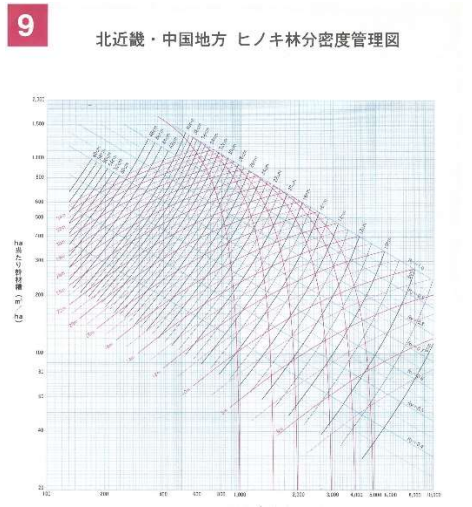
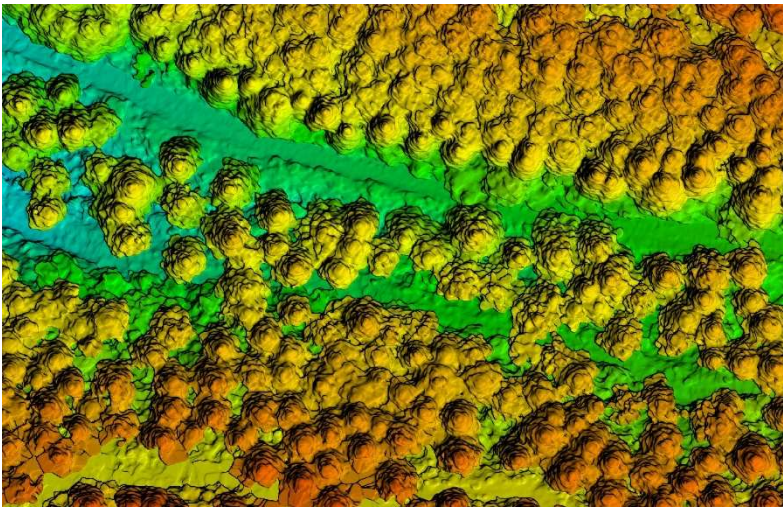
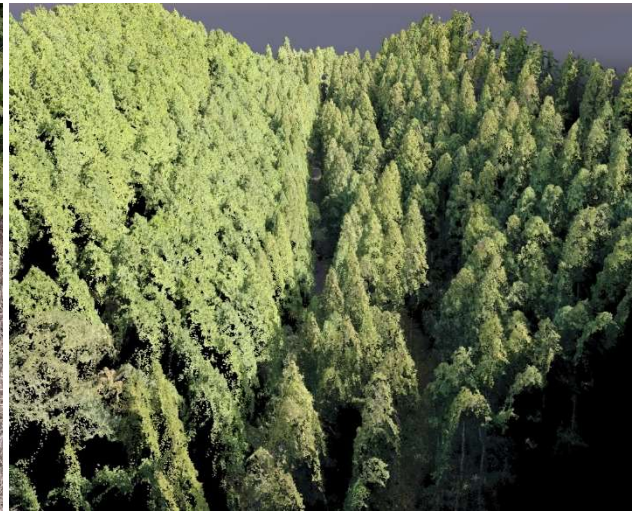


ドローン空撮による森林調査



2024年6月
岡山県農林水産総合センター
森林研究所 林業研究室

目次

I はじめに

- 1 持続的な森林経営のために1
- 2 森林情報取得の方法1
- 3 ドローンを利用した森林調査2

II 森林の空撮

- 1 飛行計画4
- 2 撮影条件の設定5
- 3 現地撮影6

III 空撮画像の処理

- 1 DSM(Digital Surface Model)の作成6
- 2 DCHM(Digital Canopy Height Model)の作成8
- 3 樹頂点抽出と樹高の判読10
- 4 林分材積の算出13
- 5 その他の解析14

IV 林分データの推定精度と適用条件

- 1 立木密度と材積推定の一例15
- 2 適用に当たっての留意事項15

参考文献

I はじめに

1 持続的な森林経営のために

森林の機能を高度に発揮させ、かつ持続的に利用していくためには、日本の森林の4割を占める人工林の適切な管理と計画的な利用が求められます。人工林の利用に当たっては、その資源の賦存量を把握し、種々の計画とそれに基づく施業に反映させることが不可欠です。また、林業の採算性を向上させるために、施業提案や設計に当たって、省力的でありながら、精度良く森林の現況を調査し、推定することも求められます。このような要求から、人工林資源量の調査や推定の方法としては、後述する様々な技術が開発されてきました。他方で、これらの技術によって得られる人工林データの予測値には、その方法ごとに異なる特性があります。それをよく理解した上で、用途や目的に応じて適切に使用する必要があります。

昨今は、林業の成長産業化に向けて様々な取り組みがなされていますが、とりわけ森林情報の分野ではドローン等を活用した森林データのデジタル化やICTスマート林業の普及が求められています。これに対応し、林業分野の民間事業体等においても、ドローンやICT技術を用いた装置の導入が進んできており、これらの有効な利用方法に関する技術確立が急務となっています。ドローンを利用した森林計測の技術は、昨今、急速に進化しており、測位精度を飛躍的に高めるRTK(Real Time Kinematic)測量やドローンに搭載できるレーザーモジュールなども比較的安価に入手できるようになってきました。一方で、森林の調査でこれらの装置を効果的に使いこなすためには、取得データの解析に一定の知識を必要とすることや、精度を高めるための現地調査とそのデータの統計的処理が求められる場合があるなど、必ずしも容易ではありません。

この冊子では、ドローンを使用した空撮画像と地表面のモデル(DEM)を用いて、林木の成立本数(立木密度)と林分材積を比較的簡易に予測する方法を紹介します。なお、この内容は、令和元年度から5年度まで実施した「高齢級人工林の資源量推定に関する研究」の一部として行った調査に基づいています。

2 森林情報取得の方法

人工林の資源量等の現況を知るためには、いくつかの方法が挙げられます。

最も簡易な方法としては、成長モデル等を使用した予測値があります。これは林分収穫予想表や森林簿等に掲載された数値として参照されているものです。ここで使用される数値は、実測した林分データに基づいて統計解析により調整された、林齢と平均胸高直径及び平均樹高の関係を表す成長曲線や成長モデルと呼ばれる関数に基づきます。これにより、平均胸高直径、平均樹高及び林分材積について、林齢(樹齢)ごとに代表的な値を知ることができます。樹木の成長は、地域ごとに様ではないため、一般的には調整された成長モデルを地位指数(立地条件の指数)等で細分化し、予測精度が高まるように工夫されています。未知の林分であっても、樹種や林齢が与えられれば、各林分の地位に応じた値を得ることができ、広域的な

