

## 冬期路面摩擦係数の線推定手法について\*

Conversion of friction coefficients measured intermittently along a road in winter into continuous data\*

中辻隆\*\*\*

By Takashi NAKATSUJI\*\*\*

### 1. はじめに

本研究においては、北海道開発局が冬期路面管理の重点路線としている札幌新道を試験区間として、これまでに開発されている車両運動データから冬期路面状態を推定・予測手法に関して、実践的な配備の観点から課題の検討を行うことを主な目的としている。すなわち、道路管理者が安定し効率的な路面管理作業を実施し路面管理の効率化を図るためには、路線上の不規則な点で計測・推定された路面状態データを、冬期路面管理を行うための区間としての状態量に変換することが必要とされている。ここでは、適当な区間長の検討を行うとともに平滑・補間するための手法を検討を行う。具体的には、点で計測・推定された状態量を区間としての状態量に平滑・補間する手法の検討を行う。すなわち、試験区間を0.5～2 km 単位に分割した小区間の相関特性分析を行うとともに相互の相関性を考慮した平滑化回帰式の作成を行った。

摩擦係数の連続測定を可能とする計測センサー（SRIセンサー：SRI研究所）が開発され従来の点測定に替わる可能性を有していることからSRIセンサーを用いた路面摩擦係数の連続測定も試みた。

### 2. 冬期路面走行試験

#### (1) 計測センサー

従来の研究において、タイヤの回転運動データが冬期路面状態に密接な関係を有していることを考慮して、本研究においては、四輪の車輪回転速度データを計測するセンサーを装備しているCANシステムを用いた。表-1に測定項目を示す。CANシステムでは、車両運動データとして前後・左右全ての車輪において回転速度を計測している。車両運動データは10Hz、GPSデータは1Hzのサンプリング間隔でPCIカードに出力されている。

走行試験車両として、CANセンサーを搭載した車両スバル・レガシーを用いた（スバル技術研究所から貸与）。車両運動データによって推定された摩擦係数を検証するために、すべり抵抗測定車によって摩擦係数の直接測定を行った。すべり抵抗測定車は北海道大学工学部所有のバス型測定車であり、乗用車の輪荷重に相応する鉛直荷重を作用させた状態で試験タイヤ（スタッドレスタイヤ）をロックさせ縦すべり摩擦係数の測定を行った。実際の測定は、試験車両（スバル・レガシー）にすべり抵抗測定車が追従し、交差点前後における加・減速時、あるいは通常走行時においては試験車両のホイールパスに合わせて随時摩擦係数の測定を行った。

表2-1 CANセンサー（色塗り項目本研究で使用）

分類	測定項目
エンジン	エンジントルク、アクセル開度、エンジン回転数
運転操作	ハンドル角、ブレーキ圧力、ブレーキランプ、ヘッドライト、VDC/ABS 作動フラグ、ターンシグナル、ワイパー
車両運動	前後加速度、横加速度、ヨーレート、左前/右前/左後/右後輪車輪速
GPS	時刻、緯度、経度
外的条件	外気温

#### (2) 走行試験道路

札幌新道（国道5号線、274号線）において、札幌自動車道路・道央自動車道と並走する宮の沢インターチェンジ付近から道央自動車道南インターチェンジ付近までの約2.2 km区間を冬期路面状態に関わるデータの計測対象区間とした（図-2）。対象区間上の、発寒、新川、北郷、あるいは大谷地の各地点において気象センサーが設置され、気温、風向・風速、降水量あるいは路温などの計測が常時行われている。試験区間は重点路線であることから、レベルの高い路面管理が実施されている。昨年度は1月中旬過ぎまで殆ど冬期の路面状態、とりわけ凍結路面の出現がなかったことから、滑り摩擦係数の連続測定は、札幌市郊外の石狩新港内の道路においてデータの計測を行った。

\*キーワード: 冬期路面管理、摩擦係数、ITS、  
\*\*\*正員、工博、北海道大学公共政策大学院  
(北海道札幌市北区13条西8丁目、  
TEL011-706-6215、FAX011-706-6215)

