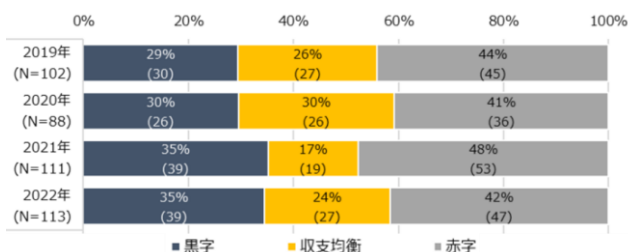


植物の生長解析を目的とする昇降式 CO<sub>2</sub> 計測装置の開発Development of Lifting Type CO<sub>2</sub> Measuring System for Plant Growth Analysis徳田 翔<sup>†</sup>  
Sho Tokuda佐伯 晃央<sup>†</sup>  
Akihiro Saeki山口 賢一<sup>†</sup>  
Ken'ichi Yamaguchi岩田 大志<sup>†</sup>  
Hiroshi Iwata

## 1. はじめに

近年、作物生産の分野において、太陽光型植物工場が注目されている。植物工場とは、「野菜や苗を中心とした作物を施設内で光、温湿度、二酸化炭素濃度、培養液などの環境条件を人工的に制御し、季節や場所にあまりとらわれずに自動的に連続生産するシステム」のことである<sup>[1]</sup>。人工光を光源として閉鎖空間で作物を栽培する完全人工光型と違い、太陽光型植物工場はガラス温室やビニールハウスといった半閉鎖環境で太陽光を光源として周年生産計画を行う施設である<sup>[2]</sup>。太陽光型のメリットとしては、完全人工光型よりも初期費用や光熱費を抑えられる点、太陽光を利用するため SDGs の観点からみて環境によい点等がある。この太陽光型や、人工光と太陽光の両者を取り入れた併用型の植物工場がオランダ型とも呼ばれるほど、オランダでは施設の大規模化や自動化、効率化を進めた太陽光型植物工場が普及している<sup>[3]</sup>。しかし、オランダと同様の植物工場を日本に導入させるにはいくつもの問題がある。具体的には、夏季がないオランダと比べ日本は温室内の高温障害が起りやすいといった点や、オランダでは天然ガスが安く入手できるのに対し、日本はエネルギーコストが高いという点、日本では台風や地震等の災害が多く対策が必要になる等の問題がある<sup>[2]</sup>。そこで日本の気象環境等に合わせた施設構造や栽培システムを用いた植物工場の開発が進んでおり、日本でも植物工場が増えつつある。しかし、その普及にはまだ課題が残っている。2022年に一般社団法人日本施設園芸協会が行った実態調査によると、調査を行った113件の植物工場のうち42%が赤字経営であることが分かっている<sup>[4]</sup>。図1に上記実態調査の直近4年間の植物工場の決算を示す。赤字となる原因として、植物工場の制御装置や環境維持費に比べ、作物自体の価格が安いことが挙げられる。以上の観点から、植物工場においては生産性の向上や、環境制御システム・観測ツール等のコスト削減が急務となっている。

植物の生育に関与する環境要素として、本稿では二酸

図 1 直近 4 年間の植物工場の決算<sup>[4]</sup>

<sup>†</sup> 奈良工業高等専門学校 National Institute of Technology, Nara College

化炭素 (以下、CO<sub>2</sub>) 量に注目する。植物は生長のために光合成を行い、光合成で光のエネルギーを使い水分や二酸化炭素から養分や酸素を生成する。作物によって違いはあるものの、光条件によらず二酸化炭素濃度が 400ppm から 1000ppm まで増加すると、光合成速度は 30%~50% 増加することが分かっている<sup>[5]</sup>。それほど、作物の生長には CO<sub>2</sub> 濃度が重要である。そのため、植物付近の CO<sub>2</sub> 濃度を測定することにより、植物がどれほど光合成を行い生長しているかを解析することが可能になる。文献<sup>[6]</sup>ではダイズ群落の光合成速度分布をシミュレーションし、生長度合いにより CO<sub>2</sub> 濃度分布にどのような違いが表れるかの調査が行われている。その調査結果によると、ある程度作物が生長し密度が大きくなると、群落の上層では CO<sub>2</sub> 濃度が大きく低下することが分かっている。

