

Characteristics and Estimation of Power Generation for Solar Matching House

ソーラーマッチングハウスの発電特性と
発電量推定

Kazuya HOSOKAWA Rissyu SEI Toshiaki YACHI Youichi HIRATA Yasuyuki WATANABE
細川 和也^{1,‡} 成立洲¹ 谷内 利明² 平田 陽一³ 渡邊 康之³

Abstract

A solar matching photovoltaic (PV) system that uses the entire spectrum of sunlight except for the wavelengths necessary for growing plants has previously been proposed. However, before it can be used effectively, we need a method for estimating the amount of power that can be generated by this system. In this study, we have used field measurements to develop an estimation method and then have modeled proposed PV systems.

Keywords: Solar matching, Organic thin-film PV, Power generation characteristics, Power generation estimation
キーワード: ソーラーマッチング, 有機薄膜太陽電池, 発電特性, 発電量推定

1. はじめに

薄膜太陽電池等のフレキシブル太陽電池は設置架台を必要とせず屋上や壁面の自由曲面に直接設置することができるため、様々な用途で用いることが期待されている。そのような用途の一つとして、シースルー有機薄膜太陽電池(OPV: Organic photovoltaic)を農業用ビニールハウスの屋根面に取り付けるソーラーマッチングが提案されている^(1,2)。

ソーラーマッチング発電システムの導入においては、正確な発電量特性に基づいてパワーコンディショナーやバッテリーの設備容量を決める必要がある。そのため、ビニールハウス曲面上での OPV モジュールの発電特性を推定することが重要である。

本研究では、OPV の曲面上の発電特性を実験により明らかにすると共に、フレキシブル太陽電池において提案されている発電量推定式⁽³⁾を用いて、ソーラーマッチングハウスにおける発電量推定を行った。

2. ソーラーマッチングと発電量推定

2.1 ソーラーマッチング

*1 東京理科大学大学院 工学研究科(〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1, ‡e-mail:4317663@ed.tus.ac.jp)

*2 東京理科大学 工学部

*3 公立諏訪東京理科大学 工学部

(原稿受付: 2018 年 10 月 9 日, 受理日: 2019 年 1 月 15 日)

図1にソーラーマッチングの概念図を示す^(1,2)。ソーラーマッチングでは、特定の光を透過する性質を有する OPV をビニールハウスの上面に設置することで、農作物の生育に必要な太陽光の波長領域(赤色, 青色)を透過させ、主に農作物栽培に支障のない波長領域(緑色)を利用して発電しハウス内の照明やセンサ機器に給電する⁽⁴⁾。太陽光を農作物と太陽電池で互いに影響のない波長領域で共存させる試みである。

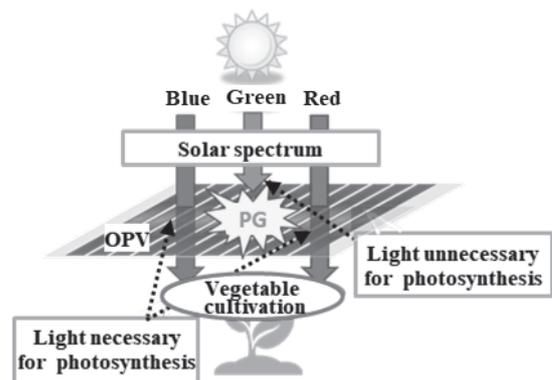


Fig. 1 Schematic of solar matching system (PG: Power generation)^(1,2)

図1 ソーラーマッチングの概略図

実際のビニールハウスを用いた実地試験では、OPV 透過光下で作物を栽培することが可能であることが実証されている⁽⁵⁾。さらに現在、OPV の変換効率向上および農作物生産効率向上を目指して研究が進められている⁽⁶⁾。