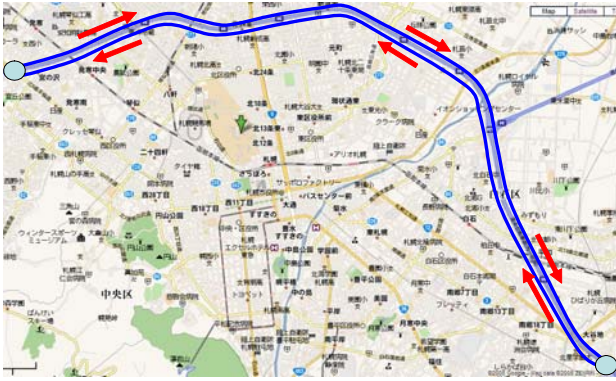


図-1 冬期路面状態に関わる走行試験道路

### 3) データ計測

試験車（レガシー）を用いた計測された車両運動データの一覧を表-2に示す。表中の路面状態に示すように、主たる対象路線である札幌新道では、1月中旬過ぎまで冬期の路面状態が出現しなかった。表-2に示す走行回数は、札幌新道では東行方向（宮の沢～大谷地）と西行方向（大谷地～宮の沢）別の回数を表している。

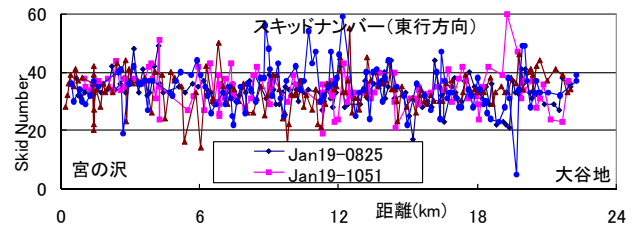
表に示すように、すべり抵抗測定車によって路面摩擦係数の測定を行ったが、札幌新道では1月19日、1月26日、および2月16日に限られている。

後の解析では、データの不足を補うために、寒地土木研究所すべり抵抗試験車で計測された昨年度平成19年1月19日データや過去の調査において計測されているデータも使用している。

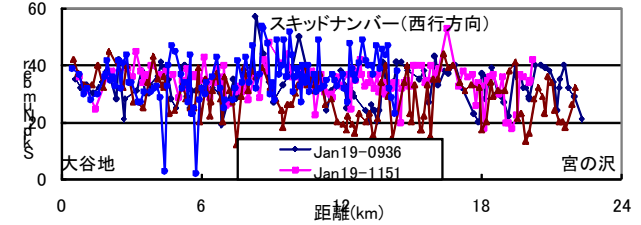
表-2 データ計測

	天気	路面状態	走行回数		摩擦係数
			東行	西行	
12/25	晴れ	乾燥	3	4	
12/26	晴れ	乾燥	2	3	
12/27	曇り	乾燥	1	1	
12/28	曇り	乾燥	0	1	
1/4	小雪	乾燥	1	0	
1/5	曇り	乾燥	0	1	
1/7	晴れ	圧雪／半乾	2	1	
1/8	晴れ	乾燥	0	1	
1/18	小雪	圧雪	1	0	
1/19	雪	新圧雪	2	3	○
1/24	曇り	圧雪	1	0	
1/25	曇り	半凍結	1	1	
1/26	雪	圧雪	1	2	○
2/5	雪	半凍結	1	0	
2/14	晴れ	凍結	1	0	
2/16	雪	新圧雪	1	2	○

図2-2(1)に1月19日、1月26日、および2月16日に札幌新道の両方向で計測された摩擦係数（SN：スキッドナンバー、%値）の路線に沿った変動分布を示している。冬期路面として警戒を要するSNが20以下となるものが少ないことが示されている。



