

植物の状態に自律順応する灌水タイミング決定手法の検討

後藤 将弥[†] 水野 涼介^{††} 若森 和昌^{††} 峰野 博史^{†,‡}[†]静岡大学情報学部 ^{††}静岡大学大学院総合科学技術研究科 [‡]JST さきがけ

1. はじめに

農業分野では、熟練農家が持つ高度な栽培技術の喪失を防ぐため、栽培技術を機械的に再現する研究が進められている[1]。高度な栽培技術の中でも、植物の水分状態に応じて灌水を行う水ストレス栽培は高糖度な果実を栽培できる技術として知られている。水ストレス栽培では、植物が受けた水ストレスを指標化し、その指標に対して閾値を設定することで灌水タイミングを決定する。しかし、従来の水分ストレス指標は植物の概日変動を考慮しないため、概日変動と比較して短期的な水ストレスの変化を捕捉できない。さらに、水ストレス指標に対する閾値は熟練農家の経験と勘に基づいて設定、調節されるため、栽培経験が浅い新規就農者が適切な閾値を設定、調節し、高糖度な果実を栽培することは困難である。

そこで、本研究では、水分ストレスの短期的変化を考慮できる水ストレス指標と、その指標を用いた栽培において、植物の状態に順応する灌水タイミング決定手法を検討する。

2. 関連研究

水ストレス栽培における灌水時の水ストレス指標として、積算日射量を用いる手法[2]や茎径の変位量を用いる手法[3]が提案されている。特に、後者はレーザ変位計を用いて、茎径の変位量を非破壊かつ経時的に計測することで、水ストレスの経時的変化に応じた灌水制御を可能とする。それにくわえて、相対茎径は水ストレスと関係のある葉身の相対含水量と高い相関があることが知られており、相対茎径を用いた水ストレスの評価が検討されている。ここで、茎径は概日変動である長期的変化[4]と、灌水にともない水ストレスが減少し茎径が増大した後、水ストレスが増加し茎径が縮小する短期的変化の特性を持つ(図1)。しかし、相対茎径は茎径の長期的変化を考慮した水ストレス指標であり、短期的変化が考慮されていない。したがって、熟練農家の行っている、灌水に応じた植物状態変化を考慮した灌水制御の実現には、茎径の短期的変化を考慮した新たな水ストレス指標が必要である。さらに、適切な水ストレス量は植物の状態に応じて変化するため、水ストレス栽培の灌水タイミング決定には植物の状態に応じた水ストレス量閾値決定手法の検討が必要である。

3. 提案手法

本研究では、灌水にともなう茎径の短期的変化に着目した新たな水ストレス指標として DSR (Difference in Stem diameter calculated from the most Recent irrigation) を定義し、熟練農家の経験と勘が必要ない灌水タイミング決定手法の検討をする。

A study of irrigation timing determination method to autonomously adapt to plant condition

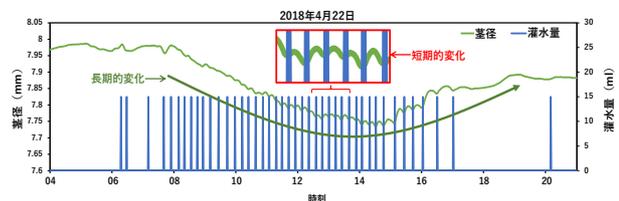
Masaya Goto[†], Ryosuke Mizuno^{††}, Kazumasa Wakamori^{††}, Hiroshi Mineno^{†,‡}[†]Faculty of Informatics, Shizuoka University^{††}Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University[‡]JST PRESTO

