

数値表層モデルを用いた資源推定において利用可能な標高モデルが及ぼす影響

森林総合研究所北海道支所
下川町役場

古家直行
斎藤丈寛

はじめに

人手不足への対応や作業の軽労化・効率化を目指して、全国でスマート林業の構築の取組みが進められている⁽⁶⁾。この中で、UAV(Unmanned Aerial Vehicle:無人航空機)による空撮等を用いた森林情報の高度利用が期待されている。UAV 空撮画像の三次元処理技術によって、樹木の数値表層モデル(DSM, Digital Surface Model, 以下「表層モデル」とする)を作成することができ、これと数値標高モデル(DEM, Digital Elevation Model, 以下「標高モデル」とする)との差分をとることで、樹木の樹高を得ることができる。航空機レーザ計測においては、一度の観測で樹木の表層モデルと標高モデルの両者を得ることができるが、UAV の利用では、同様の観測を実施可能な UAV 搭載型レーザも登場しているが、一般への普及はまだ広がっていない。

UAV 空撮画像処理に基づく資源量推定は、1.表層モデルの出来や位置精度、2.利用可能な標高モデルの精度、3.材積推定モデルの精度によって、推定精度が左右される。このうち、1.の表層モデルの出来と位置精度については、対空標識(GCP, Ground Control Point)を設置する方法⁽¹⁾や測量用 UAV を利用した方法⁽³⁾などにより検討した研究がある。本研究では十分検討されていない標高モデルの違いが及ぼす影響に焦点を当てて検討する。

現在、国土地理院において、標高モデルの整備・公開が行われており、航空機レーザ測量や写真測量を利用した高精度な標高モデルの整備も進んできており、地形解析や水文分析等に活用されている⁽²⁾。国土地理院で作成・提供されている標高モデルは、DEM5A, DEM5B, DEM5C, DEM10B という種類があり、表-1 のような仕様である⁽⁵⁾。

表-1 国土地理院が提供する標高モデルの概要

数値標高モデル	メッシュサイズ	作成方法	標高精度(標準偏差)
DEM5A	0.2秒(約 5 m)	航空レーザ測量	0.3 m 以内
DEM5B	0.2秒(約 5 m)	写真測量(地上画素寸法20 cm)	0.7 m 以内
DEM5C	0.2秒(約 5 m)	写真測量(地上画素寸法40 cm)	1.4 m 以内
DEM10B	0.4秒(約10 m)	地形図の等高線	5.0 m 以内

日本全国の 5 m メッシュ標高モデルの整備状況は図-1 の通りである(国土地理院地理院地図参照(2021 年 11 月現在))。日本全国で見れば、中国地方や東北地方の一部などを除いて、レーザ測量に基づく DEM5A の整備が進んでいる。一方、森林域を広く持つ北海道では、都市部・平野部を除いてカバー率は低い状況である(図-1)。

標高モデルは、森林のみならず、市街地や農地等を対

象として作成されている。森林域に限った場合には、地形の起伏や樹木による被覆によって、標高モデルの精度も落ちると考えられるが、実際にどの程度の誤差が生じているのかよく分かっていない。

そこで本研究では、北海道を対象に航空機レーザ計測が実施されている 3 市町の事例を取り上げ、標高モデルの違いが数値表層モデルを用いた資源推定に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。



図-1 日本全国における 5 m メッシュ DEM の整備状況

材料と方法

本研究では、航空機レーザ測量が実施された 3 市町(厚真町, 下川町, 芦別市)を対象として、航空機レーザ測量成果の標高モデルを真値とした際に、それと対応する地点において国土地理院から提供されている標高モデルとの差分の大きさを評価することとした。航空機レーザ測量自体も、照射密度等のデータ取得の仕様や成立する樹木密度やササの植生被覆によって、実際の地盤高との誤差が生じる可能性があるが、本研究では広域での標高モデルの違いが及ぼす影響に着目しており、航空機レーザ測量の持つ誤差は相対的に小さいものとしてここでは真値として使用する。本研究で参照した航空機レーザ測量は、1 点あるいは 4 点/m²の点密度で取得され、作成機関において、地面と区分された点群データに基づいて 0.5 m あるいは 1.0 m のグリッド単位で作成された標高モデル

