

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06669

研究課題名（和文）極微量な流下水の凍結挙動の解明と排水管閉塞防止技術への応用

研究課題名（英文）Clarification of freezing behavior of water with very low flow rate and Application to drainpipe blockage prevention technology

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） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、寒冷地における冬期間の排水管の凍結による閉塞を防止するための技術を改良することを目的に行った。研究の結果、排水流量や排水管の傾斜角度が排水の冷却量に及ぼす影響が定量的に明らかになった。また、排水の落下地点における氷筍の成長を抑制する方法に対する指針を得た。さらに、出口部形状を改良した排水管が凍結抑止効果を向上できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、排水流量が小さい場合には管の設置角度が変化しても凍結のしやすさに大きな違いはなく、逆に流量が大きい場合には管が鉛直に近い角度で設置されているほど、凍結しにくいことが分かり、排水管の凍結が起こりやすい設置条件を知ることができた。また、排水の落下点に生じる氷筍を防止するための指針を得ることができ、氷筍を起点とする管閉塞の防止技術の開発に着手する目処が立った。さらに、排水管出口の形状を鋭角に改良することで、凍結抑制効果のさらなる向上を果たした。これらの成果により、開発している排水管のもつ管閉塞防止効果を向上させることができ、熱エネルギーに依らない排水管閉塞防止技術の実現に近づいた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to improve the technique to prevent the pipe blockage caused by drainage freezing in cold regions in winter. As a result of the research, the effects of the drainage flow rate and the inclination angle of the drainpipe on the cooling rate of the drainage were clarified quantitatively. In addition, we obtained a guideline on how to suppress the growth of ice stalagmite at the drainage dropping point. Furthermore, it was confirmed that a drainage pipe with an improved outlet shape could improve the anti-freezing effect.

研究分野：伝熱工学

キーワード：凍結抑制 排水管

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

北海道や東北などに代表される積雪の多い寒冷地において、屋上に積もった雪は建物の暖房の熱を受けて融解する。そのため屋上に生じた融解水を、排水管を通じて屋外へ流下させる必要がある。しかしながら、外気温が著しく低下している場合には流下する水が排水管内で凍結し、氷による管閉塞が生じる。これにより排水管の破損や排水管継ぎ手部分からの漏水や氷柱の落下事故防止への対応などに迫られる。また、屋上に溜まった排水が建物内部へ漏水し、大規模な補修工事を必要とするなど大きな損害を引き起こす場合もある。

このような排水管の管閉塞を防止するために、排水管内部に紐状ヒーターを設置する方法が一般的だが、ヒーターの加熱部は建物の高さ分に相当する長さを要するため、イニシャルコストやランニングコストが高額なものになってしまう。また、排水管が閉塞しなくとも、排水管内に形成された氷が、比較的あたたかな日に融解した後、ヒーターを巻き込みながら落下しヒーターを断線させる事例も多く見られるなどメンテナンスコストも大きい。このように経済的にも環境にも負荷が大きい紐状ヒーターだが、これに代わる技術・製品がないために、排水管凍結閉塞防止手法として広く採用されているのが現状である。

そこで申請者らは紐状ヒーターに代わる管閉塞防止技術を構築するために、まず排水管が如何にして凍結し始め閉塞に至るのか、閉塞メカニズムの解明に取り組んだ。その結果、排水管内を流れる排水量はごく僅かであるために、排水は表面張力の影響を強く受けて管内壁を伝うようにゆっくりと流れ落ち、排水管流出部の厚み部分に表面張力によって液滴が留まり、この液滴が凍結し氷柱の起点となることが分かった。一方で、流れは周方向に不安定であるため、上述した氷柱が周方向に複数発生し、発生した氷柱が隣り合う氷柱と結合することで凍結速度を増して成長を続け、最終的に管閉塞に至ることを突き止めた。この管閉塞メカニズムから「排水を周方向に乱さず1か所から集中的に流出させ、かつ流出部における表面張力の影響を低減させるように排水の挙動を制御することができれば、ヒーターを用いない無エネルギーの排水管で氷柱の発生・成長を抑制することができる」と考えた。その後、実験によって、この予測が正しいことを確認したが、開発途中の管閉塞防止技術には、未だ解明すべき問題や克服すべき課題がある。

2. 研究の目的

研究代表者らが開発している管閉塞防止技術には、以下に示すような解明すべき点や克服すべき課題がある。

- (1) 外気温が著しく低下している場合には排水管の途中にも氷塊が発生するため、凍結抑制効果を、より向上させる必要がある。
- (2) 排水管出口から流下した水が地表面に達した後に氷匂を形成する。この氷匂が排水管と繋がり管閉塞の起点となってしまう可能性がある。

