

建物の屋根積雪性状の予測・評価手法構築に向けた
屋根積雪多層熱収支モデルの高度化

Improvement of multi-layer heat balance model of
snow on roofs for the predicting and evaluating
roof snow

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部 北方建築総合研究所

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization
Building Research Department Northern Regional Building Research Institute

概要 Abstract

建物の屋根積雪性状の予測・評価手法構築に向けた屋根積雪多層熱収支モデルの高度化 Improvement of multi-layer heat balance model of snow on roofs for the predicting and evaluating roof snow

阿部 佑平¹⁾
Yuhei Abe*

キーワード : 屋根雪、数値モデル、水分移動モデル
Keywords : Roof snow, Numerical model, Water transport model

1. 研究概要

1) 研究の背景

近年、北海道では空き家、倉庫、廃校となった学校の体育館などで屋根雪荷重による建物の倒壊被害が相次いでいる。屋根雪は、気象条件のみならず、建物側からの熱的影響を受け性状が大きく変化するため、屋根積雪性状（積雪深、重量など）を詳しく推定することは困難である。

当研究所では、この現象を予測する数値モデルの開発に取り組んでいるが、屋根雪荷重を予測する場合、屋根雪内部における融雪水の発生と移動を把握する必要がある。しかし、これらの現象については、未だに分からないことが多くあり、特に勾配屋根では現象が複雑になることが考えられる。

2) 研究の目的

本研究は、積雪内部における融雪水の発生や移動を実験により明らかにしモデル化することで、勾配屋根においても屋根積雪性状（積雪深、重量など）を予測することが可能な数値モデルの開発を目的とする。

2. 研究内容

1) 実験室における屋根雪実験（H25～26年度）

- ・ねらい：建物を模擬した試験体を作成し、定常状態における屋根雪の変質過程の観察や屋根面における融雪水量の測定などを行い、実験結果の分析を行う。
- ・試験項目等：屋根雪実験

2) 実建物を対象とした屋根雪観測（H25～26年度）

- ・ねらい：勾配屋根を有する実建物において屋根雪観測を行い、観測結果の分析を行う。
- ・試験項目等：屋根雪観測、気象観測

3) 数値モデルの検討（H26～27年度）

- ・ねらい：勾配屋根を考慮した数値モデルの検討を行い、1) で得られた結果を入力条件として数値計算を行うことで妥当性を検証する。
- ・試験項目等：既往研究の整理、数値計算、モデルの作成

4) 数値モデルの構築（H27年度）

- ・ねらい：1) ～3) の結果を総合的に検討し、かつモデル係数などのチューニングを行うことで数値モデルの精緻化を行い、モデルを構築する。
- ・試験項目等：数値計算、チューニング

¹⁾ 地域研究部居住・防災グループ 研究職員

* Researcher of Residential Planning and Disaster Management Group

3. 研究成果

1) 実験室における屋根雪実験 (H25~26年度)

- ・実験室実験は2種類実施した。まず、勾配の違いによる融雪水の出水と融雪水量を比較するため、建物の屋根を模擬した1.8m×0.9mの試験体を作成し融雪実験を行った。試験体勾配を1寸、2寸、3寸、4寸とし、雪重量を103kg、実験室温度を3℃、試験体内部温度を6℃の条件で融雪水量などを測定した。融雪水の出水は1寸勾配で最も遅く、実験開始から12時間後であった。また、実験開始から20時間を経過すると1時間あたりの融雪水量はどの勾配でも同じになり、約1.2kg/hになった。
- ・次に、雪質の違いによる融雪水の出水と融雪水量を比較するため、30cm×30cm×30cmの試験体を作成し融雪実験を行った。雪質は3種類(①氷板2cm+ざらめ雪28cm、②ざらめ雪15cm+しまり雪15cm、③しまり雪30cm)を設定し、実験室温度を3℃と5℃の条件で融雪水量などを測定した(写真1)。底面に氷板がある試験体①では、融雪水の出水が最も早く、次いで試験体②、試験体③の順になった。また積算暖度^{注1)}と融雪水量の関係から融雪係数を算出した。融雪係数が大きくなると融雪速度も大きくなることから、試験体①<試験体②<試験体③の順に融雪速度が大きくなることを把握し、雪質が融雪速度に与える影響を定量化した(図1)。

2) 実建物を対象とした屋根雪観測 (H25~26年度)

- ・勾配屋根を有する実建物を対象に屋根雪観測を行い、屋根上積雪深、積雪重量、積雪密度、雪温などの基礎データを得た(図2)。

3) 数値モデルの検討 (H26~27年度)

- ・積雪内部の水分移動モデルに係る既往研究を整理し、融雪水の移動を考慮した数値モデルを作成した(図3)。また、1)で実施した屋根雪実験の結果を用いて、数値モデルの妥当性を確認した。

4) 数値モデルの構築 (H27年度)

- ・3)で開発した数値モデルによる計算結果と実建物における屋根雪の観測結果を比較したところ、雪の初期含水率等のチューニングを行うことで概ね計算値と観測値が一致することを確認した(図4)。

