

Characteristics of Sliding Friction Coefficient on Slushy Road Surface

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-09-02 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 藤本, 明宏, 渡邊, 洋, 齊田, 光, 福原, 輝幸, Fujimoto, Akihiro, Watanabe, Hiroshi, Saida, Akira, Fukuhara, Teruyuki メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/7708

シャーベット路面のすべり摩擦特性

Characteristics of Sliding Friction Coefficient on Slushy Road Surface

藤 本 明 宏^{*1}・渡 邊 洋^{*2}
Akihiro Fujimoto Hiroshi Watanabe
齊 田 光^{*1}・福 原 輝 幸^{*1}
Akira Saida Teruyuki Fukuhara

SYNOPSIS

The sliding friction coefficient, μ , on a slushy road surface was formalized based on the results obtained from past 4-year field experiments using a vehicle mounted a Multi-Axial Sensing system.

The characteristics of the formulas are (1) the dependence of vehicle speed on μ can be disregarded in the range 30 to 60 km/h, (2) the thickness of ice component in the slush layer is most appropriate factor that minimizes the variance of μ , compared with the mass ice content or thickness of the slush layer, (3) μ decreases exponentially with the increase in the thickness of ice component in the slush layer.

Keywords : sliding friction coefficient, slushy road, physical properties, snow/ice condition model on road

1. はじめに

路面すべり摩擦係数 μ は路面の危険性(すべり易さ)を最も客観的に数値化したものであり、スリップ事故と密接に関わる物理量と考えられる。従って、 μ は機械除雪や凍結防止剤散布の効果を検証するための有効な指標となる。さらに μ を誰もが分かりやすい形式で公開できれば、道路利用者の安全意識と運転レベルの向上が期待できる。そのために筆者らは μ 予測モデルの開発を行っている。しかしながら、走行時の μ はタイヤ-雪氷層-路面間のすべり抵抗(雪氷層が厚いとタイヤ-雪氷層間のすべり抵抗)を反映しており、必ずしも従来のポータブル・スキッド・レジスタンス・テスター、加速度計、回転式すべり抵抗測定器(DFテスター)から得られた値に一致するとは限らない。いずれにせよ、 μ 測定は容易でないため、従来は視覚的に捉えた雪氷状態と μ の関係が研究のテーマとなっていた。しかしながら、周知のとおり μ のばらつきは大きく、道路雪氷分類による μ の推定は定量的には信頼性に欠ける。この理由は同じ雪氷温度であっても μ が

走行速度に加えて、雪氷層の厚さ、密度、質量含水率などにより変化するからである¹⁾。

筆者らは、 μ 予測モデルの開発を最終目標として、これまでに車両熱²⁾や凍結防止剤散布^{3), 4)}に係わる熱フラックスを定式化し、大気-雪氷層-舗装間の熱・水分移動による路面雪氷状態モデル^{5)~7)}を構築した。その結果、雪氷層の厚さ、密度、質量含水率を求めることができるようになった。しかしながら、 μ 予測へ展開するためには、上述の物性値で表現される路面雪氷状態と μ の関係を明確にする必要がある。

路面雪氷状態と μ の関係は、木下ら⁸⁾、松本・斎藤⁹⁾、千葉ら¹⁰⁾、Fengら¹¹⁾などによって報告されている。これらの研究では、雪氷状態を湿潤、シャーベット(水べた雪)、圧雪、氷板などに分類し、それぞれの μ の範囲を示した。Fengら¹¹⁾の計測では、乾燥および湿潤路面の μ は0.8~1.0で比較的ばらつきが小さいが、シャーベット路面の μ は0.2~0.7で広い範囲に分布する。この理由として、シャーベットは圧雪や新雪のような高含水状態から湿潤に近い低含水状態まで含水率

表-1 試験内容の一覧

日 時	2004/02/19-2004/02/20	2005/01/24-2005/01/25	2006/02/14-2006/02/15 2007/02/21-2007/02/22
場 所	新潟県妙高市大字橋本新田	福井県坂井市春江町	福井県福井市福町
μ 計測速度	30 km/h	30 km/hおよび50 km/h	30 km/hおよび50 km/h (2006) 40 km/hおよび60 km/h (2007)
舗装	密粒度アスファルト混合物	密粒度アスファルト混合物	密粒度アスファルト混合物
路面状況			