本研究では、作物付近の CO<sub>2</sub> 濃度を高さ方向に複数箇所測定し CO<sub>2</sub> 濃度分布を推定することで、作物のより詳細な生長状態や正味光合成速度を解析する。この CO<sub>2</sub> 濃度の計測は、手作業では呼気の影響を受け正確な値を採取するのが困難である。解決策として、CO<sub>2</sub> センサを複数個設置すれば CO<sub>2</sub> 濃度分布の推定は可能だが、CO<sub>2</sub> センサは温湿度センサ等に比べ高価であり、精度の良いものを使うとセンサ 1 個につき数万円程かかってしまう。そこで、本研究では 1 個の CO<sub>2</sub> センサを高さ方向に昇降可能な自動計測装置の開発を行う。そして、測定したデータをクラウド上にアップロードする。最終的には測定データから作物の生長状態や正味光合成速度を解析し、作物にとっての最適な生育環境を算出する。図 2 に研究の概要図を示す。本研究で対象とする作物は、太陽光型植物工場における栽培品目で高い割合を占めているトマトとする。

2. 昇降式 CO<sub>2</sub> 計測装置

今回開発した計測装置を図 3 に示す。計測装置は土台に取り付けたポールとセンサが搭載されている昇降部からなり、昇降部に取り付けられたモータを回転させることにより昇降部がポールに沿って上下に移動する。この計測装置を作物の傍に設置し、昇降部に搭載している CO<sub>2</sub> センサと

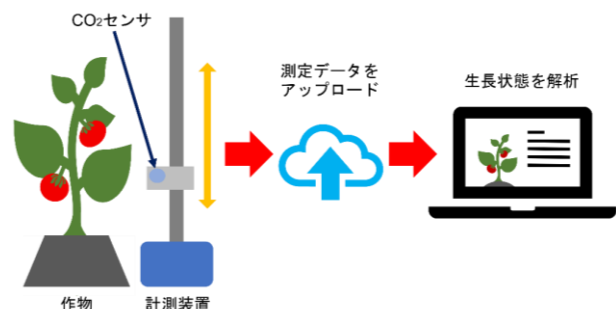


図 2 研究の概要図

温湿度センサで作物付近のデータを採取する。ここで得られたデータを、LTE ルータ等を通してクラウドにアップロードし保存する。この計測装置を電源駆動で常時稼働させておくことにより、作物の微細な変化も記録することが可能となり、詳しい生長状態の解析につながる。

## 2.1 ポール

計測装置のポールには 2m のミスミ製 30mm 角アルミフレームを使用しており、2.2.1 節で記す昇降機構用のラックをフレームの溝に沿うように貼り付けている。このポールは 3DCAD で設計、3D プリンタで造形した固定部により、ZHTY 製パラソルベースに固定されている。実際に運用する際にはこのポール台に砂を入れ重くすることで、計測装置が衝撃により倒れることを防止する。

## 2.2 昇降部

図 4 に昇降部を拡大した図を示す。昇降部は主に、昇降部を移動させるための昇降機構と CO<sub>2</sub> センサ等を搭載した計測部、モータ制御や計測データの処理を行うコンピュータで構成されている。その他の要素としては昇降部の上限・下限を計測するリミットスイッチやモータ・コンピュータに電源を供給するためのコンセント等がある。昇降部のベースはポールの固定部と同様に 3D プリンタを用いて造形されており、四角の穴にポールが丁度ハマるように設計している。昇降部の穴の内側にはスライダをフレームの溝に噛み合うように取り付けており、昇降させた際の滑らかな移動を実現させている。

### 2.2.1 昇降機構

昇降機構を図 5 に示す。昇降機構にはバイポーラ駆動のステッピングモータ SM-42BYG011 を使用しており、モータドライバ DRV8835 により印加電圧 9V で制御している。