注1) 積算暖度とは、温度が0℃以上の値を積算したものの。



写真1 屋根雪実験の様子

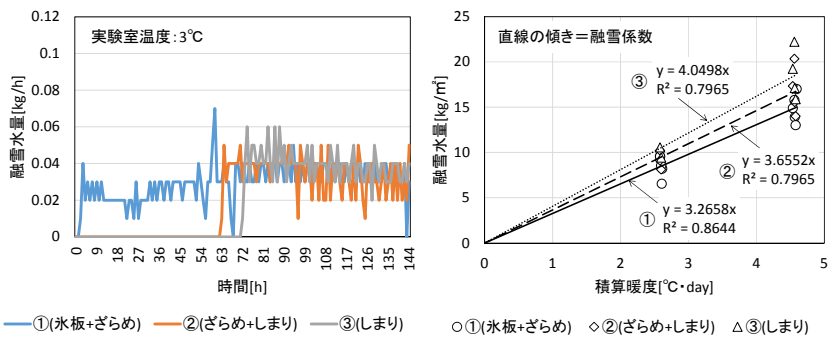


図1 実験室実験の結果

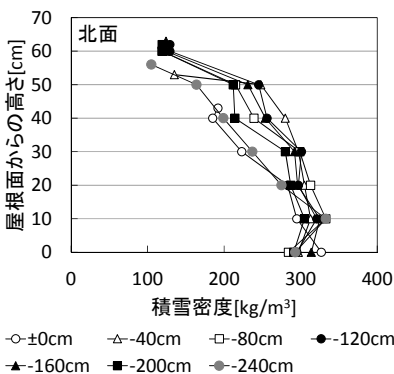


図2 屋根雪観測の結果

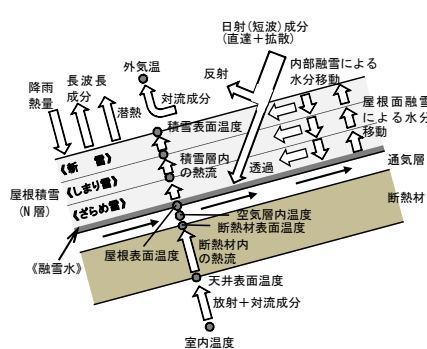


図3 数値モデルの概念図

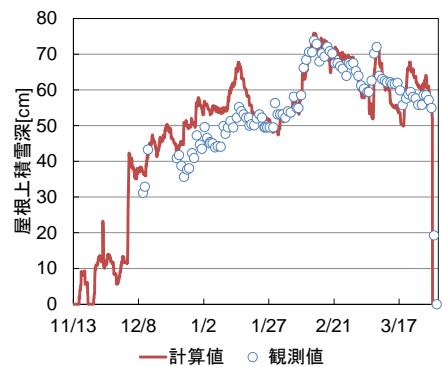


図4 数値モデルによる計算結果

4. 今後の見通し

- ・本研究で開発した数値モデルにより、積雪地域における建物の屋根積雪性状(積雪深、重量など)を予測することが可能となり、屋根雪荷重による建物の倒壊被害の防止に向けた基礎的知見として活用される。
- ・今後は数値モデルの精度向上と改良を加え、屋根雪の落雪や敷地内の融雪に関する研究に活用する。

目 次

1.	はじめに	.....	1
2.	実験室における屋根雪実験	.....	2
3.	実建物を対象とした屋根雪観測	.....	6
4.	数値モデルの検討と構築	.....	8
5.	まとめ	.....	12

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

近年、北海道では空き家、倉庫、廃校となった学校の体育館などで屋根雪荷重による建物の倒壊被害が相次いでいる（写真 1-1）。また、建築物の荷重設計や屋根雪処理計画を行う上では、時系列で変化する屋根雪の重量や密度を適正に予測する必要がある。

当研究所では、この現象を予測する数値モデルの開発に取り組んでいるが^{1)～3)}、屋根雪荷重を予測する場合、屋根雪内部における融雪水の発生と移動を把握する必要がある。しかし、これらの現象については、未だに分からないことが多くあり、特に勾配屋根では現象が複雑になることが考えられる。

以上の背景を踏まえ、本研究は、積雪内部における融雪水の発生や移動を実験により明らかにしモデル化することで、勾配屋根においても屋根積雪性状（積雪深、重量など）を予測することが可能な数値モデルの開発を目的とする。

(2) 研究内容

本研究の研究フローを図 1-1 に示す。各項目において以下の内容を実施する。

1) 実験室における屋根雪実験（H25～26 年度）

建物を模擬した試験体を作成し、定常状態における屋根雪の変質過程の観察や屋根面における融雪水量の測定などを行い、実験結果の分析を行う。

2) 実建物を対象とした屋根雪観測（H25～26 年度）

勾配屋根を有する実建物において屋根雪観測を行い、観測結果の分析を行う。

3) 数値モデルの検討（H26～27 年度）

勾配屋根を考慮した数値モデルの検討を行い、1) で得られた結果を入力条件として数値計算を行うことで妥当性を検証する。

4) 数値モデルの構築（H27 年度）

1)～3) の結果を総合的に検討し、かつモデル係数などのチューニングを行うことで数値モデルの精緻化を行い、モデルを構築する。



写真 1-1 屋根雪荷重で倒壊した体育館

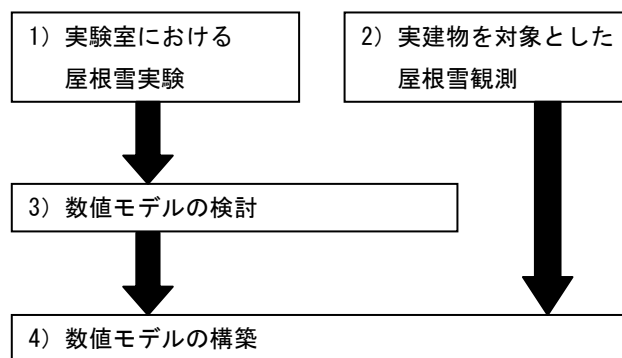


図 1-1 研究フロー

[参考文献]

- 1) 鈴木大隆, 本間義規, 廣田誠一, 鎌田紀彦, 坂本弘志: 30° 勾配屋根住宅の立地条件や断熱・換気条件を考慮した小屋裏・通気層温度解析結果と考察 積雪寒冷地の断熱気密化住宅における小屋裏換気手法に関する研究 (その 2), 日本建築学会計画系論文集, No. 504, pp25-31, 1998. 2
- 2) 本間義規, 福島明, 鈴木大隆: 低勾配アトリウムガラス屋根の積雪性状に関する数値解析, 第 19 回日本雪工学会大会論文報告集, pp59-60, 2002. 12
- 3) 阿部佑平, 堤拓哉, 本間義規: 建物の熱的影響と気象条件による雪質の変化を考慮した屋根積雪多層熱収支モデルの開発 その 4 数値モデルの概要と計算結果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 5-6, 2013. 8

2. 実験室における屋根雪実験

(1) 勾配を考慮した屋根雪実験

1) 実験概要

勾配の違いによる融雪水の出水と融雪水量を比較するため、当研究所の外部環境シミュレータ室において温度一定の条件で屋根雪の融雪実験を行った(写真2-1・2-2)。

表2-1に実験条件を示す。建物の屋根を模擬した1.8m×0.9m×0.45mの試験体を耐水合板で作成し、試験体の上に雪(積雪深20cm、雪重量103kg、雪密度307kg/m³)を載せた。実験室温度は札幌における融雪期の気温を想定して3℃に設定し、試験体内部温度は6℃に設定した。試験体勾配を1寸、2寸、3寸、4寸とした場合の融雪水量を電子はかりで測定した。

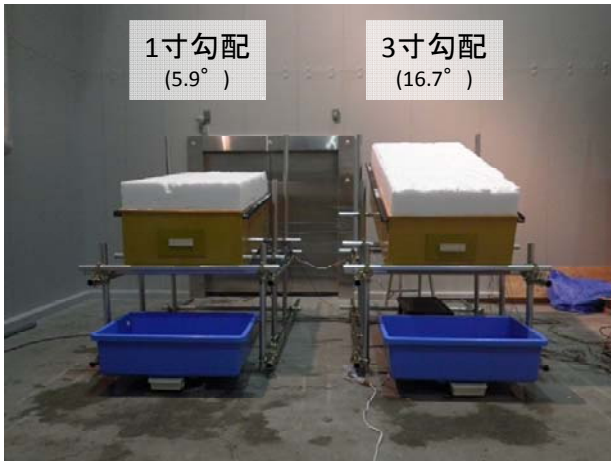


写真2-1 実験の様子(1寸、3寸勾配)

