

研究・活動紹介

作物生体情報を利用した施設園芸の栽培管理

佐藤 展之（静岡県立農林環境専門職大学生産環境経営学部）

I. 作物生体情報

施設園芸における環境制御では、温度センサにより窓の開閉や、暖房機のオンオフを行う方法が最も普及している。更に高度な環境制御となると、湿度センサや日射センサ、風速センサなどを組み合わせ天候の変化に対応できる複合環境制御法や、日射量と比例して給液管理を行う養液制御装置などがある。

このような温度や湿度などの環境要因の情報に加え、栽培者は作物の生育を判断しながら、温度やかん水の条件を変更する。熟練した栽培者は、作物の生育状況や病害虫発生状況、今後の天候の変化など様々な要因を考慮しながら栽培管理を行うため、品質の高い農産物を生産できる。このようないわゆる篤農家技術を自動化しようと、様々な取り組みが行われてきた。中でもスピーキング・プラント・アプローチ（SPA: Speaking Plant Approach）というコンセプト（Udink et al., 1978¹⁾, Hashimoto, 1980²⁾, 高山, 2013³⁾）は、作物の生体情報をとらえその情報をもとに作物を管理する技術で、近年の情報機器の発展に伴い農業のICT化技術としても注目されている。

Udinkら（1978）¹⁾ は、「温室作物のコンピュータ制御は、i) 温室環境の瞬時値、ii) 短期間の

作物生育、iii) 長期間の作物の成長の3つのレベルで構成され、ii) の短期間の作物生育の把握にSPAアプローチが有効である」としている。iii) の長期間判断は、経験に基づき栽培者によって管理が調整されるが、このレベルも今後コンピュータにより自動化されるものと思われる（第1図）。

筆者は静岡県の特産物である温室メロンのかん水自動化をめざし、レベルii) に関わる作物生体情報の栽培管理利用について取り組んだ。本報ではその例を挙げながら、主に作物の水分状態を把握する技術について記述する。

II. 作物の水分状態の把握

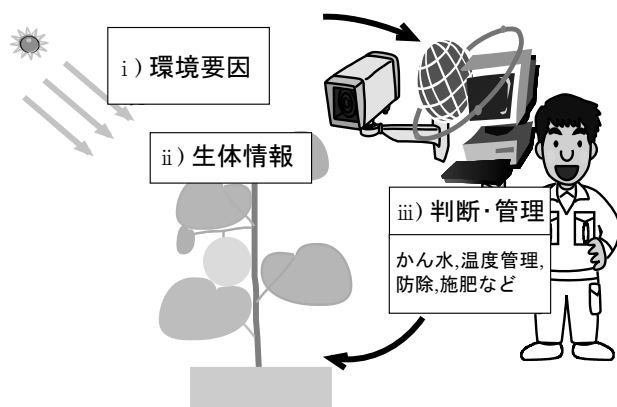
高山（2013）³⁾ は、作物の生体情報をとらえその情報をもとに作物を管理する技術として、光合成を最大化する生育モデルを作成し制御に利用している。

作物の生育を制御する上で、光合成を指標とすることは理にかなっており今後の普及が期待されるが、実際の栽培管理で最も一般的に行われているのが、温度管理と、かん水または給液の制御による生育調節である。とくに土壤水分や給液制御による水分ストレスの付加は、トマトの糖度向上に大きく関与している（栃木ら, 1987⁴⁾, 石上ら, 1994⁵⁾）。温室メロンの隔離ベッド栽培では、土壤中の水分状態を適切にコントロールしながら生育制御を行ない、高品質の温室メロンを生産している（鈴木, 1970）⁶⁾。

作物の水分状態を把握する技術は、基本的に非破壊での測定が望ましい。葉や植物体の一部を切り取るような測定法では、作物生育に悪影響を与えると同時に、即時的及び継続的な計測が困難である。以下の項目で作物の水分状態の把握技術について説明する。

III. 葉温による水分状態の把握

葉からの蒸散は、水分の蒸発とともに気化潜熱



第1図. SPAアプローチによる栽培管理模式図



写真1. 放射温度計による葉温測定



写真2. バラ養液栽培のサーモグラフ

により葉温を低下させる働きがある。蒸散が少ないと葉温が高くなるため、葉温は葉の水分含量の指標として使用できる (Hashimoto, 1980)²⁾。中原ら (1997)⁷⁾ は、赤外線放射温度計やサーモグラフィーによりトマトの水分ストレスを連続的に測定できると報告した。作物体の水分ストレスが高いほど葉温は高くなるが、実際に葉温をかん水指標として用いるには、日射等の環境条件が刻一刻と変化するため、気孔抵抗など植物生理的なパラメータが必要だとも記述している。

