

2) 立木本数精度に関する考察

H10 プロット内では、立木が存在するにも関わらず、検出されない箇所があった。その多くは斜面上部方向で確認された（図 2.49）。そこで、レーザ点群データの取得状況を確認したところ、林縁に近い箇所（林道沿い）ほど幹の断面形状が円形に近く、斜面上方向に林内に入り込むほど、幹の断面形状が半円になっていた。

よって、図 2.49 のような箇所では、計測の条件が悪くなった際に、幹の断面形状の再現性が低くなり、立木が検出できなかった可能性がある。

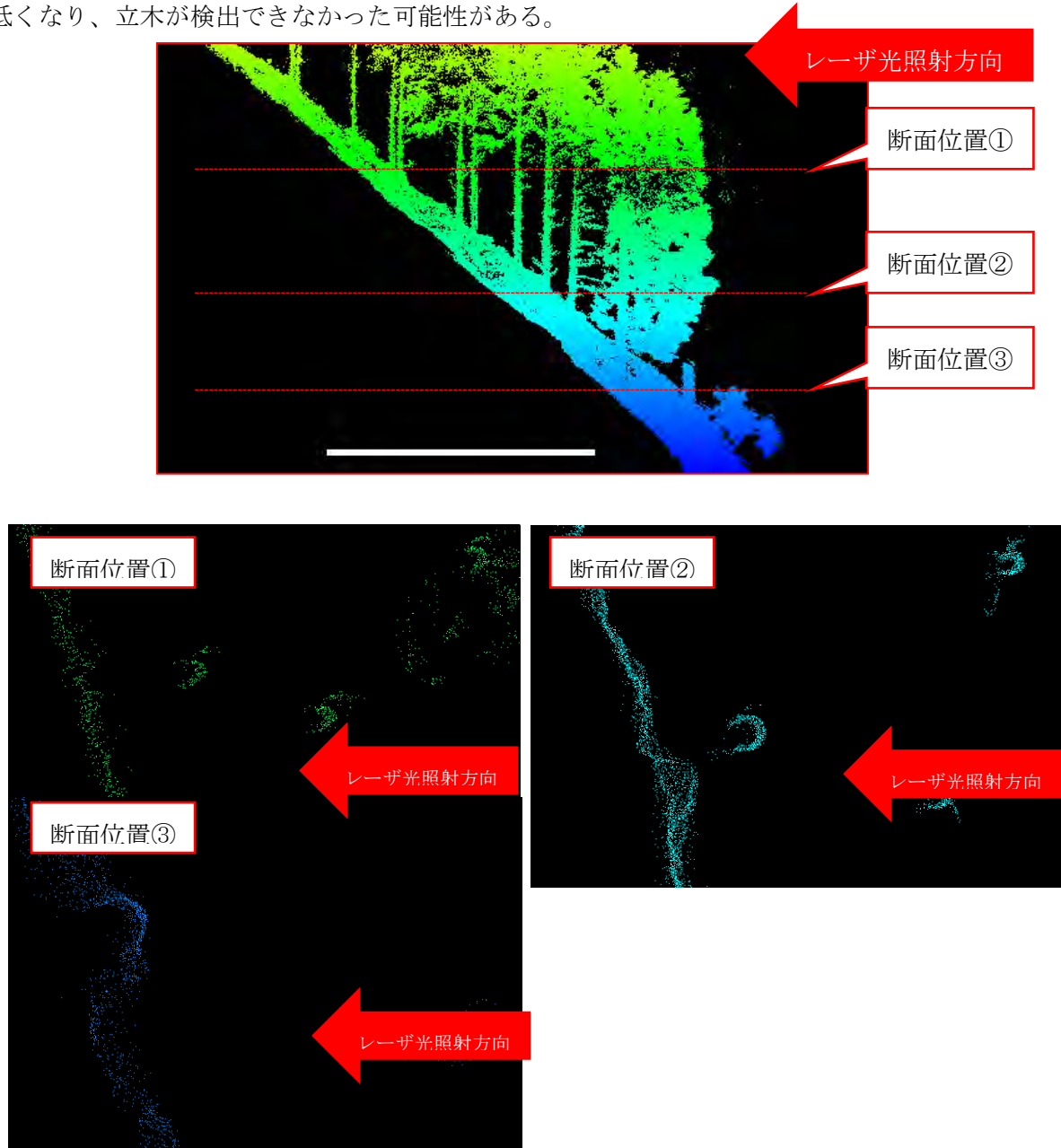


図 2.49 林内 UAV レーザ計測データの点群取得状況

3) レーザ計測範囲と立木本数が抽出されない範囲の関係

過年度のレーザ計測では、高さ 2m、10m、20m、背負子方式の 4 パターンで計測されているが、ソフトウェア上で立木を認識するには、樹幹の胸高位置に照射して、胸高断面の形状を正しく計測することが重要である。つまり、枝葉に照射が遮られない高さである、梢下を飛行している 2m、10m、背負子方式のデータが大きく影響したと考えられる。すでに、昨年度の報告書では、41 林班のような、斜面傾斜が 35° を超えるような急傾斜地で、道から 9m より遠い樹木では、レーザ計測で取得した樹幹断面が再現されなかったと説明されている（図 2.50、図 2.51）。その要因として、斜面に対する計測の方向及び急傾斜地か否かにより、地面や樹冠部に照査されて、樹幹の胸高部分に照査されにくくなることが考察されている。このため、計測対象とする林分の斜面位置を考慮した計測方法の検討が必要だと考えられる。

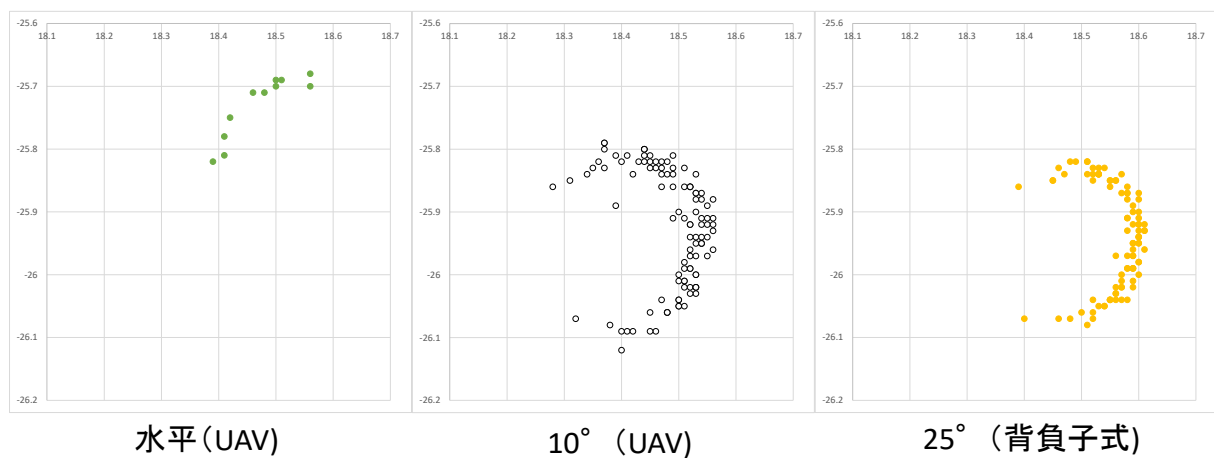


図 2.50 道から 9m 断面高 1.2m

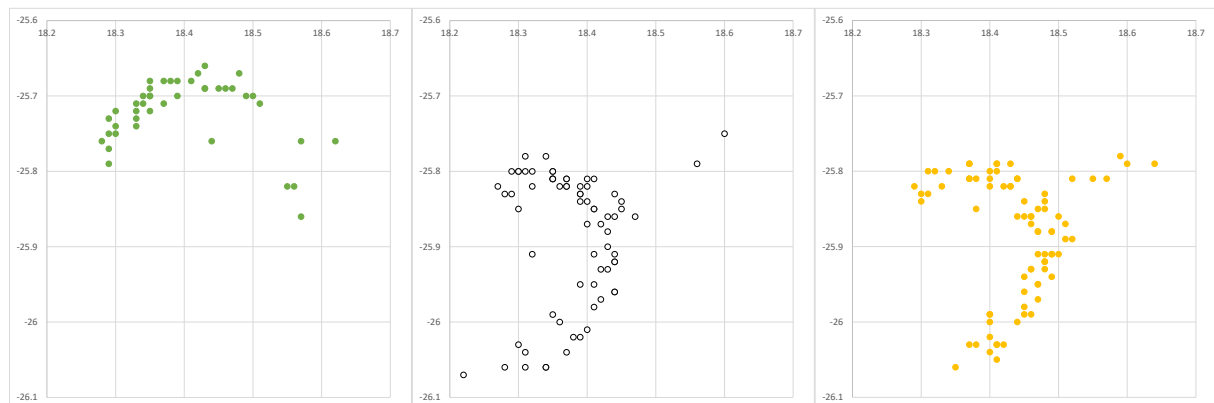


図 2.51 道から 9m 断面高 3.1m

今回の解析結果で、特に立木本数が抽出されなかった H10 は、プロット内の平均傾斜度が 38.9° であり、作業道中心からの水平距離が約 12m より遠い範囲で顕著であった（図 2.52）。

一方で、UAV を計測した高さより斜面下部にあるスギの林分では、誤差率は立木本数で 1.8% と非常に高精度であり、胸高直径は 13.4% と、一般的なレーザ解析を上回る 15% 以下の精度を示している。

