

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

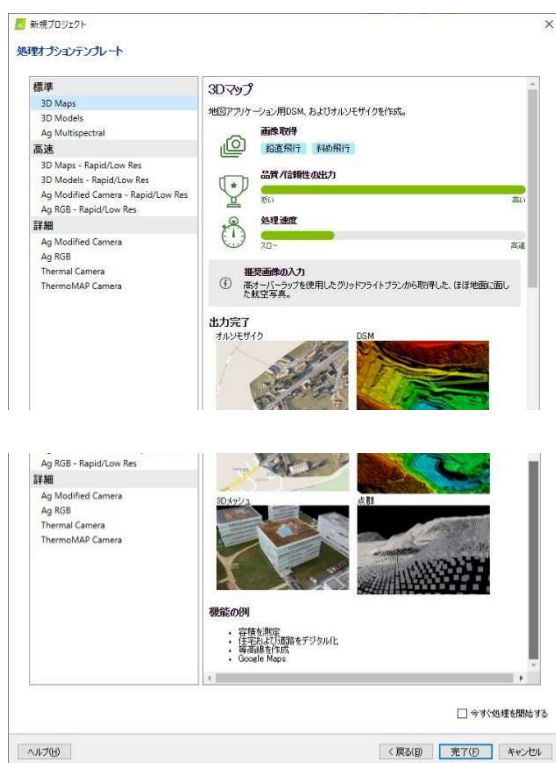


図3 画像処理アプリ (Pix4D) のプロジェクト設定画面

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

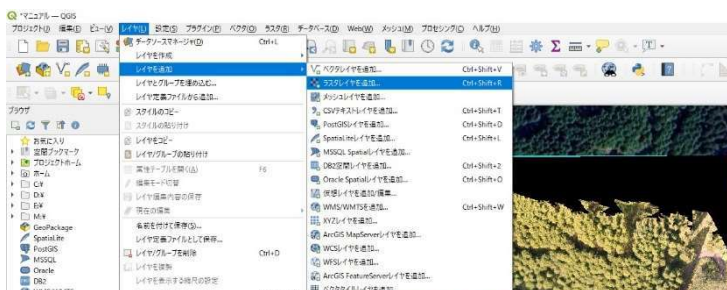


図 5 QGIS ソフトに DSM（ラスタファイル）を読み込む

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、座標参照系 (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。

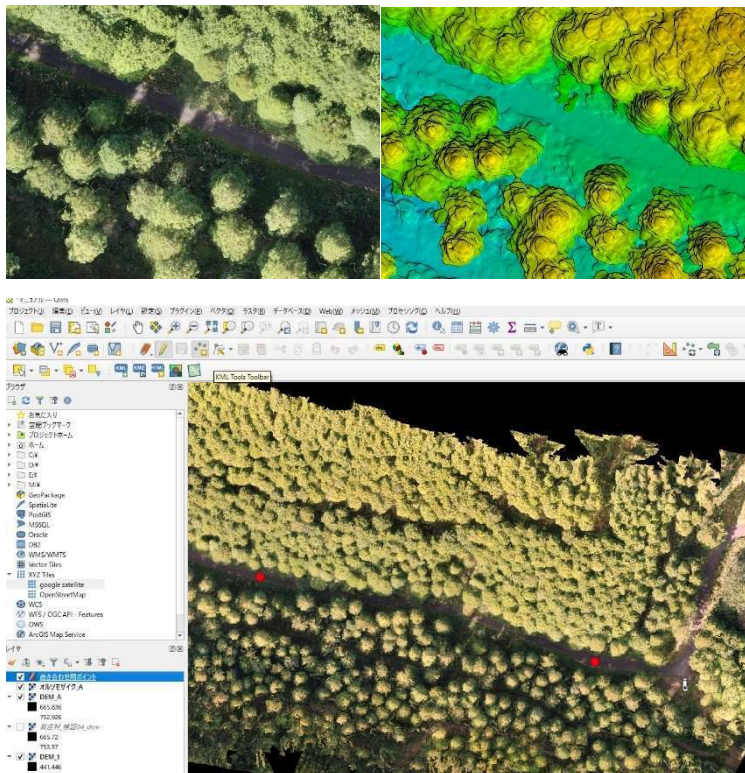


図 6 DSM と DEM の高さを合わせる(1)

