

北海道型SMAのきめ深さと 走行安全性の関係に関する研究

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○田中 俊輔
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム 木村 孝司
北海学園大学 工学部 武市 靖

北海道型SMAは、高い耐久性と走行安全性の機能を併せ持つ表層用アスファルト混合物である。その耐久性と走行安全性を確保するためには、十分な締固め度ときめ深さを確保することが重要である。しかし、両者は逆相関の関係を持つことが確認されており、耐久性向上のために締固め度を高めようとする、きめ深さの減少により走行安全性の機能が低下する懸念がある。したがって、きめ深さと走行安全性の機能との関係を明確にすることは非常に重要である。そこで本研究は、北海道型SMAのきめ深さと走行安全性の機能との関係を定量的に明らかにした。その結果、きめ深さと路面上に水膜が発生する時の水分供給量の関係に着目することで、走行安全性の機能を推定・評価することができる可能性を示すことができた。

キーワード：北海道型SMA、きめ深さ、走行安全性、品質管理

1. はじめに

北海道開発局では、高規格幹線道路や一般国道において、路面の粗いきめ深さによる走行安全性の機能と高い耐久性を併せ持つ北海道型SMAの施工実績が増加している。北海道型SMAは、走行安全性の機能発現が路面のきめ深さに起因していることから、出来形管理として路面のきめ深さの規格値を設けている。また、きめ深さと耐久性に影響を与える締固め度には逆相関の関係があることが既往研究¹⁾から明らかになっており、耐久性向上のために締固め度を高めようとする、きめ深さの減少により走行安全性の機能が低下する懸念がある。このような現状から、きめ深さと走行安全性の機能との関係を明確にすることは非常に重要である。

きめ深さと走行安全性の関係に関する既往研究としては、湿潤路面時におけるきめ深さとすべり抵抗値との関係について世界的に研究され、測定装置の開発など積極的に行われた^{2), 3), 4)}。また、世界道路協会 (PIARC) は、1992年に国際共同実験を行い、その成果として国際摩擦指標 (International Friction Index: IFI) が開発されている⁵⁾。

一方で、雨天時の視認性や積雪寒冷地特有の路面状況において、舗装表面のきめ深さに着目した検討事例は少ない。

そこで本研究は、一例として夜間湿潤路面時の視認性と凍結路面時のすべり抵抗値に着目した試験を行い、きめ深さによる走行安全性の機能の定量的評価を試みた。

また、試験結果から、走行安全性の機能を確保するために必要なきめ深さの推定手法について検討した。

2. 北海道型SMA

これまで北海道開発局において採用されてきた排水性舗装 (空隙率17%) は、湿潤路面に限らず、冬期の水膜 (ブラックアイス) 路面においても走行安全性の機能を有することが確認されている。しかしながら、排水性舗装は耐久性の面から問題が散見された⁶⁾。積雪寒冷地では、冬期間の除雪作業による摩耗や融解期の融雪水による凍結融解作用など、舗装にとって、過酷な環境におかれることとなる⁷⁾。

そのため、北海道型SMAは、図-1に示すように、粗いきめ深さによる走行安全性の機能 (雨天時のハイドロプレーニング現象発生抑制や視認性確保、凍結路面時のすべり抵抗確保など) を保ちつつ、優れた耐久性も併せ持つことをコンセプトに開発された表層用アスファルト混合物である⁸⁾。

北海道型SMAの走行安全性の機能に関わるきめ深さは、出来形管理項目として設定されており、その規格値は、CTメータなどで測定された平均プロファイル深さ (MPD: Mean Profile Depth) ⁹⁾で設定されている。本研究も、きめ深さの指標としてMPDを用いることとした。