これら課題を克服するため、排水管凍結現象を系統的に調査して凍結開始位置などを算出し、凍結抑制効果の向上を目指すことおよび、氷匂の形成過程を観察し、氷匂形成を抑制する方法の検討をすることの2点を研究目的とした。

3. 研究の方法

本研究の排水管凍結現象の系統的な調査および凍結抑制効果向上の検討に用いる実験装置の概要図を図1に示す。実際の排水管の一部を切り取って製作した1460 mmのV字溝流路に体積流量で50, 100, 150 ml/minの水を流下させ、氷点下20℃に保たれた低恒温室内において排水実験を行う。恒温水槽内で一定温度保持された水はポンプによってオーバーフロータンクまで運ばれる。一定の流量で安定した水は流量計を通った後、低恒温室内の流路入口へ供給さ

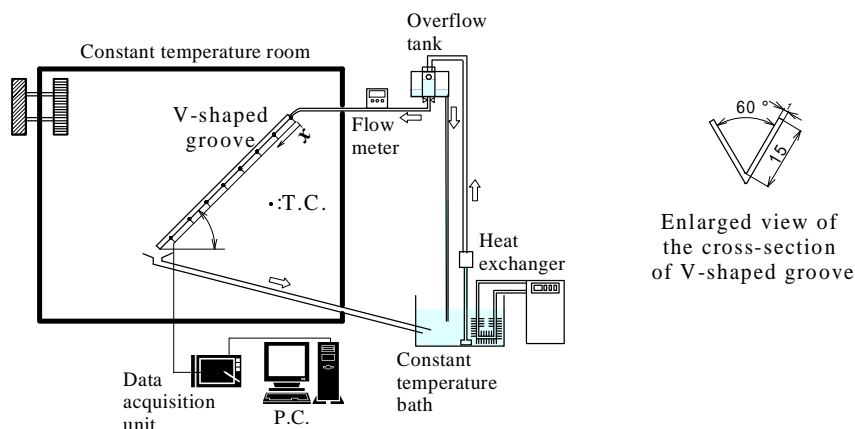


図1 実験装置の概要図

れる．また，オーバーフローした水は恒温水槽に戻される．流路入口で2 になるように調整された水は，流路上部に供給された後，流路の溝部を伝いながら流下し，条件によっては一部の水が凍結する．この V 字溝流路は任意の角度に傾斜することができ，その傾斜角度は 30, 45, 60, 90 (鉛直) 度である．凍結せずに下部から流出する水は恒温水槽に戻される．流下水の温度および流路入口からの凍結開始位置 (L_{fs} mm) が定常状態に達した後，流下水の各部定常温度をクロメル・アルメル熱電対で測定し，凍結開始位置をメジャーで測定した．実験は各条件で 2 回ずつ行った．また，室温下において，流下水にフロートを混入させ，その移動速度から，流れ方向中心位置における流下水の流下速度の概略値を算出した．なお，図 1 において V 字溝流路を実際の排水管に変更した装置において，鉛直に設置した排水管に対する凍結抑制効果の改善を図った実験を行ったが，この際の排水管長さは 1000 mm であり，流路入口水温は 1 である．

また，氷筍の形成過程を観察に用いる実験装置の概略図と試験部の概略図を，それぞれ図 2-1 および図 2-2 に示す．恒温水槽から V 字溝流路までの構成は実験装置と同じである．低恒温室は氷点下 20 に設定し，流下水の体積流量は 50, 100, 150 ml/min とし，V 字溝入口での水温は 0.5 から 1 になるように調整した．V 字溝から流下した水は，V 字溝と繋がった液柱を形成したのち，液滴となって 300 mm 下に設置されたスタイロフォーム上に落下し，凍結する．なお，図 2-2 に示した液滴の落下速度の測定は室温下で行い，V 字溝から 50 mm 下で測定した液滴速度を v_1 ，300 mm 下で測定した速度を v_2 とする．なお，液滴の落下速度は高速度カメラで撮影した画像 (1250fps の画像の 4 コマ分) を解析することで算出し，10 回撮影した結果を平均化して評価した．ただし，体積流量が小さい (50 ml/min) 場合の液滴の落下位置は不安定であったため，およそ鉛直に落下した結果のみを解析に使用した．

