

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05043

研究課題名（和文）大雪時におけるスタック車両発生条件の定量的評価と予測技術開発

研究課題名（英文）Quantitative evaluation and prediction technology development for occurrence conditions of vehicles-stranding during heavy snowfall

研究代表者

藤本 明宏（FUJIMOTO, Akihiro）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：90456434

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）：本研究では、車両を圧雪路面上で走行させる実車試験を実施し、スタック発生メカニズムを解明した。この知見を路面雪氷状態モデルに反映させ、スタック危険率予測モデルを開発した。また、2020/2021年の冬期に発生した車両滞留を調査し、雪による車両滞留イベントデータベースを更新した。さらに、2021年1月に福井県内において発生した大雪による立ち往生を調査し、立ち往生の状況や車両滞留最中における圧雪路面の状態を観察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実際の立ち往生の踏査や実車試験によるスタック発生メカニズムの解明は、スタックを発生させないためにより有効な対策の検討や実施を可能にさせる。また、スタックする圧雪状態を明らかにしており、これは冬期道路管理においてスタックや立ち往生の発生の回避を除雪で対応可能か、あるいは通行止めを実施すべきかの判断材料になる。スタック危険率予測モデルは世界的にも他になく学術性が高い。また、冬期道路管理に導入し、事前にスタック発生の危険性を把握することは、通行止めの期間の短縮や安全な交通確保につながるなど社会的意義が高い。

研究成果の概要（英文）：We conducted vehicle tests on compacted-snow roads to elucidate the mechanism whereby vehicles become stranded on roads in this study. The vehicle-stranding risk prediction model was developed by reflecting this knowledge in the road surface snow and ice condition model. Database of vehicle-stranded events due to snow updated from investigation of vehicle-stranded in winter 2020/2021. We investigated the conditions of the compacted-snow road surface under a standing vehicle during heavy snowfall that occurred in Fukui in January 2021.

研究分野：雪工学、地盤工学

キーワード：スタック 大雪 車両滞留 路面雪氷状態予測 冬期道路管理 立ち往生

1. 研究開始当初の背景

大雪による大規模な車両滞留は立ち往生と呼ばれ、最大約 1500 台・最長 62 時間に及んだ平成 30 年 2 月の福井-石川県境など、近年各地で発生している。立ち往生は生活・医療物資の枯渇、生産活動の停滞、緊急輸送機能の不全などを引き起こし、人命にも係わる甚大な影響を社会経済に及ぼすため、対策の強化が急務である。立ち往生の発端は車両のスタック(発進不能)が多い。積雪地域において平時の降雪であれば、路面圧雪による走行速度の低下こそあってもスタックに至ることは珍しい。しかし、大雪時にはスタック車両が発生し、立ち往生の発端となる。なぜ大雪時にはスタック車両が発生するのであろうか?この疑問の解決、すなわちスタック車両の発生メカニズムの解明は、大雪による立ち往生の対策を行う上で根幹的な課題である。

度重なる大雪による立ち往生の発生を受けて、大雪時の道路交通確保に対する考え方は転換された。これまでは「出来るだけ立ち往生や通行止めを回避する」であったが、これからは「立ち往生の早期解消やその長期化や大規模化を抑止する」が重要視されることになった。この転換に伴い新たに取り入れられた代表的な対策としては、「大雪時の需要抑制と広域迂回の呼びかけ」と「予防的通行規制・集中除雪の実施」が挙げられる。また、2018 年 12 月には大雪時にタイヤチェーン装着を義務付けるチェーン規制省令が施行された。こうした対策を機能させるために、通行止めやチェーン規制の適切な実施がより重要になっている。実際の冬期道路管理では、それらの実施の有無や時期を、時々刻々と変化する気象予報、路面雪氷状態、交通や除雪の状況などから総合的に判断することになるが、その判断は極めて難しい。この判断を客観的に支援する技術の一つとして、スタック車両の発生を予測するような技術の開発が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、車両を圧雪路面上で走行させる実車試験を実施する。その結果より、スタック発生メカニズムを解明すること、およびスタックし易さを定量的に評価することを目的とする。また、これらの知見を路面雪氷状態モデルのアウトプットと結びつけて、スタックの危険性を予測する新たな数値解析モデルとして、スタック危険率予測モデルを開発し、検証することも目的とする。さらに、大雪による立ち往生の対策を検討する上での基礎資料とするため、2020/2021 年の冬期に発生した車両滞留を調査し、雪による車両滞留イベントデータベースを更新した。加えて、2021 年 1 月に福井県内において大雪による立ち往生が発生したため、立ち往生の状況や車両滞留最中における圧雪路面の状態を観察する現地調査を実施した。

