積雪層モデルによる地上積雪重量のリアルタイム推定

REAL-TIME ESTIMATION OF GROUND SNOW LOAD USING SNOW LAYER MODEL

込山 大^{*1}, バトスーリ アシドマー^{*2}, 高橋 徹^{*3}

Dai KOMIYAMA, Ashidmaa BATSUURI and Toru TAKAHASHI

We proposed a real-time estimation model based on model to get a handle on the snow weight that changes by 1-hour step. In the real-time estimation, the hourly snow layer model and the optimized parameters for each location were newly introduced into the previous model. The optimized parameters for each location use the average of several years of winter optimized parameters obtained at each location.

We compared the estimated values obtained from the model with the measured data of Sapporo, Shinjo and Tokamachi. The estimated values were accurate in Tokamachi and Shinjo, but not so good in Sapporo.

Keywords : Real-time estimation, Snow Weight, Snow layer, Optimized parameter

リアルタイム推定, 積雪重量, 積雪層, 最適化パラメータ

1. はじめに

鉄骨大スパン建造物のように屋根の固定荷重が相対的に小さい場合、断面算定において、雪荷重が支配的となるため、その設定を的確に行うことが重要である。

屋根雪荷重の算定方法として建築物荷重指針・同解説（以後、荷重指針）では、以下の式を示している¹⁾。

$$S = \mu_0 S_0 \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は屋根形状係数、 S_0 は地上積雪重量である。したがって屋根雪荷重を算定するためには地上積雪重量が重要となる。

これまで地上積雪重量の推定方法として、桜井・城²⁾³⁾及び上村・梅村⁴⁾⁵⁾⁶⁾は積雪重量の積算値から Degree-Day 法により求める融雪量を減じる手法の提案、高橋らは積雪の各層ごとに積雪重量および単位体積重量を算定して層厚を求め、実測の積雪深との誤差が最小となるパラメータを求める積雪層モデル（以後、高橋モデル⁷⁾⁸⁾⁹⁾の提案、また平島らは詳細な積雪の層構造を計算する積雪変質モデルを開発する¹⁰⁾など様々な研究がなされてきた。

城・桜井ら及び上村・梅村らの方法では、断面観測がされていない地点の融雪係数が示されていないこと、平島らの方法では、入力データが多く、公式サイトから簡単に手に入る AMeDAS 観測データのみで解析ができないという問題がある。他方、高橋モデルは AMeDAS から入手可能な 5 項目のデータで高精度に解析できる。当該モデル提案当時の日データとしては、9 時の積雪深が公開されていたが、現状は日最大積雪深となっており、夜中に降雪があつて、その上に降雨があり沈降したりすると、前日の 24 時の積雪深と当日の 1 時の積雪深が最大積雪深として記録されることが起こり得る。そこで、本研究では高橋モデルを基に、より現時点での公開データ

と親和性の高い方法で地上積雪重量を推定する方法を提案し、観測記録を用いてその精度を検証する。

2. 観測記録

2.1 気象観測記録

モデルの検証を行うためには積雪重量が観測されている場所であること、または断面観測の単位体積重量と積雪深から積雪重量を算定できる必要がある。本稿ではその地点として、新潟県十日町市、山形県新庄市、北海道札幌市を対象とした。解析期間は、十日町では 1999/00 冬期から 2018/19 冬期までの 20 年間、新庄では 1998/99 冬期から 2017/18 冬期までの 20 年間、札幌では 2005/6 冬期から 2018/19 冬期までの 14 年間である。また気象データは十日町では、森林総合研究所十日町試験地から提供して頂いた観測記録を、新庄、札幌では AMeDAS¹¹⁾の観測記録を用いた。

2.2 積雪重量記録

解析対象地点である 3 地点ではそれぞれの場所で下記のように積雪重量の計測および断面観測が行われている。

十日町の森林総合研究所十日町試験地及び新庄の雪氷防災センターではメタルウェファールにより積雪重量の観測が行われている¹²⁾¹³⁾。また札幌の北海道大学低温科学研究所では週 2 回の頻度で断面観測が行われている¹⁴⁾。したがって検証には、十日町、新庄ではメタルウェファールによる観測記録を、札幌では断面観測の単位体積重量と積雪深から積雪重量を算定して用いた。

^{*1} 西松建設 修士(工学)(元・千葉大学 大学院生)^{*2} 千葉大学大学院融合理工学府 大学院生^{*3} 千葉大学大学院工学研究院 教授・博士(工学)Nishimatsu Construction Co., Ltd., M.Eng. (Former Grad. Student of Chiba Univ.)
Grad. Student, Graduate School of Science and Engineering, Chiba University
Prof., Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr.Eng.