本事業のヒノキとスギの解析結果の差異から、立木が抽出されなかった原因は、UAV 飛行高度より上方向の斜面は、十分な照射点数がなかったためだと考えられる。

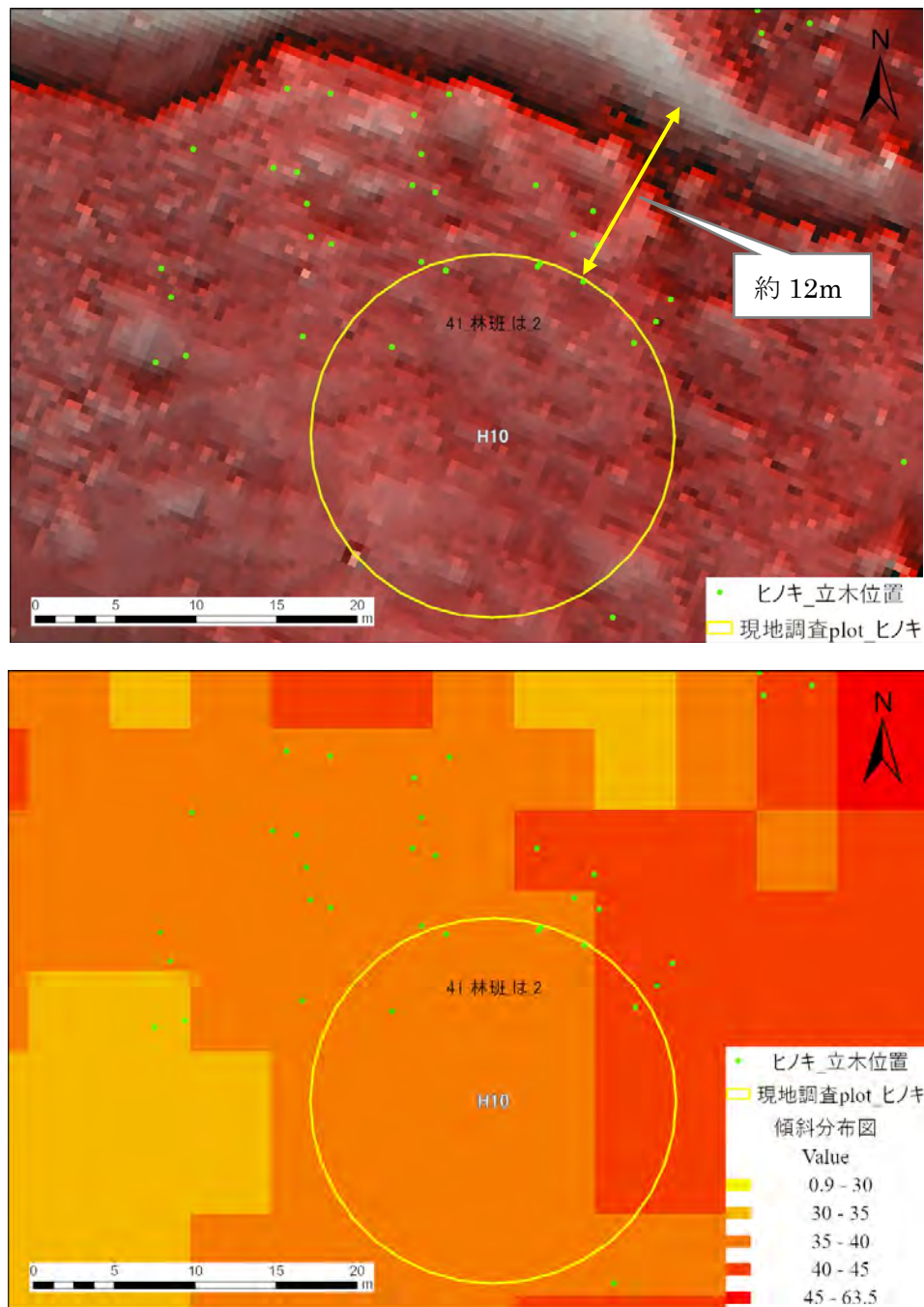


図 2.52 調査地点 H10 の状況（上図：赤色立体地図、下図：傾斜区分図）

4) 林内 UAV レーザ計測によって森林解析をする際の注意事項

計測にあたっては、斜面が急なエリアでは、極端に解析対象範囲が狭まる可能性があることから、計測機器のスキャン角を確認し、スキャン角度と斜面傾斜度から解析が可能な範囲を予測することが望ましい（図 2.53）。

今後、解析対象範囲を一定の面積に維持もしくは拡大するためには、計測を作業道沿いだけに限らず林内も含めて行うことで、より正確な胸高断面形状を取得し、立木を検出することが可能になるものとする。

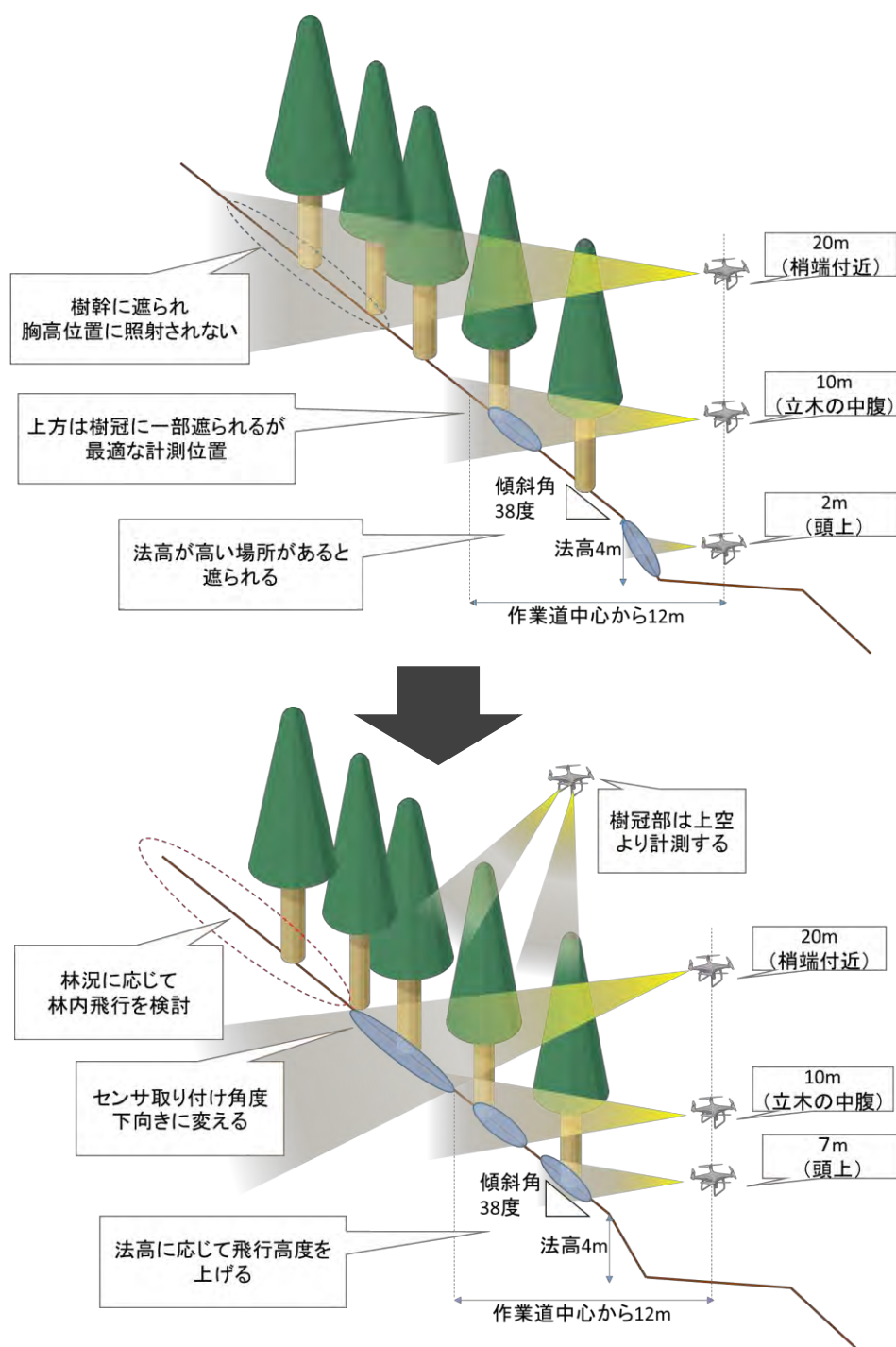


図 2.53 計測対象地のシミュレーションイメージ

(5) 上空レーザ解析結果と林内 UAV レーザ計測データの比較

上空レーザ計測により得られた森林資源解析結果と、林内 UAV レーザ計測データから検出した立木本数および樹高、胸高直径、材積を比較した。

1) 現地調査プロット範囲内での比較

現地調査プロット範囲内を対象として、それぞれのプロットにおける上空レーザ解析結果と林内 UAV 解析結果を比較した。

樹木本数については、林内 UAV で計測されるのは全木本数となるため、全木本数のみで比較した（表 2-20）。現地調査結果と比較すると、スギ（40 林班）では林内 UAV で精度が高かったのに対し、上空レーザ計測では過小評価となっている。40 林班は立木密度が高く、上空からでは下層の立木を抽出することが難しかったことが原因と考えられる。このような過密林分において立木本数を計測する上では林内 UAV の利用が有効であることがわかる。

