

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：53601
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2021
課題番号：18K03905
研究課題名（和文）CNT複合シートの超音波振動を利用した滑雪性能革新および滑雪メカニズムの解明

研究課題名（英文）Innovation of snow sliding performance and clarification of snow sliding mechanism using ultrasonic vibration of CNT composite sheet

研究代表者
柳澤 憲史（Yanagisawa, Kenji）
長野工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：90585580
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：豪雪地帯の屋根雪を加振により滑落させるために、材料と加振の両面から滑雪性能の向上を試みた。本研究は加振時の滑雪メカニズムを、振動による固体摩擦低減と滑水性向上の二つの観点（固体潤滑と境界潤滑）から明らかにしようとするものである。結果として振動加速度と雪と材料間の摩擦力には負の相関がみられた。雪と材料間の摩擦状態は固体潤滑状態であることが明らかになり、着雪による鉄塔の倒壊事故なども防止できることから、社会的意義は大きい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動加振による固体の摩擦低減（固固界面）および滑水性の向上（液固界面）については、これまでにそのメカニズムが定性的に説明されているが、振動加振による滑雪性の向上（固固、液固界面の混在）についてはまだ明らかになっていない。本研究により滑雪メカニズムが明らかになり、様々な雪質（湿り雪でも乾き雪でも）でより良好な滑雪性を示す最適な超音波振動の周波数や振幅が明らかになることで、様々な雪質の着雪氷防止技術の飛躍的な発展が期待できる。さらに水や雪氷と構造物の界面に超音波振動を加振するための新たな応用研究創出にもつながることは学術的意義も高く、固体表面の摩擦メカニズム解明の一助にもなる。

研究成果の概要（英文）：In order to make snow slide off roofs in heavy snowfall areas by vibration, an attempt was made to improve the snow sliding performance from the viewpoints of both materials and vibration. This study attempted to clarify the mechanism of snow sliding during vibration from two viewpoints (solid lubrication and boundary lubrication): the reduction of solid friction and the improvement of snow sliding properties due to vibration. As a result, a negative correlation was found between the vibration acceleration and the friction force between the snow and the material. The results have great social significance because the friction state between snow and materials was found to be solid lubrication, which can prevent accidents such as the collapse of steel pylons due to snow.

研究分野：トライボロジー

キーワード：はっ水性 滑水性 滑雪性 トライボロジー 超音波振動

1. 研究開始当初の背景

豪雪地帯では、屋根に積もった雪(以後、屋根雪)の除雪作業は欠かせない。また、地方では過疎化が進み、高齢者による除雪作業を余儀なくされ、除雪中の死亡事故¹⁾も報告されている。屋根雪の除雪対策として、雪を自然に滑り落とすために屋根の材料やこう配を利用する落雪式、雪をとかすためにガスや電気などを利用する融雪式、積雪による荷重に耐えられるように住宅の構造自体を強くする耐雪式がある²⁾。これらの対策には様々な問題があり、屋根雪に振動を与えることで除去の制御³⁾が期待できる。

横山ら⁴⁾は斜面をX・Y・Z軸方向に振動させたときの、斜面と剛体の間の見かけの摩擦係数について理論的に検証した。斜面に振動を与えることで、振動がない場合よりも小さな外力で滑り始め、見かけ上あたかも摩擦係数が減少したかのように見える。剛体が滑る方向をX軸、斜面に対し直交する方向をZ軸、X・Z平面に直交する方向をY軸とすると、Z軸方向の振動による見かけの静摩擦係数は、振動加速度が増加すると減少し、振動加速度が重力加速度と等しくなると0になる。Z軸方向の振動による見かけの動摩擦係数は、振動による瞬間的な変化はあるが、平均すると変化しないと述べられた⁴⁾。加振により屋根面と雪の間の摩擦係数を減少させることができれば、固体表面に積もった雪の滑りやすさ(以後、滑雪性)が向上すると考えている。

上村らのグループは、垂直に立てられた板を振動させたときの、板への着雪有無について実験的に検証した。実験は屋外で行われ、風速はビデオ映像より微風とされている。板を振動させるために、振動スピーカーが使用された。板を振動させることで、板に着雪しないような結果が得られた⁵⁾。これは振動スピーカーの発熱により、雪が融解している可能性を報告した⁶⁾。これらの実験は自然降雪を対象としているため、雪質や雪粒形状などの実験条件が明確にされておらず、振動と着雪の関係が分かりづらくなっている。これらの実験に使用された板は親水性であり、雪は水を含んで湿っていた場合、板に着雪してしまう可能性がある。また、着雪についての検討を行っているが、雪の付着しやすさ(着雪性)と、滑雪性の両方を切り分けずに評価していることも問題である。

