積雪深履歴を用いた 積雪重量のリアルタイム推定

阿部 雅人¹・中村 一樹²・島村 誠³

¹正会員 株式会社BMC研究・開発部 (〒261-7125 千葉県市美浜区中瀬2-6-1 WBGマリブウエスト25階)
E-mail: masato@hashimori.jp

²非会員 防災科学技術研究所気象災害軽減イノベーションセンター (〒305-0006 つくば市天王台3-1)
E-mail: kazuki.snow@bosai.go.jp

³フェロー会員 防災科学技術研究所気象災害軽減イノベーションセンター (同上)
E-mail: shimamura@bosai.go.jp

積雪重量は、構造設計上の雪荷重や除雪・雪下ろし等のリスクマネジメントの基礎となる情報である。また、融雪水推定や、高精度の重力測定など幅広い分野で課題となっている。反面、その直接計測は一般に困難で高費用であることから、リスクマネジメント上は容易かつ多様な方法で計測可能な積雪深が用いられることが多い。しかし、雪質によって単位重量が変化するため、積雪深のみに依存したリスクマネジメントには限界があり、積雪による構造物の崩壊事例が後を絶たない。本研究では、積雪深と積雪重量間の履歴関係を明らかにしてモデル化し、積雪深の履歴情報からリアルタイムに積雪重量を推定する方法を構築した。さらに、防災科学技術研究所において実施している積雪重量の長期モニタリングデータを利用して検証を行い、運用についての検討を行った。

Key Words : snow weight estimation, hysteretic model, snow depth measurement

1. はじめに

積雪重量は、構造設計上の雪荷重や除雪・雪下ろし等のリスクマネジメントの基礎となる情報である^{1,2,3,4}。また、雪が融解した際の水の量に相当することから、水文学上の研究対象でもある⁵。さらに、近年は、地球物理学において、高精度の重力測定への積雪の影響が観測され、積雪重量の定量的測定が試みられている⁶。

一方、積雪重量の測定や推定は必ずしも容易ではない。積雪深は、簡易な積雪目視をはじめ、レーザー計測や航空測量、リモートセンシングの活用など多様な技術があり、比較的容易に広域に計測できるのに対して、同じ積雪深であっても、雪質によって単位重量が変化するためである。そこで、スノーサンプラーによって原位置 (in situ) で雪を採取し密度を計測する方法が、標準的に実施されてきた⁷。それらの結果に基づいて、積雪の単位重量の統計が得られ、積雪荷重に反映されている。ただし、手間や費用が掛かるのみならず、近接が困難な場所も多いことから、広域で高密度な計測を実施することが難しく、また、連続的なモニタリング計測には適していない。

図-1 メタル・ウェハー型積雪重量計

そこで、図-1に示すメタル・ウェハー型の積雪重量計が開発され、継続的なモニタリングが実現された^{8,9}。このシステムは高い精度での計測が可能であるものの、5m×5m程度の平坦な場所を要するなど規模が大きいため、設置に手間がかかり、また、適用可能な場所に制限がある。そこで、小型で簡易な積雪重量計の開発も進められているが、現状では、工学的に十分な精度が実現されるに至っていない⁹。

(a) 観測された年最大積雪深と年最大積雪重量

(b) 年最大積雪深と年最大積雪重量の関係

図2 長岡・新庄で計測された年最大積雪深・積雪重量

(a) 2014年～2015年

(b) 2011年～2012年

図3 長岡で計測された積雪深・積雪重量の時系列の例

図4 東京電力湯沢発電所屋根の崩落

それに対して、気温や降水量などの気象データに基づいて雪質の変化を予測する雪質変化モデルも開発されており、積雪重量の推定に活用されている¹⁰⁾¹¹⁾。気象データは、必ずしも全ての対象位置で得られるわけではないので、広域推定には、内挿やデータ同化のプロセスが含まれることになる。

このように、リアルタイムかつ局所的に積雪重量を得ることが現状では困難であるため、雪下ろし・除雪等のリスクマネジメントは、その場所の積雪深によって判断されることが一般的である。図2に、本研究で用いた長期観測記録の概要を示した。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、以下「長岡」と略）ならびに同センター新庄雪氷環境実験所（山形県新庄市、以下「新庄」と略）で実施されている、レーザー積雪深計とメタル・ウェハー型積雪重量計による1時間毎の観測記録から得られた年最大積雪深および年最大積雪重量（面積当たり）である。当然ながら相関は見られるが、ばらつきも小さくない。

なお、長岡では1964年から、新庄では1973年から積雪の観測が行われているが、本研究では、デジタル化されて利用可能な毎時データ（長岡：1997年以降、新庄2008年以降）を用いて検討した。ただし、2004年長岡のデータには長期的な欠測があるため本研究では用いていない。

