

〔研究論文〕

## 屋根一体型太陽電池の通電加熱による除雪

齋藤 輝文<sup>1)</sup>、柴崎浩一郎<sup>2)</sup>、武澤 港斗<sup>3)</sup>、初谷 博<sup>4)</sup>、  
味原 真穂<sup>5)</sup>、宍戸 保範<sup>6)</sup>、杉山 丞<sup>7)</sup>

### Snow Removal from Photovoltaic Panels with Joule Heating

T. Saito<sup>1)</sup>, K. Shibazaki<sup>2)</sup>, M. Takesawa<sup>3)</sup>, H. Hatsuya<sup>4)</sup>,  
M. Ajihara<sup>5)</sup>, Y. Shishido<sup>6)</sup>, S. Sugiyama<sup>7)</sup>

#### Abstract

We have conducted demonstration experiments for snow removal from photovoltaic panels with Joule heating by applying electrical power to the photovoltaic array. It has been shown that necessary electric energy is 2.7kWh and 1.6kWh when applied electric power is 766 W and 312 W, respectively for the array of nominal generating power of 325 W. Each energy corresponds to electric energy produced during 4.9 days and 2.8 days, respectively. No degradation in power generation has been observed. It has been concluded that the method is easy to apply and energy-effective.

#### 1. 背景と目的

太陽光発電は再生可能エネルギーの中でも、短期間で容易に設置できることから、近年急速に普及が拡大しているが、降雪が多い地域にはあまり普及が進んでいない。太陽光発電パネルへの積雪により、発電量が少なくなることが大きな要因である。

山形大学の東山<sup>1,2)</sup>らは電気発熱体を裏面に取り付けられた融雪瓦を用いることにより落雪処理を行うことができることを報告している。

本研究<sup>3)</sup>では、太陽光発電パネルにヒーターを取り付けることなく、ただ外部から電流を流し通電加熱させることによって、パネル上に降り積もった雪を滑り落とす方式の技術開発を実施することとした。同様の方式の融雪・除雪については、既に報告例<sup>4,5,6)</sup>があるが、除雪に要する電力量と発電量の比較や最適条件の探索、通電加熱による発電性能への影響の評価などについての記述が十分とは言い難い。

- 
- 1) 東北工業大学 工学部 環境エネルギー学科 教授
  - 2) 東北工業大学 工学部 環境エネルギー学科 平成 26 年度卒業生
  - 3) 東北工業大学大学院 工学研究科 環境情報工学専攻 修士課程 2 年
  - 4) 株吉岡 専務取締役
  - 5) 株吉岡 技術グループ係長
  - 6) 株吉岡 技術グループ
  - 7) 株タニタハウジングウェア秋田工場技術部部长

雪を滑り落とすために必要となる条件（電力，傾斜角等），障害となる条件を実験的に明らかにすること，通電によって発電能力に劣化が生じないかどうかを評価することを本研究の目的とした。

豪雪地である秋田県大仙市において実証実験を実施することが主題であるが，それに先立ち，小型の太陽電池について家庭用冷凍冷蔵庫を用いた模擬実験も実施し，問題点の抽出，検討を行った。

## 2. 実験

本研究の主要な実験は，豪雪地として知られる秋田県大仙市の自然環境下において実証的な比較対照実験を実施することとした。その実験は積雪期にのみに限られるので，それに先立ち，実証実験に用いるのと同型の発電モジュールについての印加電力と温度の関係等の基礎データの収集のほか，小型の太陽電池について家庭用冷蔵冷凍庫を用いた模擬実験を手始めに実施した。

### 2.1 模擬実験

実証実験に先立ち，小型の太陽電池について家庭用冷凍冷蔵庫を用いた模擬実験を実施した。本模擬実験の主な目的は以下の通りである。

- ・ 滑雪に影響を与える要因の探索
- ・ 通電加熱による発電性能劣化の有無の検証

#### 2.1.1 実験に使用した太陽光発電モジュールほか各種機器

本模擬実験では，次の太陽電池モジュールを評価対象とした。

Table 1. Photovoltaic cell used for simulated experiments.