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)。

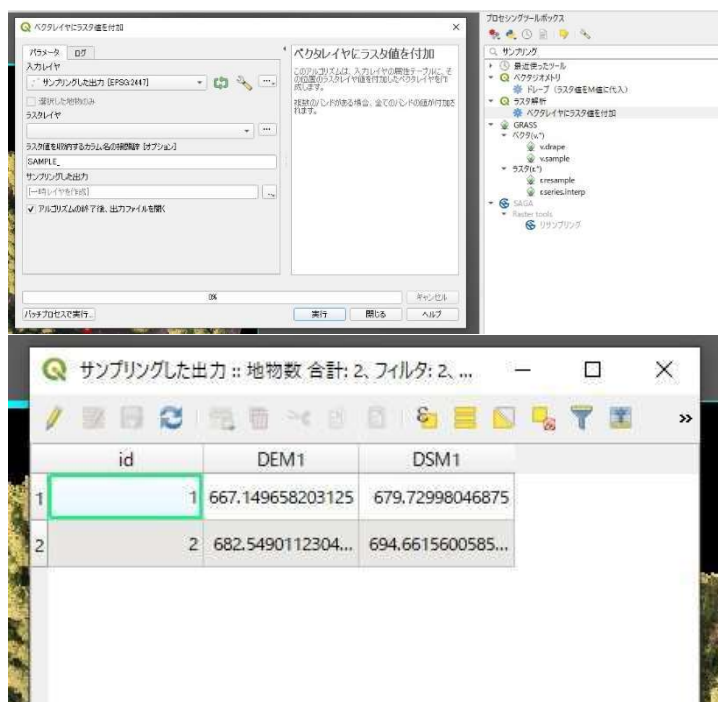


図7 DSM と DEM の高さを合わせる(2)

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

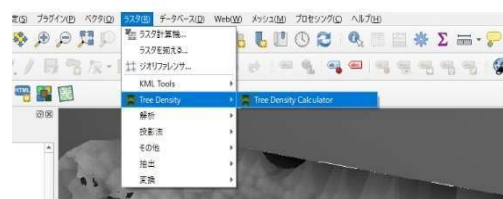


図 8 Tree Density Calculator を開く
このプラグインは、事前にダウンロードして準備しておく。

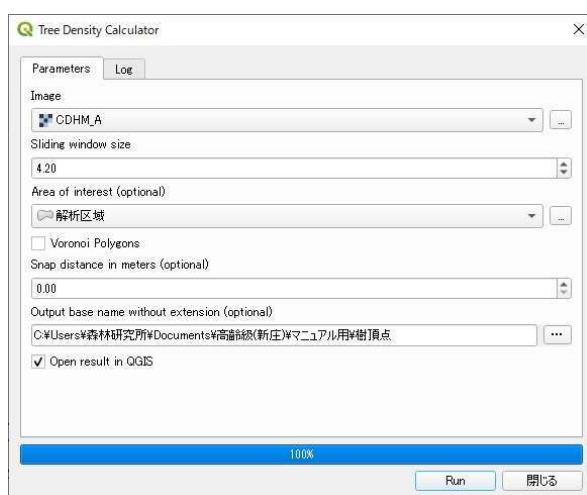


図 9 Tree Density Calculator の条件設定

「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樣な林分であれば、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。

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



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。

	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、比較的正确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「ボロノイ分割」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

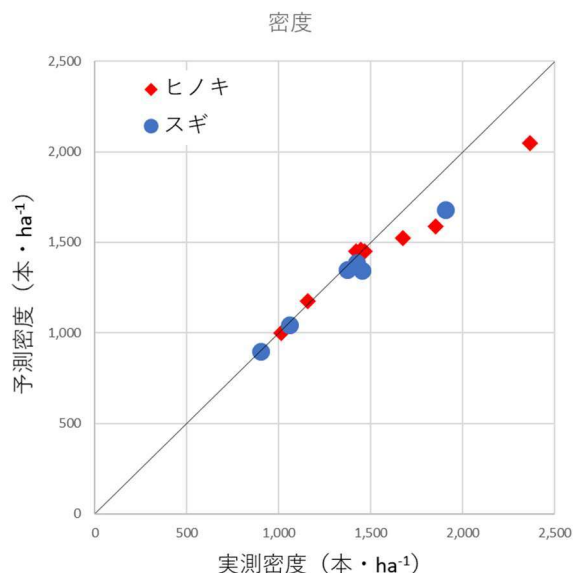
本研究では、本書に紹介した手法による立木密度と林分材積の推定結果を、実際の林分において、地上レーザー計測装置で実施した毎木調査の結果と比較して、検証を行いました。

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



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://psgsv2.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.