東北工業大学地域連携センター・研究支援センター紀要 EOS
Vol.32 No.1 p.29 ～ p.38, 2020

共同プロジェクト研究（実用化開発）
〔研究論文〕

カーボンナノチューブ織物状発熱体の太陽光発電分野への応用に関する研究

齋藤　輝文[1)]，今野　友貴[2)]，土屋　薫生[3)]，初谷　博[4)]，竹村　喜寿[4)]，
杉山　丞[4)]，鳥居　彰夫[5)]，木村　吉宏[4)]

Research on Application of Carbon Nanotube Fabric Heater to Photovoltaic Fields

T. SAITO[1)], Y. KONNO[2)], S. TSUCHIYA[3)], H. HATSUYA[4)], Y. TAKEMURA[4)],
S. SUGIYAMA[4)], A. TORII[5)], Y. KIMURA[4)],

Abstract

Carbon nanotube（CNT）fabric heaters featured by flexibility in shape and homogeneity in temperature distribution are applied to photovoltaic fields, 1）constant temperature control aimed for direct measurements of internal conversion efficiency for photovoltaic cells, and 2）snow-melting for photovoltaic modules. In summary, the constant temperature control was achieved using negative feedback control by CNT heater itself（without additional temperature sensors）as a temperature sensor at the power density exceeding 1kW/m^2, and snow-melting using CNT heaters was achieved with the energy density of 15kWh/m^2.

1　背景と目的

太陽電池の評価には，変換効率の測定が不可欠である。太陽電池の外部変換効率は，入射放射束に対する発生電力の比として定義され，分子の電力が容易に測定できる一方で，

1）東北工業大学工学部環境エネルギー学科
Department of Environment and Energy, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology.
2）みちのくコンサルタント㈱（環境エネルギー学科平成30年度卒業生）
Michinoku Consultant Co., Ltd.（ex-student graduated in fiscal year 2018 from Department of Environment and Energy, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology）
3）工藤電機㈱（環境エネルギー学科平成30年度卒業生）
Kudo Denki Co., Ltd.（ex-student graduated in fiscal year 2018 from Department of Environment and Energy, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology）
4）㈱タニタハウジングウェア
Tanita Housingware Co., Ltd.
5）㈱Fabtech
Fabtech Co., Ltd.

分母の入射放射束は，規定のスペクトルを用いて定まった条件の下[1]測定する必要があるため容易ではなく，信頼に足る効率測定は世界中でも数箇所の認証機関に限定されている[2]。入射放射束のうち一部は反射等によって失われるので，性能評価上は，吸収放射束に対する発生電力の比，すなわち内部変換効率の方が本質的に重要である。従来の評価法では，標準太陽電池を用いて入射放射束を評価することによって，始めに外部変換効率を決定し，その後，反射率・透過率測定を実施することにより，内部変換効率を求めるという手順であり，内部変換効率は間接的な測定とならざるを得なかった。

齋藤らは近年，太陽光発電パネル自体が放射束を吸収した結果発生する熱出力を電力で置換する新たな手法により吸収放射束を評価し，太陽電池の内部変換効率を直接決定することに世界で初めて成功した[3]。具体的には，光入力を遮った状態で，太陽光発電パネルへ順方向に通電し，太陽電池に外部から電力を加えてヒータとして動作させ（あるいはそれに付加した電気ヒータに通電），光照射時の温度と同じになるように電力を調整することにより，熱を電力で置換する。すなわち，その電力が吸収した放射束として求められるという手法である。

電気から熱への変換は一般的なヒータによって容易に実現できるが，本研究では，ニクロム線等によるこれまでの線状の金属ヒータに比べ，温度むらのない一様な温度分布に加え，任意のサイズ・形状の曲面で発熱体を構成できる特徴を持つ㈱Fabtech 製カーボンナノチューブ織物状発熱体（CNT 発熱体）を主要なヒータとして採用した。前記独自の方式により太陽電池の内部変換効率を直接測定することを最終的な目標とするが，その前段階として，測定自動化のために，負帰還回路により CNT 発熱体を恒温制御することを本研究の第一の目的とした。

