

2023 年度
博士学位論文

リモートセンシングデータによる
森林現況簡易把握法の開発

竹島 喜芳

要旨

近年、多くの国民が森林や林業に関心を持つようになってきた。この関心に応えるには、森林現況把握が重要である。現在のところ、民有林では都道府県が設置している森林簿が、国有林では林野庁で設置する森林調査簿が、そのために使われている。しかし、それらには、そこに示された情報が森林現況と異なっているという問題がある。これでは、森林に対する国民の関心に応えられない。

そこで、近年では林業現場において、森林簿更新を視野に入れつつ、多くのコストをかけてリモートセンシングによって森林を計測し、それを元に森林の計画・施業を実施するモデル的取り組みが、国の補助を得て行われるようになった。しかし、採算性の低い林業現場では、補助なしにそうした森林計測を実施することは困難で、この技術の全国展開は難しいと思われる。したがって、森林現況の把握は別のデータソースを探索する必要がある。そこで本論文では、森林現況として、広域の①森林蓄積や②植生の把握に、また狭域では③森林所有界探索や緊急に手入れが必要となる林分検出に着目し、費用対効果を考慮しながら、3つの森林現況簡易把握法の開発を行った。

1つは、近年オープンデータとして利用可能になってきた航空レーザデータによる広域森林蓄積の自動把握法の開発である。これまで航空レーザデータで森林蓄積を推定する際、現地調査が必ず必要となり、そこにはコストが発生していた。しかし本開発では、現地調査や、樹冠モデル・材積モデルなどを総合し、航空レーザ測量によって計量される樹木が占有する空間の体積に対する蓄積の割合が概ね0.26%であり、その比率は樹種や樹木の込み具合によって多少前後することを明らかにした。これによって、場合によっては現地調査を実施することなく大まかな森林蓄積を推定することができるようになった。

もう1つは、衛星画像や航空写真などから、地形による影の影響をほぼ自動で消去する手法の開発である。我が国の森林は、起伏の多い山岳に分布しているため、光学センサ画像には地形による影の影響が避けられず、それが画像解析精度に影響を与えている。この影を消去する技術はこれまで様々なものが開発されてきたが、どのような画像に対しても効果的な消影法は存在しなかった。そこで、斜面方位とその平均輝度との関係に着目し、複数の光学センサ画像と数値標高モデルを使い、斜面方位と輝度との関係を調査した。その結果、どの画像も太陽入射方位の平均輝度がもっとも高く、そこから北に回り込むに従い、平均輝度が落ちていた。その点に着目し、もっとも明るい斜面方位の平均輝度に全て

の方位の平均輝度をオフセットするという消影法を開発した。この方法は衛星画像だけではなく、モノクロ空中写真をモザイク処理した、従来の方法では地形補正を適用できないようなオルソフォトへも使用可能であるという特徴を持つ。

最後の1つは、UAV・レーザ測量機が計測する点群密度が、約 10,000~30,000 点/m²の超細密データで、森林所有界の確定や森林の手入れが緊急に必要な場所の検出に鍵となる、地形や地物がどの程度分かるかを整理した。その際、航空レーザ測量では、地表の状況を表す主題図として微地形図が作成されているが、本研究ではそれに加え、地面と地表面の地物を計測していると思われる点群を使って、新たに超細密地表状況図を開発した。これらを用いて、樹冠下の人工的な構造物、歩道、自然石、獣道、倒木、下草等の把握の可能性を検討した。近年、技術の発展が著しい UAV・レーザ測量において、林業現場でもそれらを使った森林計測が行われることがあるが、多くは、航空レーザ代替として使われているだけのところ、本研究により UAV・レーザ測量が強みを持つ新たなデータ用途と解析法を創出できた。

目次

1章	はじめに	1
1.1	森林現況把握と持続可能社会	1
1.2	林業実務で中核となる森林現況情報—森林計画図・森林簿の現状と課題	1
1.3	新たな森林現況情報収集の取り組みとその横展開の難しさ	2
1.4	費用対効果に配慮した森林現況把握手法開発の必要性	3
2章	航空レーザ・データによるスギ・ヒノキの森林蓄積自動推定法の開発	6
2.1	背景・目的	6
2.2	蓄積推定法開発の流れ	8
2.3	実測による蓄積比とそのモデル化	13
2.3.1	方法	13
2.3.2	テストサイト及び使用データ	13
2.3.3	結果	17
2.3.4	蓄積比に着目した蓄積推定モデル	22
2.3.5	考察	23
2.4	空間体積・幹材積モデルを用いた蓄積比のシミュレーション	25
2.4.1	方法	25
2.4.2	蓄積比の簡略化	25
2.4.3	使用した空間体積・幹材積モデル	26
2.4.4	モデルの調整	29
2.4.5	結果	32
2.5	蓄積推定モデルの汎化	33
2.5.1	方法	33
2.5.2	実測値とシミュレーション値の比較	33
2.5.3	蓄積比を使った広域森林蓄積推定モデルの改良	34
2.6	蓄積比の活用法について	37

2.7	まとめ	39
3章	斜面方位と平均輝度に着目した半自動地形補正法の開発	40
3.1	背景・目的	40
3.2	既往の地形補正法	42
3.2.1	バンド比や統計値をベースにした方法	42
3.2.2	DEMをベースにした方法	42
3.3	素材と方法	45
3.3.1	仮説設定と地形補正法開発の方法論	45
3.3.2	対象地	46
3.3.3	試料	47
3.4	結果	50
3.4.1	斜面方位と輝度との関係	50
3.4.2	半自動地形補正のアルゴリズム	51
3.4.3	IKONOS 画像への地形補正結果	53
3.5	効果の検証	57
3.5.1	ASTER 画像の場合	57
3.5.2	地域を変えた場合 岐阜県東白川村のケース	58
3.5.3	地域を変えた場合 岐阜県高山市のケース	60
3.6	まとめ	66
4章	UAV レーザ・データによる林床状況把握法の開発	67
4.1	背景・目的	67
4.2	方法	69
4.3	予備実験：レーザ反射強度と森林現況把握の可能性について	70
4.3.1	レーザ反射強度情報による森林現況把握可能性	70
4.3.2	反射強度と素材との関係を把握するための実験	70
4.3.3	結果	75
4.3.4	まとめ	77

4.4	テストサイト	79
4.5	試料	80
4.5.1	レーザー測量機器	80
4.5.2	UAV	80
4.5.3	取得データ	81
4.5.4	グラウンド・トゥース	82
4.6	データ加工	83
4.6.1	フィルタリング	83
4.6.2	反射強度補正	83
4.6.3	超細密微地形図の作成	84
4.6.4	超細密地表状況図の作成	86
4.7	結果	88
4.7.1	歩道（超細密微地形図）	88
4.7.2	盛土・石積み（超細密微地形図）	89
4.7.3	礎石（超細密地表状況図・反射強度）	91
4.7.4	立木（超細密地表状況図）	92
4.7.5	倒木や草本類（超細密地表状況図）	92
4.7.6	獣道（超細密地表状況図）	93
4.7.7	まとめ	94
4.8	手法改善の検討	96
4.8.1	礎石・立木検出のための超細密地表状況図の改善	96
4.9	まとめ	104
5章	おわりに	106
	謝辞	108
	引用文献	109
	資料	117
	資料1 森林計画図	118

資料 2	森林簿	119
資料 3	森林計画図・森林簿設置の目的と沿革	120
資料 4	森林計画図・森林簿が使われ続ける背景	124
資料 5	地貌図	125
資料 6	収穫予想表	126

1章 はじめに

1.1 森林現況把握と持続可能社会

国土面積の約7割が森林に覆われている我が国は、森林が提供する生態系サービスを高度に維持しながら、如何に社会の持続的な発展を達成していくかという大きな命題を抱えている。特に、森林は石油・石炭、鉄やコンクリートなどと異なり、人が育てることができる数少ない資源である。従って、不確実な将来の木材需要に対して、生態系サービスを維持・向上させながら、成長に長い時間がかかる森林資源をどのように育み供給していくか、その計画立案と具現化は、現代に生きる我々に課せられた重要な課題である。

近年、森林が果たす生態系サービスの役割の1つである森林の光合成機能によるCO₂固定能力や酸素供給能力の重要度が、国際的にも高まっている。こうしたなか、我が国は、省エネ・節エネなどの技術水準が既に高くCO₂排出削減量の大幅な増加は期待し難いことから、森林のCO₂吸収量への期待が高い(例えば総務省, 2017)。

また、温暖化が原因とされる風水害の激甚化で、森林由来の流木被害も多く発生するようになった。その原因として、間伐後の林地残材の流出を問題視する報告(和田ら, 2014)もあれば、林地残材の影響はごくわずかで、想定外の大雨による表層崩壊に伴って発生する流木がその原因(太田, 2017)という報告もある。しかし、原因は何れにせよ、林内の倒木は流木被害の原因になり得る可能性があるばかりか、林地の保水力を低下させる放置林の所在を示す情報にもなる。そのため、災害防備のためにもそのような林分を把握することは重要である。

森林の状態は河川の水量に影響を与えている(小松, 2010)。過剰な森林被覆の変化は、①土砂災害の増加、②保水力の低下、③浮遊砂の増加等を引き起こし、災害被害や水量の不安定化、河床上昇による外水氾濫のリスクを高めることにもつながりかねない。

このように森林が提供する生態系サービスは、枚挙にいとまがない。

生態サービスの恩恵を享受しながら、社会の持続性を維持していくための出発点は、ともかく森林の現況の把握することである。

1.2 林業実務で中核となる森林現況情報—森林計画図・森林簿の現状と課題

森林の現況を知る情報として、たとえば環境省の自然環境保全基礎調査、林野庁の森林生態系多様性調査、国土地理院の国土環境モニタリングの植生指標データ、あるいは、宇宙航空研究開発機構のGCOM-Cプロダクト(植生指標、地上部バイオマス、葉面積指数等)等がある。しかし、それらのデータは特定の空間スケールを対象とした場合にしか使えないことも多いうえ、森林の機能評価、法規制、森林所有者情報がないなど、実効性のある総合的な計画を立てる基礎情報として使いにくい面がある。

一方、我が国には森林法によって定められた森林計画制度があり、その制度を進めるうえで、国や都

道府県に設置をなかば義務付けられた森林計画図（資料1）・森林簿（資料2）という森林現況を把握できる情報がある。この情報は、森林管理の最小単位の区画毎に、地番、（私有林の場合）所有者、森林資源量、法規制等の情報を整えたもので、林業を行っていく上で欠かせない情報となっている。

こうしたことから、この情報は他の情報に比べ、①全国整備されている、②空間スケールが細かい、③必要な情報の多くが一括して整えられている、④計画が現実に反映される仕組みが既にある、⑤都道府県にその保守管理システムを行う担当部局があり、森林の現況を継続的に把握できるデータベースとなっているなど、使い易さや情報の一貫性から、その情報の活用は林業活動に留まらず、森林現況把握に使われている。例えば、気候変動枠組条約締結国に報告を義務付けられている森林によるCO₂固定量は、森林簿を起源とする「国家森林資源データベース」（松本ら, 2007）から集計されている。また、一般に知られている「日本の森林面積は国土面積の約7割である」、「森林の成長量は年間7,000万m³」（林野庁, 2021）などという数字もこの森林計画図・森林簿を集約して導き出されている。

このように森林計画図・森林簿は、国内外に向け、日本の森林の現況を示す情報として広く使われている。

ところが、林業実務に携わる行政職員・林業事業者には自明のことだが、森林計画図や森林簿には、それが示す情報が現実の森林の状況と乖離しているという問題が存在する。蓄積においてその違いは森林簿の1.5倍、成長量は2倍以上（Egusa et. al., 2020）という報告もある。その背景には、その森林計画図・森林簿の設置目的と初期データ作成、その後の保守管理や運用（資料3）、社会情勢や制度（資料4）など複雑な原因があることから、この問題の解消には時間を要すると思われる。これでは、直近の問題として、実効性ある総合的な森林資源保全計画が立案できないばかりか、林業に限った場合でも、実効性ある木材生産計画は立案できない。そこで、森林計画図・森林簿とは別に、現実的な森林の現況を把握することが、ときに望まれてきた。

1.3 新たな森林現況情報収集の取り組みとその横展開の難しさ

こうした状況の中、平成20年代前半より、平成14年に18.8%にまで下降した国産材率（日本で使用される木材のうち、国内で生産された木材の材積割合）を向上させるため、林野庁は、量と価格と品質で、海外の木材に打ち勝つ木材供給体制整備を目指し、新生産システム（稲本, 2007）という補助事業を展開した。あわせて同時期、民主党政権下で「森林・林業再生プラン」（林野庁, 2009）がまとめられ、新生産システムで目指す林業を強く後押しする政策が推進された。これらの中で、林地の集約化、林業の機械化、高密度路網、人材育成、製材品の人工乾燥、森林簿の精度向上などが議論された。その結果、集約化・機械化・路網整備・人材育成・人工乾燥では、現在の林業の基盤となる体制が形作られてきたが、森林簿の精度向上は当初から問題視されながらも（林野庁, 2009：林野庁, 2010）結局、手つかずのままであった。

それが、2013年の安倍政権で始まった「攻めの農林水産業 成長戦略」（農林水産業・地域の活力創

造本部, 2013) がキッカケとなり、林業の生産性向上や ICT 等を使った流通の短絡化などを行いながら、林業を盛り上げ、地域活性化を実現しようとする総務省・林野庁の補助事業が行われるようになった(例えば総務省, 2012; 林野庁, 2018)。その事業の中で、森林計画図や森林簿とは異なる森林情報を現場で整備し、それらを活用して、生産性が高く収益性のある木材生産を目指す取り組みも行われるようになった。

この動きは、現在、岸田政権下においてデジタル田園都市国家構想、DX/GX でも引き継がれ(内閣官房デジタル田園都市国家構想実現会議事務局, 2022)、スマート林業と呼ばれる、林業再生に欠かせぬ取り組みとして、航空レーザや UAV、地上レーザなどを活用して、森林簿とは異なる、あるいは森林簿の修正に使う情報収集が、行政からの補助を得て行われている。行政としては、そうした取り組みで成功事例を打ち立て、それを横展開しようという目論見である。

ところが、こうしたスマート林業の取り組みは、補助金があってこそ取り組めるもので、成功事例を補助金無しで横展開するのは、現実性を欠いていると思われる。

このことは、業界の現状を採算面から俯瞰すれば分かる。例えば令和 3 年の林業産出額のうち木材生産によるものは 3,254.1 億円(農林水産省, 2021)とされる一方、同じ年、そうした森林を整備するために投じられた投資額は、少なめに見積もって 3,419.6 億円であった(間伐コストの 51%を標準的に国が負担しており、令和 3 年は、間伐補助に投じられた予算は、通常枠+2 年度補正追加額の合計が 1,744 億円(林野庁, 2020)であったことから $1,744 \div 0.51$ より試算)。また別の視点になるが、平成元年から 30 年までの間に路網整備と造林に投じられた補助は合計 12 兆 288 億円だったのに対し、その間の木材生産額の合計は 10 兆 6716 億円(白井, 2021)であった。つまり林業は、総体として補助金がなければ成立し得ない不採算事業となっている。そのため、現在行われている補助を前提とした森林情報収集は、補助がなければそれが生産コストに跳ね返ることになり、平均的な林業事業者には、コストをかけて森林現況を把握する余裕はない。スマート林業は、結局、補助が出る前述のような場合、あるいは一部の現場や事業者にのみ成立する特殊な形態と言える。

1.4 費用対効果に配慮した森林現況把握手法開発の必要性

しかしながら、近年、航空レーザ・データがオープンデータになったことから、レーザ・データを使い、用途に応じた適切な使い方(目的・空間スケール・精度・費用対効果)の提案とその解析方法があれば、多くの林業現場でレーザ・データを使える環境が整ってきた。加えて、近年無料で利用できる衛星画像や空中写真も増加してきた。こうしたことから、樹種分布や CO₂ 固定量を把握するため、空間スケール・精度・費用対効果に見合った土地被覆(植生や伐採地・裸地など)を把握できる方法があれば、現実性のある計画で使えることもあり得る。

また、そのような方法によって現実的な森林現況を把握し計画を立案した後は、計画を実行に移すことが重要になるが、日本の森林の約 7 割を占める民有林には森林所有者が存在しており、所有者の同意

なしには計画は実行できない。ところが、少なからぬ森林所有者が、自己の所有する山林の位置を知らないという現実がある。そして、その問題（所有する場所や境界が分からない）解決のために行われる取り組みは、現在、林業事業者にとって、労力の割に見返りが得られない現場が多く、なかなか所有者探しや境界確定は進まなくなってきた（竹島，2021）。

しかしながら、資源を俯瞰し付加価値の高い資源があると目星をつけられた林分や、災害防備や災害復旧のために緊急工事が必要な林地に対して森林境界明確化を実施するときには、エリアを絞ってコストをかけられる場合もある。このとき、それを支援するツールとして近年、普及しつつある UAV (Unmanned Aerial Vehicle) レーザの活用は大いに検討に値すると思われるが、そのデータを活かしてきれていない現場も少なくないようである。こうしたデータを活かすことができれば、所有者探しや境界確定を進める強い一助になる。

そこで本論文では、多くの林業事業者が実行可能な森林現況把握手段として、2章で航空レーザ・データ（本来なら、有人航空レーザとすべきところだが、本文中は、慣例的に有人航空レーザを航空レーザと表現していることから、以下、有人航空レーザを航空レーザと表現する）を使った蓄積の自動推定法の開発、3章で光学センサ画像から地形による影の除去法の開発、4章で UAV レーザ・データによる林床状況把握法の整理・開発についてまとめた。

なお、こうした開発は、次の4つの条件を満たすよう配慮を行った。

- 第1条件 費用対効果に見合うもの（公的支援なくても実践できる）であること
 - 第2条件 汎用・一般化（様々な現場で使える）されたものであること
 - 第3条件 解析手法はシンプルで専門知識がなくとも理解ができること
 - 第4条件 誰がやっても同じ結果を得られること
- である。

また、森林現況把握の際のコストについて、以下の2つの異なる視点があることにも配慮しながら開発を行った。

1つ目は、広域を対象にした森林の成長に伴う変化や、現在・過去の状態を知るために行うデータ解析コストは、限りなく抑えるという視点。この場合は、解析精度よりも解析コストを優先することになる。理由は、現在や過去の状況が明らかになったとしても、時間の経過により情報が現実から乖離していくことや、それが確実に収益増につながるわけではないからである。木材生産の原価を抑えるために、この点ではコストをかけられない（2章・3章のケース）。

2つ目は、比較的狭い範囲で一旦データを取得したら、その後も使い続けることができる情報や、林業事業者が投資する価値ある場所と判断したり、緊急性が高いと行政が判断したりできる場合は、範囲を絞ればコストをかけられる場合があるという視点（4章のケース）。

こうした条件や視点を考慮しながら、リモートセンシングデータを活用した森林現況把握法の開発を行った。

では、まず航空レーザ・データを使った蓄積の自動推定から説明する。

2章 航空レーザ・データによるスギ・ヒノキの森林蓄積自動推定法の開発

2.1 背景・目的

日本は第二次世界大戦後の拡大造林政策によって、広葉樹の林をスギ・ヒノキ主体の林に作り変えてきた（林野庁, 2013）。これまで保育中心だったそれらの広大な森林も、近年では利用可能な状態に成熟してきたため、これを原資とした国産材利用推進及び産業振興のための政策が展開している。現在それらの実現に向け官民一体となった取組が推進され、国内の森林資源への感心が高まっている。また、福島原発事故以来加速した、再生可能なエネルギー源として国内の森林資源への期待も高い（林野庁, 2013; 梶山, 2013）。そこで、森林の公益的機能を維持・向上させながら同時に産業振興を実現する、実効性のある森林資源保全計画が重要になってくる。このときに最も基礎的な情報となるのは、森林の蓄積と成長量である。

日本の森林の蓄積や成長量は、森林簿（民有林）、森林調査簿（国有林）によって把握することができる。しかし、その中身は現況と乖離していると言われており（例えば松下ら, 1998; 松下ら, 1997）、その乖離の程度は森林蓄積では現況の半分しかない可能性があるとも指摘されている（熊崎, 2012）。いずれにせよ、森林簿などを元にした森林資源保全計画では、計画と実行との間に大きな齟齬が生じ、実効性ある計画立案は不可能に近い。

そこで、森林簿に代わる、あるいは森林簿を更新する手段としてリモートセンシング技術を使った森林資源量把握への期待は高い（例えば加藤, 2010）。なかでも、航空レーザは、光学衛星画像で問題となる太陽高度による地形や地物の影等の影響を受け難いことから、広域森林資源量把握に優れた手法となり得る。また光学衛星や空中写真などとは異なり、広域を比較的均一な精度で計測ができるため、データ計測コストの問題は残るが、広域の森林資源量（蓄積・成長量）把握に向け期待は高い（竹島ら, 2005）。特に近年、公共測量によって得られた航空レーザ・データが、国土交通省への申請により無償で利用可能になるなど、航空レーザによって広域の森林資源が把握し易い環境が整いつつある。

これまで、航空レーザを用いた森林資源量把握は、大まかに2つのアプローチで行われてきた。1つは単木の材積を推定し、それらを集計することで森林の蓄積を推定する方法（例えば Nelson, 1988; Hyypä et. al., 2001; Takahashi et. al., 2005a; 松英ら, 2006; 伊藤ら, 2011）、もう1つは単木材積を経由せずに林分単位で直接推定する方法である（例えば Næsset, 1997; 米, 2008; Tsuzuki et. al., 2008; 小谷ら, 2013; 林ら., 2013）。

前者の手法によって、航空レーザ技術の可能性について様々な知見が得られてきている。しかし、ここで問題としている広域での蓄積推定において、その手法の実用化はいまのところ現実的ではない。単木の抽出には詳細な点密度のデータが必要なうえ（例えば平田, 2005a; Næsset et. al., 2002; Hyypä, 2001）、コストをかけた詳細な点密度のデータでも樹高計測誤差は避けられない（例えば Hyypä et. al., 2008; Takahashi et. al., 2005b; 平田, 2005b; Gaveau et. al, 2003）。加えて、樹冠が上

層木に被圧された樹木は航空レーザから抽出されない（例えば伊藤ら, 2009; 平田, 2005b）。つまり、現在までのところ、推定誤差が必ず発生する。しかも、木材価格は材積によって一意に決まるのではなく、曲がり、樹木の腐り・食害の有無、年輪の間隔、マーケット動向などによって総合的に決まり、木材価格は常に変動リスクを抱えている。したがって、資源量の現況把握（木材在庫把握）にコストをかければかけるほど、収支（木材販売価格-木材在庫把握コスト）が負になるリスクが高まる。そのため、コストが多くかかる高密度な航空レーザ計測は実効性のある広域の森林現況把握には使用し難い。さらに、森林の成長量を把握する上で時系列データは欠かせないが、日進月歩の航空レーザ技術の進展に依存するこうした解析手法（点密度や、ファーストパルス・セカンドパルスなどの反射の種類や反射強度等）は、そこから得られる最新手法を過去のデータに適応することができなく、データの実利用は限定的なものにならざるを得ない。

以上、推定誤差、費用対効果、過去のデータとの連続性（成長量計測）の3点から、国内の森林を対象とした、広域で実効性のある森林現況把握のための蓄積推定・成長量推定には、単木材積を集計する方法は不向きである。

一方、林分単位で森林の蓄積を直接推定する方法には、航空レーザの点群を、空間的なメッシュ単位で集計した指標から森林蓄積を推定するアプローチ（例えば、Næsset, 2002; 小谷, 2013）や、DCHM（Digital Canopy Height Model）から集計した樹冠面と地面により規定される森林空間の体積との回帰分析によって森林蓄積を推定するアプローチ（例えば米, 2008; Tsuzuki et. al. 2008）がある。このうちNæsset et. al. (2002) や小谷ら (2013) などのアプローチは、研究対象地が異なると、航空レーザの点群から作成した指標と森林蓄積との関係が異なる可能性があり（小谷ら, 2013）、喫緊の森林現況把握の方法とするには更なる検討が必要である。一方、空間体積から森林蓄積を推定するアプローチ（例えば小谷ら, 2013; 米, 2008; Tsuzuki et. al., 2008）はシンプルであり実用的であるが、そこから推定される森林蓄積の精度は他の手法に劣るという問題がある（小谷ら, 2013）。

そこで本研究では、空間体積から森林蓄積を推定する手法をいま一度見直し、シンプルで実用的な蓄積推定モデルの開発を行うこととした。

2.2 蓄積推定法開発の流れ

先に述べた空間体積法は、航空レーザから計量される樹木が占有する空間の体積と、実測した蓄積との関係を現地調査から導き出し、林分の蓄積を推定するものであった。この蓄積推定法は、簡易ではあるが、精度の問題と現地調査が必要だという点、また導き出した空間体積と蓄積との関係が、現地調査した林分に依存し、汎用的ではないという点があり、ここで目指す蓄積推定法とはなりえない。そこで次のような仮説を設定し、現地データやシミュレーションによって、図 2-1 の流れで、仮説を検証しながら実用的な蓄積推定モデルの開発を行った。

仮説：樹木が占有する空間の体積 (m³) に対する蓄積 (m³) の比率は大まかに普遍的な数値が存在する。ただし、その数値は林分の特性 (樹種や混み具合等) によって多少前後する。

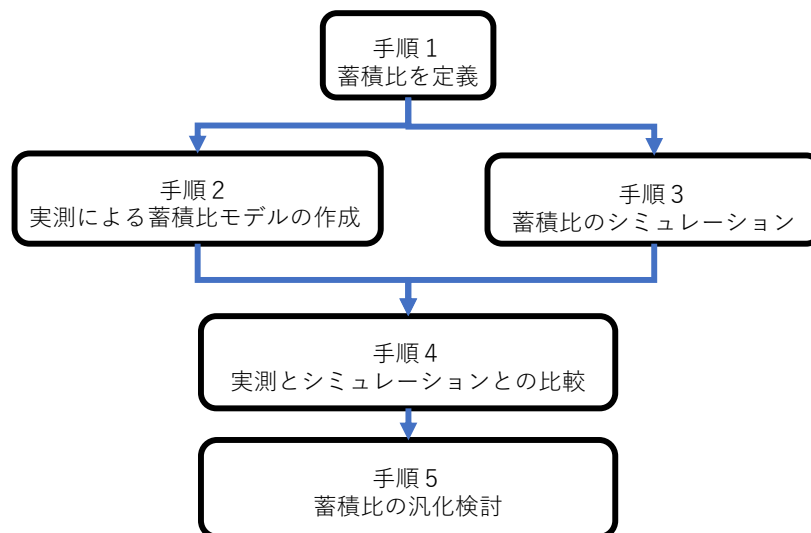


図 2-1 航空レーザによる森林蓄積自動推定法開発の流れ

手順 1 蓄積比について

まず、前述の仮説を検証するため、空間体積と蓄積との比を、図 2-2 のように蓄積比 (Stock Ratio) と定義する。

蓄積比 s を、蓄積を v (m³/ha)、空間体積を V (m³/ha) として、

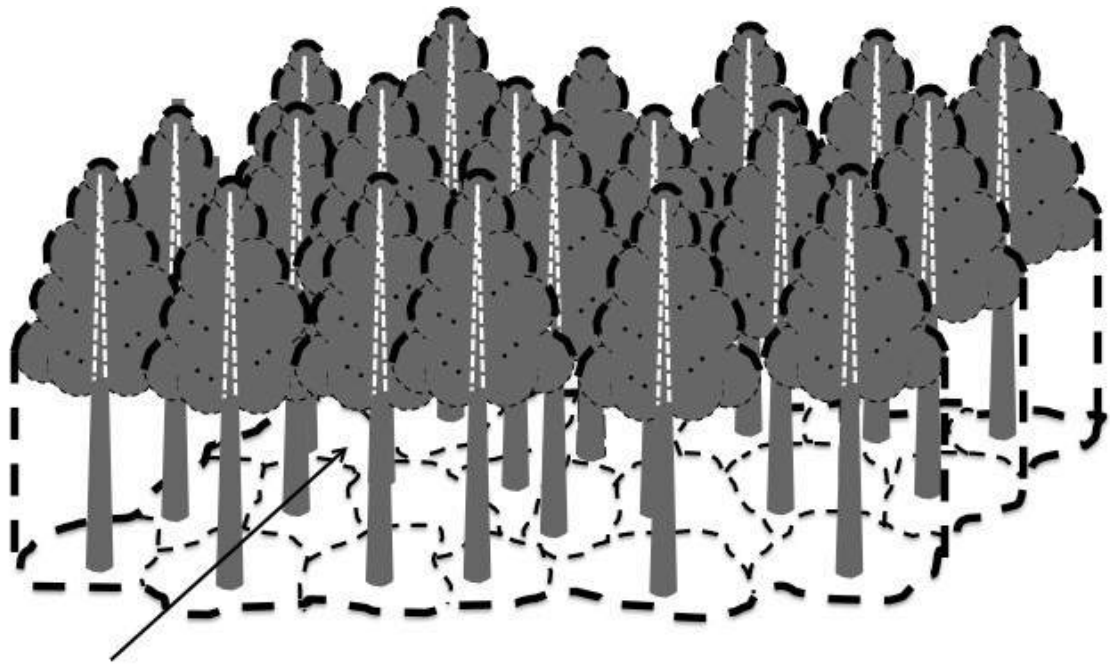
$$s = \frac{v}{V} \cdots (1)$$

と表す。ここで(1)式は

$$v = sV \cdots (2)$$

と変形することができる。これは、蓄積が未知な林分でも V 、 s が既知であれば蓄積が推定できることを示している。

一般に、空間体積は航空レーザによって直接計測が可能であり、既知とすることができる。ところが



Spatial Volume
Occupied by Trees(m³)

$$\text{Stock Ratio: } s = \frac{\sum(\text{Stem Volume}) (\text{m}^3)}{\text{Spatial Volume} (\text{m}^3)}$$

図 2-2 蓄積比の概念（樹木が占有する空間体積に占める蓄積の割合）

蓄積比 s は直接計測できず、未知である。そのため、式 (2) を使って蓄積を推定することはできない。しかし、蓄積比と直接計測可能な林分特性を $x, y \dots$ としたとき、

$$s = f(x, y \dots) \quad \dots (3)$$

という関係を見出すことができれば、蓄積比は間接的に既知となり、式 (2) を適用して蓄積を推定することができるようになる。

そこで、蓄積比に主に影響を与えると考えられる林分特性を、既往研究等から以下 5 点選び検討することにした。

平田 (2005a) は樹種によって航空レーザの透過率に違いがあると指摘しており、そのことが樹種によって空間体積を変化させ、蓄積比に影響を与えている可能性がある。また、林分を構成する樹木の樹高が同じでも、胸高直径や本数密度が違えば蓄積は異なることから、それが蓄積比に影響を与えているかも知れない。あるいは、平田 (2005b) や Takahashi, et. al., (2005b) は、樹木は斜面に対し常に垂直に生育しているとは限らないため航空レーザ・データから算出される樹高は実際の樹高とは異なる場合があると指摘しており、傾斜が空間体積と蓄積との関係を変化させる可能性もある。

以上、蓄積比に影響を与えると考えられる林分特性として①樹種、②胸高直径③生育地の傾斜、④形状比、⑤樹木の混み具合の 5 因子を選んだ。

なお今回、樹種については、日本の人工林の多くの割合を占め、産業的にも重要な樹種であるスギ・ヒノキに着目した。

また、樹木の混み具合を示す指標には、収量比数、相対幹距比などがあるが、今回は航空レーザから直接計測可能な樹高や本数密度などから計算できる可能性のある相対幹距比（隣の木との間隔が樹高に対してどれほどかを示す指標：Hart-Becking index）を樹木の混み具合を表す指標として採用した。

ところで既往の研究で使われてきた、プロット調査による実測蓄積 v と空間体積 V との関係、切片 0 の 1 次関数 $v = s'V$ によって回帰分析する手法（小谷ら, 2013; 米, 2008; Tsuzuki et. al., 2008; takejima et. al., 2008）は、蓄積比がどの林分でも同様であることを前提としており、回帰分析によって求める 1 次関数の傾き s' が蓄積比である、と解釈できなくもない。ところがこの方法は蓄積比とは異なる概念である。図 2-3 を用いて説明する。図 2-3 は 4 つのテストサイトの中に複数のプロットを設け、そこでの毎木調査から蓄積を計算し、そのプロットに対応する航空レーザから計量できる空間体積を図示し、両者の関係を切片 0 の線形回帰によって求めたものである。両者の関係は、 $y = 0.0027x$ （ここで、 y は蓄積 (m^3)、 x は空間体積 (m^3)）となった。すなわち、空間体積の 0.27% が蓄積であるとなった。

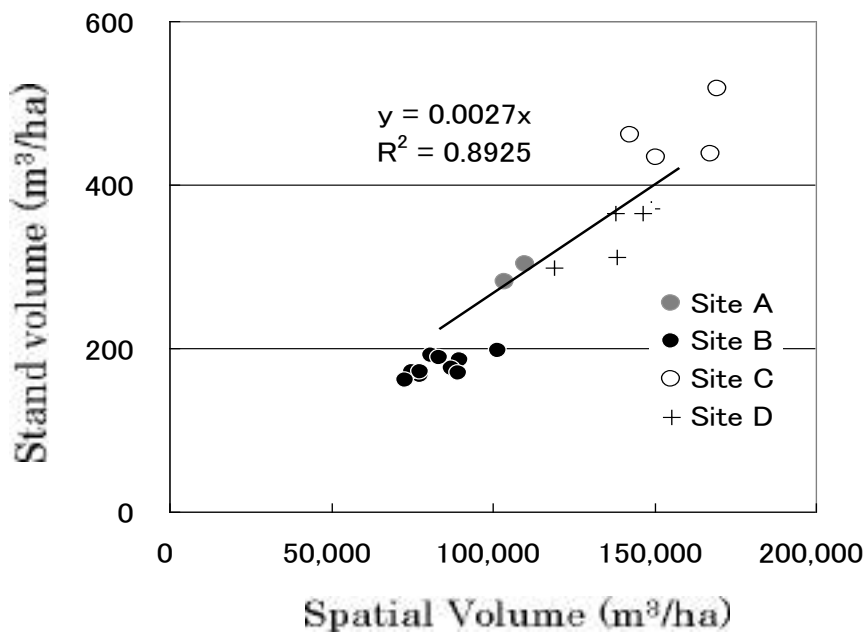


図 2-3 空間体積法による蓄積推定式の例

しかしこの最小二乗法によって求められる s' （ここでは 0.0027）は、プロットの識別番号を i とすれば、 v_i を観測値、 $s'V_i$ を期待値としたとき、 $(v_i - s'V_i)$ の平方和を最小とするよう求められ、その値は

$$s' = \frac{\sum_{i=1}^n v_i V_i}{\sum_{i=1}^n v_i v_i} \dots (4)$$

となる。これは V や v の大きな林分、すなわち実測した林分の中で相対的に蓄積が多い林分の値が、 s' の決定に大きな影響を与え、蓄積の少ない林分の値は埋没することを示す。つまり空間体積を使った既往の蓄積推定モデルでは、調査した林分が異なれば回帰係数の傾き（蓄積比）が容易に変化することになる。そのため、たとえ回帰式の適合度が高くとも、調査地を選んだ時点で作為が入る。もし、どのような林分でも蓄積比が一様として式 (2) を適用するなら、蓄積比は

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \cdot \dots \cdot (5)$$

とすることが妥当である。これならばどのような林分でも蓄積比は同じ重みで計算され、作為が入ることはない。

また、なかには蓄積と空間体積との関係を切片が 0 ではない 1 次関数で回帰することもあるが、いずれの手法も、適合度を優先した手法でしかなく、蓄積比に着目した本研究とは本質的に異なったものである。

手順 2 実測による蓄積比のモデル化

蓄積比を定義した後は、林分特性の異なる林分で毎木調査を行い、実際の蓄積を実測する。同時にその林分の樹木が占有する空間体積を航空レーザ・データから計量する。両者を使って蓄積比を計算したのち、毎木調査によって明らかになっている林分特性との関係を吟味し、蓄積比と林分特性との関係のモデル化を試みる。

手順 3 蓄積比のシミュレーション

手順 2 で導いた、蓄積推定モデルやパラメータは、特定林分のデータを使って実証的に見出したものに過ぎない。ゆえに、そのモデルやパラメータは他の林分でも適用可能とは必ずしも言えない。そこで、モデルやパラメータの汎用性を検討する為、林分特性の違いによる蓄積比の挙動をシミュレーションし、蓄積比と林分特性との普遍的な関係を探る。

シミュレーションは次の方法で行う。樹木が占有する空間の体積は、樹冠形状をモデル化し数値計算によって算出する。蓄積は、樹高と胸高直径と樹木の本数との関係をモデル化し、数値計算によって算出する。この両者を用い、蓄積比と林分特性との関係をシミュレーションする。

手順 4 実測とシミュレーションとの比較

手順 2 の実測による蓄積比と、手順 3 のシミュレーションによる蓄積比とを比較し、手順 2 で見出した関係が一般的なものであるか吟味する。差異があれば、その差異が発生する理由を考察する。

手順5 汎化

手順4の検討を踏まえ、手順2で開発した実測値から見出した蓄積推定モデルやパラメータを改良し、蓄積比を使った蓄積推定法の汎化を検討する。

以上の検討によって、広域の森林蓄積を、現地調査を必要とせず計量できる簡易蓄積推定法の開発を目指す。

2.3 実測による蓄積比とそのモデル化

先の2.2にて既に蓄積比の定義を行ったことから、2.3では手順2の内容を検討する。

2.3.1 方法

スギとヒノキを対象に毎木調査を行い、航空レーザから計量される空間体積と実測蓄積との比、すなわち蓄積比と、林分特性との関係を整理し、蓄積比のモデル化を試みる。

なお、樹木サイズや傾斜、形状比、相対幹距比や空間体積などは、現地調査を実施する林分の大きさ（調査する樹木の数）によって変わり、解析結果がそうした林分の設定法に影響されることも考えられる。さらに、林相が均一と考えられる林分でも設けるプロットの位置により、それぞれの林分特性が微妙に変わることもある。加えて、プロットが小さければ航空レーザとの位置の対比で誤差が生ずることもある。こうした問題を抑えることを目的に、本研究では、まず0.5ヘクタール以上の同質と思われる林分（植栽年などが同じ：以降SITEとする）の立木位置と胸高直径を全て測定し、GISで林分の中に20m四方（0.04ヘクタール）のプロット（PLOT）を設定して、林分内における蓄積比の違いを表出させ易いようにした。このような調査を行えば、GISを使って調査後自由にプロットを設定できること、他の研究でのデータの二次利用も可能となること、斜面の傾斜を航空レーザが計測する地盤ではなく立木の根元位置の高さから計算できることなど、データの有効活用が期待できる。図2-4に林分（SITE）とPLOTとの関係を示す。

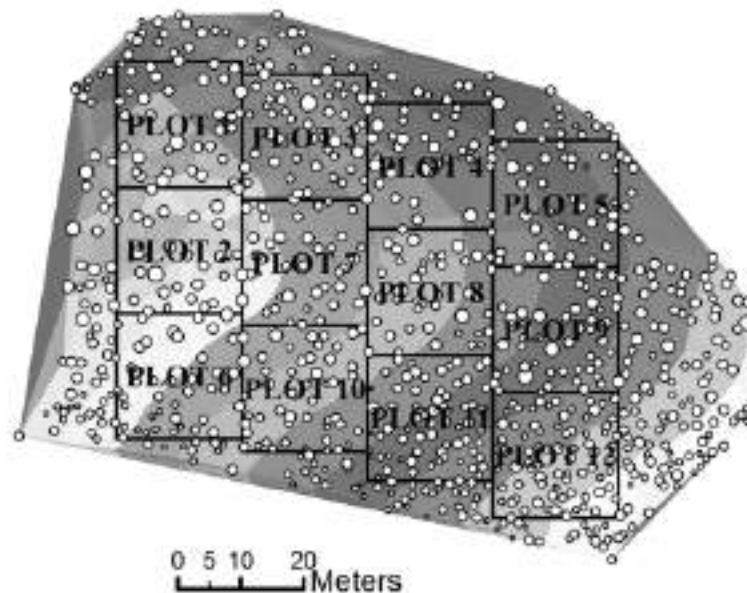


図2-4 テストサイトに設けたプロット（SITEとPLOTとの関係）

2.3.2 テストサイト及び使用データ

- ・テストサイト

テストサイトは、アクセスのし易さから、図 2-4 の岐阜県長良川流域で設定した。調査林分の選定にあたっては、国有林、民有林問わず 0.5 ヘクタール以上まとまりのある候補地を営林署・森林組合・林業事業者等に照会し、調査地候補を選出したのち、候補地を踏査することで、候補地間の林分特性が異なることを確認しながら調査対象林分を絞り込んだ。ただし、ヒノキの林分にはヒノキの成長速度が遅いこと、また最近植林地が少なくなったことから、類似した樹木サイズの林分を選ばざるを得なかった。一方、スギの林分については、特に近年スギの植林が少なくなったため若齢林が確保できず、ヒノキと比べ胸高直径の大きな林分を選ばざるを得なかった。表 2-1 に現地調査を行ったテストサイトの林分の概況を示す。

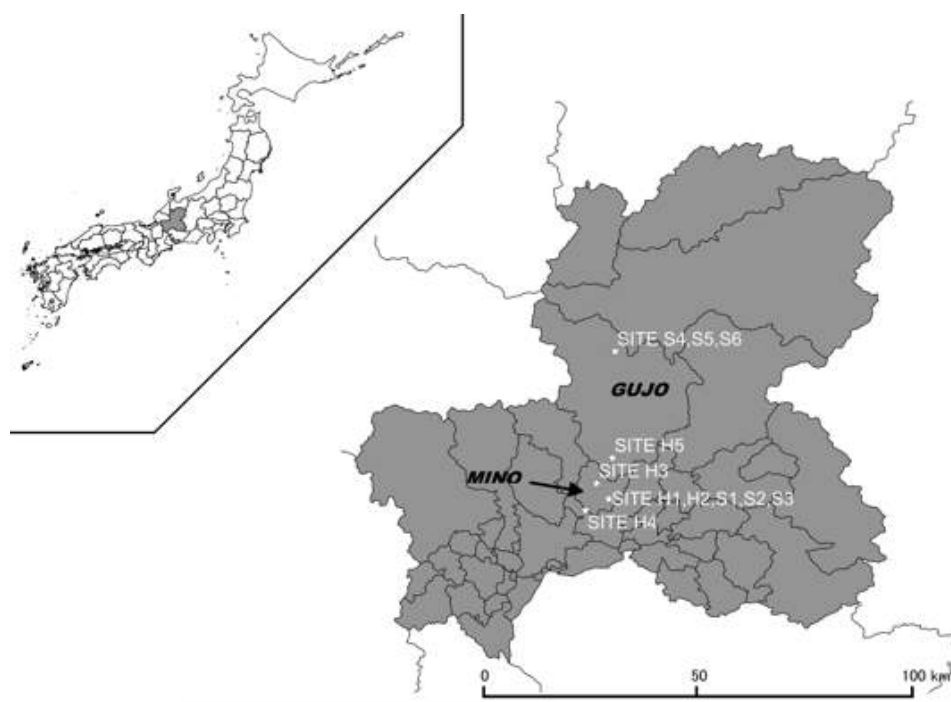


図 2-5 テストサイト位置図

表 2-1 テストサイトの林分概況

Species	Site Name	Site Location		Plot Size	Number of Plots	Ownership	Date of Field Work
		Latitude	Longitude				
<i>Hinoki</i> (<i>Chamaecyparis</i> <i>Obtusa</i>)	SITE H1	35.5516	136.9259	20m × 20m	14	Prefecture	2005.5
	SITE H2	35.5621	136.9258	20m × 20m	8	Private	2005.5
	SITE H3	35.5936	135.8951	20m × 20m	3	National	2006.4
	SITE H4	35.5253	136.8666	20m × 20m	16	Private	2006.5
	SITE H5	35.6586	136.9351	20m × 20m	6	Private	2006.3
<i>Sugi</i> (<i>Cryptomeria</i> <i>Japonica</i>)	SITE S1	35.5506	136.9247	20m × 20m	12	Prefecture	2005.5
	SITE S2	35.5602	136.9252	20m × 20m	3	National	2006.4
	SITE S3	35.5591	136.9283	20m × 20m	5	National	2006.5
	SITE S4	35.9344	136.9315	20m × 20m	15	Private	2009.5
	SITE S5	35.9405	136.9415	20m × 20m	13	Private	2009.4
	SITE S6	35.9420	136.9380	20m × 20m	14	Private	2009.5

・林分データ

林分調査は、2004年～2009年に行った。

サイトの境界測量及び立木位置計測は、Laser Technology社のデジタルコンパスである、Impulseに同社製Mapstarを接続した機器及び同社製TruePulseを用いた。

周囲測量、立木配置図などの進捗状況を現場で確認できるよう、デジタルコンパス測量データ処理ソフトは、センスウェア株式会社に開発を依頼したソフトウェア（FieldMapper）を用いた。

胸高直径は、スチール製の林尺を用い、mm単位で計測した。

林分調査にあたっては、まず対象林分の周囲を閉合トラバース測量した後、閉合トラバース時の測点から視準可能な立木の位置を放射測量によって計測し、林分全ての立木の相対位置と胸高直径を計測した。図2-6に林分調査の流れを示す。

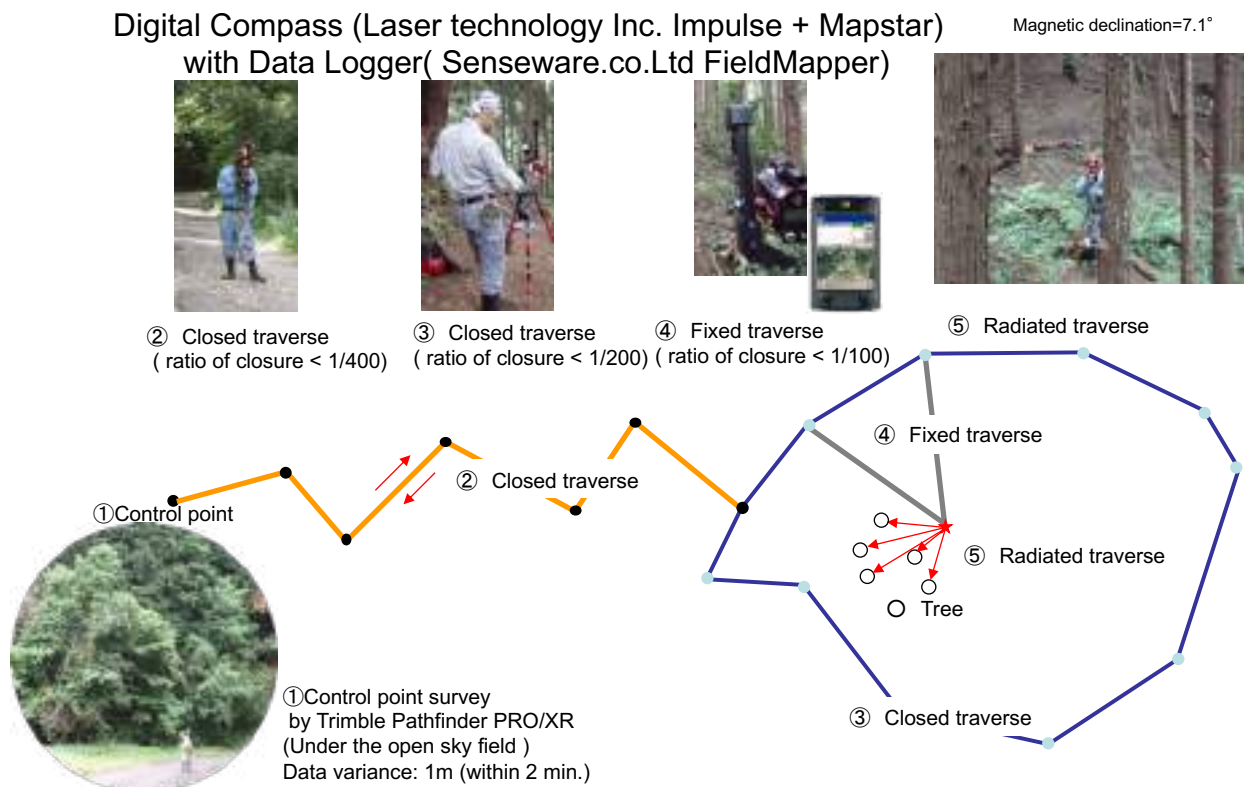


図 2-6 林分調査（周囲測量・立木位置計測）の流れ

各立木の絶対座標を求めるにあたっては、林分近くの開けた場所でTrimble社 Pathfinder Proで2分間以上の測位を行い、測位のバラ付きが1m以内のデータを、後処理によって補正し、その点を基準点とし、全立木位置の絶対座標を算出した。

樹高は、森林計測学で一般に使われる樹高曲線を調整して推定した（例えば大隅，1995）。具体的には、SITE内で胸高直径と樹高を計測した複数のサンプルから樹高曲線を調整し、樹高を計測していない立木の樹高を胸高直径から推定した。サンプル木を選ぶにあたって、一般に樹高は、同一胸高直径であっても地位によって異なるとされることから、胸高直径・地位の状況を見ながら林分内万遍なくサンプル

ルを選んだ。なお、樹高曲線は1つの林分に対して1本を調整することとしていたが、SITE H1は、過去に抜き伐りが行われた後に植林を行なった林分であるため、大径木（胸高直径 30cm 以上）とそうでない樹木がはっきりと別れていた。そのため樹高曲線は別々に2本を調整した。

材積は、大隅（1995）にもとづき、全国的で平均的なものとして使える式（6）によって計算した。

$$v' = \frac{2}{5} D^2 H \dots (6)$$

ここで v' は単木材積（ m^3 ）、 D は胸高直径（ m ）、 H は樹高（ m ）である。

なお、航空レーザ計測時期と林分調査時期との間には数年の差があり、厳密にはTakahashiら（2005b）のように樹冠解析を行い、樹木の樹高や胸高直径を航空レーザ計測時に同期させて解析を進める必要があるが、この種の調査には、樹高計測誤差や樹高曲線による樹高推定などによる誤差が既に含まれており、それら誤差は航空レーザ計測時期と林分調査時期との違いよりも大きいと考え、航空レーザの計測時期に合わせた林分材積の同期補正は行っていない。

・航空レーザ・データ

空間体積は、岐阜県が発注し、2003年から2004年にかけて航空レーザで岐阜県全域を計測し納品されたものを使って算出した。

このときレーザ計測の発注者である岐阜県に納品されたデータには、航空レーザによって計測された全ての点群と、データ計測会社によって2mグリッドで加工された地盤高(DEM:Digital Elevation Model)の二種類がある。

今回は、対象地の点群を地上分解能2mのDEMに合わせ、樹冠表層高(DSM:Digital Surface Model)を作成し、DSMとDEMとを減算することでDCHM(Digital Canopy Height Model)を作り、プロットの空間体積を計算した。図2-7にその流れを記す。

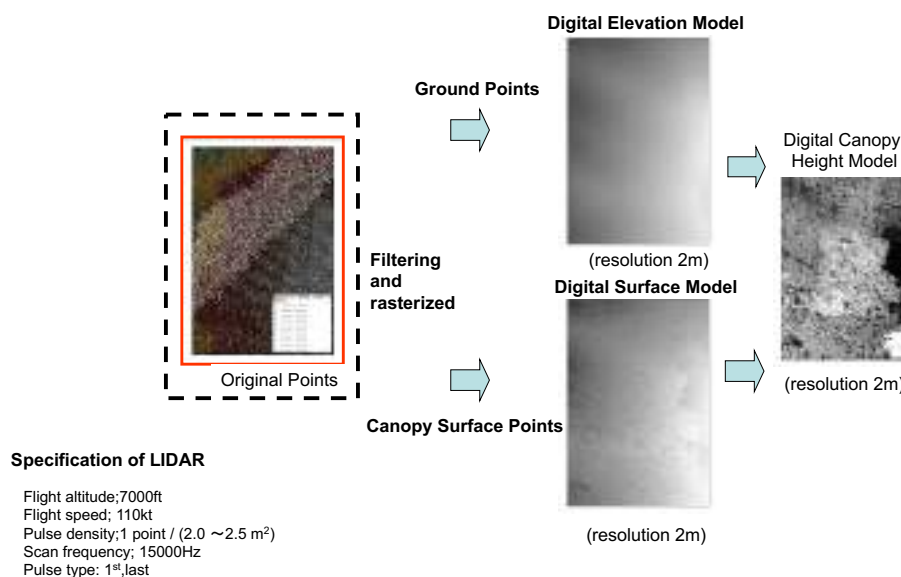


図 2-7 航空レーザ・データ加工の流れ

航空レーザの諸元およびデータ計測時期は表 2-2 の通りである。

表 2-2 使用したレーザ測量機器使用及びデータ取得時期

Test Sites	Sites	SITE H1~H5 SITE S1~S3	SITE S4~S6
	Town	Mino, Minami	Takasu
Operation	Month, Year	April, 2004	Oct. 2003
	Corporation	KOKUSAI KOGYO CO., LTD.	PASCO CORPORATION
Aircraft	Altitude(m)	2000	1830
	Speed(km/h)	200	200
Laser	System	RAMS systems (Azimuth)	RAMS systems (Azimuth)
	FOV(degree)	22	16
	Rate of pulse emission(Hz)	15000	15000
Data Profile	Foot print size(cm)	50~60	50~60
	Density (Points/m ²)	0.25~0.16	0.25~0.16

