

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。特に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連続的の最大摩擦（以下ピーク μ ）計測が必須となる。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非接触式路面摩擦係数推定について検討を行う。特に、先行研究¹⁾²⁾では真値となる摩擦係数が定置計測のものや、車両加速度挙動などから間接的に求めているものが多く、路面摩擦の空間・時間的变化やピーク μ を反映していないという側面があり、我々の目的には適さない事が示唆される。そこで、本研究では接触式ピーク μ と環境情報を走行しながら連続的に同時計測を行った上で多変量回帰モデル構築を行い、その有効性を確認する。

2. 路面摩擦計測装置

2.1. 接地式路面摩擦計測システム

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、夏季路面では、サマータイヤ（MICHELIN CLASSIC X 125/80 R12-62S）冬季路面では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、車両進行速度算出のために光学式車速計を用い、前後方向速度の計測をした。

2.2. 接触式路面摩擦推定手法

本研究では、想定される路面タイヤ間の多様な状況に適用させつつ、推定に要する時間効率を考

慮し、タイヤ特性を近似化するMFタイヤモデルを簡易化したものを用いる³⁾。推定に用いる初期状態の簡易的なMFは以下の式を用いた。

$$\mu = a \cdot \sin\{b \cdot \tan^{-1}(c \cdot s)\} \cdots (1)$$

ここで、各項を以下とする。

μ ：路面摩擦係数
 s ：スリップ比
 d ：転がり抵抗係数
 a ：係数1， b ：係数2， c ：係数3

摩擦特性計測システムにより計測した μ - s 特性の摩擦係数とスリップ率3点を求め、これらを実験点として(1)式中の a, b, c の係数について最小二乗法を用いて同定することを基本方針とする。

さらに、図1の(b)の通り、第1輪と第2輪間は0.904m、第1輪と第3輪間は1.804mとなっている。ここでは、第3輪を基準輪として第1輪と第2輪の位置を合わせたデータの取り扱いをする。第3輪のデータ番号を n とすると、第1輪タイヤは $n-180$ 、第2輪タイヤは $n-90$ となる。そして、実験で得られた3点の摩擦係数とスリップ比を基に前述のリサンプリングした等間隔距離状態における摩擦特性をMFにより同定を行い、その最大値であるピーク μ を求めた。

2.3. 非接触式路面摩擦計測システム

「路面粗さ」は路面の摩擦係数と相関が高いとされており⁴⁾、また急激な摩擦を低下させる要因として「路面水分量」が考えられる⁵⁾。その他に路面の摩擦係数に影響を与える要因として、熱的特性が考えられる⁶⁾。また、路面の摩擦に関連する物理特性変化は、光や電磁波の応答は波長帯によって感度が異なる。可視・近赤外域は「水膜や表面粗さ」に、遠赤外域は「表面温度や氷結状態」に、ミリ波域は「誘電率や水分量」にそれぞれ強く反応し、それぞれ路面に対する「反射・吸収・放射」の違いとして現れる。LiDARは、レーザ光の路面の反射・吸収特性を基に圧雪路や乾燥路における摩擦係数に感度がある。アルベドは、太陽光の入射と路面からの反射からのエネルギー比を測定し、路面の反射・吸収特性に基づいて湿潤や氷路で感度が高い。深度カメラは、赤外カメラ

Relationship Between Road Surface Friction Characteristics
and Environmental Information

Atsushi WATANABE, Ichiro KAGEYAMA and Yukiyo KURIYAGAWA

によるアクティブステレオ視を利用し路面の微細な凹凸を捉え、圧雪路や乾燥路における摩擦係数に感度がある。放射温度計は摩擦係数と直接結びつかないものの、雪や氷などの状態を間接的に捉え、補正要素として使用できる可能性が高い。ミリ波レーダは、電波のエネルギー吸収量が、氷・雪・水で差が生じるため、湿潤～雪氷までの広い領域で摩擦係数と関係性がある。これらを基に、構築した非接触式路面摩擦計測システムを図2に示す。このように、各センサは異なる物理メカニズムに基づいて路面摩擦特性と関係しており、単独で全路面状態をカバーすることは困難であるが、相補的に組み合わせることで安定した推定精度が得られることが期待される。

