

## コンシューマ・システム論文

## 植物体内水分の変化を考慮した灌水制御手法の提案

後藤 将弥<sup>1,a)</sup> 水野 涼介<sup>1,b)</sup> 峰野 博史<sup>2,c)</sup>

受付日 2020年2月25日, 採録日 2020年6月22日

**概要:** 近年, 高度な栽培技術を ICT で自動化する研究が進められている. 高度な栽培技術のなかでも, 植物の水分不足度を示す水ストレス指標を基に植物への灌水を行う水ストレス栽培は高品質な果実を栽培できる手法として知られており, 水ストレス指標を用いた植物への灌水を自動化する手法が研究されてきた. しかし, 既存手法では熟練農家の経験と勘を基に植物体内水分の変化に応じて, 水ストレス指標に対する閾値の調節が必要だった. そこで, 本研究では灌水制御手法として, 閾値決定アルゴリズムを用いる自動灌水制御手法を提案する. 提案手法は, 植物体内水分の変化に基づいて閾値を算出する閾値決定アルゴリズムで閾値を随時更新することで, 熟練農家による閾値の調整を自動化する. 提案手法の有効性を評価するため, 提案手法を用いた灌水制御によるトマト栽培実験を行った. その結果, 提案手法を用いた灌水制御は, 熟練農家が栽培した果実糖度と同等以上で栽培できたことに加え, 総収穫量に対する可販果実の割合が熟練農家と比べ 14.3%増加した. また, 新たな植物体内水分指標として Optical Flow を用いて植物の葉の萎れ具合を定量化した LWC (Leaf wilt condition) を検討した. LWC と茎径の相関分析をしたところ, 平均相関係数が 0.59 であったことから, 植物体内水分指標として LWC の有効性が示唆された.

**キーワード:** 農業, IoT, 画像処理, フレームワーク

## Proposal of Irrigation Control Method Considering Change of Water Content in Plant

MASAYA GOTO<sup>1,a)</sup> RYOSUKE MIZUNO<sup>1,b)</sup> HIROSHI MINENO<sup>2,c)</sup>

Received: February 25, 2020, Accepted: June 22, 2020

**Abstract:** In recent years, research to automate advanced cultivation technology by ICT has been promoted. With existing irrigation control methods in water stress cultivation that requires advanced cultivation techniques, farmers need to adjust the threshold value for water stress index according to plant growth and cultivation environment. Therefore, in this study, we propose an irrigation control method that adapts to the change in water content in the plant using a threshold determination algorithm. In a cultivation experiment of high-sugar tomatoes, the proposed method succeeded in cultivating fruits with a sugar content equal to or higher than that of the fruits cultivated by farmers, and increasing the percentage of available fruits by 14.3% compared to farmers. In addition, the index LWC (Leaf wilt condition), which quantified the degree of leaf wilting of plants using Optical Flow, was examined as a new water content index in plants. Analysis of the correlation between LWC and stem diameter indicated that the average correlation coefficient was 0.59, indicating the effectiveness of LWC.

**Keywords:** agriculture, iot, image processing, framework

<sup>1</sup> 静岡大学大学院総合科学技術研究科  
Graduate School of Integrated Science and Technology,  
Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan

<sup>2</sup> 静岡大学学術情報学領域  
College of Informatics, Academic Institute, Shizuoka University,  
Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan

a) goto@minelab.jp

b) ryosuke@minelab.jp

c) mineno@inf.shizuoka.ac.jp

### 1. はじめに

近年, 国内の農業分野において, 農業従事者の高齢化と就農者人口の減少とともない, 熟練農家の持つ高度な栽培技術の継承が困難となっている. 特に高糖度トマト栽培に代表される高度な栽培技術は, 熟練農家が長い年月をかけて培った作物に対する経験と勘によるものである. そのた

め、作物に対する経験と勘を十分に培っていない新規就農者への継承が困難である。この問題を解決するため、ICTを用いて熟練農家による高度な栽培を自動化する研究が進められている [1]。高度な栽培技術が必要な高糖度トマトなどの高品質な果実を栽培する水ストレス栽培では、植物に与えられている水ストレス（水分不足度）を定量的に表した水ストレス指標に対して閾値を設定し、自動的にきめ細やかな灌水制御を行うことで品質の向上を実現している。水ストレス指標に閾値を設けた灌水制御では、水ストレス指標の値が閾値以上または以下になったときに一定量の灌水を行う。なお、灌水を行う条件が閾値以上か以下であるかは水ストレス指標によって異なる。そのため、灌水管理が最も重要な水ストレス栽培において、閾値というのは灌水の頻度やタイミングを決める重要な値である。また、閾値は植物生長や気象環境などで変化する植物体内水分量に応じて調節される [5], [6]。

水ストレス指標として、土壤水分量 [2]、積算日射量 [3]、茎径の変位量 [4] などが用いられている。しかし、上記の水ストレス指標では、閾値の調整に経験と勘を要するため新規就農者に適切な閾値の調整が困難である。そこで、本研究では、植物体内水分の変化に応じて任意の水ストレス指標に対する閾値を決定する閾値決定アルゴリズムを用いた灌水制御手法を提案する。提案手法によって熟練農家の経験と勘が不要な灌水制御を実現する。閾値決定アルゴリズムでは、植物体内水分を表現可能な指標を用いることで植物の生長や気象環境などに応じて変化する植物体内水分を考慮した閾値を随時算出し更新する。また、植物体内水分を表現可能な新たな指標を提案する。植物体内水分の状態が顕著に表れる葉の上下運動を定量化することで、植物体内水分を定量化できると考えた。そこで、経時的に撮影した草姿画像に画像内の物体の動きをベクトル表現可能な Optical flow (OF) を適用することで、植物体内水分の表現が可能かを検証する。

以降、2 章では水ストレス栽培における灌水制御手法の関連研究を述べ、3 章では提案手法と閾値決定アルゴリズム、OF で表現した新たな植物体内水分指標について説明する。4 章では実証実験の実験環境と実験条件を述べ、5 章では実証実験と提案した新たな植物体内水分指標の評価結果と考察を述べる。最後に 6 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 土壤水分量を用いた灌水制御手法

水ストレス指標として土壤水分量を用いた灌水制御 [2] では、土壤水分量が根からの吸水量と密接な関係があるため、植物の水ストレスに応じた灌水制御が可能となる。

土壤水分量の計測方法は、テンシオメータを用いて水分張力を計測する方法と誘電土壌水分計を用いて水分が占め

る体積の割合である体積含水率を計測する方法がある。テンシオメータを用いた計測は、湿潤な土壌の水分量しか計測できない。一方、誘電土壌水分計を用いた計測は、計測可能範囲が広く含水量が少ない土壌においても計測可能である。しかし、土壌水分量は土壌内で不均等になりやすく、土壌水分量を正確に計測するには、テンシオメータや誘電土壌水分計を土壌の複数箇所に設置する必要がある。そのため、農業従事者の金銭的負担が増える。さらに、土壌水分量に対する閾値は、植物生育や気象環境以外に培地の種類でも適切な値が異なるため、閾値決定が困難である。

### 2.2 積算日射量を用いた灌水制御手法

水ストレス指標として積算日射量を用いた灌水制御 [3] では、積算日射量が植物の蒸散量と密接な関係があるため、植物の蒸散によって発生する水ストレスを考慮した灌水制御が可能となる。なお、積算日射量は直前の灌水時刻から現在時刻までにおける日射量の積算値である。

