

施設栽培の環境制御を考慮した光合成量推定による 営農型太陽光発電のシステム設計手法

System Design Method of Agrivoltaics with Photosynthesis Estimation Considering Environment Control of Greenhouse Cultivation

増田 理気^{*}・前 匡鴻^{*}・吉岡 剛^{*}・松橋 隆治^{*}

Riki Masuda

Masahiro Mae

Tsuyoshi Yoshioka

Ryuji Matsuhashi

Abstract

Agrivoltaics is gaining attention for balancing agriculture and renewable energy in Japan, with greenhouse cultivation showing high potential due to its inherent energy demand. However, designing systems that ensure sufficient crop yields while managing complex environmental controls remains a challenge. This study proposes a design method for greenhouse strawberries, focusing on optimizing ventilation, CO₂ enrichment, and shading to maximize photosynthesis.

Using a simulation based on FvCB and Two-Leaf models, canopy photosynthesis were estimated under semi-transparent solar panels. Verification results revealed that around noon, photosynthesis rates with panels are comparable to those without, as conventional methods also require shading to maintain CO₂ levels. Under a PPFD transmittance of 62.3%, both the monthly photosynthesis from November to March and the total over five months met the MAFF's 80% yield requirement. The results also indicate that considering environmental control is essential for accurately estimating crop yields when installing solar panels. However, several issues remain, including the need for further analysis of morning and evening photosynthesis, humidity effects, and environmental dynamics.

Key words : Agrivoltaics, Greenhouse, Environmental Control, Photosynthesis, System Design

1. 序論

日本におけるエネルギーと農業の問題は、カーボンニュートラルや自給率、安全保障の観点から、社会課題としての重要度が増してきている。エネルギー分野では、カーボンニュートラルに向け、野心的な再生可能エネルギー導入目標を掲げている¹⁾。特に日本で普及している太陽光発電に関しては、国土面積あたりの設置率が世界トップクラスで、新たな導入適地を創出することが課題となっている¹⁾。さらにメガソーラーの不適切な導入を発端に、社会的受容性が下がっていることも課題となっている²⁾。

一方で、農業分野では、低所得や就農人口の減少³⁾という慢性的な課題に加え、国際情勢の不安定化やカーボンニュートラルから化石燃料への依存という課題が現在化しており、早急な対策が求められている⁴⁾。

そこで、近年注目を集めているのが、営農型太陽光発電（Agrivoltaics）である。営農型太陽光発電とは、一時転用許可を受け農地に太陽光パネルを設置し、同じ土地で農業と発電事業を両立させるというシステムである⁵⁾。2020年以降から国内外ともに本分野の研究が活発化してきており⁶⁾、日本国内では FIT 制度の利用という形で露地栽培を中心に導入事例が増加している⁷⁾。

エネルギー分野にとっては、太陽光パネルの導入余地として全国 400 万 ha 以上もの農地がポテンシャルとして検討できるというメリットがある⁸⁾。仮に 400 万 ha の 1% に太陽光発電を導入すると、単位面積あたりの発電容量を 0.1kW・m² として、40GW となる。2024 年 12 月時点の導入量が 75.6GW であり、2030 年目標が約 110GW である¹⁾ことを踏まえると農地のポテンシャルが十分に大きいことがわかる。一方で農業分野にとっても、再生可能エネルギーの利用によって化石燃料への依存を解消することや発電事業によって農家の収益を増加させることなどがメリットとして認識されており、農村の豊富な再生可能エネルギーを地産地消するためのエネルギーマネジメントが研究されている⁹⁾。

しかし、FIT 制度の利用により、売電による収益が、農業による収益を大きく上回る構造となっていたために、発電事業に注力し、農業を半ば放棄するような形となってしまう事例が発生しており、規制の対象となっている¹⁰⁾。本来、農業を行う土地で農業が放棄されてしまうことは、食料の供給不足を招き、食料品の高騰や食料自給率の低下など国家の経済および安全保障の観点から望ましくない。さらに FIT の買取価格の低下や FIT 制度から FIP 制度への移行が進み、発電事業での採算性は大きく変わることが予想される。これらの事情を踏まえ、農業と発電事業を両立する新しいシステムの設計が求められている。

農業は水稻栽培を含む露地栽培と施設栽培に大別され、

^{*} 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 : masuda@enesys.t.u-tokyo.ac.jp

