

ベタ雪豪雪地帯における勾配屋根型雁木の自然融雪性能 — 於新潟県長岡市栃尾原町 2012. 12/2013. 3 —

深澤 大輔*

(平成 25 年 10 月 31 日受理)

The natural melting snow performance of GANGI
with the steep roof in the wet and heavy snowfall zone
— At Niigata Pref. Nagaoka City Tochio Haramachi December 2012 / March 2013 —

Daisuke FUKAZAWA*

In the winter season of 2012 and 2013, the cold day continued, the maximum snow depth reached 205 cm and the snow weight of the ground became 615 kg/m^2 . In spite of these surroundings, looking at the steep roof of 40 degrees to south which is covered with black asphalt roofing with sand, the maximum snow load stopped to 72 kg/m^2 and the snow melted 25 day earlier completely.

The followings are this cause.

① the average amount of evaporation was up to $4 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{day)}$ between the 25th January and the 6th March. ② Solar radiation in the winter season is usually less, but the average global solar radiation during the period reached $77 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{daytime)}$. ③ The average daily amount of snow melting of the steep roof in the snow period reached $5.2 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{day)}$.

Key words: wet snow, natural melting snow, GANGI, steep roof, performance

1. はじめに

2013 年冬季(2012. 12-2013. 3)は寒い日が続き、連続的に降雪が見られ、最高積雪深は 205cm(地上雪荷重: 615 kg/m^2 、一般屋根の雪下ろし: 2 回前後)に達した。この冬季の気象状況は五九豪雪に次ぐ寒くて雪の多い年で、暖冬少雪年が続いた中で 29 年振りであった。しかしながら、新潟県長岡市栃尾原町に 40 度の勾配を持つ自然融雪型雁木を設置して各種データを計測をして見たところ、屋根雪荷重は 72 kg/m^2 と地上の 12%に留まった。そこで、何故、そのような融雪効果が得られたのか、検討して見ることにする。

尚、平成 9～11 年および平成 12～15 年にかけて文部省の科学研究費助成^[1]を受けて同様の研究を行った。当時は見暖冬少雪年が続いたため、化石燃料に依存しないで建築の屋根形態を工夫することによって雪下ろしをしないで済む自然融雪が可能となるとの実証は不可能であったが、今回、ローコストな屋根雪処理方式成立の目途が立ったと言える。

* 建築学科教授 Department of Architecture and Building Engineering, Professor

2. 結果

2.1 雁木の概要

雁木の概要を述べると以下の如くである。

- ・建設地：新潟県長岡市栃尾原町 1-7-35
- ・雁木の規模：高さ 2.5m×幅 1.35m×長さ 32.0m(公道面に幅 3.5m×長さ 6.0m の車庫)
- ・基礎：コンクリート製独立基礎(120×120×100)、上部に単管ベースをボルトで固定
- ・柱・梁・斜め材：単管 Φ48
- ・単管留め具：直行クランプ
- ・自在クランプ
- ・屋根勾配：約 40 度
- ・屋根材：砂付き鉄板⑦0.8
- ・落雪防止：エキスパンドメタル 1820×910
- ・設計雪荷重：最大 600kg/m²



写真 1 自然融雪勾配屋根型雁木の様子

2.2 各種計測データ

各種計測データは、随時見られるグラフィックモニター付きのデータロガーに集積した。但し、工事と計測機器の取り付けの遅れから、計測は 1 月 24 日から開始した。

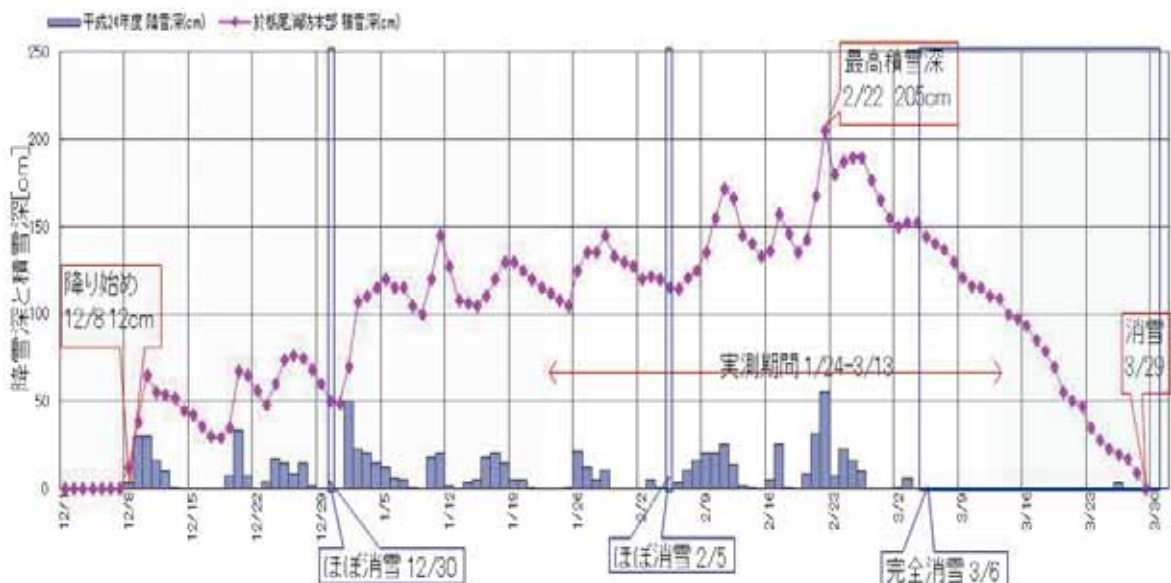
- ・温度：熱電対式(外気温・屋根表面温度・エキスパンド温度・単管温度)
- ・降雪量と融雪量：転倒柵式雨雪量計
- ・日射：全天日射計
- ・風速：微風速計
- ・湿度：温湿度計

