

平成20年度

T C 研究助成成果報告書

平成21年6月

社団法人 雪センター

平成 20 年度 TC 研究助成成果報告書

目 次

『雪崩の連続体モデルの開発』

西村 浩一 名古屋大学 大学院 教授 1

『雪中爆破工法による雪層中の圧力伝播と人工雪崩誘発技術の確立』

町田 誠 町田建設株式会社 代表取締役社長 9

『路面状況測定のためのデータ処理方法に関する検討』

高田 英治 富山工業高等専門学校 准教授 15

『連続滑り抵抗測定車による路面雪氷と滑り摩擦に関する研究』

福原 輝幸 福井大学 大学院 教授 21

雪崩の連続体モデルの開発

名古屋大学大学院環境学研究科 教授 西村 浩一

キーワード：雪崩、連続体モデル、底面摩擦、内部摩擦

1. はじめに

スイス、フランス、イタリア、オーストリア、ノルウェー、アメリカ、カナダそして日本を含めた世界の多くの雪崩国では、雪崩そのものの観測と並行して、その運動や到達距離を記述するモデルが数多く開発されてきた。蓄積された多量の雪崩データにもとづき統計解析から雪崩走行距離を判定するモデルに加え、雪崩の運動そのものを記述するモデルも 1955 年の Voellmy の定式化にはじまり多数存在する。それぞれ一応の成果をあげてはいるが、雪崩の内部構造、雪の取り込みや堆積等に関連した未知のパラメータが多数含まれており、改善を要する課題も多い。しかし、実際の雪崩のデータが質、量ともに限られているため、それぞれのモデルの有効性、正当性を客観的に評価することも容易ではないのが現状である。

一方、これまで日本で開発された「流れ型雪崩」および「煙り型雪崩の流れ層」の運動モデルは、その多くが雪崩全体を平均化し、質点または剛体と見なして記述するものであった。最大到達距離や速度が再現されるよう抵抗係数等のチューニングが進められてきたが、雪崩の高さ、3次元の地形上での広がりなどの情報が得られないなど、防災上不十分な点が多かった。こうした背景のもと、本研究では雪崩を連続体として捉えた運動モデルの開発を実施する。

2. 雪崩の連続体モデル

雪崩は巨視的に見ると液体のような振る舞いをするが、微視的には雪粒子や、雪塊を要素とする固体粒子集団がお互いに相互作用をしながら流れ下る運動である。Savage and Hutter(1989)は、空気抵抗の無視できるスケールでの有限な一定量の粒状体の傾斜流に対する2次元の運動方程式を連続体の方程式から導いた。この方程式は斜面方向の速度を厚さ方向に平均したもので、非圧縮性、非付着性が仮定されており、粒子集団の物性値としては、クーロンの境界摩擦角と内部摩擦角が含まれるだけである。このモデルでは、変数は雪崩の先端から後端までの雪崩の厚さと流れ方向の速度の平均値であり、雪崩の発生から停止までの雪崩本体の変形と流れ方向の速度分布の変化が記述される。その後、約20年にわたりモデルの3次元化、斜面の曲率が大きい場合への拡張、さらにガラスビーズなどの粒子を用いた数 m 程度のスケールのモデル実験との比較検証が実施されている(Pudasaini and Hutter, 2007)。

西村ほか(2004)も上記の粒状体モデルに基づき、質量保存と運動量保存を以下の式で与える連続体モデルを提案した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hv \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(hv \cdot v) = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y}(gh^2 \cos \theta) + gh \sin \theta_y + F_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(hu \cdot v) = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x}(gh^2 \cos \theta) + gh \sin \theta_x + F_x \quad (3)$$

ここで、 x 、 y は斜面に平行な座標系で、 θ は斜面の傾斜角、 h は雪崩の厚さ、 u と v は x と y 方向の雪崩の速度である。 F は摩擦力で、クーロン摩擦のほか、フルード数と厚さの関数として与えることもできる。上記のモデルを1次元化し、「ざらめ雪」を用いた低温室の斜面上での小規模な雪崩実験結果との比較を行った。物理量(厚さ)の局所的な変化の状況に従って差分を切り替える TVD スキームを用いて数値振動を抑える等の工夫を行った結果、モデルからはほぼ妥当な結果が得られるに至った。しかしこの手法を拡張して現実の複雑な地形上での雪崩の運動を議論するためには、計算の安定性など数多くの克服すべき課題が残された。

そこで次のステップとして、土石流や地すべり等の乾燥粒状体の流れを対象に開発され、すでに実際の地形上での溶岩流等のシミュレーションにも実績がある TITAN2D(Pitman et al., 2003)を、雪崩の運動に適用することを試みた。このモデルも、Savage and Hutter(1989)と同様に非圧縮性のクーロン連続体の流れを記述するもので 質量保存と運動量保存はそれぞれ以下の式(4)、(5)で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial (hu^2 + .5k_{ap} g_z h^2)}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} \\ = g_x h - \frac{v_x}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left[g_z + \frac{1}{\kappa_x} u^2 \right] h \tan(\phi_{bed}) - \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) h k_{ap} \frac{\partial h g_z}{\partial y} \sin(\phi_{int}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで ϕ_{bed} は底面摩擦、 ϕ_{int} は内部摩擦である。 u と v は式(13)と同様に雪崩の x と y 方向の速度で、 y 方向の運動量も式(5)と同様に表現できる。

本稿では2008年2月17日に新潟県の妙高山域にある幕の沢で発生した大規模な面発生表層雪崩を対象に、10mグリッドの数値標高データを用いて計算を行った結果を紹介する。この雪崩は、当地に設置されている地震計、ビデオカメラおよび雪崩発生検知システムの記録から、発生時刻は13時48分と推定されている。また発生区は標高約1700m付近の東～南東向き斜面で、3月以降に数回にわたり実施された現地調査により、約3000mの距離

を流れ下ったことが明らかとなっている（竹内ほか、2008a、b）。GPS等を用いたデブリの到達地点や雪崩によって損傷を受けた樹木の位置の計測、積雪の断面観測、積雪水量の測定値を総合した結果、デブリの堆積量は最大で約 $1.3 \times 10^8 \text{kg}$ と見積もられた。図1に雪崩の流下経路と到達範囲を示す。

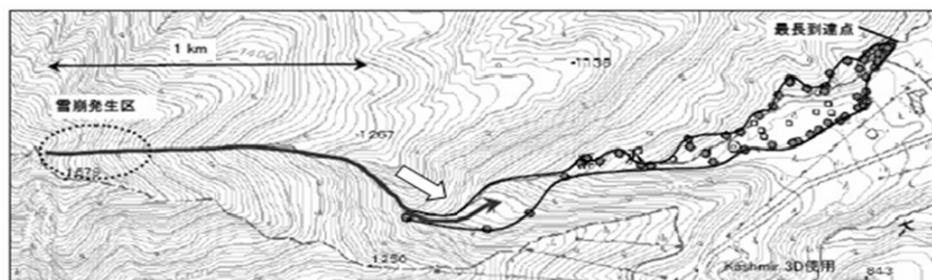


図1 2008年2月17日に新潟県の妙高山域にある幕の沢で発生した大規模な面発生表層雪崩の流下経路と到達範囲（竹内ほか、2008a）

図中の●、◎、□は、それぞれ位置計測、断面観測、水量の測定が行われた地点を示す。

内部摩擦角を $\phi_{\text{int}}=20^\circ$ 、底面摩擦角： ϕ_{bed} をそれぞれ 16° ($\mu=0.29$)、 18° ($\mu=0.32$)、 20° ($\mu=0.36$) としたときの計算結果を図2に、また 18° ($\mu=0.32$) の際に幕の沢の斜面を雪崩が流下する状況を図3に示す。現地での調査結果（図1）と比較すると、雪崩の広がりや到達距離は $\phi_{\text{bed}}=16^\circ$ と設定した場合に、最も高い精度で一致することが明らかになった。また現地では沢底より100m程高い斜面上部や尾根上にも倒木の存在が確認されており、その位置や倒れている方向から、雪崩の一部は沢筋に沿ってカーブせず張り出した尾根の上を横切って真っ直ぐ流下した可能性が指摘されている（図1中の白抜き矢印、竹内ほか、2008）。計算結果bにおいても雪崩の一部が尾根を乗り越えた様子が再現されている。 $\phi_{\text{int}}=20^\circ$ 、 $\phi_{\text{bed}}=16^\circ$ とした際の、雪崩全体の平均流下速度の変化を図4に示す。ちなみに本モデルでは、雪崩内部の速度構造も計算される。図5はその一例で、色の薄い部分（雪崩の中心部）の速度が周辺部より高速で谷を流れ下っている様子がわかる。仮にこのモデルが、2008年2月17日に発生した雪崩の発生から停止に至る運動のプロセスを高い精度で再現していると仮定すると、今回の雪崩は東～南東向き斜面で発生以降、地形の影響を受けて高さ、幅、長さを変化させながら谷を流れ下り（図2(b))、発生から約30秒後には速度（流れ全体の平均）が60m/sに達したと推定される（図4）。

