

施設栽培における営農型太陽光発電の 経済性と環境負荷低減

Economical Efficiency and Environmental Load Reductions of Agrivoltaics in Greenhouses

増田 理気*・中島 昭彦**・前 匡鴻*・吉田 好邦***・松橋 隆治*

Riki Masuda

Akihiko Nakajima

Masahiro Mae

Yoshikuni Yoshida

Ryuji Matsuhashi

Abstract

Agrivoltaics is the dual use of land for agriculture and photovoltaics. It may be one of the solutions for installing more photovoltaics in Japan, to increase the capacity of photovoltaics for carbon neutral society until 2050. However, farmers' understanding is essential to prevail agrivoltaics system and it is important for them that agrivoltaics system increases their revenue. This paper estimates the potential power generation by replacing the glass of a greenhouse with semi-transparent Building Integrated Photovoltaics (BIPV) panels and heating load with preset temperature, and evaluates how much of the heating load could be covered. As a result, installing BIPV panels across the entire surface increases self-sufficiency in heating through power generation by BIPV, assuming heating is performed with an average Annual Performance Factor (APF).

Key words : Agrivoltaics, Solar Power Generation, Greenhouse, Building Integrated Photovoltaics, Heating

1. 序論

太陽光発電は2023年12月時点で73.1GWの導入容量を達成しており、日本において最も導入容量の大きい再生可能エネルギー電源である¹⁾。2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向けた太陽光発電の導入目標の一例として、2030年度に125GW、2050年度に300GWというものがある²⁾。カーボンニュートラル社会において、太陽光発電が主力電源となることが期待されている。しかしながら、国土面積あたりの太陽光発電の導入容量が世界主要国の中で最大級である日本では、太陽光発電に適した土地が減少しており、今後の導入ペースを目標達成の水準で維持できるのか、という懸念がある¹⁾。

このように太陽光発電に適した土地が求められる中で、耕作地を活用した営農型太陽光発電が検討されている^{1,2)}。2023年時点で国内の耕地面積は42970km²であり³⁾、太陽光パネルの単位面積あたりの発電容量を0.1kW・m²と仮定すると、耕地面積の5%に太陽光発電を導入した場合の設備容量は214.85GWとなる。この概算から分かるように耕作地の一部を太陽光発電に利用することができれば、太陽光発電の今後の導入拡大に大きく貢献すると期待される。

しかし、耕作地で太陽光発電を行うということは、光合成によって生長する作物の収穫を維持するという観点から、容易ではない。本来であれば作物に降り注ぐ太陽光を太陽光発電に使用することになるため、作物の収量の減少や品質の低下などの影響が考えられる。これまで耕作地における太陽光発電の導入について、さまざまな議論や研究が行われているが、収益性に対して課題や不明確な点が残されている⁴⁾。

本研究では、農家に対して有効な収益性を示すという観点から、環境調節が必要とされ、比較的動力光熱費の大きな施設栽培⁵⁾において、発電した電力を自家消費に用いることに着目した。施設栽培では、燃料価格高騰への対策やCO₂排出量の削減策として、ヒートポンプ式冷暖房が導入されるなど、A重油をはじめとした化石燃料から電力への転換が進められている^{6,7)}。このことから発電した電力の自家消費によって動力光熱費が削減するポテンシャルがあると考えられる。そして、施設栽培において、農業経営費の約12.4%を占める動力光熱費⁵⁾を削減できることは、農家に対して有効な収益性を示す助けになると考えられる。本研究では、農業用ハウスに半透明な建物一体型太陽光発電モジュール(BIPV)を設置した場合を想定する。そして、BIPVの発電電力量と冬季の主な電力需要である暖房負荷を算出し、発電した電力がどの程度の暖房負荷を賄い得るのかを検証している。

*東京大学工学部電気電子工学科

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

**株式会社カネカ

〒107-6028 東京都港区赤坂1-12-32

***東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

表1 温室の設計に関する定数

名称	記号	数値	単位
間口	w	10	m
奥行き	l	30	m
軒高	h	2.0	m
屋根の傾き	θ	30	°
被覆面積	A_g	535.28	m ²
床面積	A_s	300	m ²