Type	SB-1V380MA
Dimension	64 × 45 mm <sup>2</sup>
Nominal maximum power, $P_{\max}$	0.39 mW
Nominal maximum power voltage, $V_{\text{mp}}$	1.3 V
Nominal maximum power current, $I_{\text{mp}}$	0.3 mA

その他実験に使用した装置・機材は以下の通りである。

- ・ データロガー（GRAPHTEC GL900）
- ・ 電流クランプ（GWInSTEK GCP-100）
- ・ 熱電対（K型熱電対）
- ・ 電源（GWInSTEK PSW 80-27）
- ・ Si フォトダイオード（浜松ホトニクス S1337-1010BQ）
- ・ 赤 LED（632 nm），青 LED（477.8 nm），緑 LED（529.3 nm）
- ・ 実験台

#### 2.1.2 冷凍冷蔵庫を用いた滑雪実験

家庭用冷凍冷蔵庫を用いた滑雪の模擬実験を以下の方法で実施した。

測定環境：冷凍庫内

通電電力：公称出力の約9倍（2.4 V × 1.5 A = 3.6 W）

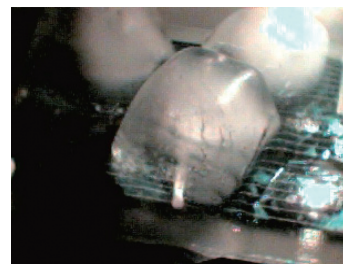
測定対象：Table 1 の太陽電池モジュール（多結晶 Si）

測定方法：冷凍庫内に傾斜させた太陽電池モジュールと観測用の USB ネットカメラを設置し、太陽電池モジュール上に氷あるいはシャーベット状氷（以下両者をともに氷と表記）をのせる。太陽電池モジュールの電線を冷凍庫外に引出し、直流電源により順方向に通電する。滑り落ちるか、またどのくらいの時間で滑り落ちるかの様子を USB ネットカメラを用いて撮影する。

氷およびシャーベット状氷についての実験結果をそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。氷について時間をかけることにより容易に滑り落とすことができたが、シャーベット状氷について、中心部に空洞ができたものの、滑り落とすことができない結果となった。



a) Before heating.



b) 42 minutes after heating.

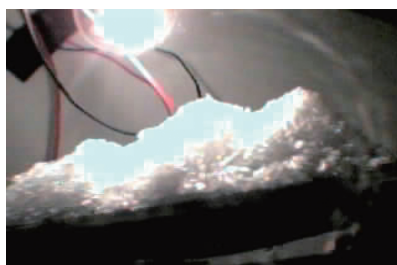


c) 46 minutes after heating.

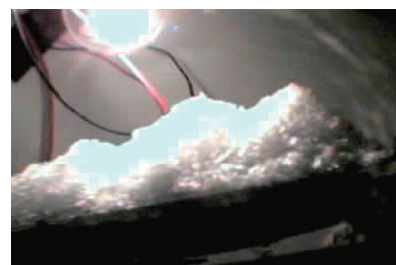


d) At the end of 48 minute-long heating.

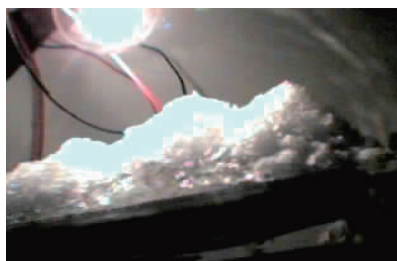
Fig. 1 Photographs of simulated experiments in a freezer for Joule heating snow removal using ice cubes on a photovoltaic panel.



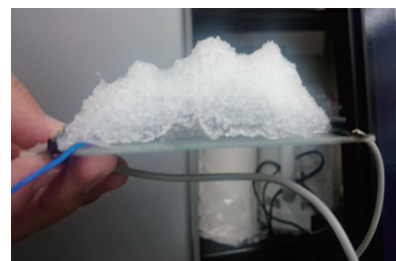
a) Before heating.



b) 29 minutes after heating.



c) 65 minutes after heating.



d) At the end of 65 minute-long heating.