一方、ヒノキ（41 林班）では上空レーザ計測ではほぼ本数が一致しているのに対し林内 UAV では過小評価となっているプロットが多い。前述したように、林内 UAV の計測条件・計測方向によって立木の検出精度が大きく左右されることが原因と考えられる。

表 2-20 現地調査、上空 UAV レーザ、林内 UAV レーザ解析の全木本数の比較

プロット名	現地調査 全木本数 (本)	レーザ解析 樹木本数 (本)	林内UAV 樹木本数 (本)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
S01	62	45	61	74%	27%	2%
S02	27	26	28	93%	4%	4%
S03	51	48	51	94%	6%	0%
S04	51	43	49	88%	16%	4%
S05	23	25	23	109%	9%	0%
平均	42.8	37.4	42.4	88%	12%	2%

プロット名	現地調査 全木本数 (本)	レーザ解析 樹木本数 (本)	林内UAV 樹木本数 (本)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
H06	34	34	27	126%	0%	21%
H07	25	24	18	133%	4%	28%
H08	19	19	14	136%	0%	16%
H09	18	18	18	100%	0%	0%
H10	37	35	7	500%	5%	81%
平均	26.6	26.0	16.8	155%	2%	29%

現地調査、上空 UAV レーザ解析、林内 UAV レーザ解析結果における平均樹高を比較した（表 2-21）。現地調査結果と比較すると、スギ・ヒノキともに上空 UAV レーザでは概ね高い精度で計測されていた。林内 UAV では一部過小評価されたプロットもあるが、概ね問題ない精度で樹高が測定された。

表 2-21 現地調査、上空 UAV レーザ、林内 UAV レーザ解析の樹高の比較

プロット名	現地調査 平均樹高 (m)	レーザ解 析 平均樹高 (m)	林内UAV 平均樹高 (m)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
S01	18.2	20.5	17.6	117%	12%	2%
S02	18.3	18.5	16.1	115%	1%	12%
S03	17.0	18.0	15.1	119%	6%	12%
S04	17.1	17.1	15.9	107%	0%	7%
S05	13.6	14.1	13.4	105%	4%	1%
平均	16.9	17.6	15.6	113%	5%	7%

プロット名	現地調査 平均樹高 (m)	レーザ解 析 平均樹高 (m)	林内UAV 平均樹高 (m)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
H06	15.1	15.9	14.3	111%	6%	5%
H07	15.6	16.0	13.5	119%	3%	13%
H08	12.7	13.2	13.8	95%	4%	9%
H09	15.2	16.2	14.2	115%	7%	6%
H10	15.1	15.1	13.4	112%	0%	10%
平均	14.7	15.3	13.9	110%	4%	9%

現地調査、上空 UAV レーザ解析、林内 UAV レーザ解析結果における平均胸高直径を比較した（表 2-22）。現地調査結果と比較すると、スギ・ヒノキともに上空 UAV レーザでは概ね誤差率 10%以内の範囲で推定できていた。林内 UAV ではスギ・ヒノキともに一部のプロットで大きく過小評価されていた。前章で報告したように、斜面上部方向へ照射した林内 UAV レーザでは立木の樹幹形状を正確にとらえられていないものがあつた。そのため、胸高直径についても一部プロットで誤差が大きくなったものと考えられる。

表 2-22 現地調査、上空 UAV レーザ、林内 UAV レーザ解析の胸高直径の比較

プロット名	現地調査 平均胸高 直径 (cm)	レーザ解 析 平均胸高 直径 (cm)	林内UAV 平均胸高 直径 (cm)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
S01	24.8	26.1	21.8	120%	5%	8%
S02	25.4	24.5	25.0	98%	4%	2%
S03	25.7	23.3	18.9	123%	9%	27%
S04	24.4	22.8	17.4	131%	7%	28%
S05	22.9	20.3	22.3	91%	11%	3%
平均	24.7	23.4	21.1	111%	7%	13%

プロット名	現地調査 平均胸高 直径 (cm)	レーザ解 析 平均胸高 直径 (cm)	林内UAV 平均胸高 直径 (cm)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
H06	22.6	21.5	17.5	123%	5%	22%
H07	23.1	22.5	18.7	121%	3%	19%
H08	21.6	20.9	19.3	108%	3%	4%
H09	24.2	23.6	20.1	117%	3%	15%
H10	24.9	23.2	16.0	145%	7%	35%
平均	23.3	22.3	18.3	122%	4%	19%

現地調査、上空 UAV レーザ解析、林内 UAV レーザ解析結果における平均単木材積を比較した（表 2-23）。現地調査結果と比較すると、スギにおける上空 UAV レーザの推定値は、樹高の誤差が比較的大きかった S01、胸高直径誤差が比較的大きかった S03,S05 で誤差率が大きくなっているが、全体では誤差率 15%以内に収まった。ヒノキの上空 UAV レーザ推定値はどのプロットも誤差が少なく高い精度で推定できていた。

林内 UAV ではスギ・ヒノキともに一部のプロットで大きく過小評価されていた。特に、胸高直径が大きく過小評価となっていた S03,S04,H06,H07,H10 で誤差が大きい。S05 など一部のプロットでは精度が高かったが、全体としては誤差率がスギ・ヒノキともに 15%を上回った。

表 2-23 現地調査、上空 UAV レーザ、林内 UAV レーザ解析の単木材積の比較

プロット名	現地調査 平均単木 材積 (m^3)	レーザ解 析 平均単木 材積 (m^3)	林内UAV 平均単木 材積 (m^3)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
S01	0.43	0.51	0.35	147%	19%	11%
S02	0.44	0.41	0.37	111%	6%	15%
S03	0.42	0.36	0.22	165%	14%	48%
S04	0.38	0.33	0.20	168%	12%	47%
S05	0.27	0.23	0.26	87%	16%	4%
平均	0.39	0.37	0.28	132%	14%	25%

プロット名	現地調査 平均単木 材積 (m^3)	レーザ解 析 平均単木 材積 (m^3)	林内UAV 平均単木 材積 (m^3)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
H06	0.31	0.31	0.20	160%	2%	35%
H07	0.33	0.33	0.23	145%	0%	31%
H08	0.23	0.24	0.23	103%	2%	12%
H09	0.36	0.38	0.25	152%	4%	29%
H10	0.37	0.34	0.18	187%	9%	51%
平均	0.32	0.32	0.22	147%	3%	32%

現地調査、上空 UAV レーザ解析、林内 UAV レーザ解析結果におけるプロット合計材積を比較した（表 2-24）。現地調査結果と比較すると、スギにおける上空 UAV レーザの推定値は、本数の誤差が比較的大きかった S04、単木材積の誤差が比較的大きかった S03 で誤差が大きくなっているが、全体では誤差率 15%以内に収まった。ヒノキの上空 UAV レーザ推定値はどのプロットも誤差率 15%以内に推定できていた。

林内 UAV では単木材積の結果と同様、スギ・ヒノキともに一部のプロットで大きく過小評価されていた。全体として誤差率はスギ・ヒノキともに 15%を上回った。

表 2-24 現地調査、上空 UAV レーザ、林内 UAV レーザ解析の合計材積の比較

プロット名	面積 (ha)	現地調査 合計材積 (m ³)	レーザ解 析 合計材積 (m ³)	林内UAV 合計材積 (m ³)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
S01	0.04	22.7	23.0	21.2	109%	1%	12%
S02	0.02	11.8	10.3	10.4	99%	13%	12%
S03	0.04	21.5	17.4	11.2	155%	19%	48%
S04	0.04	19.0	14.3	9.7	147%	25%	49%
S05	0.02	6.2	5.6	5.9	95%	9%	4%
平均		16.2	14.1	11.7	121%	13%	25%

プロット名	面積 (ha)	現地調査 合計材積 (m ³)	レーザ解 析 合計材積 (m ³)	林内UAV 合計材積 (m ³)	上空UAV/ 林内UAV	上空UAV 誤差率	林内UAV 誤差率
H06	0.04	10.2	10.7	5.3	201%	5%	49%
H07	0.02	8.3	8.0	4.1	194%	4%	50%
H08	0.02	4.4	4.5	3.2	139%	2%	6%
H09	0.02	6.2	6.8	4.5	152%	10%	29%
H10	0.04	13.3	11.8	1.3	935%	12%	91%
平均		8.5	8.3	3.7	227%	6%	45%

2) 林内 UAV 計測範囲内での比較

現地調査プロットの範囲外についても含めた計測結果の比較を行う目的で、林内 UAV 計測範囲内を対象とした上空レーザ解析結果と林内 UAV レーザ解析結果を比較した。比較範囲は、林内 UAV 計測において単木抽出が可能となった範囲のやや内側とした（図 2.54）。

