

# 太陽光を利用した植物工場の低コスト化

## Cost reduction of plant factory using solar energy

小川貴代\*, 小池佳代\*, 藤井克司\*, 和田智之\*

### 1. はじめに

食の確保は、人類が継続して反映するために重要な課題である。しかしながら、温暖化による異常気象の発生や、地方都市の過疎化による農業にかかわる生産人口の急激な減少、さらに世界規模では、急激な人口増加による食糧不足など様々な問題が発生している。さらに、国内では、TPPをはじめとする輸出や輸入の政治的な問題、自給率の低下など様々な課題が山積している。

こうした様々な食糧に関する課題の多くは、農業にかかわる課題である。いま、この農業の課題を科学技術の力によって解決しようとする新しい農業の形が議論されて始めている。一般的には、スマート農業という分野である<sup>(1)</sup>。本稿では、スマート農業の一つの分野である最先端の植物工場技術と再生可能なエネルギー技術を中心に今後の農業のあり方について我々の取り組みを中心に述べる。

農業の形態は、露地栽培に加えてハウスを利用した園芸型農業が中心である。それらに加えて、すべての環境を人工的に制御できる植物工場が近年注目されている。しかしながら、植物工場の実情は、現時点でその60%が破たんするといわれている。その多くの問題点は、その利点を十分利用しきれないことに由来している。具体的には、十分な環境制御ができないために歩留まりが十分とれないことである。もう一つの理由は、大きなコストである。大きなコストの内訳は、空調とLED等の照明のコストである。特に、コストの解決では、通常の電力を利用するだけでなく、太陽光を改めて光とエネルギー源として利用する手法の開発を進めている。また、歩留まりを高めるための環境制御では、センサー技術を駆使し、考えるパラメータの計測を行い、特に温度分布のシミュレーションによる解析と空調

制御により、室内の均等な温度分布の達成に関する研究を推進している。

### 2. 太陽光の効果的な利用法

太陽光の利用では、光をそのまま利用する方法と電力に変換して利用する方法を開発している。本節では、前者について述べる。植物工場の場合、一般には、完全環境制御を行うために、光も太陽光を直接利用するのではなく、その多くは電力から得られる照明を利用している。特に、光合成に必要な赤、青色のLEDから得られる光が中心である。こうした状況に対し、改めて光として必要な波長や出力を太陽光から取り出して使うことも考えられる。しかしながら、太陽光の再利用は、現実的には、太陽光の十分な伝達技術がないためにこれまで利用されてこなかった。

われわれは、時間、季節によって位置が異なる太陽光を効果的に集光する方法を開発中である。図2.1に、太陽光を効果的に集めるシステムを示す。中央の回転部分が回転し、日動部分の補正をする。中に設置した変動する鏡が、高度を補正して鏡筒に対して光を平行にする。この平行光を、フレネルレンズを利用して集光する。また、集光された光を伝送することも重要である。石英の光ファイバーを用いてkWクラスの光を伝送することは難しく、本研究では、「ファイバーの内部」を水溶液で満たし、容易にコア径を拡大することができる液体コアファイバーを導入した(図2.2)。このようなファイバーでは、kWクラスの太陽光を低コストで比較的長い距離伝搬できる。さらに、集光された太陽光は、光学フィルターや2色性鏡を利用することで容易にスペクトルの分離ができる。このシステムを用いて、わ

\* 国立研究開発法人理化学研究所  
量子制御技術開発チーム

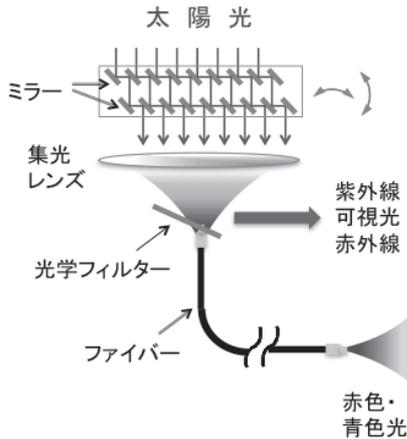
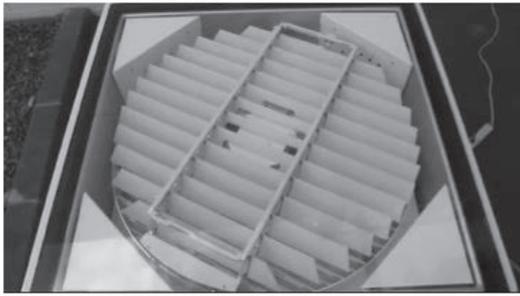