Fig. 2 Photographs of simulated experiments in a freezer for Joule heating snow removal using shaved ice on a photovoltaic panel.

### 2.1.3 小型模擬太陽電池についての劣化評価

通電加熱によって発電性能に劣化が生じないかどうかの評価を以下の方法で実施した。

測定対象：Table 1 に示した出力 0.39 mW の劣化実験用小型太陽電池

通電加熱電力：公称最大出力の約 1 倍から約 4 倍

測定方法：暗室中において赤 LED、青 LED、緑 LED と光源を変え、比較参照用フォトダイオードの短絡電流と被試験太陽電池の出力電力との比を求め、光の波長の関数として太陽電池の発電能力が低下するかどうかを検証する。次の通電時間毎に測定を繰り返す：10 分、30 分、1 時間、1.5 時間、2 時間。

公称出力の約 4 倍に相当する 1.57 W で通電加熱をした場合についての結果を Fig. 3 に示す。120 分のデータが高めにしているのは、測定のために太陽電池を設置するときの位置再現性に問題があったためと推測された。公称最大出力の約 4 倍の電力で通電加熱しても発電能力に劣化は生じていない結果が得られた。

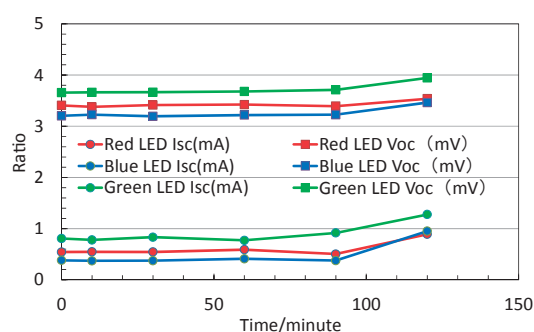


Fig. 3 Short circuit currents and open circuit voltages of the test module normalized by those of a stable photodiode as a function of accumulated time for Joule heating of 1.57 W.

## 2.2 実証実験

通電加熱による除雪の効果を確かめるための実証実験を、豪雪地として知られる秋田県大仙市において実施した。それに先立ち積雪期の前には、同型の発電モジュールについての印加電力と温度の関係等の基礎データを収集した。

### 2.2.1 実験に用いた太陽光発電モジュール

実証実験には、下表の(株)吉岡製屋根一体型多結晶 Si 太陽光発電モジュール「エコテクノルーフ」出力 130 W のフルモジュール (ETRO1SN) 2 基および出力 65 W のハーフモジュール (ETRO1HN) 1 基からなるアレイを 2 組用いた。

Table 2 Specifications of photovoltaic module, “EcoTechnoRoof”.

Type	ETRO1HN	ETRO1SN
Dimension	1365 × 392 mm <sup>2</sup>	1365 × 712 mm <sup>2</sup>
Nominal maximum power, $P_{max}$	65 W	130 W
Nominal maximum power voltage, $V_{mp}$	7.98 V	15.99 V
Nominal maximum power current, $I_{mp}$	8.13 A	8.16 A
Nominal open circuit voltage, $V_{oc}$	10.09 V	20.13 V
Nominal short circuit current, $I_{sc}$	8.69 A	8.77 A

### 2.2.2 基礎データ収集

実証実験に設置するものと同型のハーフモジュールへ通電する実験を実施した。使用した機材とともに実験時の様子を Fig. 4 に示す。太陽光発電モジュールの公称出力 65 W に

対し、約1倍から約3倍の電力を通電し、それぞれの程度温度が上昇するのか測定した。

約3倍の183Wの電力で通電加熱した場合の温度変化等のデータをFig. 5に示す。通電後約15分で熱平衡に達し、約22℃の温度上昇を確認した。その前後において、発電機能を比較したが、損傷や劣化は認められていない。

