

# 博士論文

フードシステム最適化のための  
定量性指標構築に関する基礎的研究

(Practical Studies on the Construction of  
Quantitative Indices for Food System Optimization)

三重大学大学院生物資源学研究科

共生環境学専攻

亀岡 慎一

# 目次

1 章 緒言.....	5
1-1 フードシステムとは .....	5
1-1-1 本研究におけるフードシステムの定義 .....	6
1-2 フードシステムの Internet of Things(IoT) .....	8
1-2-1 農業 ICT からフードシステム IoT へ.....	9
1-2-2 フードシステム全体における IoT の役割と条件.....	10
1-2-3 フードシステム IoT の現状 .....	10
1-3 フードシステムを通じた対象農産物の「品質」 .....	13
1-3-1 温州みかんの場合.....	14
1-3-2 ワイン用ブドウの場合 .....	16
1-3-3 カット野菜用レタスの場合 .....	18
1-3-4 「品質」に対する学術的なアプローチ .....	20
1-4 品質を情報化する光センシング.....	21
1-5 機械学習・人工知能 (AI) とは.....	23
1-6 本研究の目的 .....	24
1-7 本研究の構成 .....	26
2 章 ワイン用ブドウ圃場における農業 IoT による 栽培指標提供アプリケーションの構築 .....	29
2-1 背景 .....	29
2-1-1 研究背景.....	29
2-1-2 果樹栽培におけるフェノロジー指標 .....	30
2-1-3 既往の研究 .....	32
2-1-4 研究目的.....	33
2-2 WSN を用いた栽培支援システム .....	33
2-2-1 システム構成.....	33
2-2-2 取得情報の指標化.....	40
2-2-3 栽培支援 Web アプリケーションの開発.....	46
2-2-4 生育環境データの精度検証 .....	52
2-2-5 結果及び考察.....	54
2-3 結論 .....	62

2-3-1	本章のまとめ	62
2-3-2	本章の課題	63
3	章 マルチバンド光を用いた樹体診断法確立	65
3-1	背景	65
3-1-1	研究背景	65
3-1-2	植物における葉の機能	66
3-1-3	既往の研究	69
3-1-4	研究目的	70
3-2	実験手法	70
3-2-1	みかんおよびブドウの葉サンプルについて	70
3-2-2	蛍光分光分析器による色素定量	72
3-2-3	可搬型蛍光 X 線分光器を用いた元素定量	78
3-3	結果および考察	83
3-3-1	みかん葉の計測結果	83
3-3-2	ブドウ葉の計測結果	104
3-4	結論	117
3-4-1	本章のまとめ	117
3-4-2	本章の課題	118
4	章 光分析手法を用いたレタス品質・鮮度指標の確立	120
4-1	背景	120
4-1-1	研究背景	120
4-1-2	レタスの実用性	120
4-1-3	レタスの品質・鮮度とは	121
4-1-4	既往の研究	126
4-1-5	研究目的	127
4-2	実験試料、装置及び方法	127
4-2-1	実験試料	127
4-2-2	実験装置	129
4-2-3	実験方法	132
4-3	実験結果および考察	140
4-3-1	FTIR を用いた脂質酸化指標計測・定量	140
4-3-2	蛍光 X 線分光分析を用いた元素分析	149

4-3-3	撮像システムを用いたレタス分析.....	151
4-3-4	機械学習のためのデータ取得.....	159
4-3-5	各種計測データを用いた鮮度判別モデル.....	169
4-3-6	レタス内部の情報を反映させた分解実験.....	182
4-4	結論.....	193
4-4-1	本章のまとめ.....	193
4-4-2	本章の課題.....	196
5 章	結言.....	198
5-1	本研究の成果.....	198
5-1-1	農業 IoT による栽培支援 Web アプリ.....	199
5-1-2	マルチバンド光を用いた栽培指標.....	200
5-1-3	マルチバンド光を用いたレタスの鮮度指標.....	202
5-2	今後の課題.....	203
5-3	今後の展望.....	207
	謝辞.....	243

# 1章 緒言

## 1-1 フードシステムとは

食品関連産業に関する呼び名には、コールドチェーン、フードバリューチェーン、フードシステム等様々なものが存在する。この中で、コールドチェーンとフードバリューチェーンについては流通に重きを置いた概念となり、他方、フードシステムは食料の生産から流通、そして最終的に消費されるまでの過程を一つのシステムとして捉える考え方と言える（Lee et al., 2017 <<https://www.gsb.stanford.edu/faculty-research/publications/technology-agribusiness-opportunities-drive-value>> 2017年12月25日確認）。近年、特に海外においてはフードシステムという用語が使用されることが多くなってきている。

ここで、そもそもシステムとは何かについて考えてみる。システム工学におけるシステムの定義は「所定の目的を果たすべく、選定され、配列され、連携して動作する一連の構成要素（サブシステム）の組み合わせ」とある（猪瀬, 1967, p.4）。この定義に照らし合わせると、フードシステムの構成要素（サブシステム）は、施肥や播種から始まり、最終的な農産物を中心とした原料食物の収穫までを担う「栽培・生産」、収穫物・および加工品の鮮度および品質を管理する「保蔵」、食料を生産現場から加工現場へと移動させる「輸送」、種々の方法によって原料食物を様々な形へと変化させる「加工」、加工品および生食用産品を消費者にいき届ける「流通」、流通した食品を消費者が代謝に利用する「消費」、そして主に消費によって生じた廃棄物等の再利用を行う「再資源化」であると考えられる。そして、このフードシステムの目的は、グローバル化および人口増加が進行する中で、有限な食料資源を無駄なく世界中に行きわたらせることと定義できる。そこで本研究においてフードシステムとは、「栽培・生産」、「保蔵」、「輸送」、「加工」、「流通」、「消費」、「再資源化」というサブシステム間の相互作用から成り立ち、有限な食料資源を世界中に無駄なく行き渡らせ、各サブシステムを環境と調和させることで、地球上の全人類に持続可能な生活を享受させることを目的とする循環型システム」とであると定義する。さらに、この循環型フードシステムの起点は「栽培・生産」であるということもここで定義しておく。

### 1-1-1 本研究におけるフードシステムの定義

本論文は、「フードシステムの最適化」を目的としているため、ここではそのことについて触れていく。システムの「最適化」とは、システムを構成するサブシステムそのものおよび、サブシステム間の連携を調整することで、そのシステムの機能改善を図ることである。その上で、システムが具備すべき要件は、経済性・信頼性・有用性・両立性の4点であるとされている（猪瀬, 1967, p.6）。

経済性とは、そのシステム全体にかかる価格的なコストを指している。現在のフードシステムにおいて、この経済性の最適化を「消費者に行き渡った時の価格がいかに安いか」に焦点を合わせているために、後の項で論ずる幾つかの問題をを引き起こしている。また、人間の生命に関わる「食」を、経済性の強弱で決定することの倫理的な問題点なども考慮し、本論文の定義するフードシステムでは、ここについてあまり立ち入らないこととする。

信頼性とは、システム自体の安全性とも言い換えられる概念であり、様々な不測の事態にも柔軟に対応できる度合いを意味する。グローバル化したフードシステムにおいては「食料安全保障」や「持続可能性」が信頼性に直結する概念であり、その尺度は「全世界の総人口に対する健康人口の割合」や「環境汚染レベル」などで定量される。

有用性とは、そのシステムの存在価値に関わる概念である。しかしながら、そもそもフードシステム自体が人間にとってなくてはならないものであるから、本システムにおいてここについてはあまり議論を必要としない。

両立性とは、サブシステム間の連携をできるだけようにすることを指す。フードシステムも、先述した幾つかのサブシステムの相互作用によって成立しているため、「各サブシステムが持つ入力および出力情報が、フードシステム全体を通じていかに標準化されているか」などは両立性の重要な指標になりうる。

本論文では、この4つの要素の中で、信頼性と両立性の2点を重視したシステムの最適化を目指す。すなわち、「サブシステム間の連携を円滑にし（両立性最適化）、地球環境に配慮し、食品の安全品質供給を実現する（信頼性最適化）持続可能なフードシステム」構築を目標とし、そのための要素研究という位置付けを取る。そして、以下の項目ではその目標のための要素技術に関して説明を加えていく。

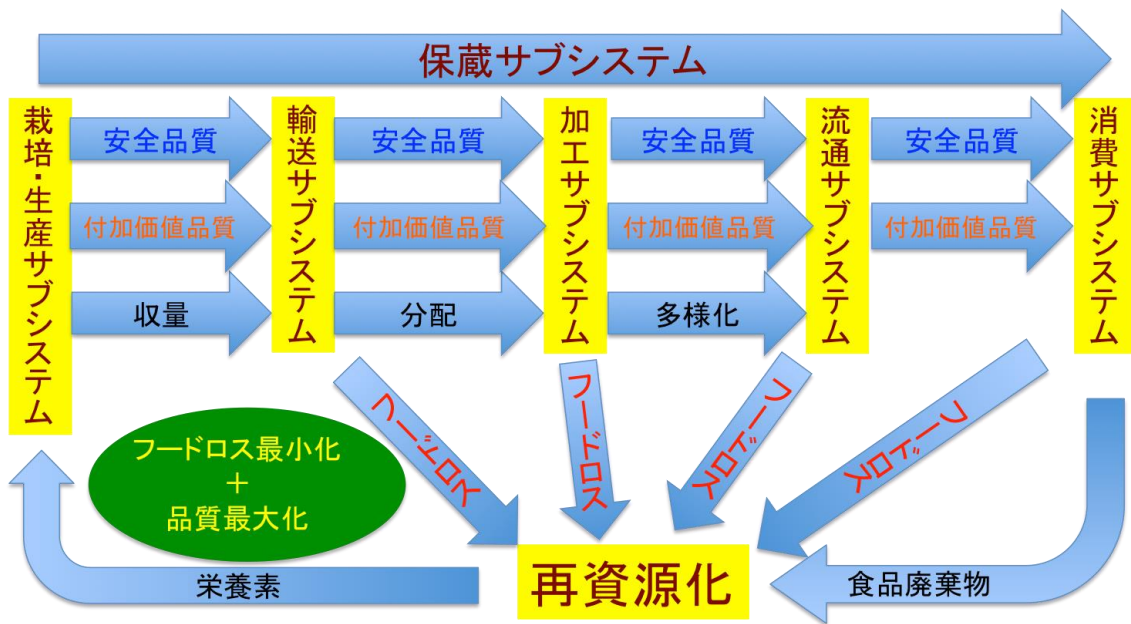


図 1.1 フードシステムの構成要素とその関係

## 1-2 フードシステムの Internet of Things(IoT)

現代社会では、特に工業の世界において Internet of Things(IoT)の援用による生産の最適化が行われ始めている。IoT とは、あらゆるモノおよびデバイスがインターネットを通じて接続され、モニタリングやコントロールを可能にするといった概念・コンセプトのこととされている (IT 用語辞典)。この IoT を構成するのは、1) 現実社会の事象を情報化するセンサ群、2) センサが取得したデータを格納・解析し、意味のある情報として保存するデータインフラ、3) 保存された情報を社会に還元するサービス、4) これらを相互に結びつけるインターネット等の通信技術という 4 つである。

ここで、人とインターネットとの歴史について振り返る。インターネットがつながりはじめた 1988 年に、ユビキタスコンピューティングという言葉が普及し始めた。これは、「社会や生活のあらゆる所にコンピュータが存在し、コンピュータ同士が自立的に連携し、動作することによって人々の生活を強力にバックアップする情報環境」と定義されている (IT 用語辞典)。この概念がアンビエント、すなわち人間が意識的にアクセスすることなく、センサを中心とした IT 機器群が協調して人々の生活をバックアップするという思想に派生した。そしてこのアンビエントな社会の中心となるのが IoT だと言える。この変化の中で重要なのが、センサ間の情報連携によって異なるシステム同士が結びついていく「水平統合」の考え方となる。

現在、このような IoT 技術との強い統合を通じ、交通、医療及びエネルギー等の公共サービスのインフラと業務プロセスを連動させ、より効率的、持続的、機能的に改善していくというスマートシティというコンセプトが存在し、その設計に対して様々な先行研究が存在する (Zanella et al., 2014; Petrolo et al., 2014; Linger and Havner, 2016; Hashem et al., 2017; Rao and Syamala, 2017)。具体的な例を挙げれば、自動車の IoT 化によって、交通情報を反映した最適なルート案内や、事故を起こしやすい状況への警告、運転データを生かした自動車保険の最適化などの多岐にわたるメリットが期待されている (Huang et al., Smart Car [Application Notes], 2016)。

その一方で、フードシステムに対する IoT 利用を通じたシステム最適化が他産業と比較して遅れており、各サブシステムの最適化に終始していた。そこで本項目では、各サブシステムにおける IoT 化から、それらのトータルシステム



としてのフードシステム IoT 化の必要性について考える。

## 1-2-1 農業 ICT からフードシステム IoT へ

まず、フードシステムの出発点となる「栽培・生産」への IoT 援用の歴史について触れる。農業への ICT 活用に関する重要な要素研究は、農林水産省の「増殖情報ベースによる生産支援システム開発のための基盤研究」（増殖情報ベース 1997～2000 年度）、および「農林水産研究情報デジタルコミュニティの構築」の一環としての「データベース・モデル協調システムの開発（2001～2005 年度）」で開始された。このプロジェクトでは、主として圃場という限られた範囲での IoT 化（農業 ICT）が行われ、その一環としてワイヤレスセンサーネットワーク（WSN）の元祖と位置づけられる農業用小型計測ロボット「フィールドサーバ」が開発され、圃場環境や作物の生育状況などのリアルタイム計測が可能となった（深津 and 平藤, 2003; 田中, 2013）。しかし、圃場内の土壌水分状態を把握し、植物の状態に合わせた確な栽培管理のためには、フィールドサーバによる圃場の代表点の気象データだけでなく圃場全体をカバーする面データも必要であるため、複数のセンサで構成される WSN を利用した生育環境モニタリングが必要となった。近年の技術発展により、農業用の WSN が数多く開発されてきており、国内外で広く研究が行われている（Ojha et al., 2015; Srbinovska et al., 2015; <<https://www.e-kakashi.com/>>, 2018 年 2 月 12 日参照）。

フィールドサーバから WSN という変遷と並行して、農業 ICT から、より広範囲の圃場データをカバーする農業 IoT への移行も進行している。本多らは、圃場ごとに独立していた圃場環境データ管理システムを水平統合させるためのデータインフラの構築を行い、圃場間の相互運用性を向上させる研究を行ってきた（Honda et al., 2009）。さらに国ベースでも、農業 ICT から農業 IoT への発展的研究が、現在農林水産省「革新的技術創造促進事業・ICT 活用農業事業化・普及プロジェクト（異分野融合プロジェクト、2013～2016 年度）」（<<http://www.aip.nagoya-u.ac.jp/industry/ict/index.html>>, 2017 年 1 月 27 日確認）で行われた。この農業 IoT では、センシング層・基盤情報サービス層・ユーザサービス層という農業情報インフラの 3 層構造が基本となる（図 1.3）。

具体的には、圃場の生育環境や農作物の生育状況などの情報がセンサと WSN といったセンシング層により自動収集されてクラウド（基盤情報サービス層）に入り、国際標準に則って単位系や観測項目名が統一された後にクラウド上で

他の農業情報と組み合わせることで、栽培管理作業や経営情報などのサービス（ユーザサービス層）の農家への提供が可能となる（Honda et al., 2016）。このような農業 IoT を、フードシステムの各サブシステムまで拡張した概念がフードシステム IoT であり、持続可能なフードシステム実現に不可欠な要素である。

## 1-2-2 フードシステム全体における IoT の役割と条件

フードシステムの持続可能性を担保するためには、フードシステム全体を通じた共通概念（例えば安全性、環境負荷）を定義し、その指標となりうる情報を取得する必要がある。そしてこれこそが IoT が得意とする分野である。

1-2-1 で示したように、IoT はフードシステムのサブシステムレベルにおいて威力を発揮するが、その効果は、むしろサブシステム間の連携を管理し、トータルシステム化するときこそ最大に発揮される。具体的に言えば、各サブシステムで集約されたデータを解析し、最も食料「品質」の劣化が著しかったサブシステムに対する原因分析および改善の要求することや、食品安全に関わる事故や食中毒の元となる病原体の感染の発生源を特定すること、さらには特定の作物に対する分析などを可能とする。これに加えて、IoT はフードシステムにおけるサブシステム外のデータとのリンクによる分析も可能とする。例えば、水域や土壌などの環境データや、各工程で使用したエネルギーに関するデータとのリンクは、フードシステムの持続可能性を定量する上で非常に重要である。

このようなトータルでのフードシステム最適化に寄与する IoT 実現のためには、1) 各種情報を取得するための環境センサ等のデバイス、2) 取得したデータを通信するための技術およびフレームワーク、3) 取得したデータを格納する基盤クラウド、という 3 層構造から成り立つ共通情報基盤システムが不可欠となる（Zhao et al., 2015）（図 1.3）。

## 1-2-3 フードシステム IoT の現状

「栽培・生産」サブシステムにおいて実際に行われている研究として、衛星からの圃場における熱画像解析による圃場管理（Guerschman et al., 2015）、気温、相対湿度等の圃場環境モニタリングによる経験と勘に頼る農業からの脱却

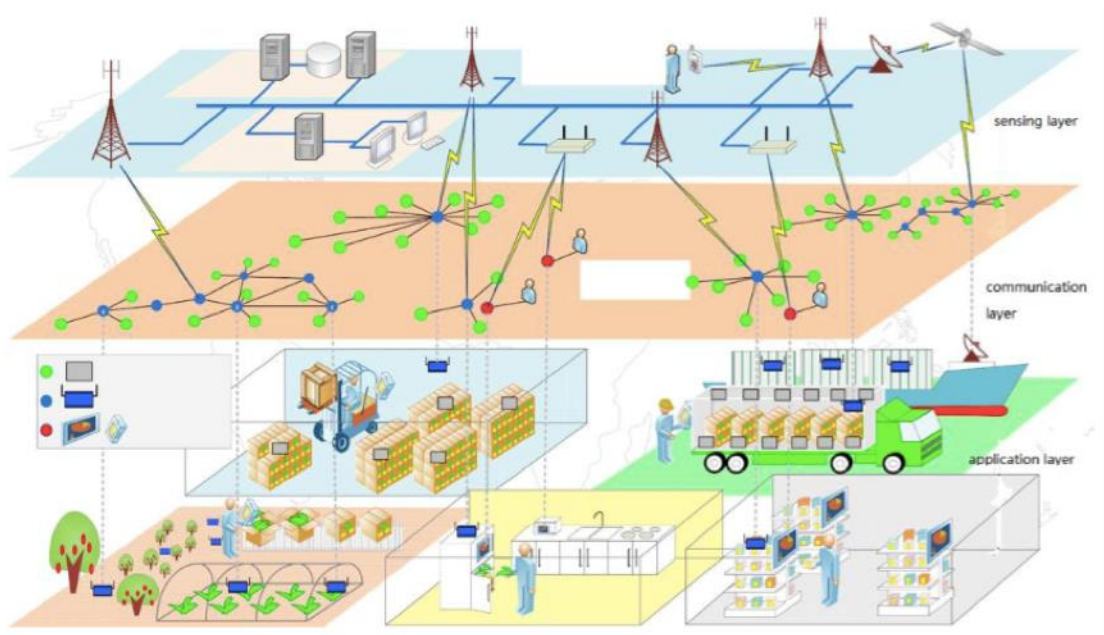


図 1.2 IoTの3層構造 (Zhao et al., 2015 より引用)

(Kirubakaran, 2014)、水耕栽培に関する環境制御(Bo; Yan and Ping, 2014; Yang and Fang-Tsou, 2014)、精密農業のアーキテクチャについて (Ye et al., 2013)、水の管理について (Robles et al., 2014; O' brien and Jeffery 2012; Zhang et al., 2015)、農業ロボットにおけるナビゲーションシステムについて (Rovira et al., 2015) などが挙げられる。

「保蔵」サブシステムでは、インターネットへのアクセス機能を持つ冷蔵庫による温度変化と品質劣化をモニタリングする研究 (Roeder, 2016, <<https://powerhousedynamics.com/resources/white-papers/internet-things-reinvents-food-safety/>>, 2018年2月12日参照)、家庭用冷蔵庫におけるIoT化について (Pearson et al., 2016, <[https://figshare.com/articles/Feasibility\\_of\\_the\\_IoT\\_for\\_domestic\\_refrigerators\\_food\\_safety\\_and\\_waste/4135554](https://figshare.com/articles/Feasibility_of_the_IoT_for_domestic_refrigerators_food_safety_and_waste/4135554)>, 2018年2月12日参照)、サンドイッチ市場における温度のモニタリング (Smith and Alaizuki, 2016, <<http://www.itutility.ac.uk/files/2016/07/Birmingham-final-report-updated.pdf>>, 2018年2月12日参照) 等が研究されている。

加工サブシステムとフードシステムIoTとの関連研究は、1) HACCPに対応するためのデータ取得とその応用、2) コールドチェーンの中での「スマートパッケージ」などに分類される (Wilder, 2015; Marcovic and Edwards, 2016; Ramundo et al., 2016)。輸送サブシステムとIoTとの関連研究は、スマートロジスティックスのためのクラウドおよびインターネット技術に関するものが主体となっている (Li et al., 2013; Gubbi et al., 2013; Verdouw et al., 2013a; Verdouw et al., 2013b; Verdouw et al., 2015)。そして、流通サブシステムにおける、IoTと安全かつスマートなフードシステムに寄与する研究は、スマート包装による商品トレーサビリティ由来の情報可視化や、クラウドベースの個人向け販売システムなどがある (Heising et al., 2014; Gonzalez-Miranda et al., 2013)。

このような諸研究の中で、生産から消費というフードシステムを通じた共通概念の定義が希薄であることがわかる。そこで本研究では、持続可能なフードシステムを目指す際の指標として、農作物自体の「品質」に着目し、「品質」最適化を目指すフードシステムIoTの構築を試みた。次項目では、フードシステム全体に共通する「品質」とは何か、という点について考えていく。

### 1-3 フードシステムを通じた対象農産物の「品質」

先に説明したフードシステム IoT において、すべての構成要素たるサブシステムに共通する評価基準が、その作物および加工物の「品質」であるとした。そして、この品質にも、味覚や機能性といった付加価値につながる品質と、食品安全の観点に立った品質という 2 種類の「品質」が存在する。本研究では、前者を付加価値品質、後者を安全品質という名称で統一していく。

いずれの「品質」も、フードシステムを通じたその食品・農作物固有の生体内情報であるため、各サブシステムに全く独立な概念ではない。よって「品質」の最適化を実現するために、初期品質を出力するサブシステムである栽培・生産サブシステムと、その後の輸送・加工・流通にわたって「品質」を保持し続ける保蔵サブシステムとを結ぶ連続した定量的な「品質」指標が不可欠となる。

しかし、個々の農作物の生体内情報たる「品質」概念は、その農作物に固有な部分が多い。そのため、定量的な「品質」指標を構築する上で、各農作物に固有の特徴量と、多くの農作物で共通する特徴量とを分類して、最終的には対象作物それぞれに対する「品質」指標構築が求められる。

そこで本研究では、そのような対象作物への依存性が高い「品質」の取りうる範囲を把握するため、「栽培・生産」においてはワイン用ブドウおよび温州みかん栽培、「保蔵」においてはレタス保蔵に着目した。ワイン用ブドウは、フランスを中心に生育環境と品質の関連性が多く研究されている数少ない農作物である (Zapata et al., 2015; Ruosteenoja et al., 2016)。そのため、本研究の目的である「フードシステム IoT のための定量性品質指標構築」に最も適していると考えられる。温州みかんは、ワイン用ブドウが加工用原料果実であるのに対し、生食用果実であることに加え、常緑樹という違いを持っている。そのようなフードシステムにおける位置付けや植物種としての固有の特徴差が、品質指標構築に及ぼす影響を評価するのに重要であると判断し、対象作物に選抜した。最後にレタスは、保蔵時の劣化が早く、迅速な品質変化が計測可能であることと、カット野菜需要が高く、将来的な加工サブシステムとのリンクに適切であることから選抜した。

本項では、研究対象作物それぞれに対して実際の「栽培・生産」過程と「保蔵」過程における「品質」を考える。

## 1-3-1 温州みかんの場合

### 1-3-1-1 栽培および生産工程

温州みかんの生育期間における特色について見ていく（図 1.2）。温州みかんの生育期間は3月ごろから始まる。一般的に、温州みかんの地下部は10度以上になると水分および養分の吸収を開始させ、樹体の発芽に向けて活動を始める。次に、4月になり地上部が15度以上になると、今度は新梢および芽が活動を開始し「発芽」が起こる。ここから約1か月かけて花器形成を行い続けて、5月初旬に開花し始め、中旬には満開期を迎える。この時みかんは多くの果実をつけるが、そのほとんどが落果し、実際に果実をつけるのは1%程度だと言われている（Iglesias et al., 2007）。この間、樹体の栄養成長の活発化に伴って、地上部では春枝と呼ばれる新梢の成長を活発化させる一方、地下部ではコンスタントな根の成長を続けることにより、樹体への栄養供給を充実させている（農山漁村文化協会編, 2000b, p.17）。

果実は、6月の中旬（満開後30日後）から実をつけ始め（細胞分裂開始）、細胞伸長を続け果実の肥大を進め、梅雨が明ける7月中旬頃に果汁が液胞に溜まり始める。この7-8月にショ糖の転流が起こり、その一部がクエン酸に変換され、9月になるとさらにショ糖転流が加速し果実に蓄積される。10月には気温の低下とともに果実への着色が始まり、11月下旬から12月の上旬に収穫時期を迎える（日本土壌学会・有機栽培技術の手引 <<http://www.japan-soil.net/report/h25.html>>, 2018年2月12日参照）。この果実の成熟に関しては品種により様々であり、本研究で対象とする三重県熊野市の温州みかんは10月に収穫時期を迎える早生品種である。

この工程において求められる温州みかんの付加価値品質要件は、表面に傷がないことと、糖度および酸度とそのバランスであると考えられる。安全品質条件においては、付加価値品質とも重複するが、表面にカビなどが生えていないかや、散布農薬が表面に付着しすぎていないかなどが重要になる。

### 1-3-1-2 保蔵工程

収穫後の温州みかんは果皮に多くの水分を含んでおり、この水分が原因でコハン病や黒斑ができてしまう可能性が高いことから、収穫後すぐに予措乾燥に

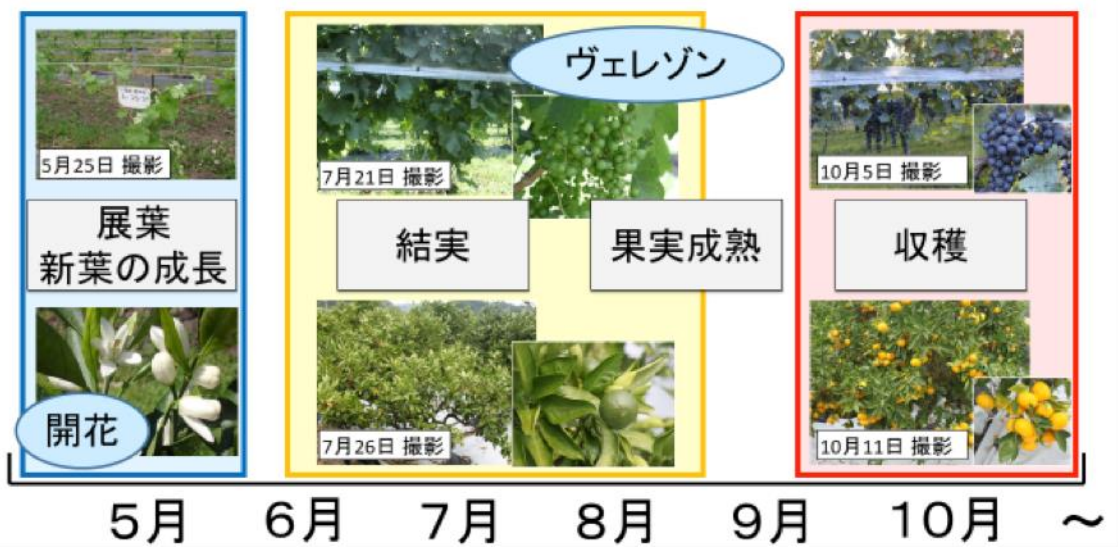


図 1.3 みかんおよびブドウの生育ステージ

よって果皮を乾燥・硬化させる必要がある。この過程には様々な方法があるが、基本的には貯蔵庫に保管する前に風乾することで、果皮の水分を約5%低下させる作業を行う。その後、みかん表面を洗浄・殺菌し、主に水分などの品質保持用のワックスを表面塗布する。このワックスは、1) 天然樹脂からなる無毒なもの、2) 食べることができるワックス、という2種類に分類され、健康上問題がないことが担保されている。貯蔵中は、植物における外観品質の向上及び追熟の制御を行うために植物ホルモンを使用する。主に貯蔵中の柑橘類においては種子由来のアブシジン酸が優勢となることで老化が進むと考えられているが、これをジベレリンや2,4-D ジクロロフェノキシ酢酸の外部散布によって抑制することで、果実の長期保蔵を可能としている (Ladanyia, 2010, p.276)。

このようなみかん果実の栽培・生産過程で求められる付加価値品質要件は、第一に糖度と酸度のバランスといわれており、その次にビタミンC含量などの栄養素があげられる。そして忘れてはいけないのが外観品質となる色づきであり、これを改善するために、収穫後にエチレン処理するなどの工夫がなされている (Ladanyia, 2010, p.233)。