(1) 札幌新道東行方向



(2) 札幌新道西行方向

図-2 計測された路面摩擦係数（SN値）

### 3. 点推定から線推定への拡張

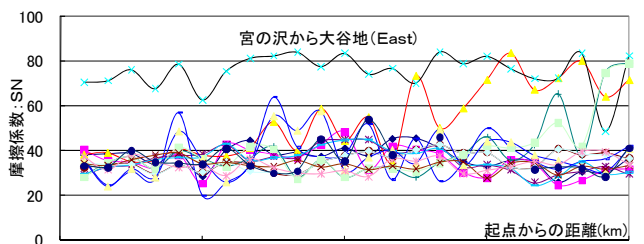
道路管理者が路面管理を実施するにあたっては、道路パトロール車等の試験車によってランダムに計測された摩擦係数値をそのまま利用することはできない。ある程度の距離に跨ってデータの平滑化を行ってデータの信頼性を高める必要がある。これまでの郊外市街地道路における計測データは、そのばらつきを考慮して500m～1000m程度の管理長が適当であるとされている。札幌新道は幹線道路としての特徴が大きく市街地道路に比べ変動の波長は大きいと予想される。ここでは、すべり抵抗測定車によって計測された摩擦係数(SN)データを用いて、隣接区間同士の相関特性を分析するとともにその相関性を利用して、前方区間におけるSNの予測値や欠損区間のSNの平滑値を自己回帰型モデルを用いて推定することを試みる。

#### (1) 隣接区間との相関特性

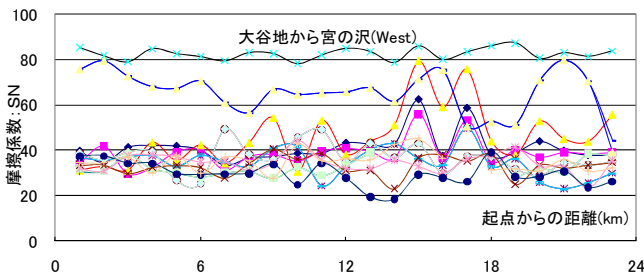
札幌新道の試験区間を1km単位の小区間に分割し、小区間ごとの摩擦係数を算定した。図-2に示した摩擦係数データは必ずしも毎回同じ地点で計測されているとは限らない。北大測定車での走行試験では、交差点前後と交差点間で2、3点の計測を行い、各単一方向の走行で100～150点ほどの計測値を得ている。寒地研究所による走行試験では予め設定した75地点での計測が各往復走行時に得られている。試験区間全長が約22kmであるので、北大データでも寒地土木研究所データでも、1km区間には少なくとも数点の計測データが得られている。ここでは、昨年に寒地土研の新型連続走行試験車によって計測されたデータも加えて、各1km区間に含まれている摩擦係数の平均値をもとめ、それをその区間の摩擦係数として解析を行った。求められた摩擦係数値の分布を図-3に示す。例外も数多くあるが総じて同位相で変動している傾向が見られている。

図-4は各 1km 区間と他区間の相互相関係数を表している。上段が東行き方向、下段が西行き方向に対応している。札幌新道が幹線であり、また質の高い路面管理を実施していることもあってかなり均質な路面状態がたもたれていることが示されている。東行きの場合には、0.5を下回る相関係数値をもつ区間が2, 3あるが、西行きの場合には対象区間と離れた区間とも殆どで0.6以上がの相関係数が確保されている。この特徴は摩擦係数の予測や補間にとって好都合である。

区間長を変えて同様な解析を行うことによって、路面管理を行う際に望ましい管理長を推察することができる。区間長が短すぎると隣接区間同士の相関の変動が大きくなり長すぎると変動の変化を表現できない。このような観点から、当該試験区間では1 km の区間長が適当である。

