

# カーブ区間の路面すべり抵抗計測技術構築 について

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム ○徳永 ロベルト  
同上 佐藤 賢治  
同上 齊田 光

我が国では、交通に支障を及ぼすことなくカーブ区間の路面のすべりやすさが計測可能な技術がなく、冬期の路面状態とスリップ事故等の因果関係や対策効果の検証が十分に行えない。著者らは、カーブ区間での路面のすべり抵抗が計測可能な技術の確立を目指し、近年新たに開発されたカーブ区間対応型路面すべり抵抗計測装置の動向や既往機器との比較実験等を行っている。本報では、当該研究の進展状況および今後の展望について述べる。

キーワード：冬期道路管理、カーブ区間、すべり抵抗、計測技術

## 1. はじめに

北海道の国道では、冬期特有の冬型事故（スリップ事故・視界不良事故・わだち事故等）の約85%が路面すべり抵抗と関連するスリップ事故である。また、非市街地でのスリップ事故は、市街地に比べて約37%と少ないが、「その他単路（約47%）」に次いで「カーブ」がスリップ事故全体の約30%を占めており、致死率も市街地より高い<sup>1)</sup>。そのため、道路管理者は上記区間等において凍結防止剤散布や特殊舗装敷設などのスリップ対策を恒常的および重点的に行っている。しかし、カーブ区間でも交通に支障を及ぼすことなく連続的に路面のすべり抵抗を計測できる技術が確立されていないため、当該区間の路面すべり抵抗データが殆どなく、路面状態とスリップ事故の因果関係や各種対策効果の検証が十分に行えていない。

寒地土木研究所では、これまでに連続路面すべり抵抗計測装置（Continuous Friction Tester、以下：CFT）を導入し、路面すべり抵抗モニタリング結果をWebGIS上でリアルタイムに情報提供する他、様々な分析が可能な「路面摩擦モニタリングシステム（特許第4665086号）」を構築した。しかし、上記CFTは牽引車のステア角が一定以上になると、路面のすべり抵抗を示す値の信頼性が低下するため、カーブ区間では路面すべり抵抗を計測できない。

近年、カーブ区間でも交通に支障を及ぼすことなく路面のすべり抵抗を連続的に計測できる装置の開発が進められている。我が国でも活用可能か否かを検討することが望ましい。このような技術を導入できれば、維持管理データ、車両挙動データ等に加えて、カーブ区間の詳細な路面すべり抵抗データが加わることで、カーブ区間を

含む全路線の交通事故や各種対策効果に関する分析が大きく前進することが期待される。

著者らは、我が国におけるカーブ区間の路面すべり抵抗計測技術の確立を目指している。本稿では、これまでの路面すべり抵抗計測技術の特徴と課題、また、近年新たに開発されたカーブ区間対応型CFT（以下、CFT-C）と既往のCFTとの比較試験など当該研究の進展状況および今後の展望について述べる。

## 2. 路面のすべり抵抗計測技術について

路面のすべりやすさは、車両の挙動に直接的な影響を及ぼすため、交通安全において重要な要素である<sup>2)</sup>。このような中、冬期道路管理を効果的・効率的に行う上で、路面状態の把握は重要な要素と位置付けられ、北欧諸国（フィンランド、ノルウェー、スウェーデン等）では、既に路面のすべり摩擦係数を指標として冬期道路管理に導入しており、これら以外の国や機関においても路面すべり抵抗計測技術に関する様々な研究開発がこれまでに行われている<sup>3)</sup>。以下に、道路を走行中に計測可能な既往および最近の路面すべり抵抗計測技術の開発動向について紹介する。

### (1) 制動停止距離による計測

諸外国での冬期路面を対象としたすべり摩擦係数の計測は、1940年代に北欧で空港の滑走路の安全性を確認するために開始された<sup>4,5)</sup>。計測方法は、砂を搭載した大型トラックを時速30kmで走行させ、急制動をかけて停止するまでの距離から路面のすべり摩擦係数を算出するという方法である。しかし、急制動が必要なため交通量の多い道路での使用に適さないこと、制動区間を対象とし

