

大型車両の燃費に路面雪氷が及ぼす影響に関する研究

寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○大浦 正樹
丸山 記美雄
木村 孝司

舗装路面の種類等が車両の燃費に影響を及ぼすことが、最近の研究によって明らかにされてきている。このことから積雪寒冷地において路面雪氷が存在することで燃費に影響を及ぼすと推測されるが、その影響度合いは定量的に把握されていない。本研究では実車を用いた各種実験を行い、燃費と雪質や走行抵抗の関係についての知見が得られたので、路面雪氷による燃費への影響を定量的に把握する手法の一つとして報告する。

キーワード：燃費、路面雪氷、走行抵抗、積雪寒冷地

1. 背景と目的

車両の燃料消費率（一般的には燃費と呼ばれ、単位はkm/L、以下、燃費）に関する最近の研究によって、舗装路面の種類¹⁾²⁾、路面のテクスチャ³⁾、平坦性⁴⁾などが、燃費に影響を及ぼすことが分かっている。それらの報告結果から類推すると、積雪寒冷地においては路面に存在する雪氷が、燃費が悪化する方向に影響を及ぼすことが推測される。しかし、既往の研究論文をレビューする限り、路面の雪氷がどの程度燃費に影響を及ぼすのかを定量的に論じた報告は見当たらない。

燃費に路面雪氷がどの程度影響を及ぼすのかを定量的に知ることは、2つの側面から有用な意味を持つ。1つは燃料消費に伴う金銭的側面であり、もう1つはCO₂の排出量削減という環境的側面である。燃費を良くすることができれば、燃料に要する費用とCO₂排出量を減らすことができるので、金銭的側面と環境的側面の両方でプラスの効果が発生する。路面の雪氷がどのように燃費に影響を及ぼし、たとえば除雪作業などによって雪を除去することの金銭的効果や、環境的効果がどの程度得られているのか定量的に知る事ができれば、有意義なことと考えられる。

しかし、現状では路面の雪氷によって燃費がどのように変化するのか、その影響度合いは定量的に把握されていない。そのため路面の雪氷を除雪作業などで除去することによる道路利用者費用の低減効果や、CO₂排出量の低減効果を把握することができないのが現状である。

そこで、本研究では路面の雪氷が走行車両の燃費にどのような影響を及ぼすのか、その影響度合いを把握し、さらに雪氷の影響度合いを定量化する手法を構築することを目的としている。そのために、積雪雪氷路面における大型車両の燃費を把握するための実験を行い、データ

を解析した結果、路面に雪氷がある場合には大型車両の燃費が低下することや、燃費の低下割合は雪氷の密度や路面の凹凸に影響されることなどの知見が得られた。さらに、燃費は走行速度、路面平坦性指標IRI、雪密度を考慮した数値の関数として表現することが可能で、雪氷の存在によって燃費がどのような影響を受けるか定量的に算定する一手法を構築することができたので、ここに報告するものである。

2. 実験方法

路面に存在する積雪や踏み固められたり乱された雪氷が、タイヤを介して車両の燃費にどの程度影響を及ぼすかを試験周回路において4年間にわたり実験によって検討した。

実験手順を図-1に示す。雪氷路面を作成し、その雪氷路面上で平坦性IRI(International Roughness Index、国際ラフネス指数)、燃費、雪密度、風向風速、気温、気圧を計測し、一連の計測が終わると、次の雪氷路面を作成してまた一連の計測を行うといったことを繰り返した。

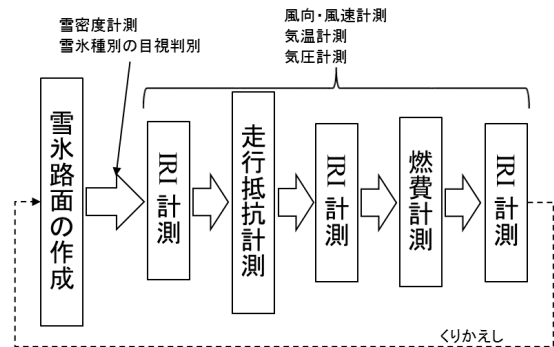


図-1 実験の流れ概要図

(1) 実験場所と実験路面

a) 実験場所

実験場所は当研究所が保有する苫小牧寒地試験道路であり、図-2に示すような全長2,700mの周回路である。周回路の直線区間であるKP=400~900間の500mのアスファルト舗装上に、雪をバックホウとホイールローダで敷き並べ、適宜ロードローラで締め固め、必要に応じて除雪グレーダ等で整正を行って様々な積雪雪氷路面を人為的に作成し、その上を試験車両を通過させて各種測定を行った。