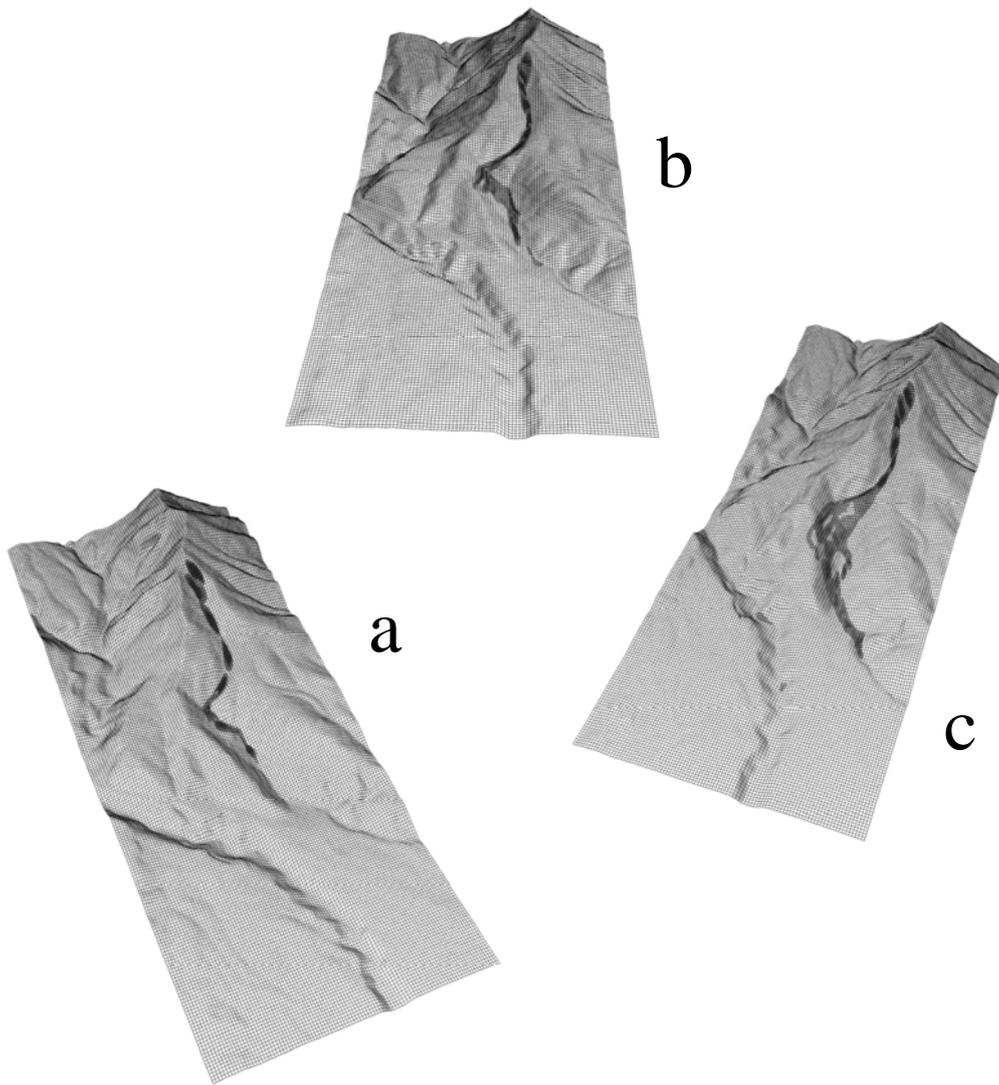


図2 幕の沢で発生した雪崩の計算結果（走路と到達範囲）

内部摩擦角 $\phi_{\text{int}}=20^\circ$ とし、底面摩擦角： ϕ_{bed} をそれぞれ

a: 16° ($\mu=0.29$)、b: 18° ($\mu=0.32$)、c: 20° ($\mu=0.36$) としたときの計算結果

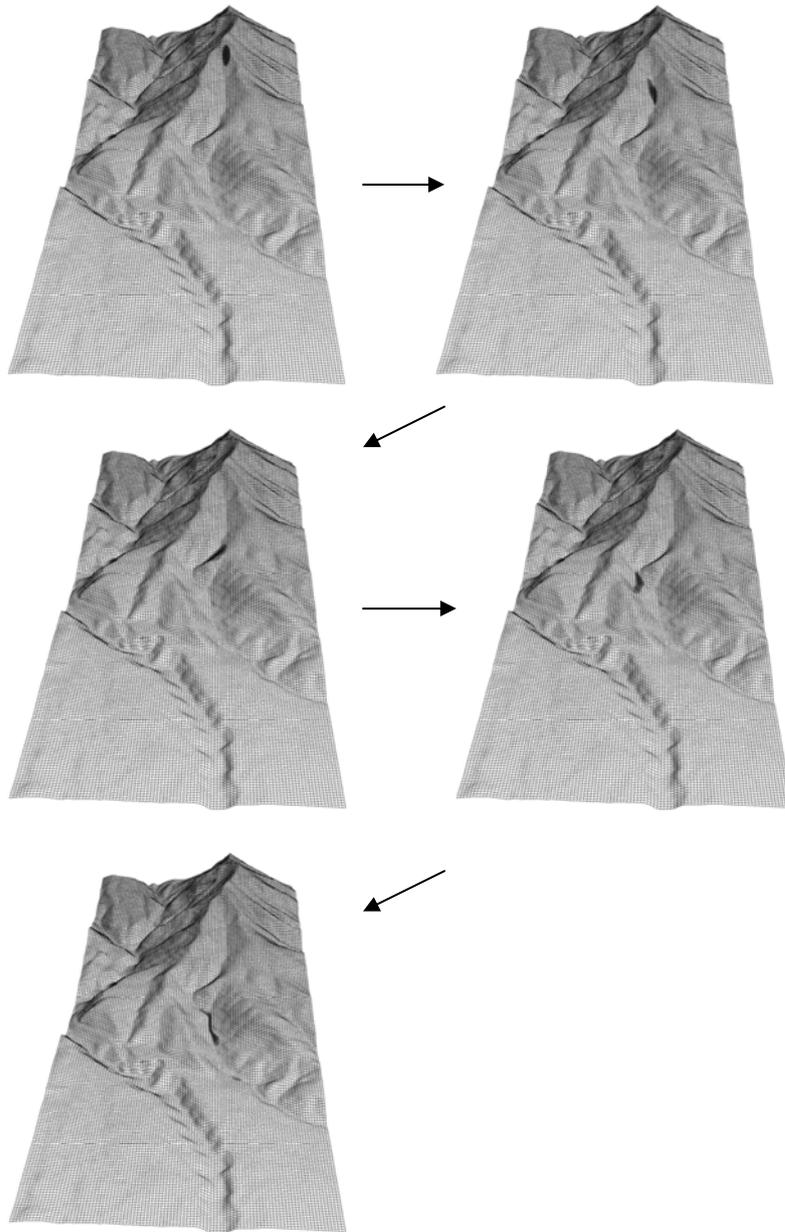


図3 走路上での雪崩の動態の変化

内部摩擦角 $\phi_{\text{int}}=20^\circ$ 、底面摩擦角 : $\phi_{\text{bed}}=18^\circ$ ($\mu=0.32$) の場合

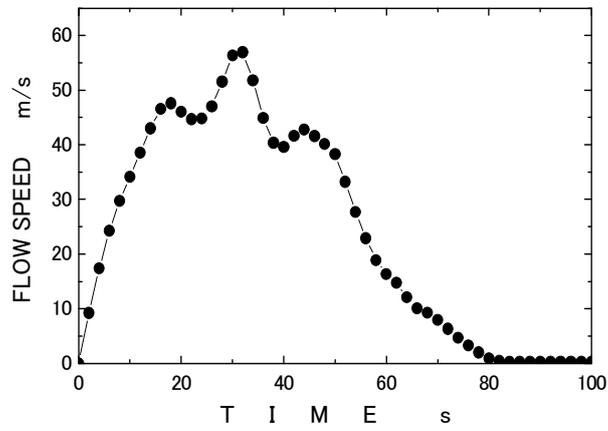


図4 走路上での雪崩の平均速度の変化
 内部摩擦角 $\phi_{int}=20^\circ$ 、底面摩擦角： $\phi_{bed}=16^\circ$ ($\mu=0.29$) の場合

