Output characteristic and Transmitted Radiation Evaluation of Transparent type OPV (Organic PhotoVoltaic) applied to Agriculture

# 農業への適用を考慮した透過型有機薄膜 太陽電池の出力特性及び透過光評価

Yuki ITOUYugo TAKIZAWAKohei KUWANOTaichi IINO伊藤 勇輝 <sup>1</sup>瀧沢 悠吾 <sup>1</sup>桑野 航平 <sup>2</sup>飯野 太智 <sup>3</sup>Youichi HIRATAYasuyuki WATANABEToshiaki YACHI平田 陽一 <sup>44 ‡</sup>渡邊 康之 <sup>5</sup>谷内 利明 <sup>6</sup>

## Abstract

To improve the efficiency of PV modules, the back is laminated so that the PV modules confine radiation. Because of this, the generated output is improved, but the back of the modules is shaded. If a transmission-type PV module is applied, the conversion efficiency is reduced. However, by utilizing light transmitted from the back, it is possible to expand the applications for the back surface to utilize transmitted light.

Transparent OPV (Organic PhotoVoltaic) that can add a value of photosynthesis in addition to the power generation. This transparent OPV emits blue and red light effective for photosynthesis. In this study, investigation was carried out for a certain period of time, the evaluation of the power generation characteristics and the transmitted light characteristics of OPV were examined.

This paper recommends to use transparent OPV in a greenhouse. Output and transmitted light characteristic of transparent OPV attached to a small size greenhouse were measured.

As a result, effective transmitted light for photosynthesis was confirmed concurrently with power generation function. The optimal arrangement direction of the cells was confirmed when transparent OPV attached to a small size greenhouse. And spectral solar radiation of transmitted light on the horizontal surface and on the curved surface was confirmed.

Keywords: Organic Photo Voltaic (OPV), Solar Sharing, Output Evaluation, Transmitted Irradiance Evaluation

キーワード: 有機薄膜太陽電池, ソーラーシェアリング, 出力評価, 透過光評価

# 1. はじめに

透過型有機薄膜太陽電池(OPV)を農業と複合利用する ためには、屋外フィールドサイトにおける日射強度、セル 温度、太陽光スペクトル分布などの環境要因による透過 型 OPV の出力の変化、また透過光特性を明らかにする必

研究論文

\*5 公立諏訪東京理科大学 工学部 電気電子工学科 教授

要がある. 透過型 OPV を屋外で使用した測定データはま だ少ないため,本研究では平面における屋外暴露状態の 透過型 OPV の環境要因による出力の変化,透過光を測定 し,定量的に評価することによって屋外フィールドサイ トにおける透過型 OPV の有用性を確認する. さらに,太 陽光発電と農作物の栽培の複合利用を目的として,アー チ型ビニールハウスに透過型 OPV を設置する形態,つま り各方位の曲面設置において透過型 OPV のセルの向きに ついて具体的に異なる状況を検討し,想定したビニール ハウスにとってより良い設置形態を明らかにする. また, 透過光スペクトル分布特性の分析により,透過光が光合 成に適したスペクトル分布になっているかを評価する. これらの分析,評価によって,農業利用への道筋をつける.

<sup>\*1</sup> 公立諏訪東京理科大学 工学部 学部生

<sup>\*2</sup> 東京理科大学大学院 工学研究科 大学院生

<sup>\*3(</sup>株) ヤマウラエンジニアリング 事業部

 <sup>\*4</sup> 公立諏訪東京理科大学工学部電気電子工学科 教授 (〒391-0292 長野県茅野市豊平 5000-1)
 ‡ e-mail:youichi@rs.sus.ac.jp

<sup>\*6</sup> 東京理科大学 工学部 第二部電気工学科 嘱託教授 (原稿受付:2018年6月14日,受理日:2018年9月3日)

また,野菜の育成には,強光性,中光性,弱光性などの光 適応性があり,本研究におけるビニールハウスに適用し た太陽電池の透過光率が20%であり,弱光に適した野菜 などへの適用も考慮した基本特性への基礎データとして 測定を行った.<sup>(1)(2)</sup>

#### 2. 透過型有機薄膜太陽電池と農業の複合利用

## 2-1. 透過型 OPV の分光感度

透過型 OPV の分光感度の一例を示す.主に緑色の波長 域の光で発電を行い,赤色の波長域の光では発電を行っ ていないことが分かる.そのため,植物の光合成に必要と 考えられている赤色の波長域<sup>(3)</sup>の光を多く透過し,農業と 複合利用できる可能性があると考えられる.