図-2 苫小牧寒地試験道路の試験区間概要図

b) 雪氷路面の密度計測方法及び分類方法

実験を行った雪氷路面の雪密度計測方法及び雪質分類や道路雪氷としての分類の判別方法について述べる。

まず本実験で使用した雪氷路面は、試験区間内で行えるだけ均一な性状となるよう配慮して作成したものの、実際の供用中の道路における雪氷路面がそうであるように、2種類以上の複数の雪質が存在し、密度が鉛直方向にも平面方向にも不均一なものであった。たとえば表面数ミリはざらめ雪で、その下は数cm程度の圧雪、その下には氷の層があるなどである。このような道路雪氷の性質を的確に定量的に表現することは難しく、現在において表現方法は確立していないのが実態である。

そこで、本研究ではタイヤが接触する表面から3~5cm程度の深さまでの雪氷層のおおよその密度及び雪質に着目することとし、その部分の雪氷の状態を数値化して定量的に表現することを試みた。具体的には実験路面の表面から3~5cm程度の深さまでの雪氷層を容積100cm³の角型サンプラーで採取し、測定した雪密度によって雪の状態を代表させることとした。測定した雪密度値を元に表-1に示すような0.1g/cm³刻みの階級に区分し、その階級の中間値を階級代表値として扱うこととした。計器の不備で雪密度を欠測した場合には、路面雪氷の種類を目視によって判別し、雪氷分類に対応する密度を決定することとした。目視での路面雪氷判別においては、表-2に示す日本雪工学会の自然積雪分類法⁷⁾や、表-3に示す低温科学研究所の前野らによる道路雪氷分類方法⁸⁾などの既往の研究報告を参考にして路面雪氷の分類を行い、密度を決定した。

さらに、本研究では雪氷路面の表面から3~5cm程度までの深さの雪氷密度の逆数を取り「雪区分値」なる指標を定義した。たとえば表-1に示すように新雪など密度が0.15g/cm³の場合の雪区分値は6.667、乾き硬圧雪で密度が0.65g/cm³の場合の雪区分値は1.539となる。路面に雪氷が

ない場合の乾燥路面での雪区分値は0と定義した。つまり、雪氷が存在し雪密度が低く軟らかいほど数値が大きくなる指標となっており、乾燥路面→氷板路面→粒雪路面→新雪路面の順番で数値が大きくなる。このような指標を設定することで、燃費と路面雪氷の相関を定量的に把握できるよう工夫した。

表-1 実測雪密度の階級分け及び階級代表値と雪区分値

実測雪密度の階級(g/cm ³)	階級代表値(g/cm ³)	雪区分値
0.1~0.2	0.15	6.667
0.2~0.3	0.25	4.000
0.3~0.4	0.35	2.857
0.4~0.5	0.45	2.222
0.5~0.6	0.55	1.818
0.6~0.7	0.65	1.539
0.7~0.8	0.75	1.333
0.8~0.9	0.85	1.177
0.9~1.0	0.95	1.053

表-2 雪工学会による自然積雪の分類方法

雪質	密度(kg/m ³)
新雪	50~150
こしまり雪	150~250
しまり雪	250~500
ざらめ雪	300~500
こしもざらめ雪	300前後
しもざらめ雪	

表-3 低温科学研究所による道路雪氷の新分類

大分類	名称	密度(kg/m ³)	硬度(kg/cm ²)	別称・通称
新雪	乾き新雪	約100	~0	-
	濡れ新雪	100~200		
圧雪	乾き圧雪	250~500	10~50	しまり
	乾き軟圧雪			
	乾き硬圧雪	50~200		
	濡れ圧雪	400~800	10~50	
粉雪	粉雪	200~400	~0	-
粒雪	乾き粒雪	250~500	~0	ざらめ ざくれ ざくざく
	濡れ粒雪	400~750		
水べた雪	水べた雪	700~1000	~0	シャーベット
氷板	乾き氷板	700以上	90~300	アイスバーン 氷盤
	濡れ氷板	800以上		
氷膜	乾き氷膜	700以上	-	アイスバーン つるつる(圧雪)
	濡れ氷膜	800以上		

c) 実験路面の状態

実験を行った雪氷路面は、雪の密度、硬さ、厚さ、踏み固め状態などが様々に異なる12種類の路面である。また、雪氷路面での測定値と比較するために、同一の区間においてアスファルト路面2回、湿潤路面1回においても測定を行った。アスファルト路面の乾燥路面は標準的な路面であり、基準路面と位置づけられる。なお乾燥路面の表層混合物は密粒度13Fである。

