

実路面の摩擦特性計測に関する研究

～実路計測における推定精度低下要因について～

日大生産工 ○渡辺 淳士 日大生産工 栗谷川 幸代
元日大生産工 景山 一郎

1. まえがき

道路交通では、路面摩擦により、車両の縦・横運動が大きく影響を受け、ドライバーが行う緊急回避行動などの減速や停止距離予測に大きな影響を与える¹⁾。そこで、例えば先進運転支援システム (ADAS) や自律走行車 (AD) などの安全管理のために供用中の舗装の路面摩擦係数を系統的に測定し、データベース化し、それを用いて道路摩擦推定システムを構築することが期待される。我々は今までに道路進行方向に対して連続的に計測できる路面摩擦計測装置を構築し、湿潤路面摩擦係数が規定された試験路において乾湿異なる条件下の基で実験を行い路面摩擦係数推定値が規定値と同等であることを確認済みである²⁾³⁾。本稿では、次のステップとして実路での摩擦係数推定を行い、路面摩擦係数の推定精度低下要因を挙げその結果を提示する。

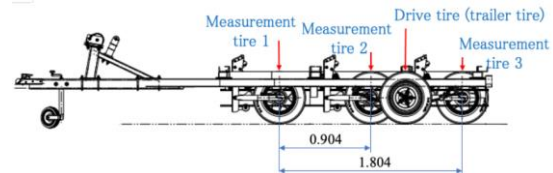


Fig.1 Experimental trailer

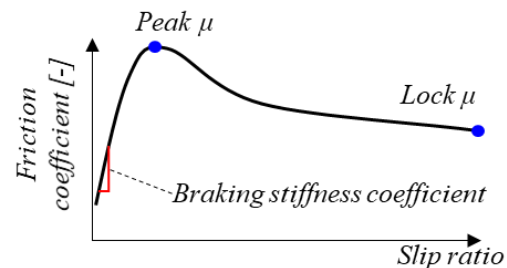


Fig.2 The friction characteristics indices

なお、計3か所の各計測輪における摩擦係数とスリップ比は以下で算出される。

$$\mu_i = \frac{F_{Bi}}{N_i} \quad (2)$$

$$s_i = \frac{v - \omega_i r_i}{v} \quad (3)$$

ここで、各項を以下とする。

μ_i : i番目の計測輪における摩擦係数
 F_{Bi} : i番目の計測輪における制動力 [N]
 N_i : i番目の計測輪における垂直抗力 [N]

s_i : i番目の計測輪におけるスリップ比
 v : 車両進行方向速度 [m/s]
 ω_i : i番目の計測輪における車輪角速度 [rad/s]
 r_i : i番目の計測輪におけるタイヤ半径 [m]

これらを実験点として(1)式中のa,b,cの係数を最小二乗法を用いて同定し、走行中のピーク μ の連続計測を可能とする。

2. 路面摩擦特性計測手法

過去に設計・開発した摩擦特性計測システムを図1に示す。各タイヤに配置している2軸のロードセルの出力 (垂直抗力と制動力) から摩擦係数を、各タイヤにおける車輪速の比からスリップ比を求めている。算出した計測タイヤにおけるスリップ比及び摩擦係数から後述のマジックフォーミュラ⁴⁾ (以下MF) により μ -s 特性を推定する。また、ADAS等において重要な摩擦特性指標は図2の通りであり、1)制動係数 2)ピーク μ 3)ロック μ が代表的な指標である。推定に用いる簡易的なMFは以下の式を用いた。

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

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

3. 実路における計測

3.1. 計測結果概要

A Study on Measurement of Friction Characteristics of Actual Road Surface
 - Factors that Decrease the Accuracy of Road Friction Coefficient Estimation
 in Actual Road Measurements -

Atsushi WATANABE, Yukiyo KURIYAGAW and Ichiro KAGEYAMA

実路にて計測された路面摩擦特性は、試験路と比較して外乱要素が強く試験路のように安定して計測ができない可能性がある。計測された路面摩擦特性の推定精度低下要因について以下が考えられる。

1：加減速を含む走行パターンの影響

2：路面の突起や路面勾配の影響

3：旋回操作を含む走行パターンの影響

計測した結果を基に判断した問題点が上記のどの項目に該当するかを確認していく。

解析例として、湿潤状態における舗装が施された実路を走行した場合におけるピーク μ の連続測定結果を図3に示す。センサの座標系はSAE座標系を用いており、全てのセンサはトレーラ車体に取り付けられている。また、横軸は走行位置を示す。車両挙動の概要は以下のようである。

