

平成29年度 委託プロジェクト研究
「森林資源を最適利用するための技術開発」
最終年度報告書

13405791

低コストな森林情報把握技術の開発

研究実施期間	平成25年度～平成29年度（5年間）
代表機関	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
研究開発責任者	佐野 真
共同研究機関	一般社団法人 日本森林技術協会
普及・実用化支援組織	一般社団法人 日本森林技術協会
研究開発責任者 連絡先	TEL : 029-829-8312 FAX : 029-874-3720 E-mail : masakoto@ffpri.affrc.go.jp

様式3. 最終年度報告書

1頁～ 19頁

<別紙様式3. 平成29年度の最終年度報告書>

I-1. 年次計画

研究課題	研究年度					担当研究機関・研究室	
	25	26	27	28	29	機関	研究室
1. 航空機計測による林分情報の低コスト計測技術の開発 (1) 林分情報推定のためのデジタル空中写真応用技術の高度化 (2) 低コスト航空機LiDAR計測技術の開発	林冠高モデルの開発					日本森林技術協会	事業部
	LiDARデータの解析技術開						
2. 低コスト林分情報推定技術の開発 (1) 低コスト林分情報推定技術の開発	材積推定モデルの開発					森林総合研究所	森林管理研究領域

I - 2. 実施体制

研究項目	担当研究機関・研究室		研究担当者	エフォート (%)
	機関	研究室		
研究開発責任者	森林総合研究所	森林管理研究領域	◎ 家原敏郎 (~2014. 3) 佐野真 (2014. 4~)	
1. 航空機計測による林分 情報の低コスト計測技術 の開発 (1) 林分情報推定のため のデジタル空中写真 応用技術の高度化○ (2) 低コスト航空機 LiDAR計測技術の開発	日本森林技術協会	事業部	○ 金森匡彦	
	日本森林技術協会	事業部	△ 金森匡彦	
2. 低コスト林分情報推定 技術の開発	森林総合研究所	東北支所	△ 小谷英司	
	森林総合研究所	森林管理研究領域	○ 細田和男	

(注1) 研究開発責任者には◎、小課題責任者には○、実行課題責任者には△を付すこと。

中課題番号(e-Rad システム課題 ID8 桁)	13405791	研究期間	平成25～29年度
大課題名 (委託プロジェクト 名)	森林資源を最適利用するための技術開発		
中課題名 (契約課題名)	低コストな森林情報把握技術の開発		
代表機関・研究開発責任者名	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 森林管理研究領域長 佐野 真		

I-1. 研究目的

戦後営々と植林されてきた人工林は約1000万haに達し、伐採して利用可能となる概ね50年生以上の人工林は、平成29年に全体の6割に達すると見込まれている。人工林面積の43%を占めるスギ林は壮齢となるまでの成長が早く、気候変動緩和策における二酸化炭素の吸収源として重要な役割を担っている。しかしながら、今後スギを主体とした人工林は高齢化していくため、成長量の低下による二酸化炭素吸収量の低下が懸念されている。これを回避するには、人工林を適期に伐採し、収穫した後に成長の良い苗木を再植林し、成長量の大きい若い林分に置き換えていくことが必要である。伐採・収穫のためには、まず収益が得られるだけの材積があるかどうかを把握することが必要である。主伐する林分の材積を把握するために行われる収穫調査では、1日に調査できる面積が2～5ha程度と言われており、精度の良い林分調査を現地で広い面積で行うには、多大なコストを必要とする。また森林組合等が利用可能な行政情報である森林簿は、地域森林計画樹立を目的としたものであり、伐採時点での林分材積等の現況把握のためには精度が十分とはいえない。

このため、本研究では、

1. 航空機計測による林分情報の低コスト計測技術の開発
2. 低コスト林分情報推定技術の開発

により、デジタル空中写真や航空機レーザー計測といった空から森林資源を調査する技術を用いて、現地調査を最小限にとどめて、低コストで精度良く、人工林の本数密度や材積などを把握する技術を開発することを目的にする。

その結果、

1. 主伐量が増加し林業生産基盤の強化
2. 林分の若返りによる温暖化対策への貢献

が期待される。

I-2. 研究結果

デジタル空中写真から生成した表層高モデルおよび樹高モデルの精度の検証を行うとともに、空中写真による樹高や本数密度を判読し、判読面積や判読箇所数と精度との関係を、プロットレベルおよび小班レベルで検討した。この結果と費用を考慮し、林分情報推定のための適切な表層高モデルのメッシュサイズや、小班あたりの適切な判読面積・判読箇所数につ

いて明らかにした。この結果、表層高モデルのメッシュサイズは2 mメッシュを基本とし、小班当たりの判読面積は0.1ha、箇所数は、均一な林分で4箇所とすることが適切であると判断された。

デジタル空中写真解析により得られる表層高と整合性の高い林分代表樹高や、空中写真判読によって得られる本数密度と整合性の高い優勢木を定義した。新たに定義された林分代表樹高のみを説明変数として、もしくは林分代表樹高と優勢木本数密度の両方を説明変数として、小班の材積等を推定する汎用性の高いモデルを作成した。

新たに作成した林分材積式による材積推定精度を、テストサイト19か所のうち、本数が1000本/ha以下であった11か所における地上調査、空中写真DSMによる林冠高、立体視ソフトによる樹高や本数の判読データなどにより比較検証した。①空中写真DSMから得られた平均林冠高とその標準偏差から平均樹高を推定し、一変数林分材積式で材積を推定する方法、②立体視ソフトで判読した平均樹高と本数から二変数林分材積式で材積を推定する方法、③空中写真DSMから得られた平均林冠高とその標準偏差から推定した平均樹高と、立体視ソフトによる判読本数から二変数林分材積式を用いる方法、④立体視ソフトによる判読した平均樹高と本数から林分密度管理図を用いる方法（「もりったい」の既存の機能）を比較すると、相対RMSEはそれぞれ11.5%、7.2%、10.0%、12.8%であった。推定のための作業量は①<③<②≒④と考えられ、精度とはトレードオフの関係にあるが、同じ作業量である②と④では②のほうが精度が明らかに高く、本課題で新たに作成した二変数林分材積式の有効性が確認された。

以上より、デジタル空中写真等によって把握される林冠高や本数密度から、伐採計画に必要な材積等の林分情報を低コストで推定する技術を開発した。

I-3. 今後の課題

本課題では当初計画していたスギに加え、ヒノキとカラマツについても林分材積式を作成したが、主要造林樹種のうちではさらにトドマツとエゾマツについても同様の手法が適用と考えられる。

また、林業現場にも近年導入されつつある無人航空機による低空からの撮影では、従来の航空写真よりも格段に高解像度の画像が得られるため、1000本/ha以上の高密度林分でも、精度の良い本数推定が実現する可能性がある。高解像度ステレオ写真の立体視による肉眼判読だけでなく、画像解析による半自動的な本数推定も含め、今後の技術開発が望まれる。

航空機LiDARでの本数密度の自動抽出法を開発した。この手法を一般的に利用するにあたり自動処理が望ましく、手法のパッケージ化が必要である。また、秋田県の共通テストエリアに限定して、現場での利用を念頭に様々な条件で森林情報把握の精度を検討したが、現場での応用研究として、行政の既存の精密地形用の航空LiDARデータを使用し、県単位など広域での森林情報把握の研究が必要であり、他の研究課題で継続する。

広報普及に当たっては、実務に沿った効果的な活用方法を提案し、事業者への普及を進める事が重要である。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	13405791	研究期間	平成25～29年度
小課題番号(桁数は任意)	11110	研究期間	平成25～29年度
中課題名(契約課題名)	低コストな森林情報把握技術の開発		
小課題名	1 航空機計測による林分情報の低コスト計測技術の開発		
実行課題名	(1) 林分情報推定のためのデジタル空中写真応用技術の高度化		
小課題責任者名・研究機関	金森匡彦・日本森林技術協会・事業部		

1) 研究目的

近年、空中写真がアナログからデジタルに一般化してきたことによって、より効率的な高さ情報の取得が可能となっている。森林分野では、デジタル空中写真を用いて高さや密度などを用い、幹の材積といった森林資源情報を低コストで把握する条件が整いつつあるが、これを精度よく実現するためにはいくつかの技術的課題が残されている。

