

芝生地上部に設置した黒色太陽光パネルの裏面下部の温度と電力量の季節変化

Seasonal Changes of Temperature under Back Surface and Electric Energy of Silicon Crystal Solar Panel on Turf Grass

菊池 佐智子* 奥水 肇**

Sachiko KIKUCHI* Hajime KOSHIMIZU**

Abstract: Weed control is one of serious problems about maintenance of generating efficiency and facilities at photovoltaic systems. There are various methods, such as concrete pavement, gravel pavement, weed control materials, mowing and herbicide application. Greening has been expected not only weed control but also decreasing of surrounding temperature and improving of regional landscape. In order to suggest the relation between high-temperature control and amount of power generation based on seasonal changes, and photovoltaic silicon solar panels were examined. Based on the measured results, these were clarified; High-temperature control be expected all year long except winter term. High-temperature control wasn't affect by some turf management, such as winter over seeding (WOS) and spring transition. High-temperature control was the most effective in summer term. There remained the landscape effect of turf greening and the relative analysis of life cycle cost of turf greening and electric energy.

Keywords: turf grass, solar panel, temperature under back surface, electric voltage, electric energy

キーワード: 芝生緑化, 太陽光パネル, 裏面下部温度, 発電電圧, 電力量

1. はじめに

遊休地での大規模太陽光発電(以下、メガソーラー)において、夏期に繁茂する雑草への対策は、発電の効率や設備の維持に関する重要な課題の一つである。雑草の繁茂により、発電に必要な太陽光の減少、鳥獣や虫の発生に伴う太陽光パネル(以下、パネル)の汚れは発電効率低下につながる。パネル配線につる性の雑草が絡みついた運用障害、草刈作業時に砂利が飛散し、パネルを破損する二次被害の報告もある¹⁾。現在実施されている雑草対策(表-1)のうち、コンクリートやアスファルトで地表面を舗装した場合、最も確実に雑草抑制が可能だが、初期投資がかかる。砂利で地表面を舗装した場合、時間の経過とともに、砂利の隙間から雑草や土が混入してしまう。防草シートで地表面を被覆した場合、その施工方法や採用したシートの性能にもよるが、時間の経過とともに、シートが破損し、隙間に雑草が侵入してしまう。草刈の場合、人件費と草刈機のコスト、作業中のケーブル断線やパネル破損のリスクが発生する。除草剤散布の場合、1回のコストは草刈に比べて安価に抑えられるものの、定期的な散布や散布する農薬の周辺環境への配慮が必要となる。緑化による雑草対策は、使用する植物種によりメンテナンスや費用が異なるが、雑草防除のほか、パネル周辺の高温化抑制や周辺の景観性向上などの副次的な効果が期待できる²⁾。パネルと緑化の関係について、海外では、Köhler, M. et al.(2007)³⁾や Sam C.M. Hui and S.C.Chan (2011)⁴⁾ が緑化

によるパネル周辺の高温化抑制の効果を検証しており、国内では、十河ら(2014)⁵⁾がメガソーラーで使用する各種雑草抑制資材の性能とライフサイクルコストについて比較検討しているだけである。今後、国内で緑化による雑草対策を推進していくためには、パネル周辺の高温化抑制や景観性向上などの副次的効果に関するデータを蓄積し、電力量と合わせたその効果の検証が有効と考えられる。そこで、本研究では、地表面を地被植物で覆い雑草を抑制することを想定し、芝生緑化上に太陽光システムを設置し、温湿度、日射量、電力量の長期測定を行った。そして、季節の違いによる芝生緑化のパネル周辺の高温化抑制と電力量の関係を考察した。

2. 研究の方法

(1) 測定概要

測定は、神奈川県川崎市にある明治大学農学部第1校舎4号館の屋上において、既存の屋上面と芝生緑化面に試験区(表-2)を設置して、2012年8月4日から実施した⁶⁾。試験区1はノシバ(*Zoysia japonica* Stued.)の改良種エルトロ⁷⁾とアニュアルライグラス

