HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ
学校法人北海学園
北海学園大学
北海商科大学

タイトル	凍結路面のすべり抵抗特性および凍結抑制効果の定量的評価方法に関する研究
著者	田中，俊輔；武市，靖；増山，幸衛；高橋，尚人；Tanaka，Shunsuke；Takeichi，Kiyoshi；Masuyama，Yukiei；Takahashi，Naoto
引用	工学研究 ： 北海学園大学大学院工学研究科紀要(11)：25-37
発行日	2011-09-30

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

研究論文

凍結路面のすべり抵抗特性および凍結抑制効果の定量的評価方法に関する研究

田　中　俊　輔*・武　市　　靖**・増　山　幸　衛***・高　橋　尚　人****

Study on properties of skid resistance on freezing pavements and quantitative evaluation method of antifreezing effects

Shunsuke Tanaka*, Kiyoshi Takeichi**, Yukiei Masuyama*** and Naoto Takahashi****

1．はじめに

現在，冬期の路面状態把握や凍結抑制舗装の効果を評価する手法として，路面状態の写真による比較，または目視観察などが用いられているが，定性的な要素が多く，評価方法として十分に確立されているとは言えない[1]．一方，すべり摩擦係数による路面管理が世界的に用いられる傾向にあり[2),3),4),5)]，我が国においても検討されているが，その測定は必ずしも容易ではない[6),7)]．

本研究は，凍結路面のすべり抵抗を評価する簡便な定量的方法の確立を目的としている．一定の環境下で試験を行うことができる恒温室内に，人為的に路面露出させた雪氷路面を作製して制動試験を行い，路面露出率とすべり摩擦係数の関係を明確にした．さらに，実路を想定した室内実験として凍結路面で繰返し走行試験を行い，走行輪荷重による外乱を受けた路面状態にして制動試験を行って，その測定値と得られた関係の近似式より算出した値を比較した．

また，すべり摩擦係数に影響を与える要因分析の観点から，制動試験と繰返し走行試験の結果について重回帰分析を行い，すべり摩擦係数と路面露出率，路面テクスチャ，凍結抑制材との関係を検討した．特に氷膜・氷板路面に対して，スペクトル解析も試みて，各舗装における路面テクスチャの特性と変化の違いを明らかにした．

本論文において路面テクスチャとは，舗装表面の凹凸量と空間周波数の指標から構成されたものを意味する．

さらに，屋外試験を実施した寒地土木研究所の苫小牧寒地試験道路において，本研究の成果の実路における適用性を明らかにするために，実路で使用されているすべり抵抗値の測定装置を用い，室内試験の結果と比較した．

2．試験路面

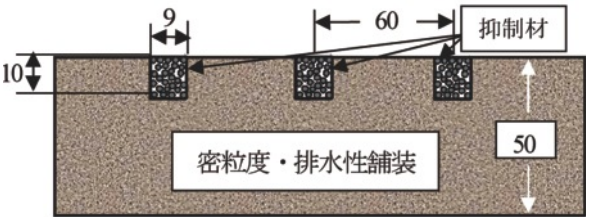
本研究では，一般的な密粒度舗装と排水性舗装および，凍結抑制舗装として，両者を母体舗装としたものにグルービングを施し，廃スタッドレスタイヤなどのゴムチップをウレタン樹脂で結合させた凍結抑制材を充填したものを用いた．

この凍結抑制舗装は，凍結抑制材部分のたわみ特性と排水性舗装では粗面効果も利用した物理的凍結抑制効果を有しており，密粒度舗装を母体としたタイプ（以下 G-9）と排水性舗装を母体としたタイプ（以下 G-P）の 2 つを用いた[8]．凍結抑制舗装の概要を**表－1**，各凍結抑制舗装の断面と舗装表面を**図－1**，**写真－1** および**写真－2** に示す．

* 北海学園大学大学院　工学研究科建設工学専攻　博士後期課程
Graduate School of Engineering (Civil and Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University
** 北海学園大学大学院　工学研究科建設工学専攻（社会環境系）
Graduate School of Engineering (Civil and Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University
*** 世紀東急工業株式会社　技術研究所
SEIKITOUKYU KOGYO CO., LTD
***** ㈱土木研究所　寒地土木研究所
Civil Engineering Research Institute for Cold Region

表－１　凍結抑制舗装の概要

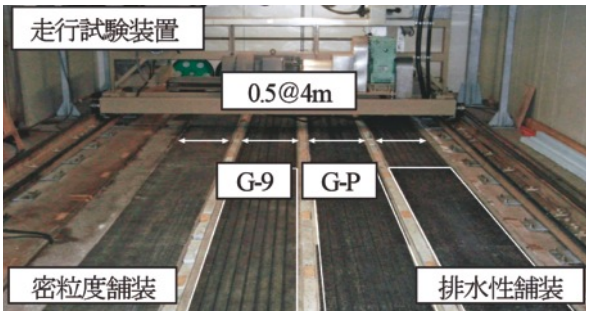
タイプ	G-9	G-P
母体舗装	密粒度舗装	排水性舗装
グルービング 幅・深さ・間隔	9 mm・10 mm・60 mm	
凍結抑制材	ゴムチップ結合材	



図－１　凍結抑制舗装の断面（単位：mm）

写真－１　G-9 の舗装表面

写真－２　G-P の舗装表面



写真－３　室内凍結路面走行試験装置と試験路面

３．すべり摩擦係数と路面露出率の関係

写真－３に示す室内凍結路面走行試験装置は，我が国における路面のすべり摩擦係数の標準的な測定装置として使用されているバス型すべり測定車[9] とほぼ同様の仕組みである．恒温室内の温度は－20℃から＋60℃まで，最大走行速度は繰返し走行試験で 5 km/h，制動試験で 10 km/h，最大輪荷重は 5 kN まで設定が可能である．

この装置を用いて，すべり摩擦係数と路面露出率の関係を求めるために，恒温室内に設置された走行レーンの各舗装に，人為的に路面露出率を変化させた凍結路面を作製し，制動試験を行った．凍結路面は，密粒度舗装に対して厚さ 0.5 mm の氷膜ができる量の水を散布した氷膜路面，同様の基準で作製した厚さ 1.0 mm の氷板ができる量の水を散布した氷板路面，舗装表面のテクスチャが現れない程度の厚い氷板路面（厚さ 3 ～ 5 mm），および圧雪路面の 4 種類とした[10]．

3.1　凍結路面の作製と試験条件

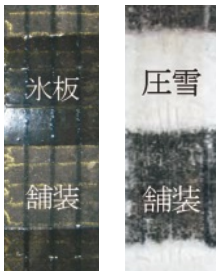
凍結路面は，ガムテープで路面をマスキングした後，氷板・氷膜路面においては 0 ℃の水を散布し，圧雪路面においては密度 700 kg/m³ になるように雪を敷き均して作製した．なお，排水性舗装および G-P は，水の浸透を防ぐためにパテを路面に押し付けて対処した．観測路面全体の面積に対する路面の露出面積の割合を示す路面露出率は 0，20，40，60，80％とした．以下に路面露出パターンを示す．