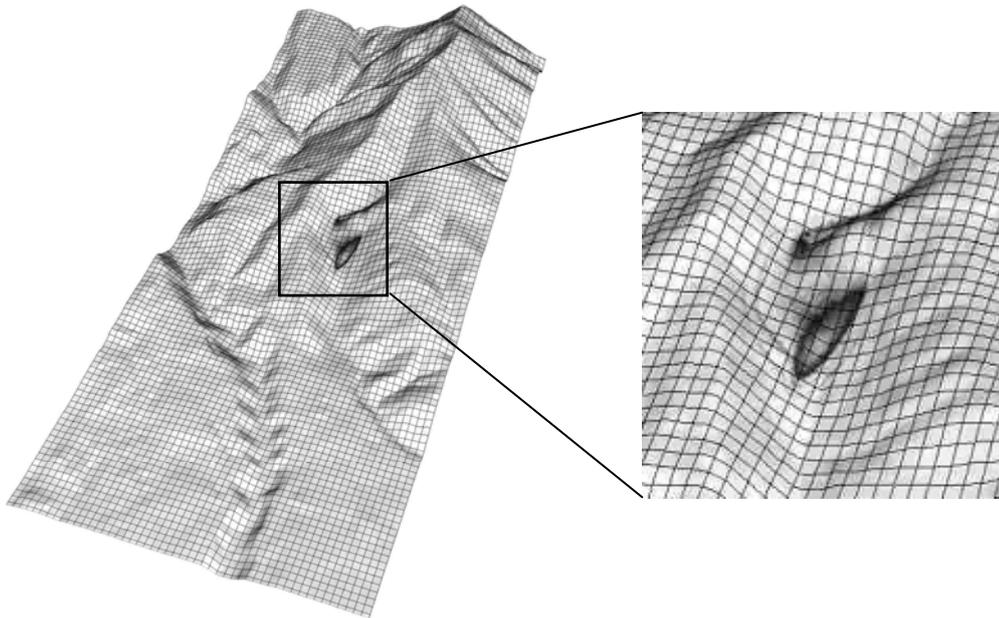


図5 雪崩内部の速度構造の例
 拡大部の薄い色で表示された部分（中心部）が高速で流下している様子がわかる

3. おわりに

土石流や地すべり等の乾燥粒状体の流れを対象に開発され、溶岩流等のシミュレーションにも実績がある TITAN2D を用いて、2008 年 2 月 17 日に新潟県の妙高山域にある幕の沢で発生した大規模な面発生表層雪崩の運動の計算を行った。今回は、内部摩擦角： $\phi_{int}=20^\circ$ 、底面摩擦角： $\phi_{bed}=16^\circ$ ($\mu=0.29$) とした場合に、雪崩の広がりや到達距離を最も高い精度で再現することができた。しかし底面摩擦角、内部摩擦角ともにその値の妥当性などについては、実際の雪崩データによる検証が依然不可欠である。また、加速から停止に至る過程での積雪の取り込みや堆積のプロセスのモデルへの組み込みも重要な課題である。こうした問題の解決にむけ、ドップラーレーダ、FMCW レーダなど最新の計測機器を結集した組織的かつ大規模な人工雪崩実験（平成なだれ大実験）の実施が望まれる。

参考文献

Savage, S.B. and Hutter, K., The motion of a finite mass of granular materials down a rough incline. *J. Fluid Mech.*, 199, 177-215 (1989).

Pudasaini, S. P. and Hutter, K., *Avalanche Dynamics; Dynamics of rapid flows of dense granular avalanches*, Springer (2007).

西村浩一、納口恭明、常松佳恵、雪崩の連続体モデルの開発 I . 2004 年度日本雪氷学会講演予稿集、B3-5、216 (2004).

Pitman, E. B., Patra, A., Bauer, C., Nichita, C., Sheridan, M. and Bursik, M., Computing granular avalanches and landslides. *Physics Fluids* 15, 3638-3646 (2003).

竹内由香里、上石勲、和泉薫、河島克久、山口悟、宮崎伸夫、平島寛行、西村浩一、Podolsky, E.、鈴木貴、2008 年 2 月に妙高・幕の沢で発生した大規模な乾雪表層雪崩の到達範囲と堆積量. 雪氷研究大会 (2008・東京) 講演要旨集、P2-23 (2008a)

竹内由香里、平島寛行、和泉薫、上石勲、河島克久、山口悟、宮崎伸夫、西村浩一、Podolsky, E.、鈴木貴、村上茂樹、遠藤八十一、妙高山域の幕ノ沢で 2008 年 2 月に発生した大規模な乾雪表層雪崩. 雪氷、71、(2008b).

雪中爆破工法による雪層中の圧力伝播と人工雪崩誘発技術の確立

町田建設株式会社・代表取締役社長 町田 誠

町田建設株式会社・技術顧問 早川典生

長岡技術科学大学 環境建設系・教授 陸 旻皎

防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター・研究員 上石 勲

キーワード: 湿雪全層雪崩, 人工雪崩, 爆風圧, 爆雪圧, 発破騒音

1. はじめに

雪中爆破工法とは、雪崩の潜在的危険性を回避するための人工雪崩誘発技術の一工法であり、積雪中に爆薬を装填し発破することにより、雪層を破壊して力のバランスを壊し、雪崩を誘発させることによって不安定積雪の排除を行うものである。わが国における爆薬を用いる人工雪崩技術開発の歴史は、昭和30年代の実験に始まり、わが国独特の歴史的展開をとげた。すなわち欧米における爆薬を使用しての人工雪崩誘発技術では、爆薬を雪面の上、1~2m離れた上空で爆破させるのに対し、わが国の人工雪崩誘発手法では爆薬を積雪層中に埋め込んで爆破させるという大きな違いを有しているのである。この人工雪崩は1990年代の暖冬少雪時期にはあまり行われなくなったが、平成18年豪雪時には、新潟県南魚沼郡湯沢町の国道17号沿線において実施され、雪崩対策技術としての大きな役割を果たしている。

2. 研究目的

雪中爆破工法では、雪中において、雪層の破壊または融雪、圧力の伝播による雪層の変形などが起こり、積雪内の空洞域である破壊孔の形成、雪層の変形と雪質の変化をもたらす。本研究においては、これらの現象を研究対象とし、湿雪全層雪崩対策として、雪質や装薬条件によって積雪中を伝播する発破の圧力の計測や発破後の積雪断面観測によって人工雪崩誘発に適切な装薬方法の確立を目的とする基礎実験を行った。

また、発破において、爆薬の爆発に伴い強い衝撃波とガス膨張による弾性波が発生し、空気中を

伝播する弾性波（音圧）が騒音という聴覚的感覚で感知される。本研究は、雪中爆破工法において、装薬条件による発破騒音への影響を同時に計測した。

3. 実験条件

3. 1 実験地

実験地は、図1に示す、新潟県南魚沼市清水地内の平坦な田圃（標高560m）で行った。選定理由としては、小雪であった2008年度においても多くの積雪を有し、関係者以外の立ち入りを制限しやすく、自然雪崩の危険性がなく、周辺民家等から隔離された地形を有しているためである。

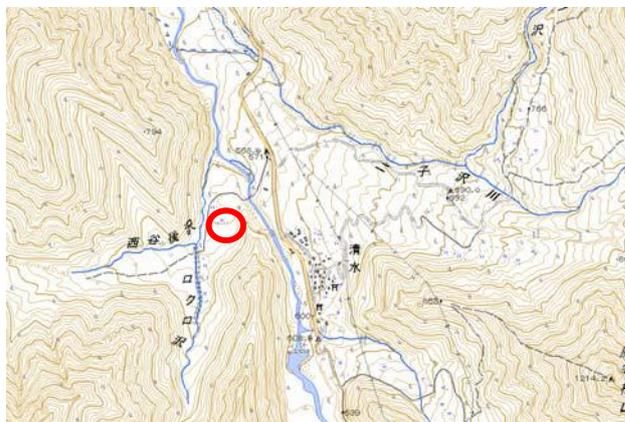


図1 実験地位置図

3. 2 実験時の積雪層構造

実験日は2009年3月21日で、天候は晴れ、気温7.2℃、相対湿度47.1%、風速0m/sであった。実験時の積雪層構造は、全層濡れざらめ雪であり、積雪深は156cmであった。積雪重量は、全層で785kg/m²であり、融雪期に見られる代表的な積雪構造を形成していた。各測定結果を図2、図3に示す。

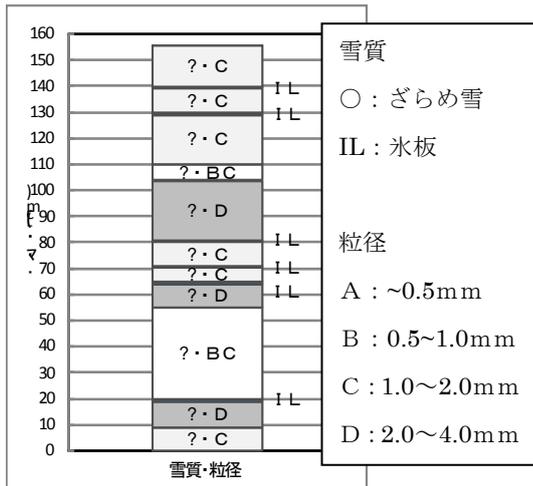


図2 積雪層構造

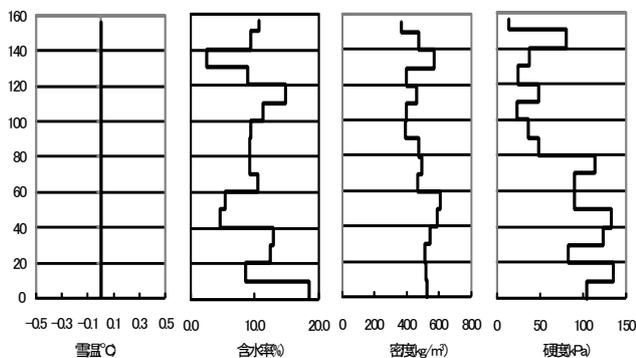


図3 各断面観測結果

3.3 使用爆薬

使用爆薬については、含水爆薬であるハイジェックス（製品名）を使用している。この爆薬は、安全性、耐水性、耐衝撃に優れており低温化においても爆破性能の低下がなく、これまでの雪中爆破工法による人工雪崩誘発に使用している。詳細な爆薬の性能を表1に示す。