表-2 試験区の概要

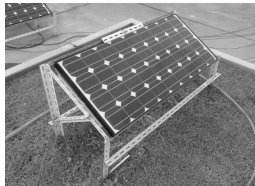
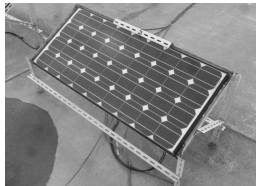
試験区	1	2
被覆材	ノシバ(<i>Zoysia japonica</i> Stued.)の改良種エルトロ ⁷⁾ とアニュアルライグラス(<i>Lolium rigidum</i> Gaud.)の改良種アライ ⁸⁾ のWOS	コンクリート
写真		
大きさ	4.0×4.0m	概ね半径4.0mの範囲内一様

表-1 雑草対策の比較^{1, 2)}

対策	メンテナンス	10年間にかかるコスト(円)	
		1m ² あたり	内訳
コンクリート舗装	不要	5,000~10,000	メンテナンス無の場合
砂利舗装	2~3年毎	1,500~6,000	メンテナンス無の場合
防草シート	2~3年毎	500~2,000	メンテナンス無の場合
草刈	毎年	9,000~15,000	300~500×3回/年×10年
除草剤散布	毎年	2,000~4,000	100~200×2回/年×10年
地被植栽	適宜	3,060	2,000+106×10年 ⁹⁾

*山梨県富士山科学研究所環境共生研究部 **明治大学農学部

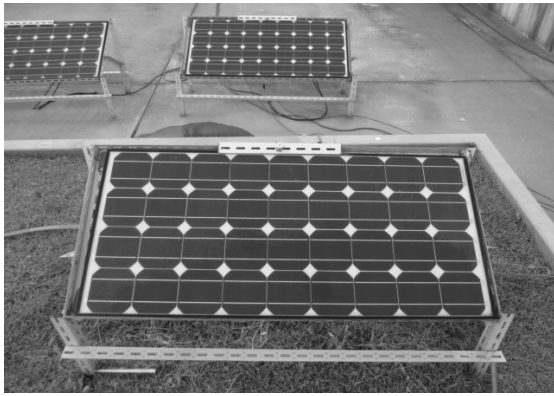


写真-1 パネル配置(手前が試験区1, 後ろが試験区2)

(*Lolium rigidum* Gaud.)の改良種フェアウェイ2[®]のWOSで、年間を通して緑化が維持できるよう灌水・施肥・芝刈を行った⁶⁾。試験区2は一般的なコンクリート舗装による屋上面であり、概ね半径4.0mの範囲は同じコンクリート舗装である。

太陽光発電システムは、パネル(SHARP製独立型単結晶型太陽電池 NT84L5H)にバッテリー(G&Yu・グローバルユアサ製サイクルバッテリーSMF31MS-850)、コントローラ(未来舎社製コントローラ PV-1212D1A)を接続して使用した(図-1左)。パネルは地表面からの高さ30cm, 方位角0度, 傾斜角33.1度に設定した。傾斜角33.1度は、測定を行った神奈川県川崎市において、年間で最大の日射量が得られる角度である。発電能力, コントローラとバッテリーの器差確認を行い、発電は2012年7月8日から開始し、試験区1の芝生の生育が安定した2012年8月4日に設置した⁶⁾。

(2) 測定項目および測定方法

表-3に測定項目と測定機器をまとめた。パネル裏面付近, 地表面付近の温湿度は、温湿度計を水糸で固定してパネル中央から垂らした。測定高さは、20cm(地表面付近), 40cm(パネル裏面付近)とした(写真-2左)。測定期間中は、データ回収以外の試験区への人の立入を制限し、人による輻射の遮蔽および人からの輻射に留意した。測定は10分間の平均値とし、得られた温湿度は専用ソフトRhManegerでパソコンに取り込んだ。日射量は、小型日射計をパネル上部(方位角0度, 傾斜角33.1度)に設置し、測定した(写真-2右)。測定は10分間の瞬間値とし、得られた値は専

