

積雪荷重実験

Experiment for snow load on PV array

千葉隆弘*

1. はじめに

積雪寒冷地における地上設置型太陽電池アレイでは、積雪荷重による損傷被害が発生している。その損傷状況を見ると、アレイ下端部（以下、軒先という。）が積雪荷重により折れ曲がる状況となっており、当該箇所に大きな荷重が作用していることがうかがえる。また、アレイ架台の強度が構造計算に基づいて検証されていない場合も多く、積雪荷重に対して脆弱な太陽電池アレイが数多く整備されていることが予想できるのが現状である。

このような背景から国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、地上設置型、傾斜地設置型、営農型、および水上設置型の太陽光発電システムの設計・施工ガイドラインを整備してきた¹⁾。これらのうち、地上設置型および傾斜地設置型の太陽電池アレイに作用する設計用積雪荷重、特に、軒先に作用する積雪荷重の算定方法について、試験体を用いた実験で得られた結果に基づいて構築した。本報では、当該積雪荷重実験で得られた結果について報告する。

2. 実験方法

太陽電池アレイ試験体を用いた積雪荷重実験は、北海道札幌市、山形県新庄市、および秋田県湯沢市の旧スキー場（以下、それぞれ札幌、新庄、およびとことん山という。）で行った。試験体の設置状況を図1に示す。札幌および新庄は平地、とことん山は10°の傾斜地であり、いずれも幅1.6 m×長さ1.0 m×4枚で勾配が $\theta = 10^\circ$ 、 20° 、および 30° の太陽電池アレイ試験体を設置して積雪荷重を測定した。地上から軒先までの高さ（以下、軒高という。）は、平年に比べて雪が少ない冬期となった場合でも積雪で埋没した軒先に作用した積雪荷重が測定でき

るように、札幌では0.7 m、新庄およびとことん山では0.9 mと年最大積雪深の平年値に比べて低く設定した。

積雪荷重の測定方法を図2に示す。札幌、新庄、およびとことん山に設置した全ての試験体で、その柱脚部4箇所ロードセルを設置して積雪荷重を測定した。測定インターバルは1秒であり、10分間平均値を用いて積雪荷重のデータを整理した。表1に、測定年と実験で対象とした試験体の勾配を示す。

