

ISBN 978-4-909941-14-5

地上型レーザースキャナーとUAVによる 新しい森林調査



国立研究開発法人 森林研究・整備機構
森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute

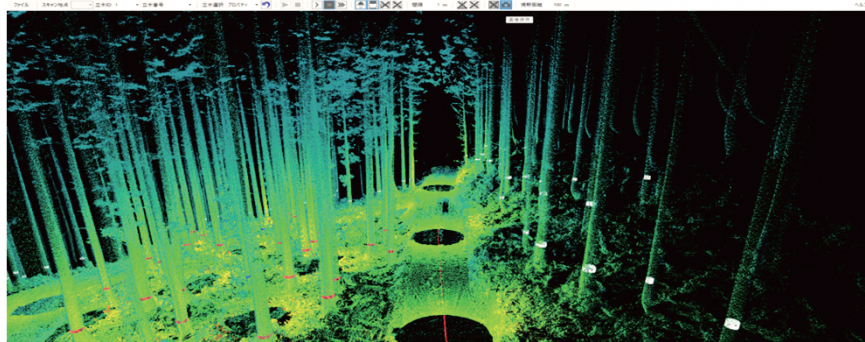
森林総合研究所 第4期中長期計画成果番号34（森林管理技術-23）

はじめに

森林総合研究所では、平成29年度から令和元年度の3年間、一般財団法人日本森林林業振興会「森林林業振興助成事業」の助成を受け「地上型レーザースキャナーによる効率的な収穫調査と素材生産現場への活用方法の提案」という研究課題に取り組みました。本課題では、収穫調査から素材生産の実行に至る過程で地上型レーザースキャナー（TLS）を効率的に運用・活用するための基礎的な知見を得るために、（1）複数の種類のTLSによる森林計測の精度評価、（2）TLS計測では精度の低い樹高測定を補う手法、（3）TLSと無人飛行機（UAV）の画像を組み合わせた森林計測手法、（4）TLSによる森林計測のコスト分析、（5）林業現場でのTLSの活用方法について検討しました。

この小冊子では、このうち、本課題で研究対象とした機器（TLSとUAV）の概要や使い方のポイントなどを紹介しました。特に林業の現場において森林調査に携わる方々にとって、TLSの導入を検討する際の参考となれば幸いです。

本課題で得られた知見は、成果報告書（概要版）として（一財）日本森林林業振興会のウェブサイト（<http://www.center-green.or.jp/>）に掲載されていますので併せてご覧ください。また紹介した機器の具体的な使用方法は、各機器のカタログや取扱説明書をご参照ください。



目次

はじめに

1. 一脚型レーザースキャナーの概要	4
2. 一脚型レーザースキャナーの使い方と注意点	5
3. 背負子型レーザースキャナーの概要	6
4. 背負子型レーザースキャナーの使い方と注意点	7
5. 据置型レーザースキャナーの概要	8
6. 据置型レーザースキャナーの使い方と注意点	9
7. UAV（無人航空機）の機種選択	10
8. TLSと連携させるためのUAVの計測計画と安全管理	11
9. 樹高の測定精度を補う方法	12
10. 高価な計測機器の費用対効果	13

（研究担当者）

森林管理研究領域	チーム長（資源動態担当）	西園 朋広
森林管理研究領域	資源解析研究室 主任研究員	北原 文章
林業工学研究領域	収穫システム研究室長	中澤 昌彦
林業工学研究領域	収穫システム研究室 主任研究員	瀧 誠志郎
東北支所	チーム長（地域資源利用担当）	小谷 英司
林野庁研究指導課（前・森林管理研究領域 資源解析研究室長）		細田 和男

