



営農型太陽光発電の到達点と今後の展望

合原 亮一

株式会社ガリレオ代表取締役

1. 営農型太陽光発電開発の背景

株式会社ガリレオでは2013年より営農型太陽光発電の開発を続けている。

脱炭素に向けて再生可能エネルギー（再エネ）への転換が急がれている。現在最も経済的な再エネは太陽光発電であるが、広い土地を必要とするという欠点があった。そこで提案されたのが、農地で営農を続けながら上部で発電も行う営農型太陽光発電（以下 営農型）である。日本には約430万haの農地があり、その2割に営農型を設置すれば、現在使われているすべての電力を賄うことができる。営農型なら農業生産への影響も最小限に抑えられ、土地が有効活用できる。

農林水産省は2013年、条件を満たせば基本的にどの農地でも太陽光発電を認める通達を出した。ガリレオを経営しながら有機農業も営んでいたため、所有する水田に営農型を設置したいと考えたが、当時長野県上田市では営農型を設置できる業者が見つからなかった。

また当時架台メーカーが提案していた営農型架台の多くは、野立て架台の柱を伸ばしただけのものがほとんどで、アレイも大きく、遮光率が高いものが多かった。パネルの位置が高くなると風応力が大きくなり、野立てと同じ構造では強度的に無理がある。筋交を入れて強度を高めようとした架台もあったが、農業機械が通ることができない構造で、農業の知識がない設計者による設計であることは明らかだった。

当時は営農型に関する知見はほとんどなく、光飽和点以上の光を発電に活用すれば良いという仮説があるだけだった。稲の光飽和点が高いことも

あり、水田への設置には否定的な意見も多かった。

しかし農地の54%は水田であり、水田は比較的日当たりの良い場所にあり、土地も水平に整地されているという利点がある。「水」田なので、水の管理が行われている。産業用太陽光発電所を土地に設置する場合は、水の流れが変わる場合が多く、排水設備を設置しなければならない場合が多い。しかし水田の場合は営農型を設置したからといって排水設備を追加する必要はない。脱炭素化を目指す規模の発電システムを指向するには、水田への導入可能性の検証が必要と思われた。

そこでガリレオで要素技術から営農型設備を開発することにした。2013年に開発を開始し、発電量を増やすことと、作物と発電のバランスを自由に制御できるように、駆動システムによる自動太陽追尾機能の実装を目指した。ガリレオはIT企業であるため、発電設備に設置したセンサーからパネルの角度や気温、日射量などのデータをインターネットでサーバーに集め、サーバーサイドのシステムで太陽の軌道を計算して最適な角度を計算してパネルを制御するシステムを開発した。いわゆるIoTシステムである。パネル角度を検出するためのセンサーも製作した。

さらに日射量を計測して作物にかかる影が大きくなり過ぎないように制御したり、前列のパネルの影が後列のパネルにかからないかチェックして適切な角度に調節する機能や、パネルの反射光が水平またはそれ以下になり「光害」を起こすことがないように、監視して自動制御する機能などを実装した。

2. 2016年に最初の実証設備を設置

試験設備を設置して1年間稼働することでこうした要素技術の目処が立ち、2016年に水張面積2,985㎡の水田に架台下面積1,512㎡の低圧最大規模（AC49.5kW、DC約67kW）の実証設備の設置を行うことになった。

当初の開発方針は、農家がある程度自分で設置や保守ができることを目指していたので、入手しやすい足場用単管と単管杭で架台を構成し、柱間隔も、農作業に支障が少ないよう5m×5.4mのスパンとした。また基礎杭も足場用単管と同じ、直径48.6mmとし、営農への影響が最小限の設計とした（写真1）。

遮光率については当時20-30%を推奨する意見が多かったが、制御で影を抑制することが可能なため、遮光率33%の南向き設置の設計とした。また駆動用アクチュエーターの比較試験も兼ねて全体を3つの区画に分割し、それぞれ別のアクチュエーターで独立して駆動できるようにした。