ａ）横断方向に連続的に路面を露出（横・連続）
ｂ）横断方向にゼブラ状に路面を露出（横・ゼブラ）
ｃ）縦断方向に連続的に路面を露出（縦・連続）
ｄ）縦断方向にゼブラ状に路面を露出（縦・ゼブラ）

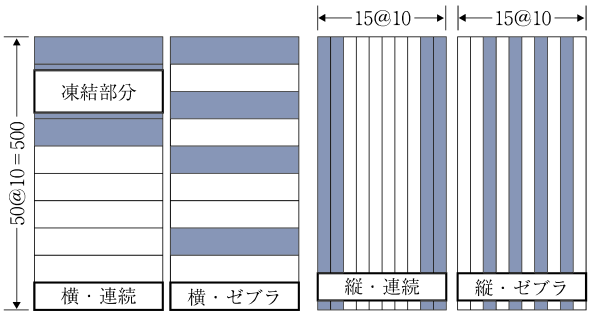
写真－４と**写真－５**に凍結路面作製作業の状況と作製後の路面状態を示す．**図－２**に一例として 60％路面露出時の路面露出パターンを，**表－２**に試験条件をそれぞれ示す．なお，路面温度は舗装供試体に埋め込んでいる熱電対より測定した値を用いた．

実際の舗装では，不均一に路面が露出する場合も多いと考えられるが，再現が困難なため，氷板・氷膜路面においては，ゼブラ状に路面露出させた路面状態の近似式を計算値算出の際に採用した．一方，圧雪路面においては連続的に路面を露出させたパターンのみについて試験を行い，その結果を採用した．これは道路気象条件にもよるが，路面露出過程に注目した路面調査において，氷膜・氷板路面では，**写真－６**のように数 mm～数 cm という短い間隔で路面の露出を部分的に繰り返す現象が多く見られるのに対して，圧雪路面においては，**写真－７**のように，比較的長い間隔で路面露出を繰り返す路面状態が多く観測されたことによる．

写真－４　凍結路面の作製状況



写真－５　作製した路面



図－２　60%路面露出時の路面露出パターン（単位：mm）

表－２　制動試験の試験条件

路面温度	－５℃
接地圧（輪荷重）	0.196 MPa（5 kN）
走行速度	10 km/h
使用タイヤ	冬期すべり測定用標準タイヤ 165/80 R-13

3.2　制動試験によるすべり摩擦係数の算出

制動試験は，制動時にタイヤの回転を固定した状態（スリップ率100%）で走行試験装置を走行させたときに，タイヤを固定するのに要したタイヤトルクを測定し，すべり摩擦係数を式(1)によって算出するものである[11]．

$$\mu = \frac{M_t}{r \times F} \tag{1}$$

ここに，

μ：すべり摩擦係数，M_t：タイヤトルク（Nm），

r：タイヤ半径（m），F：荷重（N）

である．

なおタイヤトルクは，測定区間であるレーン中央４ｍの平均値を用いている．

写真－６　氷板路面の路面露出状況

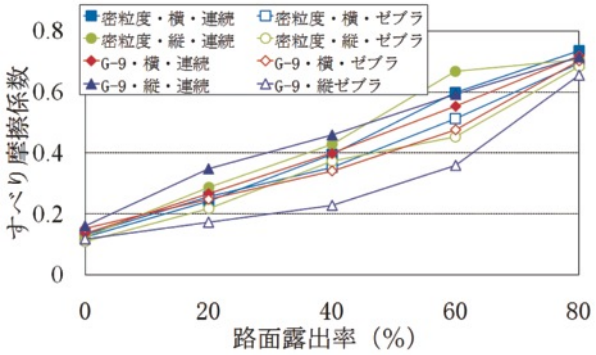
写真－７　圧雪路面露出状況（左：縦断露出　右：横断露出）

3.3　試験結果と考察

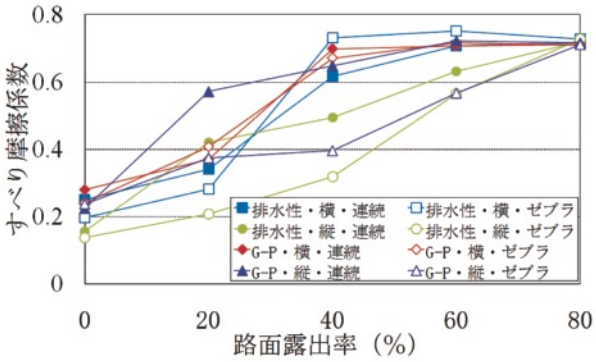
図－３から図－10に，氷膜路面，氷板路面，厚い氷板路面および圧雪路面におけるすべり摩擦係数（y）と路面露出率（x）との関係を，表－３に関係の近似式を示す．

各路面の結果より，路面露出率が同じ値であっても，路面の露出状況によってすべり摩擦係数が異なることが確認された．したがって，路面の露出状況により，舗装のすべり抵抗や凍結抑制効果の評価を試みる場合には，その舗装区間における路面の露出パターンを特定する必要があると考えられる．

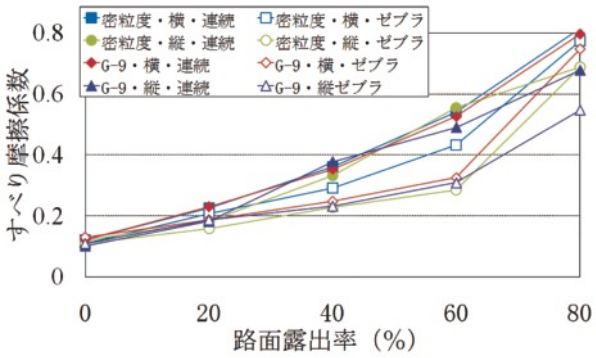
また，路面露出率０％の時に着目すると，厚い氷板路面時以外は，密粒度舗装を母体とした舗装よりも，排水性舗装を母体とした舗装の方が高いすべり摩擦係数となった．これは氷膜・氷板路面に，路面のテクスチャが粗くなった影響（粗面効果）が現れたものと考えられる．この傾向は，路面露出率０％～60%のときに顕著に表れており，凍結路面の種類の違いにより差がみられる．特に，圧雪路面は，密粒度舗装やG-9が，排水性舗装やG-Pよりも路面露出率の増加に伴うすべり摩擦