比較範囲の面積は、スギが 1.02ha、ヒノキが 0.96ha である。

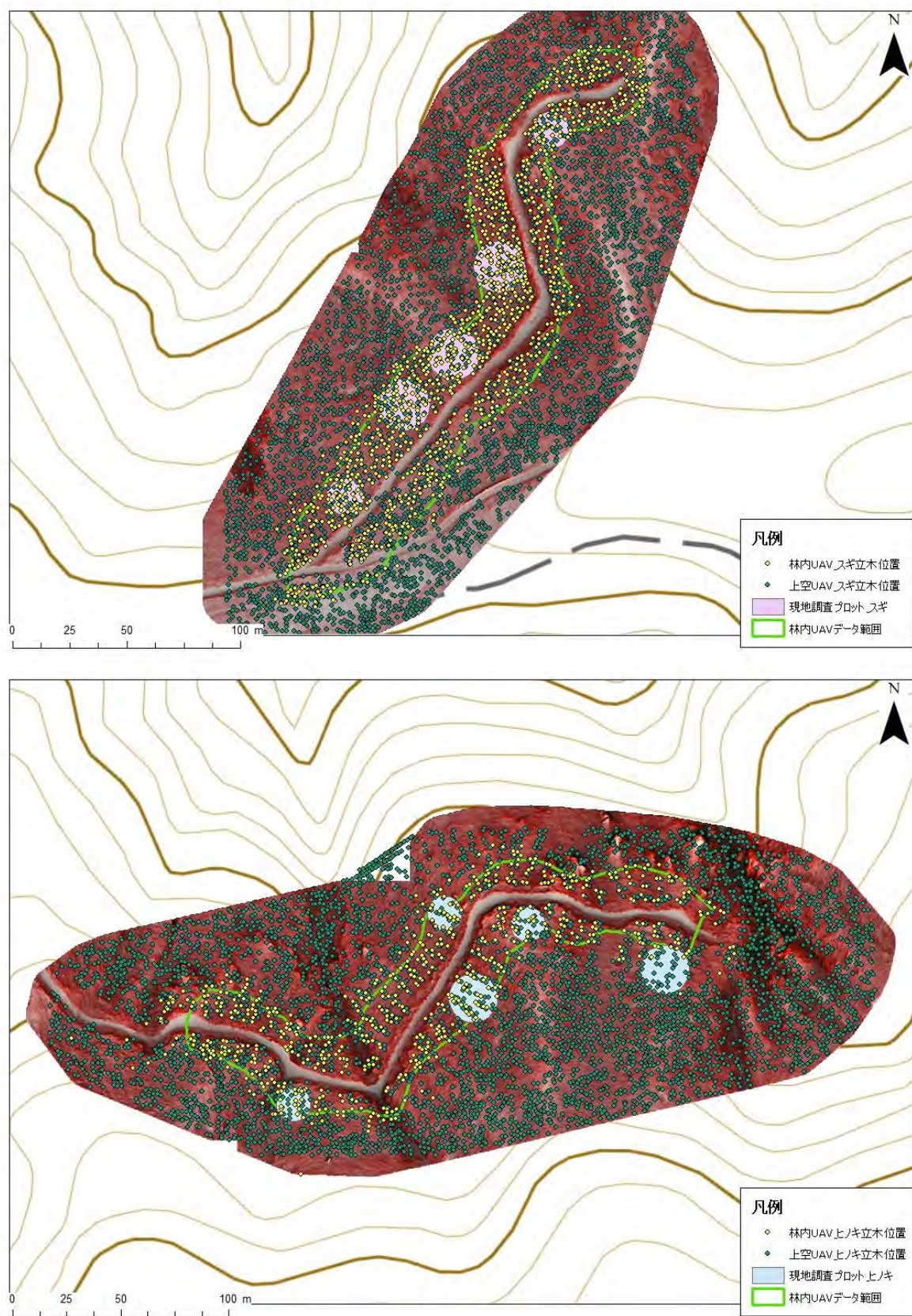


図 2.54 林内 UAV と上空 UAV の比較範囲（上：スギ 40 林班、下：ヒノキ 41 林班）

表 2-25 に比較結果を示す。立木本数について、前章での比較から 40 林班（スギ）では林内 UAV による計測結果の精度が高かったことがわかっている。過密林分では上空からの計測では下層立木を抽出できないのに対し、林内 UAV では下層も含めた全木の本数を抽出できるため、基本的に林内 UAV で抽出した立木本数の方が上空 UAV によるものよりも多くなると考えられる。ただし、41 林班（ヒノキ）のように林内 UAV の抽出本数の方が上空レーザよりも少ない場合は、レーザ照射方向等の影響により検出できない立木があったと考えられ、データ利用に注意が必要となる。

平均樹高については、現地調査結果に比べ上空 UAV レーザの計測結果はやや大きい値となっていたが、現地調査で正確に樹頂点の高さを計測できていない場合もあり得るため、上空 UAV レーザによる計測結果がより実際の樹高に近い可能性もある。それに対し、林内 UAV での計測結果は現地調査結果よりもやや低く、過小評価傾向があった。

平均胸高直径についても、林内 UAV レーザではうまく樹幹形状を取得できない場合半月形の樹幹となるため、過小評価傾向になると考えられる。

平均単木材積の推定結果は、胸高直径・樹高の精度に影響を受ける。林内 UAV の計測結果はいずれも過小評価傾向となるため、平均単木材積および合計材積についても過小評価傾向となる。

表 2-25 林内 UAV 計測範囲内における林内 UAV と上空 UAV 解析結果の比較

40林班	林内UAV	上空UAV	林内UAVとの比
立木本数(本)	1097	907	83%
平均樹高(m)	14.3	17.1	120%
平均胸高直径(cm)	19.7	23.8	121%
合計材積(m ³)	266.8	336.3	126%
平均単木材積(m ³ /本)	0.24	0.37	152%

41林班	林内UAV	上空UAV	林内UAVとの比
立木本数(本)	527	606	115%
平均樹高(m)	13.7	15.2	111%
平均胸高直径(cm)	19.6	23.3	119%
合計材積(m ³)	126.2	207.2	164%
平均単木材積(m ³ /本)	0.24	0.34	143%

2.2.4 検証結果のまとめ

林道・作業道からの UAV 計測結果と、本年度実施した上空 UAV レーザおよび現地調査との比較の結果、スギの過密林では本数の抽出において上空 UAV レーザよりも精度の高い結果を得られた一方、特にヒノキ林では本数、DBH、材積について林内 UAV の誤差が大きかった。

その要因として、林内 UAV ではスキャン角が ± 15 度に制限されるため、林道から斜面上側に位置する立木について十分にレーザを照射できなかったことが考えられた。ヒノキ林では林道に対して斜面上側に位置する現地調査プロットが多かったため、本数等の誤差が大きくなったと考えられる。特に、傾斜が急な林分ではこの影響が大きくなることが予想される。

ただし、今回の検証においては地上調査のサンプル数も少なく、あくまで一つの事例としてとらえる必要がある。林内 UAV や上空 UAV の技術の精度そのものを評価しているわけではないことに留意が必要である。

以上の結果より、林道・作業道から林内 UAV による計測を行う際は、対象林地の傾斜を確認し、計測機器のスキャン角度と斜面傾斜度から解析が可能な範囲を予測した上で計測計画を立てることが重要だとわかった。

解析が可能な範囲の予測においては、林道・作業道から斜面上側か下側かによっても変わることが想定される。また、林縁木や林縁部の低木が発達していて、道からの見通しが悪い林分も解析可能範囲が狭まるものと考えられる。解析可能な範囲外の林分については、地上レーザや上空 UAV レーザとの併用を検討する必要がある。

2.2.5 総合考察

(1) 計測方法の選択について

高精度な森林情報を得る手段は林内 UAV レーザだけではなく複数の選択肢がある。「高精度な森林情報の整備・活用のためのリモートセンシング技術やその利用方法等に関する手引き（平成 30 年度、林野庁）」（以下、リモートセンシング手引き）において整理されているセンサの選定フローでは、解析の目的や条件に応じて適切なセンサを選択することができる（図 2.55）。本業務で検討した林内 UAV は、このうち樹幹解析が必要な場合に選択されるセンサの一つである。なお、データの整備状況や対象林分の状況に応じて、各手法を組み合わせる用いることもあり得る。

