

# 2012年夏期実測に基づく屋上被覆形態と 太陽電池発電量の関係

菊池 佐智子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 茨城大学 地球変動適応科学研究機関 (〒310-8512 茨城県水戸市文京2-1-1)  
E-mail:skikuchi@mx.ibaraki.ac.jp

太陽光発電は、太陽電池周辺が高温になると発電量が低下することから、屋上緑化の暑熱環境緩和効果に着目して、方位角・傾斜角を同一にした太陽電池を屋上緑化面とコンクリート面に設置して測定を開始した。太陽電池パネルの裏面温度、地表面温度と発電量の関係を分析した結果、屋上緑化区とコンクリート区の地表面とパネル裏面温度の最大の温度差は、それぞれ1.16°C、0.82°Cとなり、統計的にも屋上緑化は太陽パネル裏面温度の上昇の抑制に効果を発揮することが示された。また、パネル裏面温度と地表面温度との関連性を分析したところ、回帰式の有意性を示す決定係数・重相関係数は小さかったものの、パネル裏面温度の偏回帰係数が、屋上緑化区では-0.287、コンクリート区では-0.196となり、パネル裏面温度が上昇すると発電量が低下することが示唆された。

**Key Words :** extensive green roof system, electric power, reverse of solar panel, ground surface

## 1. はじめに

再生可能エネルギーとは、化石燃料以外のエネルギー源のうち永続的に利用することのできるものを利用したエネルギーである<sup>1)</sup>。わが国における利用形態は、太陽光発電と風力発電がその代表格となっている<sup>2)</sup>。太陽の光エネルギーを直接電気に変換する太陽電池<sup>3)</sup>は、日射に伴う温度上昇により標準状態で定められる出力の定格値からその出力が低下する傾向<sup>3)</sup>を有している。温度特性と呼ばれるこの傾向は、-0.4~0.5(%/°C)を示しており、温度上昇による発電出力の低下は無視できない<sup>4)</sup>。特に、国土の狭い日本では、多くの太陽光発電システムが住宅や建築物の屋根・屋上面に設置され、太陽電池は日中の日射によりかなりの高温に上昇することが予想される。住宅の省エネルギーのための高気密・高断熱化が進むにつれて、太陽電池の温度上昇は大きくなると考えられる<sup>3)</sup>。したがって、この温度上昇を抑える仕組みが必要であり、設置場所および方法が限定される場合が生じる可能性もある<sup>3)</sup>。

このような高度・高密度化した都市部において、建築物や土木構造物の表面を緑化することで緑地面積を増やす手法<sup>5)</sup>として、屋上緑化・壁面緑化がある。屋上緑化・壁面緑化は、物理効果や生態的效果、生理・心理効果、その他の効果など多彩な効果をたった1つの装置で獲得

できる点が優れている<sup>5)</sup>。海外では、この屋上緑化と太陽光発電を組み合わせ、新たな環境改善装置として位置付け、すでにいくつか実践が試みられている(写真-1)。しかし、国内では、太陽光パネル設置面積を緑化面積として算入したり<sup>6)</sup>、日照条件に合わせて屋上・屋根面を太陽光発電、太陽熱利用、屋上緑化に使い分けることを推奨する<sup>7)</sup>にとどまっており、屋上緑化と太陽光発電システムの同所利用にまで議論が達していない。

そこで研究では、太陽電池の温度上昇を抑制する仕組みとして、屋上緑化に着目し、太陽電池下の被覆形態を変化させて発電を開始した。同時に、パネル裏面温度と、地表面温度を測定し、太陽電池発電量との関係を分析した。そして、屋上被覆形態の違いが太陽電池発電量に与える影響を考察した。また、本研究では太陽光パネル裏面温度と太陽電池温度は等しいものとして扱った。



写真-1 ドイツにおける太陽光発電システムと屋上緑化の同所利用の事例(右: Unterensigen<sup>8)</sup>, 左: Stuttgart<sup>9)</sup>)

