断した．

まず，DBHに関連するさまざまなパラメーターとの関係性を考察し，その上で回帰に用いる変数を決める．DBHと樹高，樹冠平面面積，局所林分密度*2，樹冠長径，樹冠短径，円面積相当直径*3，周囲長との相関係数を算出した．

図4.8と図4.1にDBHと樹高，面積，局所密度，樹冠の長径と短径，周囲長との相関係数を散布図と表で示す．散布図の楕円は，95%信頼確率楕円である．

St.2, St.3, St.4の中でDBHの推定に使用される樹木数は134本である．これは，後述する樹冠面積を計算する際に，毎木調査に基づく単木位置からポロノイ分析を行い推定した．よって，毎木調査を行った一番外周部分は，ポロノイ領域が過大評価されるので，分析対象外とした．

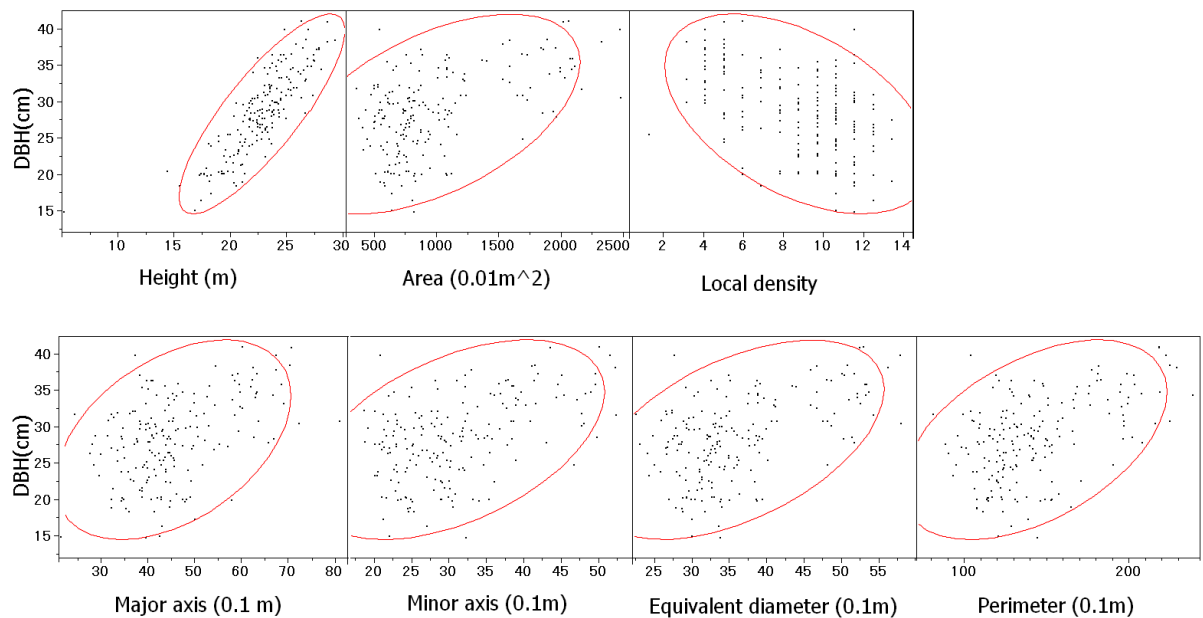


図4.8. DBHと樹高，面積，局所密度，樹冠の長径と短径，周囲長との散布図．

表4.1. DBHと樹高，面積，局所密度，樹冠の長径と短径，周囲長との相関係数散布図．

Valuables	Height	Area	Local density	Major axis	Minor axis	Equivalent diameter	Perimeter
Correlation coefficient	0.83	0.52	-0.48	0.44	0.48	0.51	0.48

図4.8と表4.1を見ると，樹高との高い相関が確認できる．面積との相関は0.52であり，中程度の正の相関があると判断できる．局所密度も先行研究に倣う形で負の相関が出ている．その他の変

*2 単木単位の密度指標はあまり見当たらない．本研究ではある単木から半径5メートル以内に存在する樹木数を，局所林分密度と定義した．

*3 (英)Equivalent diameter．領域と同じ面積の円の半径． $\sqrt{\frac{4Area}{\pi}}$ で計算される．

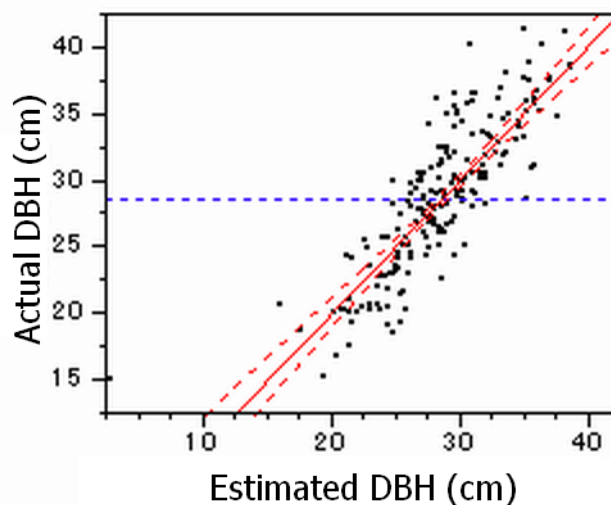
数は基本的に樹冠面積に依存する変数のため、樹冠面積を超える相関係数を有するものはない。

樹高と樹冠面積による DBH の重回帰分析 以上のように DBH の推定を目的として、リモートセンシングで得られるさまざまな変数との関係性を検討したが、DBH に対する Z と $Area$ の相関係数はそれぞれ 0.83 と 0.52 であった。 Z と $Area$ の相関係数は 0.08 であった。DBH と樹高・樹冠面積が強い相関を示したことから、それら 2 つの変数間に相関が見られなかったため多重共線性の可能性が低いと判断して、重回帰分析を行った。

$$DBH = -5.289 + 1.438Z + 0.134Area \quad (4.2)$$

このとき DBH は胸高直径 (センチメートル)、 Z は樹高 (メートル) で、 $Area$ (平方メートル) である。 t 値は、定数項、樹高、面積において、それぞれ -2.97, 16.45, 2.44 であり統計的に傾きがゼロである可能性は否定される。また p 値は同様に、0.0033, 0.001, 0.0156 であり、5% の有意水準で統計的に被説明変量を説明していると判断できた。

重回帰式による予測値は R^2 で 0.70, RMSE で 3.081 センチメートルとなっており、2 センチメートル活約で整備されている林分材積表と比べると誤差が大きいのは否定できないが、その他の推定モデルがこれを越えるものが存在しなかったため、本モデルを採用すると結論付けた。



$Rsq=0.70, P<0.001, RMSE=3.0816$

図 4.9. 樹高と樹冠面積による DBH の推定結果。

以上をもって、リモートセンシングで得られたデータからの樹冠領域の推定と、それをもちいた樹高と DBH の推定方法を説明した。次のセクションでは、上述してきた推定値の検証方法を説明する。

4.4 実測値と推定値の検証方法

検出された樹木に対して適用した検証方法を説明する。検証は2段階に分かれる。林班単位の検証と単木単位の検証、である。

実測値および推定値の表示に関して、整数部の位が1つもしくは1以下の場合は、小数点以下3桁まで、整数部の位が2つ以上の場合は小数点以下2桁までを有効小数点とした。

4.4.1 林分単位の本数と材積の検証方法

まず、林分単位における検証を説明する。林班単位では、本数、ha 当たり本数、合計材積、ha 当たり材積、平均材積と標準偏差を計算し、実測値と推定値の比較を行った。これらの変数を選択した理由は、林業経営を行ううえで林班の全体的な状態を把握するパラメータとして使用されているからである(南雲・箕輪, 1990)。

判断基準を以下に示す。

合計値の差 実測値と推定値を差分して比較する。具体的には、林分単位の ha 当たりの材積と ha 当たりの本数を、この方法で判断する。

平均値の差 一本当たりの平均値を実測値と推定値がどれほど違っているかを差分して比較する。林分単位においては、平均材積をこの基準で判断する。

標準偏差の差 実測値の標準偏差と推定値の標準偏差を比べることで、それぞれの分散を比較する。

この分析の位置づけは、リモートセンシングで抽出できる林分パラメータが、ある広がりを持つエリア内でどれほど偏り少なく推定できているかを分析するためである。管理という実務面から考えると、林分を全体として把握する能力を検討する。

4.4.2 単木単位の位置，樹高，胸高直径，材積の検証方法

次に単木単位の結果の検証方法を説明する．単木単位ではマッチングという処理を行ったうえで，材積，樹高，DBH の平均値，標準偏差，2乗平均誤差を比較する．ここでの検証対象は，マッチングが行えた樹木のみであり，とは林分当たりの数が異なるので，留意されたい．

実測樹木位置と推定樹木位置のマッチング

ここではマッチングを説明する．マッチングとは，推定樹木を実測樹木に対応付けすることである．目視による対応付けも検討したが，作業量が膨大になるため自動化を行い，本研究では，すべての推定樹木から実測樹木までの距離を計算し，実測樹木から3メートル以内の一番近い推定樹木をマッチングした．推定樹木と実測樹木とのマッチングを行うことで，単木レベルで，位置，材積，樹高，DBH の比較が可能になる．

マッチングに際しては3つの方法で，その精度を判断する．

マッチング率 = マッチング本数 / 実測樹木本数 (%)

誤検出数 = 推定樹木本数 - マッチング樹木本数

未検出数 = 実測樹木本数 - マッチング樹木本数

マッチング率とは，推定樹木のうちどれほどの割合がマッチングが行われたかの指標である．この中には「正しく」マッチングされた樹木も「誤って」マッチングされた樹木も含まれているため，あくまでも本数ベースでの判断基準である．未検出とは，実測では存在するが，3メートル以内に推定樹木が存在しない場合である．また誤検出とは，実測では存在しないが，推定では存在する場合である．

さらに，マッチングが行われた樹木は，材積，樹高，DBH の観点から比較した．

これらの単木単位の結果の検証は，林班に対する検証よりも詳細に単木レベルで分析することで，通常は林班で直接観察・計測されるパラメータが，リモートセンシングによってどの程度の精度と正確さで検出できるかを検討する．

平均値の差 一本当たりの平均値を実測値と推測値がどれほど違っているかを差分して比較する．

単木単位において，材積，樹高，DBH をこの基準で判断する．

標準偏差の差 実測値の標準偏差と推定値の標準偏差を比べることで，それぞれの分散を比較する．平均値と同様に，材積，樹高，DBH をこの基準で判断する．

誤差範囲 2乗平均誤差 (Root Mean Square Error: RMSE) を求め，ある推定値が平均すると，どれくらいの誤差範囲を有しているかを検証した．単木単位で，材積，樹高，DBH をこの基準で判断する．目標値は樹高で1メートル，DBH で2センチメートル設定した．主な理由は，この目標値をクリアすれば林分材積表で1クラス以内の相違で推定することが可能になるからである．

4.5 まとめ

本章では以下の4点を示した。

- スギ人工林における基本樹木モデルを示し、視覚的特徴と形態的特徴を明示した。このモデル化によりリモートセンシングデータへの対応付けが可能となった。
- 基本樹木モデルの特徴を捉えたりリモートセンシングデータを用いて、樹木の検出行った。視覚的特長に DMC を、形態的特長に LiDAR を用いることで、樹冠領域の抽出手法を示した。
- リモートセンシングによって抽出された樹冠領域より、樹高と DBH を推定する手法を提示した。これら2つの変数を推定することにより、林分材積表を活用した材積の算出を実現した。
- 最後に、基本樹木モデルに基づいたリモートセンシングによる林分パラメータ(材積, 樹高, DBH) の推定結果の検証する方法を示した。検証の判断基準を明示することで、本研究の成果に対して定量的な判断が行える。

第5章 リモートセンシングを用いた林分パラメータの抽出結果

この章では、これまで説明してきた手法を、林分単位で合計材積に主眼を置いて結果の検証を行う。そのうえで各林分において、単木単位で材積、樹高、胸高直径の結果を検証する。

5.1 林分単位の結果と検証

4つの林分の真値と推定値について、本数、ha 当たり本数、合計材積、平均材積、ha 当たり材積と標準偏差を表 5.2 に示す。この表をもとに、各林分の結果の特徴を述べる。

表 5.1. 林分単位の推定材積の結果

St.No.		N	N/ha	sumV	meanV (s.d.)	V/ha
1	GT	149	1202	5.21	0.035 (0.026)	42.02
	EST	152	1225	4.94	0.033 (0.024)	39.84
2	GT	110	710	74.39	0.676 (0.258)	479.94
	EST	117	755	82.29	0.716 (0.195)	530.90
3	GT	77	385	81.21	1.055 (0.246)	406.05
	EST	78	390	73.46	0.942 (0.377)	367.30
4	GT	118	734	68.31	0.579 (0.291)	424.29
	EST	124	770	71.37	0.576 (0.169)	443.29

St.No.=林分番号, GT=実測値, EST= 推定値, N=本数, N/ha=ha 当たり本数, sumV= 合計材積 [m^3], meanV=平均材積 [m^3], V/ha=ha 当たり材積 [m^3], s.d.=標準偏差

St.1 では、本数と ha 当たり本数は実測値の 1.02 倍であるが、合計材積では 0.95 倍の過小評価になっている。平均材積も過小評価となっていることから、一本当たりの材積を過小評価している結果だと分かる。

St.2 では、本数と ha 当たり本数は 1.06 倍と誤差は少ないが、合計材積では 1.11 倍の過剰評価になっている。St.1 とは逆に一本当たりの材積を過剰評価している。一方で推定値の標準偏差は 0.75 倍と推定値の方がばらつきは少ない。

St.3 では、本数と ha 当たり本数は実測値とほぼ等しいが、合計材積と平均材積はそれぞれ 0.90 倍と 0.89 倍と過小評価になっている。標準偏差は実測値に対して、1.53 倍の過剰評価である。

St.4 では、本数と ha 当たり本数は 1.05 倍の過剰評価である。平均材積も同様には 1.04 倍である。推定値の標準偏差は 0.58 倍の値でありとばらつきが小さい。

ここでは、すべての林分において $\pm 10\%$ 程度の精度で本数と材積推定が可能であると示された。

5.2 単木単位の結果検証

次に 4.4.2 で説明した手法に基づいて、単木レベルの検証を行う。ここでは、マッチングが正しく行われたかという観点から、マッチング率、一本一本の位置の誤差という観点から考察を行う。

表 5.2. 林分単位のマッチング率、誤検出、未検出

St.No.	N(GT)	M	rateM	N(EST)	+ error	- error
1	149	117	77.0	152	35	31
2	110	75	68.1	117	42	35
3	77	75	97.4	78	3	2
4	118	85	72.0	124	39	33

St.No.=林分番号, N(GT)=実測樹木本数, M=マッチング数, rateM=マッチング率(%), N(EST)=推定樹木本数, + errors = 誤検出, - errors = 未検出.

まず抽出率に注目する。St.3 を除いて、70%前後である。これはつまり本数で過小評価していることを示している。付録に示すように、St.3 以外では複合樹冠が、過小評価の原因となっている。

次に単木抽出の誤差の内訳として誤検出と未検出の数に着目する。St.3 を除くすべての林分でプラスマイナス 30 ~ 40 本程度の未検出と誤検出を含んでいることが分かる。これだけの未検出と誤検出を含みながら、材積は 10%前後の正確さを保っていることは興味深い。これらのエラーが多い原因は、以下のようなものが考えられる。

樹頂が頂点として林冠から飛び出していない St.1 や St.3 は閉鎖した林冠を形成しており、樹木の成長により梢端の飛び出しが相対的に小さくなっている可能性がある。

レーザーパルスで計測できていない 樹頂と樹頂の間の凹面が、今回のフットプリント径 (47 センチメートル) より小さい場合は、今回の手法では計測することが困難である。上層点群を平滑化する BISE 法は、一番上の点群をとってくるため、例えば 2nd, 3rd パルスで凹面を捉えていても、平滑処理ではじかれていた可能性が高い。

傾斜などの影響で現地観測の位置と樹頂部分がずれている マッチングは最短距離法で行っているため、一番近い点から対応付けが行われる。たとえば一本の実測値が、違う樹木に対応付けられてしまうと、ドミノ倒しのようにマッチングがずれている可能性が考えられる。

次のセクションからは林分ごとに材積、樹高、DBH の推定の正確さについて分析を行う。

5.2.1 St.1 における単木単位の結果

まず，実測値および推定値の材積・樹高・DBH の平均・標準偏差・2 乗平均誤差を表 5.3 に示す．また，材積・位置・樹高・DBH の実測値と推定値の散布図を図 5.1 に示す．

表 5.3. St.1, 実測値と推定値の平均値, 標準偏差, 2 乗平均誤差 (材積, 樹高, DBH)

St. No.		meanV(s.d.)	rmseV	meanZ(s.d.)	rmseZ	meanDBH(s.d.)	rmseDBH
1	GT	0.035 (0.028)	-	6.782 (1.344)	-	11.01 (3.021)	-
	EST	0.046 (0.023)	0.024	7.635 (1.146)	1.405	12.47 (2.191)	2.859

GT=実測値, EST=推定値, meanV=平均材積 [m^3], meanZ= 平均樹高 [m], meanDBH=平均 DBH[cm], rmseV[m^3], rmseZ[m], rmseDBH[cm] = 材積, 樹高, DBH の 2 乗平均誤差, s.d.=標準偏差

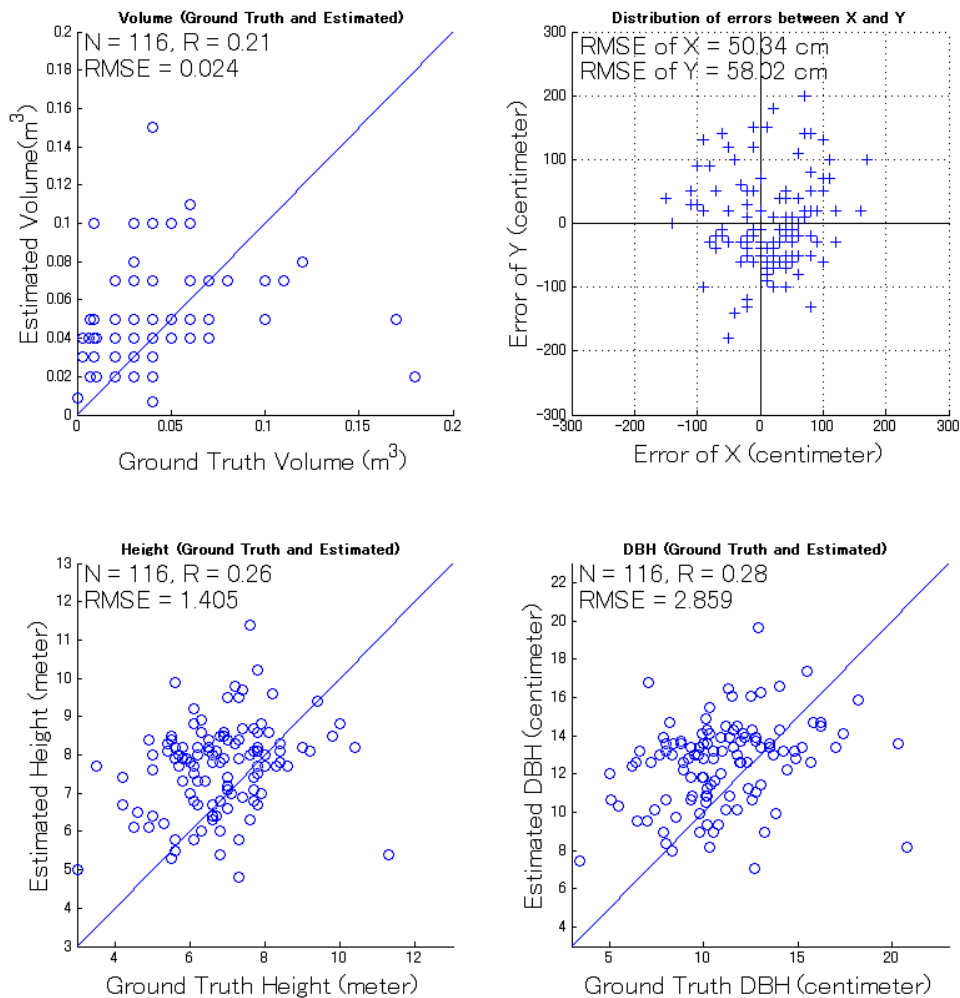


図 5.1. St.1, 実測値と推定値の散布図 (材積, 位置, 樹高, DBH)

