

土耕栽培における水分重量監視装置の開発と実証試験

Development and verification test of moisture weight monitoring device in soil cultivation

鈴木 悠泰¹ 須原 廉¹ 星野 拓巳¹ 山崎 優太¹ 木村 竜士² 高田 拓¹

Yuta Suzuki Ren Suhara Takumi Hoshino Yuta Yamazaki Ryushi Kimura Taku Takada

要旨：土耕栽培の施設園芸での利用を目指し、植物の水分重量監視装置の開発を行った。装置は、周囲の気温や日射量などの環境情報を計測する環境計測部、植物と土壤全体の重量変化を計測する重量計測部、一定重量の水やりを定期的に実施する灌水部からなる。ブロッコリー苗に対する装置の動作試験では、各部の計測を設計通り実施できており、植物と土壤全体の水分重量の増減が得られ、水分の減少速度を算出できた。今後、長期間のデータ取得を行うことで、水分出力である蒸散量と蒸発量の切り分けを行い、植物の水分保有量の推定を行う。将来的には、本装置による継続的なデータ収集により、植物の水分保有量と植物画像との関連付け学習を行う教師データの生成を目指す。（307字/300字程度）

キーワード： 小型計測装置、土耕栽培、植物の水分保有量、蒸散量、蒸発量、

1. はじめに

植物にとって水は命の源であり、欠かすことのできない存在である。一般に植物は、根や茎、葉などから構成されており、それらの一つひとつは水分を多く含んでいる。特に高等植物の葉などは、重量の約80~90%が水が占めている。植物内の水が減少すれば、植物は生命活動を維持することが困難となり、萎れや枯れの原因となる。植物内に保有される水分量は、気象条件（気温、湿度、日射量など）によって大きく影響を受けるため、植物内の水分量の動きを把握し、植物内の水分の保有量や渇き具合を知ることが重要となる。

図1に植物への水分量の入出力例を示す。植物近くの土に水を撒くと、根は地中の水分を吸収し、水分は茎の中を通り、周囲の組織を潤しながら葉の末端まで運ばれる。葉では光合成による消費や蒸散による放出によって植物内の水分が失われる。また、土中の水分は気温や湿度の状態により、空气中へ蒸発して失われる。植物内に保有される水分量を監視することができれば、植物内の適切な水分保有量を、水やりなどによって管理することが可能になると考えられる。

一方で、農家はその日の天候や気温を感じ、植物全体や葉の状態を見るなどして、適切な水やりを行っている。つまり、植物内に保有される水分量は、植物の見たと関連している可能性がある。近年のスマート農業化の進展により、植物の生育状態の計測と生育特徴量の抽出の

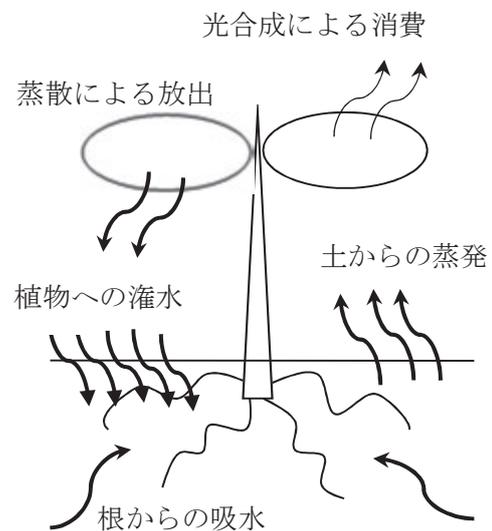


図1 植物における水分量の入出力例

試みが始まっている^[1,2,3]。トマトの樹勢画像から、萎れ具合と適切な灌水量を深層学習させる試みなどが成功している^[4]。将来的には、植物が保有する水分量を、深層学習などにより植物画像から推定することが可能となるだろう。そのため、植物が保有する水分量の正確な測定手法を確立する意義は大きい。

本研究では、植物内の水分量の入出力を把握するため、周囲の環境状態を計測するとともに、植物と土壤全体の重量変化を計測する装置を開発し、妥当な計測値を取得することを目指す。