DSM の作成にあたっては、Terra Solid 社の TerraScan を使用した。点群から 2m グリッドの DSM への加工は、グリッドに含まれる全点群の標高の最高値を DSM の値とした。

なお、急傾斜地にヒノキが生育している SITE H5 については図 2-8 のように DEM が適切に抽出されていなかった場所があったため、毎木調査を行ったものの今回の解析対象から除外した。

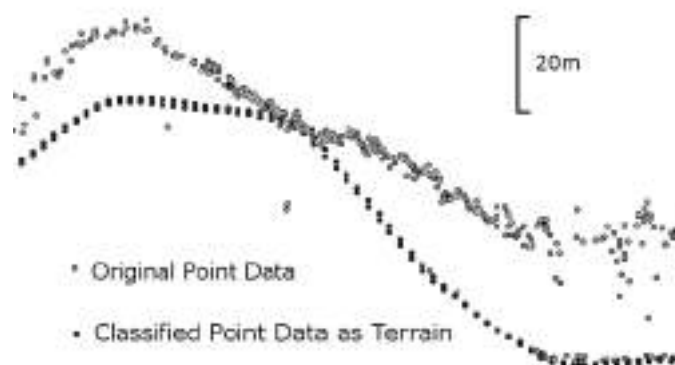


図 2-8 SITE5 で地盤と推定された点群と計測されたオリジナル点群の様子（縦断面）

表 2-3 にテストサイトの林分特性概要を示す。

2.3.3 結果

・樹種と蓄積比

プロット毎に式 (1) を使い蓄積比を求め、樹種別に整理した。

スギ・ヒノキを区別しない場合の平均蓄積比は、0.0035 (標準偏差 0.0013、変動係数 0.37) であったが、樹種毎に集計すれば、平均蓄積比はヒノキ 0.0021 (標準偏差 0.0004、変動係数 0.17)、スギ 0.0045

表 2-3 テストサイト林分概況

Site Name	Number of Plots	Ground Survey		LiDAR Survey	Characteristics of Sites				
		Mean Diameter of Breast Height (m)	Mean Tree Height (m)	Mean Crown Height (m)	Stock Ratio	Sr (Hart-Becking index)	HDR (Height to Diameters Ratio)	$\frac{MeanCrownHeight}{MeanTreeHeight}$	
								Range	Mean
SITE H1	14	0.171~0.238	14.9~17.9	16.4~20.2	0.00192~0.00297	15.3~19.3	75.3~89.9	1.02~1.32	1.16
SITE H2	8	0.157~0.175	15.5~15.8	14.8~17.2	0.00199~0.00261	13.2~15.5	90.2~100.1	0.96~1.11	1.02
SITE H3	3	0.165~0.171	13.2~13.2	10.4~11.1	0.00246~0.00262	14.2~14.6	101.2~107.5	0.79~0.84	0.81
SITE H4	16	0.141~0.166	10.2~11.2	6.2~10.4	0.00193~0.00257	20.4~24.8	67.0~73.1	0.59~0.98	0.78
SITE S1	12	0.194~0.269	20.0~22.7	15.1~19.5	0.00380~0.00581	11.5~16.2	84.5~103.5	0.76~0.87	0.83
SITE S2	3	0.202~0.231	17.5~18.5	15.9~17.2	0.00347~0.00420	15.1~17.2	79.9~86.7	0.74~0.79	0.76
SITE S3	5	0.237~0.256	20.5~21.8	17.3~19.0	0.00481~0.00561	13.8~15.0	81.9~86.6	0.84~0.92	0.87
SITE S4	15	0.279~0.356	19.9~23.2	14.8~18.5	0.00379~0.00630	14.4~17.0	65.1~71.4	0.69~0.86	0.77
SITE S5	13	0.260~0.308	17.7~19.0	14.1~17.7	0.00314~0.00414	16.4~19.8	61.5~68.1	0.75~0.95	0.85
SITE S6	14	0.281~0.362	19.8~21.8	15.0~20.7	0.00300~0.00588	14.5~19.8	60.1~70.5	0.75~0.96	0.85

(標準偏差 0.0008、変動係数 0.17) となった。これをヒストグラムで表現すると図 2-9 のようになる。蓄積比は樹種 (スギ・ヒノキ) によって 2 倍以上違った。そのことから樹種別に蓄積比を変えなければ、蓄積推定精度は悪くなるのが分かる。

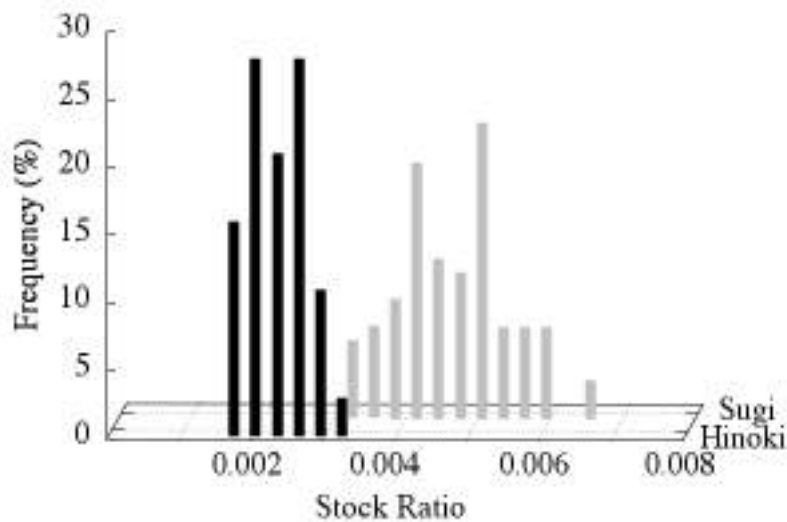


図 2-9 樹種と蓄積比の関係 (手前がヒノキ、奥がスギ)

・胸高直径と蓄積比

樹種別の平均胸高直径と蓄積比との関係は図 2-10 のようになった。

スギは胸高直径の小さなプロットが少なかった (近年植林が減っているため)。ヒノキは胸高直径の大きなプロットが少なかった (スギよりも成長が遅いため)。そのため、データに偏りがあるが、樹種別か否かにかかわらず、平均胸高直径と蓄積比の間には見かけ上、正の相関があるようである。しかし、同一林分内の異なるプロットのデータのバラ付きに着眼し、表 2-4 のようにサイト毎に各プロットデータから平均胸高直径と蓄積比との相関を確認してみたところ、平均胸高直径と蓄積比の間には無相関 (例えば、SITE H4、SITE S5)、あるいは負の相関 (例えば、SITE S1) の林分も見受けられた。このこ

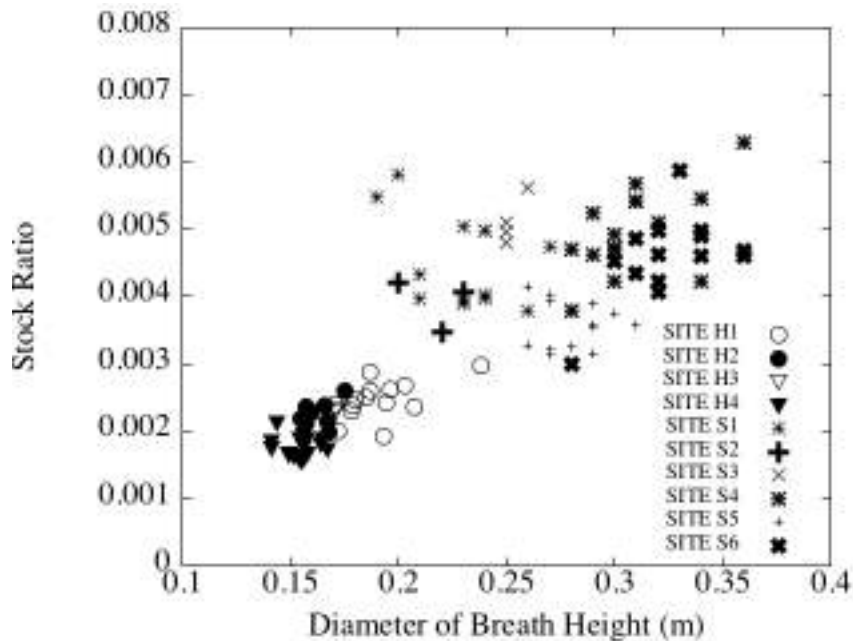


図 2-10 DBH と蓄積比との関係

表 2-4 プロット別胸高直径と蓄積比の線形回帰の結果

Site Name	Observations - Number of Plots in the Site	Regression Line		Coefficient of Determination
		Slope	Intercept	
SITE H1	14	0.00009	0.00077	0.291
SITE H2	8	0.00010	0.00064	0.130
SITE H3	3	0.00020	▲ 0.00050	0.959
SITE H4	16	▲ 0.00002	0.00210	0.012
SITE S1	12	▲ 0.00013	0.00754	0.203
SITE S2	3	▲ 0.00089	0.00585	0.123
SITE S3	5	0.00032	▲ 0.00278	0.525
SITE S4	15	0.00016	0.00002	0.326
SITE S5	13	▲ 0.00001	0.00385	0.002
SITE S6	14	0.00015	▲ 0.00031	0.281

とから、今回のデータだけでは、平均胸高直径と蓄積比との関係性については明確な判断ができない状況であった。

・斜面傾斜と蓄積比

プロットの平均傾斜と蓄積比との関係性は、図 2-11 の通りであった。プロットの平均傾斜は航空レーザによる DEM ではなく、毎木調査で測量した立木位置の高低差から計算している。そのため、下層植生（たとえば、航空レーザが透過しにくいと考えられる群生する笹やシダなど）などによる傾斜の計測誤差はない。

図 2-11 より、図 2-9 と同様、樹種別（図中○△の SITE H1~H4 はヒノキ、+×の SITES1~S6 はスギ）に蓄積比が 2 倍近く違うことが分かるが、生育地の傾斜と蓄積比との間には積極的な関係がないことが分かった。

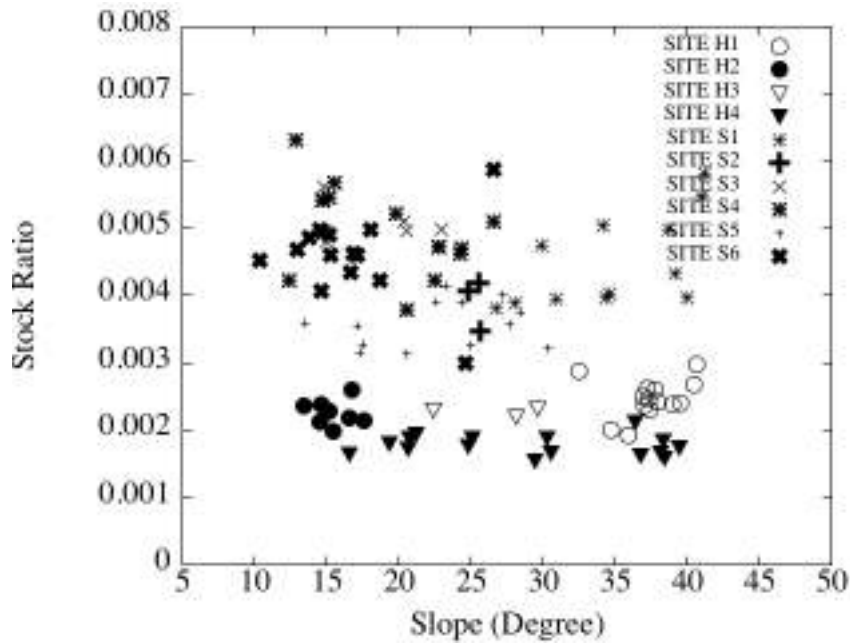


図 2-11 斜面傾斜と蓄積比との関係

・形状比と蓄積比

形状比 (HDR) を式 (7) で計算し、形状比と蓄積比との関係性を調べたところ図 2-12 の通りとなった。

$$HDR = \frac{\bar{H}}{\bar{D}} \times 100 \dots (7)$$

ここで、 HDR は形状比、 \bar{H} はプロットの平均樹高 (m)、 \bar{D} はプロットの平均胸高直径 (cm) である。

同一樹高でも胸高直径の違いによって幹材積は異なる。蓄積は、その幹材積を集積したものである。

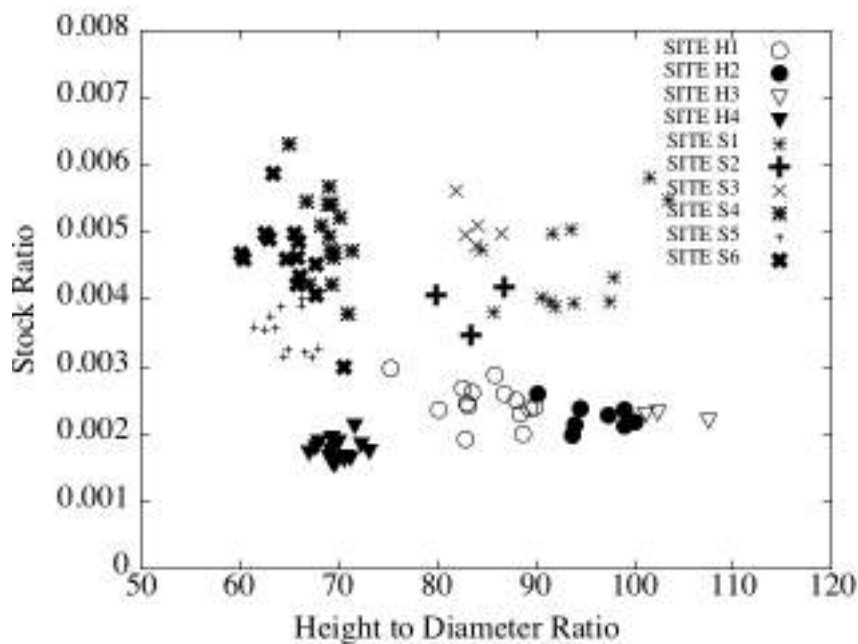


図 2-12 形状比と蓄積比との関係

したがって樹高の割には太い（形状比が小さい）林分の蓄積比は、樹高の割には細い（形状比が大きい）林分の蓄積比に比べ、大きいように思われる。すなわち、蓄積比と形状比の間には負の相関があると考えるのが妥当である。しかし、図 2-12 より、そういった負の相関はみられないことが分かった。むしろ無相関のようである。蓄積は単木の材積を本数分足し上げたものであることから、形状比（樹木の形状）だけでは、単位面積あたりの蓄積の寡多を代弁できないことが示された。

・相対幹距比と蓄積比

相対幹距比 S_r を式 (8) によって計算し、相対幹距比と蓄積比との関係性を調べたところ図 2-13 の通りとなった。

$$S_r = \frac{L}{\bar{H}} \times 100 = \sqrt{\frac{10,000}{N}} \times 100 \dots (8)$$

ここで、 N はプロットの本数密度（本/ha）で、 L は 1ha (10,000m²) に N 本の樹木が格子状に生育していたと仮定したときの格子の間隔、すなわち、樹木と樹木の間の距離 (m) である。

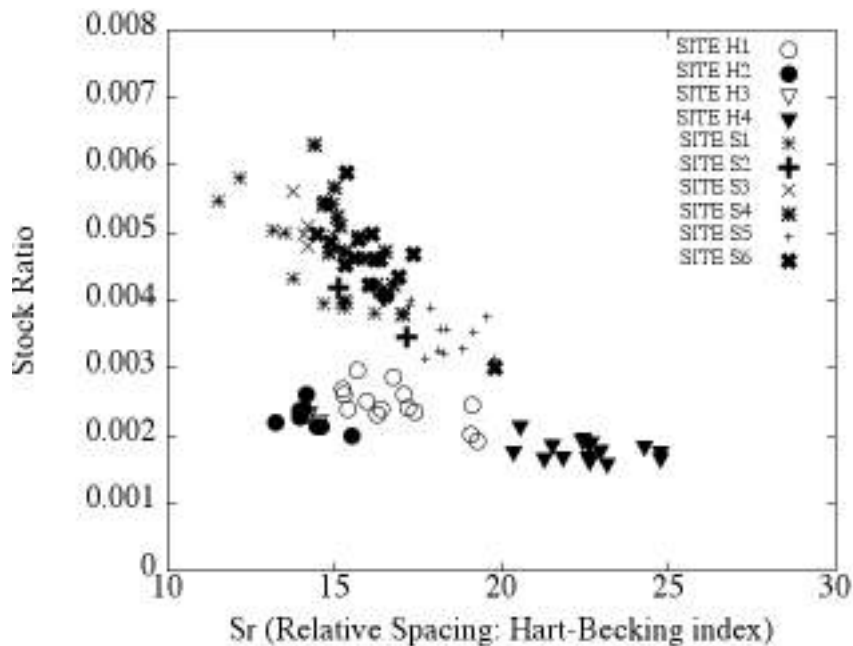


図 2-13 相対幹距比と蓄積比との関係

図 2-13 より、スギ・ヒノキともに、相対幹距比が大きくなる（疎になる）に従い蓄積比が減少する傾向があることが分かった。ここで特徴的なのは、相対幹距比と蓄積比との関係が樹種によって異なることである。ヒノキは相対幹距比が異なっても蓄積比はあまり変わらないが、スギは相対幹距比の違いによって蓄積比が大きく異なっている。

・林分特性と蓄積比まとめ

蓄積比は樹種と相対幹距比によって明確に異なることが分かった。また、平田 (2005b) や Takahashi et. al. (2005b) が単木抽出の時に問題にした個別樹高の誤差は、今回の対象サイトに限れば、図 2-13 の各サイト内のデータ分布で、突出した異常点も見いだせないことから、20m 四方のプロット単位で

考えれば、個別樹高の誤差は蓄積推定に顕著な影響を与えないことが示唆された。加えて、形状比と蓄積比とは積極的な因果関係がないことも示された。ただ、今回のデータだけでは平均胸高直径と蓄積比との間に因果関係が有るか無いかを断定するのは難しく、さらなる検討が必要である。

以上の知見に基づき、蓄積比を、樹種と相対幹距比を説明変数とした関数として表せるか、次に検討した。

2.3.4 蓄積比に着目した蓄積推定モデル

蓄積比は樹種によって 2 倍以上の差が見られ、蓄積比と相対幹距比の間には因果関係が見られた。そこで樹種毎に蓄積比を相対幹距比の関数としてモデル化することができれば、式 (2) を使い、林分特性に応じた蓄積を推定することが可能となる。そこで図 2-13 をいま一度注視し、相対幹距比と蓄積比との関係を見出すことにする。

図 2-13 では、スギ・ヒノキともに相対幹距比の増加に伴い蓄積比が線形に減少しているが、相対幹距比と蓄積比との関係が線形であるとすれば、ある相対幹距比のときに蓄積比が 0 となる。これでは、樹木が存在するが蓄積が無となり、相対幹距比と蓄積比との関係を示すモデルとして適切ではない。そこで改めて相対幹距比と蓄積比の因果関係について検討し両者のモデル化を試みる。

蓄積比は式 (1) で空間体積に占める蓄積の割合と定義したものである。そこから蓄積比と相対幹距比との関係は、相対幹距比の増加に従い、式 (1) の分母は小さく減少するなかで、分子は大きく減少することとなるため、相対幹距比が大きくなればなるほど、蓄積比は小さくなりつつ、次第にその減少量は小さくなると考えられる。そこで蓄積比と相対幹距比との関係を式 (9) のように設定し

$$\frac{ds_s}{dSr} = -A_s s_s \cdot \cdot \cdot (9)$$

これを解き、 Sr が ∞ のとき蓄積比は 0 として係数を調整すれば、樹種別蓄積比は式 (10) の関数となる。

$$s_s = B_s e^{-A_s Sr} \cdot \cdot \cdot (10)$$

このとき、 s_s は樹種別蓄積比、 S_r は相対幹距比、 A_s 、 B_s は樹種別定数である。

以上より、式 (10) を式 (2) にあてはめた式 (11) がこれまでの議論を踏まえて開発した、林分特性の違いを考慮した蓄積推定モデルである。

$$v_s = B_s e^{-A_s Sr} V \cdot \cdot \cdot (11)$$

ここで、 v_s は樹種別蓄積である。

なお、式 (10) を使い、相対幹距比と蓄積比との関係を実測値に基づき回帰したところ、樹種、相対幹距比、蓄積比との関係として式 (12-1)、式 (12-2) を得た。

$$\text{スギ:} \quad s = 0.0155e^{(-0.079Sr)} \cdot \cdot \cdot (12-1)$$

$$\text{ヒノキ:} \quad s = 0.0041e^{(-0.036Sr)} \cdot \cdot \cdot (12-2)$$

それを図 2-13 に示せば図 2-14 のようになる。

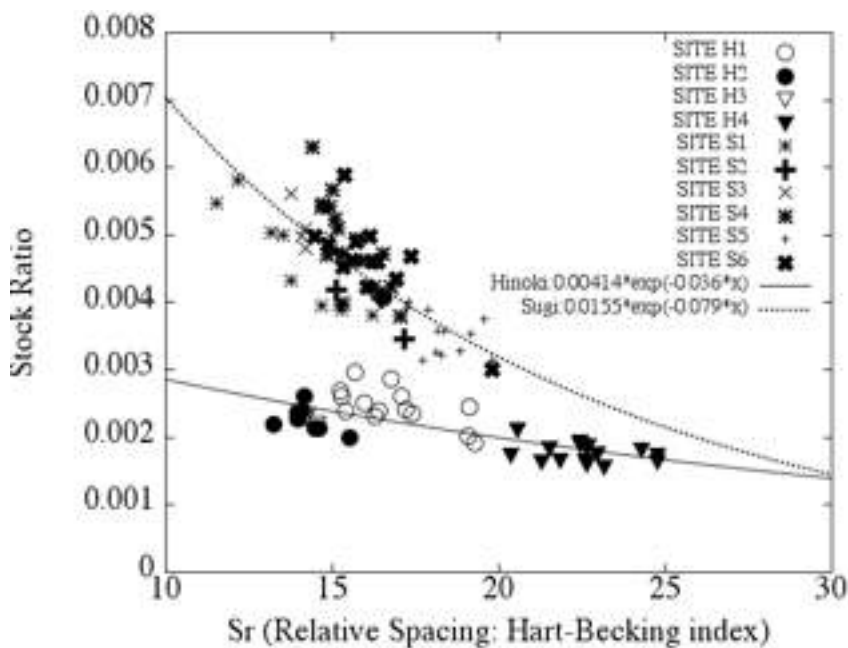


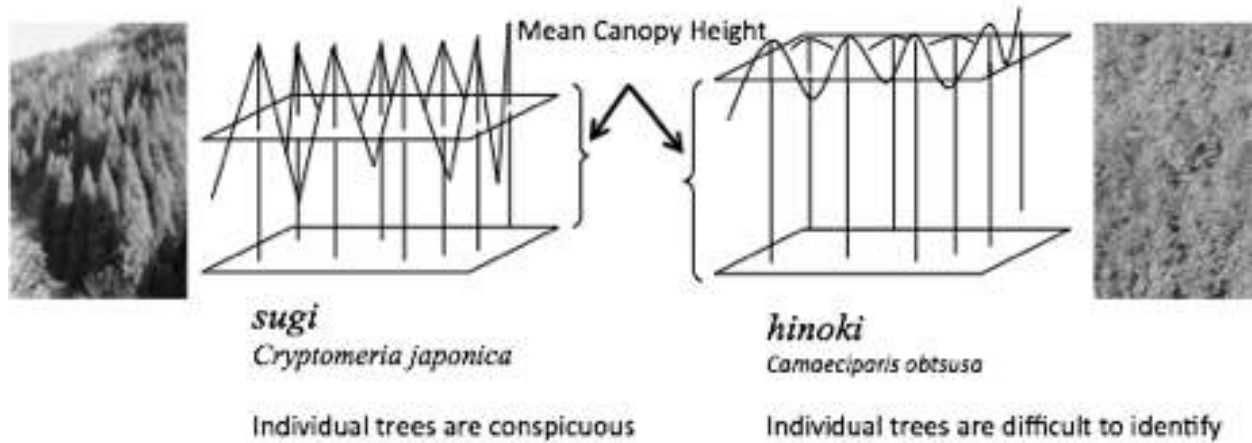
図 2-14 樹種別相対幹距比に対する蓄積比モデル適用

このとき、式 (12-1)、式 (12-2) から推定できる蓄積比の期待値と観測値との標準偏差を求めると、スギ 0.0005、ヒノキ 0.0002 となった。先の 2.2.3 で示した樹種別蓄積比の期待値（平均蓄積比）と観測値とのばらつきでは、標準偏差はスギ 0.0008、ヒノキ 0.0004 であったことから、蓄積は相対幹距比を考慮することで、より現状に則した蓄積が把握できるようになった。

2.3.5 考察

樹種によって平均蓄積比が 2 倍以上異なることが示されたが、その原因は樹種固有の樹形にあると思われる。スギは遠方から目視すると 1 本 1 本が際立って見えるが、ヒノキは間伐が行き届いた林分以外では、1 本 1 本が分別しにくい。このことはスギの樹冠表面が凸凹な一方、ヒノキのそれは比較的平らであることを示している。本論で議論している空間体積は、平均樹冠高に樹冠投影面積を乗じて求めたものと等しい。そのことから、例え樹高や胸高直径、本数密度が同じ（蓄積が同じ）でも、スギとヒノキとでは、樹冠形状の違いによって平均樹冠高が異なってくるはずである。表 2-3 の地上調査による樹高と航空レーザからの平均植生高を比べると、ヒノキは、両者が同程度の高さであるプロットが多いが、スギは地上調査による樹高のほうが高くなっている。こうした状況を模式的に示せば図 2-15 のようになる。スギでは図 2-15 のように平均樹冠高は低いため、たとえスギとヒノキで蓄積が同じでも、空間体積に占める蓄積の割合（蓄積比）は、ヒノキのそれに比べ大きくなっていると思われる。

混み具合の指標である相対幹距比と蓄積比との間の因果関係は、改めて考えれば道理である。混み合えば混み合うほど (S_r が小さくなるほど)、空間体積はさほど増えないものの単位空間体積に占める蓄積の量は増える。つまり蓄積比は増加する。逆に疎になればなるほど (S_r が大きくなるほど)、蓄積は減少し蓄積比は小さくなる。したがって空間体積から蓄積を推定するとき、相対幹距比は蓄積推定精度に大



$$\text{Spatial Volume} = \sum(\text{DCHM})$$

$$= \text{Projected Area of Canopy} \times \text{Mean Canopy Height}$$

図 2-15 樹形と空間体積との関係（模式図）

大きく影響を与える因子となる。

今回、林分の傾斜・形状比・平均胸高直径と蓄積比との間には、明瞭な関係を見いだせなかった。しかし、それを普遍的な結論とするのは今回の解析だけでは不十分と考えている。なぜなら、樹高の計測では、実測とはいえ誤差が含まれていることに加え、プロット内の蓄積は計測誤差を含んだ樹高を使って調整した樹高曲線から樹高を推定した上、どの林分にも式 (6) の材積式を適応している。つまり実測は、相応の誤差を含んでいる。しかも林分調査した蓄積は、航空レーザ計測時に同期処理させていない。従ってここで使用したデータでは、蓄積比に影響を与える林分特性を厳密に抽出できてはいない。今回は、明らかに影響の大きい蓄積比の説明変数を検出したに過ぎない。

なお、今回の結論である式 (12) は、ギャップが少ない（林分の樹冠が閉鎖している）林分に於いてのみ適用可能なものであることには注意が必要である。間伐直後の林分では、樹冠が閉鎖しておらず、空間体積と林分蓄積との関係が今回仮定している設定には当てはまらないからである。しかし、現在、我が国の森林資源計画において最もその量の把握が必要なのは、戦後の拡大造林によって植林され、その後の林業低迷によって間伐が遅れ、高密度になっている人工林である。そういった森林はギャップが少ないため、我が国において喫緊の課題であるスギ・ヒノキの蓄積推定では条件が揃えば、本研究の成果は活用可能性があると思われる。さらに、過去の航空レーザ・データにも適用可能なこの手法は成長量解析や間伐実績などの解析にも適用可能と思われる。

2.4 空間体積・幹材積モデルを用いた蓄積比のシミュレーション

先に設定した仮説を、林分調査と航空レーザ測量による実測に基づいて検証してきた。これまでのところ概ね仮説が成立するようと思われるが、複雑で多様な森林空間の一部を選び出し調査を行ったに過ぎず、導き出した蓄積比の値や樹種や相対幹距比との関係などは、一般的な森林、この場合は、岐阜県郡上市周辺の森で広く成立するかは不明である。従って、この蓄積比を用い現地調査を行わずに蓄積を推定しても結果は信憑性に欠ける。そこで、これまで導き出した蓄積比の値や樹種・相対幹距比との関係が、一般的に（とくに岐阜県郡上市周辺で）成立するものなのかを、蓄積比のシミュレーションによって検討する。

2.4.1 方法

蓄積比のシミュレーションは次の5つの手順に従い実施する。①複雑な林分構造を単純化し、同一形状の樹木が規則的に生育している集合体として考え、林分の蓄積比（空間体積比占める蓄積に割合）を単木の蓄積比（空間体積に占める材積の割合）と簡略化して考える。②単木の蓄積比を、樹冠形状に基づいた空間体積モデルと幹材積モデルを使って数式で表し、両者により蓄積比モデルを構築する。③そのモデルのパラメータを、岐阜県に生育するスギ・ヒノキの実測データを使って調製する。④調製されたパラメータで蓄積比と樹種・相対幹距比との関係を数値計算によってシミュレーションし、三者の関係を精査する。流れを図 2-16 に整理した。

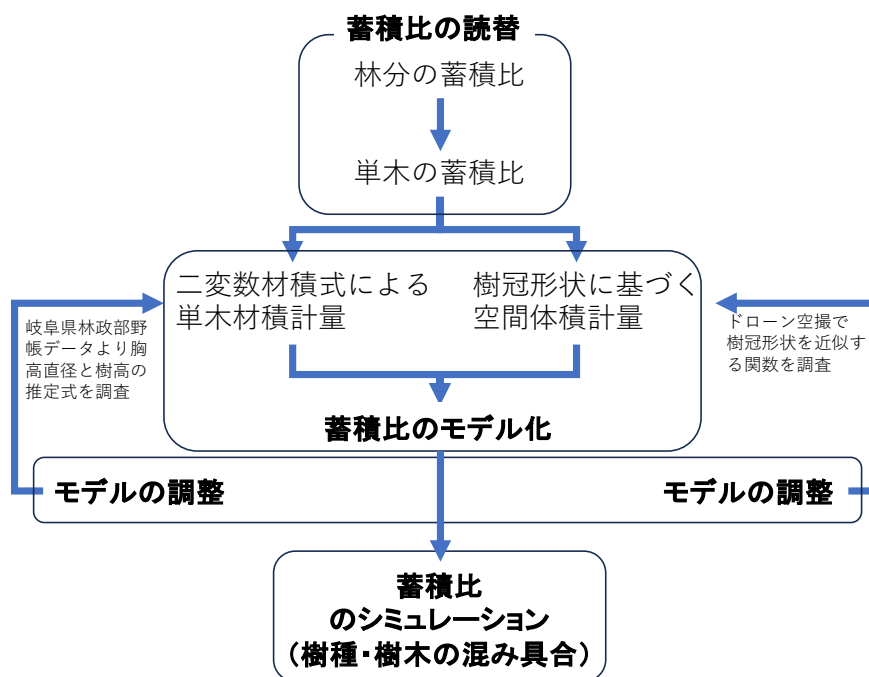


図 2-16 蓄積比シミュレーションの流れ

2.4.2 蓄積比の簡略化

山に実在する立木の樹高や樹冠、樹幹の形状は様々で、立木の配置も不規則である。よって、林分単位での蓄積比のモデル化は非常に複雑なものとなる。そこで、現実の森林を図 2-17 のように幹を芯と

した回転体が規則的に配列すると単純化したうえ、成長段階が異なっても樹の形状はそれぞれ相似と考え、特定樹高 (20m: 現在の日本に多く存在すると言われる収穫時期を迎えたスギ・ヒノキ人工林の樹高) の1本の樹木に着目し、蓄積比のモデル化を考える。つまり林分の蓄積比 s を単木の蓄積比 s' と単純化し、蓄積比 s のモデル化を試みる。

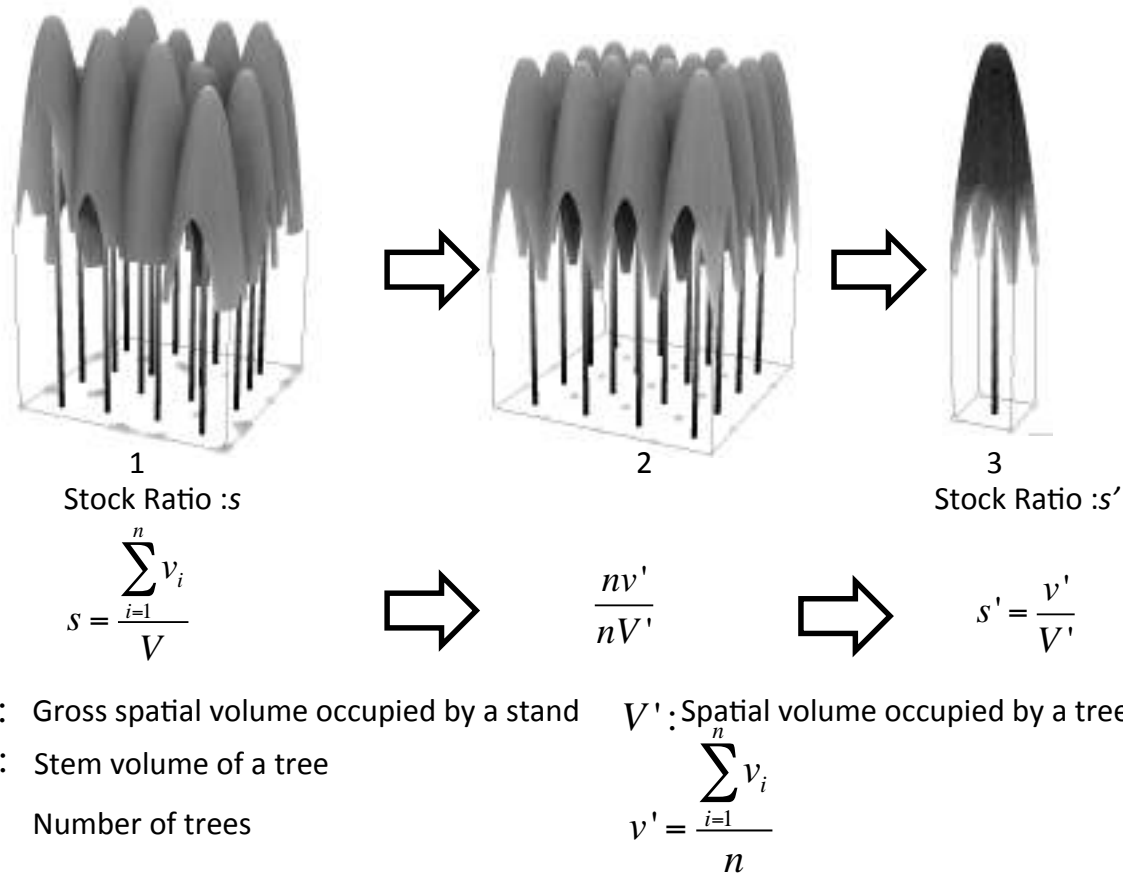


図 2-17 蓄積比の簡略化

2.4.3 使用した空間体積・幹材積モデル

・空間体積モデル

1本の樹木が占有する空間体積は、樹木が間隔 L (m) で等間隔に配置しているとき図 2-18 で示す、樹冠形状関数 $F(r)$ 、 H 、 Sr を使って求めることができる (r (m) は樹幹中心の任意の点から樹冠表面への水平距離である)。以下に空間体積モデル構築の手順を示す。

いま、幹の接地部分を点 0 ($0, 0, 0$) とする。そして、 L (m) を十分小さな幅 e (m) で分割し、樹冠投影面を $(L/e \times L/e)$ 個の格子に分ける。このとき、任意の地面上の格子を点 $A(x_i, y_i, 0)$ とすれば、点 A を

通る地面の垂線と樹冠表面との接点 B は $(x_i, y_i, F(\sqrt{(x_i^2 + y_i^2)}))$ と表せる。こうして計算される樹冠高と

格子面積を掛け合わせて体積を計算し、それを合計することで、式(13)によって空間体積 V' (m^3) を求める。

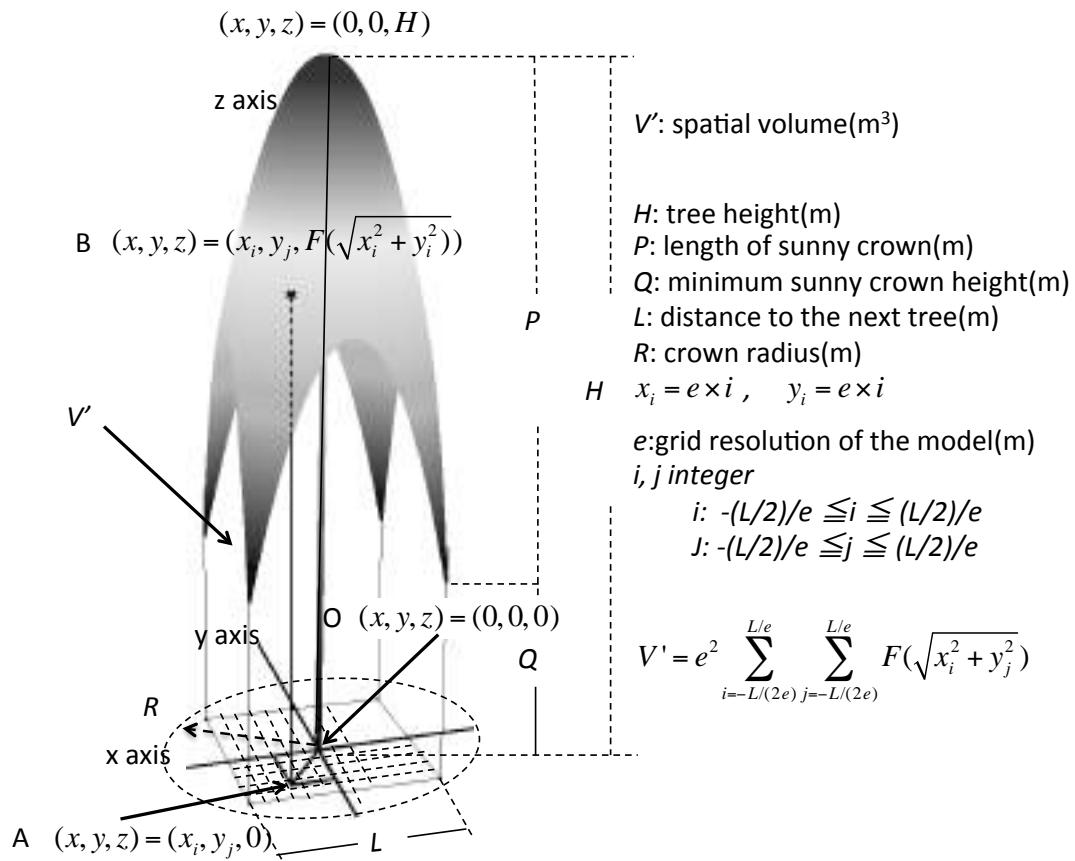


図 2-18 樹冠形状と空間体積

$$V' = e^2 \sum_{i=-L/(2e)}^{L/e} \sum_{j=-L/(2e)}^{L/e} F(\sqrt{x_i^2 + y_j^2}) \cdots (13)$$

ここで、 i, j は整数で、それぞれ $-\frac{L}{2e}$ から $\frac{L}{2e}$ の間の値をとる。

今回、 H を20mと固定していることから、式(13)において L を変化させれば、式(8)の L と Sr との関係から、同じ樹冠形状に対して Sr の異なる空間体積を計量できることになる。

なおこのモデルは、樹冠形状と L の条件によっては、樹冠が地面に接地する場合がある。しかし、そのような形状をした樹木は現実的には存在し難い。そこで最低陽樹冠長(m) (光があたる樹冠面のもっとも低い高さ)の最低値を樹高の15%と設定し、樹木が占有する空間に限界を設けた。これにより、樹木と樹木の間隔が広がったときのギャップを表現できるようにした。

・幹材積モデル

材積は、一般に材積式によってモデル化されている。本研究では大隅(1995)に基づいた式(14)の2変数材積式を使用する。

$$v' = \frac{2}{5} D^2 H \cdots (14)$$

ここで、 D は胸高直径(m)である。

式(14)から v' は、樹種や相対幹距比と独立したものと考えがちである。しかし、実際はそうではない。一般に、樹高と胸高直径の比であり樹幹の大まかな形を表す式(15)で定義される形状比 HDR は、林分の密度管理（林分の混み具合を表す指標 等を使った立木本数の管理）によって人為でコントロールできるとされている（例えば林野庁監修，1998）。これは、 HDR と Sr が式(16)のように関数 $G(Sr)$ で表せることを示唆している。

$$HDR = H / D \times 100 \dots (15)$$

$$HDR = G(Sr) \dots (16)$$

このことから式(14)は、式(15)、式(16)を使って式(17)と変形できる。

$$v' = 0.4 \frac{H^3}{\{G(Sr)\}^2} \dots (17)$$

つまり、 v' は相対幹距比を説明変数とした関数となり得る。図 2-19 に幹材積モデルを整理したものを示す。

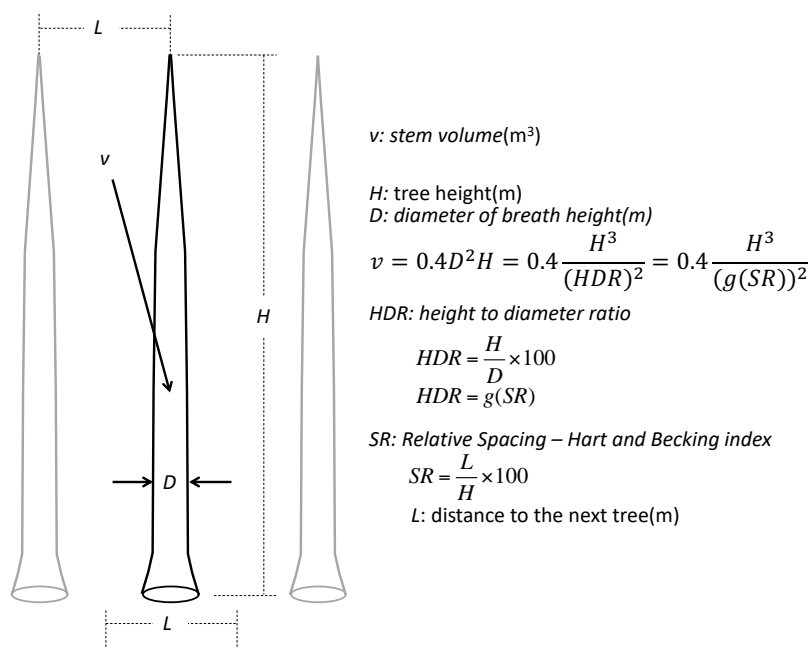


図 2-19 幹材積のモデル化

以上により蓄積比 s' は、式(13)と式(17)を使って式(18)としてモデル化できたことになる。

$$s' = \frac{e^2 \sum_{i=-L/(2e)}^{L/e} \sum_{j=-L/(2e)}^{L/e} F(\sqrt{(x_i^2 + y_j^2)})}{0.4 \frac{H^3}{\{G(Sr)\}^2}} \dots (18)$$

2.4.4 モデルの調整

・樹冠形状（空間体積）

これまでも樹冠形状を扱った様々な研究が行われてきた。例えば、Nelson(1997)、梶原(2000)、Sheng et al., (2001)、Lovell et al., (2005)、伊藤ら(2008)、Kato et al., (2009)、田口ら(2009)、Frazer et al., (2011)などである。しかしながら既往研究には、関数 $F(r)$ の係数とそのバラツキ（形状のバラツキ）を調査した、本研究で利用可能な成果はなかった。その為、今回 UAV 空撮によって樹冠形状を立木のまま計測し、スギとヒノキの樹冠形状の違いや個体の違いによる形状のバラツキを独自に調査した。

空撮は、岐阜県高山市清見の国有林（緯度:36° 1' 28" , 経度:137° 3' 46" 周辺）にて実施した。図 2-20 にその位置を示す。使用した UAV・カメラ・点群処理ソフトなど樹冠形状測定に関する諸元は表 2-5 の通りである。

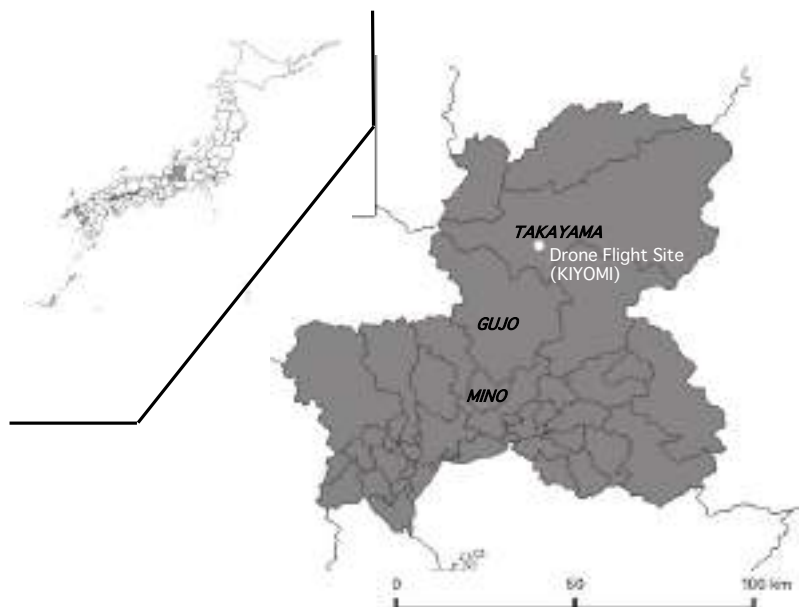


図 2-20 樹冠形状モデル調整のためにドローン空撮を行った場所

表 2-5 ドローン・カメラ・点群処理ソフト諸元

Environment		Flight information		DSM	
Site location	35 33 33N, 136 22 22E KIYOMI, TAKAYAMA, GIFU	Software for flight plan	Mission Planner 1.3.19	Software	Agisoft Photoscan 1.2.0
Flight date	12-Nov-15	Flight plan setting	Manual	Processing method	SfM
Weather	Cloudy	Flight method	Auto Pilot	Geo-reference	Flight log - without GCPs
Wind speed (Average)	2.6 m/s	Flight speed	8m/s		
Drone	Hexacopter (DJI F550 with 3DR Pixhawk)	Altitude	150m	Resolution of point cloud	520~640 pixel/m ²
Camera	Ricoh GR	Shutter control	Interval shooting 1 shoot/2second		

樹冠の縦断面形状は、空撮後の処理によって得られた点群データから、スギ・ヒノキの樹冠に該当する部分を各 10 本抜き出し、それぞれを 4 方向から図 2-21 のように切り出し、直線: $ax + b$ 、二次放物線: $a'x^2 + b'$ 、指数関数: $e^{a''x} + b''$ をその縦断面に当てはめ、最も適合度の高いものが多かった関数をその樹種を代表する樹冠縦断面形状関数 $F(r)$ として求めた。その結果、表 2-6 のようにスギ・ヒノキともに樹冠縦断面は直線が最も適合していた (残差二乗和が小さかった)。これは、ヒノキのほうがスギより樹冠形状がなだらかであるという経験知に一致する一方、丸みを帯びていると考えていたヒノキの樹冠形状は経験知に反した結果となった。

なお、樹冠形状の勾配をきめる直線の傾きは、樹種毎に表 2-7 の通りとなった。

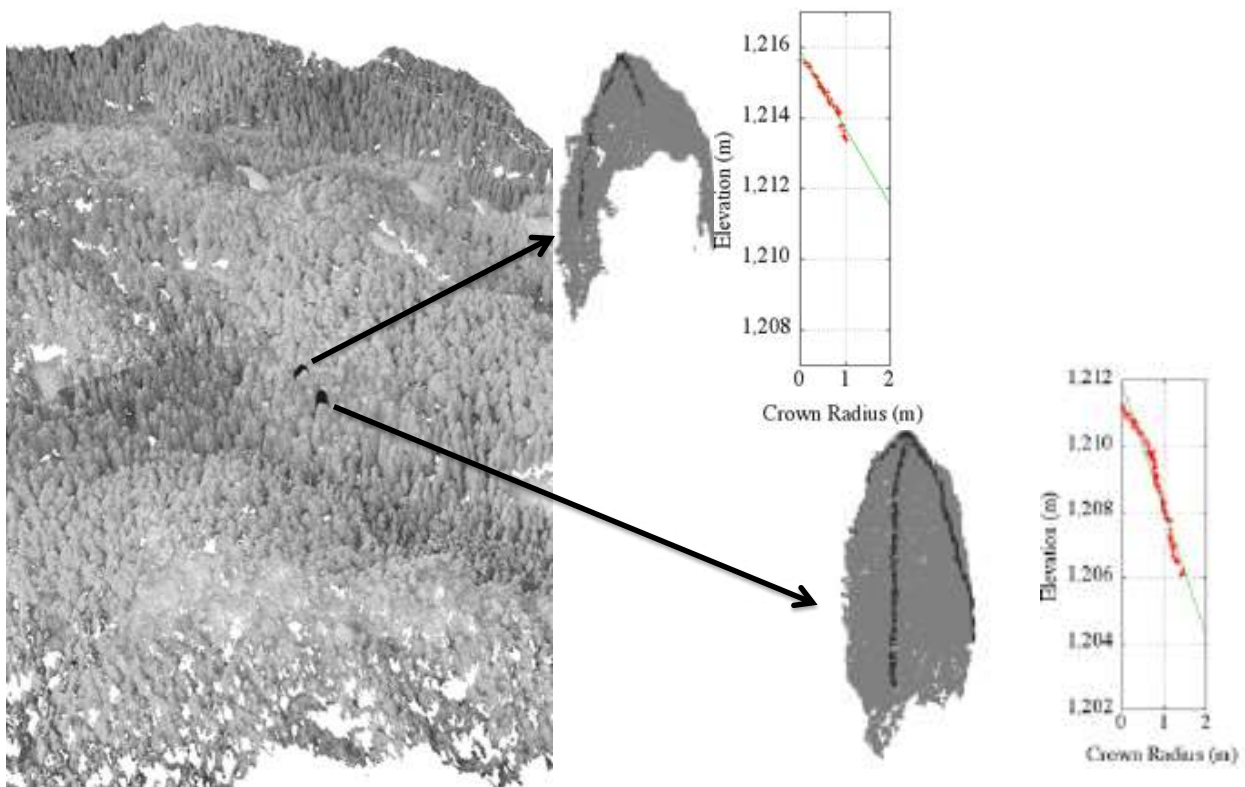


図 2-21 点群データからの樹冠断面形状の求め方

表 2-6 樹冠断面形状と関数 (直線・放物線・指数関数) との適合性

-スギ・ヒノキごとの断面と最も適合度が高かった関数の数-

		<i>Chamaecyparis obtusa</i> -hinoki-	<i>Criptomeria japonica</i> -sugi-
Type of function	Linear	13	19
	Sigmoid	8	9
	Exponential	10	12
Total(number of samples)		31	40

表 2-7 使用した樹冠断面形状（直線）のパラメータとそのバラツキ

	<i>Chamaecyparis obtusa -hinoki-</i>	<i>Criptomeria japonica -sugi-</i>
Mean	-2.7	-4.3
Standard Deviation	0.9	0.8
Maximum	-4.5	-6.1
Minimum	-1.3	-3.3

・幹材積

式(16)の関数 $G(Sr)$ は、岐阜県が平均的な県内森林の把握を目的に行った、収穫表(資料 6)作成のために行った林分調査の野帳データ(岐阜県林政部, 1992a; 岐阜県林政部, 1992b)から見出した。図 2-22 に調査の野帳データをもとにした相対幹距比 Sr と形状比 HDR との関係を示す。

図 2-22 より、 Sr と HDR との間には、スギとヒノキで傾向が異なるものの、どちらも Sr が大きくなる、すなわち立木密度が疎になるに従い、 HDR が小さくなることが確認できた。そこで、 Sr と HDR との関係にも式(10)と同様の関係があるとして、樹種別に式(19-1)、式(19-2)のようにモデル化した。

スギ：
$$HDR = 116.286e^{(-0.0210 \times Sr)} \dots (19-1)$$

ヒノキ：
$$HDR = 149.589e^{(-0.0342 \times Sr)} \dots (19-2)$$

それぞれの決定係数は 0.2374、0.4904 であった。式(19-1)の決定係数は統計的に相関が希薄であることを示しているが、図 2-22-(a)を見る限り、ヒノキと同様、相対幹距比が大きくなるに従い形状比が小さくなっていることが分かる。したがって決定係数の低さは、相対幹距比と形状比との緩やかな関係性によって統計的に決定係数が小さくなった結果であり、関係性を否定するものでないと考え、式(19-1)を採用した。