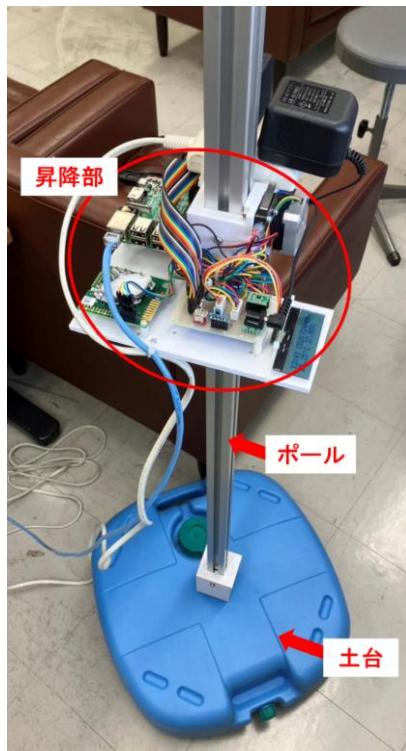


図 3 計測装置

この機構は昇降部側にピニオンとモータを取り付けており、モータに固定されたギアとピニオンを噛み合わせることでピニオンの回転を可能としている。そのピニオンをポール側のラックと噛み合わせ、ピニオンを回転させることで昇降部を移動させることが可能である。モータに取り付けたギアとピニオンはギア比 1:2 にしており、細かい移動調整を可能としている。DC モータや AC モータではなくステッピングモータを用いることで、昇降部を指定した高さで正確に停止させることが可能となっている。また、計測装置を長時間駆動しているとモータが発熱してしまうため、モータに小型のファンを取り付けることで発熱を抑えている。

### 2.2.2 計測部

本装置には環境を計測するセンサとして、Senseair 製の CO<sub>2</sub> センサ CO2 Engine K30 と SENSIRION 製の温湿度センサ SHT31-DIS を搭載している。データシートによると、CO<sub>2</sub> センサの精度は  $\pm 30\text{ppm} \pm 3\% \text{rdg}$ 、温湿度センサは温度精度  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 、湿度精度  $\pm 2\%$  である。コンピュータとのデータの通信には、CO<sub>2</sub> センサは UART 通信、温湿度センサは I<sup>2</sup>C 通信を使用している。

### 2.2.3 コンピュータ

制御・処理用のコンピュータには、小型でインターネットの接続が容易であるという利点から、Raspberry Pi 3 を採用している。Raspberry Pi には計測部のセンサや昇降機構制御用のモータドライバ、測定データを表示する LCD 等を接続している。また、ユニバーサル基板を用いて回路を作成することで容易な取り付け・取り外しを可能にし、整備性・可搬性を向上させている。

## 3. プログラム

### 3.1 装置制御

装置制御プログラムのフローチャートを図 6 に示す。電



図 4 昇降部

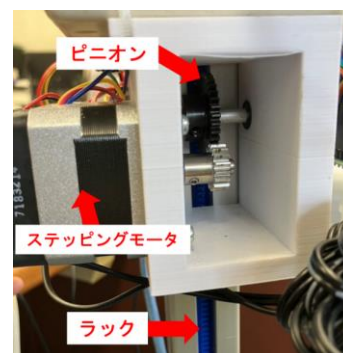


図 5 昇降機構

源を入れると自動でプログラムが立ち上がり待機状態となる。その状態で起動スイッチを ON にすると昇降機構が動き出し、下限のリミットスイッチが反応するまで昇降部が下降する。下降しきると自己位置の初期化が行われ、事前に設定した目標地点への移動を始める。目標地点に到着するとモータを停止し、CO<sub>2</sub> センサと温湿度センサから測定データを受け取る。測定したデータは昇降部に搭載されている LCD に表示する。また、LCD の表示と合わせデータをクラウド上にアップロードする。その後、次の目標地点を設定し移動を再開する。目標地点は地上 300mm の地点から 30mm ずつ上昇し、1800mm の地点まで到達すると目標が地上 300mm の地点に戻る仕様となっている。地上 300mm から 1800mm までは 70 秒程度（実測）で移動を行い、1800mm から 300mm 地点まで戻る際は 35 秒程度（実測）で移動する。移動時の誤差で自己位置がずれることを考慮し、移動中にも上限・下限のリミットスイッチが反応するようにしている。スイッチが反応するとモータを停止し、自己位置の補正を行った後に移動を再開させる。また、途中で起動スイッチを OFF にするとその場で停止し、再度 ON にすることで続きから再開することができる。

