

研 究 報 告 書

「多様な環境に自律順応できる水分ストレス高精度予測基盤技術の確立」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 27 年 12 月～平成 31 年 3 月

研 究 者: 峰野 博史

1. 研究のねらい

日本の環太平洋経済連携協定(TPP)の参加によって、日本市場への輸出拡大を期待する各国農業団体から歓迎の声が相次いでいるが、同時に日本の持つノウハウやICTを駆使して、高品質野菜類を同協定参加国へ輸出していくという攻めの準備に転じる良い契機が到来したともいえる。東海地方は、古くからその温暖な気候を活用した施設園芸が盛んに行われ、農芸品といわれる高品質な野菜類(高糖度トマト、温室メロン等)の供給に大きく寄与してきた。しかし、近年は気象変動による周年生産の不安定化によって収益性が低下し、労働の厳しさから後継者不足も深刻化している。

本研究では、果実の糖度を上げる栽培技術の一つである水分ストレスに焦点を絞り、野外や施設園芸環境だけでなく多種多様な生育環境に自律順応できる汎用的な水分ストレス高精度予測基盤技術の確立を目指した。環境データ、生育データ、農作業データといったデータに基づく制御環境要因の中でも、特に養水分制御が収量、品質を大きく左右する重要な要因となっている。基本的な仕組みは解明されつつあるが、多種多様な環境や植物の中で、環境変動と生育状況を考慮した適切な判断指標を構築することが課題であるといえる。これまでも、環境情報や生育情報を得ることで、よりの確な判断を実現できる可能性は示唆されてきたが、「匠の技」を持たない生産者にとってはこれら情報を適切な管理判断に結び付けることが困難で、その効果は限定的であった。そこで、実世界の法則が明確でない複雑な諸現象でも、関連するデータを大量に収集し適切な特徴量を抽出できれば、データドリブンな機械学習によってモデル化でき、時間経過や季節変化に伴って特性が変化するだけでなく地域やハウスによって特性の異なる条件に対しても、高精度に水分ストレスを予測可能な基盤技術を確立できるのではないかと考えた。水分ストレスと果実の糖度を上げる栽培技術との因果関係解明も進めば、「匠の技」を持たない生産者でも果実の高糖度化による高品質化を容易に実現でき、適切な管理判断に結び付けられる基盤技術となりうる。

農学・植物生理学研究者らと連携しながら情報科学的アプローチで研究を進め、時間経過や季節変化に伴って特性の変化する複雑な植物成長を対象とした機械学習手法や情報協働栽培手法に関して、学術的にも価値ある新たな革新的な研究分野を切り拓く。

2. 研究成果

(1)概要

果実の糖度を上げる栽培技術の一つである水分ストレスに焦点を絞り、まずは施設園芸環境でのトマト低段密植養液栽培で、多様な生育環境に自律順応できる汎用的な水分ストレス高精度予測基盤技術を確立し、果実糖度向上による高品質化を容易に実現できる基盤技術創成を目指した。特に、①水分ストレスの定量化、②自律順応できる高精度予測基盤の確

立、③様々な環境での実証、の3ステップで研究を進めた。

熟練農家が感じている水分ストレスの判断指標の一つである植物の『しおれ』が生じる要因を検討し、植物のしおれ具合で熟練農家の感じる水分ストレスを推定できると考えた。植物は、晴天時に葉の表面にある気孔によって水を蒸散させ、根から水や養分の取り込みを促進するが、取り込める水が少ないと植物体内の水分が蒸散によって失われ、蒸散過多で茎が徐々にしぼみ、葉の重さを耐えきれなくなって垂れ下がっていく現象が『しおれ』であると考えた。蒸散量に関係する気孔の開閉量は光量や温湿度で変化し、葉面積や群落繁茂度にも関係する。そのため、温湿度の計測に加え、植物群落の上部と下部の散乱光の比で蒸散量を把握し、また、蒸散の結果、視覚的に把握可能なしおれの度合いは、小型定点カメラを用いて周期的に撮影する草姿画像によって把握できると考えた。