3. 高橋モデル

3.1 解析方法

高橋モデルは降雪モデル、圧密モデル、融雪モデルから構成される積雪層モデルである。降雪が記録された日に積雪層を形成し、圧密や融雪、降雨の浸透などを経て1日ごとの積雪重量を推定する。入力データは、AMeDAS から入手可能な1冬期における雪の降り始めから消雪までの日平均気温、日降水量、積雪深、日降雪量である。ただし風により捕捉損失した日降水量を補正する場合はさらに風速が必要である。またこのモデルにおける仮定は2つであり、1つ目は日平均気温が2℃以上の日は降雪が記録されていても積雪層を形成せずに全て雨とすること、2つ目は積雪層の最大単位体積重量を4.9kN/m³とし、それ以降は融雪水や降雨は保持せずにさらに下の層に浸透させることである。解析では最小単位体積重量と融雪係数を未知数として解析をはじめ、推定積雪深と実測積雪深の誤差が最も小さくなる1冬期に1つの組合せ（以後、冬期最適化パラメータ）をプログラムのアルゴリズムの1つである最急降下法を用いて求める。このときの誤差は次式に示すような、誤差の平均値を表すRMSEを用いる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (2)$$

ここで、RMSE は積雪深の二乗平均平方根誤差、Nはデータの総数、 x_i は*i*日の積雪深推定値[m]、 $\hat{x}_i$ は*i*日の積雪深観測値[m]である。

3.2 降雪モデル

降雪時に形成される積雪層の初期単位体積重量は日平均気温 T を用いて次式から求める。

$$m\rho_0 = \begin{cases} \rho_{\min} & (T \leq 0^\circ\text{C}) \\ \rho_{\min} + \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{3} \cdot T & (0^\circ\text{C} < T \leq 3^\circ\text{C}) \\ \rho_{\max} & (3^\circ\text{C} < T) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $m\rho_0$ は*m*層の降雪時単位体積重量[kN/m³]、 $\rho_{\min}$ は最小単位体積重量[kN/m³]、 $\rho_{\max}$ は最大単位体積重量[kN/m³]である。

3.3 圧密モデル

積雪層の圧密は、積雪層が形成された翌日から起こるものと考え次式で求める。

$$m\rho_n = \rho_{\min} \sqrt{n + m k} \quad (4)$$

ここで、 $m\rho_n$ は降雪から *n* 日目の *m* 層の単位体積重量[kN/m³]、*n* は層形成からの経過日数、 $m k$ は補正日数である。また補正日数は、積雪層形成時の単位体積重量が圧密過程において何日目に相当するかを表し、次式から求める。

$$m k = \frac{(m\rho_0)^2}{(\rho_{\min})^2} \quad (5)$$

3.4 融雪モデル

融雪量は、平均気温のみから融雪量を求める簡易法として知られる Degree-Day 法を用い、次式から求める。

$$W_c = \begin{cases} C_m(T - T_0) & (T_0 < T) \\ 0 & (T \leq T_0) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 W_c は融雪量[N/m²]、 C_m は融雪係数[N/(m²℃)]、 T_0 は融雪下限気温[℃]である。融雪下限気温は-2℃としている。また融雪は降雪が観測された時、新たに形成された積雪層では起こらず、その下の層から起こるものとする。

3.5 積雪深の算定法と浸透による単位体積重量の補正

積雪層の重量は降水量から融雪分を除いた値（以後、水当量）であるから、各層の積雪深は次式により求める。

$$m r = W_{in} - W_c \quad (7)$$

$$m d_n = \frac{m r}{m \rho_n} \quad (8)$$

ここで、 W_{in} は降水量、 $m d_n$ は降雪から*n*日目の*m*層の積雪深[m]、 $m r$ は*m*層に含まれる水当量から換算した重量[kN/m²]である。降雨や融雪水が浸透するときは、積雪深を変化させずにその分単位体積重量のみを増加させる。

3.6 降水量の補正

降水量は、測器において一定面積の受水口に入った降水を集め測定される。このとき受水口付近の気流が乱され、降水の一部が測器に捕捉されない捕捉損失という現象が生じることがある。横山らによればこのときの捕捉率 CR は次式で求められる¹⁵⁾。

$$CR = \frac{1}{1 + m U_z} \quad (9)$$

ここで、 CR は捕捉率、 m は測器ごとの係数、 U_z は受水口高さにおける平均風速[m/s]である。このときの U_z は荷重指針により次式から求める。

$$U_z = U_{SDP} \left(\frac{Z}{Z_{SDP}} \right)^{\alpha_{SITE}} \quad (10)$$

ここで、 U_{SDP} は気象観測点の風速[m/s]、 Z は雨量計の受水口高さ[m]、 Z_{SDP} は気象観測点の風速計高さ[m]、 α_{SITE} は地表面粗度区分から決まる指数である。