本研究室ではこれまでに振動による滑雪性を評価するため、傾斜した滑水性シートを斜面に対して直交する方向に振動させ、その上に雪粒を載せたときの雪粒移動距離を測定し、振動により雪粒移動距離が増加するような傾向が得られた⁷⁾。さらに、水平面上で垂直方向に振動させた滑水性シートと三点接触させた氷球間の摩擦力を測定し、振動により摩擦力が減少するような傾向が見られた^{8,9)}。しかし、周波数や加速度についての検討が不充分であった。また、振動による界面への水の発生等についての検討がされていない。

2. 研究の目的

本研究は超音波振動加振時の滑雪メカニズムを、振動による固体摩擦低減と滑水性向上の二つの観点(固体潤滑と境界潤滑)から明らかにしようとするものである。

振動による摩擦力の減少メカニズムを明らかにするために、水平面上で垂直方向に振動させた滑水性シートと三点で接触する氷の間の摩擦力測定を行う。周波数と振幅を変化させた際の摩擦力に与える振動加速度の影響について調査する。滑水性シートと氷の界面観察を行い、振動と水の発生について考察する。

3. 研究の方法

シリコンゴムを母材とした滑水性シートが用意された。氷試験片の作製には、蒸留水が使用された。氷試験片はシリコン製の製氷型を用いて作製された。

振動させた滑水性シートと氷試験片の間の摩擦力を測定するために、摩擦力測定装置が作製された。図1に摩擦力測定装置を示す。振動発生機の上にステージ、滑水性シート、氷試験片の順で配置される。氷試験片はロードセルと糸で繋がれた。ロードセルは単軸ロボットのスライダに固定された。このスライダを水平方向に移動させることで、滑水性シートと氷試験片の間の摩擦力測定が行われた。氷試験片が移動する方向をX軸、重力加速度の方向をZ軸、X・Z軸方向に直交する方向をY軸とする。振動発生機は、Z軸方向に振動させた。

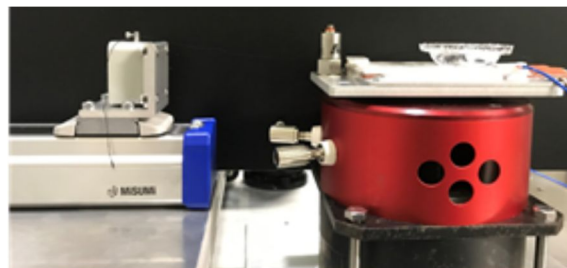


Fig. 1 Photograph of friction force measuring equipment.

振動させた滑水性シートと氷試験片の界面を観察するために、一眼レフカメラが使用された。界面の観察は、Y軸方向から撮影される。

本実験はプレハブ冷凍庫内で行われた。庫内設定温度は -4 ± 1 ℃、氷移動速度は2mm/s、氷の質量は 13 ± 1 gとされた。振動加速度は0, 2, 5, 8, 10m/s²で加振された。

横山ら⁴⁾の報告と比較するため、動摩擦係数を算出する。摩擦力測定結果より、動摩擦力は測定時間2~8sの摩擦力を平均した値とし、動摩擦力を氷試験片の重量で除することで動摩擦係数を算出した。

4. 研究成果

斜面に直交する方向に加振された場合，固体同士の見かけの静摩擦係数は振動加速度の増加により減少するが，見かけの動摩擦係数は平均的には振動の影響を受けないことを示している．図2に振動周波数が25, 50, 75Hz，振動加速度が0, 2, 5, 8, 10 m/s^2 のときの，動摩擦係数を示す．横軸は振動加速度，縦軸は摩擦係数，凡例は振動周波数，破線は式(1)で求めた見かけの静摩擦係数，実線は式(2)で求めた見かけの動摩擦係数を示す．本実験で得られた動摩擦係数は，見かけの静摩擦係数と同様に減少する傾向を示した．

界面に水が発生しているようには見えなかった．振動周波数が50, 75Hz，振動加速度が10 m/s^2 のときには，氷が跳躍するような現象が見られた．振動加速度が10 m/s^2 のときに起きた摩擦力の増減の原因は，この跳躍であると考えられる．

