山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用性に関する検討

Adaptability of an airborne laser scanner to determine a snow depth distribution on a mountain area

岡本 隆¹⁾ 黒川 潮¹⁾ 松浦純生¹⁾ 浅野志穂¹⁾ 松山康治²⁾
Takashi OKAMOTO Ushio KUROKAWA Sumio MATSUURA Shiho ASANO Kouji MATSUYAMA

1) 独立行政法人森林総合研究所
Forestry and Forest Products Research Institute

2) 林野庁森林保全課
Forest Environment Division, Forestry Agency

山地斜面の積雪分布を精度良く把握するため、冬季に3 - 5 mの積雪がある新潟県東頸城丘陵内の同一斜面(0.3km²)を対象に、航空レーザスキャナを用いた積雪深計測をおこなった。計測は積雪期と無積雪期にそれぞれおこない、得られた積雪面標高と地表面標高の差分から積雪深の平面分布を求めた。精度検証のためGPSおよび超音波積雪深計による積雪深(グラウンドトゥルース)と比較した結果、航空レーザスキャナによる計測誤差は+26.5 ~ -13.6cm, 平均で+1.8cmとなった。これは一部の急斜面や尾根での異常値を除き、積雪深の平面分布を議論するために十分な精度を持っていると考えられた。

積雪分布図をもとに、地形条件による積雪特性について以下の傾向が明らかとなった。1) 積雪深は北および北東斜面で増加し、南斜面で減少する。2) 積雪深は尾根状地形で減少し、谷状地形で増加する。急斜面から緩斜面への傾斜変換帯に沿って積雪増大域が筋状に分布する。これは積雪が上部斜面からクリープ、グライド、雪崩の各現象によって堆積した結果と推測された。

キーワード: 積雪分布, 航空レーザスキャナ, 積雪深, リモートセンシング

Snow depth distribution on a mountain slope (total area of 0.3km²) was determined using an airborne laser scanner in Higashi-Kubiki hill of Niigata prefecture. We measured elevations of both the snow and ground surface at the same area, then calculated snow depth distribution by the difference between the two. A comparison with a ground truth of GPS and ultrasonic snow depth gauge showed the error range by airborne laser scanner to be from +26.5cm to -13.6cm, with an average of +1.8cm. This result indicates that there was sufficient accuracy for evaluating snow depth distribution.

Snow distribution has the following characteristics. 1) Snow on the slopes facing north and northeast is deeper than that on the slopes facing south. 2) Snow is deeper on the ridge than in the valley. There are deeper snow zones along the contour line where the slope gradient changes from steep to gentle. A likely explanation for this is that snow is piled by creep, glide, and snowslide, and drifted to such places.

Key words: Snow distribution, Airborne laser scanner, Snow depth, Remote sensing

はじめに

東北地方や北陸地方の山間地域は世界でも有数の豪雪地帯であり、冬期の最深積雪は数mに及ぶ。山地に堆積した積雪は融雪期に緩やかに融け出し、下流域への貴重な水資源となる。しかし気温上昇や強風、強雨が生じると大量の融雪が短期間に集中し、洪水や地すべりなどの融雪災害を誘発する危険性も

有している。水資源の適正な管理、融雪災害の予測といった観点から、山地の積雪分布を正しく評価することは重要な課題である。

山地における積雪分布の評価に関する研究は、これまで様々な手法でおこなわれてきた。基本的には、現地で測深棒、スノーサンプラーを用いて積雪深や積雪水量を複数点で測定する手法が用いられ、そこから積雪深や積雪水量の平面分布が求められている

1) 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 P.O. BOX. 16, Tsukuba Norin, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, Japan

2) 〒100-8952 東京都千代田区霞ヶ関1-2-1 Kasumigaseki 1-2-1, Chiyoda, Tokyo, 100-8952, Japan

(小池ら, 1985; 笹ら, 1989; 藤原ら, 1994; Lapen and Martz, 1996; 松山, 1998). この手法は, 直接計測するためデータの信頼性は高いが, 人力に依存するがゆえに平面分布を論じるには観測密度, 精度ともに問題が残る. さらに, 衛星画像を用いた積雪域抽出技術の発達にともない, Landsat や NOAA/AVHRR データから積雪域と非積雪域を分離して積雪量分布を推定する試みが盛んとなった(武田・高橋, 1981; 風間・澤本, 1995; 朝岡ら, 2002; 島村ら, 2003). この手法は, 広範囲の積雪量分布を比較的容易に捉えられるが, 積雪深を直接的に求めることが困難である.