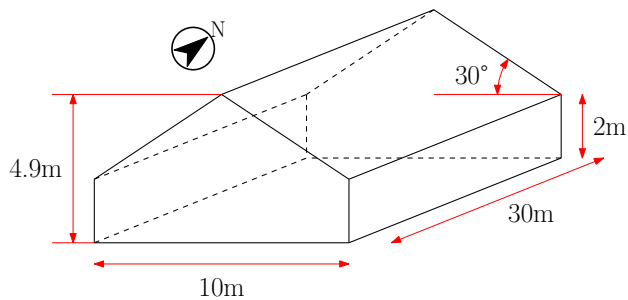


図1 ハウスの設計

営農型太陽光発電の導入を踏まえると両者にはそれぞれ異なる特徴がある。露地栽培は大きな耕地面積を持つため、太陽光発電の導入容量のポテンシャルが大きいという長所がある。一方で、施設栽培では、冷暖房や換気、灌水などの環境制御において電力需要があり、発電電力の自家消費率を向上させる余地がある¹¹⁾。また、施設栽培では遮光という日射を遮る環境制御を実施しているケースがあり、従来の栽培方式が営農型太陽光発電との親和性が高いことも強みとしてあげられる。以上より、施設栽培は耕地面積という面では露地栽培に劣るものの、営農型太陽光発電の実現可能性や、太陽光発電の導入と農業の電化という相乗効果の創出において大きなポテンシャルを持つと考えられる。

2. 問題設定

施設栽培で営農型太陽光発電を実現させるにあたり、大きく3つの課題がある。

1 つ目は、営農の適切な継続である。農林水産省より通常の8割以上の単収を確保すること、品質に著しい劣化がないことという条件が課されている⁷⁾。ここで単収とは単位面積あたりの収穫量のことであり、以降では施設全体を対象に議論を行うため、収穫量という単語を使用することとする。現時点では、施設栽培での事例があまり見られず、露地栽培での事例がほとんど全てであるため、露地栽培に向けた基準として解釈されるものの、施設栽培に対しても同じ条件が適用されることが考えられる。

2 つ目は、複雑な環境制御の最適化である。施設栽培では、温度・CO₂濃度・日射量などの多数の環境要素を、冷暖房・換気・CO₂施用・遮光・補光といった多様な環境制御で、制御している。特に、環境要素と環境制御が1対1の関係ではなく、1つの環境要素の制御に複数の環境制御が用いられる。一方で、1つの環境制御によって複数の環境要素が制御されるという、多対多の関係にあることが複雑さの要点である。

3 つ目は、収益性の追求である。営農型太陽光発電を行うと、主に売上は収穫量と発電量で構成され、費用は電力や燃料などの資源と設備で構成される。収益性を維持するためには、この売上と費用から算出される収益を最大化す

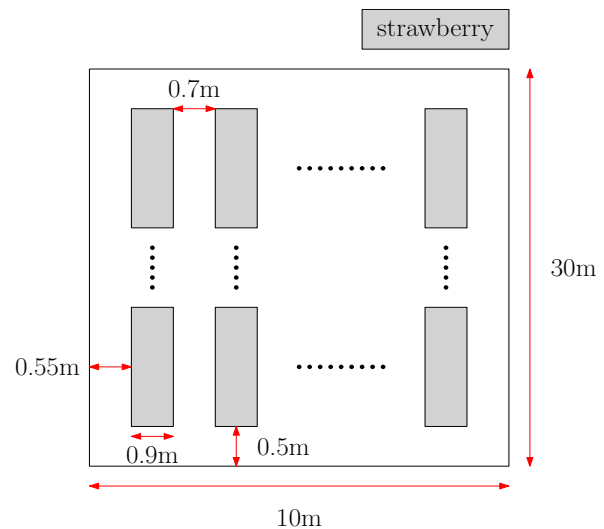


図2 イチゴの定植部分

る問題に落としこみ、システム設計と運用を最適化することが必要である。

本論文では、施設栽培が主流であり、高付加価値作物でもあるイチゴを対象に、特に営農の適切な継続において重要な収穫量の確保と複雑な環境制御の最適化に焦点を当て、営農を適切に継続することが可能な営農型太陽光発電システムの設計を検討し、将来的な収益性の追求につながる指針を示すことを目指す。収穫量については、収穫量と光合成量の間に比例関係が成立することを仮定し、植物生理学に基づくモデルから光合成量を推定することで間接的に評価を行う。ハウス内の環境については、気温・CO₂濃度・日射量の3つの環境要素を対象に、換気・CO₂施用・遮光の3つの環境制御を行うこととした。環境制御はいくつかの制約条件下で光合成量を最大化するように決定することとし、太陽光パネルを設置する場合と設置しない場合を比較し、光合成量がどの程度小さくなるかを検証する。

