

## デジタル画像を用いた写真測量による屋根上積雪深の測定精度について

## Accuracy of Snow Depth on Roofs by Photogrammetry Using Digital Images

千葉 隆弘\* Thomas Thiis\*\* 高橋 徹\*\*\* 苫米地 司†

Takahiro Chiba, Thomas Thiis, Toru Takahashi and Tsukasa Tomabechi

## Abstract

In this study, we examined accuracy of snow depth on roofs measured by photogrammetry using digital images. The photogrammetry was conducted at 4 buildings in Norway, which have different roof shape. At the same time, snow depth on the roofs was measured using snow scale. Consumer-grade digital camera was used in shooting of images. The shooting methods were drone shot and hand-held camera. 3D mesh for building and roof snow was generated using PhotoScan of Agisoft. The snow depth was measured based on the value of the 3D mesh.

3D mesh of roof snow could be generated at all of 4 buildings. For the condition of direct light, it was easy to create 3D mesh of roof snow. However, for the condition of diffusion light, it was difficult to create 3D mesh due to monotonous surface of the roof snow. In addition, the error of the estimated snow depth and measured depth was examined. As the results, it was found possibility of measurement for the snow depth by photogrammetry using digital images, and that the error increased with shooting distance and mesh spacing.

As stated above, accuracy of snow depth on roofs measured by photogrammetry was indicated at relationship between the shooting distance and the error.

## 1. はじめに

近年、デジタルカメラで撮影した複数の画像を用いて被写体表面の3Dメッシュを生成するソフトウェアが利用しやすくなった。図1に、AgisoftのPhotoScan<sup>(1)</sup>を用いてぬいぐるみ表面の3Dメッシュを生成した例を示す。図のように、撮影した画像相互のオーバーラップを頼りに撮影位置を推定し、次に、高密度ポイントクラウドを生成する。そして、生成された数多くのポイントを用いて3Dメッシュを構築する。このように、デジタルカメラで撮影した複数の画像から比較的容易に被写体のモデルを生成することができる。すなわち、このような技術は、建物の写真測量として応用することが可能であり、これまで危険が伴う実測が中心であった屋根上積雪深においても、デジタル画像を用いて測定できる可能性がある。

デジタル画像を用いた写真測量に関する既往の



図1 ぬいぐるみ表面の3Dメッシュ生成例

研究をみると、内山・井上らは、斜面の形状を写真測量でモデル化し、土砂災害の調査で活用する可

\* 北海道科学大学工学部建築学科（寒地環境エネルギーシステム研究所）  
 \*\* ノルウェー生命科学大学  
 \*\*\* 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻  
 † 北海道科学大学

能性を検討しており、小型の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を利用した空撮技術に対しても言及している<sup>(2)・(3)</sup>。また、Mark らは、車両の形状を読み取る技術として写真測量の可能性を検討している<sup>(4)</sup>。一方、雪氷関連分野における写真測量の研究をみると、氷河の動きを写真測量で測定する研究や<sup>(5)</sup>、自然雪を用いた吹雪風洞実験で再現された模型屋根の吹きだまり分布を写真測量で測定する研究がある<sup>(6)</sup>。しかし、実際の屋根雪を対象とした写真測量は、過去に桜井らが行った研究のみである<sup>(7)</sup>。湯川らは、空撮で得られたデジタル画像を用いて戸建て住宅地の積雪分布を調査しているものの、写真測量に基づいた定量的な積雪分布については言及していない<sup>(8)</sup>。このように、デジタル画像を用いた写真測量による積雪深の測定事例は極めて少ないのが現状である。

このようなことから本研究では、屋根上積雪深を対象としたデジタル画像を用いた写真測量の可能性を検討することを目的に、いくつかの建物で写真測量を行い、その精度を検討した。なお、写真測量の精度は、撮影距離に依存するものと考えられる。屋根上積雪深の場合、建物全体の雪荷重を評価するための屋根全体の積雪分布を対象とするのか、あるいは、一部の屋根上積雪深を高精度で測定するので撮影距離が変化する。また、測定範囲を一定とした場合、撮影距離の減少に伴い画像の撮影枚数が増加する。本研究では、建物全体の雪荷重を評価するための屋根上積雪深を対象とし、具体的には、積雪深 1.0m で 10%以内の測定誤差を目標として写真測量の精度を検証した。

## 2. 研究方法

本研究では、ノルウェーの各地域に建設されている 4 つの既存建物を対象に、写真測量による屋根上積雪深の測定を行った。表 1 に示すように、大規模アーチ屋根、地上 4 階建て RC 造校舎の陸屋根、および 2 つの平屋建て勾配屋根の No.1~4 を対象とした。測定は、2014 年 12 月から 2015 年 3 月の期間で実施し、写真測量のための写真撮影と同時に、その精度を検証するための屋根上積雪深の実測を行った。実測で得られた屋根上積雪深の最大値  $d_{\max}$  は、No.1 が 0.30m、No.2 が 0.04m (2014/12/6) と 0.09m (2015/1/11)、No.3 が 0.08m、No.4 が 0.90m であった。

屋根上積雪深の測定方法を表 2 に示す。表のよ

表 1 写真測量の対象とした建物の概要

写 真	建 物 概 要
	<b>【No.1 アーチ屋根】</b> ・建設地: Oslo, Norway ・平面規模: 86 × 120m ・高さ: 28m(アーチ半径62m) ・用途: サッカー等競技場 ・測定日: 2015/2/3 ( $d_{\max} = 0.30\text{m}$ )
	<b>【No.2 陸屋根】</b> ・建設地: As, Norway ・平面規模: 11.7 × 31.5m ・高さ: 15m(パラペット0.5m) ・用途: 校舎, 研究室 ・測定日: 2014/12/6 ( $d_{\max} = 0.04\text{m}$ ) 2015/1/11 ( $d_{\max} = 0.09\text{m}$ )
	<b>【No.3 勾配屋根Ⅰ】</b> ・建設地: As, Norway ・平面規模: 6.8 × 22.3m ・軒の高さ: 2.0m(勾配24.5°) ・用途: ガレージ ・測定日: 2015/1/10 ( $d_{\max} = 0.08\text{m}$ )
	<b>【No.4 勾配屋根Ⅱ】</b> ・建設地: Gålå, Norway ・平面規模: 6.0 × 9.0m ・軒の高さ: 2.5m(勾配28.0°) ・用途: キヤビン ・測定日: 2015/3/4 ( $d_{\max} = 0.90\text{m}$ )