近年, 航空機搭載型のレーザスキャナ(以下, 航空レーザスキャナ, とする)を用いて地形測量がおこなわれる例が増えてきた(高橋, 2000; 八木ら, 2003). さらにその応用として, 都市域における三次元モデルの作成(Murakami *et al.*, 1999; 政春, 2000)や森林域での樹高分布の測定(Magnussen and Boudewyn, 1998; 瀬戸島ら, 2002), 立木体積の測定(Næsset, 1997)など, 幅広い分野へも適用されつつある.

本スキャナによる計測の応用として, 積雪分布計測への適用がある. すなわち, 同じ区域(0.1 - 10km²程度)において同スキャナによる計測を積雪期と無積雪期にそれぞれおこない, 両者の標高値の差分計算から, 積雪深の面的分布を求める方法である. 航空レーザスキャナの持つ精度が十分発揮されれば, 従来の現地計測や衛星データに比べて, 解像度, 精度ともに高い質の積雪分布が求められるものと考えられる. 斉藤ら(1999), 秋山ら(2002)は航空レーザスキャナの積雪面計測への適用例を示し, 岩男ら(2001), 小菅ら(2003)はグラウンドトゥルス(現地での実測値)との比較によって計測精度についての検討も進められている. しかし, それらの検討例はまだ少なく, 求められた積雪分布の特徴についても記述された例はほとんどない.

本論では, 豪雪地帯である新潟県東頸城丘陵内の山地斜面において, 航空レーザスキャナを用いて積雪最盛期の積雪深分布を求め, その精度を検証するとともに地形条件による積雪分布特性について考察した結果を報告する.

・計測方法

1. 航空レーザスキャナの計測原理

航空レーザスキャナとは, レーザスキャナ(走査

式光波測距儀), GPS, IMU(慣性計測装置)等を航空機に搭載した測量装置である. 同装置は, 上空から地表面に向けてスキャナの首を振りながらレーザをパルス状(25,000Hz)で発射し, 反射時間から地表面の標高を面的に計測する. 樹林密度が著しく密でなければレーザの一部が樹冠の間隙を通過して林床に達するため, 森林地帯においても地表面形状を計測可能である特長を持つ.

一般的な計測精度は平面座標で約 $\pm 50\text{cm}$, 鉛直座標(標高)で約 $\pm 15\text{cm}$ である. 平面座標の精度は計測密度に依存して変化するが, 鉛直座標の精度はレーザ自身の精度に依存するため不変である. 計測方法と計測精度の関係については仲野ら(2001)が詳しい.

2. 積雪分布計測の概要

計測対象範囲は, 新潟県東頸城丘陵内の0.3km²(東西600m × 南北500m), 標高520 - 660mの区域である(図 - 1). 区域西側には南北に尾根が走り, そこから東西に向けて平均勾配13度(東側)の中緩斜面が広がっている. 冬季の最大積雪深は平年で300cm - 400cm, 多雪年には500cm近くになる. 斜面の多くはスギの人工林, 一部はミズナラ等の広葉樹の天然林に覆われるが, 下部の緩斜面は一部が水田となっている. 区域中央部の谷状斜面は地すべり地(長さ350m, 幅50 - 70m)のため疎林地になっている.

積雪最盛期の雪面標高を2003年2月26日に航空レーザスキャナで計測した. 区域内の気象露場に設置された超音波積雪深計(カイジョーソニック製, SL-340)の観測によると, 雪面標高計測時の露場積雪深は274cmで, 同寒候年の最大積雪深359cm

図 - 1 計測斜面の位置と周辺地形図.

Fig. 1 Location and topography of the study site.

(2003年3月12日)に比べ85cm少なかった(図-2)。気象観測場での計測積雪深は計測当日を挟んで1月下旬から3月中旬までで約250-350cmの範囲で推移しているため、計測当日の積雪深分布は本地域における積雪期の平均的な状態にあるとみなした。

無積雪期の地表面標高を2003年5月19日に計測した。同日は消雪日(2003年4月30日)から19日が経過しているが、まだ植生の繁茂は少なく地表面計測への影響は小さいと考えられた。本計測実施時の計測仕様を表-1に示す。

この他に、計測範囲内の緩勾配疎林地における6

図-2 気象観測露場における2002-2003年寒候期の積雪深。

Fig. 2 Snow depth observed at the meteorological station from Nov. 2002 to May 2003.

表-1 航空レーザスキャナの計測仕様。

Table 1 Specification of the airborne laser scanner.