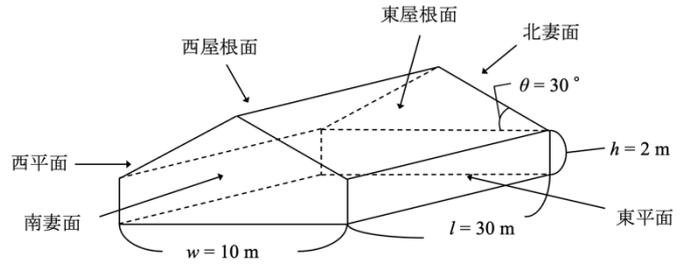


図1 温室の設計

月番号	i	1, 2, ..., 12	month
各月の最大日数	J_i	28, 30, 31	day
日番号	j	1, 2, ..., J_i	day
時間番号	k	1, 2, ..., 24	hour
日射熱取得率 BIPV	G_{pv}	0.67	-
ガラス	G_{glass}	0.90	-
熱貫流率	h_t	5.8	W·m ⁻² ·K ⁻¹
隙間換気伝熱係数	h_v	0.5	W·m ⁻² ·K ⁻¹
風速に関する補正係数	f_w	1.0	-
保温被覆の熱節減率	f_r	0.30	-
温室の設定温度	T_{in}	5.0	°C
昼(19時から翌6時)			
夜(7時から18時)	T_{in}	20	°C
標準試験条件の日射強度	GS	1000	W·m ⁻²

表2 暖房負荷と発電電力量に関する変数

変数	記号	単位
月間暖房負荷	Q_i	W
貫流熱負荷	$q_{t,i,j,k}$	W·m ⁻²
隙間換気伝熱負荷	$q_{v,i,j,k}$	W·m ⁻²
地中伝熱負荷	$q_{s,i,j,k}$	W·m ⁻²
外気温	$T_{out,i,j,k}$	°C
吸収日射エネルギー	$I_{abs,i,j,k}$	W
日射エネルギー吸収率	η	-
垂直面の日射量	$I_{wall,i,j,k}$	W
屋根面の日射量	$I_{roof,i,j,k}$	W
月間発電電力量	EPm_i	Wh
標準太陽電池アレイ出力	$KPAS_i$	W·m ⁻²
太陽電池の設置面積	A_{pv}	m ²
太陽電池への月積算日射量	HAm_i	Wh·m ⁻²

2. 手法

2.1 概要

本研究ではガラス温室に以下の2つの形式で半透明なBIPVを導入することを想定し、それぞれの形式で各月の発電電力量と暖房負荷の比較を行った。ただし、電力需要となりうる環境制御としては、暖房のみを考慮し、冷房・換気・灌水などは考慮していない。

- Case 1; 全面にBIPVを設置
- Case 2; 垂直面にBIPV, 屋根面は通常のガラス (垂直面とは図1における南北妻面と東西平面)

Case 1は発電量を重視した設計であり、Case 2は日射の取得を重視した設計とした。太陽電池の設置面積 A_{pv} [m²] は、Case 1で約535 m²、Case 2で約189 m²であり、Case 1はCase 2に比べて約2.8倍の設置面積となった。ガラス温室のモデルを図1に示す。中型の両屋根型を想定し、間口10 m・奥行き30 m・軒高2 m・屋根の傾き30°とした。表1には、温室の設計に関する定数を示し、表2には、暖房負荷と発電電力量の算出に用いられる変数を示す。

環境要素は気温と日射量のみを考慮し、風速・湿度などは考慮しないこととした。気温と日射量のデータは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の日射量データベースMETPV-20を用いることとし、エリア名「東京都」・地点名「東京」の1時間毎の気象データを1年分取得した。ただし、METPV-20は2010年から2018年の気象データの中から各月を代表する年を選定し、それらを組み合わせることで作成されるため、月毎に気象データを観測した年が異なることに注意が必要である⁸⁾。今回は対象期間の中で、日射量が平均的な1年になるように作成されたデータを使用している。

