

植物の時系列放射温度分布計測システムと放射温度画像解析ツールの開発

木村竜士^{*1}・宮岡奨一朗^{*2}・大内晴貴^{*3}・中山信^{*1}・大角理人^{*1}・高田拓^{*4}

Development of time series measuring system of radiation temperature distribution and thermal image analysis tool for plants

Ryushi KIMURA, Shoichiro MIYAOKA, Haruki OUCHI,
Shin NAKAYAMA, Masato OSUMI and Taku TAKADA

Summary

It is important that prevention of occurred surface condensation on fruits and leaves caused by rapid outside temperature and humidity change by climate change in solar lighting type plant factories. In this study, a final goal is a development of local air conditioning method to prevent surface condensation on fruits and leaves without inhibition of plant growth. In this paper, we developed thermal images analysis tool using radiation distribution data to grape characteristics of change of surface temperature on fruits and leaves. This tool can extract object images such as fruits or leaves by manual and make histogram of temperature distribution. This tool was developed by “Processing 3” that is Java based programming language and is easy to operate image data. As a result, the analysis tool output easily an image of dew-point temperature distribution of fruit or leaf based on thermal images using and change of median temperature of fruits and leaves.

1. はじめに

近年、頻発する異常気象に影響されない野菜の安定供給を目的として、植物工場による野菜の栽培が注目されている。植物工場は、人工光型植物工場と太陽光型植物工場に大別される。主な特徴として、人工光型植物工場は、気象条件に左右されずに植物を栽培できるが、1ヘクタールあたり約30～50億円と甚大な初期投資を必要とする¹⁾(表1)。さらに、太陽光型植物工場の運用時において、照明にかかるエネルギー消費量が全体の約80%を占める²⁾(表2)。そのため、光環境の運用費や初期の設備投資が人工光型植物工場と比べ安価なことから太陽光型植物工場の需要が増加している。一方、太陽光型植物工場は、気象変化の影響を受けやすく、施設内に温度ムラが生じ、不特定多数の果実や葉の表面結露発生の原因となり、そこから疫病の発生率が高くなるという問題がある。そのため、太陽光型植物工場において、収量の安定性を向上させるために、気象の変化に対応しながら温度ムラを解消する必要がある。現状の窓開閉装置や空調設備は、施設全体に対して一様な環境制御を目的としているため、局所的に発生する温度ムラに全く対応できない。また、植物の生長

*1	高知工業高等専門学校	ソーシャルデザイン工学科	准教授
*2	高知工業高等専門学校	ソーシャルデザイン工学専攻	1年生
*3	高知工業高等専門学校	ソーシャルデザイン工学科	5年生
*4	東京都立産業技術高等専門学校	ものづくり工学科	准教授

を考慮しない風量での送風は、葉の温度低下を招き、光合成減少の一因となる³⁾。

そこで本研究では、葉や果実の生長を阻害せず、葉や果実の表面環境の特性を把握することで表面結露を予防するための局所空調の制御方法を明らかにすることを最終的な目的としている。

本報では、葉や果実の基本的な表面温度の変化を把握するために、サーモカメラにより撮影された熱画像から分析対象となる葉や果実の画像データを迅速に抽出し、画像内の温度データのヒストグラムから熱分布特性が容易に把握できるツールを開発する。対象植物は、高知県の重要特産品であるピーマンとする。

2. 熱画像の撮影

2.1 実験の概要

実験の概要を図1、使用機器を表3、測定項目を表4に示す。日射量と風速によるピーマンの果実および葉の表面の温度変化の影響を確認することを目的とし、環境制御装置として、人工太陽灯、加湿機能付きディフューザを用いた。なお、本初期実験では、湿度を高くしないように加湿は行っていない。植物は湿度が高い程、蒸散しやすくなるため、今回は蒸散による温度変化を抑えた。測定項目として、空気温度は、中野ら⁴⁾の成果を参考に筆者らが自作した環境計測装置内に設置したT型熱電対、空気放射温度は、グローブ温度球(φ150mm)内に設置したT型熱電対、表面放射温度は、筆者らが自作したサーマルカメラシステム⁵⁾をそれぞれ用いた。測定間隔は、熱電対が1秒、サーマルカメラシステム(サーマルカメラモジュールFLIR社製lepton3.5を小型コンピュータボードRaspberryPi 4により制御している)による熱画像撮影は、システムの動作が比較的安定する60秒とした。なお、熱画像の解像度は、120×160画素である。測定期間は、2021年10月11日15:30-18:00である。測定は、高知高専S棟1階にある木村研究室で行った。