管理計画等に利用されます。地位等級さえ決定していれば、現地に行くことなく、図上で予測が行える点で最も省力的な方法です。

より正確な林況を知りたい場合には、現地に赴いて個々の樹木の樹高や胸高直径を調査します。知りたい範囲の全ての樹木を面的に調査する方法を、毎木調査といいます。毎木調査は膨大な時間と労力を要しますが、稀有な現象を捉えやすいので学術調査等で行われる方法です。林業の施業提案や設計に際しては、対象となる林分の一部を切り取って調査し、その結果を林分の代表値として扱う「標準地調査」が行われることが一般的です。標準地は、その林分の中で代表となり得る最も標準的な区域に設ける必要があります。また、対象となる林分の現況にばらつきがある場合には、複数の標準地を設けて、調査結果を調整するなどの配慮が必要となります。標準地の面積が大きいほど、得られるデータが調査対象林分の現況に近づきやすくなりますが、その分手間がかかります。標準地の設定場所、箇所数、面積の決定には、一定の技術や知識を要します。

最近では、現地調査の労力を軽減させるツールとして、林内で使用できるレーザー計測装置が開発され、各所で導入が進んでいます。これらの装置を利用することで、比較的広い面積の毎木調査を簡単に行うことができるようになりました。それぞれの装置には、スキャニングモジュールや専用の解析ソフトに特性があり、各測定値や解析結果の各項目の精度に長短があるため、運用に当たっては、装置の特性をよく理解して使用することが大切です。

もう一つの方法が、本冊子で紹介するような、航空機やドローンにより上空から森林を調査するものです。こういった方法は、リモートセンシングと呼ばれ、かなり以前から開発が試みられてきた分野です。初期の頃は、衛星画像や航空写真から、立体視して地形の概略を捉えたり、色相解析によって樹種(林種)を推測したりといった技術開発が盛んでした。最近では、センサーの種類や、得られた情報の電磁的処理の能力と統計的手法の技術の向上により、森林のリモートセンシングでも、本数や蓄積などの資源量情報を解析できるようになりつつあります。

3 ドローンを利用した森林調査

様々な用途のドローンが普及し、森林調査の分野でもドローンを導入する動きが広がっています(図 1)。大面積で複雑な外観を有する森林・林業分野でドローンを使用することは、他分野にも増してそのメリットは大きいと言えます。これまで簡単に到達できなかった場所や普段は見ることのなかった上空からの様子を、比較的簡単に観察でき、また同時に映像として記録・保存することもできるようになったからです。

森林における撮影用ドローンの最も単純な使用方法是、病虫被害木の探索など、映像を利用したリアルタイムの観察です。病虫害の発生状況や林地における土砂災害等の面的な広がりや、踏査のみによって把握する従来の方法は、膨大な労力と時間を要するものでしたが、ドローンを活用すれば、ある程度の面積の概況を短時間で知ることができます。調査時に撮影した画像は、その時点における状況と位置を記録し、保存しておくことができます。これらの記



図1 森林調査で利用されるドローンの一例

カメラのみを搭載した撮影用ドローン（写真左と中）や、センサーを任意に交換できる調査用ドローン（写真右）がある。この他に、農薬散布や資材運搬に使用できる大型の産業用ドローンも林業分野で活躍し始めている。

調査目的や対象地の条件に応じて使い分けている。本冊子に紹介する方法には、高画質で撮影ができれば、いずれのドローンでも対応可。

録は、森林の経時変化の比較にも活用できます。こういった用途は、特に事後の画像処理を要するものではなく、カメラ付きドローンの機体だけ購入すれば実施可能になります。

次に、複数の撮影画像を結合処理してGIS（地理情報システム）で活用できる「オルソ画像」にすることで、GIS上で距離や面積を簡易に計測できるほか、境界管理などに役立てることも可能です。オルソ画像の作成に使用する画像は、その作成に当たって求められるいくつかの条件を満たすように意図して撮影する必要があります。詳しくは、国土交通省のホームページから、「公共測量の作業規程の準則」を参照してください。オルソ化の処理は、フリーソフトで可能なものもありますが、専用のSfM（Structure from Motion）ソフトを購入するか、オルソ化のクラウドサービスを利用するのが、コストはかかりますが手軽で一般的です。

ドローンの機種によっては、備え付けのカメラ以外の各種センサーを取り換えて使用できるものがあります。多波長センサーカメラは、異なる波長の光を別々に感應するセンサーで、農業分野では、例えば稲の生育状態を知る方法として実用化されています。サーマルセンサーは、対象物の温度を可視化して記録するセンサーで、コンクリート構造物の点検や野生動物の観察などに使用されます。また、ドローンに搭載できる小型のレーザーモジュールも、ひと昔前と比べるとかなり安価になり、森林調査に適用できるレベルになってきました。ただし、レーザー計測で得られたデータから、林木の情報を知るには専用のソフトウェアを使用するか、現地調査等により自ら相関解析を行う必要があり、その点は航空機レーザー計測を行った後の解析処理と技術的には変わりません。従って、必ずしも簡単ではないと言えます。当森林研究所では、これらの各種センサーや解析用ソフトウェアについても、森林分野での応用を目指した検討を行っています。

このように、森林・林業の分野でもドローンの用途の幅は広がりつつあり、これまでできなかった様々なことが可能となり始めています。しかし、多機能で高性能な機体やセンサーが手に入るからといっても、高度な森林解析等を行うのは、やはりまだややハードルが高いと言わざるを得ません。

そこで、森林調査でドローンを最大限活用し、省力的に森林調査方法を行う選択肢のひとつとして本冊子のような方法を検討しました。この冊子で紹介する方法は、空撮用ドローンとSfM処理をする方法(ソフトウェアかアウトソーシング)があれば、あとはフリーソフトのQGIS上で調査(立木密度と林分材積の推定)を完了させることができます。

II 森林の空撮

この冊子で紹介する方法の最も特筆すべき点は、低高度を飛行するドローンによる空撮画像であれば、かなり精緻な林冠高モデルが作成できるという点にあります。そのためには、ブレや滲みの少ないシャープで奥行きのある撮影画像の取得が求められます。以下の項では、そのための飛行と撮影に関する留意点を紹介します。なお、これらの留意点は、精密な林冠高モデルを作るのに有効だけでなく、歪みやノイズの少ないオルソ画像を作る上でも大切なことが多く含まれていますので、普段からドローン空撮の際には心がけておくことをお勧めします。

実際のドローンの飛行は、法令や自主マニュアル等に則って安全に配慮して行わなければならないことは言うまでもありません。特に以下に記述すること以外の点についても、通常のドローン運用と同様に、適切な運用を心がけてください。

1 飛行計画

飛行の計画に当たっては、調査したい林分のアクセス条件、地形、面積等について現地下見等により事前に把握しておく必要があります。特に、撮影時のドローンの離発着の地点については、十分な広さがあるか、近くに配慮が必要な施設等がないか、上空が十分に開けているか、調査区域全体の上空が概ね見通せるか、飛行空域との間に高圧送電線がないか、などの事前確認が調査の安全性と効率を大きく左右します。

