

冬期道路の走行性評価技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地道路研究グループ（寒地交通チーム、雪氷チーム）、寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全チーム）、技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

研究担当者：高橋尚人、丸山記美雄、徳永ロベルト、星卓見、住田則行、佐藤賢治、中島知幸、藤本明宏、武知洋太、大山健太朗、佐藤信吾、三浦豪、小宮山一重

【要旨】

積雪寒冷な地域では、冬期における路肩堆雪による道路幅員の減少、路面凍結による路面すべり抵抗値の低下、積雪による路面凹凸、吹雪時の視程障害等によって走行環境が悪化し、冬期旅行速度の低下、冬型事故の発生等の道路交通特性が悪化するとともに道路利用者の満足度が低下している。近年の財政的制約の中、効率的に冬期道路管理事業を進めかつ道路利用者の満足度向上を図るためには、冬期の走行環境の計測技術の開発、冬期の走行環境が走行性に与える影響を評価するための技術開発が必要である。

本研究では、冬期道路の走行環境が走行性（運転挙動、利用者満足度等）に与える影響を評価するため、冬期道路状態（路面状態、平坦性、道路幅員、視認性、除雪レベル等による走行抵抗）の計測技術、道路利用者の視点を考慮した走行環境の評価技術の開発に取り組み、道路利用者満足度の向上およびより効果的・効率的な雪寒道路対策の実施に資することとする。本報では、本研究の成果を報告する。

キーワード：冬期道路、走行環境、走行性、運転挙動、利用者満足度、評価技術

1. はじめに

積雪寒冷な地域では、冬期の降雪及び低温によって路肩堆雪（雪山）による道路幅員の減少、凍結による路面のすべり抵抗値低下、路面の凹凸、吹雪時の視程障害等によって道路の走行環境が悪化し、旅行速度の低下、冬型事故の発生等の交通問題が発生するとともに道路利用者の満足度が低下する。一方、平成 21 年に実施された行政刷新会議（事業仕分け）で「直轄国道の維持管理」について「少なくとも 10～20%程度の予算要求の縮減を行う」との方針が出された。除雪等の道路維持管理の水準が低下することによって、冬期道路の走行環境が更に悪化し、道路交通の安全性・円滑性・快適性の低下、道路利用者満足度の低下が懸念される。効率的に冬期道路管理事業を進め、道路利用者の満足度を向上させるため、冬期の走行環境の計測技術の開発、冬期の走行環境が走行性（運転挙動と道路利用者の満足度）に与える影響を評価するための技術開発が必要である。

以上の事から、本研究では積雪寒冷地における冬期道

路の走行環境が走行性（運転挙動と利用者満足度）に与える影響を評価するため、冬期道路状態（路面状態、平坦性、道路幅員、視認性、除雪レベル等による走行抵抗）の計測技術、道路利用者の視点を考慮した走行環境の評価技術の開発に取り組む。

2. 研究実施内容

本研究では、以下の事項について取り組んだ。

- ① 走行環境の測定・評価方法に関する検討
- ② 冬期走行環境が走行性に与える影響評価手法に関する提案

3. 走行環境の計測・評価方法に関する検討

3. 1 路肩の雪提形状の計測技術に関する検討

走行環境のうち道路の有効幅員（写真 1）は、降雪や除雪による路肩堆雪の成長により減少し、渋滞を引き起こすなど、冬期交通（旅行速度）に大きく影響する要因の一つである。しかし、現状では目視による確認がほと



写真1 路肩堆雪と道路有効幅員

んどで、定量的な把握はあまり行われていない。そこで、路面および路肩堆雪の形状を同時に計測し、路面と路肩堆雪の境界位置から道路有効幅員を効率的に把握できる計測技術について検討した。

3.1.1 計測技術の必要条件と計測システムの概要

計測技術の検討にあたっては、定量的な計測結果が得られるほか、安全性、効率性および経済性についても考慮した。

具体的には、①計測員による車道上もしくは車道脇での計測は行わない（安全性）、②計測員以外の機器等による車道上もしくは車道脇での計測であっても、一般交通に対する影響を最小限に抑える（安全性）、③計測対象である堆雪形状は、日々の降雪や除雪により刻々と変化するため、計測および解析が迅速に行える（効率性、経済性）という3つの必要条件を設定した。

この必要条件を基に、道路有効幅員計測システムを製作した。道路有効幅員の計測イメージを図1に、計測システムの構成を図2に示す。

計測機器には、雪に対する計測実績があり¹⁾、比較的安価でシンプルなシステム構成が可能な「レーザースキャナ」を採用し、このレーザースキャナにより道路横断方向の路面及び堆雪形状を計測する。また、「GPSセンサ」により計測位置、時間および走行速度のデータを取得し、さらに「Webカメラ」により計測箇所の道路状況を撮影する。

計測システムは、これらの機器を計測用ソフトウェアが搭載された端末（ノートPC）に接続する構成とし、このシステムを車載して走行しながら連続計測する。

道路有効幅員は、道路横断方向の断面形状計測後に、解析ソフトウェアにより解析する（図3）。この解析で

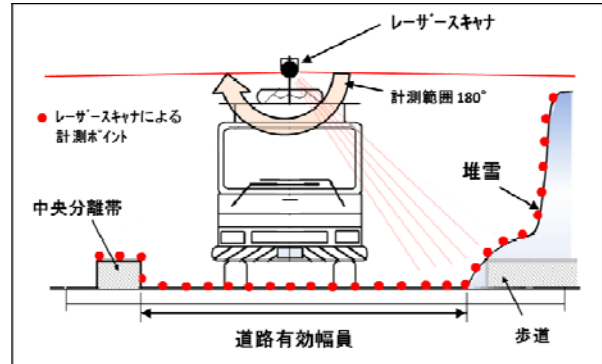


図1 計測イメージ

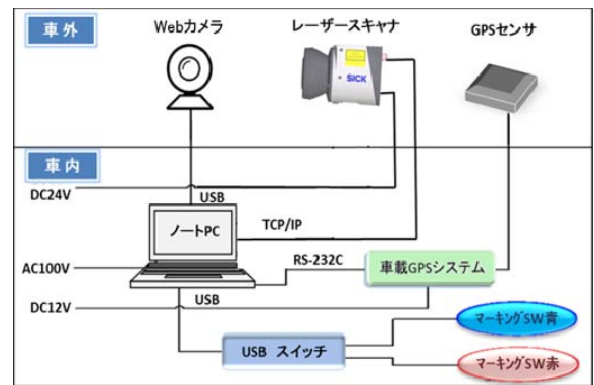


図2 計測システムの構成

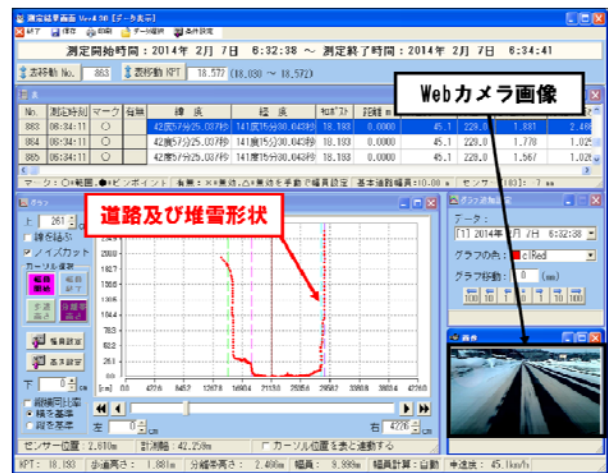


図3 道路有効幅員解析画面

は、計測箇所の道路条件（車線数、幅員、歩道および中央分離帯の有無）などを入力することにより、堆雪や道路構造物と路面の境界を自動で判別することが可能である。

また、Webカメラで撮影した計測箇所の道路状況を表示する機能により、計測結果の妥当性を視覚的に検証することが可能である。

3.1.2 精度確認試験

試作した計測システムの精度確認試験を行った。

(1) 試験概要

中央分離帯付き片側2車線を想定した模擬道路を構内に設置し、そこに表面に雪を付着させた合板製の模擬堆雪を置き、試験車両に搭載した計測システムにより計測を行った。計測は、走行速度の違いによる計測精度への影響を確認するため、車両停止状態、10km/h および30km/hの3条件で行った。

