

電力量と芝草の成長解析によるソーラーシェアリングの環境条件

Environmental Conditions of the Solar Sharing based on the Analysis of Electric Energy and Turf Grass Growth

菊池 佐智子* 奥水 肇**

Sachiko KIKUCHI Hajime KOSHIMIZU

Abstract: Solar sharing means keeping agricultural managements and photovoltaic. Plants selection is based on the point of light saturation in agricultural sector. Installing green roofs have been expected the improvement of urban environmental condition. After the Great East Japan Earthquake, photovoltaic has competed against green roofs at roof areas. In order to suggest the environmental conditions of solar sharing in landscape sector, and photovoltaic a crystal silicon solar panel and turf grass roof were examined. Based on the measured results, three relationships were analyzed: the roof surface and temperature of solar panel, electric energy and temperature of solar panel and the roof surface and surroundings, freshness indicator (NDVI) and photosynthetic photon flux. There remained the measurement of spectral distribution and the relative analysis of the plants growth and the spectral distribution.

Keywords: photovoltaic, solar sharing, electric energy, turf grass, amount of isolation
キーワード：太陽光発電，ソーラーシェアリング，電力量，芝草緑化，日射量

1. はじめに

2001年、東京都の自然保護条例改正に伴う屋上緑化の義務化を契機に、日本国内の屋上緑化施工面積は、2000年からの12年間で3,298,901m²と拡大した¹⁾。しかし、年間施工面積、1件当たりの施工面積は2008年をピークに3年連続で減少しており、この要因として、建築着工面積の減少が挙げられている²⁾。また、緑化義務制度を設けている自治体には、緑化面積の算定のもととなる屋上面積から太陽光パネルの設置面積を除いているところもあり、これが年間施工面積や1件当たりの施工面積の減少につながったとの指摘もある³⁾。太陽光パネルは、摩耗を伴う可動部がなく、安定したシリコン結晶でできているため、メンテナンスが不要であること、余剰電力の売電や国・自治体の補助制度の充実により、注目が集まっている環境配慮技術である⁴⁾。

日本と同様、住宅の屋根・屋上部への太陽光パネルの設置が進んでいるドイツでは、1990年代に屋上空間に太陽光パネルを設置する場合と、粗放型の屋上緑化を施工する場合のどちらがよいかの議論がなされ⁵⁾、屋上緑化と太陽光パネルの同所利用に関する様々な研究⁶⁾⁷⁾が取り組まれてきた。これは、太陽光パネルは日射に伴う周辺温度の上昇により標準状態(25°C)で定められている出力が低下するため⁸⁾である。温度特性と呼ばれるこの傾向は、-0.4~0.5(%/°C)を示し⁹⁾、温度上昇による発電量の低下は無視できない。そこで、発電に使われない太陽光を植物成長に利用するソーラーシェアリングに着目した。ソーラーシェアリングは、遮光率が増加しても収穫量が減少しないよう設計された農業分野の技術であり¹⁰⁾、緑地の蒸発散効果により太陽光パネルの周辺温度の上昇を抑制しながら、植物成長を両立させる有効なシステムと言える。しかし、国内では、屋上緑化と太陽光パネルの同所利用に関する調査研究は少なく、適用の可能性を検討する必要がある。そこで、本研究では、屋上緑化上に太陽光パネルを設置し、周辺環境および電力量、芝生サッチの鮮度を測定、分析した。そして、測定項目間の関係性に着目し、電力量と植物生育の維持を可能に

する環境条件を検討した。

2. 研究の方法

(1) 実験材料および実験経過

実験は、神奈川県川崎市の明治大学農学部第1校舎4号館の2階部分の屋上に設置された緑化試験区(4.0×4.0m)で行った(写真-1左)。供試植物はセダム緑化と比べて環境改善効果が高い芝草緑化¹¹⁾とし、ターフ形成とダメージ回復が早く、乾燥に強く、維持管理の手間・費用が軽減できるノシバ *Zoysia japonica* Steud. の改良種エルトロ(以下『エルトロ』)¹²⁾とし、草丈は冬季のWOS