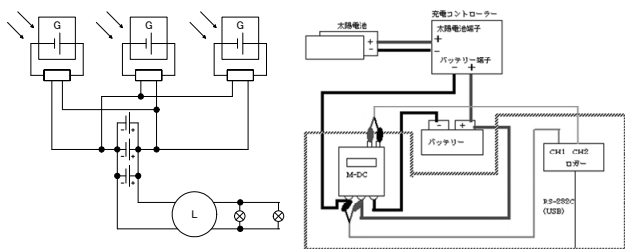


図-1 配電図⁷⁾(左: 太陽光発電システム, 右: ログを組み込んだ場合)

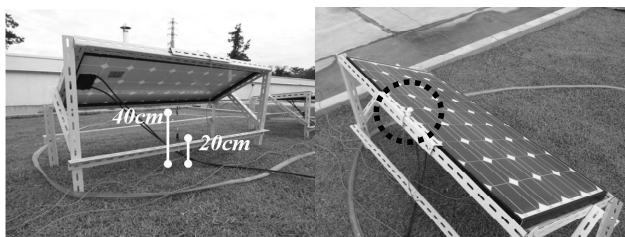


写真-2 測定方法(左: 温湿度計, 右: 日射計)

表-3 測定機器

測定要素	試験区	測定高さ	測定機器	サンプリング間隔
温湿度	1・2	200mm 400mm	温湿度 ⁷⁾ 「カカ ⁷⁾ (1923, KNポトリーズ)	10min
日射量	1・2	---	小型日射計 (ML-020MV, 英弘精機) ソーラー計測くん	10min
電力量	1・2	---	(M-DC/12VKY-REC-12, 安川商事)	10min
温湿度		1,500mm	気象観測装置 (KADEC21, ノースワン)	10min
風向風速		4,000mm		
雨量		---		

用ソフトLR5000用ユーティリティでパソコンに取り込んだのち、式(1)を用いて傾斜面日射強度に換算した。電力量は、本測定で使用した太陽光発電システム(図-1左)では直接測定できないことから、発電電圧を記録するログを組み込んだ(図-1右)。測定は10分間の平均値とし、得られた値は専用ソフトVoltage Recorder for Windowsでパソコンに取り込んだのち、全く発電しなかった0Vとノイズ(0.001~0.002V)を除き、電流量を乗じて電力量に換算した⁶⁾。

$$Q = \frac{E}{K} \quad \text{式(1)}$$

ここで、Qは傾斜面日射強度(W/m²), Eはセンサー出力μV(mV), Kはセンサー感度(μV/W/m²)とする⁶⁾。

3. 結果

分析対象期間は、2012年9月1日から2013年8月31日の1年間とした。季節の違いによるパネル周辺の高温化抑制と電力量を比較検討するため、気温, 日射量, 電力量に絞って分析した。

(1) 気象概要

気象観測装置で測定された気温は、日平均を算出した(図-2)。パネルに定められている標準状態は25°Cであり、この標準状態を超えた日平均気温を示した日は365日中80日あった。

(2) 各試験区の測定結果

1) 気温

地表面付近(測定高さ20cm), パネル裏面付近(測定高さ40cm)の気温は、気象観測装置で測定された気温同様、日平均を算出した。図-3に本試験地の高さ1.5mで測定された気温と、各試験区の高さ20cm, 40cmの位置で測定した気温の差(気温偏差)を示す。対象期間中の気温偏差の平均は、試験区1・40cm(-4.48°C), 試験区1・20cm(-4.27°C), 試験区2・20cm(-3.50°C), 試験区2・40cm(-3.09°C)の順に大きくなった。そこで、この気温偏差が試験区および測定高さの違いによるものか否かを検討するため、図-3に示した気温偏差を用いて、一元配置分散分析を行った。その結果、有意水準0.01のとき、両側P値2.01×10⁻¹⁰でこの気温偏差が試験区および測定高さの違いによることが示唆された。次に、FisherのLSDを用いて水準間の多重比較を行ったところ、

