

### 3. 報告会の開催

令和2年2月26日に林野庁が主催した「令和元年度林業成長産業化地域の取組の分析・評価等に係る調査委託事業報告会」で森林資源情報整備技術実証事業の全体概要と林内 UAV の取組内容を説明した。発表資料については資料編に示す。

## 4. 検討委員会の設置・運営

### 4.1 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 4-1 に示す。

表 4-1 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 生産環境科学科 准教授	UAV リモートセンシングに関する知見を有する。

## 4.2 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2年2月18日(火) 15:00～17:00

■会場：新宿グリーンタワー 15階 アジア航測株式会社 会議室

■参加者：加藤正人委員(信州大学)、瀧誠志郎委員(森林総研)

尾前幸太郎、山之内留美子、藤木俊行、柳瀬隆史(林野庁)

大野勝正、北林拓、伊藤隆明、水上伸也(アジア航測)、渡辺豊(ルーチェサーチ)



検討委員会実施状況

■協議内容：

(内容1) 上空 UAV レーザ計測について

瀧委員：調査したのは何月か。落葉はしていたか。

事務局：12月の上旬と下旬で、落葉はしていた。

瀧委員：広葉樹の解析はやはり難しいか。葉があった方が解析には良いか。

事務局：広葉樹の解析は難しいところ。レーザ計測でやる場合は葉がある方が良い。写真解析については後ほど村上先生のコメントで紹介するが、落葉した時期を利用する解析の方法もある。

加藤委員：胸高直径の推定の回帰式について、利用した回帰式はどこでも適用できるのか。

事務局：どこまで適用できるかは検討している最中だが、利用した回帰式は和歌山県や市町村で実施された森林解析業務で作成された回帰式で、和歌山県下周辺の現地調査の結果を利用している。和歌山県下で適用できるものとして胸高直径推定に使用した。しかしながら、推定精度を高めるためにはやはりこの国有林の中だけで調査をして式を作ったほうが良いと思うが、今回は調査地点が少ないのでなかなか難しいところ。この回帰式がここに当てはまるのかどうかに関していえば、スライド22に0.62という相関があり、平均誤差でいうと27.3cmに対して28cmという数字になっている。この結果が、今回どれくらい当てはまっているかについては、本事業ではプロットの中の調査対象としては20本だけを見ている数値でありサンプルが少ないため、実際にはこの当てはまりが良いのか悪いのかはもう少し違う地点を見てみないといけない。特に、対象の現地調査の直径幅がだいたい25cmから35cmくらいの幅で、10cmくらいしか幅持っていないので、そういう意味ではもっと広域の林分で見たときに、今後精度がどのようになるかというところもまた課題になるかと思う。

加藤委員：回帰式自体どこでも適用できるかどうかはまだ分からないと。

事務局：そのとおり。

加藤委員：スライド7の赤色立体地図と、スライド9のレーザ林相図があるが、これは航空レーザ計測データか。

事務局：UAVレーザによるもの。

加藤委員：スライド9のレーザ林相図は、ヒノキ、広葉樹、アカマツと、樹種ごとに色分けされていて非常に分かりやすく、一本一本樹木が識別できて良い画像である。地図の南側に倒木状況が確認できるがこれは伐採した後か。さらにその南側は、伐採跡地の造林地か。

事務局：伐採した後というより、風倒木だと思われる。その南側は造林地である。

加藤委員：UAVレーザ計測による林相図は、林相の区分はもちろん、造林地の状況把握にも活用できる。

加藤委員：スライド9の調査結果について、針広混交林のヒノキの樹木本数がやや少ないが問題ないか。

事務局：この調査プロットは面積が100㎡で行っており、本数が6本と少ない。このプロットは尾根沿いのところで、尾根をまたぎ、プロットが設置しづらかったため、100㎡とした。他のプロットが400㎡と大きさが違うため、面積が小さい分、上層木の本数が他のプロットよりも少なくなっている。

加藤委員：計測は高度140mということだが、レーザは200メートルくらいまで届くという理解でいる。今までの経験で140メートルくらいにしたということか。

事務局：高低差があるときはレーザパルスの距離を飛ばさないといけないため、今VX1シリーズは発射数を絞れば距離が飛ぶという仕様なので、対地高度に合わせて諸元を計画している。

