

# スリップ角検出による路面摩擦係数測定システム

## Tire-road friction measurement system by detection of slip angle

知能機械システム工学コース

機械・航空システム制御研究室 1205040 合田 和輝

### 記号の説明

$a$	: 定数
$\beta$	: スリップ角
$F_c$	: 遠心力
$F_{cor}$	: コーナリングフォース
$F_{s1}$	: 車両運動から求める横力
$F_{s2}$	: タイヤの弾性変形から求める横力
$g$	: 重力加速度
$G$	: トレッドゴムの横弾性定数
$l$	: 接地長さ
$m$	: タイヤへの負荷質量
$P(x)$	: タイヤの周方向の接地圧力分布
$R$	: 旋回半径
$s$	: すべり位置
$v$	: 車速
$w$	: 接地幅
$\theta_d$	: 車両の向き
$\theta_t$	: 車両の進行方向
$\omega$	: 角速度
$\mu$	: 路面摩擦係数

## 1. はじめに

気温や天候の影響により路面状況は大きく変化する。ドライバーは、路面状況に応じた適切な運転操作が要求されるが、路面変化に適応することができず、車両事故が発生している。冬季はスリップによる車両事故が多く見受けられており<sup>(1)</sup>、事故原因として路面摩擦係数（以下、 $\mu$ ）の低下が挙げられる。スリップ事故の対策としては、路面の滑りやすさを表す指標である $\mu$ をリアルタイムで検知し、低下している場合はドライバーに注意喚起するシステムが有効であると考えられる。加えて、近年開発が進められている横滑り防止システム（Electronic Stability Control, ESC）などの車両挙動制御技術などに対し、検知した $\mu$ を制御入力として使用することで、路面状況を考慮した車両制御が可能となり、安全性の向上が見込めると考える。

現在、 $\mu$ の測定は一般車に測定用タイヤを追加した車両<sup>(2)</sup>などを用いて行われており、大型な装置を必要としたり、測定範囲が限定的であるといった問題がある。本研究では、 $\mu$ をより簡便かつリアルタイムでの検出を可能にする推定方法を提案し、一般車の走行安全性の向上を図ることを目的とする。

本論文は、旋回時の車両運動とタイヤ力に着目した $\mu$ 推定システムを提案する。今回、GPS信号を用いて定常円旋回時の車両運動を測定し $\mu$ 推定実験を行った。その際の走行実験結果を示し、提案したシステムの有用性の検討を行う。

## 2. 路面摩擦係数推定原理

### 2.1 概要

車両が旋回する際のタイヤの運動を図1にもとづいて説明

する。図1の上方向がタイヤの移動方向であり、タイヤの向きとの差をスリップ角という。スリップ角が生じると、タイヤの向きに直角方向に横力が発生し、車両からタイヤに与えられる遠心力と逆向きに働くことが考えられる。また、路面からは、タイヤの弾性変形による横力が発生することが考えられる。

本報告で提案する $\mu$ の推定原理は、車両の運動から求めた横力とタイヤの弾性変形により発生する横力がつりあうと仮定し、2つの横力を等値することによって求めるものである。ただし、タイヤの慣性力は無視できるものとし、従動輪を考え駆動力や制動力が働かないと仮定する。

### 2.2 車両の運動から求める横力

横力をタイヤの移動方向と直角方向に分解した力をコーナリングフォース $F_{cor}$ とし、車両からタイヤに与えられる遠心力とつりあうと仮定する。遠心力は、タイヤに垂直に負荷される重量分が関与すると考える。タイヤへの負荷質量を $m$ とし、図1よりコーナリングフォース $F_{cor}$ と横力の関係を踏まえ、車両運動から求める横力 $F_{s1}$ は次式で表される。

