

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：53601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17962

研究課題名(和文)超音波振動を利用した超滑水CNT複合シート構成による着雪氷防止技術の研究

研究課題名(英文) Study on snow and ice accretion prevention technology by ultra-low-drag hydrophobic CNT composite sheet composition using ultrasonic vibration

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：冬季の災害において毎年頻発している着雪氷による災害の防止技術として期待される超音波振動を利用した超滑水性CNT複合シートを開発し、滑水性におけるCNT複合シートへの超音波振動の効果を明らかにし、超音波振動影響下でのCNT複合シートの雪の滑り落とし性能を検証することを目的としている。CNT複合シート表面の水滴および雪粒が振動により滑水性を向上させることを確認し、振動の振幅と周波数が与える影響について考察した。

研究成果の概要(英文)：Disasters caused by snow and ice are frequent occurrence every year in winter. As a technology to prevent the disasters, ultra-low-drag hydrophobic CNT composite sheet using ultrasonic vibration is developed. An aim of this study is clarified with the effect of ultrasonic vibration on CNT composite sheet in water sliding, and is verified with the sliding performance of snow of CNT composite sheet under the influence of ultrasonic vibration. The variations of amplitude and frequency with the drag property of water droplets and snow particles on CNT composite sheets were clarified and discussed.

研究分野：工学

キーワード：トライボロジー 超滑水 超はっ水 雪氷 超音波振動

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の社会的背景

2012年11月に北海道で起きた送電線への着雪に起因する鉄塔の倒壊事故の例をあげるまでもなく着雪や着氷を原因とした災害は毎年のように起こっている。着雪・着氷防止技術としては水性材料に注目が集まっているが、ハスの葉のように水をはじき滑り落とす「ロータス効果」とバラの花びらのように水をはじくが水を吸着させてしまう「ペタル効果」の相反する現象からもわかるように表面で水滴が球状になる「(静的)はっ水性」と「滑水性」のメカニズムは異なることがわかる。ハスの葉の表面の水は振動数約100Hz、振幅1mmの振動により落ちるとの報告<sup>(1)</sup>があるが、振動の周波数および振幅と「滑水性」についての報告は見当たらない。一方、摩擦低減効果をねらい超音波振動を機械加工へ応用する研究は多くみられるが、超音波振動の滑水性との関連研究は国内外で見られずそのメカニズムははっきりしない。着雪氷防止の観点からも実用上は「滑水性」が求められているが、本研究は超音波振動を利用しどのような構造物の固体表面でも超滑水表面を実現し、着雪氷防止効果を実証する初めての試みを行う。

(2) 研究の学術的背景

研究代表者はこれまでに、プラスチックとカーボンナノチューブ(CNT)の複合材料に金型でプレス成型を行い表面に微細な凹凸を転写することで超はっ水性をもつ表面の作製および右図に示すようにCNT複合による滑水性の向上を確認した<sup>(2)</sup>。さらに予備実験からシートに28kHz、振幅10μmの超音波振動を与えることで与えない場合より水滴の滑落速度が最大8倍増加することを見出した<sup>(3)</sup>。振動により水滴に与えられる力 $F_{max}$ は周波数 $f$ 、最大振幅 $D$ とすると $m(2\pi)^2 f^2 D$ と予測できるため、周波数を大きくすれば振幅は平方根で小さくしても滑水性を向上させることが可能と考えられ、かつ人間が知覚できず生活への影響が少ない方向にシフトできる。しかし、CNT複合シートの滑水性に及ぼす超音波振動の振幅と周波数の影響を調査した例はない。

2. 研究の目的

本研究は、冬季の災害において毎年頻発している着雪氷による災害の防止技術として期待される超音波振動を利用した超滑水性CNT複合シートを開発し、滑水性におけるCNT複合シートへの超音波振動の効果を明らかにし、超音波振動影響下でのCNT複合シートの雪の滑り落とし性能を検証することを目的としている。

3. 研究の方法

超音波振動の加振による周波数と振幅が滑水性に与える影響を調査する。CNT複合シートの作製を行い、現有の装置を超音波振動が加振できるように改良し、滑水性の評価を行い、超滑水性をもたせることのできる超音