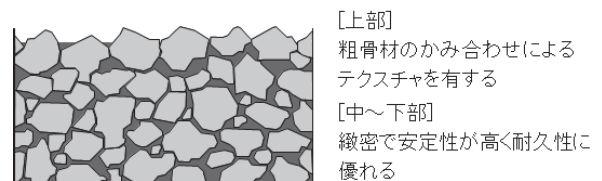


図-1 北海道型SMAの構造

3. 夜間湿潤路面時の視認性ときめ深さの関係

きめ深さによる走行安全性の機能としては、雨天時のハイドロプレーニング現象発生の抑制、水けむり抑制による視認性確保、夜間雨天時の視認性確保、凍結路面時のすべり抵抗性確保などがある。ここでは、夜間雨天時の視認性に着目した室内試験を行った。

夜間湿潤路面では、対向車や街灯などの高輝度光源が周囲の物体の視認性を低下させるまぶしさ（グレア）を与えることがあり、事故を引き起こす一因となり得る¹⁰⁾。

本試験は、対向車のヘッドライトが運転者の視認性に影響を与える状況を想定し、きめ深さと視認性の関係を検証した。

(1) 路面反射グレア

夜間の湿潤路面、凍結路面などでは、対向車のヘッドライトの直射だけではなく、路面からの鏡面反射もあり、運転者にグレアを引き起こす。乾燥路面時、路面に入射した光の多くは拡散反射する。しかし、湿潤路面になると一部が鏡面反射するようになり、路面が平滑な水膜や氷膜に覆われると完全に鏡面反射し、路面反射グレアが強く感じられるようになる。

(2) 供試体の作製

本研究で使用した供試体は、きめ深さをCTメータで測定したMPDで管理し、0.15mmから1.50mmの間で7枚の供試体を作製した。供試体の寸法は、縦400×横400×厚さ50mmである。各供試体のMPDを表-1に示す。なお、MPDは供試体の中心近傍3箇所測定し、その平均値を用いた。また、この後の試験において、MPDの測定は、常に同じ位置になるようにした。

供試体は北海道型SMAの配合設計（骨材最大粒径13mm、目標空隙率5.0%）を基本とし、アスファルト量や転圧方法などを変化させることで、きめ深さを調整した。作製した供試体は、写真-1のように側方および底面を供試体形状に沿ってコーティングし、透水しないようにすることで、きめ深さによる影響のみを検証できるようにした。

表-1 作製した供試体のきめ深さ（MPD）

供試体	きめ深さ（MPD）
A	0.15 mm
B	0.33 mm
C	0.50 mm
D	0.69 mm
E	0.88 mm
F	1.20 mm
G	1.50 mm

※CTメータで3回測定したものの平均値

※北海道型SMAの規格はMPD0.9mm以上（平均値）

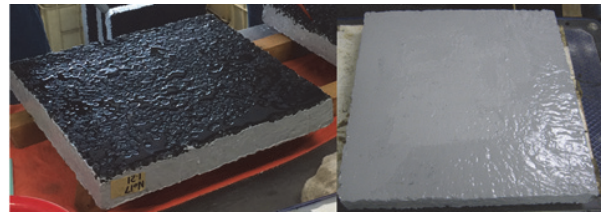


写真-1 作製した供試体（左：表面、右：底面）

(3) 試験概要

本試験では、輝度に着目して、人為的に発生させた湿潤路面が、鏡面反射する状況であるかを明らかにすることにより、夜間湿潤路面時の視認性評価とした。

本試験の概要を図-2に示す。ヘッドライトの代用としたハロゲンライトを使用し、輝度測定のための輝度計を設置した。ハロゲンライトは、光束10000lm、照射角30°であり、光度は46500cdになる。設置高さは0.9mとし、普通乗用車程度の高さを想定した。輝度計は1.2mの高さに設置した。これは、我が国の道路構造令で定められる視距が、目の高さ1.2mを標準としていることによる。散水量は500～3000g/m²の間で、6条件を設けた。表-2に試験条件を示す。

