気象観測データと熱収支モデルに基づく地上積雪重量推定法

長岡市の観測データを対象としたモデルの感度解析と精度検証

METHOD TO ESTIMATE GROUND SNOW WEIGHT BASED ON METEOROLOGICAL OBSERVATION DATA AND HEAT BALANCE MODEL

Sensitivity analysis and validation of a model based on measurement data for Nagaoka

富永 禎秀^{*1}, 本吉 弘岐^{*2}

Yoshihide TOMINAGA and Hiroki MOTOYOSHI

A versatile method to estimate the weight of ground snow based on meteorological observation data and a heat balance model was proposed. The performance of the model in terms of estimating the maximum and 7-day increasing snow weights was validated through a comparison with measurement data of Nagaoka for eight winters. The sensitivity of the model parameters and accuracy were examined considering daily variation in snow weight. Furthermore, a disadvantage of the model, in that it requires a number of meteorological factors, could be overcome by estimating the unmeasured meteorological factors using the concept of extended AMeDAS meteorological data.

Keywords: Ground snow weight, Estimation method, Heat balance model, Meteorological observation data

地上積雪重量, 推定法, 熱収支モデル, 気象観測データ

1. はじめに

屋根雪荷重を正確に推定することは、積雪地域の安全な建築構造性能を確保する上で重要である。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。ここで単位重量は、多雪区域が $30\text{N/m}^2/\text{cm}$ 以上、それ以外の地域が $20\text{N/m}^2/\text{cm}$ 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過小に評価されてしまう¹⁾。積雪の密度が、気象条件や降雪後の経過時間、積雪の内部構造等によって大きく異なることはよく知られており、このような一律の単位重量を用いることは、積雪の本来の性質からは乖離している。設計者に対して誤解を生じさせないよう直接的に荷重値を示すことが本来は望ましく、海外の基準（例えば ASCE 7³⁾）等では、面積当たりの地上積雪重量が直接的に規定されている²⁾。また 2004 年以降の日本建築学会の建築物荷重指針・解説⁴⁾では、降水量と気温に基づいて算出された地上積雪重量の再現期待値 100 年の値が提示されている。

文献 4 で示されている降水量と気温に基づいて計算された地上積雪重量は、Takahashi ら⁵⁾の方法を用いている。この方法は、最小密度 ρ_{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。これらのパラメータの最適値を決定するためには、観測された積雪深の時刻歴に対して最も誤差が小さくなるパラメータを事前にチューニングする必要があるため一冬期のデータが揃ってから解析が前提である。メリットとしては、モデルの入力値として必要な気象要素は降水量と日平均気温、積雪深だけであり、適用できる地点が多いことである。なお建築分野における地上積雪重量の推定方法に関する研究としては、他に桜井・城^{6,7)}のものがあるが、融雪量は後述の Degree-Day 法を用いるか、最大値の推定には寄与が小さいとして考慮されていない。

日平均気温と融雪限界気温の差の積算値に融雪係数をかけて融雪量を求める方法は、Degree-Day 法と呼ばれ、古くから様々な分野で使用されている^{8,9)}。Takahashi らのモデルや Degree-Day 法は、実際の融雪量を決定する日射、顕熱・潜熱の熱交換などによって構成される雪面の熱収支を、日平均気温という一つのパラメータに代表させ、その感度を融雪係数で調整していると解釈できる。少ない入力データで簡便に利用できる点は大きなメリットであり、現状の雪荷重推定において重要な役割を担っている^{4,5)}。しかしながら融雪係数は経験的な値であり、物理的な意味は必ずしも明確ではないことから、将来的な気候変化への対応など多様な気候条件への適用性の課題も指摘できる。一方、地上積雪重量の推定を直接の目的と

¹ 新潟工科大学工学科 教授・博士（工学）² 国立研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究部門
主任研究員・博士（理学）

Prof., Faculty of Engineering, Niigata Institute of Technology, Ph.D.

Researcher, Snow and Ice Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Ph.D.

はしていないものの、積雪内部の熱収支や水分移動を考慮して積雪の層構造を計算するモデルとして、平島ら¹¹⁾や藤本ら¹²⁾の研究があるが、これらのモデルは、複雑な方程式系が採用されているためモデルに含まれる数値パラメータが膨大で、これらのチューニングに課題があるほか、計算アルゴリズムも複雑である。

以上のことから、地上積雪重量変化を支配する熱収支要因を考慮しつつ、経験的な係数のチューニングを極力回避した汎用的かつ簡便な地上積雪重量の推定モデルの開発は意義あることと考えられる。また熱収支に基づく方法は、積雪重量を決定する気象のメカニズムが直接組み込まれているので、地上積雪に比べて日射や風速などの気象要素の影響を受けやすいと考えられる屋根上積雪（雪荷重）への応用も容易であることが期待される。

本研究では、気象データと熱収支モデルに基づき、汎用性および適用性の高い地上積雪重量推定モデルを開発することを目的とする。本報では、推定法の概要を説明するとともに、その手法を用いて、代表的な積雪都市の一つである新潟県長岡市の詳細な気象観測データに基づいて地上積雪重量の推定を行う。そして同条件下で計測された積雪重量の観測値との比較により、使用するパラメータの感度解析を行うとともに、その精度を検証する。さらに本手法のような多くの気象要素を用いるモデルの欠点である、必要な気象要素の観測が行われている地点が限られてしまうという課題に対して、気象庁の地域気象観測所（アメダス）の気象データのみでも適用できる方法を検討する。