0m-70m区間は直進路を一定速で走行し、70m区間から最大0.1Gで減速し、130m付近で停車した。その後最大0.2G程度加速度で直進路を走行し、直進走行後290m付近から減速(最大0.25G)すると(A点)停車せずに再び加速し330m付近(B点)で路面変動に伴うロール変動を受けつつも、左車線の駐車車両を右→左操舵操作で回避し、470m付近で停車した。再び駐車車両を回避する(C点)とすぐさま、交差点にて信号を左折するために加速しながら左操舵操作を行い(D点)左旋回し、ハンドルを戻す動作をして左折を完了させた。ここで、路面摩擦係数が他と比較して大きな変動を示した部分に着目する。図3のA～D点が該当箇所である。これらは過去の試験路データや前後の変動から外れた値を示している。特に、Dは旋回動作と連動して路面摩擦特性の形状を大きく変化させている。Bは、路面凹凸により第1輪が浮いてしまっており、計測の前提から外れるため今回の報告では、検討から除外する。

A,C,Dの運転場面と推定精度低下の関係性を明確にするため、路面状態及び車両応答を確認し、実路の走行に合わせた装置改良について検討する。

3.2. 実験装置の改良

本装置は、路面の凹凸に応じて適切な荷重を受けるためにサスペンションとスイングアームを用いている。そこで、図4に示すようにスイングアーム上にIMUを追加した。本センサは3軸方向の角度に加えて3軸方向角速度及び加速度が計測可能である。これにより、ロードセルの荷重方向や計測輪毎の運動状態の計測が可能となる。また、トレーラフレーム上部

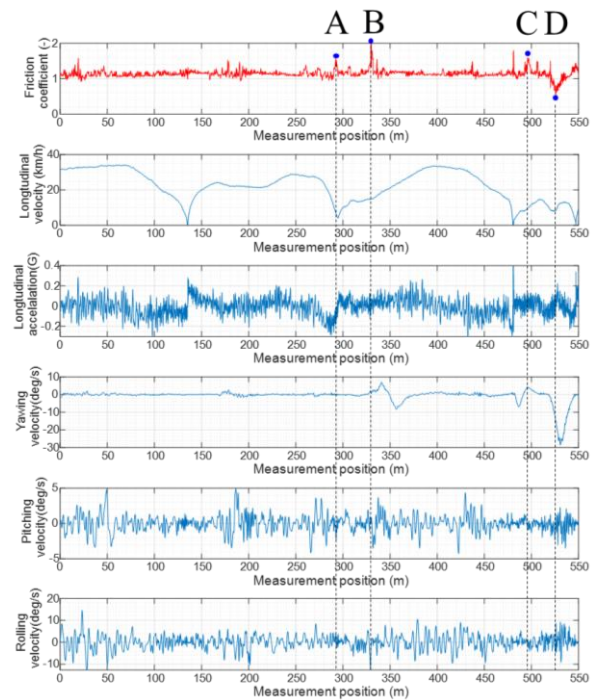


Fig.3 Experimental test Results on Actual Road

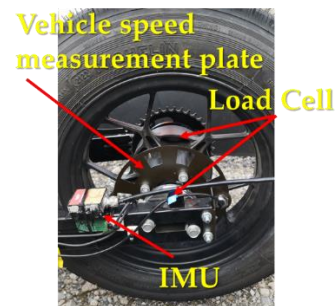


Fig.4 Overview on measurement system

にも同様にIMUを固定して計測を行った。次章では、本章で改良した装置を用いていくつかの運転場面走行時の車両応答とピーク μ の関係を確認する。

4. 車両応答を用いた課題抽出

4.1. 加減速の影響

図5は直線路において加減速走行を含むピーク μ を連続計測した結果である。加減速の影響と路面変動の影響を見るために、図1に対して新たに計測輪毎のピッチ角を追加した。ピッチ角の初期角は重心点やヒッチ点高さの影響を受け概ね、第1輪から順に4deg/2.7deg/2.3degである。車両挙動の概要は以下のようである。

135mの停車状態から加速を開始し、175m付近で速度約23km/hの一定車速にて走行し、185m前後で路面のうねり等の影響により多少

のピッチングを伴いつつも 235m 付近から加速し、185m 付近で最大 0.2G 程度の減速をしている。ピーク μ の変動量は、A 点で最大となる。この A 点ではピッチ角は制動に伴い最大約 10deg 前傾していることが分かる。

A 点の特徴を掴むために、ピッチ角とピーク μ の波形を比較すると相関関係は見られないことが分かった。また、A 点における減速度は最大減速度 0.2G の頂点を過ぎた 0.16G であった。このずれの影響は計測輪の取り付け位置関係の影響であると仮定する。