Fig. 1 Spectral response with wavelength of OPV 図 1 OPV の分光感度の一例<sup>(2)</sup>

#### 2-2. R/B 比の導出法

植物には赤色光と青色光が光合成に作用する特性がある. R/B 比とは青色帯(400 nm~500 nm)と赤色帯(600 nm~700 nm)の光量子東密度の比であり、この比率が植物の生育に大きく関与すると考えられ<sup>(4)</sup>,(1)~(3)式で定義する.

青色帯の光量子東密度は

$$B = \int_{400}^{500} \{E_{\lambda}/(h\nu_{\lambda})\} / N_a d\lambda \tag{1}$$

赤色帯の光量子束密度は

$$R = \int_{600}^{700} \{E_{\lambda}/(h\nu_{\lambda})\} / N_a d\lambda$$
 (2)

R/B 比は

$$\frac{R}{B} = \frac{\int_{600}^{700} \{E_{\lambda}/(h\nu_{\lambda})\}/N_{a}d\lambda}{\int_{400}^{500} \{E_{\lambda}/(h\nu_{\lambda})\}/N_{a}d\lambda}$$
(3)

ただし、*E*<sub>*l*</sub>:分光放射照度[W/m<sup>2</sup>/nm], *h*: プランク定数

6.626×10<sup>-34</sup> [Js], *Na*:アボガドロ定数 6.023×10<sup>23</sup> [*mol*<sup>-1</sup>], c:光速 2.9979×10<sup>8</sup> [m/s], *v*:振動数[Hz] v=c/λ, λ:波長 [nm]

# 3. 平面に設置した透過型 OPV の出力及び透過光 特性

#### 3-1. 測定装置及び測定方法

今回の測定には、図2に示すような可撓性のあるコナルカ製、透過型 OPV (30cm・21cm), red を使用した.



Fig. 2 Transparent OPV film. 図 2 透過型 OPV フィルム

透過型 OPV の *I-V*カーブの測定には電子負荷方式の *I-V*メータ, ADCMT㈱ 4601 を使用し, 0.2 s で 0. V ずつ増加するステップ電圧を設定した電子負荷で測定を行った. 有機薄膜太陽電池は,結晶系に比べ掃引時間が遅いため, それを考慮して測定した.また,透過光スペクトル分布の分析については 350 nm~1050 nm の波長範囲が測定できる 分光放射計, EKO㈱, MS700, 2 台を使用し,図3のように入射面側と透過側に設置し,5 nm おきのスペクトル分布を測定した.使用した測定装置を表1に示す.

Table1.	Measu	urement equipment.
	表 1	測定機器

equipment	Туре	Co.			
<i>I-V</i> meter	4601	ADCMT			
Spectroradiometer	MS-700	EKO			



Fig. 3 Diagram of the *I-V* curve measurement on inclined slope. 図 3 傾斜面での透過光の測定環境

日射計,分光放射計,透過型 OPV フィルムは方位真南, 傾斜角 30°の傾斜面に平面設置し,フィルム温度は平板型 熱電対を裏面に添付し測定を行った.

## 3-3. 平面設置時の透過型 OPV の基礎特性

屋外において測定した透過型有機薄膜太陽電池を平面 設置した際の日射強度 1.0 kW/m<sup>2</sup>における *I-V* カーブの屋 外における測定例を図 4, 出力特性を表 2 に示す.



Open circuit voltage [V]	10.7
Short circuit current [A]	0.109
Output [W]	0.613

透過型有機薄膜太陽電池のセル温度特性を図 5 に示す. セル温度特性は 2016/8/28~2016/10/31 の日射強度 7.7×10<sup>2</sup> W/m<sup>2</sup>~8.3×10<sup>2</sup> W/m<sup>2</sup>の測定データでセル温度係数を分析 した. 図5より, セル温度の増加に対し出力変換効率を直 線近似したところ, 傾きは+0.02%℃となり,50℃増加して も+1%なので影響が非常に僅かである. そのため, 出力の シミュレーション評価においてセル温度の影響は非常に 少ないものとし今回はセル温度による変換効率の変化を 考慮しないものとした. 研究で使用した透過型 OPV はコ ナルカ製のものであり, 製品紹介では温度特性は +0.005%℃5)とされている.