2.2 フレキシブル太陽電池の発電量推定式

フレキシブル太陽電池を円筒型やドーム型などの曲面に設置した場合、太陽電池モジュール面内において複数の

方位角および傾斜角が存在する。そこで、従来の太陽電池モジュールの発電量推定式を基に曲面を多面体に近似し、フレキシブル太陽電池の発電量を推定する手法が提案されている⁽³⁾。その手法では、全天日射量データから多面体を構成する各面の日射量を算出し、その日射量分布をもとに平均値を求め、発電量を推定する。図2にソーラーマッキングハウスへの適用が可能である円筒型太陽電池モジュールの多角柱近似図形を示す。円筒型モデルは、傾斜角が90°で一定であり、方位角のみが変化する発電量推定モデルとなる。一方、ソーラーマッキングハウスに適用する場合は方位角が一定で傾斜角が変化するモデルである。

円筒型太陽電池モジュールの発電量推定式⁽³⁾を以下に示す。

$$W_{cyl} = H_{V_{ave}} A \eta + H_{V_{rms}} A \eta \alpha_w (T_{M_{cyl}}(H_{V_{rms}}) - T_{STC}) \quad (1)$$

$$H_{V_{ave}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_v(\theta_i) \quad (2)$$

$$H_{V_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_v(\theta_i))^2} \quad (3)$$

$$T_{M_{cyl}}(H_{V_{rms}}) = 0.943T_A + 0.028H_{V_{rms}} - 1.528W_S + 4.3 \quad (4)$$

ここで、 A ：太陽電池モジュールの面積[m²]、 η ：太陽電池の変換効率[%]、 α_w ：太陽電池モジュールの発電量温度係数[%/°C]、 $H_v(\theta_i)$ ：多角柱に近似したある方位角 θ_i の平面の全天日射量[Wh/m²]、 $H_{V_{ave}}$ ：曲面の平均日射量[Wh/m²]、 $H_{V_{rms}}$ ：円筒設置全方位日射量のRMS値[Wh/m²]、 $T_{M_{cyl}}(H_{V_{rms}})$ ：円筒型太陽電池モジュール全体温度[°C]、 T_A ：気温[°C]、 W_S ：風速[m/s]、 T_{STC} ：標準試験状態の太陽電池モジュール温度25°Cである。太陽電池モジュールの面積、変換効率、発電量温度係数は仕様値を用いる。日射量、風速、気温には、METPV-11等より取得したデータを用いる⁽⁷⁾。

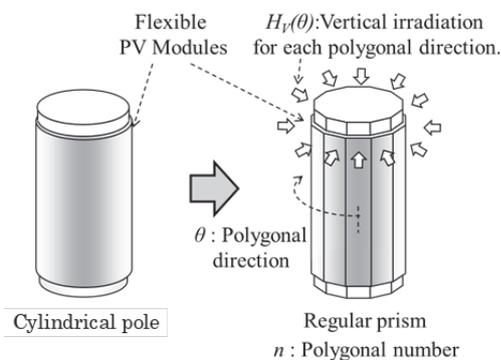


Fig. 2 Approximation of cylindrical PV module by polygonal column
図2 円筒型太陽電池モジュールの多角柱近似

3. OPV の曲面上発電特性

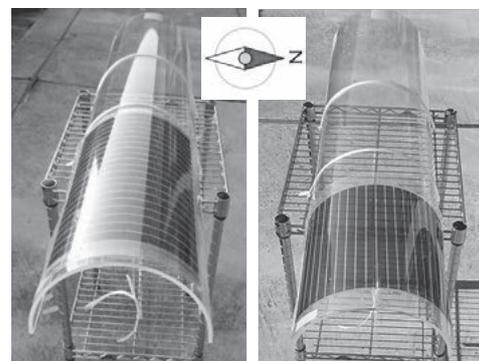
ソーラーマッキングハウスの発電量推定式およびシミュレーションモデルを作成するために、OPVの曲面上の発電量特性を測定により明らかにした。

