

脱炭素社会のための持続可能な農業

－ 作物生産と再生可能エネルギー生産の両立 －

柴田 大輔^{1,2*}

Sustainable Agriculture in the Decarbonizing Society : Co-production of Food and Energy

Daisuke Shibata^{1,2*}

概要

農業は、田畑の耕運、農作物の収穫、温室や保存庫での温度管理、使用する肥料の製造過程などに化石燃料由来エネルギーを大量に消費しており、気候変動の要因である二酸化炭素を大気に放出している。さらに、農業分野は温室効果がより高いメタンなどのガスも大量に放出している。温室効果ガスが原因となり引き起こされる気候変動が人類活動に深刻な影響を与えるとの懸念から、化石燃料に依存しない社会（脱炭素社会）に向かうために、あらゆる産業で再生可能エネルギーの導入が進んでいる。本稿では、バイオエコノミー、サーキュラーエコノミー、公共投資、ESG 投資、RE100、SDGs をキーワードにして農業に再生可能エネルギーを導入することの意義を述べる。近年、太陽光発電コストが急激に下がり、化石燃料発電コストよりも安くなっていることから、従来のバイオマス由来エネルギーを農業に導入する議論だけでは不十分であり、太陽光発電由来エネルギーを導入することの技術的課題を述べ、再生可能エネルギー駆動型農業（再エネ駆動農業）を提案する。最後に、再生可能エネルギーの導入は農村を中心とした地域コミュニティを活性化する可能性があり、京都大学が提唱する持続可能な農業に向けたグリーンエネルギーファーム活動を紹介する。

1. はじめに

野菜、穀物などの農作物は二酸化炭素が光合成で固定化されたものであるが、食品としてすぐに消費され二酸化炭素を放出するので、大気中の二酸化炭素の増減にはほぼ影響しない。むしろ、現代農業においては、田畑を耕運するためのトラクターや農作物を収穫するためのコンバインの運転、肥料の製造、温室や保冷库での温度管理、農産物の運搬などに化石資源由来のエネルギーを消費しており、他の産業と同様に、農業全体としては二酸化炭素を大気に放出している。さらに、二酸化炭素よりも温室効果が高いメタン、一酸化二窒素を水田・畑から大量に放出している。

産業革命以来、化石燃料の大量燃焼によって大気中の二酸化炭素濃度が上昇し、その温室効果によって、大気温度が上昇し、気候変動のリスクが高まっている。その結果、大規模な災害の発生や農作物の不作による飢餓など、人類活動への様々な悪影響が懸念されている。2015 年に大気温度の上昇を

2019 年 7 月 3 日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所 森林代謝機能化学分野, ²同エネルギー理工学研究所 複合化学過程研究分野。

* E-mail: shibata.daisuke.h93@kyoto-u.jp

産業革命以前に比べて 2℃までに抑えることを目標にした国際的な枠組み「パリ協定」が採択された。全ての産業において、化石燃料の代替となる再生可能エネルギーの導入に向けた取り組みが始まっており、農業も例外ではない。

農業は、先進国であれ発展途上国であれ、複雑な課題が多い産業である。単なる技術的、経済的な要因だけでなく、地域文化、環境・景観保全などの要因が関わり、食料安全保証の面では国際的、政治的な側面もあるので、単純な議論には馴染まない。最近、農業に参入あるいは興味を示す企業が多くなっているが、単に作業効率を上げるだけでは解決できない場面が多い上に、制度上の制約も多く、企業の参入は容易ではない。日本においては、少子高齢化、収益性の確保の難しさなどがあり、後継者不足により、農業維持が困難になっている地域も多々ある。中山間地などでは、農業の衰退は地域コミュニティの消滅につながっている。

農業生産プロセスに必要とされるエネルギーを再生可能エネルギーで代替できれば、二酸化炭素放出量の削減に貢献するだけでなく、農産物の栽培コストの抑制による農業収益の向上、余剰の再生可能エネルギーが得られる場合は、その売買により収益性がさらに向上する可能性がある。農業にバイオガス発電などの再生可能エネルギーを導入することが地域再生につながることを農業経済学者村田武氏（九州大学・金沢大学名誉教授）は指摘している¹⁾。