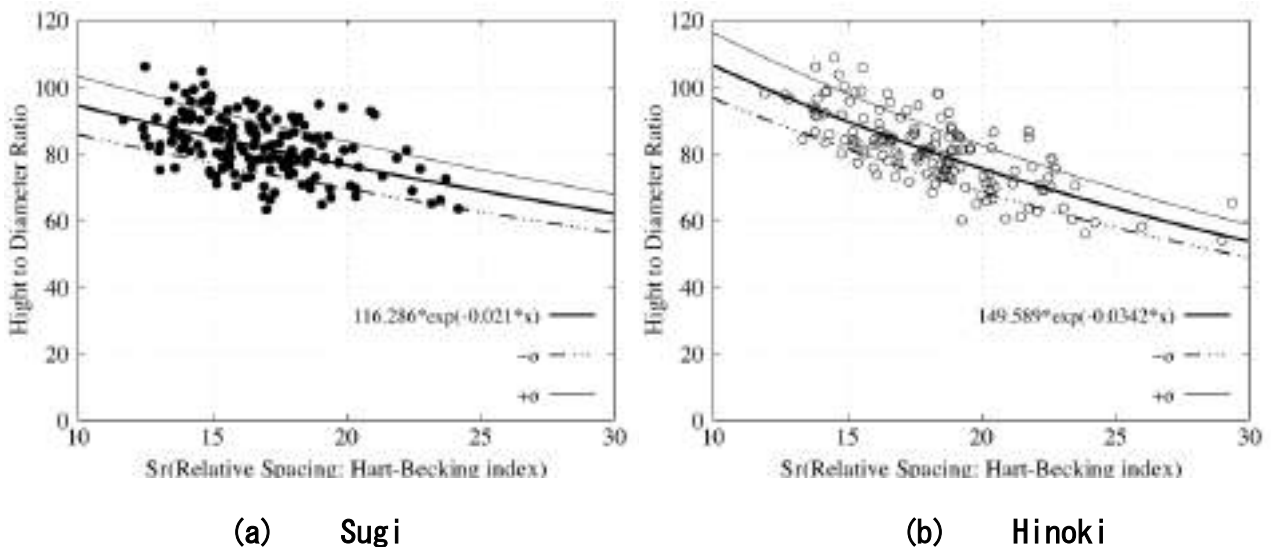








図 2-22 樹種別相対幹距比と形状比との関係

2.4.5 結果

式(18)で蓄積比モデルを構築し、現地データを使って樹種別に各モデルのパラメータを調製した。これにより蓄積比のシミュレーションが可能となった。

ところで、同一樹種でも樹冠形状にはバラツキがある。また、形状比と相対幹距比との関係にもバラツキがある。そのため両者の平均的なもののみを取り上げて蓄積比をシミュレーションしても得られる知見は少ない。そこで蓄積比が、任意の Sr で取り得る上限や下限の値を、樹冠や樹幹の形状のバラツキ (σ) を考慮し設定した。各設定は表 2-8 の通りである。

表 2-8 蓄積比のシミュレーションで採用した樹冠形状・幹形状のパラメータについて

v Stem volume	 more thin than typical stem shape: $(+\sigma)$	 typical stem shape	 more thick than typical stem shape: $(-\sigma)$
V Spatial volume	 more round than typical crown shape: $(+\sigma)$	 typical crown shape	 more sharp than typical crown shape: $(-\sigma)$
$\frac{v}{V}$ Stock Ratio	Lower	Typical	Upper

以上により、式(18)の e を L に比べて十分小さい $0.01(m)$ に設定し、任意の Sr における蓄積比の平均、上限、下限を数値計算によってシミュレーションしたところ、図 2-23 の結果を得た。そこから、図 2-23 も、実測に基づく図 2-13 同様に相対幹距比と蓄積比との間には、相対幹距比が大きくなれば蓄積比が小さくなる関係があり、樹冠形状の異なるスギとヒノキでは蓄積比の現れ方が異なることが分かった。

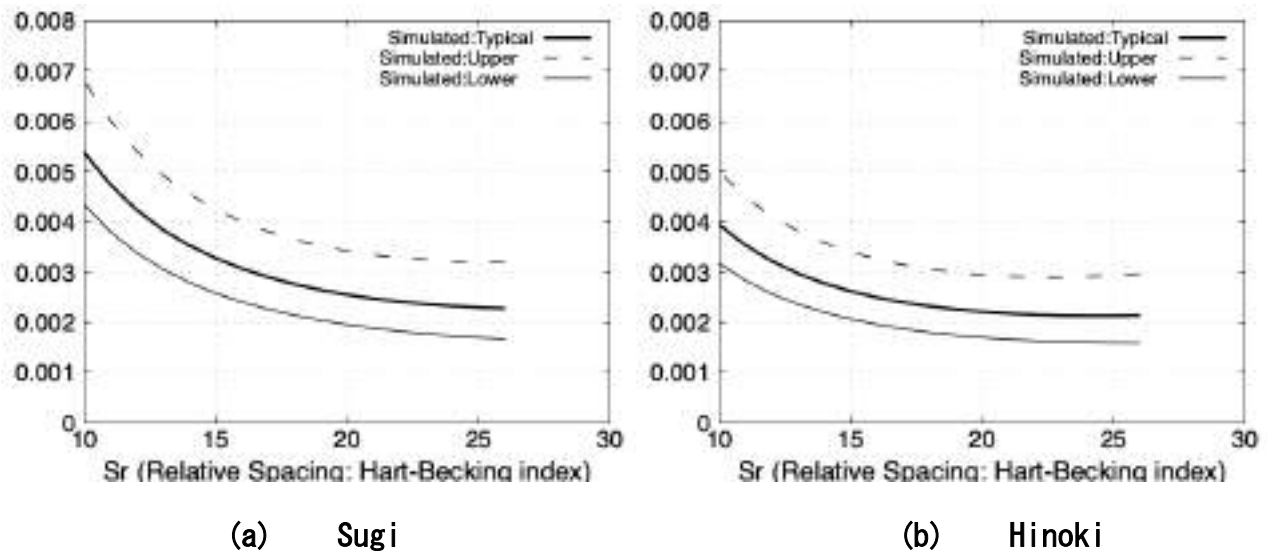


図 2-23 樹種別蓄積比のシミュレーション結果

2.5 蓄積推定モデルの汎化

2.5.1 方法

図 2-13 と図 2-23 とを重ねて図 2-24 を作成し、林分特性と実測による蓄積比とシミュレーション値との間に差異があるか確認する。差異があれば、その差異が合理的に説明できるものか検討する。

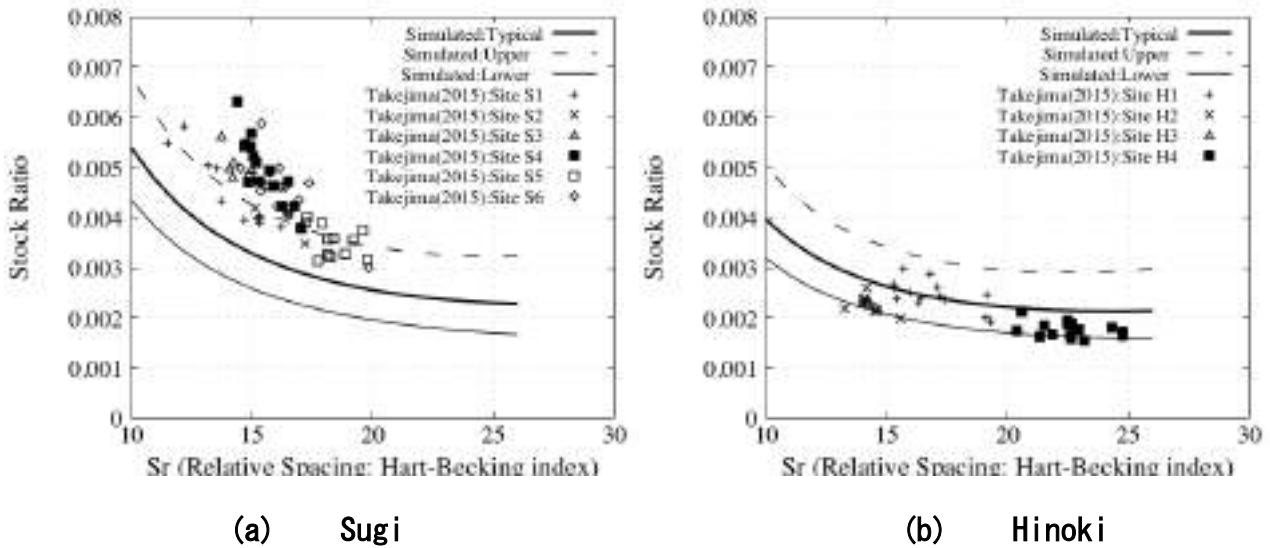


図 2-24 樹種別蓄積比のシミュレーション結果と実測値の比較

2.5.2 実測値とシミュレーション値の比較

・スギの蓄積比と相対幹距比

図 2-24-(a) では、実測値は全てシミュレーションによって想定される平均値より大きく、上限として想定したものより大きいものが 70%ほどあった。とりわけ SITE4、SITE6 では顕著であった。

その原因を岐阜県林政部(1992a, 1992b)データと 2.3.2 の実測値との関係を図 2-25-(a) で確認した。

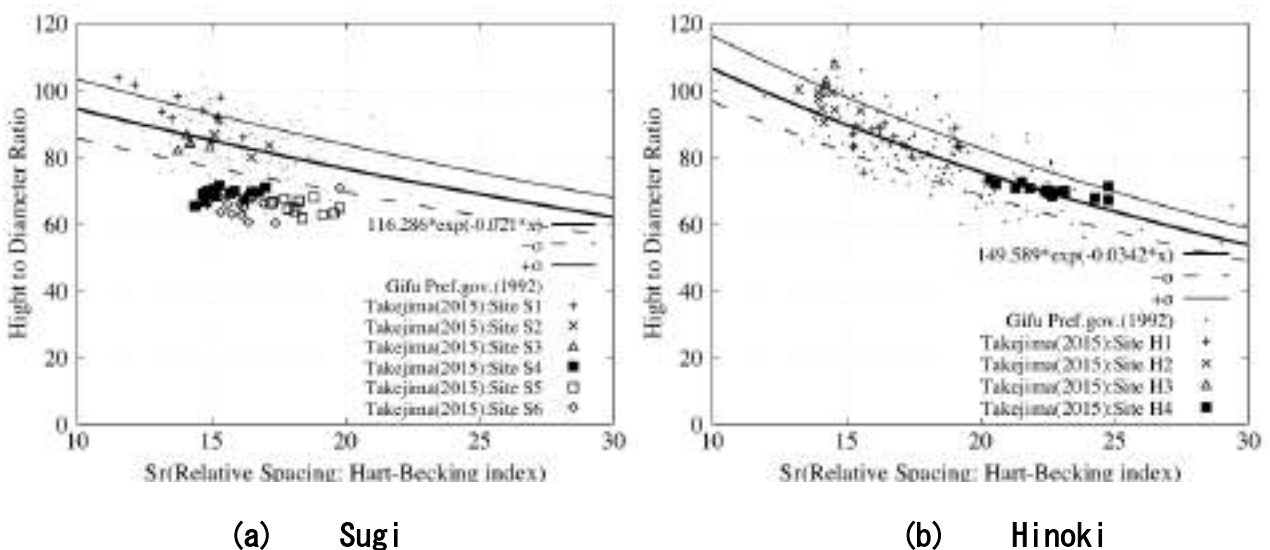


図 2-25 岐阜県林政部データと実測値との関係

実測した林分の Sr に対する形状比を、図 2-22-(a) で示される式 (19-1) で算出可能となった値と比べてところ、SITE4、SITE 5、SITE6 では、形状比が岐阜県の調査した林分と比べて極端に小さく、樹高の割に太い樹木で構成される林分であったことが分かった。そのため、この 3 つの SITE では式(1)の分子が大きくなり、蓄積比が大きくなったものと思われる。その一方で、SITE 5 では蓄積比は想定内に収まっているものも多い。そうなる理由は、図 2-25-(a) の横軸から読み取る SITE 4、SITE 6 と SITE 5 との Sr の差による混み具合の違いだと思われる。SITE 5 は SITE 4、SITE 6 より Sr が大きい、すなわち疎な林分である。こうした材積と本数との効果によって、結果として図 2-24-(a) のようになったと考えられる。

このような結果になるのは、SITE 4、SITE 5、SITE 6 とその他のサイトの立地の違いにあると考えられる。一連の森林調査では、ある程度均一な樹種で構成されるまとまった林分を探していた。しかし、本研究の開始当初に想定していた岐阜県美濃市周辺では、スギのまとまった林分が見つからなかったため、調査地が美濃市周辺から離れることになり、スギ林が多く分布している岐阜県郡上市高鷲町のスギ林を調査することになった。高鷲町の SITE は美濃市の SITE とは異なり、冬期の積雪が 2m を超えることもあるスキー場周辺の林分であることから、降雪地帯によくある“雪折れ”によって、既に直径の割に樹高が高い強度の弱い樹木は淘汰されており、形状比が低いものが残っていた可能性もある。こうしたことを踏まえると、今回の森林調査対象林分が、岐阜県が平均的な県内森林の把握のために行った調査対象林分とは異なっていたことが、今回の結果の原因ではないかと推察される。

・ヒノキの蓄積比と相対幹距比

図 2-24-(b) では、実測値がシミュレーションで想定される平均的な値よりやや低めに出るものが多いものの、ほぼ全ての実測値はシミュレーションの想定内であった。

実測値がやや低めにでる理由は、岐阜県林政部(1992a, 1992b)データと 2.3.2 の実測値との関係を比較した図 2-25-(b) によって以下のように解釈できる。

図 2-24-(b) で観測される実測値は、式 (19-2) で想定した平均的なものより(太い実線)上側にあるものが多い。このことは実測した林分は、モデルで想定した林分に比べ、樹高の割に材積が小さい(細い)樹木で成立している林分(蓄積が小さい)が多いことを示している。そのため、蓄積比の分子である蓄積が小さくなり、想定された平均的な蓄積比より低めになったと思われる。

2.5.3 蓄積比を使った広域森林蓄積推定モデルの改良

蓄積比 Sr のシミュレーション値と実測値とは差異はあったものの、その差異は説明できるものであった。よって、今回のシミュレーションから得られた蓄積比 s' の挙動は、実測によって得られた知見を包含しており、林分単位の蓄積比 s の挙動と解釈しても問題ないと考え、実測値から導き出した蓄積推定モデルの改良を試みる。

・樹種と蓄積比との関係

先の 2.3.4 では、スギとヒノキで蓄積比は約 2 倍異なるとしていた。今回のシミュレーションによって、確かにスギとヒノキでは同じ Sr に対して蓄積比が異なることが示された。しかし、両者の差は約 2 倍ではなく、図 2-24 から分かるように岐阜県内でよく見られる Sr が 15~25 という範囲において、本来両者は漸近するものであることが分かった。2.3.4 の知見は一部誤っていた。原因は、調査した林分の特殊性に影響を受けたことであった。

・蓄積比と相対幹距比との関係

先に開発したモデルでは、 Sr が大きくなる（林分の立木密度が疎になる）に従い、蓄積比は小さくなる傾向があるとしていた。今回のシミュレーションによっても、確かに、スギ・ヒノキともに、 Sr の増加に伴って蓄積比が減少する傾向があることが示され、両者の関係は普遍的であると考えられる。しかし、シミュレーションによって示された Sr と蓄積比との関係は、図 2-24 のように想定したものとは異なっていた。特に、スギにおいて顕著であった。原因は調査した林分が特殊な林分であったことによるものと考えられる。

以上により、経験的に導かれたモデル、すなわち式 (12-1)、式 (12-2) のパラメータは、岐阜県郡上市周辺という限定した地域でさえ、スギ・ヒノキの森林蓄積推定式として適当でないことが分かった。

・モデルの改良。

スギ・ヒノキの蓄積比としてシミュレーションされた値を使い、式 (11) に対して最小二乗法により樹種別定数を調製した結果、図 2-26 を得た。 Sr が大きくなるに従いモデルの適合度が悪くなる傾向が見られ、モデルとして改善の余地があるように思われる。しかし、式 (9) の関係は図 2-23 でも成立している。そこで今回、2.3.4 で導いたモデルで、 Sr が ∞ で蓄積比が 0 になるとした条件を見直し、式 (9) の解を式 (20) とする。

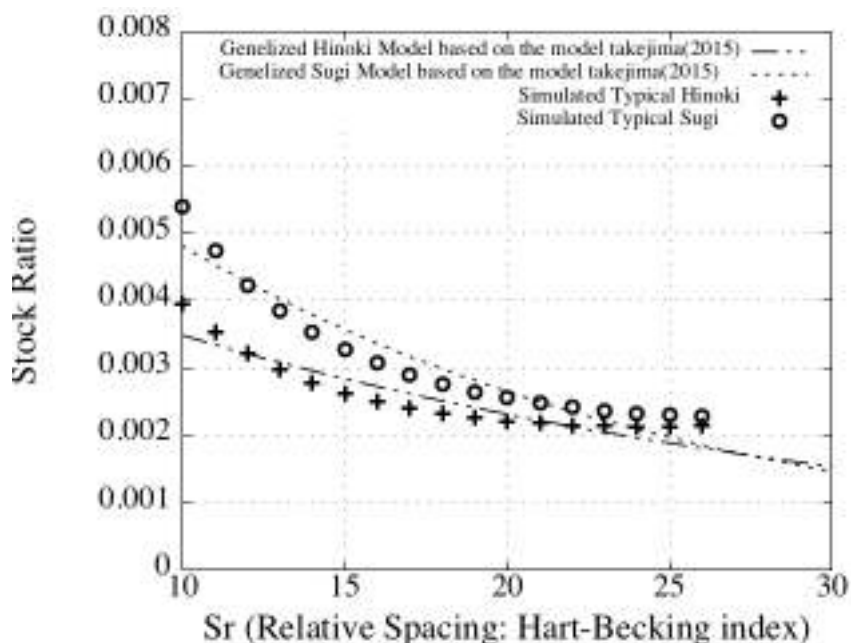


図 2-26 蓄積比シミュレーション値を既開発モデルに当てはめた結果

$$s_s = B_s e^{-A_s Sr} + C_s \cdot \cdot \cdot (20)$$

ここで C_s は樹種別定数である。

式(20)に対し、図 2-23 で示されたスギ・ヒノキの平均的な値を当てはめ、式(20)を調製した結果、スギ・ヒノキの蓄積比は式(20-1)、式(20-2)のようになった。これを図示すると図 2-27 のようになる。図 25 と図 26 のモデルの適合度を残差二乗和で比較すると、スギは $22,038 \times 10^{-9}$ から 4×10^{-9} 、ヒノキは $3,530 \times 10^{-9}$ から 3×10^{-9} となり、適合度は明らかに向上していることが分かる。

$$\text{スギ} : s = 0.0270e^{(-0.2140 \times Sr)} + 0.00217 \cdot \cdot \cdot (20-1)$$

$$\text{ヒノキ} : s = 0.0226e^{(-0.2485 \times Sr)} + 0.00207 \cdot \cdot \cdot (20-2)$$

以上により、岐阜県のスギ・ヒノキの森林蓄積は、樹冠形状や樹幹形状に起因する誤差を含むものの、式(21-1)、式(21-2)を使って現地調査を行うことなく推定可能となった。

$$\text{スギ} : v = sV = \{0.0270e^{(-0.2140 \times Sr)} + 0.00217\}V \cdot \cdot \cdot (21-1)$$

$$\text{ヒノキ} : v = sV = \{0.0226e^{(-0.2485 \times Sr)} + 0.00207\}V \cdot \cdot \cdot (21-2)$$

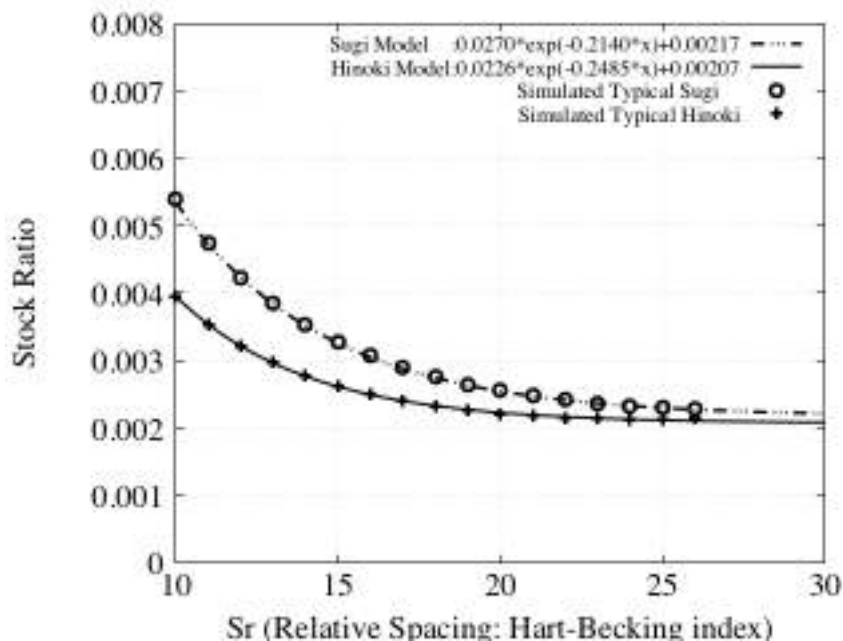


図 2-27 シミュレーション結果を使った蓄積開発モデルの改良

2.6 蓄積比の活用法について

式(21-1)、式(21-2)による森林蓄積の推定では、樹種と Sr が自明でなければならない実用上の問題が存在している。そこで最後に、樹種や Sr が不明時の対処について検討したい。

まず、 Sr が不明な場合を考える。

図 2-28-(a) から分かるよう、岐阜県内のスギ林分の Sr は 17.0 を平均として 11.7 から 21.7 の間 (2σ 相当) がほとんどである。ヒノキ林分の Sr は図 2-28-(b) より、17.9 を平均として 12.5 から 23.3 の間 (2σ 相当) がほとんどである。そこで式(20-1)、式(20-2)を使い、それぞれの Sr での蓄積比を計算した。その結果、スギの場合は Sr が 11.7 (-2σ) のとき、蓄積比は 0.004374、21.7 ($+2\sigma$) のとき 0.002430 で、両者の差は 80% であった。一方、ヒノキは Sr が 12.5 (-2σ) のとき、蓄積比が 0.003089、23.3 ($+2\sigma$) のとき 0.002134 であった。両者の差は約 45% である。この差は、平均的な Sr (スギ: 17.0、ヒノキ: 17.9) における、樹冠形状や樹幹形状のバラツキによる蓄積比の上限下限の差 (スギ: 0.003652 ~ 0.002119 (72%)、ヒノキ: 0.003107 ~ 0.001790 (70%)) と同程度である。それを考慮すれば、 Sr が自明のときに比べ精度は低下するが、蓄積比は樹種によって一定 (ヒノキ林分の平均的な 17.9 のときの蓄積比 0.002342、スギ林分の平均的な 17.0 のときの蓄積比 0.002902 を採用) と考えることが受け入れ可能なケースもあり得る。例えば、地域の資源を俯瞰し、林業を行う施業地をゾーニングする場合には、そうした誤差も許容できよう。

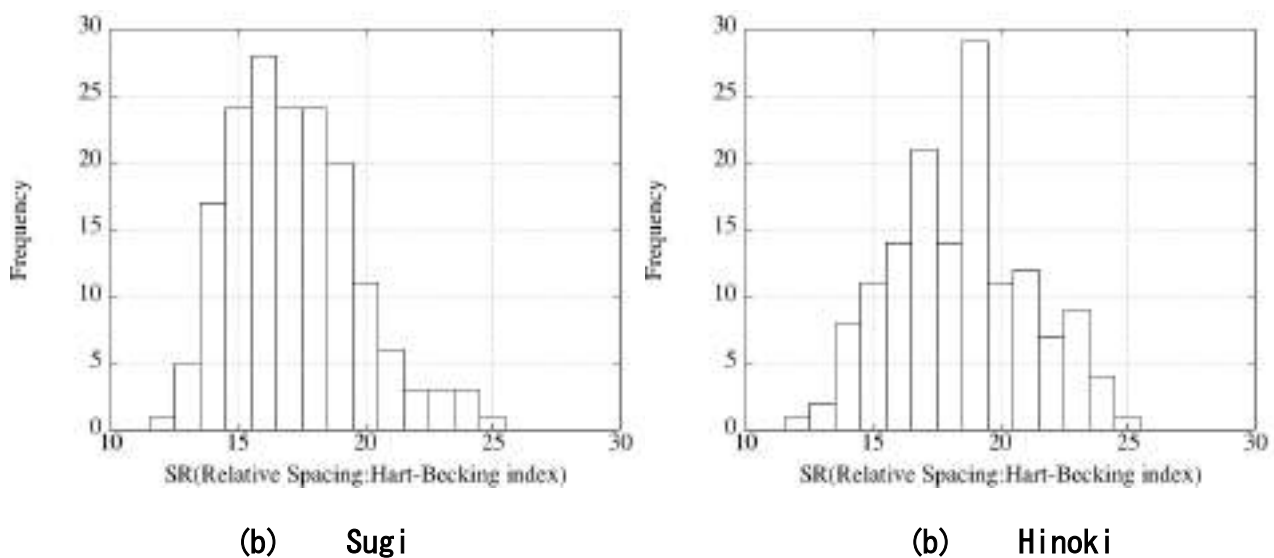


図 2-28 岐阜県林政部データから見る岐阜県内の樹種別相対幹距比の度数分布

次に、樹種も Sr も不明な場合を考える。樹種や Sr を入手するには、調査手間や解析手間がかかり、それは森林蓄積推定コストに反映する。収益を上げることすら容易でない林業では、森林蓄積推定にコストをかけられない実情もある。その場合、費用対効果を考え、国土地理院から無償で提供される航空レーザ・データから計量できる空間体積に、先に述べたスギ・ヒノキの蓄積比の平均値である 0.002622

を乗じて推定される森林蓄積でも、土地勘のない地域の森林資源の俯瞰には十分利用可能な情報と考える。

2.7 まとめ

本研究によって

- ① 樹木が占有する空間の体積に対する蓄積の比率（つまり蓄積比）は、樹種によって異なる。
- ② その比率（つまり蓄積比）は、相対幹距比の大小によって変化する。

ことを示すことができた。そしてこの知見を用い、樹種と相対幹距比を説明変数として蓄積比をモデル化した。その結果、航空レーザから計量する空間体積に蓄積比を乗ずることで、林分の蓄積を簡易に推定する手法が開発できた。

また、その知見の利用法として、樹種も相対幹距比も不明なときは空間体積に 0.0026 を乗ずれば、蓄積の見当がつき、さらに樹種や相対幹距比などが分かる場合には、それらを加味して蓄積比を調整すれば、蓄積の推定精度が向上することも示せた。本手法は、現地調査を行い現場単位で調整する方法や、高い解析技術力を要する単木材積を集計して蓄積を計算する方法などと比べ、現地調査もデータ解析技術も不要な広域の森林資源量の把握に有効な手段になり得るかと思う。

しかし、今回の調査で、多雪地域とそうでない地域では相対幹距比と形状比との関係に違いがあることが分かった。そのことから形状比を蓄積比の説明変数として組み込むことができれば、より正確な蓄積推定が行える可能性も示唆された。

今回 UAV によって樹冠形状を一箇所の林分 10 本をそれぞれ 4 方向で計測した。その結果、ヒノキは樹冠縦断形状が線形という経験知と異なる結果だった。これはサンプル数が少なかったために、本来のヒノキの平均的な形状とは異なる可能性もある。他の手法や他の現場でそうした樹形に関する知見を蓄積していけば、より蓄積推定精度を向上できるかもしれない。

近年レーザ計測技術は進展しており、現在流通している航空レーザデータは、2003 年から 2004 年にかけて取得しものとフットプリントサイズや、点密度が異なっている。また今後も変化していくことも想定される。こうしたことから、レーザ計測した機器が 2003・2004 年のときのものとは異なる場合は、機器やデータ取得方法などの違いによる森林空間体積の違いも見当せねばならないなど、厳密に考えれば、いろいろ考慮すべき点がある。

今後は、スギ・ヒノキ以外でも樹種を広げながら、蓄積比について検討を続けたい。また、蓄積比を森林の状況にあわせて適切に推定するには、現実的な樹種や相対幹距比を把握する必要があることから、それらの推定方法も検討していきたい。

3章 斜面方位と平均輝度に着目した半自動地形補正法の開発

3.1 背景・目的

2章で蓄積比を用いた森林蓄積推定法を開発したが、その手法を実用には、予め樹種や相対幹距比 (Sr) が既知であることが望ましい。こうしたとき樹種を特定する方法として、光学センサ画像解析が用いられることがよくある。しかし、起伏の激しい山岳地域で取得される光学センサ画像は、データ取得時の太陽高度・太陽方位の違いによって、地形の起伏に起因した影の影響を受けている (e. g. Ekstrand, 1996, Colby 1991, Vincini and Frazzi 2003)。そのため、そのような影響を含んだ画像を使った教師付分類、クラスター分析、セグメンテーションなどの結果には、影の影響が含まれることになる (Civco 1989)。

一般に森林を対象にした光学センサ画像を使ったリモートセンシングでは、土地被覆分類、植生分類が行われることが多いが、地形による影の影響を受けたデータを使うと、分類結果の精度は低下しがちである (Meyer et. al. 1993, Gu 1998)。更に季節が異なるデータを使った時系列解析では、取得時期によって光の強さや地形による影の影響が異なることから、単一時期の画像による解析よりも、更に影の影響を受けることになる (Hills and Sturm 1991)。

このような理由から、起伏の激しい地域で取得された光学センサ画像の解析では、データから地形の影響、すなわち影を除去する (以降、リモートセンシングデータから地形の影響による影の影響を除去することを地形補正と表現する) ことが重要となる (Conse et. al. 1993a, Proy 1989)。特に、日本の森林のほとんどは起伏の激しい山岳に成立しており、前述のように光学センサによって取得される画像には、地形による影の影響が強く反映されている。また、そうした画像を使った時系列解析では、太陽高度の違いに起因する地形による影の差異も含まれることになる。こうしたことから、日本における、特に森林域を対象としたリモートセンシング技術の活用場面では、画像から地形の影を除去することが重要となる。

また土地被覆分類、植生分類以外にも地形の影響の除去が必要な事案もある。例えば、2005年に京都議定書が発効したが、その3条3項では、日本を含む付属書I国にある国は、2008年から2012年の第一約束期間の二酸化炭素削減目標達成に利用できる吸収源として、1990年から2008年にかけてのARD (Afforestation, Reforestation, Deforestation) 活動の計量が求められた。それ以降もCO₂固定量の算出に当たり、ARD活動のモニタリングは継続して行われている。

このような、広範の樹種分布の把握やARD活動の把握では、リモートセンシングへの期待が高い (Rosenqvist et. al. 200; Yamagata et. al. 2002)。ところが、日本の森林は、地形が入り組んだ山岳に成立しているため、リモートセンシングによる植生把握やARD活動の抽出は容易ではない。そこでその為には、まず、画像から地形による影の影響を除去することが重要になる。

なおその際、利用可能な地形補正法は次の3つの要件を満たすことが望ましい。①地形補正処理を行う技術者による結果の違いがない (再現性)。②対象とする領域は最大で国土全域になる可能性がある

ため、広範囲のデータを一括処理することも視野に入れ、地形補正はほぼ自動で行える（自動処理）。③利用可能なデータはどのようなデータでも利用可能となるように、空中写真を含むより多くのセンサに対して適用可能である（汎用性）、の3点である。

既に開発されている各種方法ではこの3つの要件を満たしていなかったため、本研究によって、新たな地形補正法を考案して、その効果を検証した。

3.2 既往の地形補正法

これまで地形による影を除去する様々な方法が開発されてきた。それらの効果を比較した多くの研究がある (e.g. Teillet et.al., 1982; Meyer et.al., 1993; Riano et.al., 2003)。開発されてきた手法は大別すると、バンド比や統計的な手法によるものと、DEM (Digital Elevation Model) を使ったものの2種類に分けられる。後者のものは更に、太陽光と地形との関係の公式を機械的に適用して地形補正を行う Non-Empirical approach のものと、画像をサンプリングしながら公式のパラメーターを定めていく Empirical approach のものの2種類がある。

3.2.1 バンド比や統計値をベースにした方法

Band 比は早くから地形の影響を除去する方法として使われてきた (Lyon, 1975; Jensen, 1986; Holben and Justice, 1981)。そしてこれまで様々なバンド比や指標が提案されてきた (Tucker, 1980)。例えばランドサット画像から地形の影響を除去し植生の健康度を判断する指標に Band5/Band4 が提案されている (Rock et.al., 1986a; Rock and Vogelmann, 1986b; Vogelmann, 1988)。また主成分分析を使った手法なども提案されている (Conse et. al., 1993b)。これらの手法を使えば確かに地形の影響は少なくなる。しかし、被覆の違いが分かりにくくなったり、本来は意味をもつ画素の情報から意味が欠落したり (Colby, 1991)、単バンドしかないパンクロなどのセンサに使えるなどの問題がある。

3.2.2 DEM をベースにした方法

地形補正法でもっとも多く議論が費やされているのが DEM を使った地形補正法である (例えば Civio, 1989; Du, 1989; Smith, 1980; Teillet, 1982; Colby, 1993; Meyer, 1993; Vincini, 2002)。この DEM を使った手法には前述のように Non-Empirical approach と Empirical approach との二種類がある。

Non-Empirical approach は地形補正の公式を機械的に適用して影を取る方法である。この手法は Empirical approach と異なり、サンプリングを必要とせず、自動的に地形補正ができる手法であるため、どのようなシーンや森林に対してでも適用可能なら、一度に大量画像を自動処理することができ、今回設定した目的達成のための地形補正法になり得る。

この Non-Empirical approach の中で最も簡便な方法は、太陽光が地物に当たったときの光の反射の様子がランベルトモデルに従うとして地形補正を行うコサイン法である。この方法は、地物に太陽の光があたったとき、その反射は特定の方向に偏ることなく満遍なく反射すると仮定して考案されたものである。これは地形モデル (Digital Elevation Model) があれば地形補正できるシンプルな方法ではあるが、斜面にあたった光を補正しきれなかったり (Gu 1998)、斜面に対する光の入射角が大きければ過補正になったりし (Smith, 1980; Gu, 1998)、限られた地形条件を満たした場所でなければ有効ではない (Teillet, 1982; Justice and Holben, 1979; Smith, 1980) 問題がある。その原因は、地物に当たる光の反射はランベルトモデルのような単純なモデルでは言い表せないという指摘がされている (Coulson, 1966; Egbert 1972)。ところが、改良を加えればこれらの手法は十分に使えるとの報告もある (Proy, 1989)。しかし、いずれにしても現在のところ、簡便な方法であり理解も適用もし易いが、本

目的達成に使用できる手法ではない。

一方、汎用的に使える手法として SCS (Sun-Canopy-Sensor) 法が提案されている (Gu and Gillespie, 1998)。SCS 法は森林域で特に汎用的に使えるようにと、光と地表との関係だけでなく、光と樹幹表面との関係を加味した手法である。その効用を従来の手法と比較した研究があり (Vincini, 2003; Gu, 1998)、コサイン法よりも地形補正効果は高いという結果が報告されている。しかし、波長によって地形の影響の現れ方は異なるのに (Teillet, 1982; Deering, 1994; Shoshary, 1993; Vincini, 2003)、どの波長に対しても単一の式を適用する点で実情にあっていないという指摘もあり (Vincini, 2003)、これも汎用的に簡便に使用できる方法とは言い難い。

Empirical approach の手法の全ては、地形要因と輝度に関する理論式に画像サンプリングした実際のデータを当てはめ、理論式のパラメータを調整し、画像から影の影響を除去する方法である。その代表的な手法は月の表面の粗度の解析のために提案された Minneart 定数を使う手法である。その後、この手法は LANDSAT マルチスペクトルデータに適用され (Smith, 1980)、それ以降、改良されながら (Colby, 1991; Ekstrad, 1996) 使われてきた。この手法で使われている Minneart 定数 k は被覆の粗度を反映した指数 (Smith, 1980) と解釈されたり、BRDF を反映した指数 (Colby, 1991) と解釈されたりしている。そして、 k が 1 に等しいときには、この手法はコサイン法と同様の地形補正法となる。Minneart 定数 k の値は被覆によって、またバンドによって異なる (Richter 1997)。Minneart 法の効果については補正の効果を上げている研究 (例えば Colby, 1991; Meyer, 1993) も多いが、 k を導くための手法は、全て均一な被覆に覆われた画像ならば自動で k を求めることができるが、現実的にはそのような条件の画像はきわめて稀であり、被覆が均一と思われる箇所を画像からサンプリングして、 k を求めることになる。そのためサンプルのとり方によって k の値が異なるため、補正効果が安定していないうえ、自動処理が不可能であり、大量にデータを処理する必要がある本目的達成のための地形補正には使用できない。

Minneart 法と同じく、波長によって異なる係数を回帰式から求めて地形による影の補正量を決定する方法に C-Cosine 法がある (Teillet, 1982)。その効果は、単純なコサイン法や Minneart 法よりもよいという報告がある (Riano, 2003; Meyer, 1993)。さらにその後、Meyer (1993) の回帰モデルを改良した B-Cosine 法も提案された (Vincini, 2003)。この方法は、異方向性の強い光の波長域と等方向性の強い光の波長域にそれぞれ別のモデルを用意し、各画像に対して 2 つのモデルを適用し、優位なモデルをその画像における補正モデルとして採用するというものである。光学的関数を使用していないこの手法は、どの季節でも安定的な結果を出す (Vincin, 2003)、処理のプロセスは複雑である。本目的達成のための地形補正法としては、C-Cosine 法も B-Cosine 法も、Minneart 法と同様の問題を抱えており使用に向かない。こうした地形補正が複雑になる原因の主なものは、可視域と赤外域では大気の影響が異なり (Deering, 1994; Shoshary, 1993) 波長ごとに地形の影響の出方が異なる (Teillet, 1982) ことや、被覆によっても反射が異なる (Vincini and Frazzi, 2003) ためである。また、森林では林の林齢・樹

種・密度などによって、被覆としては同じ植生に属していてもBRDFが異なる(Gu and Gillespie, 1998)。こうしたことから、正確な補正をしようとするほど、手順は複雑にならざるを得ない。

そこで、国土の広い範囲を対象とした本目的達成のためには、画像への適応手順が簡単かつ適用効果があり、空中写真を含む様々なソースに対して適用可能となる、新たな地形補正法を開発する必要がある。

これまで述べたうちのDEMを用いた地形補正法の一覧を表3-1示す。

表3-1 DEMを利用する主な既往の地形補正法

Non-empirical		Empirical	
Lambertian method	$L_n = L \frac{\cos \theta}{\cos i}$	Minnaert method	$L_{\lambda_n} = L_{\lambda} \frac{\cos \theta}{\cos^k i \cos^k e}$
SCS method	$L_n = L \frac{\cos \theta \cos \alpha}{\cos i}$	c-cosine method	$L_{\lambda_n} = L_{\lambda} \frac{\cos \theta + c_{\lambda}}{\cos i + c_{\lambda}}$
		b-cosine method	$L_{\lambda_n} = L_{\lambda} \exp \{b_{2\lambda}(\cos \theta - \cos i)\}$ $L_{\lambda_n} = L_{\lambda} + (b_1 + x)(\cos \theta - 1)$
L_n :topographically normalized radiance		L_{λ_n} :topographically normalized radiance in band (λ)	
L :slope – observed radiance		L_{λ} :slope – observed radiance in band (λ)	
i :incident angle with respect to surface normal		k_{λ} :minnaert constant in band (λ) k_{λ} are derived from the following regression line $\log(L_{\lambda} \cos e) = \log L_{\lambda} + k_{\lambda} + k_{\lambda} \log(\cos i \cos e)$	
θ :sun zenith angle = incident angle for horizontal surface		c_{λ} :c-correction factor in band (λ), which are calculated as $a_{1\lambda} / b_{1\lambda}$ $a_{1\lambda}, b_{1\lambda}$ are derived from the following regression line $L_{\lambda} = a_{1\lambda} + b_{1\lambda} \cos i$ $a_{1\lambda}$:interception of the regression line $b_{1\lambda}$:slope of the regression line	
α :slope angle		$b_{2\lambda}$:b-correction factor in band (λ), which are derived from the following regression line $\ln L_{\lambda} = a_{2\lambda} + b_{2\lambda} \cos i$ $a_{2\lambda}$:interception of the regression line $b_{2\lambda}$:slope of the regression line	

3.3 素材と方法

3.3.1 仮説設定と地形補正法開発の方法論

まず、地形補正法を検討する前に、地形によって生ずる影（すなわち明るさの変化）がどのような性質なものか、太陽高度・斜面方位・地形と影との関係を考えてみる。それにあたり、それらの単純なモデルから、少しずつ複雑なモデルを想定して、地形と影との関係を検討してみた。

いま、表面が同一素材でできた円錐があったとする。そして、その円錐に真南から太陽光を当てたとする。このとき円錐表面の明るさは図 3-1-(a-1)のようになると考えられる。その円錐を真上から撮影すれば、できあがる画像は、図 3-1-(a-2)のようになる。この画像の中の明るさと斜面方位との関係を精査すれば、円錐表面と明るさの間には、太陽光が円錐に対して垂直に当たっている真南部分が最大の明るさになり、光が東西方向に回り込むほど徐々に暗くなり、真北の斜面が最も暗くなることが想定できる。こうした関係を縦軸に光の強さ、横軸に円錐の斜面方位をとり、円錐の表面の各斜面方位の平均的な明るさをとると、図 3-1-(a-3)のようになると考えられる。

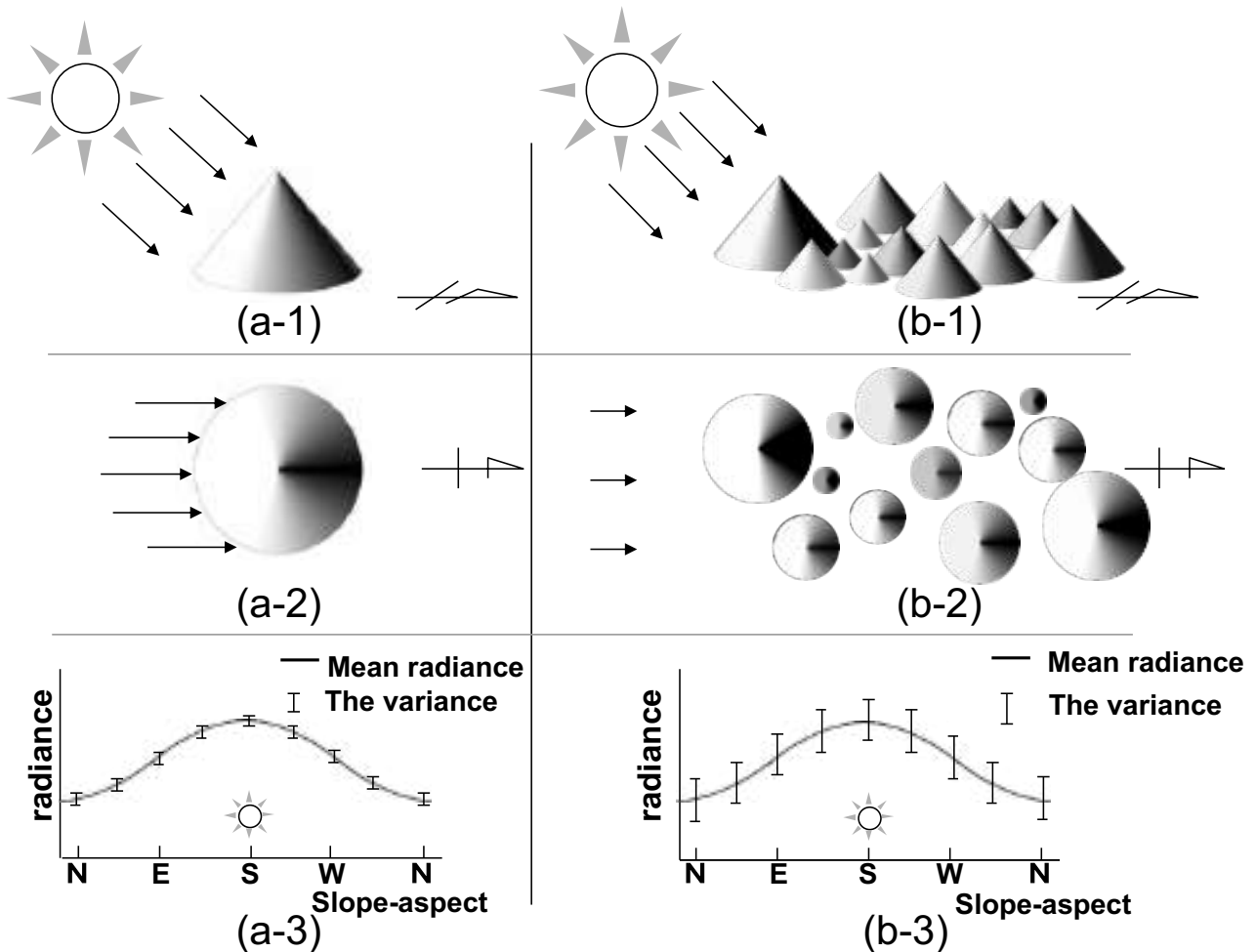


図 3-1 山岳地帯を単純化したときの光学センサ画像の輝度と斜面方位との関係

次に、一つの山を円錐と単純化してみる。そして起伏の激しい山岳地帯を様々なサイズの円錐が複雑に入り組んで乱立する図 3-1-(b-1) のような造形だと見立ててみる。この単純化した円錐の山々に、真南から光を当て、真上から撮影すると、ある円錐が別の円錐の影になり、円錐にあたる光が円錐毎に異なり、図 3-1-(b-2) のようになると思われる。このとき、全ての円錐表面の斜面方位別に明るさを集計し、縦軸を明るさ、横軸を斜面方位にとったグラフを作成しその傾向を確認すると、どの円錐も同一素材でできていれば、そのグラフは図 3-1-(a-3) よりも明るさのバラツキは大きくなるものの、同じ傾向を示し、図 3-1-(b-3) のようになっていると考えられる。

こうした関係を実データで検証し、その結果をモデルとして表現することができれば、円錐表面の明るさを斜面方位によらず揃えることも可能となり、新たな光学センサ画像の地形補正法になり得ると考えられる。

これらを踏まえ、光学センサ画像に含まれる地形による影と画像の輝度について、次の仮説を設定した。

【仮説】 起伏の激しい山岳地域の光学センサによるリモートセンシング画像の斜面方位と輝度との関係を調べてみると、斜面方位と画像の明るさとの関係は、太陽入射方位角にあたる斜面の明るさがもっとも明るく、その方位から離れば離れるほど暗くなってゆき、太陽入射方位角の反対の斜面方位でもっとも暗いという関係がある。

今回、実際の光学センサ画像と DEM とを用いて上記仮説を検証し、実データが仮説通りであれば、斜面方位毎に異なる明るさを、同じ明るさに揃えるアルゴリズムを考案する。

3.3.2 対象地

現地へのアクセスの観点及び、現地を頻繁に訪れているため当該地の植生の状況、森林管理の状況、地形の状況などが頭に入っていたこと、更には森林所有者への森林への立ち入り許可などについて別件で既に得られていたことから、Study Site は岐阜県郡上市美並町上田の私有林を使用した。Study site の位置を図 3-2 に示す。ここは日本のほぼ中央に位置する、北緯 35° 40′ 東経 136° 56′ 周辺で、標高は約 100m~400m、気候は温暖帯である。この周辺の森林は、岐阜県の典型的な樹種・地形構成で、急峻な山地に生育する人工林（スギ・ヒノキ）が全体の 70%以上を占め、残りはかつて薪炭林であったソヨゴ・コナラ・アラカンの生育する広葉樹林となっている。人工林は林齢がほぼ 20-50 年にある。

斜面方位と明るさの仮説の検証に使用した範囲は 5.5km² である。

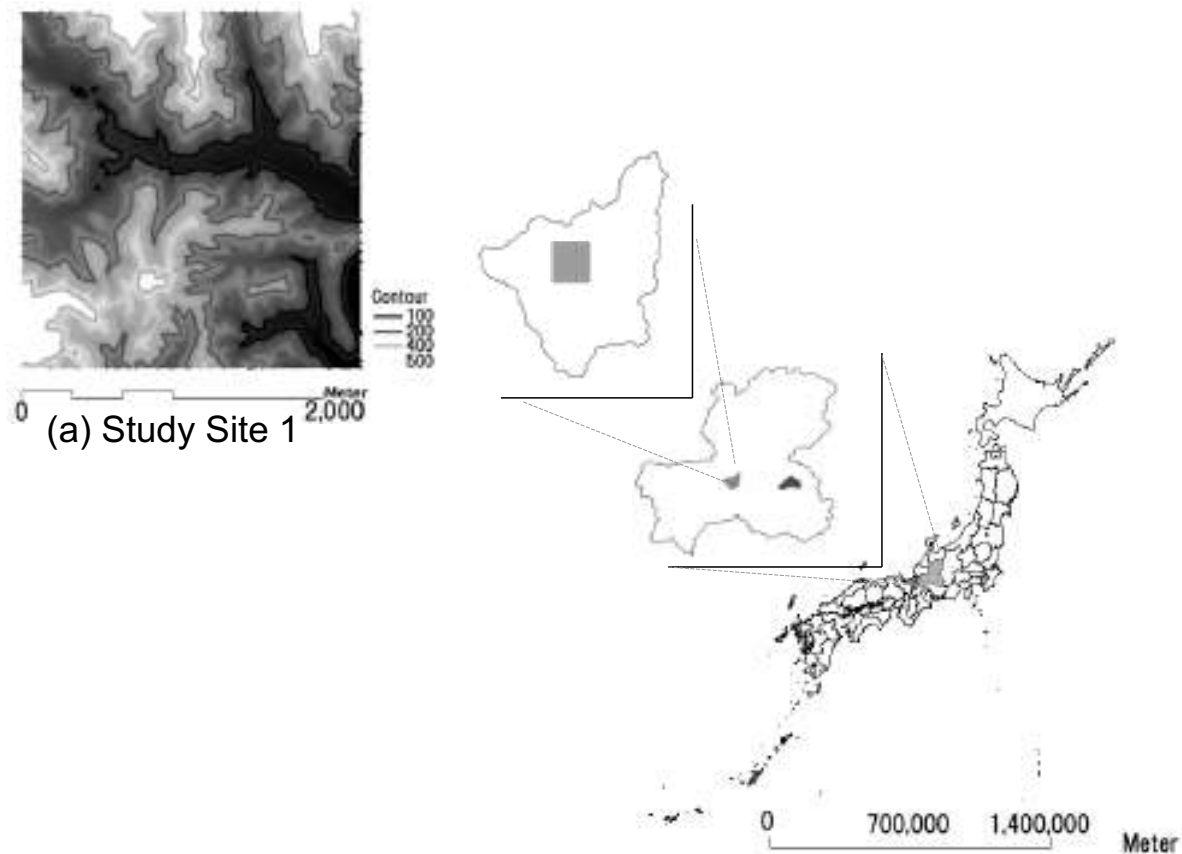


図 3-2 テストサイト：岐阜県郡上市美並町

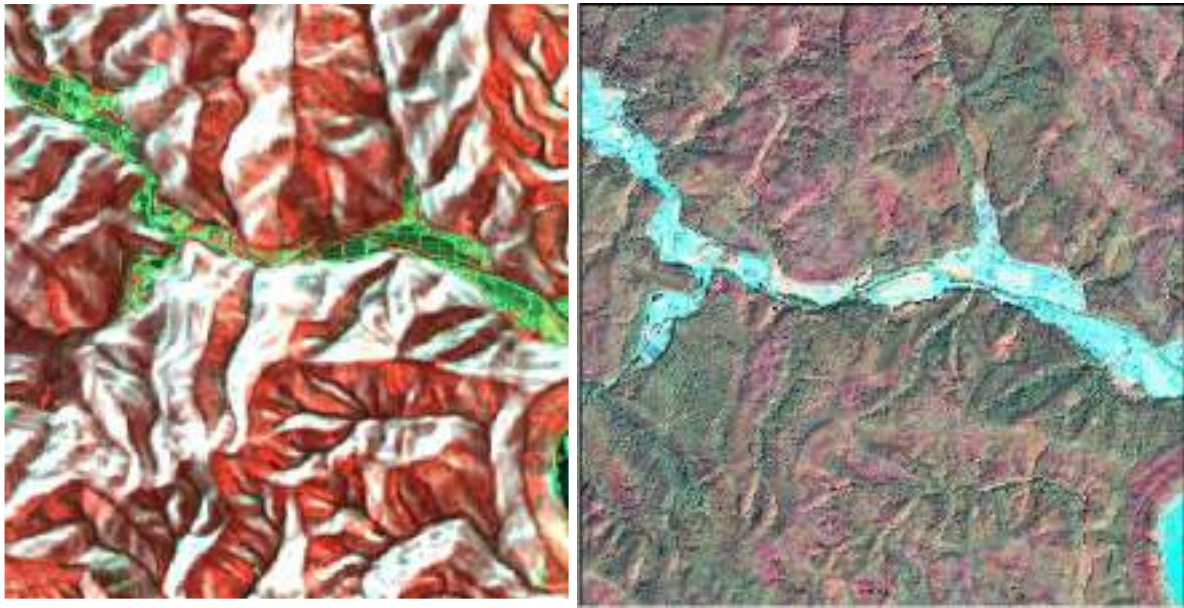
3.3.3 試料

・衛星画像

斜面方位と明るさとの関係を調べる光学センサ画像は、SpaceImaging 社の IKONOS のマルチスペクトル画像を使った。IKONOS は 1999 年に打ち上げられた商用の高分解能衛星で、地上分解能 4m のマルチスペクトルセンサ (0.445-0.516 μm 、0.506-0.595 μm 、0.632-0.698 μm 、0.757-0.853 μm) と、地上分解能 0.8m のパンクロマチックセンサ (0.45-0.90 μm) を搭載した光学衛星である。Landsat などの 1970 年代から登場している衛星には、先に述べたような様々な地形補正法が開発されてきたが、運用の浅い IKONOS のような高分解能衛星は、Landsat と比べて利用実績が少なく、どのような地形補正法が効果的か不明な点も多い。実際著者は、この IKONOS 画像に対して Cosine 法、Minneart 法を試したが、図 3-3 のように明らかに不調であった。そこで本仮説の検証には、IKONOS のマルチスペクトル画像を使いながら、まずは IKONOS 画像から地形の影響による影の除去を検討することにした。