図1 茎径の長期的変化と短期的変化の様子

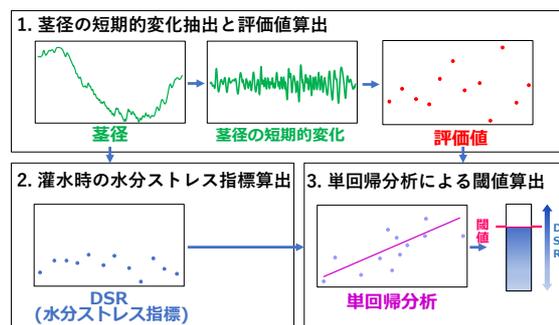


図2 灌水タイミング決定手法の概要

DSR は、直前の灌水により水ストレスが減少し茎径が増大した後から現在までにおける水ストレスの増加にともなう茎径の縮小度合いを評価でき、灌水にともなう茎径の短期的変化の考慮が可能となる。 DSR_{t+n} は、直前の灌水時刻 t から現在時刻 $t+n$ までの最大茎径 $MaxSD_{t+n}$ に対して現在の茎径 SD_{t+n} を引いた値である。

灌水タイミング決定手法は、DSR に対する閾値を栽培期間中のデータから算出するデータ駆動型アプローチであり、図2に灌水タイミング決定手法の概要を示す。灌水時の水ストレス指標に対する評価値と灌水時の水ストレス指標を用いて単回帰分析を行い、水ストレス指標に対する閾値を算出する。閾値の値が不適切であると、増加した水ストレスの量に対して灌水により減少する水ストレスの量が多くなる場合や少なくなる場合がある。そのため、水ストレスを適切に与えることができず、果実の低品質化や葉の萎れ等の原因となる。したがって、増加した水ストレスの量だけ灌水により水ストレスが減少する閾値が適切である。つまり、水ストレスの増加により縮小した茎径の変位量だけ茎径が増大する閾値が適切である。そこで、各灌水前後の茎径の短期的変化 SD' における最大値 $MaxSD'$ の差を灌水タイミングの評価値として算出する。評価値は、 $n-1$ 回目($n \geq 2$)の灌水から n 回目の灌水までにおける茎径の短期的変化の最大値 $MaxSD'_{n-1}$ から n 回目の灌水から $n+1$ 回目までにおける茎径の短期的変化の最大値 $MaxSD'_n$ を引いたものである。茎径の短期的変化は、時刻 t における茎径の長期的変化を表す移動平均 MA_t を茎径 SD_t から引くことで抽出する。移動平均の区間は、移動平均に茎径の短期的変化を含めないために、閾値算出に用いる日の最大灌水間隔とする。算出した評価値と各灌水時における DSR の値を用いて単回帰分析を行い、評価値が 0 となる DSR の値を算出し閾値とする。

したがって、灌水により縮小した茎径変位量だけ茎径が増大する閾値が算出できると考える。

閾値の算出には、茎径の短期的変化が顕著に現れている日のデータを使用する必要がある。そのため、閾値算出日の条件を日射が強い時間帯である10時から14時の平均飽差が2.5kPa[5]以上の日とし、この条件を満たした最新日の10時から14時のデータを閾値算出に用いる。

4. 実験方法

提案手法の有用性の評価として、DSRの閾値を使用した栽培(表1, 処理区B)と提案手法を用いることで植物の状態に順応したDSRの閾値を使用した栽培(表1, 処理区A)、積算日射量の閾値を使用した栽培(表1, 処理区C)を行い、収穫時果実の収量と品質比較を行った。本実験では、静岡県袋井市の中玉トマト栽培ハウス内の3か所の処理区で、無線散乱光センサノード[6]を用いた飽差と日射量の毎分計測、レーザ変位計(HL-T1, 分解能: 4 μ m)を用いた第9節と第10節間の茎径の毎分計測を行った。また、果実の収量と品質計測を選果機(QSCOPE-T81, 三井金属計測器工)を用いて2018年12月15日から2019年01月03日の間実施した。

処理区Aと処理区B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提案手法に適用することで算出した。処理区Cにおける閾値の初期値は熟練農家の知見によって決定した。また、処理区A~Cにおける1日の最初の灌水タイミングは、栽培ハウスのある、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。

5. 実験結果

図3に処理区Aにおける閾値の推移を示す。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。閾値の増加は、初期値算出に使用した春の期間よりも本実験は、飽差が低く、1度の灌水で茎径がより増加したことが原因だと考える。また12月23日以降における閾値の減少は、茎の加齢にともなう茎の弾力性低下が原因だと考える。したがって、提案手法を用いて閾値を調節することで植物の状態に順応した灌水タイミングを決定できたと考えられる。

