

冬期路面管理の判断・評価におけるすべり抵抗値の導入と活用について

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム ○徳永 ロベルト
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム 切石 亮
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム 高橋 尚人

我が国では、目視判別による路面状態の定性的な評価が冬期路面管理の基本となっている。他方、欧米諸国ではすべり抵抗値等の定量的な指標を冬期路面管理の基準として採用している国がある。本報では、我が国の地域特性に適した冬期道路管理水準の検討に資するため、諸外国における冬期路面管理基準の設定状況、測定手法等を紹介しながら、冬期路面管理の判断・評価におけるすべり抵抗値の活用可能性について述べる。

キーワード：維持管理、冬期路面、判断支援、すべり抵抗値

1. はじめに

冬期路面のすべりやすさは、車両の発進・走行・停止に影響を与える要因である¹⁾。そのような中、我が国では目視確認による路面状態の定性的な評価が冬期路面管理の基本となっている。他方、欧米ではすべり摩擦係数等の定量的な指標を冬期路面管理の基準として採用している国がある。また、近年では連続的にすべり抵抗値を計測する実用的な機器も開発され、冬期路面状態を定量的に評価する技術の発展とその導入が進みつつある。しかし、国によって使用している計測機器、計測原理、計測方法等も異なる。そのため、各国の試験結果や冬期道路サービスを単純に比較することができない。

当研究所では、我が国の地域特性に適した冬期道路管理水準・サービス水準の検討に資するため、各国の冬期路面管理基準の設定状況、測定手法の比較等について調べた。本報では、これまでの結果と今後の展望について述べる。

1. 国内外における管理基準等について

(1) 冬期路面管理基準

日本と諸外国における冬期路面管理基準に関する文献をレビューし、冬期路面管理基準について把握した。大まかに区分すると、日本型、欧州型（定性的または定量的な基準設定）及び北米型にまとめられる。

a) 日本の冬期路面管理基準

日本では、道路の区分に応じて維持すべき路面状態を目標設定することが特徴である。北海道の国道では、スパイクタイヤ規制後の冬期路面管理をより効果的・効率

的に行うため、1997年に「冬期路面管理マニュアル(案)」を策定し、交通量と沿道状況に応じた管理目標を設定している²⁾。路面分類には、乾燥路面と13種類の路面状態の計14の路面状態を設定している。また、路面状態が正しく判別されるように、雪氷の有無、表面の光沢、トレッド跡、雪の色や厚さ等によって路面状態を区分する表を別途設けている。

b) 欧州の冬期路面管理基準

欧州の場合、PIARC（世界道路協会）Snow & Ice Databook³⁾によると冬期道路管理基準は概ね次のとおりである。道路管理者の大半は、道路ネットワークを三種類以上に区分し、それぞれに交通量と道路構造に応じた管理目標が設けられている。各区分の成果目標を正確に記述している国（デンマーク、エストニア等）があるが、重要度の低い道路では圧雪路面を容認している。一方、交通量の多い区間では幅員全体を露出路面とするなど目標には幅があり、目標サービスレベルに回復するまでの最大許容時間を定めている国もある。また、北欧では路面摩擦による管理基準が利用されている。他方、オーストリア、ベルギー、ドイツ等、路面状態に関する基準がそれほど厳密に規定されていない国もある。そのような場合は、冬期道路管理の手順（工法と時間帯、維持管理対象時間）を、道路区分と気象状況または交通条件によって設定している。

定性的な基準設定の例として、エストニアの冬期道路管理基準によるサービスレベルは4段階に設定されている。その適用区分は、道路種別と日平均交通量で分類される。自動車専用道路と日平均交通量8,000台以上の幹線道路では最も高い管理基準が適用され、1日24時間路面に雪氷がない状態を保つこととしている。



図-2 路面すべり測定車

定量的な基準設定の例として、北欧4か国（フィンランド、ノルウェー、アイスランド、スウェーデン）では、冬期道路管理基準にすべり摩擦係数を導入している。スウェーデンの冬期道路管理基準では、年平均日交通量のみで管理水準の適用区分を設定している。路面のすべり摩擦係数の計測には、4か国とも加速度計を主に使用している。計測方法は、加速度計を設置した車両が一定速度で走行し、測定箇所にて1秒間急制動をかけ、得られた「減速度」からすべり摩擦係数を計算する（図-1）。

c) 北米の冬期路面管理基準

北米（米国・カナダ）では、北欧4か国のような詳細な基準設定はされていない。北米では、露出路面（ベア・ペーブメント）管理が原則であることが理由として挙げられる⁴⁾。北米では、路面のすべり計測も行われているが、露出路面であるか否かの判定が主であるため、使用する機器や測定方法には統一性がない。