滑水性シートと氷試験片の接触面積をヘルツの接触式により求めた．滑水性シートと氷試験

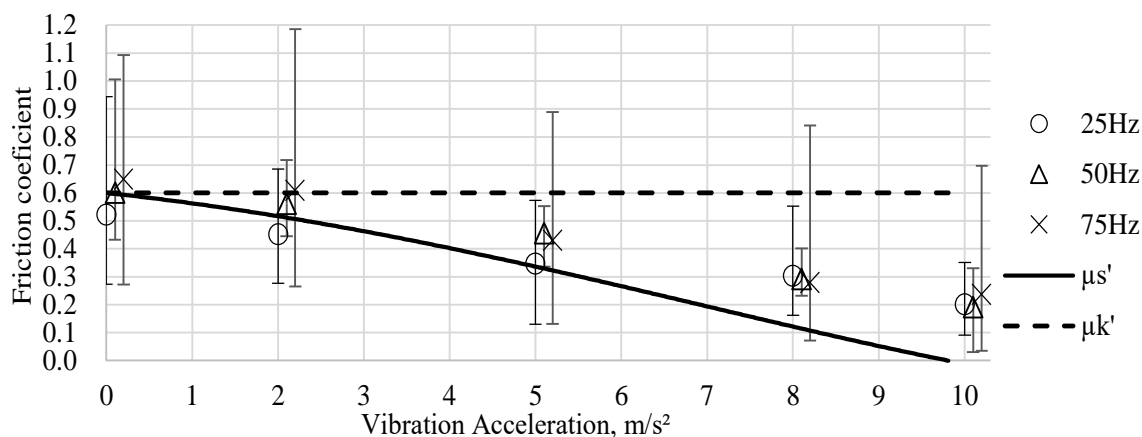


Fig. 2 Measurement results of friction coefficient with various vibration accelerations.

片のヤング率を，それぞれ1.0MPaと94GPa，ポアソン比をそれぞれ0.5と0.3と仮定すると，滑水性シートと氷試験片の接触面積は約3.6 mm^2 となる．界面での圧力による融点降下を求めると $-2.5 \times 10^{-4} K$ であり，圧力による氷の融解は無視できるほどわずかだと考えられる．

振動させたシリコンシートと氷試験片の間には振動エネルギーが発生する．発生したすべての振動エネルギーが，熱エネルギーに変換された場合の氷の温度上昇について考える．振動エネルギー ΔE は，運動エネルギー，位置エネルギー，氷の質量，振動の各要素で決まる．振動周波数が25Hz，振動加速度が10 m/s^2 のとき，振動エネルギーは $2.6 \times 10^{-5} J$ となる．この振動エネルギーがすべて熱エネルギーに変換されると，氷の温度増加量 ΔT は $1.25 \times 10^{-9} K$ であり，加振による氷の融解は無視できるほど小さいと考えられる．

以上のことから，本実験条件においては滑水性シートと氷試験片の界面に融解水は発生していないと考えられ，すなわち固体潤滑状態であると考えられる．振動加速度の増加により摩擦係数が減少している傾向から考えるに，横山ら⁴⁾の報告する見かけの静摩擦係数が減少する傾向と同様の傾向である．安留ら⁸⁾は，氷同士の摩擦において，氷移動速度を $10^{-1} m/s$ から $10^{-4} m/s$ に減少させるにつれて，動摩擦係数が増加することを報告している．その中で約 $3 \times 10^{-3} m/s$ 以下の低速度領域においてはスティック・スリップが発生していることが動摩擦係数の増加の原因の一つであると述べている．固体表面の違いはあるが，本実験の氷移動速度 $2 \times 10^{-3} m/s$ においてもスティック・スリップが発生している可能性があり，垂直方向の振動は氷試験片の付着を軽減させるように作用していると考えられるが，界面の詳細な観察などが今後必要である．

さらに，周波数の影響を確認するために，1000Hz以上の周波数領域において，滑水性シートと氷の摩擦力を調査した．超音波振動領域も含め，低周波領域のような摩擦低減は見られなかった．これは横山ら⁴⁾の述べるように重力加速を超える振動加速度においては摩擦力のそれ以降の減少がみられないことを裏付けている．滑水性シートと氷間の固体潤滑下において，スティック・スリップの低減による摩擦力の減少という説明に矛盾はない．

以上の実験および考察により得られた研究成果の一部をトライボロジー会議2021秋および日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会およびトライボロジー会議2022秋にて報告を行った．

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局地方振興課：雪害による犠牲者発生要因等総合調査，第2回雪害による犠牲者ゼロのための地域の防災力向上を目指す検討会資料，(2008)，p.2．
- 2) 新潟県土木部都市局建築住宅課：屋根雪の処理方法の特徴や工夫に関する資料，(2006)，pp.1-8．
- 3) 呉超群，中川紀壽，小西佑典：超音波防塵装置の開発に関する研究，広島大学新技術

説明会発表資料, (2008).