本研究テーマに関連する先行研究として，平成 26－27 年度に本学実用化開発研究「屋根一体型太陽電池の通電加熱による除雪」[4,5]を実施し，技術的には成功裡に終了した。この先行研究では，太陽電池の pn 接合に外部電源から通電してヒータとして動作させて，雪を滑り落とすことに成功した。しかし，現実的な課題として豪雪地帯の場合，滑雪による除雪では雪の捨て場に困るため，経済的負担が増えても雪を融解させることを望む声が強いことが判明した。

そのため本研究では，除雪ではなく完全融雪を指向することとした。さらに，太陽電池への直接通電では，電力ネットワークへの系統連携が認め難い現実があるため，本研究では系統連携に支障がないようにするため，太陽電池とは独立したヒータを取り付ける方式へ変更することとした。そのヒータには，前記テーマと同様，CNT 発熱体を用いることとした。

本研究の目的をまとめると，以下の通りである。

1）本学齋藤研で開発した電力置換による太陽電池内部変換効率の直接測定を自動化するため，負帰還回路による CNT 発熱体の恒温制御を実現する。

2）CNT 発熱体を用いて太陽光発電パネル上の積雪を融雪する実証実験を行い，必要とする電力量を最小とする条件の探索等，最適化を行い融雪技術の実用化を図る。

2　CNT 発熱体の特性評価とその制御方式の比較

2．1　CNT 発熱体の電流電圧特性とその温度依存性

㈱Fabtech 製カーボンナノチューブ織物状発熱体（サイズ：10 cm×10 cm）の電流電

圧特性を ADCMT 製計測電源 6241 A を用いて 28℃ および 60℃ の温度条件下で測定した。最大通電電流が 0.1 A，0.5 A のときの結果をそれぞれ Fig.1，Fig.2 に示す。これらの結果より，CNT 発熱体は，ダイオードのような非直線性電流電圧特性を持ち，かつ負の温度係数（金属ヒータとは反対）を持つことが明らかとなった。

もしこれを定電圧電源で通電すると，「発熱→抵抗減少→電力増加→さらに発熱」という正帰還になって原理上熱暴走のリスクがあることになり，これを回避する必要がある。

以下では，1）定電圧通電方式に加え，このリスクを回避する方法として，2）定電流通電方式と 3）CNT 発熱体を温度センサーとしても兼用する独自の恒温制御を行う回路方式（追加の温度センサなし）の 3 種類の方式で通電して，温度と熱流束を測定する比較実験を行った。

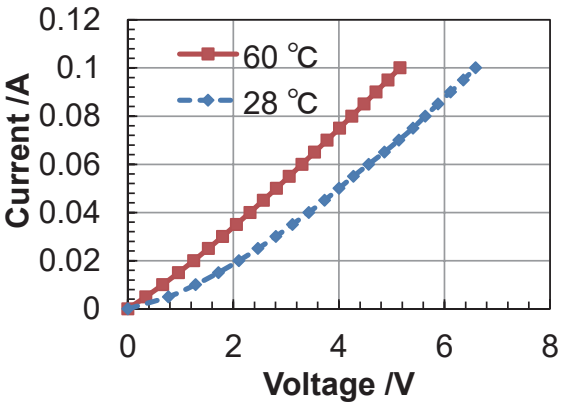

Fig. 1　Current-voltage characteristics of a CNT heater（maximum current: 0.1 A）.

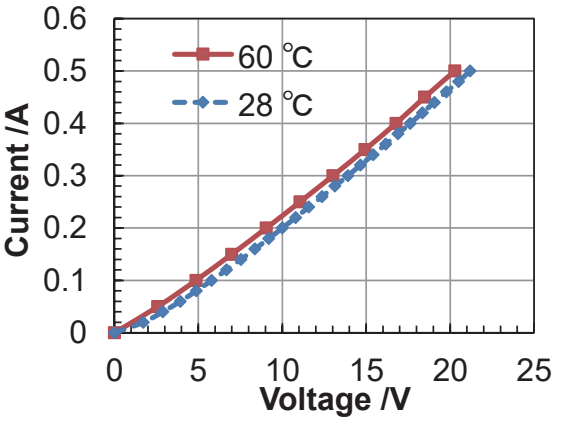

Fig. 2　Current-voltage characteristics of a CNT heater（maximum current: 0.5 A）.

