

農業の現在と未来を考える中での IT・センシングの有効利用

亀岡孝治^{†1}

現在から未来につながる持続的な農業を実現するには、地域コミュニティと地域リソースとの関係で持続可能性を追求しようとするスマート農業の確立が極めて重要である。本稿では、このスマート農業に必須とされる科学的農業技術体系の確立に向けて現在進められている技術と技術的課題を ICT との関連でとらえつつ、農業用センサネットワーク、農業現場での環境と農作物のための光センシング技術に関わる研究を中心に紹介する。

Effective Application of IT and Sensing in Present and Future Agriculture

Takaharu Kameoka^{†1}

This paper gives an outline of key technologies necessary for science-based agriculture. In order to design future agriculture, present agriculture should be redesigned based on the context of smart agriculture that indicates the overall form of agriculture including a social system while the present precision agriculture shows a technical form of agriculture only. Wireless sensor network (WSN) and the various type of optical sensors are assumed to be a basic technology of smart agriculture which intends the harmony with the economic development and sustainable agro-ecosystem. In this paper, the current state and development for the environmental and plant sensing based on the next generation agricultural technology with WSN are introduced.

1. はじめに [1]

20 世紀に人口は 16 億人から 60 億人（国内では 4,384 万人から 1 億 2,693 万人）と爆発的に増大したが、農林水産業（以下農業）はこの人口増を画期的な技術で支えた。しかし、この技術の無計画な使用は、水質汚染・土壌汚染、機械化、化学肥料・農薬に関わる資源とエネルギーの多大な消費、あるいは水消費環境に対する多大な負荷をもたらした。20 世紀の終わりには「食の安全・安心への不審」という少し性格の異なる新たな負の遺産を背負い込むに至った。この反省を踏まえ、2050 年の人口が 90 億人を超えると予想される 21 世紀農業においては、EU を中心に 1) 持続可能性、2) 気候変動への適応、3) 生態調和型 / 環境保全型、4) エネルギー節約などへの対応が叫ばれている。

国内農業に目を転ずると、戦後、日本経済の高度成長は農業から大量の労働力流失を促し、稲作の兼業化が増える中で、日常の農作業が機械化で補われる形で農業労働力の弱体化が進行した。この間農業生産の変貌も著しく、国内農業生産の拡大以上の速度で食糧需要が拡大したため、海外からの農産物輸入が増大し、食糧自給率は 39% まで漸減し今日に至っている。また、今日では米に代わり、畜産部門が農業生産の 1 位を占めるが、これは海外からの安価な飼料穀物輸入に支えられたものである。現在の日本の農業の GDP 比は他の先進国と同様に 2% 以下となり、数字的には産業としての存在感に欠けるものの、農業が食料生産を担っているという一点で農業は依然として人類にとって最

も重要な産業である。また、2005 年に 1 億 2800 万人でピークに達した人口は、2060 年までには 1950 年と同じ人口約 8600 万人まで減少し、この間 65 歳以上の高齢者人口は全体の 40% を占める時代が到来すると予想されている。日本固有の未来を考えると、特に農業に対しては収量増を目指す国際的アプローチと品質向上を目指す国内的アプローチでは、コンセプトが全く異なることになる。

現在進みつつある農業への IT（情報技術）、ICT（情報通信技術）、およびセンシング応用技術に関しても、基礎研究は世界的に共通であるものの、応用研究や実用化研究においては、現在から未来に向けた国家シナリオを構築した上での正しい技術的対応をとることが不可欠となる。

ところで、現在、日本では環境・エネルギーの最適化の観点から、スマートシティを代表に様々なスマート化構想が動き始めているが、食料生産を担うスマート農業拠点も極めて重要である。農業情報学会では、スマート農業を「ICT とセンサを基盤技術とし、地域条件に依拠して要素技術を最適制御しつつ経済調和、環境調和を志向し、持続的な農業を目指す次世代農業技術」と定義し、地域コミュニティ、地域リソースと連携する持続可能性を持つ科学的農業技術体系の構築を求めている。さらに、東日本大震災と原発事故によりもたらされた農産物の倫理品質の問題でも、新しい技術的取り組みが求められている。

本稿では、現在から未来につながる「農業現場での農作物の栽培における環境と農作物の計測技術」を中心テーマとして掲げ、科学的農業技術体系の確立を目指して現在進められている技術と技術的課題を ICT との関連でとらえつつ、筆者らのグループの研究を中心に紹介することとした。

^{†1} 三重大学
Mie University.

2. 農業での計測と ICT の応用

2.1 圃場における環境と農作物の計測

工業と農業を隔てる重要なポイントは現場のシステムにおける計測と制御の完備性である。工業の中心場としての工場では、計測と制御システムが完備しているが、圃場では、農作物を取り巻く生育環境の計測は可能であるが制御は不可能である。一方、対象となる農作物（植物体）側の、荒っぽい制御は可能であるが、草丈などの簡単な計測を除けば植物生理・機能などの複雑な計測は難しい。したがって、農業現場での農作物の生育モニタリングを考える場合、計測対象を、制御不能な生育環境を有する場としての「圃場」とそれ以外の「農作物、農業者、および土壌・土壌微生物」に分けて考えることが重要となる（図1）。

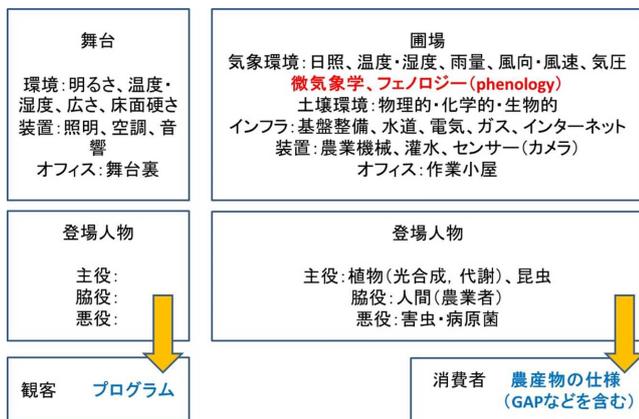


図1 農業を科学的に理解する視点

Figure 1 Perspective to understand agriculture scientifically

圃場では、生育条件の大部分を構成する気象条件(温湿度、風向・風速、気圧、降雨、日射量)は農作物と無関係に地理的位相で定まるため、それぞれの生物が四季の変化に応じて自身をコントロールしていることを意味するフェノロジー（生物季節）からの視点が、計測では重要となる [2]。このフェノロジーからは、毎日の平均気温の積算値（有効積算温度）や毎日の日射量の積算値（積算日射量）を指標とする考え方が産み出されており、これらが気候変動のモニタリングにおける重要指標となることが分かる [3]。

近年気候変動の影響が増大し、「経験と勘」だけに頼る農業経営が難しくなる中で、圃場の生育環境データや近隣のアメダス気象データを活用し、生育作物との関係でデータ蓄積・解析を行う事で栽培における現状理解を深めつつ、近未来を予測し農作物の生産見通しを立てることに、計測技術・センサ開発と ICT は大きく貢献し始めている。2001年のフィールドサーバ (FS) の開発 [4] に端を発する農業向けの計測機器やセンサ開発、圃場センサネットワーク研究が過去 10 年間で飛躍的に進展し実用的利用が進んだおかげで、生育環境（気象・土壌環境）のモニタリングとデータ蓄積が容易になると共に、フェノロジー指標である二次情報としての有効積算温度と積算日射量も簡単に計

算・出力できるようになった [5]。

科学的栽培支援システムは、21 世紀が求めている環境保全型農業を G.A.P（適正農業規範）のもとで、農業を実践するために極めて重要な位置を占めている。しかし、現在の農業 ICT のステージは、圃場で生育環境データが安定的に取得出来るステージにたどり着いたところであり、圃場の気象データ、あるいは土壌水分データがモニタリング出来るにすぎない。最近の新しい動きとしては、稲作に関する農業生物資源研究所のトランスクリプトームを用いた開発があげられる [6]。この開発は実際の複雑な気象変動を踏まえた上で遺伝子の働き方を推定するシステムも世界初の成果であり、過去の気象データを用いてイネや他の作物の生育状況の予測、施肥や農薬散布などの適切な時期の把握などへの可能性が期待される。しかし、トマトや果樹を対象とする樹体計測では、ようやく樹体中の樹液流計測が可能になったところである [7]。

ところで、農作物の遺伝子の読み解き速度がムーアの法則を超える速さで高速化されている上に、遺伝子発現が体内時計や人間の管理も含む環境との相互作用で大きく変化することも徐々に明らかになり、時系列に沿った高速の表現型計測がますます重要になっている [8,9]。この植物体の高速センシング技術は、短期的には植物表現型研究（フェノミクス）の大きな推進力となると共に、将来低価格化が実現されれば、需要期に高品質な農産物を生産するための栽培管理システムのコア技術になることが期待される。そのためにも、農作物の状態を計測し栽培管理に反映させる新たな栽培技術体系の構築が急務であると思われる。

2.2 農業用センサネットワーク

近年の気候変動は農業現場においては極めて大きな問題となっている。一般的に、高温は雑草や病害虫の増加を助長し、降雨パターンの変化は作物の不作や長期的な生産性の低下を招くことが知られている。FS は、通信モジュールに無線 LAN を利用することで高解像度画像などの取得を実現し、計測・制御モジュールに Web サーバを内蔵することで、遠隔地からの容易な管理・アクセスを実現するという特徴を備えている。最近では商用 FS(イーラボエクスぺリエンス (株) FS, 次世代技術(資) アグリサーバなど)やそのコンセプトに沿った様々な機器(ソフトバンク (株) e-案山子, クロスアビリティ(株) フィールドルータ+気象計測器など)が製品化され、農業研究分野を中心に様々な場所で利用されはじめてきた[5]。しかしながら、これらはまだコスト的に敷居が高く、機能・項目・扱い方などが必ずしも利用者にマッチするわけではない。現在能研機構では、①オープンソース・ハードウェア(Arduino)の利用、②フリーのクラウドサービス(twitter, flickr)の活用、③FS の図面・仕様・ソース情報のオープン化、④複雑な部品をユニット化し、入手情報の公開、⑤製作～運用のマニュアル・ノウハウの共有化、といった特徴を持つオープン・フィールド

サーバ(Open-FS)を提案し, 研究開発が行われている [10].
 また, 果樹栽培現場などでは, 遠隔からの果実の成長にと
 もなう外観品質のモニタリングが重要であるため, 農作物
 の栽培現場での高精細画像に特化したシステムと, 栽培者
 への画像を用いたサービスのための画像ハンドリングソフ
 トウェアの研究も平行して行われている [11]. このような
 背景のもと, 栽培管理のために栽培現場にワイヤレスセン
 サネットワーク (WSN)を導入・構築し, 継続的なデータ
 を取得する研究が, 国内外で広く行われている [12-17].

