DOI:10.20776/S18814859-19-1-P30

特集／脱炭素スマート農地プロジェクトキックオフシンポジウム

スマート農業技術の可能性

千葉大学大学院園芸学研究院准教授
深野　祐也

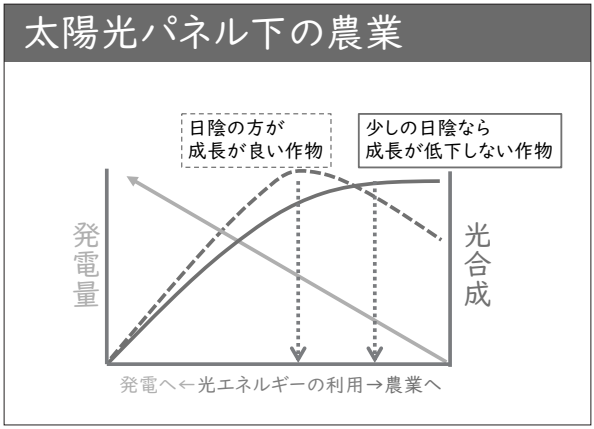
千葉大学園芸学部の深野祐也と申します。私からはソーラー下の農業に関して、スマート農業技術の可能性というタイトルをいただき、これまでの議論や課題を述べさせていただきます。少しアカデミック寄りと言いますか、おふたりに比べると地味な話になりますが、どうぞよろしくお願いします。

今日お話する内容としましては、スマート農業技術ということですが、まずはその前に農業がどうなっているのか、太陽光パネルの下で農業をするというのはどのようなことか、そこにはどのような課題があるのか、そしてその課題を解決するために、スマートを含めどのような技術が使えるかということをみなさんと共有させていただこうと思います。

私は、「農業」の話をします。ソーラーシェアリングは、農業として見た場合には、かなり大胆なことをしているように私自身は感じます。上にある太陽光発電のパネルの方は、農業をしない太陽光発電の技術開発もありますし、確立された方法であると思います。農業の上で行うソーラーシェアリングに関しても、先ほどの馬上氏の話で、最適化しつつあり、コスト、お金がかかって売電収入として得られる収入も、変動はあると思いますが、ある程度の予想ができると言えると思います。

一方、パネルの下で行う農業に関しては、大袈裟かもしれませんが、おそらく有史以来存在しなかった方法です。あえて日陰でしか農業できない作物を日陰で農業をすることはあったと思いますが、そうではない作物を大規模に日陰の下で農業をするというのは、情報の蓄積がないことがいちばんの課題だと思

【図1】

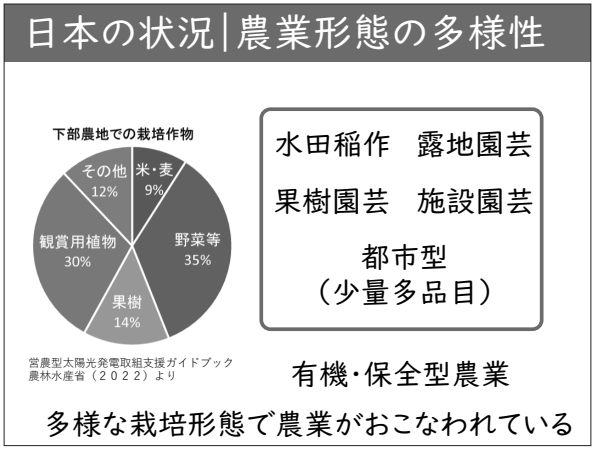


（出典）当日の発表者のスライドより。以下すべて同じ。

います。パネル下の農業で何をするか、先ほどいろいろとお話がありましたが、どのような農業をするかがそのものも非常に多様です。農業も多様であるし、かつ日本に限らず世界中で気候風土、それから、この産地はこれがいいですというような販路の多様性もあり、どこでどのような品目・品種を、どのような管理で栽培すればよいかという情報がほとんど整理されていません。個々の事業者さんが蓄積しているということはあると思いますが、全くオープンになっておらず、共有されていない。情報の蓄積・共有を進める必要性があると思います。