## 2. 研究の方法

### (1) 実験区の概要

発電および測定は、神奈川県川崎市多摩区(東経139.55, 北緯35.61)の明治大学農学部第1校舎4号館屋上(2階建て)で行った(写真2)。屋上緑化は、4m×4mの緑化試験区に湿質多孔質人工軽量土壌25cmに改良日本芝エルトロ(*Zoysia japonica*)のソッドを2012年5月2日に張り、灌水・刈り込み・施肥を適宜行った。ここに、太陽光パネル(SHARP製大型太陽光発電モジュールNT-84L5Hを使用。以下、太陽光パネル)にバッテリー(G&Y製ディープサイクルバッテリーSMF31MS-850を使用)、コントローラー(未来舎製充放電制御器PV-1212D1Aを使用)をつなげた太陽光発電システムを設置した(図-1)。本研究では、太陽光パネルを改良日本芝エルトロを張った屋上緑化区と緑化が行われていないコンクリート区に1枚ずつ設置し、造成した屋上緑化の芝生の生育が安定した2012年7月8日から発電を開始した。

発電に用いた太陽光パネル(表1)は、方位角を0度(南)、傾斜角はNEDOが開発した日射量データベース閲覧システム(<http://app7.infoc.nedo.go.jp/>)から、年間での一定の発電量が期待できる最適傾斜角33.1度とした。

### (2) 測定方法

#### a) 温度測定

太陽光パネルの裏面と地表面の温度を測定するため、太陽光パネル裏面から水糸を垂らし、温室度ロガー(KNラボラトリーズ製超小型温室湿度記録計ハイグロクロン温



写真2 明治大学農学部第1校舎4号館屋上

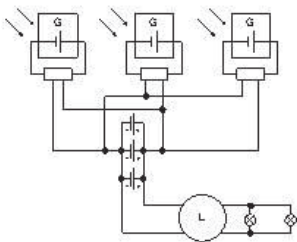


図-1 実験に使用した太陽光発電システムの配電図

表-1 太陽光パネルの電気出力特性

特性項目	記号	公称値	単位
開放電圧	$V_{oc}$	22.00	V
短絡電流	$I_{sc}$	5.400	A
最大出力動作電圧	$V_{pm}$	17.42	V
次第出力動作電流	$I_{pm}$	4.830	A
最大出力	$P_m$	84.00	W
モジュール変換効率	$\eta_M$	13.2	%

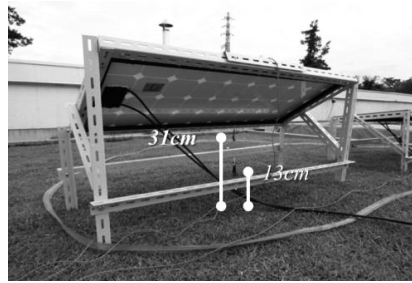


写真3 温室度ロガーの設置位置

湿度ロガー#1923を使用)を地表面から高さ13cm、地表面から高さ31cmの地点に結び付け(写真-3)、10分間隔に設定し、2012年7月21日から測定を開始した。測定したデータは、専用ソフトRhManagerでパソコンに取り込んだ。

#### b) 発電電圧測定、発電量算出

本研究で設置した太陽光発電システムでは、直接、電流量を計測することができない。そこで、M-DC・データログセット(安川商事株式会社製ソーラー計測くん: 12V KY-REC-12を使用)を組み込み(図-2)、温度測定と同様、10分間隔とし、発電を開始した2012年7月8日から、発電電圧の測定を開始した。そして、得られた発電電圧は専用ソフトVoltage Recorder for Windowsでパソコンに取り込んだ。そして、Microsoft Excel®上で、電流を乗じて発電量を算出した。

