

特定非営利活動法人三鷹ネットワーク大学推進機構

「民学産公」協働研究事業 成果報告書

調布市立第一小学校屋上スマート農園プロジェクト

国立大学法人電気通信大学

目次

1 概要・目的	1
2 申請団体のプロフィール	2
3 期間	2
4 背景	2
5 詳細	3
5.1 水耕栽培施設の設置	3
5.2 水耕栽培管理インタフェース開発	8
5.3 スマートホームとの連携	16
5.4 液肥管理システムの開発	21
5.5 太陽光発電システムの開発	21
6 実験結果	23
6.1 水耕栽培施設の設置と栽培	23
6.2 水耕栽培管理インタフェース開発	27
6.3 スマートホームとの連携	30
6.4 液肥管理システムの開発	33
6.5 太陽光発電システムの開発	42
7 むすび	43
文献	43
付録 - 栽培マニュアル	45

1 概要・目的

電気通信大学佐藤証研究室では、ビルの屋上等の空きスペースを利用し、農作物の生産としてではなく、栽培を楽しむ新しい形のスマート都市農業の実現に向け、IoT 技術を導入した水耕栽培装置の開発を進めている。また、大学の屋上等で様々な果菜類の栽培実験を行い、こども食堂や課外授業、そしてバーベキューイベント等に活用している。この水耕栽培システムを実験から実用に進めるために、調布市立第一小学校の校舎屋上に 5m×10m の施設を構築し、これまでの研究成果の導入と新たな技術開発を進め、児童の食育や情報教育へ資することを目的とする。また、風雨や強い日差しにさらされ、電源やネット環境が安定しない屋上で、新たに開発したシステムが安定動作することの実証・検証も重要な目的である。具体的な開発事項は以下のとおりである。

① 水耕栽培施設の設置と栽培

水耕栽培装置 3 台を備えた施設を設置し、モバイルネットワークと太陽光発電を整備し、遠隔管理可能な環境を構築する。また、試験栽培を通じて課題の洗い出しを行う。

② 水耕栽培管理インタフェース開発

これまで研究用として管理ソフトウェアを開発してきたが、研究者でない第三者でも使用できるようなインタフェースをフローベースプログラムのプラットフォームである Node-RED により作成する。そして、スマートフォン等のモバイルデバイスや PC からの管理を行う。

③ スマートホームとの連携

家電製品と連動して音声による制御が行える AI スピーカーが普及し始めており、本水耕栽培装置も家電の感覚で利用できるよう、オープンソースのスマートホームプラットフォーム Home Assistant へのシステムの統合を行う。また、市販の AI スピーカーを用いて、水耕栽培装置の遠隔監視・制御を行う機能を追加する。さらに複数台のカメラで施設を監視するため、千円前後で購入可能な無線カメラデバイスの Home Assistant への実装も行う。ディスプレイとスピーカーを備えた小型 IoT デバイスの M5Stack 等も活用する。

④ 液肥管理システムの開発

本水耕栽培装置のタンクはボールタップを備えており、植物が消費した分だけ水が追加されるようになっている。また肥料も使用された分だけ追加し、植物の成長に合わせて液肥濃度を適切な値に調整することが重要であるが、これまではそれを人手で行っていた。そこで、液肥濃度を測定して、自動的に肥料を追加するシステムを開発する。

⑤ 太陽光発電システムの開発

屋上には電源が敷設されていないことも多いため、水耕栽培装置をどこにでも設置可能にするために太陽光発電を利用する。しかしながら発電量は天候に大きく左右されるため、突然バッテリーが上がってシステムがダウンすることのないように、天候や時間に応じて使用電力を抑える制御を行う必要がある。そこで、遠隔で発電量と消費量を監視できるソーラーチャージコントローラを開発する。

2 申請団体のプロフィール

電気通信大学は、1918（大正7）年に無線通信技術者の養成機関として創設された社団法人電信協会管理無線電信講習所をその起源とする。その後、1949（昭和24）年に国立学校設置法施行により新制大学として電気通信大学を開学し、1952（昭和27）年には、現在の調布校舎を開校した。

2004（平成16）年には、国立大学法人法の施行に伴い「国立大学法人電気通信大学」として新たに発足し、2018年に創立100周年を迎えた。

3 期間

2019（令和元）年7月9日～2020（令和2）年1月31日

4 背景

SDGsの目標として掲げられた、食料の安定確保と持続可能な農業、環境に配慮した住み続けられるまちづくりへ向けた取り組みとして、都市農業が注目を集めている。しかしながら、日本における都市農業は都市に残っている農地をどう守り活用していくかに議論が集中しており、都市に住む一般の人との接点は希薄である。また、IT企業が進出しているスマート農業も、大規模圃場や植物工場における生産性向上を目的としたもので、一般の人だけでなく都市の小さな農家はその恩恵にあずかることはほとんどない。その一方で、都市部における市民農園やレンタルファームへの個人のニーズは高く、全国のおよそ1/3が東京と神奈川に集中している。また、マンションのベランダ等で夏にゴーヤの緑のカーテンを楽しむ家庭も少なくない。しかし土を使う栽培では、虫の発生、土の流出や風による飛散などの問題もある。屋上緑化は商業施設だけでなく個人宅に対する促進の助成金制度があるが、土は非常に重いため耐荷重や、防水・防根対策等の問題を解決する必要がある。

そこで本学佐藤研究室では、地方の広い農地で作物の生産を目的とする従来農業は異なり、都市のビルの屋上やベランダ等で栽培と収穫を個人で楽しむ農のエンターテインメント化を目的とした研究を進めている。ここでは、クリーンで軽量かつ設置が簡単な水耕栽培装置を開発し、大学の屋上等で本格的な果菜類（トマト、苺、メロン等）の栽培実験を続けている（図4.1）。



図4.1 電気通信大学校舎屋上の水耕栽培施設でのイベントの様子

植物の栽培は屋外で子供から高齢者まで一緒に楽しむことができるレクリエーションであり、自然と触れ合いながらコミュニケーションを取ることは子供の成長にとっても有用である。また、農業従事者の

高齢化が問題となっているが、長期的な視点に立って、子供の頃から植物に親しみ、考えながら栽培する場の提供が後継者の育成には不可欠である。そこで本事業では、本学の向いの調布市立第一小学校の屋上に水耕栽培施設を設置し、情操教育、食育、また情報・科学教育の場として活用する。屋上での水耕栽培は敷地の限られた都市の学校での活用に適しており、また土を用いず害虫や病気が少ないことから化学農薬を使う必要がなく、児童にも安心して参加してもらうことができる。また大学として、企業との共同研究や学会論文発表だけの教育・研究機関としてだけでなく、本事業を通じてPTAや地域との結びつきを深めることも目指している。

5 詳細

5.1 水耕栽培施設の設置

平成元年7月26日～10月3日にかけて、図5.1.1の調布市立第一小学校4階建の校舎屋上に10m×5mの水耕栽培施設を敷設した。図5.1.2のように、制御機器やカメラそして照明等を設置し、また植物を誘引するためのフレームを単管パイプで組み、3台の水耕栽培装置に内蔵したセンサで生育状況をリアルタイムで遠隔管理している。電源はセンサモジュールとポンプ駆動にはソーラーパネルで発電した直流12Vを供給するとともに夜間用にカーバッテリーに充電し、バックアップ用ポンプには商用の交流100Vを用いている。水耕栽培装置と大学に設置したサーバとの通信には、LTE モバイルルータを用いている。図5.1.3と表5.1.1にそれぞれ施設の見取り図と諸元を示す。なお図5.1.3内の数字は寸法(cm)を表している。水耕栽培装置は南の校庭に向かって右から順に1号機、2号機、3号機と呼ぶ。



図 5.1.1 水耕栽培施設の設置場所 (google map より)



図 5.1.2 水耕栽培施設全景

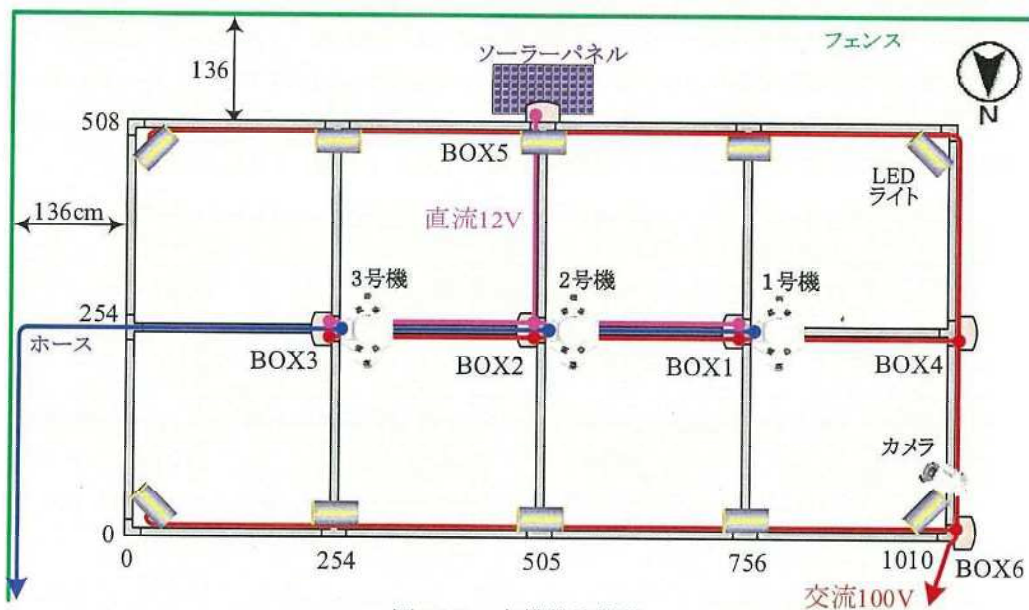


図 5.1.3 水耕栽培施設

表 5.1.1 水耕栽培施設の諸元

設置場所	東京都調布市小島町1丁目8-1 調布市立第一小学校 4階建校舎屋上
設置面積	縦5m×横10m×高さ2.25m 48.6mm単管パイプ組
工事期間	令和元年7月26日~10月4日
水耕栽培装置	3台
電源	100Wソーラーパネル直流12V, 商用交流100V
灌水	水道からの自動注水とポンプによる循環, 液肥自動注入
通信	LTE Wi-Fi ルーター (OCN モバイル)

図 5.1.4 に水耕栽培装置の外観・内部・構造を、表 5.1.2 に諸元を示す。装置後部の防水ボックスには、センサモジュールと通信・制御用のマイコンボードが入っている。タンク中には直流 12V と交流 100V の二つの水中ポンプ、自動注水用のボールタップ、液肥原液注入用のチューブが入っている。ポンプはそれぞれマイコンボードと外部の交流 100V タイマーで制御される。また、防水ボックスからタンクへは水温、水位、液肥濃度センサ測定用のコードが伸びている。ボックスの中には温湿度センサが置かれている。ボックスの後部には L 型のパイプが付けられており、そこから直流 12V 電源を引き入れている。また、センサモジュールからは L 型パイプを通して外に交流 100V ポンプの動作監視用の電流プローブと、追肥機構のエアポンプを動かすための USB ケーブルを引き出している。

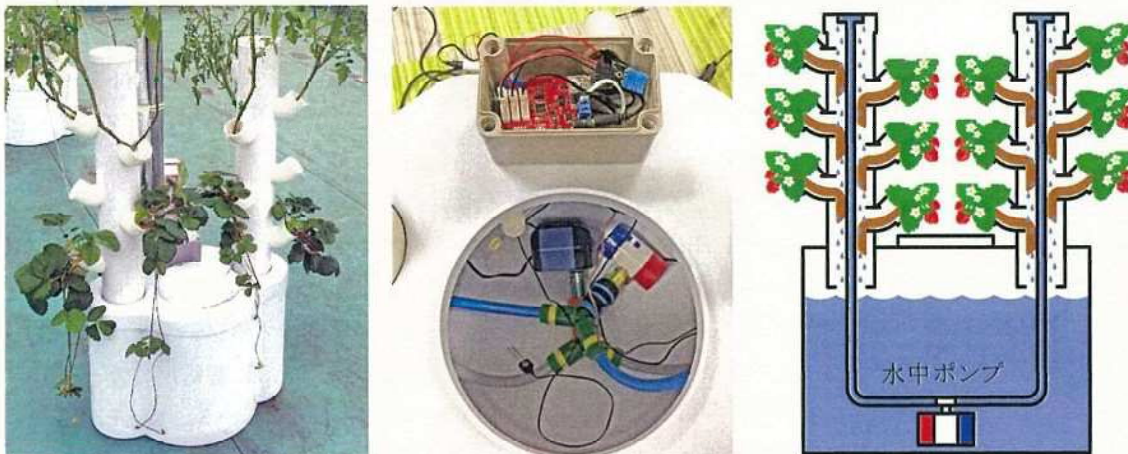


図 5.1.4 水耕栽培装置の外観(左)と内部(中央)と構造(右)

表 5.1.2 水耕栽培装置の諸元

サイズ	33cm× (縦) ×55.5cm (横) ×135cm (高)
重量	約 5kg, 満水時約 40kg
素材	タンク : ABS, パイプ : PVC
電源	直流 12V 5A (MAX) : センサモジュールおよびメインポンプ用 交流 100V 0.4A : サブポンプ用
ポンプ寿命	約 2 年 (15 秒オン 10 分オフ間欠使用時)
設置面積	最大 4m×4m (トマト栽培時)
設置場所	屋外 (防水仕様)
動作温度	0~40°C
センサ	温度, 湿度, 液肥濃度, 水位, 水温, 電流
通信	2.4GHz Wi-Fi
機能	自動ポンプ制御 自動注水 自動追肥 異常メール通知 (ポンプ停止, 通信・センサ停止, 高水温, 低水位)

施設のフレームは図 5.1.5 のように上下二段になっているが、上段は夏場の日差しが強いときに遮光ネットを掛けるために用い、下段は図 5.1.5 右のように、苗を誘引するための太さ約 1mm の農業線を横方向に張っている。



図 5.1.5 遮光ネットとエスター線

縦方向のフレームには、図 5.1.6 に示した防水ボックス BOX1~6 が固定されている。BOX1~3 はそれぞれ水耕栽培装置 1~3 号機用で、中はいずれも同じとなっており、交流 100V ポンプ用の白いタイマーと、タイマーからポンプへつながる電源コードの電流を監視する電流プローブ、液肥注入用の緑色のエアポンプが入っている。BOX4 には、通信用の黒い LTE モバイルルータが入っている。また図 5.1.7 の監視カメラの電源は BOX6 から取っており、BOX6 にはリモートスイッチが入っており、図 5.1.7 に示した LED 投光器 10 個を同時に遠隔操作で点灯/消灯する。また、図 5.1.7 の監視カメラの電源も BOX6 から取っている。BOX5 には、施設の南中央に設置した図 5.1.8 のソーラーパネルを制御するソーラーコントローラが入っている。ソーラーパネルの裏には、夜間に水耕栽培装置を駆動するために蓄電用のカーバッテリーが設置されている。バッテリーの蓄電量は、図 5.1.6 の BOX5 の写真にある赤い 3 つの LED で確認できる。天候が悪く発電量が消費量を下回ると LED が次第に消えていくので、適宜確認が必要である。



図 5.1.6 防水ボックスの中身



図 5.1.7 監視カメラと LED 投光器



図 5.1.8 ソーラーパネルと蓄電用カーバッテリー

図 5.1.9 にタンクへの注水と追肥機構を示す。水道につながれたホースは施設の左側から Y 字分岐ジョイントで 2 分されながら 3 号機→2 号機→1 号機の順でタンクに接続される。蛇口の栓は開けたままで、植物が使って減った分だけタンクの中に自動注水される。タンクは葉陰に入るので夏場は直射日光はほとんど浴びないが、水道から延びて単管の上部を這うホース内の水は直射日光が当たると 50°C 以上となることもあるため、銀色の断熱シートで覆っている。図 5.1.9 左のペットボトルには肥料の原液が入っており、センサモジュールで制御される防水ボックス内のエアポンプから空気が注入されると、それに応じた分の原液がタンクに注入される。



図 5.1.9 タンクへの注水・追肥機構(左)とホースの Y 字分岐ジョイント(右)

図 5.1.10 に水耕栽培施設のネットワーク構成を示す。3 台の水耕栽培装置とリモートスマートスイッチは、LTE モバイルルータを通じてインターネット経由で、電気通信大学に設置した Raspberry Pi [1]サーバに接続される。Raspberry Pi サーバ上には、オープンソースのスマートホームアプリ Home Assistant [2]、水耕栽培装置の管理を行うフローベースのプログラムプラットフォーム Node-RED [3]、IoT 向けの通信規格 MQTT サーバ Mosquitto [4]、時系列データベース InfluxDB [5]とその可視化を行う Grafana [6]等をインストールした。また Raspberry Pi サーバにはローカルで、IoT 用 32 ビット Wi-Fi マイコンモジュール ESP32 [7]を実装したカメラモジュールを 6 台接続した。これは将来、水耕栽培施設に設置するための実験用である。水耕栽培施設にはそれとは別に図 5.1.7 の ctronics 社のリモートカメラ [8]を設置しており、スマートフォンや PC で遠隔監視している。水耕栽培装置の管理や制御もスマートフォンや PC から行え、さらに AI スピーカー Amazon Echo [9]や小型マイコンモジュール M5Stack [10]もユーザインタフェースとして実装した。これら各コンポーネントについて以下で詳解する。

