

スマート農業の研究事例からみる 数理・データサイエンス教育の必要性

岡安 崇史

わが国の農業は高齢化や担い手不足、異常気象の多発、消費者嗜好の変化などを背景に厳しい状況が続いている。そこで、農作業の効率化・省力化や栽培管理技術の高度化を目的に、ICT（情報通信技術）や AI（人工知能）などを導入したスマート農業への期待がますます高まっている。一方、スマート農業を実践するには、情報のハンドリング（計測・処理、評価・分析、可視化など）の知識と技術の習得が必要であり、普及・拡大を妨げている一因となっている。本稿では、筆者らが進めているオープンソースハードウェア・ソフトウェアを用いたスマート施設園芸研究ならびに植物形質を計測・抽出する植物フェノタイプ研究に関する事例紹介を行うとともに、これらの実践における数理・データサイエンス教育さらには人材育成の必要性について述べさせていただく。

キーワード：スマート農業、ユビキタス環境制御システム (UECS)、植物フェノタイプ研究、深層学習、データハンドリング、DX (Digital Transformation)、人材育成

1. 緒言

わが国の農業は、農家の高齢化、担い手の不足、異常気象の多発、消費者嗜好の変化などを背景に厳しさを増している。基幹的農業従事者人口は、2015年に約176万人だったが2020年には約136万人と5年間で40万人も減少し、平均年齢も67.3歳と高い水準を維持するなど深刻な状態が続いている。加えて、農業は地理的条件、地形、圃場の状態、市況などによってもさまざまな影響を受ける。よって、農家は長年の経験と勘の中で植物の生育状態を評価できる能力を身につけ、現状に適した栽培管理方法を選択・実施できるようになる。このような能力は一般に継承が難しく、その習得には長い年月が必要となる。このような農業の特異性から、将来の担い手であるはずの新規就農者の3割程度は5年以内に離農している [1]。以上述べた状況を抜本的に改革するため、情報通信技術 (ICT) や人工知能 (AI) を活用して農業生産技術の高度化を実現する「スマート農業」に関する研究が国家的プロジェクトとして精力的に進められている。たとえば、気温、湿度、日射量などの環境情報は植物の成長を左右する重要な情報となるので、農地環境計測と灌水などの環境制御を廉価な ICT 機器を用いて開発する試みも行われている [2]。

他方、植物の成長には遺伝子が大きく関与している。

植物の遺伝子情報は次世代シーケンサの登場によって網羅的かつ高速に抽出・解析できるようになり、植物の品種改良や新品種開発などに活用されている。しかし、植物は同一の遺伝子型（生物個体の遺伝的特性の構成）をもっていたとしても、植物の形態的形質（形状、色、大きさ、数など、以下形質と略称）は栽培環境や栽培方法などの環境的要因によって変化することが知られている。このような、植物形質の環境応答性を計測・定量化する技術は「植物フェノタイプ研究」と呼ばれる。近年では、コンピュータ技術の飛躍的な発展を背景に、植物の形質計測を網羅的かつ高速に行うための高速植物フェノタイプ研究に関する研究も世界各国で推進されている [3-5]。筆者らもスマート農業の高度化への活用を目的に、廉価な植物フェノタイプ研究システムの開発を行っている。

これらスマート農業や植物フェノタイプ研究の実践には、植物の栽培管理を担保する農学に加えて、環境計測・制御および植物成長計測のための工学、さらには計測したさまざまな情報を多角的に評価・分析するための数理・データサイエンスの習得が必要となる。わが国の農業生産技術の継承と高度化には、これらの知識・技術を有した高度専門人材の育成が急務である。

本稿では、まず、スマート農業の中でも施設園芸を対象に、栽培管理の効率化・省力化に必要な環境計測・制御技術の仕組みと研究事例の紹介を行う。次に、栽培管理の高度化、植物の品種改良や新品種開発に資すると期待されている植物フェノタイプ研究について研究事例も含めながら解説する。最後に、農学に加えて工学・数理・データサイエンスの素養を身につ

おかやす たかし
九州大学大学院農学研究院
〒819-0395 福岡市西区元岡 744
okayasu@bpes.kyushu-u.ac.jp

けた高度専門人材をどのように育成していくのかについても考えてみたい。

2. スマート施設園芸

国内におけるスマート農業は、国や地方自治体などからの支援もあり、導入する農家が徐々に増えてきている。施設園芸の場合でみると、施設内の温湿度やCO₂濃度などを計測するための環境モニタリング装置が普及してきており、パソコン、スマートフォンやタブレットなどを用いて、園芸施設内の環境情報を容易に把握できるようになってきた。さらに、栽培管理の省力化や適時環境調節による環境負荷低減の実現のため、環境制御装置の導入も注目されている。本節では、中小規模の施設園芸を対象にした栽培管理のスマート化技術について紹介する。

