

# 有機薄膜太陽電池を用いた発電する ビニールハウス

## Greenhouses to generate electricity using Semitransparent Organic Photovoltaics

渡邊康之\*

### 1. はじめに

農業革命及び産業革命以来、世界人口が増加するとともに化石燃料の消費量も増加しており、この傾向は今後 100 年間継続していくものと思われる。さらに、未来を俯瞰してみると、エネルギー・環境・食糧問題に対する解決の糸口を探ることは、世界人類の存亡の危機を回避する上で重要な研究課題である。ここで、宇宙空間から地球に降り注ぐ太陽光エネルギーに注目すると、無尽蔵かつ膨大なエネルギー源であるため、食糧やエネルギー生産への高度利用技術が確立できれば人類が必要とするエネルギーの大部分を賄うことも可能となる。最近ではメガソーラーという言葉も市民権を得て、我が国でも各地域で広大な敷地に太陽光パネルを設置した発電所を目にするようになってきた。さらに、2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災に伴い東京電力福島第一原子力発電所の事故の影響で、電力を安心安全なシステムで供給可能な太陽光発電などの再生可能エネルギーへの期待感が高まっている。また、日本の食を支える農業者の高齢化や TPP 問題を受け、いよいよ農業の衰退や自給率の低下、食への安心・安全が大きな課題となっている<sup>(1), (2)</sup>。

ここで、我が国の国土利用の現況に目を向けると、国土面積の 12% が農用地（約 460 万ヘクタール）として利用されており、さらにその 10% 程度を太陽光発電に利用すれば、全電力量の 3 割程度を供給することが可能と言われている。すなわち、農地に太陽電池を設置し、農業と太陽光発電事業の両立が可能になると、日本の電力供給だけではなく農業復興への貢献度をも高められる可能性を秘めている。そのような状況の中、太陽光を発電と農作物栽培の両方に利用するソーラーシェアリングが考案さ

れ<sup>(3)</sup>、農林水産省は 2013 年 3 月日付で、農地に太陽光発電設備を設置するための運用方針を条件付きで示した<sup>(4)</sup>。現在、ソーラーシェアリングでは主にシリコン系太陽電池が使われていると考えられるが、シリコン太陽電池は重いことや値段が高いなどの課題に加え、太陽光パネル下での影が農作物に与える悪影響も懸念されており、検討すべき課題が山積している。

本稿では、ソーラーシェアリングが抱える問題解決策として、新たに支柱を立てる必要のないビニールハウスへの搭載を勘案し、軽量で安価な半透明有機薄膜太陽電池を用い、太陽光を農作物栽培に必要な光波長と太陽光発電に利用する光波長とで調和させる「ソーラーチューニング」技術<sup>(5), (6)</sup>について紹介する。

### 2. 発電するビニールハウス開発への指針

#### 2.1 有機薄膜太陽電池を用いた植物栽培の原理

図 1 に太陽光を農作物栽培に必要な波長と太陽光発電で利用する波長域を調和させるソーラーチューニングの概念図を示す。図 1 (a) では、太陽光を半透明有機薄膜太陽電池による発電とその透過光を用いて植物栽培を行うシステムの概念図を表している。図 1 (b) に、光合成作用スペクトルと半透明有機薄膜太陽電池の太陽光下での透過光スペクトルを示す。ここで、光合成作用スペクトルとは、1999 年に田澤信二氏が 61 種類の植物について植物の光合成に必要な光スペクトルとして報告<sup>(7)</sup>したものであり、植物工場の人工光源開発等でよく引用されるデータとして知られている。これらの図から、農作物栽培に必要な光である青色域と赤色域の光を透