このサイトの樹木本数は全部で 149 本であるが、ここでの検証は推定位置と実測位置に基づくマッチングが行われた 116 本の樹木のみに対して行われた。

推定平均材積は 1.31 倍の過剰評価となっているが、これは推定平均樹高が過剰評価であることに起因する。推定平均樹高は、実測値の 1.13 倍である。これが DBH の推定に影響 (1.13 倍) し、それら 2 つの変数を用いる林分材積表を用いることで最終的に推定材積が過剰評価になっていると解釈できる。

推定値に対する誤差範囲は、材積で 50%、樹高で 18%、DBH で 22% である。実測値と推定値の相関係数は 0.22 ~ 0.29 と低い相関を示しており、図 5.1 散布図からも分散が大きいことが確認できる。

位置の系統誤差に関しては、 $X \cdot Y$ の RMSE はともに 60 センチメートル以下であり、特に南側に 0-100 センチメートルの推定樹木が多く存在する。これは樹頂が根元と比べて南側に移動していることを示している。St.1 は急な南側斜面であることが関係している可能性はある。

St.1 での誤差の要因は樹高が低めである点と下草が旺盛に成長していることが考えられる。図 5.2 に、材積、樹高、DBH を、樹高をもとに昇順で並び替え、実測値、推定値、誤差範囲をグラフに表した。

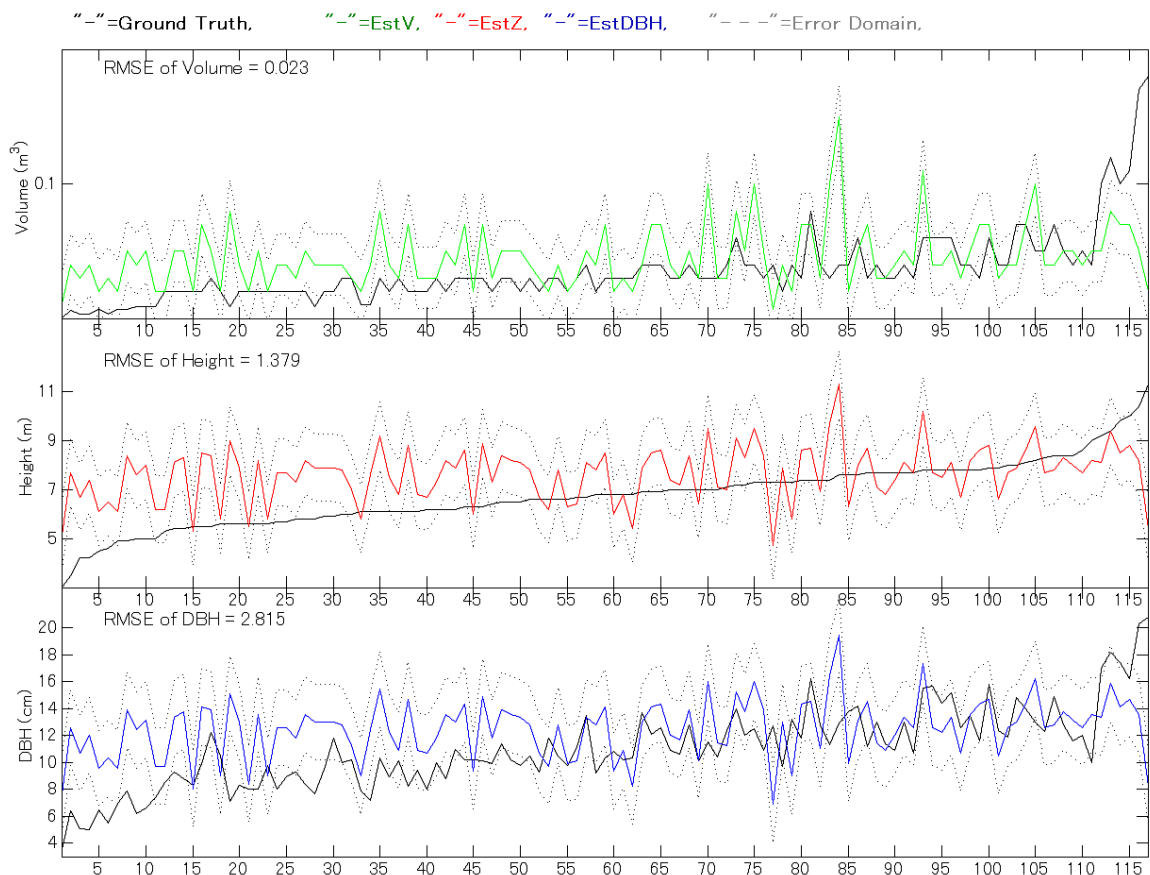


図 5.2. St.1, 実測値, 推定値と誤差範囲の折れ線グラフ (樹高昇順)

推定樹高は上下の変動が大きいですが、実測値に伴った上昇トレンドが見受けられない。推定 DBH と推定材積は、基本的に樹高の推定値と同じ挙動を示しており、推定樹高同様に上昇トレンドが確認できない。これは 4.3 で示した推定方法に起因する。しかし一部の樹木では実測 DBH と推定

DBH が連動する挙動を示しており (例えば ID : 86-92) , DBH が樹高に大きく左右されていることが確認できる . 樹高の高い樹木が大きな DBH を形成することができるという , 樹木の自然エネルギーの競争原理が現れていると考えられる .

図 5.3 では , 青い X を実測位置 , 青い X から伸びる赤い線の末端が推定位置を表している . 赤い X は未検出であった実測位置である .

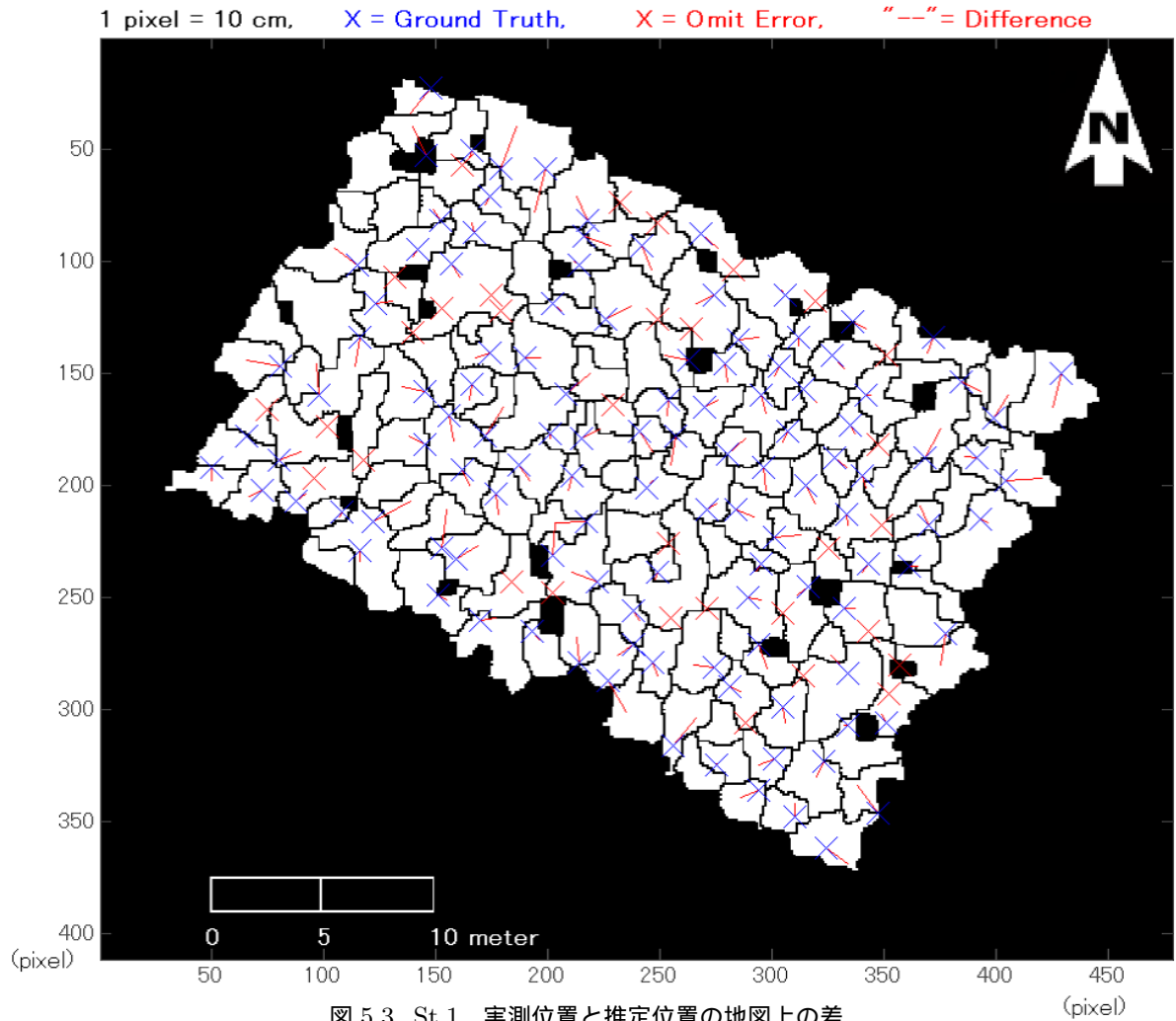


図 5.3. St.1 , 実測位置と推定位置の地図上の差

位置に関しては , 図 5.1 においても南方向へ 100 センチメートル以下の系統誤差が見られた . 地図上でも X : 300-350 , Y : 150-200 のエリアで , 推定位置が実測位置の南側に多く見られる .

未検出樹木は複合樹冠に見られる . 誤検出は実測樹木が他の推定樹木にマッチングされた場合に , 取り残される形で誤検出となるケースが確認できる .

5.2.2 St.2 における単木単位の結果

まず，実測値および推定値の材積・樹高・DBH の平均・標準偏差・2 乗平均誤差を表 5.4 に示す．また実測値と推定値の散布図を図 5.4 に示す．

表 5.4. St.2, 実測値と推定値の平均値, 標準偏差, 2 乗平均誤差 (材積, 樹高, DBH)

St. No.		meanV(s.d.)	rmseV	meanZ(s.d.)	rmseZ	meanDBH(s.d.)	rmseDBH
2	GT	0.654 (0.256)	-	22.03 (2.427)	-	28.07 (4.920)	-
	EST	0.762 (0.147)	0.240	23.61 (1.364)	2.369	29.84 (2.256)	4.392

GT=実測値, EST=推定値, meanV=平均材積 [m^3], meanZ= 平均樹高 [m], meanDBH=平均 DBH [cm], rmseV [m^3], rmseZ [m], rmseDBH [cm] = 材積, 樹高, DBH の 2 乗平均誤差, s.d.=標準偏差

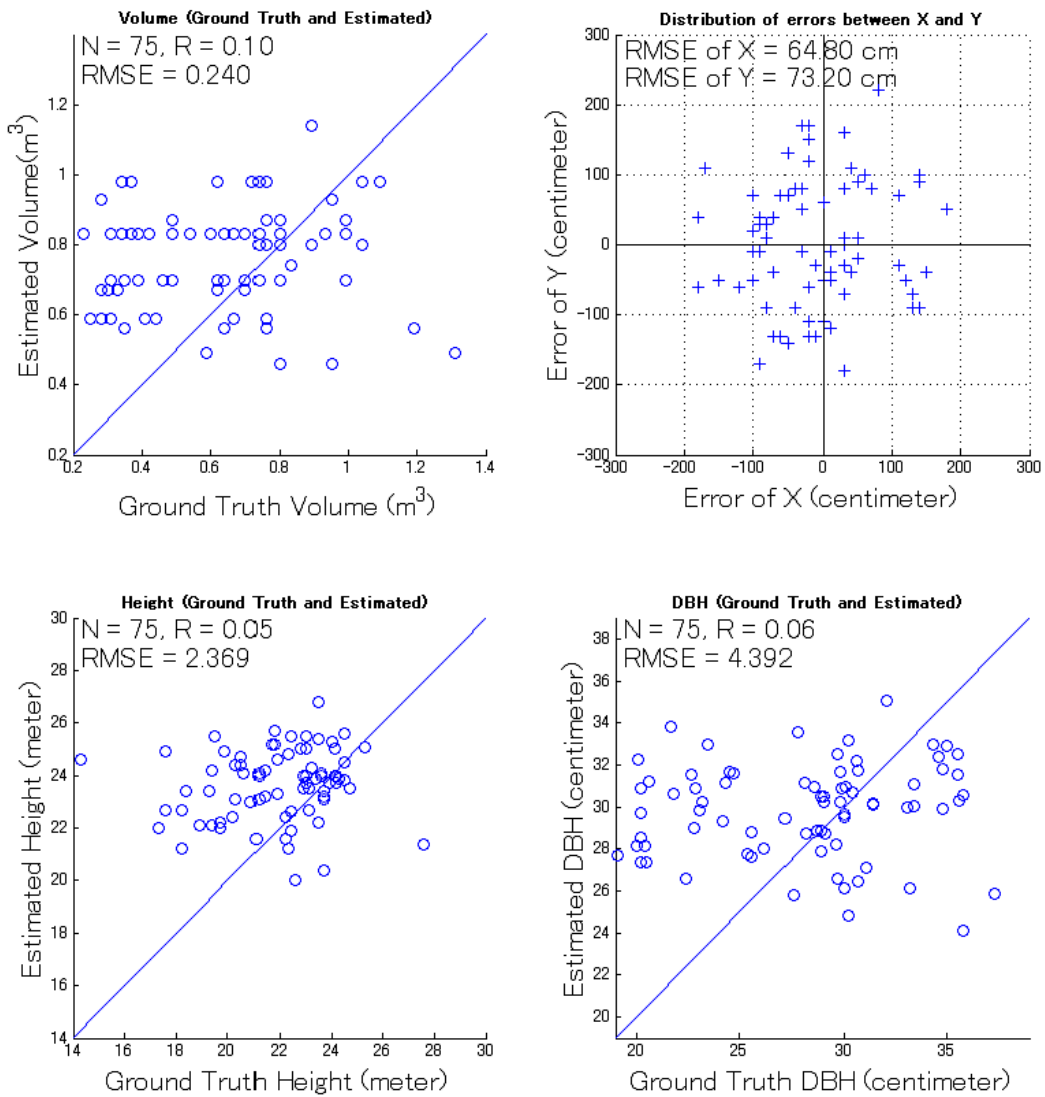


図 5.4. St.2, 実測値と推定値の散布図 (材積, 位置, 樹高, DBH)

このサイトの樹木本数は全部で 110 本であるが、ここでの検証は推定位置と実測位置に基づくマッチングが行われた 75 本の樹木のみに対して行われた。

推定平均樹木は 1.17 倍、推定平均樹高は 1.07 倍、推定平均 DBH は 1.06 倍であり、樹高の過剰評価が全体へ影響を与えている。

推定値に対する誤差範囲は、材積で 31%、樹高で 10%、DBH で 15% である。また実測値と推定値の相関係数は 0.05~0.10 で極めて低い。St.1 と比べると誤差範囲は小さくなったが、同時に相関係数も低い。