2.2 月間暖房負荷 Q_i の算出

月間暖房負荷 Q_i は式(1)に示すように1時間ごとの暖房負荷を積算することで得られる。各時間の暖房負荷は、貫流熱負荷 $A_g \cdot q_{t,i,j,k}$ ・隙間換気伝熱負荷 $A_g \cdot q_{v,i,j,k}$ ・地中伝熱負荷 $A_s \cdot q_{s,i,j,k}$ の和から吸収日射エネルギー $I_{abs,i,j,k}$ を差し引くことで得られる。

$$Q_i = \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{24} \{(A_g \cdot (q_{t,i,j,k} + q_{v,i,j,k}) + A_s \cdot q_{s,i,j,k}) \cdot f_w - I_{abs,i,j,k}\} \quad (1)$$

where

$$q_{t,i,j,k} = h_t \cdot (T_{in} - T_{out,i,j,k}) \cdot (1 - f_r)$$

$$q_{v,i,j,k} = h_v \cdot (T_{in} - T_{out,i,j,k})$$

$$q_{s,i,j,k} = \begin{cases} -24, & T_{in} - T_{out,i,j,k} < 12.5 \\ -12, & 12.5 \leq T_{in} - T_{out,i,j,k} < 17.5 \\ 0, & 17.5 \leq T_{in} - T_{out,i,j,k} \end{cases}$$

$$I_{abs,i,j,k}$$

$$= \begin{cases} \eta \cdot (I_{wall,i,j,k} \cdot G_{glass} + I_{roof,i,j,k} \cdot G_{glass}), & \text{(Case 1)} \\ \eta \cdot (I_{wall,i,j,k} \cdot G_{pv} + I_{roof,i,j,k} \cdot G_{glass}), & \text{(Case 2)} \end{cases}$$

吸収日射エネルギーは、METPV-20 から得られる各面の斜面日射量 $I_{wall,i,j,k}$, $I_{roof,i,j,k}$ に、日射熱取得率 G_{glass} , G_{pv} と日射エネルギー吸収率 η を乗算し、足し合わせることで算出した。日射エネルギー吸収率については、推定が困難であったため、 $\eta = 0.3, 0.5, 0.7$ の3つの場合を想定し、それぞれの場合における吸収日射エネルギーを算出した。

温室内の設定温度 T_{in} は、施設園芸省エネルギー生産管理マニュアル⁹⁾を参考に、いちごの生育適温である、昼気温 20°C 、夜気温 5°C に設定した。

地中伝熱負荷 q_t ・熱貫流率 h_t ・隙間換気伝熱係数 h_v ・風速に関する補正係数 f_w ・保温被覆の熱節減率 f_r ・日射熱取得率の値については、文献^{10,11)}を参照した。

2.3 月間発電電力量 EPm_i の算出

月間発電電力量は、日本産業規格 JIS で定められている太陽光発電システムの発電電力量推定方法¹²⁾を用いて次のように算出した。

$$EPm_i = KPAS_i \cdot A_{pv} \cdot \frac{HAM_i}{GS} \quad (2)$$

標準太陽電池アレイ出力 $KPAS_i$ は、標準試験条件下での出力に月別総合設計係数を乗算したものであり、本研究では約 $0.07 \text{ kW} \cdot \text{m}^2$ と想定した。 A_{pv} は太陽電池の設置面積、 HAM_i は太陽電池に対する月積算日射量である。 GS は標準試験条件下での日射強度であり、日本産業規格 JIS によって、 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^2$ と定められている¹³⁾。

3. 結果

3.1 月間暖房負荷

図2にCase1における月間暖房負荷を日射エネルギー吸収率ごとに示している。また、表3では、具体的な暖房負荷と発電電力量の値を示している。ただし、ここにおける暖房負荷とは、温室内部を設定温度に保つために供給する必要がある熱量を指し、消費電力量とは異なることに注意が必要である。まず、5月から9月は月間暖房負荷が30kWh