\* 公立諏訪東京理科大学 工学部 機械電気工学科

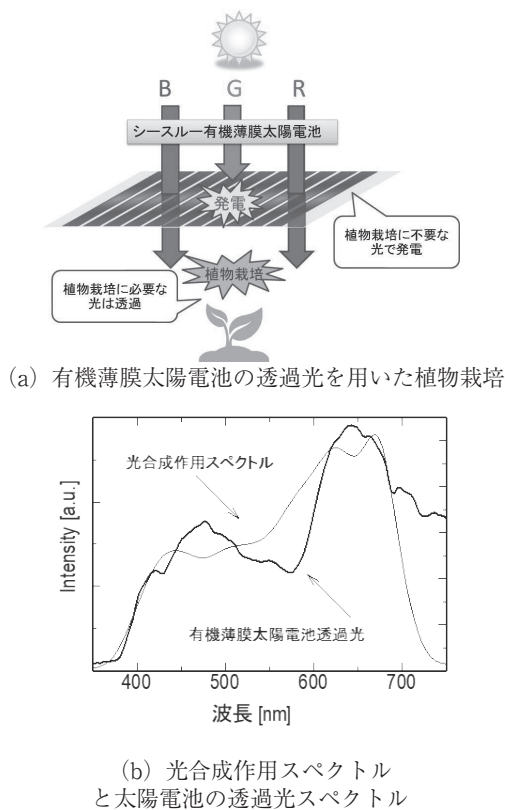


図1 農作物栽培と太陽光発電を両立するソーラーチューニング技術

過し、農作物栽培にあまり寄与しない緑色域の光で発電可能な光透過型有機薄膜太陽電池を開発することで農作物栽培と太陽光発電の両立が可能となることがわかる。

## 2.2 植物栽培と発電に利用する光量

植物の光強度と光合成速度の関係を示したものを光-光合成曲線といい、図2に示す。光強度に対して光合成速度が比例する線形領域と光強度に対して光合成速度が一定となる飽和領域とに分けることができる。光強度がゼロのときには、暗呼吸のため葉の光合成速度はマイナスの値を示す。さらに光強度

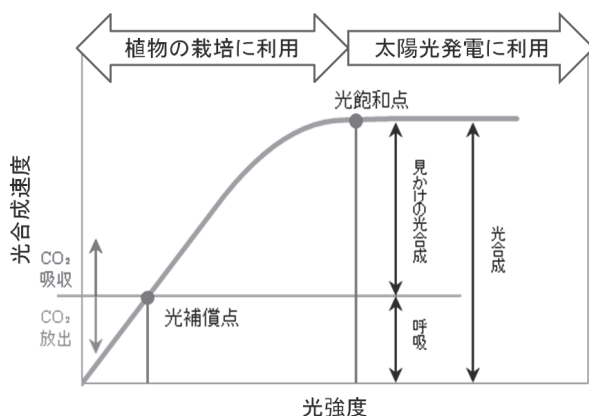


図2 植物の光合成速度と光強度の関係

が高くなるとともに光合成速度は上昇し、プラスの値を示すようになる。なお、光合成速度がゼロの値をとるときの光の強度を光補償点という。光合成速度の増加は、弱光域では直線的で、光が強くなるにつれてその傾きが徐々に減少し、やがて傾きがゼロとなり飽和する。弱光下での直線の傾きを初期勾配といい、光合成における光利用の効率の指標として用いられる。なお、光強度として葉にあてた光強度をとる場合と葉が吸収した光強度をとる場合があるが、葉が吸収した光強度を用いた場合の初期勾配は量子収率と見なされる。また、飽和光下の最大光合成速度はしばしば光合成能力と呼ばれる。この光-光合成曲線から植物の光合成には図2の光飽和点以上の光強度は必要がないことがわかる。つまり、光飽和点以下の光量を植物の光合成に利用し、残りの光飽和点以上の光量を太陽光発電に利用することができれば太陽光エネルギーを農業と太陽光発電に利用することが可能となる。勿論、このデータは植物の種類によって異なることは言うまでもなく、詳細は、植物生理学や農学の教科書を参照されたい。

## 2.3 植物栽培と発電に利用する光波長

図3に太陽光スペクトル及び光合成の明反応で光エネルギーを吸収する役割をもつ光合成色素の代表格であるクロロフィルの光吸収スペクトルを示す。太陽光スペクトルは、光の低波長側から400nm以下の紫外光(UV)、400nm～700nmの可視光、700nm以上の赤外光(IR)に至る広範囲の波長域にわたり分布していることがわかる。一方、農作物栽培に必要な光波長について考えてみる。植物は光受容タンパク質をいくつかもっており、光合成のための光受容体としてよく知られるクロロフィル(葉緑素)では、図3に示すように400nm～500nmの青色光と600nm～700nmの赤色光吸収しているこ