$$F_{s1} = \frac{mv^2}{R} \cos\beta \quad (1)$$

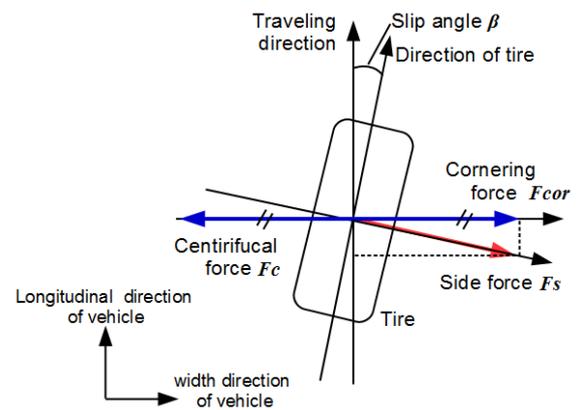


Fig.1 Various force acting on tire

### 2.3 タイヤの弾性変形による横力

#### 2.3.1 タイヤモデル

タイヤモデルを図2に示す。図2左図に示すようにタイヤは、リムの外周部にカーカス部、ブレーカを有し、最外周部にトレッドゴム（弾性体）があるモデルを考える。タイヤモデルが、図2右図のようにスリップ角 $\beta$ をもって横滑りしながら転動する場合、トレッド表面が接地前端で路面と接地し、以後路面に粘着して静摩擦から動摩擦へ変わる点 $s$ （すべり位置 $s$ ）まで移動する。すべり位置 $s$ 以降は、静摩擦から動摩擦に移行するため滑り状態となり、接地後端で元の状態に戻る<sup>(3)</sup>。

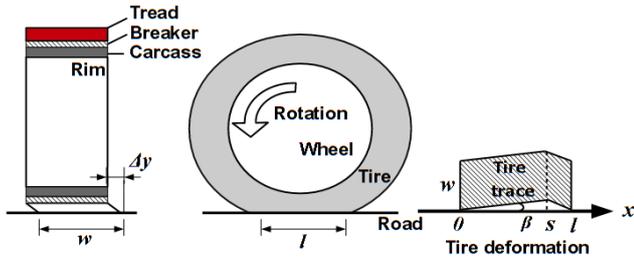


Fig.2 Tire model

### 2.3.2 接地圧力

タイヤの周方向の接地圧力分布 $P(x)$ は、タイヤ路面間の接地長さ $l$ に対し図3左図のように分布すると仮定する。接地圧力分布 $P(x)$ は、 $x$ をタイヤが接地した点から後方への長さとし、4次の関数で表すと、次式となる。

$$P(x) = -a \left( -x^4 + 2lx^3 - \frac{3}{2}l^2x^2 + \frac{1}{2}l^3x \right) \quad (2)$$

タイヤへの荷重を $mg$ とし、接地圧力分布を接地面全体に積分したものがタイヤ荷重とつり合うことから定数 $a$ が求まる。

### 2.3.3 横力とすべり位置

タイヤの横方向の変形は、図2右図に示すようにスリップ角 $\beta$ の増加にともなってタイヤの変形量 $\Delta y$ が増加してゆく。タイヤの変形量 $y$ を全接地区間において積分すると、横力になる。図3右図のすべり位置 $s$ 以降の曲線部分を破線のようになら直線と仮定すると、タイヤゴムの弾性変形による横力 $F_{s2}$ は、三角形の面積の部分となり次式で表せる。

$$F_{s2} = \frac{1}{2} w G l \tan \beta \quad (3)$$

すべり位置 $s$ の点では、タイヤに働く横力と最大摩擦力がつり合う<sup>(3)</sup>。そこで、すべり位置 $s$ において微小区間 $dx$ を考えると、次式が成り立つ。

$$wG \cdot \tan \beta dx = \mu \cdot P(s) \cdot w dx \quad (4)$$

(4)式よりすべり位置 $s$ を得ることができ、得られたすべり位置 $s$ を(3)式に代入することで、タイヤの弾性変形による横力 $F_{s2}$ を導出できる。

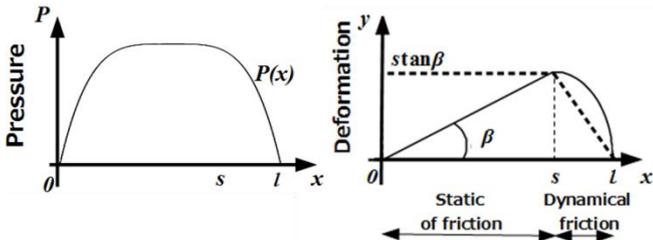


Fig.3 Ground pressure and deformation of tire

## 2.4 路面摩擦係数 $\mu$ の推定

2通りの方法で求めた横力(1)式, (3)式を等値することで $\mu$ についての関数を得ることができる。本研究は、(1)式, (3)式から導出したモデルを用いて $\mu$ を推定する。

## 3. 実車を用いた測定実験

### 3.1 各諸量の測定方法

$\mu$ の推定のために検出が必要な諸量は、車速 $v$ 、旋回半径 $R$ 、スリップ角 $\beta$ の3つである。これらの検出は、株式会社アイティエス 21 企画”GPS コンパス V100 /21” (以下、GPS コンパス) を使用する。本装置は、2つの GPS 受信部を持ちそれぞれの相対的な位置関係から、方位を計算する方位センサーであり、車両の向き $\theta_d$ と実際の車両進行方向 $\theta_t$ を測定できる。