3. 手法

3.1 ハウスの設計

本論文では中小規模の一般的な農業用ハウスでイチゴを栽培することを想定した。ハウスの形状と寸法は、図1に示すように、間口10m、奥行30m、軒高2m、棟高4.9m、屋根の傾き30°とした。妻面を南北にもつ東西棟と呼ばれる形式であり、ハウス内に均一に光が入るという特徴を持つ¹²⁾。床面積を除く被覆面積は535m²となる。イチゴは土耕栽培により栽培するものとし、定植部分は図2に示すように、幅0.9m、長さ29mの畝が6つ並ぶ設計とした。定植面積は157m²となっており、床面積300m²に対して、52.3%を占める。

3.2 気象データ

環境要素として気温・日射量を考慮するにあたり、国立

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2010												
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												

平均年	2018	2015	2017	2012	2016	2012	2013	2014	2017	2014	2011	2013
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

図3 METPV-20 の代表年

研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が提供する日射量データベース METPV-20¹³⁾の気温と日射量のデータを利用した。まず、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、図3に示すように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¹⁴⁾。今回は日射量が平均的な1年になるように作成されたデータを使用している。

3.3 太陽光パネルと透過日射量

今回設置を検討する太陽光パネルは結晶系シリコン製で、ストライプ状の発電素子部分の間隔を調節することで、擬似的に半透明なパネルとなっている¹⁵⁾。太陽光パネルの発電素子以外の部分および太陽光パネルを設置しない部分については、ガラスと想定する。図4はNRELが提供するASTM G173-03の基準太陽光スペクトル¹⁶⁾に対する、ガラスと太陽光パネルの透過光スペクトルを示したものである。ガラスの透過率は全ての波長について90%と設定している。また太陽光パネルの光の透過率に関して、基準太陽光スペクトルと比較すると透過するエネルギー量は42.9%、光合成有効光量子束密度 (PPFD) は47.6%である。そして太陽光パネルを設置しない場合に用いられるガラスと比較すると、エネルギー量は47.7%、PPFDは52.9%となる。ここで、PPFDとは、植物の光合成に有効な波長の光量子の密度を表す指標であり、植物の光合成と光環境の関係性において頻繁に用いられるものである。エネルギー量とPPFDの透過率は、本論文において、環境制御の最適化および光合成量に直接影響を及ぼす重要な数値となる。

3.4 群落光合成量の推定

イチゴの収穫量を推定するにあたり、光合成量を推定するモデルを作成する。今回はハウス内の定植面積における光合成量を推定するため、複数の葉、個体の集まりである

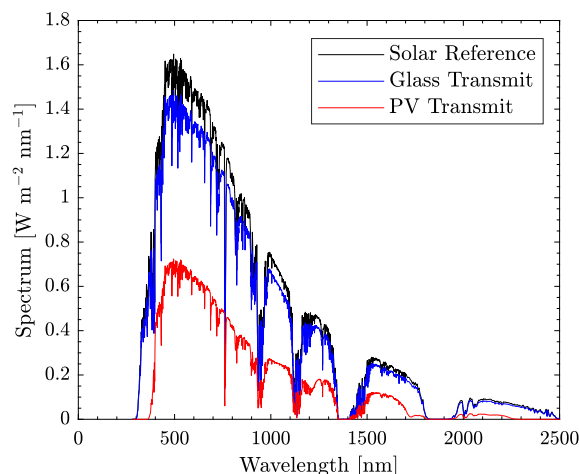


図4 ガラスとPVの透過光スペクトル

群落の各時刻の光合成速度をモデル化する。群落の光合成速度のモデル化は、個葉の光合成速度のモデル化と群落の光合成速度への拡張という2つの段階で行われる。

まず、個葉の光合成速度のモデル化には、FvCBモデルを用いた¹⁷⁾。光合成によってCO₂を吸収する速度から呼吸によってCO₂を放出する速度を差し引いた純光合成速度 A_n は、次のように表せる。