た計測であるため路線の路面状態を連続的に計測することができないこと、計測時における安全確保の観点からカーブ区間での実施が難しいこと等が課題である。

## (2) 試験輪の制動による計測

我が国では、路面状態の定量的な計測が可能な装置として、フルロック式の路面すべり計測車 (Locked-Wheel Friction Tester、以下：LWFT) が挙げられる。



写真-1 路面すべり計測車と試験輪 (第5輪)

LWFT (写真-1) は、通常の走行タイヤの他にすべり摩擦係数を計測するための試験輪 (第5輪) が設けられており、我が国における路面のすべり摩擦係数の標準計測装置として使用されている。計測方法は、試験車を一定速度で走行させた状態で試験輪にのみフルロック制動を掛けることによって生じるタイヤと路面の摩擦力 (F) と試験輪に掛けられた荷重 (W) との関係からすべり摩擦係数 ( $\mu$ ) を算出する。当該計測方法は、ASTM (American Society for Testing and Materials) に規定された計測方法<sup>5)</sup> に準拠しており信頼性は高い。しかし、タイヤを制動した地点のすべり摩擦係数の計測に限るため、区間によって変化する路面のすべりやすさを連続的に計測できない。また、直進時のみの計測しかできず、カーブ区間の計測ができない。更に、LWFTは大型で非常に高価なため、日本全国に数台しかなく、主に試験研究目的での使用に留まっており、日常の冬期道路管理における使用は難しい。

## (3) 加速度計による計測

加速度計は、車両が急制動した場合に発生する加速度 (減速度) から路面のすべり摩擦係数を計算する装置である。スウェーデン、ノルウェー、フィンランド等では、冬期道路管理における路面のすべり摩擦係数計測機器として使用されている (図-1)。

加速度計の長所としては、機器が安価で設置に際し車両に特別な改造を必要としないことが挙げられる。半面、ブレーキ操作者および車両の違いによって影響を受けること、交通量の多い道路での使用に適さないこと (急制動が必要なため)、減速地点での計測であること、道路



図-1 加速度計の外見 (上) および計測方法 (下)

勾配が計測値に影響を与えること等の短所もある。また、この減速による計測は直線走行時に限られており、カーブ区間の計測ができない。

## (4) タイヤ振動・車両挙動等による計測

近年の車両には、走行状態を監視するセンサーや電子制御装置が数多く搭載され、タイヤの振動、タイヤにかかる微細な荷重、車両の挙動等から路面状態を判別する計測方法が確立しつつある。

花塚ら<sup>6)</sup> は、タイヤの振動が路面状態ごとに特徴的な波形を示すことに着目し、タイヤの内面に張付けた加速度センサーの接地面における加速度波形の時系列及び周波数の特徴から連続的に路面状態 (乾燥、半湿、湿潤、シャーベット、積雪、圧雪、凍結) を判別する手法を開発した。路面状態の評価は定性的であるが、路面状態判定的中率は80%以上であることが報告されており、今後の発展が期待される技術である。なお、当該手法によるカーブ区間の路面状態の判別可否や精度は不明である。

鈴木ら<sup>7)</sup> は、走行中の車両から速度、ABS (アンチロックブレーキシステム) やTCS (トラクションコントロールシステム) の作動情報、外気温などをGPSデータと合わせて通信端末を経由してサーバーに収集し、収集した情報の分析を行ってすべりやすい箇所の抽出を行っている。前後車輪速度差からタイヤのスリップ率を計算してスリップ率の変化をGPSで把握し、それらの関係から路面のすべりやすい箇所を推定する手法である。スリップした場所の履歴およびスリップしやすいと推定できる場所などに関する情報がインターネット等に公開することで、道路管理者・道路利用者への注意喚起や様々な運転支援技術に活用すること等が考えられるが、本手法によって抽出された箇所のすべり摩擦係数の計測による検証等は見受けられず、今後の発展が期待される。