このあたりは参加されている方は周知のことかもしれませんが、そもそも日陰で農業ができるのかということを、非常に簡単な説明で議論してこうと思います。ソーラーシェアリングは光エネルギーを植物、農業に使うか、パネルとして太陽光発電に使うか、この分配の問題だと思います。発電量に関しては、パネルに使えば使うほど線形に伸びていく。一方で、農業ということでは、植物の成長は頭打ちになることがあります。そのなかで、少しの日陰程度であれば100％に近いところで成長できる作物があるかもしれません（**図1実線**）。その場合、矢印で示したように、農業と発電の両方のメリットが大きいということになります。

【図２】



それから日陰の方が成長がよい植物、先ほど馬上氏からもご紹介がありましたようにそのような作物もあります（**図１点線**）。その場合も、発電量はそれなりに得られて、農業生産としても得られる。しかしながら、これはモデルなので実際どのような結果が得られるかは分かっていないところが多いのです。つまり農業としては、一定の遮光下でも作物の成長を妨げず、十分に栽培・収穫できる方法、栽培方法や品種を探索することが課題と言えると思います。

日本の現状を農林水産省のガイドブックで見ますと、パネル下の農地での栽培作物として、**図２**のような割合が紹介されています。この割合は品目ごとですが、農業のやり方として見たときには非常に多様で、水田稲作、露地園芸、果樹園芸、施設園芸、それからここには書かれていませんが、おそらく、都市型と言われる少量多品目の農業をされている方も入っていると思います。さらに慣行農業いわゆる化学肥料や農薬を使う農家さんもいますし、それを減らす保全型的な有機的な農業をされている方もおられ、パネル下の農業そのものは非常に多様だと言えるのが特に日本の現状だと思います。

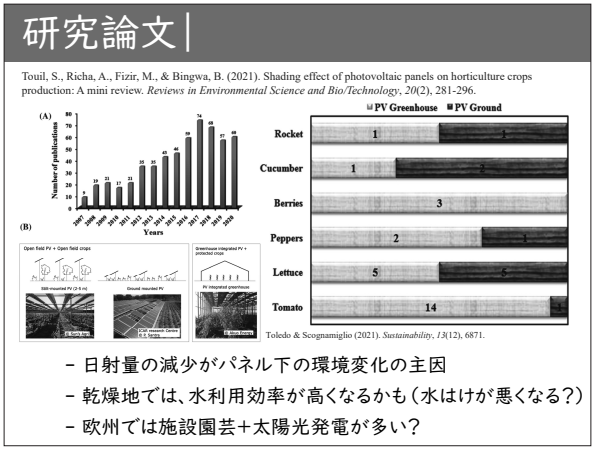
さらに日本の特殊性として、ヨーロッパやアメリカ、特にヨーロッパと違うのは、水田稲作が日本の農地の大部分を占めるので、そこで行われるソーラー

シェアリングはいろいろな点で違ってきます。さらに、こちらの方が重要かもしれませんが、水田の耕作放棄地を再利用というか利用することで急拡大してきたという背景があります。つまりすでに営農している畑もしくは水田の上にパネルを設置するのではなく、耕作放棄地であるところに新たに営農型の太陽光発電システム、つまり農業と太陽光発電のセットをデザインして進める。このようなところが日本の特殊性というか、ひとつの特徴だろうと思います。つまり事業者さんから見ると、まず「どこで」という選択肢が非常に大きいということがひとつ、そして何を作るかという選択肢も大きいですし、かつパネルの遮光率、農業から見ると遮光率が非常に重要ですが、その遮光率と農業生産、品目、それから場所、ここだけを見ても３つあります。では、耕作放棄地からソーラーシェアリングをする場合に何を栽培したらよいか、先ほど質問がありましたが、これは自由に選べる状況にあると思います。