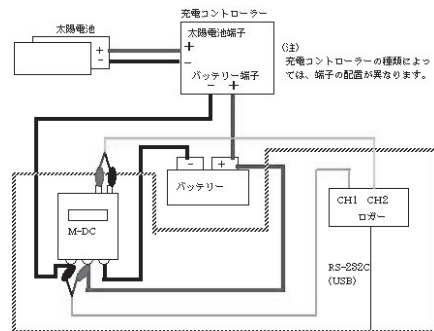


図-2 ソーラー計測くんの配線イメージ<sup>10)</sup>

### c) 傾斜面日射量, 日射強度測定

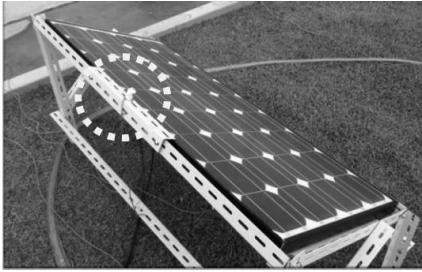


写真4 小型日射計の設置位置

発電量の低下が温度上昇によるものか否かを判断するため、太陽光パネルに照射される日射量を測定し、日射強度に換算した。測定は、太陽光パネルと同じ面(方位角 0 度、傾斜角 33.1 度)に設定した日射計(英弘精機株式会社製小型日射計 ML-020VM を使用)を用いた(写真-4)。2012 年 8 月 5 日から、温度、発電電圧同様、10 分間隔で測定し、得られた傾斜面日射量を専用ソフト LR5000 用ユーティリティでパソコンに取り込み、式(1)を用いて日射量を全天日射強度に換算した。

$$I[W/m^2] = \frac{E[\mu V]}{S[\mu V/W \cdot m^2]} \quad (1)$$

I: 全天日射強度(W/m<sup>2</sup>)

E: 出力電圧(μV)

S: 感度係数(μV/W · m<sup>2</sup>)

## 3. 結果および考察

解析対象範囲は、温度、電圧・発電量、傾斜面日射量・日射強度が安定して測定できるようになった2012年8月5日から、屋上緑化区の芝草を深刈し、寒地型芝草(アニュアルライグラス、フェアウェイII)を播種した2012年10月19日までとした。

### (1) 地表面およびパネル裏面温度

解析対象とした2012年8月5日から10月19日までの屋上緑化区、コンクリート区における地表面から13cm地点の温度(以下、地表面温度)、地表面から31cmの地点の温度(以下、パネル裏面温度)および実験区の気温(ノースワン株式会社KADEC-21を使用)の経時変化を図-3に示す。

温湿度データログの不備で欠測値となった9月17日から20日の4日間を除いた72日間において、屋上緑化区、コンクリート区とも、地表面温度とパネル裏面温度に急激な低下が4か所(9月2日、9月23日、10月7日、10月19日)でみられた。このとき、実験区の気温も同様の傾向を示していたことから、地表面温度、パネル裏面温度は周辺

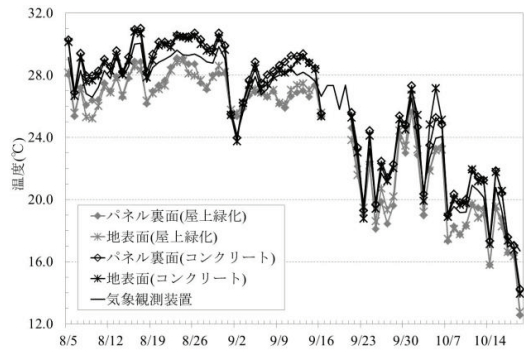


図3 地表面温度とパネル裏面温度の経時変化

気温の影響を受けていることと判断した。

屋上緑化区では、地表面とパネル裏面の最大の温度差は1.16°C、平均ではパネル裏面の方が0.04°C低い結果となった。コンクリート区では、地表面とパネル裏面の最大の温度差は0.82°C、平均ではパネル裏面の方が0.17°C高い結果となった。そこで、屋上緑化による太陽光パネルの裏面温度の上昇抑制の効果を確認するため、屋上緑化区およびコンクリート区のパネル裏面温度と地表面温度の差を用いて、対応のある2群の平均値の差の検定を行った。その結果、有意水準0.01のとき、両側P値0.0015となり、屋上緑化に太陽光パネルの裏面温度の上昇を抑制する効果があることが示唆された。

### (2) 発電電圧

屋上緑化区、コンクリート区に設置した太陽光パネルの発電電圧および同区の傾斜面日射量の測定結果の一例として10月1日の経時変化を図-4に示す。なお、図-4の傾斜面日射量のように、雲等によりパネルの一部もしくは全面への日射が遮蔽されなかったのは、10月1日のほか、8月21日、9月10日、10月16日、10月19日の計5日間であった。

