

【2-1】

屋根雪荷重の推定方法に関する研究
—2016/17 冬期に実施した実測との比較—

正会員 ○ 五十嵐 賢次 ^{*1}
正会員 富永 禎秀 ^{*2}

雪荷重 降水量

1. はじめに

屋根上の積雪荷重を正確に推定する方法を構築するための基礎資料を得ることを目的として、2016/17 シーズンに、屋根試験体を設置した。シーズン中の積雪荷重を計測することで、その挙動を把握した。そして気象観測データから得られる降水量から、それを重量換算して屋根雪荷重を推定し、実際に計測した屋根雪重量との比較を試みた。

また、日本建築学会の荷重指針 ¹⁾の中には降水量と気温に基づく地上積雪量の算定がある。これは多雪地域でない地域でも、観測される日降水量をベースに、積雪量や積雪重量を推定できれば、例えば 2014 年 2 月における関東・甲信地方での大雪による建築物の被害も軽減できた可能性がある。この算定方法を用いて、今回計測した積雪重量との比較を試みた。

2. 観測概要

2-1 屋根モデル

新潟県柏崎市にある新潟工科大学グラウンドに陸屋根試験体を設置した。試験体形状を図 1 に示す。屋根面積は 1m×1m、高さは 1.5m の鋼板屋根で、水勾配を 1/100 とした。水下側には雪止めと雨どいを設けて、水下を南側に配置した。

2-2 観測項目

屋根試験体の 4 本の柱途中には荷重計（容量 2kN；CLS-2KNB 東京測器研究所）を設置し、降雪による重量変化を測定した。また雨どいにホースを取付け、その先に流量計（10ml/P；NW05-PTP 愛知時計電機社）を設置し、雨水や融雪水も測定した。

学内には屋根試験体から約 200m 離れた地点に気象観測装置があり、そこで計測される外気温、風速、降水量を用いてデータ比較を行った。これらは何れも 1 時間毎の計測・観測値である。

3. 観測結果及び考察

3-1 屋根試験体測定

試験体は 2016 年 12 月に設置した。図 2 に柱 4 本の荷重計の値を合計したシーズン中の積雪荷重を示す。主な降雪としては 1/16 の 624N を最大として、他に 1/25 の

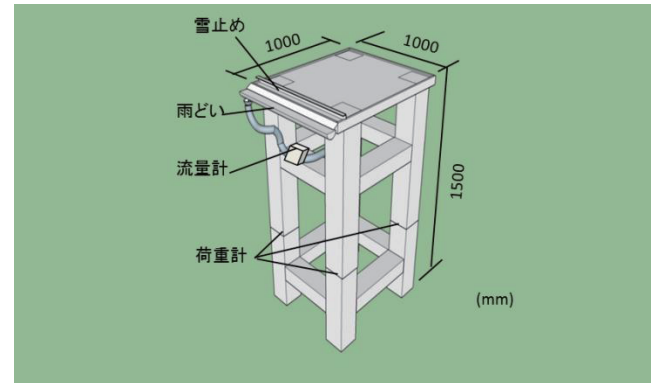


図 1 陸屋根試験体

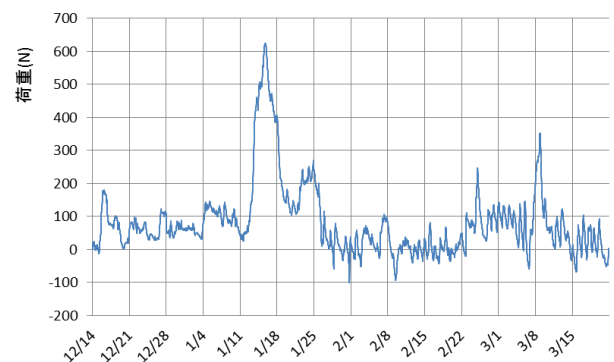


図 2 荷重計によるシーズンデータ

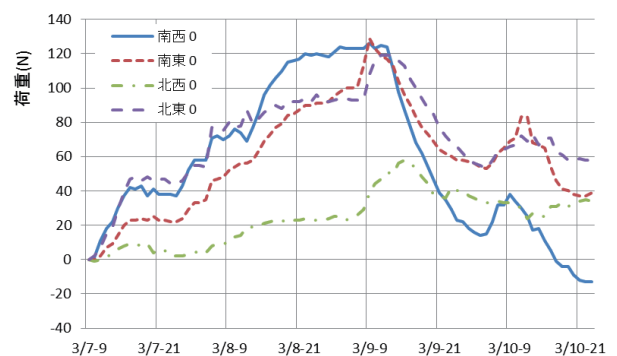


図 3 各柱で計測した荷重変化

269N、2/25 の 247N、3/9 の 283N の計 4 回程度であり、例年と比較して少ない降雪量であった。荷重計は積雪のない状態でも変動しており、合計がマイナス値を示すなど、融雪後でも荷重が 0 近傍に戻らない場合があった。

