

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：53101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04973

研究課題名(和文)道路除雪作業で形成される雪堤の崩れ現象に関係する力学的特性の評価

研究課題名(英文)Evaluation of mechanical characteristics related to the collapse phenomenon of the snow bank formed by snow removal work

研究代表者

河田 剛毅 (KAWADA, YOSHITAKA)

長岡工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：50177705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：降雪地域では、自然積雪に加え、道路除雪により路肩に雪が積み上げられ、雪堤と呼ばれる雪の壁が形成される。この雪堤が崩れると歩行者や車両に危害が及ぶ可能性があるため、崩れ防止対策を立てるための基礎研究として、雪堤崩れ現象に関係する可能性が高い力学的特性(主に雪の強度)を把握することが目的である。雪はざらめ雪を用いた。主な知見として、「雪塊の強度は日数が経過するほど増加する。但し、水分を多く含むと増加傾向はなくなる」、「積み上げ日が異なる2つの雪層の境界面のせん断強度は、境界面にかかる加圧力が小さいと日数経過による変化がないが、加圧力が大きいと日数経過により増加する」ことが得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義については、雪層の崩れ現象に関して雪崩(なだれ)に関する研究が多数行われているが、それらの研究で対象とする雪層は自然に降り積もった雪である。それに対して、本研究で対象としている雪堤の雪は、路上の積雪を除雪機で積み上げたものと自然積雪の複層構造になっているため、自然に降り積もった雪とは構造・性状が異なるとともに、不純物を多く混入している点も異なる。これにより力学的特性も両者で大きく異なると考えられる。

社会的意義については、本研究の最終目的は交通事故等の被害を招く雪堤の崩れを防止することであり、今回の成果をさらに発展させればその目的を達成できる。

研究成果の概要(英文)：In snowfall areas, in addition to natural snowfall, removed snow is piled up on the sides of the road, forming snow banks. The purpose of this study is to understand the mechanical properties (mainly snow strength) that are likely to be related to the phenomenon of snow bank collapse as a basic research to develop countermeasures to prevent the collapse. Granulated snow was used as a test sample. The main findings were as follows. The strength of a snowpack increases with the passage of days. However, this trend disappears when the snow contains more water. The shear strength at the boundary between two snow layers with different stacking dates does not change with the passage of days when the pressure applied to the boundary is small, but increases with the passage of days when the pressure is large.

研究分野：熱工学

キーワード：雪堤 崩れ 力学的強度 せん断強度 雪層境界

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

降雪地域では、自然積雪に加え、道路除雪により路肩に雪が積み上げられ、雪堤と呼ばれる雪の壁が形成される。その高さは2mを超えることも珍しくない。雪堤は高くなるほど見通しを妨げるので交通安全上、危険である。さらに、雪堤が崩れることで歩行者や車両に危害が及ぶ可能性もあり、実際に「2012年1月：秋田市の県道で雪壁が崩れ下校中の小学生が胸まで埋没」「2014年12月：新潟県長岡市の国道で雪堤が崩れ車両が一部破損」などの事故が発生している。このようなことから雪堤はなるべく早期の除去が望ましいが、降雪量が多い時期にはすぐには手が回らず放置されたままとなることが多いのが実情である。さらに最近ではゲリラ豪雪の頻度が増してきていることから、雪堤崩れのリスクは増加傾向にあると言える。そこで、雪堤崩れ防止対策が重要であるが、その立案のためには、まず雪堤崩れの発生メカニズム・発生条件を解明する必要がある。しかしながら、これに関した研究は全く行われていない。

道路除雪で形成される雪堤は、「形状・寸法が不特定」「内部構造的には複層構造」で、「雪質は不均質かつ不純物が混入している」「環境条件によって構造・各種特性が刻々変化する」ことから、様々な要素が雪堤崩れに関係していると考えられる。おそらくは何らかの原因で弱層(強度が低下した、ある程度の広がりを持った領域面)が生じ、そこに限度を超える応力がかかって破壊が生じたと考えられるが、詳細は不明である。これらのことから、雪堤崩れ現象を解明するためには、まずは崩れ現象に関係する力学的特性量を把握するのが賢明であると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 1つ目の調査アプローチ

雪堤の崩れ発生機構を解明するための足掛かりとして、雪堤崩れ現象に関係する可能性が高い力学的特性を把握する。力学的特性への影響因子として下記(iii)に記載したものに着目し、これら因子の条件を実際の雪堤で想定される範囲内で変えたときに雪の力学的特性量がどのように変わるのかを調べる。具体的な調査内容・項目は次の(i)～(iii)のとおりである。