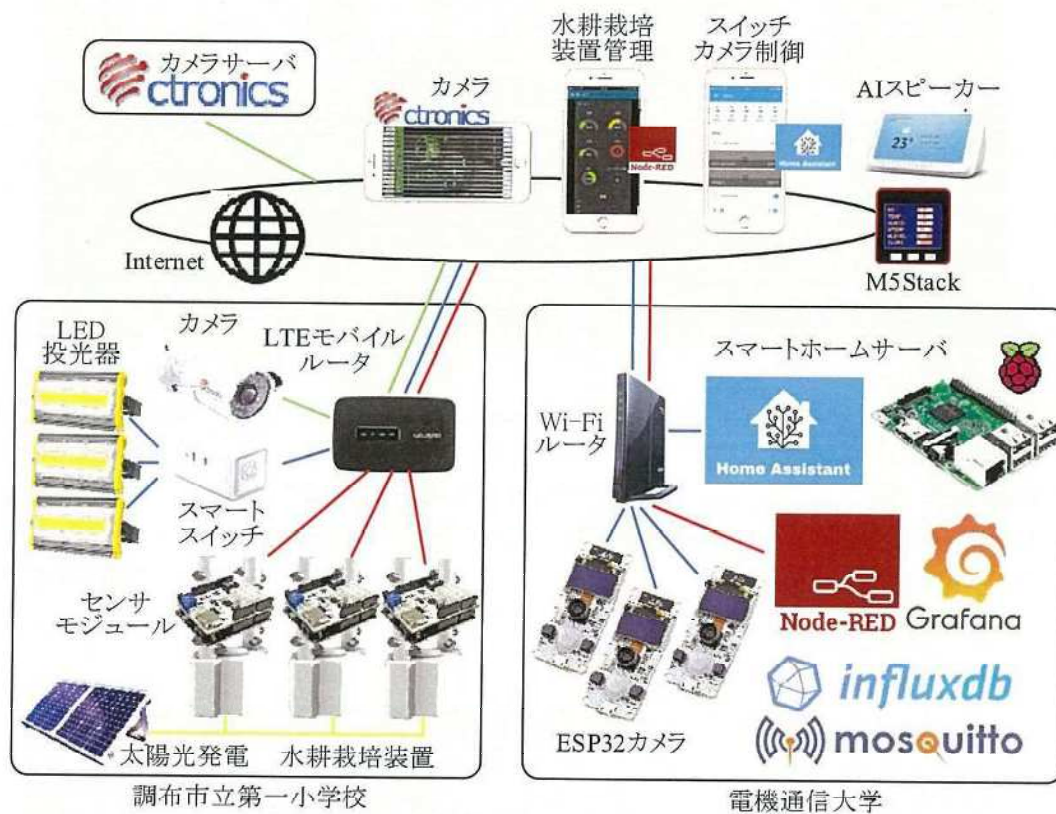


図 5.1.10 水耕栽培施設のネットワーク構成

5.2 水耕栽培管理インタフェース開発

水耕栽培装置から LTE モバイルルータを経由して、MQTT プロトコルで大学内の Raspberry Pi サーバに送信されたデータは、Node-RED によって図 5.2.1 のメインフローおよび図 5.2.2 のサブフローで処理され、スマートフォンや PC の管理画面に表示される。また、管理画面で入力した制御データは、逆の経路をたどって水耕栽培装置に送信される。

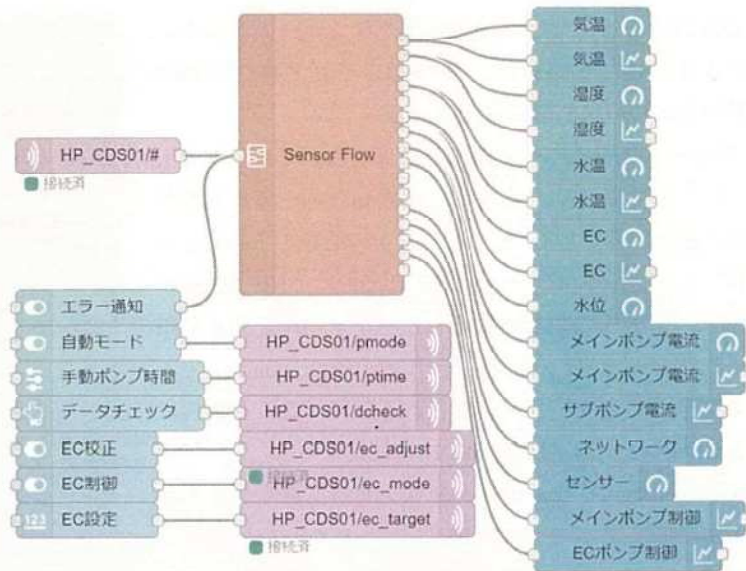


図 5.2.1 水耕栽培装置制御のメインフロー

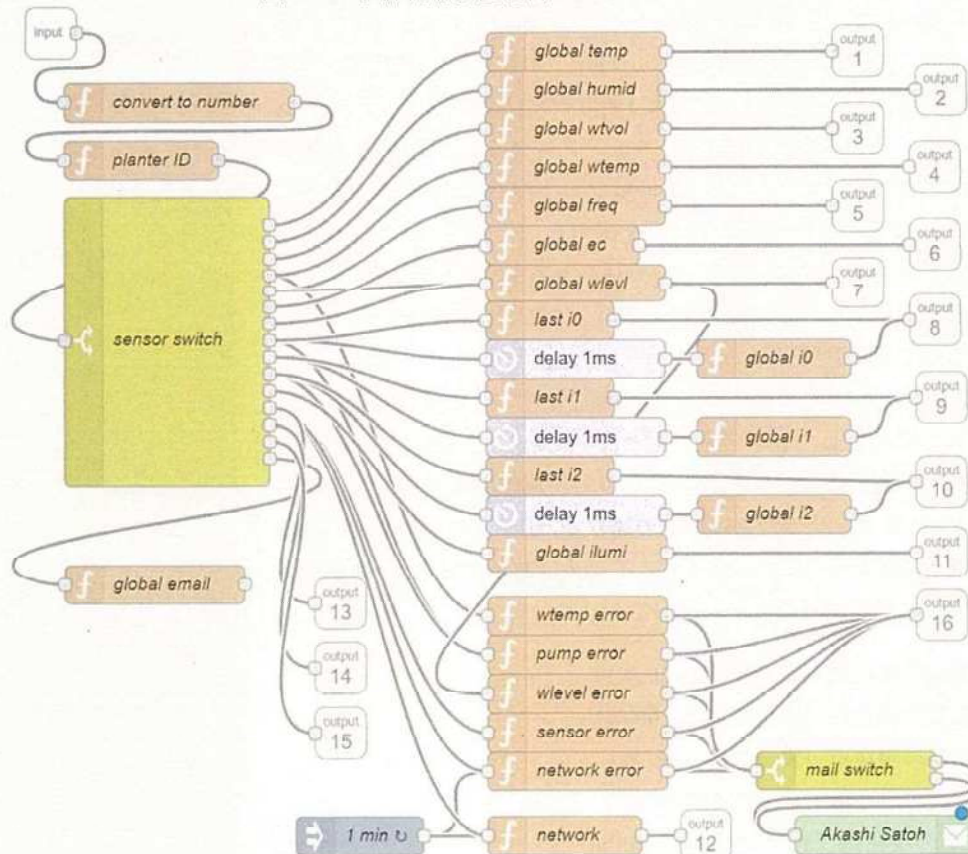


図 5.2.2 水耕栽培装置制御のサブフロー

図 5.2.1 の左上の紫の入カードは、装置名“HP_CDS01”(Hydroponic Planter Chofu Daichi Sho 01)の一号機からの全てのデータ(#)を受信する。受信したデータはサブフロー“Sensor Flow”を通じて、右側の 16 個の水色のノードで管理画面に表示される。また、左側の 7 個の水色のノードは管理画面での操作ボタン

やスイッチからの入力である。“エラー通知”はサブフロー内のエラーメール通知に用いられるが、それ以外のノードは、それに続く 6 個の紫色の出力ノードから水耕栽培装置に送信される。

図 5.2.2 のサブフローは 3 台の水耕栽培装置で共有されるが、ソフトウェアのサブルーチンとは異なり、装置毎に独立したローカル変数は使用できない点に注意が必要である。そこで、左上の肌色の function ノード“Planter ID”でプランター名“HP_CDS01”、“HP_CDS02”、“HP_CDS03”を識別して、装置の数だけ用意したグローバル配列を利用して処理を行う。また“Planter ID”の前のノード“convert to number”であるが、MQTT は通常データを文字列で送信されるため、これを数値に変換する。なお function ノードの処理は JSON で記述する。

黄土色のノード“sensor switch”は、データをセンサ毎に振り分けるものである。MQTT 通信でデータの識別に“HP_CDS01/temp”や“HP_CDS01/humid”のようにトピック名を用いるが、ここでは装置名の後の“/”に続くのがセンサ名である。センサ名 temp (気温), humid (湿度), wtemp (水温), ec (液肥濃度), wlevl (水位), i0 (直流ポンプ電流), i1 (交流ポンプ電流), network (通信状態) に対応したデータは、各 function ノードで処理された後、メインフローに出力されて、管理画面に表示される。また、5 つの function ノード“xxx error”は、データに異常があった時にエラーメッセージを出力し、その後のメールノードから指定したアドレスにメッセージが送られる。スイッチノードは、水耕栽培装置毎にメール先を切り替えるが、ここでは宛先を一つだけにしてるので特に意味はない。

図 5.2.3 にスマートフォン上の管理画面を示す。ここでは、実際の画面を下にスライドしたときの全てをつないで示している。図中の○のついた数字は説明のために記載したもので、実際の画面上には表示されていない。各センサの情報は下記の通りで、①～⑥の半円や丸の色は数値によって変わる。またスライドスイッチは左がオフ (ボタンが灰色表示) で、右がオン (緑表示) である。

- ① 気温の現在値 (表示範囲 0~50 度)
- ② 湿度の現在値 (表示範囲 0~100 度)
- ③ 水温の現在値 (表示範囲 0~50 度)
- ④ 水位の現在値 (表示時範囲 0~3)
- ⑤ EC の現在値 (表示範囲 0~3.0 mS/m)
- ⑥ 液肥循環ポンプ電流の現在値 (0~1,023)
- ⑦ 気温の 24 時間経過
- ⑧ 湿度の 24 時間経過
- ⑨ EC 値の 24 時間経過

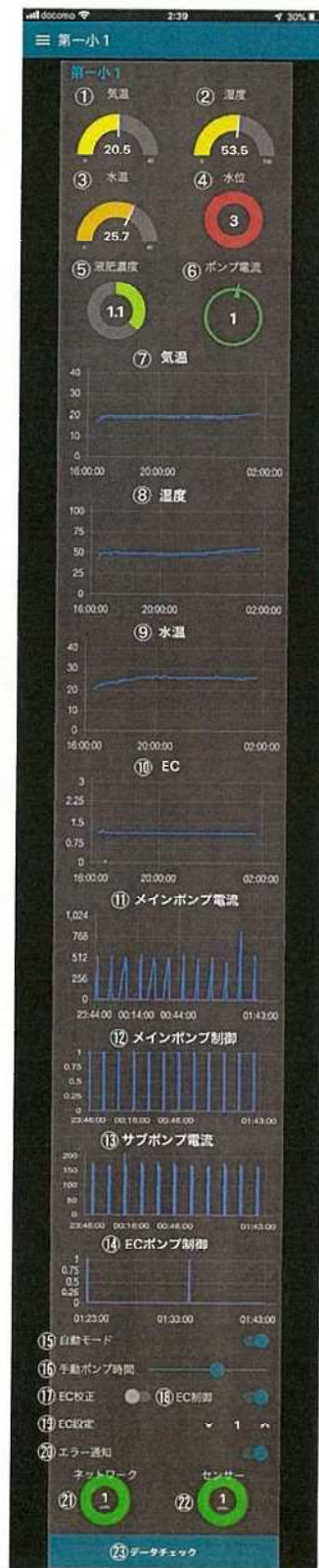


図 5.2.3 管理画面

- ⑩ 水温の 24 時間経過
- ⑪ メインポンプ電流（表示範囲 0~1,023）の 2 時間経過
- ⑫ メインポンプ制御信号（0 または 1）の 2 時間経過
- ⑬ サブポンプ電流（表示範囲 0~1,023）の 2 時間経過
- ⑭ 追肥用エアポンプの制御（0 または 1）の 2 時間経過
- ⑮ ポンプの動作モード（手動/自動）
- ⑯ 手動ポンプ動作時のポンプ動作時間制御スライド（左端 停止～右端常時オン）
- ⑰ EC 校正モード（オフ/オン）
- ⑱ EC 制御モード（オフ/オン）
- ⑲ EC 値の目標
- ⑳ エラーメール通知（オフ/オン）
- ㉑ ネットワーク接続状態（1:正常 0:切断）
- ㉒ センサ状態（1:正常/0:停止）
- ㉓ データチェックボタン



図 5.2.4 水耕栽培装置の切替え

⑥⑪⑬のポンプの電流/制御は変化があるとすぐに値が更新されるが、他のデータは 5 分に一回しか更新されない。そこで、現在の情報を今すぐに見たい場合は、㉓のデータチェックボタンを押す。また、3 台の水耕栽培装置の切り替えは、画面上部の緑のバーの左側のハンバーガーメニューをクリックして、図 5.2.4 の選択メニューを表示させ、その中から第一小 1～第一小 3（1 号機～3 号機）の一つを選ぶ。なお電通大 0～電通大 5 は、大学の施設にある水耕栽培装置で、第一小 4 は佐藤研究室内のテスト用装置で、小学校に置いてあるものと同じの構成をしている。

①と⑦の“気温”と②と⑧の“湿度”は、前出の図 5.1.4 中央の水耕栽培装置後部にある防水ボックス内の、センサモジュールに接続された青い温湿度計で計測している。ボックスには電源ケーブル用の穴を開けているが、空気の対流はあまりないため、外気ではなくあくまで箱の中の温湿度を参考値として計測している。また湿度が 80%を越えた場合は箱がきちんと締まっていない等の要因で水滴が入ってしまったり、高湿度に長期間さらされてセンサが狂っている可能性がある。ボックスの底には穴を開けてセンサやポンプ電源のケーブルをタンクの中に入れており、ケーブルを通した後に穴はエアコンパテで塞いでいるが、きちんと塞がれていないと、冬季にタンクに入れる予定の熱帯魚用ヒーターで温まった水蒸気が侵入する可能性があるので注意が必要である。

③と⑨の“水温”は気温よりも重要な情報である。水温が 35°C を超えると水耕栽培では根が腐り始めるため、現在のシステムではその場合にユーザに「水温が 35°C を超えました」と警告メールを送信するようにしている。冷却装置で水を冷やすことも



図 5.2.5 水位計測用ケーブル



図 5.2.6 ボールタップ

原理的には可能であるが、大きな電力が必要となる。タンクに直射日光が当たらないように保温シートで覆ったり、ペットボトルに水を入れて冷凍庫で凍らせたものをタンクに放り込むといった対処が効果的である。気温が35°Cでも直射日光が当たり、また熱帯夜が続くとタンク内の水が40°C以上となることもある。本水耕栽培装置は根が常時水に浸かっている通常の水耕栽培と異なり水をかけるタイプなので、日中35°Cを超えても夜間に冷えればさほど問題はない。しかし、2018年と2019年は夜も高温が続いたために、夜間も水温が35°Cを超える日が続き作物が大きなダメージを受けており、夜間の水温にも注意が必要である。

④の水位は3→1→0と変化し、1になると「水が減っています」、0になると「水がなくなりました」というエラーメールが送信される。水位は満水ならば3、水位が下がってタンク内に垂らした図5.2.5の水位計測用ケーブル水から出ると1、水が空になると0となる。なお、水位測定用のケーブルよりも下にあるEC値測定用の電極が液肥に浸かっていると3または1となり、2となった場合は、なんらかの原因で満水時に液肥濃度センサが動いていないことを意味している。タンク内には図5.2.6のボールタップが取り付けられており、自動的に注水されるので通常は水が減ることない。もし水位が低下していた場合は、水道の元栓が閉まっているか、タンク底の排水栓が外れていないかをチェックする。図5.2.6は満水時で、この状態で水位が1や0となった場合は水位センサの故障も考えられるが、ケーブルが下に伸びずに上に曲がって浮いていることもあるのでチェックする。

⑤と⑩のECは、液肥中の養分の濃さによって変化する電気伝導度（EC: Electro Conductivity）を数値化したもので、値が高いほど濃度が高いことを意味する。通常の濃度は1.0mS/cm（1000 μ S/cm）に調整する。

⑥と⑪は直流12Vメインポンプ電流、⑬は交流100Vサブポンプ電流で、動作時にそれぞれ700以上、150以上の値、停止すると両者とも0から一桁の値となる。

⑪⑬は電流変化を2時間表示としており、メインポンプは15秒オン/10分オフ、サブポンプは1分オン/10分オフ動作を繰り返している。サブポンプは外付けのタイマーで制御しており、最小設定時間が1分のため、メインポンプの15秒よりもオンしている時間が長い（グラフの線が太い）ことが図5.2.7からもわかる。電流センサは5秒間隔で値を調べ、15秒のオン状態でも3~4回電流を検知できるようにしている。メインポンプの電流値が500を切った状態が30分間続くと（センサやポンプの故障、あるいはユーザが誤って手動モードにして止めてしまっている等）、ポンプが停止していると判断して、「ポンプが止まっています」というメールがユーザに送信される。またポンプが再び動作を開始すると「ポンプが復活しました」というメールが送信される。

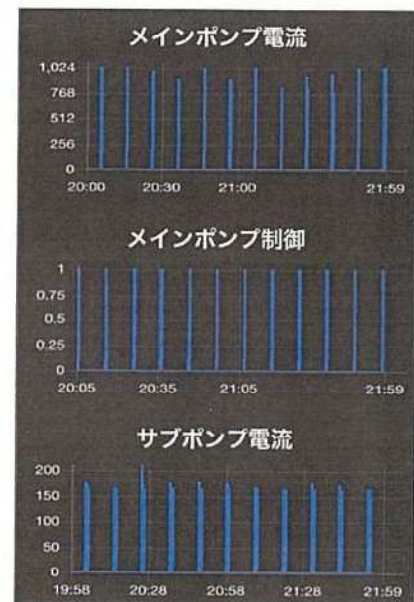


図 5.2.7 ポンプ電流と制御



図 5.2.8 電流の見逃し



図 5.2.9 電流値異常

ポンプが動作している 15 秒間に、センサモジュールが他のセンサデータの取得等を行っている時、図 5.2.8 のようにこの 15 秒を見逃してしまう場合がある。センサモジュールや通信状況によって差があるが、一日に数回この見逃しが起こることもある。エラーメールが送られるのはポンプが 30 分以上停止していると判断された場合なので、見逃しが連続しない限りメールは送られずまた問題もない。見逃しが 2 回以上続いた場合でもその後ポンプが動いていれば問題ないが、それが頻繁に起こる場合はセンサや通信系に問題がある可能性があり、原因を調べる必要がある。

図 5.2.9 ではポンプは正しく動作しているものの、ホースが外れている場合の電流波形である。ホースが外れていると水を汲み上げないため、ポンプに負荷がかからずこのように消費電流が低下する。したがって、単にポンプ電流があらかじめ定めた閾値の 500 を越えたら動作しているという単純な判断ではなく、エラーメールが届いたならば、その前後で電流値がどのように変化していたか、いつもと違う動作をしていないか等にも気を付ける必要がある。

⑫のメインポンプ制御は⑪のメインポンプ電流と同じタイミングの信号であるが、センサが計測したポンプ動作時の電流ではなく、マイコンボードが出しているポンプを動作させる 0/1 の制御信号である。

図 5.2.10 のようにセンサモジュールは上下 2 段構造になっており、上がセンサ部（図 5.1.4 では赤い基板であるが、ここでは白い基板）、下が Wi-Fi 通信機能を備えた ESP32 マイコンを実装したボード WeMos D1 R32 である。センサはポンプ動作時の電流を見逃すことがあるが、マイコン部は制御信号をそのままデータとして Wi-Fi 送信するため、そのような見逃しは起きない。センサ部に不具合が出て全てのデータが来なくなった場合、ポンプ制御信号が画面上で確認できればポンプは動作している可能性が高い。一方、ポンプ電流だけが検知されなくなった場合は、ポンプが故障して止まっている可能性が極めて高い。また、制御信号のデータも来なくなった場合の原因は、センサモジュール全体が停止しているか、LTE モバイルルータとの通信障害かのいずれかである。

