

路面すべり摩擦係数別による車輪速度プローブデータの特徴と考察

国立研究開発法人	土木研究所寒地土木研究所	正会員	○奥村	航太
国立研究開発法人	土木研究所寒地土木研究所	正会員	齊田	光
国立研究開発法人	土木研究所寒地土木研究所	正会員	大廣	智則
国立研究開発法人	土木研究所寒地土木研究所	正会員	伊東	靖彦

1. はじめに

冬期の道路維持管理作業には除排雪や凍結防止剤、防滑材の散布の実施がある。これらの作業の出動は限られた路面状態の把握や天気、気温などを参考とした現状がみられる。しかし実際に走行する一般車両の挙動を反映した管理手法によって、網羅的に路線全体の路面状態を把握することができれば、より効率的に路面を維持できる可能性がある。

これまでに路面状態と車輪の挙動について示した大廣ら¹⁾の研究がある。これはタイヤ内部に加速度センサを取り付け、路面状態を判別する技術開発を行ったものである。しかし、その装置は高価であり限定的な普及に留まっている。また近年の車両には位置や加速度などの情報を取得する機能と共に、インターネットに接続できるシステムが搭載されるようになってきた。これら一般車両のプローブデータを冬期の道路維持管理に活用することが可能であれば、維持管理作業の効率化に繋がると考えられる。

本研究では一般道において走行調査を行い、路面すべり摩擦係数別に前方車輪の左右速度差から得られた値の有意差を示す。

2. 走行調査の概要とデータの取得方法

走行調査は 2023/1/25～2023/2/21 の内、15 日間において、寒地土木研究所と道の駅 望羊中山の発着点とした主に国道 230 号を通る区間を一般的な SUV を用いて行った。その際に取り付けた 2 つの装置によってデータを取得した。

路面すべり摩擦係数は車両後部に取り付けた連続路面すべり抵抗値測定装置 (Halliday Technorogy RT3) を用いて走行経路上のすべり抵抗値を 10 Hz で取得した。ここで得たすべり抵抗値をすべり摩擦係数に変換して分析を行った。車輪速度は VIDEO VBOX

Pro を用いて 20 Hz で取得した。VIDEO VBOX Pro は GPS データロガーとビデオカメラ、車両 CAN 入力を組み合わせた装置である。これら双方のデータについて計測時刻を元に結合した。ただし連続路面すべり抵抗値測定装置の計測において低速時の不安定な挙動を除くため 20 km/h 未満のデータは分析対象外とした²⁾。

3. 分析方法

プローブデータから得られた車輪速度を基に、前方の左右車輪速度差の割合を示す指標として、 V_{per} ：前方車輪速度差割合[%]を定義した。下記の算出式を示す。

$$V_{per} = \begin{cases} \frac{V_{fr} - V_{fl}}{V_{fr} + V_{fl}}, & V_{fl} \text{かつ} V_{fr} \neq 0 \\ 0, & V_{fl} \text{かつ} V_{fr} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 V_{fr} ：前方右車輪速度[km/h]

V_{fl} ：前方左車輪速度[km/h] とする。

この前方車輪速度差割合 V_{per} を 1 秒毎に 128 地点分、遡ったデータを用いて高速フーリエ変換 (以下、FFT とする。)を行った。車輪速度の取得は 20 Hz であることから、128 地点分のデータは 6.4 秒間によるものである。つまり時速 60 km で走行した場合、走行挙動を 100 m 分取得できることを参考に、処理するデータ数を採用した。

路面すべり摩擦係数 μ を基準にして 9 段階に前方車輪速度差割合 V_{per} をクラス分けした。クラス毎の閾値は $\mu < 0.1$, $0.1 \leq \mu < 0.2$, $\dots$ $0.8 \leq \mu$ とした。なお、一般的に $\mu < 0.3$ は圧雪や凍結等の雪氷路面に分類される³⁾。

3. 分析結果

路面状態別に前方車輪速度差割合 V_{per} の特徴を確認するため、調査期間中の任意の 1 日において湿潤

キーワード：冬期道路管理、車輪速度、プローブデータ、すべり摩擦係数、周波数帯解析

連絡先：〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号 TEL 011-841-1738

路面と圧雪路面の 2 区間を例として示す．そこで前方車輪速度差割合 V_{per} を FFT 分析した結果が図-1 である．目視で確認した湿潤路面（上段）と圧雪路面（下段）を比較すると，湿潤路面の FFT 分析によって周波数帯毎の振幅は約 5 から 7 Hz 域にピークがあることがわかった．それ以外の周波数帯域においてはそのピーク値に対して低い値で安定している．この湿潤路面に対して圧雪路面は多くの周波数帯域で振幅が大きいことがわかる．ハンドル操舵による左右車輪速度差の影響を考慮して 0.5 Hz 未満の振幅を除去し，前方車輪速度差割合 V_{per} の FFT 分析した値の 0.5 から 10 Hz 帯に見られた振幅の分散を算出した．この値を前方車輪速度差割合の分散 V_{std} と定義する．