(i) 注目する調査部位は2か所

一般に雪堤は異なる日の積雪や除雪した雪の積み上げによる多層構造になっており、「1つの雪層内部」と「積み上げ時期が異なる2つの層の境界」では、雪の結合状態が異なり、力学的特性の振る舞いも異なると考えられる。したがって「雪層内部」と「積み上げ時期が異なる2つの層の境界」の2か所に分けて、それぞれの部位における力学的特性を評価する。

(ii) 調べる力学的特性量の具体的な項目

調べる力学的特性量としては断強度を中心に評価する。これは雪堤崩れの事例情報が少ない中で、前ページの事例で挙げた2014年12月に長岡市で発生した雪堤崩れは、現場写真により、ある程度の大きさの雪塊がまとめてずり落ちる「せん断型破壊」によるものと推察したためである。また、雪の力学的特性には雪粒子の構造・結合状態が大きく影響する。そこでそれを調べるための粒子観察も行い、雪の各種力学的特性の変化を粒子構造の変化と関連付けて解明する。

(iii) 着目する影響因子(実験パラメータ)

雪堤の力学的特性に影響する因子は多数考えられるが、特に重要な基本的因子として、初期の雪質・雪性状、雪堤に積み上げられてからの経過時間、加圧力(積み上げ高さ分の自重に相当)、不純物(凍結防止剤や砂)の混入状況が挙げられる。また雪堤は気象条件によっては融解が生じ、これが力学的性質に大きく影響すると考えられる。そこでまず第1段階として、雪が融解しない条件下で～の因子の影響評価を行い、次いで第2段階として融解を生じさせる気象因子(気温・降雨等)が雪堤の力学的特性に与える影響を調べる。

(2) 2つ目の調査アプローチ

雪堤は構造が複雑であることに加え、その力学的特性に影響を与える因子も数多いことから、上記(1)のような各種因子の影響評価する調査アプローチは多大な時間を要する可能性がある。そこでより効率よく雪堤崩れの発生条件を推定するために、実際に崩れ発生の元となる弱層(強度が極端に小さくなった層)ができやすい状況をいくつか想定し、どのような条件でどの程度強度が低下するかを調べる。

3. 研究の方法

[研究項目1：雪層内部の力学的特性評価]

・研究項目1.1 雪が融けない環境下での評価

まずはなるべく単純な場で基本的な因子の影響を調べるため、約0℃に保持した低温室で実験を行う。単相雪層の単純モデルとして、実験室規模の寸法の断熱容器に充填した雪塊を用いる。これを設定した条件の下で保管した後、試験片を切り出して力学的特性量(せん断強度、密度)を測定するとともに、粒子観察により粒子構造の変化を調べる。実験条件として、初期の雪質・雪性状、経過時間(雪堤に積み上げられてからの時間に相当)、加圧力(積み上げ高さ分の自重に相当)、不純物(凍結防止剤、砂)の混入量の4種類について、各々数種類設定することで、各因子が力学的特性に与える影響を明らかにする。

・研究項目1.2 雪の融解が生じる気象因子の影響評価

雪の融解が生じる気象要因は主に気温上昇と降雨である。そこで、約0℃の環境で所定日数保管した雪塊を0℃以上の気温、もしくは降雨に晒した後に、力学的特性量の雪層内部分布を測定することで、これら融解因子による力学的特性への影響がどの程度雪層内部まで現れるかを調べる。「気温」「降雨」とともに数パターンの時間変化プロファイルを設定する。

[研究項目2：2つの雪層境界の力学的特性評価]

2層の雪層モデルとして、実験室規模の寸法の断熱容器に、日を変えて2回に分けて充填した雪塊を用い、以下の研究を行う。

・研究項目2.1 雪が融けない環境下での評価

研究項目1.1と同様な調査を「積み上げ日が異なる2つの雪層境界」を対象に行う。実験条件として、2層目積み上げ時の各層の雪質・雪性状、2層目積み上げ後の経過日数、雪層境界にかかる加圧力、雪層境界面の不純物の介在状況の4種類を設定し、雪層境界面のせん断強度を測定する。また雪層境界面周辺の粒子観察により雪層の結合状況を解析する。