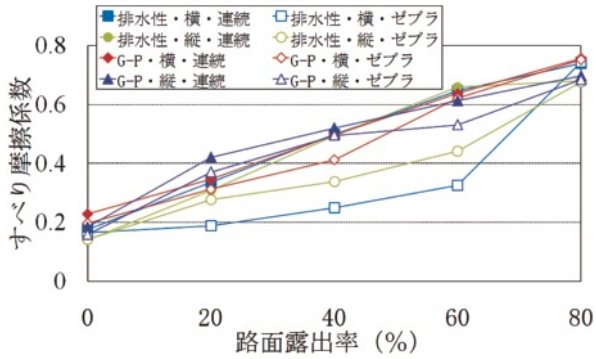
図－ 3　氷膜路面の密粒度舗装と G-9 の試験結果



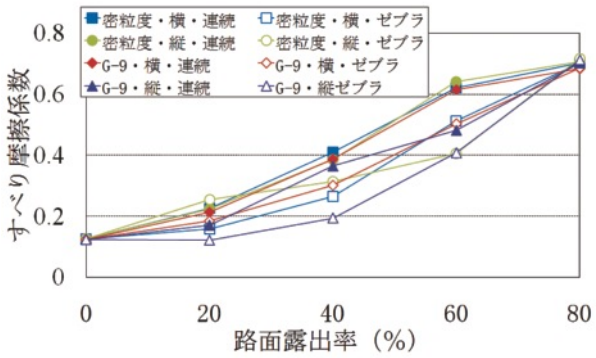
図－ 4　氷膜路面の排水性舗装と G-P の試験結果



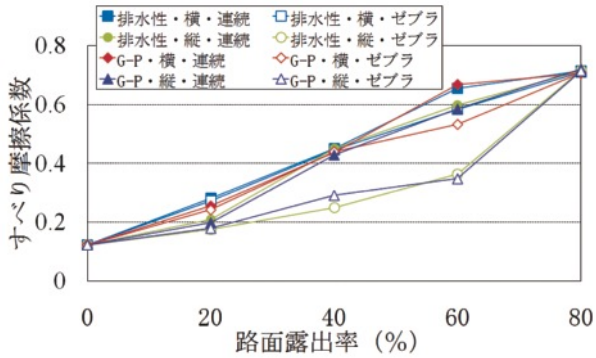
図－ 5　氷板路面の密粒度舗装と G-9 の試験結果



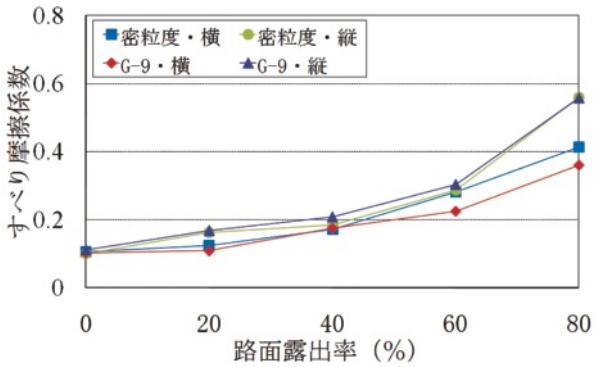
図－ 6　氷板路面の排水性舗装と G-P の試験結果



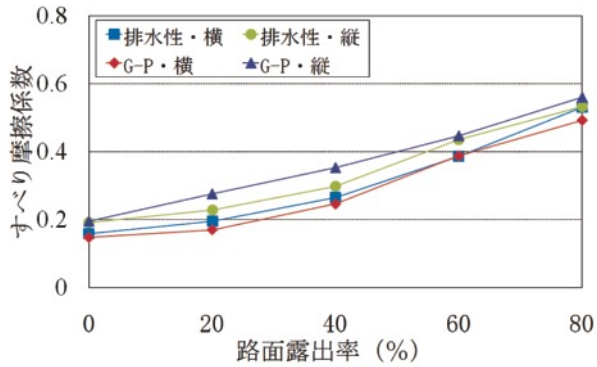
図－ 7　厚い氷板路面の密粒度舗装と G-9 の試験結果



図－ 8　厚い氷板路面の排水性舗装と G-P の試験結果



図－ 9　圧雪路面の密粒度舗装と G-9 の試験結果



図－10　圧雪路面の排水性舗装と G-P の試験結果

表－3　すべり摩擦係数と路面露出率の関係の近似式

路面	舗装・露出パターン	近似式	R^2 値
氷膜	密粒度・縦ゼブラ	$y=0.007x+0.091$	0.975
	G-9・縦ゼブラ	$y=0.006x+0.055$	0.865
	排水性・縦ゼブラ	$y=0.007x+0.217$	0.917
	G-P・縦ゼブラ	$y=0.006x+0.229$	0.960
氷板	密粒度・縦ゼブラ	$y=0.006x+0.037$	0.777
	G-9・縦ゼブラ	$y=0.005x+0.078$	0.886
	排水性・縦ゼブラ	$y=0.006x+0.128$	0.949
	G-P・縦ゼブラ	$y=0.006x+0.206$	0.949
厚い氷板	密粒度・縦ゼブラ	$y=0.007x+0.097$	0.899
	G-9・縦ゼブラ	$y=0.007x+0.050$	0.847
	排水性・縦ゼブラ	$y=0.007x+0.018$	0.840
	G-P・縦ゼブラ	$y=0.007x+0.61$	0.849
圧雪	密粒度・縦連続	$y=0.005x+0.051$	0.830
	G-9・縦連続	$y=0.005x+0.065$	0.858
	排水性・縦連続	$y=0.004x+0.156$	0.958
	G-P・縦連続	$y=0.005x+0.185$	0.993

係数の上昇が小さい．以上から，路面のテクスチャは，凍結路面におけるすべり抵抗の向上に影響を与え，凍結抑制効果も大きくなると推測されるが，その影響度合いは，発生する凍結路面の種類によって，異なると考えられる．

凍結抑制舗装であるG-9およびG-Pと一般的な舗装である密粒度舗装および排水性舗装をそれぞれ比較すると，G-9と密粒度舗装では結果に違いが見られなかったが，G-Pと排水性舗装では，氷膜・氷板路面において同じ路面露出率でもG-Pの方が，排水性舗装よりも大きいすべり摩擦係数を示す傾向が確認された．これは，G-Pが母体舗装にグルービングを施している舗装であることから，排水性舗装よりも路面テクスチャの粗面効果が維持され，すべり抵抗が向上したと考えられる．

以上から，舗装によるすべり抵抗の向上には様々な要因が考えられるが，特に今回使用した舗装では，路面テクスチャやグルービングを施した箇所に充填した凍結抑制材の効果が大きな要因となっていると推測される．

また，それらの要因は，凍結路面の種類によって影響の度合いが大きく異なることが確認された．

4．繰返し走行試験による検証

現場に近似した環境下で繰返し走行試験を行い，1000回走行後に制動試験も行って，実路への適用性を考慮したすべり摩擦係数と路面露出率の関係と，各舗装の凍結抑制効果について検討した．