一脚型レーザースキナーの概要

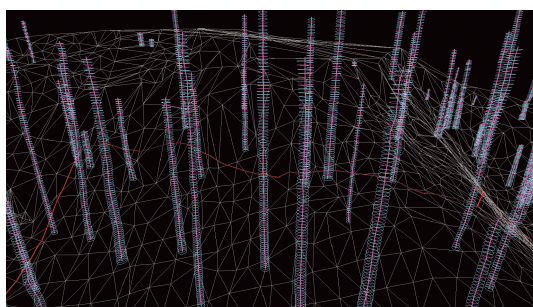
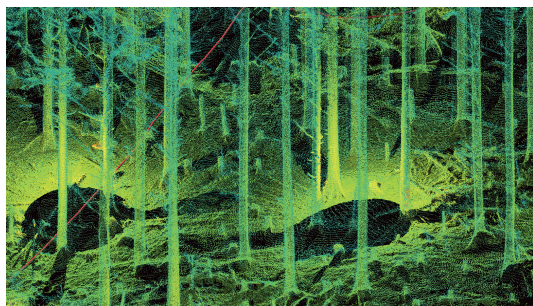
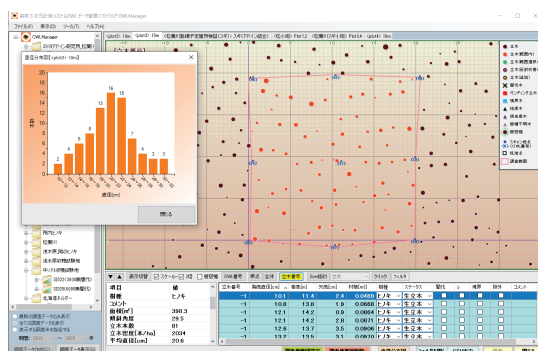
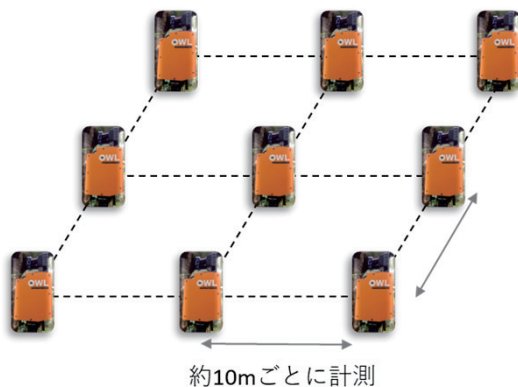


森林3次元計測システムOWL®
(株式会社アドイン研究所)

概要と特徴

- 林内に10m間隔の測定点を設け、各点を移動しながらレーザー計測を行う
- 本体を一脚で固定して計測する。1点当りの計測時間は約45秒である
- 本体重量は3.1kg（一脚を含まず）である
- 満充電で約200回（約2ha）のスキャンが可能である
- レーザーの到達距離（検出保証距離）は30mである
- 計測データは外部メディアに記録される
- 計測データを専用の森林計測ソフト（OWL Manager）で解析すると点群データが生成され、さらに直径、樹高、矢高、材積、位置の情報が得られる
- 材積は直径と樹高から材積式で算出する

一脚型レーザースキャナーの 使い方と注意点



- 一筆書きをするように移動しながら各点で計測を行う（計測した点をピンクテープなどでマークするとよい）
- 死角ができないように、周囲に障害物が少ない測定点を選ぶ
- 尾根、谷など地形の変化点では、10m間隔にしばられず計測するようにする
- スキャン中は装置が揺れないように、一脚部分を肩でしっかりと支える。スキャン中のせき、くしゃみ、談笑にも注意する
- 計算時間は比較的短いので、モバイルパソコンを携帯すれば、現場で計測結果を確認することができる
- 下層植生が多く林内の見通しが悪いと、点群の合成に失敗したり、計測精度が低下することがある

背負子型レーザースキャナーの概要

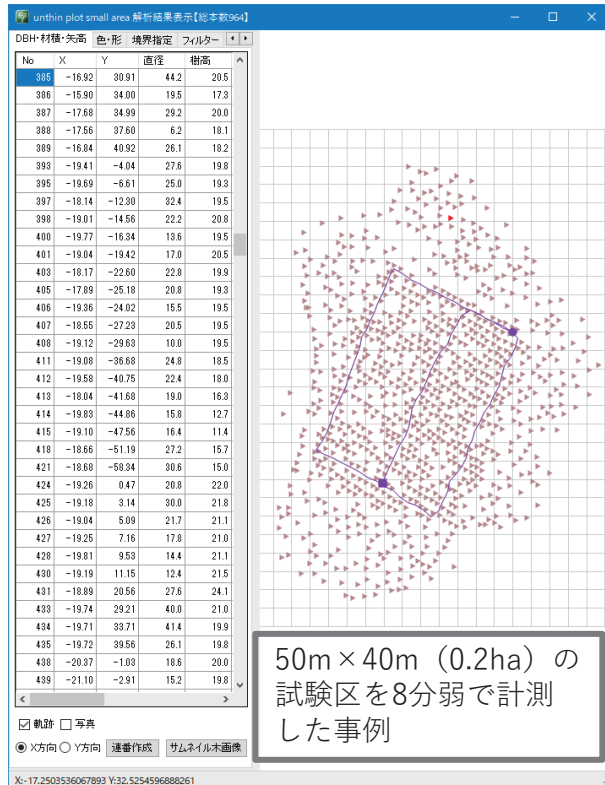


3DWalker
(株式会社woodinfo)

