

植物生育と栽培環境に順応する灌水制御手法の提案

後藤将弥¹ 水野涼介¹ 若森和昌¹ 峰野博史²

概要: 近年, 熟練農家の経験と勘に基づく高度な栽培技術を ICT で自動化する研究が進められている。栽培技術の中でも, 高品質な果実を栽培する水ストレス栽培では, 様々な水ストレス指標を用いる灌水制御方法が提案されてきた。しかし, 既存手法では水ストレス指標に対して閾値を設定することで灌水制御を行うため, 適切な閾値の決定には熟練農家の経験と勘が必要であった。そこで, 本研究では閾値決定アルゴリズムを用いた植物生育と栽培環境に順応する灌水制御手法を提案し, 閾値決定アルゴリズムで用いる植物体内水分量の新たな指標の検討を行う。提案手法は, 任意の水ストレス指標を用いて灌水制御を行い, 閾値決定アルゴリズムを用いて植物生育や栽培環境に応じた閾値を随時算出し更新することで, 植物生育と栽培環境に順応する灌水制御を実現する。高度な栽培技術が必要な高糖度トマト栽培における熟練農家と提案手法の比較実験を行ったところ, 提案手法では, 閾値が植物生育と栽培環境に応じて算出でき, 熟練農家が栽培した果実と同等以上の糖度の果実を栽培できた。さらに, 可販果実の収量割合を熟練農家と比べ 14.3%増加させることに成功した。また, Optical Flow を用いた植物の葉の萎れ具合を定量化した指標 LWC(Leaf wilt condition)を新たな植物体内水分量の指標として検討するため, LWC と茎径の相関分析をしたところ, 平均相関係数が 0.47 で, 最大相関係数が 0.94 であったことから, LWC の有効性が示唆された。

Proposal of irrigation control method adapted to plant growth and cultivation environment

MASAYA GOTO¹ RYOSUKE MIZUNO¹ KAZUMASA WAKAMORI¹
HIROSHI MINENO²

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新規就農者の減少にともない, 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, 新規就農者への継承は難しく, 高度な栽培技術は喪失の危機にある。この問題を解決するため, ICT を用いて高度な技術が必要な栽培を自動化する研究が進められている[1]。例えば, 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, 植物に水ストレス(乾き状態)を与える灌水制御を行う。そのため, 農業従事者が植物の状態を正確に見極め, きめ細やかな灌水を行う必要がある。そこで, 植物に与えられている水ストレス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, 自動的に灌水制御を行う研究が注目されている。水ストレス指標を用いた灌水制御手法として, 土壌水分量に基づく灌水制御手法[2], 日射量に基づく灌水制御手法[3], 茎径に基づく灌水制御手法が提案されてきた[4]。しかし, 既存手法は水ストレス指標に対する閾値を熟練農家の経験と勘で決定する必要があるため, 新規就農者には閾値決定が困難である。

本研究では, 熟練農家の経験と勘が必要ない植物生育と栽培環境に順応する灌水制御を実現するため, 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。閾値決定アルゴリズムでは, 植物体内水分量を表現する指標を用いることで植物生育と栽培環境に応じた閾値が算出できる。また, 植物体内水分量は葉の萎れのような動きで表現可能と考え, 経時的な草姿画像間の葉の動きをベクトルで表現した Optical Flow (以下「OF」と称する)を用いて植物体内水分量を表現可能か検討する。

以降, 第 2 章では関連研究を述べ, 第 3 章では提案手法および閾値決定アルゴリズムについて説明する。第 4 章では実証実験結果を述べ, 第 5 章では OF を用いた植物生育量の指標に対する検討結果を述べる。最後に第 6 章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

2.1 土壌水分量に基づく灌水制御手法

土壌水分量に基づく灌水制御[2]では, 土壌内に含まれている水分量を水ストレス指標として灌水制御を行う。[2]は, 根からの給水量と密接な関係がある土壌水分量を計測することで, 植物の水ストレスに応じた灌水制御が可能となる。土壌水分量の計測方法は, テンシオメーター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

1 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
2 静岡大学学術院情報学領域
College of Informatics, Academic Institute, Shizuoka University