一方、安全品質には、農薬散布による果実への有害化学物質の付着が最も人体に影響を及ぼすと考えられている。そのために、洗浄工程の徹底が不可欠となっている。

## 1-3-2 ワイン用ブドウの場合

### 1-3-2-1 栽培および生産工程

ワイン用ブドウの生育フェーズ(フェノロジー現象)について見ていく(図)。はじめに、展葉開始から30日前後で開花期に移る。さらに開花から30日後を目安に結実し、ここから果実の生育フェーズが始まる。まず開花後から数えて5週目までは果実は肥大成長し(第Ⅰ期)、6・7週目は種子が硬化する硬核期(第Ⅱ期)、最後に8週目から11週目にかけて果皮の着色や果実中の酸減少や糖増加が起こる(第Ⅲ期)。Ⅱ期とⅢ期の移り変わりをヴェレゾン期という。ヴェレゾン期の直前には、果肉の細胞膜を構成するペクチン質が変化し、果肉がやわらかくなるのに加え、垂表皮細胞中の液胞内にアントシアニン蓄積により着色が進む。また、果実に利用される光合成産物の割合は、第Ⅰ期では17%、第Ⅱ期では8%、第Ⅲ期では32%となっており、第Ⅲ期が最も果実への糖の転流が



多いということが言える。これに加えて、第Ⅲ期は細胞分裂をはじめとする糖のエネルギー利用が少ないため、この期間の転流糖はそのまま糖として蓄積されると考えられる。よって、この第Ⅲ期にいか天候が安定するかがワイン用ブドウ栽培における重要なポイントである。

この生産・栽培過程で最も求められる付加価値品質要件は、高い糖度、および糖度と酸度のバランスと言われており、この 2 条件を満たすための栽培管理が重要となる。

一方で、安全品質をクリアするために、果実に含まれる重金属を指定されたレベルにまで下げる必要があることに加えて、この次に説明する発酵過程（加工）を速やかに進行させるために、あらゆる病原微生物から果実を守らなければならない。このような微生物およびバクテリアの中には、発酵過程を阻害するだけでなく、人間に有害な毒素を生成するものも存在するため、加工前の果実選定は非常に重要である。

### 1-3-2-2 加工（主に発酵）・保蔵（主に熟成）工程

ワイン用ブドウの一次加工過程は大きく分けて、1) 茎や葉、さらには虫などの細かい不要物を取り除く作業、2) 果実を破碎もしくは圧縮して果汁を抽出する作業、3) 得られた果汁から不要な物質（タンパク質等）を取り除く作業、4) 果汁の pH および糖度を調整する作業、5) 実際に果汁を発酵する作業、という 5 つに分類される (Jackson, 2008, p.333-340)。1) の過程は収穫後すぐに行うことが非常に重要とされており、その理由は果実の酸化による変色が起こる前に処理することで、フレーバーおよびアロマ成分の分解を防ぎ、ワインの鮮やかな色を表現することができるからである。色に関しては、この中で赤ワイン、ロゼワイン、白ワインなどの違いを決めているのは 2) の果汁抽出工程で、この時に生成された残りかすと果汁との接触が多いのが赤ワイン（むしろ残りかすと果汁を混合した状態で発酵を行う）、少ないのが白ワイン、その中間がロゼワインである。また、白ワインにおいては、3) の不要物を取り除く作業が非常に重要とされており、この過程でポリフェノール酸化酵素を始めとするタンパク質を分離することが、フーゼル油という雑味につながるアルコールの生成を防ぐのに役立つと考えられている。5) のアルコール発酵過程にも、一般的に知られている酵母 (*S. cerevisiae*) による糖のアルコール発酵以外に、マロラクティック発酵という低 pH 条件下でのみ発生するリンゴ酸から乳酸への発酵が存在する。この発酵は、酸度の高いワインの味をまろやかにする効果を持っている。

こうして生成されたワインは、さらに樽の中で熟成され、最終的に商品となる。

この加工（発酵）・保蔵（熟成）過程において、重要となる付加価値品質は、糖度と酸度の割合、色づき、そしてそのワインの持つテロワールにマッチしているかであり、一方の安全品質においては、発酵後の微生物混入による食味の低下およびカビ毒生成、農薬が原因となる硫黄成分が硫化水素などの物質になることによる悪臭などが挙げられる（Jackson, 2008, p.499）。

あとは、これらを流通経路に送るという流れである。

### 1-3-3 カット野菜用レタスの場合

#### 1-3-3-1 栽培および生産工程

レタスの生育ステージは、1) 種子の発芽、2) 葉の形成（主に非結球の外葉）、3) 収穫される結球部分の形成、4) 開花に向けた茎伸長、5) 開花、6) 果実形成、7) 果実および種子の成熟、8) 老化および枯死、という流れになっているが、レタスは葉野菜であり、その果実を食する訳ではないので、実際の生産および栽培に必要となるのは、1-3のステージまでとなっている。まず、1)の種子発芽ステージでは、光の量と温度に注意する必要がある。また現在では、レタスは直播栽培ではなく育苗生産方式がほとんどであるため、この時の土壌成分調整も発芽率向上のために最適化が求められる。1)と2)の家庭の間に、定植の準備という栽培過程も存在しており、ここでの水はけの良い圃場の選定や、土壌への施肥が、育苗とセットで品質の良いレタス作りへの第一歩となる（日本土壌協会、<[http://www.japan-soil.net/report/h22tebiki\\_00.pdf](http://www.japan-soil.net/report/h22tebiki_00.pdf)>, 2018年2月12日参照）。2)および3)、つまり葉の形成の過程では、病虫害や病原菌の管理、水管理、土壌肥料管理によって、安全品質と付加価値品質の双方を高めていく。3)の収穫過程においては、収穫適期の見極めが最重要項目となっており、一般的な収穫の目安としては、レタス結球が上から手で押さえた時に硬く締まってきた時とされている（Gil et al., 2012）。しかしながら、近年の研究において、生食用のレタスとカット野菜を始めとする加工用のレタスでは、求められる品質が変わってくるのがわかってきた。具体的には、カット野菜用のレタスは生食用よりも早い時期に収穫することで、レタス葉が柔らかく加工しやすくなることに加えて、葉組織自体が栄養成長をしている状態、つまり生育段階の切り替えができていないので、エチレン等の老化促進物質に対する感受

性が低く、長期保蔵が可能になることがわかってきた (Guiboileau et al., 2010)。

この過程の中で、付加価値品質となるものは、ビタミン C などの栄養分、シャキシャキ感などのテクスチャ、そして鮮やかな緑色をしているかといった外観が挙げられ、他方安全品質には、病害および腐敗の有無や、実際に存在する生菌数などが重要とされている。

### 1-3-3-2 保蔵および加工工程

収穫後作物は、保蔵に移る前に 1) 表面部分の殺菌、2) 作物全体の予冷という過程を経る。1) の過程においては塩素水や過酸化水素水などによる化学的な殺菌とブラッシングによる物理的な殺菌が併用されており、2) の過程では、一般的な果実では冷水による予冷が行われるが、レタスのような内部に空気が多く存在する葉野菜においては真空冷却によって保蔵期間が延長することが知られている (Kim et al., 1995)。

一般的に、収穫後作物の腐敗および鮮度低下を促進する要因は、呼吸・蒸散・微生物活性の 3 つだと言われており、その中でも特にレタスに代表される葉野菜は気孔の数が多く、そこから水分および酸素が出入りするため、他の野菜および果実と比較して蒸散量・呼吸量ともに高くなることから、収穫後の鮮度低下が最も著しい作物とされている。(Gil et al., 2012)。そのため、より長期間にわたってレタスの鮮度および品質を保持するためには、この 3 要素をコントロールすることが不可欠である。レタスの最適保蔵環境は温度が 0°C で相対湿度が 95% 以上とされており、0°C 以下になるとレタス組織内の水分が凝固することで細胞が破壊され、微生物への抵抗性が低くなり、0°C 以上になると、少しずつ呼吸量が増えていくことから組織内の構成物が分解され、やはり微生物への抵抗性が低くなる (Sinha, 2010)。

また、加工過程、特にカット野菜への加工過程においては、このプロセス自体がレタス組織に対して物理的に外傷を与える行為に他ならないため、当然呼吸量とエチレン生成の増加を伴う (Cantwell and Suslow, 1999)。よって、この過程で重要となるのは、1) より切れ味の良い刃物を用いてカットすることでレタス組織に余分な傷を与えないこと、2) カット後の洗浄を徹底することで微生物の繁殖を防ぐこと、3) 低温高湿度条件に加えて大気条件を変える (酸素量を減少) ことで、加工後のレタスの呼吸量および蒸散量をコントロールする、という 3 条件である。

この時に求められる付加価値品質および安全品質は、栽培・生産工程におけ

るそれと同様であるため、この保蔵「品質」過程が非常に重要となる。

以上のように、安全で持続可能なフードシステムを考察・構築するうえで、その対象物となる野菜や果実固有の「品質」に関する問題は避けては通れない。

### 1-3-4 「品質」に対する学術的なアプローチ

近年、学術的な分野において、栽培作物の持つ品質と、品種、栽培環境さらには栽培管理方法との関係性を理解していこうという領域横断的な動きが見られる (Hertog et al., 2011)。

栽培・生産においては、生育環境情報が植物の表現型にどのような影響を与えるのかを定量するフェノミクス研究が盛んに行われており、例えばブドウ作物においては、様々な植物-生育環境間の相互作用 (フェノロジー) を栽培指標化し、生育ステージの予測などに役立てている (Gladstones, 2015)。

保蔵サブシステムにおいては、遺伝子の総発現量ならびに特定遺伝子の発現量の違いを環境変数が異なるサンプル間で比較することで、その遺伝子に対する環境の影響を定量するトランスクリプトーム (mRNA 解析)、ある特定の反応のある段階におけるタンパク質の量や構造の変化、さらにはタンパク質と他の物質との相互作用を解析することで、生物の代謝反応等に与える環境の影響を評価するプロテオーム (タンパク質解析)、タンパク質以外の有機物などを定量することで、環境の違いによってもたらされた代謝変化を評価するメタボローム (代謝物質解析) などを中心に研究されている。そして近年では、レタスの栽培期間における生育環境と保蔵時における品質保持能との密接な関係に注目が集まっている (Gil, 2015)。このような食品加工や食品栽培における環境、微生物、添加物等による影響を定量するためのオーミクス研究はフードミクスと呼ばれている (Capozzi and Bordoni, 2013)。

フードミクスにおいて用いられる手法は、その対象が食品科学、分析化学、生物化学、微生物学、分子生物学、食品工学、臨床科学となっている。このような領域横断的な協力によって、トランスクリプトミクス関連では病気の予防に関わる栄養素バランス (Bordoni et al., 2007) や、加工食品内での微生物の動き (Soni et al., 2011) に関する研究が、プロテオーム分野では食品安全分野で広く役立っている報告がある (D'Alessandro and Zolla, 2012) 他、がん予防に関わる栄養に関する研究も存在する (Shukla and George, 2011)。そしてメタボローム分野であるが、この分野は、その「細胞内の化学反応による

生成物を網羅的に解析する」という性質から、近年急速に研究が進行しつつあり (Hong, 2011)、栄養科学的な研究も同時進行している (Puiggro`s et al., 2011)。

この分野の発展には、大量の情報をハンドリングし、格納するための情報技術と、生体内の物質を迅速に定量する計測技術、さらにはビッグデータ化した計測データを解析する手法が不可欠となり、それぞれに対応するのが近年の ICT、光分析技術、機械学習・人工知能 (AIs) 等の発展であることに疑いの余地はない (Kashyap et al., 2015; Rezzi et al., 2007; García - Cañas et al., 2011; Bordoni et al., 2011)。そこで次項では、生体内情報を計測する有効な手段として光センシングに、そのようなデータの解析手法として機械学習についてそれぞれ触れる。

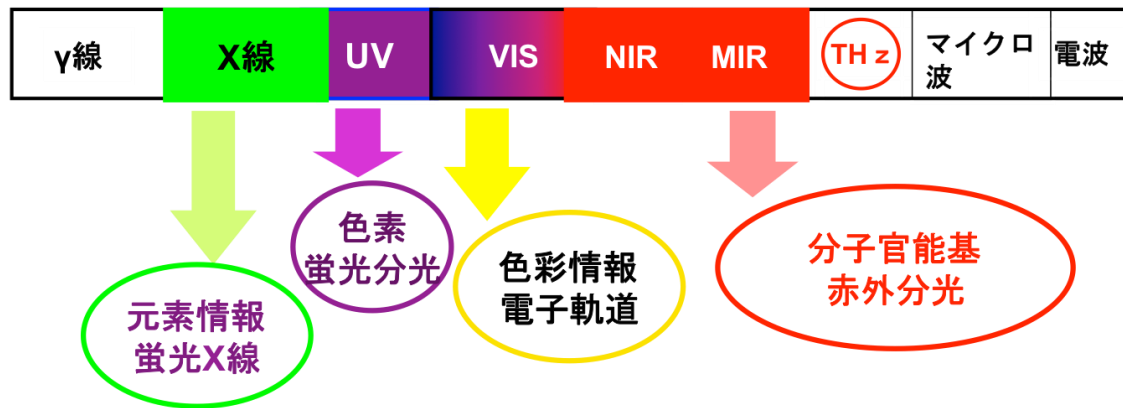
## 1-4 品質を情報化する光センシング

光は電磁波というエネルギー形態の一種であり、電磁波は互いに直角をなして同じ周期で時間的に変化する電場と磁場に垂直な方向に波として進む。この波の波長の短い方から  $\Gamma$  線 (0.01nm 以下)、X 線 (0.01 ~ 10nm)、紫外線 (10 ~ 400nm)、可視光線 (400 ~ 760nm)、赤外線 (近赤外域: 700 ~ 2500nm、中赤外域: 2500 ~ 4000nm、遠赤外域: 4000nm ~ 1mm)、マイクロ波 (1mm ~ 1m)、ラジオ波 (1m 以上) と呼ばれる (Johnsen, 2012) (図 1.4)。

分光センシングの特徴について触れる。クロマトグラフィ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上げても多岐のサンプリング方法 (透過法・反射法・拡散反射法・光音響法) が存在する (亀岡 and 橋本, 2016)。また、それぞれの波長が有するエネルギー量の違いから、定量できる物質が異なるのも光分析の特徴である。例えば、X 線は元素固有の最内殻電子移動エネルギーによって元素種を判断し、紫外線および可視光は外殻電子の移動に伴う蛍光によって、物質の特定を行い、これらと比較してエネルギーが小さい赤外線は、特定官能基の振動を通じて有機物を定量するのに用いられる。

ここで、このような光センシング手法の農業に対する応用について触れる。X 線の応用について、橋本らは蛍光 X 線分光法を用いたトマト葉中元素の検量線

## 作物，農産物の品質評価で利用可能な 光センシング（分光センシング）技術の概要



**利点：非破壊・ケミカルフリー・リアルタイム性**

図 1.4 マルチバンド光センシング

法による定量手法を確立した (Hashimoto et al., 2005)。紫外線について、齊藤はレーザー誘起型蛍光分光法を用いた圃場および森林における植物の生理状態モニタリング手法を確立し (Saito, 2007)、小林らは植物の最も重要な色素の一つであるクロロフィルの形成および消失、生理活動の結果である代謝二次産物情報の同時取得方法を確立した (小林ら, 2009)。可視光線は画像解析一般に用いられているが、その中でも農業分野では、山本らによるトマト果実の形状解析による品質推定手法や (Yamamoto et al., 2014)、橋本らによる可視分光スペクトルを用いたトマト植物の自然光下における画像補正手法 (Hashimoto et al., 2017) 等の先行研究が存在している。そして赤外線は糖類を中心とする有機成分や、より具体的には植物体内における硝酸態窒素の定量などにそれぞれ利用されており、橋本らはフーリエ変換赤外分光法を用いた葉柄の計測による硝酸態窒素の定量手法を確立した (Hashimoto et al., 2005)。このように、農業分野における光センシングの応用研究は、今後もより一層の発展が期待できる分野である (Kameoka and Hashimoto, 2016)。

## 1-5 機械学習・人工知能 (AI) とは

機械学習とは、情報処理システムとしての機械に学習能力を持たせる能力のことを指し、大量に存在するデータから「特徴量」を抽出することで、所与のデータ (学習データ) だけでなく、未知のデータ (テストデータ) でも性能を発揮する汎化能力を最大化することを目的としている。

人工知能とは、「人工的に人間の知能を模倣するための概念および技術」であり、そのための基礎技術として機械学習および深層学習が存在している。深層学習とは、人間の脳神経回路をモデルにした多層構造アルゴリズム「ディープニューラルネットワーク」を用い、特徴量の設定や組み合わせを人工知能自ら考えて決定するという仕組みを持つことを言う (<<https://www.optim.cloud/blog/ai/ai-deeplearning/>> 2018年2月12日参照)。

このような ICT の発展に伴う分析・予測技術が、フードシステムの最適化に対しても重要な位置を占め始めており、農業現場では、主に画像を主体に機械学習を用いた解析が研究されている (Behmann et al., 2015; Singh et al., 2016; Hengl et al., 2017)。その中でも、Guo らによるイネの開花予測のための機械学習を用いた画像解析 (Guo et al., 2015) や、山本らによるトマト実生の樹勢診断に対する節間長画像の機械学習法確立 (Yamamoto et al., 2016) 等は、画像

解析と機械学習を応用した農作物フェノタイピングの代表的な既往研究として位置付けられる。

## 1-6 本研究の目的

以上の研究背景を受けて、本研究では、持続可能なフードシステム実現のための条件として、飛躍的發展を遂げている情報科学を駆使し、IoT化したシステム設計による各サブシステムのリアルタイムモニタリング、さらには将来予測を通じたサブシステム間連携の動的最適化が不可欠であると考えた。また、そのようなフードシステムにおけるサブシステム間の入出力となるのが農作物および食品の「品質」であると仮定した。この仮説において、栽培・生産サブシステムにおいて、出力は「収穫農産物の品質」であり、これが保蔵サブシステムの入力となる。保蔵サブシステムが加工サブシステムに繋がる場合には、このシステムの出力は「保蔵後の品質」となり、これが加工サブシステムにおける「原料農産物の品質」となる。このように「品質」はそれぞれのサブシステムによって意味が異なるため、それぞれの「品質」定量性指標が必要になる。しかしながら、「品質」に対する考え方は非常に漠然としており、それらに対する定量性指標や、リアルタイムモニタリング技術、さらには将来予測に関する研究はほとんど行われてきていない。

そこで、本研究では、栽培・生産サブシステムと、保蔵サブシステムにおける「品質」定量化指標の有効性検証を目的とした。栽培・生産サブシステムにおいては、生育環境情報に対するワイン用ブドウと温州みかんの樹体の応答を栽培に還元する「二次栽培指標」の有用性を検証するために、標準化フードシステム IoT クラウドを挟んだ 3 層構造のフードシステム IoT に対応した、生育環境情報取得のための WSN と、栽培従事者へのサービスとしての Web アプリケーションのそれぞれの実装・検証を行うとともに、マルチバンド光センシングを用いて、樹体の樹勢の指標として、葉の植物栄養と光合成活性指標の経時変化の可視化を試みた。他方、保蔵サブシステムにおいては、収穫後レタスの鮮度を含む「品質」の定量的な定義の検証を目的として、葉の状態計測に有効であるマルチバンド光センシングを用いて、保蔵過程のレタスの鮮度変化を計測するとともに、機械学習を導入して、鮮度を定量的に定義する方法を検討した (図 1.5)。





図 1.5 本研究の目的

## 1-7 本研究の構成

本研究においては、「栽培・生産」「保蔵」「輸送」「加工」「流通」「消費」「再資源化」というサブシステムから構成される食の循環系を「フードシステム」と定義し、このシステムを「持続可能性」、「食料安全保障」、「食品安全」という観点から最適化することを試みた。まず、各サブシステムにおける入力および出力を考察し、食の「安全」に大きく関わる食料品の「品質」という概念に着目した。そして、この「品質」の定量指標を通じたフードシステムの動的最適化という仮説を検証するために、「栽培・生産」および「保蔵」サブシステムを中心に、「品質」指標がフードシステム最適化におけるパラメータになりうるかどうかを検証するため一連の研究テーマを考案した（図 1.6）。

これを受けて 2 章では、フードシステムにおける「栽培・生産」サブシステムを支援するために、従来の垂直統合型の農業 ICT サービスを脱却し、より幅広いサービスの提供を可能にする農業 IoT に立脚した水平統合型システムの有効性検証を目指した。具体的には、圃場生育環境の計測を行うためのセンシング層、センシング層で取得されたデータを格納し、様々なデータとの連動を可能とする基盤情報サービス層、栽培従事者にとって有効なサービスを展開するユーザーサービス層という 3 層構造システムの有用性を評価するため、実証実験を行った。この章において、ユーザーサービス間の相互運用性を担保する上での標準化の重要性や、生育環境データを二次的に加工して、より栽培への寄与度を高めた二次栽培指標についての説明も行った。

第 2 章では圃場生育環境をメインとした栽培管理の最適化に向けた試みについて触れたが、各栽培ステージでの作物および樹体のミネラルおよび色素等の栄養状況を直接的に診断する方法については触れてこなかった。

そこで第 3 章では、マルチバンド光分析による作物および樹体の栄養状態および樹勢の直接診断を試みた。具体的には、みかん樹体の葉を対象にし、色素定量には蛍光分光装置、元素定量には蛍光 X 線分光装置をそれぞれ用いた樹勢診断手法の有効性を検証した。また、この手法を利用して、樹勢の強弱によって区分けした群間の差を評価できるかどうかを検討した。それに加えて、みかん葉とワイン用ブドウ葉を対象に、生育期間における葉の色素量および元素量をそれぞれ定量する。計測期間はそれぞれの樹体の展葉期から収穫期までとし、その間の色素および元素の経時的変化をモニタリングする。加えて、この 2 章

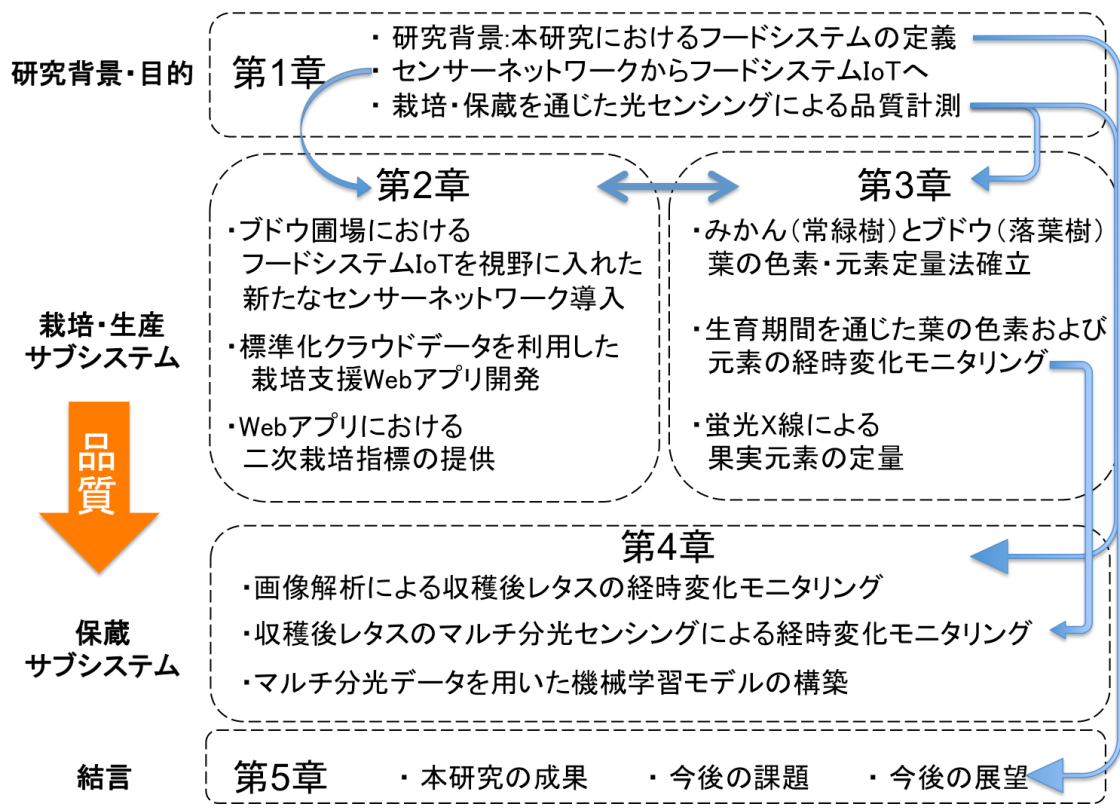


図 1.6 本研究の構成

と 3 章を結合することによる、果樹における品質を決定する外的要因（気象データ）と内的要因（ミネラル・色素情報）をパラメータとする三次栽培指標および果実品質定量指標の将来的な有効性評価についても触れる。

これまでの章では「栽培・生産」に関する「品質」指標の有効性検証に向けた基礎研究を行ってきた。そこで第 4 章では、「保蔵・加工・流通」の最適化を図るために、品質を代表した概念である「鮮度」定量指標の有効性検証を試みた。また前章で植物樹体の葉を対象に計測を遂行したことを踏まえ、葉菜類の中でも特にカット野菜需要が高まるレタスを対象作物に用い、レタス内の元素変化および水分変化を定量するために蛍光 X 線分光装置、野菜内部の有機物、特に脂質の酸化具合を定量するために FTIR を、可視画像取得のために撮像装置をそれぞれ用いて、経時的な値の変化をモニタリングした。さらに、それらの機器から得られたデータをより複合的に解釈し、鮮度をさらに精度よく定量的に評価するために、蛍光 X 線分光データと可視画像データを用いて機械学習を行い鮮度による判別アルゴリズムの実用性を検証した。

第 5 章では、これらの結果をもとに、本研究の成果をまとめ、今後の課題について述べる。そして最後に、本研究における今後の展開を提示する。

## 2章 ワイン用ブドウ圃場における農業 IoT による栽培指標提供アプリケーションの構築

### 2-1 背景

「栽培・生産」サブシステムは、フードシステムにおける起点であることは1章で説明した。本論文の目的である安全なフードシステムの最適化・実現のためには、「収量」に加えて、このサブシステムにおける生産物の「品質」が極めて重要である。しかしながら、日本においてこのサブシステムを担う農林漁業の従事者数は、厳しい経済状況や工業化社会を目指した教育システム等の社会的な要因や、近年における気候の不安定化、農業においては農薬や化学肥料、漁業においては乱獲などによる水産資源の枯渇などによる生産力低下のような環境的な要因により従事者が年々減少しており、生産物の「収量」と「品質」に対する保障が困難になりつつある。

このような状況に対応するために、生産物の品質向上を最終目標とした生産者への栽培支援への関心が高まっている。特に、生物とその周辺環境との関わりはフェノロジー（季節学）とよばれ、桜の開花に例えられるような季節と協調した生育ステージの移り変わりが、農業をはじめとする一次産業に大きな意味を持つことが明らかになりつつある（Schwartz, 2003）。

そこで本章では、フェノロジーを反映した二次栽培指標の、「栽培・生産」サブシステム最適化への有効性を検証するため、農林水産業で最も GDP が高い農業に着目し（農林水産省，GDP に関する統計< <http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/01.html> >2018年2月12日参照）、さらにその中でも生食・加工などのフードシステムにおける多様性を示し、なおかつフェノロジー研究が盛んなワイン用ブドウ栽培に焦点を当てて、フードシステム最適化のための圃場環境情報を収集する WSN と情報基盤クラウド等のインフラ整備と、そのインフラを用いた栽培支援用アプリケーション構築に関する基礎研究を行った。

#### 2-1-1 研究背景

近年、日本では国産ワインの需要が高まる傾向にあり、ワイン用ブドウの栽

培・生産工程を安定化させ、収穫量と品質を向上させる必要性が生じている。この理由として、海外産のワインと国産ワインとの間で明確な風味の違いが認められることがあげられる。このようなブドウが育った土地の味わいはフランス語で「テロワール」と呼ばれ、品種による味の違いだけでは説明できない概念とされている (Law, 2005)。

他方、近年の地球温暖化をはじめとする異常気象が農業全般に影響を与えつつあり、ワイン用ブドウ栽培もその例を外れない。こうした状況の中、生育環境の影響を定量的にとらえるためのシミュレーション研究がヨーロッパを中心に広く行われ、気候変動による環境変化が作物の栽培適地に多大な変化をもたらし、特にフランスなどではその地域で栽培・醸造を経たワインの価値とも言えるテロワールが失われる可能性が懸念されている (Fraga et al., 2016)。そこで、気候変動に対応するために、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・解析を行うこと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ような科学的栽培に基づく農業を行う必要がある。

## 2-1-2 果樹栽培におけるフェノロジー指標

フェノロジー (phenology, 生物季節) は、本来は「植物は出芽や展葉、開花などを四季の変化に応じてコントロールしている」ことを指すが、広義には開花、発芽、芽吹き、紅葉や落葉など植物が示す季節的变化とこれらの現象と気象/気候との関係を扱う研究に対しても用いられる (図 2.1)。植物の生育ステージ遷移に影響を与える季節的变化では温度とは日照が重要であるが、長期にわたる経験と半理論的な観点から温度 (気温) が一番の関係を持つことが知られている。フェノロジーでは温度としては、一般に平均温度ではなくて積算温度が使われる。レオミュール (Reaumur, 1683 - 1757) が提唱したレオミュールの法則 (Rene Antoine Ferchault de Reaumur, 積算温度の法則) に従えば、ある植物についての有効積算温度を調べておけば、毎年の植物の挙動の予想が可能となる。「桜前線」という現象からわかるように、植物は生理活動のタイミングを、外部環境の何らかの変化を感知して自律的に制御しているものと考えられている。一般には気温や日照量などが外部環境の基本だとされている。