植物は、蒸散量が根からの吸水量を上回り植物体内水分が減少することで水ストレスが与えられる。そのため、きめ細やかな灌水制御には植物の蒸散量を把握する必要がある。植物の蒸散量は気象環境によって異なる。日射量が多い快晴時では、植物の気孔が大きく開き蒸散量が増えることで、蒸散量が吸水量を上回る。一方、日射量が少ない曇天時では、植物の気孔が晴天時よりも開かず、蒸散量が吸水量を上回することは少ない。そこで、積算日射量を水ストレス指標として用いること日射量の変化に合わせて適切な灌水頻度で灌水制御が可能となる。しかし、蒸散量は植物の生長や温湿度、風速などによっても変化するため、日射量のみで蒸散量や植物の水ストレスを十分に考慮した灌水制御は困難である。そのため、水ストレス指標である積算日射量に対する閾値は、蒸散量に関係する気象環境などに応じて調節する必要がある。

### 2.3 茎径の変位量を用いた灌水制御手法

水ストレス指標として茎径の変位量を用いた灌水制御 [4] では、1 日における茎径の減少率を表現した RSD (Relative stem diameter) を水ストレス指標として灌水制御を行う。茎径の変位は植物体内水分の変化と密接な関係がある。そのため、茎径をレーザ変位計で非破壊かつ経時的に計測し、植物に水ストレスが与えられ茎径が減少した割合に応じて灌水を行うことで、植物の水ストレスに応じた灌水制御が可能となる [7]。しかし、灌水後も RSD が閾値を超え続けた場合、一定の時間間隔で灌水を行う制御になるため、適切な閾値を決定しなければ、植物の水ストレスに応じた灌水制御が困難である。さらに、茎径は植物の生長が進むと加齢により硬質化し変化量が減少するため閾値を調節する必要がある [8]。

### 3. 提案手法

#### 3.1 提案手法の概要

植物の生長や気象環境に影響する植物体内水分の変化をもとに、閾値決定アルゴリズムを用いて栽培期間中に日単位で閾値を随時算出し更新することで、熟練農家の経験と勘が不要な灌水制御手法を提案する。

提案手法の概要を図 1 に示す。提案手法は、はじめに任意の水ストレス指標に設定した閾値を用いた灌水制御を行う。同時に、閾値決定アルゴリズムに必要なデータ（植物体内水分指標、水ストレス指標、灌水時刻）を経時的に 1 分間隔で収集し、これらのデータから閾値決定アルゴリズムを用いて閾値を算出する。次に、算出した閾値を水ストレス指標に対する閾値として更新する。また、閾値更新条件を設けることで、植物体内水分の変化が現れていないデータを用いて算出された不適切な閾値に更新することを防ぐ。そのため、閾値更新条件を満たした場合のみ閾値決定アルゴリズムで閾値を算出する。以上のように、閾値決定アルゴリズムで随時算出された閾値に更新することによって、植物体内水分の変化を考慮した灌水制御を実現する。なお、閾値の初期値は、提案手法で行う栽培の時期と近い過去のデータ（植物体内水分、水ストレス指標、灌水時刻）から閾値決定アルゴリズムを用いて算出することが望ましい。しかし、過去の栽培データがない場合は、灌水制御を始める初日は農家が考えるタイミングで灌水を行う、もしくは適当な値を設定する必要がある。また、提案手法は、1 回あたりの灌水を少量（15 ml～100 ml）で多頻度に行う灌水制御を想定している。

#### 3.2 閾値決定アルゴリズムの概要

閾値決定アルゴリズムは、閾値更新条件を満たした日における日中（10 時から 14 時）のデータを用いて植物体内水分の変化から水ストレス量の過不足がない閾値を決定するデータ駆動型のアルゴリズムである。閾値決定アルゴリズムの概要を図 2 に示す。閾値決定アルゴリズムは、日中のデータを用いて日中に適切な灌水制御が可能となる閾値を算出する。というのも植物は、日射量が多く温度が高い日中に最も水ストレスが付与されるため、日中の灌水管理を最も厳密に行う必要があるためである。そこで閾値決定アルゴリズムは、まず、日中の灌水で発生する植物体内水分の短期的変化を抽出する。次に、抽出した短期的変化から植物に与えた水ストレス量と植物が灌水で回復した水ストレス量を各灌水に対して算出する。これらをもとに各灌水に対してタイミングの良し悪しを水ストレス量の過不足で表した灌水タイミング評価指標を算出する。また、収集した水ストレス指標と灌水時刻のデータから灌水時刻における水ストレス指標を取り出す。算出した灌水タイミング評価指標と灌水時の水ストレス指標を用いて回帰分析を行い、

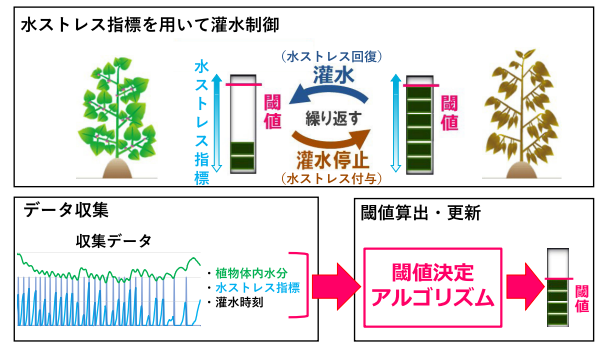


図 1 提案手法の概要

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed method.

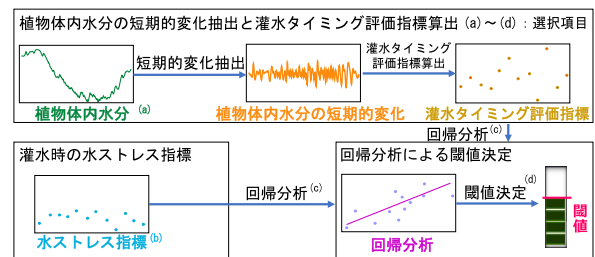


図 2 閾値決定アルゴリズムの概要

Fig. 2 Schematic diagram of threshold determination algorithm.

灌水タイミング評価指標が 0（与えた水ストレス量と灌水で回復した水ストレス量が等しい）となる水ストレス指標の値を算出し、この値を閾値に更新する。また、閾値決定アルゴリズムで使用する一部の指標や回帰分析（図 2 (a)～(d)）、閾値更新条件はユーザである農家が選択することで農家がすでに構築した多様な栽培環境に対応可能となる。

水ストレス指標に対する閾値は、与えた水ストレス量（葉からの蒸散量）と灌水で回復した水ストレス量（根からの吸水量）が等しくなり、各灌水における水ストレス量の過不足がない値が適切だと考える。なぜなら、与えた水ストレス量が灌水で回復した水ストレス量よりも多い場合、植物に水ストレスが蓄積され続け、不可販果実が増加すると考える。反対に、与えた水ストレス量が灌水で回復した水ストレス量よりも少ない場合、植物に十分な水ストレスを与えられず、果実の高糖度化が困難と考える。そのため、閾値決定アルゴリズムでは、灌水後に与えた水ストレス量と灌水で回復した水ストレス量が等しくなる水ストレス指標の値を閾値として算出する。

植物体内水分の変化は、概日運動と呼ばれる 1 日を通した長期的変化 [9] と灌水にともなう短期的変化の 2 つの変化を持つ（図 3）[10]。長期的変化は、灌水の影響に比べて気象環境の影響を大きく受けるため、灌水で制御が困難な変化である [11]。一方で短期的変化は、気象環境にも影響を受けるが、植物に灌水されることで起きる変化であるため、灌水で制御が可能な変化である。具体的に短期的変化は、主に灌水後における根からの吸水による水分変化と



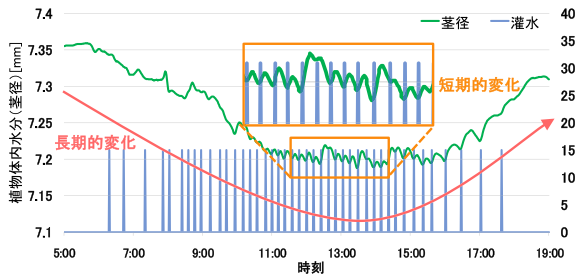


図3 植物体内水分の長期的変化と短期的変化

Fig. 3 Long-term and short-term changes in water content in plants.