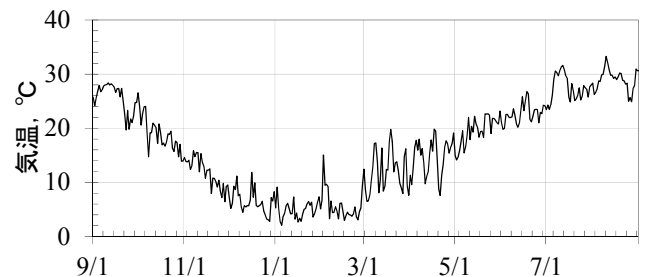


図-2 分析対象期間中の気温状況

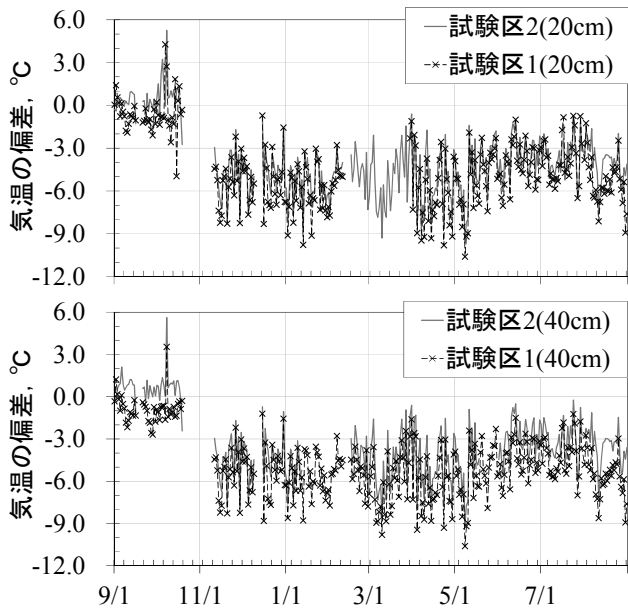


図-3 気温偏差の経時変化 (上: 20cm, 下: 40cm)

有意水準 0.01 のとき、試験区 1・20cm と試験区 2・20cm (両側 P 値 0.70×10^{-3})、試験区 1・20cm と試験区 2・40cm (両側 P 値 2.56×10^{-7})、試験区 1・40cm と試験区 2・20cm (両側 P 値 0.17×10^{-4})、試験区 1・40cm と試験区 2・40cm (両側 P 値 1.39×10^{-9}) において、試験区 1 は試験区 2 と比べて、パネル周辺の高温化を抑制することが示唆された。

2) 日射量 (傾斜面日射強度)

傾斜面日射強度は、上掲の式(1)を用いて算出した(図-4)。2013年3月8日～31日は、試験区1の傾斜面日射強度が急激に大きくなったが、それ以外は試験区1、2ともに類似の傾向を示した。傾斜面日射強度が試験区の位置の違いによるものか否かを検討するため、上記期間(2013年3月8日～31日)と浸水により記録データが回収できなかった日時(2012年9月19日、20日、6月30日～8月6日)を外した試験区1、2の傾斜面日射強度を用いて、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 2.33×10^{-9} で試験区の位置の違いの影響を受けていないことが示めされた。

3) 電力量

2012年9月1日から2013年8月31日までに記録された発電電圧を電力量に換算し、1日ごとに集計(日累積電力量)とした(図-5)。試験区1の日累積電力量は、正しく測定が行われていなかった期間を除き、最大で 173,376.00Wh/日、平均で 56,635.92Wh/日となった。試験区2の日累積電力量は、試験区1同様、正しく測定が行われていなかった期間を除き、最大で 594,912.00Wh/日、平均で 96,965.39Wh/日となった。地表面の被覆状態と電力

