MASS 車によるすべり摩擦と道路雪氷との関係

Relation between Sliding Friction and Snow/Ice on Winter Roads using Multi-Axial Sensing System Vehicle

藤本 明 宏^{*1}・渡 邊 洋^{*2}
Akihiro Fujimoto Hiroshi Watanabe
福 原 輝 幸^{*3}・武 士 俊 也^{*4}
Teruyuki Fukuhara Toshiya Takeshi
小 林 一 治^{*5}・宮 崎 長 生^{*6}
Kazuharu Kobayashi Nagao Miyazaki
小 川 明 子^{*7}・浅 野 基 樹^{*8}
Akiko Ogawa Motoki Asano

SYNOPSIS

The purpose of this study is to investigate the validity of slide-friction measurement on winter roads by the MASS vehicle from joint tests using a slide friction-measurement bus with an instrument-embedded wheel mounted to its body (5th wheel bus) and to investigate the effect of physical properties of the snow/ice on a road surface on the sliding friction coefficient.

It is concluded that the sliding friction coefficient by the MASS vehicle agrees with that by the 5th wheel bus on horizontal roads, and that the effect of road inclination on the sliding friction coefficient is negligible for the MASS vehicle but significant for the 5th wheel bus. Moreover, it is found from an indoor experiment and the present field tests that the value of sliding friction coefficient depends on the height of the sherbet layer on a road surface. In case of the no contact of tires and pavement surface because of a deep sherbet layer, the sliding friction coefficient decreases with the increment of the mass ice content in the sherbet.

1. はじめに

冬期の路面状態は地形や気象などの自然的影響に加えて、凍結防止剤の散布や車両通過などの人為的影響によっても、多様に変化する。そのために、橋梁道路やトンネル坑口付近などでは局所的に滑り易い路面が発生する¹⁾。降雪・圧雪・凍結・融解に起因する路面状態の多様な変化は、除雪車の最適な出動と凍結防止剤の散布時期・量の決定を困難にさせている。従って、今後道路管理の高度化および効率化を取り組む上で、正確な路面状態の把握および予測が重要な課題となる。

路面状態を表す指標として、種々の道路雪氷分類

法がある。例えば、木下ら^{2), 3)}は北海道、東北および北陸での道路雪氷調査の結果、雪を7種類に分類した。その分類は北海道などの寒冷地で頻繁に出現する道路雪氷に重点が置かれた。一方、青木ら⁴⁾は暖地寒冷地域で適用するように、雪を8分類した。また、前野ら⁵⁾はその分類が地域や機関によって異なることが情報の共有化の妨げになると指摘し、より統合的な分類を作成した。さらに、松沢ら⁶⁾はスパイクタイヤの規制により、普及したスタッドレスタイヤがもたらした非常に滑り易い路面に対応するように、雪を8分類した。加えて、秋田谷ら⁷⁾は雪の質・形態と外見の関係に着目し、雪氷の輝き・

* 1 福井大学大学院工学研究科

* 2 株式会社水工工学研究所

* 3 福井大学工学部

* 4 国土交通省大臣官房付

* 5 土木研究所新潟試験所

* 6 日本電子工業株式会社

* 7 永和住宅株式会社

* 8 北海道開発土木研究所

[本稿受理：2004年12月27日，修正原稿受理：2005年4月25日，討論期限：2006年9月30日]

色、タイヤ跡の状況、雪氷の凹凸による分類法を提案した。しかしながら、これらの分類はいずれも目視によって路面状態を判別する方法であり、判別結果が観測者の主観によって、異なりやすいという難点を抱える。

従って、路面状態の分類をより客観的に把握するためには、目視よりも、むしろ路面のすべり摩擦係数（以下、 μ と呼称）が適していると考え。現在、筆者らは熱収支法に基づいて道路雪氷の物理的な変化を予測するモデルを開発しており、このモデルで路面の滑りやすさを評価するためには、 μ と路面雪氷物性の関係が必要不可欠となる。しかしながら、 μ と路面雪氷物性の観点から路面状態を整理した研究は少なく、路面のすべり摩擦特性を路面管理に適用した例は見当たらない。その要因の一つとして、時々刻々と変化する路面状態のすべりを短時間に測定できるような技術がこれまで未成熟であったことが挙げられる。