この中で, 筆者が中心となって行った柑橘栽培の支援の
 ための実用化研究を紹介する. ここで特筆すべきは, 農業
 用 WSN が現在まで 4 年以上安定運用されていることであ
 る. この事業では, 農水省の二つの画期的発明であるマル
 ドリ栽培技術と園地の状況やミカンの生育状況をリアルタ
 イム計測するフィールドサーバ技術を導入するとともに,
 WSN の eKo (Crossbow Technology 社) も試験導入し, 高
 品質ミカン育成のための農業 ICT 活用ノウハウを見つける
 ための実証事業を行った [17,18]. 図 2 に圃場情報取得シ
 ステムとデータフローを示した.

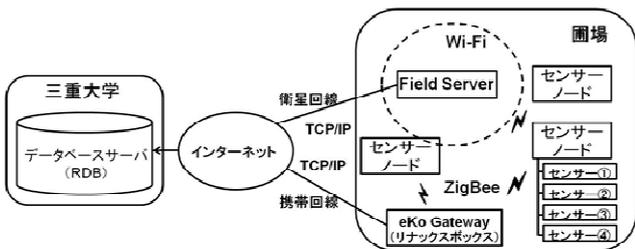


図 2 圃場情報取得システムとデータフロー

Figure 2 Field information acquisition system and its data flow

得られた気象データや圃場の土壌水分や樹体水分スト
 レスデータを収集・分析して, 最適な点滴灌水を行うこと
 で高品質なミカン生産を促進するというものであり, 樹体
 水分ストレスや土壌水分情報が携帯電話で見られるだけ
 でなく, 灌水指示のアドバイスが受けられるようなシステ
 ムが構築された. 取得データの分析の結果, 得られるきめ
 細かなモデルパターンがあらかじめデータベース化されて
 いれば収量の安定化につながることを示唆されたため, 取
 得データの分析モデルのさらなる充実とともに現場ニーズ
 を反映した的確なサービスに今後の期待がかけられている.

近年の WSN の展開について少し述べる. WSN で 900MHz
 帯が利用可能になったため, センサノード間の通信距離が
 飛躍的に伸張すると思われる. また, 農業現場からの計測
 データの転送には主として携帯電話網のデータ通信が用
 いられ, データ端末にはスマートフォンが一般に用いられ
 るようになってきおり, 今後の WSN の普及が期待される [16].

ところで, 植物工場では, 気象計測は施設に備わってい
 るシステム (UECS [19] など) により行われるため, WSN
 は光センサを対象として, 対象農作物の群落における光環

境計測, 特に葉面積指数 (LAI) に用いられることが多い.
 以下に特徴的な研究を紹介する. 近赤外領域の光が葉に吸
 収されにくいことを利用して, 樹体への入力光と地面に到
 達する光を計測し, 樹体の葉の重なりを推定することで
 LAI を求める研究が, UECS へのシステム化との関連で行
 われている [20]. 筆者らは, 総務省 SCOPE のプロジェク
 トの一環として, トマトの栽培スケジューリングを実現す
 るために, 植物工場三重実証拠点で温湿度・照度が計測で
 きる小型センサを開発し WSN として用いることで, 農作
 物周辺の微気象とともに葉面積指数 (LAI) の変化を計測
 中である. また, 植物工場の環境センシングでは, センサ
 は出来る限り植物に密接して配置できるように 920MHz
 特定省電力無線を用いて WSN を構築した (図 3) [21-23].

WSN に接続の小型ステレオカメラで取得される 3 次元
 画像の解析を通して LAI やそれに準ずる指標を計算する手
 法も研究されている [24]. 図 4 にステレオカメラから得ら
 れた 2 枚の画像を用いて再構成した 3D 画像を示した.

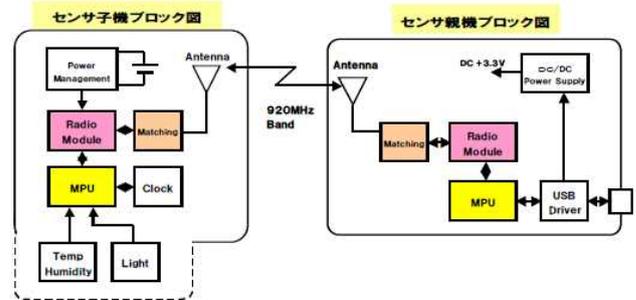


図 3 920MHz 特定省電力無線システムの構成図

Figure 3 Block diagram of 920MHz specified low power radio station

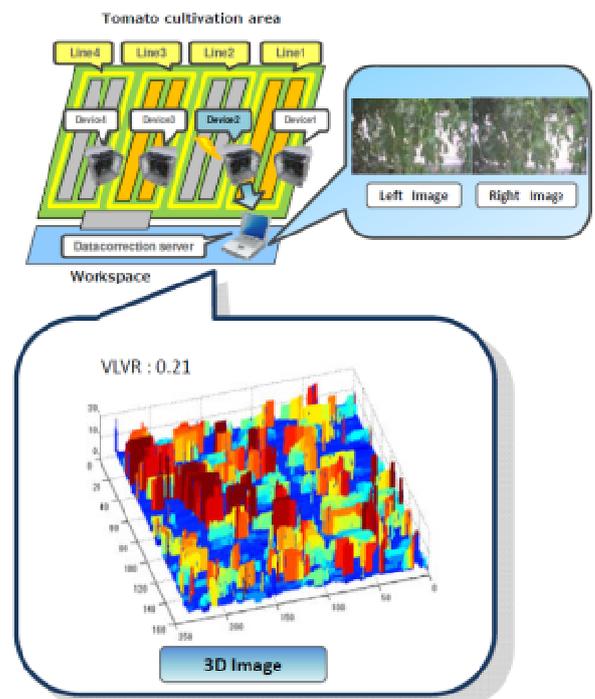


図 4 ステレオカメラからの 3 次元画像構成

Figure 4 3D images taken by the stereo camera devices.

データに基づく農業を行う場合、長期に渡り蓄積されたり、いくつかの種類が組み合わせたりしたときに初めて「情報」が生まれる。また、複数の情報が適切に組み合わせられると「知識」になり、さらに使える知識が「知恵」に格上げされる [25]。本日に ICT が理解されるためには、早急にこの流れが作りだされることが必要である。

膨大な農業情報変から重要な情報を抽出する問題を変化点検出問題としてとらえ、特異スペクトル解析法 (singular spectrum analysis) [26] を応用して抽出を試みた岡安らの研究 [27] を紹介する。変化点検出問題とは、観測される時系列データの背後にあるデータ生成機構を想定した際、その生成機構の構造的な変化を検出する問題である。これは時系列データからノイズを取り除くために、時系列から作られるハンケル行列に特異値分解を施し、特徴抽出するものであり、特異スペクトル解析を変化点検出に応用する手法が提案されている [28]。岡安らは、この特異スペクトル解析法を膨大な農業環境情報の変化点抽出に適用し、良好な結果を得ている [27]。

図 5 に筆者らが考える ICT を用いた科学的栽培支援システムの考え方を示した。最も重要な点は ICT による自動システムを目指すものではないということである。

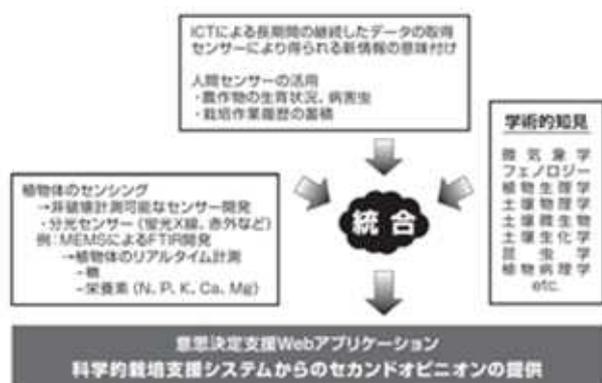


図 5 ICT を用いた科学的栽培支援システムの考え方
 Figure 5 Concept of scientific cultivation support system using ICT

農業はあくまでも農業者により営まれるべきであるため、ICT ベースの科学的栽培支援システムから農業者に与えられる情報・知識は、セカンドオピニオンに過ぎないととらえる姿勢が重要となる。農業者が科学的知見から得られる情報・知識を得ながら科学的根拠に基づく「経験と勘」を持つ農業者が育成されることが大きな目標となっている。

3. 農業と光センシング

高品質農作物の安定供給を目指すには、栽培時における農作物の栄養状態の計測とその状態への最適な対応は非常に重要である。特に、食糧問題や食の安全・安心等から注目されている植物工場の場合には露地栽培と異なり、作物

の栄養状態の計測・制御が不可欠となる。植物体は、必須元素を無機養分の形で水とともに根から体内に吸収しており、植物体内における必須元素バランスは栄養状態に大きく関与する。農作物栽培において、元素バランスの変化を栽培現場レベルで把握することは非常に重要なポイントであり、正確な元素バランス情報を取得することにより、施肥量や環境調節などの制御が可能になると考えられる。また、近年の不安定な気候と農作物との関連では、異常気象や大気汚染による外的環境因子は植物内の栄養状態バランスに大きな変化を与え、結果として農作物の収穫率減を引き起こすことになるため、元素バランスの変化を栽培現場レベルで把握することは非常に重要である。

そこで、農作物の非破壊的、ケミカルフリー、簡易、迅速な測定を可能にする光センシングを X 線からテラヘルツ波の応用例や可能性を概観することとした。図 6 に主な分光センシング手法を示した。



図 6 主な光 (分光) センシング手法
 Figure 6 The major optical (spectral) sensing technique

3.1 分光センシングの特徴 [29-31]

分光分析は、分離分析と比較することで特徴づけられる。クロマトグラフィーや電気泳動に代表される分離分析では、基本的に混合物を単一化学種にまで分画する。一方、分光分析では、対象物のスペクトルを混合物のまま取得し、そのスペクトル情報から目的化学種を分離しスペクトル的に定量する。分光分析には吸光・発光・散乱分光法などがあり、吸光分光法だけを取りあげても多岐のサンプリング手法 (透過法, 反射法, 拡散反射法, 光音響法) が存在する。また、どの分光分析法でも混合情報から目的とする情報を分離して取得するための分析手段であることは共通している。さらに、分光分析を行う際には、混在情報の中から一部の情報に的を絞って定量的にスペクトルを解析するためのケモメトリックス [32] と呼ばれる多変量解析を化学に応用した分野の理解が不可欠である。