屋上緑化区の発電電圧は、7時20分から8時30分の間で急激に低下し、14時10分まで発電していなかった。これは、負荷として接続したフォグランプに発電した電流が流れず、発電量がバッテリーの容量を超え、太陽光パネル側に逆流したためと考えられた。そのため、屋上緑化区では、8時30分から14時10分まで正常に発電することができなかった。コンクリート区の発電電圧は、傾斜面日射量の増加に合わせて増加したが、屋上緑化区同様、発電量の逆流が発生し、9時50分から14時40分の間、発電電圧が低下した。

図-4に示した10月1日における屋上緑化区とコンクリート区の発電電圧を比較すると、最大値は屋上緑化区で0.210V、コンクリート区で0.205Vであった。平均値は屋上緑化区で0.015V、コンクリート区で0.037Vであった。

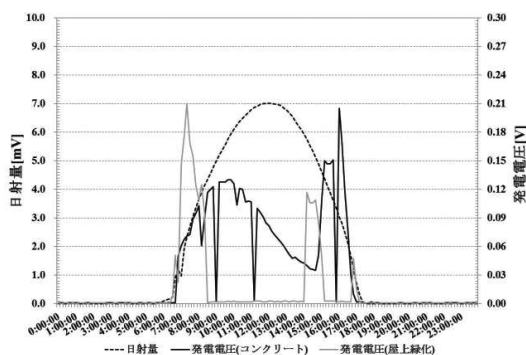


図4 10月1日における発電電圧と傾斜面日射量の経時変化

これは、屋上緑化区では発電量の逆流が発生し、正常に発電せず、分析対象となる発電電圧のデータ数に偏りが生じたためである。以上から、(1)雲等によるパネル面への日射遮蔽が発生しなかった日のみのデータを用いて、発電量とパネル裏面および地表面温度の関係を議論するのは困難であること、(2)発電量の逆流が発生し、屋上緑化区とコンクリート区のデータ数に偏りがあること、という2つの理由から、地表面温度・パネル裏面温度の解析対象範囲とした72日間に記録された発電電圧のデータを発電量に換算し、分析に用いることとした。

### (3) 発電量の算出

発電量は、屋上緑化区、コンクリート区が発電電圧から、全く発電しなかった0V、ノイズとして記録された0.001~0.002Vを外し、電流量を乗じて時間発電量(Wh)に換算した。この時間発電量を1日ごとに集計し、屋上緑化区、コンクリート区別に日累積発電量(W/日)としてグラフ化した(図-5, 6)。屋上緑化区では、8月18日から9月20日の間、太陽光パネルとログの接続に問題があり、発電電圧のデータが記録されていなかった。発電電圧のデータが記録されていた8月5日から17日、9月21日から10月19日の間の屋上緑化区の日累積発電量は、最大で12.41V、平