¹ 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科

² 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科

2. 装置の開発

2.1. 装置概要

今回開発した計測装置には、表 1 に示すように、環境計測部、重量計測部、灌水部の 3 つの機能がある。環境計測部では、植物周辺の環境状態を計測し、植物の光合成や呼吸、蒸散に関連する影響を把握する。重量計測部では、鉢植えた植物と土壌全体の重量を計測し、水分重量の変化を計測する。灌水部では、植物に対して、定期的に定められた量の灌水を行う。

表 1 計測装置の機能概要

装置名	計測パラメータ	目的
環境計測部	気温・湿度・気圧・日射量・CO ₂ 濃度・熱画像・可視画像	・環境状態の計測 ・光合成や呼吸の間接的な影響把握
重量計測部	植物と土壌全体の重量	・水分重量変化の計測
灌水部	灌水重量	・一定重量の灌水

2.2. 環境計測部について

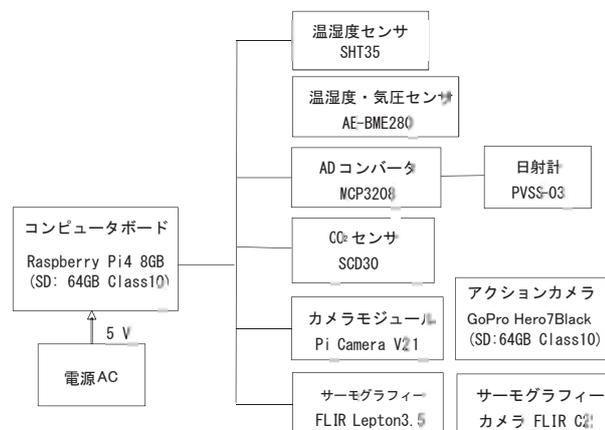


図 2 環境計測部のシステム構成図

環境計測部は、植物周辺の環境状態を計測するため、気温 [°C]、相対湿度 [%]、気圧 [hPa]、日射量 [W/m²]、二酸化炭素濃度 [ppm]、植物の表面温度 [°C/pixel] の計測を行う。ビニールハウスに設置している環境計測装置を参考に^[4,5,6]、新たに環境計測部のシステム構成を決めた（図 2 参照）。日射計で日射量を、CO₂ センサで二酸化炭素濃度を計測することで、植物が光合成するのに必要な状態に関わる量を計測する。植物の光合成の活発度を判断し、光合成によって消費される水分量を推測する。植物周辺の気温や湿度、気圧は、土壌からの蒸発量

や蒸散の条件となる。蒸散では、葉の気孔から水蒸気が出て行く際に気化熱が奪われるため、葉の温度が低下する。サーモグラフィーカメラで葉の表面温度の低下を計測することで蒸散具合と関連付け、間接的に水分の変化量を推定する。

2.3. 重量計測部について

重量計測部は、植物と土壌全体の重量を継続的に監視する。定期的な水やりによる、水分重量を記録し、鉢全体の重量変化から水分の重量変化を求める。重量測定器（FX-5000i）は秤量 5,200 g、最小表示 0.01 g のものを使用した。記録に関しては、GoPro カメラ（Hero7 Black）によるタイムラプスモードで 60 秒毎に、重量表示部と植物全体を撮像している。

2.4. 灌水部について

灌水部には、自動散水タイマー（スマジヨロ SJ1）を使用した。タイマーをセットして自動で二つの苗に同時に灌水を実施する。灌水に関しては、開始時刻を午前 7 時と午前 12 時の 1 日 2 回とし、散水時間を 1 回あたり 5~20 秒間（設定は 5 秒間隔毎）とした。ホースの長さに関しては、散水タイマーから水道蛇口までは約 1.4 m、二股分岐までは 9.0 m、二股分岐から鉢植えまでは各々 1.4 m であった。スプリンクラー部は点滴タイプとした。