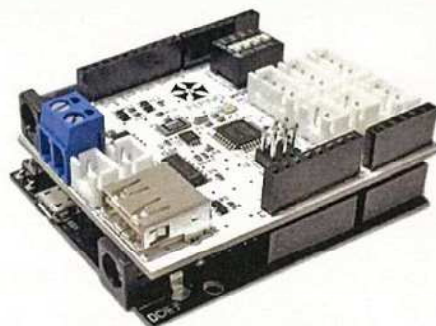


図 5.2.10 センサモジュール

図 5.2.6 の⑮の“自動モード”と⑯の“手動ポンプ時間”は、ポンプ制御用のスイッチである。⑮のスイッチを右にすると自動モードに入り、⑯のスライドスイッチとは無関係に 15 秒オン/10 分(600 秒)オンを繰り返す。⑮のスイッチを左にすると手動モードになり、⑯のスライドスイッチの位置を左→右に動かすほど、ポンプの動作時間が長くなり、中央に設定すると自動モードと同じ 15 秒オン/10 分オンとなる。正確にはスライドは 8 段階に設定でき、“オン秒/オフ秒”の組み合わせは次の通りとである。なおポンプはスペック上、30 分以上連続して動作させることが禁止されているので、連続運転には注意する。

0/1200, 15/1200, 15/900, 15/600, 15/480, 15/240, 45/90, 60/0

図 5.2.11 はスマートフォンからポンプを制御するときの様子で、⑬のサブポンプと⑭の EC ポンプは省略している。(a)は自動モードで動いている状態で、手動ポンプ時間のスライドを動かしても、“15 秒オン/10 分オフ”の動作は変わらない。(b)は手動モードにして動かし、手動ポンプモードのスライドを左端にセットしてポンプを停止させた状態で、ポンプ電流はずっとゼロを維持している。(c)で次にスライドを右端に動かすとポンプが動作して電流が検出される。そして(d)で再びスライドを左端に動かすか、あるいは自動モードに切り替えると電流は 0 に戻る。手動モードでポンプを連続運転させたとき、メイ

ンポンプ制御信号が激しくオン/オフを繰り返しているように見える。これはプログラム上、60秒経過すると制御信号が一瞬オフとなつてすぐにオンとなるため、実際にはポンプが止まることはない。

「ポンプが止まっています」というエラーメールが届いたときには、まず、データチェックボタンを押して通信状態をチェックする。ネットワークが繋がっていて、何らかのデータが届いたならば、図 5.2.11 の操作を行ってポンプ動作の確認し、切れていたならば現地へ赴いて通信を回復する必要がある。なお通信が切れただけで、センサモジュールは正常に動作しているときは、モジュールがポンプを自動モードに切り替えるようになっている。



図 5.2.11 ポンプの遠隔制御

⑰⑱⑲は液肥濃度の EC 制御用のボタン、また⑳㉑は肥料原液を追加するエアポンプの状態を示している。EC センサにはばらつきがあり、また EC 測定用の電極には腐食や肥料の析出等があるため使用中に値がずれてくる。それを補正するのに使うのが㉑の EC 補正と㉒の EC 値である。図 5.2.12 に管理画面から必要な部分だけをまとめた EC 操作の手順を示す。

- (a) “EC 制御” をオンにして自動追肥を行い、ターゲットである “EC 値” を 1mS/cm (EC 計の表示は $1,000\mu\text{S/cm}$) に設定した状態で、計測された EC 値がドーナツの中に 1mS/cm と表示されている。これが理想的な状態であるが、追肥が行われた直後は比重の重い原液がタンクの底にたまり、循環ポンプで攪拌されるまでは、同じくタンクの底においている EC 測定用電極の周りの濃度が高くなるので、EC の計測値が設定値を大きく超える場合がある。また、一見正常に見えても、センサの誤差で計測値がずれている場合がある。例えば(a)で EC が 1 と表示されていても EC 計で測定すると 1.13 ($1,130\mu\text{S/cm}$) であった場合、EC センサを構成する必要がある。
- (b) それには “EC 校正” をオンに、“EC 制御” をオフにして、“EC 設定” を 1.14 にセットする (設定値を 0.02 刻みとしているため 1.13 には設定できない)。
- (c) “データチェック” ボタンを押すと、ドーナツの中の EC 値が 1.14 となり、校正が完了する。
- (d) “EC 設定” を 1 に、“EC 制御” をオンに戻して自動 EC 調整モードにする。
- (e) “EC 制御” は “EC 校正” に優先するので、“EC 制御” がオンであれば “EC 校正” のオン/オフは無視される。したがって、(d)とこの(e)は同じ動作となる。
- (f) EC センサの値よりも EC 計による測定値が小さく 0.9 だった場合、(b)と同じように校正モードに入り、“EC 設定”を 0.9 にする。
- (g) “データチェック” を押すと、EC 値が 0.9 に校正される。
- (h) “EC 設定” を 1 にして自動調整モードに入ると、設定値の 1 が現在の EC 値 0.9 よりも大きいので

で、原液を抽出するための EC ポンプが稼働する。



図 5.2.12 EC の遠隔制御

図 5.2.3⑳ はエラー発生時にメールをユーザに送信する（スイッチ右）かしないか（スイッチ左）を決めるものである。例えば掃除のためにポンプを停止したり、水を抜いたり、また電源を抜いたりすると、ポンプ停止エラー、水位エラー、通信遮断エラー等のメールがサーバからユーザに送信されるため、これを行わないようにするときなどに使用する。なお、エラーメールを送信するアドレスは Node-RED のフローを書き換える必要があるので、ユーザは設定できない。

㉑と㉒はそれぞれネットワークとセンサの状態の表示部分で、図 5.3.13(a)(b)がネットワークに繋がっているとき、(c)(d)がネットワークが切れている時の表示である。

(a)はセンサも正常で、(b)はセンサが止まっている状態、(c)はネットワークが切れているのにセンサは正常と表示されているが、これはネットワークが切れる直前までセンサが正しく動いていたことを意味している。(d)はセンサが止まってからネットワークも切れたという状態である。マイコンボードの Wi-Fi はそれほど強くないので、電波状況の悪い場所ではしばしば切れることがあり、(c)の状態であれば後でネットワークが復活する可能性がある。しかし(d)はセンサにもネットワークにも異常が検知されているので、このままの状態が続く場合は、すぐに装置をチェックし、必要に応じて緊急用のポンプに付け替えるなどの対応が必要である。



図 5.2.13 ネットワークとセンサの状態

センサが止まってポンプ電流が検出できなくてもネットワークが動いていれば、上述したとおりマイコンボードは図 5.2.14 のようにポンプ制御信号を送信して、ポンプは動いている可能性が高い。

③の“データチェック”はEC校正時以外では、画面のデータを現在の値に更新するときにクリックする。ポンプ電流は5秒に一回計測を行っており、変化があった時にはすぐに更新されるが、その他のデータは通常は15分に一回だけ自動更新される。それらの計測データは誤差によるノイズを含んでいるため、値が大きく変化する場合を除いて、自動更新時には移動平均をとって滑らかにしている。これに対してECと水温は、液肥を人が手で入れて細かく調整したり水を入れ替えるなどするとき、平均ではなく現時点の値を知りたいため、“データチェック”のクリック時にはそのままの値を表示している。

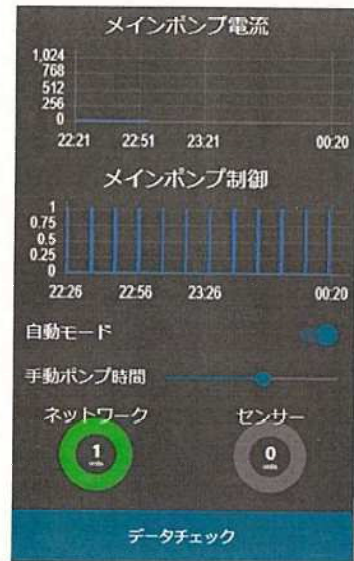


図 5.2.14 ネットワークとセンサの状態

5.3 スマートホームとの連携

《Home Assistant》

Home Assistant は、スマートホームを実現するオープンプラットフォームで、様々な家電をスマートフォンやスマートスピーカーから制御できる。Raspberry Pi 用の SD カードイメージもサポートされたことでインストールが簡略化されている。Home Assistant は実際には Rasbian OS [11]上で動作しているがそれを意識せず、これまで個別にインストールしていたツールやライブラリは、add-on を追加することで面倒な設定作業等を行わずに機能拡張することができる。水耕栽培システムの管理を行う Node-RED も add-on でサポートされている。図 5.3.1 に、Home Assistant のメインパネルを、また図 5.3.2 にインストールされた add-on の画面を示す。

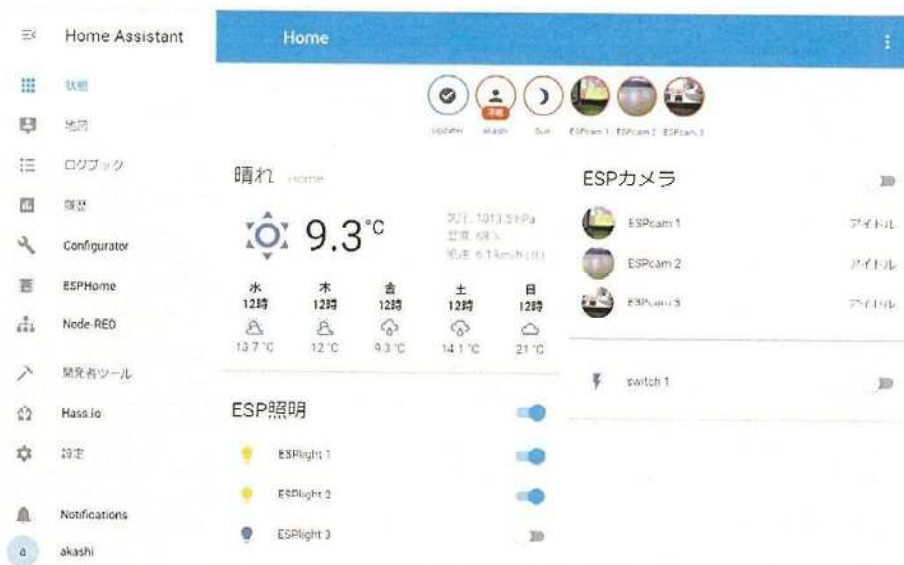


図 5.3.1 ESP32 カメラを 3 台接続したときのメインパネル

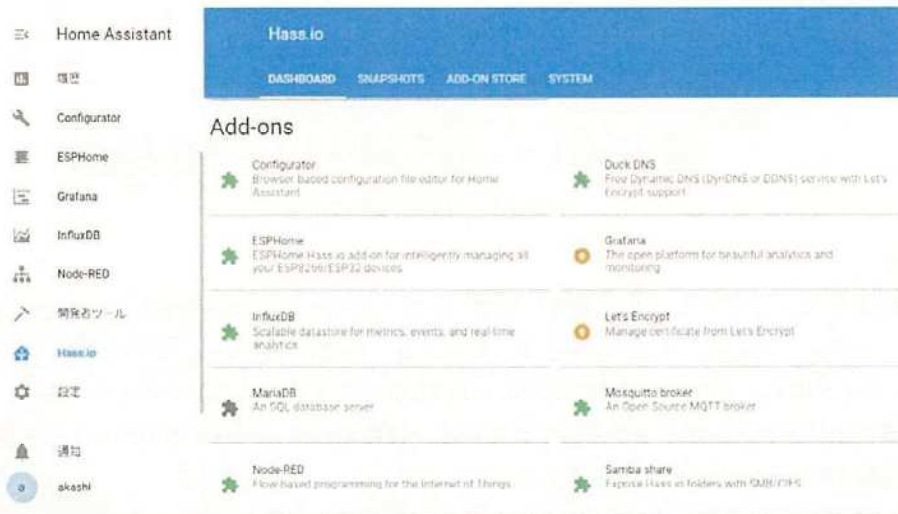


図 5.3.2 インストールされた add-on

メインパネルには接続している 3 台のカメラのコントロールメニューが表示されており、またこのパネル上から照明の遠隔操作も可能となっている。

スマートスピーカー Amazon Echo を用い、Alexa [9] の音声認識により Node-RED を通じて水耕栽培装置にコマンドを送り、水耕栽培装置から Node-RED に帰ってきたデータを Amazon Echo に送って音声出力させることで、音声入出力による制御を行えるようにした。これには下記の手順を踏む。

1. Node-RED Alexa Home Skill Bridge [12] にアカウントを作成
2. 制御するデバイスを作成
3. Alexa アプリでスキル Node-Red を追加して Node-RED Alexa Home Skill Bridge のアカウントにログイン
4. 先に作成したデバイスをリンク
5. Home Assistant で Node-RED にログインし、パレット管理から node-red-contrib-alexa-home-skill [13] と node-red-contrib-alexa-remote2 [14] のノードを登録
6. Node-RED のフローを作成

図 5.3.3 は水耕栽培装置の Node-RED フローの音声制御の部分だけを示したものである。ここでは上の 2 で HP_HOME というデバイスを作成し、それに水耕栽培装置 HP_HOME をリンクしている（デバイス名と水耕栽培装置名は異なってもよいが、ここでは間違いのないように同じとしている）。灰色の node-red-contrib-alexa-home-skill の入力ノードは、Alexa からのコマンドを受け取り、紫色の MQTT 出力ノードは、センサデータの読出しを指示するトピック“HP_HOME/d_check”を水耕栽培装置に送る。これによって装置は Raspberry Pi サーバにデータを送信し、先に図 5.2.1 および図 5.2.2 に示したフローで処理される。そしてこのときグローバル変数にセンサデータは保存される。function ノード“センサデータ”はこのグローバル変数を読み出して音声出力用のテキストを生成し、水色の node-red-contrib-alexa-remote2 の出力ノード “Alexa 音声”に送り、Amazon Echo スピーカーで発話させる。なお、紫色の MQTT 入力ノード“M5_HOME/dchek”は、後述の M5Stack から送信されたデータリクエストトピックである。Alexa にどのような音声コマンドでアクションを行わせるかは、Alexa アプリの「定型アクション」で設

定を行う。



図 5.3.3 音声制御のフロー

《M5Stack》

M5Stack は 32 ビットプロセッサを実装した Wi-Fi モジュール ESP32 を実装し、320×240 ピクセルの 2 インチカラーディスプレイ、スピーカー、3 つのボタン、内臓バッテリー、Micro SD カードスロット、GROVE コネクタ(I2C)、GPIO、520KB SRAM、16M Flash メモリを持つ IoT デバイスである。スタックして用いる様々なオプションボードが用意されている。複数のラインナップの中からメモリ容量の関係で本研究では図 5.3.4 の M5Stack FIRE を用いた。

M5Stack FIRE に音声合成ライブラリ AquesTalk [15]を実装し、図 5.3.5 に示したように、現在時刻と水耕栽培装置のデータをディスプレイに表示する機能と、無料で世界の天気を提供している図 5.3.6 の Open Weather Map [16]から指定した場所の天気情報を取得し、JSON コードを解析してディスプレイ表示する機能を実装した。M5Stack FIRE を起動すると図 5.3.5 左のニクシー管時計 [17]が表示され、左ボタンを押す度に、「時計」→「センサデータ」→「天気」と画面が切り替わる。



図 5.3.4 M5Stack FIRE

中央のセンサデータ画面では、右ボタンを押す度に、最新のデータを取得して表示と発話を行う。この画面に切り替わった時と右ボタンを押したときに、M5stack から図 5.3.3 のトピック“M5_HOME/dcheck”が送信され、水耕栽培装置がセンサデータを読み出す。装置から送られてきたデータは図 5.3.7 のフローでセンサデータごとに分離され、紫色の MQTT 出力ノードを通じて M5Stack に送られ、図 5.3.5 中央の表示が行われる。



図 5.3.5 M5Stack FIRE の操作画面 (左から、時計、センサデータ、天気情報)

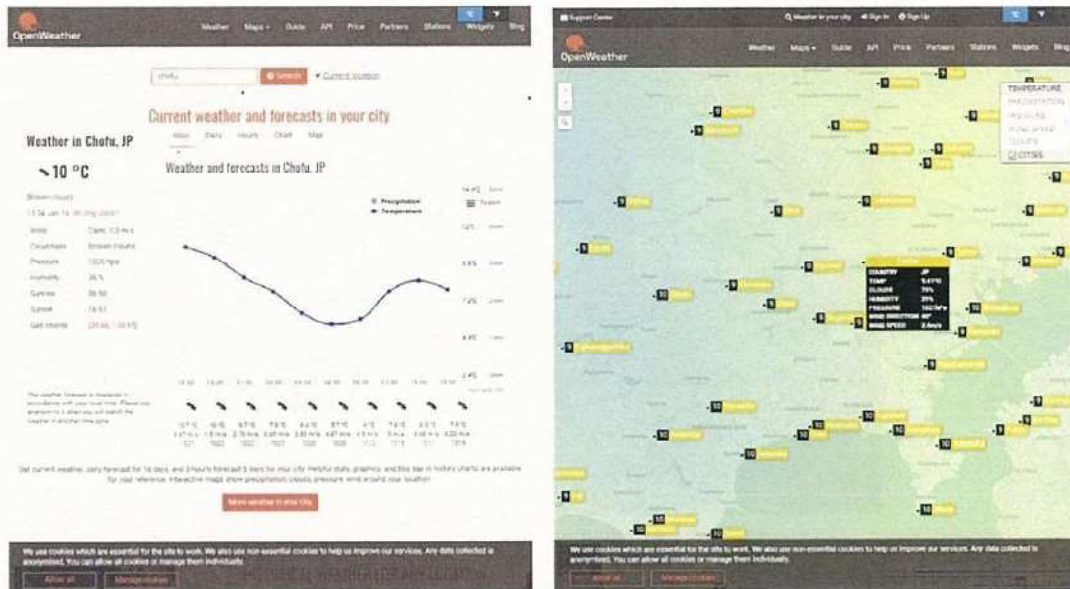


図 5.3.6 Open Weather Map

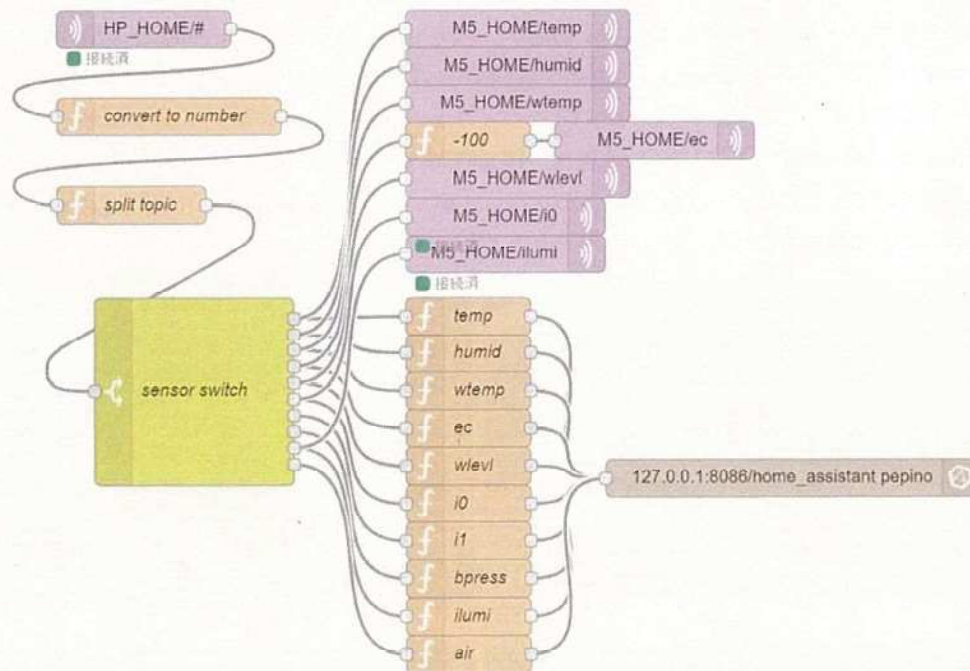


図 5.3.7 センサデータの M5Stak および InfluxDB への出力処理フロー

《InfluxDB と Grafana》

図 5.3.7 下側でスイッチノードの各センサ出力は、function ノードで、水耕栽培装置名、センサデータ名、センサデータがセットにされ、茶色の出力ノードで時系列データベース InfluxDB へ書き込まれる。