概要と特徴

- 林内を徒歩で移動しながらレーザー計測を行う
- 本体を背負子を用いて計測者の頭上に配置し、歩行中に連続的に計測する
- 本体重量は3.2kg（背負子を含まず）である
- 満充電で約2時間駆動する
- レーザーの到達距離は80mである
- 計測データは本体に記録される
- 本体で点群データを生成する処理を行い、その後に、データを外部メディアに出力できる
- 点群データを専用の森林計測ソフト（Digital Forest for 3DWalker）で解析すると、直径、樹高、矢高、材積、位置などの情報が得られる
- Digital Forestの材積は材積式を用いることなく、幹の立体形状から直接算出する

背負子型レーザースキャナーの 使い方と注意点

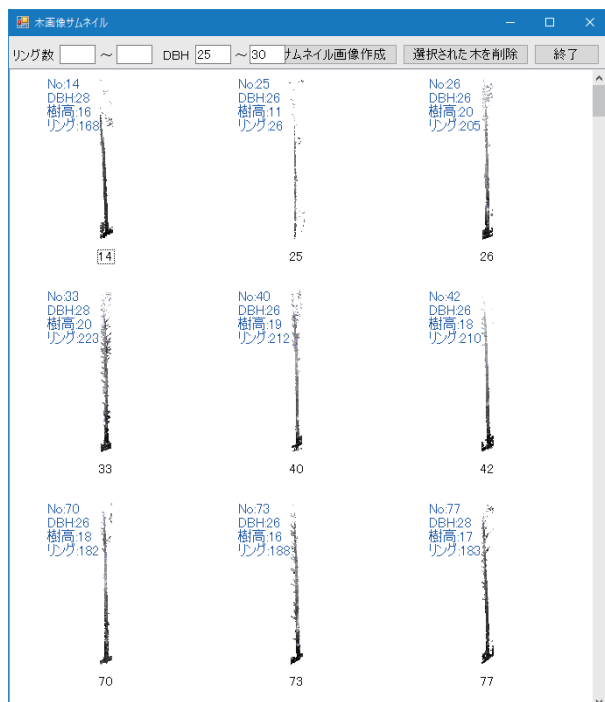


- スキャン時には歩行軌跡の一部を10m程度オーバーラップさせる。そのためにあらかじめ歩行ルートを決めておく
- スキャナーの向きが変わる曲がり角では歩行速度を十分に低下させる。一旦立ち止まるのが望ましい
- 本体における点群データの生成処理には長時間を要し、処理中には計測作業を実施できない。計測とその後のデータ処理を効率的に行うための適切な作業計画が必要である。そのため以下の点に注意が必要である

①効率的に点群データを処理するために、1回の計測を10分以内でおこなう

②点群データの生成処理を事務所帰着後等の空き時間に実施できるように計画する

- 下層植生が多く林内の見通しが悪いと、点群の合成に失敗したり、計測精度が低下することがある



据置型レーザースキャナーの概要



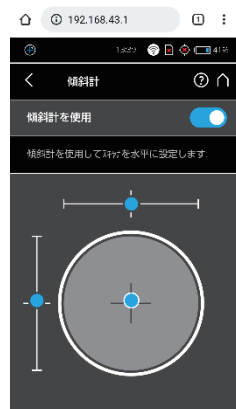
FARO®FOCUS^S 150 Laser Scanner (米国FARO社)

概要と特徴

- 林内に5～20m間隔の測定点を設け、各点を移動しながらレーザー計測を行う
- 本体を三脚で固定して計測する。1点当りの計測時間は3～5分である
- 本体重量は4.2kg（三脚を含まず）である
- 満充電で約4.5時間駆動する
- レーザーの到達距離は150mである
- スキャンの「解像度」と「品質」を設定できる。屋外においては、「解像度」は「1/4」か「1/5」、「品質」は「3×」の設定が標準である
- 計測データは外部メディアに記録される
- FARO® SCENE等で点群データを生成した後に、森林計測ソフト（Digital Forest等）で解析すると、直径、樹高、矢高、材積、位置などの情報が得られる