表 2 屋根上積雪深の測定方法

No.	撮影方法	カメラ	撮影枚数	撮影距離	実測線
1	空撮	Canon IXUS (18M pixel)	250	平均 45m	1
2	手持ちカメラ	Pentax Q (12M pixel)	25	5m	1
3	手持ちカメラ	Pentax Q (12M pixel)	60	7m 15m	1
4	空撮	Canon IXUS (18M pixel)	245	平均 15m	1
	手持ちカメラ	Pentax Q (12M pixel)	89	7.5m	

うに、写真測量の場合は、写真の撮影方法が屋根上積雪深の測定方法に該当する。本研究では、空撮と手持ちカメラの 2 種類で写真を撮影した。空撮は、小型の UAV (dji Phantom 1) にコンパクトデジタルカメラ (Canon IXUS) を直付けして行った。撮影インターバルは 3 秒であり、写真相互のオーバーラップを確保するため、様々な箇所でも多くの画像を撮影した。手持ちカメラ (Pentax Q) での撮影では、写真相互のオーバーラップを確保できるように被写体の周りを少しずつ動きながら撮影し

た。No.1 では、建物の規模が大きく、手持ちカメラで撮影することが困難であったことから空撮のみとし、No.4 では、空撮と手持ちカメラの2種類で撮影した。撮影枚数およびカメラから被写体までの撮影距離は表2に示す通りであり、No.3 では、手持ちカメラで2種類の距離で撮影した。なお、本研究における写真測量による屋根上積雪深は、屋根表面からの相対深さとして捉えた。従って、屋根雪のない屋根表面の3Dメッシュが必要となる。No.1～3 では、屋根に積雪がない状態での写真撮影を測定日以外に実施し、No.4 においては、屋根雪の写真撮影および実測が終了した後に実測した領域を除雪し、屋根表面の写真撮影を行った。

被写体（建物および屋根雪）の3Dメッシュを生成するソフトウェアは、AgisoftのPhotoScanを用いた。本ソフトウェアでは、生成する高密度ポイントクラウドを数段階で設定することが可能であり、そのポイントの増加に伴い解析時間が増加する。本研究では、解析時間を24時間程度と設定して3Dメッシュを生成することとし、生成する高密度ポイントクラウドは、いずれの建物においても、300万点程度を目指した。一方、撮影距離については、本ソフトウェアで撮影画像を解析した際に、モデル化された被写体と撮影位置が表示されることから、被写体と撮影位置との相対関係から撮影距離を推定した。また、空撮の場合は、撮影位置が様々となったことから、表2には、各撮影画像から推定された撮影距離の平均値を示した。

屋根上積雪深の実測は、10mm刻みの目盛りが付いた雪尺を用いて行った。各建物で1本の測線を対象とし、その測線上において0.10～0.30mの間隔で鉛直方向に屋根上積雪深を測定した。

### 3. 研究結果

#### 3.1 3Dメッシュの生成状況

No.1のアーチ屋根で行った空撮の状況を写真1に示す。写真のように、小型のUAVにコンパクトデジタルカメラを直付けし、250枚の画像を空撮した。この空撮で得られた画像の状態と生成された3Dメッシュを図2に示す。図のように、様々な箇所の鮮明画像を撮影することができたものの、UAVにカメラを直付けしているため、その振動がカメラに伝達するとともに、UAVの姿勢制御に伴う揺れが断続的に生じていることから、フォーカスが合っていない画像が全体の約1/3を占めてい



写真1 空撮状況

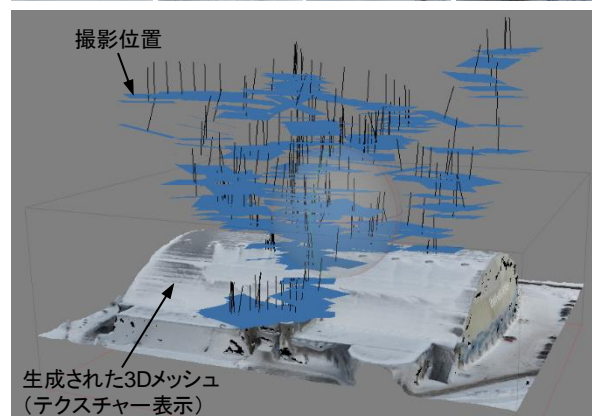
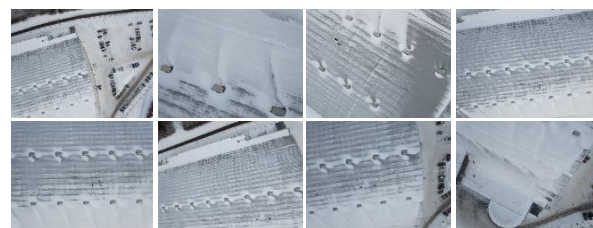


図2 撮影画像と3Dメッシュ (No.1)