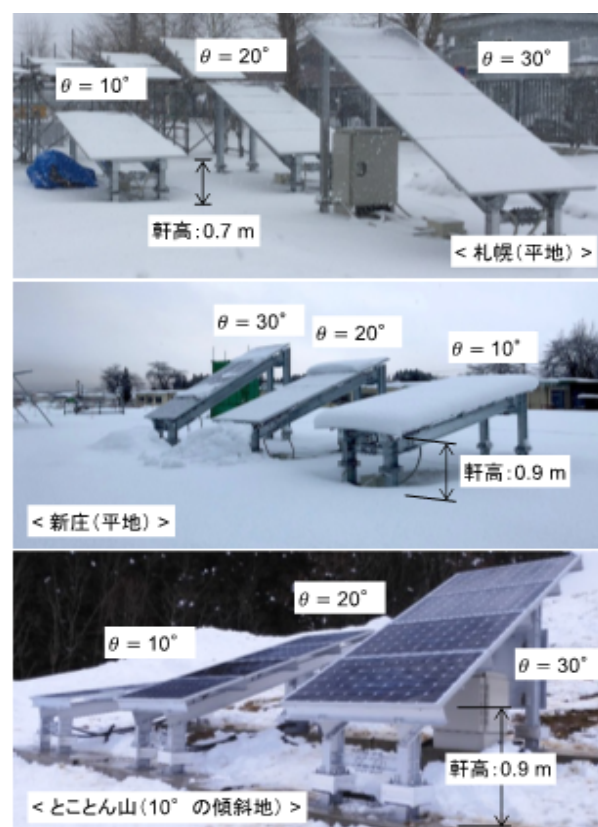


図1 太陽電池アレイ試験体の設置状況

* 北海道科学大学 工学部 建築学科教授

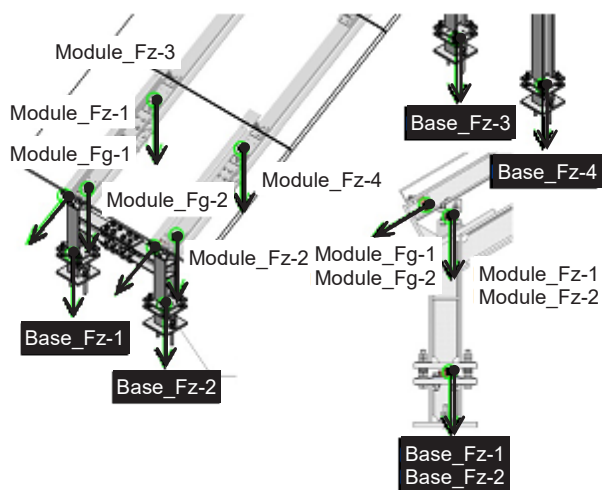


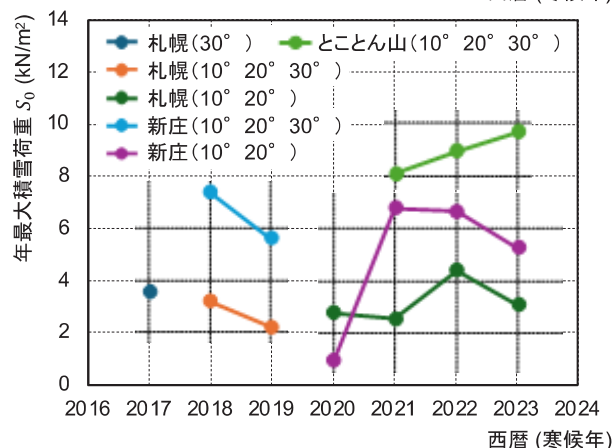
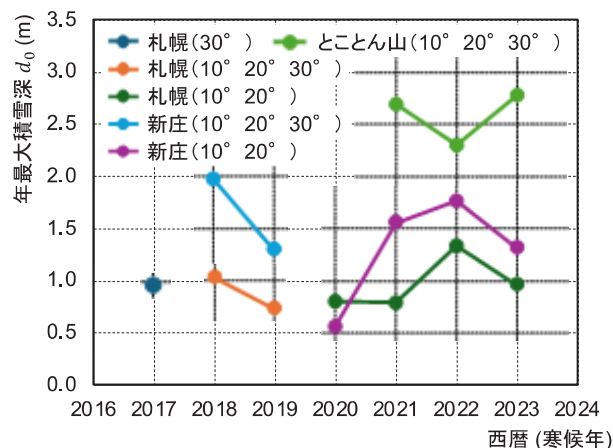
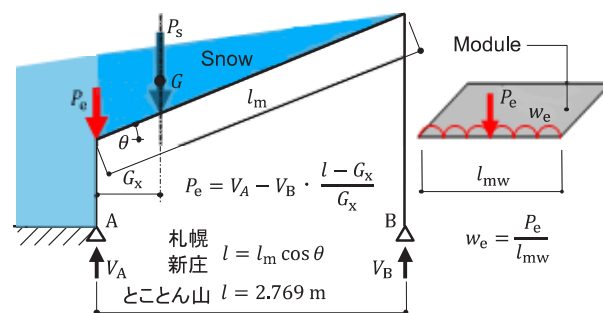
図2 積雪荷重の測定方法

表1 測定年と対象とした試験体の勾配

寒候年	札幌 (平地)	新庄 (平地)	とことん山 (10° の傾斜地)
2017	- - 30°	- - -	- - -
2018	10° 20° 30°	10° 20° 30°	- - -
2019	10° 20° 30°	10° 20° 30°	- - -
2020	10° 20° -	10° 20° -	- - -
2021	10° 20° -	10° 20° -	10° 20° 30°
2022	10° 20° -	10° 20° -	10° 20° 30°
2023	10° 20° -	10° 20° -	10° 20° 30°

なお、測定年は寒候年（前年秋から当年夏までの期間）で表している。2017寒候年は札幌で30°の試験体のみを対象として積雪荷重を測定し、翌年の2018寒候年から札幌と新庄で勾配10°、20°、および30°の試験体を対象に2019寒候年まで積雪荷重を測定した。札幌と新庄の2020～2023寒候年は勾配10°および20°の試験体を対象とした。一方、とことん山では、2021～2023寒候年に勾配10°、20°、および30°の試験体を対象に積雪荷重を測定した。