また IKONOS を使った別の理由として、地上分解能が 4m の IKONOS 画像は、これまで地形補正法の開発・検証で使われてきた Landsat よりも細かい地形の起伏が画像に反映されているため、斜面方位と輝度との関係が明確になりやすいこと、また、幾何精度も一定精度以上のものが配布されているため、DEM との位置ずれも少ない。そういった理由もあり、IKONOS を用いた。

そして、IKONOS で利用した画像の取得時期は、図 3-4 の 2 時期のものを用意した。衛星画像への地形



(a) Result by Cosine method

(b) Result by Meannert method

図 3-3 既存地形補正法の適用結果

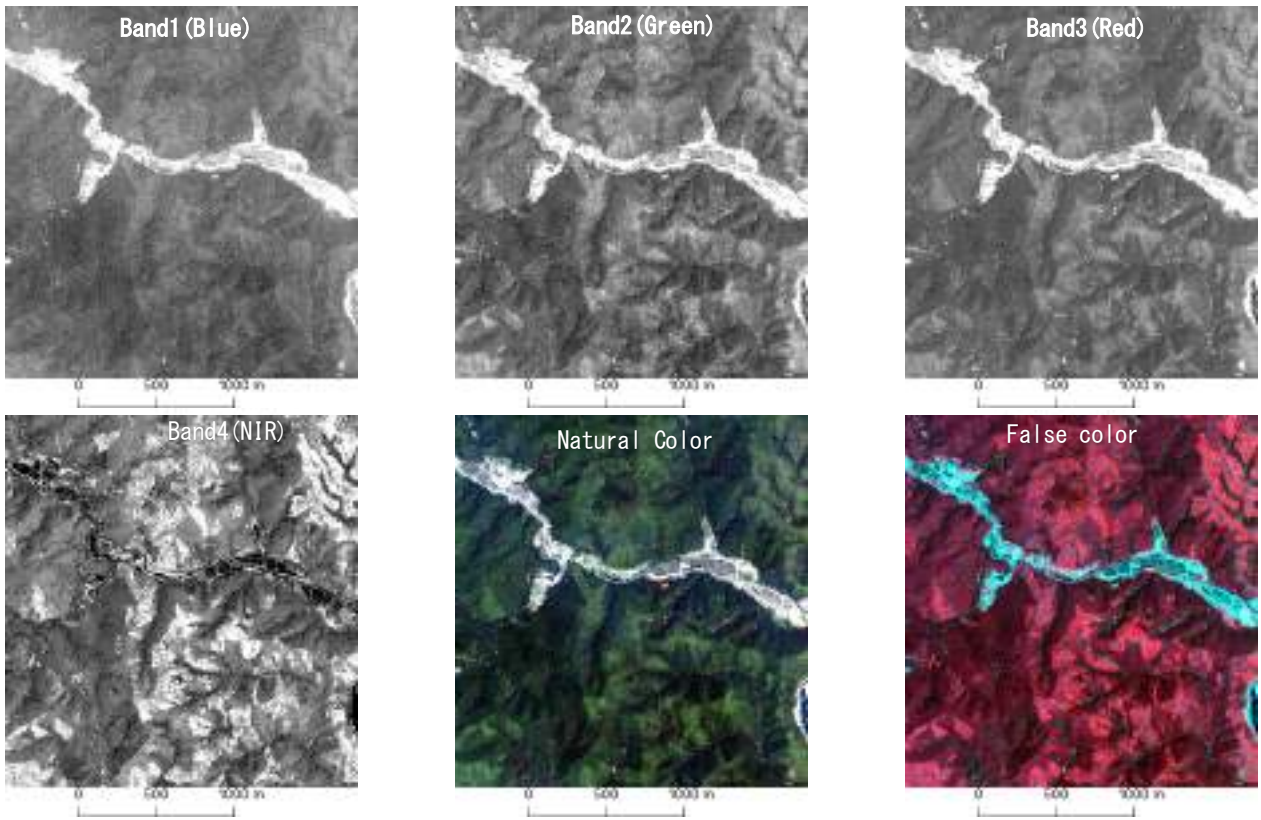
の影響は、太陽高度が低ければ多く、高ければ少ない。このように太陽高度と画像への地形の影響には密接な関係があるため、太陽高度の異なる秋と春の2つの季節の画像を使用し、斜面方位と輝度との関係を調べることにした。

秋画像は2001年9月16日午前10:46に撮影されたものを使った。そのときの太陽光入射方位角は 153.32° 太陽高度は 54.24° であった。一方、春画像は2003年5月21日午前10:50に撮影され、太陽光入射方位角は 136.24° 太陽高度は 69.84° のものを使用した。太陽高度が低い秋画像は太陽高度が低い春画像よりも地形の影響による影が顕著である。

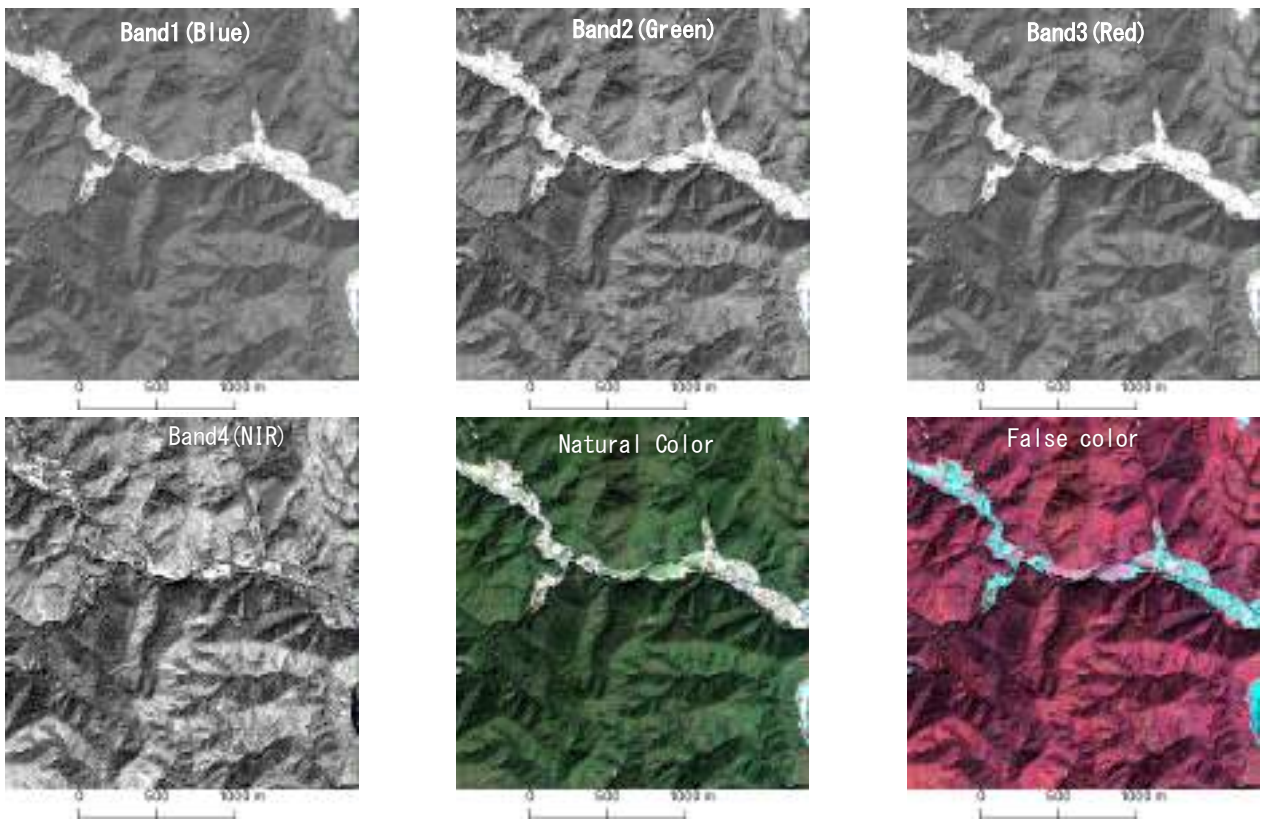
なお画像は、幾何精度が $\pm 3.5\text{m}$ (1σ)であるデジタルオルソ・ライトを使用し、それぞれの画像はスペースイメージング社HP (<http://www.spaceimaging.com/products/ikonos/spectral.htm>)の公式を使いDN値から輝度へ変換した。

・DEM

斜面方位の計算には、既存の数値標高モデルを用いた。用いた数値標高モデルは、北海道地図株式会社のGISMap Terrainである。GISMap Terrainは1/25,000地形図の等高線をベクトルデータとしてデジタル化し、その後10mの空間分解能のラスタ画像として出力したものである。この数値標高モデル(以後DEM)を、解析で使用したソフトウェアPCI社のGeomatica Ver. 9.1.7の都合上、Bilinear convolutionのリサンプリング法を使いIKONOS マルチスペクトルデータの空間分解能4mに合わせジオコーディングした。このDEMからGeomaticaのアルゴリズムを使い、斜面方位を計算した。なお、斜面方位は解析の都合上16方位のクラスに分けた。



May21,2003 AM10:50 Azim May21,2003 AM10:50 Azimuth 136.24° ,



Sept16,2001 AM10:46 Azimuth 153.32° , Elevation Angle

図 3-4 用いた IKONOS 画像 (2 時期)

3.4 結果

3.4.1 斜面方位と輝度との関係

先に述べた、山を単純な円錐の造形に見立てた【仮説】では、円錐は均一な表面でできていると考えた。いま画像全体の斜面方位と輝度との関係を、実際の複雑な山岳に位置する森林を対象に調べるが、なるべくこの仮説に近い状態で検討するため、調査対象となる被覆は、なるべく均一であることが望まれる。被覆が異なれば反射特性が異なり、太陽入射角と斜面方位以外の部分が輝度の明暗に影響するからである。そこで、樹種や林齢や樹高のバラツキや樹冠形状の違いによる光の反射の違いが山岳の森林内にも様々あるが、それら森林内の輝度のバラツキは、道路・水域・田・コンクリート・住宅等の非森林の土地被覆との違いに比べたら微細なものである。従って、ここでは、緑域は均一な被覆であると考ええることにした。

そのため、斜面方位と輝度との関係を調べる前に、まず画像から緑域を抽出する必要がある。この緑域を把握するために、近赤外波長、赤波長帯のバンドを使い、緑域を表す指標として一般に使われている NDVI を、IKONOS のバンド 4 と 3 から計算し、衛星画像を目視しながら緑域と思われる閾値を選び、その後、緑域として抽出された画素の斜面方位と輝度とを調べ、図 3-5 のようなヒストグラムを作成した。その結果、次の 3 点が明らかになった。

- ① 各グラフは波長の如何にかかわらず、画像撮影時の太陽方位入射角近辺をピークにした上に凸の形をしている。
- ② 波長が長くなればなるほど凸はきつくなる。
- ③ 太陽高度が低い画像ほど（秋画像）凸がきつい

①から、Study site では、斜面方位とその斜面方位の平均輝度との関係は、仮説で考えたような山を円錐と見立てたシンプルなモデルと同様に考えても問題ないようであることが分かった。

②から、波長毎に地形の影響の現れ方が異なることが示された。今回の処理では大気補正をしていないが、このことがその大きな要因の一つと考えられる。一般に大気を光が通過するとき、大気中の水分やチリなどによって光はレイリー散乱の影響を受ける。レイリー散乱では、波長が短い光ほどその影響を強く受け、浸透性の強い波長の長い光ほどその影響を受けにくい。また大気中の水分量が多ければレイリー散乱の影響が強くなる。一方、大気中の水分量が少なければレイリー散乱 (Jeensen, 1995) の影響は少なくなる。これは、短い波長は地形の影響が反映されにくく（代わりに大気の状態の影響を受けている）、長い波長は地形の影響が反映されていることを意味している。こうしたことから、大気補正をしていない画像を用いた各種指数やバンド比は、図 3-5 で分かる凸のきつい長い波長の影響を強く影響を受けるため、各種指数やバンド比は正確には地形の影響を取り除く手段としては使えないことが分かる。また Non-Empirical モデルのコサイン法や SCS 法のように、波長によらず画一的に補正量を決めてしまうモデルも正確には地形の影響を取り除く手法にはなり得ないことが分かる。

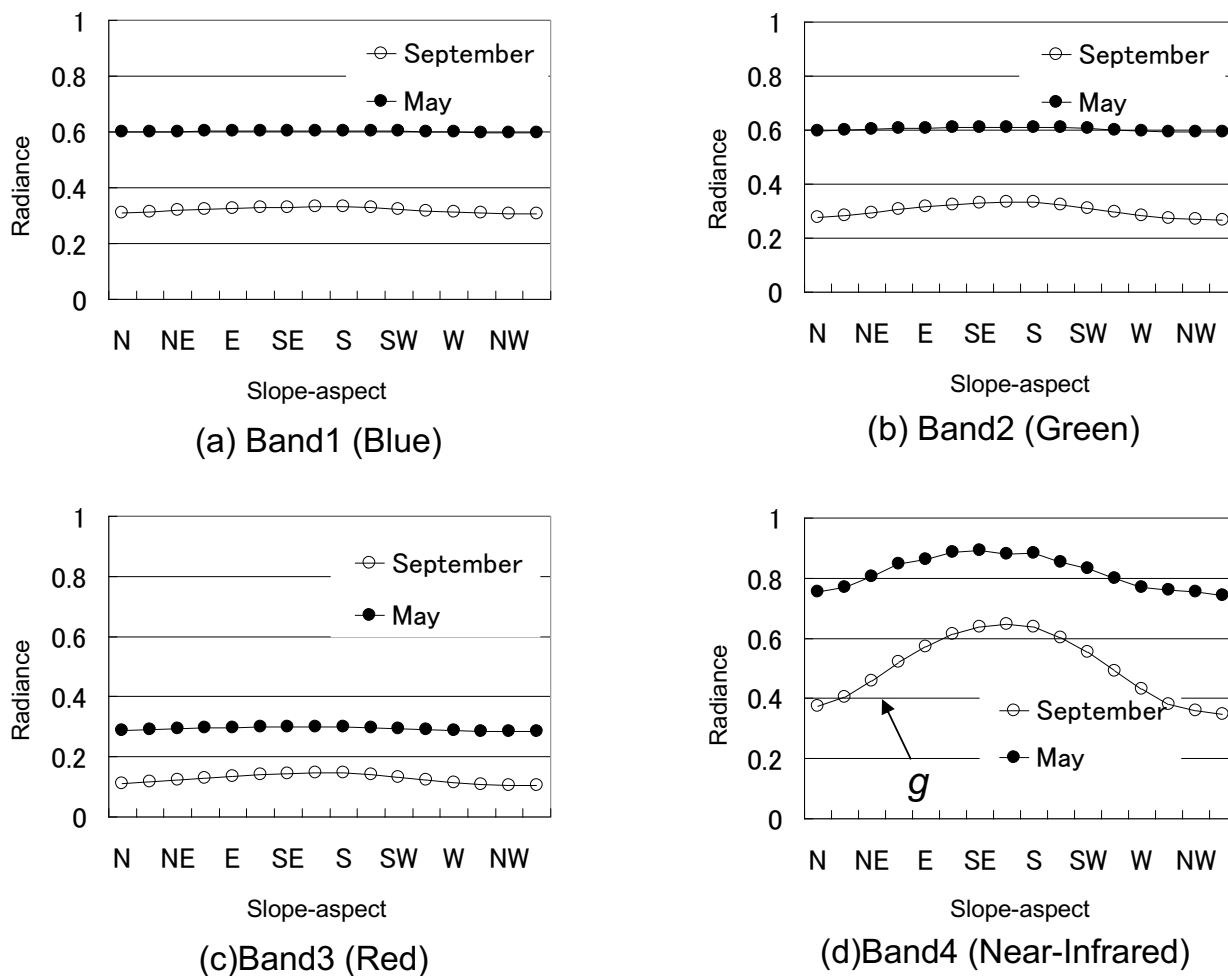


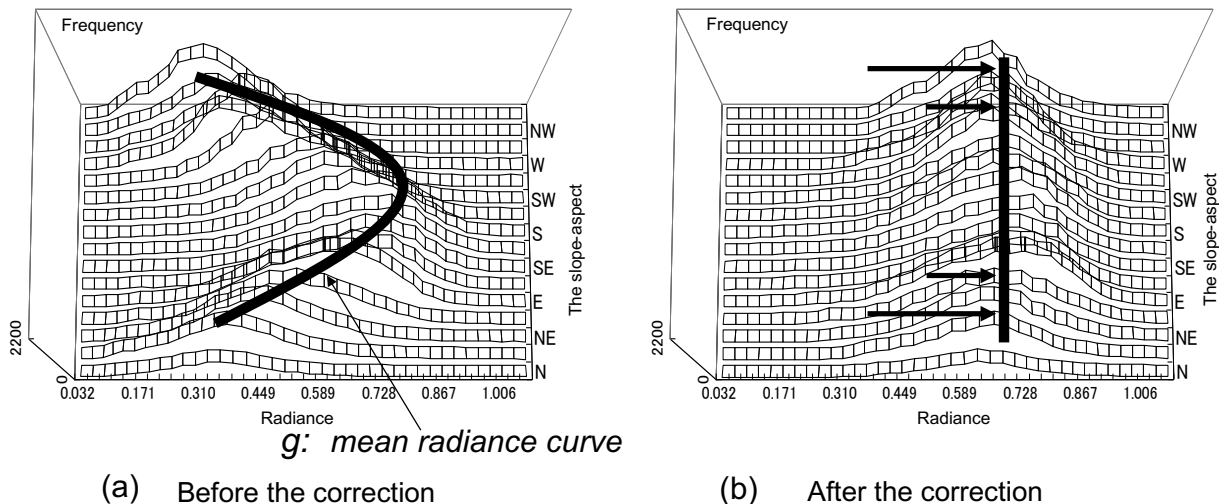
図 3-5 IKONOS 画像の斜面方位と平均輝度との関係

③は当たり前のことであるが、太陽高度が低ければ低いほど影の影響が強くなり、画像に反映されるうえ、地形+樹冠表面凸凹（今回は樹冠表面の凸凹は未評価だが）の影響により、画像中に影の要素を含んだ画素が多くなることを示している。

3.4.2 半自動地形補正のアルゴリズム

3.4.1 で明らかになったように、対象地の IKONOS マルチスペクトル画像の斜面方位と輝度との間には、先の仮説で設定したように、バンドや季節によって違いはあるものの、太陽入射角の斜面方位がもっとも明るく、北に回り込むに従って暗くなっていくという一定の関係があった。この関係をさらに詳しく検討する。

例えば斜面方位と平均輝度との関係を示した図 3-5(d)の曲線 g は、Y 軸に斜面方位、X 軸に輝度、Z 軸に輝度の頻度をとって画像中の斜面方位と輝度との関係を示した図 3-6 の曲線 g と同等のものである（図 3-6 では、ある斜面方位のときの輝度をヒストグラムで表現し、図 3-5 ではある斜面方位のときの輝度を平均値で代表して表現している）。



The brightness of every slope-aspect is adjusted to the brightest slope-aspect by adding the difference of the mean radiance of each slope-aspect.

The relation between radiance, slope and frequency on 16 Sept '05 IKONOS image in band4 (Nir-infrared)

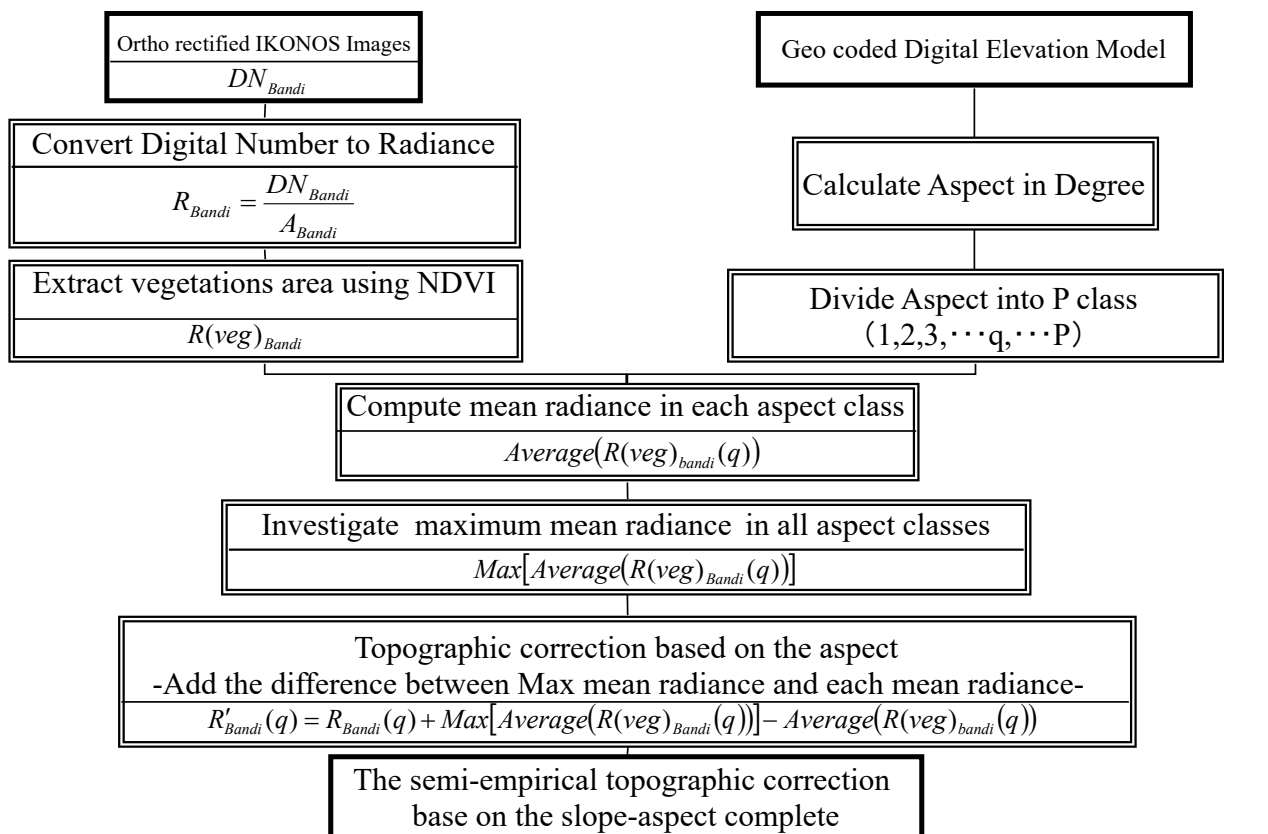
図 3-6 半自動地形補正法のデータ処理処理 (IKONOS Sept16, 2001 Near infrared)

図 3-6 に示すよう、画像全体の明るさは、衛星画像が撮影されたときの太陽光入射角近辺となる斜面方位が最も明るく、そこから 180° 回り込んだ斜面方位が最も暗くなっている。これは仮説で考えたように、輝度と斜面方位は、複雑に入り組んだ山々でも円錐の明るさと斜面方位との関係と同じと考えられることを示している。

従って、画像から斜面の影響を取り除くということは、図 3-6-(a)の斜面方位別の輝度の違いをなくすことに他ならない。例えば、最も明るい斜面方位の平均輝度と他の斜面方位の平均輝度を一致させるように各斜面方位の輝度をオフセットすれば、斜面方位ごとに明るさが異なるという現象は解消される。つまり地形による影の影響が取れるということになる。

以上より、図 3-6-(b) に示すように、全ての斜面方位別の平均輝度を最も輝度の高い斜面方位の平均輝度に合わせれば、画像から斜面の影響を取り除くことができると考えられる。具体的な手順を図 3-7 に示し、その適用法を以下に述べる。

- 1 IKONOS マルチスペクトル画像とそれに対応する DEM を用意する
- 2 IKONOS マルチスペクトル画像の画素値を輝度に変換する。
- 3 DEM から斜面方位を計算し、計算された斜面方位 (0-360°) を P 個の階級に分け、1 から P の画素値を持つラスタ画像を作成する。



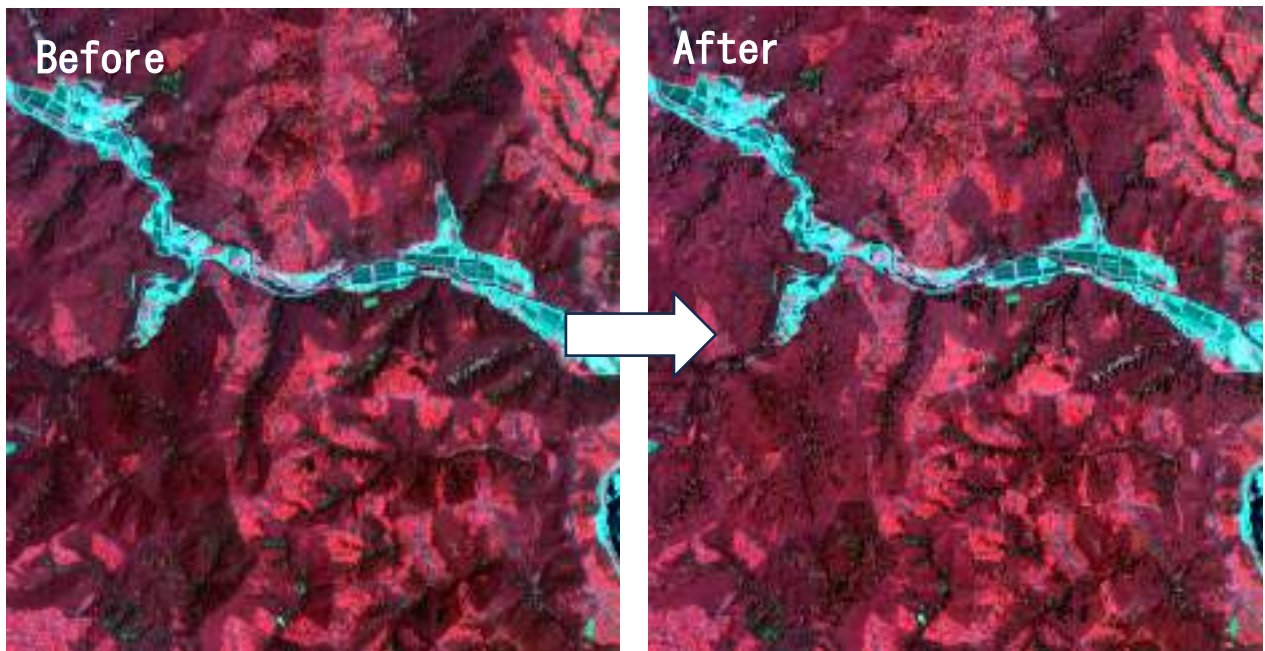
DN_{Bandi}	Digital number in band i
A_{Bandi}	In - Band i radiance calibration coefficient
$R(veg)_{Bandi}$	Radiance on vegetated area in band i
$Average(R(veg)_{bandi}(q))$	Mean radiance at aspect class q in band i
$Max[Average(veg)(R_{Bandi}(q))]$	Maximum mean radiance thorough all aspect classes in Band i

図 3-7 半自動地形補正法の処理フロー

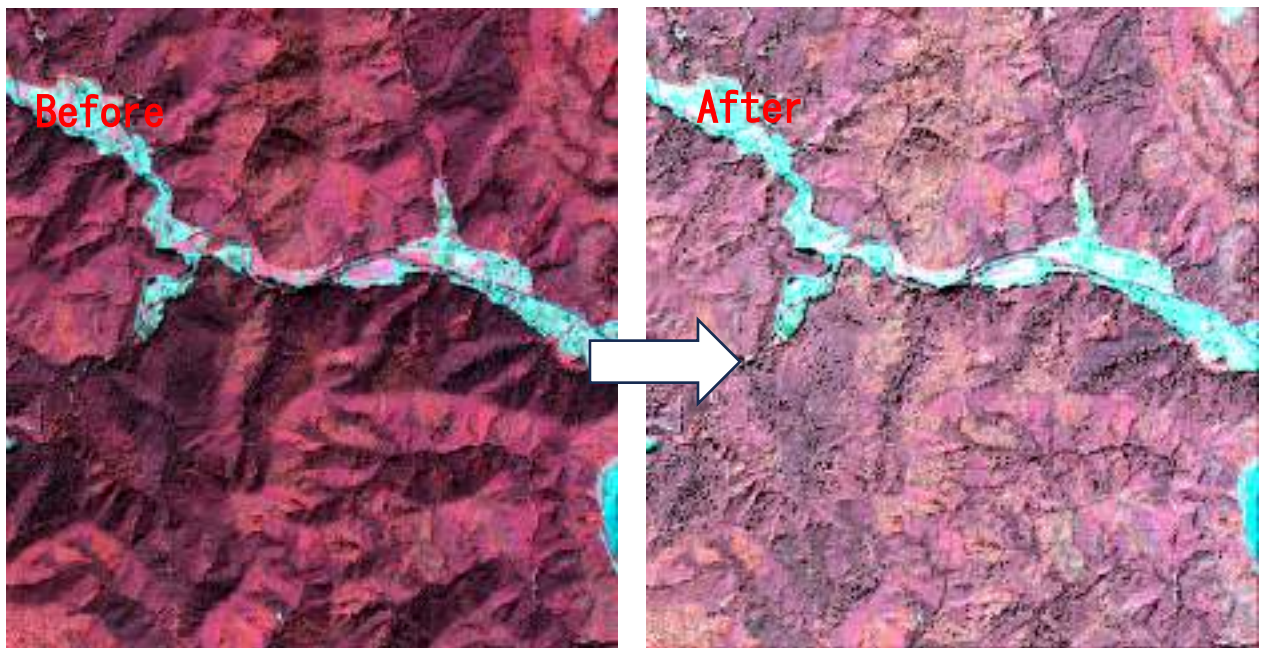
- 4 光学センサ画像の中から、緑域を抽出する (NDVI を使って目視で緑域を抽出)。
- 5 抽出された緑域を、3 で作成した 1 から P の斜面方位毎にそれぞれ対応する緑域の輝度を調べ、斜面方位毎の平均輝度を算出する。
- 6 最大値の平均輝度を持つ斜面方位を選出する。
- 7 各斜面方位の平均輝度と最大平均輝度となった斜面方位との差を算出する。(斜面方位階級ごとの輝度オフセット量の決定)
- 8 IKONOS 画像の輝度値を、対応する斜面方位階級毎に 7 のオフセット量を加え、輝度の補正をする。

3.4.3 IKONOS 画像への地形補正結果

このアルゴリズムを、P を 16 とし、実地の画像に適応したところ図 3-8 の結果を得られた。アルゴリズムを適用するのに必要なパラメータは、NDVI による緑域抽出の閾値と割約する斜面方位の数だけで、画像から地形による影の影響が季節を問わず除去されていることが分かる。



Mar. 21 '03 IKONOS Multispectral false color



Sept. 9 '01 IKONOS Multispectral false color

3-8 IKONOS 画像への半自動地形補正の適用結果

今回 NDVI を使って緑域を抽出したが、NDVI の閾値の違いによる補正効果の違いを図 3-9 で確認した。NDVI の閾値の多少の違いは、全体にそれほど影響を与えていなかった。また図 3-8 では、斜面方位を 16 階級にしたが、これも階級数別に補正の効果を図 3-10 のように確認したが、16 階級以上なら、できあがる画像に差はほとんどなかった。

このような状況を考慮すると、各パラメータは所与のものとも考えることもでき、DEM さえあれば、ほぼ全て自動で処理が可能である。

この簡便な方法で、視覚的には春・秋の画像とも、地形による影の影響が除去できた。

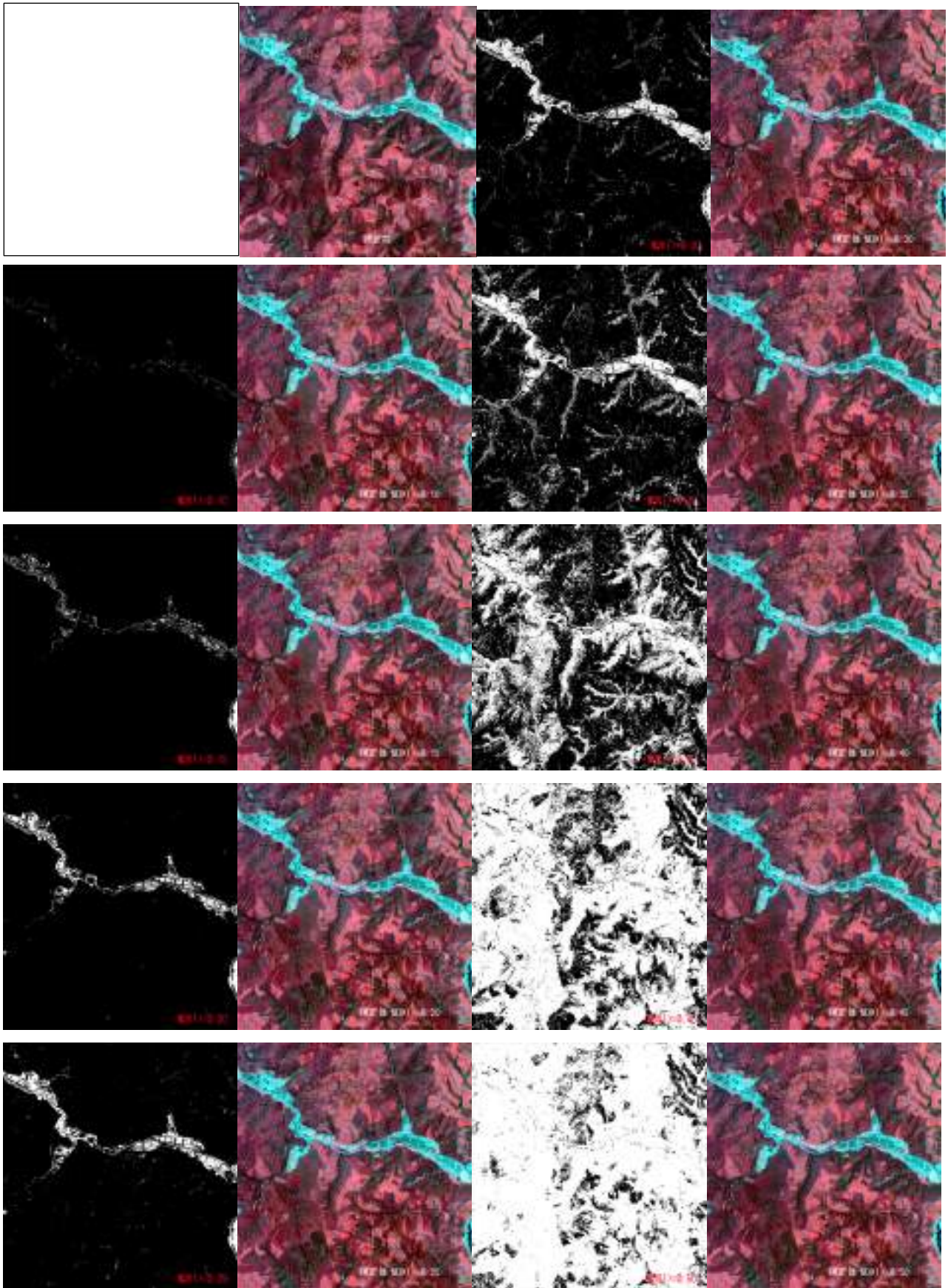


図 3-9 NDVI の閾値の違いによる緑域抽出状況の違いと、緑域の違いによる地形補正効果の違い
 黒が图中 NDVI の閾値によって緑域としたエリア

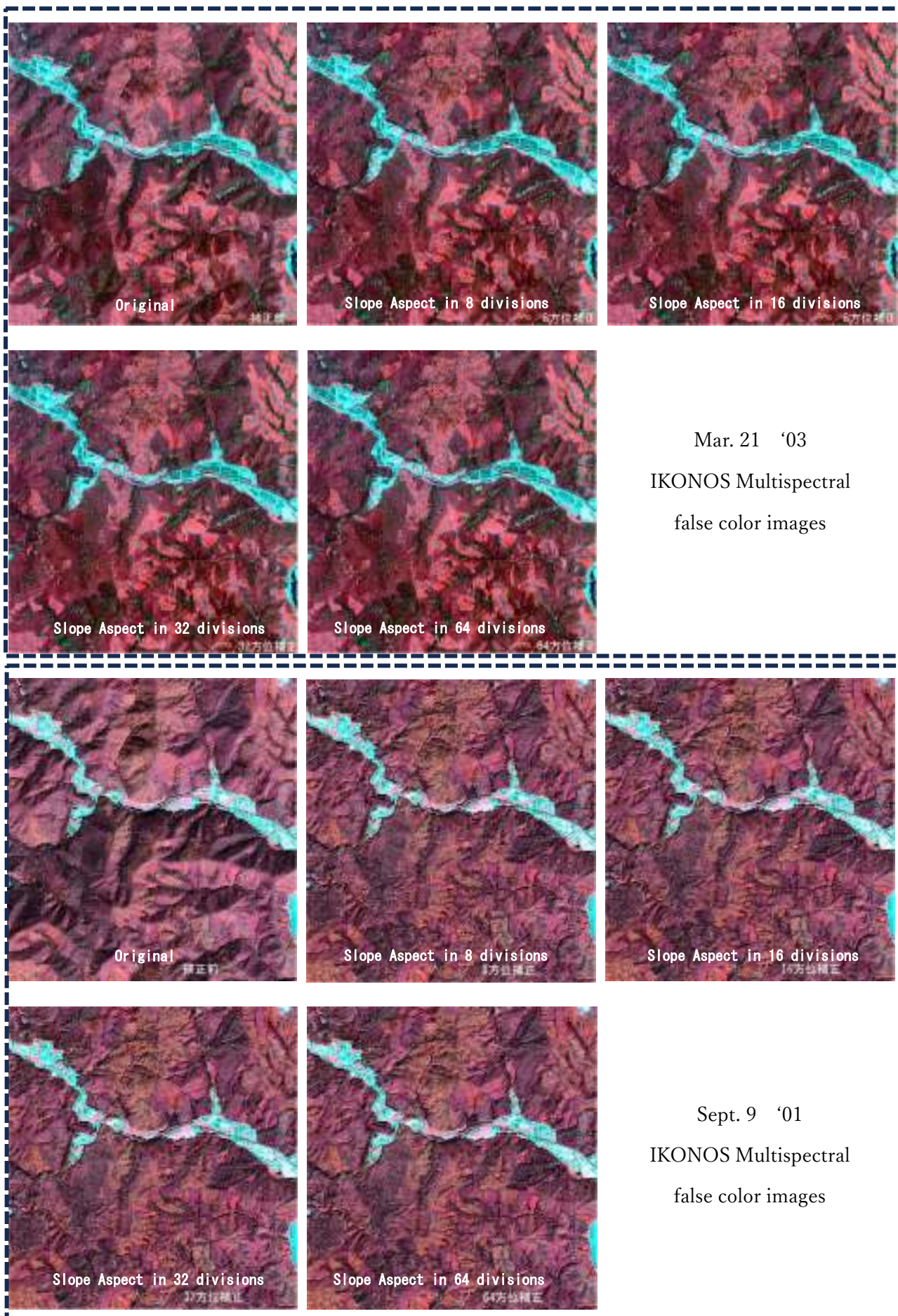


図 3-10 斜面方位の括約数と地形補正効果の比較

3.5 効果の検証

今回、IKONOS マルチスペクトル画像から、地形による影の影響を除去するアルゴリズムを開発したが、このアルゴリズムの適用範囲は Study site に限り IKONOS で適用可能だった可能性もある。地上分解能やセンサ特性が異なれば、地形の影響の出方も異なることも考えられるため、このアルゴリズムの汎用性を確認するため、同地域他センサ・他地域同センサ・他地域他センサの画像に適用し、その効果を確認した。

3.5.1 ASTER 画像の場合

同じ Study Site で、異なる光学センサによって取得された画像を用い、斜面方位と平均輝度との関係を調べた。用いた光学センサは IKONOS とほぼ同じ時期に打ち上げられた地上分解能 15m の可視光(緑・赤)、近赤外のセンサを搭載した地球観測衛星 Aster の画像である。画像は、2003 年 9 月 19 日取得(太陽高度 54.1° 、太陽入射方位角 160.5°)の初秋の画像、2000 年 7 月 10 日取得(太陽高度 70.7° 、太陽入射方位角 131.2°)の初夏画像、2001 年 4 月 6 日取得(太陽高度 58.1° 、太陽入射方位角 154.3°)の春画像の 3 点である。

赤と近赤外バンドを使い NDVI を算出後、それを用いて緑域を抽出し、各緑・赤・近赤外バンドの季節毎に斜面方位と輝度との関係を調べた。結果は図 3-10 の通りであった。センサが異なる ASTER 画像で

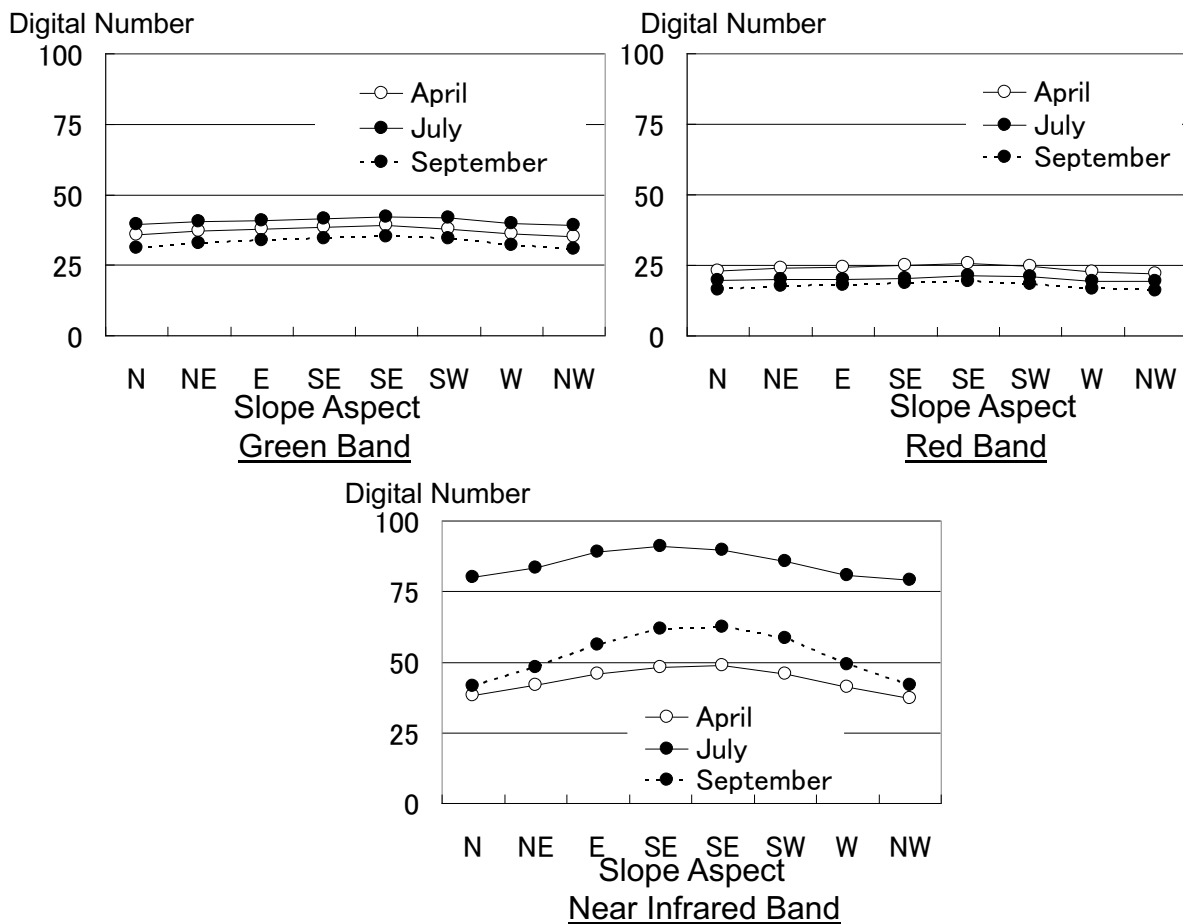


図 3-10 ASTER 画像における斜面方位と平均が措置との関係

も、IKONOS 画像で見られた①各グラフは波長の如何に問わず画像撮影時の太陽方位入射角近辺をピークにした凸の形をしている。②波長が長くなればなるほど凸はきつくなる。③太陽高度が低い画像ほど(秋画像)凸がきつい、の3点は、同じ傾向を持つことが分かった。従って、本アルゴリズムは同地域ならば、他センサでも適用可能だと考えられた。

3.5.2 地域を変えた場合 岐阜県東白川村のケース

起伏・被覆が異なる他地域で、本アルゴリズムの適用を検討した。対象にしたのは流域が異なる(前述岐阜県郡上市美並町は長良川流域)緯度 $35^{\circ} 38'$ 経度 $137^{\circ} 20'$ 、標高 260m~ 1130m の岐阜県東白川村(飛騨川流域)周辺約 100 km²である。図 3-11 にその位置を記す。

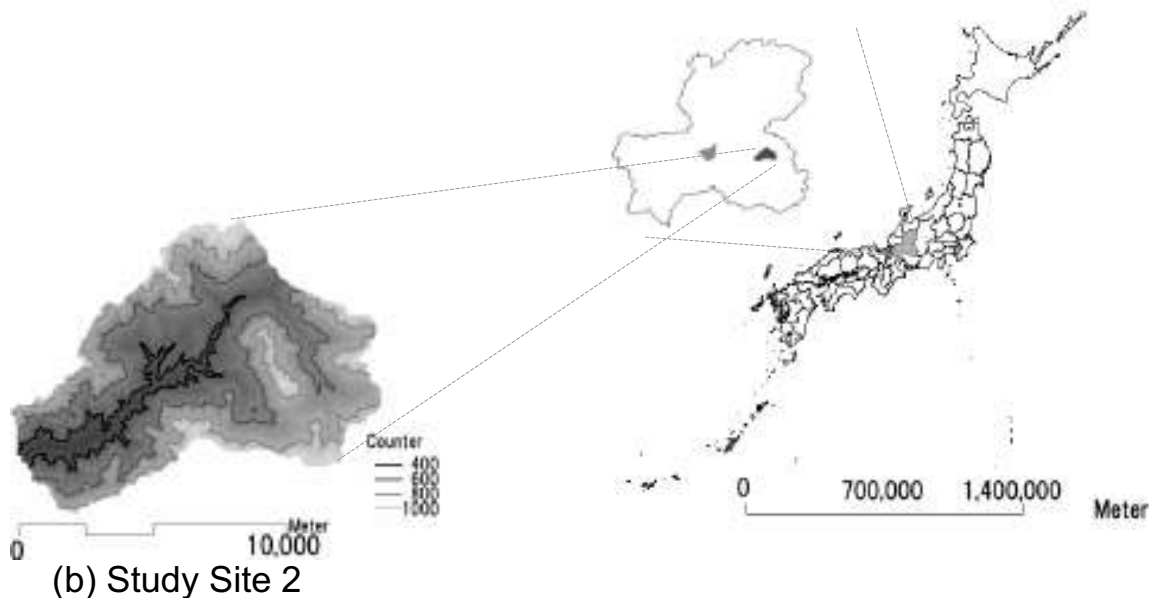
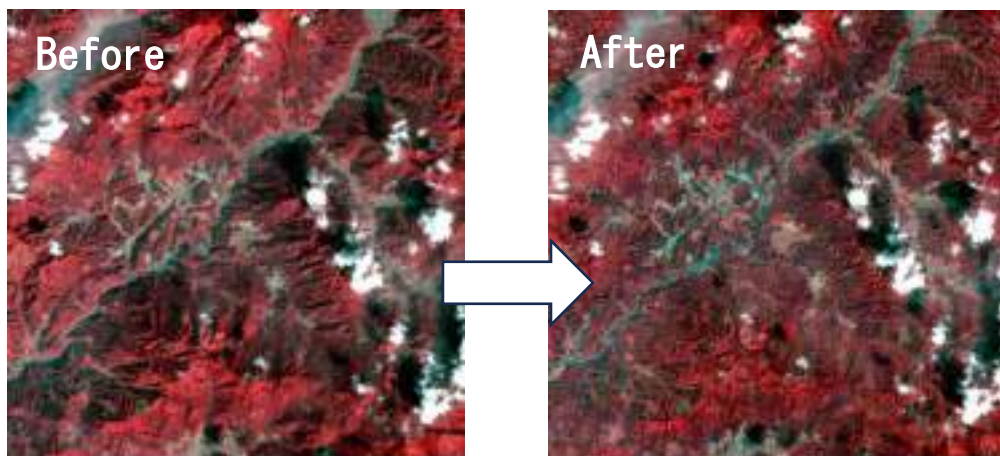


図 3-11 検証用テストサイト 2 : 岐阜県東白川村

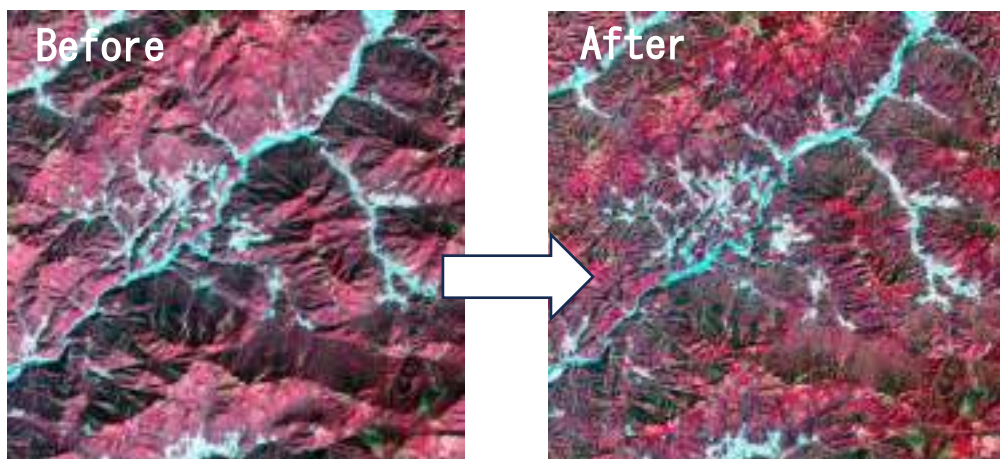
まず、美並町のケースと同様 IKONOS に対して適用した。その結果、美並町と同様の視覚的効果が確認できた。

次に異なるセンサ画像に対して適応を試みた。用いた画像は起伏の激しい当該地で太陽高度が低い時期に取得された LANDSAT TM の 3 時期、1987 年 10 月 10 日取得(太陽高度 41.1° 、太陽入射方位角 145.0°)、1991 年 11 月 11 日取得(太陽高度 32.7° 、太陽入射方位角 150.1°)、2000 年 11 月 6 日(太陽高度 34.9° 、太陽入射方位角 157.3°)の画像である。