現在、日本における μ 計測は車両に特別な測定車輪（垂直昇降型）を装着した大型バス（路面すべり測定車⁸⁾、以下、BUS 車と呼称）が主流である。しかしながら、筆者らの研究により、BUS 車による μ は見かけ上同じ雪氷路面であるにもかかわらず、道路勾配によって異なる値を示すことが分った^{9), 10), 11)}。世界的にも μ 計測技術は十分に確立されておらず、容易で精度の高い技術開発が要求されている¹²⁾。

そこで、本研究では新しく開発された μ センサー（MASS: Multi-Axial Sensing System¹³⁾）を搭載した高精度動的試験車（以下、MASS 車と呼称、日本電子工業製）に注目し、BUS 車との μ 比較野外試験から、MASS 車の実用性について検証を行った。さらに、この野外試験と室内実験から、 μ と路面雪氷物性の関係について、新たな知見を得たのでここに報告する。

2. MASS 車と BUS 車による μ 比較野外試験

2.1 μ 計測車両の概要

(1) MASS 車

Fig.1 に MASS 車による μ 計測の概観を、Fig.2

Fig.1 MASS 車

Fig.2 高精度 4 軸方向 μ センサー

には μ 計測のために搭載されたサスペンション埋め込み型の高精度 4 軸方向 μ センサーの概観を、それぞれ示す。MASS 車は独自に開発したニュートラルスポット・センシング技術¹³⁾により、走行および制動中に生じる懸架装置の内部応力を計測できる。計測される内部応力はタイヤと路面間に働く車両進行方向摩擦力 (F_x)、車両水平方向摩擦力 (F_y)、車両垂直力 (F_z)、および車両軸回転方向の力 (F_b : 制動力) の 4 種類である。また、これらの応力を 0.1msec で計測し、ブレーキ・アクチュエーターの制御により、道路走行しながらリアルタイムに μ 計測ができる。なお、本試験で用いた MASS 車はプリヂストン製のスタッドレスタイヤ (195/65R15) を使用した。

(2) BUS 車

Fig.3 に BUS 車による μ 計測の概観を、Fig.4 に μ 計測のために搭載された垂直昇降式縦横両用型すべり測定装置の概要を、それぞれ示す。本装置は走行中に試験輪（走行輪とは別の第 5 番目の計測用標準冬タイヤ（ダンロップ製 165/80R13）のみ制動を加えたときに発生する路面とタイヤとの間のすべり

Fig.3 BUS 車

Fig.4 垂直昇降式縦横両用型すべり測定装置

摩擦抵抗力を検出する。また、 μ はこのすべり摩擦抵抗力を輪荷重で除すことにより算出される。なお、BUS 車は2000年9月末に(財)日本自動車研究所の水平路にて実施されたすべり摩擦試験車両合同試験(国土交通省、大学などの研究機関が所有する車両との測定精度の同時試験)により、精度検証がなされた⁸⁾。

2.2 水平路における μ 比較

(1) 試験概要

Fig.5に水平路における μ 比較野外試験の概要を、Table 1に本試験における μ 計測条件の一覧(走行速度、測点数、測定回数)を、それぞれ示す。本試験は、2002年1月27日(午前10時~午後0時)に北海道苫小牧試験道路(北海道開発土木研究所実験施設)で実施された。試験道路は直線で水平なアスファルト路面である。路面状態は圧雪と氷板(厚さ ≈ 50 mm)の2種類とし、人工降雪機を用いて、それぞれ作成した。

本試験では、MASS 車と BUS 車(北海道開発土

Fig.5 水平路における μ 比較野外試験の概要
(北海道苫小牧試験道路, 2002/01/27 10 a.m.-0:00 p.m.)