2.3 2013 年冬季のデータ計測結果の推移グラフ

2.3.1 日降雪深と積雪深の推移

グラフ 1 は、実験地から約 1km 南南西に位置する栃尾消防本部の日降雪深と積雪深の推移を示している。12 月 8 日から根雪となり、2 月 22 日に積雪が 205cm と最高を記録し、3 月 30 日に消雪した。連続降雪日と無降雪日は寒気団の通過に伴い 10 回程度見られた。

雁木屋根の完成は 1 月 4 日で、計測開始は 1 月 24 日からであったが、雁木屋根上の積雪は、12 月 30 日と 2 月 5 日にはほぼ消え、3 月 6 日には完全に消えた。



グラフ 1 2011. 12. 1-2013. 3. 31 までの降雪深と積雪深の推移(栃尾消防本部調べ)

2.3.2 2013. 2. 3～3. 6 の自然融雪式勾配型雁木屋根の積雪と融雪の様子

上述の如く、雁木屋根上の積雪は、12 月 30 日と 2 月 4 日に消雪し、3 月 6 日に完全消雪した。しかしながら、雁木屋根が完成したのは、1 月 4 日なので、その後の消雪から再び積雪し完全に消雪するまでの期間は 2 月 5 日から 3 月 6 日となる。従って、その期間において見られた積雪と融雪過程の写真を示すと、写真 2 の a～d の如くとなる。但し、東西方向に延びる雁木の右上の写真が南面、左上の写真が南面の西方向、右下の写真が北面。左下の写真が南北方向に延びる東側に傾斜する雁木を北側から撮ったものである。

これを見ると、22 日には 55cm の降雪が見られたので雁木の屋根上の積雪は、溢れ出す形となっているが、その 2 週間後には完全消雪に至っている。また、2 月 10 日の写真を見ると、単管の下に空洞の発達が見られ、地面の積雪に対して柔らかい密度の低い積雪となっていたと見られる。



(a) 積雪が無くなる前々日の様子



(b) 20cm の新雪が降り積もった様子



(c) 地上積雪が最高に達した時の様子



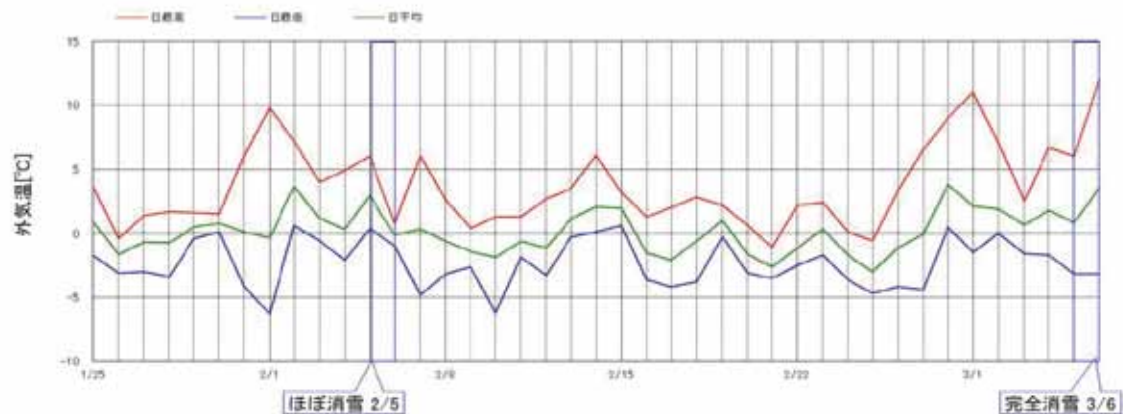
(d) 屋根上の積雪が無くなった様子

写真 2 自然融雪式勾配型雁木屋根の積雪と融雪の様子

2.3.3 日最高気温・日平均気温・日最低気温の推移

グラフ 2 は、栃尾原町において 1 月 25 日から 3 月 6 日まで計測して得られた日最高気温・日平均気温・日最低気温の推移を示したものである。

2012/2013 冬期は、五九豪雪年に次ぐ寒い冬であった。グラフ 2 を見ると、日平均気温が 0℃を下回った日が 17 日と半数あった。また、日最低気温は、-5℃を下回った日が 2 日あり、真冬日は 3 日見られた。日最高気温は 10℃前後の暖かい日が 3 日あり、5℃を超える日が 13 日見られる等、気温の日較差がやや大きかった。