測定条件を表5に示す。用いる環境制御装置は、日射を想定した人工太陽灯(セリック社製)と通風を想定した加湿機能付きディフューザ(Dyson社製)である。太陽灯の出力は、著者らが高知県安芸郡芸西村に所在するピーマン園芸施設で実測している2020年10月初旬の施設内の日射量を参考に500W/m²程度とした。

加湿機能付きディフューザは、植物生長を促進する1.2m/s程度とした²⁾。なお、本実験では、蒸散効果による温度変化への影響を除外するため、加湿は行っていない。機器の発停は、人工太陽灯は30分間毎に発停する。ディフューザは、測定開始90分後に人工太陽灯とともに30分間動作させる。なお、発停の操作はすべて手動で行っており、研究室は、設定温度28℃で空調した。

表1 栽培法別の特徴

項目	露地栽培	施設園芸栽培	太陽光型植物工場	人工光型植物工場
光源	太陽光	太陽光(+補光ランプ)	太陽光(+補光ランプ)	LED・蛍光灯など
環境制御	困難	やや容易	やや容易	容易
病害虫リスク	大	中	やや小	小
除草作業	大	中	小	小
立地	畑地	畑地	郊外	市街地可
初期費用	小	中 (2000万円/ha)	やや大 (3~5億円/ha)	大 (30~50億円/ha)
生産能力の費用	大	中	小	小
気象の影響	大	中	やや小	ほぼ影響なし
土壌の影響	大	中	小(養液栽培)	ほぼ影響なし

参考文献1)を基に著者が一部加筆して作成

2.2 空気温度および平均放射温度

グローブ温度から平均放射温度の算出を式(1)に示す。

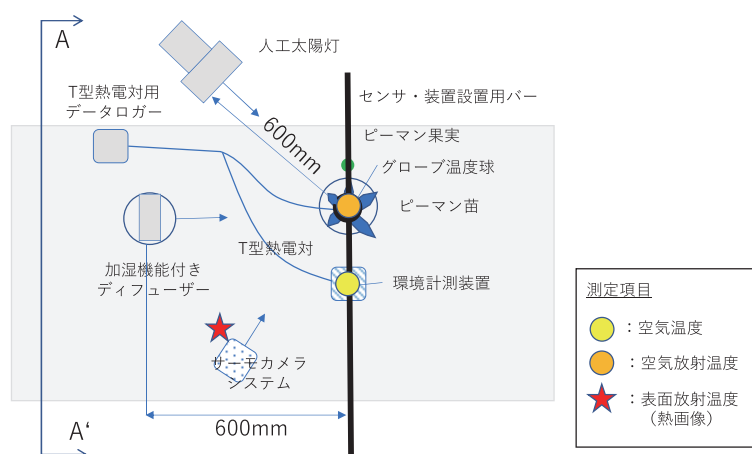
$$MRT = t_g + 2.37\sqrt{V}(t_g - t_a) \cdots (1)$$

表2 人工光型植物工場運用時の消費電力量割合

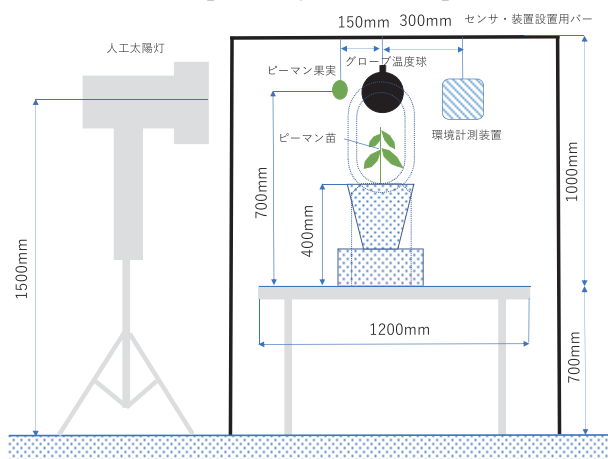
使用項目	消費電力量割合	機器
照明	約80%	蛍光灯40W
冷房	約16%	家庭向けヒートポンプ
その他	約4%	溶液循環ポンプ、送風ファン等