分光計測 (電磁波計測) などの光センシングの最大の特徴は、様々なバンド光を用いた一斉同時計測による情報量の多さと、計測に要する時間の短さにある。クロマトグラ

フィーなどによる計測では、カラム選択などにより最終的に得られる情報が限定的になるのに対して、分光計測では原スペクトルを持つ一次情報には情報の欠落がない。つまり、「スペクトル(光センシング)情報を保存しておくこと」と「試料を保存しておくこと」がほぼ同様の意義を持つことである。この特徴は、農作物等の植物を対象の品質計測屋状態把握において極めて大きなアドバンテージとなる。

3.2 各波長領域の特性と品質計測

(1) X線

高品質作物の安定供給と環境保全を意識した持続的な農業を目的とした場合、迅速かつ簡易的な作物体内の元素計測法の確立が重要となる。そこで、非破壊的に複数元素の同時計測が可能な蛍光X線分析の利用が注目されている。蛍光X線の波長は元素ごとに固有である内殻と外殻のエネルギー差に対応するため、蛍光X線のエネルギーを実験的に求めることにより、測定試料の構成元素の分析が可能となる [33]。蛍光X線分析はサトイモの産地判別と微量元素分析に応用 [34] されてきているが、ここでは、筆者らの蛍光X線分析を用いた農作物の葉中の元素情報の取得例 [35] を紹介する。図7にトマト葉の蛍光X線分光スペクトルを示す。この図は、蛍光X線強度を照射X線発生時に生じる $RhL\alpha$ (2.71 keV 付近) のピーク強度を用いて正規化処理を行ったスペクトルである。

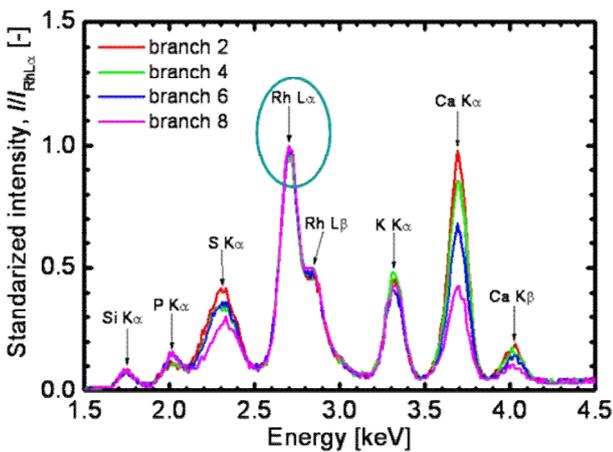


図7 正規化された蛍光X線分光スペクトル
 Figure 7 Normalized X-ray fluorescence spectrum

この Ca ピークの面積強度を用いて、元素の定量分析の標準法でプラズマ発光分析 (ICP) による葉中含量分析値との比較を行った結果を図8に示す [35]。その結果、カルシウムに関する正規化蛍光X線強度とトマト葉中含量との間に相関係数が 0.976 となる良好な直線性が示され、Ca が定量的に計測されていることが確認された。また、カリウムについても両者の間に相関性が見られた。そこで、トマト果実に尻腐れ症状が現れた樹体と正常果であった樹体の生葉について蛍光X線分光計測を行ったところ、カルシウムの樹体内バランスにおいて両樹体間で差異が認められ、

異常体の値が正常体の値を下回る結果となった [35]。このように、蛍光X線分光の利点は K, P, Fe などの元素のリアルタイム同時計測であり、圃場での蛍光X線分光法による植物中の栄養元素情報の取得の優位性が確認された。

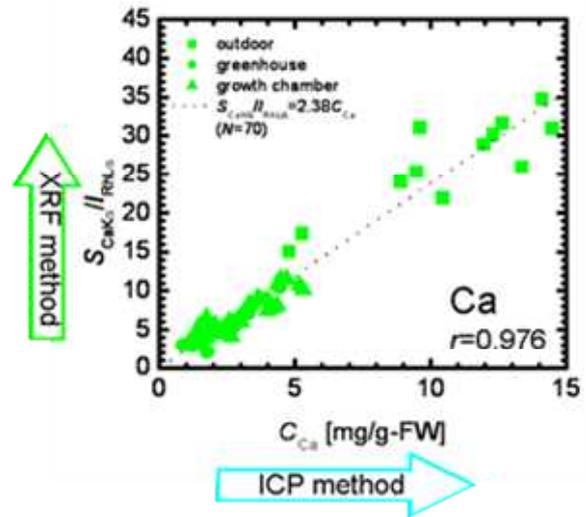


図8 無次元面積強度と ICP での Ca 成分値との比較

Figure 8 Comparison between the dimensionless area intensity with the Ca component value measured by ICP

(2) 紫外線

様々な応用が期待されている遠紫外分光法と農業に密接関連するレーザー誘起植物蛍光法を簡単に紹介する。遠紫外 (Far Ultraviolet: FUV) 光とは、オゾン吸収バンドがはじまる 280 nm より短波長の紫外線領域の光を指す。この領域の水の吸光係数は赤外領域に観測される HOH 伸縮振動に比べると 20 倍程度で非常に大きいため、これまでは気相の研究に用いられることがほとんどであったが、窒素置換型遠紫外分光器の採用と ATR (Attenuated Total Reflection) 法を導入した FUV-ATR 法により、液体状態の水または水溶液の遠紫外スペクトルが簡単に測定出来るようになっている。水は遠紫外領域の 150 nm 付近を中心に $n \rightarrow \sigma^*$ 遷移による巨大な吸収ピークを持ち、このピークは水素結合状態の変化を反映して変化することが知られている。温度変化や、水中に微量な溶質が溶解しただけでピーク位置やバンド幅が敏感に変化するため、その変化から、高感度な水溶液の判別分析や微量濃度測定が可能となる [36]。

一方、植物蛍光スペクトルの現地観測が可能な可搬型 (レーザー誘起) 蛍光計測装置と、遠隔観測が可能な (レーザー誘起) 蛍光ライダーシステムにより、レーザー誘起植物蛍光法で光合成機能の主要分子であるクロロフィルの形成・消滅に関する情報、生理活動の結果である代謝二次産物に関する蛍光スペクトルの増減が測定できることが示されている [37]。高山ら [38] は、植物工場内で栽培されるトマト群落を対象の光合成機能診断を行うために、励起光照射用の 60cm×60cm の大型 LED パネル光源 ($\lambda <$

650nm) とロングパスフィルタ ($\lambda > 700\text{nm}$) を装着した CCD カメラからなるクロロフィル蛍光画像計測部, トマト群落の高さに合わせて画像計測部を昇降させる駆動部, 計測した蛍光画像を解析して植物診断を行う解析・診断部 (PC), および, これらを搭載して植物工場内の通路を移動するための走行部 (カート) で構成されるクロロフィル蛍光画像計測システムを用いて, 植物工場内でトマト樹体の計測を行っている。

通常の蛍光測定は, 単一の励起波長帯および 蛍光波長帯で計測を行ない, 特定物質の有無を調査することがほとんどであり, 多くても 2, 3 の励起波長帯・蛍光波長帯の組み合わせで数種類の物質を調査する程度であった。こうした単純な蛍光測定は簡単である反面, 分光スペクトル計測などと比較して, 取得可能な分子の光学的特性に関する情報は少ない。そこで, 励起波長・蛍光波長の双方を連続的に走査しつつ 蛍光強度を測定して得られる「励起・蛍光マトリックス (Excitation-Emission Matrix: EEM)」を利用した計測が試みられてきた [39]。杉山ら [40] は, この EEM を「蛍光指紋」と名付けるとともに, 200~340 nm の励起波長を用いて創りあげる蛍光指紋と PLS 回帰分析を用いる分析法により, マンゴーの産地判定, かび毒の同時定量, そば粉と小麦粉の混合割合の推定など様々な成分が混在する食品・農作物などにおいて適用可能なことを示した。

(3) 可視光線

可視光はわれわれの可視領域の光であるため, 古来より可視光を利用した植物育成状態評価が日常的におこなわれている。植物の場合, 葉の光合成では赤色光と青色光が主として使われるために, 葉は緑色を呈している。葉色を用いる植物診断は古くから行われているが, 農学分野では植物の健康度を知る上で必要な, 植物の葉に含まれる葉緑素 (クロロフィル) 量を SPAD 値 (葉緑素含量を示す値) として計測する装置の SPAD が一般に用いられる [41]。近年, よく似た原理でレーザーを用いて生育状況を非接触で計測する装置 CropSpec [42] が登場し, トラクターに搭載して広い栽培面積の計測をカバーし, 肥料の散布量の調整まで行えるシステムとして設計されている。

一方, 近年のデジタルカメラの高画質化・低価格化により, 汎用的なデジタルカメラを用いた可視画像の取得が一般的な手法となってきた。ここでは, 自然環境下での農作物の色彩情報の簡易的な取得方法 [43] について紹介する。農作物の色彩は, 代謝の結果生ずる二次代謝物質である生体色素に由来するので, 農作物の栄養成分や色素成分などの成分情報, さらにその色彩が現れるまでに至った栽培条件等の情報が反映されている。色彩画像解析技術は, 色彩評価に有効と考えられるだけでなく, 形や大きさといった数量的把握の難しい情報も同時に取得できる。

デジタルカメラを用いて撮影した色彩画像の RGB 値は, カメラ素子が受光した光の量 (受光感度 Hm) を底とした

べき関数で表現できる。

$$RGB = a \cdot Hm^b \quad (1)$$

ここで, 係数 a は照射光の色に関するパラメータであり, 係数 b は定数である。色彩情報の定量的評価の基準となる赤 (R), 緑 (G), 青 (B) 色を有している標準カラーチャート画像に対し, 正規化 Hm と取得した画像の正規化 RGB 値との関係は, チャートの色に関わらず一本の曲線として表される。係数 a は, 照射光情報から算出可能な色に関するパラメータであるので, 自然光を特徴付ける 3 波長を設定することにより, 式(1)に基づいてカラーチャートの RGB 値が算出できる。そこで, 算出した仮想カラーチャート画像の RGB 値と, 基準光源下において取得した実在カラーチャートの RGB 値とを比較することにより, 自然光下で撮影した画像を補正することができる。図 9 に示すように, 補正画像と基準画像の HSL (H : 色相, S : 色相, L : 明度) 値はほぼ一致し, 自然光下で撮影した画像の色補正が可能であることが分かる。自然光下で取得した画像に色補正を施すことにより, 目視で行われている植物育成状態評価を客観的に解析できる可能性が示されたものと考えられる。