$$A_n = \min(A_c, A_j) - R_d \quad (1)$$

右辺第一項の A_c は、カルボキシル化速度であり、Rubisco酵素の活性に依存する。一方で A_j は光反応の電子輸送速度であり、電子伝達速度に依存する。CO₂が不足している状態ではRubisco律速と呼ばれ、カルボキシル化速度が律速要因となり、日射量が不足している状態では、RuBP再生律速と呼ばれ、電子輸送速度が律速要因となる。

次に、群落の光合成速度をモデル化するために、群落を日のよく当たる陽葉と日があまり当たらない陰葉に分ける、Two-Leafモデルを採用した¹⁸⁾¹⁹⁾。このモデルは光の減衰に関するBeer-Lambertの法則に由来するものである。群落内の日射量 $I(l)$ は、累積葉面積 l の関数であり、次の式で表される。 I_0 は群落に最上部における日射量であり、 K は群落における吸光係数であり、今回は一般的なイチゴの群落に対応する値として0.8とした。

$$I(l) = I_0 \cdot \exp(-K \cdot l) \quad (2)$$

また、単位地表面積あたりに存在する葉の面積を表す葉面積指数LAIは3 m²・m⁻²とした。吸光係数から陽葉と陰葉の葉面積指数は次の式で与えられる。

$$LAI_{\text{sunlit}} = \frac{1 - \exp(-K \cdot LAI)}{K} \quad (3)$$

$$LAI_{\text{shaded}} = LAI - LAI_{\text{sunlit}} \quad (4)$$

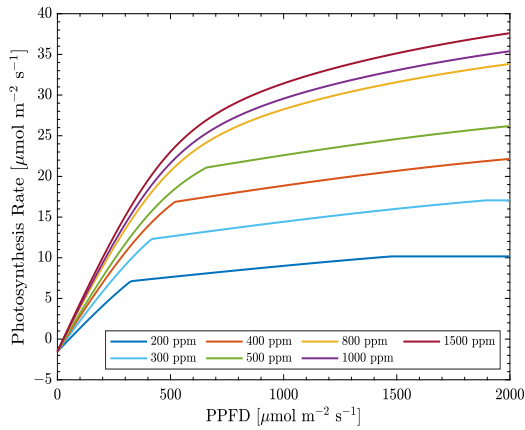


図5 PPFD と CO₂ 濃度に対する光合成速度

式(1)から(4)をもとに群落の光合成速度 $A_{n,canopy}$ は次の式で表される。

$$A_{n,canopy} = (A_{n,sunlit} \cdot LAI_{sunlit}) + (A_{n,shaded} \cdot LAI_{shaded}) \quad (5)$$

ただし、 $A_{n,canopy}$ は単位面積あたりの群落光合成速度であるため、これに定植面積を乗算することで、全体の光合成速度を算出することができる。図5は単位面積あたりの光合成速度をPPFDとCO₂濃度を説明変数としてグラフ化したものである。PPFDおよびCO₂濃度が大きいほど光合成速度は大きくなるが、一定以上になると光合成速度が飽和する形となっている。今回のモデルから算出される光合成速度は先行研究の実証実験から報告されている結果²⁰⁾と比較して、概ね一致していたため妥当なモデルであると考えられる。

3.5 環境制御

先述の通り、今回は換気・CO₂施用・遮光を環境制御として考慮する。

まず、換気はハウス内気温を一定に保つために行う。今回は顕熱輸送のみを考慮することとし、次の式により換気量 V が決定する。

$$V = \frac{I \cdot \alpha \cdot A_f}{c_p \cdot \rho \cdot (T_{in} - T_{out})} \quad (6)$$

METPV-20のデータである日射量 I をもとにハウス内に吸収されるエネルギー量を分子とし、単位換気量あたりに放出できるエネルギー量を分母とすることで計算している。計算に用いられる各パラメータの数値は表1に示す。

次に、CO₂施用はハウス内のCO₂濃度を高め、光合成速度を大きくすることが目的である。ただし、換気を同時に行っている場合には、施用したCO₂が全て光合成に使用される訳ではない。そこで、経済性を損なう運転を防ぐため、施用効率という考えを導入し、施用量の5%以上が光合成