2．2　CNT 発熱体の定電圧通電

CNT 発熱体（サイズ：10 cm × 10 cm）を INSTEK 製安定化電源 PSW80-27 により定電圧通電し，徐々に電圧を上げて，温度が安定したときに赤外線カメラ（AVIO 製 TVS-600）で撮影した温度分布画像と実物写真を Fig.3 に示す。電極周辺での温度が高いが，それ以外の箇所では温度がほぼ均一であることが確認できた。

HIOKI 製熱流ロガー LR8432 を用いて，CNT 発熱体を定電圧通電したときの CNT 発熱体中央部表面温度を K 型熱電対，熱流束を熱流センサ Z2012 を用いて，通電時の電圧をステップ状に変え，電圧と電流（0.1 Ω のシャント抵抗の両端電圧を測定して算出）とともに時間的変化を計測した。その結果を Fig.4 に示した。10 cm 角の CNT 発熱体に 10 W を超える電力（最大約 14 W）を印加した（パワー密度で 1 kW/m^2 超）。

CNT 発熱体は負の温度係数を持つため，定電圧動作では熱暴走するリスクが懸念され，実際電流と電力を見るとやや増加傾向が確認され，その兆候があることが示唆された。しかし，温度変化については，その明確な兆候は観測されていない。その原因については，温度が上昇すると放射による熱流出がシュテファンの法則により絶対温度の 4 乗に比例して急激に増加するのに対し，温度係数が比較的小さいため，抵抗値減少による電力増加の寄与が大きくないためと解釈される。

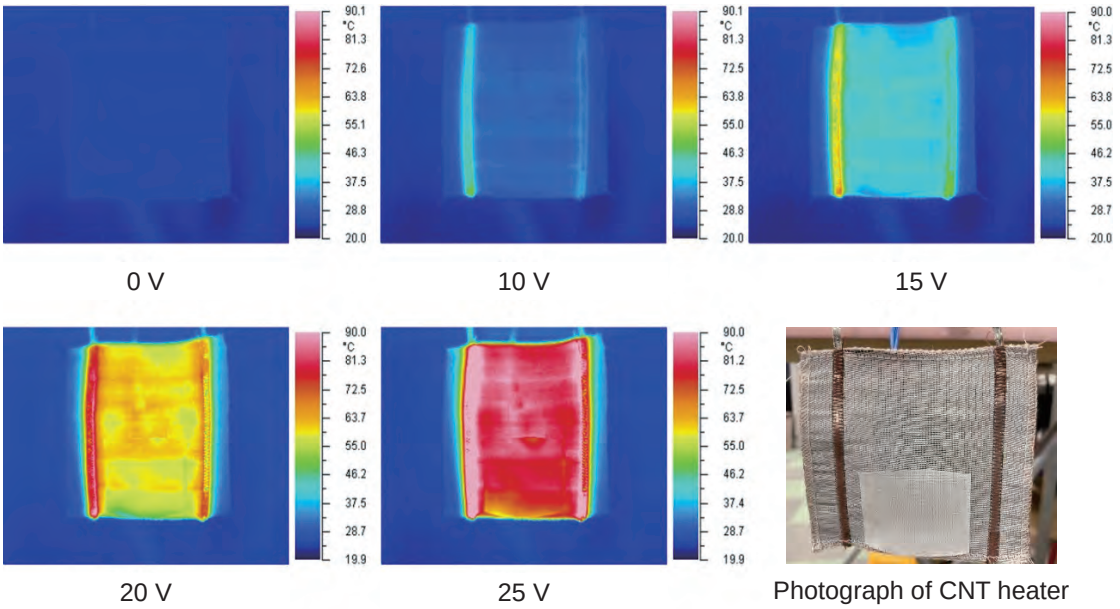

Fig. 3 Temperature distribution of CNT heater observed by IR camera under constant voltage operation together with its photograph.