2.1 中小規模施設園芸のスマート化技術

中小規模の施設園芸において、大規模園芸施設で導入されている複合環境制御システム（側窓、換気扇、加温器などの環境制御装置が単体ではなく装置同士が協調的に動作して、より植物生産にとって適切な環境調節を行うシステム）が導入されているケースは未だ少ない。その理由の一つがシステム導入に掛かるコストであり、施設規模に対してオーバースペックであることが原因である。このため、国は園芸施設の大規模化を含めた構造改革を進めているものの、十分な成果は上がっていない。特に、農業生産大国であるオランダとは地理的要因が大きく異なっており、島国であることゆえの販路開拓（輸出も含む）の難しさや、台風襲来・異常気象に起因する被害発生などにより、大規模化のメリットを十分に発揮できていない面もある。その結果、複合環境制御システムが導入された園芸施設の普及率は、園芸施設全体の2.7%程度に留まっている[6]。前述の農業就業者人口の高齢化・減少や消費者ニーズへの対応なども考慮したうえで、わが国の施設園芸の実状に合った栽培管理の省力化・高度化技術の導入が求められている。

安場ら[7]は中小規模園芸施設を対象とした環境制御システムの更新や後付けによる機能の拡張を行うことを目的に、UECS (Ubiquitous Environment Control System, ユビキタス環境制御システム) の普及を精力的に行っている。UECSは、星ら[8]が提唱した施設園芸向け環境制御技術で、園芸施設内に設置された環境計測装置、加温器、灌水装置、換気装置などに小型のコンピュータを導入して、これらをネットワークで相互接続することで、複合的な環境調節を実現する自律分散



図1 ロードセルを用いた植物体重量計測装置

型環境制御技術である。コンピュータ間の通信プロトコルもオープンソースとして公表されており、農家自ら環境制御装置を製作することも可能である。詳しくはUECS研究会ホームページ (<https://www.uecs.jp/>) を参照されたい。上記ホームページからはUECSに基づく環境計測・制御装置の製作方法に関する情報のほか、実際の栽培管理に利用可能な各種ソフトウェアのダウンロードも行えるようになっている。

2.2 UECS の応用事例

植物は、光エネルギーと根から吸収した水および葉の気孔から取り込まれたCO₂を用いて光合成を行い、炭水化物を生成する。この一連の過程で葉に供給された水の大部分はCO₂を取り込む際に水蒸気として大気中へ放出される。同様の現象は呼吸の際にも発生する。さらに、水は土壌表面からの蒸発によっても失われることから、水の動態を精度良く把握することができれば、植物が必要な水を適切なタイミングで供給するための適時適量灌水制御が実現できる。このため、従来より植物の重量変化を用いた水利用特性を把握する研究が報告されている[9]。以下では、UECSを用いたトマト植物体の重量計測とその計測結果に基づく適時適量灌水制御の一例を紹介する。

図1にロードセルを用いた植物体重量計測装置を示す。本計測装置はロードセル（エー・アンド・ディ、LCB03K030L）、ひずみ計測用アンプモジュール（秋月電子通商、HX711）とワンボードコンピュータ（Arduino, Arduino MEGA 2560）、Ethernet Shield 2 (Arduino) から構成される。この装置を植物栽培ポットの下部と上部に取り付けることで、灌水による植物および土壌からの水の蒸発散量を計測できるようになっている。実験では、中玉トマト・フルティカ（タキイ

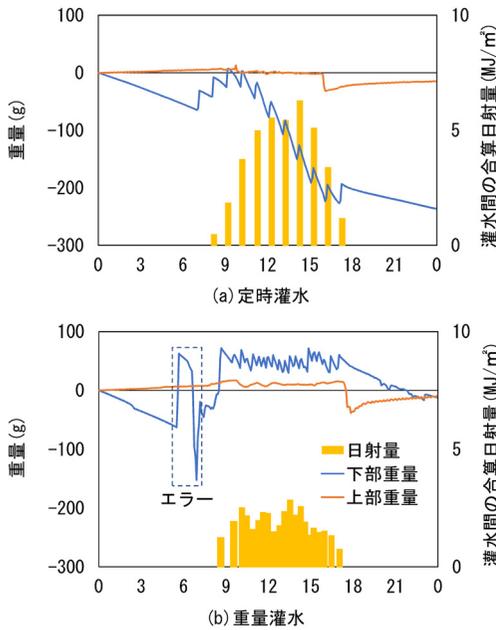


図2 定時および重量灌水の比較

ミディ 195) を、定時灌水(予め設定した時間間隔で灌水)ならびにトマト植物個体の重量変化に基づく灌水の二つの方法で栽培し、灌水総量とトマト植物体の生育特性の差異を調べた。