(2) 路面状態計測技術

本節では、国内外で使用されている路面状態の計測技術をレビューし、測定原理で類型化した。

a) 制動停止距離による計測

諸外国での冬期路面を対象としたすべり摩擦係数の計測は、1940年代に空港の滑走路の安全性を確認するために開始された⁵⁾。測定は、砂を搭載した大型トラックを30km/hで走行させ、急制動をかけて停止するまでの時間と距離から路面のすべり摩擦係数を算出する。

b) 測定輪の制動による計測

我が国では、建設省（現国土交通省）等で「路面すべり測定車」を保有し、これを道路管理分野における路面のすべり摩擦係数の標準的な計測装置としている。「路面すべり測定車（LWFT）」は、車両に測定輪（第五輪）を設置した試験車両である（図-2）。測定輪のみを制動（ロック）し、一定荷重で接地させた状態で車両が一定速度で走行した際に発生する摩擦力と荷重の比からすべり摩擦係数を求める。測定輪をロックして計測する方式は、測定の信頼性は高いが、車両に大幅な改良を要するため高価で、タイヤ制動箇所にて計測することから路面のすべりやすさを連続測定できないことが欠点である。

c) 加速度計による計測

加速度計は、車両が急制動した場合に発生する加速度（減速度）から路面のすべり摩擦係数を算出する。加速度計の長所は、機器が安価で設置に際し車両に特別な改造を必要としない。短所は、オペレータ及び車両の違いによる影響を受けやすいこと、交通量の多い道路での使用に適さないこと、地点での測定であること及び道路勾配が測定値に影響を与えることが挙げられる⁶⁾。



図-3 Traction Watcher One (TWO)

d) スリップ率による計測

走行車両の対路面速度とタイヤの回転速度に差がある場合をスリップ率のあるすべり摩擦状態という⁷⁾。タイヤが自由に路面上を転がっている場合のスリップ率は0%で、車輪がロックされた状態はスリップ率100%となる。なお、スリップ率を利用した方式は、スリップ率固定方式とスリップ率変動方式がある。前者の例として、TWO (Traction Watcher One)（図-3）等がある。TWOの測定輪は2輪あり、1つの車輪がもう1つの車輪より遅く回転し、遅く回転する車輪から発生した抵抗力からすべり摩擦係数を計算する⁷⁾。比較的安価だが、特殊な専用タイヤを用いることが欠点である。一方、後者のスリップ率変動方式では、ノルウェーで用いられているRoAR (Road Analyzer and Recorder) Mark IIIやOSCAR (Optimum Surface Contamination Analyzer & Recorder) がある。RoAR

Mark IIIは20～130 km/hで測定できる他、機器単独又は車両牽引による測定可能だが、機器コストは著しく高い。OSCARは、RoAR Mark IIIの測定値検証用として世界に1台だけ存在する。

e) 横力による計測装置

タイヤが車両の進行方向と同一方向に回転している時に、タイヤ面に直角方向に外力が働いた場合、タイヤの接地面でこの力に抵抗する横力（side force）が働く。この横力と輪荷重の比から横すべり摩擦係数を算出する。具体的には、測定輪を進行方向に対して一定の角度（slip angle）を与え、走行しながら測定輪にかかる横力を計測する。



図-4 Sideway-force Routine Investigation Machine (SCRIM)

横力による代表的な測定装置には、英国で開発されたSCRIM（Sideway-force Routine Investigation Machine）⁸⁾がある（図-4）。測定輪は前輪と後輪の間に設置され、測定輪のスリップ角は20度に固定されている。SCRIMは連続測定が可能だが、測定輪にかかる大きな横力に対抗するため計測車両が大きい必要がある。また、測定部と本体の補強が大きく、結果として計測車両が高額になることが欠点である。



図-5 Continuous Friction Tester (CFT)