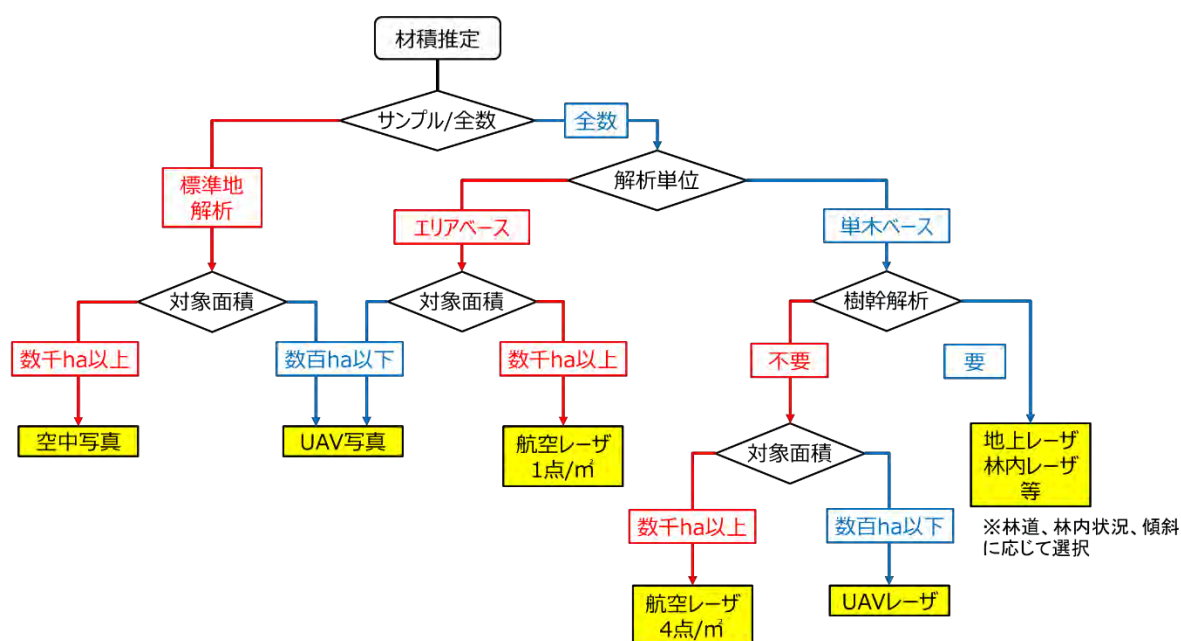
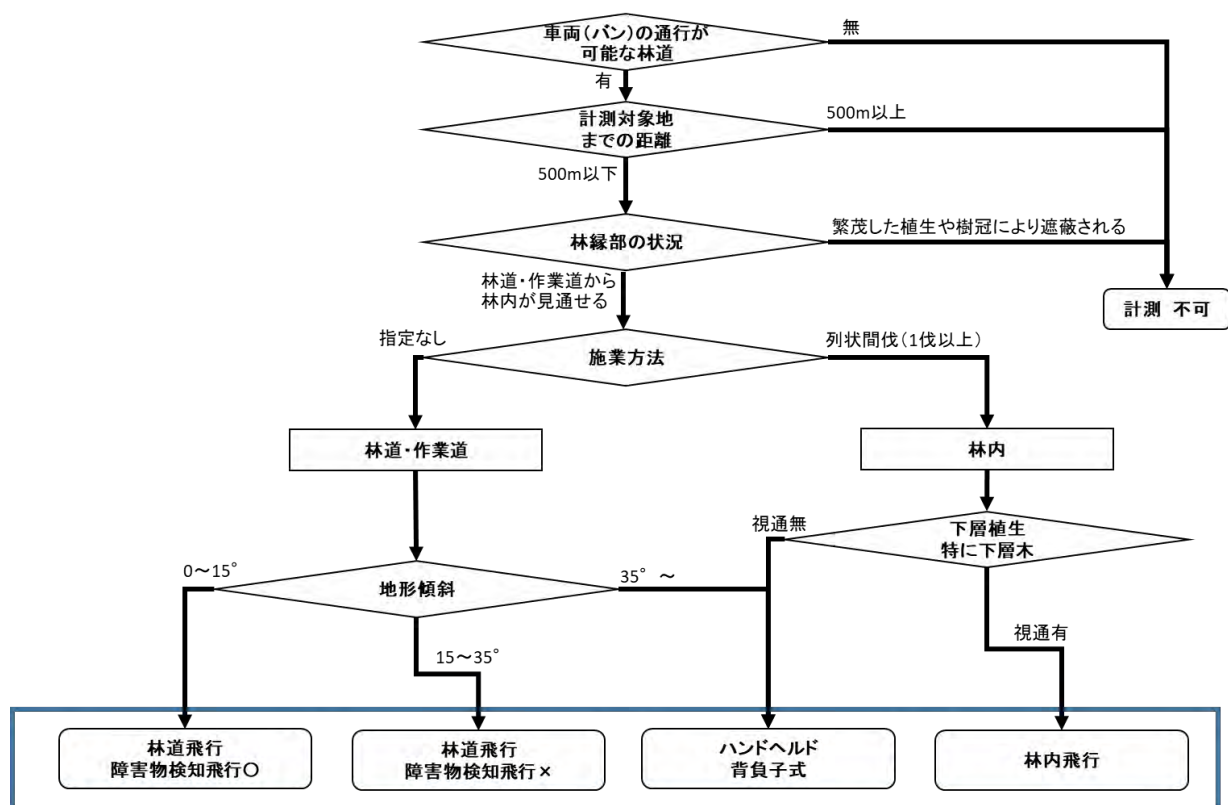


図 2.55 森林資源量の調査のためのセンサ選定フロー（リモートセンシング手引きより引用、一部改変）

一昨年度から本年度までの林内 UAV に関する実証事業により、様々な知見が得られてきた。現状の林内 UAV には技術的制約があるため、林内状況や施業状況、路網の配置、地形といった種々の条件を踏まえ、地上レーザ等を含めた計測方法の検討が必要だと言える。具体的には、昨年度業務において検討した計測条件の検討フローに基づき判断を行うこととなる（図 2.56）。林内の立木密度や林道・作業道からの傾斜方向、距離といった条件に応じて、適宜地上レーザや林内 UAV、上空 UAV との組み合わせを検討する必要がある。

国有林全体の施業計画を作成する際など、広域的な情報が必要となる場合は航空レーザ、特定の施業地について情報更新などを行う際は UAV、収穫調査など正確な胸高直径が必要とされる場合は林内 UAV、といったように、目的に応じてセンサを使い分け、全体として国有林における業務を効率化、高精度化していくことが重要である。



※林内の状況に応じて、各センサの組み合わせや上空UAVとの組み合わせを検討

図 2.56 計測条件の検討フロー（令和 2 年度森林資源情報整備技術実証事業（国有林）報告書より引用、一部改変）

(2) 林内 UAV のメリット

林内 UAV による計測は、上空からではわからない林内の情報（樹幹形状や位置等）（表 2-26）を、地上レーザよりも効率的に取得できる、という点にメリットがある。

国有林野事業では、従来より収穫調査を限られたマンパワーで効率的かつ適切に実施することが課題とされ、「令和 2 年度航空レーザ計測を活用した収穫調査実証等委託事業」により航空レーザを活用した効率化について検討されている。検討の結果、航空レーザ解析成果により多くの作業を代替することができる可能性があるものの、情報を得られる対象樹木が上層木であること、材種や品質等の情報を得られないことが課題であった。

本事業で検討した林内 UAV 計測から得られる情報は、こうした課題を解決できる可能性がある。林内 UAV 計測からは上層に達しない被圧木の情報や、立木の樹幹形状が把握できるため、生産される木材の品質・品等区分（A 材～D 材）が可能となる。

このように、林内 UAV により新たに取得できる情報が既存の作業を大幅に省力化できる可能性がある。今後も、こうした情報を活用した省力化の実証や、樹幹形状だけでなく正確な立木位置を用いた林業機械での造材指示など新たな情報を用いた技術開発を進めていくことが望まれる。

表 2-26 林内 UAV レーザ計測により新たに取得できる森林情報（令和 2 年度森林資源情報整備技術実証事業（国有林）報告書より引用、一部改変）

新たに取得可能な森林情報	林内 UAV レーザ計測	上空 UAV レーザ計測
樹木位置図	○	○
樹高	△	○
樹幹形状・矢高	○	
樹冠形状		○
未到達木の状況	○	
微地形	○	○

(3) 今後の展望

【計測機材の高機能化】

今回の検証結果はあくまで現時点の結果であり、今後の技術開発により林内飛行 UAV の高機能化、小型化が期待される。また、上空 UAV レーザ計測に使用した直下型のセンサにおいても、レーザ取得範囲が横方向まで広がる機種があるため、林内 UAV 計測に適用できる可能性がある。

【収穫調査等の実作業への導入】

前述したように、林内 UAV レーザ計測により、航空レーザ計測だけでは代替することができなかった部分を代替することができるようになる可能性がある。収穫調査や実際の施業でどのように活用できるか実証を行うことが望ましい。

【レーザデータによる計測の新たな評価方法】

林内で計測したレーザデータは、従来はとれなかったデータの取得を可能にするものであり、単純にこれまでの現地調査を置き換えるだけでなく、新たな評価方法を検討する必要がある。例えば、従来は人手による調査の都合上、立木の胸高直径を測定しているが、レーザ計測であれば胸高にこだわる必要はなく、より材積の推定精度が高まる上部直径を計測することができる。材積についても樹高と胸高直径による二変数材積式からの推定ではなく、直接利用材積を計測することが可能となる。この場合、材積の精度検証としては実際に伐採して出材された利用材積との比較が考えられる。

このように、レーザのデータから新たに取得可能となる情報については、従来の枠組みにあてはめた評価ではなく、目的や手法に応じたより適切な評価方法を検討する必要がある。なお、評価においては、レーザ計測の機材性能や飛行方法といった技術的な部分の精度と、得られたデータを解析して直径や材積を推定するアルゴリズムの部分の精度とがあるため、分けて議論する必要がある。

【点群データの活用方法】

レーザ計測により得られた点群データの活用方法として、本業務では森林資源解析に適用する場合の精度を検証したが、そのほかにも活用方法は様々考えられる。

例えば、上空からのレーザ解析では得られない被圧木の情報を、林内でのレーザデータと比較検証し、上空からわかる情報から推定が可能か検証するなど、レーザ解析の高度化につなげられる可能性がある。また、幹が通直でないため材積の評価が難しい広葉樹について、材積の評価方法を確立させるなど、広葉樹への適用も様々考えられる。

レーザ計測のみならず、画像データから SfM 技術により得られた点群データの活用もあわせて検討の余地がある。さらに、取得した情報をいかに現場まで情報共有するかについても、データの共有媒体や利用しやすい形式などの検討を要する。

このように活用の可能性と検討事項は多岐にわたるが、国有林野事業においてこれまでに認識されている課題やニーズについて、その都度必要に応じた検討を行うことが第 1 歩であり、そうした取り組みの積み重ねがこれらの検討事項についての知見の蓄積となり、議論の進展につながるものと期待される。