本解析に用いた風速計高さと雨量計高さを Table1 に示す。機器の高さは、新庄と札幌では気象庁から公開されている資料¹⁷⁾及び Google ストリートビューで確認して、十日町では十日町試験地の資料¹²⁾をもとにそれぞれ決定した。また雨量計は3地点ともに溢水式降水量計、地表面粗度区分はⅢとした。ただし、十日町の2009/10冬期及び2013/14冬期は計器の不具合によるデータ欠損があったことから転倒ます式雨量計で観測した値を用い、このときの雨量計高さは3.9 mとした。

Table1 Instrument height of each station measurement¹⁶⁾

	Anemometer height (m)	Rain gauge height (m)
Tokamachi	10	3.5
Shinjo	30.8	2.5
Sapporo	59.5	2.5

Fig.1 Analysis result of Daily snow layer model using corrected data in Tokamachi for 20 years

Fig.2 Analysis result of Daily snow layer model using corrected data in Shinjo for 20 years

Fig.3 Analysis result of Daily snow layer model using corrected data in Sapporo for 10 years

3.7 高橋モデルの推定結果

高橋モデルを用いて 3 地点を解析し、捕捉率補正を行った推定結果を Fig.1～Fig.3 に、捕捉率補正無しで行った解析結果を Fig.9, Fig.11, Fig.15 に示す。推定値の精度検証は、推定の積雪重量と実測の積雪重量から作成した散布図における回帰直線の傾きと決定係数 R^2 を用いた。縦軸に推定積雪荷重、横軸に観測積雪荷重を取り、回帰直線の傾きが 1 に近いほど精度が高いといえる。解析結果は図から分かるように、十日町と新庄では良好な結果を得ることができた。しかし札幌では、傾きが大きく、またばらつきが大きい。その原因としては、札幌は新庄と十日町と比べて積雪量が少なく、当モデルは積雪量が小さいと精度が低くなることが考えられるが、詳しくは 5 章で考察する。

3 地点ともに降水データをそのまま用いた解析に比べて、補正データによる解析は、十日町では傾きが 1.0807 から 1.125 に、新庄では傾きが 1.0545 から 1.1221 に、札幌では傾きが 1.1642 から 1.2813 に大きくなり、決定係数 R^2 は小さくなっていることが分かる。

この結果より、高橋モデルでは捕捉率補正して解析を行うと積雪重量が過大推定となり、ばらつきが大きくなることが分かった。今後は補足率補正の式改善について検討が必要である。リアルタイムで推定するモデルでは、補足率補正をある条件のもとで使用したが、詳しくは 4.4 節で述べる。

4. リアルタイム推定モデル

4.1 積雪時の降水について

高橋モデルは、降雪が記録された日に積雪層を形成し、その層にその日の降水を全て含むものである。しかしこの方法では過大な積雪層を形成する可能性がある。例として新庄の AMeDAS における 2016 年 2 月 19 日の 1 時間毎の降水の観測記録を Fig.4 に示す。この日の 1 日毎の気象観測記録では平均気温が -1.4°C 、降雪が 1 cm、降水量が 6.5 mm と記録されている。しかし積雪は 9 時に 1 cm 降ったのみでこの時間の降水量はわずか 0.5 mm であった。したがって 1 時間毎の観測記録（以後、時間観測記録）では、残りの降水量 6 mm は降雨として記録されているのにも関わらず、解析では全て雪として計算していることになる。このように 1 日毎に解析を行った場合、降水を過剰に含む（モデルの上限である単位体積重量 4.9 kN/m^3 を上回る）層が形成され過大推定となる場合があるため、解析には 1

日毎の気象観測記録を用いるのではなく、時間観測記録を用いることで精度向上が期待できると考えられる。

Fig.4 Precipitation record for February 19th, 2016 in Shinjo

4.2 時間観測記録を用いた解析法

時間観測記録を用いて解析を行うために新たに 1 時間毎の積雪層である時間積雪層を導入した。この積雪層は (3) 式の降雪モデルを用いて気温から降雪時の単位体積重量を求める。また時間積雪層はその日の 24 時に日積雪層に変化すると考えれば、その後の積雪層は 1 日毎の積雪層（以後、日積雪層）として扱うことができ、これまでの降雪モデル、圧密モデルをそのまま用いることが出来る。このときの日積雪層の単位体積重量と時間積雪層の関係を次式に示す。

$$m\rho_n = \frac{\sum_{h=1}^{24} h r}{\sum_{h=1}^{24} h d} \quad (11)$$

ここで、 $h r$ は m 日の h 層に含まれる累計降水量から換算した重量 $[\text{kN/m}^2]$ 、 $h d$ は m 日の h 層の累計積雪深 $[\text{m}]$ である。時間積雪層は 1 時間毎に形成され、最長でも 24 時間という短い時間で日積雪層に変化すると考えることから圧密は考慮せず、融雪及び降水・融雪水の浸透のみ考えるものとする。またこの手法における融雪モデルは、1 時間毎の融雪量を求める Degree-hour 法を用いる。この方法で求める融雪量は融雪係数の値のみ変えることから 1 時間毎の平均気温を用いて (6) 式から算定する。