雪中爆破工法においては、1孔あたりの爆薬量を100g以上にする場合は、図4に左に示すように雷管を取り付けた爆薬に雷管の取り付けを行っていない爆薬をビニールテープにて密着固定することによって爆薬量を100g単位で増加することが可能である。これは、雪中での殉爆性を高めるためである。

積雪層への窄孔には、図4の右に示す窄孔棒を

用いる。これは鋳鉄製の直径10cmの棒であり、先端が円錐状になっていて、掘った孔中の雪を排除するために円錐形の根元が“えら”状をしている。この穿孔した穴に爆薬を装薬し、任意の深さに装薬されているかは、装薬した爆薬から延びる脚線の長さによって最終確認することができる。その後、穿孔した穴に雪を少量ずつ詰め込み、しっかりと充填する。

表1 爆薬の性能

項目	製品名 ハイジェックス 紙巻品
仮比重	1.10~1.20
爆速[JIS法] (m/s)	5,500~6,000
砂上殉爆度 (径倍)	2.5~5.0
低温起爆感度	-25℃で完爆
耐水性 耐吸湿性	優秀
落槌感度 [JIS法]	8級
後ガス	最優秀
火薬力 (ℓ・atm)	8,327
薬径・薬長	25mm・177mm
薬量	100g/本



図4 窄孔棒と爆薬

4. 爆風圧

4. 1 計測方法

衝撃圧の計測としては、図 5 に示すように半導体圧力トランスデューサを用いて積雪層中を伝播する爆風圧の測定を各装薬条件で行った。この圧力センサを地上高 50cm, 100cm, 150cm, 200cm に対応する高さで設置できるように鋼材に固定し、1 回の発破で鉛直方向の圧力分布測定が可能とした。

積雪内への設置は、スノーサンプラーにより窄孔し固定している。これらの圧力センサを用いて 1 孔当り 100g, 300g, 500g の 3 種類の装薬量と 150cm, 100cm, 50cm の 2 種類の装薬深において発破を行い、センサの水平距離を 1.0m として計測を行なった。この際、図 6 に示すようにセンサの向きは、全て爆破中心点を向くように設置をした。

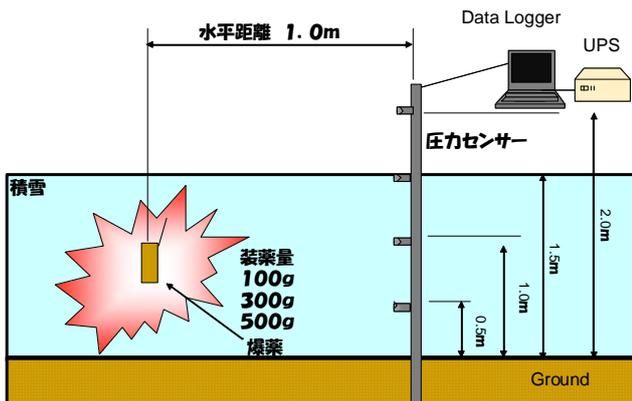


図 5 爆風圧測定概要図



図 6 発破後の爆風圧センサと積雪表面クラック

4. 2 爆風圧計測結果

各装薬条件における、爆風圧の測定結果を、図 7, 図 8, 図 9, 図 10 に示す。各図において、系列の凡例の数値は、地上からのセンサ高さである。

装薬量が同じ条件で、装薬深が浅くなると爆風圧が減少する結果が得られた。これは、発破の衝撃圧が雪面上から空気中に噴出されるためと考えられる。

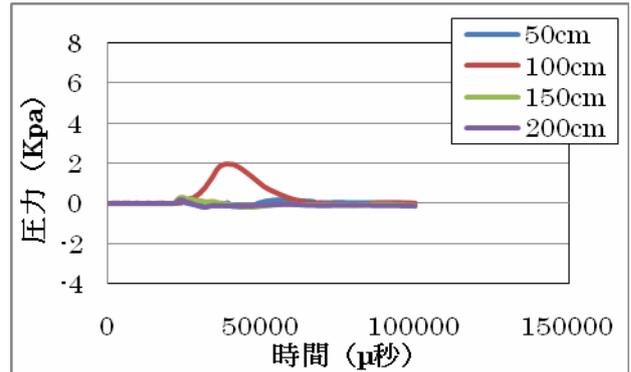


図 7 装薬量 300g, 装薬深 50cm の爆風圧

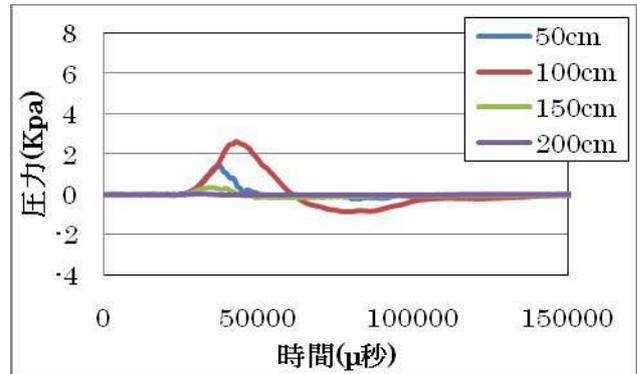


図 8 装薬量 300g, 装薬深 100cm の爆風圧

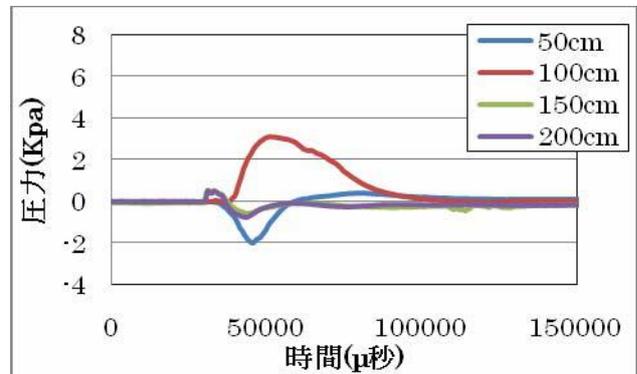


図 9 装薬量 500g, 装薬深 50cm の爆風圧

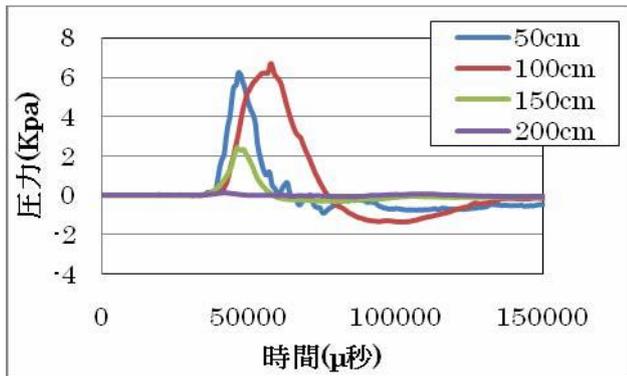


図 10 装薬量 500g, 装薬深 100cm の爆風圧



図 12 爆雪圧の計測状況

5. 爆雪圧の計測

5. 1 計測方法

爆雪圧の計測としては、図 11 に示すようにロードセルを箱の中に入れ、受圧板 (15cm×15cm) の中心を装薬位置と同じ高さに設置した。また、箱の中には、受圧板と箱の摩擦を無くすために、滑車を取り付けてある。ロードセルの入った箱は、型枠を固定する鉄製の突っ張り棒で固定し、反対側は、動かすようにベニヤ板を雪中に埋設している。実際の設置状況を図 12 に示す。

今回の実験では、発破位置からの水平距離 150cm と 100cm の地点において、発破によって雪中を伝わる雪圧を計測した。

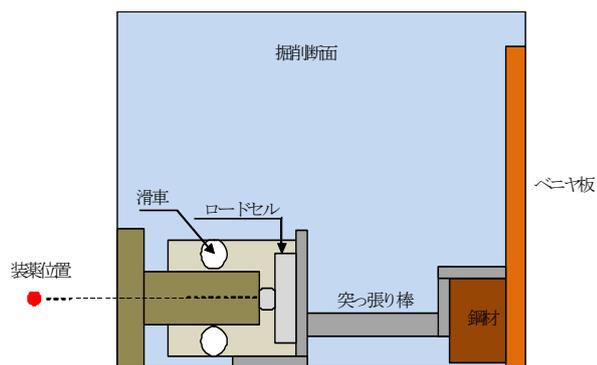


図 11 爆雪圧測定概要図

5. 2 爆雪圧計測結果

各装薬条件における爆雪圧の測定結果を図 13, 図 14, 図 15, 図 16 に示す。この結果、爆薬量が同量の場合、装薬深が浅くなると噴出現象が顕著に生じるため伝播する圧力が低下していることが明らかとなった。さらに、爆薬量が増加しても、装薬深が浅く噴出現象が発生するために伝播する雪圧があまり変わらない結果となった。これらから、装薬量を多くしても積層を破壊する圧力の伝播が大きくなる言える。

