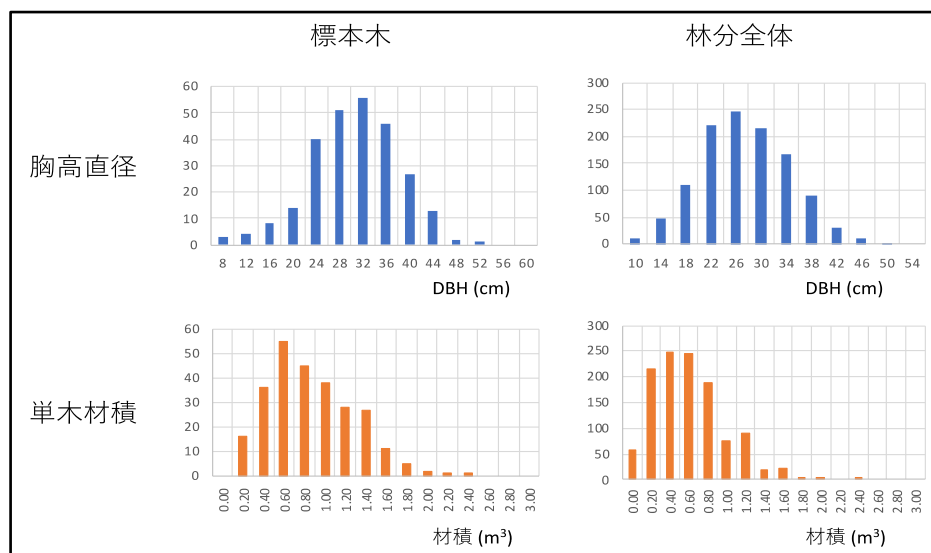


図5.5.10 標本木および
林分全体の立木サイズ
ヒストグラムの比較
(調査区 5)



一方、樹高については、従来の樹高標準地法では近似された樹高曲線を用いていたため、個々の立木について樹高の違いはあまり反映されず、しかも樹高標準地（あるいは樹高サンプリング）の選定の是非を確認することも困難であり、その妥当性はほとんど考慮されてこなかった。今回の調査で得られた標本木の胸高直径と樹高のデータを、全立木のデータと重ね合わせたのが図 5.5.11 である。標本木（●）が全立木（●）のデータ分布範囲を網羅していることがわかる。つまり、上述した胸高直径と単木材積だけでなく、樹高についても今回の標本木調査で適切なサンプリングがなされていること示すものである。

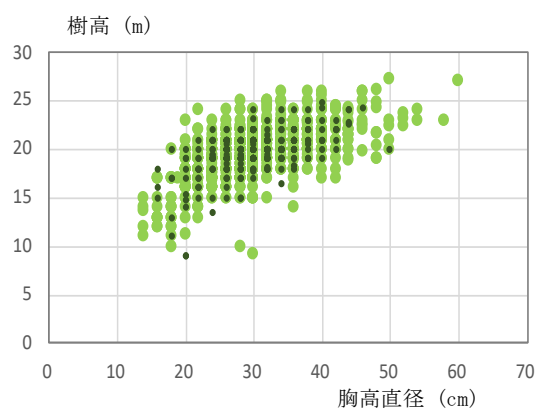


図5.5.11 樹高と胸高直径の関係（調査区 1）
● 全立木、● 標本木

（２）標本抽出率と推定精度

一般に行われている収穫調査では標本抽出率を 5%程度とされているが、その統計的な妥当性について定量的・実証的に論じた報告は見当たらず、統計的な論考がほとんどである（木梨 1978, 大隅 1989 南雲・箕輪 1990）。そこで本事業では、精密調査区（調査区 1）における詳細な調査データとその分析を試みるとともに、標本抽出率と推定精度との関係等について検討した。全調査区での集計結果を表 5.5.1 に示す。

（立木本数）5.4 節で述べたように、目視判読でカウントされた立木本数は実際の立木本数よりも過小評価となるため、現地での標本調査でチェックした被圧木の本数割合を考慮して立木本数を補正した。標本抽出率が大きいほど、補正後の本数誤差率は縮小し、特に抽出率が 15%以上では本数誤差率はほぼ 2%以下まで改善された。

（林分材積）林分材積の推定では、本数補正後の立木本数によって標本区と林分全体の本数比率を求め、本数比例によって林分材積を算出した。その結果表 5.5.1 に示したように、調査区による違いはあるが、標本抽出率が大きいほど材積誤差率は小さくなる傾向があった。標本抽出率が 10%以上では、すべての調査区で材積誤差率が 10%以下となった。

今回の調査では、標本区の選定にあたって、調査対象木の標本抽出率と推定精度を検証するために、標本抽出率が 5%～20%まで段階的に抽出できるように配慮したほか、調査手法や手順を検討するという目的があった。そのため、より丁寧な標本区の設定となり、結果的に標本区が 3～5 本と

多くなった（図 5.5.5）。しかし、実際に収穫調査を行う場合には、標本抽出率を調整（低く抑える）することにより、標本区の本数を減らすことも可能であり、また林況の違い・不均質さを丁寧に考慮する判断基準等を改善することによって、より簡潔な手順で、推定精度を向上させることも可能と考えられる。