デジタル写真による表層高(digital surface model, DSM)を自動生成する一般的手法として、二枚の画像を用いたステレオマッチングをする方法が確立している。DSMのメッシュサイズは、その生成過程で変えることができるが、メッシュサイズによる高さ精度の違いは明らかになっていない。さらに、材積の推定に用いる林冠高(crown height model, CHM)の精度は、地盤高(digital terrain model, DTM)の精度にも大きく左右されることが指摘されてきており、精度および費用対効果について、DSMとDTMの両面からの検討が必要である。

そこで本課題では、デジタル空中写真から生成したDSMおよびCHMの精度の検証を行うとともに、空中写真による樹高や本数密度を判読し、判読面積や判読箇所数と精度との関係を、プロットレベルおよび小班レベルで検討する。この結果と費用を考慮し、林分情報推定のための適切なDSMメッシュサイズや、小班あたりの適切な判読面積・判読箇所数について明らかにする。これらの結果より、デジタル空中写真の利用システム開発者やシステムの利用者が利用できる技術マニュアルを作成し、林業技術者を対象としたシンポジウムや展示でのデモンストレーション等を通じ、研究成果の普及を図る。

2) 研究成果

① 共通テストエリアにおいて撮影したデジタル空中写真から生成した複数メッシュサイズのDSMおよびCHMを、小課題11120で行う航空機LiDAR計測によるDSMやDTMと比較・参照し、精度の検証を行った。

地形が急峻でないエリアでは、分解能10mの空中写真のDSMであれば2mのものとは比べ10%以内の差でCHM(Crown height Model, 以下CHM)が得られること、また地形が急峻

であれば5m分解能レベルのDSMが望ましいことが示唆された。空中写真のCHMはLiDARと比べると、数値が高く出やすいが、蓄積推定の際には、LiDARと同程度の精度で推定できると考えられる。

これにより、LiDARより低い費用で撮影が可能な空中写真から、蓄積推定に利用可能な精度のDSMを作成可能であることが明らかとなった。

表2 解像度別のCHMの精度

	2m	5m	10m	20m
平均	16.9	17.4	17.7	31.5
最小	2.2	1.8	1.4	6.7
最大	26.9	28.2	30.6	48.8
標準偏差	4.8	5.0	5.6	7.4

② 空中写真立体視による樹高や本数密度の判読の精度と効率について、全林毎木調査を実施している126林班ほ小班（面積1.68ha）において、立体視ソフトを用いた樹高と本数の計測を3名のオペレータにより実施し、作業時間と樹高計測の精度を比較した。人工は立体視計測では合計6.7人、現地計測では10人と、立体視計測の方が少ない結果となった。計測精度は、平均で1,011.7 m³/haとなり、地上計測結果の1,122.7 m³/haに比べ、-111.0m³/ha (-9.8%)となった。

立体視による樹高計測、本数密度の判読の精度について、サンプルプロット地上調査地点（6か所）を対象に実測の樹高・立木本数と比較した。樹高は計測誤差5%以内と高い精度の値が得られた。樹高は、傾斜が大きくなるほど、誤差が大きくなる傾向が得られ、また立木密度が高い場合にも誤差が大きくなる可能性がある。立木密度は平均誤差18.7%となり、傾斜が大きくなるほど誤差が大きくなる傾向が見られた。

これにより、立体視計測は現地調査より少ない労力で、10%程度の誤差で蓄積推定が可能であることが明らかとなった。

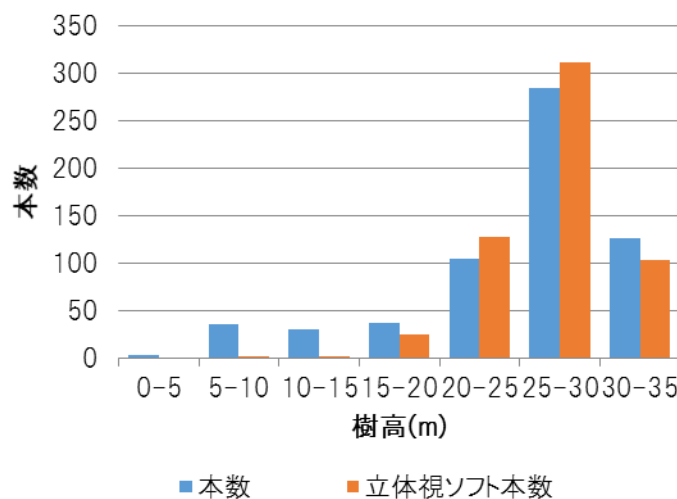


図1 樹高別本数の分布

表1 立体視ソフトによる樹高計測結果

	初回計測			3者調整後再計測			地上調査
	A	B	C	A	B	C	
本数	534	550	527	573	573	573	672
平均樹高(m)	27.0	27.3	26.8	26.6	27.0	26.5	25.1
材積(m ³)	957.5	1087.9	937.4	1001.1	1054.9	979.2	1122.7
時間	3h30	12h30	9h20	11h25	24h45	20h50	31h05

③ 費用対効果を考慮したうえで、林分情報推定のための適切なDSMメッシュサイズや、小班あたりの適切な判読面積・判読箇所数を明らかにした。デジタル空中写真より作成した異なる分解能のDSMについて、小班毎にCHM (Crown height Model, 以下CHM) を算出し、それらの差を比較した。CHMはDSMとDTMの差分から得られる。地形が急峻でないエリアでは、分解能10mの空中写真のDSMであれば2mのものと比べ10%以内の差でCHMが得られること、また地形が急峻であれば5m分解能レベルのDSMが望ましいことが示唆されたが、最終的には精度とコストの面から2mメッシュのDSMを作成し、それらの平均を対象林分の樹高とすることが適当と考えられた。

標準地面積は0.2haで10%以内の誤差で蓄積が推定できることが分かったが、実用レベルでの対応方針としては、均質な5ha以上の林分では0.1haのプロット4点で可能と考えられた。

④ 研究成果を一般に普及するための取組みとして、既存の立体視ソフト「もりったい」へ本プロジェクトの「12110 低コスト林分情報推定技術の開発」で得られた式による材積推定機能を追加した。

材積推定の手順は以下のとおりである。

1. 地盤高として外部のDTMを読み込み、自動作成される表層高モデル、または梢端を立体視判読して樹高を数本計測し、その差分から上層樹高を求める。 →H
2. 0.1ha範囲の枠を設定し、立体視判読により枠内の立木本数を数える。 →N
3. 平均樹高、立木本数から小課題12110により開発された材積推定パラメータに基づき材積を求める。

材積式は以下のとおりである。

$$V = a \times H^b \times N^c$$

従来は、HおよびNの計測値から、地域ブロック単位の林分密度管理図にあてはめて材積を計算する手法をとっていたが、本研究では、上層樹高の適切な定義及び収穫試験地のデータを用いて精緻化された新たな材積推定機能を実装し、材積を簡易かつ高精度にできるようになった。また、ユーザーが独自にパラメータを登録・更新することも可能である。

普及については、森林GISフォーラムにおけるデモの他、実務利用を想定した自治体、事業者等への普及として、秋田県羽後町の雄勝広域森林組合、埼玉県小鹿野町の三両地域協議会、山梨県森林整備課、石川県森林管理課を対象にデモや研修を実施した。

普及活動におけるユーザーへのニーズ等の聞き取りの結果、今後さらなる普及を推進するためには、材積推定機能単体のみではなく、「もりったい」に実装されている他の機能と組

み合わせ、境界明確化 → 施業提案 → 施業実施 といった一連の実務の流れに沿った活用方法等を提案する必要性が感じられた。雄勝広域森林組合（秋田県）においては、実際に「もりったい」を導入し、境界明確化に利用することから、本事業の成果が施業に活用することが期待できる。