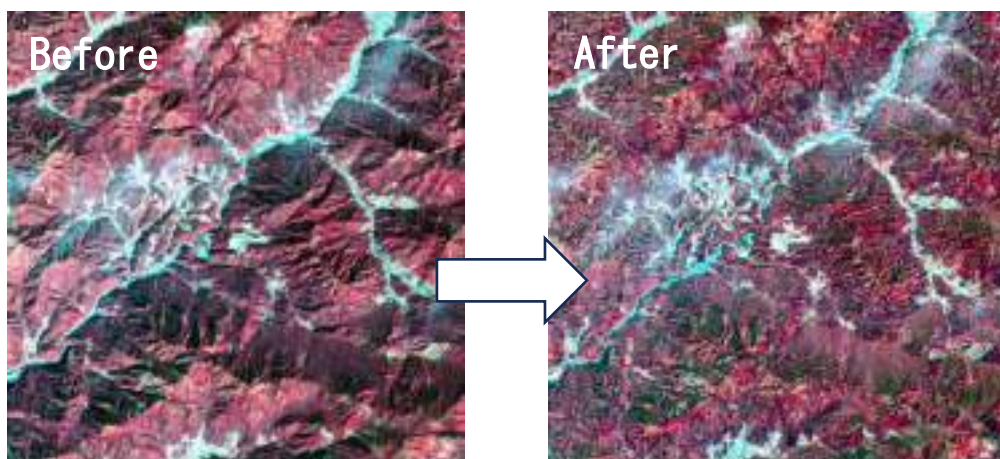
まず、各画像の Band3、Band4 から NDVI を計算し、緑域を抽出し、斜面方位毎に画素値のオフセット量を決めた(大気補正や画素値の輝度への変換は行わず、それらは本アルゴリズムの適用とは独立なものであると考え、画素値のままオフセット量を決めた)。適応結果は、図 3-12 のとおりである。1987 年 10 月 10 日の画像は、画像中に雲が映り込んでいるが、緑域を抽出する過程で雲の影響を受けた画素は、



Oct. 10 '87
 Sun elevation angle=41.1°
 Sun azimuth = 145.0°



Nov. 11 '91
 Sun elevation angle=32.7°
 Sun azimuth = 150.1



Nov. 6 '00
 Sun elevation angle=34.9°
 Sun azimuth = 157.3

図 3-12 半実証的地形補正法を Landsat TM 画像に適応した例

地形補正の対象外でなっているため、雲の影響を受けずに地形の影響は除去されている。1991年11月10日、2000年11月6日も同様に、補正前は地形の影響を受けたと思われる陰影が画像中に見られたが、補正後は、そうした地形の影響は少なくなっていた。これらの地形補正は Landsat TM 画像に対して用いられる、Minneart 法を適応した場合と効果が似ていたが、Minneart 法ではサンプリングを行う必要がある一方、本手法はサンプリングを必要とせず、ほぼ自動である。緑域の閾値と斜面方位の括約数のみ決める必要があるが、3.3.4 で述べたように両者の値は厳密でなくても結果はあまり変わらない。また予め森林簿・森林計画図、あるいは国土数値情報などから緑域データが利用できれば NDVI を使った緑域抽出のプロセスを省け、その場合は地形補正を全自動で行うことができる点に本手法の特徴がある。

3.5.3 地域を変えた場合 岐阜県高山市のケース

IKONOS、Landsat TM、Aster、いずれのデータに対しても本開発アルゴリズムが適応可能であることが分かった。そこで、IKONOS 以降に打ち上げられた地上分解能 2.4m マルチスペクトルセンサ、及び地上分解能 0.61m のパンクロマティックセンサを搭載し、Maxar Technologies 社によって打ち上げた Quick bird が取得した画像に対しても本アルゴリズムを適用してみた。適用したのは図 3-13 の岐阜県高山市で 2003 年 9 月 22 日に取得された画像である。

他の画像と同様に、Quick bird が観測した赤、近赤外のバンド情報を使い NDVI で緑域を抽出した後、本アルゴリズムを適応した。その結果、図 3-14 のように、地形による影の影響の多くが除去されていることが分かる。

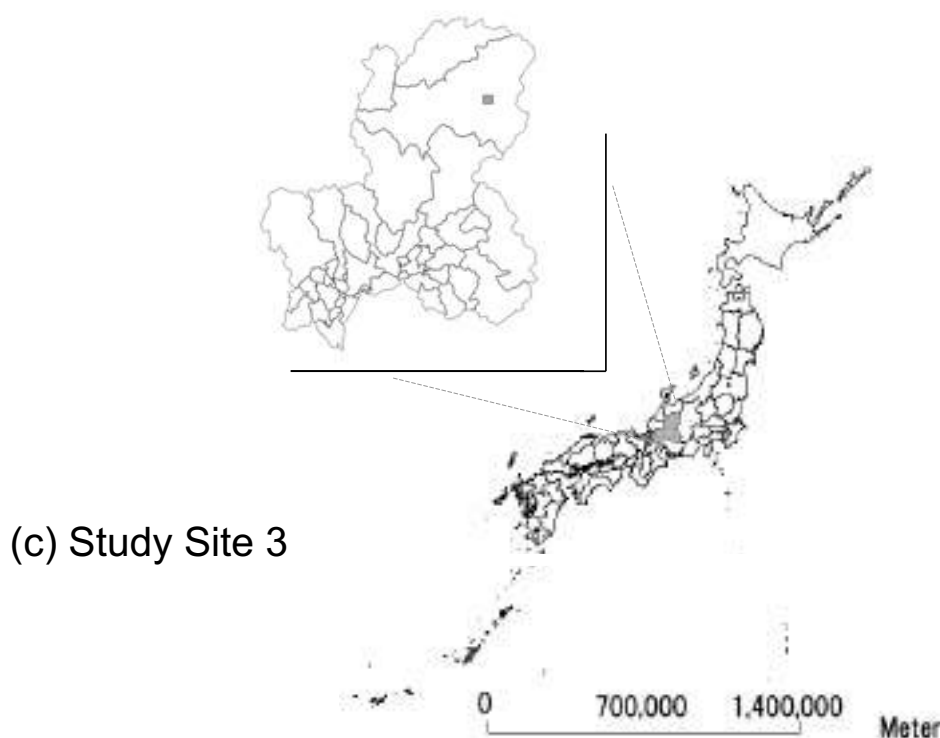


図 3-12 検証用テストサイト 3：岐阜県高山市

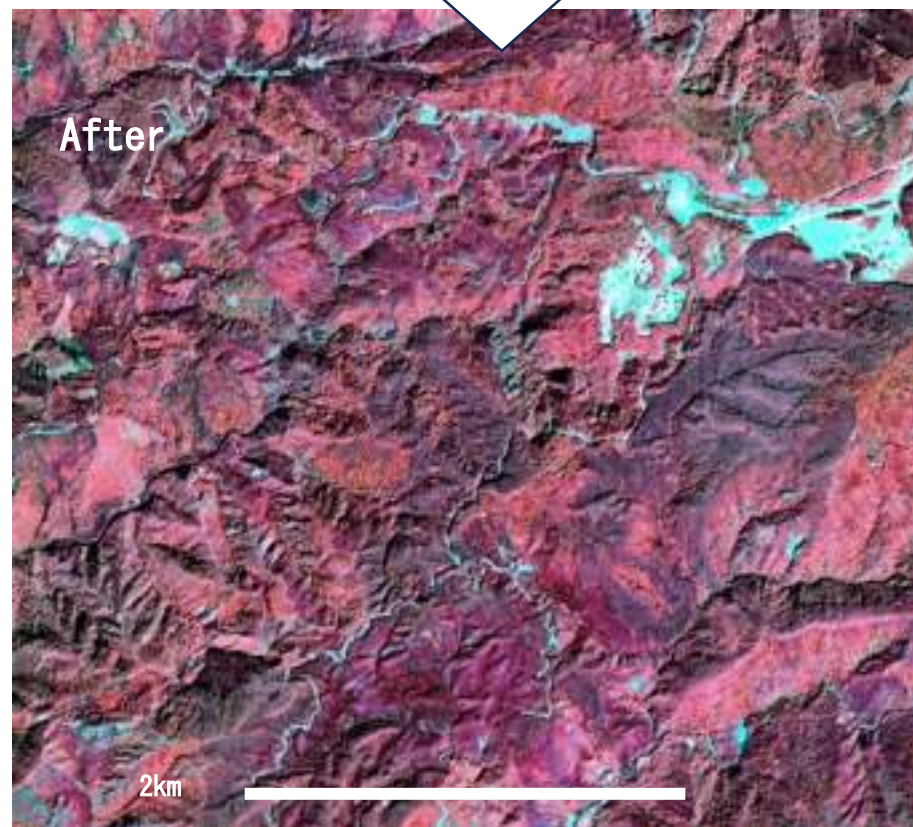
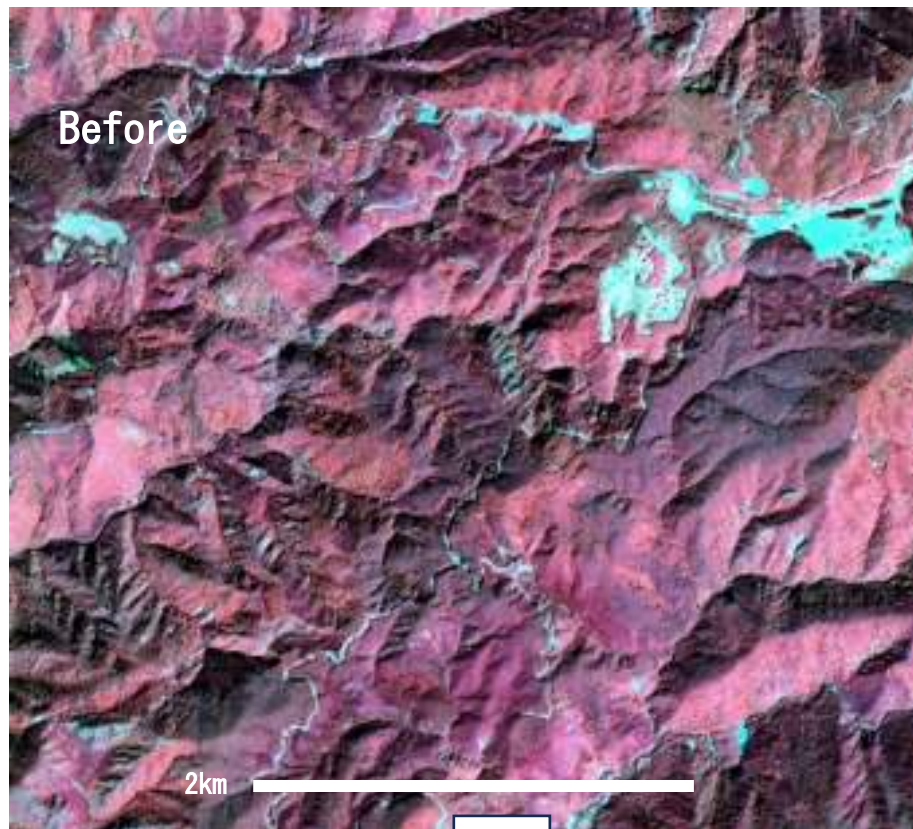


図 3-14 Quick Bird への適用

3.5.4 モザイクされた空中写真の場合

これまで、Study Site、センサ、データ取得時期を変え、それぞれの画像に対して本アルゴリズムを適用し、その効果を確認してきた。本アルゴリズムは、“ほどほど”に画像全体の地形による影の影響を消去することが第一の特徴であり、局部的には取り切れない影の影響や、過剰な補正もあり得たが、概ねこれまで検討してきた光学センサ画像で、本手法は適用可能と思われる。

ところで、土地被覆の変化を時系列で把握するとき、必ずしも同じ光学センサによって取得された画像が入手できるとは限らない。なかには、過去の空中写真と現在の高分解衛星画像との差分を検出する方法を検討せねばならないときもある。もちろん、その際両者の画像からは、地形による影の影響を除去していることが望ましい。

ところが、空中写真は衛星画像と異なり、データ取得時の対地高度が極めて低く、画像の中心と端とでは、レンズと地物との間の距離が大きく異なる。そのため画像の中心と端とでは、大気中の光の減衰の影響が大きく異なる。また、太陽を背にして撮影される画像と、太陽に向かって撮影される画像とでは同じ場所を撮影していても、地形による影の影響が現れ易い。

そのような空中写真に対して、空中写真に現れるホットスポットの影響を減ずる方法はこれまでも考案されてきた。また一枚の空中写真を撮影した日時、航空機位置とカメラの詳細な向きなどの情報を使えば、既存の方法でも空中写真から地形による影の影響をとることも可能と思われる。しかし、複数枚を1枚にモザイクした空中写真のオルソフォトは、それを構成する元となった個々の写真は、撮影日時・航空機の位置・カメラの向きが異なっている。しかも、モザイクする過程で空中写真がオーバーラップしている箇所は、ソフトウェアに搭載された機能を使って色調補正してある。こうしたことから、モザイクされたデジタルオルソフォトは、既存の手法では地形補正できない。

そこで、“ほどほど”全体を見て補正量を決める本アルゴリズムが、モザイクされた空中写真でも適用可能か検討した。

先ず、モザイクされた空中写真から緑域を把握するために、IKONOS マルチスペクトル画像から NDVI によって緑域を抽出し、各斜面方位別に緑域内の明るさの分布を調べ、最も明るい斜面方位に合わせて他の斜面方位の明るさが揃うように補正量を決め、地形補正を試みた。図 3-15 に結果を示す。地形による影の影響が軽減されていることが確認できた。

次に、岐阜県東白川町でのモザイクされた空中写真を、岐阜県美並町と同様 IKONOS で緑域を抽出し本アルゴリズムを適用した。その結果が図 3-16 である。こちらも地形による影の影響が概ね除去されていることが確認できた。

また、図 3-17 に 1991 年撮影された空中写真の簡易デジタルオルソフォトを空間分解能 4m で Cubic

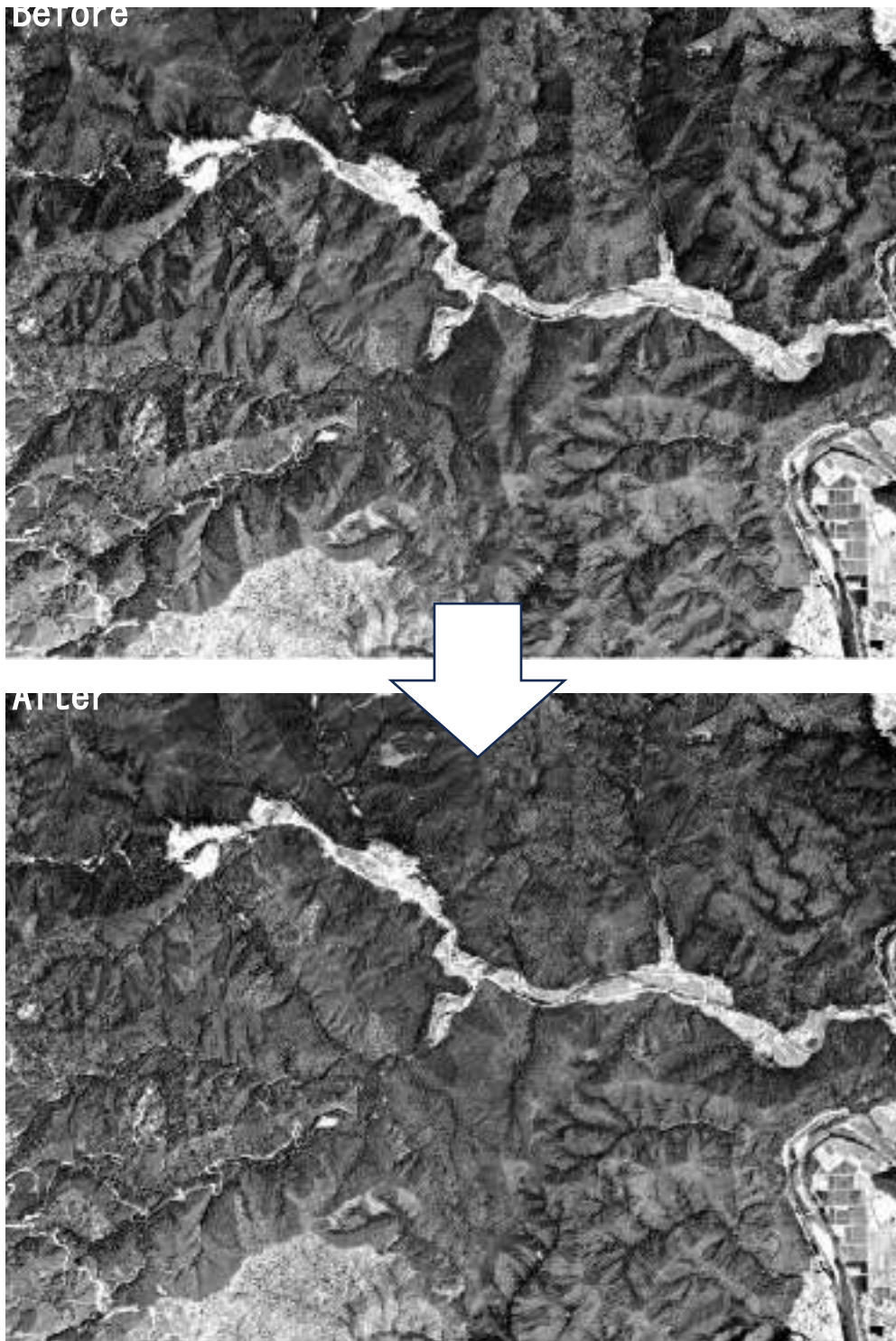


図 3-15 モザイク処理された空中写真への適用例 (Study SITE 1)

Convolution によりリサンプリングした画像と、03 年に撮影された空間分解能 4m の IKONO マルチスペクトルの RED バンドとの差分を、閾値を変化させながら最も森林伐採域が抽出できるように調節した画像を示す。この図から、補正を行わない画像では細かいノイズが多く見られるが、補正を行ったものでは、それら細かいノイズの頻度が抑えられ、より図中上段の Grand truth に近いものが得られていることが確認できる。このように今回の地形補正法と分類精度の向上については今後検証が必要であるが、

起伏の激しい日本における時系列解析などの際の差分抽出には効果が見られている。

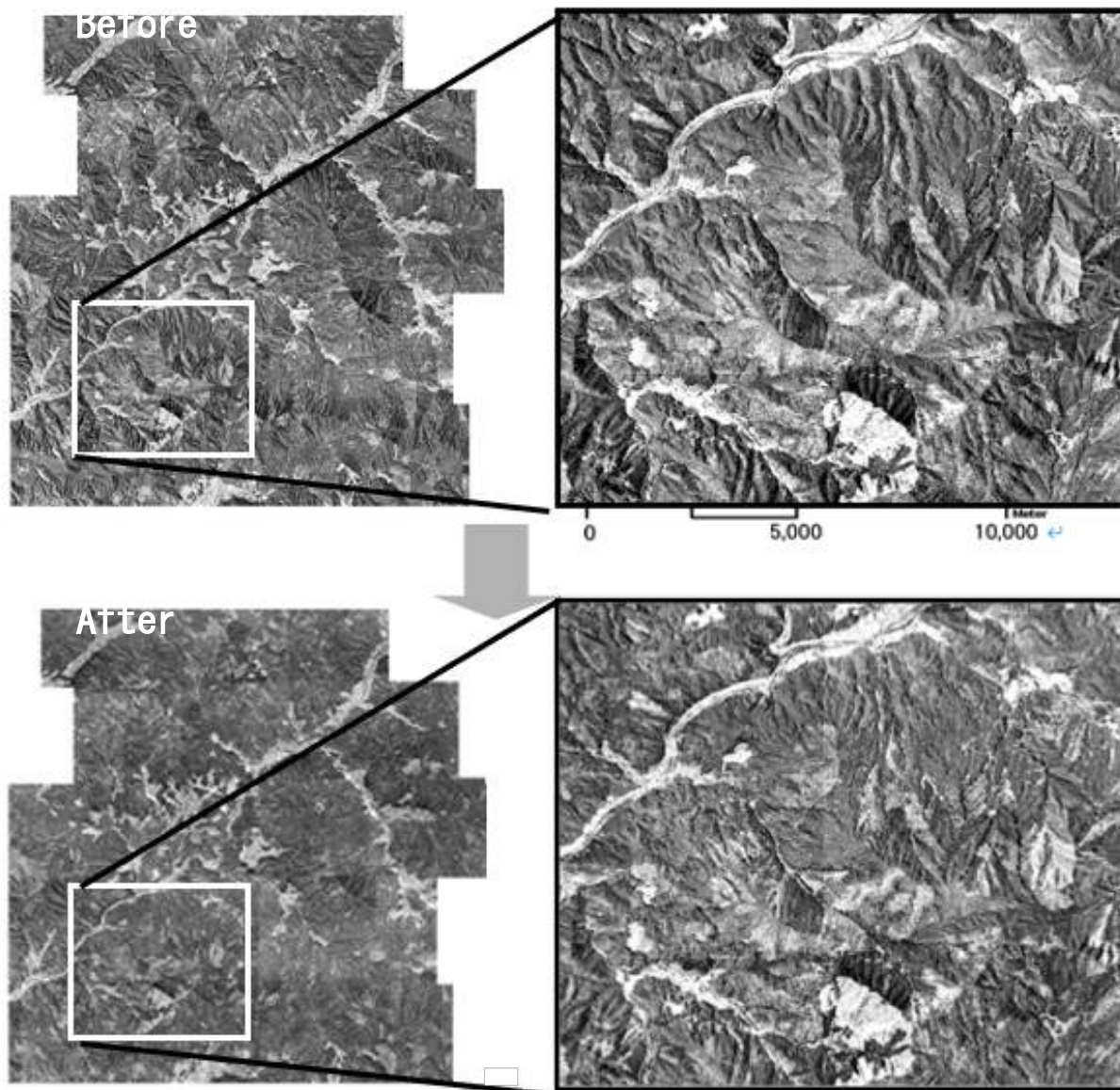
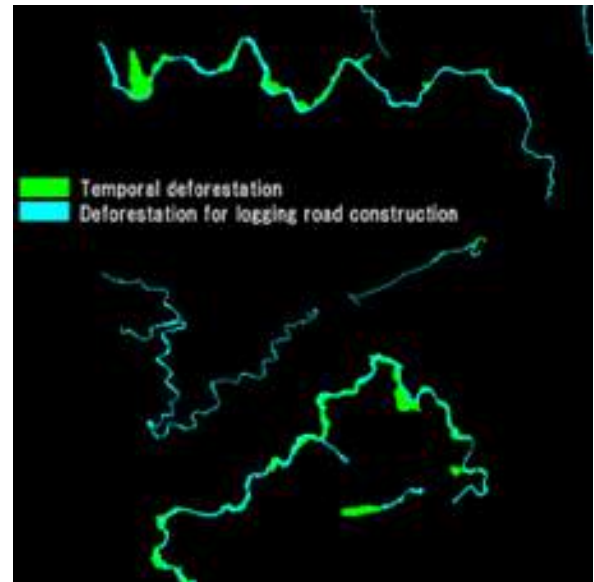
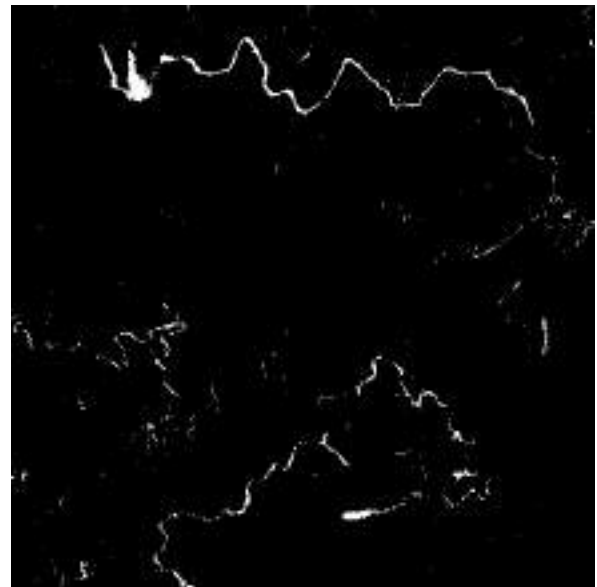


図 3-16 オルソ処理された空中写真への本手法の適用事例

Deforestation
From '91 to '03



Deforestations
extraction from 2
topographically
corrected images
- '91 mosaic
airphoto and '03



Deforestations
extraction from 2
raw images
- '91 mosaic
airphoto and '03
IKONOS MSS -

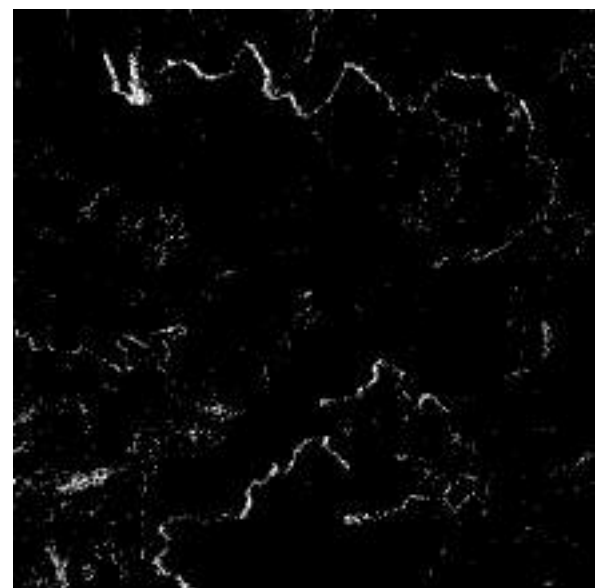


図 3-17 本地形補正の効果例

3.6 まとめ

今回開発した地形補正法には2つの特筆すべき点がある。1つ目は、この地形補正を実行する際の手順の簡便さである。2つのパラメータ、すなわち分割する方位の括約数と緑域範囲が、必要になるだけである。これらのパラメータは、これまで述べてきたように厳密さを要求するものではなく、“ほどほど”であれば、それで適用が可能で、緻密にサンプリングをしながらパラメータを決定するような複雑さはない。こうした簡便さは、誰がやっても同じ結果を得られることに貢献する。また、既往の地形補正では、処理を行う前に大気補正や画素値を輝度に変換する必要のあるものもあるが、本手法はそういった手順は不要である。

もう1つの特筆すべき点は、様々な既存の地形補正法は、利用する画像によって使えるもの、使えないものがあるが、本手法はそういった画像（センサ）を選ばないことである。どのようなセンサで取得した画像であろうと、同一のアルゴリズムで処理が可能である。しかもパノクロマティック画像やモザイクされた空中写真にも適応可能である。

ところで、そのような特徴を持つ手法であるが、いくつか利用上の制約も存在する。まず、この手法は起伏の激しい山岳に成立している森林を対象としている点である。非森林地帯の影の影響を取ることには考えていない。2つ目の点は、地形の影響を除去することを第一目的に“見た目”を優先し補正しているため、画素の値は、物理的な意味を持っていない。3つ目の点は、傾斜のきつい稜線や深い谷、崖などは、ときに過補正や補正不足の場所が発生することである。そして最後の制約は、特定の樹種が特定の斜面に集中していたとき、つまりある樹種が斜面方位の特定方向に片寄っていた場合は、補正量が適切ではなくなることである。（ただしこの場合、対象地域を拡大することによって局所的に特定被覆が片寄って分布するという特徴を目立たなくさせれば、対処は可能である）。経験的ではあるがシーンのほとんどが独立峰であるような画像では、本アルゴリズムの地形補正効果は低いようである。また、深い谷などは補正量が少なく地形補正効果が低いようである。

以上のように、いくつかの問題を内包しているものの、本手法は、簡便性、効果、適用性において他にはない特徴がある。それらを考えれば、内包された問題は小さなものであり、広範囲の画像に対し半自動で地形補正できる特徴的な地形補正法といえる。こうしたことから、はじめに述べた3つの条件、すなわち再現性、汎用性、自動処理を満たした手法であると考えている。

4章 UAV レーザ・データによる林床状況把握法の開発

4.1 背景・目的

日本の森林の約7割は民有林で構成されている。そのため、仮に森林の現況が正確に把握でき、人間社会と自然環境のバランスに配慮した森林保全計画を立案できたとしても、多くの森林では計画を実行に移す際、森林所有者の意向を確認することなく、木を伐採したり、道を通したり、災害復旧のための治山工事などは行えない。近年、森林法第10条の11の6「早急に間伐が必要な森林の施業代行制度の見直し」や、「森林管理制度の特例処置」などによって、定められた行政手続きを経れば、市町村長の判断や都道府県知事の裁定によって、所有者不明のままの森林に手を入れることが可能となる仕組みができたが、こうした行為が行われるのは稀で、現在のところ、所有者の確認と林地境界の確認は欠かせない。ところが、近年、自分が所有する森林の場所を知らないという森林所有者も少なくなく、大きな問題となっている。

ところで日本の民有林には、所有する森林面積が小さい所有者が多いという特徴がある。こうした零細森林所有者の多くは、戦後の入会林整備（燃料や肥料などを採取するために共同で管理していた森を、ガスや化学肥料が使われ始め山林の用途がなくなったことから、共有林を分割して個人所有の森林に移行させる施策）によって森林を所有する事になった者で、林業への特別なこだわりや森林経営のノウハウを持った者達ではない。彼らは、森林所有者になった後、当時の拡大造林（広葉樹の林、つまり入会林のような用途で使われていた林を、人工林に変えていくことを推奨した）施策によって薪炭林だった広葉樹林を伐採・換金し、人工林に転換していったが、やがて森林所有の経済的価値が低下していく過程で、森林への関心が薄らいでいった者が多い。その世代の所有者も今では多くで代替わりを迎えている。しかし、こうして代替りによって突如森林所有者となった者は、森林について申し送りされることなく相続することになったうえ、林業に依存しなくても生活の基盤を確保できている者も少なくない。そうした背景を持つ森林所有者が年々増えてきている。例えば、今から20年以上前の2002年に、著者が岐阜県郡上市のある地域の山林所有者を対象に座談会を開催し聞き取り調査した際には、およそ50人の森林所有者のうち、3分の2の所有者が、自己の山林の位置を知らない、あるいは人に聞けば分かるという回答した。現在ではその割合はもっと増加していると思われる。こうした状況は地籍調査が行われていない地域では程度の差こそあれ、同じような状態である。こうしたことから、森林所有者の特定や境界の確認は、森林管理の上で大きな解決すべき課題となっている。

この問題解決を解決するため、森林境界明確化をサポートするツールもこれまで登場してきた。例えば時系列空中写真を活用した小班区画抽出（村上ら, 2013）、過去の空中写真を3次元に表示しながら、森林境界確認を行う「温航知森」システム（宮城, 2011）、過去の空中写真とGNSSとを連携させた森林境界現地確認システム（小林, 2018）などである。しかしながら、森林の境界の目印となるのは、林相やその変化に限ったものではない。山林の中の人工構造物（土留の石積み・炭焼き跡）や人が運べる程度の重さの石、周辺で目立つ露頭、歩道なども森林境界を探索する目安となる。しかし、そういった情報

は地図として存在せず、現地でそれらを発見したときのみ、境界の目安として認知されるだけである。

ところで、近年地球温暖化の影響と言われることもあるが、毎年のように甚大な風水害被害の報道に接するようになった。その中で、土砂災害によって発生した流木が橋梁等に引っかかったり、橋梁を破壊したりして、風水害被害を更に拡大させている事例も見られる。こうした流木の出処として、一般に伐り捨て間伐によって発生した林地残材の流出が問題されることがある。これには、原因は立木を流出させる表層崩壊であって、林地残材が原因となるのはほんの僅かである（太田，2017）という指摘もある。いずれにせよ災害防備として、ともかく林地の保水力を高めるため、間伐の推進は自明のことと捉えられている。ところが、公益的機能を維持向上させるには、実際どこの林分を優先的に間伐するか、エビデンスを使って検討されることは少なく、現場では、間伐できる山林から間伐しているのが実情である。そこで、エビデンスを得ようと、4点/m²程度の航空レーザ・データに高度な解析手法を用いて、解析精度が不安定であることを承知で、間伐指標となる相対幹距比等の解析に投資する都道府県や市町村もある。

一方近年、レーザ測量機器を搭載した UAV が、UAV の高性能化と低価格化、レーザ測量機器の低価格化、BIM(Building Information Modeling)や DX への対応もあり、普及しつつある。実際、著者は岐阜県郡上市において、森林環境譲与税を財源とした UAV レーザ測量機器による森林境界明確化事業を支援する機会があった。その事業の中で、UAV レーザ測量機器は、航空レーザ・データの解析に使われる手法で、航空レーザと同様の成果物（微地形図・林相図・立木位置図・相対幹距比分布図）を生み出すためだけに使われていた。こうした使い方は、UAV レーザの最大の強みである低空・低速度・超高密度でデータ計測が可能であるという特徴を活かしたものになっていない。ところが特徴を活かすために知っておく必要がある「UAV レーザの強みは何であるか」は、機器が登場して間もないこともあり、未だ整理されていない。

このような中、著者は本研究とは異なる研究(早川ら, 2018)で実施した UAV レーザによるデータ計測で、UAV レーザ計測が、森林境界明確化や要間伐林分特定、災害をもたらす可能性のある林地残材の特定において、航空レーザでは分からない森林の現況を把握する有効なツールとなる潜在力を持っていることを実感した。

そこで、本章では、超高密度 UAV レーザ・データをどのように加工すると、いかなる森林現況が把握できるか検証し、UAV レーザ・データの強みとなる利用法・データ加工法の開発を行った。

4.2 方法

森林境界明確化に有効な情報として、人工物（石積み、炭焼き跡）、人が移動させることができる石や周辺から突出した岩、歩道などに着目し、それらを検出するため、それらが存在する山林で、UAV レーザ測量を 10,000 点/m²程度の密度（一部は更に高密度）を目安に取得する。そのデータから地面データを抽出し、それを加工して作成する超細密微地形図から、何がどの程度判別できるか、現地を詳細に測量したグラウンド・ドルースと踏査によって、航空レーザの微地形図と比較しながら UAV レーザの強みを確認する。

加えて、地表面に存在する地物（石や立木、倒木、下草）などの視認性を把握するため、地面から地上 50cm 以内のレーザ点群を抜き出し、そのデータから作成する地表の起伏を表した超細密地表状況図（後述）で、それらの視認可能性を検討する。

これらの結果を踏まえ、超細密微地形図や超細密地表状況図作成手法の改善策を検討する。

なお、点密度を 10,000 点/m²としたのは、地上（地面あるいは地物）の 10cm 四方に 1 点はレーザが到達し、照射されたレーザの 1%が地上（地面あるいは地物）に到達するとしたとき、地上に到達したレーザが 10cm 四方に 1 点あるような点密度として設定した。

4.3 予備実験：レーザ反射強度と森林現況把握の可能性について

本題である山林で計測された UAV レーザ・データによる超細密微地形図・超細密地表表層図によって森林現況把握の可能性を検証する前に、1点、基本情報として確認したいことがある。レーザ反射強度情報を使った森林現況把握の可能性である。そのため、次の実験を行いレーザの反射強度が持つ特性について整理した。

4.3.1 レーザ反射強度情報による森林現況把握可能性

レーザ測量による地物の計測では、レーザが計測する地物の3次元情報が利用されることが多いが、近年ではそれに加え、機器に搭載されたカメラを使った色情報(R, G, B)も付加され、計測対象の識別に活用されることがある。しかし、今回問題としているような樹冠下の状況は、そもそも上空からのカメラ画像では把握が不可能で、地物の色情報は、森林境界明確化では利用しにくい。

一方、レーザ測量機器は、XYZやRGB以外の情報として、地上に向けて照射したレーザが地物で反射し、機器に戻ってきたときのレーザのエネルギーの強さ(以下反射強度と称す)を記憶している機器も少なくない。そしてこの反射強度情報が、地物の識別に利用されることがある。例えば、土地被覆把握(長谷川, 2006)・樹種把握(中武ら, 2018; 朱ら, 2016; 坂田ら, 2016)・道路白線検出(長谷川ら, 2006)・遺跡調査(Challis et. al., 2011; Historic England, 2018)などである。しかし、そういった計測の多くはレーザが対象に到達するまでの間、何にも遮られることなく、すなわちエネルギーが減衰することなく地物にあたって戻ってきた反射強度を使ったもので、今回問題としているような樹冠下の状況把握に、それらが利用可能な情報になるかは不明である。

そのような中、少なくともレーザ測量用反射板(Timbertech社製 PFR-240L)なら、レーザが樹冠に遮られた状態であっても、図4-1のように位置が識別可能であることが分かった。このことから、林床の地物を特定する方法として、3次元情報以外に反射強度情報が使える可能性があると思われた。そこで、森林境界明確化に使える林床の素材の反射強度特性を調査することにした。

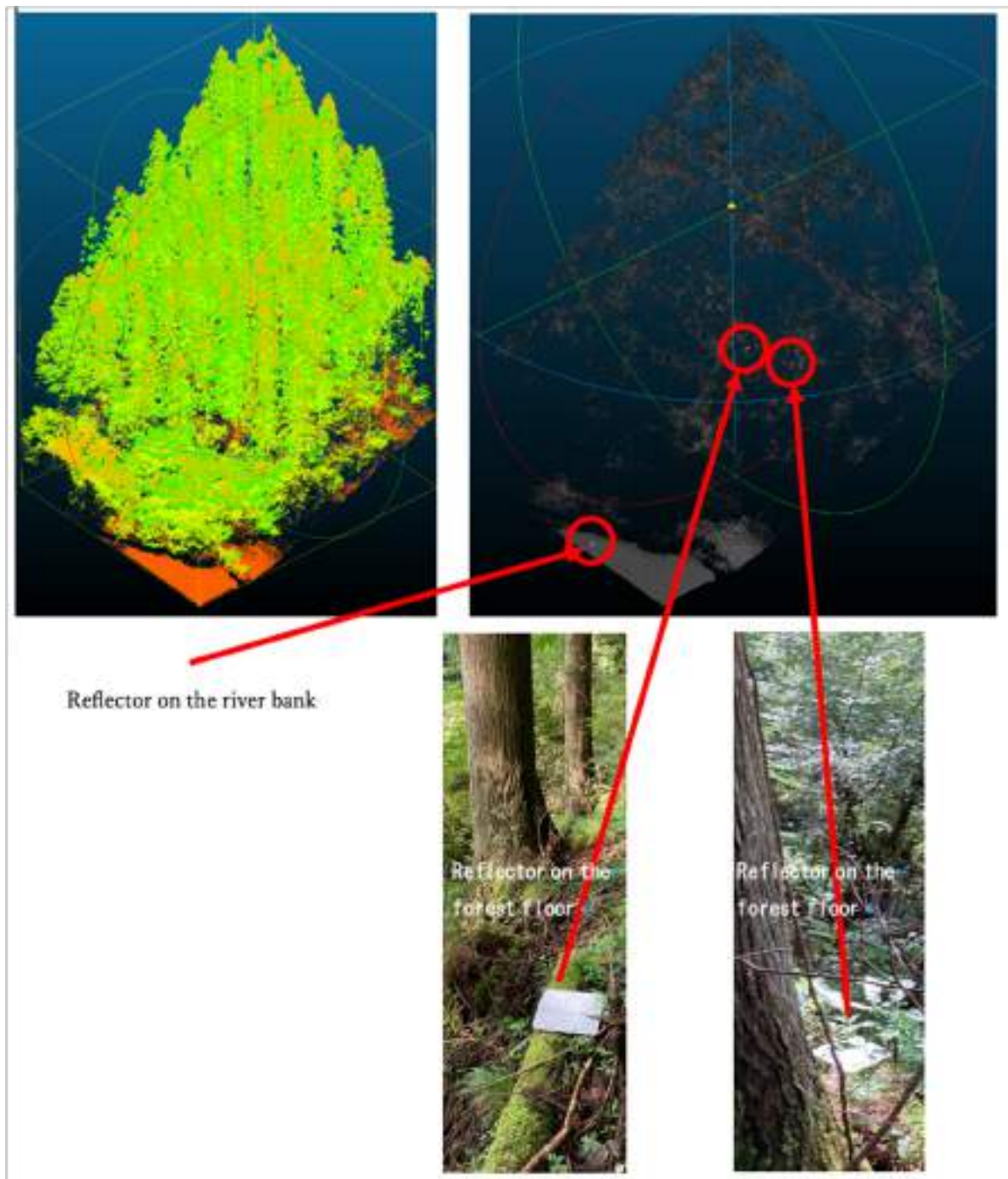
4.3.2 反射強度と素材との関係を把握するための実験

・方法

屋内実験

素材と反射強度との関係が明確に分かるように、屋内で実験装置を作成し、素材とレーザ反射強度との関係を調べる。

まず、直射日光が当たらない室内で、図4-2のように高さ2.7mの架台を制作し、架台上部に表4-1の仕様のレーザ測量機器(Velodyne VLP-16)を固定する。そして、レーザ測量機器直下から0m、1m、2m、3m、3.7mの位置に、林内の素材に見立てた試料を型枠用塗装合板の上に置き、レーザ測量機器から素材に向けてレーザを照射して、入射角と素材と反射高度との関係を調べる。このとき、およそ30cm四方程度の素材には複数のレーザが照射されることになるが、素材の設置位置が予め分かっていることから、素材に当たった点群だけを抽出し、その反射強度を調べる。



4-1 樹冠下でも反射板の強度によって、反射板の位置は確認できる

なお、本来であれば、航測会社などが、飛行機やヘリに搭載して使用するレーザ測量機器で、本実験を行えば、より実用的な知見を得られるが、そうしたレーザ測量機器は、最短計測距離が数メートル以上必要なことから、室内実験に用いるには適していない。そこで今回は、①UAV 等に搭載されるこ

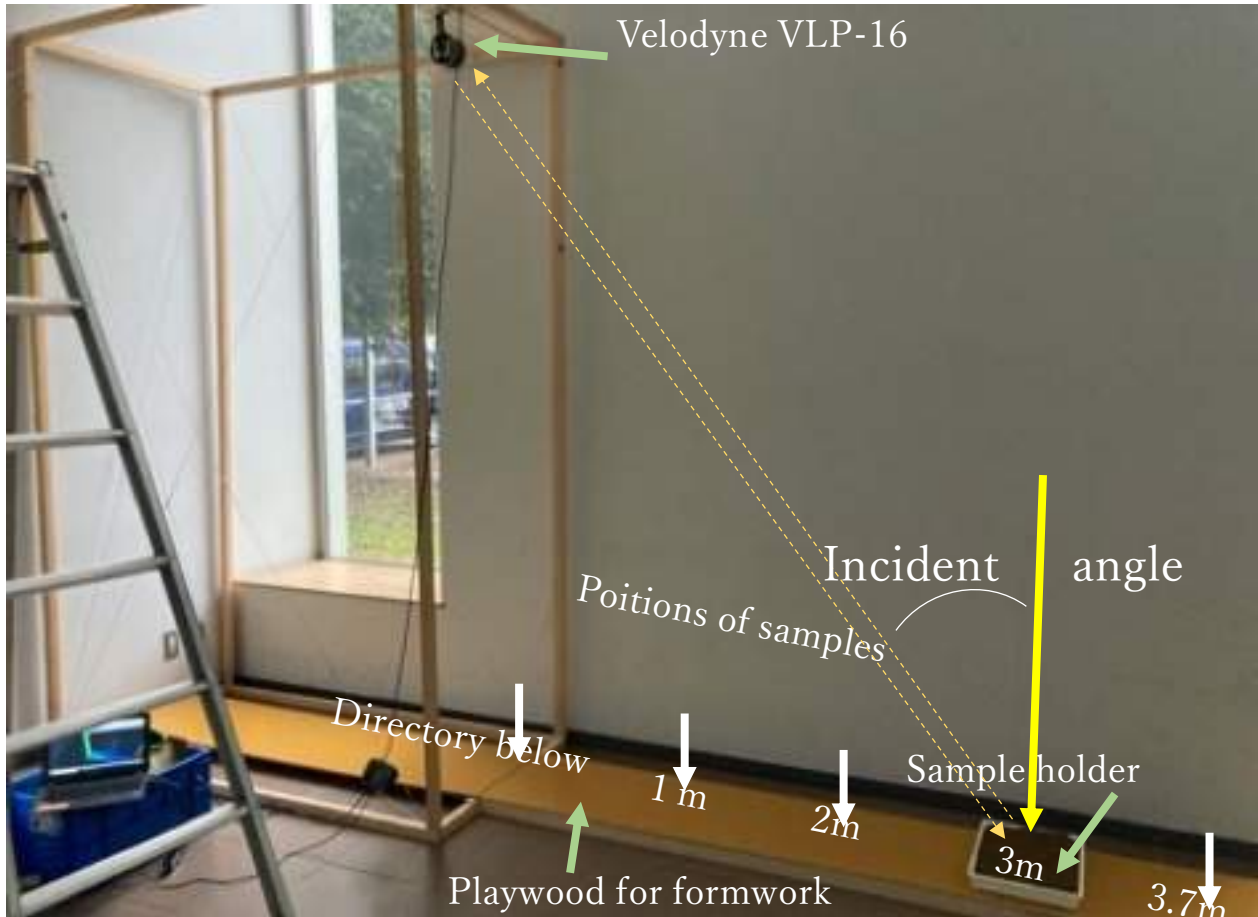


表 4-1 屋内実験で使用したレーザ測量機器 (Velodyne VLP-16 仕様)

Sensor	V L P - 1 6
Type	16 Channels
Field of View	Horizontal/360° Vertical /+15° to -15°
Measurement Range	0.5~100m
Rotation Rate	5~20Hz
Points per Second	300,000
Accuracy	± 3 c m (1 σ @25m)
Angular Resolution	Horizontal 0.1° ~0.4° / Vertical 2.0°

とがあること、②比較的安価で UAV に搭載されるレーザ測量機器として普及しつつあること、③最低計測距離が 30cm と屋内実験装置として扱い易いなどの理由で、レーザ測量機器とし Velodyne VLP-16 を使用した。なお Velodyne VLP-16 の反射強度は 0-255 の数字の大小として強弱が記憶される。

屋外実験

光の状況や床の環境が単純化された屋内実験で、林内の地物に見立てた素材とレーザ入射角と反射強度との基本的な知見を得た後、林内で同じように架台を設置し、実際の林床の地物とその反射強度・入射角との関係を調べる。

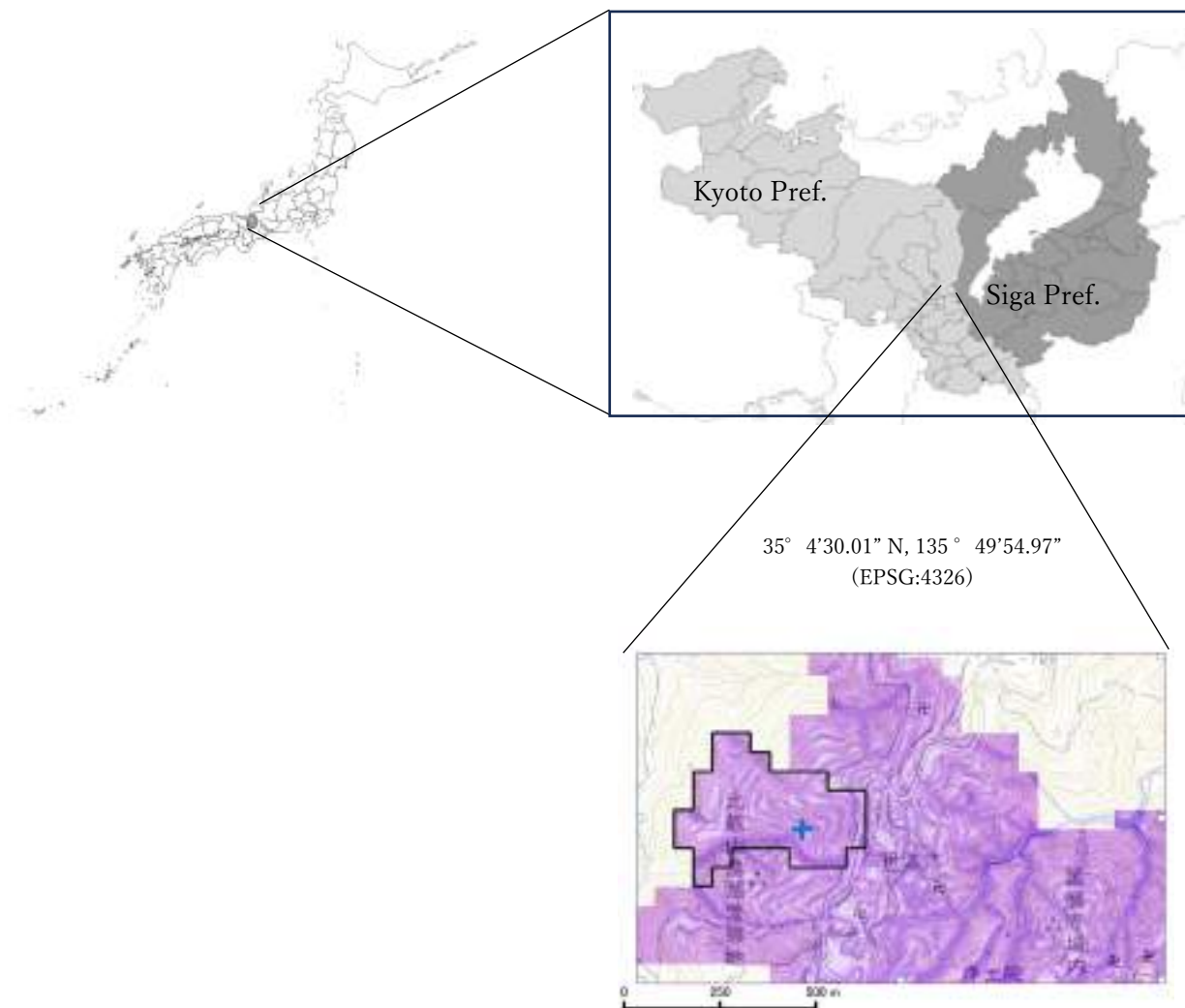


図 4-3 屋外実験装置設置場所

実験は、本研究とは別の研究（早川ら, 2020）でフィールドとしている、滋賀県と京都府にまたがる図 4-3 の比叡山で行った。理由は、当該地はスギ人工林であること、さらには比叡山山中に点在するかつての堂舎・山坊の跡に残存する礎石や自然石などがあることから、本実験に適していると判断したためである。

この比叡山山中で、早川ら（2020）が、C 削平地と命名した地点の、ある礎石の直上（2.7m）に、レーザー測量機器を固定するための架台を図 4-4 のように設置する。そして、直下（0m）、2.1m、4.05m に配置している 3 つの礎石と、周辺地表の素材の反射強度の違いが計測できるように、架台の向きを調整し、架台上部に室内実験と同じレーザー測量機器を固定する。なお、礎石は 2.1m 間隔で 3 つ配置されているが、その間隔を広いと考え、直下から 1.05m、3.15m の場所に御影石タイルを礎石代替として利用する。

データの取得は、まず、1 度の計測で 3 つの礎石の反射強度を測定し、後に 1.05m、3.15m の場所に御影石タイルを置き、それぞれの位置での御影石タイルの反射強度を計測する。

室内実験と同様、素材（花崗岩の礎石やタイル）の位置が自明であることから、架台から地面に向け

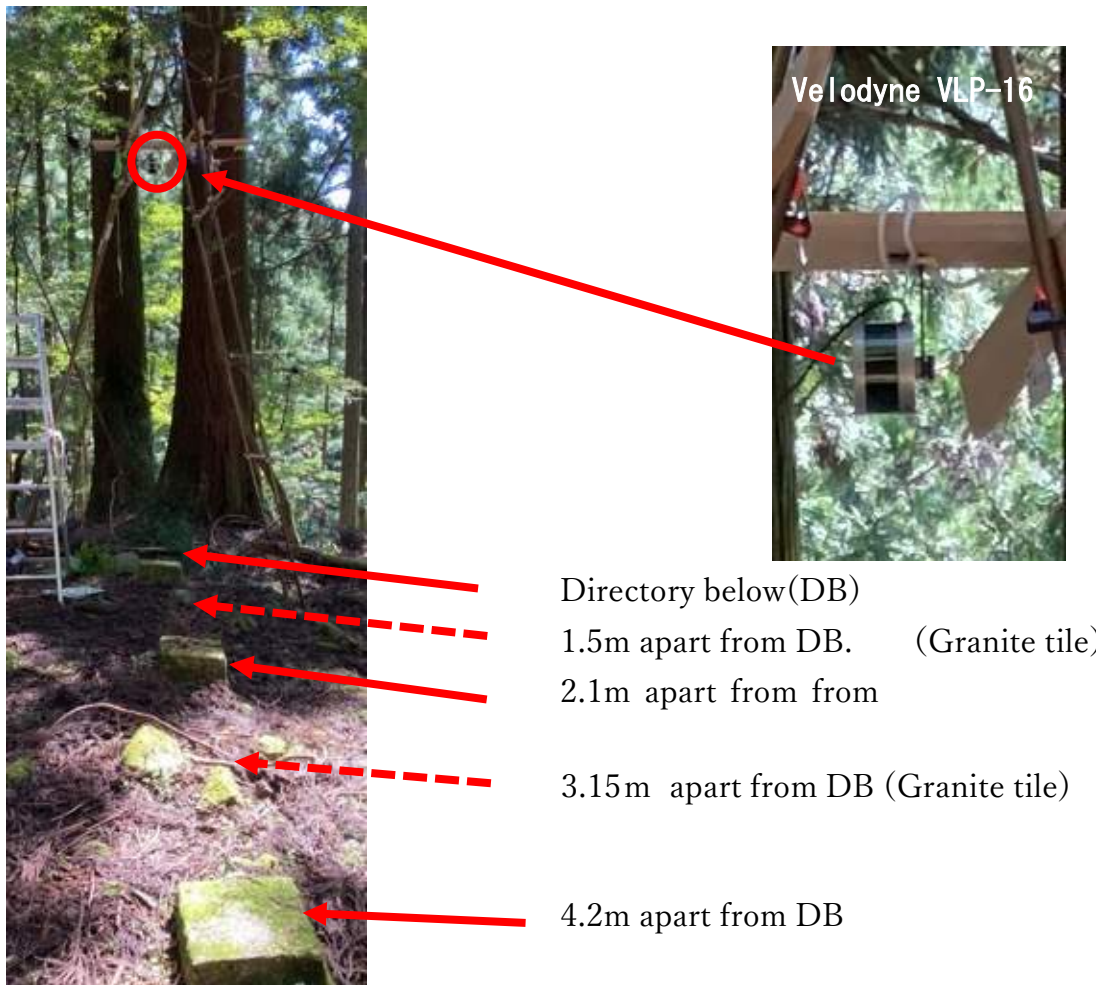


図 4-4 屋外実験装置

て照射されたレーザから、礎石やタイルに当たった場所を特定し、どのような条件の場所なら地面と礎石や御影石タイルを識別できるか整理し、反射強度による石の検出可能性を把握する。