Table 1 水平路における μ 計測条件の一覧

Test vehicle	Road condition	Vehicle speed (km/h)	Measuring point	Test case	Total
MASS	Packed snow	35	2	1	2
		50	2	1	2
		60	2	1	2
	Ice plate	35	2	1	2
		50	2	1	2
		60	2	1	2
BUS	Packed snow	35	2	2	4
		50	2	2	4
		60	2	1	2
	Ice plate	35	2	2	4
		50	2	2	4
		60	2	1	2

木研究所所有)による μ 計測(図中の濃色部分)、気温計測および放射温度計による路面表面温度計測が同時に行われた。また、 μ 計測車両の走行速度は35, 50および60km/hの3種類とした。

(2) 試験結果

Fig.6はMASS 車から得られた μ (μ_m), BUS 車か

Fig.6 μ , 気温および路面表面温度の経時変化
(水平路, 圧雪および氷板路面)

ら得られた μ (μ_b), 気温(T_{air}), 圧雪表面温度($T_{snow-surf}$)および氷板表面温度($T_{ice-surf}$)の経時変化である。まず, T_{air} は試験開始から徐々に上昇し, 午前10時～午前11時までは氷点下(-3～0℃)にあり, それ以降では0～0.5℃の範囲にあった。一方, $T_{snow-surf}$ は午前11時30分まで氷点下にあり, 試験終了時(午後0時)には約1.0℃になった。また, $T_{ice-surf}$ は試験期間を通して, 常に氷点下にあった。

次に, 氷板路面の μ 計測結果に着目する。氷板路面における μ_m (◆)および μ_b (◇)はともに0.12程度であり, 両計測車両の μ は良好に一致した。しかしながら, 圧雪路面における μ_m (●, ▲, ▼)は0.30～0.40の範囲に, μ_b (○, △, ▽)は0.21～0.38の範囲に分布しており, μ_b が μ_m よりも相対的に低い値を示した。なお, 試験当日の天候は曇天で降雪はなかった。

Fig.7はFig.6の結果を μ と走行速度(V_c)の関係で整理し直したものである。圧雪路面に着目すると, $V_c=35\text{km/h}$ における μ_m (●)の平均値は0.38, 50km/hでは0.35, 60km/hでは0.32であり, μ_m は走行速度の増加に伴い低下する。この関係は次式で表される。

$$\mu_m = -2.28 \times 10^{-3} V_c + 0.46 \quad (35 \leq V_c \leq 60 \text{ km/h}) \quad (1)$$

他方, μ_b (○)も走行速度の増加に伴う μ の低下傾向が認められるものの, μ_m (●)と比較していずれの速度においてもバラツキが大きい。また, 氷板路面では, 走行速度の増加に伴う明確な μ の低下は両計測車両とも見受けられず, $\mu=0.12$ であった。

Fig.7 μ と走行速度
(水平路, 圧雪および氷板路面)

2.3 坂路における μ 比較

(1) 試験概要

Fig.8は坂路における μ 比較野外試験の概要を示す。本試験は, 2003年2月3日(午後4時～午後6時)に福井県大野市南六呂師地先の県道26号(未供用道路)で実施された。試験路線は, 縦断勾配6%の直線坂路であり, 除雪路線に指定されていないため, 試験当日は0.50m程度の積雪があった。そこで試験の事前準備として, まずロータリー除雪車を用いて, 厚さ0.15m程度の積雪路面(雪密度(ρ_{snow}) $\approx 300\text{kg/m}^3$)を作成した。その後, 延べ20台程度の車両を通過させ, 厚さ0.10m程度の圧雪層($\rho_{snow} \approx 600\text{kg/m}^3$)を作り, これを試験路面の初期状態とした。

Fig.8 坂路における μ 比較野外試験の概要
(福井県大野市南六呂師, 2003/02/03 4p.m.-6p.m.)