パリ協定が採択された 2015 年を前後して、海外では風力発電と太陽光発電のコストが化石燃料での発電コストを下回るようになり、今では再生可能エネルギーが最も安い電力源になっている。本稿では、最近の国際情勢の中で農業に再生可能エネルギーを導入することの意義を述べ、農業生産に太陽光発電を組み込む技術的可能性、および、再生可能エネルギー駆動型農業について解説する。再生可能エネルギーの導入は農村を中心とした地域コミュニティを活性化する可能性があり、持続可能な農業生産に向けて産官学と連携している京都大学グリーンエネルギーファーム活動も紹介する。

2. 脱炭素社会に向けた農業とエネルギーを取り巻く状況

世界は脱炭素社会に向かって大きく舵を切っており、農業に再生可能エネルギーを導入することは必然的に要請される。化石資源依存社会から脱炭素社会へ移行する国際情勢の中で農業とエネルギーがどのように位置付けられているのかを関連するキーワードごとに紹介する。

2.1 気候変動リスク

気候変動は食料生産に悪影響を及ぼす可能性が高い。地球の温暖化が進むと農作物の栽培適地が変わり、生産量の確保が難しくなる。世界人口は、2050 年には 100 億人を超えたとの国連の予想があり、現在にも増して、深刻な飢餓が懸念されている。飢餓は、負の連鎖として貧困、紛争など社会の様々な不安要因を引き起こし、人類活動に大きな影響を及ぼす。

現代農業は大量の化石資源エネルギーに依存しているので、省エネと再生可能エネルギーの導入が必要であり、さらに、温室効果が高い農業由来のメタン、一酸化二窒素の放出を抑制する技術開発や今後の温暖化に適応した作物の育種なども必要である。

2.2 バイオエコノミー

2009 年に OECD（経済協力開発機構）は、新たな経済の枠組みとして「バイオエコノミー」(<https://www.oecd.org/futures/long-termtechnologicalsocietalchallenges/42837897.pdf>) を提唱した。生物資源（バイオマス）やバイオテクノロジーをベースにした経済活動をバイオエコノミーとしているが、化石資源に依存した社会から脱炭素社会に移行する際の経済体系であるとの広い意味合いで使われる場合も多い²⁻⁵⁾。植物バイオマス由来の製品は使用後の燃焼で二酸化炭素を放出したとしても光合成によって植物に再吸収されるので、大気中の二酸化炭素濃度を上昇させないという炭素循環の性質（カーボンニュートラル）があることがバイオエコノミーの考え方の根底にある。

2009 年以降、各国はバイオエコノミー政策を打ち出しているが、欧州では農業とエネルギー問題が

しっかりと組み込まれている場合が多い。一方、日本ではバイオエコノミーへの対応が遅れた。その背景として、2011年3月に東日本大震災による福島原発事故が起こり、エネルギー政策が混乱していたことが考えられる。この状況への危機感から、経済産業省の働きかけでバイオエコノミー調査委員会が立ち上がり、2017年にその報告書が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)から公表された(https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201708/20170000000796.html)。その後、政府、産業界(産業競争力懇談会など)での議論が深まり、日本政府は2019年6月21日にバイオ戦略を閣議決定した(<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/dai5/siryos3-2.pdf>)。しかし、農業、バイオ製品製造へのエネルギー問題が言及されておらず、今後の対応を期待したい。

2.3 サークュラーエコノミー

今までの経済活動では物質循環は必ずしも十分には配慮されてこなかったが、持続可能な社会の構築には、経済活動に関わる全ての物資を循環させる必要がある。農業では、例えば、リン酸肥料は資源量が限られ、特定の地域のみで算出するリン鉱石から製造されるので、循環的に使うべきである。農産廃棄物をメタン発酵させた後に残る液体(消化液)には、リン酸、窒素、カリウムなどの肥料成分が含まれており、田畑に散布することによって循環的に再利用できる。

2.4 公共投資、ESG投資、RE100

脱炭素社会への移行は容易ではないので政策レベルや産業界の支援が必要である。アメリカ農務省(USDA)では、化石資源由来の製品とバイオ由来の製品がある場合、後者を優先するBioPreferredプログラムを定めている(<https://www.biopreferred.gov/BioPreferred/>)。バイオ由来製品はコスト高であることが多いので、このような政府の後押しはその製品を作る産業を育てるために必要である。欧州でもこの仕組みが導入されている。政府が税金を使って、通常製品よりも高い価格で買い上げているので、国民の理解が必要であり、広報活動が重要である。