各雪氷路面の雪密度、道路雪氷分類、雪区分値などの判定及び測定結果を表-4に示す。

表-4 実験を行った12種類の雪氷路面一覧表

路面種別 番号	雪質分類 and 道路雪氷分類	実測雪密度 (g/cm ³) 上段：上部 下段：下部	雪密度 代表値 (g/cm ³)	雪区分値	気温 (°C)	試験時 風速 垂直成分 (m/s)
乾燥路面1 (基準路面)	雪無し 乾燥			0	1.1	1.5
乾燥路面2	雪無し 乾燥			0	-1.8	-1.8
雪氷路面1	凍結 乾き氷膜、つるつる圧雪	欠測	0.85	1.177	0.6	0.3
雪氷路面2	こしもざらめ雪 乾き粒雪	欠測	0.30	3.333	1.3	-2.7
雪氷路面3	しまり雪 乾き圧雪	0.43 0.62	0.55	1.818	0.8	3.1
雪氷路面4	しまり雪 乾き硬圧雪	0.57 0.68	0.65	1.539	2.3	1.2
雪氷路面5	凍結 乾き氷膜、つるつる圧雪	0.85 0.85	0.85	1.177	-3.1	3.7
雪氷路面6	ざらめ雪 乾き粒雪、下層氷版	0.42 0.68	0.55	1.818	-4.3	3
雪氷路面7	しまり雪 乾き圧雪	0.42 0.64	0.55	1.818	0	1
雪氷路面8	しまり雪 乾き硬圧雪	0.62 0.64	0.65	1.539	-3.3	-0.3
雪氷路面9	ざらめ雪 乾き粒雪、下層氷版	0.44 0.59	0.55	1.818	-4.4	-1.5
雪氷路面10	ざらめ雪 濡れ粒雪、下層氷版	0.56 0.58	0.55	1.818	-0.9	3
雪氷路面11	凍結 乾き氷膜、つるつる圧雪	0.85 0.85	0.85	1.177	-4.4	1.7
雪氷路面12	こしまり雪 乾き圧雪	欠測	0.45	2.222	-6.1	1.7
湿潤路面	雪無し 湿潤			0	1.2	1.1



写真-1 試験に使用した大型車両

表-5 試験車両の主要諸元

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 車両総重量	25,010 kg (満載状態)
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) 実験に使用した車両および計測機器

試験に使用した車両は、写真-1に示すカーゴタイプの大型車両であり、その主要諸元を表-5に示す。試験車両には500kgのコンクリートブロックを29個荷台に積載し、満載状態に相当する車両総重量25tとした。

雪氷路面上での走行速度計測のために、図-3に示すGPSセンサーによる計測装置であるRACELOGIC社製のGPSロガーV-BOX3を使用した。

燃費の計測には、燃料タンクとエンジンをつなぐ経路の燃料配管上に小野測器社製の車載型燃料流量計DF-210および容積式燃料流量検出器FP-2140Hを設置し(写真-2)、実際の燃料消費量をリアルタイムで計測し、燃料使用量と走行距離から燃費を算出した。

雪氷路面のIRIの計測には、車両の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IRIを算出する装置⁹⁾である共和電業社製のSTAMPERを使用した。なお本研究において測定したIRIは、前述したとおり加速度計を使用して主に雪氷路面上で計測したものであり、水準測量など静的手法で舗装路面を計測して得られる一般的なIRIと区別するため、以降IRI_aと表現することとする。

測定時の環境条件を把握するために、風向風速計、気圧計、路面温度計、雪密度計を使用した。燃費にタイヤの空気圧が影響することが知られているため、日々の試験前と試験後にタイヤ空気圧計によって空気圧をチェックし、空気圧を一定に保つよう配慮した。

項目	性能	
分解能	速度	0.01km/h
	距離	1cm
	時間	0.01s
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)	