4.1　路面露出率の算定

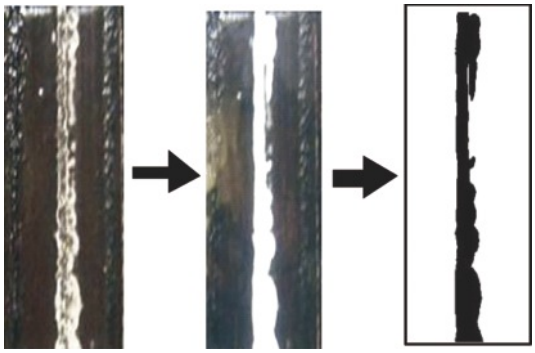
路面露出率は，一般に路面状況をデジタルカメラで撮影し，それを2値化した画像解析により式(2)で表すことができる．

$$\text{路面露出率（\%）}=\frac{\text{路面露出面積}}{\text{解析画像全体面積}} \qquad (2)$$

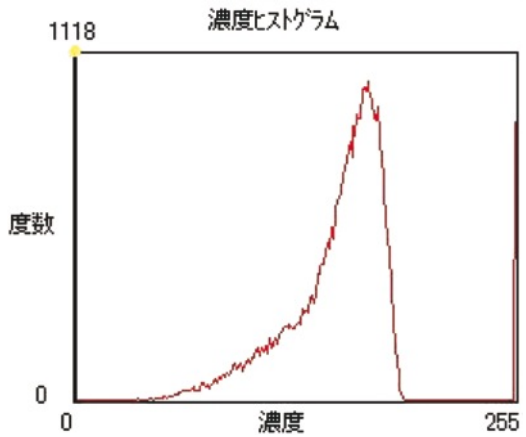
氷膜・氷板は薄く透明なため，2値化することが困難である．そこで図－11のように，所定の走行回数毎に路面に透明なラミネートシートを敷き，氷の剝離箇所を油性のホワイトマーカーで塗りつぶして撮影[12]し，2値化処理を行った．2値化処理の方法は，画像の濃度ヒストグラムを用いて行う方法の中から，ヒストグラムが双峰性を示す場合にはモード法として働き，モードがない場合でも自動的に閾値が決定できる判別分析法[13]を用いた．

圧雪路面は，タイヤ走行による汚れなどの影響で，自動閾値決定法を用いることが困難であることから，図－12に示すように，路面は露出していないが汚れが出ている画像の濃度ヒストグラムを用いて，路面露出率が0％になるように閾値指定法で決定した．

解析画像は，タイヤの接地部分を用い，寸法は縦300 pixel×横145 pixelとした．また路面露出率は，制動試験でタイヤトルクが測定可能なレーン中央4 mの区間で，予め定めた3カ所の測定値を平均したものを用いた．



図－11　氷膜・氷板路面の露出率算出例



図－12　圧雪路面画像の濃度ヒストグラム

4.2　試験条件

試験路面は，氷膜路面，氷板路面および密度 500 kg/m³ の圧雪路面とし，走行速度は 5 km/h，走行は 1000 回と設定した．その後，制動試験を行ってすべり摩擦係数を測定し，各近似式より算出した値（計算値）と比較検証した．なお，圧雪路面の繰返し走行後の密度は 700 kg/m³ 程度であり，その他の条件は，前述の制動試験と同様である．圧雪路面の密度は，雪氷調査法に準じた方法を用いて測定した[14]．

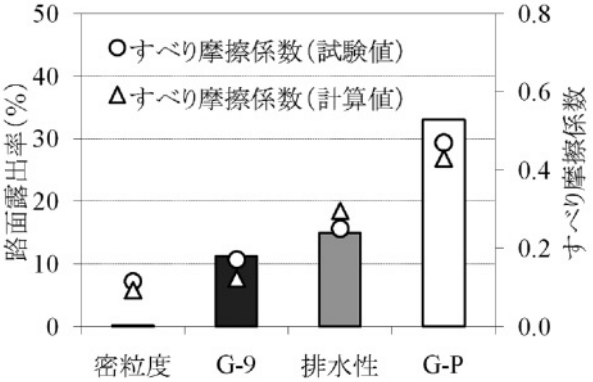
4.3　試験結果と考察

図－13 から図－15 に，氷膜路面，氷板路面および圧雪路面における路面露出率とすべり摩擦係数を示す．試験は 3 回行い，それぞれの結果の平均値を用いている．

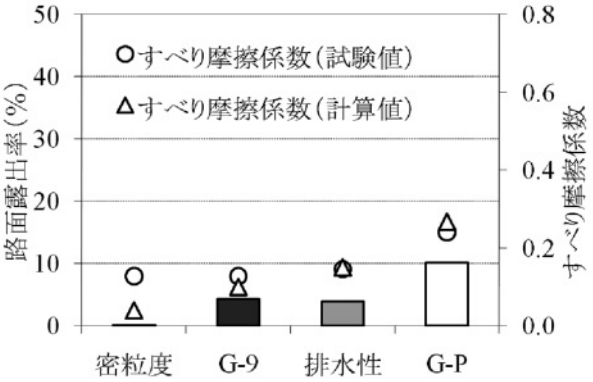
氷膜，氷板，圧雪路面ともに，全ての試験路面で，すべり摩擦係数の試験値と計算値の差が 0.1 以下となった．よって，人為的に路面を露出させた凍結路面で行った制動試験より得られたすべり摩擦係数と路面露出率の関係と，ほぼ同様の関係が確認された．

圧雪路面は，特に密粒度舗装が排水性舗装よりも高い路面露出率であるにもかかわらず，すべり摩擦係数は 1/2 程度となっており，近似式も氷膜・氷板路面に比べて，路面露出率の増加に伴うすべり摩擦係数の増加が明らかに小さいことから，路面の露出がすべり抵抗の向上に影響を与える度合いは小さいことが分かる．

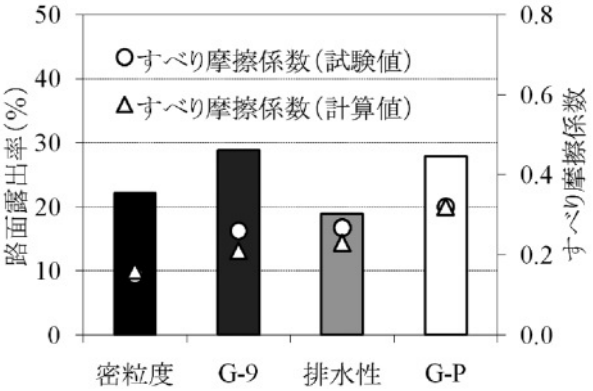
排水性舗装を母体とした舗装の方がすべり摩擦係数が大きくなっており，常にすべり抵抗を向上



図－13　氷膜路面の路面露出率とすべり摩擦係数



図－14　氷板路面の路面露出率とすべり摩擦係数



図－15　圧雪路面の路面露出率とすべり摩擦係数

させる傾向にあることが分かる．これは凍結路面の種類にもよるが，テクスチャの違いによる粗面効果が現れたと考えられる．

5．重回帰分析による試験結果の検討

凍結路面のすべり抵抗には，路面の露出状況をはじめ，舗装の種類，特に母体舗装のテクスチャなどが複雑に影響していることが明らかになった．しかし同時に，その影響度合いは，路面の状

態によって大きく異なることも明らかになった．これらに関しては，さらなる検討が必要と考えられることから，制動試験および繰返し走行試験の結果に重回帰分析を適用し，路面露出率，舗装の路面テクスチャ，凍結抑制材の有無といった因子とすべり摩擦係数との関係を分析値から検討した．