近年、SCRIMの欠点である大きな横力を解消する計測装置が開発されている。CFT（Continuous Friction Tester）

（図-5）は、フレームに保持された回転可能な測定輪を牽引する構造で、測定輪のスリップ角を1～2度と小さくすることで測定機構及び牽引車両の小型化に成功している。CFTによって計測されるすべり抵抗値は、装置開発者の名前からHFN（Halliday Friction Number）と呼ばれている。値は、測定輪が空転する横力無負荷状態をHFN0、乾燥した舗装路面（路面温度-17.8℃）における横力負荷状態をHFN100とし、その間を100等分した整数値である。CFTは、米国及びカナダの一部の州、スウェーデン等で約80台が導入されている（2012年6月現在）。CFTは、走行しながら0.1秒間隔で連続測定が可能だが、横力を計測する方式の短所として、牽引車両のステア角度が変化すると測定輪のスリップ角が変化して測定値に影響する。そのため、ステア角が±14度以内で路面のすべり抵抗値を計測し、ステア角の影響を補正している。

f) タイヤ振動や車両挙動による計測

近年では、車両の電子制御技術が高度化し、走行状態を監視・制御するセンシングデバイスが数多く搭載されている。タイヤ振動や、タイヤにかかる微細な荷重や車両挙動から路面状態を判別する技術開発が進んでいる。例えば、路面と唯一接している部品であるタイヤにセンシング機能を付加し、タイヤの振動の波形特性から路面状態を判別するといった研究開発が進められている⁹⁾。他にも、タイヤと路面間に作用する3軸方向力と、制動時のブレーキ力を精緻に計測するMASS車（Multi-Axial Sensing System Vehicle）¹⁰⁾、ABSの作動情報をサーバーに送信し、車両周辺の最新及び過去のABS作動情報と過去のスリップ事故発生情報を発信する取り組み¹¹⁾等、数多くの研究開発が行われている。

車両そのものをセンサーとした路面状態の把握には、現在のところ車両の挙動データを精密に測定できる特殊車両と装置を必要とする他、路面状態の判別精度の検証が不十分のため、実用段階に至っていない。今後、汎用性のある技術開発が期待される。



図-6 赤外線式非接触センサー

g) 非接触式センサーによる計測

近年では、タイヤと路面の接触を要しない非接触式セ

ンサーの開発が進んでいる。測定機構を設ける必要が無く、停止状態でも計測できるメリットがある。計測には、近赤外線（図-6）¹²、可視光¹³及びマイクロ波放射計¹⁴を用いたセンサーの開発が進んでいる。近赤外線による計測装置は、欧州のロードアイディア・プロジェクト（<http://www.roadidea.eu/default.aspx>）で試験が行われ、加速度計の計測値と良好な相関を示したことが報告される¹³など、欧米での試験検討が進められている。

3. 路面すべり計測機器の比較

(1) 試験対象機器の選定

著者らは、上記レビューを踏まえ、日本の道路分野における路面のすべり摩擦係数の標準的な機器である路面すべり測定車（LWFT）の他、加速度計（ACC）、連続路面すべり抵抗値測定装置（CFT）及び非接触センサー（IR）を選定した。本報では、2012年1月に行った比較試験の結果を例として紹介する。

(2) 試験方法



図-7 苫小牧寒地試験道路



図-8 試験道路周回路に作製した各種路面

当研究所所有の苫小牧寒地試験道路（図-7）において上記計測機器を用いた比較試験を実施した。比較試験は、試験道路周回路の直線部分における乾燥路面の他、湿潤路面、圧雪路面及び氷膜路面（図-8）を人工的に作製し、当該路面上を各計測機器が走行して路面状態の評価を行

った。乾燥路面（L=600m）は、細粒度ギャップアスコンによる舗装路面とした。湿潤路面（L=600m）は、乾燥路面に散水車で散水して作製した（水膜厚：0.5～1.0mm）。圧雪路面（L=600m）は、舗装上に厚さ約15cm（平坦性：20mm以下）に敷きならした雪の上を300台の通過車両を走行させて作製した。氷膜路面（L=600m）は、気温低下時に散水して凍結させた（膜厚：0.5～1.0mm）。

比較試験実施時の気象条件は、天候が概ね晴れ又は曇り、気温-16.9℃～4.9℃、路面温度-9.2℃～6.8℃であった。各装置を搭載した試験車両は、約40km/hで走行しながら計測を行った。計測項目は、すべり摩擦係数（ μ ）、すべり抵抗値（HFN）、気温、路温、路面状態及び時刻とした。

LWFTとACC搭載車は、あらかじめ指定した地点において試験輪又は車両に約1秒間の急制動を掛け、すべり摩擦係数を計測した。一方、CFT及びIRを搭載した車両は試験路を連続的に計測し、他の計測装置の計測値と比較ができるように、指定した地点でマーキングした。