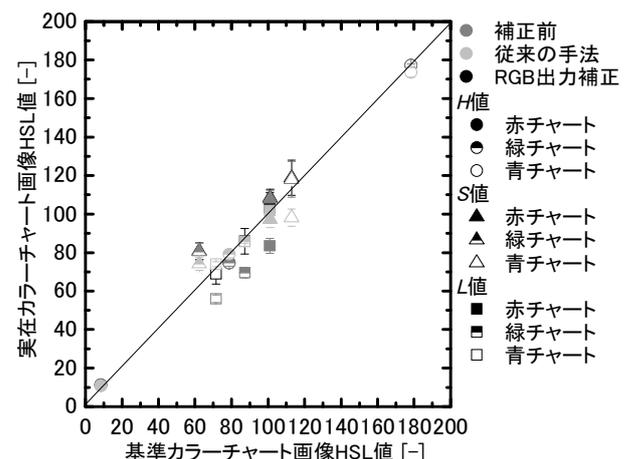


図 9 カラーチャート画像の色補正結果

Figure 9 Color correction result of the color chart image

(4) 赤外線

赤外線は大変広い分野において利用されており, それぞれの利用分野において異なる呼び名の組み合わせを用いている (図 10) [44]。本稿では植物育成状態の光センシングに関して論じるため, 分光分野の呼び名を用いることとする。中赤外線の吸収は, 主として分子振動あるいは格子振動と関係する。ある分子振動によって分子全体の双極子モーメントが変化する場合, その分子振動と等しい振動数の中赤外光が吸収される。なお, 化学結合の振動は赤外スペクトルだけではなく, ラマン効果によっても観測できる。赤外吸収は双極子モーメントに変化がある振動, ラマン効果は分極率に変化のある振動が許容される [45,46]。たいいてい分子は常温では基底状態にいたので, 赤外光の吸収により基底状態 (振動量子数 $v=0$) から第 1 励起状態 ($v=1$)

への遷移が起こる。この遷移に対応する吸収を基本音という。倍音に対応する吸収はより高い励起状態 ($v=2, 3, 4, \dots$) への遷移によって生ずるものであるが、これらの遷移確率は一般に低い。したがって、近赤外領域において観察される倍音の吸収は基本音よりも通常はるかに弱い。

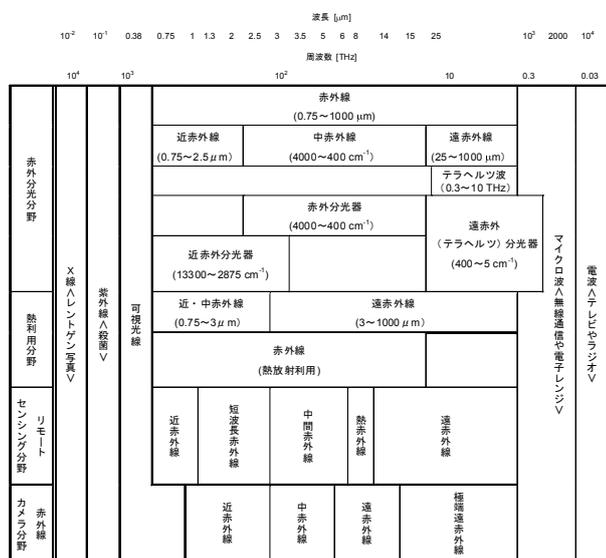


図 10 赤外線の種類

Figure 10 Nomenclatures of infrared rays in some application fields.

ところで、土壌、水、植物、果実など固体や液体の試料の非破壊でその場で分析が求められる農業現場では、中赤外線の利用例は極めて少なく、もっぱら近赤外線が多用されている [47,48]。これらの理由としては、中赤外領域では試料による吸収が強いこと、農業において計測対象となる試料には多くの水分が含まれているため、その水分が測定を著しく妨害することがあげられる。また、農作物などは多成分から構成される複雑系であるため、その中赤外吸収スペクトルに非常に多くのバンドが観測され、スペクトル解析が困難なことなども理由としてあげられる。

しかし、近年急速に普及してきた全反射測定法 (ATR 法, attenuated total reflection) を用いることにより、比較的手軽に固体や液体の中赤外吸収スペクトルを測定できるようになってきた。中赤外領域のスペクトルには近赤外領域のスペクトルよりも多くの情報が含まれていると考えられるので、ATR 法の普及とともに中赤外分光法が農業現場で応用される機会が増えるものと考えられる。一方、分子振動の倍音、結合音への振動遷移が観測される近赤外分光法の特徴としては、物質に対する高い透過性や光ファイバーの利用などがあげられる。また、これらの性質は、透過光を用いた果実成分の非破壊測定など、農業現場においては利点となることも多い。近赤外領域ではバンド幅の広い非常に複雑なスペクトルが得られるため、近赤外吸収スペクトル

の解析には、ケモメトリックスや 2 次元相関分光法のような情報を引き出すことが不可欠となる [49]。

現場での応用技術にまでいたっていないが、農業現場でのセンシングに必須となりそうな新たなデバイスとして、MEMS FTIR を紹介しておきたい [50]。半導体微細加工技術でシリコン (Si) チップ上に、トランジスタ回路だけでなく機械的に動く構造などを製作する MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術は、センサ開発にも広く用いられている。FTIR は広く物質特有のスペクトルが検出されるため、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) により小形化された分光器とアレイ状の赤外線センサを組み合わせた、静電引力でミラー間隔を変える可変波長のフリップペロー干渉計を用いたりする研究が世界中で行われている。2013 年に浜松ホトニクスにより開発された MEMS FTIR (図 11) は、その分光可能域は現時点ではまだ近赤外域 (2200nm まで) にとどまっているが、今後の中赤外における指紋領域 (10 μm 近傍) までの拡張が待たれる [51]。



図 11 MEMS FTIR (浜松ホトニクス株式会社)

Figure 11 MEMS FTIR

英国のベンチャー Pyreos 社では MEMS を使い、検出波長が近赤外 ($0.7 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$) から中赤外 ($2.5 \mu\text{m} \sim 4 \mu\text{m}$)、遠赤外 ($4 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$) までの極めて広い IR (赤外線) センサが開発されている。この IR センサ、MEMS メンブレン、ZnSe レンズで構成される超小型 FTIR (センサ部の直径とこのレンズの直径は 3.5mm) は、 $0.7 \sim 20 \mu\text{m}$ のフラットな波長の分光特性とともに、感度が高く、冷却する必要がなく冷却装置なしで $-20 \sim +70^\circ\text{C}$ の温度範囲で動作できるため、植物の計測への幅広い応用が期待できる [52]。

(5) テラヘルツ波

テラヘルツ波 (THz 波) とは、おおよそ周波数が $0.3 \sim 10 \text{ THz}$ 、波長が $1000 \sim 30 \mu\text{m}$ の領域、つまり光と電波の間にある周波数領域の電磁波のことである。テラヘルツは、周波数が THz (10^{12} Hz) の単位で呼ばれることに由来し、光の側からは長波長側になり、電波から見ると短波長側もしくは高周波側となる。光と電波の間の電磁波は、定義する範囲に若干の差はあるものの、テラヘルツ以外に

も遠赤外，サブミリと呼ばれることもある。これまで，この周波数領域における電磁波技術の開発は立ち遅れており，基礎研究のみならず産業的にもあまり利用されることはなく，未開拓電磁波領域とも呼ばれている。

テラヘルツ周波数領域の情報は，物質の誘電分散，格子振動，分子の骨格振動，ねじれ振動，回転など，物質の重要な動的挙動と関係しているため，農業への応用においてもキラーテクノロジーとなる可能性を有している。テラヘルツ波を利用したイメージングは，電波の物質透過性を有する最短波長域であり，かつ光波の直進性をもつ最長波長であるという点から，最も重要な応用技術のひとつに挙げられている [53]。図 12 は，生命活動の基点となり，かつその情報伝達物質としての機能を有する糖類のテラヘルツ分光スペクトルである [54]。

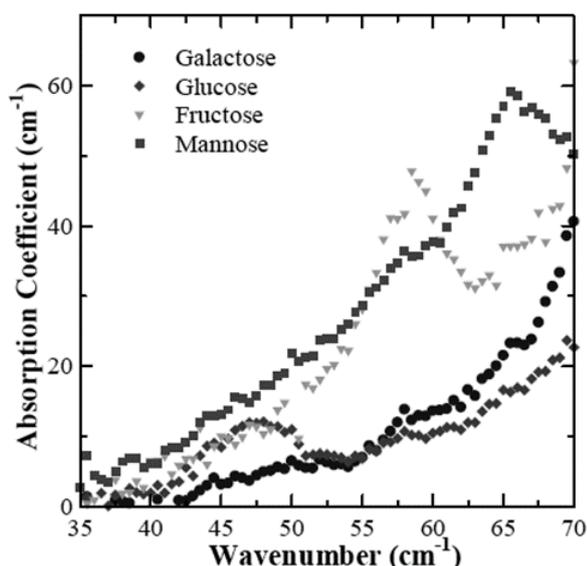


図 12 単糖類の THz 帯吸収スペクトル (300 K).

●ガラクトース，◆グルコース，▼フルクトース，
 ■マンノース

Figure 12 THz spectra of monosaccharides.