表1 パラメータ

名称	記号	数値	単位
葉面積指数	LAI	3	$m^2 \cdot m^{-2}$
吸光係数	K	0.8	-
顕熱発生率	α	0.5	-
床面積	A_f	300	m^2
空気比熱	c_p	1004	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
空気密度	ρ	1.225	$kg \cdot m^{-3}$
ハウス内気温	T_{in}	25	$^{\circ}C$

速度の増大に寄与するという制約条件を設けた。

最後に、遮光は換気とCO₂施用という2つの環境制御を踏まえ、光合成速度を最大にするように、ハウス内に取り込む日射量を調節することが目的である。遮光制御を行うにあたり、日射量とCO₂濃度のトレードオフが非常に重要である。光合成速度は日射量とCO₂濃度の両方に正の相関を持っているが、実際の施設栽培では、日射量とCO₂濃度を同時に高い水準に保つことは難しい。日射量が多い場合は、ハウス内に大きなエネルギーが取り込まれるため、気温が上昇しやすく、適切な気温を維持するために必要な換気量が多くなる。すると、CO₂施用効率が悪化し、CO₂濃度を高めることができなくなる。一方で、CO₂濃度を高く保つためには、換気量を小さくする必要があり、そのためには、ハウス内に取り込まれるエネルギーを小さくする、つまり日射量を小さくする必要がある。このトレードオフを踏まえ、本論文では、換気量・CO₂施用量・遮光を変数とし、光合成速度を最大化する最適化問題を定式化している。

4. 検証

この章では、上述の手法を用いたシミュレーションによって得られた結果を検証する。まず、図6は太陽光パネルの有無により、環境制御および光合成速度がどのように異なるかをグラフ化したものである。1日を通して晴天であった1月2日を選出し、太陽光パネルを設置しない、従来通りの設備の場合を青線で、太陽光パネルを設置する場合を赤線で示している。(a)は日射量に関するグラフで、点線は遮光をしない場合にハウス内に入射する日射量を、実線が最適化された遮光制御によりハウス内に入射することになった日射量を示している。太陽光パネルを設置しない場合では、最大で50%弱の日射量が遮光されることになった。その結果、遮光という環境制御を考慮しない点線の場合に比べ、作物が受ける日射量の差は縮小していることがわか