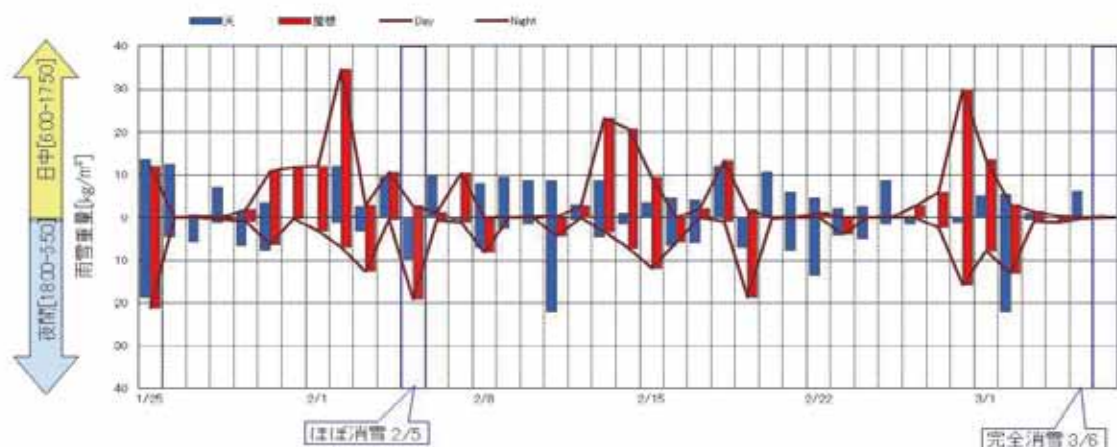


グラフ 2 栃尾原町における 2013. 1. 25-3. 6 の日最高気温・日平均気温・日最低気温の推移

2.3.4 日中と夜間の天雨雪量と屋根雨雪量の推移

グラフ 3 は、1 月 25 日から 3 月 6 日における日中と夜間の天雨雪量と屋根雨雪量の推移を示したものである。尚、日中は 6 時 00 分から 17 時 50 分、夜間は 18 時 00 分から 5 時 50 分とした。

日中に比べて夜間の出水量はやや少ないが予想以上に出水が見られた。また、天からの降雪はかなり連続的に見られたが、屋根からの出水には波が見られる。日最大出水量は約 50kg/m² となり、20kg/m² 以上出水した日が 9 日見られた。

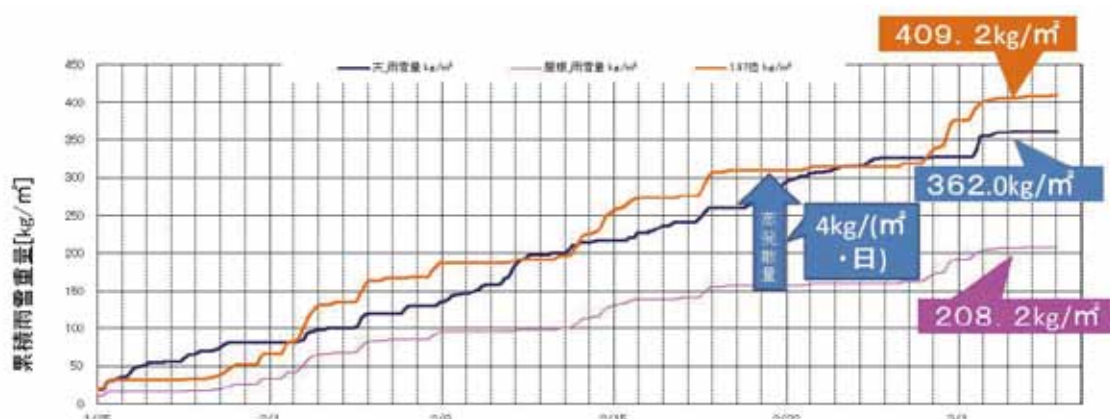


グラフ 3 栃尾原町における 2013. 1. 25-3. 6 の日中と夜間の天雨雪量と屋根雨雪量の推移

2.3.5 1日当たり天雨雪量と屋根雨雪量の推移

グラフ4は、1月25日に計測を開始してから雁木の屋根の上の積雪が完全融雪し、消雪する3月6日までの屋根雨雪量と天雨雪量の累積を示したものである。

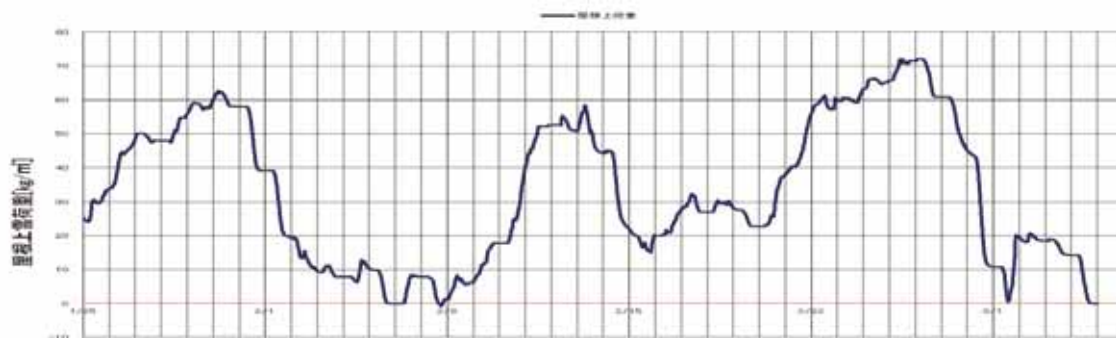
1月25日から3月5日(3月6日)における天の積算降水量は362.0mmであったので、累計降雪重量は362.0kg/m²である。同様にその間の屋根からの積算出水量は208.20mmであったので、累計出水重量は208.2kg/m²である。これが40日に出た訳であるから1日当たり5.2kg/(m²・日)と言うこととなる。ところで、天雨雪量から屋根雨雪量を引くと差は159.8kg/m²となる。この差は40日で生じているのでその日数で割ると4kg/(m²・日)となる。つまり、1日当たり平均すると4mmが蒸発散したこととなる。



グラフ4 栃尾原町における2013.1.25-3.6の1日当たり天雨雪量と屋根雨雪量の推移

2.3.6 自然融雪式勾配型雁木屋根の雪荷量の推移

一度消雪し再度消雪した2月5日から3月5日の期間におけるアメダス降水量積算値は240mmであり、計測した天雨雪量とほぼ一致している。従って、その期間の降雪重量は240kg/m²と言える。蒸発散のパラメーターは、気温・湿度・日射量・風速が考えられる。積雪表面のアルベド(反射率)は新雪の場合0.90程度と高いが、春先の融雪期のそれは0.50以下となる。ここではその期間のアルベドを0.65と仮定し、蒸発散係数を天と合わせる形とし、日射量のみを考慮し計算したものがグラフ5である。