図2に2022年1月25日(晴天)における定時灌水(60分ごと)および重量灌水を行った際の重量変化と灌水間の積算日射量を示す。(a)定時灌水では、朝方は植物の水消費量より供給量の方が多かったため、下部重量が徐々に増加している。一方、日射量の増加に伴って植物の水消費量が多くなると、水消費量が灌水量を上回ってしまうので、結果として下部重量が大きく減少してしまっている。よって、定期灌水では、植物に与える水ストレスは午前と午後で大きな差となっている。一方、(b)重量灌水では日射量の増加に伴って灌水の回数が自動調節されるので、灌水間の日射量と下部重量の変動はおおむね一定の変動幅に収まっている。つまり、定時灌水の場合より植物に過度な水ストレスを与えるリスクは減少する。

表1に雨天ならびに晴天時における植物の水消費量と灌水量の比較を示す。水消費量は非灌水時の下部重量減少量を、灌水量は灌水時の下部重量の増加量を合算した値である。本表より、重量灌水では植物の給水作用に対応した灌水制御が行えていることがわかる。表2に定時ならびに重量灌水による収穫したトマトの重量および糖度の比較結果を示す。糖度は無作為に3粒を選択し計測した。果実重量は重量灌水の方が重くなった

が、糖度に関しては有意な差は認められなかった。

3. 植物形質の計測と評価

スマート農業の実践には、2節で述べたような各種機器や技術の導入が必要であることを述べた。しかし、これらの普及には栽培管理技術の高度化も重要であり、植物の生理生態特性の把握と、それに合わせた環境制御技術の開発にも注目が集まっている。その裏付けとなる興味深いデータがCostaらによってまとめられている[10]。同氏らはSCOPUSデータベースやほかの研究者がまとめた統計データなどを用いて、1997年から2017年までに公表されたゲノミクス、プロテオミクス、植物フェノタイピング、精密農業などに関する論文数の比較検討を行った。その結果、ゲノミクスやプロテオミクス関連の論文は2009年以降公表数が伸び悩んでいる反面、植物フェノタイピング関連の研究論文数は急増している点を指摘している。さらに、その流れに呼応して精密農業(スマート農業も含む)関連の研究論文数も増加傾向になっている点を示した。植物の生理生態的特性とその環境応答性の解明を目的とする植物フェノタイピング研究は、環境調節が可能な施設園芸の高度化に極めて有効かつ重要な研究となると期待される。

3.1 植物フェノタイピングロボットを用いた植物形質の自動計測

植物フェノタイピング研究では、植物形質の高速かつ非破壊での計測が求められるため、画像情報が利用される場合が多い。近年の電子機器の低価格化を背景に、可視画像のみならず、撮影対象物までの距離も同時計測可能なRGB-D(可視-深度画像撮影用)カメラも利用されており、2次元形質解析から3次元形質解析を含めた、より高度な植物形質の評価が行えるようになってきている。筆者所属の研究室では、廉価な電子機器とRGB-Dカメラにロボット技術を援用した葉菜類向け高速植物フェノタイピングシステムの開発を行っている[11]。

図3に植物フェノタイピングシステムの構成を示す。本システムは、植物の形質計測を行う移動式計測装置と走行レールから構成される。計測装置の移動は、Raspberry Pi 3B (Raspberry Pi Foundation)、モータドライバ(Cytron Technologies)、DCモータ(Crouzet)から成るシステムを用いた。計測装置の位置は、レール側面に配置したAR(拡張現実感)マーカを赤外線LED付カメラ(ELP)で撮影・認識することによって、ミリメートル精度で制御可能である。ARマーカには