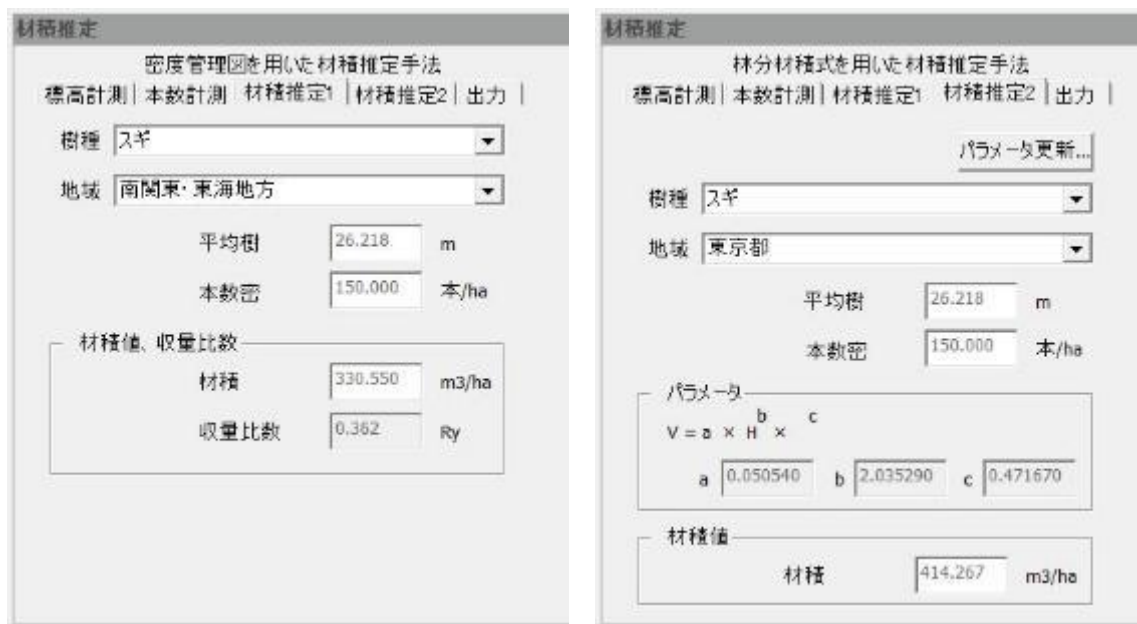


図2 材積推定の画面イメージ。左が従来方法で右が本研究による追加メニュー



図3 雄勝広域森林組合における立体視ソフトによる材積計算の普及風景

3) 成果活用における留意点

DCMの精度、立体視判読の精度に地形（傾斜）が影響していることから、急傾斜地では誤差が大きくなることに留意が必要である。ただし、現地調査の労力も急傾斜地では大きいことを考えると、立体視による材積推定機能の利用可能性は大きい。

普及活動時の聞き取り等により、材積推定機能単体では事業者への実導入は難しいことが明らかになった。明確化 → 施業提案 → 施業実施 という一連の業務の流れに沿った効果的な活用方法等の提案が必要である。

4) 今後の課題

実務に沿った効果的な活用方法等を提案し、事業者への普及を進める。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8桁)	13405791	研究期間	平成25～29年度
小課題番号(桁数は任意)	11120	研究期間	平成25～29年度
中課題名(契約課題名)	低コストな森林情報把握技術の開発		
小課題名	1 航空機計測による林分情報の低コスト計測技術の開発		
実行課題名	(2) 低コスト航空機LiDAR計測技術の開発		
小課題責任者名・研究機関	森林総合研究所・東北支所・小谷英司		

1) 研究目的

林業活性化には、まずは精度良い森林情報に基づく伐採計画が重要であるが、現地調査が高コストであり、既存の森林情報は精度が不十分である。そこで、現地調査を最小限にとどめて、低コストで精度良く人工林の本数密度や材積を把握する技術開発が必要である。

近年、航空機を利用した森林資源調査技術として、デジタル空中写真や航空機レーザ計測が発展してきた。デジタル空中写真は、国土院や都道府県が定期的に撮影する行政的仕組みができており、大変有望であるが、計測に必要な地表面が見えにくく、その点で林冠を透過する能力が高い航空機からのレーザ計測(航空機LiDAR)に利点がある。ただし、航空機LiDARでは、センサーの高精度化・データの低価格化が進むものの、空中写真よりデータ単価が高い。そこで、レーザ密度を下げ、コストを下げた場合の推定手法をその費用と精度の両面から評価する必要がある。国土交通省が、低密度航空機LiDARによる全国観測に着手しており、将来的にこのデータが公開されコストが飛躍的に安くなり、林業での利用もより容易になると考えられるので、それを想定した技術開発が必要である。

そこで本実行課題では、1) 航空機LiDARまたは小型無人機による主伐対象林分の本数密度または材積を精度良く把握する技術の開発、2) レーザの低密度化による低コストなLiDAR技術の開発と費用対効果での評価、3) 共通テストエリアで、地盤高(DTM)など他の課題の補完データの作成、を目的とする。

2) 研究成果

① 航空機LiDARと小型無人機によるスギ林の本数密度の把握手法の開発

デジタル空中写真、航空機LiDARの研究開発のために、秋田県北部に共通テストサイトを設定した。2013年に航空機観測と地上サンプル調査を行い、その後に小型無人機により写真撮影を実施した。この共通テストサイトの資料を用いて、航空機LiDARと小型無人機によるスギ林の本数密度の把握手法の開発を実施した。5[点/m²]の高密度の航空レーザのデータから、地盤高(DTM)と林冠高(DCHM)を算出した。この林冠高データから、単木梢端の

凸部を自動抽出する可変フィルター局所最大値法によって、本数密度を推定した（LiDAR抽出本数）。一方で、共通テストサイトにおいて、小型無人機によって上空から林分の写真撮影を行い、写真測量ソフトによりオルソフォトを作成した。オルソフォトの写真判読により本数密度を推定した（オルソ判読本数）。

オルソ判読本数と現地調査による本数を比較した結果、現地の本数密度が800[本/ha]を超えると上空から識別できない立木が増えるが、それ以下の林分では、オルソ判読本数と現地調査の本数は概ね等しかった(図1)。一方で、LiDAR抽出本数とオルソ判読本数を比較した結果、本数密度が750[本/ha]を超えるとLiDARから識別できない立木が増えたが、それ以下の個体サイズの大きな林分ではLiDAR抽出本数とオルソ判読本数は1対1の関係にあった(図2)。

・成果： 対象地のスギ林分では、主伐までに本数密度をおよそ1000[本/ha]以下まで間伐するので、主伐対象林分においては高密度の航空機LiDARと小型無人機によって本数密度を直接的に把握できることを明らかにした。また、本数密度の高い林分でも、現地調査との回帰式により本数密度を推定できる(図1,2)。

② 費用対効果の分析による低密度航空LiDARの最適レーザ密度設定

まず実験1として、秋田県の共通テストサイトの高密度航空LiDARデータより、0.25, 0.5, 1[点/m²]の3段階の低密度データを作成し、DTMと林冠高を生成し、林冠高から算出した平均林冠高を用いて材積推定のべき乗単回帰分析を行い、レーザ密度毎の精度を求めた。次いで実験2として、DTMは既に有り2回目のLiDAR計測という設定として、高密度航空LiDARデータより、1/300・2[点/m²]の10段階の低密度データを作成した。実験1と同様に単回帰分析を行い、精度を求めた。最後に、測定の費用積算に使用される「設計業務標準積算基準書」より、航空LiDAR測定の積算基準をコストモデルとして、実験1と2の全ての事例のコストを試算し、共通テストサイトでの実際の入札結果から補正した。低密度DTMの作成コストは、入札結果と各作業時間から算定した。

実験1のDTMと航空機LiDAR計測のコストについて、レーザ密度が高くなると航空計測のコストは大きくなるが、これに対してDTMのコストへのレーザ密度の影響は小さく固定的であった(図3)。DTM作成ありの場合の実験1と、無しの場合の実験2のコストと材積推定精度について、図4にまとめた。LiDARのレーザ密度が0.1より高くなると、精度は小さく、つまり精度が良くなり、安定した。一方で、レーザ密度が0.25より高くなるとコストは高くなった。

