

# 新たな屋根雪下ろし装置の開発 およびその性能評価に関する事業

工博 福井大学 研究機関研究員 寺崎寛章

## 1. 事業背景

近年、世界各地で発生している自然災害が人々に大きな被害をもたらしている。2011年だけでも、2月のアメリカ中西部(シカゴなど)豪雪、4月のタイの大洪水、8月のアメリカ南部の大干ばつなどが記憶に新しい。

日本でもゲリラ豪雨や豪雪などが年々頻発しており、これらの被害は深刻である。一般的に地震や風水害にのみ注目されがちだが、雪害も大きな被害をもたらしている。事実、平成13年～平成22年の雪害による犠牲者の数は全自然災害の犠牲者の3割を超え、雪害は風水害に次ぐ第二の自然災害となった。

特に56豪雪、18年豪雪および平成22年度の大雪では大きな物的・人的被害が生じた。例えば、平成22年度冬期の大雪では、鳥取県内の国道9号、福島県内の国道49号および福井県内の国道8号において、大型車両が走行不能となったため、長時間に亘り150台以上の車両が道路上に滞留した。また、鉄道では北陸線が運転を休止し、車両内に乗客が閉じ込められるなどの被害が相次いだ。さらに東北電力、中部電力、北陸電力、関西電力および中国電力で延べ約56万5千戸が停電になったほか、上水道は長崎県等で約1万戸が断水し、通信関係では固定電話で障害が発生し、携帯電話の基地局が停波するなど、その被害は多方面に亘った。

また、家屋に関する被害も多く、秋田県、島根県等の21道府県で全壊9棟、半壊14棟、一部損壊623棟、床上浸水6棟および床下浸水62棟が報告された。また、空き家から屋根雪放置による倒壊、落雪による物的・人的被害

も深刻である。平成10年度～平成20年度の10年間に、空き家は181万戸増加しており、今後、空き家に関連する雪害は更に増加する懸念がある。

一方、雪害による物的被害だけではなく、人的被害も著しい。図-1は平成16年度～平成22年度における福井県、山形県および新潟県の雪害関連の死傷者数を示す。図-1より、平成18年度～平成20年度の3県の死傷者数は非常に少ないものの、平成17年度および平成22年度の死傷者数は著しく多いことが分かる。また、図-2は同3県の平成16年度～平成22年度における降雪量と雪害関連の死傷者数の関係を示す。図-2より、3県の死傷者数は年降雪量の増加に伴い、指数関数的に増加する。また、山形県の死傷者数は、新潟県のそれよりも増加傾向は緩やかなものの、年降雪量が約320cmで死傷者数は100人を超える。なお、福井県ではデータが少ないものの、山形県と同様の傾向が見られる。このように、豪雪で多数の死傷者が報告されたにも関わらず、毎年の降雪量が一定ではないため、雪害の社会的関心は希薄になりがちである。

図-3は平成22年度の山形県の原因別の死傷者数の割合を示す。上述の人的被害は、136人が屋根からの転落(61%)、27人が屋根からの落雪(12%)、22人が除雪機による事故(10%)および21人が転倒(9%)であり、人的被害の約73%が屋根雪に関連していることが分かる。従って、屋根雪対策の強化が雪害防止の根幹となる。

雪害は社会構造とも関連がある。特に、中山間部では過疎高齢化が急速に進んでおり、高齢者世帯での屋根雪処理が大きな問題となっている。平成22年度の大雪では死者131名中、65歳以上74歳以下が全体の27%、75歳

