

【2-1】

## 気象観測結果と熱収支モデルに基づく地上積雪重量の推定方法の検証

正会員  
正会員

○ 富永 禎秀\*  
五十嵐 賢次\*\*

地上積雪重量 熱収支モデル 推定方法  
気象観測

### 1. はじめに

建築基準法において、屋根雪荷重を算定するための地上積雪重量は、各特定行政庁で指定されている垂直積雪量に単位重量を乗じて算定することとされている。ここで単位重量に関しては、多雪区域が 30N/m<sup>2</sup>/cm 以上、それ以外の地域が 20N/m<sup>2</sup>/cm 以上と規定されている。しかし、2014 年 2 月の関東地方での大雪のように、降雪後に降雨があるようなケースでは、このような単位重量では積雪重量は非常に過小に評価されてしまう。設計者に対して誤解を生じさせないように直接的に荷重値を示すことが本来は望ましく、ACSE 7 や Eurocode では、面積当たりの地上積雪重量が直接的に規定されている<sup>1)</sup>。また 2004 年以降の日本建築学会の建築物荷重指針・同解説<sup>2)</sup>では、降水量と気温に基づいて算出された地上積雪重量における再現期待値 100 年の値が提示されている。

文献 2 で示されている降水量と気温に基づく雪荷重評価結果は、Takahashi ら<sup>3)</sup>の方法に基づいて計算されている。この方法は、最小密度  $\rho_{min}$  と融雪係数  $C_m$  をパラメータとし、降水量から降雪イベントごとに形成される積雪層の時刻歴を推定することによって地上積雪重量の最大値を求めるものである。文献 2, 3 において、推定値と観測値がよく対応することが確認されているが、パラメータの決定方法に課題がある他、積雪重量を観測している事例が少ないため、直接的な積雪重量の予測精度は十分明らかではない。

本研究では、降水量や風速などの気象要素の観測結果と雪面での熱収支モデルを用いて、地上積雪重量を推定し、同条件下で計測された積雪重量との比較により、その精度を検証する。なお将来的には、この予測手法を、地上積雪深に比べて、より直接的に日射や風速などの気象要素の影響を受けると考えられる屋根上積雪重量の予測モデルへと展開することを意図している。