本冊子の方法において、もっとも重要なポイントのひとつが、調査対象地域の近くで、地表面が撮影できる場所を事前に探しておくことです。人工衛星の配置等によりますが、GPS測位で最も誤差が生じやすいのが、高さです。この方法では、撮影画像から作成したDSMと、既存のDEMの高さの差を、双方が同じ場所を示していることが確実な地表面の位置で合わせて、GIS上で補正します。従って、調査(撮影)の際に、調査プロジェクトの中で必ず地表面が見える箇所を同時に撮影しておく必要があります。このとき、撮影する地表面は、DEMを作成した時にも同じ高さで存在していた場所である必要があるため、道路や古い作業道などで地形の変化が少ない場所を選定することが重要です。なお、この高さの補正は、樹高推定の誤差を小さくするためのものなので、作業道の表面の攪乱などの小さな変化にまで極端に神経質になる必要はありません。より正確に位置を合わせるためには、地表が見える撮影箇所を離れた場所に2箇所以上設けることや、建築物のように形の明確な対象物が写るように工夫することも有効です。

2 撮影条件の設定

ドローンに搭載されたカメラは、ある程度画素数が大きいものが一般的で、あまり設定に気を遣わずに撮影しても高画質の写真が撮影できます。しかし、SfM処理やその後のDSMの生成に当たっては、少しでもノイズやブレの少ない明瞭な写真を撮影することが、精度の向上にとっては大切であると言えます。

カメラの設定は、シャッタースピード(露光時間)、絞り値(F値)、センサー感度(ISO)を調整して行います。シャッタースピードが速ければ、ブレの少ないシャープな写真が撮影できます。同じ条件でシャッタースピードを速くするためには、絞りを開く(F値を下げる)か、センサー感度を上げる(ISOの設定値を上げる)必要があります(図2)。センサー感度は、高くしすぎると写真にノイズが現れやすいので、できれば、ISO:200 以下で撮影するのが望ましいところです。絞りを開くと、被写界深度(ピントが合う奥行き)が浅くなりますが、上空数十mから撮影するドローン空撮では、あまり気にする必要はありません。上空を飛行しながら撮影するドローンカメラでは、写真の画質はシャッタースピードに最も影響を受けやすいので、まずシャッタースピードを 1/1,000 秒程度に設定します。その状態で、現地で本番の撮影を行う前に、テスト飛行を行い、数枚撮影してみます。その時、送信機のモニターで全体がやや暗く見える程度が最適です。作業道など色合いの明るい箇所では、露光が多すぎると起伏に由来する陰影などの特徴が失われがちなので注意が必要です。植生等の部分がモニターで見てやや暗く、



図2 撮影条件の違いによって生じる画質の差の一例

シャッタースピードが遅すぎる場合や ISO を高く設定しすぎると、画質にノイズやボケ味が生じやすい。同程度の露光量でも、拡大してみると、感度を上げすぎた左の写真 (ISO1600) は、右 (ISO100) と比べて明らかに画質が粗いことがわかる。多くのドローンは、カメラの撮影条件はオートモードがデフォルトになっているが、マニュアルに切り替えて適正な条件で撮影するよう心がける。マニュアルモードでも、シャッタースピードを上げすぎると、露光が足りない場合に自動的にセンサー感度を上げて撮影することがあるので、注意が必要。ここに挙げたような撮影画像の差は、調査中にモニターで確認することができず、事務所に戻ってから気づくことになるので、撮影条件の数値をこまめにチェックしながら、調査を進めるのが望ましい。

例えばフォトレタッチソフトの明るさの調整で対象物が見えるようにできる程度であれば、画像処理には問題ありません。

天候の悪い日や谷あいの地形の撮影で暗すぎる場合は、シャッタースピードを長めに設定する必要が生じますが、その時には、ドローンの飛行速度を下げるか全ての撮影地点でホバリング状態で撮影するモードに設定して飛行するのが望ましいでしょう。

3 現地撮影

ドローンの飛行は風のない薄曇りの日が最も適しています。樹木の枝葉が遠目に見てわかるほど風で揺れているような時は、安全な飛行はもちろん、撮影にも不向きです。なお、国土交通省が示した「無人航空機の飛行マニュアル」では、「風速 5m/s以上の状態では飛行させない」とされています。また、日射が強く、明暗のコントラストが強すぎる場合も避けたほうが無難です。やむを得ず、日射の強い日に撮影する場合には、画像に写る影が極力少なくなるよう、正午に近い時間帯に撮影するといった配慮が必要です。

飛行高度は、カメラの性能にもよりますが、地上解像度(GSD; Ground Sampling Distance)が概ね3cm/ピクセル以下となるような高度で撮影すれば、ここで紹介する方法には十分な画質であると言えます。飛行高度が低すぎると、地上解像度は上がりますが、同じ面積に対する撮影枚数が増加し、調査に時間がかかることになります。また、画面の端の方に映った対象物の視野角が大きくなりすぎ、その後の処理で他の画像との共通ポイントと認識されにくくなる点が増えてしまい、結果的に画像の結合処理が適切にできない場合があります。

高度を一定にした自動飛行ルートを設定して調査を行う場合、対象林分の比高が高い場所では、相対的に対象とカメラとの距離が近くなり、ラップ率が不足する場合があります。こうした影響は、飛行高度とラップ率をある程度高めに設定して調査を行うことである程度軽減できます。もちろん、対地高度を一定にして飛行させることや、傾斜の急な林分では飛行プロジェクトを複数回に分割して行うなどの配慮を行うのが、手間はかかりますがかえって効率的です。

Ⅲ 空撮画像の処理

1 DSM(Digital Surface Model)の作成

DSM は、ドローンから撮影した画像の表面(見えている部分)を 3 次元的に表現したモデルです。オルソ画像を作るためのソフトウェアでは、SfM(Structure from Motion)という処理によって、同じ対象物を写した複数の画像のそれぞれの共通点の写り方からカメラと対象物の相対位置を解析し、写っている対象を立体として再構築します。つまり、森林の部分では見えている樹冠表面、作業道等が見えていればその地表面、建物は見えている表面などが DSM として表現されます。なお、この冊子の作成に当たって使用したのは「Pix4D mapper」というソフトウェアです。撮影してきた画像をソフトウェアに取り込んで、SfM により、一旦立体

の点群が生成され、それを真上から2次元の平面に転写することで、視角による歪みのない投影図ができます。オルソモザイク画像は、視角差による影響が無いことで、上空からみた平面画像のように見えながら、その平面上で2点間の距離や任意の区画の面積を正確に計測することができるのです。

さて、このようにオルソ画像を作る際には、必ず立体の点群モデルができることから、SfMで求められたそれぞれの点には、高さ(標高)の情報が含まれます。これを GIS で扱えるオルソ画像のような2次元データに投影した時にも、それぞれの地点に標高の値を持たせることができるということです。このようにして作られたデータを DSM といいます。

通常、航空機 LiDAR で取得する点密度は、1平方メートル当たり4点程度を狙って調査を設計します。航空機よりも低高度で飛行するドローンの場合、撮影画像が明瞭に取得できているほど、林冠表面の凹凸の再現性が高くなると考えられます。また、航空機による調査のよ