表3 主な使用機器

使用機器	用途	製品名・メーカー他
加湿機能付きディフューザ	植物への送風 (1.2m/s)	PureHumidity+Cool・Dyson 社製 相対湿度：最大70%
人工太陽照明灯	植物への照射 (500W/m ²)	SOLAX500W XC-500B・セリック社製 放射波長領域：300～780nm
グローブ温度球	空気放射温度の測定	ベルノン式 (φ150mm)・柴田科学社製
データロガー	T型熱電対通信・記録	GL-240・グラフテック社製
環境計測装置	空気温度の測定	著者自作 ⁵⁾
サーマルカメラシステム	表面放射温度の測定	著者自作 ⁵⁾



[平面図中 A-A' 立面]



[平面]

図1 実験装置・測定項目の概要

ここで、 MRT ：平均放射温度 $[^{\circ}\text{C}]$ 、 t_g ：グローブ温度球温度 $[^{\circ}\text{C}]$ 、 t_a ：空気温度 $[^{\circ}\text{C}]$ 、 V ：気流 $[\text{m/s}]$

空気温度と空気放射温度は、測定開始時はともに 28°C 程度であったが、開始30分後の人工太陽灯による放射熱の影響により、空気温度が 28.8°C に対し、空気放射温度は、 30.2°C と最大 1.4°C 程度大きい値を示した。

次に、30分間人工太陽灯を消灯した後に再び人工太陽灯による照射とディフューザによる 1.2m/s の気流の送風を30分間行った結果、空気温度は 28.6°C に対し、空気放射温度は、 29.1°C と最大 0.5°C 程度大きい値を示した。送風の有無で比較した場合、送風ありの温度差が、送風なしの温度差と比べ、最大 0.9°C 程度小さい値を示したことから放射温度より低い室内温度の気流がグローブ球に送風されることでグローブ球の表面温度が低下したと考えられる。

・果実および葉の表面放射温度

サーマルカメラで撮影した熱画像の一例を表6に示す。熱画像は、256段階のグレースケールにより温度分布が表示されており、明度が高いに近いほど高温であることを示している。なお、今回使用したカメラモジュールは、視野角内の最小温度・最大温度から自動で256段階の色調が配色される。そのため、温度差の大きい画像かつ相対的な低温領域が大きい場合、画像全体が明度が低い画像となる（例えば、表6中の経過時間30分の熱画像など）。

経過時間30分後（人工太陽灯ON直後）の熱画像における果実と葉を比較した場合、葉が果実より高温であることを確認できることから葉のほう放射熱の影響を受けやすいことがわかる。次に、経過時間60分後の熱画像から果実が葉と同様に高温部の占める領域が大きくなっていることから果実温度の上昇が確認できる。続けて、経過時間65分後（人工太陽灯OFF後、5分経過）の熱画像において、葉の温度低下が確認できる一方、果実は、葉よりも高温であることが確認できる。これは葉と果実の熱容量の違いによる影響と考えられ、より熱容量の大きい果実は、葉に比べ人工太陽灯による放射熱を蓄熱しているため、明度の高い領域が増加したと考えられる。経過時間120分後（人工太陽灯ON・ディフューザON後30分経過）の熱画像において、経過時間60分後（人工太陽灯ON・ディフューザOFF後30分経過）と比較した場合、経過時間120分後の果実と葉が同程度の温度領域になっていることから、果実や葉の表面温度が送風により室内温度に近づくように温度が低下したと考えられる。

表4 測定項目

測定項目	計測端末	測定間隔 [秒]	備考
空気温度 [$^{\circ}\text{C}$]	T型熱電対	1	放射シールド内 通風
空気放射温度 [$^{\circ}\text{C}$]	T型熱電対	1	グローブ温度球 ($\phi 150\text{ mm}$)
表面放射温度 [$^{\circ}\text{C}$]	サーマルカメラ Lepton3.5	60	解像度 (120×160 画素)

表5 測定条件

測定時間 [分]	人工太陽灯・発停	ディフューザ・発停
0 - 30	OFF	OFF
30 - 60	ON	OFF
60 - 90	OFF	OFF
90 - 120	ON	ON
120 - 150	OFF	OFF