表 1 植物の水消費量と灌水量の比較

灌水方法	2022/1/24 (雨天)		2022/1/25 (晴天)	
	積算日射量 3.0 (MJ/m ²)		11.1 (MJ/m ²)	
	灌水量 (g)	水消費量 (g)	灌水量 (g)	水消費量 (g)
定時灌水	294.0	247.6	296.3	536.8
重量灌水	153.3	246.3	693.3	738.6

表 2 トマトの重量および糖度の比較

灌水方法	収量 (g)		糖度 (%)	
	第 1 果房	第 2 果房	第 1 果房	第 2 果房
定時灌水	322.6	289.3	9.3	9.2
重量灌水	362.7	319.3	9.2	9.3



図 3 植物フェノタイピングシステムの構成

計測開始・終了、撮影などの情報を予めマーカ ID として紐付けし、撮影用マーカは必要に応じて自由に追加・削除できるようにした。さらに、温湿度、日射量、CO₂ 濃度などの気象計測用センサも搭載することで、植物の生育画像撮影と併せて、圃場環境情報の同時計測も可能にしている。一方、植物の生育画像の撮影は、RGB-D カメラ (Microsoft, Azure Kinect DK) を使い、カメラの制御と撮影画像の処理に Jetson Nano 4G を用いた。画像情報は膨大な量となるため SSD (Solid State Drive) 内にいったん保存した後、データをネットワーク経由でファイルサーバへ送信するようにした。

上記システムの計測性能を評価するための実験結果の一例を示す。実験にはハウレンソウ (早生クローネ) を用いた。栽培条件は栽培パネルの全穴 (縦 8、横 6 の計 48 個) に対して 3 種類の定植密度 (高密度: 100%, 中密度: 50%, 低密度: 37.5% および 33.3%) を設定した。草高の計測は定植 10 日後から週 5 回程度、指定した 5 株に対して定規を用いて実測した。また、上述した各生育指標と対象区画内のハウレンソウの茎および葉を含めた重量 (新鮮重と称する) を比較のため

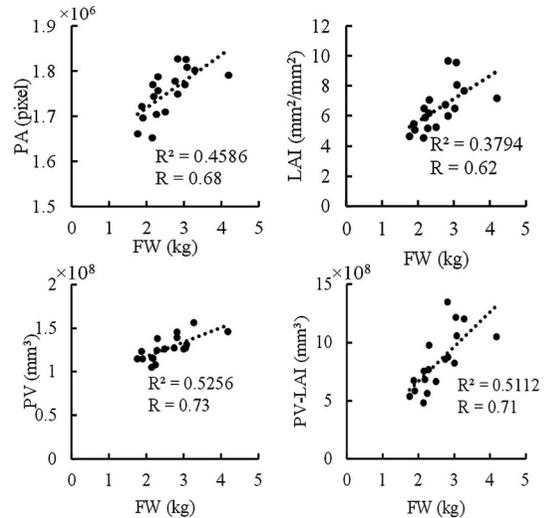


図 4 各生育指標と新鮮重 (FW) との関係

測定した。

図 4 に各計測地点における収穫前 2 日間の各生育指標と新鮮重 (FW) との関係を示す。FW の計測は各定植密度に対して 6 箇所ずつ計 18 点で行った。その結果、投影体積 (PV) および投影体積×葉面積指数 (PV-LAI) は FW との高い相関が得られた。既往の研究で用いられている投影面積 (PA) や葉面積指数 (LAI) なども FW と比較的高い相関が得られたが、草高情報を加えることによって高精度が実現できていることが確認された。

図 5 に各生育指標の経時変化と定植密度との関係を示す。エラーバンドは標準偏差を表す。PA は定植後 29 日付近まで増加し、定植密度に対しても明確な差異が認められるが、生育が進むにつれて、その差は徐々に小さくなった。これに対して、LAI は生育終盤においても定植密度に対して明瞭な差が認められた。PV

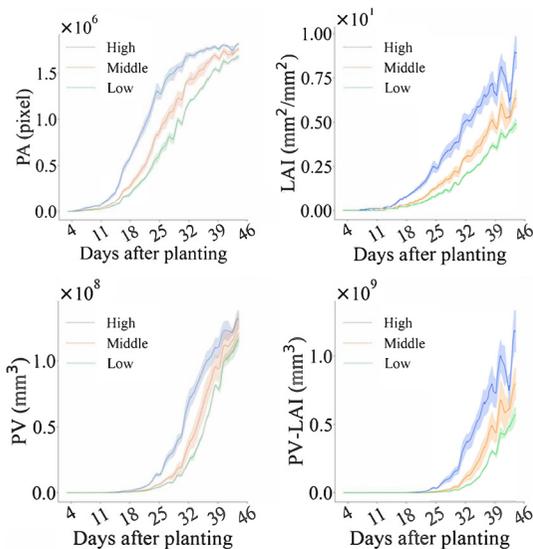


図5 各生育指標の経時変化と定植密度との関係

は17日付近から低・中密度区に比べて高密度区では大きく増加しており、定植密度による差は明確となった。同様に、PV-LAIについてもLAIの変化が考慮されており、定植密度による生育特性の差異を表現できていることがわかった。