4.3 パラメータの設定方法

これまで高橋モデルでは、推定積雪深と AMeDAS 観測積雪深の誤差が最小となるように、未知の 2 つパラメータである、融雪係数

と最小単位体積重量をその冬期に最適値で求めている。しかし冬期最適化パラメータを求めるためには、1 冬期の雪の降り始めから消雪までの気象観測データが必要である。リアルタイム推定ではデータがそろってから解析を始めるため、あらかじめパラメータを設定しておく必要がある。

本研究では、融雪係数と最小密度を既知パラメータとして、積雪深と積雪重量を推定した。Fig.5 に新庄と十日町の 20 冬期分、札幌の 14 冬期分の冬期最適化パラメータを示す。

地点ごとのパラメータがある程度固まっていることから、冬期によらず、地点ごとに 1 つのパラメータの組合せが存在すると考える。このパラメータは札幌と十日町での 20 冬期分、新庄の 35 冬期分の解析を行い、平均値をその地点の最適なパラメータ（以降、地点最適化パラメータ）として解析に用いる。3 地点における地点最適化パラメータの値は Table2 にそれぞれ示す。

Fig.5 Winter optimal parameters for each location

Table2 Optimized parameter for each location

	Unit weight (kN/m3)	Snowmelt coefficient (N/(m2 °C))
Tokamachi	0.659	1.466
Shinjo	0.542	1.528
Sapporo	0.464	1.054

4.4 実測の積雪深による補正

前節では、リアルタイム推定モデルにおける地点最適化パラメータの必要性を述べた。しかしこのパラメータの値が冬期最適化パラメータとかけ離れている場合、積雪深の推定精度が悪くなり、それに伴って積雪重量の推定結果も悪くなることが考えられる。

全国で積雪重量を測定しているところは少ないが積雪深を観測している AMeDAS 観測点は 323 か所ある。そこで、AMeDAS 観測データのみで解析可能な高橋モデルの優位点を利用して Fig.6 に示すように推定積雪深を AMeDAS 観測積雪深と比較することで補正を行った。

3.7 節、高橋モデルの推定結果で述べた通り、降水量の補足率補正を行うと積雪重量を過大推定する傾向にある。そのため、Fig.7 のように推定積雪深が過小となっている場合は、捕捉損失が起きていると考え、捕捉率補正をした降水を用いた。この補正により (8) 式の分子の ρ_r が増加され、積雪深及び積雪重量の推定値が高くなる。ま

た Fig.8 のように推定積雪深が過大推定となった場合は、最大単位体積重量に達していない下の積雪層から実測の積雪深と同じ深さになるまで強制的に圧密を行う。この補正では積雪深の推定精度が向上するだけでなく、圧密によって単位体積重量が増加する。従って、それ以降の融雪水や降雨の保持できる浸透量が減少する。これらの補正を行うことで積雪重量の推定精度が向上すると考えられる。

Fig.6 Condition on using correction

Fig.7 Example of underestimation when using optimized parameters for each location in Shinjo in 2002/03.

Fig.8 Example of underestimation when using optimized parameters for each location in Tokamachi in 2014/15

5. モデルの精度検証

リアルタイム推定モデルで解析を行い、1 日ごとの推定積雪重量を実測の積雪重量と比較、精度検証を行った。検証には、1 冬期における積雪重量の推移、高橋モデルの検証と同様に推定の積雪重量と実測の積雪重量から作成した散布図における回帰直線の傾きと決定係数 R^2 、推定の最大積雪重量と実測の最大積雪重量の誤差の割合と実測の最大積雪深から作成した散布図を用いた。

5.1 十日町での推定結果

Fig.9 には高橋モデルの推定結果を、Fig.10 にはリアルタイム推定の結果を示す。図より全体的にリアルタイム推定で高橋モデルよ

Fig.9 Analysis result of Daily snow layer model in Tokamachi

Fig.10 Analysis result of Hourly snow layer model in Tokamachi

り推定精度を上げることができたとと言える。

Fig.9.a と Fig.10.a には 2001/02 冬期の雪の降り始めから消雪までの積雪深及び積雪重量の推移を示す。図から分かるように、高橋モデルでは、推定積雪重量が最大積雪重量に達する時期と観測値が最大積雪重量に達する時期が一致するが、全体的に推定値は観測値を上回る傾向にある。一方リアルタイム推定では、精度が高く推定できており、その要因は時間観測記録を使用したことだと考えられる。