## (5) タイヤのスリップ率による計測

一般に、走行車両の対路面速度とタイヤの回転速度に差がある場合をスリップ率のあるすべり摩擦状態という。タイヤが自由に路面上を自由に転がっている場合、スリップ率は0%であり、車輪がフルロックされた状態はスリップ率100%である。よって、(2) で紹介した計測輪

をフルロックさせる方式はスリップ率100%の計測に該当する。

スリップ率を利用した方式には、スリップ率固定方式とスリップ率変動方式の大きく2つの方式があり、スリップ率を固定させて計測する装置では、SFT (Surface Friction Tester) (写真-2) やTWO (Traction Watcher One) (写真-3) が挙げられる。



写真-2 SFTを搭載した専用車両



写真-3 牽引車後部に装着されたTWO



写真-4 ROARの外見

SFTは、車体の後部中心に設けられた計測輪ですべり摩擦係数を計測する装置であり、空港の滑走路の路面管理に多く用いられている<sup>8)</sup>。しかし、高価な専用車両を用いること、特殊な専用タイヤを要すること、また、車体後部中心に計測輪が設けられているため、通常の車両走行部のすべり摩擦係数を計測できないといった短所が

ある。

TWOの計測輪は2輪あり、1つの車輪がもう1つの車輪より遅く回転し、遅く回転する車輪から発生した抵抗力からすべり摩擦係数を計算する<sup>9)</sup>。

スリップ率変動方式では、ノルウェーで用いられているROAR (Road Analyzer and Recorder) (写真-4) が例として挙げられる。当該装置は、スリップ率を固定して計測することも変動させて計測することも可能である。ROAR Mark IIIの利点は20~130km/hの間で計測できることであるが、装置の導入コストが著しく高いことが欠点である<sup>10)</sup>。

本節に述べた全装置共通の特徴として、カーブ区間を含む路線の連続的な路面すべり抵抗が計測可能であるという利点がある反面、試験輪には特殊な専用タイヤを要することが欠点として挙げられる。

### (6) 横力による計測

タイヤが進行方向と同一方向に回転している時に、タイヤ面に直角方向に外力が働いた場合、タイヤの接地面でこの力に抵抗する横力(SF)が働く(図-2)。この横力と輪荷重の比から横すべり抵抗を算出する。具体的には、計測輪(タイヤ)を進行方向に対して一定の角度(SA)を与え、走行しながら計測輪にかかるSFを計測する。SFによる既往の代表的な計測装置は、英国で開発されたSCRIM (Sideway-force Routine Investigation Machine) がある<sup>11)</sup>。SCRIMの計測輪は、計測車両の前輪と後輪の間に設置されており、計測輪の進行方向に対するSAは20°で固定されている。SCRIMの利点は、スリップ率を利用した計測方式と同様に連続計測が可能であるが、計測輪にかかる大きなSFに対抗するため、計測車両の車体が大きくなる他、計測部取付けのための本体補強が大きくなり、結果として高額な計測車両になることが欠点である。

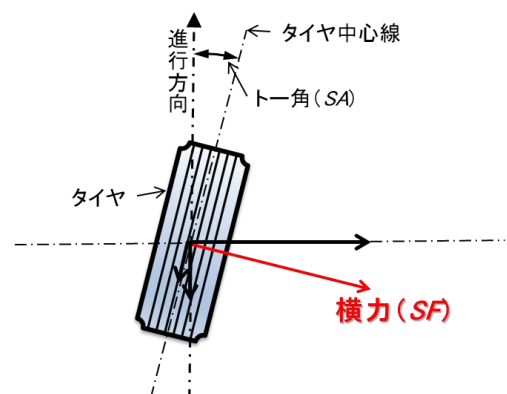


図-2 横力による計測概念図

近年、横力式による計測装置として市販されているのが冒頭に述べたCFTである。CFTは、これまでに米国の幾つかの州において道路巡回車や除雪・散布車に取り付

けられ、実務に導入・運用されてきた実績がある。また、カナダ・オンタリオ州、スウェーデンでも冬期道路管理への導入の検討・試行が進められている。寒地土木研究所では、我が国でも他の装置と比較して容易かつ安価に入手でき、また冬期路面管理の実務への活用が期待できるとして、このCFTを2006年に導入した(写真-5)<sup>10)</sup>。