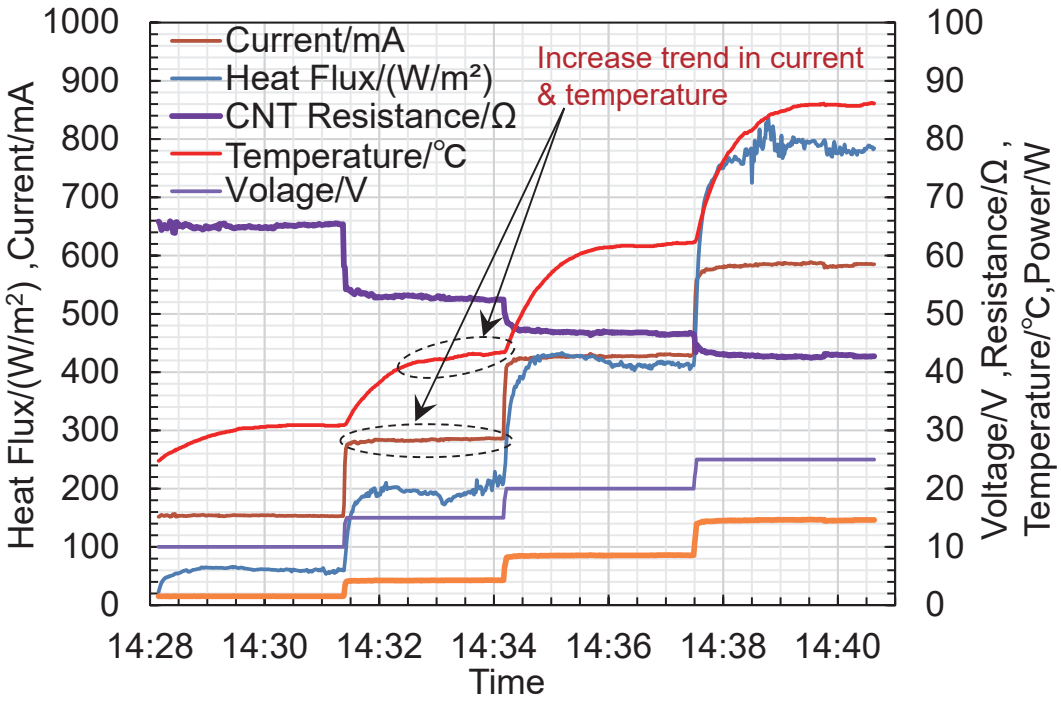

Fig. 4 Constant voltage operation of CNT heater.

2．3　CNT 発熱体の定電流通電

CNT 発熱体を定電流条件で通電し，設定電流をステップ状に変えながら計測した結果を Fig.5 に示した。定電流通電では，原理上「発熱→抵抗減少→電力減少→ジュール損失（発熱量）減少」という負帰還動作が予想される。熱流束に減少傾向が観測され，期待通り負帰還による安全な動作が確認できた。

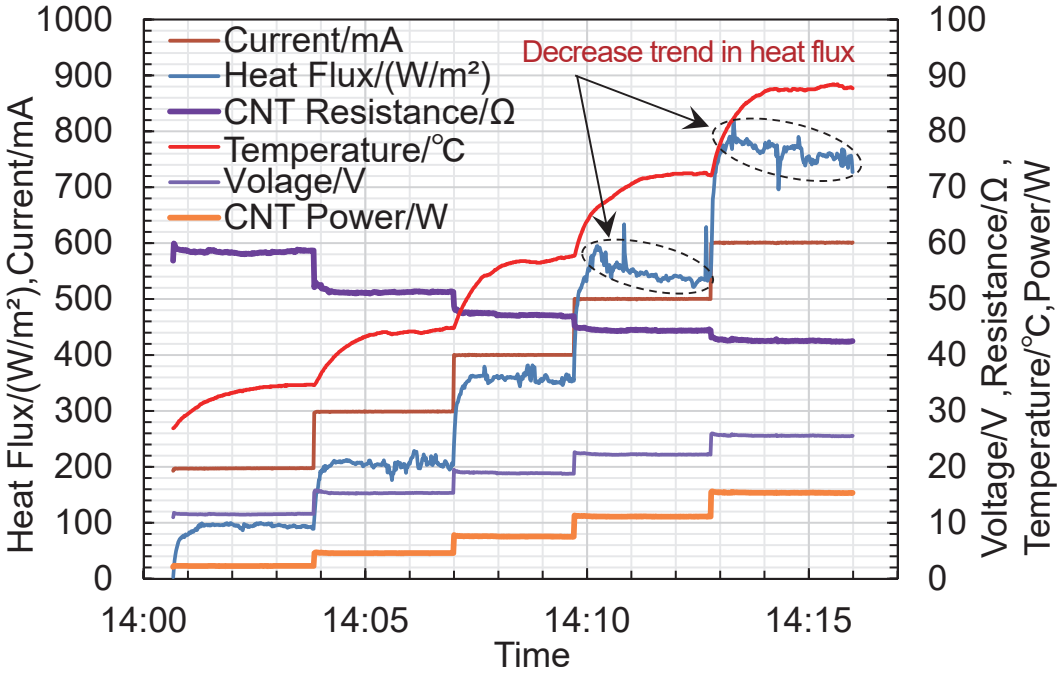

Fig. 5　Constant current operation of CNT heater.