グラフ5 栃尾原町における2013.1.25-3.6の自然融雪式勾配型雁木屋根の雪荷量の推移

因みに屋根上雪荷重(kg/m^2)は、降水量から出水量と蒸発散量とを差し引いたものとなるが、最高は2月26日の $72\text{kg}/\text{m}^2$ であった。

3. 考察

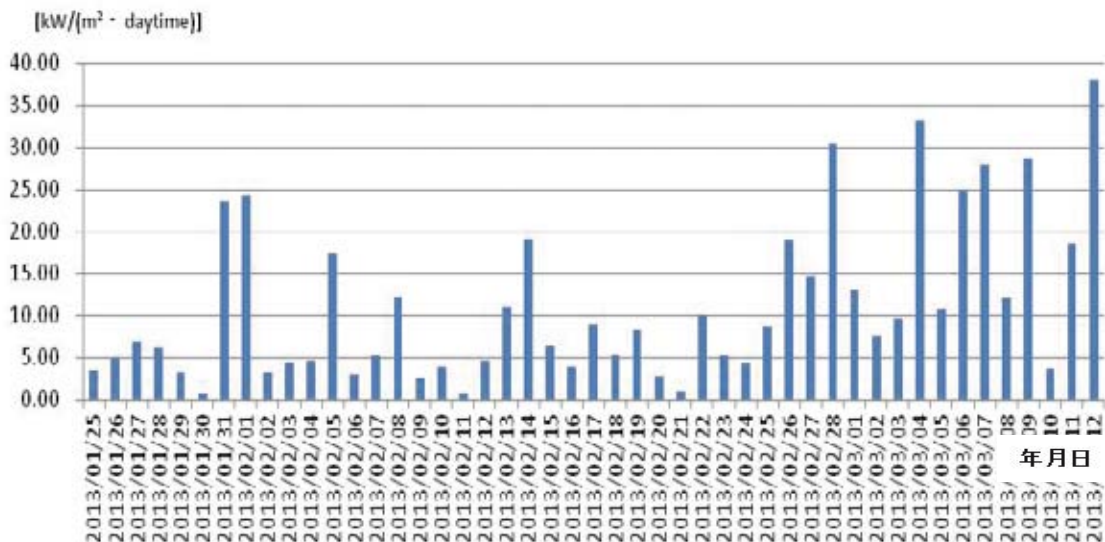
栃尾原町において計測した2013(平成25)年2月の月平均気温は -0.09°C であり、1984(昭和59)年1月の -0.7°C に次ぐ寒い年であった。栃尾の年最高積雪深は1963(昭和38)年4m28cm、1984(昭和59)年2m87cmで、2013(平成25)年は2m5cmの如くであり、三八豪雪時の約半分に過ぎないが、暖冬少雪が続いていたので30年振りの年であったと言える。

そのような連続的に降雪が見られ寒い冬季であったにも関わらず、前項で見た如く、地上の積雪重量が $615\text{kg}/\text{m}^2$ に達したにも関わらず屋根上の雪荷重が $72\text{kg}/\text{m}^2$ とその12%に何故留まったのか、以下、考察して見ることにする。

3.1 全天日射量について

太陽を起源とする放射を日射と言う。その中で太陽面から直接入射するものを直達日射、大気や雲等で散乱・反射され太陽面以外から入射するものを散乱日射、直達日射と散乱日射を合わせたものを全天日射と呼んでいる。

栃尾原町の1月25日～3月12日にかけて見られた晴れた日は8日しか無いが、その直達日射量は $20\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ を超えている。これに対し、厚い雪雲に覆われた日は47日の内28日と約60%を占めているが、そのような日でも $10\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ 以下の散乱日射が計測された。晴れた陽の射す日は少なかったものの、曇りの日で陽の射さない日でも雲を通して $5\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ 未満の散乱日射が見られた。