ワイン用ブドウの生育段階は、フェノロジー的観点から 1) 萌芽、2) 開花、3) ヴェレゾン (果実の色づき)、4) 結実、という 4 つのステージに分類され、

そ

# 作物の生育環境とフェノロジー(Phenology)

－ 圃場の気象と土壌環境 －

## フェノロジー(生物季節、植生の季節変化)



- 大気情報  
天候  
温度・湿度  
露点温度  
風速・風向  
気圧・雨量  
日照量、CO<sub>2</sub>
- 土壌情報  
温度・水分  
PH、EC  
無機成分  
構造  
微生物



太陽の表面温度:  $T_s = 5800K$   
光合成使用波長(400~700nm)の実効温度:  $Tr = 1180K$   
有効積算温度  
René Antoine Ferchault de Réaumurの法則 (1683 - 1757)  
積算日射量・積算雨量

**フェノロジー(生物季節)**  
René Antoine Ferchault de Réaumurの法則 (1683 - 1757)

- ・有効積算温度
- ・積算日射量
- ・積算雨量

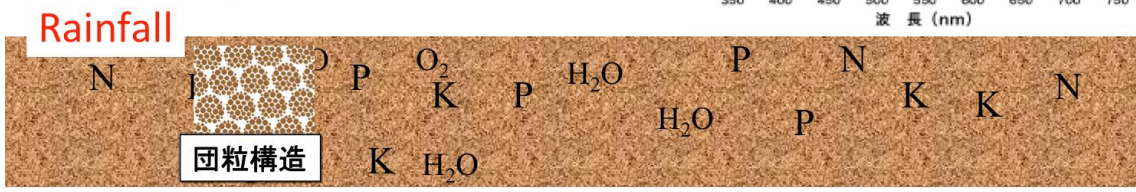
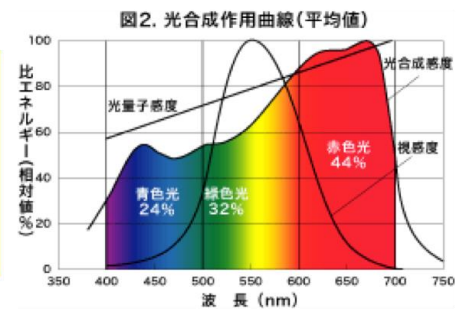


図 2.1 生育環境とフェノロジー

それぞれの生育ステージに至るまでの間期における気象条件が整うことが、品質の高いワイン用ブドウの生産にとって重要であることが経験的に知られている。例えば、萌芽から開花までの間期は約 50 日であるが、この期間中に温暖かつ適度に乾燥している状態が保持されると、光合成が促進され樹体に栄養が行き渡ることによって、樹体内の誤差が少なく開花がスムーズに行われるとされる。それ以外にも、春の芽生えの時期に霜が降りることによる収量の大幅な低下、35 度以上の高温が続くことに伴う果実成熟の遅延及び品質の低下、夏期の降雨によるブドウ果実品質の低下等も経験的に知られている (Law, 2005)。

### 2-1-3 既往の研究

本研究室では、2007 年から圃場内の生育環境データを最適に取得するための無線センサネットワーク (WSN) の実証実験と、栽培者がそのデータを栽培管理に役立てられる Web サービス開発を山梨県甲斐市のワイン用ブドウ栽培圃場 (サントリー登美の丘ワイナリー、北緯：35.7103912885258°、東経：138.5118197255086°) と、三重県熊野市のみかん農園 (金山パイロット果樹園、北緯：33.8634418°、東経：136.05652822°) の 2 圃場を対象に行ってきた (Togami et al., 2011; Kameoka and Hashimoto, 2013; Kameoka et al., 2014)。

本研究で対象とするサントリーワインインターナショナル登美の丘ワイナリーにおいては、2009 年から DARPA (アメリカ国防総省高騰研究計画局) のスマートダストプロジェクト (Kahn et al., 1999) の流れをくむ農業・屋外用センサネットワーク eKo (旧 Crossbow Technology) システムを採用した WSN が構築され、実証実験が行われてきた (戸上ら, 2011)。この先行研究における WSN システムの問題点として、1) 採用したセンサが海外製であるため、故障時に日本で修理ができないことによるシステム復旧の遅れ、2) データベースのレプリケーション機能が原因となる約半年に一度の SD カード交換頻度、3) 転倒ます式雨量計のメンテナンス頻度が高く、負担が大きかったこと、4) 無線の規格 (2.4GHz) に起因する通信距離の制限の 4 点が挙げられ、これらに対するシステム改善が緊急の課題となっている。



## 2-1-4 研究目的

本章では、フードシステムの起点である「栽培・生産」の品質に深く関与する生育環境と、実際の植物の応答としてのフェノロジーとの関係性検証を目的として、サントリー登美の丘ワイナリー圃場において、フードシステム IoT における 3 層構造の考え方に則ったプロトタイプ構築を行った。具体的に、圃場環境を正確にモニタリングする国産 WSN 構築（センシング層）、WSN とサービス間の相互運用性を向上させる標準化 IoT クラウドインフラとの API を介した接続（基盤情報サービス層）、そして標準化された圃場環境データを栽培に活用するための Web アプリケーション構築（ユーザサービス層）の 3 点を行い、将来的な二次栽培指標の評価に向けた研究基盤を作り上げた。

センシング層に関しては、既設の WSN を先行研究から得られた課題を克服する形で更新した。続く基盤情報サービス層では、WSN で取得された生育環境データを共通基盤クラウドに格納することでデータの観測名と単位の標準化を行い、ユーザサービス層においては、標準化データを用いて、ワイン用ブドウ固有の栽培ステージと密接に関連する栽培指標を作成し、Web アプリケーションサービスとして提供した。

## 2-2 WSN を用いた栽培支援システム

### 2-2-1 システム構成

本研究のサントリー登美の丘ワイナリー圃場における、WSN のシステム構成・計測機器について述べる。

農業 ICT を用いた栽培管理、特に生育環境データに基づく栽培指標を活用する栽培支援サービスにおいては、植物生理と栽培管理者の観点に基づき情報収集することが不可欠である（戸上ら，2011）。また近年、気象観測ではメッシュデータが多く利用されており、農業分野においても「メッシュ農業気象データ」が利活用されている（大野ら，2016）。その一方で、登美の丘ワイナリーのような標高の高い地域（標高 600m）では、さらに細かい地点毎の微気象、特に土壌水分データがブドウの生育に重要になるため、圃場内の生育環境分布のセンシングを可能とする通信機能を具備するシステムとともに、今後新たな生育環境

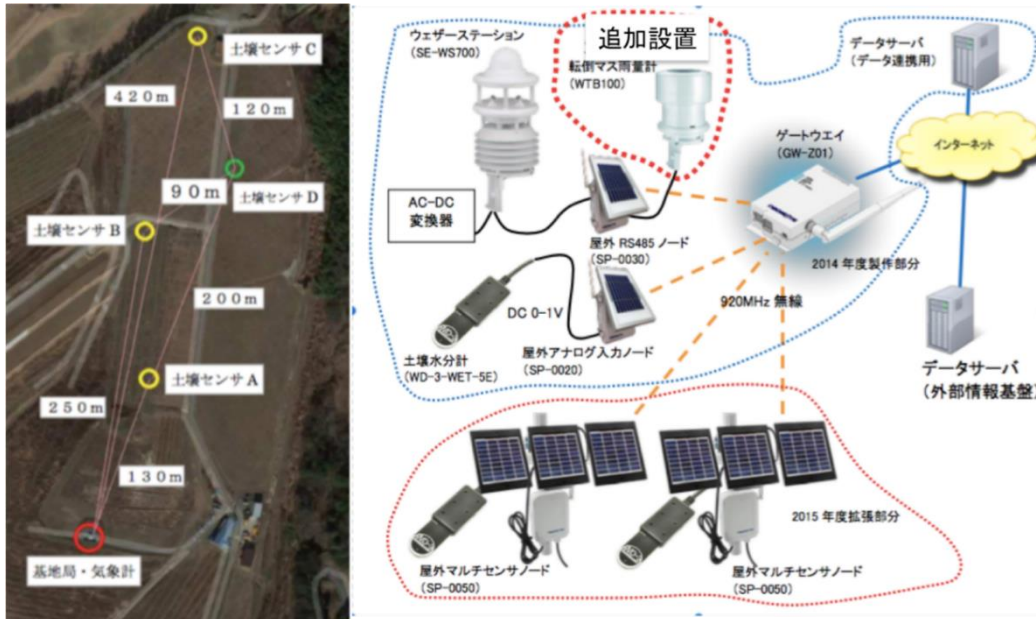


図 2.2 登美の丘ワイナリーにおける無線センサネットワーク

センサや植物の生体センサなどが開発される可能性を考慮すると、WSN 自身の拡張性も求められる。

そのため、登美の丘ワイナリー圃場における WSN を、より良いサービスに資するフィールドセンサによって構築し、拡張性を付与すること、無線規格を変更し通信距離を向上すること、加えて先行研究で明らかになった課題を克服することを目指して、図 2.2 に示すドイツ製のウェザーステーション(Lufft 社製 SE-WS700)、及び 1 台で電気伝導度・土壌含水率・土壌温度が計測可能な国産の土壌水分センサ(A・R・P (株) 社製 WD-3-WET-SE)をセンサとする圃場内 WSN を設計・構築した。各センサが取得した圃場生育環境情報は屋外 RS485 ノード(住友精密工業 (株) 製 SP-0030)や、野外アナログ入力ノード(住友精密工業 (株) 製 SP-0020)から、ゲートウェイ(住友精密工業 (株) 製 GW-Z01)へ集約され、上位のデータベースサーバへ格納される。

#### 2-2-1-1 使用している通信プロトコル

ウェザーステーションと屋外無線ノード(SP-0030)との接続は Modbus プロトコルを用い、物理層コネクタには RS485 を採用した。これらの電源には既設の商用電源を利用し、AC/DC 変換器(PBA100F-24-N)により AC100V を DC24V に変換することでウェザーステーションの電源とした。Modbus マスタであるゲートウェイ(GW-Z01)はウェザーステーションに要求コマンドを送信し、これに対しウェザーステーションが各種計測データを返信する。

土壌水分計は屋外アナログ入力ノード(SP-0020)と接続する。これらの電源には、ノードと接続してある太陽光パネル由来の直流パネルを利用する。ゲートウェイは屋外アナログ入力ノードに要求コマンドを送信し、これに対して野外アナログ入力ノードが電圧値を計測して返信する。これらに加えて、将来的な WSN へのセンサ追加に備えて、野外マルチセンサノード(SP-0050)を追加した。この方式によってセンサ群に対してゲートウェイが無線子機でプロトコル変換することなく直接通信できることで、汎用性・保守性を高めるというメリットがある。

#### 2-2-1-2 920MHz の周波数帯における無線通信

ゲートウェイと無線ノード間の通信には Wi-SUN 規格に準ずる 920MHz 帯の送受信周波数を用いた。各センサノードの無線部性能は、送電電力が 20mW、データ転送速度が 100kbps、通信距離に関しては遮蔽物の少ない箇所であれば

最大 5km にも達する。

また、各センサノードからゲートウェイに集約された取得環境データは、既設の 3G 回線によるインターネット通信で住友精密工業に存在する上位サーバに格納される。先行研究の WSN(戸上ら, 2011)では、レプリケーション機能によるデータバックアップを行っていたため、全データが常に SD カード内に蓄積・保存されるシステムであったが、本システムではこの仕組みを無くし、インターネットの不具合時には送信予定のデータを一時ファイルにデータ待避しデータ欠損を防止するシステムを採用することで、SD カードへの負担が軽減されデータ書き換え回数も大幅に減少した。先行研究では、SD カードの書き換え回数が約半年で限度に達するため、Linux システムの入った SD カードの取り替えが必要となっていたが、更新システムでは数年間に一度の交換ですむ設計となっている。

### 2-2-1-3 採用したウェザーステーション

先行研究での、圃場内におけるウェザーステーションの必要性と共に、一般的な実装に向けたセンサの機能性充実や、転倒ます式雨量計のメンテナンスに関する課題を克服するために、従来の検定付きウェザーステーションと比較してメンテナンスが容易かつ、雨量をドップラーレーダー方式により計測するウェザーステーションという観点から本ウェザーステーションを採用した。

設置したウェザーステーションの計測項目は、気温、相対湿度、気圧、風速、10 分間最大風速、10 分間最低風速、10 分間平均風速、風向、1 分間降水量、日射量、10 分間最大日射量、10 分間最低日射量、10 分間平均日射量である。これらの項目を 1 つのウェザーステーションで計測できる。本ウェザーステーションの計測方法において特筆すべき点は、日本の AMeDAS が降水量を計測する際に使用している雨量計が転倒ます式であるのに対して、Lufft 社の WS700-UMB における雨量計(R2S)は、24GHz のドップラーレーダー方式により降水量を計測している点である。落下物の落下速度を計測することで雨と雪の識別も可能となる。加えて、この方式はメンテナンスがほとんど必要ない(Haij et al. 2010)。また、雨量計の分解能は本ウェザーステーションのドップラーレーダー方式雨量計(R2S)では、0.01mm であるのに対し、気象庁検定付きの転倒ます式雨量計では 0.5mm である。雨量計としてこの方法が採用されたことで、農業の圃場で最も要望されているメンテナンスフリーのウェザーステーションが実現されるとともに、農業では重要となる低降水量の降雨に対しても有効と



図 2.3 本システムにおけるウェザーステーションの設置図

表 2-1 cloudSense による命名規則

Sensor Name	Physical Quantity	UOM
air_temperature	Temperature	Cel
relative_humidity	Humidity	%
air_pressure	Air Pressure	hPa
wind_speed	Wind Speed	m/s
10min_maximum_wind_speed	Wind Speed	m/s
10min_minimum_wind_speed	Wind Speed	m/s
10min_average_wind_speed	Wind Speed	m/s
wind_direction	Wind Direction	deg
1min_precipitation	Precipitation	mm
solar_irradiance	Global Radiation	W/m <sup>2</sup>
10min_maximum_solar_irradiance	Global Radiation	W/m <sup>2</sup>
10min_minimum_solar_irradiance	Global Radiation	W/m <sup>2</sup>
10min_average_solar_irradiance	Global Radiation	W/m <sup>2</sup>

なることが期待できる。

このウェザーステーションを地上から 3m の位置に設置するとともに、隣接する位置に気象検定付きのウェザーステーション(NTTDoCoMo 製)を設置した(図 2.3)。

#### 2-2-1-4 TDR 型土壌水分センサ

土壌水分センサ WD-3-WET-SE の特徴として 2 つ挙げることが出来る。1 つ目は、1 台で土壌中の水分量(土壌体積含水率)、土壌中の養分濃度(電気伝導度: EC)、土壌中の温度という 3 項目を同時に計測出来ること。2 つ目は、IP68 相当の防塵・防水耐性により長期間土壌埋没が可能であることが挙げられる。ここで各測定項目に関する測定方法について説明する。電圧出力には、体積含水率は絶乾(0%)から飽和(100%)までの含水率に応じて 0~1VDC が出力、そして土壌温度は-10℃~50℃までの測定範囲に応じて 0~1.2VDC が出力される。そして、この土壌水分センサを圃場内の 3 箇所に設置した(図 2.2)。

#### 2-2-1-5 共通基盤クラウドによるデータの標準化

農業情報創成・流通促進戦略個別ガイドライン(IT 総合戦略本部)に基づいて、生育環境データの単位・名称を標準化するために(表 2-1)、取得データを WebAPI の利用によって共通基盤クラウドを経由させる仕組みを構築した。また、この標準化された生育環境データを用いてワイン用ブドウ栽培支援 Web アプリケーションの開発を行った。

ワイン用ブドウ栽培では、長年にわたる研究成果としていくつかの有益な栽培指標が提案され(Gladstones, 2015)、フランスなどの海外では栽培ステージに合わせて各種栽培指標が一般に用いられている。しかし、これらの栽培指標は国内的にはあまり普及していないため、Web アプリケーションのサービスでは、有益な栽培指標を選択し、標準化された生育環境データを用いてそれらの栽培指標を計算しスマートフォンやタブレットパソコンで農業従事者に提供する内容とした。

圃場センサネットワークにより取得された環境情報を共通基盤クラウド「cloudSense」へ接続することで生育環境データの単位・名称を標準化した。図 2.4 に圃場の生育環境情報データが栽培者に提供されるまでの概略図を示す。

図 2.4 に示した共有基盤クラウド「cloudSense」は、地理空間情報の相互運用性向上を目的とする米国の非営利の業界標準化団体である Open Geospatial

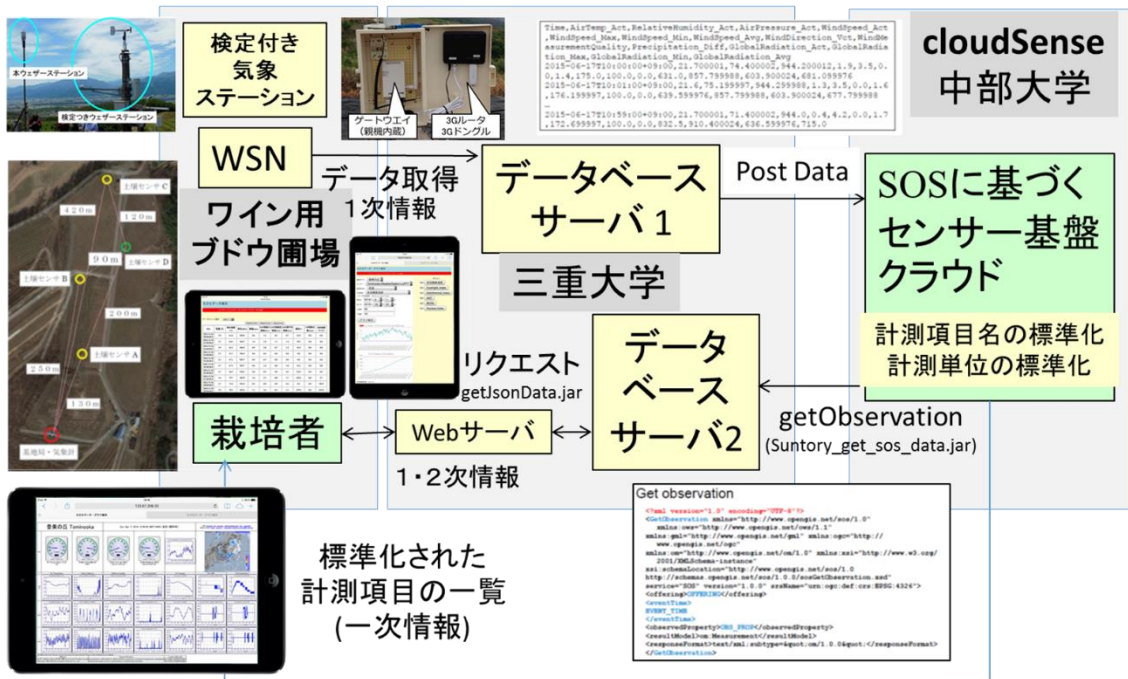


図 2.4 本システムのデータフロー

Consortium, Inc. (OGC) によって策定された Sensor Observation Service (SOS) という標準仕様に基づく HTTP プロトコルを用いたセンサデータサービスインターフェースである (<<http://www.opengeospatial.org/standards/sos>>, 2017年2月12日参照)。この SOS はデータの取り扱いに関するいくつかの WebAPI を具備しており、それらを利用することで、データの標準化並びに標準化されたデータのハンドリングが容易になり、データ管理システムの持続的な運用が可能となる。

WSN を用いて取得された生育環境データは、図 2.4 のデータベースサーバ 1 へ格納され、続いて cloudSense に SOS の HTTP-GET API を用いてポストされる。これにより、センサネットワークを構成するセンサ群の情報も同様にクラウドに認識され、取得されたデータがそれぞれ校正されることで統一された単位系を持つ数値に変換される。

このような標準化による利点として、異なる地域間のデータを同様の単位系で比較できること、センサネットワーク構成の変化によって観測項目の単位や名称が変わり、栽培支援サービスに関するプログラムの変更が不要になること、センサネットワークへの直接アクセスとクラウドへのアクセスの双方が可能となることで、よりクライアントからの利用が簡便になることなどが挙げられる。

## 2-2-2 取得情報の指標化

適切な栽培管理を行うためには、対象となる植物種の生理学的理解を前提として、気温・相対湿度・降水量・日照時間等の様々な環境要因に基づいて植物体の生理的な状態を予測する必要がある。それを手助けするのが圃場の生育環境データから導出される植物種固有の栽培指標である。

Web ベースの栽培者支援ツールを作成するにあたって、圃場環境についての一次栽培指標を何らかの形で加工した二次栽培指標の有用性がこれまでに多く議論されている (Gladstones, 2015; Demaree et al., 2006; Puppi, 2007; Faisal, 2011)。ここで一次栽培指標とは、生育環境の一次情報をグラフ化するなどして栽培者側に分かり易く提供するものであり、二次栽培指標は、一次情報を植物生理学的見地から加工し、より栽培者にとって便利な物差しとなる栽培指標のことと定義する。

本研究では、より栽培者支援の側面を強くするために、その時点での圃場環境情報としての一次情報に加え、三重大学サーバ内に格納した標準化済みの一



次データを既知の二次栽培指標に加工して栽培者に提供するプログラムを作成した。

一次栽培指標に関しては、選択された期間におけるある観測項目に関する一次情報の推移をグラフ化するサービスを構築した。それに加えて、全ての観測項目の一次情報が一覧できる表を作成した。

栽培指標には、主に積算気温の概念を用いてワイン用ブドウ樹体の生育ステージやワイン用ブドウ果実の成熟度合などを予測するための、ワイン造りが盛んな地域において広く普及している指標に加えて、ワイン用ブドウ栽培において非常に重要であるとされる土壌の水分状態を判断するための指標を採用した。

### 2-2-2-1 有効積算温度

有効積算温度(Accumulated Growing Degree-Days : AGDD)は植物体内の代謝活性を測る栽培指標として用いられている。日最高気温  $T_{max}$  (°C)と日最低気温  $T_{min}$ (°C)の平均値から作物固有の基準温度(ブドウの場合 10°C)を引いたものを有効温度と言う。つまり、基準温度が 10°Cの場合、平均気温が 13°Cの時の有効温度は 3°Cである。日平均気温が基準温度を下回った場合の有効温度は 0°Cである。これは、基準温度以下の温度は植物の生育に寄与しないという考え方に基づいている。式(1)にあるように AGDD は、この有効温度をブドウの生育期間(北半球なら 4/1 から 10/31)分足し合わせた栽培指標である。(Gladstones, 2015; Kameoka and Hashimoto, 2013)。

$$AGDD = \sum_{Apr1}^{Oct31} \max \left[ \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - 10, 0 \right] \quad (1)$$

### 2-2-2-2 Growing Season Temperature

Growing Season Temperature(*GST*)は、ブドウの生育期間における平均気温を示しており、これによりブドウの生育環境を 4 段階(cool, intermediate, warm, hot)に分類することが出来る (Jones et al., 2005)。

$$GST = \frac{1}{n} \sum_{Apr1}^{Oct31} \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \quad (2)$$

### 2-2-2-3 Coolnight Index

Coolnight Index(CI)はブドウの成熟期(北半球なら 9/1 から 9/30)における日

最低気温  $T_{min}$  を平均したものである。この栽培指標は、ポリフェノール、芳香成分及び色成分などの二次代謝物の蓄積に関する栽培指標で、ワインの品質において重要となる。(Tonietto and Carbonneau, 2004)

$$CI = \frac{1}{30} \sum_{Sep1}^{Sep30} T_{min} \quad (3)$$

#### 2-2-2-4 Heliothermal Index

Heliothermal Index(HI)は、日平均気温  $T_{mean}$  と日最高気温  $T_{max}$  の平均から作物固有の基準温度を引いた値を、緯度と日長を考慮した緯度補正係数  $K$  で補正して、作物の成長期間(ブドウの場合 4/1 から 9/30)分足し合わせた指標である。緯度補正係数  $K$  については、北緯  $40^{\circ}$  以下では  $K=1.00$  を用いることが記されているため、登美の丘ワイナリーの緯度  $35.71^{\circ}$  を考慮し、この値を採用した (Tonietto and Carbonneau, 2004)。

この指標は、AGDD と異なり光合成への日照時間による影響を考慮したものとなっている (Gladstones, 2015)。

$$HI = \sum_{Apr1}^{Sep30} \max \left( \left[ \frac{(T_{mean} - 10) + (T_{max} - 10)}{2} \right], 0 \right) \times K \quad (4)$$

#### 2-2-2-5 Biologically Effective Degree-Day

Biologically Effective Degree-Day (BEDD)は、基準温度以下ではブドウ樹体中における代謝に寄与しない、又平均気温が  $19^{\circ}\text{C}$  の時に成長効率が最大になるという考えに基づいている。そこに日温度格差補正係数  $DTR_{adj}$  と緯度補正係数  $K$  を加えることで算出される栽培指標である。日温度格差補正係数  $DTR_{adj}$  は日最高気温  $T_{max}$  ( $^{\circ}\text{C}$ )と日最低気温  $T_{min}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )の差によって算出される日温度格差  $DTR$  に応じて変化する。この指標でも HI と同様に緯度補正係数  $K$  は 1.00 となる。この栽培指標はブドウ果実の成熟度合を判断するのに利用される (Gladstones 2015)。

$$BEDD = \sum_{Apr1}^{Oct31} \min \left[ \left( \max \left[ \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - 10, 0 \right] \right), 9 \right] + DTR_{adj} \times K \quad (5)$$

他方、日射を光合成量と近似して光合成産物量の指標とする有効日照時間や

積算日射量などのといった指標も存在する。気象庁によると日照時間とは 1 日のうちで、直達日射量が  $120\text{W/m}^2$  以上である時間とされており、この  $120\text{W/m}^2$  という日射量は、物体に影が出来る程度の日射量である。本ウェザーステーションでは全天日射量のみを測定していて日照時間を測定していない。全天日射量のみを測定している場合、直接日照時間を算出できない。過去に蓄積された日照時間データとの互換性を考慮する必要があるため、全天日射量から日照時間を推定する Slob and Monna によるアルゴリズム (Vivar et al, 2014) を利用し、Web アプリケーション内の日射量の二次指標として日照時間を実装した。Slob and Monna によるアルゴリズムは、World Meteorological Organisation(WMO) において全天日射量から日照時間を推定する方法として使用されている (図 2.5)。

### 2-2-2-6 日照時間

Slob and Monna によるアルゴリズムでは、全天日射量と他の変数から日照時間を推定することが出来る。日射量では、10 分間の平均日射量  $G$ 、最大日射量  $G_{\max}$ 、最小日射量  $G_{\min}$  を使用する。変数として、緯度、経度、雲量、濁度などを使用する。

このアルゴリズムは、雲のない状態の直達日射量と拡散日射量の推定式に基づいている。大気中のガス、エアロゾルの濁度に関する変数 Linke turbidity( $T_L$ )、太陽定数  $I_0$  ( $=1367 \text{ W/m}^2$ )、太陽天頂角( $\theta$ )の余弦  $\mu_0$  ( $=\cos\theta$ )から、雲のない状態の直達日射量  $I$ 、雲のない状態の拡散日射量  $D$ 、大気における水平放射  $G_0(=I_0\mu_0)$ として雲のない状態の直達日射量と拡散日射量は以下の式(7)、式(8)のような推定式になる。

$$I = I_0 \exp(-T_L/(0.9 + 9.4\mu_0)) \quad (7)$$

$$D/G_0 = \begin{cases} 0.2 + \frac{\mu_0}{3} & 0.1 \leq \mu_0 \leq 0.3 \text{ の時} \\ 0.3 & \mu_0 \geq 0.3 \text{ の時} \end{cases} \quad (8)$$

このアルゴリズムは全天日射量  $G$  と雲のない状態の日射量の下限值( $I\mu_0+D$ )を比較し、これを大気における水平放射  $G_0$  で正規化を行う(式 9)。これにより 10 分間の日照時間の端数値  $fr$ (0 なら日照無し、1 なら日照のみ、0 から 1 の場合は一部日照があり一部曇り)が計算できる。この 10 分間の日照時間の端数値  $fr$  に 10 を掛けることで、10 分間における日照時間の推定が可能になる。

このアルゴリズムを繰り返すことで1日の日照時間を算出した (図 2.5)。

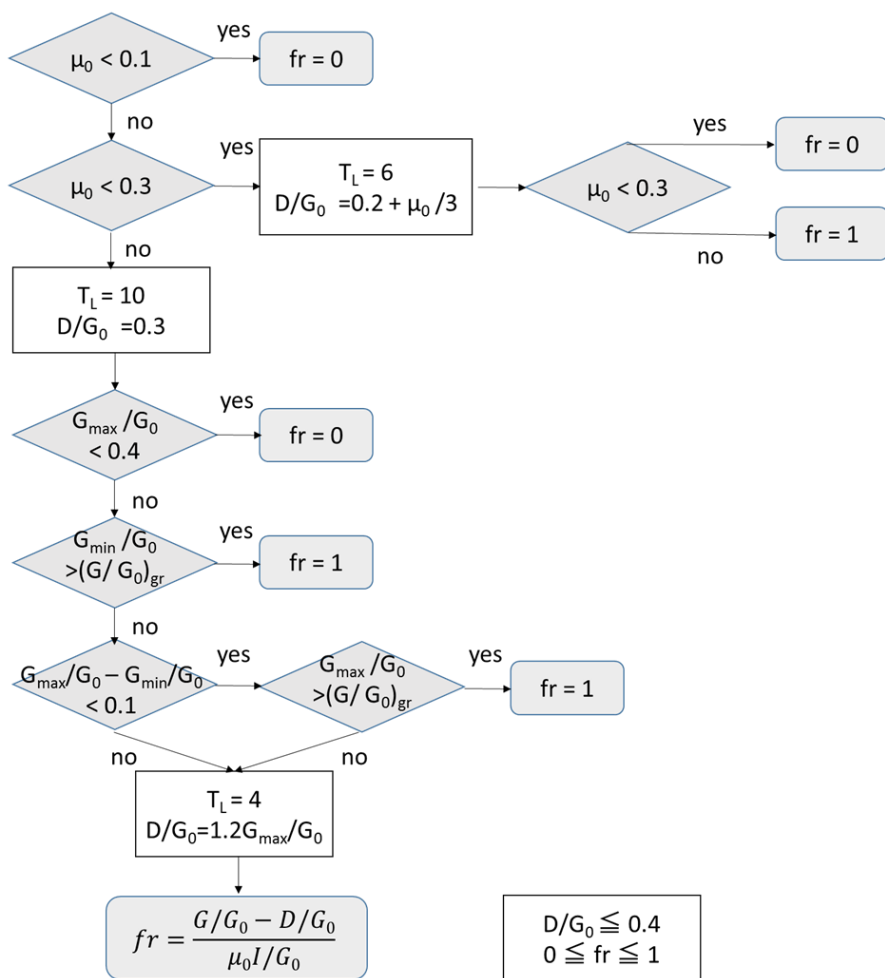


図 2.5 Slob and Monna アルゴリズムによる日照時間の推定

$$(G/G_0)_{gr} = \mu_0 I/G_0 + D/G_0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mu_0 I/G_0 &= \exp(-T_l/(0.9 + 9.4\mu_0)) \\ &= \exp(-T_l/(0.9 + 9.4\mu_0)) \end{aligned} \quad (10)$$