2.3 委員の意見聴取

上記検討結果について、昨年度事業において技術的指導及び助言を得るために設置した検討委員会の各委員に報告を行い、意見を聴取した。なお、新型コロナウイルスの感染防止のため、web 会議システムを活用しオンラインで聞き取りを行った。

表 2-27 昨年度事業検討委員会委員

氏 名	所 属
加藤 正人	信州大学 先鋭領域融合研究群山岳科学研究拠点 教授
瀧 誠志郎	森林総合研究所 林業工学研究領域 収穫システム研究室
松英 恵吾	宇都宮大学 農学部森林科学科 准教授
村上 拓彦	新潟大学 農学部 農学科 准教授

ヒアリングにおける各委員の主な意見は以下の通り。

【加藤委員】

- 林内 UAV は材の品質・品等（A 材～D 材）の判定に使うことができること、収穫調査の省力化につながることをメリットとしまとめていくのが良い。
- UAV レーザに限らず、航空レーザも含めて国有林の施業全体をレーザデータにより効率化し価値を高めるという視点での整理にすると良い。
- 今回の検証結果はあくまで現時点の結果であり、今後の技術開発により林内飛行 UAV の高機能化、小型化が期待される点も今後の展開に記載すると良い。

【瀧委員】

- 上空のデータと地上のデータを組み合わせたものが最も納得感のあるデータとなる。
- 当方で試験を行っている限りでは林内 UAV の適用可能範囲は意外と限られる印象であり、今回の結果も合致する。
- 現場のニーズとして、利用材積がわかるようになることに期待されている。また、点群だけでなく林内状況がわかるような画像の提供にもニーズがある。
- 胸高直径や材積の算出は、利用ソフトのアルゴリズムの問題となるので、レーザ計測によるデータ取得とは別次元の問題として切り分けて議論するのがよい。

【松英委員】

- 今回の検証結果は、サンプル数も少ないので、あくまで 1 つの事例であり、それぞれの技術の精度そのものを評価しているわけではない。
- 斜面上部と下部で得られるデータも異なる。それぞれの樹種で上部・下部が異なるプロットは 1 つしかとれていないが、作業道沿いで計測する前提で留意すべき点を整理するとよい（斜面方向、林縁木の影響など）。

- 各センサの組み合わせや、上空 UAV と林内 UAV の組み合わせも考えられるのでフロー選択時に考慮できるようにするとよい。
- 林内レーザなら胸高直径よりも上部直径の方が材積推定の精度が高い。従来取れなかったデータをレーザの点群データで可能にする、レーザのデータに合わせた評価の仕方という視点での整理も検討するとよい。
- そのほか、上層木と全木の関係も今回のような上空データと林内データを用いると検討可能になる。樹冠量と林分状況や本数の関係も解析できる。SfM の利用も可能である。取得方法によって特性は異なるが、全体として点群データをどう活用していくか、方法論のところも今後整理が必要。

【村上委員】

- 新しい計測方法に合わせた新しい資源把握を検討していきたい。胸高直径を用いた二変数材積式から、利用材積など新たな評価をする段階に来ているのかもしれない。
- これまで伐倒しないとわからなかった情報が立ったままわかるようになったことは画期的で、レーザだからこそわかる情報。レーザによる測樹として新しい見方が提供されている。
- 林内 UAV のメリットとして挙げられている、収穫調査の代替や材の品質区分について、国有林でのニーズを踏まえたものであることがわかる流れとしたほうが良い。
- 林内 UAV の計測計画を立てる上で得られた知見を整理しておくとうい。

2.4 民有林関係者への情報提供

これまでの成果と合わせた上記林内 UAV レーザの解析結果について、林業成長産業化地域内の民有林関係者に情報提供した。情報提供は「令和 3 年度 林業成長産業化地域 成果報告会」において報告を行う形で実施した。

以下に成果報告会の開催概要を示す。

- 開催日時：令和 4 年 2 月 21 日（月） 13:15~17:00
- 主催：林野庁（事務局：公益財団法人日本生態系協会）
- 内容：
 - 林業成長産業化地域創出モデル事業の概要／林野庁 計画課
 - モデル地域からの事例発表（3 地域）
大館北秋田地域（秋田県）、南会津地域（福島県）、高吾北地域（高知県）
 - パネルディスカッション及び話題提供
 - ☆ 出演者によるパネルディスカッション
 - ☆ 国有林野事業におけるモデル事業の成果報告（※本業務の報告）
 - ☆ 話題提供

3. 広葉樹林分における調査手法の整理・分析

樹種・樹型・林相等が多様で針葉樹における資源量把握等に関する調査・研究蓄積がそのまま適用できないと考えられる広葉樹林の効率的な森林情報の把握手法を検討・整備することを目的として、既往の研究成果を収集し、その成果や特徴について分析を行った。

具体的には、各種リモートセンシング技術等（空中写真（同等の解像度をもつ衛星画像を含む。以下同じ。）のほか航空レーザデータ、UAV 写真、UAV レーザ、林内レーザ等の新たな技術）を用いた広葉樹林分の調査方法について、既往の研究成果を収集し、（１）樹種判定、（２）森林資源量把握（バイオマス量、材積量）、（３）病虫害・気象害把握（ナラ枯れや風倒木等の早期発見）、（４）森林更新可能性把握（更新可能性等の判断に資する観点からの林内におけるササ等の林床植生、低層・中層等の広葉樹の生育状況）の４項目について、目的に応じて把握できる項目、精度、コスト等の観点からの整理・分析を行った。

3.1 既往の研究成果の収集・整理・分析

3.1.1 各計測技術の整理

広葉樹林分における調査においても、活用する計測技術の基本的な特徴や大まかな精度、コストについては針葉樹林分で整理されているものと大きな違いはないと想定される。そこで、平成 30 年に林野庁で整理されている「高精度な森林情報の整備・活用のためのリモートセンシング技術やその利用方法等に関する手引き」（以下、リモートセンシング手引き）を参照し、各計測技術の特徴を確認した。

表 3-1 に、リモートセンシング手引きで整理された、森林資源量の調査に関する各技術の整理表を引用した。活用する技術を選定する際には、コスト、適用面積、把握したい情報に応じて選択することが必要となる。なお、この表の情報は平成 30 年度当時のものであり、現在までに技術開発や低コスト化が進んでいる技術もある可能性がある。

適用面積としては、衛星画像、空中写真/航空レーザ、UAV、林内レーザの順に適した面積が小さくなる。面積あたりのコストも同様の順で高くなる。また、把握できる情報として、衛星画像、空中写真、UAV 写真では樹種判定と病虫害発見、簡易的な資源量把握となる。航空レーザ、UAV レーザではより高精度な資源量把握が可能となる。林内レーザは、上空から判定するような情報は不向きだが、立木の曲がり等上空からは得られない情報を取得可能となる。

表 3-1 森林資源量の調査とりまとめテーブル（リモートセンシング手続きより引用※平成 30 年度時点）

評価項目		現地調査	光学衛星画像	空中写真		航空レーザ		UAV写真		UAVレーザ	地上レーザ
				空中写真 オルソ画像	立体視						
適用 面積	～1ha プロットレベル	○			○			○		○	○
	1ha～10ha 小班単位	○			○			○		○	○
	10ha～100ha 小班単位				○			○		○	
	2,000ha～ 市町村・都道府県単位		○	○		○					
	100,000ha～ 都道府県単位		○	○		○					
データ諸元			地上解像度 0.41m～10m	地上解像度 0.1～0.3m	地上解像度 ～0.5m	計測密度 1点/㎡	計測密度 4点/㎡以上	地上解像度 1cm～10cm （センサのサイズ、 対地高度により変動）		計測密度 20点/㎡～100点/㎡ （飛行速度、対地高度 により変動）	レーザ機器設置間隔 10～20m
活用方法			林相判読	林相判読	林相判読 林分情報把握 （標準地解析）	林相判読 林分情報把握 （エリアベース解析）	林相判読 単木情報把握 （単木解析）	林相判読 林分情報把握 （標準地解析）	林相判読 林分情報把握 （エリアベース解析）	林相判読 単木情報把握 （単木解析）	単木情報把握 （単木解析）
森林 調査	材積	○			○	○	○	○	○	○	○
	樹高	○			○	○	○	○	○	○	○
	胸高直径	○					○			○	○
	立木本数	○			○		○	○		○	○
	立木位置図				○		○	○		○	○
	樹冠長率	○					○			○	○
	収量比数	○			○		○	○		○	○
	相対幹距比	○			○		○	○		○	○
	形状比	○					○			○	○
	林相・樹種	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	曲がり										○
導入 コスト	計測機器		－	－	－	－	－	15万円～200万円		3,000万円	200万円～1,000万円
	解析ソフト		－	－	10万円/年	－	－	100万円		－	～400万円
	コスト ※ヒアリング結果平均値 詳細は手引き72p以降を 参照		2～100円/ha	300円/ha	30,000円+1,000 ～1,600円/空中写真1枚 （搭載データ作成費用）	－	2,500円/ha （計測のみ） 6,300円/ha （解析+ソフト 導入費を含む）	－		247,000円/ha （計測+解析）	200,000円/ha （計測+解析）

3.1.2 広葉樹林分における調査手法に関する文献調査

以下に、(1)～(4)までそれぞれの観点について計測技術別に既往文献を収集・整理した結果を示す。観点は(1) 樹種判定、(2) 森林資源量把握、(3) 病虫害・気象害把握、(4) 森林更新可能性把握の4項目とした。