Fig.5 Conversion efficiency characteristic with cell temperature 図5 セル温度に対する変換効率特性

2016/8/31の積算日射量 7.51 kW/m<sup>2</sup>の晴天日の日射強度 に対する変換効率の変化は図6のようになった.日射強度 の増加に対しわずかに減少を示した.直線近似したとこ ろ傾き-0.4304,切片 1.5046 となり,日射強度特性は -0.43 %/(kW/m<sup>2</sup>)となった.



Fig. 6 Conversion efficiency characteristic with irradiance. 図 6 日射強度に対する変換効率特性



Fig. 7 Daily integrated output conversion efficiency of transparent OPV and simulation value from the measurement data of environmental factors

図 7 透過型 OPV の日別積算出力変換効率の実測値と環境因子によるシミュレーション値

# 3-4. 平面設置における透過型 OPV の実測値とシミュレ ーション値

*I-V*メータを使用し、屋外暴露状態の透過型 OPV の日別 積算変換効率の測定値  $\eta_{meas}$ を求め、図 7 に示す.測定期間 は 2016/8/27~2017/5/31 である.また、同時に 3-3 節で述 べた特性に基づき太陽光スペクトル分布、日射強度の測 定データから日別積算変換効率のシミュレーション値  $\eta_{simu}$ も示した.この様子を(5)式に示す.

日射強度特性は

$$r = \frac{-0.4304E + 1.5046}{1.5046} \tag{4}$$

シミュレーション値は

$$\eta_{simu} = \frac{A \int_{4:00}^{20:00} r \int_{350}^{700} E_{\lambda} \times Q_{\lambda} d\lambda dt}{\int_{4:00}^{20:00} E dt}$$
(5)

ただし、*E*<sub>*i*</sub>:分光放射照度[W/m<sup>2</sup>/nm], *Q*<sub>*i*</sub>:相対分光感度 [A/W/m<sup>2</sup>], *E*:日射強度[kW/m<sup>2</sup>]

シミュレーション値は,各日射強度による出力変換効率の特性を考慮して以下のように算出した.ηsimu は 2016/10/8 でのηmeasと等しい値になるようにAを定めた.

実測した透過型 OPV の変換効率の値は,太陽光スペク トル分布の測定データからのシミュレーション値に追従 する傾向がみられた.

# 3-5. 平面設置時の透過型 OPV の透過光特性

分光放射計を使用し,透過型 OPV の入射光と平面設置 時の透過光スペクトル分布を分析した.晴天日における スペクトル分布の時刻別データを3次元データで図8に 示す.一日を通して緑色の波長域が相対的に吸収されて いることが確認できる.







■0-100 ■100-200 ■200-300 = 300-400 ■400-500 ■ 500-600

(b) Transmitted spectral irradiance of transparent OPV
 (b) 透過型 OPV の透過光スペクトル
 Fig. 8 Solar spectral irradiance with time in fine day.
 図 8 時刻に対する太陽光スペクトル分布 (2016/9/30)

3-6. R/B 比

日射量4.52 kWh/m<sup>2</sup>の2016/10/2の一日を通した RGB に おける平均遮光率は79.3 %と求まった.また, 2016/10/2の透過型 OPV の入射光と透過光の R/B 比特性 の一例を図9に示す. R/B 比は2-2節で述べた式より算出 した. R/B 比は赤が多いほうが良く,10:1光合成が最大 になるとされている<sup>(3)</sup>.この日の R/B 比は,一日を通し て入射光に比べ透過光の方が大きくなり, R/B 比が増加 していることが確認された.また,他の日も同様な特性 となった.



図9 一日を通じた入射光と平面の透過光の R/B 比

# 4. 曲面に設置した透過型有機薄膜太陽電池の出 カ及び透過光特性

# 4-1. 出力測定

図 10 に示すような小さいサイズのビニールハウス(断面が直径 40 cm の円を半分に切った形で奥行が 60 cm)を 実際に作成し、そのビニールハウスに透過型 OPV を張り 付けて、測定を行った.ビニールハウスは図 10 に示すよ うに両端を南北方向に設置しており、セル配列は南北方 向と東西方向両方を測定した.つまり、セルの配列方向に よる出力の違いを見るために、ビニールハウスの向きは 変えずにセルの配列方向を変える南北と東西の 2 パター ンの測定を行った.太陽電池は両面発電のため、ビニール ハウス裏面側からの反射に影響を受けないよう、床面を 黒くした.