3つの区画の遮光率は全て33%で同一であるが、A区画を稲の生育優先区画として日射量40klxまではパネルを太陽光と並行に制御して影を最小化し、40klxを超えた比率が影の比率となる制御を行なった。B区画はパネルを水平固定し、影の比率が常に一定の33%となるようにした。C区画はパネルが常に太陽光と直角になる制御を行い、前列のパネルの影が後列のパネルにかかる場



写真1 最初の実証設備

合は角度を調整して影の影響を排し、常に発電量を最大化する制御を行なった。

3. 遮光率33%で収量低下はわずか6.3%

2016年にコシヒカリを作付けし、秋の収穫時に区画ごとに全収量を計測したところ、単収に換算してA区画（米優先）420kg/10a、B区画（影一定）429kg/10a、C区画（発電優先）447kg/10aという結果となった（図1）。稲への日射量が一番多いA区画の収量が一番少なくなっているが、A区画のみ電線埋設工事で表土が攪乱されたことと、水口に面しているため水温が低めに推移しやすかったことの影響であり、3区画で収量の差はなかったと評価した。架台下の平均収量は432kg/10aであり、架台外の平均収量は461kg/10aであったので、太陽光発電設備による減収率は6.3%であった。実証圃場のある地域の平均単収は約600kg/10aであるが、実証圃場では有機栽培

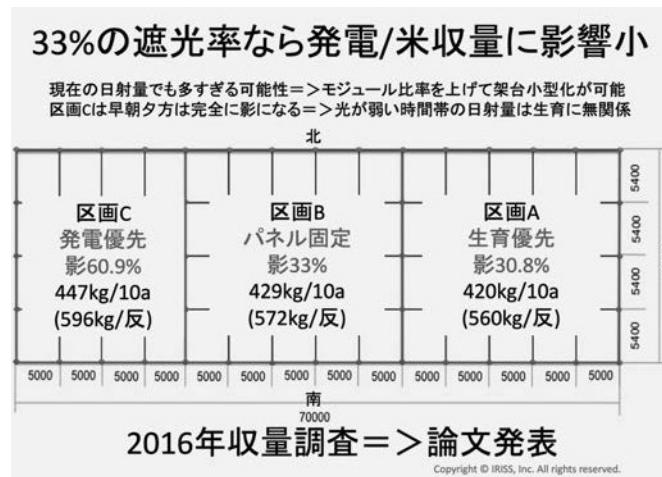


図1 遮光率の収量への影響

を行っている。「有機農業基礎データ作成事業報告書」(2011)によると有機栽培の米の平均減収率は25%であり、架台外で450kg/10a、営農型は20%までの減収が認められているので、360kg/10a以上の収量が求められているが、実証圃場では共に上回っていた。品質に関しても架台下と架台外の1000粒重に有意な差はなく、品質の低下も見られなかった(合原ら, 2020)。

4. 遮光率を上げ太陽追尾を東西方向に変更

A区画とC区画の違いは、日射量が低い時間帯に影ができるかどうかであり、C区画が減収しなかったことは、日射量が低い時間帯の太陽光は収量に大きな影響を与えない可能性を示している。2016年の設備はパネルを南側に向け、太陽高度に合わせて上下に駆動していたが、日射量が低い時間帯の太陽光を発電に活用するには、駆動軸の向きを90度変更し、東から西に太陽を追尾する仕様に変更することで、より発電効率の向上が期待できる。また日射量が最大となる南中時前後の影が最小になるので、稲の生育も向上する可能性がある。また33%の遮光率では大きな減収が見られなかったため、より大きな遮光率として発電量を向上できる可能性もある。