3. 研究の方法

(1) 大雪による立ち往生最中の現地調査

現地調査は、2021 年 1 月 10 日に発生した国道 8 号(福井市~あわら市)での立ち往生を対象に実施した。福井県嶺北地方では 1 月 7 日から断続的に降雪があり、積雪は約 100 cm に及んだ。この大雪によって、北陸自動車道では 1 月 9 日から通行止めが始まり、1 月 10 日から 1 月 12 日までの間、上下線ともに福井 IC から加賀 IC の区間で通行止めとなった。国道 8 号では、1 月 10 日 20 時から石川県境から玄女南交差点(坂井市)の区間を通行止めにし、集中除雪が行われた。

現地調査は、1 月 11 日 4 時半から 7 時半の 3 時間に亘り実施した。調査区間は国道 8 号線の米松交差点(福井市)から高柳交差点(坂井市)の約 7 km である。なお、米松交差点は金沢方向への立ち往生の最後尾であった。

(2) 実車試験

本試験は、停車試験とタイヤ空転試験に分けられる。表 1 に実車試験の車両とタイヤの条件を示す。

停車試験では、渋滞や立ち往生を想定して、車両を圧雪路面上に停車させた時の圧雪状態の変化を調べた。具体的には、約 30 分間、約 30 km/h で圧雪路面を走行し、所定の圧雪路面上で停車させた。停車時間は、30 分、70 分および 120 分とした。停車箇所の圧雪の初期状態として、停車前に表層密度、表層重量含水率、すべり摩擦係数および表面形状を測定した。走行直後にタイヤ表面温度を計測した。停車時間経過後、再び圧雪の表層密度、表層重量含水率、すべり摩擦係数および表面形状を測定した。

タイヤ空転試験では、タイヤの空転が圧雪状態に及ぼす影響を調べた。具体的には、駆動する後輪の前に雪を成形したタイヤ止めを設けて、圧雪路面上でタイヤを空転させた。タイヤを規定回数だけ空転させた後、牽引して車両を移動させ、圧雪の厚さ、全層密度、全層重量含水率、すべり摩擦係数および硬度を測定した。タイヤの空転数は、0、5、10、30 および 80 回の 5 ケースとした。タイヤの空転数はタイヤ表面にチョークで目印を付けて目視で数えた。タイヤの回転速度に関して、目視でカウン

表 1 実車試験の概要と条件

車両 条件	車種	2t アルミトラック
	車両重量	2.7 ton
	駆動方式	FR 駆動
タイヤ 条件	種類	スタッドレス
	装着形態	前輪：シングル 後輪：ダブル

トできる速度でタイヤを回転させた結果、1分間当たりタイヤの空転数は約60 rpmであった。この回転速度は、スリップ比0%として走行速度に換算すると7 km/hである。

(3) スタック危険率モデルの開発と検証

実車試験の結果を基に、スタックの危険性と圧雪物性等の関係を数式化し、路面雪氷状態モデルに組み込むことでスタック危険率モデルを構築した。また、2023年1月に富山県内の道路で現地観測を実施し、スタック危険率モデルの検証を行った。現地観測では、気象、交通量および路面雪氷状態を測定した。また、除雪と凍結防止剤の散布状況を道路管理者から入手した。なお、当該期間において、立ち往生は発生しなかったため、検証は路面雪氷状態について行った。

4. 研究成果

(1) 立ち往生中の現地調査

調査は、2021年1月11日4時30分に金沢方面の立ち往生の最後尾であった米松交差点から開始した。写真1(a)では圧雪路面に窪みが観られる。この地点は国道416号との交差点の手前であり、交通量の多い国道が交差するため普段から信号待ち車両が多い。この写真に示すように、停止車両が長く存在する場所では圧雪路面に窪みが発生していた。こうした場所以外の多くでは、走行に大きな支障がない平坦な圧雪路面が形成されていた。その中、圧雪路面に波打つような凹凸が現れた(同写真(b))。踏査した時点では、この凹凸が如何に発生したのかは不明であったが、後述の実車試験結果などから推測できるようになり、4.(3)に詳述している。いずれにしてもこうした凹凸の圧雪路面は走行に大きな支障を及ぼすことが容易に推測できる。この凹凸区間は50~100 m程度であった。