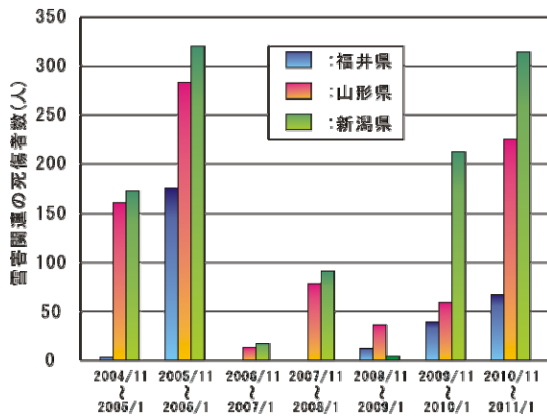


図-1 過去7年間の雪害関連の死傷者数

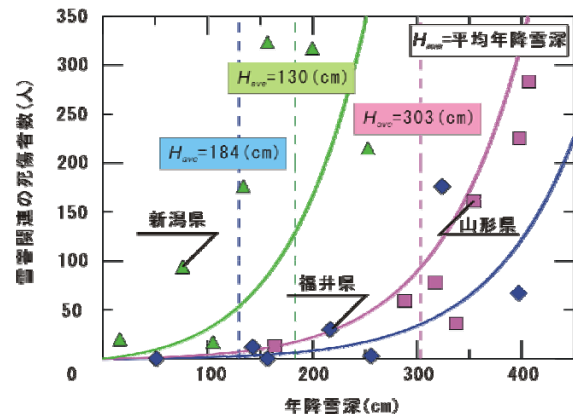


図-2 年降雪深と雪害関連の死傷者数の関係

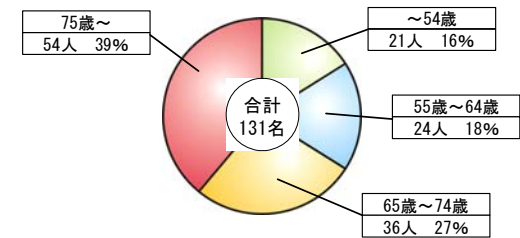
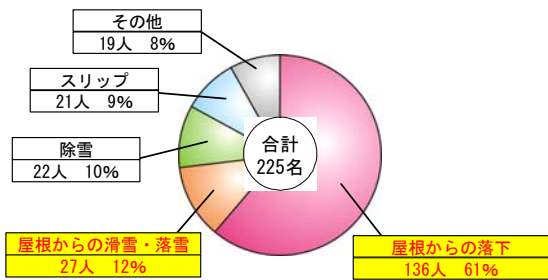


図-3 平成22年度の山形県の雪害関連の原因別死傷者数

図-4 平成22年度の全国の雪害関連の死者年齢別構成

表-1 従来の屋根雪処理方式

| 方式  | 細目  | 内容・機材       |              | 課題点          |
|-----|-----|-------------|--------------|--------------|
| 除排雪 | 人力  | スコップ・スノーダンプ |              | 危険           |
|     | 機械  | 滑落          | 除雪板・シート      | 滑落のタイミング不明   |
|     |     | 装置          | 発熱切断         | コスト増加、荷重増加   |
|     | 自然  | 急勾配         |              | 滑落のタイミング不明   |
| 放置  | 耐雪  | M型屋根        |              | 初期コスト増加      |
| 消融雪 | 散水  | 水道水・地下水     |              | 水量の確保難、凍結の恐れ |
|     | 無散水 | 滑落          | 発熱体（面状・線状）   | コスト増加        |
|     |     | 装置          | 放熱パイプ（温水・温風） | コスト増加        |

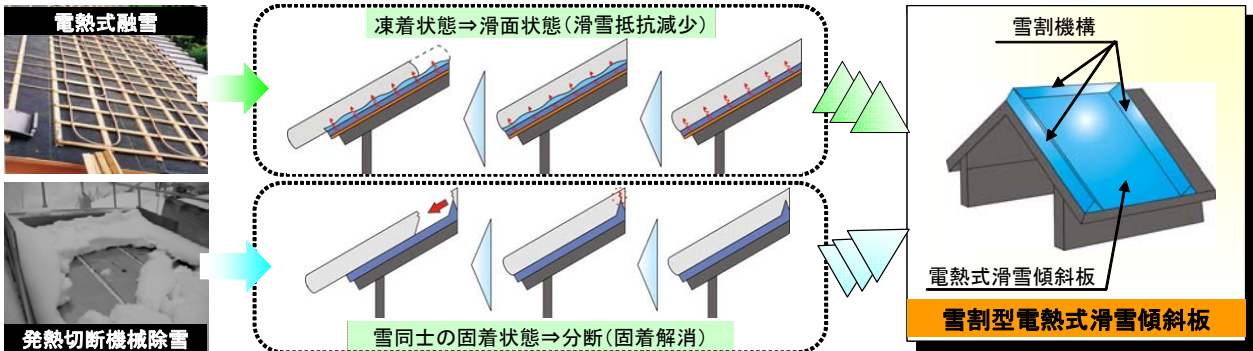


図-5 新たな雪下ろし装置のコンセプト

以上が全体の39%であり、65歳以上の高齢者が全体の約66%を占める（図-4を参照）。また、死傷者の約半数が1人での除雪作業中に事故が発生しており、除雪作業に対する高齢者の負担増加や油断等が事故の原因であると思われる。このように、高齢者世帯の屋根雪下ろしが重要課題である。