農水省のガイドラインにもQ&Aの２つ目に「どういった作物で取り組めばよい？」と書かれています。ここに書かれているのは、「農業技術が確立されその地域の気候風土にあっており、販路も確保しやすいという観点から、その土地や地域で通常栽培されている作物を選ぶのが望ましいと考えている。」と書かれており、非常になんだかつきはなすような答えになっています。その地域で栽培されているものがいいのではないか。ひとつ注意しなくてはいけないのが、先ほどの馬上氏や倉阪先生からもありましたが、農地転用許可基準としてパネル下であってもあまり収量が下がるとダメですということや品質が下がるとダメですということが書かれています。これは絶対に守らなくてはならない。この状況で何を選ぶかというと難しい。水稲は別として、ほとんど決められない状態にあるのではないかと思います。品目・場所・農地条件・産地によって異なりますし、遮光率、どのくらいの遮光率にするかによっても異なります。

繰り返しますが、情報の蓄積、共有が少ないことが非常に大きな課題だと思います。これがざっくりとした農業から見た営農型太陽光発電の現状だと思います。情報の蓄積・共有という点で、誰でも最も手に入りやすいものとしては、やはりアカデミックな分野で行われる研究論文が第一に挙げられると思います。

【図 3】



発表された論文は世界中に公開され手に入りやすいので、知見として有用です。たとえば**図 3** は 2021 年に発表された論文の内容です。園芸の作物に限ったものですが、ソーラーシェアリングの日陰効果がどの程度園芸作物に影響を与えているかというもののレビューです。いろいろな研究をまとめた、まとめ論文のようなものです。

左上に示されたグラフによると、ソーラーシェアリングのような農業に関する論文として出版された数を示したものですが、ずっと増え続けています。アカデミックな研究としての注目も高まっていることが分かると思います。ただ、論文の多くが工学的な見地や発電の見地からで、農業の見地からのものは少ないです。この総説論文でひとつ目に書かれている知見としては、当然かもしれませんが、パネル下で環境要因がいろいろと変わり日射量の減少が最も大きな要因であるということがまとめられています。さらに、これは馬上氏の発表でもありましたが、ヨーロッパの乾燥地での研究がやはり多く、そのような場合にはパネル下で農業をすることで水利用効率が高くなるということが結論づけられています。結論づけられているというほど強い主張ではありませんが、高くなるかもしれないということが言われています。

これは逆に言うと、後で議論しますが、日本のようなモンスーンアジアの畑地では水はけが悪くなるということと表裏一体ではないかと思います。さらに、どのような作物がこの論文の中で研究されているかというと、**図3**の右のグラフに示されているように、ルッコラ、キュウリ、ベリー、ペッパー（唐辛子）、レタス、トマトです。数としては、トマトとレタスが圧倒的に多いことがお分かりになると思います。

さらにグラフの色の違い（左の薄い色と右の濃い色）が何を示しているかと言いますと、前者が施設園芸（温室）の上で太陽光発電をする場合、後者が露地の上で太陽光発電をする場合です。おそらくこの研究の多くは欧州で出版された論文ですが、施設園芸プラス太陽光発電の方が論文ベースでは多いということが分かると思います。

重要であると思われる論文の成果をいくつか簡単にお伝えします。まず遮光率と生産性です。当然いろいろなケースで遮光率が高くなれば高くなるほど、生産性が落ちるというデータが示されています。たとえばこのトマトの研究は、遮光率0％の時は生産性が最も高く、15％になると少し下がるということが示されていて、さらにトマトの色も15％の遮光率だと色が変わり、50％くらいにすると色づきが非常に悪くなるというようなことが示されています。

またコムギとジャガイモの研究では、左がコムギで右がジャガイモの例ですが、単年度の試験ではなく複数年度試験をしています。この研究では、ある年ではパネル下の方が、コムギもジャガイモも生産性が低くなっていますが、ある年は逆にパネル下でコムギは変わらず、ジャガイモに関しては高くなっている。この年は猛暑もしくは渇水の年だったようです。