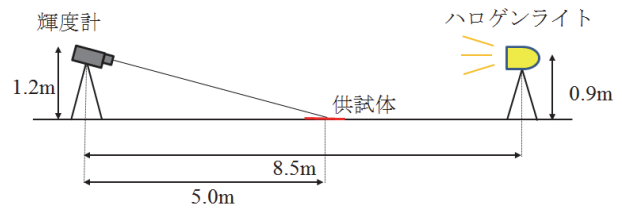


図-2 試験状況

表-2 夜間湿潤路面時の視認性に関する試験の条件

供試体	供試体A～G（計7枚） きめ深さ（MPD）：0.15～1.50mm
路面	湿潤路面
散水量	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000g/m ²
光源	ハロゲンライト 高さ0.9mに設置 光度46500cd, 照射角30°, 光束10000lm
輝度	輝度計を用いて測定 高さ1.2mに設置

(4) 試験結果

図-3に輝度の測定結果を示す。乾燥路面時（散水量0g/m²）は、きめ深さの違いによる輝度の差は見られないが、散水量の増加に伴い輝度も上昇し、ある一定の散水量を超えると、高い輝度値で一定となった。この状況の時、供試体の表面は水膜で覆われ、ハロゲンライトの光を鏡面反射していると考えられる。実道でこのような路面状況になると、路面反射グレアが強くなり、視認性に影響を与える可能性がある。

きめ深さ（MPD）が0.15～0.33mmでは散水量500 g/m²、0.50mmでは散水量1000 g/m²、0.69～0.88mmでは散水量

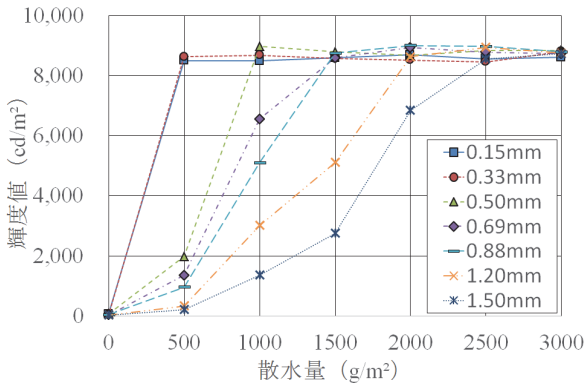


図-3 輝度測定結果

1500 g/m², 1.20mmでは散水量2000 g/m², 1.50mmでは散水量2500 g/m²で一定となっている。このように、きめ深さが大きいほど、鏡面反射が発生していると予測される散水量は多くなっている。したがって、出来形管理の規格値できめ深さを0.9mm以上（定められた箇所数の平均値）を確保することとされている北海道型SMAは、一般的な密粒度系の舗装と比較して、夜間雨天時の視認性確保に有効である。

4. 凍結路面の走行安全性ときめ深さの関係

粗いきめ深さを有する北海道型SMAは、凍結路面において、すべり抵抗を確保している状況が確認され、そのような走行安全性の機能発現を期待して施工される事例もある¹¹⁾。凍結路面における走行安全性の機能発現は、路面のきめ深さが確保できる状況（薄いシャーベットや氷膜など）において効果が認められている¹¹⁾。そのため、効果発現は、きめ深さと発生する雪氷膜の厚さに依存すると考えられる。ここでは、凍結路面時のすべり抵抗に着目した室内試験を行い、きめ深さとすべり抵抗値の関係について検証した。

(1) 試験概要

この試験は、夜間湿潤路面時の視認性評価試験で使用した供試体と同じものを使用した。表-3に、試験条件を示す。まず試験温度を+2°Cに設定し、供試体と散布する水を12時間以上養生した。次に、散水を行い、徐々に室内温度を低下させて凍結路面を作製し、DFテストを用いてすべり摩擦係数を測定した。散水量は500, 1000, 1500g/m²とし、供試体をできる限り水平に設置するなど、氷膜が一樣な厚さで生成されるようにした。