通電加熱を開始して50分後のパネルを赤外線カメラで撮影して得た温度分布をFig. 6に示した。電極部分の温度が高く、周辺特にフレーム部分の温度が低い様子がわかる。電極部分の温度が高いのは、電流密度が大きいことを反映していると考えられる。フレーム部分の温度が低いのは、滑雪に関しては懸念材料である。

### 2.2.3 実証実験の概要

自然環境下の実証実験を、豪雪地として知られる秋田県大仙市にある㈱タニタハウジングウェア秋田工場の敷地内において実施した。Fig. 7に示したように、公称最大出力325W（出力130WのフルモジュールETRO1SNが2基+出力65WのハーフモジュールETRO1HNが1基）の㈱吉岡製屋根一体型多結晶Si太陽光発電モジュール「エコテクトーフ」2組を方位角182°（ほぼ南向き）、傾斜角13°にて設置した。状況は常にWebカメラにてモニター可能である。

通常はどちらにも発電電力利用を模擬するため、最適負荷抵抗値（=最大出力電圧/最大出力電流）に近い約6Ωの抵抗負荷を接続してある。除雪実施時には、向かって左側の太陽光発電モジュールのみ負荷を切り離し、代わりに直流電源から定電流で通電し、効果を確認した後はまた負荷を接続する。右側は参照比較用であり、負荷が常時接続されている。

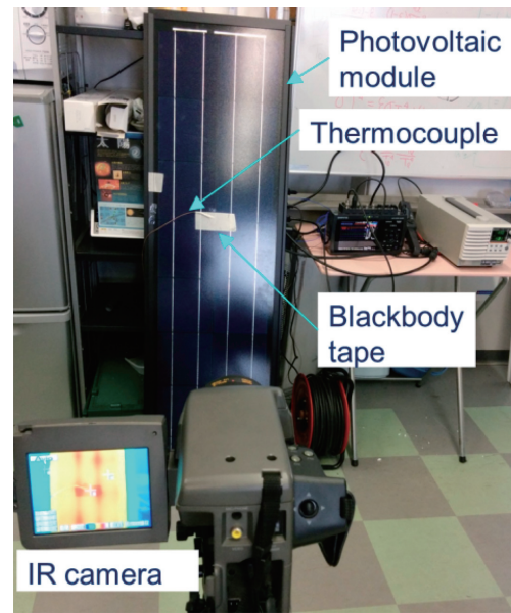


Fig. 4 Photograph of the Joule heating experimental setup for photovoltaic module.

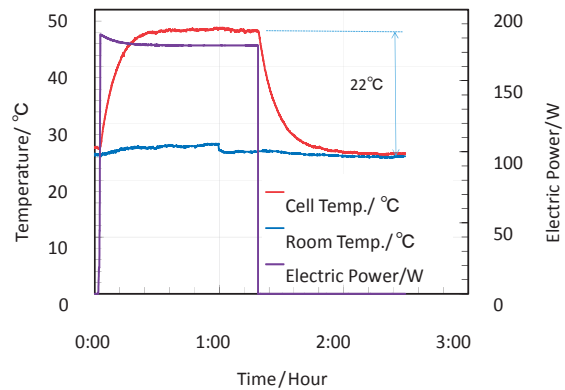


Fig. 5 Temporal change in temperatures and electrical power under constant current.

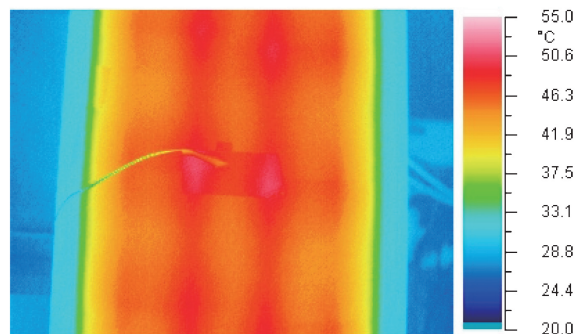


Fig. 6 Temperature distribution 50 minutes after the Joule heating.