### 3.2 データのアップロード

装置制御で測定したデータは、計測・制御・管理向けの通信プロトコルである IEEE1888<sup>[7]</sup>を用いた学内クラウドに

アップロードされる。データは温度[°C]、湿度[%]、CO<sub>2</sub> 濃度[ppm]、昇降部の地上高[mm]が送信されるようになっている。

## 4. 評価実験

開発した計測装置の有用性を確認するため、閉鎖空間内で装置を作物の傍に設置し評価実験を行う。

### 4.1 実験方法

評価実験を行うにあたり、計測対象となる作物が必要となるが、今回は学内で人工光型トマト栽培をしている研究室に実験場所の提供をしていただいた。実験の様子を図 7 に示す。計測対象には中玉トマトの苗（フルティカ）を使用し、図 7 に示すように、苗が地面から約 590mm の地点から生え、約 1580mm の高さまで生長している状態の苗付近の CO<sub>2</sub> 濃度の計測を行った。計測装置は苗への最接近時 30mm 程の場所に、CO<sub>2</sub> センサが苗の方向を向くよう設置した。実験日は 5 月 19 日で天候は曇り、13:36~14:08 の 32 分間で計測装置を稼働させ、13:36~14:00 は部屋を暗くした状態、14:00~14:08 の 8 分間は作物生長用の LED ライトを点灯させた状態で計測を行った。また、実験部屋の扉や窓は通常時閉め切った状態で実験を行っている。図 7 では部屋の照明が点いた状態で撮影を行っているが、実験中は部屋の照明は消した状態である。