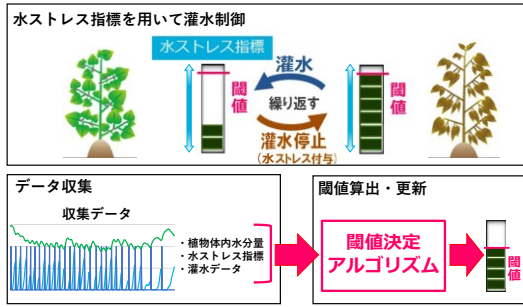


図1 提案手法の概要図

ンシオメーターを用いた計測は、湿潤な土壤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壤においても計測可能である。しかし、水ストレス栽培では、植物に適度な水ストレスを与えるために少量の灌水を多頻度で行うことが想定される。そのため、土壌水分量は不均等になりやすく、土壌水分量を正確に計測するには、テンシオメーターや誘電土壌水分計を土壤の複数箇所に設置する必要がある。また、土壌水分量に対して設定する閾値は培地の種類で適切な値が異なるため、閾値決定が困難である。

2.2 日射量に基づく灌水利制御手法

日射量に基づく灌水利制御[3]では、直前の灌水時刻から現在までにおける日射量の積算値を水ストレス指標として灌水利制御を行う。植物は蒸散量が根からの給水量を上回り植物体内水分量が減少することで水ストレスが与えられる。蒸散量が給水量を上回る要因の一つとして、気象環境がある。日射量が多い晴れの日では、植物の蒸散が活発になり蒸散量が増えるため、蒸散量が給水量を上回る。一方、日射量が少ない雨や曇りの日では、植物の蒸散が活発に行われず、蒸散量が給水量を上回することは少ない。日射量に基づく灌水利制御では、気象環境における日射量の変化に基づくことで蒸散量の変化を考慮でき、植物の水ストレスに応じた灌水利制御が可能となる。しかし、蒸散量は飽差、風速等によっても変化するため、日射量のみで植物の水ストレスを十分に考慮した灌水利制御は困難である。また、日射量の積算値に対する閾値は気象環境や季節に応じて適切な値が異なるため、閾値決定が困難である。

2.3 茎径に基づく灌水利制御手法

茎径の変化に基づく灌水利制御[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利制御を行う。茎径の変化は植物体内水分量の変化と密接に関係があるため、茎径をレーザ変位計で非破壊かつ経時的に計測することで植物の水ストレスに応じた灌水利制御が可能となる [5]。しかし、RSD が閾値を超え続けた場合、一定時間間隔での灌水利制御となってしまう、水ストレスに応じた灌水が困難となる。したがって、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利制御が困難である。さらに、茎径の変化は気象環境や

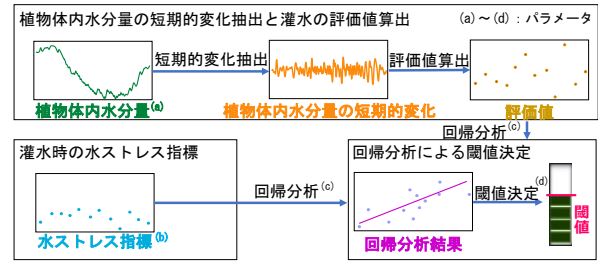


図2 閾値決定アルゴリズムの概要図

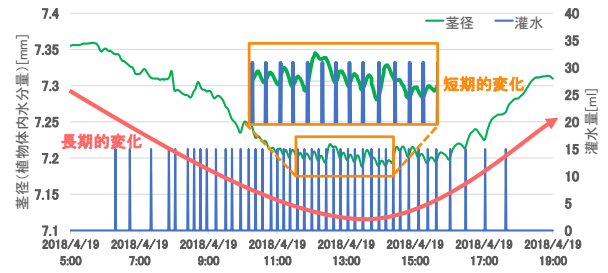


図3 植物体内水分量の長期的変化と短期的変化

苗の成長により変化が異なるため適切な閾値決定が困難である[6]。

3. 提案手法

3.1 概要

本研究では、水ストレス指標に対する閾値を栽培期間中に植物生育や栽培環境に応じて変化する植物体内水分量の変化に応じて算出し随時更新することで、植物生育と栽培環境に順応する灌水利制御手法を提案する。

提案手法の概要図を図1に示す。提案手法は、まず任意の水ストレス指標を用いた灌水利制御を行い、栽培中に収集したデータ（植物体内水分量、水ストレス指標、灌水データ）から閾値決定アルゴリズムを用いて閾値を算出し、水ストレス指標に対する閾値を算出された閾値に更新する。また、閾値更新条件を設けることで、不適切なデータで算出された閾値に更新されることを防ぐことができる。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生育と栽培環境に応じた灌水利制御が可能となる。