表 5.5.1 簡易画像解析法による調査結果総括表

調査区	区 域	1 (伊豆)	2 (伊豆)	3 (伊豆)	4 (茨城)	5 (茨城)
	林小班	2 3 ろ 2	4 6 い 2	6 3 い 2	219 は 3	2065 ほ
	林小班	68	58	53	54	46
	区域面積	2.43	2.17	2.16	1.91	1.73
毎木調査	総本数	1,550 本	2,220 本	1,056 本	2,033 本	1,152 本
	材 積	1,091 m3	1,769 m3	912 m3	681 m3	811 m3
オルソ画像 読み取り	総本数	1,496 本	2,171 本	950 本	1,924 本	1,118 本
	材 積	-3.5 %	-2.2 %	-10.0 %	-5.4 %	-3.0 %
	作業時間	75	90	70	75	65
5 %抽出	標本本数	80 本	109 本	59 本	107 本	56 本
	うち被圧木本数	6 本	3 本	10 本	5 本	0 本
	補正後総本数	1,617 本	2,232 本	1,144 本	2,018 本	1,118 本
	本数誤差率	4.3 %	0.5 %	8.3 %	-0.7 %	-3.0 %
	標本木材積	56.55 m3	80.53 m3	41.95 m3	41.16 m3	45.34 m3
	総材積	1,143 m3	1,649 m3	813 m3	776 m3	905 m3
	材積誤差率	4.8 %	-6.8 %	-10.9 %	14.0 %	11.6 %
10%抽出	標本本数	159 本	215 本	111 本	213 本	119 本
	うち被圧木本数	9 本	3 本	16 本	10 本	6 本
	補正後総本数	1,586 本	2,202 本	1,110 本	2,019 本	1,177 本
	本数誤差率	2.3 %	-0.8 %	5.1 %	-0.7 %	2.2 %
	標本木材積	110.30 m3	159.29 m3	82.24 m3	77.78 m3	88.46 m3
	総材積	1,100 m3	1,631 m3	822 m3	737 m3	875 m3
	材積誤差率	0.8 %	-7.8 %	-9.9 %	8.2 %	7.9 %
15%抽出	標本本数	230 本	331 本	161 本	321 本	174 本
	うち被圧木本数	11 本	7 本	19 本	17 本	6 本
	補正後総本数	1,571 本	2,218 本	1,077 本	2,032 本	1,158 本
	本数誤差率	1.4 %	-0.1 %	2.0 %	0.0 %	0.5 %
	標本木材積	162.00 m3	243.61 m3	131.37 m3	116.56 m3	133.12 m3
	総材積	1,107 m3	1,632 m3	879 m3	738 m3	886 m3
	材積誤差率	1.5 %	-7.7 %	-3.6 %	8.4 %	9.2 %
20%抽出	標本本数	308 本	442 本	209 本	426 本	233 本
	うち被圧木本数	16 本	7 本	19 本	19 本	9 本
	補正後総本数	1,578 本	2,206 本	1,045 本	2,014 本	1,163 本
	本数誤差率	1.8 %	-0.6 %	-1.0 %	-0.9 %	1.0 %
	標本木材積	215.70 m3	333.84 m3	179.65 m3	156.46 m3	179.01 m3
	総材積	1,105 m3	1,666 m3	898 m3	740 m3	894 m3
	材積誤差率	1.3 %	-5.8 %	-1.5 %	8.7 %	10.2 %

5.6 調査精度及び調査工程

前述の検討結果を踏まえ、調査区1～5において標本調査の本数抽出率を5、10、15、20 %の4パターンとして帯状標本区を設定した。収穫調査を実施するための外業及び内業のフローを図5.6.1のように整理し、従来のその精度及び工程等を分析した。