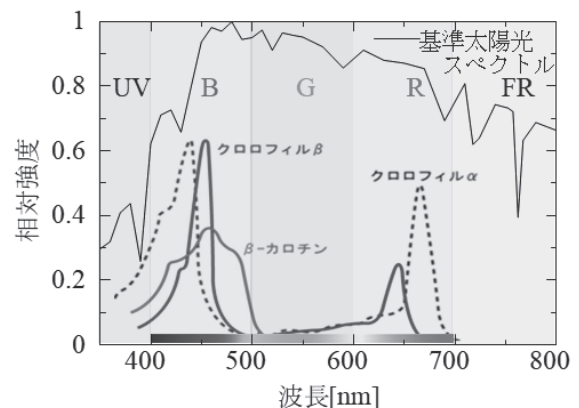


図3 太陽光スペクトルと光合成色素の吸収スペクトルの関係

とがわかる。その他、植物が光を認識するしくみとしては、光の強さや明暗周期などの光環境を認識するための光受容体としてフィトクローム（主に赤色光、遠赤色光を吸収）、クロプトクローム（青色光を吸収）、フォトトロピン（青色光を吸収）が明らかにされている。これら光受容体に関する研究は、主に生物物理学や植物生理学、近年では分子生物学の技術を駆使して進展している。以上のデータをもとに、太陽光が植物に与える影響について、可視光領域に限定して考えてみると、青色域（400nm～500nm）は植物の形態形成に作用する波長帯域、緑色域（500nm～600nm）は光合成色素が吸収しにくく光合成に作用しにくい波長帯域、赤色域（600nm～700nm）は光合成色素に吸収されやすく光合成に最も作用する波長帯域であることがわかる。つまり、植物は主に青色光と赤色光を利用していることがわかる。

そこで、本研究では植物の成長に寄与しない緑色域を発電に利用し、残りの青色域と赤色域を植物栽培に有効に利用することで、太陽光を植物栽培と太陽光発電の両方に利用することが可能である点に着目した。

### 3. 有機薄膜太陽電池の発電特性

本学（公立諏訪東京理科大学7号館2F）のガラス窓際付近にて太陽光が差し込む条件の下で半透明有機薄膜太陽電池の発電特性について測定を行った。このときのガラス窓透過光スペクトルを図4に示す。図5に太陽電池の配置写真を示し、図6に正面と側面のI-V特性を示す。また、この条件下での太陽電池特性を表1に示す。図4の透過光スペクトル放射照度を基準に太陽電池の変換効率を求めた。