・研究項目2.2 雪の融解が生じる気象因子の影響評価

気温上昇により発生した融解水、もしくは降雨が雪層境界面に流れ込むことによる雪層境界面の力学的特性の変化を調べるため、約0℃の環境で作成した2層積み上げ雪塊を0℃以上の気温、もしくは降雨に晒した後に、雪層境界面のせん断強度測定と粒子観察を行う。

・研究項目2.3 崩れ発生の元となる弱層の形成状況の推定

雪堤内に弱層が形成されやすい状況を想定し、それぞれの状況を模した2層の雪層モデルを使ってどの程度対象部分の強度が低下するかを調べる。

[研究項目3：実際の雪堤の形状・寸法・構造調査]

強度評価の際の参考情報として、実際に形成される雪堤の形状・寸法、構造、組成を把握しておくことは重要である。そこで可能な範囲で、近隣で形成される雪堤の形状・寸法・密度計測、断面観察を行う。

4. 研究成果

最初に断りとして述べておくと、研究期間である3年間のうち2020～2021年度の2年間は新型コロナウイルス感染拡大により学生の登校が原則禁止になるなどがあり、思うように実験が進まず、結果として、当初の計画よりも進捗が遅れ気味となり、したがって成果の点で不十分な項目がいくつか出てしまうこととなった。

[研究項目1：雪層内部の力学的特性評価]

・研究項目1.1 雪が融けない環境下での評価について

試料雪として、製氷機で作成した氷を削氷機で細かく削った人工雪を用いた。当初、雪質も変えるつもりであったが、人工雪では新雪などの降雪直後の雪質を安定した条件で作成することが困難であったため、ざらめ雪のみで固定することとした。以下の研究項目においても同じ理由で基本、雪試料の雪質は人工ざらめ雪のみである。

せん断強度試験から得られたせん断強度と経過日数の関係を図1に示す。データのばらつきはあるが、単層の雪塊のせん断強度は日数経過とともに増加する傾向が明確に認められる。具体的には経過日数が30日の間にせん断強度の平均値は約40%増加している。また、経過日数が増えるほどせん断強度の増加率が小さくなる傾向も得られた。

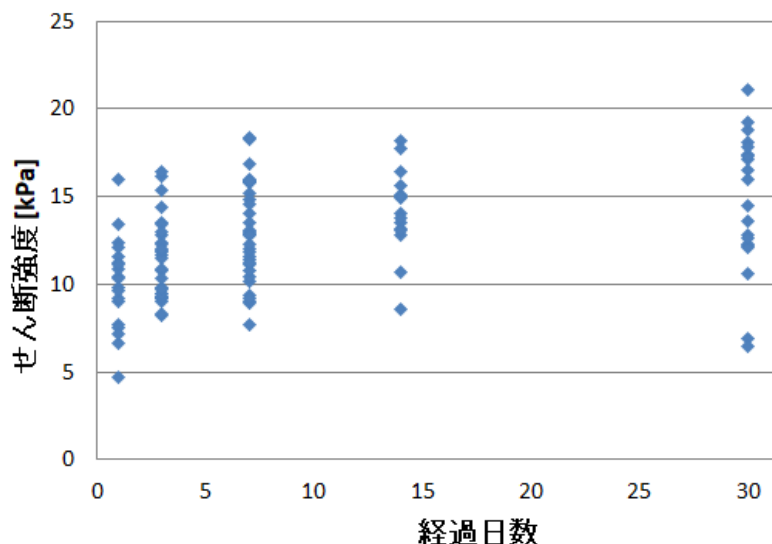


図1 単層雪塊のせん断強度と経過日数の関係

並行して行った粒子観察では、強度実験で用いた雪試料から厚さ0.2mm程度の薄片を作成し、反射光観察、および透過光による偏光観察をした。これにより粒径や粒子構造などの変化を調査した。結果として、粒径、比個数(単位面積当たりの粒子数)、結合度合い(単位面積当たりの粒子同士の結合長さ)と日数経過の関係を図2から図4にそれぞれ示す。日数経過とともに粒径は増加、比個数(単位面積当たりの粒子数)は減少する傾向が得られた。一般的に日数経過とともに焼結による粒子同士の結合が進むと考えられるので、これら粒径と比個数の実験結果はそうした焼結の進行を裏付けると言える。一方、結合度合い(単位面積当たりの粒子同士の結合長さ)はデータのばらつきが大きく、傾向は明確には得られなかった。日数経過とともにせん断強度が増

すのは焼結の進行により粒子同士の結合が進んだためと考えられるので、結合度合いは日数経過とともに増加する傾向が得られると予想していたが、今回の結果は観察方法や結合度合いの指標の選定に改善の余地があることを示唆している。