図 2.1 太陽光集光装置と伝送イメージ



図 2.2 大口径液体コアファイバー

われわれは、太陽光と、人工の光である LED を併用可能なシステムを開発中である。将来的には、過疎化する都市のビル内でも自然光を利用した農業可能となることを期待している。

### 3. 太陽エネルギーの電力変換

太陽光のもう一つの利用法は、電力とする方法である。ソーラーパネルを利用する方法では、昼間の電力を確保することはできるものの、夜間や天候が悪い日の電力を確保することができない。われわれは、独自に水素をエネルギーの保存媒質としたシステムを開発し、電力がコスト削減のキーとなっている植物工場と合わせた運用を検討している。本節で

は、われわれが開発したソーラーパネルと水素を利用した電力システムを紹介する。植物工場は、CO<sub>2</sub>を植物に固定するシステムでもある。したがって、自然エネルギーを利用した植物工場は、二酸化炭素削減にも寄与するシステムである。

ソーラーパネルだけを利用したシステムの課題は、エネルギー源としての電力供給に要求される同時同量性を保てないことである。すなわち、電力はそれ自体では保存できないため、利用電力と同量の発電を同時に行うことが要求されるが、天気任せの太陽電池発電ではこの制御ができない。そのため、何らかの方法で、発電が余剰の場合は電力貯蔵を、不足の場合は電力供給を行う必要がある。電力網に接続された太陽電池の場合、この制御の多くは揚水発電や火力発電で調整されているが、自然エネルギーは広く分散しているうえ、送電量の限界があるため、最近では分散発電制御が求められている。特に、送電容量が大きい場所には作られることがある植物工場のように昼夜問わずほぼ一定の電力を消費する設備などではその消費に合わせた電力貯蔵を併せ持つことが望まれている。

このように比較的中小サイズの発電で電力貯蔵を伴う電力供給をユーザー・オン・デマンドで行うことを考える場合、エネルギー効率の観点から、自然エネルギーにより発電した電力を直接利用できる場合には直接利用を行い、発電が出来ないときに貯蔵しておいたエネルギーを使えるようにすることが肝要である。ここではこのシステム制御の考え方について述べる。

比較的中小型の自然エネルギーをエネルギー源とした電力供給システムを考えた場合、直接利用とエネルギー貯蔵を考える必要がある。特に、長期間の貯蔵が必要な場合など、貯蔵量が多くなる場合は、二次電池による電力貯蔵だけではなく、水電解セルと燃料電池を組み合わせた水素貯蔵を行うことでその貯蔵量を飛躍的に増やすことが出来、価格的にも低く抑えることが出来るとされている。

一方、その制御方法は電力の直接利用と貯蔵への分岐・統合を行う必要があり、簡単ではない。各デバイスへの電力量を詳細に測定して供給量を制御する方法や DC のバスラインを設け、バスラインの電圧変化をモニターして、いくつかに分割して接続されたデバイスをスイッチングにより制御する DC Bus Signaling といった方法が提案されているが、どれも複雑で高度な CPU 制御を要する。ここでは、この制御方法として CPU が不要であり、各デバイ

スの動作を秒から分単位の比較的ゆっくりした速度で制御することで装置全体がユーザー・オン・デマンドの状態に恒常性 (Homeostasis) を保つことが可能な Modified DC Bus Signaling と呼ぶ制御手法を紹介する (図 3.1)。この手法では積極的な DC バスラインの電圧制御を信号として用いてシステム全体の電力の分配・統合を行う。

図 3.1 からわかるように、太陽電池をエネルギー源としてユーザー・オン・デマンドを実現するためのシステムには多くの電力の分岐・統合が存在する。この制御を行うために、Modified DC Bus Signaling では電力の分岐・統合制御を主電力制御装置 (Main Voltage Controller: MVC) と従電力制御装置 (Sub Voltage Controller: SVC) を用いることを特徴とする。MVC デバイスではシステム全体の電力の入出力バランスの変化に対して、最初に DC バスラインから MVC デバイスへの電流入出力で対応することで他の装置の応答を緩和する。その際同時に、MVC デバイスへの電流が流入の場合はシステム内に余剰な電力が存在すると判断し DC バスラインの電圧を上昇させ、MVC デバイスからの電流が流出の場合はシステム内の電力が不足していると判断し DC バスラインの電圧を下降させる。これらの動作は MVC デバイスの入出力口につながっている DC/DC コンバーターが担う。一方、SVC はバスラインの電圧を感知し、DC バスラインの電圧がそれまでの電圧より上昇した場合には DC バスラインから SVC デバイスへの電流流入量を増加 (電流流出量