各条件において、水平距離が 50cm しか違わないのに、計測された圧力は非常に小さくなることが明らかとなった。このことから、積雪が衝撃圧を吸収する効果が非常に高いことが伺える。

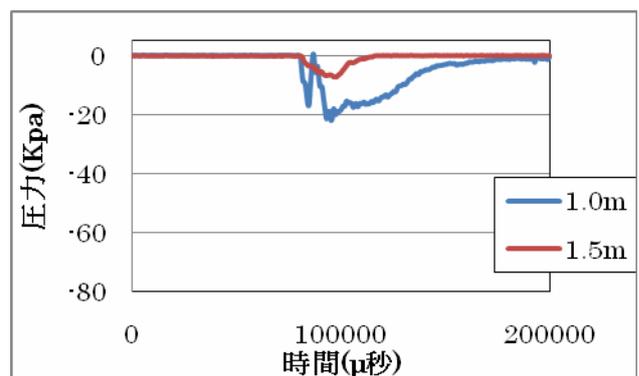


図 13 装薬量 300g, 装薬深 50cm の爆雪圧

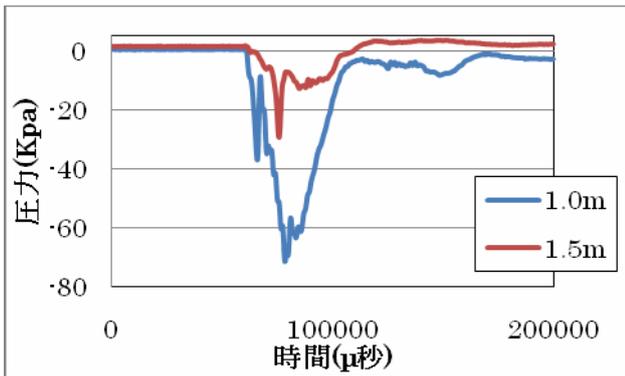


図 14 装薬量 300g, 装薬深 100cm の爆雪圧

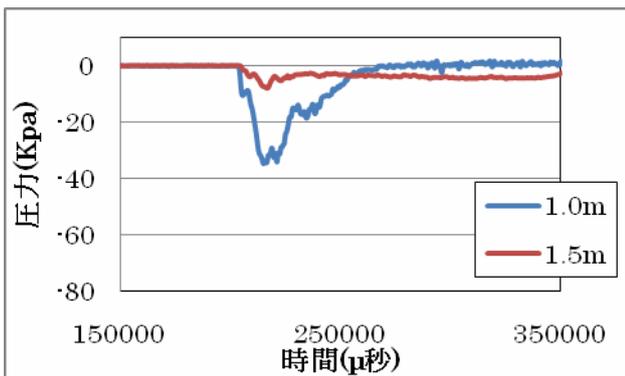


図 15 装薬量 500g, 装薬深 50cm の爆雪圧

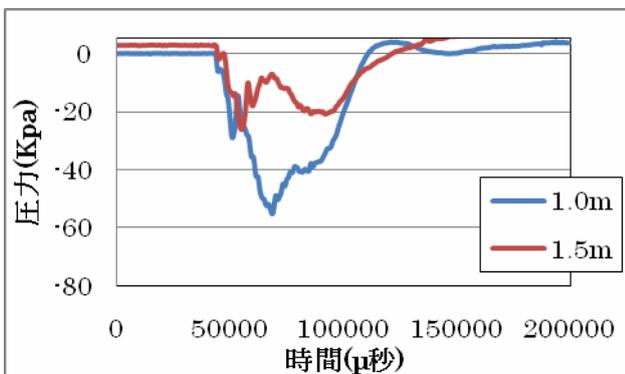


図 16 装薬量 500g, 装薬深 100cm の爆雪圧

6. 発破騒音の計測

6. 1 計測方法

騒音測定には、計量法普通騒音計 NL-21(リオン製)を用いた。音波の中で、人間の可聴できる音は、周波数が 20~20000Hz で音圧レベルが 0~120dB の範囲と言われている。発破による音が騒音となるのは、その音の大きさが主要な要因となるが、音の大きさを測定することが難しく、騒音測定においては音の大きさにできるだけ近似した値を測

定し評価する。今回の計測においては、騒音レベルの周波数特性は、A 特性を用いている。A 特性は、低い周波数の音に対しては相対的に感度が鈍いという人間の耳の特性をとり入れたものである。この A 特性による補正特性を用いて測定した音圧レベルを騒音レベルまたは、A 特性音圧レベル (A-weighted sound pressure level) LA と言い、単位は dB である。今回の測定においては、発破時の最大値 (LAmax) を計測し、サンプリング周期は 30.3μs とした。騒音計の設置条件として、装薬箇所から水平距離 30m の地点に雪面上 1.5m の位置に設置した。

6. 2 発破騒音の計測結果

表 2 に発破により雪面上に雪が噴出した痕跡を計測した結果を示す。今回の実験では、装薬量 100g, 装薬深 50cm の条件以外全てで、噴出現象が確認された。

各装薬量において、図 17 に示すように装薬深が深く噴出現象が少ない場合に、発破騒音が少ないことが言える。これは、雪による消音効果が非常に高いためと考えられる。

表 2 積雪表面に生じた噴出孔直径

装薬深 \ 爆薬量	150cm	100cm	50cm
100g	0cm	140cm	150cm
300g	235cm	235cm	200cm
500g	320cm	285cm	220cm

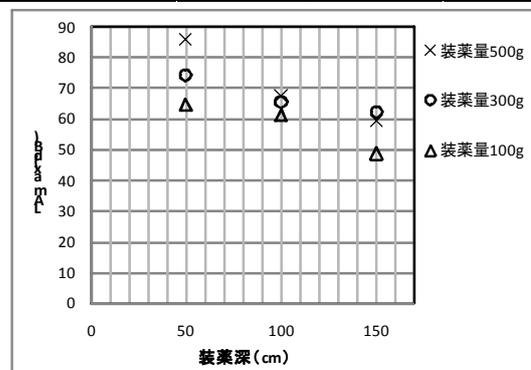


図 17 各装薬条件における発破騒音の最大値

7. まとめと今後の課題

今回の実験により、積雪中を伝播する圧力である爆風圧、爆雪圧ともに積雪表面から空気中へ圧力が噴出すると伝播する圧力が低下することが明らかとなった。このことから、効率的かつ安全な装薬配置を考える上で重要な成果を得ることが出来た。また、爆雪圧の伝播においては水平距離 150 cm における圧力減少が著しく、装薬間隔を決定する重要な計測をすることができた。今後は、さらに解析を進め、噴出現象と発破点に加わる積雪の上載荷重や雪質の関係を導き出し、装薬方法の確立を行っていきたい。

また、雪中爆破による発破騒音の計測では、噴出現象が発生することによって、発破騒音が増大することが分かった。さらに、積雪による消音効果が非常に大きいことが定量的に把握できたことは、大きな成果となった。

路面状況測定のためのデータ処理方法に関する検討

富山工業高等専門学校 高田 英治

キーワード：カメラ、画像処理、路面凹凸、凍結、特殊路面、照明

1. はじめに

我々のグループでは、図-1 に示すようにラインレーザーを積雪面上に照射し、カメラで撮影した画像をコンピュータで処理することにより、積雪の状況を把握するシステムについて検討を行っている。積雪深に加え雪の凹凸状況などの情報も積極的に取得するシステムを目指した。平成 19 年度までの研究により、高さ 5m にレーザー、カメラを設置しても、1cm 程度以上の精度で平均積雪深が測定できることが示された。しかし、可視レーザー(赤)を用いた場合には、昼間の明るい時間帯に測定が難しいとの結果が得られていた。そこで平成 20 年度には、近赤外レーザー及びカメラを用いて測定可能な時間帯を拡大すること及びノイズ等の写りこみの影響を画像処理によって除去することを目的に検討した。

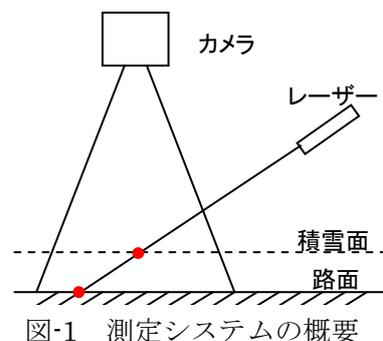


図-1 測定システムの概要

また凍結検知を目標として、路面に人工的に凹凸を作った上でラインレーザー法と組み合わせ、乾燥・ぬれ・凍結の各状態を画像から定性的に判別する手法についても検討を行った。

2. ラインレーザー法の適用時間帯拡大及びノイズ除去に関する実験

(1)実験の概要

適用時間帯の拡大のために、太陽光強度の小さい近赤外領域のレーザーを用いた。実験は防災科研雪氷防災研究センターの実験道路で行った。図-2に示すように高さ5mの位置に近赤外ラインレーザー(アルゴ: LyteMV-Excel)及び近赤外カメラ(アートレイ: ARTCAM-130MI-NIR)を設置し、明るい時間帯における測定可能性を検討するとともに、ノイズ除去のための画像処理手法の開発を行った。