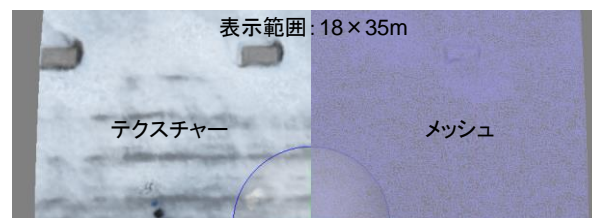


図3 生成した3Dメッシュの大きさ

る。しかし、撮影位置はソフトウェア上で適正に推定されており、目標としていた約300万点の高密度ポイントクラウドが生成された。テクスチャー表示した3Dメッシュをみると、撮影画像の状態に近いモデルが得られていることがわかる。生成されたメッシュの大きさを図3に示す。図のように、生成されたメッシュは非常に小さく、屋根面にあるベンチレーターの部分や、その周辺の吹きだまり状況も概ね捉えることができています。このように、撮影位置が適正に推定され、高密度ポイントクラウドが多く生成することができれば、画像の状態に近いテクスチャーでモデルが表示されるとともに、繊細な3Dメッシュを獲得できる。

2014年12月6日におけるNo.2の撮影した画像の状態と3Dメッシュの生成状況を図4に示す。



図のように、撮影画像の状態をみると、当日の天候は晴れで、実測に伴う数多くの足跡が認識できるとともに、雪面の模様も捉えやすい画像である。3D メッシュの生成状況をみると、目標としていた高密度ポイントクラウド数を生成することができ、極めて解像度の高いテクスチャーで 3D メッシュが表示されている。これに対し、2015 年 1 月 11 日における No.2 の撮影した画像の状態と 3D メッシュの生成状況を図 5 に示す。図のように、当日の天候は雪からくもりへと変化した。周囲はやや暗い状態であり、前述の晴れた状態に比べて雪面の模様は全く認識できない。このような場合、ソフトウェア上で撮影位置を正しく推定できたとしても 3D メッシュを生成できない恐れがあったことから、実測線上に青色の粉チョークを散布して撮影を行った。ここで、3D メッシュの生成状況をみると、粉チョークを散布した箇所と足跡が認識できる箇所で 3D メッシュを獲得することができたものの、雪面の模様等が認識できない領域は、高密度クラウドポイントが生成されず、3D メッシュを獲得できなかった。高密度ポイントクラウドは、画像の画素を基に生成され、被写体表面の模様が単調で同じ色の画素が広がって分布している場合は、撮影位置が正しく推定された場合においても、画素の位置を特定できないことがある。このことが要因で 3D メッシュが生成されなかったと考えられる。これに対し、粉チョークを散布した領域や足跡が認識できる、あるいは、直射光が得られた状態の画像では、雪面における画素の色が様々な状態となっているため、3D メッシュを獲得することができたと考えられる。

No.3 の場合における撮影した画像の状態と 3D メッシュの生成状況を図 6 および図 7 に示す。なお、建物の裏側に立ち入ることができなかったことから、切妻屋根の片側のみを測定の対象とした。また、本調査日は、天候がくもりから晴れに変わっており、くもりと晴れの 2 種類の状態で撮影した。図のように、くもりの状態で撮影した図 6 の画像をみると、前述の No.2 で撮影した場合と同様に、雪面の模様が捉え難い。生成された 3D メッシュをみると、建物壁面のメッシュは適正に生成されているものの、雪面のメッシュは部分的に生成されない、あるいは、雪面が平らであったにもかかわらず起伏があるように生成され、精度が良いとは言えない状態である。これに対し、晴れの状態で撮影

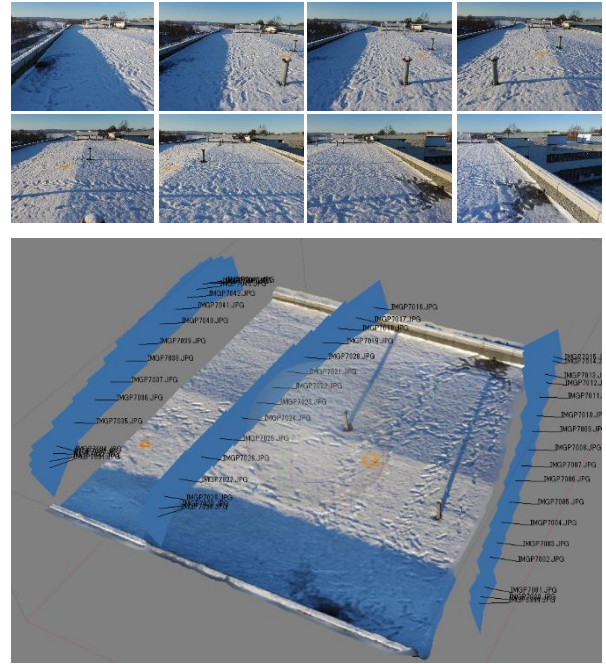


図 4 撮影画像と 3D メッシュ (No.2 12/6)

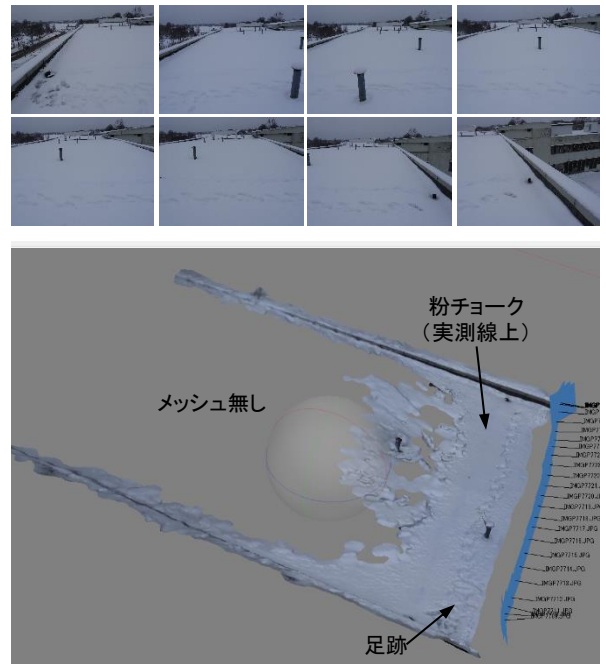


図 5 撮影画像と 3D メッシュ (No.2 1/11)