産業界では、環境(Environment)、社会(Society)、企業統治(Governance)を重視した企業に対するESG投資が広がっており、世界持続的投資連合によれば2018年のESG投資は世界で約31兆ドルである(日本経済新聞2019年4月28日)。ESG投資では、単なる目先の収益ばかりでなく、社会に対する責任を取れる企業が将来的に生き残れるとの判断がなされており、脱炭素社会に資する企業活動への投資が活発化している。天然ガスより二酸化炭素排出量が多い石炭火力への風当たりは強く、投資撤退(ダイベストメント)まで起こっている。今後は、農業への再生可能エネルギーの導入を後押しする農業技術分野へのESG投資も広がるだろう。

自社が企業活動で使う全てのエネルギーを再生可能エネルギーに代替することを宣言する企業活動を支援するRE100プロジェクト(<http://there100.org/re100>)に参加する企業は、Googleなどの大手企業を中心として増え、2019年6月の時点で185社が宣言している。ドイツでは「100%再生可能エネルギー地域」づくり運動が農村で行なわれている⁶⁾。

2.5 SDGs

国連はSDGs(持続可能な発展目標、Sustainable Development Goals)として、2030年までに達成すべき17項目を定めている。産業革命以降、化石資源の大量消費を原動力として人類の富が増加した反面、格差、貧困、紛争などが負の側面として顕在化しており、SDGsはこれらの解消を目指していると言える。ESG投資ではSDGsを達成する姿勢を評価している場合が多い。発展目標の多くは農業問題、エネルギー問題に直接的、間接的に関係している。

3. 農業での再生可能エネルギー生産

農林水産分野での温室効果ガスの排出量は日本の総排出量の2.8%であるが、その9割はメタン、一酸化二窒素であり、二酸化炭素の放出量は0.3%である。二酸化炭素の放出の内訳は農林業と水産業が

ほぼ同じ割合である (<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-53.pdf>)。農林水産業がGDPに占める割合が1.1%であることを考えると、温室効果ガスの排出が多い産業であると言える。メタン、一酸化二窒素は慣行農法の改善などによる削減が試みられている。本稿では、農業分野への再生可能エネルギー、特に太陽光発電によるエネルギー生産に焦点を当てる。以下で述べるように、農地での太陽光発電のポテンシャルは大きく、農業以外の分野での二酸化炭素排出削減にも貢献できることの意義は大きい。

農林水産省の資料 (<http://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/attach/pdf/index-118.pdf>) によると、再生利用困難な荒廃農地 (18.3 万ヘクタール) で太陽光発電を行うと年間 1,347 億 kW 時の発電が可能になると推定している。この値は国内総電力量の13%ぐらいに相当する。本稿で述べるように、荒廃農地以外でも農地を使つての太陽光発電は可能であるので、農地 450 万ヘクタール (国土面積 3,780 万ヘクタールの 11.9%) の一部を使つた太陽光発電のポテンシャルはかなり高い。農林水産省は、再生可能エネルギーの導入を通じて、農山漁村の活性化と農林漁業の振興を一体的に進めて行くとの方針で、実際の事例などを HP で公開している (<http://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/index.html>)。

従来の農業への再生可能エネルギー導入は、農産物であるバイオマス由来エネルギーに限られていた。しかし、太陽光発電のコストがここ数年で急激に下がっているので、土地利用の面で競合するバイオマス生産との関係性を整理する必要がある。

以下では、同じ面積の土地を使うのであれば太陽光発電の方が有利であることを示す。ただし、バイオマス発電は肥料成分の循環、地域での雇用創出などの要素があり、必ずしも二者択一ではないことも指摘する。さらに、農作物生産 (バイオマス生産) と太陽光発電の競合関係を緩和する技術である営農型太陽光発電の課題を整理し、新たな技術開発の方向性として、再生可能エネルギー駆動型農業 (再エネ駆動農業) を提案する。