(3) 試験結果

当該比較試験において各装置で取得した合計サンプル数は、LWFT、ACC、CFT、IR各々で176個であった。表-1及び図-9に、取得した測定結果を装置別・路面別に基礎統計量と箱ひげ図で示している。LWFTの計測結果は、平均値（ μ LWFT×100）が15（氷膜）から83（乾燥）の範囲で推移した。ACCの計測結果は、平均値（ μ ACC×100）が19（氷膜）から53（乾燥、湿潤）の範囲で推移した。CFTの計測結果は、平均値（HFN）が40（氷膜）から101（乾燥、湿潤）で推移した。IRの計測結果は、平均値（ μ IR×100）が30（圧雪）から80（乾燥）、の範囲であった。計測値の標準偏差は、乾燥におけるACC、圧雪におけるLWFT・IR、氷膜におけるIRが大きな値となった。

標準偏差が大きくなった原因として、圧雪路面が均一でなかったことに加え、ACCでは、計測時の急制動操作を運転者が行うため、制動操作（ブレーキペダルの踏み方）のばらつきが影響したものと考えられる。また、IRでは、センサー内部で演算処理を行っており、計測値の出力に4～7秒の範囲でタイムラグが発生していることが認められた。そのため、値が大きくばらついたと考えられる（図-10）。

図-11は、LWFTと他の計測装置の相関を示す。その結果、CFTの決定係数（ R^2 ）が0.69と最も高く、比較的良好的な相関が認められた。他方、ACCは決定係数（ R^2 ）が0.58、IRは決定係数（ R^2 ）が0.53に留まった。ACC及びCFTの決定係数（ R^2 ）は、過去の試験結果¹⁵（ $R^2>0.7$ ）と比べて低くなったが、ACCの近似式は2011年冬期の結果とほぼ同じであり、CFTについても2011年冬期と類似した近似式となった。

表-1 計測結果の基礎統計量

路面状態	乾燥				湿潤				圧雪				氷膜			
	LWFT ($\mu \times 100$)	ACC ($\mu \times 100$)	CFT (HFN)	IR ($\mu \times 100$)	LWFT ($\mu \times 100$)	ACC ($\mu \times 100$)	CFT (HFN)	IR ($\mu \times 100$)	LWFT ($\mu \times 100$)	ACC ($\mu \times 100$)	CFT (HFN)	IR ($\mu \times 100$)	LWFT ($\mu \times 100$)	ACC ($\mu \times 100$)	CFT (HFN)	IR ($\mu \times 100$)
データ数	48	48	48	48	64	64	64	64	32	32	32	32	32	32	32	32
平均値	83	53	101	80	49	53	101	75	22	28	53	30	15	19	40	32
中央値	83	55	101	80	49	54	102	76	17	29	52	27	15	19	40	16
標準偏差	4.0	10.0	3.2	0.6	3.2	5.9	2.6	9.9	10.2	4.3	3.9	14.9	2.1	1.0	4.0	28.2
最大値	93	67	111	81	59	64	106	82	52	35	62	82	20	20	53	80
最小値	77	24	92	79	44	14	94	19	13	13	45	14	12	16	30	12
75パーセン タイル	86	59	103	80	52	56	103	80	26	32	56	31	17	20	42	53
25パーセン タイル	80	52	98	80	47	52	100	74	15	26	51	23	14	18	38	14

