

新潟大学災害・復興科学研究所
共同研究報告書

不織布シートによる圧雪路面におけるスタック脱出効果の評価

研究代表者 藤本 明宏¹⁾
研究分担者 河島 克久²⁾

1) 福井大学学術研究院工学系部門 2) 新潟大学災害・復興科学研究所

研究要旨

本研究では、圧雪路面において不織布シートによるスタック脱出効果をより詳細に調べるために、(i)不織布シートと圧雪またはタイヤの摩擦係数の測定、(ii)不織布シートのスタック脱出効果の評価と駆動輪下への敷設方法の検討、(iii)不織布シートを考慮したスタック発生窪み深さ推定モデルの構築と検証を行った。その結果、不織布シートと圧雪の凍着によって高いスタック脱出効果が得られることが分かった。駆動輪下への不織布シートの敷設に関しては、不織布シートの端部をホイールに通して括り付ける方法（括り付け法）が有効であることが分かった。

A. 研究目的

申請者らは、2018年度から実車試験を実施し、車種別、タイヤ種別、チェーン装着の有無・チェーン種別を考慮してスタック脆弱性を圧雪路面に生じた窪み深さ（スタック発生圧雪窪み深さ d_{sp} ）で評価してきた。これまでのスタック試験を通じて、チェーンは駆動輪を圧雪内部へ沈み込ませることがあり、必ずしもスタック脱出に効果的でないこと、スタック状態の車両には装着が難しいことが分かった。また、駆動輪と圧雪の間に布、板、シートなどを挟めて駆動輪と圧雪との間の摩擦力を高める器具（以下、スタック脱出器具と呼ぶ）も駆動輪の回転によって後方に抜けてしまい、殆ど効果がないことが分かった。

本共同研究では、新たなスタック脱出器具の開発を目指す。これまでの研究より、駆動輪の回転時にスタック脱出器具を駆動輪の下に維持させることが重要と考えた。そこで、面状シートを採用し、その一部を前輪で踏ませることで面状シートを動かないように工夫して、予備試験を実施した。その結果、前輪で押さえたとしても面状シートが駆動輪の空転に巻き込まれ、そのスタック改

善効果が限定的であった中、不織布シートが特別に高いスタック脱出の効果を示した。この理由は、他のシートに比べて、不織布シートと圧雪との間の摩擦係数が高いためと推察した。

以上を踏まえて、本共同研究では、圧雪路面において不織布シートによるスタック脱出効果をより詳細に調べるために、以下の(i)～(iv)の研究を実施した。

- (i) 繊維の長さや密度の異なる不織布シートを対象に、不織布シートと圧雪との間の摩擦係数 μ_{sc} ならびに不織布シートとタイヤとの間の摩擦係数 μ_{st} を測定する。
- (ii) 不織布シートを用いて、スタック試験を繰り返して実施し、不織布シートのスタック脱出効果を調べるとともに、駆動輪下への不織布シートの敷設方法を検討する。
- (iii) (i)および(ii)の結果を踏まえて、スタックするか否かを判定する d_{sp} 推定モデルを構築する。また、実車のスタック試験での d_{sp} と d_{sp} 推定モデルによる d_{sp} を比較し、 d_{sp} 推定モデルの妥当性を検証する。

B. 研究方法

(1) 摩擦係数測定

μ_{sc} および μ_{st} は、傾斜法によって求めた。傾斜法とは、不織布シートと圧雪あるいは不織布シートとタイヤの両面をそれぞれ接触させた状態で傾け、滑り始めた時の傾斜角 θ を読み取る方法である。 μ_{sc} または μ_{st} は後述の式(2)のように求められる。タイヤは新品のスタッドレスタイヤであり、圧雪は直径が 2 mm 以下の人工雪を締め固めて作成した。その密度は約 500 kg/m^3 とした。鉛直荷重は 2, 5 または 10 kg とした。試験は各条件で 5 回実施し、 μ_{sc} または μ_{st} は最大と最小の測定値を除いた平均値とした。