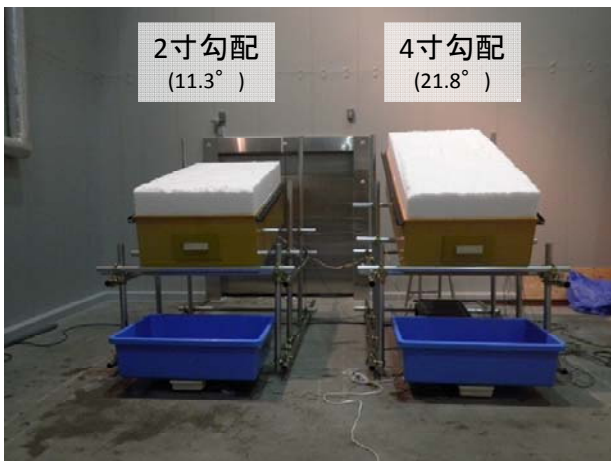


写真2-2 実験の様子(2寸、4寸勾配)

表2-1 実験条件

実験室温度	3℃
試験体内部温度	6℃
積雪深	20cm
雪密度	307kg/m ³
雪重量	103kg
実験時間	41時間
試験体勾配	1寸(5.9°)、2寸(11.3°)、 3寸(16.7°)、4寸(21.8°)

2) 実験結果

図2-1に実験中における累積融雪水量を示す。融雪水の出水は1寸勾配で最も遅く、実験開始から12時間後であった。他の勾配における融雪水の出水は、ほとんど同じであり、実験開始から約10時間後であった。

図2-2に1時間当たりの融雪水量、図2-3に融雪水量の変化率を示す。図2-3を見ると、実験開始から20時間を経過するといずれの勾配でも変化率は1となり、概ね定常になった。定常状態における1時間あたりの融雪水の出水は約1.2kg/hであった。

図2-4に実験前後における試験体上の雪重量を示す。1寸勾配では融雪水の出水時間が他の勾配よりも遅かったため、実験終了後の雪重量が他の勾配よりもやや大きい。2寸、3寸、4寸勾配では融雪水の出水時間がほとんど同じであったため、実験終了後の雪重量もほとんど同じであった。

実験より、勾配が緩いと融雪水の出水時間は遅くなったが、2寸勾配以上ではほとんど変わらないことを明らかにした。また、融雪水の出水が定常状態になると、1時間当たりの融雪水量には勾配による違いが見られなかった。

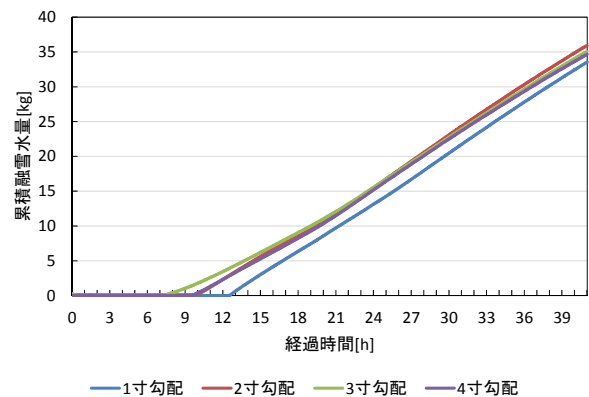


図2-1 累積融雪水量

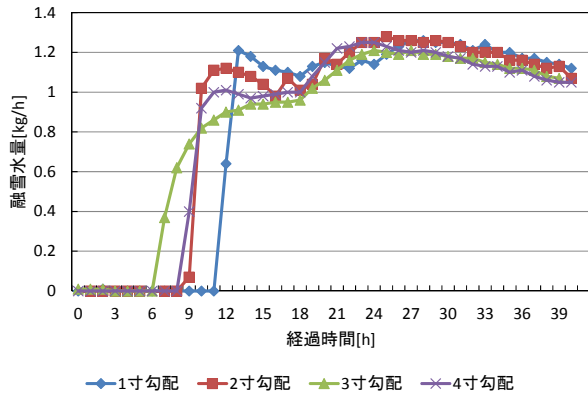


図 2-2 1 時間当たりの融雪水量

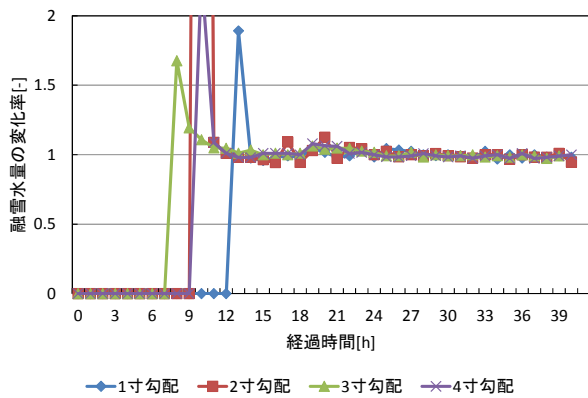


図 2-3 融雪水量の変化率

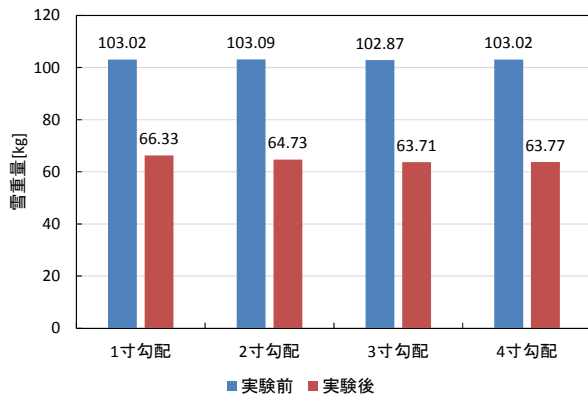


図 2-4 実験前後における試験体上の雪重量

(2) 雪質を考慮した屋根雪実験

1) 実験概要

雪質の違いによる融雪水の出水と融雪水量を比較するため、当研究所の外部環境シミュレータ室において温度一定の条件で屋根雪の融雪実験を行った(写真 2-3)。

表 2-2 に実験条件、図 2-5 に各試験体の重量、雪密度を示す。実験では、内寸 300mm×300mm×300mm の断熱材(厚さ 100mm、熱伝導率 0.040 W/mK)で作成した枠体に試験体となる雪を入れ、6° 傾けた耐水合板の上に設置し、電子はかりを用いて融雪水量を測定した。雪質は3種類(①氷板 2cm+ざらめ雪 28cm、②ざらめ雪 15cm+しまり雪 15cm、③しまり雪 30cm)とし、雪は屋外から自然積雪を採取した。試験体①の氷板は、試験体①の下部に予めしまり雪を敷き詰め、そのしまり雪に氷板 2cm に相当する水を含ませた後、-10℃の冷凍庫内で凍らせて作成している。雪質が違うため各試験体の総重量は異なるが、試験体への伝熱の条件を同じにするため、試験体の大きさを揃えて実験を行った。また、試験体内部は加熱せず、実験室温度は札幌における融雪期の気温を想定して 3℃、5℃とし、実験時間は 144 時間とした。なお、温度の違いによる融雪水量を測定するため、試験体に日射は当てずに実験を行った。



写真 2-3 実験の様子

表 2-2 実験条件

実験室温度	3℃、5℃	
実験時間	144 時間	
雪質	試験体①	氷板 2cm+ざらめ雪 28cm
	試験体②	ざらめ雪 15cm+しまり雪 15cm
	試験体③	しまり雪 30cm

