

# 車両運動データを用いたすべり摩擦係数の逆推定に関する研究\*

## A Study on Inverse Estimation of Friction Coefficients Using Vehicular Motion Data \*

林郁子\*\*・中辻隆\*\*\*・川村彰\*\*\*\*

By Ikuko HAYASHI\*\*・Takashi NAKATSUJI\*\*\*・Akira KAWAMURA\*\*\*\*

### 1. 本研究の背景と目的

スパイクタイヤの規制後、滑りやすい路面が多くなり、冬期の交通事故の増加や都市内の交通渋滞が深刻な問題となっている。冬型事故の多くはスリップ事故であるため、路面凍結を防止する薬剤の散布量が年々増加し、環境問題やコスト面でも影響が出ている。このような問題を軽減するため、より効果的かつ効果的な冬期路面管理が求められている。

現在、わが国では目視や計器による観測から路面状態を分類しているが、観測が容易である反面、その分類は路面状態を的確に反映できてはいない。そこで、路面の滑りやすさを的確に表すことのできるすべり摩擦係数の導入が研究されてきた。これにより、広域的に路面状況がリアルタイムに把握できれば、凍結している地域に重点的に薬剤散布を行うことができる。しかしながら、すべり摩擦係数の計測は、測定機器が高価であり、値自体が小さく測定が困難であるため、実用には向いていない。また、すべり摩擦係数を推定する実用的なモデルはまだ確立されていない。

本研究は、近年普及してきたGPS装置に車両運動センサーを取り付け、得られた車両運動データから車両の運動方程式を作成し、そこからすべり摩擦係数を逆推定するモデルを構築することを目的とする。

\*キーワード：交通安全、交通情報、ITS

\*\*学生員、北海道大学大学院工学研究科  
(北海道札幌市北区北13条西8丁目、  
TEL 011-706-6217、FAX 011-706-6217)

\*\*\*正員、工博、北海道大学大学院工学研究科  
(北海道札幌市北区北13条西8丁目、  
TEL 011-706-6215、FAX 011-706-6215)

\*\*\*\*正員、工博、北見工業大学土木開発工学科  
(北見市公園町165番地  
TEL 0157-26-9510、FAX 0157-26-9510)

### 2. 走行試験による路面状況のデータ取得

#### (1) 寒地試験路走行試験

平成13年12月17日～12月19日に苫小牧寒地試験道路で走行試験を実施した。凍結路面と圧雪路面の2路面を作成し、試験車が様々な走行パターンで試験路を走行して、0.1秒ごとに車両運動データを計測した後に、すべり抵抗測定車で路面のすべり摩擦係数を計測した。

#### (2) 市街地走行試験

平成14年12月25日～12月28日に札幌市内及び石狩湾新港内で走行試験を実施した。この走行試験では、試験車にすべり抵抗測定車が追従する形で試験車の走行地点のすべり摩擦係数を測定した。

#### (3) 測定項目

これらの試験で試験車によって測定されたデータ項目を表-1に示す。

表-1 センサーと測定項目

センサー	測定項目
加速度	進行方向 横方向
角速度	方位角速度
車速パルス	前輪パルス 後輪パルス
GPS	時刻 緯度、経度 GPS速度 GPS方位

### 3. すべり摩擦係数の推定方法

#### (1) 1自由度モデル

既存研究<sup>1)</sup>より、車両運動を剛体運動として扱い、初等力学の数式を用いた推定では精度に限界が

あることから、本研究ではタイヤと路面に作用する力を考慮して運動方程式を導く。タイヤと路面に作用するすべり抵抗だけでなく、粘着域の形成とそこに生じる粘着力も評価する必要がある。車両が速度  $V$  で走っている時のタイヤに働く力を模式的に表すと、図 - 1 のようになる。使用しているタイヤの特性から粘着域とすべり域の大きさを算出すると、車両が直線走行している時の粘着域の大きさ  $l_h$  は