その後、システムで解析した有効幅員の値とメジャーによる実測値との比較により精度検証した。なお、模擬堆雪間の距離の実測値は7,015mmであった。

(2) 試験結果

結果を表1に示す。

最大誤差は、車両停止状態で13mm、走行速度10km/hで15mm、30km/hでは35mmであった。走行速度の増加に伴い誤差が大きくなる原因は、速度増加に伴い路面凹凸等による車両振動が大きくなり、レーザースキャナの高さ位置の変化が大きくなったためと考えられる。

しかし、誤差率は最大でも0.5%程度(誤差35mm/実測値7,015mm)であり、冬期道路有効幅員計測に十分な精度を有していると考ええる。

表1 精度確認試験結果

走行速度	試験No	スキャン回数 ※1	実速度 (km/h)	道路有効幅員	
				計測値 (mm)	誤差 (mm)
0 km/h	1回目	10	0.0	7,024	9
	2回目	10	0.0	7,022	7
	3回目	10	0.0	7,028	13
	平均誤差(絶対値)				10
	最大誤差(絶対値)				13
10 km/h	1回目	5	9.6	7,030	15
	2回目	4	9.3	7,017	2
	3回目	5	11.4	7,013	-2
	平均誤差(絶対値)				6
	最大誤差(絶対値)				15
30 km/h	1回目	1	28.4	7,009	-6
	2回目	2	30.2	7,015	0
	3回目	2	29.6	7,050	35
	平均誤差(絶対値)				14
	最大誤差(絶対値)				35

※1 レーザースキャナが計測対象物をスキャンした回数

3.1.3 路上計測試験

試作した計測システムの現場適応性を確認するため、現場での冬期路上計測試験を行った。

(1) 試験概要

同一路線に都市部・郊外部・山間部を有する札幌近郊の一般国道において、試験車両に計測システムを搭載し通常の走行速度で計測を行った。

供用中の現道での有効幅員の実測は困難なため、解析した道路有効幅員の妥当性の検証は、Webカメラ画像と見比べることにより視覚的に行った。

(2) 試験結果

結果の一例(郊外部)を表2に、解析画面の一例(郊外部)を図4に示す。

都市部・郊外部・山間部のいずれも計測データのばらつきは少なく、Webカメラ画像と解析した堆雪および歩道形状が概ね一致したことから、試作した計測システムは有効な計測データを得られていると考える。

表2 路上計測試験結果の一例(郊外部)

データ No.	KP	計測速度 (km/h)	道路有効幅員 (mm)	データ No.	KP	計測速度 (km/h)	道路有効幅員 (mm)
1	18.190	39.2	9,618	26	18.212	41.5	9,909
2			9,657	27			9,955
3			9,646	28	18.224	42.1	9,974
4			9,695	29			9,965
5			9,728	30			9,946
6			9,760	31			9,917
7			9,781	32			9,974
8			9,775	33			9,968
9			9,748	34			9,896
10	18.201	40	9,843	35	18.236	42.7	9,907
11			9,858	36			9,914
12			9,839	37			9,965
13			9,895	38			9,941
14			9,953	39			9,918
15			9,881	40			9,939
16			9,521	41			9,944
17			9,924	42			9,876
18	18.212	41.5	9,992	43			9,870
19			9,947	44	18.248	43.4	9,952
20			9,917	45			9,883
21			9,925	46			9,904
22			9,967	47			9,866
23			9,901	48			9,868
24			9,926	49			9,819
25			9,937	50			9,913

* KP及び速度計測は1秒毎、道路有効幅員計測は0.1秒毎であるため、表記方法が異なる

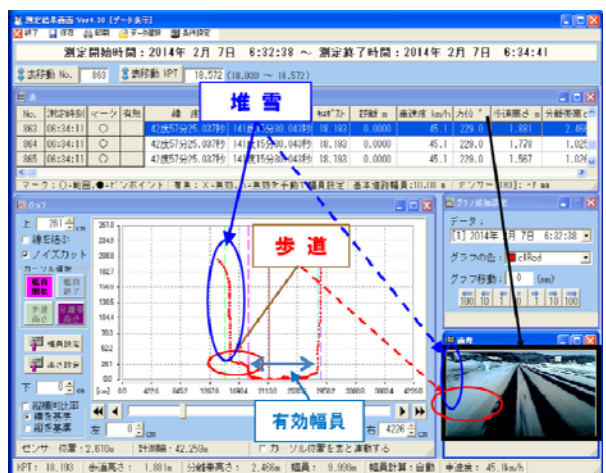


図4 路上計測試験解析画面の一例(郊外部)

3.1.4 計測システムの機能

試作した計測システムには、効率的な計測を目的に以下の機能を搭載した。

(1) 閾値の自動設定機能

道路有効幅員の自動解析に使用する異常値を排除するための各閾値を、別途入力する計測箇所の道路条件（車線数、幅員、歩道および中央分離帯の有無）などから自動的に設定する機能を設けた。

(2) 取付角度の補正機能

レーザースキャナ取付け角度のずれが計測精度に与える影響を防ぐため、レーザースキャナから地面までの距離を計測したときの最小値（最短値）をレーザースキャナの設置高さとし、その最小値の方向を路面に対して垂直とする補正機能を設けた。これにより、レーザースキャナが地面に対して水平に設置されていない場合でも適正な計測が可能となる。

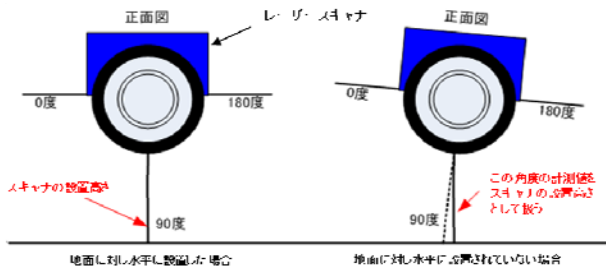


図5 取付角度補正機能

(3) 車両傾斜角度の補正機能

道路横断方向に対する車両の傾斜に伴う計測誤差を自動で補正する車両傾斜角度の補正機能を設けた。具体的には、レーザースキャナの垂直方向を中心に左右等角度（ θ ）の2点（A,B）の座標を求め、この座標から傾斜角度を演算し、この結果を自動で道路有効幅員の解析に反映する。また、傾斜角度の手動入力も可能にした。

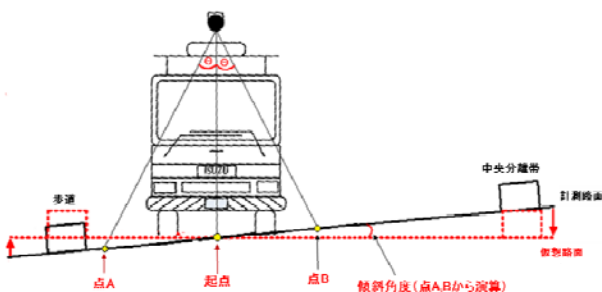


図6 車両傾斜角度の補正機能

3.2 除雪レベルの違いによる走行抵抗の測定・評価方法に関する検討

除雪レベルの違いによって路面に残留した積雪や雪氷が、車両の走行抵抗や燃料消費率に及ぼす影響を測定・評価する方法を検討した。

3.2.1 測定方法の検討

(1) GPS センサを用いた惰行法での走行抵抗測定方法

走行抵抗は JIS D1012 自動車—燃料消費率試験方法²⁾ および JIS-D1015 自動車—惰行試験方法³⁾ に規定されている惰行法の手法に準拠して測定することとした。具体的には、様々な種類の路面を、試験車両を約 60km/h まで加速して一定速度としたあと、測定区間に進入させてギアをニュートラルにして惰行させ、車速度が 0km/h になるまで車速の変化を GPS センサ（写真2）を用いて測定し、設定速度の ± 5 km/h の 10km/h ごとの速度低下に要する時間から走行抵抗を算出した。本研究では雪氷路面上で降雪などもある中で測定を実施するため、レーザ器等で測定する方法では誤検知が起りうるため、GPS センサを用いるのが適当と判断したものである。往路と復路を3回ずつ計測し、それらの平均値から走行抵抗を算出した。試験時の外気温、路面温度、風速風向、気圧の計測も併せて行うこととした。