試験路における μ -s 特性は、一定速度で走行中に制動をかけ、ある一定区間の μ -s 特性が一定であるという仮定の基で計測を行った。そこで、過去においては各計測タイヤの取り付け位置による影響を速度と相対的な位置関係を基に補正して取り扱うことが可能であった。しかし、実路の摩擦特性計測においては速度の変動及び路面が平滑である保証がないため、平均速度を用いた前述の補正手法が適用できない可能性がある。そこで、以下のような手順で補正を行った。一定周期で収録した速度データを基に走行距離を算出し、走行距離を用いて等間隔距離でのリサンプリングを行った。図 1 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 1 輪を基準輪として第 2 輪と第 3 輪の位置を合わせたデータの取り扱いをする。第 1 輪のデータ番号を n とすると、第 2 輪タイヤは $n+90$ 、第 3 輪タイヤは $n+180$ 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。

タイヤ位置の補正結果を適用し路面摩擦特性の連続性を示したピーク μ の結果を図 6 に示す。横軸は走行位置を示す。補正前後で比較すると、全域において補正前の方の振れ幅が大きくまた進行方向に対する位相も遅れている。また、走行位置 275m 以降の急減速する場面で顕著に位置ずれとピークの絶対値が大きく異なっている。これは、第 1 輪と同一路面を 2 輪 3 輪が同一の路面を踏むまでに時間が掛かるために路面の変動をずれて捉えてしまっているためと考えられる。これらの結果から補正を行わない場合、前後方向に異なる位置の路面同士で μ -s 特性を求めることとなるため、本稿における以後の解析は本手法を適用するものとする。

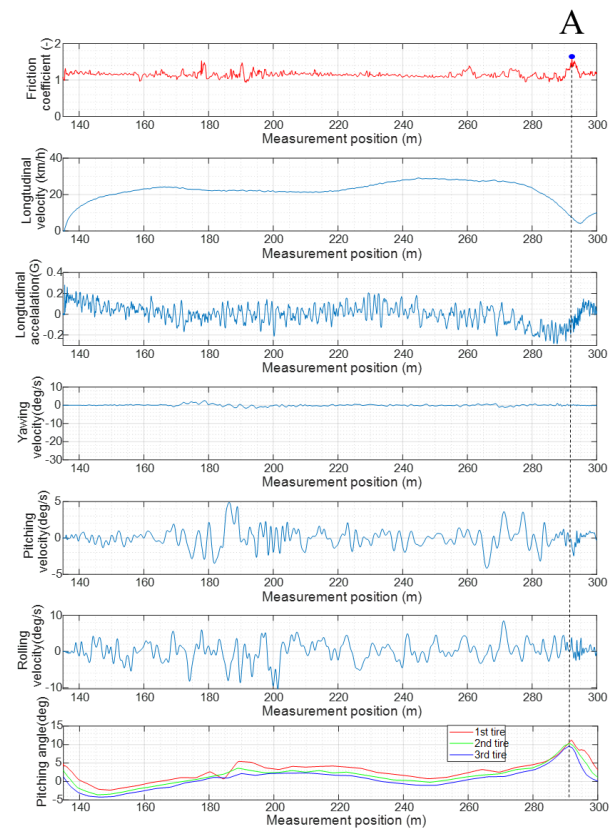


Fig.5 Coefficient of road friction at intersection

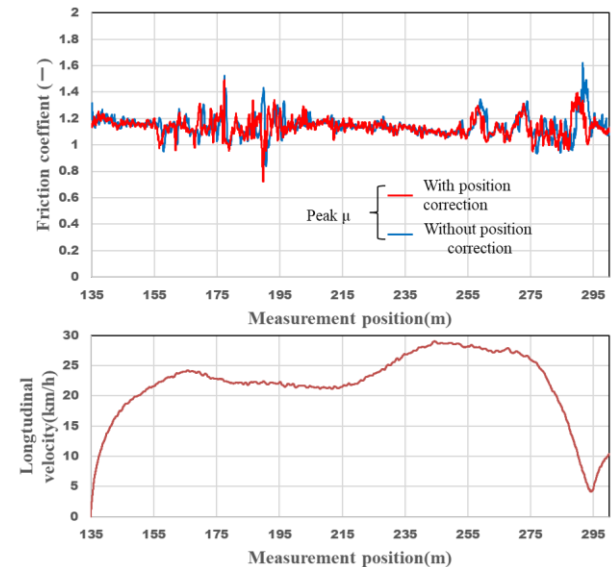


Fig.6 Road friction characteristics with and without position correction of measured tires

4.2. 旋回操作影響

図 7 は C 点及び D 点を含む、駐車車両回避動作や交差点にて 90 度旋回走行時におけるピーク μ を連続計測した結果である。旋回時の影響を見るために、図 3 に対して新たに計測輪毎のヨーレート及び計測輪毎の制動力並びに垂直抗力を追加した。ヨーレートの挙動を確認す