5.1　路面テクスチャの測定

まず解析を行う前に，説明変数の一つである，試験路面のテクスチャを測定した．測定には，**写真－8** に示す，面的にテクスチャを評価することが可能である ST メータ[15] を用い，式(3)によって算出することができる平均プロファイル深さ（Mean Profile Depth：以下，MPD）[16] によって，定量的に表した．

$$MPD = \frac{Max\,1 + MAX\,2}{2} - \text{平均レベル} \qquad (3)$$

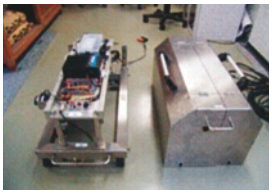
ここに，

$Max\,1$：1 番目の最大レベル，

$Max\,2$：2 番目の最大レベルである．

G-9 および G-P については，測定箇所にグルービングに施された凍結抑制材部分が 3 本含まれるように ST メータを設置し測定した．

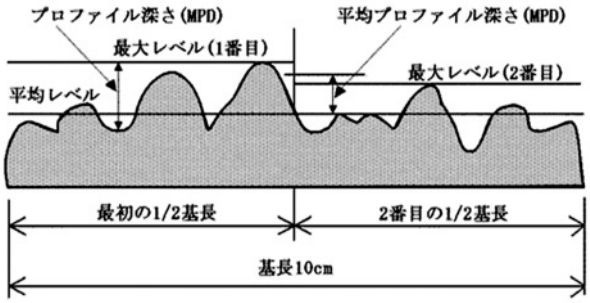
表－4 に ST メータの仕様を，**図－16** に MPD の算出方法の概略[15] を，**図－17** に各試験路面の MPD 測定結果をそれぞれ示す．



写真－8　ST メータ

表－4　ST メータの仕様

x 方向延長	300 mm
y 方向延長	100 mm
x インターバル	0.1 mm
y インターバル	3.0 mm
基長	100 mm
測定ピッチ	0.1 mm



図－16　MPD の算出方法[15]

5.2　重回帰分析の結果と考察

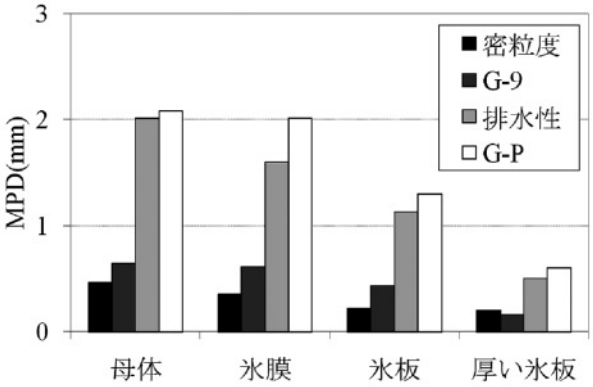
表－5 に，各路面のすべり摩擦係数に影響を与える因子を調べるために，制動試験の結果について重回帰分析を行った結果を示す．

全ての路面状態において，高い決定係数（R^2）を得ることができた．

標準偏回帰係数は，全ての路面状態において路面露出率が最も大きな値となったことから，路面露出率により，すべり抵抗を予測することは可能であると考えられる．また，試験路面の MPD については，厚い氷板路面では全くすべり摩擦係数に対する影響は見られなかったが，それ以外の路面では若干影響が確認された．凍結抑制材の有無による影響は，ほとんど見られなかった．

次に，繰返し走行試験の結果を用いて重回帰分析した結果を**表－6** に示す．氷膜・氷板路面の時は，R^2 が 0.70 程度の値を示したのに対して，圧雪路面は 0.97 と高い値となった．氷膜路面では，MPD と凍結抑制材の有無の偏回帰係数で符号の不一致が確認された．これは，繰返し走行試験で外乱の影響やラミネートシートの計測点における路面状態のばらつきが影響していると考えられる．ただし，路面露出率の測定者による差は，最大 5 %程度の範囲とわずかなことが確認されている．

標準偏回帰係数より，氷膜・氷板路面の時には，路面露出率がすべり摩擦係数に最も大きな影響を与えているのに対して，圧雪路面では，MPD や凍結抑制材の有無が大きな影響を与えている．排水性舗装や凍結抑制材部分を含んだテクスチャの粗い舗装は，表面の凹の部分に雪氷が充てんされるが，**写真－9** に示すように，凸部は路面がドット状に露出することから路面露出率は低くなる傾向



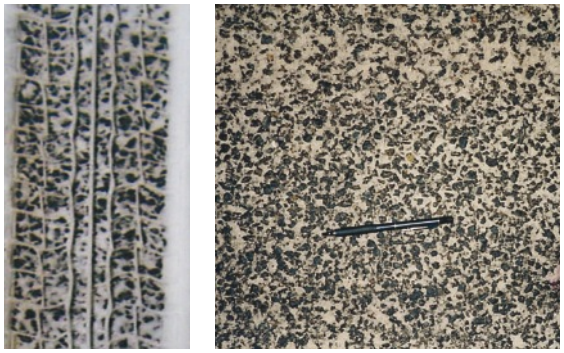
図－17　MPD 測定結果

表－5　制動試験の重回帰分析結果

路面	R^2	偏回帰係数				標準偏回帰係数		
		路面露出率	MPD	凍結抑制材	定数項	路面露出率	MPD	凍結抑制材
氷膜	0.94	0.007	0.058	0.008	0.050	0.929	0.160	0.019
氷板	0.92	0.006	0.096	0.036	−0.007	0.873	0.282	0.095
厚い氷板	0.92	0.007	−0.015	−0.024	0.085	0.921	−0.040	−0.057
圧雪	0.94	0.005	0.071	0.026	0.027	0.902	0.266	0.086

表－6　繰返し走行試験の重回帰分析結果

路面	R^2	偏回帰係数				標準偏回帰係数		
		路面露出率	MPD	凍結抑制材	定数項	路面露出率	MPD	凍結抑制材
氷膜	0.74	0.014	−0.045	−0.051	0.127	1.004	−0.152	−0.159
氷板	0.65	0.010	0.035	0.029	0.057	0.560	0.290	0.222
圧雪	0.97	−0.001	0.092	0.086	0.133	−0.074	0.962	0.820



写真－9　圧雪路面の路面露出状況（左：試験室　右：現場）

写真－10　パテを用いた MPD 測定の様子（左）と舗装に押し付けた後のパテの様子（右）

がある．しかし，すべり摩擦係数は，密粒度舗装に比べて高くなっている．この点は，氷膜・氷板路面の時と大きく異なる点である．

6．氷板・氷膜路面の路面テクスチャによる影響

重回帰分析の結果より，舗装のテクスチャによるすべり抵抗を向上させる効果は，路面の状態により変化する．特に，氷膜・氷板・厚い氷板路面では，路面テクスチャや凍結抑制材の有無による影響の大きさが異なっていることが確認された．これらの結果より，氷膜・氷板・厚い氷板路面は，路面テクスチャによって大きな違いが現れていることが予想される．それを，より明確に確認するために，室温－5℃の環境下で氷膜・氷板・厚い氷板路面を，各試験路面の供試体（縦 300 mm×横 300 mm×高さ 50 mm）に作製した．ST メータのレーザー光は氷膜・氷板を透過してしまうので，パテを**写真－10** のように押し付けてはがしたものを用いて MPD を測定し，各路面状態における路面テクスチャを定量的に表した．