項目	性能
速度	0.01 km/h
距離	1 cm
時間	0.01 s
サンプリングレート	100Hz
出力データ	経緯度 速度・垂直速度 方位・高度 距離 加速度(縦/横)

写真2 GPSセンサ

(2) 燃料流量計を用いた燃費測定方法

除雪レベルが走行抵抗に影響を及ぼすと、その結果として燃料消費量が違ってくと推測される。そのため、燃費（燃料消費率）の計測手法も検討した。

検討の結果、燃料消費率は、JIS D1012 自動車—燃料消費率試験方法²⁾ に規定された定速度燃料消費率試験方法に規定されている手法に準拠して測定することとした。具体的には、試験車両のギアを固定して 30km/h、40km/h、50km/h の一定速度で試験区間を走行させ、その間の燃料消費量を燃料流量計で実測した。燃料流量計は、燃料タンクとエンジンを繋ぐ経路のパイプに車載型流量計および容積式流量検出器を設置し、実際の燃料使用量をリア

ルタイムで実測し、燃料使用量と走行距離から燃料消費率を算定した。ちなみに、燃料の経路はエンジンに供給するための配管（入り）と、エンジンで燃焼に用いられずに戻る配管（戻り）があることから、両方に流量検出器を設置し、同時刻の入りと戻りの流量差を燃料の使用量として扱った。

(3) 雪氷路面の IRI を連続計測可能な測定方法

走行抵抗や燃料消費率は、除雪レベルの違いに伴って発生する雪氷路面の凹凸によっても影響されると推測される。そのため、雪氷路面の平坦性の計測手法も検討した。

舗装路面の凹凸や平坦性を計測する場合、レーザー変位計を用いて計測することが広く行われているが、雪氷路面の凹凸や平坦性を計測する場合には、レーザーで測定する方法では測定に支障が生じることが予想された。そのため、本研究では、車両バネ上およびバネ下に設置した2つの加速度計から得られる上下加速度を逆解析することによって路面プロファイルを測定し、リアルタイムで国際ラフネス指数 (International Roughness Index: IRI) を算出する手法を用いた。この手法を用いれば、雪氷路面上の平坦性を計測することが可能となる。この計測は、2個の加速度計と GPS センサ、アンプおよびデータ処理ソフトを内蔵したモバイルパソコンで行われ、任意の車両に取り付けることができ、走行しながらの計測が可能であることから、計測が非常に容易で経済的な負担も少ないことも特徴として挙げられる。

3.2.2 周回路における測定

(1) 実施概要

除雪レベルの違いによって路面に残留した積雪や雪氷が、車両の燃料消費率や走行抵抗にどのような影響を及ぼすのかを、定量的に把握するための実験を実施してデータを蓄積した。実験は、寒地土木研究所の施設である苫小牧寒地試験道路周回路で実施した。周回路の全延長は2700mで、図7に示すように直線500m区間の路面に様々な雪氷路面を人為的または自然降雪によって作成して、その上を試験車両を通過させることで燃料消費率測定、走行抵抗測定、平坦性測定を行った。また、積雪雪氷路面と比較するために、乾燥路面および湿潤路面においても測定を行った。

燃料消費率は、先述したように JIS D1012 自動車—燃料消費率試験方法²⁾に規定された定速度燃料消費率試験方法、走行抵抗は JIS D1012 自動車—燃料消費率試験方法および JIS-D1015 自動車—惰行試験方法³⁾に規定され

ている惰行法の手法に準拠して測定した。具体的には、様々な種類の路面を、表3に示した諸元を持つ大型車のギアを6段に固定して30km/h、40km/h、50km/hの一定速度で走行させ、燃料消費量を燃料流量計で実測した。また、試験車両を約60km/hまで加速して一定速度としたあと、様々な種類の路面区間に進入させてギアをニュートラルにして惰行させ、車速度が0km/hになるまで車速の変化を測定して走行抵抗を算出した。試験時の外気温、路面温度、風速風向、気圧、雪の状態や密度の計測も併せて行った。

また、試験路面の平坦性と燃料消費率や走行抵抗との関係を調査するために、試験対象区間の平坦性を表現する指標として国際ラフネス指数 (IRI) の計測も併せて行った。加速度計を用いた車両搭載型の IRI 簡易測定装置を用いて測定しており、基底長が10mの IRI によって評価を行った。

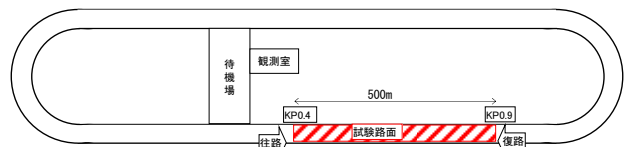


図7 苫小牧寒地試験道路の試験区間概要図

表3 試験車両の緒元一覧表

車種区分	大型車
車両名称	いすゞGIGA
駆動方式	6×2 (後輪一軸駆動方式)
ミッション	マニュアル
試験時 車両重量	25,010 kg (満載状態)
使用タイヤ	ブリヂストン W990 275/80R22.5 (スタッドレス)
タイヤ空気圧	前輪: 900kPa 後輪: 900kPa
燃料種類	軽油

(2) 周回路における測定結果

a) 走行抵抗測定結果

惰行試験により得られた大型車の走行抵抗 (全抵抗) 測定結果を図8に示す。基準となる乾燥路面に比べて、路面に雪氷が存在する路面はいずれの場合も走行抵抗 (全抵抗) が大きくなっていることが読み取れる。

なお、走行抵抗 (全抵抗) とは、図9に示すとおり転がり抵抗、空気抵抗、路面抵抗の総和と定義される。そのうち路面抵抗は、乾燥路面において測定した場合には乾燥路面の路面抵抗、雪氷路面において測定した場合に

は雪氷路面の路面抵抗を測定したことになる。ここでは、雪氷が存在したことに起因する走行抵抗の増加分を把握するために、乾燥路面時の走行抵抗（全抵抗）を雪氷路面時の走行抵抗（全抵抗）から差し引いたものを雪氷抵抗と定義し、算定結果を図10に示した。路面に雪氷があることで走行抵抗が増加し、約300~2000Nの抵抗が生じていることがわかる。

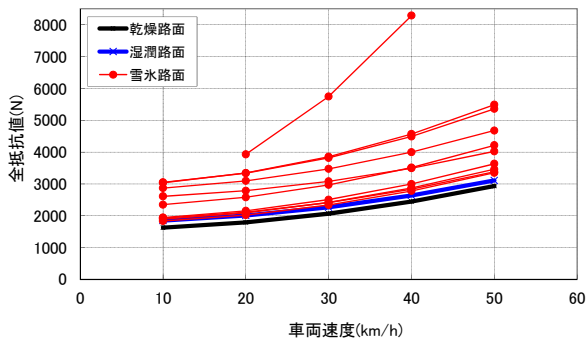


図8 様々な雪氷路面における大型車の走行抵抗(全抵抗)

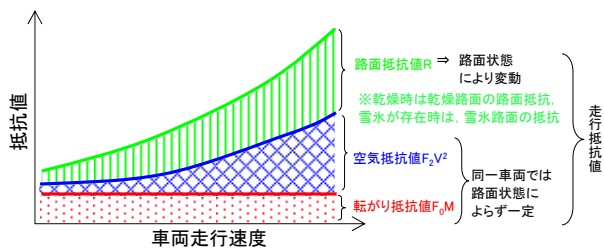


図9 走行抵抗値の概略

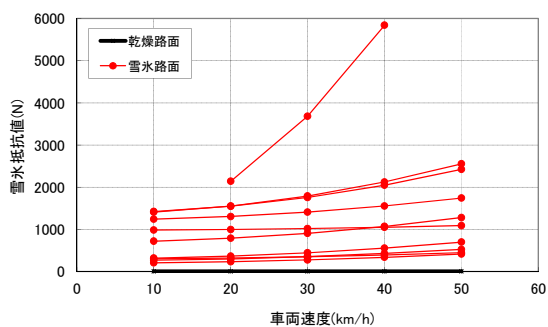


図10 雪氷による路面抵抗

b) 燃料消費率試験結果

各路面における車両速度ごとの燃料消費率試験結果を図11に示す。乾燥路面を基準として、湿潤路面、様々な雪氷路面の燃料消費率を比較すると、路面に雪氷が存在する路面はいずれの場合も燃料消費率が低下しているこ