3.2 閾値決定アルゴリズム

閾値決定アルゴリズムの概要図を図2に示す。閾値決定アルゴリズムは、植物体内水分量の変化から閾値を決定する、データ駆動型のアルゴリズムであり、以下の3.2.1～3.2.6により構成される。植物体内水分量の変化には、概日運動と呼ばれる1日を通した長期的変化と灌水にともなう短期的変化が存在する(図3)[7]。長期的変化は、気象環境に応じた変化なため、灌水で制御が困難な変化である[8]。そこで、短期的変化のみに着目しより灌水にともなう植物

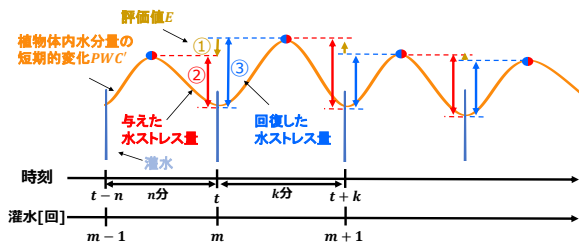


図4 評価値算出の概要図

体内水分量の変化を捉えるため、閾値決定アルゴリズムは、まず植物体内水分量の短期的変化を抽出する。次に、抽出した短期的変化から各灌水のタイミングを評価した評価値 E を算出し、算出した評価値 E と灌水時の水ストレス指標の値を用いて閾値を決定する。また、閾値決定アルゴリズムにはパラメータ(図2(a)~(d))と閾値更新条件が存在し、植物生育や栽培環境などに応じてパラメータを選択することで、多様な条件に対応可能となる。

3.2.1 植物体内水分量の指標

植物体内水分量を計測することにより、水ストレスの変化を抽出できる。植物体内水分量は、計測による植物への影響を減らすため非破壊かつ経時的に計測できる必要がある。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量の指標として、第2章で述べた茎径が考えられる。また、OFを用いた新たな植物体内水分量の指標を第5章で検討する。

3.2.2 水ストレス指標

水ストレス指標は、植物に与えられている水ストレスを定量化した指標である。そのため、水ストレス指標に閾値を設定することで、植物に一定の水ストレスが与えられると灌水を行う灌水制御が可能になる。しかし、水ストレス指標はデータの収集周期や灌水設備などによっては、閾値の値に達した瞬間に灌水を行うには困難である。そのため、閾値決定アルゴリズムで用いる際には、実際に灌水された時刻の灌水データを用いて各灌水時刻における水ストレス指標の算出を行う。また、関連研究で述べたとおり水ストレス指標にはさまざまな指標があるため、閾値決定アルゴリズムで用いる水ストレス指標はパラメータとした。

3.2.3 植物体内水分量の短期的変化抽出

植物体内水分量の短期的変化は、植物体内水分量の長期的変化を除去することで抽出する。長期的変化は、植物体内水分量の1日を通したトレンドと考えられる。そこで、長期的変化の除去ではまず、トレンド分析に用いられる移動平均を植物体内水分量に対して算出する。移動平均を算出する区間は、短期的変化が各灌水の間隔で変化するため、3.2.6で述べる閾値更新条件を満たしたデータにおける灌水の最大間隔とする。次に、算出された植物体内水分量の移動平均を植物体内水分量から引くことで長期的変化を除去し、短期的変化を抽出する。



図5 実験環境図

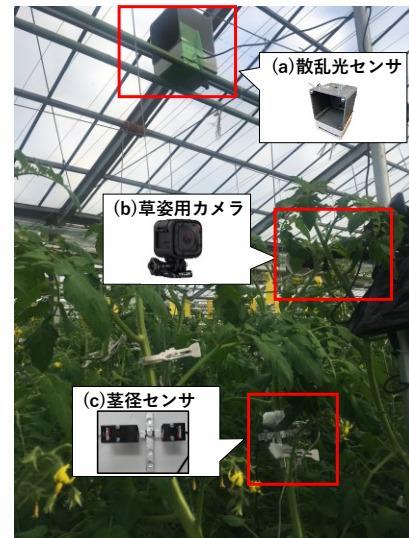


図6 センサ設置図

3.2.4 評価値算出

評価値 E は、各灌水のタイミングを評価した値とし、植物体内水分量 PWC (Plant water condition) の短期的変化 PWC' を用いて算出する。評価値算出の概要図を図4に、時刻 t にされた m 回目の灌水に対する評価値 E_m を式(1)に示す。