さらに，MPD を算出する際に用いるプロファイルデータに基づき，フーリエ変換によるパワースペクトルに注目したスペクトル解析を行い，各舗装による路面テクスチャの特性および変化の違いを明らかにした．

6.1　MPD による検証

表－7 に，各路面状態における測定結果を示す．なお，測定は 2 つの供試体について行い，その平均値を用いた．

表－7　氷膜・氷板路面の MPD 測定結果（単位：mm）

	密粒度	G-9	排水性	G-P
乾燥	0.46	0.64	2.01	2.08
氷膜	0.35	0.61	1.60	2.01
氷板	0.22	0.43	1.13	1.30
厚い氷板	0.20	0.16	0.50	0.60

全ての舗装が，氷板が厚くなるにつれて MPD も小さくなる傾向が確認された．密粒度舗装を母体としたものに比べて，排水性舗装を母体としたものは大きな MPD となっており，凍結抑制材部分を有する舗装も，母体舗装に比べて大きい値を示している．これらの結果より，きめの粗い舗装や凍結抑制材を有する舗装は，アイスバーンのような路面に対しては，その発生を抑制する効果があると考えられる．

6.2　スペクトル解析による検証

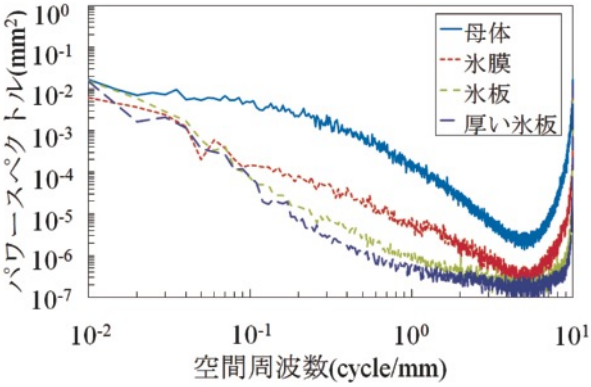
路面テクスチャを不規則波形と仮定し，それを一連の和と考え，各周波数成分のパワーの分布を示したものがパワースペクトルである[17]．ここでは，フーリエ変換に FFT 法を用いてスペクトル解析を行った．

1）トレンドの除去

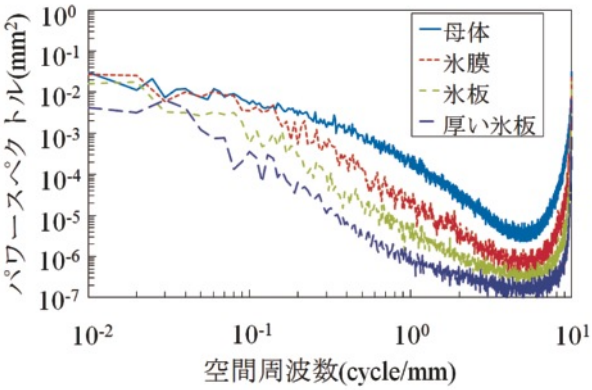
今回，MPD を算出する過程で得られるプロファイルデータを基に分析を行ったが，そのデータには供試体のわずかな傾斜が，路面テクスチャの波形の周波数よりもはるかに低い周波数の変動成分（トレンド）として現れてしまう[18]．そこで，この低周波成分を除去するために平均勾配を求め，変動分を算出してから分析を行った．

2）分析結果

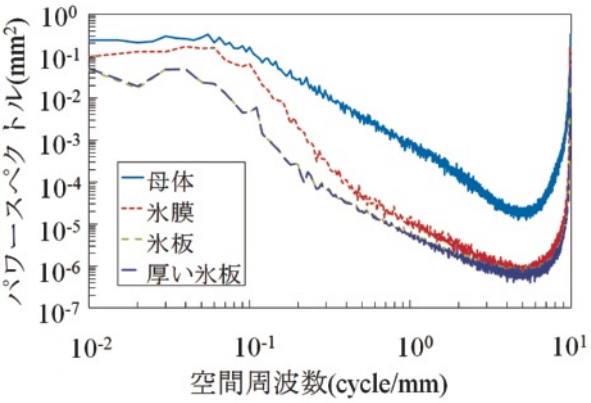
図－18 から図－21 に各舗装における空間周波数－パワースペクトル曲線の全計測線を平均した



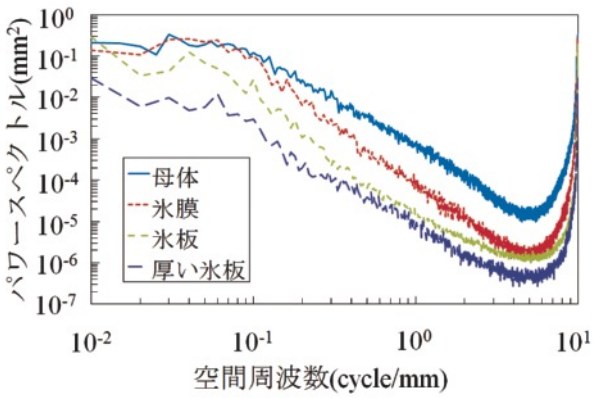
図－18　密粒度舗装の空間周波数 ── パワースペクトル曲線



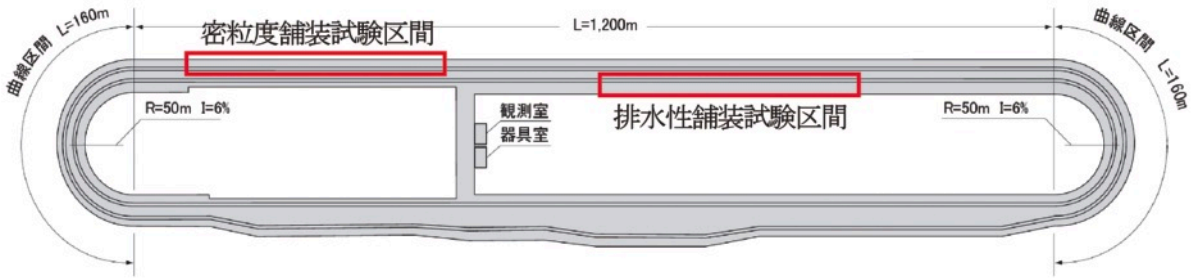
図－19　G-9 の空間周波数 ── パワースペクトル曲線



図－20　排水性舗装の空間周波数 ── パワースペクトル曲線



図－21　G-P の空間周波数 ── パワースペクトル曲線



図－22　苫小牧寒地試験道路

ものを示す．

全ての試験路面について，路面状態が氷膜，氷板，厚い氷板と変化するに伴って，パワースペクトルが小さくなっている．これは，氷が厚くなるに従い，路面は平坦になっていく現象を表現していると思われる．ただし，低周波成分では，その傾向にそぐわない結果も見られるが，それは，路面テクスチャではないものを表現していると考えられる．