透過型 OPV は, 3-1 節と同様のコナルカ製 (30 cm×21 cm), red を使用した. 透過型 OPV の *I-V* カーブの測定も

3-1 節と同様である. 日射計は水平面に設置しており、その日射強度を入射エネルギーの基準とした.



## 4-2. 透過光測定

まず水平面での透過型 OPV の透過光測定も行った.次 に出力測定に使用したビニールハウスに透過型 OPV を全 面に張り付けて,曲面内での透過光を測定した.また,水 平面と曲面の透過光とを比較した.測定は4時から20時 まで10分間隔で行った.透過光測定に使用した透過型 OPV は出力測定に使用したものと同じものである.透過 光スペクトル分布の測定には3-1節と同様の*I-V*メータと 分光放射計を使用した.

水平面での測定はビニールハウスでの測定と同条件に するために,透過型 OPV の裏面に農業用透明ビニールを 張り,分光放射計で測定した.



(a) Horizontal plane
 (b) Greenhouse
 (a) 平面裏
 (b) 曲面裏
 (c) 時間
 Fig. 11 Measurement of spectroradiometer
 of transmitted radiation
 図 11 分光放射計による透過光測定

#### 4-3. 曲面設置時の透過型 OPV の出力特性

水平面の透過型 OPV とビニールハウスに張り付けた透 過型 OPV の時間と出力の関係を図 12 に示す.また,時間 と水平面の日射エネルギーを基準とした変換効率の関係 を図 13 に示す.測定は,同季節の晴天日に行った.ビニー ルハウスの両端は南北でセルを東西方向に配列した場合, つまり太陽の軌跡に合わせた場合は,中央の出力は正弦 波を描いているが,セルを南北方向に配列した場合,中央 の出力は 12:00 以外の時間帯は日射のムラに太陽電池の セルが影響を受け出力全体が減少している.東と西に張 り付けた透過型 OPV の出力は,太陽の入射角の違いによ り朝方と夕方にそれぞれ増加している.つまり,セルを南 北方向に配列した場合のほうが弧の長さは長くなるが, 日射のムラによるセル同士の影響をモジュール全体出力 が影響を受けやすいため,セルを東西方向に配列した場 合のほうがより多くの出力を得られたと考えられる.



(a) arranged the cell direction of east-west. (2017/12/2)
 (a) セルを東西に配置





Fig. 12 Maximum output characteristic of transparent OPV with time and with azimuth in fine day.



最大出力

水平面日射強度に対する太陽電池の出力,つまり出力比 は、セルを東西に配置した時,水平面と中央の値が同様の値 となり、セルを南北に配置した時,12:00 付近で水平面と中央 は同様の値となったが、それ以外では中央の値が小さくなっ た.





(a) セルを東西に配置



Fig. 13 Output ratio characteristic of transparent OPV with time in fine day.

#### 4-4. 出力積算量比較

水平面に設置した透過型 OPV の出力積算量を基準に, 曲面に設置してセル長辺を東西に配列したもの,セル長 辺を南北に配列したものの各方位別,東,中央,西の出力 積算量を比較したものを表3に示す.数値は水平面の透過 型 OPV の出力積算量を基準とした値に対する各方位の比 率となっている.セル長辺を東西に配列したものと,セル

図 13 晴天日における時間と各方位の透過型 OPV の 出力比率

長辺を南北に配列したものの出力積算量比率を,測定日 が異なる 2017 年 11 月~2018 年 1 月の数日ずつ各方位で 測定したデータを使用した.

Table3. Ratio of accumulated output of OPV modules on curved surface reference to accumulated output of OPV on horizontal surface.

表 3	水平面に設置した透過型 OPV を基準とした曲面に
	設置した透過型 OPV の出力積算量の比率

	Insolation			4	
	[kWh/m <sup>2</sup> ]	east	center	west	
	3.58	0.93	1.06	0.75	
	3.57	0.73	0.94	0.76	
east/west	3.52	0.90	1.07	0.79	
cells	3.42	0.75	0.95	0.76	
	2.30	0.79	0.93	0.73	
average		0.82	9.9	0.76	
	3.69	0.68	0.59	0.67	
	3.62	0.67	0.60	0.68	
south/north	3.52	0.72	0.63	0.62	
cens	2.25	0.66	0.61	0.65	
	2.00	0.66	0.60	0.57	
average		0.69	0.61	0.64	
Significant difference		0.01	0.00	0.00	