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

時刻 t にされた m 回目の灌水に対する評価値 E_m (図4①) 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植物体内水分量の短期的変化 PWC' の最大値から時刻 t における植物体内水分量の短期的変化 PWC'_t を引いた値(図4②与えた水ストレス量)と、時刻 t にされた m 回目の灌水のから時刻 $t+k$ にされた $m+1$ 回目の灌水までにおける植物体内水分量の短期的変化 PWC' の最大値から時刻 t における植物体内水分量の短期的変化 PWC'_t を引いた値(図4③灌水で回復した水ストレス量)の差である。各灌水に対して、灌水までに与えられた水ストレス量と灌水で回復した水ストレス量を比較することで、各灌水のタイミングを評価できる。

3.2.5 閾値算出

閾値は、各灌水に対する評価値と各灌水時の水ストレス指標の値を用いて評価値 $E=0$ となる閾値を算出することで、灌水までに与えられ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を算出できる。そこで、各灌水に対する評価値と各灌水時の水ストレス指標の値で回

表 1 各処理区の栽培条件

処理区	株数	水ストレス指標	閾値決定方法
熟練農家	604 株	積算日射量(MJ)	熟練農家
閾値固定 ^{*1}	823 株	DSR(mm)	閾値決定 アルゴリズム ^{*2}
提案手法	728 株	DSR(mm)	閾値決定 アルゴリズム

*1: 閾値を初期値で固定 *2: 初期値算出に使用

帰分析を行い、算出された回帰式を用いて評価値 $E = 0$ となる水ストレス指標の値を算出し、算出された水ストレス指標の値を閾値とする。また、各灌水の評価値が一定などの回帰式が適切に算出不可な場合は、評価値の平均値を設定中の閾値から引くことで評価値 E を 0 に近づける閾値が算出できる。さらに、植物生育において水ストレスを与えない期間の場合は、評価値 $E < 0$ となる水ストレス指標の値を閾値とすることで、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が可能となる。

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量に変化のあるデータを用いることで、植物に適切な水ストレスを与えられる閾値を決定する。植物体内水分量の変化は、気象環境に影響を受ける特性がある。快晴の日における日中の時間帯は植物の蒸散が活発になり、水ストレスが与えられ植物体内水分量が変化する。一方、雨天の日は植物の蒸散が活発に行われず、水ストレスが与えられないため、植物体内水分量はあまり変化しない。そのため、閾値決定アルゴリズムで植物の蒸散が活発であった日かつ植物の蒸散が活発である時間帯のデータであることを閾値更新条件として閾値を算出し、閾値を更新することで適切な閾値で灌水制御が可能となる。

4. 実証実験

4.1 実験環境

提案手法の有効性を実証するため、高糖度トマト栽培における熟練農家との比較実験を実施した。本実験では、トマト品種「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ヶ所の処理区(図 5)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 16 日で、計測対象トマト株(図 5area1～8)に無線散乱光センサノード(図 6 (a)) [9]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 6 (b))を用いた草姿の毎分撮影、茎径センサ (HL-T1, 分解能:4 μ m, 図 6 (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、糖度計測は選果機

表 2 閾値決定アルゴリズムに使用するパラメータ

パラメータ	選択されたパラメータ
(a): 植物体内水分量の指標	茎径
(b): 水ストレス指標	DSR
(c): 回帰分析	単回帰分析
(d): 閾値算出時評価値 E	$E=0$
閾値更新条件	平均飽差 VPD ≥ 2.5 kPa以上の日 における 10 時～14 時のデータ

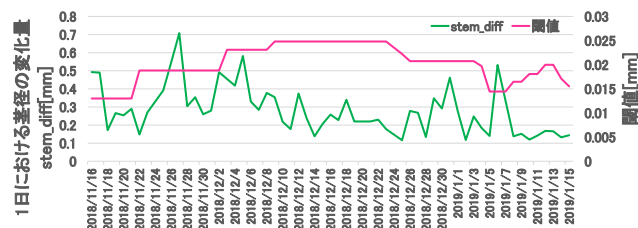


図 7 閾値の推移と茎径の変化量

(QSCOPE-T81, 三井金属計測器工)を用いて計測し、収量は、熟練農家が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それぞれの収量を重量計で計測した。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 16 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。閾値固定処理区と提案手法処理区において水ストレス指標 DSR (Difference in stem diameter calculated from the most recent irrigation) を用いる。時刻 t における DSR_t の算出式を式(2)に示す。