本試験はBUS車とMASS車を交互に走行させて, 同一路面(図中の濃色部分)で登坂時と降坂時の μ を計測した。また, μ 計測後に円管サンプラーを用いて, ρ_{snow} の測定を行った。なお, μ 計測車両の走行速度は30km/hとした。

(2) 試験結果

Fig.9に試験時の T_{air} とサンプリング計測した ρ_{snow} の経時変化を示す。 T_{air} は常に氷点下にあり, 午後6時には-2℃近くまで低下した。また, ρ_{snow} は600～800kg/m³の範囲にあり, 車両の通過に伴い, 徐々に増加する傾向が見られた。なお, 同日の気象状態は曇天で降雪もなく, 日射に伴う圧雪路面の性状変化は見受けられなかった。

Fig.10に登坂における μ_m および μ_b の経時変化を示す。登坂時の結果において, μ_m (●)は0.30前後を推移する。一方, μ_b (○)は0.40から0.57へと増大

傾向にある。この間、 T_{air} はほとんど変化せず、 ρ_{snow} は上述したように微増していることを考慮すれば、 μ は低下傾向にあることが推測され、この μ_b (○)の増加は疑問が残る。また、 μ_m (●)と比較して μ_b (○)は大きく、かつバラツキも大きい。

Fig.11には降坂における μ_m および μ_b の結果を示す。 μ_m (●)および μ_b (○)はともに0.30付近を推移し、両者の差違は登坂時に比べて小さい。

Fig.9 気温と圧雪密度の経時変化

Fig.10 μ の経時変化
(登坂時、圧雪路面)

Fig.11 μ の経時変化
(降坂時、圧雪路面)

次に、Fig.10とFig.11をもとに、両計測車両における登坂時と降坂時の μ の差($\Delta\mu$)について述べる。MASS車の μ は登坂および降坂ともに0.30程度であり、MASS車の $\Delta\mu$ ($\Delta\mu_m$)は概ね0と言える。また、BUS車の $\Delta\mu$ ($\Delta\mu_b$)と比較すると、明らかに $\Delta\mu_m$ よりも $\Delta\mu_b$ の方が大きい。これにより、MASS車の μ 計測の精度はBUS車と比べて十分もしくはそれよりも良く、MASS車は後段での μ 測定ツールとして使うことが出来る。

新潟で行った別の野外試験⁹⁾では降坂時に $\mu_m < \mu_b$ が生じたが、本試験では登坂時にこの傾向が見られた。この原因としては、前回の試験がシャーベット(水べた雪)、あるいは厚さ0.01m程度の圧雪路面で、本試験では厚さ0.10m程度の圧雪路面で、それぞれ行われており、両者における路面状態の相違が考えられる。しかしながら、試験結果の違いおよびBUS車による μ のバラツキに関して、今後検討する必要がある。

3. シャーベット路面の μ 室内実験

冬期の気温が水の融解温度(0°C)を前後する環境下の多雪地帯では、シャーベット路面が頻繁に発生する。しかしながら、シャーベット路面の μ については、未だ不明な点が多い。そこで、人工シャーベットを用いた室内実験を実施し、シャーベット路面のすべり摩擦特性を調べた。

3.1 実験概要

シャーベット路面の μ 室内実験は、恒温実験室に設置されたホイールトラッキング試験器(以下、WT試験器と呼称)を使用して行った。ここで、本研究におけるシャーベットとは、雪氷層内の水が重力排水するような雪氷状態を意味する。

Fig.12にWT試験器の外観を示す。WT試験器は奥行き1.5m、幅2.0mおよび高さ2.0mであり、中央下部に設置した密粒度アスファルト舗装体(L:0.5×W:0.3×H:0.1m)、舗装体上面のシャーベット、その上に装着した試験車輪(スタッドレスタイヤ、165/80R13、ダンロップ社製)、および動力モーターにより構成される。動力モーターの回転運動はシャ

Fig.12 ホイールトラッキング試験器

フトパイプと連動し、試験車輪の往復運動に変換される。この往復運動によって、タイヤがシャーベット路面上を通過する。

実験手順として、まずアイススライサー（削氷機）で作成した人工雪（ $\rho_{\text{snow}} \approx 300 \text{ kg/m}^3$ 、厚さ $\approx 20 \text{ mm}$ ）を舗装体上面に敷設する。そこへ人工雪内に含まれる空気と同じ体積の水（水温 $\approx 0^\circ \text{C}$ ）を加え、質量含水率（ θ_{wat} ）が約70%、換言すれば質量含水率（ θ_{ice} ）が30%程度のシャーベット層を作成する。この状態を初期条件として、WT 試験器を稼動し、試験車輪を規定回数だけ往復させ、質量含水率の異なるシャーベット路面を作成する。その後、シャーベット上の湛水を除去し、BPN (British Pendulum Number: すべり抵抗値) とシャーベットの θ_{wat} を測定する。