・研究項目 1.2 雪の融解が生じる気象因子の影響評価について

雪の融解による力学的特性の変化は、融解による含水率の増加によるものと、融解による粒子の形状変化によるものに分けて考えられるので、とりあえず、含水率の影響について調べた。但し、雪塊中の含水率を均一かつ時間的に一定に保持することは困難なので、極端な条件設定として、含水率が数%程度(上記の研究項目 1.1 で用いた雪試料と同じ条件で、0 程度の環境での通常の積雪中の濡れざらめ雪に相当)と 100%(0 の水に雪試験片を浸すことで実現)の 2 条件で比較することとした。

結果として、上記 2 種類の含水状態に対するせん断強度と経過日数の関係を図 5 に示す。含水率 100%で保持した場合は日数が経過してもせん断強度はほとんど変化が認められず、研究項目 1.1 で認められた増加傾向とは異なることとなった。これより雪単層の塊の強度は 0 の水(したがって融解はしない)を多く含むだけ

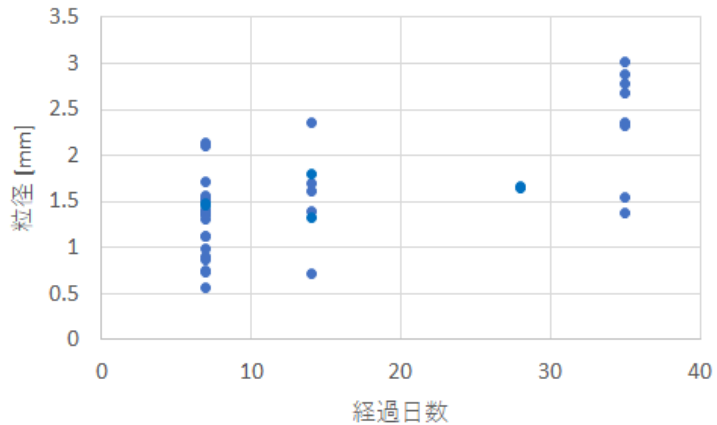


図 2 粒径と経過日数の関係

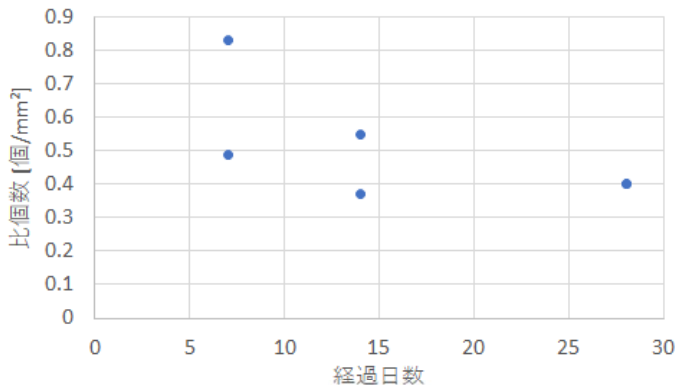


図 3 比個数と経過日数の関係

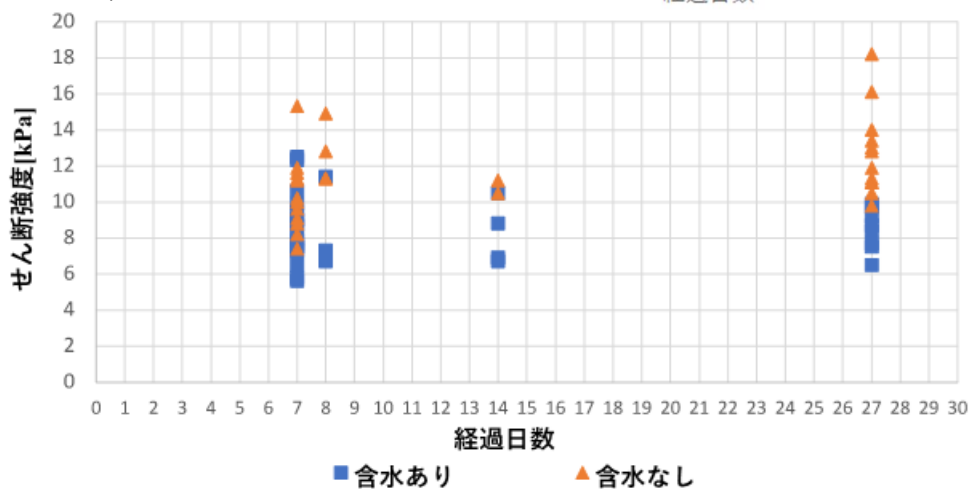
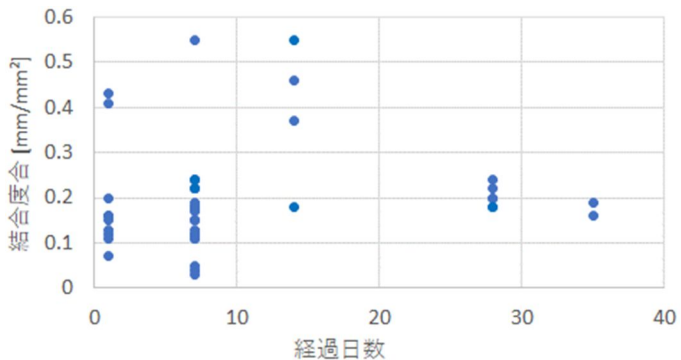