図-3 GPSセンサーによる計測装置の概観と仕様



写真-2 燃料タンク脇に設置した燃料流量検出器

(3) 燃費測定方法

燃費の測定方法は「JIS D 1020自動車-燃料消費率試験方法」¹⁰⁾で示された方法のうち、定速度燃料消費率試験方法に則って実施した。具体的には、2章(1)節c)項で示した様々な種類の路面を、試験車両のトランスミッションギア段を6段に固定して、試験速度である30km/h、40km/h、50km/hの一定速度で500mの実験路面区間を走行し、その間の燃料消費量を燃料流量検出器で実測した。

(4) IRI_a計測による平坦性測定方法

IRI_a計測時の走行速度は40km/hで一定とした、燃費測定の前後にIRI_aの計測を行い、その平均値をもって燃費測定時のIRI_aとした。

3. 実験結果および考察

(1) 燃費試験結果

各路面における車両速度ごとの燃費試験結果を図-4に示す。乾燥路面を基準として様々な雪氷路面の燃費を比較すると、雪氷が存在する路面では雪氷がない乾燥路面と比較すると、いずれの場合においても燃費が悪化していることが読み取れる。

図-5は乾燥路面を基準として、様々な雪氷路面での燃費の低下割合を示した。雪氷路面2の低下割合は約70%程度と群を抜いて大きな値を示している。雪氷路面2は幹線道路ではほぼ出現しないレベルの悪い路面であり、上限値として見ておくのが妥当である。雪氷路面2を除いた11種類の雪氷路面の燃費低下割合は5~50%程度の範囲にあり、低下割合が10%を超えるデータが大半で平均約21%と算定された。既往の研究¹²⁾³⁾でアスファルト舗装とコンクリート舗装の燃費差は数%程度とされていることや、タイヤ自体のころがり抵抗の改良による燃費の改善効果は数%とされているものと比較すると、路面の雪氷が燃費に及ぼす直接的な影響は無視できないほど大きいと評価できる。除雪により完全に乾燥路面を出すことができたと仮定すれば、燃費は改善することとなり、その燃費改善分が除雪の効果として計量可能となる。

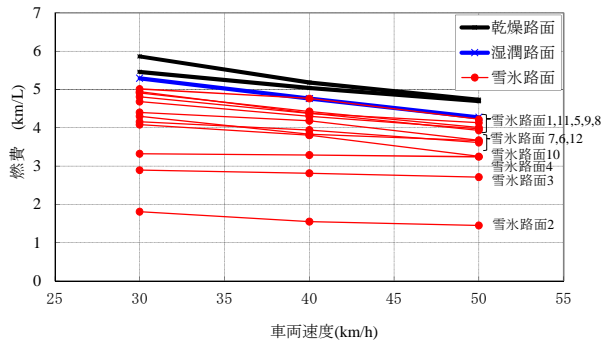


図-4 雪氷路面上の燃費測定結果

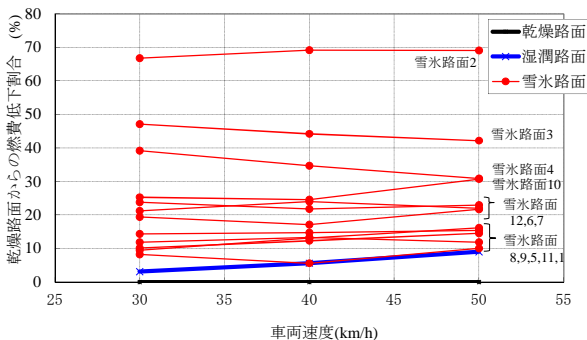


図-5 乾燥路面からの各雪氷路面の燃費低下割合

(2) IRI_aの値と走行抵抗値および燃費の関係

IRI_a値はその値が大きいほど路面の平坦性が悪く、乗りごちが悪いと評価される指標である。実験を行った区間のアスファルト乾燥路面でのIRI_aは1.4であるが、その路面上に雪氷路面を作成する場合には多少なりとも凹凸が生じるため、IRI_aは悪化する(大きくなる)傾向を示す。つまり試験を行った雪氷路面のIRI_aは、アスファルト乾燥路面でのIRI_aよりも値が大きくなっている。

試験を行った様々な路面のIRI_a測定値(基底長10m)と、大型車の燃費の関係について図-6に示す。雪氷の存在によってIRI_a値が大きくなった路面ほど燃費が悪くなる傾向が読み取れる。