を減少) させ、下降した場合は SVC デバイスへの電流流入量を減少 (電流流出量を増加) させる。これらの動作も SVC デバイスの入出力口につながっている DC/DC コンバーターが担う。

これら一連の動作を MVC デバイスへの電流の流入・流出がゼロになるように行う。結果的に、このシステム全体への電力入出力量の総和がゼロになるように制御されるため、ある DC バスラインの電圧で SVC の電流の流入・流出が一定の値となったところで定常状態に至る。この方法では、各デバイスの動作が DC バスラインの電圧を信号としてアナログ的に行われるため、システム制御は各デバイスの動作による分散処理で行うことが可能であり、CPU による集中的なシステム全体制御は必要ない。結果的に、集中管理を行う場合に問題となる誤差の問題も解消する。MVC の反応速度はシステムがもつ電力変動に追従する必要があるが、MVC が早い変動を吸収するため SVC の動作は比較的緩慢でも問題なく、また、その電流の向きも制御可能なため、水電解セルや燃料電池などの電力の吸収もしくは放出の一方しか行うことが出来ない、かつ、高速出力変動を苦手とするデバイスでも利用可能である。

さらには、これらデバイスの動作電圧しきい値の設定や DC バスライン電圧に対する電流の流入・流出割合を変えることによって複数のデバイスを SVC として利用することも可能となる。また、各デバイス動作のシグナルが DC バスラインの電圧であることから SVC デバイスの増減等へも比較的簡