次に、測定した θ_{wat} を次式に代入して、 θ_{ice} を求める。

$$\theta_{\text{ice}} = 100 - \theta_{\text{wat}} \quad (2)$$

θ_{wat} は独自に製作した融解型熱量方式¹⁴⁾の含水率計を用いて測定した。Fig.13に含水率計の概要を示

Fig.13 含水率計

す。含水率計はステンレス製の円筒型容器、断熱材、ポリエチレンカップおよびサーミスタ温度計から成る。測定手順として、最初にポリエチレンカップに $T_1 (^\circ \text{C})$ の湯を入れ、湯の質量 $M_1 (\text{kg})$ を測定する。次に、湯を入れたポリエチレンカップの中に $M_2 (\text{kg})$ のシャーベットを入れ、すばやく密閉する。最後に、ポリエチレンカップ内のシャーベットが完全に融けて、平衡状態に達した時の水温 $T_2 (^\circ \text{C})$ をサーミスタ温度計で測定する。これらの測定結果を用いて、 θ_{wat} は参考文献¹⁴⁾から次式で算出できる。

$$\theta_{\text{wat}} = 100 \left[1 - \frac{1}{L} \left\{ \frac{(T_1 - T_2) M_1}{M_2} - T_2 \right\} \right] \quad (3)$$

ここに、 L は融解潜熱である。なお、円筒型容器内のポリエチレンカップは断熱材で完全被覆され、熱損失は次式の中では考慮していない。また、BPN は英国式ポータブル・スキッド・レジスタンス・テスターより求められ、温度補正がなされる¹⁵⁾。また、BPN 測定時にシャーベットの飛散は生じなかった。

実験条件として、室内温度は -2°C に設定し、車輪の往復回数は20, 40, 100, 500, 1000, 2000および3000回の7種類とし、車輪の通過速度は 0.3 km/h とした。

なお、 μ は温度補正した BPN¹⁵⁾を用いて、次式により換算される（以下、BPN は温度補正後の値を表す）。

$$\mu = \frac{3 \times \text{BPN}}{300 - \text{BPN}} \quad (4)$$

3.2 実験結果

(1) 車輪の往復回数と質量含水率

Fig.14に車輪の往復回数（ N_w ）とその時点におけるWT 試験後のシャーベットの θ_{ice} の関係を示す。なお、同図には θ_{wat} と N_w の関係を併せて示す。同図より、WT 試験前の初期質量含水率（ θ_{ice0} ）はいずれも30%程度であり、試験が一定の初期条件で行われたことが知れる。 θ_{ice} は初期から $N_w < 100$ の間で急激に増加し、 $N_w \geq 100$ に対して微増する。最終（ $N_w = 3000$ ）の θ_{ice} は75%となる。この θ_{ice} の増大の主要

Fig.14 車輪の往復回数と質量含水率

因として、 $N_w < 100$ ではタイヤの通過によって、シャーベット層に含まれる水が飛散したことに加えて、タイヤの軸荷重 (150kgf) による圧密が挙げられる。他方、 $N_w \geq 100$ での θ_{ice} の僅かな増加は、タイヤによる圧密と室内温度 (-2°C) の影響を受けて、シャーベット層内部の水が時間経過とともに凍結したためと考えられる。

(2) 車輪の往復回数と BPN (μ)

Fig.15 に N_w と BPN および μ の関係を示す。実験開始後、BPN は N_w の増加に伴って急激に低下し、

Fig.15 車輪の往復回数と BPN (μ)

Fig.16 BPN (μ) と質量含水率

$N_w \geq 500$ では25を推移する。また、BPN と N_w の分布形は、 θ_{wat} と N_w のそれと酷似しており、 μ (BPN) と θ_{ice} (θ_{wat}) は密接な関係にあることが示唆される。なお、 θ_{ice} が55%以下では、BPN 測定時にシャーベットが飛散したため、その抵抗を受けて、BPN の正確な測定は出来なかった¹⁶⁾。