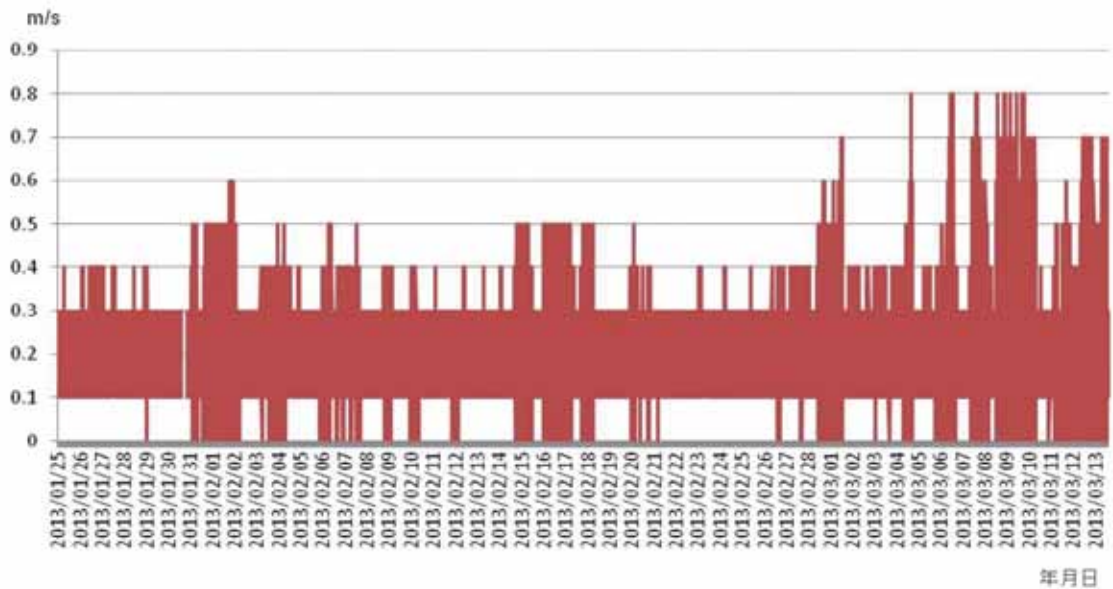


グラフ6 栃尾原町における2013.1.25-3.12の全天日射量

グラフ 6 に示した日毎の全天日射量を、1000 倍して W に換算し、1 日 24 時間で割って、更に 10 分当りに換算するとその平均日射量は 77.11 W/m^2 となる。これは、1997 年に木村忠志氏が行ったデータを基に、長岡の雪氷防災センターが公開している北陸地方の豪雪地帯である十日町市でも、住宅の耐雪荷重 400kg/m^2 、融雪能力を 86 W/m^2 (ただし、融雪効率 90%とした場合)とすれば、過去 30 年間の豪雪時にも耐えられる。 $1\text{m}(300\text{kg/m}^2)$ 程度屋根に積雪を残す部分融雪方式の場合は 30 W/m^2 程度で済むとした値の倍以上となっている。

3.2 風速・風向・風温について

グラフ 7 を見ると栃尾は盆地のため積雪期における原町の風速は $0.1\sim0.3\text{m/s}$ (10 分間の平均)と大変弱い。しかしながら、弱いながらも気流の動きは常時見られる。



グラフ 7 長岡市栃尾原町における 2013. 1. 25-3. 13 の風速の推移

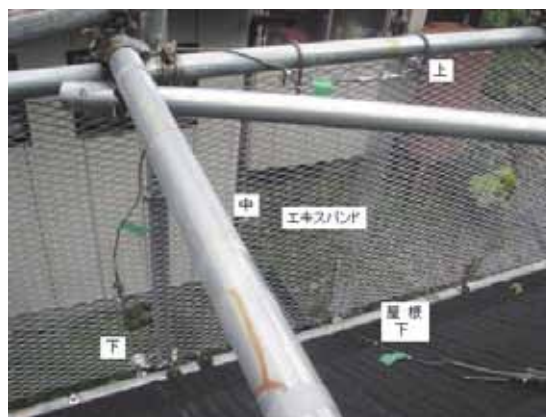


グラフ 8 長岡市栃尾原町における 2013. 1. 25-3. 13 の風速・風力・風温の分布

グラフ 8 は、2003(平成 15)年 1～2 月のデータであるがそれを見ると、西の季節風と守門山からの南東の吹き下ろしの風が多いことが分かる。また、西の風は寒波の襲来に伴い強く吹くことがあるが、普段は南ないし南東の守門山からの穏やかな風が吹いている。西から北の風の温度は 2℃前後と低い、南西から東の風は 4～6℃と暖かくなっている。

3.3 屋根材の温度について

屋根材である単管とエキスパンド・砂付き鉄板屋根の温度は、それぞれ上と中と下に熱電対をアルミテープで固定し、データロガーで記録した。その計測箇所は、写真 3 の(a)(b)に示した如くである。