した図 7 の画像をみると、くもりの場合に比べて雪面の模様が認識できるようになり、適正な 3D メッシュを獲得することができた。

No.4 における空撮で得られた画像の状態と 3D メッシュの生成状況を図 8 に示す。図のように、空撮で鮮明な画像が得られた一方で、フォーカスが合っていない画像も多く、その画像は全体の約 1/2 を占めた。3D メッシュの生成状況をみると、目標としていた数の高密度ポイントクラウドが生

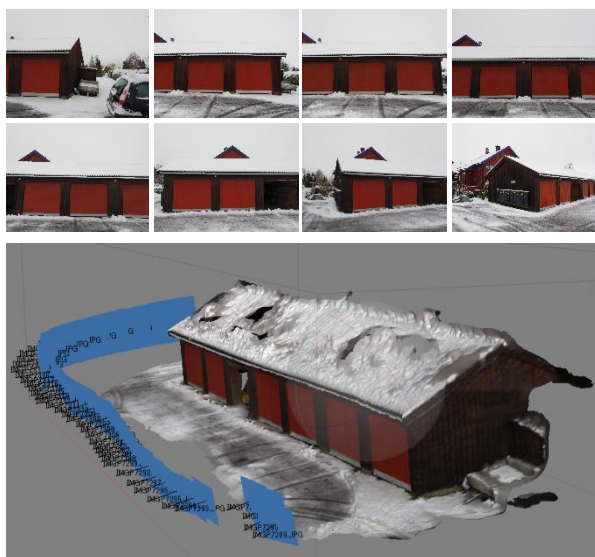


図6 撮影画像と3Dメッシュ (No.3 A)



図7 撮影画像と3Dメッシュ (No.3B)

成されたものの、フォーカスが合っていない画像に依存する傾向があり、テクスチャー表示の3Dメッシュが鮮明ではない部分がみられる。次に、手持ちカメラで撮影した画像の状態と3Dメッシュの生成状況を図9に示す。図のように、建物の裏側で撮影することができなかったため、切妻屋根の片側のみを対象としたが、直射光を得られる環境にあったことから雪面の模様が捉えられており、鮮明な3Dメッシュを獲得することができた。

以上に示す3Dメッシュ生成状況の結果をまとめると、天候が晴れて直射光が得られる環境の場合は、白い雪面でも細かな模様を撮影することができる。それによって十分な数の高密度ポイントクラウドが生成され、繊細な3Dメッシュを獲得することができた。これに対し、天候がくもりで雪面

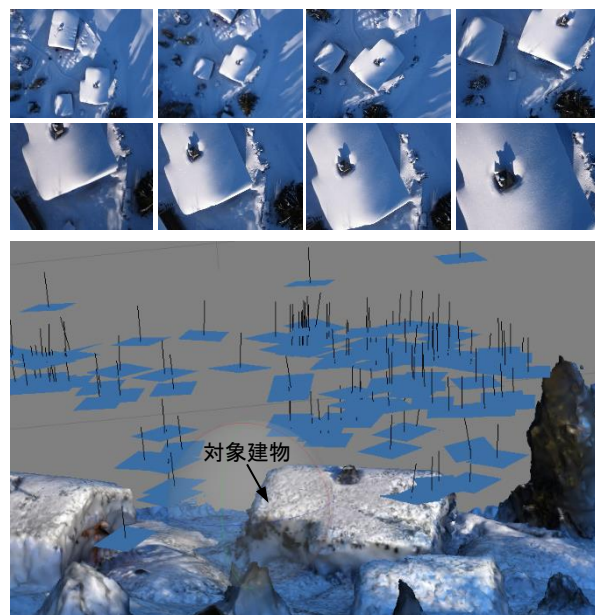


図8 撮影画像と3Dメッシュ (No.4 空撮)

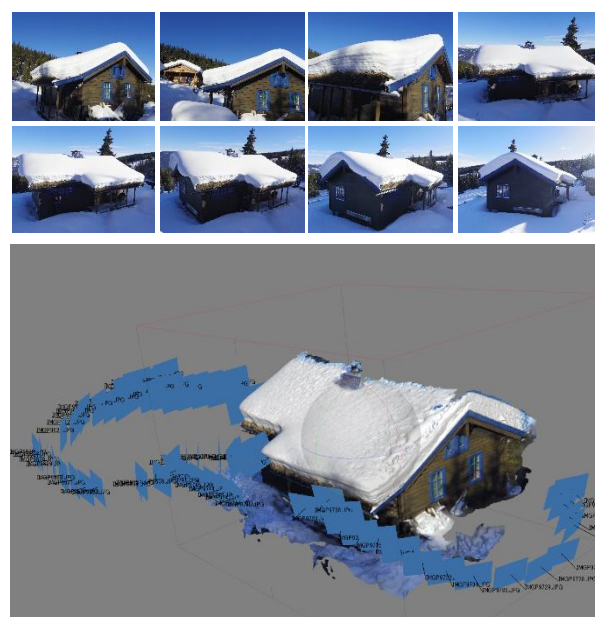


図9 撮影画像と3Dメッシュ (No.4 手持ち)

の様子が単調になっている撮影画像を用いた場合は、撮影位置が正しく推定されたとしても3Dメッシュが部分的に生成されないことが明らかとなった。

### 3.2 写真測量の測定値と実測値との比較

実測線を対象に、写真測量による3Dメッシュから得られた屋根上積雪深の測定値と実測値との比較を行った。図10に、No.1のアーチ屋根で比較した結果を示す。なお、写真測量で得られた積雪がない屋根表面および雪面の3Dメッシュを座標値として表示した。屋根上積雪深の実測値は屋根表面からの相対深さとなるが、写真測量による