ると、トレーラ車体及び各輪に設置したセンサ値は同様の傾向を示していると考えられる。車両挙動の概要は、以下のものである。

440m付近から470mにかけて減速しその後、最大0.4Gの加速度で加速するとすぐに駐車車両を回避した。(C点)そして、520m付近で交差点左折を開始し(D点)535m付近で左折を完了させた。ピーク μ の変動について見ると、C点付近ではなだらかな増加傾向を示し、D点付近ではなだらかな減少傾向を示した。

まず、C点について詳しく見ていくことにする。制動力について見ていくとC点付近において第3輪のみが他の2輪と異なる傾向を示し、他の2つに対して位相が進んでいる。この原因としては、旋回時の慣性力等の影響が考えられる。この場合、慣性力の影響により制動力が増加することで路面摩擦は実際の値よりも大きく計測される可能性がある。今後の検討の中で、慣性力等の影響度について調査し必要に応じて補正項を導入する必要がある。

次に、D点について詳しく見ていくことにする。D点付近において垂直抗力の減少量は軽微なものであるが制動力においては3輪共に設定荷重500Nの約半分程度まで低下していることが確認できる。これは、90度カーブのような比較的大きな横力が計測タイヤに作用することで相対的に制動力が減少することに起因すると考えられる。言い換えると、制動力の低下分が横力に変換されてしまうということである。この具体的な対策方法については次報で検討し、報告する。

5. 結論

提示した課題に対して得られた結論は以下のものである。

(1) 加減速を伴うような直進走行時における路面摩擦係数推定においては、走行距離を等分でリサンプリングして補正する手法が有効である。ただし、距離方向でリサンプリングしたデータは時系列的な要因が消えるので十分な注意が必要となる。

(2) 90度カーブにおいて推定精度が低下する要因は比較的大きな横力発生による制動力の低下が1要因であると推察される。旋回時の影響を見ていくためには計測輪毎の横力計測ができることが望ましい。新たに横力が加わることで3軸出力のベクトル合成により力の向きが捉えられるためである。

今後、推定精度が低下した要因に対して対策

を講じることで、実路面環境における路面摩擦推定精度向上を行っていく。そのためには、本稿で示した課題に対して補正手段の検討やハードウェアの改修を随時行っていく必要がある。

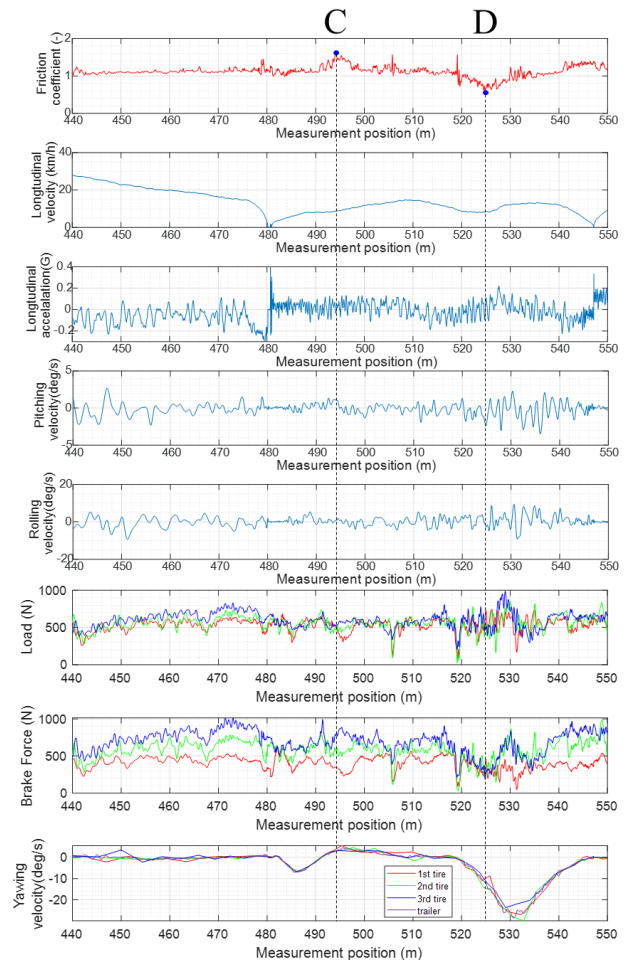


Fig.7 Coefficient of road friction at intersection

参考文献

- 1) Mataei, B.; Zakeri, H.; Zahedi, M.; Nejad, F.M. Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review. *Open J. Civ. Eng.* No 6, pp.537–565(2016)
- 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) Pacejka, H. B., Bakker, E.: The magic formula tire model, *Supplement to Vehicle System Dynamics*, Vol.21 (1991)