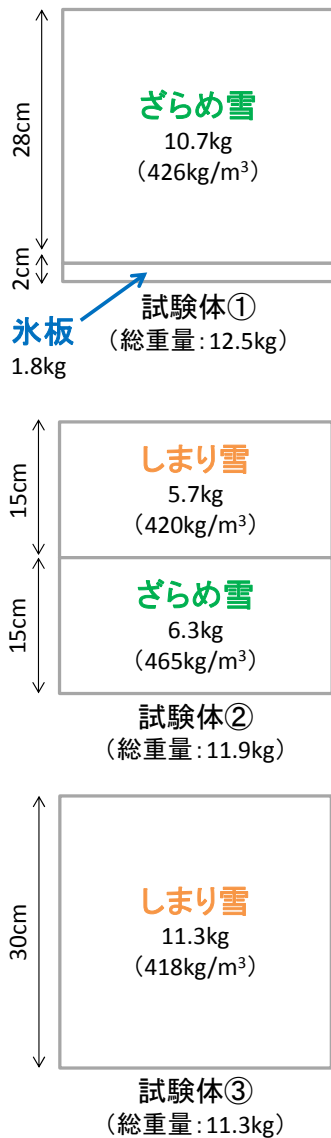


図 2-5 各試験体の重量、雪密度

2) 実験結果

図 2-6・2-7 に各試験体における 1 時間毎の融雪水量の変化を示す。雪質毎に融雪状況を見ると、底面に氷板がある試験体①は、他の試験体に比べて融雪水の出水時間が最も早く、次いで試験体②、試験体③の順になった。これは、氷よりも雪の方が、滞水効果が大きいことが影響していると考えられる。実験室温度別に融雪状況を見ると、試験体②と③では、実験室を 5℃にした方が融雪水の出水時間は早かったが、一方、試験体①では 3℃の方が早かった。これは、初期雪温の影響によるものである。融雪水の出水が定常となった 84 時間以降における融雪水量を比較すると、試験体①の実験室 3℃では 0.38 kg/m²、5℃では 0.57 kg/m²、試験体②の 3℃では 0.37 kg/m²、5℃では 0.63 kg/m²、試験体③の 3℃では 0.43 kg/m²、5℃では 0.70 kg/m²となった。なお、いずれの試験体も実験中にすべて融けてなくなることはなかった。

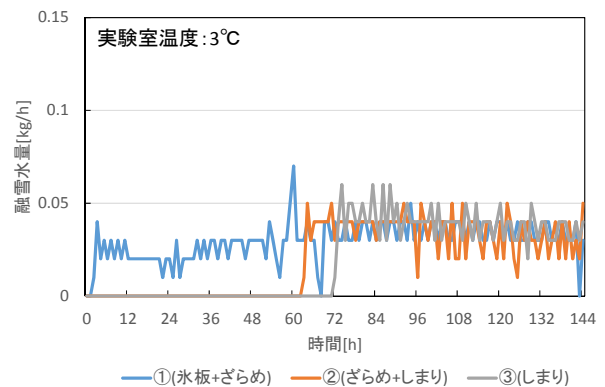


図 2-6 融雪水量の変化 (実験室温度: 3℃)

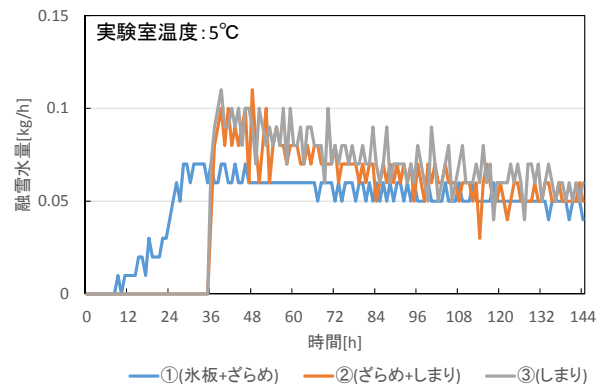


図 2-7 融雪水量の変化 (実験室温度: 5℃)

図 2-8 に積算暖度と融雪水量の関係を示す。積算暖度とは、温度が 0°C以上の値を積算したものである。積算暖度と融雪水量は 24 時間毎に算出した値をプロットした。融雪水量は、試験体①<試験体②<試験体③の順に大きくなる傾向が見られた。

また、融雪水量と積算暖度には式 (2-1) の関係が成り立つことから、図 2-8 の直線の傾きは融雪係数となる。

$$M = K \sum T \quad (2-1)$$

ここに、

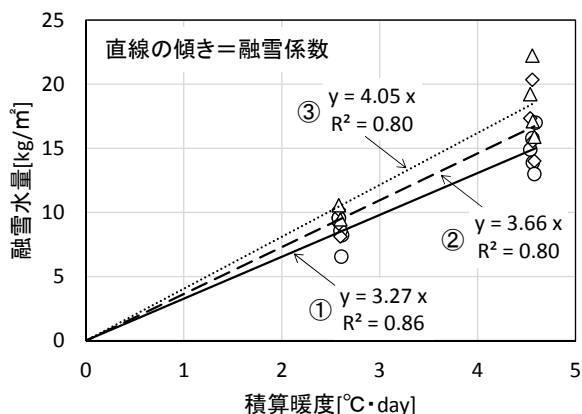
M = 融雪水量 [kg/m²]

K = 融雪係数 [kg/(m²°Cday)]

$\sum T$ = 積算暖度 [°C・day]

これより、各試験体の融雪係数を算出すると、試験体①は 3.27 kg/(m²°Cday)、試験体②は 3.66 kg/(m²°Cday)、試験体③は 4.05 kg/(m²°Cday)となった。融雪係数が大きくなると融雪速度も大きくなることから、試験体①<試験体②<試験体③の順に融雪速度が大きくなることを把握し、雪質が融雪速度に与える影響を定量化した。

実験より、雪質の違いによる融雪水の出水時間や融雪係数を算出した。底面に氷板がある場合、融雪水の出水時間は他の試験体よりも早い、融雪係数は他の試験体よりも小さくなることを明らかにした。



○①(氷板+ざらめ) ◇②(ざらめ+しまり) △③(しまり)

図 2-8 積算暖度と融雪水量の関係

3. 実建物を対象とした屋根雪観測

(1) 屋根雪観測の概要

当研究所の敷地内にある木造建物を対象に、屋根雪の断面観測を行った(写真 3-1)。観測対象建物は、屋根勾配が 2.5 寸 (14°) であり、冬期間は室内を暖房していない。屋根雪の断面観測は 2014 年 2 月 24 日に行い、棟から 40cm 毎に南面および北面の屋根における屋根上積雪深、積雪重量、積雪密度、積雪温度を測定した(図 3-1)。ただし、南面の軒先(+240cm)では融雪が進んでいたため観測できなかった。

図 3-2 に外気温と室温変動、図 3-3 に地上積雪深を示す。建物内は無暖房であるため、室温は外気温と同じように変動し、観測時における平均外気温は -1.1°C、建物内の平均室温は 1.4°C であった。地上積雪は 2013 年 11 月 26 日から根雪になり、屋根雪観測日における地上積雪は 71cm であった。