2．4　CNT 発熱体をヒータ兼温度センサとした恒温制御

熱を電力で置換して内部変換効率を直接測定する独自の方法を自動化する上で要となる負帰還回路について，ヒータと温度センサの多様な組み合わせで動作実験を行った。その中で，CNT 発熱体の温度係数が比較的大きいことを利用して，温度センサなしで恒温制御する回路方式を開発した。この技術を利用し，融雪にも利用できるよう高出力化する実験を行った。その回路図を Fig.6 に示す。この回路では，OP アンプの入力側にある CNT 発熱体，ポテンショメータを含む抵抗ネットワークがブリッジを構成しており，仮に温度が上昇すると CNT 発熱体の抵抗が減少し，オペアンプの出力電圧が減少し，抵抗ネットワークへの印加電圧も減少し，CNT 発熱体への印加電力も減少して，一定温度を保つように動作する。

この恒温制御（定温度）制御実験において，設定温度を階段状に変化させて，温度，熱流束，電圧，電流，電力を測定した結果を Fig.7 に示した。熱流束がほぼ一定に保たれていることから，期待通りの動作をしていることが確認できた。なお温度曲線がやや不安定になっているが，この原因として，熱電対を CNT 発熱体表面にテープで貼り付けていたが，熱的な接触がやや不完全であったためと推定される。

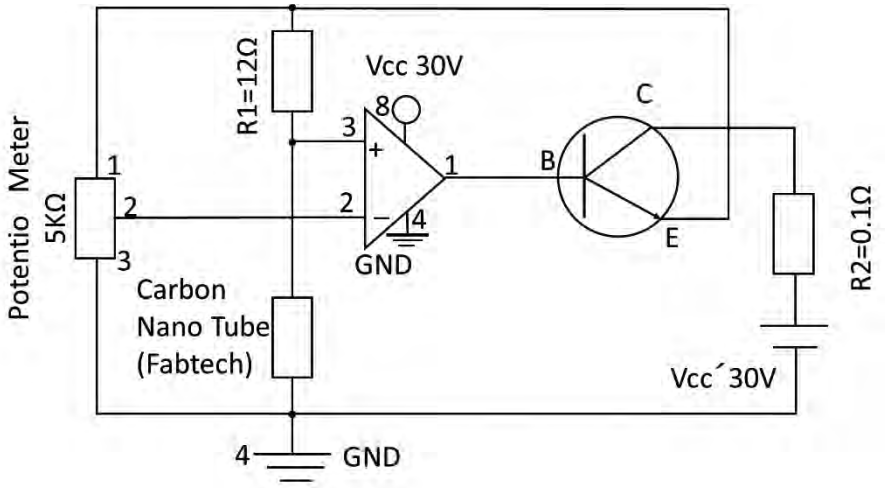

Fig. 6 Circuit for constant temperature operation using CNT heater functioning as a temperature sensor simultaneously.

