

新潟大学災害・復興科学研究所  
共同研究報告書

## スタック車両の原因となる圧雪路面の轍掘れ発生条件の解明

藤本 明宏<sup>1)</sup>  
河島 克久<sup>2)</sup>

1) 福井大学 2) 新潟大学

### 研究要旨

本研究では、圧雪轍掘れの発生メカニズムの解明およびその深さの定量化を目的に、圧雪貫入試験を実施し、圧雪層の乾き密度および重量含水率ならびにタイヤ接地圧が貫入深さに及ぼす影響を示した。また、乾き密度が  $605 \text{ kg/m}^3$  の圧雪に対して、貫入深さを重量含水率とタイヤ接地圧を用いて定量的に評価した。さらに、本試験結果と福井での圧雪轍掘れ事例を基に、比較的に低密度の圧雪が水分を含むと圧雪轍掘れが起こり易いことを示した。

### A. 研究目的

筆者らは、平成30年2月の国道8号における大雪立ち往生の発生を契機に、スタック車両発生メカニズムの解明に取り組んでいる。これまでに、圧雪路面での実車試験を通じて大雪時の車両発進不能およびタイヤチェーン装着効果のメカニズムについて報告した。スタック車両は、大雪の渦中だけでなく、厚い路面圧雪層の軟化に起因して発生する場合がある。国道8号線の大雪立ち往生解消後に発生した福井市内での著しい交通渋滞はその一事例である。大雪や立ち往生の間、福井市内の生活道路の多くは除雪が行き届かず、厚さ10~20 cm程度の圧雪に覆われた。その後、日中の強い日差しや気温上昇は路面圧雪層を融かして軟化させ、写真-1のような車両通過に伴う圧雪の窪み（以下、圧雪轍掘れ）が出現した。深い圧雪轍掘れは、車重の軽い2輪駆動車や後輪駆動のトラックなど駆動輪に十分な輪荷重がかからない車両を容易にスタック状態にさせる。一方、4輪駆動車など駆動力に優れた車両は、スタックを回避できても、圧雪の窪みを益々深くし、新たな圧雪轍掘れを発生させることがあった。

圧雪轍掘れの発生メカニズムとそれに起因し



写真-1 圧雪轍掘れが発生した道路状況

たスタック車両の発生メカニズムの解明は、適切な除雪車の出動基準の基礎資料となり、スタック車両発生を未然に抑止することにつながる。

圧雪轍掘れの発生に関して、積雪の圧縮変形、やせん断破壊については古くから研究が行われており、道路上で発生する高密度の圧雪を対象とした研究例も存在する。しかしながら、圧雪轍掘れを対象とした研究例は筆者の知る限り殆どなく、その発生の条件やメカニズムは依然として不明な点が多い。

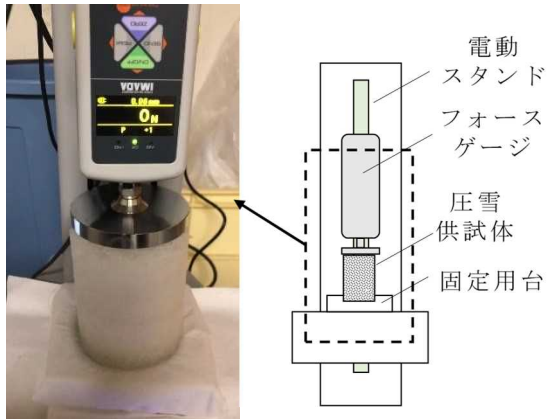


図-1 高密度圧雪供試体の作製方法

著者らは、圧雪轍掘れの発生メカニズムの解明とその深さの定量化のために、室内試験と実車試験を実施している。本報告では、まずは圧雪の物理性状および静的な輪荷重に着目し、湿潤圧雪への鉛直方向貫入試験（以下、圧雪貫入試験）を実施したので、結果の一部を記載する。

## B. 研究方法

図-1 は低温実験室で実施した圧雪貫入試験の概要である。試験の手順は次のとおりである。(i)  $-5^{\circ}\text{C}$ の低温室に製氷機で作製した1辺が4 cm程度の立方体の氷を一昼夜以上放置し、完全に水分を無くす。(ii) アイススライサーを用いて削氷し、人工雪を作製する。(iii) 人工雪をふるい分けし、直径が1.4~2.0 mmの人工雪を取り出す。(iv) この人工雪を $0^{\circ}\text{C}$ に制御した別の低温室に移し、雪温が $0^{\circ}\text{C}$ になるまで放置する。(v) 目安の乾き密度 $\rho_{dry}$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) および重量含水率 $\theta_{mw}$  (%)になるように規定量の人工雪と $0^{\circ}\text{C}$ の水を袋に入れて、素早く攪拌し、人工雪を湿潤状態にする。なお、ここで加水しない試験条件もある。(vi) その濡れ雪を用いて円柱の圧雪供試体を作製する。(vii) 圧雪供試体の重量を測定し、その体積で除して濡れ密度 $\rho_{wet}$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) を算出する。(viii) 貫入棒を圧雪供試体の上面と接するように固定する。(ix) 試験開始時に貫入棒の固定を外すことで、圧雪供試体上面から貫入させ、貫入深さ $D_s$  (mm) を測定する。(x) 圧雪供試体の上部と下部を採取してそれぞれ $\theta_{mw}$ を測定し、それらの平均値を用いて $\rho_{dry}$ を算出する。表-1 に試験条件の一覧を示す。