中赤外領域と同様に，テラヘルツ周波数領域においても糖類の「指紋領域」が存在することが示されている。また，THz 波は電波の透過性も兼ね備えていることから，容器や袋の中の非破壊検査への利用が期待されている。

4. 赤外放射応用

近赤外線を利用した普及技術の代表として，ミカン，リンゴなどの果実の糖度の非破壊計測があげられるが，ここでは 2 つの意義深い開発商品を紹介しておく。1 つは浜松ホトニクス開発本部内にある (株) デュナミストが開発したグローブ型の近赤外分光センサであり，果実をつかむだけで精度の高い分光スペクトルの現場計測が可能である [55]。もう一つの方法は長崎県工業技術センターで考案された TFDRS 法 (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance

Spectroscopy) という新しい計測原理 (散乱光路長補正吸収方式) に基づく計測器である [56]。この方法によれば反射光の連続スペクトルを必要とせず，分光器や白色光を得るためのハロゲンランプも不要となる。分光器が不要となることで部品コストは激減し，ハロゲンランプを使用しないことで発光スペクトルを安定化させるためのアイドリング時間も不要となるばかりでなく消費電力も大幅に減少する。その結果，電源電池も小型のもので賄えるようになったために更に小型化，軽量化が可能となっている。図 13 に TFDRS 法における計測部の基本的な構成を示した。基本は発光部に 1 本，受光部に 2 本の合計 3 本の光ファイバーで構成されるが，実際の製品においては 2 つの受光部は発光部を中心とした 2 重の同心円状に配置されている。

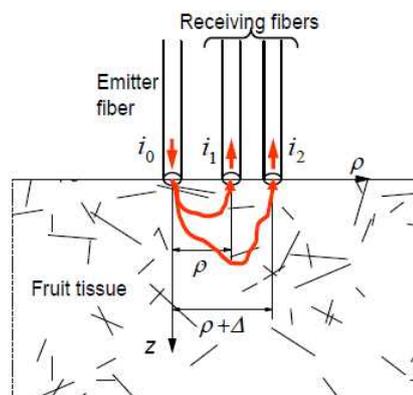


図 13 TFDRS 法における計測部の基本的な構成

Figure 13 The basic configuration of the measuring unit in TFDRS method

4.1 硝酸態窒素の計測法

植物体内の硝酸態窒素含量は，重要な栄養状態指標のひとつであり，葉柄の搾汁スペクトルを用いての硝酸態窒素の定量の可能性が高いことが確認できている [57]。

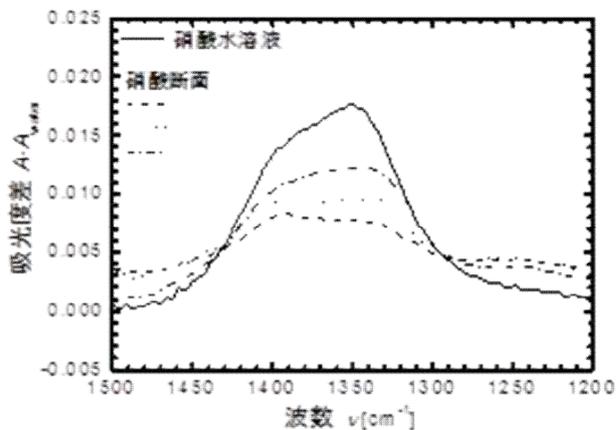


図 14 葉柄断面と搾汁液の水との吸光度差スペクトル

Figure 14 The spectrum of absorbance difference between the juice and water and that between the petiole cross section and water

しかし、搾汁液を使った測定は、実際の栽培現場において煩雑である。ここでは、栽培現場で簡易に搾汁液と同等のスペクトル情報を得ることを目的とした葉柄切断面のスペクトル測定法 [58] について述べる。

図 14 に硝酸水溶液と養分の供給経路にあたる葉柄断面の吸光度スペクトルを示す。葉柄断面のスペクトルは、1350～1400 cm^{-1} の領域で硝酸水溶液と比較的よく似たスペクトル形状である。これらの計測結果は、葉柄の赤外分光計測が簡易かつ迅速な硝酸の定量方法であることを実験的に示している。また、この様な計測方法は、栽培管理を対象とした場合に植物生理学的な観点からも有効と考えられる。

4.2 味見ロボット・ソムリエロボットのコンセプトと概要

昨今の健康ブームや高齢者の在宅介護問題などを考えると、五感を備えたパートナーロボット実現への社会的要請は今後強まると予想される。三重大学と NEC システムテクノロジー(株)は、2006 年 7 月に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の支援を受けて、「味覚」を備えた世界初のパートナーロボット「健康・食品アドバイザーロボット (味見ロボット)」を開発した [59]。

味見ロボットは、赤外線センサーを装着し、食品をそこに提示すると数秒で食品を分析し健康や食品についてのアドバイスをを行う。味見ロボットは、ロボットに味覚を持たせることの意義や可能性を主張する狙いもあったので、ソムリエを模倣させるという娯楽性も考慮して設計開発した。

味見ロボットは、赤外線センサを NEC のパートナーロボット PaPeRo[60]に装着したものであり、PaPeRo の大きさに合わせた腕を製作し人間の舌の役割をする赤外線センサを一体化するように装着した (図 15)。また、食品の赤外吸収スペクトル情報を解析し、特徴的な成分の有無や含有量によって、食品名の推定を行う。さらに、予め登録しておいた個人の身体情報をマッチングさせることにより、食品や健康に関するアドバイスをロボットが行なう。

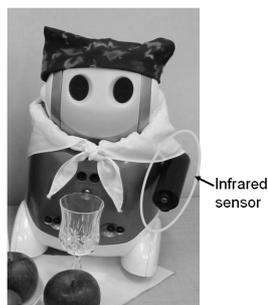


図 15 味見ロボットの外観写真
 Figure 15 Photograph of tasting robot

取得したスペクトル処理は、検量線に基づく定量分析と、パターン認識による食品名推定の 2 つに分かれ、それぞれ独立に処理される。その概略を 図 16 に示す。定量分析に関しては、食品の主成分のスペクトル特性の濃度依存性をあらかじめ検討することにより行う。一方、食品名を推定する

場合には、取得スペクトルをパターンとしてとらえ、パターン認識技術を使って食品の識別や分類を行う。そのためには、事前に種々の食品のスペクトルを蓄積し、食品名と対にして辞書に格納しておく必要がある。つづいて、ソムリエロボットへの展開が試みられ、この新しいロボットは世界初のソムリエロボットとして 2008 年度版のギネスブック[61]に登録された

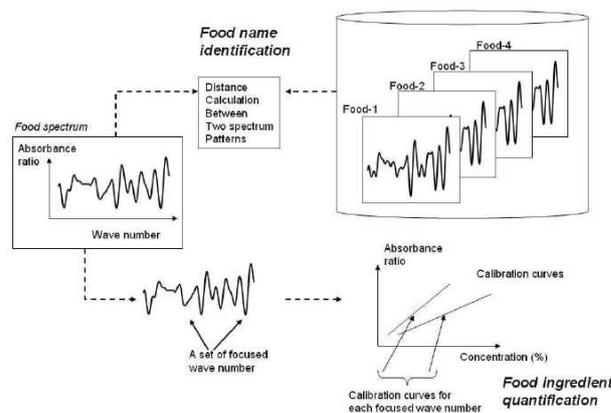


図 16 味見ロボットによるスペクトル処理
 Figure 16 Spectral processing by the tasting robot

4.3. 赤外分光情報に基づいた味見に関する新展開

代表的な嗜好飲料であるワインを対象とし、赤外分光法情報に基づいた食品の特徴抽出例について説明する [62]。ワインでは有機酸類などのイオン解離性成分がその味品質の鍵を握っている。ここでは、それらイオン解離性成分と赤外分光情報との関連について解説する [63]。

pH を変化させたワインおよび各主要成分 (エタノール、グルコース、フルクトース、酢酸、クエン酸、乳酸、リンゴ酸、コハク酸、酒石酸) を混合して調製したワインモデルのスペクトルを図 16 に示す。ワインのスペクトルにおいて、1130, 1155, 1272 cm^{-1} 付近の吸収の増減や、ピーク波数のシフトが認められ、その挙動はワインモデルスペクトルと同様である。また、ワインモデルの各構成成分の赤外吸収スペクトル特性を解離平衡の理論を用いて解析結果より、ワインモデルスペクトルの変化はワイン中の有機酸類に由来することがわかっている。つぎに、ワインのスペクトルはエタノールスペクトルに類似しているため、ワイン中のエタノール以外の成分情報の抽出方法を示す。図 17 は、ワイン、ワインモデルスペクトルから、水およびエタノールスペクトルを差し引いたスペクトル、およびワインモデルの各構成成分の濃度と pH を考慮して計算した合成スペクトルである。主な吸収帯がほぼ一致し、ワイン中のエタノール以外のワインの銘柄に固有の成分情報を抽出できていることが分かる。このように、ワインの赤外吸収スペクトルを解析することで、品質情報の抽出およびワイン

の銘柄識別が可能である。

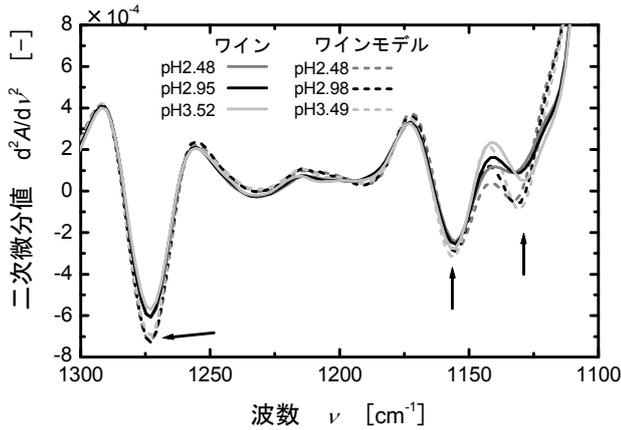


図 16 pH を変化させたワインおよびモデルのスペクトル
 Figure 16 Spectra of the model wine and the wine with varying pH

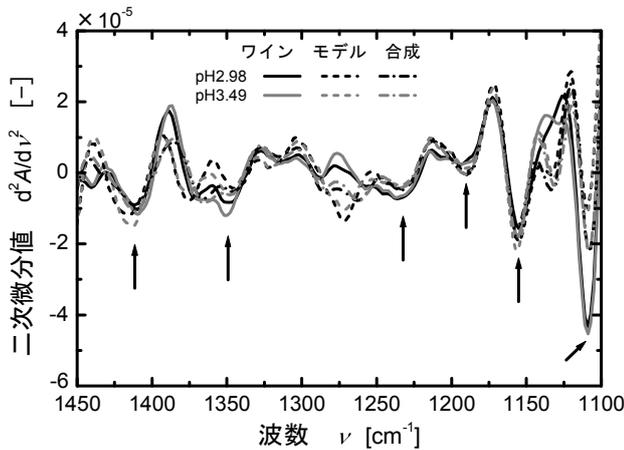


図 17 pH を変化させたワイン，モデル，合成スペクトル
 (水およびエタノールとの差)
 Figure 17 Wine, wine model and synthetic spectra with varying pH (the difference between water and the ethanol)

5. 画像処理

農業分野では、画像処理は極めて重要である。FS に代表されるカメラ付きセンサネットワークで大量の時系列画像が取得されるようになり、一連の農作物画像から農作物の生理関連につながる情報が抽出できる可能性が高まっている。ここでは、まず二宮ら [64] の研究を紹介する。

ダイズ育種において、草姿はひとつの選抜指標である。現在、育種家の目視による草姿判別が行われているが、主観性や判断の不安定性の問題がある。画像解析によって得られた草姿特徴量を変量とする線形判別関数やファジィ論理による草姿評価モデルで目視判断を代替することが一般的にであるが、樹形モデル(Breiman et al.,1984)に基づいて決定木を構築して行う判別方法の判別能力が高いことが示されている。樹形モデルによる誤判率は同じデータに対して求めた線形判別関数とほぼ同じであったが、決定木の構成

から選択された変数の判別に係わる意味の解釈が容易である特徴があり、人間がどのように判別を決定しているか知るための情報を与えてくれることが分かる [65]。

この決定木は、自然光下で撮影された画像からの植物部分の切り取りを行う画像処理でも有効である。デジタル植物画像を用いて、生の効果的かつ効率的なセグメンテーションを行うことは作物の表現型研究で極めて重要な研究テーマである。従来の方法は、制御された照明条件下での画像抽出では優れた性能を示したが、フィールドサーバからの画像のように自然光条件下で撮影され画像中に鏡面反射や影の部分が含まれ、それらが時系列にランダムに変化する場合には、RGB 画像から植生を抽出することは困難である。二宮ら [66] は、小麦画像を用いて、自然光条件下で撮影した植物画像から植生を抽出するための堅牢な手法として、機械学習法、決定木と画像ノイズ低減フィルタを用いる方法を提案し、テスト画像を用いて EXG, EXG-EXR あるいは修正 EXG 法と比較し、この方法が極めて良好な結果をもたらすことを示した。この方法は、同じモデルが画像の閾値調整を必要とせず異なる作物画像に適用することができるという大きな利点を有している。図 18 に水田での稲の生長ステージにおける一連の画像セットを示した。



図 18 水田での稲の生長ステージにおける一連の画像セット

Figure 18 An example of paddy rice images from initial to maturing growth stage.