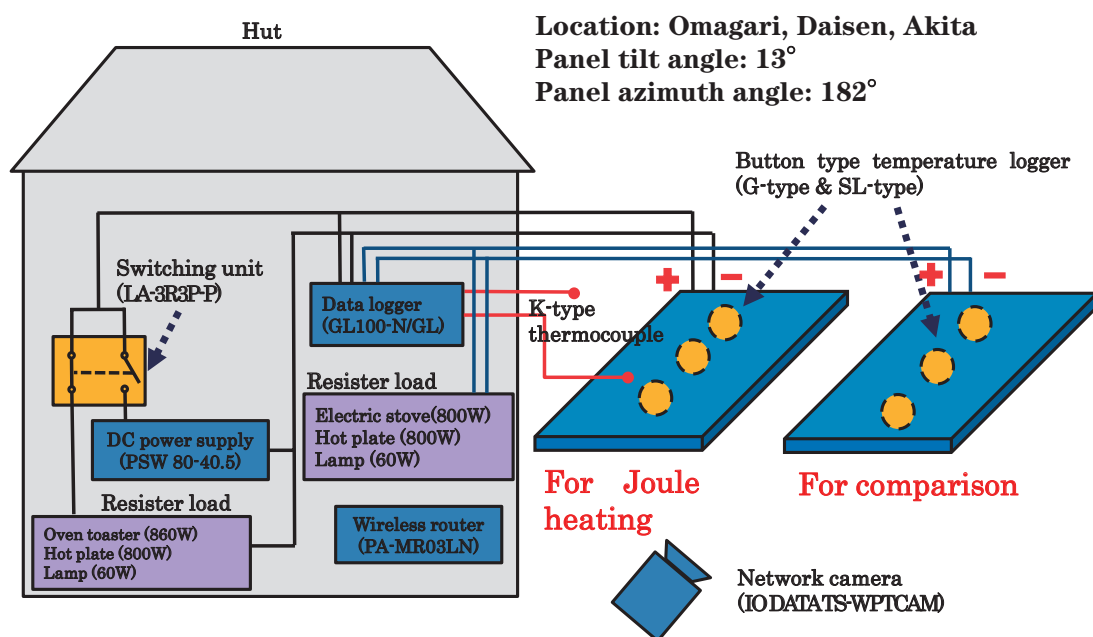


Fig. 7 Schematic diagram of the demonstration experiment system for snow removal by Joule heating.

#### 2. 2. 4 通電加熱実験その1 (通電電流 12 A)

実証実験結果の一例を Fig. 8 に示す。積雪を確認した後、2014年12月22日11:25に12 A, 64 V, 766 W (公称最大出力の2.4倍)にて通電を開始した。2時間35分後、雪が滑り落ち始め、3時間26分後、使用電力量2.7 kWhにて、ほぼ雪がなくなり、除雪の効果を確認した。

この使用電力量が発電電力量に比べてどの程度であるかを考える。NEDO日射量データベース MONSOLA-11<sup>7</sup>を用いて、設置した太陽光発電パネルへの入力である平均日射量を知ることができる。実際の設置条件に近い傾斜角10°、方位角0°(真南)として、大曲における冬季(12月~2月)の平均斜面日射量を求めると

$$X = 1.70 \text{ kWh/m}^2$$

となる。標準太陽光の強度である放射照度  $1 \text{ kW/m}^2$  が24時間連続する場合の面積当たりの総エネルギーは

$$Y = 24 \text{ kWh/m}^2$$

であるので、当地冬季の設備稼働率は

$$u = X / Y = 0.071$$

であることがわかる。

これより本太陽光発電モジュールの1日当たりの発電量期待値 $Z$ は、 $P = 325 \text{ W}$  (トータルの公称最大出力)、 $t = 24 \text{ h}$ を用いて以下のように求まる。

$$Z = Ptu = 325 \text{ W} \times 24 \text{ h} \times 0.071 = 554 \text{ Wh}$$

したがって、使用電力量2.7 kWhは、当地冬季の当該太陽光発電パネルによる4.9日分の発電量に相当することになる。



Fig. 8 Field experiment at Daisen, Akita with constant current heating of 12 A (766 W) started at 11:25.



