

園芸施設の屋根を利用した太陽光発電

谷野 章 (地域開発科学科)・門脇正行 (農業生産学科)

緒 言

園芸施設で得られる太陽光を太陽電池 (photovoltaics; 以下, PV と略記) を用いて電力に変換すれば, 環境制御装置の電力源として利用できる可能性がある. ハウスの屋根に PV を設置することは発電の観点からは有望であるが, 作物へ到達する日射を PV が遮る結果となる. したがって, 作物生育への影響を最小限に留めつつ必要な発電エネルギーを得るためには, その PV の設置位置および配向の熟慮が必要である. 例えば南北棟ハウスに PV を配置する場合, 作物への影の影響を最小とするために, 北端屋根面に配置する方法が直感的に想定される. しかしながら, 南北棟屋根面に PV を設置することでどの程度のエネルギーが得られるかは不明である. そこで本研究では南北棟ハウスに PV を取付ける場合の設置位置および配向と発電量の関係を明らかにするために, 実験及びシミュレーションを行った.

方 法

1. 異なる傾斜角度で南北棟ハウスに設置した PV の発電エネルギー測定

試験用南北棟ハウス (間口 5.4 m, 奥行 18.0 m, 高さ 3.3 m) は南北から 7.03° 傾いていた. ハウス被覆資材は農 PO (0.15 mm) であった. 作物への影の影響を最小とするために, ハウスの屋根面北端にハウスの形状に沿うようにアーチ型に 4 枚のアモルファスシリコン PV を配置した (PV₁-PV₄). 被覆資材内側に PV 受光面を上空に向けてこれらの PV を貼り付けた. PV₁ および PV₂ は屋根東面に, PV₃ および PV₄ は西面に配置した. PV₁ および PV₃ の受光面が水平面となす角を 20° とした. PV₁ および PV₃ の下端に, PV 受光面と水平面のなす角が 28° となるように PV₂ および PV₄ をそれぞれ配置した. 使用した PV の大きさは, 受光素子部分の短辺が 412 mm, 長辺が 832 mm である. 被覆材を含めた PV の厚さは 1 mm, 質量は 0.42 kg であり, フレキシブルである. PV の定格最大出力は 24 W, エネルギー変換効率は 7% である. 1 kW/m^2 の光照射条件で最大出力を与える PV の動作点は 80 V, 0.3 A である. そこで, PV₁-PV₄ の出力端子にそれぞれ 270 Ω (= 80 V/0.3 A) の抵抗 R を接続して抵抗の両端の電圧 E を計測し, 出力を E^2/R から求めた. 試験ハウスの屋根部分 (地上 1.8 m よりも上の部分, 妻面は除く) の表面積は

108.1 m^2 であった. 屋根面におけるパイプの総投影面積は 5.6 m^2 であり, 屋根面の表面積の 5.1% であった. それに対し, PV₁-PV₄ の 4 枚の PV の受光素子総面積は 1.7 m^2 であり, 屋根部分の表面積の 1.5% であった. PV によりハウス内の作物へ到達する日射が遮られる量はパイプによるものよりも少なく, しかも最北端に PV を設置したため, ハウス内の作物へ到達する直達光が遮られる可能性は無かった.

2. ハウスに設置した PV の発電シミュレーション

太陽高度を α , PV の傾斜角を β , 太陽方位角を ψ_s , PV 法線の方位角を ψ_p , 時角を ω , 直達光と PV 法線がなす角 (入射角) を γ とした. 角度は全てラジアンとした. α および β はそれぞれ, 水平面を 0 rad とし, 水平面よりも上側を正, 下側を負とした. ψ_s および ψ_p の符号は, 真南を 0 rad とし, 西側を正, 東側を負とした. また, ω の符号は, 太陽の南中時を 0 rad, 午前中を負, 午後を正とした.

α を次式から算出した.

$$\alpha = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \quad (1)$$

ここで, φ は計測地点の緯度 ($35.5^\circ \text{N} = 0.620 \text{ rad}$), δ は太陽赤緯であり次式を用いて算出した.

$$\delta = \frac{23.45\pi}{180} \times \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right) \quad (2)$$

(2) 式で, n は 1 月 1 日を 1 とする日数である. また, ω は次式により算出した.

$$\omega = \frac{\pi}{12} (LAT - 12) \quad (3)$$

ここで, LAT は local apparent time (hour) である. ψ_s は次式から算出した.

$$\psi_s = \arccos\left(\frac{\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \varphi}\right) \quad (4)$$

(4) 式で, $\omega < 0$ の場合には $\psi_s < 0$ とするため -1 を乗じた. これより, γ は,

$$\gamma = \arccos\{\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(\psi_s - \psi_p)\} \quad (5)$$