図 5.3.8 は InfluxDB に保存したデータを可視化ツール Grafana で表示した画面である。Node-RED ダッシュボードに表示されているデータは一定時間経過後に消えてしまうが、Grafana は表示範囲を変えたりデータを加工しながら高速な表示を行うことができる。



図 5.3.8 Grafana によるセンサーデータの表示

《監視カメラ》

Home Assistant には図 5.3.1 のメインパネルにもあるように、複数の ESP32 カメラを接続しているが、室内での性能テスト段階で屋外に設置する防水ケース等もない。そこで、ctronics 社の屋外用ネットワークカメラを一台だけ小学校に設置した。カメラは図 5.3.9 の SD 画質 (720×480) 画質と HD 画質 (1280×720) をサポートしている。小学校に設置した LTE モバイルルーターを通じてスマートフォンでモニタした場合の描画速度は、HD 画質で 1 フレーム/秒程度、遅延時間は 5 秒程度である。図 5.3.10 左は赤外線カメラによる映像である。日中に比べて状態がわかりづらいが、Home Assistant から 10 台の LED 投光器を遠隔で点灯することで図 5.3.10 右のようにはっきりとした映像を得ることができる。



図 5.3.9 ctronics カメラによる SD 画質 (左) と HD 画質 (右) の映像



図 5.3.10 ctronics カメラによる夜間の暗視映像 (左) と照明 HD 画質 (右) の映像

5.4 液肥管理システムの開発

液肥管理システムは、液肥の濃度を測定するセンサ、原液をポンプで追肥する機構、それらを制御する Node-RED によるアプリケーションから構成される。濃度測定では、液肥に浸けた二本の電極の間に電流を流し、濃度が濃くなると高くなる電気伝導率 (EC: Electro Conductivity) を計測する方法が広く用いられている。液肥濃度計は EC 計とも呼ばれる。液肥に浸けた電極の面積が大きくまた距離が近いほど抵抗は小さく、逆に面積が小さく距離が離れば抵抗は大きくなる。面積 A の電極が距離 L で向かい合っており、電極と液肥には接触抵抗がなく、 $A \times L$ の直方体の液肥を通じてのみ電流が流れるとき、抵抗率を ρ (単位は Ωm) とすると、抵抗 R は次式で表される。

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (\Omega)$$

電気伝導率 EC は ρ の逆数で、基本単位は $\text{S/m} = 1/\Omega\text{m}$ であるが、これは実用には大き過ぎるので mS/cm が通常用いられる。

本水耕栽培装置では、図 5.4.1 のオペアンプ回路を用いた EC センサを実装した。発振周波数 f は液肥の電気抵抗 R によって変化する。電極が上式のように理想的な平行板電極であれば、比較的簡単 f と R の関係を求めることができる。しかしながら、実験で使用した電極は図 5.4.2 のような形をしており (ケース内はパテで埋めている)、液肥に浸した電極の周囲全体に電流が流れる。そこで、実験により発信周波数 f と EC 値のデータを複数求め、両者の関係を近似する式を実験により算出した。

図 5.4.2 は原液を追肥する機構の構成である。図 5.2.12 の EC の遠隔制御でも説明したように、EC センサで計測した値が設定値低いとき、Node-RED は液肥コントローラにエアポンプを動作させる指示を出す。それによってコントローラは、5V の USB 電源をオンしてエアポンプを動かす。そして、前出の図 5.1.9 左の写真にも示した原液の入った 2ℓ ペットボトルに空気が送られ、押し出された原液が液肥タンクに注入される。

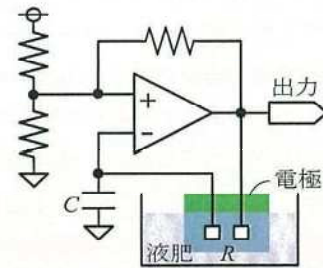


図 5.4.1 オペアンプ発信回路



図 5.4.2 実験で使用した電極

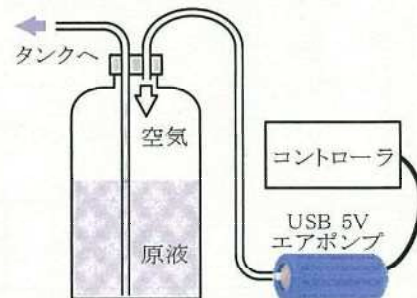


図 5.4.3 追肥機構の構成

5.5 太陽光発電システムの開発

水耕栽培システムは、前出の図 5.1.6 の BOX5 および図 5.1.8 に示したように、ソーラーチャージコントローラに、100W のソーラーパネルと 12V のカーバッテリーを接続して使用している。チャージコントローラは価格がおおよそ①1,000 円、②1,500 円、③3,000 円の 3 つを試してみた。いずれも回路と制御が簡単なものの発電効率の低い PWM (Pulse Width Modulation) 制御方式を用いており、①と③はアナログ回路による制御、②はマイコンを搭載したデジタル制御である。③は 12V 専用、①は 12V/24V 兼用とし販売されているが、回路を見る限り 12V バッテリーにしか対応できないはずである。②は 12V/24V 自動切換えを行うが、それによる次のトラブルが発生している。

ソーラーパネルの発電電圧は～17V程度であるが、晴天時には18Vを超えることがある。するとそれまで12Vモードであったコントローラが突然24Vモードに切り替わり、カーバッテリーの電圧が12V以上であるにもかかわらず、バッテリーの電圧が24Vに対して低すぎるとして、充放電を停止してしまうのである。このため、水耕栽培システムが停止してしまうというトラブルが数回発生しており、そのような場合はソーラーパネルとバッテリーのケーブルをコントローラから外し、再度接続するというところを行わないとリセットすることができない。①はそのようなトラブルは発生していないが、初期不良や故障が比較的多かった。また待機電流が大きいと、天候が悪い日が続いたときにバッテリーが上がってしまう懸念から、オーバースペックであると思われるが100Wのソーラーパネルを使用している。

水耕栽培装置の図5.2.10 センサモジュールには、ESP32を実装したマイコンボード WeMos D1 R32 を用いているが、ボードやWi-Fiのライブラリアップデートや相性により、通信距離が3～4メートルほどしか出ないこともある。特に雨天等では通信遮断が発生しやすく、遮断中にソーラーコントローラに不具合で水耕栽培システムが停止しても気付かない可能性がある。センサデータが遠隔モニタできなくなった場合、次の4つの可能性が考えられる。

- ① Wi-Fi ルータとマイコンボード間の通信障害
- ② センサ基板の停止
- ③ ソーラーチャージコントローラの停止
- ④ マイコンボード全体の停止

①は長くても数時間で回復し、大きな問題はない。②はセンサが止まっても液肥ポンプを駆動しており、センサデータが来なくてもマイコンが正常であることは制御画面で確認できる。③④が発生するとポンプが停止し、放っておくと植物が枯れてしまう。③はこれまで1シーズンに1～2回発生しているが、コードの修正を繰り返した現在、④が発生することはほぼない。①～④で②以外の区別は困難であるが、③を判別することが重要である。そこで、ESP32で発電量と消費量を測定し、無線でデータを送信するソーラーチャージコントローラを制作する。また、ESP32マイコンで制御することで発電効率の良いMPPT (Maximum Power Point Tracking) 制御方式を実装する。

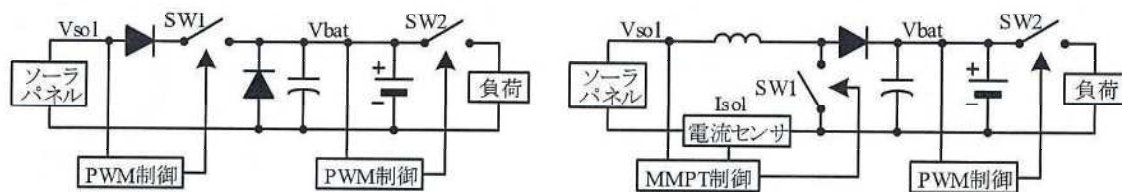


図 5.5.1 PWM 制御方式と MMPT 制御方式 (昇圧回路)

図 5.5.1 に PWM 制御方式と MMPT 制御方式の概略図を示す。PWM 制御方式は、ソーラーパネルの電圧 V_{sol} がバッテリーを充電するのに十分高いときに、SW1 を PWM 制御によってオン/オフすることで、バッテリーに電圧 V_{bat} を供給して充電を行う。バッテリーの電圧は接続する装置 (負荷) の定格よりも高い場合があるので、出力電圧も SW2 を PWM 制御することで適切な値に調整する。PWM 制御は非常に簡単であるが、降圧回路なので、天候が悪くなりソーラーパネ

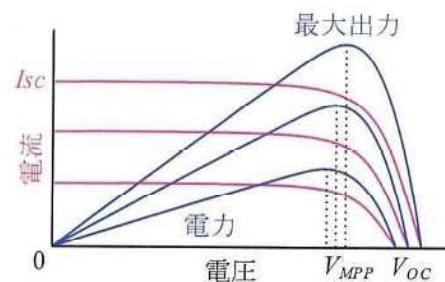


図 5.5.2 ソーラーパネルの特性

ルの電圧が落ちてくると充電できないという欠点がある。

一方 MPPPT 制御方式は、ソーラーパネルの電圧 V_{sol} と電流 I_{sol} を計測し、発電電力 $V_{sol} \times I_{sol}$ が最大となるように、スイッチ SW1 のオン/オフを制御するものである。SW1 はパルス信号による PWM 制御で行う。電圧が低い場合でも、インダクタを用いた昇圧回路でバッテリーへの充電電圧を調整する。

ソーラーパネルの特性を示すパラメータには、図 5.5.2 に示すように、ソーラーパネルが発生可能な最大電流である短絡 (Short Circuit) 電流 I_{sc} 、無負荷で発電させた場合の開放 (Open Circuit) 電圧 V_{oc} 、 $I-V$ 特性が挙げられる。ソーラーパネルは内部に複数の太陽電池セルが直列につながっており、単セルでの電圧は 0.6~0.7V 程度である。電力=電圧×電流であるから、出力電力は山形のカーブとなる。このとき最大出力 (Maximum Power Point) が得られる電圧が V_{MPP} である。最大出力 (および $I-V$) カーブは日照や気温によって刻々と変化するので、その状況に応じた最大電力点で発電させることが重要となる。ただし、 V_{MPP} の変動はそれほど大きくなく、かつ V_{MPP} は開放電圧 V_{oc} の約 76%なので、図 5.5.3 のように電流を計測せずに電圧だけで簡易的に制御することも可能である。

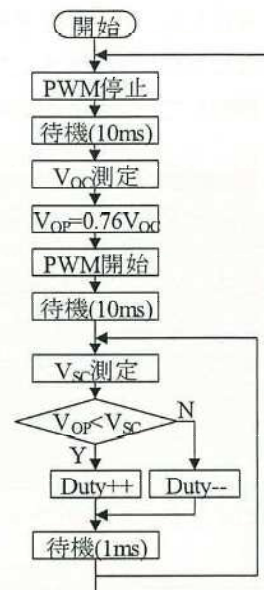


図 5.5.3 簡易制御

6 実験結果

6.1 水耕栽培施設の設置と栽培

まず以下では、水耕栽培装置の設置と栽培の経過について図 6.1.1~6.1.3 に示す。7月9日から部材の発注をはじめ、7月26日から調布第一小学校屋上で単管パイプの加工と組み立てを始め、7月31日に水耕栽培施設のフレームが完成した。お盆明けから遮光ネットと投光器の取付、ソーラーパネル、電源ケーブルの取り回しと防水ボックス設置、水道から各水耕栽培装置位置まで水道からホースで水を分岐し、装置設置の準備が完了した。しかし9月9日に台風15号が上陸し、強風によって結束バンドと金属ハトメが引きちぎられ、図 6.1.1(e) のよう遮光ネットが破れる事態となった。過去にこのような前例はないが、小学校校舎は図 5.1.1 にも示したように周りに高い建物がなく、南側は校庭となっていたため、そこから校舎屋上に強風が吹きあがったためと考えられる。なお、このような強風にもかかわらず、ネットを溜めていたフレームが動くなどの影響は一切なく、高い安全性が示された。

本来は夏休み明けの9月初旬に水耕栽培装置を設置する予定で準備を進めていたが、中国からのタンクとパイプの到着が9月27日まで遅れた。到着後すぐに装置の組み立てとセンサやポンプの取付、サーバ設定を行い、一ヶ月遅れの10月3日に現地に設置を行った(図 6.1.2(e))。翌週の10日にトマトとイチゴの苗を定植する予定であったが、台風15号よりも大きな19号が迫っていたため15日に延期し、大学の屋上で育てていた苗を室内に退避した。台風の実害はなく、図 6.1.2(b) のようにタンクのフタが飛んでパイプが風で少し傾いただけであった。風の抵抗が大きいソーラーパネルもフレームにしっかり固定していたため、多少ずれただけであった(図 6.1.2(b))。また電気系統やセンサにも異常はなく、台風の最中にフタが外れたタンクに雨が吹き込んで EC 値が下がっていく様子がモニタされていた。

10月15日の午後、図 6.1.2(c) のように小学校校舎屋上で電気通信大学アメリカンフットボール部の協

力のもと、トマトとイチゴの苗の定植を行った。児童は百名以上が集まり、にぎやかなイベントとなった。なお、アメリカンフットボール部は地域の小学生と保護者を集めた電気通信大学こども食堂を毎年開催しており、令和2年度から本施設の栽培に参加予定である。

(a) 7月26日 単管パイプ搬入



(b) 7月31日 フレーム組み立て完了



(c) 8月21日 遮光ネットとLED 投光の取付



(d) 9月1日 ソーラーパネル・電源系統・水道の敷設



(e) 9月9日 台風15号により遮光ネット破損



(f) 9月27日 水耕栽培装置用タンク到着



(g) 9月27日 水耕栽培装置組立とセンサ実装



(h) 10月3日 水耕栽培装置設置



図 6.1.1 水耕栽培装置の設置(7月26日~10月3日)

(a) 10月10日 苗を室内に退避



(b) 10月13日 台風19号の被害



(c) 10月15日 トマトとイチゴの苗定植



(d) 10月15日 苗定植後



(e) 10月21日 追肥装置設置



(f) 11月8日 カメラ設置



(g) 11月22日 照明の遠隔操作



図 6.1.2 トマトの栽培(10月10日～11月22日)



(c) 1月25日 トマトの種まき

(d) トマトの発芽



図 6.1.3 トマトの栽培(7月26日～10月3日)

その後の施設は、図 6.1.2(e)～(g)に示したように自動追肥装置、遠隔監視カメラ、照明の遠隔操作などの機能の実装を行い、令和2年1月13日に今シーズンの栽培を終了した。黄色い花が咲きトマトの青い実はたくさん生ったものの、食べられるまでに赤くなったのは数個しかなかった。このため残念ながら収穫イベントや、児童にアンケートを取ることができなかった。熟れなかった要因は9月予定の栽培開始が一月遅れたことが大きい。9月に開始していた場合は台風で大きな被害を受け、逆に一つも実が生らなかった可能性もある。時期の遅れもさることながら気候の影響も大きかった。図 6.1.4 に気象庁の観測による令和元年の9～10月の府中の日毎の気温の推移を示す。10月に入っても30度を超える日があり、10月13日までは平均気温は25℃前後であった。しかし、苗定植の前日の10月14日から急に冷え込んで平均気温が20度を下回り、最低気温が10度を下回るようになった。このためほとんどのトマトが熟れることなく、青いまままで終わってしまった。

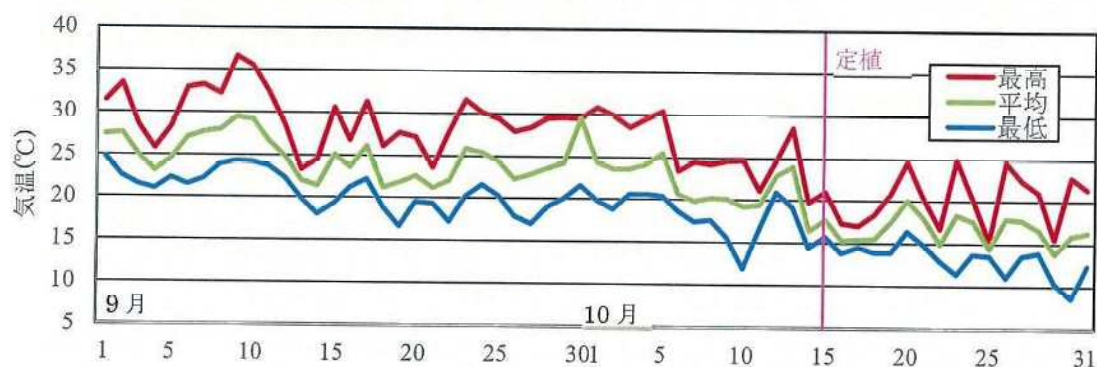


図 6.1.4 9～10月の府中の気温

その後は暖冬となったため、令和2年度は3月下旬には新しいシーズンを開始する予定である。そこで図 6.1.3(c)~(d)に示したように、湿らせたロックウールを敷き詰めたタッパーに種を撒き、電気毛布で保温しながらトマトの育苗を開始している。