なお、①節の単木法から材積推定を行ったが、精度は実験1と同程度であり、高密度レーザで単木法でも精度が向上する訳では無かった。

・成果： 材積把握でのコストと精度の費用対効果分析から、航空機LiDARの最適なレーザ密度は0.1-0.25[点/m²]と結論した(図4)。

③ 低密度LiDARによる地盤高(DTM)の精度と材積推定精度への影響

秋田県共通テストサイトでのレーザ密度5[点/m²]の高密度LiDARによる地盤高を真値として、②節の実験1での0.25, 0.5, 1[点/m²]の低密度の地盤高の精度とバイアスを表1にまとめた。

・成果： 一般的に、森林資源分析に地盤高は必須であるが、デジタル空中写真や小型無人機写真のみでは地盤高は把握できない。旧来の国土地理院地形図などの地盤高は精度が不

十分であり、航空機LiDARによる地盤高が必要である。既に国土地理院、国土交通省、一部の県により日本国内の広い範囲で、0.25-1[点/m²]の低密度LiDARの地盤高は整備されている。レーザ密度毎の地盤高の精度とバイアスは表1の通りであるが、②節の実験1の結果からレーザを低密度化しても材積推定への影響は小さかった。実用上からLiDARの地盤高があれば、森林資源把握のためには既存のどのレーザ密度のデータを用いても問題はないと結論した。

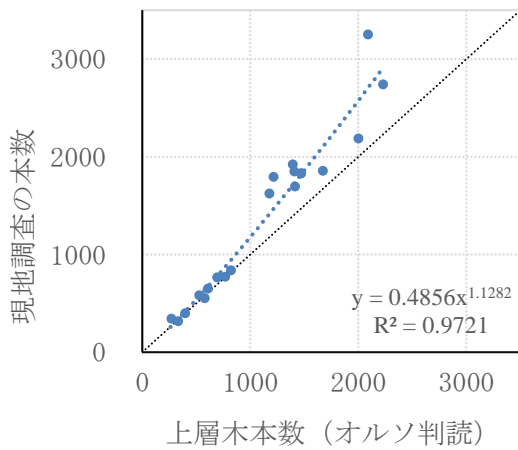


図1 小型無人機オルソ判読による上層木本数と現地調査の本数の関係

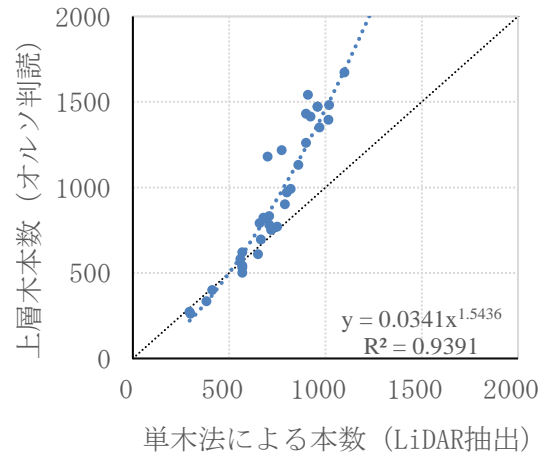


図2 航空機LiDARの単木抽出による本数とオルソ判読の上層木本数の関係

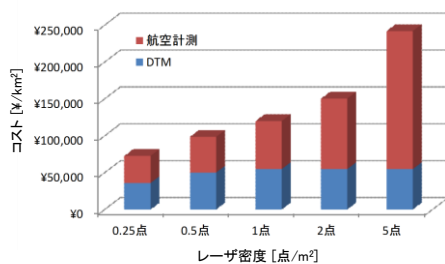


図3 レーザ密度毎の1km²あたりの航空機LiDAR計測とDTM作成のコスト

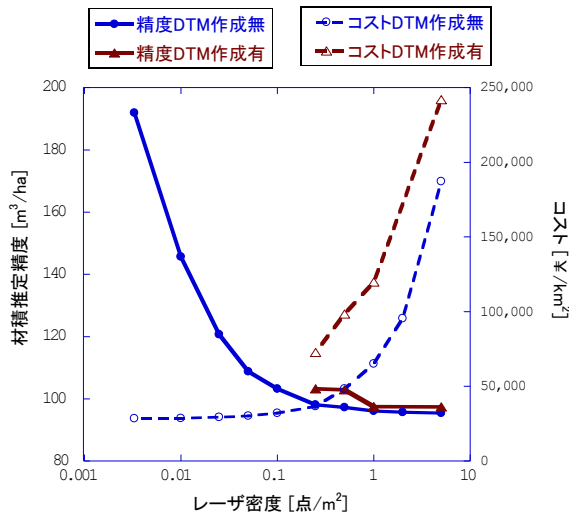


図4 航空機LiDARのレーザ密度毎のコストと精度の関係

表1 低密度LiDARによる地盤高の精度

項目	レーザ密度 [点/m ²]	レーザ密度 [点/m ²]		
		1点	0.5点	0.25点
地盤高 (DTM)	精度 (誤差の標準偏差) [m]	0.484	0.624	0.912
	バイアス (誤差平均) [m]	0.130	0.170	0.253

3) 成果活用における留意点

先ず、デジタル空中写真や小型無人機で森林資源を把握するためには正確な地盤高(DTM)が必須で有り、一度は対象域を航空機LiDARで地盤高を測量する必要がある。次いで、地域の森林計画など広域の森林資源を把握するためには、デジタル空中写真や航空機LiDARを用い、一方で、伐採や間伐など数ha-100haと狭い範囲で森林資源を把握するためにはデジタル空中写真や小型無人機を用いるなど、対象のスケールにより適切な手法を選択する必要がある。

4) 今後の課題

航空機LiDARでの本数密度の自動抽出法を開発した。小型無人機写真では目視判読したが、LiDARでの応用により本数密度の自動抽出も可能であり、他の研究課題で継続する。また、一般利用では自動処理が望ましく、手法のパッケージ化が必要である。

本課題では、秋田県の共通テストエリアに限定して、現場での利用を念頭に様々な条件で森林情報把握の精度を検討した。さらに現場での応用研究として、行政の既存の精密地形用の航空LiDARデータを使用し、県単位など広域での森林情報把握の研究が必要であり、他の研究課題で継続する。

中課題番号(e-Radシステム課題 ID8 桁)	13405791	研究期間	平成25～29年度
小課題番号(桁数は任意)	12110	研究期間	平成25～29年度
中課題名(契約課題名)	低コストな森林情報把握技術の開発		
小課題名	2 低コスト林分情報推定技術の開発		
実行課題名	低コスト林分情報推定技術の開発		
小課題責任者名・研究機関	細田和男・森林総合研究所・森林管理研究領域		

1) 研究目的

デジタル空中写真等により低コストで把握される林分情報は、主に林冠高や本数密度である。また、伐採計画に必要な材積等の林分情報を、林冠高等から低コストで推定するためには、地上調査を前提としない手法開発が必要である。

そこで本小課題においては、まず、空中写真DSM(地表面高)等によって得られる林冠高と整合性の高い林分代表樹高や、空中写真判読によって得られる本数密度と整合性の高い優勢木を定義する。そして、新たに定義された林分代表樹高のみを説明変数として、もしくは林分代表樹高と優勢木本数密度の両方を説明変数として、小班の材積等を推定する汎用性の高いモデルを作成する。これらにより、デジタル空中写真等によって把握される林冠高や本数密度から、伐採計画に必要な材積等の林分情報を低コストで推定する技術を開発することを目的とする。

2) 研究成果

秋田県大館市大茂内沢国有林に設定したテストエリアにおいて、林齢50年生前後の主伐期で、広葉樹の侵入や林冠ギャップが少なく、比較的斉一なスギ人工林の小班6か所を選定した。また、より若齢で高密度な小班3か所を選定した。各小班において、面積0.1ha、半径17.84mの円形プロットを各小班2～3か所、合計19か所設定した。スギおよび胸高直径9cm以上の広葉樹について、樹種、胸高直径、樹高、被圧木の当否、被害の有無などを調査した。樹高は測高器(ハグロフ社バーテックスIV)を用いて、三角法で精密に全数測定した。また、円形プロットを中心点の地理座標をGPSで測位するとともに、全立木の根元位置をレーザーコンパスで測量した。これらの調査結果を整理し、空中写真DSMによる林冠高、空中写真判読による樹高や本数、地上調査による樹高や本数を、相互に比較可能なデータセットを整備した。