吸水後における植物の蒸散による水分変化を表す。そのため、閾値決定アルゴリズムでは日中の灌水による影響が大きい短期的変化のみに着目した閾値決定を行う。

### 3.2.1 植物体内水分指標

植物体内水分指標は、植物体内水分の変化を抽出でき、計測による植物への影響を減らすため非破壊で計測する必要がある。したがって、閾値決定アルゴリズムで用いる植物体内水分指標は、レーザ変位計を用いて非破壊で計測可能な茎径が適切だと考える。また、植物体内水分の状態が顕著に表れる葉の上下運動を定量化することで、植物体内水分の変化を定量化できると考えた。そこで、画像内の物体の動きをベクトル表現可能な OF をカメラで経時的に撮影した草姿画像に適用することで、非破壊で植物体内水分の変化を計測できると考える。OF を用いた新たな植物体内水分指標は 3.3 節で述べる。

植物体内水分指標の計測対象は、農家が設置した水ストレス指標を計測するセンサに可能な限り近い植物体、またはセンサが植物体を計測対象としている場合は、計測している植物体とする。なぜなら、水ストレス指標の変化と植物体内水分指標の変化は気象環境に影響を受けるため、両データの変化を合わせるために気象環境を合わせる必要があるからである。そのため、ハウス内で気象環境に大きな違いがなく水ストレス指標を部分サンプルで収集している場合は、植物体内水分指標も部分サンプルで収集する。複数箇所や全箇所に同じセンサを設置し、灌水判断に各箇所の水ストレス指標を使用している場合は、植物体内水分指標も同数のセンサで計測し各箇所の閾値を算出する。

### 3.2.2 植物体内水分の短期的変化抽出

植物体内水分の短期的変化は、植物体内水分の長期的変化を除去することで抽出する。長期的変化は、植物体内水分の 1 日を通したトレンドと考えることができる。そこで、トレンド除去手法として一般的に用いられる移動平均を用いて長期的変化の除去を行う。植物体内水分の短期的変化は灌水の有無に大きく影響を受けるため、各灌水時刻の時間間隔で変化する。そこで、移動平均を算出する区間は、使用するデータにおける各灌水間隔の最大時間間隔とする。

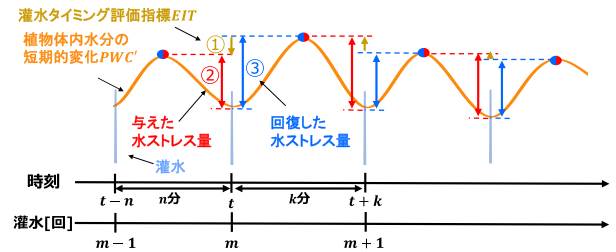


図4 灌水タイミング評価指標算出の概要

Fig. 4 Schematic diagram of calculation of evaluation indicator of irrigation timing.

### 3.2.3 灌水タイミング評価指標算出

灌水タイミング評価指標 (EIT: Evaluation indicator of irrigation timing) は、各灌水で起きた水ストレスの過不足を定量的に表し灌水のタイミングを評価した値で、植物体内水分 (PWC: Plant water condition) の短期的変化 (以下、PWC の短期的変化を  $PWC'$  とする) を用いて算出する。各灌水における灌水タイミング評価指標の算出の概要を図 4 に示す。まず初めに、時刻  $t$  にされた  $m$  回目の灌水に対する与えた水ストレス量 ( $Stress_m$ : 図 4 ②灌水後に与えた水ストレス量、式 (1)) と、灌水で回復した水ストレス量 ( $Recover stress_m$ : 図 4 ③灌水で回復した水ストレス量、式 (2)) を以下のように定義する。

$$Stress_m = \max(PWC'_{t-n}, \dots, PWC'_t) - PWC'_t \quad (1)$$

$$Recover stress_m = \max(PWC'_t, \dots, PWC'_{t+k}) - PWC'_t \quad (2)$$

$Stress_m$  は、時刻  $t-n$  にされた  $m-1$  回目の灌水から時刻  $t$  にされた  $m$  回目の灌水までにおける  $PWC'$  の最大値から時刻  $t$  にされた  $m$  回目の灌水における  $PWC'_t$  を引いた値である。これは、蒸散で減少した水分量を表す。 $Recover stress_m$  は、時刻  $t$  にされた  $m$  回目の灌水から時刻  $t+k$  にされた  $m+1$  回目の灌水までにおける  $PWC'$  の最大値から時刻  $t$  における  $PWC'_t$  を引いた値である。これは、根からの吸水で増加した水分量を表す。続いて、時刻  $t$  にされた  $m$  回目の灌水に対する  $EIT_m$  (図 4 ①) を式 (3) に示す。

$$EIT_m = Stress_m - Recover stress_m \quad (3)$$

$EIT_m$  は、 $m$  回目の灌水に対する  $Stress_m$  から  $m$  回目の灌水に対する  $Recover stress_m$  を引いた値である。このように、与えた水ストレス量 (蒸散量) から灌水で回復した水ストレス量 (吸水量) を引くことで、各灌水に対する水ストレス量の過不足を表現できる。つまり、各灌水に対する灌水タイミングの定量的な評価が実現できる。たとえば、 $EIT = 0$  だった場合、与えた水ストレス量と灌水で回復した水ストレス量が等しいため、適切なタイミングだと評価できる。また  $EIT < 0$  だった場合、与えた水ストレス量

よりも灌水で回復した水ストレス量が多いため、灌水タイミングが早く EIT の値だけ水ストレス指標の値が大きいタイミングが適切だったと評価できる。一方で、 $EIT > 0$  だった場合、与えた水ストレス量よりも灌水で回復した水ストレス量が少ないため、灌水タイミングが遅く EIT の値だけ水ストレス指標の値が小さいときの灌水タイミングが適切だったと評価できる。

### 3.2.4 水ストレス指標

水ストレス指標は、植物が蒸散などによって受ける水ストレスを定量化した指標である。そのため、水ストレス指標に対して閾値を設定することで、植物に閾値以上の水ストレスを与える灌水制御が可能になる。

関連研究で述べたように水ストレス指標にはさまざまな指標がある。そこで、農家が使用している水ストレス指標に対応するため、閾値決定アルゴリズムで用いる水ストレス指標は選択可能とした。これにともない、水ストレス指標を計測するセンサの数や設置位置は、農家に委ねる。