## 2. 従来の屋根雪対策

従来の屋根雪処理方式（表-1を参照）は、(I)除排雪、(II)放置および(III)消融雪に分けられる。(I)の人力による除排雪は最も一般的だが、先述の様に危険性を伴い、機械除雪ではコストの増加や屋根荷重が増加する。また急勾配屋根は、降雪時期の予測が困難であり、降雪および落雪による危険性が高い。(II)M型屋根を代表とする耐雪では、雪下ろしを行う必要はないが、インシャルコストが高く、既存の建物に適応し難い。(III)温水や電熱を使用する消融雪では、屋根雪処理能力は高いが、ライフサイクルコストが高く、漏電やパイプ内流体の凍結などの問題がある。

上述のようにいずれの屋根雪処理方式も(1)高コスト（経済性）、(2)耐久性、(3)重量および(4)降雪時期の予測（安全性）などにそれぞれ固有の課題を残している。

## 3. 事業目的

本研究では、まず電熱式融雪および発熱切断機械除雪に着目した。従来の電熱式融雪では屋根雪を融雪するために膨大なエネルギーを必要とし、コストの増加や装置停止後は再凍結等の課題が生じている。しかしながら、滑面状態を作り出し、付着力を低下させるだけならばエネルギーを最小限に抑えることができる。

また発熱切断機械除雪では、屋根上の雪を切断しても周囲との雪を分断しない限り、滑雪し難いことが既に明らかとなっている。すなわち装置周辺の雪と縁を切断する工夫（雪割機構）が必要である。

そこで本事業では、図-5に示すように滑面状態を作り出す電熱式滑雪傾斜板に雪割機構を付属した新たな屋根雪下ろし装置（雪割型電熱式滑雪傾斜板）を提案し、その効果を検証することを目的とする。



$F_s$ : 滑雪抵抗力  
 $F_{sf}$ : 静摩擦力  
 $F_a$ : 付着力

図-6 平板上の滑雪運動モデルの概要

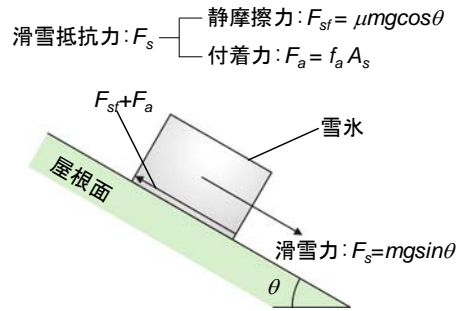


図-7 斜面上の滑雪運動モデルの概要

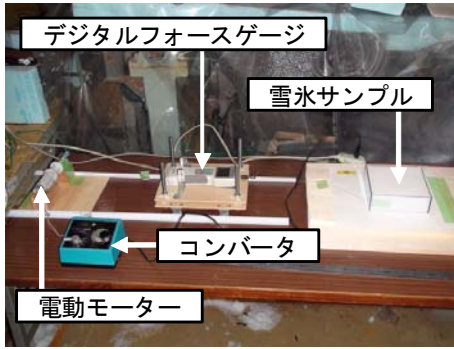


図-8 室内凍着実験概要

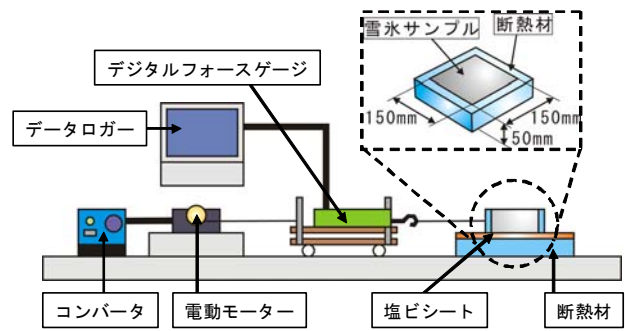


図-9 滑雪抵抗試験装置概要

#### 4. 滑雪モデル

滑雪の抵抗力には摩擦力と付着力があり、平板上の滑雪運動方程式は式(1)で表される(図-6を参照)。

$$F_s = F_{sf} + F_a \quad (1)$$

ここに、 $F_s$ : 滑雪抵抗力(N),  $F_{sf}$ : 静摩擦力(N)および  $F_a$ : 付着力(N)をそれぞれ意味する。なお、付着力は雪氷の凍着力や雪氷界面における水の摩擦力を意味する。