とが読み取れる。湿潤路面の燃料消費率も、乾燥路面と比較して若干低下している。以上のことから、雪氷が路面に存在することによって、燃料消費率が低下する傾向を示すといえる。

ただし燃料消費率の低下度合いは約5%程度から約70%程度と幅が広く、雪氷による燃費への影響は大きな場合もあれば、小さな場合もある。

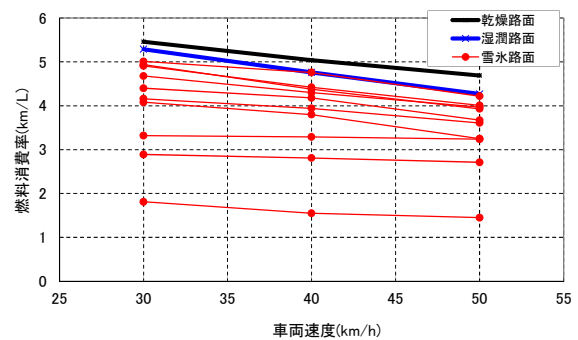


図11 雪氷路面上の燃料消費率測定結果(大型車)

c) IRIの値と燃料消費率および走行抵抗値の関係

試験を行った様々な路面のIRI測定値(基底長10m)と、大型車の燃料消費率および雪氷による抵抗の関係について図12および図13に示す。IRI(基底長10m)の値が大きいほど燃料消費率が悪い傾向にある。また、雪氷による抵抗が大きいほど燃料消費率が悪い傾向にある。

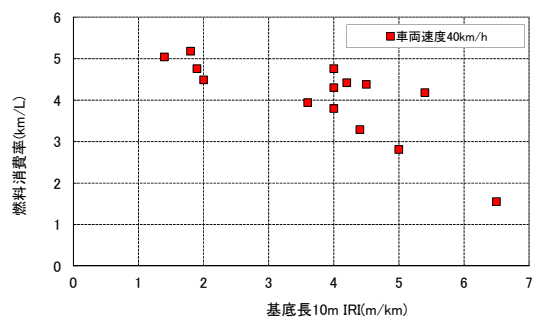


図12 路面のIRI値と燃料消費率の関係

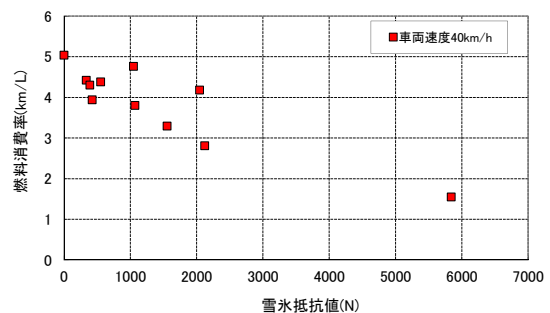


図13 雪氷による抵抗値と燃料消費率の関係

3.2.3 供用道路における測定

(1) 実施概要

供用中の道路における測定として、日高地方の国道において、2000m と 1000m の 2 区間（以下、おのおの A 区間、B 区間という）の直線区間で測定を行った。なお、各測定区間内の縦断高低差は各々3m、2m と縦断勾配は非常に緩やかな区間である。これらの区間において、夜間に降雪があり新雪除雪が施された後の雪氷路面を、昼間に試験車両を走行させて燃料消費率測定と走行抵抗測定を行った。雪氷路面での測定は 10 日の間をあげて 2 回行った（以下、おのおの雪氷路面 1、雪氷路面 2 という）。また、雪氷路面と比較するために、標準となるアスファルト舗装乾燥路面においても測定を行った。なお、アスファルト舗装の表層混合物は密粒度 13F である。試験時の路面状況の一例を写真 3 に示す。除雪後に雪氷が薄く覆っているものの、所々路面が露出して平坦性もさほど悪化していないといった路面状況であり、国道における一般的な除雪後の路面状態であった。

表 4 に示した諸元を持つ車両総重量約 19.8t の大型車のギアを 7 段に固定して 50km/h、60km/h の一定速度で走行させ、燃料消費量を燃料流量計で実測した。また、試験車両を約 60km/h まで加速して一定速度としたあと、測定区間に進入させてギアをニュートラルにして惰行させ、車速度が 35km/h になるまで車速の変化を測定して走行抵抗を算出した。試験時の外気温、路面温度、風速風向、気圧の計測も近傍にて行った。



a) 雪氷路面 1



b) 雪氷路面 2

写真3 試験時のA区間の路面状況

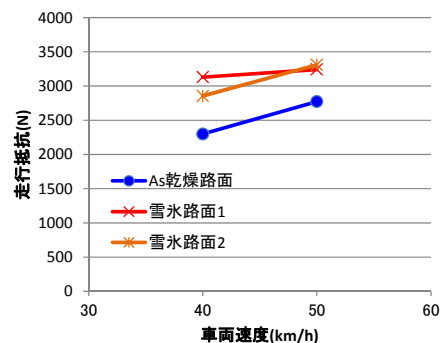
表4 試験車両の緒元一覧表

車種区分	大型車
車両名称	いすゞGIGA
駆動方式	6×2 (後輪一軸駆動方式)
ミッション	マニュアル
試験時 車両重量	19,765 kg (20t未満)
全長	11,980mm
車軸数	3
使用タイヤ	ブリヂストン W990 275/80R22.5 (スタッドレス)
タイヤ空気圧	前輪: 900kPa 後輪: 900kPa
燃料種類	軽油

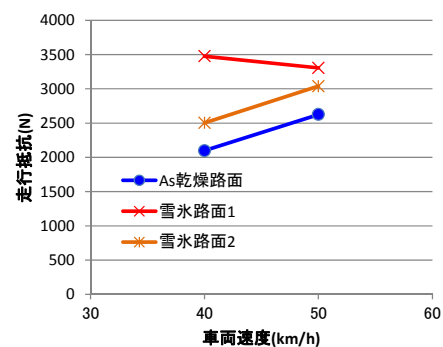
(2) 供用道路における測定結果

a) 走行抵抗測定結果

惰行試験により得られた大型車の走行抵抗（全抵抗）測定結果を図 14 に示す。基準となるアスファルト乾燥路面に比べて、路面に雪氷が存在する路面はいずれの場合も走行抵抗（全抵抗）が大きくなっていることが読み取れる。路面に存在する雪氷によって、車両が走行する際にエネルギーロスが生じ、車両が一定速度で走行するための必要な抵抗値が大きくなるものと推測される。走行抵抗が大きくなると、走行に要するエネルギーが余分に必要になるため、その分燃費は低下すると考えられる。



(a) 区間A



(b) 区間B

図14 雪氷路面における大型車の走行抵抗(全抵抗)

b) 燃料消費率試験結果

実道における車両速度ごとの燃料消費率試験結果を図15に示す。アスファルトの乾燥路面を基準として雪氷路面1、2の燃料消費率を比較すると、路面に雪氷が存在する路面はいずれの区間においても、そしていずれの雪氷路面においても燃料消費率が低下していることが読み取れる。以上のことから、雪氷が路面に存在することによって、燃料消費率が低下する傾向を示すといえる。

次に、アスファルト乾燥路面に対する雪氷路面の燃料消費率低下率を図16に示す。燃料消費率の低下度合いは数%程度から約20%程度の間となっている。前述した周回路での試験結果と整合しており妥当と考えられる。