具体的には、環境データ(温湿度、散乱光)と、時間的に連続する草姿画像から各画素が時間的にどの方向にどれだけ動いたかを示す Optical Flow を用いて生成したマスク画像へ CNN (Convolutional Neural Network) を用いて抽出したしおれ特徴量を重畳し、蒸発散量に関する茎径変位量に紐づけたマルチモーダル深層学習によって、非線形で複雑な植物生理状態を現実的な計測データと時間粒度で機械学習可能なことを示した。これにより、比較的計測容易な非破壊データである環境データ(温湿度、散乱光)と草姿画像のみを入力することで、蒸散過多に基づく茎径変位量をソフトウェア的に出力する『しおれ検知ソフトセンサ』の研究開発に成功した。その後、IoT (Internet of Things) や無線通信技術を駆使した多様かつ長期間のデータセット拡充に加え、機械学習手法の改良、本しおれ検知ソフトセンサを用いた AI (Artificial Intelligence) 灌水制御システムの構築、数百株規模での栽培実証実験の結果、中玉トマト低段密植養液栽培にて、収穫期間における可販果率を低下させることなく高糖度トマト(平均 Brix.8.87、最大 16.9、サンプル数 15,901)を機械的に低負担で大量生産可能なことを確認した。

(2) 詳細 (図1に研究開発の流れを示す)

① 水分ストレスの定量化

トマト低段密植養液栽培における環境データ(気温、湿度、光量)、生育データ(茎径、草姿画像)といった非破壊・非侵襲で比較的計測容易なデータを高信頼に計測し、農業従事者が経験や勘で推測している水分ストレスの定量化を目指した。時間的に連続する画像から、各画素が時間的にどの方向にどれだけ動いたかを示す Optical Flow を用いて特徴量の経時変位量

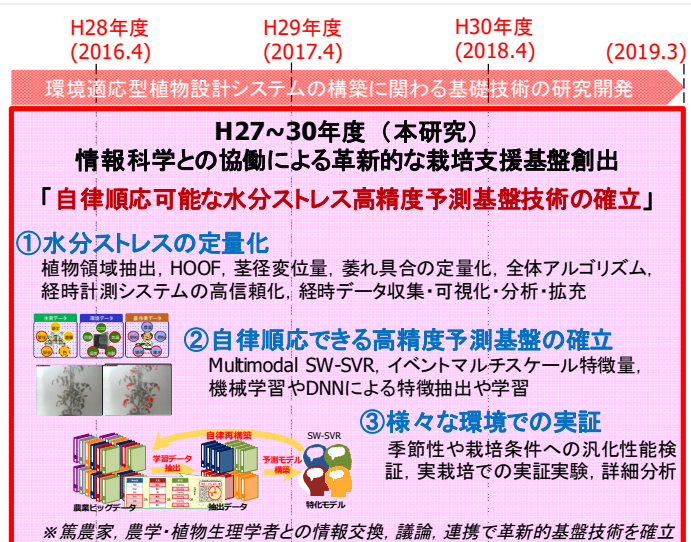


図1. 研究開発の流れ

を抽出し、角度毎の平均速度成分を要素とする多次元ベクトルでしおれ具合の定義を試みた。環境データ(気温、湿度、光量)と生育データ(茎径、草姿画像)の収集を行い、Optical Flow の角度をビン、速度を重みとしたヒストグラムである HOOF (Histograms of Oriented Optical Flow)を用いて草姿変位特徴量の定量化を行い、異なる複雑背景画像であっても植物の萎れ具合を表現可能なことを確認した[2]。