本調査の結果から、大雪時の路面圧雪は多くの箇所で行に支障がない平坦な状態であったが、交差点手前など部分的にスタックを誘発させそうな凹凸の状態となっていた。後述の実車試験では、これらの凹凸な圧雪路面の発生メカニズムとそれに伴うスタック車両の発生メカニズムを解明することを一つの目的とした。



(a) 5時06分



(b) 6時23分

写真1 立ち往生最中の道路状況
(国道8号・2021年1月11日)

(2) 実車試験

① 停車試験

図1は圧雪路面上を30分程度走行した直後の車両の熱画像である。エンジン部や室内温度の影響を受けるフロントドアの部分を除けば、車体の表面温度は0℃以下であるが、タイヤの表面温度は7.0℃近くと他に比べて高い。

図2は120分停車後の圧雪表面形状であり、タイヤの外形(外径621.5 mm)も併せて示す。同図は鉛直下方向を正とする。試験後に車両を同図の右側に移動させたため、右側の圧雪は圧密されている。図2から分かるように、圧雪に停車させると、圧雪に窪み(以下、圧雪窪み)が発生する。その圧雪窪みは時間とともに深くなった。120分経過後の圧雪窪みの深さは最深部で91 mmであった。なお、圧雪窪みの形状はタイヤの外形と一致した。120分の停車によって、圧雪物性も変化した。圧雪の表層密度は初期の450 kg/m³から経過後に800 kg/m³に増大し、表層重量含水率も24%から50%へ増大した。圧雪厚の減少は圧密と融解の両方が要因として考えられるが、表層密度および表層重量含水率の増大から、氷点下の気温の中でタイヤからの熱供給によって圧雪に融解が生じたことは間違いない。すべり摩擦係数は停車前の0.35から120分経過後に0.11へ低下した。なお、120分停車後の車両はスタック状態であった。

以上をまとめると、圧雪路面での停車は、圧密や融解によりタイヤを圧雪内へ沈ませると同時にすべり摩擦係数を低下させる。この結果、長時間(本試験では120分)の停車によってスタック状態に陥る場合がある。

② タイヤ空転試験

タイヤ空転数の増大とともに、圧雪窪みは成長し、その全層密度および全層重量含水率はともに増大した。すべり摩擦係数はタイヤ空転数とともに低下したが、タイヤ空転数30回以降は横ばいとなっ

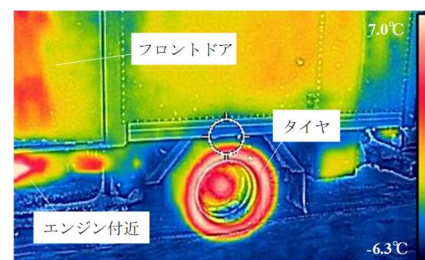


図1 30分程度走行した車両の熱画像

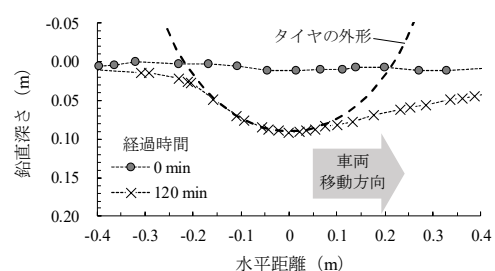


図2 停車による圧雪表面形状の変化

た。

停車試験およびタイヤ空転試験は、ともにタイヤを圧雪内へ沈ませ、すべり摩擦係数を低下させるが、停車に比べるとタイヤ空転の方がこれらの変化は顕著に表れる。本試験では、120分停車後と3回転のタイヤ空転後の圧雪状態の変化が同等であった。