表-1 圧雪貫入試験の条件

乾き密度	450, 530, 600 $\text{kg}/\text{m}^3$
重量含水率	0~35 %
貫入重量	2.3, 5.2, 10.8, 22.1 kg
貫入棒の接地面積	$4.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
貫入棒接地圧	56.4, 127.4, 264.6, 541.5 $\text{kN}/\text{m}^2$
想定車両重量	0.39, 0.85, 1.79, 3.67 ton

## C. 研究結果

### (1) 貫入深さと圧雪物性の関係

図-2 は $D_s$ と $\rho_{wet}$ および $\theta_{mw}$ の関係であり、同図はタイヤ接地圧 $P_t = 127.4$  ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )の結果をそれぞれ示す。 $D_s$ は $\rho_{wet}$ および $\theta_{mw}$ とともに増大したことが分かる。また、 $D_s$ は同じ $\theta_{mw}$ であっても $\rho_{dry}$ が小さいほど相対的に大きい。

### (2) タイヤ接地圧が貫入深さに及ぼす影響

ここでは、 $\rho_{dry} = 605 \text{ kg}/\text{m}^3$ のデータを用いて、 $D_s$ の定量化を試みる。なお、 $\rho_{dry} = 605 \text{ kg}/\text{m}^3$ では上述の $P_t$ 以外に56.4および541.5  $\text{kN}/\text{m}^2$ の試験を実施しており、以下では考慮される。図-3 左図は $\rho_{dry} = 605 \text{ kg}/\text{m}^3$ での $D_s$ と $\rho_{wet}$ の関係を $P_t$ 毎に分けて示す。 $\rho_{wet} = 605 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、すなわち水分を全く含まない圧雪では $P_t = 541.5 \text{ kN}/\text{m}^2$ のみ $D_s$ が発生し、その値は10 mmであった。前述のとおり、 $D_s$ は $\rho_{wet}$ とともに線形的に増大し、その増大率は $P_t$ とともに大きくなった。

図-3 右図は左図の結果を $\theta_{mw}$ を用いて表現したグラフである。 $D_s$ は $\theta_{mw}$ の増大とともに線形的に増大している。この $D_s$ と $\theta_{mw}$ の関係を次式の一次関数で近似した。

$$D_s = a\theta_{mw} + b \quad (1)$$

ここで、 $a$ および $b$ は一次関数の傾きと切片である。 $D_s$ と $\theta_{mw}$ をそれぞれmmおよび%で表したときの $a$ および $b$ は図-4に示すように $P_t$ の増大につれて一次関数的および対数関数的にそれぞれ増大した。これらの関係は、以下の式で近似できる。

$$a = 6.2 \times 10^{-3} P_t + 0.1 \quad (2)$$

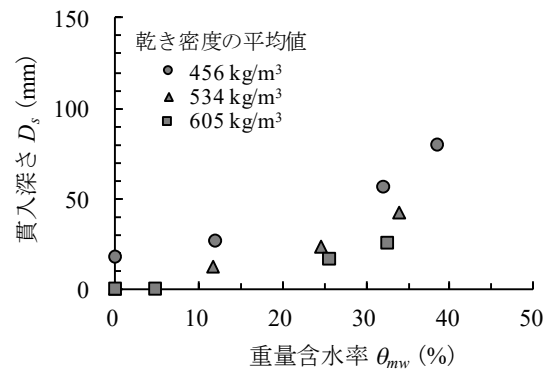
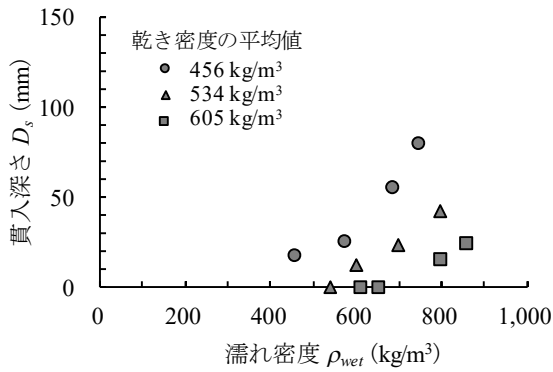


図-2 圧雪物性と貫入深さの関係 ( $P_t = 127.4 \text{ kN/m}^2$ )