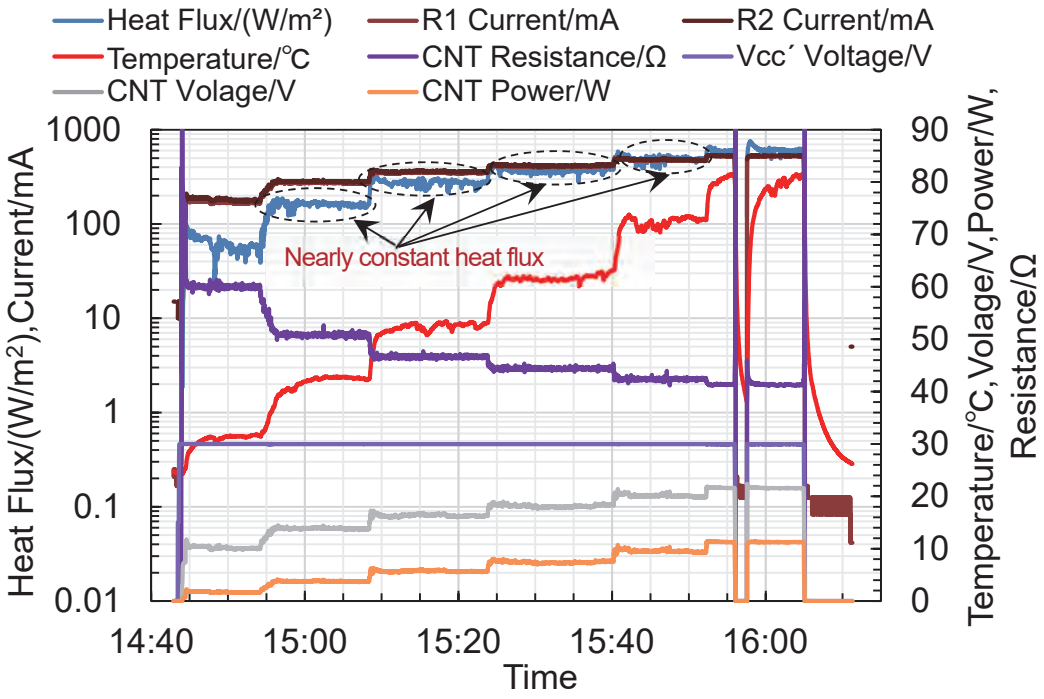

Fig. 7 Constant temperature operation using CNT heater as a temperature sensor simultaneously.

3　融雪実証実験

融雪の実証実験を豪雪地として知られる秋田県大仙市大曲において行った。公称最大出力 130 W の屋根一体型多結晶 Si 太陽光発電モジュール「エコテクノルーフ」（ETR01SY）２枚からなるアレイ２組を方位角 182°（ほぼ南向き），傾斜角 6° にて設置した。

向かって左側の太陽光発電アレイ裏面には CNT 織物状発熱体を直接貼り付けた（直接加熱）のに対し，右側の太陽光発電アレイは間接加熱とし，この二つの加熱方法の比較を行った。

間接加熱については，当初 CNT 発熱体を太陽光発電モジュール裏側に約 1ｃｍの空気層を挟んでブラック（非遮熱）塗装ガルバリウム鋼板の上に貼り付け，発熱体がモジュール裏面に向き合うようにして実験を行った。その後，飛び火認定（建築物の屋根は防火に関する一定の技術基準を満たし大臣認定を取得すること）対策上，CNT 発熱体をガルバリウム鋼板の下に変更して，実験を継続した。

電気的な結線図と温度センサーを取り付けたパネル表面上の大まかな配置を Fig.8 に示す。温度センサーにはＫＮラボラトリーズ製ボタン型温度データロガーＧタイプと SL タイプを使用した。図にあるように左上段パネル左上端に G8，左下段パネル右上端に SL1，右上段パネル左上端に G9，右下段パネル右上端に SL2 を配置した。

CNT 発熱体の電源は，交流，直流いずれでも切り替えて使用できるようにしてあるが，本論文中のデータはすべて直流電源を定電流モードで使用して取得した。

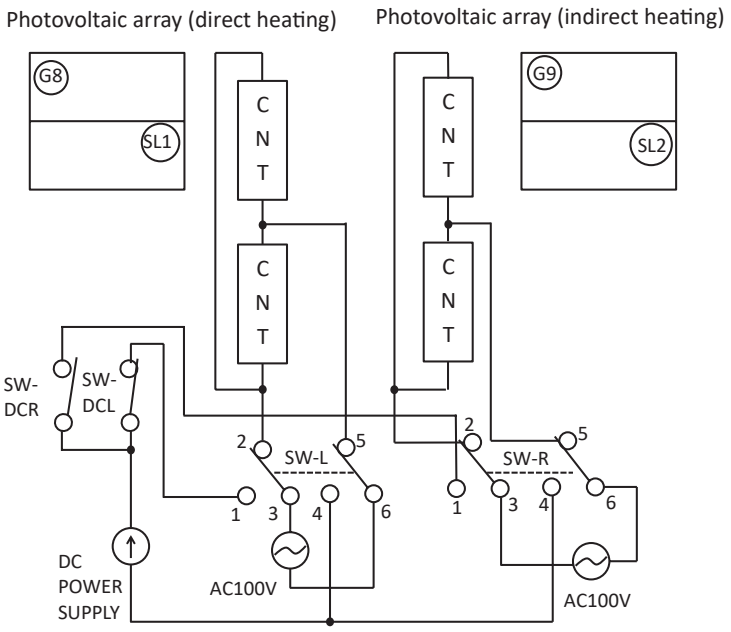

Fig. 8　Wiring diagram with location map for photovoltaic arrays and temperature sensors（G8, SL1, G9 & SL2）.