(3) 凹凸のある圧雪路面の形成メカニズムおよびスタック車両の発生メカニズム

上述の現地調査と実車試験を踏まえて、以下に凹凸のある圧雪路面の形成メカニズムとスタック車両の発生メカニズムについて述べる。

窪みや凹凸のある圧雪路面は以下のように形成されると考えられる。(i)大雪時には吹雪による視界不良、堆雪による道路有効幅員の低下、路面状態の悪化などによって、次第に走行速度が低下し、渋滞が発生し始める。(ii)車両が停止すると、停車試験で示したように、タイヤからの熱移動や輪荷重によってタイヤが圧雪内に沈むとともに、すべり摩擦係数が低下する。また、発進時のアクセルワークによってはタイヤが空転し、それが上記の圧雪の変化を促進させる。(iii)こうして発生した圧雪面の窪みに後続車両のタイヤが嵌ると、その度にタイヤの空転が生じ、益々窪みを深める。このように圧雪面に窪みが一旦発生するとその窪みは成長し易く、写真1(a)に示した深い圧雪窪みが形成される。(iv)圧雪窪みは走行性をさらに悪化させ、車両滞留を深刻化させる。車両滞留の時間や区間が広がれば、窪みの発生エリアも広がる。(v)滞留時に強い降雪が伴えば、車両が存在しない箇所にだけ積雪し、路面の圧雪厚さは益々不均一となり、写真1(b)のような波状の荒い凹凸のある圧雪路面が形成される。

図3は圧雪窪みに嵌ったタイヤを回転させた時の力の状態図である。また、図4はタイヤが圧雪窪みに嵌った状態からスタック状態に陥る場合とスタックを回避する場合のフローを示す。まず、車両が前進するしくみを説明しておく。アクセルを踏むと、エンジンが生み出した力によってタイヤは回転する。タイヤが回転すると、タイヤと路面の間に進行方向の駆動力が発生し、車両はタイヤと路面の間の進行方向とは逆の摩擦力（以下、摩擦力）を反力に前進する。駆動力<摩擦力であれば車両は前進し、その逆であればタイヤが空転する。

以下に、(0)圧雪窪みにタイヤが嵌った状態からスタックに至る過程を説明する(図4)。(i)圧雪にタイヤの輪荷重が作用すると同時に、(ii)タイヤの熱が伝わる。(iii)アクセルを踏むとタイヤが回転する。アクセルの踏み込みが強いと(iv)駆動力>摩擦力の関係になり、(b-v)タイヤの空転が生じる。タイヤの空転は、(b-vi)タイヤと圧雪との間に摩擦熱を発生させるとともに、(b-vii)タイヤ自体を発熱させる。タイヤからの熱移動により、(b-viii)圧雪が融解する。この融解と(i)輪荷重により、(b-ix)タイヤを圧雪内に沈ませ、(b-x)タイヤ前方の圧雪表面の傾斜角が増大する。(b-xi)その傾斜面ではタイヤの垂直抗力が減少する。同時に、タイヤの空転や圧雪の融解は、(b-xii)圧雪表面の平滑化や(b-xiii)圧雪のすべり摩擦係数の低下を引き起こす。これにより、(b-xiv)摩擦力が低下する。摩擦力が低下すると、(iv)駆動力を抑制しても駆動力>摩擦力の関係になり易く、スタック状態に陥る。

一方、ゆっくりとアクセルを踏み、(iv)駆動力<摩擦力の関係にある場合は、(a-v)車両が前進する。ただし、タイヤが前進前に圧雪窪み(タイヤ外形と同じ円形状)の底(傾斜角0)にあるとすると、(b-x)車両が前進するとタイヤと接する圧雪窪み面の傾斜角が増大する。これにより、(b-xi)垂直抗力が減少し、(b-xiv)摩擦力が低下する。摩擦力