・データ処理

屋内実験では試料に当たったレーザの反射強度を全て集計し、反射強度の平均、最大、最小、第一四分位、第三四分位を算出し、素材とレーザ反射強度、入射角の違いを可視化する。

屋外実験は、土壌や礎石・御影石タイルが単一の素材で構成されていないため（土壌は森林土壌・落枝落葉・草本類が、礎石にはコケなどが付着しており）試料の状態が不均一であり、屋内実験のような反射強度の定量評価は実施せず、礎石とその周辺土壌との違いを評価するため、反射強度で色分けした地図を目視判読して行うことにした。

なお、入射角はレーザーと試料の中心と床面とのなす角度とした。

・試料

屋内実験：石素材として市販の①30cm 四方の御影石タイル（花崗岩：表面がざらついている仕上げのもの）、また林床の素材として、市販の②腐葉土・③砂利・④真砂土（花崗岩が風化したもの）を用いることにしたが、比較・参考とするために前述反射板、加えて鋼板も、反射強度と入射角との知見を得るた

め使用した。

Velodyne VLP-16 から照射されるレーザは近赤外領域の光であり、近赤外線は水によって吸収されることが知られている。そこで、①から④の素材は、それぞれ湿り気が異なる状態でも計測することにした。湿潤状態は、御影石タイルの場合はレーザ照射直前に 10 秒間水に浸したものを使用し、その他の素材はビニールケースに保存されていた素材の開封直後のものを使用した。

乾燥状態は、御影石は入手直後のもの、その他の素材は開封後約 40 日自然乾燥したものを使用した。なお、②③④の試料は 30cm×45cm で厚さ 45mm のプラスチック容器に容器厚と同厚の試料を入れて使用した。試料を図 4-5 にまとめた。

Material	Steel	Granite Tile	Pebbles	Sand	Soil
Size (mm)	300x300x3.2	300x300x12	300x450x40		
Wet Condition (Moisture Percentage)	-	Soak in water in 10 seconds	24.27%	37.01%	52.45%
Dry Condition (Moisture Percentage)	-	-	-	17.04%	-
Appearance					

図 4-5 屋内実験で使用した資料

屋外実験：試料は、御影石でできた約 30cm 角の礎石、及び 30cm 四方の御影石タイルである。御影石の礎石には一部に数センチの苔が堆積しているものもあった。

現地は樹高が約 20m 程度のスギが成立本数約 1,200 本/ha で生育し、林床は草本類が疎らに生え、現地の基岩を構成する堆積岩が散在し、所々森林土壌が露出している状況であった。現地の土壌の乾湿状態は、実験日の 2 日前 46mm、8-6 日前に合計 40mm の降雨があったが（近隣大津市）、実験当日は全ての雨水は地中に浸透し、地表表面は手で押しても水がにじまない程度に湿っていた（後日、同じような条件の日に水分量を計測したところ、水分量は 53.1% (σ 4.65, $n=13$) であった)。

4.3.3 結果

室内実験

素材が湿状態の実験は 2021 年 9 月 7 日午後 3 時から 5 時の間に、乾状態の実験は同年 10 月 20 日午後 4 時から 6 時の間に行った。その結果を図 4-6 に記す。

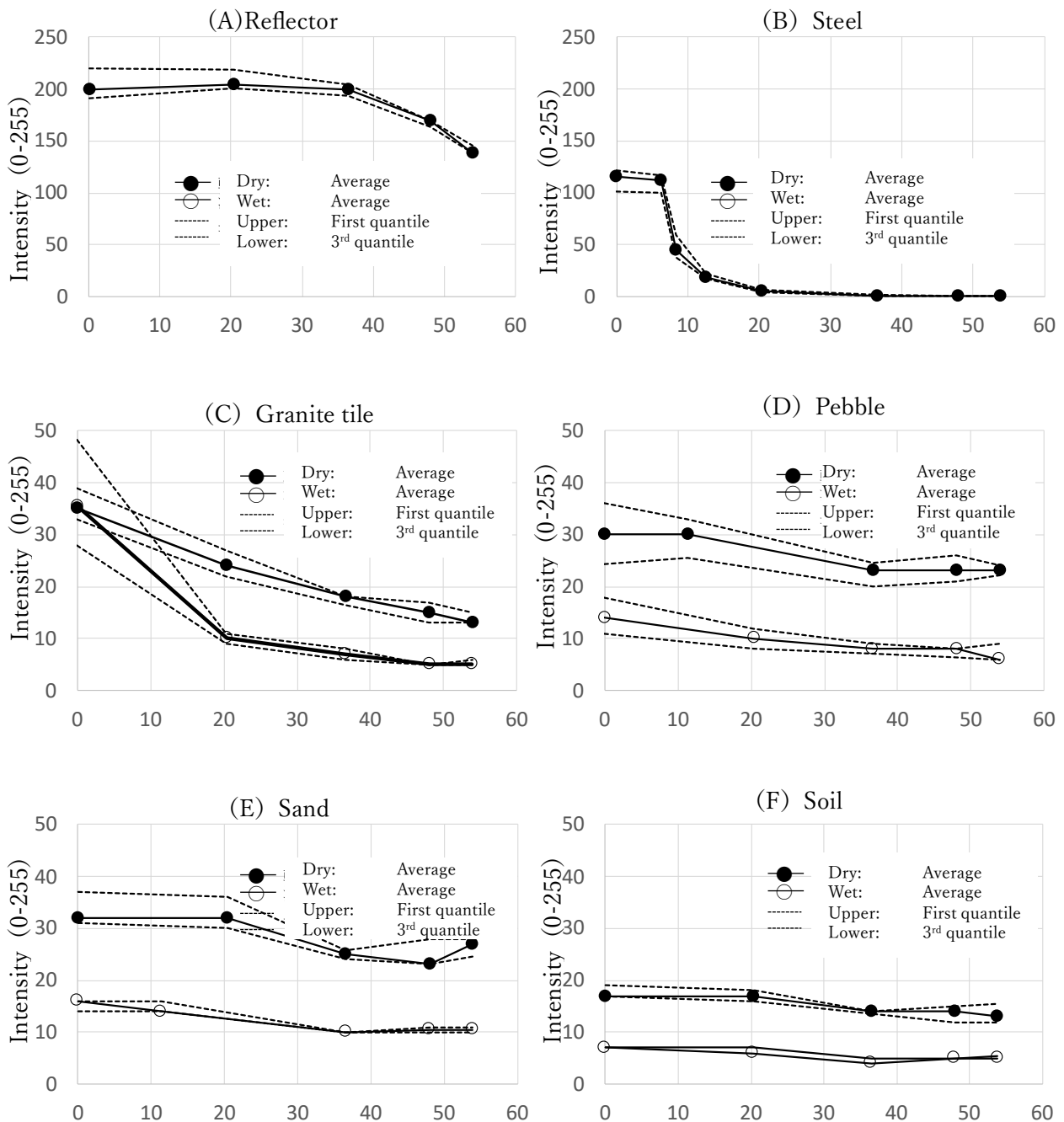


図 4-6 屋内実験結果 反射強度・入射角と素材の乾湿との関係

・反射板と反射強度

反射板のレーザ反射強度は入射角約 35° までは約 200(最大 255) で推移し、入射角が 35° を越えるあたりから減少傾向になった。入射角度が 50° を越えても反射強度は 140 程度あった。

・鋼板と反射強度

鋼板は、反射板と比べると直下の反射強度は半分程度の 100 であったが、入射角が 5 度を越えるあたりから急激に反射強度が弱くなり、入射角度が 20° あたりでは、反射強度 0、つまり計測されない状態となった。これは鋼板がレーザを鏡面反射していることによるものと考えられる。

・御影石と反射強度

御影石の入射角に対する反射強度を、乾湿それぞれ計測した結果、図 4-6-(C)を得た。反射板の反射強度と比較すると、レーザ測量機器直下の反射強度は反射板のその約 25%であった。レーザ測量機器直下では湿状態、乾状態ともに反射強度の平均値はほぼ同程度であった。しかし、入射角が大きくなるに従い反射強度は、乾湿それぞれ異なる減少傾向が見られた。入射角が 20° を越えるあたりから反射強度は、乾湿の違いで約 2 倍の開きがあった。また反射強度のバラツキは、入射角が同じなら乾状態のほうが大きかった。

・砂利と反射強度

砂利の入射角に対する反射強度を、乾湿それぞれで計測した結果、図 4-6-(D)を得た。砂利の反射強度を反射板のそれと比較すると、湿状態の反射強度は直下では、反射板の約 7.5%、乾状態では約 15%であった。乾湿状態の違いで反射強度は約 2.5 倍違っていた。御影石の反射強度と異なり、入射角に伴う反射強度の減少傾向は御影石のそれに比べ緩やかであった。

・真砂土と反射強度

真砂土の入射角に対する反射強度は図 4-6-(E)であった。真砂土の乾湿状態と反射強度との関係には、砂利と同じ傾向が見られた。湿状態の反射強度はレーザ測量機器直下で反射板の約 7.5%、乾状態では約 15%であった。また乾湿状態の違いで反射強度は約 2.5 倍違っていた。

・腐葉土と反射強度

腐葉土の入射角に対する反射強度を乾湿それぞれで計測した結果、図 4-6-(F)を得た。反射板の反射強度と比較すると、湿状態の反射強度は、直下で反射板の反射強度の 4%、乾状態では 10%であった。砂利・真砂土・腐葉土のうち腐葉土が最も反射強度の弱い素材であった。

屋外実験

2021 年 9 月 13 日に屋外実験を実施した。礎石・礎石代替(御影石タイル)、及びその周辺の地表の反射強度分布は図 4-7 の通りであった。入射角が 37° を越えるあたりから礎石の反射強度と周辺地表との反射強度の差異は無くなるが、入射角が 37° 程度以内であれば、礎石の反射強度は周辺の地表よりも反射強度が大きかった。すなわち反射強度から礎石検出が可能なが示唆された。

4.3.4 まとめ

屋外実験結果と屋内実験結果から、林床に散在する 30cm 角程度の礎石（または石）を検出するための必要条件について考察する。

図 4-6-(C)から、礎石が濡れ、土壌(腐葉土)が湿っていた場合、レーザ入射角が概ね 20° を越えると、両者の反射強度が同程度となるため、礎石の検出が難しい。

一方、乾いた礎石と湿った土壌（腐葉土）との組み合わせならば、両者の反射強度は重なる部分がないことから、反射強度によって礎石が検出できる可能性がある。

以上により、林床に散在する岩（30cm 角程度の大きさ）でレーザ測量データから礎石を検出するに

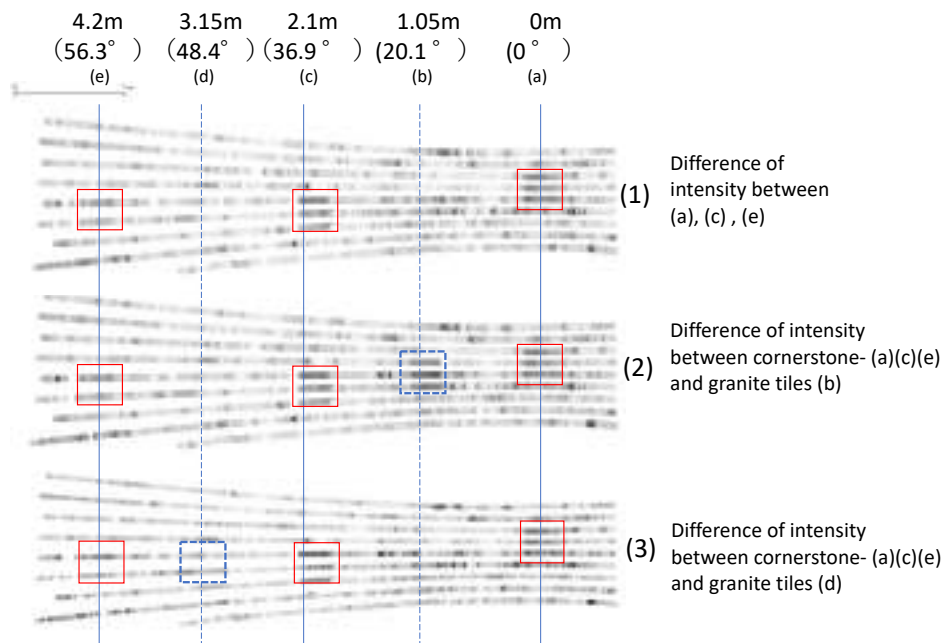


図 4-7 屋外実験結果

は、礎石が乾き、土壌が湿っているタイミングを狙ってレーザ測量を実施し、入射角が少なくとも 37° (図 4-7) 以内の点群の反射強度を利用すれば、反射強度から礎石 (石) を検出できる可能性がある。

前述タイミングを具体的に表現すれば、乾燥注意報が出る時期の計測は避け、降雨や朝露・朝霜などの影響を受けない時間帯、可能なら、なるべく土壌の水分状況が高いとき、ということになる。

今回、レーザ測量機器と地物との関係を高さ 2.7m から調べたにすぎない。実際のレーザ測量では、樹冠上から地上に向けてレーザを照射することになる。従って、今回得られた知見が直接反射強度を用いた礎石検出法に使える知見となる訳ではない。レーザが樹冠を通過し林床に当たったときの反射強度と素材との関係も把握しておく必要がある。こうしたことから本来なら、次の実験として樹冠の上からレーザを照射して、今回の屋外実験と同じような検討をする必要がある。しかし今回それを実施していない。そのような理由で今回の検討は、必ずしも礎石検出の必要十分条件には結びつくものではない。しかし、必要条件は見出せたと考え、以下実際の現場での解析を実施した。

4.4 テストサイト

先に述べたよう著者らは、本研究とは異なる研究（早川ら，2020）のため、既に UAV によるレーザ測量データを図 4-8 の場所で取得済みであった。当該地は谷部を除きほぼ樹冠がうっ閉した杉に覆われている。ところどころ、土壌や倒木の関係で木本類のないギャップがあり、そこには草本が生育している。そして、かつて比叡山の堂舎・山坊を形成した盛土や礎石、石碑などの人工物の多くが樹冠下に散在している。こうしたことから、この地のデータには、本研究の目的である歩道、地面の凸凹、人工物、森林境界を示す可能性のある岩、立木、倒木が比較的狭い範囲で数多く存在していることから、本研究では、図 4-8 の比叡山延暦寺西塔北尾谷で計測したデータを使用することにした。

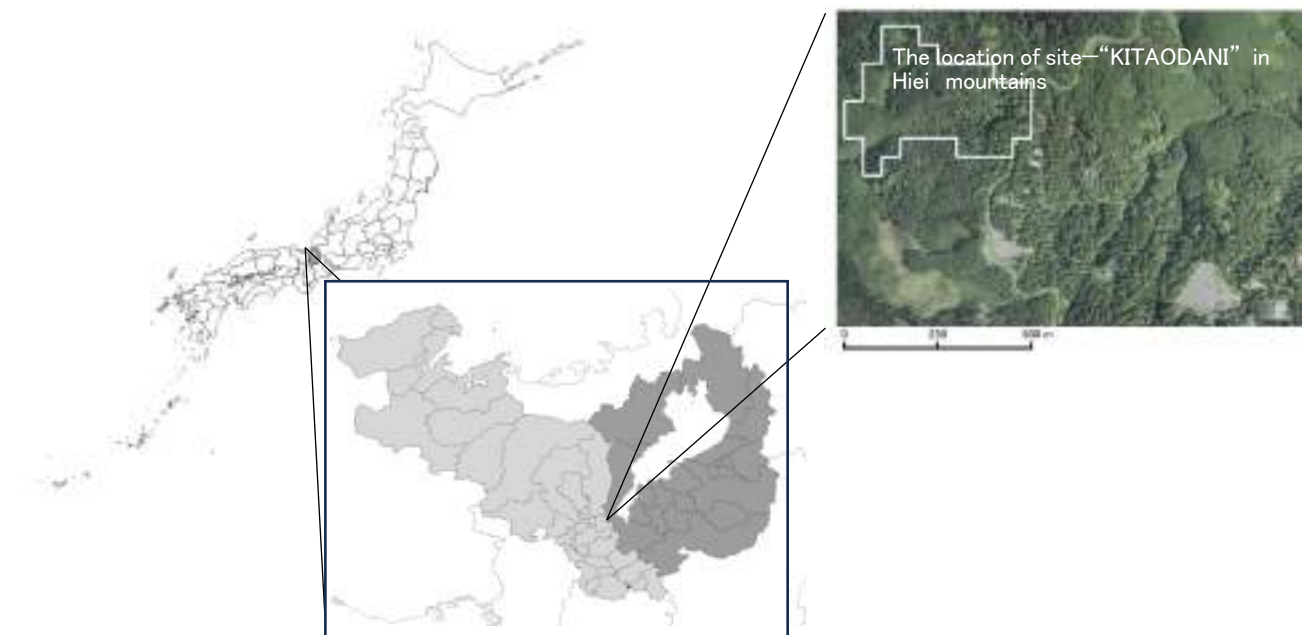


図 4-8 テストサイト位置図（比叡山西塔北尾谷）

4.5 試料

4.5.1 レーザ測量機器

今回のデータは、Phenix LiDAR System 社の Ranger LR を使用したレーザ測量機器で取得したものであった。表 4-2 に Ranger LR、そして比較・参考のために先の実験で使用した VLP-16、航空機に搭載されることがあるレーザ測量機 ALS-70 の仕様をまとめた。それぞれレーザの波長やフットプリント（ビーム径）が異なることから、仮に同じ高さから同じ角度でレーザを照射しても、計測される地物の 3 次元情報や反射強度が異なることが考えられる。

表 4-2 Ranger LR(使用 LiDAR) : 航空機搭載 LIDAR 例 : 室内実験使用 LIDAR 仕様

System	Phenix Lidar System Ranger LR	Leica ALS60	Velodyne VLP-16	Units
Accuracy	25(150m)	10(800m)	30(25m)	mm
Detection Range	1350	200-5000	100	m
Pulse Rate	750,000	200,000	300,000	Hz
Return/Echoes	7	4	2	
Beam divergence	0.5	0.15	3	mrd
Lazer wave length	1,550	1,064	903	nm

なお、反射強度に関する知見を得るための予備実験で使用した VelodyneVLP-16 と Ranger LR とは、レーザの波長やパルス数、ビーム径等すべてが異なるが、レーザ計測の精度は VelodyneVLP-16 よりも優れていることから、あえて VelodyneVLP-16 で計測しなすことなく、既存のものを流用した。

4.5.2 UAV

前述レーザ測量機器を、図 4-9 のシングルローター UAV、YAMAHA 発動機株式会社の FAZAR R に搭載してデータ計測を行った。比叡山山中 200ha 以上の計測では、長時間飛行が必須条件であり、モーターを



UAV	YAMAHA Motor Co.Litd. FAZAR R
Feature Type	Single Rotor
Engine	Gasoline
Flight Time	max 100 miinutes
Operational Altitude	2,800m
Weight	80kg
Payload	35kg
Operation	Manual/Programs

図 4-9 使用した UAV 仕様概要

動力とする電池式 UAV では電池の着脱や、頻繁な離着陸、計測場所の移動に時間がかかることから、長時間飛行ができる本体重量 80kg のガソリンエンジンを動力とした UAV の使用が実用的だと思われ、本 UAV でデータ計測が行われた。

4.5.3 取得データ

比叡山全体のデータ計測は、2021 年 10 月 25 日から 29 日、11 月 30 日、12 月 1 日で行った。本研究では、そのうち西塔北尾谷のものを使った。反射強度で問題となる土壌の乾湿の観点では、計測当日は曇りまたは晴れという状態であり、礎石や石の上に水が溜まっている状態でもなく、地面に水たまりがあるという状態でもなかった。

レーザ測量では、照射されたレーザが空間を通過する間、複数箇所地物にあたることで、その位置データが計測される。最初に返ってくるレーザは First Pulse、最後に返ってくるレーザは Last Pulse、途中で返ってくるレーザは Intermediate Pulse、1 回の照射で 1 つの反射しか返ってきていなければ、Only Pulse として、Pulse の区別がつくように記録される。

図 4-10 に計測されたデータをパルス毎に示す。Last Pulse や Only Pulse は地面に到達したものと考

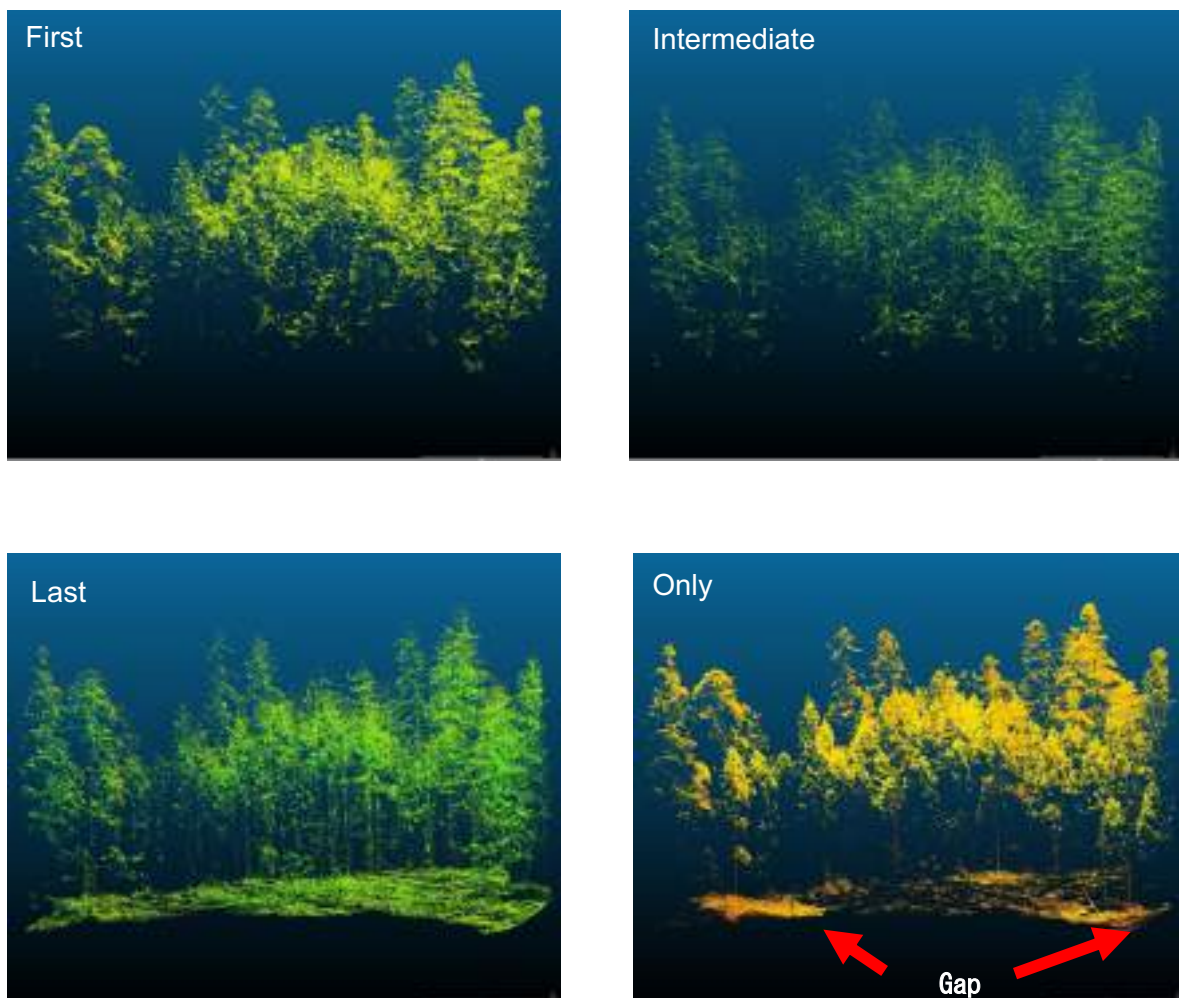


図 4-10 計測されたパルスの様子

えがちだが、実際はそうでもなく、地面に到達しない点群も多い。また、Last Pulse は満遍なく林床に到達している一方、Only Pulse は、ギャップ（樹冠が上空にない地面）の位置を示唆する情報になり得ることが分かる。

4.5.4 グランド・トルース

UAV レーザ計測の特性を把握するため、特に他研究（早川ら，2020）で注目してきた高密度の計測を行ったC削平地でグランド・トルースとなる詳細なデータを取得した。まず、樹冠の間を DJI 社の UAV Mavic Pro を手動操作しながら空撮し（108 枚の画像）、Agisoft PhotoScanVer1.4.1 にてオルソフォトに加工した。このオルソフォトと、UAV レーザから作成した超細密微地形図とを、ArcMap10.8 のジオリファレンス機能により相互参照し、オルソフォトの幾何補正及びジオコーディングを行った。

あわせて、礎石は四隅、自然石は中心 1 点を、トータルステーションで測量（放射測量）し、そのうちレーザ測量結果から現地測量と対応がとれた礎石の角の座標 (EPSG コード 2448) を使って測量成果に、絶対座標を付与した。このオルソフォトとトータルステーションによる測量成果をグランド・トルースとした。グランド・トルースを図 4-11 に示す。

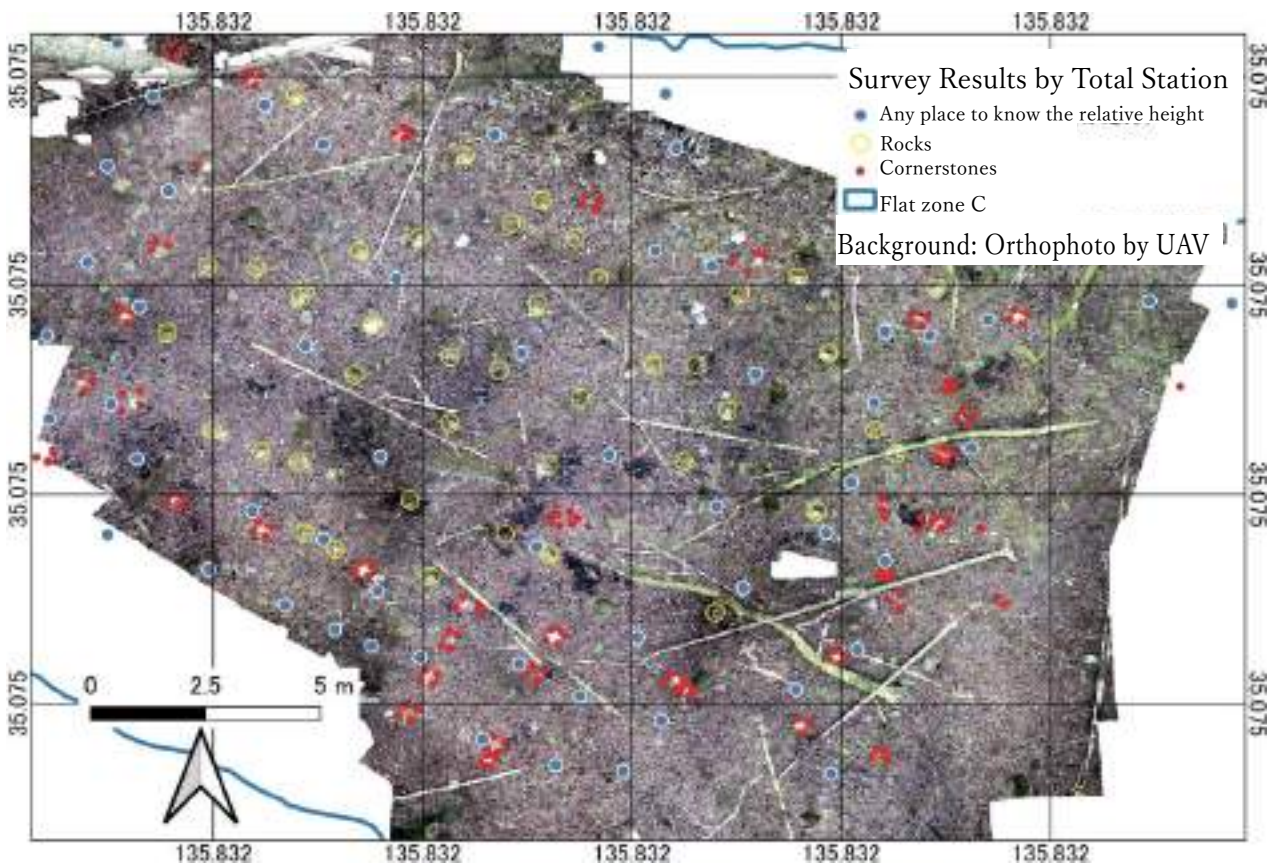


図 4-11 グランド・トルース

4.6 データ加工

4.6.1 フィルタリング

得られた点群を、TerraSolid 社の TerraScan に実装された地上点抽出アルゴリズム (Axelesson, 2000) に6度かけ、全点群から地面をフィルタリング (分類) した。処理に用いたパラメータは森林地帯の解析であることから、max building size (樹冠のサイズと読み替えた) を 10m とした以外は、Axelesson のアルゴリズムで推奨されているパラメータを用いた。その結果、図4-8の北尾谷全体では平均 10,667.4 点/m² の点群が計測され、そのうちの 14.3 点/m² が地面に到達していると分類された。一方、UAV の飛行間隔を狭め、かつ十字に飛行させ、詳細な計測を行った C 削平地では、平均 36,587.3 点/m² の点群が計測され、このうち 14.1 点/m² が地面に到達したと分類された。

次に、先にフィルタリングした地面の点群を基準にして、そこから上に 50cm 以内のものを図 4-12 のように更に地表の地物情報として抜き出した (図中緑点)。地上から 50cm の間のデータには岩・倒木・草本などを示す情報を含んでいることが期待できる。

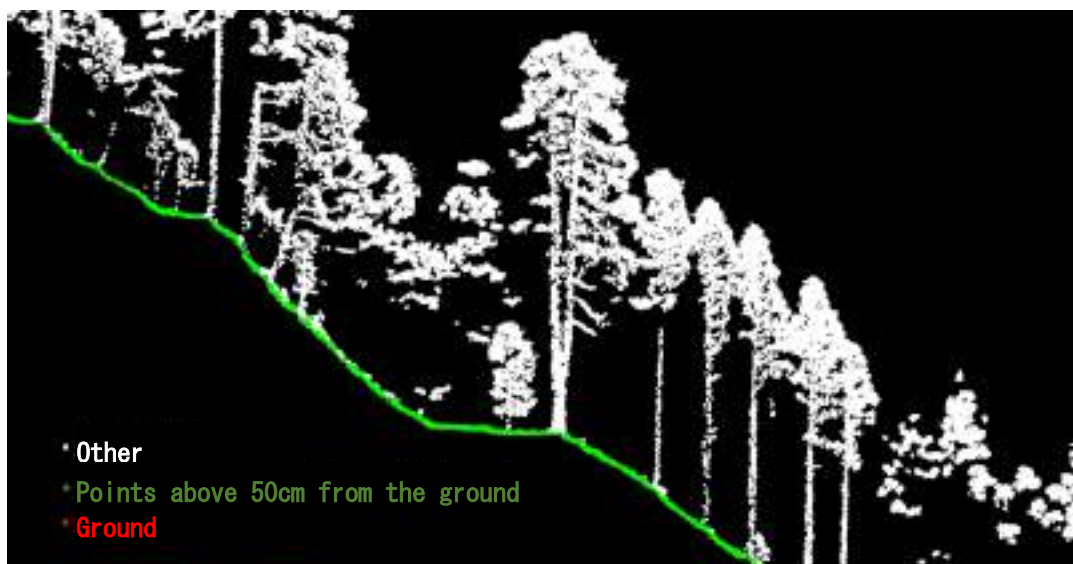


図 4-12 分類されたパルスの様子

4.6.2 反射強度補正

Luzum ら (2004) は、レーザの反射強度が距離の二乗に反比例して弱くなる性質があることを利用した反射強度補正法を提案している。

そこで今回、計測されたレーザ反射強度を Luzum らの手法で補正した。具体的にはレーザ計測を行ったプラットフォームの軌跡とレーザ計測時刻から、レーザ計測時のプラットフォームの位置を求め、照射された各レーザが地上に当たるまでの距離を計算し、この距離を使い、記録されたレーザ反射強度を全て同じ距離で計測されたとして補正するものである。本試みでは、Luzum らが用いたレーザ測量機器とは異なる機器を使用していることや、計測対象やそれを取り巻く環境、計測目的等が異なるため、全く同じ成果を期待できるものではないが、反射強度の有用性を評価するため、まずはパルスの種類が Only のものを点群から抽出し (途中に遮るものがないとして)、且つ、先の調査から得た知見である、

プラットフォーム (UAV) から地上への照射角度が 37° 以内のものだけを対象に反射強度の補正を行った。

4.6.3 超細密微地形図の作成

先に示したように、今回使用したデータは、地面に到達した点群が平均で 14.3 点/m²であった。このとき、その点群が 1m²に均等に分布していたと仮定すれば、1点はおおよそ $26\text{cm}(\sqrt{1(\text{m}^2) \div 14.3(\text{点}/\text{m}^2)}) \times 100$ の地上分解能に相当することになる。そこで、地上分解能 20cm の DEM を北尾谷全体で作成した。そして、その DEM から GIS ソフトウェアである QGIS で地面の傾斜を計算した。また、DEM から GIS ソフトウェアである SAGA の機能の 1 つである Topographic Openness を 15(Radial limit)/ Sectors(方

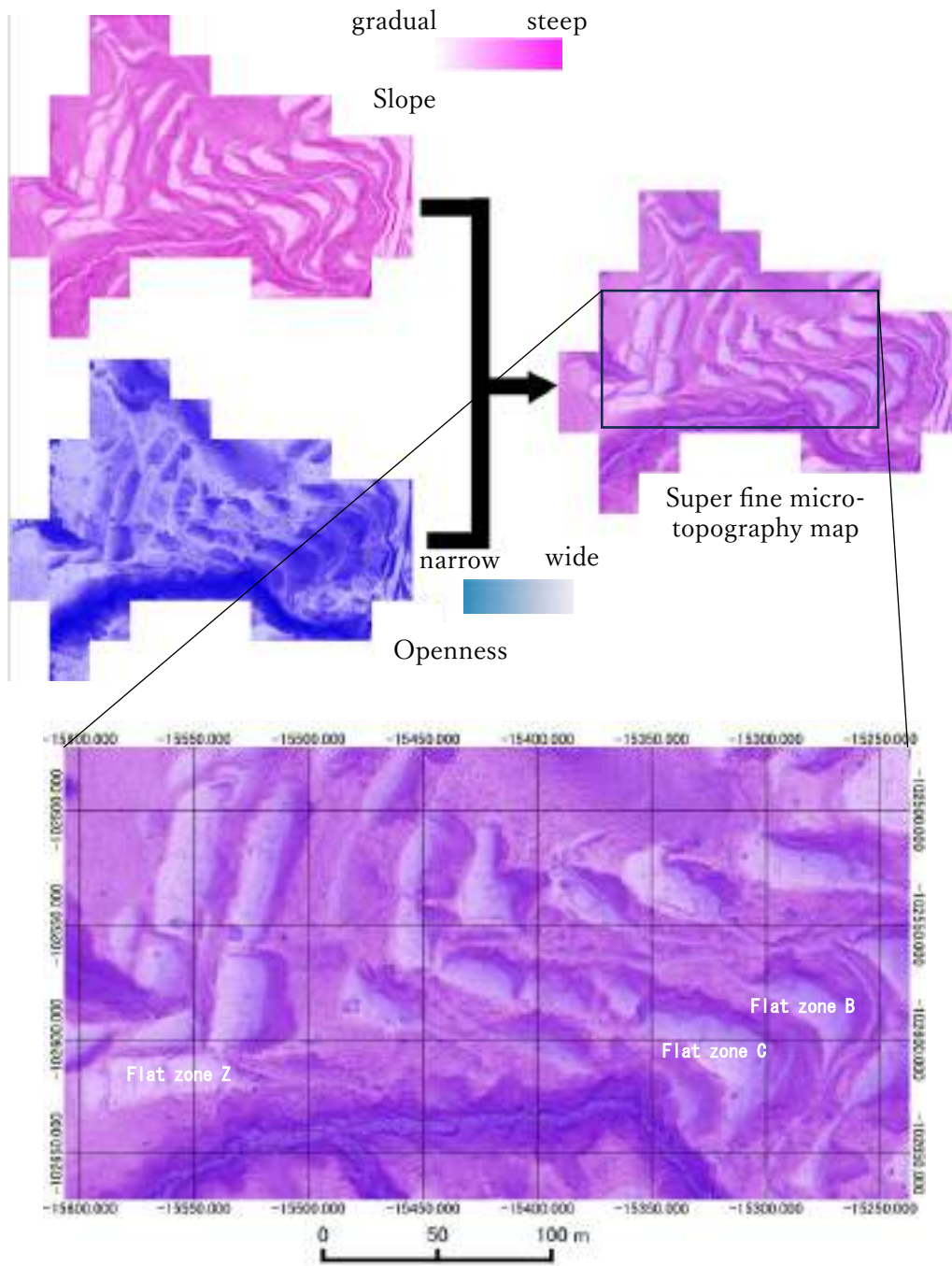


図 4-13 微地形図の合成

法)/3 (マルチスケール係数) /8(セクターの数)のパラメータで開度 (横山ら, 1999) を計算し、そこで生成された正の Openness 画像と傾斜画像とを図 4-13 のように合成し、超細密微地形図を作成した。

今回、このようにして微地形図を作成したのは、作成方法が公開されている微地形図のうちの1つである CS 立体図は、尾根・谷の着色により、尾根・谷の位置や形状がよく分かる一方、今回対象としている地面の微小な凸凹や岩などは、その着色により気づき難くなっている。これを回避するため、シンプルな傾斜と凸凹だけで微細な地面の凸凹を表現することにした。

ただし、この作り方の超細密微地形図も着色の仕方によっては図 4-14 のように、凸凹の視認しやすさに若干違いがあるように思われた。複数の色の組み合わせを試した結果、傾斜はピンクのグラデーション、開度は青のグラデーション、そしてピンクの傾斜画像を透過率 50%で開度画像に重ねたものが地面の起伏を視認し易いと感じ、以降この配色で超細密微地形図を作成することにした。

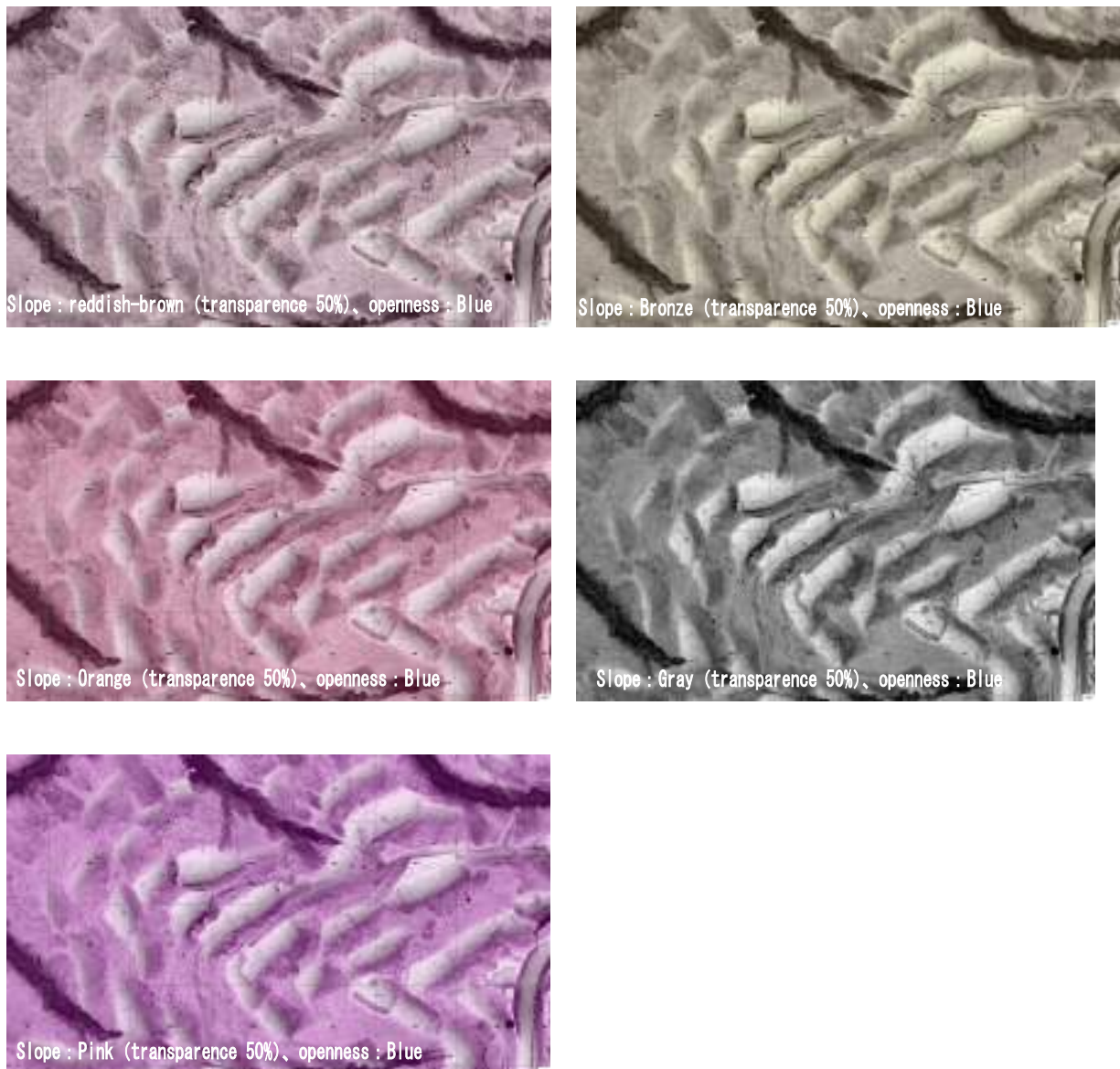


図 4-14 微地形図配色の検討例

4.6.4 超細密地表状況図の作成

地面の表面に存在する地物の状況を把握するため、前述 DEM の作成元となった地面の点群(図 4-12 赤点) から地上 50cm 以内の点群(図 4-12 緑点) を、全点群から全て抜き出したところ、北尾谷全体では 778.5 点/m² が、詳細な計測を行った C 削平地では 8,812.7 点/m² が、地面から 50cm 以内の点群として抽出された。

地面から 50cm 以内に位置する点群は平均で 778.5 点/m² であった。その点群が 1m² に均等に分布していたと仮定すれば、1 点はおよそ 3.58cm の地上分解能に相当する。そこで図 4-12 の緑点と赤点とを合わせた点群を地上分解能 3cm のラスターデータに出力し、そのデータから石・草木・倒木を含んだ地表の傾斜を計算し、微妙な地面の起伏を視認し易かったピンク色のグラデーションで配色して、図 4-15 のような超細密地表状況図を作成した。図 4-16 に C 削平地周辺の超細密地表状況図を拡大したものを示す。

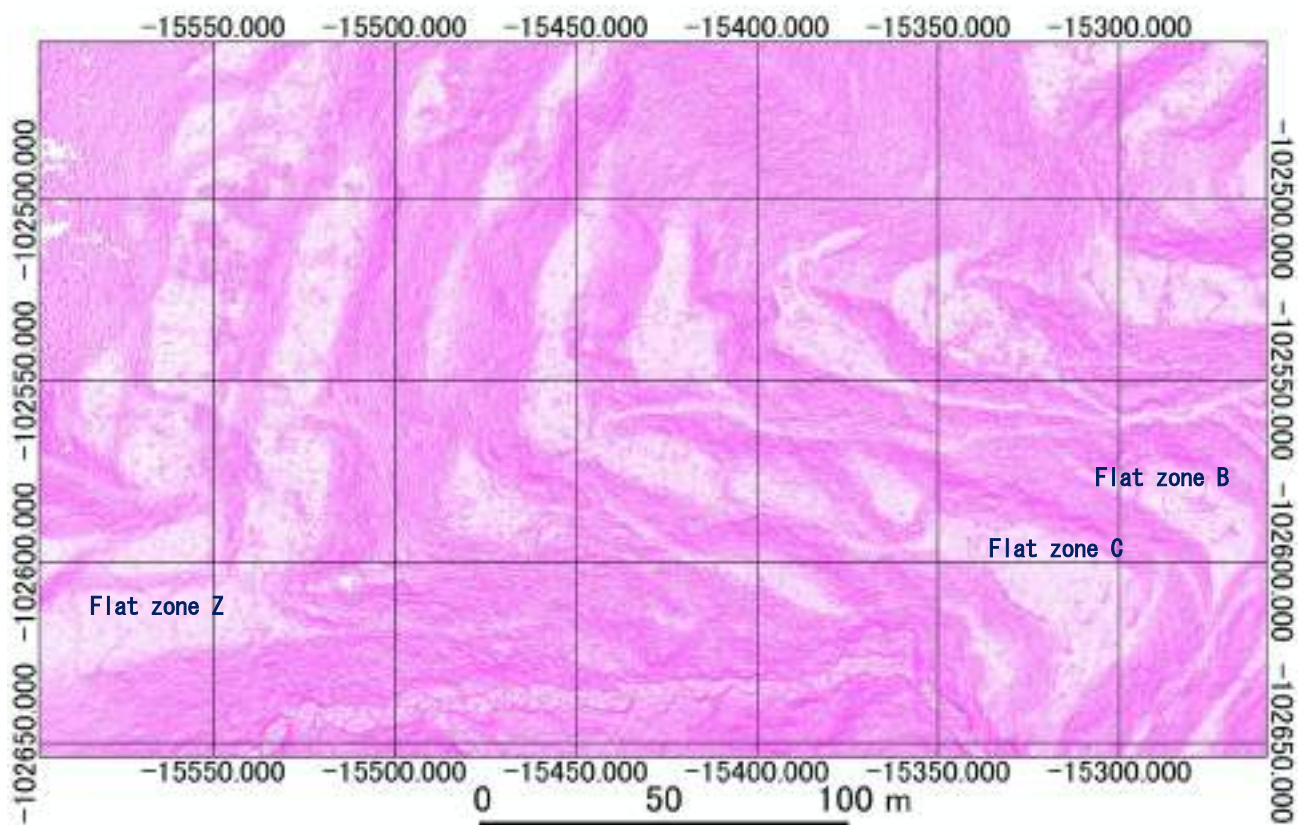


図 4-15 超細密地表状況図

なお、点群を 3cm の DEM に出力する際、3cm 四方の空間には、標高の異なる複数の点群が存在することがあるが、今回使用した TerraSolid 社の TerraScan では、3cm 四方に含まれる点群の標高の最高値、最低値、平均値、TIN モデルに基づく値を用いて作成する方法のいずれかを選択することになっている。グラウンド・トゥースとの比較から図 4-17 に示すよう最高値あるいは平均値がもっとも現地の状況を忠

実に再現できていると考え、今回は最高値を使って超細密地形状況図を作成した。

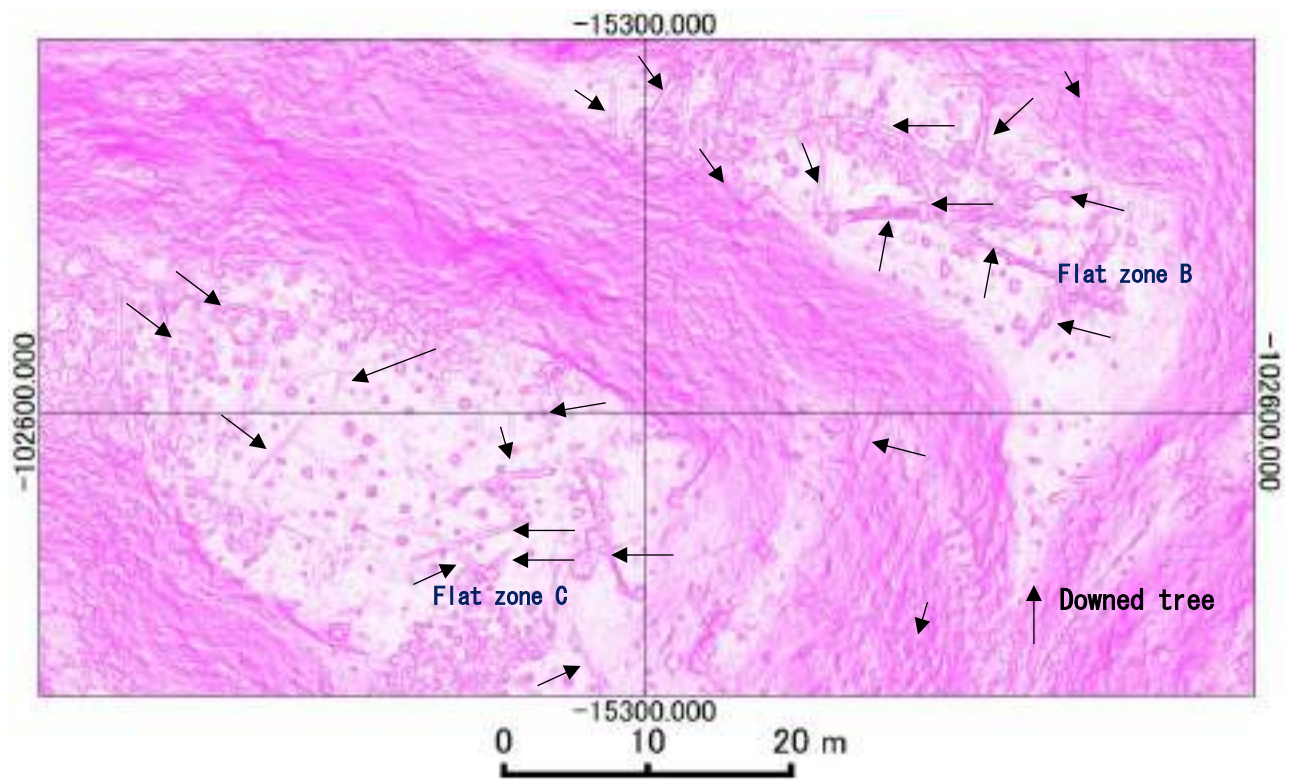


図 4-16 超細密地表状況図の C 削平地拡大図

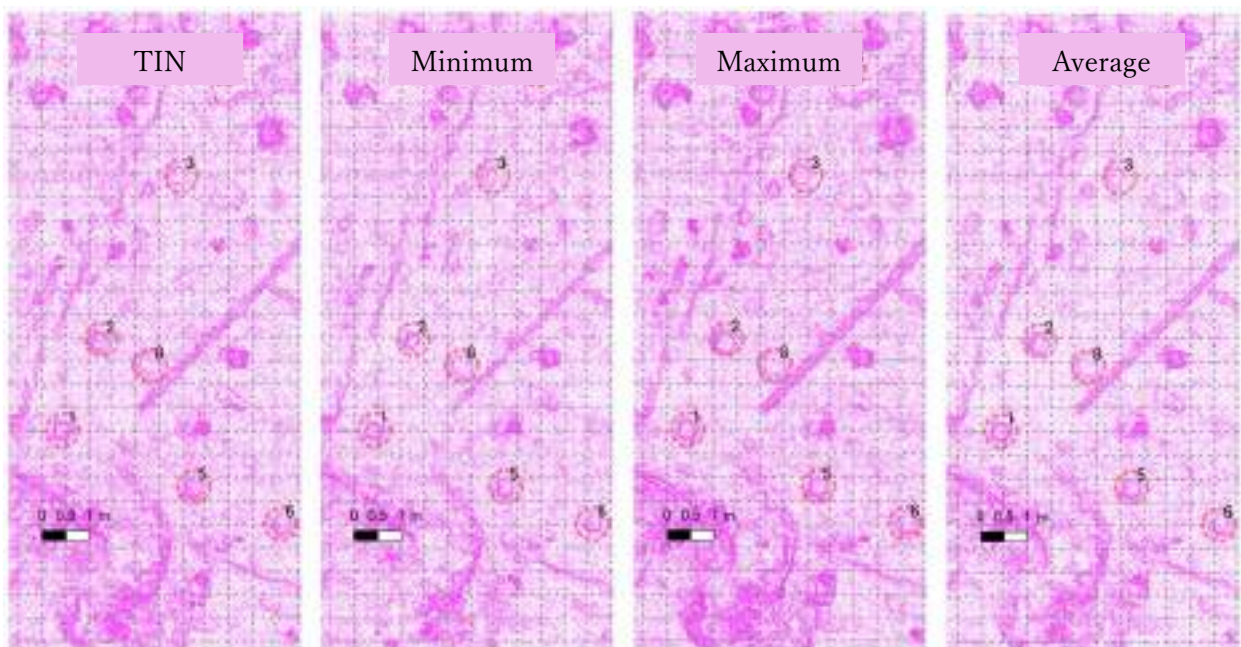


図 4-17 超細密地表状況図作成に当たって検討したデータ作成方法

4.7 結果

4.7.1 歩道（超細密微地形図）

UAV レーザと航空レーザとの比較のため、航空レーザ・データから作成される微地形図（地上分解能 50cm）と UAV レーザから作成する超細密微地形図（地上分解能 20cm）とを比較しながら歩道の視認性を検討する。二人が余裕を持ってすれ違うことができる幅員 1.8m 程度の山道なら、図 4-18 右の航空レーザでも図 4-18 左の UAV レーザでも明瞭に識別できる。例えば、図 4-18 箇所 A である。しかし、同じような幅員でも航空レーザでは識別が難しくなる場所も見られた。その結果、山道が途中で断絶したように見られた。例えば、図 4-18 箇所 B である。そうなる原因は、航空レーザの点密度が低かったため、レーザが地面に到達しなかったからと思われる。

