

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月13日現在

機関番号：80122

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860065

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Development of Multi-layer Heat Balance Model of Snow on Roofs with Considering Changes of Snow Conditions by Thermal Performance of Buildings and Meteorological Conditions

研究代表者

阿部 佑平 (ABE YUHEI)

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・研究員

研究者番号：70614147

研究成果の概要（和文）：本研究では、旭川市と札幌市に設置したモデル検証用建物や実建物を対象とした屋根積雪性状の実測調査を行い、数値モデルの開発に必要な基礎データの整備、及び建物性能と気象条件が屋根積雪性状に与える影響について把握した。また、気象分野と建築分野における研究蓄積を統合し、フラットな屋根における屋根積雪性状を予測可能な数値モデルのプロトタイプを開発した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted a survey of roof snow on using model buildings in Asahikawa City and Sapporo City and actual buildings, and we obtained basic data necessary for developing a numerical model and determined the effects of thermal performance of buildings and meteorological conditions on roof snow. Moreover, by integrating results of studies in meteorology and architecture fields, we also developed a plot-type model that can predict roof snow on a flat roof.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築環境・設備

キーワード：屋根雪、数値モデル、実測調査、数値解析

1. 研究開始当初の背景

我が国の面積の半分以上を占める豪雪地帯はもちろんのこと、それ以外の地域においても、毎年、多種多様な雪による事故が発生している。平成18年豪雪（死者152名）後に起きた平成23年大雪では、雪による死者が全国で131名に達するなど甚大な被害が生じ、屋根の雪下ろしや落雪など住宅等の屋根

雪による死者は全体の約90%を占めた。

また国内外では、大規模建築物における屋根雪事故が相次いでいる。建物の構造性能や除雪技術は年々向上しているにも係らず、このような甚大な被害が発生する要因として、屋根積雪性状（雪質・重量）が気象条件のみならず建物からの熱損失にも影響されるため、詳しく推定することが困難であることが

挙げられる。

すなわち、屋根積雪性状と各種の障害、そして雪による事故との関係の定量的把握に必要な屋根雪を対象とした数値モデルが未開発であることが大きな課題である。

2. 研究の目的

本研究では、建物の熱的影響と気象条件により異なる屋根雪を対象とし、雪質（密度・重量）の変化や積雪に係る物理的諸過程を数値モデルにより再現し、フラットな屋根における屋根積雪性状を予測可能な数値モデルのプロトタイプの開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 気象分野と建築分野における既往の積雪モデルの整理

既往の研究における各種積雪モデルを体系的に整理し、本研究で作成する数値モデルを検討した。

(2) モデル検証用データ収集のための屋根雪実測調査

モデル検証用建物や実建物を対象とした屋根積雪性状の実測調査を行い、数値モデルの開発に必要な基礎データの整備、及び建物性能と気象条件が屋根積雪性状に与える影響について把握した。

(3) 屋根積雪多層熱収支モデルの開発

気象分野と建築分野における研究蓄積を統合し、フラットな屋根における屋根積雪性状を予測可能な数値モデルのプロトタイプを開発した。

4. 研究成果

(1) 気象分野と建築分野における既往の積雪モデルの整理

気象分野では、積雪の詳細な層構造を考慮した積雪多層熱収支モデル（例えば、山崎（1998）、Bartelt（2002）、齋藤（2005））、積雪の層構造を1～3層として扱う簡便モデル（例えば、Motoyama（1990）、Kondo and Yamazaki（1990））などがある。

建築分野では、屋根雪の融雪を対象とした屋根融雪モデル（本間（2002））、地上積雪を対象としたモデル（例えば、岩前（1995）、Takahashi（2001）、Mochida（2002）、富永（2009））などがある。

本研究では、気象分野における積雪多層熱収支モデルと建築分野における屋根融雪モデルを統合した数値モデルを開発した。

(2) モデル検証用データ収集のための屋根雪実測調査

① モデル検証用建物における実測調査

(a) 実測概要

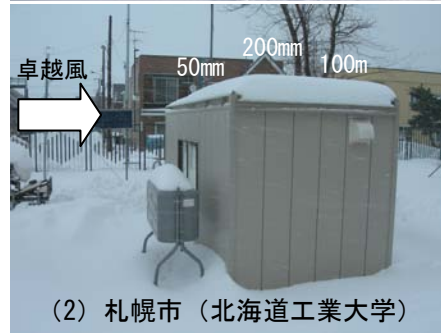
実測調査は北海道旭川市にある北方建築総合研究所と、北海道札幌市にある北海道工業大学の敷地内で行った。実測対象とした建

