

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870212

研究課題名(和文)低温環境下高圧高速せん断時の雪の摩擦および粘着特性とその発現メカニズムの解明

研究課題名(英文) Clarification of Friction and Adhesion Characteristics of Snow and Their Expression Mechanism in High Shearing Velocity under High Pressure and Low Temperature Conditions

研究代表者

藤野 俊和 (FUJINO, TOSHIKAZU)

東京海洋大学・学術研究院・助教

研究者番号：70508514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、除雪機械等の合理的かつ効率的な設計開発に求められている「低温」環境のもと互いに「高圧接触」、「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摩擦および付着・粘着特性を解明することを目的に、雪と機械材料間および雪内部のせん断特性を計測可能な「環状せん断特性実験解析システム」をせん断界面における水の発生や流動等の高速かつマイクロな現象を高精細に撮影・観察し解析することも可能なシステムに高度化した。さらに制御された低温環境下で実験解析するための環境システムを構築した。それらシステムを用いて、雪と機械材料間および雪内部の摩擦および付着・粘着特性を実験解析により解析して考察した。

研究成果の概要(英文)：To design and develop more effective and efficient snow removal machines, clarification of friction and cohesion/adhesion characteristics between snow and mechanical materials and in snow is necessary in high shearing velocity under high pressure and low temperature 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 to the system that can shoot and observe a high speed and micro phenomenon such as generating and a flow of water between snow and mechanical materials and in snow with high definition. We created an environmental system for conducting experiment analysis under the controlled low temperature condition. The characteristics of friction and adhesion/cohesion between snow and mechanical materials, as well as in snow itself, were analyzed by using these experimental analysis systems.

研究分野：工学

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特別地域において、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働範囲は拡大するものと思われる。ロータリ除雪機械をはじめとする雪を扱う機械等の性能向上ならびに安全性革新に係る技術開発は停滞期にある。その原因は、経験則に基づく技術開発の行き詰まりにある。発達が進んでいる動的シミュレーション解析技術の導入が、行き詰まり打破に期待されている。

(2) 研究の学術的背景

研究代表者らは、これまでに雪と機械が複雑かつ高速に動的相互作用するロータリ除雪機械を対象に、その性能向上と安全性革新に係る技術開発に不可欠な雪の三次元高速流動状況と機械への負荷特性を高精度かつ動的にシミュレーション解析できる方法を構築してきた。図1にロータリ除雪の動的シミュレーション解析モデルを示す。しかし、この除雪機械の動的シミュレーション解析方法の構築を阻害する中核的問題に「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雪と作業装置あるいは雪と雪の動的相互作用、特に摩擦および付着・粘着特性の未知」がある。

雪の摩擦に関する最近の代表的研究に、国内では伊東らの研究⁽¹⁾がある。鋼板表面に石粒を樹脂付着させた屋根葺材の雪止め性能を評価するために、表面形状が異なる3種類の石粒仕上げの屋根葺材と雪の動摩擦係数を実験的に求めている。このほか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間の摩擦および付着特性を研究したものはかなりある。これら静止構造物を対象とした研究では静止もしくは低速条件下での摩擦および付着特性を調べている。海外ではCasassaらの研究⁽²⁾がある。雪および氷の摩擦力を測定した注目すべき研究であるが、低荷重条件下のみについて解析されている。本研究対象である除雪機械等で問題となる高速せん断かつ高

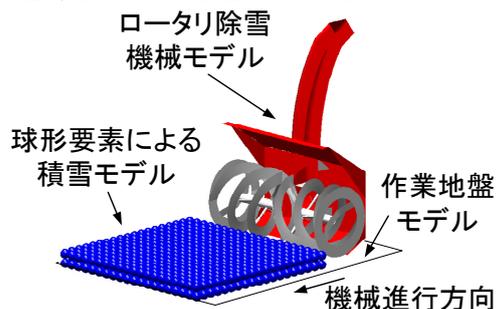


図1 ロータリ除雪の動的シミュレーション解析モデル

負荷条件下における雪の摩擦および付着・粘着特性に関する関連研究はなく、その解明が望まれている。特性解明時には、温度環境の異なる各地で使用される除雪機械等の設計開発への応用を考慮すると、それら機械の使用条件に応じて制御した「低温」環境の実現も重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、除雪機械等の性能向上と安全性を合理的に革新するため、その基盤として活用できる動的シミュレーション解析方法の構築において渴望されている、「低温」環境のもと互いに「高圧接触」、「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摩擦および付着・粘着特性を解明することである。この際、雪のせん断界面における高速かつミクロな現象を精細に観察し解析することにより、せん断界面における現象と雪の摩擦および付着・粘着特性の相関関係を明らかにする。