が大きく変化すること、およびシャーベット厚が系統だっけ分類されていない(必ずしも同じ厚さでない)ためと推察される。

このようにシャーベットの μ はばらつきが大きいこと、および関西や北陸ではシャーベットの出現率が最も高い¹²⁾ことから、筆者らはシャーベットの μ 特性を調べてきた。前報¹⁾では30 km/h走行における μ とシャーベット層の質量含水率および厚さの関係を明らかにした。その後、渡邊ら¹²⁾はデータを追加し、シャーベット層厚を5 mm、5～15 mmおよび15 mm以上に分けて、 μ と質量含水率の関係を示した。しかしながら、これまでのデータは雪氷条件および走行速度の範囲が限られていた。

そこで本論文では、すべり摩擦測定車を用いた野外実験を追加して、 μ に及ぼす走行速度およびシャーベット物性の影響、特に今回はシャーベット層中の氷成分の厚さ(以下、氷厚)に着目して μ を包括的に定式化したので、ここに報告する。

2. μ およびシャーベット物性の測定試験

2.1 概要

表-1は μ およびシャーベット物性の測定試験内容(日時、場所、 μ 計測速度、舗装および路面状況)を示す。本試験は2004年から2007年の冬期に実施された。全ての試験路は直線で水平な密粒度アスファルト舗装

である。福井市と坂井市で実施した試験では、試験地の雪および石川県白山市の雪を利用した。

試験の手順を述べる。(i)試験路面上の積雪を除去する、(ii)タイヤローダーを用いて路肩に堆積した雪を目標雪氷層厚になるように敷設し、散水車を用いて目標質量含水率のシャーベット層を作成する、(iii)ノギスを用いて目標シャーベット層厚を確認しながら、スノーブッシャー、グラブドレーキおよび熊手などを用いて均一なシャーベット路面を作成する、(vi)事前に定めた μ 計測地点でシャーベット層の厚さ(3地点)、密度(1地点)および質量含水率(1地点)を計測する、(v) μ 計測車両(次節に記述)で μ を計測する。(ii)から(v)の過程を繰り返す。これらの μ およびシャーベット物性の平均値を試験データとした。なお、シャーベット層の密度は円管サンプラーを用いて、質量含水率は融雪式含水率計¹³⁾を用いて、それぞれ測定した。

2.2 μ 計測

本試験では、 μ センサーを搭載した試験車(以下、Multi-Axial Sensing System: MASS車と呼称)を使用した。MASS車については参考文献¹⁴⁾に詳述されているので、ここでは概要のみ述べる。図-1に示すようにMASS車はサスペンションに μ センサーを搭載し、走行および制動中に生じる懸架装置の車両進行方向摩擦力(F_x)、車両水平方向摩擦力(F_y)、車両垂直方向力(F_z)および