項目	仕様
プラットフォーム	回転翼(ヘリコプター: AS350)
レーザ発射回数	25,000 Hz
スキャン回数	25 Hz(可変)
スキャン角度	0 ~ ±20°(可変)
ビーム拡散度	0.2 mrad
受信/パルスモード	First / Last 同時
レーザ波長	1064 nm
飛行高度	300 ~ 800 m
飛行速度	50 ~ 300 km h ⁻¹
コース間隔	200 m
コース重複率	9~75 %
平均計測密度	1.0点 m ⁻² 以上
測距(鉛直)精度	±0.15 m / shot
座標(水平)精度	±0.5 m(高度1000 m)

点(A-F)においてリアルタイムキネマティックGPS(計測精度±3cm)を同時期に実施して各点の積雪深を求め、グラウンドトゥルースとした。さらに、気象観測露場1点(Me)において超音波積雪深計(計測精度±1cm)により求められた積雪深もグラウンドトゥルースとして採用した。各点の位置を図-3に示す。

・結果と考察

1. 積雪深分布図の作成

積雪期と無積雪期、航空レーザスキャナ計測によって得られた積雪面と地表面のランダム三次元座標データ(1点以上/1m²)にそれぞれ内挿処理を施し、計測範囲について1m格子(600×500, 格子点数300,000点)の数値標高モデル(DEM)を作成した。そして、各格子点ごとに積雪面標高から地表面標高を差し引いた値を積雪深と見なして積雪深の平面分布を求めた。地表面等高線図上に表された積雪深分布図を図-3に、全格子点についての積雪深ヒストグラムを図-4に示す。

2. 計測精度の検証

航空レーザスキャナによる積雪面の計測については、積雪の色や雪の結晶の凹凸がレーザ光線の反射率を高めるため通常の地形計測に比べてデータの取得が容易になるという報告(秋山ら, 2002)がある一方で、積雪のような白色体ではレーザ反射速度が過大になるため、計測値が真値に対し10cm強から20cm強ほど高くなるという報告(小菅ら, 2003)もあり、精度について一般的な解明は十分に進んでいない。そこで同スキャナによる計測精度を検証するため、航空レーザスキャナによって求められた積雪深をグラウンドトゥルース、すなわちGPS観測6点(A~F)および超音波積雪深計観測1点(Me)で求められた積雪深と比較した。

グラウンドトゥルースを真値とみなした場合、航空レーザスキャナによる計測積雪深の計測誤差は+26.5 ~ -13.6cm, 誤差平均は+1.8cm, 標準偏差は15.4cmとなった(図-5)。誤差の分布は過大値が3カ所、過小値が4カ所と正負一様に広がった。航空レーザスキャナ自身の持つ標高の計測精度は±15cmであるから、任意の1点における積雪深の計測精度は2点の標高の差分から求められるため±30cmとなる。本計測結果は全てその誤差範囲に収まっており、航空レーザスキャナの性能とほぼ一

図 - 3 航空レーザスキャナ計測による積雪深の平面分布 .

Fig. 3 Snow depth distribution determined by the airborne laser scanner.

図 - 4 積雪深ヒストグラム .

Fig. 4 Snow depth histogram.

致した .

以上の精度検証から、航空レーザスキャナによって計測された積雪深は任意の1点での積雪深を議論する場合には誤差が $\pm 30\text{cm}$ となりその信頼性に問題が生じるが、積雪深が数mにも及ぶ緩勾配疎林地において積雪深の平面分布を議論する場合には、十分な信頼性を持つと考えられた .

ただし、図 - 3において積雪深が0または負の異常領域（黒色域）が、尾根部、急勾配斜面の一部で認められた。全格子点に対する負の格子点数の割合は1.3% (3,914/300,000点)であった。尾根部において負の領域が現れた原因は、レーザが樹木を透過できず樹冠標高を地表面標高と見なしたためと

図 - 5 グラウンドトゥルース (A - F: GPS, Me: 積雪深計) と航空レーザスキャナによる計測積雪深の比較.

Fig. 5 Relationship of the snow depth determined by ground truthing (A-F: GPS, Me: ultrasonic snow depth meter) and the airborne laser scanner.