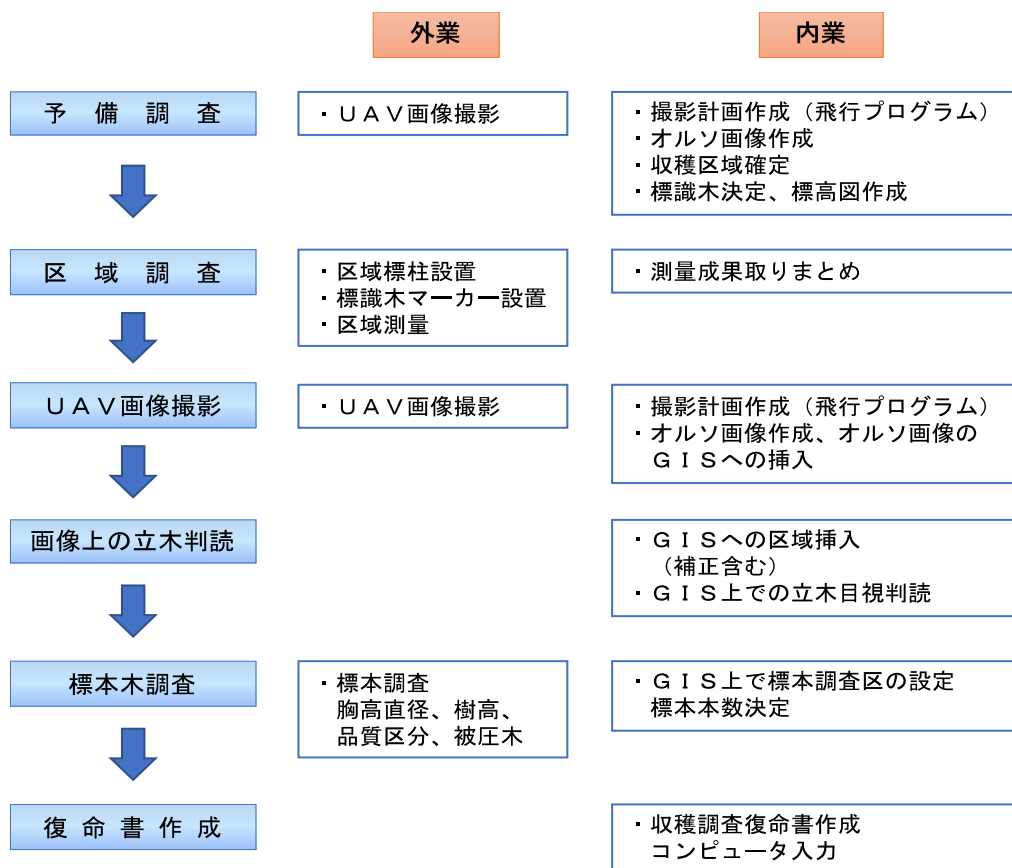


図5.6.1 簡易画像解析法による収穫調査の作業手順

5.6.1 調査精度

調査区1～5について、図5.6.1の手順で簡易画像解析による立木調査を行うとともに、検証のための毎木調査を実施し、立木本数及び立木材積について推定誤差率等を比較検討した。なお、今回提案する簡易画像解析では、本数比例法による材積推計をベースとしており、目視判読による立木本数の推計が重要な要件である。

（1）立木本数

オルソ画像の目視判読でカウントされる立木本数は、上空からの画像では識別困難な被圧木があることや急峻な地形等の影響が理由として考えられるが、実本数よりも過少になる傾向にある。実態としては10%程度本数が過小になる場合もあった（調査区3）。解決策としては、5.5.4項で説明した、被圧木を考慮した本数補正を行うことにより、立木本数の過少評価がほぼ解消された（表5.6.1、図5.6.2）。また本数抽出率が高くなるほど本数誤差率はゼロ%に収束していくことも確認され、抽出率15%ではすべての調査区で本数誤差率が2%以下となった。以上のことから、今回採用した被圧木による本数調整が有効であり、方法論として妥当であると判断された。

表5.6.1 抽出率による本数誤差率の変化

調査区	補正なし	5%	10%	15%	20%
1	-3.5	4.3	2.3	1.4	1.8
2	-2.2	0.6	-0.8	-0.1	-0.6
3	-10.0	8.3	5.1	2.0	-1.0
4	-5.4	-0.7	-0.7	-0.1	-0.9
5	-3.0	-3.0	2.2	0.5	1.0

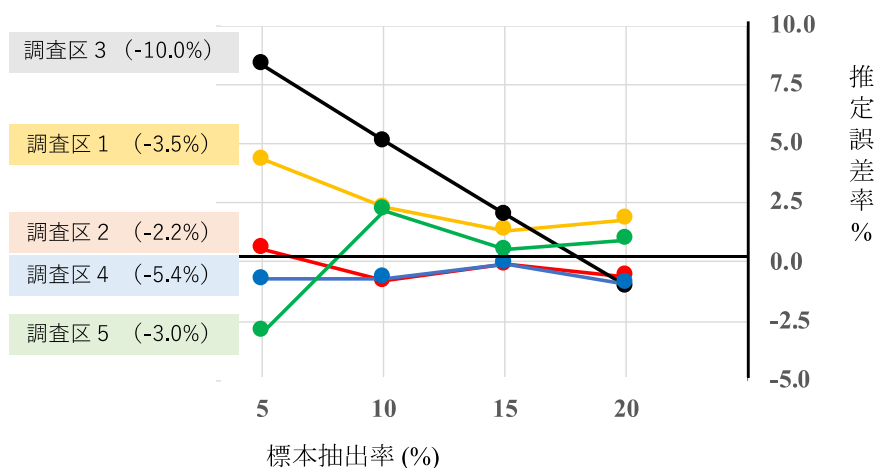


図5.6.2 目視判読による立木本数の推定誤差率（再掲）

（ ）は被圧木調整前の誤差率で、いずれもマイナスであった

（２）立木材積

立木材積については、被圧木補正後の立木本数をもとに「本数比例」（本数比例法）によって、林分材積を求め、毎木調査結果と比較して材積誤差率を算出した。**5.5.4項**ですでに述べたように、材積推定の誤差率は標本抽出率が高くなるとおおむね低下する傾向が見られ（表5.5.1）、標本抽出率が10%以上になると収穫調査として実用レベルの推定精度90%程度を確保できることが確認できた。品質区分（一般材および低質材）ごとの内訳については、標本調査時に判定した品質区分に基づいて、国有林で一般に行われている「比例法」（標準地調査での品質区分割合を、区域全体の品質区分割合と見なす）により分配して推定した（表5.6.2、表5.6.3）。