を使用した（航空機レーザ測量の標高精度はグリッド内にグラウンドデータがある場合 0.3 m, ない場合 2.0 m (標高値(標準偏差)である)。なお、対象とした航空機レーザ測量のデータ取得は一般民有林の範囲が中心であり、これらの林分を対象とした。このため、北海道の中でも、国有林等の多く分布する奥山よりは、市街地近郊の里山周辺に分布する森林域が対象となっている。一般民有林の空間情報は、北海道水産林務部よりオープンデータとして公開されている森林 GIS データ⁽⁴⁾を利用した。

標高モデルは、対象とした 3 市町の航空機レーザ計測の範囲内で、国土地理院で作成・提供されている標高モデルを取得、加工して使用した。DEM5A は航空機レーザ測量成果に基づき作成されており、厚真町や芦別市では、2021 年 7 月の更新によって、今回比較する航空機レーザ測量を基に作成された DEM5A に更新された。これらは解像度の違いのみで同じデータを基に作成されている。そこで、2021 年 7 月の更新前のデータが利用できる場合には、遡って更新前に提供されていたデータセットを比較対象に加えた(厚真町の DEM5B が該当)。

解析の手順は以下の通りである。手順①航空機レーザ測量成果に合わせて DEMXX(XX は 10B など標高モデルの種類)をリサンプリングし、森林 GIS を用いて一般民有林の範囲のみを抽出した。手順②航空機レーザ測量成果 (ALS, Airborne Laser Scanning)の標高モデル DEMALS を真値として、DEMXX-DEMALS で差分を計算した。手順③上記差分結果を -10, -5, -2, 2, 5, 10 m を閾値として 7 区分に区分した。手順④航空機レーザ測量成果 DEMALS に基づき 5 m メッシュ単位に集約して Tntmips pro 2021 (MicroImages 社)の地形分析ツールを用いて斜面位置を示す 6 区分の斜面位置クラス(Slope Position Class⁽⁷⁾)を計算し、標高モデルの誤差との関係性を分析した。手順⑤実際の UAV 空撮による資源推定の適用事例として、赤平市市有林(カラマツ人工林)での UAV 空撮による樹高推定結果について、測量用 UAV(DJI Phantom 4 RTK)を用いて伐採前後に撮影した結果と標高モデルのみ異なる DEM を使用して推定した結果とを比較した。この際、数値表層モデルは全て同じ伐採前の測量用 UAV による空撮成果を使用した。測量用 UAV は伐採前、伐採後ともに、センチメートルオーダーの測位を実現する ntrip を用いたネットワーク方式の GNSS-RTK 測位により撮影時のカメラ位置を取得した。UAV 空撮画像の処理は、Metashape pro 1.6.3 (Agisoft 社)を使用して行った。伐採後の切り株中心位置の測量結果(高精度 GNSS モバイルステーション DJI D-RTK2 の ntrip を用いた GNSS-RTK 測量成果)との比較による精度検証の結果、平均誤差は 28 cm (n=15)であった。また、樹高計測木の地上計測結果と測量用 UAV での樹高推定結果を比較したところ、 $R^2=0.83$, RMSE は 0.87 m (n=15)であった。手順⑥樹高の推定誤差が林分の材積推定に及ぼす影響を事例により明らかにするため、樹高のみ各 DEM を利用した場合の差分量を用いて、地上調査で樹高曲線から得られた毎木の樹高を変化させて(樹木位置は伐採後の切り株位置から推定した)、林分材積を集計した。本数や胸高直径は毎木調査の結果を利用している。また、一律に樹高を +2 m あるいは -2 m 変化させた場合の材積変化量も比較として示した。

結果と考察

各地域で取得された航空機レーザ測量の成果と標高モデルの差分の大きさによって 7 クラスに区分した結果は図-2 の通りである。ここでは 3 種類の標高モデルの比較が可能な厚真町の例を示す。