また葉温の連続測定を指標にかん水を制御するには、計測にも工夫が必要である。最も利用しやすいのが赤外線放射温度計である (写真1)。非接触で温度の測定ができるため、作物に対する負担は少なく、簡単に測定値を用いた制御ができる。

しかし、作物体は成長とともに位置がずれるので、常に適切な位置の葉温を測定するためには、日々のチェックが欠かせない。

サーモグラフィーは、広範囲の熱画像として作物体の葉温を捉えることができる (写真2)。しかし、熱画像から作物体を自動抽出するには通常のサーモグラフィーではハードルが高く、画像処理のステップが必要となる。

葉温測定用の熱電対も発売されているが、熱電対の測定は、葉との接点のみのわずかな部分の測定となる。温室の柱や作物体の影などが葉温に大きく影響を与えるため、作物体の代表値として使用するのには十分とは言えない。

IV. 分光反射特性

植物の葉や果実などの各部位は、分光光度計によって反射率を測定できる。近赤外領域の1450nmと1950nm付近には水分の吸収帯がある。この波長域を用いて、キュウリの水ポテンシャルの計測を試みた結果では、回復可能な生育範囲を超えた範囲 (水ポテンシャル値が1.5MPa以下) の幅広い水分状態の変化を検知する際にのみ有効であり、キュウリの葉の早期の水ストレスを検知するには適していないとしている (藤野ら, 2002)⁸⁾。分光反射による作物の環境制御は、葉温を利用するよりもさらに困難と思われる。

V. 重量計測による水分状態把握

作物体の生体重を常時計測すれば、その変化から培地を含む作物体の水分状況を把握できる。土壌を培地とし隔離ベッドで栽培している温室メロンにおいても、ロードセルを用いて重量を連続計測することで、水分状態を把握することができる (大須賀, 2003)⁹⁾。土壌を培地とする場合は、土壌の重量が大きく水分のバッファーとなるために生体情報そのものとは言い難い。しかし少量培地養液栽培など極めて少ない培地であれば、ロードセルによる全体の重量測定は、ほぼ作物体の生体重に等しく水分ストレスの指標となり、自動給液システムとして使用できる (大石ら, 2018)¹⁰⁾。栽培管理の中では、葉欠きや誘引、収穫など作物によって栽培途中で重量測定に影響を及ぼす作業などがあるので、実際に給液制御システムを開発する場合には調整が必要である。

VI. 茎径の膨縮による水分状態把握

作物体の水分を連続測定する方法として、茎の太さを連続的に測定することで水分ストレスを測定できることをNamekenら（1969）¹¹⁾が報告している。筆者らは温室メロンの茎径を、分解能10 μ mのレーザーセンサを用いることで計測し、茎径の膨縮率と葉の相対含水量との間に高い相関関係があり、かん水判断の指標として使用できることを報告した（Sato and Hasegawa, 1995¹²⁾、佐藤・長谷川 1995¹³⁾）。

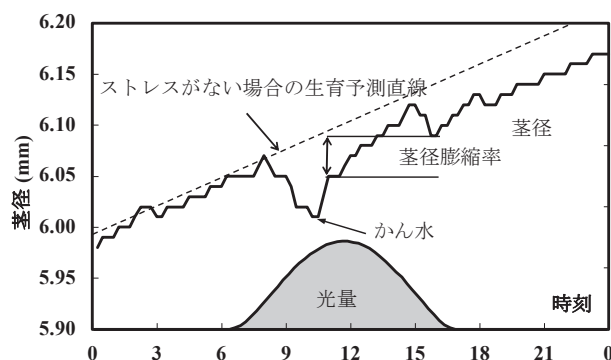
この測定は、温室メロンの株元の茎の部分に発光部と受光部で構成されるレーザーセンサを取り付け、茎がレーザーを遮ることで茎の僅かな膨縮を測定するものである（写真3）。温室メロンの場合は定植後2週間程度すれば設置可能で、一度作物体に設置しておけば収穫まで連続的に計測できる。

茎径は、水分状態を表すとともに肥大する。特に生育初期は肥大が大きく、茎径から水分状態を求めるには肥大の補正が必要となる。筆者らは夜間における肥大の速度を、水分ストレスがない場合の肥大速度と仮定し、水分ストレスのない場合はそのまま肥大するものとして予測直線と実際の測定値の差を茎径膨縮率として水分状態の指標とした（第2図）。