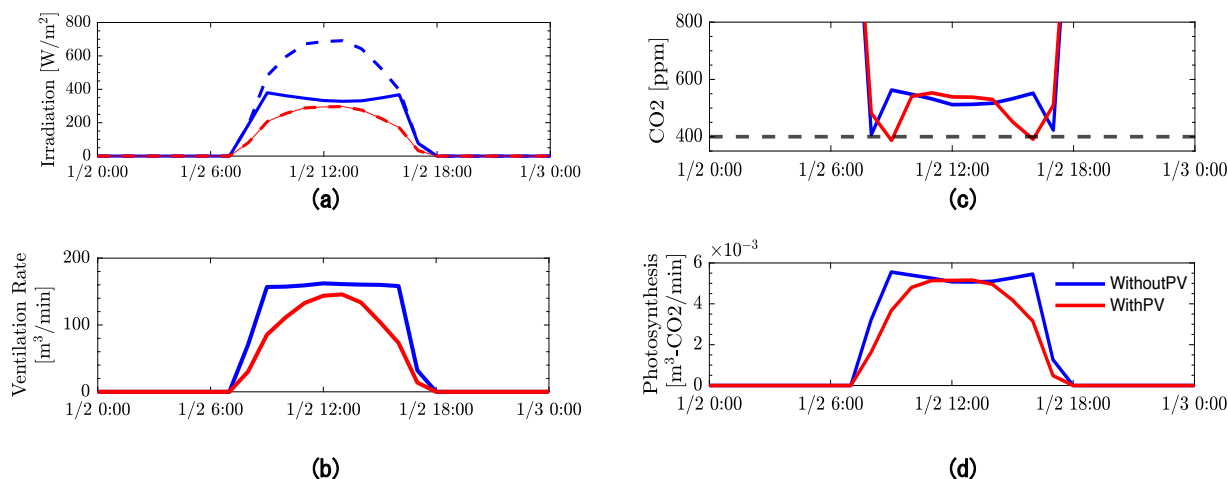


図6 環境制御と光合成速度

る。次に、(b)は換気量を示している。概ね遮光後の日射量のグラフを同じ形となっており、どの時間帯でも太陽光パネルを設置しない場合の方が換気量は大きい。そして、(c)はCO₂濃度を示している。正午前後は500ppmから600ppm付近の濃度となっており、実際に行われている日本国内の施設栽培と比較しても妥当な範囲での運用となっている。最後に、(d)は光合成速度を示している。最適化された環境制御の結果、太陽光パネルを導入すると朝夕の光合成速度は小さくなるものの、正午前後は同等の光合成速度となることがわかった。

次に図7は、11月を対象期間とし、太陽光パネルの設置率を減少させていった場合に、累計の発電量と光合成量がどう変化するかを示したグラフである。太陽光パネルの設置率に対し、発電量は線形に大きくなるのに対し、光合成量は非線形に小さくなるのがわかる。グラフより太陽光パネルの設置率を0.8とすることで、太陽光パネルを設置しない場合に比べて光合成量は81.0%となり、適切な営農の継続の基準である80%の収穫量の確保が実現できる。この時、PPFDの透過率は62.3%であることがわかった。

さらに図8は、イチゴの主な栽培期間である、11月から3月の期間について、各月ごとに光合成量の合計を集計し、太陽光パネルの有無で比較したものである。PPFDの透過率は図7の結果から62.3%となる設置率とした。月によって日数や日射量が異なるため、光合成量に差はあるものの、太陽光パネルを設置しない場合に対して、太陽光パネルを設置する場合の光合成量の割合は、11月が最も小さく81.0%、1月が最も大きく86.6%となっている。5ヶ月間の光合成量の総和で比較すると、84.2%の光合成量が得られることがわかった。PPFDが62.3%となる環境であっても、光合成速度を最大化する環境制御を考慮することで、数値的には、累計の光合成量の減少が緩和される結果となった。

換気・CO₂施用・遮光という環境制御を考慮し、イチゴの光合成速度を最大化させたところ、図6の(d)に示されるように、正午前後では、太陽光パネルを設置する場合でも設置しない場合と同等の光合成速度となることがわかった。また、PPFDの透過率が62.3%の場合に、11月から3月までの期間において、各月の光合成量も、5ヶ月間の光合成量も農林水産省による収穫量80%の基準を満たすことができるという結果が得られた。そして今回の結果から、太陽光パネルを設置する場合の収穫量を推定し、太陽光パネルを設置しない場合と適切に比較するためには、環境制御を考慮することが重要であることがわかった。

しかし、本論文では解決できていない課題となる点や考慮しきれていない点があることも事実である。特に、朝夕の光合成速度の詳細検討、湿度の考慮、環境変化のダイナミクスの分析については今後の課題である。

今後の展望としては、これらの点を考慮したシミュレーションモデルを作成すること、さらには実証実験を実施し、実際のデータをもとにモデルのバリデーションを行うことが挙げられる。そして推定された発電量と光合成量をもとに、農家や農村、ひいては国全体にとって有益な営農型太陽光発電システムの設計および運用を決定することが期待される。

謝辞

本論文の作成にあたり、太陽光パネルの吸収スペクトルデータを提供して下さった株式会社カネカの中島様と檀野様、および実際の栽培環境の見学や深い知見をもとにした議論を重ねた農業法人および農家の方々には感謝の意を表したい。