2. 解析概要

2.1 積雪重量の算出方法

降水量の積算値から、融雪による流出量を引いたものが積雪重量になる。この考え方は、Takahashi らの方法⁵⁾と同様である。本研究では1時間ごとの気象要素を用いて逐次的に計算を行う^{注1)}。なお本手法では積雪重量のみを計算対象としており、積雪深は計算過程には現れない。

(1) 雨雪の判定

降水量は、雨雪判別気温 T_{SR} 以上で降雨によるもの、 T_{SR} 未満で降雪によるものとみなす。本手法では、後述する積雪内の水分量の計算と降水量計の捕捉率係数の選択、そしてアルベドの計算時に T_{SR} を使用する。既往の研究では判別気温として 2°C を用いている場合が多いが^{4, 6)}、山口ら¹³⁾は、長岡と新庄で観測された積雪深と積雪密度から求めた総雪降水量と実際の降雪水量の一致する判別気温として 0.5°C を得ている。このように既往研究の T_{SR} の選択には幅があることから、3.2において推定結果への感度解析を行う。

(2) 降水量の補正

降雪による降水量は風速の影響を受け、実際よりも過小に計測される傾向が知られており⁵⁾、横山らにより風速と機器別の係数を用いた捕捉率の計算式が提案されている¹⁴⁾。計測された降水量はこの捕捉率を用いて、時刻別のデータに対して次式で補正を行った。

$$P' = P/C_R \quad (1)$$

P : 降水量計による計測値

C_R : 捕捉率

捕捉率は雨と雪の場合でそれぞれ示されているので、本研究では、その適用に際して前述の判別気温 T_{SR} を用いた。

(3) 流出量の算出

融雪量（流出量）の算出には、近藤・山崎¹⁴⁾のモデルを用いた。このモデルでは積雪は1つの層（単層）として扱われており、積雪の内部構造は検討対象としていない。融雪によって氷から水に変化する1時間当たり単位面積あたりの重量 MW は、融雪エネルギー M （後述）を用いて次式で表される。

$$MW = 3600M/C_M \quad (2)$$

C_M : 氷の融解熱 (0°C で $0.344 \times 10^6 [\text{J}/\text{kg}]$)

$M > 0$ の場合、積雪中の（重量）含水率が MW だけ増加し、最大含水量 LW_{MAX} ($CLW_{MAX} \times SW$; ここで SW は積雪重量、 CLW_{MAX} は最大含水率)を超えた分が新たな流出水量となる。近藤・山崎¹⁵⁾の論文では CLW_{MAX} として5%が用いられている。しかしながら本研究と同じ観測地点の含水率の測定結果¹⁶⁾を見ると、積雪下層の地表付近で5%程度であるものの積雪層の平均では7~10%程度であることから、 CLW_{MAX} を10%とした計算も行い、推定結果への感度を検討した。

(4) 融雪エネルギーの算出

積雪面表層の熱収支の構成をFig. 1に示す。表層の熱収支を考えているので地中からの伝導熱は現れない。積雪面表層の熱収支は(3)式で表せる。なお降水に伴う熱量は小さいものとして無視している⁹⁾。

$$M = R^{\downarrow} - L^{\uparrow} - H - LE \quad (3)$$

各構成要素は以下のように計算される。

① 入力放射量 $R^{\downarrow}$ [W/m^2]

$$R^{\downarrow} = (1 - a)S^{\downarrow} + \varepsilon L^{\downarrow} \quad (4)$$

a : アルベド

$S^{\downarrow}$: 全天日射量 [W/m^2]

$L^{\downarrow}$: 大気放射量 [W/m^2]

ε : 積雪の射出率（本研究では1.0とした）

② 上向き長波放射量 $L^{\uparrow}$ [W/m^2]

$$L^{\uparrow} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (5)$$

σ : ステファン・ボルツマン定数 [$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4$]

T_s : 積雪表面温度 [K]

③ 顕熱輸送量 H [W/m^2]

$$H = C_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (6)$$

C_p : 空気の比熱 [$\text{J}/\text{kg}/\text{K}$]

ρ : 空気の密度 [kg/m^3]^{注2)}

C_H : 顕熱輸送のバルク輸送係数（本研究では0.002とした）^{注3)}

U : 高度1.0mでの風速 [m/s]

T : 気温 [K]

④ 潜熱輸送量 LE [W/m^2]

$$LE = l \rho C_E U [(1 - rh)q_{sat}(T) + \Delta \cdot (T_s - T)] \quad (7)$$

l : 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（本研究では0.002とした）^{注3)}

rh : 相対湿度

$q_{sat}(T)$: 気温に対する飽和比湿 [kg/kg]^{注4)}

Δ : 飽和比湿の温度に対する変化率^{注5)}

⑤ 融雪エネルギー M [W/m^2]