3．1　間接加熱：ガルバリウム鋼板上に CNT 発熱体

13A の定電流で通電したときの実験結果例を Fig.9，Fig.10 に示す。Fig.9 において G8 は直接加熱，G9 は間接加熱のモジュール表面温度である。通電前の 1 月 13－14 日は降雪・積雪はなく，特に夜間は氷点下を大きく下回っている。15 日夜から雨が降り始め，16 日早朝からは雪に変わっている。16 日の温度がほぼ 0℃で一定となっているのは，モジュール表面で雨と雪が共存していることを示唆している。積雪後，17 日の日中に 1 回目の通電をしたときは，滑雪・融雪はほとんど認められなかった。2 回目の通電を 18 日 8:05 から 19 日 16:44 の間，実施した。

予想された通り間接加熱の方が融雪の進行が遅いが，時間経過とともにその差は小さくなり間接加熱でも実用上あまり支障がないことがわかった。

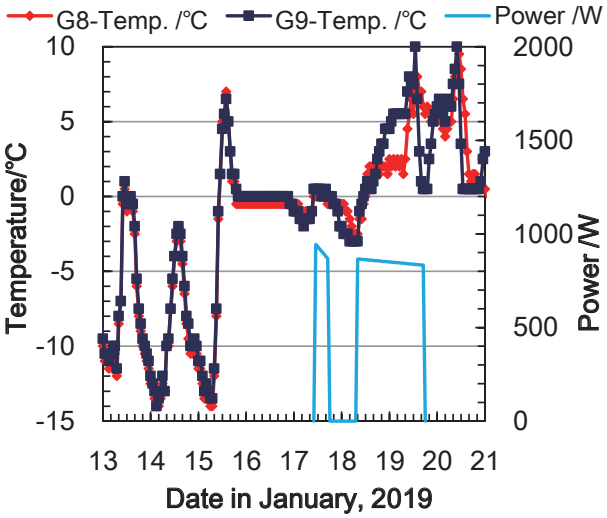

Fig. 9　Temporal change in the module temperatures and the applied power.

19 minutes after

7 hours 3minutes after

9 hours 9 minutes after

17 hours 12 minutes after

23 hours 55 minutes after

29 hours 4 minutes after

Fig.10　Snow melting experiment at Oomagari. Left array: direct heating. Right array: indirect heating (CNT heater is placed on Galvalume steel plate with 1 cm air gap in front.)

３．２　間接加熱：ガルバリウム鋼板裏に CNT 発熱体

10 A の定電流で通電したときの実験結果例を Fig.11 に示す。ガルバリウム鋼板上に CNT 発熱体を配置する場合よりさらに融雪効果が低くなることが予想されたが, ほぼ同程度の融雪ができた。

必要な電力量を最小にする試みは途上であるが，昨シーズンの実験では，約 15 kWh/m^2 の電力量で完全融雪できることがわかった（通常の電力単価 27 円 / kWh では 405 円 / m^2，融雪用電力 A の電力単価 11 円 / kWh では 165 円 / m^2）。

間接加熱の場合，融雪の効果が弱くなることが懸念されたが，実験結果より技術的な実現性には問題がないことが実証された。

それ以外の課題として，寒冷な豪雪地域においては，雨樋が中の水の凍結によって詰まるだけではなく，氷の膨張によって破損される事例が多いとのことであり，次に必要となる対策として，融雪後の水が流れる雨樋の融雪に潜在的な需要がある。この需要に応えるため，既に CNT 発熱体を組み込んだ雨樋の試作品を設置し，今後基礎データの収集を予定している。