Fig.9.b と Fig.10.b には縦軸に推定積雪重量、横軸に観測積雪重量を取った、観測値と推定値の 20 年分の比較散布図を示す。実線と破線が近く、回帰直線の傾きが 1 に近いほど精度が高いが、十日町では傾きが 1.062 となり推定重量が観測積雪重量を上回る傾向にある。その一方、決定係数 R^2 は解析を行った 3 地点の中で最も高く 0.9628 で、20 年間分の解析結果は全体的にばらつきが小さく、最も精度がよかった。さらに高橋モデルと比較したところ、傾きが Fig.9.b と Fig.10.b から分かるように、1.0807 から 1.062 に下がっており、20 年分全体的に過大推定していた結果の精度を上げた。

Fig.9.c と Fig.10.c に実測の最大積雪深に対する推定値と観測値の最大積雪重量の誤差の関係を示す。誤差は次式によって計算した。

$$Error = \left(1 - \frac{W_{m,max}}{W_{e,max}}\right) \times 100 \quad (12)$$

ここで、 $W_{m,max}$ は実測の最大積雪重量、 $W_{e,max}$ は推定値の最大積雪

重量である。散布は高橋モデルとリアルタイム推定が共に実測の積雪深が小さくなるにつれて誤差が大きくなる傾向にある。高橋モデルではすべての誤差がプラスの値で、0～40%の間であることから、改めて過大評価していたことが証明された。Fig.10.c から、リアルタイム推定では、誤差は-15%～20%の範囲内だった。

5.2 新庄での推定結果

Fig.11 には高橋モデルの推定結果を、Fig.12 にはリアルタイム推定の結果を示す。全体的に、十日町と同様に、リアルタイム推定では高橋モデルより推定精度を上げることが出来た。Fig.11.a と Fig.12.a には 1998/99 冬期の雪の降り始めから消雪までの積雪深及び積雪重量の推移を示す。図からわかるように、高橋モデルとリアルタイム推定はともに、積雪期間に大きな融雪が起これば積雪重量の急激な減少を推定できないことが分かる。(Fig.11.a と Fig.12.a の 1 月中旬からの積雪重量の推移を参照)。高橋モデルでは、推定積雪重量が最大値に達する時期は観測値が最大積雪重量に達する時期より早まっており、全体的に観測値より高い。その一方、リアルタイム推定は高橋モデルと同様に 1 月に起こった大きな融雪をうまく推定できていないにもかかわらず、推定積雪重量が最大積雪重量に達する時期とその値は観測値と一致している。Fig.11.b と Fig.12.b は縦軸に推定積雪重量、横軸に観測積雪重量を取った 20 年分の観測値と推定値の比較分布図である。新庄では傾きが 3 地点の中で最

Fig.11 Analysis result of Daily snow layer model in Shinjo

Fig.12 Analysis result of Hourly snow layer model in Shinjo

も 1 に近く 1.0355 となった。さらに決定係数 R^2 は十日町より低いものの 0.9529 と高く、精度がよかったと言える。その要因は Fig. 5 から分かるように新庄での最適パラメータの固まりが一番小さく、その冬期最適パラメータは地点最適化パラメータに近く、精度のよい結果となったと考えられる。しかし、リアルタイム推定と高橋モデルがともに、散布図の広がりから分かるように十日町と同様に積雪重量が小さく $1 \sim 2 \text{ kN/m}^2$ の時、推定値は観測値を下回る傾向が見られ、積雪重量が重くなるにつれて観測値と推定値が一致している。全体的には高橋モデルの過大推定する傾向を観測値に近づけ、ばらつきを小さくさせ、推定の精度を上げることができた。その要因としては 4.1 節でも述べたように、時間観測記録を用いたことで雨雪判別が明確になったことが考えられる。

Fig.11.c と Fig.12.c には 20 年分の実測の最大積雪深に対する推定値と観測値の最大積雪重量の誤差の関係を示す。新庄では、高橋モデルとリアルタイム推定の 2006/07 冬期の誤差は、非常に大きく、それ以外ではリアルタイム推定は $-5 \sim 15\%$ の範囲内で納まり、ばらつきが少なく、十日町の場合と違ってマイナスの誤差が出る場合も多い。さらに、高橋モデルの誤差はばらついているのに対して、リアルタイム推定は誤差の範囲が狭く、積雪量が多い年でも良い精度で推定をしている。

2006 年度冬期は降雪が少なく最大積雪深は 48cm で (Fig.13 参照)、冬期平均気温が解析を行った 20 年分の中で最も高かった (Fig.14

参照)。気温が高いことで湿り雪となり、各層の含まれる水当量が推定値より高く、例外となる大きな誤差を招いたと考えられる。

Fig.13 Snow weight and snow depth in Shinjo in 2006/2007.