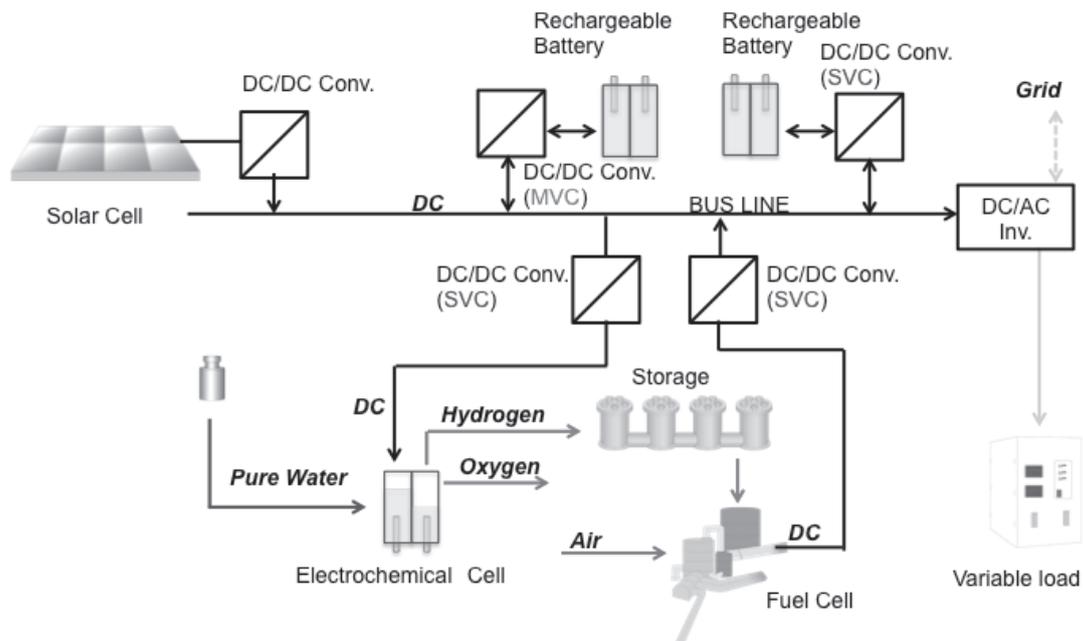


図 3.1 太陽電池をエネルギー源としたユーザー・オン・デマンド電力供給システムの模式図

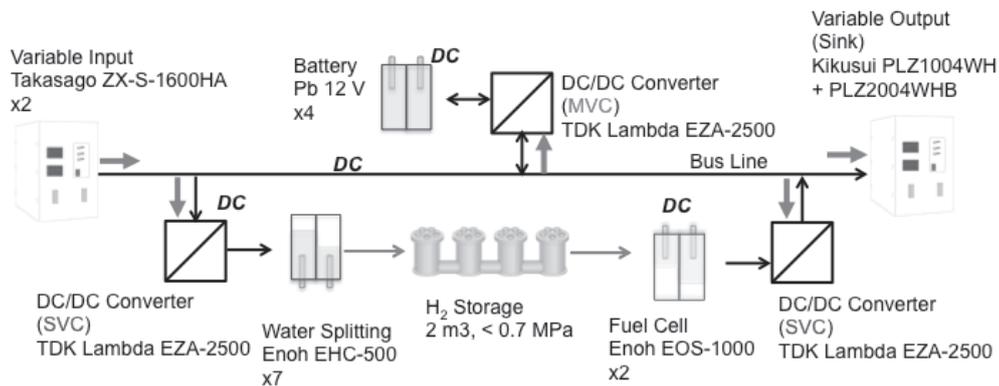


図 3.2 最大 2kW クラスのエネルギー供給システム概念図

単に対応することが可能である。一方、DC バスラインの電圧を変化させるため、利用側への電力の供給には DC/DC コンバーターや DC/AC インバーターが必要となる。

実際のシステム動作は最大で 2 kW 程度の電力供給が可能な装置とし、太陽電池の代わりに変動電源を、利用側の代わりに電子負荷を用い、これらの入力・出力を変動させることで行った。実際に評価を行ったシステム全体像をそれぞれに用いたデバイスの具体名とともに図 3.2 に示す。

また、このシステムを用いて入力・出力をステップ的に変化させた際のシステム全体の応答の状況を図 3.3 に示す。図 3.2 の太い矢印は図 3.3 における正の電流の方向を示す。MVC として用いている二次電池が最初に応答するとともに DC バスラインの電圧が変動し、その後、SVC として用いている水電解セルと燃料電池が動作してエネルギー収支を取っ

ていることがわかる。この際、水電解セルや燃料電池へは余計な負荷がかからないよう、ゆっくりとした変化となるように DC/DC コンバーターの制御を行っている。この結果、電力の急激な入力や出力の変化に対し、最初に MVC として用いた二次電池が応答し、そののちになりにゆっくりした応答で水電解セルや燃料電池が応答していることがわかる。ここでは極端な例として電力の入出力のステップ状の変化に対する応答を示したが、この変化をランダムに行った場合においてもシステムは問題なく追従動作した。

自然エネルギー利用、特に太陽電池を利用した自然エネルギー利用電源に対しては、自然エネルギーが広がりをもって存在するため、分散化と現地でのエネルギー貯蔵が求められている。特に長時間、大容量貯蔵に対しては、蓄電池だけでなく水電解や燃料電池を用いた水素貯蔵も必要となる。ここでは、その制御方法として、CPU を必要とせず、システムのユーザー・オン・デマンドに対する恒常性を保つことが可能な Modified DC Bus Signaling という手法を紹介した。この手法を用いて実際にシステムを動作させてみたところ、問題なく動作した。

#### 4. 植物工場の環境制御と歩留まりの向上

前述の通り、植物工場の運営においては、歩留まり向上が重要な課題になっている。歩留まり低下の大きな原因の1つとして、環境温度の問題がある。人工光型植物工場では、蛍光灯や LED を光源として用いるが、発生する熱により、栽培室内に大きな温度勾配が生じる。図 4.1 に、栽培棚周辺の温度分布のシミュレーション結果の一例を示す。上部に行くほど温度が上がり、下部と上部では、10℃以上の差があることがわかる。この結果、施設全体を同じ温度設定で栽培した場合、作物の生育にも大きな差