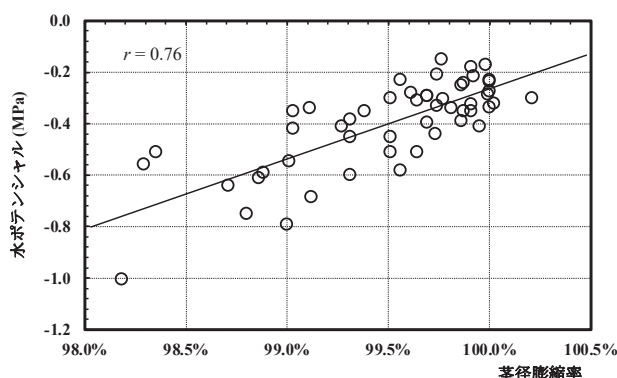
茎径膨縮率と葉の水ポテンシャルの値との関係は相関が見られ、温室メロンにおいても茎径の連続計測が、葉の水分状態を表すことを明らかにした（第3図）。レーザーセンサによる茎径測定が優れているのは、茎を測定することで、1枚の葉



写真3. レーザーセンサによる茎径測定



第2図. 茎径の変化と膨縮率の求め方



第3図. 茎径膨縮率と葉の水ポテンシャル

だけでなく、株全体の水分状態を把握できることである。

しかし、栽培においては薬剤散布などの管理作業が欠かせない。レーザーセンサも薬液がかかると値が変わるため、薬剤がかからないように注意して作業をしなければならない。農業用のセンサ全般に関わることであるが、防水の機能があり、管理作業による影響を受けないことも実用化には重要である。

VII. 画像解析の利用

作物の水分が不足すると、作物体にはしおれが見られる。栽培者はしおれの程度から、水分の不足状態を推測するが、この判断を画像データから行う試みがなされている。静岡大学の峯野教授のグループであるWakamoriら（2019）¹⁴⁾は、トマトの画像データのオプティカルフロー手法により葉のしおれを推測し、短時間の水分状態の変化が推定可能だと報告した。その時の水分の指標としては、茎径の変化を用いているが、オプティカルフローにより求められた葉のしおれ具合と、茎径

の膨縮変化に高い相関が見られた。画像データを指標に用いることにより、トマト栽培の管理の自動化も行っている。

画像データを生体情報として使用することは、人がしおれの状態を把握するプロセスと似ていることから、人の判断に近いかん水制御が可能になるものと思われる。作物の種類や生育状況、生育ステージによるしおれの変化などについて、今後の検討が必要と思われる。

VIII. 制御上の課題

様々な作物の生体情報を得て、作物のかん水制御を行う場合に解決すべき問題点がある。1つは施設面からみた環境の均一性である。通常栽培農家は、大学や研究所のように小さな実験ハウスではなく、広い施設で栽培している。ハウスが大きくなると、施設内の環境条件も大きく異なる。温度・日射・湿度条件などは場所により異なり、作物の生育にも影響を与える。ハウスを分割して栽培管理することも可能であるが、制御装置のコストは高くなる。制御の自動化において、施設内環境の均一化を図る事や、生育が均一になるような栽培システムを構築することも重要である。

2つ目の課題は、作物からみた均一性である。生体情報を把握する株が、制御施設内の代表値を示すかどうかの課題である。画像データを用いれば、広範囲における生体情報が可能であるが限界もある。またセンサを移動して計測する方法もあるが、コストに見合うかが問題となる。温度の制御は、一般農家の施設栽培では大きなブロックをまとめて制御を行っていることを考慮すると、生体情報についても温度センサーのようにブロックごとに設置し制御の値として捉えても、大きな問題は無いと思われる。いずれにしても、施設環境と生育の均一化を図ることが重要となる。

IX. 生体情報のIoT化

温室の温度や湿度などの環境情報は、スマートフォンなどで簡易に見ることができるよう機器が近年では多く販売されている。生体情報についてもIoT機器として利用できるものが多く、環境情報に加えて作物生体情報が簡易に得られるようになれば、施設作物の遠隔管理にも役立つとともに、栽培管理判断の補助的データとしても利用で