3.1 実験条件

OPVモジュールは、1.3cm×22.3cmの単セルが、20セル直列接続された構成(580cm²)である。OPVを平板と図3に示すビニールハウスを模した曲率の異なる2種類のアクリルパイプ(曲率=4.0, 8.7)に貼り付けて、発電量を測定した。アクリルパイプは東西に延びる方向に設置(東西設置)し、OPVモジュールは単セルの長辺が円周方向(A貼付)および円周に垂直な方向(B貼付)になる2種類で検討した。測定は2017年12月7日(快晴)にA貼付で、2017年12月12日(快晴)にB貼付で同一のモジュールを用いて行った。場所は東京理科大学葛飾キャンパス屋上で9時から15時までの1時間毎に発電特性を測定した。

発電量は、可変抵抗(0~5kΩ)を負荷として変化させてI-V特性から最大出力を求めた。また、全天日射計(MS-402, 英弘精機)を用いて、水平面全天日射量を測定した。さらに、図4に示す傾斜面全天日射計を用いて南北方向の傾斜面全天日射量も測定した。

傾斜面全天日射計傾斜角度の定義を図5に示す。傾斜角は地面と全天日射計のなす角を表し、太陽がある南側を正、北側を負とした。傾斜角度は0°(水平面)と30°~90°までの15°刻みで測定し、南北方向の日射量分布を求めた。単セル面内の日射量分布からモジュールを貼り付けた曲面の平均日射量と最低日射量を求めた。平均日射量は、単セル内の平均値とした。また、最低日射量は、曲率4.0の場合は-45°、曲率8.7の場合は-90°の傾斜面全天日射量とした。



(a) Attachment A (a) A貼付
(b) Attachment B (b) B貼付

Fig. 3 OPV module attachment positions (curvature of 8.7)

図3 OPVモジュールの貼付法(曲率8.7)



Fig. 4 Pyranometer attached to an inclined surface
図4 傾斜面に取り付けた全天日射計

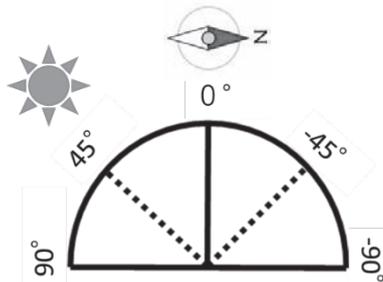


Fig. 5 Definition of inclination angle of pyranometer attached to the inclined surface

図5 傾斜面に取り付けた全天日射計の角度の定義

3.2 発電特性

(a) A 貼付

A 貼付は、単セル面内で広く日射量分布を持ち、どのセルもほぼ同様の日射量条件になる貼付法である。また、OPV モジュールは 20 セルが直列接続されているため、セル面内の平均日射量でモジュールの発電電流が決まると推測できる。

① I-V 特性

図6に OPV モジュールの電流-電圧特性 (I-V 特性) を示す。開放電圧は約 12V で、9 時、12 時、15 時の短絡電流は各々 74mA, 93mA, 26mA である。最大発電電力は各々 433mW, 488mW, 174mW である。測定時の日射量と有効セル面積から算出した変換効率は 1.8~2.0%になる。

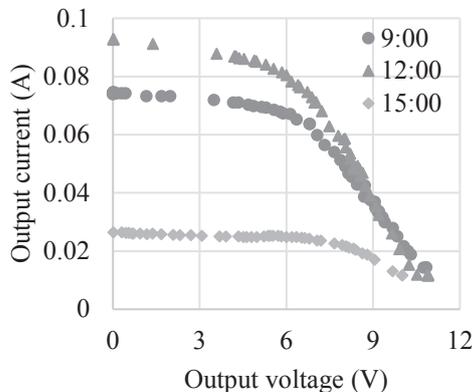


Fig. 6 OPV module I-V characteristics with attachment A and curvature of 4.0

図6 A 貼付時の OPV の I-V 特性 (曲率 4.0)

② 傾斜面日射量

図7に 12 月 7 日の南北方向の日射量分布を示す。傾斜面全天日射量はどの時間帯も 60°付近で最大となる。また、-30°以下では、散乱光および反射光成分のみとなるため一定となる。