なお、本試験は、湿潤路面が気温と路面温度の低下によって、氷膜路面が生成されるような状況を想定している。実道において、すべり抵抗値が著しく低下する状況は、ある程度まとまった降雪後に発生する圧雪路面なども考えられるが、このような路面は、舗装のきめ深さによる走行安全性の機能発現はほぼ期待できない。

表-3 凍結路面の走行安全性に関する試験の条件

試験温度	試験開始時+2°C、散水後 10 分ごとに1°C低下させ、-8°Cまで低下。
散水量	500g/m ² , 1000g/m ² , 1500g/m ²
測定項目	すべり摩擦係数 (DF テスタで測定)

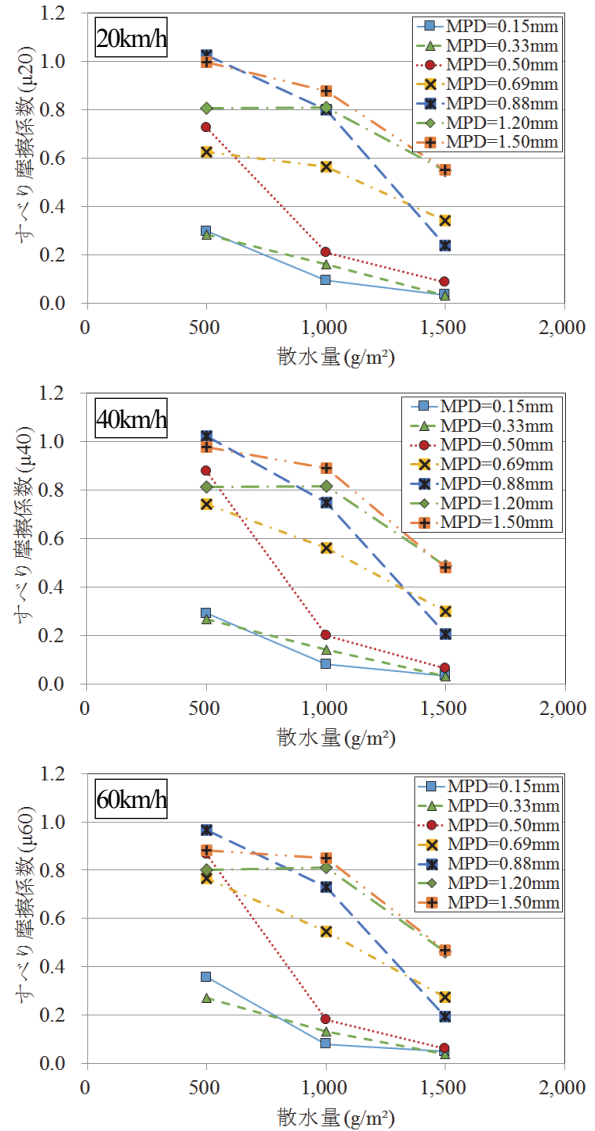


図-4 すべり摩擦係数の測定結果

(2) 試験結果

図-4に試験結果を示す。きめ深さ (MPD) が0.15～0.33mmでは散水量500 g/m²でもすべり摩擦係数は低く、0.50mmでは散水量500 g/m², 0.69～0.88mmでは散水量1000 g/m²ですべり摩擦係数が0.5以上となった。1.20～1.50mmでは散水量1500 g/m²でもすべり摩擦係数は0.5程度となっている。このように、きめ深さが大きくなるにつれて、すべり摩擦係数が大きくなる傾向が見られる。なお、速度変化によるすべり摩擦係数の変化は、ほぼ見られない。

前野らが提案した雪氷分類¹²⁾によると、路面上に厚さ1.0mm以下の氷層が形成されている状態のことを氷膜路面としている。本試験の1000 g/m²散水の時、散布した水