位置は X と Y の RMSE は 70 センチメートル以下であり、の系統誤差は見られない。

マッチングの改善手法として、樹高の高い順からマッチングすることで、被圧木への mismatching を防ぐことが考えられる。

図 5.5 に、材積、樹高、DBH を、樹高をもとに昇順で並び替え、実測値、推定値、誤差範囲をグラフに表した。

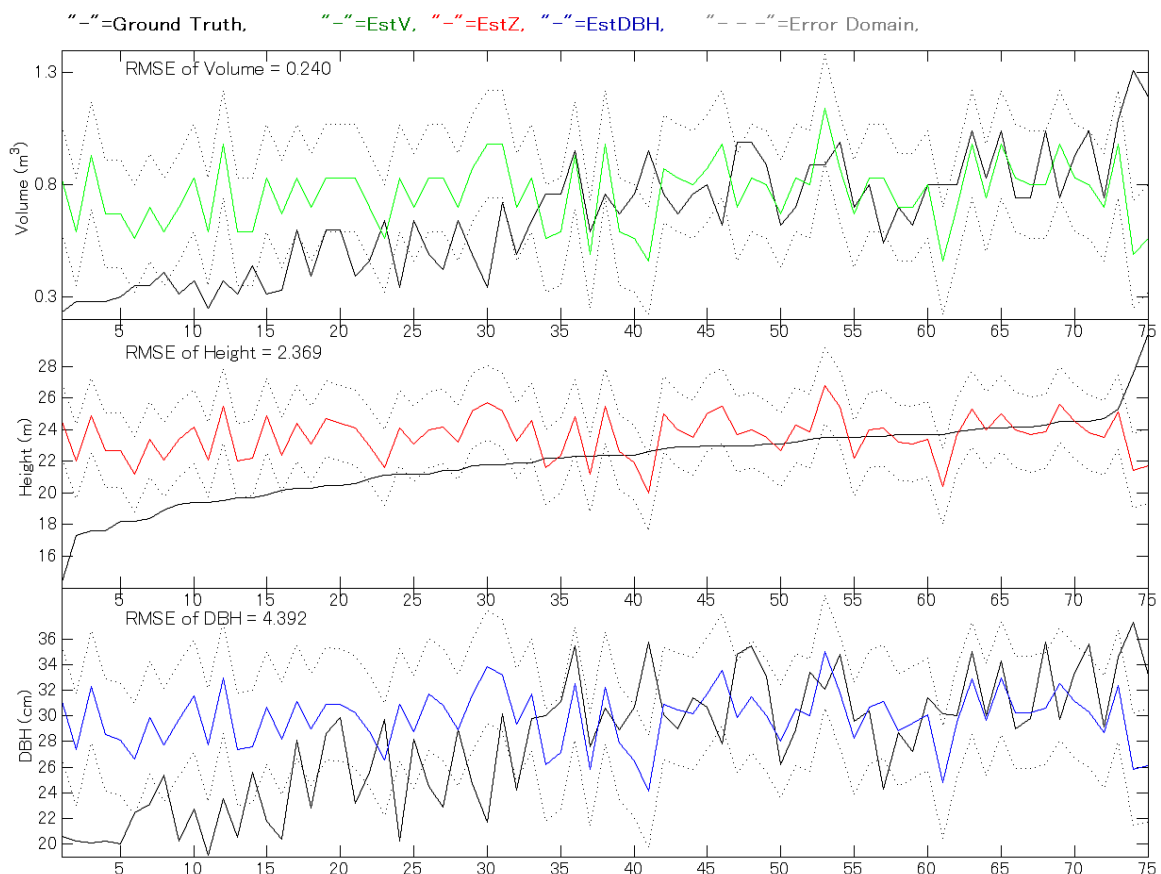
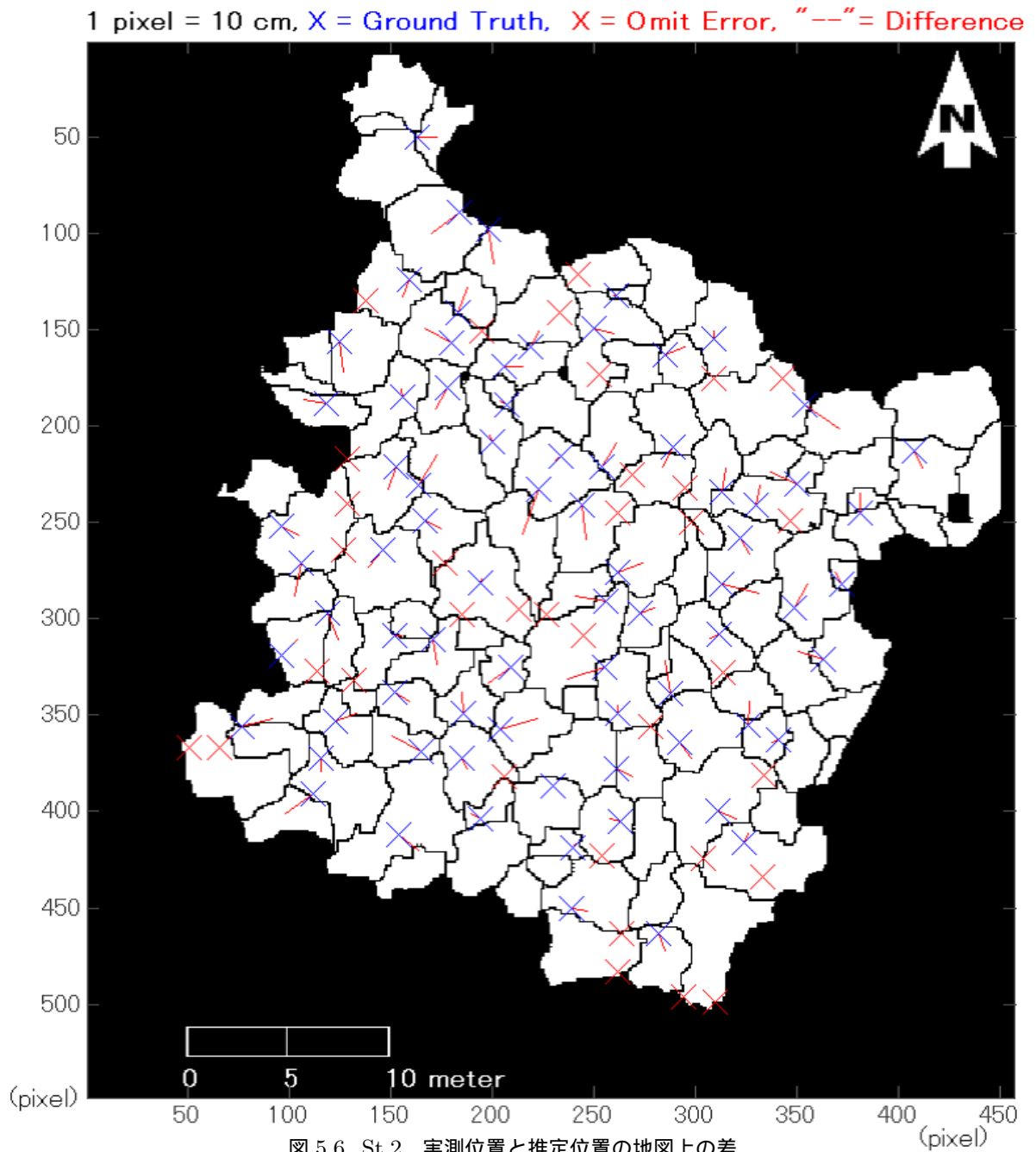


図 5.5. St.2, 実測値, 推定値と誤差範囲の折れ線グラフ (樹高昇順)

推定樹高は上下の変動が大きいですが、実測値に伴った上昇トレンドが乏しい。誤差が大きい樹木は樹高が低い (22 メートル以下) 樹木である。推定 DBH と推定材積は 4.3 で示した推定方法に起因して、推定樹高と同じ挙動を示している。St.1 で見られたような、DBH が樹高と連動する傾向も少ない。

図 5.6 では、青い X を実測位置、青い X から伸びる赤い線の末端が推定位置を表している。赤い X は未検出であった実測位置である。



位置に関しては、図 5.1 においても、大きな系統誤差は確認できなかった。
未検出樹木は複合樹冠に見られる。誤検出は実測樹木が他の推定樹木にマッチングされた場合に、取り残される形で誤検出となるケースが確認できる。

5.2.3 St.3 における単木単位の結果

推定値の平均と 2 乗平均誤差を，材積 (meanV, rmseV)，樹高 (meanZ, rmseZ)，DBH(meanDBH, rmseDBH)，標準偏差 (s.d.) について求めた表を 5.5 に示す．また実測値と推定値の散布図を図 5.7 に示す．

表 5.5. St.3, 実測値と推定値の平均値, 標準偏差, 2 乗平均誤差 (材積, 樹高, DBH)

St. No.		meanV(s.d.)	rmseV	meanZ(s.d.)	rmseZ	meanDBH(s.d.)	rmseDBH
3	GT	1.057 (0.249)	-	25.74 (1.430)	-	33.79 (3.550)	-
	EST	1.109 (0.195)	0.140	26.31 (1.274)	0.721	34.48 (2.204)	2.153

GT=実測値, EST=推定値, meanV=平均材積 [m^3], meanZ= 平均樹高 [m], meanDBH=平均 DBH[cm], rmseV[m^3], rmseZ[m], rmseDBH[cm] = 材積, 樹高, DBH の 2 乗平均誤差, s.d.=標準偏差

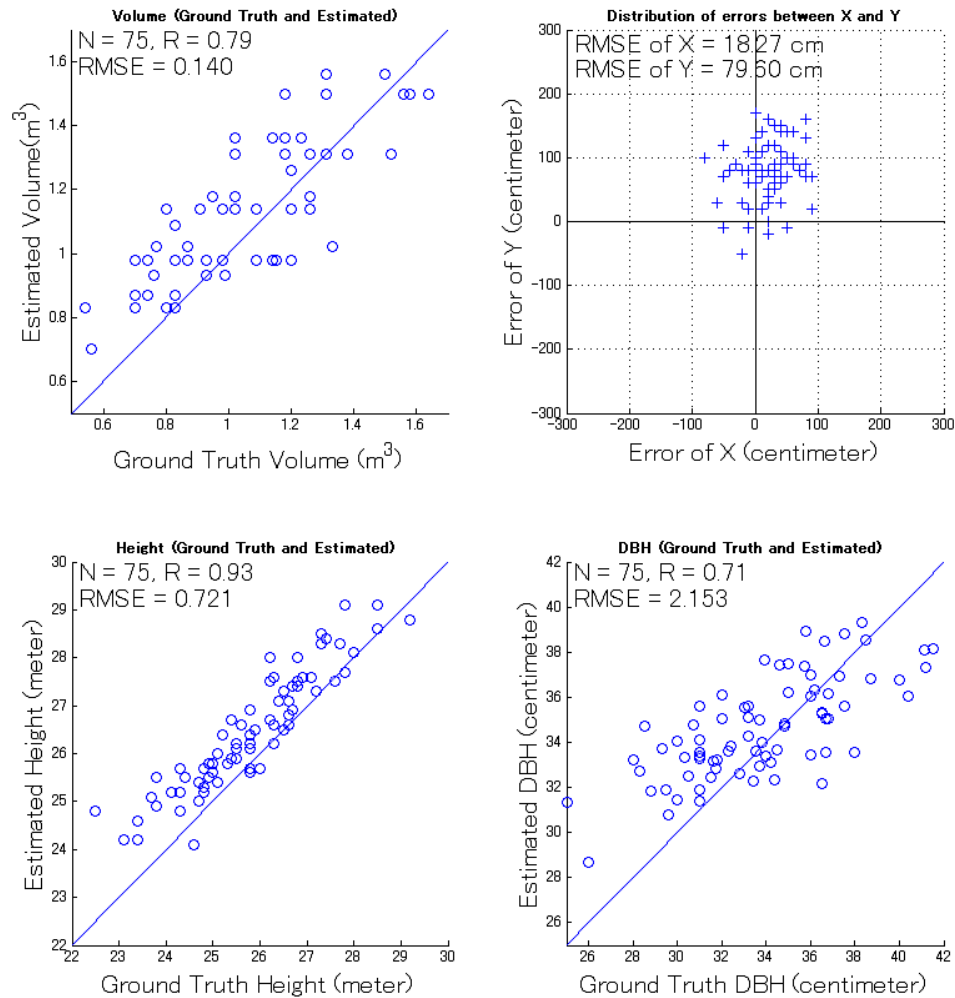


図 5.7. St.3, 実測値と推定値の散布図 (材積, 位置, 樹高, DBH)

このサイトの樹木本数は全部で 77 本であるが、ここでの分析は推定位置と実測位置に基づくマッチングが行われた 75 本の樹木のみに対して行われた。実測および

推定材積は実測の 1.05 倍と過剰評価ながらも単木レベルでも真値に近い値を示している。RMSE は $0.164m^3$ であり、一本の材積に対しては約 17 パーセントの誤差を含むこととなるが、平均材積や合計材積ではそれらの誤差が相殺されていることが分かる。

推定値に対する誤差範囲は、材積で 12%、樹高 2%、DBH で 6% である。実測値と推定値の相関係数は材積で 0.79、樹高で 0.93、DBH で 0.71 と強い相関を示している。5.10 散布図からも分散は少ないことが確認できる。

位置の系統誤差に関しては、X の RMSE は 20 センチメートルなのに対して、Y の RMSE は 80 センチメートル程度確認できる。特に北側に 100-200 センチメートルの推定樹木がまとまって存在する。これは樹頂が根元と比べて北側に移動していることを示している。St.3 は緩やかな北東斜面であることが関係している可能性はある。

次に V, Z, DBH を実測値の昇順に並び替え、推定値と誤差範囲を示したグラフを図 5.8 に示す。

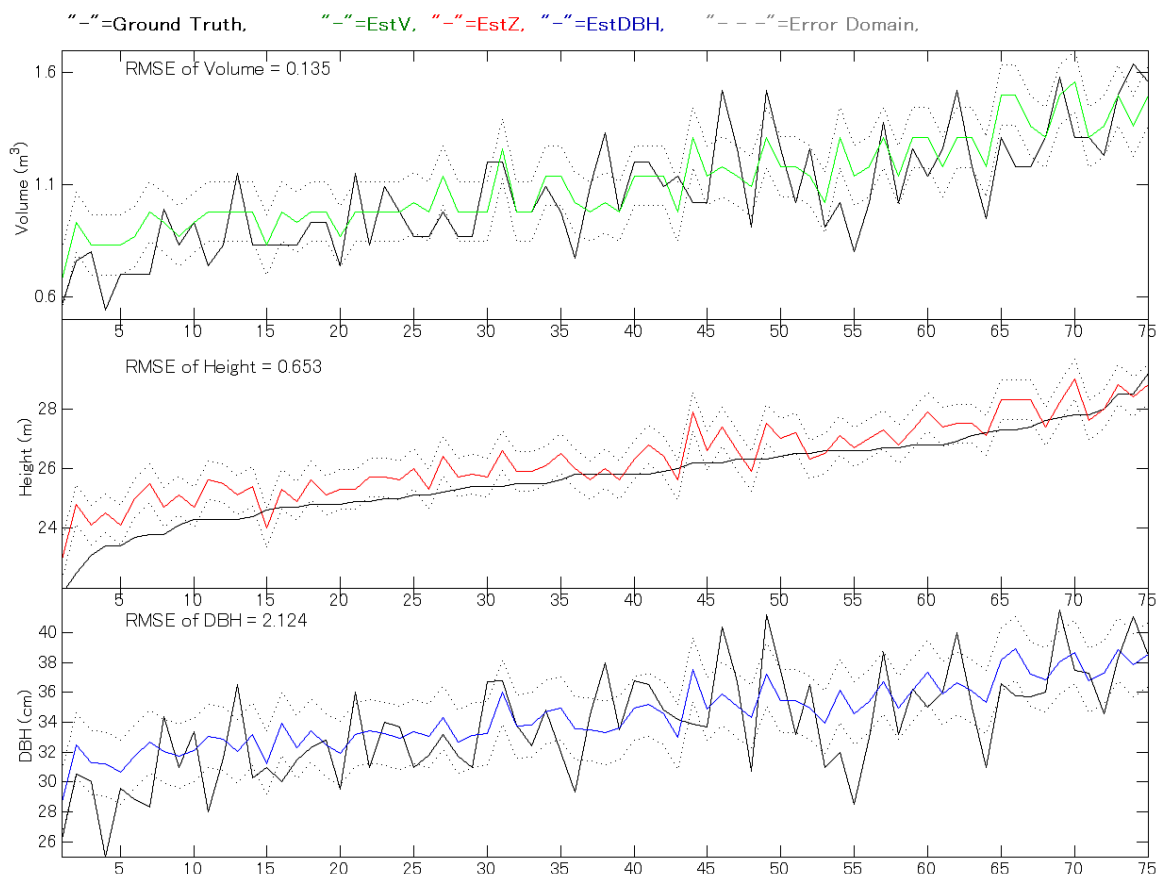


図 5.8. St.3, 実測値, 推定値と誤差範囲の折れ線グラフ (樹高昇順)

図 5.8 では、推定材積に関しては、実測材積が少ない低い樹木に関しては過剰評価、実測材積が多い樹木に関しては過小評価という傾向が見られる。推定樹高に関しては 24 メートル以下の樹木で過剰評価が目立つが、それ以降は高い精度で推定が行われている。推定 DBH は実測 DBH が少ない樹木で過剰評価、実測が DBH が大きい樹木で過小評価となった。この推定 DBH の傾向が、

推定材積に影響を与えたものと考えられる。

図 5.9 では、青い X を実測位置、青い X から伸びる赤い線の末端が推定位置を表している。赤い X は未検出であった実測位置である。

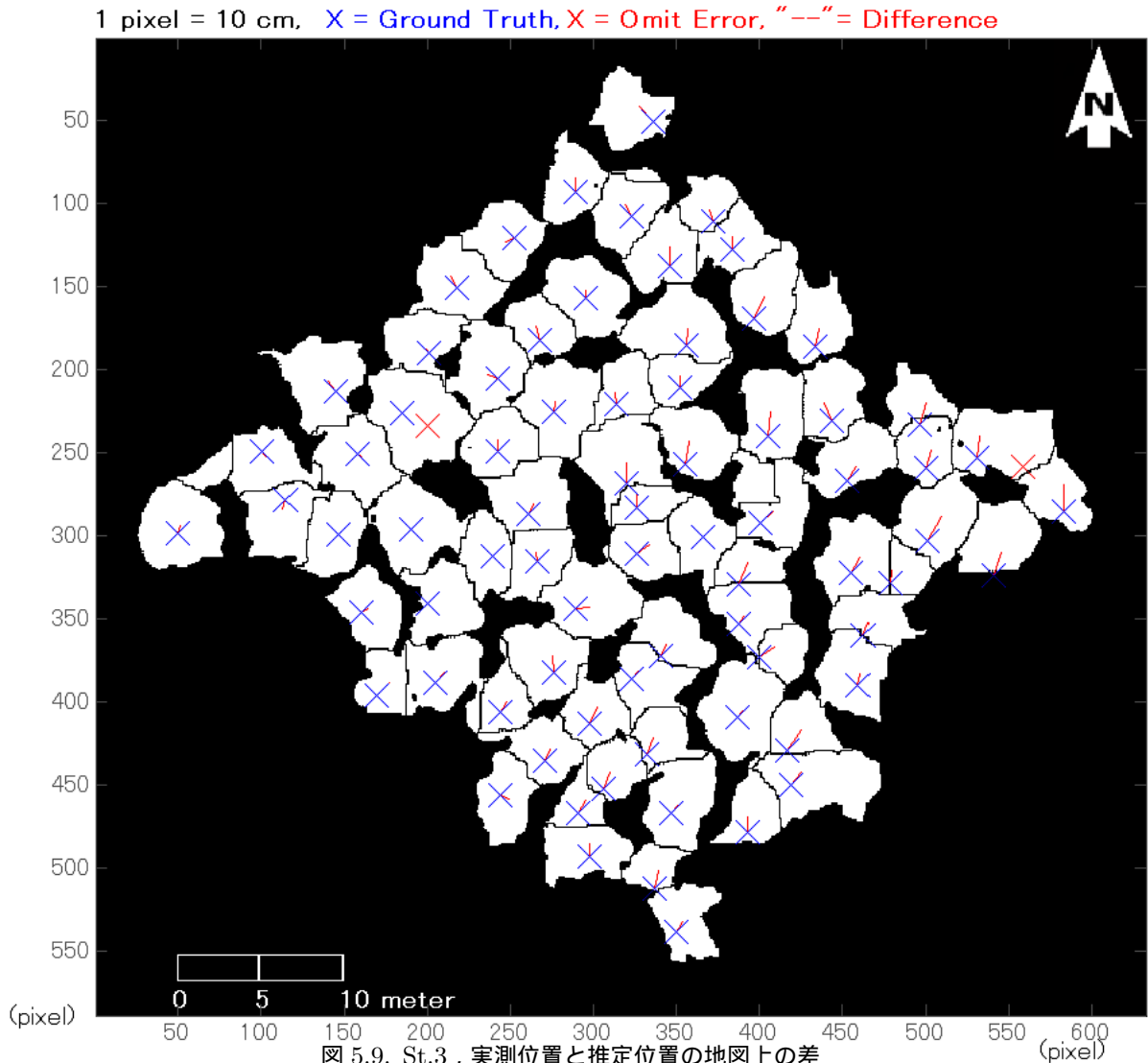


図 5.9 では未検出の 2 本は複合樹冠によって樹頂が隣接する樹冠に吸収してしまっているために検出できなかった。NDSM を確認すると目視では樹冠が 2 つあるように認知できるが、NDSM のデータは 2 つの樹頂の間に凹面を形成していなかった。

誤検出 3 つあるが、X:350:400, Y:250-300 の樹冠は、もともとはすぐ下部の樹冠と同一のものであるが過剰に分割してしまった結果である。この樹冠では、樹頂が分かれるかもしくは大きな枝が張り出すことで、樹頂に似た部分が形成されている可能性が高い。そのセグメントのすぐ西側にはギャップが確認できる。間伐によって形成されたスペースと太陽エネルギーを求めて、枝が張り出してきたと考えられる。

5.2.4 St.4 における単木単位の結果

まず、実測値および推定値の材積・樹高・DBH の平均・標準偏差・2 乗平均誤差を表 5.6 に示す。また実測値と推定値の散布図を図 5.10 に示す。

表 5.6. St.4, 実測値と推定値の平均値, 標準偏差, 2 乗平均誤差 (材積, 樹高, DBH)

St. No.		meanV(s.d.)	rmseV	meanZ(s.d.)	rmseZ	meanDBH(s.d.)	rmseDBH
4	GT	0.600 (0.300)	-	21.10 (3.220)	-	26.89 (5.947)	-
	EST	0.649 (0.142)	0.275	22.50 (1.446)	2.546	28.27 (2.384)	5.376

GT=実測値, EST=推定値, meanV=平均材積 [m^3], meanZ= 平均樹高 [m], meanDBH=平均 DBH [cm], rmseV [m^3], rmseZ [m], rmseDBH [cm] = 材積, 樹高, DBH の 2 乗平均誤差, s.d.=標準偏差