図-2 防災科研の実験道路における実験風景

実験は快晴の昼間(照度: 約 80,00Lux)に行った。アスファルトは黒色のために光の反射が小さく、もともと本測定には適していない。そこで雪面を模擬するために路面上に白色の布を敷き、その上に近赤外レーザー光を照射してカメラ撮影を行った。

ノイズ除去アルゴリズムの検討においては、あえてレーザー光以外の像が写りこんだ画像を撮影した。その後、ハフ変換等の画像処理を施すことで画像からレーザーの光像のみを取り出すことを検討した。処理内容は図-3に示す通りである。具体的には画像からの直線抽出アルゴリズムとしてよく知られているハフ変換を行う。ハフ変換は部品検査などでもよく使われる手法であるが、雪面

での反射光に適用する場合には測定されるラインの幅が広いこともあり特別な処理が必要であった。

例えば、ハフ変換がよく用いられる半導体部品検査のような場合には、細いラインが測定できるために1度のハフ変換で2本の直線の抽出が可能である。しかし雪面での反射光に適用する場合には測定画像におけるラインが太いために、単純にハフ変換を行っても傾きが少し異なる直線が得られるだけとなる。そこで今回は1度のハフ変換で得られた直線を原画像上に投影し、その直線周辺の画素を消去した上で再度ハフ変換を行うという手法をとった。このようにすることである程度の大きさの凹凸であれば抽出が可能となった。また、ハフ変換を行って直線抽出を行うため、単純な最小二乗法による直線抽出と違いノイズの多い画像でもレーザーのラインが抽出可能となった。

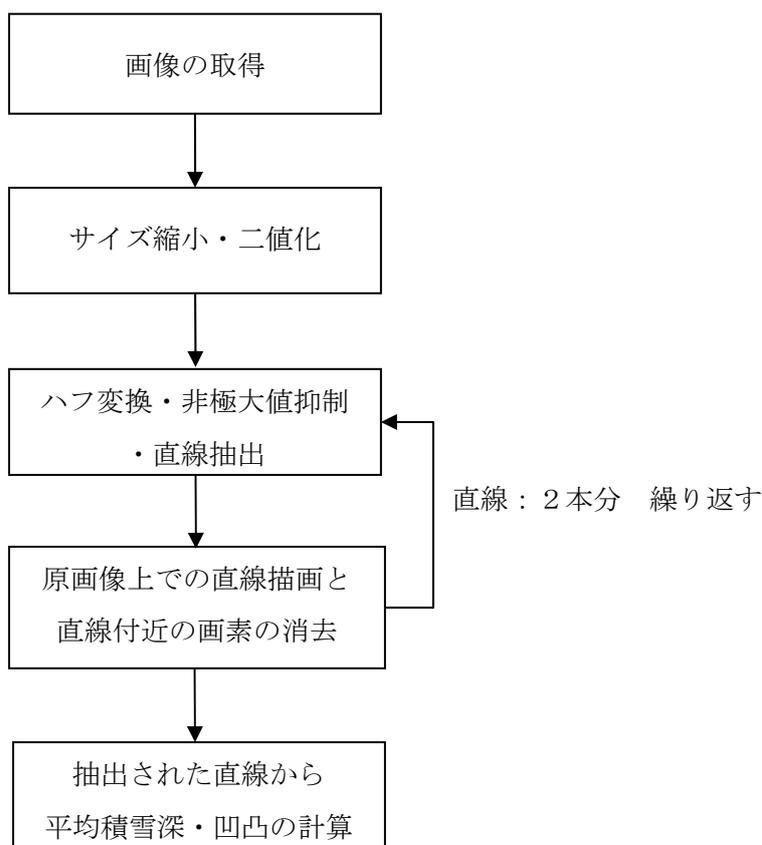


図-3 今回試みた画像処理のフロー

(2)実験結果

近赤外レーザーによる使用可能時間帯の拡大のための測定は、露光時間設定を変化させて行った。そのうち露光設定：550 及び 300 の場合の測定結果を図-4(a)及び図-3(b)に示す。露光時間設定値が大きいほど露光時間は長くなっている。

図-4 を見ると、露光設定が 550 の場合にはレーザー光を表すラインが観測できていないことが分かる。これは露光時間が長すぎるために周囲の明るさの影響を強く受け、ほとんどの画素値が最大値 (255) に達してしまったために、レーザーの部分とほかの部分の違いが無くなったことが原因である。一方、露光時間設定を 300 まで小さくすると、図-3(b)に示すようにレーザーのライン

が明瞭に測定できている。画素値の飽和がなくなったためと考えられる。実験は3月に行っており、照度もかなり大きい状態であった。従って、今回の実験により、近赤外レーザーを用いることで昼間の時間帯でも測定可能となったといえる。ただし、夜間は露光時間をもう少し長くした方が明瞭な画像が得られる。そこで今後は照度計データをパソコンに取り込み、露光時間設定を自動的に行うようにシステムを改良することが必要である。

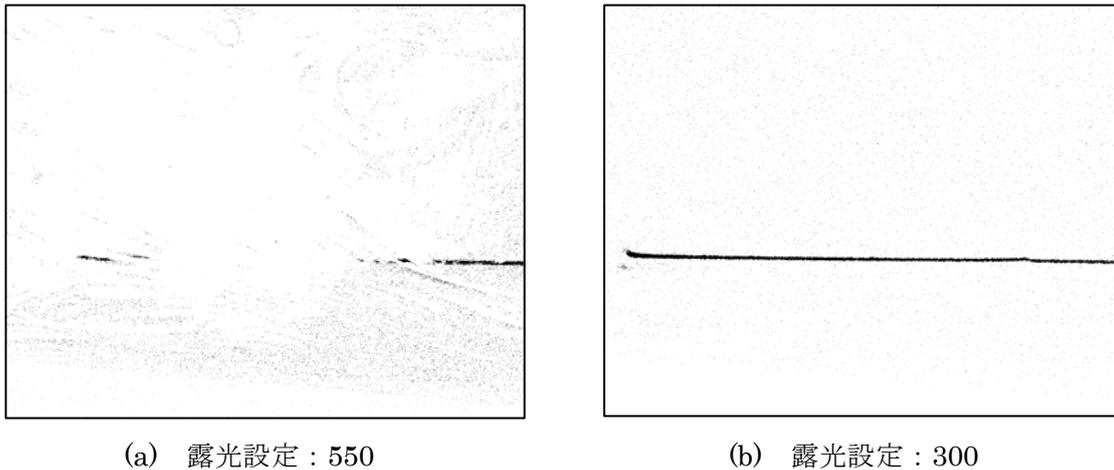


図-5 露光を変えた場合の測定結果例

一方、ノイズ除去アルゴリズムの適用結果を図-5 に示す。二値化原画像（図-5(a)）では水平に近いレーザーの像に加え、縦に何かの影に起因する像が写りこんでいる。この画像に対して図-3 のフローに従って処理を施すと、図-5(b)が得られた。影に起因するノイズは明らかに傾きが異なることから、レーザーの光像のみが抽出できていることが分かる。最小二乗法と違って点状のノイズがあっても直線だけが抽出でき、正確に積雪深等の測定が可能である。

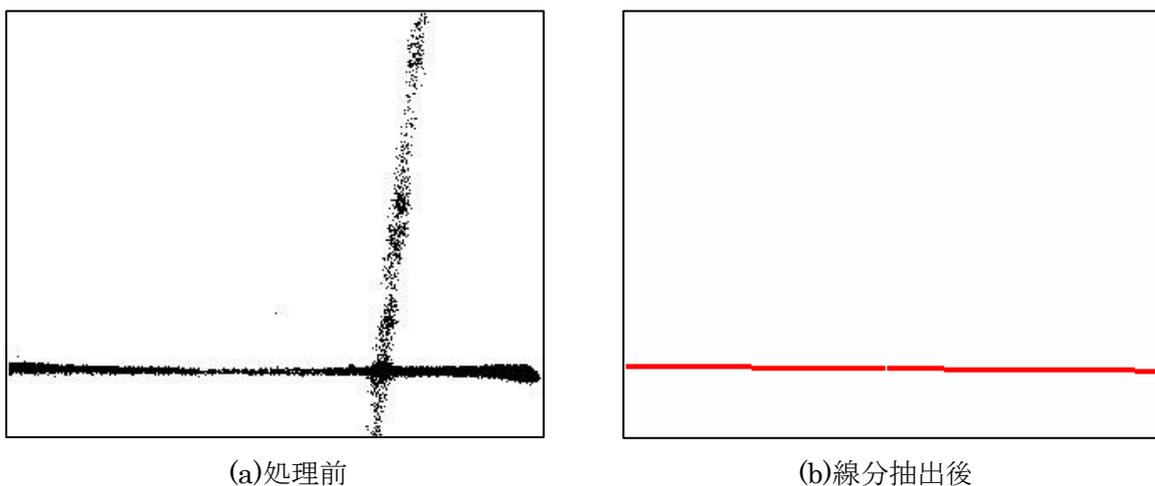


図-5 ノイズ(影)のある画像の処理結果例

3. ラインレーザーによる凍結検知のための実験

(1) 実験方法

図-6のような凹凸加工を施したアルミ板を模擬路面とし、その上にラインレーザーを照射した。この凹凸路面の凹部の深さは0.5mm、1.0mm、1.5mmの3種類とした。図-7に示すように、測定対象とする模擬路面に対して斜め方向からレーザー光を照射し、その際の路面の変化の様子をカメラで撮影した。このとき、乾燥路面では図-8(a)に示すように、凹凸のライン形状が測定されることを想定した。一方、水や氷によって溝が埋まっている場合には、水・氷中の光の屈折により図 15(b)に示すようにライン形状が直線に近く測定されることを想定した。