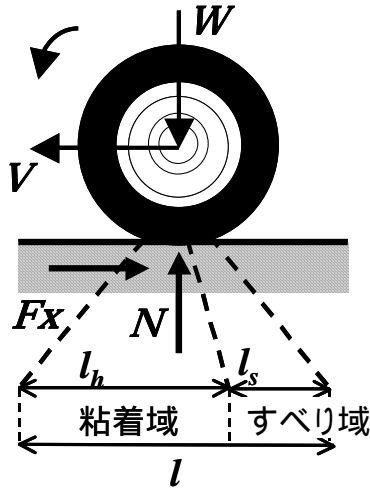


図 - 1 タイヤに作用する力

(1) 式の解で表される<sup>2)</sup>。

$$\frac{n+1}{n} \frac{2^n F_z \mu_s}{l^{n+1} w} \left[ \left( \frac{l}{2} \right)^n - \left( l_h - \frac{l}{2} \right)^n \right] = s C_x l_h \quad (1)$$

$n$ : 接地圧分布の放物線曲線の次数

$F_z$ : 鉛直荷重

$\mu_s$ : 静止摩擦係数

$w$ : 接地幅

$s$ : スリップ比

$C_x$ : トレッドの縦方向バネ定数

次に、粘着域、すべり域それぞれに働く摩擦力を総計し、総摩擦力  $F_x$  を求めると、(2) 式のように表される。

$$F_x = s C_x w \frac{l_h^2}{2} + \frac{n+1}{n} \frac{2^n F_z \mu_d}{l^{n+1}} \times \left[ \left( \frac{l}{2} \right)^n (l - l_h) - \frac{1}{n+1} \left\{ \left( \frac{l}{2} \right)^{n+1} - \left( l_h - \frac{l}{2} \right)^{n+1} \right\} \right] \quad (2)$$

### (2) 3自由度モデル

本研究では曲線走行や右左折時の適用も考慮し、3自由度のモデルでもすべり摩擦係数の推定を行う。

ハンドルを切ると、図 - 2 のようにタイヤの進行方向  $x$  とタイヤの向き  $x'$  との間にスリップ角  $\phi$  ができる。このとき、タイヤの前後方向に転がり抵抗  $F_x$ 、左右方向に横力  $F_y$  が作用し、それらを合成して全摩擦力  $F$  を求める。

更に、全摩擦力  $F$  をタイヤの進行方向  $x$  と、それに垂直な  $y$  方向に分解し、コーナリング抵抗  $R_c$  とコーナリングフォース  $F_c$  を求める。以上より、 $x$  方向、 $y$  方向それぞれタイヤに作用する力が求められるので、(3)、(4) 式のように車両の運動方程式を作成し、速度、位置を推定する。

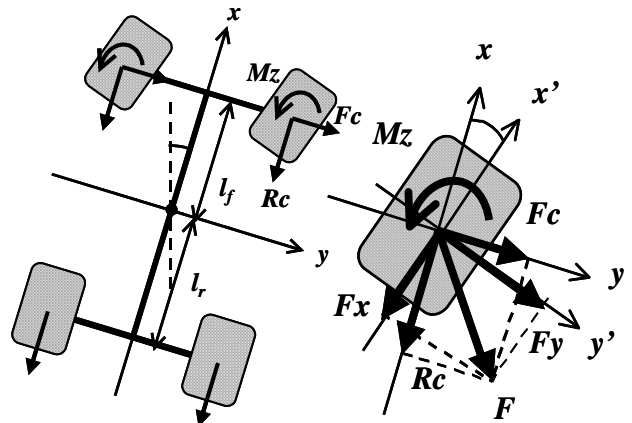


図 - 2 車両に作用する力

$$\begin{Bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{d\phi}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{dV_x}{dt} \\ \frac{dV_y}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{-2g(R_c^f + R_c^r)}{M} \\ \frac{2g(F_c^f + F_c^r)}{M} \\ \frac{2(F_c^f \times lf - M_z)}{I} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$V_x$ :  $x$  方向の速度