以下に3つの諸量の検出方法を示す。

車速 $v$ は、GPS コンパスより進行速度が出力でき、これを使用する。

旋回半径 $R$ は、GPS コンパスより車両が旋回する際の角速度 $\omega$ が出力できるため、以下の式で求まる。

$$R = v / \omega \quad (5)$$

スリップ角 $\beta$ の測定は、前輪操舵角の検出が必要になるが、本実験は駆動方式がFF(Front engine Front drive)の車両を使用し、後輪タイヤでの $\mu$ の推定を行うため、前輪操舵角の検出が不要となる。加えて、後輪タイヤでは、図4に示すようにタイヤの向いている方向は車両部と固定されており常に一定であると仮定できる。従って、後輪タイヤのスリップ角 $\beta$ は、以下の式で求まる。

$$\beta = \theta_t - \theta_d \quad (6)$$

$\theta_t$ および $\theta_d$ は、GPS コンパスにて測定が可能であるため、これを利用する。

そのほか、トレッドゴムの横弾性定数 $G$ は定数を与える。

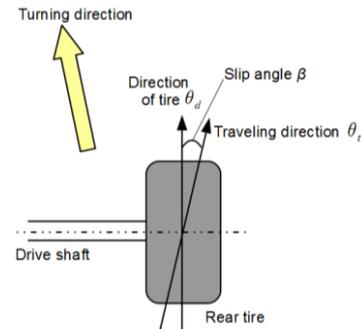


Fig.4 Slip angle of rear tire

### 3.2 実験方法

今回、定常円旋回にて $\mu$ の推定実験を行った。実験の概要を表1に示す。実験日は2018年2月8日、天候は晴れ、路面は乾いていた。実験場所は高知競馬場の第2駐車場で行った。車両はTOYOTA COROLLAを使用し、測定に用いたGPS コンパスは、図5のように車両の天井部に磁石で固定した。実験の条件は、車速を20[Km/h]から5[Km/h]刻みで50[Km/h]までとし、各速度に対し旋回半径を20~40[m]まで5[m]刻みで変更した。旋回半径は、旋回中心点からメジャーを用いて測定し、赤コーンを円周上に配置した。実際の走行は、指定の速度まで直線で加速、赤コーンの周りを速度を維持しながら旋回し、5周したのちに、直線で減速・停車した。各条件において5回繰り返し、平均値を求め実験結果とした。

GPS コンパスの設置場所は、タイヤの真上が望ましいが、ボディ形状の要因から設置できない。本実験の解析は、GPS コンパスから出力された生データを後方の左右輪のタイヤへ座標変換を行った数値を使用する。



Fig.5 A vehicle on the GPS compass

Table.1 Outline of experiment

Data	2018年2月8日
Weather / state	晴れ / DRY
Location	高知競馬場 第2駐車場
Vehicle	TOYOTA COROLLA
Apparatus	GPS コンパス V100/21
Measurement	車速, 角速度, 車両の向き, 進行方向, 位置情報
Conditions	左旋回を行う. 車速 : 20~50[Km/h] (5[Km/h]刻み) 旋回半径 : 20~40[m] (5[m]刻み) メジャーで測定, 赤コーンを配置する. 1条件に対し, 5周旋回を1セット. 計5セット行う. サンプリング周波数 : 5[Hz]

3.3 実験結果および考察

実験条件が車速 25[Km/h], 旋回半径 25[m]のときの走行軌跡を図6に示す. 図6より直線的に加速し, 円周上を走行後, 直線的に減速・停車していることがわかる. また, ほぼ真円を描いて走行できている. 図7にGPSコンパスで測定した運動データに座標変換を行い, 算出した後方の左右輪の走行データを示す. 青でプロットした値が右タイヤ(アウトサイド), 赤でプロットした値が左タイヤ(インサイド)である. 図7よりGPSコンパスの測定データは安定して取得できており, 旋回半径は, 指定した条件より左タイヤで約+2[m], 右タイヤで約+3.5[m]多くなっている. これは, 旋回時, 赤コーンとの接触を防ぐため, 大回りして走行していることが影響している. 図7に示す各諸量を用いて $\mu$ の推定を行った. 推定した $\mu$ を各実験条件において, 平均値を求め横軸に旋回半径[m], スリップ角[deg]をとり, プロットしたものを図8に示す. 実験データ点数の多い車速20~45[Km/h]に関しては, 最小二乗法による近似線を引いている. 図8より推定された $\mu$ は実験条件により 0.6~1.0の範囲を推移している. また, 今回, 実験場所の $\mu$ を加速度を用いて測定したところ0.9であった.