この研究1例だけですが、パネルの効果は年度のよって違う。たとえば猛暑や渇水ではパネル下の方が有利になる場合もある。場所にもよりますが、そのような場合もあるということを示唆しています。このような知見を積み重ねて、ではどのような作物が向いているのだろうと、先ほどの質問にありましたように興味を持たれると思います。

重要なのは日陰でもある程度の光合成効率を維持できる作物が第一です。さらに少し見落とされがちでほとんど研究はありませんが、私はこれが大事だと思いますし、農業従事者の方は当然思っていると思いますが、被陰反応が少ない品目に注目する必要があると思っています。

植物は面白い反応をたくさん持っていますが、被陰反応とは、群生する植物のうちひとつが日陰に隠れてしまったときに、いちかばちかで背を伸ばす反応のことです。つまり小さな植物は、周りの植物に光が遮られて暗くなったりすると、競争に負けて枯れてしまう。その時にどうするかというと、ひょろひょろと上に伸びていきます。茎が細くなったりしますので植物にとってリスクのある反応ですが、周りの植物よりも上に行こうとする反応を持っています。徒長と言ったりしますので、みなさん馴染みがあるかもしれません。

光の波長の変化や光の量の変化によって、作物の草丈が増えたり、茎と茎の間の節が伸びたり、葉色を落としたり、枝分かれを減らしたり、葉を薄く広くしたり、そのような急速な変化をします。これは先ほど言いましたように競争に勝つためのいちかばちかの反応と言えます。農業にとって厄介なのは、これらの反応は全て基本的に栽培には悪影響になりますので、このような反応が少ない作物や品種を選ぶ必要があります。

日本でもパネル下で作物の生産がいろいろとされていますが、それらがどのように生産されているか、少ないながらも学術的な研究として出版されたものがあります。日本はやはり稲作の国なので稲の研究が多いですが、稲の場合、遮光率にもよりますが収量が 2〜3 割低下や玄米の品質が少し劣化することが報告されています。

大豆の研究もされていますが、大豆は先ほどの被陰反応によって徒長する、草丈が伸びることが遮光率によっては起きることが報告されています。では、日本のソーラーシェアで栽培される作物で大きな割合を占める「観賞用植物」とは何かというと、倉阪先生の調査でもありましたが、サカキやセンリョウ、シキミなど、これらはもともと日陰条件で苗を作ったり成長させたりするいわゆ

る耐陰性の植物と言われていたもので、このような作物でしたら、パネル下でもあまり気にせずに生産できているということになると思います。

ただ論文のように共有されているデータは、多くないのではないかと思います。現状で、ある事業者さんがパネル下で何か農業をしたいとなったときには、不明点が多く、手探り状態になってしまうと思います。品目で選ぶのも難しいですし、品目の中に品種があります。同じ稲でもコシヒカリがあったりニッポンバレがあったり、そのようなかたちでいろいろと品種があります。農業試験場は新しい品種ができたときに、品種測定としてどのくらいの穂ができるかとか色はどうかとか、病気への抵抗性はどうかとか、いろいろ調べますが、やはり当然、日陰でどのくらい成長できるかは測定されていません。被陰耐性がどのくらいかは測定されていないので分からない。さらに、あとで議論しますが、日陰だけではない、日陰になることに伴っていろいろな土壌変化が起こるかもしれない。そのような変化ももしかしたら品種選びに大事かもしれません。品目も大事ですが、品種がどのくらい大事か、品目の中の品種によってもいろいろ違うというデータをお見せします。