一方本間ら(2016)によると遮光率34%での太陽光発電設備下での稲の生育試験の結果、強遮

光区(架台中央部)は非遮光区(架台南端)の半分以下の収量であり、シミュレーションの結果20%の遮光率で約20%減収するので、水稻の遮光率は約20%までと結論している。シミュレーションでの結論であり、当方の2016年の調査結果とも矛盾しているため、遮光率の上限について実圃場で確認する必要があると考えた。

そこで2017年に向けて設備の改造を行い、東西方向に設置されていた回転軸を南北方向に変更し、遮光率をA区画33%、B区画40%、C区画50%とし、全区画で東西方向に太陽追尾して稲の生育試験を行なった(図2)。

5. 水稻の遮光率の上限は約40%

本来なら各区画の全面が設定した遮光率になるようパネルを設置したいところである。しかしパネル容量の変更には煩雑な手続きが必要な上に売電価格が引き下げられるため、パネルの位置を変更して設置した。このため、図2に示すように、架台にパネルが設置されていない部分がある。

2017年もコシヒカリを栽培し、架台のパネル下の収量を計測し、遮光率ごとに減収率を計算したところ、遮光率33%で約7.4%の減収、40%で約17%の減収、50%で約36%の減収という結果となった(図3)。

つまり、上田市で遮光率40%の営農型太陽光

図2

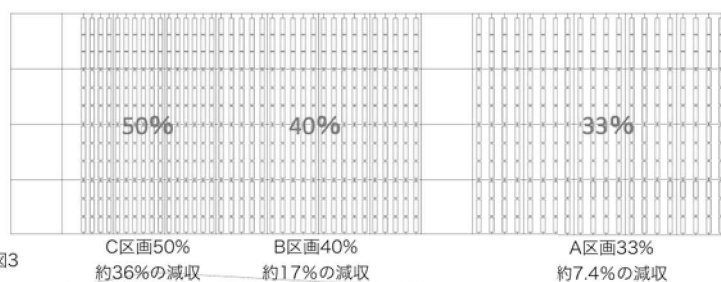
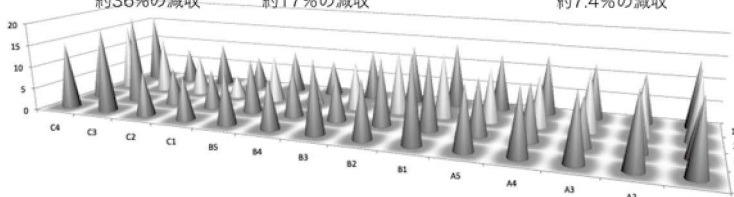


図3



遮光率による収量差: 2017年収量調査

Copyright © IRISS, Inc. All rights reserved.

図2 区画ごとの遮光率、図3 遮光率による収量

発電でコシヒカリを栽培すれば、太陽追尾でも近隣の80%以上の収量が期待できる。年により生育に問題が起こった場合は、パネルの駆動システムで影を小さくすることで、必要な収量を得ることができる。

2016年と2017年の実証試験により、光飽和点が高い水稲も、他の作物と同程度の遮光率の営農型で栽培できることが明らかになった。

ただし、実証水田のある上田市は、晴天率、日射量共に日本でも上位にある。従って日本の他の地域でこの遮光率の営農型で近隣の80%以上の収量が保証できるとまでは言えない。

また年間日射量は年毎に変動するので、40%の遮光率で毎年80%以上の収量を得ることができるかは、今後の調査が必要である。ただし、池鯉鮒（2012）によれば、国内の地域別全天日射量の経年変化は、どの地域でも1975年から2010年までの変化で上下10%以下となっている。また国内14点の観測点の直達日射量平均値は1990年から10年で約10%増加している。

6. 営農型の営農への影響を実証圃場で調査

2018年、2号架台をアルミで新設計して2号機を設置した（写真2）。強度の向上と商品性の向上を目指した新設計であったが、アルミは剛性が低い柱間のスパンは4mに狭まることになった。