### 2. 解析概要

#### 2.1 熱収支モデル

本研究で採用した熱収支モデルは近藤・山崎のモデルに基づく<sup>4)</sup>。積雪面の熱収支の構成を図 1 に示す。積雪面の熱収支は(1)式で表せる。

$$M = R - L + H + E \quad (1)$$

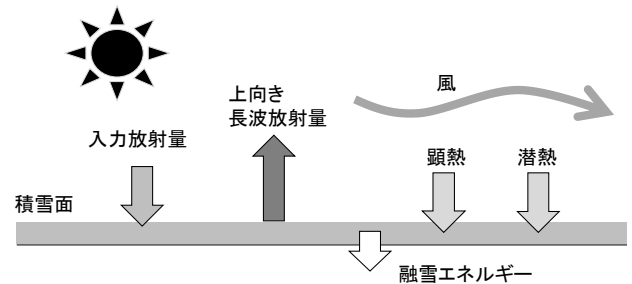


図 1 積雪面熱収支の構成

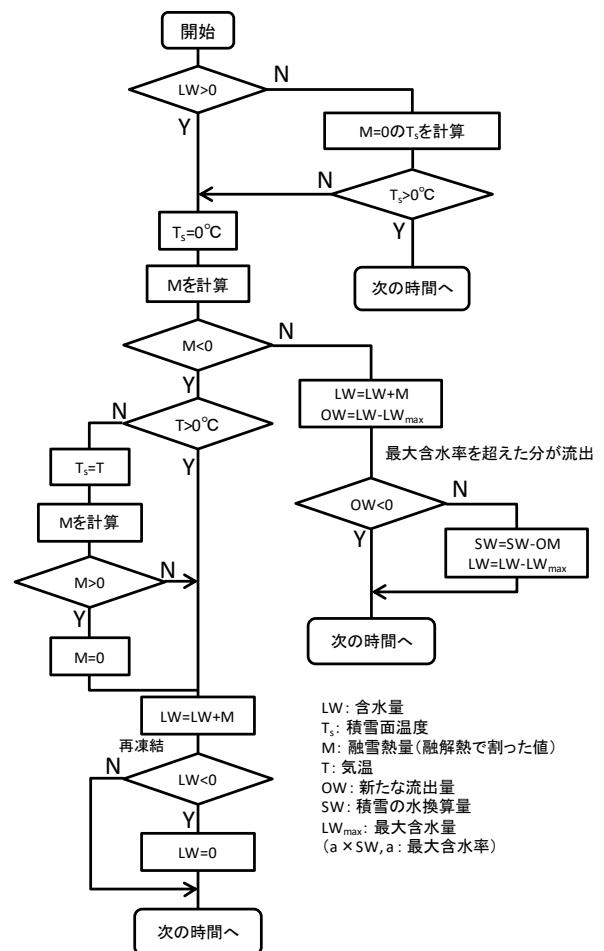


図 2 融雪モデルのフローチャート

各構成要素は以下のように計算される。

(1) 入力放射量  $R$  [W/m<sup>2</sup>]

$$R = (1 - ref)S^{\downarrow} + L^{\downarrow} \quad (2)$$

ref : アルベド

$S^{\downarrow}$  : 全天日射量[W/m<sup>2</sup>]

$L^{\downarrow}$  : 大気放射量[W/m<sup>2</sup>]

(2) 上向き長波放射量 L[W/m<sup>2</sup>]

$$L = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

$\varepsilon$  : 積雪の射出率

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数[W/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>]

$T_s$  : 積雪表面温度[K]

(3) 顕熱輸送量 H[W/m<sup>2</sup>]

$$H = C_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (4)$$

$C_p$  : 空気の比熱[J/kg/K]

$\rho$  : 空気の密度[kg/m<sup>3</sup>]<sup>注1)</sup>

$C_H$  : 顕熱輸送のバルク輸送係数

$U$  : 高度 1.0m での風速[m/s]<sup>注2)</sup>

$T$  : 気温[K]

(4) 潜熱輸送量 E[W/m<sup>2</sup>]

$$E = \iota \rho C_E U [(1 - rh) q_{sat}(T) + \Delta \cdot (T_s - T)] \quad (5)$$

$\iota$  : 氷の昇華の潜熱または水の気化の潜熱[J/kg]

$C_E$  : 潜熱輸送のバルク輸送係数

rh : 相対湿度

$q_{sat}(T)$  : 気温に対する飽和比湿[kg/kg]<sup>注3)</sup>

$\Delta$  : 飽和比湿の温度に対する変化率<sup>注4)</sup>

(5) 融雪エネルギー M[W/m<sup>2</sup>]

積雪表面温度  $T_s$ [K] は次式で算出される。

$$T_s = \frac{[R - \varepsilon \sigma T^4 - \iota \rho C_H U (1 - rh) q_{sat}(T)]}{[4 \varepsilon \sigma T^3 + (\iota \Delta + C_p) \rho C_H U]} + T \quad (6)$$

(6)式で求めた  $T_s$  が 0°C以下であれば、融雪は起きないとして次のステップに進む。もし  $T_s > 0^\circ\text{C}$  となったときには、 $T_s = 0^\circ\text{C}$  とおき直す。このときの  $M$  を(1)式を使って求める。ここで  $M > 0$  ならこれが融雪に使われるエネルギーである。

## 2.2 積雪重量の算出方法

(1) 雨雪の判定

雨雪判別気温以上で降雨、雨雪判別気温未満で降雪とみなす。本研究では、0.5°Cを採用した<sup>5,6)</sup>。

(2) 降水量の補正

Takahashi<sup>ら</sup>も指摘している通り、降雪による降水量は補正する必要がある。計測された降水量は、補正率を仮定して、以下の通り補正を行った。

$$P' = P / C_R \quad (7)$$

P : 降水量計による計測値

$C_R$  : 捕捉率<sup>注5)</sup>

(3) 重量変化の計算

融雪量算出のフローを図2に示す。融雪によって氷から水に変化する重量は、融雪エネルギー M を用いて次式で表される。

$$M_H = M * 3600 / C_M \quad (8)$$

$C_M$  : 氷の融解熱

$M > 0$  の場合、積雪中の含水率が  $M_H$  増加し、最大含水量  $LW_{max}$  ( $a \times SW$ ,  $a$ : 最大含水率) を超えた分が新たな流出量 OW となる。 $M < 0$  の場合、積雪内の液体水を再