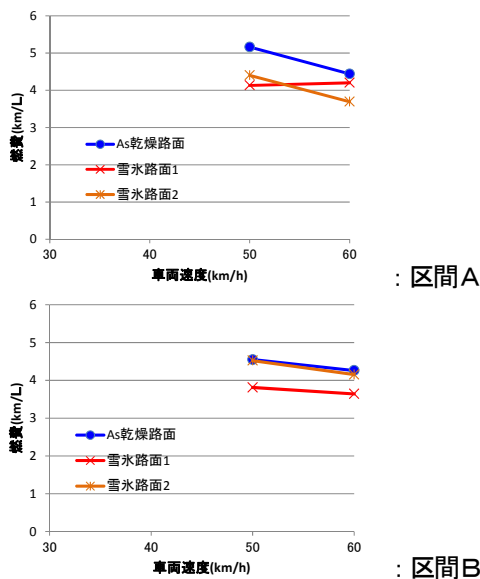


図15 雪氷路面上の燃料消費率測定結果(大型車)

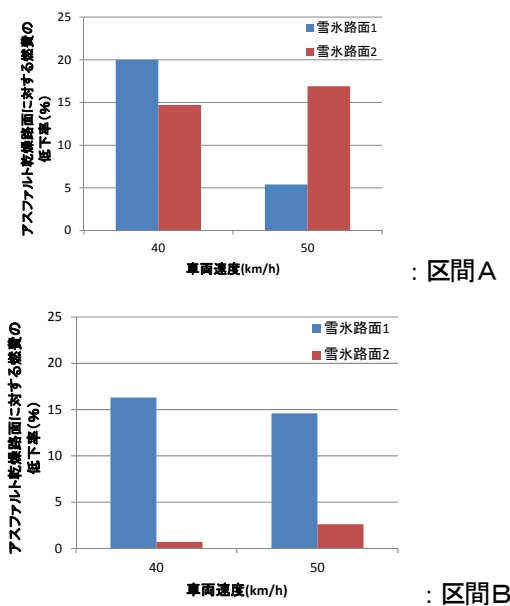


図16 雪氷路面の燃費悪化率(大型車)

3.2.4 評価法の開発

周回路において様々な雪氷路面上で走行抵抗、燃費、IRIを測定して得られたデータの解析を進めたところ、燃費と走行抵抗は、走行速度、平坦性IRI、雪密度の関数であり、定式化が可能と考えられた。つまり、除雪レベルが異なることで生じる様々な雪氷路面における走行抵抗や燃費がどの程度になるか、定量的に予測することが可能な評価手法を構築することが可能と考えられた。

そこで、燃費を従属変数とし、走行速度、IRI、雪区分値を説明変数とした非線形重回帰分析を行った。ここで、雪区分値とは、本研究で定義した指標値であり、雪氷路面の表面から3cm程度までの深さの雪氷密度の逆数をとった値である。つまり、新雪積雪など密度が0.15g/cm³の場合の雪氷区分値は6.67、圧雪で密度が0.65g/cm³の場合の雪氷区分値は1.54となり、路面の雪密度が低く柔らかいほど数値が小さくなる指標とした。なお、路面に雪氷がない場合は、0と扱うこととした。このように設定することで、乾燥路面→氷板路面→ザラメ雪→粉雪→新雪の順番で雪区分値が大きくなる指標となり、燃費や走行抵抗との相関式の導入が可能となった。

非線形重回帰分析の結果得られた燃費の算定式を式(1)に示す。また、式(1)から算定した燃費と、実測燃費の対応関係を図17に示す。

$$\text{燃費} = 6.8492 * e^{-0.008 * \text{車両速度}} - 0.06825 * \text{IRI} - 0.786773 * \text{雪区分値} + 0.25225 \quad (1)$$

式(1)によって算定された燃費は、実際の計測燃費と非常に良い対応関係にあり、算定値と実測値のR²値は0.66、誤差の平均は0.14となっており、精度よく算定できる式であると評価できる。各説明変数の係数の符号に着目すると、車両速度、IRI、雪区分値の増加はいずれも燃費の悪化方向に作用しており、計測結果と整合性のとれた妥

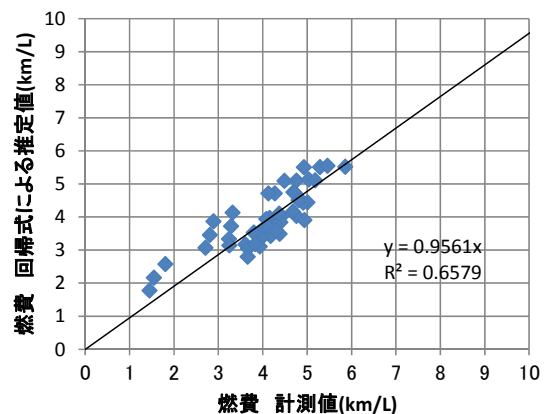


図17 燃費の計測値と回帰式による推定値の関係(大型車)

当な式であるとも評価できる。雪が存在すること、特に雪質が燃費に大きく影響を及ぼすことがわかり、その影響度合いを重回帰分析によって定量化、定式化できた。

次に、燃費と走行抵抗（全抵抗）は図18に示したように R^2 値が 0.7 以上と高い相関が得られていることから、その回帰式(2)を用いて燃費から逆算する手法を考えた。

$$\text{燃費} = 7.7426 * e^{0.0001939 * \text{走行抵抗}} \quad (2)$$

式(1)と式(2)を用いることで、様々な雪氷路面を走行する場合の走行速度、IRI、雪質に応じた燃費と走行抵抗を計算することが可能となる。除雪レベルの違いが走行抵抗や燃費に及ぼす影響を定量評価する手法として提案した。

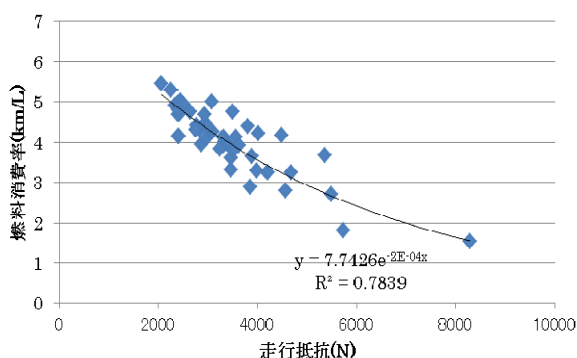


図18 走行抵抗と燃費の関係（大型車）

3.3 冬期走行環境が走行性に与える影響評価手法に関する提案

本研究では、冬期に走行試験を実施し、冬期走行環境が走行性に与える影響を客観的および主観的に評価し、その手法を提案した。

3.3.1 走行試験

走行試験は、客観評価と主観評価に区別してそれぞれ実施された。

(1) 客観評価

客観評価のための走行試験は、平成23年度から平成27年度までの冬期の平日の午前10時～午後0時に一般国道231号で行った。本報告書では、便宜上、各走行試験をRunと呼ぶ。走行試験の対象区間は、起点の札幌自動車道との交点(KP0.0)から石狩市八幡(KP18.0)までの延長18.9kmとした。本研究では、交通量の相違を踏まえて、試験区間を札幌市と石狩市の境(KP7.0)で市街地区間(札幌市:KP0.0～7.0)と郊外区間(石狩市:KP7.0～18.9)に区別した。平日12時間自動車類交通量は、市街地区間における6観測地点の平均で上り12,600台・下り11,600台、



写真4 測定車両

(左上: HFN 、右上: L_v 、左下: L_r 、右下: IRI)



写真5 アンケート調査の様子

郊外区間における4観測地点の平均で上り7,800台・下り8,400台であった。

計測項目は、路面すべり抵抗値 HFN 、視程 L_v (m)、道路有効幅員 L_r (m)、路面平坦性 IRI (mm/m) および走行速度 V_v (km/h) である(写真4)。計測機器はいずれも車載され、走行しながら計測を実施した。 V_v は、連続路面すべり抵抗値測定装置を搭載した車両の計測値を採用した。計測時は全車両ともに自由走行とした。各測定車両で得られたデータは、全て1km間隔で平均値を求め、位置情報を基に整合させた。

(2) 主観評価

主観評価のための走行試験は、一般国道230号の札幌市内を対象として平成25年2月、3月の間で10回行われた。走行試験では、試験車両に一般的なセダントタイプの乗用車を用い、被験者を乗せて走行し、試験後に満足度に関するアンケート調査を実施した(写真5)。