加藤委員：尾根から沢に向けて飛行しているが、飛行に問題はないか。

事務局：地形に合わせて等対地高度で飛行するのではなく、視認性を高めるために同一高度で飛行している。飛行計画段階では詳細な地形情報が得られないため、同一高度で飛行している。加えて、UAVの特性として、大きく機体が気圧高度計の高さ情報で飛んでいるので、10mくらいの誤差は生じ、等対地での飛行には危険が伴う可能性があるため、同一高度で飛行している。極端に地形が変わるときは上下させるが、等高線に沿って飛行するのが基本となっている。

加藤委員：今回のUAV計測は航空レーザの補完データということだが、UAVで作られたスライド7と9の資料について、これまでの航空レーザ計測と比較して優れていた点はあるか。

事務局：やはり解像度が上がることで細かいレーザ林相図ができるということ。やはり航空レーザの4点/m<sup>2</sup>だと一本一本の識別が若干ゆるいというかシャープさが足りない。一方 UAV レーザだと計測密度が高いため、かなりシャープできれいな画像が出来上がる。しかしながら、樹頂点の抽出に関していえば、画像の見た目はきれいになるが、4点/m<sup>2</sup>で解析しても100点/m<sup>2</sup>のデータを用いて解析しても樹頂点の抽出精度の大きく変わらないという結果であった。樹木本数を数えるということに関していえば、例えば2500本を超えて3000~5000本くらいある林分であれば話は違うが、2000本くらいの林分であれば4点/m<sup>2</sup>でも100点/m<sup>2</sup>の密度でも結果にはあまり変わりはない。

加藤委員：スライド18について、50cm解像度のレーザ林相図は航空レーザ計測の一般的なレベルの解像度という理解で、10cm解像度のレーザ林相図は UAV のレベルで表現できることが分かった。この図の中で樹頂点の凡例が分かりづらいところがあるが、上空の UAV と現地の確認した樹木の位置が合っているということか。

事務局：そのとおりだが、突合せができていない本数は18本。凡例の整理をすると、上空からの UAV で抽出した樹頂点がまずある。これとは別に水色で表示されているものが林内 UAV で反射テープを確認できた樹木。黄緑色のものが林内 UAV レーザから樹木の位置は識別できるが反射テープを確認できない樹木。この二つのほかに、オレンジ色の凡例が、水色の点の中に小さく表示しており、これは反射テープは確認できるが現場で確認したときに上層を形成していない樹木。反射テープを34箇所巻いてきたが、現場でこの木が上層まで到達しているかどうかを見ると、21本しか到達していなかったということになる。13本が上空からは視認できないという結果だが、それはここが尾根に近くて風が強いところで、幹が折れてしまい周りの高い木の下に隠れているため、樹木間隔が近いようなところは識別ができなかったことによるものである。

加藤委員：解像度10cmのレーザ林相図のほうを見ると、一つの樹幹の中にオレンジ色とか緑とか水色とかの凡例があるが、これは測定するセンサが違ったけれども、同じ木を見ているという理解でよいか。

事務局：そのとおり。

加藤委員：この樹木本数の比較について、上空 UAV と林内 UAV との解析結果の比較はあるか。

事務局：この後説明するスライド50がそれに該当。

(内容2) 林内 UAV レーザ計測と各計測手法の比較整理について

瀧委員：スライド 53 の工期比較について、現地の状況によっても違うが、一脚式の地上レーザの現地での計測は最大 10 時間/ha と、こんなにかかるものか。

事務局：昨年度の報告書から引用したもの。

瀧委員：林内 UAV のメリットや有用性についてはどうか。

事務局：いくつかメリットがあると思うが、地上レーザとの大きな違いは急斜面を歩かなくてよくなるということ。今回はセンサのスキャン角が 15 度のためまだ急斜面对応できていないが、今後センサの角度が変われば適用性が向上し、急斜面運用できるようになったときに、人が急傾斜を歩かなくて良くなるため、安全性・効率性が向上する。また、もう 1 つのメリットは計測時の効率性。地上レーザの背負子式にしても一脚式にしても、どこから計測するのかという計画を客観的に立案し、それを林内で確認することが難しい。歩いたところや設置箇所を確認することが難しく、本当に予定通りの計測ができていないのか分からない。それが計画通りでない場合、計測点密度が疎になって計測結果が十分ではない可能性もある。それに対してこの林内 UAV はある程度自分で座標を決めて上空 UAV の飛行と同じようにどこを飛ぶかを決められるため、データの計測漏れがなく、データとして高品質なものが取れることにも繋がると考えている。