が全て一様に凍結した仮定すると、ほぼ平滑な路面上には約1mmの水膜が形成される。この状況の時、MPDが0.15~0.50mmの供試体はすべり摩擦係数が0.2以下と低くなっているがMPDが0.69mm以上となると、すべり摩擦係数が0.5以上確保されている。この結果から、北海道型SMAは、一般的な密粒度系の舗装と比較して、ブラックアイスバーンのような氷膜路面における走行安全性の確保に有効であると考えられる。

5. 走行安全性確保に必要なきめ深さの検討

前述の試験結果より、夜間湿潤路面時の視認性および凍結路面時のすべり抵抗値は、きめ深さと関係があることが明確になった。これらの結果は、粗いテクスチャを持つ路面の凹部に供給された水分が貯留することにより、路面の水膜（凍結路面では氷膜）が薄くなる、もしくは発生自体が抑制されることによると考えられる。

ここでは、きめ深さと路面の凹部に貯留することのできる水分量（貯留可能水分量）の関係に着目し、走行安全性確保に必要なきめ深さを検討した。

(1) 貯留可能水分量

貯留可能水分量は、路面から供給された水分が、粗いきめ深さを持つ路面の凹部に貯留することのできる限界量と定義する。本研究では、供試体の乾燥重量と、路面から注水してあふれる直前の重量との差を求め、1m²あたりに換算したものを貯留可能水分量 (g/m²) とした。貯留可能水分量は、きめ深さの空隙のみ着目しており、排水性舗装が有する排水機能は考慮しない。なお、供試体は室内試験で使用したものと同一ものを使用した。

(2) きめ深さと貯留可能水分量の関係

図-5にきめ深さ (MPD) と貯留可能水分量の関係を示す。きめ深さが大きくなるにつれて、貯留可能水分量も増加した。

きめ深さ (MPD) と貯留可能水分量の関係式を、直線回帰により求めた。MPDが0mmの時、路面は平滑であると考え、原点 (0, 0) を通過する回帰直線とした。式(1)に關係式を示す。

$$y = 817x \quad (1)$$

ここに、xはMPD、yは貯留可能水分量である。

なお、決定係数 (R²値) は0.9以上となり、式(1)より得られる理論値は、十分に信頼できると考えられる。したがって、この關係式を用いて、湿潤路面および凍結路面における走行安全性確保に必要なきめ深さの検証を行うこととする。