凍結させることになるが、 $T < 0^\circ\text{C}$  の場合には  $T_s = 0^\circ\text{C}$  は一般に高すぎることから、 $T_s = T$  として、M を再計算する。

## 2.3 検証用観測データ

防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター(新潟県長岡市、山形県新庄市)の積雪・気象観測露場の気象データを用いて予測した積雪重量と、同露場で実際に計測された地上積雪重量と比較した。積雪重量はメタルウェハー式積雪重量計によって計測されている。その他の気象要素の観測方法の詳細は文献 8,9 参照。

## 3. 解析結果

### 3-1 アルベドの値が結果に及ぼす影響

2015-16 冬期の長岡における地上積雪重量の観測値と推定値の比較を図 3(1)に示す。アルベドは、雪面での短波放射エネルギーの反射率であり、値が 1 に近いほど雪面が受けるエネルギーは小さい(2)式参照)。0.7 とした場合が最も観測値と良く合う結果となった。次に、2010-11 冬期の比較を図 3(2)に示す。アルベドを 0.65 とした場合が最も観測値と合う結果となった。これらの結

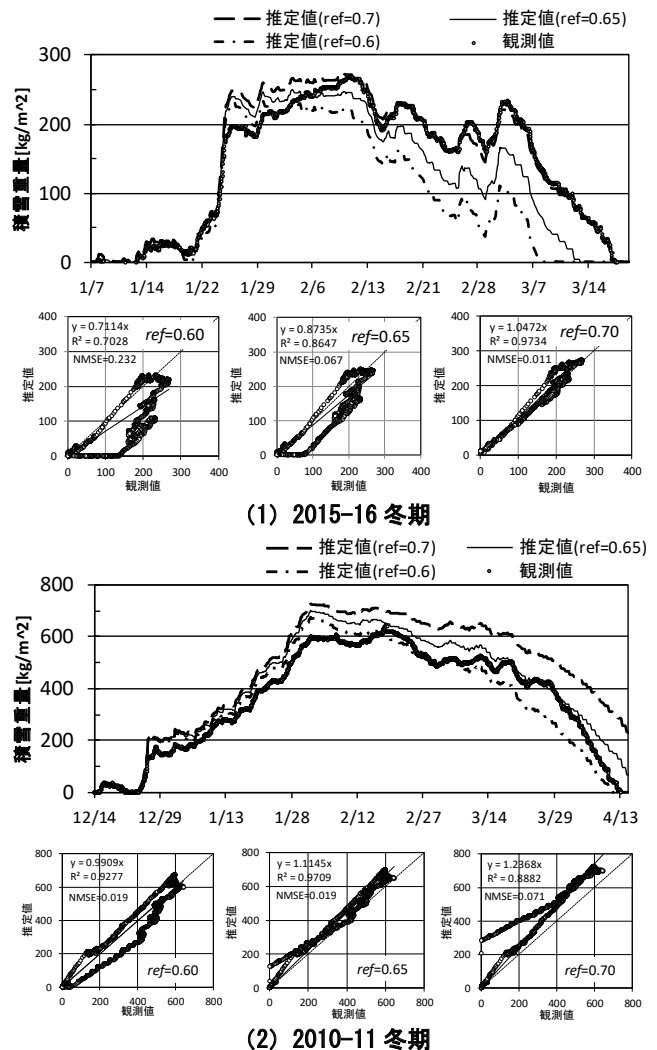


図3 時刻別積雪重量の観測値と推定値の比較(長岡)

