

営農型発電システム設計における日射量分布と発電効率の評価

Evaluation of Solar Radiation Distribution and Power Generation Efficiency in Agrivoltaic System Design

鄭 聡 * · 前 匡 鴻 * · 松 橋 隆 治 *
Cong Zheng Masahiro Mae Ryuji Matsuhashi

Abstract

This study evaluates the performance of agrivoltaic systems by comparing two structural designs: the trellis-type and the vertical-type configurations. The research focuses on the influence of solar radiation on crop growth and power generation efficiency, using “bifacial_radiance”, a simulation tool based on ray-tracing techniques. The results reveal that the trellis-type system achieves higher overall annual power generation, with peak performance during spring and summer, but forms distinct shaded areas suitable for shade-tolerant crops like strawberries and lettuce. Conversely, the vertical-type system evenly distributes sunlight and performs better during winter, making it suitable for sun-demanding crops such as corn and wheat. Seasonal weather effects, such as reduced radiation during the rainy season (June-July) and typhoon impacts in September, are also analyzed. The findings highlight the importance of considering regional climate conditions, energy demands, and crop selection in optimizing agrivoltaics system designs. Future research should focus on integrating field data and economic analysis to further enhance system performance and sustainability.

Key words : Agrivoltaics, Solar Radiation, Trellis-type, Vertical-type, Sustainable Energy Production

1. 序論

世界的なエネルギー需要の増加に伴い、持続可能かつ環境に配慮したエネルギー資源を活用した発電を推進することは、エネルギー供給の脱炭素化を実現する上で重要な課題である。その中でも、太陽光発電 (Photovoltaics, PV) 技術は、急速なコストの低下と性能の向上により注目を集めており、世界における累積設置容量はすでに 1581 GW を超えている。また、2032 年までに太陽光発電の設備容量が石炭火力発電を上回り、世界最大のエネルギー源となると予想されている¹⁾。しかしながら、太陽光発電のさらなる普及においては、適切な土地利用の確保が大きな課題となっている。具体的には、日射量が豊富な平地の多くは農地として利用されており、太陽光発電設備の設置が農地との競合を引き起こすことが懸念されている。この競合は、耕作地の減少や生物多様性の損失といったリスクを伴う²⁾。

このような課題を解決するための革新的な方法として、近年注目されているのが営農発電 (Agrivoltaics) である。営農発電とは、農地に架台を設置し、その上に太陽光パネルを配置することで、作物の栽培と発電を同時に実現するシステムを指す。このシステムでは、パネルの配置間隔や角度を適切に調整することによって、地表に届く日射量を

確保しつつ、作物への影響を最小限に抑える工夫がなされている。営農発電は、農地の収益性を向上させるだけでなく、土壌水分の保持や水資源の効率的な利用³⁾、さらには極端な気候条件への耐性強化といった多面的な利点を有している⁴⁾。太陽光パネルの配置密度、設置高さ、傾斜角度を最適化することで、エネルギー供給と作物生産の間での資源配分を調整することが可能であり、農地の多機能化を通じて持続可能なエネルギー供給が期待されている。

このように、営農発電は食料とエネルギーの持続可能な供給を実現するための新たな形態として、地球規模の課題解決に向けた大きな可能性がある。本論文は、営農発電システムにおける日射量の影響を評価し、作物および太陽光発電効率への相互作用を明らかにすることを目的とする。営農発電システムの設計指針を最適化し、そのコスト効率と環境適合性を向上させる技術的基盤を提供する。

2. 日射量の計算

図 1 に示すパネルが受ける総日射量は、直達日射、散乱日射、反射日射の合計として算出される⁵⁾。パネルの設置面は通常傾斜しているため、傾斜面における総日射量を評価するには、傾斜面に入射する全天日射の式を用いる必要がある。このとき、パネルが特定の時刻および日付に受ける総日射量 IR_{PV} は、直達日射 IR_{PV}^{Direct} 、反射日射 $IR_{PV}^{Reflected}$ 、および散乱日射 $IR_{PV}^{Diffuse}$ の合計として表され

*東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
E-mail : zheng@enesys.t.u-tokyo.ac.jp

る⁴⁾。

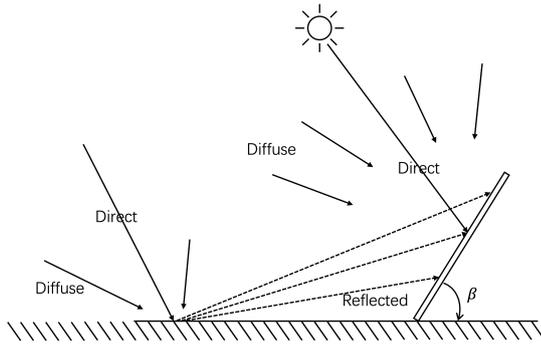


図1 パネルに届く日射成分

$$IR_{PV} = IR_{PV}^{Direct} + IR_{PV}^{Diffuse} + IR_{PV}^{Reflected} \quad (1)$$