2号機では架台下の位置による収量の違いを調査した。南側や東側、西側は、パネルの影がかからない時間帯がある。北側はほとんどの時間に影がかかる。日射量が違うため日射量に応じて収量に違いが出ると予想したが、収量測定結果は図4の通りで、日射量によって収量の変動する傾向は見られなかった。

2019年、2号架台と基本設計は同じであるが、国産の一番背の高い水田用農業機械が使えるように、最低地上高を3m以上とし、必要な強度を持たせた3号架台を開発して3号機を設置した（写真3）。

2号機での収量測定では、日射量と収量の間農業電化 77巻7号



写真2 2号機の設置状況



写真3 3号機の設置状況

強い相関関係がないことが示された。水稲の生育は積算温度によることが知られているため、日射量に関わらず、架台下の温度が均一に近いことが示唆された。本件を実証するため、架台下30箇所、架台外の圃場内に2箇所の計32箇所に温度センサーを設置し、栽培期間中の架台下の雰囲気温度を測定した。

温度と日射量には相関が見出せなかった。水田は熱容量の大きな水を湛えているため、パネルや架台の下部だけでなく、水田全体の雰囲気温度が低下することが確認された。取得した温度のビッグデータについて、引き続き解析を進める予定である。

7. より営農重視の営農型を目指して

調査研究によって、営農型太陽光発電が水稲に及ぼす主な影響が評価できた。正しく制御すれば、営農型は水稲栽培と共存できることが明らかになったわけである。

現在は、より営農の邪魔にならず、営農にメリッ

トがある営農型太陽光発電を追求し続けている。

営農面から見れば、営農型の支柱は明らかに邪魔である。2020年に開発した4号架台は、アルミ架台で柱スパンを初号機と同じ5m×5.4mとした(写真4)。

これまでと同じアルミ材でこのスパンを実現するため、横架材はトラス構造とした。しかしその結果、部材点数が大幅に増加し、組立や調整に要する工数が増加してコストが増大した。

4号架台での反省を元に、2021年に設計施工した5号架台では、構造材に大断面のアルミ柱材・桁材を採用し、部品点数を削減しながらさらに柱間のスパンを6mに広げた。またコスト削減のために、これまでの幅が狭いがコスト高の3列セルの太陽光パネルではなく、住宅屋根やメガソーラーで採用されている6列セルの大面積の太陽光パネルを採用した(写真5)。

営農型では当初より、影が大きくなり作物への影響が懸念される大面積のパネルではなく、2列セルや3列セルの、影の面積が半分以下になる狭幅パネルが推奨されてきた。しかしFITの買取価格が下がり続けた結果、コスト高の狭幅パネルを採用すると設置自体がコスト的に見合わなくなりつつあった。

部品点数が大幅に減ったことによる建設費の削減と、単価の低い太陽光パネルの採用で、構造材単価の上昇を吸収して総コストを引き下げることができた。

水稲と大豆の収量も、狭幅パネルと比較して減少しなかった。柱間のスパンが6mあれば、架台下部で農業機械の転回が可能であり、これまで架台外の農地に設けていた転回スペースが不要となり、農地の発電への利用効率を上げることができるようになった。藤棚式架台として一つの到達点と考えている。

残った課題が、牧草用やブームスプレーヤーなどの、横幅が10m以上と広い農業機械が藤棚式架台では使用できないことだった。こうした農地に対応できる営農型架台としてヨーロッパ発の垂直設置架台が知られているが、太陽光パネルを垂



写真4 4号架台



写真5 大面積の太陽光パネルを設置した5号架台



写真6 T字型構造の6号架台

直に設置するため風応力が大きく、パネルの高さが制限されるため下部のパネルの高さを上げることができず、背の高い作物を栽培するとパネルに影がかかるという制約がある。また幅の広い農業機械に合わせて設置間隔を広げると、土地の発電への利用効率が下がるという問題もある。