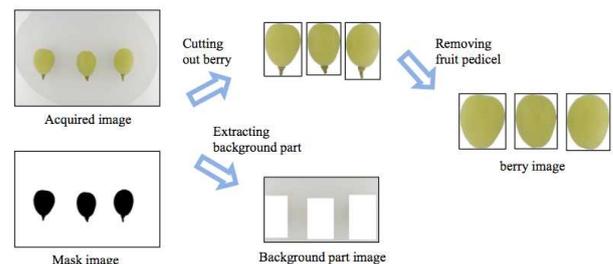


図 19 果実カラーチャート作成時のベリーと背景の抽出
 Figure 19 Procedure of image processing for extraction of a berry image and a background part image

農産物の画像解析手法については、既往の研究において、農産物の外観特徴を解析するための手法がいくつか報告されている。中でも、形状やサイズに関しては、極座標・接線座標系に基づく形状解析手法[67]や P 型フーリエ記述子を用いた形状解析[68]、ピクセル数に基づくサイズ解析[69]など、ある程度手法が構築されつつある。

筆者らは、色彩表現に HSL 色空間を用いることで、農作物の色素情報が抽出できることを示した。この方法と形状解析を組み合わせて作成した果実カラーチャートは、現在栽培目標の設定と果実の外観品質評価に一般に使用されており、新たな品種が登場する毎に新しい手法が開発されている [71,72]。図 19 にシャインマスカットを用いた際の画像の背景の抜き出し手順を示した。

また、フェノミクス研究においても色彩・形状は極めて重要な指標であり、花の色彩・形状解析、葉の形状解析などが行われており、吉岡ら [72] は、パンジーの花の画像から、情報科学分野の研究で開発された Color signature と呼ばれる色分布に関する画像特徴量を算出し、この特徴量に基づく花色の定量的評価法の有効性を検証した。

パンジーの花色は薄い黄色と茶色、上弁は茶色から成り立っており、このように複数の色で構成される花の色分布の評価は、これまで定性的な評価、あるいは部位ごとに色彩色差計などの数値を記録する方法が用いられてきた。ここで用いた Color signature による花色の記述では、各色の分布位置の情報が無視される欠点はあるが、花に含まれる色を効率よく表現していると考えられた (図 20b,c)。各画像を MDS により二次元空間上に配置した結果、第一軸では値の高い場所に黄色系の花、低い場所に青色系の花が分布しており、第一軸は花色の青色から黄色の変化に対応していると考えられ、第二軸では黒色系から白色系への変化を表すと考えられた (図 20d)。MDS により導出された第一軸の得点を花色の特徴量として分散分析により品種効果を検定したところ有意な品種効果が認められた。このように、Color signature に基づく新しい花色の評価法は、花色の客観的かつ定量的な評価に有効であり、育種や関連研究において有効に活用できると考えられる。

農産物には色相や彩度の差異、さらに色彩の空間分布などが存在し、その解析が非常に困難であるため、色彩解析に関しては未だ統一的手法は存在しない。一方で、画像の特徴を基に類似画像を検索する手法として Content-based Image Retrieval (以下、CBIR) が注目されている。類似画像検索でも色彩は重要要素であり、今日では画像検索の分野において多くの色彩解析手法が報告されている [73, 74]。

また、農産物の外観特徴は食味などと共に商品価値を決める重要な品質要素であると同時に、消費者が特に重視し、価格を決定づける品種の特徴を表わす指標ともなる。しかしながら、農産物の外観特徴は栽培環境や品質の変化によって変化しやすく、同一品種であっても外観特徴が様々であるため、目視による品種識別は専門家であっても非常に困難である。最近では、遺伝子解析による品種識別の技術がいくつか開発されているものの [75,76]、DNA 分析を用いる場合、コストや解析に要する時間が問題となる。外観特徴の定量的評価が可能な画像解析技術であれば、短時間で解析が可能となり、またコストも DNA 分析と比べると

非常に安価であることから、これらの問題を解決する一次スクリーニング的な品種識別が可能となると考えられる。

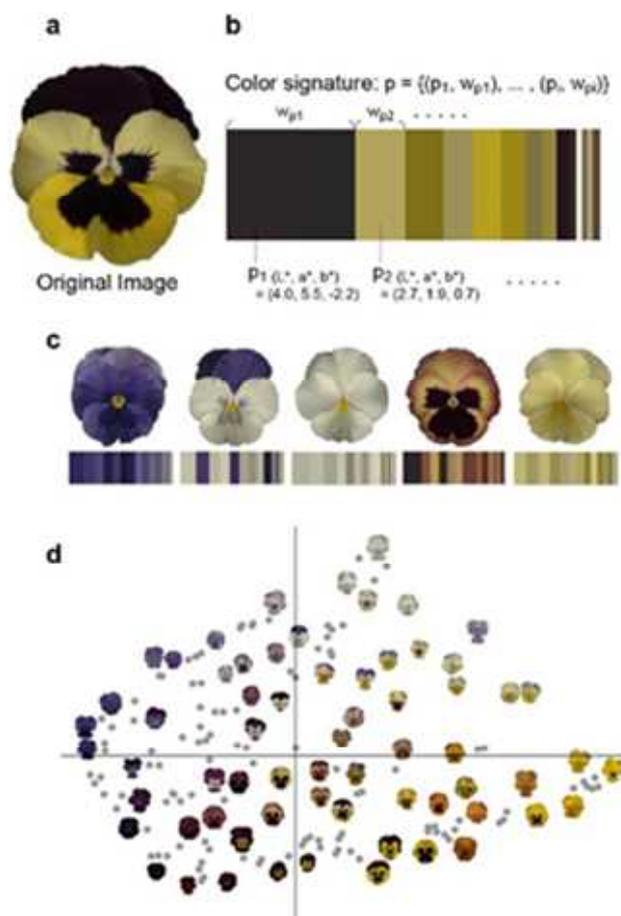


図 20 Color signature と EMD によるパンジー花色の解析
 Figure 20 Analysis of pansy flower color by EMD and Color signature

筆者ら [77] は、農産物の正確な色彩情報が記録された画像が取得可能な色彩画像撮像装置を試作し、イチゴに対して色彩画像解析と形状解析を行った。色彩画像解析には色彩の出現頻度の解析が可能な Color Histogram と色彩の空間分布情報の指標化が可能な CDE (Color Distribution Entropy) [74] を採用し、形状解析には、対象サイズに依存しない極座標・接線座標系に基づく形状解析手法 [67, 78] を用い、試料サイズの指標には対象の射影面積を用い、イチゴの外観特徴を構成する複数の要素を解析対象とすることで、より熟練者による評価に近い解析結果が得られた。従来の CDE 手法は画像全体の特徴化を目的としていたため、色彩の分散をもとに Annular Circle の大きさを決定している。その結果、大きく分布している色に対するほど大きな Annular Circle が描かれていた。しかし、従来の CDE 手法では解析対象物のみが写っている画像の色彩解析を目的としているため、色の空間情報が解析対象物のサイズ情報に依存するという問題が生じる。そこで、従来の CDE 手法を修正し、最外の Annular Circle の直径を解析対象物の長径

を基に決定し、農産物の品質解析に対応できるように、直径を等間隔で分割する (N-1)個の Annular Circle を全ての色彩に対して同じ大きさで描くことで、色彩の分布情報が解析対象物のサイズによって正規化されるようにした。図 11(a)に従来の CDE を、図 11(b)に修正 CDE の生成例を示す。

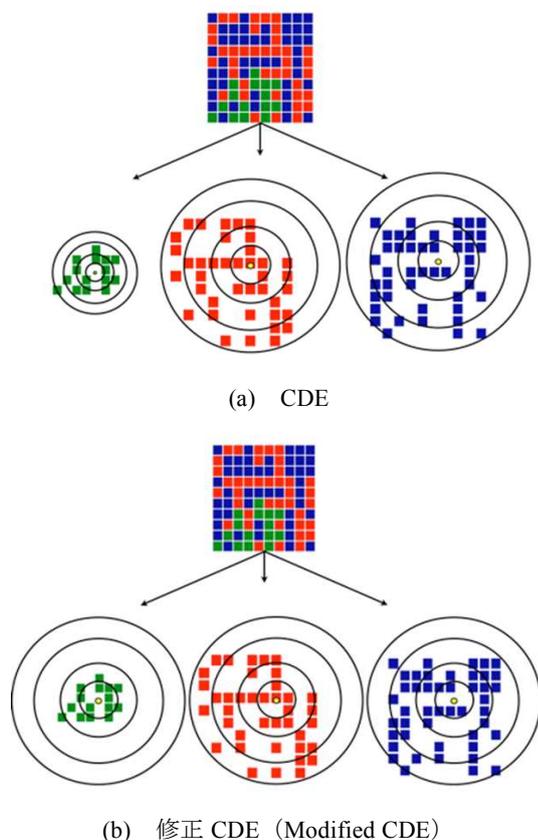


図 11 生成例

Figure 11 Generation example

近年、制御技術の発展やセンサの小型化、モータやバッテリーの性能向上により、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) と呼ばれる小型無人航空機が実用的なものとなりつつある。すでに、幅広い分野への応用可能性が示されており、災害現場の状況把握や写真測量などへ活用する試みが報告されている [79]。UAV は小型で機動性が高く、低コストで導入・運用できるため、農業用途特に農地モニタリングへの応用は十分期待できる。ここでは紹介出来なかったが、リモートセンシング技術は農業においても極めて重要で、その熱画像 [80-82] を含む多くのデータが農業現場で用いられている。欧米・オーストラリアと異なり、日本のように狭い農地面積での農業では、UAV によるリモートセンシングが極めて重要であろう [83]。圃場の情報を高頻度で迅速に得られることが UAV による空撮の強みであり、そこから得られた画像は作物個体を識別できるほどの精細なものである。さらに、一度設定した経路で定期的に圃場の空撮を行えば、作物生育や圃場状態の経時変化を詳細な情報として捉えられる。UAV による空撮は農地情報を時間・