### 3.2.5 閾値算出

閾値算出は、はじめに各灌水に対する EIT と各灌水時の水ストレス指標の値を用いて回帰モデルを構築する。次に、構築した回帰モデルにおける  $EIT = 0$  となる水ストレス指標の値を算出する。最後に、算出した値を閾値とする。これによって、植物に対して灌水後に与えた水ストレス量と灌水で回復した水ストレス量が等しくなる閾値が算出できると考える。また、各灌水の EIT や水ストレス指標が一定の場合、回帰モデルが適切に構築できない。その際は、EIT の平均値または中央値を設定中の閾値から引くことで EIT を 0 に近づける閾値が算出できると考える。さらに、水ストレスを与えない灌水制御を行う場合は、 $EIT < 0$  となる水ストレス指標の値を閾値とすることで、灌水後に与えた水ストレス量と比べ灌水で回復した水ストレス量が多くなり植物に対して水ストレスを与えない灌水制御も可能となる。

### 3.2.6 閾値更新条件

閾値決定アルゴリズムは、植物体内水分の短期的変化に十分な変化がある日中（10時から14時）のデータを用いて、閾値を決定する必要がある。植物体内水分の短期的変化は、植物の蒸散量と吸水量に応じて変化する。また、植物の蒸散量と吸水量は、特定の温度と湿度に対して空気中に含まれる水蒸気量を示す飽差と関係がある [6], [12]。快晴日で日中の飽差が高い場合、植物の蒸散が活発になり、これにともない吸水も活発になることで植物体内水分の短期的変化が大きく現れる。一方、雨天日で日中の飽差が低い場合、植物の蒸散や吸水が活発に行われなため、植物体内水分の短期的変化が十分ではない。そのため、閾値更新条件を日中の飽差が高く植物の蒸散と吸水が活発な日とすることで、適切なデータを用いて閾値を算出できる。以上をふまえ、本研究の対象植物の1つであるトマトの水ス

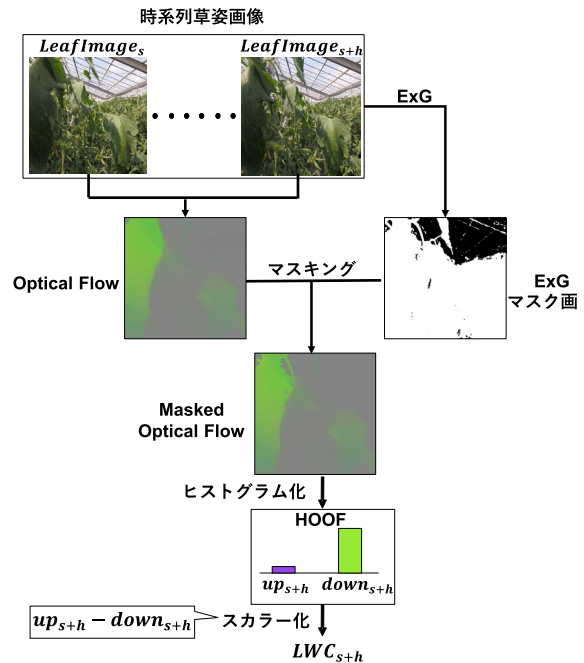


図 5 LWC 算出方法

Fig. 5 LWC calculation method.

トレス栽培における閾値更新条件を、日中（10時から14時）において飽差 2.5 kPa 以上の日とする [13]。そのため、毎日その日の 14 時以降で、遅くとも次の日の日中の時間帯になる前に 10 時から 14 時の飽差を算出し、閾値更新条件で新たな閾値を算出するかを判断する。ここで、閾値更新条件を満たした場合、閾値を算出し閾値の更新を行う。また、栽培する植物によって蒸散と吸水が活発になる飽差の値が異なるため、閾値更新条件を農家の選択を可能とした。

## 3.3 新たな植物体内水分指標 LWC の概要

OF を用いて植物の葉の萎れ具合を定量化した LWC (Leaf wilt condition) を新たな植物体内水分指標として提案する。葉の萎れ具合と茎径は葉の水ポテンシャルに応じて変化すると報告されている [14], [15]。また、茎径の短期的変化は、5 分の間隔がある 2 時点の草姿画像から OF を用いて短期的な葉の萎れを定量化した値と相関があることが報告されている [16]。そこで、植物体内水分が大きく変化する始める前のある特定時刻における草姿画像とその特定時刻以降における草姿画像から OF を用いて 1 日における葉の萎れ具合を定量化することで、1 日における植物体内水分の変化を表現できると考える。そのため、上記のように算出する LWC の有効性を示すため、5.4 節で LWC を茎径との相関分析で基礎評価を行う。

### 3.3.1 LWC の算出

LWC の算出方法を図 5 に示す。LWC の算出には時系列になっている 2 時点の草姿画像を用いる。2 時点の草姿画像のうち 1 時点の草姿画像は、草姿が確認できるほどの明るさで植物の蒸散が活発になり植物体内水分が大きく変

化し始める前の時刻  $s$  における草姿画像で固定する．もう一方の時点における草姿画像は，時刻  $s$  以降の時刻  $s+h$  ( $h \geq 0$ ) の草姿画像とする．時刻  $s+h$  における  $LWC_{s+h}$  の算出ではまず，時刻  $s$  と時刻  $s+h$  の草姿画像を用いて OF を算出する．OF の算出アルゴリズムとして草姿のような非剛体の動きに対応可能な Deep Flow を用いる [17]．次に，草姿以外の OF の検出を防ぐために，RGB 画像における G 成分の比率を示す ExG (Excess green) [18] を用いて，植物領域以外をマスクした OF を生成する．その後，各 OF の角度をビン，大きさを重さでヒストグラム化した HOOF (Histogram of oriented optical flow) を算出する [19]．算出した HOOF を，植物の萎れからの回復を示す上方向のビンにおける HOOF の合計 ( $up_{s+h}$ ) と植物の萎れを示す下方向のビンにおける HOOF の合計 ( $down_{s+h}$ ) を算出する．最後に， $up_{s+h}$  から  $down_{s+h}$  を引くことで  $LWC_{s+h}$  を算出する．以上のように，葉が萎れる前の画像と植物体内水分が減少し葉が萎れたように下方向に動作した画像を用いて現在における葉の萎れ具合を評価することで，植物体内水分の変化を相対的に評価できる．

## 4. 実証実験

### 4.1 実験環境

提案手法の有効性を評価するため，提案手法による灌水制御と熟練農家による灌水制御によって，高糖度トマトの低密度密植養液栽培で実証実験を実施した．本実験では，トマト品種のフルティカがロックウール培地に定植されている静岡県袋井市のトマトハウス内に，灌水制御方法が異なる3つの処理区 (図 6) を用意し，各処理区で収穫されたトマトの糖度と収量を比較した．実験期間は 2018 年 11 月 16 日～2019 年 1 月 15 日で，計測対象トマト株 (図 6, area1～8) に無線散乱光センサ (図 7(a)) [20] を用いた温湿度と日射量の毎分計測，ネットワークカメラ (GoPro Hero5 Session, 図 7(b)) を用いた草姿の毎分撮影，レーザー変位計 (HL-T1, 分解能:  $4\mu\text{m}$ , 図 7(c)) を苗の第 9～10 節間に設置し茎径の毎分計測を行った．また，糖度は選果機 (QSCOPE-T81, 三井金属計測器工) を用いて計測し，収量は重量計で計測した．その際，熟練農家による判断をもとに販売可能な果実である可販果実と販売不可能な果実である不可販果実を分類し，可販果実の収量と不可販果実の収量を計測した．糖度と収量の計測は，2018 年 12 月 15 日 (収穫開始日) から 2019 年 1 月 15 日 (収穫終了日) の間に 12 回実施した．

### 4.2 実験条件

各処理区の灌水制御方法を表 1 に示す．熟練農家処理区は熟練農家が積算日射量を基準に灌水制御を行い，閾値を決定する．閾値固定処理区と提案手法処理区の水ストレス指標は DSR (Difference in stem diameter calculated from

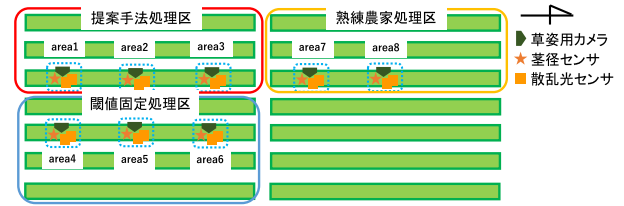


図 6 実験環境図

Fig. 6 Experimental environment diagram.