波振動の周波数と振幅を明らかにする。

超滑水シート構成の着雪氷防止技術としての実用化可能性検証のために様々な降雪条件での難着雪性の試験を行い雪の滑り落とし性能の検証を行う。

4. 研究成果

(1) 振動加振による滑水性評価システムの構築

図1に振動加振装置の構成図を示す。振動装置には、旭製作所製のWaveMaker01を使用しており図1にあるように振動装置にねじでアルミ台を固定しておりその上にシリコンシートと加速度センサが取り付けられている。

加速度センサは、振動装置のアンプに振幅が表示されないため使用した。加速度センサより測定した加速度を使用して(1)式により振幅を計算している。

$$A = a / (2\pi f)^2 \quad (1)$$

ここで、 $A$ : 振幅 [m],  $a$ : 加速度 [m/s<sup>2</sup>],  $f$ : 振動数 [Hz]を示す。

図2に超音波振動加振装置の構成図を示す。

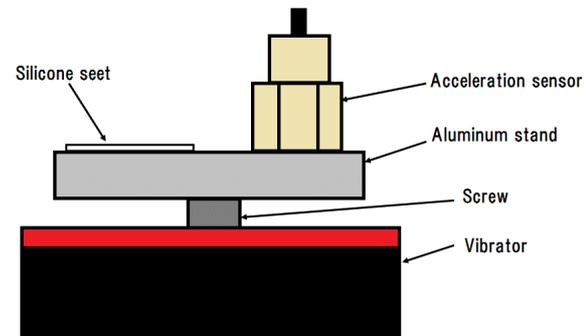


図1 振動加振装置の構成図、図下部の振動台にねじで固定された図中央のアルミ台が上下方向に振動する。

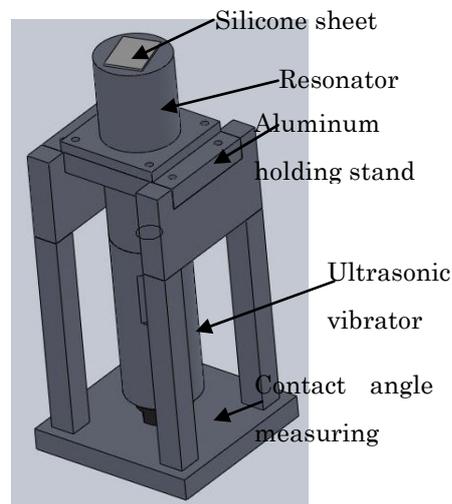


図2 超音波振動加振装置の構成図、超音波振動子の振動を共振器で共振させシリコンシートに振動を入力する。

超音波振動子には、本多電子製の HEC-3028 P4BX を使用した。図 2 にあるように超音波振動子にねじで共振器が取り付けられた。共振器の周りを保持台で支え、保持台は接触角計にねじで取り付けられた。

図 3 に示すのが滑水性の測定方法の概略図である。滑水性の測定には、First Ten Angstroms 社製の接触角計 FTA1000 を使用した。ステージに図 1 および図 2 で示した振動加振装置を取り付け、ステージを 10 度に傾けた状態のままシートに 10 $\mu$ l の水滴を滴下し水滴の移動距離と経過時間を測ることで水滴の滑水性を調べる。振動加振条件は、振幅 1~22 $\mu$ m、振動数は 250~28000Hz の振動を加振した。

(2) 振動加振による周波数と振幅が滑水性に与える影響

図 4~7 は横軸に水滴着の直後を 0 秒とした経過時間[s]、縦軸にシート上の水滴の前端の移動距離[mm]を示している。図 4, 5 は、振幅 1 $\mu$ m、周波数を 0Hz~500Hz の振動を与えた時の水滴の移動距離を示し、図 6, 7 は振幅 0 $\mu$ m~22 $\mu$ m、振動数 500Hz の振動を与えた時の水滴の移動距離を示したグラフである。図 4, 6 が CNT 複合シート、図 5, 7 がシリコンシートの結果を示しており一つの条件に対して 3 回実験を行った。