また、2016 年夏栽培期間のデータに対し、比較的計測の容易な草姿画像や温湿度・光量といった環境データを蒸発散量に関係する茎径と紐づけたマルチモーダル深層学習の詳細検討を行った。その結果、草姿画像から抽出可能な萎れ特徴量は茎径の局所的経時変化を学習でき、また環境データから得られる特徴量は茎径の大域的経時変化を学習できる見込みが得られた。また、通信品質の不安定な無線アップリンク通信を用いた IoT システムで遅延耐性のある多様なデータを効率よく収集するための優先度通信制御方式を実装した[5]。さらに、群落光合成量推定に群落上部下部の散乱光値が繁茂度を間接的に把握するため、これまでの運用や計測性能をもとに改良した 920MHz 帯無線散乱光センサノード(温湿度、散乱光)を現場投入し、長期運用時の安定稼働と計測値精度など性能評価を行い 2018 年冬栽培実験から本格運用を開始した。

② 自律順応できる高精度予測基盤の確立

微気象データのような経年変化のある時系列データに対して、適切な学習データを自動的に抽出し予測精度が向上するよう自律的に予測モデルを再構築し続けることのできる機械学習アルゴリズム Sliding Window-based Support Vector Regression (SW-SVR) の詳細評価を進めた[1]。

また、2016 年秋冬栽培期間に収集したデータと比べて、データ量も品質も向上させられた 2016 年春夏栽培期間のデータに対し、深層学習の一種であり画像認識分野で効果の出ている CNN (Convolutional Neural Network) を用いてしおれ特徴量を抽出し、草姿画像からでは抽出が困難と考えられる温湿度・散乱光といった環境データを適切に重畳することで、蒸散量に関係する茎径変位量(分解能 0.004mm のレーザー変位計で計測)と紐づけたマルチモーダルデータセットが、植物の成長期や発育期で影響を受ける環境条件や生育状況、経時情報は徐々に変化していることが分かってきた。そこで、Multi-modal SW-SVR[3, 特願 1]を研究開発し、各時点における多次元マルチモーダルデータをクラスタリングし、多次元空間において様々な特徴を持ったサブデータセットで構築された多数の特化型サブモデルで加重アンサンブル学習を行うことで、非線形で複雑な植物生理情報を現実的な計測データと時間粒度で外挿し機械学習することに成功した(図 2)。

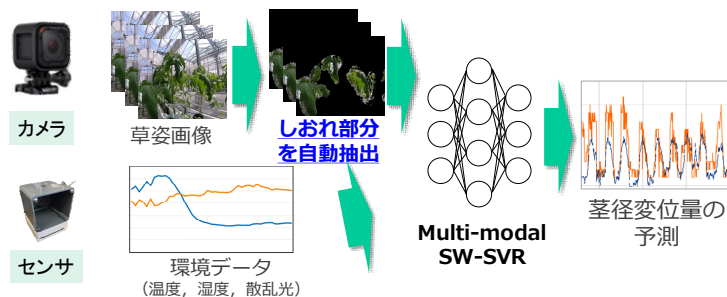


図 2. Multi-modal SW-SVR

さらに、一時的な風などの影響を抑えつつしおれに関する時間的変位情報を抽出する画像処理手法[特願 2]を考案しただけでなく、高層の深層学習では膨大な訓練データセットが必

要となるが、低層の深層学習かつ少量訓練データセットで数日から数週間といった中期的経時特性を学習可能なイベントマルチスケール特徴学習手法[4, 特願 3]によって、より少ないデータセットかつ現実的な時間で効率よく非線形かつ複雑な植物成長といった比較的長い粒度の経時特徴の機械学習に成功した。

③ 様々な環境での実証

本さがけ領域内外の農学や植物生理学研究者らからの知見に加え、静岡県農林技術研究所(磐田市)、静岡大学農学部(静岡市)、(株)Happy Quality&サンファーム中山(株)(袋井市)らの支援で、データ計測や仮説の検証を進め、比較的計測容易な非破壊データである環境データ(温湿度、散乱光)と草姿画像のみを入力することで、蒸散過多に基づく茎径変位量をソフトウェア的に出力する『しおれ検知ソフトセンサ』の研究開発に成功した。また、これまでの分析で、環境データのみ、草姿画像のみ、環境+草姿、環境+草姿+茎径、といった組み合わせや、茎径変位量の閾値を調整した灌水制御によって、収穫時トマトの糖度を調整できる可能性も得た。