図-6 アルミ模擬路面上の凹凸

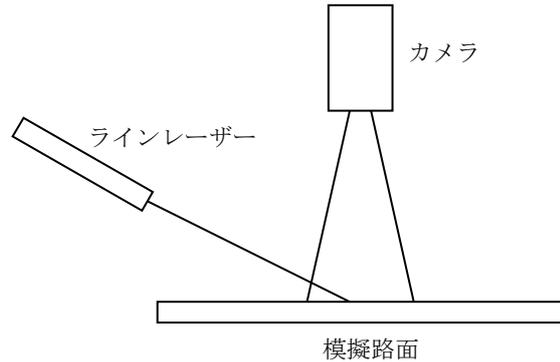
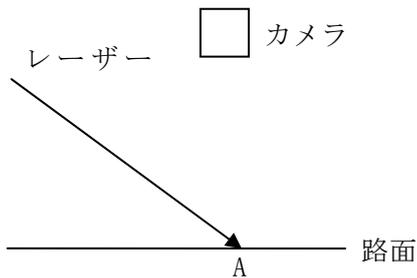
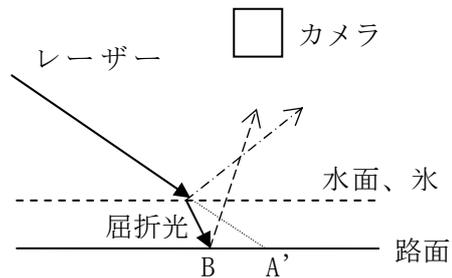


図-7 測定体系



(a) 乾燥状態



(b) 水・凍結状

----- 乾燥状態でのライン

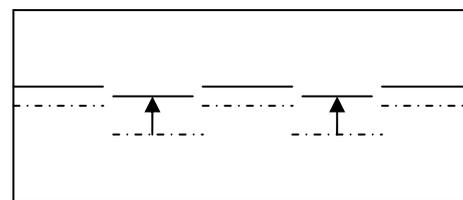
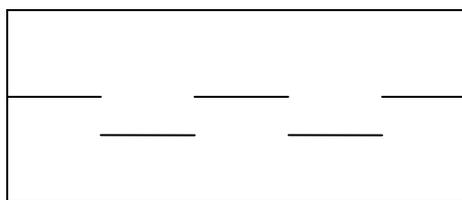


図-8 レーザー光の反射・屈折による位置の変化

(2) 測定結果

模擬路面が乾燥した状態、「ぬれ」状態、凍結状態での測定結果をそれぞれ図-9～図-11に示す。これらは凹凸の深さが1mmの場合の結果を表している。乾燥状態では、画像上に凹凸のライン形状がはっきりと現れたのに対し、「ぬれ」・凍結の状態では画像上で凹凸のライン形状が得られず、ほぼ直線的な結果となった。



図-9 乾燥状態の測定結果

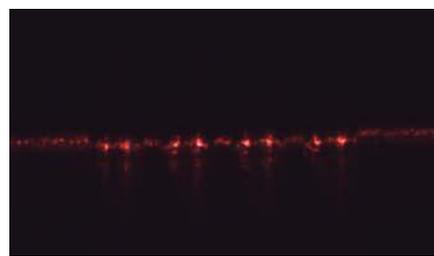


図-10 ぬれ状態の測定結果

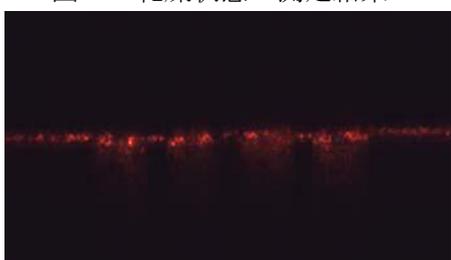
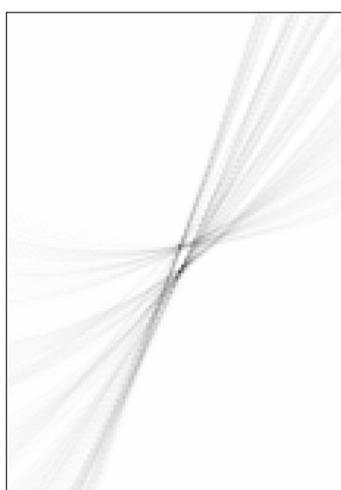


図-11 凍結状態の測定結果

上で得られた画像に対して細線化、ハフ変換などの画像処理を施し、測定されたライン形状の特徴を抽出した。ハフ変換の結果を図-12に示す。図-12はハフ変換によって原画像を $\rho - \theta$ 平面に投影したものであり、多くの曲線が交わっている交点が原画像上の直線に相当する。図-12を見ると、(b)ぬれ状態、(c)凍結状態では、ハフ変換により得られた曲線の交点が近接して存在しているのに対し、(a)乾燥状態では曲線の交点が明らかに離れて存在していることが分かった。すなわちこの画像から交点の近接度を抽出すれば、乾燥状態か否かを測定することができる。



(a)乾燥状態



(b)ぬれ状態



(c)凍結状態

図-12 ハフ変換結果

(3)凍結検知への適用可能性について

上で述べたように、路面に人為的な凹凸構造を作り出し、ラインレーザーを用いた測定を行うことで乾燥状態か否かを判断できる可能性がある。一方、これまでも偏光を用いてぬれ検知を行おうとする研究が行われてきたが、今回はその追認試験を行った。その結果、偏光を用いた測定により、ぬれ状態を凍結状態・乾燥状態と区別できる可能性が示された。今回提案した人工凹凸法と既往の偏光法を組み合わせることで、下のような表に従って凍結状態を検知できる可能性がある。すなわち凹凸法でハフ変換結果が近接しており、しかも偏光法で反射に伴う最大輝度値が小さければ凍結している、という予測ができる可能性がある。今後、周辺光が存在する場合についても検討を行い、実用化可能性を検討したい。

表-1 路面状態の判別表

	凹凸法でのハフ変換 結果の近接度	偏光法での反射に伴う 最大輝度値
乾燥	離れている	非常に小
ぬれ	近接している	大
凍結	近接している	小

5. まとめと今後の課題

ラインレーザーと画像処理による路面積雪状況測定手法に関し、近赤外レーザー及び近赤外カメラを用いることで昼間の時間帯にも適用可能であるとの見通しを得た。また、ハフ変換等の画像処理手法を適切に組み合わせることで、レーザー光以外に起因する影・ノイズ等を除去し、正確にレーザー光像を抽出できることを示した。

また、路面に人工的な凹凸を作っておくことで凍結検知を行う手法について基本的な検討を行った。乾燥状態とぬれ状態・凍結状態を区別できるとの原理的な可能性を示した。一方、これまでも検討されてきた偏光を用いる手法により、ぬれ状態を凍結状態から区別できることも再確認した。これらの手法を組み合わせることで凍結状態のみを抽出できる可能性がある。現段階では実験室内の理想的な環境での実験にとどまっていることから、今後はより実際に近い条件での実験を通じ、実用化可能性の検討を行う予定である。

連続滑り抵抗測定車による路面雪氷と滑り摩擦に関する研究

福井大学大学院 教授 福原 輝幸

キーワード： μ マップ、路面滑り摩擦係数、凍結路面、積雪深、質量含水率

1. はじめに

冬期道路は凍結・残雪によるスリップ事故の危険性が高い箇所が点在する。滑り摩擦係数(μ)マップは、路面の危険度(滑り易さ)を地図上に図示したもので、道路管理の効果化と利用者に周知すれば交通安全性の向上の一助となる。従来、技術的・経済的な問題から μ マップの作成は難しかったが、福井大学が新たに導入した連続滑り抵抗測定車(RT3)は、通常の運転で滑り抵抗値(HFN)を連続的に計測し、リアルタイムに表示することができる。これにより、 μ マップ作成を実現できる可能性が高まった。しかしながら、 μ とHFNの関係は不明な点が多く、特に雪氷路面におけるHFNのデータが不足している。

そこで本研究では、シャーベット路面でHFN測定を行い、雪氷物性とHFNの関係を調べた。

2. 連続路面滑り抵抗測定車

図1は、RT3の概観を示す。HFNは、車両後部に装着した第5輪を車両進行方向に対して微小(1~2%程度)な角度に設置し、この状態で路面上を転がすことで測定される。HFNはタイヤ空転時(抵抗最小)を0、乾燥舗装走行時を通常80から100(路面温度に依存)に較正される。従って、HFNは0から約80を変動し、凍結路面のように滑りやすい(抵抗が小さい)ときに小さく、湿潤や乾燥路面のように滑り難い(抵抗が大きい)時に大きくなる。なお、通常の走行では、