また、流量計の設置が遅くなり荷重計と同時に測定できた積雪期間は 2017 年 2 月からであり、それ以降でまとまった降雪は 3/7～10 日であった。その間は降雪のみで降雨はなかった。この期間における計測値を対象に考察を行う。まずは降雪が始まる日の 9 時は変動する荷重計の下限値であり、この時点でゼロ調整を行った。

図 3 に柱 4 本の各数値を示す。水上側にある北西側柱を除いて積雪により荷重が増分する様子が分かる。屋根試験体の精度や設置状況にもよるが、荷重計の当たり具合が 4 本均等になることが困難であると推測される。

図 4 にこの期間の 4 本の荷重計の合計と、流量計で測定した水量を重量に換算したグラフを示す。7 日からの降雪により重量が大きくなるが、9 日の 12 時以降から流量がカウントされ始めると、急激に重量が軽くなる経過が分かる。融雪により積雪重量が軽減されている。

3-2 気象観測降水量から算出した屋根雪重量との比較

気象観測装置で観測された降水量から、使用した降水量計の RT-3 型式²⁾と風速³⁾により補正降水量を求めた。これは風速により計量される雨量を補正したものである。図 5 には補正した降水量の 1 時間毎の重量と、これを積算することで算出した累計降水量を示す。降水量 1mm は 0.01kN/m^2 であり、これに屋根面積 1m^2 を乗じることによって重量に換算した。

この累計降水量に対して、地上積雪深より屋根上面積雪深がやや小さくなる影響を屋根勾配と風速によって求められる屋根形状係数 μ_b ¹⁾を参考に補正したものが推定屋根雪重量①である。今回の観測では風速が 2.0m/s 以下であったため、 $\mu_b=0.9$ を採用した。これから流量計による流水重量を差引いたものが推定屋根雪重量②となる。これらの重量変動を図 6 に示す。図 4 に示す試験体の荷重計の変動と比較して、グラフの形状は類似しているが、推定屋根重量の値が全体的に大きい傾向を示した。陸屋根試験体の荷重計の変動と、推定屋根雪重量②を比較したグラフを図 7 に示す。両者の相関は高いものの傾きは約 1.5 であった。

4. 降水量と気温に基づく地上積雪量

建築学会の荷重指針では、日降水量と日平均気温資料に基づく地上積雪重量の算定が記載されている。指針には 3 つの提案式が述べられている。高橋ら⁴⁾が提案したのは式 (1) である。日降水量・日平均気温・融雪係数を用いた積雪重量推定法を応用して、積雪の内部に降雪ごとに形成される各積雪層の厚さを算定しているのだが、具体的な検証の方法は難しい。その中で、千葉ら⁵⁾は式 (1) を分かり易く検証・解説を行っている。