瀧委員：上空からの UAV と林内 UAV レーザは組み合わせたほうが良いのか。

事務局：組み合わせた方がより良い情報ではあるが、必ずしも組み合わせなくても良いと考えている。今回は上空 UAV と林内 UAV の性能評価を行うために同じところで行ったが、将来的な運用を考えたときには必ずどちらもないといけないというわけではなく、どちらかがあれば良いと考えている。目的に応じて計測手法を選択する必要がある。

瀧委員：スギなどの針葉樹の素材生産を考えたときに、樹高は必要としない可能性があると考えられる。枝下までの A 材や B 材が取れるところまでの径と長さが分かれば、例えば 4 メートル材が何本とれて、2 メートル材が何本とれて、それ以外は総材積からの引き算で残りの材積が全部チップになるという計算でもいいのかなと考える。そう考えると、地上レーザは確かに歩かないといけないのが手間であり、データ処理に時間もかかるため、それを考えると林内 UAV のほうが有利かなという印象もある。今後小

型化していけばまた違うのかもしれないが、林内にある程度スペースがないと現状としては難しいのではないか。

事務局：現状では適用できる林分に限りがあることは確か。ただし、UAVにはまだ小型化の余地があるため、将来性はあると思う。

瀧委員：道がなくても入って行けるのが UAV だと思っているが、この UAV を林内に持ち込まなくてはいけないから車が通れるくらいの道が必要ということだった。実際にはそこに道があるかどうか分からないのが現状で、2km とか 3km とか離れたところから UAV を飛ばしてそこに道があるかどうかを解析したうえで、そのデータを基に、例えば飛行ルート等を設定できるという形に展開していけば、「UAV ならでは」というところが出てくるのかなという気はしている。

事務局：今回行った林内 UAV は GNSS を搭載していないが、将来的には目的地の上までは GNSS で行って、そこから下は SLAM で計測というような複合技術が活用できるようになる可能性は考えられる。現状では整備されている林内であればある程度飛行できると考えられるが、問題は飛行時間。バッテリーの性能がまだまだ十分ではないため、2km～3km が最大の範囲になる。林内 UAV について林内では風が吹きにくいいため、環境に合わせた機体の設計をすることで、効率性は向上すると思う。

瀧委員：今後の実用化を考えると UAV レーザで計測するというのは費用が高くなるため、職員がやるということよりも、基本的にはアウトソーシングになるのか。

林野庁：自分たちで分析ができるようなソフトや環境ができれば、それは職員が対応した方が時間もかからないため良いと思う。しかし、まだそういう状況ではないので、今後 5 年 10 年という期間の中で検討していくものになる。現状ではアウトソーシングになる。

加藤委員：林内 UAV の機材について、センサを回転させるなどの対応で計測可能な角度を変えるのは可能か。

事務局：回転機構を取り付けることは可能だが、一長一短ある。視野を広げ、運用できる範囲を広げる目的では回転機構が良いが、単位面積当たりの計測密度が低下するため、枝などの小さい障害物を見落とす可能性がある。また、回転機構のモーターの劣化による影響により計測誤差が生じる可能性がある。どの程度精度低下が起きているか把握しにくいことが課題であり、現状では回転機構は導入していない。固定でレーザを複数付けるような工夫が現実的だと考えている。

加藤委員：今回の事業では一度飛行を行い、地図作りを行ってからその地図をベースに飛行ルートを設定する手法となっているが、自律飛行技術を活用して、自動的に避けながら林内を飛行するという事は可能か。

事務局：将来的には可能だと考えているが、問題は飛行時間。探索型と言われる UAV では地図がないところを自動的に探索しながら飛行するが、林内を迷路のように飛行し、最終的に袋小路のような箇所に着いた場合、戻ってくる時間がなくなり、最終的には不時着するようなことが起きると考えられる。

加藤委員：ササが非常に高い林分があり、このような林分では調査をすることが非常に大変。今後、境界明確化などの活用に向けて、林内を自動飛行するような仕組みがあれば、作業者の労力軽減に繋がると思う。また、そのような環境が整うことで、若い学生も就業しやすくなると思う。

瀧委員：林内 UAV による地形の計測精度はどの程度か。

事務局：かなり精密に取得できていると思う。今回断面図をいくつか載せているが、法面などの地形が精密に取得できている。例えばスライド 44 で林内を示しているが、法面のところを見ると植生があっても地形情報が把握できているのが分かる。