写真 3-1 観測対象建物

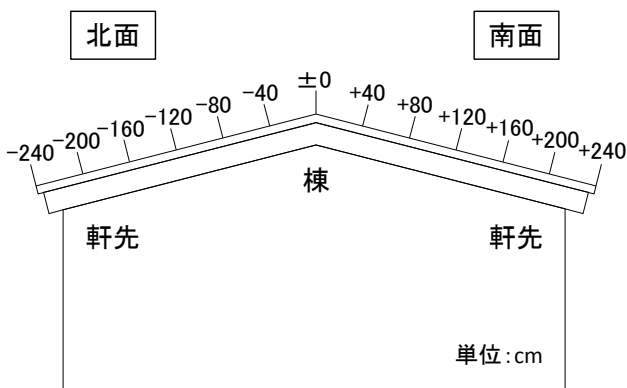


図 3-1 観測点

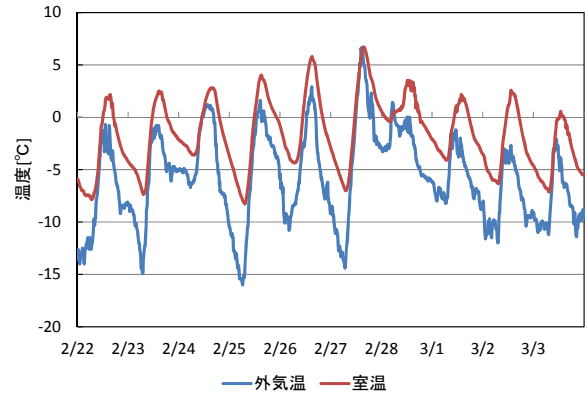


図 3-2 外気温と室温変動

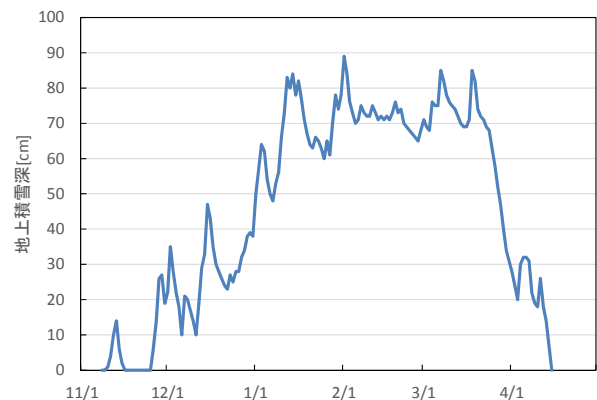


図 3-3 地上積雪深

(2) 観測結果

図 3-4 に屋根上積雪深、図 3-5 に屋根上積雪重量を示す。屋根上積雪深は棟付近(±0cm)で最も小さく、棟から軒先に向かって積雪深は大きくなった。北面では 60cm、南面では 57cm でほぼ一定であったが、南面の軒先付近では融雪により積雪深がやや小さかった。なお、降雪時の卓越風向は西が多く南北軸の吹き溜まりの影響は小さく、雪止めがあるため屋根雪の滑動はない。屋根上積雪重量は積雪深と同様に棟付近(±0cm)で最も小さかった。北面では棟から離れると積雪重量が大きくなり軒先付近では小さくなったが、南面では各観測点における差は小さく、約 134kg/m² であった。各観測点の積雪重量を平均すると 136kg/m² となり、地上積雪重量(181kg/m²)の 0.75 倍であった。

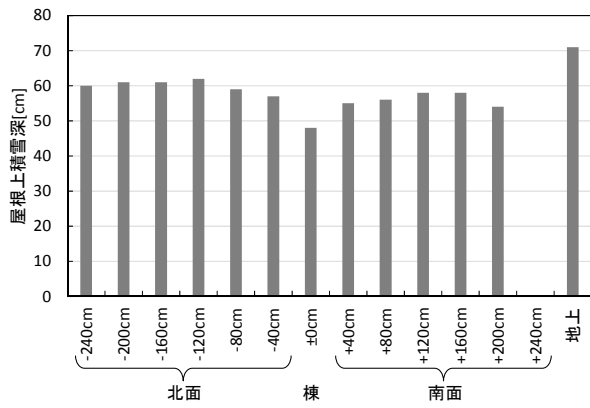


図 3-4 屋根上積雪深

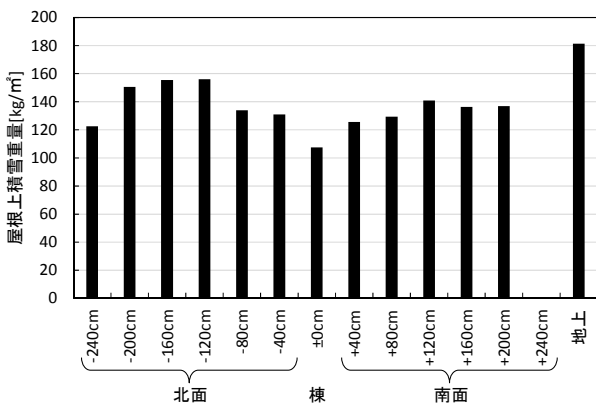


図 3-5 屋根上積雪重量

図 3-6 に屋根上積雪温度の鉛直分布を示す。北面、南面ともに屋根面付近および積雪表面では約 0°C、10~40cm では-4~-3°Cであった。また、40cm 以上の高さでは、日射の影響により北面よりも南面の積雪温度の方が全体的にやや高い傾向にあった。

図 3-7 に屋根上積雪密度の鉛直分布を示す。北面、南面ともに屋根面付近では約 300kg/m³であったが、積雪表面付近では、北面では 100~200kg/m³、南面では 200~300kg/m³であった。南面では日射により積雪表面が融雪し含水率が大きくなったため、積雪密度も大きくなったと考えられる。

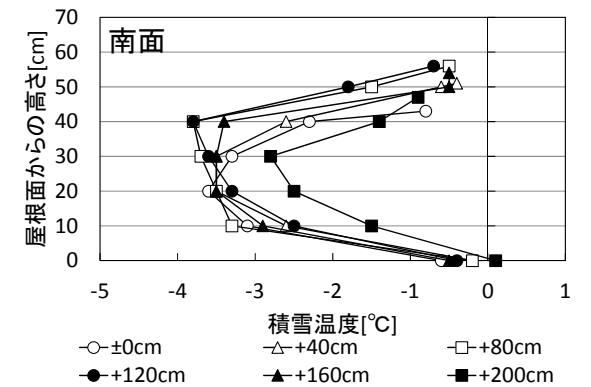
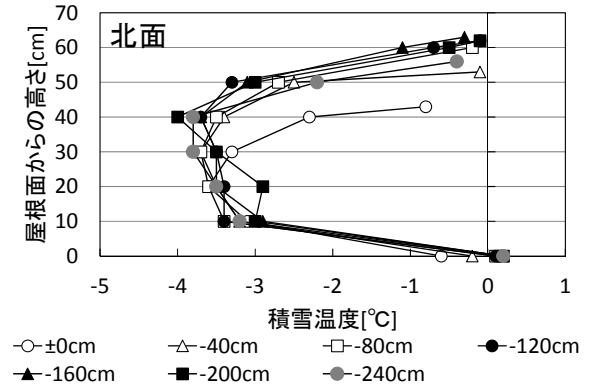