さらに、温度指標や日射指標とは異なり、複数の観測項目を利用することで得られる指標も存在する。その代表が以下に示す **Dryness Index** である。

### 2-2-2-7 Dryness Index

**Dryness Index(DI)**は、根が利用できる土壌含水量に関する栽培指標である。*DI* の計算は単位円筒あたりの水頭によって表現されることから、その単位は mm となる。具体的には、初期の利用可能な土壌水分量  $W_0$ (通常  $W_0=200$ )に日降水量  $P$ を足し、気温・相対湿度・風速・日照時間を用いて算出される蒸発散位 *ETP*を引くことで導出される。この *ETP*はペンマン式によって導出される(三浦 and 奥野, 1992)。本ウェザーステーションでは日照時間を直接測れないことから、全天日射量から日照時間を算出するアルゴリズムを用いて日照時間を求めた。また *ETP*の算出には地表面における太陽放射の反射率であるアルベドが必要である。これは土壌表面の植生状況、栽培管理方法そして傾斜等に依存する固有の値である (Jackson, 2008)。この値は、日本の一般的な植生では 0.2~0.25 とされている一方で (三浦 and 奥野, 1992) 植生の生い茂っている土地においては 0.27 にも及ぶという報告もある (Carrasco et al., 2014) ため、今回のプログラムでは、登美の丘ワイナリーの植生を考慮し 0.25 をデフォルト値とした。この蒸発散位 *ETP*は畑地の有効土層から失われる水分量を意味する。

本来 *DI*は、エネルギーのつり合いに関する式であるが、式中の両辺に存在する温度  $T$ における水の蒸発潜熱  $l$ (MJ/kg)、水頭断面積  $a$ (m<sup>2</sup>)、水の密度  $\rho$ (kg/m<sup>3</sup>)の積で除することで、単位水頭あたりの降水量 (mm) をそのまま適用できることから、下に示す(7)式が導出される。

$$DI = W_0 + P - ETP \quad (11)$$

本研究では、三重大学サーバ内に格納された標準化データを加工することで、*AGDD*、*GST*、*CI*、*HI*、*BEDD*、日照時間、*DI*などの栽培指標を算出するプログラムを、開発言語として汎用性が高く、開発が継続しているという観点から Java 言語によって開発した。

### 2-2-3 栽培支援 Web アプリケーションの開発

まず、データベース構造について説明する。本研究ではリレーショナルデータベースとして PostgreSQL を用いた。図 2.6 にデータベースのテーブル構造についての ER 図を示す。

データベースの最上位に `site`、つまり圃場の位置情報を格納するテーブルが存在し、この直下に `sensor` という圃場に存在するセンサに関するテーブルが作成されている。本研究では、`site` テーブルには「登美の丘」が、`sensor` テーブルには「Tominooka-WeatherStation-LUFFT」と「Tominooka-Soil-1」がそれぞれ登録されている。センサ情報とセンサのデバイスの情報を紐付けるテーブルとして `device` テーブルが存在し、ここでデバイスの通称・メーカー・型番などが定義される。センサ情報とセンサが観測できる項目の観測値とを紐付けるテーブルとして `sensor_offering` テーブルが存在し、ここに観測項目の `id` などが定義される。そして各気象センサによって取得された観測値を格納する「`data_air_temperature`」などのテーブルが存在し、そのテーブルのフィールドにはセンサ観測情報 `id` を主キーとして、`id`、観測時刻、観測値を設定した。センサが観測できる項目の情報と観測できる項目の詳しい情報を紐付けるテーブルとして、`offering` テーブルが存在する。このテーブルに、`id`、観測項目日本語名、観測項目英語名、単位、取得を有無の指定を設定し、このテーブルの `id` が観測項目 `id` となる。センサの観測できる項目とそれらを用いて算出する二次栽培指標を紐付ける `calculation_type` テーブルが存在する。観測項目 `id` を主キーとして、`id`、名称、通称、計算種別 `id` を設定した。

また、JavaServerPages(JSP)を実行するための Web コンテナとして Apache Tomcat 8.0.33 を用いた。

#### 2-2-3-1 データ取得プログラム

共通基盤クラウド「cloudSense」によって標準化されたデータは、cloudSense の持つ HTTP-GET API を利用することで取り出すことができる。API 中の仕様の 1 つである「getCapabilities」リクエストは、SOS を利用するために必要な各種情報を取得するためのリクエストであり、これによってどのようなデータが入手可能なのかが確認することができる。もう一つの「getObservation」

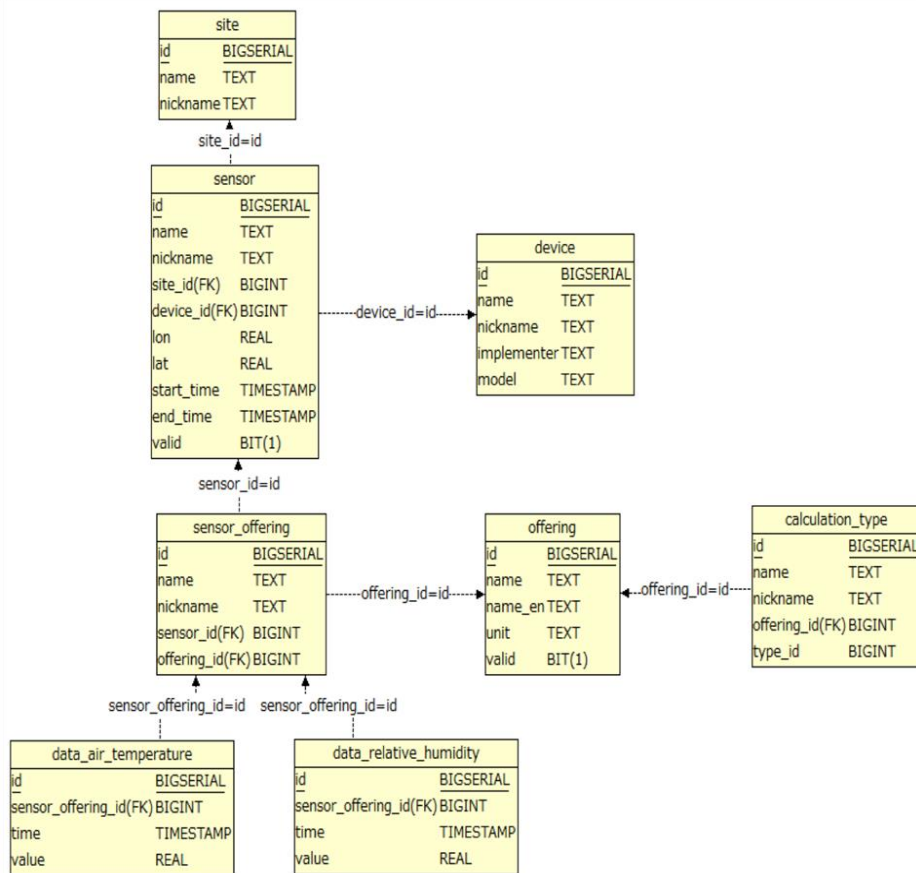


図 2.6 データベースのテーブル構造の ER 図

メソッドは、センサによって測定された観測データを取得するためのリクエストであり、出力フォーマットを表す「responseFormat」、リクエストする観測データの観測時刻を指定する「eventTime」、そしてリクエストするセンサの種類を選択する「observedProperty」などのパラメータをセットすることで、選択されたセンサによるその期間中の観測データを Observations & Measurements(O&M)と呼ばれる XML 形式の言語で取得できる (図 2.7)。この API を利用した圃場環境情報取得プログラムを作成することで、単位と観測項目名が標準化されたデータを三重大学大学院生物資源学研究科に構築したサーバ内に受信し、データベースに格納した。

標準化データのリレーショナルデータベースへの格納の際に、XML 形式で受信データされる標準化データのパーズが必要となる。そこで、getObservation メソッドによってサーバ内に受信された XML データから、観測項目名、観測時刻、観測値という 3 項目を抽出し、データベースへの格納を行うプログラムを Java 言語にて開発した。

### 2-2-3-2 データ表示プログラム

データベース内の標準化された圃場環境情報は、一次情報や二次情報として Web に公開される (図 2.4)。この際、サーバ間のデータ送信及びサーバ内でのデータベース接続は Java 言語を、クライアント側のブラウザへの出力には、タブレット対応のグラフ描画用ライブラリが利用でき、クライアント側に特別なプラグインのインストールを要求しないことから JavaScript 言語をそれぞれ採用してプログラム開発した。

本研究において開発した栽培管理支援 Web アプリケーションでは、一次データと二次データを提供するサービスを構築した。ページのヘッダー部分に一次データ・二次データに加えて、樹体の生育ステージをより具体的に反映する三次データを将来的に独立で表示するためのボタンを作成した。

#### 2-2-3-2-1 1次データ表示ページ

1次データ表示ページでは、当日分の全ての観測項目の毎正時における一次情報を一覧できる表を作成した (図 2.8)。これにより栽培者が複数の気候条件から作物の状態とそれに対する作業工程判断への手助けになることが期待される。現時点で観測項目が 16 個存在する。これは各列に見やすい幅を設定した場合、観測項目が多すぎることで画面を横にスクロールする必要がある個数である。



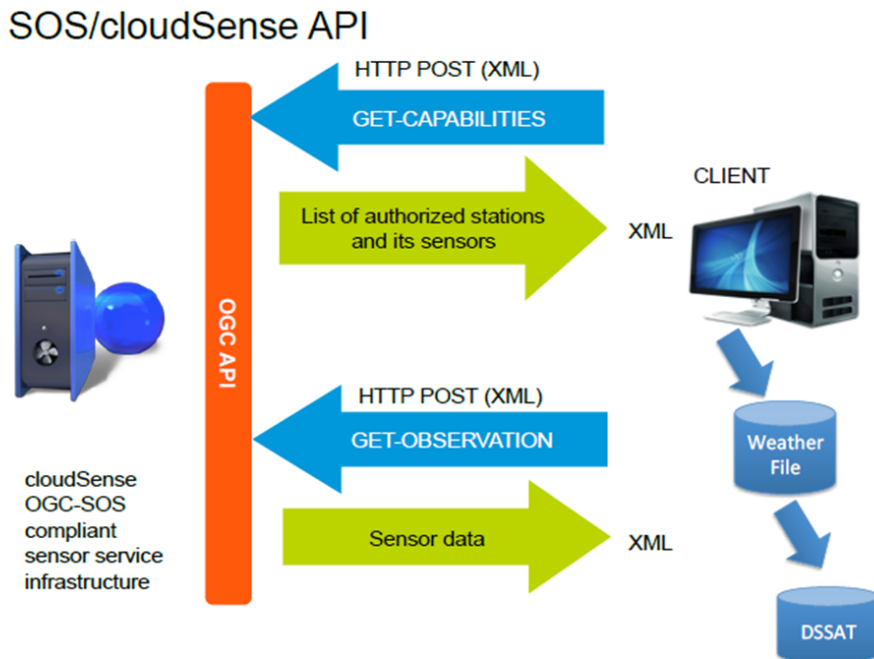


図 2.7 cloudSense による SOS API の概略図

(引用 : Honda, 2017)

### SOS データ表示

1次データ | 2次データ | 3次データ | データ比較

データセット選択 : 気象データ

Export to xls | Export to csv | Export to txt

date	気温(°C)	相対湿度 (%)	気圧(hPa)	風速(m/s)	10分間最大風速(m/s)	10分間最低風速(m/s)	10分間平均風速(m/s)	風向(°)	1分間降水量(mm)	日射強度 (W/m <sup>2</sup> )
2016-12-26 00:00:00.0	3.9	61.6	965.0	0.6	1.2	0.3	0.7	63.4	0.0	0.0
2016-12-26 01:00:00.0	3.1	64.4	964.7	1.6	1.8	1.1	1.4	78.2	0.0	0.0
2016-12-26 02:00:00.0	3.9	61.2	964.5	0.9	2.0	0.7	1.2	41.9	0.0	0.0
2016-12-26 03:00:00.0	2.7	67.1	964.4	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2016-12-26 04:00:00.0	2.3	67.1	963.7	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2016-12-26 05:00:00.0	2.7	67.3	963.7	0.0	1.4	0.0	1.0	21.2	0.0	0.0
2016-12-26 06:00:00.0	2.7	66.9	964.3	0.0	0.9	0.0	0.4	124.3	0.0	0.0
2016-12-26 07:00:00.0	1.4	73.7	963.9	1.6	2.3	0.8	1.7	122.6	0.0	5.7
2016-12-26 08:00:00.0	2.7	71.0	963.6	0.4	0.8	0.0	0.4	8.3	0.0	146.9
2016-12-26 09:00:00.0	3.9	70.3	963.6	1.1	2.6	0.4	1.1	219.9	0.0	232.0

図 2.8 Web アプリケーション 1 次データ表示

現場での利用が見込まれるタブレットを意識し、データセットを選択することで横スクロールをせずブドウ栽培に必要な観測項目のみの表示にも対応した。また、この表を xlsx 形式、csv 形式、txt 形式でダウンロードできる仕組みを構築した。データダウンロードには jQuery プラグインである tableexport.js を利用した。

### 2-2-3-2-2 2次データ表示ページ

2次データ表示ページでは、観測サイト名、センサ名(ウェザーステーションもしくは土壌水分センサ)、気温・気圧・相対湿度などの観測項目名、二次指標の選択を意味する計算種別、開始日、終了日、二次指標に必要な定数の全てを入力するとその期間中の選択した観測項目の一次栽培指標の日単位データグラフが表示させる(図 2.9)。また、この一次栽培指標を加工し算出される、計算種別で指定した二次栽培指標のグラフが表示され、その下部に二次栽培指標の値、指定期間、日数が表示される。加えて、日にち・一次栽培指標・二次栽培指標を数値で一覧できる表を作製した。1次データ表示ページと同様に複数の形式でデータダウンロードできる仕組みを構築した。ブラウザでのデータ表示には JavaScript 言語ベースのオープンソースである chart.js を利用し、データダウンロードには 1次データ表示ページと同様に tableexport.js を利用した。

2次データ表示ページの各観測項目のデータ表示方法について説明する。気象庁統計では、1日の気温・相対湿度・風向・風速・気圧の値は毎正時の 24 個のデータを平均して用い、データ欠測がない場合を正常値、データ欠測が 20%以下なら準正常値、データ欠損が 20%を上回る場合には資料不足値としている。毎正時値の平均を取る場合は、正常値は 24 個のデータになり、これの 20%は 4.8 個である。よって 4 個以下の欠測値であれば観測データの平均を代表値とし、5 個以上の欠測値が存在する場合は欠測日とした。気象庁統計では、1日の降水量と日射量の値は当日の 0 時 00 分から 23 時 59 分の値を合計したものである。ウェザーステーションでは 1 分に 1 回のペースで取得するため 1440 個のデータが存在する。これの 20%は 288 個であるから、欠測値が 288 個以下なら観測データの合計を代表値とし、欠測値が 288 個より多ければ欠測日とした。

欠測日は、欠測日の前後の日の値を平均することで欠測日の代表値とした。

Web アプリケーションのサイド部分にメニューとして、栽培管理に有効なフェノロジーに基づいた二次栽培指標である有効積算温度、Coolnight Index、Heliothermal Index、Growing Season Temperature、Biologically Effective



図 2.9 Web アプリケーション 2 次データ表示

Degree-Days、Dryness Index のショートカットボタンと二次栽培指標の解説ページを作成した。ショートカットボタンを押すと観測サイト、センサ、観測項目名、計算種別、開始日、終了日、二次栽培指標に必要な定数のそれぞれが自動で既定の値になりプログラムが実行され、対応した一次栽培指標・二次栽培指標のグラフと表が作成される。

ショートカットボタンの横に存在する「解説」の文字をクリックすると、モーダルウィンドウが作成され、解説ページが表示される。解説ページには二次栽培指標の名称、略称、定義式、植物生理的な意味、ワイン用ブドウ栽培において何と関係しているのかを表示している（図 2.10）。

## 2-2-4 生育環境データの精度検証

ウェザーステーションが取得する圃場内の生育環境データ項目と栽培支援に対しての利用方法を説明する。まず気温情報は、植物の代謝をはじめとする栽培に関わる多くの現象に関係している。ブドウ栽培では、開花・萌芽・ヴェレゾンといった生育ステージの開始時期を予測するのに不可欠なデータである。相対湿度は、2016年9月のような降水量・高湿度が続く気候においては病気発生を予測するためのデータとなり、降水量は、土壌水分量とも密接に関連しており、植物の蒸散を定量するための重要なデータである。日射量は、植物の光合成状態を把握するためのデータと考えられる（Gladstones, 2015）。その一方で、風速データは植物体への影響よりはむしろ作業の安全性を考えるために利用される瞬間最大風速も非常に重要である。このように、各データ利用目的は異なるものの、センサの計測した値の精度は極めて重要な意味を持つ。

そこで、本研究ではこうした観点から、採用したウェザーステーションの性能、加えてプログラムで推定した日照時間の有効性を検証するために、隣接する位置に設置した気象検定付きのウェザーステーションからのデータや近隣のAMeDASのデータを検証用データとして用い、8月1日から8月31日の期間を対象にデータの精度検証を行った。

SOSデータ表示

1次データ 2次データ 3次データ データ比較

メニュー

有効積算温度 (AGDD : Accumulate Growing Degree-Days)

$$AGDD = \sum_{Apr1}^{Oct31} \max\left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}, 0\right]$$

1. 日単位成長度を示している、標準的な生物季節的な指標。これを積算することで有効積算温度となる。
2. この有効積算温度から、開花時期や収穫時期の予測が出来る。
3. 基準温度とはその温度以下だと正常に植物が発達しない温度のことでブドウの場合、基準温度( $T_{base}$ )は通常10°Cである。
4. 下限だけでなく上限も設定することもあり、今回も上限値を設定している。

[close](#)

解説 有効積算温度

解説 Coolnight\_Index

解説 Heliothermal\_Index

解説 GST

解説 BEDD

解説 Dryness Index

欠測 (線形補間) 日平均気温 上限値 下限値

図 2.10 Web アプリケーション解説ページ表示

## 2-2-5 結果及び考察

### 2-2-5-1 本 WSN で得られた生育環境データ

本ウェザーステーションで一次情報として得られた生育環境データは、当日の毎正時における、気温(°C)、相対湿度(%)、気圧(hPa)、風速(m/s)、10 分間最大風速(m/s)、10 分間最低風速(m/s)、10 分間平均風速(m/s)、風向(°)、1 分間降水量(mm)、日射量(W/m<sup>2</sup>)、10 分間最大日射量(W/m<sup>2</sup>)、10 分間最低日射量(W/m<sup>2</sup>)、10 分間平均日射量(W/m<sup>2</sup>)である。検証の結果、各データは共通基盤クラウド cloudSense から定義に基づいて標準化されたデータが取得できることが確認された。欠測データについては、ブドウの植物体の生育期間とされる 4/1~10/31 までの 214 日間で 5 日間見られたが、通常の生育環境データの値が気象検定付きウェザーステーションと一致していれば、二次栽培指標を構築する上で問題がない範囲と言える。

また同様に土壌水分センサで一次情報として得られた生育環境データは土壌体積含水率(%)、土壌温度(°C)、土壌電気伝導度(mS/cm)でも共通基盤クラウド cloudSense から定義に基づいて標準化されたデータが取得できることが確認された。

ウェザーステーションと土壌水分センサのデータは連続的に計測されている。図 2.11 に土壌体積含水率と土壌温度の経時変化(4 月 1 日から 9 月 30 日)を示した。また、図 2.12 に土壌電気伝導度の経時変化(4 月 1 日から 9 月 30 日)を示した。図中に青点で欠測データを示した。欠測データの計測データを用いて欠測期間のデータを直線補完して示すことでデータ表示期間中の土壌特性を示した。8 月 17 日以降に生じたデータ欠測は明らかに大雨が原因であることが降水量データからも示されており、機器の設置方法等の改善が必要になることが認められた。

### 2-2-5-2 検定付きウェザーステーションとの精度検証

本ウェザーステーション(Lufft)と検定付きウェザーステーション(NTT)との日単位データのデータ検証の結果、気圧、日射量、風速、相対湿度、風向に関してはほぼ誤差なく一致した結果が得られた。その一方で気温、降水量の比較データにおいてそれぞれ誤差が見られた。

相対湿度、気圧、風速、風向、日射量についてのデータ検証結果をそれぞれ

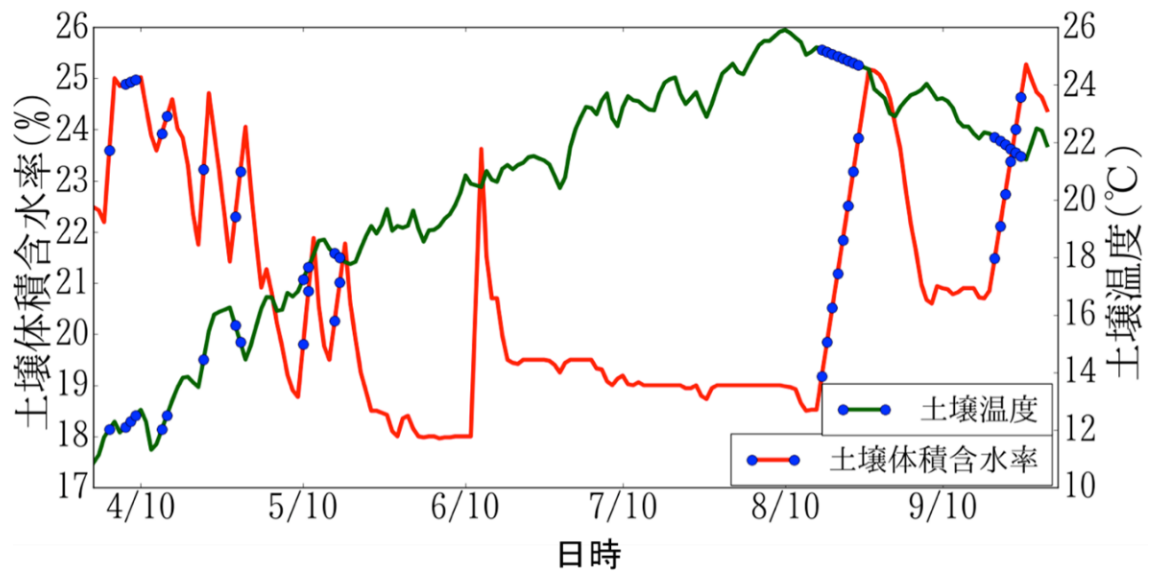


図 2.11 土壌体積含水率、土壌温度の連続データ

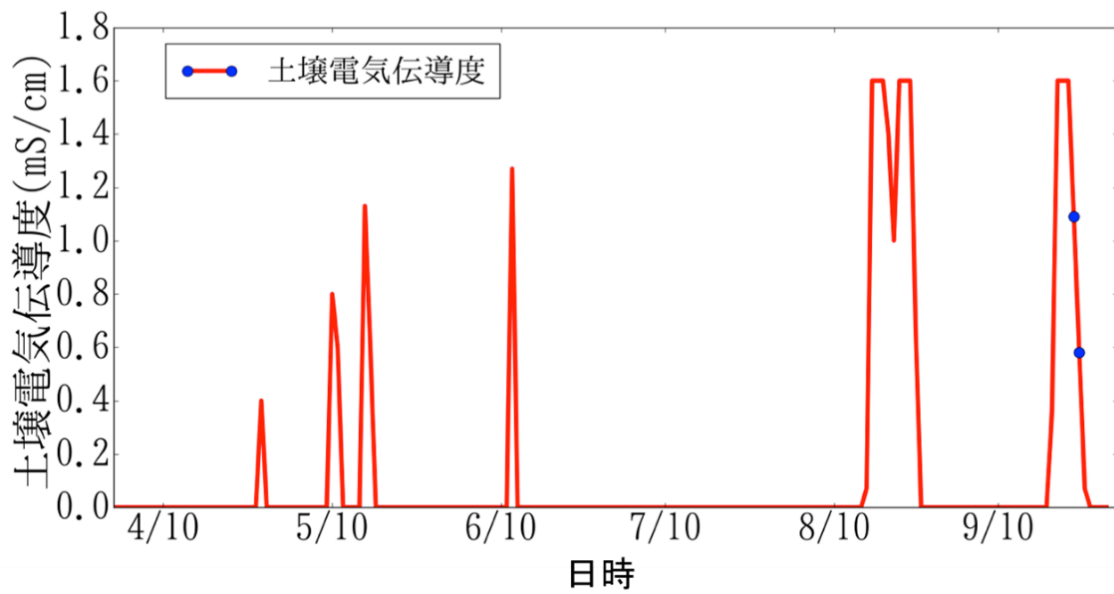


図 2.12 電気伝導度の連続データ

2.13 にまとめて示す。

気温に関しては 1 日の変化傾向は一致している一方で、最高気温と最低気温については 1°C 前後の誤差が見られた(図 2.13 (F))。具体的には、最高気温は本ウェザーステーションの温度計の方が引く値を示し、最低気温では高い値を示す結果となった。

気象庁の気象観測の手引きには、地表付近では気温は日射などの影響を受けて高さと共に変化するので、観測データを相互比較できるように温度計を設置する高さを常に一定にすることが望まれているとある。本ウェザーステーションは地上から約 3m の位置に設置されている一方で検定付きウェザーステーションは地上から約 1.5m の位置に設置されている。このことを考慮すると本ウェザーステーションの最高気温が過小評価されていることについては地表からの輻射熱が小さいことが原因と考えられる。

温度計の精度に関わる項目として、輻射熱の他に通風条件がある。気象観測に手引きによると、ガラス製温度計・金属製温度計は百葉箱、電気式温度計は通風筒にそれぞれ収容し、百葉箱や通風筒は内側の温度が出来るだけ外気温と同じで一樣になるように風を通す必要があるが、自然通風ではほとんど効果を示さず、最高気温を実際の温度より高く、最低気温を実際の温度より低く記録してしまう。本ウェザーステーションと気象検定付きウェザーステーションの観測値誤差はこれとは逆の傾向を示していたため、ウェザーステーション内の温度センサ付近に設置されていたファンは正常な通風機能を具備していると考えられる。

他方、多くの二次栽培指標で利用されるのは日最高気温と日最低気温の平均値であるため、本ウェザーステーションと気象検定付きウェザーステーション間の気温に関する誤差はちょうどキャンセルされる。よって、この誤差は CI を除く二次栽培指標の値に影響を与えるものではないといえる。

続いて、降水量の検証を行った結果、降水量データにおける測定値間の誤差が非常に大きくなった(図 2.14)。その中でも特筆すべき点は、8 月 17 日～18 日と 8 月 22 日それぞれ記録された 2 件の降水量の誤差で、前者は検定付きウェザーステーションが 2 日間で約 135mm の降水量に対して本ウェザーステーションは約 75mm の降水量であった。後者は検定付きウェザーステーションが約 15mm の降水量に対して本ウェザーステーションは約 70mm の降水量であった。