各地点における各測定年の年最大積雪深 d_0 と年最大積雪荷重 S_0 を図3に示す。なお、札幌および新庄の d_0 は最寄りの気象観測地点での測定値であり、とことん山の d_0 は現地に設置した積雪深計による測定値である。また、 S_0 は最寄りの気象観測地点の降水量に基づいた推定値である。 d_0 をみると、札幌では2022寒候年に1.33 mを記録した以外は0.8～1.0 mの範囲で推移した。新庄では札幌に比べて変動が大きく、2020寒候年においては0.5 mの積雪となったが、2018、2021、および2022寒候年は1.5 m以上の積雪となった。とことん山の d_0 は新庄に

図3 各地点における各測定年の d_0 および S_0 図4 軒先荷重 P_e および w_e の算定方法

比べて大きく、いずれの測定年においても2.5 m程度の積雪となった。 S_0 については、測定年ごとの d_0 の増減にほぼ対応している。

本実験では、ロードセルで測定した積雪荷重を用いて軒先荷重 P_e および w_e を算定した。その算定方法を図4に示す。試験体軒側の測定値 V_A 、試験体棟側の測定値 V_B 、試験体の柱スパン l 、および軒先からアレイ面積雪の重心間距離 G_x をパラメータとして図中に示す算定式に基づいて軒先荷重 P_e を算定し、 P_e をアレイの幅 l_{mw} で除して等分布荷重 w_e を算定した。 G_x は2017～2019寒候年に札幌で測定したアレイ面の積雪分布に基づいて設定した。8

回の測定結果を用いて平均値を算定すると、勾配 10° が $G_x = 1.70 \text{ m}$ 、勾配 20° が $G_x = 1.44 \text{ m}$ 、勾配 30° が $G_x = 1.12 \text{ m}$ となり、勾配の増加に伴い G_x が小さくなった。

3. 実験結果

3.1 積雪荷重および軒先荷重の測定結果

札幌における 2018 寒候年の積雪荷重 S_m および軒先荷重 w_e の測定結果を図 5 に示す。 S_m の推移をみると、いずれの勾配においても 3 月上旬の融雪期に入る直前で最大積雪荷重 $S_{m \max}$ が測定されており、 S_m の値は勾配の増加に伴い小さくなる傾向を示す。 w_e の推移をみると、いずれの勾配においても $S_{m \max}$ の起日付近で最大軒先荷重 $w_{e \max}$ が測定されており、 $w_{e \max}$ の勾配依存性は小さい傾向を示す。 w_e の推移の詳細をみると、勾配 10° では S_m と同様に、積雪荷重が増加する期間は w_e が漸増し、融雪期に入ると w_e が減少している。これに対し、勾配 20° および 30° をみると、 w_e は増減を繰り返しながら推移している。 w_e が増加する際の気温をみると、いずれの場合も気温がマイナスで推移しており、 w_e は気温が低下してアレイ面の積雪が凍結付着した際に作用することを意味している。気温がプラスで推移した際は、アレイ面における積雪底面の摩擦抵抗力が試験体に伝達されることから、 w_e が小さくなったものと考えられる。なお、勾配 20° および 30° の場合で w_e の値がマイナスに達する期間があるのは、

G_x は実際、変動するものであるが、本実験では G_x を連続的に測定することができず、従って $w_{e \max}$ を捉えることを目的として一冬期間で一定の値を仮定したためである。

新庄における 2018 寒候年の積雪荷重 S_m および軒先荷重 w_e の測定結果を図 6 に示す。 S_m の推移をみると、札幌と同様に、いずれの勾配においても 3 月上旬の融雪期に入る直前で最大積雪荷重 $S_{m \max}$ が測定されており、 S_m の値は勾配の増加に伴い小さくなる傾向を示す。 w_e の推移をみると、いずれの勾配においても増減を繰り返しながら推移しており、気温が低下した際に w_e が増加している。 $w_{e \max}$ は気温がマイナスに低下している期間に発生し、勾配 10° では $S_{m \max}$ と同時期に発生しているものの、勾配 20° および 30° の場合をみると、札幌に比べて気温が高い地域であることから、 $S_{m \max}$ より先に $w_{e \max}$ が発生している。また、 $w_{e \max}$ の勾配依存性は見受けられない。