写真-1 実験風景(左：屋上，右：黒点線内拡大)

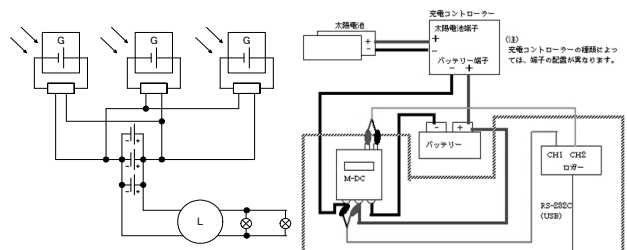


図-1 配線図 (左：本実験の太陽光発電システム，右：データロガセットを組み込んだ太陽光発電システム¹³⁾)

*茨城大学地球変動適応科学研究機関 **明治大学農学部

一定程度の保水性と排水性を有する湿性多孔質人工軽量土壌¹⁴⁾を想定した芝生管理の定常値 20mm とした。供試土壌は軽量化を敷き、土壌厚 25cm の屋上緑化を造成した(2012 年 5 月 2 日)。灌水は、芝草が活着するまで適宜ホースで行い、芝草活着後は、灌水コンピュータ(GARDENA 製電池式ウォーターコンピュータ・自動水やりタイマー1862-20)を用いた。灌水方法は、自動灌水により懸念される局所的な乾燥や過湿を防ぐため、通常よりも灌水回数を増やし、緑化試験区の水分条件が芝生・芝草の生育の制限要因にならないように配慮した。

太陽光発電システムは、太陽光パネル(SHARP 製独立型単結晶型太陽電池 NT-84L5H)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)、コントローラー(未来舎社製コントローラー-PV-1212D1A)をつなげた(図-1 左)。太陽光パネルは、UR 都市機構技術研究所での現地調査と技術者へのヒアリング、NEDO が公開する日射量データベース閲覧システムに基づき、地表面からの高さ 30cm、方位角 0 度、傾斜角 33.1 度と高さ方位角は同一、傾斜角のみ 5 度に設定した。ここで、傾斜角 33.1 度は、緑化試験区のある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、傾斜角 5 度は、現地調査を実施した UR 都市機構が既存住宅に太陽光パネルを設置する際に、浮き上がり荷重に対する安全性を確保した角度である。そして、発電と緑化の両立条件を検討するため、傾斜角 33.1 度の太陽光パネルを緑化試験区(以下、緑化 33.1 度区)とコンクリート面(以下、コンクリート 33.1 度区)、傾斜角 5 度の太陽光パネルを緑化試験区(以下、緑化 5 度区)に設置した(写真-2 右)。発電能力、コントローラーとバッテリーの器差確認のため発電は 2012 年 7 月 8 日から開始した。発電能力及び器差がないことを確認し、造成した屋上緑化の芝草の生育が安定した 2012 年 8 月 4 日に屋上緑化上に設置した。

(2) 測定項目および測定方法

測定項目は、発電電圧(電力量)、芝草の生育状況(鮮度^(註 1))のほか、気温・湿度(太陽光パネル裏面、地表面付近)、日射量(傾斜面日射強度、光量子束密度)とした。鮮度は月 1 回、被覆状況は週 1 回、それ以外の項目は気温・湿度は 10 分間の平均値、発電電圧と日射量は 10 分毎の瞬間値と平均値を測定した。

1) 発電電圧(電力量)

本実験で設置した太陽光発電システムは、直接、電力量を測定することができない。そこで、発電電圧を計測できるログ(安川商事株式会社製 M-DC・データログセット、ソーラー計測くん 12VKY-REC-12)を組み込んだ(図-1 右)。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み、Microsoft Excel®上で電流量を乗じて電力量を算出した。