表1 アルベドを変えた場合のR2とNMSE

アルベド		2015-16	2012-13	2011-12	2010-11	2009-10	2008-09	2007-08	平均値		
定値	ref=0.6	R2	0.703	0.977	0.864	0.928	0.807	0.897	0.641	0.831	
		NMSE	0.232	0.008	0.143	0.019	0.133	0.022	0.431	0.141	
	ref=0.65	R2	0.865	0.967	0.964	0.971	0.865	0.963	0.739	0.905	
		NMSE	0.067	0.010	0.034	0.019	0.119	0.055	0.264	0.081	
	ref=0.7	R2	0.973	0.904	0.994	0.888	0.857	0.883	0.816	0.902	
		NMSE	0.011	0.097	0.002	0.071	0.278	0.182	0.161	0.115	
変数	C <sub>1</sub> =0.03	C <sub>2</sub> =0.75	R2	0.972	0.910	0.995	0.960	0.870	0.921	0.811	0.920
			NMSE	0.018	0.056	0.004	0.065	0.194	0.215	0.169	0.103
	C <sub>1</sub> =0.05	C <sub>2</sub> =0.7	R2	0.789	0.994	0.914	0.948	0.854	0.967	0.674	0.877
			NMSE	0.109	0.004	0.045	0.021	0.124	0.048	0.359	0.101
		C <sub>2</sub> =0.75	R2	0.913	0.969	0.977	0.993	0.880	0.970	0.757	0.923
			NMSE	0.034	0.030	0.008	0.036	0.156	0.148	0.234	0.092
	C <sub>2</sub> =0.8	R2	0.988	0.953	0.993	0.956	0.855	0.902	0.819	0.924	
		NMSE	0.035	0.053	0.020	0.089	0.250	0.294	0.159	0.129	
	C <sub>1</sub> =0.07	C <sub>2</sub> =0.75	R2	0.842	0.995	0.943	0.967	0.873	0.978	0.695	0.899
			NMSE	0.067	0.014	0.021	0.027	0.136	0.097	0.317	0.097

果から、アルベドの最適値は、冬期毎に異なることが分かる。これは、アルベドが雪面の状態により変化するため、各冬期の降雪パターンの違いにより、実態のアルベドも異なっているためと考えられる。従って、アルベドを固定値とせず、雪面状態を考慮して日別のアルベドを変数として与える方法を検討する。本研究では、日平均アルベドの推定方法として、伊豫部らのアルベドモデルを適用した<sup>10)</sup>。降雪があった日より  $n$  日経過した日の日平均アルベド  $a_n$  を次式で求める。

$$a_n = (a_{n-1} - a_{min}) \exp(-1/k) + a_{min} \quad (9)$$

$k$ : アルベドの低下速さを表すパラメータ

$$k = -8.0T_{mean} + 14.8 \quad (T_{mean} \leq 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (10)$$

$$= 14.0 \quad (T_{mean} \geq 0.1 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$a_{min}$ : アルベドの取り得る最小値 (0.40)

降雪のあった日のアルベド  $a_{max}$  は次式で求める。

$$a_{max} = -C_1 T_{mean} + C_2 \quad (T_{mean} \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (11)$$

$$= C_2 \quad (T_{mean} \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C})$$

本研究では、(11)式の係数の組み合わせを変えて積雪重量を計算した。推定値と観測値との相関を評価した結果を表1に示す。なお平均値の算出では、推定精度が極端に悪かった2009-10冬期の結果(後述)を除外した。R2は決定係数を表し、1に近いほど相対的な残差が少ないことを表す。NMSEは平均二乗誤差を表し、0に近いほど両者の誤差は小さい。全ての冬期の結果の平均値から、アルベドを変数として  $C_1=0.05$ ,  $C_2=0.75$  とした場合の推定精度が、総合的に最も良い結果となった。

図は省略するが、2009-10冬期は、観測値に比べて推定値がかなり小さい。その原因を検討するため、積雪期間の総降水量の近い2010-11冬期と比較する。各冬期の降水量を、気温によって雨雪に判別した結果の累積を図4に示す。2009-10冬期は、2010-11冬期と比べ降雪量が少なく、積雪の始まりから雨による降水量が雪による降水量を大きく上回っている。そのため、積雪初期の多量の降雨により、本来、積雪重量計上から流出する水が、積雪内に保持されてしまった可能性が考えられる。