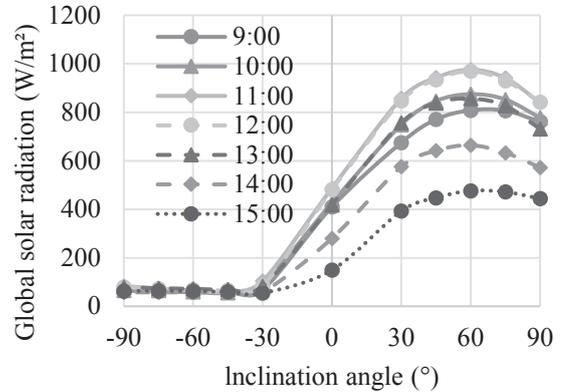


Fig. 7 Solar radiation distribution in the north-south direction on December 7, 2017

図7 2017 年 12 月 7 日の南北方向の日射量分布

③ 平均日射量と発電量

図8に平均日射量と発電量の関係を示す。OPV モジュールの発電量は平均日射量に比例した増大を示す。A 貼付では単セルの平均日射量からモジュールの発電量が求まることが確認できる。また、曲率の小さい 4.0 では平板と同等の発電量が得られるが、曲率の大きい 8.7 では、平板と比較して近似線よりも下側に多く分布し、やや発電量の減少が見られる。しかし、実際のビニールハウスでは今回検討した曲率よりもはるかに小さいため、平板と同等の発電量が得られると考えられる。

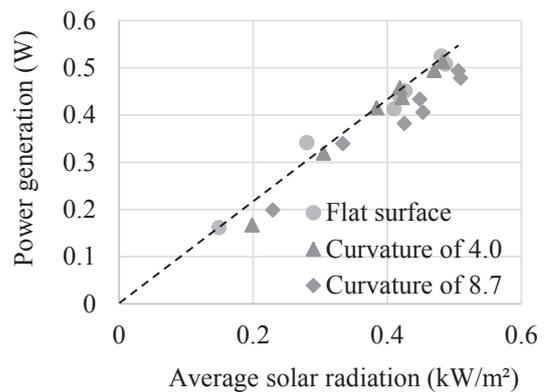


Fig. 8 Relationship between average solar radiation and power generation for attachment A

図8 A 貼付時の平均日射量と発電量の関係

(b) B 貼付

B 貼付は、単セルごとに照射される日射量が異なり、直達光が届かず影になる範囲のセルが存在する貼付法である。このため、B 貼付では最低日射量が照射される単セルでモジュールの発電電流が決まると推測できる。

① I-V 特性

図 9 に用いた OPV モジュールの電流-電圧特性 (I-V 特性) を示す。開放電圧は約 12V で、9 時、12 時、15 時の短絡電流は各々 13mA、20mA、13mA である。最大発電電力は各々 88mW、116mW、89mW である。

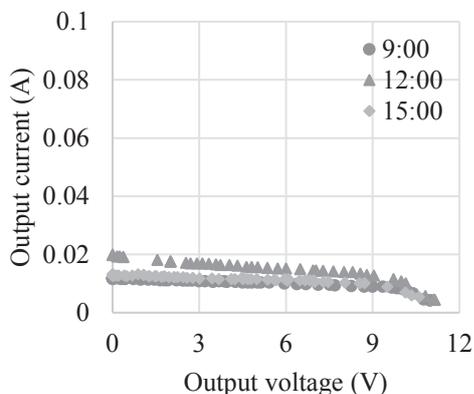


Fig. 9 OPV module I-V characteristics with attachment B and curvature of 4.0

図 9 B 貼付時の OPV の I-V 特性 (曲率 4.0)

② 傾斜面日射量

図 10 に 12 月 12 日の南北方向の日射量分布を示す。12 月 7 日と同様、傾斜面全日射量はどの時間帯も 60°付近で最大となる。また、-30°以下では、散乱光および反射光成分のみとなるため一定となる。