調査区1～5の低質材が非常に少なく一般材の比率が高かった。毎木調査結果でみると、本数割合で80.9%～98.6%（表5.6.2）、材積割合で88.9%～99.8%（表5.6.3）が一般材であった。本数抽出率と一般材比率の関係を見ると、両者に特段の傾向は認められなかった（図5.6.3、図5.6.4）。毎木調査の品質区分割合と標本木調査（抽出率5～20%）とを比較すると、立木本数、林分材積ともに、一般材比率の違いは5ポイント未満であった。したがって、標本木調査で判定された品質区分は、林分全体の立木評価に十分に反映させることが可能と判断された。

しかしながら、広い林内にあっては局所的に下層植生や林分密度の濃淡もあり、低質材の分布は実態として「ムラ」が生じることはあり得る。したがって、層化抽出による標本区を設定する段階で、作業道や気象害等の発生で大きく疎開された個所などが極端に含まれることがないように配慮し、品質区分の実態が適切に再現されるよう留意する必要がある。

表5.6.2 品質区分ごとの立木本数
および一般材比率

調査区		1	2	3	4	5
毎木調査	一般材	1,434	2,117	912	1,645	1,136
	低質材	116	103	144	388	16
5%抽出	一般材	1,480	2,160	1,020	1,680	1,080
	低質材	120	20	160	460	40
10%抽出	一般材	1,470	2,140	940	1,680	1,120
	低質材	120	10	170	450	70
15%抽出	一般材	1,420	2,180	940	1,700	1,113
	低質材	113	27	133	440	47
20%抽出	一般材	1,435	2,185	865	1,710	1,115
	低質材	105	25	180	420	50
一般材の 比率(%)	毎木調査	92.5	95.4	86.4	80.9	98.6
	5%抽出	92.5	99.1	86.4	78.5	96.4
	10%抽出	92.5	99.5	84.7	78.9	94.1
	15%抽出	92.6	98.8	87.6	79.4	95.9
	20%抽出	93.2	98.9	82.8	80.3	95.7

注：毎木調査および5～20%抽出の単位は[本]

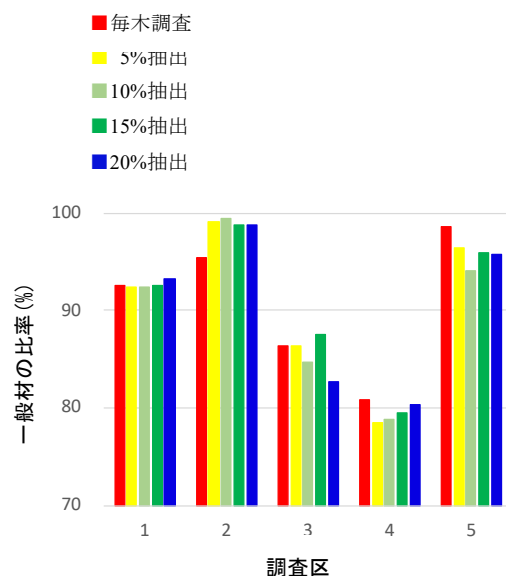


図5.6.3 立木本数に占める一般材比率の比較
(調査区ごと、抽出率ごと)

表5.6.3 品質区分ごとの林分材積
および一般材比率

調査区		1	2	3	4	5
毎木調査	一般材	1,034.6	1,709.5	871.3	605.2	809.0
	低質材	56.1	60.0	41.2	75.7	1.4
5%抽出	一般材	1,071.2	1,604.2	795.6	735.0	896.4
	低質材	59.8	6.4	43.4	88.2	10.4
10%抽出	一般材	1,053.4	1,589.7	787.0	698.5	878.2
	低質材	49.6	3.2	35.4	79.3	6.4
15%抽出	一般材	1,024.4	1,607.9	848.0	704.2	883.2
	低質材	55.6	16.2	27.8	72.9	4.3
20%抽出	一般材	1,031.0	1,654.8	871.1	711.3	888.5
	低質材	47.5	14.4	27.2	71.1	6.6
一般材の 比率(%)	毎木調査	94.9	96.6	95.5	88.9	99.8
	5%抽出	94.7	99.6	94.8	89.3	98.9
	10%抽出	95.5	99.8	95.7	89.8	99.3
	15%抽出	94.9	99.0	96.8	90.6	99.5
	20%抽出	95.6	99.1	97.0	90.9	99.3

注：毎木調査および5～20%抽出の単位は[m³]

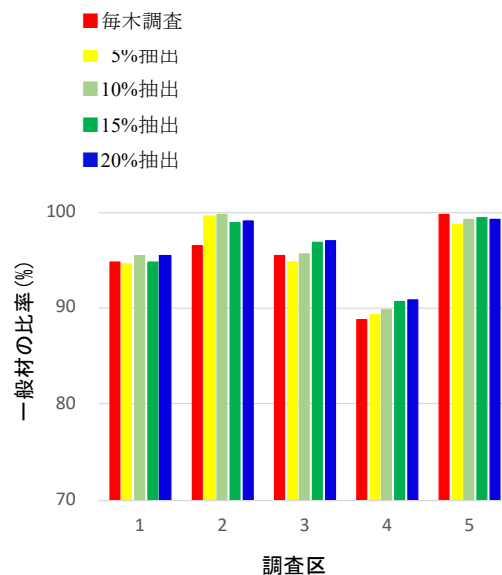


図5.6.4 林分材積に占める一般材比率の比較
(調査区ごと、抽出率ごと)