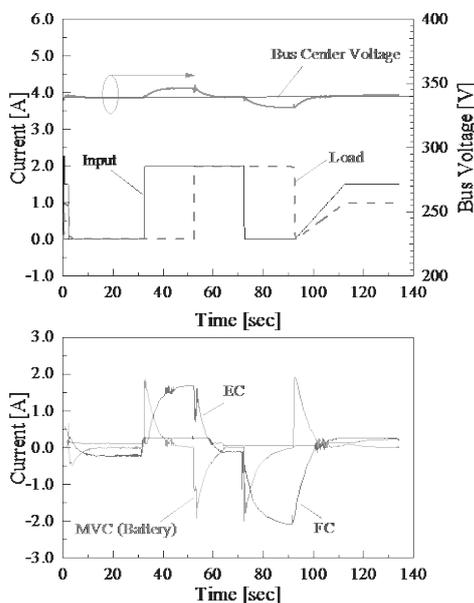


図 3.3 入出力変化時の装置全体の応答

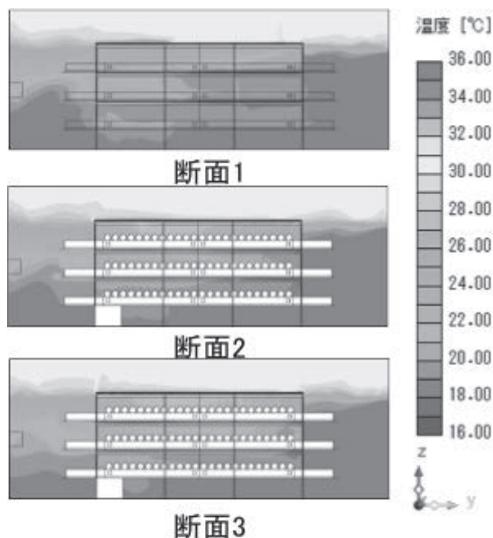


図 4.1 温度分布の解析結果

が出てしまうことになる。

現在、我々は、歩留まりの向上と実用化に向けたコストモニタリングを目的とした人工光型植物工場を構築し、実証栽培を実施している。本施設では、栽培室内に長さ13m、6段の栽培棚を8列に配置し、日産500株程度の栽培を行いながら、栽培室、栽培棚内、および屋外の詳細な環境データを取得し、最適な環境設定により歩留まりの良い栽培を実現する。実証実験の結果、栽培室および栽培棚の温度は、空調とファンにより上下の温度差を±2℃程度に押さえることを可能とした。

表 4.1 に、モニタリングの項目とセンサーの数量を示す。モニタリングによって得られたデータは、Wifiにてリアルタイムで確認することができ、その結果を栽培現場の環境制御にフィードバックすることで、最適な育成環境を実現し、歩留まりの向上を可能とする。

図 4.2 は、レタスの実証栽培の様子である。

表 4.1 モニタリング項目

計測項目	センサー数
栽培棚の水温	96
栽培棚の温湿度	9 (屋外1)
栽培用LEDの光強度	5 (屋外1)
栽培室の湿度	2
栽培室のCO2濃度	2
栽培棚の培養液EC	8
栽培棚の培養液pH	8
栽培棚の静止画像	24
降雨量	1 (屋外)



図 4.2 栽培試験の様子

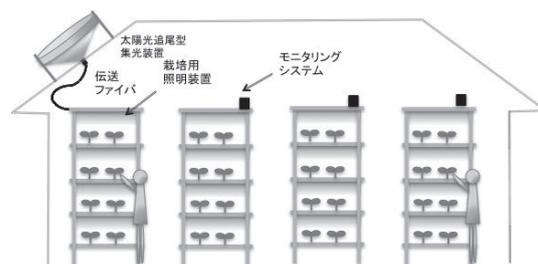


図 4.3 太陽光併用型植物工場のイメージ

詳細な環境のモニタリングと制御により、本植物工場では90%を超える歩留まりを達成することができている。将来的には、太陽光エネルギーを併用し、歩留まりを維持しながらの低コスト化に関する検討を行っていく予定である (図 4.3)。

## 5. まとめ

本稿では、植物工場の低コスト化に向けた太陽光エネルギーの利用について、太陽光の直接利用と、電力に変換しての利用について、開発の現状を紹介した。直接利用の場合、集光した太陽光から、赤・青を基本とした、植物の生長に必要な光を取出して、熱の影響を低減するだけでなく、残りの波長の光については発電や温熱利用などに利用することが考えられる。一方、電力として利用する場合は、直接利用に比べ効率は低下するが、水素などに変換することで蓄積を可能とし、エネルギー需要に応じた発電をすることが可能である。

植物工場は、近年の異常気象での収量不足の解決や、極地、砂漠、過疎地などのインフラの整備が伴わない地域での食糧自給のために重要な役割を担うことが期待される。そのような条件下を考慮し、また電力コストを下げっていくためには、自然エネルギーとの組み合わせによる運用について、今後、更なる技術開発が期待される。

#### 参考文献

- 1) 神成淳司監修「スマート農業」株式会社エヌ・ティー・エス, 東京都.

#### 著者略歴

小川貴代 (オガワ タカヨ)

2000年東京理科大学理学部二部物理学科卒, 2009年同学大学院理学研究科物理学専攻・博士(理学)取得. 2002年より理化学研究所にてレーザー物理・工学に関する研究に従事. 2017年より同所研究員(現職).