とことん山における 2023 寒候年の積雪荷重 S_m および軒先荷重 w_e の測定結果を図 7 に示す。 S_m の推移をみると、札幌や新庄と同様に、いずれの勾配においても 3 月上旬の融雪期に入る直前で最大積雪荷重 $S_{m \max}$ が測定されており、 S_m の値は勾配の増加に伴い小さくなる傾向を示す。 w_e の推移をみると、勾配 10° では気温の影響を受けずに小さい値で推移している。これは、積雪が多く試験体が完全に埋没したためであり、アレイ面に対してほぼ均等に積雪

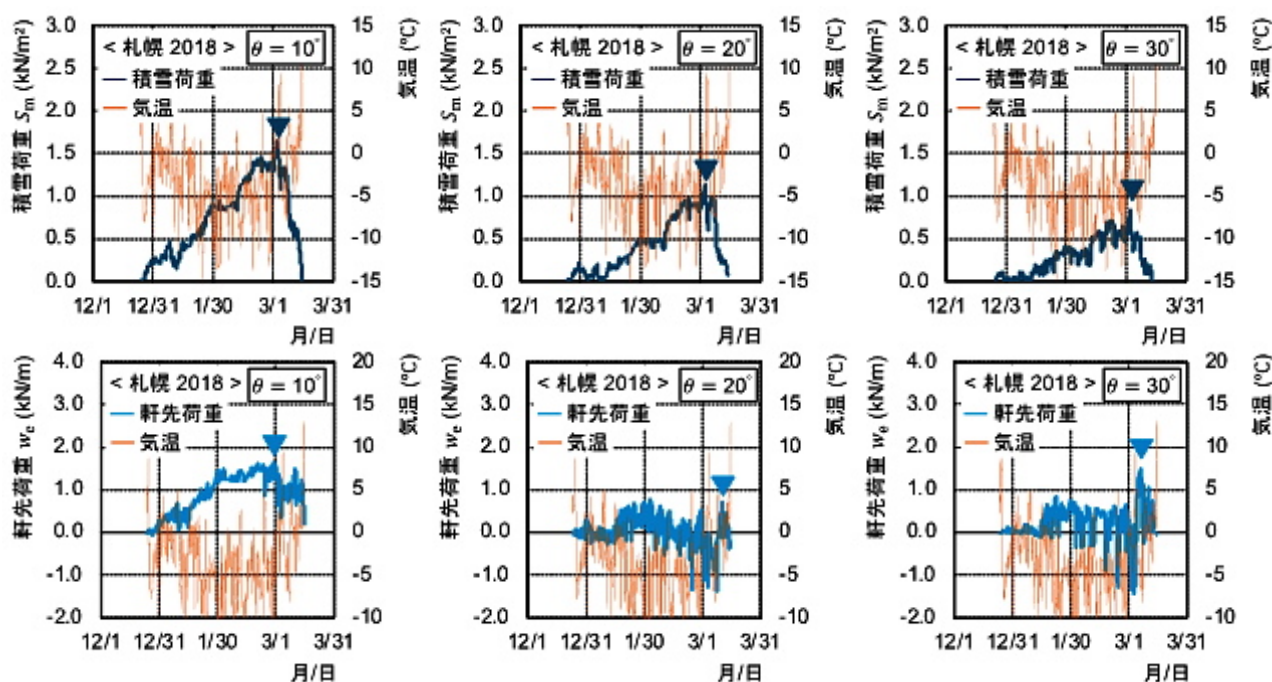


図5 札幌における積雪荷重および軒先荷重の測定結果

荷重が分布したことを示している。これに対し、勾配 20° および 30° の場合をみると、札幌や新庄の場合と同様に、増減を繰り返しながら推移し、 $w_{e \max}$ は気温がマイナスに低下した期間に発生している。 $w_{e \max}$ の発生時期は、札幌の場合と同様に、 $S_{m \max}$ とほぼ同時期であり、勾配の影響は小さい状況である。