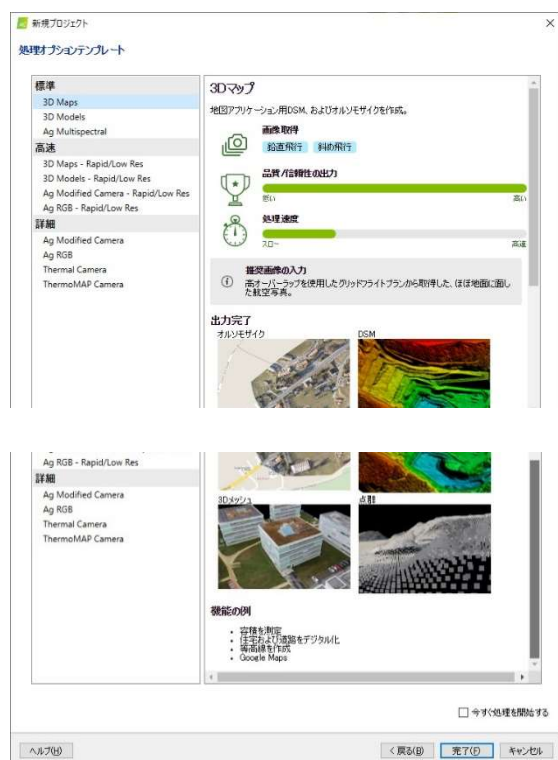


図3 画像処理アプリ (Pix4D) のプロジェクト設定画面

SfM のソフトウェアには、様々な処理を行うプロジェクトが用意されている。ドローン画像を使った森林調査の場合、オルソモザイクの作成が最も汎用性の高い処理となるので、この場合「3D Maps」を選択する。その後の設定で、DSMの生成や簡易な DTM の作成のオプションが選択できるようになっている。撮影に使用するドローンのカメラの特性や撮影条件等により、細かな処理条件の設定が行えるが、深い知識がない場合でもデフォルトの設定で概ね良好な処理画像を得ることができる。

比較的大きな面積の調査を行った場合、高速処理を使用すれば、本処理前に撮影画像の不備などを洗い出すこともできる。このソフトウェアは、この他に多波長カメラやサーマルカメラの反射強度の解析などを行えるなど、ドローン搭載センサーを使用した様々な調査データの処理に活用できる。

うに広大な面積を一度に調査することはできないため、解析の際に PC の負荷や処理にかかる所要時間を考えてデータを極端に間引くことなく、できるだけ詳細なモデルを作ることに重点を置いた方が良いでしょう。

Pix4D で DSM を生成するには、プロジェクト作成時の設定画面で、「3D Maps」を選択します(図 3)。この処理では、GIS 等の地図アプリで使用できるオルソモザイク画像のほか、他の点群処理ソフトで使用できる点群データなどを生成します。処理を開始する前に、処理オプション設定画面で、作成するデータの解像度を設定することができます。デフォルトでは、撮影画像の GSD(Ground Sample Distance, 地上解像度)のサイズで生成するようになっ



図4 画像処理アプリ（Pix4D）の処理オプション設定画面

処理オプション設定画面では、SfM 処理の細かな条件設定から、DSM やオルソモザイク、LAS データの出力などの設定が行える（上画像）。

3 番目の処理工程の「DSM、オルソモザイクおよび指数」で、DSM 等の解像度を設定する（下画像）。デフォルトでは、「自動（1×GSD）」にチェックが入っているが、この倍率を上げるか、「カスタム」にチェックを入れて任意の数値を入力することで、概ね 20～30cm／ピクセルに指定する。

「ラスタ DSM」と「オルソモザイク」欄の「Geo TIFF」及び「タイルを融合」にそれぞれチェックを入れると、GIS ソフトで表示できる Geo TIFF 画像を生成する。

処理が完了したら、3 次元点群やオルソモザイク画像を表示し、目的の区域の生成状況を確認する。生成された Geo TIFF 画像の周縁部については、解析に使用する際には必ず除去しなければならない。

ています(図 4)。GSD は撮影画像の解像度なので、これより細かい DSM の生成は理論上できません。即ち、DSM を GSD の解像度で作ると、最も詳細な DSM が生成できますが、一方で撮影画像のブレや SfM 処理の際のノイズも一緒に DSM に現れ、正確な樹頂点抽出の妨げになってしまいます。本書の方法では、樹頂点をできるだけ正確に抽出することと、その樹頂点を限りなく梢端に近い点で再現すること(樹高の推定精度を担保するため)を目的としているので、細かな樹冠の形状まで再現する必要はありません。ここでは、20～30cm/ピクセルの範囲で、解像度を手動で設定します。

2 DCHM(Digital Canopy Height Model)の作成

DSM が生成できたら、この後の処理は全て GIS ソフトウェア上で行います。本書では、フリーソフトの QGIS を使用します。QGIS のメニューバーの「レイヤ」から「レイヤを追加」、「ラスタレイヤを追加」と選択し、データソースマネージャを開きます。ダイアログの中の「ソース」の欄

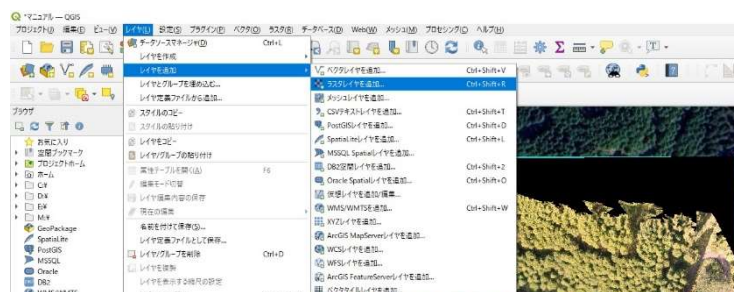


図5 QGIS ソフトに DSM（ラスタファイル）を読み込む

PIX4D で作成した DSM ファイルや既存の DEM ファイルを QGIS ソフトに読み込む際には、座表参照系 (CRS) がすべて一致するように注意する。ポイントやポリゴンの新規レイヤを作る時も同様。