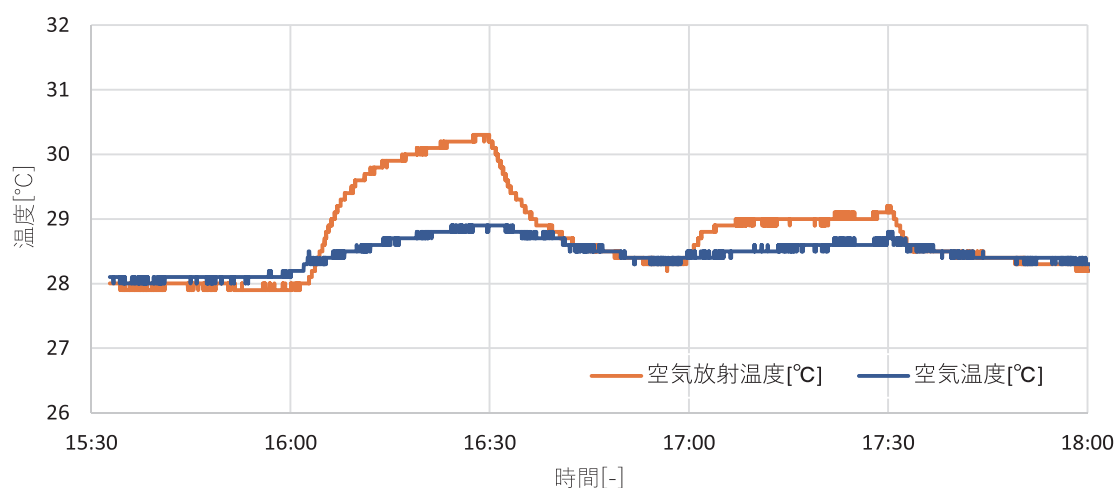


図2 空気温度および表面放射温度の変化

表6 ピーマンの果実および苗の熱画像の変化

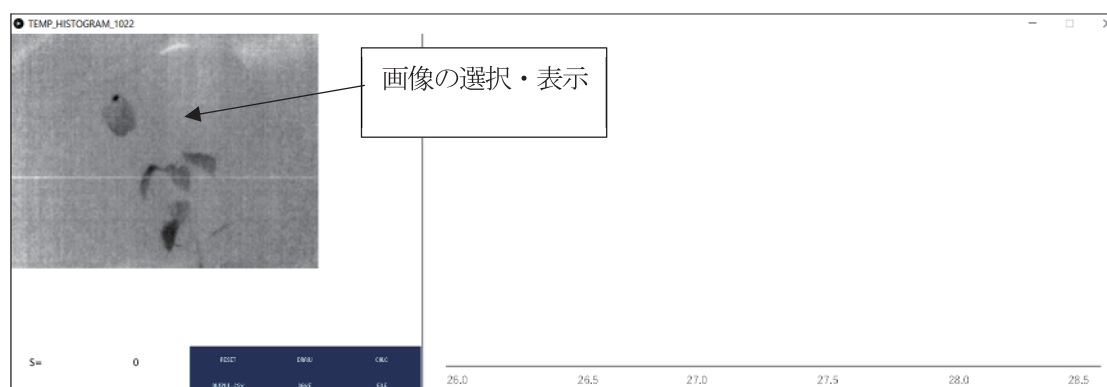
経過時間 (分) : 0 時刻 : 15 : 30 ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : OFF	経過時間 (分) : 30 時刻 : 16 : 00 ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : ON	経過時間 (分) : 60 時刻 : 16 : 30 ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : ON	経過時間 (分) : 65 時刻 : 16 : 35 ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : OFF
経過時間 (分) : 90 時刻 : 17 : 00 ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : OFF	経過時間 (分) : 95 時刻 : 17 : 05 ディフューザ : ON 人工太陽灯 : ON	経過時間 (分) : 120 時刻 : 17 : 30 ディフューザ : ON 人工太陽灯 : ON	経過時間 (分) : 150 時刻 : 18 : 00 ディフューザ : OFF 人工太陽灯 : OFF