(3) BPN (μ) と質量含水率

Fig. 16 に BPN および μ と θ_{ice} の関係を示す。乾燥路面における BPN は70、湿潤路面では45、また氷板路面では13であった。シャーベット路面の BPN は、 θ_{ice} が59~72%の範囲において θ_{ice} の増大に伴い、35から29に低減する。また、 $N_w \geq 500$ における BPN は24~25であった。

4. MASS 車による μ 野外試験

4.1 試験概要

Fig.17は2004年2月20日 (午前6時~午後0時) に新潟県中頸城郡妙高村地先で実施した MASS 車による μ 野外試験の概要を示す。試験路線は直線で水平な基幹農道であり、冬期間は使用されない。試験当日は晴天であり、気温は午前7時までは -3°C を推移し、それ以降から上昇し始め、午後0時に 7°C になった。

本試験は、シャーベット路面、湿潤路面および氷板路面を対象とし、MASS 車による μ 計測および雪氷物理測定が行われた。Fig.17に示すように、シャーベット路面の試験は試験区間1の3ヶ所 (図中の濃色部分) で、湿潤および氷板路面の試験は試験区間2の1ヶ所 (図中の濃色部分) で、それぞれ実施された。特に、シャーベット路面での試験は、シャー

Fig.17 MASS 車による μ 野外試験の概要 (新潟県中頸城郡妙高村, 2004/02/20 6a.m.-0p.m.)

ベット厚さ(h_s)と θ_{ice} を変えながら繰返し行った。

次に、シャーベット路面の作成方法を述べる。本試験路線は試験前日に0.50m程度の積雪があった。そこで、試験区間1では、ロータリー除雪車を用いて、路面上に厚さ0.10m程度の積雪が残るように除雪した。路面上の積雪は、試験当日が晴天であったことから、日射によって融解が進行し、シャーベット状態になった。さらに、日中の急激な温度上昇によって、シャーベットが融解したところは、路肩の積雪を試験路線へ持ち込み、シャーベット状態にした。シャーベット路面の μ 試験は午前7時～午後0時に亘って行われた。

氷板および湿潤路面の作成方法は、以下の通りである。試験区間2では、試験前日の夕方にロータリー除雪車で積雪を除去し、その後散布車で路面上に散水を行った。この状態を試験当日の早朝まで放置することで、試験区間2で氷板路面が形成されたので、氷板路面の μ 試験は日射の影響がない午前6時～午前7時に行われた。また、この氷板路面は午前9時には完全に融解し、湿潤路面となったので、湿潤路面の μ 試験は午前9時～午前10時に行われた。

試験手順は、まずMASS車が試験路線を走行し、 μ 計測を行う。特に、シャーベット路面の試験では、MASS車の通過後に h_s および θ_{wat} を測定する。 θ_{wat} は3.1の室内実験で使用した含水率計を用いて測定した。また、 θ_{wat} を式(2)に代入して、 θ_{ice} を求めた。なお、MASS車の走行速度は30km/hとした。

Fig.18 μ と質量含水率

4.2 試験結果

(1) μ と質量含水率

Fig.18に μ と θ_{ice} の関係を示す。まず、氷板路面($\theta_{ice}=100\%$)の μ は0.29～0.38であった。この値は2.2(2)に記した μ 比較野外試験における氷板路面の μ (0.12)に比較して大きい。これは本試験の氷板路面が完全なつるつる状態ではなく、所々に氷粒を含むような凹凸の多い氷板路面であったことが要因として挙げられる。また、湿潤路面($\theta_{ice}=0\%$)の μ は0.61であった。

次に、シャーベット路面の結果に着目する。同図より、シャーベット路面の μ と θ_{ice} の関係は2つに分類できる。1つは μ が0.70前後であり、 θ_{ice} に依存しない場合である。これは、 μ 計測時にタイヤがシャーベットを押し退けてアスファルト舗装と接触したことにより、タイヤとアスファルト舗装との間のすべり抵抗が計測されたと考えられる。もう一つは μ が θ_{ice} に依存し、 θ_{ice} の増大に伴い低下する場合であり、シャーベット層が厚いために μ 計測時にタイヤがアスファルト舗装上に接触しない状況で起こる。このとき、 μ はシャーベットとタイヤとのすべり抵抗が計測されたと考えられ、3.2の室内実験結果(Fig.16)と同じように、 θ_{ice} の増大とともに減少する。