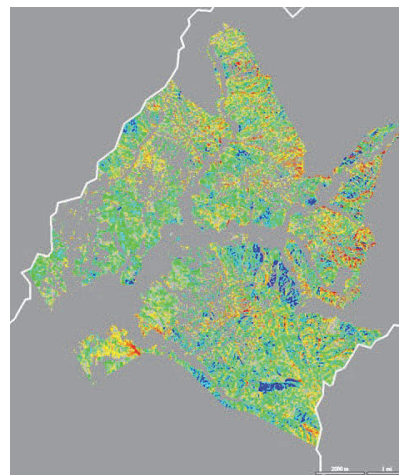


図-2a. DEM10B の誤差の空間分布 (厚真町)



図-2b. DEM5A の誤差の空間分布 (厚真町)

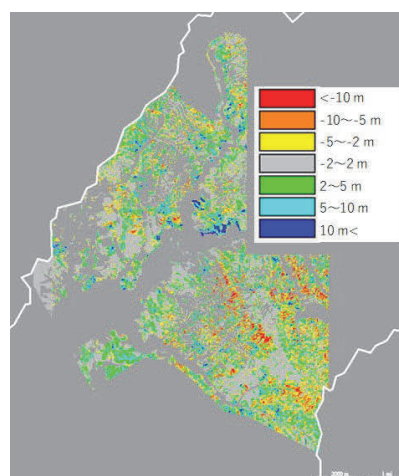


図-2c. DEM5B の誤差の空間分布 (厚真町)
(凡例は図-2c に記載のものに共通)

地域ごとと標高モデルごとの誤差区分の出現割合は図-3 のようになった。標高モデルごとに誤差区分の出現割合は異なり、DEM10Bでは5 mより大きな誤差が生じているものが森林域ではかなりの割合あることが分かった(13.2 %(下川町), 19.6 %(芦別市), 27.9 %(厚真町))。DEM5A(レーザー計測による)では出力のメッシュサイズの違いを考慮しても2 m以内の誤差に収まった。一方で、同じ5 mメッシュでもDEM5B(写真測量による)ではDEM10Bと比べると誤差が大きい区分の出現割合は小さい傾向にあるが(5 m以上の誤差が18.0 %(厚真町)), 少なからず大きな誤差が生じる地域があることが分かる。

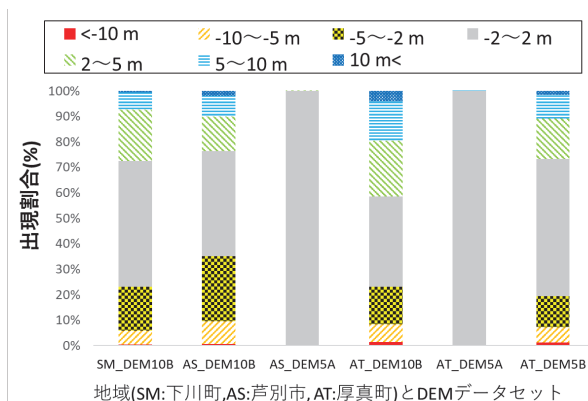


図-3 地域ごとと標高モデルごとの誤差区分の出現割合

次に、斜面地位ごとの誤差発生状況を集計した結果を図-4に示す。尾根や谷部、またそれらに隣接する斜面位置において誤差が大きくなる傾向が見られた。誤差の大きさはおよそDEM5A, DEM5B, DEM10Bの順番に大きくなる。DEM5Bも平坦地の区分では誤差が小さく、このことは写真測量そのものの誤差は小さいが、森林域などの被覆のある地域において、標高精度が低くなる傾向があることを示していると思われる。

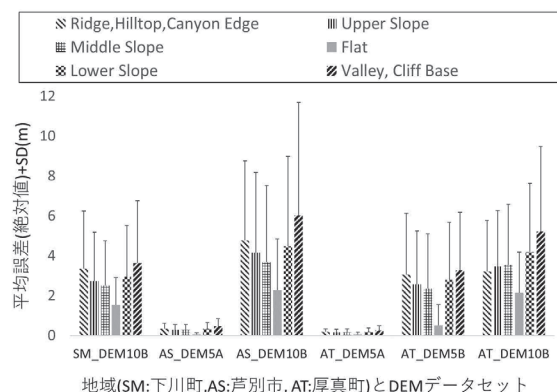


図-4 斜面位置ごとと標高モデルごとの誤差発生状況

以上を踏まえて、実際にUAV空撮による数値表層モデルと異なる標高モデルを組み合わせて、樹高分布を推定した事例を示す。伐採前後に測量用UAV(DJI Phantom 4 RTK)を用いて撮影し処理した樹高分布(図-5a)が真値