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「高圧接触」、「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摩擦および付着・粘着特性を解明するために、JSPS 科研費 22760111 の支援を受け基盤を構築した、雪と機械材料間および雪内部のせん断特性を計測可能な「環状せん断特性実験解析システム」をせん断界面における水の発生や流動等の高速かつミクロな現象を高精細に撮影・観察し解析することも可能なシステムに高度化する。さらに制御された低温環境下で実験解析するための環境システムも構築する。独自に設計開発し高度化した環状せん断特性実験解析システムを用いて、雪と機械材料間および雪内部の摩擦および付着・粘着特性の本格解明を推進する。

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、せん断速度の影響以外に、雪の粒子直径および含水率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高速かつミクロな現象を高速度ビデオカメラにより撮影、観察する。

4. 研究成果

(1) 環状せん断特性実験解析システムの高度化

図2に設計開発し高度化した環状せん断特性実験解析システムの全体、図3にせん断部の詳細を示す。図4に下部せん断リングを示す。図3に示すように、アクリル製の内側せん断ケースと外側せん断ケースの間（以下、せん断ケース内と称する）に雪試料を充填する。その際、外側せん断ケース側面をハンマーにて打撃することにより、雪試料を均一に

表1 撮影条件

カメラユニット	DITECT : HAS-L1
レンズユニット	SELMIC : SE-M1Z
解像度 [pixel]	H400×W300
フレームレート [fps]	1000
シャッタースピード[s]	1/2500
撮影範囲 [mm]	H12×W8

シリンダにて上部せん断リングを介してせん断ケース内の雪試料に垂直力を負荷する。せん断ケース底面に設置された下部せん断リングを AC サーボモータにて駆動し回転することにより雪と機械材料間および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 4(a)に示す形状のものを、雪内部の特性計測時には図 4(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 4(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。

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の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、雪試料と機械材料または雪試料の間に生じるせん断抵抗力（摩擦力および付着・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。雪のせん断界面における水の発生や流動等の高速かつミクロな現象を高速ビデオカメラにて撮影し観察した。表 1 に高速ビデオカメラの主要諸元および撮影条件を示す。

(2) 実験環境システムの構築

図 5 に構築した実験環境システムを示す。-10℃から 5℃までの範囲で温度制御が可能な低温室内に環状せん断特性実験解析システムを設置して、低温環境下における雪と機械材料間および雪内部の摩擦および付着・粘着特性の解明実験を行う環境システムを構築した。実験解析のほかに、雪試料の観察、降雪期間以外の雪試料の保存にも活用できる。実験解析で使用する機器およびセンサ類はこの低温環境下において使用できるものを選定した。

(3) 雪の摩擦および付着・粘着特性の実験解析による解明

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採取し、雰囲気温度 $-4\pm 1^{\circ}\text{C}$ に制御された低温室内で6ヶ月から9ヶ月の間保存したざらめ雪⁽³⁾を解析対象とした。この雪試料を回転式の粉碎機により粉碎した後、ふるいにかけることで粒径範囲を揃えて実験に供した。使用したふるいの目開き W は 0.55mm, 0.85mm, 1.70mm, 2.00mm, 2.36mm および 3.35mm である。図 6 に、2.36mm の目開きを通過し 1.70mm の目開きを有するふるい

に留まった雪粒子の一例を示す。本研究では、ある粒径範囲を有する雪試料の粒子の大きさを表す代表寸法として個数中位径 d_{50} ⁽⁴⁾を用いた。これは個数基準粒度分布において累積率 50%における粒子径である⁽⁴⁾。この d_{50} は、図 6 に一例を示す雪粒子の画像データから画像解析ソフトウェア「ImageJ」により各