(a) エキスパンドメタルの計測箇所

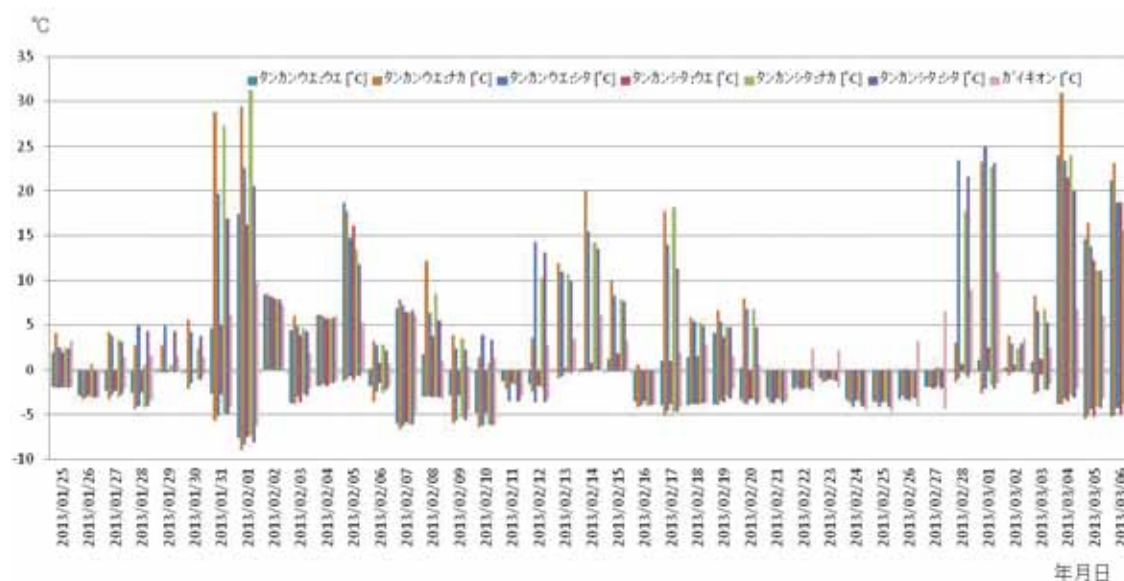


(b) 屋根と単管の計測箇所

写真 3 屋根材の表面温度計測箇所

3.3.1 単管の表面温度について

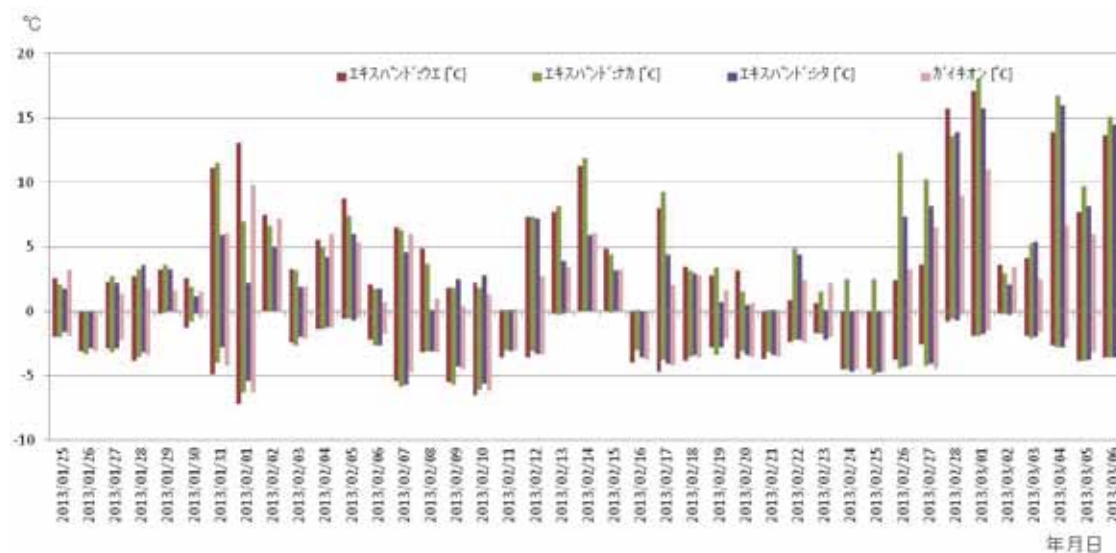
単管は、降雪があると積雪が被り、多くなると埋まり、落雪すると露出するため、その表面温度の変化は大変大きい。つまり、晴れて日射のある日に単管が露出しているとその表面温度は 30℃前後に達するが、雪が被り寒い日には外気温程度の -5℃前後に下がる。全体的に見ると、日射の影響を受けて 10～20℃に上がる日が目立つが、外気温がプラスになっても雪が被っているとその表面温度は氷点下となっている。



グラフ 9 栃尾原町における 2013. 1. 25-3. 6 の自然融雪式
勾配型雁木の単管表面温度と外気温の推移

3.3.2 エキスパンドメタルの表面温度について

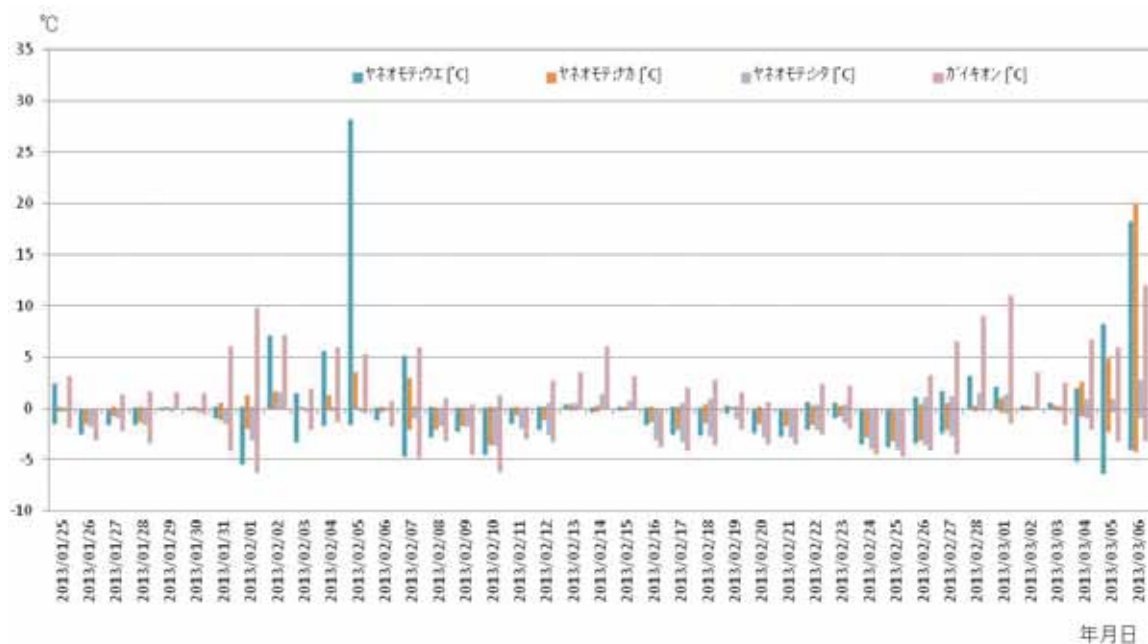
エキスパンドメタルは、屋根面に積もった雪の落下防止と雪庇の発達防止を目的に設置した。その積雪の状況は、降雪が見られると積雪が付着するが、降雪が止むと数時間で落下し、積雪は見られなくなる。勾配屋根の低い位置には雪が吹き溜まり、積雪層は深くなるが、次第にエキスパンドメタルとの間に間隙が生じる。これは、エキスパンドメタルからの放射熱によるものと考えられる。エキスパンドメタルの表面温度は、日射の影響を受けているが、ほぼ外気温に追従して変動している。



グラフ 10 栃尾原町における 2013. 1. 25-3. 6 の自然融雪式勾配型
雁木のエキスパンドメタルの表面温度と外気温の推移

3.3.3 砂付き鉄板屋根材の表面温度について

グラフ 11 を見ると、2 月 5 日に勾配屋根の棟の部分で 28℃にまで上昇したことが分かる。しかしながらその日のみで他には見られない。1～2 月の他の日を見ても 7℃が最高で 0℃前後で推移している。これは、積雪があり、積雪で覆われた状態だとほぼ 0℃の融雪水が表面を流れ、それによって濡れ冷やされたためと考えられる。尚、晴れた日にはエキスパンドメタルからの放射熱で積雪が後退し、下部の屋根材が露出する。その際には表面から水蒸気が時々立ち上るのが観測された。砂付き鉄板屋根材の表面温度は、積雪と融雪水で冷やされるため低くなっているが、その熱的な融雪効果は、一番大きいものと見られる。