図1 連続路面滑り抵抗測定車

第 5 輪は舗装と接触せず、HFN 測定時に第 5 輪が油圧ポンプによって降下し、舗装と接触して HFN を測定する。HFN の測定間隔は最小で 0.01sec（時速 40km/h 走行時で約 10cm）である。また、得られた微小間隔の HFN は任意の時間間隔に平均化できる。計測された HFN は外部記録装置に自動記録されると同時に、リアルタイムに運転手横のディスプレイに表示される。

3. 野外実験の概要

本実験は、平成 21 年 1 月 9 日から平成 21 年 1 月 12 日の日中に福井大学文京キャンパス内駐車場で行われた。図 2 は野外実験の概要を、図 3 は実験の様子をそれぞれ示す。実験では図中に示すように、密粒アスファルト舗装上の積雪（図の灰色）で RT3 を速度 30km/h で通過させ、HFN を測定した。また、雪氷厚を 9 箇所（図中の□）でノギスを用いて、質量含水率を 3 箇所（図中の△）で遠藤式含水率計を用いて、雪氷密度を 3 箇所（図中の△）でスノーサンプラーを用いて、それぞれ測定した。

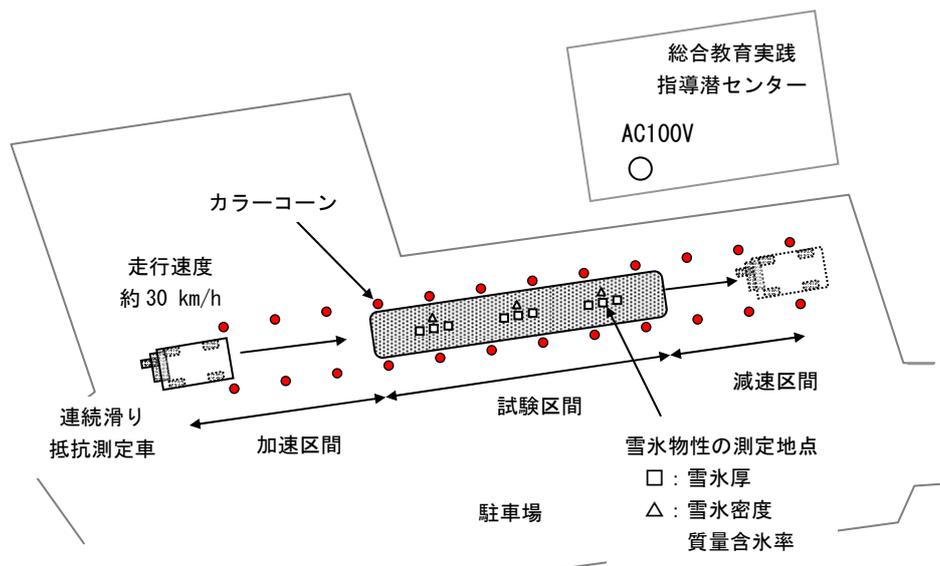


図 2 野外実験の概要図



図 3 野外実験の様子

4. 実験の結果

4-1 気象

図4および図5は、気象庁の気象統計情報サイト¹⁾から得られた実験期間における気温と相対湿度および積雪深と時間降雪強度を示す。なお、同図には HFN 測定期間（帯状部分）とその時の路面状態を併せて示す。

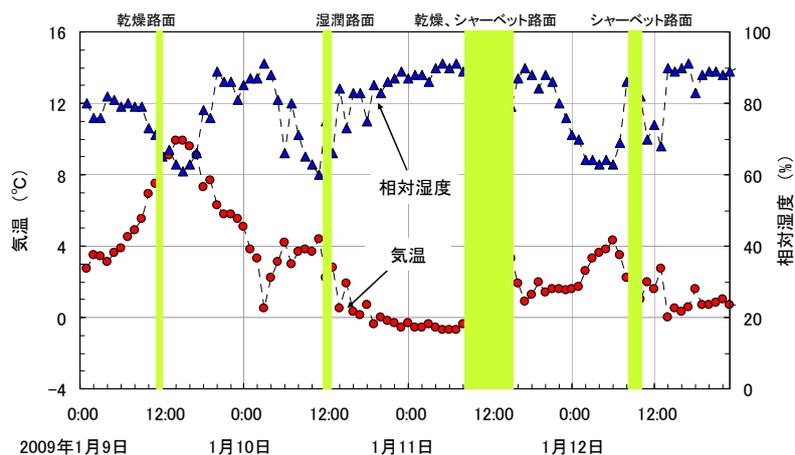


図4 気温および相対湿度の時間変化

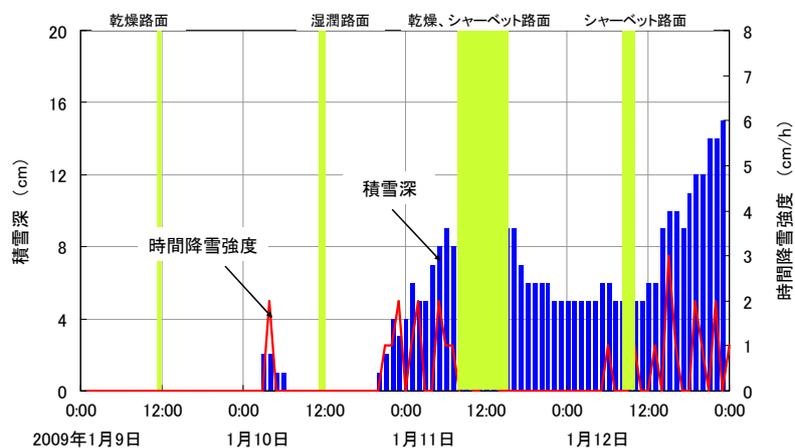


図5 積雪深と時間降雪強度の時間変化

4-2 質量含水率と HFN の関係

図6は、質量含水率と HFN の関係を示す。図中の●は雪氷厚が 10mm 未満で、△は雪氷厚が 10mm 以上の結果である。同図より雪氷厚が 10mm 未満（●）の HFN は、質量含水率に依存する

ことなく、80 前後の値をとり、湿潤路面の HFN と変わらない。これは、雪氷厚が 10mm 未満ではタイヤが通過する際に雪氷層が押し分けられ、タイヤと舗装が接触するためと考えられる。一方、雪氷厚が 10mm 以上ではタイヤと舗装が非接触状態にあると推測され、雪氷厚が 10mm 未満よりも HFN は低いレベルにあり、質量含氷率の増加に伴い緩やかに低下する。なお、この結果はこれまでに得られた質量含氷率と μ の関係²⁾と同じ傾向である。

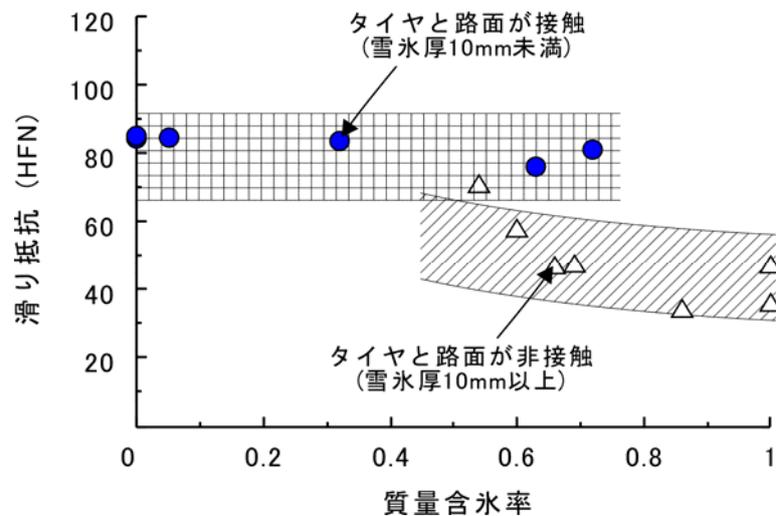


図6 質量含氷率と HFN の関係

5. まとめと今後の課題

本研究では、RT3 による HFN 測定と雪氷物性（雪氷厚、質量含氷率および雪氷密度）測定を実施した。その結果、雪氷厚が 10mm 未満では質量含氷率が増加しても HFN は変わらず湿潤路面と同程度であり、雪氷厚 10mm 以上になると質量含氷率の増加に伴い HFN は緩やかに低下することが分かった。これにより、RT3 から得られる HFN は μ と同じ物理量を捉えていることが示唆された。

昨冬は、近年の小雪傾向の代表的な年であり、実験を行う機会が十分に得られなかった。今後は更に実験を追加し、昨冬に得られなかったデータの補間を行いたい。

参考文献

- 1) 気象庁気象統計情報 (<http://www.data.jma.go.jp>)
- 2) 藤本明宏、渡邊洋、福原輝幸ら：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、日本雪工学会、Vol. 21、No. 5、pp. 26-35、2005.