

路面摩擦特性と環境情報の関係について

日大生産工 ○渡辺 淳士 日大生産工（非常勤） 景山 一郎
日大生産工 栗谷川 幸代

1. まえがき

次世代道路交通の高度安全, 例えば先進運転支援システム (ADAS) や自律走行車 (AD) などの車両安全管理のために様々な車両制御システムが開発されている. 車両走行状況変化の把握は, タイヤと路面間に発生する力に関係するため, ADASやADの発展と普及のためには路面とタイヤ間の関係を把握することが非常に重要となる. これまでタイヤと路面間に発生する路面摩擦係数を推定するために種々の検討を行い, 連続的の最大摩擦 (以下ピーク μ) 計測を実施し, その可能性を示した¹⁾³⁾. さらに, これらを拡張し前方の路面状況を認識することにより, 衝突被害軽減ブレーキなどの安全支援システムにおいて, さらに高度な車両制御が可能となる. そこで本研究では, 路面摩擦特性と関連のある前方路面を含む環境状況認識技術について検討を行う. 特に, 先行研究⁴⁾⁵⁾で有効等に絡む吸収量を計測する手法などに加えて, 3次元的にデータの路面の距離データが計測可能な深度カメラを導入し, 画像処理による路面テクスチャ等の認識可能性について検討する.

2. 路面摩擦計測装置

2.1. 接地式路面摩擦計測

路面摩擦計測装置は, 図1に示すようにこれまでに構築したトレーラを使用した. タイヤは雪氷路用スタッドレスタイヤ (BLIZZAK VRX3 135/80 R12-68Q) を採用した. 3つの計測輪の左右にはそれぞれ2軸および3軸方向の荷重を計測するロードセルを用いて, 制動力並びに垂直抗力を計測し各計測輪の摩擦係数を求めた. また, 車両進行速度や横すべり角算出のために6軸IMUと光学式車速計を用い, 前後方向速度・横方向速度, GPSによる位置, 3軸周りの角速度並びに角度の計測をした.

2.2. 非接触式路面摩擦計測

路面の粗さは路面の摩擦係数と相関が高いとされており⁶⁾, その他に路面の摩擦係数に影響を与える要因として, 熱容量が考えられる⁷⁾. 本研究では, これらの路面摩擦特性を効率よく捉える

ための検討を行った. 測定に使用したデバイスの仕様を表1に示す. 路面における反射率は, 入射光に対して路面の凹凸によって生じる拡散反射量と路面の材質や表面状態によるレーザー光の吸収量に依存するため道路表面の材質毎に特有の値を持つ. 非接触式で計測車近傍から遠方までの広い範囲で計測可能な2次元LiDARを用いて, 計測位置までの距離, 入射光と反射光の割合から求まる反射強度を計測値として用いた. LiDAR取付け位置は, 牽引車ルーフ上, 地上高約1850mmで路面に対して迎角約6degとし, 車両前方約16.5m付近を計測できるように設置した. また, 路面表面の物理的凹凸解析を行うため, 画像式深度計を用い, 計測輪が通過する路面を撮影した. 深度計で物理的な凹凸を確認することで, マクロな凹凸変動と路面摩擦の関係を把握することがで



Fig.1 実験車両 (トレーラ)

表1 路面計測装置の諸元

Device name	Specifications	
Depth Camera (Depth)	Measurement range	0.2m ~ 2m ± 1mm
	Resolution & FPS	848x480 30FPS
Depth Camera (RGB)	Resolution & FPS	1280x720 30FPS
	Distance Measurement range	0.5 ~ 25m
LiDAR	RSSI Measurement range	0 ~ 65535 (16bit)
	Measurement range	-20℃~150℃
Road Temperature sensor	Measurement range	-20℃~150℃

Study on continuous friction characteristic between tire and road
- Relationship between environmental data and road friction characteristics -

Atsushi WATANABE, Yukiyo KURIYAGAW and Ichiro KAGEYAMA

きる。路面の熱容量は、各路面状態における路面表面温度の違いを検出することで把握する。これらの原理に沿って、表1のセンサ・デバイスを牽引車およびトレーラに設置し、計測を行った。なお、各センサ・デバイスのサンプリングレートは路面温度系が100Hz、LiDARが47Hz、深度カメラが30Hzである。さらに、走行した路面の状況を確認するために、牽引車両および後続車のフロントガラスに設置したビデオカメラにより、前方路面画像を撮影した。