空間的にきめ細かく迅速に得られる技術として、生育追跡や病害監視、圃場観察などへ十分活用できる [84]。

6. おわりに

まず、大政らの研究 [85] についてまとめて紹介する。大政らは、異なる 3 次元形状をもつ植物の機能が、環境との相互作用で空間的に異なることに注目し、蒸散や光合成、成長などの基本的な植物の機能解析を、3 次元画像計測や独自に開発した空間情報解析手法を用い、世界に先駆けて行ってきた。熱赤外画像による葉温、気孔反応、蒸散速度、大気汚染ガス吸収量分布の推定、クロロフィル蛍光画像による光合成機能解析、核磁気共鳴 (NMR) 画像による根系や土壌の水分分布の推定、葉緑体レベルでの光合成機能解析のためのクロロフィル蛍光の 3 次元リアルタイム共焦点レーザー顕微画像計測法などの研究は、先駆的な研究として位置づけられており、遺伝子のスクリーニングや解析を含む農学・植物科学や環境学分野の研究に広く用いられている。さらに、すでに述べた励起・蛍光マトリックス、植物の形状や群落構造、バイオマス、気孔反応、蒸散、光合成などの 3 次元計測や複合リモートセンシングに関する研究は、植物環境応答のモニタリングや解析の分野だけでなく、フェノミクス研究に多大な影響を与えている。

植物を対象としては実験室レベルでは詳細な計測と機能解析が行われてきているが、圃場レベルで農作物の構造・機能の変化をモニタリングするためのセンサは数少なく、植物、葉および果実などのサイズ、形状、色彩変化のモニタリングは、圃場レベルはもちろん実験室レベルでも人による計測が一般的である [86,87]。

遺伝子が高速に読み解かれる今日、対となる表現型の網羅的な計測システムの確立が急務である。そこで、植物の機能のセンシングに関する興味深い研究を紹介しておきたい。植物の茎あるいは幹は導管と師管を持ち、導管は根からミネラルを含む水を輸送し、師管は光合成で作られたデンプンをショ糖水溶液 (リンゴ、ナシ、モモなどのバラ科果樹ではソルビトール水溶液) の形で転流を行っていることが知られている。さらに茎は太陽光から得られる遠赤色光 (>700nm) を根まで導く導波管の役割を果たし、根まで届けられた遠赤色光はフィトクロム A を介したシグナル伝達系を介して、根の中のアクアポリン遺伝子発現を調節することにより、地下にある根も光を環境シグナルとして感知していることが解明されている。植物フェノミクスとの関係で、実験室レベルで根域のさまざまな可視化技術も報告されており、農業現場で根域のモニタリングが可能となる日も近いと思われる [88]。植物の構造と機能の 3D モデリングが実用化の域に達しつつある現在 [89]、ここで紹介した ICT とセンシング技術が近い将来に統合化され、圃場の栽培管理システムとして整備されることを期待しつつ、本稿を締めくくりにしたい。

参考文献

- 1) 亀岡孝治：地域産業活性化における課題と求められる展開，展望について，月刊 LASDEC，H25.11月号，pp.23-29 (2013)
- 2) Puppi, G.: Origin and Development of Phenology as a Science, Italian Journal of Agrometeorology xx-xx (3), pp.24-29 (2007)
- 3) Kameoka, T., Hashimoto, A.: A sensing approach to fruit-growing, Wireless Sensor Networks and Ecological Monitoring, Series: Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, Vol. 3 Mukhopadhyay, Subhas C; Jiang, Joe-Air (Eds.), XII, pp.217-246, Springer (2013)
- 4) Fukatsu, T., Hirafuji, M.: Field Monitoring Using Sensor- Nodes with a Web Server Journal of Robotics and Mechatronics, 17(2), pp.164-172 (2005)
- 5) 戸上 崇，坂井 洋平，山口 典男，深津時広：圃場計測システムについて (特集 圃場作物の生育モニタリングのためのセンシングデバイス)，計測と制御 52(8)，pp.736-741 (2013)
- 6) Nagano, A.J., Sato, Y., Mihara, M., Antonio, B.A., Motoyama, R., Itoh, H., Nagamura, Y., Izawa, T.: Deciphering and Prediction of Transcriptome Dynamics under Fluctuating Field Conditions Original Research Article, Cell, Volume 151, Issue 6, 7 December, pp.1358-1369 (2012)
- 7) 西岡 一洋：樹液流センサの農業利用に向けた課題と展望について，計測と制御 52(8)，pp.684-689 (2013)
- 8) Houle, D., Govindaraju, D.R., Omholt S.: Phenomics: the next challenge Nature Reviews Genetics 11, pp.855-866 (2010)
- 9) Vaslis, V.C., Gay, A., Camargo, A., Doonan, J.H.: Challenges of crop phenomics in the post-genomic era, Phenomics, Hancock, J.M.(Ed), pp.142-171, CRC Press (2014)
- 10) 深津時広，平藤雅之，木浦卓治：圃場スマートセンシングを実現するオープン・フィールドサーバ(Open-FS)，第30回センシングフォーラム，SICE，pp.170-174 (2013)
- 11) 齊藤 保典，小林 一樹，鈴木 剛伸，平藤 雅之，木浦 卓治，深津 時広：アグリサーバ：実時間圃場センシングネットワークの構築と取得データの利活用，農業情報研究 22(1)，pp.1-11 (2013)
- 12) Burrell, J., Brooke, T., Beckwith, R.: Vineyard computing: sensor networks in agricultural production, IEEE Pervasive Computing, 3(1), pp.38-45 (2004)
- 13) Beckwith, R., Teibel, D., Bowen, P.: Unwired wine: sensor networks in vineyards, Sensors, IEEE Proceedings, pp.561-564 (2004)
- 14) Meier, N.: Grape harvest records as a proxy for Swiss April to August temperature reconstructions, Diplomarbeit an der philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Bern (2007)
- 15) Matese, A., Di Gennaro, S.F., Zaldei, A., Genesio, L., Vaccari, F.P.: A wireless sensor network for precision viticulture: the NAV system, Computers and Electronics, 69, pp.51-58 (2009)
- 16) 戸上 崇，伊藤 良栄，橋本 篤，亀岡 孝治：高品質ミカン生産を目的とするセンサーネットワークを利用した圃場環境計測，農業情報研究，20(3)，pp.110-121 (2011).
- 17) ICT-AGRI Newsletter: 3D-mosaic advanced monitoring of tree crops for optimized management, Issue7, p.6 (2012), http://www.atb-potsdam.de/3d-mosaic/download/ICT-AGRI_Newsletter_8.pdf
- 18) 藤田 絢香，中村 元一，亀岡 孝治：生産現場における高品質ミカン生産のための IC 利用に向けた土壌水分計測手法の確立，農業情報研究，20(3)，pp.110-121 (2011).
- 19) 星 岳彦：ユビキタスセンサネットワークによる施設植物生産支援，電子情報通信学会誌，95(9)，pp.779-783 (2012)
- 20) 星 岳彦：光と重量センサによる作物生育情報の計測と温室環境情報等との統合規格化，計測と制御，52(8)，pp.690-695 (2013)
- 21) Kato, M., Hashimoto, T., Saito, T., Takahira, S., Kawakita, T., Isozaki, M., Suzuki, K., Hashimoto, A., Kameoka, T.: Scheduling software construction utilizing the sensor network in plant factory, EFITA-WCCA-CIGR Conference, C0277 p.1-8 Turin, Italy (2013).
- 22) 川北友博：無線温湿度・照度センサを用いた新しい植物工場スケジュール管理，計測と制御，52(8)，pp.696-701 (2013)
- 23) Kawakita, T., Kato, M., Isozaki, M., Suzuki, K., Hashimoto, A., Kameoka, T.: Sensor development suitable for the plant growth prediction model in the plant factory, SICE Annual Conference 2013, pp.1787-1788, Nagoya, Japan (2013)
- 24) Nakajima, A., Nishikawa, Y., Shiraiishi, K., Kameoka, T.: Operation and Evaluation of a Stereo Camera Sensor Network System, SICE Annual Conference 2013, pp.2080-2081, Nagoya, Japan (2013)
- 25) Bellingier, G., Castro, D., Mills, A.: Data, Information, Knowledge, and Wisdom, (2004). <http://www.systems-thinking.org/dikw/dikw.htm>
- 26) Ghil, M., Allen, M.R., Dettinger, M.D., Ide K., Kondrashov, D., Mann, M.E., Robertson, A.W., Saunders, A., Tian, Y., Varadi, F., Yiou, P.: Advanced spectral methods for climatic time series, Reviews of Geophysics, 40, pp.1741 (2002).
- 27) Okayasu, T., Nugroho, A.P., Arita, D., Ozaki, A., Mitsuoka, M., Nanseki, T., Inoue, E., Hirai, Y.: Environmental Change Point Analysis and Its Application to Agriculture, SICE Annual Conference 2013, pp.2425-2428, Nagoya, Japan (2013)
- 28) 井手剛，井上恵介：非線形変換を利用した時系列データからの知識発見，第4回データマイニングワークショップ，日本ソフトウェア科学会データマイニング研究会，研究会資料シリーズ ISSN 1341-870X, No.29, pp.1-8 (2004)
- 29) 長谷川健：スペクトル定量分析，講談社サイエンティフック (2005).
- 30) 亀岡孝治，橋本篤：農産物・食品の赤外分光分析とその応用，農業情報研究，12，pp.167-188 (2003).
- 31) Hashimoto, A. and Kameoka, T.: Applications of Infrared Spectroscopy to Biochemical, Food, and Agricultural Processes, Appl. Spectrosc. Rev., 43, pp.416-451 (2008).
- 32) Wold S.: Chemometrics; what do we mean with it, and what do we want from it?, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 30, pp.109-115 (1995)
- 33) 中井泉：蛍光 X 線分析の実際，朝倉書店 (2005).
- 34) 岩崎美穂，今井晶子，中村哲，鈴木忠直，中井泉：蛍光 X 線を用いたサトイモの微量元素分析と産地判別への応用，X 線分析の進歩，第44集，pp.207-216 (2013)
- 35) Hashimoto, A., Niwa, T., Yamamura, T., Suehara, K., Kanou, M., Kameoka, T., Kumon, T., Hosoi, K.: X-Ray Fluorescent and Mid-Infrared Spectroscopic Analysis of Tomato Leaves., SICE-ICASE International Joint Conference, pp.3359-3562 (2006).
- 36) 関西学院大学尾崎幸洋研究室：遠紫外分光法，<http://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/~ozaki/FUVmenu.html>
- 37) 小林一樹，金原和哉，小林史利，大谷武志，齊藤保典：多波長蛍光画像同時撮影システムを用いたトマトの生葉観測，第27回レーザーセンシングシンポジウム予稿集，pp.148-149 (2009)
- 38) 高山弘太郎：太陽光利用型植物工場による企業の農産物生産を支えるスピーキング・プラント・アプローチ技術，ECPR, Vol.31, pp.40-45 (2012)
- 39) Coble, P.G., Green, S.A., Blough, N.V and Gagosian, R.B.: Characterization of dissolved organic matter in the Black Sea by fluorescence spectroscopy, Nature (London), 348, pp.432-435 (1990).
- 40) 杉山純一：光の指紋による食品の鑑別・定量，食品と容器，54(5)，pp.308-315 (2013)
- 41) 葉緑素系 SPAD-502Plus，<http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/color/chlorophyll/>
- 42) レーザー式生育センサー活用事例，レーザー式生育センサー活用事例，<http://www.topcon.co.jp/positioning/atwork/cropspec.html>
- 43) Hashimoto, A., Suehara, K., Kameoka, T.: Quantitative Evaluation of Surface Color of Tomato Fruits Cultivated in Remote Farm Using Digital Camera Images, SICE JCMSI, 5: 18-23 (2012)
- 44) 日本工業標準調査会：遠赤外線用語，JIS Z 8117 (2002)
- 45) 田隅三生：FT-IR の基礎と実際，第2版，東京化学同人 (1994).
- 46) 錦田晃一，岩本令吉：赤外法による材料分析，講談社サイエ