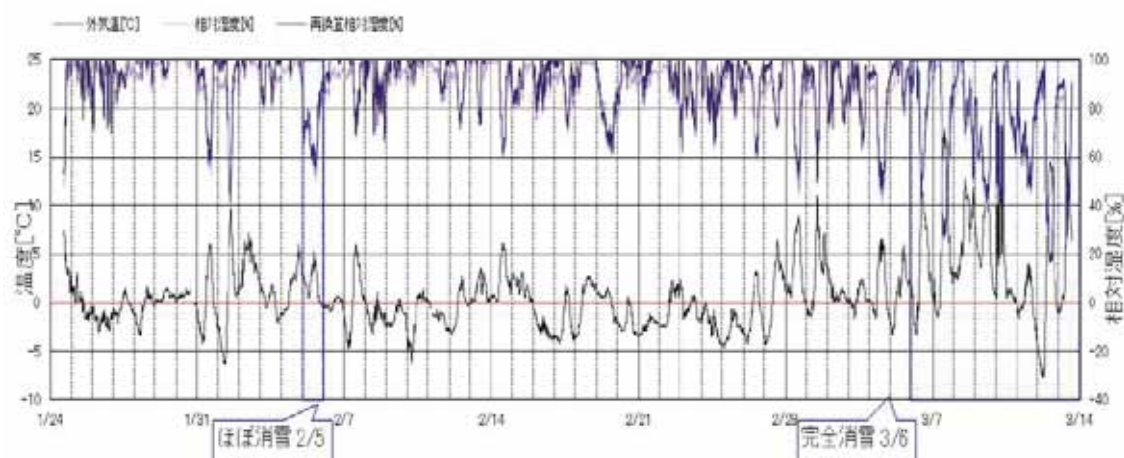


グラフ 11 栃尾原町における 2013. 1. 25-3. 6 の自然融雪式勾配型
雁木の砂付き鉄板屋根材の表面温度と外気温の推移

3.4 湿度について

これまで観測して来た経験から、雲の多い湿度の高い日に、融雪水が多く出ると言える。これは、空気中の水蒸気が飽和に近付き過飽和状態になると結露水が見られるようになる。水が蒸発する時に気化熱として 540cal/gr が奪われる。これに対し、空気中の水蒸気が水滴となる場合には逆に 540cal/gr の凝結熱を放出することとなる。雪の融解熱は 80cal/gr である。従って、空気中の水蒸気が 1gr 水になる時に放出するエネルギーは雪を 7gr 融かすことが出来るので、湿度の高い日に融雪水が大量に出ることとなる。

グラフ 12 で勾配屋根の積雪が完全消雪した 3 月 6 日までの湿度を見ると、80%以上の日が多く、その中には 90%を超えた日もかなり見られ、湿度が高かったことが伺われる。



グラフ 12 栃尾原町における 2013. 1. 24-3. 14 の外気温と相対湿度の変動

ところで、1 月 5 日からほぼ毎日写真を撮って見たところ、外気温が氷点下であるにも関わらず、単管に水滴が見られた。その日を一覧表にしてまとめると表 1 の如くとなる。

表 1 外気温が氷点下の時に単管に水滴が見られた日

月 日	時 刻	天 気	外気温
1 月 28 日	9:10	雪	-0.7
1 月 31 日	9:00	晴れ	-1.4
2 月 11 日	13:20	曇り	-1.8
2 月 21 日	9:00	雪	-2.9
2 月 26 日	9:10	雪	-1.1

この説明の前に、鉄と水と空気の比熱と熱伝導率について見ると表 2 の如くとなる。

表 2 鉄と水と空気の比熱と熱伝導率

	密度 ρ [W/(m · K)]	比熱 C [kJ/(kg · K)]	熱伝導率 λ [W/(m · K)]
鉄	7890	0.460	75.36
水	999	4.178	0.63
空気	1.293	1.005	0.0241

鉄製の単管は、熱伝導率が空気の 3,127 倍も大きいので、曇りや雪の日で外気温が氷点下でも拡散日射によって暖まり易い。従って、単管が露出していると空気よりも早く暖まるため、単管に残っている積雪を融かすので水滴が見られる。また、外気温よりも単管の表面温度が低い時には、空気中の水蒸気はその表面で結露する。この際には、水蒸気の水となる時に凝結熱が出るため、凍らないで水滴が見られたものと推察される。