表2に各処理区における収量及び糖度の結果を示す。提案手法を用いた処理区Aで栽培した果実の平均糖度は、処理区B, Cに対して有意差があり、全処理区の中で最も高く、8.44 brixであった。一方、閾値を変更しなかった処理区Bでは、平均糖度が高糖度とされる8brixを下回った。処理区Bは、過去の春の期間(2018年4月7日から5月27日)における栽培データを用いて算出した閾値を使用したため、本実験における植物の状態に適さず糖度が低下したと考える。また、積算日射量を用いた処理区Cは、処理区Aと同程度の糖度を得られたが、処理区AとBと比べて、可販果実の収量が約0.80から0.94倍となり少なく、不可販果実の収量は約6から7倍となり多かった。処理区AとBは、DSRを用いた灌水制御であったため、茎径の短期的変化を考慮することができたが、処理区Cでは日射のみを考慮した灌水制御であるため水ストレスの考慮が不十分であり、尻腐れや裂果が発生し不可販果実が増加したと考える。以上から、処理区Aでは、提案手法を用いることで灌水タイミングを植物に順応でき、可販果実数を維持しながら高糖度な果実を栽培できたことから、提案手法の有効性が示唆された。

表1 各処理区の栽培条件

処理区	株数(株)	水ストレス指標	閾値の初期値	閾値の変更
A	728	DSR(mm)	0.013mm	あり
B	823	DSR(mm)	0.013mm	なし
C	604	積算日射量(MJ)	0.3MJ	なし

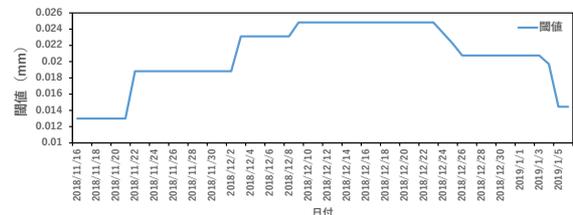


図3 処理区Aにおける閾値の推移

表2 各処理区における収量及び品質の結果

処理区	可販果実				不可販果実		
	収量(g/株)	果実数(個/株)	果実重(g/個)	糖度(brix)	収量(g/株)	果実数(個/株)	果実重(g/個)
A	296.7	11.7	26.2	8.44 a*	2.1	0.1	16.5
B	347.8	12.1	28.2	7.94 c	1.6	0.1	20.0
C	279.5	11.1	25.2	8.41 b	11.9	0.5	13.3

* Steel-Dwassの多重検定により、異なる英小文字間に5%水準で有意差あり

6. おわりに

本研究では、茎径の短期的変化に着目した水ストレス指標であるDSRを用いて灌水制御を行い、植物の状態に自律順応する灌水タイミング決定手法の検討をした。また、提案手法の基礎実験として高糖度トマトの栽培実験を行った。その結果、提案手法はDSRに対する閾値を植物の状態に応じて変更し灌水タイミングを調節することで、可販果実数を維持しながら高糖度な果実を栽培できることを確認した。今後、提案手法を用いて他品種や異なる環境における高糖度トマト栽培の実現を目指す。

謝辞

本研究はJST さきがけの支援を受けて実施した。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., Shibata, S. & Mineno, H: Multi-modal sliding window-based support vector regression for predicting plant water stress, Knowledge-Based Syst, Vol.134, pp135-148 (2017).
- [2] 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, pp31-38 (2017).
- [3] 大石直記: トマトの養液栽培における水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(1), pp91-98 (2002).
- [4] 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).
- [5] Chanseetis, C., et al.: An Estimation of Tomato Transpiration for Effective Fertigation Management System Using Intergrated Solar Radiation and Vapor Pressure Deficit, Environment Control in Biology, Vol.43(2), pp105-112 (2005).
- [6] Ibayashi, H., et al.: A Reliable Wireless Control System for Tomato Hydroponics, MDPI Sensors, Vol.16(5), 664 (2016).