図3に示すような、IoT (Internet of Things) や無線通信技術を駆使した多様かつ長期間のデータセット拡充に加え、機械学習手法の改良、本しおれ検知ソフトセンサを用いた AI (Artificial Intelligence) 灌水制御システムを構築し、蒸散と吸水のバランスで決まる『しおれ』という物理現象に基づき、ある意味、植物の顔色をうかがった適切なタイミングで自動灌水制御可能なシステムを開発した。様々な基礎評価と改良を経て、最終年度、茎径変位量に対し成長や状況に応じた動的閾値での灌水制御(A: 茎径(動的))、茎径変位量に対し固定閾値での灌水制御(B: 茎径(静的))、日射比例に基づく灌水制御(C: 日射比例)、農業 AI の茎径推定値による灌水制御(D: AI)、の比較処理区を設けた栽培実験(中玉トマト低段密植養液栽培、同一ハウス)を実施した。その結果、AI 灌水制御区で収穫期間における可販果率を低下させることなく、高糖度トマトを機械的に低



図 3. 実証実験の様子

負担で大量生産可能なこと(平均 Brix.8.87、最大 16.9、可販率 0.917、サンプル数 15,901)を確認でき、他処理区に比べ高糖度トマトを機械的かつ容易に大量生産可能な見込みを得た(表 1)。

表 1. 栽培実験の結果

処理区	労力負担	糖度 [brix]				サンプル数	平均果実重	10a収量 (t/10a)*	可販率
		Avg.	Max.	Min.	SD				
A: 茎径(動的)	中(設置)	8.75	16.9	3.00	0.900	14,089 (728株)	22.5	8.7	0.963
B: 茎径(静的)	中(設置)	8.10	16.9	4.80	0.717	17,885 (823株)	27.5	11.7	0.955
C: 日射比例	高(管理)	8.73	15.7	5.10	0.941	10,591 (604株)	22.8	9.5	0.826
D: AI	低	8.87	16.9	4.30	0.845	15,901 (822株)	20.8	8.6	0.917

3. 今後の展開

培地量や品種、養液濃度によらず、植物体の成長に応じた蒸散と吸水のバランスで決まる『しおれ』という物理現象に基づき、ある意味、『植物の顔色をうかがった』適切なタイミングで自動灌水制御可能なシステムを構築できれば、水の重要な環境だけでなく世界中の様々な

気候や地域へも展開できる可能性がある。また、栽培の基本である『光合成』の促進について、植物の成長や発育状況に応じて太陽光を最大限に有効活用できるよう、灌水だけでなく、CO₂ 施用、飽差も上手に制御し、時に厳しくとも優しい対話に基づく柔軟な栽培のできる農業 AI の実現を目指し、新規就農者や世代間をまたぐ農業の継承を支援していく。その上で、これまで研究開発してきた非線形かつ複雑な植物成長を考慮した植物の『時点』における状態推定技術から、より長い時間粒度での『経時的』な将来予測技術へ深化させていくことで、収量や品質予測の可能性を検証し、収穫物の機能性向上や計画生産技術の基盤技術としての確立を目指す。

4. 自己評価(公開)

果実の糖度を上げる栽培技術の一つである水分ストレスに焦点を絞り、多種多様な生育環境に自律順応できる汎用的な水分ストレス高精度予測基盤技術を確立し、果実糖度向上による高品質化を容易に実現できる基盤技術実現という当初目標達成の目処が立っている。