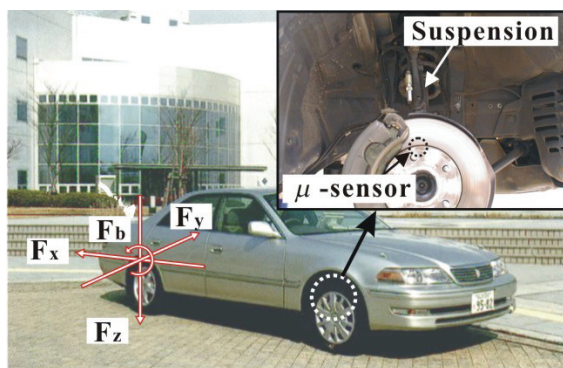


図-1 MASS車

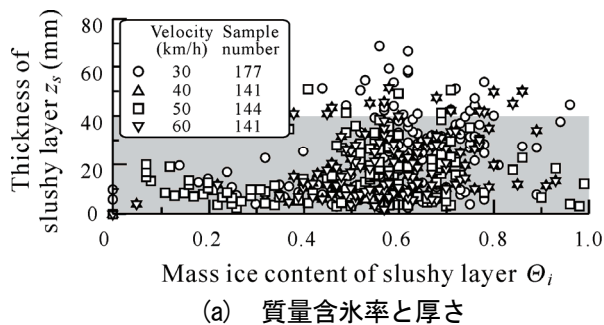
車両軸回転方向の力(F_b :制動力)を、時間分解能 0.1~100 msecで検出できる。本論文では、ブレーキを瞬間的に掛けた500~1000 msec間に亘り0.1 msec間隔で得られた F_x/F_z の平均値を μ と定義する。なお、本試験ではブリヂストン社製のスタッドレスタイヤを用いた。

3. 試験結果

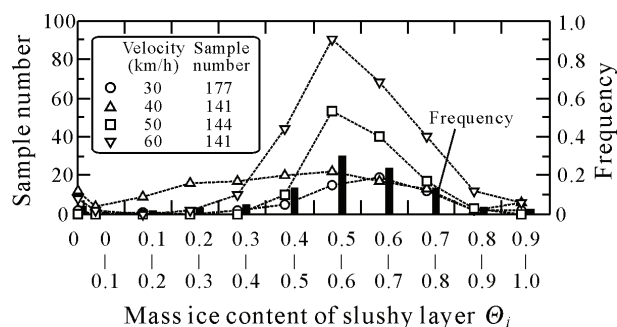
3.1 試験条件

本試験回数は 2004 から 2007 年の順で、60, 138, 123 および 282 回であり、計 603 回に及んだ。図-2 は本試験におけるシャーベット物性の頻度分布を示す。同図 (a) はシャーベット層の質量含水率 $\Theta_i (= M_i / (M_i + M_w))$, M_i および M_w : シャーベット層中の氷および水質量(kg))と厚さ z_s (mm)の関係である。同図に示すように本試験は $\Theta_i = 0 \sim 1.0$, $z_s = 0 \sim 69$ mmの範囲で行われた。ただし、 $z_s > 40$ mmのデータは全サンプルの約 10%であるものの、同図(c)に示すように 5 mm間隔に仕分けた時の各データ数は少ないために、本論文では $0 \leq z_s \leq 40$ mm(図中の灰色部)を対象とした。 $\Theta_i < 0.4$ では、シャーベット層中の重力排水により目標の Θ_i と z_s の維持が難しかったためにデータ数は少ない。特に、 $z_s > 20$ mmかつ $\Theta_i < 0.3$ のシャーベット路面は作成できなかった。ちなみに本試験では低 Θ_i のシャーベット路面は、シャーベットを取り囲むように雪堤を設け、シャーベット中からの水分流出の抑制に努めた。

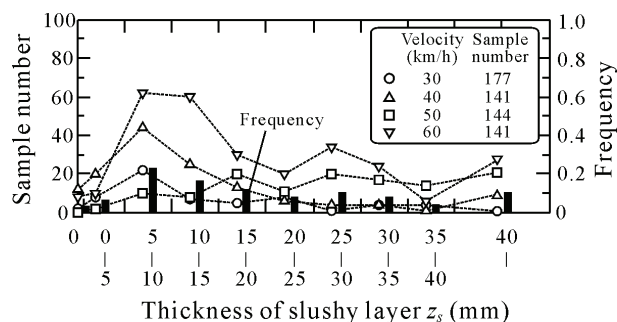
同図 (b) は Θ_i の頻度(0.1間隔)を、(c) は z_s の頻度を、速度別に示した。なお、速度別総サンプル数は30から60 km/hの順で177, 141, 144および141であった。