図 5 含水率状態が異なる単層雪塊のせん断強度と経過日数の関係

で強度増加が抑えられるといえる。

[研究項目 2 : 2 つの雪層境界の力学的特性評価]

・研究項目 2.1 雪が融けない環境下での評価について

実験条件として設定できたのは、2 層目積み上げ時の各層の雪質・雪性状、2 層目積み上げ後の経過日数、雪層境界にかかる加圧力、雪層境界面の不純物の介在状況のうち、と

の2種類であった。各層の雪質はざらめ雪のみで行った。結果として、加圧力が大きい(積雪1.3 m程度相当)場合と小さい(積雪0.3 m程度相当)場合の雪層境界のせん断強度と経過日数の関係をそれぞれ図6と図7に示す。2層目積み上げ後の経過日数の影響は、加圧力が小さいと日数が経過しても雪層境界のせん断強度はほとんど変化しないが、加圧力が大きいと日数経過とともにせん断強度が増加する傾向が明確に認められた。

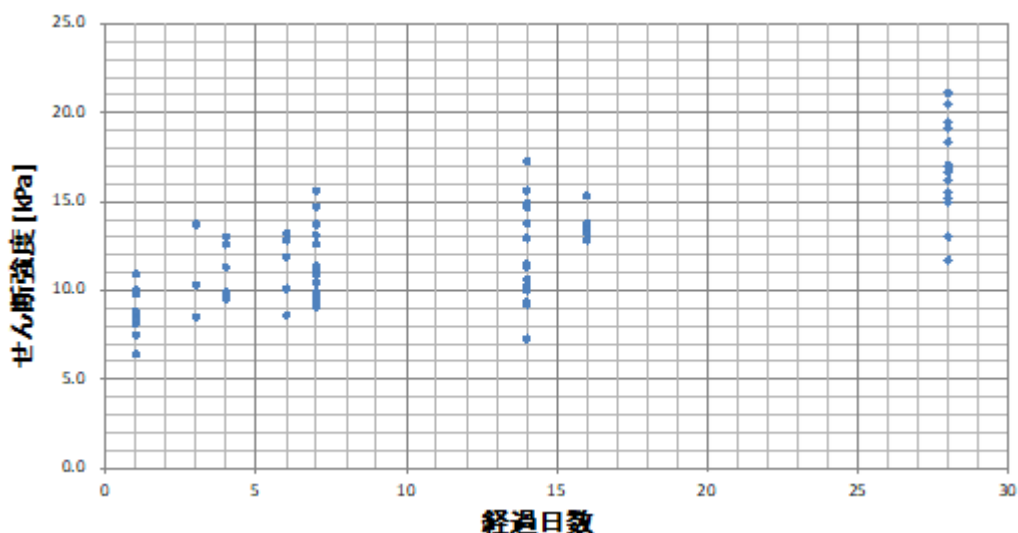


図6 加圧力が大きい(積雪1.3 m程度相当)場合の雪層境界のせん断強度と経過日数の関係

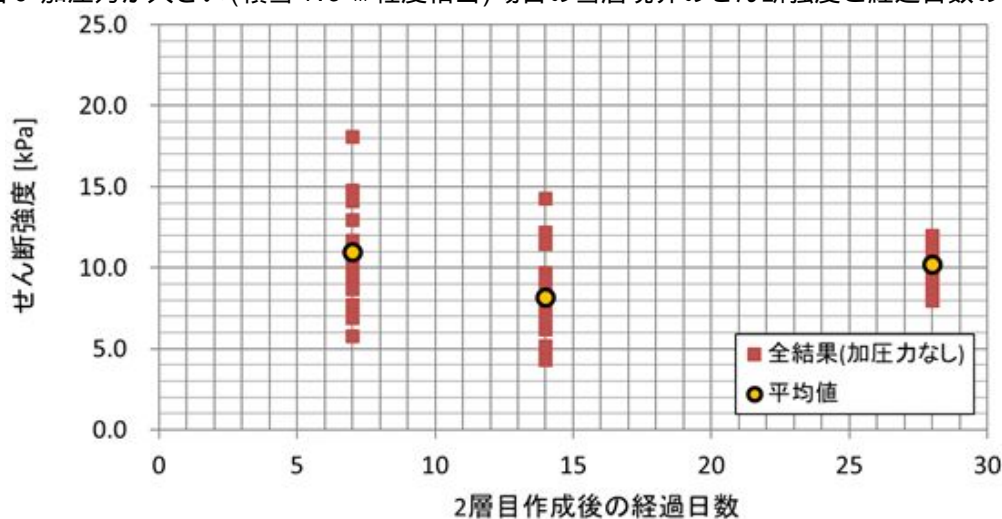


図7 加圧力が小さい(積雪0.3 m程度相当)場合の雪層境界のせん断強度と経過日数の関係

・研究項目2.2 雪の融解が生じる気象因子の影響評価について
進捗状況の遅れにより、調査できなかった。

・研究項目2.3 崩れ発生の元となる弱層の形成状況の推定について

弱層の形成要因として、1つは含水による強度低下が考えられ、これについては研究項目1.2の成果で述べたとおりである。もう1つの要因として凍結防止剤の散布による強度低下を想定した。そこで雪塊を10~20%の濃度の塩水に短時間浸した試料のせん断強度を調べる実験を行ったが、温度設定等に問題があり、有効なデータを得ることができなかった。

・研究項目3：実際の雪堤の形状・寸法・構造調査について

2021年度の冬季に新潟県と長野県的高速道路、及び周辺の一般道路を巡回し、雪堤崩壊の発生地点の探索と状態観察を行った。結果として、ガードケーブルやガードレールが存在する地点において構造物に接する面で剥がれ落ちるように崩れるパターン(剥がれ型)と、雪堤上部が道路側に滑り落ちるように崩れるパターン(滑り型)の2種類の崩れパターンに分類できること、および、高速道路では構造物が多いことから、剥がれ型の方がかなりの割合を占めていることが分かった。雪堤の内部構造については、特徴的なこととして、ガードケーブルやガードレール周辺(特に下部)に大きな空洞が存在すること、および空洞表面は凍結していることが分かった。こうした空洞の存在が上記の剥がれ型の崩れと大きく関係しているものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河田剛毅, 永井悠都, 上村靖司