3.2 深層学習による植物形質の計測と可視化

近年農業でも深層学習 (Deep learning) の利用が行われるようになってきている。特に、画像解析の応用事例は多く、花、果実などの認識・計数情報を用いた生育状態の評価や収量予測や病害虫の計数・診断に基づく適時防除などへの応用が拡大している。

図6は深層学習によるトマトの花・果実の抽出結果を示す。植物画像は、全天球カメラ (RICOH, Theta V) で撮影およびひずみ除去を行った後、深層学習を用いてトマトの花および果実を検出した。実際には花と果実 (緑色果、赤色果) だけでなく、誘引器具、灌水バルブ、捕虫シートも判別できるように検出器を作成している。物体検出には、Faster R-CNN (Regions with Convolutional Neural Networks) を用いた。検出精度は、全天球画像で画素数が少なかったことや、後列の植物体除去を行わなかったことなどが原因で十分な精度ではなかった。それでも植物1個体の草高や葉の状態 (今回は自動計測ではなく、日付の異なる画像による目視での確認のみ) を評価できたと同時に、着果・結実の状態 (深層学習により数と果実の熟度を検出) を取得できていることがわかった。画質の改善によって検出器のさらなる精度向上も期待できるが、栽培管理にどの程度の精度が必要なのかは十分に検討する必

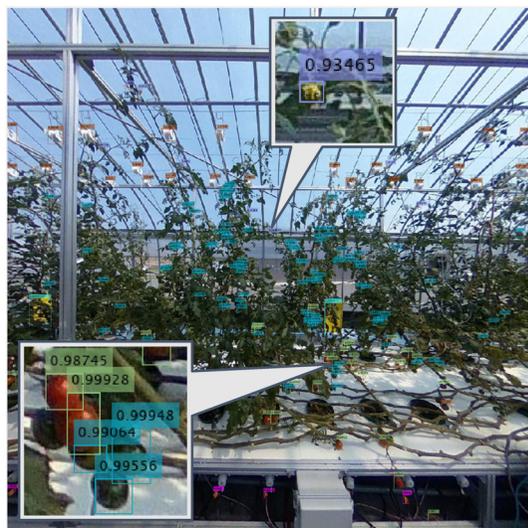


図6 深層学習によるトマトの花・果実の抽出結果



図7 VR空間における花・果実情報の表示 (イメージ)

要がある。管理・収穫作業などの自動化のための情報としてはより高精度な検出結果が必要になる。一方、栽培管理の意思決定のための補助的な情報として利用する場合には、植物個体ごとの花や果実の状態と、ハウス内における分布をある程度把握できる方が有益である。

図7は深層学習で検出された花・果実の情報のVR (Virtual reality, 仮想現実) 空間内での表示例 (イメージ) を示している。本図はゲーム開発エンジンのUnity上で、ハウス内で撮影した全天球画像に深層学習で抽出された植物の生育特徴量を重ね合わせ表示したもの