(a) 質量含水率と厚さ



(b) 質量含水率



(c) シャーベット層厚さ

図-2 シャーベット物性の頻度分布

3.2 μ の速度依存性

μ の速度依存性を調べるために、図-2(b)で示したようにデータ頻度の高い $0.4 < \Theta_i \leq 0.7$ における μ - z_s 関係を、速度30および60 km/hで整理した。その結果を図-3(a)および(b)の箱ひげ図に示す。箱ひげ図の見方を説明する。箱の下端は全測定データの第1四分位(25%)の μ 値(μ_{25})を、上端は第3四分位(75%)の μ 値(μ_{75})を、箱の中の水平線は μ の平均値(μ_{mean})を示す。箱から上下に延びるひげの上下端は、箱の高さの1.5倍以内にある μ の最大値(μ_{max})あるいは最小値(μ_{min})までの距離をそれぞれ示す。 μ_{max} 以上あるいは μ_{min} 以下の μ は外れ値として白丸($\circ$)で示す。

両図を比較すると、両者の μ は0.6ぐらいから z_s の増大につれて減少するが、 $z_s \geq 10 \sim 15$ mmではほぼ一定

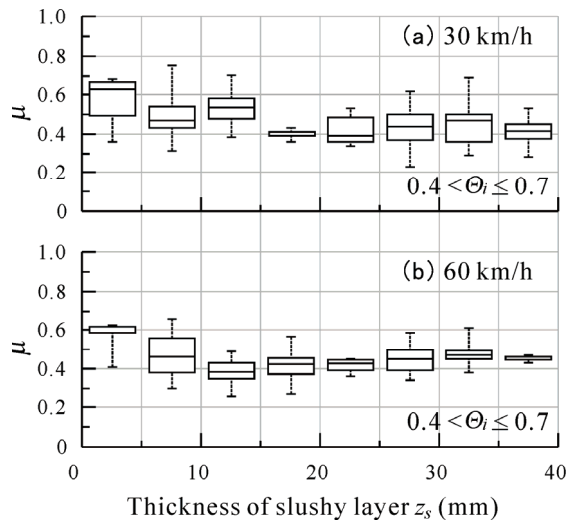


図-3 μ とシャーベット層厚の関係
(μ 計測速度, (a) : 30 km/h, (b) : 60 km/h)

値(0.4)となり、両図の μ 分布に明確な違いは見られない。なお、ここには示していないが、40 km/hでの μ - z_s 関係も図-3と同じ分布形状を呈した。

以上より、速度30～60 km/hの範囲において μ の速度依存性は無視できるものとして、以下では μ 計測速度を区別せず、速度毎のデータ数の合計を基に μ に及ぼすシャーベット物性の影響について述べる。

3.3 μ に及ぼすシャーベット物性の影響

(a) シャーベット層厚

図-4は μ - z_s 関係を示す。湿潤路面($z_s = 0$)の μ は0.65(μ_{min})～0.84(μ_{max})の範囲にあり、 $\mu_{mean} = 0.74$ であった。 $0 < z_s \leq 5$ mmの μ は0.31(μ_{min})～0.88(μ_{max})の広い範囲に分布した。 μ は z_s の増大とともに減少し、その減少率は μ_{max} 、 μ_{75} 、 μ_{mean} 、 μ_{25} および μ_{min} の順に小さくなった。その結果、 z_s の増大とともに箱の高さは小さくなり、ひげの長さは短くなった。

上述した μ - z_s 関係は、次式に示す指数関数で与えられる。

$$\mu = a \exp(bz_s) + c \quad (1)$$

各 μ に対する係数 a 、 b および c を表-2に示す。ただし、 $0 < z_s \leq 5$ mmの μ_{max} は、湿潤路面のそれと殆ど変わらないことから0.84とした。

図-5は Θ_t 別の μ - z_s 関係である。図中の()にデータ数を示す。 $0 < \Theta_t \leq 0.2$ では、 μ は0.50～0.82の範囲にあ

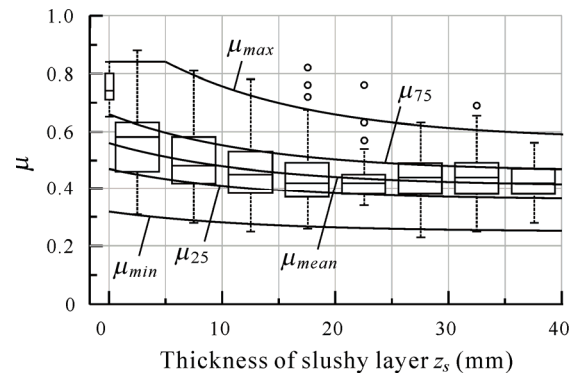


図-4 μ とシャーベット層厚の関係
(全データ)