6.2 水耕栽培管理インターフェース開発

栽培実験においては、センサデータが届かないといったことが時々発生している。大きな問題は発生していないが、センサモジュールや太陽光発電が止まらない保証はない（そのためポンプは二重化する対策を取っている）。ユーザには“xx が止まっています”といったエラーメッセージは送信されるものの、その原因までは特定していない。そこで、本施設でのトラブル実験を通じて得たノウハウから、トラブルへの対応について以下にまとめる。

《センサデータ停止への対処》

図 6.2.1 は、センサデータが届かないときのスマートフォンの管理画面である。センサデータが止まると、左端のように何も表示されないととき、表示されているもののデータが更新されないときがある。いずれの場合においても他の2台の水耕栽培装置からデータが届いているかを確認し、全て止まっていれば図 6.2.2 の防水ボックス BOX5 中のソーラーコントローラからの電源が切れているか、前出の図 5.1.6 の防水ボックス BOX5 中の LTE モバイルルータが止まっていると考えられる。ソーラーコントローラの緑色 LED “LOAD” が点灯しているか、また赤色 LED “CHARGE” の少なくとも一つが点灯しているかを確認し、いずれかが消えていれば配線を確認する。雨天が続いていた場合チャージされずにバッテリーが上がっていることも考えられるので、充電されたバッテリーと交換する。また図 6.2.2 左の BOX5 内のスイッチが下側の ON になっていることを確認する。

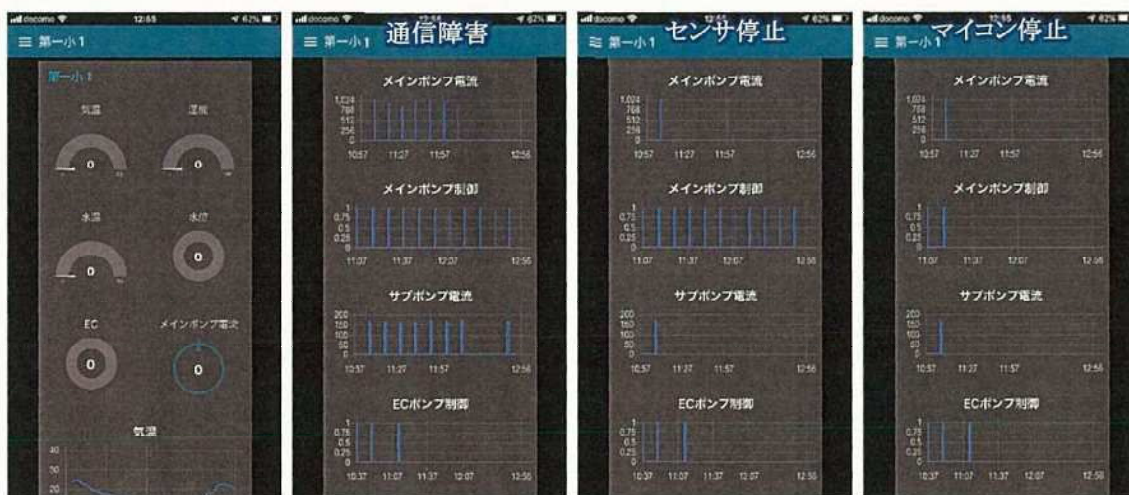


図 6.2.1 センサデータが届かない場合の管理画面

電源に問題がなければ、モバイルルータの状態を確認するために、スマートフォン等で飛んでいる SSID の中に“ocn”があるかどうかを確認する。もし見つからなければ、ルータがオフになっていないかどうかを確認する。ルータのバッテリーが切れていた場合は、USB 充電器からのケーブルが抜けていたり、あるいは交流 100V 電源の根元が抜けている可能性もあるのでチェックする。充電されているにも

関わらず SSID が見えない場合はルータ内の設定が消えてしまっている場合があるので、SSID とパスワードを再設定する必要がある。

大学内のネットワークや RaspBerry Pi サーバに問題がある場合も当然、水耕栽培装置との通信はできなくなるが、その場合はそもそも図 6.2.1 の管理画面は表示されない。

Wi-Fi ルータに問題がなく、他の水耕栽培装置のセンサモジュールが動作しており、1 台だけに不具合がある場合は、三つの場合が考えられる。第一は、雨等で通信状態が悪くなっている場合である。特に、ルータから一番遠い 3 号機が一番通信障害が起こる可能性が高い。図 6.2.1 で“通信障害”と記されている図のように、ところどころデータが歯抜けになっているような場合は、それが原因である。本来は垂直方向に真っすぐな線しか出ないはずのポンプ電流のグラフが斜めの線となる場合もある。このようなときは、ルータの向きを調節してみる。

第二の可能性は、センサモジュールが止まっているか、その下のマイコンボード WeMos D1 R32 との間のシリアル通信の障害である。図 6.2.1 で“センサ停止”と記されているように、メインポンプ制御の信号は出ているのに、ポンプ電流の線が途中から切れて 0 の値にもなっていない場合はこれが原因である。現在のセンサ基板はマイコンボードからリセットをかけることができないので、センサ基板とマイコンボードの電源を一旦落として再起動する必要がある。これには水耕栽培装置後部のセンサ基板を入れている箱を開ける必要があるが、非常に手間である。そこで、図 6.2.2 の防水 BOX5 の中に電源 ON/OFF スイッチを用意している。これを一旦 OFF にしてから ON に戻す。なおこの操作によって、水耕栽培装置 3 台全部がリセットされることになる点に注意する。ルータへは 90 秒間隔で再接続するので、2 分経っても不具合のあった装置からデータが届かなければ、再度スイッチを OFF/ON し、それでもダメな場合は、通信の問題ではなくセンサ基板自身に不具合が生じていると考えられるが、とりあえずポンプが動いていれば枯れることはないので、後に基板交換を行う。

第三目の可能性は、マイコンボードが停止していることである。図 6.2.1 で“マイコン停止”と記されている状態で、マイコンボードが出すポンプ制御信号も止まってしまう。この時も先のセンサ基板が止まっている時と同様に、BOX5 内のスイッチを OFF/ON して回復するかどうかを確認する。回復しない場合はマイコンボードが壊れている、内部のコードが消えている、あるいは装置の防水ボックス内で電源コードが切れている等の原因が考えられるが、いずれの場合も管理者に連絡をする。

なお、図 6.2.1 では EC ポンプ制御のデータがいずれのケースでも届いていないが、これはもともとマイコンボードが液肥用エアポンプを駆動するときにしかデータを送らないので、不具合ではない。



図 6.2.2 防水 BOX5 内のソーラーコントローラ

《ポンプ停止への対処》

次いで、直流 12V メインポンプが動作していない場合の対処法について説明する。制御画面上で、メインポンプの電流がその場合、通信障害等でなければ、図 6.2.3 左のように自動モードをオフにして手動ポンプ時間を最大にしてみる。図 6.2.3 右のようにポンプが動作すれば問題ないが、

動かなければポンプが故障しているか、センサ基板のポンプ電源が抜けている可能性が高い。なお、図 6.2.3 左ではエラー通知がオンになっているので、ユーザにはメールが届いているはずである。

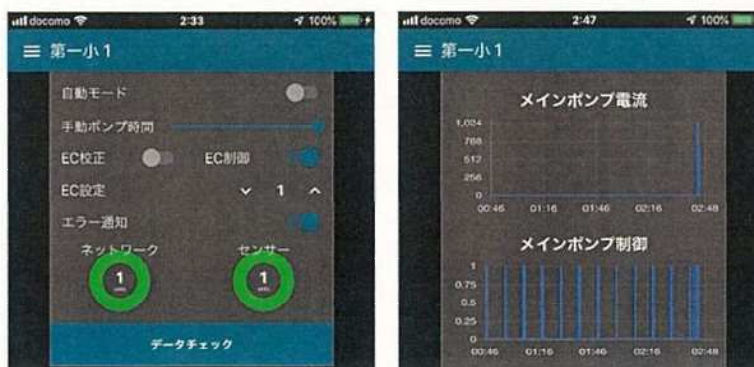


図 6.2.3 メインポンプの手動モードでの駆動

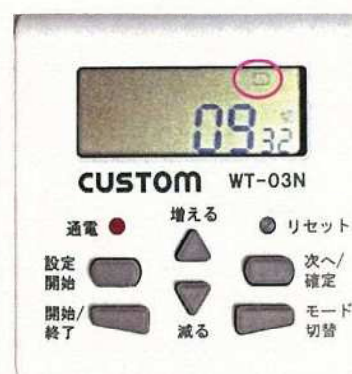


図 6.2.4 防水 BOX1~3 内の交流 100V タイマー

交流 100V サブポンプの電流が止まっている時は、その水耕栽培装置に対応する防水ボックス BOX1~3 の中のタイマー[18]を調べる。図 6.2.4 右のディスプレイで丸く囲った繰り返しタイマーモードを示す記号が出ているかどうかを確認し、出ているならば“通電”の LED が赤く光るまで“開始/終了”ボタンを押す。光らなければ AC 電源が来ていない可能性がある。繰り返しタイマーモードの記号が出ていなければ、出るまで“モード切替”ボタンを押した後、“開始/終了”ボタンを押して、LED が光るかどうかを確認する。このとき数字が出ていなかったりカウントダウンが進まなければ、先の細いドライバー等で“リセット”ボタンを押す。その後タイマーを 1 分オン/10 分オフに設定して、通電するかどうかを確認する。設定方法は文献 [19] の取り扱い説明書を参照すること。LED が光らない場合はタイマーの故障であり、光ってもサブポンプが動作しない場合は、タイマーあるいはポンプの故障のいずれかである。そこでタイマーから横に伸びている短い白の延長コードから、ポンプの黒いコードを外して直接コンセントに挿して動くかどうかを確認する。動かなければポンプの交換が必要である。

《液肥濃度測定の不具合》

次に、液肥濃度のトラブルへの対処法である。原液の減り方が他に比べて早いなどの異常が見られたら、市販のポータブル液肥濃度計で測定を行う。EC 値が高すぎる ($2,000\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上) 場合は、まず水耕栽培装置の EC センサの校正がおかしいと考えられるので、図 5.2.12 の手順に従って校正を行う。また EC センサは水温でも値の補正を行っており、水温センサ (サーミスタ) に不具合がある場合も考えられるので、他の 2 台の装置の水温とかけ離れていないのかも確認する。さらに、自動注水が行われないと、タンク内の液肥の水が肥料よりも多く消費されるため、次第に濃度が高くなっていく。液肥

の水位が下がっていたならば、水道の蛇口が空いているかどうかを確認し、空いていたならば前出の図 5.2.6 のボールタップが横にねじれるなどしていないかを確認して真っすぐに直す。またタンク後部から入っている現役注入用のチューブがタンク内に延びて、液肥の中に入ってしまったかどうかを確認する。

値が低すぎる場合は原液が注入されていないので、まず高い場合と同様に EC センサの校正状態を調べる。EC センサが正しく動作している場合は、ペットボトル内の液肥が沈殿して詰まっていないかどうかを確認し、よく振ってから戻してみる。原液はペットボトルに空気を送り込んで押し出すため、フタが緩んで空気が漏れていないかどうか調べる。また当然のことながら、原液が消費されて無くなっていたならば追加する。このとき 2 本のチューブが外れ逆につけてしまうと原液が注入されなくなってしまう。タンクにつなぐチューブはフタから細い透明の ABS パイプがペットボトルの底まで延びている側である。なお豪雨によって、水耕栽培装置のパイプのポット部分から雨が大量にタンク内に入った場合も追肥が間に合わずに一時的に薄くなる場合がある。3 台の水耕栽培装置には同じような植物を植えるため、原液の減り方はそれほど変わらないはずである。消費量に大きな差がある場合は、EC センサの不具合や、タンクからの水漏れなども考えられる。

《植物のしおれ》

各水耕栽培装置に電源が異なるメインとサブの 2 つのポンプを備えているので、両者が同時に故障することは考えにくい。液肥が無くなってポンプが空回りしている可能性が高いので、タンクのフタを開けて水位を確認し、液肥が無くなっていけばタンクへの注水ホースが外れていたり（数回発生している）、どこかから水漏れしていたり、水道の元栓が締まっていないかを確認する。それと同時にタンク内にホースで水を入れ、2 つのポンプを通常の 10 分間の繰り返しに運転ではなく、管理画面から手動モードに切り替えて連続運転にする。万が一ポンプが両方とも故障していた場合は、他の水耕栽培装置から図 5.1.4 中央の写真の青い交流 100V ポンプを外して、壊れていたポンプと交換する。ポンプのコードはタイマーではなく、交流 100V コンセントに直接挿す。万が一、交流 100V と直流 12V の両電源が落ちて、全ての装置のポンプが止まっていた場合、電源ケーブルの接続を確認するとともに、タンク内のどちらか一方のポンプを外して、2 分岐コネクタに図 6.1.2(e)の青いホースコネクタを直接接続して、水道水をかけ流しにする。

6.3 スマートホームとの連携

《カメラの接続》

水耕栽培施設に設置している市販のネットワークカメラは、モバイルルータを通じて専用のクラウドサーバに接続され、そこからスマートフォン等で専用アプリを使って映像をモニターする。モバイルルータに挿してある月額 1,000 円以下のデータ専用格安 SIM は、毎月 3GB までは送信速度最大 50Mbps (12.5MB/s) の高速通信ができるが、それを使い切ると最大 200Kbps (25KB/s) に制限される。そこで通信量節約のために必要な時にだけカメラに接続し、その他の時間は接続を切るというオペレーションを行っている。当然、24 時間のモニターや、過去の成長の過程を観察することはできない。現在のカメラ 1 台では栽培施設全域をモニターできないが、複数台設置すると通信量の問題がさらに大きくなる。また、専用アプリでのみ操作可能なため、ユーザは独自の機能をプログラムすることはできない。そこでプロ

グラム可能な Wi-Fi マイコン ESP32 を実装したカメラモジュールを複数台利用し、現地に Raspberry Pi サーバを設置してローカルで映像を送信して処理することを検討した。

ESP32 カメラでは Motion JPEG で映像を送信するが、実験で用いた映像の 1 フレームのデータサイズを解像度毎に表 6.3.1 にまとめる。撮影ではカメラを固定しているので、多少のゆらぎはあるがデータサイズはほぼ一定である。図 6.3.1 のように 5m×10m の水耕栽培施設の中央にルータを、その周り 6 ヶ所

または 10 ヶ所にカメラを設置し、またルータとカメラの高低差を 1m とすると、その距離はそれぞれ 3.7m と 5.7m となる。そこで、5m、7m、9m の距離でカメラ 1 台、3 台、6 台の同時接続を試みたときに、安定して接続できた台数、接続したカメラのフレームレートと転送レート、そして全てのカメラの総転送レートを表 6.3.2 に示す。

カメラ 1 台を 5m の距離で接続した場合、フレームレートは VGA で 8.4fps、解像度が高くなるに従って下がっていき UXGA では 2fps となっている。これは ESP32 のエンコード時間が大きい画像ほど長いのである。XGA で接続した場合、転送レートは 480KB/s なので、3GB/480KB/s/3,600 秒=1.74 時間、つまり約 1 時間 45 分で SIM カードの高速通信容量を使い切ってしまうことになる。もし 6 台でモニターすると、一台当たり 17 分程度しか接続できない。つまり一日当たり 30 秒そこそこ

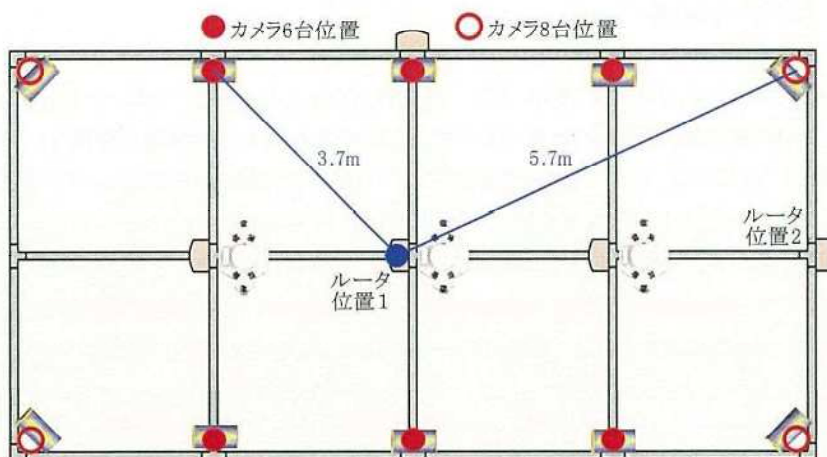


図 6.3.1 カメラとルータの設置位置

表 6.3.1 解像度と画像サイズ

	VGA	SVGA	XGA	UXGA
解像度(ピクセル)	640×480	800×600	1,024×768	1,600×1,200
サイズ(KB)	50	82	120	286

表 6.3.2 カメラの距離と台数に対する画像の転送速度

	解像度	5m			7m			9m		
		1台	3台	6台	1台	3台	6台	1台	3台	6台
接続台数(台)	VGA	1	3	6	1	3	6	1	3	3
	SVGA	1	3	6	1	3	3	1	3	3
	XGA	1	3	6	1	3	3	1	3	2
	UXGA	1	3	5	1	3	2	1	3	1
フレームレート(fps)	VGA	8.4	6.0	3.8	8.3	5.5	2.9	8.1	4.9	2.5
	SVGA	7.1	4.8	2.8	5.5	3.6	2.4	4.4	2.3	2.2
	XGA	4.0	2.9	1.3	3.7	2.7	1.2	3.6	2.5	1.0
	UXGA	2.0	1.2	0.9	1.7	1.1	0.8	1.7	0.6	0.8
転送レート(KB/s)	VGA	420	300	190	415	215	170	405	245	100
	SVGA	582	394	230	4510	221	139	361	189	134
	XGA	480	348	156	444	300	103	432	300	85
	UXGA	572	343	213	486	217	160	486	172	149
総転送レート(KB/s)	VGA	420	900	1,140	415	644	511	405	735	300
	SVGA	528	1,181	1,378	451	664	418	361	576	403
	XGA	480	1,044	936.0	444	900	310	432	900	170
	UXGA	572	1,030	1,067	486	650	320	486	515	149

表 6.3.3 屋内と屋外のフレームレート比較

	3m	5m	7m	9m
屋内	3.6	3.4	2.6	2.4
屋外(雨天)	2.5	2.1	0.1	-

となる。これは ESP32 に限ったことではなく、現在使用している ctronics 社のリモートカメラでも同様である。逆に 6 台のカメラで、3GB の容量で 1 ヶ月間連続的に接続するためには、何分間隔で撮影すればよいかを考える。一日に使用できる容量は $3GB/30=100MB$ 。XGA の画像 1 枚は 120KB だったので、一日に撮影できる枚数は $100MB/120KB=833.3$ 枚。6 台で撮影すると 1 台当たり $833.3/6=138.9$ 枚。つまり 24×60 分/ $138.9=10.4$ 分となり、およそ 10 分間隔で撮影した画像を外部に転送できることになる。短時間で大きく成長はしない植物の観測では十分と考えられる。

