

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7日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760111

研究課題名（和文）低温高速環境下における雪と機械材料間のトライボロジー特性の解明

研究課題名（英文）Clarification of Tribology Characteristics between Snow and Mechanical Materials under Low Temperature and High Velocity Conditions

研究代表者

藤野 俊和（FUJINO TOSHIKAZU）

長岡技術科学大学・工学部・助教

研究者番号：70508514

研究成果の概要（和文）：除雪機械等の合理的かつ効率的な設計開発において渴望されている、「低温」環境のもと互いに「高速せん断」する条件下における雪と機械材料間および雪内部のトライボロジー特性を解明することを目的に、低温条件下でかつ高速負荷時において雪と機械材料間および雪内部のせん断特性を計測できる環状せん断特性実験解析システムを独自に設計開発した。この実験解析システムより雪のトライボロジー特性、特に摩擦および付着または粘着特性を解析した。雪質およびせん断速度の変化による摩擦係数および単位面積当たりの付着力または粘着力の変化特性を明らかにし考察した。

研究成果の概要（英文）：To design and develop more effective and efficient snow removal machines, clarification of the tribology characteristics between snow and mechanical materials and in snow is necessary under low temperature and high shearing velocity conditions. We originally designed and developed an annular shearing type experimental analysis system that can measure shearing characteristics between snow and mechanical materials and in snow under those conditions. The tribology characteristics, especially the characteristics of friction and adhesion/cohesion between snow and mechanical materials, as well as in snow itself, were analyzed by using this experimental analysis system. The variations of friction coefficient and adhesion/cohesion force per unit area with the snow type and the shearing velocity were clarified and discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成22年度	700,000	210,000	910,000
平成23年度	2,200,000	660,000	2,860,000
平成24年度	100,000	30,000	130,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー、雪氷、機械材料、特殊環境、流体

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の社会的背景

国土の約6割を占める積雪寒冷地域において、少子高齢化社会に突入し、人力除雪範囲の縮小、熟練機械運転者不足により、機械による除雪範囲の拡大および除雪の質の向

上が強く求められている。この要望を受け、機械の投入範囲が歩道除雪の推進に見られるように拡大されつつあり、今後ますます除雪のための機械の稼動範囲は拡大するものと思われる。図1～図3に示すような各種の除雪機械等の設計開発はほとんど経験則に



図1 プラウ除雪機械



図2 ロータリ除雪機械



図3 ゲレンデ整備車

基づいて行われており、合理的かつ効率的な設計開発がなされているとは言い難い。その最大の原因は、雪を機械的に除去する際に必然的に生じる雪がせん断変形から破壊に至るまでの作業装置と雪あるいは雪と雪の動的相互作用、特にトライボロジー特性が全く解明されていないためである。

(2) 研究の学術的背景

雪に関するトライボロジー特性として、摩擦に関する最近の代表的研究に、海外では Tiefenbacher らの「Experimental devices to determine snow avalanche basal friction and velocity profiles⁽¹⁾」がある。国内では千葉らの「振動による屋根雪の摩擦抵抗力と構造体の応答特性に関する実験的研究⁽²⁾」がある。前者は雪崩が生じる際の雪の進行速度と積雪層の破断面における動摩擦係数を実験的に求めている。後者は、振動による屋根雪の滑動と屋根材料との動的相互作用が木造家屋の地震応答に及ぼす影響を明らかにする基礎研究として、加振した屋根材料と雪のすべり面に発生する摩擦力を測定している。このほかにも土木工学や建築工学あるいは基礎自然科学の分野において、いわゆる静

止構造物と雪のトライボロジー特性を研究したものはかなりある。しかし、これら静止構造物を対象にした研究では静止か低速条件下でのトライボロジー特性を調べている。除雪機械等で問題となる高速条件下におけるトライボロジー特性、特に摩擦および粘着特性に関する関連研究は全くなく、その解明が長きに渡り切望されている。この際、除雪機械等の設計開発への応用を考え、それらの機械の使用条件としての「低温」環境の実現も重要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、除雪機械等の合理的かつ効率的な設計開発において渴望されている「低温」環境のもと互いに「高速せん断」する条件下における雪と機械材料間および雪内部のトライボロジー特性を解明することである。