表-2 係数(μ とシャーベット層厚の関係)

μ	a	b	c
μ_{max}	0.40	-0.077	0.57
μ_{75}	0.20	-0.077	0.46
μ_{mean}	0.15	-0.077	0.41
μ_{25}	0.11	-0.077	0.36
μ_{min}	0.07	-0.077	0.25

り、 z_s の増加による μ の低下は見られない。これはシャーベット層中の氷成分が少なく、 $0 < \Theta_t \leq 0.2$ の範囲では z_s が増大しても($z_s \leq 20$ mmでは)、タイヤがシャーベットを押し退けて舗装とグリップするためと推察される。 $0.2 < \Theta_t \leq 0.4$ では、データにばらつきが見られるものの、 z_s の増大に伴い μ の緩やかな低下が認められる。 $0.4 < \Theta_t \leq 0.6$ および $0.6 < \Theta_t \leq 0.8$ では、 z_s が増大するにつれて μ は指数関数的に低下した。 $0.8 < \Theta_t \leq 1.0$ では、 μ は z_s に関係なく比較的低い値(0.4前後)であった。

以上より、シャーベット路面の μ の分布域は、同じ z_s であっても Θ_t によって異なることが再確認された。

前報¹¹⁾では、 $z_s < 10$ mmのシャーベット路面の μ は湿潤路面のそれと同程度と記したが、データを蓄積した結果、 $z_s < 10$ mmであっても0.4程度の比較的低い μ も存在することを追記しておく。

(b) 質量含水率

図-6(a)は μ - Θ_t 関係を、図-6(b)は μ の開き $\Delta\mu (= \mu_{max} - \mu_{min})$ と Θ_t の関係を示す。 μ_{mean} は Θ_t の増加とともに0.4に漸近するように低下した。 μ_{max} は、 $0 < \Theta_t \leq 0.4$ では0.80に向かって微減し、 $\Theta_t > 0.4$ では0.57に向かって緩やかに低下した。 μ_{min} は $\Theta_t \leq 0.4$ までは Θ_t の増加につ

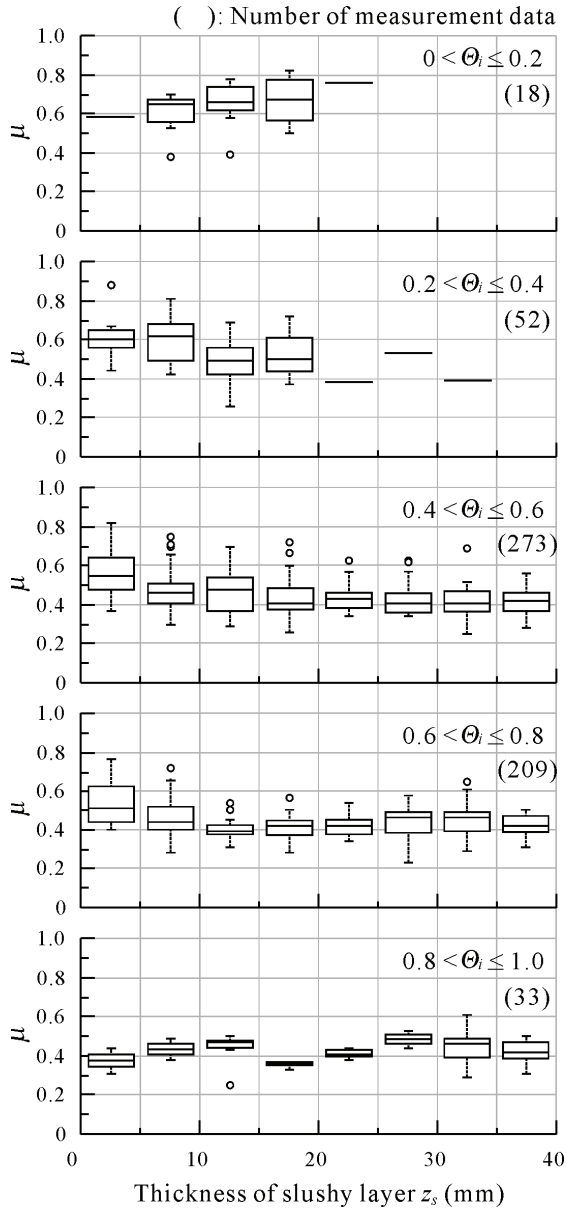


図-5 μ とシャーベット層厚の関係
(質量含水率別)