5.6.2 調査工期

調査工程の分析は、精密毎木調査法を採用した調査区1を除く調査区2～5について、簡易画像解析法と従来型の毎木調査法(樹高標準地)を内業と外業に分けて所要の工期を分析し、表5.6.4、図5.6.5に示すように、従来法の「毎木調査」と工期を比較した。

表5.6.4 調査手法による調査工期の比較総括表

単位：人/ha

区 分			毎木調査	簡易画像解析法							
				5%抽出	毎木調査比	10%抽出	毎木調査比	15%抽出	毎木調査比	20%抽出	毎木調査比
外業	予備調査		0.251	0.314	125%	0.314	125%	0.314	125%	0.314	125%
	区域調査		2.276	2.339	103%	2.339	103%	2.339	103%	2.339	103%
	立木調査	毎木調査	2.705								
		画像撮影		0.411		0.411		0.411		0.411	
		標本調査		0.465		0.929		1.394		1.859	
		小 計	2.705	0.876	32%	1.340	50%	1.805	67%	2.270	84%
	計		5.232	3.529	67%	3.993	76%	4.458	85%	4.923	94%
内業	画像毎木調査			0.251		0.251		0.251		0.251	
	標本区設定			0.125		0.125		0.125		0.125	
	復命書作成		0.818	0.818		0.818		0.818		0.818	
	計		0.818	1.194	146%	1.194	146%	1.194	146%	1.194	146%
合 計			6.050	4.724	78%	5.188	86%	5.653	93%	6.117	101%

注1：所要人工数は調査区2～5のhaあたりの平均値である。

注2：区域調査とは周囲実測及び区域表示を指す。

この結果、従来の毎木調査法に比べて、簡易画像解析法ではすべて工期が改善され、特に、外業のトータルの工期は、従来の毎木調査法を100とすると、67～94%に削減されることが確認された。外業の内訳で特筆すべきは、簡易画像解析法では、毎木調査法の現地調査「毎木調査」(2.705 人工)がなくなり、それに代わる「UAV 画像撮影・標本調査」が入る。胸高直径等を把握する従来の「毎木調査」が「標本調査」に変わることによって人工数は大きく削減された。内業では、簡易画像解析法はオルソ画像作成や標本区設定の人工が追加され、毎木調査法の内業を100とすると146と増えるが、全体の調査工期(合計欄)としては削減されて、5%抽出で22%、10%抽出で14%の工期縮減が図られ、効率的な調査法であることが確認できた。なお、現地調査に必要な人員体制は、従来の毎木調査法における人員体制(最低3名程度)で十分に実施可能と判明した。

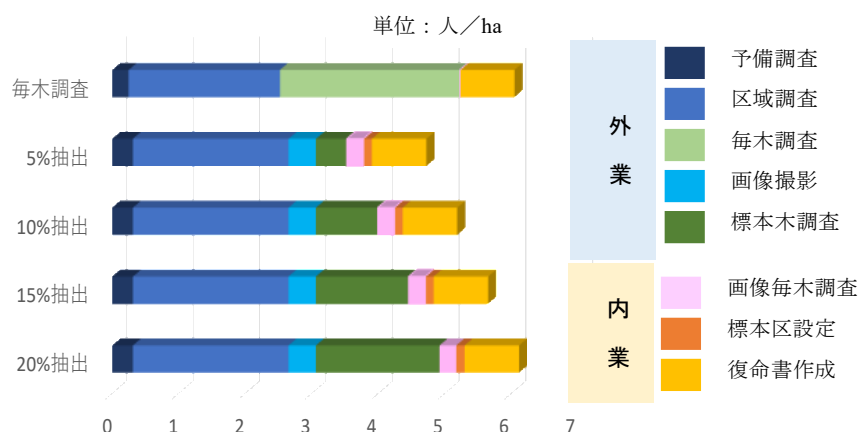


図5.6.5 収穫調査に係るhaあたり所要人工数

5.6.3 調査コスト

簡易画像解析法に係る使用機材及びその調達コスト（直営実施の場合）、ならびに指定調査機関に委託する場合のコストについて検討した。

調査に必要な機材・装備としては、通常の収穫調査でも使用している輪尺、測距器、ポケットコンパス、ハンディーGNSSレシーバー等のほか、各種測樹や測量機器に加えて、新たに表5.6.5に列挙した機材装備が必要となる。

表5.6.5 簡易画像解析法で新たに必要な機材装備一覧

- ・ UAV本体（Phantom4等）
- ・ 送信機及びコントロール用タブレット
- ・ プログラム飛行アプリ
- ・ 対空標識
- ・ SfM解析用ソフト
- ・ SfM解析可能な比較的高性能のパソコン
- ・ GISソフト（QGIS等）