実線：実測値； 点線：リアルタイム推定値
図5 長岡で計測された積雪深・積雪重量の履歴関係

図-3に2014年と2011年の時系列を例示した。最大積雪深と最大積雪重量の発生時期も異なっていて、また、その傾向も年によってかなりばらつく。これらのデータからも、積雪深に依存したリスクマネジメントの限界がうかがえよう。実際、2014年には、屋根雪除雪目安を積雪深で定めていた東京電力湯沢水力発電所で、図-4のように建屋屋根が崩落する事故が発生している^{12,13}。湯沢発電所から80km程度離れた地点での計測ではあるが、図-3に示した2014年と、最大積雪深ならびに最大積雪重量がより大きい2011年の長岡の時系列を比較すると、2014年には早期に積雪深が急増した後急減していることが見てとれる。その影響で、積雪の圧密や高温、降雨による積雪のざらめ雪化、融雪等の締め固まるプロセスが比較的早期より発生し、かつ類似プロセスが繰り返されたことで、比較的浅い積雪深で大きな積雪重量が発生しやすい気象条件であったことが推測される。

このように、リアルタイムの積雪重量推定が一般に困難であることから、リスクマネジメントが適切に実施されず、橋梁¹⁴をはじめ、前述した建屋屋根^{12,13}や、農業用温室¹⁵の崩壊例が、近年も後を絶たない。

そこで、本研究では、原位置において比較的容易に計測可能な積雪深記録のみを用いて、リアルタイムに積雪重量を推定することが可能な履歴モデルを構築し、長岡および新庄の長期観測記録を用いてその検証を行った。

2. 履歴モデル

図-5に、積雪深と積雪重量の履歴の計測値を実線で示

した。降雪によって積雪が増加する際は比較的小さい傾きであり、その後、圧密や高温、降雨による積雪のざらめ雪化を経て、融雪で積雪が減少する際は大きな傾きとなるヒステリシスを描くことがわかる。この現象のモデルとして、図-6に示したトリリニアの履歴モデルを考案した。積雪深増加時は傾き a で積雪重量が増加し、減少時は傾き b (切片0)の線に至るまでは積雪重量一定のまま推移したのち、傾き b の直線に達したところでその線に沿って減少するモデルである。すなわち、任意の時間 t における積雪深を d 、単位面積当たりの積雪重量の推定値を w 、それぞれの増分を Δt 、 Δd 、 Δw とすると

$$\Delta d > 0 \text{ の場合 : } \Delta w = a \Delta d \quad (1)$$

$$\Delta d < 0 \text{ の場合}$$

$$w < bd \text{ であれば, } \Delta w = 0 \quad (2a)$$

$$w = bd \text{ であれば, } \Delta w = b \Delta d \quad (2b)$$

であり、積雪深 $d=0$ における積雪重量 w が0であることを所与の条件として逐次推定を行う。

積雪深の増加は降雪によるものであり、その際の雪質変化の積雪深に及ぼす影響は相対的に小さいとすれば、パラメータ a は、概ね降雪の単位重量に相当すると考えられる。同様に、 b は、雪質変化によって発現した融雪直前の単位重量であると考えられる。したがって、本モデルでは、雪質の変化は、積雪深の等重量変化として現象論的に表現されていることになる。なお、文献16)では、最大積雪重量は、降雪時の累積降水量から推定可能であることを明らかにして、最大積雪重量に達するまでは排水等による重量減少の影響が少ないとの指摘がなされている。本研究のモデルは、この指摘と整合的なものとなっている。

図-6 履歴モデル

実線：実測値； 点線：リアルタイム推定値

図-7 積雪重量の推定結果 (長岡)

図-8 パラメータ値の設定

図-9 最大積雪重量のリアルタイム推定精度と計測頻度

本モデルにおいてパラメータ a および b を、各年毎に積雪深から推定された積雪重量と計測値の残差が最小になるよう求めた後に、改めて推定を行った結果の例が図-7および図-5の点線である。時系列ならびに履歴ともに、おおむね精度よく推定されており、このモデルで基本的な現象は再現可能であることがわかる。

3. パラメータの設定法

次に、モデルパラメータの設定法について検討する。

長岡ならびに新庄の対象各年のデータに対して、残差を最小とするパラメータ値を求め、年最大積雪深に対して表示したのが図-8である。パラメータ a については、ばらつきはあるが、系統的な増減の傾向はみられない。パラメータ b は、積雪深が小さい領域では増加しているが、大きくなるにつれて、ばらつきは大きいものの一定値に近づく傾向がみられる。そこで、 a についてはその平均値、 b については、積雪深が0から1mまでは線形増加するものとし、 $d=1\text{m}$ 以上では平均値を採用することとした。すな