表3より東曲面に設置した透過型OPVの出力積算量比 率を長辺が東西と長辺が南北と比較してみると、セル長 辺を東西に配列した方が、各値及び平均値が大きくなっ た.セル長辺を東西にした場合は、各セルに入射する日射 強度がほぼ等しい.セル長辺を南北にした場合は各セル に入射する日射強度が異なるため、一番弱い出力のセル にモジュール全体の出力が影響を受けるためと推測され る.東曲面について、東西の平均値が0.90で南北の平均値 が0.72 となった.中央についても一番弱い出力のセルに 全体の出力が影響を受け東西の値が南北よりも大きくな った.平均値で東西が1.01、南北が0.69 である.

西側に設置してある透過型 OPV は設置環境の都合上夕 方から建造物の日陰がかかる位置になってしまっており, セル長辺の方向を変えても各値にあまり違いが見られず, 平均値もほぼ近い値になった.

また,各面ごと有意差検定を行ったが,全て5%を下回 ったため有意差が認められるデータである.

# 4-5 曲面設置時の透過型 OPV の透過光特性

曲面に透過型 OPV を設置し,入射面側と裏面側に分光 計を設置し,同時に入射光スペクトルと透過光スペクト ルを測定した.入射光は緑がピークの分布特性を,透過光 は緑が吸収された分布特性を示した.さらに,日射の弱い 朝方や夕方でも同様の透過光特性が確認できる.3-5 節で 平面での透過光を確認しているが,同様の透過光特性と なっている.



(b) Transmitted irradiance of transparent OPV installed on curved surface
(b) 曲面に設置時の透過光
Fig. 14 Solar spectral distribution with time in fine day.
図 14 時刻に対する太陽光スペクトル分布 (2017/1/20)

# 5. 結論

本研究では透過型 OPV を平面と曲面に設置し、出力特

性及び透過光評価を比較分析し,以下の結果を得た. 1)水平面で出力特性を分析した.そこで,日射強度,太 陽光スペクトル分布の環境因子を用いて平面の透過型 OPVの1日の出力積算量をシミュレーションした. 出力の測定値の積算量とほぼ同様の変化を再現できた.

2) 水平面で透過光特性を分析した.晴天日で入射光は 緑にピークを持ち,透過光は緑を吸収し光合成に適した 青と赤にピークが現れた.

3) 水平面で晴天日に青と赤の光量子束密度から R/B 比 を求めたところ入射光より透過光が R/B 比が大きい値で あることが確認された.

4) ビニールハウスの両端を南北方向に設置した場合の透 過型 OPV の最適なセル配列方向は,南北よりも東西であ る. 直径 40 cm のビニールハウスに透過型の OPV を設置 した場合,水平面の出力積算量に対する東曲面の出力積 算量の比率の平均値は,セル配列が東西で 0.90,南北で 0.72 となった.

5)曲面で透過光特性を分析した.透過光特性は緑を吸収 し,平面と同様の特性を示した.また、透過光率は約20% であり、弱光下にて育つ野菜への適用が検討される。

6)曲面の R/B 比を求めた結果, 平面と同様, 入射光より 透過光が大きい値を示した.

# 6. 参考文献

(1) WEBRONZA:「ソーラーシェアリングで広がる可能性」 http://webronza.asahi.com/business/articles/2015032 300005.html (2018/8/3) (2)株式会社秀農業経営コンサルタント「野菜と光環境」 https://www.hidefmc.com/hikari/ (2018/8/3) (3) 桑野航平:修士論文「窓発電や農作物栽培への応用可 能な光透過型有機薄膜太陽電池の開発」 (2017) (4)阿部他:光波長変換を利用したクロレラの増殖に関す る研究, Journal of JSES Vol. 30, No1 P. 35~40 (2004) (5) Konarka Power Plastic® 40 Series (製品情報リーフ レット) (6)黒川浩助 田中良 伊藤雅一:中規模·大規模太陽光 発電システム,オーム社,P.110 (2016) (7)飯野他: 複合機能を有する有機薄膜太陽電池の出力評 価及び透過光評価,太陽/風力エネルギー講演論文集 No. 96 P.341~344 (2016) (学会奨励賞受賞) (8)飯野他:透過型有機薄膜太陽電池をビニールハウスに 適用した時の出力及び透過光特性,太陽/風力エネルギー