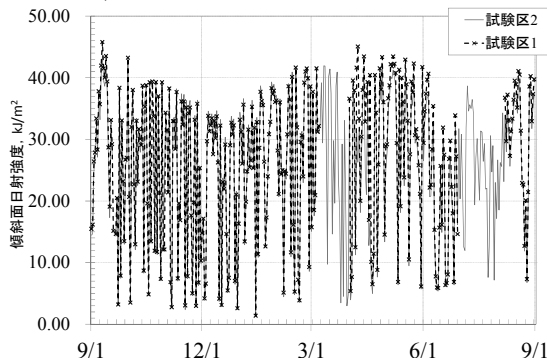


図-4 傾斜面日射強度の経日変化 (異常値、欠測値を外す)

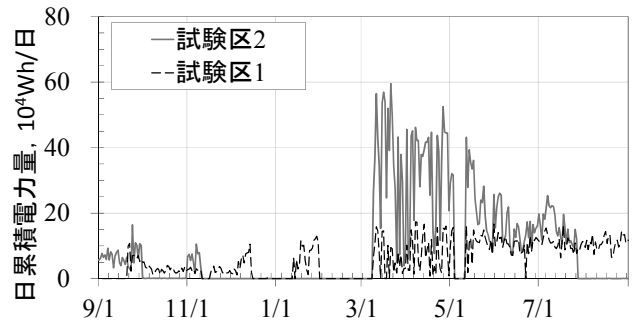


図-5 日累積電力量の経日変化

量の関係を検討したところ、有意水準 0.01 のとき、両側 P 値 1.29×10^{-9} で試験区 2、すなわちコンクリート面に設置したパネルの日累積電力量が大きいことが示された。

4. 考察

気象観測統計指針(気象庁, 2013)⁷⁾に示された3か月の統計の考え方に基づき、得られた気温および気温偏差、電力量を2012年9月～11月、2012年12月～2013年2月、2013年3月～5月、2013年6月～8月に分け、パネル周辺の高温化抑制と電力量の関係を考察した。

(1) 2012年9月～11月 (秋期)

秋期では、気温偏差は、試験区 2・40cm、試験区 2・20cm、試験区 1・20cm、試験区 1・40cm の順で小さくなり、パネル裏面付近の気温が最も冷やされていた(表-4)。秋期に測定された電力量として、試験区 2・40cm と試験区 1・40cm の気温偏差の差が最大となった2012年10月1日の経時変化を図-6に示した。2012年は、10月19日にWOSを実施した⁶⁾ため、芝草の蒸発散効果によるパネル周辺の高温化抑制は低くなることが予想された。そこで、WOS がパネル周辺の高温化抑制に影響を与えるか否かを検討したところ、同一の測定高さにおいて、有意水準 0.01 のとき、それぞれ両側 P 値が 3.23×10^{-6} (20cm)、 3.55×10^{-18} (40cm)となり、WOS の影響を受けていないことが示唆された。菊池ら(2014)⁸⁾は、パネル裏面、地表面付近の気温が下がるほど電力量が増加することを示していた。本稿では、パネル周辺の気温をパネル裏面、地表面付近の気温と合わせて議論するため、線形結合している40cmの気温偏差を外し、測定高さ別の気温と気温偏差を説明変数、電力量を目的変数にして重回帰分析を行い、パネル周辺の高温化抑制に関係する項目を検討した。その結果、式の有意性は低かったが、40cmの気温、20cmの気温偏差の偏回帰係数が負の値を示した。これは、菊池ら(2014)⁸⁾と同様、パネル裏面付近の気温が下がるほど電力量が増加し、加えて、地表面付近の気温と周辺の気温差が小さくなるほど電力量が増加することを示唆するものと言える。このことから、地球温暖化によって平均気温が

表-4 各季節の気温偏差の傾向

			試験区 1		試験区 2	
			20cm	40cm	20cm	40cm
秋	期	平均	-2.08	-2.30	-1.15	-0.92
	2012年9月～	最高	4.27	3.54	5.26	5.62
冬	期	最低	-8.29	-8.29	-8.29	-7.79
	2012年12月～	平均	-5.18	-5.40	-4.88	-4.51
春	期	最高	9.23	-1.21	-0.71	-0.71
	2013年2月～	最低	-9.11	-8.82	-8.11	-7.61
夏	期	平均	-6.11	-6.12	-5.17	-4.69
	2013年3月～5	最高	-1.11	-1.61	-0.61	-0.61
月	最低	-10.61	-10.61	-9.61	-9.11	
	2013年6月～8	平均	-4.44	-4.75	-3.66	-3.15
月	最高	-0.73	-1.23	-0.73	-0.23	
	最低	-8.93	-8.93	-7.63	-7.13	