- 4) 横山泰男, 岡部左規一, 石川憲一: 振動による等価動摩擦係数の減少(直線振動の場合), 日本機械学会論文集, 36, 28, (1970), pp.915-922.
- 5) 川本浩介, 小川克昌, 上村靖司: 音響振動による着雪防止技術の開発, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, (2006), p.150.
- 6) 小川克昌, 上村靖司, 川本浩介, 田辺義浩: 振動式着雪防止装置の開発, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, (2007), p.206.
- 7) 土屋光喜, 柳澤憲史, 藤野俊和, 阿部雅二郎: 滑水シリコン/CNT 複合シートを用いた振動加振に伴う滑雪性と滑水性との比較, 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会講演会講演論文集, (2017), 1041.
- 8) 安留哲, 荒川政彦, 前野紀一: 氷・氷摩擦係数の測定, 日本雪氷学会誌雪氷, 61, 6, (1999), pp.437-443.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kneji Yanagisawa, Ren Goto, Chinatsu Saito, Yuri Gomi and Hiroo Taura	4. 巻 7, 1
2. 論文標題 Evaluation for Sliding Behavior of Water Droplets on Surface of VGCF Compositied Silicone Sheet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions on GIGAKU	6. 最初と最後の頁 07005-1-07005-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 柳澤憲史, 安達 聖, 佐藤研吾	4. 巻 36
2. 論文標題 各種はっ水性シートの付着雪垂直せん断試験について	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 寒地技術論文・報告書	6. 最初と最後の頁 45-48
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 柳澤憲史, 安達 聖, 佐藤研吾	4. 巻 35
2. 論文標題 各種はっ水性シートの着雪滑雪性能測定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 寒地技術論文・報告書	6. 最初と最後の頁 pp.27-30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 柳澤憲史, 五味佑理, 黒岩岳大, 斎藤千夏
2. 発表標題 シリコンゴム表面上の水滴の水平引離し力に及ぼす液滴変形の影響
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤蓮, 柳澤憲史
2. 発表標題 シリコン/CNT複合シートのCNT分散変化が滑水性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 斎藤千夏, 柳澤憲史, 岩下航, 奥村紀浩
2. 発表標題 微細な表面凹凸をもつシリコンシート斜面と其上を滑り落ちる水滴間の摩擦力の解析
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林誠虎, 柳澤憲史
2. 発表標題 振動させたシリコンシートと3点接触する氷の間の摩擦力測定および界面状況の観察
3. 学会等名 トライボロジー会議2020秋 別府
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳澤憲史, 安達 聖, 佐藤研吾
2. 発表標題 各種はっ水性シートの付着雪垂直せん断試験について
3. 学会等名 第36回寒地シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Yanagisawa
2. 発表標題 Evaluation of Dynamic Hydrophobicity on Silicone Sheet with Small Contact Area
3. 学会等名 International Tribology Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳澤憲史, 安達 聖, 佐藤研吾
2. 発表標題 各種はっ水性シートの着雪・滑雪性能測定
3. 学会等名 第35回寒地シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳澤憲史, 小林誠虎, 加藤正幸, 市川敬夫
2. 発表標題 加振によるシリコンゴムシートと氷球間の摩擦力の変化
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部第56期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林昇市, 柳澤憲史
2. 発表標題 着雪防止のための加熱/加振式シリコンシートのシート温度と滑雪性の関係調査
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部第56期総会・講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 柳澤憲史他	4. 発行年 2021年
2. 出版社 サイエンス&テクノロジー株式会社	5. 総ページ数 227
3. 書名 超はっ水・超撥油・滑液性表面の技術	

1. 著者名 柳澤憲史他	4. 発行年 2020年
2. 出版社 株式会社技術情報協会	5. 総ページ数 550
3. 書名 高分子材料のトライボロジー制御	

〔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
---------	---------