アンケート調査の項目は、既往の研究^{4),5)}を参考に、走行しやすさの総合評価と、走行しやすさに影響を与える要因として「直線区間のすべりやすさ」、「カーブ区間のすべりやすさ」、「坂道区間のすべりやすさ」、「交差点付近のすべりやすさ」、「車の流れ」、「道幅」、「前方の見通し」、「路面の平坦性」、「沿道出入り車両との衝突危険性」

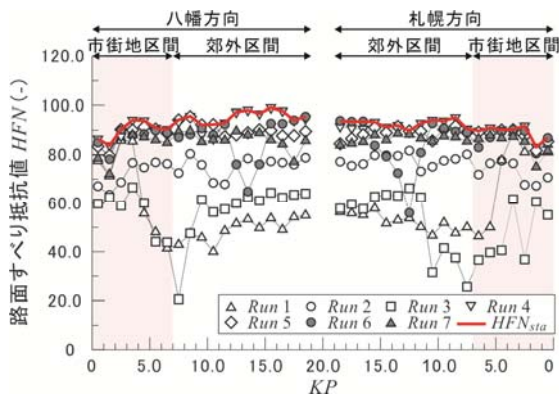


図19 冬期道路環境の路線分布

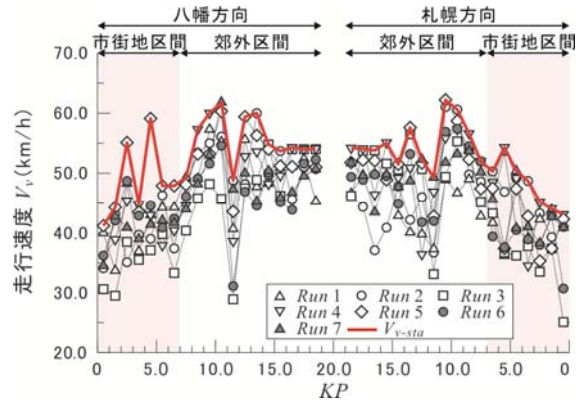


図20 走行速度の路線分布

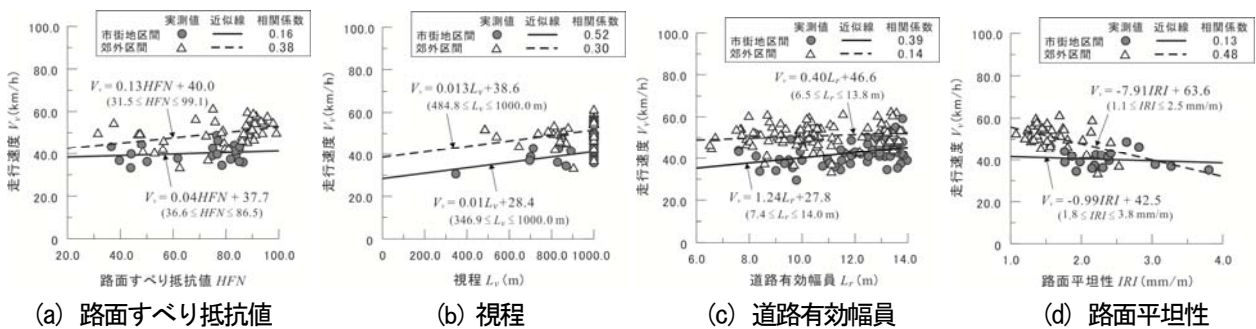


図21 冬期走行環境因子と走行速度の単相関関係

の10項目を設定した。評価は、「良い」、「やや良い」、「普通」、「やや不満」および「不満」の5段階で評価した。

3.3.2 結果の解析・評価手法の検討

(1) 客観評価

走行試験結果の一例として、図19に路面すべり抵抗値 HFNの路線分布を、図20に走行速度 V_v の路線分布を、それぞれ示す。同図の横軸の左 (KP0.0) から中央 (KP20.0) のデータは八幡方向に向かって計測した結果を、中央 (KP20.0) から右 (KP0.0) のデータは札幌方向に向かって計測した結果を示す。プロットは図中の凡例に示すように Run 1~Run 7の実測値である。実線については3.3.4で詳述する。

走行試験データを基に、冬期走行環境因子と走行速度の関係性をまとめたものが図21である。黒丸のプロットは市街地区間を、白抜き三角のプロットは郊外地区間を意味する。いずれのグラフでも走行速度 V_v は概して市街地区間より郊外地区間が大きいことが確認できる。

(2) 主観評価

どの冬期走行環境因子を優先的に改善することで満足度を高められるかを評価するため、CSポートフォリオ分析を行った。CSポートフォリオ分析は、顧客満足度

(CS : Customer Satisfaction) から改善項目の優先度を検討する手法である。CSポートフォリオ分析では、縦軸を満足度、横軸を重要度とする散布図 (CS グラフ) を作成する (図22)。CS グラフは、①重要度が高いが満足度が低く重点的に改善すべき分野 (重点改善分野)、②重要度は低いが満足度も低いいため改善が望まれる分野 (改善分野)、③重要度も満足度も高く重点的に維持すべき分野 (重点維持分野) および④重要度が低いが満足度が高く現状維持が望ましい分野 (維持分野)、の4つの分野に分割される。CSポートフォリオ分析によって、顧客のニーズを測り、改善項目を定量的・視覚的に把握することが可能である。

本研究では、「不満」を1、「良い」を5として各項目をスコア化し、その平均値を満足度とした。また、総合評価を従属変数、各項目を独立変数として偏相関係数を求め、重要度とした。その満足度および重要度をそれぞれ縦軸および横軸とし、算出した各項目の値をCSグラフにプロットした。

CSポートフォリオ分析結果を図23に示す。同図(a)および(b)は都市部および郊外部の結果である。都市部では、「車の流れ」、「道幅」、「前方の見通し」および「路面の平坦性」が重点改善分野にプロットされた。郊外部では、

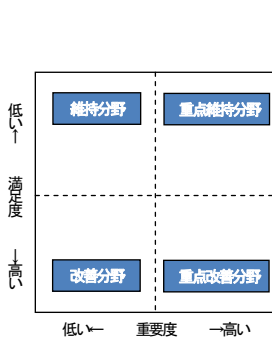
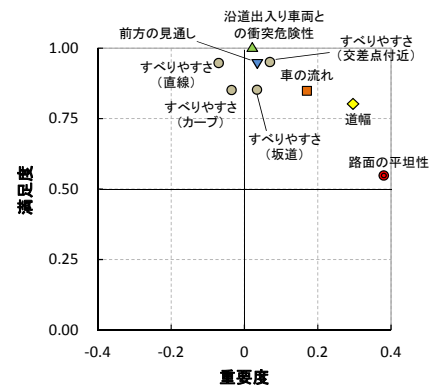
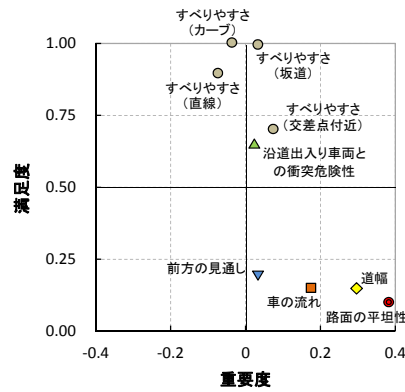


図 22 CS グラフ



(a) 都市部

(b) 郊外部

図 23 CS ポートフォリオ分析結果

改善分野および重点改善分野はなかった。このように、アンケート調査と CS ポートフォリオ分析によって、冬期走行環境に関する満足度と重要度の関係は明らかになり、道路利用者の視点での冬期道路管理事業の改善項目は評価できる。

3.3.3 走行環境の評価手法の提案

(1) 概要

本研究では、冬期走行環境が走行性に与える影響の客観と主観の両面を考慮した総合評価手法を提案する。総合評価のフローを図24に示す。図24右側に示す主観評価については3.3.2(2)に示した。ここでは、図24左側に示す客観評価⁶⁾の中で「冬期走行環境変化率と走行速度低下率の関係」および「冬期走行環境の悪化に伴う走行速度低下率の評価」について詳述する。また、本評価法の検証のために冬期交通の走行速度 V_v (km/h) の推定値 V_{v-cal} (km/h) も求め、実測値と比較検証したのでその結果を示す。加えて、本手法の課題について記載する。