2) 芝生の生育状況

鮮度は、携帯鮮度測定機(EBA Japan 製鮮度アシスト FC-3117-11A)を用いて、小型光量子計を中央とした 20×20cm のコドラート内のサッチを 5 秒間隔で 25 回測定し、その平均とした。

3) 気温・湿度

太陽光パネル裏面および地表面付近の気温・湿度は温湿度データログ(KN ラボラトリーズ製超小型温湿度記録計 1923)を使用した。地表面とパネル裏面間のどの部分で温度変化が生じるかを明らかにするため、測定点は傾斜角 33.1 度の太陽光パネル中央から、3 等分した地点(地表面から高さ 13cm、31cm)にとし、ログを水糸で固定した(写真-2)。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。得られた気温・湿度はそれぞれ対応した専用ソフト RhManager でパソコンに取り込んだ。

4) 日射量(傾斜面日射強度、光量子束密度)

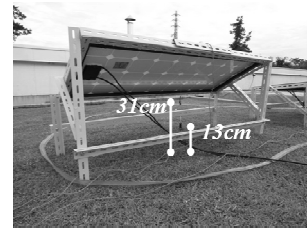


写真-2 太陽光パネル裏面、地表面付近の温湿度測定点

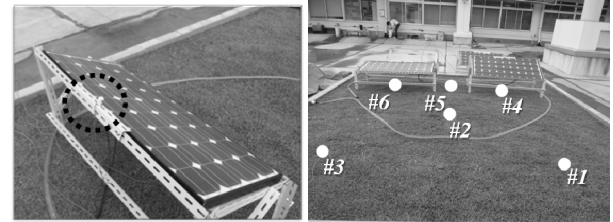


写真-3 日射量計測位置(左: 傾斜面日射量, 右: 光量子量)

発電量は日射量¹⁵⁾、芝草の生育状況は照度および日長時間¹⁶⁾に影響を受けることから、傾斜面日射量と光量子量を測定した。傾斜面日射量は、太陽光パネルと同じ面(方位角 0 度、傾斜角 33.1 度または傾斜角 5 度)に設置した小型日射計(英弘精機株式会社製小型日射計 ML-020MV)で測定した。光量子量は、傾斜角 33.1 度の太陽光パネルの下(#4)、傾斜角 5 度の太陽光パネルの下(#6)、太陽光パネルの間(#5)、太陽光パネル設置の影響を受けない 3 点(#1, 2, 3)の計 6 点に設置した小型光量子計(英弘精機株式会社製小型光量子計 ML-020P)で測定した(写真-3)。得られた値は専用ソフト LR5000 用ユーティリティでパソコンに取り込み、式(1)を用いて傾斜面日射強度、光量子束密度に換算した。

$$Q = \frac{E}{K} \quad \text{式(1)}$$

ここで、Q は傾斜面日射強度(W/m²)、光量子束密度(μmol/s/m²)、E はセンサーの出力 μV(mV)、K はセンサーの感度(μV/μmol/s/m²、μV/W/m²)とする¹⁷⁾。

3. 結果

分析対象期間は、測定開始(2012 年 8 月 5 日)から緑化試験区の芝草を深刈し、寒地型芝草(アニュアルライグラス‘フェアウェイ 2’*Lolium rigidum* の改良種)を播種した 2012 年 10 月 19 日とした。ここでは、発電と緑化の双方に関係する気温、日射量、電力量、鮮度の 4 項目に絞り、分析した。