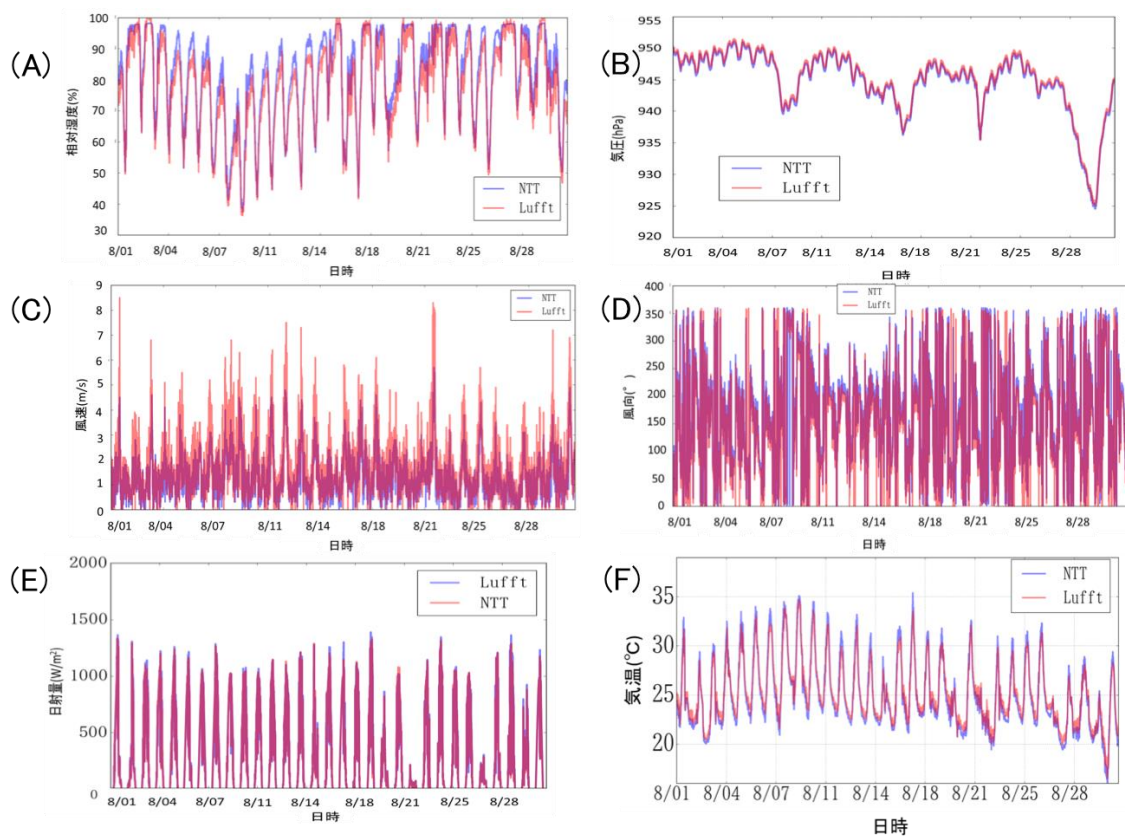


図 2.13 ウェザーステーション(Lufft)と気象検定付きウェザーステーション(NTT)のデータ比較。(A) 湿度データ比較。(B) 気圧データ比較。(C) 風速データ比較。(D) 風向データ比較。(E) 日射量データ比較。(F) 気温データ比較。

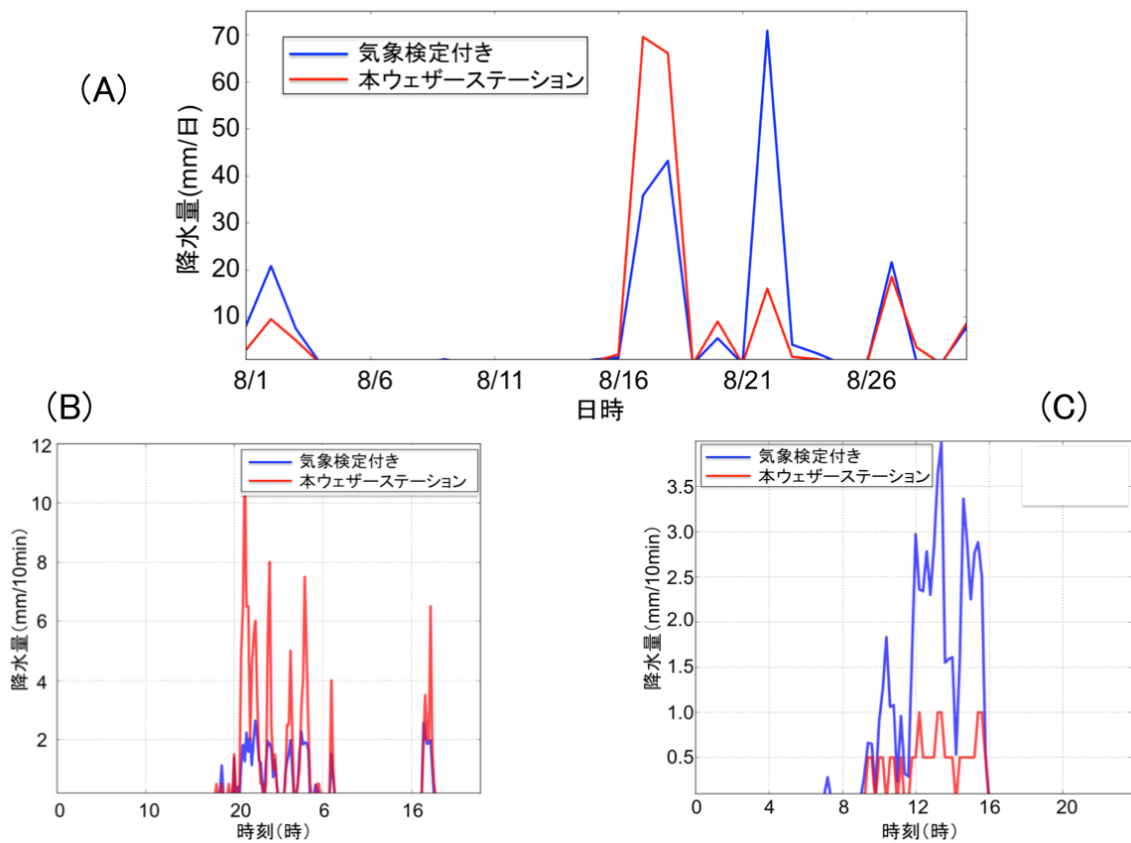


図 2.14 ウェザーステーション(Lufft)と気象検定付きウェザーステーション(NTT)の降水量データ比較。(A) 8月の降雨量検証。(B) 8月17日~18日の降水量検証。(C) 8月22日の降水量検証。

そこでこの 2 つ誤差をより詳細に調べるために、それぞれの点の日降水量を 10 分単位の細かい降水量データに加工し、比較検証を行った。8 月 17 日～18 日では検定付きウェザーステーションでは最大で 10 分で約 12mm という激しい雨を記録した一方で、本ウェザーステーションは最大でも 10 分間に約 2.5mm にとどまった。同様に 8 月 22 日における 10 分間降水量の比較を行った。検定付きウェザーステーションでは最大で 1.0mm に対して、本ウェザーステーションは最大で 4mm の降水量を記録した。

この誤差の大きな要因として、2 つの降水量計間の計測原理の違いが挙げられる。本ウェザーステーションが降水量計測で採用する 24GHz ドップラーレーダーはセンサ上部の水滴の大きさ・量・スピードを計測することで、降水量とその種類を求めるタイプのセンサである。

そのため低降水時における計測精度が高く雨や雪の識別が可能となる反面、センサ上部に虫などの小さい飛散物がある場合に誤認識してしまうという欠点がある。また、横殴りになるような激しい風を伴う非常に強い雨に対しても、水滴を正確にとらえることが出来ずに実際の降水量よりも過小評価してしまうことがある(図 2.14 (B))。

その一方で、8 月 22 日のデータから、ドップラーレーダー方式では転倒ます式雨量計では検知できない細かい雨を正確に感知できる可能性も示唆された(図 2.14(C))。

ドップラーレーダーを用いた本ウェザーステーションの降水量計は低降水時の計測精度が高い点、雨や雪の識別が可能な点などの長所を有することも考慮して、新たに標準的な降水量計である転倒ます式雨量計をセンサネットワーク内に併設した。

### 2-2-5-3 栽培指標を提供する Web アプリケーション開発

本研究では、圃場に展開した WSN のデータが共通基盤クラウドを経由し、名称や単位が標準化されたデータを、一次栽培指標や二次栽培指標の形に加工し、Web 上で表示するアプリケーションを開発した。ページのヘッダー部分に 1 次データ表示ページ、2 次データ表示ページに加えて将来的に構築する必要がある 3 次データ表示ページを独立して表示するためのボタンを設定することで異なる形式のデータ表示が可能となった。加えて、各ページにデータダウンロード機能を具備した。

1 次データ表示ページにおいては生育環境データの一覧表形式での表示を行

った。また、現場での利用が想定されるタブレットに対応したデータセットを選択できるようにすることでよりユーザが使いやすい形での 1 次データの提供を可能にした。現在のデータセットでは WSN が取得する 16 個の全データの表示とブドウ栽培に必要な気象データの 2 種類を提供している。今後、栽培者との密接な協調を経て、よりブドウ栽培に適応した生育環境データセットを決定する必要がある。また、1 次データ表示は当日の時間単位のデータを表示している。ユーザの求めるサービスの機能として任意の年月日の選択や日単位・旬単位・半旬単位・月単位などの表示できるデータの範囲を拡大していくことが挙げられる。今後、表示可能なデータ範囲の拡大が望まれる。

2 次データ表示ページにおいては、一次栽培指標と二次栽培指標の任意の期間の値をグラフ化して提供することで生育環境の経日変化の把握を容易にした。また、解説ページを作成することで二次栽培指標の意味や定義をユーザ提供することを可能とした。現在、2 次データ表示ページで提供している二次栽培指標は AGDD、CI、日最高気温、日温度格差、HI、BEDD、GST、最大瞬間風速、累積降水量、日照時間、積算日射量、DI の 12 項目である。期間が定義されている指標、例えば AGDD であれば 4 月 1 日から 10 月 31 日までをデフォルト値として設定し、それ以外の期間については値を知りたい好みの指定期間を設定できるようにした。これらの栽培指標の出力結果のうち DI、CI、HI については、先行文献における山梨県甲府市のデータとそれぞれ比較したところ、甲府市はそれぞれ DI が 150mm 以上、CI は 18°C 以上、HI は 2400~3000°C の間という範囲であるのに対して、2016 年の登美の丘ワイナリーは DI が 214.5mm、CI は 19.8°C、HI は 2435°C とすべての値が一致したため、それぞれの指標から得られた数値の有効性が示された (Tonietto and Carbonneau, 2004)。

日照時間に関してセンサの取得する値ではなく、本ウェザーステーションの取得する全天日射量からの推定値である。そのため本プログラムが Slob and Monna アルゴリズムで算出した推定値、最も近隣の甲府に設置されている AMeDAS が取得した日照時間、本ウェザーステーションの日射量が 120W/m<sup>2</sup> を超えたときの時間を日照時間としたときの値を比較し、本プログラムの日照時間の妥当性を検証した。

その結果、AMeDAS と Slob and Monna アルゴリズムで算出した推定値の誤差は夏季に 10%前後(図 2.15(A))、冬季には 5%前後となり(図 2.15(B))、全天日射量が 120W/m<sup>2</sup> を超えた時間を日照時間とする手法と比較して大幅に改善さ

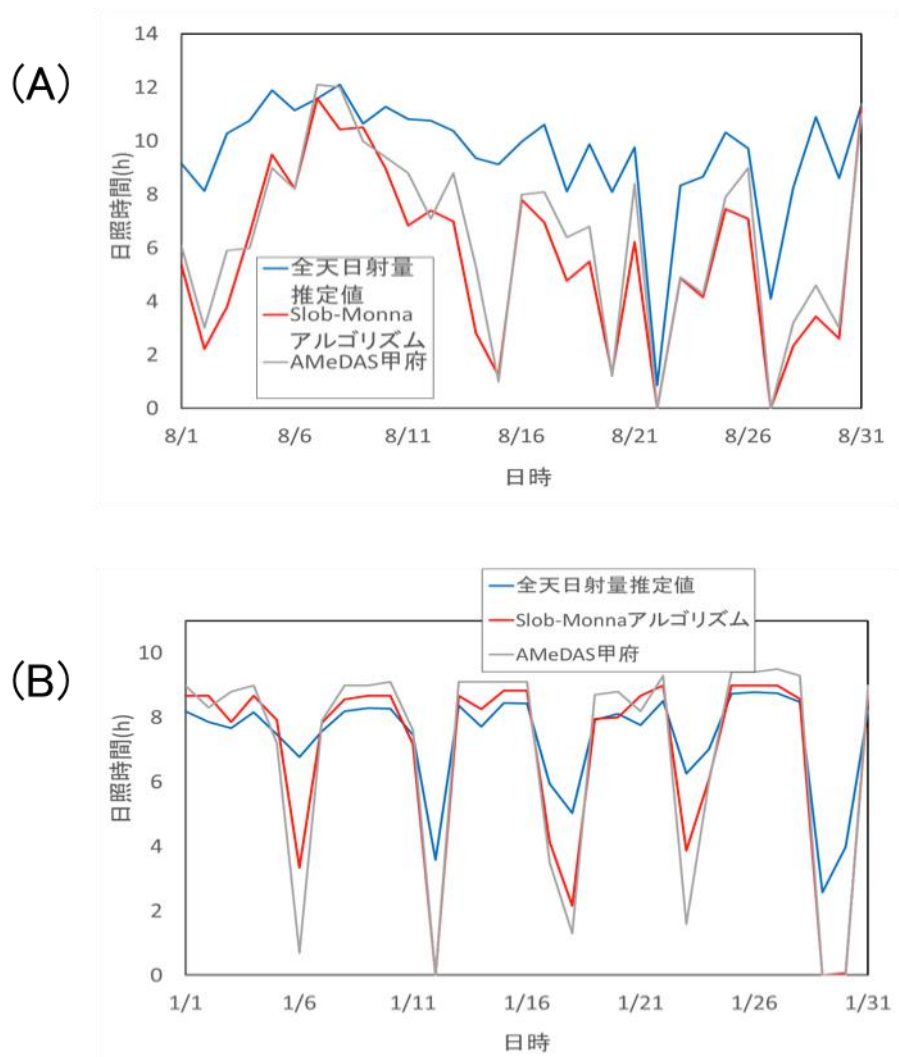


図 2.15 日照時間検証データ。(A) 夏季(8月)におけるそれぞれの日照時間。(B) 冬季(1月)におけるそれぞれの日照時間。

れたのが確認できた。その一方で、日照時間が最もワイン用ブドウの品質に寄与するとされている夏季について誤差が大きく、常に AMeDAS の値よりも低い値を示している。また 2016 年の年間日照時間においても検証を行った。気象庁統計による甲府の日照時間は 2187.8 時間であった。本プログラムの Slob and Monna のアルゴリズムで推定した 2016 年の登美の丘ワイナリーの日照時間は 2026.15 時間であった。年間日照時間においても推定値が約 7.4%低い結果であった。直達日射量から日照時間を求めているものより年間を通して低い値を算出していることから、より精度の高いアルゴリズムが必要だという事が示された。

また、二次栽培指標と実際の栽培・収穫との比較検証については、2016 年 9 月の非常に多雨な気候の影響を受け、例年と比較すると評価が難しい年になってしまったため、今後、栽培の開始から収穫までの植物の成長期間と共に、二次栽培指標の有効性に関して比較検証を行っていくことが必要である。

今回構築した全てのページにデータダウンロード機能を具備した。これにより xlsx 形式、csv 形式、txt 形式でのダウンロードを可能にした。これにより Excel などの表計算ソフトでの解析が可能になり、異なる土地や年のデータ比較や統計解析を容易に行うことが出来る。

## 2-3 結論

### 2-3-1 本章のまとめ

本章では、フェノロジーに基づく二次栽培指標を用いた「栽培・生産」サブシステム最適化および IoT 化によるフードシステム全体を通じた動的最適化のそれぞれについての有効性を実証するために、登美の丘ワイナリーにてこれまで行ってきた農業用 WSN による圃場環境情報のリアルタイム取得システムを、3 層構造を有するフードシステム IoT へと更新した。その中で、センシング層では海外製中心だったセンサやセンサノードを国内産ないし自作できるものに変更した。利用する無線規格を 2.4GHz から Wi-SUN 規格で国際的に標準化された 920MHz に変更した。ウェザーステーションをメンテナンスフリーのものへ更新し、基盤情報サービス層については共通基盤クラウド「cloudSense」を通じて生育環境データの標準化を行うことで、より他サービスとの連携等の拡張性を有し相互運用性を持つ標準的な農業 IoT を構築した。

ユーザサービス層に関しては、圃場環境の一次栽培指標と同時に、一次情報を加工し、よりワイン用ブドウの栽培ステージと密接な関わりを持つとされる二次栽培指標の提供を可能とする Web アプリケーションの開発を行うことで、今後の二次栽培指標の有用性検証に向けたデータ蓄積・解析を円滑に進めるための研究基盤サービスを構築した。

ワイン用ブドウの生育課程は、フェノロジー的観点から 1) 萌芽、2) 開花、3) ヴェレゾン、4) 結実、という 4 つのステージに分類される。これらの生育ステージに至るまでの間期における気象条件が整うことが、品質の高いワイン用ブドウの生産にとって重要であることが経験的に知られている。高品質なワインブドウ栽培のためにはこのような生育ステージの理解が不可欠であり、それを手助けするのが栽培指標である。

## 2-3-2 本章の課題

本研究で構築した Web アプリケーションをユーザがより使いやすい栽培支援システムとするためには、Web アプリケーションの表示項目や表示方法について栽培側との密接な協調を経て、改善を続けていくことが必要とされる。

はじめに WSN に関して考えていく。土壌水分センサに関して、データ欠測が非常に多い結果となった。降水量のデータから特に大雨が降った場合センサが情報を取得できない可能性が示されており、機器の設置方法等改善が必要になることが認められた。

雨量計については、ドップラーレーダー式の雨量計がどのようなデータを取得しているのかを考察する必要がある。本研究における検証の結果、このタイプのウェザーステーションは弱雨に対する感度が高い可能性が示唆されたが、実際の農作物栽培において、植物が利用可能な水分は弱雨によるものが多いため、土壌水分とは別の視点での植物水分指標を構築できる可能性も存在する。

今後の研究では、WSN から取得した生育環境情報を加工し算出する栽培指標、光センシングを用いて取得した樹体情報を複合して考える必要がある。特に、BEDD を用いた生育ステージの予測については、植物体におけるフェノロジー応答のどのような側面を抽出している指標なのかを学術的に捉え、より正確なモデルとして再構築できる可能性を有している。

そのために、植物生理学的視点から植物一個体における光合成・蒸散などの代謝活動について整理し、科学的根拠に基づいた栽培管理システムを構築し

ていかなければならない。また、栽培現場では樹体が一個体で存在することはなく、多数の個体が生育している。そのため、圃場における植物を群落として捉える群落生態学的に解明していくことが求められている。

これに加えて、過去の圃場生育環境データを格納するデータベースの構築も不可欠となる。本研究にて利用した二次栽培指標は、フランスのボルドー地方の気候をベースに作成されたため、登美の丘ワイナリーの過去データを基に算出した栽培指標と、実際にその年の作物が体験した生育ステージとの当てはまり具合を解析する必要がある。この作業を通じて、登美の丘ワイナリーの気候に適した独自の栽培指標を構築することが可能となる。

栽培指標においては、それぞれの栽培指標が有する性質をカテゴリー分けしていく必要がある。例えば、DIは土壌の水ポテンシャルを定量する栽培指標であることから、果樹中におけるミネラル移動等に関与していると推定され、CIは夜間の最低気温、つまり葉からの蒸散量がどれだけ少ないかを表すことによって、導管から師管への水分移動および栄養分の果樹全体への再配分の度合いを示していると考えられる。つまり、これらの栽培指標は果実の品質に大きく関わることを示唆されている。

これに対して、有効積算温度や有効積算日射量は、それぞれ植物体の代謝や光合成を表しているため、生育ステージ予測に利用される。その中でも特に、BEDDを用いた生育ステージ予測が重要である。この指標は、有効積算温度の一種ではあるが、生育ステージの変化を正確に予測することに特化しており、栽培管理支援という観点に最も適合する指標となっている。その一方で、ヴェレゾン以降の生殖成長フェーズ予測に関するBEDDによる予測精度は減少することが示されていることから、この点に関しても過去データベースの構築によるデータ蓄積によってその要因を分析する必要がある。

これらをまとめると、栽培指標と樹体情報の2つを植物生理学・群落生態学的な視点から再整理し、植物固有の栽培ステージに対応した、科学的根拠に基づく栽培支援サービスを視覚的、感覚的に提供するWebアプリケーションを構築することが必要となっていると言える。



## 3章 マルチバンド光を用いた樹体診断法確立

### 3-1 背景

前章にて、生育環境情報から樹体およびその果実品質を推定し、最終的な栽培における果実の品質向上を試みたが、実際の樹勢および果樹のコンディション、さらには栽培・生産ステージの入力となる植物栄養分を計測することができていない。そこで本章では、生育環境モニタリングと対をなす形で、みかんおよびワイン用ブドウ果樹を対象に、樹体の樹勢モニタリング手法の確立および、樹体診断・果実予測に資する品質定量指標の有効性を検証した。

#### 3-1-1 研究背景

植物の生育は、数多の要因が相互に関係を持ちながら織り成されており、それらは大まかに生物要因 (biotic factor) と非生物要因 (abiotic factor) の二種類に分類できる。生物要因とは、動物・植物・微生物といった生命活動を行う他者の及ぼす影響に関連する事象を指し、これに対して非生物要因は気温・相対湿度といった周辺環境による影響のことを意味する。これらの外部要因は植物体の生理状態を左右し、その結果が様々な形で植物体の表現型に現れてくる。

このような種々のストレス応答は、1) 光合成量の低下、2) 蒸散量の低下、3) その他の代謝低下というように分類ができる。まず、1) の光合成量低下は、日の当たらない陰の部分に葉が繁茂していること、植物体内の維管束や根系の機能低下、光合成に必要な多量必須元素および微量必須元素の欠乏などが要因と考えられ、2) の蒸散量低下は、塩害等による水ストレスや、維管束におけるキャピテーションなどにより発生する。そして、3) のその他の代謝低下は主に生物要因、例えば病原体や昆虫による感染や草食動物による食害、さらには植物間の忌避反応などによって、基礎代謝機能が低下するといったことが挙げられる。そして、これらの生理障害の多くは、葉の表現型として顕在化する。

他方、工業の世界において、対象試料における元素含量を同時計測できる可搬型蛍光 X 線装置が、農業の世界では圃場での葉中色素定量を可能とする可搬型蛍光分光計が開発されており、従来のラボベースでの元素・色素計測から、圃場でのリアルタイム計測が可能となってきた。

### 3-1-2 植物における葉の機能

植物の生命維持において、葉は不可欠な存在である。その機能は多岐にわたるが、最も強調しなければいけないのは、光合成機能であると考えられる。この光合成反応で重要となるのが、その葉の持つ色素量および元素量となる。

#### (1) 色素

作物における色素は、一次代謝物である炭水化物、脂肪酸、アミノ酸などから誘導され、生合成される二次代謝物である。主にフラボノイド・カロテノイド・クロロフィル・ベタレインの4群の色素が存在する(塩井ら, 2009)。

クロロフィルは、光合成生物に存在する環状のテトラピノール色素の総称である。光合成生物は、クロロフィルにより光エネルギーを補足する。全てのクロロフィルは赤色光と青色光に主要な光吸収帯を持ち、クロロフィルによって吸収されない緑色の光は反射するため植物の葉は緑色に見える。クロロフィルは、側鎖や環の共鳴構造の違いにより吸収波長が異なる。高度な植物はクロロフィルbを持ち、アンテナ系で集光性クロロフィルとしてのみ働く。

フラボノイドはフラボン(flavone)・フラボノール(flavonol)やアントシアニン(anthocyanin)などを含む物質の総称で、多くは有色であるが、無色のフラボノイドも多く存在する。フラボンやフラボノールは、ほとんどの植物の花や葉、根など植物全体に含まれる色素である。単独で存在する場合は白から淡黄色を示すが他の色素が存在する場合は色が見えなくなる。これら二種のフラボノイドは、葉や茎の表皮層に蓄積しており、太陽光から過剰量の紫外線 UV-B(280~320nm)を吸収する一方、光合成に必要な可視光は通過させるので有害な紫外線から身を守る機能がある。アントシアニンは、赤~紫~青色を呈する色素で、アントシアニンに糖鎖が結びついた配糖体の形で液胞などに存在する。液胞のpHやアントシアニンに結合している有機酸など様々な要因で色調が変化する。花粉を運び、種子をまき散らしてくれる動物を引き付ける役割を持っている。また、葉肉細胞の日照を和らげる遮光色素としても働く。

カロテノイドは、全ての光合成生物そして多くの非光合成生物が有している。光合成において、補助色素として光エネルギーを受容し、そのエネルギーをクロロフィルに移行させる。また、励起されたクロロフィルや活性酸素を消去し、無毒化することが出来る。また、カロテノイドは花や果実の色素(淡黄色~黄色~橙色)としても働いている。

ベタレインは、ナデシコ科を除く中心子目植物のみが有する、赤色もしくは黄色の色素である。ベタレインは最も研究が遅れており、生合成経路や生合成に関わる酵素の多くは不明なことが残されている。

## (2) 元素

色素量と同様に、作物の栄養診断では、作物体内に存在する元素を分析し、その作物の栄養状態が把握することが一般的である。作物体内の元素分析では、体内の元素特性を把握することは重要であり、対象とする元素の体内情報が表れる部位、つまり栄養診断に利用するポイントが元素の特性によって決定する。この元素の中で植物の生育に必要とされる特性の元素を必須元素と呼ぶ。

必須元素とは、その元素がないことにより植物がその生活環をまっとうできないもの(Arnon and Stout, 1939)、もしくは生理的役割が明確な元素(Epstein, 1999)である。必須元素は、植物体内の相対的な濃度の違いから多量元素と微量元素に分けられる。多量元素は酸素(O)、水素(H)、炭素(C)、窒素(N)、リン(P)、カリウム(K)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)、イオウ(S)であり、微量元素は鉄(Fe)、マンガン(Mn)、ホウ素(B)、亜鉛(Zn)、モリブデン(Mo)、銅(Cu)、塩素(Cl)である。このうち、N・P・Kは肥料三要素と呼ばれ、土壤中で不足することが多く、重要な肥料となっている。表 3-1 に多量元素の主な生理作用を、表 3-2 に微量元素の主な生理作用を示す。

元素はその移動性により欠乏症の症状が異なる。移動しやすい元素は N、K、Mg、P、Cl、Na、Zn、Mo である。こうした移動しやすい元素は、葉から葉へ容易に移動し葉の老化と共に他の個所へ徐々に流れていく。その為これらの元素の欠乏症状は古い葉から現れる。逆に、動きにくい元素は Ca、S、Fe、B、Cu である。移動しにくい元素の場合、古い葉に蓄積され再利用ににくい為、これらの元素の欠乏症は樹体の生長点付近の若い葉から現れる。(L. Taiz et al., 2015)

表 3-1 多量元素の種類と主な生理作用

元素	主な生理作用
酸素 O	・炭水化物・タンパク質・有機化合物の構成元素 ・呼吸作用上不可欠
水素 H	・炭水化物・タンパク質・有機化合物の構成元素 ・水として植物体内中のあらゆる生理作用に関与
炭素 C	・炭水化物・タンパク質・有機化合物の構成元素 ・空気中の炭酸ガスを吸収同化(光合成作用) ・一部呼吸作用の最終生産物 炭酸ガスとして放出
窒素 N	・原形質の主成分であるタンパク質構成要素 ・光合成に必要な葉緑素、各種体内代謝を促進する重要な働きをする物質の構成元素 ・生育を促進し、養分吸収、同化作用を盛んにする
リン P	・光合成、呼吸作用、糖代謝などの中間生成物として重要 ・ATP、ADPとして植物体内エネルギー伝達に重要な役割をする ・重要な生理作用に関与する核酸、酵素の構成元素
カリウム K	・多くの酵素の補助因子であり、光合成や炭水化物の蓄積と関係がある ・細胞の膨圧や電気的バランスの維持において主要な陽イオン ・開花結実の促進
カルシウム Ca	・ペクチン酸と結合し植物細胞膜の生成と強化に関係 ・有機酸など有害物質の生体内中和 ・根の生育を促進する
マグネシウム Mg	・クロロフィル分子の構成成分 ・呼吸、光合成、DNA合成、RNA合成に関わる酵素を特異的に活性化 ・リン酸転移反応に関わる酵素の多くに必要
イオウ S	・含硫アミノ酸、タンパク質の構成成分 ・代謝に必須の補酵素やビタミンの構成成分

表 3-2 微量元素の種類と主な生理作用

元素	主な生理作用
鉄 Fe	・光合成、窒素固定、呼吸に関わるシクロム及び非ヘム鉄の成分 ・鉄タンパクとして酸化還元反応、マンガンとの拮抗作用
マンガン Mn	・酸化還元反応の活性化 ・光合成における酸素発生反応に関係
ホウ素 B	・細胞壁構成成分に結合 ・細胞伸長や核酸代謝に関与
亜鉛 Zn	・多くの酵素の構成元素 ・鉄・マンガンと拮抗作用
モリブデン Mo	・硝酸還元酵素を構成 ・根粒菌の窒素固定に関与
銅 Cu	・酸化還元反応に関与する酵素に結合 ・光合成の明反応における電子伝達に関わっている
塩素 Cl	・光合成反応のうち酸素発生に関わるものに必要

### 3-1-3 既往の研究

柑橘の葉分析に関しては、中国 (Wang, 1985; Zhuang et al., 1985; Zou et al., 1990)、アメリカ (Chapman 1949; Chapman 1960; Smith 1966; Embleton et al., 1973; Koo et al., 1984)、ブラジル (Rodriguez and Gallo, 1961; Primo et al., 1969; Quaggio and Canteralla, 1996)、インド (Aiyappa et al., 1963; Chahill et al., 1991)、フランス (Marchal et al., 1978)、オーストラリア (Jorgensen and Prince, 1978) など世界の様々な地域で行われてきており、その土地における葉の元素における適量基準が導き出されている (Srivastava and Shyan, 2004)。その一方で、柑橘における葉の色素に関する研究はあまり行われてきていない。また柑橘においては、「隔年結果」という実りの良い年 (表年) と実りの良くない年 (裏年) が交互に続くという現象も観察されており、これに対する分子生物学的な研究も存在する (Shalom et al., 2012)。

ワイン用ブドウに関しては、葉柄や葉身に含まれるミネラルの基準値を設定する試みが地域レベルで行われてきている (Romero et al., 2014) 他、樹体全体における P, K, Ca といった主要栄養素の経時的分布変化について (Conradie, 2017) も研究が行われている。また、K (Bhargava, 2001; Ganeshamurthy et al., 2011; Rogiers et al., 2006)、Ca (Hocking et al., 2016; Knipfer et al., 2015)、P (Lima et al., 2011; Piccin et al., 2017) をはじめとして、各元素の役割についても広く研究が進んでいる。また、果実に関しても、水ストレス、熱ストレス、紫外線等による果実ヴェレゾンおよび成熟への影響や、テルペンやフェノールをはじめとする色素生成への影響を分子生物学的に解析している研究が多数存在する (Savoi et al., 2016; Rienth et al., 2014; Carbonell-Bejerano et al., 2016)