(2) 冬期走行環境変化率と走行速度低下率の関係評価

以下では、 HFN 、 L_v 、 L_r および IRI を総称して P で表す。 P の変化率と走行速度低下率の関係は、次の手順で求められる。

- (i) 非冬期と冬期において、複数回に亘って走行試験を実施し、 HFN 、 L_v 、 L_r 、 IRI および V_v を計測する。各計測データから HFN 、 L_v 、 L_r 、 IRI および V_v の路線分布を作成する。
- (ii) 全走行試験における路線分布を対象に距離毎の HFN 、 L_v 、 L_r および V_v の最大値、また IRI の最小値を抽出し、これらの最大値あるいは最小値の路線分布を作成する。これらの路線分布を良好な（非冬期の）冬期走行環境における P および V_v として、 P_{sta} および V_{v-sta} の記

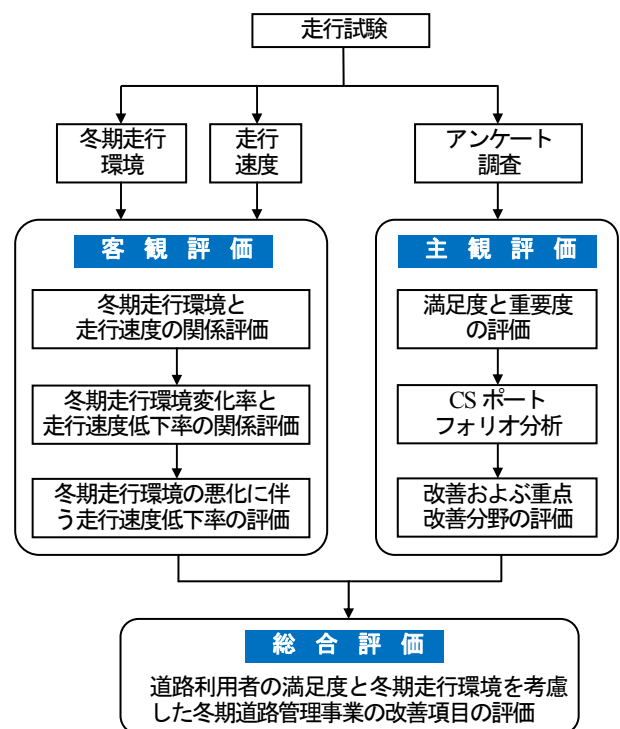


図 24 冬期走行環境が走行性に与える影響の総合評価フロー

号で表す。なお、本走行試験の P_{sta} および V_{v-sta} は図 19 および図 20 の赤色実線で示される。

- (iii) P と V_v の単相関式を作成する (図 21)。
- (iv) P の変化率 $R_p (= 1 - P/P_{ave})$ と走行速度低下率 $R_{v,p} (= 1 - V_v/V_{v-ave})$ をそれぞれ求め、 R_p と $R_{v,p}$ の関係図を作成する (図 25)。
- (v) 次式のように R_p と $R_{v,p}$ の関係を一次式で近似し、定式化する。

$$R_{v-p} = a_p R_p \quad (3)$$

ここで、 a_p は上記一次関数の傾きである。なお、下付

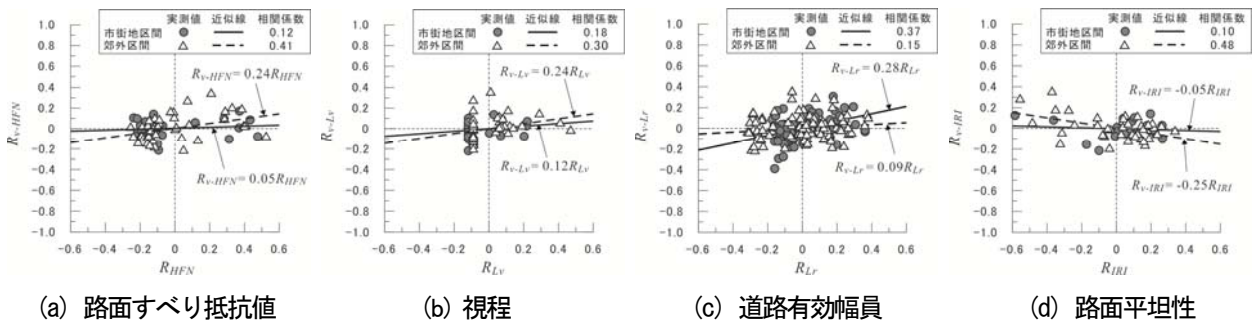


図25 道路雪氷環境因子と走行速度の関係の標準化

きの添字 *ave* は平均値を意味する。

図25に $R_{v,p}$ と R_p の関係を示す。各近似式はいずれも $(R_p, R_{v,p}) = (0, 0)$ を通過する。 $R_{v,p}$ と R_p を比例関係で近似したことで、 P の大小に拘わらず、 R_p に伴う $R_{v,p}$ を定量的に評価することが可能になった。これら $R_{v,p}$ と R_p の関係の相関係数を市街地区間と郊外区間に区別して図中に示す。相関係数を観ると、十分に相関性が得られていない関係がある。今後、相関係数が低い $R_{v,p}$ と R_p の関係については、分析データを交通量に加えて道路構造で分類するなど、高い相関係数が得られるようにカテゴリーの細分化が必要と考える。

(3) 冬期走行環境の悪化に伴う走行速度低下率の評価

複数の冬期走行環境因子の悪化に伴う走行速度低下率 R_{v-mult} は次の手順で求められる。なお、上述した冬期交通の走行速度の推定値 V_{v-cal} (km/h)の求め方も併せて記載する。

- (i) 各走行試験における $R_p (= 1 - P/P_{sta})$ を求める。
- (ii) R_p を式(1)に代入して $R_{v,p}$ をそれぞれ求める。
- (iii) 次式のように各 $R_{v,p}$ を足し合わせて R_{v-mult} を求める。

$$R_{v-mult} = R_{v-HFN} + R_{v-Lv} + R_{v-Lr} + R_{v-IRI} \quad (4)$$

- (iv) V_{v-sta} と R_{v-mult} を用いて V_{v-cal} を以下の式より求める。

$$V_{v-cal} = V_{v-sta} (1 - R_{v-mult}) \quad (5)$$

図26は R_{v-HFN} 、 R_{v-Lv} 、 R_{v-Lr} 、 R_{v-IRI} および R_{v-mult} の路線分布の変化である。本報告では、一例としてRun 1およびRun 3の結果を示す。試験時の路面状態を動画から判断し、黒路面(乾燥、湿潤)と白路面(シャーベット、積雪、圧雪状態)に区別して図中に示す。同図より、非冬期交通と比較して冬期交通の走行速度がどこで・どのくらい低下したか、その低下に対してどの道路雪氷環境因子の影響度が高いか、を把握することが可能になる。

同図を観ると、極端に大きな R_{v-IRI} がある(図中AおよびBなど)。走行試験中に撮影した動画を基にこれらの要因について以下に考察すると、図中Aについては交差点付近

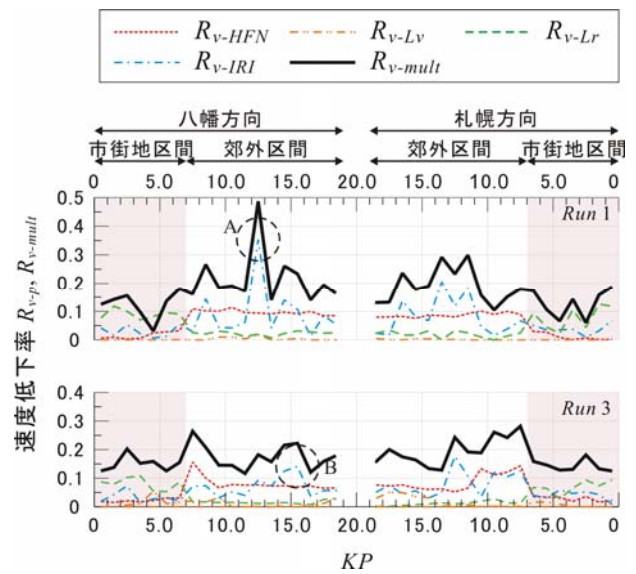


図26 走行速度低下率の路線分布

におけるポットホールやクラックなどの舗装の劣化や車両通過位置の相違が要因と推察される。次に、図中Bについて、路面は圧雪状態にあったが、交差点とその手前数十メートルにおいては圧雪層がシャーベット状に軟化しており、そこに輪荷重が加わったことで路面の凹凸が増大していた。この圧雪層の軟化は、凍結防止剤のスポット散布や停止車両からの熱供給に起因したものと考えられる。