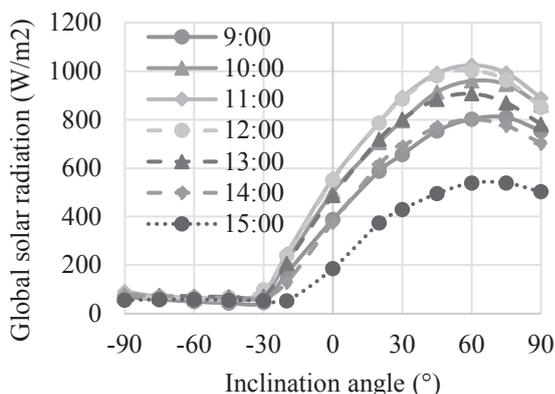


Fig. 10 Solar radiation distribution in the north-south direction on December 12, 2017

図 10 2017 年 12 月 12 日の南北方向の日射量分布

③ 最低日射量と発電量

図 11 に日射量分布より求めた曲面の最低日射量と発電量の関係を示す。両貼付共にほぼ同等の日射分布で測定したが、B 貼付では A 貼付と比較して発電量は 1/3 程度と少ない。また、B 貼付では、発電電力は単セルの概ね最低日射量に比例して増大し、最低日射量の単セルの日射量でモジュールの発電電力が求まることが確認できる。

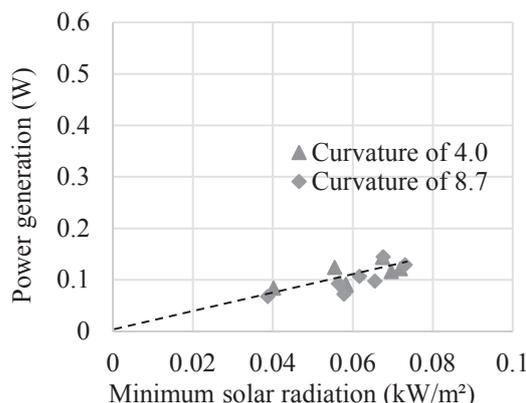


Fig. 11. Relationship between minimum solar radiation and power generation for attachment B

図 11 B 貼付時の平均日射量と発電量の関係

4. 実験値による推定モデルの検証

前章の発電特性を基にした推定式による推定発電量と実測発電量を比較し、推定式の妥当性を検証した。

4.1 実験条件とシミュレーション条件

2018 年 4 月 28 日 (晴れ)、6 月 19 日 (晴れ時々曇り)、6 月 21 日 (曇り) に東京理科大学葛飾キャンパス屋上で曲率 4.0 のアクリルパイプを東西設置し、前章と同一のモジュールを A 貼付し、9 時から 15 時まで 1 時間毎に発電量を測定した。

発電量推定式の係数は、2018 年 5 月 11 日 (晴れ) の平面設置で 10 時から 14 時までの 30 分毎に測定したデータから取得した。その時の変換効率は 1.31% (モジュール温度 25°C 基準)、発電量温度係数 0.22%/°C であり、シミュレーションにはその値を用いた。モジュール温度は気象庁データから測定日の気温と風速から推定した。発電量誤差率は以下の式で定義した。

$$\text{発電量誤差率} = \frac{\text{推定発電量} - \text{実測発電量}}{\text{実測発電量}} \times 100 \quad (5)$$

4.2 推定モデルの検証

図 12 に 4 月 28 日 (晴れ)、図 13 に 6 月 19 日 (晴れ時々曇り)、図 14 に 6 月 21 日 (曇り) における実測発電量と推定発電量の関係を示す。

晴天日は図 12 に見られるようにシミュレーション値が概ね実測値を上回り、1 日の誤差率は 2.8% と小さい。一方、曇天日は図 14 に示されるように、実測値がシミュレーション値を上回り、1 日の誤差率は -34% と大きい。図 12~14 を通して、晴天の日射量の多い時間帯ではシミュレーション値が実測値を上回り、曇天の日射量の少ない時間帯では実測値がシミュレーション値を上回ることが分かる。