なお、本研究における水膜とは、きめ深さの凹部が水

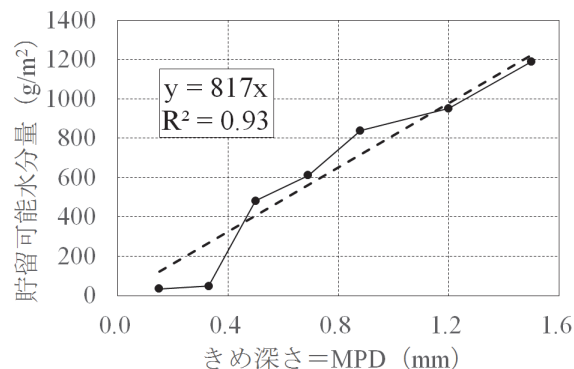


図-5 きめ深さ (MPD) と貯留可能水分量の関係

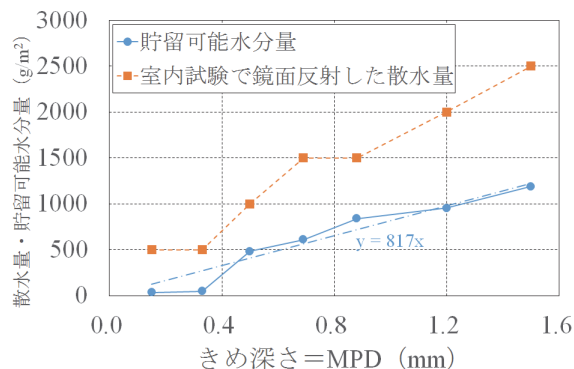


図-6 夜間湿潤路面で鏡面反射する散水量と貯留可能水分量

に満たされ、路面に平滑な水膜が発生する状態を示しており、路面に供給される水分が、貯留可能水分量に達した時に、平滑な水膜が発生すると仮定した。

(3) 貯留可能水分量に着目した走行安全性の検討

図-6に、貯留可能水分量および室内試験の結果から夜間湿潤路面時に鏡面反射する可能性がある水膜が発生したと考えられる散水量ときめ深さとの関係を示す。

きめ深さ (MPD) が大きくなると、室内試験の結果および貯留可能水分量は増加している。その増加傾向は似たような形となっているが、相対的に試験結果の方が、多い散水量となっている。例えば、きめ深さ (MPD) が1.2mmの時、貯留可能水分量からは1000g/m²水分が供給されると鏡面反射するような水膜が路面に発生すると考えられるが、試験結果では2000g/m²散水時に路面に水膜が発生している。このような差が生じた要因としては、供試体表面のわずかな歪みによる影響などが考えられ、今後、試験の精度向上が必要と考えられる。しかしながら、きめ深さの増加に伴う貯留可能水分量の変化傾向は室内試験の結果と近似していることから、今後、道路構造 (勾配や排水能力など) や環境条件 (降雨強度や車両の影響など) を考慮し、貯留可能水分量に着目することで、きめ深さから夜間湿潤路面時の視認性調査を行うことができる可能性がある。

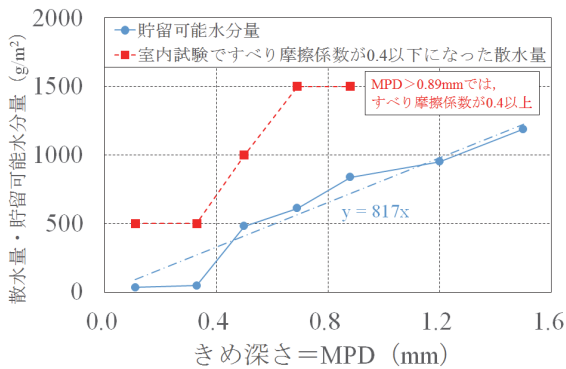


図-7 凍結路面ですべり摩擦係数が0.4以下になった時の散水量と貯留可能水分量

図-7に、貯留可能水分量および凍結路面ですべり摩擦係数が0.4以下になった時の散水量ときめ深さとの関係を示す。なお、すべり摩擦係数が0.4の時に着目したのは、すべり摩擦係数を冬期路面管理目標に採用している北欧の国々（ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、アイスランドなど）が0.25～0.40¹²⁾を管理目標値としていること、また我が国の既往研究¹³⁾より、雪氷路面のすべり摩擦係数が概ね0.1～0.4であることによる。

夜間湿潤路面時の試験結果と同様に、貯留可能水分量と比較して、試験結果の方が多量に散水して氷膜が発生し、すべり摩擦係数が低下しているが、きめ深さの増加に伴う貯留可能水分量の変化傾向は室内試験の結果と近似している。

このように、貯留可能水分量に着目することで、夜間湿潤路面時の視認性および凍結路面時のすべり抵抗性ときめ深さとの関係について、きめ深さの変化に伴う走行安全性の変化傾向を把握することができた。したがって、きめ深さから走行安全性の間接的評価を行うことができる可能性がある。

北海道型SMAは、北海道開発局が管理する高規格幹線道路で暫定運用され、今後、一般国道などへの適用拡大や、新設箇所だけでなく修繕箇所にも幅広く適用されていくことが予想される。その中で、北海道型SMAの機能の持続性や耐久性の検証、耐久性や品質が安定的に得られる設計・施工技術の確立が必要とされるが、きめ深さと走行安全性の関係を明確にすることは、基礎的資料として非常に重要であると考えられる。