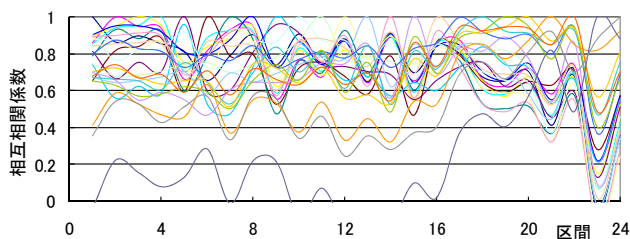


(1) 札幌新道東行方向

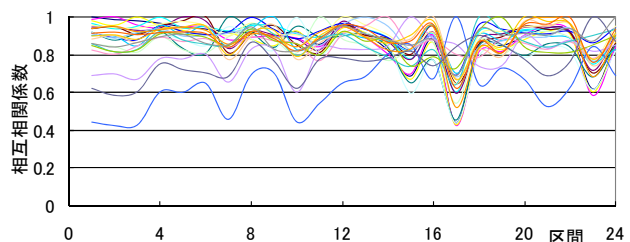


(2) 札幌新道西行方向

図-3 1km 小区間ごとの摩擦係数分布



(1) 札幌新道東行方向



(2) 札幌新道西行方向

図-4 各小区間と他の区間の相互相関係数

## 2) 隣接区間の摩擦係数の推定と平滑

### ・自己回帰モデルによる推定と平滑

路面管理を行う区間長が短いとその中で計測データが得られなかったりした場合には周辺の区間の摩擦係数値を用いて推定(平滑)することが合理的である。自己回帰モデルは元来時系列データの解析開発された手法であるが、空間的データに適用することによってここでの欠損値の平滑化を行うことができる。一般的に多変数の自己回帰モデルは、区間kでの摩擦係数をとすると近隣区間との相関性を考慮して線形の回帰式を構成する。

$$x(k) = \sum_{\substack{m=-n \\ m \neq 0}}^n a_m x(k-m) + e(k) \quad (1)$$

は誤差を表している。通常の回帰モデルと同様に回帰係数の同定を行うことができるが、自己回帰モデルの特色として、回帰係数を新しい計測値が入手される毎にそれまでの値から新たな計測値も用いて微調整する自己組織化能力にある。すなわち、利用可能な過去のデータがない場合にも、計測を行うことによってモデルの同定を自律的に実施できる。

### ・摩擦係数の推定事例

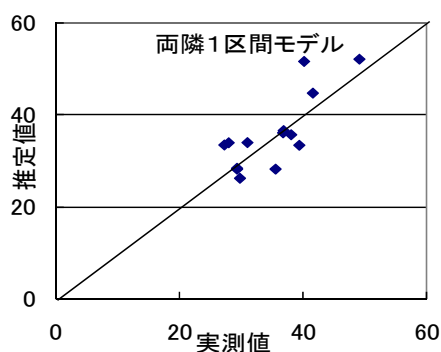
図-3に示した東行き方向15組、西行き方向16組のすべり摩擦係数データを用いて自己回帰モデルの同定を行った。両方向とも起点より9~10km区間の摩擦係数が欠損していると仮定してその推定(平滑)を行った。考慮する隣接区間として、a)両隣1区間、b)両隣2区間を想定した。図-5は、両モデルによる推定値を実測値と比較したものである。また、表-2は回帰分析の結果を総括し、決定係数R<sup>2</sup>値と標準誤差RMSEを示したものである。

解析事例の対象とした道路区間では前後区間との相関性が高いので、両隣1区間のデータでも十分な精度の推定がなされている。西向き方向では両隣1区間ではやや不足で2区間のデータを利用することによって精度の改善が見られている。

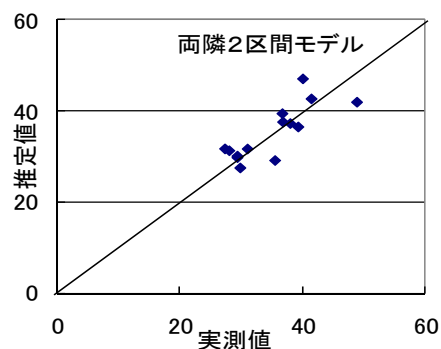
ここでの解析では、単純化のために単変数の自己回帰モデルによる定式化によったが、対象全区間の摩擦係数をベクトル表示して多変数の自己回帰モデルとして定式化を行って、連続的な欠損や区間による考慮区間数の変化などに対応する必要がある。

表-3 自己回帰モデルによる推定結果

	東行き方向		西行き方向	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
両隣1区間モデル	0.85	5.9	0.71	8.1
両隣2区間モデル	0.93	4.4	0.82	7.0