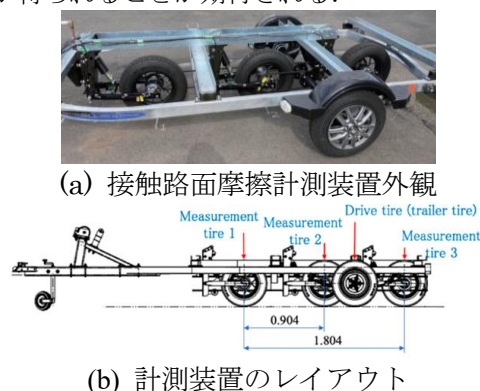


Fig.1 接触式路面摩擦計測システム

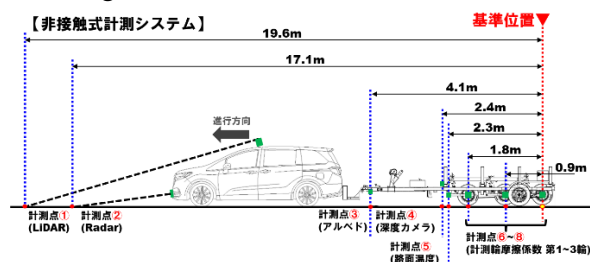


Fig.2 非接触式路面摩擦計測システム

表 1 非接触式環境センサと路面との対応

Sensor	Physical principle / Indicator	Effective surfaces
LiDAR (RSSI)	Near-infrared reflectance	Snow/Icy, dry
Albedo sensor	Broadband average reflectance	Snow/icy, wet
Depth Camera	Standard deviation of surface roughness	Snow/icy, snow
RGB Camera	Visible reflectance, luminance variation	Snow, sherbet
mmWave radar (M-wave peak ratio)	Ratio of peak to mean received power	Wet/icy
mmWave radar (AoA std)	Dispersion of angle-of-arrival	snow, sherbet

2.4. 非接触式計測アルゴリズム

本システムでは、対地車速計で取得した車体進行速度を基に走行距離を算出する。図2に示すように走行距離に同期した計測輪第3輪位置（基準位置）にオフセットして同一路面位置データへ修正した。また、単回帰分析を行うためにスケールの影響を受けないようにセンサデータを標準化（Z変換）をおこなった。それから、単回帰分析による特徴量の抽出をした後、強制投入法を用いた重回帰分析により重回帰モデルを構築する。

3. 摩擦係数を規定した試験路実験

3.1. 実験に使用した路面

路面摩擦の変動等を計測するために、夏季に栃木のGKNプルービンググラウンド（図3(a) 参照）を借用し、計測を行った。実験に使用したコースの詳細を図3(b)に示す。このコースでは、高摩擦係数路（以下高 μ 路）、中摩擦係数路（以下中 μ 路）、低摩擦係数路（以下低 μ 路）を用い、これらの連続摩擦特性変動を計測した。なお、それぞれの摩擦係数は高 μ 路で1.01、中 μ 路で0.91、低 μ 路で0.75である。

3.2. 実験結果

ピーク μ とロック μ はそれぞれのロードセル出力から計算され、2.2節で説明したMFを用いて推定した。図4では、速度40km/hで高 μ 路を計測した結果を示す。乾燥路面と湿潤路面では0.4～0.45の差が確認された。それ以外の区間では、特に湿潤路面では安定した計測結果が得られた。図5では、速度40km/hで低 μ 路を計測した結果を示す。乾燥路面と湿潤路面では最大0.65の差が確認された。図4と図5を確認すると、高 μ 路と低 μ 路共に、規定された μ 値同等の摩擦係数が測定できた。また、乾燥と湿潤時を比較した際に絶対値だけでなく変動量も大きい路面であることが確認された。特にこのような路面は、湿潤時に急激な摩擦係数が伴うことを指すため早期に検出する手法が望まれることが示唆された。