以上に示すように、勾配により推移の違いがみられるものの、アレイ面の積雪が滑って落雪することによって、軒先に大きな荷重が作用することが明らかとなった。

3.2 実験で得られた勾配係数

札幌、新庄、およびとことん山の実験で得られた

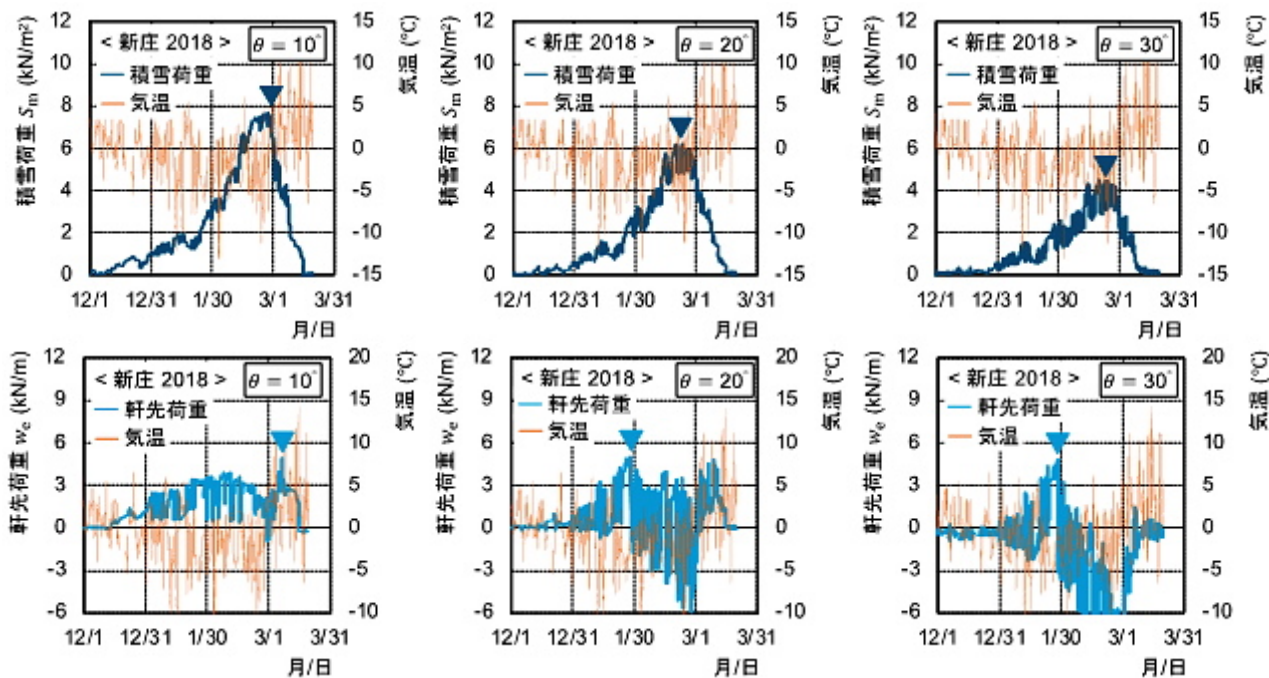


図6 新庄における積雪荷重および軒先荷重の測定結果

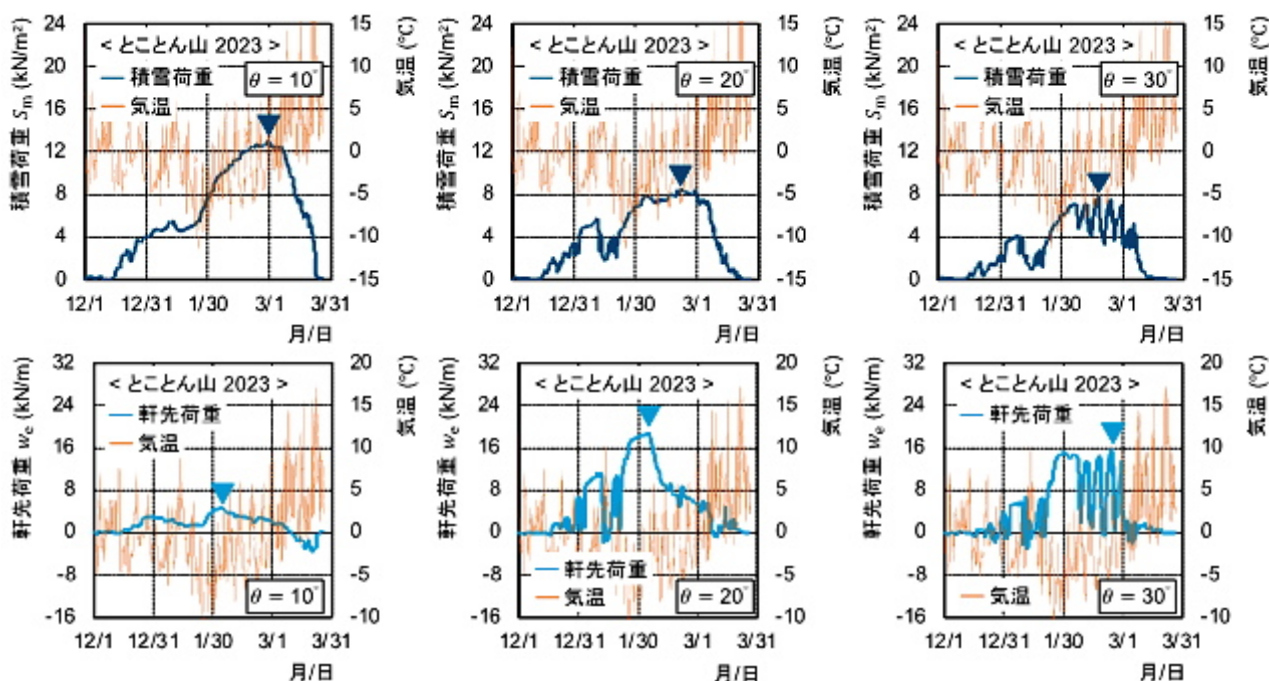


図7 とことん山における積雪荷重および軒先荷重の測定結果

最大積雪荷重 $S_{m \max}$ を年最大積雪荷重 S_0 で除することによって算定した勾配係数 C_{sm} と JIS C 8955²⁾ の勾配係数 C_s を比較した。勾配 θ と勾配係数 C_{sm} および C_s との関係を図 8 に示す。本実験の勾配係数 C_{sm} は、概ね JIS C 8955 の勾配係数 C_s を下回っているものの、新庄およびとことん山において C_{sm} が C_s を上回った冬期が確認できる。特に、とことん山の 2022 寒候年においては、 C_{sm} が C_s の約 1.5 倍を示すような大きな積雪荷重が試験体に作用した。ここで、とことん山における 2022 寒候年の積雪状況を写真 1 に示す。積雪が多く 2022 年 3 月 1 日には全ての試験体は積雪で完全に埋没していた。このような状態になると、積雪の圧密に伴う沈降荷重が軒先のみならずアレイ側面や棟側にも作用することから、積雪荷重に加えて沈降荷重が同時に作用したことによって C_{sm} の値が大きくなったものと考えられる。このような状況は、太陽電池アレイにおける架台の高さは現地の設計用積雪深を勘案し、十分な高さを確保しなければならないことを意味している。軒高の下限は、設計用積雪深が目安であると考ええる。

3.3 軒先荷重の評価方法

本実験で測定した最大軒先荷重 $w_{e \max}$ を既往の沈降荷重の算定式と比較した。最大沈降荷重を $w_{e \max}$ 、最大積雪荷重を S_0 とすると、荘田の式³⁾ は以下の