3. 研究の方法

本研究の目的である、「低温」環境のもと互いに「高速せん断」する条件下における雪と機械材料間および雪内部のトライボロジー特性を解明するために、低温条件下でかつ高速負荷時において雪と機械材料間および雪と雪のせん断特性を計測できる環状せん断特性実験解析システムを独自に設計開発する。低温環境下での実験解析を、設計開発した環状せん断特性実験解析システムを独立行政法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センター所有の恒温室内に設置し実施する。

実験では、除雪機械等にて破壊を繰り返すことによって流動する雪の特性解析において、最も重要である摩擦および粘着特性を高精度に求めることに留意する。この際、雪の構成の違いによる影響以外に、せん断面押し付け圧力およびせん断速度の影響も検討し考察する。せん断界面における水の発生や流動等の現象を高速度ビデオカメラによって撮影、観察しトライボロジー特性との相関関係を解析し考察する。

また、実験者によらず再現性、信頼性の高い実験結果を得るための標準的実験解析方法を構築する。

4. 研究成果

(1) 環状せん断特性実験解析システムの構築

図4に独自に設計開発した環状せん断特性実験解析システムの全体、図5にせん断部の詳細、図6に下部せん断リングをそれぞれ示す。上部せん断リングは固定とし、実験装置最上部に設置されたエアシリンダを用いてせん断ケース内の雪試料に垂直力を負荷する。下部せん断ケース底面に設置された下部せん断リングを AC サーボモータで駆動し

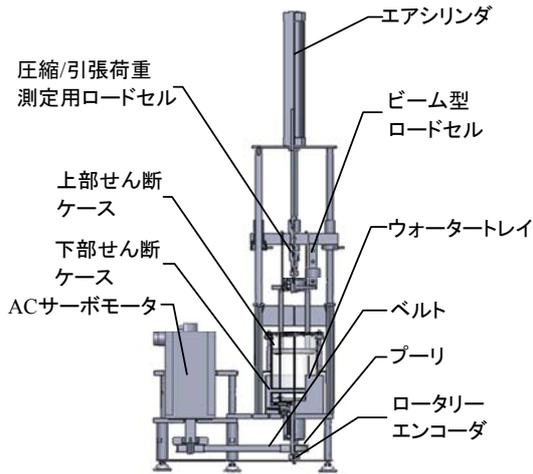


図4 環状せん断特性実験解析システム外観

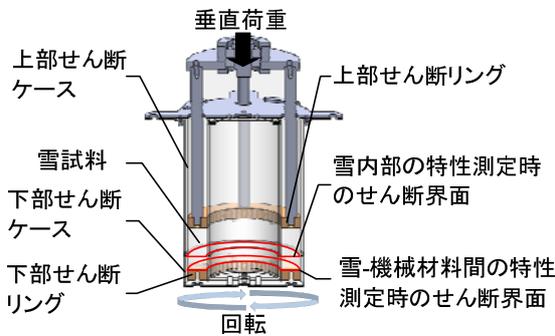


図5 実験解析システムせん断部詳細

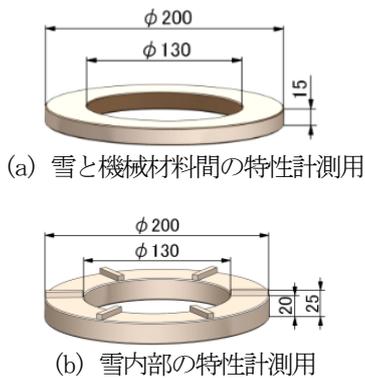


図6 下部せん断リング

回転させることにより雪と機械材料間あるいは雪にせん断力を負荷する。

下部せん断リングは、雪と機械材料間の特性計測時には図6(a)に示す形状のものを、雪内部の特性計測時には図6(b)に示す形状のものをそれぞれ使用した。上部せん断リングと図6(b)に示す下部せん断リングには、雪試料全体がすべり回転することを防ぐた

めにすべり止めブラシを設けた。上部および下部せん断ケースは亚克力板で製作し、雪と機械材料間および雪内部のトライボロジー特性を生み出す現象を高速ビデオカメラにて撮影、観察し解析した。

雪試料に負荷する垂直力は引張圧縮荷重用ロードセルを用いて計測した。せん断力を負荷する際に生じる回転速度は、下部せん断リング下に設置したロータリーエンコーダにより、上部せん断リングに生じるせん断抵抗力(摩擦力および粘着力)は、上部せん断リングに設置したビーム型ロードセルによりそれぞれ計測した。