また、二人が余裕をもってすれ違うことができない幅員が 0.5m 以下の山道では、例えば図 4-19 上段

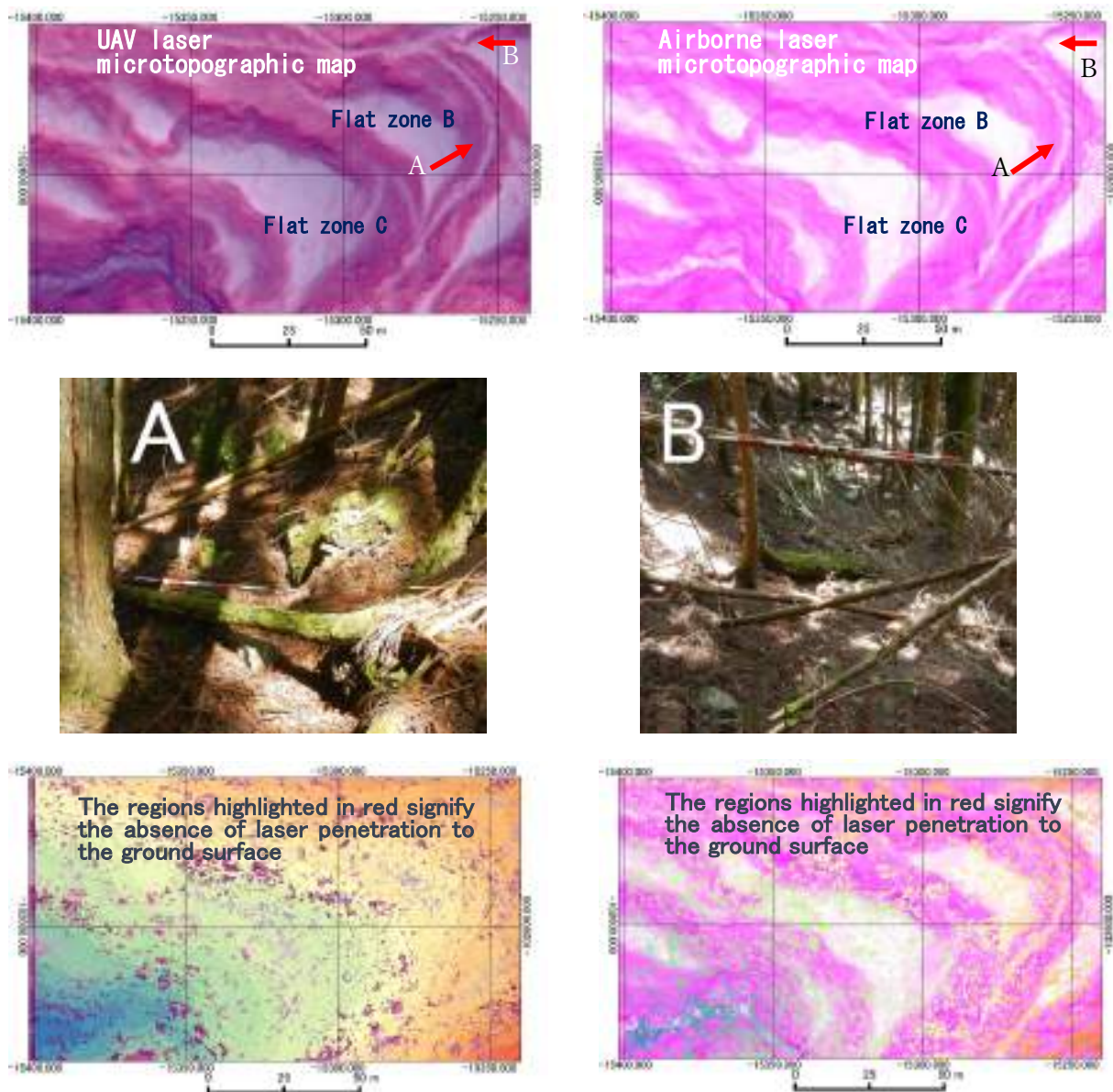


図 4-18 UAV レーザ・航空レーザの幅員約 180cm の超細密微地形図での見え方の違い

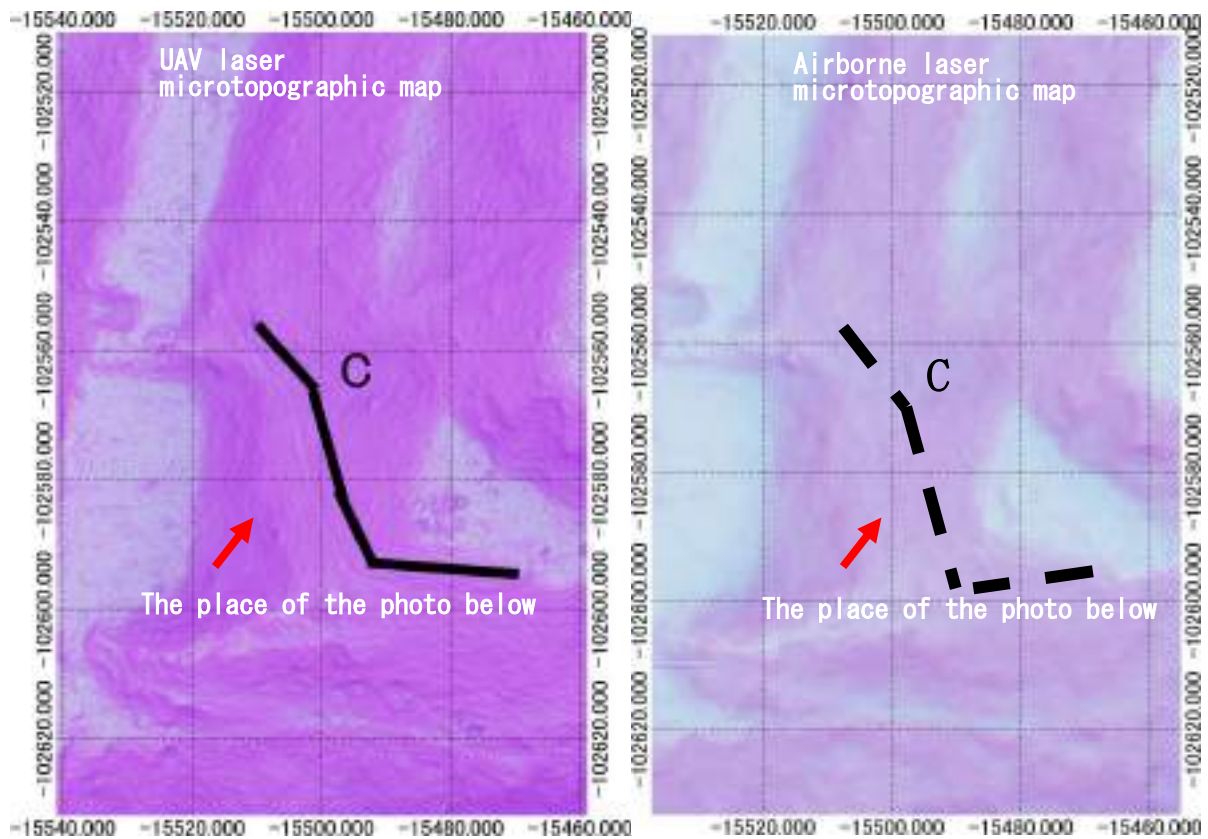


図 4-19 航空レーザと UAV レーザとの幅員約 90cm の歩道の見え方の違い

右の航空レーザのように視認しづらかったが、UAV レーザでは明瞭に現れていた。それぞれの地上分解能が航空レーザでは 50cm、UAV レーザでは 20cm ということを考えると、当然の結果と思われる。

4.7.2 盛土・石積み（超細密微地形図）

林内ではときおり炭焼跡など自然地形とは異なる人工的な凸凹が存在する場所がある。今回は、それがかつて比叡山に存在していた堂舎・山坊の盛土に見立て、その検出し易さについて確認した。

UAV レーザと航空レーザの微地形図から視認できる盛土の差異は以下のものであった。

UAV レーザでは、人工的な形状の盛土が明瞭に視認できた。盛土は高さ 10cm~40cm 程度である。一方、図 4-20 の上段中図のように航空レーザでも、盛土と思われる箇所が確認できるが、盛土と地盤との境界が不明瞭で、自然地形なのか人工地形なのか判別が難しい箇所もあった。また航空レーザでは盛土での面積は小さめに出るようであった。

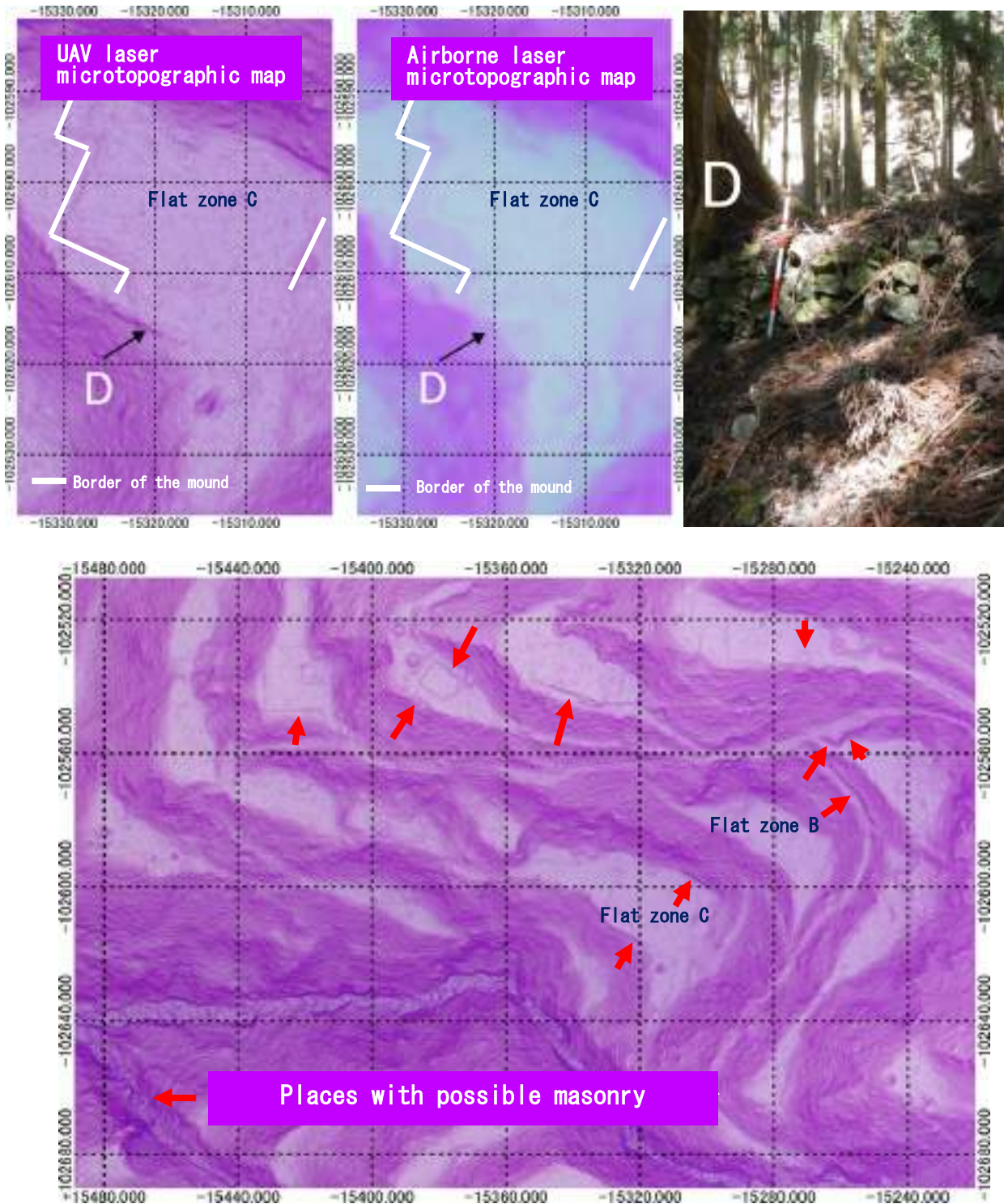


図 4-20 UAV レーザ・航空レーザによる盛土や石積み土留) の見え方の違い

一方、UAV レーザでは、図 4-20 上段左の D に示すよう、急激な傾斜の切り替わり地点が線上に伸びる

箇所が見られた。同じ箇所は航空レーザでは視認できない。現地を確認したところ、図 4-20 上段右のように、土留の石積みが、そのような図形となっていることが分かった。山を歩いていると時々、かつて伏せ焼きで炭を作ったと思われる地面の凸凹や、土留の石積みを確認できるときがあるが、そうした山中の人工物は 10,000 点/m² あれば十分視認可能のようである。

4.7.3 礎石（超細密地表状況図・反射強度）

地面の傾斜と開度を合わせて作成した微地形図は、例えば空間分解能が詳細でも、地面抽出アルゴリズムが近隣点群の中で最低点を抽出し、その最低点を起点に近隣の低い点を探して、あれば地面の点群に組み込むという性質上、地面から上の微小な凸凹は除外される傾向にある。そのため地面に転がる石や丈の短い草本類は微地形図では表現できないことが考えられる。

そこで、礎石（岩）をレーザの 3 次元情報から視認するための情報として、前述超細密地表状況図を使用して、超細密微地形図では捉えられない地表の細かな凸凹を捉えているものと期待して、以下の検討を行った。

C 削平地の超細密地表状況図と礎石等の位置とを重ねたものが図 4-21 である。例えば図中 1、2、5、6、7、8 等など、礎石の存在を示唆する形状が見られた。グランド・トルースから、それらが 10cm 程度地面から突出している礎石であることが認められた。一方、図中に矢印で示した 7 に隣接している赤丸や 11 に隣接している赤丸は、形状は礎石に似ているが、実際は近くの斜面から移動してきたと思われる自然石であった。また、15、16、17、18、21、28、27 等は埋没した礎石であり、形状から検出することはできなかった。

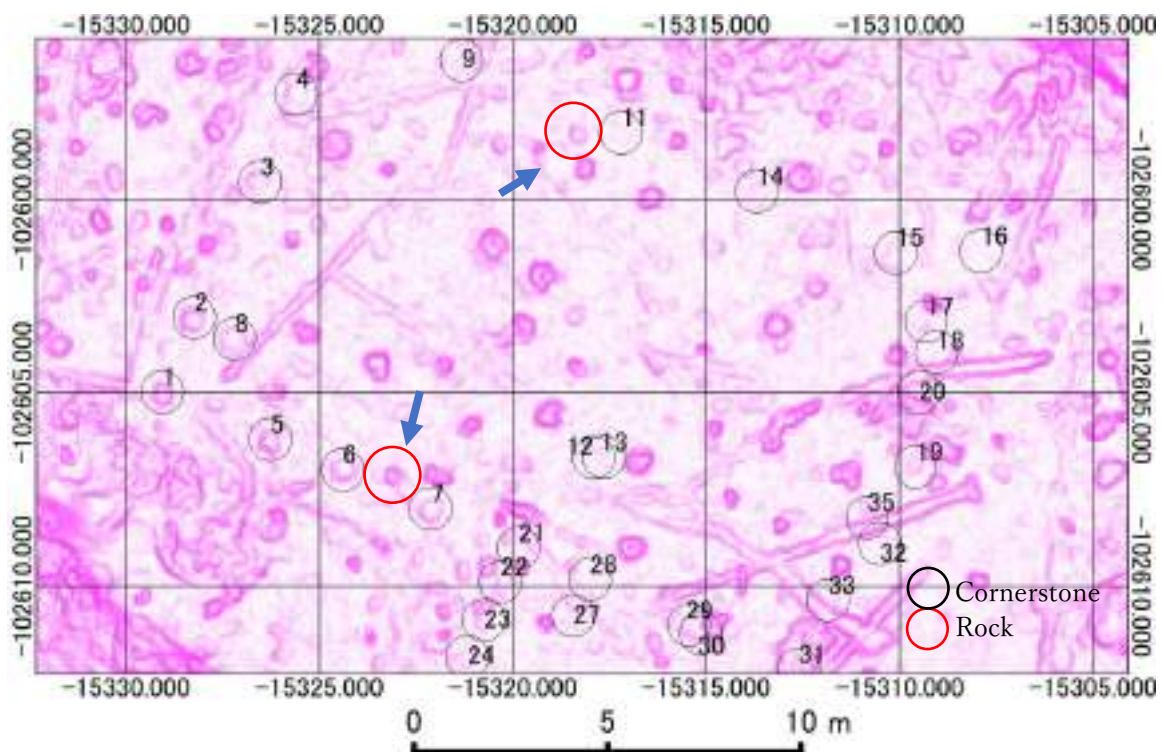


図 4-21 超細密地表状況図で確認できる C 削平地の地表の起伏の様子

そこで、レーザが測量機器から発射され、地表に到達するまでどこにも遮られることはなかったと思われる Only Pulse の反射強度を Luzum の手法を用いて補正し、礎石と思われる形状の地物から礎石を検出しようと試みたところ、図 4-22 の右図を得たが、礎石の絞り込みが可能なデータとはならなかった。むしろ補正前では礎石の中心に、周りと比べて反射強度が若干強いと思われる箇所（図 4-22 左図矢印部分）があったが、反射強度を補正することで反射強度の差がなくなり、礎石の検出に使える情報にならなかった。

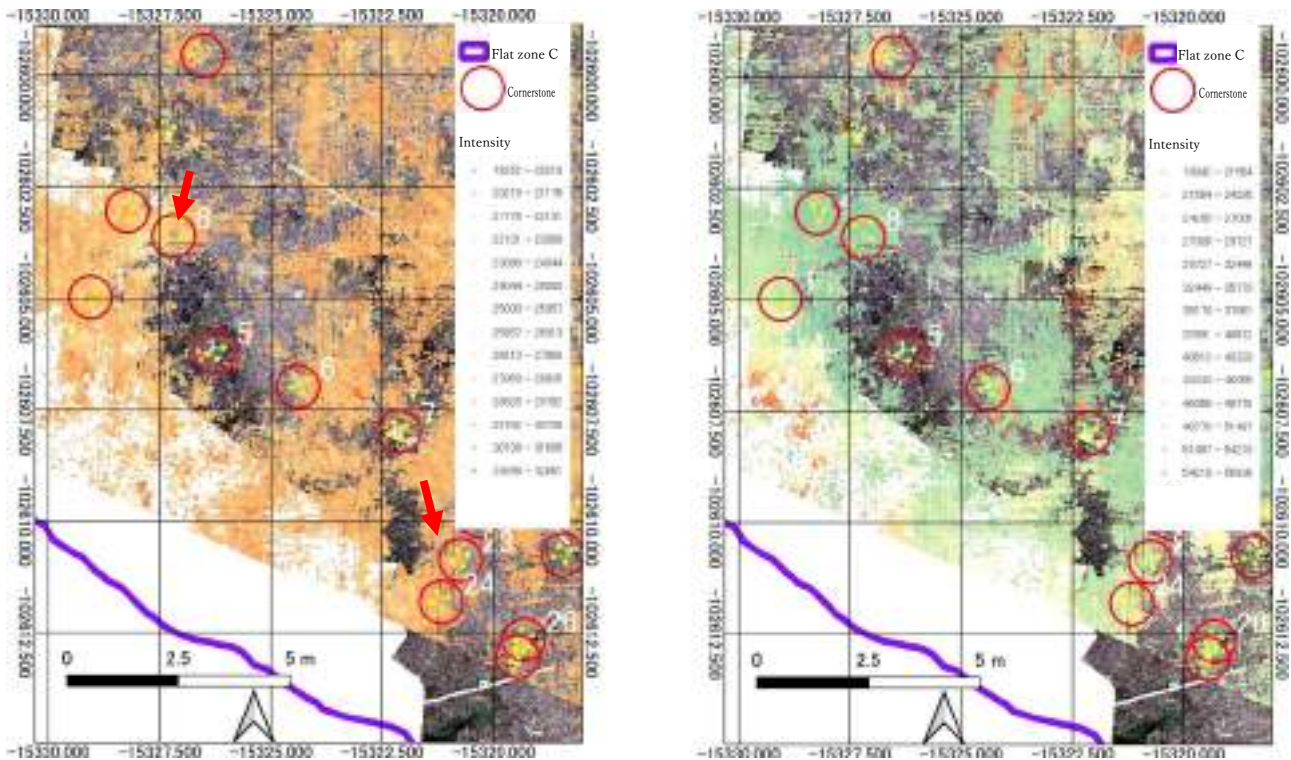


図 4-22 反射強度の補正による礎石・自然石の検出の試み

4.7.4 立木（超細密地表状況図）

航空機に搭載したレーザ測量機器から計測する 4 点/m² の点があれば、データ解析により立木位置が把握できる。同時にレーザ測量によって推定される樹高と立木本数から、相対幹距比も推定できる。そのようなことから、要間伐林分マップなどを作るガイドラインなどが林野庁で公開されているが、この手法は、被圧された樹木（隣接する樹木の樹冠下に置かれる樹木）が計測対象とならず、本数を過小評価する傾向にあることが言われている。今回、航空レーザよりも遥かに点密度が高い UAV レーザでは、被圧木の樹冠にレーザが到達しなくても、被圧された樹木の幹にレーザが到達することも考えられる。そこで、今回のテストサイトの点密度が最も高い C 削平地で立木がどのように認識できるか、改めて図 4-21 で確認してみた。その結果、地面と地面から 50cm の点群から作成した超細密地表状況図では、岩か樹木か識別できず、樹木本数は判別できないことが分かった。

4.7.5 倒木や草本類（超細密地表状況図）

倒木や森林のギャップに生育している草本類は、図 4-23 の UAV レーザの超細密地表状況図で識別可能

であった。草本は、図 4-23 で見られるよう、テクスチャーが荒い少し盛り上がったまとまりある地物として表現されていた。

一方、倒木は図 4-16 や図 4-21 を改めて見ると、超細密微地表状況図で視認できているようだが、点密度が 6,000 点/m² を下回るような箇所では、倒木が一本の連続したオブジェクトとして表現されず、小さく刻んだ丸太が一直線に並んでいるように見える箇所もあった。これは地表状況図の地上分解能が当該地の点密度の割に粗いことから、そのようになったものと思われる。

ちなみに、図 4-23 の下段に示すよう、UAV で作成した超細密地表状況図を作成する方法で航空レーザ・データによる地表状況図を作成したが、倒木も草本類の存在も視認できるような地図にはならなかった。

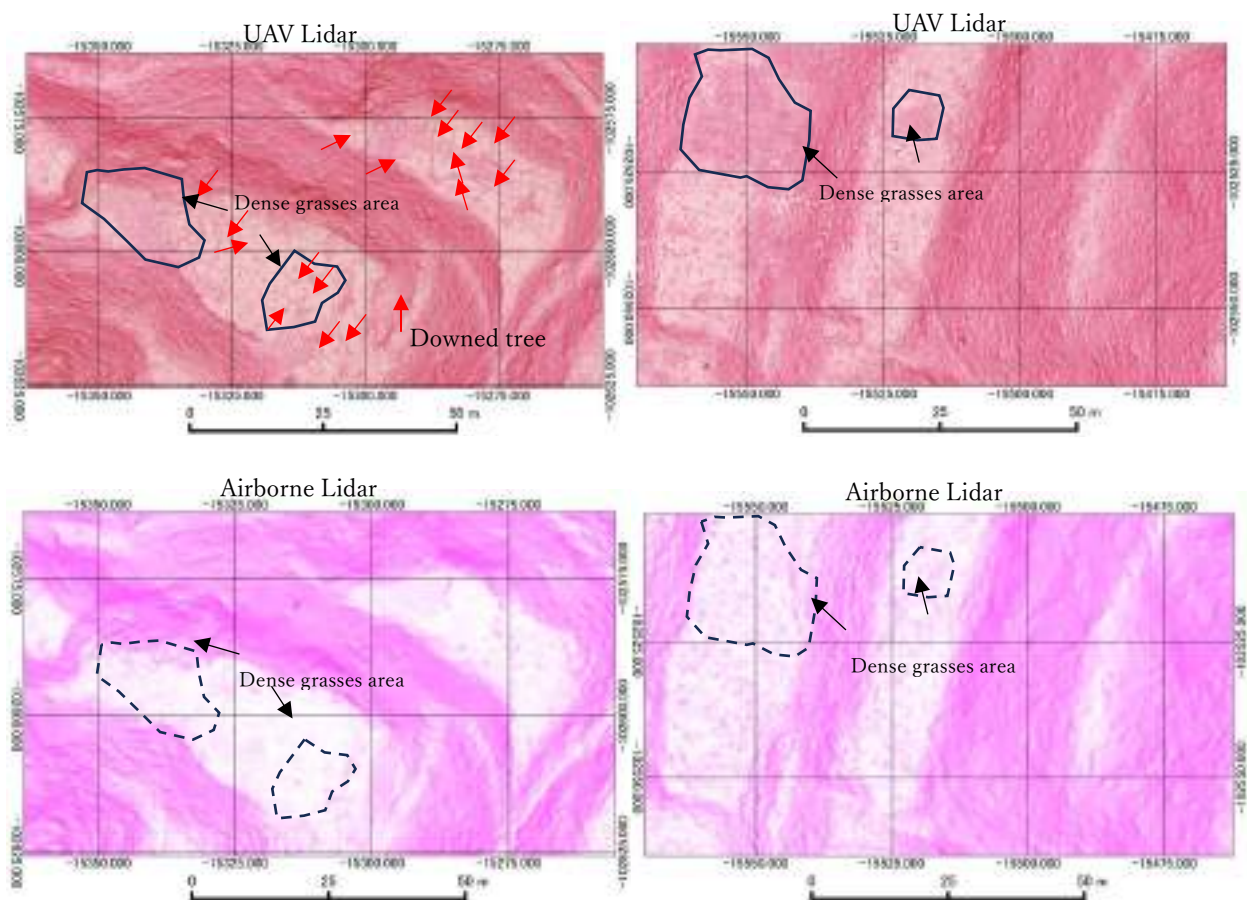


図 4-23 超細密地表状況図による UAV レーザ・航空レーザによる倒木や草本の見え方の違い

4.7.6 獣道（超細密地表状況図）

獣道は境界明確化とは逸れるが、森林を巡る問題の一つである鳥獣害対策で使える情報になるか検討するため、その視認性も確認した。先に示したように、地上分解能が 20cm の超細密微地形図なら、幅員が 90cm 程度の歩道でも視認できるが、獣道のように動物が何度も移動するうちにできる、地上の細かい線上に伸びる凹地は、超細密微地形図では確認できないと思われる。そこで、超細密地表状況図で確認

してみた。図 4-24 がそれである。

獣道は足元にそれがあつたときに認識できるような微小な凹地形であるが、平均点密度が 10,000 点/m² 程度から作成した地上分解能 3cm の超細密地表状況図なら、等高線を緩やかに横切る細い線形（人工的ではない直線と時折方向が変わる）から、獣道でも検出できているものがあるように思われた。

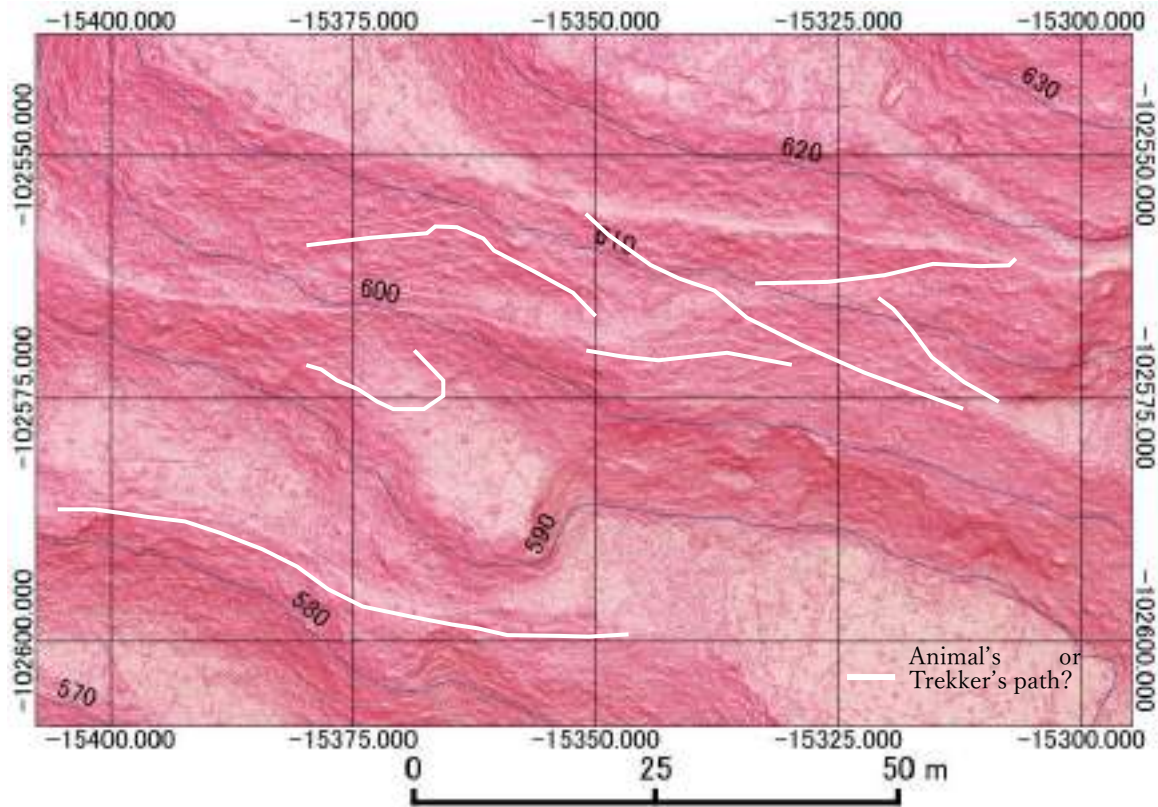


図 4-24 超細密地表起伏図による獣道（推定）の見え方

4.7.7 まとめ

以上の結果を表 4-3 の一覧表にまとめた。特に UAV がレーザでは、倒木・下草・獣道という航空レー

表 4-3 UAV レーザによる簡易林床把握できる対象と地図

		Airborne Laser	UAV Laser	
		Microtopographic map Resolution = 50cm	Microtopographic map Resolution = 20cm	Grand Surface Condition Map Resolution = 3cm
Trail	W=1.8m	○	◎	—
	W=0.9m	△	◎	—
Mound		△	◎	—
Masonry		×	◎	—
Rock		×	—	△
Standing Tree		×	—	△ Depending on point density and measurement method
Downed Tree		×	—	◎
Grasses		×	—	○
Animal Path		×	—	○ Depending on point density

ザからでは引き出せない情報を持っていることが分かった。

4.8 手法改善の検討

4.8.1 礎石・立木検出のための超細密地表状況図の改善

UAV レーザ測量データから作成する超細密地表状況図を使えば、たとえ樹冠下に埋没する礎石でも、地表から突出してさえいれば、図 4-21 のように検出できる可能性があることが分かった。しかし、その形状だけでは、立木・岩・切株などを分別することができなかった。そこで、レーザの反射強度を利用したが、Luzum らの反射強度補正法は有効ではなかった。

そうした結果をふまえ、反射強度によらず、超細密地表状況図から礎石や立木を識別する方法として次の処理を試みた。

図 4-21 の凸凹は、グラウンド・トルース、現地踏査から概ね礎石、自然石、立木、草本であることが分かっている。そこで、超細密地表状況図から礎石・自然石と立木・草本とを分別することができれば、林内に散在する石や立木の確認方法になり得る。このことを念頭に以下の処理を行った。

礎石や自然石は、地上 50cm 以下に収まっている。一方、計測される点群のうち地上 0.5~1m の範囲に存在する点は、木本の幹や草本の葉だと思われる。そこで、点群から超細密地表状況図のもとになった、地上から 0.5m の点群に加え、地上 0.5~1m の点群を抜きだし、それらを地表状況図に重ねた。その結果が図 4-25 である。黒の部分が立木・草本と考えられることから、超細密地表状況図で黒部分周辺を無視して残った突起物として認識できるものが、形状から礎石や自然石と考えて良さそうである。図 4-21 と図 4-25 とを比較すると図 4-25 のほうが礎石候補を視認し易くなっていることが分かる。

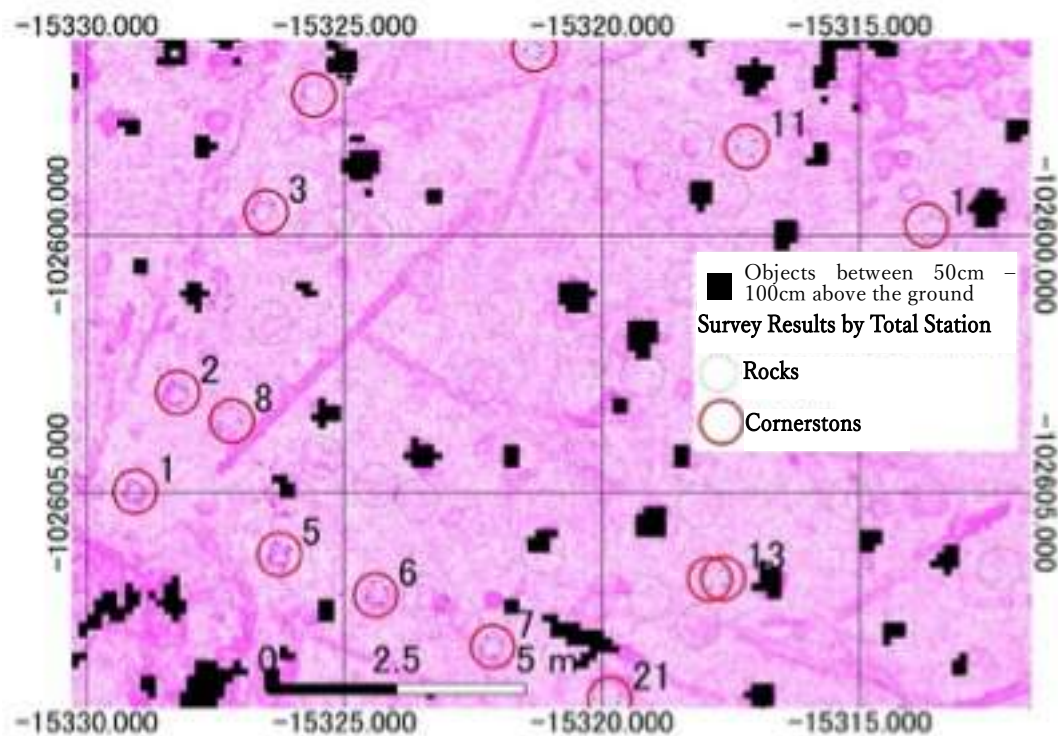


図 4-25 地表 0~50cm の地物と 50~100 に存在する地物の位置 (C 削平地)

この方法が、他の場所でも適用可能か検討するため、他に礎石の存在が知られている、C 削平地上部で暫定的に B 削平地と命名した場所でも（図 4-13 参照）同様の方法で礎石候補の絞り込みを試みた。図 4-26 に超細密地表状況図、図 4-27 に図 4-26 上に地上 0.5~1m の間に存在する点群位置を重ねたものを示す。B 削平地は C 削平地と異なり、花崗岩を正方形に加工した礎石は少ない。代わりに、30cm 四方程度の大きさの自然石を、その平らな面を上に向け並べたものが多数ある。図 4-26 だけでは、そうした自然石や礎石が判別しづらいが、図 4-27 のように示されれば、自然石・礎石と思われるものを超細密地表状況図から絞り込むことができそうである。

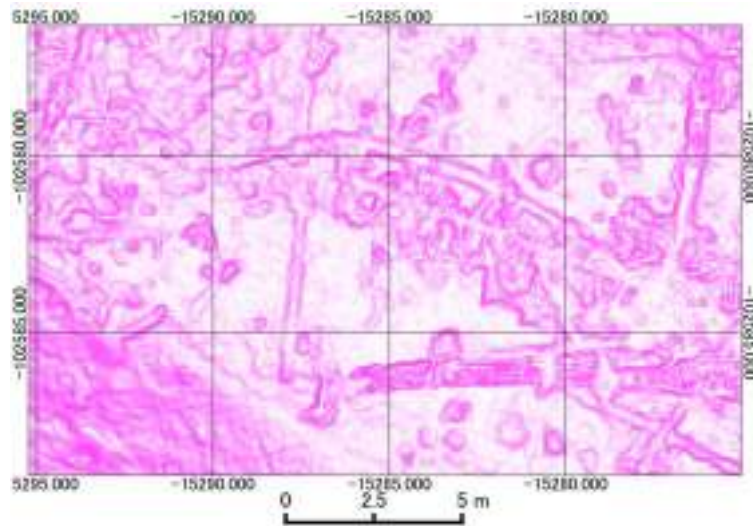


図 4-26 B 削平地超細密地表状況図

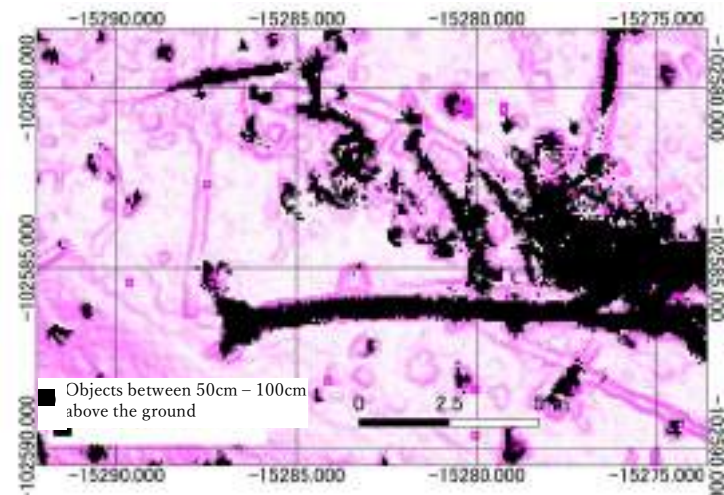


図 4-27 地表 0-50cm の地物と 50~100 に存在する地物の位置 (B 削平地)

しかしながら、C 削平地も B 削平地も表 4-4 のような高密度なレーザ測量を行っているため、こうした結果が得られた可能性がある。そこで、図 4-13 の北尾谷で、低めの点密度で取得され、暫定的に Z 削平（図 4-13 参照）と命名した図 4-28 の削平地の超細密地表状況図にも、上記手法を適応し、手法の汎用性を確認した。その結果が、図 4-29 である。

表 4-4 UAV レーザの地面からの高さ別点密度

	削平地	Area(m2)	TOTAL	GROUND	0-50cm	50-100	100-150	150-200	Other
Number of points	C	1,201.3	43,952,835.0	16,925.0	5,522,162.0	115,358.0	74,467.0	44,644.0	38,179,279.0
	B	541.4	15,018,995.0	8,909.0	1,589,313.0	154,314.0	60,775.0	47,057.0	13,158,627.0
	Z	1,067.9	8,197,418.0	10,135.0	248,993.0	4,100.0	2,759.0	3,131.0	7,928,300.0
Point density (points/m2)	C		36,587.3	14.1	4,596.8	96.0	62.0	37.2	31,781.3
	B		27,740.6	16.5	2,935.5	285.0	112.3	86.9	24,304.4
	Z		7,676.2	9.5	233.2	3.8	2.6	2.9	7,424.2
	Reference : In case of Airborne Lidar		46.5	1.7	2.8	0.3	0.3	0.4	
Percentage (%)	C		100	0.039	12.564	0.262	0.169	0.102	86.864
	B		100	0.059	10.582	1.027	0.405	0.313	87.613
	Z		100	0.124	3.037	0.050	0.034	0.038	96.717
	Reference : In case of Airborne Lidar		100	3.656	6.022	0.645	0.645	0.860	
Rough guideline for ground resolution of the map (cm) $\sqrt{10000/(\text{point density})}$	C			27	1	10	13	16	
	B			25	2	6	9	11	
	Z			32	7	51	62	58	
	Reference : In case of Airborne Lidar			77	60	183	183	158	

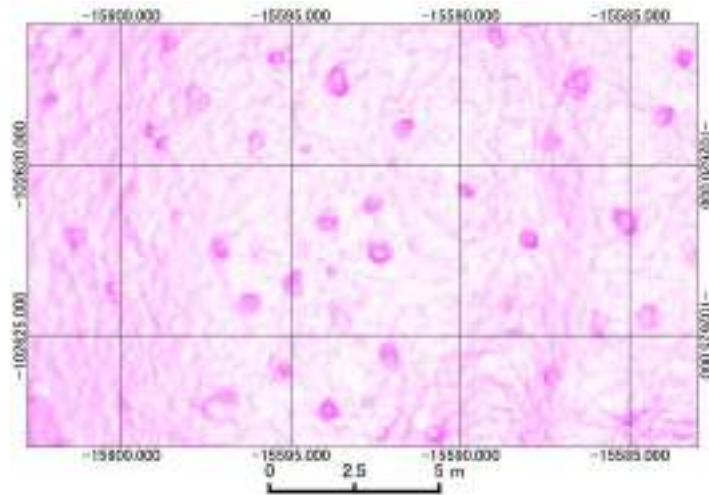


図 4-28 Z 削平地超細密地表状況図

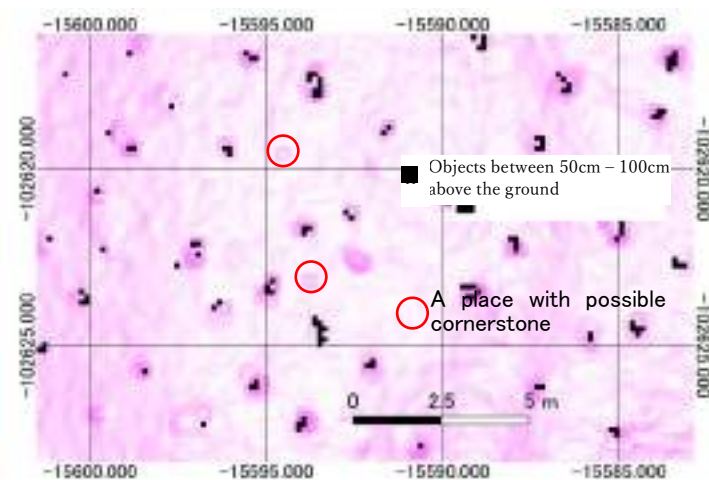


図 4-29 地表 0-50cm の地物と 50~100 に存在する地物の位置 (Z 削平地)

図 4-28 の Z 削平地は、C 削平地や B 削平地同様のスギ植林地だが、両者と比較し、樹木が小さく立木本数が 2 つの削平地よりも多いという特徴がある。どれが礎石・礎石代替自然石なのか、立木と混在しているため、判断に迷う地物が多く、もし地上 0.5~1m に存在する地物位置が、図 4-29 のように示されていないければ、その削平地に多くの礎石あるいは自然石があるかに見える。こうしたことから、Z 削平地でもこの処理は、礎石・自然石の検出に有効な手段となり得るようである。

ところが例えば、図中赤丸で示したところは、形と黒い点がないことから礎石と判別できるが、踏査の限り、この削平地には礎石はなかった。

こうした誤認は、データの点密度の違いによるものと考えられる。すなわち、超細密計測ではあるが、①点密度が低くなるに従い、樹木の幹に当たる点が減少し、地上 0~50cm では点が樹幹に当たるものの、地上 0.5~1m のところで当らなかったという結果と、②レーザの点密度が低くなるに従い、作成する超細密地表状況図の地上分解能も荒くならざるを得ず、礎石を構成する超細密地表状況図の画素数が数画素（図 4-29 の場合、2x2 画素）になり、礎石サイズの矩形の形状を発生させ易くしたことが、そのような誤認の原因だと思われる。図中赤マルをよく見ると、矩形の角が不自然なほど東西南北方向で整っていることから、そういったことが推定できる。

以上から、超細密地表状況図と地上 0.5~1m に存在する点群の位置を重ね、超細密地表状況図を改良すれば、今回の場合、単位面積あたりのデータ点密度が 30,000 点/m² 以上あれば、礎石・自然石・植生から、礎石・自然石を絞り込むことができそうだが、7,000 点/m² 程度の点密度の計測ではそうした絞り込みは望めないことが分かった。

次に、立木の位置の把握について検討する。全点群を図 4-30 のように 3 次元で俯瞰すれば、樹木の本数や太さも概ね検討が付きそうだが、実用上、データ容量が大きくなり、実務で使用するには扱いにくい。

そこで簡便に樹木本数や太さが把握できるか検討するため以下の処理を行った。

前述、地上 0.5~1m の範囲を抜き出した点群には、木本・草本の幹や枝葉が計測されている可能性がある。ここでは木本、すなわち樹木の検出を目的としているため、地上 0.5~1m の範囲の点群だけでは木本と草本を分別することはできない。そこで、地上 1m~1.5m、1.5m~2m の点群をそれぞれ抜き出し全てを重ねた図を、それぞれ B 削平地、C 削平地、Z 削平地で図 4-31 のように作成した。図中の数字は、10m 四方で計測された点群数を 1m² で換算したときの点密度である。最も点密度が高い C 削平地では、樹木の位置ばかりか直径まで検討がつくものもあるが、胸高直径が 5cm 程度の小径木は、レーザの計測精度が照射距離 150m で 25mm という事もあり、いかに高い点密度でデータ計測を行っても、カタログ性能から、樹木の位置や本数は把握できるにしても、上空 100m 近くからのレーザ計測では、直径の把握には無理があるようである。

C 削平地に隣接する B 削平地でも点群密度は高い。ところが、C 削平地とは異なり、例え胸高直径が

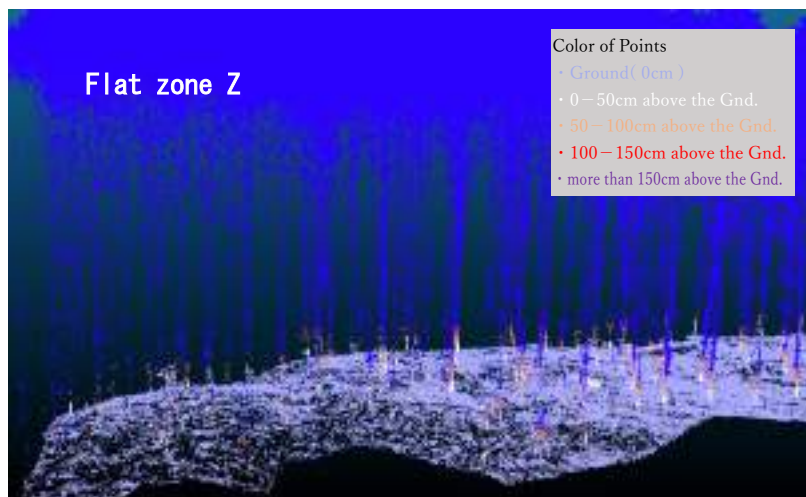
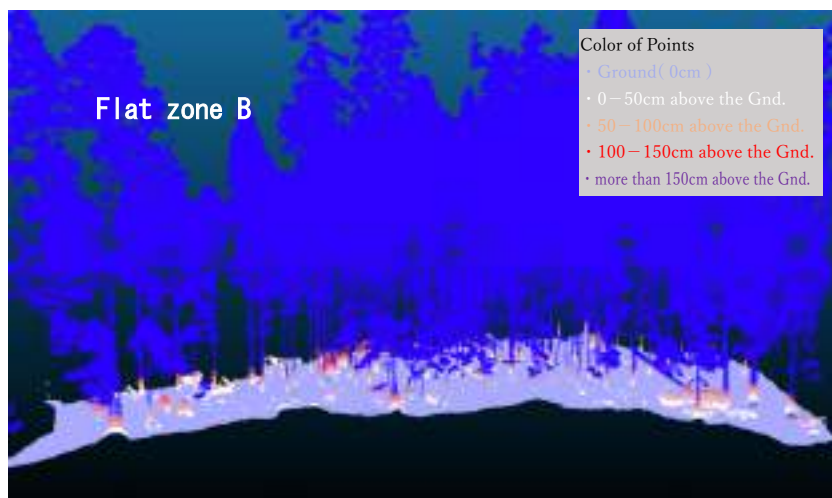
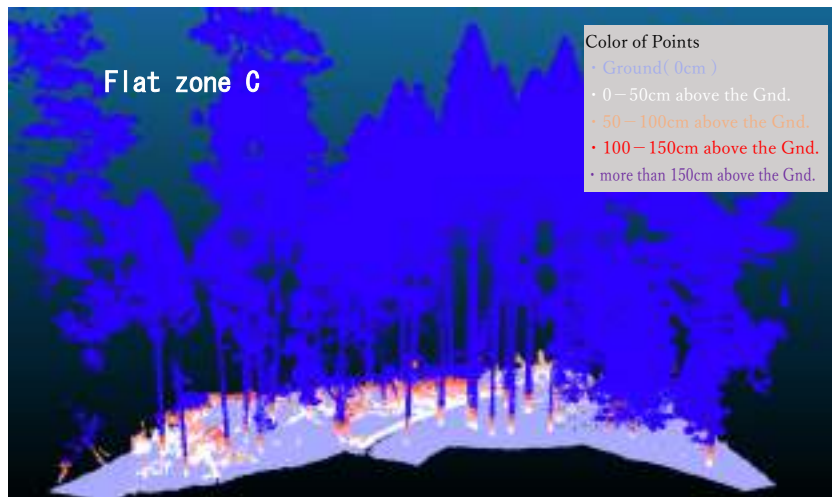
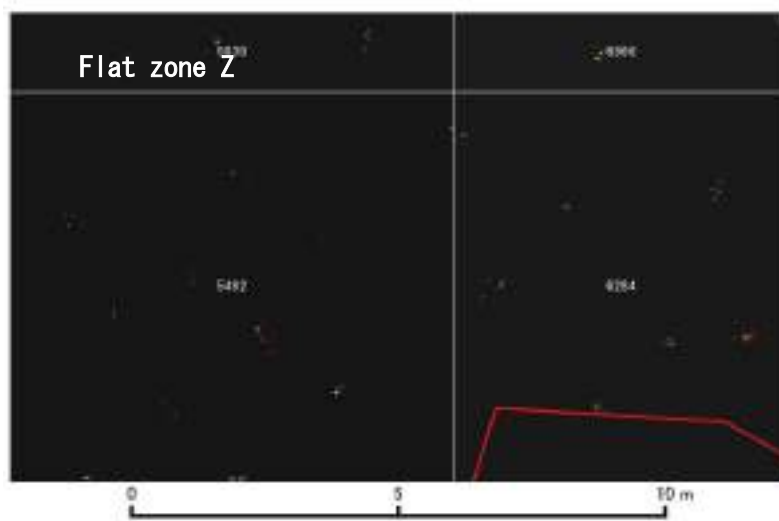
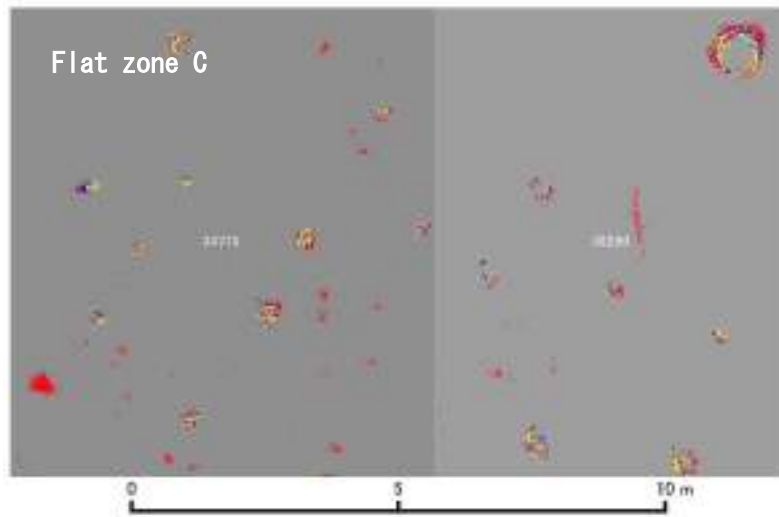
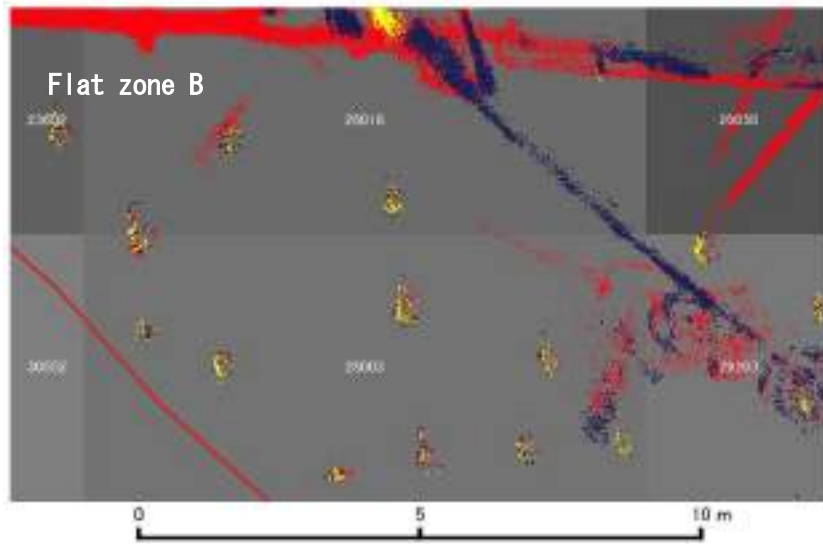