3. 実証試験

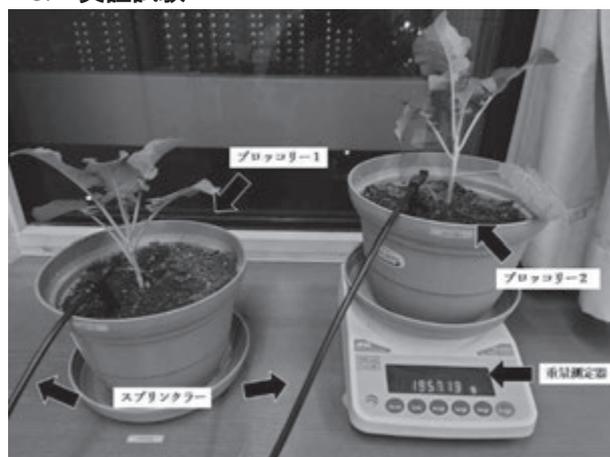


図 3 計測の様子

比較実験のため、ブロッコリー苗を鉢植した物を 2 セット用意した。設置場所は建物 8 階の南西に面した窓辺

にし、晴天時の日中はよく直射日光が当たる。苗の移植後、水やり前の鉢全体の重量は、1.57 kg と 1.52 kg であり、今後の成長を考慮しても、重量測定器の適正重量範囲であった。計測の様子を図 3 に示す。

3.1. 灌水部の試験結果

図 4 に灌水部の様子を示すが、自動散水タイマーでは、散水時間の設定ができる。散水時間内に灌水される重量を試験計測し、表 2 に灌水重量の結果をまとめた。1 回 20 秒間の灌水により、210 g 相当の水分重量が灌水される。今回の試験では、ホースを 2 股にして、2 つの鉢に灌水するため、1 鉢あたり 100 g 相当の水分重量を灌水できる。また、1 日に 2 回の灌水を実施するため、合わせて 1 鉢あたり 200 g 相当の水分重量を灌水する。灌水量のばらつきが大きいのは、散水タイマーから鉢植えまでをつなぐホースが長いことが考えられる。ただし、灌水量自体の重量計測ができるため、大きな問題にはなっていない。



図 4 灌水部の様子

表 2 灌水重量の試験結果 (20 秒間)

灌水重量 [g]			平均重量 [g]
207	203	221	210.3

3.2. 環境計測部の試験結果

図 5 に環境計測部の外観を示す。現状では、環境状態に関するセンサデータは 10 秒毎に、植物の可視画像は 1 分毎に、熱画像は 10 秒毎に記録している。

図 6 に、気温、湿度、気圧、二酸化炭素濃度、日射量の時系列変化を示す。気温は 11:00 頃から上がっていき、15:30 頃から下がっている。また、センサにより気温の上がり方が異なるのは、センサ位置の違いにより直射日光の当たり方が異なることによる。BME280 の湿度