空中写真DSMにせよ空中写真判読による樹高にしても、上空からは観測できない被圧木の樹高は含まれないと考えられることから、まず、地上調査データにおいて被圧木の影響を受け

ない上層樹高の定義を探索した。その結果、現地の目視判定による被圧木以外の平均樹高は、Loreyの平均樹高（胸高断面積を重みとする加重平均樹高）と概ね一致することを見出した（図1）。

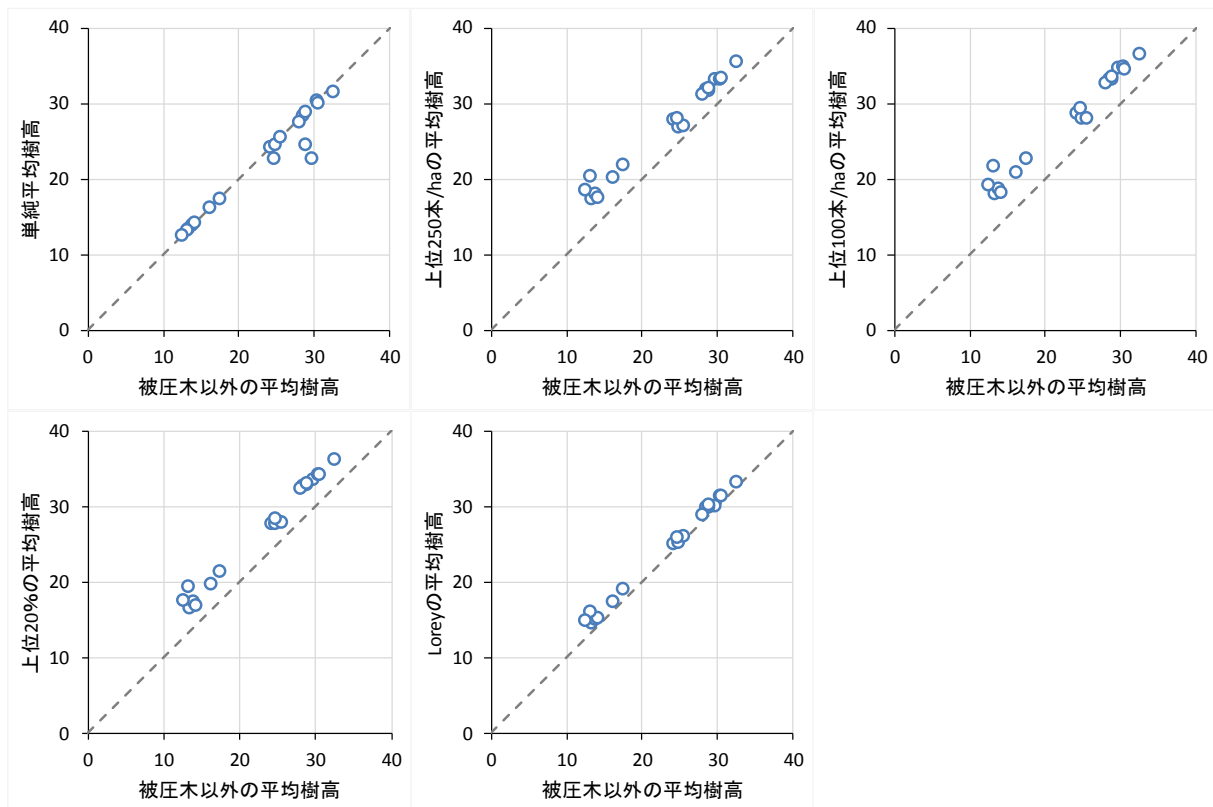


図1. 目視判定による被圧木以外の平均樹高と様々な定義による上層樹高の比較

各プロットの地上調査によるLoreyの平均樹高と、各メッシュサイズの空中写真DSMによる平均林冠高を比較したところ（図3）、メッシュサイズ20mの平均林冠高はばらつきが大きく、現地平均樹高の推定には適さないことが分かった。メッシュサイズ2m、5m、10mの場合、平均林冠高のばらつきは少ないが、Loreyの平均樹高よりは過小であった。これはLoreyの平均樹高が上層木の樹頂点の平均に相当するのに対し、平均林冠高は樹頂点以外や林冠ギャップを含む平均であることによると考えられた。この補正方法を検討したところ、2mあるいは5mメッシュの場合、林冠高の平均値に標準偏差の2倍を加算することにより、Loreyの平均樹高とほぼ一対一に対応づけられることが分かった（図3）。この方法で空中写真DSMからLoreyの平均樹高を推定した場合の平均二乗誤差平方根（RMSE）は、2mメッシュの場合で1.3m、5mメッシュの場合で1.5mであった。

一方、各プロットの地上調査によるLoreyの平均樹高と、立体視ソフト「もりったい」による判読樹高を比較したところ、ほぼ一対一に対応するが（RMSE 1.4m）、わずかに過小傾向があることが分かった。

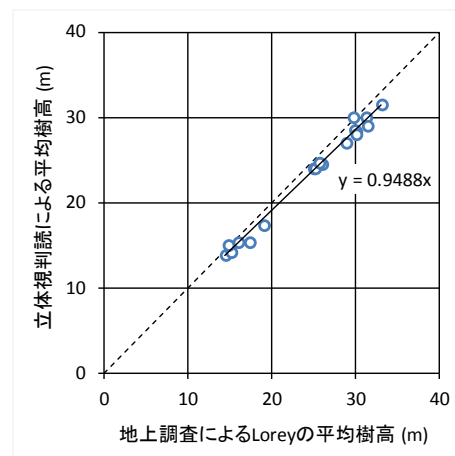


図2 写真判読樹高の精度

これは、航空機が飛行しながら撮影するため、梢端がぶれて消失することによるもので、フィルム写真と反射立体視鏡を用いていた時代から広く認められていた傾向である。デジタル空中写真とPCによる判読でも、5%程度のプラスの補正をすることが適切と考えられた。