3.1 バイオマス利用と太陽光発電のエネルギー比較

植物バイオマスとして蓄えられる太陽光エネルギーは地上に届く日射量の 1%未満であることが多い。光合成の効率、植物体の呼吸量などの計算から、維管束植物のエネルギー蓄積量の理論値は 4~6%程度と見積もられるが、理想的な栽培条件下でも 3%ぐらいが上限であり、実際にはそれよりかなり低い⁷⁾。バイオマス量が多い飼料用イネ品種の場合、栽培期間を半年として年間の乾物収量、年間の全日射量から計算すると、太陽光エネルギーの蓄積は 0.6%程度である。バイオマス生産には耕運、施肥、収穫、搬出にエネルギーを使うので利用できる正味のエネルギー量はさらに少ない。

一方、同じ条件で太陽光発電を行った場合、メガソーラー発電 (年間 60 万 kW 時/ha) の例では、年間の全日射エネルギー (日本の平均値: 1400 万 kW 時/ha) の 4%ぐらいが電力になっている。太陽電池製造に投入したエネルギーが生産したエネルギーと同じになるペイバックタイムは独立行政法人産業技術総合研究所太陽光発電研究センターによると、欧州では結晶シリコンで 1.5~2.0 年とされている (https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/supplement/supplement_1.html)。太陽電池の設置、保守にもエネルギーが必要だが寿命は 20~30 年程度なので、バイオマスに比べてかなり有利である。

海外では、太陽光発電コストは急激に下がり、2013 年で石炭火力 (約 11 円/kW 時)、2015 年にはガス火力 (約 6 円/kW 時) と同等になり、現在、最も安いエネルギー (約 5 円/kW 時) となっている (米投資銀行ラザード、日本経済新聞 2019 年 7 月 6 日)。

国内では、太陽光発電はまだ高コストであるが、同じ土地面積を使つて再生可能エネルギーを導入するのであれば、バイオマスよりも太陽光発電を利用の方が効率も経済性も高い。

ただし、バイオマス利用とは農産物利用そのものであり、農産物廃棄物、食品廃棄物からバイオガス発電でエネルギーを取り出すことには意義がある。農産物生産に投入したエネルギーの回収だけでなく、バイオマスに含まれる肥料成分を消化液の形で取り出し、田畑に還元することは資源循環を保つばかりでなく、肥料の製造工程で使われるエネルギーの節約にもなっている。さらに、それらのプ

ロセスで雇用が創出されることも地域社会にとっては重要である。資源循環の観点から農業でのバイオガス発電の実情に関しては参考文献 8 が詳しい。

バイオマス由来エネルギーは固定価格買取制度での買取価格が太陽光発電に比べて高いためにバイオマス発電が増えている。以前、ドイツでは高い売電収入を期待して、バイオマス発電のためだけの家畜飼料用トウモロコシ（デントコーン）栽培が広がり、農業体系が歪む事態になったが、現在では固定価格買取制度依存であれば農産廃棄物に限定されている⁹⁾ 国内では、バイオマス発電施設を設置したが、バイオマス収集で行き詰まっている例が多い（朝日新聞 2018 年 12 月 12 日）。バイオマスのエネルギー利用では、資源循環や熱利用などを考慮し、太陽光発電なども取り入れたシステム設計、地域住民との同意形成が大切だろう。

バイオマスから液体燃料を生産する研究開発が世界的に行われてきた。しかし、風力・太陽光発電コストが下がり、液体燃料で走るエンジン車から電気自動車（EV）へのシフトが現実味を帯び、エネルギー収支が厳しいバイオ燃料の研究は下火になってきた。ただし、バイオ燃料製造に必要なエネルギーを風力・太陽光発電エネルギーで代替できれば、バイオ燃料そのものが再生可能エネルギー保持体（エネルギーキャリア）になるので、自動車の全走行距離でのバイオ燃料コストが EV に搭載するエネルギー保持体である蓄電池コストと同等程度になれば、エンジン車が EV と共存していく可能性もある。

3.2 作物栽培と両立する太陽光発電

作物栽培と太陽光発電は太陽光エネルギー摂取のために広い面積の土地を使う点において競合しているが、以下で示すように、競合を避ける、あるいは、妥協点を探ることは可能である。

3.2.1 栽培していない期間の利用

田畑を一年間を通して使っているケースは比較的少なく、水田などは冬季に使用していないケースが多い。この期間だけを利用した可動式の太陽光パネルを設置することも理論的には可能である。ただし、降雪が多い地域での設置には工夫が必要だろう。

