

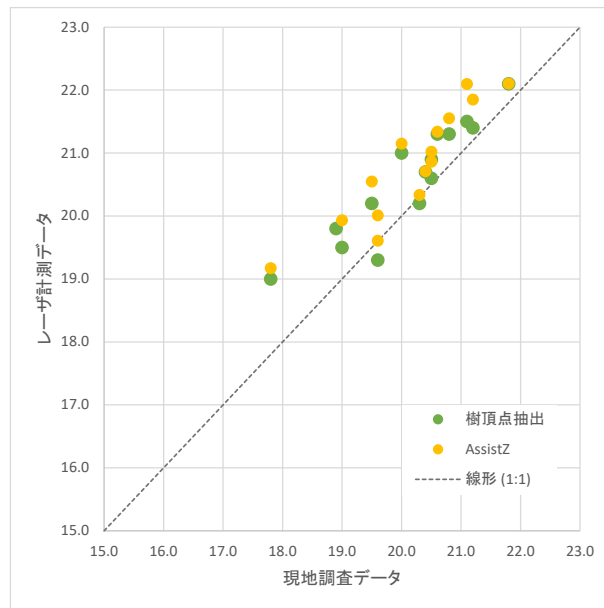


図 2-102 樹頂点抽出及び AssistZ による樹高推定結果

表 2-15 樹高の推定結果の精度検証

	樹頂点抽出	AssistZ
RMSE	0.60m	0.75m
R	0.92	0.91
現地比	102%	103%

(3) 胸高直径

AssistZ、および樹頂点抽出により算出された胸高直径は、樹頂点抽出の結果が現地胸高直径に対し小さめに計測する傾向にある一方で、AssistZ では大きめに推定される結果となった（図 2-95）。推定結果より AssistZ においては 4cm 程度の誤差が生じると考えられる（表 2-16）。

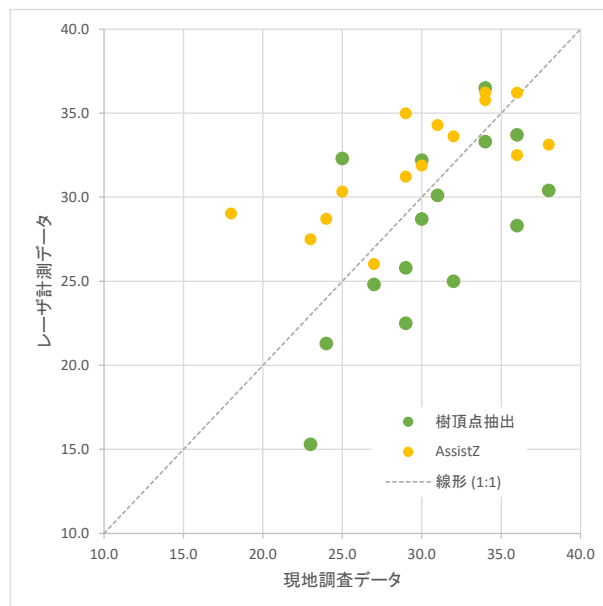


図 2-103 樹頂点抽出及び AssistZ による胸高直径の推定結果

表 2-16 胸高直径の推定結果の精度検証

	樹頂点抽出	AssistZ
RMSE	4.92cm	4.44cm
R	0.65	0.73
現地比	92%	111%

AssistZ による胸高直径の推定では、胸高直径係数をサンプルデータとして読み込ませた樹高 - 胸高直径リストにより作成している。そのため、サンプルデータの内容により推定式は変化する（別紙 5 参照）。サンプルデータより算出された胸高直径推定式は、手動操作により変化点を移動させ、調整することも可能である（図 2-96）。推定式及び現地の樹木の生育状況に合わせて推定式を調整することで、より現況に近い胸高直径の推定が行えると考えられる。