図6の太陽電池特性において短絡電流が正面、右側、左側の順で低くなる傾向を示し、表1より、変

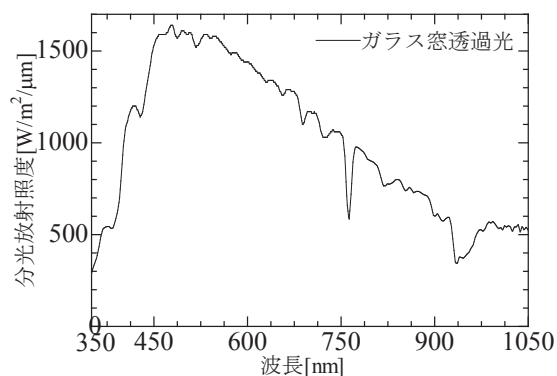


図4 ガラス窓の透過光スペクトル

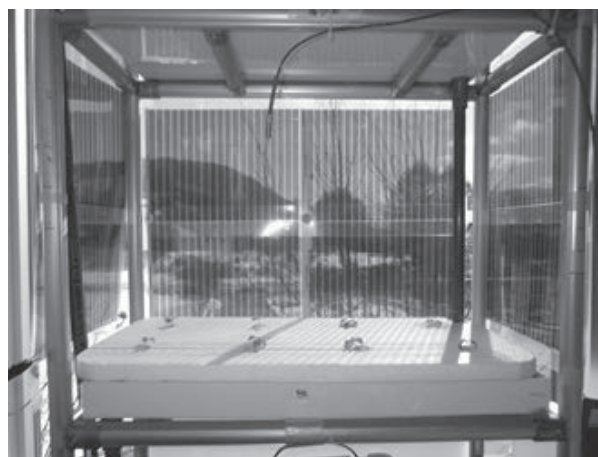


図5 ガラス窓付近に設置した有機薄膜太陽電池

表1 各配置による有機薄膜太陽電池の測定結果

|                         | 側面:左    | 正面      | 側面:右    |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| 短絡電流 $I_{sc}$ (mA)      | 22.004  | 128.952 | 59.646  |
| 開放電圧 $V_{oc}$ (V)       | 10.52   | 11.1872 | 10.9411 |
| 最大出力電力 $P_{max}$ (mW)   | 159.123 | 902.89  | 438.38  |
| 最大出力動作電圧 $V_{max}$ (V)  | 8.79    | 8.47    | 8.7     |
| 最大出力動作電流 $I_{max}$ (mA) | 18.1028 | 106.599 | 50.388  |
| 曲線因子 FF                 | 0.68741 | 0.62587 | 0.67174 |
| 変換効率 $\eta$ (%)         | 0.89    | 4.89    | 2.46    |

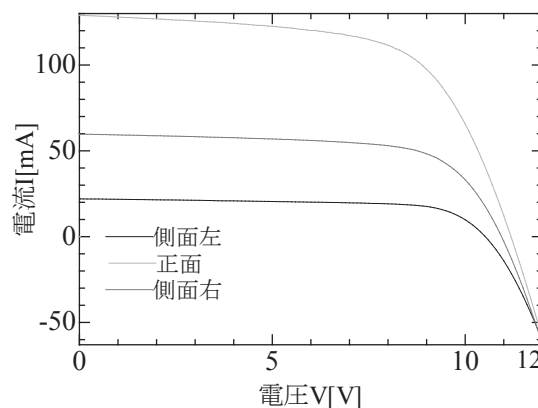


図6 各配置による有機薄膜太陽電池特性

換効率は正面、右側、左側の順で低くなる傾向を示した。特にこの中では正面の変換効率が一番高く、公表値を上回った。しかし、これは正午における測定時の結果であり、太陽の位置は刻々と変わるので、この結果は、参考までにしておきたい。

### 4. 有機薄膜太陽電池を用いた植物栽培実験

#### 4.1 屋内栽培結果

本研究では最終的に屋外にて半透明有機薄膜太陽電池の透過光を用いた植物栽培、つまり「発電するビニールハウス」を実証することを目的としている。

そのためには、半透明有機薄膜太陽電池の透過光を用いた植物栽培において、通常のビニールハウス栽培と同等の収穫量や品質を保証する可能性について定量的に検証しておく必要がある。しかしながら、研究の第一段において、屋外の農場で実験をするには次のいくつかの課題がある。実際の農場では土、水、光等のパラメータをコントロールするのが非常に難しい。例えば、土壌に含まれる肥料等の成分違いが栽培に与える影響が大きいことに加え、成分等の管理や制御を定量的に行うことが困難である。つまり、工学的な実験では、他のパラメータを同一にし、1つのパラメータを振って、効果を確認するというのが常套手段であるが、実際の農場では必ずしもそうはなっていないので、再現性に乏しいという課題がある。そこで本研究では、上記の屋外の農地での課題をクリアにするため、液肥栽培を可能とする植物栽培ラックを用い、半透明有機薄膜太陽電池を用いた植物栽培実証実験において、通常の農業ビニールシートでの栽培実験と比較して、ハウス内の温度湿度状況等をモニタリングしながら作物への影

響について検証を行った。まず、屋内の実験においては、液肥を用いた植物育成ラックにおいて、農業用ビニールシートを用いた場合と半透明有機薄膜太陽電池を使用した場合との比較実験を行った。栽培に用いたのはサンチュである。本研究で用いた植物栽培ラックの上段では半透明有機薄膜太陽電池、下段では農業用ビニールシートでの栽培を行い、液肥は上段から下段に循環しているため、液肥成分を同一とした実験が可能である。