注：従来使用している調査用機材装備を除く

これら機材装備のうち、プログラム飛行アプリ、GISソフトはフリーソフトが利用可能である。新たに調達する必要のある機材装備として、UAV本体、SfM解析用ソフト、SfM解析に必要な比較的高性能のパソコン、比較的精細なモニター等があるが、いずれも汎用品で概ね対応可能である。なお、UAV本体やSfM解析ソフト、SfM解析用パソコン等を新たに調達する場合の価格は製品スペック等によって区々ではあるが、今回の解析に使用したUAVやSfM解析用ソフト、SfM解析用パソコン等の市販価格は総額100万円程度である。

5.7 検討事項

林野庁収穫調査規程準則において、標準地調査法は「調査区域内に標準地を設け、当該標準地内の立木の材積等を調査し、面積比例または本数比例によって調査区域全体の材積等を算出する調査方法」と定義されている。この定義に照らせば、今回検討した簡易画像解析法は、本数比例（本数拡大とも言う。）による標準地調査法に位置付けられる^{注1}。

現在、国有林における標準地調査法は、面積比例によるものが太宗を占めており、今回検討した本数比例による標準地調査法が適用されているのは、主として北海道地域での間伐に係る立木販売箇所等に限られるようである。これは、従来実施されていた毎木調査についてコストをあまりかけず、比較的計測精度が良好で、すべての販売対象木にテープ等を表示して誤伐を防止する作業も可能であることが理由と考えられる。一方で、皆伐に係る立木販売箇所については、全国的に毎木調査（樹高曲線法）が収穫調査の主流であり、調査方法の効率化が課題となっている。

（簡易画像解析法の特徴と実用性）

今回実施した精度検証では、層化抽出法を採用することにより、標本木本数が概ね 10% 程度の抽出率であれば、実用レベルの材積推定精度 90% 以上が得られた。調査手法としての効率性に関しては、従来の毎木調査法に比べて、本数把握に関する工程が大幅に削減されるとともに、品質区分（一般材と低質材）が可能であり、立木価格の評価にも対応できることが確認された。また販売区域については従来通り地物表示することによって、買受者も混乱なく販売区域を識別でき、区域内立木すべてを販売対象木とする皆伐等においては何ら問題なく販売することが可能であり、本調査法の導入について大きな混乱は生じないものと考えられる。したがって今回検討した簡易画像解析法は、調査工程の効率性や収穫調査法としての実用性・客観性の点からも、現在国有林で採用されている毎木調査法に代わる手法として位置づけることが可能と考えられる。

簡易画像解析法の応用事例としては、立木販売の間伐（列状間伐）の場合のように、間伐完了後の確認検査での活用が考えられる。列状間伐などの定量間伐（機械的間伐）では、立木のサイズ・形質の分散が間伐前後でも変化しない。即ち、皆伐を行う場合と同様の手法で間伐実施前の林況を UAV によるオルソ画像で把握し、間伐率に応じて収穫量を計上して立木評価を行い、事業完了後には、再度オルソ画像を取得して、所定の伐採率、伐採列幅、列間幅となっているかを画像上で確認検査が可能となる。この場合、伐採対象木への表示も省略可能となる。このように、今回提案した簡易画像解析法は、対象森林を広く俯瞰することができる空撮画像が入手できることと、その画像から立木配置等の数値情報が容易に取得できることから、様々な業務での応用や森林情報管理システムへの活用など、画像解析の利点を活かした活用法の展開があり得る。