以上より、 μ と θ_{ice} の関係は次式で表される。

$$\mu = \begin{cases} 0.70 & \text{for tires contact pavement} \\ 0.23 \exp(-0.035 \theta_{ice}) + 0.38 & \text{for no contact} \end{cases} \quad (5)$$

なお、 μ と θ_{ice} の関係については、今後さらにデータを蓄積し、検討を進める必要がある。

Fig.19 μ とシャーベット厚さ

(2) μ とシャーベット厚さ

Fig.19はシャーベット路面における μ と h_s との関係である。同図より、 $h_s \geq 15\text{mm}$ のシャーベット路面における μ は h_s に依存せず、0.40前後である。一方、 $h_s < 10\text{mm}$ の場合、 μ は上述の4.2(1)の理由から、 θ_{ice} に関係なく0.70前後となり、湿潤路面の μ と同程度である。また h_s が10～15mmの範囲では、 μ は h_s の増大に伴い低下する。この μ の低下は、 h_s が厚くなるほどタイヤとアスファルト舗装との接触面積が小さくなるためと推察される^{17), 18)}。

以上より、 μ と h_s の関係をまとめると、次式で表される。

$$\mu = \begin{cases} 0.70 \pm 0.05 & \text{for } 0 < h_s \leq 10 \text{ mm} \\ -0.06h_s + 1.30 \pm 0.05 & \text{for } 10 < h_s \leq 15 \text{ mm} \\ 0.40 \pm 0.05 & \text{for } 15 < h_s \leq 30 \text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

なお、上式は θ_{ice} が40～60%の範囲で得られたものである。

5. おわりに

路面雪氷状態予測モデルを構築するにあたり、 μ と路面雪氷物性との関係の解明が必要不可欠であるが、日本における μ 計測技術は十分に確立されていない。特に、シャーベット路面の性状は広範囲に変化し、その μ は依然として不明な点が多い。

そこで、本論文では、①本研究で提案するMASS車とこれまでの μ 計測車(BUS車)による水平路と坂路における μ 比較野外試験を実施し、MASS車の実用性を明らかにすること、②ポータブル・スキッド・レジスタンス・テスターを用いた μ 室内実験およびMASS車を用いた μ 野外試験より、シャーベット、氷板および圧雪路面の μ 特性を明らかにすること、を試みた。

その結果、以下の結論を得ることができた。

1. MASS車とBUS車の μ 比較野外試験より、
 - (1) 水平路では、MASS車とBUS車の μ は概ね一致する、
 - (2) MASS車から得られる μ は道路勾配に依存せず、そのバラツキは小さい。一方、BUS車から得られる μ は道路勾配および雪氷路面状態に依存し易く、そのバラツキは大きい、

- (3) 以上より、 μ 計測に関して、MASS車はBUS車に比べて信頼性が高く、 μ 測定ツールとして期待できる、ことが分った。

2. シャーベット路面の μ 特性に関しては、 μ 室内実験より、

- (4) シャーベット路面の μ は質量含水率の増加に伴い低下する、ことが分った。

また、 μ 野外試験より、

- (5) 走行速度30km/hで、質量含水率が40～60%の場合、シャーベット路面の μ は主にシャーベット厚さに依存し、10mm以下で0.70前後(湿潤路面と同程度)となり、15mm以上では、0.40前後に減少する、

- (6) (5)より、シャーベット路面の μ はタイヤが舗装と接触するか否かで、大きな違いが生じる、

- (7) 特に、タイヤが舗装と接触しない場合、シャーベット路面の μ は質量含水率の増加に伴い低下しながら、氷板路面の μ に漸近し、室内実験の結論(4)と同じ性状を示す、ことが分った。