グラフに示す通りすべての条件において振動を加振しているものが振動を加振していないものとは比べ滑水性が向上している。また、振動数や振幅を上昇させていくとそれに伴い滑水性も向上する。振動を単振動と考え速度エネルギーと位置エネルギーから水滴に加わるエネルギーを(2)式のように考えられる。この式より振幅又は、振動数が増加すると水滴に加わるエネルギーが大きくなり滑水性が上昇していると考えられる。

$$E = 2\pi^2 m f^2 A^2 \quad (2)$$

ここで、 $E$ : 水滴に加わるエネルギー[J],  $m$ : 水滴の質量[kg],  $f$ : 振動数[Hz],  $A$ : 振幅[mm]を示す。

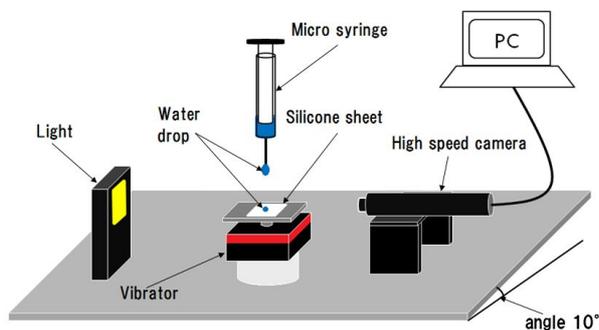


図 3 滑水性の測定方法の概略図、図中央の振動台上の水滴に図左のライトから光をあて図右の高速度カメラで水滴の影を撮影する。

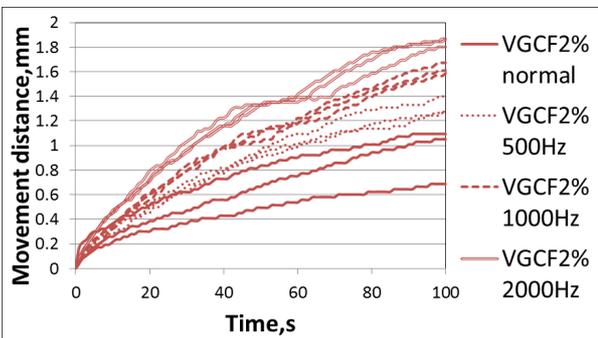


図 4 振幅 1 $\mu$ m、振動数を 500~2000Hz に変化させたときの CNT 複合シート上の水滴の移動距離、振動数の増加により水滴の移動距離も増加する。

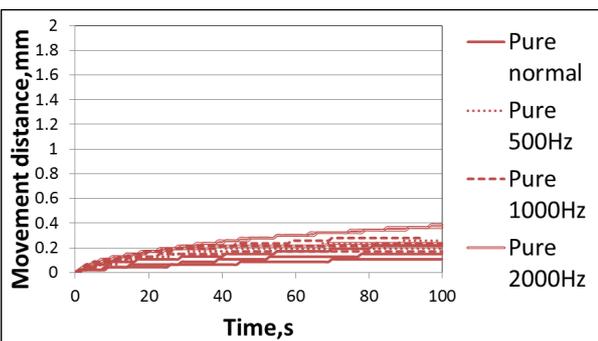


図 5 振幅 1 $\mu$ m、振動数を 500~2000Hz に変化させたときのシリコンシート上の水滴の移動距離、振動数の増加により水滴の移動距離も増加する。

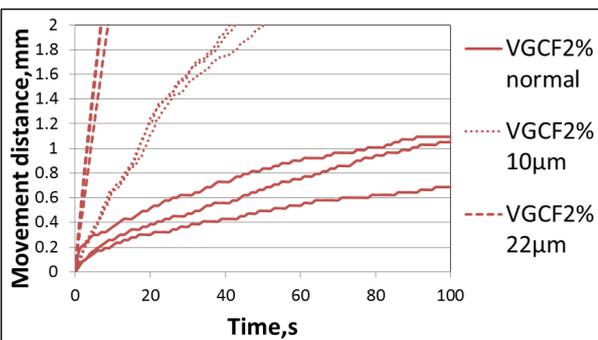


図 6 振動数 500Hz、振幅 10~22 $\mu$ m に変化させたときの CNT 複合シート上の水滴の移動距離、振幅の増加により水滴の移動距離も増加する。