特筆すべきは異種データ群から相補的に生育状況に関する特徴を重畳するマルチモーダル深層学習によって、草姿画像や温度・湿度・明るさといった比較的計測容易なデータのみで、形式化困難だった植物水分ストレスを表現する茎径変位量の予測を世界に先駆けて実証した。経時画像から一時的な農作業や複雑背景の影響を抑えつつ時間的変位情報を学習しやすくする新技術や、経時特性変化に順応可能な適応型機械学習器 SW-SVR によって、蒸散と吸水のバランスで決まるしおれという物理現象に基づき植物の顔をうかがった自動灌水を可能とし、植物との対話による栽培へ新たな一歩を切り拓いた。ヒトと AI の協働によって奥深い農作業の分業や負担軽減が促進されるだけでなく、データ駆動型農業の延長線上には、植物と対話しながら高品質な野菜や果物を栽培できる革新的な農業の実現があると実感する。果菜類の品質制御や計画生産技術への展開に加え、水の貴重な環境での節水栽培への適用も期待でき社会的意義が高く、情報科学による植物との対話に基づく革新的農産物栽培手法創出における独創性とインパクトは極めて大きい。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. Yukimasa Kaneda, Hiroshi Mineno, “Sliding window-based support vector regression for predicting micrometeorological data,” Expert Systems with Applications (ESWA), Vol.59, pp.217-225 (15.Oct.2016). (2016IF:3.928, Q1)
2. 柴田瞬, 峰野博史, “Optical Flow を用いた複雑背景画像における草姿の変化検出,” 情報処理学会論文誌(トランザクション), コンシューマ・デバイス & システム (CDS), Vol.7, No.2, pp.97-105 (25.May.2017).
3. Yukimasa Kaneda, Shun Shibata, Hiroshi Mineno, “Multi-modal sliding window-based support vector regression for predicting plant water stress” Knowledge-based Systems (KNOSYS), pp. 135-148 (15.Oct.2017). (2016IF:4.529, Q1)
4. 若森和昌, 柴田 瞬, 澤村 武, 鈴木大地, 切岩祥和, 鈴木克己, 峰野博史, “ニューラルネットワークを用いた植物蒸発散量推定における時間的特徴重畳手法,” 電子情報通信

学会, パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU) (20.Feb.2018).
5. Takuma Tachibana, Eisuke Kasahara, Takamasa Yoshida, Hiroshi Mineno, "Evaluation of Priority Control Mechanism for Remote Monitoring IoT System in Greenhouses," 9th EAI Int'l Conf. on Mobile Computing, Applications and Services (MobiCASE) (28.Feb.2018).
6. Shogo Nagano, Shogo Moriyuki, Kazumasa Wakamori, Hiroshi Mineno, Hirokazu Fukuda, "Leaf-Movement-Based Growth Prediction Model Using Optical Flow Analysis and Machine Learning in Plant Factory," Frontiers in Plant Science (11.Feb.2019). (IF3.677)

(2)特許出願

研究期間累積件数: 7 件

(うち 2 件は国内特許の PCT 出願案件。公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.

発 明 者: 峰野博史、兼田千雅、柴田瞬

発明の名称: 萎れ具合予測システム及び萎れ具合予測方法

出 願 人: 国立大学法人静岡大学

出 願 日: 2016/8/26

出 願 番 号: 特願 2016-166073

2.

発 明 者: 峰野博史、兼田千雅、柴田瞬、若森和昌

発明の名称: 画像データ加工装置及び画像データ加工方法

出 願 人: 国立大学法人静岡大学

出 願 日: 2017/6/20

出 願 番 号: 特願 2017-120665

※PCT/JP2018/023131 (2018/6/18)で PCT 出願、WO2018/235777 (2018/12/27)で公開

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- ・2017/7/26 プレスリリース「AI 技術による植物の萎れ具合の予測に成功」
- ・2017/10/15 日本農業新聞一面「高糖度トマト AIにお任せ」
- ・2018/5/16 農業情報学会 2018 年度年次大会 招待講演
「施設栽培における人工知能(AI)の新たな展開」
- ・2018/9/15 アグリテックグランプリ オムロン賞、竹中工務店賞 (W 受賞)
- ・2018/10/19 ドコモ・モバイル・サイエンス賞 社会科学部門 奨励賞
- ・2019/1/12 日経新聞「新技術・大規模経営で活路 経験値 AIで補う」
- ・2019/2/23 農耕と園芸 2019 年 春号(誠文堂新光社), 「スマート農業① 人工知能による灌水制御で糖度の高い高品質トマトを生産する」, pp.9-14, ISBN:07315-03.