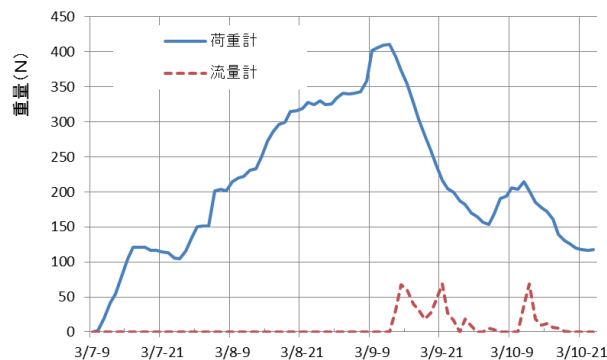


図 4 荷重計・流量計による重量変化

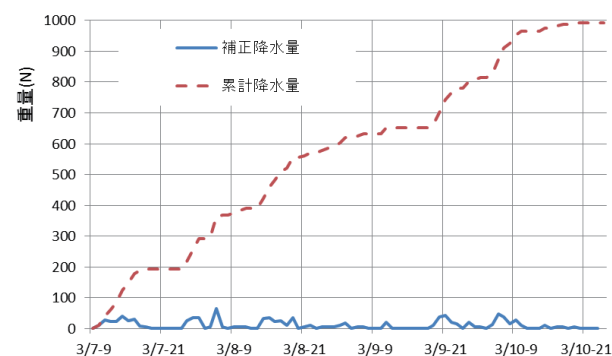


図 5 降水量の変化

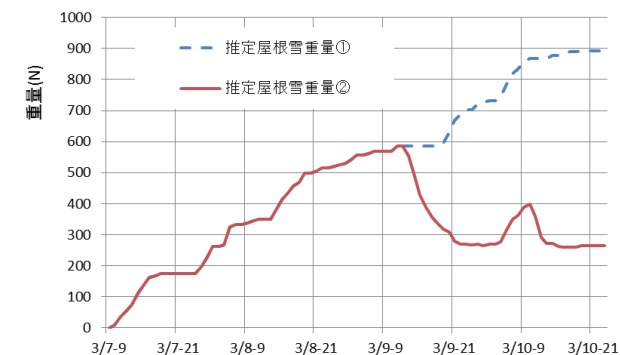


図 6 推定屋根雪重量の変化

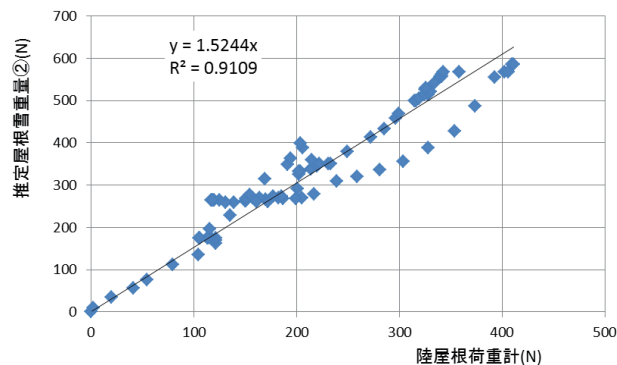


図 7 荷重計との比較

今回の観測では、用いた気象観測データは補正降水量、気温、風速であることから、提案式を用いて具体的に検証を試みる。

式(1)は分子が重量による項(kN/m²)、分母が単位体積重量(kN/m³)なので、除することによって積雪量(m)が求められる。

ここで、

$${}_m d_n = \frac{{}_m P - {}_m P_c}{\rho_{\min} \sqrt{n+k}} \quad \text{—式(1)}$$

${}_m d_n$: 根雪開始後 m 日目の降雪により形成された第 m 層の n 日目の層厚(m)

${}_m P$: 根雪開始後 m 日目の日降水量(mm)から換算した降水重量(kN/m²)

${}_m P_c$: 根雪開始後 m 日目の融雪量(kN/m²)

P_c : 融雪量(kN/m²)

$$P_c = \sum_m {}_m P_c = C(T - T_0) \quad (T > T_0) \quad \text{—式(2-1)}$$

$$P_c = 0 \quad (T \leq T_0) \quad \text{—式(2-2)}$$

C : 融雪係数(kN/m²°C) (1 冬期間一定値と仮定)

T : 日平均気温 (°C)

T_0 : 融雪下限温度 (°C) -2°Cに設定

n : 第 m 層形成からの経過日数 (日)

${}_m k$: 第 m 層の単位積雪重量増加分の補正係数

$${}_m k = {}_m \rho_0^2 / \rho_{\min}^2 \quad \text{—式(3)}$$

ρ_{\min} : 積雪の最小単位体積重量(kN/m³)

ρ_{\max} : 積雪の最大単位体積重量(kN/m³)

4.9kN/m³に設定

${}_m T$: 根雪開始後 m 日目の日平均気温 (°C)

${}_m \rho_0$: 降雪時の単位体積重量(kN/m³)

$${}_m \rho_0 = \rho_{\min} \quad (T \leq 0^\circ\text{C}) \quad \text{—式(4-1)}$$

$${}_m \rho_0 = \rho_{\min} + {}_m T (\rho_{\max} - \rho_{\min}) / 3 \quad (0^\circ\text{C} < T \leq 3^\circ\text{C}) \quad \text{—式(4-2)}$$

$${}_m \rho_0 = \rho_{\max} \quad (3^\circ\text{C} < T) \quad \text{—式(4-3)}$$

降雪から各積雪層が毎日積上がるわけだが、1 層分の計算過程は以下の通りとなる。

① 降雪日に日平均温度から密度 ρ_0 の算出、日降水量から積雪重量 ${}_m P$ と積雪量 ${}_m d_n$ を算出
式(4-1~3)を用いて ρ_0 を算出するが、関係は図 8 に示す通りである。

② 翌日の 1 つ目の現象として、積雪後の経過日数 n と補正係数 ${}_m k$ から ρ_n を算出し、 ${}_m P$ をそのままにして ${}_m d_n$ の低減。日が経過することによって雪が締まり、積雪量が低減する過程。