①~④の各要素が求まれば、(3)式から融雪エネルギー M を計算することができるが、その際、次式により積雪表面温度 T_s [K]を求める。

$$T_s = \frac{R^{\downarrow} - \varepsilon \sigma T^4 - l \rho C_H U (1 - rh) q_{sat}(T)}{4 \varepsilon \sigma T^3 + (l \Delta + C_p) \rho C_H U} + T \quad (8)$$

Fig. 1 Schematic of heat balance on snow surface

Fig. 2 Yearly maximum snow depths observed for eight winters

このように積雪表面温度の計算を線形化することで、収束解を求めるための反復計算を行う必要がなく、簡便に熱収支計算を行うことが可能となる。(8)式で求めた T_s が 0°C 以下であれば、融雪は起きない($M=0$)として次のステップに進む。 $T_s>0^\circ\text{C}$ となったときには、 $T_s=0^\circ\text{C}$ において、(3)式から M を計算する。 $M>0$ なら $T_s=0^\circ\text{C}$ とおいたことと整合するので、 M を用いて融雪量を計算する。 $M<0$ の場合、積雪内の液体水を再凍結させることになるが、 $T_s=0^\circ\text{C}$ は一般に高すぎることから、 $T_s=T$ として M を計算しなおして凍結量を求める。

(5) アルベドモデル

(4)式中のアルベド a は融雪過程に大きな影響を及ぼすことが知られている¹¹⁾。山崎ら¹⁷⁾は、札幌において観測された気象データをもとにアルベドが時間の経過によって低下していく様子を次のような指数関数で表現した。

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

$$a_0 = a_{\max} \quad (10)$$

$$a_{\max} = -0.12T_{\text{mean}} + 0.76 \quad (T_{\text{mean}} \geq -1.0^\circ\text{C}) \quad (11)$$

$$= 0.88 \quad (T_{\text{mean}} \leq -1.0^\circ\text{C})$$

a_n が降雪から n 日後のアルベド、 $a_{\min}$ はアルベドの取り得る最小値(0.40)である。 $a_{\max}$ は新雪のアルベドであり、日平均気温 T_{mean} を用いて推定される。 k はアルベドの低下速さを表すパラメータで、次式で表される。

$$k = -4.9T_{\text{mean}} + 4.5 \quad (T_{\text{mean}} \leq 0.1^\circ\text{C}) \quad (12)$$

$$= 4.0 \quad (T_{\text{mean}} \geq 0.1^\circ\text{C})$$

山崎ら¹⁷⁾は、このモデルについて、札幌以外で成り立つことは保証しないと延べており、伊豫部ら¹⁸⁾は、山崎らのモデルを温暖な本州の新潟県に適用すると推定結果が過小評価になるとの理由で、アルベドの低下の速さを表す k と $a_{\max}$ の係数を変更している。しかしながら本研究では、極力、モデルパラメータなどのチューニングを必要としないモデルを構築しようとする立場から、山崎ら¹⁷⁾のモデルをそのまま使用した。

Table 1 Meteorological parameters required for the proposed method

Meteorological factor	Availability at meteorological office	Availability at AMeDAS observation point
Precipitation	○	○
Atmospheric pressure	○	—
Air temperature	○	○
Relative humidity	○	—
Wind velocity	○	○
Solar radiation	○	—
Atmospheric radiation	○	—

(6) 入力条件として必要な気象要素

本推定モデルで入力条件として必要な気象要素を Table 1 に示す。気象官署では全ての気象要素が計測されており、入手可能であるが、アメダス観測点では、観測されていない要素が含まれており、本モデルの適用性における課題となる。この点は、5 章で検討する。

2.2 検証用観測データ

新潟県長岡市の防災科学技術研究所・雪氷防災研究センターの積雪・気象観測露場で計測された各気象要素を入力条件として使用した。また同露場でメタルウェハー式積雪重量計^{注9)}によって計測された地上積雪重量を検証用のデータとした。降水量は RT-3 (温式水) によるデータを用いたが、2017-18 冬期のみ欠測があった都合で RT-4 (溢式水) のデータを用いた。風速の測定高さは、8.7m であり、べき指数 0.15 のべき乗則で必要な高さに補正して使用した。その他の気象要素の観測方法の詳細は文献 19, 20 を参照されたい。

2008-09 冬期から 2018-19 冬期までの観測結果から、欠測値のあった冬期を除いた 8 冬期の観測結果を使用した。対象とした 8 冬期の最深積雪の比較を Fig. 2 に示す。8 冬期の最深積雪の平均値は 150 cm であり、過去 20 冬期の平均値 (135 cm) を上回っていることから、一定の降積雪のあった代表性のある観測値と考えられる。なお以降の結果の表示に際しては、代表的な冬期として、8 冬期の中で最深積雪が最大であった 2010-11 冬期と、地上積雪重量が最大であった 2012-13 冬期を採り上げる。

3. 観測結果との比較によるパラメータの決定と精度の検証

3.1 アルベドモデルの精度の検証

気象データとして、下向き短波放射量と上向き短波放射量が計測されているので、その値からアルベドの真値を求めて、モデル ((9)~(12)式) による計算値と比較した。モデルのアルベドは日代表値として算出されるが、観測結果は各日の正午の値とした。2010-11 と 2012-13 冬期の結果を Fig. 3 に示す。特に積雪初期において、観測のばらつきも大きいのが、降雪及び経過日数に伴うアルベド変化の傾向は十分捉えられていると判断される^{注7)}。