Fig. 9 Field experiment at Daisen, Akita with constant current heating of 6 A (312 W) started at 9:33.

### 2. 2. 5 通電加熱実験その2（通電電流 6 A）

翌年1月29日には、6 A、52 V、312 W（公称最大出力の0.96倍）にて9:33に通電開始した。そのときの様子を Fig. 9 に示す。時間が経つにつれ、徐々に雪全体が下へと動き始め、開始から約5時間経ち写真の様に積もっていた雪が割れ、大方の雪が滑り落ちた。

使用電力量は1.6 kWhと削減できた。この電力量は、当地冬季の2.8日分の発電量に相当する。通電加熱による除雪を実施しない場合には、積雪状態が1週間あるいは気象条件によっては1か月間程度すら継続することが想定され、この間、発電はほとんど期待できないので、約3日分程度の発電量で除雪できることは、十分メリットがあると言える。

通電加熱前後の電力、温度変化を Fig. 10 に示す。通電後、通電モジュールの温度が氷点近くではほぼ一定に保たれているのは、まだ積雪状態のままであるものの、接触面にて雪と水が共存状態になっていて、時間とともに水の割合が増えているものと考えられる。14時頃にモジュール温度が急増したのは、積雪の大部分が滑落したためである。

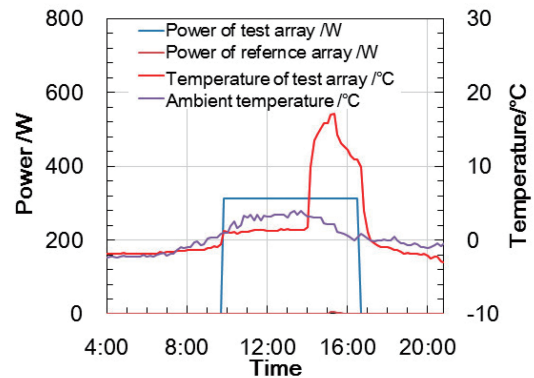


Fig. 10 Temporal change in temperatures and electrical powers during the Joule heating.

## 2. 2. 6 発電能力の劣化検証

2. 1. 3 節で示したように、小型模擬太陽電池の場合には、公称出力の4倍程度の電力を加えても劣化は認められなかった。実証実験に使用したモジュールについても劣化の有