次に、斜面(屋根面)上の滑雪運動方程式(つり合い方程式)は式(2)~(4)を用いて、式(5)で表される(図-7を参照)。

$$F_s = mg \sin\theta \quad (2)$$

$$F_{sf} = \mu mg \cos\theta \quad (3)$$

$$F_a = f_a A_s \quad (4)$$

$$mg \sin\theta = \mu mg \cos\theta + f_a A_s \quad (5)$$

ここに、 $m$ : 雪氷重量(kg),  $g$ : 重力加速度( $m/s^2$ ),  $\theta$ : (屋根)勾配( $^\circ$ ),  $\mu$ : 静摩擦係数(-),  $f_a$ : 単位面積当たりの付着力( $N/m^2$ )および  $A_s$ : 接触面積( $m^2$ )であり、 $\mu$  および  $f$  は質量含水率 $\theta_w$ (%)の変数と考えられる。なお、式(5)より、雪氷の滑落は  $F_s > (F_{sf} + F_a)$  になった時点で始まる。

#### 5. 室内および野外滑雪実験

##### (1) 室内凍着実験

図-8は室内凍着実験の概要を、図-9は滑雪抵抗試験装

置の概要をそれぞれ示す。実験は雪氷片を作製するアイススライサー(中部コーポレーション製)、均一の雪氷状態を作るための2mm篩い、さらに付着力を測定するためのデジタルフォースゲージ(イマダ製)、雪氷サンプルを引張るための電動モーター(タミヤ製)、測定値を記録するデータロガー(パナソニック製)、試料(塩ビシート)およびコンバータ(カトー製)から構成される。

次に、 $\mu$ の測定手順について述べる。

- 1) 低温実験室( $-5 \sim -6^\circ C$ )にて数十時間置いた氷をアイススライサーによって雪氷片を作製し、さらに数十時間置く。
- 2) 試料(縦300×横300mm)上に断熱材の型枠(内法:150×150mm, 高さ:50mm)を設置し、上方から雪氷片を篩いにかける。
- 3) 2)の雪氷片を型枠内で成型し、雪氷サンプルを2個作製する。
- 4) 試験体(雪氷サンプル, 試料および断熱材)ごと恒温実験室( $25^\circ C$ )に移動させる。
- 5) 任意の時間経過後、低温実験室に再び試験体を移動させ、一方の雪氷サンプル(図-10を参照)の $\theta_w$ を測定する。なお、雪氷サンプルの $\theta_w$ は界面から厚さ約5mmまで(図-10の赤色部)の部分を表させる。
- 6) 型枠とデジタルフォースゲージをナイロン製の紐で固定し、雪氷サンプルが試料上を移動する(滑り出す)までデジタルフォースゲージを電動モーターで水平に引張る。
- 7) デジタルフォースゲージとデータロガーより、測