$$DSR_t = \max(SD_{t-n}, \dots, SD_t) - SD_t \quad (2)$$

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。

熟練農家処理区の閾値は熟練農家が決定し、閾値固定処理区の閾値は初期値から変更を行わず、提案手法処理区の閾値は閾値決定アルゴリズムを用いて閾値を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、過去の栽培期間(2018 年 4 月 7 日から 5 月 27 日)に収集したデータを閾値決定アルゴリズムに適用することで算出し、0.013mm を初期値とした。また、各処理区の 1 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。

提案手法処理区の閾値算出に用いるパラメータを表 2 に示す。閾値更新条件は、トマトの蒸散が促進される飽差が 2.5kPa 以上の日で[10]、算出に用いるデータは日射量の多

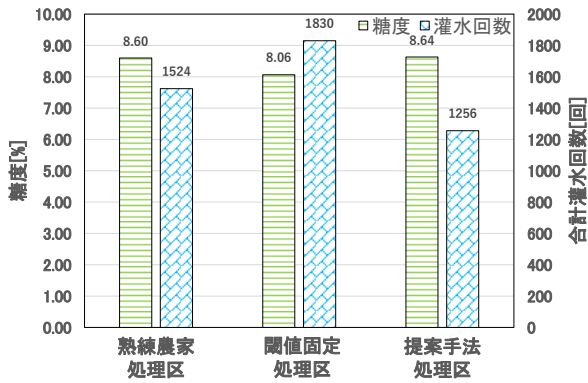


図 8 各処理区における糖度の結果と合計灌水回数

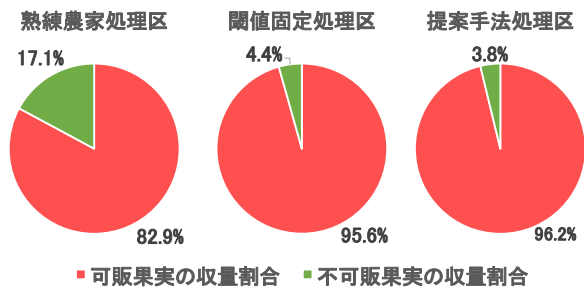


図 9 各処理区における可販果実と不可販果実の収量割合

い 10 時から 14 時のデータとした。飽差はある温度と湿度の空気にどれほど水蒸気の入る余地があるかを示す指標である。時刻 t における飽差 VPD_t を式 (3) を用いて温度 ($TEMP_t$) と湿度 ($HUMI_t$) から算出した。

$$VPD_t = (1 - HUMI_t/100) \times \exp(19.0177 - 5327/(TEMP_t + 273.15)) \quad (3)$$

5. 実験結果・考察

5.1 提案手法処理区における閾値の推移

栽培期間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栽培期間中の各日における茎径の変化量（1 日における茎径の最大値と最小値の差）の推移を図 7 に示す。閾値が 11 月 21 日から徐々に増加し、12 月 23 日から減少していることがわかる。トマトは飽差が高く蒸散が活発である場合、蒸散量が根からの給水量を上回るため、灌水で回復する水ストレス量が減少する[11]。閾値の初期値算出に使用した過去の栽培データの期間（2018 年 4 月 7 日から 5 月 27 日）は飽差が高い春季だが、本実験の期間（2018 年 11 月 16 日～2019 年 1 月 16 日）は飽差が低い冬季であるため、灌水で回復する水ストレス量が過去の栽培と比べ多く、閾値が増加したと考えられる。また、12 月 9 日以降から茎径の変化量が減少していることがわかる。12 月 23 日以降における閾値の減少は苗が成長し加齢したこ