スマートフォン等とWi-Fiで連動、操作可



据置型レーザースキャナーの 使い方と注意点

ターゲットの例



① FARO®FOCUSS 150 Laser Scanner



② UAV



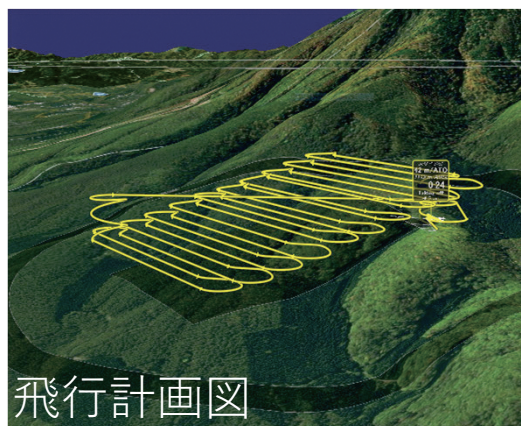
③ ① + ②



- 測定点の間隔は林内の見通し具合に応じて調整する
- 調査域内に人工ターゲットを3つ以上設置してスキャンすると、後の点群生成が確実になる
- スキャンの「解像度」と「品質」は、いずれも高い方が望ましいが、計測時間（作業効率）に大きく影響する
- 取得できる点群数が減らないように、「品質」を下げても、「解像度」は高く維持した方が森林構造を精度良く計測できる場合が多い
- 本TLS機器から生成した点群により森林を可視化できる(①)。しかし、梢端付近にレーザーが届きにくいため樹冠上部ではデータ精度が低下する。TLSデータに無人航空機（UAV）の空撮画像(②)から生成した点群データを結合すると(③)さらに森林の再現性が高まる

注：他のTLS機器から生成された点群とUAV点群の結合については今後検討する

UAV（無人航空機）の機種選択



UAVには大別して固定翼型と回転翼型があり、撮影目的、対象面積、距離、必要解像度、離発着場所の状況等から適切な機種を選定する必要がある

◆大面積＆遠距離向け

【固定翼型】

- ・重量：約1kg
- ・最大飛行時間：59～90分
- ・離着陸：手投げ離陸
胴体着陸
直線約50mの上空が開けた
スペースが必要
- ・空撮解像度：cm/px単位
- ・空撮可能範囲：500ha程度
- ・静止画のみ
- ・ホバリング：不可