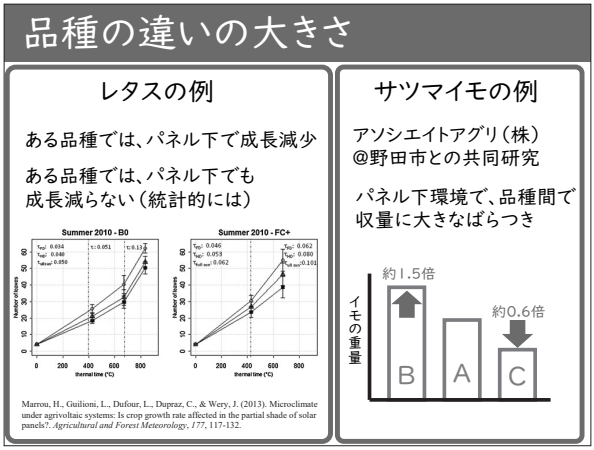
たとえば**図4**の左はレタスの例ですが、ある品種ではパネル下で成長が減少します。一方である品種では統計的には成長は減らないということが論文では書かれています。

さらに同図の右は、学生さんと野田市にあるソーラーシェアリングの企業であるアソシエイトアグリ㈱さんとの共同研究ですが、これはちょうど先月からデータを取ったばかりで、あまりきちんと解析できていませんが、明らかにパネル下環境の収量は品種間でばらつきがあります。非常に大きなばらつきが品種間であることが分かってきています。

たとえば代表的な品種に比べて、ある品種では1.5倍くらいイモの重量がありますし、ある品種は全然収量がないということが分かってきていますので、やはり品種の違いは非常に大きい。しかしこの辺まで公開されているデータはほとんどありません。

さらに、農業はいろいろありますので細かいことを言いますと、一般的な話

【図 4】



としてソーラーパネル下で作物栽培をしたときに、どのように収量が決まるかといいますと、ひとつは遺伝的な要素です。たとえばどのような品目を作るか、どのような品種を作るか、しかしそれだけでは当然決まらなくて、この点を最適化することも必要ですが、栽培環境をどう最適化するかということも同じくらい大事です。日射量が下がることはどうしても避けられない変化なので、それ以外の栽培環境を最適化する必要があります。

一例として、全然研究がないので可能性だけですが、倒伏（作物が折れたり倒れたりすること）が起こりやすくなるかもしれない。パネル下では被陰反応が起きて、草丈がひょろっと伸びることで、倒れてしまう。これは穀物であるイネやムギでは非常に厄介な問題として捉えられています。倒伏が起こりやすくなるかもしれないので、もしかしたら肥料の量をコントロールする必要があるかもしれません。というのも、過去の膨大な研究で肥料を与えると倒伏が起こりやすくなる。これも品種によって影響は違いますが、一般的に施肥をすると倒伏が起こりやすくなるということがわかっていますので、もしかするとパネル下では適切な施肥の量が違うかもしれない。それから同じように栽培密度も倒伏と関係しています。

栽培密度が高いと、草丈が高くなり倒伏につながることがわかっていますので、もしかするとパネル下ではそうではない、一般的な農地と植える播種密度、種を蒔く密度が違うかもしれない。このようなことが全然わかっていません。日射が劇的に変わるのは当然ですが、それによっていろいろな物理的環境が変わるかもしれません。

先ほど紹介しましたように、パネル下では乾燥しにくくなるという主に欧州の研究でよく言われています。先ほどのジャガイモとコムギのように渇水年によっては生産性が高くなる、パネル下ではないところよりも有利になるかもしれない。しかし我々はそのような乾燥しやすいところには住んでおらす、湿潤なモンスーンアジアにいます。そのようなところではパネル下は土壌水分量が高く維持されてしまうかもしれません。

これは農業ですと、湿害と呼ばれることが多く、湿害が起きやすい作物では注意が必要です。特に日本の事例として、耕作放棄地になる場所の多くが水田であると思いますが、水田からソーラーシェアリング農地の畑になったところでは、このような湿害が起きやすい可能性があると思います。このあたりも全く知見がありませんので、私個人の意見というか予想になっています。

これも馬上氏からありましたように、日陰なので当然、夏の暑さを緩和することもあると思います。日陰になることで、作業者の負担は減ると思います。さらにこれはメリットして捉えることができるかもしれないのは、たとえば早期収穫、秋作で早く植え付けが出来たりすることができれば、今までは暑くて植え付けすることができなかったところでも、日陰だと早く植え付けすることができて、早期収穫できる。早く収穫できれば、市場価値が高いので農家さんにはメリットになるかもしれません。