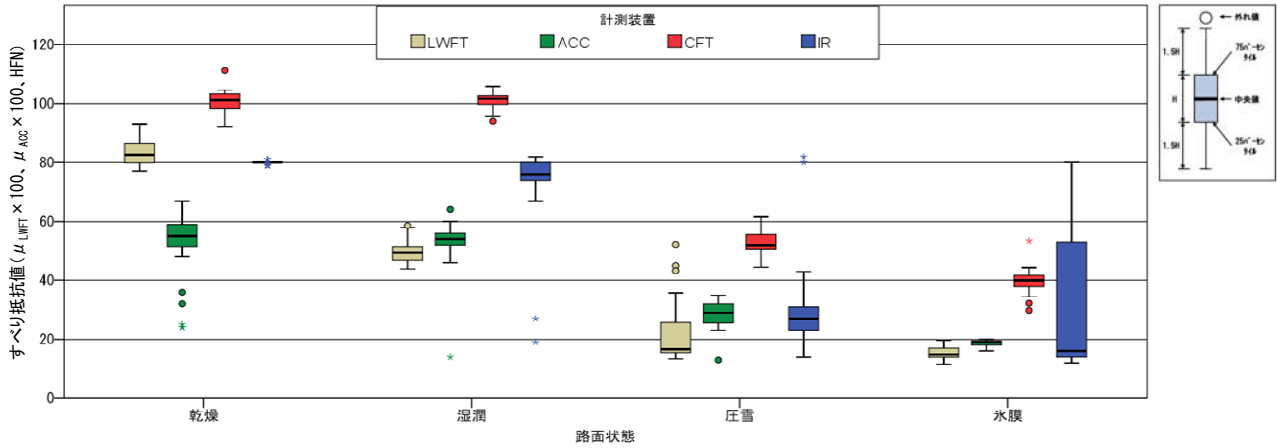


図-9 路面状態別計測値の箱ひげ図

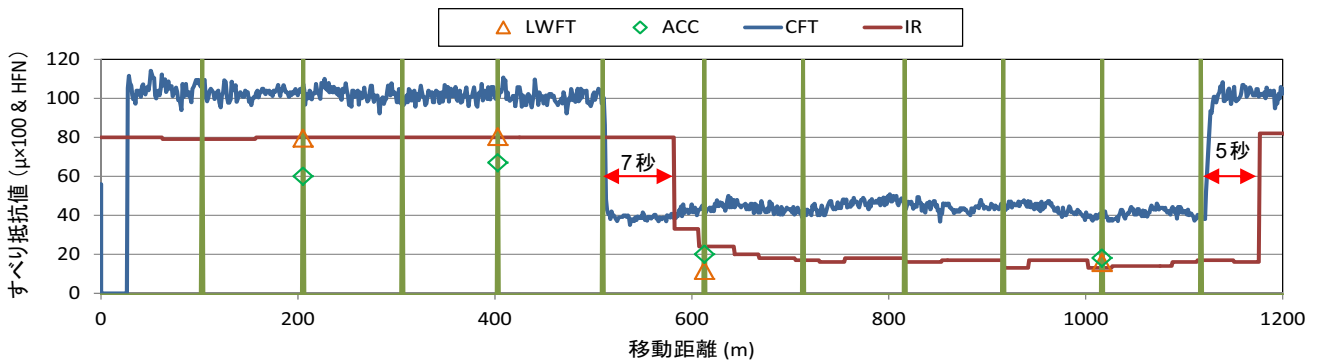


図-10 平成 24 年 1 月 25 日の試験結果 (乾燥・氷膜路面)

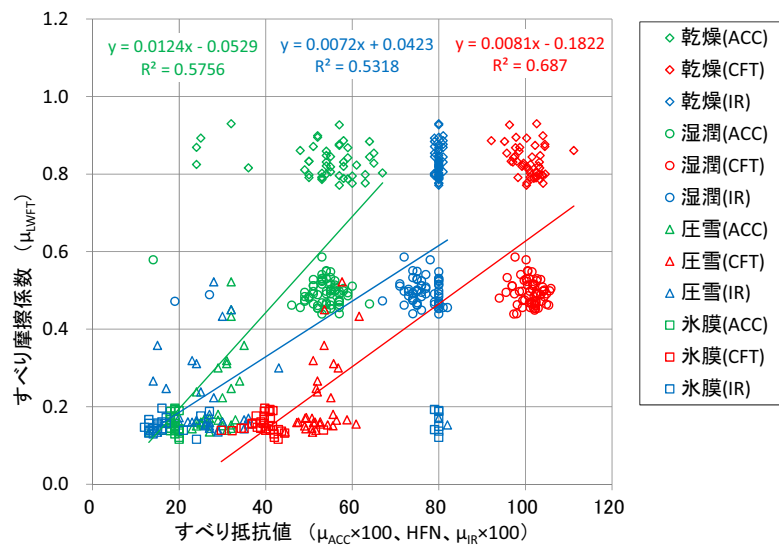


図-11 LWFT と他の計測機器の相関関係

4. まとめと今後の課題

著者らは、我が国の地域特性に適した冬期道路管理水準・サービス水準の検討に資するため、各国における冬期路面管理基準の設定状況、測定手法及び活用方法について検討した。