この結果を元に全走行調査で得られたデータを活用して，各クラス間による有意差検定を行った．多クラス間の有意差検定には多重比較検定を用いて有意水準を補正する必要がある．従って 1 秒毎の路面すべり摩擦係数別による前方車輪速度差割合の分散 V_{std} について Bonferroni 法の多重比較検定を行い，P 値を算出した．その結果，及び前方車輪速度差割合の分散 V_{std} のサンプル数と平均値を表-1 に示す．多くの路面すべり摩擦係数別の前方車輪速度差割合の分散 V_{std} は $p<0.001$ であり有意な差を示す結果となった．一方， $0.3\leq\mu<0.6$ と $\mu\geq0.7$ の範囲においてクラス間の有意差は認められない結果となった．これらの範囲では比較的サンプル数が少なく，各々のクラス間内の平均値が近いことがわかる．

4. まとめ

本研究では路面のすべり摩擦係数を基準として路面を分類し，その路面を走行した車両の車輪速度に注目した分析を行った．得られた知見を以下に示す．

- ・前方車輪速度差割合 V_{per} を算出し圧雪路面と湿潤路面について傾向を調べた．直近 6.4 秒以内のデータで FFT 分析を行ったところ，非積雪路面では 5 から 7 Hz 帯域の振幅にピークが現れ，それ以外の周波数帯域においては，そのピーク値に対して低い傾向が見られた．
- ・路面すべり摩擦係数別による前方車輪速度差割合 V_{per} の 0.5 から 10 Hz 帯における振幅の分散は多くのクラス間で有意な差が見られた．また $0.3\leq\mu<0.6$ と $\mu\geq0.7$ における各々のクラス間においては前方車輪速度差割合の分散 V_{std} における平均値の差が

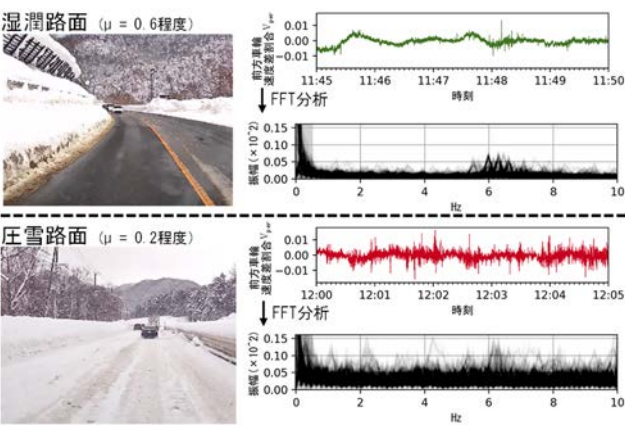


図-1 左右車輪速度差割合の計測状況

表-1 多重比較検定における P 値

μ	-0.1	0.1-	0.2-	0.3-	0.4-	0.5-	0.6-	0.7-	0.8-
-0.1	1.000	***	***	***	***	***	***	***	***
0.1-0.2		1.000	***	***	***	***	***	***	***
0.2-0.3			1.000	***	***	***	***	***	***
0.3-0.4				1.000	0.417	0.915	***	***	***
0.4-0.5					1.000	1.000	***	***	***
0.5-0.6						1.000	***	***	***
0.6-0.7							1.000	***	***
0.7-0.8								1.000	1.000
0.8-									1.000
サンプル	23,090	34,823	14,235	7,836	6,228	7,527	19,084	19,935	2,543
平均値	2.990	2.136	1.429	1.150	1.107	1.093	0.915	0.797	0.770

※平均値は(×10⁻⁸)であり，p<0.001は***で示す．

小さく，路面すべり摩擦係数のサンプル数が比較的小さいため有意な差が認められなかった．

また，これらの範囲における路面の把握は車輪速度差の割合から表現できない可能性もあるため，約 5 から 7 Hz 帯域に見られた振幅の活用や他のプローブデータを合わせて活用することが解決の一策として考えられる．

本研究により路面すべり摩擦係数によって前方車輪速度差割合において FFT 分析した結果の分散に有意な差が見られることが明らかとなった．今後は，このように路面状態毎に特徴がある指標を作成し，車両プローブデータから路面すべり摩擦係数を推定するモデルの開発を目指す．

参考文献

1) 大廣智則, 萩原亨, 花塚泰史, 高倉清, 中村広美(2022), 道路管理者と協調した凍結防止剤散布の低減に資するスマート凍結防止剤散布システムの開発, 日本雪氷学会誌「雪氷」, 第 82 巻, 6 号, pp.299-316.

2) 徳永ロベルト, 齊田光, 星卓見, 佐藤昌哉, 佐藤賢治(2020), カーブ区間対応型連続路面すべり抵抗計測技術について, 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所月報, No.802, pp.32-37.

3) 北海道開発局(1995),冬期路面管理マニュアル(案)