(1) 気温

太陽光パネル裏面・地表面付近の気温は、日平均を算出し、比較した(図-2)。緑化 33.1 度区、緑化 5 度区、コンクリート 33.1 度区の太陽光パネル裏面・地表面付近の気温は、9 月 2 日、23 日、10 月 7 日、19 日で急激に低下した。このとき、気象観測装置でも同様の傾向を示しており、人為的影響を受けていないと判断した。同期間中の太陽光パネル裏面・地表面付近の日平均気温は、緑化 33.1 度区、緑化 5 度区、コンクリート 33.1 度区の順に高くなった。屋上緑化の有無による太陽光パネル裏面と地表面付近の気温を比較したところ、緑化 33.1 度区では、太陽光パネル裏面と地表面付近の気温差の最大値は 1.2°C、平均では太陽光パネル裏面が 0.1°C 低くなった。コンクリート 33.1 度区では、太陽光パネル裏面と地表面付近の気温差の最大値は 0.8°C、平均では太陽光パネル裏面が 0.1°C 高くなった(表-1)。そこで、この太陽光パネル裏面と地表面付近の気温差が地表面形態の違いによるものか否かを検討するため、緑化 33.1 度区およびコンクリート 33.1 度区

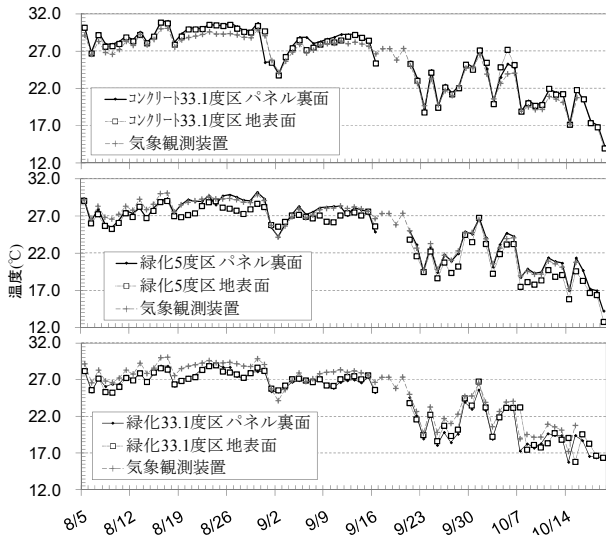


図-2 太陽光パネル裏面、地表面付近気温の経日変化

表-1 太陽光パネル裏面、地表面付近気温の概要

	緑化33.1度区		緑化5度区		コンクリート33.1度区		気象観測装置
	裏面	地表面	裏面	地表面	裏面	地表面	
平均(°C)	24.3	24.5	25.2	24.4	26.0	25.8	25.4
裏面-地表面(°C)		-0.1		0.8		0.1	-
最大(°C)	29.1	29.0	30.2	29.0	31.0	30.8	30.1
最小(°C)	15.8	15.8	14.3	12.8	14.3	14.0	16.7
標準偏差	4.0	3.8	3.9	4.1	4.2	4.2	3.9
標本数	73	73	73	73	73	73	76
備考	2012年9月17日~20日は欠測値						

の太陽光パネル裏面の気温と地表面付近の気温の差を用いて、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で芝草緑化は太陽光パネル裏面の気温上昇を抑制することが示唆された。

(2) 日射量(傾斜面日射強度, 光量子密度)

分析には、2012年8月12日から同年10月19日までに測定したデータを用いた。

1) 傾斜面日射強度

上掲の式(1)を用いて算出した傾斜面日射強度は、正しく測定が行われなかった期間(2012年8月17日から31日、コンクリート33.1度区)を除き、1日ごとに集計した(図-3)。日射強度の違いが傾斜角の違いによるものか否かを検討したところ、緑化33.1度区と緑化5度区は有意水準0.01のとき、両側P値 1.27×10^{-7} で緑化33.1度区の日累積傾斜面日射強度が強いことが示された。

2) 光量子束密度

上掲の式(1)を用いて算出した光量子束密度は、1日ごとに集計し、測定機の再設定を行った期間(2012年8月17日から31日)を除いた(図-4参照)。太陽光パネル設置の影響を受けない#1, 2,