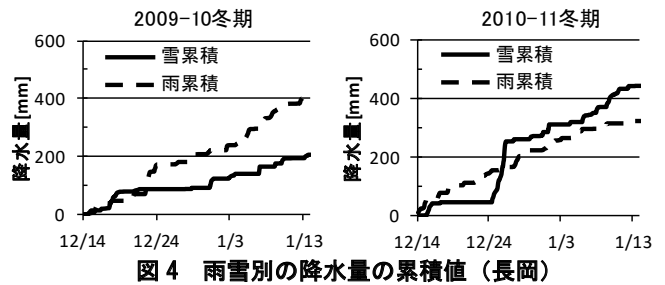
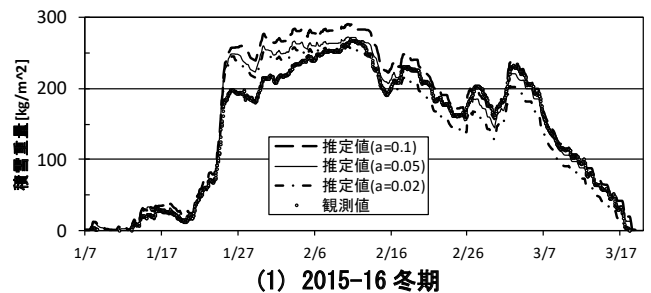
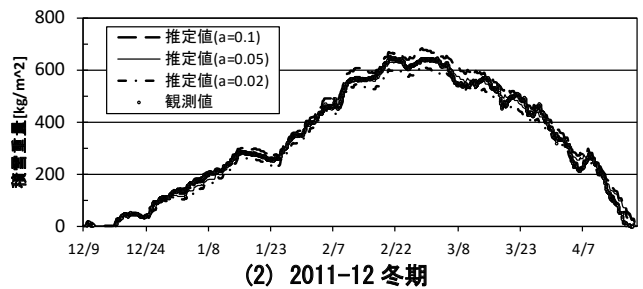


図4 雨雪別の降水量の累積値(長岡)



(1) 2015-16 冬期



(2) 2011-12 冬期

図5 積雪重量の推定値と観測値の比較(長岡)

### 3-2 最大含水率の値が結果に及ぼす影響

最大含水率  $a$  の値が予測結果に及ぼす影響を検討する。文献4では0.05が用いられていることから、0.1, 0.05, 0.02の3種類の値を比較した。2015-16冬期及び2011-12冬期の結果を図5に示す。この解析では、アルベドの値は一定値としている。最大含水率が推定値に及ぼす影響は小さい。

### 3-3 他地域の積雪重量予測への適用

本研究で用いた積雪重量推定モデルの気候条件の異なる地域への適用性を検討するため、新庄における積雪・

気象観測露場の観測データとの比較を行った。2016-2017 冬期と 2009-2010 冬期を対象にした比較を図 6 に示す。どちらの年も、変化の傾向は良く再現しているものの、観測値と比べ推定値全体がやや大きくなる結果になった。考えられる原因としては、使用したアルベドモデルは、比較的温暖な本州の長岡に合わせて調整したものであるため、長岡とは気象条件の異なる新庄では適さなかった可能性がある。

#### 4. 結論

- 1) 積雪重量推定モデルを推定値と観測値との比較によって検証した結果、アルベドを調整することで、積雪重量の時間変化を概ね正しく予測する事が出来た。
- 2) 観測値と推定値の相関を定量的に評価し、長岡におけるアルベドを推定するための最適なモデル及び係数を見出した。
- 3) 地域特性の異なる新庄において、積雪重量がやや過大評価されたことから、他地域における最適なアルベドモデルの検証等が今後の課題である。

注 1) 密度は以下の通り求めた。

$$\rho = P / \{R(t + 273.15)\} \quad (12)$$

P: 大気圧[hPa], R=2.87, t: 気温[°C]

注 2) 風速は、ベキ指数 0.17 を仮定し、ベキ乗則によって高さ補正を行った。

注 3) 気温  $T_s$  における飽和比湿[kg/kg]は次式で求めた。

$$\rho_{sat}(T_s) = 0.622 e_{sat}(T_s) / (p_s - 0.378 e_{sat}(T_s)) \quad (13)$$

気温  $T_s$  における飽和水蒸気圧[hPa]は次式で求めた。

$$e_{sat}(T_s) = 6.108 \times 10^{(7.5T_s / 237.5 + T_s)} \quad (14)$$

注 4) 飽和比湿の温度  $T$  に対する変化率は次式で求めた。

$$\Delta \equiv \frac{dq_{sat}}{dT} = \frac{de_{sat}}{dT} \times \frac{0.622 p_s}{(p_s - 0.378 e_{sat}(T))^2} = \frac{4098.03}{(237.3 + T)^2} \times e_{sat}(T) \quad (15)$$

注 5) 捕捉率は横山らの提案<sup>7)</sup>に従い、次式を用いた。

$$CR = \frac{1}{1 + mU_r} \quad (16)$$

$m$ : 降水量計の型式ごとに定められる係数(長岡は RT-3、新庄は RT-4 を使用)