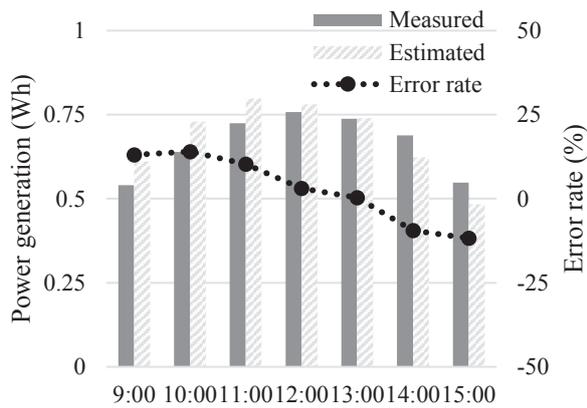


Fig. 12 Measured power generation and estimated power generation on April 28, 2018

図 12 2018 年 4 月 28 日の実測発電量と推定発電量

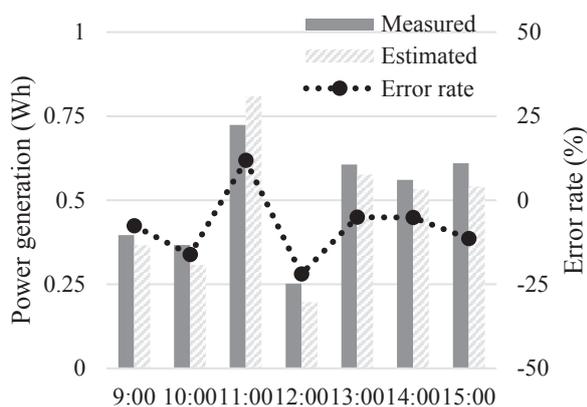


Fig. 13 Measured power generation and estimated power generation on June 19, 2018

図 13 2018 年 6 月 19 日の実測発電量と推定発電量

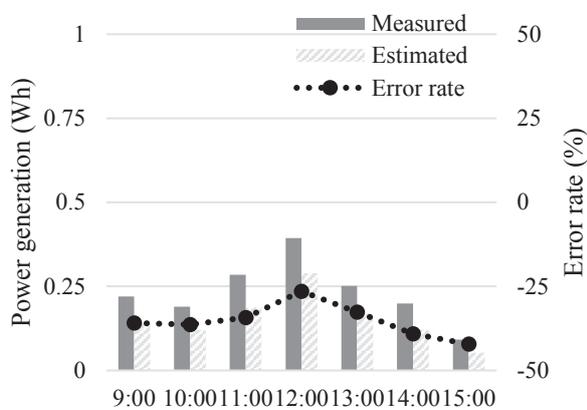


Fig. 14 Measured power generation and estimated power generation on June 21, 2018

図 14 2018 年 6 月 21 日の実測発電量と推定発電量
本研究で用いた OPV モジュールでは、図 6 に示したよ

うに日射量が多く発電電流の大きい 12 時では I-V 特性に傾斜が見られる。これは太陽電池セルの直列抵抗による電圧降下と推察できる。本シミュレーションでは晴天時の特性から変換効率を求めているため、この直列抵抗による見かけ上の変換効率の低下が生じ、日射量の少ない曇天時ではシミュレーション値が実測値よりも小さくなると考えられる。

表 1 に測定日毎の一日の合計発電量と誤差率を示す。晴天日 (4 月 28 日) は曇天日 (6 月 21 日) の約 3 倍の発電量が得られた。上述したように曇天時の誤差率は-34%と大きい。曇天時は発電量が少ないため、天候の異なる 3 日分の発電量誤差率は-6.2%と比較的小さい。本シミュレーションでは年間発電量を推定するための精度としては十分用いることが可能である。

Table1 Total power generation error rate per day for each measurement day

表 1 測定日毎の一日の合計発電量と誤差率

| | April 28 | June 19 | June 21 | Total |
|-----------------------|----------|---------|---------|-------|
| Measured PG (Wh/day) | 4.6 | 3.5 | 1.6 | 9.8 |
| Estimated PG (Wh/day) | 4.8 | 3.3 | 1.1 | 9.2 |
| Error amount (Wh/day) | 0.13 | -0.19 | -0.55 | -0.6 |
| Error rate (%) | 2.8 | -5.4 | -34 | -6.2 |