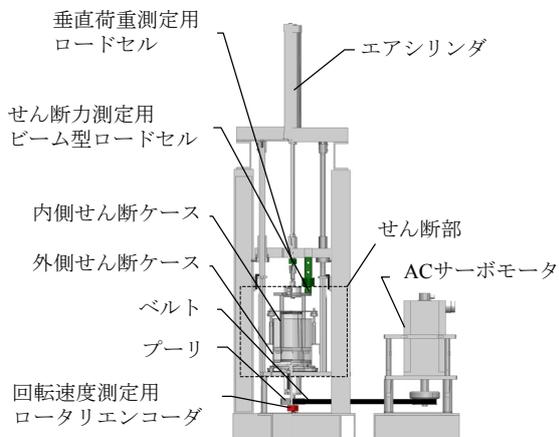


図2 環状せん断特性実験解析システム

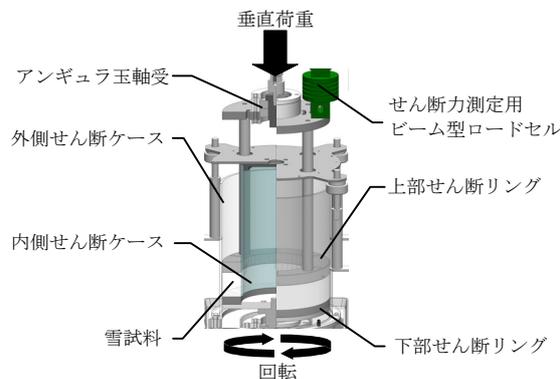
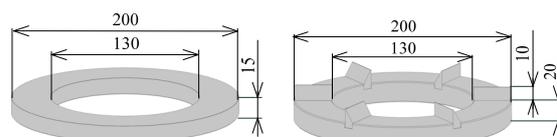


図3 実験解析システムせん断部詳細



(a) 雪と機械材料間の特性計測用 (b) 雪内部の特性計測用

図4 下部せん断リング



図5 実験環境システム

粒子の円相当径 $d_4^{(4)}$ とその個数を求め、個数基準粒度分布を作成し得た。図 7 に、各雪試料の個数基準粒度分布をまとめて示す。図 7 より、各試料の d_{50} はそれぞれ 2.9mm, 2.4mm, 1.8mm および 1.0mm となった。試料のかさ密度 $\rho_s^{(4)}$ は、試料を実験解析システムのせん断ケース内に充填する直前に電子天秤にて計測された試料質量と、せん断ケース内に充填された試料の体積より求めた。試料温度 T_s は、試料をせん断ケース内に充填する直前にデジタル式温度計にて計測した。試料の含水

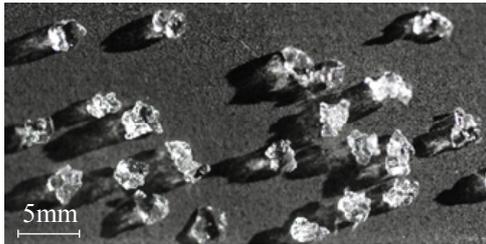


図 6 2.36mm の目開きを通過し 1.70mm の目開きを有するふるいに留まった雪粒子の一例

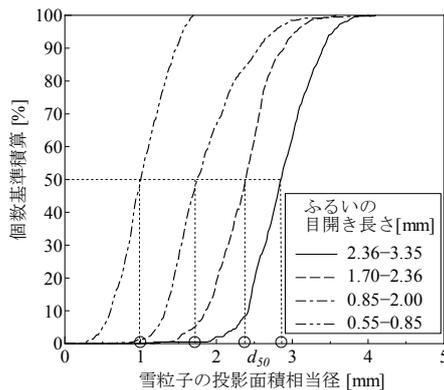


図 7 雪試料の個数基準粒度分布

率 θ_w は、計測された T_s が水の融点(氷点:0°C)を下回ったため 0% と評価した。図 13 および図 14 に示す初期含水率が 10% から 30% の各雪試料は、この θ_w が 0% の雪試料に概ね 0°C の水を混合させて作成したものである。

雪と機械材料間の特性計測時に使用した機械材料は SS400 である。図 4 (a) に形状と寸法を示す。雪との接触面における表面粗さは、触針式表面粗さ計 (小坂研究所: Surfcoorder SE300) にて半径方向に 4 箇所測定し算術平均して得た。雪との接触面における接触角 θ は、JIS R 3257:1999; 基板ガラス表面のぬれ性試験方法⁽⁵⁾ に記載の静滴法にて 5 箇所測定し算術平均して得た。表 2 に実験条件の一覧を示す。