3. 熱画像の解析

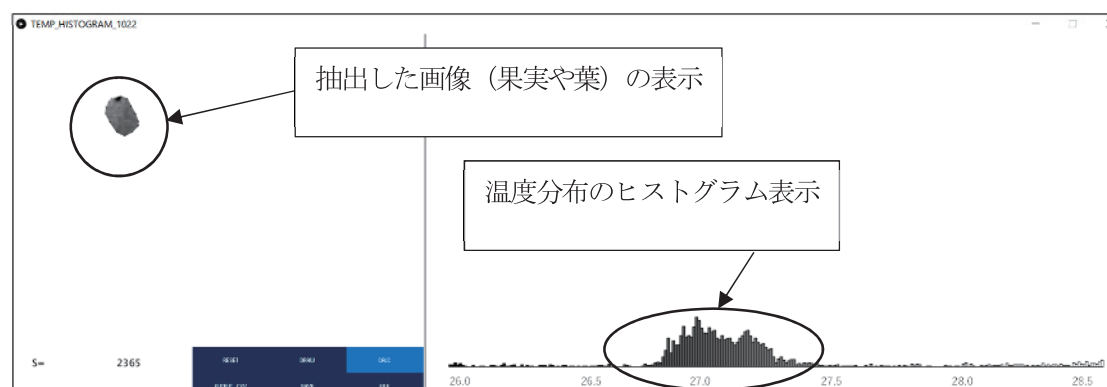
3.1 解析ツールの概要

開発した熱画像解析ツールのプロトタイプモデルの画像処理実行前後の画面を図3に示す。ツールの基本的な機能として、①熱画像ファイルを読み込み、②画像内にある果実や葉などの解析対象物の縁をマウスクリックで選択し、処理実行ボタンを押す。③実行後は、選択した画像のみが表示され、④温度分布のヒストグラムが作成される。⑤そのヒストグラムから容易に温度の最小値、最大値および中央値が算出される。対象画像選択のアルゴリズムは、マウスポインタで選択された画像の座標値を読み取り、対象画像の領域を指定する。その後、対象画像の領域以外の画素データをすべて白色のRGB値である(255,255,255)を入力することで対象画像のみ表示することができる。ヒストグラム作成アルゴリズムは、抽出された対象画像のグレースケールの画素データ(0~255)を読み取り、繰り返し構文で画素値別に積算する。その後、サーマルカメラモジュールから読み込める画像内最小温度(画素RGB(0,0,0))および最大温度(画素RGB(255,255,255))から割合を算出し、温度変換を行う。

また、その他の機能として、実行後の画像ファイルの保存やヒストグラムデータのCSV形式での出力が可能である。なお、開発は、Webアプリケーションとしての使用を想定しており、グラフィックユーザインターフェースに関する機能ライブラリが豊富にあるJAVAベース言語Processing 3により行った。



〔解析処理の実行前（画像の選択）〕



〔解析処理の実行後（ヒストグラムの表示）〕

図3 熱画像解析ツール実行前後の画面

3.2 解析結果および考察

表6に示した8枚の熱画像にあるピーマン果実および葉の表面放射温度の中央値を開発したツールにより算出し、その変化を出力したグラフを図4に示す。葉の温度変化は、26.5℃～27.5℃であったことに對し、果実の温度変化は、26.5℃～27.2℃とわずかに上限値が下回った。原因として、果実と葉の熱容量の違いが挙げられる。葉の急激な温度低下は、気孔の閉口による植物生長の阻害要因となり、かつ果実の急激な温度変動は表面結露による病原菌発生の要因となることから、葉や果実の熱容量を考慮しながら急激な温度低下を引き起こさない風量を明らかにする必要がある。結果の一例として、図5に表6中経過時間65分時の果実の表面放射温度を相対湿度90%の空間に入れた場合に発生する結露予測分布を示す。直接日射が当たらない、かつ表面の凹み箇所に結露発生の可能性があることがわかった。