写真-5 牽引車後部に連結されたCFT

CFTは、RV型道路巡回車の後部に取り付け可能な装置で、計測輪や車両に制動を掛ける必要がないため、走行しながら連続的に路面のすべり抵抗値を計測することが可能であり、計測の際には特別な操作(機器操作や走行速度維持等)を必要としないという利点がある。また、市販のタイヤを試験輪に使用しているため、国内での調達が可能である。計測原理は、上記のSCRIMと似ているが、車両進行方向に対する計測輪の角度が1~2°程度と小さく、計測輪に発生する微量なSFから路面のすべりやすさを算出するため、SCRIMと異なって大きな車体や大規模な補強を必要としない。

CFTで得られるすべり抵抗値は、HFN(Halliday Friction Number)と呼ばれ、装置開発者が独自に設定した単位である。HFNは、装置に使用しているタイヤの溝や物性を考慮したアルゴリズムを介して算出される。具体的には、計測輪が路面に接地していない状態(無負荷状態)をHFN0とし、乾燥した標準舗装路面(路温:-17.8℃)において一定の速度で走行した際に掛かるSFがHFN100となるよう設定されており、その間の路面状態(例:湿潤・圧雪・凍結)を100等分したHFNで表す。なお、CFTによって得られたHFNと我が国の標準機器であるLWFTから得られたμの間には良好な相関関係があることを確認済みである<sup>12)</sup>。しかし、SCRIM・CFT共通の欠点は、冒頭でも述べたように装置搭載車のステア角が一定以上になるとすべり抵抗値の信頼性が低下するため、カーブ区間では路面のすべり抵抗を計測できないことである。

### (7) 非接触式センサーによる計測

これまで紹介してきた計測装置は、路面とタイヤの接触から路面状態や路面のすべりやすさを評価する技術

であったが、非接触式の光学式路面状態センサー等の研究開発の取り組みも進んでいる。光学式路面状態センサーの利点は、路面との接触が不要であること、車両の運動に依存していないこと(停止時やカーブ区間でも計測可能)、車両の改造を要しないこと等が挙げられる。

Saarikiviら<sup>13)</sup>は、スリップ事故の多い地点や道路管理者が見落としがちな地点を抽出するCold Spot Projectの一環として、車両に光学式路面状態センサーと路面温度センサーを設置した車両を用い、路面の摩擦係数と路面温度のモニタリングを実施した。(5)で紹介したTWOによるすべり摩擦係数と比較した結果、良好な相関が得られ、これらのセンサーを使用することでCold Spotの検出が可能であると報告している。しかし、どのようなアルゴリズムを用いて光学式路面状態センサーからすべり摩擦係数を推定しているかが明らかにされていない。

### 3. CFT-Cについて

近年、ステア角の影響を受けることなく曲線半径が50m程度のカーブ区間でも路面のHFNを連続的に計測することが可能なCFT-C(写真-6)が開発された。CFTに関する既往知見、汎用性等を踏まえ、著者らは当該装置を試行的に導入し、我が国でもカーブ区間における路面すべり抵抗の計測に活用可能か否かについて検討を進めている。



写真-6 牽引車後部に連結されたCFT-C

表-1 CFT-Cの基本仕様

型式	トレーラー式
連結方式	ピボット付きヒッチプラグで牽引車ヒッチメンバーに連結
寸法	全長1,530mm×全高790mm×前幅2,130mm
トレッド	1,625mm
重量	約500kg
計測輪	×2(左右端部)
計測輪接地荷重	151kg(各計測輪)
計測輪加重方式	自重+油圧ダンパー
計測輪タイヤ仕様	BS Ecopia, 205/65R15 [空気圧:20.7kPa(18℃)]
作動用電源	DC12V(牽引車から供給)
計測インターバル	100Hz(最大)
出力インターバル	10, 5, 2, 1, 0.5または0.1秒間隔(デフォルト値:0.1秒)
データ出力形式	テキスト形式(距離・左HFN・右HFN・平均HFN・速度など)
作動可能温度範囲	-54℃~120℃