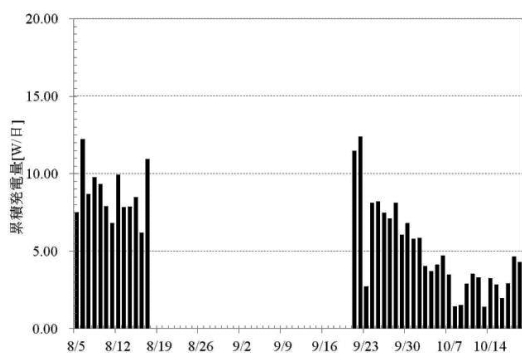


図5 屋上緑化区の日累積発電量

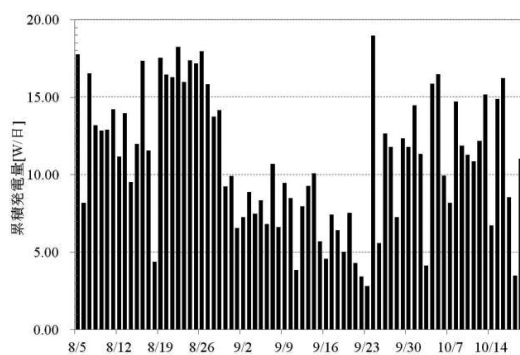


図6 コンクリート区の日累積発電量

均では6.14Vとなった。

コンクリート区の日累積発電量は、最大で18.98V、平均では10.95Vとなった。計測に不備があり、対象とした発電量のデータ数は異なるものの、太陽電池パネルを設置した地表面の被覆形態の違いが発電電圧に影響を与えているかどうかを検討するため、2群の等分散性と対応のある平均値の差の検定を行った。その結果、2群の等分散性は有意水準0.05のとき、P値0.0499となり、屋上緑化区とコンクリート区の日累積発電量は等分散でないことが示された。そして、対応のある平均値の差の検定では、有意水準0.01のとき、両側P値 $2.034 \times 10^{-7}$ となり、コンクリート区の方が屋上緑化区よりも日平均累積発電量が大きくなったことが示唆された。これは、屋上緑化区の日累積発電量がコンクリート区の半分と少なかったためと考えられた。

### (4) 発電量と温度の関係

#### a) 発電量とパネル裏面温度、地表面温度

太陽光の分光分布や太陽電池への入射角など、条件の異なる条件が入り混じっているため、単位時間における発電量(Wh)のばらつきは大きい<sup>11)</sup>と言われている。そこで、JISC8919(結晶系太陽電池セル・モジュールの屋外出力測定方法)で規定された日射強度の下限値 $800\text{W/m}^2$ に準拠<sup>11)</sup>、傾斜面日射強度が $800\text{W/m}^2$ 以上であった発電量のみを抽出し、説明変数をパネル裏面温度、地表面温度、目的変数を発電量とした重回帰分析を行った(表-1, 2)。

屋上緑化面では、決定係数0.083、重回帰係数0.289と小さく、発電量と各種温度の関係を示す回帰式の有意性は示されなかった。個々の変数の係数と有意性に着目すると、パネル裏面温度、地表面温度の順にP値が小さく、偏回帰係数は、パネル裏面で-0.287、地表面面では0.140であった。このことから、パネル裏面温度が低下するほど、発電量が増加することが確認できた。また、説明変数同士の相関関係を確認するため、多重共線性(Variance Inflation Factor : VIF)を算出したところ、パネル裏面、地表面温度ともに7.531となり、パネル裏面温度と地表面温度

表-1 屋上緑化区における発電量と各種温度の重回帰分析

決定係数=0.0833		重相関係数=0.2886			
変数名	重回帰係数	t値	P値	判定	VIF
定数項	14.4915	3.1614	0.0057	**	
パネル裏面温度	-0.2871	-0.7825	0.4447		7.5313
地表面(屋上緑化)	0.1401	0.3769	0.7109		7.5313

表-2 コンクリート区における発電量と各種温度の重回帰分析

決定係数=0.0136		重相関係数=0.1168			
変数名	重回帰係数	t値	P値	判定	VIF
定数項	9.4217	4.7927	0.0000	**	
パネル裏面温度	-0.1960	-2.1527	0.0320	*	2.4287
地表面(コンクリート)	0.1585	2.1616	0.0313	*	2.4287

の関係の強さが確認できた。

コンクリート面では、決定係数0.014、重回帰係数0.117と小さく、屋上緑化区同様、発電量と各種温度の関係を示す回帰式の有意性は示されなかった。個々の変数の係数と有意性に着目すると、地表面温度、パネル裏面温度の順にP値が小さく、有意水準0.05のとき、地表面温度のP値=0.032、パネル裏面温度のP値=0.032となり、係数の有意性が示された。それぞれの偏回帰係数は、パネル裏面で-0.196、地表面では0.160であった。このことから、屋上緑化区同様、パネル裏面温度が低下するほど、発電量が増加することが確認できた。また、説明変数同士の相関関係を確認するため、多重共線性(Variance Inflation Factor : VIF)を算出したところ、パネル裏面、地表面温度ともに4.117となり、屋上緑化面ほどではないが、パネル裏面温度と地表面温度の関係の強さが確認できた。

b) 発電量とパネル裏面温度

屋上緑化区、コンクリート区ともに、発電量の低下にはパネル裏面温度が影響していることが明らかになったことから、縦軸に発電量(W)、横軸にパネル裏面温度分布(°C)を配したグラフを作成した(図-7, 8)。