(1) 両隣1区間モデル



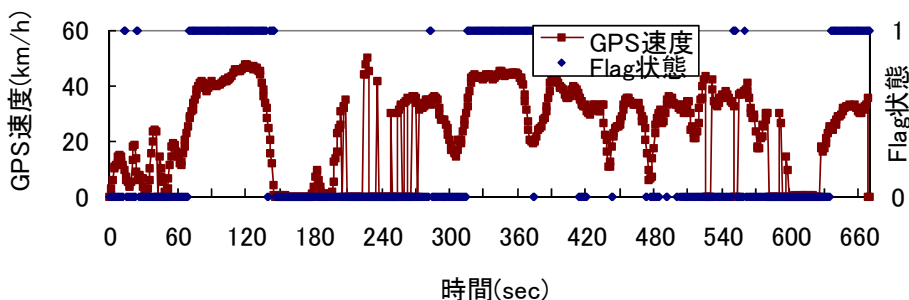
(2) 両隣2区間モデル

図-5 自己回帰モデルによる摩擦係数の“欠損値”の推定と実測値の比較（東行き方向：9～10 km区間）

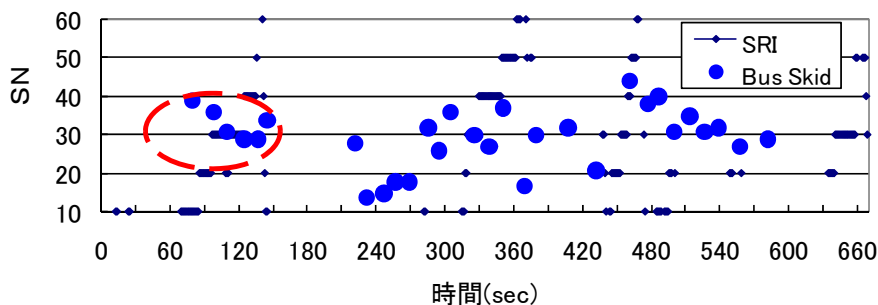
### 3) 摩擦係数の連続計測

摩擦係数の点推定から線推定への拡張は、摩擦係数の連続計測技術が確立していないことを背景としている。スリップ比- $\mu$  曲線の初期立ち上がり注目して摩擦係数の連続測定するセンサーが開発されている（SRIセンサー）。従来の計測センサーと異なり、摩擦係数測定のために加速や減速などの操作が一切不要であるだけでなく、通常の定常走行時のデータを利用することを最も大きな特色としている。従来の方法では、大きな加減速度を得るために時として過剰な加減速操作に陥っていたことを考慮すると画期的な手法であるが、正確なスリップ比データを計測するために、FF車やFR車の場合には非駆動輪の車速データをスリップ比算定に用いるが、本試験で用いた試験車のように4輪駆動車では高精度なDGPSによる車速測定が必要とされている。

札幌新道は高架区間と並走しDGPSデータの計測には適さないため、札幌市郊外部での計測データを用いて、バス型すべり抵抗車による計測値との比較を行った。図-6はDGPSデータの受信フラグの状態とSRIセンサーで連続計測された摩擦係数をすべり抵抗車による計測値と比較したものである。GPS信号が安定的に受信されている時には、すべり抵抗車による計測値に比較的近い値が計測されている。



(1) GPS速度とセンサーフラグ状態



(2) バス型すべり抵抗測定車による計測値との比較

図-6 SRIセンサーによる路面摩擦係数の連続計測

### 4. まとめ

地点で計測・推定されたデータの区間データへの変換に関して、1) 試験区間を1 km 単位の試験区間に分割して際の特定期間の摩擦係数は隣接区間と0.6～0.8の安定した相互相関係数を有している、2) 欠損値

の推定を行うために、隣接区間との相関性を考慮した自己回帰型のモデル式が有効であり、隣接する1～2区間からの摩擦係数値から決定係数0.8程度の精度を有する推定が可能である、等の結果を得た。