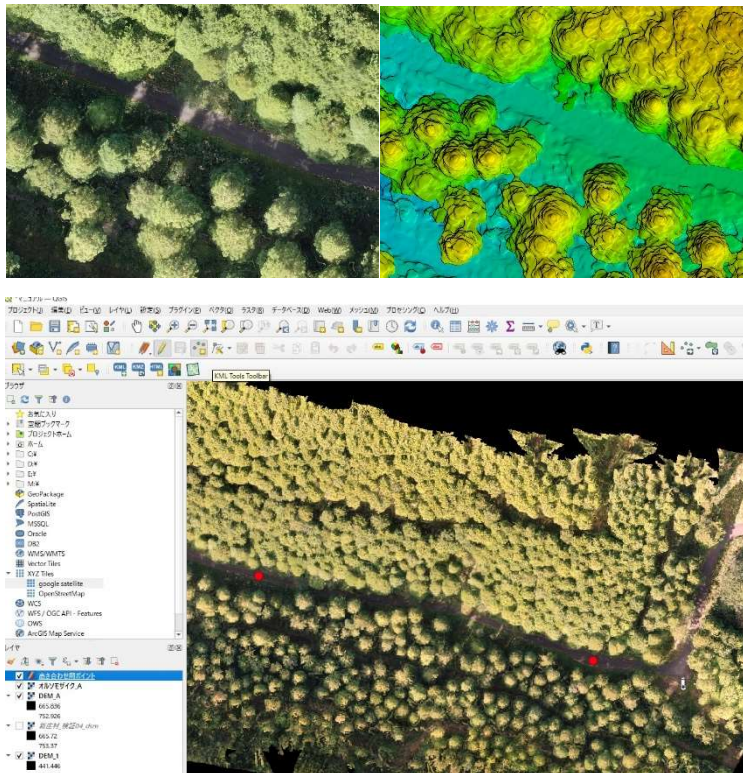


図6 DSM と DEM の高さを合わせる(1)

DSM と DEM のデータが持つ高さは、必ずしも一致しないので、高さの差を調べて、必要に応じて補正する。

まず、オルソモザイク(上左図)と DSM(上右図)を比較しながら、地表面(車道や作業道など)とわかる箇所に、ポイントを落とした新規シェープファイルを作成する(下図)。

ポイントは、十分離れた位置に2点以上作るのが望ましい。地表面が見えていても、崩壊地やごく最近作設されたばかりの作業道など、参照する DEM の作成時に現状とほぼ同じであったことが確かでない箇所は使用できない。一方で、林業機械等が走行した軌程度程度の表面的な地形変化であれば、数点の平均をとることや樹高の推定精度が数 cm ずれる程度の影響にとどまるので、極端に配慮する必要はない。

の右のボタンから、DSM のファイルを読み出します(図 5)。

次に、同様の手順で、地表高のデータを読み込みます。地表高データは、DEM(Digital Elevation Model)や DTM(Digital Terrain Model)と呼ばれるデータで、いずれも航空レーザ計測の成果等から地上植生や人工物を除去して、地形だけのモデルにしたものです。前項で作った DSM から DEM の高さを引くと、地表面に対する DSM の絶対的な高さを持つモデルができます。このモデルを DCHM(Digital Canopy Height Model, 林冠高モデル)と呼びます。

DCHMを作る前に、DSMとDEMの高さの差を補正する必要があります。DSMとDEMを読み込んだGISのプロジェクトに、同じ区域のオルソモザイク画像を表示します。新規シェープファイルレイヤを作成し、高さを合わせるために撮影時に決めていた作業道等の地上部に該当する位置に任意のポイントを落とします(図 6)。プロセッシングツールボックスを開き、ラスタ解析の「ベクタレイヤにラスタ値を付加」を選んで、DSMとDEMのそれぞれのラスタ値(その地点における高さ)をサンプリングします。前述のとおり、DSMはドローン空撮時のGPS測位データ等に基づくモデルなので、必ずしもDEMと高さが合うとは限りません。しかし、地表が見えている箇所の高さは、現実では同じと考えることができるので、この両者のサンプリング値の差に基づいてDSMの高さを補正します。メニューバーの「ラスタ」から「ラスタ計算機」を選択し、DSM の値に、先ほど調べた値を加減して、実行します(図 7)。

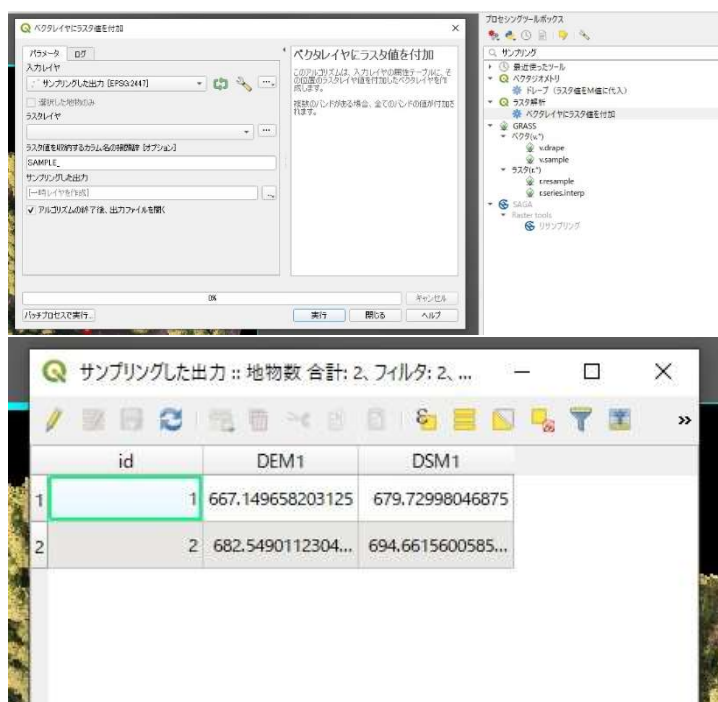


図 7 DSM と DEM の高さを合わせる(2)

ベクタレイヤのポイントの属性に、ラスタレイヤの数値をサンプリングする(上図)。この場合、道路上に落としたポイントの位置の、DEM と DSM の値をそれぞれ調べる。

右図の例の場合、サンプリングの結果、DSM と DEM の値の差は、それぞれ 12m 程度となった。この差の平均値の分だけ、DSM を下げることで DSM と DEM の高さの誤差が改善できる。

DSM と DEM の差が、位置によって大きくばらつく場合は、SfM による DSM の生成が正確に行われていない可能性が高い。その場合は、撮影からやり直すのが妥当である。

QGIS で DCHM を作成する場合には、まず、解析対象としたいエリアのポリゴンで、DSM と DEM の双方を切り抜くことから始めます。空撮画像から作成した DSM は、周縁部の精度が劣るので、全部を解析に使うことはできません。撮影の段階から、解析に必要なエリアよりも十分広く撮影し、解析したい部分の全てが精度よく DSM になるように留意する必要があります。また、本冊子の方法を、標準地調査の代わりとして考えるなら、樹頂点抽出の誤差が出やすい林縁部や種林木以外の混交樹木が入らない区域を選ぶことで、後の計算の精度が高まることが期待できます。DSM と DEM の切り抜きに使うポリゴンは、そういった点に留意して準備してください。

メニューバーの「ラスタ」から「抽出」、「マスキレイヤによる切り抜き」を選択し、ダイアログの中の「入力レイヤ」に DSM 及び DEM のレイヤを、「マスキレイヤ」には、切り抜きたいエリアが単体に入ったポリゴンのベクタレイヤを選択します。これを実行すれば、調べたい区域に切り抜かれた DSM と DEM がそれぞれできます。前述の DSM の高さ補正と、DSM 及び DEM の切り抜き操作は、順序が前後しても差し支えありません。