Fig.14 Winter season's average temperature in each location

Fig.15 Analysis result of Daily snow layer model in Sapporo

Fig.16 Analysis result of Hourly snow layer model in Sapporo

5.3 札幌での解析結果

札幌での高橋モデルの推定結果を Fig.15 に、リアルタイム推定の推定結果を Fig.16 に示す。ただし、14 冬期分の解析を行ったが、手元にある積雪重量データが 10 冬期分しかなかったため、比較は 10 冬期とした。

Fig.15.a と Fig.16.a では推定精度のよかった 2013/14 冬期の積雪重量と積雪深の推移をそれぞれ示す。高橋モデルでは、積雪重量の推移が滑らかである一方、推定値は観測値を大きく下回る傾向が見られる。他方、リアルタイム推定による解析の結果は、全体的に推定値は観測値より小さめだが高橋モデルより観測値に近づいており、最大積雪重量に達する時期が観測値と一致している。

Fig.15.b と Fig.16.b には縦軸に推定積雪荷重、横軸に観測積雪重量を取った 10 年分の観測値と推定値の比較分布図を示す。札幌での解析結果は高橋モデルとリアルタイム推定が共に、3 地点の中で最も精度が低い。その原因の一つとしては北海道大学低温科学研究所で測定された値に誤差が生じているためと推察されるが、これについては、5.4 節で詳しく述べる。

Fig.16.b から分かるように、札幌での傾きは最も大きく 1.092 となった。その原因の一つとしては Fig.5 の札幌の冬期最適化パラメータのばらつきが大きいためであると考えられる。札幌の地点最適化パラメータは 14 年分の冬期最適パラメータの平均値であるため、

2 つのパラメータが大きくかけ離れたことで、誤差が大きくなった可能性がある。

さらに高橋モデルと比較してリアルタイム推定では、回帰直線の傾きや決定係数 R^2 は改善されたが、新庄と十日町と比較して分布は広がっており、ばらつきが大きい。また新庄や十日町の傾向と異なり、積雪重量が低いときは精度が良いものの、積雪重量が増加すると精度が悪くなる傾向が見られた。

Fig.15.c と Fig.16.c には 10 年間分の実測の最大積雪深に対する推定値と観測値の最大積雪重量の誤差の関係を示す。解析対象となった 10 年間の最大積雪深のばらつきが小さいものの、誤差は大きく異なり、高橋モデルの方がリアルタイム推定より、誤差の広がりが小さいように見える。

また札幌の 2012/13 冬期では、積雪深を見ると実測と推定で完全に雪が無くなる時期にずれが生じている (Fig.17 参照)。これは解析による春先の融雪量が実際に比べて少ない事が原因であると考えられる。そのため 3 月頃の融雪係数は地点最適化パラメータで設定した値よりも大きい値とするなど、融雪係数を時期に応じて使い分けることが必要であると考えられる。これにより消雪時期が一致し、推定精度が向上する可能性がある。

一方で Fig.17 と Fig.18 を見ると、2 月中旬頃からの降雨による積雪重量の増加は推定値で過大に降水を保持しているような傾向が

見られた。この結果より2月中頃から3月頃の積雪層の雪質は、圧密や降水の浸透によって解析よりも早くザラメ雪に変化し、実際は降雨や融雪水は保持されずに積雪底面から流出している可能性がある。また札幌では気温が低く融雪下限気温の -2°C を下回る日も多い。このときモデル上では融雪は全く起こらないが、気温が低い場合でも晴れて日差しがあれば日射によって融雪が起こる事が考えられる。積雪重量が正確な値であるならば、これらを考慮できていない事が過大推定となった原因の一つであると考えられる。

Fig.17 Snow weight and snow depth in Sapporo in 2012/13.

Fig.18 Snowfall, rainfall and average temperature of Sapporo in 2012/13.

5.4 北海道大学低温科学研究所での測定方法

Fig.17の2月から3月にかけて積雪重量と観測値の推移を見ると、積雪深が大きく減少したことがあまり見られないにも関わらず、積雪重量だけを見ると3回も大きく増減している。その原因としては北海道大学低温科学研究所での積雪重量の測定結果にばらつきが生じている可能性がある。

2.2節で述べた通り北海道では週に2回、断面観測の単位体積重量の測定をしている。Fig.19は積雪の断面図である。北海道大学低温科学研究所では一定の高さ毎に単位体積重量の測定を行い、等価単位重量を計算している。積雪重量はこの等価単位重量と積雪深の積で求めているため、積雪層が複雑になるほど等価単位重量の計算に誤差が生じ、結果として積雪重量の誤差が大きくなると推察される。このため実測値が大きく増減し、推定の精度が下がったように見えると考えられる。

Fig.19 Measuring method of snow weight in Hokkaido University.