図7(a)は未来の太陽光利用植物工場を勘案した「発電するビニールハウス」のモデルとして、通常の農業用ビニールシートの代わりに半透明有機薄膜太陽電池を用いて栽培した結果を示しており、図7(b)は、基準データとして通常ビニールハウスで使用する透明な農業用ビニールシートで囲んで栽培した結果を示した。これらの写真でもわかるようにサンチュの栽培結果の外観においては両者の間で大きな違いは見られなかった。半透明有機薄膜太陽電池の透過光で栽培されたサンチュの最終的な収穫量については、比較用通常ハウスに対して同様の結果を得ることができた。この際、育成のスピードについては、葉の枚数や大きさの測定値から違いは見られないことを実証した。

#### 4.2 屋外栽培結果

屋外の実験においては、通常の農業用ビニールハウスに半透明有機薄膜太陽電池を使用した場合において、通常農業ビニールハウスと比較して、ハウス内の作物への影響及びハウス内の温度湿度状況においてどのような差が出るか検証することを目的に実験を行った。

図8は、屋外のハウスにおいてミニトマトを栽培した結果である。図8(a)は、基準データとして通常ビニールハウスで使用する透明な農業用ビニ



(a) 半透明有機薄膜太陽電池を用いた植物栽培実験



(b) 農業用ビニールシートを用いた植物栽培実験

図7 半透明有機薄膜太陽電池を用いた屋内栽培実験



(a) 通常の農業シート



(b) 半透明有機薄膜太陽電池

図8 半透明有機薄膜太陽電池を用いた屋外栽培実験

ルシートを用いて栽培した結果を示しており、図8(b)では上記の農業用ビニールシート上に半透明の有機薄膜太陽電池を搭載して栽培した結果を示した。これらの写真からもわかるように栽培結果の外観においても上記の屋内栽培実験と同様の結果を得た。ミニトマトの栽培育成状況では、半透明有機薄膜太陽電池の透過光で栽培されたトマトについては、定植から収穫の時期を同様にして比較した場合は比較用通常ハウスに対して8%減となる程度であったが、これは育成のスピードが若干遅れ、収穫時期が後にずれる程度で、最終的には同量の収穫量となることを実証した。なお、ハウス内の温湿度については、半透明有機薄膜太陽電池を用いたハウスは遮光される分、比較用通常ハウスに比べて、温度は数℃低いときがあったが、植物栽培に影響を及ぼす程の温度差でないと考えられる。

## 5. 発電するビニールハウスのモデル例

### 5.1 発電量の試算

ここで発電するビニールハウスのモデル例として、図9に示すような縦40m、横5mのビニールハウスのアーチ状の上面に半透明有機薄膜太陽電池を搭載した場合について考える。この場合、発電面積は、アーチ長さが $2.5\pi$  m、天井面積は約 $300\text{m}^2$ となる。簡単のため、この $300\text{m}^2$ に対して垂直に太陽光が降り注ぐと仮定する。また、太陽光の一日当たりの日射量を $3.3\text{kWh}/\text{m}^2$ 、有機薄膜太陽電池の発電効率を5%、最大出力を $50\text{W}/\text{m}^2$ とすると、ビニールハウス全体の最大出力は、 $50\text{W}/\text{m}^2 \times 300\text{m}^2 = 15\text{kW}$ 、一日当たりの発電量は $3.3\text{kWh}/\text{m}^2 \times 300\text{m}^2 \times 5\% = \text{約} 50\text{kWh}$ となる。では、一日当たりの発電量 $50\text{kWh}$ に対して、農地で何ができるかを考えてみると下記ようになる。