3. 雪氷路における路面摩擦特性計測実験

3.1. 実験に使用した路面



(a) 人口氷盤路 (b) 乾燥アスファルト路



(c) 圧雪路

Fig.2 使用した試験路外観

本研究の目的である雪氷路における路面摩擦特性と関連のある環境情報の特定のために、北海道網走市のデンソー網走テストセンターを使用し、各種整備された冬季路面の特性計測を行った。計測を行った試験路は、①人口氷盤路、②ロードヒーティングが施された乾燥アスファルト路、③圧雪路である。また、これらの結果との関係を求めるために部分的に積雪状態であった一般路でも計測を行った。それぞれの試験路を図2に示す。

3.2. 乾燥アスファルト路における計測結果

過去計測した路面と比較的近い乾燥アスファルト路面の計測を行い他の路面の基準とした。この路面はロードヒーティング設備を持つアスファルト路であり、計測時乾燥状態を維持している。図3は、乾燥アスファルト路における計測結果を連続ピーク μ 計測結果と、計測した環境測定結果を走行位置に対して示したものである。なお、各計測輪が同一場所で得たデータを用いて解析する必要性から、センサの取り付け位置及び角度等を加味して、第3輪の計測位置へ距離方向にオフセットしている。本計測路で

は、路面が一定の状況に管理されていることから、計測されたピーク μ の値が安定していることが確認できる。なお、計測時の区間平均速度は11.2m/sである。ピーク μ については、平均値1.086であり、過去取得した乾燥アスファルト舗装と同等の値を示した。また、路面表面温度が約10℃程度でロードヒーティング装置により安定していた。LiDARの反射強度 Received Signal Strength Indicator (以下RSSI)は、測定範囲のタイヤ幅位置付近の代表値5点を基に、平均値を走行位置毎に求めて代表値とした(約200mm幅相当)。多少の変動が確認されたが概ね100~200の範囲に収まっている。これは、出力した赤外線が路面等で反射または吸収された後に受光部に戻ってきた反射量を最大値65535となるように示した指標である。先を見渡せるように角度を浅く設定した影響もあり受光量としては非常に小さな値となった。また、深度値[m]は比較的低周波成分の車両のピッチングや路面のうねりの影響により数cm単位で値が変動する。そこで、直近の計測前5フレームと計測後5フレームの計10フレーム毎の移動平均値を求め、元波形から差し引くことで低周波成分による影響を取り除き、路面凹凸[m]として取り扱った。この区間の路面凹凸の実効値は0.91[mm]であり平滑な乾燥アスファルト路面を表現していることを確認した。

以上の結果を以降検討する雪氷路面との基準データとする。

3.3. 圧雪路における計測結果

圧雪路の計測結果を図4に示す。計測時の区間平均速度は11.2m/sである。ピーク μ の平均値は0.518であり、路面表面温度は、走行位置0~75mの間は-9℃付近で変動しており、それ以降でほぼ-8℃で一定値になっており、区間平均値は-8.1℃であった。LiDARの反射強度RSSIは、温度が急激に低下した部分で同様にRSSIは低下した。多少の変動が確認されたが、概ね200~300の範囲に収まっており、乾燥アスファルト路と比較して倍程度の値を示した。乾燥路と比較して圧雪路が高い値を示した理由として、乾燥路と比較して圧雪路は踏み固められた雪が均一ではなく、これにより、乱反射を起こし相対的に高い値を示したと考えられる。圧雪路面は図2(c)の前方画像からも分かるように、路面の凹凸が他と比較して大きなことが確認された。この結果は、前述のRSSIの結果を裏付ける結果となった。この区間の路面凹凸の実効値は0.97[mm]となった。実効値とし

ては、乾燥路面と同等となったが 0-50m 区間で何度か確認されるように圧雪の不規則な路面凹凸と見られる最大 7mm 程度の変動が確認された。

3.4. 氷盤路における計測結果

氷盤路面の計測結果を図 5 に示す。計測時の区間平均速度は 11.1m/s であり、圧雪路から氷盤路に侵入する位置を 0m とし、それ以降が氷盤路となり、ピーク μ の平均値は 0.204 であり、路面表面温度は約 -10°C 程度である。LiDAR の反射強度 RSSI は、概ね 0~100 の範囲に収まっており、多くが 0 となった。原因としては、氷盤の平滑度が高いことに加え LiDAR の設置角が浅く照射したレーザー光が戻ってこなかったためと推察される。この区間の路面凹凸の実効値は 1.25[mm] となった。実効値が乾燥アスファルト路と同等またはそれ以上の値になった原因として、画像で確認された氷盤表面の上に舞っていた氷の粒を誤検出してしまった可能性がある。