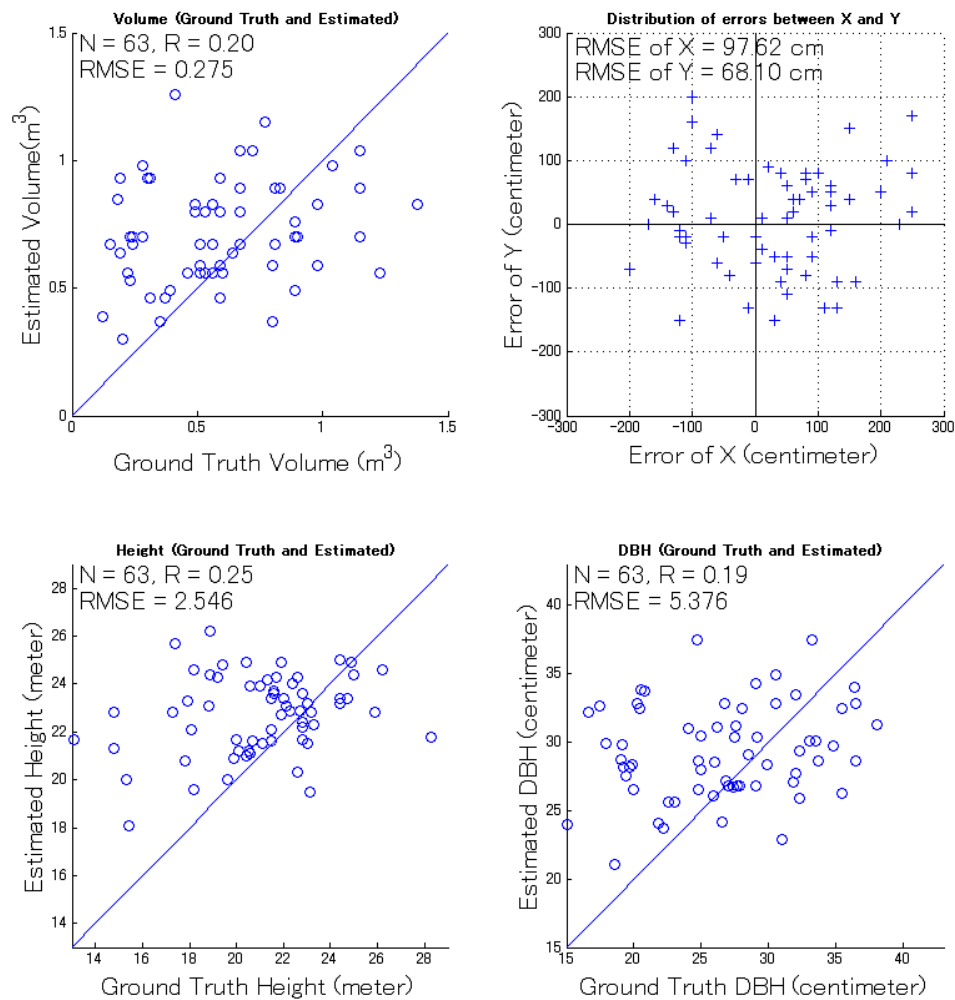


図 5.10. St.4, 実測値と推定値の散布図 (材積, 位置, 樹高, DBH)

このサイトの樹木本数は全部で 118 本であるが、ここでの分析は推定位置と実測位置に基づくマッチングが行われた 85 本の樹木のみに対して行われた。

推定平均値は材積で 1.08 倍、樹高で 1.06 倍、DBH で 1.05 倍のの過剰評価であり、基本的に樹高の過剰評価がほか 2 つの推定にも影響を与えていると考えられる。

推定値に対する誤差範囲は、材積で 38%、樹高で 10%、DBH で 17%である。実測値と推定値の相関係数は 0.20 ~ 0.25 と低い相関を示しており、図 5.10 散布図からも分散が大きいことが確認できる。

平均値、誤差、相関係数の傾向は St.2 と似ている。林齢は異なるが、ha 当たり本数が似ていることに起因する。林分のタイプは、林齢だけでなく閉鎖の有無などに大きく影響されていることが分かる。

位置の系統誤差に関しては、X・Y の RMSE はそれぞれ約 73 センチメートルと約 62 センチメートルであり系統誤差は確認できない。

図 5.11 に、材積、樹高、DBH を、樹高をもとに昇順で並び替え、実測値、推定値、誤差範囲をグラフに表した。

推定樹高は上下の変動も少なく、実測値に伴った上昇トレンドが見受けられない。推定 DBH と推定材積は、基本的に樹高の推定値と同じ挙動を示している。実測 DBH は高さの昇順に並べた場合変動が大きい。推定 DBH もわずかながら上昇トレンドが確認できるが、実測値との連動性が見られない。

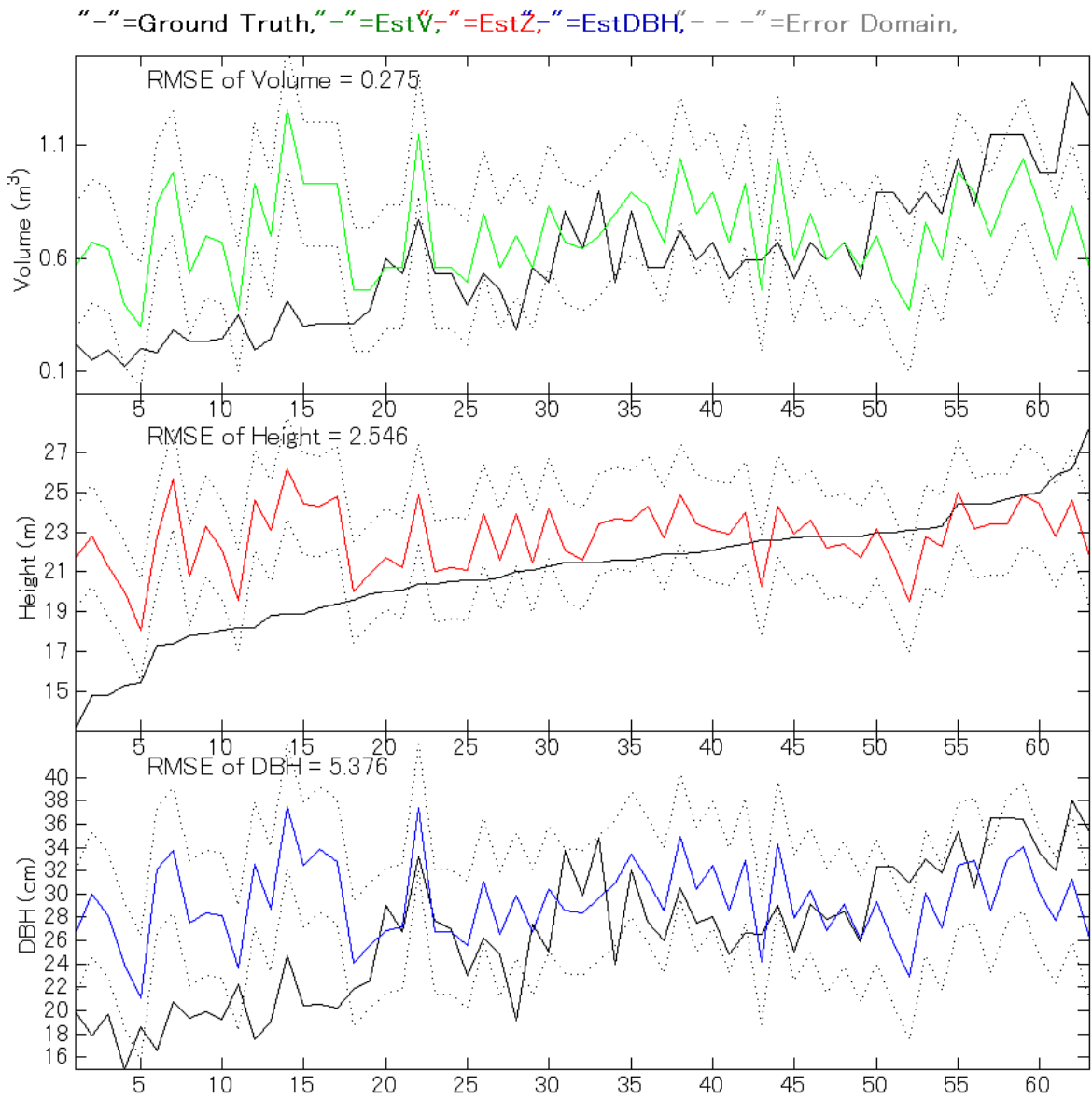
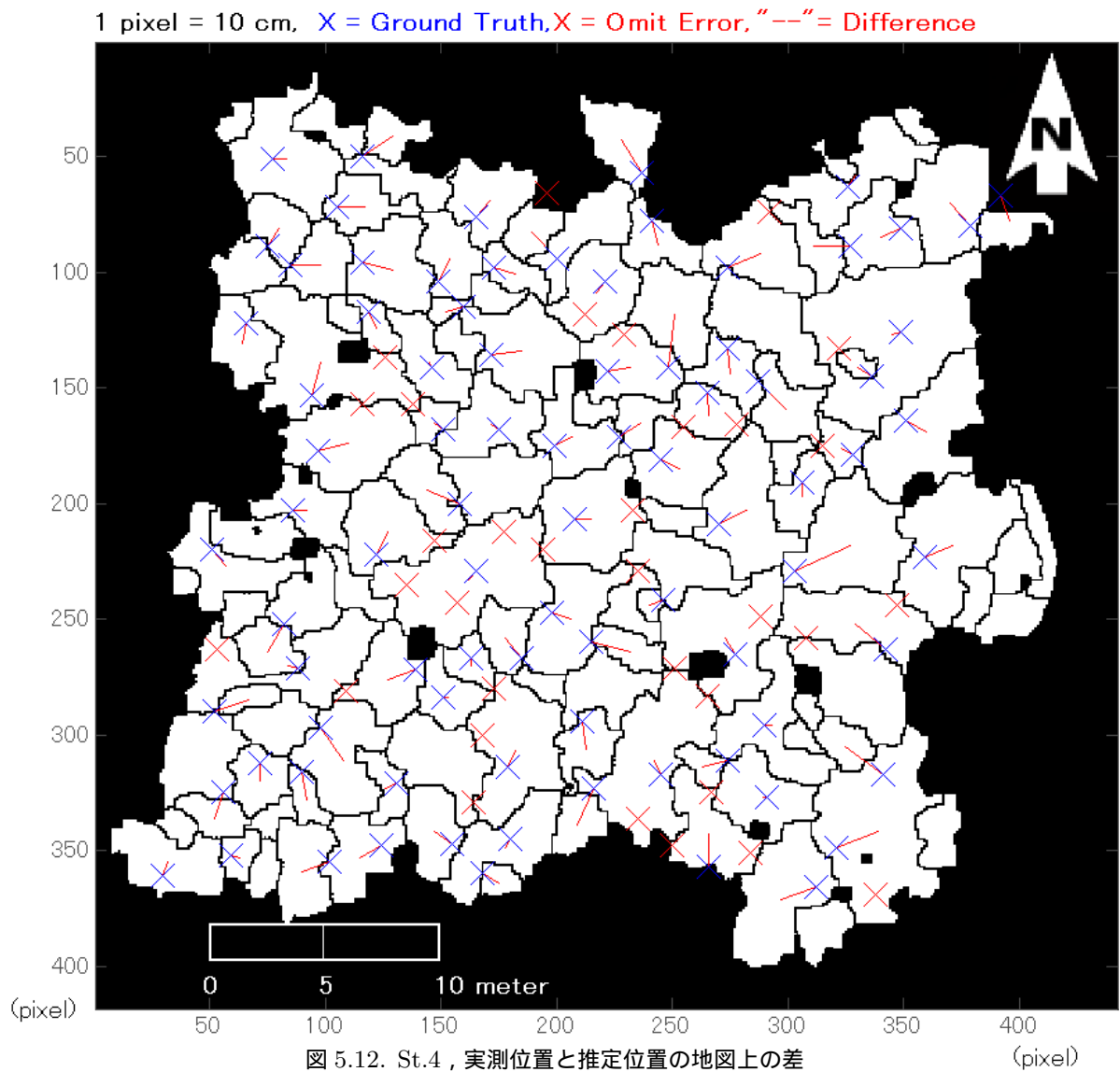


図 5.11. St.4, 実測値, 推定値と誤差範囲の折れ線グラフ (樹高昇順)

図 5.12 では、青い X を実測位置、青い X から伸びる赤い線の末端が推定位置を表している。赤い X は未検出であった実測位置である。



推定位置と実測位置に関しては、図 5.12 で地図上で見ても系統誤差は見られない。

推定樹木には比較的大きな複合樹冠が形成され、未検出樹木はその中に吸収されている。誤検出は実測樹木が他の推定樹木にマッチングされた場合や探索距離を超えマッチング起こらなかった場合、取り残される形で誤検出となるケースが確認できる。

5.3 考察

本研究で得られた結果から，主に2つの観点から考察を行う．まず，樹高が全体的に高めに推定されたことを考察する．次に樹頂の過小評価について検討する．

樹高の推定値は実測値と比べ全体的に過剰評価されている．先行研究の例では，樹高計測に関して過小評価する，という結論が多い(大政他, 2000; 田村・高槻, 2000; 瀬戸島, 2002)．本研究ではNDSMを作成する際の内挿法 Bilinear 法であり線形補間のため，実際の樹高より高い値が新たに内挿されることはない．全体的に過剰評価なことに対する考えられる理由は，DEMが低めに生成されていることや，森林内での計測誤差，などが考えられる．また今回使用したDEMには，付録Bで検証したように，70センチメートル程度の過小評価が確認されているため，これを差し引いて考えることや，DEMの作成方法再検討する必要がある．

次に樹頂数の過小評価に関して考察を加える．St.2やSt.4において，樹頂の数が少なめに出るのはレーザーによって捉えられた林冠がなめらかで凹凸が少ない表面が表現されているからである．この誤差要因がのちの樹高やDBHそして材積の推定に大きな影響を与えている．

本研究で用いたデータは，高い密度で取得することにより，フットプリント径によって樹冠面が埋め尽くされているので，レーザーパルスが梢端を捉えている可能性は高い．それでも樹頂点が過小評価になっているのは，樹頂と樹頂の間の凹面が，フットプリント径(47センチメートル)より小さいため，今回の手法では計測が困難になっている可能性もある．

第6章 結論と今後の課題

6.1 結論

本研究における成果を以下に示す。

1. 林分単位での材積は，合計値，平均値ともどの林齢においてもプラスマイナス 10%程度で推定することができた。
 - 林分内での過剰抽出や過少抽出は確認されたが，ha 当たりの本数を把握する上では十分正確だと結論付けた。
2. 単木単位での樹高と胸高直径の推定は，林冠が開いていると高い精度で行うことができた。
 - 林冠が開いている場合に高い精度で樹高と胸高直径の推定は樹高で 1メートル以内，胸高直径で 2センチメートル程度であった。
 - 林冠が閉鎖している場合には樹高および樹高の推定精度が著しく低下した。
3. LiDAR と DMC のデータを相互補完的に融合する手法を開発した。
 - 既往研究例と比べると，単独のデータ使用と比べて，推定の精度が向上した。
 - 林齢や植林密度が異なる多様な環境への適用可能性を示した。

6.2 今後の課題

今後の課題として以下が挙げられる

- 林分の疎密度の違いによる単木抽出手法の開発
本研究ではすべての林分に同一の手法を適用した。その結果林分密度によって，抽出率に違いが現れた。抽出率の改善のためには，たとえば林冠が閉鎖している林分に対しては，樹頂探索の方法を変えるなどの選択肢が考えられる。
- 林冠内部での反射レーザーパルスに対する 3次元局面フィッティング
今回の手法では林冠の表層部の情報を用いて材積の推定を行ったが，林冠の内部で反射するパルスに注目することで，複合樹冠や被圧木の推定ができる可能性がある。
- マッチング手法の改良。
直接計測をリモートセンシングで面的に補間しようと思った場合，マッチングが重要である。単木レベルで正確に対応付けることが，林分単位での推定精度をあげることになり，さらにはそれが広域での推定精度に影響を与えるからである。具体的な改良方法としては，樹高の高い順にマッチングを行うなど，なんらかの優先順位を設ける必要がある。

参考文献

日英混合アルファベット順 .

- Andersen, H., S.E. Reutebuch, and G.F. Schreuder (2001) “Automated Individual Tree Measurement Through Morphological Analysis of LIDAR-Based Canopy Surface Model”, *Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium*, pp. 11–22.
- アレンコーンビス (1994) 『木の写真図鑑』, 日本ヴィーグ社 .
- 千葉啓七 (1966) 「私の県では空中写真をこう使っている [北海道]」, 『森林航測』, 第 54 巻, 9–10 頁 .
- Fujimori, T., Y. Kanazawa, Y. Kiyono, K. Kamo, and I. Iimori (1984) “Crown Development and Stem Growth in Relation to Stand Density in Even-Aged Pure Stands (I) Stand Structure of Young *Cryptomeria japonica*”, *Journal of Japanese Forest Society*, Vol. 66, No. 4, pp. 132–140.
- Gougeon, F.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*, Vol. 21.
- 原田久吉 (1966) 「立木販売業務への空中写真利用の現状」, 『森林航測』, 第 54 巻, 8 頁 .
- Hese, S., W. Lucht, C. Schmullius, M. Barnsley, R. Dubayah, D. Knorr, K. Neumann, T. Riedel, and K. Schroter (2004) “Global biomass mapping for an improved understanding of the CO² balance -the Earth observation mission Carbon 3D”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 94, pp. 94–104.
- Heurich, M., A. Persson, J. Holmgren, and E. Kennel (2004) “Detection and Measuring Individual Trees with Laser Scanning in Mixed Mountain Forest of Centra Europe Using an Algorithm Developed for Swedish Boreal Forest Conditions”, *Proceedings of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Working Group VIII/2, 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment'*, pp. 307–312.
- 平田泰雅・鷲尾元 (2004) 『LIDAR リモートセンシングによる森林機能パラメータ計測手法に関する研究』, 文部科学省 研究開発局 . 海洋開発及地球科学技術調査研究促進費地球環境遠隔探査技術等の研究 平成 14 年度成果報告書 .
- 平田泰雅 (2004) 「航空機レーザースキャナーによる森林の 3 次元計測」, 『土木学会誌』, 第 89 巻, 第 1 号, 28–30 頁 .
- 樋渡幸男 (1974) 「森林の判読 < 1 >」, 『森林航測』, 第 105 巻, 16–20 頁 .
- 堀江延韶 (2002) 「航空機搭載型デジタルカメラシステム DMC」, 『写真測量とリモートセンシング』, 第 41 巻, 第 4 号, 33–35 頁 .