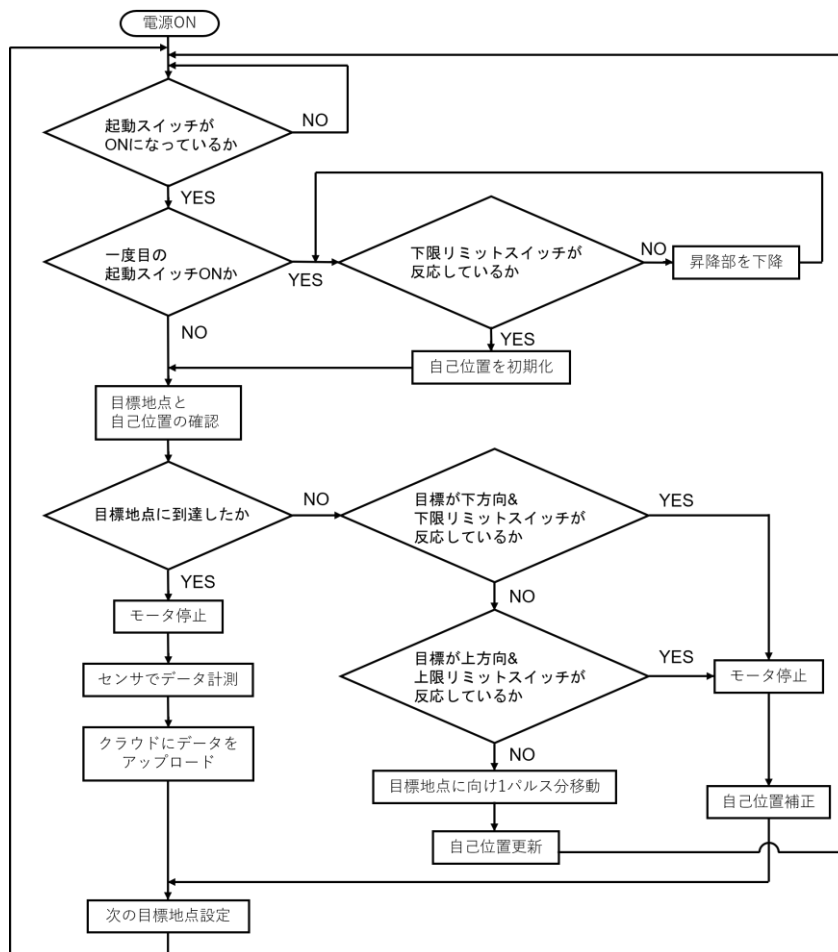


図 6 装置制御のフローチャート



図 7 実験の様子

## 4.2 実験結果

実験開始時の 13:36~13:39 頃の CO<sub>2</sub> 濃度の測定結果を図 8 に、14:00 にライトが点灯する前の 13:56~13:59 頃の結果を図 9 に、ライト点灯後の 14:03~14:06 頃の結果を図 10 に示す。どの図も中央に計測結果が空白の時間があるが、この空白は昇降部が 1800mm の高さから 300mm の位置に移動する間は計測を行わないため発生したものである。また、実験中に CO<sub>2</sub> 濃度と同時に計測した温湿度の平均値を算出したところ、温度は 23.1℃、湿度は 72.9% となった。

## 4.3 考察

図 8 と図 9 を比較すると、実験開始時は CO<sub>2</sub> 濃度が 692ppm であったのに対し、20 分ほど部屋を暗くしていると 710ppm まで増加したことがわかる。また、図 9 と図 10 を比較すると、ライトが点灯したことにより作物が光合成を行い 684ppm まで減少したことが見て取れる。以上から、計測装置により作物の暗呼吸と光合成による CO<sub>2</sub> 濃度の変化が観測できたといえる。しかし、計測の問題点もいくつか考察できる。図 8 では CO<sub>2</sub> 濃度が作物の暗呼吸により増加していることがわかるが、図 9 では 13 時 56 分台から 13 時 58 分台にかけて減少している。これは、実験中に人が出入りを行い部屋のライトをつけてしまった事が要因としてあげられる。よって実験中は外部による影響を受けないよう注意する必要がある。他にも図 10 に着目すると、作物の光合成により CO<sub>2</sub> 濃度の減少がみられるが、これは部屋の CO<sub>2</sub> 濃度が減少していることを示しているのか、または高さ方向により CO<sub>2</sub> 濃度が増加していることを示しているのかの判断性に欠ける。対策として、地上 300mm 地点または 1800mm 地点に定点計測部を設置し、定点部と昇降部の値を比較することで、高さによる CO<sub>2</sub> 濃度の変化なのかを確認するといったことが挙げられる。また、図 10 の 2 度目 (14 時 5 分台) の 300mm、330mm の CO<sub>2</sub> 濃度がその後の計測値と比較して大きくずれている。これはセンサの計測遅れによるものだと考えられ、今後対策が必要である。今回の実験では実験前から部屋が閉め切られていたため、開始段階で 692ppm と外気の CO<sub>2</sub> 濃度 420ppm に比べ高くなっていた。そのため、一度換気を行い CO<sub>2</sub> 濃度を外気と同等にしてから今回同様の実験を行うと、また違った計測データが採取できるのではないかと考える。今後の課題として、上で挙げた問題を解決し長時間の実験を行っていくことで計測装置の精度をより向上させることが可能だと考える。

## 5. おわりに

本研究では太陽光型植物工場の計測システム向上のため、作物付近の CO<sub>2</sub> 濃度の変化を計測するための昇降計測装置開発を行った。今後は、この装置を改良し計測精度を上げるとともに、太陽光型植物栽培の環境計測データ採取を行う。また、採取したデータから生長状態や正味光合成速度の解析をすることで、作物の最適な生育環境の算出を行う。