そこで2022年にガリレオの駆動システムを活用し、幅の広いアレイを1本足1列の柱で支えるT字型構造の6号架台を開発した(写真6)。アレイを水平にすれば地上高も抑えられ、風応力の

影響を最小化できる。太陽追尾中は地上 6m 程度の高さになり、隣の架台との距離が大きくても、大型のアレイによって発電量を増やすことができる。これまでの追尾式システムと同じく、一定以上の風速を検出すると自動的にアレイが水平になるので、強風の影響も受けにくい。

T 字型架台と名付けた 6 号架台は、水田への設置に際しても、畦や畦際に設置することで、営農への影響をさらに小さくできる。写真 7 は並んだ水田間の畔のみに支柱を立て、営農への影響を最小化した設置例である。農地の制約で水田の中央に設置した場合でも、支柱が 1 列しかない上に柱間のスパンも 7m に拡大したので、他の架台に比べてどの方向への農作業でも営農への制約を最小化することができた。

加えて T 字型架台は、大型パネルの採用と構造部材の大型化によって部品点数がさらに少なくなり、コストダウンも実現している。

8. 営農型の活用 1：スマート農業への発展

営農型が水田にも効率的に設置でき、日本の多くの農地に設置可能であることが実証された。農地の 54% を占める水田が活用できると、日本に必要な全エネルギーを再エネで置き換えることが可能になる。さらに営農型には再エネの発電以外にも多くのメリットがある。その 1 つがスマート農業への波及効果である。

スマート農業は少子高齢化の影響が大きい日本農業の将来に重要な役割を期待されているが、実際にはその普及は進んでいない。その大きな原因に、農地には電源もインターネットも到達していないことが挙げられる。

ガリレオの営農型には電源もインターネットも引かれており、気象センサーも設置されている。ガリレオの営農型に LPWA 無線通信のゲートウェイを設置することで、半径数キロの農地に設置されたセンサー端末とサーバーが通信できるようになり、スマート農業のハブとしての機能を発揮することができる。

ガリレオでは 2019 年に乾電池で利用できる電源
農業電化 77 巻 7 号



写真 7 営農への影響を最小化した設置例

が不要で、気温、水温、水深等を測定できるセンサー端末を開発した。既に水田の水管理に利用しているが、積算温度を計測して次の作業時期を予測したり、いもち病の発生を予測する機能を準備中である。

また営農型設備には気象センサーを設置しているので、地域に点在する営農型の気象センサーをつなぐことで、微気象の測定と農業への活用も可能と考えている。将来的には、発電した電気を活用した電動農業機械の活用や、鳥獣害防止設備なども考えられる。

9. 営農型の活用 2：高温障害の防止

地球温暖化により気温が上昇し、水稻だけでなく様々な作物に高温障害が発生している。

設備の遮光率を上げておき、通常は一部の日射を作物に逃して生育を確保し、温度センサーが高温障害が発生しそうな温度を検出した時は影を大きくして障害を防ぎつつ、追加の発電を得ることができる。また夜間もパネルによって地表面を保温したり、パネルを立てて放射冷却を増やすことで、地表の温度をある程度制御することが可能であり、作物の生育に合った温度制御が可能である。この機能の一部は既にガリレオの営農型制御システムに実装済みである。

10. 営農型の活用 3：メタンガスの排出抑制機能

水田は湛水によって還元環境を形成するため、メタン発酵によりメタンガスが発生する。メタン

ガスは二酸化炭素の25倍の温暖化係数を持つGHGであり、国際的に水田に対する非難が高まっている。

農林水産省の耕地及び作付面積統計によると、日本の水田面積は1956年の332万haから2012年には245万haに減少しており、残った水田でも転作等が行われているので、メタンガスの発生は減少しているはずである。しかしFAOの統計によると、世界の水田作付面積は1948年から2000年に77%増加している。世界の人口増加は続いており、今後も農地面積は拡大すると考えられるので、水田からのメタンの発生を抑制する必要がある。