密粒度舗装および G-9 は，排水性舗装および G-P よりもパワースペクトルが小さくなった．それぞれを比較すると，G-9 および G-P は，母体舗装に比べてパワースペクトルの減少の度合いが小さい．これは，舗装全体の路面テクスチャを表現している MPD の測定結果においても，同様の傾向が確認されている．

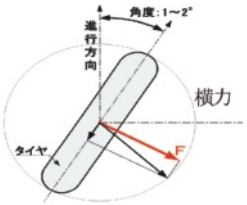
したがって，粗面効果による凍結抑制効果が期待できる排水性舗装[19] であっても，それを維持するためには，効果が期待できる管理水準を保つことが必要である．また，グルービングを施すなどの対策をとることによって，路面テクスチャによるすべり抵抗を確保できる箇所を，増加させることができると考えられる．

7．屋外試験によるすべり抵抗特性の比較検証

これまで，室内凍結路面走行試験装置を用いた実験結果を基に考察を行ったが，これらの結果が自然環境条件下の路面に対する適用性がどの程度あるかについて，十分な検討がされていない．そこで，**写真－11** に示す，我が国の標準的な測定装置として利用されているバス型すべり試験車（Locked-Wheel Friction Tester，以下 LWFT）と，**写真－12** に示す，米国で開発された連続路面すべり抵抗値測定装置（Continuous Friction Tester，以下 CFT）[9] を用いて，**図－22** に示す苫小牧寒地土木研究所寒地土木研究所の苫小牧寒地試験道路[9] において，室内と同様の試験を行った．

写真－11　バス型すべり試験車（LWFT）

写真－12　CFT



図－23　CFT の計測概念図[9]

7.1　すべり抵抗測定装置の概要

LWFT や室内凍結路面走行試験装置は，走行させた状態で，すべり摩擦係数の測定輪の回転を固定することによって生じる回転トルクからすべり摩擦係数を算出するのに対し，CFT は**図－23** に示すように，車両進行方向に対して 1°程度の角度を与えた測定輪に発生する横力を計測することによってすべり抵抗値を算出する[9]．CFT によるすべり抵抗値は HFN（Halliday Friction Number）と呼ばれ，開発者が独自に設定したものである．

HFN は，測定輪が路面に接地していない状態（横力が無負荷状態）を 0，乾燥路面（路面温度－17°C 状態）において横力が発生している時の値を 100 とし，その間を 100 等分した値で定義されている．HFN と LWFT で計測されたすべり摩擦係数の関係は，平成 19 年より乾燥，湿潤，圧雪，氷板，氷膜路面における走行試験を寒地土木研究所が行い，確認している[20]．その結果，決定係数が

0.9 以上と良好な相関関係が得られており，その関係は以下に示す式(4)によって表わされる[20]．

$$y = 0.009\,x - 0.0929 \qquad (4)$$

ここに，x：HFN，y：すべり摩擦係数である．

HFN は，式(4)に代入することによって得られた値を FN (Friction Number) として定義し，すべり摩擦係数と比較検討した．

7.2　試験条件

本試験は，すべり摩擦係数と路面露出率の関係を明らかにするために実施した制動試験の結果と比較するために，密粒度舗装と排水性舗装の路面上に，**写真－13** のように横・連続パターンで人為的に路面を露出させた氷膜路面を作製して行った．路面露出率は 20%，40%，60%と設定した．走行速度は，室内試験が 10 km/h であるのに対し，屋外試験では，LWFT および CFT の測定時の標準速度である 40 km/h とした．LWFT は 2 回試験を行った．CFT を牽引した 3 台の試験車を 2 回ずつ走行させたが，車両のステアリング角±7°以下のデータを採用した結果，2 台で有効なデータが得られた．屋外試験時の気温および路温は，**表－8** に示すとおりである．

写真－13　屋外試験の路面状態（左：全体　右：拡大）

7.3　試験結果の比較検討

表－9 に，LWFT による試験結果を，**表－10** に CFT による試験結果をそれぞれ示す．LWFT による試験結果は，ばらつきも小さく安定した測定値を示した．CFT による試験結果は，LWFT の結果に比べて測定値にばらつきが見られ，最大 0.2 程度の差が確認された．

次に，**図－24** に密粒度舗装，**図－25** に排水性舗装における各試験結果を比較したものをそれぞれ示す．LWFT と室内凍結路面走行試験装置の測定結果は，走行速度に 30 km/h の差があるにもかかわらず，各路面露出率に対してほぼ同様のすべり摩擦係数となった．CFT による測定結果より得られた FN は，LWFT や室内凍結路面走行試験装置による測定結果とほぼ同様な値を示した．

表－8　屋外試験の試験条件

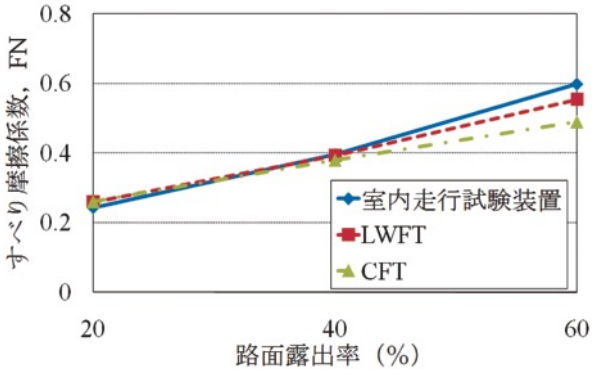
気　温	密粒度舗装測定時	−10.1〜−11.4℃
	排水性舗装測定時	−6.5〜−8.1℃
路　温	密粒度舗装測定時	−6.0〜−6.6℃
	排水性舗装測定時	−3.7〜−5.0℃
輪 荷 重	4 kN	
走行速度	40 km/h	

表－9　LWFT による試験結果

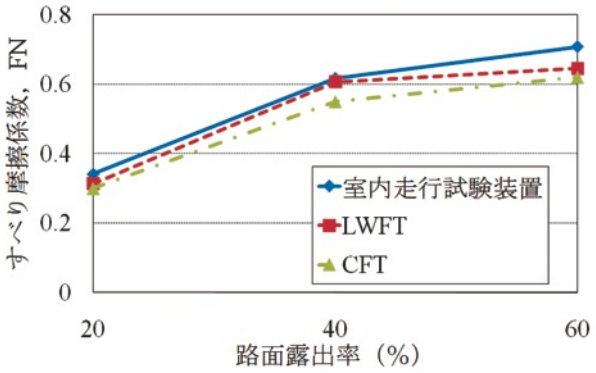
	路面露出率 20%			路面露出率 40%			路面露出率 60%		
	1 回目	2 回目	平　均	1 回目	2 回目	平　均	1 回目	2 回目	平　均
密粒度舗装	0.26	0.26	0.26	0.38	0.40	0.39	0.57	0.54	0.56
排水性舗装	0.36	0.27	0.32	0.60	0.62	0.61	0.67	0.62	0.64