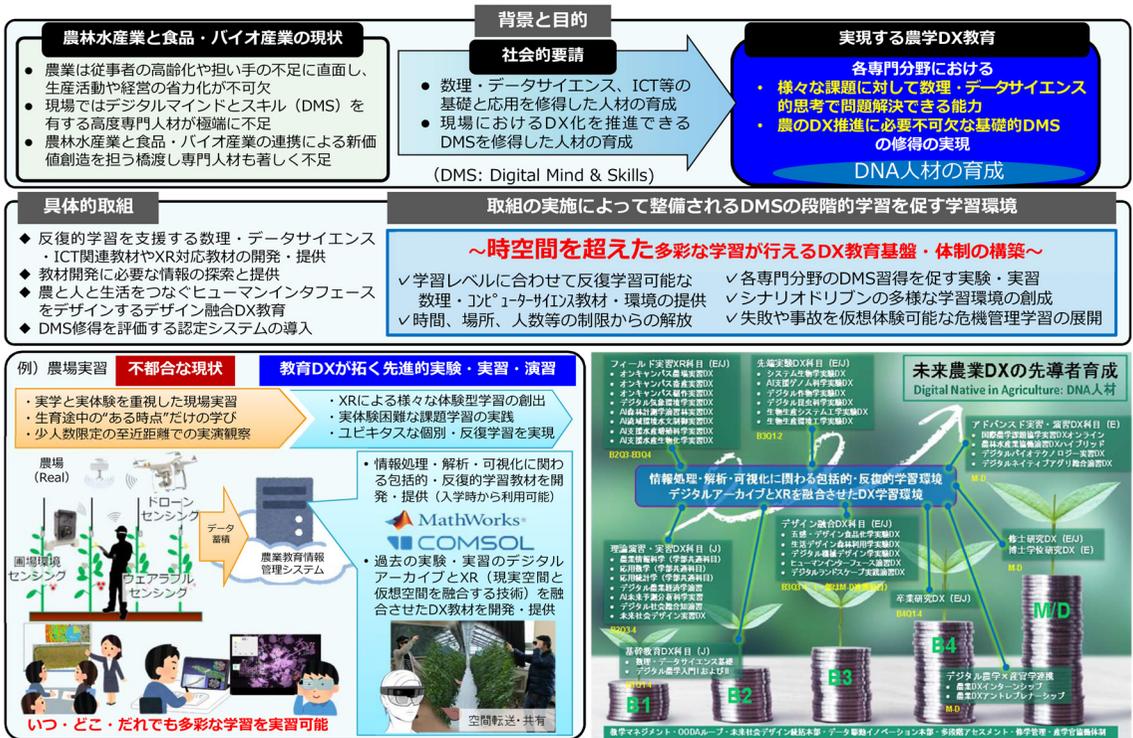


図 8 採択された人材育成プログラムの概要

である。このように全天球画像を用いれば、ハウス内にいるような感覚で植物の生育情報を観察できるようになる。農家目線で情報を可視化できるユーザインタフェースの利用は、栽培管理の意思決定の改善に繋がらずである。

4. スマート農業実践における数理・データサイエンス教育の必要性

前述のように栽培環境や植物の生育状態を定量的に評価できれば、栽培管理の改善や最適化に活かせる可能性は高い。その一方で、どのような良い技術が開発されたとしても、実際の農業生産現場で、それらの技術を適切かつ十分に活用できなければ全く意味をなさない。さらに、ICTやAIの導入によって膨大な情報が継続的に自動収集できるようになるため、これらの情報のハンドリング（計測・処理、評価・解析、可視化など）に関する知識や技術についてもある程度習得しておく必要がある。以上の点はスマート農業の普及を妨げている要因であると同時に、収集された情報が十分に活かされない実態を招いている。

九州大学では、「総合知で社会変革を牽引する大学」を実現するための「Kyushu University VISION 2030」を策定している。中でもDX（デジタルトランスフォー

メーション）は第1の大学経営の合理化に次ぐ、第2のビジョンに位置付けられており、数理・データサイエンス、AIなどを応用できる人材、さらにはDXによる社会変革や社会実装に貢献できる人材の育成を掲げている。その実現のため、入学当初からの数理・データサイエンス、AIに關する多様な学習環境の構築が行われている。たとえば、2023年1月からMathWorks社のMATLABをキャンパスワイドライセンスとして導入する計画もその一端である。

一方、筆者が所属する農学研究院においても文部科学省の「デジタルと専門分野の掛け合わせによる産業DXをけん引する高度専門人材育成事業」に採択され、「近未来の農林畜水・食品・バイオ産業のDX化を牽引するDNA (Digital Native in Agriculture) 人材育成プログラム（図8参照）」をテーマに教育・研究へのDX導入を進めている。同プログラムでは、低年次の数理・データサイエンス教育においてデータハンドリングに必要な基礎知識・技術を習得し、高年次専門教育でこれらを農学分野の社会的課題解決のために利用する方法を学習するように概念設計されている。たとえば、前述したスマート農業を実践するには、植物の栽培環境や生育状態の計測・評価のための時系列データ解析、画像処理・解析、AIなどの知識・技術が必要と