つまり雪氷の存在によるIRI_a値の変化は燃費に影響を及ぼし、IRI_a値が大きいほど走行抵抗が大きくなり、燃費が悪化する関係にあるといえる。

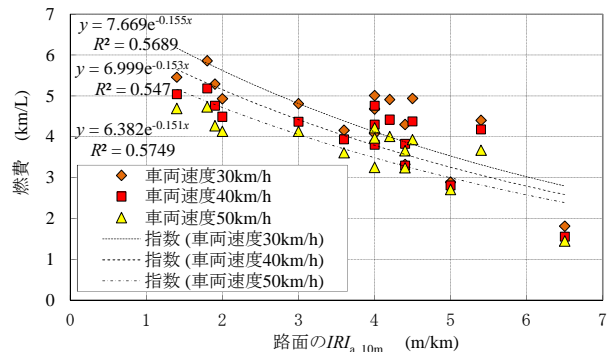


図-6 路面のIRI_a値と燃費の関係

(3) 路面上の雪密度や雪質と燃費の関係

試験を行った様々な雪氷路面の雪密度と燃費の関係について図-7に示す。雪密度が低くなれば燃費が悪くなる傾向を示すことがわかる。つまり路面雪氷の密度が低く新雪に近い状態であれば燃費は悪化する。燃費はタイヤが接触する部分にある雪の密度、つまり雪質に影響を受けていることが確認できたといえる。密度の低い雪はタイヤの進行方向のエネルギーを吸収損失させるものと理解される。

次に2章(1)節b)で定義した雪区分値と燃費の関係について図-8に示す。雪区分値はその値が0の時は路面に雪がない乾燥路面や湿潤路面を意味し、大きくなるにつれ路面に雪密度が低い雪が存在していることを示す指標である。図-8から雪区分値が大きくなるにつれ燃費は悪化することが分かる。

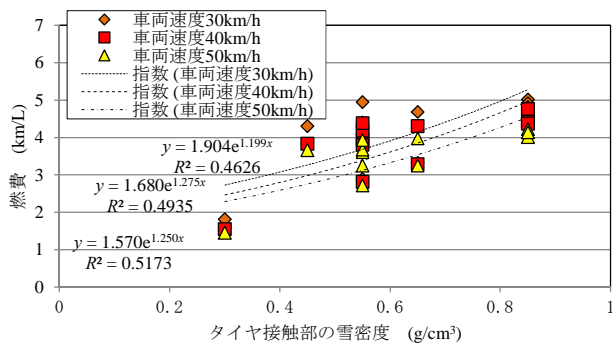


図-7 雪密度と燃費の関係

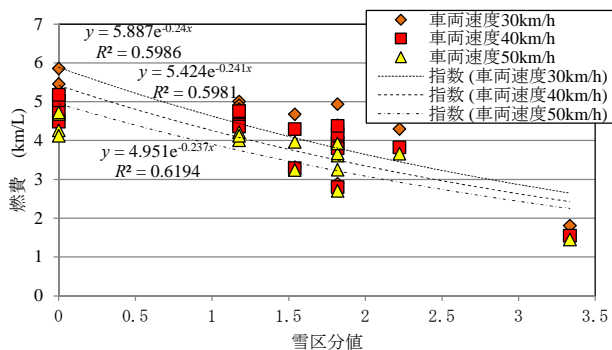


図-8 雪区分値と燃費の関係

(4) 路面雪氷が燃費に及ぼす影響の定量化手法の考察

a) 雪氷路面による燃費への影響の定量化

既往の研究によれば、燃費に影響を与える路面に関する要因としては、以下の項目が挙げられている。

- 1) 路面の平坦性(IRI)
- 2) 路面のテクスチャ
- 3) 舗装材料の質(コンクリートとアスファルト)
- 4) 段差

本研究での試験結果を踏まえると、積雪寒冷地の場合には上記の項目のほかに、路面に影響を及ぼす要因として以下の項目を加える必要があることを指摘できる。

- 5) 路面雪氷による平坦性IRI_aの悪化
- 6) 路面雪氷の密度や質

そこで燃費を従属変数とし、走行速度、IRI_a、雪区分値を説明変数とした非線形重回帰分析および線形重回帰分析を行った。重回帰分析に際しては、各説明変数の指数関数または一次関数を結合した複数の重回帰モデルを設定し比較検討した。具体的には走行速度、IRI_a、雪区分値の3つの説明変数の一部を指数関数とし、他の説明変数は一次関数として結合したモデルなどを設定した。3つの説明変数全てを一次関数とした線形重回帰分析も行った。解析に統計解析ソフトSPSSを使用した。