カメラがルータから離れるにつれて電波が弱くなるので、転送レートが落ちる傾向にある。6 台のカメラが全て繋がったのは、5m では XGA まで、7m では VGA のみで、9m ではいずれも 3 台以下しか接続できなかった。6 台の設置の最長距離 3.7m だったので、XGA であれば 6 台の接続は問題ない。しかし 10 台設置では最長距離が 5.7m に伸び、6 台でも 7m の距離では VGA 以上は厳しい結果となっていることから、そのままでは実施困難である。また大きな画像で接続に失敗するのは、データ転送中にエラーが発生する確率が高く、そのリカバーが間に合わず、台数が増えるに従ってその影響が顕著になるためと考えられる。なお、距離が短い場合に台数を増やすと総転送レートが上昇するのは、画像のエンコード時間が律速条件となっているためである。そして、台数が増え解像度が上がると総転送レートは 1MB/s を超えたあたりから頭打ちとなる。

実運用では屋上で使用となり、雨による通信状況の悪化が考えられる。そこで、雨天の屋上で測定を行い、室内でのフレームレートと比較した結果を表 6.3.3 に示す。なお、解像度は UXGA に固定し、カメラ台数は 1 台とした。雨が通信を妨げるため、屋内よりもフレームレートが低く、特に距離が伸びるに従って急激に通信状態が悪化している。長くなるほどその差は大きくなり、距離 9m の時点で屋外ではカメラが接続できなくなった。距離 5m において雨天時のフレームレートは屋内の 62%に落ちているため、雨天時の解像度 XGA で 6 台接続した場合のフレームレートは、屋内のフレームレート 1.3fps の 62%とすると 0.8fps 程度になると考えられる。動態検知等の画像処理機能を追加する場合、1fps 前後の速度が出れば大きな問題はない。

複数のカメラを同時接続する場合を想定した実験において、カメラとルータは全て等距離としたが、図 6.3.1 からわかるようにルータからの距離はカメラによって異なる。従って、実際の利用環境下での評価も必要である。ローカルの転送速度や通信可能距離はルータの性能に大きく左右され、また ESP32 の通信距離はもともと 10m 前後とそれほど長くないため、ルータを変えたりリピーターを入れるなどで速度性能は大きく左右されると考えられる。また 3,000 円/月程度で通信速度制限のないサービスも登場しており、それらの利用についても今後検討が必要である。

《スマートスピーカーの課題》

M5Stack での発話は、音声合成ライブラリ AquesTalk の評価版を使用しているため、ナ行とマ行が全てヌ行で発音されるが、それほど違和感はなく、また有償ライセンスの購入でこれは解決できる。その一方、Amazon Echo は、例えば気温が 25.1 度のとき ‘.’ は句点とみなされて発音せず、“気温は 25 1 度です” のように発話されることがわかった。従って、図 5.3.4 の Node-RED のフローで、ノード “Alexa 音声” に渡すテキストを作る function ノード “センサデータ” 内で、‘.’ を “てん” に変換する処理が必要である。なお、図 5.3.8 の M5Stack は水耕栽培装置から送信されてきたデータをそのまま順不同で読み上げているが、これと同じことを Alexa にさせようとしてもうまく動作しない。それは Amazon Echo スピーカーは最初に受けとったテキストを読んでいる間、次のデータを受け取らずに無視するためである。この発話のタイミングを見計らって、delay ノードを入れて調整することも困難であった。そこでグロー

バル変数に保持されているデータを読み出し、全てを繋いだ文章を“センサデータ”内で作成し、Alexaに送信するという手段を取った。前回測定したデータを読み上げているため、最新のデータとすることが今後の課題である。

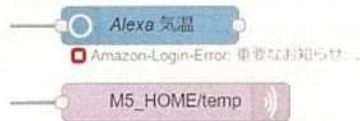


図 6.3.2 Alexa のログインエラー

なお、Node-RED にパレット node-red-contrib-alexa-remote2 をインストールし Alexa の設定を行ったときには発話に問題なかったが、数日で次のようなエラーによりスピーカーが反応しなくなった。これは、Alexa アカウントへの bot による不正アクセスを防ぐため、reCAPTCHA v1 の画像認識による認証をしているためであった。Web ブラウザで“https://alexa.amazon.co.jp/”の自分のアカウントにアクセスしようとする時、図 6.3.3'のように画像を読み取って入力するように求められる。bot 対策なので、これを求められた Node-RED の Alexa ノードが自動的に入力することは不可能である。そこで、cookie を使って認証することとした。これには、ブラウザで上記 URL からアカウントにログインし、ブラウザの開発者画面から cookie 内の Alexa のログインに対応する部分を検索、コピーする。そして、Node-RED の Alexa Routine ノードのプロパティの“Auth Method”を“Email & Password (deprecated)”から“Cookie”に変更し、コピーしたテキストをペーストして、「更新」をクリックし、フロー画面に戻ったら「デプロイ」ボタンをクリックする。これによって図 6.3.4 のようにログインに成功し、Alexa の音声出力が使用可能となる。しかし、いずれまたログインエラーが出るようになるので、その都度、同じ作業を行う必要がある、この改善も今後の課題である。



図 6.3.4 Alexa へのログイン成功

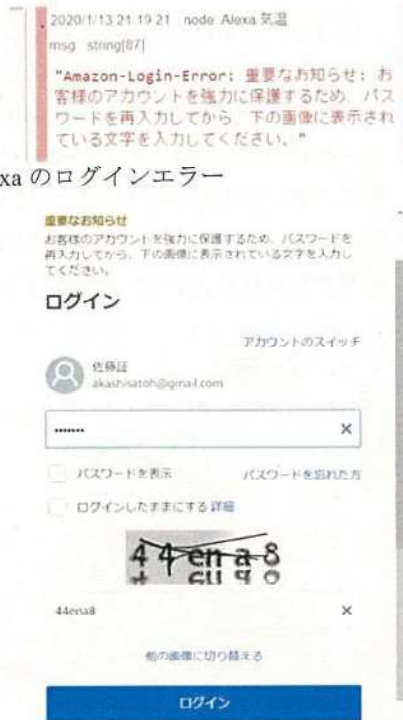
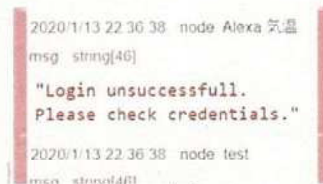


図 6.3.3 Alexa のログイン画面



6.4 液肥管理システムの開発

《液肥濃度算出式の導出》

オペアンプ発信回路による前出の図 5.4.1 の液肥濃度センサで、計測した周波数 f から R を求めることは論理的には可能である。しかし、回路図上の R は単純な抵抗素子を想定したもので、同じ濃度の液肥であっても電極の形状によってまったく異なる抵抗値を示す。実験に使用した図 5.4.2 の電極は平行平板ではなくまた直接向き合っている面以外からも回り込んで電流が流れるため、簡単に抵抗値を計算することはできず、複雑な 3 次元シミュレーション等が必要となる。そのため実験によって、数種類の濃度の液肥と周波数の関係を調べ、周波数から補完式によって EC 値を算出することにした。また電気伝導率は水温が高くなると上がるので、この補完も行うこととした。

図 5.4.1 の回路のセンサモジュールを 3 つ用意し、図 5.4.2 の電極を接続して、9 種類の濃度 (0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 mS/cm) の液肥に対する発振周波数を測定した。また温度補正も行うため、冷蔵庫で冷やしておいた液肥を湯煎しながら温度特性も測定した。図 6.4.1 に計測した 9 種類の液肥のうち 4 種類 (0.25, 1.0, 2.0, 3.5 mS/cm) の測定結果を示す。3 つのセンサモジュールの特性のばらつきは非常に小さいことがわかる。また EC=1.0 程度までは、周波数は水温に対して比較的良好な線形成を有している。様々な作物に適した濃度は 1.0 前後なので、線形近似でも実用的な精度が得られるが、広範囲で高い精度が得られるように、周波数 f と水温 t をパラメータとする EC 値の近似曲面を求める。

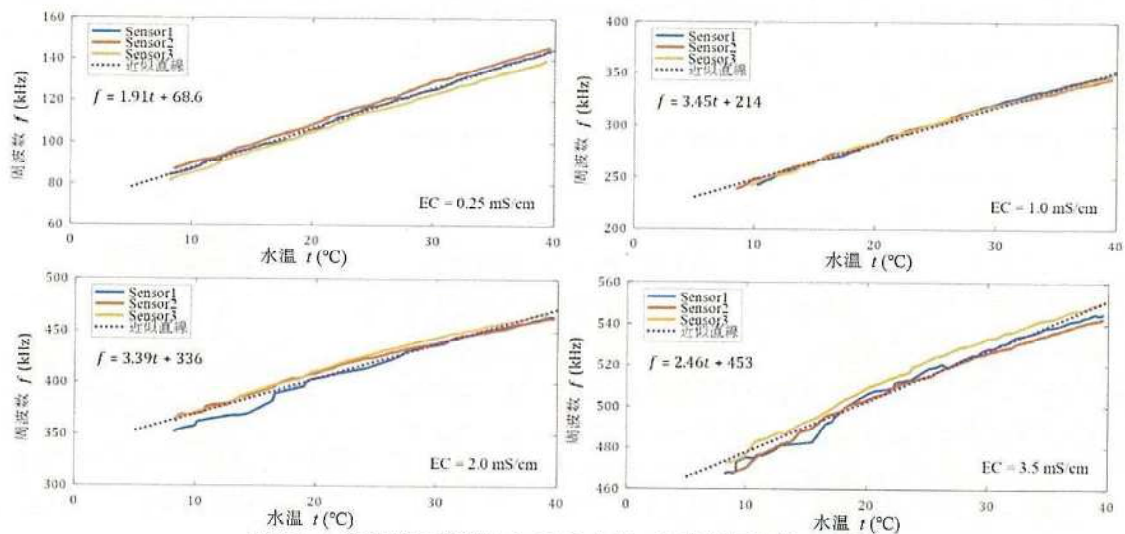


図 6.4.1 各濃度の液肥における水温 t と発信周波数の関係

まず、測定データを近似する式(6.4.1)の二次曲面を最小二乗法により求めた。またその曲面の上に実測値を乗せたものを図 6.4.2 に示す。表 6.4.1 は各液肥に対して、センサ毎に周波数と温度の測定値から式(6.4.1)で EC 値を求め、その最小値と最大値(対応する周波数と温度は省略)、誤差をまとめたものである。

$$EC = p_0 f^2 + p_1 f t + p_2 t^2 + p_3 f + p_4 t + p_5 \quad (\text{mS/cm}) \quad (6.4.1)$$

$$\begin{cases} p_0 = 1.91 \times 10^{-5} \\ p_1 = -1.06 \times 10^{-4} \\ p_2 = 4.06 \times 10^{-4} \\ p_3 = -1.77 \times 10^{-3} \\ p_4 = -9.87 \times 10^{-3} \\ p_5 = 5.45 \times 10^{-1} \end{cases} \quad (6.4.1)$$

上式の曲面による近似誤差は低い EC 値ほど大きく、Sensor 1 において 0.25 mS/cm の液

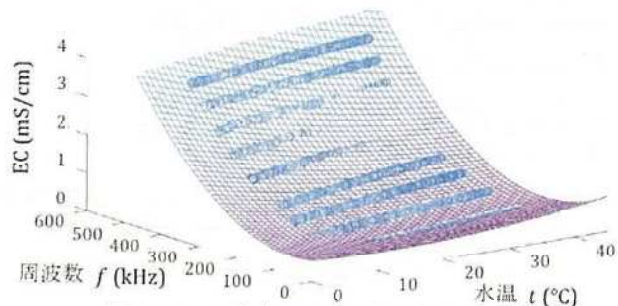


図 6.4.2 2次曲面による EC 値の近似

表 6.4.1 曲面近似による EC 値の範囲と誤差 (式 6.4.1)

EC (mS/cm)	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
Sensor 1	最小	0.293	0.379	0.611	0.918	1.43	1.88	2.40	2.91	3.22
	%	17.1	-24.2	-18.6	-8.2	-4.7	-5.9	-3.9	-3.1	-8.1
	最大	0.405	0.505	0.700	1.03	1.62	2.15	2.61	3.03	3.47
	%	61.8	1.0	-6.7	3.1	8.0	7.4	4.2	1.1	-0.8
Sensor 2	最小	0.293	0.397	0.653	0.940	1.48	2.02	2.55	2.91	3.18
	%	17.0	-20.7	-12.9	-6.0	-1.1	1.2	1.9	-3.0	-9.1
	最大	0.402	0.506	0.717	1.01	1.60	2.14	2.63	3.08	3.44
	%	60.9	1.2	-4.3	1.0	6.4	7.1	5.1	2.5	-1.8
Sensor 3	最小	0.293	0.397	0.630	0.921	1.47	2.04	2.59	2.98	3.30
	%	17.2	-20.5	-16.1	-7.9	-2.1	2.2	3.6	-0.6	-5.7
	最大	0.403	0.516	0.727	1.02	1.62	2.19	2.68	3.12	3.54
	%	61.1	3.2	-3.1	2.4	7.8	9.5	7.1	3.9	1.2

肥で、近似値が 0.405 mS/cm と 61.8 %もの誤差となった。ただし、値としては 0.145 mS/cm であるので、スペック上は市販されている通常の EC 計と同等の 0.2 mS/cm 範囲内である。回路に電流が流れず発振しない場合は電気伝導率である EC は 0 となるべきであるが、図 6.4.2 から明らかなように、発振周波数 150kHz 付近から、下がるべき EC 値が上昇に転じ、青の丸印で示した測定値が大きく外れて曲面の下に隠れてしまっている。

一般的には EC=1.0 前後の液肥が使われ、低い値での精度が重要となる。そこで、これを改善するため、表 6.4.2 のような重み付けをすることとした。低い EC ほど大きな重みとなるように、EC の逆数を用いている。2 次式は(6.4.1)と同じなのでパラメータだけを式(6.4.2)に、曲面の形を図 6.4.3 に、EC 値の誤差を表 6.4.3 に示す。

$$\begin{cases} p_0 = 1.39 \times 10^{-5} \\ p_1 = -9.85 \times 10^{-5} \\ p_2 = 1.71 \times 10^{-4} \\ p_3 = 1.04 \times 10^{-3} \\ p_4 = -5.60 \times 10^{-4} \\ p_5 = 1.36 \times 10^{-1} \end{cases} \quad (6.4.2)$$

重み付けにより 0.25 mS/cm の液肥における最大の誤差は、Sensor 2 で 0.266 mS/cm の 6.4% と大幅に精度が向上した。しかしながら、重みを小さくした 3.5 mS/cm の液肥に対しては、Sensor 2 で 2.93 mS/cm の -16.4% と精度が下がっている。全体では誤差が 61.8% から -16.4% に、特に低い EC 値の誤差が大幅に改善しているので実用上十分なレベルではあるが、追肥装置の制御の誤差も考慮し、さらに精度を向上させることとした。

図 6.4.2 と 6.4.3 からわかるように、2 次曲面では $f=0$ Hz で EC=0 mS/cm に近づけようとすると、どうしても周波数が高い部分で誤差が大きくなってしまふ。そこで 3 次曲面を用いたのが式(6.4.3)および図 6.4.4 である。なお

表 6.4.2 曲面近似の重み付け

EC	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
重み	14.0	7.00	4.67	3.50	2.33	1.75	1.40	1.17	1.00

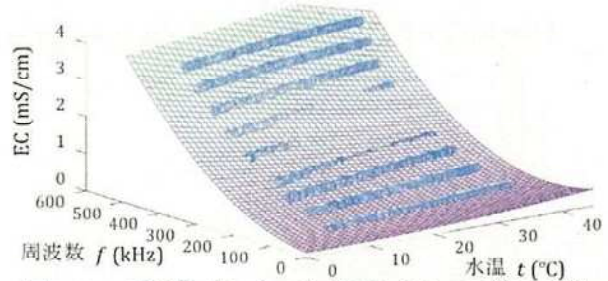


図 6.4.3 重み付けした 2 次曲面による EC 値の近似

表 6.4.3 曲面近似による EC 値の範囲と誤差 (式 6.4.2)

EC (mS/cm)	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
Sensor 1	最小	0.248	0.434	0.690	0.973	1.48	1.92	2.37	2.70	2.96
	%	-0.6	-13.2	-8.0	-2.7	-1.0	-3.8	-5.2	-10.0	-15.5
	最大	0.262	0.475	0.771	1.09	1.65	2.12	2.53	2.95	3.32
	%	4.8	-4.9	2.7	9.3	9.8	5.8	1.2	-1.8	-5.1
Sensor 2	最小	0.254	0.448	0.724	0.985	1.52	2.03	2.40	2.70	2.93
	%	1.8	-10.3	-3.5	-1.5	1.6	1.7	-3.9	-10.1	-16.4
	最大	0.266	0.469	0.762	1.08	1.64	2.15	2.58	2.98	3.29
	%	6.4	-6.2	1.5	8.1	9.2	7.7	3.2	-0.8	-5.9
Sensor 3	最小	0.247	0.447	0.710	0.983	1.53	2.07	2.47	2.76	3.03
	%	-1.1	-10.6	-5.4	-1.7	2.0	3.4	-1.4	-8.1	-13.5
	最大	0.256	0.480	0.754	1.08	1.65	2.18	2.62	3.01	3.38
	%	2.5	-3.9	0.5	7.8	9.9	8.9	4.8	0.4	-3.3

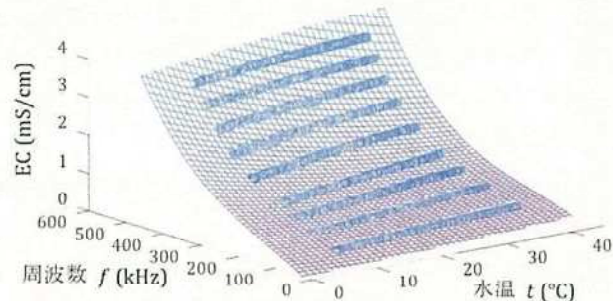


図 6.4.4 重み付けした 3 次曲面による EC 値の近似

表 6.4.4 曲面近似による EC 値の範囲と誤差 (式 6.4.3)