6. 結論

本研究から以下のことがわかった。

1. 地点最適化パラメータを新たに導入することでリアルタイム推定が可能となった。
2. 1時間ごとの記録データを解析に用いることによって、全体的に高橋モデルより推定精度を上げることができた。
3. 高橋モデルで、捕捉率補正を行うと、地点によっては回帰直線の傾きが大きくなり、推定精度を下げるため、今後再検討が必要である。
4. 観測と推定の積雪深が完全に無くなる時期がずれる場合が多いことから、リアルタイムで一致させるためには融雪係数を1冬期に通じて同じ値を使用するのではなく、融雪係数を時期に応じて使い分ける必要がある。

謝辞

本稿では新庄と札幌の気象観測記録は AMeDAS の観測記録を使用させて頂きました。推定積雪重量の精度検証にあたり積雪重量の観測記録は、新庄では防災科学技術研究所雪氷防災研究センターで公開しているデータを使用させて頂き、札幌では北海道大学低温科学研究所と気象庁気象研究所との共同研究（気象庁気象研究所に配分された環境省地球環境保全等試験研究費、及び北海道大学低温科学研究所一般共同研究（19G036））にて取得されたデータを、十日町では森林総合研究所十日町試験地の竹内由香里博士に観測記録をそれぞれ提供させて頂きました。また本研究の一部には、新潟大学災害・復興科学研究所共同研究費（2019-10）の助成を受けました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) Architectural Institute of Japan: Recommendations for Loads on Buildings (2015), 2015
日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説(2015), 2015
- 2) SAKURAI Shuji, JOH Osamu: Estimation of Ground Snow Weights Based on the Data of Daily Precipitations and Daily Mean Air Temperatures -Influence of Limit Air Temperature to the Error of Estimation-, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, pp. 91-92, 1995. 7
桜井修次, 城攻: 累積降水量に基づく地上積雪重量の推定-推定に及ぼす判別気温の影響について-, 日本建築学会大会学術講演梗概集,

- B-1, pp. 91-92, 1995. 7
- 3) SAKURAI Shuji, JOH Osamu: 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-1, pp. 75-76, 1995. 7
桜井修次, 城攻: 気温、降水量資料に基づく地上積雪重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-1, pp. 75-76, 1995. 7
  - 4) KAMIMURA Seiji, UMEMURA Teruyoshi: Estimation of Daily Snow Mass on the Ground Using Air Temperature and Precipitation Data, Second International Conference on Snow Engineering, CREEL Special Report 92-97, pp. 157-167, 1992
  - 5) KAMIMURA Seiji: Improvement of Snow Weight Estimation Formula Using Daily Temperature and Precipitation Data, Proceedings of The Japanese Society of Snow and Ice, p. 162, 1995
上村靖司: 日気温、降水量データによる積雪重量推定式の改良, 日本雪氷学会大会講演予稿集, p. 162, 1995
  - 6) KAMIMURA Seiji, UMEMURA Teruyoshi: A Proposal Effective Design of Snow-melting System, Journal of Snow Engineering of Japan, Vol. 12, No. 3, pp. 212-217, 1996
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, Vol. 12, No. 3, pp. 212-217, 1996
  - 7) KURAMOTO Koji, TAKAHASHI Toru: Estimation of snow load using rainfall data, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-1, pp. 81-82, 1996. 7
倉本幸治, 高橋徹: 降水量データによる積雪重量の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 81-82, 1996. 7
  - 8) KURAMOTO Koji, TAKAHASHI Toru: Estimation of Ground Snow Load Using Snow Layer Model Part1. Part2, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, pp. 107-110, 1997. 7
倉本幸治, 高橋徹: 積雪層モデルによる積雪重量の推定その1・その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 107-110, 1997. 7
  - 9) TAKAHASHI Toru, KAWAMURA Taiki, KURAMOTO Koji: 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荷重の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第545号, pp. 35-41, 2001. 7
  - 10) HIRASHIMA Hiroyuki, YAMAGUCHI Satoru, KOSUGI Kenji, NEMOTO Masaki, AOKI Teruo, MATOBA Sumito: Validation of the SNOWPACK model using snow pit observation data, Journal of the Japanese Society of Snow and Ice, Vol. 77, No. 1, pp. 5-16, 2015 1
平島寛之, 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, 日本雪氷学会誌雪氷, 77巻1号, pp. 5-16, 2015. 1
  - 11) Japan Meteorological Agency: Download past weather data, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, (accessed 2020-01-06)
気象庁: 過去の気象データ・ダウンロード, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, (参照 2020-01-06)
  - 12) TAKEUCHI Yukari, KATSUSHIMA Takafumi, ENDO Yasoichi: Data of meteorology and snow pit observations at Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute, Japan(IX) (2014-15 to 2018-19, five winter periods), Bulletin of FFPRI, Vol. 18-No. 4 (No. 452), pp. 393-443, 2019. 12
竹内由香里, 勝島隆史, 遠藤八十一: 森林総合研究所十日町試験地における冬期の気象及び雪質の調査資料(9) (2014/2015 年~2018/195 冬期), 森林総同研究所研究報告, Vol. 18-No. 4 (No. 452), pp. 393-443, 2019. 12
  - 13) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: Meteorological, Snowfall and Snow Cover Data Observed at Shinjo (2017/18 Winter), Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, No. 433, 2019. 3
防災科学技術研究所: 新庄における気象と降積雪の観測 (2017/18 冬期), 防災科学技術研究所研究資料, 第433号, 2019. 3
  - 14) Aoki Teruo, Niwano Masashi, Matoba Sumito: Snow observations and development of physically based process model at Sapporo, Low Temperature Science, No. 74, pp. 163-174, 2016
青木輝夫, 庭野匡思, 的場澄人: 札幌における積雪観測と物理プロセスモデル開発, 低温科学, 74巻, pp. 163-174, 2016
  - 15) YOKOYAMA Kotaro, OHNO Hiroyuki, KOMINAMI Yasuhiro, INOUE Satoshi, KAWAKATA Toshikazu: Performance of Japanese precipitation gauges in winter, Journal of the Japanese Society of Snow and Ice, Vol. 65, No. 3, pp. 303-316, 2003
横山安太郎, 大野宏之, 小南靖弘, 井上聡, 川方俊和: 冬期における降水量計の補正特性, 日本雪氷学会誌, 第65巻3号, pp. 303-316, 2003
  - 16) Japan Meteorological Agency: List of weather stations, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf, (accessed 2019-12-26)
気象庁: 気象観測所一覧 [PDF形式], https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf, (参照 2019-12-26)