雪を高速でせん断すると大量の水が発生するため、せん断部の下部にウォータートレイを設置し防水対策を施した。実験解析システムで使用する機器およびセンサ類は低温環境下において使用できるものを選定した。

(2) 標準的実験解析方法の構築

図7に構築した標準的実験解析方法のフローチャートを示す。図7中の工程②の自然積雪の断面観測ならびに工程③の雪試料の採取は「(社)日本雪氷学会：積雪観測ガイドブック⁽³⁾」に基づき実施した。構築した標準的実験解析方法より、再現性があり信頼性の高い実験データを得られる。

(3) トライボロジー特性の実験解析による説明

① 条件

雪試料は、屋外にある機械除雪の対象となる自然積雪から、新雪、しまり雪およびざらめ雪を採取し解析対象とした。図8に雪試料の外観を示す。雪質は雪の国際分類「UNESCO: International classification for seasonal snow on the ground⁽⁴⁾」に基づき粒径より判断した。雪試料の密度は内容積一定の容器に雪試料を充填し、質量を計測することにより求めた。雪試料の含水率は遠藤式含水率測定計にて、雪試料温度はデジタル式温度計にてそれぞれ計測した。雪試料の硬度はデジタル荷重測定器(プッシュゲージ)にて計測した。表1に雪試料の物性を示す。

雪と機械材料間の特性計測時に使用した機械材料はSS400、雪との接触面における表面粗さは、算術平均粗さRaにて平均0.29 μ mであった。

独自に設計開発した環状せん断特性実験解析システムを使用して、雪と機械材料間および雪内部のトライボロジー特性を解明するための実験を、恒温室内において $-5.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の低温環境のもと、垂直圧力20~60kPa、せん断速度0.5~25.0m/sの高速条件下にて実施した。雪質、垂直荷重およびせん断速度が同一である条件下で3回実験した。

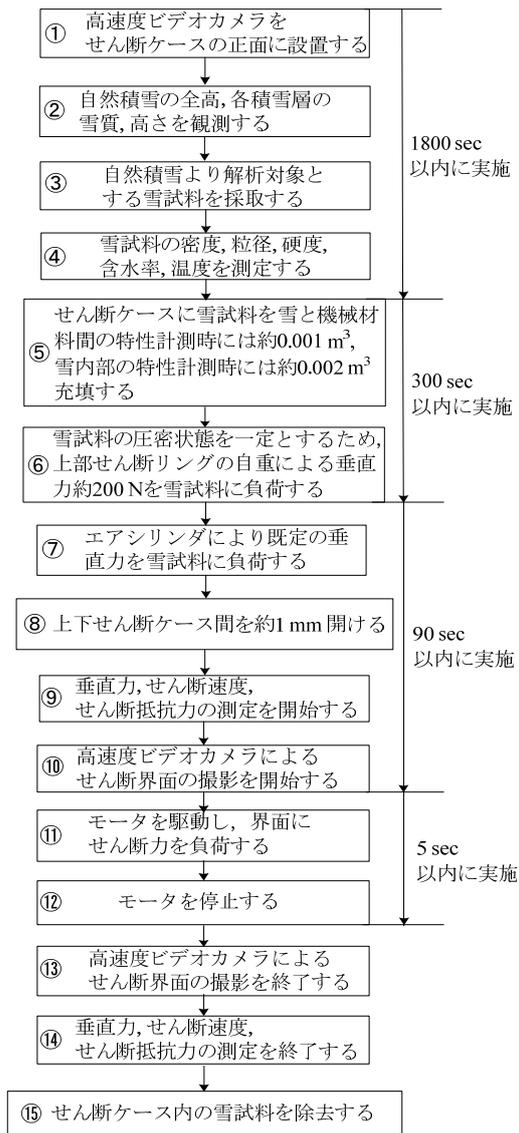


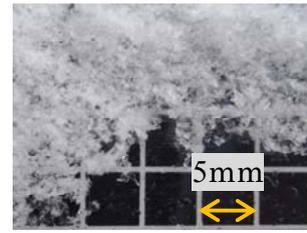
図7 標準的実験解析方法のフローチャート

② 概要

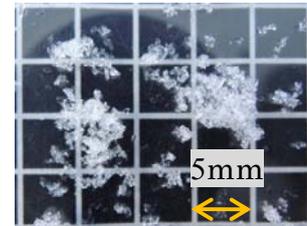
図9に、ざらめ雪と機械材料間の垂直応力 σ_n 、せん断速度 v_s およびせん断抵抗応力 τ の時間変化を示す。