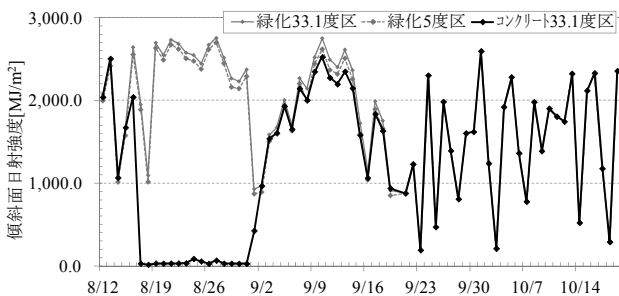


図-3 日累積傾斜面日射強度の経日変化

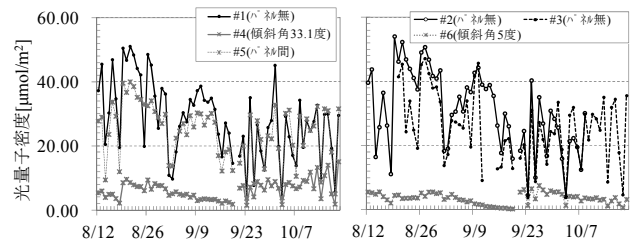


図-4 日累積光量子密度の経日変化

表-2 日累積光量子密度の概要

	パネル無 (#1,2,3平均)	傾斜角33.1度 (#4)	傾斜角5度 (#6)	太陽光パネル 間(#5)
平均	28.27	6.22	3.28	24.33
最大	52.23	39.97	15.03	7.50
最小	3.95	1.49	0.19	3.68
標準偏差	11.35	2.99	1.76	9.01
標本数	68	68	68	68

3は統計的に類似性を確認し、太陽光パネル無(#1, 2, 3の平均)、傾斜角33.1度(#4)、太陽光パネル間(#5)、傾斜角5度(#6)の4点の日累積光量子束密度を比較した(表-2)。その結果、日累積光量子束密度は、傾斜角5度、傾斜角33.1度、太陽光パネル無の順に大きくなり、太陽光パネル無を100とすると、傾斜角33.1度は75.44、傾斜角5度では85.87減少した。そこで、傾斜角33.1度、傾斜角5度の日累積光量子密度が傾斜角の違いによるものか否かを検討するため、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 1.85×10^{-13} で傾斜角33.1度の日累積光量子束密度が大きいことが示された。

(3) 電力量

分析には、2012年8月5日から同年10月19日までに測定したデータを用いた。傾斜角を同一とした緑化33.1度区とコンクリート33.1度区の電力量を算出するため、ログに記録された発電電圧から、まったく発電しなかった0Vとノイズ(0.001~0.002V)を外し、電流量を乗じて、1日ごとに集計した(図-5参照)。緑化33.1度区の電力量は、正しく測定が行われていなかった期間(2012年8月18日から9月20日)を除くと、最大で12.41Wh、平均で6.14Whとなった。コンクリート33.1度区の電力量は最大で18.98Wh、平均で10.95Whとなった。設置面の形態と電力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 2.034×10^{-7} でコンクリート区の日累積電力量が大きいことが示された。

(4) 鮮度

鮮度は、3か月の間で低下し、平均37.58、最大で48.02も減少した(表-4)。月別にみると、8月では#3が最も高く、次いで#4(傾斜角33.1度)、#6(傾斜角5度)となった。9月では、#4(傾斜角33.1度)が最も高く、次いで#6(傾斜角5度)となった。10月では、#6(傾