$U_r$ : 降水量計開口部の高さにおける風速(その時刻の風速) [m/s]

注 6) 不凍液で満たされ、パイプで連結されている 4 枚のメタルウェハを地表に設置し、その上に積もった積雪による内部圧力の変化を測定することにより、積雪相当水量を求める方式である

#### 謝辞

本研究は科学研究費(16H04467)の助成を受けて行われた。本研究の実施にあたり、新潟工科大学建築学科 4 年生(当時) 廣川昂大氏の多大なるご協力を得た。また防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの観測データの使用に際しては、同センター山口悟研究員、根本正樹研究員に便宜を図って頂いた。同研究所・気象災害軽減イノベーションセ

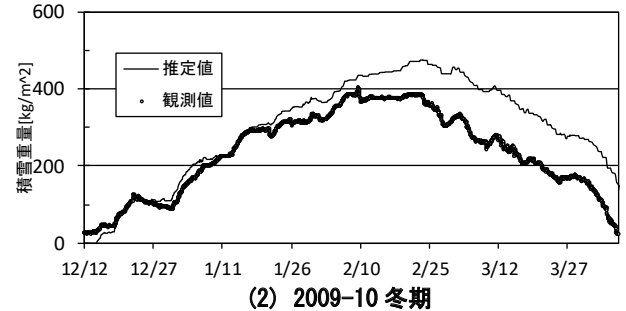
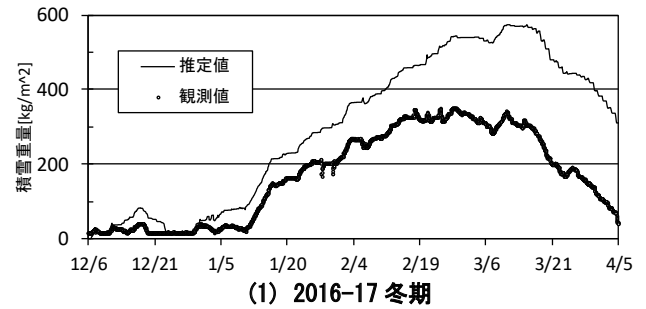


図 6 積雪重量の推定値と観測値の比較(新庄)

ンター長岡サテライトの皆様には貴重なご助言を頂いた。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 千葉隆, 高橋徹, 降水量をベースにした雪荷重評価について, 2014 年 2 月の大雪と積雪後の降雨を踏まえた建築物の耐雪設計に関するシンポジウム, 日本建築学会, (2017), pp.19-24.
- 2) 日本建築学会, 雪荷重, 建築物荷重指針・同解説(2015), pp. 214-235.
- 3) Takahashi, T., Kawamura, T., Kuramoto, K.: Estimation of ground snow load using snow layer model (積雪層モデルによる地上積雪重量の推定), 日本建築学会構造系論文集, 第 545 号(2001), pp.35-41.
- 4) 近藤純正, 山崎剛, 熱収支法による融雪量の予測, 雪氷 49 巻 4 号(1987), pp. 181-191.
- 5) 山口悟, 平島寛行, 石坂雅昭, 佐藤篤司, 積雪変質モデルを用いた平成 28 年豪雪における積雪特性の研究, 寒地技術シンポジウム (2006), pp. 44-47.
- 6) 山口悟, 佐藤篤司, 積雪深の変化に寄与する降雪の雨/雪判別気温に関する考察, 雪氷北信越 26 号(2006), pp.21.
- 7) 横山宏太郎, 大野宏之, 小南美靖弘, 井上聡, 川上俊和, 冬期における降水量計の補足特性, 雪氷, 65 (2003) pp. 303-316.
- 8) 本吉弘岐, 長岡における積雪観測資料(38)(2015/16 冬期) 防災科学技術研究所研究資料, (2017), pp. 1-28.
- 9) 佐藤研吾・小杉健二・根本征樹・安達 聖・阿部 修新庄における気象と降雪深の観測(2015/16 冬期), 防災科学技術研究所研究資料, 第 408 号 (2017), pp. 1-39
- 10) 伊豫部勉, 河島克久, 外狩麻子:温暖多雪地域に適用可能なアルベドモデルの検討 新潟大学災害・復興科学研究所年報

\*新潟工科大学・教授  
\*\*新潟工科大学・准教授

Professor, Niigata Institute of Technology  
Associate Professor, Niigata Institute of Technology