わち

$$a=0.95 \text{ kN/m}^3 \quad (3)$$

$\max(d) < 1\text{m}$ で、

$$b=0.95+3.05d \text{ kN/m}^3 \quad (4a)$$

$\max(d) \geq 1\text{m}$ で

$$b=4.0 \text{ kN/m}^3 \quad (4b)$$

となる。ここで、 a の値と b の値は、 $d=0$ で一致するようにした。前述した a と b の物理的意味から考えて、最大積雪深が0に近い極限的な場合では、雪質変化プロセスが発現する以前に雪が融解してしまう可能性が高いと考えられるので、 $a=b$ とするのが合理的であると考えたものである。なお、文献16)において、積雪深1mで積雪深と単位積雪重量の関係の傾向が変化することが指摘され、回帰式に反映されている。本研究では、その知見を踏まえ、パラメータ b の設定式の変化点を積雪深1mとした。

なお、リアルタイム推定において、 b の値を求めるにあたって、各年のある時点において、年最大値 $\max(d)$ は予め定まらず不確定である。そこで、以下の推定では、各時点までの最大積雪深を式(4a)(4b)に代入して、パラメータ b の値を逐次更新している。

図-10 リアルタイム推定に対する計測頻度補正の効果 (長岡)

構造設計上の積雪荷重を決定する目的で、これまでも、面積当たりの単位重量を統計的に求めた回帰式が提示されているので、道路橋示方書の値と併せて、図-7に表示した^{1), 16), 17), 18)}。これらの単位重量は、ある時点での積雪深と積雪重量の比やその平均値から求めたものであるから、積雪深・重量履歴における割線係数を求めることに相当する。本研究で提案しているモデルのパラメータ値は履歴の接線係数にあたることから、厳密には一致しないが、概ね類似の傾向にあることがわかる。

4. モデルの精度と運用

式(3)(4)の方法でパラメータを設定して、改めて積雪重量を推定し直した結果を、各年の最大積雪重量について図-9に、また、例として前掲の長岡の2つの時系列について図-10に示した。図中毎時とした点線が提案しているリアルタイム推定の結果であり、高い精度で最大積雪重量を再現することができた。

以上の推定は、連続計測された毎時の積雪深履歴データを利用したものであった。より簡易な運用として、雪尺目視での積雪深観測を想定して、毎日正午、ならびに日中3回(午前8時、正午、午後4時)のみの、より低頻度な積雪深計測値が得られるとして最大積雪重量を推定した結果も図-9に示した。各場合の結果の回帰式を併せて図中に示している。いずれの場合も決定係数 R^2 値は 0.9 を超えており、推定結果と実測値の相関は高いが、1日1回正午のみの場合は実測値の 67%、1日3回の場合は 83%と、小さめの推定値となっている。

これは、1日の間に大きく積雪深が増加したり、あるいは減少したりする場合に、そのピーク値を補足できな

かったり、履歴の反転などの形状を十分に把握できなかったりすることに起因する。したがって、高い精度の推定には、毎時の連続記録が得られることが望ましい。一方、推定結果と実測値の相関が高いことから考えると、低頻度の観測の場合には、割増係数を掛けるという運用もあり得よう。図-9の結果によれば、1日1回の場合で、 $1/0.67 \approx 1.5$ 、日中3回の場合で、 $1/0.83 \approx 1.2$ 程度の補正係数値を推定値に掛ける方法での運用が考えられる。

図-10に、毎時、日中3回、および毎正午の観測による推定結果ならびに上述の係数による補正(日中3回で1.2倍、毎正午で1.5倍)を行った場合のリアルタイム推定結果を示した。補正結果を見ると、特に積雪重量が減少する段階で過大評価となっているが、最大積雪重量発生時点まではおおむね良好な推定となっている。最大積雪重量に対して事前に除雪等を行うのが一般的なリスクマネジメントであると考えられるので、このような低頻度の観測による推定も、費用等の制約があって連続観測が困難な場合には有効であろう。

5. 結論

積雪深履歴情報から積雪重量をリアルタイムに推定する方法を構築し、実測データによってその有効性を明らかにした。主たる結論は以下の通りである。

- ・積雪重量の降雪増加時および融雪減少時の積雪深に対する変化率を、降雪単位重量に相当するパラメータ a 、および融雪単位重量に相当する b で規定し、その間の雪質変化に伴う積雪深減少時の積雪重量は一定とした、トリリニア型の履歴モデルを考案し、積雪深履歴記録のみからリアルタイムに積雪重量を推定する方法を構

築した.