5. ソーラーマッキングハウスの発電量推定

前章で求めた発電量推定シミュレーションモデルにより実際のビニールハウスモデルで発電量を推定した。

5.1 シミュレーション条件

図 15 にシミュレーションモデルのソーラーマッキングハウスの寸法と屋根面への OPV モジュールの貼付を示す。本研究で提案するソーラーマッキングハウスは、一般的なビニールハウスを想定し、モジュール面積が 22cm×22cm で 15 セル直列接続された構成の OPV モジュールを円周方向に 56 枚、奥行き方向に 60 枚貼り付けたモデルである。一般的に住宅用で使用されている太陽電池モジュールの出力電圧に合わせるため、日射条件が同じ列のモジュールを 12 枚直列接続し、さらに日射条件がほぼ同じ 4 列を並列接続したものを 1 ユニットとした。図 16 にソーラーマッキングハウスのシステム構成を示す。ユニット 5 つをまとめて DC-DC コンバータに接続し、それを 14 個合わせて全体構成とした。

設置は東京とし、方位は東西とした。モジュールの変換効率は OPV の性能向上を見込み 2.5% とし、発電量温度係数は前章で求めた $0.22\%/^{\circ}\text{C}$ とした。貼付法は、A 貼付の発電特性が得られるように複数のモジュール全てを単セルの長辺が円周方向なる貼付とした。東西設置したビニールハウスに複数のモジュールを上記のように貼り付けることで、ソーラーマッチングハウス全体の発電量は曲面の平均日射量に比例する推定モデルとなる。日射量、風速、気温のデータは METPV-11 の年間データを用いた。

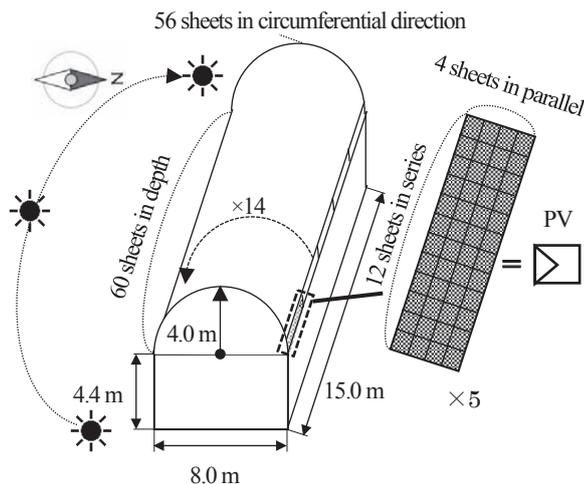


Fig. 15 Schematic diagram of Solar matching house

図 15 シミュレーションに用いたソーラーマッチングハウスの寸法と屋根面への OPV モジュールの貼付

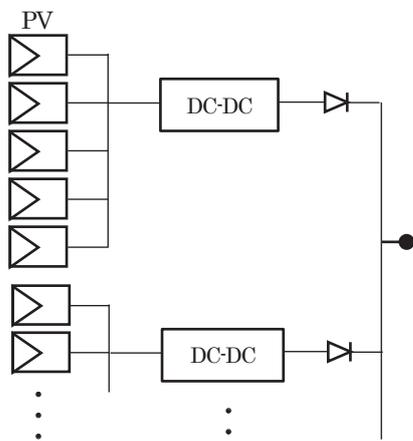


Fig. 16 PV system configuration of solar matching house

図 16 シミュレーションに用いたソーラーマッチングハウスの PV システム構成

5.2 シミュレーション結果

図 17 にソーラーマッチングハウスの月別発電量を示す。発電量が最も多い 5 月では 270 kWh/月、最も発電量が少ない 11 月では 150 kWh/月の発電量が得られる。