CFT-Cの基本仕様を表-1に示す。CFT-Cの左右端部に位置する計測輪には、CFTと同様に進行方向に対して内側に1°程度のトー角が設けられており、前進時に発生する両計測輪のSFから路面の平均HFNを算出する。CFT-Cは、計測時に計測輪や搭載車両に制動を掛ける必要がなく、10~130km/hの速度で走行しながら直線区間およびカーブ部において連続的に路面のHFNを計測することが可能である。以下に、既往のCFTと新たに開発されたCFT-Cの主な仕様の相違について列挙する。

- I. CFTの場合は、左側か右側のどちらか（日本では左側）に試験輪が設置されているが、CFT-Cは左右両端部に計測輪を有する。
- II. CFT-Cの計測原理はCFTと同様で、出力値は左右の計測輪から得た2つのHFNの平均HFNである。
- III. CFTは、牽引車後部のシャシフレーム左右および中心の3点に直接連結されており、牽引車とCFTが一体となっている。そのため、カーブ区間において牽引車のステア角が左右14°以上になると装置への影響が大きくなり、HFNの信頼性が低下することからステア角が14°以上で計測された値は記録しないよう設定されている。他方、CFT-Cは牽引車後部のヒッチメンバー中心にピボット付きプラグによって連結されているため、牽引車のステア角が左右14°以上になっても装置への影響がなくカーブ区間においても計測が可能である。

#### 4. 計測装置の検証と今後の展望

著者らは、既往のCFTおよびこの度新たに導入したCFT-Cを用いてカーブ区間における路面のすべり抵抗計測等を試験道路および実道において行い、各計測装置から得たHFNから装置間の関係を把握するとともに、CFT-Cによる直線およびカーブ区間におけるHFNの再現性・信頼性の確認を進めている。図-3に、2018年6月に曲線半径<300mのカーブが連続する札幌圏内の一般国道230号山間部区間（KP35.0~37.0）において計測したCFTおよびCFT-Cの計測結果を比較試験の一例として示す。当該区間計測時は、気温25°C、晴れ、および路面は乾燥状

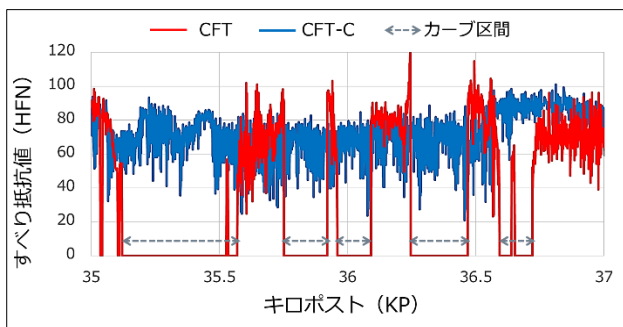


図-3 カーブ区間におけるCFT・CFT-Cの計測結果

態であった。CFT（赤色線）の場合、直線区間は概ねHFN60以上を推移しているが、カーブ区間ではHFNが欠測していることが分かる。他方、CFT-C（青色線）はカーブ区間を含む全区間においてCFT同様にHFN60以上を推移し、連続かつ安定的にHFNが取得できることを示している。

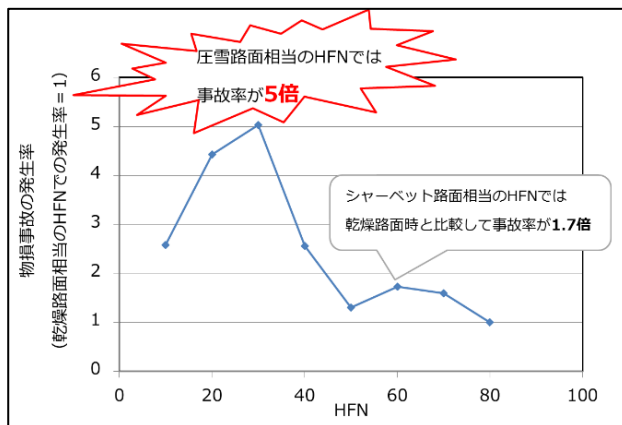


図-4 活用イメージ1 (HFNと物損事故発生率の関係)