地表面における日射量 IR_{ground} は、水平面直達日射 $IR_{ground}^{Horizontal}$ と散乱日射 $IR_{ground}^{Diffuse}$ の合計として計算される⁵⁾。営農発電システムにおいては、パネルが形成する影が地表面の日射量に大きな影響を及ぼす、この影の影響を評価するためには、影の範囲を表す情報 i が必要であり、この情報は「影の有無」を示すブール値（影あり=0、影なし=1）として処理される。影の情報を効率的にデータ処理に利用することで、地表面の日射量の正確な評価が可能となる。

$$IR_{ground} = i \cdot IR_{ground}^{Horizontal} + IR_{ground}^{Diffuse} \quad (2)$$

3. 営農発電の設計

3.1 シミュレーションツール

営農発電システムの評価において、本論文では $bifacial_radiance$ ⁶⁾ を用いたモデリングを実施する。 $bifacial_radiance$ は、レイトレーシングツールである RADIANCE⁷⁾ を基盤とした太陽光発電シミュレーターである。このシミュレーターを使用することで、パネルの配置、設置地点、日時を指定することにより、精密なシミュレーションが可能となる。特に、パネルおよび地面に到達する日射量は、レイトレーシング技術を通じて計算される。

3.2 シミュレーションの条件

本論文では、鹿児島県 (31° 35' 49" N, 130° 33' 26" E) を対象地域とし、両面発電型パネルを用いた営農発電システムの2つの構造タイプについて比較評価を行った。評価期間は2020年1月1日から2020年12月31日までとし、農地面積はそれぞれ 30 m×30 m である。

設置タイプの1つ目は藤棚式であり、パネルの設置高さは4m、南向きで傾斜角は35°とした、パネルは12枚×3列の構成で設置され、各列の間隔は10mに設定した。2つ目は垂直式であり、パネルの設置高さは3.5m、東向きで傾斜角は90°とした。パネルの配置は藤棚式と同様に12枚

×3列であり、列間隔も10mに設定している。シミュレーションの様子は図2に示す。

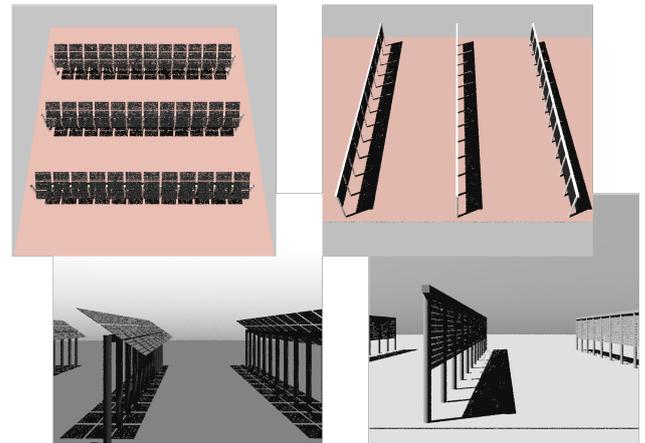


図2 $bifacial_radiance$ におけるシミュレーションモデル (左：藤棚式、右：垂直式)

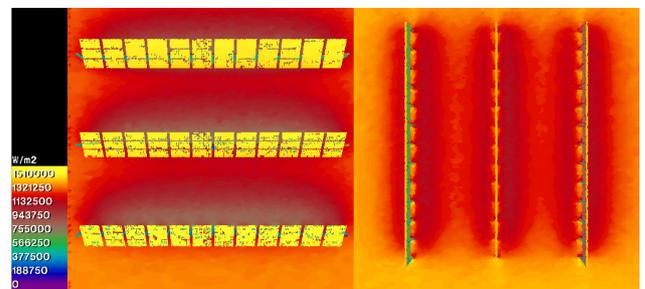


図3 年間日射量 (左：藤棚式、右：垂直式)

4. 結果

4.1 日射量の評価

図3に藤棚式および垂直式の2つのタイプにおける年間日射量の分布を示す。シミュレーション結果から、2つの構造の特徴と地表面の日射量への影響が明確に異なることが分かる。

藤棚式では、パネルの下に明確な影のエリアが形成されており、地表面日射量の分布に顕著な不均一性が見られる。特に、パネル直下のエリアでは日射量が大幅に減少している一方で、列間のエリアでは比較的高い日射量が確保されている。このような特徴により、藤棚式は耐陰性の高い作物（例：イチゴ、レタス）の栽培に適していると考えられる。垂直式では、影の形成が比較的均一であり、全体として地表面の日射量分布の空間的变化は少ない。この均一性は、日射を多く必要とする作物（例：トウモロコシ、小麦）の栽培に有利であると考えられる。また、垂直式の設計により、影の影響が特定のエリアに集中せず、農地全体での効率的な土地利用が可能となることが示唆される。