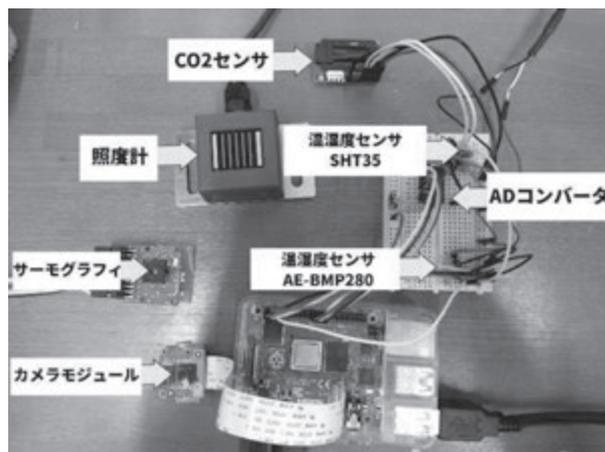


図 5 環境計測部の外観

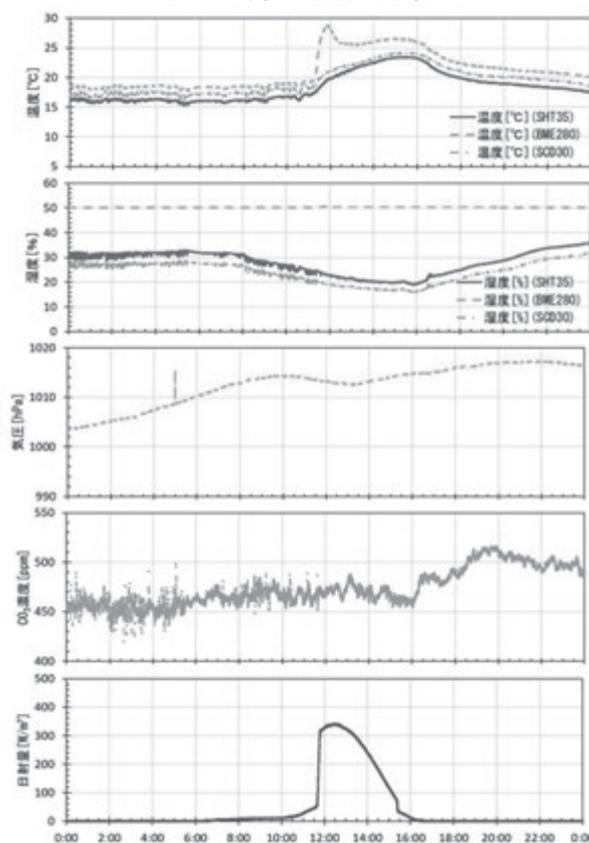


図 6 環境計測データの時系列変化
(2021 年 12 月 2 日 0:00~24:00)

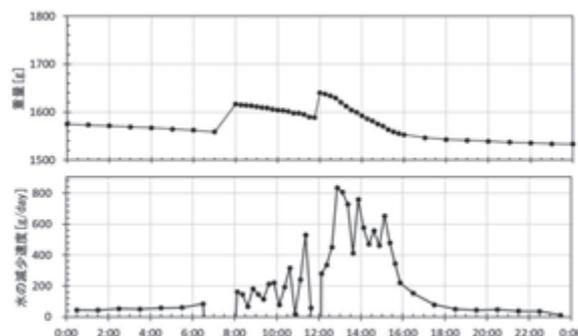


図 7 重量計測データの時系列変化
(2021 年 12 月 2 日 0:00~24:00)

はデータエラーであるが、原因の特定には至っていない

い。このとき、日射量は 10:30 頃から緩やかに増え、11:30 頃から急激に大きくなり、12:30 頃のピークから緩やかに下がっている。天候は概ね晴れであり、気圧は 1 日を通して徐々に 10 hPa 程度高くなっている。二酸化炭素濃度に関して、夜間から日中にかけて変動はあるがあまり大きな変化は見られないが、日射量が小さくなった 16:00 以降に、50 ppm 程度高くなっている。植物が光合成を終えて、呼吸が支配的になったためと考えられる。