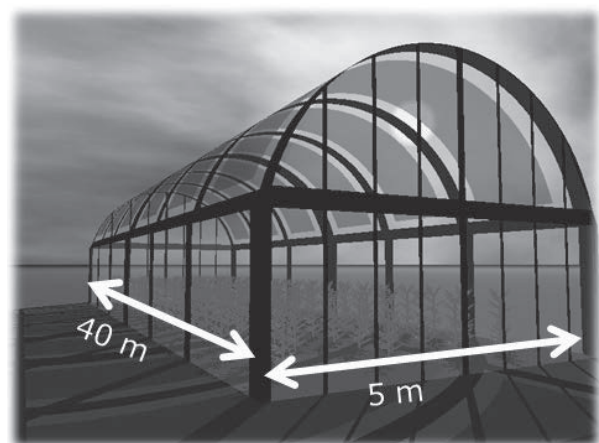


図9 発電するビニールハウスのモデル例

### 5.2 ハウス栽培用品と消費電力

表2に上記の計算結果を受けて農地で利用可能なハウス栽培用品と消費電力を示す。一日当たりの発電量 $50\text{kWh}$ を利用して、ヒートポンプで14時間、除湿器で27時間、換気扇で581時間、送風機で139時間、ナノバブルで66時間の駆動が可能となり、ハウス栽培で課題となる温度管理で必要となる電力の大部分を発電するビニールハウスで賄うことも夢ではない。

さらに、一年間の発電量は $50\text{kWh} \times 365 = 18000\text{kWh}$ となり、電気代を $1\text{kW}$ 当たり20円とすると $18000 \times 20\text{円} = \text{約} 36\text{万円}$ となることから、一年間で36万円の節約が可能となる。しかしながら、上記の計算はあくまでも曲面形状の太陽電池を平面上にした場合の簡単なモデル計算結果であることに注意を要する。

この課題を解決するために、現在、太陽電池の曲面形状での発電量の試算についてのデータを参考にしながら、農業への適用を考慮した半透明有機薄膜太陽電池の出力特性及び透過光評価<sup>(8)</sup>やソーラーチューニングハウスの発電特性と発電量推定<sup>(9)</sup>等に関して、理論と実験の両面から検討を行っており、モジュール内の回路形成の最適化を図っている。

## 6. ソーラーシェアリングとの比較

図10に従来の「ソーラーシェアリング」<sup>(10)</sup>と半

表2 ハウス栽培用品と消費電力

| 項目         | 消費電力       | 補足  | 50 kWhで運転可能な時間 |
|------------|------------|-----|----------------|
| ハウス用ヒートポンプ | 3.4 kW     | 7馬力 | 14時間           |
| ハウス用除湿機    | 1.4~1.8 kW | 2馬力 | 27時間           |
| ハウス用循環扇    | 71~86 W    | -   | 581時間          |
| ハウス用送風機    | 260~360 W  | -   | 139時間          |
| ナノバブル      | 760 W      | -   | 66時間           |



【従来の研究】  
無機系太陽電池の問題点  
・日陰ができてしまう  
・重い、新たな設備必要  
・栽培効率の低下



【本研究】  
有機系太陽電池の優位性  
・日陰ができない  
・軽い、ビニールハウスに搭載  
・栽培促進機能の付加も可能

(a) ソーラーシェアリング (b) ソーラーチューニング

図10 従来のソーラーシェアリングと半透明有機薄膜太陽電池をソーラーチューニングとの比較

透明有機薄膜太陽電池を農地の上に用いて植物栽培を行う「ソーラーチューニング」との比較例を示す。一般的なソーラーシェアリングでは、図 10 (a) の写真に示すように農地の上に設置した短冊状の太陽電池で発電を行い、各太陽電池の隙間を通り抜けてくる太陽光を用いて農作物栽培を行っている。これは素晴らしいアイデアではあるが、日陰ができてしまうため農作物の収穫量の確保に対して不安が残るだけでなく、重量のある太陽電池を設置するための支柱が必要となり初期投資費用がかかるという課題も残る。一方、図 10 (b) にビニールハウスでの農作物栽培施設において、ビニールハウス上に半透明有機薄膜太陽電池を搭載したときの植物栽培の様子を示す。ここで特筆すべきは、図 7 で紹介したように農作物栽培に必要な青色光及び赤色光を通す半透明太陽電池を用いており、農地全体に影を作らずに栽培が可能である点である。さらに、有機半導体デバイスのフレキシブルかつ軽量である点を活かし、既存のビニールハウス上に設置が容易であり、特別な支柱などを使わずにシステムを構築できるという優位性があることに加え、発電した電力を売電することなく同じ場所で利用するのであれば、従来の農業用ビニールシートと同じ扱いになるため、地元の農業委員会への申請は必要がなく、事務的な手間も省けるメリットがある。