(1) 樹種判定

a) 衛星画像

衛星画像による樹種判定は多数の論文で発表されている。従来は分解能が30m程度の中分解能データが用いられてきたが、近年では空間分解能が数m程度の高解像度衛星(IKONOS、QuickBird等)を用いた判読精度の向上が進められている。高分解能衛星データを利用した林相区分においては、従来のピクセルベースの処理ではなくオブジェクトベースでの分類が適しているとされており、大西ら(2005)はオブジェクトベース分類の手法を用いた林相区分について報告している。

特定の樹種に絞った判読の取り組みについて、ブナ(松林, 2007)及びアラカシ(岡本, 2018)で研究事例がある。ブナについては地形等のデータからブナ群落分布の予測モデルを作成するもので、判定精度は50%程度であった。アラカシについては、開葉直後にドローンで別途空撮した画像では特徴が見られたが、Landsat 衛星の画像では確認できず、高解像度衛星写真が必要との結論であった。

複数樹種を対象とした研究では、事例・樹種により判定精度は1～9割とばらつきが大きい。共通して、植林などによって単一樹種で成林している林分の判定は精度が高く、混交林では精度が落ちる傾向にあった。

また、単木での樹種判定を試みた加藤(2002a,b)の事例では、天然林において樹冠幅の直径が8m以上であれば単木での判読が可能とされている。

表 3-2 衛星画像を用いた樹種判定に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
加藤正人, 2002a ¹	天然林、カラマツ、トドマツ	北海道	12 林分		IKONOS
加藤正人, 2002b ²	広葉樹 19 種、カラマツ、トドマツ	北海道	200ha	全体で 55%, ミズナラ 62%, 広葉樹 27～50%	IKONOS
大西ら, 2005 ³	針葉樹、広葉樹、混交林	宮崎県、鹿児島県		45%～47%	IKONOS, LANDSAT/TM

¹ 加藤正人. (2002). 高分解能 IKONOS 画像による単木判読可能性の比較. 日本林學會誌, 84(4), 221-230.

² 加藤正人. (2002). 高分解能 IKONOS 衛星による針広混交林の樹種分類. 森林航測, (198), 6-9.

³ 大西紀子, 村上拓彦, 溝上展也, & 吉田茂次郎. (2005). オブジェクトベース画像分類による

著者・発表 年	対象樹種	対象地	解析 面積	精度	使用機材等
Kosaka, 2005 ⁴	スギ、ヒノキ、カラマツ、混交林、広葉樹	高山市		単一樹種 8 割、混交林 3～7 割	QuickBird
河 邑 ら , 2005 ⁵	スギ、ヒノキ、カラマツ、広葉樹	岐阜県	4ha	スギヒノキカラマツで 9 割、ナラ類 3 割、クリ 1～2 割	IKONOS
松 林 健 一 , 2007 ⁶	ブナ	鳥取県	4900 ha	50%程度	Aster
Immitzer et al., 2012 ⁷	10 種(広葉樹 5 種、 針葉樹 5 種)	Austria	3000 ha	全体 82%、メイン樹種 (トウヒ、マツ、ブナ、カ シ)95%	World View-2
Sheeren et al., 2016 ⁸	13 種(広葉樹 8 種、 針葉樹 5 種)	France	24km 四方	全体で 0.91(カッパ係 数)	Formosat-2
岡 本 ら , 2018 ⁹	アラカシ	宮崎県	1100 m ²		Landsat、ド ロ ー ン
Karasiak et al., 2019 ¹⁰	13 種(広葉樹 8 種、 針葉樹 5 種)	France	24km 四方	広葉樹 26～87%, 針葉 樹 10～50%	Formosat-2

林相区分. 九州森林研究, 58, 131-134.

⁴ Kosaka, N., Akiyama, T., Tsai, B., & Kojima, T. (2005, July). Forest type classification using data fusion of multispectral and panchromatic high-resolution satellite imageries. In Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. (Vol. 4, pp. 2980-2983). IEEE.

⁵ 河邑眞, 辻野和彦, & 辻子裕二. (2005). 森林の樹種に関する高分解能衛星画像特性の分析. 写真測量とリモートセンシング, 44(5), 82-90.

⁶ 松林健一. (2007). リモートセンシングと自然環境要因情報を用いた大縮尺による現存ブナ群落域の抽出と図化 氷ノ山, 扇ノ山を事例地として. 景観生態学, 11(2), 113-124.

⁷ Immitzer, M., Atzberger, C., & Koukal, T. (2012). Tree species classification with random forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data. Remote sensing, 4(9), 2661-2693.

⁸ Sheeren, D., Fauvel, M., Josipović, V., Lopes, M., Planque, C., Willm, J., & Dejoux, J. F. (2016). Tree species classification in temperate forests using Formosat-2 satellite image time series. Remote Sensing, 8(9), 734.

⁹ 岡本南, 光田靖, 小田三保, & 加治佐剛. (2018). アラカシ林抽出技術開発に向けた Landsat データによる分光反射特性の時系列解析. 森林計画学会誌, 52(1), 7-14.

¹⁰ Karasiak, N., Dejoux, J. F., Fauvel, M., Willm, J., Monteil, C., & Sheeren, D. (2019). Statistical stability and spatial instability in mapping forest tree species by comparing 9 years of satellite image time series. Remote Sensing, 11(21), 2512.

b) 空中写真

空中写真を用いた樹種判読は 1970 年代から取り組まれている。広葉樹についてもカラー航空写真を用いて判読キーを作成し目視での樹種判別が進められた（小木 1986 等）。広葉樹種間の樹種判別については、瀬戸島ら（2001, 2002, 2006）により精力的に研究され、航空写真の撮影時期が判別に重要であることがわかっている。特に、常緑広葉樹では春季に開花・展葉が起こるため判別に適し、落葉広葉樹では春季と秋季に色調が大きく変わると報告されている。また、季節変化の少ない夏季においても、近赤外域の波長も取得できるハイパースペクトルスカナを用いることで一定程度樹種判別が可能となると報告されている（瀬戸島ら 2006）。

過去の空中写真と現在の空中写真を比較することで分布の変化を追った研究では、現在の写真から判読した結果を過去の写真と照らし合わせることで比較が可能となる、と報告されている（奥田ら 2007, 中園ら 2015）。この場合においても、適切な撮影季節の選択が重要とされていることは他の文献と共通している。

表 3-3 空中写真を用いた樹種判定に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
小 木 , 1986 ¹¹	広葉樹 8 種	北海道			空中写真
瀬戸島ら , 2001 ¹²	アラカシ、スダジイ、 クスノキ	福岡県			空中写真
瀬戸島ら , 2002 ¹³	広葉樹 6 種、スギ、 ヒノキ、モウソウチク	福岡県			空中写真
瀬戸島ら , 2006 ¹⁴	スダジイ、アラカシ、 スギ、ヒノキ、ケヤ キ、コナラ	東京都	3.4ha	全体で 68%程度、 スダジイ・スギで 精度低い	可視近赤外 線放射計

¹¹ 小木和彦. (1986). 空中写真による広葉樹の樹種判読（会員研究発表講演）. 日本林学会北海道支部論文集, 34, 16-18.

¹² 瀬戸島政博, 赤松幸生, 福井裕子, 重松敏則, 朝廣和夫, & 児玉滋彦. (2001). 春季の時系列カラー航空写真データからみた里山林の代表的な常緑広葉樹の色調変化（平成 13 年度 日本造園学会研究発表論文集（19））. ランドスケープ研究：日本造園学会誌：journal of the Japanese Institute of Landscape Architecture, 64(5), 801-804.

¹³ 瀬戸島政博, 赤松幸生, 今井靖晃, 重松敏則, 朝廣和夫, & 児玉滋彦. (2001). カラー航空写真上の季節の色調変化からみた里山構成樹種の識別に関する研究. ランドスケープ研究, 65(5), 679-684.

¹⁴ 瀬戸島政博, 今井靖晃, 船橋学, 鈴木雅和, & 勝木俊雄. (2006). 航空機から観測した多波長帯データを用いた里山の代表的な樹種区分に関する検討. ランドスケープ研究, 69(5), 677-682.

著者・発表 年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
奥 田 ら , 2007 ¹⁵	シイ	京都府	116ha		空中写真
中 園 ら , 2015 ¹⁶	常緑広葉樹、落葉広 葉樹	静岡県	150m 四 方 3 か所	2005 年は 90%以 上	空中写真

¹⁵ 奥田賢，美濃羽靖，高原光，& 小椋純一．（2007）．京都市東山における過去 70 年間のシイ林の拡大過程．森林立地，49(1)，19-26．

¹⁶ 中園悦子，武生雅明，田中信行，& 大丸裕武．（2015）．空中写真判読による函南原生林の 40 年間の林冠変化．

c) 航空レーザ

航空レーザを用いた樹種判定の取り組みは比較的近年から研究がされている。また、初期の研究では判定する樹種は常緑種・落葉樹といった大まかな判定にとどまり、近年の研究でも針葉樹の樹種を判定することには成功しているが、広葉樹の樹種を細分して判定する研究はあまり進んでいない。

判定に用いる特徴量としては、樹冠高（DCHM）をはじめ、レーザの反射強度や樹冠形状、レーザ透過率等をいくつか組み合わせることで判定精度を向上させている例がある（朱ら 2016, 中武ら 2018）。

また、衛星画像や空中写真を使用する場合と同様、樹種の判定には複数時期のデータを組み合わせることで精度が向上するとの報告がある（Kim et al. 2009, 小荒井ら 2010）。

表 3-4 航空レーザを用いた樹種判定に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
Kim et al., 2009 ¹⁷	常緑樹、落葉樹	USA	93ha	落葉期で 83.4%, 着葉期と組み合わせると 90.6%	航空レーザ
小荒井ら, 2010 ¹⁸	常緑樹、落葉樹	東京都、北海道		都市緑地では精度良い、北海道では針広混交林 5 割以下	DSM, DEM
朱ら, 2016 ¹⁹	スギ、ヒノキ、広葉樹、他針葉樹	茨城県	1250m × 700m	総合分類精度 86.8%	航空レーザ
中武ら, 2018 ²⁰	スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツ、広葉樹	愛知県	200ha	93.70%	航空レーザ

¹⁷ Kim, S., McGaughey, R. J., Andersen, H. E., & Schreuder, G. (2009). Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 113(8), 1575-1586.