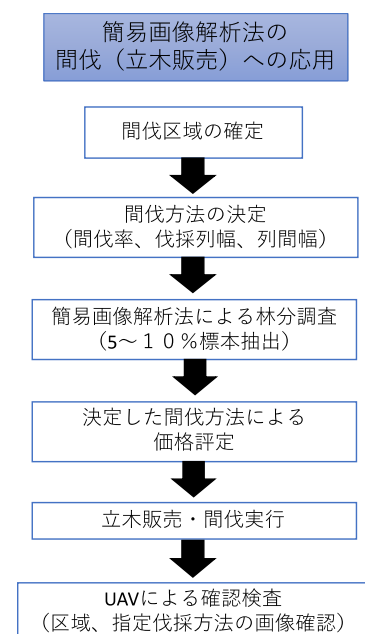


図5.7.1 簡易画像解析法の間伐への応用の概念

（今後の検討課題）

今回検討した簡易画像解析法の特徴を生かし、さらに、効率的な調査法としていくために解決すべき課題を挙げると以下のとおりである。

- ① 今回の精度検証等を行った調査区は、いずれも比較的均質な人工林を選定した。一般に、林分の均質さ（胸高直径、樹高）が低下すると、調査精度が変化すると予想され、今後、実用化に向けて適切な標本抽出率の確認等が必要と考えられる。
- ② 標準地調査法との比較検証のため、精密調査区とした調査区1において、地上レーザスキャナ（OWL）で林分全体を計測して林分情報のデータベースを作成した。地上レーザスキャナによる計測は、林分状況を把握する上で極めて効率的であるが、過密林分では樹高の計測精度が低下し、下層植生によって胸高位置の計測が困難になる等（千葉 2015 ほか）の課題があり、樹高補正あるいは幹材積表の工夫等、実用面での改善が図られれば、将来的には地上レーザスキャナを用いた効率的な標本調査（室木・井 2019）も可能と考えられる。
- ③ 樹頂点の抽出については、今回は目視判読で行ったが、進化が著しい AI（人工知能）による画像解析技術が応用されれば、樹頂点抽出が高精度で自動化される可能性があり、手法的な改良に引き続き取り組む価値があると考えられる。
- ④ 簡易画像解析法で得られるオルソ画像や立木位置情報は、買受者の効率的な生産計画の検討に極めて有効である。ICT 技術を活用して得られるデジタルデータは、その利活用の便宜が図られれば、様々な場面で有益な情報として活用が期待される。収穫調査復命書や立木販売の公売情報等には直ちに活用できるものであり、収穫調査復命書の作成業務や立木買受業者の業務の効率化等に向けた取り組みが必要である。

注）本数比例による調査法は、一般に、地上踏査により調査対象林分内の全ての立木にナンバーテープを付し、本数及び樹種を把握するとともに、5%標本抽出の場合は20本おきに胸高直径及び樹高を測定（樹高測定は省略し別に作成した樹高曲線を使用する場合もある）する系統抽出法による標本調査を行い、測定したデータを本数比例により拡大し資源量を算出するものである。なお、本数比例による調査法は、標本調査法に位置付けられる場合もある。

6 総合考察

6.1 UAVレーザおよび航空レーザの時点補正

UAVレーザおよび航空レーザによる立木調査では、いずれも林内で立木を直接計測する必要が無いので、立木測定に係る外業は大幅に省力化されるが、その一方で、収穫調査で求められる幹曲がり等の品質区分には対応できない。また上空からレーザデータによる間接的な推定であるため、地形や林況によって立木本数の計測精度が低下するといった問題がある。今後はこれらの課題を解決するため、レーザ計測およびデータ解析等の手法を検討する必要がある。

また立木調査における最も基本的なデータである胸高直径については、レーザデータの解析によって樹冠情報を算出し、それをベースに適当な胸高直径推定式を作成するという手法をとることになる。UAV、航空機ともに広範囲の森林データを取得できるというメリットはあるが、その中の林木に対して包括的に適用可能な推定式を見出すことが理想ではあるが、現時点は十分に汎用性のある推定式が整備されていないため、計測の都度、調査対象地でサンプリング調査を行って推定式を調整せざるを得ない。今後、全国各地で計測実績を重ね、林齢、地位、林相等に応じた推定式の誘導手法を開発し、地域的な適用範囲を明らかにしつつ適合度の高い推定式を整備することが有効で考えられる。

過去に実施された航空レーザ計測データを利用して森林資源情報の推定するためには、本報告の4章で述べたように、計測時点からの経過期間に応じて変化する林況や成長量等のデータを補正しなければならない。今回は収穫予想表を利用して「時点補正」を行ったが、より適切な補正を模索することが必要であろう。また森林の場合は、気象害や風水害等によって林相が変化することがあり得るため、過去のレーザデータがそのまま利用可能かどうか判断基準が必要になる。また対象区域を明示する適切な対空標識がないために区域設定をどのように工夫するかという問題もあり、これらの課題解決が求められる。

しかしながら、UAVレーザ計測および航空レーザ計測の時点補正が可能となれば、これらによる森林調査法は、立木計測に係る外業調査の工期を大幅に削減できる利点があり、適合度が高く、信頼性のある推定式を整備していくことも兼ねて、製品生産箇所等で試行的に取り組む価値はあると考えられる。

6.2 簡易画像解析法

簡易画像解析法は、地上踏査に比べて立木本数を容易に把握することが可能で、現地の作業工期を大幅な縮小できると期待される。また対象区域の立木配置もPC上で同時に把握できるため、調査対象木を層化抽出する手法を採用することで、標本抽出の作業工期と併せて計測精度の向上も期待される。しかも標準地調査の場合にありがちであった調査地選定における「恣意性」が排除されて、標準地調査法の欠点をも補うことができる。したがって簡易画像解析法は、樹高標準地による毎木調査法の次に位置付けられ得る比較的精度の良い調査法と考えられる。

本事業では標本抽出率5～20%を想定して推定精度の検証を行ったが、様々な林相の森林を対象とした標本抽出率の精度検証が十分には行われていない。そのため、毎木調査箇所における精度検証の実績を重ねつつ適切な抽出率を明らかにしていく必要がある。収穫調査として本調査法が採用されるためには、実務的な状況を想定して、調査者や立木買受者に混乱無く受け入れられるよう、配慮していく必要があると考えられる。

6.3 今後の課題

今回調査した3種類の調査法（UAV レーザ計測、航空レーザ計測、簡易画像解析）に共通する課題として、地物表示を基本とした収穫区域について、画像上にどのように挿入し確定させるかという問題がある。現状では、平成29年度調査で明らかになったように、国有林GIS上の区域に係る位置情報の誤差が大きい場合が見受けられることや、GNSSによる直接測位では十分な測位精度が得られないといった問題がある。