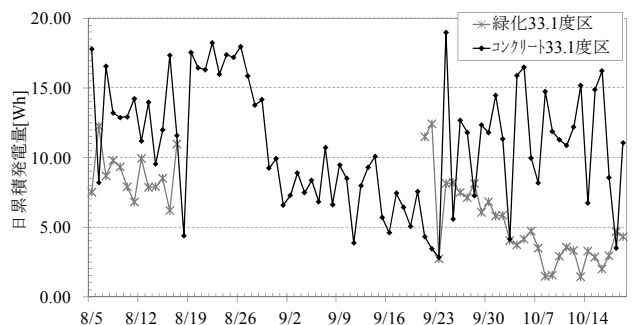




















図-5 緑化33.1度区とコンクリート33.1度区の日累積電力量

表-3 鮮度測定に使用したサッチと鮮度

	#1(°無)	#2(°無)	#3(°無)	#4(33.1度)	#5(°無)	#6(5度)
8月						
平均	76.00	74.80	87.40	86.20	73.00	83.40
(偏差)	(0.71)	(0.45)	(1.67)	(1.92)	(0.71)	(0.55)
9月						
平均	64.00	65.50	57.73	74.73	61.40	71.20
(偏差)	(18.10)	(19.00)	(25.74)	(20.74)	(18.57)	(20.69)
10月						
平均	37.09	45.42	39.38	39.15	40.00	53.62
(偏差)	(5.17)	(11.19)	(11.50)	(9.68)	(22.94)	(17.29)

斜角5度)が最も高く、次いで#2, そのほかは等しい値を示した。このデータを対象に、一元配置の分散分析を行ったところ、すべての組み合わせにおいて、有意水準0.01のとき、鮮度低下は季節変動の影響を受けたことが示唆された。次に、#1から#6の地点間の違いが鮮度に影響を与えているか否かを一元配置の分散分析を用いて検討したが、8月のときのみ、有意水準0.01のとき、P値 3.33×10^{-17} を取り、太陽光パネルの設置、傾斜角の違いが鮮度に影響を与えていたことが示唆された。サッチの写真から、同一刈取面積でも、#4(傾斜角33.1度)、#5(太陽光パネル間)、#6(傾斜角5度)のサッチは、葉長の伸長が確認された。

4. 考察

測定項目間の関係性に着目し、電力量と植物生育の維持が両立できる環境条件を考察した。

まず、屋上緑化には、断熱作用・蒸散作用・遮蔽作用からなる熱環境改善作用¹⁸⁾があり、屋上緑化と太陽光パネルに関する既往研究^{6, 7)}では、その作用により、電力量が約6~8.3%増加している。本実験で、傾斜角が同一の場合、芝草緑化上に太陽光パネルを設置すると、太陽光パネル裏面の気温上昇が抑制されることが明らかになった。そして、太陽光パネル裏面・地表面付近の気温、気象観測装置で測定された気温を説明変数、電力量を目的変数に重回帰分析を行ったところ、式の有意性を示す重相関係数、重決定係数がそれぞれ0.30, 0.09と小さくなったが、太陽光パネル裏面・地表面付近の気温の偏回帰係数の符号が負となった。これは、太陽光パネル裏面、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唆している。次に、芝草の鮮度と光量子束密度の関係とサッチの状態を検討した。鮮度と日累積光量子束密度は、太陽光パネル設置の影響を受けない群(#1, 2, 3, 5)と太陽光パネル下の群(#4, 6)の2つに分けられたが、標本数が少なく、統計的な関係性を求めることはできなかった。太陽光パネルの下の群(#4, 6)のサッチは、葉長の伸長が確認でき、太陽光線のスペクトルの黄や赤が不足していること¹⁶⁾が示唆された。芝草の生育は光だけでなく、気温とも関係がある¹⁶⁾が、本実験で使用した『エルトロ』の生育適温は27~35°C¹⁶⁾である。太陽光パネル裏面・地表面付近の気温は、この生育適温の範囲に含まれており、太陽光パネル設置による気温の変化は影響がなかったと考えられた。

5. まとめ及び今後の課題

以上から、芝草緑化は太陽光パネル裏面の気温上昇を抑制すること、太陽光パネル下の芝草の葉長は伸長することが示された。今後は、電力量の計測に関する精度を高め、各種測定項目との関係性の分析に耐えるデータを蓄積すること、パネル透過光の分光を測定し、葉長の伸長等生育状況の原因の正確な把握に取り組み、芝生緑化による太陽光パネル裏面温度上昇抑制の定量化、太陽光パネル下で生育可能な植物特性が提示できるよう研究を進め