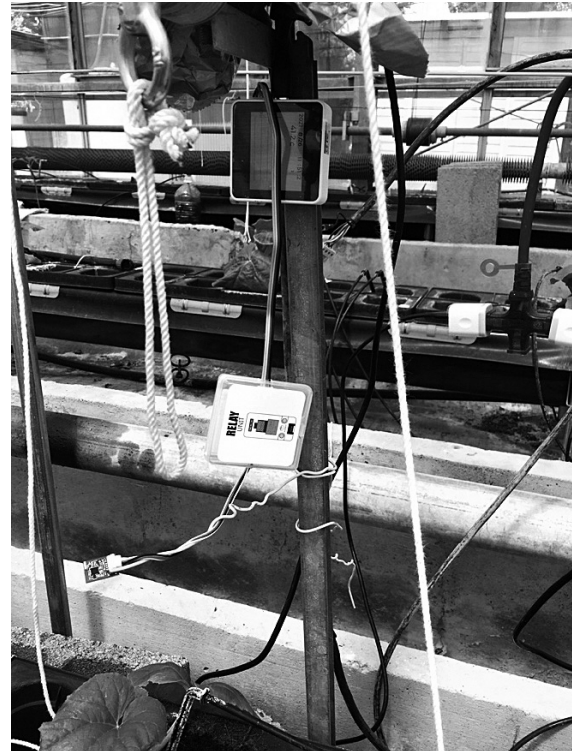


写真4. ワンボードマイコンによる葉温測定

きる。

近年のIoT機器の発展に伴い、低コストで使いやすい情報機器が数多く発売されている。かつてレーザーセンサによる茎径測定と制御には、パソコンやI/Oボードなどの付属機器が必要で、機器をそろえるだけでかなりの高額になった。さらにセンサによる計測値に基づき制御するシステムを組むためには、専門的な知識とプログラミング技術が必要であった。しかし、現在はワンボードマイコン、簡易に利用可能な様々なセンサ、モバイルルータなどを低価格で入手することができる(写真4)。一定条件以下であれば無料で使用することができる、クラウド型データベースサービスもある。

これらを組み合わせることで、ある程度の知識があれば簡易に環境情報や生体情報をクラウド上で閲覧可能なシステムを構築できる。データの可視化だけでなく、生体情報を含め蓄積した情報を有効に活用した施設園芸栽培が、今後ますます重要になってくるものと思われる。

参考文献

- 1) Udink ten Cate, A.J., Bot, G.P.A., and van Dixhoorn, J.J. Computer control of greenhouse climates. Acta

- Horticulturae 87: 265-272. (1978)
- 2) Hashimoto, Y. Computer control of short term plant growth by monitoring leaf temperature. Acta Horticulturae 106: 139-146. (1980)
 - 3) 高山弘太郎, 第2世代のSPA とその実装, 植物環境工学 (J. SHITA) 25 (4) : 165-174. (2013)
 - 4) 栃木博美・川里 宏, トマトの促成栽培における土壌水分が果実品質に及ぼす影響, 栃木農試研報 36:15-24. (1987)
 - 5) 石上清ら, 根域を制限した循環式養液栽培装置による高糖度トマトの生産, 静岡農試研究報告 38 : 61-72. (1994)
 - 6) 鈴木英治郎, 温室メロン栽培の基礎, 誠文堂新光社, 東京 (1970)
 - 7) 中原正一, 井上吉雄, 赤外線放射测温によるトマトの水ストレス反応の検出, 農業気象, 53 (3), 191-199, (1997)
 - 8) 藤野素子ら, キュウリ葉における水ストレスの非破壊計測に関する研究, 農業情報研究, 11 (2) 161-170, (2002)
 - 9) 大須賀隆司, ロードセルを利用した温室メロン生育の観察, 新しい農業技術 (静岡県), (2003)
 - 10) 大石直記ら, 高糖度トマト養液栽培におけるロードセルを用いた植物重量計測に基づく給液制御システムの開発, 植物環境工学, 30 (2) : 94-102, 2018
 - 11) Namken,L.N.et al, Monitoring cotton plant stem radius as an indication of water stress, Agronomy J, 61: 891-893, (1969)
 - 12) Sato,N.and K, Hasegawa. Automatic watering for muskmelon using lazar stem diameter sensor. Acta Hort., 399: 161-166. (1995)
 - 13) 佐藤展之・長谷川和宏, レーザーセンサを利用した温室メロンの茎径変化による体内水分連続測定, 静岡農試研究報告, 40, 1-5, (1995)
 - 14) Wakamori,K and Mineno,H. Optical Flow-Based Analysis of the Relationships between Leaf Wilting and Stem Diameter Variations in Tomato Plants, Plant Phenomics, (2019)