蛍光 X 線を使った植物の定量については、小麦 (Paltridge et al., 2012; Guild and James, 2016)、イネ (Paltridge et al., 2012)、コーヒー (Tezotto et al., 2013)、そして樹体の葉 (Stikans et al., 1998) などが存在するが、サイクロトロンをベースとした大規模な施設での蛍光 X 線分析がほとんどである。ハンドヘルド型の蛍光 X 線を用いた植物の元素定量に関する研究には、りんごおよび梨の果実におけるカリウムとカルシウム含量の計測研究 (Kalcsits, 2016) や、ニンジンを始めとする 5 つの野菜を根、茎、葉に分類し、それぞれをペレット化した後に、組織に含まれる元素量を定量する研究 (Gallargo et al., 2016) が

あるが、葉に対する前処理なしで元素定量を試みた研究はこれまでにほとんど行われてきていない。

また、蛍光分光機器を用いた色素定量に関しては、ブドウにおいては幾つかの先行研究が存在する (Casa et al., 2015; Cerovic et al., 2015) 一方、みかん葉では先行研究が存在しない。また、どちらの果実に関しても、果実における色素の研究は多数存在するものの、葉の季節ごとの色素量変化についてはほとんど先行研究が存在しない。

### 3-1-4 研究目的

植物生理学的観点から、ミネラル等の必須元素やクロロフィルを始めとする色素の量を適正に保つことが、その樹体の樹勢管理にとって重要である。加えて、フードシステム最適化の観点からすると、目的とする最終産物の「品質」を決定するためには、その圃場生育環境モニタリングとともに樹体生理状態を反映する葉の元素及び色素情報が重要になる。

そこで、本章では樹体の生理状態を生育期間おきに診断する際の日安となるような元素・色素指標の構築可能性の検証を最終目標にし、可搬型分光器を用いた葉中元素・色素定量の有用性検証を行った。そして、葉中元素定量には蛍光 X 線分光分析を、葉中色素定量には蛍光分光分析をそれぞれ用いた。

## 3-2 実験手法

### 3-2-1 みかんおよびブドウの葉サンプルについて

#### 3-2-1-1 みかん

本研究では、三重県熊野市金山パイロットファームにおけるミカンの葉を実験に使用した。実験は 2016 年から 2017 年にわたって実施され、2016 年は 6 月の一回のみ、2017 年は展葉が開始するとされる 6 月から収穫期の 10 月までの 5 回行われた。樹勢の強い木の 3 本から 10 枚(図 3.1(A))、樹勢の弱い木の 3 本から 10 枚(図 3.1(B))を採取した。ミカン葉は全て果実のついていない新梢から採取した。樹勢の判断基準としては木の大きさ・木についている葉の枚数・葉色である。採取された葉はクール宅急便で三重大学に送られ、葉サンプル採

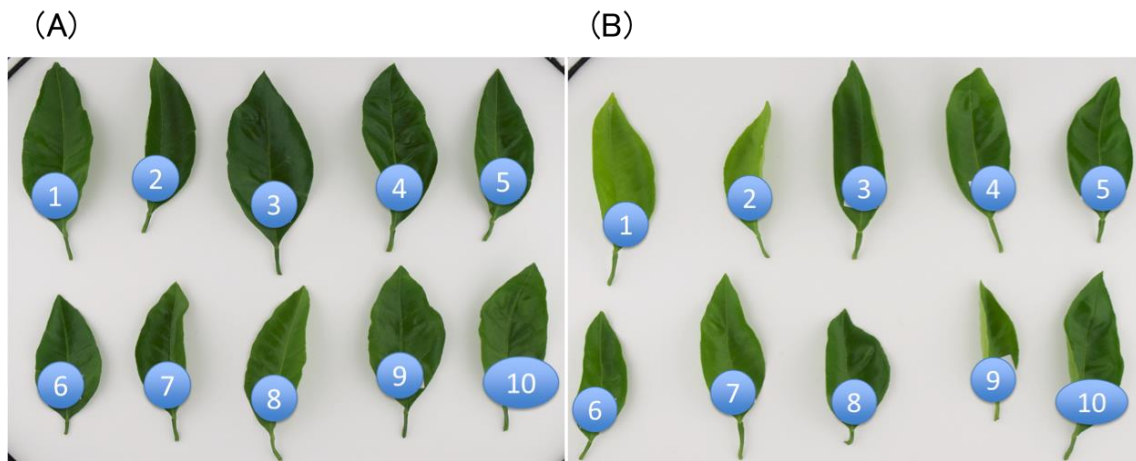


図 3.1 みかん葉サンプル例。(A) 樹勢が強いとされる群の葉。(B) 樹勢が弱いとされる群の葉。

取の翌日から実験を行った。樹勢の強い木から採取した葉は、全て濃い緑色をしていたが、樹勢の弱い木から採取した葉は、緑色が薄いものも存在した。

### 3-2-1-2 ブドウ

ブドウ用に関しては、長野県塩尻市サンサンワイナリー圃場におけるワイン用ブドウ葉を用いた。実験は2017年に実施され、時期としては展葉が始まる5月下旬から、収穫時期である10月までのブドウ果実生育期間中に、月に2回のペースで計測した。対象となる品種は、メルロー品種とシラー品種を用いた。メルロー品種については、樹勢の強弱を尺度とし、強・中・弱という3群を設定した(図3.2)。この時の樹勢判断基準は、1) 主幹の太さ(太いと樹勢は強いとされる)、2) 節間の長さ(長いと樹勢は弱いと判断される)、3) 枝のちょうど良い太さ、という3点で決定された。一方のシラー品種では、前年度における葉の健康状態によって2つの群を設定した(図3.2)。採取された葉はクール宅急便で三重大学に送られ、葉サンプル採取の翌日から実験を行った(図3.3)。

### 3-2-2 蛍光分光分析器による色素定量

本実験で使用した葉のポリフェノール測定器 Dualex Scientific+ (Force-A, Orsay, France)の外観を図3.4 (A)に、センサ部模式図を図3.4 (B)に示す。また、本装置の仕様を表3-3に示す。

本装置は先端のクリップ部分がセンサになっており、この部位に葉状のサンプルを挟むことで励起光が照射され、サンプルに含まれる色素物質の蛍光を取得することにより定量を行う。3種の色素の定量が可能であり、具体的にはクロロフィル、フラボノール、アントシアニンを指標値として測定する。本装置の励起光とサンプルの吸収の関係を示した模式図を図3.7に示す。

本装置では3種類の励起光をLED光源によって照射している。詳細には、紫外領域にあたる375nmの光と可視領域の緑色の光にあたる530nm、赤色の光にあたる655nmの3波長である。また、それとは別により正確なクロロフィル含量を算出するために、近赤外領域の850nmの光と710nmの光を利用し、その透過光から直接蛍光を検出している。色素ごとに定量式を示しその原理を簡潔に述べる。

本装置におけるクロロフィル指標値(CHL)は式(1)で与えられる。近赤外領域の850nmの光の透過光を(T850)、近赤外領域の710nmの光の透過光を



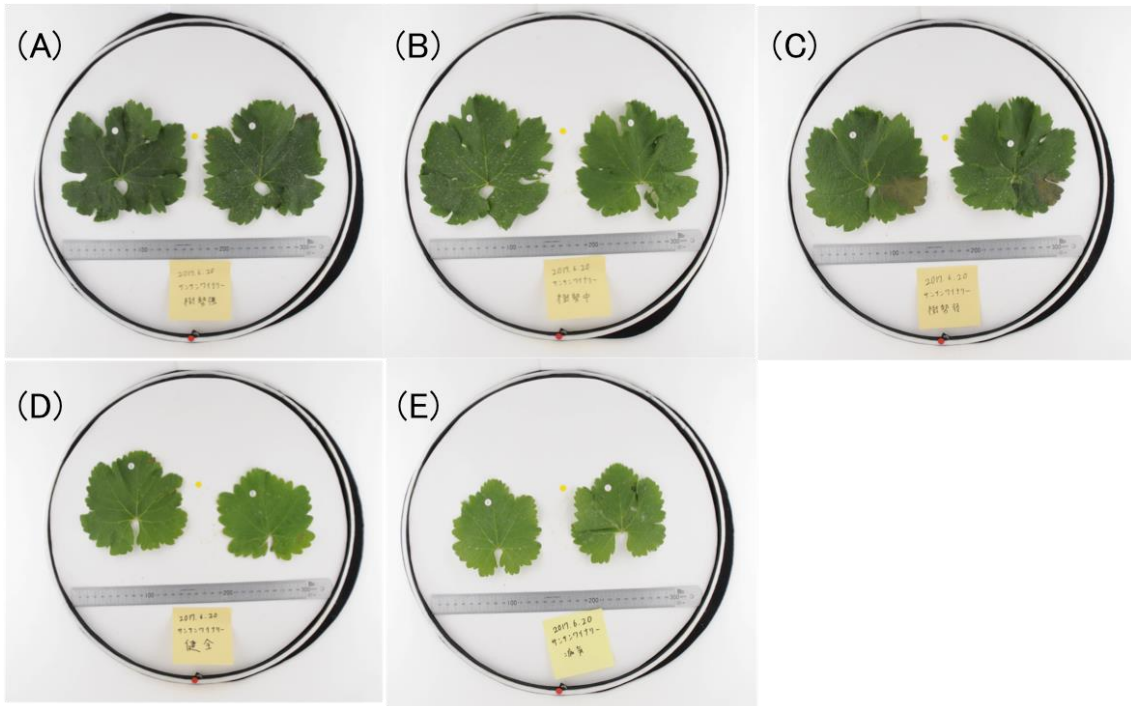


図 3.2 6/19 のワイン葉ブドウの葉サンプル。(A) メルロー品種の樹勢強区。(B) メルロー品種の樹勢中区。(C) メルロー品種の樹勢弱区。(D) シラー品種の健全区。(E) シラー品種の病気区。



図 3.3 サンプルの包装方法

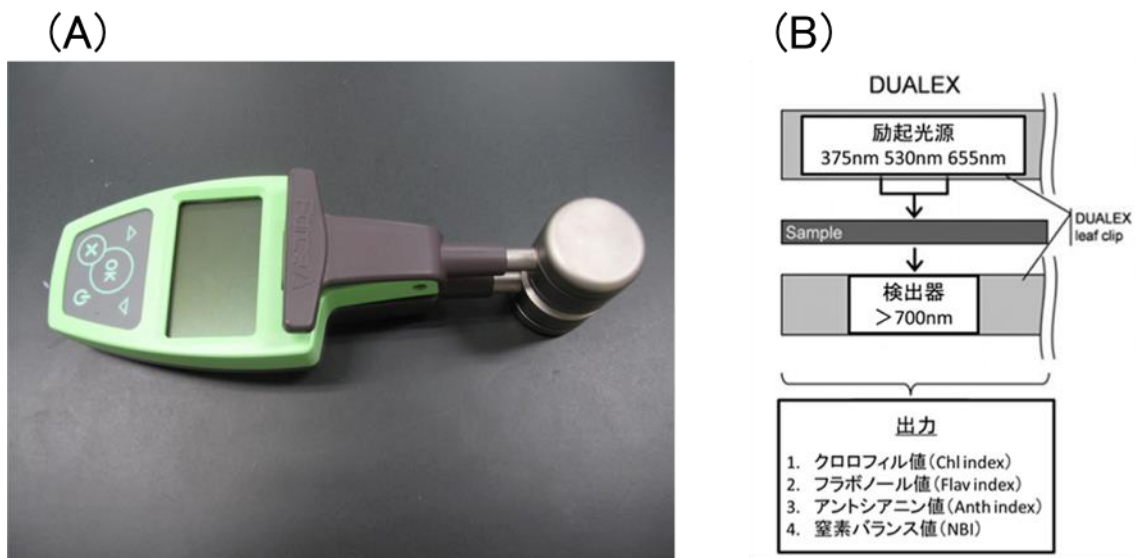


図 3.4 ポリフェノール測定器について。(A) ポリフェノール測定器の外観。(B) センサ部模式図。

表 3-3 ポリフェノール測定器の仕様(Force-A, 2017)

DUALEX SCIENTIFIC+ 紫外蛍光光度計	
質量	220g
計測対象物	葉
計測可能厚さ	最大1.0mm目安
計測範囲	直径5.0mm
検出器	1シリコンフォトダイオード
使用温度	5°C～45°C
内部GPS誤差	2.5m以下
計測時間	500ms以下
記憶容量	約10000計測
データ分類レベル	ファイル/グループ/測定番号

(T710)から算出される。

図 3.5 に示されるように、一般的な植物の葉におけるクロロフィルは、紫外光または可視光によって励起されると 680nm と 730nm 前後にピークのある蛍光を放出する。つまりこの 2 波長の吸光度によりクロロフィルから発せられる蛍光が取得できると考えられる。しかし、680nm、730nm のどちらの波長も、葉の構造由来の吸収が存在するため、クロロフィルによる蛍光のみの分離ができない。そこで考え出された定量式が上記式の方法である。葉全体（ここではクリップ型検出器に挟んだサンプル）を透過する近赤外光である 850nm の光の透過率から、葉由来の赤色光が重なる部分である 710nm の光の透過率を引くことでクロロフィルによる蛍光だけを取り出せるとした。Golasr らによると、ワイン用ブドウの葉における計測で、実際に上記式から算出したクロロフィル値と化学分析によるクロロフィル量に密接な相関が確認されている(Force-A, 2017)。その検定結果を図 3.6 に示す。

本装置ではフラボノールとアントシアニンの 2 種類のフラボノイドが計測できる。フラボノイドはクロロフィルよりも葉の表皮側に多く存在し、フラボノイドに吸収を持つ波長帯の光が入射するとその光は減衰し次の層へと届くことになる。図 3.7 にその概略図(Force-A, 2017)を示す。

図 3.5 より植物の葉においてフラボノールは 375nm 付近に大きな吸収を持つ。つまり 375nm の紫外領域光の大部分は葉の表皮層に多く存在するポリフェノールのうちフラボノールに吸収される。減衰した紫外光はそのままクロロフィルが豊富な葉肉層に到達し、クロロフィルの励起が行われ、蛍光が発生する。それに対し、基準励起光である 655nm の赤色光はポリフェノールに吸収されず、透過する。その後葉肉層でクロロフィルの励起を引き起こし、蛍光を発生させる。本装置ではこの 2 種類のクロロフィル蛍光の差（基準励起光 655nm による蛍光(F655) — 紫外励起光 375nm による蛍光(F375)) によってフラボノールに吸収された光の量を算出する。また、Lambert-Beer の法則の考え方に従ってこの差の対数を取ることで、単位体積あたりのフラボノール含量と考えられる指標値を導くことが可能となる。

同様にアントシアニンは 530nm 付近に大きな吸収を持つ。アントシアニンに関しても 2 波長の励起光による蛍光の差（基準励起光 655nm による蛍光(F655) — 緑色励起光 530nm による蛍光(F530)) を用いて指標値を導いている。

Cartelat らは植物の葉におけるクロロフィルとフラボノール値を用いて窒素

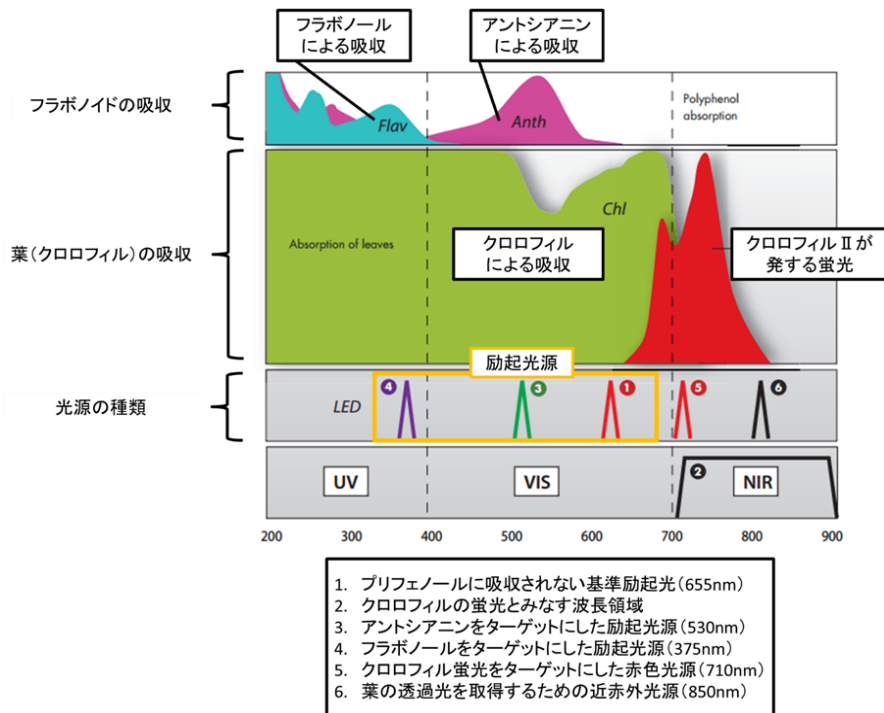


図 3.5 各色素の吸収・蛍光と励起光の関係図(Force-A, 2017)

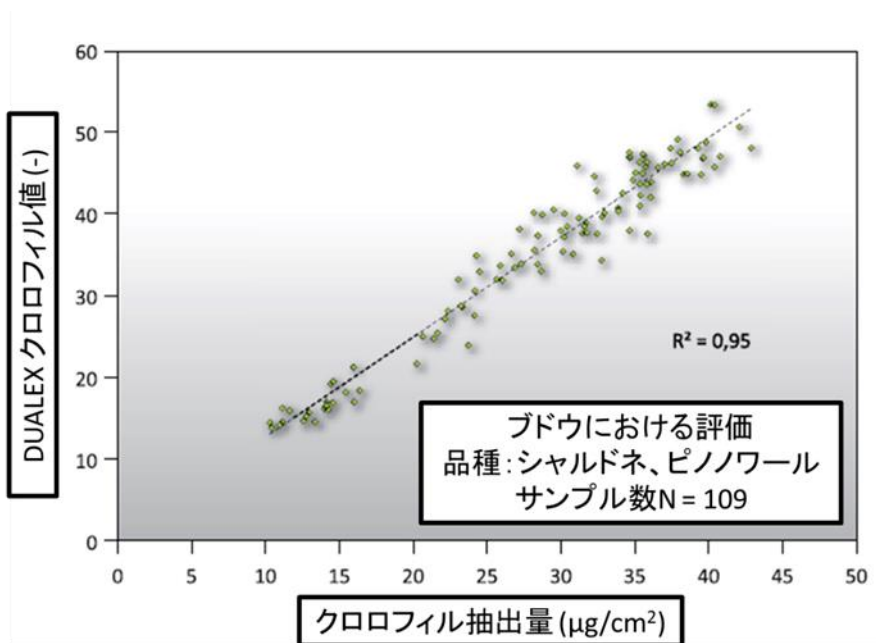


図 3.6 クロロフィル値と実際のクロロフィル量

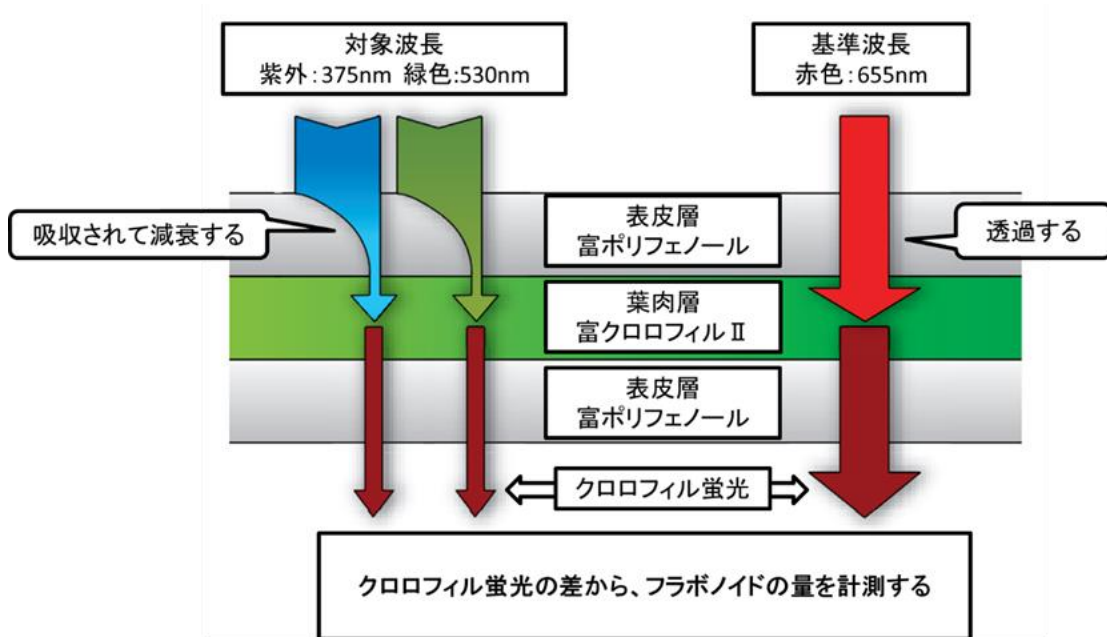


図 3.7 葉におけるフラボノイド値算出原理の概略図 (Force-A, 2017)

バランス値 (NBI : Nitrogen Balance Index) という新しい指標を定義した。この指標では、葉の窒素含量そのものの測定値よりも C/N 比と高い相関を示す結果が報告されている。現在も窒素施肥のための強力な意思決定指標として使用されている。

指標が考え出された背景としては、古くから葉におけるクロロフィルの質量が植物の窒素状態の指標として用いられて来たが、指標として用いるためには LMA (Leaf Mass per Area) という葉面積あたりの葉の重さによって処理が必要になる。本装置のように光を用いて計測を行う場合、LMA を算出することは不可能であるという問題があった。その中で Meyer らは、葉における LMA とフラボノール量に相関があることを明らかにし、Cartelat らはクロロフィル量をフラボノール量によって補正することで NBI という窒素指標を定義した。本装置ではこれらの報告に従い算出されたクロロフィル値をフラボノール値で割ることで NBI を算出している。

また、Agati ら(2016)による本装置を圃場のキャベツ栽培に使用した報告では、NBI 値はクロロフィル値よりも、窒素施肥量に対して高い相関を示し、指標の有用性が確認されている。

### 3-2-3 可搬型蛍光 X 線分光器を用いた元素定量

元素計測にはハンドヘルド蛍光 X 線分析計 (OLYMPUS 社製 DELTApremium) を用いた。蛍光 X 線分析計の外観と測定結果の一例を図 3.8 に示す。

本実験装置は、材料のマグネシウムからプルトニウムまでの成分元素を ppm から 100% の質量%濃度または蛍光 X 線スペクトルで、素早く非破壊で分析可能な携帯型の分析計である。40keV の X 線管と大口径シリコン・ドリフト・ディテクター (SDD) 検出器を搭載し、合金、土壌、鉱物、プラスチック試料などの微量元素や軽元素の成分を分析することができる。0~40keV までの主に重元素を計測する beam1 と 0~10keV までの主に軽元素を計測する beam2 の 2 種類のエネルギー域を使用して計測している。本装置は検出量を FP 法により算出している。検出限界以下の元素は LE (Light Element) として算出される。

本実験に用いた装置の仕様と計測条件を表 3-4 と表 3-5 に示す。X 線ターゲットであるロジウムで補正を行うことにより表面情報に左右されず、再現性の高い計測ができることが知られている (林, 2007)。本研究においても、断りがない

(A)



(B)

測定ID: 10/15/15 #4C	情報表示
89.8 sec	全て表示
89.8 sec	
元素 PPM +/-	
LE 97.60% 0.0277%	
K 6155 78.83	
Fe 5990 112.10	
Zn 5176 63.44	
Ca 2431 39.91	
P 1710 83.68	
S 1506 47.01	
Cr 799 53.13	
Mn 112 28.44	
Sr 80 2.47	
Th 33 7.12	
Zr 23 2.26	
Y 9 1.61	
不検出(ND)	
Ni ND <109	
Cu ND <293	
Ti ND <5409	
As ND <62	
Se ND <51	

図 3.8 使用した蛍光 X 線分析器。(A)蛍光 X 線分析計の外観。(B)測定結果の一例。

表 3-4 蛍光 X 線分析計 DELTA の仕様(OLYMPUS 2015)

DELTA Premium		ハンドヘルド蛍光X線分析計
質量		1.5kg(バッテリー含まず)
X線管(出力、アノード)		最大4W、Rh
検出器		大口径シリコンドリフトディテクター
電源		充電式リチウムイオンバッテリー
cal check金属		SUS316(ステンレス鋼)
使用環境	使用温度	-10℃～45度
	使用湿度	相対湿度10%～90%(結露なし)
	高度	2000mまで
オペレーティングシステム		Windows Embedded CE
測定可能元素		Mg(原子番号12)～Pu(原子番号94)

表 3-5 DELTA 計測条件

分解能[keV]		0.02
コリメータ直径[mm]		3
測定窓フィルム		プロレン製
計測時間[秒]	beam1	30
	beam2	60
計測範囲[keV]	beam1	0～40
	beam2	0～10
スペクトル単位	縦軸	csp
	横軸	keV



限り、ロジウムで補正した値を使用した。

本実験に用いた装置の仕様と計測条件を表 3-4 と表 3-5 に示す。X 線ターゲットであるロジウムで補正を行うことにより表面情報に左右されず、再現性の高い計測ができることが知られている(Hayashi et al., 2007)。本研究においても、断りがない限り、ロジウムで補正した値を使用した。

蛍光 X 線を用いた計測を行う場合、入射光(1 次 X 線)の侵入深さが波長(エネルギー)によって異なることが知られている(中井ら, 2016)。また、同じ波長でも軽元素の割合が多ければ多いほど、入射光が深くまで侵入することが分かっている。軽元素が主成分の試料を分析する場合は試料の厚みによって蛍光 X 線強度が変化することがあり、そのため蛍光 X 線計測を行う場合の試料厚みを決定することは重要であることが分かる。

葉は主成分が軽元素で X 線が透過しやすく、試料厚さの調整が困難であるため、本研究では、キャリブレーション用のデルタドッキングステーション(DDS)のステンレス鋼のコイン状の金属をチタン含有率 99.6%の金属に変え、葉計測用のスタンドとした。チタンは基本的に葉に含まれておらず、蛍光 X 線 DELTA の 2 種類の波長域のビームのどちらでも検出できることから使用した。葉計測用スタンドに使用した金属を 3 回計測したときの様子の写真を図 3.9 に、平均値を表 3-6 にそれぞれ示す。ごく微量であるが、植物の必須元素である鉄(Fe)とニッケル(Ni)を含んでいるため、葉の元素含有量を求める場合には考慮する必要がある。

葉計測スタンドを用いた場合の計測安定性の検討を行った。主に軽元素を検出する beam2 の計測時間を変化させ 3 回計測を行うことで、計測時間によるスペクトルの違いを検討した。加えて 1 点を 3 回計測する事で、葉計測用スタンドを用いた場合の計測の安定性を確認した。

また、全ての葉サンプルの 3 点において葉計測スタンドを用いて蛍光 X 線分光分析を行い(図 3.10(A))、葉内の元素濃度分布の検討を行った。計測した 3 点を図 3.10 (B) に示す。また、計測した 3 点の平均値を葉の代表値として、樹勢の強い木のサンプル群、樹勢の弱い木のサンプル群における同一サンプル群内の比較やサンプル群間の比較を行った。