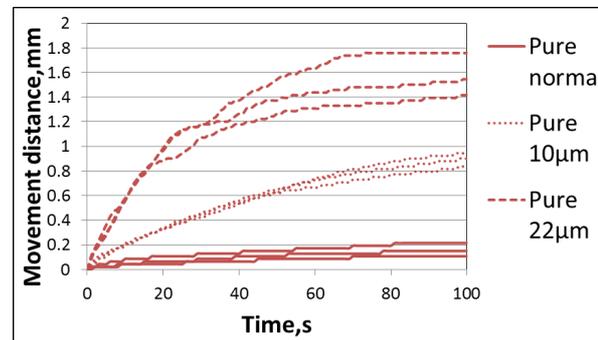


図 7 振動数 500Hz、振幅 10~22 $\mu$ m に変化させたときのシート上の水滴の移動距離、振幅の増加により水滴の移動距離も増加する。

図8は横軸が水滴着滴直後を0秒とした経過時間[s]、縦軸が水滴の前端点の移動距離[mm]を示している。一つの実験に対して3回実験を行い、図には3回の平均を示している。図8で用いたシートはCNT複合シートである。振幅1 $\mu\text{m}$ の振動を加振した際、周波数が大きくなるにつれ滑水性が向上する。また周波数28kHzの振動を加振した際には、振幅が1 $\mu\text{m}$ より5 $\mu\text{m}$ のときに滑水性が飛躍的に向上していることがわかる。同一振幅でも周波数を増加することで滑水性が向上し、振幅を増加することでさらに滑水性が向上することが明らかになった。

### (3) 振動加振による滑雪性評価システムの構築

滑雪性の評価には冬季に採取した雪を用いた。採取した雪を砕氷機によって砕いた後、目の粗さが異なるふるいを目の粗いほうからふるっていくことで図9のように雪の粒の直径を2.8mmから3.3mmの範囲にそろえる。これらの雪粒から図10のように直径約3mmの雪粒を選択し(2)で示した実験で使用している10 $\mu\text{l}$ の水滴と同等の質量の雪粒を実験に使用した。滑雪性の評価には滑水性の評価に用いた振動装置を用いた。10°または20°に傾斜させたステージの上にシート及び雪の粒を乗せ振動を加える。その様子をビデオカメラで100秒間撮影し、ソフトを使用し解析を行う。図11に示すように動画を解析し、シートに着雪させてから100秒後の雪粒の移動距離を測定した。実験は-1°C及び-4°C冷凍室の中で行った。

### (4) 振動加振による滑雪性の評価

図12および13は、10°に傾斜させたシリコンシート及びCNT複合シートに振動を加えた際の、水滴と雪の粒の移動距離をグラフにしたものである。図12は振幅1 $\mu\text{m}$ で振動数を変化させた時の雪粒と水滴の移動距離、図13は振動数500Hz、振幅を変化させた時の雪粒と水滴の移動距離を示している。図の黒棒がCNT複合シート上、白棒がシリコンシート上の雪粒の移動距離を、黒三角がCNT複合シート上、白三角がシリコンシート上の水滴の移動距離を示している。なお、図中の○は移動距離ゼロを示し、図6中の黒×は水滴の移動距離が7mm以上であることを示している。

図12に示す通り水滴が滑りやすい条件で雪粒も滑りやすい傾向がみられる。水滴に比べ雪粒のほうが滑りにくいことがわかる。水滴が2mm以上移動する条件では雪粒も滑る。振動加振が雪粒の滑りやすさに影響を与えることがわかった。水滴と同様に振動数の変化よりも振幅の変化のほうが滑水性に与える影響が大きいといえる。また、CNT複合シートの方が滑雪性がよいといえる。

滑水性がよいシートのほうが滑雪性がよい傾向がみられたが、雪粒のほうが水滴に比べ滑りにくい傾向がみられた。図14に振動加振中のシート上の雪粒の様子を示す。画像

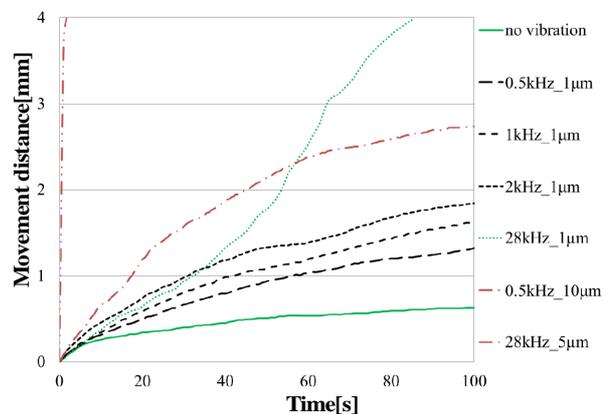


図8 振幅1~10 $\mu\text{m}$ 、振動数を5~28kHzに変化させたときのCNT複合シート上の水滴の移動距離、超音波振動の加振により水滴の移動距離も飛躍的に増加する。