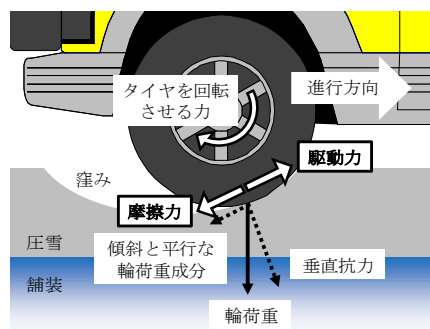


図3 圧雪窪みでタイヤを回転させた時の力の状態図

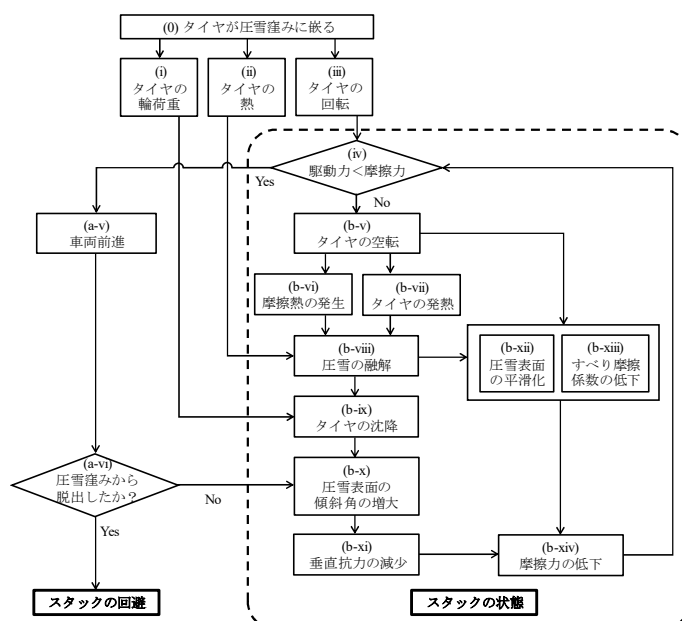


図4 タイヤが圧雪窪みに嵌った状態からスタック発生とスタック回避する場合のフロー

が低下しても(iv)駆動力<摩擦力の関係にあれば、(a-v)車両が前進し、(a-vi)いずれ圧雪窪みから抜け出し、スタックは回避される。摩擦力の低下によって、(iv)駆動力>摩擦力の関係になると、タイヤの空転が発生し、上述のように(b)のフローに従ってスタック状態となる。

(4) 雪による車両滞留イベントデータベース

2020/21年冬期までに日本において発生した雪による車両滞留イベントの発生日時、場所、路線名、発生原因、車種、滞留規模、発生状況等をまとめた「雪による車両滞留イベントデータベース」を更新し、公開した。

(5) スタック危険率モデルの開発と検証

① スタック危険率

上記の研究を基に、スタック危険率Rを以下のように数式化した。

$$R = J_1 J_2 J_3 R_1 + J_1 J_2 R_2 + (1 - J_1) J_2 R_3$$

$$J_1 = F(T_a), J_2 = F(T_r), J_3 = F(I_s), R_1 = F(H_s), R_2 = F(\Theta_s), R_3 = F(\mu)$$

ここに、 J_1 : 0~1.0の間を変化する重み変数(i=1, 2, 3, 4)、 R_i : 各説明変数によって0~1.0の間を変化するスタック危険率(i=1, 2, 3, 4)、 T_a : 気温(°C)、 T_r : 交通混雑度、 I_s : 時間降雪量(mm/h)、 H_s : 路面雪氷厚(mm)、 Θ_s : 路面雪氷含水率および μ : 路面すべり摩擦係数である。

② スタック危険率モデルの検証

本研究では、除雪や凍結防止剤散布を考慮して路面雪氷状態の変化を計算可能にする熱、水質量、氷質量、空気体積および塩質量収支による路面雪氷状態モデルに上記のスタック危険率を組み込んだスタック危険率モデルを開発した。本モデルは気象条件(気温、相対湿度、風速、降水量、日射熱および大気放射熱)、交通条件(交通量および走行速度)、道路管理作業(除雪の時刻、凍結防止剤散布の時期と量)を入力することで、路面雪氷や舗装の温度、路面上の水・氷・空気の体積、凍結防止剤の質量や塩濃度、スタック危険率を出力する。本解析期間に車両滞留は起こらなかったため、路面雪氷状態について計算値と測定値を比較し、モデルの妥当性を検証した。ここでは検証の一例として、図5に2023年1月25日~翌日16時の検証結果を示す。これらの期間中に除雪は1月26日16時に実施され、凍結防止剤散布は1月26日5時に実施された。

図5を見ると、測定での路面雪氷状態は積雪から始まり、25日17時~19時にシャーベット、それ以降は積雪となり、翌日9時以降にシャーベットや湿潤となった。この水分の発生による積雪からシャーベットや湿潤への変状は5時の凍結防止剤散布の影響と推察される。計算の路面雪氷状態は凍結防止剤散布の影響を含めて測定結果を概ね再現できた。