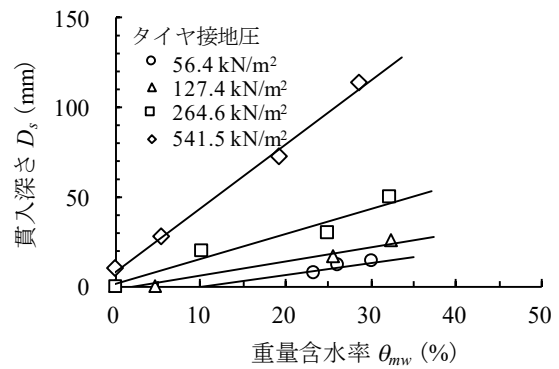
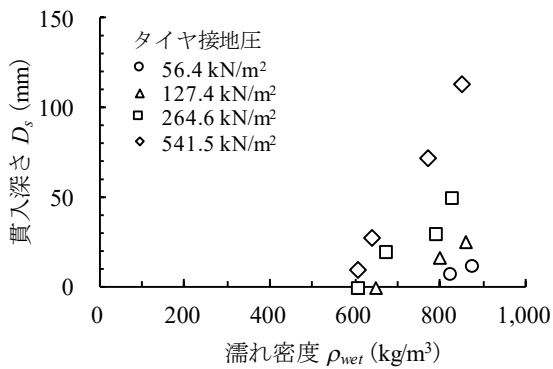


図-3 タイヤ接地圧が貫入深さに及ぼす影響 ( $\rho_{dry} = 605 \text{ kg/m}^3$ )

$$b = 6.4 \ln P_t - 33.0 \quad (3)$$

#### D. 考察

上記の試験結果では、圧雪層の乾き密度が小さく、重量含水率が大きいほど、また、タイヤ接地圧が大きいほど、貫入深さは大きいことを示した。この試験結果から1章に記載した福井での圧雪輾掘れ事例は、比較的到低密度の圧雪が水分を多量に含んだため発生した可能性が高い。ただし、本試験による圧雪への貫入現象と道路上の圧雪輾掘れ現象は以下の相違があり、更なる研究が必要である。外部静的要因（輪荷重による载荷）については、本試験での圧雪への接地圧を実車のそれと同等にしたが、载荷棒とタイヤでは圧雪との接地面積が異なる。また、本試験では圧雪表面から载荷棒を落下させて圧雪を载荷したのに対して、実車ではタイヤが転がりながら圧雪を载荷しており、载荷形態も異なる。車体の挙動やタイヤの回転などの外部動的要因については本試験では考慮されていない。こうした相違や未考慮な点を踏まえると、本試験から得られた貫入深さの知見が圧雪輾掘れ深さにどの程度適応できるかにつ

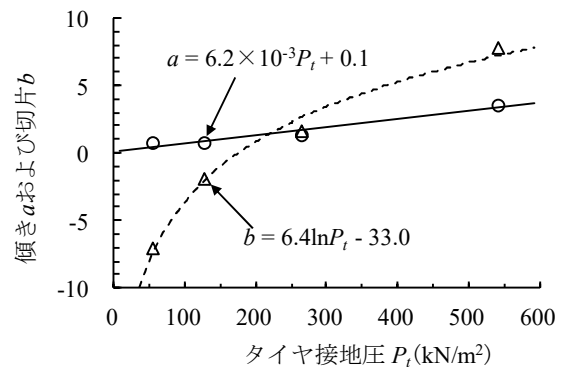


図-4 式(1)の係数とタイヤ接地圧の関係 ( $\rho_{dry} = 605 \text{ kg/m}^3$ )

いては実車試験の結果と比較して検証する必要がある。

#### E. 結論

本研究では、圧雪輾掘れの発生メカニズムの解明およびその深さの定量化を目的に、まずは圧雪貫入試験を実施し、圧雪層の乾き密度および重量含水率ならびにタイヤ接地圧が貫入深さに及ぼす影響を示した。また、乾き密度が  $605 \text{ kg/m}^3$  の圧雪に対して、貫入深さを重量含水率とタイヤ接地圧を用いて定量的に評価した。さらに、本試験

結果と福井での事例を基に、比較的到低密度の圧雪が水分を含むと圧雪轍掘れが起こり易いことを示した。

今後は、室内試験や実車試験に圧雪内部の断面観測を追加し、载荷に伴う圧雪内部で起こる物理現象を明らかにする。また、実車試験から外部動的要因が圧雪轍掘れに及ぼす影響について解明を試みる。ただし、圧雪物性や輪荷重など様々な条件下で実車試験を繰り返し行うことは極めて困難であるため、室内試験と併用しながら研究を進める予定である。

## F. 研究発表

### 1. 論文発表

藤本明宏，河島克久：車両通過に伴う湿潤圧雪の轍掘れを想定した室内貫入試験，寒地技術論文・報告集，Vol. 36，pp. 1-6，2020.

### 2. 学会発表 (学会名・発表年月・開催地なども記入)

木村逸，川崎海，藤本明宏，河島克久：通過車両による圧雪路面の轍掘れ現象に関する研究，雪氷研究大会 (2020・オンライン)，2020年11月，オンライン。

## G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

### 1. 特許取得

なし

### 2. 実用新案登録

なし

### 3. その他

なし