(4) 実測値との比較による走行速度の推定値の検証

図27は式(3)から求めた V_{v-cal} 、 V_v の実測値 V_{v-mes} (km/h)および V_{v-sta} を示す。 V_{v-cal} には、 V_{v-mes} と一致した区間もあれば、不一致の区間も観られる。例えば、図中CやDでは V_{v-cal} は V_{v-mes} を大きく下回った。図中Cの V_{v-cal} の過小評価は、3.3.3(3)で記述した R_{v-IRI} の局所的な増大に対して V_{v-mes} が V_{v-sta} と大差ないことが要因である。また、図中Dでは、 R_{v-mult} が0.14~0.26程度であるにも拘わらず、 V_{v-mes} は V_{v-sta} と大きく異なる。逆に、図中EやFでは V_{v-cal} は V_{v-mes} を上回った。

全Runにおける V_{v-cal} と V_{v-mes} の平均絶対誤差MAEの平均

値は全区間で4.7 km/h、市街地区間で5.0 km/h、郊外区間で4.6 km/hであった。

V_{v-cal} と V_{v-mes} の不一致の一要因として、本評価では1台の試験車両の V_v を用いたために、信号での停車の時間や有無が V_{v-mes} および V_{v-sta} に影響したと考えられる。信号や右折車による停滞などの不確実事象を包括して冬期交通の走行速度の路線分布を評価するには、プローブデータを活用するなど、複数車両の走行速度の平均値を用いることが望まれる。また、本評価法の信頼性を高めるには、非冬期の計測データ数を増やし、 P_{sta} と V_{v-sta} を最大・最小値で与えるのではなく、非冬期の計測データの平均値で与えることも必要と考える。

4. まとめ

冬期の道路有効幅員の計測を目的に、路肩の堆雪形状の計測技術について検討した。計測技術には、定量的な計測データの取得を前提に、安全性、効率性および経済性についても考慮しレーザースキャナを採用した。また、レーザースキャナを使用した道路有効幅員計測システムを試作して精度確認試験および路上計測試験を行った結果、実用上十分な精度の道路有効幅員の計測データが得られることを確認した。

除雪レベルの違いによる走行抵抗の測定方法の検討を行った結果、GPS センサを用いた惰行法での走行抵抗測定方法を確立し、燃料流量計を用いた燃費測定方法並びに雪氷路面のIRIを連続計測可能な測定方法も併せて確立した。その上で、様々な雪氷路面上で走行抵抗、燃費、IRIの測定を実施し、雪氷が各々の指標に及ぼす影響を定量的に把握した。そして、計測データを重回帰分析することによって、雪氷の密度や雪氷によるIRIの悪化を考慮した、走行抵抗と燃費の算定式を定式化した。これによって様々な除雪レベルの雪氷路面における走行抵抗や燃費を算定可能となり、除雪レベルの違いが走行抵抗や燃費に及ぼす影響を定量評価する手法として提案した。

冬期走行環境が走行性に与える評価手法の提案に関して、実道での走行試験を実施し、冬期走行環境が走行性に与える影響を客観的および主観的に評価し、両者による総合評価手法を提案した。冬期走行環境が走行性に与える影響の主観評価ではアンケート調査とCSポートフォリオ分析から冬期走行環境に関する項目について満足度と重要度を明らかにし、道路利用者の視点での冬期道路管理事業の改善項目を評価した。冬期走行環境が走行性に与える影響の客観評価では路面すべり抵抗値(HFN)、視程(L_v)、道路有効幅員(L_r)および路面平

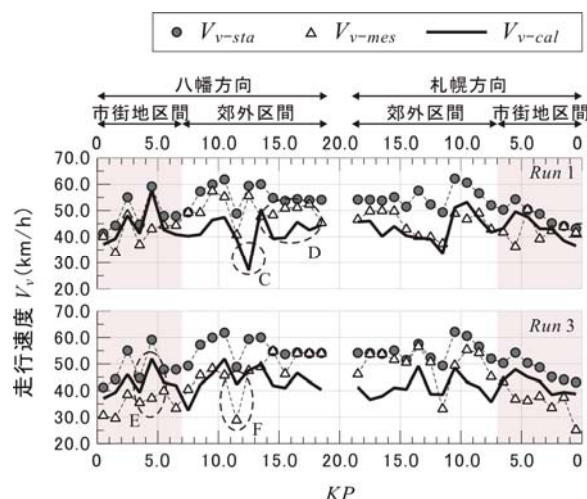


図27 走行速度の実測値と計算値の路線分布

坦性(IRI)の冬期走行環境が走行速度低下率に及ぼす影響を評価するとともに、複数の冬期走行環境因子が同時に作用した時の走行速度低下率の計算方法を提案した。

本研究により、冬期走行環境の同時連続計測および被験者による走行試験を行うことで、冬期交通における走行速度低下率を客観的に、道路利用者の満足度を主観的に、それぞれ評価できる可能性が示された。こうした評価法により、冬期に走行速度の低下が大きい区間を特定するだけでなく、どの対策を講じることが走行速度の低下抑制ならびに道路利用者の満足度向上に効果的かをよりの確に判断できるようになることが期待される。

参考文献

- 1) 石川真大, 佐々木憲弘, 中村隆一, 今岡大輔:「運搬排雪施工管理システムの開発」、第24回寒地機械技術シンポジウム、2008.11
- 2) 日本規格協会:自動車-燃料消費率試験 JIS D 1012-1997, 平成9年3月
- 3) 日本規格協会:自動車-惰行試験方法 JIS D 1015-1993, 平成5年
- 4) 高田哲哉, 徳永ロベルト, 高橋尚人:主観的評価手法を用いた冬期道路の走行環境に関する研究、土木学会第66回年次学術講演会、66、pp.445-446、2011
- 5) 高田哲哉, 徳永ロベルト, 高橋尚人:顧客満足度を活用した冬期道路の走行環境に関する研究、土木学会第67年次学術講演会、67、pp.167-168、2012
- 6) 藤本明宏, 徳永ロベルト, 武知洋太, 住田則行, 丸山記美雄:道路複合雪害が走行速度に及ぼす影響評価、第50回土木計画学研究発表会、50、2014

A STUDY ON DRIVABILITY ASSESSMENT TECHNOLOGY ON WINTER ROADWAY

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Cold Region Road Engineering Research Group (Traffic Engineering Research Team, Snow and Ice Research Team), Cold Region Maintenance Engineering Research Group (Road Maintenance Research Team), Cold Region Technology Development Coordination (Machinery Technology Research Team)

Authors : TAKAHASHI Naoto, MARUYAMA Kimio, TOKUNAGA Roberto, HOSHI Takumi, SUMITA Noriyuki, SATO Kenji, NAKAJIMA Tomoyuki, FUJIMOTO Akihiro, TAKECHI Hirotaka, OYAMA Kentaro, SATO Shingo, MIURA Go, KOMIYAMA Kazushige

Abstract: In cold and snowy region, with wintertime comes the potential for icy, bumpy, slippery and narrow roadway. These winter conditions result in negatively affecting driving performance on roadways. In order to counter these negative effects and to improve user's satisfaction level, development of measurement technology of winter driving environment is needed. And also it is necessary to develop a technique for evaluating how the winter environment impacts on driving performance and driver's satisfaction.

In this project, to contribute in the more effective and efficient winter roadway management implementation, the authors conduct a series of studies and experiments to establish measurement methodology to evaluate winter road driving environment (road surface condition, flatness, width, visibility, etc.) and to develop a drivability assessment technology that considers the perspective of road users.

Key words: winter roadway, driving environment, driving performance, user's satisfaction, assessment