【No.1 アーチ屋根】

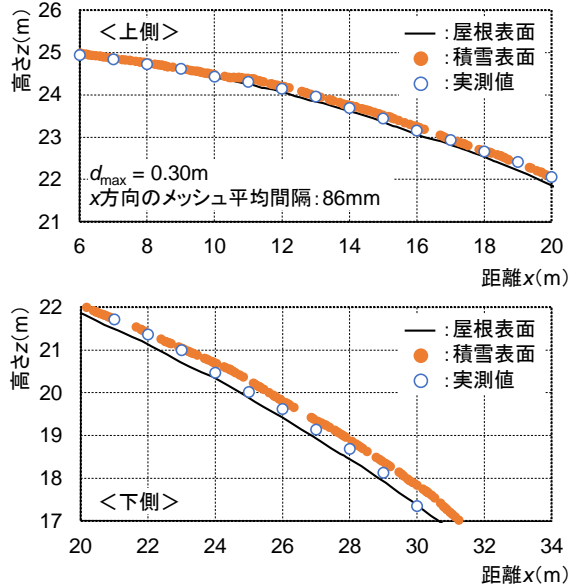


図 10 測定値と実測値との比較 (No.1)

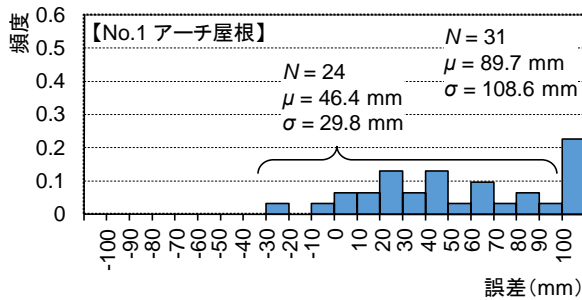


図 11 誤差の分布 (No.1)

屋根表面の 3D メッシュを基準として実測値を座標値に変換して表示した。また、アーチ屋根の上側と下側を分けて示した。図のように、x 方向のメッシュ平均間隔は 86mm と小さく、繊細なメッシュが得られていると考えられる。アーチ屋根上側の測定値と実測値とを比較すると、測定値が実測値に比べて大きめであるものの、アーチ頂部から下側に向かって屋根雪が分布していくタイミングは写真測量で再現されている。一方、アーチ屋根下側をみると、測定値が実測値に比べて大きくなる傾向が顕著となっている。

ここで、実測値を屋根上積雪深の真値と捉え、測定値から実測値を引いて算定した誤差の分布を図 11 に示す。図のように、誤差の大半は 0mm 以上に分布しており、100mm 未満では概ね正規分布を成しているものの、100mm 以上の誤差が全体の 20%程度を占めている。このような誤差が 100mm 以上と大きくなった箇所をみると、いずれもアーチ屋根の下側であった。誤差の平均値  $\mu$  が 89.7mm,

【No.2 陸屋根】

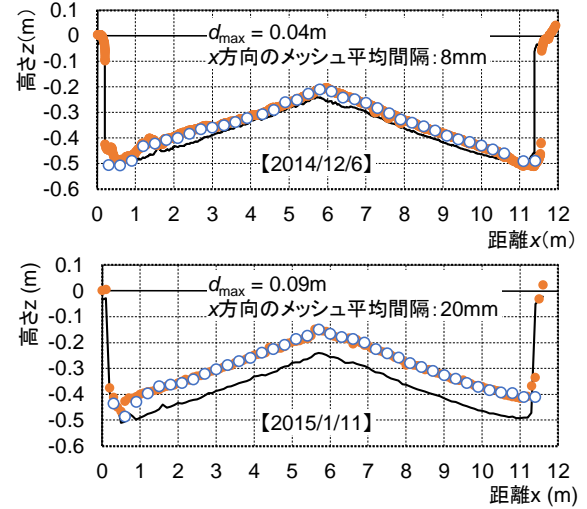


図 12 測定値と実測値との比較 (No.2)

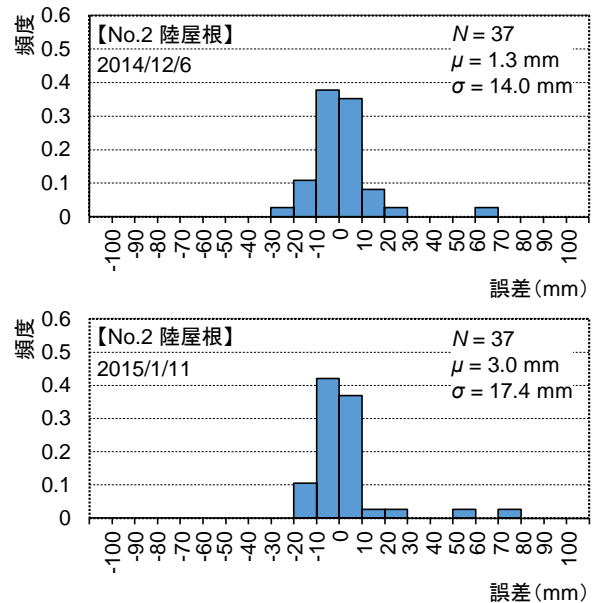


図 13 誤差の分布 (No.2)

標準偏差  $\sigma$  が 108.6mm であり、正規分布を成している 100mm 未満を対象とした  $\mu$  が 46.4mm,  $\sigma$  が 29.8mm であった。すなわち、アーチ屋根上側では測定値が実測値に比べて 40~50mm 程度大きく、アーチ屋根下側の大きな誤差によって全実測値から算定した  $\sigma$  が大きくなったと言える。