考えられる。また、急勾配斜面で負の領域が現れた原因は、その形状から見てまず雪崩の発生による積雪深の低下があり、そこへ急斜面ほど計測値の異常領域が増加する航空レーザスキャナの特徴 (内山・井口, 2003) の影響が重なりあったためと考えることができる。このような負の異常領域は積雪分布解析において値の過小評価を招く恐れがあるため、尾根部と急勾配斜面での計測値の検証が今後の課題である。

一方、対象区域南縁部 (Northing 115 910m, Easting - 4 830m) における楕円状の積雪増加域 (東西50m, 南北30m, 最大積雪深1,110cm) は、2003年4月に発生した地すべりによる地表面標高の低下が原因であり、実際の積雪深は反映されていない。

3. 積雪の分布特性

斜面の標高や方位、地形条件の違いによる積雪深分布の特徴を、積雪分布図 (図 - 3) および同図上の測線 L1 - L2 および L3 - L4 の積雪断面 (図 - 6) から読み取り、整理した。

図 - 6 航空レーザスキャナによる計測積雪深の鉛直分布。

Fig. 6 Vertical distribution of snow depth determined by the airborne laser scanner.

1) 標 高

一般に積雪深は標高に比例して増加することが指摘されている (中島ら, 1993; 野村ら, 1999)。しかし、図 - 6 の L1 - L2 測線の積雪深断面からは、標高の増大による積雪深の明瞭な増加は認められなかった。標高300 ~ 500m 程度の低山地では標高が積雪深に与える影響は小さい (藤原ら, 1994) ためと、対象範囲の比高が140m と小さいための両要因が考えられる。

2) 方 位

積雪深の増加領域 (黄色) は北向きおよび北東向き斜面で多く、南向き斜面では少なかった。これは単位面積あたりに受ける日射エネルギーが最も大きい南向き斜面で、融雪が促進されたことが原因のひとつであると考えられる。

3) 地 形

図 - 3 によると、積雪深は尾根部で減少し (赤色

黒色域), 谷部で増大する(黄色域)傾向があった。同様の傾向は図-6のL3-L4測線の積雪深断面からも読み取ることができる。ただし大地形的なスケールによる影響は小さく、 10^2m^2 以下の小さな地形の凹凸に強く影響を受けた。笹ら(1989)は現地観測結果から、尾根部では強風によって積雪が飛ばされるため積雪深は減少し、風速の弱まる山腹斜面から谷部にかけて積雪深が増大することを指摘している。また、藤原ら(1994)は、低山地では積雪深は標高よりも $10^0 \sim 10^1\text{m}^2$ スケールでの地形形状に影響を受けると報告している。本航空レーザスキャナによって計測された積雪深分布は、上述の現地調査と同様の結果が得られた。

急斜面では雪崩の発生が原因と考えられる積雪深減少域が斑状に存在した。また、急斜面から緩斜面への傾斜変換点付近で積雪深の大きな領域(黄色)が筋状に分布した(図-3)。これは雪崩、積雪のグライド、クリープによる積雪層の下方移動、堆積が原因と考えられた。なお、尾根部と急傾斜部では積雪深が負の領域が現れているため、詳細な評価には注意を要する。

まとめと今後の発展性

航空レーザスキャナを用いて計測した雪面、地表面(0.3km^2)の標高差分から、新潟県東頸城丘陵内の山地斜面における積雪深分布を求めた。得られた積雪深分布は、既往の現地調査、衛星データに比べて解像度、精度ともに高く、微地形スケールでの積雪深の変化を把握できることが分かった。

本研究の全体像は図-7のとおりであり、本論はその速報としたために、積雪深分布図から読み取られた一般的な積雪深の特性を述べるに留め、現在GISを用いて標高、斜面方位、斜面勾配、凹凸など各条件による積雪深の特性について定量的な解析を進めている。

航空レーザスキャナによって得られる積雪情報は積雪深であるが、水資源貯留量としての評価は積雪深分布に積雪密度を乗じて算出される積雪水量分布として扱うべきである。今後は、積雪密度の拡がり気象露場での定点観測や現地調査から精度良く求めることにより、本研究を水資源の有効な評価手法として発展させたい。

謝辞: 本研究は林野庁地すべり対策調査の調査課題の一環として林野庁、関東森林管理局と共同で行っ

図-7 本研究における計測・解析の流れ。

Fig. 7 Flowchart of the measurement and analysis procedures.