物は、平面 5.45m×2.3m、高さ 2.603m の矩形の鉄骨造プレハブである（写真 1）。

屋根断熱厚さの違いによる屋根積雪性状を把握するために、天井を3等分し、室内側から 50mm、100mm、200mm の断熱材を施工した。壁・床にも 50mm の断熱材を施工した。室内は電気ストーブ（最大暖房能力 600W/台）で暖房を行い、サーモセンサーで室温を制御した。旭川では 20℃、札幌では 15℃に室温を設定した。温度むらを作らないように、扇風機を用いて空気を攪拌させた（図 1、表 1）。また、積雪条件を同一にするため、冬季の卓越風が実測建物の長手方向に対して垂直にあたるように配置をした（写真 1）。



(1) 旭川市（北方建築総合研究所）



(2) 札幌市（北海道工業大学）

写真 1 実測建物外観

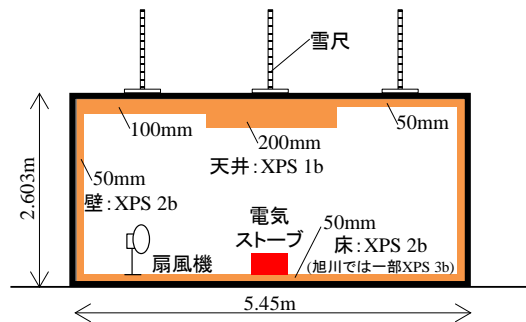


図 1 実測概要

表 1 実測条件

	旭川		札幌	
実測期間	2011/12/09～2012/03/31		2011/12/08～2012/03/30	
設定室温[℃]	20		15	
断熱材熱伝導率 [W/mK]	天井	0.040	天井	0.040
	壁	0.034	壁	0.034
		0.028		床
床	0.034	床	0.034	
ストーブ[台]	2		1	

※旭川では床の断熱材を2種類使用した。

(b) 屋根上積雪深

図 2・3 に屋根上積雪深の推移を示す。屋根上積雪深は、鋼製の雪尺を用いて 1日 1回測定を行った。地上積雪深は、旭川では気象庁観測データを用い、札幌では実測建物近くに積雪深計を設置し測定を行った。

旭川では、断熱 100mm・200mm の屋根上積雪深はほぼ同一で推移し、2 月中旬までは地上積雪深と大差なく、100mm では最大で 81cm、200mm では 82cm に達した (2 月 13 日)。実測期間における断熱 50mm と断熱 100mm・200mm との屋根上積雪深の差は、平均して約 10cm であった。3 月末には外気温が 11℃ まで上昇したため融雪が進み、断熱 50mm は 3 月 30 日、100mm・200mm は 3 月 31 日に消失した (図 2)。

札幌では、旭川と同様に断熱 100mm と 200mm の屋根上積雪深の推移が殆ど同じであったが、3 月上旬までは地上積雪深より 1~2 割程度少なかった。実測期間における断熱 50mm と断熱 100mm・200mm の屋根上積雪深の差は、設定室温の高い旭川よりも大きく平均して約 13cm であった。3 月上旬から屋根上積雪深が徐々に減少し、断熱 50mm は 3 月 28 日、100mm・200mm は 3 月 30 日に消失した (図 3)。

実測期間を通して断熱 100mm と 200mm の屋根上積雪深の推移が旭川と札幌でほぼ同一であった原因の一つに、屋根上で風による積雪の再配分が起きていたことが考えられる。

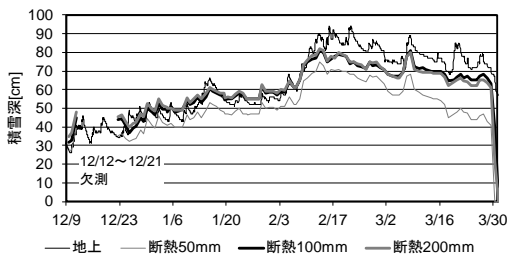


図 2 屋根上積雪深の推移 (旭川)

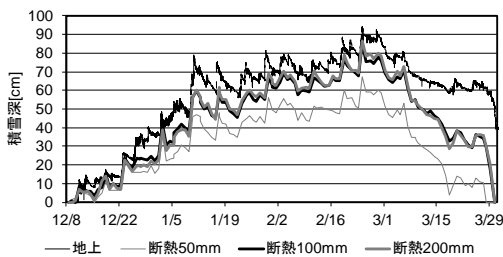


図 3 屋根上積雪深の推移 (札幌)