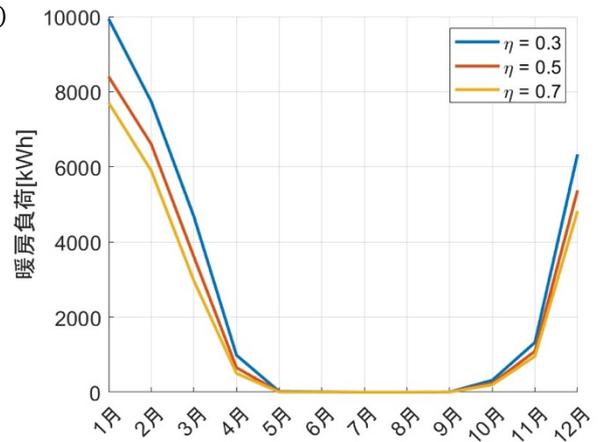


図2 全面にBIPVを設置した場合(Case 1)の月間暖房負荷

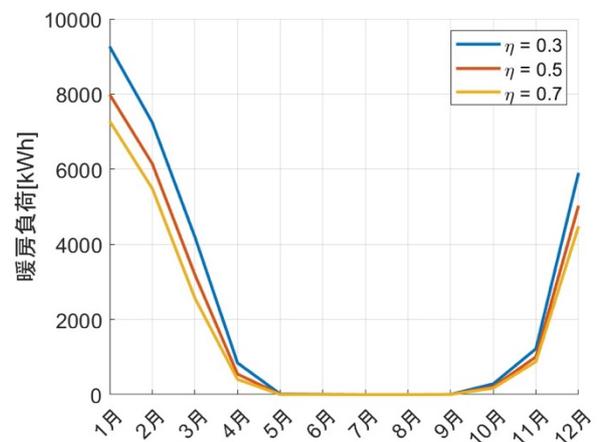


図3 垂直面にBIPVを設置した場合(Case 2)の月間暖房負荷

未満であり、他の月に比べると無視できる程度であった。暖房が必要とされるのは10月から4月の計7ヶ月であり、特に12月から2月にかけての3ヶ月の暖房負荷が大きかった。また、日射エネルギーの吸収が暖房負荷の低減に寄与していることが確認できた。Case 1の1月に着目すると、日射エネルギー吸収率が0.3, 0.7のときのそれぞれの暖房負荷は、9939 kWh, 7709 kWhであり、日射の吸収率が2.3倍になることで、暖房負荷が77.6%に抑えられたことが分かる。

図3にはCase 2における月間暖房負荷を日射エネルギー吸収率ごとに示している。暖房負荷の推移の仕方はCase 1と同様であるが、Case 1に比べて全体的に暖房負荷が小さかった。1月の日射エネルギー吸収率が0.3の時に着目すると、Case 2の暖房負荷は9264 kWhであり、Case 1の9939 kWhに比べて6.8%小さくなっていった。これは、Case 2で屋根面を通常ガラスにしたことで、日射熱取得率が0.67

表3 各月の暖房負荷と発電電力量 単位[kWh]

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
Case 1	月間暖房負荷 $\eta = 0.3$	9939	7735	4678	985	21	12	0	0	6	319	1325	6333
	$\eta = 0.5$	8402	6605	3607	653	11	7	0	0	5	241	1090	5374
	$\eta = 0.7$	7709	5898	2968	502	6	5	0	0	4	197	956	4823
	発電電力量	3102	2825	3776	4082	4802	3878	4363	4052	3062	2763	2438	2513
Case 2	月間暖房負荷 $\eta = 0.3$	9264	7243	4197	843	17	9	0	0	5	285	1220	5902
	$\eta = 0.5$	7991	6148	3193	546	8	6	0	0	4	209	1003	5030
	$\eta = 0.7$	7282	5487	2567	409	3	3	0	0	3	171	878	4478
	発電電力量	1005	793	958	970	1063	868	941	915	732	729	703	779