3.2 雨雪判別気温と最大含水率の感度解析

推定モデルの使用にあたって決定すべきパラメータである雨雪判別気温 T_{SR} と最大含水率 CLW_{MAX} について、感度解析を行った。

Fig.3 Comparison of the albedo obtained by observations and by the model

CLW_{MAX} が5%と10%の条件において、 T_{SR} を0.2℃から0.3℃刻みで2.0℃まで変化させた。例として、 CLW_{MAX} を5%とし、 T_{SR} を変化させた場合の代表2冬期の推定結果と観測結果の比較を Fig. 4 に示す。全体的には、 T_{SR} の値によらず一冬期における積雪重量の増減の過程をよく捉えている。 T_{SR} を高くすることで、積雪重量の増加ペースが早くなり、重量のピークも大きくなる。また高い T_{SR} は融雪の時期を遅らせる傾向にある。0.5℃以下は積雪重量を過小に推定しており低すぎると判断できるが、それ以上の値では、冬期によって最適値は異なるように見受けられる。そこで8冬期を対象に、2つの CLW_{MAX} (5, 10%) で、 T_{SR} を同様に变化させた解析を行い、推定積雪重量と観測積雪重量の誤差を比較した。誤差は NMSE (Normalized mean square error : 正規化平均二乗誤差) を次式により求めた。

$$NMSE = \frac{\overline{(P_i - O_i)^2}}{\overline{P_i} \cdot \overline{O_i}} \quad (13)$$

P は推定結果、 O は観測結果を意味する。またオーバーバーは全データの平均を、添え字の i は各時刻のデータを示す。

8冬期分の NMSE の平均値及び最大最小値を Fig. 5 に示す。 $T_{SR}=0.2℃$ で誤差の平均値と最大値が最も大きく、 T_{SR} が高くなるとともに誤差は小さくなる。既往研究で T_{SR} として用いられることの多い2.0℃は、NMSEの平均値は比較的小さいものの冬期毎の偏差がやや大きくなる。 CLW_{MAX} は5%と10%の場合を比較するとNMSEの分布傾向に殆ど違いが見られない。1.1~2.0℃の範囲の T_{SR} 及び CLW_{MAX} がNMSEに及ぼす影響は小さく、誤差も小さいと判断できるが、以降の検討においては、NMSEの8冬期平均値が0.126と最も小さかった、 $T_{SR}=1.4℃$ 、 $CLW_{MAX}=5\%$ を標準条件として採用する。

3.3 精度検証

上記の標準条件で、日別積雪重量の観測値と推定モデルの比較を散布図として Fig. 6 に示す。図中の矢印は時間の進行を表す。冬期によるばらつきはあるものの、概ね45°の線に沿って分布しており

Fig. 4 Influence of T_{SR} on estimated snow weights with $CLW_{MAX} = 5\%$

Fig. 5 Average and deviation of NMSE for eight winters with different T_{SR} values

積雪重量の増減傾向を精度よく推定できている。積雪重量の小さい時期において、プロットが45°の線の下側に分布する傾向にあり、これはモデルが推定する融雪が観測結果よりも早く進んでいることを示している。結果は省略するが、 T_{SR} をより高く設定すると融雪期の積雪重量は観測とよく合うようになるものの、その分積雪重量の上昇分が大きくなり、最大積雪重量を過大に評価するようになる。各冬期の7日増分積雪重量についても同様に Fig. 7 に示す。プロットはほぼ45°の線上に分布しており、7日増分積雪重量の方が地上積雪重量よりも全体に精度が高い。

各冬期の最大積雪重量と最大7日増分積雪重量の推定値と観測値の比較を相関図として Fig. 8 に示す。推定モデルがやや積雪重量を大きめに予測する傾向があるものの、全体的に高い精度で予測できている。

4. 熱収支モデルに基づく気象条件が積雪重量変化に及ぼす影響に関する考察

モデルによって推定された積雪重量と(3)式の熱収支式における各エネルギー要素の経時変化を Fig. 9 に示す。2010-11 冬期では、初期の積雪は、大きな融雪エネルギー (M) によって、一度消雪し

Fig. 6 Relationship between daily snow weights obtained using measurements and estimation model for eight winters

Fig. 7 Relationship of 7-day increasing snow weights obtained using measurements and estimation model for eight winters

Fig. 8 Relationship of yearly maximums of daily and 7-day increasing snow weights obtained using measurements and estimation model for eight winters

ている。その後、積雪重量は比較的単調に増加し、その間の融雪エネルギー (M) は小さい。2/2 の積雪重量のピーク以降では、融雪エ

ネルギーの上昇が何回か見られるようになり、その内訳は放射収支 ($R^1 - L^1$) による寄与が殆どであり、顕熱・潜熱輸送 (H , IE) の寄与は小さい。融雪エネルギーの上昇と積雪重量の減少のタイミングは対応しており、そのピークが大きいほど、積雪重量の減少も急となる。2012-13 冬期においても、傾向は同様であるが、積雪重量のピークが 2010-11 冬期より遅い時期 (2/27) に現れているのは、その間の融雪エネルギー (M) が小さいまま推移していることと対応している。2 月末から融雪エネルギー (M) の上昇が何度も見られるようになり、放射収支 ($R^1 - L^1$) によるものだけでなく、顕熱・潜熱輸送 (H , IE) の寄与もある程度見られる。それに伴い、積雪重量の減少の勾配は、2010-11 冬期に比べて急峻である。このように積雪重量の増減の要因やメカニズムを定量的に理解できる点は熱収支モデルに基づく本手法の大きなメリットである。