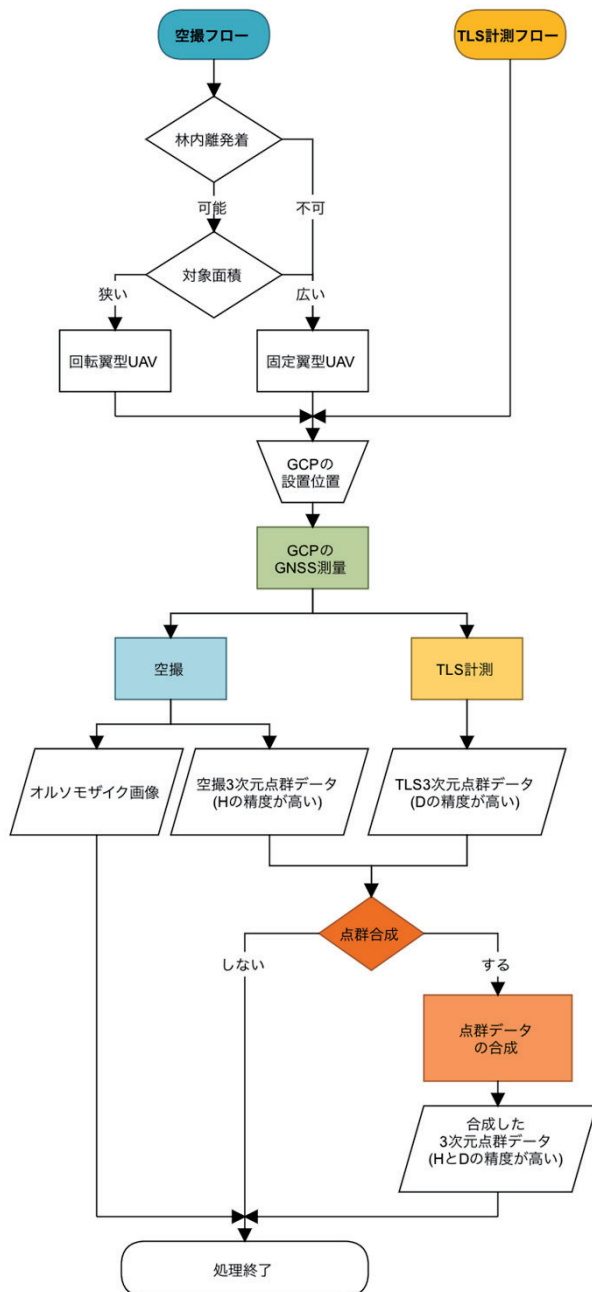
◆小面積＆近距離向け

【回転翼型】

- ・重量：約3kg～
- ・最大飛行時間：15～30分
- ・離着陸：垂直離着陸
上空が開けた
スペースが必要
- ・空撮解像度：mm/px単位
- ・空撮可能範囲：2ha程度
- ・静止画と動画
- ・ホバリング：可

TLSと連携させるための UAVの計測計画と安全管理

安全管理

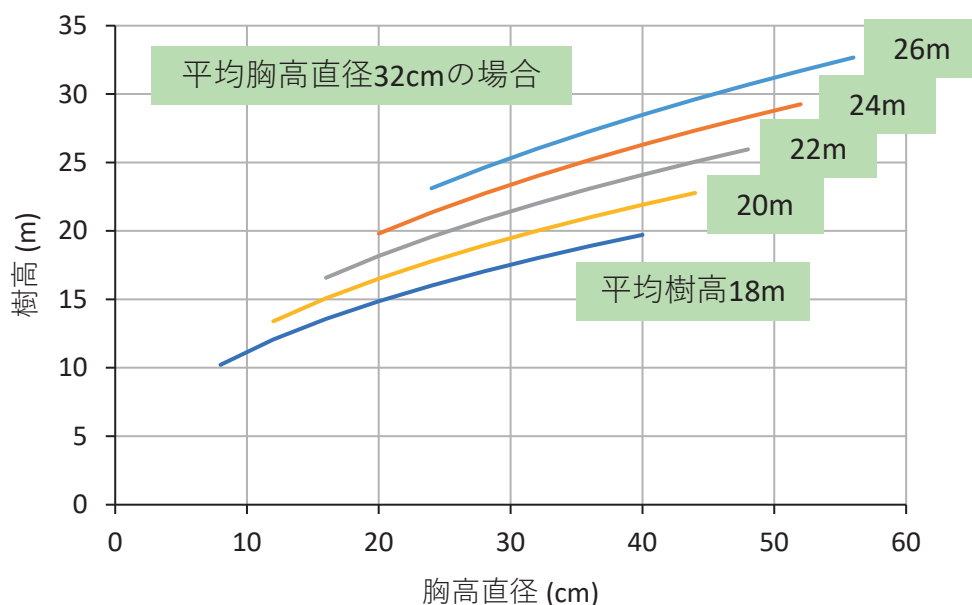


- 不測の事態に備えて、現地の下見とフライトプランの精査が重要である
- カラスや猛禽類の存否を確認し、営巣期を避ける
- 森林では電波が大きく減衰する。機体との通信維持と機体の予期せぬ挙動に即応できるように森林域では目視内飛行を強く推奨する
- バッテリーの中身は空気に触れると激しく発火する。墜落した際に枝や石等が当たることによって火災の危険もある。飛行前点検は機体の他にバッテリーについても実施し、膨らみのあるバッテリーや古いバッテリーは使用しない
- 衝突回避システムを過信しない。枝や電線等には反応しないことがある
- GCP（Ground Control Point：地上基準点）は必ず設置する。特に多時期にわたる空撮時には必須である

樹高の測定精度を補う方法

地上型レーザースキャナー（TLS）による森林調査では、本数や胸高直径は実用上十分な精度が得られるが、樹高については、林分の条件により精度が低下し、過小評価になることがある。今後、高性能なレーザースキャナーの小型化、低価格化や、解析ソフトの改良により、この問題も解決する方向にあると思われる。しかし、当面の間の対応策として、不十分な樹高測定精度を補正する必要がある。