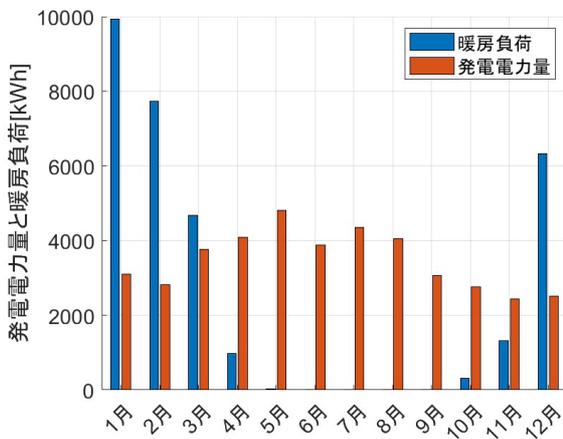


図4 全面に BIPV を設置した $\eta = 0.3$ の場合の月間発電電力量と月間暖房負荷

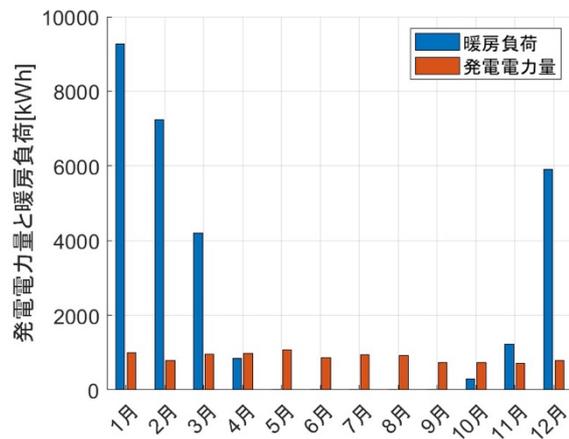


図5 垂直面に BIPV を設置した $\eta = 0.3$ の場合の月間発電電力量と月間暖房負荷

から 0.90 となり、ハウス内に取り込まれる日射エネルギーが増えたことによるものと推察される。

3.2 月間発電電力量

図4には、Case 1における発電電力量を日射エネルギー吸収率が 0.3 の場合の暖房負荷と共に示している。発電電力量は5月に最も多く、暖房負荷の大きくなる冬季は相対的に発電電力量が小さくなっていた。また、4月から11月にかけての8ヶ月は発電電力量が暖房負荷を上回っているのに対し、12月から3月の4ヶ月は暖房負荷の方が大きかった。ただし、例えばヒートポンプ式の暖房では使用電力量以上の熱量を供給することが可能である。そこで、通年エネルギー消費効率(APF: Annual Performance Factor)がいくつであれば発電した電力量で暖房負荷を賄い得るのかを計算した。その結果、12月から3月では、それぞれ APF が、2.52, 3.20, 2.74, 1.24 であれば、発電電力量が暖房負荷に相当することが分かった。2016 年度でのエアコンの APF は

4.5 から 7.3 程度である¹⁴⁾ことを踏まえると、発電した電力で全ての暖房負荷を賄える可能性があることが示された。

図5には、Case 2における発電電力量を日射エネルギー吸収率が 0.3 の場合の暖房負荷と共に示している。発電電力量は5月が最も多いものの、月毎の変動はCase 1ほど見られずほぼ一定の値となった。また、Case 1と同様に、12月から3月について、発電した電力で暖房負荷を賄うために必要となる APF はそれぞれ、7.58, 9.22, 9.13, 4.38 と計算され、特に12月から2月の期間は発電電力のみでは暖房負荷を賄いきれないことが分かった。

4. まとめと今後の展望

本研究では、ガラス温室のガラスを半透明な BIPV に置き換えた場合に、どの程度の発電量を得られるのか、そして想定される暖房負荷を賄いうるのかについて検証を行った。その結果、全面に BIPV を設置すると、暖房負荷の