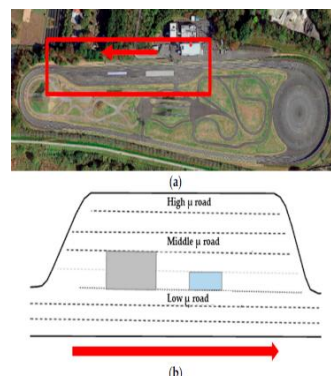


Fig.3 試験路外観（GKNテストコース）

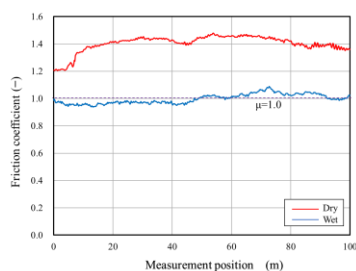


Fig.4 高 μ 路における乾燥条件と湿潤条件におけるピーク μ の変化

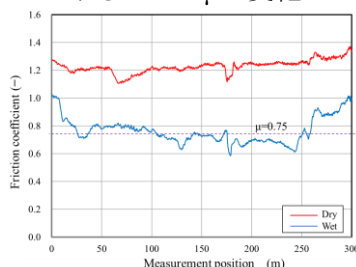


Fig.5 低 μ 路における乾燥条件と湿潤条件におけるピーク μ の変化

4. 雪氷路における路面摩擦特性計測実験

4.1. 実験に使用した路面

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。計測に使用した試験路は、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6に示す。



(a) 人口氷盤路 (b) 乾燥アスファルト路



(c) 圧雪路

Fig.6 使用した冬季試験路外観

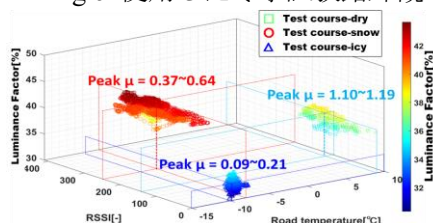


Fig.7 路面摩擦係数と路面輝度・LiDAR 反射強度・路面温度の関係 (乾燥アスファルト/圧雪路/氷盤路)

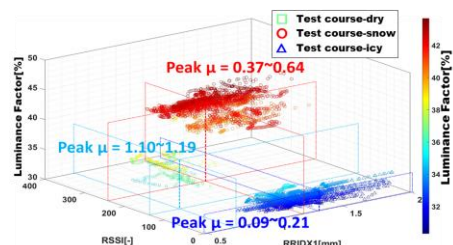


Fig.8 路面摩擦係数と路面輝度・LiDAR 反射強度・路面凹凸指標の関係 (乾燥アスファルト/圧雪路/氷盤路)

4.2. 冬季試験路における計測結果

「RSSI」「路面温度」「路面輝度率」「RRIDX」を用いて相関図を描いたものを図7～8に示す。図7は路面摩擦係数と路面輝度率、RSSI及び路面温度の関係を表しており、図8は路面摩擦係数と路面輝度率、RSSI及びRRIDXの関係を表している。また、「RSSI」「路面温度」「路面輝度率」「RRIDX」について平均値を補助線で表した。図7より、RSSI単体では乾燥路面と氷盤路面の区別が難しい場合でも、路面輝度率や路面温度を用いて路面種別の分類の可能性を示した。ここで、路面温度は昼間の日射影響等による温度変化が確認される路面では問題ないが、一般道における真夜中や降雪の降り注ぐ雪氷路等では温度変化が今回の路面のように、得られない可能性がある。そこで、図8より路面粗さを間接的に示すと考えられるRRIDXを用いることで、雪氷路とアスファルト路の路面種別の分類可能性を確認した。

5. 雪氷一般路の路面摩擦特性計測実験

5.1. 実験に使用した路面

雪氷路を含む路面摩擦係数推定アルゴリズム検討のために、新潟県魚沼市の部分的に積雪状態であった一般道を使用して計測を行った。計測を行った路面の代表例を図9に示す。実験当日は、図9(a)(b)(c)にあるように雪のない湿潤路面や雪が解けてシャーベット状態の路面また、積雪路面も確認された。今回は、これらの路面を含む区間での計測を行った。

5.2. 重回帰モデルによる推定結果

2.4節で説明したように、各センサ位置を考慮して基準位置合わせを行った後、単回帰分析を行った結果を図10に示す。路面毎に、LiDAR反射強度(乾燥アスファルト)、アルベド(湿潤路)、深度カメラ(シャーベット、雪氷路)、ミリ波レーダ(積雪路)で比較的高い相関係数が得られ、全てで $R=0.53$ 以上の値が確認できた。本結果に基づいて、ピーク μ を目的変数とする強制