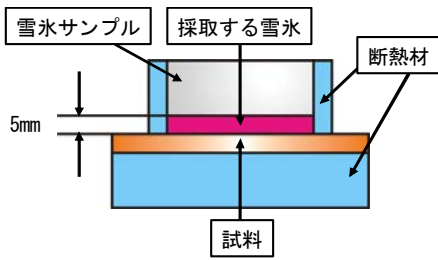


図-10 試験体



図-12 野外滑雪実験現場位置図

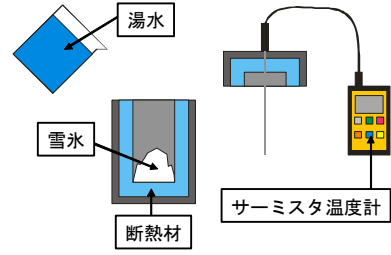


図-11 遠藤式含水率計

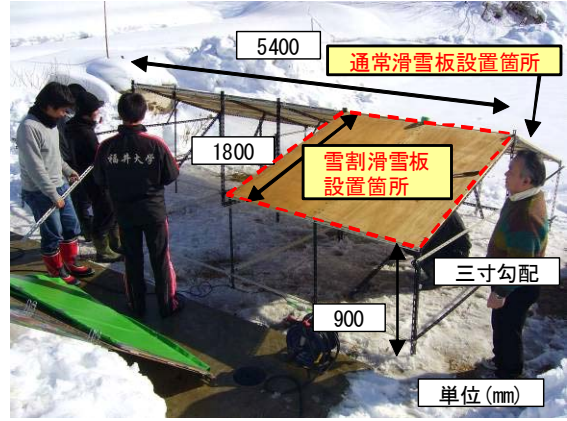


図-13 模擬屋根の製作状況

定間隔 0.05 秒毎の摩擦力  $F_f$  の経時変化を求める。

- 8)  $F_f$  の最大値を静摩擦力  $F_{ef}$  とし、6) および 7) の手順を 3 回行い、 $F_{ef}$  の平均値を静摩擦力  $F_{ef}$  とする。
- 9) 雪氷サンプルの質量  $m$  を測定した後、 $F_{ef}$  を式(3) に代入し、 $\mu$  を求める。

次に、付着力の測定手順について述べる。

- 1) 摩擦係数の測定手順 1)～5) に従い、凍着前の雪氷の  $\theta_w$  を求める。
- 2) 他方の雪氷サンプルを完全に凍着させるために数十時間置いた後、型枠とデジタルフォースゲージをナイロン製の紐で固定し、雪氷サンプルが試料上を移動する(滑り出す)までデジタルフォースゲージを手動で水平に引張る。
- 3) デジタルフォースゲージより  $F_s$  の経時変化を求める。
- 4) 滑りだした直後の  $F_s$  ( $=F_s$  の最大値  $F_{smax}$ ) を求める。
- 5) その後、再度、雪氷サンプルを試料上に設置し、摩擦係数の測定手順 6)～9) と同様の手順で  $F_{ef}$  を求める。
- 6)  $F_s$  および  $F_{ef}$  を式(1) に代入し、 $F_a$  を求める。

最後に、 $\theta_w$  の測定方法について述べる。雪氷の  $\theta_w$  測定には、遠藤式含水率計を用いる(図-11 を参照)。遠藤式含水率計は湯水の水温と質量、雪氷を加えた湯水の平衡温度と質量の関係より、雪氷の  $\theta_w$  を求める方法である。以下に測定手順を示す。

- 1) 含水率計(質量  $M_1$ ) に 30～40℃の湯水を 60～100g 入れる。
- 2) 湯水を入れた含水率計の質量  $M_2$  を測定する。
- 3) 湯水をよく攪拌させてから温度  $T_1$  をサーミスタ温度計(佐藤計量器製作所製)により測定する。
- 4) 含水率計に 15～30g の雪氷を素早く入れる。

- 5) 雪氷を入れた含水率計の質量  $M_3$  を測定する。
- 6) 含水率計内の雪氷が完全に融け、平衡状態に達した時の水温  $T_2$  を測定する。
- 7) これらの測定結果を用いて  $\theta_w$  は式(6) で算出できる。

$$\theta_w = 100 \left[ 1 - \frac{1}{79.6} \left\{ \frac{(M_2 - M_1)(T_2 - T_1)}{M_3 M_2} \right\} \right] \quad (6)$$

## (2) 野外滑雪実験

本事業で提案する雪割型電熱式滑雪傾斜板(以下、雪割滑雪板)の滑雪性能を調べるために、平成24年1月13日～2月14日に亘って野外滑雪実験は福井県大野市六呂師高原スキー場(図-12を参照)にて行われた。実験にはアングル材で縦1800×横1800mmの骨組みユニットを6基製作し、それらを3基ずつ繋ぎ合わせた。その後、その骨組みユニットに垂木を打ちつけ、その上に厚み3mmのベニヤ板を貼り付け、さらに高さ900mmの架台に取り付けることで三寸勾配の模擬屋根(坪み勾配)を製作した(図-13を参照)。

### a) 実験装置

次に、電熱式滑雪傾斜板(以下、通常滑雪板)および雪割滑雪板について説明する(図-14を参照)。通常滑雪板は、縦1800×横1800×厚み20mmの断熱材の上に、毛織物で上下を挟んだ直列配線方式の発熱線(消費電力500W、消費電力量310Wh)を配置した後、厚み0.5mmのステンレス板を表面に貼り付けることで製作された。その後、雨水浸入防止のために断面部および接合部は防水加工を施した。