れて0.27まで低下し、 $\Theta_i > 0.4$ では0.27程度で大きく変化しなかった。この結果、図-6(b)に示すように $\Delta\mu$ は $\Theta_i = 0$ から0.4に向かって増大し、その後 $\Theta_i = 1.0$ に近づくにつれて減少した。 $\Delta\mu$ についてさらに考察を加える。 $\Theta_i \leq 0.2$ では図-2(a)で示したように z_s の範囲が比較的限定されている(低 Θ_i で高 z_s のシャーベットは出現し難い)ために、 $\Delta\mu$ は小さくなったと推察される。 $0.4 < \Theta_i \leq 0.6$ では、最も z_s の範囲が広いために $\Delta\mu$ は大きくなったと考えられる。また、 $\Theta_i > 0.75$ では、車両通過によるシャーベットの飛散(シャーベットを押し退ける抵抗)が生じることなく¹⁵⁾、 μ はシャーベット

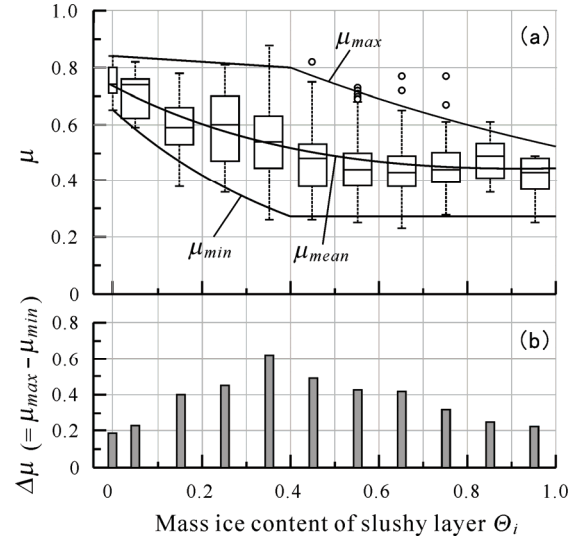


図-6 μ と質量含水率の関係

((a) : μ_{max} , μ_{mean} および μ_{min} , (b) : $\Delta\mu$)

層の表面粗度で決定される。そのために、高 Θ_i における $\Delta\mu$ は小さくなったと考えられる。

μ_{max} , μ_{mean} および μ_{min} は Θ_i を用いて以下のように定式化される。

$$\mu_{max} = \begin{cases} -0.10\Theta_i + 0.84 & (0 < \Theta_i \leq 0.4) \\ 1.19 \exp(-1.20\Theta_i) + 0.17\Theta_i & (0.4 < \Theta_i \leq 1.0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{mean} = 0.74 \exp(-1.50\Theta_i) + 0.28\Theta_i \quad (3)$$

$$\mu_{min} = \begin{cases} 0.65 \exp(-2.20\Theta_i) & (0 < \Theta_i \leq 0.4) \\ 0.27 & (0.4 < \Theta_i \leq 1.0) \end{cases} \quad (4)$$

(c) 氷厚

シャーベット層中の氷厚 z_i (mm)は、以下に示す z_s 、 Θ_i およびシャーベット密度 ρ_s (kg/m³)を用いた式で与えられる。

$$z_i = \frac{z_s \Theta_i \rho_s}{\rho_i} \quad (5)$$

ここに、 ρ_i : 氷の密度(kg/m³)である。なお、本データの z_i は0～20 mmの範囲にあった。

図-7は、 μ - z_i 関係を示す。 μ は z_i の増大とともに指数関数的に低下する。 $z_i \leq 10$ mmでは、 z_i の増大とともに μ_{max} および μ_{min} は μ_{mean} のおよそ ± 0.20 から ± 0.15 の範囲で減少する。 $z_i > 10$ mmでは、 $\mu_{mean} = 0.42$ であり、 μ は $\mu_{mean} \pm 0.15$ の範囲にある。