施設園芸の場合、冬季に加温の為にエネルギーを大量に使うので、もし、冬季に栽培していない田畑が近くにある場合には、加温に太陽光発電のエネルギーを使うことも可能かもしれない。

田畑の未利用期間を再生可能エネルギー生産に使うための装置などを設置して使うには、農地利用に関する農地法の制限を理解しつつ、実際の農地運用を管理している各市町村の農業委員会などとの調整が必要だろう。

3.2.2 波長選択性太陽電池の利用

作物（植物）の光合成は地上に到達する太陽光波長の一部を使っているに過ぎないので、それ以外の波長を使った発電は可能である。筆者は、科学技術振興機構（JST）低炭素プログラム ALCA プロジェクト「コンビナトリアルバイオケミストリーによる太陽電池有機素材の開発（研究代表者：柴田大輔）」で、京都大学化学研究所若宮淳志准教授（現、教授）、村田靖次郎教授との共同研究で、光合成で主に使われる 660nm 付近の光を透過し、それ以下の波長で発電する新規な色素増感型太陽電池を開発した。この太陽電池を透過する光でモデル植物シロイヌナズナを栽培することが可能であることを実験室レベルで確認した。

京都大学附属農場では、光を透過する有機薄膜太陽電池パネル（三菱化学社製）を、トマト栽培温室の内側に配置して、トマトの収量などを検証した。この研究は環境省からの受託研究「光透



写真 1 有機薄膜太陽電池パネルを貼った温室でのトマト栽培（京都大学附属農場提供）

過型有機薄膜太陽電池を用いた施設園芸における CO₂ 排出削減技術」(平成 27～29 年度、代表者：京都大学 土井元章)として行われた(写真 1)。研究の詳細は環境省 HP (https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cpttv_funds/pdf/prod2017/p20170303.pdf) で知ることができる。

3.2.3 営農型太陽光発電(ソーラーシェアリング)

田畑に支柱を立て、3m ほどの高さに適当な隙間を開けて太陽電池パネルを配置し、その隙間から差し込む太陽光で作物を栽培する方法があり、ソーラーシェアリングと呼ばれている(写真 2)。一時的に太陽電池パネルで光が遮られて影ができて、太陽の日周運動によって影が移動するので、作物には一定量の光が当たるとの理屈である。この方法の考案者らは、植物の光合成には光飽和現象があり、光飽和点を超える太陽光を利用して発電すると主張している(http://www.maff.go.jp/j/shokusan/kankyo/seisaku/s_midorimizu/pdf/h24f02.pdf)。

しかし、この主張は植物生理学の観点からは誤りである。光飽和現象は一枚の葉に光を当てた時の生理現象を観察しているに過ぎない。上位の葉を通過、反射した光は下位の葉で使われるので、植物体全体(群落)では光飽和は起こりにくい。多くの農作物は十分な日射を必要とするので、ソーラーシェアリングは植物が受け取るべき光を遮って、その分を電気エネルギーに変換しているに過ぎない。

植物が受け取る太陽光エネルギーが少なくなると収量は低下する。稲作で実験した例では、太陽電池パネルの遮光率が 20% の場合、米収量は 2 割減少するとの報告がある¹⁰⁾。この報告書では 50% の遮光率まで実験しているが、遮光率にほぼ反比例して収量が減少している。営農発電をする場合に、光を散乱するフィルムを利用してレタスの収量を上げる研究もされている¹¹⁾。日陰でよく育つ植物の場合(例えば、アシタバ、園芸用ジャノヒゲなど)では、遮光することにより、強光障害が抑えられるので、その場合は有効な方式だろう。この方式の営農発電を普及させるためには、科学的な根拠に基づいた様々な作物の生育データの集積が必要である。

ソーラーシェアリング方式の太陽電池パネルは建築基準法の適用を受けていない構造物であり、強風で太陽電池パネルが飛散する可能性がある。軟弱土壌である田畑、水田に鉄パイプを 1m ほど差し込んで支柱全体を支えており、風耐力の観点からの基準作りが必要だろう。

ソーラーシェアリング農法は農地法に抵触する可能性があったが、農林水産省は 2013 年 3 月 31 日に農林水産省農村振興局長からの各都道府県知事などへの通達(農振第 2657 号)の中で、この種の営農型農地発電を一定の条件下で許可した。通達では、農地法に従った一時転用許可が必要であること、容易に撤去可能な簡易な構造であること、収穫量が 2 割以上減少していないこと、品質が著しく低下していないこと、農業委員会が監視していること、一時転用は 3 年以内であり、農業委員会の許可により延長が可能であることなどが決められている。3 年の一時転用期間は、2018 年 5 月に 10 年以内に延長された。