3.3. 重量計測部の試験結果

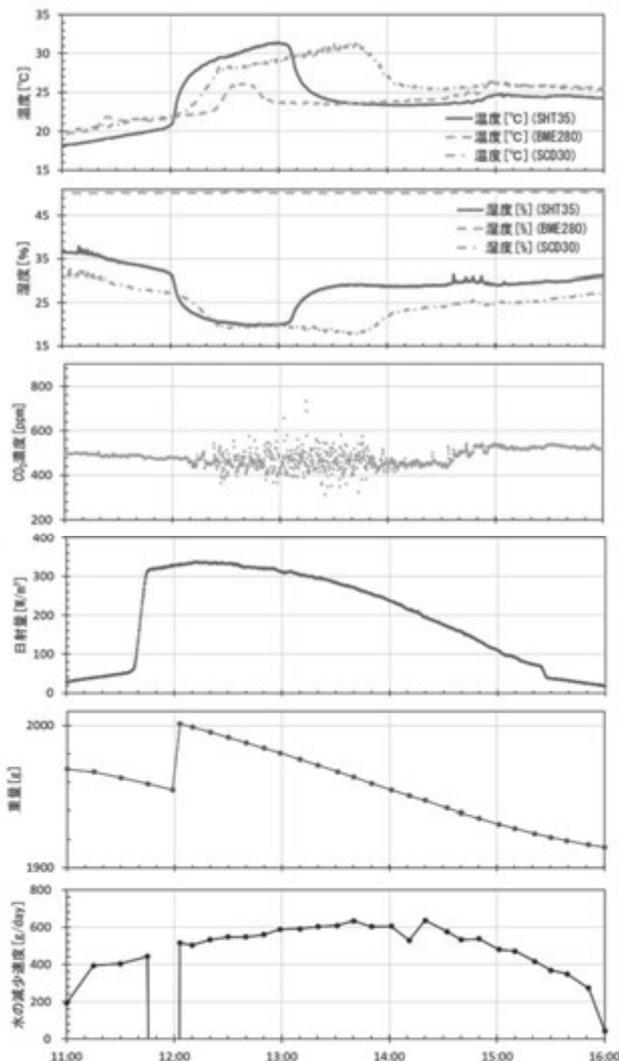


図 8 環境計測データの時系列変化 (2021 年 11 月 25 日 11:00~16:00)

図 7 に、図 6 と同じ時間帯の重量計測データを示す。散水タイマーにより 7:00 と 12:00 に 25 g 程度の水を灌水した。灌水後、時間の経過とともに、全体重量が減少しているが、水分重量の減少量は時間帯によって異なる。そこで、水分重量データの差を時間で割ることで、水分重量の減少速度を算出した。水分重量の減少速度は、夜

間は小さく、灌水後と日射量が高い時間帯に、大きくなっている。日射が植物や土壤に当たっており、気温が高いことから、土壤からの水分蒸発が多くなっており、植物の蒸散も活発だったことが推測される。そのため、現状で、水分重量減少の原因に関しては、土壤からの蒸発か、葉からの蒸散かを区別できていない。

一方で、図 8 に、別日の環境計測データと重量計測データを示す。水分重量の減少速度が大きく変化する日中のみを拡大し提示しているが、重量データのサンプリングレートを上げることで、水分の減少速度に関しては、大小を正確にとらえられている。特に、水分の減少速度が急激に小さくなる 16:00 頃の時間帯は、気温や日照量が急激に変化する時間帯ではない。土壤表面の乾き具合が関係していると考えられる。このように、環境計測データとの比較解析を行っていくことで、水分重量の減少速度の違いや、環境状態データとの関係性を探ることが可能となる。

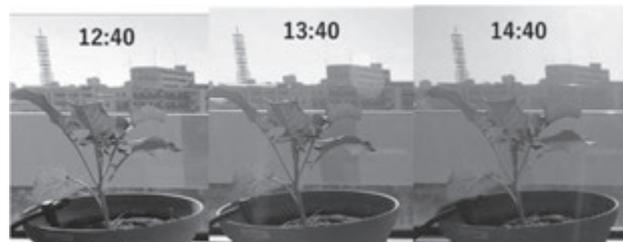


図 9 植物画像の時系列変化 (11 月 25 日)

図 9 に、重量計測に用いている GoPro カメラで取得した植物画像を示す。植物の変化に関しては、日射のあたり方による違いは画像全体の色味が変化するため分かりやすいが、水分保有量による違いは分かりづらい。図では、右側の下の葉の形状がわずかに変化するなどしている。

4. 考察

今回開発した計測装置により、妥当な計測データが取得できた。今後、様々な天候時のデータや長期間のデータ取得を行うことで、データ分析を進めることが可能である。植物付近の二酸化炭素濃度は、植物の光合成や呼吸の活発度と関係が深い。葉の表面温度は、葉からの蒸散量と関係する。一方で、土壤からの水分蒸発量は、土壤表面や土壤中の状態により大きく変わることが分かってきた。今後、土中水分量センサや土中温度・湿度センサなどを用いることで、土中水分量や土中温度を計測す