屋上緑化区のパネル裏面温度は、最大で45.5°C、平均では24.95°Cであった。パネル裏面温度が平均温度

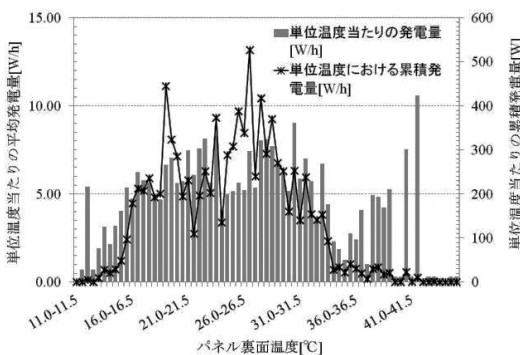


図-7 屋上緑化区におけるパネル裏面温度別発電量

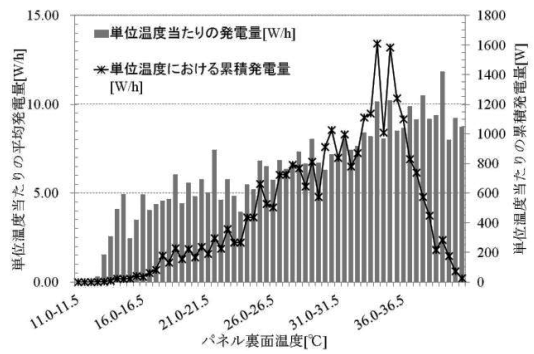


図-8 コンクリート区におけるパネル裏面温度別発電量

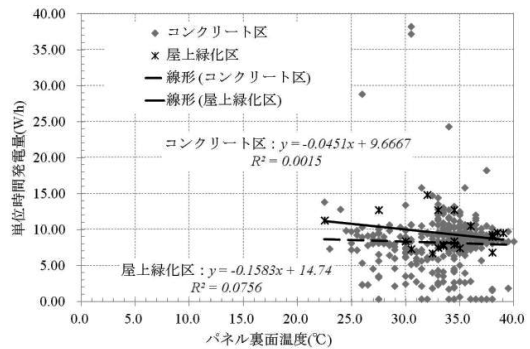


図-9 発電量とパネル裏面温度の関係性

(24.5~25.0°C)を示したときの累積発電量は288.7W、累積発電量が最大527.2Wを示したときのパネル裏面温度は26.5~27.0°Cであった。

コンクリート区のパネル裏面温度は、最大で40.5°C、平均では29.48°Cであった。パネル裏面温度が平均温度(29.0~29.5°C)を示したときの累積発電量は813W、累積発電量が最大1,611.00Wを示したときのパネル裏面温度は34.0~34.5°Cであった。

次に、パネル裏面温度と発電量の関係式を導くため、発電量とパネル裏面、地表面温度の重回帰分析に使用したデータを用いて、散布図を作成し(図-9)、近似式を算出したところ、屋上緑化面の回帰式は式(2)、コンクリート区回帰式は式(3)が得られた。

$$y = -0.1583x + 14.74 \quad (2)$$

$$y = -0.0451x + 9.6667 \quad (3)$$

これらの式から、発電量とパネル裏面温度には負の相関関係があり、屋上緑化上に太陽電池パネルを設置した場合は、パネル裏面温度が1°C上昇するごとに、発電量

は0.0016%低下すること、コンクリート面に太陽電池パネルを設置した場合は、パネル裏面温度が1°C上昇するごとに、発電量は0.00045%低下することが示された。