水田からのメタンの放出量は地温と高い相関があることが知られている（細野ら、1998など）。営農型の設置により日射の一部が電気エネルギーに転換され、さらに一部が反射されることで、設備下部は温度が低下する。水田は熱容量の大きな水を湛えているため。パネルや架台の下部だけでなく、水田全体の温度が低下することがガリレオの2019年の研究で確認されている。このため水田全体で地温も低下し、メタン菌の活性が下がり、メタンガスの放出量が減少することが期待できる。水田からのメタン放出に関しては研究が進められており、営農型の設置等によって効果的な対策が世界的に普及することが期待される。

11. 営農型の活用4：若者の就農が可能になる

各種統計によると、就農を希望する若者は多く、実際に就農する若者も多くいる。しかし就農しても農業を継続できない場合が多い。安定した収入を得られないことがその原因である。

農業で生活を支えるだけの収入を得ようとする、選択肢は少ない。多品目の野菜を周年途切れることなく栽培して直売するか、価格の高い贈答用の果物などを栽培するか、米麦大豆といった土地利用型農業の場合は10ha以上の大面積を効率的に耕作する以外の選択肢はあまりない。

いずれも、かなりの農業技術や設備投資が必要

であり、若者が数年程度で実現するのは難しい。

しかし発電事業者が設置した営農型の下部を耕作して営農協力金を受け取ることで、有機農業の場合、土地利用型農業でも試算によれば1haで年間100万円程度の収入が期待できる。つまり3haなら300万円、5haなら500万円ほどの年収が期待できる。若い就農希望者は有機農業への関心が高いが、慣行農法の場合でも、5ha程度で300万円程度の年収を得ることが可能である。

また自ら営農型を設置すれば、さらに小規模でも同程度の所得を得ることができる。設置費用についても、JAの融資で全額賄うことが可能であり（JAによる）、自己資金を用意する必要はない。

こうしたモデルが広まることで、農業問題、食料問題、エネルギー問題、温暖化問題を同時に解決することが可能になる。

12. 営農型太陽光発電の今後

現在、営農型にさらに新たな機能追加ができないか、様々な実験や研究を進めている。

例えば岐阜大学と中部電力株式会社と協力し、岐阜大学構内に駆動式営農型太陽光発電実験設備を設置し、生育と発電に最適なパネル制御を検討するための実験を行っている（写真8）。

弊社では今後もより良い営農型太陽光発電の普及を目指し、営農型駆動式システム・架台の開発、改良を進めていく。またデータの蓄積を行い農業と発電の最適化を追求する所存である。そこから新たな価値を生み出し、農業の発展に寄与することを目指している。

営農型太陽光発電はまだまだ発展途上の分野である。営農者、企業、自治体等多くの方に営農型太陽光発電分野へ関心を持って頂くことを期待している。



写真8 生育と発電に最適なパネル制御を検討するための実験の様子

参考文献

- 合原亮一, 高橋伸英, 加藤茂春, 堀江智明, 2020, 営農型太陽光発電のパネル制御が水稻栽培に及ぼす影響, 農業食料工学会誌, 82 (4), 380-389.
- NPO 法人 MOA 自然農法文化事業団, 2011, 有機農業基礎データ作成事業報告書: 農林水産省補助事業, 20.
- 本間優, 土肥哲哉, 吉田好邦, 2016, 水稻栽培における営農型太陽光発電の実証とシミュレーション, エネルギー・資源学会論文誌, 37 (6), 23-31.
- 池鯉鮒悟, 2012, 国内の日射量変化について, 太陽エネルギー, Vol.38 No.5 (211), 49-54.
- 細野達夫, 野内勇, 1998, 水田からのメタンフラックスの日変化と地温との関連, 農業気象, 54 (4), 329-336.