営農型太陽光発電(ソーラーシェアリング)は農林水産省の資料によれば、平成 28 年度の時点で 1,269 件の農地転用許可実績がある。電力は固定価格買取制度を利用して売電していると考えられる。再生可能エネルギーに関する固定価格買取制度では申請時の売電価格が 20 年間は法律で保障されているので、太陽光パネル設置のような高額投資のリスクを下げ、再生可能エネルギー導入を促している。一方、ソーラーシェアリングは農作物栽培と再生可能エネルギー生産が両立することが前提であるが、前者よりも後者での収益性が高いので、農作物栽培への営農意欲の低下が懸念される。営農型太陽光発電の背景、制度、実施状況は参考文献 12 が詳しい。



写真 2 営農型太陽光発電による野菜栽培
(撮影：著者、2013 年)

3.2.4 農業に太陽光発電を導入する課題

太陽光発電の固定価格買取制度での買取価格が毎年下がり、2019年度では営農型太陽光発電のような小規模発電（10kW-500kW）では14円（+税）/kWhとなっている。ソーラーシェアリングでは、作物の種類にもよるが、一般的に作物の収穫量が低下するので、売電により得られる金額よりも作物販売による収益減が大きいと営農型太陽光発電をする意味がなくなる。固定価格買取制度は再生可能エネルギーを導入するための仕組みなので、導入が進んだ段階では制度そのものがなくなる。今後は、固定価格買取制度に依存せず、化石資源エネルギーに依存していた農作業を再生可能エネルギーで代替することが必要だろう。農作業には、田畑の耕運、施肥、草刈り、農薬散布、収穫、運搬、保存管理など多様な形態のエネルギー消費があり、すぐに代替される訳ではないが、技術開発、補助金制度の導入などを多面的に検討する必要がある。

3.2.5 再生可能エネルギー駆動型農業（再エネ駆動農業）の提案

営農型太陽光発電について述べたが、この農法は土地利用で競合するバイオマス生産と発電の折衷案である。日陰でよく育つような日照量の要求度が低い作物の場合はこの方法は一举両得となるが、通常の作物では光要求性が高く、太陽光パネルで遮光すると収量が低下する（前述）。

一方、化石燃料よりも太陽光発電コストが低いことを念頭において、農業収益を維持、あるいはそれ以上に増やすために、農地を栽培部分と発電部分に分け、発電したエネルギーを使って作物の生産性を増加させる技術が開発できれば、画期的である。以下の説明のために、営農型太陽光発電と区別するために“再生可能エネルギー駆動型農業（再エネ駆動農業）”と仮に命名する。

再エネ駆動農業は、農地法の農地利用に関する制約があり、現在は実際に行うことはできない。しかし、大学や研究機関が技術開発して、実際に有効であることを示せば、営農型太陽光発電の例があるように（前述）、農地法の運用を変えればよい。

作物は栽培の過程で様々な環境ストレス、例えば、強光、乾燥、加湿、病害などを受けているために収量が下がる。技術的には様々な方法でこれらのストレスを回避できることが知られているが、何らかのエネルギーが必要になる。そのエネルギーを太陽光発電で供給することは理論的には可能である。現在の植物生理学、作物栽培学の基礎研究のレベルは高く、しかも、国内の植物研究者のレベルが高いことは文部科学省科学技術・学術政策研究所（NISTEP）の「サイエンスマップ 2016—一論文データベース分析（2011-2016年）による注目される研究領域の動向調査—」にも示されており、技術開発を推進すれば、再エネ駆動農業は可能になるだろう。

このような技術開発が進めば、理論的には、農地以外の土地で得られた再生可能エネルギーを農業に供給し、農業生産を上げることも可能であるが、農家がエネルギーを購入する必要があり、農業収入の向上に繋がらないことに留意すべきである。