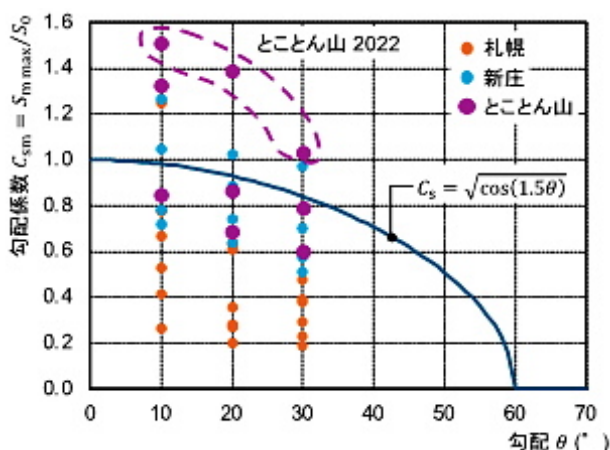


図 8 勾配と勾配係数との関係



写真 1 とことん山での 2022 寒候年の積雪状況

式(3.1)で、中俣・須藤の式³⁾ は以下の式(3.2)で表される。

$$\text{荘田の式}^3) \quad w_{e \max} = 9.8 \times 1.7 (S_0/9.8)^{1.5} \quad (3.1)$$

$$\text{中俣・須藤の式}^3) \quad w_{e \max} = 1.4 S_0 \quad (3.2)$$

図 9 に、年最大積雪荷重 S_0 と最大軒先荷重 $w_{e \max}$ の関係を示す。なお、札幌と新庄を平地、とことん山を傾斜地に分類して図中に示した。両者の関係をみると、 S_0 の増加に伴い $w_{e \max}$ が増加する関係を示し、平地においては試験体の勾配が $w_{e \max}$ に及ぼす影響が小さい。一方、傾斜地においては、勾配 10° の $w_{e \max}$ が小さい値を示しているが、前節に示したように積雪が多く試験体が埋没したためである。本実験で得られた $w_{e \max}$ と既往の式(3.1)および式(3.2)を比較すると、平地では式(3.2)に $2/3$ を乗じた値に概ね対応し、傾斜地では平地に比べて $w_{e \max}$ が大きくなり式(3.1)に概ね対応している。以上に示すように、平地に設置される太陽電池アレイに作用する軒先荷重は式(3.2)に $2/3$ を乗じた値で、傾斜地に設置される太陽電池アレイに作用する軒先荷重は式(3.1)に基づいて算定することが可能である。なお、太陽電池アレイの軒先が一冬期間を通じて積雪に埋没しなければ軒先荷重が作用しないことになるが、地上の積雪に加えてアレイ面からの滑落雪を考慮すると、軒先荷重が作用しない軒高は、設計用積雪深の 2 倍以上になることを考慮する必要がある¹⁾。

3.4 軒先荷重の作用メカニズム

前節に示すように、最大軒先荷重 $w_{e \max}$ は、年最大積雪荷重の増加に伴い増加し、太陽電池アレイにおける勾配の影響は小さいものの、傾斜地の $w_{e \max}$ は平地に比べて大きくなる傾向を示した。以下では、試験体軒下での積雪断面観測の結果に基づいて軒先