冬期路面管理基準については、日本型、欧州型（定性的な基準設定）、欧州型（定量的な基準設定）、北米型の4区分に大別されることを確認した。日本では、沿道状況や交通量に応じた管理目標を設定していること、緯度の割に多雪寒冷な気象条件下にあることを考慮すると、路面管理にすべり計測や定量的な基準を導入することを検討する場合、主に北欧4か国のすべり計測方法・基準設定を参考に検討するのが望ましいと考えられる。

路面状態計測技術の開発・導入状況については、国内外で使用されている計測技術をレビューし、測定原理ごとに類型化した。特殊な車両または測定タイヤを必要とする装置、測定輪の負荷による車両の大型化、地点のみの計測など、計測の汎用性や連続性の面で課題があったが、近年では道路巡回車に設置可能で、計測に特別な操作を要しないで連続測定可能な装置の開発及び実用化が進められている。また、近年では測定機構を設ける必要が無く、タイヤと路面の接触を要しない非接触式センサーの開発も進められている。

路面すべり計測機器の比較試験の結果から、CFTの測定するすべり抵抗値は路面すべり測定車の測定値と良好な相関関係があり、また、路面状態の変化も的確にとらえることが可能であることを確認した。ステアリング角による制約はあるが¹⁶⁾、現時点では日本の道路条件下で最も信頼性と実用性の高い計測装置と考えられる。

路面のすべり計測分野については、これまでと同様に今後も様々な技術開発が進むと考えられる。今後も、新たな計測装置の特性（実用性や測定の信頼性、長所と短所）を継続的に調べるため、机上検討や比較試験等を行い、技術の進展に柔軟に対応していく必要がある。特に、非接触式センサー（IR等）に関しては、カーブ区間や停止状態で路面状態を評価できることを踏まえると、冬期の道路管理上特に注意が必要なカーブ区間や交通量の多い都市部の交差点などの路面状態の評価の有用性は高い。現時点ではタイムラグ等の技術的課題はあるが、冬期道路管理分野において当該装置の導入が今後進むものと考えられる。そのため、今後も非接触式センサーを含めた路面のすべり計測技術進展の動向把握並びに比較検証等を継続的に実施していく所存である。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路構造令の解説と運用（改訂版）、2004年
- 2) 北海道開発局：冬期路面管理マニュアル（案）、1997年
- 3) PIARC Technical Committee 3.4 - Winter Maintenance: Snow & Ice Databook - 2006 Edition, 2006.
- 4) Ontario MOT : Probabilistic Models for Discriminating Roads Surface Conditions Based on Friction Measurements, 2008.
- 5) Al-Qadi et al.: Feasibility of Using Friction Indicators to Improve Winter Maintenance Operations and Mobility, NCHRP Web Document 53 (Project 6-14): Contractor's Final Report, 2002.
- 6) Baard N.: The use of Friction Measurement Techniques in Winter Maintenance in Norway, 11th International Winter Road Congress, CD-ROM, 2002.
- 7) 小野田：路面のすべり、アルファルト第46巻第214号、ISSN0912-0793、pp.3-10、2003年
- 8) Hosking, J R et al.: Measurement of Skidding Resistance (Part I: Guide to the Use of SCRIM), Transport and Road Research Lab., Report Number: TRRL LR 737, 1976.
- 9) 花塚他：センシングテクノロジータイヤによる路面状態判別—冬季道路管理への活用—、雪氷研究大会（2009・札幌）、2009年
- 10) 藤本他：MASS 車によるすべり摩擦と道路雪氷との関係、日本雪工学会誌Vol.23No.4（Ser.No78）、pp.26-35、2005年
- 11) 塚田他：プローブ情報を活用した安全運転支援システムの開発—積雪寒冷地域のスリップ地点を対象として、第39回土木計画学研究発表会（春大会）、CD-ROM、2008年
- 12) Haavasoja T. et al.: Friction as a Measure of Slippery Road Surfaces, 15th SIRWEC Conference, CD-ROM, 2010.
- 13) ヌアスムグリアリマス他：光学センサーを用いた路面凍結検知計開発の研究、北海道の雪氷第28号、2009年
- 14) 渡邊他：マイクロ波放射計を用いた路面状態自動判別システムの開発、雪氷73巻4号、pp.213-224、2011年
- 15) 切石他：冬期路面状態評価手法の比較試験について、寒地土木研究所月報第702号、pp.50-55、2011年
- 16) Transportation Association of Canada: Winter Maintenance Performance Measurement Using Friction Testing, 2008.