対象とした不織布シートは、写真 1 に示す 8 種類である。写真 2 はマイクロSCOPE を用いて拡大した不織布シートの断面と表面形状である。表 1 は不織布シートの緒元である。不織布シートの素材は主にポリエステルである。写真 2 のようにマイクロSCOPE で観察すると、繊維の組み込み方は、曲線的に絡み合ったもの (A~E) と直線的に絡み合ったもの (F, H) があつた。また、それらの密度は $30 \sim 197 \text{ kg/m}^3$ の範囲にあつた。

(2) スタック試験

スタック試験は、令和 8 年 1 月 20 日および 21 日に新潟県魚沼市大白川地先にて実施された。期間中の平均気温は -2.9°C であり、累計降雪量は 69 cm であつた。試験前の試験地は 130 cm 程度の積雪があつたため、試験 6 日前に全て取り除き、その後の積雪で試験を実施した。試験初日に積雪を締め固めて圧雪路面を作成した。圧雪の雪質は水分を全く含まないしまり雪であり、その硬度および密度は約 3 MPa および約 380 kg/m^3 であつた。

試験車は、燃費が良いことから運送業界で使用されることが多く、かつスタックし易い後輪駆動の中型トラックを対象とした。タイヤはスタッドレスタイヤである。

本共同研究では、不織布シートのスタック脱出効果を調べる試験 (スタック脱出試験) と駆動輪と圧雪との間に不織布シートを敷設させる方法を検討する試験 (スタック脱出器具敷設試験) を行った。

昨年度のスタック脱出試験では、後輪の駆動輪に加えて前輪の従動輪でも不織布シートを踏ませたが、今回の試験は駆動輪のみに踏ませること

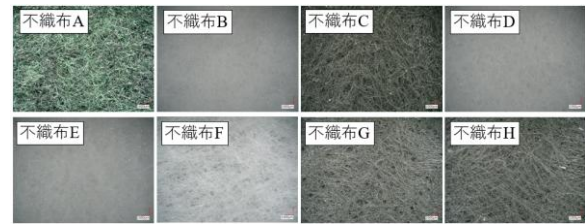


写真 1 対象とした不織布シート

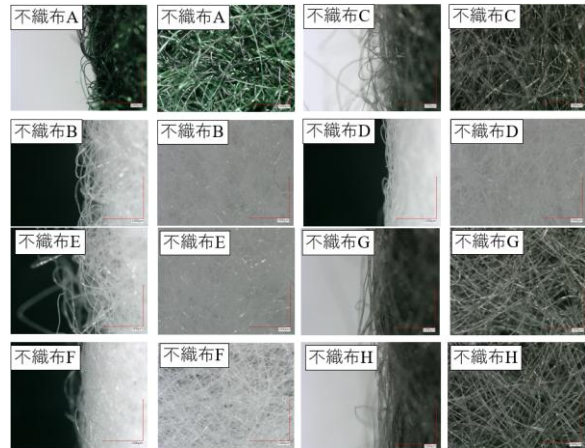


写真 2 不織布シートの拡大写真
(左：断面，右：表面形状)

表 1 不織布シートの緒元

シート	素材	密度 (kg/m^3)	厚み (mm)
A	ポリエステル	180	2.0
B	ポリエステル	174	0.7
C	ポリエステル	100	5.0
D	ポリエステル/ レーヨン	197	0.6
E	ポリエステル	30	4.7
F	ポリエステル	100	1.0
G	ポリエステル	100	3.0
H	ポリエステル	100	2.0

にした。この変更の理由は、前輪と後輪で同時に不織布シートを踏ませた状態にすることが簡単でないことと、スタック脱出器具をより簡素にすることである。不織布シートは表 1 の H を採用し、そのサイズは幅が 1 m と 2 m の 2 種類、長さが 1 m, 2 m および 4 m の 3 種類である。

スタック脱出器具敷設試験では、不織布シートの敷設方法として、(i) 駆動輪に不織布シートの端部が接触するように設置し、駆動輪の回転によって巻き込ませて敷設する方法 (巻き込ませ法)、(ii) 不織布シートの端部を図 1 のように加工し、不織布シート端部の細長い部分 (図中の a, a') を駆動輪のホイールに通して両者を括り付け、その状態で駆動輪を回転させることで不織布シートを巻