た。また、航空レーザスキャナによる積雪・地表面計測については朝日航洋株式会社にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- 秋山幸秀・高貫潤一・藤原輝芳・山本岳史・関谷正(2002): 航空レーザによる雪面計測事例, 平成14年度砂防学会発表講演集, pp. 156-157.
- 朝岡良浩・風間 聡・沢本正樹(2002): 広域積雪水資源量の変動特性とその地理・気候依存性, 水文・水資源学会誌, 15(3), pp. 279-289.
- 内山庄一郎・井口 隆(2003): 航空レーザ測量によるデータ使用時の留意点, 第42回日本地すべり学会発表講演集, pp. 531-534.
- 藤原滉一郎・笹賀一郎・佐藤冬樹(1994): 北海道大学天塩・中川地方演習林附近の積雪分布, 北海道大学農学部演習林研究報告, 51(1), pp. 74-88.
- 岩男忠明・寺田秀樹・金子正則・松田宏・織茂郁・本間信一(2001): 積雪深計測への航空機搭載型レーザプロファイラの適用性検討, 2001年度日本雪氷学会発表講演集, pp. 181.

- 風間 聡・澤本正樹(1995): NOAA/AVHRRを用いた積雪深分布および水資源量推定, 水文・水資源学会誌, **8**(5), pp. 477-483.
- 小池俊雄・高橋 裕・吉野昭一(1985): 積雪面情報による流域積雪水量の推定, 土木学会論文集, **357/II-3**, pp. 159-165.
- 小菅 博・斉藤充則・星野光男・津留宏介・中島 保(2003): 航空レーザ測量による積雪面計測についての精度検証, 日本写真測量学会平成15年度発表講演集, pp. 203-204.
- Lapen, D. R. and Martz, L. W. (1996): An investigation of the spatial association between snow depth and topography in a Prairie agricultural landscape using digital terrain analysis, *Journal of Hydrology*, **184**, pp. 277-298.
- Magnussen, S. and Boudewyn, P. (1998): Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators, *Can. J. For. Res.*, **28**, pp. 1016-1031.
- 政春尋志(2000): ヘリコプター搭載レーザースキャナーによる都市三次元情報の計測, 写真測量とリモートセンシング, **39**(2), pp. 19-24.
- 松山 洋(1998): 巻機山における積雪密度・積雪水当量の季節変化と高度分布, 水文・水資源学会誌, **11**(2), pp. 117-127.
- Murakami, H., Nakagawa, K., Hasegawa, H., Shibata, T. and Iwanami, E. (1999): Change detection of buildings using an airborne laser scanner, *ISPRS*, **54**, pp. 148-152.
- 中島 皇・福島義宏・小橋澄治(1993): 暖候性積雪地域の山地流域における気象要素の空間的分布 降雨量・気温・積雪深, 京都大学農学部演習林報告, **65**, pp. 113-124.
- 仲野公章・清水孝一・山越隆雄・葛西勝栄・中村剛・秋山幸秀・高貴潤一(2001): 2000年有珠山噴火時におけるヘリコプター搭載レーザースキャナーによる地形変化測定, 砂防学会誌, **53**(6), pp. 88-94.
- 野村 睦・佐藤冬樹・芦谷大太郎・榎本浩志(1999): 気温と降雪深による山地の積雪深と積雪水量の推定, 北海道大学農学部演習林研究報告, **56**(2), pp. 11-19.
- Næset, E. (1997): Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data, *Remote sens. Environ.*, **61**, pp. 246-253.
- 笹賀一郎・藤原滉一郎・佐藤冬樹(1989): 森林の強風地における堆雪効果, 北海道大学農学部演習林研究報告, **46**(4), pp. 801-828.
- 斉藤和也・林 真智・沼田洋一・真屋 学・高槻幸枝(1999): リモートセンシングデータを利用した積雪モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, **19**(3), pp. 51-56.
- 瀬戸島政博・赤松幸生・船橋 学・今井靖晃・天野正博(2002): 航空機レーザスキャナによる森林域の計測とその適用性, 写真測量とリモートセンシング, **41**(2), pp. 15-26.
- 島村雄一・泉 岳樹・中山大地・松山 洋(2003): 積雪指標を用いた積雪水当量・融雪量の推定 黒部湖集水域を事例に, 水文・水資源学会誌, **16**(4), pp. 331-348.
- 高橋佳昭(2000): 航空機レーザプロファイラーの地形測量への利用, 写真測量とリモートセンシング, **39**(2), pp. 14-18.
- 武田 要・高橋 裕(1981): LANDSAT 雪線情報と積算暖度法による流域最大積雪水量算定に関する研究, 土木学会論文集, **311**, pp. 81-92.
- 八木浩司・檜垣大助・吉松弘行・相楽 渉・高木洋一・内山庄一郎(2003): 空中レーザ高精度地形図の地すべり・微地形判読への応用, 地すべり, **39**(4), pp. 35-41.
- (受付: 2003年12月9日, 受理: 2004年2月21日)