過渡状態はせん断開始からせん断速度がほぼ一定に達するまでの状態と定義した。定常状態はせん断速度がほぼ一定である状態と定義した。過渡状態における最大せん断抵抗応力 τ_{max} は計測された最大せん断抵抗力 F_{tmax} より、定常状態における平均せん断抵抗応力 τ_s は計測された平均せん断抵抗力 F_{tav} より、後藤らの「改良リングせん断試験機の試作とその性能⁽⁵⁾」に示された方法に基づきそれぞれ得た。

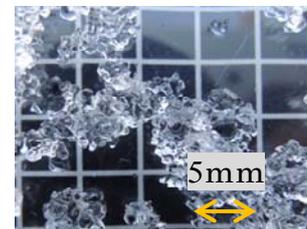
図10に過渡状態における最大せん断抵抗応力 τ_{max} と τ_{max} が生じるときの垂直応力 σ_t の関係および定常状態における平均せん断抵



(a) 新雪



(b) しまり雪



(c) ざらめ雪

図8 雪試料の外観

表1 雪試料の物性値

雪質	新雪	しまり雪	ざらめ雪
密度[kg/m ³]	67~ 86	196~ 252	387~ 431
粒径[mm]	非常に 細かい	0.5~ 1.0	2.0~ 5.0
硬度[kPa]	7.4~ 8.3	15.8~ 17.1	7.9~ 100.4
含水率[%]	0.0~ 7.7	0.0~ 6.6	10.1~ 21.2
温度[°C]	-0.5~ 0.0	-0.1~ 0.0	0.0

抗応力 τ_s と平均垂直応力 σ_s の関係を示す。過渡状態における雪の摩擦係数 μ_{mt} または μ_{st} および単位面積あたりの付着力 c_{at} または粘着力 c_{ct} は、最大せん断応力 τ_{max} と垂直応力 σ_t の関係、定常状態における雪の摩擦係数 μ_{ms} または μ_{ss} および単位面積あたりの付着力 c_{as} または粘着力 c_{cs} は平均せん断応力 τ_s と平均垂直応力 σ_s の關係に、以下に示すモールドの破壊基準則を適用し求めた。

$$\tau_{max} = c_{at} (\text{or } c_{ct}) + \mu_{mt} (\text{or } \mu_{st}) \cdot \sigma_t \quad (1)$$

$$\tau_s = c_{as} (\text{or } c_{cs}) + \mu_{ms} (\text{or } \mu_{ss}) \cdot \sigma_s \quad (2)$$

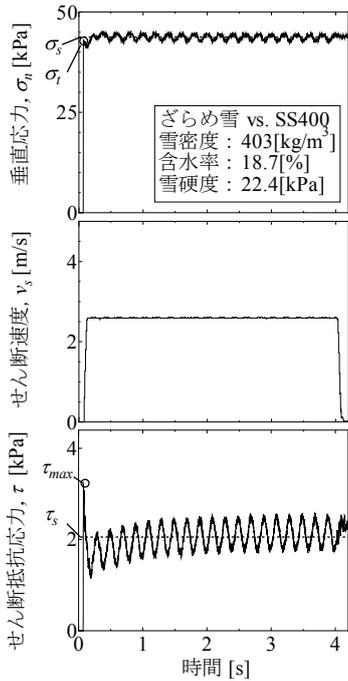


図9 垂直応力, せん断速度, せん断抵抗応力の時間変化

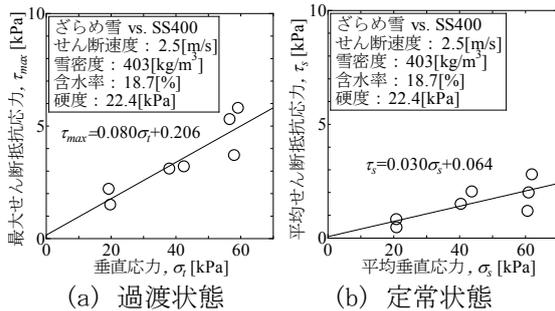


図10 せん断抵抗応力と垂直応力の関係

③ 雪と機械材料間のトライボロジー特性

図11および図12に雪とSS400の間の過渡状態における摩擦係数 μ_{mi} および単位面積あたりの付着力 c_{at} 、定常状態における摩擦係数 μ_{ms} および単位面積あたりの付着力 c_{as} をそれぞれ示す。