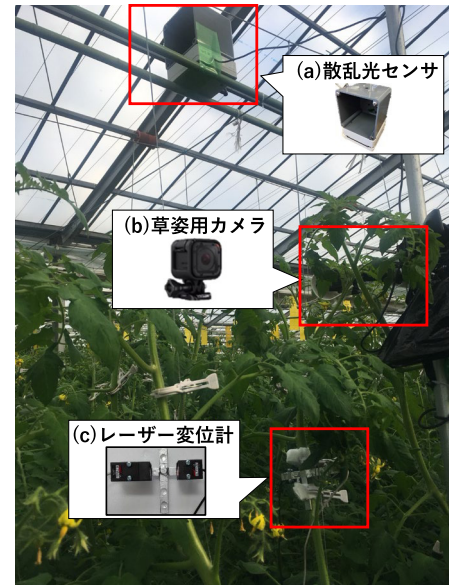


図 7 センサ設置図

Fig. 7 Sensor installation diagram.

表 1 各処理区の栽培条件

Table 1 Cultivation conditions of each treatment zone.

| 処理区                | 株数    | 水ストレス指標   | 閾値決定方法         |
|--------------------|-------|-----------|----------------|
| 熟練農家<br>(従来手法)     | 604 株 | 積算日射量(MJ) | 熟練農家<br>(従来手法) |
| 閾値固定 <sup>*1</sup> | 823 株 | DSR(mm)   | 閾値決定<br>アルゴリズム |
| 提案手法               | 728 株 | DSR(mm)   | 閾値決定<br>アルゴリズム |

\*1: 栽培期間中の閾値を初期値で固定 \*2: 初期値算出に使用

the most recent irrigation) を用いる [21]．時刻  $t$  における  $DSR_t$  の算出式を式 (4) に示す．

$$DSR_t = \max(SD_{t-n}, \dots, SD_t) - SD_t \quad (4)$$

DSR は直前の灌水時刻  $t-n$  以降における最大茎径と現在の茎径  $SD_t$  の差を取ることで，灌水後に植物が与えられた水ストレス量を評価できる．DSR に対する閾値では，閾値固定処理区は初期値から変更を行わず，提案手法処理区は閾値決定アルゴリズムを用いることで植物の体内水分変化に応じた閾値を算出し，初期値から随時更新した．閾値固定処理区と提案手法処理区における閾値の初期値は，



表 2 閾値決定アルゴリズムに使用する選択項目

Table 2 Selectable items used for threshold determination algorithm.

| 選択項目                     | 選択した内容               |
|--------------------------|----------------------|
| (a): 植物体内水分指標            | 茎径                   |
| (b): 水ストレス指標             | DSR                  |
| (c): 回帰分析                | 単回帰分析                |
| (d): 灌水タイミング<br>評価指標 EIT | EIT=0                |
| 閾値更新条件                   | 日中の平均飽差が 2.5kPa 以上の日 |

過去の栽培期間（2018 年 4 月 7 日から 5 月 27 日）に収集したデータから本実験と同条件で閾値決定アルゴリズムを用いて算出し、0.013 mm を初期値とした。提案手法処理区の閾値決定アルゴリズムの設定を表 2 に示す。閾値更新条件は、トマトの蒸散が促進される日中の平均飽差が 2.5 kPa 以上の日とした [13]。閾値更新条件の判定および閾値の算出と更新は毎日、灌水制御が終了する 19 時に行った。時刻  $t$  における飽差 ( $VPD_t$ ) を温度 ( $TEMP_t$ ) と湿度 ( $HUMI_t$ ) を用いて式 (5) で算出した。

$$VPD_t = (1 - HUMI_t / 100) \times \exp(19.0177 - 5327 / TEMP_t + 273.15) \quad (5)$$

各処理区の各日における最初の灌水は、トマトハウスがある静岡県袋井市の日の出時刻を指標として 6 時 20 分 に実施した。また、各処理区における灌水 1 回あたりの灌水量は 15 ml/回とした。

## 5. 実験結果・考察

### 5.1 提案手法処理区における閾値

実験期間中に閾値決定アルゴリズムを用いて算出した提案手法処理区の閾値と各日の灌水で回復した平均水ストレス量の推移を図 8 に示す。図 8 から 12 月 8 日頃まで灌水で回復した水ストレス量が上昇傾向であり、閾値も同様に初めての閾値更新条件を満たした 11 月 21 日から徐々に増加していることが分かる。一方、12 月 9 日頃から灌水で回復した平均水ストレス量が減少傾向にあり、閾値も同様に閾値更新条件を満たした 12 月 23 日から減少傾向になっていることが分かる。また、閾値更新日における灌水で回復した平均水ストレス量と閾値の関係を図 9 示す。灌水で回復した平均水ストレス量と閾値の間に正の相関が確認できる。正の相関があるため、灌水で回復した水ストレス量が増加するほど閾値が増加していることが分かる。したがって、灌水で回復した水ストレス量に応じて閾値が算出されていることが分かる。

灌水で回復した水ストレス量が増減する原因として、飽差と茎径の硬質化があげられる。トマトは飽差が高く蒸散が活発である場合、蒸散量が根からの吸水量を上回るため、

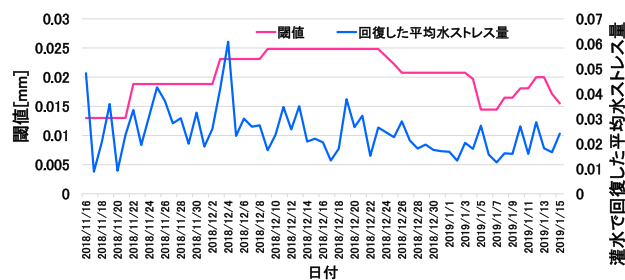


図 8 閾値と灌水で回復した平均水ストレス量の推移

Fig. 8 Changes in threshold and average water stress recovered by irrigation.

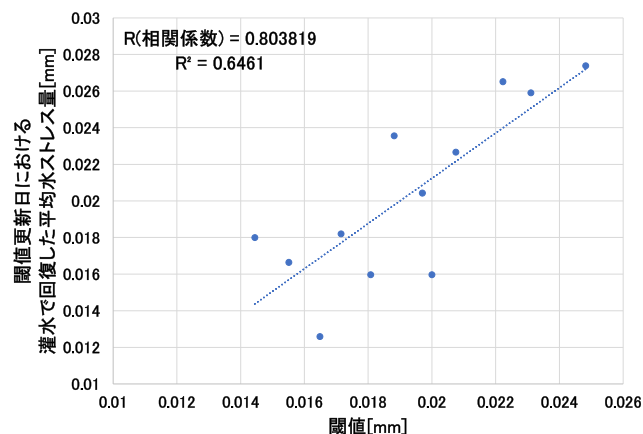


図 9 閾値更新日における灌水で回復した平均水ストレス量と閾値の関係

Fig. 9 Relationship between average water stress recovered by irrigation and threshold on the threshold update date.