様々なモデルを比較した結果、速度の指数関数にIRI_aと雪区分値の一次関数を線形結合させる式が最も決定係数が高く、実測値に近い値を得られると判断した。一連の非線形重回帰分析の結果得られた重回帰式を式(1)に

示す。

$$Fe = 6.849 \cdot \exp(-0.008 \cdot V) - 0.06821 \cdot IRI_a - 0.7868 \cdot SNOW + 0.2523 \quad (1)$$

ここに、 Fe : 燃費(km/L)
 V : 速度(km/h)
 IRI_a : 対象区間のIRI_a値(m/km)
 $SNOW$: 雪区分値(雪密度の逆数、雪がない路面では0とする)

なお、この式の決定係数 R^2 は0.671であり、この非線形重回帰式は当てはまりが良いと判断できる。各説明変数の係数の符号に着目すると、車両速度、IRI_a、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、実験結果とも整合がとれた妥当な式であると評価できる。

また、式(1)を用いて算定した燃費推定値と、燃費実測値の対応関係を図-9に示す。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 R^2 値は0.67、誤差の平均は0.14となっており、精度良く算定できる式であると確認できる。この式を用いれば、様々な雪質の雪氷路面において、走行速度、IRI_a、雪質に応じた燃費を計算することが可能になる。従来はその影響度合いが明確でなかった、路面に存在する雪氷が燃費に及ぼす影響を定量的に表現した式であるとする。

式(1)を用いることで、様々な雪氷路面を大型車が走行する場合の走行速度、IRI_a、雪質に応じた燃費を計算することが可能となる。

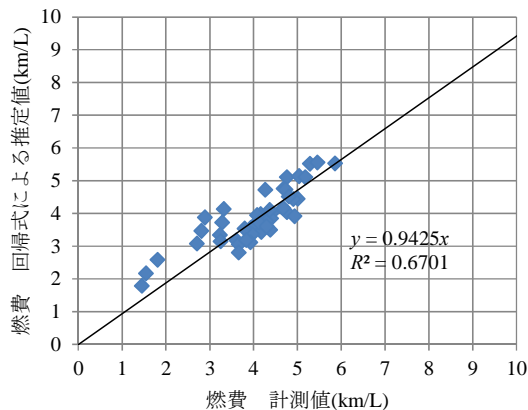


図-9 燃費実測値と重回帰式による推定値の関係

b) 乾燥路面からの燃費の低下割合の定量化

次に路面が雪氷路面の場合に、乾燥路面に比べてどの程度燃費が低下したか、その低下割合を定量的に把握できる式を検討した。乾燥路面からの低下割合として示すことで、車種やエンジン性能などによる燃費の絶対値に左右されることなく雪氷の影響を一般化して表現できるのではと考えたためである。

図-5に乾燥路面からの燃費の低下割合をグラフで示してあるが、このデータに対して従属関数を乾燥路面から

燃費低下割合として線形重回帰分析を行った。その結果得られた重回帰式を式(2)に示す。

$$A=0.045 \cdot V+1.688 \cdot IRI_a+26.97 \cdot SNOW-26.60 \quad (2)$$

ここに、 A : 乾燥路面からの燃費低下割合(%)

V : 速度(km/h)

IRI_a : 対象区間の IRI_a 値(m/km)

$SNOW$: 雪区分値(雪密度の逆数、雪がない路面では0とする)

各説明変数の係数の符号に着目すると、車両速度、 IRI_a 、雪区分値の増加はいずれも燃費の低下割合が増える方向に作用しており、実験結果とも整合性がとれた妥当な式であると評価できる。

重回帰式(2)の精度を確認するために、重回帰式(2)を用いて算定した燃費低下割合推定値と、燃費低下割合実測値の対応関係を図-10に示す。式(2)によって算定された燃費低下割合は、実測の燃費低下割合と良い対応関係にあり、算定値と実測値 R^2 値は0.691、誤差の平均は0.424となっており、精度良く算定できる式であると確認できる。この式を用いれば様々な雪質の雪氷路面において、走行速度、 IRI_a 、雪質に応じた大型車一般の燃費低下割合を計算することが可能になると考えられる。