4. 分散型再生可能エネルギーを農業に導入する意義

本稿では、脱炭素社会に向かう世界情勢の中で、農業に再生可能エネルギーを導入するケースとして、営農型太陽光発電と新たな提案として再エネ駆動農業を紹介した。今後、再生可能エネルギーが農業に使われると、余剰電力が地域に供給される可能性が高い。環境経済学者によれば、地域への再生可能エネルギー導入は地域の自立と活性化を促すとされているので^{13,14}、農業が抱える様々な問題の解決に貢献すると期待できる。

世界の農業経営の85%が2ヘクタール未満（日本では80%）の農地を耕作し、世界の食料生産の8割を支えている¹⁵。これらの家族農業は、食料生産だけでなく、地域の環境・景観保全に重要な役割を果たしており、農業を営む地域・農村が文化継承を担っている。世界の家族農業では多くの場合、貧困に直面している。一方、日本の農村では少子高齢化が進み、農地の集約化、大規模農地が増え、家族農業は減少する傾向にある¹⁶。近年、ロボット、IOT技術、ドローン技術、人工知能（AI）技術

など先端技術を使って農業の非効率性を改善する「スマート農業」(<http://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/>)を農林水産省が進めているが、この新しい農業技術は大規模農業が経済的競争力を保つためには必須ではある。しかし、地域コミュニティを支える家族農業を営む農家は収入が低く、置き去りにされている。農業での再生可能エネルギー生産が可能になれば、余剰電力からの収入によって生活が向上するだろう。また、余剰電力による新産業が地域で起これば、地域コミュニティが維持されるだろう。このようなシステムが日本で成功すれば、貧困と向き合っている世界の家族農業への技術供与にも繋がり、SDGsに貢献できる。

環境省は、第五次環境基本計画（2018年閣議決定）に含まれる「地域循環共生圏」構想に沿った政策を進めている（<https://www.env.go.jp/seisaku/list/kyoseiken/index.html>）。この構想は、地域資源を最大限活用し、自立・分散型の社会を形成しつつ、地域の活力が最大限に発揮されることを目指す考え方であり、SDGsや政府が進めるSociety5.0の実現にもつながるとされている。国連は2019年から2028年を「家族農業の10年」と位置付けて、家族農業の関わる施策を進めているが、農業と再生可能エネルギー生産を両立させる考え方は「地域循環共生圏構想」、「家族農業の10年」と基本的なコンセプトで重なっている部分も多い。

京都大学附属農場は、2017年に大阪府高槻市から京都府木津川市に移設された際に、持続可能な次世代型農業のあり方として、自然エネルギー利用型農業モデルの構築を掲げており、農業生産と再生可能エネルギー生産を両立させる農業をグリーンエネルギーファームと定義し、研究や教育活動を行ってきた（<http://www.farm.kais.kyoto-u.ac.jp/research04>）。夏季集中実習「グリーンエネルギーファーム論と実習」を開校し、農業に興味を持つ学生の教育を行っている。

京都大学農学研究科はグリーンエネルギーファーム構想を社会実装するために、NTTデータ経営研究所にコンサルタント業務を委託してグリーンエネルギーファーム産学共創パートナーシップを立ち上げた（2017年10月、<https://www.nttdata-strategy.com/gef/>）。このパートナーシップでは京都大学以外の大学の研究者も参加し、民間、民間同士の共同開発などを進めている。

5. おわりに

近年、太陽光・風力発電コストが化石資源発電よりも安くなり、脱炭素社会に向けた動きが加速化している。地域分散型エネルギーである再生可能エネルギーが農業に導入され、地域の活性化に繋がるためには、農業でのエネルギー利用に関する新たな技術開発が必要である。京都大学のグリーンエネルギーファーム構想は、農学、工学、エネルギー科学、情報、環境、経済の専門家が交流するとともに、社会実装するために企業と連携しており、今後の進展を期待したい。