② 概要

図 8 (a) に過渡状態における雪と SS400 材の間のせん断応力 $\tau^{(6)}$ の最大値 τ_{max} とこれが生じた際の垂直圧力 σ_r の関係、図 8 (b) に定常状態における雪と SS400 材の間のせん断応力 $\tau^{(6)}$ の平均値 τ_s と垂直圧力の平均値 σ_s の関係を示す。せん断開始からせん断速度が一定に達するまでの間を過渡状態、せん断速度が一定である間を定常状態と定義した。過渡状態および定常状態における摩擦係数および単位面積当たりの付着力は、図 8 (a) に示す $\tau_{max} - \sigma_r$ 線図および図 8 (b) に示す $\tau_s - \sigma_s$ 線図に、

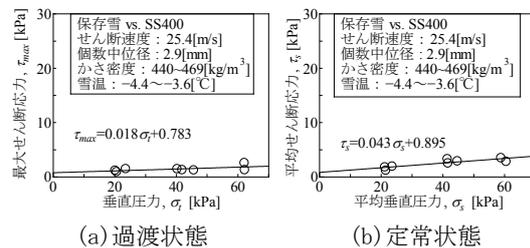


図 8 せん断抵抗応力と垂直圧力の関係

表 2 実験解析条件

雰囲気 (低温室内)	温度: T_a [°C]	-4.0 ± 1.0			
	湿度: RH [%]	50~70			
雪	雪質	ざらめ雪			
	個数中位径: d_{50} [mm]	1.0	1.8	2.4	2.9
	充填質量: m [kg]	0.4	0.4	0.4	0.4
	かさ密度: ρ_s [kg/m ³]	469~490	469~512	459~469	440~469
	含水率: θ_w [%]	0	0	0	0
	温度: T_s [°C]	-3.3	-4.0	-3.3	-3.8
機械材料	材質	SS400			
	雪との接触面における算術平均粗さ: Ra [μ m] (半径方向)	0.736			
	雪との接触面における表面うねり: Wa [μ m] (半径方向)	0.384			
	雪との接触面における接触角: θ [°]	74.9			
負荷条件	垂直圧力: σ_n [kPa] (垂直荷重: F_n [N])	10, 20, 40, 60 (200, 360, 720, 1080)			
	回転中心から半径 r : 0.81[m] における定常せん断速度: v_s [m/s]	2.5, 25.4			
	過渡状態におけるせん断加速度: α [m/s ²]	50.8			

次式によって表されるモール・クーロンの破壊基準則⁽⁷⁾を適用し求めた。

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

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

ここで、 μ_{mt} 、 μ_{st} および c_{at} 、 c_{ct} は過渡状態における摩擦係数と単位面積当たりの付着力または粘着力、 μ_{ms} 、 μ_{ss} および c_{as} 、 c_{cs} は定常状態における摩擦係数と単位面積当たりの付着力または粘着力である。

③ 雪とSS400材の摩擦および付着特性

図9に μ_{mt} と c_{at} 、図10に μ_{ms} と c_{as} の解析結果をそれぞれ示す。図9および図10の横軸は、雪試料の個数中位径 d_{50} である。過渡状態および定常状態において、同一 d_{50} 値で比較すると、せん断速度 v_s が25.4m/sの場合の μ_{mt} と μ_{ms} および c_{at} と c_{as} は、 v_s が2.5m/sの場合のそれらより大きい。 v_s が2.5m/sの場合、 d_{50} が変化しても μ_{mt} と μ_{ms} および c_{at} と c_{as} は大きく変化しない。一方、 v_s が25.4m/sの場合、 d_{50} が大きくなると μ_{mt} と μ_{ms} および c_{at} と c_{as} は小さくなる。

これらの解析結果について考察するために、雪粒子とSS400材の接触状態の解析と、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て撮影し観察した。接触状態の解析では、雪試料とSS400材の間に圧力測定フィルム（面積 $A: 960\text{mm}^2$ ）を設置し、垂直圧力40kPaにて雪試料に垂直力を負荷した。圧力測定フィルムは雪粒子とSS400材が接触した領域が変色する。図11の(a)は d_{50} が1.0mmの雪試料とSS400材の接触状態を、同図(b)は d_{50} が2.9mmの雪試料と

