

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04366

研究課題名（和文）雪層内を流下する融雪水挙動の解明と氷柱形成防止技術の開発

研究課題名（英文）Elucidation of the behavior of melted snow flowing down the snow layer and development of icicle formation prevention technique

研究代表者

小松 喜美（Komatsu, Yoshimi）

秋田大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：90422162

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、雪国で問題になっている折板屋根先端に形成された氷柱に着目し、その氷柱の形成過程を室内実験によって模擬することができる実験装置を開発し、その装置を用いて氷柱形成メカニズムを推測した。また、前述のメカニズムを基に考案した新規折板屋根によって、ヒーターなどの熱エネルギーを用いることなく、氷柱の形成を抑制する方法を提案し、実証実験によって、その効果を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果を実用化することで、積雪の多い寒冷地の多くの建物で問題となっている屋根先端の氷柱形成を抑制することができる。これにより、氷柱の落下による被害を防止するために費やしている、多くのコストを削減することができる。また、本研究の成果は流体の凍結・凝固による被害を受けている、他の事象に応用できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the problem of icicles formed at the tip of folded-plate roofs in snowy regions, and developed an experimental apparatus that can simulate the formation process of icicles in a laboratory experiment, and speculated the mechanism of icicle formation using this apparatus. We also proposed a new folded-plate roofing system based on the aforementioned mechanism to suppress the formation of icicles without the use of heaters or other thermal energy, and confirmed its effectiveness through demonstration experiments.

研究分野：伝熱工学

キーワード：融雪 氷柱 建築物

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

雪国の建物に特有な凍結被害の解決に関連した研究を進めるなかで、折板屋根を雪国で使用する場合には軒先部分から大きな氷柱が発生し、その氷柱の落下による物的人的被害を回避するために多大なるコストを要していることを知り、冬期間の北海道にフィールド調査に訪れた。そこで形成されている 3 m を優に超す大きさの氷柱を目の当たりにしたと同時に、同じ折板屋根でも全く氷柱が発生していない部分があることに気づき、屋根雪の融雪は太陽熱よりも、暖房熱による影響が大きいと推測した。そこで、著者らは、人工的に製作した雪を積もらせた折板屋根を低恒温室に設置し、暖房熱を模擬したヒーターによる融雪で生じる融雪水の挙動と氷柱の形成過程を調査した。その結果、現場の氷柱形成過程を完全に再現することはできなかったが、融雪水は雪層のなかを流下する際に、雪層へ浸潤することで流れが遅くなり、多くの熱量を失い凍結し易くなると考えた。逆にいえば、比較的大きな熱量をもった融雪水を雪層に浸潤しないように集束した状態を保ちながら流すことができれば、軒先部からの氷柱の発生を抑制することができると思った。

一方、著者らは過去の研究成果により、排水管を流れる水の凍結抑制に関する特許を保有している。具体的には、円管である排水管内を不安定に流れることで凍結し易い排水に対し、円管の内側に溝を付けた構造体を設置し、流れを制御・安定化して、排水の凍結を抑制できる排水管に関する特許である。本特許を応用し、融雪水を集束して、雪層の下を流れるように制御すれば、雪層への熱移動を抑えながら流下でき、なおかつ上部の雪層が外気冷熱の断熱層となり、結果として氷柱の形成を大きく抑制することができるのではないかと考え、本研究の提案に至った。

2. 研究の目的

商用施設や工場の屋根材には、安価で耐久性に優れ、現場での施工性も良好な折板屋根(図1手前の建物の屋根参照)が広く採用されている。しかしながら、積雪の多い寒冷地においては、この折板屋根の軒先部分に、しばしば大きな氷柱が形成される。図1は著者らがフィールド調査に訪れた北海道石狩市にある工場の折板屋根に形成された氷柱や周囲の様子を撮影したものである。奥の建物の軒先部分から形成された氷柱は、長いものでは 3 m を優に超える大きさに達している。このように大きな氷の塊が落下した場合に生じる衝撃は想像するに難くない。したがって、雪国において折板屋根を採用している建物の多くは、建物の出入口部分などには小屋根を設置するなどの防護策を施し、さらに氷柱を定期的に破壊するなど、様々なコストを費やしているのが現状である。一方、氷柱の発生そのものを防止する手法として、軒先部分に面状ヒーターを設置する方法があるが、その施工コスト、ランニングコストの割に効果が十分とは言えず、これに代わる方法の開発に対するニーズは大きい。未だ決定的な解決策はない。



Fig. 1 Icicles at the edge of the folded-plate roof.