灌水で回復する水ストレス量は減少する。反対に、飽差が低い場合は蒸散が活発ではないため、根からの吸水量の方が蒸散量よりも多くなり灌水で回復した水ストレス量が増加する [22]。そこで、各日における灌水で回復した平均水ストレス量と平均飽差の関係を図 10 に示す。図 9 から灌水で回復した平均水ストレス量と平均飽差に負の相関が確認できる。つまり、実験期間および閾値更新日において、各日の平均飽差が高いほど灌水で回復した水ストレス量が減少しており、灌水で回復した水ストレス量は飽差に影響を受けることが分かる。また、2.3 節で述べたとおり、植物の生長が進むと茎径が硬質化することで、実際に植物が受けている水ストレス量に対して変化する茎径の変位量が減少してしまう。本実験においては、12 月 9 日頃から灌水で回復した平均水ストレス量が減少している。12 月 9 日は収穫開始の 6 日前であり十分に植物の生長が進んでおり、茎径の硬質化が起こっていたと考える。そのため、茎径の硬質化にともない茎径の変化量が減少し、茎径から抽出される灌水で回復した平均水ストレス量が減少したと考える。

以上より、植物体内水分の変化に応じて閾値を算出することで、茎径の硬質化や灌水で回復した水ストレス量の変化を考慮して閾値を算出することができた。

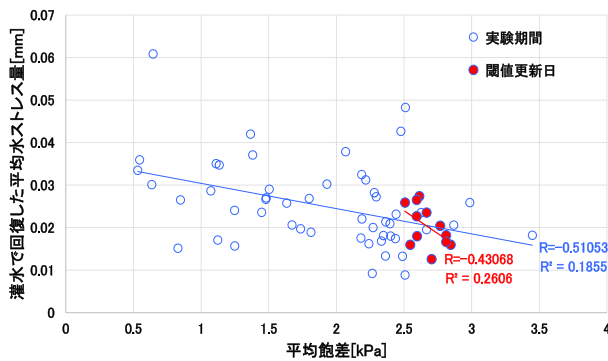


図 10 各日における灌水で回復した平均水ストレス量と平均飽差の関係

Fig. 10 Relationship between average water stress recovered by irrigation and vapour pressure deficit.

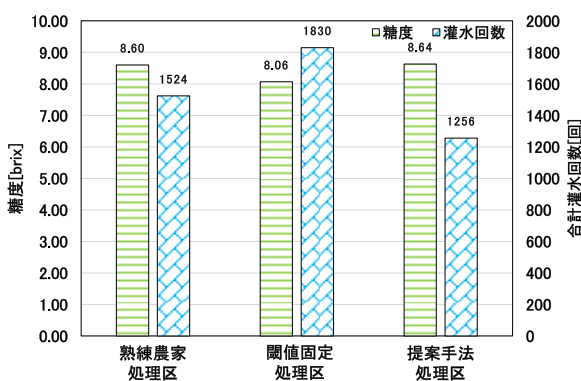


図 11 各処理区における糖度の結果と合計灌水回数

Fig. 11 Sugar content and total number of irrigation in each treatment zone.

## 5.2 糖度および収量

各処理区における収穫時の糖度および合計灌水回数を図 11 に示す。提案手法処理区の平均糖度は、8.64 brix と全処理区の中で最も高く、熟練農家処理区と比べ 0.04 brix、閾値固定処理区と比べ 0.58 brix 高かった。また、一般的にトマトは灌水量が少ないほど水ストレスが与えられるため、糖度が高くなる傾向がある [23]。実際に、灌水回数が少なく灌水量（15 ml/回）が少ない処理区ほど糖度が高いことが分かる。閾値固定処理区は閾値を固定にしたため、植物体内水分の変化を考慮した灌水ができず他の処理区と比べ、灌水回数が多く糖度が低くなったと考える。一方、熟練農家処理区と提案手法処理区は、閾値固定処理区よりも高糖度なトマトを栽培できたため、植物体内水分の変化を考慮して適切な閾値で灌水制御ができたと考える。

可販果実と不可販果実の収量割合を図 12 に示す。可販果実の収量割合も提案手法処理区が最も高く 96.2%であり、熟練農家処理区と比べ 14.3%高く、閾値固定処理区と比べると 0.6%高かった。各処理区で発生した主な生理障害は尻腐れ（カルシウム欠乏症）と裂果であった。これをふまえ、提案手法処理区は、閾値決定アルゴリズムを用いて植物体内水分の変化に応じて閾値を更新することで、高糖度

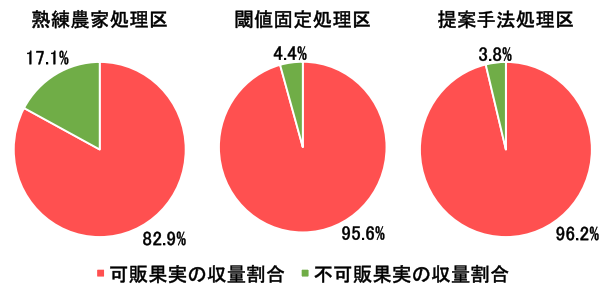


図 12 各処理区における可販果実と不可販果実の収量割合

Fig. 12 Yield ratio of available and unsold fruits in each treatment zone.

を維持し灌水過多で発生する裂果を減らし可販果実収量の割合を熟練農家処理区と比べ増加できたと考える。閾値固定処理区は、灌水回数が多いため養液からカルシウムを含む養分を吸収できたことから尻腐れを防ぐことができ、可販果実の割合が熟練農家処理区と比べ増加したと考える。一方、熟練農家処理区は、水ストレス指標に積算日射量を使用しているため、植物体の考慮が不足しており適切なタイミングでの灌水が行われず、尻腐れや裂果が増加し可販果実の割合が減少したと考える。

## 5.3 各処理区における灌水タイミング評価指標 EIT

各処理区における灌水タイミング評価指標 EIT の箱ひげ図と統計量を図 13 および表 3 に示す。EIT は、実験期間の各日における日中（10 時から 14 時）のデータを使用し算出した。どの処理区とも EIT の平均と中央値は 0 付近となっており有意差が見られなかったが、分散では各処理区間で等分散性が見られなかった。閾値固定処理区の EIT の分散が提案手法処理区よりも大きくなった主な原因としては、茎径の硬質化と環境変化の考慮不足だと考える。5.1 節でも述べたように茎径の硬質化と気象環境の変化によって植物体内水分指標である茎径の変位量が変化するため、閾値を固定した場合だと、閾値が茎径と気象環境の変化に追従できず EIT の分散を抑えた灌水制御が困難であったと考える。一方、提案手法処理区は、与える水ストレス量と灌水で回復する水ストレス量を等しい閾値を随時算出し更新することで、茎径と気象環境の変化に追従し過剰な灌水を防ぎつつ EIT の分散を抑えた灌水制御ができたと考える。その結果、高糖度なトマトを栽培することができた。