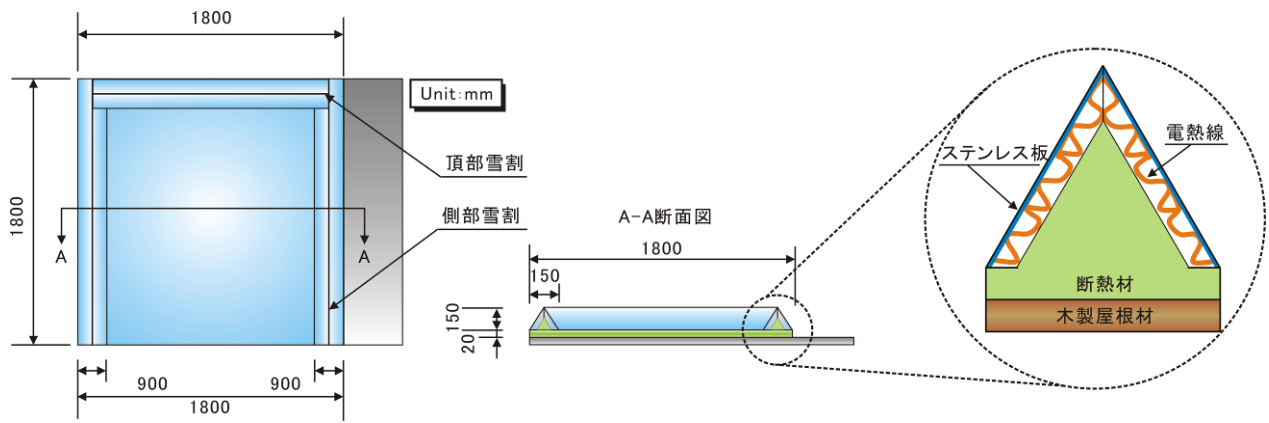


図-14 雪割型電熱式滑雪傾斜板概要

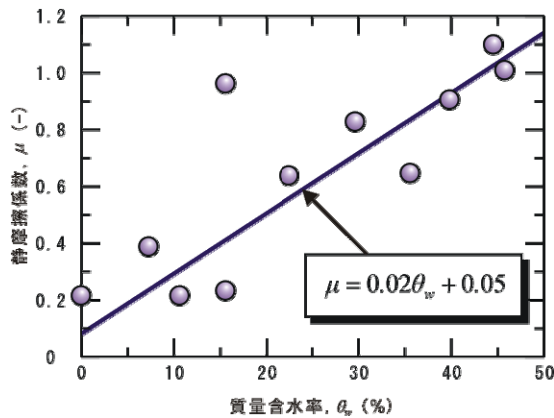


図-15 静摩擦係数と質量含水率の関係

雪割滑雪板は、図-14に示すように通常滑雪板の屋根頂部および両端に雪割装置を備えたものである。雪割装置は、高さ150mm×底辺150mmの三角形状にステンレス板を曲げ加工し、その内部に滑雪板と同様に毛織物で上下を挟んだ発熱線をステンレス板に張り付け、断熱加工して製作された。

その後、雪割滑雪板および通常滑雪板は図-13に示す位置にそれぞれ設置し、これを初期状態とした。

野外滑雪実験ではまず、微気象観測を行った。滑雪実験時における外気温および相対湿度は温度・湿度センサー(Vaisala製)により、日降雪深および時間降雪深は降雪板により、風速は三杯式風速計(牧野応用測器製)により、それぞれ測定される。

また、滑雪実験で使用した雪塊の基本雪氷物性として、雪氷サンプラーおよび電子重量計(Mettler Toledo製)により雪密度  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) を、サーミスタ温度計および熱電対により滑雪板と雪氷との界面温度を、遠藤式含水率計により  $\theta_w$  を、それぞれ測定した。

微気象観測および雪氷物性を調べた後、雪割滑雪板および通常滑雪板の雪をそれぞれ分断するために、図-13に示す屋根頂部を切断した。切断後、両滑雪板の発熱線の通電スイッチを入れ、実験を開始した。