そこで本研究では、ヒーターなどの熱源を用いずに、折板屋根の先端に生じる氷柱の発生を抑制する方法を検討することを目的に、実験的な検討を行った。

3. 研究の方法

図2に示すように、実験は任意の温度に設定された低恒温室で行った。折板屋根の実験モデルには、氷層を削って製作した模擬雪をできる限り均等になるように堆積させた。結果として模擬雪の密度は 230 kg/m^3 であった。外部恒温槽からポンプにより上部のオーバーフロータンクへ一定温度の水を供給することで、折板屋根の底部へ一定温度 ($0.5 \text{ }^\circ\text{C}$) で一定流量 (100 ml/min) の水を供給することができる。この水は、建物の熱で融解した雪による融雪水を模したものである。軒先部分に対応する折板屋根部分は 0.5 m であり、これは実際の現場と本実験装置で同じである。しかしながら、折板屋根全体の長さは実際の現場では短くとも 10 m 以上になるのに対して実験室では 1 m 程度しか確保できない。そのため、実際に折板屋根にある雪が融解して融雪水が発生した場合と比較して、実験モデルの積雪量では極めて少ない融雪水量しか確保できない。そこで本装置は、外部から融雪水を模した低温水を一定流量で供給することにより、上記の欠点を克服した。折板屋根

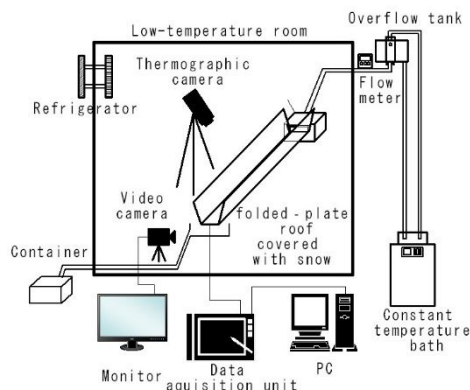


Fig. 2 Experiment apparatus.

に所定の流量の水を流入させたときを実験開始とし、実験中はサーモグラフィカメラを用いて雪層の表面温度分布を取得し、屋根の先端側（融雪水の流出側）に設置されたビデオカメラで氷柱が形成される過程を撮影した。また、各部の温度変化をクロメル・アルメル熱電対によって測定した。これら得られたデータから、融雪水の挙動や氷柱の形成メカニズムを考察した。

その後、得られたメカニズムを基に、現状保有している特許を応用することで、融雪水を雪層に浸潤しないよう集束した状態を保ちながら流下するように工夫した形状をもつ折板屋根をガルバリウム鋼板で製作し、融雪水の挙動および氷柱抑制効果を検証した。

4. 研究成果

(1) 従来の折板屋根における氷柱形成過程

従来の折板屋根における氷柱の形成過程は、図2に示した実験装置を用いて氷点下15°Cの環境下で検討した。図3は折板屋根の先端から流出した融雪水の流量の時間変化を示したものである。実験開始15minまでは融雪水が流出していない。つまり、この時点までは、供給された水は雪層内に浸潤したまま留まっている。その後は融雪水の流出が確認され、その量は時間とともに増加する。60min後には供給している水量と流出している水量はほぼ等しくなる。その後は、流出量に若干の乱れはあるものの、実験終了まで供給している水量と流出している水量はバランスしていることがわかる。つまり、供給した水量と同じ分だけ先端から流出し、雪層内に留まる水量はほとんど変化しないといえる。

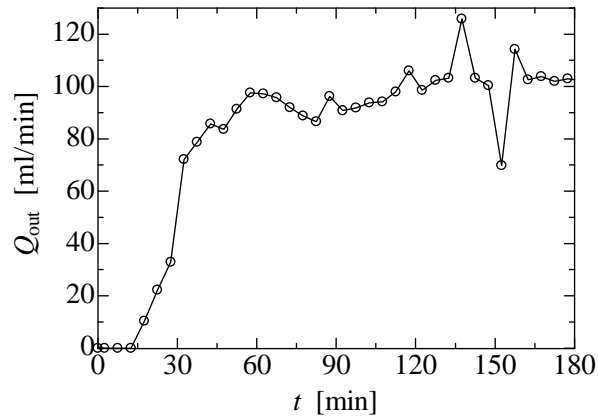


Fig. 3 Temporal variation of the drain flow rate.