EC (mS/cm)	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
Sensor 1	最小	0.240	0.477	0.705	0.973	1.41	1.83	2.32	2.89	3.28
	%	-4.0	-4.6	-5.9	-2.7	-6.2	-8.4	-7.2	-3.8	-6.4
	最大	0.254	0.523	0.763	1.02	1.54	2.06	2.55	3.04	3.57
	%	1.4	4.6	1.8	2.3	2.6	2.9	1.8	1.4	2.1
Sensor 2	最小	0.252	0.495	0.739	0.986	1.47	1.99	2.50	2.91	3.24
	%	1.0	-1.1	-1.5	-1.4	-1.8	-0.4	-0.1	-3.1	-7.5
	最大	0.262	0.525	0.781	1.01	1.52	2.06	2.56	3.08	3.51
	%	5.0	4.9	4.1	1.5	1.2	3.0	2.6	2.6	0.3
Sensor 3	最小	0.234	0.496	0.722	0.976	1.46	1.99	2.55	2.99	3.38
	%	-6.5	-0.8	-3.7	-2.4	-2.9	-0.3	2.2	-0.4	-3.4
	最大	0.245	0.539	0.787	1.01	1.54	2.10	2.62	3.12	3.65
	%	-1.9	7.7	5.0	1.5	2.4	5.0	4.7	4.1	4.3

重み付けは表 6.4.2 と同じものを用いた。これらにより、誤差の最大値は液肥濃度 2.0 mS/cm に対する Sensor 1 の 1.83 mS/cm で-8.4%に改善された。図 6.4.4 からも、測定値が曲面全体にきれいに乗っていることがわかる。

$$EC = p_0f^3 + p_1f^2t + p_2ft^2 + p_3t^3 + p_4f^2 + p_5ft + p_6t^2 + p_7f + p_8t + p_9 \quad (\text{mS/cm})$$

$$\begin{cases} p_0 = 4.02 \times 10^{-8} \\ p_1 = -2.19 \times 10^{-7} \\ p_2 = 1.59 \times 10^{-6} \\ p_3 = -2.95 \times 10^{-6} \\ p_4 = -1.38 \times 10^{-5} \\ p_5 = -5.75 \times 10^{-5} \\ p_6 = 1.14 \times 10^{-4} \\ p_7 = 6.87 \times 10^{-3} \\ p_8 = -6.47 \times 10^{-3} \\ p_9 = -1.65 \times 10^{-1} \end{cases} \quad (6.4.3)$$

《追肥実験》

追肥システムの動作検証に際して、市販の ABS 製タンクを用いて実験用の水耕栽培装置を制作した。図 6.4.5 はその制作の過程で、これについて以下で簡単に説明する。

- (a)(b) 長さ約 1m, 直径 114mm の白のカラーパイプ(VU100)の上部に、苗を植えるための片受エルボを挿し込む 6 個の穴を、下部にホースとポンプをつなぐための穴を 60mm のホールソーで開ける。6 個の穴の中心は 65mm ずつずらし、かつ 120 度ずつ回しながららせん状に開ける。
- (c)(d) 6 個の片受エルボを接着する。水漏れしないようにエルボの周囲に接着剤を上塗りする。
- (e) タンク [20]は容量 100 リットルで、中の液肥に光が当たって青粉が生えないように黒を使用する。
- (f) タンクのフタにパイプを立てるための 114mm の穴を開け、穴の周囲に紙やすりを軽くかけておく。
- (g)(h) タンク側面に注水用の穴を開けて内側からボールタップを通し、G1/2 規格のネジ式の蛇口用ニップル金具で固定する。
- (i)(j) 写真の位置にポンプ用電源コードやセンサの電極等を通す 39mm の穴を、その左横には点検用の 60mm の穴を開ける。
- (k)(l) T 型ホース繋ぎ手に写真のように穴を開けて、長さ 1m のホースにホースバンド固定する。さら塩ビ管キャップ VU-CAP100 に 4 つの小さな穴を開けて、繋ぎ手を耐候性結束バンドで固定する。
- (m) 点検穴用に塩ビ管(VU50)を 3cm 幅に切ったものを塩ビ管キャップ(CU-HC50)に接着する。
- (n) カラーパイプをタンクのフタの穴に通し、パイプの下の穴からホースを出して、排水量 350GPH (Gallon per Hour) で定格 12V 1A のビルジポンプをホースバンドで固定する。500GPH のほうが入手しやすいが、定格電流が 3A で、後述の制御回路のスペックをオーバーしてしまうので注意。
- (o) パイプをタンクに立て、点検用穴を(m)のキャップで塞ぎ、ゴムプッシングに十字の切込みを入れたものを穴にはめて電源コードを引き出し、最後にタンクのフタを回して閉める。

6.4.6 に完成した実験用装置でトマトとメロンを栽培し、追肥実験を行っている様子を示す。右側の防水ボックスには、ソーラーコントローラと追肥用のエアポンプ、そして装置を制御するための実験用回路ボード等が入っている。



図 6.4.5 実験用水耕栽培装置の制作



図 6.4.6 完成した実験用装置

この装置を制御するために、ブレッドボード上に ESP32 マイコンボードを載せ、図 6.4.7 のセンサ回路を組んだ。また、図 6.4.8 はフリーの CAD ツール Fritzing [21] を用いて、ブレッドボード上の部品の位置と配線を具体的なイメージにした実体配線図である。各色の配線は部品の下を通っているものも上に表示されていることに注意する。電源は赤、GND(0V)は黒の配線、その他の配線は見やすいように基本的に同じノードは同じ色にしているが、配色に限りがあるので離れている配線では違うノードでも同じ色にしているものがある。表 6.4.5 に電子部品一覧と購入先および価格を示す。ネット購入可能であり、部品表に送料は含めていない。

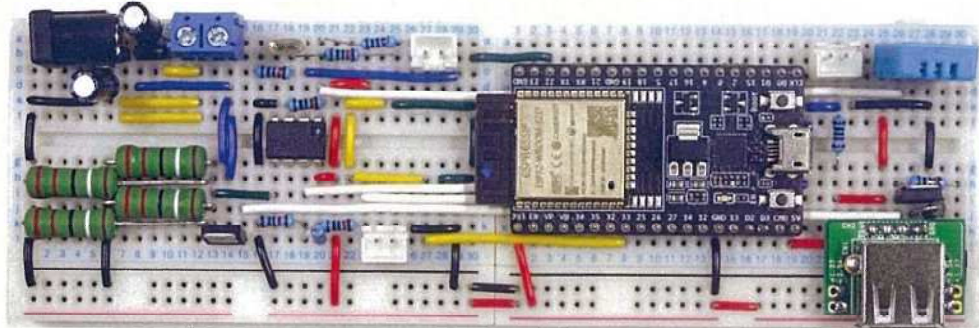


図 6.4.7 ESP32 マイコンボードによる実験用センサ回路

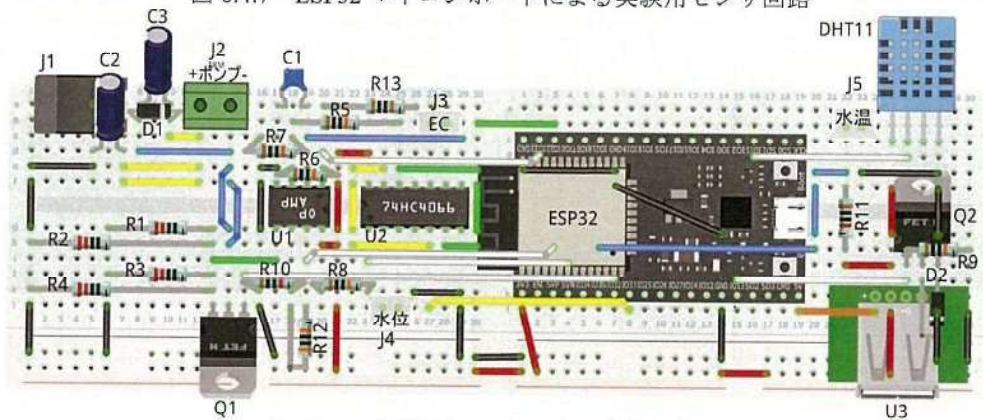


図 6.4.8 実験用センサ回路の実体配線図

表 6.4.5 電子部品一覧

記号	品名	個数	単価	小計	購入先
ボード	ブレッドボード 6穴版 EIC-3901	2	280	560	秋月電子 通商
基板	耐熱通信機器用ビニル電線 導体径0.65mm 単芯	1	520	520	
XH	XHコネクタ ベース付ポスト サイド型 2PS2B-XH-A(FL)(SN)	3	10	30	
ESP32	ESP-32-DevKitC ESP-WROOM-32開発ボード	1	1,480	1,480	
DHT11	温湿度センサ モジュール DHT11	1	300	300	
U1	2回路入出力フルスイングオペアンプ NJU7043	1	70	70	
U2	アナログスイッチ HD74HC4066P	1	25	25	
U3	USBコネクタDIP化キット (Aメス)	1	120	120	
Q1	NchパワーMOSFET 2SK4018(Q) (60V5A)	1	30	30	
Q2	NchパワーMOSFET 2SK4017(Q) (60V5A)	1	30	30	
J1	2.1mm標準DCジャック (4A) 基板取付	1	30	30	
J2	ターミナルブロック 2ピン(青)(縦)小	1	20	20	
C1	フィルムコンデンサー 0.01μF50(ルビコンF2D)	1	10	10	
C2, C3	電解コンデンサー100μF25V85°C(ルビコンPK)	2	10	20	
D1, D2	汎用整流用ダイオード 1000V1A 1N4007-B	2	10	20	
R1~R4	不燃性酸化金属皮膜抵抗 3W0.22Ω	4	20	80	
R6~R9	金属皮膜抵抗 100KΩ	4	セット	298	amazon
R10, R11	金属皮膜抵抗 10KΩ	2			
R12	金属皮膜抵抗 1KΩ	1			
R13	金属皮膜抵抗 300KΩ	1			
水温	SODIAL 2メートル NTCサーミスタ 10K 1% 3950	1	158	158	
合計				3,801	

(価格は2020年1月31日現在)

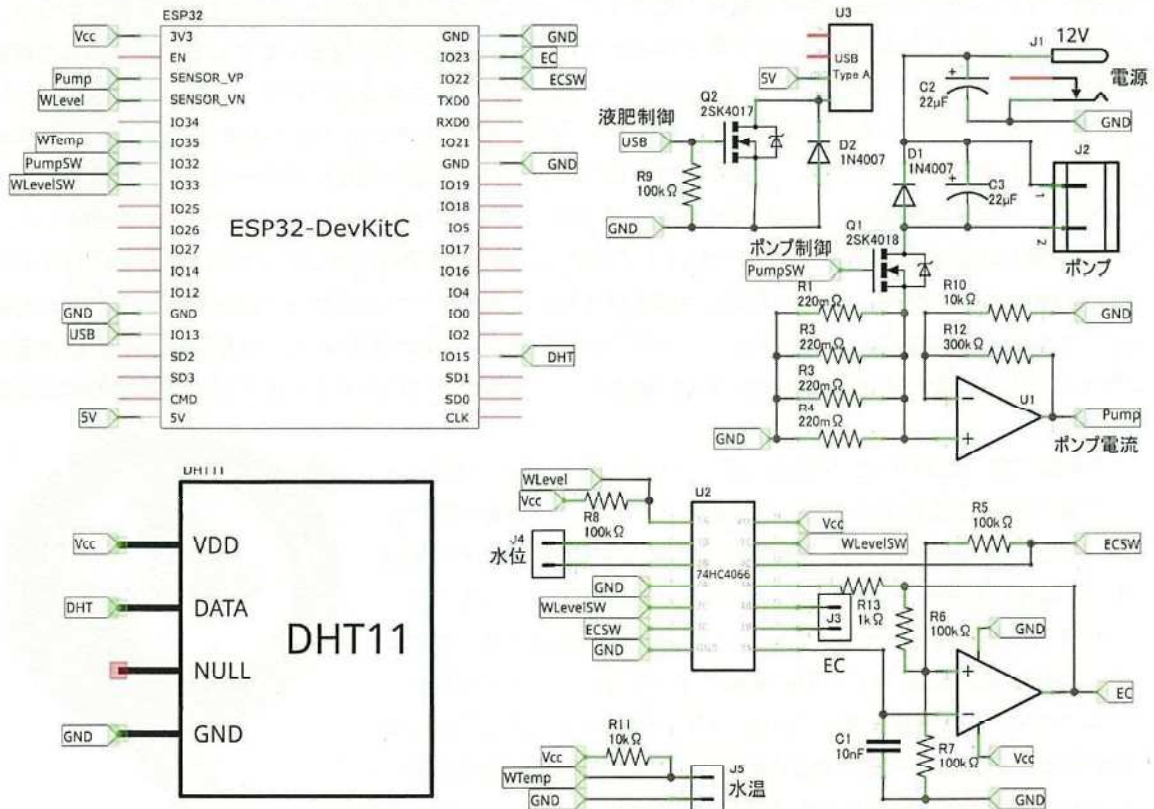


図 6.4.9 実験用センサの回路図

表 6.4.6 ESP32-DevKitC の入出力信号

信号名	ピン	入出力	概要
ECSW	IO22	出力	EC 測定制御制御. 0:停止 1:開始
EC	IO23	入力	EC 値を周波数として取得
WLevelSW	IO33	出力	水位測定制御信号. 0:停止 1:開始
Wlevel	SENSOR_VN(IO39)	入力	水位を 0~1023 の値で取得
Wtemp	IO35	入力	水温を 0~1023 の値で取得
DHT	IO15	入力	気温を 0~50, 湿度を 0~90 度で取得
PumpSW	IO32	出力	水循環ポンプ制御. 0:停止 1:駆動
Pump	SENSOR_VP(IO36)	入力	ポンプ駆動電力を 0~1023 の値で取得
USB	IO13	出力	追肥制御信号: 0:停止 1:追肥
Vcc	3V3	出力	電源 3.3V
5V	5V	出力	電源 5V
GND	GND	出力	グラウンド 0V

図 6.4.99 に Fritzing で作成した実験用センサの回路図を、表 6.4.6 に各信号の入出力と概要を示す。ESP32 ボードの信号の向きが全て入力のように見えるが、これは信号名を示すラベルの形がそのようになっているだけである。ESP32 ボードの 3ヶ所に出ている GND はマイコンモジュールの内部でつながっているが、センサ回路全体の基準電位なので、安定化させる意味で外部でも配線で接続している。

マイコンは回路図の左上の ESP32-DevKitC で、センサを制御して取得したセンサデータを Wi-Fi 経由でサーバに送り、ポンプや追肥の制御を行う。取得するデータは、気温、湿度、EC(液肥濃度)、水位、水温、ポンプ電力である。気温と湿度は DHT11 [22] を専用ライブラリを用い、一本の入力信号 DHT から計測している。EC は液肥に浸けた電極に電流を流し、発振回路の周波数を入力信号 EC から測定するが、電流を流し続けると無駄な電力を消費するだけでなく、電極の腐食を加速させてしまう。そこで制御信号 ECSW をオン/オフすることで、測定する 1~2 秒間だけ動作させるようにしている。水位も電極間に電流が流れるかどうかを入力信号 WLevel で調べ、液肥の有無をチェックするので、EC と同様に測定時だけ WLevelSW をオンする。水温測定では温度によって抵抗値が変化するサーミスタを液肥に付けているが、液肥に電流は流れないのでオン/オフ信号は不要で、必要なときに信号 WTemp を読めばよい。

信号線 PumpSW は水循環ポンプのオン/オフ制御を行う。制御信号をオンにしても、壊れていたりケーブルが外れポンプが回らなければ電力は消費されない。またポンプからホースが外れていると水の負荷がかからずに消費電力が少なくなる。このようなトラブルを検知するために、信号線 Pump で消費電力をモニタする。信号線 USB は追肥のため、原液をタンクの液肥に注入するのエアポンプを制御する信号である。

6.4 節で用いた図 5.4.2 の電極はばらつきが大きく、水の浸透によって使用中に特性が変わることが判明した。そこで追肥実験では図 6.4.10 の中国製の土中湿度センサ（メーカー不詳）の電極を使用した。電極は伝導性のゴムで覆われているので、これをはがして中のアルミ製の棒を露出させた。このセンサは以前 amazon で購入できたが、現在は aliexpress 等の中国の通販サイトでないと入手できない。

エアポンプ駆動可能なセンサ回路をブレッドボード上に新しく作り、電極も変更されたので、正確な EC 値を算出するには 6.4 節の実験を行ってパラメータを取り直す必要があるが、EC センサの値が正確でなくとも、その値に合わせるように追肥用エアポンプの制御ができるかどうかの確認が



図 6.4.10 土中湿度センサと電

重要である。そのためパラメータの再取得は行わず、設定する EC 値の 1.0mS/cm 付近では高い精度が出るように EC 値算出後に補正を行った。

水耕栽培の定番の肥料は OAT アグリオ株式会社の OAT ハウスの 1 号と 2 号 [23]で、その粉末を水に溶かして濃い原液を作り、使用時にそれを混合して水で薄める。図 6.4.6 のペットボトルの黄色い液体が 1 号原液、透明が 2 号原液である。両者を濃いまま混合すると肥料が沈殿してしまうので、このように分けて使用する。図 6.4.7 の実験用センサ回路の USB 電源出力を 2 分岐して、2 つの USB エアポンプを同じタイミングで駆動するようにした。なお、エアポンプの性能は事前に調べ有意な差が見られないことを確認した。しかしながら、原液の抽出量に数十%もの差が出てしまった。その要因はペットボトルの種類であった。ペットボトルに空気を送り込むと一旦ボトルが膨らみ、それから原液が送り出された。図 6.4.6 は 2 つの原液に異なるメーカーのペットボトルを用いているため、両者の変形の加減が異なっていた。そこで、変形しにくい厚みのあるペットボトルを選び、同じボトルで実験を行ったが、やはり大きなばらつきが出てしまった。これは、ペットボトルにエアを注入し、液肥を抽出するチューブの取り回しの違いが影響しているようであった。正確に合わせればそれなりに動作するが、日々の栽培作業でそこまで気を遣うのも面倒である。

そこで、液肥栽培用ではないが、OAT ハウス 1 号・2 号と異なるものの同じ成分を含む(配合比は異なる)OAT アグリオの肥料 OK-F-1 [24] だけの 1 液で実験を行った。なお、OK-F-1 だけで育てた場合と 1 号・2 号の混合で育てた場合とで、収量や味など詳細な比較は行っていないものの、見た目の生育はほとんど変わらなかった。その結果、目標とする EC 値に 10%以下の誤差で追肥することができたため、小学校の水耕栽培装置への追肥システムの実装を行った。しかし、液肥が図 6.4.11 のように 1~2 週間で劣化し、変色と沈殿が生じるという問題が新たに発生した。室内に置いた液では劣化が見られず、また 1 号・2 号ではこのような劣化はこれまで生じていない。劣化の原因が直射日光にあるのか熱にあるのか、また他の原因かはわかっていない。成分の変化が栽培にもたらす影響は不明で、そのまま使用しても問題ないのかもしれないが、沈殿した肥料がチューブを詰まらせてしまったため、いずれにしても対策を講じる必要がある。