Fig. 9 Variations in heat balance components and ground snow weight

5. AMeDAS 観測データへの拡張性の検討

2.1 で述べたように、本推定法では、Table 1 に示した 7 つの気象要素を必要とし、気象官署では全ての要素が計測されており入手可能であるが、全国各地により多くの観測地点を有するアメダス観測点においては入手できない気象要素があり、モデルのより幅広い地点における適用という点で課題となる。その課題を克服する方法として、建築環境・設備の分野で広く用いられている拡張アメダス気象データ²¹⁾の利用を検討する。拡張アメダス気象データは、アメダスで観測された気象データの欠測を補充するとともに、アメダスで観測されていない気象要素のデータを観測されている気象要素から推定して整備された気象データである（以降 EA 気象データと呼ぶ）。EA 気象データは、年別 EA 気象データとして 1981～2010 年までが整備・公開されているが（2020 年 8 月時点）、本研究で検討対象としている全ての冬期のデータは整備されておらず、また本研究の対象露場と最寄りのアメダス観測点（長岡）は 6km 程度離れており、精度の検証には適さない。そこで、本研究の対象露場で計測されている気象要素のうち、アメダス観測点で計測されていない気象要素はあえて使用せず、アメダス観測点で計測されている要素のみを使用して、不足する要素を EA 気象データと同様の方法で推定して、モデルの入力条件として精度を検証することとした。具体的には、大気圧と水蒸気圧（相対湿度）は、文献 22 の方法に基づき、複数の周辺の気象官署の観測値を距離の逆数の重みで荷重平均して推定した。日射量は、文献 23, 24 の方法に基づき、別途計算して求めた大気外水平面日射量と日照率、気温、降水量の観測値から推定した。大気放射量は、文献 25 の方法に基づき、日照率、気温、降水量を用いて推定した（以降これらをまとめて EA 推定と呼ぶ）。

実際に計測された気象要素を用いて算出された積雪重量と、アメ

Fig. 10 Comparison of ground snow weights estimated using full observation data and using EA estimation

ダス観測要素以外を EA 推定して算出された積雪重量の比較を Fig. 10 に示す。EA 推定した気象データで計算された積雪重量が 1 割程度大きめではあるものの、両者は高い相関を示す。すなわちアメダス観測点の気象要素を用いても、EA 推定を併用することにより、本研究で提案する手法によって、気象官署のデータを使用する場合と同等の精度で地上積雪重量を推定することが可能である。

6. 結論

本報では、気象観測データと熱収支モデルに基づく地上積雪重量推定手法を構築し、その概要を示した。その手法を用いて、代表的な積雪都市の一つである新潟県長岡市の詳細な気象観測データに基づ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の観測値との比較を行い、以下の結論を得た。

- 1) 推定モデルで使用される雨雪判別気温 T_{SR} は 1.1～2.0℃の範囲では推定誤差の平均値に大きな差は生じない。また最大含水率は 5%と 10%では全体的な誤差に大きな違いは及ぼさない。本報で検討した 8 冬期については、 T_{SR} を 1.4℃、最大含水率 5%とした場合が、NMSE が最も小さくなった。
- 2) 上記の条件で推定した地上積雪重量、及び 7 日増分積雪重量の日変化は、冬期によってばらつきはあるものの、特に年最大値に関して、観測値に対して約 10%以内の精度で推定できた。すなわち本手法が、既往の研究と比較しても十分な精度を有することが確認できた。
- 3) モデルの解析結果から熱収支の内訳を分析すると、積雪重量の減少に寄与する融雪エネルギーは、有効放射によるものが支配的であることが確認できた。また今回の条件では、顕熱、潜熱輸送による寄与は比較的小さかった。融雪エネルギーの増減と地上積雪重量の増減は密接に関係しており、このように積雪重量の増減の要因やメカニズムを理解できる点は熱収支に基づく本手法の大きなメリットである。
- 4) 必要な気象要素の観測が行われている地点に限られるという適用性の課題に対して、拡張アメダス気象データと同様の手法によってアメダス観測点の気象要素を用いて不足する気象要素を推定する方法の有効性を検討し、アメダス観測データしか得られない地点においても十分な精度で本モデルの適用が可能であることを示した。

なお本論文では、長岡市における観測データに基づき推定モデル

の精度を検証した結果を示した。言うまでもなく、気象条件や雪質の異なる他の地点への本モデルの適用性の有無の確認は大きな課題である。本論文で示した通り、本手法で使用するモデルパラメータの選択に対する結果の感度は比較的小さく、地域依存性はあまり大きくないと予想されるが、具体的な検証結果は、続報にて報告する予定である。また本論文で提案した地上積雪重量推定モデルを屋根荷重の推定に拡張する検討も、観測結果²⁹⁾との比較に基づき、進めていく予定である。