図 3-6 屋根上積雪温度

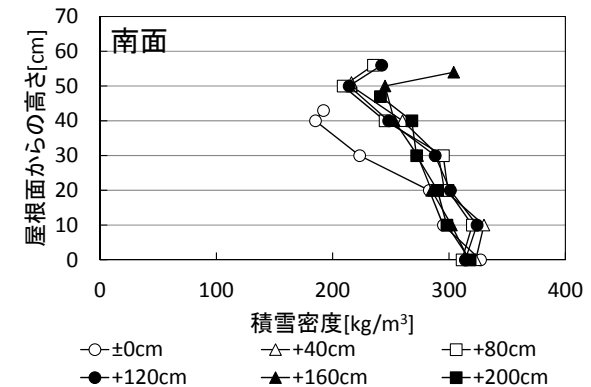
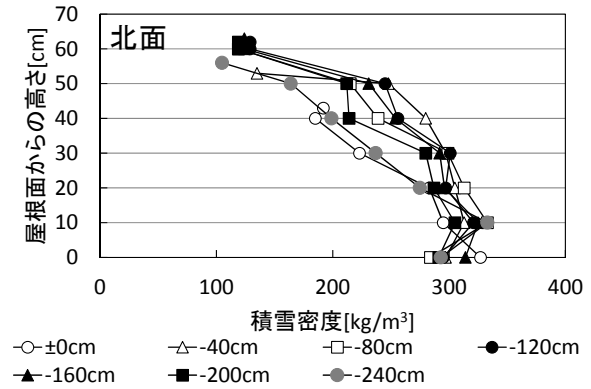


図 3-7 屋根上積雪密度

4. 数値モデルの検討と構築

(1) 数値モデルの概要

図 4-1 に数値モデルの概念図を示す。当研究所で開発した屋根積雪の数値モデル¹⁾に、積雪内部における融雪水の水分移動モデルを組み込んだ数値モデルを作成した。数値モデルによる計算は大きく分けて、1) 降雪量等の計算、2) 圧密の計算、3) 温度の計算、4) 熱収支の計算、5) 融雪量・再凍結量の計算、6) 水分移動の計算の 6 つから構成される。以下に、各計算方法を記述する。

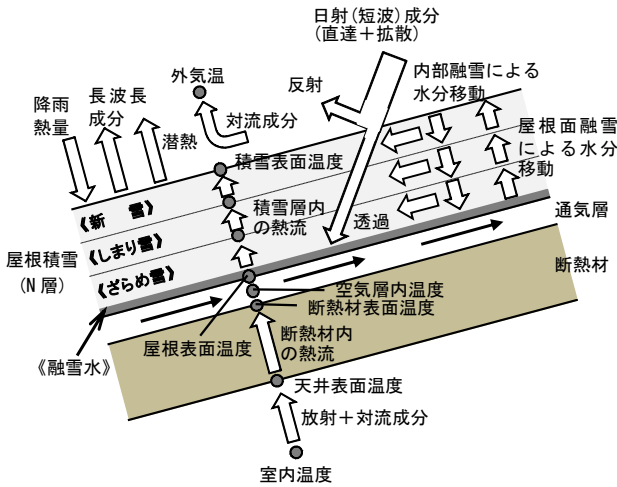


図 4-1 数値モデルの概念図

1) 降水量等の計算

降水が雨または雪の判別は、通常、気温によって行われ、一般に気温が 2℃ 以上の場合には雨、2℃ 以下の場合には雪として判別される。しかしながら、近藤 (1994) は乾燥しているほど降水粒子の温度は低くなるので、雨と雪の判別には気温よりも湿球温度を用いるの方が良いと指摘している⁴⁾。ここでは、湿球温度を考慮して作成された近藤 (1994) の雨・雪判別式⁴⁾を用いる。

雨・雪判別式

$$T_c = 11.01 - 1.5e \quad (0.4 < rh \leq 1.0) \quad (4-1)$$

$$= 7.7 - 6.6rh$$

判別条件

$$T_a > T_c : \text{雨} \quad (4-2)$$

$$T_a \leq T_c : \text{雪}$$

式 (4-1) で雪と判別された場合、式 (4-3) より

降水量 P_r から降雪量 R_{snow} を求めた。雨量計の捕捉率は特に降雪時に低下することが知られているので、横山 (2003)⁵⁾ (式 (4-4)) にならって捕捉率 CR を計算し考慮した。

$$R_{snow} = P_r \cdot \rho_w / \rho_{new} \cdot CR \quad (4-3)$$

$$CR = \frac{1}{1 + mU} \quad (4-4)$$

雪の熱伝導率 λ_{snow} は、最も単純なタイプの実験式であり、広い密度領域 ($100 < \rho_{snow} < 600$) において平均的な熱伝導率を与えている Devaux の経験式 (1933)⁶⁾ を用いた。

$$\lambda_{snow} = 2.9 \times 10^{-2} (1 + 10^{-4} \rho_{snow}^2) \quad (4-5)$$

新雪密度 ρ_{new} には、梶川 (1989)⁷⁾ の式を用いた。

$$\rho_{new} = 3.6U - 0.2T_a + 62 \quad (4-6)$$

新雪の温度は、湿球温度に等しいとした。ただし、湿球温度が 0℃ 以上の場合には、0℃ にした。

2) 圧密の計算

積雪層の粘性圧縮による積雪深変化の基礎式は式 (4-7) で表され²⁾、圧縮粘性係数 η は式 (4-8) を用いた⁹⁾。ただし、積雪の乾き密度 ρ_{dry} が非常に小さいと表層では荷重も小さくなり、以後の圧密計算がうまく進まない。そこで、 $\rho_{dry} < 30 \text{ kg/m}^3$ の時には、式 (4-7) によらず自動的に $\rho_{dry} = 30 \text{ kg/m}^3$ とする。なお、圧密の計算過程では積雪水量や含水率是不変とし、 $\eta'_0 = 1.0 \times 10 \text{ kg} \cdot \text{day/m}^2$ 、 $K = 21.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ とした。

$$\frac{\partial \rho_{dry}}{\partial t} = \frac{W}{\eta} \rho_{dry} \quad (4-7)$$

$$\eta = \eta'_0 \cdot e^{K\rho_{dry}} \quad (4-8)$$

3) 温度の計算

式 (4-9) に示す非定常熱伝導方程式により温度の計算を行う。時間は後退差分、空間は中心差分により離散化し、室内側と積雪表面の境界条件は第 3 種境界条件とした。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4-9)$$

4) 熱収支の計算

図 4-1 に示すように、積雪表面では、短波長放射 S 、長波長放射 R 、顕熱輸送量 H 、潜熱輸送量 LE 、積雪表面の伝導熱 Q_C 、降雨による熱量 Q_R 、融解・再凍結による潜熱 Q_M の収支を解く。積雪内部では、透過日射量 S_{trans} 、積雪内部の伝導熱 Q_C 、融解・再凍結による潜熱 Q_M の収支を解く。積雪面への流入を正、流出を負とする。式 (4-10) ~ (4-11) に積雪表面および内部の熱収支式を示す。