(c) 屋根雪密度の鉛直分布

図 4・5 に屋根雪密度の鉛直分布を示す。屋根雪密度は、角形密度サンプラー (容積 100cm³) を用いて測定を行い、風上側から鉛直方向 10cm 毎に積雪を採取した。

旭川では、1 月 23 日の断熱 50mm・100mm・200mm の密度は、屋根面に近い方が大きく、屋根面からの高さが大きくなるにつれて小さくなった。しかし、2 月 22 日は、ざらめ雪

が層構造の中にあっただため、途中で密度が 300kg/m³ を超えるところがあった。両日とも屋根上と地上の密度分布の傾向は概ね同じであった (図 4)。

札幌においても、1 月 31 日の断熱 50mm・100mm・200mm の密度は、屋根面からの高さが大きくなると密度は小さくなり、2 月 28 日はざらめ雪により密度が大きくなる場所があった。両日とも高さ 40cm までは、屋根上と地上の密度分布は殆ど同じであった (図 5)。

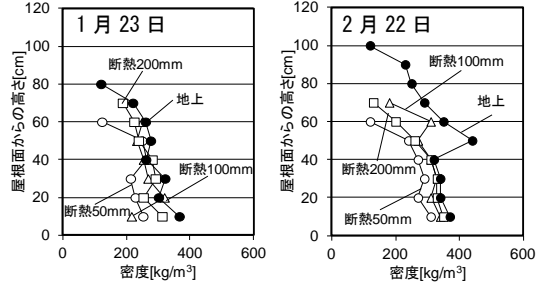


図 4 屋根雪密度の鉛直分布 (旭川)

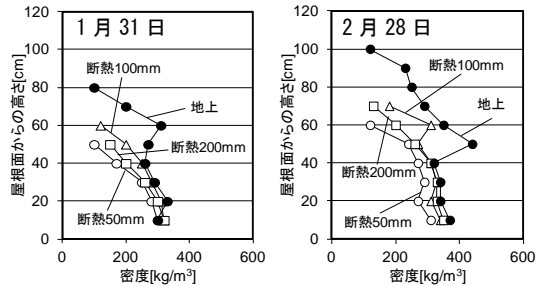


図 5 屋根雪密度の鉛直分布 (札幌)

(d) 屋根上積雪重量

図 6・7 に屋根上積雪重量の変化を示す。積雪重量は、神室型スノーサンプラー (断面積 20cm²) を用いて測定を行った。

旭川では、屋根上積雪重量の最大値は断熱 50mm で 180kg/m²、100mm で 214kg/m²、200mm で 230kg/m² となり、断熱の厚い方が最大値は大きく 200mm と 50mm では 50kg/m² の差があった。また、断熱 100mm と 200mm は、2 月初旬まで地上との積雪重量の比が 1 を超える場合もあった (図 6)。

札幌では、屋根上積雪重量の最大値は断熱 50mm で 173kg/m²、100mm で 245kg/m²、200mm で 223kg/m² となり 100mm で最も大きく、実測期間を通して地上よりも小さい。断熱 50mm と 100mm には 72kg/m² の差があった (図 7)。

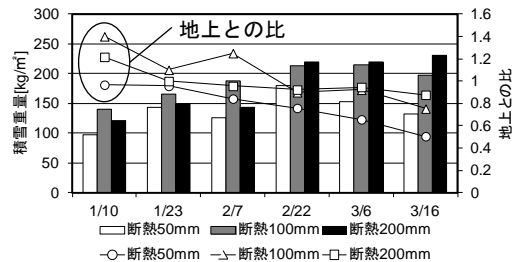


図 6 屋根上積雪重量の変化 (旭川)