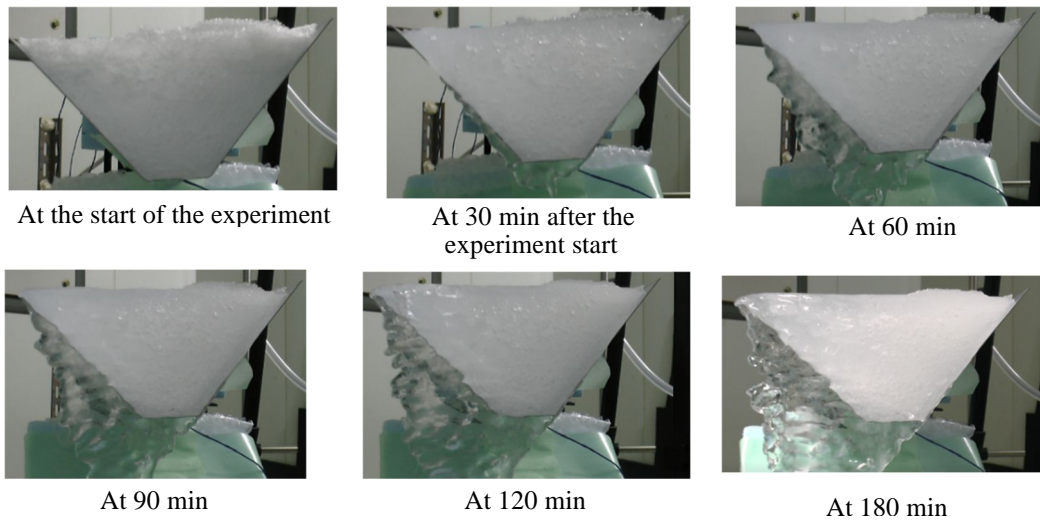


Fig. 4 Freezing process of the edge of the folded plate roof.

図4に折板屋根先端部の凍結過程を示す。実験開始から15min後には、先端の前面の大部分に融雪水が浸透している。30minでは、前面部の凍結が確認でき、底部には氷柱が形成されている。つまり、前面の凍結部分では融雪水が堰き止められていたが、部分的に未凍結部が残ることで融雪水は排出されて続けているのである。その後、氷柱は時間をかけてゆっくりと成長する。図3から明らかなように、この時点以後の流入量と流出量がほとんど等しいため、凍結開始初期段階と比較して、氷柱の形成速度は緩慢である。

図5(次頁)は雪層表面の温度分布の時間変化を示す熱画像である。実験開始から15min後には部分的に高温部分が見られ、融雪水が雪表面まで浸透していることがわかる。図3に示したように、この時点では融雪水は排出されていない。30min経過すると融雪水は雪表面全体に浸透している。図4に示したように、このとき雪層の前面は凍結している。つまり、前部でせき止められた融雪水が雪層全体に浸透していると思われる。120minでは流出部付近に比較的高温の領域が見られる。この高温部分からは融雪水が流れ出ていると考えられる。つまり、雪層の前面は凍結・氷層化し融雪水が浸透できないため、融雪水は前面の凍結部分を越えて流れ、先端で凍結し氷柱を形成すると考えられる。