加藤委員：スライド 54 で計測効率をまとめているが、スライド 53 で紹介したヘクタール当たりの計測時間ベースにした方が良い。また、導入コストについては機材購入費としてまとめてもらいたい。

本日欠席した委員のヒアリングについて、村上先生と松英先生のコメントは非常に有益。今後、使用目的などを明確にし、今回の結果と実際の現場ニーズも踏まえて活用を検討していくことが重要。

林野庁：今回の事業では、補完データとしての UAV レーザがどれくらい精度なのか、林内 UAV の課題がどこにあるのか、また将来性があるのかを検討しておくことが重要であった。林内レーザ計測は、精度自体良いことは地上レーザの事例で明らかになっているため、飛行するということが自体が大きなテーマであった。委員のコメントのように、林内レーザは樹幹をスキャンしているため、胸高直径だけを使うのはもったいなく、全部使うべきだと感じた。将来的には胸高直径と上部直径から樹高を計算する方が、樹高を計測するよりも正確になる可能性がある。また、従来、2 変数材積式を利用し、歩留まりを考慮して、素材生産量を推定していたが、直接、樹幹から材長を設定し、末口二乗法で材積を計算することができる可能性もある。このような手法が ICT を進めていく中で将来性があると考えられるが、本事業により一定の成果と課題が得られたのではないかと考えている。

## ■事前ヒアリング

2月18日の検討委員会に欠席した委員については2月17日に事前ヒアリングを実施した。

村上委員ヒアリング内容（於：新潟大学、2月17日）

- リモートセンシング技術の導入にあたり業務実施者の作業範囲を想定しておくことが重要となる。計測から解析まで全て行う場合や委託する場合などを検討する。
- 上記の検討の後にコスト比較が可能となるが、現在林内 UAV は検討・研究段階であることからまずは実用性を評価することが優先となる。
- 補完技術は計測頻度の優位性を活かすべきである。検査業務などの省力化に役立つと考える。そのため UAV 空撮についての可能性も評価していくことが求められている。また、手軽に利用できるようにソフトによる半自動解析が重要となる。
- 精度検証については対現地比較が一般的であるが、現地調査が真値とは限らない。データの活用目的に応じて比較対象を考えていく必要がある。例えば、林業での利用であれば素材生産量との比較などが必要である。また、実用に耐えうる精度についても比較対象に合わせて新たに検討する必要がある。
- 広葉樹については解析が困難な場合が多いため、着葉期の樹冠による解析だけでなく、落葉期の空撮画像を用いて樹幹を特定する手法も考えられる。
- 広葉樹については UAV 空撮画像を用いることで解像度が向上するため、航空機の空中写真では区分が困難であった樹種でも新たに区分できる可能性がある。

松英委員ヒアリング内容（於：宇都宮大学於、2月17日）

- リモートセンシング技術の活用方法と利用目的を今後整理していく必要がある。技術が適用できる範囲から利用目的を検討する方法もあるが、利用目的から適用技術を検討する方法もある。
- 2変数材積式を利用しなくても地上レーザや林内 UAV レーザは樹幹形状から材積を把握できるようになる。これまでにない技術をこれまでの調査項目の代替として利用するだけでなく、新しい利用方法を検討する必要がある。例えば、広葉樹の材積の新しい計測方法なども考えられる。
- 素材生産量を計算する場合に材積式よりも樹幹形状の材積の方が正確な答えが得られる可能性がある（素材生産には梢端部分の情報は不要）。場合によっては従来用いられてきたパラメータ（樹高や DBH）を計測する必要がないことも想定した利用方法を検討することができる。
- センサの良い面を活かす利用方法を検討することが良い。樹幹形状や上層樹高が分かるという特徴を活かすことも重要である。
- 針広混交林や広葉樹の資源量の利用方法を明確にした上で今後の解析精度レベルの検討を進める必要がある。
- UAV 本体やセンサの小型化が進んでいる。将来を見据えたポテンシャルの検討も大切である。

- 林内の計測は適用林分が限られる可能性があるため、作業道からだけのデータ取得（計測）と解析結果を活用する方法について検討することも考えられる。
- できることだけでなく、できないことにも注目して今後の検討を行う必要がある。そのためにも利用目的を明確にする必要がある。
- コストは技術の使用目的が定まってこそ検討できる項目である。