き込ませて敷設する方法(括り付け法)を試みた。

(3) スタック発生圧雪窪み深さ推定モデル

既往の研究¹⁾では、図3のように現象を単純化するために一定の傾斜角をもつ圧雪傾斜面において駆動輪が静止した状態を考え、 d_{sp} 推定モデルを構築した。駆動輪の輪荷重 W_{rg} (kN) は圧雪傾斜面に垂直な成分 $W_{rg}\cos\theta$ (垂直抗力) と平行な成分 $W_{rg}\sin\theta$ (輪荷重傾斜分力) に分けられる。ここで、 θ は傾斜角 ($^\circ$) である。圧雪傾斜面上で駆動輪が滑り落ちる直前の極限状態において、輪荷重傾斜分力と駆動輪と圧雪傾斜面との間の摩擦力は等しく、

$$W_{rg}\sin\theta = \mu_{ct}W_{rg}\cos\theta \quad (1)$$

$$\mu_{ct} = \tan\theta \quad (2)$$

となる。 μ_{ct} は駆動輪と圧雪傾斜面との間の摩擦係数である。 θ は、図3のように平坦な圧雪面と駆動輪の外郭の交点(図中の点 a) に現れる圧雪傾斜面の推定最大傾斜角 θ_{max}' と等しいと仮定して求めた。 θ_{max}' と駆動輪外郭の半径 r_t 、 d_{sp} の関係は次のようになる。

$$\theta_{max}' = \cos^{-1}\left(\frac{r_t - d_{sp}}{r_t}\right) \quad (3)$$

以上より、 μ_{ct} および r_t を定めると式(2)および式(3)より d_{sp} を推定することができる。

C. 研究結果

(1) 摩擦係数測定

図4は摩擦係数測定の結果であり、上段に μ_{sc} を、下段に μ_{st} をそれぞれ示す。不織布シートの密度が大きく、繊維の組み込みが曲線的なものほど摩擦係数が高い傾向にあった。

(2) スタック脱出試験

スタック脱出試験の結果、スタック状態から脱出できた場合とできなかった場合があった。スタック状態から脱出できた場合は、駆動輪が載っていた箇所において圧雪と不織布シートが凍着していた(写真3)。これは、駆動輪からの熱が不織布シートを介して圧雪に伝わり、圧雪表面で発生した融解水の一部を不織布シートが吸い込んだ状態で再凍結した結果と考えられる。一方、スタック状態から脱出できなかった場合は、不織布シートと圧雪との凍着が弱く、両者の摩擦力だけで