$x$ :  $x$  方向の位置

$V_y$ :  $y$  方向の速度

$y$ :  $y$  方向の位置

$\omega$ : 方位角速度

$\phi$ : 方位角

$M$ : 車両の重量

$g$ : 重力加速度

$R_c^f$ : 前輪に働くコーナリング抵抗

$R_c^r$ : 後輪に働くコーナリング抵抗

$F_c^f$ : 前輪に働くコーナリングフォース

$I$ : 慣性モーメント

(3) すべり摩擦係数の逆推定の考え方

粘着域  $\mu_s$  を計算する際に、摩擦係数の値を説明変数として使用するが、この時点で摩擦係数は未知である。そこで、初めにランダムに生成された値を摩擦係数として代入し、そこから求められた粘着域の値を用いて摩擦力を計算して運動方程式を解く。結果として出された速度、位置の推定値を、GPSによって得られた実測値と比較し、実測値と推定値の差が最小の時の摩擦係数を解として算出する。

4. すべり摩擦係数の逆推定

(1) 1自由度モデルを用いたすべり摩擦係数推定

a) 試験路データでの推定

試験路での走行データの中から直線走行と交差点での発進・制動時のデータを用いてすべり摩擦係数の推定を行った。試験路のすべり摩擦係数の値を表-2に示す。

表-2 試験路のすべり摩擦係数

	凍結路面	圧雪路面
最小値	0.10	0.28
最大値	0.22	0.55
平均値	0.13	0.41

表-3 直線走行でのすべり摩擦係数推定値

	加速時		減速時	
	凍結	圧雪	凍結	圧雪
平均値	0.18	0.18	0.22	0.23
標準偏差	0.068	0.058	0.067	0.069

表-4 交差点でのすべり摩擦係数推定値

	発進時		制動時	
	凍結	圧雪	凍結	圧雪
平均値	0.08	0.17	0.15	0.31
標準偏差	0.015	0.03	0.028	0.071

表-3の直線走行での推定値の平均値と表2の実測値の平均値を比較してみると、誤差が0.2以上もあり実用的ではない。また、表-4の交差点のデータを用いた結果では、特に制動時において実測値に近い値が推定されている。

b) 市街地データでの推定

市街地走行試験で計測されたデータの中から、交差点走行のデータを用いて試験路と同様に推定を行った。各走行地点の実測値と推定値の関係を図-3に、実測値と推定値のR<sup>2</sup>値を表-5に示す。制動時においては実測値に近い値を推定することができたが、誤差が0.15以上出たデータもあり、その精度

にはまだ問題がある。

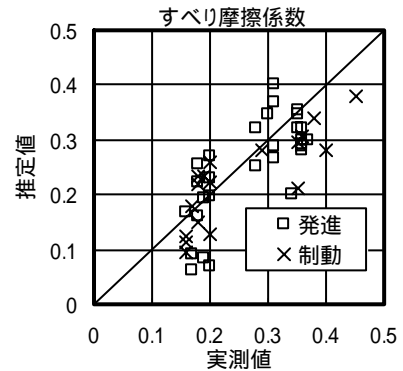


図-3 交差点走行時の推定結果

表-5 実測値と推定値のR<sup>2</sup>値

	発進時	制動時
R <sup>2</sup> 値	0.55	0.67

(2) GPSデータの誤差による推定精度の比較

本研究の逆推定で、実測値として用いる速度や位置のGPSデータには誤差が含まれているため、GPSデータの誤差による推定精度を比較する。前述したように、逆推定では速度や位置の実測値と推定値の差が最小のときの摩擦係数を解とするが、その際に以下の3つの場合が考えられる。

1. 速度の差が最小の時の摩擦係数
2. (速度の差 + 位置の差)が最小の時の摩擦係数
3. 位置の差が最小の時の摩擦係数

表-6 R<sup>2</sup>値の比較

	1	2	3
発進時	0.55	0.42	0.41
制動時	0.67	0.52	0.40

これら3つの場合の推定精度を比較するため、市街地の交差点データを用いて推定を行った。摩擦係数の実測値と推定値のR<sup>2</sup>値を表-6に示す。

表-6より、速度の実測値と推定値の差が最小の時の摩擦係数を解とする場合が、一番推定精度が高いことがわかる。これはGPSの位置データよりも速度データの方が、精度が良いためと考えられる。