一般的に $\mu$ は, 表2に示すように路面状態によって一定値をとり<sup>(4)</sup>, 得られた結果を踏まえると, 路面の状態は, DRYであると本システムで特定することができる. ただし, 加速度による測定値と差異が多いことから, 本システムの推定精度については, 今後の課題である. 今後は, タイヤモデルをよりリアルに再現できるよう改良することで推定精度の向上を目指す.

4. おわりに

今回, 旋回時の車両運動を用いて $\mu$ を推定するシステムを提案した. 接地圧力分布を4次で近似し,  $\mu$ を推定するモデルを導出した. 導出したモデルを定常旋回による走行実験を行い検証した結果, 推定した $\mu$ は, 実験条件により 0.6~1.0の範囲を推移し路面状態を特定することができた. ただし, 推定精度向上を図るため, タイヤモデルについては今後の課題である.

文献

- (1) 高田哲哉, “冬期気象条件下における交通事故発生形態について”, 日本雪氷学会, No.29 (2010)
- (2) 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所, “路面のすべり摩擦係数測定機器の紹介”
- (3) 酒井秀男, “タイヤ工学 入門から応用まで”, グランプリ出版 (1987) pp.163-164., pp.202.

- (4) 安藤和彦 “路面のすべり摩擦と路面管理水準およびすべり事故” 土研センター, 土木技術資料 52-5 (2010)

謝辞

研究遂行にあたり, 高知競馬場の皆様に感謝の意を表します.

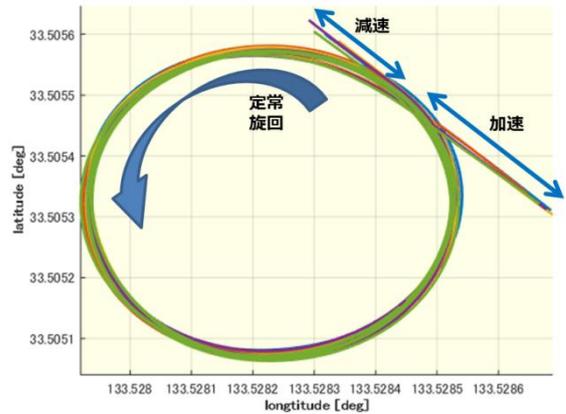


Fig.6 Running Locus of 25[Km/h], Turning radius 25[m]

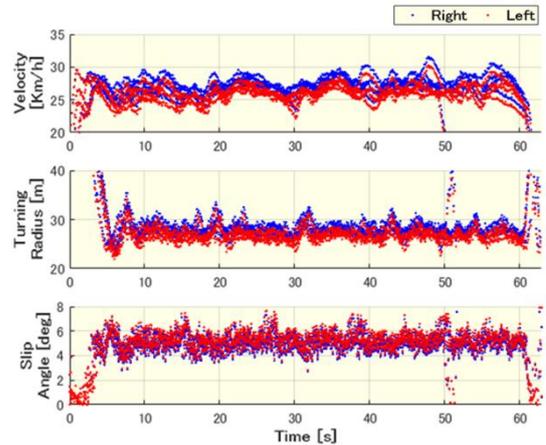


Fig.7 Rear tire data of 25[Km/h], Turning radius 25[m]

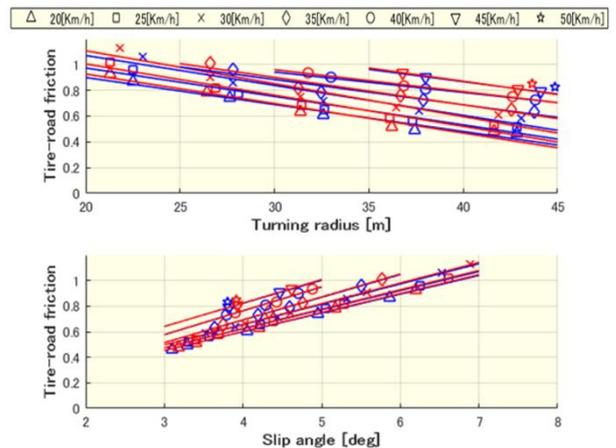


Fig.8 Estimated tire-road friction on February 8, 2018

Table.2 General tire-road friction

$\mu$	路面の状態
1.2 ~ 0.7	DRY
0.6 ~ 0.4	WET
0.3 ~ 0.2	SNOW
0.1 ~ 0.0	ICE