6. 謝辞

本稿の前半で紹介したバイオエコノミーの動向などに関しては、一般財団法人バイオインダストリー協会坂元雄二氏、藤島義之氏（現在、NEDO）、（株）三菱ケミカルリサーチ増田宏之氏らとの意見交換を踏まえて記述しており感謝いたします。後半で紹介した内容は、京都大学グリーンエネルギーファーム構想の立ち上げに際し、以下の京都大学職員（敬称と職位は省略）北島宣、中崎鉄也、土井元章、富永達、白岩立彦、松村康生、河田照雄、中野龍平、滝澤理仁、間合絵里、鍋島朋之、山本衛、篠原真毅、野平俊之、石原慶一、尾形清一、植田和弘、西嶋一欽、若宮淳志、吉川暹、松山隆司（故人）、小川正昭、松井孝之（現在、農林水産省）、喜多山篤（現在、東京大学）、橋本伸、高橋和彦の各氏、および、大阪府立大学太田大策氏、東北大学本間香貴氏・金子俊郎氏との議論の中で至ったものであり、ここに感謝いたします。また、グリーンエネルギーファーム産学共創パートナーシップに関する部分では、NTTデータ経営研究所の齊藤三希子氏（現在、EY Advisory & Consulting Co., Ltd.）らに感謝いたします。

参考文献

- 1) 村田武, “日本農業の危機と再生 地域再生の希望は食とエネルギーの直産に”, かもがわ出版, 2015, pp. 37-56.
- 2) 五十嵐圭日子, バイオエコノミーによるゲームチェンジを私たちはどう受けるか: 欧州の動向に対する一考, バイオサイエンスとインダストリー誌, vol.75, pp.344-348, 2017.
- 3) 増田宏之、小林 幹, 欧州バイオエコノミー関連政策と今後, アグリバイオ誌, vol.2, pp.1164-1167, 2018.
- 4) 坂元雄二, 国連「持続可能な開発目標 (SDGs)」に貢献するバイオプラスチックの普及促進, バイオプラジャーナル誌, vol.70, pp.5-9, 2018.
- 5) 柴田大輔, バイオエコノミー社会におけるバイオマス利用の動向, バイオサイエンスとインダストリー誌, vol.77, pp.64-67, 2019.
- 6) 村田武, “ドイツ農業と「エネルギー変換」”, 筑波書房, 2013, pp.1-77.
- 7) Hamlyn G. Jones, “植物と微気象”, 久米篤・大政謙次監訳, 森北出版, 2017, pp. 398-401.
- 8) 河原林由基・村田武, 第1章 農協が取り組める畜産バイオガス発電, “自然エネルギーと協同組合”, 村田武・河原林由基編著, 筑波書房, 2017, pp. 1-30.
- 9) 河原林由基, エネルギー作物ではなく食品残渣でバイオガス発電 (ドイツ・バイエルン州のヘーグル農場), “自然エネルギーと協同組合”, 村田武・河原林由基編著, 筑波書房, 2017, 99-107.
- 10) 本間優, 土肥哲哉, 吉田好邦, 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, 37, 23-31, 2016.
- 11) Tani, A., Shiina, S., Nakashima, K., Hayashi, M., Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels, *Journal of Agricultural Meteorology*, 70, 139-149, 2014.
- 12) 坂内久・河原林由基, 第2章 農協が取り組める営農型太陽光発電 (ソーラーシェアリング), “自然エネルギーと協同組合”, 村田武・河原林由基編著, 筑波書房, 2017, pp. 31-58.
- 13) 高橋真樹, エネルギーでまちづくり 地域と市民が担うこれからのエネルギー事業, 世界 別冊 再エネ革命 RE100 日本は変わるか?, 岩波書店, No. 907, 170-177, 2018.
- 14) 諸富徹, 地域経済循環と成熟型都市経営, “人口減少時代の都市”, 中公新書, 2018, 160-178.
- 15) 河原林由基, 家族農業をSDGsの主役に-国連「家族農業の10年」を迎えるにあたって-, 農林総研 調査と情報, 第70号, pp.20-21, 2019.
- 16) 大泉一貫, “2025年 日本の農業ビジネス”, 21世紀政策研究所編, 講談社現代新書, 2017, pp. 3-12.

著者プロフィール



柴田 大輔 (Daisuke Shibata)

＜略歴＞ 1983 年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了 (農学博士) / 1984 年米国 Purdue 大生化学部門ポスドク / 1987 年三井植物バイオ研究所主任研究員 / 1999 年かずさ DNA 研究所主席研究員 / 以降、同部長、農工大、奈良先端大、東北大、京大、岐阜大にて客員教授、京都大学農学研究科、同エネルギー理工学研究所、同生存圏研究所にて特任教授、バイオインダストリー協会理事、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞分子生物学、バイオマス変換、太陽電池。エネルギーの視点で農業と地域の活性化に貢献したい。＜趣味など＞Raspberry Pi で”iBad”を自作。