最も発電量の少ない 11 月の発電量を例にとりて、電照栽培用の照明に電力を供給する場合を検討する。キクにお

いては電照時間 3~6 時間で花芽分化抑制効果がピークに達し、それ以上は効果が低下すると報告されている⁽⁸⁾。このことを考慮し、消費電力 6.5W の赤色 LED を一日当たり 5 時間電照すると、今回想定したソーラーマッチングハウスでは、およそ 150 個の LED 照明の電力を賄える。

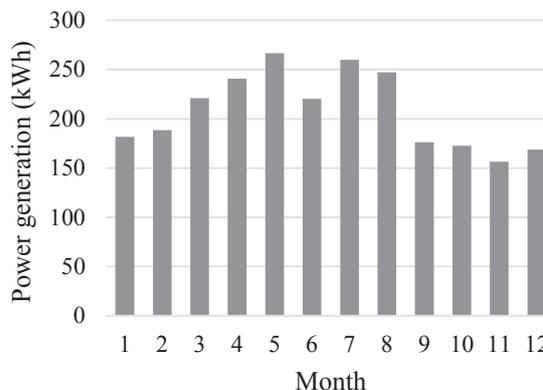


Fig. 17 Monthly estimated power generation of solar matching house

図 17 ソーラーマッチングハウスの推定月別発電量

6. まとめ

ソーラーマッチングハウスの発電量推定のため、OPV の曲面上の発電特性を実測し、その特性を基にしたシミュレーションにより発電量を推定し、以下の結果を得た。

1. ビニールハウスのような曲面に太陽電池を貼り付ける場合、モジュールを構成する各セルに当たる日射量が異なるため、貼付によって 3 倍ほど発電量に差が生じる。また、曲率を大きくしすぎると、発電量が低下する。
2. 発電量推定シミュレーションによる推定値と実測値を比較した結果、晴天や曇天を含む合計の発電量誤差が比較的小さくなり、年間発電量を推定するのに用いることが可能である。
3. 実際のビニールハウスに合わせた発電量推定シミュレーションで発電量を推定した結果、一日当たり 5kWh 以上の発電量が得られ、その電力は電照栽培用の LED 照明 (約 150 個) の 5 時間分に相当する。

7. 参考文献

- 1) 渡邊康之他, 透過型薄膜太陽電池, 特願 2016-10051.
- 2) Y. Watanabe, N. Ohashi, S. Kobayashi, Semi-transparent organic solar cells to combine commercial agriculture and photovoltaic electricity production, JSES/JSWS Joint Conference (2016), 95, Matsuyama.

- 3) M. Shibasaki, T. Yachi, A Power Output Estimate of Cylindrically-shaped Flexible Photovoltaic Module with Polygonal Approximation, IEEJ Transactions on Power and Energy, **135** (7), 454-461 (2015).
- 4) Y. Itou, Y. Takizawa, K. Kuwano, T. Iino, Y. Hirata, Y. Watanabe, T. Yachi, Output characteristic and Transmitted Radiation Evaluation of Transparent type OPV (Organic Photovoltaic) applied to Agriculture, Journal of Japan Solar Energy Society, **44** (5), 49-56 (2018).
- 5) N. Ohashi, S. Nishizawa, T. Momose, K. Kuwano, S. Kobayashi, Y. Watanabe, Plant Cultivation with the Solar Matching Method by Using Semi-transparent Organic Photovoltaics, JSES/JSWS Joint Conference (2016), 131, Matsuyama.
- 6) 東京理科大学, シースルー有機薄膜太陽電池を用いた植物栽培システム資料ダウンロード(Oct. 2018), <https://www.suwa.tus.ac.jp/wp-content/uploads/2016/03/20160308-301.pdf>
- 7) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 年間特別日射量データベース (METPV-11) データダウンロード (Nov. 2018), <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>
- 8) 白山竜次, 木戸君枝, キクの電照栽培における最適な電照の長さおよび照射時間帯, 園芸学研究, **16** (3), 309-315 (2017).