謝辞

本研究は科学研究費(16H04467, 20H02315)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及び工学科4年生(当時)廣川昂大氏、青木空氏、丸山司氏のご協力を得た。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に便宜を図って頂いた。また新潟工科大学 風・流体工学研究センターの伊部文子さんにはデータ整理と版下原稿作成にご協力頂いた。記して謝意を表す。

注

注 1) 別途精度の検証は必要であるが、本モデルをより長い時間間隔(例えば3時間)の気象データに対して適用することも原理的には可能である。

注 2) 空気密度は次式により求めた。

$$\rho = P / \{R(t + 273.15)\} \quad (14)$$

P : 大気圧[hPa], $R=2.87$, t : 気温[°C]

注 3) 文献 10 によれば、雪面上の顕熱輸送および潜熱輸送のバルク係数は、既往の研究例のほとんどが C_H , C_E とも $1.5 \sim 3 \times 10^{-3}$ に入っているとされ、近藤・山崎¹⁵⁾の用いた0.002を変更する根拠は希薄と考え、 C_H , C_E ともそのままの値を用いた。

注 4) 気温 T における飽和比湿[kg/kg]は次式で求めた。

$$\rho_{sat}(T) = 0.622 e_{sat}(T) / (p_s - 0.378 e_{sat}(T)) \quad (15)$$

気温 T における飽和水蒸気圧[hPa]は次式で求めた。

$$e_{sat}(T) = 6.108 \times 10^{(7.57/237.5+T)} \quad (16)$$

注 5) 飽和比湿の温度 T に対する変化率は次式で求めた。

$$\Delta \equiv \frac{dq_{sat}}{dT} = \frac{de_{sat}}{dT} \times \frac{0.622 p_s}{(p_s - 0.378 e_{sat}(T))^2} = \frac{4098.03}{(237.3 + T)^2} \times e_{sat}(T) \quad (17)$$

注 6) 不凍液で満たされ、パイプで連結されている4枚のメタルウェハーを地表に設置し、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、積雪重量を求める方式である。

注 7) アルベドの観測値は、春先の融雪期に0.4を下回っている場合もあり、 $a_{min} = 0.4$ という設定によってこの時期の融雪量を過小に評価する可能性がある。しかし、この値をさらに低く設定することで、本研究の主たる目的である積雪重量の大きい期間のアルベドを過小評価することの影響の方が大きいと考え、文献17での a_{min} の値である0.4をそのまま用いた。

参考文献

- 1) Otsuki, M. et al.: Study on Estimation Method for Surcharge Snow Load due to Rainfall, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.739, pp.1329-1338, 2017.9 (in Japanese)
大槻政哉ほか9名: 降雨を考慮した積雪荷重の推定方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第739号, 1329-1338, 2017.9
- 2) Chiba, T. and Takahashi, T.: Evaluation of Snow Load based on Precipitation Data, 2014nen 2gatsu no ooyuki to sekisetsugo no kouu wo fumaeta kenchikubutsu no taisetsusekkei ni kansuru symposium, AIJ, pp.19-24, 2017.11 (in Japanese)
千葉隆弘, 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対雪設計に関するシンポジウム, 日本建築学会, pp.19-24, 2017.11
- 3) O'Rourke, M.: Snow Loads - Guide to the Snow Load Provisions of ASCE