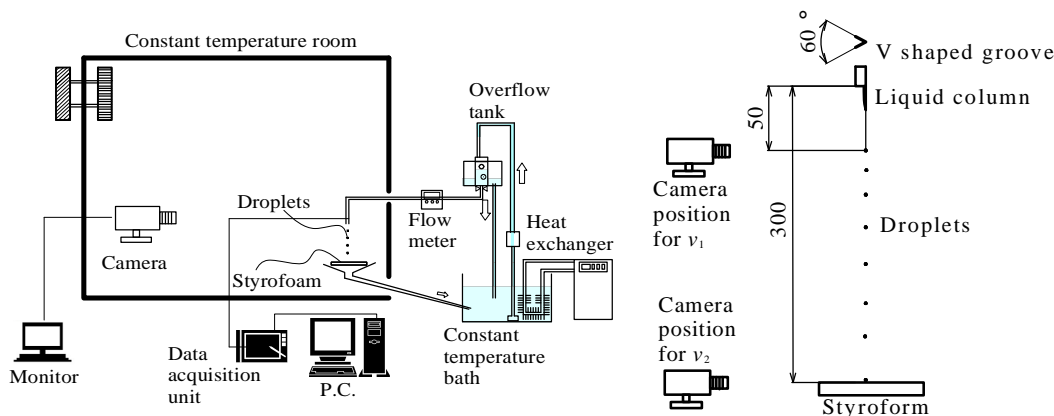


図 2-1 実験装置 概略図

図 2-2 試験部概略

4. 研究成果

(1) 凍結開始位置 (L_{fs}) および平均熱伝達率 () について

図 3 に流下水の体積流量 (Q ml/min) と凍結開始位置 (L_{fs}) の関係を，流路傾斜角度 () をパラメーターにして示す．この図から流路の傾斜角度に関係なく，流下水の流量が増加すると凍結開始位置は下流側へ移動することが分かる．また，同じ流量で考えた場合に，流路傾斜角度が大きいほど凍結開始位置は下流側へ移動することが分かる．さらに，本研究の範囲内において，流路傾斜角度が 30, 45 度の場合はずべての流量で凍結が生じたが，流路傾斜角度が 60 度の場合には流量 150 ml/min では凍結が生じず，流路傾斜角度が 90 度の場合には流量 100, 150 ml/min では凍結が生じなかった．

図 4 に流下水の体積流量 Q (ml/min) と壁面の平均熱伝達率 ($W/(m^2K)$) の関係を，流路傾斜角度 () をパラメーターにして示す．この図から流路の傾斜角度が小さい (30, 45 度) 場合には流量の増加に対して平均熱伝達率も増加し，その増加量は傾斜角度が小さい 30 度の場合に顕著に大きいことが分かった．一方，流路の傾斜角度が大きい (60, 90 度) 場合には流量の増加に対して平均熱伝達率が減少し，その減少量は 60 度と 90 度では大きな違いがなかった．また，流量が小さい (50 ml/min) 場合の平均熱伝達率は，傾斜角度に依らず，およそ 2500 から 3500 $W/(m^2K)$ の範囲内にあるが，流量が大きい (150 ml/min) 場合の平均熱伝達率は傾斜角度の影響が大きいことが分かった．

これまで本研究のような微小流量の水が V 字溝を流れながら凍結するような問題に対する基礎データは少なく，本データは，この種の研究の端緒となり得るものと思われる．

(2) 氷筍の形成メカニズムと形成抑制に対する一案

図 5 に体積流量と液滴の落下速度の関係を示す．流量が非常に少ないため，V 字溝に繋がって形成される液柱は液滴が発生するごとに，その長さを変化させる複雑な現象を呈していたが，液滴の落下速度は流量とほぼ線形関係にあることが分かった．