3.5. 一般路における計測結果

雪氷路含む一般路における路面摩擦係数と関連性のある環境情報データを把握するために、乾燥アスファルト路、圧雪路、氷盤路の特性計測結果を用いて、それらの特性について確認する。本研究では、走行した一般路の内、主に圧雪された路面の環境データ情報の計測例を示す。図 6 に計測した 900m 区間のピーク μ 及び路面温度、路面反射強度、路面凹凸、路面反射率について示す。計測対象の路面は、一部舗装面が露出する圧雪路であり、試験路の圧雪路よりも路面凹凸が顕著に見受けられた。路面温度は、アスファルト舗装が露出している箇所では -7°C 前後であり、圧雪部分では -14°C 程度であった。また、一般路において積雪状態や圧雪状態並びに路面の露出など路面状況が大きく変動することが確認できた。次に、環境情報を用いた路面推定の前段階として、カテゴリー分類について検討を行う。一般路における路面摩擦係数と路面吸収率及び路面温度の関係を図 7 に示す。この図では、図 3-5 で得られた試験路の結果を合わせて示している。計測した路面摩擦係数と前方画像映像と照らし合わせて該当する路面を判断し、3つの路面にカテゴライズした結果を○で囲み示した。図 7 から、路面温度が低い場合は RSSI と路面温度のセンサフュージョンが路面分離には有効であると考えられる。特に、氷盤路面の検出の可能性を示した。一般路における路面摩擦係数と RSSI 及び路面凹凸の関係を図 8 に示す。図 8 から路面温度が高い場合

は RSSI と路面凹凸のセンサフュージョンが有効であり、ドライ路面とその他の路面の識別が可能となる。

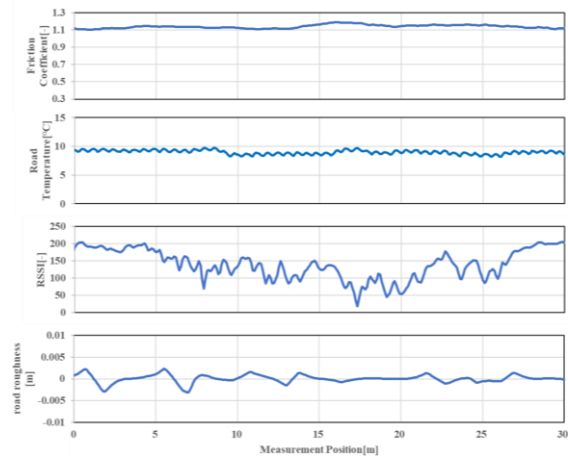


Fig.3 乾燥アスファルト路での路面摩擦係数と環境情報との関係

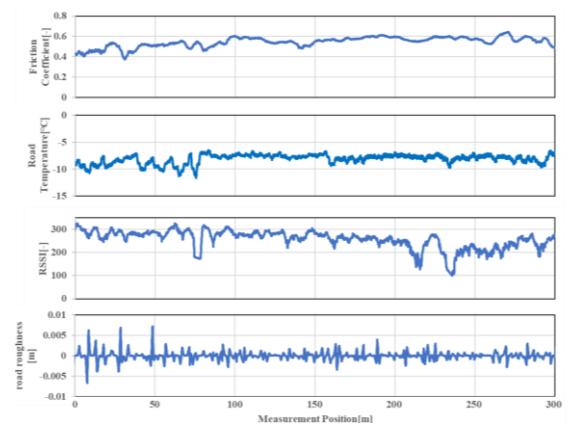


Fig.4 圧雪路での路面摩擦係数と環境情報との関係

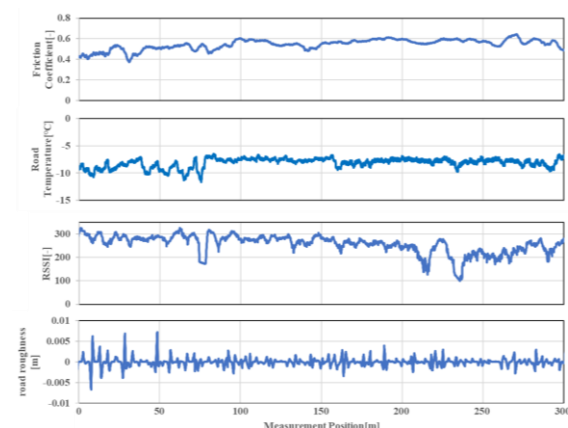


Fig.5 人口氷盤路での路面摩擦係数と環境情報との関係

4. 結論

本研究では、非接触式路面摩擦推定システムのための計測手法検討のために、実験から路面摩擦と関連のある環境情報の抽出を行った。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 管理された試験路を用いて人工氷盤路、圧雪路、乾燥アスファルト路を用いて計測を行い、路面摩擦と関連のある環境情報について走行位置毎の特性計測結果を示した。
- (2) 試験路内で取得したこれら環境情報の変動を把握し、これを基に積雪のある一般路計測結果と比較してそれらの対応を確認した。
- (3) 温度領域毎に推定ロジックを切り替えることで乾燥舗装路面・圧雪路・氷盤路のカテゴリ分けの可能性が示唆された。