なお、滑雪時の状況をより詳細に調べるために、3台

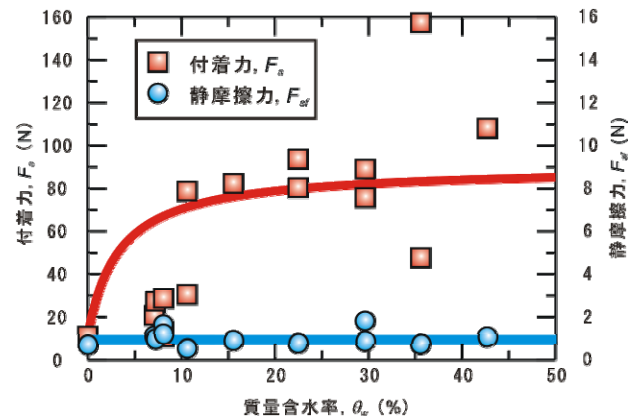


図-16 付着力および静摩擦力と質量含水率の関係

の高解像度ビデオカメラ(Sony製)を用いて滑雪速度および滑雪時間をそれぞれ調べた。

## 5. 実験結果

### 5.1 室内凍着実験結果

#### (1) 静摩擦係数

図-15は静摩擦係数  $\mu$  と質量含水率  $\theta_w$  の関係を示す。 $\mu$ - $\theta_w$  関係は、 $\theta_w$  が0~50%の間で概ね線形的に増加する。この  $\theta_w$  の増加に伴う  $\mu$  の増加は、雪氷による静摩擦力に加えて、滑雪界面の融雪水による抵抗力(潤滑摩擦)が増加することに起因すると推察される。

なお、 $\mu$ - $\theta_w$  関係は以下の式(7)により表される。

$$\mu = 0.02\theta_w + 0.05 \quad (7)$$

#### (2) 付着力および静摩擦力

図-16は  $F_a$ - $\theta_w$  関係および  $F_{sf}$ - $\theta_w$  関係を示す。 $F_a$  は  $\theta_w$  の増加に伴い対数関数的に増加するが、 $F_{sf}$  は  $\theta_w$  に依らず一定であることが分かった。

$$F_a = 90 - \frac{79}{1 + 0.3\theta_w} \quad (8)$$

$$F_{sf} = 0.95 \quad (9)$$

これは、 $\theta_w$  が大きいほど  $A_s$  に対する融雪水の面積比、すなわち凍着による付着面積が大きくなるため、 $F_a$  は増加すると推察される。

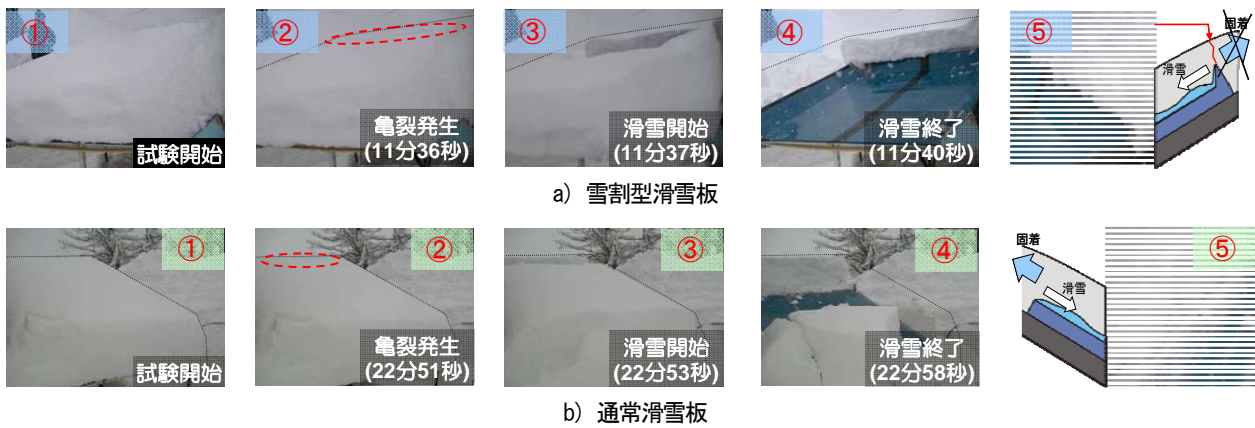


図-17 屋根雪の滑落状況

なお、 $F_a$ と $F_f$ の比率と $\theta_w$ の関係から、付着力は摩擦力の約12~90倍となり、滑雪に及ぼす抵抗は付着力が支配的であることが分かった。