- Hyypä, J., O. Kelle, M. Lehtikainen, and M. Inkinen (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*.
- JIFPRO (2005) *Global Warming and Afforestation (CD-ROM)*: 財団法人国際緑化推進センター.
- 環境省 (2004) 『地球温暖化 CDM フォーラム 2004』, 環境省地球環境局地球温暖化対策課 (国際対策室) .
- 加藤正人 (2002) 「高分解能 IKONOS 画像による単木判読可能性の比較」, 『日本林学会誌』, 第 84 巻, 第 4 号, 221–230 頁 .
- 小村良太郎・久保守・村本健一郎 (2003) 「空撮画像を用いた局所フラクタル次元による樹冠解析」, 『写真測量とリモートセンシング』, 27–36 頁 .
- Kosaka, N., R. Nagai, T. Akiyama, and B. Tsai (2004) "Tree crown analysis using high-resolution panchromatic satellite imagery", *Proceedings of 25th Asian Conference on Remote Sensing*, pp. 674–679.
- 航空レーザ測量 WG (2004) 『航空レーザ測量ハンドブック』, 財団法人日本測量調査技術協会 . コクサイクリエイティブセンター .
- Leckie, D.G., F.A. Goueon, S. Tinis, T. Nelson, C.N. Burnett, and D. Paradine (2005) "Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 94, pp. 311–326.
- Maltamo, M., K. Eerikainen, J. Pitkanen, J. Hyypä, and M. Vehmas (2004) "Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 90, pp. 319–330.
- 丸紅株式会社 (2004) 『平成 15 年度 CDM/JI 事業調査カンボジア・モントギリ高原におけるゴムノキ植林事業可能性調査』 .
- 政春尋志 (2002) 「レーザスキャナ」, 『写真測量とリモートセンシング』, 第 41 巻, 第 4 号, 11–12 頁 .
- 南雲秀次郎・箕輪光博 (1990) 『現代林学講義・10 測樹学』, 地球社 .
- Nelson, R. (1997) "Modeling forest canopy heights: The effects of canopy shape", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 60, pp. 327–334.
- 日本リモートセンシング研究会 (2001) 『図解リモートセンシング』, 社団法人日本測量協会 .
- 西沢正久 (1971) 「森林調査とコンピューター」, 『森林航測』, 第 89 巻, 8–10 頁 .
- 小熊宏之・山形与志樹 (2000) 「リモートセンシングを用いた森林樹冠率の推定 (京都議定書対応のためのリモートセンシング技術の確立)」, 『写真測量とリモートセンシング』, 第 39 巻, 第 2 号, 82–89 頁 .
- 王子製紙株式会社 (2004) 『平成 15 年度 CDM/JI 事業調査マダガスカル・トアマシナ州における循環型バイオマスプラントの事業化報告書』 .
- 岡崎亮太・瀬戸島政博・船橋学・今井靖晃 (2003) 「航空機レーザスキャナの異なる FootPrint による樹冠把握の検討」, 『日本測量学会平成 15 年度 年次学術講演会発表論文集』, 199–202 頁 .
- 大隈眞一 (2001) 『森林計測学講義』, 養賢堂 .
- 大政謙次・秋山幸秀・石神靖弘・吉見健司 (2000) 「ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning

- Lidar システムによる樹冠高」, 『日本リモートセンシング学会誌』, 第 20 巻, 第 4 号, 34–46 頁 .
- Patenaude, G., R.A. Hill, R. Milne, D.L.A. Gaveau, B.B.J. Briggs, and T.P. Dawson (2004) “Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 93, No. 3, pp. 468–380.
- Persson, A., J. Holmgren, and U. Soderman (2002) “Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 68.
- Riano, David, Emilio Chuvieco, Sonia Condes, Javier Gonzalez-Matesanz, and Susan L. Ustin (2004) “Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 92, pp. 345–352.
- 林野庁 (2004) 『平成 15 年度 林業白書』, 農林水産省 .
- 林野庁計画課 (1970) 『立木幹材積表 (東日本編)』, 林野庁計画課 . 日本林業調査会 .
- 坂田景祐・木平勇吉・田中純一・井上公基 (2001) 「CO₂ 排出権取引を想定した林業経営の環境経済学的分析」, 『日本学会誌』, 第 83 巻, 220–224 頁 .
- 坂田景祐・木平勇吉 (2003) 「森林の CO₂ 吸収機能に対する助成を想定した林業経営収支モデル」, 『日本林学会誌』, 第 85 巻, 第 1 号, 7–11 頁 .
- 坂上寛之・竹島喜芳・李雲慶・福井弘道 (2004) 「高分解能衛星画像を用いた森林植生区分における Object ベース分類の有効性の検討」, 『日本測量学会 平成 65 年度 秋季学術講演会発表論文集』, 129–130 頁 .
- 瀬戸島政博 (2002) 「森林計測への航空機レーザースキャナの利用-落葉前後の航空機レーザースキャナデータを用いた地盤高・樹高の計測-」, 『写真測量とリモートセンシング』, 第 41 巻, 第 4 号, 41–45 頁 .
- 社団法人海外産業植林センター (2004) 『CDM 植林技術指針調査事業平成 15 年度事業報告書』 .
- Sheng, Y., P. Gong, and G.S. Biging (2001) “Model-Based Conifer-Crown Surface Reconstruction from High-Resolution Aerial Images”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 67, No. 8.
- 住友林業株式会社 (2004) 『平成 15 年度 CDM/JI 事業調査インドネシア共和国 3 州における植林およびバイオマスエネルギー利用プロジェクト報告書』 .
- 竹下敬司 (1985) 「パラボラ樹冠形モデルによるスギ林の構造解析」, 『九大演報』, 第 55 巻, 55–104 頁 .
- 竹内渉・安岡善文 (2004) 「MODIS データを用いた合成画像作成手法の開発」, 『日本リモートセンシング学会誌』, 第 43 巻, 第 5 号, 36–48 頁 .
- 田村正行・高槻幸枝 (2000) 「航空機レーザースキャナーによる樹高計測」, 『写真測量とリモートセンシング』, 第 39 巻, 第 2 号, 8–13 頁 .
- 田中淳夫 (2002) 『日本の森はなぜ危険なのか～環境と経済の森林業レポート～』, 平凡社新書 .
- Touminen, S. and A Pekkarinen (2005) “Performance of differenc spectral and textual aerial photograph features in multi-source forest inventory”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 94, pp. 256–268.
- UNFCCC (1997) *Kyoto Protocol: United Nations Framework Convention on Climate Change*.

- 白田裕一郎・渡部展也・福井弘道 (2003) 「Object-Oriented Classification における Image Segmentation の最適化に関する研究」, 『日本測量学会 平成 15 年度年次学術講演会発表論文集』, 125–128 頁 .
- Viovy, N., O. Arino, and A. S. Belward (1992) “The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13.
- Wulder, M., K.O. Niemann, and G. Goodenough (2000) “Local Maximum Filtering for the Extraction of Tree Locations and Basal Area from High Spatial Resolution Imagery”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 73, pp. 103–114.
- 米康充・小熊宏之・山形与志樹 (2002) 「京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発-航空機 Lidar によるカラマツ林の樹冠計測と材積・炭素重量計測精度の検証-」, 『日本リモートセンシング学会誌』, 第 22 巻, 第 5 号, 531–543 頁 .
- 米康充・小熊宏之・守田英明・金子潔 (2003) 「空中写真を用いた天然林特徴抽出手法の研究」, 『日本測量学会 平成 15 年度年次学術講演会発表論文集』, 31–32 頁 .
- 吉田茂二郎 (1991) 「樹冠によるスギ単純同齢林の定期直径成長量の推定」, 『日本林学会誌』, 第 73 巻, 第 1 号, 29–33 頁 .

謝辞

本研究を行うにあたり、お世話になりましたたくさんの方々へ感謝いたします。

柴崎先生には修士2年の夏に急なテーマ変更を申し出て、無理なお願いをするかたちになりましたが、その後も鋭い視点と経験に基づいた斬新なアイデアで私の研究をサポートしていただきました。東京大学で学ぶ機会をいただいたことで、人生の中でもっとも濃い2年間を過ごすことができ、たくさんの財産を得ることができました。心からの感謝をしております。

安岡先生には、所属が異なることからご負担を増やしてしまうこととなりましたが、環境問題や研究に対する真摯な姿勢は、一人の研究者として反省や見習うべき多くの点に気が付かされました。定例ゼミは苦しみでもありましたが楽しみでもありました。部屋を訪れればいつでもウェルカムな雰囲気でご相談に乗っていただき、夜帰宅される前の励ましの言葉を嬉しく思っています。

副指導員の梶先生には林学の観点から貴重な助言を頂きました。自分の無知さに気づくとともに、森林の魅力を確認するよい機会となりました。

須崎先生には、ゼミや発表練習の場で冷静な観点からご指摘をいただきました。気さくに話しかけて頂いたことで、研究以外の事柄でも相談することが出来ました。

遠藤さんには、出張や計測の段取り、研究の方向性に加え、多くの過酷な作業にご協力いただき本当に感謝しております。特にバイオマス調査の根の洗浄と樹幹円板の切断作業では、泥と雪の中での格闘となり、恐縮な思いです。また研究の合間の息抜きも楽しい時間でした。

青森県上十三地区の森林組合のみなさん、および国際航業株式会社と三菱製紙株式会社の関係者の方々には、こちらの要望による通常業務を超えた無理難題に、柔軟かつ前向きに対応していただきましてありがとうございます。それに応えられるような成果物を積み重ねていければ幸いです。

青森林業試験場の兼平先生、山梨大学の長沼先生、森林総合研究所の平田先生には、森林調査に必要な機材や知識を惜しみなく提供していただきました。森林に関して素人な私たちの素朴な疑問にも親切に答えていただき貴重な知見を得ることができました。ありがとうございました。

竹内さん、バルアさん、大吉さん、山岸君、佐々木君、藤原君、山地君には、毎木調査やバイオマス調査のために、予想は遥かに超える辛い作業を強いることになりました。みなさまのご協力がなければ、自分の研究は成立しないことを考えると、感謝の念に絶えません。

藤野さん、明子さん、彩さん、久美子さん、順子さん、ミキさんは研究室の支え、楽しい雰囲気の中で研究生活を送ることができました。また柴崎・安岡研究室のみなさんのおかげで、この2年間が充実したものであったことは間違いありません。本当にありがとうございました。

シンガポールアメリカンスクールや慶応大学の友人にも、会う度に、新しい社会人として、異なる分野の研究者として頑張るみなさまの姿に、励まされ、刺激されました。富士山、屋久島そして沖縄などの自然豊かな場所から欧州やインド・中国まで足を運ぶ機会を持つことができました。そしてのんびりとした週末は、心安らぐとともに忙しい研究生活にメリハリを与えてくれました。

最後に、知らない間に、知らない場所に行って、泥まみれになって帰ってくる私を、陰ながら暖かく見守ってくれている両親・姉・そして愛猫に感謝したいと思います。

2005年1月吉日

付録A 専門用語の定義と解説

樹冠 (英) crown . 樹木の枝や葉の茂っている部分。

単木 (英) individual tree . 森林を構成している一本一本の木 .

林冠 (英) canopy . 森林の上部の葉の茂った部分が相接して森を覆う層のこと . 樹冠が単木であるのに対して , 樹冠の集合体として林冠と呼ぶ .

林班 ある地域に生えてる樹木を班分けをする森林区分 . 国有林の管理上の区画など .

林分 (英) stands . 森林を構成する樹木の種類 , 大きさあるいは混交率によって , 区分可能な部分 .

付録B レーザースキャナで得られた点群データによる標高モデルの作成

ここでは、レーザースキャナ (LiDAR) で得られた点群データ (図 B.1) の処理について説明する。点群データから作成するデータは 2 種類ある。地盤高の高さをあらわす Digital Elevation Model と、地上からの相対的な高さを表す Normalized Digital Elevation Model である。それぞれ順を追って説明する。

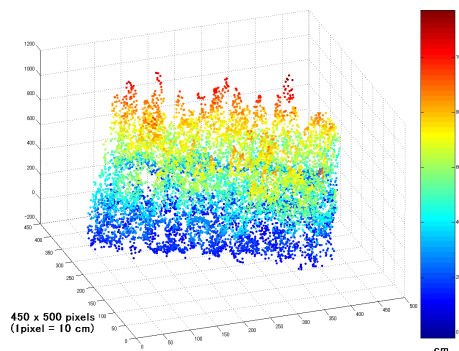


図 B.1. レーザースキャナで得られる点群データ。

B.1 Digital Elevation Model(DEM) の作成

ここでは点群データから DEM データを生成した手法について説明をする。

点群データはパルス番号によって 1st, 2nd, 3rd, Last パルスに分類されるが、それらすべてを合算してランダム点群 (Random points) と呼ぶ。発射されたパルスの中には樹冠をすり抜け、枝や幹、下草、そして地盤などから反射してくるパルスも多数存在する。周囲に比べて標高が特に低い場所を地盤高の高さを示す点を抽出し 1 メートルグリッドに再配列した。フィルターは地形を曲面で近似し、その曲面に応じて設定されたしきい値を超える点群を取り除く手法である。Triangular Irregular Network(TIN) を作成してラスタデータとして DEM を作成した。

図 B.2 に、LiDAR によって作成された DEM の標高と三角点の標高を比べた散布図を示す。今回計測したエリアには 7 点の三角点が存在したので、そのすべてで対応する点の標高を比較した。相関係数は 1.00 となるほど精度はいいが、RMSE で 0.734 メートルとなっている。平均をみると -0.734 メートルとなっていることから、すべての点で過小評価であったことが理解できる。

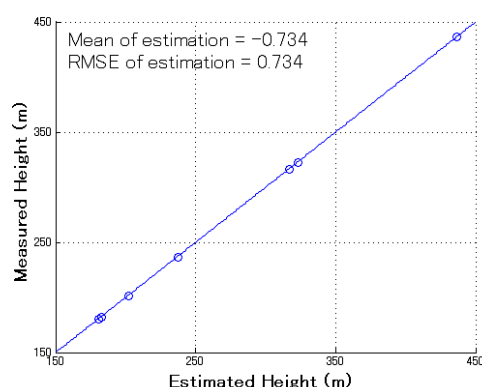


図 B.2. DEM の標高と三角点の標高を比べた散布図 .

B.2 Normalized Digital Surface Model(NDSM) の作成

次に正規化された標高データである Normalized Digital Surface Model(NDSM) の作成方法について説明する．この NDSM は表層の標高より，地盤高である DEM を差し引いたもので，地上からの相対的な高さを表現している．図 B.3 に元データのランダム点群から，NDSM 生成までのフローを示し，以下に順を追って説明を加える．

ランダム点群と DEM を用いた正規化

まず，ランダム点群から，対応する DEM 位置の標高を差し引き，正規化ランダム点群 (Normalized random points) を作成する．正規化とは地盤高を基準とした地物の高さを計算することを指す．

$$Z_{normalizedR} = Z_{originalR} - Z_{DEM} \quad (B.1)$$

ここで正規化ランダム点群の標高が $Z_{normalizedR}$ ，オリジナルのランダム点群が $Z_{originalR}$ ，DEM の標高が Z_{DEM} である．これにより，地盤高を差し引いた，地物のみの高さを算出することができた．

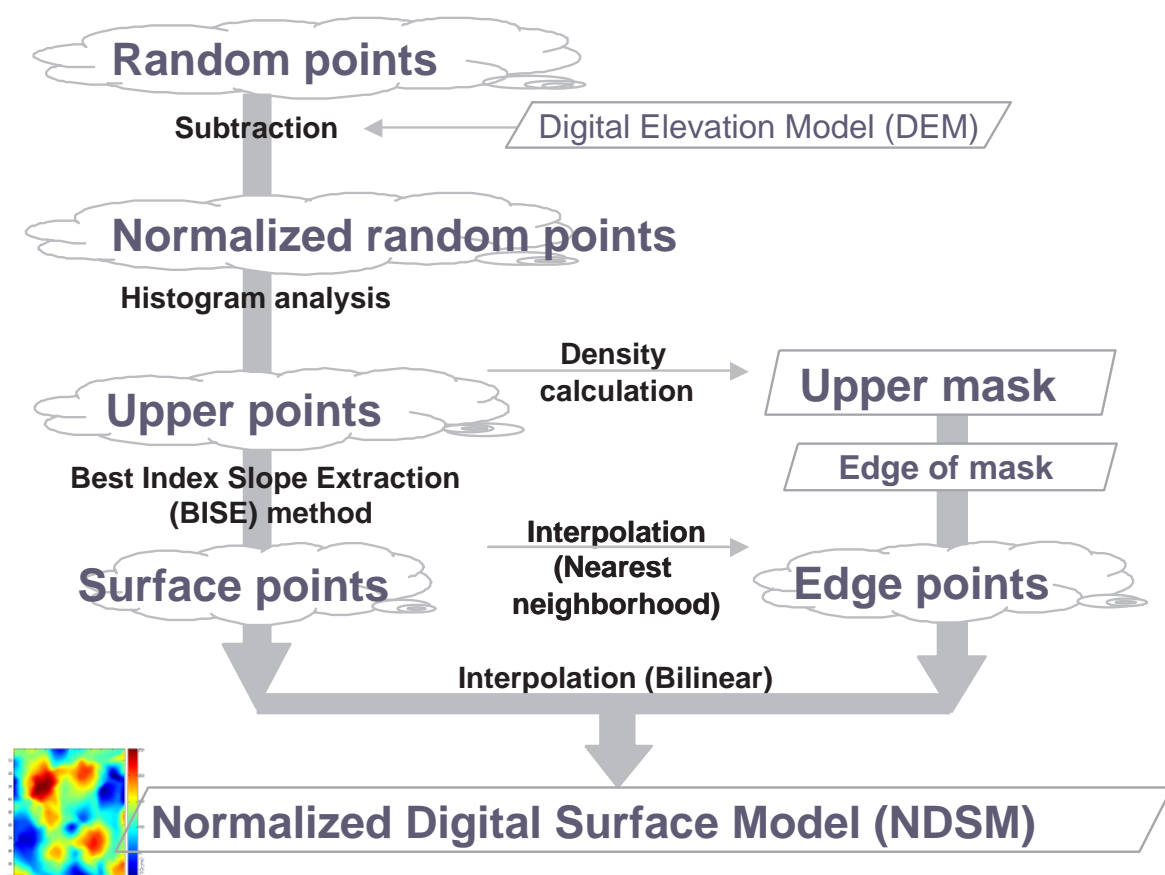


図 B.3. ランダム点群から NDSM 生成のフローチャート .