表面：

$$Q_{n+1(surf)} = S + R + H + LE + Q_C + Q_R + Q_M \quad (4-10)$$

内部：

$$Q_n = S_{trans} + Q_C + Q_M \quad (4-11)$$

アルベドには、積雪深が 0~9cm までは 0' neil & Gray (1979) らが測定した黒い板上での積雪深とアルベドの関係の実測値を補間して用いることとし、10cm 以上になった場合は、積雪深とアルベドの関係を 1 次直線で近似して用いる³⁾。積雪内部への日射透過率は Beer の法則に従うものとし、減衰係数を 30 m^{-1} とした。顕熱輸送量 H 、潜熱輸送量 LE は近藤等の地表面の熱収支の考えに倣い⁴⁾、バルク式を用いて算出した。

5) 融雪量・再凍結量の計算

融解は式 (4-10) ~ (4-11) で解いた熱収支 $Q_n > 0$ 、積雪温度 $T_s > 0$ の時に起こり、 $T_s = 0$ に置き換え、融解に使われる潜熱 ($Q_n - Q'_n$) を求めて、式 (4-12) より融雪量 F を求める。また、再凍結は式 (4-10) ~ (4-11) で解いた熱収支 $Q_n < 0$ 、積雪温度 $T_s < 0$ 、含水量 $\rho_{lw} > 0$ の時に起こり、 $T_s = 0$ に置き換え、再凍結に使われる潜熱 ($Q_n - Q'_n$) を求めて、式 (4-12) より再凍結量 F を求める。

$$F = \frac{Q_n - Q'_n}{l_F \rho_{dry}} \quad (4-12)$$

但し、融雪・再凍結量の計算過程では、積雪密度 ρ_{snow} は不変で、含水量 ρ_{lw} と乾き密度 ρ_{dry} が変化するとして計算を行った。融解により積雪層が消滅した場合には、該当する層の計算節点を消去する。

6) 水分移動の計算

積雪内部の水分移動の計算には、式 (4-13) と式 (4-14) を用いた。積雪の透水係数 k は、飽和時と

不飽和時で異なる式を使用した。飽和透水係数 k_s には式 (4-15) に示す Snimizu(1970)¹¹⁾ の式を用い、不飽和透水係数 $k(S_e)$ には van Genuchten モデルに従うとして、式 (4-16) に示す式を用いた^{12) 13)}。有効飽和度 S_e については式 (4-17) に示す数式を用い、残留体積含水率 θ'_w は 0 とした。係数 f については、式 (4-18) に示す数字を用い、雪の平均粒径 d は 0.5 とした。

$$q_z = k \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \cos \theta \right) \quad (4-13)$$

$$q_x = k \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \sin \theta \right) \quad (4-14)$$

$$k_s = 0.077 \frac{d^2 \rho_w g}{\eta} \exp(-0.0078 \rho_{dry}) \quad (4-15)$$

$$k(S_e) = k_s S_e^{1/2} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/f} \right)^f \right)^2 \quad (4-16)$$

$$S_e = (\theta_w - \theta'_w) / (\theta_{ws} - \theta'_w) \quad (4-17)$$

$$f = 1 - 1 / (-3.3d + 14.4) \quad (4-18)$$

(2) 数値モデルの妥当性の検証

1) 計算条件

数値モデルの妥当性を検証するため、第2章の実験室で行った雪質の違いを考慮した屋根雪実験を対象に数値計算を行った。実験室温度や雪密度などの入力条件は実測値を与えた。

2) 計算結果

図4-2に融雪水量の計算値と実験値を示す。計算値は実験値よりもやや小さいが、両者は概ね一致することが確認され、本研究で検討した数値モデルの妥当性が示された。

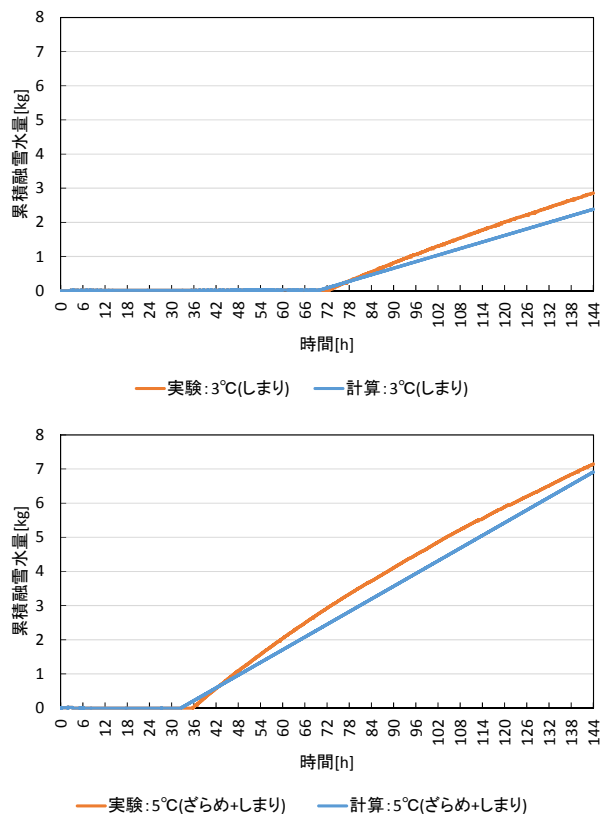


図4-2 計算値と実験値の比較

(3) 実建物における観測値との比較

1) 計算条件

数値モデルの実建物への適用可能性を検証するため、第3章で観測を行った実建物を対象に数値計算を行った。気象データには、旭川の気象庁観測によるデータを用いた。旭川の気象庁観測所では、溢水式降水量計 (RT-4、設置高さ2m) により降水量を計測しているため、式(4-3)と式(4-4)から冬期の累積降雪量を算出したところ観測値よりも過大になった。この理由として、旭川は比較的風速が弱いた

め、降水量計の捕捉率があまり低下しなかったことが考えられる。このため、本計算では、式(4-4)の捕捉率による補正は行わずに降雪量を算出した。降雪は乾き雪とし、初期含水率を0とした。顕熱輸送量、潜熱輸送量の算出における風速 U は、べき乗則により高さ4mに補正した風速を用いた。

2) 計算結果

図4-3・4-4に屋根上積雪深及び屋根上積雪重量の計算値と観測値を示す。ここでは、北面屋根における観測値と比較を行った。屋根上積雪深及び屋根上積雪重量の計算値と観測値は、概ね一致していることが確認された。これより、本研究で開発した数値モデルの妥当性が示された。