降雪時の ρ_0 から補正係数 ${}_m k$ を算出し、経過日数 n を追加することで更に ρ_0 が増加する。関係は図 9 に示す通り。

③ 翌日の 2 つ目の現象は、翌日の日温度により融雪量 ${}_m P_c$ を算出し、 ${}_m P$ をそのままにして ρ_n が増加して ${}_m d_n$ の低減。融雪によって雪が締まり、積雪量が低減する過程。

このうち、融雪量 P_c に関しては、式(2-1~2)で算出するが、融雪係数 C は融雪下限温度以下では融けずに、気温がそれ以上の場合に上昇する。図 10 に融雪係数 $C=0.04$ 、 0.07 の場合の関係を示す。

④ 翌々日以降は積雪量 ${}_m d_n$ が 0 になるまでこの過程が繰り返される。但し、 ρ_n が ρ_{\max} を超えた場合はそれ以上増加しないため、超過分を ${}_m P$ から差し引いて重量低減する。

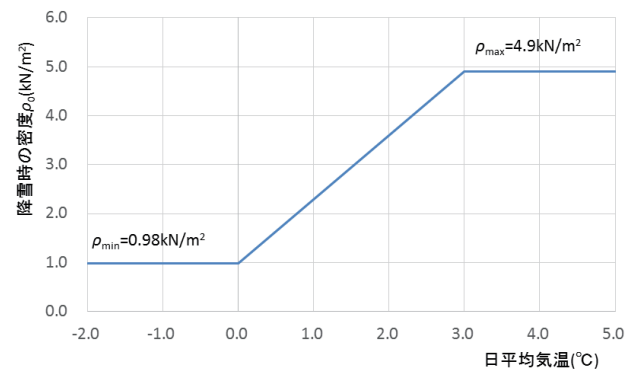


図 8 日平均気温と降雪時の密度との関係

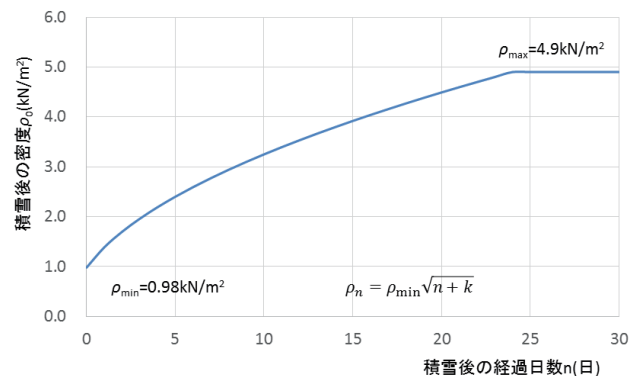


図 9 積雪後の経過日数と密度との関係

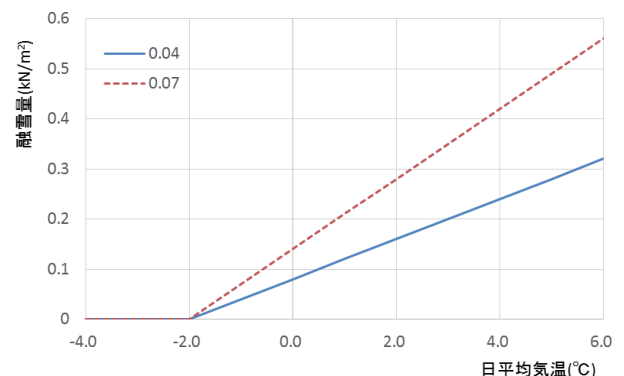


図 10 日平均気温と融雪量との関係

式 (1) では分子の重量に関する項は、降水量重量 mP から融雪量 mP_c を差し引いているのだが、③の過程では融雪により単位積雪重量 ρ_n を 増大させて積雪量 $m d_n$ を求めている。

この提案式ではパラメータは幾つもあるが、積雪の最大単位体積重量 $\rho_{max}=4.9\text{kN/m}^3$ 、融雪下限温度 $T_0=-2^\circ\text{C}$ を一定として、積雪の最小単位体積重量 $\rho_{min}(\text{kN/m}^3)$ と融雪係数 $C(\text{kN/m}^2\text{C})$ は地域により変動して 1 冬期間一定値と仮定している。

ここでは $\rho_{min}=0.98\text{kN/m}^2$ と、融雪係数 $C=0.04\sim0.07\text{kN/m}^2\text{C}$ を変化させた場合の地上積雪重量と積雪量を算出した。なお、日毎の算出だと計測値との比較が粗くなってしまうため、12 時間刻みの日毎データを用いた。例えば、3/8 の 0 時の値は 3/7 の 1 時～3/8 の 0 時までの平均気温や累計降水量のデータを用い、3/8 の 12 時の値は 3/7 の 13 時～3/8 の 12 時までのデータである。