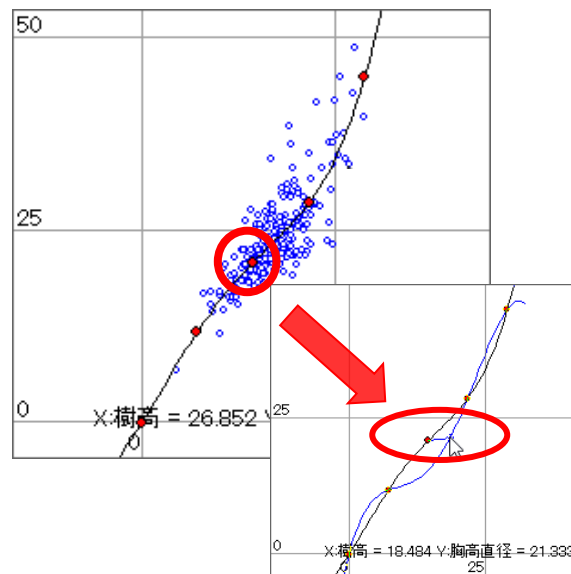


図 2-104 手動による胸高直径推定曲線の調整

(4) 材積

AssistZ において、材積算出手法として樹高および胸高直径を利用した二変数材積式を使用している。立木密度により材積を算出する機能も存在するが、AssistZ において主として利用されている機能が二変数材積式であること、昨年度の森林資源解析においても二変数材積式を活用していることから、二変数材積式による材積の推定を行った。

1) 二変数材積式による材積推定

AssistZ、および樹頂点抽出により算出された材積は、現地材積に対しに大きく計測する傾向にあり（図 2-97）、AssistZ において誤差率は 27%となった（表 2-17）。

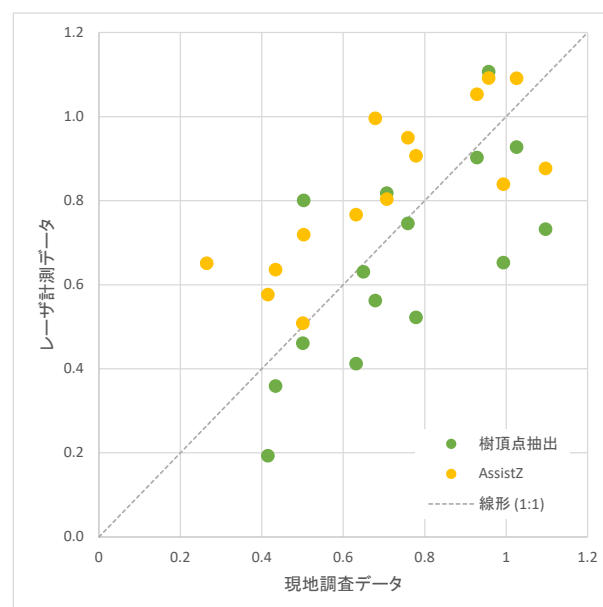


図 2-105 樹頂点抽出及び AssistZ による材積の推定（二変数材積式）

表 2-17 材積の推定結果の精度検証（二変数材積式）

	樹頂点抽出	AssistZ
RMSE	0.19m ³	0.19m ³
R	0.70	0.79
現地比	89%	126%
誤差率	26%	27%

本解析において、現地で計測を行えた樹木と抽出結果と一致した樹木は、AssistZにおいて15本であり、サンプル数としてはやや少ないデータ数となっている。そうした中で、特に胸高直径において、現地計測値と大きく乖離した結果となった樹頂点がいくつかあった（図 2-98）。こうした著しい誤差を生じている樹木が、全体の精度に影響を与えているのではないかと考えられる。

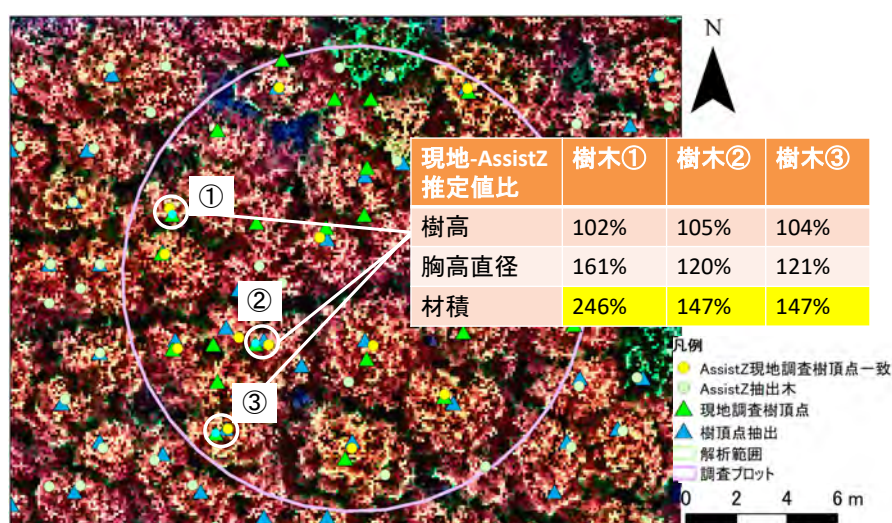


図 2-106 材積推定において誤差が大きかった樹木

また、二変数材積式では、樹高と胸高直径をもとに材積の算出を行う。AssistZにおいては、樹高、胸高直径ともに、過大に算出する傾向にあった。ゆえに、材積に推定結果においても推定値が過大となる結果になったと考えられる。