図 12 と図 13、表 3 から、不可販果実の割合が低い処理区ほど EIT の分散が小さくことが分かる。各灌水で EIT のばらつきが大きい場合、各灌水で植物の水ストレス量に過不足が起き、不可販果実が増加したと考える。従来手法である熟練農家処理区が提案手法よりも EIT の分散が大きくなった原因は、植物体内水分量の変化の考慮が不十分な灌水制御だと考える。なぜなら、熟練農家処理区は、熟練農家が植物の萎れ具合や灌水の廃液量から経験と勘をもとに閾値を決定しているため、植物体内水分量の変化を正



確に把握することが困難である。その結果、提案手法処理区よりも EIT の分散が 0.0004 mm 増加してしまい、不可販果実が増加したと考える。一方、提案手法処理区では、レーザ変位計で植物の茎径を計測し、植物体内水分量の変化を熟練農家よりも正確に把握することで EIT の分散を

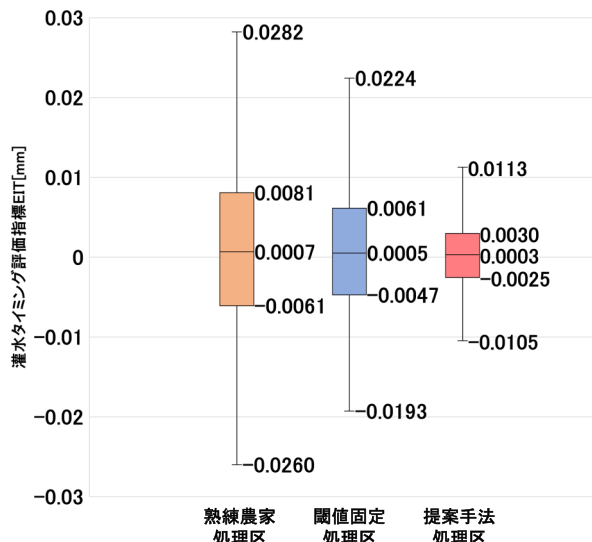


図 13 各処理区における灌水タイミング評価指標 EIT の箱ひげ図  
Fig. 13 Boxplot of evaluation indicator of irrigation timing for each treatment zone.

表 3 各処理区における EIT の統計量

Table 3 Statistics of EIT in each treatment zone.

| 処理区  | 灌水タイミング評価指標 EIT (mm) |           |          |          |
|------|----------------------|-----------|----------|----------|
|      | 時点数                  | 平均値       | 中央値      | 分散       |
| 熟練農家 | 287                  | 0.0012 a* | 0.0007 a | 0.0005 a |
| 閾値固定 | 305                  | 0.0007 a  | 0.0005 a | 0.0002 b |
| 提案手法 | 206                  | 0.0004 a  | 0.0003 a | 0.0001 c |

\* : 異なる小文字英文字との間に 5%水準で有意差あり

抑えた制御できた。その結果、水ストレス量の過不足や灌水量の過多や過少で発生する尻腐れや裂果の数を減らすことができたと考える。

以上より、与える水ストレス量と灌水で回復する水ストレス量が等しくなるように灌水制御した提案手法の有効性が示された。

## 5.4 LWC の基礎評価

### 5.4.1 基礎評価の方法

LWC の有効性を示すため、植物体内水分と密接に関係のある茎径と LWC の関係を確認する。そこで、本稿で検討した LWC と茎径の相関分析で LWC の基礎評価を行う。相関分析には、図 5 における全 area で日射量が最も多かった area1 の栽培実験期間である 2018 年 11 月 16 日から 2019 年 1 月 16 日のデータを用いた。相関係数は各日で 7 時から 17 時の LWC と茎径のデータを使用し、各日の LWC と茎径の相関係数を算出した。また、LWC 算出時に用いる時刻 s の草姿画像を草姿が確認でき、蒸散量が比較的少なく葉が大きく萎れ始める前であった午前 7 時の草姿画像とした。

### 5.4.2 基礎評価の結果

area1 の茎径と LWC の推移と相関係数の箱ひげ図を図 14 に示す。相関係数の平均値、中央値、最大値は 0.59, 0.68, 0.94 であり LWC と茎径が強い相関を示した。LWC と茎径の推移から LWC が茎径と同様な長期的変化と短期的変化を示している。以上より、植物体内水分指標として有効であることが示唆された。

## 5.5 高糖度トマト栽培以外に対する適用の可能性

提案手法を用いることで、ミカンやナシ、ブドウなどの多くの果物に適用の可能性があると考える。なぜなら、トマトの茎径の変化がこれらの植物と酷似しているという報告があるからである [10]。したがって、これらの植物の茎

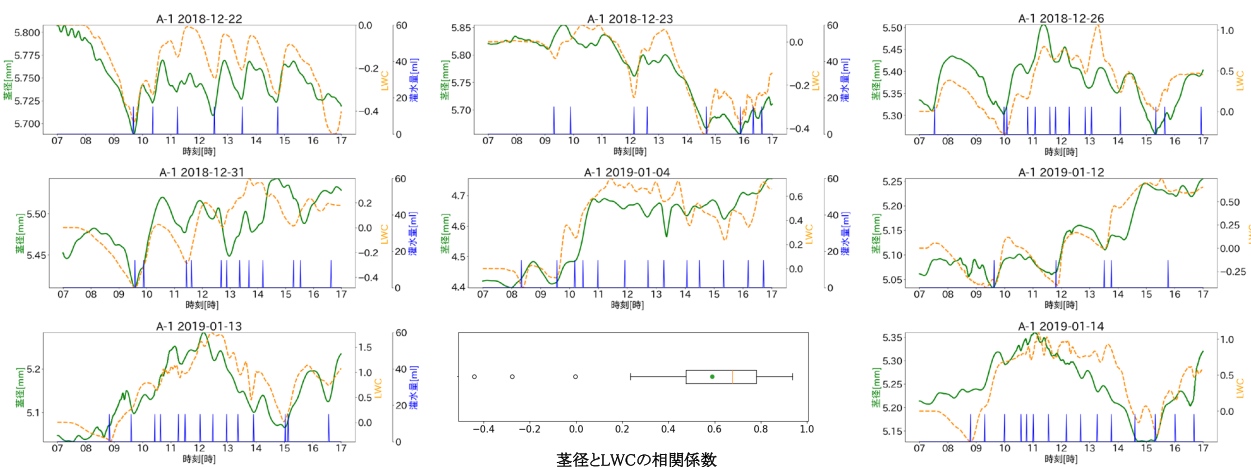


図 14 茎径と LWC の推移と相関係数の箱ひげ図

Fig. 14 Changes in stem diameter and LWC and Box plot of correlation coefficient.