また、新たに用いたアルミ電極であるが、一ヶ月半ほどで黒く変色して抵抗値が大きく上昇してしまった。紙やすりで磨くと元の状態に戻るが、これもやはり面倒である。同じ土中湿度センサで、アルミ電極からステンレス電極に変更された図 6.4.12 の製品が aliexpress で販売されている。こちらの利用も検討しているが、電極が長いので液肥の抵抗成分が低くなり過ぎ、そのままでは発振回路には向かない。また電極をカットして使用する場合は、その加工精度が問題になる。そのため、発振回路ではなく、直接的に電極間の電気抵抗を電圧として測定することを検討中である。



図 6.4.11 水耕栽培用肥料の劣化



図 6.4.12 土中湿度センサの新電極

6.5 太陽光発電システムの開発

図 6.5.1 は、開発中のソーラーコントローラの昇圧・降圧動作に関する部分である。まず、昇圧動作について説明する。Q1 と Q2 がオンしていると、図 6.5.1(a)左のようにソーラーパネルとインダクタ L1 の間にループができて、インダクタにエネルギーが蓄積される。続いて、Q1 と Q2 をオフすると、インダクタに蓄積されたエネルギーがキャパシタ C2 側に放出される。

ソーラーパネルの出力電圧を V_{sol} (定電圧源ではないが)、バッテリー側の電圧を V_{bat} とするとき、インダクタ L の両端に電圧 V を時間 T 印加するときの、インダクタの電流変化量 ΔI は次式で表される。

$$\Delta I = 1/L \times V \times T$$

従って、Q1 と Q2 がオンしている時間 T_{on} のインダクタ $L1$ の電流増加量 ΔI_{on} は

$$\Delta I_{on} = 1/L1 \times V_{sol} \times T_{on}$$

となる。Q1 と Q2 がオフしている時間 T_{off} にインダクタの両端にかかる電圧は $V_{bat} - V_{sol}$ なので、電流の減少量 ΔI_{off} は次式となる。

$$\Delta I_{off} = 1/L1 \times (V_{out} - V_{in}) \times T_{off}$$

$\Delta I_{on} = \Delta I_{off}$ と均衡したところが出力電圧となるので、これから V_{bat} は次のように求められる。

$$V_{bat} = (T_{on} + T_{off}) / T_{off} \times V_{sol}$$

このように T_{on} と T_{off} の時間、つまり PWM 信号のパルス幅を変えることで V_{bat} が制御できる。

次に降圧動作を示す Q1 がオンで Q2 がオフのとき、図 6.5.1 (b)左のようにソーラーパネルとインダクタが導通し、キャパシタ C2 を充電する。次に Q1 をオフにすると、(b)右のようにインダクタから電流が流れる。バッテリー側の電圧 V_{bat} は次式となる。

$$V_{bat} = T_{on} / (T_{on} + T_{off}) \times V_{sol}$$

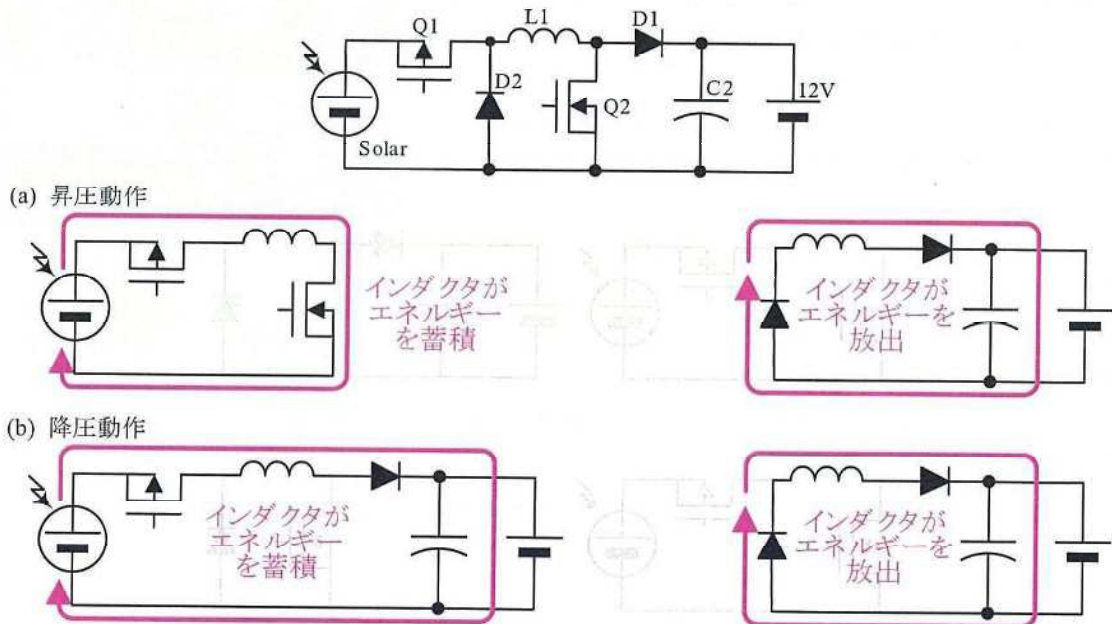


図 6.5.1 ソーラーチャージコントローラの降圧・昇圧の動作

図 6.5.2 に本ソーラーチャージコントローラのイメージを示しておく。

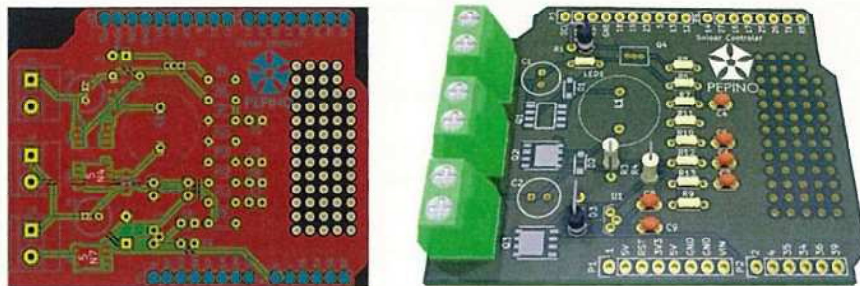


図 6.5.2 開発中のソーラーチャージコントローラの基板レイアウトとイメージ

7 むすび

本事業では、生産ではない農のエンターテインメント性にフォーカスした水耕栽培システムを、調布市立第一小学校の校舎屋上に設置し、管理インターフェース、液肥管理システム、太陽光発電システムを開発し、また AI スピーカー等のスマートホームシステムとの連携を進め、栽培実験を通じてその有効性を示すとともに課題を明らかにした。また、食育や情操教育を目的に児童を集めてトマトとイチゴの定植イベントを開催した。残念ながら、急な気温の低下や二回の巨大台風の襲来等の気候や天候の影響により、栽培と収穫は当初の想定通りとはいかなかったが、暖冬のため既に1月から次シーズンに向けた育苗を進めている。なお、本事業にその成果を活用した電気通信大学の水耕栽培施設は、IoT等の技術面に加えて農のメリットを活用した様々な取り組み等も評価され、都市緑化機構の第18回屋上・壁面緑化技術コンクールで日本経済新聞社賞を受賞した。今後は、本事業の水耕栽培施設の運営において、近隣の親子を集めて子ども食堂を開催している電気通信大学アメリカンフットボール部や、地元のフレンチレストランの協力を得ながら、地域との結びつきも深めていきたい。

文献

- [1] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi”,
<https://www.raspberrypi.org/>
- [2] “Home Assistant”
<https://www.home-assistant.io/>
- [3] OpenJS Foundation, “Node-RED”
<https://nodered.org/>
- [4] Eclipse Foundation, “Eclipse Mosquitto An open source MQTT broker”
<https://mosquitto.org/>
- [5] InfluxData Inc., “InfluxDB: Purpose-Built Open Source Time Series Database”,
<https://www.influxdata.com/>
- [6] Grafana Labs, “Grafana: The open observability platform”
grafana.com

- [7] ESPRESSIF, “ESP32 WROOM Series”
<https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp-wroom-32/overview>
- [8] etronics, “CTIPC-245C720P-JP”
<https://jp.ctrionics-tech.com/ctrionics-100-wifiip-ip66-36-led-30m-3-6mm-sd-sd-720phd.html>
- [9] amazon, “Alexa とできること”
<https://www.amazon.co.jp/meet-alexa/b?ie=UTF8&node=5485773051>
- [10] M5Stack, “M5Stack”
<https://m5stack.com/>
- [11] Raspberry Pi Foundation, “Raspbian”
<https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>
- [12] “Node-RED Alexa Home Skill Bridge”
<https://alexa-node-red.bm.hardill.me.uk/#>
- [13] OpenJS Foundation, “node-red-contrib-alexa-remote2”
<https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-alexa-remote2>
- [14] OpenJS Foundation, “node-red-contrib-alexa-home-skill”
<https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-alexa-home-skill>
- [15] 株式会社アクエスト, “規則音声合成エンジン AquesTalk シリーズ”
<https://www.aquest.com/products/aquestalk.html>
- [16] OpenWeather, “OpenWeatherMap: Current weather and forecast”
<https://openweathermap.org/ニキシー管時計>
- [17] 気象庁, “各種データ資料”
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_amd_d.php?prec_no=44&block_no=1133&year=2019&month=9&day=&view=p1
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_amd_d.php?prec_no=44&block_no=1133&year=2019&month=10&day=&view=p1
- [18] 株式会社カスタム, “ウィークリータイマー WT-03N”
<https://www.kk-custom.co.jp/eco/WT-03N.html>
- [19] スイコー株式会社, “HLT（ホームローリー）”
<http://www.e-suiko.co.jp/product/98/>
- [20] Fritzing, “Fritzing”
<https://fritzing.org/home/>
- [21] “DHT11 Humidity & Temperature Sensor”
<https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>
- [22] OAT アグリオ株式会社, “養液栽培用肥料 OAT ハウス肥料シリーズ”
<https://www.oat-agrio.co.jp/cgi/psearch/item/2013101716413104/index.html>
- [23] OAT アグリオ株式会社, “園芸用追肥肥料 OK-F シリーズ”
<https://www.oat-agrio.co.jp/cgi/psearch/item/2013101717255204/index.html>

付録 – 栽培マニュアル

液肥は自動的に追加されるようになっているが、EC センサがまだ安定していないため、現在のところ市販のポータブル EC 計でもときどき測定する必要がある。EC 値は $1,000\mu\text{S}/\text{cm}$ を基準としているので、通常の栽培で $800\sim 1,200\mu\text{S}/\text{cm}$ であれば問題ないが、これを外れている場合は EC センサの校正がきちんとできていない可能性があるため、図 5.2.12 の手順で校正を行う。また濃度が低い方にずれている場合は、ペットボトルの原液が切れていたり、追肥機構のパイプが沈殿物で詰まるなどしてうまく働いていない可能性があるため適宜対応する。原液が切れていてタンクの液肥がかなり薄くなっている場合は、肥料の粉末を直接タンクに入れてかき回して溶かしてもよい。 $2,000\mu\text{S}/\text{cm}$ まではほとんどの作物は枯れることはないため、タンクの液肥はそのままにして校正だけ合わせてもよいが、これを越えて $3,000\mu\text{S}/\text{cm}$ では根が腐り始める作物もあるので直ちに液肥を薄める。また苗を定植した直後は $600\sim 800\mu\text{S}/\text{cm}$ とするため、この範囲を超えていた場合もすぐに濃度を調整する。

市販の EC 計は TDS(濁度)計と一緒に買ったものも多く、TDS 値は EC 値の $1/2$ となる。そのため、EC モード($\mu\text{S}/\text{cm}$)と間違えて TDS モード(ppm)で液肥を調整すると、濃度が 2 倍になってしまうので絶対にモードを間違えないこと。例えば TDS 計モードで $1,000\text{ppm}$ は、EC 値は適正值の 2 倍の $2,000\mu\text{S}/\text{cm}$ である。図 A.1 はこの状態を示している。



図 A.1 ポータブル EC 計による測定の様子

苗の定植には、図 A.2 左のようにろ過マットを縦 $1/4$ に裁断したものを用意する。これを図 A.2 中央のように苗の根元に巻きつけ、パイプの中にきちんと根が垂れるように注意しながら、図 A.2 右のようにポットにしっかりと差し込む。ポットからは単管パイプに張ったエスター線に紐を結んで、その紐に苗を固定する。



図 A.2 ろ過マットを用いた水耕栽培装置への定植

苗の固定には図 A.3 左の緑のガーデンテープを 4cm ほどに切ってものを使用する。ガーデンテープは裏面の白い部分を合わせると簡単に接着でき、その後で剥がすと再び接着できなくなるので、丁寧に留める。また、水にぬれると接着できなくなる（乾かせば使用できる）。ガーデンテープは手でも切れるが、比較的高価なのでハサミで適切な長さにきれいに切ってきちんと止める。また、基本的に紐に沿って縦方向に誘引するときだけに使用する。定植時には、ろ過マットやガーデンテープをきつく巻き付けすぎると苗が枯れることがあるので注意が必要である。



図 A.3 トマトクリップとガーデンテープによる枝の誘引

苗を頭上のエスター線に這わせるときには、図 A.3 左の白いリングのトマトクリップを使用する。これは再利用可能であるが紫外線で劣化し、耐久年数は 2 年程度である。図 A.4 左にトマトの枝の這わせ方の例を示す。通常トマト栽培では作業効率の観点から次々と出てくる図 A.4 右の脇芽を取って 1 本の枝を長く伸ばしていくが、本栽培では頭上に緑を四方に広げていくため基本的に脇芽は取らない。



図 A.4 トマトの這わせ方の例と脇芽



図 A.5 トマトクリップによるエスター線への誘引

成長する苗を紐にガーデンテープで固定しながら上のエスター線まで伸びたなら、実を下に垂らすために、図 A.5 左のようにエスター線の下にぶら下げないようにトマトクリップで固定していく。この際、図 A.5 右のように枝をエスター線の上から苗止めてしまうと、後で枝の這わせ方を調整することが困難となり、またエスター線の上にトマトが生って下に葉が茂ると収穫できなくなるので注意する。

本栽培では化学農薬は使用せず、油、でんぷん、酢等を主原料と環境にやさしい農薬のみを使用している。油やでんぷんは水で希釈してクリーム状にして葉や枝に吹きかけることで、ダニやアブラムシを窒息死させることができる。しかし完全に駆除することは困難で、化学農薬のように後から来た害虫には効かないため、夏場は2~3回の散布が必要となる。うどん粉病が出てきた時には、重曹も使用する。病気や害虫が広がってから対処するのではなく、葉や枝を注意深く見て、初期の段階に気づいて早急に対処することが重要で、早期に気づけば対処の労力も軽微で済む。またダニは小さいため、目に見えなくても繁殖していることが多いので、定植~2週間を除いて必ず散布を行うこと。

次に、代表的な害虫と病気の対処法について説明する。図 A.6 は葉の表面が白くなるうどん粉病の初期の状態、トマトとウリ類には必ずと言っていいほど、特に初夏と秋に多く発生する。カビの一種で乾燥していても広がり、風に乗って飛散する。うどん粉病は作物によって菌が異なるため、トマトのうどん粉がウリに伝染することはない。葉の表面に着いたカビなので急に枯れたりすることはない、初期のうちに水をかけて指でこすって洗い流したり、油やでんぷん系の農薬、重曹等を散布することで対処する。放っておくと次第に葉が黄色くなり枯れてしまう。図 A.6 右の状態は既に手遅れなので葉をむしり取り、新芽を延ばす。葉だけでなく、茎にも付くが切ってしまうことができないので、丁寧に洗い流す。害虫と異なり枯れた葉にも多くついており、そこからさらに胞子が飛散するため、枯れた葉や黄色くなった葉、そして青い葉でも白い粉が広がっているものは早めにむしり取る。



図 A.6 うどん粉病



図 A.7 トマトハダニ

図 A.7 左の葉の白い斑点はハダニが養分を吸い取った跡で、一ヶ所に大量に発生すると図 A.7 右のように糸を張ることもある。ダニは気温が上がる 6 月末頃から発生し夏に広がり、葉の裏側に着く。

図 A.8 はトマトの茎に付いたトマトサビダニで、体長は 0.1mm 程度なので肉眼では茶色のサビのよう見え、触ると指に茶色の粉が着く。茎が老朽化したようにも見えるが、現れ始めた時は同じ苗の他の部分は青々としているのですぐわかる。早急に対処しないと壊滅的な被害となる。ダニなので油やでんぷんも効果があるが、特にコロマイトが効果的である。コロマイトは自然由来の農薬で有機栽培にも使用が認められている、有機栽培では 3 回までと制限がある。ダニ類は特に暑くなると発生するので、発生していないように見えても 6 月、7 月に一回ずつ撒いておくことよい。なおコロマイトはハダニ以外のダニにも効果がある。

図 A.9 はトマトの葉の中を、トマトハモグリバエの幼虫が移動してできた跡である。屋内栽培等でないと大量に発生することはないので、見つけたら幼虫が潜んでいる経路の先端を指でつぶすか、葉をちぎって捨てる。



図 A.8 トマトサビダニ



図 A.9 トマトハモグリバエ

図 A.10 はトマトの葉に黒い斑点が複数現れ、その周りが黄色くなるトマト斑点病である。ゆっくりと周囲の葉に広がっていくので、見つけたら早めに葉をちぎるか、住友化学園芸の有機栽培にも使用できる「サンボルドー」等、天然成分である塩化銅系の薬剤を散布する。

図 A.11 はタバココナジラミが媒介するウイルスが原因で起こる黄化葉巻病である。成長点の新葉が王単色に変化して巻いた状態となり、株全体が萎縮する。発病後はほとんど開花・結実しなくなる。ウイルス性なので効く農薬はい、見つけたら株ごと抜いて、コナジラミが伝搬しないようにビニール袋に入れて密閉して処分する。



図 A.10 トマト斑点病



図 A.11 黄化葉巻病

図 A.12 はカルシウム不足が原因で、実の底部が黒く腐ったようになる尻腐れ病である。肥料過多、特に窒素が多いとトマトの根がカルシウムを吸収するのを妨げてカルシウム不足がひどくなる。

図 A.13 はウリ類に必ずといっていいほど現れるアブラムシである。ここまで広がったきはまずホースで水をかけて洗い流してから農薬を撒く。



図 A.12 尻腐れ病



図 A.13 メロンの葉に付いたアブラムシ

図 A.14 は室内の育苗器のパプリカに派生したアブラムシ(薄茶色)とコナジラミ(白色)である。これまでの屋外での栽培でコナジラミが発生したことはないが、アブラムシは良く発生する。パプリカや唐辛子等でアブラムシは特に柔らかい芽や蕾に付くので、奇形にならないようにウルトラニーム等を散布しながら丁寧に洗い流す。筆ではたき落とすのも効果的である。なおパプリカにつくアブラムシは薄茶色であるが、アブラムシはカメムシ目アブラムシ上科に属する昆虫の総称で、植物ごとに種類が異なる。



図 A.14 パプリカに付いたアブラムシとコナジラミ