2.6 まとめ

事前調査、UAV レーザ計測、点群を解析し森林情報算出までの実証を行った結果より、森林計測を UAV レーザ計測により実施する有効と効率性をまとめた。

2.6.1 UAV レーザ計測の有効性評価

UAV レーザ計測の事前調査や、計測計画の際に検討した項目をまとめ、条件に合わせた計測方法を検討した。図 2-99 に計測方法の検討フローを示す。

現地の近くまで車両の通行が可能であることが、計測可否判断の前提として最も重要である。UAV レーザ計測に係る機材は最小でもバンタイプの車両で運搬する必要があるが、このタイプの車両で近くまでアクセスできない場合には計測ができない。次に、林縁部の状況によりレーザが遮蔽される場合や、UAV が林内に進入できない場合には計測ができないとした。また、施業方法により林内飛行と林道・作業道上の飛行に分岐する。林内飛行は飛行空間が確保できる列状間伐地でのみ実証しており、間伐後に生長し或いは林内が密となっている高齢林などは条件に含んでいない。なお、列状間伐のみの対応としているのは、UAV が林内で進行方向を変える飛行ルートとすると、林道・作業道上から操縦する難易度が高くなるため、林道・作業道上から見通すことができる林内とした。さらに下層植生が障害とならない場合にのみ林内飛行は可能となる。下層植生や下層木が多く、飛行コースを確保できない場合にはハンドヘルドや背負子式によるレーザ計測となる。

林道・作業道上を飛行する場合には斜面傾斜によって、計測手法が異なる。0～15度の緩傾斜地ではレーザスキャン角を水平に計測し、胸高直径、地盤面を計測可能である。15～35度の傾斜地ではレーザスキャン角を20度傾けて計測することで、胸高直径、地盤面を計測する。その際、レーザによる障害物の検知はできないため、操縦には十分な注意が必要となる。35度以上の場合にはハンドヘルドや背負子式によるレーザ計測となる。なお、計測に使用したレーザ計測機器は水平から上下それぞれ15度、計30度のスキャン角となっているため、上述した斜面の適用傾斜角となっているが、利用するセンサのスキャン角が異なる場合は適用範囲を見直す必要がある。