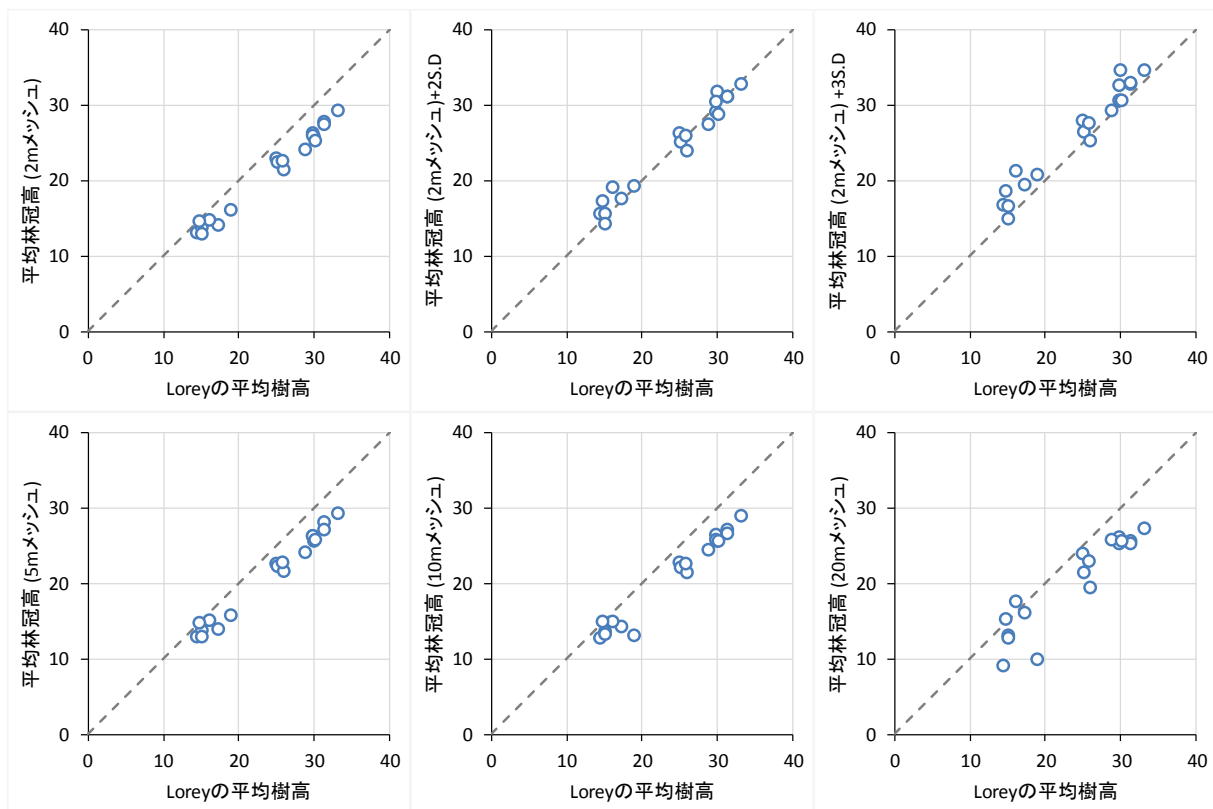


図3. Loreyの平均樹高と各メッシュサイズの平均林冠高の比較

各プロットの地上調査による本数と、立体視ソフトによる判読本数を比較すると、1000本未満の範囲では両者がおおむね一対一に対応するが（図4. 下）、1000本以上の範囲では判読本数のほうが過少になる場合が多かった（図4. 上）。これは、本数密度が高い場合は個々の立木の樹冠が小さくなり、複数の樹冠を1本と誤認しがちであったり、上空からは被圧木を視認できなかつたりすることによると考えられる。このことは、空中写真判読による本数計測の限界として、フィルム写真時代からも認識されており、その限界は1000～1300本程度というのが通説である。今回の結果はこの通説を追認したもので、本課題で開発する樹高と本数の二変数による林分材積式は、主伐期の人工林のほとんどが含まれる1000本/ha未満の範囲に限定して利用すべきものと考えられる。

以上の結果を踏まえ、全国の国有林に設定されている収穫試験地のデータを用い、Loreyの平均樹高のみを説明変数とする一変数林分材積式、およびLoreyの平均樹高とhaあたり本数の二つを説明変数とする二変数林分材積式を作成した。使用した毎木調査データは、スギ116か所・1023回分に加え、ヒノキ87か所・730回分、カラマツ64か所・539回分である。モデルは単木材積式としても広く用いられているべき乗式とし、非線形最小二乗法ではめを行った。また、真値を分母とする相対二乗誤差の平方根（相対RMSE）によって精度を評価し

た（表1）。前述のとおり、二変数林分材積式は1000本/ha以上の範囲では適用が難しいため、精度評価は1000本/ha未満のデータについてのみ行った。

空中写真DSMを介して自動的に推定可能なLoreyの平均樹高のみを説明変数とする場合、相対RMSEは、樹種や地域により異なるがスギの9区分では12.2~37.8、平均25.5%であった。地上での収穫調査の代替としては十分とはいえなかったが、肉眼判読を伴わないことから林班スケール以上の広域での材積推定に適した手法と考えられた。

立体視ソフトによる判読を前提として、Loreyの平均樹高と判読本数の二つを説明変数とする二変数林分材積式の場合、スギの9区分の相対RMSEは4.1~16.1、平均9.7%であった。スギ9区分のうち東京、名古屋、高知以外の6区分では相対RMSEが10%以内であり、収穫調査の代替になりうる精度を示した。表1に示した二変数材積式のパラメータは、立体視ソフト「もりったい」に実装した。「もりったい」には従来から林分密度管理図の構成式を利用した材積推定機能があったが、林分密度管理図による材積推定精度と、本課題で開発した二変数林分材積式による推定精度を比較すると（表1）、ほとんどの場合で二変数林分材積式のほうが精度が高く、スギ9区分では相対RMSEが最大16.1ポイント、平均5.4ポイント改善した。

以上本課題で新たに作成した林分材積式などによる材積推定精度を、テストサイト19か所のうち、本数が1000本/ha以下であった11か所における地上調査、空中写真DSMによる林冠高、立体視ソフトによる樹高や本数の判読データなどにより比較検証した（図4）。①空中写真DSMから得られた平均林冠高とその標準偏差からLoreyの平均樹高を推定し、一変数林分材積式で材積を推定する方法、②立体視ソフトで判読したLoreyの平均樹高と本数から二変数林分材積式で材積を推定する方法、③は平均林冠高とその標準偏差から推定したLoreyの平均樹高と、立体視ソフトによる判読本数から二変数林分材積式を用いる方法、④立体視ソフトによる判読した平均樹高と本数から林分密度管理図を用いる方法（「もりったい」の既存の機能）を比較すると、11か所の相対RMSEはそれぞれ11.5%、7.2%、10.0%、12.8%であった。推定のための作業量は①<③<②≒④と考えられ、精度とはトレードオフの関係にあるが、同じ作業量である②と④では②のほうが精度が明らかに高く、本課題で新たに作成した二変数林分材積式の有効性が確認された。

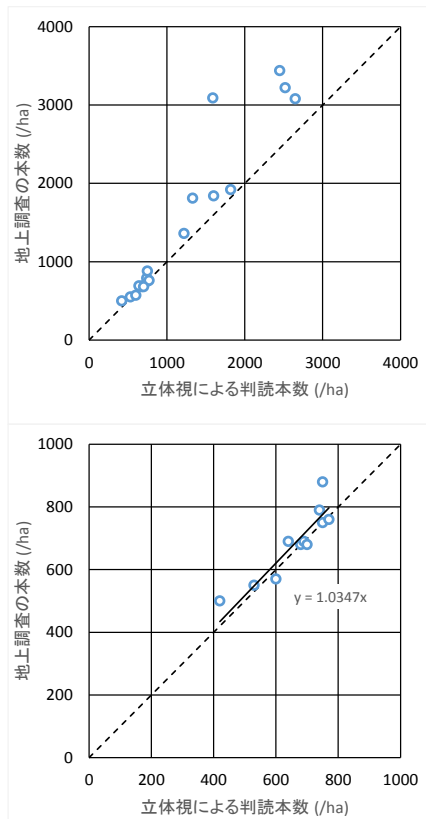


図4. 地上調査と写真判読による本数の比較（上：全体、下：1000本/ha未満）

表1. 林分材積式のパラメータと精度

地域・樹種区分	データ数	一変数材積式		二変数材積式			相対RMSE		
		a	b	a	b	c	一変数林分材積式	二変数林分材積式	既存の密度管理図
青森スギ	31	1.919	1.948	0.005	2.513	0.613	0.255	0.075	0.118
秋田スギ	363	5.661	1.528	0.003	2.559	0.632	0.378	0.084	0.128
前橋スギ	64	12.162	1.295	0.025	2.199	0.488	0.143	0.081	0.084
東京スギ	138	12.794	1.284	0.027	2.113	0.510	0.221	0.110	0.270
長野スギ	30	2.583	1.834	0.012	2.282	0.550	0.281	0.041	0.100
名古屋スギ	45	4.605	1.615	0.017	2.238	0.528	0.240	0.161	0.205
大阪スギ	102	5.946	1.478	0.001	2.653	0.762	0.280	0.090	0.136
高知スギ	184	6.864	1.524	0.032	2.159	0.472	0.376	0.149	0.146
熊本スギ	66	21.199	1.116	0.055	1.856	0.533	0.122	0.082	0.174
前橋ヒノキ	61	2.094	1.847	0.036	2.341	0.376	0.140	0.082	0.149
東京ヒノキ	89	6.392	1.551	0.008	2.349	0.603	0.262	0.065	0.071
長野ヒノキ	30	8.938	1.356	0.002	2.445	0.709	0.108	0.039	0.093
名古屋ヒノキ	248	6.036	1.537	0.009	2.493	0.517	0.237	0.066	0.074
大阪ヒノキ	94	3.445	1.687	0.256	1.889	0.286	0.169	0.124	0.145
高知ヒノキ	104	6.961	1.483	0.048	2.119	0.429	0.512	0.228	0.237
熊本ヒノキ	104	9.127	1.401	0.120	1.988	0.371	0.288	0.190	0.170
北海道カラマツ	308	5.515	1.312	0.025	2.053	0.480	0.291	0.152	0.141
秋田カラマツ	36	2.157	1.610	0.007	2.515	0.462	0.222	0.116	0.150
前橋カラマツ	43	1.025	1.930	0.004	2.470	0.593	0.186	0.073	0.146
長野カラマツ	113	3.947	1.450	0.010	2.373	0.490	0.271	0.149	0.150
名古屋カラマツ	39	2.069	1.665	0.006	2.278	0.590	0.151	0.069	0.086