ヒストグラム分析による樹冠部分の抽出

次に、正規化ランダム点群の中から、樹冠部分のみを抽出する方法を説明する。

正規化ランダム点群をヒストグラムに表示すると、B.4 のように双峰性を持った分布を示す。これは航空機から発射されたレーザーパルスが主に地盤工か樹冠面のいずれかで反射して観測されているからである。ヒストグラムの中から樹冠面と判断できるものを手動で選択し、上層点群 (Upper random points) として保存した。

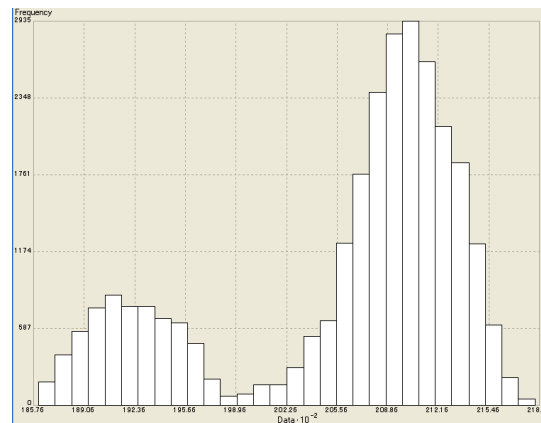


図 B.4. 双峰性のあるランダム点群のヒストグラム分布

ここからは上層点群から、表層点群 (Surface points) を抽出する方法を説明する。

通常、樹冠面を示す標高モデルを作成するときには 1st パルスのみを使用する例が多い。これは 1st パルスが樹冠の表層面で反射してきているという前提に基づいている。しかし今回使用したデータは例え 1st パルスのみ使用しても、樹冠の内部からの反射パルスが含まれてしまう。よってすべての 1st パルスを用いて内挿を行いラスタデータを作成すると、樹冠内に期待した以上の谷が出来てしまい、その後の分析が困難になる。そこで本研究では平滑化手法として Best Index Slope Extraction (BISE) 法を採用した。

BISE 法とは本来は植生指標の年間変動を平滑化する目的に開発された手法である (Viovy et al., 1992)。植生指標は雲や大気状態の影響により、本来の値よりも低下するという仮定に基づいている。始点からある一定期間のウィンドウを設定し、ウィンドウ内で始点よりも値が高い点を探索し、始点と見つかった点を線形補完する。ウィンドウ内に始点よりも値が高い点が存在しない場合には、ウィンドウ内でもっとも値が高い点を次の始点として、同様の処理を繰り返す。さまざまなウィンドウサイズで検討を行ったが、3m で行った場合に樹冠本来の形をもっとも表現できていると判断できたため、ウィンドウサイズは 3m に設定した。

B.5 に、BISE 法による上層点群の平滑化の効果を示す。青い点がオリジナル点群であり、赤い点が BISE 法による抽出結果である。赤い点群はオリジナルに比べて、表層部分をすべるように抽出されているのが分かる。

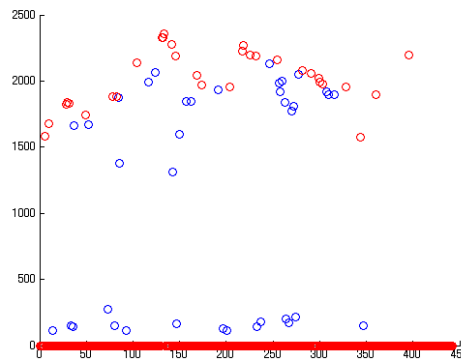


図 B.5. BISE 法による平滑化の効果 (処理前：青、処理後：赤)

表層点群を内挿する際の注意点 これまでで得られた、表層点群を用いて、空間的な内挿を行いラスタ画像を得ることは可能である。しかし表層点群は、林分に含まれるギャップの部分のデータを有していないため、データのない部分を標高ゼロとしてとして内挿してしまう。これを線形補完した場合、樹冠の縁の部分で標高が急降下する NDSM が作成されてしまう。これを防ぐために以下のような処理を行っている。

- 上層部を定義する上層マスク (Upper mask) を作成する。
- 最隣法で内挿した標高を上層マスクの境界線上に入力する。
- 入力された標高を、表層点群に追加する。
- 上層マスクの境界線の標高が含まれた表層点群を Bilinear 法により線形補完する。

図 B.3 の上層点群の存在の有無を判断する上層マスク (Upper mask) は、点群の密度を計算することで作成した。これは半径 50 センチメートル以内に 3 点以上点が存在する場合に、該当ピクセルは上層部である、と定義するマスクである。ある程度のバッファを持たせたのは、マスクの境界面を滑らかにするためである。

上層マスクにおいて、マスク領域と非マスク領域の境界線を探し、その地点の標高を入力する。このときの標高データは表層点群を最隣法で内挿し、一番近い標高データが入力されるようにした。ここで最隣法を採用する理由は、近似式などで内挿することで実際には存在しない新しい値を作成してしまうことを避けるためである。

この境界線上の標高を、表層点群に加えることで、樹冠幅の終了地点に適切な標高を与えることができる考えた。よって最終的には表層点群に加え境界線上の標高点群を加えた上で、Bilinear 法による線形補完を行った。

以上、このセクションでは NDSM の作成方法について説明した。ヒストグラム分析による樹冠部分をランダム点群を抽出したうえで、BISE 法による平滑化処理を行った。平滑化を行った表層点群に上層マスクの境界線上の標高点群を追加し、NDSM のラスタデータを作成した。

付録C 解像度の変化が樹木抽出に与える影響に関する考察

ここでは、取得した DMC 画像を用いて、シミュレーションによる解像度の変化を行い、その変化による樹木抽出にどのような影響を与えるかを考察した。画像は 0.1 メートル解像度の近赤外線画像を Bilinear 法によってリサイズした。シミュレーションした解像度は、0.25 メートル、0.5 メートル、0.75 メートル、1.0 メートルである。

対象エリアにはスギ植林地で 5 本 (左 3 本、右 2 本) の樹木が確認されている。左隅の明るい部分は下草植生である。

比較する手法は以下に説明する Local Maximum Filtering 法と Template Matching 法の 2 種類であり以下に説明をする。

Local Maximum 法

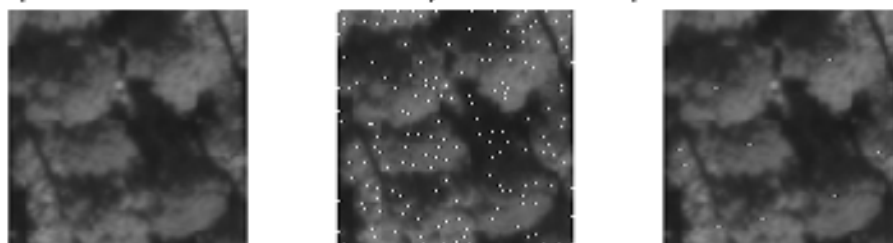
Local Maximum(LM) 法は、対象画素を中心としてある大きさのウィンドウを設定し、この時に対象画素の輝度値が最大であれば、その点を梢端の候補として抽出する。特に針葉樹のように尖った樹冠において梢端部で輝度値が高くなることに着目して採用されている。ただし単木樹冠を抽出する際には、空間分解能が低すぎると梢端においても輝度が高くなり、また逆に空間分解能が高すぎるとノイズを抽出してしまう可能性が高くなり平滑化などの前処理が必要になってくる。適切な空間分解能と前処理の選択が、抽出精度に大きな影響を与える (Wulder et al., 2000)。

Template Matching 法

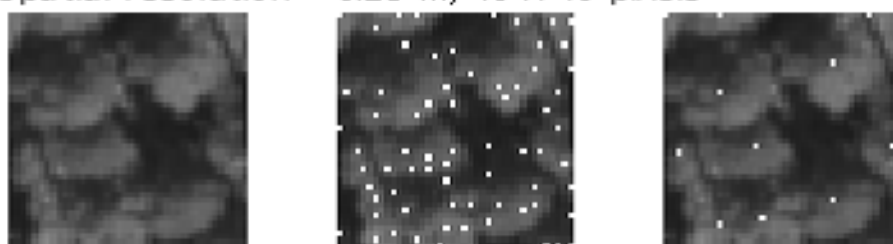
Template Matching(TM) 法は樹冠の形状や大きさ、樹冠での反射特性をモデル化し、作成もしくは選択したテンプレートを利用して、テンプレート画像と対象画像の 2 次元的な相関係数を計算し、この値が高いときに樹木の樹冠の候補として抽出する。撮影条件によりテンプレートを変えることができるが、同時に一般化が難しいことも事実である。3 次元の樹木モデルからテンプレートを作成してマッチングをする例も報告されている Matching (Sheng et al., 2001)。

以上 2 つの手法を、結果を図 C.1 に示す。

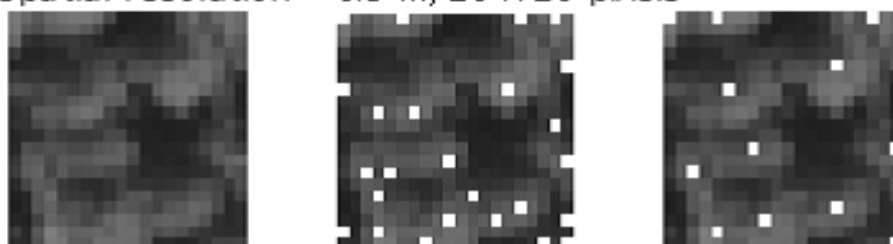
Spatial resolution = 0.1 m, 100 × 100 pixels



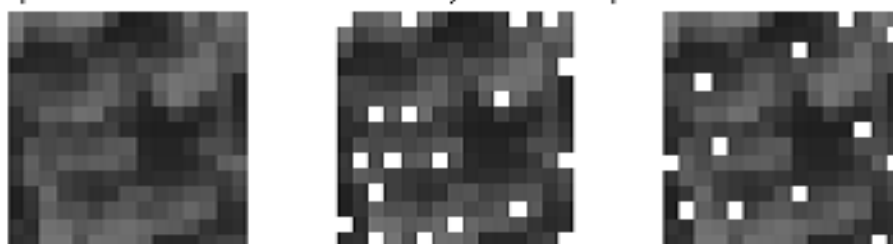
Spatial resolution = 0.25 m, 40 × 40 pixels



Spatial resolution = 0.5 m, 20 × 20 pixels



Spatial resolution = 0.75 m, 15 × 15 pixels



Spatial resolution = 1.0 m, 10 × 10 pixels



**Original
Image**

**Local
maximum**

**Template
matching**

図 C.1. 各手法の比較

比較した結果と考察

まず目視の結果を解像度ごとに検証する。0.5メートル解像度のあたりまでは6本の木が目視できるが、0.75メートルや1.0メートル画像では、4本もしくは3本の樹木に認識できる。

次に Local Maximum 法の結果を解像度ごとに検証する。0.1メートル、0.25メートル、0.5メートル画像では非常に多くの点が過剰検出されている。0.75メートルと1.0メートル画像でも過剰検出の傾向は変わらない。最後に Template Matching 法の結果を解像度ごとに検証する。0.1メートル解像度の場合は縦3列、横2列の樹木が検出されている。しかし左隅で3点検出しているのは下草植生に対する過剰検出である。この傾向は1.0メートル画像でも確認できる。

次に LM 法の結果を比較する。LM 法の結果は解像度が荒くなるにつれ、検出数が下がっていく。0.1メートルにおいては100以上の点が誤検出が含まれており、解像度が落ちるにつれ検出数は下がる。1.0メートルでも過剰抽出であるが、左列の中央の樹木は未検出となっている。

次に TM 法の結果を比較する。結果を見ると、すべての解像度で5本の樹木に対する検出は行うことができている。誤検出は、下層植生に対するものである。現地はシダ植物が旺盛に生えており、近赤外線画像で見ると強い反射を示している。この強い反射がスギの樹冠による反射とにており、そのような点を検出しているものと考えられる。

誤検出の数に注目すると、その数が一番少ないのは解像度0.1メートルである。情報量が多いことにより、テンプレートに対する相関係数にバラエティが生まれ、誤検出を減らしている。解像度が落ちることにより、周囲の情報も含んでしまい、全体的に情報が集約されていることが、結果に現れている。

付録D 各林分の本研究で用いた手法を適用した結果画像

ここでは、各林分について本文中で説明した手法を適用した結果を示す。まず、近赤外線画像 (NIR) と Template Matching 法の結果画像を示し、次に正規化標高モデル (NDSM) と Hill Climbing 法の結果画像を示した。

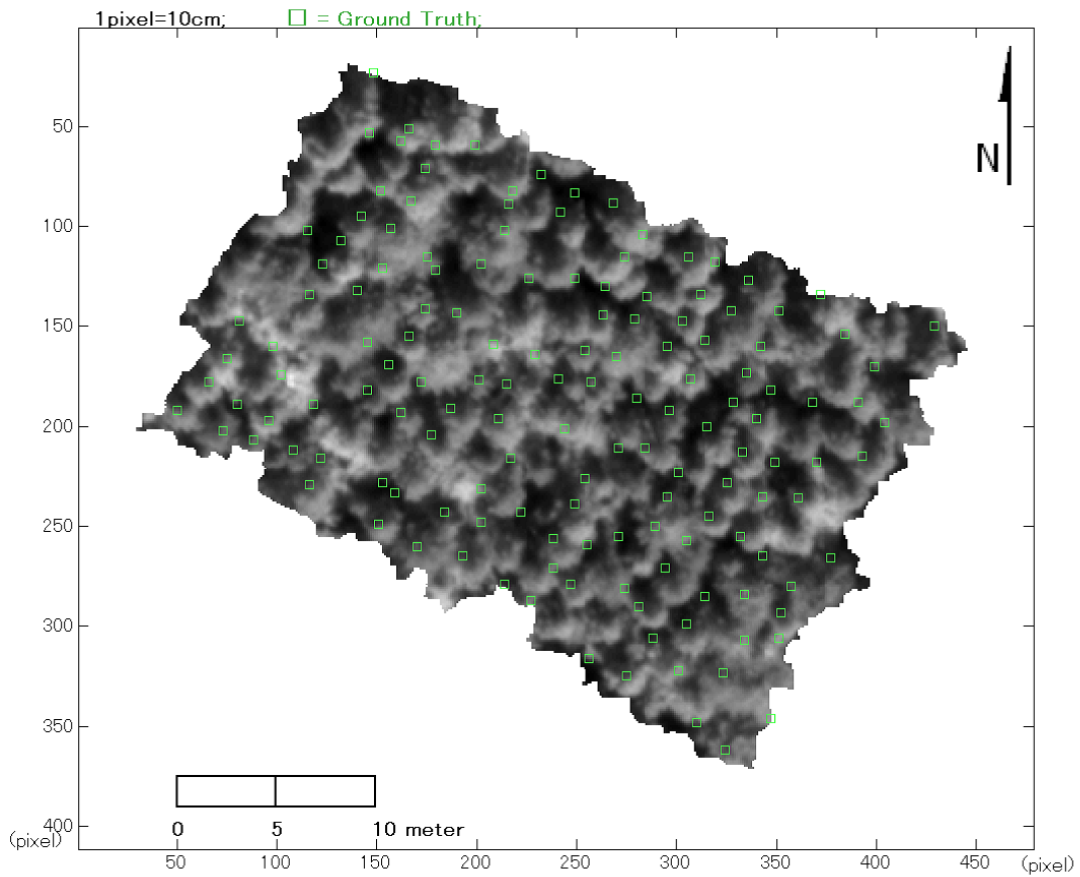


図 D.1 St.1 近赤外線 (NIR) 画像

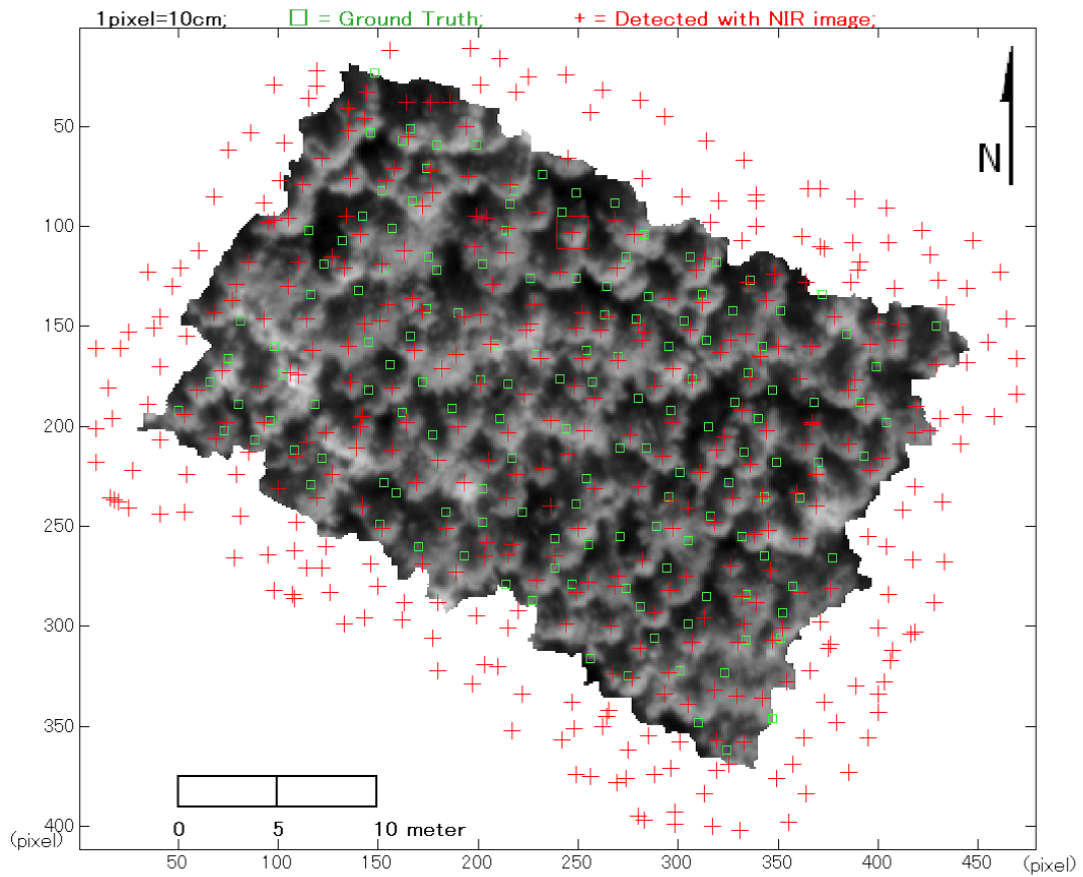


図 D.2. St.1 , NIR 画像上に表示した Template Matching 法の結果 .

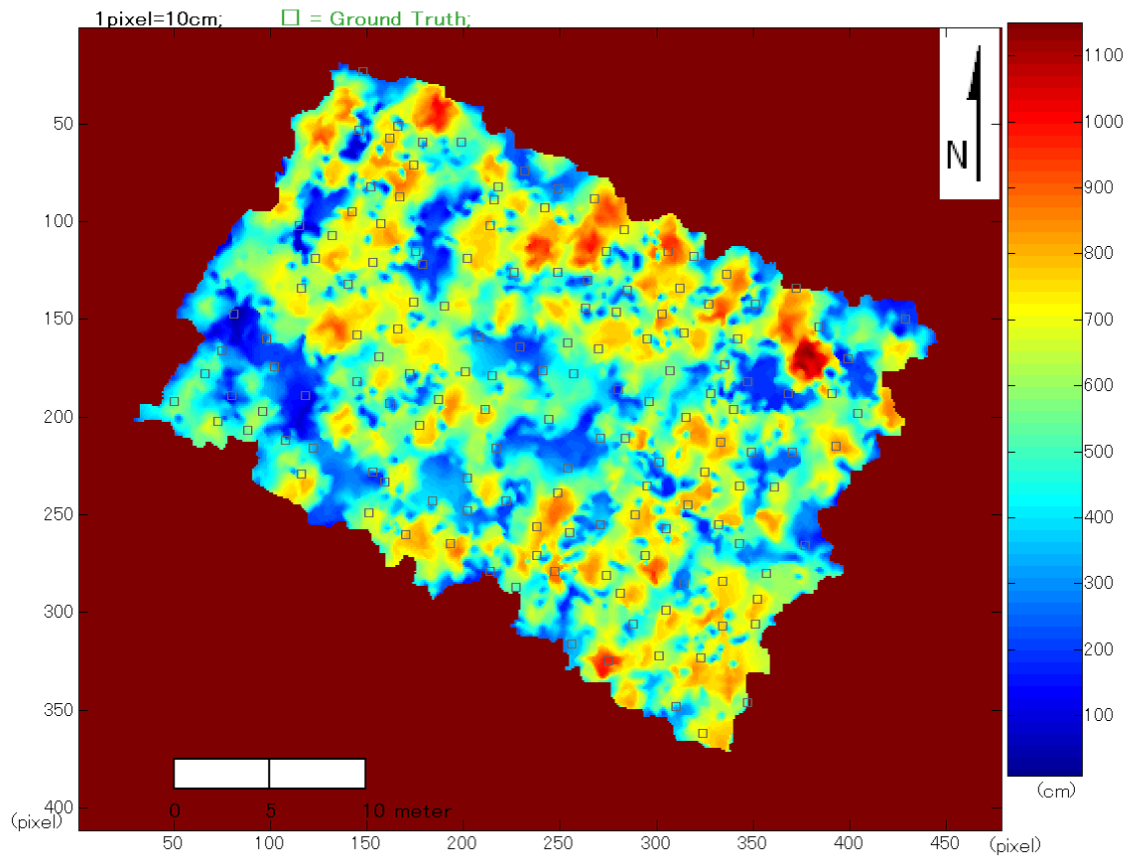


図 D.3. St.1 , 正規化デジタル標高モデル (NDSM) 画像 .