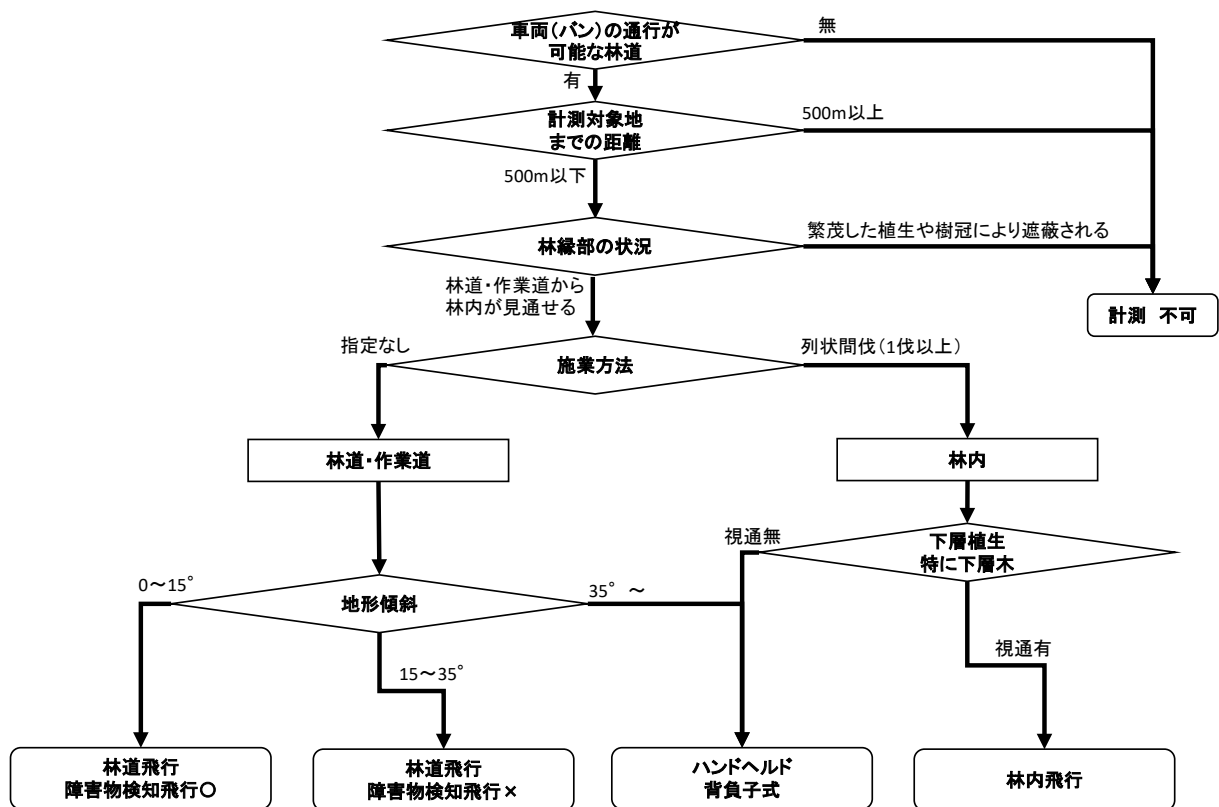


図 2-107 計測条件の検討フロー

次に、計測条件と計測方法による取得可能な森林情報について表 2-18 に整理した。胸高直径と樹高を計測するためには梢端付近のレーザ計測が必要になる。レーザのスキャン角を変更した場合にも梢端の取得は困難であり、梢端を計測するためには UAV の高さを変えた多段計測が必要となる。多段計測とすることで、梢端付近まで計測し、樹高を正確に算出することが可能となる。

上空からの UAV レーザ計測では、林道・作業道上から計測した点群とマッチングする必要があり、機器、計測条件、飛行ルートが異なるため注意が必要である。

林道・作業道上から計測の場合には複数の計測方法を組み合わせた計測を行うことで、胸高直径と樹高を解析することができる。

表 2-18 レーザ計測条件と計測方法により取得可能な点群

レーザ計測		立木本数	胸高直径	樹高	
計測条件	計測方法			梢端	地盤
林内	水平(UAV)	○	○	○	○
	一脚、三脚	○	○		○
	背負子式	○	○		○
林道	水平(UAV)	△	△		
	多段(UAV)	△	△	○	
	レーザ角(UAV)	○	○		○
	一脚、三脚	○	○		○
	背負子式	○	○		○
上空	(UAV)	△		○	○

計測条件が林道・作業道上から計測かつ計測方法が水平、多段の場合には地形条件によって取得できる項目が変わる。斜面傾斜が 15 度以下の緩やかな斜面では本数、胸高直径ともに取得が可能となる。計測条件が上空の場合には本数は上層木のみとなるが、その他の計測手法については被圧木、低木、枯損木などの本数も計測が可能である。

レーザ計測の有効性の評価として、市販のソフトウェアを利用し、林内 UAV レーザ計測データや地上レーザ計測データを解析することで、従来の森林調査では取得できなかった、立木位置図、矢高や樹幹形状、正確な地盤面のデータなどの新たな森林情報を取得することができる点が挙げられる。

同様に上空 UAV 計測データを解析することで、立木本数、胸高直径、樹高を計測でき、樹木位置図、樹冠の広がりなどの定性的な評価、正確な地盤面のデータを取得可能である。(表 2-19)

表 2-19 レーザ計測により新たに取得可能な森林情報

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	○	○
矢高	○	
樹幹形状	○	
樹冠形状		○
未到達木の状況	○	
微地形	○	○

2.6.2 UAV レーザ計測の効率性評価

平成 30 年度に実施した「森林資源情報整備技術実証事業（国有林）報告書」では地上レーザ計測に関する功程調査が行われ、令和元年度に実施した同事業でも、同様の項目について上空 UAV レーザ計測と林内 UAV レーザ計測の功程調査が行われている。本事業においては林内 UAV レーザ計測の計測条件を細分化し、功程調査を行った。各計測手法を功程比較した結果を表 2-20 に示す。