注) 一変数林分材積式 $V=a \times LH^b$ 、二変数林分材積式 $V=a \times LH^b \times N^c$

V:林分材積(m³/ha)、LH:Loreyの平均樹高(m)、N:本数密度(/ha)

地域名は国有林の旧営林局の管轄区域を指す

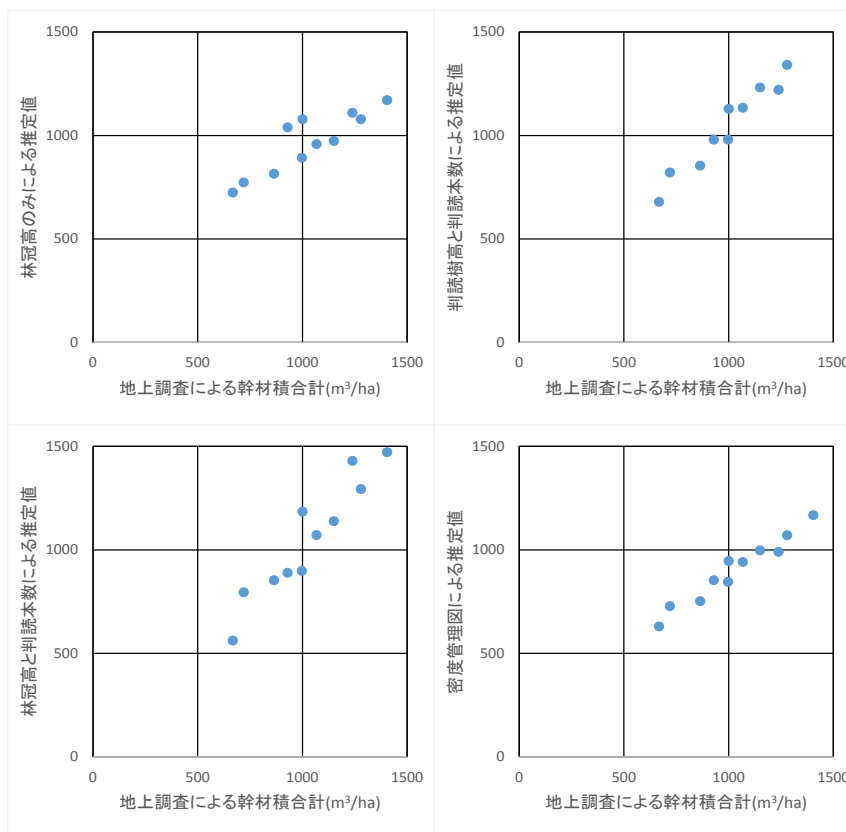


図4. テストサイト11か所における実測材積と推定材積との比較

3) 成果活用における留意点

記述の通り、1000本/ha以上では空中写真による本数判読が困難であり、本課題で開発した二変数林分材積式は、1000本/ha未満の林分に限定して適用すべきものである。また、本課題の地域区分は、立木幹材積表の地域区分によったが、環境条件や手入れ状態が類似した、より狭い地域に限定すればより高い精度が期待できる。立体視ソフト「もりったい」には本課題による成果の一部として、森林組合等のユーザーが二変数林分材積式のパラメータを独自に調整できるよう、技術的なマニュアルやデータ処理用のマクロが添付される。

4) 今後の課題

本課題では当初計画していたスギに加え、ヒノキとカラマツについても林分材積式を作成したが、主要造林樹種のうちではさらにトドマツとエゾマツについても同様の手法が適用と考えられる。

また、林業現場にも近年導入されつつある無人航空機による低空からの撮影では、従来の航空写真よりも格段に高解像度の画像が得られるため、1000本/ha以上の高密度林分でも、精度の良い本数推定が実現する可能性がある。高解像度ステレオ写真の立体視による肉眼判読だけでなく、画像解析による半自動的な本数推定も含め、今後の技術開発が望まれる。

成果等の集計数

課題番号	学術論文		学会等発表(口頭またはポスター)		出版図書	国内特許権等		国際特許権等		報道件数	普及しうる成果	発表会の主催(シンポジウム・セミナー)	アウトリーチ活動
	和文	欧文	国内	国際		出願	取得	出願	取得				
13405791	6	0	13	2	2	0	0	0	0	0	1	1	17

注1)学術論文数は直接本事業の成果を掲載したものに限定してカウントすること。

(1)学術論文

区分: ①原著論文、②その他論文

整理番号	区分	機関名	タイトル	著者	掲載誌	巻(号)	掲載ページ	発行年	発行月
1	①	森林総合研究所	低密度LiDARデータによる人工針葉樹林の林分パラメータの推定	小谷英司、栗屋善雄	写真測量とリモートセンシング	52(2)	44-55	2013	5
2	①	森林総合研究所	国有林における外部委託による収穫調査費用の現状	細田和男、家原敏郎	関東森林研究	65(1)	73-74	2014	3
3	①	森林総合研究所	人工林における標準地の適正面積	細田和男	森林計画学会誌	49(1)	51	2015	12
4	①	森林総合研究所	小型のステレオデジタルカメラによる胸高直径と樹間距離の測定精度	細田和男・西園朋広・高橋正義・齋藤英樹・鷹尾元・田中真哉	関東森林研究	67(1)	155-156	2016	3
5	①	森林総合研究所	秋田地方のスギにおける樹高を用いた一変数材積式の検討	西園朋広・細田和男・富村洋一・佐野真琴・小谷英司	関東森林研究	67(2)	223-226	2016	11
6	①	森林総合研究所	多地点・多時期データによる樹高曲線のモデル選択	細田和男、西園朋広、山田祐亮、高橋正義、齋藤英樹、佐野真琴	関東森林研究	68(2)	137-140	2017	11

注1)和文、欧文の順で記載。発行年は発行年月(西暦年以下同じ)とする。

注2)区分①の原著論文(受理されたものに限る)は、謝辞等に本事業予算の支援を受けたことが明記されていること。また、論文は直接本事業の成果を掲載したものに限定して記載すること。

注3)機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(2)学会等発表(口頭またはポスター)