投入法による重回帰式を構築する。図2に示す非接触センサ群の計測位置①～⑤毎に、図11に示すように計5パターンの重回帰式を作成した(データ数N=1905,説明変数P=最大7)。

Model①～③では,説明変数を増やす毎に改善されているが,説明力不足であり改善が求められる。乾燥/湿潤/雪氷路面でのそれぞれの特徴が,説明変数増加により表現されていき,Model⑤では観測値に対してほぼ1:1線状に近づく。図12に示すようにモデル精度・誤差について確認すると調整済み決定係数およびRMSEは共にModel⑤が最良な結果となり,特にModel③～④の段階で大幅な決定係数の改善,Model①～②の段階で大幅なRMSE改善が確認された。これは,路面輝度と路面凹凸指標が反射・粗さ・散乱情報を保管したことが要因と推察される。

6. 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アルゴリズム構築と評価を行った。得られた結論を以下にまとめる。

まず,3章では接触式路面摩擦係数の真値の妥当性について確認し,規定された摩擦係数と同等の値が計測され,真値として妥当であることが確認された。4章では雪氷路面の路面分離について検討し,LiDARや深度カメラ,路面温度が分離に重要であることを明らかにした。5章では,LiDAR・ミリ波・深度カメラ・赤外線放射温度計・アルベドを走行中に取得し,路面の反射・吸収・放射特性を利用した重回帰モデルにより乾燥～雪氷路のような多様な路面状態を1つのモデルで推定可能であることを明らかにした。今後は,より前方の路面摩擦推定精度向上について検討する。

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) Zhangcun Yan, Real-time detection of road surface friction coefficient_ A new framework integrating diffusion model and Transformer in Transformer algorithms, Alexandria Engineering Journal 113 (2025), pp. 620-632
- 3) Pacejka, H. B., Bakker, E.: The magic formula tire model, Supplement to Vehicle System Dynamics, Vol.21 (1991)

- 4) Natalia et. Contribution of Micro and Macro Texture for Predicting Friction on Pavement Surfaces, Center for Highway Pavement Preservation (CHPP) Report, 2016
- 5) Minh-Tan Do et.al, Influence of Thin Water Film on Skid Resistance Traffic and Transportation Engineering, Volume2, No.1 (Serial No.2), pp. 36-44 (2014)
- 6) 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.9 使用した雪氷一般路外観

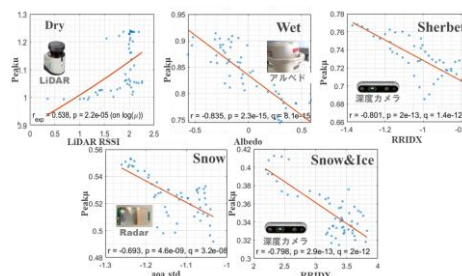


Fig.10 単回帰分析結果

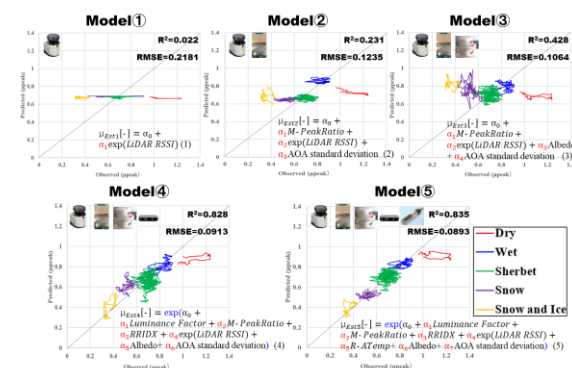


Fig.11 モデル別重回帰分析結果

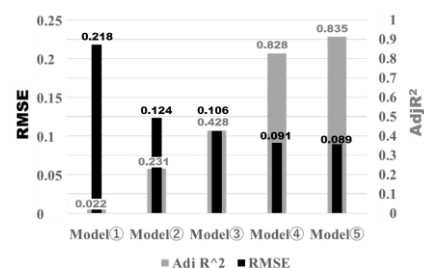


Fig.12 モデル別推定誤差と精度