- ・実測データによってその有効性ならびに精度を検証し、また、パラメータ a, b の設定方法を明らかにした.
- ・雪尺目視による運用を想定した低頻度の履歴データについてもリアルタイム推定の精度を検討した. 精度の高い推定には毎時のデータが望まれるが、疎なデータでも実測記録との相関自体は高いことが分かった. 運用上は、1日1回程度であれば1.5倍、日中3回程度の計測であれば1.2倍程度割増することが有効であると考えられる.

本研究の結果から、多様な計測技術が開発されている積雪深を用いることで、容易に積雪重量を推定できる可能性が明らかとなった. ただし、本研究は、長期観測データが得られた防災科学技術研究所での記録のみに依拠しているところに課題がある. 長岡と新庄の比較では、特段の地域性は認められなかったが、それが他の地域にも一般化可能かどうかは検証の必要がある. とりわけ、本研究で用いたデータセットでは、概ね2m程度以下の積雪記録が主であるので、さらに積雪深が大きい場合のパラメータ値等の適用可能性も課題となる. また、用いた計測データが平地での記録のみであるので、雪の移動や融雪水の流入出が想定される斜面の場合への拡張性も課題である. 今後、さらにデータの収集・計測を進め、検証およびモデルの改良を加えていく必要がある.

謝辞: 東京電力湯沢発電所屋根の崩落状況の写真(図-4)は、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター中井専人氏の提供による. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書共通編，2012.
- 2) 菅田紀之，杉本博之，尾崎初，竹本伸一：PC スノーシェルターの最適設計について，土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 43, I-26, pp. 121-124, 1987.
- 3) 阿部雅史，水谷哲也：PC スノーシェルター桁の設計とたわみ評価—北陸新幹線 桑取川橋—，プレストレ

ストコンクリート工学会第23回シンポジウム，pp. 523-526, 2004.

- 4) 日本建築学会編：雪と建築，技報堂出版，2010.
- 5) 小池俊雄，高橋裕，吉野昭一：融雪量分布のモデル化に関する研究，土木学会論文集，No. 363/II-4, pp. 165-174, 1985.
- 6) 今西祐一，大井拓磨：PET ボトルを用いた簡易型積雪重量計の開発，雪氷，Vol. 77, No. 2, pp. 191-199, 2015.
- 7) 日本雪氷学会編：積雪観測ガイドブック，朝倉書店，2010.
- 8) 木村忠志：雪情報システムのあり方について，雪氷，Vol. 48, No. 1, pp. 21-29, 1986.
- 9) 谷瀬敦，山下彰司：積雪重量計を用いた積雪層の観測について，水工学論文集，Vol. 51, pp. 355-360, 2007.
- 10) 平島寛行：積雪変質モデルによる雪崩発生予測の現状と課題，雪氷，Vol. 76, pp. 411-419, 2014.
- 11) 伊豫部勉，河島克久，和泉薫：Web 上で公開される積雪深情報の実態と一元的集約による積雪深分布図の作成，日本雪工学会誌，Vol. 28, No. 3, pp. 211-220, 2012.
- 12) 東京電力株式会社：電気事業法第106条第3項の規定に基づく報告徴収に対する報告について，湯沢発電所建屋屋根崩落事故，2015.
- 13) 高橋徹，中村一樹，植松康：2014年2月の大雪による建築物の被害，日本雪工学会誌，Vol. 30, No. 2, pp. 102-105, 2014.
- 14) 平野廣和：長野県栄村中条橋崩落追跡調査，土木学会関東支部調査報告，2012.
- 15) 日本施設園芸協会，平成26年2月の大雪被害における施設園芸の被害要因と対策指針，2014.
- 16) 桜井修次，城攻：気温・降水量記録に基づく地上積雪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，Vol. 17, No. 3, pp. 10-21, 2001.
- 17) 阿部修，清水増次郎：多雪地における雪荷重算定のための等価積雪密度について，雪氷，Vol. 66, No. 1, pp. 11-16, 2004.
- 18) 城攻，桜井修次：多雪地域における等価単位積雪重量について，日本雪工学会誌，Vol. 9, No. 2, pp. 22-24, 1993.

(2016. 10. 6 受付)

HYSTERETIC MODELING TO ESTIMATE SNOW WEIGHT FROM SNOW DEPTH HISTORY IN REAL TIME

Masato ABE, Kazuki NAKAMURA and Makoto SHIMAMURA

Snow weight information is of interest to wide area of engineering and science. However, its direct measurement is costly in contrast to snow depth measurement where variety of methods from visual measure to advanced laser or remote sensing are available. Hence, snow weight information is usually sparse both in time and space compared to snow depth information. This paper proposes a hysteretic trilinear model to estimate snow weight from snow depth history. The model is verified by continuous monitoring data of snow depth and weight operated by National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. The model is shown to match observed data well and selection procedure of parameters for the model is established. In addition, application to visual measure with sparse measurement in time is studied.