る。

謝辞：本研究は科研費(若手B, 24700778)の成果の一部である。

補注及び引用文献

^(E1) 鮮度とは、細胞の活性度、光合成による光吸収量を示す指標(正規化植生指数)の相対値¹⁹⁾である。

- 1) 永瀬彩子 (2013) : 世界の事例から見る生物多様性創出や都市洪水対策のための粗放的な屋上緑化 : 都市緑化技術 89, 12-15.
- 2) 国土交通省 都市局 公園緑地・景観課 緑地環境室 : 平成 23 年 全国屋上・壁面緑化施工実績調査結果 : 国土交通省ホームページ
<<http://www.mlit.go.jp/common/000226442.pdf>>, 2012.10.1 更新, 2013.9.19 参照
- 3) 塩澤誠一郎 : 減る屋上緑化, 増える壁面緑化 : ニッセイ基礎研究所ホームページ
<http://www.nli-research.co.jp/report/researchers_eye/2012/eye121024.pdf>, 2012.10.24 更新, 2013.9.16 参照.
- 4) NPO 法人日本住宅性能検査協会 (2012) : 太陽光発電アドバイザー試験公式テキスト : 日本能力協会マネジメントセンター, 237pp.
- 5) マンフレッド・ケラー (2013) : 太陽光発電と粗放型屋上緑化の相互影響 : 都市緑化技術 89, 6-11.
- 6) Köhler, M., Wiartalla, W. and Feige, R. (2007) : Interaction between PV-systems and extensive green roofs : Proceedings of the 5th Annual Green Rooftops for Sustainable Communities Conference, 16pp.
- 7) 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.
- 8) 新田佳照, 大林只志, 山脇竹治, 廿日岩輝樹, 水上誠志郎, 泉名政宣(1996) : 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 B, 116(4), 489-495.
- 9) 松川洋, 黒川浩助(2004) : 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, 153-156.
- 10) 一般社団法人ソーラーシェアリング協会 : ソーラーシェアリング : 一般社団法人ソーラーシェアリング協会ホームページ
<<http://solar-sharing.org/solarsharing/index.html>>, 2013.4.1 更新, 2013.9.19 参照.
- 11) 財団法人都市緑化技術開発機構編 (2003) 知っておきたい屋上緑化のQ&A : 鹿島出版会, 159pp.
- 12) 株式会社ニチソー緑化 : 改良日本芝エルトロ(雑草抑制型ダメージ耐性タイプ) : 株式会社ニチソー緑化ホームページ
<<http://www.nichino-ryokka.co.jp/sizai/eltoro.html>>, 2013.9.17 参照.
- 13) 安川商事株式会社 : システム-1 太陽光・発電量測定 : 安川商事株式会社ホームページ
<<http://www.yasukawa-shoji.co.jp/images/ky-vr71/keikun2.JPG>>, 2013.9.17 参照.
- 14) 田島緑化工事株式会社 : G ウェーブ使用部材 : 田島緑化工事株式会社ホームページ
<<http://www.tajima-ryokkakouji.jp/material/gwave.shtml>>, 2013.5.21 更新, 2013.9.17 参照.
- 15) 市川正也 (2012) : 太陽電池入門 : オーム社, 206pp.
- 16) 北村文雄・眞木芳助・柳久・大久保昌・野間豊 (1997) : 芝生・芝地ハンドブック : 博友社, 348pp.
- 17) 英弘精機株式会社 (2013) : 小型センサー-ML-020 取扱説明書 ver.2 : 英弘精機株式会社, 7pp.
- 18) (財)都市緑化技術開発機構編 (2004) NEO-GREEN SPACE DESIGN 4 新・緑空間デザイン設計・施工マニュアル : 誠文堂新光社, 231pp.
- 19) EBA JAPAN : 鮮度アシスト : EBA JAPAN ホームページ
<http://www.ebajapan.jp/fresh_index.html>, 2013.9.19 参照.