以上の μ - z_i 関係は次式で近似される.

$$\mu = d \exp(e z_i) + f \quad (6)$$

各 μ に対する係数 d , e および f は表-3に示される. ただし, $0 < z_i \leq 1.7$ mmでは, $\mu_{max} = 0.84$ とする. 以上より, z_s , θ_i および ρ_s が分かれば, 表-3に示した各 μ を決定することができる.

(d) μ 予測に関する最適な独立変数の検討

μ 予測に対する最適な独立変数(雪氷物性)は, μ のばらつきを最小にさせる条件下で決定された. 雪氷物性として, z_s , θ_i および z_i を選び, 各々に対する μ のばらつき度合いを調べた. ばらつきは標準偏差 σ および $\Delta\mu$ の平均値 $\overline{\Delta\mu}$ を採用し, それぞれ以下の式で計算された.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\mu_{mes} - \mu_{mean})^2} \quad (7)$$

$$\overline{\Delta\mu} = \frac{\int_0^{x_{max}} (\mu_{max} - \mu_{min}) dx}{x_{max}} \quad (8)$$

ここに, n : サンプル数(測定回数), μ_{mes} : μ の実測値, x : 路面雪氷物性(z_s , θ_i および z_i), 添字 max : 本論文で扱う最大値, すなわち $z_{smax} = 40$ mm, $\theta_{imax} = 1.0$ および $z_{imax} = 20$ mm である. 表-4 に σ および $\overline{\Delta\mu}$ の一覧を示す. なお, 表中の()は μ - z_i 関係の σ および $\overline{\Delta\mu}$ に対する μ - θ_i 関係および μ - z_s 関係のそれらの比である. μ - z_s 関係, μ - θ_i 関係および μ - z_i 関係の σ はそれぞれ 0.107, 0.102 および 0.098, $\overline{\Delta\mu}$ は 0.41, 0.38 および 0.35 となった. σ および $\overline{\Delta\mu}$ はともに μ - z_i 関係で最も小さく, μ - z_i 関係と比べて μ - θ_i 関係のそれらは4および9%, μ - z_s 関係のそれらは9および17%大きくなった.

4. おわりに

本研究では, シャーベットの路面の物性と μ の関係を明らかにするために4年間に亘り, μ 測定野外実験を行った. シャーベット物性および舗装表面は厳密に一樣ではないことなどが原因でデータのばらつきは避け難いものの, μ の速度依存性が評価でき, μ と質量含氷率, シャーベット層厚さおよび氷厚の関係が定式化できた.

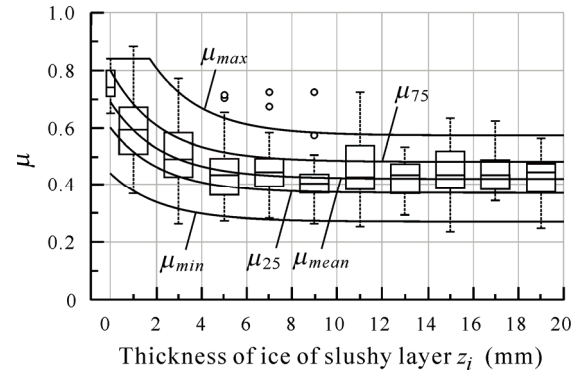


図-7 μ と氷厚の関係

表-3 係数(μ と氷厚の関係)

μ	d	e	f
μ_{max}	0.57	-0.45	0.57
μ_{75}	0.32	-0.45	0.48
μ_{mean}	0.27	-0.45	0.42
μ_{25}	0.23	-0.45	0.37
μ_{min}	0.17	-0.45	0.27