4. まとめ

以上の結果をまとめると以下の如くである。

- ①蒸発散量が平均 $4\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ と降雪重量の約 $1/2$ に達した。これは、単管の下に積雪期から空洞が発達し、積雪表面積が増加したためである。この値は、日本の水田では平均 $6\sim 8\text{mm}/\text{日}$ 、つまり $6\sim 8\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{日})$ となるので、雁木の屋根の積雪層に空洞ができ、南面する屋根の露出面からは晴天日には水蒸気が湯気のように立ち上るのが見られたことから納得できる。尚、積雪期には一般の積雪層では水 1mm 、つまり $1\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{日})$ の減少が見られる。積雪初期の7日程度は地熱による融雪と見られるが、その後は蒸発散による減少と考えられる。
- ②40度の屋根勾配にしたことで屋根上の積雪層から融雪水がスムーズに出水した。積雪層は毛管現象によって融雪水を吸い上げており、一般の4寸(22度)勾配屋根の場合過飽和状態に達した分しか出水しないが、25度勾配以上にすると積雪層底面の表面張力のバランスが崩れ、殆どが流出する。積雪期の出水量の平均は、 $5.2\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{日})$ であった。
- ③雁木屋根の積雪過程を観察すると、下記の如くとなる。
 - ・屋根面には降雪初期はほぼ均等に積るが、次第に下部の積雪が多くなり水平となる。
 - ・勾配屋根の棟の部分には冠雪状に積雪する。
 - ・全体的には勾配屋根の中央部の積雪が多くなり、消雪が遅くなる。
 - ・単管の下は単管上部に積もった降積雪の分だけ少なくなり、積雪表面は凹む。
 - ・単管と屋根面の距離が短い部分は、単管が埋まると直ぐその下に空洞が出来る。
 - ・エキスパンドメタルには降雪時には積雪の付着が見られる。
 - ・エキスパンドメタルは降雪が止むと積雪が落下したり、融雪するため露出する。
 - ・エキスパンドメタル近傍の積雪層が後退し、砂付き鉄板屋根面が露出する。
 - ・エキスパンドメタルと屋根面が日射で暖まると急速にその近傍の積雪が融雪する。
 - ・その結果、屋根上部よりも積雪層の厚い下部の融雪が早く進むことが観察出来た。以上から、積雪の落下防止と雪底の発達の阻止のために設置したエキスパンドメタルは、それらの機能を果たしたのみならず融雪にも効果を発揮したと言える。
- ④自然融雪屋根の構成材を鉄製のものとし、屋根葺き材を黒色として約40度の勾配を付けて南面させて設置したため、直達日射や拡散日射による熱を受けて、屋根上の積雪層の融雪を促進することが出来た。但し、今回計測した表面温度は、単管が一番高く、続いてエキスパンドメタルで、屋根面が一番低かった。これは、積雪が屋根にあると伝熱で 0°C に冷やされる。また、融雪があると上から下にほぼ 0°C の水が流化し屋根面を冷やす。更に濡れた屋根面から水分が蒸発散すると気化熱を奪うので、やはり冷える。このようなことから、屋根面の表面温度の上昇は少なかったが、最も融雪に寄与したのは、屋根面であったと言える。
- ⑤天候が晴れ・曇り・雪の日に限らず、外気温が氷点下の時にも時々単管の下部に水滴が見られた。良く晴れた日には、直達日射が単管に当たると外気温が氷点下の時間でも鉄製

- の単管の方が空気よりも熱伝導率が高いため早く暖まり、プラスの温度となる。その結果、単管に水滴が見られた。曇天や降雪日でも日中は雲を通過して来る拡散日射があるため、同様に水滴が見られた。これ等に対し、外気温よりも単管の温度が低い氷点下の時にも水滴が見られた。これは結露水によると考えられる。以上の如く、鉄は熱伝導率が高いので、単管も融雪に寄与したと言える。また、単管による乱流効果も考えられる。
- ⑥雪は 0℃で水となる。しかしながら、-5℃前後から雪粒子の変態が始まり、雪粒子同志が結合し、雪粒子が大きくなる凝結現象が見られる。このため、単管の下に出来た空洞が次第に大きく発達する。それに従い、積雪表面積が拡大し、外気の影響を受け易くなり、融雪が促進される。ベタ雪豪雪地帯では-5℃以下に気温が下がることが少ないので、殆ど常に雪は変態し、融けていると言え、外気温は昼夜を問わず常に融雪に寄与した。
- ⑦融雪出水は湿度の高い日に多く見られる。これは、水が蒸発する時に 540cal/gr の気化熱を必要とするが、大気中の水蒸気が水になる時には逆に 540cal/gr の凝結熱を放出する。従って、雪の融雪熱は 80cal/gr であるので、水蒸気 1gr は 7gr の雪を融かすこととなり、結露水が多く出る日には融雪が進むと言える。

謝辞

平成 10-11 年度に文部科学省から萌芽的研究費の補助を受け、平成 12-15 年度に同じく基盤研究 B(2)を受け「ベタ雪豪雪地帯において雪下ろしを不要とする通気融雪工法屋根の開発に関する研究」^[1]を行った。当時は、暖冬少雪年が続いていたが、平成 24 年度の 2012/13 冬季は、昭和 59(1984)年に次ぐ寒い年で連続的な降雪が見られた。このため、厳しい冬季環境の中で良い成果が得られ、報告することが出来た。雁木は、上述の科研費で作成した実験屋根を解体し、再利用して造ったものである。計測器は当時購入したものの他に今回(財)内田エネルギー財団からの助成金で、転倒柵式の雨雪量計 2 台と温湿度計 1 台、グラフィックモニター付きのデータロガーを新規に購入し、使用させて戴いた。

昭和 43(1968)年に正三角形の融雪池付きの母屋を新築したが、その裏手に昭和 58(1983)年に「通気融雪+木造耐雪構造」の実験建物を増築した。それらの設計を任せてくれ、その後の融雪実験のデータや写真撮りを手伝ってくれた^[2]母美恵子が、平成 19 年に他界したので、その土地と建物を遺言に従い私が相続した。今回、平成 8(1996)年に新築した建物まで通ずる雁木を造ることで、貴重なデータを得ることが出来た。また、娘の中井たまきには、データの解析の手伝いをして貰った。ここに謝意を表して終わりとしたい。

文献

- [1] 深澤大輔：ベタ雪豪雪地帯において雪下ろしを不要とする通気融雪工法屋根の開発に関する研究；新潟工科大学深澤研究室，1-148，2004.
- [2] 深澤大輔：屋根雪処理の開発に関する研究—新潟県中越地域を中心に—；国立豊田工業高等専門学校深澤研究室，1-166，1987.