図9 農業情報学で使用するテキスト

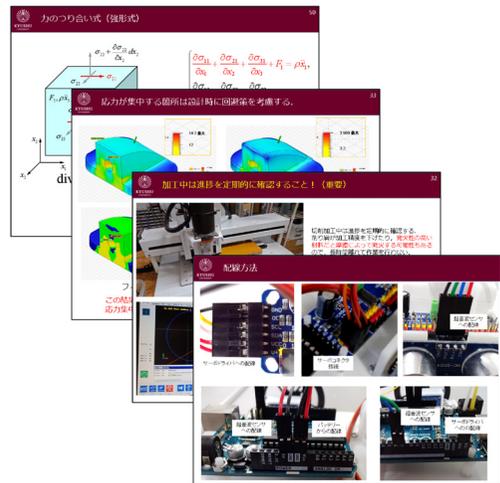


図10 機械設計学で使用するテキスト

なる。低年次においてデータハンドリングに関する基礎知識・技術の習得が完了していれば、データの解析や可視化など、より発展的な内容の講義を提供することが可能になる。さらに、講義に関しても、従来の座学中心の内容から、コンピュータを用いたハンズオン実習も含めた内容に発展させることも可能で、発想力や応用力により重点を置いた教育が行えるようになる。しかし、本プログラムはまだ始まったばかりで具体的な成果はないため、以下では筆者が行っているDX教育の一端を紹介したい。

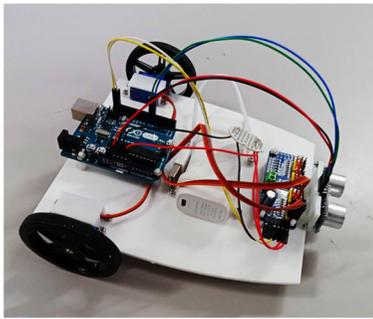
4.1 DXによる科目横断型講義の実践

筆者はスマート農業と農業機械学に関する教育・研究を行っており、専門教育では農業情報学、材料力学、機械設計学などの講義を担当している。九州大学農学部に入學した学生は2年後期の専門分野配属(学生からの希望と成績で所属分野を決定)の時期まで1学部1コースとして教育が行われる。このため、低年次教育でデータサイエンスやコンピュータプログラミングなどの科目を履修している学生の比率は少なく、これらの内容の理解度や習熟度には学生間でかなりの差が生じている状態である。したがって、専門分野の講義で、上記の内容を履修していることを前提とした内容を説明しても、十分に内容を理解できない学生もいる。専門教育は卒業研究やその後の就職に必要な内容を多く含んでいることから、内容によってはより実践的な視点で講義を行った方が有効である場合も多い。

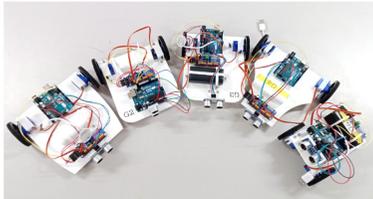
たとえば、農業情報学(2年次後期開講)の講義では、農業生産に関わる情報の収集・計測やその利用方法について理解することを目的としている。そこで、各種センサを用いた温湿度や光強度などの計測および計測

した情報に基づく機器制御に関するアルゴリズム設計と具体的プログラミングについて、学生自らが実体験しながら学べるようにした。講義内容は、すべてデジタルコンテンツとして作成し、九州大学LMS(Learning Management System)のMoodleを通じて学生にオンライン配信した(図9)。これにより、学生は事前に講義内容を確認できると同時に、実際の講義ではプログラミングスキルの習得に集中できるようにした。本講義を履修した学生の感想としては、環境計測・制御装置がどのような仕組みで動作しているのかを理解することができたとの意見も寄せられた一方、プログラミングが難しかったとの意見も寄せられるなど、学生の理解度に差があることがわかった。この辺りは今後の改善が必要である。

もう一つの例として機械設計学(3年次前期開講)の講義を紹介する。本講義は機械設計に関する知識と技術の習得を目的に、3次元CAD(Computer Aided Design)であるFusion 360(Autodesk, 教育機関であればオンライン登録を行えば無償で使用可能)を用いた機械部品の製図、同ソフトウェアのCAE(Computer Aided Engineering)機能による強度解析(有限要素法を使用)、簡易走行ロボットの製作までの一連の知識と技術を取得できる内容(図10)となっている。強度解析の導入により、学生は2年次後期に履修した材料力学の内容が実際の機械設計にどのように利用されるのかを体験しながら理解することができるようになっていく。ロボット製作実習では、履修学生を小グループに分け、基本設計からロボット製作までを実体験できるようにした。図11は履修学生が製作した簡易走行ロボットである。3次元CADによるロボット構成部品の設