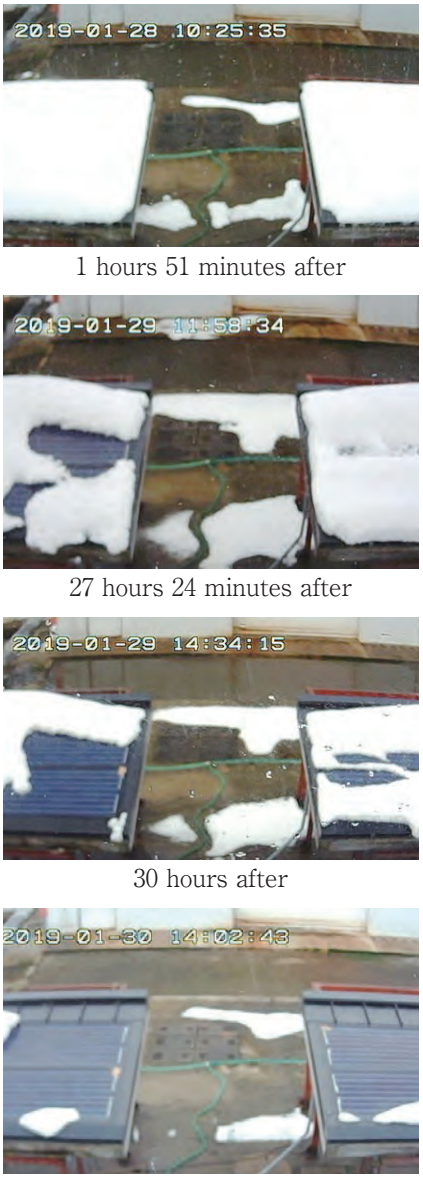

Fig.11　Snow melting experiment at Oomagari. Left array: direct heating. Right array: indirect heating（CNT heater is placed behind Galvalume steel plate with 1 cm air gap in front.）

４　まとめ

本研究で明らかとなった主な成果は以下の通りである。

- CNT 発熱体を用いて太陽光発電パネル上積雪を融雪する実証実験を大仙市で行い，約 15 kWh/m^2 の電力量（27 円 / kWh として 405 円 / m^2。融雪用電力 A では 165 円 / m^2）で完全融雪できることがわかった。
- 飛び火認定対策のため，太陽光発電モジュール裏面に空気層，ガルバリウム鋼板を挟んで CNT 発熱体を配置し，融雪効果の低下が懸念されたが，直接加熱と比較してもその低下は限定的で，融雪の支障とはならないことが実証された。
- CNT 発熱体は負の温度係数を持つため，定電圧動作では熱暴走するリスクが懸念されるので，安全な動作を保証するため，定電流動作することを提案し，期待通りの安全な動作を確認した。
- CNT 発熱体を用いて，温度センサなしで恒温制御する負帰還回路を開発し，1 kW/m^2 を超えるパワー密度で期待通りの安定動作をすることを実証した。本技術は，太陽電池

内部変換効率の直接測定法にも適用できるものである。

・特に日本海の豪雪地帯では，屋根の雪下ろし作業による事故が毎年のように繰り返されており，融雪の潜在的需要はかなり高く，本技術が実用化されことにより，除雪作業からの解放を実現できる。

・独自開発して実証した温度センサなしの恒温制御の回路方式では，通常必要となる温度センサを省くことができるため，簡素化，低価格化という大きな利点を有するため，恒温制御を必要とする幅広い分野に応用可能である。

謝辞

本研究は東北工業大学研究支援センターの平成30年度共同プロジェクト研究（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る。

参考文献

1　IEC 60891: 2009 Ed 2 *Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic（PV）devices.*

2　Osterwald C R, Anevsky S, Barua A K, Chaudhuri P, Dubard J, Emery K, Hansen B, King D, Metzdorf J, Nagamine F, Shimokawa R, Wang Y X, Wittchen T, Zaaiman W, Zastrow A, and Zhang J: *The World Photovoltaic Scale: An International Reference Cell Calibration Program,* NREL/CP-510-22942 UC Category: 1250.

3　T. Saito, M. Tatsuta, Y. Abe and M. Takesawa: *Calorimetric Measurement for Internal Conversion Efficiency of Photovoltaic Cells/Modules Based on Electrical Substitution Method,* J. of Physics: Conf. Series **972**（2018）012019.

4　齋藤，柴崎，武澤，初谷，味原，宍戸，杉山：*屋根一体型太陽電池の通電加熱による除雪*，東北工業大学地域連携センター紀要（EOS）**28**（2015）11-20.

5　齋藤，阿部，酢谷，柴崎，武澤，初谷，杉山：*屋根一体型太陽電池の通電加熱による除雪Ⅱ*，東北工業大学地域連携センター紀要（EOS）**29**（2016）23-31.