5. 結論

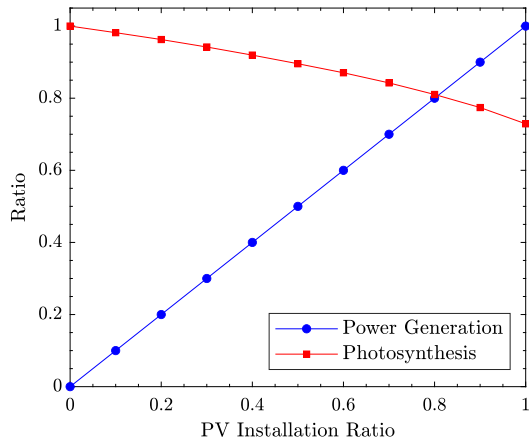


図7 PV設置率に対する発電量と光合成量（11月）

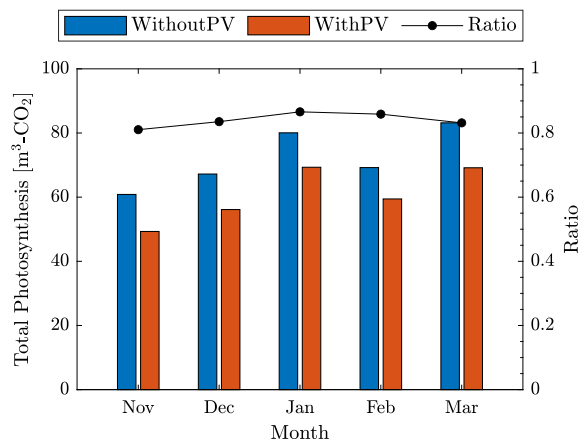


図8 月別光合成量

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, (2025.06), p.10,
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisai_kano/pdf/074_01_00.pdf.
- 2) 日本経済新聞; 地域と共生する太陽光発電に, (2025.10),
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQODK08AOG0Y5A001C2000000/>.
- 3) 農林水産省; 特集 変化する我が国の農業構造 (1) 基幹的農業従事者, (2022.05),
https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r3/r3_h/trend/part1/pdf/c0_2_01.pdf.
- 4) 農林水産省; 「みどりの食料システム戦略」 KPI2030年目標の設定について, (2022.06),
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/index-55.pdf>.
- 5) 農林水産省; 営農型太陽光発電について, (2025.04),
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/einou.html>.
- 6) 土屋遼太, 大橋雄太, 森山英樹, 石井雅久; 国内外の営農型太陽光発電に関連した研究開発動向, (2024),
https://doi.org/10.11449/sasj.55.3_64.
- 7) 農村振興; 営農型太陽光発電設備設置状況等について (令和4年度末現在), (2024.10),
<https://www.maff.go.jp/j/nousin/noukei/totiriyo/attach/pdf/einogata-55.pdf>.
- 8) 農林水産省; 令和7年耕地面積 (7月15日現在), (2025.10),
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/sakumotu/menseki/r7/kouti.html.
- 9) 石井雅久, 土屋遼太, 森山英樹, 遠藤和子, 唐崎卓也,

- 中村真人, 後藤真宏; 日本の脱炭素社会に向けた農山漁村エネルギーマネジメントシステム (VEMS) の開発と技術的展望, 農業食料工学会誌, 86-3(2024), pp.112-117.
- 10) 環境バイオマス政策課; 農林水産省説明資料, (2025.05),
<https://www.maff.go.jp/j/study/attach/pdf/250609-1.pdf>.
 - 11) 谷野章; 農業施設に関わる研究・技術の最近の展開—温室栽培における太陽光発電利用の動向—, 農業施設, 49-1(2018), https://doi.org/10.11449/sasj.49.1_1.
 - 12) 農林水産省; 第5節 園芸施設, (2006),
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_schi_kizyun/pdf/miyagi_yasai18_24.pdf.
 - 13) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構; 日射量データベース閲覧システム,
<https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/index.html> (アクセス日 2025.12.01) .
 - 14) 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>.
 - 15) 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, (2023),
<https://www.nedo.go.jp/content/100963950.pdf>.
 - 16) NREL; ASTM G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTs, (2003.01), <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5>.
 - 17) G.D. Farquhar and S. von Caemmerer and J.A. Berry; A Biochemical Model of Photosynthetic CO₂ Assimilation in Leaves of C₃ Species, Planta, 149 (1980), pp.78-90.
 - 18) Y.P. Wang and R. Leuning; A two-leaf model for canopy

- conductance, photosynthesis and partitioning of available energy I.: Model description and comparison with a multi-layered model, *Agricultural and Forest Meteorology*, 91 (1998), pp.89-111.
- 19) R. Leuning and F.X. Dunin and Y.-P.Wang; A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy. II. Comparison with measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, 91 (1998), pp.113-125.
- 20) 吉田裕一, 難波頼広; イチゴ群落の光合成に関する研究 : (第 1 報)簡易型半閉鎖式同化箱による群落光合成速度の測定, *園芸学会雑誌 別冊 園芸学会大会研究発表*, 64 (1995), pp.356-357.