REAL-TIME ESTIMATION OF GROUND SNOW LOAD USING SNOW LAYER MODEL

Dai KOMIYAMA^{*1}, *Ashidmaa BATSUURI*^{*2} and *Toru TAKAHASHI*^{*3}

^{*1} Nishimatsu Construction Co., Ltd., M.Eng. (Former Grad. Student of Chiba Univ.)

^{*2} Grad. Student, Graduate School of Science and Engineering, Chiba University

^{*3} Prof., Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr.Eng.

We proposed a real-time estimation model based on the method of Takahashi model to understand the snow weight changes during every moment of snow season. This method uses Takahashi model, which is made up from three sub models, snowfall model, compaction model, and snow melting model. In addition, the hourly snow layer model and optimized parameter for each location have been newly introduced to real-time estimation.

In hourly snow layer model, snow layer is formed by weather observation records obtained hourly from AMeDAS. The density at the hourly layer formation was calculated by the snowfall model. In addition, since it was assumed that the hourly layer was transitioning to the daily snow layer, only the infiltration of snowmelt water and rainfall was considered, while consolidation was not.

The optimized parameters for each location are average values of several years of pre-calculation result of each location. However, in the analysis using these parameters, when the value is significantly different from the average year, the error might be large. In that case, if overestimation was occurred, consolidation was forcibly performed, and if underestimation occurs, the capture rate was corrected.

The estimation accuracy was verified using this model. This paper covered Tokamachi, Shinjo, and Sapporo. The snow weight data used to compare calculation result were the observed record in Tokamachi and Shinjo, and for the Sapporo's case, the value was calculated from the record of the cross-section observation, which was done twice a week. Also, the comparison of snow weight in the verification was based on daily data.

In Tokamachi and Shinjo, the estimation results were sometimes low in the winter with little snow, they were almost accurate in the winter with a lot of snow. In Sapporo, although they were accurate in some winters, the error of the maximum snow weight was over 30% in winters with a lot of snow.

In Sapporo in the winter of 2012/13, the obtained value by cross-section observation might be inaccurate and the snow weight might be less than the true value. On the other hand, the increase in snow weight due to rainfall from mid-February might be indication that the estimated layer is overly absorbing precipitation. Therefore, the actual snow conditions of the snow layer from mid-February to March is possibly changing to granular snow earlier than our estimation due to consolidation and precipitation infiltration, rainfall. In result snowmelt water and rainfall may not be retained and flowed out from the bottom of the snow. In addition, the temperature in Sapporo is extremely low in winter, so there are many days when the temperature drops below -2°C , which is set as the minimum snowmelt temperature. At this time, snow melting does not occur in the analysis, but there is a possibility that snow melting might occur due to solar radiation. If snow weight measurements are accurate, one of the factors might lead to overestimation since these mechanisms were not considered in our estimation

Furthermore, there was a gap between the estimated values and measured values when the snow melted completely in the winter of 2012/13 in Sapporo. Since the gap was caused by the fact that amount of estimated snowmelt in early spring might be smaller than the actual one, it may be necessary to use different parameters depending on the season.

(2020年6月10日原稿受理, 2020年11月18日採用決定)