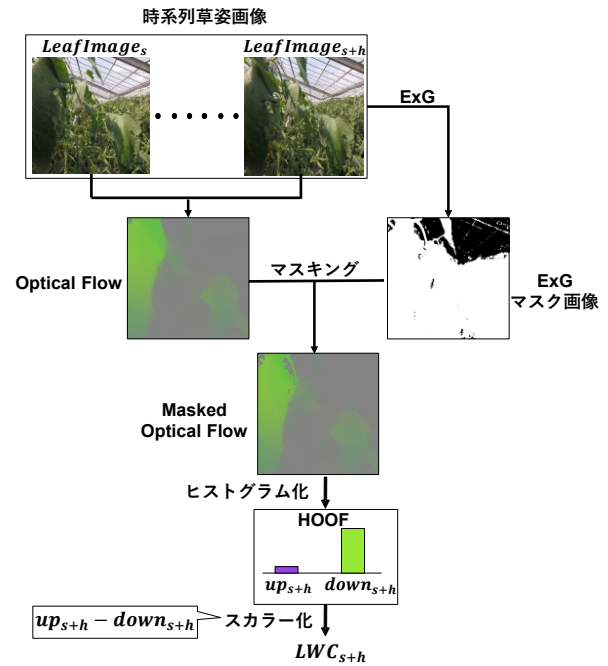


図 10 LWC 算出方法

とによる茎径の硬質化が原因だと考えられる。以上より、植物生育と栽培環境に応じた閾値の算出ができたといえる。

5.2 糖度および収量

各処理区における糖度の結果および合計灌水回数を図 8 に示す。提案手法処理区の平均糖度は、8.64%と全処理区の中で最も高く、熟練農家処理区と比べ 0.04%、閾値固定処理区と比べ 0.58%高かった。また、一般的にトマトは灌水回数が少ないほど糖度が低くなる傾向があり[12]、実際に灌水回数が少ない処理区ほど糖度が高いことがわかる。本実験と異なる栽培環境のデータを使用して算出した閾値は、本実験における栽培環境では値が低く、閾値固定処理区の灌水回数が多くなり灌水が多くなることで糖度が他の処理区と比べ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、本実験における栽培に適した閾値で灌水量を抑えつつ適切な水ストレスを与えることができたため高糖度なトマトが栽培できたと考える。

可販果実と不可販果実の収量割合を図 9 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%高かったが、閾値固定処理区と比べると 0.6%高かった。提案手法処理区と閾値固定処理区は水ストレス指標に茎径から算出する DSR を使用していたため、積算日射量よりも植物の状態に応じた灌水が可能となる。したがって、提案手法処理区と閾値固定処理区は熟練農家処理区と比べ植物に応じた灌水を行えたことで生理障害の果実を減少できたと考える。さらに、提案手法を用いて植物生育や栽培環境に応じて閾値を更新することで、閾値固定処理区と比べ提案手法処理区の方が可販果実収量をより増加できたと考える。以上から、提案手法の有効性が示唆された。