ることが必要である。水分減少量の主な原因としては、土壌からの水分蒸発、葉からの蒸散、光合成が考えられるため、各々に関連する計測データと、水分重量の減少速度の相関を調べることで、水分減少量の成因が確認できると考えられる。

植物と土壌からの水分の出力を分類することができれば、植物が保有する水分量を常時監視可能となる。現在、植物画像を低速度撮像しているが、画像を目で見る限りは、植物の微細な変化から、生育に関する特徴量を抽出することは難しい。ただし、植物画像には、日射量や気温などの環境パラメータや、植物の水分保有量による影響が隠れていると考えられる。将来的には、水分保有量と植物画像の組み合わせを教師データとして利用し、深層学習することで、植物画像から水分保有量の推定が可能となるであろう。まずは、教師データ生成のため、本装置による長期間データ取得を目指す。

植物と土壌全体の重量を計測することは有用な方法であるが、実際のビニールハウス施設の栽培植物全体において、土壌を含めた重量を計測するのは困難である。そこで、園芸施設においては、今回のように株単位での計測を行うことを当面の目標としている。ただし、水分保有量と植物画像を関連付けすることで、将来的には、直接的な重量計測を行わなくとも、植物画像情報から水分保有量を推定できることを期待している。

5. まとめ

土耕栽培の園芸施設において、植物の水分重量監視を行う装置の開発を行った。装置は、周囲の気温や湿度などの環境を計測する環境計測部、植物と土壌全体の重量変化を計測する重量計測部、一定重量の水やりを定期的にも実施する灌水部からなる。

ブロッコリー苗に対する装置の動作試験により、各部の計測は設計通り実施できた。環境計測部においては、気温や湿度、気圧、日射量、二酸化炭素濃度、植物の表面温度を取得でき、重量計測部においては植物と土壌全体の水分量の増減を十分な精度で取得でき、灌水部では定期的な一定量の水やりを実施できた。結果として、植物と土壌全体からの水分減少速度を算出でき、植物の水分保有量の推定に必要なデータ収集が可能な装置となっていることを確認できた。

今後、長期間データの取得と分析を行うことで、植物からの水分の出力である蒸散量と土壌からの水分蒸発量

の切り分けを行うなど、関連する物理量との関係を探る。将来的には、継続的なデータ収集により、植物の水分保有量と、植物画像との関連付け学習を行う教師データの作成を目指す。

謝辞

計測装置の開発に関して、一般財団法人 WNI 気象文化創造センターから助成を受けました。

参考文献

- [1] 若森 和昌, 柴田 瞬, 峰野 博史: 深層学習を用いた植物の水分ストレス推定手法の検討, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集, pp. 199-206, 2017
- [2] 伊藤 次郎, 岡安 崇史, 野村 浩一ほか: 低コスト IoT デバイスを用いた植物フェノタイプングロボットの開発とその性能評価, 農業情報研究, 30-2, pp. 13-23, 2021
- [3] 岡安 崇史, 伊藤 次郎, ハミダ アストリアティ: 植物の生育特徴量計測における低価格小型コンピュータの可能性, 電子情報通信学会誌, 104-6, pp. 532-537, 2021
- [4] 木村 竜士, 金村 匡将, 中山 信ほか: 園芸施設内固定環境計測装置の開発と耐熱設計の検討, 高知工業高等専門学校学術紀要, 66, pp. 37-44, 2021
- [5] 高田 拓, 上田 久生我, 木村 竜士ほか: 可視・熱画像データ解析による植物生長に関する特徴量抽出手法の検討, 高知工業高等専門学校学術紀要, 66, pp. 57-65, 2021
- [6] 中山 信, 高田 拓, 木村 竜士ほか: 2変数入力システム同定法によるビニールハウス内の温度・飽差モデル—春秋期におけるモデルの短期間学習と構築—, 農業情報研究誌, 30-1, pp. 1-12, 2021