No.2の陸屋根の場合で測定値と実測値とを比較した結果を図 12 に示す。図のように、測定日ごとに x 方向のメッシュ平均間隔を比較すると、2014 年 12 月 6 日が 8mm, 2015 年 1 月 11 日が 20mm であり、雪面の模様を認識し易い画像の方がメッシュ間隔は狭い。測定値と実測値を比較した結果をみると、いずれの測定日においても両者が概ね対応している。図 13 に示す誤差の分布をみても、

その平均値  $\mu$  は 1.0~3.0mm であり、標準偏差  $\sigma$  は 14.0~18.0mm と小さな値を示している。

No.3の勾配屋根Ⅰの場合における測定値と実測値とを比較した結果を図 14 に示す。図のように、 $x$  方向のメッシュ平均間隔は、撮影距離が 7m で 24mm、15m で 44mm となり、撮影距離の増加に伴いメッシュ平均間隔が増加する関係を示す。これは、メッシュ生成の基となる高密度ポイントクラウドが画素を単位としており、撮影距離の増加に伴い建物に対する画素のサイズが大きくなるため、メッシュ間隔が増加したものと考えられる。No.2 および No.3 のメッシュ間隔に比べて No.1 のメッシュ間隔が大きくなることも、撮影距離が大きく建物に対する画素のサイズが大きくなったためである。ここで、測定値と実測値を比較した結果をみると、いずれの撮影距離においても、測定値と実測値が概ね対応しており、撮影距離 15m の測定値は、実測値に比べて若干小さい傾向を示す程度であった。図 15 に示す誤差の分布をみると、いずれの撮影距離においても、正規分布に近似しており、標準偏差  $\sigma$  は、いずれも同程度である。一方、誤差の平均値  $\mu$  は、撮影距離 7m の場合で 2.9mm、撮影距離 15m の場合で -16.2mm となっていることから、撮影距離が大きいほど、誤差の分布がシフトすることがわかる。

No.4の勾配屋根Ⅱの場合における測定値と実測値とを比較した結果を図 16 に示す。図のように、空撮では切妻屋根の両側を、手持ちカメラでは切妻屋根の片側を対象とした。空撮の場合をみると、フォーカスが合っていない画像が多く含まれていることから、生成されたメッシュに小さい凹凸が確認できる。測定値と実測値とを比較すると、No.2 や No.3 の場合に比べて両者の誤差が大きい傾向を示す。なお、No.4 の勾配屋根Ⅱは、ノルウェーで伝統的な植栽を施した屋根であり、実測で用いた雪尺の先端が生成した屋根表面の 3D メッシュより数十 mm 深く刺さったり、浅かったりしている可能性があり、こうした実測誤差が大きく影響していると考えられる。次に、手持ちカメラの場合をみると、生成した雪面の 3D メッシュは滑らかであり、空撮の場合に比べて測定値と実測値との誤差は小さい。図 17 に示す誤差の分布をみると、空撮と手持ちカメラのいずれにおいても、誤差の分布は正規分布を成しておらず、空撮の場合は、 $\mu$  と  $\sigma$  のいずれも大きな値となった。これは、フォ

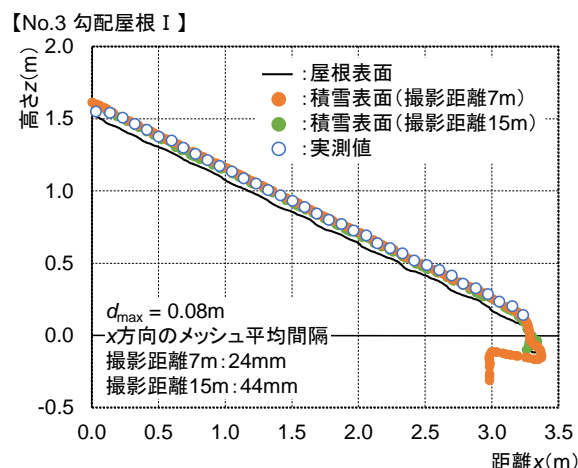


図 14 測定値と実測値との比較 (No.3)

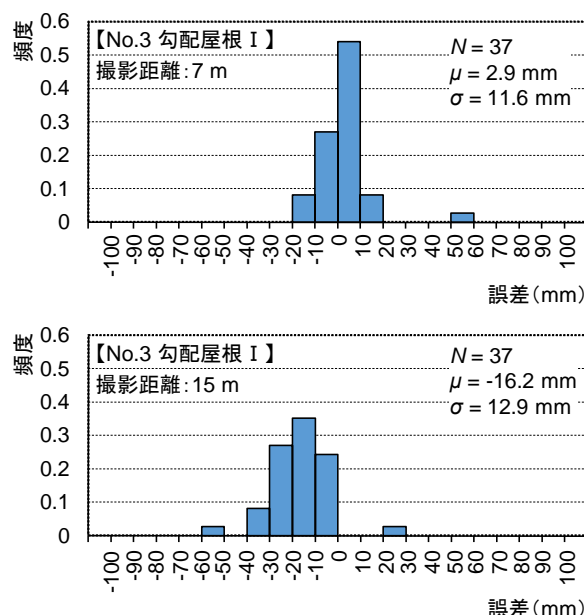


図 15 誤差の分布 (No.3)

ーカスが合っていない画像が多く含んだ状態で 3D メッシュを生成したことに加えて、実測誤差が影響したと考えられる。一方、手持ちカメラの場合をみると、 $\mu$  は -16.0mm であり、No.3 の撮影距離 15m の場合と同程度であるものの、 $\sigma$  は 55.2mm と大きい。これは、実測誤差の大きさが影響していると考えられる。

### 3.3 撮影距離・撮影方法と測定精度との関係

以上に示した測定値と実測値とを比較した結果および誤差の分布をみると、3D メッシュ生成に用いる画像の状態や撮影距離が生成されるメッシュの大きさや写真測量による測定精度に影響を及ぼしていると考えられる。ここで、撮影距離と  $x$  方向のメッシュ平均間隔との関係を図 18 に示す。図