(3) 3自由度モデルを用いたすべり摩擦係数推定

試験路の曲線部を走行しているデータを用いた推定の結果を表-7に示す。表-2の実測値の平均値と比較すると、圧雪路面では実測値より0.1以上も小さい値が推定されていた。試験路は1周約2700mもあり、表-2の最小値と最大値からもわかるよう

に、同じ路面分類でも摩擦係数に 0.1~0.2 くらいの差が生じる。特に圧雪路面では計測機器や試験路の都合上、測定データが少なく、使用できるデータ数も凍結路面に比べて少ないため、実測値より小さい値を推定してしまったのではないかと考えられる。

表 - 7 曲線部でのすべり摩擦係数推定値

	加速時		減速時	
	凍結	圧雪	凍結	圧雪
平均値	0.10	0.37	0.15	0.31
標準偏差	0.035	0.027	0.036	0.040

(4) 1自由度モデルと3自由度モデルの比較

次に、1自由度モデルと3自由度モデルとの推定精度を比較した。使用したデータは市街地の交差点走行時のデータである。これまでと同様に、発進時と制動時に分けて推定を行った。図 - 4、図 - 5 にそれぞれのモデルを適用した場合の推定結果を示す。

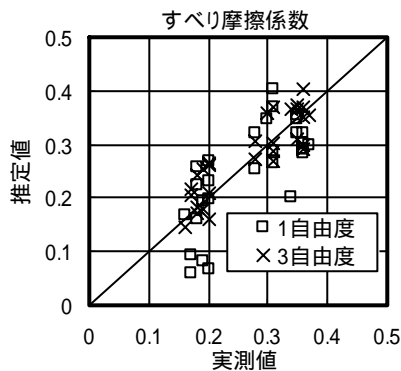


図 - 4 発進時の推定結果

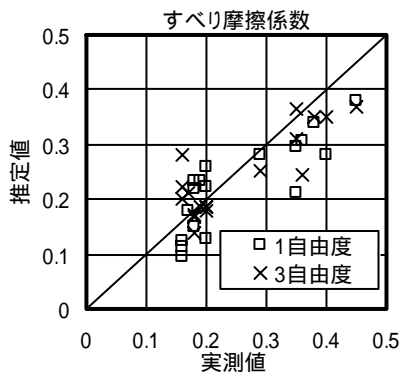


図 - 5 制動時の推定結果

また、表 - 8 はすべり摩擦係数の実測値と推定値のR<sup>2</sup>値を比較したものである。発進・制動ともに1自由度モデルよりも3自由度モデルを用いた場合の方が、より実測値に近い値を推定することができ、推定精度の向上が見られた。

1自由度モデルによる推定結果の中で、特に誤差の大きく出たデータを分析すると、1自由度モデルを用いた推定では使用していない、横加速度や方位角速度の値が比較的大きいデータであった。

3自由度モデルを用いることで、これらの値が表している車両の横滑り運動などを考慮することができ、路面のすべり摩擦係数推定の精度が向上したと考えられる。

表 - 8 R<sup>2</sup> 値の比較

	発進時	制動時
1自由度モデル	0.55	0.67
3自由度モデル	0.76	0.72

5. おわりに

本研究では、3自由度モデルを用いることで路面のすべり摩擦係数推定の精度を向上させることができた。速度と位置のGPSデータの誤差による推定精度の比較では、速度データのみを用いた方がすべり摩擦係数推定の精度が高くなるという結果が得られた。直線走行時のデータを用いた推定では、精度が低いですが、実際の市街地の走行では交差点での発進や制動、曲線走行を繰り返し行っているため、直線部のデータを用いなくても推定は可能であると考えられる。

本研究で実施した走行試験では、ドライバーや車種が限られており、データ数も少ないため、今後より高精度なモデル構築のためには幅広いデータが必要となってくる。また、現時点の路面のすべり摩擦係数だけでなく、気象要因などを説明変数として盛り込んだ1、2時間先の路面状態を予測するモデルの構築が今後の課題である。

参考文献

- 1) 中辻隆：タクシーの位置情報と車両運動データを利用した冬期路面状態のオンライン推定に関する研究、「ITS 社会に向けた交通事故分析に関する研究」研究助成報告書、2002
- 2) 酒井秀男：タイヤ工学、グランプリ出版、1987