これらの結果は、営農発電システムにおける構造設計が地表面日射量に大きな影響を与え、それに応じた作物選択が必要であることを示している。藤棚式と垂直式のそれぞれ

れの特徴を最大限に活用することで、農業生産と発電効率の両立が期待できる。

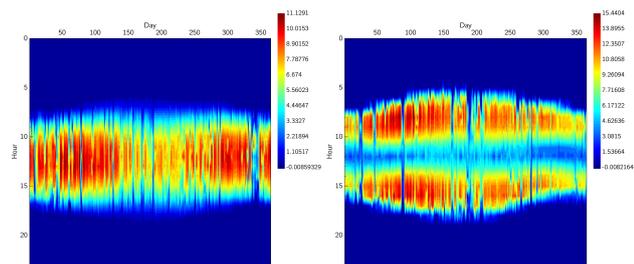


図4 発電量の時間的分布 (左: 藤棚式, 右: 垂直式)

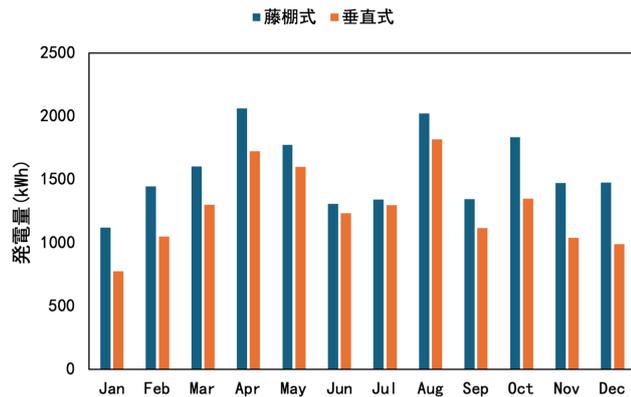


図5 月別発電量

4.2 発電量の評価

図4に藤棚式と垂直式の営農発電システムにおける発電量の時間的分布を表すヒートマップを示す。横軸は日付(年間365日)、縦軸は時間(1日内の時間帯)を表しており、色が発電量の分布を可視化している。

藤棚式では、発電量のピークが主に正午前後に集中しており、年間を通じて発電のパターンが比較的一貫している。特に春と秋には発電量が増加し、太陽高度が高い時期における高効率な発電が確認される。一方で、朝夕の発電量は小さく、発電量の大半は日中の太陽高度が高い時間帯に占められる。垂直式では、1日の発電量が対称的に分布しており、太陽の高度角に強く影響される特徴がある。この発電分布は太陽の軌道と一致しており、正午の時間帯では発電量が少なく、朝と夕方に発電量が増加し、そこから徐々に減少する。

図5に藤棚式および垂直式における月別発電量の比較を示す。この結果から二つの構造の発電量における季節変動および特性の違いが明確に示されている。

藤棚式は年間を通じて垂直式より高い発電量を示しており、春と夏にかけてピークに達しており、特に4月と8月において最も高い発電量を記録している。これは垂直式が太陽高度の影響を受けにくい反面、正午前後にパネルにおける直達日射が小さくなることに起因している。一方、6月および7月は梅雨の影響で日射量が減少し、発電量が低下

している。この時期は発電量の減少幅が似通っており、両者の差は比較的小さい。また、9月には台風による日射条件の変動により発電量がさらに低下している。

5. まとめ

本論文では、営農発電システムにおける藤棚式と垂直式的设计特性を比較し、それぞれのシステムが発電量や地表面日射量に与える影響を評価した。営農発電システム的设计において、気候条件や電力需要、作物の特性を考慮することの重要性を示している。藤棚式と垂直式は、それぞれ異なる特性を持ち、それぞれの強みを活かすことで、発電と農業生産の効率を最大化することが可能である。今後は、実地試験を通じて得られる日射量や作物の生育データを基に、営農発電システムに適した作物の選定や最適な組み合わせを検討する必要がある。また、設置コストや運用コストを考慮した上で、投資回収期間や長期的な収益性を評価するための経済分析を行うことが求められる。

参考文献

- 1) IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>(アクセス日 2024.10.11)
- 2) Al Mamun, Mohammad Abdullah, et al. A review of research on agrivoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2022), 161: 112351.
- 3) Elamri, Yassin, et al. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. Agricultural water management, (2018), 208: 440-453.
- 4) Reca-Cardena, J., & López-Luque, Rafael. Design principles of photovoltaic irrigation systems. In: Advances in Renewable Energies and Power Technologies. Elsevier, (2018), p. 295-333.
- 5) Abidin, Mohd Ashraf Zainol; MAHYUDDIN, Muhammad Nasiruddin; ZAINURI, Muhammad Ammirul Atiqi Mohd. Optimal efficient energy production by PV module tilt-orientation prediction without compromising crop-light demands in Agrivoltaic systems. IEEE Access (2023).
- 6) Ayala Pelaez and Deline, (2020). bifacial_radiance: a python package for modeling bifacial solar photovoltaic systems. Journal of Open Source Software, 5(50), 1865.
- 7) Ward, Gregory J; The RADIANCE lighting simulation and rendering system. In: Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (1994), p. 459-472.