一方、対空標識と連動した精度の高いGNSS測位が可能な新たな機器や、森林環境下でもマルチパスの影響が少ないとされる「みちびき」のL5、L6波が受信可能な汎用機が開発されるなど、ICT機器がめざましい発展を見せている。これら新たな機器の活用も含めて、国有林GISにおける区域情報の精緻化、GNSS機器を活用した効率的な区域測量等について更になる検討が必要と考えられ、立木調査における区域標示や区域測量の功程管理、コスト削減に大きく貢献できると考えられる。

ICTを活用した調査法を普及させるためには、必要な資機材の確保、調査者への教育訓練によるスキルアップが不可欠である。さらに、デジタル化された森林情報（立木位置、境界位置、地形情報等）の提供は、立木買受者や素材生産業者にとっても事業の効率化に資する重要かつ有益な情報である。立木買受者等に対して調査結果をわかりやすく、アクセスしやすいものとするなど、調査データの開示方法等についても立木買受者等の利便性に配慮した取組が必要である。

ICTを活用したリモートセンシングによる収穫調査の推進は、国有林のみならず広く民有林も含め、今後のわが国の林業成長産業化に必要な不可欠な課題である。そのような中、今回検討した各種調査法を国有林において段階的に実践し、現場での様々な課題や実情に合った創意工夫、応用を図り、一層効果的・効率的な調査法としていく取り組みは、民有林も含めた重要な先導的役割を果たすと考えられる。

参考文献

- アジア航測株式会社 (2017) 平成 28 年度和歌山県森林境界明確化促進のための森林情報整備業務.
- Brede, B. et al. (2017) Comparing RIEGL RiCOPTER UAV LiDAR derived canopy height and DBH with terrestrial LiDAR. *Sensors* 2017, 17, 2371; doi:10.3390/s17102371
- 千葉幸弘 (2017) 地上レーザー計測による森林調査のこれから. 森林科学 80: 32-35
- 千葉幸弘 (2019) 可搬型レーザー計測装置による森林調査の計測精度. 関東森林研究 69
- 藤村和重 (1998) 効率的な収穫調査 (立木) の検討. 国有林技術研究発表会講演集
- 春原久徳 (2018) ドローンビジネス調査報告書. インプレス総合研究所
- 星野勝 (2018) ドローンの撮影成果を活用した森林調査の可能性について. 関東森林管理局技術発表要旨
- 細田和男 (2012) 標準地法における調査区の大きさと形状の再検討. 日林誌 94: 105-111
- Karpina, M. et al. (2016) UAV-based automatic tree growth measurement for biomass estimation. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic
- 加藤顕 (2015) 地上レーザーを用いた正確なバイオマス測定/ 森林科学 74: 20-24
- 川北憲利 (2018) 地上型レーザースキャナーを用いた森林計測の精度検証. 森林計画誌 51: 47-56
- 木梨謙吉 (1978) 森林調査詳説. 農林出版
- 国土地理院 (2016) UAV を用いた公共測量マニュアル(案). 国土地理院
- Liang, X. et al. (2016) Terrestrial laser scanning in forest inventories. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115: 63-77
- Messinger, M. et al. (2016) Rapid Assessments of Amazon Forest Structure and Biomass Using Small Unmanned Aerial Systems. *Remote Sens.* 2016, 8, 615; doi:10.3390/rs8080615
- Mlambo, R. et al. (2017) Structure from motion (SfM) photogrammetry with drone data: a low cost method for monitoring greenhouse gas emissions from forests in developing countries. *Forests* 2017, 8, 68; doi:10.3390/f8030068
- Mohan, M. et al. (2017) Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest. *Forests* 2017, 8, 340; doi:10.3390/f8090340
- 室木直樹・井崇行 (2019) UAV 空撮画像と地上レーザスキャナを併用した林分材積の推定. 森林計画学会誌 52: 83-88
- 南雲秀次郎・箕輪光博(1990)測樹学.地球社
- 成田周平・山本一清 (2019) UAV による間伐施業評価法の開発. 第 130 回日本森林学会大会講演要旨
- 農業環境変動研究センター (2018) ドローンを用いた圃場計測マニュアル (不陸(凹凸)編). 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター
- 大野勝正 (2015) 航空機測量データを用いた針葉樹の資源把握方法. 森林科学 74: 9-14
- 大隅眞一(1989)森林計測学講義.養賢堂
- Puliti, S. et al. (2015) Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sens.* 2015, 7, 9632-9654; doi:10.3390/rs70809632
- Ryan A. (2013) UAV LiDAR for below-canopy forest surveys. *J. Unmanned Veh. Syst.* 1: 61–68
- 森林総研 (2012) REDD-plus Cookbook. How to measure and monitor forest carbon. 森林総合研究所.
- 高橋秀夫・小川吉平 (2014) 航空レーザ計測による森林及び下層植生の現況把握等の調査結果について. 関東森林管理局森林林業技術等交流発表集
- Wieser, M. (2017) A Case study of UAS borne laser scanning for measurement of tree stem diameter. *Remote Sens.* 2017, 9, 1154; doi:10.3390/rs9111154
- 山場淳史・渡辺豊・二谷卓・佐野俊和 (2018) 3次元レーザスキャナを搭載したドローンを用いたレーザー計測による森林地形と樹高の抽出および TLS との比較. 森林利用学会誌 33: 169-174