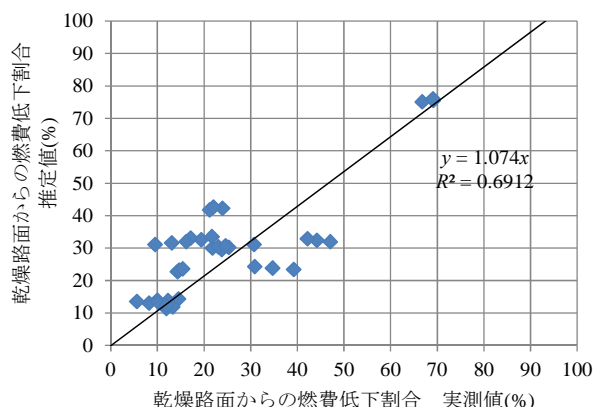


図-10 燃費の低下割合実測値と推定値の関係

4. 結論

本研究で得られた知見および成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 雪氷が存在する路面では、雪氷が存在しない路面と比べ燃費が低下する傾向を示す。
- (2) 実験データでは、路面雪氷によって燃費が最大で70%程度の低下を示し、供用中の幹線道路でみられるレベルの雪氷路面の場合でも約5~50%程度、平均で21%の低下を示した。路面の雪氷が燃費に及ぼす影響は無視できないほど大きいと評価できる。
- (3) 雪氷の存在によって、 IRI_a は大きくなる(悪化する)傾向を示す。雪氷の存在による IRI_a 値の変化は燃費にも影

響を及ぼし IRI_a 値が大きいほど燃費が悪化する関係にある。

(4) 雪氷路面における燃費は、雪の密度などの雪質にも影響され、路面雪氷の雪密度が低いほど燃費が悪化する傾向を示す。

(5) 雪氷が存在し、雪密度が低く軟らかいほど数値が大きくなる雪区分値を提案した。この指標を設定することで、燃費と路面雪氷の相関を定量的に把握できるようになる。

(6) 雪氷路面における燃費および燃費の低下割合を定量的に算定する式として、車両速度 V 、平坦性 IRI 、雪区分値 $SNOW$ を変数とする式を導出した。これまで定量的に示されていなかった、雪氷の存在による燃費への影響を定量的に把握する一手法として提示するものである。

最後に、本研究は大型車での実験結果を述べたものであるが、乗用車での実験も別途実施している。また一連の実験から得られた知見を活用することで、除雪作業による雪氷除去の効果を、燃費の改善という具体的尺度によって経済性の面から評価できるようになると考えられる。これらの検討結果は別途報告したいと考える。

参考文献

- 1) Taylor, G. W.: Additional Analysis of the Effect of Pavement Structure Type on Truck Fuel Consumption, Cement Association of Canada, 2002.
- 2) Taylor, G. W. and Patten, J. D.: Effect of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption Phase III, National Research Council Canada Technical Report, CSTT-HVC-TR-068, 2006.
- 3) 吉本徹、風戸崇之、熊田一彦、笠原篤：高速道路での重量車の転がり抵抗の測定と燃費に及ぼす影響に関する研究、土木学会舗装工学論文集、第14巻、pp.203-210, 2009.
- 4) 川上篤史、寺田剛、久保和幸、石垣勉：タイヤ/路面転がり抵抗と舗装の路面性状に関する検討、土木学会第68回年次学術講演会概要集、V-617, pp.1233-1234, 2013.
- 5) Ross, F. R.: Effect of pavement roughness on vehicle fuel consumption, Transportation Research Record, No.846, pp.1-6, 1982.
- 6) Amos, D.: Pavement Smoothness and Fuel Efficiency: An Analysis of the Economic Dimensions of the Missouri Smooth Road Initiative, Missouri Department of Transportation Organizational Results, OR07-005, 2006.
- 7) 日本雪氷学会：日本雪氷学会積雪分類、日本雪氷学会誌雪氷、60巻5号、pp.419-436, 1998.
- 8) 前野紀一、成田英器、西村浩一、成瀬廉二：道路雪氷の構造と新分類、低温科学物理編、46、pp.119-133, 1987.
- 9) 富山和也、川村彰、石田樹、中田孝一：地方自治体の道路維持管理実態と市街地道路の簡易平坦性モニタリング、土木学会第66回年次学術講演会概要集、V-408, pp.815-816, 2011.
- 10) 日本規格協会：自動車—燃料消費率試験JIS D 1012-1997, 1997.