¹⁸ 小荒井衛, 佐藤浩, & 中埜貴元. (2010). 航空レーザ計測による植生三次元構造を反映した植生図の作成. *地図*, 48(3), 34-46.

¹⁹ 朱林, & 島村秀樹. (2016). 航空レーザ計測データによる林相分類手法の研究. *写真測量とリモートセンシング*, 55(5), 303-313.

²⁰ 中武修一, 山本一清, 吉田夏樹, 山口温, & 宇野女草太. (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), 149-157.

d) UAV 写真

UAV により撮影した空中写真を用いた樹種判定について、2000 年代ではラジコン双翼機を用いた長澤ら（2004）の報告がある。また、Lisein ら（2015）をはじめ、近年の研究では近赤外波長のデータ取得もあわせて行われ、樹種判定に活用されている例が多い。

UAV の機動性を活かし、年に複数回の撮影を行った例が多いことも特徴的である。長澤ら（2004）は、春季と秋季で 3 回ずつ計 6 回の撮影を行い、短い時間間隔での色調変化が樹種分類に有効と報告した。Lisein ら(2015)はどの時期の画像が広葉樹分類に適切か検証を行い、春季のうち早い時期（early spring）と秋季のうち遅い時期（late fall）が最も有効と報告している。丹羽ら(2020)も 3 月と 5 月に撮影を行い、UAV 画像による植生図の作成について報告した。

竹中ら(2021)は、通常の RGB 形式オルソ画像を取得する UAV のみでなく、多波長センサを搭載した UAV もあわせて用いた 2 種類の UAV 画像により樹種分類を行っている。それぞれ緑葉期と紅葉期の 2 時期で撮影しており、これらの画像を用いた機械学習による分類で、クリやカエデ、ケヤキ等の樹種分類が可能になったと報告している。

表 3-5 UAV 写真を用いた樹種判定に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
長澤ら,2004 ²¹	ブナ、ミズナラ、コナラ、ホオノキ、ヤマザクラ	鳥取県			ラジコン双翼機
Lisein et al., 2015 ²²	oak, birch, maple, ash, poplar	Belgium	130ha	誤差 16%	UAV 写真(近赤外線含む)
丹羽ら, 2020 ²³	4 群落に分類	京都府	109.4ha	カッパ係数 0.43	UAV 写真(近赤外線含む)
竹中ら,2021 ²⁴	33 クラス	長野県	33.14ha, 8.49ha	RGB オルソで 56.2%, 多波長センサオルソで 64.4%	UAV 写真(多波長センサ含む)

²¹ 長澤良太, 鈴木茂之, & 佐野淳之. (2004). ラジコン空中写真を用いた落葉広葉樹林の樹種判読. 森林計画学会誌, 38(1), 11-21.

²² Lisein, J., Michez, A., Claessens, H., & Lejeune, P. (2015). Discrimination of deciduous tree species from time series of unmanned aerial system imagery. PLoS One, 10(11), e0141006.

²³ 丹羽英之, 森定伸, 小川みどり, & 鎌田磨人. (2020). 近赤外線センサ搭載 UAV を用いた効率的な植生図作成手法の開発. 景観生態学, 25(2), 193-207.

²⁴ 竹中悠輝, 加藤正人, 長澤幸一, & 増井僚. (2021). 3 種類のドローンによる広葉樹林森林資源情報解析-長野県大町市と下諏訪町を事例として. 森林計画学会誌, 55(1), 39-42.

e) UAV レーザ

UAV レーザを用いた樹種分類について報告は少なく、最近の文献に限られる。また、いずれの報告もレーザだけでなく複数のセンサーを組み合わせた研究であった。

Briechle et al. (2020) は 3 種の広葉樹の樹種分類を UAV 搭載レーザおよびマルチスペクトルセンサーで取得した画像を用いて分類を行った。分類手法としては 3D データを用いたディープニューラルネットワーク技術を用いており、従来のランダムフォレスト手法による分類よりも高い精度での分類が可能となったと報告されている。Hartling et al. (2021) は都市部の樹木を対象とした樹種分類を行っている。UAV レーザだけでなく、マルチスペクトルセンサー、ハイパースペクトルセンサー、熱赤外センサーといった複数のセンサーを組み合わせて機械学習を行うことで、8 割以上の分類精度が得られたと報告している。

表 3-6 UAV レーザを用いた樹種判定に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
Briechle et al., 2020 ²⁵	pine, birch, alder (ハンノキ), および立ち枯れ木	Ukraine	37ha	90.20%	UAV レーザ+マルチスペクトル画像
Hartling et al., 2021 ²⁶	7 樹種 (針葉樹 2 種、広葉樹 5 種)	USA	70ha	83.3% (ランダムフォレスト)	複数センサー

f) 林内 (地上、UAV) レーザ

林内からのレーザ計測による樹種判定に関する研究報告は収集できなかった。林内から樹種判定をする場合、幹の形状等から判定するため現状の技術では難しい。また、林内に人が入るため目視での樹種判定が可能であることから、樹種判定の需要も低いものと考えられる。

²⁵ Briechle, S., Krzystek, P., & Vosselman, G. (2020). Classification of tree species and standing dead trees by fusing UAV-based lidar data and multispectral imagery in the 3D deep neural network PointNet++. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2, 203-210.

²⁶ Hartling, S., Sagan, V., & Maimaitijiang, M. (2021). Urban tree species classification using UAV-based multi-sensor data fusion and machine learning. GIScience & Remote Sensing, 58(8), 1250-1275.

(2) 森林資源量把握（バイオマス資源量および材積、品等区分等）

a) 衛星画像

衛星画像等を用いたバイオマス資源量の推定は従来から実施されてきている。大貫(1986)は衛星画像を用いた森林資源把握について当時の技術のレビューを行っている。衛星画像のみではバイオマス量推定は難しいが、空中写真や地上調査を組み合わせることで実施可能となり、広葉樹林についても実際にバイオマス調査を行った事例が紹介されている。

この方法は海外協力分野でも一般的であり、志水ら（2013）ではマラウイ国における森林資源マッピングの事例が紹介されている。

また、バイオマス量の推定に近赤外の波長を用いた植生指数を組み合わせることもある（Tan et al.,2007）。

近年は、受動型センサである光学衛星画像のみならず、能動型センサとなる合成開口レーダ（SAR）や衛星 LiDAR を用いてより高精度の森林バイオマス推定を行う報告が増えている。Ma et al.(2017)は SAR データと森林インベントリ調査データを組み合わせ、広葉樹林のバイオマス量について高い精度での推定結果を得ている。また、林（2020）による最新の森林バイオマス推定に関するレビューでは、衛星 LiDAR や SAR によるバイオマス推定が光学センサによる推定よりも精度が高いこと、今後打ち上げ予定の衛星によりさらに衛星 LiDAR や SAR の森林分野での活用が可能となる展望などが紹介されている。

曲がり等を含めた用材としての資源量推定は報告がない。

表 3-7 衛星画像を用いた森林資源量把握に関する文献

著者・発表年	対象樹種	対象地	解析面積	精度	使用機材等
大貫, 1986 ²⁷	広葉樹等 ^{※1}	茨城県	32500ha		Landsat, 空中写真
Tan et al., 2007 ²⁸	落葉針葉樹、針広混交林、広葉樹 ^{※1}	China			NOAA AVHRR
志水ら, 2013 ²⁹	常緑林、ミオンボ林、ユーカリ植林等 ^{※1}	マラウイ			Landsat, ALOS AVNIR-2
Ma et al., 2017 ³⁰	針葉樹、混交林、広葉樹林 ^{※1}	China		広葉樹林 R2=0.96, RMSE=19.94Mg/ha	ALOS PALSAR

²⁷ 大貫仁人. (1986). 衛星リモートセンシングによる森林資源の把握とモニタリング.

²⁸ Tan, K., Piao, S., Peng, C., & Fang, J. (2007). Satellite-based estimation of biomass carbon stocks for northeast China's forests between 1982 and 1999. Forest ecology and management, 240(1-3), 114-121.

²⁹ 志水信雄, 富村俊介, & 古谷透. (2013). マラウイ国における森林資源マッピングプロジェクト. 海外の森林と林業, 86, 9.

³⁰ Ma, J., Xiao, X., Qin, Y., Chen, B., Hu, Y., Li, X., & Zhao, B. (2017). Estimating aboveground biomass of broadleaf, needleleaf, and mixed forests in Northeastern China