表1よりざらめ雪の含水率はしまり雪のそれより大きい。さらに雪とSS400のせん断界面の高速度ビデオカメラによる撮影、観察より、せん断による水の発生が確認された。発生した水は雪とSS400のせん断界面において潤滑剤として作用するので、図11(a)と図12(a)に示すように、過渡状態および定常状態において、同せん断速度ではざらめ雪の摩擦係数 μ_{mi} と μ_{ms} はしまり雪のそれより小さくなると考えられる。

図11(b)と図12(b)に示すように、せん断速度が小さくなるにつれて、過渡状態および

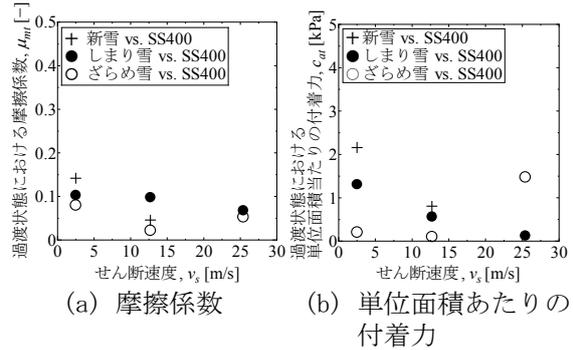


図11 過渡状態における雪と機械材料間のトライボロジー特性

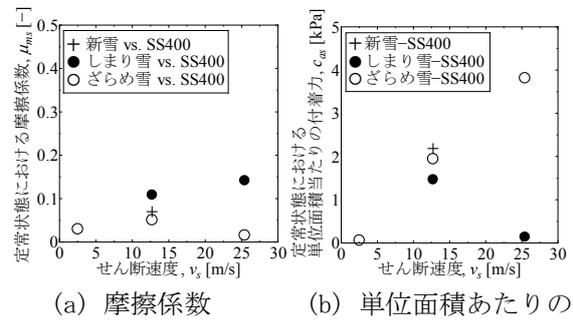


図12 定常状態における雪と機械材料間のトライボロジー特性

定常状態におけるざらめ雪の単位面積あたりの付着力 c_{at} と c_{as} は小さくなる傾向にある。一方、しまり雪の単位面積あたりの付着力 c_{at} と c_{as} は逆の傾向を示した。

新雪の摩擦係数および単位面積当たりの付着力は、新雪の特性が時間とともに急激に変化したため、過渡状態においてはせん断速度 2.5 および 12.7 m/s の条件を除き、定常状態においてはせん断速度 12.7 m/s の条件を除き正確に測定することができなかった。

④ 雪内部のトライボロジー特性

図13および図14に雪内部の過渡状態における摩擦係数 μ_{st} と単位面積あたりの粘着力 c_{ct} および定常状態における雪の摩擦係数 μ_{ss} と単位面積あたりの粘着力 c_{cs} をそれぞれ示す。

図13(a)および図14(a)より、せん断速度が小さくなるにつれて、過渡状態および定常状態における摩擦係数 μ_{st} と μ_{ss} は大きくなった。これは、Maenoらの「Adhesion shear theory of ice friction at low sliding velocities, combined with ice sintering⁽⁶⁾」に示されているように、せん断速度が小さい場合、接触時において雪の構成物質の一つである氷粒子同士がせん断界面で焼結することにより氷粒子の粘着部が大きくなるため