ンティフィック (1986).

47) 藤原孝之: 近赤外分光法を活用した各種堆肥の品質評価, 日本土壤肥料学雑誌, 80(6), pp.641-646 (2009)

48) 河野澄夫: 近赤外分光法による農産物等の非破壊品質評価, 農業機械学会誌, 75(2), pp.67-73 (2013)

49) 関西学院大学尾崎幸洋研究室: 近赤外分光法, <http://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/~ozaki/NIRTOP.html>

50) 江刺正喜: MEMS によるセンサの革新, 応用物理, 80 (3) pp.181-188 (2011).

51) 装置に組み込み可能, 小型で安価な FTIR を実現する, 世界初, MEMS 技術で指先サイズにまとめた超小型 FTIR エンジンを開発, <http://www.hamamatsu.com/jp/ja/news/development/20130129000000.html>

52) セミコンポータル ーイノベーションを加速する半導体ウェブ, <https://www.semiconportal.com/archive/editorial/technology/process/111228-pyreo.html>

53) 川瀬晃道, 伊藤弘昌: 応用物理, 71, pp. 167-172 (2002).

54) Ishikawa, Y., Minamide, H., Ikari, T., Ito, H., Hashimoto, A., Kameoka, T., Chaen, H., Nishizawa, J.: Observation of dynamical interaction modes in THz-region spectra by using terahertz-wave parametric oscillator, Conference Digest of 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics, pp.285-286 (2004)

55) 青木宏道: 生産過程における能動的モニタリングの実現: 小粒果実計測に対応した近赤外分光装置の開発, 計測と制御, 52(8), pp.714-717 (2013)

56) 立石賢二: 青果物の糖度を非破壊で計測する簡便な糖度計, 計測と制御, 52(8), pp.708-713 (2013)

57) Hashimoto, A., Hayashi, N., Suehara, K., Kanou, M., Kameoka, T., Kumon, T., Hosoi, K.: Simple, Rapid and Non-Destructive Determination of Nitrate Nitrogen Content Using Mid-Infrared Spectroscopic Method, Agricultural Information and IT, pp.235-240 (2008).

58) Hashimoto, A., Kihara, D., Suehara, K., Kameoka, T., Kumon, T.: Simple and Rapid Measurement of Nitrate Nitrogen Content in Plant Using Mid-Infrared Spectroscopic Method, Proc. of AFITA/WCCA 2012, (20)-4 (2012).

59) 橋本篤, 亀岡孝治, 島津秀雄: 味見ができるロボットの開発, 日本バーチャルリアリティ学会誌, 18(2), pp.88-92 (2013)

60) Fujita, Y.: Personal robot PaPeRo. J. Robot. Mechatron., 14, pp.60-63 (2002).

61) Guinness World Records: Guinness World Records 2008, Guinness Book, London, p.159 (2007).

62) Hashimoto, A., Sugimoto, Y., Kanou, M., Suehara, K., Kameoka, T., Kobayashi, K., Shimazu, H.: Mid-Infrared Spectroscopic Analysis on Wine Characteristics, Abstract of 10th ICEF (Vina del Mar, April 2008), M21 (2008).

63) Nakanishi, K., Hashimoto, A., Pan, T., Kanou, M., Kameoka T.: Mid-infrared Spectroscopic Measurement of Ionic Dissociative Materials in the Metabolic Pathway, Applied Spectroscopy, 57(12), pp.1510-1516 (2003)

64) 二宮正士, Nguyen-Cong Vu: 樹形モデルに基づくダイズ草姿評価, Breeding science 48(3), pp.251-255 (1998)

65) Guo, W., Rage, U.K., Ninomiya, S.: Illumination invariant segmentation of vegetation for time series wheat images based on decision tree model, Computers and Electronics in Agriculture, 96, pp.58-66 (2013)

66) Guo, W., Ninomiya, S.: Vegetation Segmentation Method for Time-series Rice Images Taken under Natural Light, SICE Annual Conference 2013, pp.1780-1782, Nagoya, Japan (2013)

67) Motonaga, Y., Kondou, H., Kameoka, T., Hashimoto, A.: Determination of the Standard Shape and Color of Agricultural Products, Proceedings of QCAV'98, pp.29-34(1998).

68) 鄭澤宇, 岩田洋佳, 二宮正士, 田村義保: P 形フーリエ記述子

に基づくハナハ ス花卉の部分形状特徴の定量的評価, 育種学研究, 7(3), pp.133-142 (2005).

69) Liming, X. and Z. Yanchao: Automated strawberry grading system based on image processing, Computers and Electronics in Agriculture, 71, S32-S39 (2010).

70) 元永佳孝: 果実の色計測とその応用, 計測と制御, 52(8), pp.718-723 (2013)

71) Motonaga, Y., Nedu, K., Suzuki, T., Kobayashi, K., Saito, Y.: Fruit Color Analysis for Defining the Color Evaluation Standard of Grape 'Shine Muscat', SICE Annual Conference 2013, pp.2449-2452, Nagoya, Japan (2013)

72) 吉岡洋輔: センシング技術を活用した作物育種研究における表現型計測の高度化, 計測と制御, 52(8), pp.724-729 (2013)

73) Rubner, Y., Tomasi, C. and Guibas, L.J.: The earth mover's distance as a metric for image retrieval, International Journal of Computer Vision, 40(2), pp.99-121 (2000).

74) Sun, J., Zhang, X., Cui, J., Zhou, L.: Image retrieval based on color distribution entropy, Pattern Recognition Letters, 27(10), pp.1122-1126 (2006).

75) 大坪研一, 藤井 剛, 橋野陽一, 豊島英親, 岡留博司, 中村澄子, 川崎信二: RAPD 法を用いた国内産精米の品種判別技術, 日本食品科学工学会誌, 44(5), pp.386-390 (1997).

76) 中村澄子, 鈴木啓太郎, 原口和朋, 大坪研一: PCR 法による清酒の原料米品種の識別技術, 日本食品科学工学会誌, 54(5), pp.233-236 (2007).

77) 山本恭輔, 木村佳嗣, 戸上 崇, 吉岡洋輔, 橋本 篤, 亀岡孝治: CBIR 手法を用いた色彩画像解析システムの構築, 農業情報学会, 20(4), pp.139-147 (2011)

78) Yamamoto, K., Togami, T., Hashimoto, A., Yoshioka, Y., Ninomiya, S., Kameoka, T.: A chromatic image analysis for evaluating appearance of agricultural products using color distribution entropy, Proc. CIGR-AgEng2012:1-6, Valencia (2012)

79) TOMITA, S.: Visualization of disaster situation by radio-controlled EV helicopter, SICE Annual Conference 2013, pp. 2441-2448, Nagoya, Japan (2013)

80) Maes, W.H., Steppe, K.: Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review, Journal of Experimental Botany, 63(13), pp.4671-4712 (2012)

81) Ohtani, Y., Togami, T., Kimura, Y., Hashimoto, Kameoka, T.: Thermal Image Utilization on the Vigor Diagnosis of Mandarin Orange Tree, Proc. of SICE Annual Conference, SICE, pp.2915-2918 (2010)

82) Kameoka, T., Hashimoto, A., Kimura, Y.: Application of Thermal Image to The Diagnosis of Orange Tree Vigor, SICE Annual Conference 2013, pp.1785-1786, Nagoya, Japan (2013)

83) Guo, T., Kujirai, T.: Watanabe: Mapping Crop Status from an Unmanned Aerial Vehicle for Precision Agriculture Applications, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, pp.485-490 (2012)

84) 杉浦綾, 平藤雅之, 本多 潔: 小型無人航空機による農地間情報の時系列モニタリング, 第 30 回センシングフォーラム, SICE, pp.179-182 (2013)

85) 大政謙次 研究業績, <http://park.ite.u-tokyo.ac.jp/joho/Omasa/>

86) Iwata, H., Kobayashi, M., Ohyanagi, H., Yano, K., Sazuka, T., Tokunaga, T., Tsutsumi, N.: A high-throughput phenotyping system supporting genomic breeding of crop plants, SICE Annual Conference 2013, pp.1778 -1779, Nagoya, Japan(2013)

87) 亀岡孝治, 堀川恵莉菜, 岩田智之, 橋本篤: トマト育苗プロセスにおける苗の成長計測, 第 30 回センシングフォーラム, SICE, pp. 183-186 (2013)

88) Kobata, K., Honda, S.: Evaluating Plant Growth by Electrical Impedance Tomography Analysis, SICE Annual Conference 2013, pp.1780-1778, Nagoya, Japan (2013)

89) Sun, Q., Yoda, K., Suzuki, H.: Journal of Experimental Botany, Vol. 56, No. 409, pp.191-203 (2005)