#### 4. まとめ

本研究では、屋上空間に屋上緑化を施工し、太陽電池を屋上緑化区とコンクリート区に設置し、パネル裏面温度と地表面温度、発電電圧を測定し、重回帰分析を行って、その関係性を明らかにしようとした。その結果、太陽電池パネルを屋上緑化面に設置した場合は、パネル裏面温度が1°C上昇するごとに発電量が0.0016%低下すること、コンクリート面に設置した場合は、パネル裏面温度が1°C上昇するごとに発電量が0.00045%低下するという結果を得た。しかし、得られた温度係数は、一般的に言われている温度特性(-0.4~-0.5%/°C)比べ、極端に小さく、かつ、屋上緑化区に設置するよりコンクリート区に設置する方が発電量が高くなる結果となった。これは、周辺温度の上昇による発電電圧の低下が発電電流量の増加に比べて小さかったためと考えられた。また、屋上緑化区に設置した太陽光発電システムの接続不備から、発電量がバッテリーの容量を超え、太陽電池側に逆流したため、正確なデータが取得できなかったことも考えられた。

何ら<sup>12)</sup>、堀口ら<sup>13)</sup>、梅干野ら<sup>14)</sup>から、屋上緑化の暑熱環境緩和効果は屋上緑化に期待される機能効果の一つであるが、今後、太陽光発電システムとの競合が予想される。今回の分析では、欠測値の多いデータを用いて解析を行ったが、今後は赤外線サーモグラフィを用いたパネル裏面温度や地表面温度を直接測定など、分析に耐えるデータを取得、解析し、太陽光発電システムと屋上緑化の同所利用の可能性提示に向けた作業に取り組む必要があると考える。

謝辞：本研究は、科学研究費補助事業・学術研究助成基金助成金(若手研究B)「省エネルギー・ライフスタイルの確立に向けたPVグリーンシステムの設計と実証実験(研究課題番号：24700778)」の成果の一部である。

#### 参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：平成 24 年度エネルギーに関する年次報告，pp.127-128，経済産業省，2013。
- 2) 金谷晃（丸田頼一編）：環境都市計画事典，pp.250-251，株式会社朝倉書店，2005。
- 3) 新田佳照，大林只志，山脇竹治，廿日岩輝樹，水上誠志郎，泉名政信：アモルファス太陽電池の温度特性の研究と建材一体型モジュールへの応用，電気学会論文集 B，116 巻，4 号，pp.489-495，1996。
- 4) 松川洋，黒川浩助：太陽電池モジュールの短時間間隔における温度特性解析，太陽/風力エネルギー講演論文集，2004，pp.153-156，2004。
- 5) 山田宏之（丸田頼一編）：環境都市計画事典，pp.254-255，株式会社朝倉書店，2005。
- 6) 大阪府：大阪府自然環境保全条例，[http://www.pref.osaka.jp/houbun/reiki/reiki\\_honbun/ak20103721.html](http://www.pref.osaka.jp/houbun/reiki/reiki_honbun/ak20103721.html)
- 7) 東京都環境局・財務局：「都有施設省エネ・再エネ等導入指針」【再エネ設備導入編】付属資料 再エネ設備導入検討マニュアル，pp.1-2，2009。
- 8) Greenroofs.com: Greenroofs & Greenwall Projects Database，<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=48>
- 9) 国土交通省都市局公園緑地・景観課：企業のみどりの保全・創出に関する取組み (5)ドイツの施策，[http://www.mlit.go.jp/toshi/park/s1/oversea\\_germany.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/park/s1/oversea_germany.html)
- 10) 安川商事株式会社：ソーラー計測くん，<http://www.naturalgoods.com/mdc-monitor.html>
- 11) 竹内栄治：日射のふるまいと太陽光発電，第 2 回日射セミナー要旨集，pp.39-55，2013。

(2013. 7. 19 受付)

## RELATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT ROOF SURFACE AND ELECTRIC POWER OF SOLAR PANEL BASED ON THE EXPERIMENT IN SUMMER 2012

Sachiko KIKUCHI

Locating both green roofs and photovoltaic on rooftop are important in order to maximize creating renewable energies on limited roof area. Heat-island effect reduction and storm water management by green roof systems are expected. In addition, generating electric power by solar panels become one of the new environmental technologies. In order to suggest effective combinations of green roofs - and photovoltaic a crystal silicon solar panel and turf green roofs were examined from August 2012. Based on the measured results, the relationship was analyzed: the roof surface and temperature of solar panels and the electric power. The effect of electric power by different roof surfaces were quantified.