このように収量に与える農業と言うと、ある品目を育てればある収量が採れるという簡単な関係が想像されがちですが、全然そうではなく、品目や品種によってもばらつきが大きく、栽培環境によっても非常に左右されます。

さらに重要なのは、掛け算です。相互作用がある。ある品種はこういうのが

いいけれども、ある品種はこうではない方がよいとか、そのようにかなりたくさんの組み合わせがあります。広く展開するため、あるいはいろいろな方が参入しやすくするためには、情報の蓄積と共有が大事だろうと思います。農業技術的な課題をざっとご紹介させていただきました。

最後にどのような技術がこの課題解決に使えるかというお話を、これはアイデアだけですが、紹介します。

この辺はみなさんご存じかと思いますが、スマート技術も様々です。ハードウエアとしてはドローンやセンサー、あとはトラクターやトラクターに内蔵する何かなどそういうもので、ソフトウエアとしては、たくさんのデータを解析できるようなシステムが今すごく発達しているので、これらを農業に応用することで、みなさんがハッピーになるということだと思います。

スマート農業を考えたときに、ソーラーシェアの大きなメリットは、いたるところに電源と架台があるということだと思います。これは、ひとつ重要な点だと思います。

でも逆にソーラーシェアならではの難しいところがあり、ネガティブなところを列挙しますが、やはり特殊な構造物なので、支柱がたくさんあり既存の農業機械ではそのまま自動化することが難しい。ドローン空撮は農業で非常によく使われていますが、パネルに覆われているので、それは不可能でしょう。そしてソーラーシェアの下は、多様な農法が行われていますので、これを使えばソーラーシェアの人はOKですというひとつの技術で全て導入可能というものはおそらくないでしょう。

さらにこれは社会的な問題かもしれませんが、現在のところ多くの農家さんが小規模で、かつ全国に分散されています。小規模だということで、ソーラーシェアに特化した公的な技術開発がおそらく期待できません。つまり、日本の農業で大切な役割を果たしている公設農試、各都道府県の農業試験場などの技術開発があまり期待できない。全国に分散されているので、あまり期待できないかなと思います。ですので、まずソーラーシェアで何か技術を使おうと思う

と、すでに普及した技術を導入して、それが使えるかどうかを試験するのが最初のステップかなと思います。

たとえばになりますが、フィールドセンサやその大量のデータを分析することはもうすぐにでもできるかと思います。日射、土壌水分、温度などを面的に図ることでパネル下とそうではない露地では、何がどのくらい違うのかとか、遮光率によってどのくらい、いろいろな遮光率の農地があると思いますが、それによってどのように変わっていくのか。そして、農地や成長のムラ、ムラは農業従事者にとって非常に厄介なのですが、パネルを設置すると、パネルは多くの場合ゼブラ状になっているので、それによって農地のムラ自身が増えるかもしれない。今安価なものが結構ありますので、フィールドセンサをたくさん埋め込むことで分かってくるかと思います。

このプロジェクトに入っているヤンマーホールディングス㈱さんがされると聞いていますが、自動操舵トラクターなどは馬上氏の紹介にありましたように、今や大きな架台、高さが結構ある農業機械がある程度入ることができる架台の太陽光パネルがありますので、このような試験をしていくことがまず展開できることだと思います。

あとは、おそらく果樹園で展開できると思いますが、草刈りも結構自律走行で無人でできるものもありますので、すぐに導入できる。電気なのでそのままエネルギーの自給自足的な農業につながる最初のステップのひとつだと思います。架台があることでカメラを設置しやすいので、植物の生育や病害虫をいち早く検知するということも展開しやすいかもしれません。