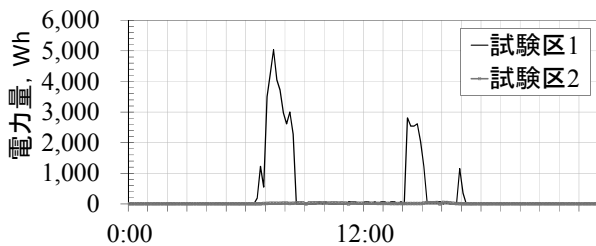


図-6 2012年10月1日の電力量の経時変化

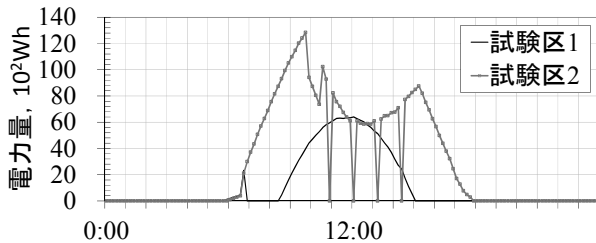


図-7 2013年4月8日の電力量の経時変化

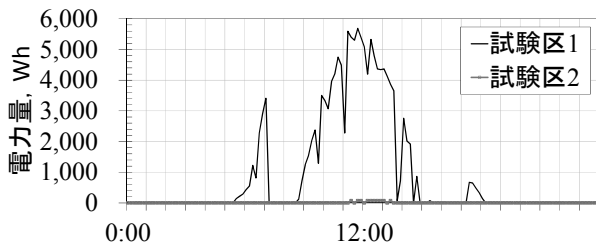


図-8 2013年8月18日の電力量の経時変化

上昇⁸⁾する秋期にもパネル周辺の高温化抑制の効果が期待できると考えられた。

(2) 2012年12月～2013年2月 (冬期)

冬期でも、気温偏差は試験区2・40cm、試験区2・20cm、試験区1・20cm、試験区1・40cmの順で小さくなり、パネル裏面付近の気温が最も冷やされていた(表-4)。試験区2・40cmと試験区1・40cmの差が最大となった2013年2月16日の電力量の比較を試みたが、各試験区とも発電が確認できなかった。WOSを行って芝生緑化を維持したが、冬期は夏期に比べ、パネル周辺が高温化しないことが予想される。そこで、冬期の芝生緑化がパネル周辺の高温化抑制に影響を与えるか否かを検討したが、パネル周辺の高温化抑制には影響がないことが示された。

(3) 2013年3月～5月 (春期)

春期も秋期・冬期同様、パネル裏面付近の気温が最も冷やされていた(表-4)。春期に測定された電力量として、試験区2・40cmと試験区1・40cmの気温偏差の差が最大となった2013年4月8日の経時変化を図-7に示した。測定期間中にスプリングトランジション⁹⁾を行っている。秋期のWOS同様、芝草を深刈するため、パネル周辺の高温化抑制が低下すると予想された。そこで、スプリングトランジションがパネル周辺の高温化抑制に影響を与えるか否かを検討ところ、同一の測定高さにおいて、有意水準0.01のとき、それぞれ両側P値が 2.94×10^{-14} (20cm)、 2.42×10^{-35} (40cm)となり、スプリングトランジションの影響を受けていないことが確認できた。そして、秋期同様、パネル周辺の気温をパネル裏面、地表面付近の気温と合わせて議論するため、線形結合している40cmの気温偏差を外し、測定高さ別の気温と気温偏差を説明変数、電力量を目的変数にして重回帰分析を行った。その結果、式の有意性は低かったが、20cmの気温偏差の偏回帰係数のみ符号が負を示した。これは地表面付近の気温と周辺の気温の差が小さくなるほど電力量が増加することを示唆してお