に近いと考えられる(以下、数値表層モデルは伐採前の測量用UAVの成果を共通に利用している)。これと比較して、DEM10BおよびDEM5Cの標高モデルを利用して作成した樹高分布(図-5bおよび図-5c)を見ると、標高モデルの標高精度によって、同じ林分内でも部分的に樹高が低く推定されていることが分かる。一方で、今回は伐採後の測量用UAVの空撮成果と比較できるが、一般的な人工林においても、斜面傾斜によって地位の違いが生じ、同じ林分内でも樹高の違いが生じる。このため、何も参照できるものがない際に、DEM10BやDEM5Bとの組合せで推定された図-5bおよび図-5cの樹高分布のみを見て樹高推定の良し悪しを判断することは難しいと考えられる。林分全体に一律に+5 mや-5 mの誤差が生じるのであれば、現地での樹高標本木の計測結果などを用いて樹高を補正することも可能かもしれないが、誤差の発生が部分的であるため、補正することも困難と思われる。

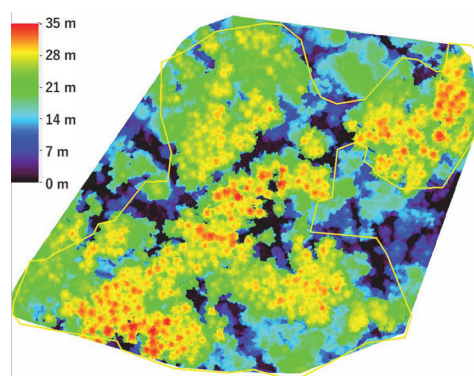


図-5a 測量用UAVを利用して推定された樹高分布

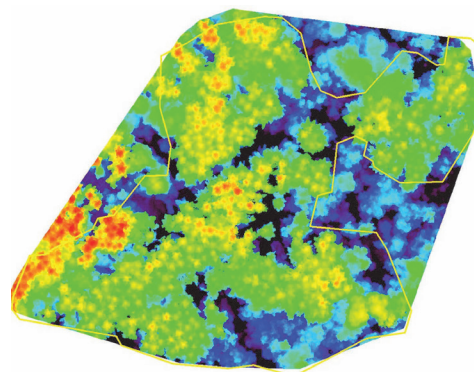


図-5b DEM10Bを利用して推定された樹高分布

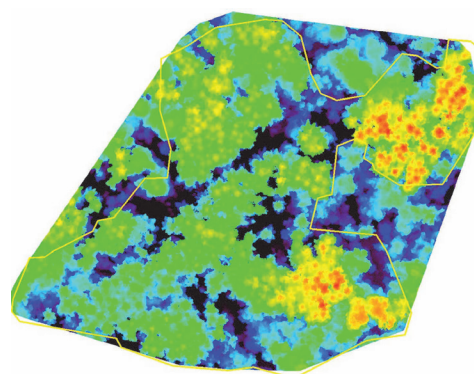


図-5c DEM5Cを利用して推定された樹高分布

参考として、今回得られた樹高分布に基づいて林分の材積推定を行った結果の例を表-2に示す。標高モデルとして、DEM10BやDEM5Bを利用することで、図-5のように5 m以上樹高が過小になる部分が生じており、結果として、推定された林分材積は、-6.5%(DEM10B利用)、-12.6%(DEM5C利用)となった。これは一林分の例に過ぎないが、図-3や図-4で見たように、DEM5BやDEM10Bを標高モデルとして利用する場合には、5 m以上の誤差が生じる場合が2割や3割の面積で生じる可能性があり、これが樹高および材積の推定精度に大きな影響を及ぼす可能性があることがわかる。なお、樹高が一律に一定量変化した場合には、+6.6%(樹高+2 m)、-6.6%(樹高-2 m)となった。実際には、UAV空撮からの材積推定では、最初に述べた通り、UAV空撮処理で作成される表層モデルの位置精度も関わってくるが、利用する標高モデルの違いだけでも、このような誤差が生じ得ることに注意する必要がある。また、今回は、毎木調査結果を利用して、樹高のみ変化させた場合の例を示したが、実際のUAVによる材積推定において、樹高を変数として材積推定する場合や樹高から胸高直径の推定を行う場合には、樹高の計測誤差の及ぼす影響はさらに大きくなる可能性が高く注意が必要である。

おわりに

本研究では、国土地理院から提供されている標高モデルの森林域における誤差分布などについて検討した。UAV空撮による効率的な森林資源の把握が期待される中で、樹高を変数として材積推定を行なう際には、利用できる標高モデルによって推定精度が変わってくることが想定される。本研究では、北海道の森林域を対象として、利用可能な標高モデルによって誤差が大きく異なることが実データから示された。また、DEM10BやDEM5BあるいはDEM5Cを利用する場合には、傾斜地や谷部を中心に5 mを超えるような誤差が生じる可能性があり、このような誤差が発生する面積割合が、今回対象とした3市町の一般民有林の範囲で1割から3割程度に及ぶことが分かった。