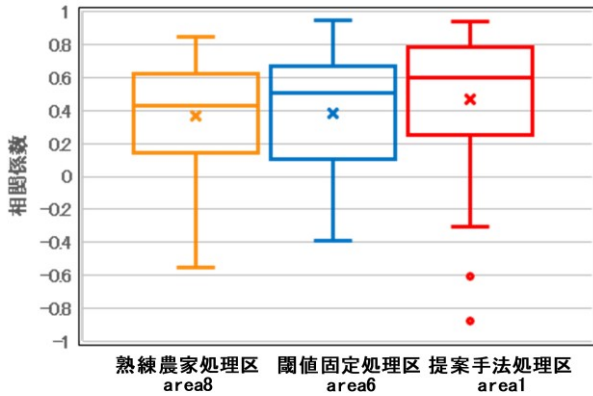


図 11 LWC と茎径の相関係数

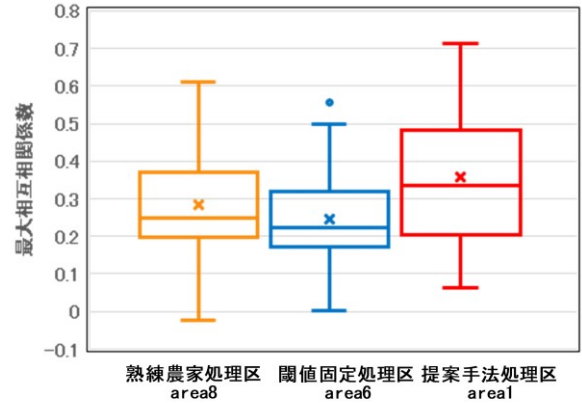


図 13 LWC の短期的変化と茎径の短期的変化の最大相互相関係数

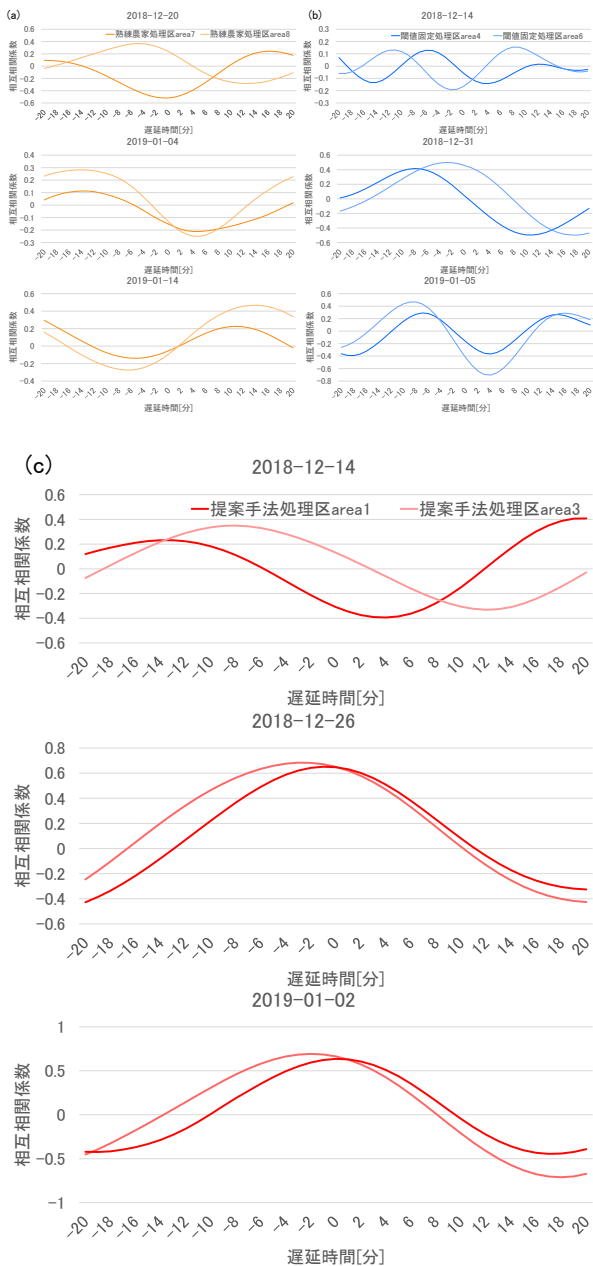


図 12 LWC の短期的変化と茎径の短期的変化の相互相関分析結果

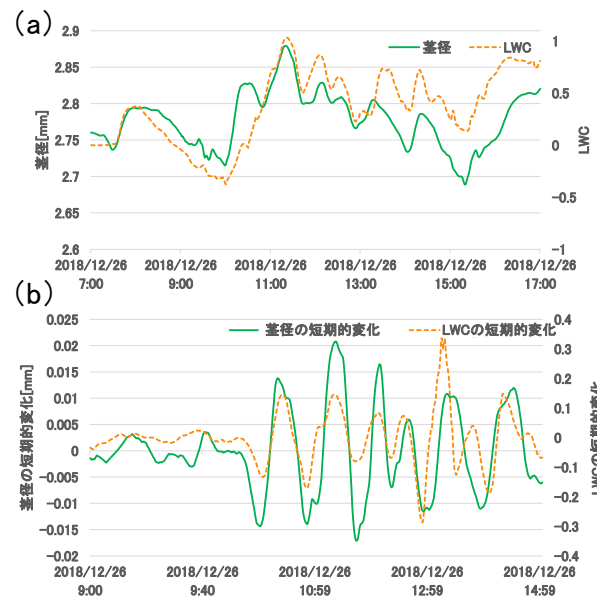


図 14 提案手法処理区における茎径と LWC の変化

6. 植物体内水分量指標の検討

6.1 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量の指標として検討する。葉の萎れ具合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[13]。さらに、葉の水ポテンシャルは植物体内水分量と密接な関係があることが知られているため[14]、葉の萎れ具合を定量化した LWC は植物体内水分量の指標として有効だと考える。そのため、LWC の有効性を示すため、茎径との相関分析で基礎分析を行う。

6.2 LWC

LWC の算出方法を図 10 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が萎れ始める前の時刻sの草姿画像で固定し、も

う一方の1時点の草姿画像は、時刻 s 以降の時刻 $s+h$ ($h \geq 0$)の草姿画像とする。LWCではまず、2時点の草姿画像を用いてOFを算出する。ここで、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[15]。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)[16]を用いて、植物以外をマスクした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[17]。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を用いて現在の葉の萎れ具合を評価することで、植物体内水分量を相対的に評価することができる。