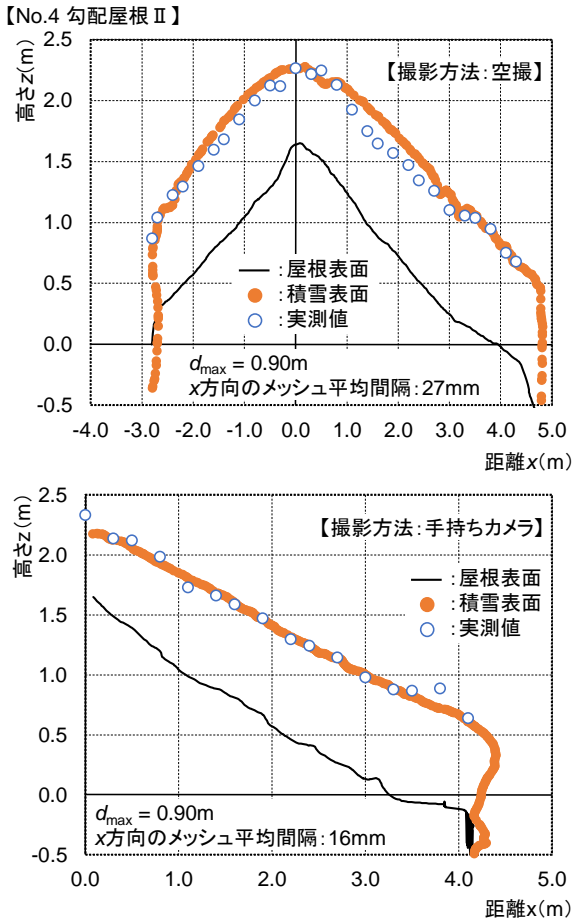


図 16 測定値と実測値との比較 (No.4)

のように、撮影方法に関わらず、撮影距離の増加に伴いメッシュ平均間隔が増加する高い相関関係がみられ、本研究において雪面を対象に生成した 3D メッシュの平均間隔は図中に示す回帰式で表すことができる。

桜井らの研究に従い<sup>(7)</sup>、誤差の平均値の絶対値に標準偏差を加えた $|\mu| + \sigma$ を測定誤差と捉え、撮影距離と測定誤差との関係を図 19 に示す。なお、図中には図 18 で求めた撮影距離とメッシュ平均間隔との関係を示している。図のように、撮影距離の増加に伴い測定誤差が増加する関係がみられる。アーチ屋根下側の大きい誤差を含んで算定した No.1 の測定誤差と、実測誤差が存在すると考えられる No.4 の場合を除くと、測定誤差はメッシュ平均間隔と同程度である。次に、実測で得られた屋根上積雪深の最大値  $d_{\max}$  と、その  $d_{\max}$  に対する測定誤差の割合との関係を図 20 に示す。図のように、 $d_{\max}$  の増加に伴い測定誤差の割合が減少する関係がみられ、手持ちカメラの場合において  $d_{\max}$  が 0.10m 程度では、測定誤差の割合が 20~40% の値を示している。これらのケースでは、測定誤差が大

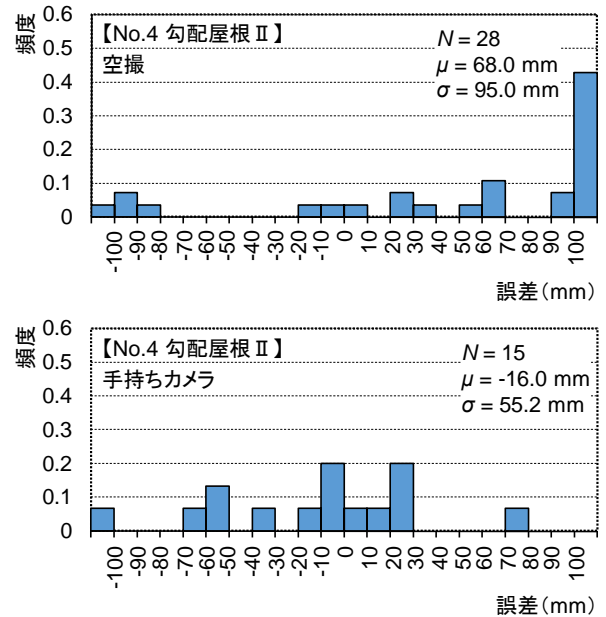


図 17 誤差の分布 (No.4)