航空機レーザ計測の成果がある地域では、ドローン空撮成果による表層モデルの位置精度を確保できれば、目的とする樹高分布も精度良く求められることが期待できる。北海道においては、航空機レーザ計測の実施が遅れているが、森林面積は広く木材生産のポテンシャルも高いことから、未取得地域における航空機レーザ計測データの取得・整備が望まれる。また、地盤高を同時に取得できるUAV搭載型レーザの普及も期待される。

謝辞

本研究は、森林総合研究所実施課題2ア c 1「持続的な林業経営および森林空間利用のための評価・計画・管理技術の開発」および2ア c T F 4「北海道型スマート林業の確立に向けた森林情報の高度利用手法の開発(委託元:スマート林業 EZO モデル構築協議会)」の受託研究の成果である。本研究で使用した航空機レーザ計測成果は対象とした各市町および取得機関から本研究のために許可を受け提供を受けました。数値標高モデルは、国土地理院が基盤地図情報として提供しているデータを加工し、使用しました。DEM5Bは、(株)オープンGISがGISソフトウェアTntmipsのユーザー向けに内部形式に変換して整備したデータ(2016年10月更新版)を利用しました。

引用文献

(1)青木千咲・米康充(2020)造林地におけるUAVを用いた測量誤差の評価. 日本リモートセンシング学会誌. **40(1)**:42-48.
(2)岩橋純子(2019)DEM(数値標高モデル)を用いた地形量・浸水量の計測. 砂防学会誌. **72(2)**:43-47.
(3)小花和宏之ら(2019)RTK-UAVを用いた地形計測の測位性能および省力効果. 地形 **40(2)**:125-134.
(4)北海道水産林務部(2021)森林計画関係資料オープンデータ(R1).
<https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srk/OPD.html>
(5)国土地理院. 基盤地図情報(数値標高モデル)で提供しているデータについて.
<https://fgd.gsi.go.jp/otherdata/spec/DEMgaiyo.pdf>
(6)林野庁(2019)林業イノベーション現場実装推進プログラム.
https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/ken_sidou/attach/pdf/191210-1.pdf
(7)Weiss, A. D. (2001) Topographic Positions and Landforms Analysis (poster), ESRI International User Conference, July 2001. San Diego, CA.

表-2 毎木調査と各種想定におけるドローン推定の林分材積推定結果の比較

	毎木調査	地盤:DEM10B	地盤:DEM5C	樹高一律+2m	樹高一律-2m
本数(本)	733				
樹高平均(m)	28.1	26.1	24.2	30.1	26.1
総材積(m ³)	765.7	715.8	669.1	816.5	714.9
毎木材積比(%)		-6.5	-12.6	6.6	-6.6