径を測定し植物体内水分量の変化に応じて閾値を更新することによって適切な水ストレスを与え高糖度で不可販果実を少なく栽培することができると考える。

## 6. おわりに

本研究では、長年の栽培経験で培われた熟練農家の経験と勘が必要であった閾値の調整を閾値決定アルゴリズムを用いることで、新規就農者にも容易に高品質な果実を安定して栽培できる灌水制御手法を提案した。提案手法の有効性を実証するために、高糖度トマト栽培における提案手法と熟練農家の比較実験を行った。その結果、提案手法で栽培したトマトは閾値決定アルゴリズムにより植物体内水分の変化に応じた閾値を算出し更新することで、熟練農家が栽培したトマトと同等以上の糖度となった。さらに、提案手法は熟練農家よりも可販果実の収量を増加させることができた。

以上から、提案手法の有効性が示され、閾値決定アルゴリズムを用いることで、新規就農者であっても高品質な果実を栽培可能であることを示した。また、新たな植物体内水分の検討として OF を用いて植物の葉の萎れ具合を定量化した LWC と茎径の相関分析を行った。その結果、相関係数の平均値、中央値、最大値が 0.59, 0.68, 0.9 であったことから新たな植物体内水分指標として有効であることが示唆された。

今後の課題として、日中の灌水制御においてリアルタイムに閾値を調整する必要があると考える。5.1 節で述べたように灌水で回復する水ストレス量は飽差で変化したことから、日中における飽差の変化でも変わることが考えられる。そのため、日中の灌水制御において、現在時刻の気象環境データなどを用いて現在の飽差に適した閾値をリアルタイムで算出し更新しながら灌水制御を行うことが考えられる。

今後は LWC の詳細分析および LWC が植物体内水分量の指標として有効であることを実証するために、LWC を用いた高糖度トマト栽培実験を行う。その後、リアルタイムに閾値を更新する灌水制御手法を検討する。

**謝辞** 本研究は JST さきがけ (JPMJPR15O5) の支援を受けて実施したものである。また、実験環境を提供していただいた株式会社 Happy Quality の宮地様、サンファーム中山株式会社の玉井様に深い感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] Kaneda, Y. et al.: Multi-modal sliding window-based supportvector regression for predicting plant water stress, *Knowledge-Based Syst.*, Vol.134, pp.135-148 (2017).
- [2] 中野和弘, 川上卓男, 大塚雅雄ほか: ハウス内環境の制御システムに関する研究 (第 4 報), *農業施設*, Vol.31, No.3, pp.163-170 (2000).
- [3] 新田益男, 澁谷和子, 玖波井邦昭ほか: 日射比例かん水制御装置の開発および高糖度トマトの根域制限栽培への適合性, *高知農技セ研報*, Vol.18, pp.31-38 (2017).
- [4] 大石直記: トマトの養液栽培における水分ストレスに応じた給液制御システムの開発 (2) —茎径変化を利用した給液制御, *生物環境調節*, Vol.40, No.1, pp.91-98 (2002).
- [5] 星川和俊, 長 智男, 黒田正治: 土壌水分条件を考慮する植物生産力の推定法—農業地域における生産力評価に関する基礎的研究 (IV), *農業土木学会論文集*, Vol.134, pp.19-26 (1988).
- [6] 細野達夫, 細井徳夫: 施設養液栽培長段トマトの日吸水量, *農業気象*, Vol.58, No.4, pp.207-216 (2002).
- [7] 大石直記: トマトの養液栽培における水分ストレスに応じた給液制御システムの開発 (1) —茎径変化による水分ストレスの非破壊評価, *生物環境調節*, Vol.40, No.1, pp.81-89 (2002).
- [8] 仁科弘重, 吉田 孝, 長友亨治, 三好正直ほか: ロックウール粒状綿を利用した養液栽培システムにおける高糖度トマト生産 (第 1 報) 水切り下における植物生体情報の測定と解析, *植物工場学会誌*, Vol.10, No.2, pp.113-118 (1998).
- [9] Meng, Z., Duan, A., Chen, D., Bandara, K., et al.: Suitable indicators using stem diameter variation-derived indices to monitor the water status of greenhouse tomato plants, *PloS One*, Vol.12, No.2 (2017).
- [10] 岩田憲三, 高野泰吉: 植物生体情報の計測手法の開発とその応用に関する研究 (第 2 報) 植物体内水分動態の諸特性, *生物環境調整*, Vol.26, No.4, pp.163-170 (1988).
- [11] Ohashi, Y., Nakayama, N., Saneoka, H., et al.: Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants, *Biol. Plant.*, Vol.50, No.1, pp.138-141 (2006).
- [12] 鈴木茂敏, 高野泰吉: 環境要因と養液栽培で育てられたトマトにおける光合成と蒸散の日変化, *名城大学農学部学術報告*, Vol.37, pp.135-145 (2001).
- [13] Chanseetis, C., Shinohara, Y., Maruo, T., Takagaki, M., et al.: An Estimation of Tomato Transpiration for Effective Fertigation Management System Using Integrated Solar Radiation and Vapor Pressure Deficit, *Environ. Control Biol.*, Vol.43, No.2, pp.105-112 (2005).
- [14] 藤野素子, 遠藤良輔, 大政謙次: きゅうり葉における水ストレスの非破壊計測 1 にする研究—分光反射率, 気孔コンダクタンス, PSil Yield および形状の変化の比較, *農業情報研究*, Vol.11, No.2, pp.161-170 (2002).
- [15] 長野敏英, 島地英夫: 植物の水分状態とその制御に関する研究 (2) 水分状態の測定と水ストレスがヒマワリ葉の蒸散速度・根の呼吸速度および ABA 生成におよぼす影響について, *生物環境調節*, Vol.16, No.3, pp.93-100 (1978).
- [16] Wakamori, K. and Mineno, H.: Optical Flow-Based Analysis of the Relationships between Leaf Wilting and Stem Diameter Variations in Tomato Plants, *Plant Phenomics* (online), DOI: 10.34133/2019/9136298 (2019).
- [17] Weinzaepfel, P., Revaud, J., Harchaoui, Z., et al.: Deep-flow: Large displacement optical flow with deep matching, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.1385-1392 (2013).
- [18] Meyer, G.E. and Neto, C.J.: Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.63, No.2, pp.282-293 (2008).
- [19] Chaudhry, R., Ravich, A., Hager, G., et al.: Histograms of oriented OF and binet-cauchy kernels on nonlinear dynamical systems for the recognition of human actions, *CVPR*, pp.1932-1939 (2009).
- [20] Ibayashi, H., Kaneda, Y., Mineno, H., et al.: A Reli-

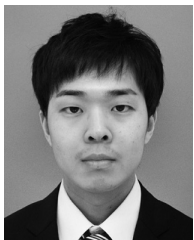
able Wireless Control System for Tomato Hydroponics, *MDPI Sensors*, Vol.16 (2016).

- [21] Wakamori, K., Mizuno, R., Nakanishi, G., et al.: Multimodal neural network with clustering-based drop for estimating plant water stress, *Science Direct* (online), DOI: 10.1016/j.compag.2019.105118 (2019).
- [22] Fusao, K.: Effect of soil moisture on diurnal variation of water content in tomato plant, *Tokai Branch Soc. Agric. Meteorol.*, Vol.52, pp.13-16 (1994).
- [23] 馬西清徳, 上田英臣, 福元康文ほか: 灌水量の違いがトマト作物体および果実に及ぼす影響, 高知大学学術研究報告, Vol.43, pp.33-40 (1994).



後藤 将弥 (学生会員)

2019 年静岡大学情報学部卒業. 同年同大学大学院総合科学技術研究科進学. 植物生育と栽培環境に自律順応する灌水制御手法に関する研究に従事.



水野 涼介

2018 年静岡大学情報学部卒業. 同年同大学大学院総合科学技術研究科進学. 植物収穫時品質や収量に関連する経時特徴量分析手法に関する研究に従事.



峰野 博史 (正会員)

1999 年静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了. 同年日本電信電話(株)入社. NTT サービスインテグレーション基盤研究所を経て, 2002 年 10 月静岡大学情報学部助手, 2006 年九州大学大学院システム情報科学部府博士(工学). 2011 年 4 月より静岡大学情報学部准教授. モバイルコンピューティング, センサネットワーク応用システムに関する研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員.