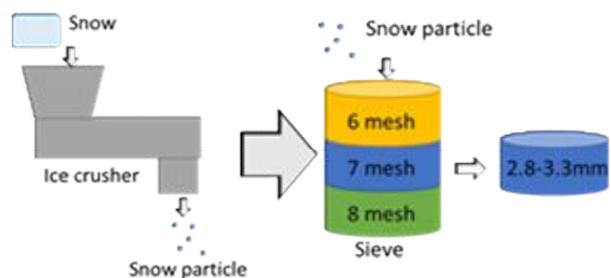


図9 雪粒の粒径のそろえ方の概略図、保管した雪塊を粉碎し目の粗いふるいから順番に雪粒を通すことで目標の粒径の雪粒を得ることができる。



図10 スケール上の雪粒の写真、雪粒をスケールの上にのせて粒径を測定する。

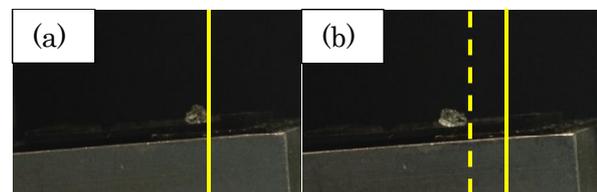


図11 シート上の雪粒の移動距離の測定方法、図のようにシート上の雪粒を撮影した動画を解析し時間ごとの雪粒の移動距離を画像上から読み取る。

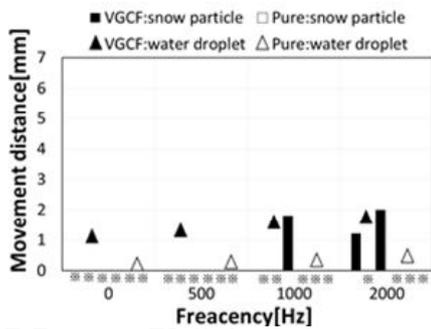


図 12 振幅 1 $\mu$ m, 振動数を 500~2000Hz に変化させたときのシリコンシート上の水滴と雪粒の移動距離, 雪粒の移動距離は水滴のそれよりも減少するが雪粒の滑りやすさの傾向は水滴のそれと一致する。

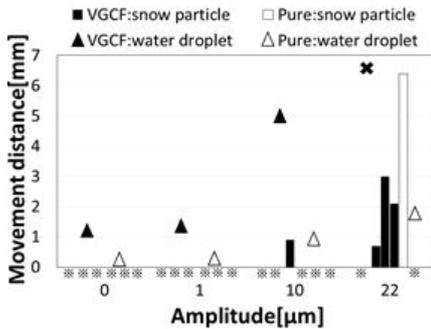


図 13 振動数を 500 振動数 1~22 $\mu$ m に変化させたときのシリコンシート上の水滴と雪粒の移動距離, 雪粒の移動距離は水滴のそれよりも減少するが雪粒の滑りやすさの傾向は水滴のそれと一致する。

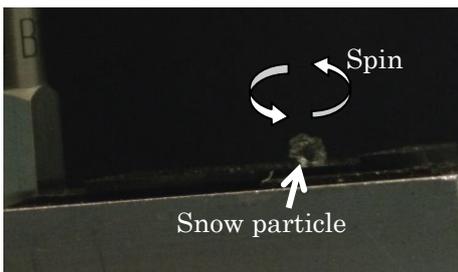


図 14 シート上の雪粒を撮影した動画のキャプチャー画像, 動画を詳細に観察すると雪粒がシート表面に直交する軸を中心とした回転をしていることが観察できた。

からはシートと雪粒の界面に水の発生は確認できなかった。しかしながら滑水性と滑雪性の傾向からかんがみるに, 入力された振動エネルギーなどにより雪粒とシート界面に液状の水が発生することが考えられ, これが雪粒の滑りに影響すると考えられる。雪粒のとシート界面に発生する水は非常に少量であることが考えられるため, 雪粒の移動距離は水滴に比べ小さくなったと考えられる。この点については今後より詳細な観察が必要となる。また図 14 中にも示したとおり動画を詳細に観察すると, 雪粒の滑り中にシート表面に対して直角となる軸を中心として雪粒が回転する様子が観察された。カーリングの回転と同様にメカニズムの詳細は分から