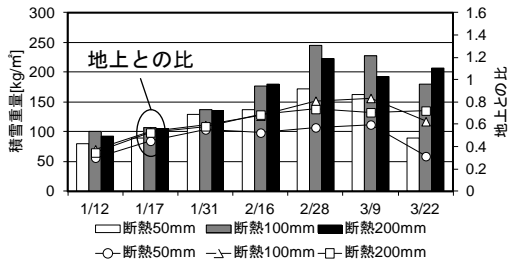


図7 屋根上積雪重量の変化（札幌）

②実建物における実測調査

(a)実測概要

写真2、表2に実測建物の外観および概要を示す。実測建物は、北海道下川町にある2階建ての木造住宅である。家族構成は3人であり、全室暖房を行っている。断熱仕様は外壁75mm、屋根200mmであり、屋根形状は二段屋根である。実測調査は、2011/2012冬期に行い、1・2階の屋根および地上の積雪深、雪密度の鉛直分布、積雪重量の測定を行った。雪密度の鉛直分布は、角形密度サンプラー（容積100cm³）を用いて測定を行い、鉛直方向10cm毎に積雪を採取した。積雪重量は、神室型スノーサンプラー（断面積20cm²）を用いて測定を行った。屋根雪の調査は、図8に示す場所で行い、地上積雪の調査は、調査建物から南東に約20m離れた平坦地で行った。



写真2 実測建物外観（北面）

表2 実測建物概要

竣工	1995年
1階面積	120.90 m ²
2階面積	59.62 m ²
延床面積	180.52 m ²
断熱仕様	外壁 GW16K 75mm
	屋根 GW10K 200mm

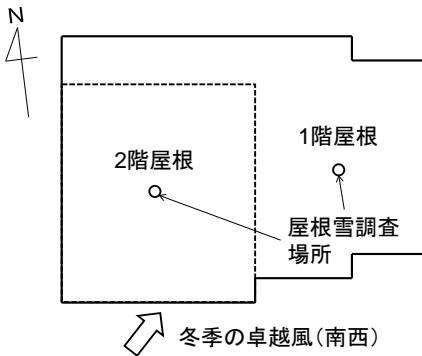


図8 屋根雪の調査場所

(b)屋根上積雪深

図9に屋根上積雪深の推移を示す。1階の屋根上積雪深は1月11日、1月20日の測定時には、地上積雪深と殆ど差はなかったが、2月24日では28cm、3月21日では40.5cmの差があり、地上よりも約2~3割少なかった。2階の屋根上積雪深は、測定期間を通して地上積雪深よりも少なく、その差は約10~70cmあった。また、1・2階の屋根上積雪深には、

測定期間を通して約20~30cmの差があった。これは、1・2階の平均室温が殆ど同じであったため、風による影響が支配的であると考える。2階屋根の方が、地上からの高さが高く、屋根上での風速が早くなり、雪が吹き払われたためである。

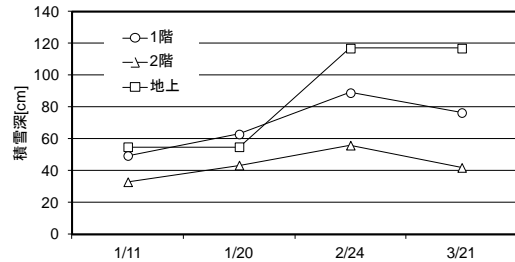


図9 屋根上積雪深の推移

(c)屋根雪密度の鉛直分布

図10に屋根雪密度の鉛直分布を示す。2月24日の1階屋根雪と地上積雪の同じ高さにおける密度分布は殆ど同じであったが、2階はこれよりもやや小さかった。また、屋根面から離れると密度は小さくなった。3月21日は、2階と地上の積雪断面の中に、積雪表面の雪が融けて形成されたと思われる氷板があり、上層の方で密度が大きくなる場所があった。1階の積雪断面の中には氷板が見られなかったため、2月24日と同じように屋根面から離れると密度は小さくなった。

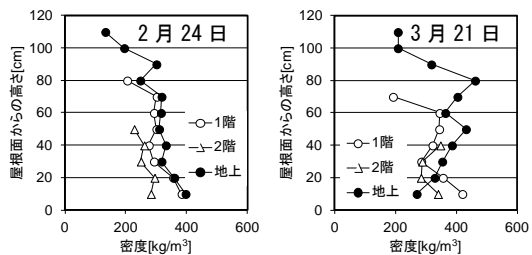


図10 屋根雪密度の鉛直分布

(d)屋根上積雪重量

図11に屋根上積雪重量の変化を示す。1階の積雪重量は、1月20日は地上との比が1を超え地上よりも大きかったが、他の日は1を下回り地上よりも小さかった。2階は、測定期間を通して地上との比が1を超えず、地上よりも小さかった。また、積雪重量の最大値はいずれも2月24日に測定した値であり、1階で288kg/m²、2階で188kg/m²であった。