次に、メニューバーの「ラスタ」から「ラスタ計算機」を選択し、DSM から DEM を減じたラスタレイヤを新たに作ります。これが DCHM です。DCHM を作る際には、出来上がったラスタレイヤの解像度が DSM と同じになるように設定します。

3 樹頂点抽出と樹高の判読

樹頂点抽出は、QGIS のプラグイン「Tree Density Calculator」を使用して行います(図 8)。このツールは、ラスタレイヤの任意の範囲の中で、最も輝度が高いピクセル(局所的最大値)にポイントが落とされた新たなベクタレイヤを作ります。DCHM のラスタレイヤは、デフォ

ルトでは高いところが明るく、低いところは暗く表示されるので、このツールを使えば任意の範囲の中で最も高い点を探して、ポイントデータを作成することができるということです。この時、DCHM の解像度を過剰に高く設定していると、DSM 生成の際に生じたノイズや細かすぎる樹冠形状によって、樹頂点の錯誤抽出が起こりやすくなります。DCHM の解像度は、ごく近い位置で隣り合う林木の樹冠の分離が辛うじてできる、といったレベルに落とすのが効果的です。しかし、樹冠が混み合っているような立木密度が高い林分では、この分離がうまくいかないことが多々あります。この際、DCHM の解像度を上げると、混み合った箇所の隣接木の分離は可能になる場合がありますが、前述の理由で、それ以上に錯誤抽出が増えてしまうため、お勧めできません。従って、この冊子で紹介した方法による立木密度の推定は、後述するある一定レベルの密度以下の林分に限って適用できるものとするのが妥当であると思われます。

樹頂点抽出を行う際の、「Tree Density Calculator」の使用に当たっては、このツールを使って局所的最大値を探索する範囲の設定が最も重要です(図 9)。最適値は、調べたい林分の密度や立木配置の集中度にもよって異なるため、抽出結果を確認して最も抽出精度が高くなるパラメータを探すのが合理的であると言えます。まずは、現地の状況を見て、おおよそ想定できる立木密度の逆数から、立木 1 本当たりの平均占有面積より少し大きい解析範囲とし、解析範囲の中に必ず 1 点以上の樹頂点が含まれるように調整します。例えば、ヘクタール当たり 1,000 本程度の密度が想定される林分の場合、林木 1 本当たりの平均占有面積である 10 平方メートルより十分大きめの範囲を設定します。この範囲の局所的最大値を探すことで、概ね全ての樹頂点が抽出されます。しかし、解析範囲の中に樹頂点がない場合にも、最も高い

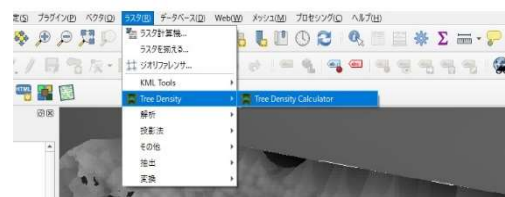


図 8 Tree Density Calculator を開く
このプラグインは、事前にダウンロードして準備しておく。

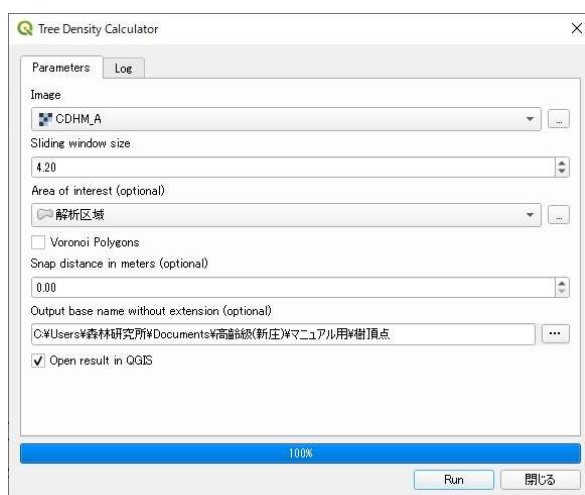


図 9 Tree Density Calculator の条件設定

「Image」には、前項までに作成した DCHM を選択する。「Sliding window size」には、調査林分の立木密度に応じて 2.0～5.0 程度の数値を入れ、最も抽出結果の良い設定値を探すのが良い。数値が大きいほど、やや樹高の低い林木の抽出漏れが多くなるが、数値を下げる（抽出範囲を狭める）と真の樹頂点以外の位置に落ちるポイントが多くなる傾向がある。本数が比較的正確でも、樹頂点の位置が異なると、樹高の推定精度が下がるため、いくらかは手動補正を行うという前提で、概ね正確な位置に樹頂点が付され、少し抽出漏れが残る程度に設定すると後の処理が容易になる。主伐期前後の立木密度の比較的林相が一様な林分であれば、このプラグインによる抽出のみでも、かなりの高精度で抽出ができる。

地点に樹頂点を落としてしまうので、このままでは抽出結果はやや過大になりやすくなります。一方で、必ず複数の樹頂点が含まれるほど解析範囲を大きくすると、周囲の林木よりも低い樹木の樹頂点はどの範囲からも抽出されないで、逆に過小になりやすいと言えます。このパラメータをどの程度に設定すべきかは、林分の疎密の偏りに依存します。ここでは、先ほど計算した林木 1 本当たりの平均占有面積に、20～50%程度を加えて最も結果のよさそうな値を探すことをお勧めします。

樹頂点抽出ができれば、抽出された樹頂点とその範囲の立木本数ということになります。面積で割り戻せば立木密度が算出されます。「Tree Density Calculator」の抽出結果だけで解析を終えても構いませんが、ここまで述べて

きたように、林分の立木の疎密差や配置によっては、抽出漏れや錯誤が全く生じないということは滅多にありません(図 10)。抽出された結果のベクタレイヤを、オルソモザイク画像や地形表現図と重ねて、手動で補正することで、より精度を高めることができます。広域の航空機レーザー計測を行う場合でも、本来はこれらの処理を行うことが可能ですが、一般的には、広大なエリアの錯誤抽出について、時間をかけて全て補正することは、現実的ではないので、全ての錯誤抽出や抽出漏れを補正することはほとんどありません。しかし、ドローンによる空撮ができる程度の限られた範囲の解析であれば、できるだけ手動で補正を行うのは効果的であると言えるでしょう。ただし、林内に混交した他樹種(広葉樹やマツ)に付された樹頂点の補正には注意が必要です。これらの樹木は、主林木ではないため、本数をデータ化するためには削除するのが本来は適切です。しかし、解析エリアをそのままにして頂点だけを削除すると、本数は正確なものになりますが、密度に誤差が生じてしまいます。さらに、そのまま解析を進めた場合、ヘクタール当たりの材積や計算で求められる平均胸高直径にも、誤差が生じることは避けられません。最も正確に解析を進めようとするならば、例えば広葉樹の樹冠に付された樹頂点を削除する処理と同時に、当該個体の樹冠投影面を解析エリアから控除する必要があります。本冊子に示す方法を、標準地調査の代わりとして活用するのであれば、他種の混交を含まないエリアを解析エリア(標準地)として設定するのが最も現実的です。