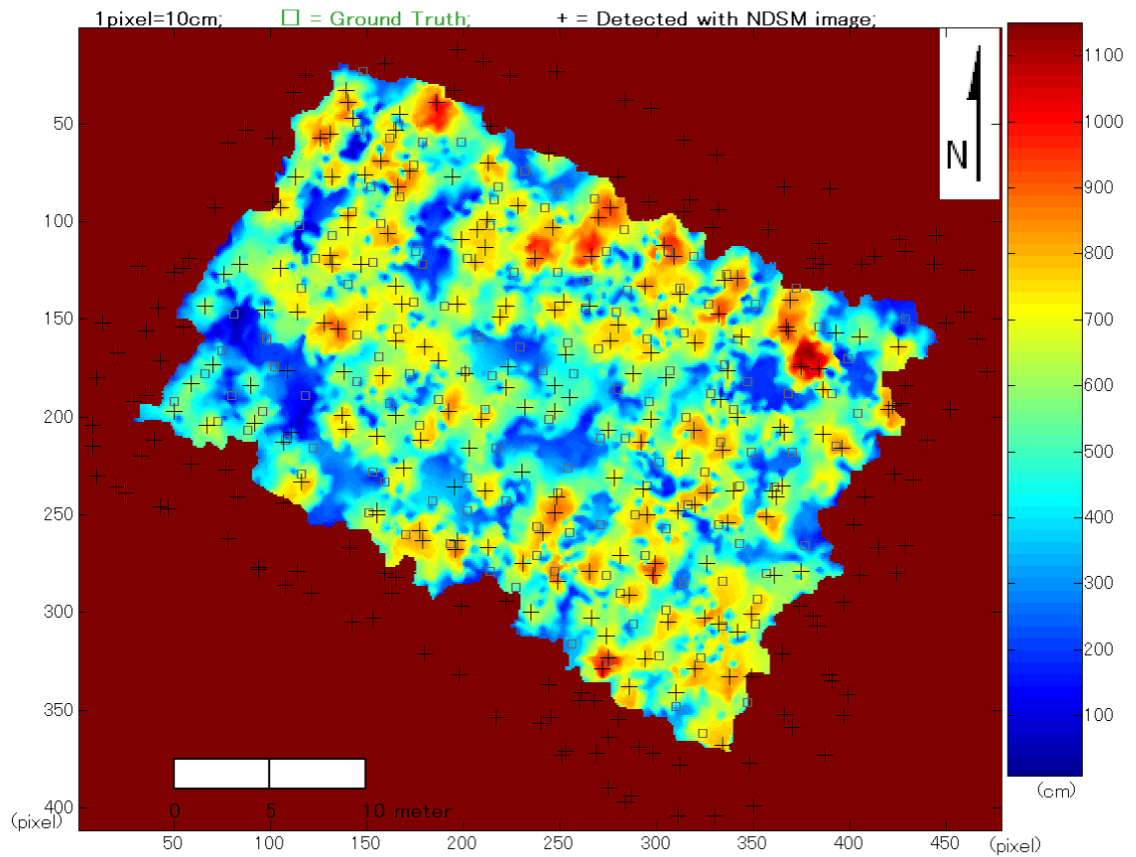


図 D.4. St.1 , NDSM 画像上に表示した Hill Climbing 法の結果 .

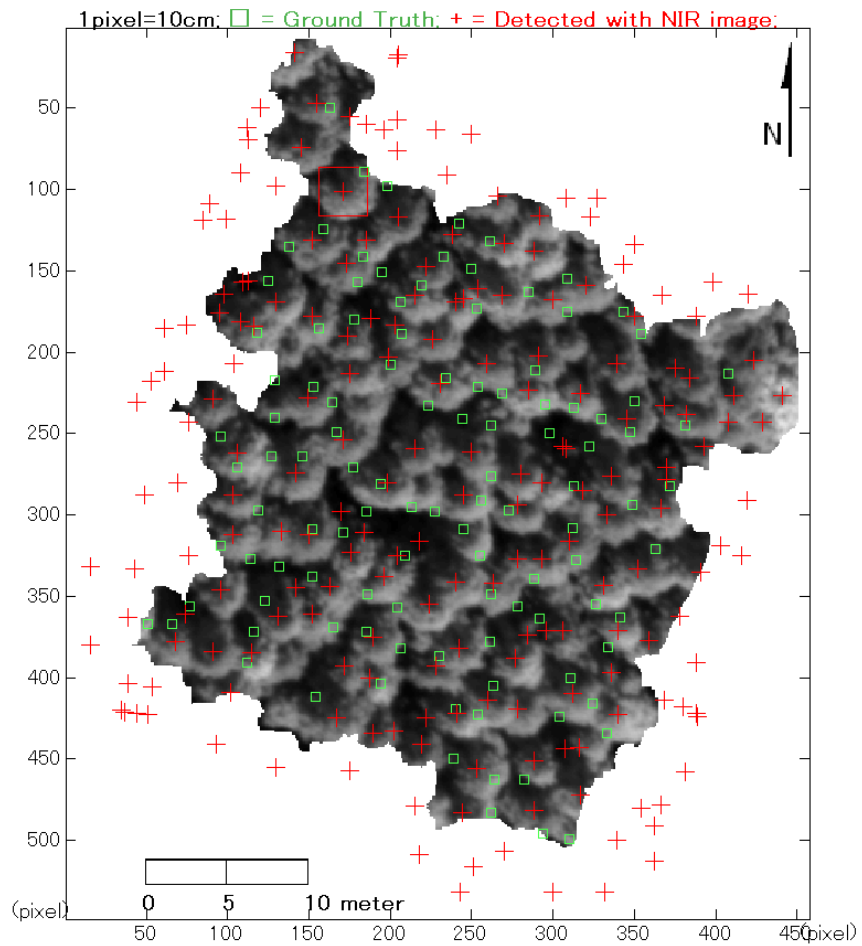
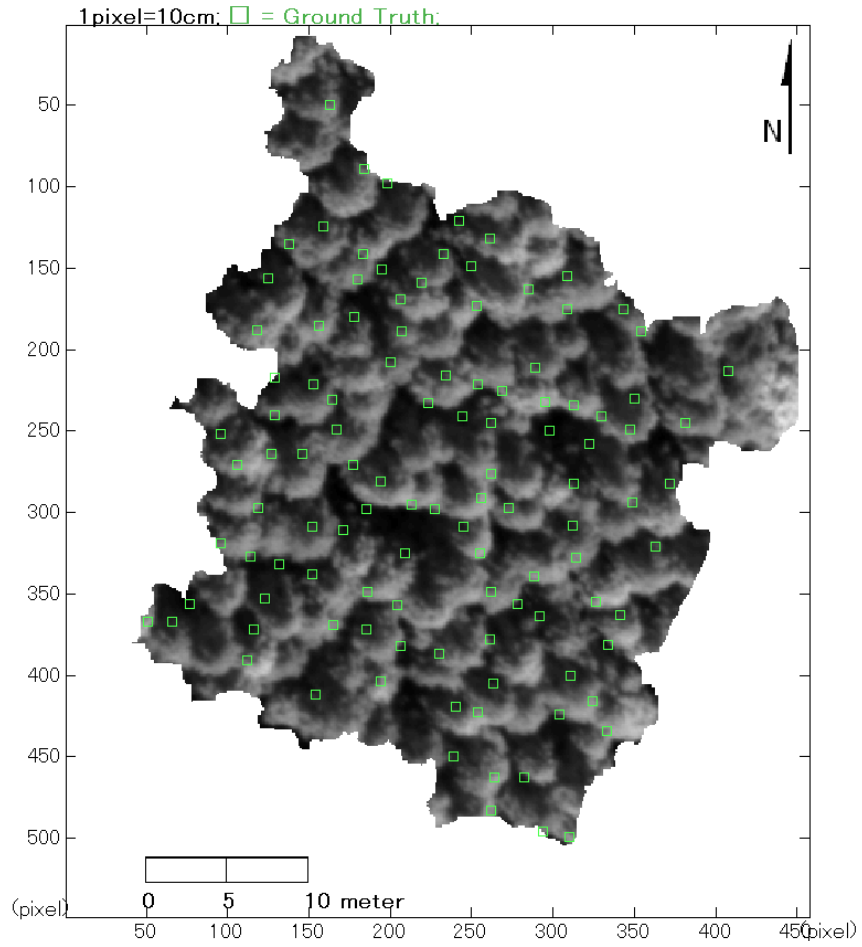


図 D.6. St.2 , NIR 画像上に表示した Template Matching 法の結果 .

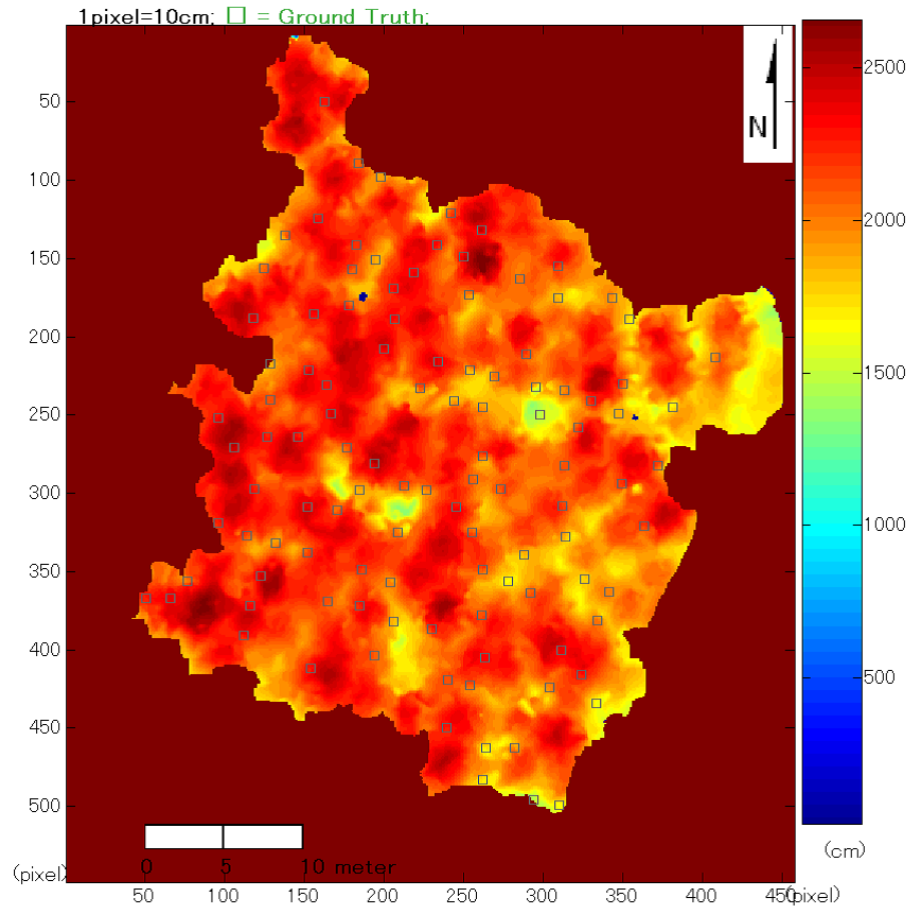


図 D.7. St.2, 正規化デジタル標高モデル (NDSM) 画像

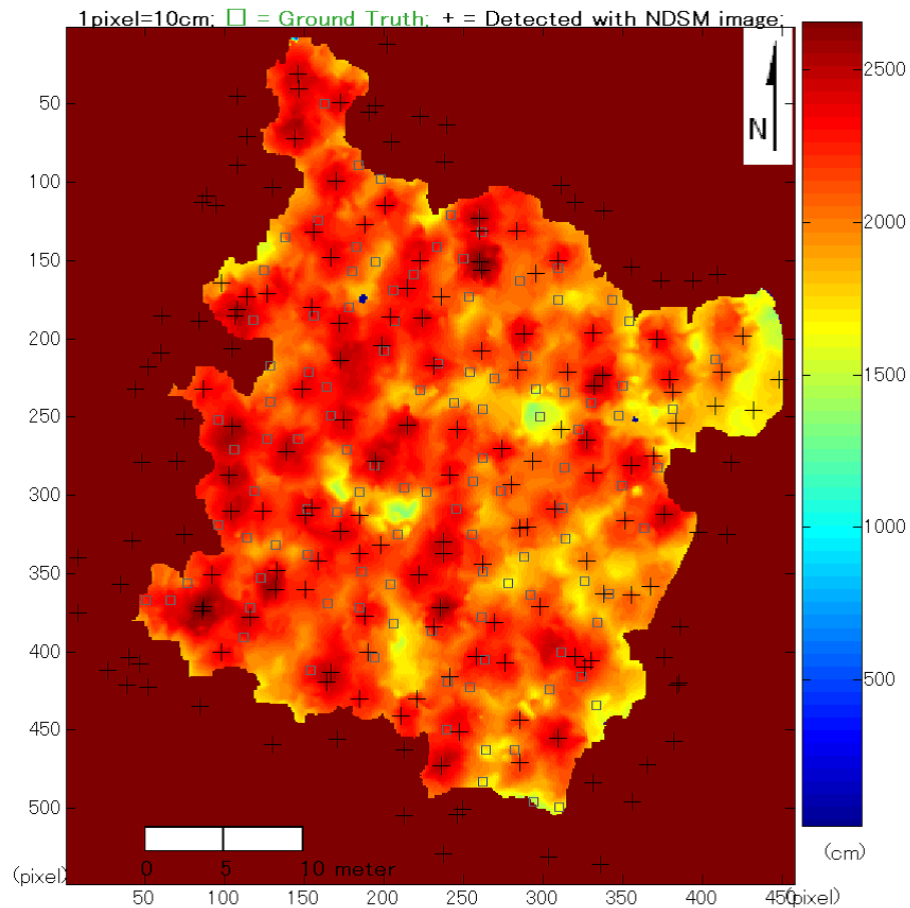


図 D.8. St.2, NDSM 画像上に表示した Hill Climbing 法の結果 .

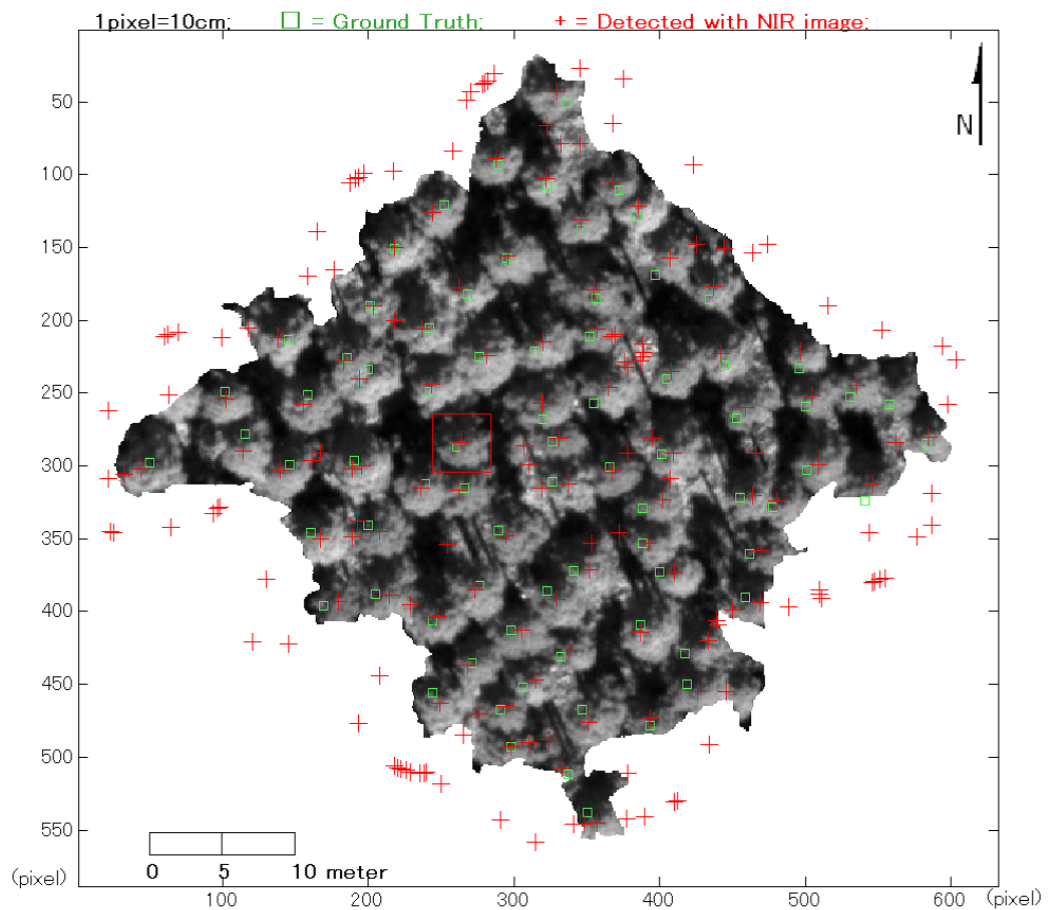
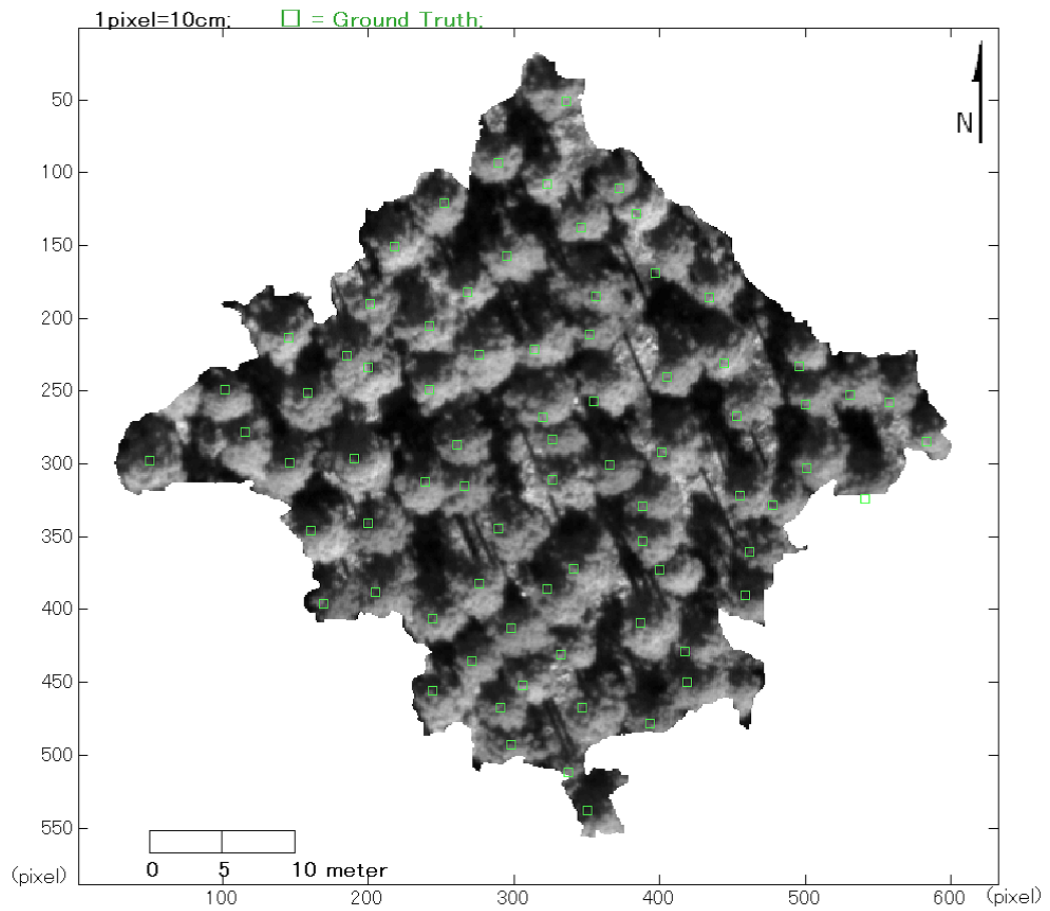


図 D.10. St.3 , NIR 画像上に表示した Template Matching 法の結果 .