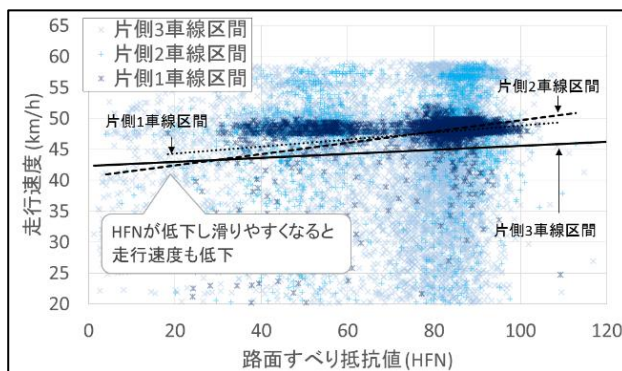


図-5 活用イメージ2 (HFNと走行速度の関係)

著者らは、今後も引き続き試験道路および実道において冬期の雪氷路面状態を含む様々な条件下で更なる比較実験を行い、蓄積したデータを用いてCFT-Cと既往の計測機器の関係、カーブ区間において計測したCFT-CのHFNデータの再現性・信頼性等について検証を更に進める予定である。併せて、CFT-Cによる計測時の施工性・操作性・安全性も確認する。また、以上の検証を経てCFT-Cを用いたカーブ区間を含む実道での計測試験を継続的に行い、CFT-CのHFNデータを活用（図-4、5）した冬期交通事故リスクマネジメント手法や冬期道路管理水準評価手法の確立に取り組む所存である。

#### 参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所・寒地土木研究所：平成24年度版・北海道の交通事故国道統計ポケットブック、2014年
- 2) Transportation Research Board of National Academies:

- N.C.H.R.P. Web-Only Document 108, Guide for Pavement Friction, 2009
- 3) TC 2.4, World Road Association (PIARC-AIPCR): Snow & Ice Databook 2014 (English Version), 2015
  - 4) Al-Qadi et al.: Feasibility of Using Friction Indicators to Improve Winter Maintenance Operations and Mobility, NCHRP Web Document 53 (Project 6-14), Contractor's Final Report, 2002
  - 5) ASTM Standards: "Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire", ASTM, Vol. 04.03, pp. 669-673, 1998
  - 6) 花塚ほか：インテリジェントタイヤによる路面状態判別－冬季道路管理への活用－、雪氷研究大会（2010・札幌）、2010年
  - 7) 鈴木ほか：プローブデータを用いた車両スリップの検知に基づく路面凍結情報提供システムの構築、土木計画学研究・講演集Vol.35、CD-ROM, 2007年
  - 8) （公社）土木学会舗装工学委員会：路面テクスチャとすべり、舗装工学ライブラリー10、pp.78-79、2013年
  - 9) Baard, N.: The Use of Friction Measurement Techniques in Winter Maintenance in Norway, PIARC 11th International Winter Road Congress, CD-ROM, 2002
  - 10) Transportation Association of Canada: Winter Maintenance Performance Measurements Using Friction Testing, CD-ROM, 2009
  - 11) Hosking, J. R. et al.: Measurement of Skidding Resistance (Part I), Guide to the Use of SCRIM, Transport and Road Research Laboratory, Report No. TRRL-LR737, 1976
  - 12) 切石ほか：冬期路面状態評価手法の比較試験について、寒地土木研究所月報702号、pp.50-55、2011年
  - 13) Saarikivi P. et al.: Observing the Variability of Road and Weather Conditions with Hybrid Mobile and Fixed Sensors, 14th Intl. Road Weather Conference, CD-ROM, 2008