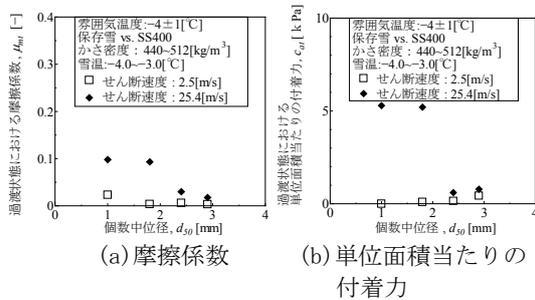


図9 過渡状態における雪とSS400材の摩擦係数および単位面積当たりの付着力と個数中位径の関係

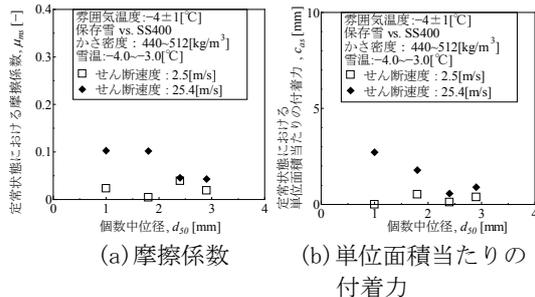


図10 定常状態における雪とSS400材の摩擦係数および単位面積当たりの付着力と個数中位径の関係

SS400材の接触状態を示す。図11において、雪粒子とSS400材が接触した領域が黒色で示されている。黒色で表示された接触領域の面積の総和 A_r を画像解析ソフトウェア「ImageJ」にて解析したところ、 d_{50} が1.0mmの雪試料とSS400材の接触面積率 $A_r (=A_r/A)$ は2.6%、 d_{50} が2.9mmの雪試料とSS400材の A_r は1.8%となった。すなわち、同一垂直力を負荷した場合、雪試料の個数中位径が大きくなると、雪粒子とSS400材の接触領域の面積の総和は小さくなる。せん断速度が大きいほど、単位時間当たりにより多くの雪粒子がSS400材と接触するので、雪試料の個数中位径の増加に伴う接触総面積の減少は、せん断速度が大きいほど雪の摩擦および付着特性の変化により大きな影響を及ぼすと考えられる。さらに図12に示す高速度ビデオカメラにて撮影した雪のせん断界面の映像によると v_s が25.4m/s、 d_{50} が2.9mmの場合、雪とSS400材の界面において青色で囲まれた領域に摩擦熱による雪の融解水が確認された。この融解水は潤滑剤の役割を果たすと考えられる。以上のことから図9および図10において、せん断速度が大きい v_s が25.4m/sのとき、 d_{50} が大きくなると μ_{mt} 、 μ_{ms} および c_{at} 、 c_{as} は小さくなったと考えられる。

図13と図14に過渡および定常状態における μ_{mt} および μ_{ms} と初期含水率 w_0 の関係を示す。図13より v_s が2.5m/sおよび25.4m/sいずれにおいても、 w_0 が大きくなると μ_{mt} も大きくなる傾向がある。これは w_0 の増加に伴いせん

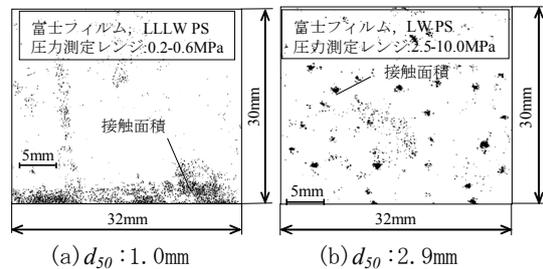


図11 垂直圧力40kPa負荷時の雪とSS400材の接触状態

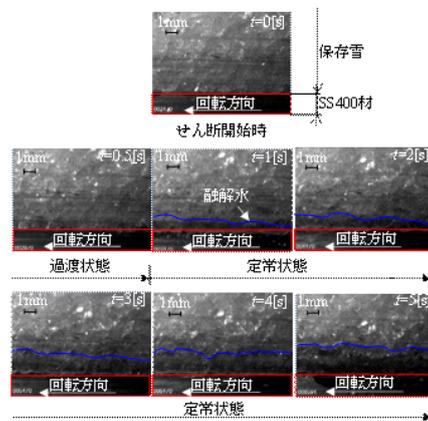


図12 $v_s: 25.4\text{m/s}$ 、 $d_{50}: 2.9\text{mm}$ における雪とSS400材のせん断界面の状況

断界面近傍に存在する水の量が増えたためと考えられる. 図14より v_s が 2.5m/s の場合, w_0 が大きくなると μ_{ms} は大きくなるのに対して, v_s が 25.4m/s の場合には w_0 が変化しても μ_{ms} は大きく変化しない.