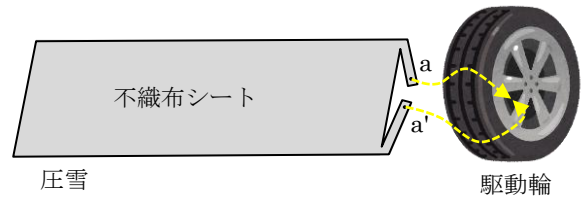


図1 括り付け法

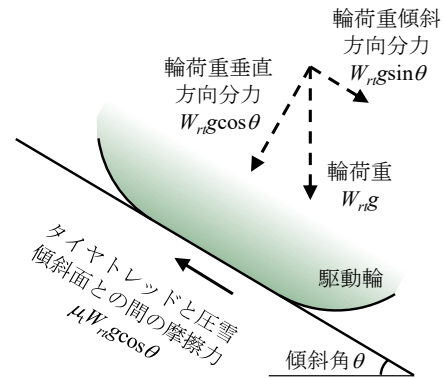


図2 駆動輪が圧雪傾斜面で静止し、滑り落ちる直前の極限状態における力の釣り合い

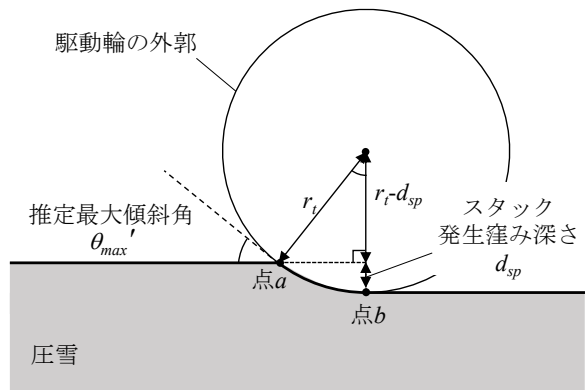


図3 スタック発生傾斜角と推定最大傾斜角

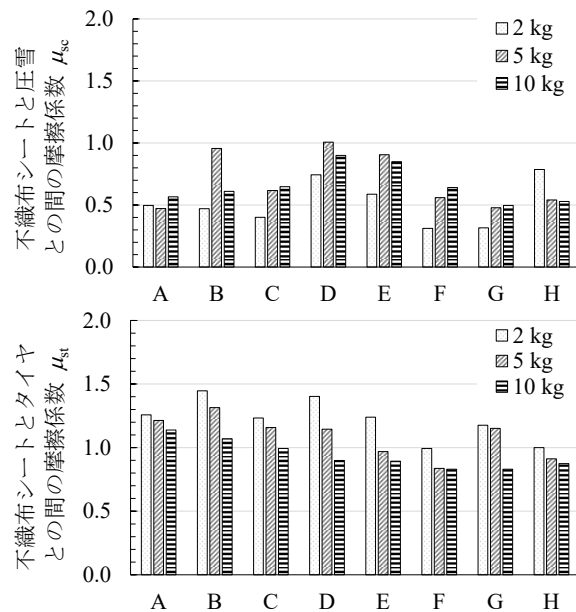


図4 摩擦係数測定の結果

は、駆動輪に巻き込まれる力に及ばず不織布シートは駆動輪の空転によって巻き込まれた。

本試験から、スタック脱出時の駆動輪に回転に伴う巻き込まれに対して、圧雪との凍着が発生した場合には凍着部のせん断に抵抗するような強大な力が作用し、巻き込まれに強く抵抗することが分かった。ただし、凍着が十分でない場合、不織布シートと圧雪との間の摩擦力だけでは、スタック脱出効果としては高くないと判断する。

(3) スタック脱出器具敷設試験

スタック脱出器具敷設試験の結果について述べる。

まず、巻き込ませ法は、アクセルの踏込が強い場合に写真4のように不織布シートが駆動輪の後方に飛び出した。また、不織布シートの端部と駆動輪との接触状態によっては不織布シートが巻き込まれないなど、確実に不織布シートを駆動輪の下に敷設することはできなかった。

一方、括り付け法は、写真5のように駆動輪を回転させると、不織布シートが駆動輪に巻き込まれ、アクセルの強弱に関係なく、駆動輪の下に不織布シートを敷設することができた。

(4) スタック発生窪み深さ推定モデル

本研究では、 d_{sp} 推定モデルに不織布シートを組み込む。図5に駆動輪が不織布シートを敷設した圧雪傾斜面で静止し、滑り落ちる直前の極限状態における力の釣り合いを示す。前述の摩擦係数測定やスタック脱出器具敷設試験より、 μ_{st} が μ_{sc} より大きく、駆動輪の空転に伴い不織布シートが巻き込まれるように移動したことから、ここではタイヤと駆動輪は一体として扱う。この場合、輪荷重傾斜分力は駆動輪（後輪）および従動輪（前輪）における不織布シートと圧雪との間の摩擦力の和は等しいと考えられ、両者の関係は次式で与えられる。

$$W_{rt}g \sin \theta = \mu_{sc} W_{rt}g \cos \theta + \mu_{sc} W_{ft}g \quad (4)$$

ここに、 $W_{ft}g$ ：従動輪の輪荷重 (kN) および $W_{rt}g$ ：駆動輪の輪荷重 (kN) である。式(4)において、 μ_{sc} に摩擦係数測定の結果を代入すると、未知数は θ のみとなり、式(2)より d_{sp} が推定される。

昨年度に実施したスタック試験での d_{sp} は 140 mm 以上であった。対して、式(4)に図4に示す μ_{sc} を適用し、 d_{sp} 推定モデルで求めた d_{sp} は 152 mm