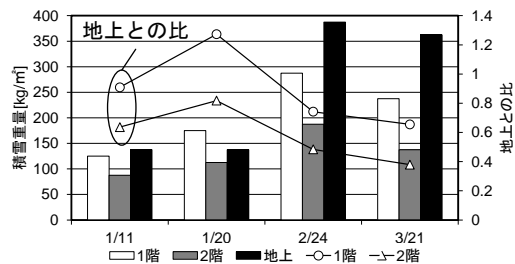


図11 屋根上積雪重量の変化

(3) 屋根積雪多層熱収支モデルの開発

① 数値モデルの概要

図 12 に数値モデルの概要を示す。本研究ではフラットな屋根を対象として、屋根と積雪内部を 1 次元非定常熱伝導モデルとして扱う。時間には後退差分、空間には中心差分を用いて離散化し計算する。室内側と積雪表面の境界条件は第 3 種境界条件とする。

地上降雪量は近藤の雨・雪判別式を用い、捕捉率を考慮して降水量から算出する。降雪があれば積雪層を新たに増やして計算を行う。雪の熱伝導率は Devaux の式、新雪密度は梶川の式を用い、新雪温度は湿球温度に等しいとする。ただし、湿球温度が 0°C 以上の場合には、0°C にする。アルベドには、0' neil & Gray の測定値を補間して用いる。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。また、積雪の圧密の過程は、圧縮粘性係数によって計算を行う。

積雪表面および内部における融雪量・再凍結量は、熱収支法により計算する。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。積雪内部の融雪水や降水の水分移動は、重力方向のみに起こるものと仮定する。積雪層が含み得る最大含水量は最大含水率 (10%) から算出し、これを越えた水はすぐ下の層に流下するとする。屋根面と接する最下層でも同様の扱いとし、最大含水量を越えた水はモデル系外に流出するとする。

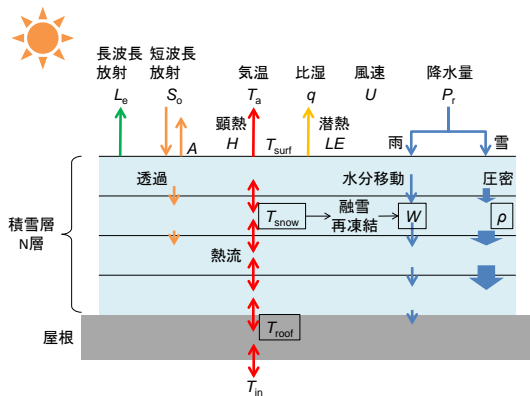


図 12 数値モデルの概要

② 計算モデル

計算結果の妥当性を検証するため、計算対象は、「(2)モデル検証用データ収集のための屋根雪実測調査①モデル検証用建物における実測調査」で調査を行った旭川市に設置した実験建物とする。

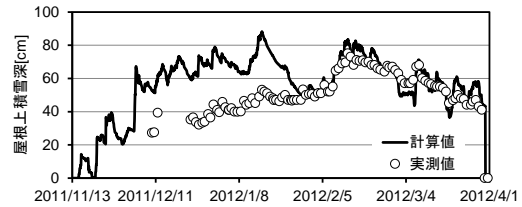
計算は助走計算を考慮し降雪の無い 2011 年 10 月 1 日から行い、計算時間間隔は 1h、気象データは気象庁観測によるデータ (旭川) を用いた。室温は実験時の設定温度である 20°C 一定として、断熱 50、100、200mm の 3 ケースについて計算を行った。また、計算

対象建物の屋根高さが低いため、屋根上積雪量は地上降雪量と同じであると仮定した。

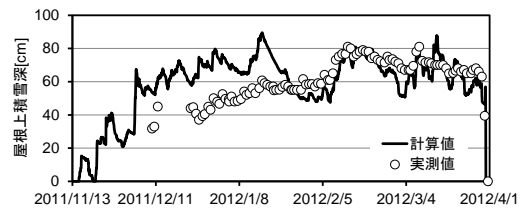
③ 計算結果

(a) 屋根上積雪深

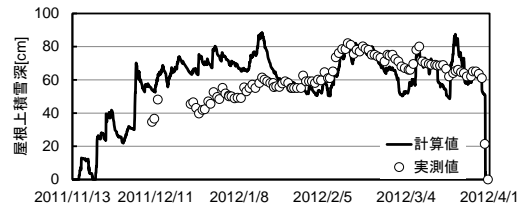
図 13 に屋根上積雪深の計算値と実測値を示す。断熱 50、100、200mm の 3 ケースとも屋根上積雪深は厳冬期である 1 月下旬くらいから計算値と実測値が比較的良好一致する結果となった。また、3 月下旬に屋根雪が消失する時期も概ね再現できた。しかしながら、降雪が始まる 11 月中旬から 1 月中旬までの時期では、計算値と実測値があまり一致しない結果となった。この理由として、実際の観測では降雨であったのにも係らず、雨・雪判別式で計算すると降雪と判断されてしまうケースがあり、観測された降雪量よりも数値計算では降雪量を多く計算してしまったこと、また地上降雪量と同じ量が屋根上にも積もるという仮定で計算したために、屋根上積雪量が大きくなってしまったことなどが原因であると考えられる。