全ての計測手法に共通することとして、調査前の計画と現地踏査に概ね 2～4 時間程度必要としている。林内 UAV については樹木間隔を考慮して計画を立案するため、林分密度など現地状況に精通していることが重要となる。

現地調査前の計画と現地踏査計測時間については、本事業での対象地が令和元年度に確認した箇所であったため、本年度も事前調査を実施してはいるが、現場で既に取得していたデータを確認することができるため、既知の箇所であれば事前調査は省略できる可能性はある。計測では林道・作業道上の計測と林内の計測では、飛行速度が林内のほうが遅く、飛行コースも自由に設定できないため、計測効率が低下すると考える。

点群合成について、林内 UAV は計測と同時に行うため、最も効率が良い。現場でも都度データを確認できることから、計測漏れなどの確認ができるため、再計測を避けることができるというメリットがある。

表 2-20 各計測手法の功程比較

手順	地上レーザ 背負子式※2	地上レーザ 一脚式※2	上空からの UAV レーザ計測※3	林内飛行の UAV レーザ計測	
				林内	林道
現地調査前 の計画	0.5 時間	0.5 時間	2 時間	1 時間※4	
現地踏査	2 時間	2 時間	2 時間	1 時間	
計測 (時間/ha)	4 時間	9～10 時間	0.2 時間	7 時間	1.0～1.2 時間
点群合成 (時間/ha)	19～33 時間	1 時間※5	7 時間	計測と同時	
立木情報 (時間/ha)	4～5 時間		4～5 時間	1 時間※5	

※2 平成 30 年度森林資源情報整備技術実証事業（国有林）報告書より

※3 令和元年度森林資源情報整備技術実証事業（国有林）報告書より

※4 現地状況に精通している必要がある

※5 OWLManager を利用（価格は令和 3 年度 3 月暫定）

調査、計測、解析を合わせた調査効率はリモートセンシング技術を用いた場合、地上調査よりも効率的となる。調査、計測にかかる時間についてはリモートセンシング技術によるところが大きく、解析にかかる時間はソフトウェアにより、その効率が大きく変わると考えられる。

導入機器のコストについては地上調査が最も安くなっているが（表 2-21）、計測手法の利用の頻度に応じた調査効率時間と運用面積を考慮して機器の導入を検討することで費用対効果を高めることができる。

表 2-21 各計測手法の比較・整理（針葉樹）

比較項目	地上調査※3	地上レーザ スキャナ※2	上空からの UAV レーザ計測※3	林内飛行の UAV レーザ計測
調査効率 (時間/ha)	30	12.5～44.5	15.2～16.2	4.0～10.0
人工	3 人	1 人	2 人以上	2 人
機器導入 コスト	15 万 (バーテックス)	300 万～600 万	1,000 万 ～4,000 万	1,700 万
運用面積	～1ha	～1ha	30ha～	1ha～
ソフト利用 コスト	—	50 万/年※5	17 万/年※6	50 万/年※5

※2 平成 30 年度森林資源情報整備技術実証事業（国有林）報告書より

※3 令和元年度森林資源情報整備技術実証事業（国有林）報告書より

※4 現地状況に精通している必要がある

※5 OWLManager を利用（価格は令和 3 年度 3 月暫定）

※6 AssistZ を利用

表 2-22 各計測手法による取得可能な森林情報及び各計測手法の比較・整理（再掲あり）

手順	地上調査※ ³	地上レーザ		上空からの UAV レーザ計測※ ³	林内飛行の UAV レーザ計測	
		背負子式 ※ ²	一脚式※ ²		林内	林道
立木本数	○	○	○	○	○	○
樹高	○	○	○	○	○	○
胸高直径	○	○	○		○	○
立木位置図 (座標値)		○	○	○	○	○
樹幹形状		○	○		○	○
樹冠形状		○	○	○		
微地形		○	○	○	○	○
調査効率 (時間/ha)	30	12.5～44.5		15.2～16.2	4.0～10.0	
人工／日	3 人	1 人		2 人以上	2 人	
機器導入 コスト	15 万 (バーテックス)	300 万～600 万		1,000 万 ～4,000 万	1,700 万	
運用面積	～1ha	～1ha		30ha～	1ha～	
ソフト利用 コスト	—	50 万/年		17 万/年	50 万/年	