## 5.2 野外滑雪実験結果

代表的な一日(2月4日)の野外滑雪実験結果についてのみ説明する。実験開始時(午後2時)の気温は $-1.6^{\circ}\text{C}$ 、風速は $0.3\text{m/s}$ であり、滑雪板上には $47.6\text{mm}$ の積雪が確認された。また、 $\rho$ (積雪重量 $124.7\text{kg}$ 、積雪面積 $3.24\text{m}^2$ )は $80.9\text{kg/m}^3$ であり、遠藤式含水率計による測定の結果、 $\theta_w$ は $5.28\%$ であった。

図-17は野外滑雪実験における屋根雪(雪塊)の滑落状況を示す(a) 雪割滑雪板、b) 通常滑雪板)。実験開始直後より、両滑雪板の表面温度は上昇し、屋根雪と滑雪板の界面は滑面状態になっていることが確認された。ここで、室内実験の結果に従えば、滑雪抵抗力は約 $1/10\sim 1/100$ 倍となる。

雪割滑雪板では、実験開始より11分36秒後に屋根頂部においてクラック(ひび割れ)が生じ、その4秒後に雪割板上の屋根雪は一度に滑落した。これは、屋根頂部において雪割滑雪板上の雪と装置周辺の雪を雪割により分断させることで両者の固着が解消され、屋根雪の滑雪が生じたと推察される(図-17 a)⑤を参照)。

一方、通常滑雪板では実験開始より22分51秒後に雪割傾斜板と同様にクラックが生じ、その7秒後に屋根雪は滑落した。従って、通常滑雪板の滑雪に要する時間は、雪割滑雪板のそれの約2倍長くなった。なお、実験の都合上、雪割滑雪板と通常滑雪板を分断するために屋根頂部を切断したため、屋根頂部における固着力は小さく、雪割による固着が解消しない通常滑雪板においても滑落が早期に生じたと推察される(図-17 b)⑤を参照)。

事実、同図には示さないが、積雪量が多く、屋根頂部および側部を切断しない場合においては、通常滑雪板では滑落が生じ難かったが、雪割滑雪板では最大積雪深が $70\text{cm}$ 程度においてはクラックが生じるまでに約 $10\sim 30$ 分の時間は要するものの、図-17と同様に滑落させることが可能であった。

なお、一旦、屋根頂部における固着が解消された後の両滑雪板の屋根雪は自重により、滑面状態の滑雪板上で約 $0.26\sim 0.45\text{m/s}$ で滑落した。

以上の結果、実験開始初期においても屋根雪と滑雪傾斜板の界面は滑面状態にあったにも関わらず、屋根頂部においては滑雪板上の雪と外周の雪同士の固着(一体化)現象により、滑落が生じ難いことが分かった。それに対して、雪割機構がその固着を解消するために有効であることが確認された。

## 6. まとめ

本事業では、基本的な屋根雪の滑雪メカニズムを明らかにするとともに、新たな屋根雪処理装置(雪割型電熱式滑雪傾斜板)を提案し、その滑雪性能を明らかにすることを目的として、室内凍着実験および野外滑雪実験を行った。

その結果を、以下に挙げる。

- (1) 質量含水率が $0\sim 50\%$ の範囲においては、質量含水率の増加に伴い、静摩擦係数は線形的に増加する。
- (2) 完全な凍着状態における付着力は、摩擦力の約12~90倍となり、滑雪の抵抗は主に付着力に起因する。
- (3) たとえ、屋根面と雪氷の接触面が滑面状態であっても、雪割をしなければ滑雪し難い。
- (4) 本実験の範囲内においては、雪割型電熱式滑雪傾斜板は滑雪を促進させる。

## 今後の課題

今後は、更に安価かつ軽量の装置への改良に努めるとともに、本装置のユニット化および屋根面への取り付け方法を詳細に検討した後、実証試験(実屋根面への施工後の滑雪性能試験)を行い、本装置の実用化を行う予定である。

## 謝辞

本事業の実施に当り、貴重な御意見を賜るとともに、本屋根雪下ろし装置の開発のために多大な御支援を賜った社団法人 北陸建設弘済会および北陸地域づくり研究所の関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。