整理番号	タイトル	発表者名	機関名	学会等名	発行年	発行月
1	「Comparing the previous regression equations of the vegetation profile method by airborne LIDAR for stand volume estimation (航空機LiDARによる林分材積推定のための植生横断面法の回帰式の比較)」	小谷英司	森林総合研究所	「Sustainable Forest Ecosystem Management in Rapidly Changing World」	2013	9
2	国有林における外部委託による収穫調査費用の現状	細田和男・家原敏郎	森林総合研究所	関東森林学会	2013	10
3	スギ人工林を対象とした分解能別DSMの高さ精度の比較	古田朝子・金森匡彦	日本森林技術協会	第126回日本森林学会大会	2015	3
4	「航空機LiDARによるスギ林の材積推定手法の開発ー林分推定法の精度比較ー」	小谷英司	森林総合研究所	第126回森林学会大会	2015	3
5	時系列空中写真三次元計測による人工林成長モニタリング	古家直行、西園朋広、小谷英司、北原文章、細田和男	森林総合研究所	第126回日本森林学会大会	2015	3
6	航空機レーザー計測と人工衛星画像による森林材積推定手法の開発	小谷英司、西園朋広、田中真哉	森林総合研究所	写真測量学会H27年次学術講演会	2015	5
7	「高密度と低密度の航空機レーザー計測データの比較分析」	小谷英司	森林総合研究所	第20回東北森林科学学会大会	2015	8
8	「高密度と低密度の航空機LiDARデータによるスギ材積推定手法の比較分析」	小谷英司	森林総合研究所	第127回森林学会大会	2016	3
9	「高・低密度航空レーザーデータによるスギ林本数密度推定」	小谷英司	森林総合研究所	写真測量学会H27年次学術講演会	2016	5
10	「Comparative analyses of high and low density LiDAR data for forest stand volume and mean height in man-made Sugi coniferous forest area (高・低密度航空レーザーデータによるスギ林の材積と平均樹高の推定)」	小谷英司	森林総合研究所	IUFRO International Symposium FORCOM /SFEM /2016	2016	8
11	樹高を用いた一変数材積式の検討ー複数地域のスギの事例ー	西園朋広・細田和男・富村洋一・佐野真琴・北原文章	森林総合研究所	関東森林学会	2016	10
12	航空機LiDARデータを用いた立木密度の推定: UAV空撮画像による上層木本数の検証	田中真哉・小谷英司・鷹尾元・細田和男・金森匡彦・佐野真琴	森林総合研究所	日本森林学会	2017	3
13	航空機LiDARによる平均林冠高法の比較分析	小谷英司、田中真哉、西園朋広、細田和男	森林総合研究所	第128回日本森林学会大会	2017	3
14	高密度と低密度での航空機LiDAR計測のコスト分析	小谷英司、田中真哉	森林総合研究所	第20回東北森林科学学会大会	2017	8
15	さまざまな定義による上層樹高の差違と間伐前後の変化	細田和男、西園朋広、山田祐亮、高橋正義、齋藤英樹、佐野真琴	森林総合研究所	第7回関東森林学会大会	2017	10

注1)機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(3) 出版図書

区分: ①出版著書、②雑誌(注)(1)学術論文に記載したものを除く、重複記載をしない。)、③年報、④広報誌、⑤その他

整理番号	区分	著書名(タイトル)	著者名	機関名	出版社	発行年	発行月
1	④	森林総合研究所関西支所・研究情報(航空機LiDARによる立木本数の推定)	田中真哉	森林総合研究所関西支所	森林総合研究所関西支所	2017	11
2	④	森林総合研究所関西支所・研究情報「デジタル空中写真による森林資源の把握」	家原敏郎	森林総合研究所関西支所	森林総合研究所関西支所	2017	11

注1) 機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

注2) 複数機関ある場合は著者名の順番と合わせる。

(4) 国内特許権等

整理番号	特許権等の名称	発明者	権利者(出願人等)	機関名	特許権等の種類	番号	出願年月日	取得年月日
	該当無し							

注1) 「特許権等の種類」には、特許権、実用新案権、意匠権、回路配置利用権及び品種登録を記載する。

注2) 複数の機関による共同出願の場合は、主となる出願人の下に行を追加し、共同出願人の情報を記載する。

(5) 国際特許権等

整理番号	特許権等の名称	発明者	権利者(出願人等)	機関名	特許権等の種類	番号	出願年月日	取得年月日	出願国
	該当無し								

注1) 複数の機関による共同出願の場合は、主となる出願人の下に行を追加し、共同出願人の情報を記載する。

(6) 報道等

区分: ①プレスリリース、②新聞記事、③テレビ放映、④その他

区分	記事等の名称	掲載紙・放送社名等	掲載年	掲載月	掲載日	機関名	備考
	該当無し						

注1) 機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(7) 普及に移しうる成果

区分: ①普及に移されたもの、製品化して普及できるもの、②普及のめどがたったもの、製品化して普及のめどがたったもの、③主要成果として外部評価を受けたもの

区分	成果の名称	機関名	普及(製品化)年月		主な利用場面	普及状況
②	立体視ソフト「もりったい」の改良	日本森林技術協会	2018	3	森林組合等での伐採計画に利用可能	現在普及活動を実施中

注1) 区分は複数可。

注2) 機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(8) 発表会の主催の状況

(シンポジウム・セミナー等を記載する。)

整理番号	発表会の名称	年月日			開催場所	参加者数	機関名	備考
1	林業経営講座「ドローン等を活用した森林調査」	2017	12	21	森林総合研究所東北支所	21	森林総合研究所	共催、参加者: ノースジャパン素材流通組合員、林業従事者など

注1) 機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。

(9)アウトリーチ活動の状況

当事業の研究課題におけるアウトリーチ活動の内容は以下のとおり。

区分：①一般市民向けのシンポジウム、講演会及び公開講座、サイエンスカフェ等、②展示会及びフェアへの出展、大学及び研究所等の一般公開への参画、

③その他(子供向け出前授業等)

整理番号	区分	アウトリーチ活動	年月日			開催場所	参加者数	主な参加者	機関名	備考
1	③	H26航空レーザー活用研修での「航空レーザー計測の概要」講義・実習	2014	7	22	森林総合研修所	17	行政、森林組合	森林総合研究所	
2	③	H27航空レーザー活用研修での「航空レーザー計測の概要」講義・実習	2015	9	14	森林総合研修所	18	行政、森林組合	森林総合研究所	
3	③	H27森林調査研修での「航空レーザーによる森林調査」講義・実習	2015	11	9	森林総合研修所	17	行政、森林組合	森林総合研究所	
4	③	H27森林調査研修での「森林調査と空中写真判読」講義・実習	2015	11	11	森林総合研修所	17	行政、森林組合	森林総合研究所	
5	①	森林計画学会50周年記念公開シンポジウム「森林資源計測の歩みと展望」	2016	6	9	東京大学弥生講堂	150	研究者、行政、企業	森林計画学会	
6	③	H28森林調査研修での「航空レーザーによる森林調査」講義・実習	2016	7	4	森林総合研修所	17	行政、森林組合	森林総合研究所	
7	③	H28森林調査研修での「デジタル空中写真による森林調査」講義・演習	2016	7	6	森林総合研修所	17	行政、森林組合	日本森林技術協会	
8	③	森林総合監理士フォローアップ研修	2016	8	23	森林総合研修所	17	行政、森林組合	森林総合研究所	
9	②	森林総研東北支所一般公開で「小型無人機(ドローン)による森林撮影の映像紹介」展示説明	2016	10	15	森林総合研究所東北支所	350	会社員、主婦、大学生、小学生、行政等 一般市民	森林総合研究所	
10	②	森林GISフォーラム 地域シンポin 島根	2016	10	21	島根県松江市	50	森林GISに関わる研究者、行政、企業	森林GISフォーラム	
11	②	森林GISフォーラム 平成28年度東京シンポジウムでのデモ	2017	2	1	東京都文京区	80	森林GISに関わる研究者、行政、企業	森林GISフォーラム	
12	③	H29森林調査研修での「航空レーザーによる森林調査」講義	2017	10	17	林野庁森林総合研修所	22	行政、森林組合	森林総合研究所	
13	③	一般公開「小型無人機で空から森を見てみよう」	2017	10	14	森林総合研究所東北支所	385	会社員、主婦、学生、行政等	森林総合研究所	
14	③	「森林・林業分野におけるドローン活用研修」	2017	11	9	横手セントラルホテル	58	秋田県の林業従事者、森林組合、市町村と県の林業担当者	森林総合研究所	
15	①	秋田県雄勝広域森林組合への研修	2017	11/13～11/17、11/27～12/1		秋田県雄勝広域森林組合	4	森林組合職員	雄勝広域森林組合	
16	①	小鹿野町森林経営計画づくり研修会成果報告会	2017	12	14	埼玉県秩父郡小鹿野町	30	埼玉県秩父郡小鹿野町の林業関係者、住民	小鹿野町地域資源協議会	別途、林業従事者に3日間の研修を実施(9/13、9/15、9/21)
17	①	岩手県林業技術センター、森林総合研究所東北支所、林木育種場東北育種センター 合同成果発表会「低コストな森林資源把握技術の開発」	2018	2	2	岩手県林業技術センター	40	会社員、主婦、学生、行政等	森林総合研究所	

注1) 機関名は当該成果に関与した代表・共同機関名を記載する。