表－10　CFT による試験結果

	路面露出率 20%					路面露出率 40%					路面露出率 60%				
	1 台目		2 台目		平均	1 台目		2 台目		平均	1 台目		2 台目		平均
	(1)	(2)	(1)	(2)		(1)	(2)	(1)	(2)		(1)	(2)	(1)	(2)	
密粒度舗装	0.24	0.31	0.22	0.29	0.26	0.31	0.49	0.30	0.42	0.38	0.41	0.55	0.44	0.55	0.49
排水性舗装	0.24	−	0.32	0.33	0.30	0.64	−	0.60	0.42	0.55	0.66	−	0.60	0.59	0.62



図－24　密粒度舗装における各試験結果の比較



図－25　排水性舗装における各試験結果の比較

したがって，今回用いた測定装置はそれぞれ，路面のすべり抵抗と路面露出率の関係を適切に評価していると考えられる．

8．結論

本研究では，様々な環境下ですべり摩擦係数と路面露出率の関係を明確にするために，制動試験や繰返し走行試験を行い，得られた結果を統計分析およびスペクトル解析し，さらに複数のすべり抵抗測定装置の結果を比較検証した．これらの結果から，以下の結論が得られた．

(1) 路面露出率が同じ値であっても，舗装の種類や露出パターンなどの環境の違いによって，すべり摩擦係数は異なることから，路面の露出状況によりすべり抵抗や舗装による凍結抑制効果の評価を行う場合には，その舗装や区間における路面の露出パターンを特定する必要がある．

(2) 繰返し走行試験後に測定したすべり摩擦係数と制動試験より得られた関係の近似式より算出した値は，ほぼ同じ値となり，路面露出率を用いて路面のすべり抵抗を評価できる可能性を示すことができた．

(3) 路面テクスチャや凍結抑制材は，すべり抵抗に影響を与えるが，その大きさは路面の状態によって大きく異なる．特に，圧雪路面や氷膜路面ではすべり抵抗に対する影響が確認されたが，厚い氷板路面ではほぼみられなかったため，路面テクスチャや凍結抑制材による効果の発現には，効果が期待できる管理水準を保つことが必要である．

(4) スペクトル解析の結果より，路面状態による路面テクスチャの変化傾向を明確にすることができた．さらに G-9 と G-P は，グルービングを施すことによって，母体舗装よりも，路面テクスチャの粗面効果を維持できることが推測される．

(5) 室内凍結路面走行試験装置，LWFT および CFT によるすべり抵抗の測定値を比較すると，ほぼ同様な路面のすべり抵抗と路面露出率の関係を示していることから，本研究で明らかになったすべり摩擦係数と路面露出率の関係は，実路においても十分に適用できる可能性を示すことができた．

9．おわりに

本研究では，路面露出率からすべり摩擦係数を予測できる可能性を示しただけでなく，舗装面のテクスチャや凍結抑制材のように，粗面効果を含む物理的凍結抑制効果を期待できる要因についても分析し，凍結路面の種類の違いによる，すべり摩擦係数に対する影響の大きさと傾向を把握することができた．

本研究は 4 種類の舗装と凍結路面において 4 パターンの露出状況を再現して行ったが，舗装の種類や発生する凍結路面は多くの種類が存在するため，今回得られた各因子とすべり摩擦係数の関係が適用できない場合も十分に有り得るであろう．しかし，ここで行ったアプローチを他の条件に対しても実施することで，すべり摩擦係数と各因子の関係を把握することが可能であり，各種舗装の効果を活かすことのできる，最適な施工箇所を予測することも可能になると考えている．

【参考文献】

1）田中俊輔，武市靖，増山幸衛：グルービング系凍結抑制舗装のすべり抵抗と氷板破砕に関する工学的研究，土木学会舗装工学論文集，第 14 巻，pp.195-202，2009.

2）Tilley, J. S., Kroeber, S. S., Green, J., Clonch, D. and Hal-liday, D.: Measurements of Pavement Condition and Road Weather Environment Within North Dakota Using a Tow-Hitch Mount Road Grip Tester, Transportation Research Circular, Number E-C126, pp. 364-378, 2008.

3）Arsenault, S.: Assessment of Devices used to measure Road Friction in Winter Conditions, AIPCR-PIARC, 13th International Winter Road Congress, T 4-4-24, 2010.

4）Engstrom, N., Latsson, R., Andren, H. and Fransson, L.: Direct low lateral slip roadgrip measurement compared with surface reflection of three laser beams, AIPCR-PIARC, 13th International Winter Road Congress, T4-4-169, 2010.

5）Vaa, T. and Hol, I.: Follow up study of winter standard as a R&D project, AIPCR-PIARC, 13th International Winter Road Congress, T1-2B-110, 2010.

6）NCHRP: Feasibility of Using Friction Indicators to Improve Winter Maintenance Operations and Mobility, 2002.

7）PIARC: Snow & Ice Databook, 2010.

8）御滝毅，鈴木徹，藤木一雄：グルービング溝を利用した凍結抑制舗装の検討について，第 8 回北陸道路舗装会議技術報文集，pp.203-206，2000.

9）舟橋誠，徳永ロベルト，高橋尚人，葛西聡：冬期路面管理における路面状態の定量的な計測技術に関する研究，第 24 回寒地技術シンポジウム寒地技術論文・報告集，Vol.24，pp.15-19，2008.

10）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，第 46 集，pp. 119-133，北海道大学低温科学研究所，1988.

11）武市靖，田近裕善：寒冷地舗装における路面テクスチャの違いが凍結抑制効果に与える影響，土木学会舗装工学論文集，第 8 巻，pp.43-53，2003.

12）田中俊輔，武市靖，増山幸衛：グルービング系凍結抑制舗装の効果の評価に関する研究，第 63 回年次学術講演会講演概要集，V-076，2008.

13）Otsu, N.: A threshold selection method from grey-level histograms, IEEE Trans., SMC, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66, 1979.

14）日本雪氷学会北海道支部：雪氷調査法，pp.29-45，北海道大学図書刊行会，1991.

15）増山幸衛，片山潤之介，草刈憲嗣，岩井茂雄，寺田剛：解析方法の違いを考慮したテクスチャの評価に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 9 巻，pp.231-239，2004.

16）Characterization of Pavement Texture Utilizing Surface Profiles-Part 1: Determination of Mean Profile Depth, International Organization for Standardization, International Standard ISO 13473-1, 1996.

17）南茂夫：科学計測のための波形データ処理，pp. 72-73，CQ 出版社，1986.

18）日野幹雄：スペクトル解析，pp.186-187，朝倉書店，1977.

19）吉井昭博，田高淳，安倍隆二：積雪寒冷地における開粒度舗装のすべり抵抗に関する検討，第 11 回北陸道路舗装会議技術報文集，B-14，2009.

20）切石亮，徳永ロベルト，高橋尚人：冬期路面状態評価技術に関する試験研究 ── 連続路面すべり抵抗値測定装置の測定タイヤ比較試験（その 2）──，雪氷研究大会講演概要集，pp.21，2010.