り、春期にもパネル周辺の高温化抑制の効果が期待できると考えられた。

(4) 2013年6月～8月 (夏期)

夏期も、パネル裏面付近の気温が最も冷やされていた(表-4)。夏期に測定された電力量として、試験区2・40cmと試験区1・40cmの差が最大となった2013年8月18日の経時変化を図-8に示す。2013年は、菊池ら(2014)⁶⁾と比べ、連続した発電量とそれに対応した気温が測定できたことから、パネル周辺の高温化抑制が最も期待される夏期の効果を検証した。その結果、有意水準0.01のとき、それぞれ両側P値が 1.56×10^{-11} (20cm)、 5.16×10^{-35} (40cm)となり、芝生緑化がパネル周辺の高温化抑制に有効であることが確認できた。また、線形結合をしている40cmの気温偏差を外し、測定高さ別の気温と気温偏差を説明変数、電力量を目的変数として重回帰分析を行ったところ、秋期同様、パネル付近の気温が下がるほど電力量が増加すること、地表面付近の気温と周辺の気温の差が小さくなるほど電力量が増加することが示された。係数の有意性を示すP値を比較すると、20cmの気温偏差の方が小さく、芝生緑化は夏期のパネル周辺の高温化抑制に効果を発揮することが考えられた。

5. まとめ及び今後の課題

以上から、芝生緑化は9～12月の秋期、3～5月の春期、6～8月の夏期においてパネル周辺の高温化抑制に有効であること、特に夏期にはその効果が顕著となることが示された。今後は、芝生緑化による修景効果、緑化にかかるライフサイクルコストと電力量の関係を検討し、パネル下の雑草抑制に緑化手法の提示ができるよう研究を進める。

謝辞：本研究は科研費(若手B, 24700778・基盤C, 26350024)の成果の一部である。

補注及び引用文献

(補注1) 引用文献2)から、地被植物はイワダレソウ(*Phyla nodiflora* Greene)の改良種クラピアとし、試算に用いられた施工単価(2,000円/m²)と管理単価(106円/m²/年)とした。

- 1) 株式会社白崎コーポレーション：太陽光発電の発電量を維持する防草メンテナンスシステムGU system (ジーユーシステム)：株式会社白崎コーポレーションホームページ<<http://gu-solar.com/contents/weeding.html>>, 2014年9月20日参照
- 2) 内山緑地緑化(2014)：太陽光パネル周辺緑化のご提案(資料), 12pp
- 3) Köhler, M., Wiartalla, W. and Freig, R. (2007) : Interaction between PV-systems and extensive green roofs: Proceedings of the 5th Annual Green Rooftops for Sustainable Communities Conference, 16pp.
- 4) Sam C.M. Hui and S.C.Chan (2011) : Integration of green roof and solar photovoltaic systems: Proceedings of Integrated Building Design in the New Era of Sustainability, 12pp.
- 5) 十河潔司・杉本英夫(2014) : メガソーラー発電用の雑草抑制資材の性能比較とライフサイクルコストの検討：日本緑化工学会誌40(1), 199-202.
- 6) 菊池佐智子・興水肇(2014) : 電力量と芝草の成長解析によるソーラーシェーディングの環境条件：ランドスケープ研究77(5), 669-672
- 7) 気象庁：気象観測統計指針：気象庁ホームページ<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/kaisetu/shishin/shishin_all.pdf>, 2013年11月1日更新, 2014年9月12日参照
- 8) 気象庁：ヒートアイランド監視報告(平成25年度)：気象庁ホームページ<<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr/2014/index.html>>, 2014年7月更新, 2014年9月24日参照
- 9) 北村文雄, 眞木芳助, 柳久, 大久保昌, 野間豊(1997) : 芝草・芝地ハンドブック：博友社, 348pp