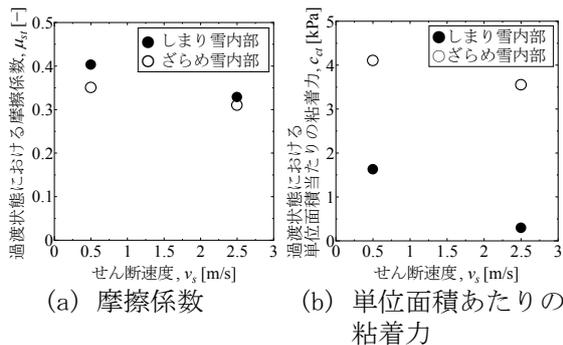


図 13 過渡状態における雪内部のトライボロジー特性

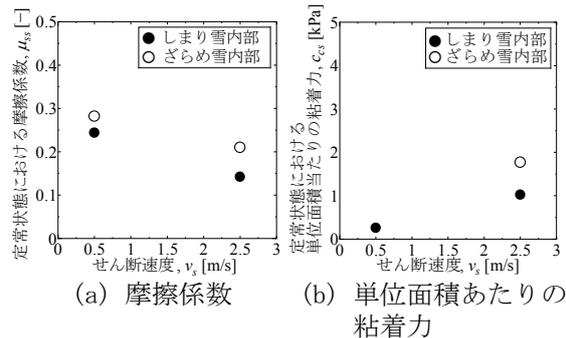


図 14 定常状態における雪内部のトライボロジー特性

と考えられる。

図 13(b)より、せん断速度が小さくなると過渡状態における単位面積当たりの粘着力 c_{ca} は大きくなった。一方、図 14(b)より定常状態における単位面積当たりの粘着力 c_{cs} は、せん断速度が小さくなるとともに小さくなった。

(4) まとめ

独自に設計開発した環状せん断特性実験解析システムを使用して、雪と SS400 間および雪内部のトライボロジー特性を解析し、雪質およびせん断速度の変化による摩擦係数および単位面積当たりの付着力または粘着力の変化傾向を示した。

今後は、雪質および雪粒子の形状や寸法のほか、密度や含水率などの違いが摩擦係数や付着力または粘着力などの雪のトライボロジー特性に及ぼす影響について詳細に解析し考察するとともに、高速条件下を含めせん断速度の影響に関する解析をより詳細に実施していく予定である。

本研究による実験解析結果や考察は、各種除雪機械の合理的かつ効率的な設計開発に寄与すると考えられる。

参考文献

- (1) Tiefenbacher, F. and Kern, M. A., Experimental devices to determine snow avalanche basal friction and

velocity profiles, Cold Regions Science and Technology, No. 38, pp. 17-30, 2004.

- (2) 千葉隆弘ら, 振動による屋根雪の摩擦抵抗力と構造体の応答特性に関する実験的研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 81, pp. 39-42, 2008.
- (3) (社)日本雪氷学会, 積雪観測ガイドブック, 朝倉書店.
- (4) UNESCO, International classification for seasonal snow on the ground, Technical Documents in Hydrology, No. 83, 2009.
- (5) 後藤昭博ら, 改良リングせん断試験機の試作とその性能, 粉体工学会誌, 21(3) pp. p131~136, 1984.
- (6) Maeno, N. and Arakawa, M., Adhesion shear theory of ice friction at low sliding velocities, combined with ice sintering, Journal of Applied Physics Vol. 95, No. 1, pp. 134-139, 2004.

謝辞

本研究の遂行にあたりご指導とご鞭撻を賜った長岡技術科学大学大学院技術経営研究科教授阿部雅二郎先生ならびに(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター長上石勲先生に感謝の意を表します。実験装置の製作に際してご指導を賜りました(株)永島工機の社員の皆様ならびに(株)パルメソ松原亨氏に御礼申し上げます。

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 2 件)

- ① Toshikazu Fujino, Masajiro Abe, Daiju Okano, Taruho Sen, Isao Kamiishi, Katsumi Iwamoto, Tribological characteristics between snow and mechanical materials and in snow, World Tribology Congress 2013 (WTC2013), 平成 25 年 9 月 8 日-平成 25 年 9 月 13 日, Torino (Italy), 発表予定.
- ② 藤野俊和, 阿部雅二郎, 仙尊帆, 丸藤皓平, 岩本勝美, 雪と機械材料および雪内部のトライボロジー特性 -環状せん断特性実験解析システムの構築-, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2012 秋 北海道室蘭, 平成 24 年 9 月 17 日, 室蘭工業大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤野 俊和 (FUJINO TOSHIKAZU)
長岡技術科学大学・工学部・助教
研究者番号: 70508514