下の式は全国共通で利用可能な樹高曲線（胸高直径から樹高を推定する曲線）であり、樹高を簡単に補正できる。この式は全国のスギ・ヒノキ・カラマツ人工林に適用可能である。この式を利用するには、まず、対象とする林分においてTLSで全立木の直径 d を測定し平均直径 D を算出するとともに、10本程度の立木の樹高を正確に測定し、それらの測定値の平均値として平均樹高 H を推定する必要がある。そして、 $D \cdot H \cdot$ 各立木の直径 d を下の式に代入することで、補正された各立木の樹高 h を計算することができる。



$$h = H \cdot (d/D)^{(0.549033796 - 0.004401367 \cdot D)}$$

h : 樹高 (m)

d : 胸高直径 (cm)

H : 平均樹高 (m)

D : 平均胸高直径 (cm)

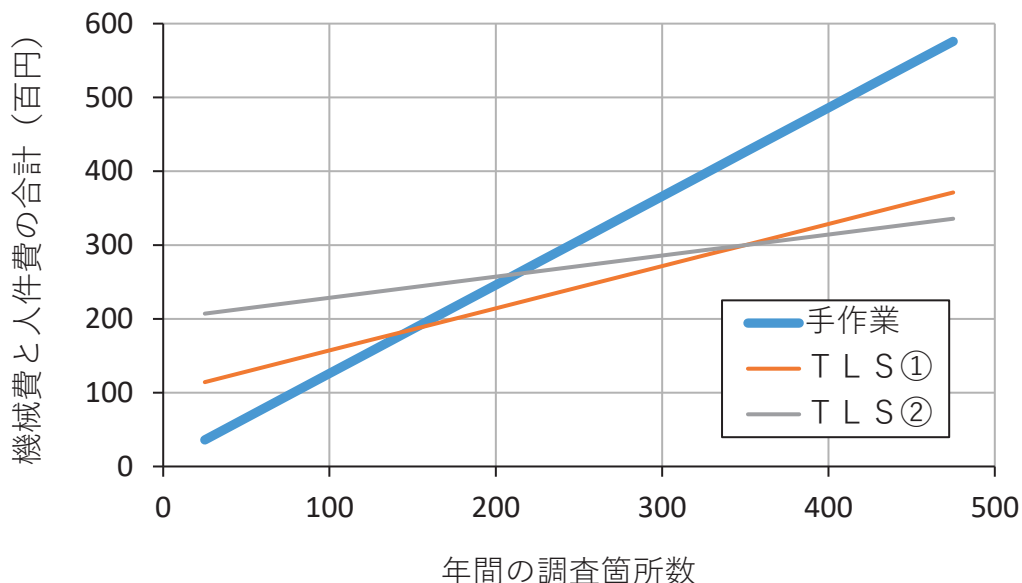
高価な計測機器の費用対効果

地上型レーザースキャナー（TLS）は、直径や樹高を人力で測定し、PCに入力する従来型の手作業よりも効率よく森林調査を実施できるが、現状では本体とソフトウェアを含めた1セットで数百万円以上と高価であり、簡単に導入できない。

TLSでは立木の曲がり・位置・林内地形など、従来型の森林調査より多くの情報が得られる。今後これらの情報を効率的な伐採搬出作業の計画等に利用することで、新たな価値を生み出していく必要がある。そのため、現状の価値だけに基づく単純な比較はできないが、少なくとも現状の費用対効果を適切に把握した上でTLSの導入の可否を検討する必要がある。

下の図は、従来型の手作業を行った場合と、TLS（購入費用の異なる2機種①・②）を導入して効率よく測定した場合の年間費用を試算したものである。年間を通じ多くの森林調査を行う場合にはTLSが有利だが、調査数量が少ない場合の導入は割高となる。両者の関係が逆転する調査箇所数は条件によって異なるが、TLSの導入を検討する際の参考にしてほしい。

	手作業	TLS①	TLS②
機器購入費用	30万円	500万円	1000万円
機器償却期間	5年		
人件費	2万円/人日		
セット人員	3人1組	2人1組	
調査効率	5か所/日	7か所/日	14か所/日



【MEMO】

【MEMO】

国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地

編集・発行 森林管理研究領域
発行日 2020（令和2）年 11月 30日
お問い合わせ先 広報普及科編集刊行係
電話 029-829-8373
e-mail: kanko@ffpri.affrc.go.jp

※本誌掲載内容の無断転載を禁じます。

リサイクル適性 

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。