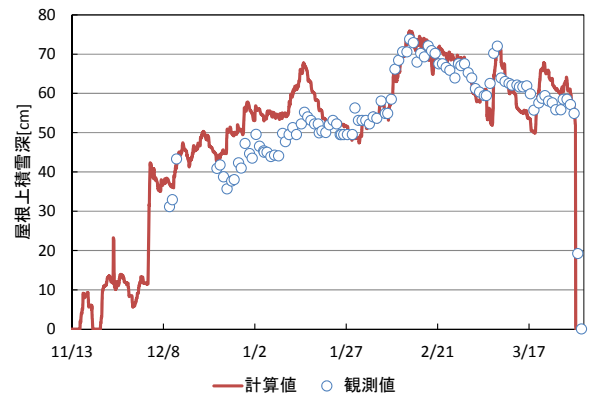


図4-3 屋根上積雪深

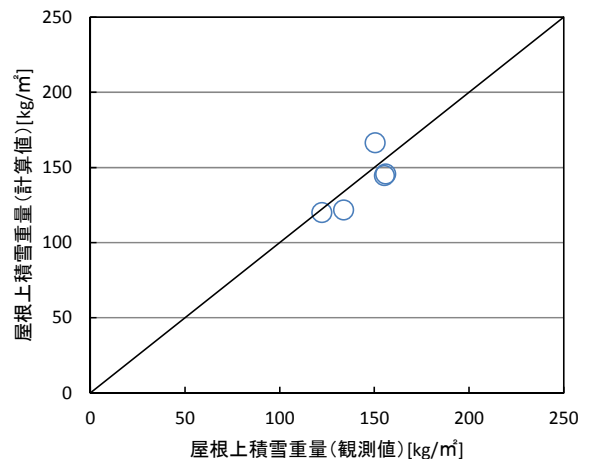


図4-4 屋根上積雪重量

[参考文献]

- 1) 阿部佑平, 堤拓哉, 本間義規: 建物の熱的影響と気象条件による雪質の変化を考慮した屋根積雪多層熱収支モデルの開発 その4 数値モデルの概要と計算結果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.5-6, 2013.8
- 2) 山崎剛: 厳寒地に適用可能な積雪多層熱収支モデル, 雪氷, Vol.60, pp131-141, 1998.3
- 3) 鈴木大隆, 本間義規, 廣田誠一, 鎌田紀彦, 坂本弘志: 30°勾配屋根住宅の立地条件や断熱・換気条件を考慮した小屋裏・通気層温度解析結果と考察 積雪寒冷地の断熱気密化住宅における小屋裏換気手法に関する研究 (その2), 日本建築学会計画系論文集, No.504, pp25-31, 1998.2
- 4) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 2011.2
- 5) 横山宏太郎, 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捕捉特性, 雪氷, Vol.65, pp303-316, 2003.5
- 6) 前野紀一, 黒田登志雄: 基礎雪氷学講座 I, 雪氷の構造と物性, 古今書院, 1994.4
- 7) 梶川正弘: 新積雪の密度と降雪粒子の結晶系との関係, 雪氷, Vol.51, pp178-183, 1989.9
- 8) 空気調和・衛生工学便覧 I 巻, 空気調和・衛生工学会編集・発行, オーム社, 1982.12
- 9) 本山秀明, 小島賢治: 積雪深変化の推定法 (乾雪の場合) —積雪層の粘性圧縮を考慮して— (北海道大学低温科学研究所業績第 2787 号), 低温科学物理篇, 44, 1986.3
- 10) 小野延雄, 石川信敬, 新井正, 若土正暁, 青田昌秋: 基礎雪氷学講座VI, 雪氷水門現象, 古今書院, 1994.5
- 11) Shimizu, H.: Air Permeability of Deposited Snow, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A22, 1-32, 1970
- 12) van Genuchten, M.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898, 1980
- 13) Hirashima, H., Yamaguchi, S., Sato, A., Lehning, M.: Numerical modeling of liquid water movement through layered snow based on new measurements of the water retention curve, Cold Regions Science and Technology, 64, 94-103, 2010

[本文中で用いる記号]

c : 比熱[J/kgK]

CR : 捕捉率

d : 雪の平均粒径[mm]

e : 水蒸気圧[hPa]

F : 融雪量・再凍結量[m]

g : 重力加速度[m/s²]

h : 毛管ポテンシャルの正負の符号を変えた値 (サクシオン)

H : 顕熱輸送量[W/m²]

k : 透水係数[m/s]

k_s : 飽和透水係数[m/s]

$k(S_e)$: 不飽和透水係数[m/s]

l_f : 氷の融解熱 (=0.334×10⁶[J/kg])

LE : 潜熱輸送量[W/m²]

m : 液体降水, 固体降水に対する降水量計の型式の係数

P_r : 降水量[m]

q : 下向きの水フラックス[kg/m²s]

Q_c : 積雪表面の伝導熱[W/m²]

Q_M : 融解・再凍結による潜熱[W/m²]

Q_n : 積雪表面および内部の熱収支[W/m²]

Q_R : 降雨による熱量[W/m²]

rh : 相対湿度 ($0 < rh \leq 1$)

R : 長波長放射[W/m²]

R_{snow} : 降雪量[m]

S : 短波長放射[W/m²]

S_e : 有効飽和度[-]

S_{trans} : 透過日射量[W/m²]

T : 代表的な高度における気温、温度[°C]

T_a : 外気温、地表面付近の空気温度[°C]

U : 代表的な高度における風速[m/s]

W : 荷重[kg]

η : 圧縮粘性係数[kg・day/m²]

η_w : 0°Cにおける水の粘性係数[Pa・s]

λ : 熱伝導率[W/mK]

λ_{snow} : 積雪の熱伝導率[W/mK]

θ_w : 体積含水率[-]

θ'_w : 残留体積含水率[-]

θ_{ws} : 飽和体積含水率[-]

ρ : 密度[kg/m³]

ρ_{dry} : 積雪の乾き密度[kg/m³]

ρ_{new} : 新雪の密度[kg/m³]

ρ_{snow} : 積雪の密度[kg/m³]

ρ_w : 水の密度 (=1000[kg/m³])

5. まとめ

本研究のまとめを以下に記す。

- ・勾配の違いを考慮した屋根雪実験より、勾配が緩いと融雪水の出水時間は遅くなったが、2 寸勾配以上ではほとんど変わらなかった。また、融雪水の出水が定常状態になると、1 時間当たりの融雪水量には勾配による違いが見られなかった。
- ・雪質の違いを考慮した屋根雪実験より、雪質の違いによる融雪水の出水時間や融雪係数を算出した。底面に氷板がある場合、融雪水の出水時間は他の試験体よりも早い、融雪係数は他の試験体よりも小さくなった。
- ・勾配屋根を有する実建物を対象に屋根雪観測を行い、屋根方位別の屋根上積雪深、積雪重量、積雪密度、積雪温度などの基礎データを得た。
- ・既往研究をもとに積雪内部における水分移動をモデル化し、数値モデルを作成した。屋根雪実験で得られた実験値と数値モデルによる計算値を比較し、モデルの妥当性を示した。また、実建物への適用可能性も検証し、計算値と観測値が概ね一致することを確認した。

今後は、本研究で得られた成果を屋根雪荷重による建物の倒壊被害の防止に向けた基礎的知見として活用するとともに、数値モデルの精度向上と改良を加え、屋根雪の落雪や敷地内の融雪に関する研究にも活用していく。