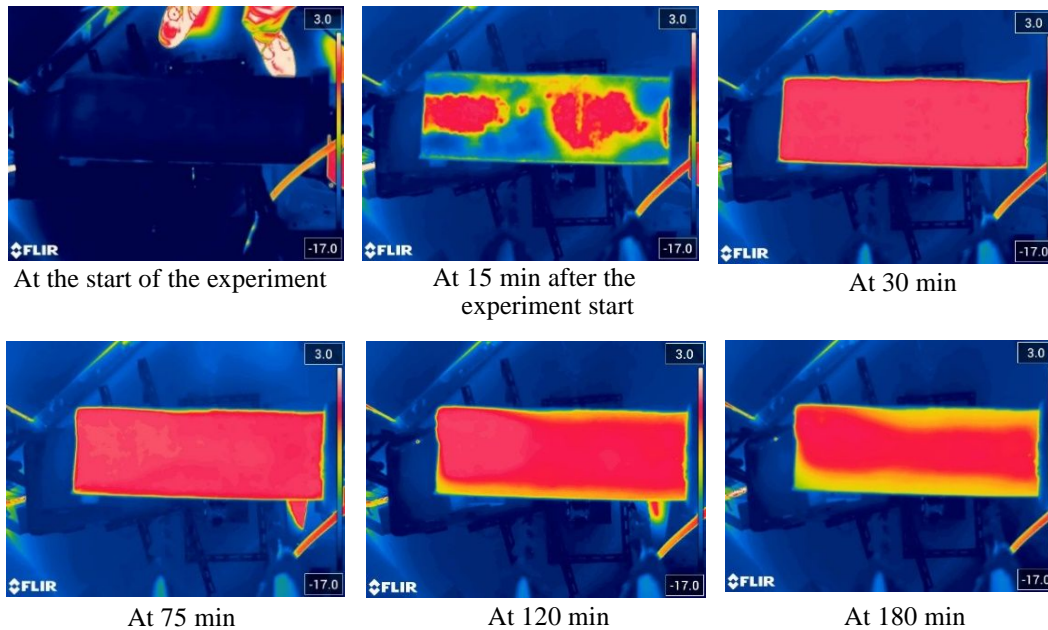


Fig. 5 Temporal variation of the temperature distribution on the snow layer surface.

(2) 新規折板屋根における凍結抑制効果

従来の折板屋根における氷柱形成過程の考察から、ヒーターなどの熱源を用いずに凍結抑制効果をもつ新規折板屋根を開発した。その凍結抑制効果の検証実験は、図2に示した装置を用いて、氷点下10°Cの環境下で行った。

図6は実験終了時(180 min)の折板屋根先端の写真(左;一部を黒塗り処理している)と同じく実験終了時の雪表面の熱画像(右)である。これらの図から明らかなように、開発した新規折板屋根では、先端部の氷柱形成を防止することができ、雪層内への融雪水の浸潤も大きく抑制できることが実証された。

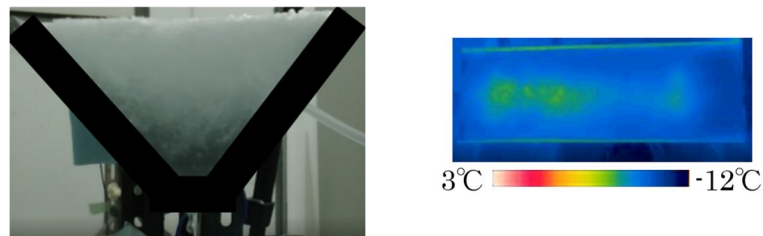


Fig. 6 View of the edge of the folded plate roof and Temperature distribution on the snow layer surface at 180min after the experiment start.

(3) 今後の課題

さらに実験を進めた結果、新規折板屋根においても、低温室内温度をより低下させると氷柱が形成されてしまうことが分かった。また、このとき氷柱が形成される主な原因は、流出部における融雪水の速度低下による凍結および凍結範囲の成長による流れの閉塞であり、微量の融雪水が雪層内を流れることで浸潤した雪の氷層化によって生じる氷柱形成現象とは異なる要因であることが分かった。つまり、本研究課題で克服した凍結とは別の凍結過程によって氷柱が形成されることが分かった。今後は、この凍結過程を抑制できるような構造を考案する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐藤修生, 小松喜美
2. 発表標題 雪層内を流下する融雪水の挙動と凍結現象
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小松喜美
2. 発表標題 折板屋根先端における氷柱形成メカニズム
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshimi Komatsu
2. 発表標題 Mechanism of Icicle Formation at Folded-plate Roof Edges
3. 学会等名 International Research Conference on Engineering and Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------