図 10 樹頂点抽出の結果

写真の中央にある車道を挟んで、上側は急傾斜地で比較的高いヒノキ林、下側は谷に位置するスギ林である。この例の設定では、スギの抽出結果は、やや抽出漏れがあるものの、位置については概ね実際の樹頂点に合致している。一方、ヒノキ林では、相対的に抽出漏れが多くなっている。このように、地形や密度によって抽出結果が大きく異なるので、解析の条件を変えて最適な設定を探る必要がある。樹頂点の位置が正しければ、樹高の推定精度はかなり高いと言える。

DCHM と樹頂点抽出ができれば、QGIS のプロセッシングツールボックスを開き、ラスタ解

	id	RasterVal	Height1
61	1	22	22.95092773437...
62	1	22	22.00976562500...
63	1	22	22.31085205078...
64	1	23	23.22662353515...
65	1	23	23.22662353515...
66	1	23	23.87377929687...
67	1	23	23.53863525390...
68	1	23	23.27032470703...
69	1	23	23.47875976562...
70	1	23	23.47875976562...
71	1	24	24.53417968750...
72	1	25	25.68566894531...
73	1	25	25.68566894531...
74	1	25	25.98913574218...
75	1	25	25.98913574218...
76	1	25	25.91217041015...

図 11 樹頂点として抽出されたベクタレイヤに樹高を付与する

「Tree Density calculator」で抽出された樹頂点には、左図の「RasterVal」のように、自動的に属性に樹高が付与されている。詳細な値をサンプリングするには、「ラスタ解析」の「ベクタレイヤにラスタ値を付加」を実行して、DCHM の値を各点に付与することもできる（左図の「Height1」欄）。

やや多めに樹頂点を抽出するような設定で解析した後、樹高が不自然に高すぎる点（DSM を作った際のノイズであることが多い）や、逆に低すぎる点（ギャップ内や作業道、林縁部に誤って付された樹頂点であることが多い）を、この属性を使って機械的に間引くことで、手動補正の手間がやや軽減できる。

このデータは、GIS 上で林分ごとの平均樹高や本数を集計できるとともに、エクセルなどの別のソフトに移して解析を行うこともできる。

析の「ベクタレイヤにラスタ値を付加」を選んで、樹頂点として抽出されたベクタレイヤ（ポイント）に樹高の値を付与します（図 11）。これで調べたいエリアの、樹木の位置、本数、樹高が解析できました。それぞれの立木の樹高を知りたいければ、地物選択ツールで任意のポイントの属性を参照します。平均樹高や密度を知りたいければ、樹頂点のベクタレイヤに付属しているデータベースファイルを用いて、それをエクセル等の表計算ソフトで集計することができます。

4 林分材積の算出

前項までの処理で、解析範囲の樹高と密度を知ることができました。ここからは、従来から林業の現場で活用されている『人工林林分密度管理図』を使用して解析を進めます。

人工林林分密度管理図は、林野庁の監修のもと、森林技術協会が刊行している人工林施業の支援ツールで、樹種や地域別に林分の密度変化やそれぞれの時点における平均樹高や平均胸高直径、林分密度などの相互関連を体系的に参照できる資料です。この林分密度管理図の裏には、密度管理図作成に当たって調整されたモデル式が紹介されており、密度管理図本体の情報はこれらの式に基づいて表現されています。この冊子では、中国・北近畿地方のスギとヒノキの密度管理図に使用された以下の数式を紹介します。

$$\text{スギ: } V = (0.061977H^{-1.351766} + 4725.2H^{-2.823636}/D)^{-1}$$

$$\text{ヒノキ: } V = (0.0390819H^{-1.147348} + 8524.5H^{-3.102942}/D)^{-1}$$

但し

$$V: \text{林分材積}(\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1})$$

H: 上層樹高(m)

D: 立木密度(本・ha⁻¹)

他の地域の数式であっても理論的には全く同じなので、この方法を同様に使用することができますが、前項までに述べた樹頂点抽出と、それに基づく樹高の把握は、スギやヒノキのように円錐状の樹冠を有し、樹頂点が根元位置のほぼ直上の1点に絞られる樹種に限られます。

ヘクタール当たり材積を計算するために必要なのは、立木密度と上層樹高です。上層樹高は、「被圧木と枯死木を除いた林木の平均樹高」と書かれていますので、必ずしもすべての林冠木の樹頂点や樹高が正確に捉えられていなくても大きな誤差は生じません。立木密度については、前述のとおり、立木として本数にカウントされた個体の樹冠を過不足なく含む面積で割り戻した数値を使用する必要があります。

5 その他の解析

前項までに本書で紹介した方法は、林分単位の概要を現実に近い形で推定する方法ですが、立木の在庫管理を行おうとする場合には、単木毎の情報をある程度推定したいという要求もよく耳にします。前述のとおり、樹高に関しては、樹頂点の位置が正確であれば、比較的正確な単木の情報としてそのまま扱えます。

「人工林林分密度管理図」に記載された関数を使えば、上層樹高と立木密度を使用して算出した林分材積から、さらに発展して計算を進めることで、平均胸高直径を求めることができます。GIS を利用すれば、算出された平均胸高直径から、単木毎の胸高直径を推定することも可能です。市販の森林解析アプリでも、多くの場合、樹高や立木の配置から単木毎の胸高直径を機械的に算出しているので、それに近い結果を自分で導くことができるということです。本章の最後にその方法をごく簡単に紹介します。なお、この平均胸高直径の計算結果は、モデルを使った計算を重ねるので、あくまでも代表的な林分の概況を表したものであり、実際に計測したものと比べると、全ての林分で高い精度を期待することは必ずしもできません。

まず、前項までに作成した樹頂点のデータから、GIS のツールで「ポロノイ分割」という処理を行います。すると、各樹頂点を取り囲む多角形のポリゴンが生成されます。このそれぞれの多角形の面積比は、各林木(樹頂点)の占有し得る最大の樹冠面積の比に近いと考えられます。この面積比とそのばらつき(標準偏差)を、そのまま使用して、平均胸高直径を単木毎に割り当てていく方法です。面積比のばらつきに対して、胸高直径のばらつきをどの程度の大きさに設定するかについて、現地抽出調査の結果を使用することでより精度が高まることが期待できます。スギとヒノキの胸高直径は、樹高と樹冠投影面積に対して相関が高いと言われており、GIS を使用して極めて簡単に推定する方法としては、もっとも効果的であると考えられます。この方法を使えば、市販のソフトウェアで機械的に算出された胸高直径に比しても、遜色ない単木情報を作ることが可能です。ただし、この方法を使用した単木毎の胸高直径の算出結果については、この研究の中で精度の検証を行っていないため、方法の概略を記述するに