(1) 断熱 50mm



(2) 断熱 100mm



(3) 断熱 200mm

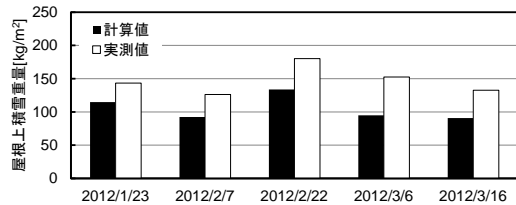
図 13 屋根上積雪深の計算値と実測値

(b) 屋根上積雪重量

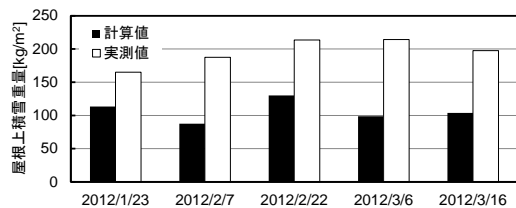
図 14 に屋根上積雪重量の計算値と実測値を示す。断熱 50、100、200mm の 3 ケースとも屋根上積雪重量は実測値よりも計算値は小さく両者の誤差が大きい傾向を示した。この理由として、積雪内部の水分移動を最大含水率から算出し重力方向のみ起こると簡略化し、屋根面と接する最下層でも同様の扱いとしたため、屋根面付近で形成される氷板、高含水率状態の積雪層、毛管力による上向き

の水分移動が再現できていないためであると考える。

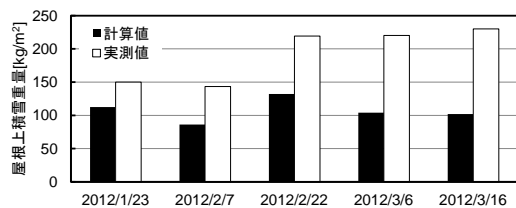
今後は、屋根雪内で起きているこれらの水分移動を再現できる新たなモデルを開発し数値モデルの精緻化を図るほか、勾配屋根においても計算可能な数値モデルに改良する予定である。



(1) 断熱 50mm



(2) 断熱 100mm



(3) 断熱 200mm

図 14 屋根上積雪重量の計算値と実測値

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

- (1) 阿部佑平, 堤拓哉, 千葉隆弘: 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 1 断熱性能の違いによる屋根積雪性状の実測調査, 2012 年日本建築学会大会 (東海), 2012. 9. 12, 名古屋大学 (名古屋)
- (2) 阿部佑平, 堤拓哉: 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 2 実建物における屋根雪調査, 日本建築学会北海道支部第 85 回研究発表会, 2012. 6. 30, 北方建築総合研究所 (旭川)
- (3) 阿部佑平, 堤拓哉, 千葉隆弘: 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 3 屋根面における融雪量の推定, 雪氷研究大会 (2012・福山), 2012. 9. 26, 福山市立大学 (福山)

- (4) 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, 2012 年日本建築学会大会 (北海道), 2012. 8. 30, 北海道大学 (札幌)
- (5) 阿部佑平, 堤拓哉, 千葉隆弘: 建物の断熱性能の違いが屋根積雪性状に与える影響, 2012 年度日本雪氷学会北海道支部研究発表会, 2012. 5. 19, 北海道大学 (札幌)

[その他]

<http://www.hro.or.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 佑平 (ABE YUHEI)

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・研究員

研究者番号: 70614147

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

堤 拓哉 (TSUTSUMI TAKUYA)

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・研究員

研究者番号: 40462345

千葉 隆弘 (CHIBA TAKAHIRO)

北海道工業大学・空間創造学部建築学科・准教授

研究者番号: 40423983

本間 義規 (HONMA YOSHINORI)

岩手県立大学・盛岡短期大学部・教授

研究者番号: 90331272