と求められる. 次に法線面直達日射量 I_{ND} (W/m^2) (直達光に垂直な面で受ける日射量) を次式により求めた.

$$I_{ND} = I_0 p^{AM} \quad (6)$$

I_0 は太陽定数 (1367 W/m^2), p は大気透過率, AM は相

対エアマスである。 $\alpha \leq 0$ の場合には、 $I_{ND} = 0$ とした。これらの数値を用いて、以下の式から水平面直達日射量 I_{DH} (W/m^2) および水平面散乱日射量 I_S (W/m^2) を求めた。

$$I_{DH} = I_{ND} \sin \alpha \quad (7)$$

$$I_S = \frac{I_0 \sin \alpha (1 - p^{AM})}{2(1 - 1.4 \log_e p)} \quad (8)$$

I_{DH} および I_S の和から水平面全天日射量 I_{HT} (W/m^2) を求めた。 I_{HT} も、 $\alpha \leq 0$ の場合の値は全て 0 とした。傾斜面全天日射量 I_T (W/m^2) は、傾斜面直達日射量 I_{TD} (W/m^2)、傾斜面散乱日射量 I_{TS} (W/m^2)、地面からの反射成分 I_{Tp} (W/m^2) の和である。これらはそれぞれ次のように与えられる。 ρ は地面からの反射率で、0.20 とした。

$$I_{TD} = I_{ND} \cos \gamma \quad (9)$$

$$I_{TS} = \frac{I_S (1 + \cos \beta)}{2} \quad (10)$$

$$I_{Tp} = \frac{\rho \times I_{HT} (1 - \cos \beta)}{2} \quad (11)$$

$|\gamma| \geq 90^\circ$ の場合には $I_{TD} = 0$ とした。また、 $\alpha \leq 0$ の場合には $I_{TS} = I_{Tp} = 0$ とした。最後に、 I_T に PV の面積 S_{pv} ($=0.344 m^2$)、エネルギー変換効率 η (%) および被覆資材の透過率 τ を乗じ、PV1 枚の出力 P_{pv} (W) を算出した。

結果および考察

PV₁-PV₄ のピーク時出力は 9 月には 22-23 W、冬期には 10-15 W 程度であった。1 日の発電の推移は、ハウス屋根面東側に配置した PV₂ が午前中最も早くピークとなり、その直後に PV₁ の出力がピークとなった。午後になると太陽が西に移動し、PV₃、PV₄ の順で出力がピークとなった。1 日の発電エネルギーは PV₃ で最大となった。また、屋根面西側に配置した PV₃ および PV₄ の発電エネルギーが、同じ傾斜角で屋根面東側に配置した PV₁ および PV₂ の発電エネルギーよりもそれぞれ多かった。この理由は、

このハウスが南北から 7.03° ずれており、西側屋根面が、若干南向きとなっていたためである。 φ_p が等しく、 β が異なる 2 枚の PV の発電エネルギー比は、PV₂ と PV₁ では 1.01 とほぼ等しく、PV₄ と PV₃ では 0.92 と、 β の小さい PV₃ の発電エネルギーの方が多くなった。

シミュレーションによって PV が最適動作点で発電した場合の発電エネルギーの予測を行なった。 p の値は 0.70、 τ の値は 0.67 とした。これらは全日快晴日の場合の予測値である。 η は公称値の 7% とした。月毎に比較すると、7 月に PV₁-PV₄ の総発電エネルギーが 56.9 MJ となり、年間で最大であった。最も発電エネルギーが少なかったのは 12 月の 18.1 MJ で、7 月の 32% となった。全ての PV において 7 月の発電エネルギーが最大、12 月の発電エネルギーが最小であった。年間の PV₁-PV₄ の積算発電エネルギーを比較すると、最も発電エネルギーが多かったのは PV₃ の 119.4 MJ、最も発電エネルギーが少なかったのは PV₂ の 109.0 MJ であった。

本研究では、南北棟に PV を取り付ける場合について、実験およびシミュレーションで発電エネルギーの解析を行った。南北棟の屋根面に PV を設置する場合には天頂付近（低傾斜角）での設置が発電に有利であることが示された。そこで、南北棟の東屋根面への PV 装着を想定し PV の法線方向が東向きの場合に β を変数として発電エネルギーを計算した。いずれの季節でも PV を水平に設置する場合が最大の発電エネルギーを与えた。いずれの β でも冬に発電エネルギーが小さく夏に発電エネルギーが大きかった。夏期には $\beta = 90^\circ$ の PV の発電エネルギーは $\beta = 0^\circ$ それの 1/3 であった。 β が小さいほど夏と冬の発電エネルギーの差が大きかった。

謝辞 本研究の実施にあたり島根県の野田修司博士、石津文人氏、山口大学の田中俊彦教授からご協力いただいた。