表-4 標準偏差および μ の開きの平均値

	μ - z_s	μ - θ_i	μ - z_i
σ	0.107 (1.09)	0.102 (1.04)	0.098 (1.00)
$\overline{\Delta\mu}$	0.41 (1.17)	0.38 (1.09)	0.35 (1.00)

その結果, μ とシャーベットの雪氷物性(質量含氷率, シャーベット層厚さおよび氷厚)に及ぼす影響は, 30~60 km/hの間では無視できる. また, シャーベット路面の μ はシャーベットの厚さ, 質量含氷率および密度から算出される氷厚 z_i で整理すれば最もばらつきが小さくなることが分かった. 以上より, 路面雪氷状態モデルから計算される z_i を式(6)に代入することで μ の算定が可能になった.

今後は, 本研究で得られたシャーベット路面の μ 特性を路面雪氷状態モデルに組み込み, μ 予測モデルを構築するとともに, 実用化に向けて μ 予測モデルの妥当性検証を行う.

最後に, 本研究を遂行するに当たり, 国土交通省近畿地方整備局福井河川国道事務所, 土木研究所, 福井県に多大なご協力をいただいた. ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 1) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸, 武士俊也, 小林一治, 宮崎長生, 小川晶子, 浅野基樹 (2005) : MASS車によるすべり摩擦と道路雪氷の関係, 日本雪工学会誌, Vol. 21, No. 5, pp. 26 - 35.
- 2) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸 (2007) : 車両熱のモデリングと乾燥路面温度への影響評価, 土木学会論文集, Vol. 63, No. 2, pp. 250 - 261.
- 3) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸 (2009) : 凍結に伴うNaCl湿潤アスファルト舗装のすべり抵抗低下, 日本雪工学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 3 - 11.
- 4) 藤本明宏, 齊田光, 福原輝幸 (2011) : 固形塩化ナトリウム散布路面の着霜－凍結解析, 日本雪工学会誌, 掲載決定.
- 5) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸 (2007) : 輻射－透過を伴う路面薄雪氷層の融解解析, 土木学会論文集, Vol. 63, No. 2, pp. 156 - 165.
- 6) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸 (2007) : 単一層路面雪氷状態モデルの適用範囲および熱的考察, 日本雪工学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 19 - 29.
- 7) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸 (2008) : 多層路面雪氷状態モデル, 日本雪工学会誌, Vol. 24, No. 1, pp. 3 - 11.
- 8) 木下誠一, 秋田谷英次, 田沼邦雄 (1970) : 道路上の雪氷の調査Ⅱ, 低温科学物理篇, Vol. 28, pp. 311 - 323.
- 9) 松本晃一, 斎藤辰哉 (1999) : 高速道路における冬期路面のすべり摩擦係数に関する研究, 高速道路と自動車, Vol. 42, No. 2, pp. 20 - 26.
- 10) 千葉学, 田高淳, 安倍隆二 (2006) : 開粒度舗装の雪氷路面におけるすべり抵抗に関する一検討, 寒地技術論文・報告集, Vol. 22, pp. 209 - 213.
- 11) F. Feng, L. Fu & M. Perchanok (2010): Classification of winter road surface conditions based on continuous friction measurement, International Winter Road Association, Session T3-1.
- 12) 渡邊洋, 藤本明宏, 福原輝幸 (2006) : 路面の雪氷性状と路面すべり摩擦係数の研究 —シャーベット路面の危険性評価—, 寒地技術報告・論文集, Vol. 22, pp. 205 - 208.
- 13) 河島克久, 遠藤徹, 竹内由香里 (1996) : 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報告, Vol. 57, pp. 71 - 75.
- 14) N. Miyazaki, S. Ueno, H. Tamaki, R. Hironaka, T. Yamaguchi & C. Li (2001): Development of High-quality Multi-Axial Sensing System (MASS) for Direct Measurement of 4 Directional Forces and Coefficient of Friction in Real Time, SAE World Congress, 2001-01-0795.
- 15) 藤本明宏, 渡邊洋, 内藤知照, 福原輝幸 (2006) : 車両通過に伴うシャーベットの飛散実験～その2～, 寒地技術報告・論文集, Vol. 22, pp. 239 - 243.