### 謝辞

装置実験に協力頂いた本校機械工学科福岡寛先生に感謝します。本研究の一部は JSPS 科研費 JP22H02469 基盤研究 (B) 「XR (リアル/バーチャル) 太陽光型植物工場システムの開発」を受け行われています。

## 参考文献

- [1] 高辻 正基, “図解 よくわかる植物工場”, 初版第 11 刷, 日刊工業新聞社 (2015).
- [2] 野並 浩, “植物工場”, 学術の動向, Vol.15, No.12 (2010).
- [3] 丸尾 達, “日本型太陽光利用型植物工場の可能性と課題”, 学術の動向 2012 年 5 月号, 日本学術協力財団 (2012).
- [4] 一般社団法人日本施設園芸協会, “大規模施設園芸植物工場 実態調査・事例調査” (2023).
- [5] E. Heuvelink and T. Kierkels, “Plant Physiology in Greenhouses”, Horti-Text BV (2015).
- [6] 原菌 芳信, “大気-植生間における CO<sub>2</sub> 等の交換と流れ”, 日本流体力学会誌『ながれ』, Vol.20, No.5 (2001).
- [7] 落合 秀也, 江崎 浩, “スマートグリッド対応 IEEE1888 のプロトコル教科書”, 初版第 1 刷, 株式会社インプレスジャパン (2012).

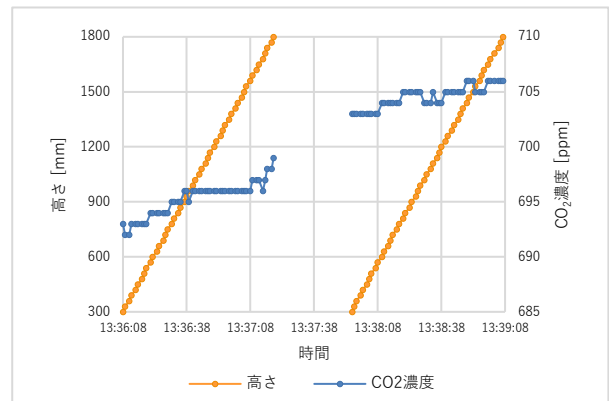


図 8 実験開始時の CO<sub>2</sub> 濃度

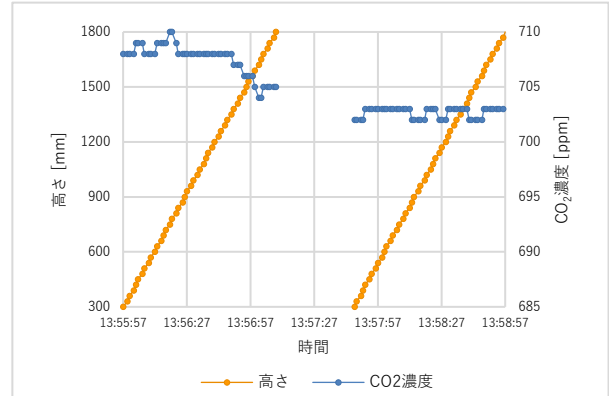


図 9 暗呼吸時の CO<sub>2</sub> 濃度

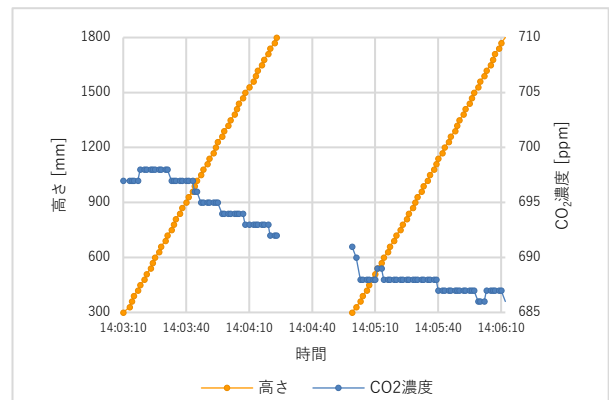


図 10 光合成時の CO<sub>2</sub> 濃度