図 11 に荷重計による計測値と融雪係数を変化させた場合の関係を示す。降雪を観測したのは 3/10 までであり、検証では 3/12 には完全に融雪したことになる。積雪重量としての最大値は何れも 3/9 の 12 時であり、測定結果と同じとなった。融雪係数が大きくなるに従って、積雪重量が小さくなり、山なりから鋭角なグラフ形状となった。特に融雪係数 0.07 とした場合には、3/9 の 12 時、3/10 の 12 時と二つピークを示すグラフは、実際の計測値と似た形状となった。

図 12 には融雪係数を変化させた積雪量の変化を示した。最大積雪量は約 200mm であり、融雪係数による変化はそれ程大きくはない。

融雪係数を変化させることによって、降雪時の段階では差が見られないが、最大値近傍とそれ以降の下降する融雪時において大きな変化を示す傾向にある。

5. まとめ

2016/17 冬の計測結果と検証をまとめると以下の通りである。

- 1) 陸屋根試験体に荷重計を設置したが、柱 4 本の値が均等になるのは難しい。冬期を通しては、融雪後の積雪なしの状態でも荷重が 0 に戻らない場合があり、計測方法のさらなる検討が必要である。
- 2) 観測降水量から算出、補正した屋根雪重量は、陸屋根試験体の荷重計の重量と比較しても 5 割程度大きくなり、原因を検討中である。
- 3) 荷重指針による検証では、融雪係数を変化させることで比較的に計測結果に近いグラフ形状とすることが可能である。他のパラメータもあり、更なる計測と検証を行う予定である。

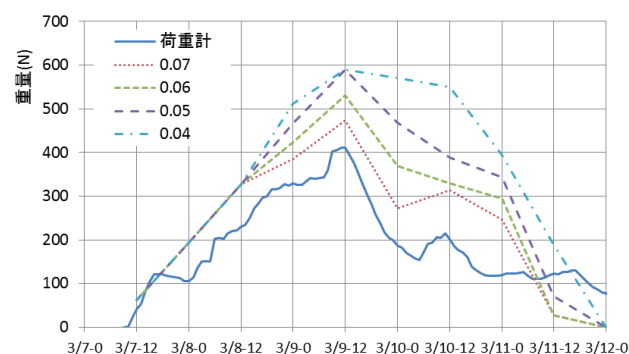


図 11 融雪係数を変化させた場合の積雪重量

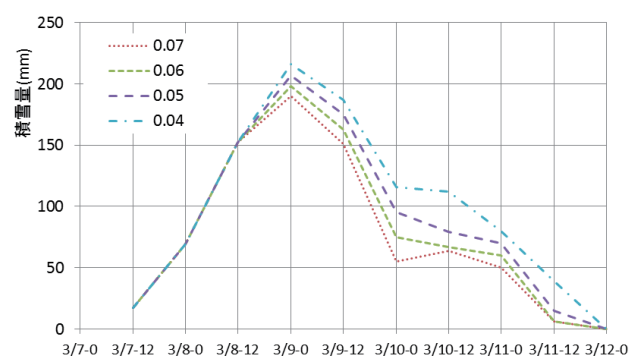


図 12 融雪係数を変化させた場合の積雪量

謝辞

本研究は科学研究費(16H04467)の助成を受けて行われた。また気象観測データは防災科学技術研究所雪氷防災研究センターのものを使用させて頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建築物荷重指針・同解説 (2015), 日本建築学会, pp214-235
- 2) 大野宏之 他: 北陸地方における降水量の固体降水捕捉率, 雪氷, 60 (3), pp225-231, 1988
- 3) 横山宏太郎 他: 冬期における降水量計の捕捉特性, 雪氷, 65 (3), pp 303-316, 2003
- 4) Takahashi, T. et al.: Estimation of ground snow load using snow layer model (積雪層モデルによる地上積雪量の推定), 日本建築学会構造論文集, 第 545 号, PP35-41, 2001
- 5) 千葉隆弘 他: 降水量をベースにした雪荷重評価について, 日本建築学会, 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, pp19-24, 2017

*1 新潟工科大学 准教授 博士 (工学)

*2 新潟工科大学 教授 博士 (工学)

Associate Professor, Niigata Institute of Technology, Dr. Eng.
Professor, Niigata Institute of Technology, Dr. Eng.