④ 雪内部の摩擦および粘着特性

図15と図16に過渡および定常状態における μ_{st} , μ_{ss} および c_{ct} , c_{cs} と d_{50} の関係を示す. v_s が 2.5m/s の場合, d_{50} が大きくなると μ_{st} と μ_{ss} および c_{ct} と c_{cs} はいずれも大きくなる. v_s が 25.4m/s の場合には, d_{50} が大きくなると μ_{st} および c_{ct} と c_{cs} は大きくなり, μ_{ss} は小さくなる.

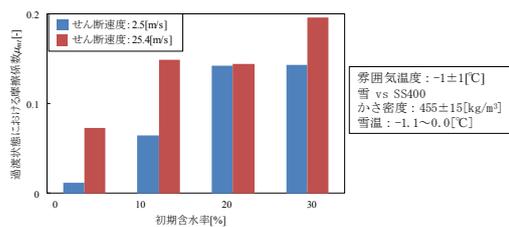


図13 過渡状態における雪とSS400材の摩擦係数と初期含水率の関係

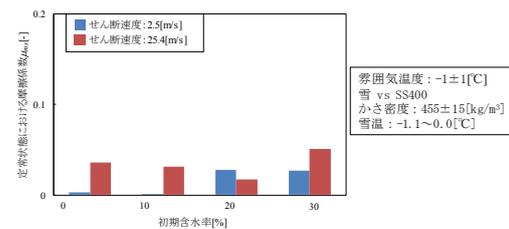


図14 定常状態における雪とSS400材の摩擦係数と初期含水率の関係

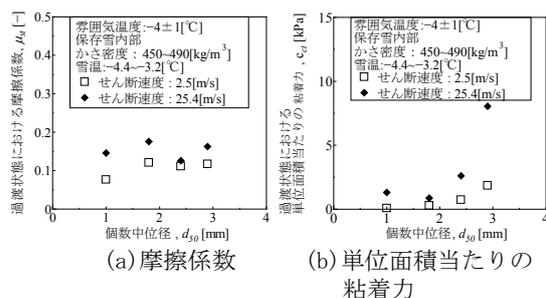


図15 過渡状態における雪内部の摩擦係数および単位面積当たりの粘着力と個数中位径の関係

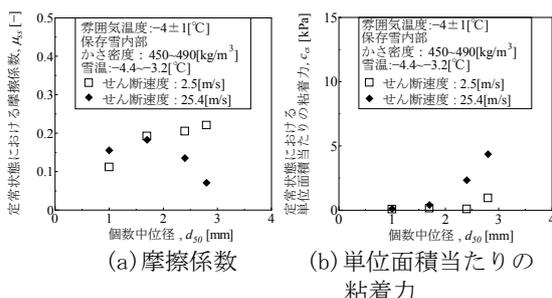


図16 定常状態における雪内部の摩擦係数および単位面積当たりの粘着力と個数中位径の関係

(4) まとめ

本研究では独自に設計開発し高度化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材の間および雪内部の摩擦および付着・粘着特性を解析し, せん断速度, 雪の粒子直径および含水率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, 雪質および雪の密度などの違いが摩擦および付着・粘着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, 雪界面の高速かつミクロな現象の精細観察と解析により摩擦および付着・粘着特性の発現メカニズムの解明にも挑む予定である.

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.

<引用文献>

- (1) 伊東敏幸, 苫米地司, 天然石粒塗装鋼板屋根の滑落雪抑止性能評価, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 84, 2011, 41-42.
- (2) Gino Casassa, Hideki Narita and Norikazu Maeno, Shear cell experiments of snow and ice friction, Journal of Applied Physics, Vol. 69, No. 6, 1991, 3745-3758.
- (3) UNESCO, International Classification for Seasonal Snow on the Ground, IHP-VII Technical Documents in Hydrology, No. 83, 2009.
- (4) 粉体工学の基礎編集委員会, 粉体工学の基礎, 日刊工業新聞, 1992.
- (5) JIS R 3257:1999, 基板ガラス表面のぬれ性試験方法, 1999.
- (6) 後藤昭博, 河村光隆, 松島弘輝, 綱川浩, 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, Vol. 21, No. 3, 1984, 131-136.
- (7) 前野紀一, 福田正己, 基礎雪氷講座 I 雪氷の物性と構造, 古今書院, 1986.

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1件)

- ① 藤野俊和, 丹羽泰紀, 阿部雅二郎, 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, 2016年3月5日, 信州大学(長野県・上田市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤野 俊和 (FUJINO TOSHIKAZU)
東京海洋大学・学術研究院・助教
研究者番号: 70508514