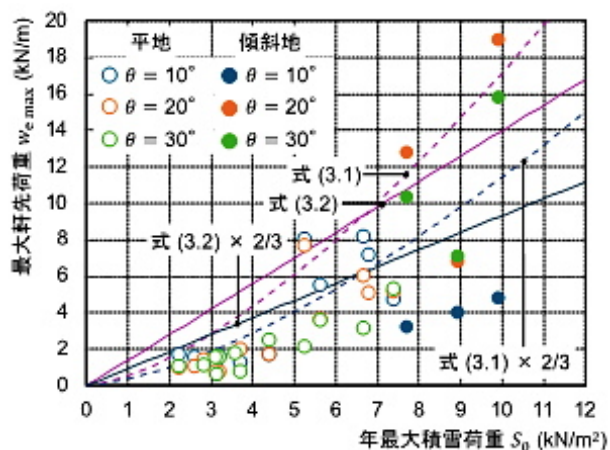


図 9 年最大積雪荷重と最大軒先荷重との関係

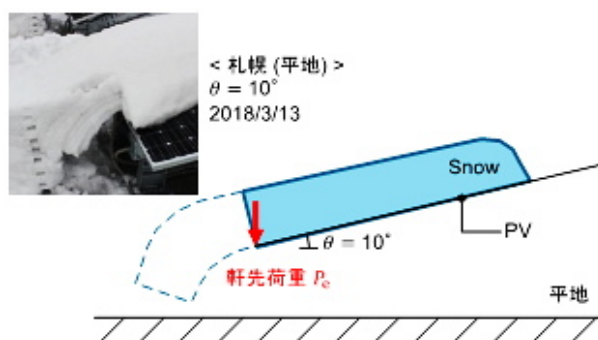


図 10 平地における勾配 10° の軒先荷重

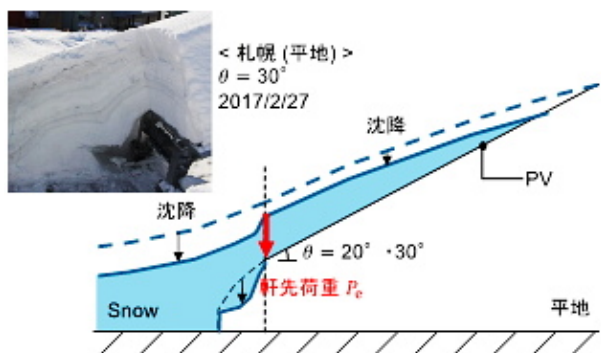


図 11 平地における勾配 20°・30° の軒先荷重

荷重の作用メカニズムを考察した。

図 10 に、平地である札幌の 2018 寒候年における勾配 10° の軒下積雪断面観測の結果と軒先荷重をモデル化した結果を示す。軒下積雪断面観測の結果をみると、勾配が小さくアレイ面の積雪がゆっくりと滑動することから、アレイ面の積雪が軒下に落雪せずに軒先からオーバーハングした状態、すなわち、「巻垂れ³⁾」が形成された状態が継続していたことがわかる。このような状態を軒先荷重としてモデル化すると、オーバーハングした積雪の総重量が軒先に集中荷重として作用するようにモデル化することができる。次に、札幌の 2017 寒候年における勾配 30° の軒下積雪断面観測の結果と軒先荷重をモデル化した結果を図 11 に示す。軒下積雪断面観測の結果をみると、アレイ面の積雪がある程度まとまって軒下に落雪したことが要因と考えられるが軒下の積雪下層には空洞があり、軒先近傍の積雪層が褶曲していた。このような状況をみると、軒先には沈降荷重が作用していたものと推察される。軒先荷重としてモデル化すると、軒下積雪下層の空洞に加えて、アレイ面の積雪に比べて軒下積雪の方が深いことから相対的に沈降量が大きくなるため、大きな沈降荷重が軒先に作用するものとモデル化することができる。なお、勾配 20° の場合については、3.1 節で示

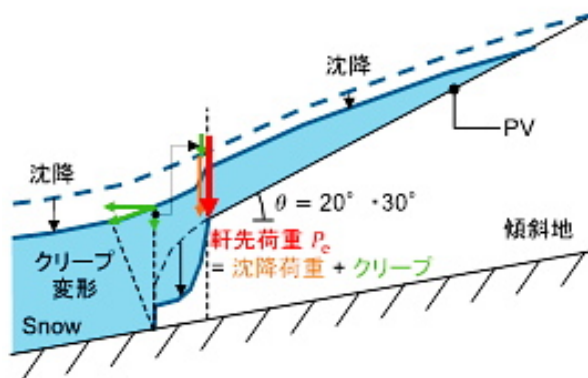


図 12 傾斜地における勾配 20°・30° の軒先荷重

した軒先荷重の推移が勾配 30° と同様の傾向を示すことから、軒先荷重の作用メカニズムについても勾配 30° と同様になるものと考えられる。

傾斜地については、平地での軒下積雪断面観測の結果を参考にして軒先荷重をモデル化することとした。図 12 に、勾配 20° および 30° の急勾配アレイを例として傾斜地における軒先荷重をモデル化した結果を示す。基本的には平地と同様の沈降荷重が軒先荷重として作用するものと考えられる。ただし、傾斜地では軒下積雪が傾斜方向にクリープ変形することから、その鉛直方向の成分が軒先荷重として作用することにより、傾斜地の軒先荷重が平地に比べて大きくなったものと推察される。

4. まとめ

本報では、札幌および新庄の平地ととことん山の傾斜地において、試験体に作用する積雪荷重を測定するための実験を行い、その結果をまとめるとともに、平地と傾斜地のそれぞれで軒先荷重の算定方法を明らかにした。

謝辞

この成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術研究開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP20015) の結果得られたものです。

参考文献

- 1) 太陽光発電協会, 資料・出荷統計, 資料, 設計ガイドライン (accessed May 2024), <https://www.jppea.gr.jp/document/handout/>
- 2) 日本規格協会, JIS C 8955 : 2017, 太陽電池アレイ用支持物の設計用荷重算出方法, (2017).

- 3) 日本建築学会編, 建築物荷重指針・同解説
(2015), 207-293 (2015), 日本建築学会, 東京.

著者略歴



千葉隆弘 (チバ タカヒロ)

2000年3月北海道工業大学大学院
修士課程修了. 2005年10月北海道工
業大学(現北海道科学大学)建築学科
に着任. 2009年3月千葉大学大学院
博士課程(社会人)修了. 研究分野は建築構造・建
築雪氷工学.