大きな冬季でも太陽光発電での自給自足の可能性が示された。その一方で、屋根面には BIPV を設置せず、垂直面のみ BIPV を設置したケースでは、冬季の暖房負荷を発電電力で賄うことは難しく、電力需要の一部を担う形になることが示された。

ただし、現時点では、1 時間ごとの電力消費や蓄電設備の活用などの検証には至っておらず、1 ヶ月の暖房負荷と発電電力量の各合計値を比較するにとどまっている。自給自足の可能性が示された Case 1 についても 1 時間ごとの電力運用を考慮し、より詳細に検証していく必要がある。また、環境制御についても、現段階では暖房のみが対象となっている。換気や夏季の冷房なども対象に加えることで、より現実的かつ 1 年を通した電力需要と発電電力量の比較が可能となる。最後に、植物の光合成への影響を考えていく上では、単に日射エネルギーの透過を考えるだけでは不十分であり、太陽光パネルやガラスの吸収スペクトルをもとに、光合成有効光量子束密度(PPFD)を推定することが必要である。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁; 今後の再生可能エネルギー政策について, (2024), pp.37-54,
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/062_01_00.pdf (アクセス日 2024.12.2).
- 2) 一般社団法人太陽光発電協会; 2050 年カーボンニュートラル実現に向けて, 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会(第 39 回会合), (2021), p.8,
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/039/039_007.pdf (アクセス日 2024.12.2).
- 3) 農林水産省; 令和 5 年耕地面積(7 月 15 日現在), (2023),
https://www.maff.go.jp/tokei/kekka_gaiyou/sakumotu/menseki/r5/koutu/index.html (アクセス日 2024.12.2).
- 4) 谷野章; 農業施設に関わる研究・技術の最近の展開, 農業施設, 49-1(2018), pp.1-7.
- 5) 農林水産省; 令和 4 年農業経営隊の経営収支, (2023),
https://www.maff.go.jp/tokei/kekka_gaiyou/noukei/einou/r4/einou_syusi/index.html (アクセス日 2024.12.2).
- 6) 石井雅久; 施設園芸における CO2 ゼロエミッションを実現するためのヒートポンプおよびゼロエネルギーグリーンハウス(ZEG)の開発, (2023),
https://www.maff.go.jp/kanto/kikaku/midori_syokuryou/attach/pdf/setsumeikai_shiryuu_5-8_2.pdf (アクセス日 2024.12.2).
- 7) 農林水産省; 施設園芸等燃料価格高騰対策事業, (2023),
https://www.maff.go.jp/seisan/ryutu/engei/nenyu/attach/pdf/nenyu_taisaku1-24.pdf (アクセス日 2024.12.2).
- 8) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構; NEDO 日射量データベースの解説書 WEB 版 Ver3.0, (2021.4), pp.6-11,
<https://www.nedo.go.jp/content/100930737.pdf> (アクセス日 2024.11.29).
- 9) 農林水産省生産局; 施設園芸省エネルギー生産管理マニュアル(改訂 2 版), (2018), p.35,
<https://www.maff.go.jp/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-112.pdf> (アクセス日 2024.12.2).
- 10) 中島昭彦; カーボンニュートラルを目指した次世代 BIPV の開発, 「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(日本太陽光発電学会学術講演会)予稿集, 3(2023), p.26.
- 11) 岡田益己; 暖房 温室設計の基礎と実際, (1980), pp.182-204, 養賢堂.
- 12) 日本産業規格; JISC8907 太陽光発電システムの発電電力量推定方法, (2005),
<https://kikakurui.com/c8/C8907-2005-01.html> (アクセス日 2024.11.29).
- 13) 一般社団法人日本電気工業会(JEMA); JISC8960 太陽光発電用語, (2012), P.33, <https://kikakurui.com/c8/C8960-2012-01.html> (アクセス日 2024.11.30).
- 14) 資源エネルギー庁; エアコンディショナーの現状について, (2019), p.9,
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/syo_energy/air_denki/pdf/002_04_00.pdf (アクセス日 2024.12.2).