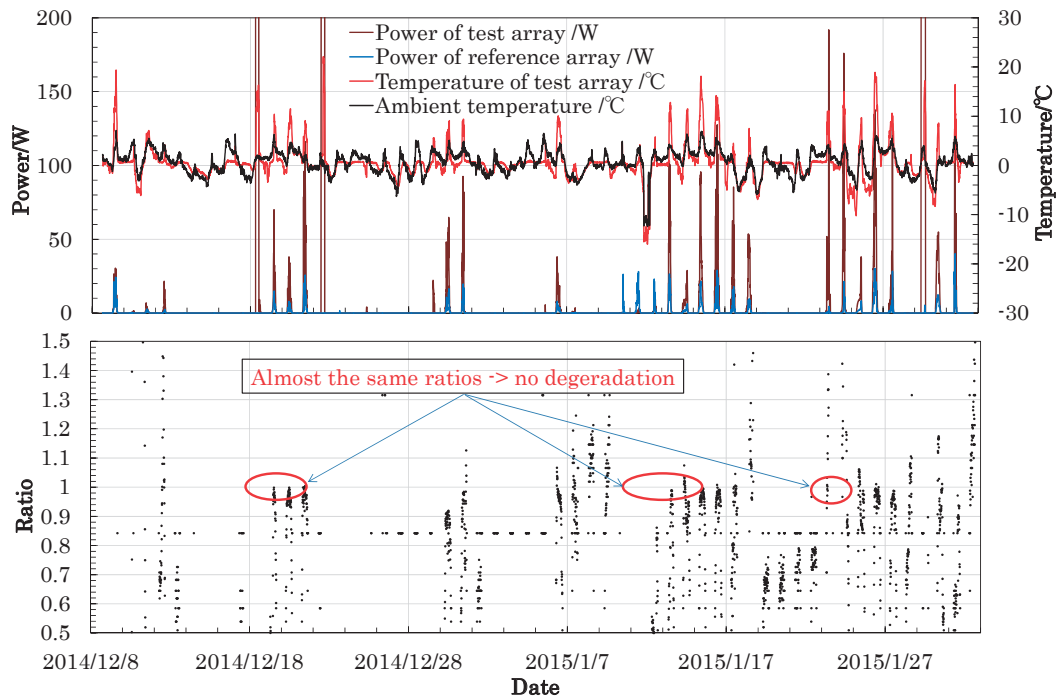


Fig. 11 Top: Temporal change in temperatures and electric powers of test array and reference array. Bottom: Normalize ratio of test array generated power to reference array generated power.



無の検証は不可欠である。

Fig. 11に12月22日の通電加熱実験を挟む約2か月間の電力、温度の時系列記録を示す。下段は通電加熱をするモジュール（向かって左）の出力電力を参照用モジュール（向かって右）の出力電力で割った比を規格化したものである（両モジュールの負荷抵抗を本来同一にすべきところ、2014年12月10日から2015年2月22日の間、通電加熱用モジュールの負荷の一部であるオープントスターが意図に反してoff状態になっており、電力に大きな差異が生じていたため）。

同一条件下に置かれた参照用太陽光発電モジュールとの比は本来一定であることが期待されるが、前記のように負荷抵抗値に差異が生じたため、非直線性が強く光強度の関数になっている。しかし正午の頃のピーク値を、通電加熱の前後で比較することにより、通電加熱によって、損傷や劣化は発生していないことが確認できた。

### 3. 結論

通電過熱によりパネルの発電能力の劣化は認められなかった。太陽光発電パネルに直接通電加熱することにより、容易に雪を滑り落とせることを確認した。ただし雪の状態等により、滑り方が異なりうることが示唆された。滑り落とすのに要した電力量を、当地同時期の平均斜面日射量から求まる発電量と比較した結果は以下の通りである。

- ・ 766 W（公称出力の2.4倍の電力）通電時：2.7 kWh = 4.9日分の発電量
- ・ 312 W（公称出力の0.96倍の電力）通電時：1.6 kWh = 2.8日分の発電量

除雪しない場合、積雪状態が1週間以上継続する可能性は高く、その間発電電力はほとんど得られないため、通電加熱による除雪に必要なエネルギーより除雪後得られる発電エネルギーが上回り、通電加熱による除雪はメリットがあると結論づけられる。

### 謝辞

本研究は東北工業大学産学連携センターの地域・産学連携プロジェクト研究（実用化開発研究）の助成を受け、実施された。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1 東山禎夫, 浅野和俊, 宮野秋彦:直線に配置した融雪瓦による落雪処理, 日本雪工学会誌7 (1991.1) 9-18.
- 2 東山禎夫, 船場洋, 浅野和俊, 宮野秋彦:融雪瓦の落雪効果に及ぼす瓦表面温度の影響, 日本雪工学会誌8 (1992.1) 3-11.
- 3 齋藤, 柴崎, 武澤, 二田, 初谷, 味原, 宍戸, 杉山:太陽光発電パネル上積雪の通電加熱による除雪, 応用物理学会予稿 12a-D12-11 (2015.3.12, 東海大).
- 4 東山禎夫, 向瀬慎一, 浅野和俊:通電した太陽電池アレイ上の雪滑落時における表面温度変化, 日本雪工学会誌13 (1997) 349-354.
- 5 東山禎夫, 向瀬慎一, 浅野和俊:瓦葺き屋根に設置した太陽電池アレイ上の雪処理 日本雪工学会誌14 (1998) 16-25.
- 6 依田弘之, 植田浩介, 渡辺百樹:融雪機能付き太陽光発電システム, シャープ技報 No.86, (2003) 43-47.
- 7 NEDO 日射量データベース MONSOLA-11 <http://app7.infoc.nedo.go.jp/metpv/monsola.html>