ないが, 振動加振と雪粒の形状によりシートと雪粒の真実接触部に摩擦力の大きい部分と小さい部分ができることで上記した回転が起こったと考えられる。この回転運動に振動エネルギーが消費されることも水膜の少なさと合わせて, 水滴よりも雪粒の移動距離が減少した原因の一つだと考えられる。

これまで雪粒と固体表面との滑り(せん断)について調査したものについては, 例えば阿部<sup>(4)</sup>や藤野ら<sup>(5)</sup>の報告がある。これらは高速で回転する固体表面上の雪粒のせん断力を測定しており, 雪粒の粒径やせん断速度とせん断力の関係を示している。しかしながら雪粒一粒一粒の挙動は複雑であり, 着雪や滑雪の問題を解決するためには, このような粒子一つ一つの詳細な観察が今後必要とされると考えられ, 本研究は一定の成果があったといえる。

#### 参考文献

- (1) Jonathan B. Boreyko and Chuan-Hua Chen, Restoring Super-hydrophobicity of Lotus with Vibration-Induced Dewetting Physical Review Letters, 103, (2009), 174502.
- (2) Kenji Yanagisawa, Kyoichi Oshida, Sung-Moo Song and Koh-ichi Sugimoto, Surface Pollution Control Technology of Photovoltaic System, The fourth international conference on Carbons for Energy Storage/Conversion and Environment Protection (CESEP'11), 135, (2011), 118.
- (3) Kenji Yanagisawa and Manabu Okada, Dynamic Hydrophobicity of Silicone Resin/VGCF Composite Sheet with Ultrasonic Vibration, 5TH World Tribology Congress (WTC 2013), (2013), PS02-01.
- (4) 阿部修, 回転円盤による雪粒子の剪断付着力の測定法, 雪氷, 69, 5 (2007) 601.
- (5) 藤野俊和, 丹羽泰紀, 阿部雅二朗, 安達聖, 上石勲, 友部恵太: 低温環境下高圧高速せん断時において雪の粒径が雪と SS400 材の摩擦および付着特性に及ぼす影響, 日本機械学会北陸信越支部第 53 期総会・講演会講演論文集, (2016) 217.

#### 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 6 件)

Kenji Yanagisawa, Dynamic Hydrophobicity of Silicone/ Carbon Composite Sheet with Surface Topography, Carbon 2015, 平成 27 年 7 月 12 日 - 平成 27 年 7 月 17 日, Dresden (Germany)

Kenji Yanagisawa, Evaluation of Topography on Silicone/ Carbon Composite Sheet with Low Drag Surface, International

Tribology Conference, Tokyo 2015, 平成 27 年 9 月 16 日 - 平成 27 年 9 月 20 日, 東京理科大学

柳澤憲史, 表面微細凹凸をもつシリコン/ VGCF 複合シートの動的はっ水性, トライボロジー会議 2015 春, 平成 27 年 5 月 27 日 - 平成 27 年 5 月 30 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター

関健吾, 柳澤憲史, 滑水性シリコン/ CNT 複合シートの滑水性に及ぼす振動加振の影響, 平成 28 年度高専 長岡技術科学大(機械系)教員交流研究集会技学セミナー, 平成 28 年 8 月 10 日, 長岡技術科学大学

柳澤憲史, 関健吾, 振動加振による滑水性シリコン/ VGCF 複合シートの開発, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 平成 28 年 9 月 12 日, 九州大学

土屋光喜, 柳澤憲史, 藤野俊和, 阿部雅二郎, 滑水性シリコン/ CNT 複合シートを用いた振動加振に伴う滑雪性と滑水性の比較, 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会・講演会, 平成 29 年 3 月 9 日, 金沢大学

## 6. 研究組織

### (1) 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