図 4-30 地上からの高さ別点群情報をすべて重ね表示したもの

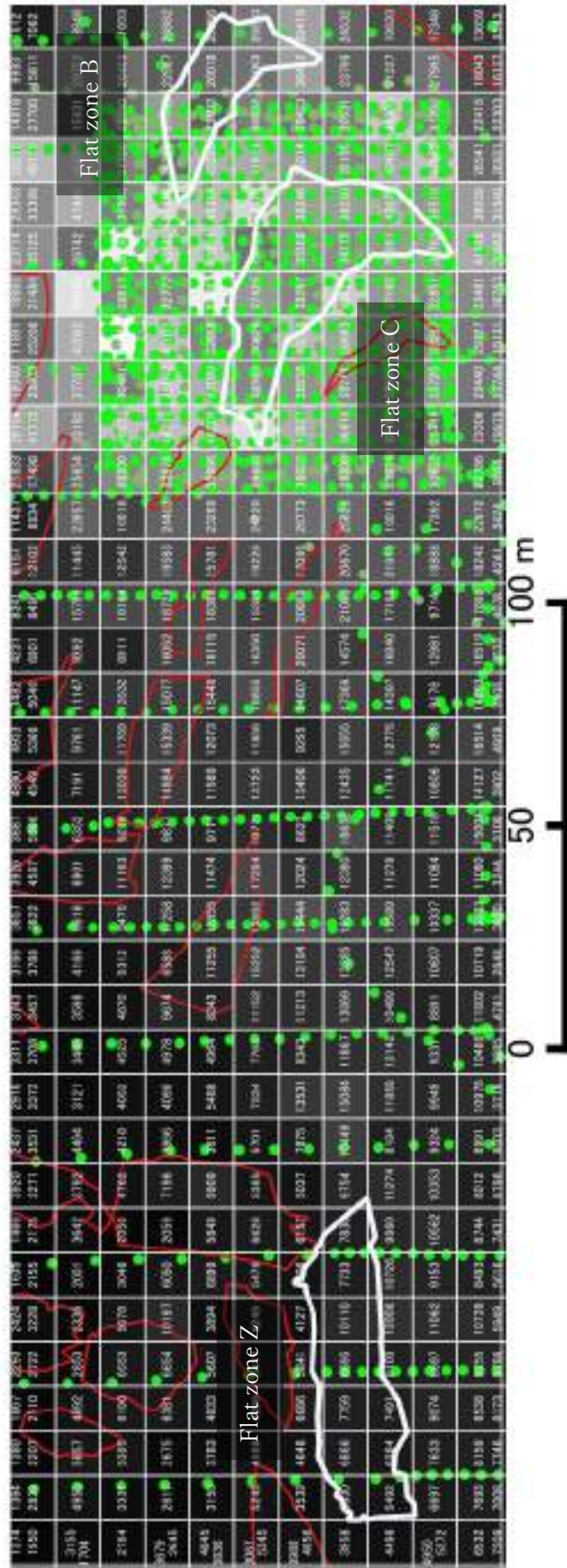
5cm 以上あっても、樹木の横断面が円形となっていないものも多い。そうなる原因は、レーザの照射方向に偏りがあったためと思われる。

図 4-32 に北尾谷で計測した点群の 1m^2 あたりの密度と、UAV の航跡を示す。C 削平地は、そこを中心として東西南北からレーザを照射しているが、B 削平地は南北方向に移動する UAV から計測を行った



图中的数字是全パルスの点群密度 (点/m²)

図 4-31 取得点密度の違いによる立木の位置や形状 (横断面) の見え方の違い



The numbers in the figure indicate the point density within the grid.-10mx10m)

図 4-32 レーザ計測の航跡と C・B・Z 削平地の位置と計測点密度の違い

けであることから、C 削平地に比べレーザ照射の方向に偏りが生じ、樹木の横断面が明瞭にならなかったものと思われる。このように、B 削平地では直径が分かる樹木は少ないが、ともかく本数は被圧木でも識別できそうであった。

ところが、Z 削平地は点密度が 7,000 点/m²と、今回の計測の中では点密度が低い場所である。そのため、0 から 50cm には計測点があるが、50cm～1m にはない。あるいは、0 から 50cm には計測点がないが、50cm～以上には点数があるというような箇所が認められた。このことから B や C 削平地と比べ立木の識別が難しいことが分かった。

このように計測される点密度と地上を基準に点群を切り出す高さや、UAV の飛行計画が、立木直径の計測と強く関係していることが分かった。

4.9 まとめ

以上、樹冠下の森林状況を、航測会社・測量会社・UAV 業務受託会社などで近年普及しつつある UAV レーザで、何がどこまで把握できるか検討してきた。それらを既に表 4-2 に整理したが、以下に特に航空レーザからは把握できない UAV レーザの強みとなる森林現況の把握についてまとめた。

今回のような平均 10,000 点/m² の計測を行えば、超細密微地形図では石積みや土留・山中に埋もれた石垣の位置を特定できる。また、地面から一定高さの点群を利用して作成した地面の地物が成す凹凸を表現した超細密地表状況図を使えば、倒木（伐り捨て間伐木、風倒木や土砂災害によって発生した倒木等）は明瞭に識別できることが分かった。そしてこの超細密地表状況図を使えば、林床の下草の状況や、現地では分からないような獣道も検出可能であった。ただ、林床の 30cm 四方程度の石や岩、立木の直径については、例え、高い点密度で計測してもその計測は簡単ではないことも分かった。

また図 4-33 のように、超細密微地形図と超細密地表状況図は、見ているものが明らかに異なっていた。同じデータを分類して作成したものだが、前者は地面の凸凹（地物は除外されている）を、後者は地面に横たわる地物の凸凹（地面の凸凹は分かり難い）を表現している。現在広く森林を対象に行われている 4 点/m² の航空レーザ計測では、点密度が薄すぎ、地表状況図を作成しても意味ある情報は得られなかった。こうしたことから、超細密地表状況図の利用こそ UAV レーザの強みであろう。

話は変わるが、今回芳しい結果を得られなかった山林の所有境界の目印となる石や岩の把握は、必ず

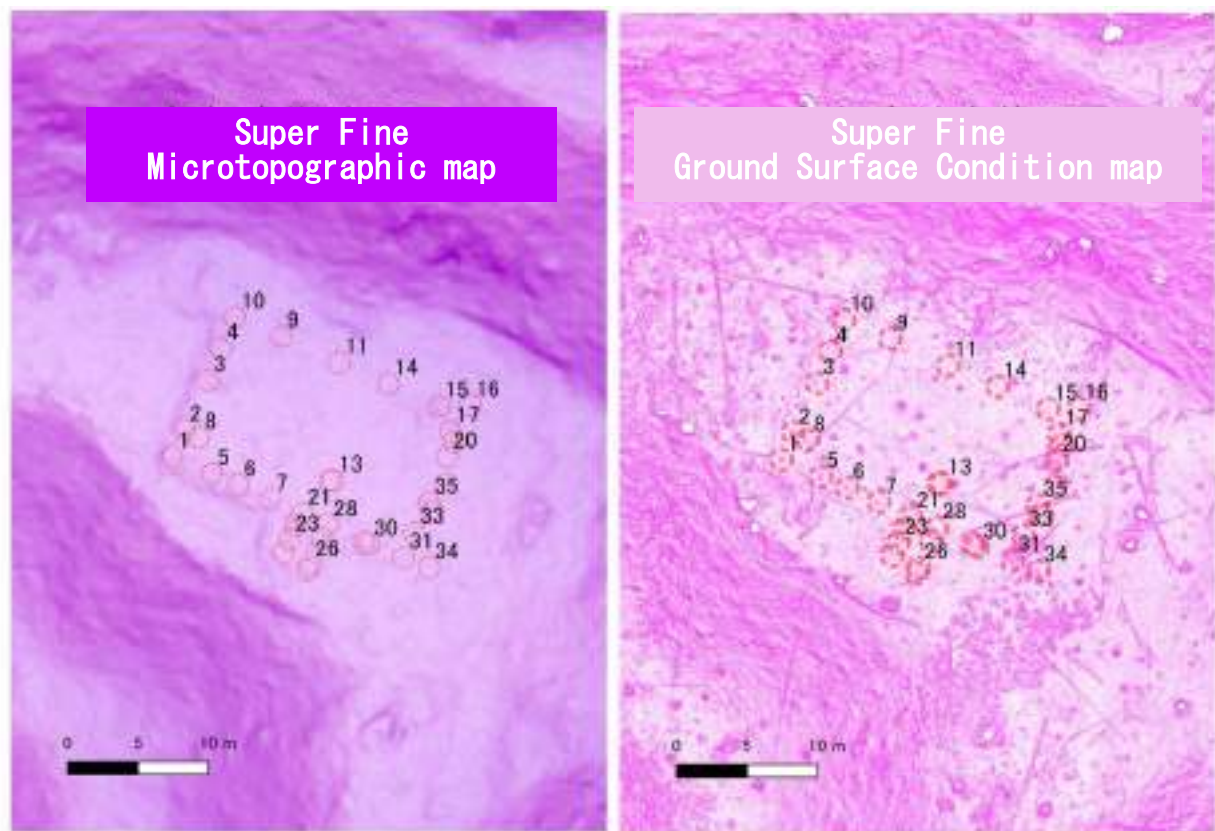


図 4-33 超細密微地形図と超細密地表状況との地物の見え方の違い

しも社会的な緊急性や高い優先順位を持つものではないかもしれないが、同じく芳しい結果が得られなかった立木直径の把握法は、社会的意義が高い技術で、更に検討する価値ある研究テーマである。

近年、温暖化対策として森林のCO₂固定量に社会的な関心が高いが、それへの対応は、樹木や森林の炭素固定量を直接計測することなく、旧来の森林簿や収穫予想表を用いて行われることが多い。その結果、実情とは異なる固定量が用いられることも少なくない。

今回、高度110m、取得点密度37,000点/m²、東西南北方向から高いオーバーラップ率で森林計測を行えば、直径の大きな樹木は、その直径を推定できそうなことが分かった。一方、直径の小さな(5cm程度)のものは、カタログ性能から直径の計測が不可能ということも分かった。しかし、今後の可能性として、飛行高度を下げれば計測誤差が小さくなり、直径の小さな樹木でも直径計測ができる可能性もある。

もし、任意の高さの木の直径が分かるようになれば、伐倒することなく樹木の体積(材積)を正確に計測することができる。このことは樹種別CO₂固定量の計測やスギ・ヒノキに限らない樹種別蓄積比のモデル構築や、蓄積モデルの精緻化に向けた基盤技術になる。こうしたことから、上空からの直径計測方法の体系化は、本研究の趣旨とは異なる他の研究として行う価値があると思われる。

なお、計測点密度が上がれば、その分、点群の地盤への到達率が下がる傾向があること、その一方で地上0~50cmの点群の数が増える傾向があることは興味深い。例えば、表4-3に示すよう航空レーザでは、照射されたレーザの地面到達率は3.656%である一方、36,587点照射されたC削平地でのレーザの地面到達率は0.039%であった。これは上空1,500mから計測する航空レーザのフットプリントは直下で15cmに対して、上空110mから計測するUAVレーザのフットプリントは直下で25cmというレーザの性能の違いというよりも、航空レーザの場合、点密度が薄いために、近くに比較できる“標高の低い点”が存在しないため、地面でないにも関わらず地面と分類されたものと思われる。

今後も航空レーザやUAVレーザなどが更に普及してくると思われる。引き続き、最適な計測手段や計測方法を継続して検討していきたい。

5章 おわりに

2章、3章、4章で、使用する場面とその費用対効果に配慮しながら簡易に森林現況を把握する方法を開発してきた。実際2章の成果は、森林バイオマス利用に関する市町村単位の森林ゾーニングにおいて、山梨県富士吉田市外ニヶ村恩賜県有財産保護組合、奈良県天川村役場、奈良県下北山村役場、奈良県御杖村役場、栃木県小川町役場で活用された。

今回の開発では、特に1.4で示した第3条件の「解析手法のシンプルさと専門知識がなくとも理解できる手法である」ことに拘り、開発を進めた。理由は、開発した手法の担い手に、林業事業者でGISを担当する技術者を想定しているからである。

かつて林業事業者では、GISベンダーがその事業者向けにカスタマイズした特定業務に特化したGISを使うことが専らであった。特に使われたGIS機能は、情報検索、編集、図面印刷、地図の塗り分けなどで、こうした定形処理は簡易に行えるようになっていた。しかし、開発時に仕様に入っていない機能は実現されることが通常であった。しかし、拙著『フリーソフトでここまでできる 実務で使える林業GIS』（竹島,2013）などにより、無料で使えるGISの存在が林業業界に周知され、今では、どの林業事業者もGISの恩恵を得ようとするユーザは、使用する機能の違いはあるものの、QGISなどの汎用GISをダウンロードして使用するようになった。また近年、林業技術者を育成する大学校では、GIS教育がカリキュラムに取り込まれたり、都道府県や関連機関が主催する研修会や大学等が行うリカレント教育でGIS研修が行われたりし、多くの林業現場の技術者が、QGISを主とした汎用GISの使い方を身に付けてきた。そうした技術者に対して1日程度の研修会やホームページで原理や解析方法を伝えれば、その技術を再現できる現場の技術者は、業界で育成されてきたように思われる（日常的に汎用GISを使う技術者が増えている）。そのため、解析手法のシンプルさ、専門知識がなくとも短時間で手法の原理を理解できることに拘った。

研修やチュートリアルでの技術の再現は、ソフトウェアの使い方を覚えればできる。しかし場所やデータが異なる実務での活用は、研修用に整えられたデータで行う場合とは異なり、マニュアル通りに行っても満足した結果を得られないケースが十分に有り得る。その時、処理の原理がシンプルであれば、どこが改善のポイントか分かるため、GISの処理で使用するパラメータや、自ら検討せねばならない事項を理解し、最適な結果を得るための試行錯誤を現場の技術者が自ら実施することが可能となる。例えば2章では、樹冠形や形状比と相対幹距比との関係、3章では、植生領域や解析対象面積の大小、4章では、地上分類アルゴリズムや地表面データとして切り出す地際高の閾値が、成果の鍵を握るが、原理がシンプルであるため、そのことに容易に気付ける。ところが、原理が複雑であったり、計算がブラックボックスであったりすると、何をどう改善していいのかわからず、研修に時間がかかるばかりか、結局技術は社会実装されず終わる事になりかねない。あるいは、外部に有償でデータ解析を依頼できれば社会実装されることになるが、1.3で述べたように、そのようなコストをかけた技術は、

林業現場では、一部でしか利用できない。大切なことは現場にいる者が、自らの意欲と思考で努力をすることができる環境を提供することである。そう考え、特に解析手法のシンプルさと専門知識がなくとも理解できるには拘った。

本研究は、日本の森林の現況を記す森林情報データベースとして森林計画図・森林簿が全国に備わっているが、それらが信憑性に欠けていることから、それらとは独立した情報を整えるため、空間スケール・精度・費用対効果に配慮して用途に応じた適切な解析方法とその使い方を開発してきたものである。しかし、それは森林計画図・森林簿に代わる情報の整備を目標に行っている訳ではない。森林計画図・森林簿に代わる情報を整えるには、森林計測技術というサイエンスに加え、森林計画制度、森林情報の管理単位（小班という森林管理の最小単位で情報をまとめるか、多くの海外で行われているようなサンプリング方法で行うか）、森林情報の使途と利用者、利用可能な技術、データベース設計等、多くの総合的な検討が必要である。そのため、本研究ではサイエンスに注力し、森林現況を把握する手法開発にあたった。しかし、今回開発した技術は、今後、森林計画図・森林簿に代わる情報を整える必要が生じたときにも、基盤技術として貢献できる技術になるものと確信している。

謝辞

先ず何より、主査を引き受けてくださった福井弘道先生に感謝いたします。先生には、四半世紀前の‘97年から、様々な見識、人、機会をご紹介いただきました。それによって、私が研究フィールドとしていた日本林業の関係者にはない視点や技術の動向を知ることができ、いまの私の業界内でのポジションに繋がったように思います。ありがとうございます。また福井先生を引き合わせてくださった古瀬勇一様、そして古瀬様を引き合わせてくださった私の学士・修士での指導教官であった末田達彦先生にもあわせて感謝申し上げます。

1991年3月に学部を卒業し、民間企業に努めた後、2001年岐阜県美濃市で開学した岐阜県率森林文化アカデミーに勤めることになりましたが、岐阜県の林業部局の出先として森林文化アカデミーは位置づけられていたため、我々スタッフには研究よりも地域貢献が求められ、私は、GIS やリモートセンシングが、森林所有者、林業事業者、林務担当公務員らにどう貢献できるか、現場に足を運び様々な人から色々話を伺ってきました。そうした中、研究のアイデアが生まれ、またそういうニーズがあるならと、新たに知識を吸収したりもしました。

出会いが、自分の新たな着想や身につけるべき技術に繋がり、今回の研究に繋がっているように思います。また研究の過程で得た知識を、現場へ普及する研修を行っていたことがキッカケになり、雑誌での連載や出版なども行う機会が得られました。そして、そこからまた新しい出会いが生まれ、いまの私のアイデンティティが強化されたように思います。これまで出会った全ての人に感謝申し上げます。

特に、本論文の2章で行った航空レーザ・データを使った森林蓄積の自動推定では、2万本以上の毎木調査を行いました。その調査は一人ではできるものではなく、当時の学生諸氏に手伝ってもらいました。夜明け前から休憩もなく、日暮れまで急傾斜地を駆け続け、単純な森林計測作業に黙々と付き合ってくれた彼らには、特に感謝しています。ありがとうございました。

引用文献

第1章

- 稲本龍生, 2006. 新生産システムについて, 木材保存 33 (2), pp. 58-62.
- 太田猛彦, 2019. 特集:平成29年7月九州北部豪雨と流木災害 「流木災害」と森林管理, 水利科学 No. 365, pp. 72-83.
- 小松光, 2010. 森林と水資源, 水利科学 314, pp. 1-29.
- 白井裕子, 2021. 森林で日本や蘇る-林業の瓦解を食い止めよ, 新潮社, 東京.
- 総務省, 2012, ICTを活用した新たな街づくり
https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ict_town/index.html (accessed 11 Nov. 2023)
- 総務省, 2017. 森林吸収源対策税制に関する検討会 ー報告書ー
https://www.soumu.go.jp/main_content/000518193.pdf (accessed 8 Nov. 2023)
- 内閣官房デジタル田園都市国家構想実現会議事務局, 2022, デジタル田園都市国家構想関連施策の全体像について, https://www.chisou.go.jp/sousei/meeting/digiden_chisou_setsumeikai/pdf/r04-01-20-shiryoul.pdf (accessed 11 Nov. 2023)
- 竹島喜芳, 森勝, 2005. LIDAR データを活用した産学官連携による森林行政データ更新プロジェクトの取組. 写真測量とリモートセンシング, 44(6), pp. 44-47.
- 農林水産業・地域の活力創造本部, 2013, 農林水産業・地域の活力創造プラン
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/pdf/20201215plan_honbun.pdf (accessed 11 Nov. 2023)
- 松本光朗, 栗屋善雄, 家原敏郎, 高橋正通, 藤原健, 細田和男, 金森匡彦, 堀修二, 鈴木圭, 松原吉隆, 今野知樹, 林真智, 七海崇, 2007. 京都議定書報告のための国家森林資源データベースの開発森林資源管理と数値モデル 6, pp. 141-163.
- 林野庁, 2009, 森林・林業再生プラン コンクリート社会から木の社会,
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kikaku/pdf/091225-01.pdf> (accessed 8 Nov. 2023)
- 林野庁, 2010, 森林林業再生プラン 中間とりまとめ
https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/saisei/pdf/dai2kaiplun_chukantorimatome.pdf (accessed 8 Nov. 2023)
- 林野庁, 2018, 平成30年度スマート林業構築普及展開事業
https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/smartforest/attach/pdf/smart_forestry-28.pdf (accessed 8 Nov. 2023)
- 林野庁, 2019, 令和3年度林野関係予算の概要,
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/rinsei/yosankesan/attach/pdf/201221-6.pdf> (accessed 8 Nov. 2023)
- 林野庁, 2021, 森林・林業基本計画
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/attach/pdf/index-10.pdf> accessed 8 Nov. 2023)
- 和田孝志, 糸数哲, 小杉賢一郎, 水山高久, 2014. 林地残材の流木化に関する実態調査, 砂防学会研究発表外梗概集, pp. 214-215.
- e-STAT 政府統計の総合窓口, 2023, 林業算出額

http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/ringyou_sansyutu/index.html (accessed 8 Nov. 2023)
Tomohiro Egusa, Tomoomi Kusamagai and Norihiko Shiraishi, 2020. Carbon stock in Japanese forests has been greatly underestimated, Scientific Reports Volume 10: pp.1-9.

第2章

- 伊藤拓弥, 松英恵吾, 内藤健司, 2009. 航空機 LiDAR による樹冠の再現性. 日本森林学会誌, 91(5), pp. 326-334.
- 伊藤拓弥, 松英恵吾, 執印康裕, 内藤健司, 2011. 本数密度の異なるスギ・ヒノキ林における航空 LiDAR による単木の立木幹材積推定. 写真測量とリモートセンシング, 50(1), pp. 18-26.
- 大隅眞一, 1995. 森林計測学講義 第4版, 養賢堂, 東京.
- 梶原幹弘, 2000. 樹冠からみた林木の生長と形質-密度管理と林型による異同, 森林計画学出版会, 東京.
- 梶山恵司, 2013. 木質バイオマスエネルギー利用の現状と課題. 研究レポート, No. 409. 富士通総研経済研究所, pp. 1-25
- 加藤正人編, 2010. 森林リモートセンシング 第4版. 日本林業調査会. 東京.
- 岐阜県林政部, 1992a. ヒノキ人工林 林分収穫表・林分密度管理図, 岐阜県林政部.
- 岐阜県林政部, 1992b. スギ人工林 林分収穫表・林分密度管理図, 岐阜県林政部.
- 熊崎実, 2012. 混迷を深めるわが国の森林資源統計 -モニタリング調査をなぜ活用しないのか-, 山林, 1540, pp. 2-10.
- 小谷英司, 栗屋善雄, 2013. 低密度 LiDAR データによる人工針葉樹林の林分パラメーターの推定, 写真測量とリモートセンシング, 52(2), pp. 44-55.
- 田口仁, 遠藤貴宏, 安岡善文, 2008. LiDAR 点群データを用いた樹冠形状に基づく単木抽出および樹高推定, 日本リモートセンシング学会誌, Vol28(4), pp. 331-340.
- 竹島喜芳, 森勝, 2005. LIDAR データを活用した産学官連携による森林行政データ更新プロジェクトの取組. 写真測量とリモートセンシング, 44(6), pp. 44-47.
- 林真智, 山形与志樹, 平春, 哈斯巴干, 鈴木力英, 三枝信子, 2013. 写真測量とリモートセンシング, 52(6), pp. 306-315.
- 平田泰雅, 2005a. 航空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), pp. 81-95.
- 平田泰雅, 2005b. 航空機レーザースキャナーデータを用いたヒノキ人工林における樹高と地形の関係, 日本森林学会誌, 87(6), pp. 497-503.
- 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), pp. 4-13.
- 松下幸司, 吉田茂二郎, 1998. 民有林に関する森林マイクロデータの有効利用に関する研究. 平成9年度科学研究補助金(重点領域研究)研究成果報告書.
- 松下幸司, 吉田茂次郎, 1997. 私有林に関する森林マイクロデータの有効利用に関する研究, 平成8年度科学研究補助金(重点領域研究)研究成果報告書.
- 米康充, 2008. 航空機および地上リモートセンシングを用いた北方林広域森林バイオマス計測に関する研究, 北海道大学演習林報告, 65(1), pp. 61-131.

林野庁監修, 1998. 林業技術ハンドブック, 全国林業改良普及協会, 東京 pp.

林野庁, 2013. 平成 25 年版 森林・林業白書, 全国林業改良普及協会, 東京.

Akira Kato, L. Monika Moskal, Peter Schiess, Mark E. Swanson, Donna Calhoun, Werner Stuetzle, 2009. Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data, *Remote Sensing of Environment*, 113, pp.1148-1162.

G.W. Frazer, S. Magnussen, M.A. Wulder, K.O. Niemann, 2011. Simulated impact of sample plot size and co-registration error on the accuracy and uncertainty of LiDAR-derived estimates of forest stand biomass, *Remote Sensing of Environment*, 115, pp.636-649.

Gaveau, D.L.A., Hill, R.A., 2003. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), pp.650-657.

Hyypä J, Kelle O, Lehtikoinen M, Inkinen M., 2001. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Trans Geoscience Remote Sensing*, 39, pp.969-975.

Hyypä, J., Hyypä, 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), pp.1339-1366.

J.L. Lovell, D.L.B. Jupp, G.J. Newham, N.C. Coops, D.S. Culvenor, 2005. Simulation study for finding optimal lidar acquisition parameters for forest height retrieval, *Forest Ecology and Management*. 214, pp.398-412.

Nelson, R., Krabill, W., Tonelli, J., 1998. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 19(2), pp.164-179.

Næsset E., Økland, T., 2002. Estimating tree height laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment*, 79(1), pp.105-115.

Næsset, E., 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 61(2), pp.246-253

Ross Nelson, 1997. Modeling Forest Canopy Heights: The Effects of Canopy Shape, *Remote Sensing of Environment*, 60, pp.327-334.

Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y. and 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, pp.305-312.

Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y. and Tsuzuku, M., 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, pp.135-142.

Tsuzuki, H., Nelson, R. and Sweda, T., 2008. Estimating timber stock of Ehime prefecture, Japan using airborne laser profiling. *Journal of Forest Planning*, 13, pp.259-265.

Yongwei Sheng, P. Gong, and G.S. Bigin, 2001. Model-Based Conifer-Crown Surface Reconstruction from High-Resolution Aerial Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 67, No8, pp.957-965.

第3章

- CIVCO, D. L., 1989. Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 55(9), pp.1303-1309.
- COLBY, J. D., 1991. Topographic Normalization in Rugged Terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 57(5), pp.531-537.
- CONESE, C., GILABERT, M.A., MASELLI, F. and BOTTAI, L.,1993a. Topographic normalization of TM scenes through the use of an atmospheric correction method and digital terrain model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 59(12), pp.745-1753.
- CONESE, C., MARACCHI, G. and MASELLI, F., 1993b. Improvement in maximum likelihood classification performance on highly rugged terrain using principal components analysis. *International Journal of Remote Sensing*. 14(7), pp.1371-1382.
- COULSON, K.L.,1966. Effects of reflection properties of natural surfaces in aerial reconnaissance. *Applied Optics*. 5, pp.905-917.
- DEERING, D. W., MIDDLETON, E. M. and ECK, T.F., 1994. Reflectance anisotropy for a spruce-hemlock forest canopy. *Remote Sensing of Environment*. 47, pp.242-260.
- EGBERT, D.D and ULABY, F.T., 1972. Effects of angles on reflectivity. *Photogrammetric Engineering*. 38, pp.556-564.
- EKSTRAND, S., 1996. Landsat TM-based forest damage assessment: correction for topographic effects. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 62(2), pp.151-161.
- GU, D. and GILLESPIE, A., 1998. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel Sun-Canopy-Sensor geometry. *Remote Sensing of Environment*. 64, pp.166-175.
- HOLBEN, B.N., and JUSTICE, C. O., 1981. An examination of spectral band rationing to reduce the topographic effect on remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*. 2, pp.115-123.
- HILL, J. and STURM, B., 1991. Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. *International Journal of Remote Sensing*. 12(7), pp.1471-1491.
- JENSEN, J.R.1995. *Introductory Digital Image Processing* 2nd edition, Prentice Hall.
- LYON, R., 1975. Correlation between ground metal analysis, vegetation reflectance, and ERTS brightness over molybdenum skarn deposit, Pine Nut Mountains, western Nevada. *Proceeding of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 2, pp.1031-1044.
- MEYER, P., ITTEN, K. I., KELLENBERGER, T., SANDMEIER, S. and SANDMEIER, R., 1993. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 48(4), pp.17-28.
- PROY, C., TANRÉ, D. and DESCHAMPS, P.Y.,1989. Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 30, pp.21-32.
- RIAÑO, D., CHUVIECO, E., SALAS, J. and AGUADO, I., 2003. Assessment of different topographic

correction in Landsat-TM data for mapping vegetation types. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 41(5), pp.1056-1061.

RICHTER, R., 1997. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. International Journal of Remote Sensing. 18(5), pp.1099-1111.

ROCK, B.N., VOGELMANN, J. E., WILLIAMS, D. L., VOGELMANN, A. F. and HOSHIZAKI, T., 1986a. Remote detection of forest damage. Bioscience. 36(7), pp. 439-445.

ROCK, B. N., and VOGELMANN, J. E, 1986b. Use of TMS/TM data for mapping of forest decline damage in northeastern United States. Proceeding of the IGARSS ' 86 Symposium, pp.1405-1410.

ROSENQVIST, Å., MILNE, A., LUCAS, R., IMHOFF, M. and DOBSON, C., 2003. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. Environmental Science and Policy. 6, pp.441-455.

SHOSHANY, M., 1993. Roughness - reflectance relationship of bare desert terrain: an empirical study. Remote Sensing of Environment. 45, pp.15-27.

SMITH, J.A., LIN, T. L. and RANSON, K.J., 1980. The Lambertian assumption and Landsat data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 46(9), pp.1183-1189.

TEILLET, P.M., GUINDON, B. and GOODENOUGH, D.G., 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. Canadian Journal of Remote Sensing. 8(2), pp.84-106.

TUCKER, C. J., 1980. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. Remote Sensing of Environment. 10, pp.23-32.

VINCINI, M. and FRAZZI, E., 2003. Multitemporal evaluation of topographic normalization methods on deciduous forest TM data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 41(11), pp. 2586-2590.

VOGELMANN, J. E., 1988. Detection of forest change in the Green Mountains of Vermont using multispectral scanner data. International Journal of Remote Sensing. 9, pp.1187-1200.

YAMAGATA, Y., OGUMA, H., SEKINE, H and TSUCHIDA, S., 2002. The role of remote sensing for monitoring the carbon sink activities. Journal of Remote Sensing Society of Japan. 22(5), pp.494-509. (in Japanese with English abstract)

第4章

- 村上拓彦, 番場和徳, 望月翔太, 2013. 時系列空中写真を用いた人工林小班区画抽出手法の開発, 森林計画学会誌 47(2), pp. 83-92.
- 小林裕之, 2018. 富山県におけるスマート林業構築のための森林情報整備, 富山県農林水産総合技術センター森林研究所研究報告書 No. 10, pp. 37-52.
- 坂田健太, 力丸厚, 田子彰大, 2016. 航空機LIDARの反射強度を用いた単位照射領域における樹種別の樹冠葉面占有率把握に関する検討, 写真測量とリモートセンシング55(4), pp. 254-258.
- 朱林, チャタクリ スバス, 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). pp. 303-313.
- 中武修一, 山本一清, 吉田夏樹, 山口温, 宇野目草太, 2018. 航空機LIDARによる単木樹種分類手法の開発, 日本森林学会誌100(5), pp. 149-157.
- 早川紀朱, 宮島明里, 竹島喜芳, 2020. 細密航空レーザ測量図を用いた比叡山三塔造成遺構の把握の試み, 中部大学工学部紀要55巻(2019), pp. 19-28.
- 長谷川裕之, 2006. 土地被覆分類に対する航空レーザ反射強度データ特性の評価, 国土地理院報告(53), pp. 43-50.
- 長谷川裕之, 都竹正志, 2006. LIDARデータを用いた道路領域抽出における反射強度の有用性, 写真測量とリモートセンシング45(4), pp. 26-34.
- 宮城正明, 2011. 温航知森—過去の空中写真とGPSを用いた森林境界明確化—, 森林技術 837, pp. 24-28.
- 横山隆三, 白沢道生, 菊池祐, 1999. 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 38, NO. 4, pp. 26-34
- Bernhard Hofle, Norbert Pfeifer, 2007. CORRECTION OF LASER SCANNING INTENSITY DATA: DATA AND MODEL-DERIVEN APPROACH, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol62, pp. 415-422.
- Challis, K., Carey C., Kinsey M., Howard J.A., 2011. Airborne Lidar Intensity and Geoarchaeological Prospection in River Valley Floor, Archaeol. Prospect. 18, pp. 1-13.
- Historic England, 2018. Using Airborne Lidar in Archaeological Survey: The Light Fantastic, Swindon, Historic England.
- Luzum, B. J., Starek, M., Slatton, K.C.: NORMALIZING ALSM INTENSITIES, 2004, Geosensing Engineering and Mapping Center Report NO. Rep 2004-07-001, pp. 1-8.
- Peter Axelsson, 2000. DEM GENERATION FROM LASER SCANNER DATA USING ADAPTIVE TIN MODELS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol33, ISPRS, Amsterdam, pp. 110-117.

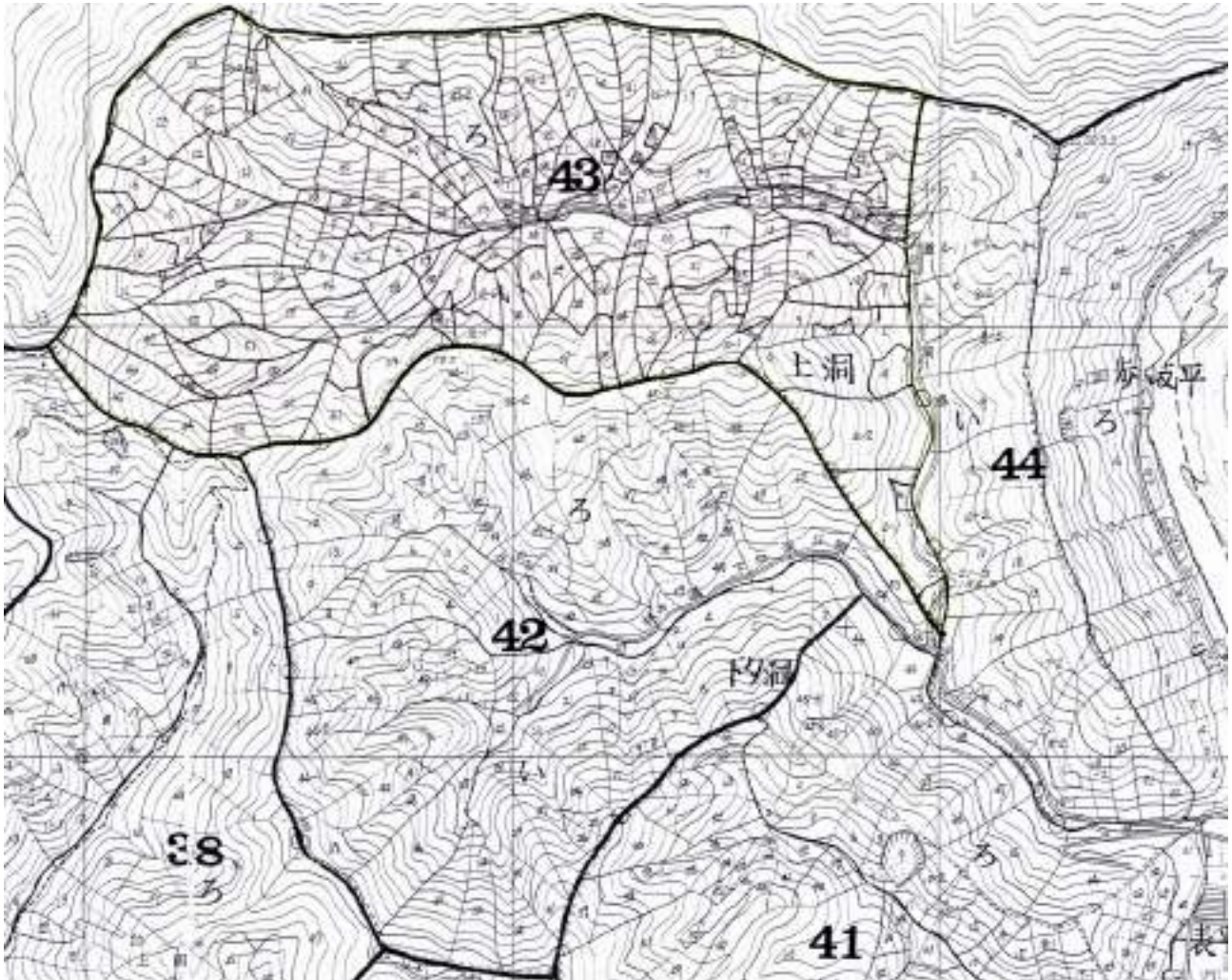
第5章

竹島喜芳, 2013/ フリーソフトでここまでできる 実務で使う林業GIS, 全国林業改良普及協会, 東京.

資料

資料1 森林計画図

(例：岐阜県郡上市美並町上田地区)



5000 分の 1 地形図（森林基本図）上に森林管理の最小単位である小班の位置を示したもの。

資料3 森林計画図・森林簿設置の目的と沿革

森林計画図・森林簿は、森林法第5条で規定された地域森林計画の樹立のための基礎資料として、都道府県に設置をなかば義務付けられた、森林の所在や現況、所有者情報を記した情報である。この地域森林計画は、昭和26年に森林法で定められた森林計画制度の一翼を担う、我が国の森林計画の中核となる計画である。というのは、森林計画制度では、政府がたてる森林・林業基本計画（平成13年以前は「森林資源に関する基本計画及び林産物需要の長期見通し」）を受けて、農林水産省がそこで定める目標を実現するために流域毎に全国森林計画を立て、都道府県がそれに適合するよう地域森林計画をたてるようになっており、実際の森林は、地域森林計画に適合するように施業が行われているからである。

この森林計画制度が発足することになった経緯は、国土保全のため伐採規制の必要性からであった。江戸時代から明治に入り、我が国の経済が資本主義経済の枠組みで動き始めたことで、資本家が自らの自由意志によって野放図に森林を伐採していた。その結果、全国で土砂災害が頻発するようになった。加えて、戦中の森林資源の収奪によって、全国ではげ山が増えた。このようなことから、これ以上の災害の原因を作らないように、国・都道府県で一貫した森林管理のビジョンを作り、事業者には都道府県に伐採届けを出させ、その伐採量に問題ないか都道府県が確認することにした。こうした背景があり、森林計画制度が始まった。森林計画図・森林簿は、この届け出られた伐採量に問題ないかをチェックするための情報として都道府県に整備を義務付けられたものである。

そこで以下に、森林計画図・森林簿が整備された時代背景や初期データをどう整備し、それをどう保守してきたかを整理した。

森林計画図

森林計画図の原型は、昭和14年の森林法改正によって作成されることになった、簡易施業案付属図面の基本図にある。基本図は、林班（尾根・谷など恒久的な地形等を基準に50町歩を目安に分けられた区画）界を実測によって作成した白地図に、切絵図等を利用しながら見取りによって林班を2、3の小班（小班の区画は、林相が似ているものを一つの小班としたもので、所有や樹種や林齢等によって細かく細分した、現在の小班とは異なるものであった）に区分けした地図である（浅川、1949）。

その基本図は昭和26年の森林法改正による森林計画制度発足に際し、都道府県に設置を義務づけられた森林区基本図と名称を変え、整備が加速することになった。森林区基本図は基本図とは異なり、米軍が撮影した空中写真によって昭和25年から逐次整備が始まった地貌図（資料5）を利用し（昭和36年に予定面積1,548haの民有林の地貌図は完成）（丸山、1980）、林班区割りが行われた地域もあった（梶本、1956）。しかし、地域による地貌図整備状況のバラツキにより、実測を主とした都道府県も依然存在した。

例えば岐阜県の場合、当初は、実測により林班界を測量した。しかし、昭和20年代後半より国が実施する空中写真判読の研修に参加し、空中写真の立体視の技術を習得し、林班界や小班界の修正を行うよ

うになった（実際に測量を入庁当時仕事としていた元林政部長浅野氏談）。なお基本図で区画された小班は、事業者から上がってくる伐採計画などが、周辺森林の状態から許容範囲内かを確認するためのものだったので、区画の厳密さは問われず、調査者の目視判断によって林班を2、3に区分けしたもので作られた（浅川，1949）。それが森林区基本図では、概ね5町歩を目安に区分けすることになった（梶本，1956）。この小班の区割り（現在の林齢・樹種・所有者等によって区画した小班とは別の概念）は、通常、切絵図等を使った見取りによって行われていたが、中には空中写真の実体視によって、地貌図と対比しながら区割りをを行う地域もあった。なお、地貌図に林班界・小班界を記入した地図は、当時、森林区施業図と呼ばれ、森林計画制度において整備すべき地図の1つとされた。こうして昭和31年、第一期森林区施業計画（現在の地域森林計画相当）樹立時には、全国の森林区基本図が完成した。

その後、昭和37年から空中写真の図化が始まり、等高線の入った5000分の1地形図、すなわち森林基本図が作成されはじめ、これに小班境界を書き入れるようになった。これを当初は森林施業図と呼んでいた（森林計画制度研究会，1963）。しかし昭和55年の森林基本図の全国的な完成に伴い、森林施業図はやがて森林計画図と呼ばれるようになった（丸山，1980）。なお、森林計画図が完成した後、小班境界（林相境界）の補正のため、オルソフォトや国土調査の成果が使われた箇所もあった。このような経緯があるため、例えば岐阜県や愛媛県のように、当初は林班内に小班が2つから3つだったものを、更に地番・所有者・樹種・林齢等で、森林管理の最小単位まで細分した都道府県もある一方、例えば、愛知県や兵庫県のように、小班界として林班の中の地番の境界を使っている都道府県もある等（従って、国土調査が終わっていない場合は、切絵図や公図を参考に小班割を行ったものである）、小班の大きさや形状の精度は都道府県や地域によって様々である。

森林簿

昭和14年から簡易施業案（都道府県が作成する地域森林計画の前身の計画）の整備が始まり、この時、小班（林班を林相が同じと思われる区画で2、3に分けたもの）の資源量を取り纏めた森林調査簿が森林簿の原型である（浅川，1949）。ただ、森林調査簿は、第二次大戦を間近に控えていた時代背景もあり、森林調査簿の都道府県の整備は順調にはいかなかった。しかし、戦後、昭和26年の森林法改正によって都道府県に設置が義務づけられ、森林調査簿は森林区森林簿と名前を変え、すべての都道府県で本格整備が始まることとなった（森林計画研究会，1954）。

この森林区森林簿に記載された森林資源情報は、森林区基本図に記された小班毎に、林況の聞き取り、あるいは目測（山の中で見通しのきく場所から周辺を見て、調査者の主観により樹種や林齢を記入）によって収集された（前述浅野氏談）。こうした森林区基本図及び森林区森林簿の作成には多大な労力が必要で、例えば岐阜県では、昭和20年代半ばから30年代にかけて、当時40人強の技術者がそのデータ整備に割り当てられた。入庁したての県職員は、一年の半分を野外での測量と聞き取りに費やし、残りの半年をそのデータ整理に当てていたほどである（前述浅野氏談）。また、国有林旭川営林署では、2～3名が12,000ha位の面積を対象に森林区基本図及び森林区森林簿の作成にあたっていた（近藤，1955）。

地域森林計画は、一つの都道府県を5つの流域に分割して、一年に1流域の森林施業計画を立てることになっている。そのため、昭和27年から昭和31年の5年間で、全国の第一期森林区施業計画（現在の地域森林計画相当）が完了することになる。つまり昭和31年度末には、全国の全ての私有林で森林区森林簿が整備された。

二期目（昭和32年～36年）では、第一期の情報を参考にしながら、再び聞き取りや目測を行い、新たに森林区森林簿を作成した。中には、森林区森林簿の作成を省力化するため、サンプリング調査を行い、第一期のデータを補正して第二期の森林区森林簿を作成した都道府県もあった（鳥飼，1958）。

第三期（昭和37年から41年）に入ると、森林区森林簿は森林簿と名称を変え（森林計画制度研究会，1963）、これまで通りの聞き取り・目測によるデータ作成を基本にしなが、各都道府県で精度向上に向けた様々な方法が試行されはじめた。

やがて、昭和40年代に入ると、森林簿作成や地域森林計画編成にかかる労力を軽減するため、森林簿の電算化が検討され（岩部，1967）、次々と各都道府県で森林簿の電算化が行われることになった。これにより、地域森林計画樹立の為のデータ集計作業が省力化された。そして集計作業が電算化によって省力化されたばかりか、その後、森林の成長に伴い変化する林齢や蓄積等の情報を更新するため、森林簿電算システムに、収穫予想表（植栽後、年数が計画するに従い蓄積がどのように変化するかを予め表にしたもの：資料6）が組み込まれ、更に森林簿の更新が省力化された（松下ら，1998）。

森林簿電算化終了後は、電算システムに造林補助・伐採届け・山林保険等の情報と、森林簿とを関連づけ、森林簿が更新されるようになり、大幅に森林簿調製にかかる労力が軽減した。なお、こうした各種電算システムと森林簿更新システムとの連携は、都道府県によって個別に企画・実装され、都道府県間に統一的な仕様はない。（松下，1998）。

引用文献

浅川林三，1949. 改正簡易施業案，林材新聞社出版局．東京．

岩部元也，1967. 森林計画編成業務能率部会について，森林計画研究会報(143)，pp.16-17.

梶本幹一，1956. 森林計画制度の拡充発展を目指して．森林計画研究会報(33)．pp.21-24.

近藤豊，1955. 経営案記載要領並びに計算要領の改訂意見．森林計画研究会報(32)，pp5-7.

松下幸司・吉田茂二郎，1998. 私有林に関する森林マイクロデータの有効利用に関する研究，平成9年度科学研究補助金（重点領域研究）研究成果報告書．

丸山正，1980. 正射投影写真（オルソフォト）の活用．森林計画研究会報(250)，pp.21-23.

森林計画研究会，1954. 森林計画の手引．全国森林組合連合会．東京．

森林計画制度研究会，1963. 森林計画の実務，地球出版．東京．

鳥飼愛美武, 1958. 民有林における森林標本抽出調査の概要について. 森林計画研究会報(57). pp. 7-8.

資料4 森林計画図・森林簿が使われ続ける背景

国が森林・林業基本計画でどのような森林像を描いても、国土の約半分を占める民有林ではそれに従う必要はなく、描かれる森林像は机上のものとなる場所である。しかし、林業が停滞している現在、林業は補助金が受給できなければ、採算割れで事業が成立しない。そこで、民有林で森林経営計画を作成し、それが市町村森林整備計画に適合していれば、国・県・市から補助を有利に得られるような仕組みがある。その仕組みを使って、民有林で森林経営計画を立てるには、森林資源状況・森林所有者情報が分かっているなければならない。しかし、一部の大手林業事業者以外は、そういった独自の情報を持っているものは少ない^(注)。そのため森林経営計画を立てるための独自の情報がなく、本来なら森林経営計画はたてられない。

一方、行政は民間が行う林業活動によって、国が描く森林の姿を現実に整えていきたいと考えている。そのため、より広範囲で森林経営計画（平成23年以前は、森林施業計画）がたてられることを期待している。

こういった背景があり、官民利害が一致し、当初伐採規制のために都道府県が独自に整備した森林計画図・森林簿であるが、民間が自らの山林の現況を示す情報を持っている者が少なかったため、いまでは、民間事業者や市町村の求めに応じて都道府県が、森林計画図・森林簿を彼らに提供するようになった。これによって、民間は森林経営計画の立案が可能となり、市町村は森林計画図・森林簿の情報に基づきそれを認定判断することができているようになった。なお実際の認定判断は、都道府県から両者に配布されるソフトウェアが行っている。

つまり、同じデータ・同じソフトウェアを使っていることから、森林情報が現状を表しているようだが、いまいが、計画は作成・認定され、それに基づいて林業実務（植栽・間伐・伐採）が進行する。補助金を前提に回っている林業実務では、補助金が実績ベースで精算されることから、森林情報の真偽は、重要ではない。こうしたことから、いまだ伐採規制を目的に整備保守されたデータが、もっとも詳細な森林情報として、現実と乖離していると言われ続けながら、林業実務において使われ続けることになっている。

注：もともと組合員から依頼があったときに、作業を担う団体として組合ができている。本来、森林資源状況は所有者が把握していることが前提であったが、入会林整備によって森林所有者になった者は、林業の知識もノウハウもなく森林資源状況の把握の必要性も多く所有者は、森林状況の把握の必要性を感じてなかったものと思われる。

資料5 地貌図

(愛媛大学演習林)

地形図（等高線入りの地図）が整備されていなかった頃、空中写真を立体視して作成した（ちぼう図）が、森林計画図（当時の森林区基本図）整備のために使われた。



資料6 収穫予想表

(岐阜県例)

森林の生育の適否を“地位”で分け、地位、林齢（植栽後の経過年）ごとの一般的な成長の推移を表にして整えたもの。この表は、現地調査を行い整えている。この時の現地調査結果が野帳として公開されており、2章では、その野帳データを使用した。

ヒノキ収穫表 地位5

林齢	樹高 (m)	本数 (本/ha)	平均胸高直径 (cm)	胸高断面積 (m ² /ha)	幹材積 (m ³ /ha)	収量比数	相対幹距比	形状比
10	4.8	2944	6.1	9.1	21.1	0.230	0.384	0.788
15	6.2	2892	7.9	15.0	46.6	0.371	0.300	0.786
20	7.4	2747	9.3	19.8	74.9	0.478	0.258	0.794
25	8.5	2483	10.7	23.5	102.4	0.550	0.236	0.797
30	9.5	2270	11.9	26.5	129.4	0.606	0.221	0.801
35	10.4	2098	12.9	28.9	155.1	0.648	0.210	0.806
40	11.2	1956	13.8	31.0	178.7	0.681	0.202	0.810
45	11.9	1840	14.6	32.6	199.8	0.707	0.196	0.814
50	12.6	1731	15.4	34.1	221.3	0.729	0.191	0.817
55	13.2	1642	16.1	35.4	240.0	0.746	0.187	0.819
60	13.7	1571	16.7	36.3	255.6	0.759	0.184	0.820
65	14.2	1503	17.3	37.2	271.4	0.771	0.182	0.821
70	14.7	1437	17.9	38.1	287.2	0.781	0.179	0.821
75	15.1	1386	18.4	38.8	299.9	0.789	0.178	0.821
80	15.4	1348	18.8	39.3	309.4	0.795	0.177	0.821
85	15.7	1311	19.1	39.7	319.0	0.800	0.176	0.820
90	16.0	1275	19.5	40.2	328.5	0.805	0.175	0.820
95	16.3	1240	19.9	40.6	338.1	0.809	0.174	0.819
100	16.6	1205	20.3	41.1	347.6	0.813	0.174	0.818
105	16.8	1182	20.6	41.4	353.9	0.816	0.173	0.817
110	17.0	1159	20.8	41.6	360.3	0.818	0.173	0.816
115	17.2	1137	21.1	41.9	366.6	0.821	0.172	0.815
120	17.4	1115	21.4	42.2	373.0	0.823	0.172	0.814
125	17.5	1104	21.5	42.3	376.1	0.824	0.172	0.813
130	17.6	1093	21.7	42.4	379.3	0.825	0.172	0.813
135	17.7	1082	21.8	42.5	382.4	0.826	0.172	0.812
140	17.8	1072	21.9	42.7	385.6	0.827	0.172	0.811
145	17.9	1061	22.1	42.8	388.7	0.828	0.172	0.811
150	18.0	1050	22.2	42.9	391.9	0.829	0.171	0.810