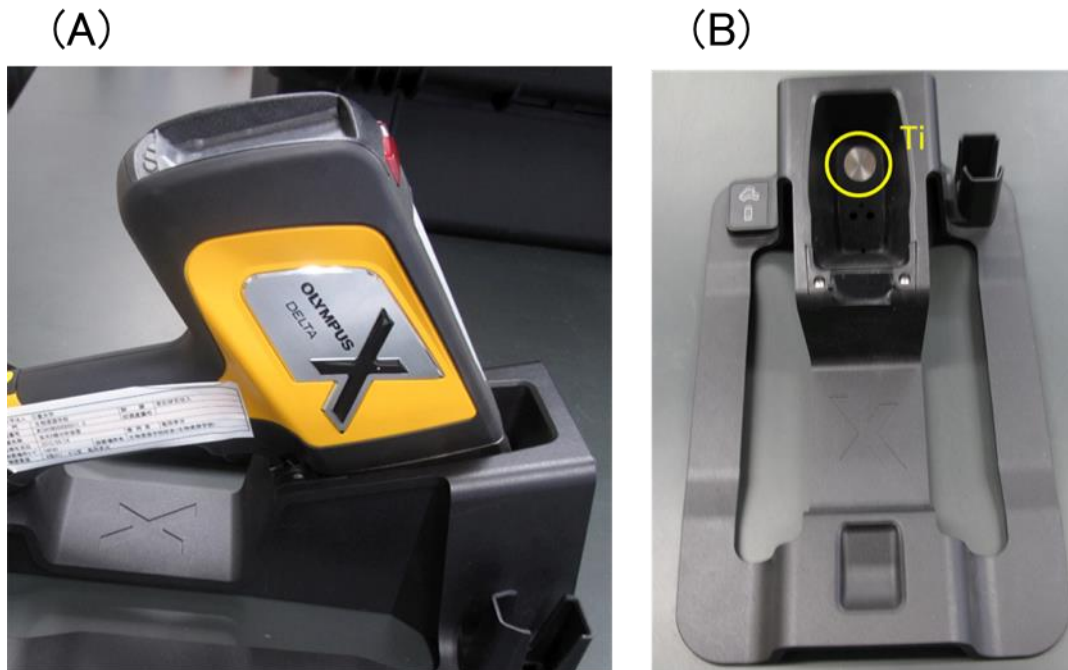


図 3.9 葉計測風景と葉サンプル計測スタンドの外観 (A)蛍光 X 線測定風景 (B)葉計測用スタンド

表 3-6 コイン状の Ti の成分表

元素	Ti	Fe	Ni	Bi
検出量(%)	99.60	0.2206	0.0847	0.280

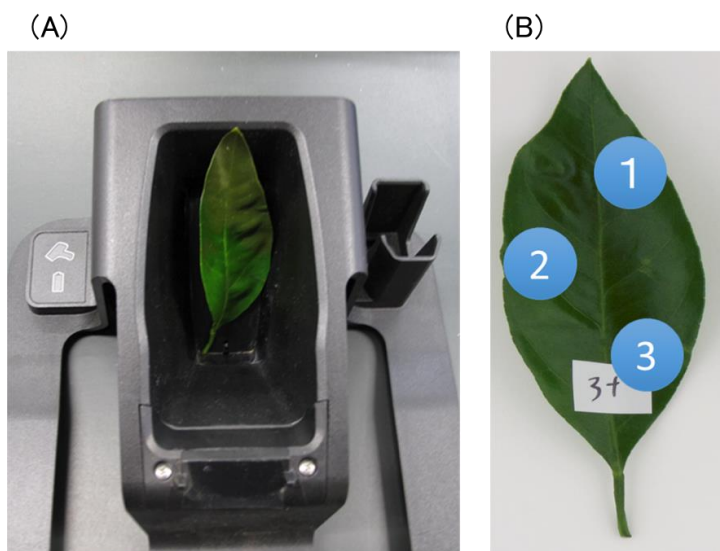


図 3.10 蛍光 X 線分析の様子。(A) 葉設置図。(B) 計測した 3 点。

## 3-3 結果および考察

### 3-3-1 みかん葉の計測結果

#### 3-3-1-1 葉分析実験系の確立

##### 3-3-1-1-1 蛍光分光分析器を用いた色素量

図 3.10 (B) に示した、2016 年における葉の 3 点において蛍光分光測定を行った場合のクロロフィル指標(CHL)、フラボノール指標(FLAV)、アントシアニン指標(ANTH)、窒素バランス指標(NBI)の各指標の計測結果を図 3.11 に示す。樹勢の強い木の葉の代表として樹勢の強い木のサンプル群の sample1、樹勢の弱く葉色の悪いものの代表として樹勢の弱い木のサンプル群の sample1、樹勢が弱い葉色の良い葉の代表として樹勢の弱い木のサンプル群の sample8 の 3 点における各色素の指標値を示した。

樹勢の強い木から採取した葉は 3 点の間で差は少なく、色素が一様に分布していることが確認できた。一方、樹勢の弱い木の葉は、葉色の良いものでは 3 点の間で差は少なく、その計測値も樹勢の良い群に近いものであった。一方で、緑色が薄い葉色の悪いものでは、計測箇所により各色素の分布があった。また、CHL、NBI では、他群にくらべて明確に計測値が低く、ANTH では他群に比べて明確に高い値を計測した。

これらの傾向は、図 3.12 に示した樹勢の強い木のサンプル群の sample1、樹勢の弱い木のサンプル群の sample1、樹勢の弱い木のサンプル群の sample8 以外のサンプルでも同様の傾向を示した。

本実験では 3 点測定した指標値の平均を葉の代表値として、樹勢の強い群と樹勢の弱い群における各指標の指標値の比較を行った。これを図 3.12 に示す。

クロロフィル指標(CHL)は、樹勢の強い群が 38 から 52 の間の値を示し、樹勢の弱い群では 22 から 42 の間の値を示した。ほとんどのサンプルで樹勢の強い群の方が大きい値であった。フラボノール指標(FLAV)では、樹勢の強い群で 1.3 から 1.6 の間の値を示し、樹勢の弱い群では、1.4 から 1.8 の間の値を示した。FLAV では樹勢に関わらず似た値を示した。アントシアニン指標(ANTH)では、樹勢の強い群では、0 から 0.033 の間の値を示し、樹勢の弱い群では 0.005 から 0.12 の間の値を示した。ANTH は特に葉サンプルによる差が大きく、葉色

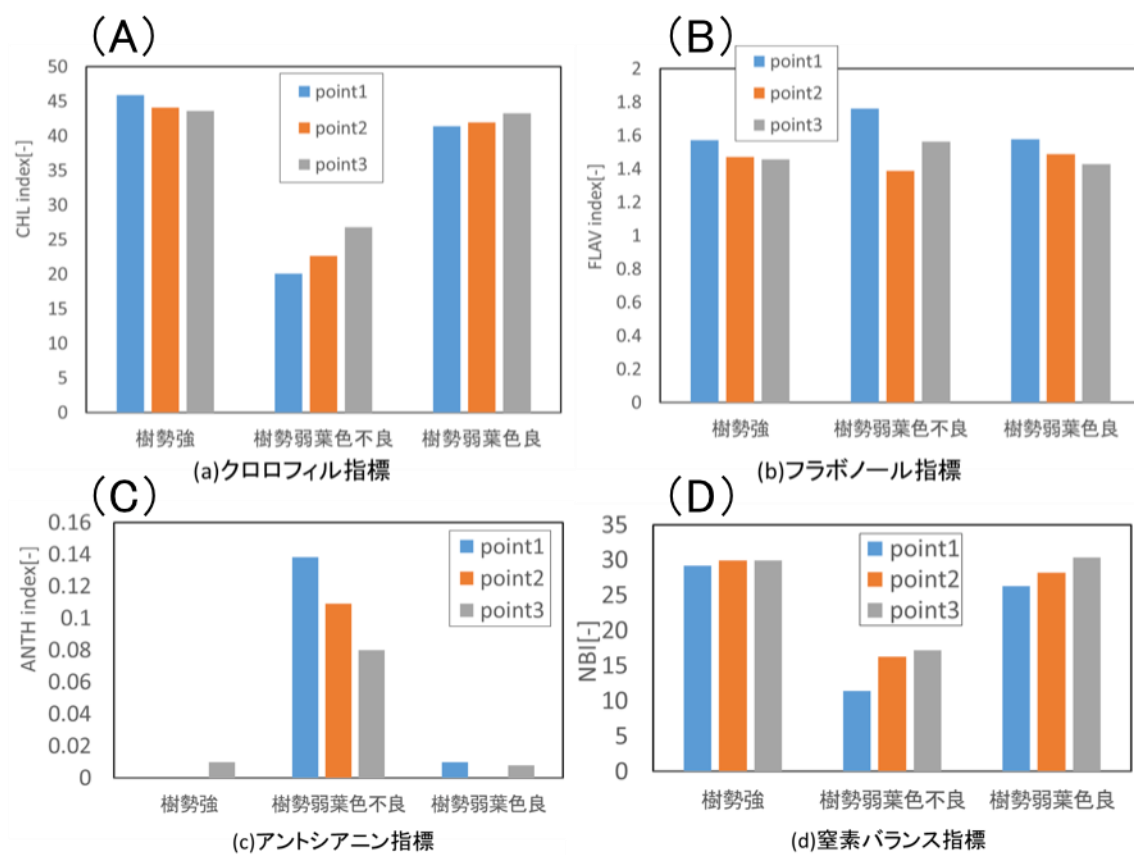


図 3.11 葉の 3 点における各色素の計測結果

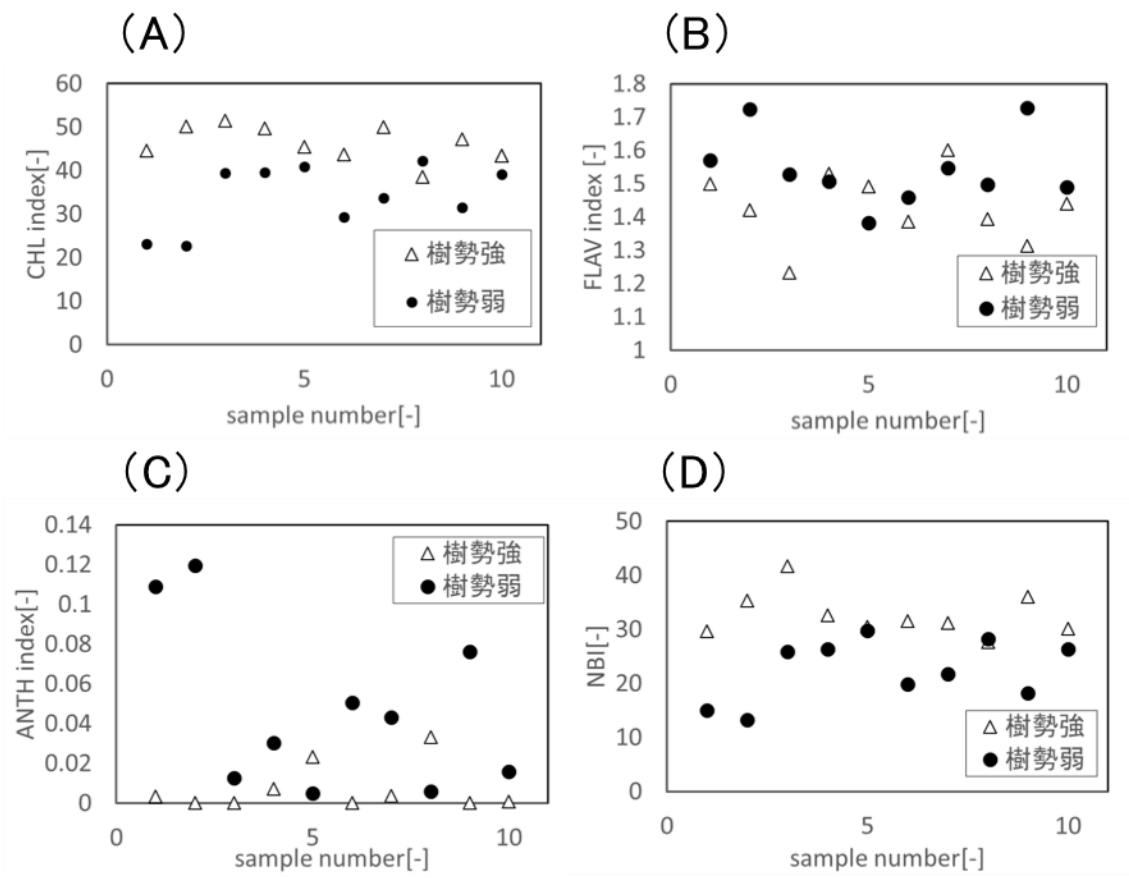


図 3.12 葉の代表値での各色素の比較

の悪いサンプルで非常に大きい値を示した。窒素バランス指標(NBI)では、樹勢の強い群は、28 から 42 の間の値を示し、樹勢の弱い群では、13 から 30 の間の値を示した。NBI は CHL と似た傾向を示し、ほとんどのサンプルで樹勢の強い群が大きい値であった。

CHL と NBI では、樹勢の強いサンプル群が大きい値を示しポリフェノール計測機 Dualex Scientific+を使用することで樹勢を反映した指標値を取得できることが確認できた。ANTH においても樹勢を反映する結果になった。これらの指標がどのように関係しているのかの検討を行った。

図 3.13 に CHL と ANTH の相関関係と NBI と ANTH の相関関係を示す。樹勢の弱い群において、近似線を引いた時の決定係数は CHL と ANTH で 0.9182、NBI と ANTH で 0.9517 と CHL と ANTH、NBI と ANTH のどちらにも強い負の相関が確認された。

この負の相関は、以下の 2 つ植物の代謝反応と関係していると推測される。

1 つ目は、光合成である。光合成は、光エネルギーを利用し生化学エネルギー(ATP、NADPH)に変換する明反応と生化学エネルギーを利用して CO<sub>2</sub> を固定する暗反応の 2 つがある。暗反応と明反応が等しい時は太陽光エネルギーが全て CO<sub>2</sub> 固定に利用されるが、明反応が暗反応を上回ると太陽光エネルギーの一部が CO<sub>2</sub> 固定に利用できなくなり、活性酸素を生み出し組織を破壊してしまう。これを光阻害と言う。植物は、低温度や無機養分のアンバランスなどの環境ストレスを受けると暗反応の活性が下がり光阻害を起こしてしまう。

これに対する防御機構がいくつか存在し、その一つとして葉の表皮細胞でアントシアニンが合成され、太陽光をカットし、暗反応と明反応が等しくなるようにコントロールしている。また、他の防御機構としてクロロフィルを分解することで明反応の活性を下げ、光阻害を防いでいる。CHL と ANTH の強い負の相関は、このような現象が原因だと考えられる。

2 つ目は要素欠乏症である。窒素欠乏がゆっくりと進行する場合には、茎が顕著に細かくかつ木のようなになる植物がある。この茎の木質化は、炭水化物がアミノ酸や他の窒素化合物の合成に使われずに余剰となり、それを用いて作られていると思われる。また、窒素代謝に使われなかった炭水化物はアントシアニン色素に合成され蓄積する。加えて、リンの欠乏でも窒素同様に過剰なアントシアニンを合成する植物種があり、葉がやや紫色を呈する。NBI と ANTH の強い負の相関はこのような要素欠乏が原因だと考えられる。

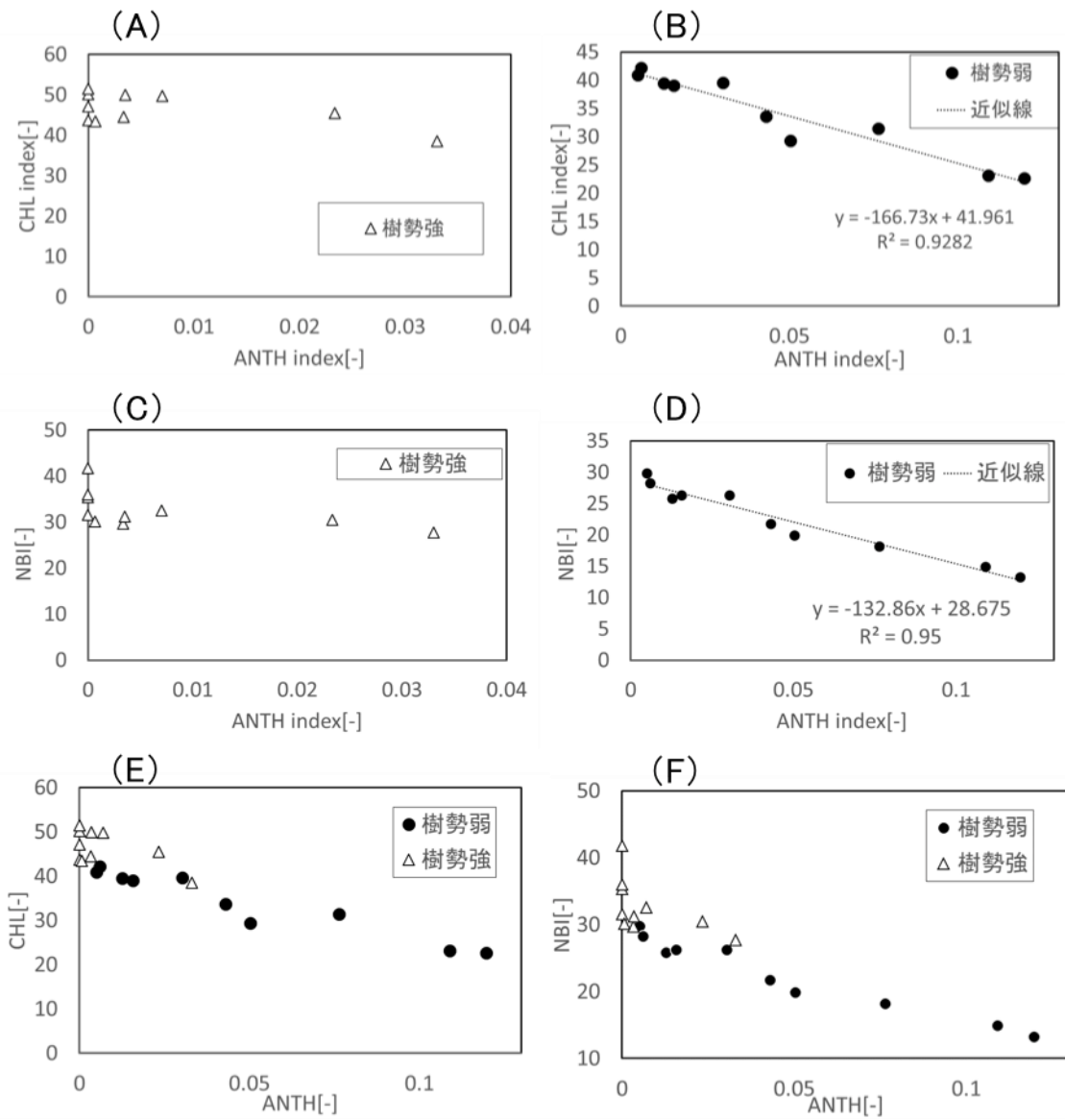


図 3.13 ANTH と他の指標の相関

### 3-3-1-1-2 可搬型蛍光 X 線分光器を用いた元素定量

葉計測スタンドを用いて、主に軽元素を計測する beam2 の計測時間を 30 秒、60 秒、90 秒、120 秒、150 秒と変化させ 3 回計測したときのスペクトルとそれぞれの平均スペクトルを図 3.14 に示す。

それぞれの計測時間においてスペクトルが完全に一致し、また各計測時間の平均スペクトルも完全に一致した。これにより、葉計測スタンドを用いることで安定して計測出来ることが確認できた。

続いて、葉の 3 点の平均スペクトルを葉の代表スペクトルとして、樹勢の強い木のサンプル群、樹勢の弱い木のサンプル群における同一サンプル群内の比較やサンプル群間の比較を行った。図 3.15 (A) に樹勢の強いサンプル間の蛍光 X 線スペクトルの比較を図 3.15 (B) に樹勢の弱いサンプル間の蛍光 X 線スペクトルの比較を示す。約 2.01keV がリン(P K $\alpha$ )、約 2.31keV がケイ素 (S K $\alpha$ )、約 2.68keV、2.83keV がロジウム(Rh L $\alpha$ 、Rh L $\beta$ )、約 3.31keV がカリウム(K K $\alpha$ )、約 3.69keV、4.01keV がカルシウム(Ca K $\alpha$ 、Ca K $\beta$ )、約 4.51keV、4.93keV がチタン(Ti K $\alpha$ 、Ti K $\beta$ )のピークである。

これらのピークは樹勢の強い木、樹勢の弱い木の両方から検出できた。植物にとって重要な多量元素である K と Ca については 20 枚全ての葉においてバラツキがあり、葉における元素の分布が存在することが分かった。また、この分布の傾向はランダムであり、葉の代表スペクトルを取得する場合、複数の領域の元素情報を取得する必要があることが分かった。

樹勢の強いサンプル群においても、樹勢の弱いサンプル群においても葉によって元素の栄養状態が異なることがスペクトルの違いから分かる。また、葉によって元素の栄養状態が違うことから同じ木あるいは同じ区画から葉サンプルを複数枚採取する必要性が確認された。

次に、この 10 サンプルの平均スペクトルを群の代表スペクトルとして、樹勢の強い群と樹勢の弱い群を比較した。樹勢の強い群と樹勢の弱い群の比較ときの蛍光 X 線スペクトルを図 3.16 に示す。図 3.16 から K のピーク強度に差があることが分かる。



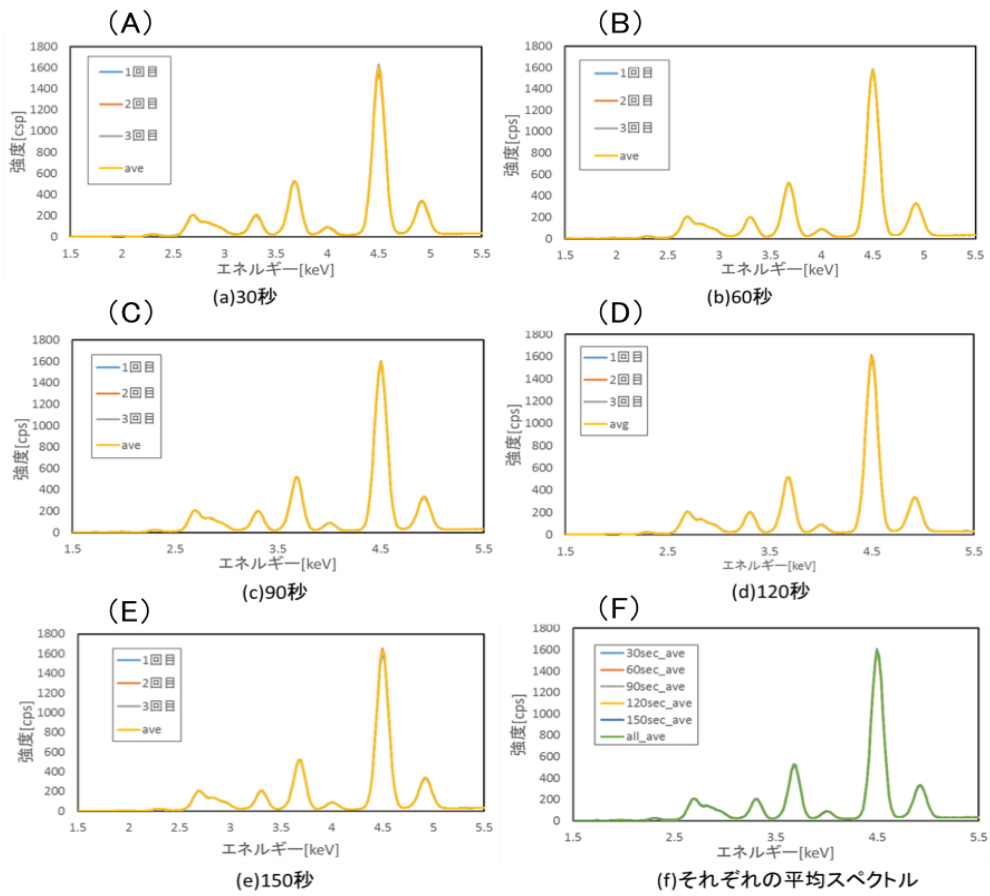


図 3.14 各計測時間の蛍光 X 線スペクトルとその平均の比較

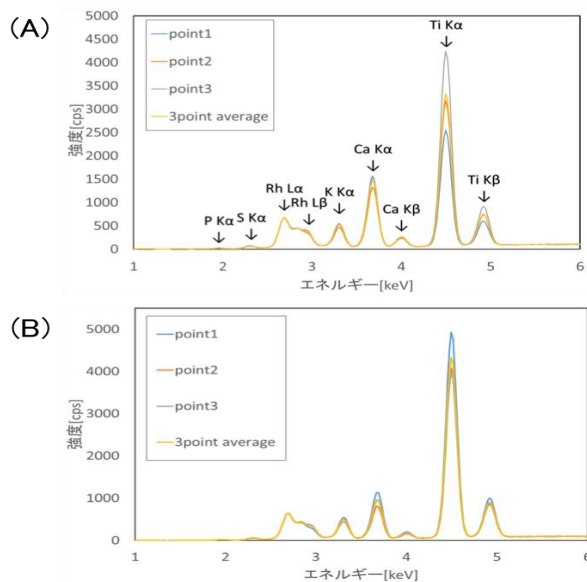


図 3.15 葉サンプルの蛍光 X 線スペクトル。(A) 樹勢の強い木サンプルの蛍光 X 線スペクトル。(B) 樹勢の弱い木サンプルの蛍光 X 線スペクトル。

葉中の無機成分含有率には樹体の肥料成分吸収状態や栄養状態が反映されることから、葉中の無機成分含有率を分析することで樹体の栄養診断をすることが出来る(杉浦, 2004)。ここでは静岡県土壌肥料ハンドブック(静岡県産業部農山村共生課, 2014)による葉中要素含量の欠乏・適量・過剰の判断基準(表 3-7)を合わせて考慮し、葉の蛍光 X 線計測による元素分析の検出値の有効性を検討した。

10 サンプルの検出値の平均を群の代表値として、葉の元素検出値、3 点計測をした 10 枚の中で検出されたサンプル数、適量判断の一覧表を表 3-8 に示した。

静岡県土壌肥料ハンドブックによる葉中要素含量の欠乏・適量・過剰の判断基準において定義されていない、欠乏と適量の間をやや欠乏、過剰と適量の間をやや過剰と定義した。

樹勢の強い木では、Ca・K・Fe・Zn が適量、P がやや欠乏、Cu・Ni がやや過剰、Mn・Mo では過剰であった。樹勢の弱い木では、Ca・K・Zn が適量、Fe・Cu がやや過剰、P が欠乏、Mn・Mo・Ni では過剰であった。

ここで、蛍光 X 線分析器 DELTA の検出限界を葉中含有量が下回っている元素が存在する。蛍光 X 線分析器 DELTA の Mg の検出限界は 1% であるが、静岡県ハンドブックによると葉中含有量の適量は 0.3~0.6% と検出限界を下回っている。Co の検出限界は 10ppm であるが、表 3-7 によると葉中含有量の適量は 5~20ppm である。Mo の検出限界は 5ppm であるが、葉中含有量の適量は 0.2~3.0ppm である。以上のようなことから Mg と Co と Mo の葉中含有量の適量判断は困難であると推測される。

ただし、本実験に使用したミカン葉サンプルの Mo ように、過剰に含まれている場合の検出は可能である。この時、検出サンプル数が葉中含有量を示していると考えられる。本実験の場合では、樹勢の強い木では Mo が検出されたのは全 30 サンプル中 6 サンプル、樹勢の弱い木では 19 サンプル検出された。検出サンプル数の少ない樹勢の強い木の方が好ましい状態にあることが推測できる。

樹勢の強い木で適量を示す元素の種類が多く、欠乏を示す元素や過剰を示す元素の種類が少ない。樹勢の弱い木で過剰を示す元素や欠乏を示す元素の種類が多く、適量を示す元素の種類が少ない。このことから葉の元素含量を蛍光 X 線計測することにより、樹勢の判断に有用である可能性が示唆された。

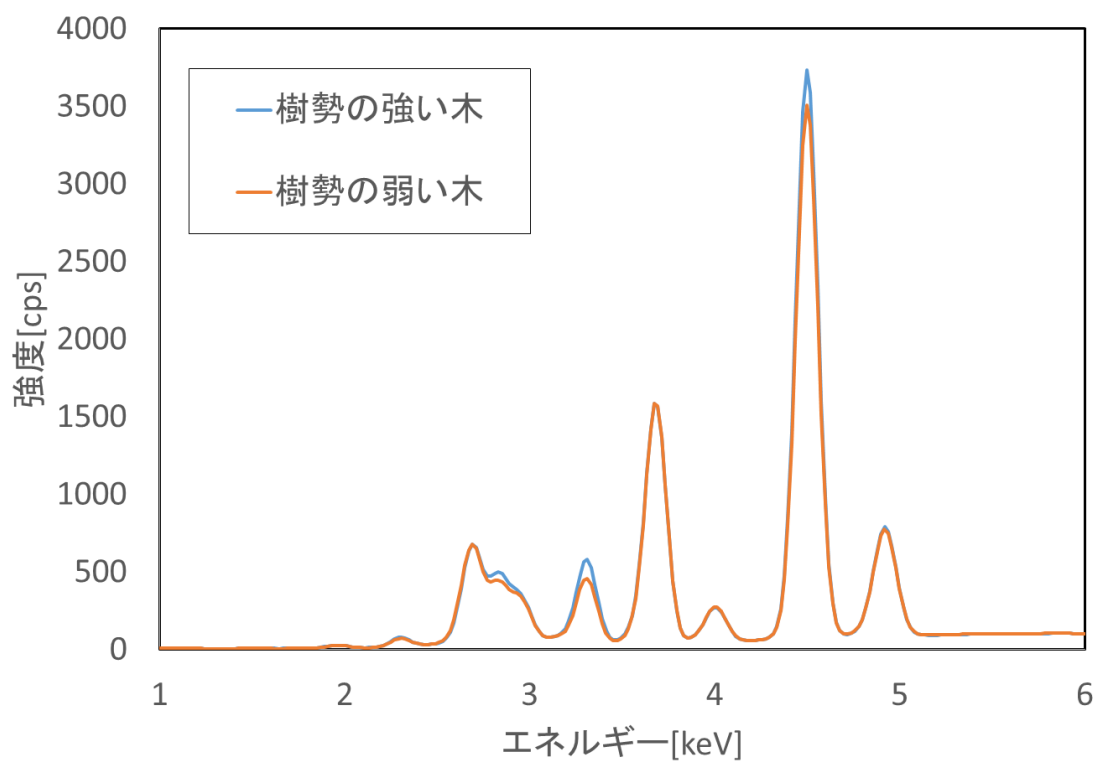


図 3.16 樹勢の差による蛍光 X 線スペクトル比較

表 3-7 葉中要素含量の欠乏・適量・過剰の判定基準（静岡県産業部農山村共生課,2014）

(a)多量元素の判断基準 (b)微量元素の判断基準

(a) 作物名	含有程度	乾物 100 g 中 g (%)				
		窒素 (N)	リン (P)	カリウム (K)	カルシウム (Ca)	マグネシウム (Mg)
温州ミカン (普通温州)	欠乏	2.3 以下	0.10 以下	0.7 以下	2.0 以下	0.10 以下
	適量	2.9~3.4	0.16~0.20	1.0~1.6	3.0~6.0	0.30~0.60
	過剰	4.0 以上		1.8 以上	7.0 以上	

(b) 乾物 1 kg 中 mg (ppm)							
ホウ素 (B)	マンガン (Mn)	鉄 (Fe)	亜鉛 (Zn)	銅 (Cu)	モリブデン (Mo)	ニッケル (Ni)	コバルト (Co)
30 以下	30 以下	35 以下	10 以下	4 以下	0.05 以下		
30~100	30~100	50~150	30~100	10~50	0.2~3.0	2.0~15	5~20
170 以上	150 以上	250 以上	200 以上	150 以上		25~90 以上	30 以上