とどめます。詳しい解析手順については、当森林研究所林業研究室にお問い合わせください。

IV 林分データの推定精度と適用条件

1 立木密度と材積推定の一例

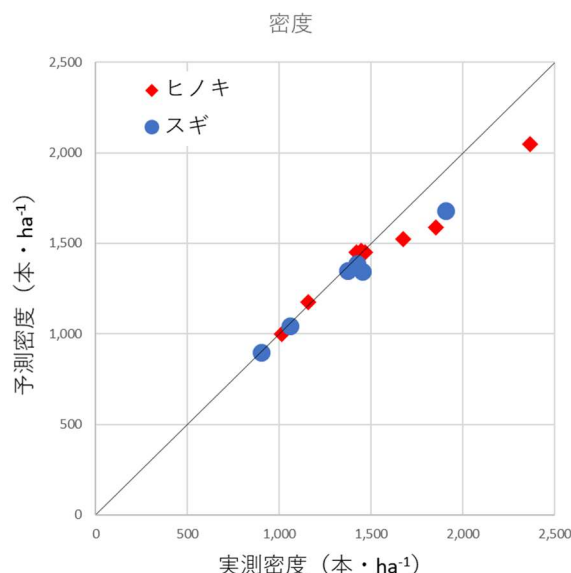
本研究では、本書に紹介した手法による立木密度と林分材積の推定結果を、実際の林分において、地上レーザー計測装置で実施した毎木調査の結果と比較して、検証を行いました。

その結果、立木密度については、条件によっては非常に高い精度で推定できることが分かりました(図 12)。ただし、この結果は、林相が一様で、林縁部や作業道・溪流を含まず、他樹種の混交のない、比較的地形変化の緩やかな林分に限定して調査し、解析を行ったものです。実際の林分に当てはめて適用する場合には、前章で紹介した樹頂点の手動補正や解析対象面積の調整などの工夫が必要です。また、ドローン画像を活用したこの解析では、立木密度と樹高について、一定程度高い精度で取得できることがお分か

りいただけたと思いますが、その結果から導くその後の解析については、既存の関数等を流用するものであり、その精度は、それぞれの関数の性能に依存します。そのような解析の手順については、実際にはかなり多くの選択肢があり、どの手順を利用するかについては、管理したい森林の構成や管理目的によって異なると考えられます。例えば、単木情報にこだわった資源管理をしたい場合には、平均胸高直径について、前章の最後に紹介した関数を使用する方法ではなく、実際の標準地で調査したデータから解析を進めるというのも一つの方法であると考えられます。各自が管理したい森林の面積、林相の構成、利用目的等に応じて最適なレベルの情報化を検討することが重要です。

2 適用に当たっての留意事項

この冊子で紹介する方法は、GISで使用するオルソ画像を得るためにドローンで撮影した画像から、林分の立木密度や林分材積を知るためのものです。この研究では、この方法の適用条件とその精度を評価するために行いましたが、ここで使用した予測モデルは、森林技術協



横軸に地上レーザー計測装置 (OWL) による実測密度を、縦軸に検証した本手法による予測値をとって、各林分の予測精度を検証した。ヘクタール当たり 1,500 本を下回る林分、とりわけ 1,000 本/ha 辺りの推定精度がかなり高かった。但し、この結果は、解析区域の選定と解析条件の設定に依存する。実際の使用に当たっては、樹頂点の手動による補正や、解析範囲の工夫等が必要であろう。

会が発行した人工林林分密度管理図に使われている数式を流用したものです。密度管理図の注釈には、「林分材積については、100林分のうち80林分で±20%以内の精度で予測できる」との記述があります。これは、樹高や密度を正確に測定して数式に当てはめたときの、この予測モデルの上限の性能であると考えてよく、ここで紹介する方法にこれ以上の精度を求めることはできません。従って、この方法による予測結果の内、林分材積の数値は、例えば立木の取引等にそのまま参照できるようなものではありません。

ここで紹介した方法では、低高度で飛行するドローン画像から作った精細な林冠高モデルを使うことで、林分密度が概ね $1,400 \text{ 本} \cdot \text{ha}^{-1}$ 以下の林分の樹頂点は、ほぼ正確に抽出することが可能であることが分かりました。樹頂点抽出の精度が高いということは、上層樹高の推定精度も概ね高いと考えられることから、 $1,400 \text{ 本} \cdot \text{ha}^{-1}$ 以下の林分については、この方法の適用は有効であると考えられます。一方、密度が高い林分では、樹頂点の抽出漏れが生じ易く、立木密度の推定精度は劣ります。しかし、林分材積を算出する数式に必要な「上層樹高」については、林冠を構成する主林木の平均樹高なので、全ての立木が抽出できていなくても、ほぼ同等の値を得ることが出来ます。即ち、現地調査等により成立本数(立木密度)だけを調査すれば、同様の計算結果が得られるということです。

毎木調査において、樹高を正確に計測することは大変難しい作業です。大抵の樹高計測方法では、測りたい樹木の根元と梢端の両方が見通せる、ある程度離れた位置から、樹木までの水平距離と仰角を測って算出します。計測する距離が近ければ、仰角のわずかなずれによる計測誤差が大きくなりますし、離れると計測点が見えにくくなります。特に、立木密度が高い林分では、個々の林木の梢端が極めて見えづらく、事実上正確な調査ができない林分もあります。条件の良いところでも、測りたいそれぞれの林木の最適な計測地点を探しながら林内を大きく移動する必要があります。この点だけでも、林分の林冠高や上層樹高を簡易に知ることができることは、ドローンを使用した森林調査の大きなメリットであると言えます。

森林・林業分野でも、DX(デジタルトランスフォーメーション)や ICT(Internet and Communication Technology)への取り組みの重要性が高まっています。これらによって、経営管理の効率化や産業としての収益性が高まることが期待されているからです。しかし、広大で複雑な森林の蓄積や動態を情報として扱うことは容易ではありません。これまでも、森林の管理や経営については、国全体から都道府県、市町村、そして各施業単位といった、複数の階層で計画を策定し、これに沿って進められており、そこに使用される情報の質を向上させる種々の取り組みが連綿と続けられてきました。近年は、本書で紹介した方法をはじめとする、人工林の情報をより高精度で取得、推定し、電磁的に記録する手段が増えてきました。さらに、これらの方法のいくつかは、この業界に関わる多くの人々が、誰でも実践できるものです。森林情報のデジタル化の手始めは、空中写真を使ってオルソ画像を作成し、GIS に搭載するところから、という方は多いと思います。その際に、本冊子で紹介した方法を使って、樹頂点抽出を行い、上層樹高(林冠木の平均樹高)を押さえておくことは、非常に有益なことであると考えます。

参考文献

古川修平・長島啓子（2020）地上型レーザースキャナを用いて算出した樹冠量指標と胸高直径, 材積の関係. 森林計画学会誌 54(1), 3-11.

小林裕之（2020）撮影高度と DTM の違いが UAV-SfM による森林計測に及ぼす影響. 森林計画学会誌 53(2), 69-79.

国土地理院 公共測量の作業規程の準則

<https://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/index.html>

森山誠・滝誠志郎（2024）小型無人航空機とソフトウェアによる立木本数計測の省力化の評価. 森林利用学会誌39(1), 31-40.