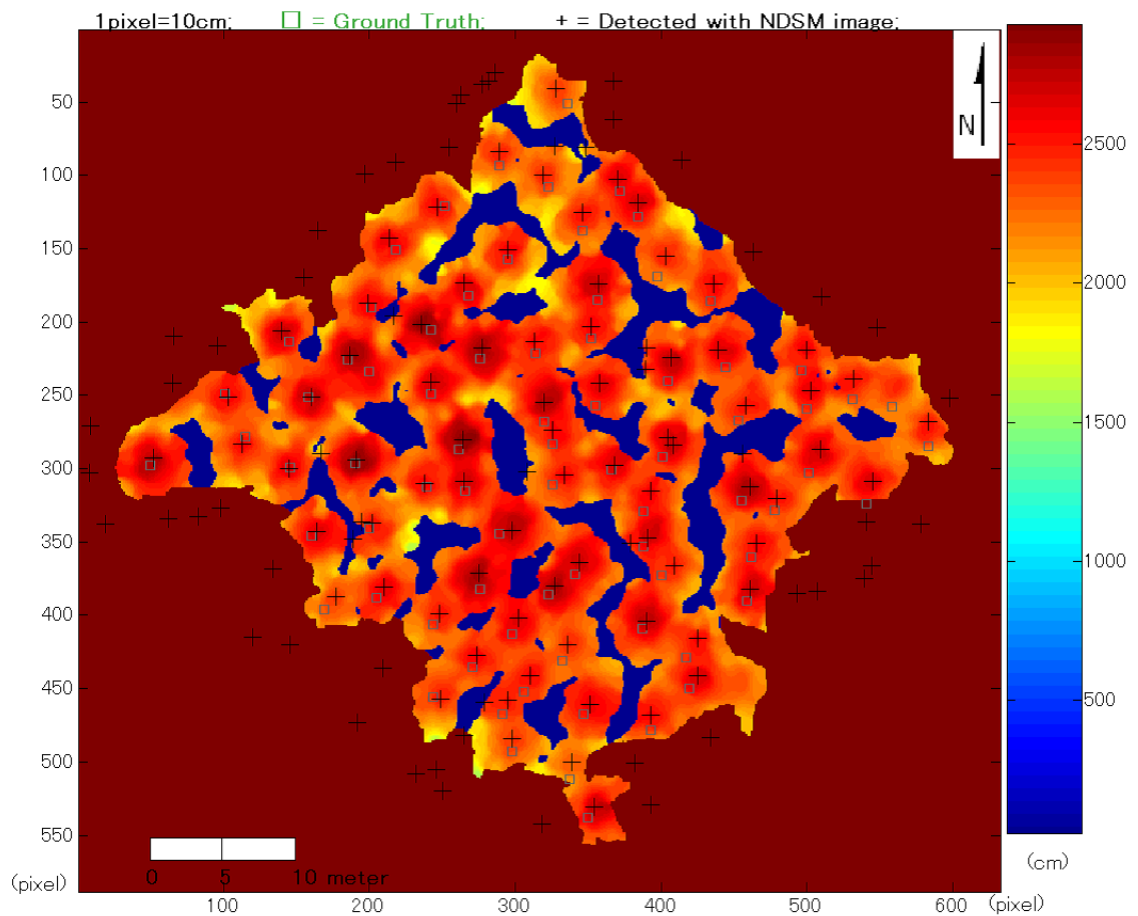
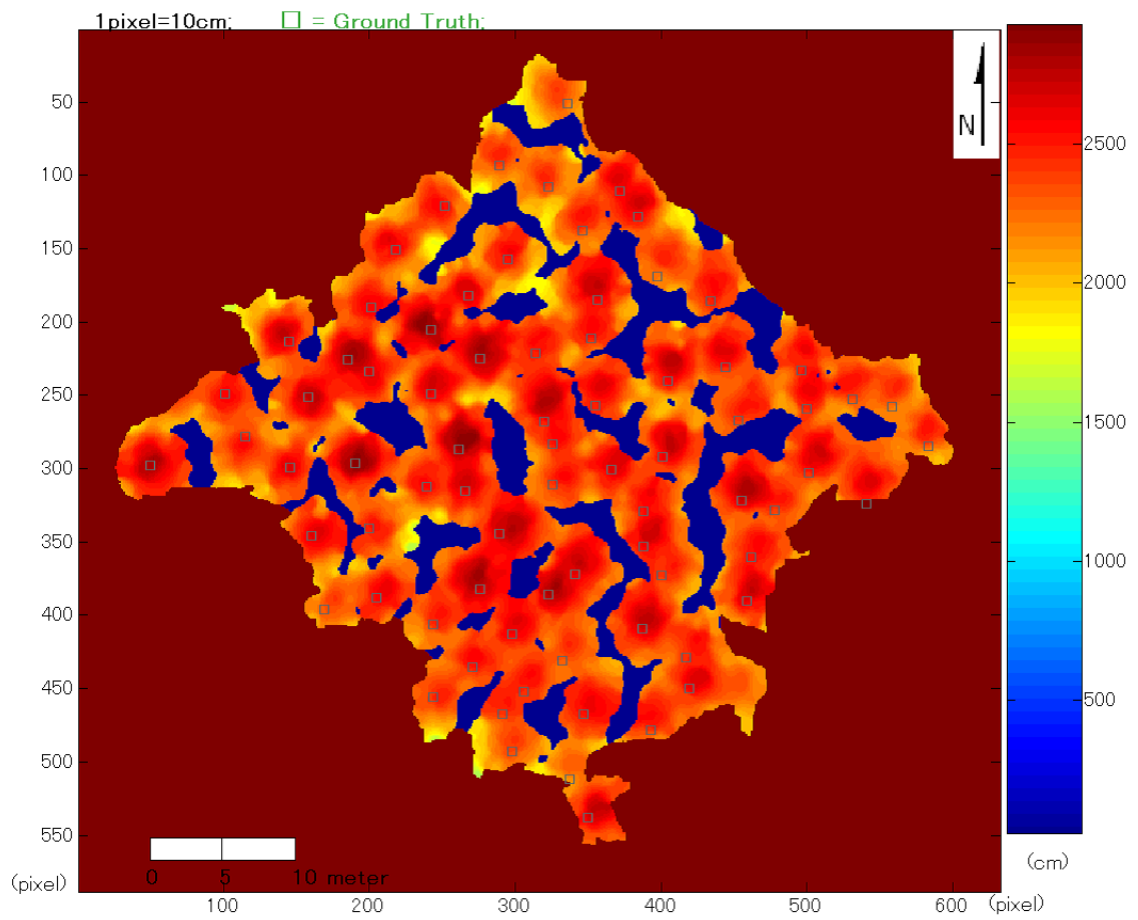


図 D.12. St.3 , NDSM 画像上に表示した Hill Climbing 法の結果 .

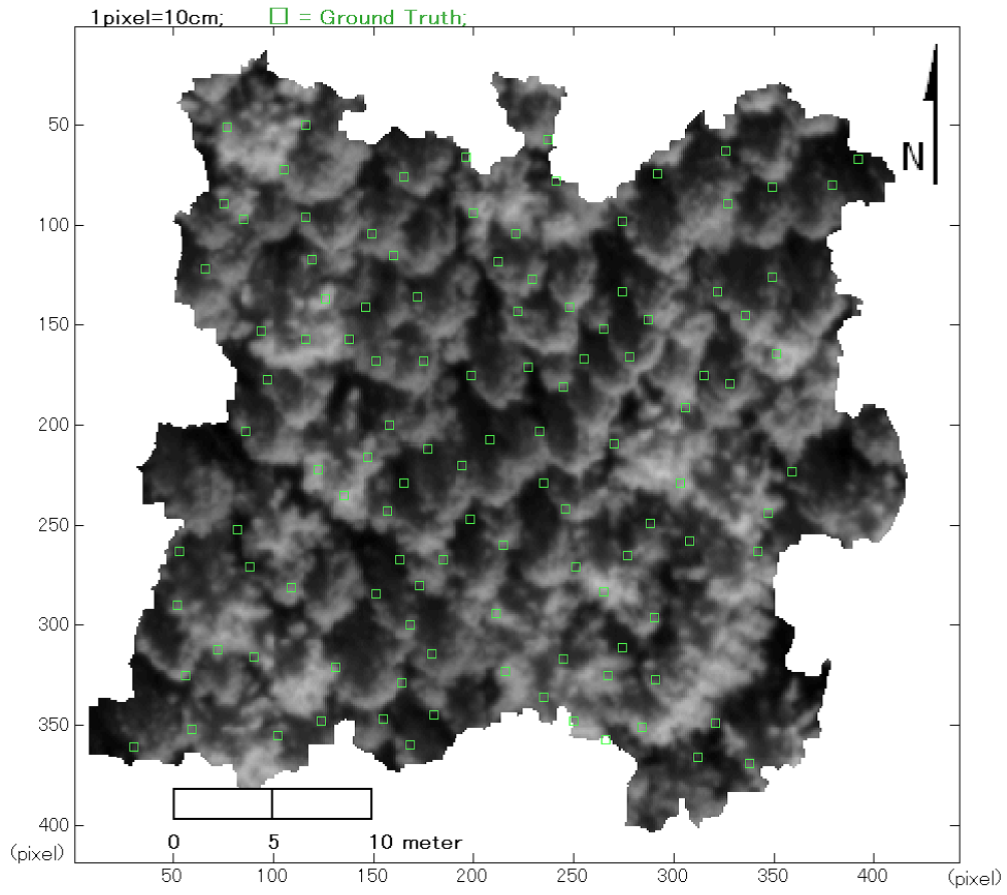


図 D.13. St.4 , 正規化テンプレート画像

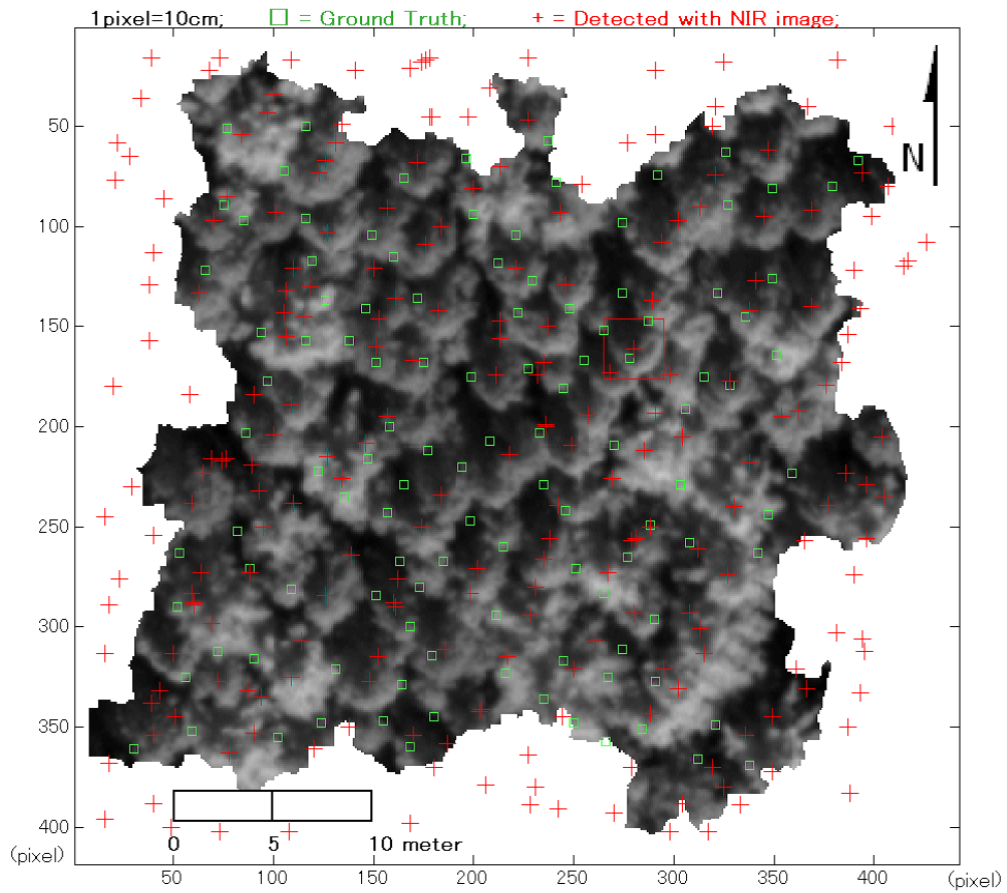


図 D.14. St.4 , NIR 画像上に表示した Template Matching 法の結果 .

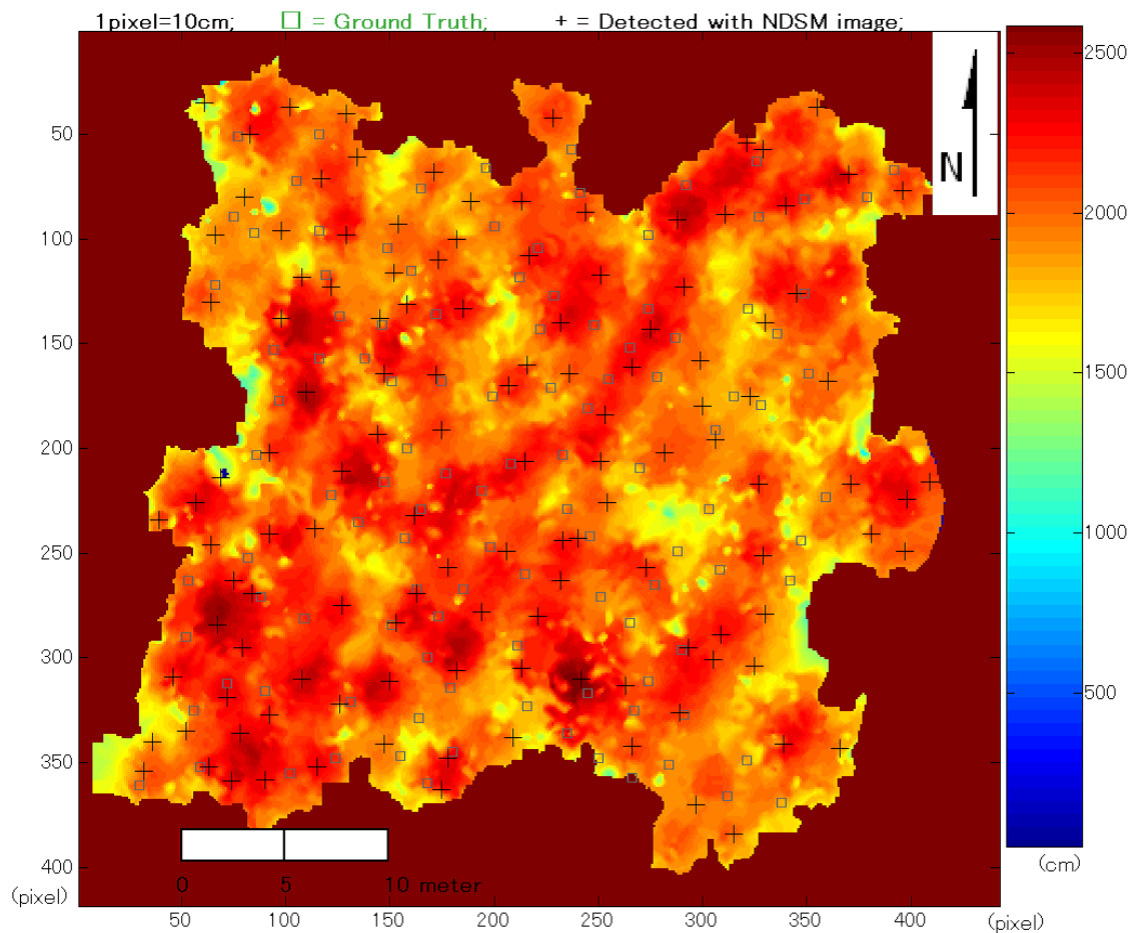
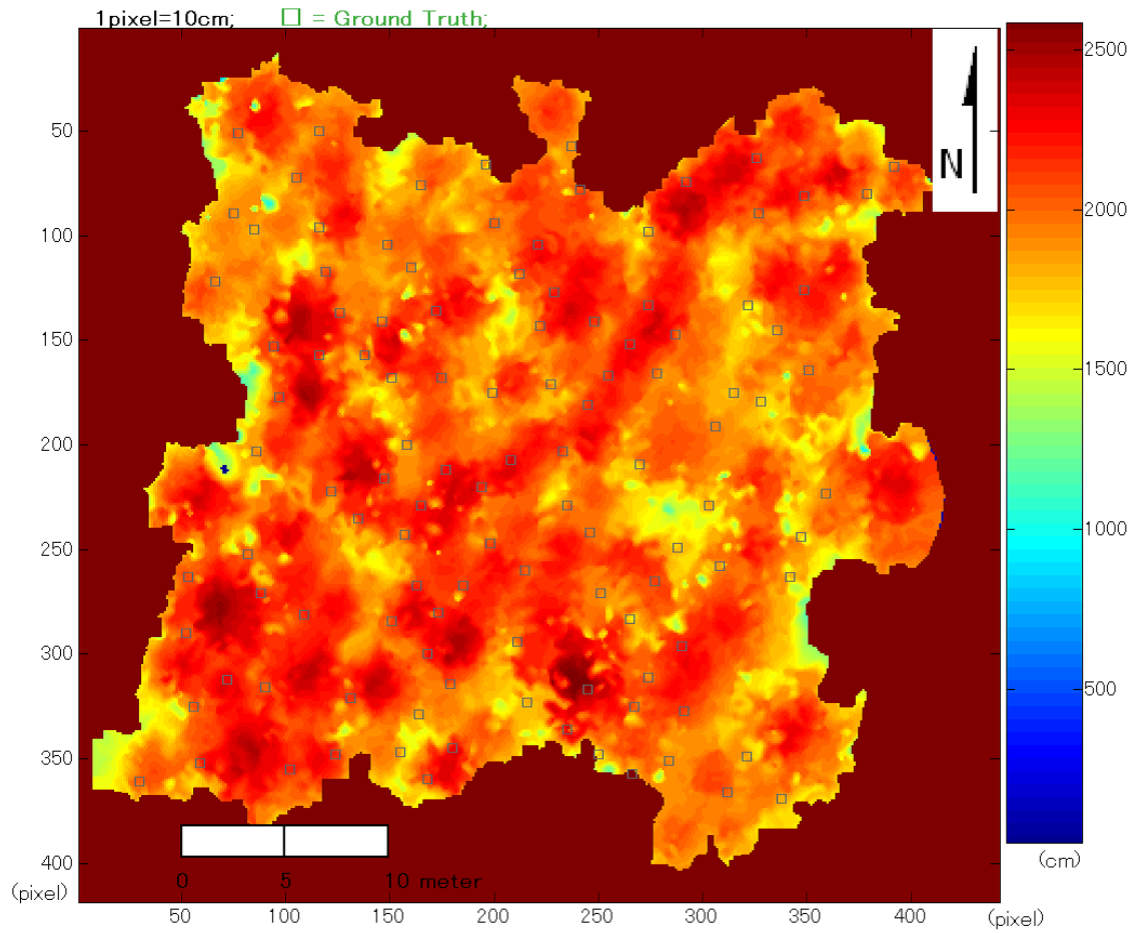


図 D.16. St.4 , NDSM 画像上に表示した Hill Climbing 法の結果 .