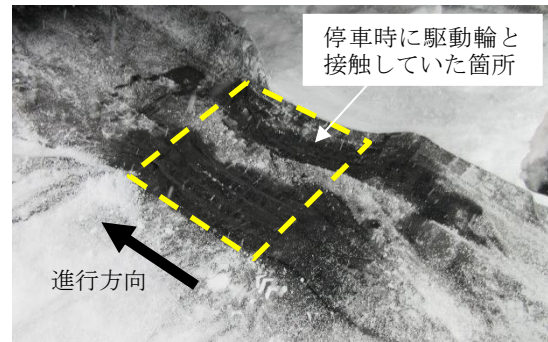


写真3 スタック車両脱出後の不織布シート

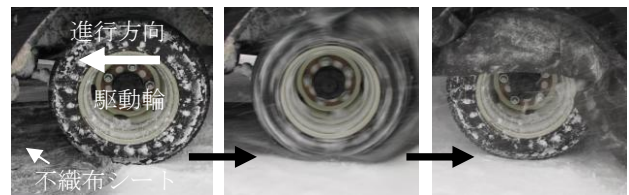


写真4 巻き込ませ法



写真5 括り付け法

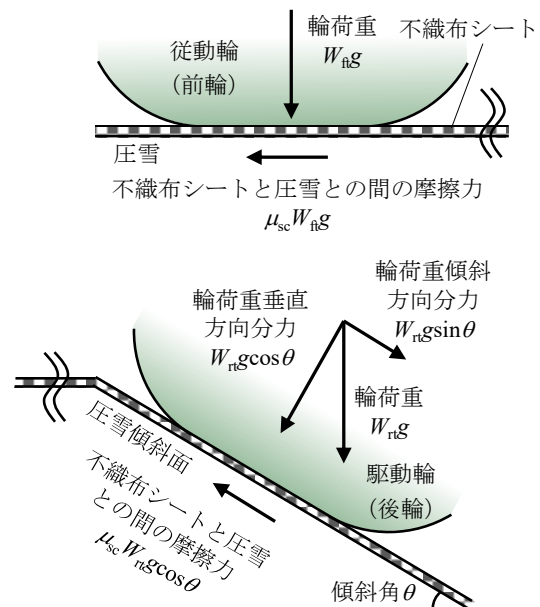


図5 駆動輪が不織布シートを敷設した圧雪傾斜面で静止し、滑り落ちる直前の極限状態における力の釣り合い

であり、実車を用いたスタック試験の d_{sp} と概ね一致した。なお、今回のスタック脱出試験では、試験最終日に極めて強い寒気が到来しており、試

験期間を短縮せざるを得ない状況にあり、予定していた d_{sp} 推定モデルを検証するための試験を実施できなかった。

なし

D. 考察

前述のとおり、スタック脱出試験において不織布シートと圧雪の凍着が重要であることが分かった。この凍着力は、駆動輪の温度、圧雪の温度、気温など熱環境、圧雪表面の状態、輪荷重、停止時間などが影響すると考えられるが、不明な点が多い。今後、これらが凍着力に及ぼす影響を定量的に評価することが望まれる。また、スタック脱出の観点からは、凍着力がスタック脱出に必要な駆動力を上回る必要があり、スタック脱出に必要な凍着力も明らかにする必要がある。

d_{sp} 推定モデルに不織布シートを適用したが、これは不織布シートと圧雪との間の摩擦力を基に d_{sp} を推定するモデルである。上述のとおり、不織布シートのスタック脱出効果は不織布シートと圧雪の凍着によって高められる。今後、この凍着を考慮した d_{sp} 推定モデルの構築が求められる。

E. 結論

本共同研究では、圧雪路面において不織布シートによるスタック脱出効果を調べた。その結果、不織布シートと圧雪の凍着によって高いスタック脱出効果が得られることが分かった。駆動輪下への不織布シートの敷設に関しては、不織布シートの端部をホイールに通して括り付ける方法（括り付け法）が有効であることが分かった。

今後は不織布シートと圧雪の凍着について詳しく調べるとともに、他の不織布シートを用いた場合のスタック脱出効果についても検討したい。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

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