(a) 製作した簡易走行ロボット



(b) 各グループが製作した簡易走行ロボット

図 11 講義で製作した簡易走行ロボット

計だけでなく、3DプリンタおよびCNC(Computer Numerical Control)加工機を用いて実際に部品製造を行うことにより、走行ロボットがどのような構造で製作されているのかを実際に手を動かしながら学習できるようになった。履修した学生からは「本講義で部品の設計から製造までを実体験したことで、一連の流れを理解することができた」とおおむね良好な回答が得られた。未だ取り組み始めたばかりであるが、モノ作りに関する知識と技術を同時に提供できる講義内容としたことにより、学生の発想力や応用力の向上に役立ったのではないかと考える。

5. 結言

本稿では、わが国の農業の現状と課題の抽出を行うとともに、その解決策として期待されているスマート農業および植物フェノタイピングに関して筆者自身の研究事例を交えながら紹介させていただいた。ここで紹介した内容はこれらの研究のごくごく一部の事例に過ぎないが、これらの研究によって得られた成果を積極的に社会還元していくことにより、農業生産技術の高度化は着実に進んでいくものと確信している。筆者自身もその流れに多少なりとも貢献できるよう、教育・研究に注力していきたいと考える。

謝辞 本稿の内容は九州大学の安武大輔先生・尾崎行

生先生・井上英二先生・平井康丸先生、堀本正文氏、小野溪太氏、上野文太氏、高知大学の北野雅治先生・岩尾忠重先生・野村浩一氏、小松製作所の伊藤次郎氏からの協力をいただいた。本研究内容の一部は富士通(株)との共同研究事業「需要に応じた食の安定供給モデルのシステム化に関する研究」、科研費(JP18K05906)および「デジタルと専門分野の掛け合わせによる産業DXをけん引する高度専門人材育成事業」の支援により実施したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 農林水産省, 「令和4年農業構造動態調査結果」, <https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukou/attach/pdf/index-2.pdf> (2022年8月10日閲覧)
- [2] A. P. Nugroho, T. Okayasu, T. Hoshi, E. Inoue, Y. Hirai, M. Mitsuoaka and S. Lilik, “Development of a remote environmental monitoring and control framework for tropical horticulture and verification of its validity under unstable network connection in rural area, *Computers and Electronics in Agriculture*,” *Computers and Electronics in Agriculture*, **124**, pp. 325–339, 2016.
- [3] F. N. Roberto and B. Aluizio (eds.), *Phenomics: How next-generation phenotyping is revolutionizing plant breeding*, Springer, 2015.
- [4] 大政謙次, “植物機能リモートセンシングとフェノミクス研究への展開,” 学術の動向, **21**(2), pp. 72–76, 2016.
- [5] N. Virlet, K. Sabermanesh, P. Sadeghi-Tehran and M. J. Hawkesford, “Field scanalyzer: An automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring,” *Functional Plant Biology*, **44**, pp. 143–153, 2016.
- [6] 農林水産省, 「施設園芸をめぐる情勢」, <https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/attach/pdf/index-57.pdf> (2022年8月18日閲覧)
- [7] 安場健一郎, “第4章 農業のスマート化 4-5-3 統合環境制御と環境制御コントローラのリニューアル,” 『新スマート農業—進化する農業情報利用—』, 農業情報学会(編), 農林統計出版, pp. 124–125, 2019.
- [8] T. Hoshi, Y. Hayashi and H. Uchino, “Development of a decentralized, autonomous greenhouse environmental controlling system in a ubiquitous computing and internet environment,” In *Proceeding of 2004 AFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture*, pp. 490–495, 2004.
- [9] T. Helmer, D. L. Ehret and S. Bittman, “CropAssist, an automated system for direct measurement of greenhouse tomato growth and water use,” *Computers and Electronics in Agriculture*, **48**, pp. 198–215, 2005.
- [10] C. Costa, U. Schurr, F. Loreto, P. Menesatti and S. Carpentier, “Plant phenotyping research trends, a science mapping approach,” *Frontiers in Plant Science*, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01933>, 2019.
- [11] 伊藤次郎, 岡安崇史, 野村浩一, 安武大輔, 岩尾忠重, 尾崎行生, 井上英二, 平井康丸, 光岡宗司, “低コストIoTデバイスを用いた植物フェノタイピングロボットの開発とその性能評価,” 農業情報研究, **30**(2), pp. 13–23, 2021.