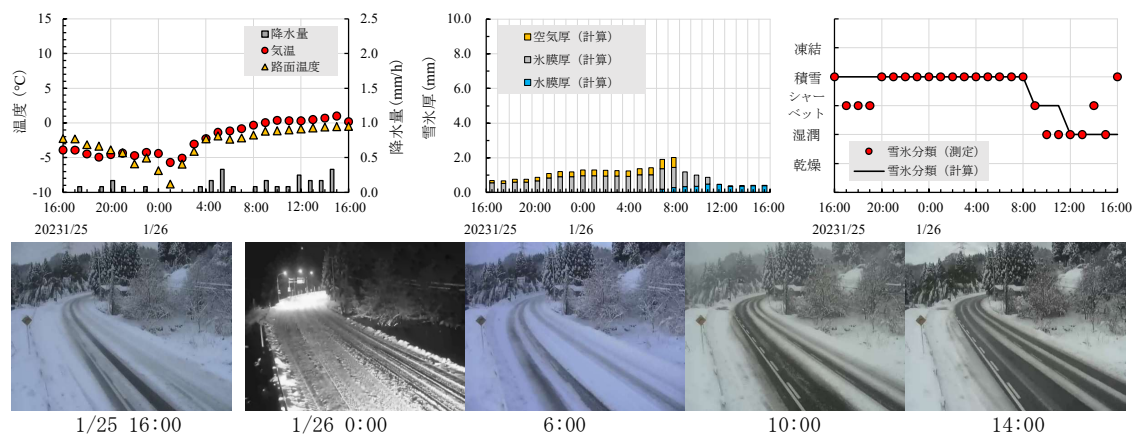


図5 スタック危険率モデルの検証 (2023年1月25日16時~翌日16時)

(6) 得られた成果の国内外における位置づけおよび今後の展望

スタック発生メカニズムやスタック危険率は新しい知見である。また、除雪や凍結防止剤を組み込んだ路面雪氷状態モデルは世界的にも新規性が高く、それにスタック危険率を組み込んだスタック危険率モデルは唯一無二である。課題として、スタック発生メカニズムについては、車種によるスタックのし易さの違い、道路勾配がスタックのし易さに及ぼすの影響、スタックに対するチェーン装着の効果などが上げられる。スタック危険率は概念に留まっており、具体的な数値の設定には更なる研究が必要となる。また、モデルの検証も継続的に実施する必要があり、計算精度の向上が望まれる。

今後は、実車試験や野外観測を継続し、スタックに関する知見を深めるとともに、モデルの検証や改良を行い、実道路でスタック危険率予測モデルの適用を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2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 藤本明宏	4. 巻 789
2. 論文標題 大雪時のスタック車両発生メカニズムについて	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 道路建設	6. 最初と最後の頁 34-39
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 無
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 藤本明宏、河島克久、渡部俊、村田晴彦	4. 巻 83
2. 論文標題 大雪時のスタック車両発生メカニズムの解明	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本雪氷学会 雪氷	6. 最初と最後の頁 507-522
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5331/seppyo.83.5_507	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 藤本明宏、福原輝幸	4. 巻 37
2. 論文標題 福井県における大雪立ち往生の事象、対策および課題	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本雪工学会誌	6. 最初と最後の頁 9-14
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 無
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 MURATA Haruhiko、KAWASHIMA Katsuhisa	4. 巻 84
2. 論文標題 Vehicle-stranding events caused by snowfall in Japan: database construction and analysis of occurrence characteristics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Japanese Society of Snow and Ice	6. 最初と最後の頁 515-527
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5331/seppyo.84.6_515	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村田 晴彦, 河島 克久
2. 発表標題 雪による車両滞留の発生件数の経年変化と日内変動の特徴の分析
3. 学会等名 雪氷研究大会（2022・札幌）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 スタック危険率算出プログラム及び情報処理装置	発明者 藤本明宏、河島克久	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-022856	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

車両スタック危険率モデルWEB-テストサイト https://heavysnowfall.snow-data.com/VehicleStranding/map/point.php

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	河島 克久 (KAWASHIMA Katsuhisa) (40377205)	新潟大学・災害・復興科学研究所・教授 (13101)	

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