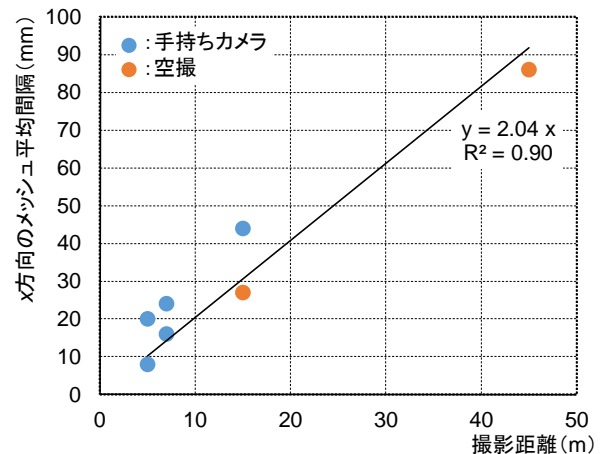


図 18 撮影距離とメッシュ平均間隔との関係

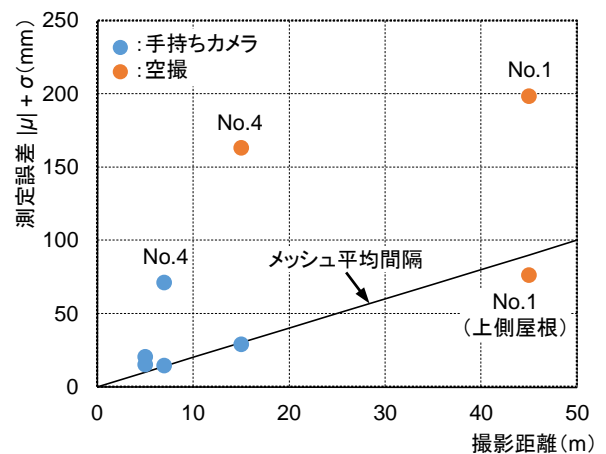


図 19 撮影距離と誤差の平均値との関係

きいように見えるものの、その誤差の実数は 10~30mm であり、十分な精度で屋根上積雪深を測定



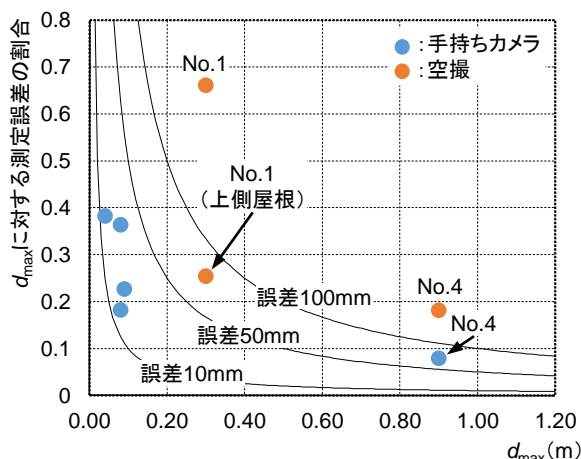


図 20  $d_{\max}$  と測定誤差との関係

できていると判断できる。No.4 で手持ちカメラの場合をみると、実測誤差が多く含まれていると考えられるが、測定誤差の割合は 10% を下回っている。このように、手持ちカメラで撮影した画像による写真測量の測定精度は、比較的高いと考えられる。これに対し、空撮の場合は、測定誤差の割合と実数のいずれにおいても大きい傾向を示す。これは、フォーカスが合っていない画像が含まれている影響であると考えられる。本研究では、軽量化および簡易化に主眼を置いて UAV にコンパクトデジタルカメラを直付けしたものの、ジンバルやピカペイ<sup>(3)</sup>を介してカメラを取り付け、フォーカスが合っている鮮明な画像のみを用いて 3D メッシュを生成することができれば、測定誤差を小さくすることが可能であると考えられる。

以上の結果をまとめると、撮影距離の増加に伴い 3D メッシュの平均間隔が増加する関係がみられ、その間隔と写真測量による測定誤差がほぼ同程度になることが明らかとなった。また、手持ちカメラで撮影した画像を用いて写真測量を行う場合は、フォーカスが合った鮮明な画像を安定して取得できるとともに、撮影距離が比較的短くなることから、屋根上積雪深の測定精度を十分に確保することができると言える。手持ちカメラでの写真測量は、地上から撮影が可能な勾配屋根の屋根上積雪深に加えて、軒先に形成された雪庇などに対しても有効な測定手法となり得る。これに対し、空撮による写真測量の場合は、フォーカスが合っている鮮明な画像の取得が必須であり、安価で利用し易い UAV を用いて鮮明な画像を取得する工夫を行った上で撮影距離と測定精度との関係を分析するためのデータ蓄積が必要であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、屋根上積雪深を対象としたデジタル画像を用いた写真測量の可能性を検討することを目的に、ノルウェーに建設されている 4 棟の建物で写真測量を行い、その精度を検討した。デジタル画像の撮影方法は、小型の UAV を用いた空撮と手持ちカメラの 2 種類とした。その結果、撮影距離の増加に伴い屋根上積雪の画像から生成された 3D メッシュの平均間隔が増加し、その平均間隔は屋根上積雪深の測定誤差と同程度であった。また、手持ちカメラで撮影した画像を用いた写真測量では、十分な精度で屋根上積雪深を測定することができた。これに対し、空撮による写真測量では、屋根上積雪深の測定精度が十分とは言えず、空撮方法に課題を残した。

今後は、空撮で鮮明な画像を撮影できる仕組みを検討し、写真測量の事例を増加させるとともに、その精度を検証していく予定である。

#### 【参考文献】

- (1) Agisoft: Agisoft PhotoScan, 入手先 < <http://www.agisoft.com/>>, 参照 2015.9.11
- (2) 内山庄一郎, 井上公, 鈴木比奈子: SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究, 防災科学技術研究報告, 第 81 号, 2014, pp.37-60.
- (3) 井上公, 内山庄一郎, 鈴木比奈子: 自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術, 防災科学技術研究報告, 第 81 号, 2014, pp.61-98.
- (4) Mark S. Erickson, Jeremy J. Bauer and Wilson C. Hayes: The Accuracy of Photo-Based Three-Dimensional Scanning for Collision Reconstruction Using 123D Catch, SAE2013-01-0784, 2013, pp.1-10.
- (5) E. Bernard, J.M. Friedt, F. Tolle, et al.: Monitoring seasonal snow dynamics using ground based high resolution photography, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 75, 2013, pp.92-100.
- (6) Keqin Yan and Tao Cheng: Close Shot Photogrammetry for Measuring Wind-Drifted Snow Distribution on Stepped Flat Roofs, 2008 ISECS International Colloquium on Computing Communications, Control, and Management, 2008, pp.332-335.
- (7) 桜井修次, 城攻: 屋根上積雪深測定への空中写真測量の応用に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 450 号, 1993, pp.25-35.
- (8) 湯川崇, 谷口尚弘, 苫米地司: 戸建住宅地における街区内および住戸周辺の雪堆積状況-空中撮影画像からみる雪堆積形成の分析-, 日本建築学会計画系論文集, 第 76 巻, 第 667 号, 2011, pp.1537-1543.