2. 発表標題 除雪作業で形成される雪堤の力学的特性の基礎的評価 - 雪層境界面の明瞭化 -
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2020・オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河田剛毅, 永井悠都, 本間翔大, 上村靖司
2. 発表標題 除雪作業で形成される雪堤の力学的特性の基礎的評価 - 雪層境界面の明瞭化による強度測定の改善 -
3. 学会等名 日本雪氷学会 北信越支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河田剛毅, 田中大地, 上村靖司
2. 発表標題 除雪作業で形成される雪堤の力学的特性の基礎的評価 - 測定値のばらつき低減の工夫と結合度合いの評価 -
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 芝崎智貴, 渡邊香歩, 杉原幸信, 上村靖司, 町田敬, 河田剛毅
2. 発表標題 道路雪堤の崩壊現象の観察と分類
3. 学会等名 第37回寒地技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鶴見竜也, 杉原幸信, 上村靖司, 町田敬, 河田剛毅
2. 発表標題 高速道路における雪堤の形成と崩壊の過程に関する研究
3. 学会等名 第33回ゆきみらい研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本間翔大, 河田剛毅, 永井悠都, 上村靖司, 杉原幸信, 町田敬
2. 発表標題 雪堤の力学的特性の基礎的評価 - 雪単層,および雪層境界面のせん断強度に与える各種因子の影響 -
3. 学会等名 日本雪氷学会北信越支部研究発表会
4. 発表年 2022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
研究分担者	上村 靖司 (Kamimura Seiji) (70224673)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

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
---------	---------