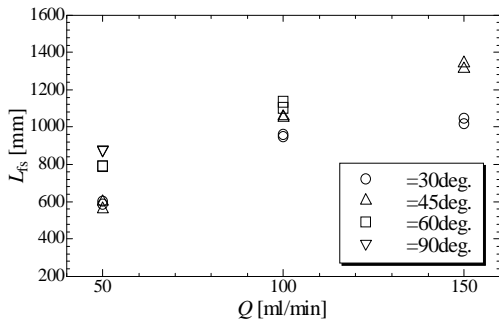


図3 体積流量と凍結開始位置の関係

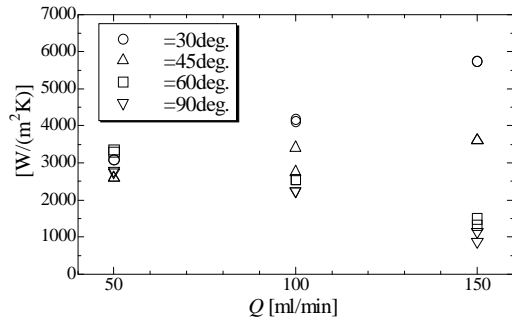


図4 体積流量と平均熱伝達率の関係

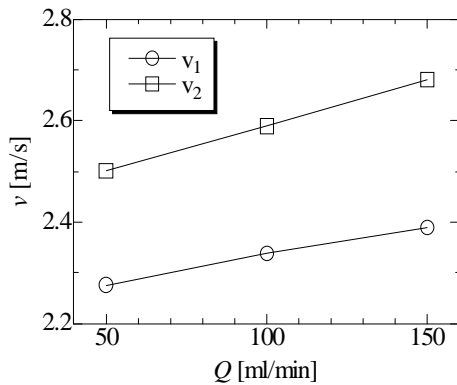


図5 体積流量と液滴落下速度の関係

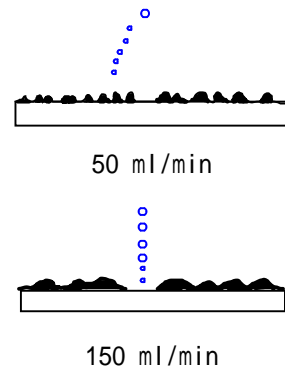


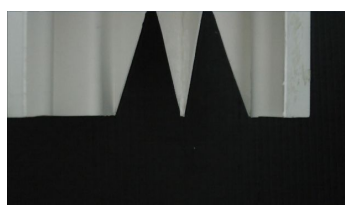
図6 氷筍の形成過程

図6に氷筍の形成過程初期のイラスト図を示す。流量が小さい場合には、V字溝から落下する液滴（図の青丸）の落下位置が不安定になるため、比較的小さな氷筍が複数形成される。一方で、流量が大きい場合には液滴の落下位置が安定しているため、V字溝直下には、ある程度の熱量と運動量をもった液滴が常に供給されるため、この部分には氷筍は形成されづらいが、周囲に留まった液滴がまとまって、比較的大きな氷塊を形成する。この観察結果から、氷筍の形成を抑制する方法の一案として、排水管出口部端面を流れ方法に同じ高さの端面とせず、流下水が流れる溝部分のみ鋭角に加工する（後述する図7の右図参照）。これにより端部の流れが安定し、液滴の落下位置が安定する。なお、この端部の流れが安定化したことにより凍結抑制効果の向上も期待できる（この効果は(3)で述べる）。さらに、その溝部分の先端（鋭角部）を排水管内側へ湾曲させることで、落下面に対して液滴を斜めに、比較的大きな運動量を持ったまま落下させ、落下後の液滴を斜方に分散させることで氷筍の発生を抑制できると思われる。

(3) 凍結抑制効果を向上させる方法について

図7に、排水管出口先端部分の（流下水が流れる）溝部分のみ鋭角に加工した形状（改善後）と従来形状（改善前）の通水実験結果を比較したものを示す。ともに、流量は100ml/minで、流下水の入口温度は1であり、排水管は図8に示すような断面形状であり、そのうちの1つのV字溝部分に極微少な流量の流下水を流入させている。

改善前の形状では、実験開始5時間後において出口部分に氷塊が発生しており、その氷塊は隣の溝まで達している。一方、改善後の形状では実験開始7時間後においても、氷塊の発生は認められず、凍結抑制効果が改善していることが分かる。



改善前（実験開始5時間後） 改善後（実験開始7時間後）

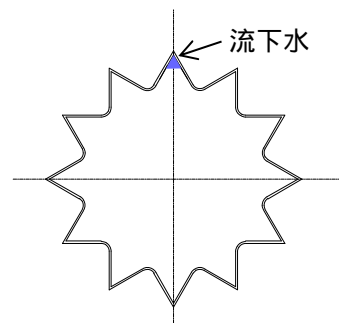


図8 排水管断面図

図7 凍結抑制効果の改善結果（Q=100 ml/min，入口水温1）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小松 喜美
2. 発表標題 管内を流下する微小流量の水の凍結
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshimi Komatsu
2. 発表標題 Droplet Behavior when Dropped from Anti-freezing Drainpipe
3. 学会等名 International Research Conference on Engineering and Technology 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshimi Komatsu
2. 発表標題 Freezing of Water with a Very Low Flow Rate through an Inclined V-shaped Groove
3. 学会等名 The International Conference on Engineering and Applied Sciences 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松喜美, 後藤佑太
2. 発表標題 凍結による管閉塞を防止する排水管の開発
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----