今後の研究として、路面温度の変化が著しい夏季の計測における推定指標を含めて確認する必要がある。これらの検討後、環境情報と路面摩擦情報を有効に関連づける路面摩擦推定システムの構築とその評価を行う。

参考文献

- 1) 渡辺ほか：路面摩擦係数推定アルゴリズムに関する研究，日本機械学会第 12 回交通・物流部門大会講演論文集，(2003)
- 2) 景山ほか：実路面の摩擦特性計測に関する研究- 計測システムの基本設計について，自動車技術会論文集，Vol. 51, No. 5, p. 924-930 (2020)
- 3) A.Watanabe et.al.: Study on the Influence of Environmental Conditions on Road Friction Characteristics, Lubricants 2023, 11(277), (2023)
- 4) 景山ほか：冬季雪国における路面摩擦特性計測について，自動車技術会春季学術講演会講演論文集，(2024)
- 5) 中島利朗ほか：近赤外光の吸光特性と偏光特性を用いた路面状態検出システムの開発，計測自動車制御学会論文集 Vol. 46, No. 12, pp. 746-753, (2010)
- 6) 堀田鴨夫，路面のすべり摩擦係数について，開発土木研究所月報，No. 481, pp. 65-68 (1993)
- 7) 福原輝幸 ほか：凍結路面の発生メカニズム，日本雪工学会誌，No. 21, Vol. 2, pp. 110-115 (2005)

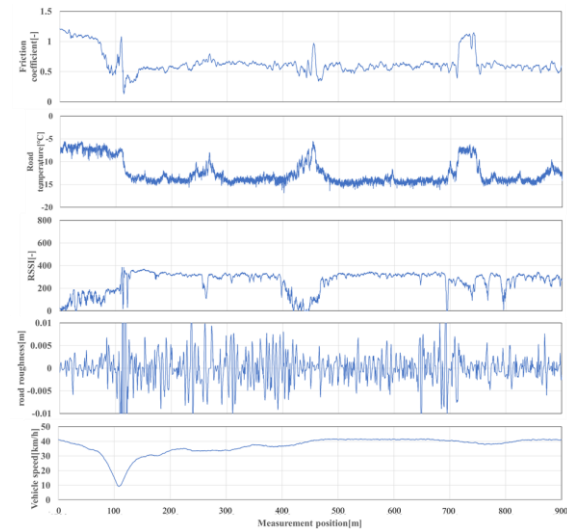


Fig.6 一般路における路面摩擦特性

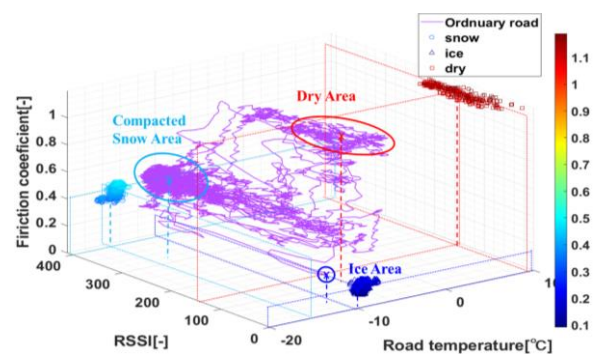


Fig.7 路面温度と RSSI 及び路面摩擦係数のセンサフュージョン

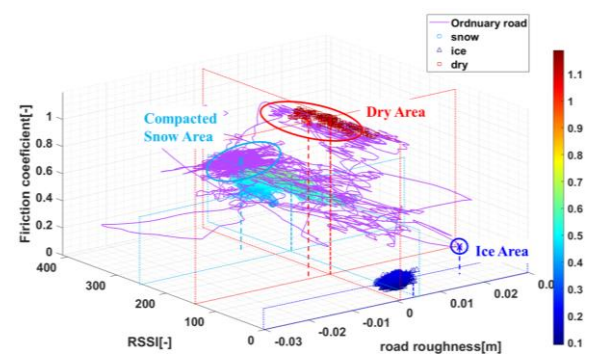


Fig.8 路面凹凸と RSSI 及び路面摩擦係数のセンサフュージョン