※² 平成 30 年度森林資源情報整備技術実証事業（国有林）報告書より

※³ 令和元年度森林資源情報整備技術実証事業（国有林）報告書より

※⁴ 現地状況に精通している必要がある

※⁵ OWLManager を利用（価格は令和 3 年度 3 月暫定）

※⁶ AssistZ を利用

2.6.3 ICT を活用した森林資源情報の展望

UAV レーザ計測により、従来の現地調査と同様に樹高や胸高直径などの森林資源情報をより効率的に取得できた。さらには、従来の現地調査では、計測に時間がかかり取得が困難であった、立木位置や樹幹形状などの森林資源情報を取得でき、レーザ計測の有効性を示すことができた。立木位置図として単木の位置との樹高、樹幹径がわかることで、造材指示やオペレータの補助、生産管理に有効なデータとなる。

針葉樹についてはリモートセンシングによる計測と解析の知見が得られてきたが、広葉樹については、その樹種、樹型、林分構造の多様性や利用用途の豊富さから計測や資源量解析の技術体系を整理できていない。今後、効率的な資源管理や木材生産に必要となる ICT を活用した森林資源情報の整備技術が一般に広く普及した際に、こうした違いによって情報量と精度に格差が出てくることが考えられる。

一方で、地上或いは UAV レーザ計測と既存の解析ソフトにより、数量的なものと同時に把握できる位置（座標）や 3D への再現など、森林簿等の台帳情報だけでは表しきれない新たなデータについては、針葉樹（人工林）のみならず、より情報量・精度が十分ではないとされる広葉樹にとっても貴重なデータとなり得る。特に天然林や針広混交林の多い国有林において、こうした貴重なデータをどのように把握し、どのように活用していくのかということも、今後の重要な検討課題であると考えられる。

3. 検討委員会の設置・運営

3.1 検討委員会の設置

本事業の検討会委員はリモートセンシング技術や UAV を利用した森林資源解析に対する経験や知見を持つ 4 名の委員を選定した。検討委員会の委員一覧を表 3-1 に示す。

表 3-1 検討委員会委員一覧

氏 名	所 属	選定理由
加藤 正人	国立大学法人 信州大学 先鋭領域 融合研究群山岳科学研究所長 教授	衛星、航空機、UAV、地上リモートセンシングに知見を有する。レーザーセンシング情報を使用した持続的なスマート精密林業の開発、研究責任者。
瀧 誠志朗	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 林業工学研究 領域 収穫システム研究室	UAV リモートセンシングに関する知見を有する。
松英 恵吾	国立大学法人 宇都宮大学 農学部 森林科学科 准教授	航空レーザ計測を活用した森林資源調査に関する知見を有する。
村上 拓彦	国立大学法人 新潟大学 農学部 農学科 准教授	UAV リモートセンシングに関する知見を有する。

3.2 検討委員会の開催

本業務の検討委員会は、事業終了期に、調査状況やとりまとめ状況について委員からの意見を聴取し、その妥当性を検証することを目的に開催した。詳細を以下に示す。（委員会資料については、資料編に示す。）

■日時：令和3年2月24日（水） 10:00～12:00

■会場：WEB 会議

■参加者

	氏 名	所 属 役 職	出欠
委 員	加藤正人	信州大学 先鋭領域融合研究群 山岳科学研究所 教授	WEB 参加
	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	WEB 参加
	松英恵吾	宇都宮大学 農学部森林科学科 准教授	WEB 参加
	村上拓彦	新潟大学 農学部 農学科 准教授	WEB 参加
	(50 音順、敬称略)		
林野庁	天田慎一	林野庁 国有林野部 経営企画課 企画官	
	山之内留美子	林野庁 国有林野部 経営企画課 担当課長補佐	
	柳瀬隆史	林野庁 国有林野部 経営企画課 計画調整係長	
	出野伸明	林野庁 国有林野部 経営企画課 地域森林計画係	
	(所属別、敬称略)		
事務局	大野勝正	アジア航測株式会社 森林・農業ソリューション技術部 ICT 林業課	
	北林拓	〃	
	平田彩花	〃	
	渡辺豊	ルーチェサーチ株式会社 代表取締役社長	
	(所属別、敬称略)		



検討委員会実施状況