- 7-16, American Society of Civil Engineers, 2017.8
- 4) Architectural Institute of Japan (AIJ): Snow load, Recommendations for Loads on Buildings (2015), pp.214-235, 2015 (in Japanese)
日本建築学会: 雪荷重, 建築物荷重指針・同解説 (2015), pp.214-235, 2015
- 5) Takahashi, T., Kawamura, T. and Kuramoto, K.: Estimation of Ground Snow Load using Snow Layer Model, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.545, pp.35-41, 2001.7
高橋徹, 川村大樹, 倉本幸治: 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, pp.35-41, 2001.7
- 6) Sakurai, S. and Joh, O.: Fundamental Study on the Estimation of Ground Snow Weights and Equivalent Snow Densities Based on the Meteorological Data, Journal of Snow Engineering of Japan, Vol.17, No.3, pp.10-21, 2001.7 (in Japanese)
桜井修次, 城 攻: 気温・降水量記録に基づく地上積雪重量の推定法および等価単位積雪重量の評価に関する基礎的研究, 日本雪工学会誌, 第17巻, 第3号, pp.194-205, 2001.7
- 7) Sakurai, S. and Joh, O.: Estimation of Ground Snow Weights Based on the Data of Daily Precipitations and Daily Mean Air Temperatures, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan. B. Structures I, pp.75-76, 1994.7 (in Japanese)
桜井修次, 城 攻, 気温・降水量資料に基づく地上積雪量の推定に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, 構造 I, pp.75-76, 1994.7
- 8) Kamimura, S. and Umemura, T.: A Proposal for Effective Design of Snow-melting System, Journal of Snow Engineering of Japan, Vol.12, No.3, pp.212-217, 1996.7 (in Japanese)
上村靖司, 梅村晃由: 屋根融雪装置の能力設計に関する提案, 日本雪工学会誌, 第12巻, 第3号, pp.212-217, 1996.7
- 9) Kawashima, K., Iikura, S., Sugiyama, T., Endo, T. and Fujii, T.: Development of a Simple Method for Estimating Daily Amount of Snowmelt with the Object of Application to Railway Disaster Prevention, Journal of the Japanese Society of Snow and Ice (Seppyo), Vol.64, No.6, pp.605-615, 2002.11 (in Japanese)
河島克久, 飯倉茂弘, 杉山友康, 遠藤徹, 藤井俊茂: 鉄道防災に適用可能な日融雪量の簡易推定方法, 雪氷, 第64巻, 第6号, pp.605-615, 2002.11
- 10) Kondo, J.: Mizukankyou no kisyougaku - Chihyoumen no mizusyuushi-netsusyuushi-, Asakura Publishing Co., Ltd., 1994 (in Japanese)
近藤純正 編著: 水環境の気象学 —地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 1994
- 11) Hirashima, H., Yamaguchi, S., Kosugi, K., Nemoto, M., Aoki, T. and Matoba, S.: Validation of the SNOWPACK Model using Snow Pit Observation Data, Journal of the Japanese Society of Snow and Ice (Seppyo), Vol.77, No.1, pp.5-16, 2015.1 (in Japanese)
平島寛行, 山口悟, 小杉健二, 根本征樹, 青木輝夫, 的場澄人: 断面観測結果を用いた積雪変質モデルの検証, 雪氷, 第77巻, 第1号, pp.5-16, 2015.1
- 12) Fujimoto, A., Terasaki, H. and Fukuhara, T.: A Roof Snow Load Model by a Heat, Ice, Water and Air Balance Method, Vol.70, No.4, pp.I_427-I_432, 2014 (in Japanese)
藤本明宏, 寺崎寛章, 福原輝幸: 熱・氷・水分・空気収支法による屋根雪荷重モデル, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第70巻, 第4号, pp.I_427-I_432, 2014.
- 13) Yamaguchi, S., Hirashima, H., Ishizaka, M., Sato, A. and Lehning, M.: A Study of Snow Cover Structures in 2005/2006 Winter Season Using a Numerical Snow Cover Model, Cold Region Technology Conference 2006, pp.44-48, 2006.11.29-12.1 (in Japanese)
山口悟, 平島寛行, 石坂雅昭, 佐藤篤司, Lehning, M.: 積雪変質モデルを用いた平成18年豪雪における積雪特性の研究, 第22回寒地技術シンポジウム, pp.44-48, 2006.11.29-12.1.
- 14) Yokoyama, K., Ohno, H., Kominami, Y., Inoue, S. and Kawakata, T.: Performance of Japanese Precipitation Gauges in Winter, Journal of the Japanese Society of Snow and Ice (Seppyo), Vol.65, No.3, pp.303-316, 2003.5 (in Japanese)
横山宏太郎, 大野宏之, 小南美靖弘, 井上聡, 川方俊和, 冬期における降水量計の捕捉特性, 雪氷, 第65巻, 第3号, pp.303-316, 2003.5
- 15) Kondo, J. and Yamazaki, T.: Estimates of Snowmelt by a Heat Balance