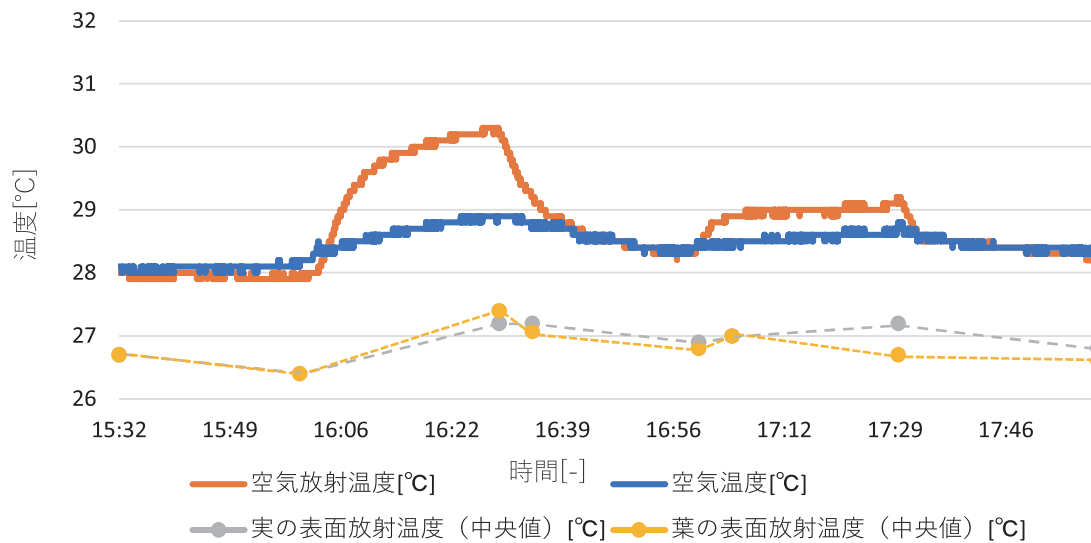


図4 果実および葉の温度（中央値）の変化

4. まとめ

本報では、筆者が開発したサーマルカメラシステムを用いて人工太陽灯とディフューザを用いて放射熱量や送風環境下でピーマンの熱画像を撮影し、果実や葉表面の放射や対流による影響を把握した。さらに、開発した熱画像解析ツールを用いることで果実と葉の時系列な表面温度分布を把握することができた。また、変数として湿度を与えることで露点温度を算出することで容易に果実表面の結露分布の予測ができた。

今後の展望として、実験室実験として結露発生の観測を目的とした空調制御環境における測定と解析結果の精度検証を行う。さらに、実証実験として太陽光に暴露された園芸施設における植物の熱画像の撮影および風向風速の測定を行い、測定データと熱画像解析ツールを用いて、果実や葉の生長を阻害せずに表面結露を予防するディフューザの制御方法を明らかにする。

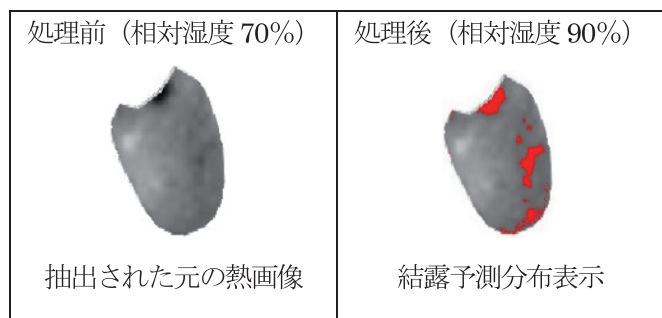


図5 果実の結露予測分布表示の一例

謝 辞

ピーマン栽培に関する助言をいただきましたピーマン園芸農家・松本政治様に深く感謝いたします。また、本研究は令和3年度電気通信普及財団の研究調査助成（テーマ名：園芸施設における環境計測装置と連携する移動式ディフューザによる局所環境制御の検証）を受けたものです。

参考文献

- 1) 古在豊樹：図解でよくわかる植物工場のきほん、誠文堂新光社、p.23、2014
- 2) 古在豊樹：人工光型植物工場 世界に広がる日本の農業革命、オーム社、pp.34-157、2012
- 3) エペ・フーヴェリンク、タイス・キールケルス、オランダ最新研究環境制御のための植物生理（中野明正・池田英男監訳）、農山漁村文化協会、p.96、2017
- 4) 安場健一郎、多根知周、田中義行、後藤丹十郎、吉田裕一、黒崎秀仁、岡安崇史、星岳彦：低コスト環境制御システム構築のためのプログラムライブラリの開発、農業情報研究、25(1)、12-18、2016
- 5) 木村竜士、金村匡将、中山信、高田拓：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紀要第66号、pp.37-44、2020

受理日：2021年11月1日