架台＋電源という特徴を生かした展開が考えられると思います。これはすでに展開済みの取り組み事例の紹介ですが、営農型太陽光発電をしつつ近隣の施設園芸に電力を供給して、こちらでうまく使う。施設園芸というのは、各種センシングと解析の技術、いわゆるAI的な技術開発が進んでいますので、これらを組み合わせることで農業生産も最適化できますし、エネルギー利用も最適化する、そのような展開もあるかと思います。

最後に、これは全然スマートではないと思いますが、実際には結構大事だと思うのは、口コミです。情報を蓄積したり公開したり、最も力強いのは科学的な論文、学術研究だと思いますが、遅いです。データを取ってから公開まで早くても１年や２年どうしてもかかってしまいますし、そんなに網羅的にはできない。さらに先ほど言いましたように、都道府県の農業試験場による共有・普及も現状ではなされていないということで、可能な範囲で生産者同士の口コミを通して技術の蓄積・共有ができれば、お互いにメリットが大きいのではないかと思います。

口コミによる情報の蓄積と共有は（ソーラーシェアリング以外の）一般の農家さんもされていて、自分のところで囲い込む秘密の技術もおそらくあると思いますが、多くは日々の雑談や地域の会合、あるいはそこを回る地域の普及員の人や『現代農業』のような雑誌、農業新聞などで結構惜しげもなく技術を披露して共有する農家さんがいますが、ソーラーシェアリングでは、各地に点在しているのでこれが結構難しい。なので、ソーラーシェアリングの農業生産者間の非公式なネットワークいわゆる口コミ的なものがあれば、分野としてはすごく発展するのではないかと思います。

今回のプロジェクトで研究会等がありましたが、その研究会はコアな部分になると思いますので、それプラス何か非公式なものがあってもいいのかと思います。スマートかどうかわりませんが、幸い様々なSNSや技術があるので、このようなものを使ってネットワークができれば非常にいいかと思います。

ソーラーシェアリングをやっている各農家さんにとっては、なぜ共有しなくてはいけないのか、という思いがあると思います。自分のところだけで十分ではないかというのがあると思いますが、当然知識の共有というのは基本的に自分ではなくて集団のメリットになるので、あまり自分のところのメリットにはならないと思います。

しかしなぜ一般の農家さんはそのような知識の共有をしているかというと、ひとつはブランドというか産地の形成につながる。例えば三浦大根。あの場所で採れるこの農産物は非常に価値が高い、ブランドとして形成されれば単価が高

くなる。そういうものに貢献するのでおそらく近隣農家さんと切磋琢磨しているのではないかと思います。

ソーラーシェアの場合はこれが結構難しいと思います。ただ、もしソーラーシェアで生産された農産物がブランド化できれば、みなさんにとって非常にプラスになるのではないかと思います。

ここでひとつ考えられるのは、これはちょうど先月ニュースになっていましたが、環境に配慮した農産物に対して農水省がラベルを付ける、ラベリングする、認証するということが書かれています。ここでいう環境配慮がどのようなものかと言いますと、化学肥料を減らしたり、詳細は省きますが、メタンの量を減らしたりするような水稲で中干期間を延長するようなことをした農産物にラベルを与える。温室効果ガスを削減した農産物ですというラベルを与える。ソーラーシェアの下で生産される農産物は、地域単位で見ると温室効果ガス削減に大きな貢献していと思います。この事実は、まだ一般の消費者には周知されていませんが、もしソーラーシェアで生産された農産物がブランド化されればみなさんにプラスになる。ブランド化するための第一歩としては、まず生産者間のコミュニティ、非公式のものがいいと思いますが、コミュニティを形成して、生産物の質と量を向上させる必要があると思います。

ソーラーシェアリングは新しい農業形態で、既存の農業とは栽培方法から品種の選び方まで最適化が全然違う。そして、課題が非常に大きいと言えると思います。いくつかの技術でそれは解決できるかもしれませんが、技術だけではなかなか解決することが難しいので、広く展開し、お互いに利益になるような情報共有が今後必要になってくるかもしれないという話で私の発表を終わらせていただきます。ご清聴ありがとうございました。

（ふかの　ゆうや）