- Method, Journal of the Japanese Society of Snow and Ice (Seppyo), Vol.49, No.4, pp.181-191, 1987.12 (in Japanese)
 近藤純正, 山崎剛: 熱収支法による融雪量の予測, 雪氷, 第 49 巻, 第 4 号, pp.181-191, 1987.12
- 16) Kawashima, K., Endo, T. and Takeuchi, Y.: A portable Calorimeter for Measuring Liquid-water Content of Wet Snow, Annals of Glaciology, Vol.26, pp.103-106, 1998
- 17) Yamazaki, T., Taguchi, B. and Kondo, J.: Estimation of the Heat Balance in a Small Snowcovered Forested Catchment Basin, Tenki, Vol.41, No.2, pp.71-77, 1994.2 (in Japanese)
 山崎剛, 田口文明, 近藤純正: 積雪のある森林小流域における熱収支の評価, 天気, 第 41 巻, 第 2 号, pp.71-77, 1994.2
- 18) Iyobe, T., Kawashima, K. and Togari, A.: Ondantasetsuchiiki ni tekiyoukanou na albedo model no kentou, Annual Report of Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University, pp.77-78, 2013.9 (in Japanese)
 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, pp.77-78, 2013.9
- 19) Yamaguchi, S. et al.: Measurement of specific surface area of fresh solid precipitation particles in heavy snowfall regions of Japan, The Cryosphere, vol. 13, pp. 2713-2732, 2019.10
- 20) Yamaguchi, S., Hirashima, H., and Ishii, Y.: Year-to-year changes in preferential flow development in a seasonal snowpack and their dependence on snowpack conditions. Cold Regions Science and Technology, vol. 149, pp.95-105, 2018.5
- 21) Meteorological Data System Co., Ltd.
<https://www.metds.co.jp/product/ea/> (accessed 2020.9.8)
 株式会社気象データシステム <https://www.metds.co.jp/product/ea/> (2020.9.8 閲覧)
- 22) Nimiya, H., Akasaka, H. and Matsuo, Y.: A Method for Appending Hourly Vapor Pressure to AMeDAS Data, Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol.21, No.62, pp.39-51, 1996.7 (in Japanese)
 二宮秀典, 赤坂裕, 松尾陽: AMeDAS データへの時刻別水蒸気圧の追加方法, 空気調和・衛生工学会論文集, 第 21 巻, 第 62 号, pp.39-51, 1996.7
- 23) Nimiya, H., Akasaka, H., Sugai, T. and Kuroki, S.: A Method to Estimate the Hourly Solar Radiation using AMeDAS Data, Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol.14, No.39, pp.13-23, 1989.2 (in Japanese)
 二宮秀典, 赤坂裕, 須貝高, 黒木荘一郎: AMeDAS のデータを用いた時刻別日射量の推定法, 空気調和・衛生工学会論文集, 第 14 巻, 第 39 号, pp.13-23, 1989.2
- 24) Nimiya, H., Akasaka, H., Matsuo, Y. and Soga, K.: A Method to Estimate the Hourly Solar Radiation Using AMeDAS Data : Part 2- Application to the Improved Sunshine Recorder of AMeDAS, Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol.22, No.65, pp.53-65, 1997.4 (in Japanese)
 二宮秀典, 赤坂裕, 松尾陽, 曾我弘和: AMeDAS のデータを用いた時刻別日射量の推定法 第 2 報一回転式日照計および改良型太陽電池式日照計への適用, 空気調和・衛生工学会論文集, 第 22 巻, 第 65 号, pp.53-65, 1997.4
- 25) Nimiya, H., Akasaka, H. and Matsuo, Y.: A Method to Estimate the Hourly Downward Atmospheric Radiation using AMeDAS Data, Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol.21, No.60, pp.133-144, 1996.2 (in Japanese)
 二宮秀典, 赤坂裕, 松尾陽: AMeDAS のデータを用いた時刻別大気放射量の推定法, 空気調和・衛生工学会論文集, 第 21 巻, 第 60 号, pp.133-144, 1996.2
- 26) Tominaga, Y., Igarashi, K., Wakui, M., Motoyoshi, H. and Takada, S.: Development of a semi-full-scale building model to obtain validation data for evaluation model of roof snow load, AIJ Journal of Technology and Design, No. 65, pp. 114-118, 2021. 2 (in Japanese)
 富永禎秀, 五十嵐賢次, 涌井将貴, 本吉弘岐, 高田清太郎: 屋根雪荷重推定モデルの検証用データ取得を目的とした準実大建物モデルの開発, 日本建築学会技術報告集, No. 65, pp. 114-118, 2021. 2

METHOD TO ESTIMATE GROUND SNOW WEIGHT BASED ON METEOROLOGICAL OBSERVATION DATA AND HEAT BALANCE MODEL

Sensitivity analysis and validation of a model based on measurement data for Nagaoka

Yoshihide TOMINAGA^{*1} and *Hiroki MOTOYOSHI*^{*2}

^{*1} Prof., Faculty of Engineering, Niigata Institute of Technology, Ph.D.

^{*2} Researcher, Snow and Ice Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Ph.D.

Accurate estimation of roof snow load is important for safely ensuring the structural performance of buildings in snowy regions. Ground snow weight is a basic design factor used to calculate the roof snow load. In a previous model, the ground snow weight was estimated based on daily precipitation and average temperature. However, this model has a limitation in terms of its universality because it is necessary to optimize the coefficients used in the model by comparing the calculated result with observation data in advance.

This study aims to develop a versatile and universally applicable method to estimate ground snow weight based on meteorological observation data and a heat balance model. The proposed model is based on the concept that the snow weight can be estimated by subtracting the snowmelt runoff from the total precipitation. The model proposed by Kondo and Yamazaki (1987) was used to calculate the amount of snowmelt. The ground snow weights were estimated through the proposed model using detailed meteorological observation data for Nagaoka, which is representative of a snowy city in Japan.

According to the estimation results, the threshold temperature of rain/snow, T_{SR} , used in the model did not significantly affect the error in the range of 1.1 to 2.0 °C. Additionally, the maximum water content values, CWV_{MAX} , of 5% and 10% did not show large differences in the estimation error. For the eight winter examples examined in this study, the average normalized mean square error (NMSE) was the smallest when T_{SR} was 1.4 °C and the maximum water content was 5%. Although the accuracy varies with the winter, the variations in the daily ground snow weight and 7-day increasing snow weight were correctly estimated with an error of approximately 20%. The maximum values of each winter were predicted within an error of approximately 10%.

By analyzing the heat balance components obtained by the model, it was confirmed that the snowmelt energy due to radiation mainly contributed to the decreasing snow weight. Under the conditions of the present study, the contributions of sensible and latent heat transport were small. An estimation method based on the heat balance model, as developed in this study, can be helpful for understanding the factors contributing to the variation in the snow weight. This is a great advantage of such a model.

The present method has a limitation in its applicability; that is, all meteorological factors required in the model are only available at very limited sites such as meteorological offices. To overcome this limitation, a method was examined through which unavailable meteorological factors were estimated by meteorological factors measured at AMeDAS observation points; this method was similar to extending AMeDAS meteorological data. As a result, it was shown that the present method can be applied with sufficient accuracy even at sites where only AMeDAS meteorological data are available.

(2020年9月8日原稿受理, 2020年12月17日採用決定)