6. 結論

以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 夜間湿潤路面を想定した室内試験の結果では、きめ深さが大きいほど視認性を悪化させる可能性のある水膜が発生する散水量は多くなった。したがって、粗いきめ深さ（出来形管理の規格値で平均0.9mm以上）を持つ北海道型SMAは、一般的な密

粒度系の舗装と比較して、夜間雨天時の視認性確保に有効である。

- (2) 凍結路面を作製して行った室内試験の結果においても、きめ深さが大きくなるにつれて、すべり摩擦係数が大きくなる傾向を確認した。したがって、北海道型SMAは、密粒度系の舗装と比較して、ブラックアイスバーンに代表される氷膜路面におけるすべり抵抗の確保に有効である。
- (3) 貯留可能水分量ときめ深さの関係式は、室内試験の結果と一致はしなかったが、きめ深さの変化に伴う走行安全性の変化傾向を把握できることが明らかになった。したがって、貯留可能水分量に着目することで、きめ深さから走行安全性の間接的に評価できる可能性があり、さらに道路構造（勾配や排水機能）や気象条件などを加味することで、直接的に評価できる可能性がある。

7. おわりに

北海道型SMAの普及が進む中で、きめ深さと走行安全性の関係を明確にすることは、非常に重要となっている。しかし、積雪寒冷環境下に着目した研究やすべり抵抗以外の走行安全性の機能に着目した研究は決して十分ではない。

本研究では、きめ深さと貯留可能水分量に着目し、夜間湿潤路面時および凍結路面時の走行安全性を検証したが、その精度は十分ではなく、環境条件などを考慮した更なる検討が必要である。

今後、道路構造や気象条件も考慮した室内試験や、実道を想定した試験を行い、きめ深さと走行安全性の機能との関係を詳細に把握することで、北海道型SMAの機能の持続性評価や技術・品質の向上に寄与していきたい。

参考文献

- 1) 田中俊輔, 磯田卓也, 木村孝司: 北海道型 SMA の施工実態および技術向上に向けた取り組みについて, 第 59 回北海道開発技術研究発表会, 2016.
- 2) 七五三野茂: アスファルト舗装のテクスチャの特性とすべり摩擦係数への影響について, 土木学会舗装工学論文集, Vol.1, pp.143-150, 1996.
- 3) Zoltan Rado: Analysis of Texture Profile, PTI Report 9510, Pennsylvania Transportation Institute, 1994.
- 4) 安部裕也, 亀山修一, 玉井昭典, 笠原篤, 斎藤和夫: Circular Texture Meter (CTM)と DF テスタによる国際摩擦指標 (IFI) の算出, 土木学会舗装工学論文集, Vol.4, pp.15-22, 1999.
- 5) PIARC Technical Committee on Surface Characteristics C.1: International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, 1995.
- 6) 熊谷政行, 安倍隆二, 布施浩司: 積雪寒冷地における排水性舗装に関する一検討, 第 12 回北陸道路会議, D-15, 2012.
- 7) 丸山記美雄, 安倍隆二, 熊谷政行: 融雪期に発生する舗装の損傷実態と損傷のメカニズム, 第 57 回北海道開発技術研究発表会, 2014.

- 8) 積雪寒冷地における舗装技術検討委員会：北海道型 SMA の施工の手引き（案），2014.
- 9) Characterization of Pavement Texture Utilizing Surface Profiles-Part 1: Determination of Mean Profile Depth, International Organization for Standardization, International Standard ISO 13473-1, 1996.
- 10) International Commission on Illumination: Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic, CIE 115, 2010.
- 11) （公社）土木学会舗装工学委員会：舗装工学ライブラリー6 積雪寒冷地の舗装，pp.193-207, 2011.
- 12) PIARC Technical Committee 2.4 Winter Maintenance: Snow and Ice Databook, 2014.
- 13) 市原薫，小野田光之：路面のすべりとその対策 一道路・滑走路・床面・雪氷面一，技術書院，pp.108-110, 1997.