6.3 基礎分析

LWCの有効性を示すため、植物体内水分量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と茎径の相関分析とLWCの短期的変化と茎径の短期的変化の相互相関分析を行い、LWCの基礎分析を行う。相関分析には、図5において各処理区で日射量が最も多かったarea(図5 area1,6,8)のデータを、相互相関分析には、各処理区で日射量が最も多かった2つのarea(図5 area1,3,4,6,7,8)のデータを用いた。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、日射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。

各areaの茎径とLWCの相関係数における箱ひげ図を図11に示す。図11から3つのarea全てにおいて正の相関が確認でき、area1の平均相関係数が最も高く0.47であり、3つのareaにおける相関係数の最大値は、0.94であった。また、LWCの短期的変化と茎径の短期的変化の相互相関分析結果を図12に、LWCの短期的変化と茎径の短期的変化の最大相互相関係数における箱ひげ図を図13に示す。LWCの短期的変化と茎径の短期的変化に遅延をともなう相関関係があることがわかる。最も平均最大相互相関係数が高かったarea1における平均値と最大値は0.37, 0.71であった。一方、相関係数と最大相互相関係数において相関が低い場合も存在しているため今後相関が高い場合と低い場合の詳細分析が必要となる。また、提案手法処理区における茎径とLWCの推移および茎径の短期的変化とLWCの短期的変化の推移を図14に示す。LWCが茎径と同様に推移していることが分かる。以上より、植物体内水分量の指標として有効であることが示唆された。

7. 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決定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、提案手法は閾値決定アルゴリズムにより植物生育と栽培環境に応じた閾値を算出し更新でき、提案手法で栽培したトマトは、熟練農家が栽培したトマト同等以上の糖度があった。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。したがって、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量の検討としてOFを用いて植物の葉の萎れ具合を定量化したLWCと茎径の相関分析とLWCの短期的変化と茎径の短期的変化の相互相関分析を行った。その結果、相関係数の平均値、最大値が0.47, 0.94であり、最大相互相関係数の平均値、最大値が0.37, 0.71であったことから新たな植物体内水分量の指標として有効であることが示唆された。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。

謝辞

本研究はJST さきがけ(JPMJPR1505)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。

参考文献

- [1] Kaneda, Y.r., 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, 他: 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(3), pp.163-170, 2000.
- [3] 新田益男, 他: 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, p31-38, 2017.
- [4] 大石直樹: 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)ー茎径変化を利用した給液制御ー, 生物環境調節, Vol.40(1), pp.91-98, 2002.
- [5] 大石直樹: 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)ー茎径変化による水分ストレスの非破壊評価ー, 生物環境調節, Vol.40(1), pp.81-89, 2002.
- [6] 仁科弘重, 他: 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(2), pp.113-118, 1998.
- [7] Meng, Z., et al.: Suitable indicators using stem diameter variation-derived indices to monitor the water status of greenhouse tomato plants, PloS One, Vol.12(2), 2017.
- [8] Ohashi, Y., et al.: Effects of drought stress on photosynthetic gas

exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. *Biol. Plant*, Vol.50(1), pp.138-141, 2006.

- [9] 井林宏文, 他: 高信頼双方向多点無線センサアクチュエータネットワークシステムの評価, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム, pp.358-365, 2014.
- [10] Chanseetis, C., et. al.: An Estimation of Tomato Transpiration for Effective Fertigation Management System Using Intergrated Solar Radiation and Vapor Pressure Deficit, *Environ Control Biol*, Vol.43(2), pp.105-112, 2005.
- [11] Fusao, K., et. al.: Effect of soil moisture on diurnal variation of water content in tomato plant, *Tokai Branch Soc. Agric. Meteorol*, Vol.52, pp.13-16, 1994.
- [12] 馬西清徳, 他: 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, 1994.
- [13] 藤野素子, 他: きゅうり葉における水ストレスの非破壊計演 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(2), pp.161-170, 2002.
- [14] 長野敏英, 他: 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 1), *生物環境調節*, Vol.16(3), pp.93-100, 1978.
- [15] Weinzaepfel, P., et al.: Deepflow: Large displacement optical flow with deep matching, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.1385-1392, 2013.
- [16] Meyer, G. E., et al.: "Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.63(2), pp.282-293, 2008.
- [17] Chaudhry, R., 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.