3. 氷板および圧雪路面の μ 特性に関しては、MASS車の μ 計測より、

- (8) 氷板路面の μ は走行速度35～60km/hの範囲において、走行速度に依存せず0.12程度である、

- (9) 圧雪路面(600～800kg/m³)の μ は走行速度35～60km/hの範囲において、走行速度の増加に伴い0.38から0.32に低減する、ことが分った。

今後は、シャーベット路面の μ 野外試験を継続し、 μ と雪氷物性の相互関係の解明に努めるとともに、車両の走行速度と μ の关系到重点を置いて、雪氷路面のすべり摩擦特性をより詳しく調べる。

最後に、本研究を遂行するに当たり、一般道路の使用に関して福井県大野土木事務所に、多大なご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡邊 洋・福原輝幸：サーマルマッピングによる冬期道路の路面温度特性，日本雪工学会誌，Vol.14，No.2，pp.11-18，1998.
- 2) 木下誠一・秋田谷英次：北海道における路面積雪調査Ⅰ，低温科学，物理偏，27，pp.163-179，1969.
- 3) 木下誠一・秋田谷英次・田沼邦雄：道路上の雪氷の調査Ⅱ，低温科学，物理偏，28，pp.311-323，1970.
- 4) 青木忠男・下村忠一・石平貞夫・金子英雄・櫛彦二郎：雪氷対策調査（Ⅰ），建設省土木研究所資料，1306号，pp.1-64，1977.
- 5) 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，物理偏，46，pp.119-133，1987.
- 6) 松沢 勝・加治屋安彦・荒井秀方・川端 隆：93/94 全道冬期路面状況調査について，寒地技術論文・報告集，第10回寒地技術シンポジウム，pp.70-75，1994.
- 7) 秋田谷英次・山田知充：目視による道路雪氷の分類と活用，寒地技術論文・報告集，第10回寒地技術シンポジウム，pp.63-69，1994.
- 8) 土木研究所新潟試験所：路面すべり測定車の性能評価に関する試験及びデータ整理・分析業務報告書，2001.
- 9) 安藤達弥・福原輝幸・横山孝男・渡邊洋・井良沢道也・林 健一・荒川智之：冬期道路の路面凍結予測に関する研究－MASS センサーを用いたすべり摩擦計測に関する検討－，寒地技術論文・報告集，第17回寒地技術シンポジウム，pp.191-196，2001.
- 10) 渡邊 洋・藤本明宏・武士俊也・樋口徳男・玉置 肇・福原輝幸：MASS 車による圧雪路面のすべり摩擦計測に関する検討，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，V-519，pp.1035-1036，2004.
- 11) 渡邊 洋・藤本明宏・武士俊也・小林一治・宮崎長生・玉置 肇・福原輝幸：雪氷路面における MASS 車を用いたすべり摩擦計測，寒地技術論文・報告集，第20回寒地技術シンポジウム，pp.193-197，2004.
- 12) Imad, L. et al. : Feasibility of Using Friction Indicators to Improve Winter Maintenance Operations and Mobility, NCHRP Web Document 53, Project6-14, 2002.
- 13) Nagao Miyazaki, Shu Ueno, Hajime Tamaki, Ryoji Hironaka, Tomohiro Yamaguchi and Chunliang Li : Development of High-Quality Multi-Axial Sensing System (MASS) for Direct Measurement of 4 Directional Forces and Coefficient of Friction in Real Time, SAE 2001 World Congress, Detroit, Michigan, 2001.3.
- 14) 河島克久・遠藤 徹・竹内由香里：熱量式による簡易積雪含水率計の試作，防災科学技術研究所研究報告，第57号，pp.71-75，1996.
- 15) 松野三郎・山下弘美：舗装技術の質疑応答第2巻，建設図書，1974.
- 16) 小川明子・福原輝幸・渡邊 洋・藤本明宏：シャーベット路面のすべり摩擦特性，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，V-518，pp.1033-1034，2004.
- 17) 市原 薫・小野田光之：路面のすべりとその対策，技術書院，1997.
- 18) 桜井俊男・広中清一郎：トライボロジー摩擦・潤滑・磨耗，共立出版株式会社，1984.