さらに、従来の無機系太陽電池を用いたソーラーシェアリングと本研究の半透明有機薄膜太陽電池を用いたソーラーチューニングの実験において、変換効率、発電量、コスト、ソーラーシェアリングで得られる収入の面から比較した結果を表 3 に示す<sup>(11) - (13)</sup>。モジュールの変換効率に着目すると、多結晶シリコンが 13% であるのに対し、半透明有機薄膜太陽電池は 5% 程度とする。一方、農地の上に太陽光パネルを設置する際の全耕地面積に対する太陽光発電面積の割合は、多結晶シリコンを用いたソーラーシェ

アリングの場合は 30% であるのに対し<sup>(14)</sup>、半透明有機薄膜太陽電池を用いたソーラーチューニングの場合では光の透過性を利用しているため 100% となる。ここで、実質的な太陽電光発電量は、上記のモジュール変換効率に全耕地面積に対する太陽光発電面積の割合の積で表されることに注目して頂きたい。つまり、全耕地面積に対する実質的な太陽電池利用効率を計算すると、従来のソーラーシェアリングでは 4% となり、半透明有機薄膜太陽電池を用いた場合には 5% となる。これを 1 反あたりの 1 年の発電量を計算し売電収入に換算すると、有機薄膜太陽電池を植物栽培に用いた場合は 250 万円となり、ソーラーシェアリングの約 200 万円と比較して、年間で 50 万円もの増収が見込めることになる。つまり、半透明有機薄膜太陽電池を用いたソーラーチューニングの技術は、農地に対して 100% 設置可能なため、トータル発電量は従来のソーラーシェアリングを上回るということである。

以上のソーラーチューニングの発想による発電するビニールハウスに関する計算では、半透明有機薄膜太陽電池の優位性を強調するために変換効率を 5% としたが、今回実験で用いた太陽電池の変換効率は約 4% 程度であり、従来のソーラーシェアリングと比較した場合、発電量や売電収入に違いはないことになる。しかしながら、有機薄膜太陽電池及び色素増感太陽電池の一番のメリットは、印刷技術等によって安価に大面積で作製できる点であり、使い方次第で上記に述べた通り、変換効率は半透明型であれば 4% ~ 5% もあれば、従来の無機系太陽電池と比較しても充分勝てる可能性があることを強調しておきたい。最後に本稿で紹介してきた「ソーラーチューニング」のコンセプトが近い将来、実用化に向けて加速するとともに農業と融合する有機エレクトロニクスの誕生を願いたい。

## 7. おわりに

屋内栽培及び屋外栽培の実証実験において、半透明有機薄膜太陽電池を農作物の上に設置し、その透過光で植物栽培した場合において、通常のハウス栽培や太陽光利用型植物工場と比較しても植物の収穫量に差はなく、野菜の味覚等においても大きな影響は認められなかった。ここで、上記で紹介した半透明有機薄膜太陽電池を用いた植物栽培の結果を植物工場などの屋内栽培技術と農地でのビニールハウスでの技術に分けてまとめると下記のようなになる。

まず、植物工場の課題としては、如何にしてコス

表 3 ソーラーシェアリングとソーラーチューニングの発電量の比較

| コスト試算項目    | 単位                                 | 従来の<br>ソーラーシェアリング | 本提案の<br>ソーラーチューニング |
|------------|------------------------------------|-------------------|--------------------|
| 太陽電池       |                                    | 多結晶シリコン           | 有機薄膜               |
| 発電効率       |                                    | 13%               | 5%                 |
| 日間発電量      | kWh / m <sup>2</sup>               | 0.43              | 0.17               |
| 太陽光発電面積の割合 |                                    | 30%               | 100%               |
| 年間発電量      | kWh / 反<br>(kWh / m <sup>2</sup> ) | 46,586<br>(47.0)  | 59,725<br>(60.2)   |
| 売電収入       |                                    | ¥1,956,595        | ¥2,508,456         |

トを削減できるかにかかっていると言っても過言ではない。太陽光利用型植物工場において、太陽光を発電と農作物栽培に利用可能となれば、植物工場が必要となる電力の一部を太陽光発電で賄うことが可能となり、植物工場の低コスト化に寄与できると考えられる。次に、農地への発電技術に関しては、ソーラーチューニングでの技術に対しては、農林水産省が農地での太陽光発電を許可する際に示した主な条件、①容易に撤去可能な簡易な構造であること、②収穫量が2割以上減少していないこと、③品質が著しく低下していないこと、の以上3つをクリアしていることを示唆している。本稿では、農地での太陽光エネルギー利用に関して、農作物栽培に必要な太陽光スペクトルに注目し、太陽光を発電と農作物栽培で分かち合う「ソーラーチューニング」の技術を独自の観点から紹介してきたが、本コンセプトに基づき、太陽光と光合成藻類による燃料生成、さらには太陽光と人工光合成による燃料生成技術へも応用可能な汎用性の高い技術となることを祈りたい。

なお、本誌面では当研究のコンセプトをより広い分野の方々に知って頂くために太陽電池の構造や植物育成条件等の詳細な点は敢えて割愛させて頂いた。さらに知りたい方は遠慮なくご連絡頂ければ幸いです。

## 謝辞

本研究は、諏訪東京理科大学「特色ある教育研究費」(2010年)の助成を受け、農業用太陽電池を作製し、植物栽培の実証実験を行った成果を足がかりとして、東京理科大学「重点課題特別研究推進費」(2014-2017)の助成の支援を受けた成果である。また、本実験で植物栽培実験に関しては長瀬産業株式会社との共同研究、太陽電池に関してはダイヤモンド電機株式会社から種々の御助言を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 古在豊樹, 太陽光型植物工場 先進的植物工場のサステナブル・デザイン, オーム社, P1~3 (2011)
- 2) TPP 研究会, 図解世界一わかりやすい TPP, 綜合法令出版, P38~45 (2012)
- 3) 北澤宏一, 日本は再生可能エネルギー大国になりうるか, DISCOVER SCIENCE 出版, P212~215 (2012)
- 4) 農林水産省 HP, <http://www.maff.go.jp/j/>

[press/nousin/noukei/pdf/130401-01.pdf](http://press/nousin/noukei/pdf/130401-01.pdf)

- 5) 渡邊康之, “太陽光を発電と農業に！究極の太陽電池の利用法”, MATERIAL STAGE Vol.13, No.8, 1-6 (2013).
- 6) 渡邊康之, “太陽光から電気, 食糧, 燃料を作る, シースルー有機薄膜太陽電池の開発”, 光合成研究と産業応用最前線 (2-6-1), エヌ・ティー・エス出版. (2014年12月).
- 7) 田澤信二, Effects of various radiant sources for plant growth, Japan Agricultural Research Quarterly, 1999年33期
- 8) 伊藤勇輝, 瀧沢悠吾, 桑野航平, 飯野太智, 平田陽一, 渡邊康之, 谷内利明, 農業への適用を考慮した透過型有機薄膜太陽電池の出力特性及び透過光評価, 太陽エネルギー 44 (5) 49-56 2018年
- 9) 細川和也, 成立洲, 谷内利明, 平田陽一, 渡邊康之, ソーラーマッチングハウスの発電特性と発電量推定, 太陽エネルギー 45 (1) 101-107 2019年
- 10) ソーラーシェアリングのすすめ, <http://www.d3dion.ne.jp/~higashi9/sola1.htm>
- 11) 2010年12月の最低価格 (<http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm>)
- 12) Joseph Kalowekamo, Erin Baker : Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells; Solar Energy 83, 1224-1231 (2009)
- 13) M.A.Green et al. : Solar cell efficiency tables (version 35) ; Progress in Photovoltaic Research Application, vol.18 (2010) pp.144-150.
- 14) ソーラーシェアリング事業の現状と課題 (<http://www.ee-minamisoma.jp/> 活動レポート / 再エネ事例検討会)

## 著者略歴



渡邊康之

2003年3月東京理科大学工学研究科博士号取得, 東京理科大学工学部助手, 2003年10月千葉大学ベンチャービジネスラボラトリー博士研究員, 2010年4月諏訪東京理科大学工学部講師, 2017年4月公立諏訪東京理科大学教授. 博士(工学). 有機半導体薄膜形成と評価及び光合成に関する研究に従事. 日本太陽エネルギー学会, 応用物理学会会員, 日本植物学会会員.