表 3-8 葉の元素検出値、検出サンプル数、適量判断の一覧 (a)樹勢の強い木の葉サンプル (b)樹勢の弱い木の葉サンプル

	平均含有量 (%又はppm)	検出サンプル数	適量判断		平均含有量 (%又はppm)	検出サンプル数	適量判断
LE(%)	73.7	30		LE(%)	71.9	30	
Ti(%)	20.3	30		Ti(%)	22.4	30	
Ca(%)	3.30	29	適量	Ca(%)	3.19	30	適量
K(%)	1.33	29	適量	K(%)	1.01	30	適量
S(%)	0.230	29		S(%)	0.201	30	
P(%)	0.112	29	やや欠乏	P(%)	0.0952	30	欠乏
Si(ppm)	855	26		Si(ppm)	764	19	
Mn(ppm)	380	30	過剰	Mn(ppm)	375	30	過剰
Fe(ppm)	138	30	適量	Fe(ppm)	155	30	やや過剰
Cu(ppm)	87.2	14	やや過剰	Cu(ppm)	72.0	4	やや過剰
Zn(ppm)	49.5	22	適量	Zn(ppm)	37.4	8	適量
Mo(ppm)	22.3	6	過剰	Mo(ppm)	23.5	19	過剰
Ni(ppm)	20.2	30	やや過剰	Ni(ppm)	42.7	30	過剰
Mg		0		Mg		0	
Co		0		Co		0	

### 3-3-1-2 果樹の生育期間を通じた計測

#### 3-3-1-2-1 蛍光分光

前年度の結果を受けて、2017年度は経時的な色素変化をモニタリングした。

図3.17に、クロロフィル値(Chl)、フラボノール値(Flav)、窒素指標値(NBI)、アントシアニン値(Anth)の経時的な変化をプロットしたグラフをそれぞれ示す。

まず Chl から見ていく。図 3.17 (A) にクロロフィルの経時変化を示す。クロロフィルの量は 1 回目の計測 (6/22) から 4 回目の計測 (9/28) にかけて上昇傾向にあることが示された。この傾向について考察するために、みかんの葉の生育について考える必要がある。すべての植物において、初期葉はソース器官であり、若葉のうちから光合成能を得ているわけではない。先行研究によれば、みかん葉において、6月までは旧葉による光合成の割合の方が大きいという報告があるため(農山漁村文化協会編、2000b)、本実験における1回目と2回目の間、シンク器官からソース器官へと変遷する時期にあると考えられる。2回目の計測以降は、すでに新葉は成熟し、十分な光合成能を有していると考えられる。次に樹勢による差を見ると、経時的な変化傾向についての差はほとんど認められず、樹勢が強いとされる樹体の葉において、常に高いクロロフィル値が計測されるという結果になった。

次に、Flav について見ていく。図 3.17 (B) にフラボノールの経時変化を示す。フラボノール値は、1 回目の計測から 3 回目の計測にかけては緩やかな上昇傾向は見せていたが、4 回目の計測 (9/25) で若干の減少を示した。フラボノールの植物生理的な機能として、紫外線からの防御機能が挙げられる。この機能はみかん葉がまだシンク器官である時から必要とされるものであり、常にその生成は一定のペースで進むとされている (Louis et al., 2009)。その一方で、光合成関連タンパク質とフェノール類は、両者とも前駆体としてフェニルアラニンが必要になることから、光合成能を獲得するためのタンパク質生成が活発な時には、フェノール類の生成はやや弱まると言われている (Jones and Hartley, 1999)。しかしながら、今回の結果でフラボノール減少がみられたのは、むしろ成熟した葉だったため、この理論は当てはまらない。一方で、dualex ではポリフェノールのような重合体や、フラボノイド、イソフラボノイド等のフラボノールとは構造の違うフェノールが dualex で計測できないことから (Louis et al.,

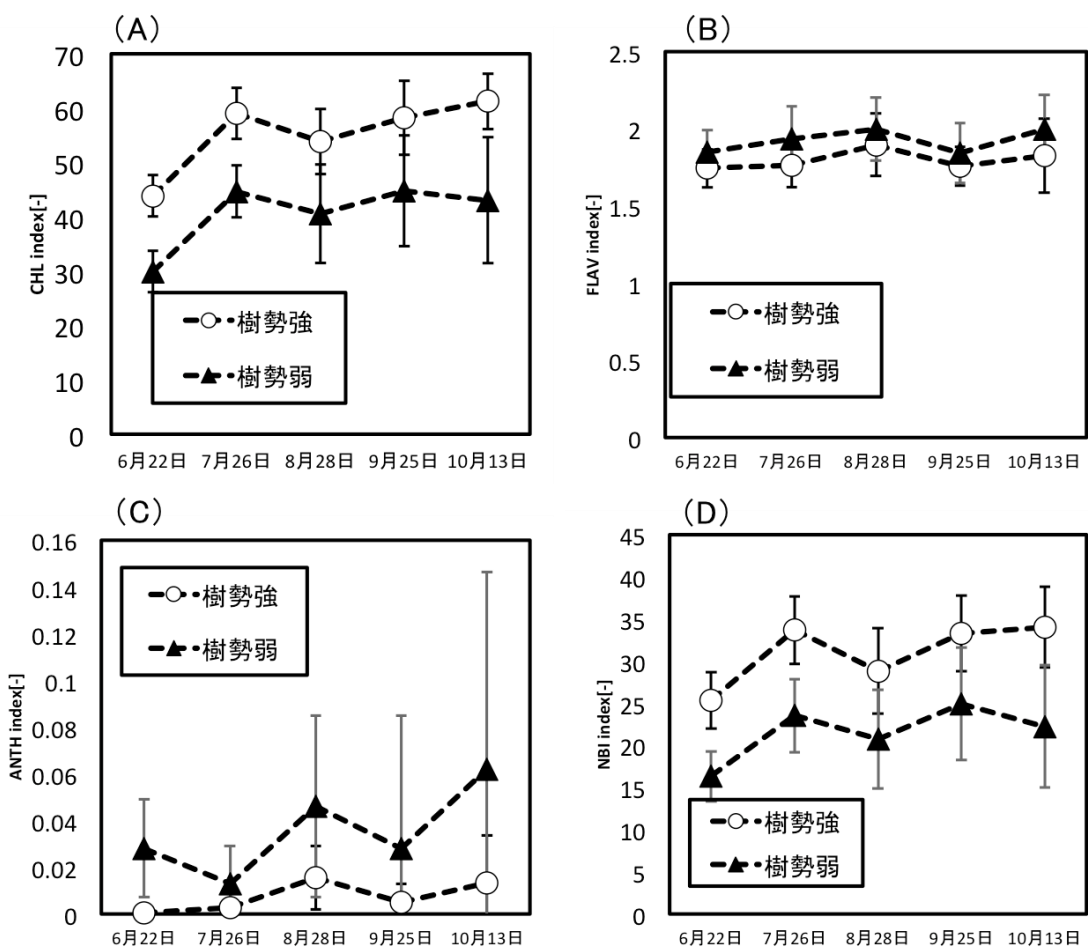


図 3.17 ワイン用ブドウ葉の色素分光データ。(A) クロロフィル値。(B) フラボノール値。(C) アントシアニン値。(D) NBI 値。

2009)、みかん葉の表皮に含まれる基本的なフェノールについても考察していく必要がある。これに加えて、フラボノールは裏面において生育期間中の一定増加が見られるという報告も存在することから (Louis et al., 2009) 葉面計測を両面において行う必要性についても検討していく課題となった。

アントシアニンについては、2016 年度に得られた結果と同様に、樹勢が弱いとされる個体群において高い値を示す傾向が計測期間中継続的に観察された (図 3.17 (C))。経時的な変化を見ていくと、樹勢の強いとされる個体群では、6/22 の初回計測にはほとんど 0 という値からスタートし、7/26 の 2 回目の計測では若干の増加を示し、8/28 の 3 回目の計測で大きく増加した後、9/25 の 4 回目の計測では低下していた。樹脂の弱いとされる個体群では、初回計測に高い値を示し、2 回目の計測では減少し、3 回目の計測では大きく上昇し、4 回目の計測では減少を示した。3 回目の計測で、樹脂が強いとされる個体群と弱いとされる個体群の両者にて最も大きな値が得られた。アントシアニンは光合成のアンバランスや窒素欠乏などに反応して増加することが知られているため、初回計測と二回目の計測の間の期間に、樹勢が弱いとされる個体群では光合成能の回復があったことが示唆される。加えて、みかん樹体において、葉は生育期間をまたいで光合成を続けるので、展葉から 8 か月ほどはほぼ同じレベルでの光合成を継続する (Srivastava, 2004) ため、8/28 から 9/25 の果実収穫機に向けて、どちらの群の樹体も光合成の暗反応と明反応のバランスを回復してきたと考えられる。

NBI の変化は、計測期間中はほぼ葉中フラボノール量が一定状態を保っていたので、クロロフィルの変化と同様の傾向を示した (図 3.17 (D))。

### 3-3-1-2-2 蛍光 X 線

前年度の結果を受けて、翌年は経時的な元素量変化をモニタリングした。

図 3.18, 3.19 に、Ca、K、S、P、Cu、Si の経時的変化を示したグラフをそれぞれ示す。この図 3.18 には必須多量元素である K, Ca, P を、図 3.19 にはその他の微量元素を示した。みかん葉中の Ca 含量について見ていくと、すべての測定時期において、樹勢が強いとされる個体における Ca 含量が樹勢の弱いとされる個体の葉中 Ca 含量よりも高いという結果になった (図 3.18 (A))。経時的な Ca 含量の変化は、樹勢の強弱を問わず増加傾向を示し、それぞれの葉中 Ca 量について静岡県土壌肥料ハンドブックを参考にして判断したところ、一回目 (6/22) のサンプルはやや欠乏であった一方で、2 回目 (7/26)、3 回目 (8/28)、

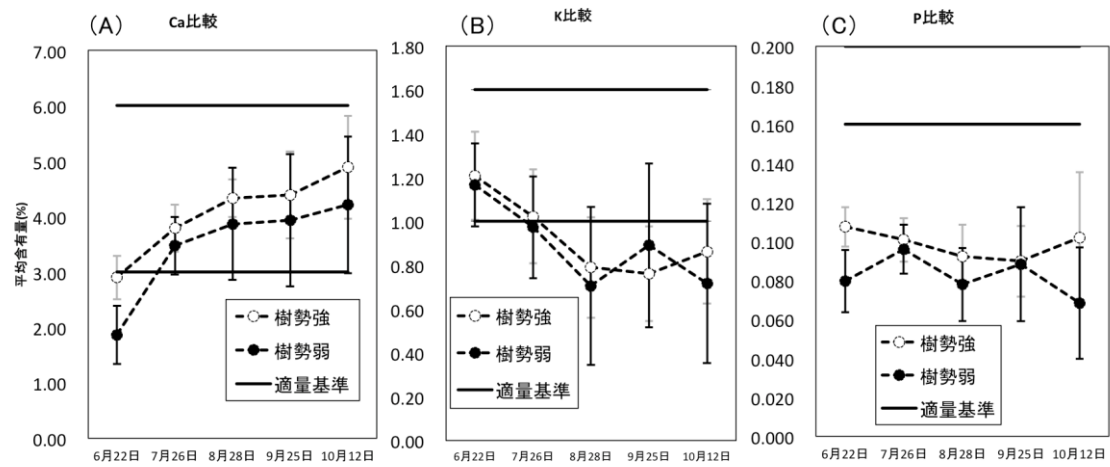


図 3.18 みかん葉中に含まれる必須多量元素 (K, Ca, P) の経時変化グラフ。(A) カルシウム含量。(B) カリウム含量。(C) リン含量。

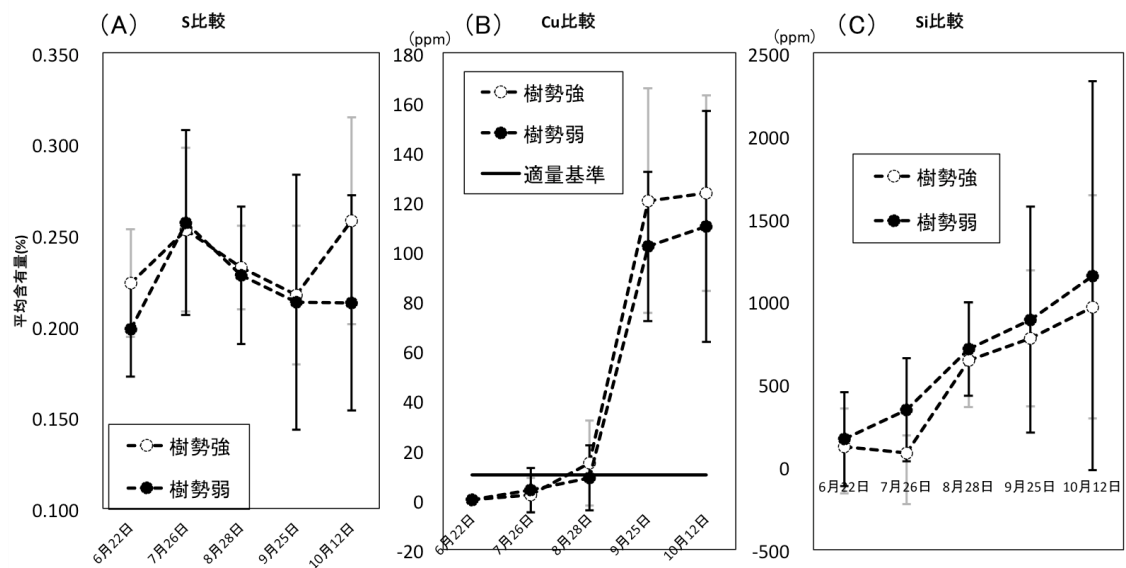


図 3.19 みかん葉中に含まれる微量元素 (S, Cu, Si) に関する経時変化グラフ。(A) 硫黄含量。(B) 銅含量。(C) ケイ素含量。



4 回目 (9/25) に採取したサンプルは Ca が適量値の範囲に収まっていた。Ca の植物生理的な役割は、果実においては、細胞壁構成多糖との相互作用による耐病性の付与 (Hepler and Winship, 2010)、シグナル伝達経路におけるメッセンジャー (Dodd et al., 2010) 等が知られている。また、Ca<sup>2+</sup>イオンは、ほぼ全てが導管を通じて根から供給され、このイオンの輸送は各器官の蒸散量に依存することが知られているため、葉と比較した時に果実への供給が少なくなる傾向にある (Montanaro et al., 2014)。よって、葉における Ca 濃度が適量基準範囲に収まっていることは、果実への適切な Ca 供給が行われていることが示唆された。また、Ca の経時的な変化を見ていくと、3 回目の計測と 4 回目の計測の間、つまり 9 月中における葉への Ca 蓄積がやや弱まっていることがわかる。あるレモン品種において、葉のカルシウム濃度は落葉するまでの 2 年間コンスタントに増え続けるという報告があるため (Robinson et al., 1997)、この時期における蒸散量が減少したか、土壌中の Ca が不足した可能性が示唆された。

次に K について見ていく。K に関しては、サンプリングの回数を経るごとに含有量が低下する傾向が読み取れた。また、1 回目の計測においては適量基準を満たしていたものの、2 回目ではちょうど適量基準の下限程度、そして 3 回目および 4 回目には適量基準を下回るという結果に終わった (図 3.18 (B))。また、樹勢の違いによる葉中含量は、有意差は見られなかったものの、1-3 回目までは一定して樹勢が強い木において高かったが、4 回目の計測においてという結果になった。

K は植物生理的に幅広い機能を持ち、それは光合成関連酵素や二次代謝産物生成酵素といった反応系から、細胞内の pH 調節や細胞の膨圧の適正化のような恒常性の維持、さらには代謝産物の輸送や気孔のコントロールなどといった植物体内における物質の動きにまで及ぶ (Alva et al., 2006)。よって、このような特に必須元素が適量基準を下回っているのは好ましくない事態だといえる。一方、K は葉の中に過剰に摂取されても、液胞によって貯められるという性質を持つことから、適量基準がこれを踏まえて大きな値に設定されていると仮定すれば、生理的な挙動に関しては問題が生じていないのは妥当と言える。

ここから、海外における先行研究を参考に柑橘葉に含まれる K 量を考察していく。各国の K 適量基準は、オーストラリアにおいて 0.9 - 1.2 % (Jorgensen and Prince, 1978)、ブラジルにおいては 1.0 % (Rodriguez and Gallo, 1961)、中国では 1.0 - 1.8 (Zhuang et al., 1985)、フランスでは 0.6 - 1.3 (Marchal et al.,

1978) といったようになっている。今回のカリウムの推移については 0.7 - 1.2 といったところなので、フランスの基準に照らし合わせれば適量となる。

次に、経時的モニタリングで減少している傾向について考察していく。今回計測の対象とした葉サンプルの葉齢は、展葉期とサンプル時期から逆算して（農山漁村文化協会編，2000a）、第1回目が0 - 2ヶ月、2回目は1 - 3ヶ月、3回目は2 - 4ヶ月、そして4回目が3 - 5ヶ月程度であると考えられる。Kは新しい組織の栄養成長に利用されることから、経時的な葉中K濃度の減少は、葉が一旦成長を止め、果実や種子といった別の組織に再分配されている様子を反映している可能性が示された。さらに、開花結実が5月下旬ぐらいであることを考慮すると、Kは果実優勢に供給されるということからも、成熟過程に入って葉からのKが果実へ転流している可能性が高い。

Sの経時的な変化は、初回の計測から2回目の計測において葉中含有量の増加が見られ、3回目の計測では再び低下するという傾向が示された（図3.28(A)）。この元素においては樹勢による差はあまり見られなかった。Sには適量基準がなかったため具体的な判断はできないが、国外において幾つかの適量基準についての報告がある。例えば、アメリカのカリフォルニアにおいて、葉齢3 - 7か月の葉における硫黄の適量基準は0.2 - 0.3%という研究結果があり（Chapman, 1949）、ブラジルにおける柑橘研究では、葉における硫黄の最適量は、2.0 - 3.0 g/kgだとされている（Quaggio and Canteralla, 1996）他、インドの研究グループからは0.34%が柑橘葉における硫黄の適量基準となるといった報告がなされている（Chahill et al., 1991）。

これらをふまえると、カリフォルニア州における適量基準で見れば1回目の計測（6/22）結果における樹勢の弱いとされる樹体の葉以外は適量範囲内に収まっており、逆に、インドでの適量基準に従うと全ての計測において欠乏という結果になる。

Pの葉における経時的な含量変化について見ていく。この元素では、全体的な含量の変化傾向に樹勢間で差が見られた。まず、樹勢が良いとされる樹体における葉では、ほぼ直線的な減少傾向を示したのに対し、樹勢の弱いとされる樹体の葉では2回目（7/26）の計測で一度P濃度が上昇し、3回目（8/28）に再び減少するという傾向を示した（図3.27(C)）。適量基準との比較では、3回の計測全てにおいて適量とされているP濃度を大きく下回っていることが示された。

P の植物生理的な役割には、ATP としてエネルギーを貯蓄することや、細胞壁や細胞膜におけるリン脂質の一部としての役割などが挙げられる。P が不足した柑橘樹体においては、暗い緑色で非常に面積の大きな葉が生成され、未成熟状態で落葉してしまうといった症状が見られる (Zambrosi et al., 2012)。今回サンプルとして利用した葉の条件は「新梢から発生している葉の先端側から 3 番目の葉」であることと、柑橘における新葉の展葉期はだいたい 4-6 月ということから、第 1 回、第 2 回、第 3 回の計測で用いられたサンプルの葉齢は、それぞれ 0-2 ヶ月、1-3 ヶ月、2-4 ヶ月となり、従来の適量基準が計測される葉齢 5-8 ヶ月よりもだいぶ若い葉だということがいえる。特に第 1 回目計測時点では、サンプリングした新芽はエネルギーを生成する役割よりはむしろ消費する側面の方が大きいとされている (農山漁村文化協会編, 2000b) ため、エネルギーである P 供給は大きくなると考えられるが、結果として濃度は低い値を取っていた。その一方で、P 欠乏時に見られる黒ずんだ葉や器官脱離なども見られなかったため、今回サンプリングした若い葉よりも、葉齢 5-8 ヶ月の最も光合成能が高いとされる葉の方が ATP 生成の場としての P 要求量が多いということが示唆された。

また、海外の葉内における P 適量基準を参照すると、0.1 - 0.2 % という広い範囲にわたっていたことから、P 存在量は若干少ないものの、生理障害を引き起こすほどでもないことも示唆された。

その他の微量元素では、Cu が 4 回目の計測において急増しているのが最も印象的であるが (図 3.28 (B))、微量元素の場合は、葉面に散布された農薬などによって値が大きくぶれることから、3 回目と 4 回目の間に農薬散布があったことが原因だと考えられる。その一方で、もう一つ特徴的な経時的変化傾向を示しているのが Si である。Si は植物における必須元素ではないものの、稲においては倒伏を防ぐための構造特性に寄与することや (Ma et al., 2001)、穀物を始めとする多くの作物において塩害などに対して細胞の膨張を促すことで NaCl 濃度を減少させ、根圧を正常に戻すといった形で耐性を付与すること (Ma, 2004; Alaghabary et al., 2005) や、リン酸欠乏時の植物体内におけるリン酸の効率的な利用 (Ma, 2004)、病原菌の侵入を防ぐための細胞壁強化 (Rodrigues et al., 2003) などが報告されている。柑橘に関しても、土壌への吸収可能なケイ素散布が、他の微量必須元素吸収を最適化するという報告が存在する (Matichenkov et al., 2001) ため、Si は柑橘の葉でも細胞骨格を変えるなどし

て、ミネラルの吸収等に寄与していることが考えられる。葉中濃度について考えるにあたり、Weber and Batchelor による、柑橘の葉に占めるケイ素は乾物重量あたり 0.04 - 0.2% という報告 (Weber and Batchelor., 1948) が手掛かりになる。本実験における計測結果は、おおよそ 0.02 - 0.1% となっているが、これは新鮮重量パーセント濃度のため、乾物重量%に直すと大体先行研究と同じ水準となる (図 3.19 (B))。よって、ケイ素は成熟度が進むにつれて、蓄積される量が増えることが示された。また、仮に P が欠乏していると仮定するならば、ケイ素が多く取り込まれることによって、少ないリン酸を効率よく使おうという生理的な反応が起きている可能性も示唆された。

### 3-3-1-2-3 すべてのデータにおける相関関係

みかん葉において取得した元素ならびに色素の定量データ間で、それぞれの要素同士の相関係数を算出した。表 3-9 に、相関係数の絶対値が 0.7 以上のものを示す。

はじめに樹勢弱群において多量元素、つまり K, Ca, P, S, Si が関わった組み合わせで相関が高かったものを見ていく。6月においては、P と S で 0.8 を超える相関を示したのに加えて、Mn と S や Mn と Ca で 0.7 を超える相関係数が算出された。この時期の葉は、栄養成長の途中であり、シンク器官としての光合成という役割を徐々に担い始める頃であるから、クロロフィル生成が活発であると考えられる。クロロフィル生成に必要な元素は、その骨格構造の素材となりうる C, N, O といった元素に加えて、グルタミン酸からピロールを経てクロロフィルが生合成される際に必要なクロロフィラーゼを始めとする種々の酵素タンパク質を構成するアミノ酸の基礎骨格元素となる S だと考えられる。また、これらに加えて、テトラピロールであるポルフィリン環の中心部で Mg のキレート化を促進する酵素である Mg ケラターゼは、ATP によってエネルギーを得て駆動することから、クロロフィル生成には P も不可欠であると言える(クロロフィルの生合成 1996 <[http://lifesciencedb.jp/dbsearch/Literature/get\\_pne\\_cgpdf.php?year=1996&number=4102&file=EjDCfotji492Pk8hjmIs7A==](http://lifesciencedb.jp/dbsearch/Literature/get_pne_cgpdf.php?year=1996&number=4102&file=EjDCfotji492Pk8hjmIs7A==>)>, 2018年2月12日参照)。また、先述したように Ca は葉の栄養成長時における構造形成に大きく関与しており、Mn は光化学系 II において、チラコイドとストロマの間で電位差を生じさせて、ATP を生成するのに必要な水素イオン生成反応に大きく関与している (Fischer et al., 2015)。

表 3-9 みかん葉における元素と色素の相関係数 (A) 樹勢強群 (B) 樹勢弱群

(A)			(B)						
6月	相関係数	7月	相関係数	8月	相関係数	9月	相関係数	10月	相関係数
P-Mn	-0.757448955 Si-K	0.700810167 P-NBI	-0.801093967 LE-K	-0.847437241 Mn-Si	0.8227919				
P-Fe	-0.720902351 P-Mn	-0.758166909 Chl-NBI	0.863622673 P-Ca	0.787583703 Cu-Si	-0.840074675				
LE-Fe	-0.868574117 Cu-Anth	0.900969657 Flav-NBI	-0.764480475 K-Ti	0.856490704 Si-S	0.71104543				
P-Ni	-0.70796047			Chl-NBI	0.868415019 Si-Ti	-0.711497785			
Chl-NBI	0.836604359				S-Ni	-0.767722248			
Flav-NBI	-0.716609169				S-Cu	-0.834266975			
					S-Flav	0.826493316			
					S-Flav	0.749431776			
					Flav-Anth	0.804330447			
					Flav-NBI	-0.790913843			
					Anth-NBI	-0.967390891			
6月	相関係数	7月	相関係数	8月	相関係数	9月	相関係数	10月	相関係数
P-S	0.807178016 Si-P	0.828843956 Si-S	0.764588809 Si-S	0.809358807 Chl-P	0.726268281				
Mn-S	0.720620927 S-Mn	0.768441291 K-Ca	-0.791654799 P-S	0.742965992 Si-Ca	0.817766233				
Mn-Ca	0.730152938 K-Zn	0.706637191 Chl-Anth	-0.869602522 Si-Ca	0.843068006 Ca-Zn	0.900858427				
Chl-Anth	-0.806030267 Anth-Flav	0.744089364 Chl-NBI	0.962328951 S-Ca	0.886009888 K-Chl	0.821922916				
Flav-Anth	0.734328441 Chl-Anth	-0.758740792 Flav-NBI	-0.73832459 S-Mo	0.728366257 Anth-Chl	-0.9335747				
Chl-NBI	0.939933137 Chl-NBI	0.877079733 Anth-NBI	-0.89264231 Anth-Chl	-0.959580719 Chl-Flav	-0.743200066				
Flav-NBI	-0.866818278 Flav-NBI	-0.779737803		Chl-Flav	-0.75569428 Flav-Anth	0.81935628			
Anth-NBI	-0.823674013 Anth-NBI	-0.877711792		Flav-Anth	0.764761598 K-NBI	0.7762724			
				Chl-NBI	0.969096884 Chl-NBI	0.976623551			
				Flav-NBI	-0.87776657 Flav-NBI	-0.86264058			
				Anth-NBI	-0.917685072 Anth-NBI	-0.936309759			

これらを踏まえて、この P-S 間の高相関は、新葉がクロロフィルを生成している、つまり栄養成長の途中であることを示している可能性が示唆された。Mn と S、および Mn と Ca についても、栄養成長が活発な葉において一貫して高いことが予想される元素であるため、これらの値に相関が見られることはつじつまが合っているとと言える。

ここから 7 月の結果に移る。7 月においても Mn と S の相関が高かったほか、6 月は 0.5 ほどの正の相関が存在した Si-P 間の相関が 0.8 を超えるほどに上昇した。また、K と Zn にも 0.7 程度の相関が見られた。この時期は、葉の光合成量が最大に達し、果樹全体が栄養成長、つまり光合成やその生成物を利用した二次代謝等を活動的に行っていると考えられる。Si は、必須元素ではないものの果樹において非常に重要な役割を持っており、その一部は P の吸収に関わっている。また、先に示したように、今回の圃場ではリンは欠乏とまではいかないもののあまり豊富ではないことから、Si をうまく取り込めた個体が P の吸収にも優れている様子を抽出した可能性が示唆された。Zn も光合成に関与しているという報告があるため、カリウムを多く含んだ、つまり反応場が準備されている葉で多く検出されている可能性はあるが、Zn 自体が微量なので誤差の範囲を超えない可能性も存在する。

続いて 8 月の結果である。8 月は、栄養成長から生殖成長への切り替わりが起り始める時期に該当し、それに伴い転流による糖の移動が新梢の生成から果実への蓄積へと目的を変える。これをもとに結果を見ると、まず K と Ca という最も葉における含有量が高い 2 元素間に 0.8 近い強さの負の相関が見られたことが非常に興味深い。これは、栄養成長から生殖成長へと切り替わった葉においては、K が葉から果実へと転流によって送られるために減少しているのに対して、栄養成長段階の葉は、K を葉に取り込み続けることを反映している可能性がある。これに対して、Ca は生殖成長に切り替わった葉においては果実への Ca 要求量が減少した分も葉に取り込まれている様子が示唆された。

最後に 9 月と 10 月、つまり完全に生殖生長への移行が終わり、葉は転流のための光合成を行う時期の結果に移る。この時期においても、K-Ca 間には 0.65 の負の相関が観察されたほか、8 月にも見られた Si-S 間の強い相関が継続して観察された。生殖成長期における Si の役割はあまり研究されていないが、S に関してはエチレン生成に関与しているという報告がある (Wawrzynska et al., 2015) ため、生殖成長に必要な S の吸収に Si が何かしらの役割を果たしている

可能性が示唆された。また、この Si と S に同調する動きを見せたのが Ca である。特に、Si と Ca の間に見られる強い正の相関関係は 9 月と 10 月を通じて観察された。Si と Ca は互いに細胞骨格の安定化に寄与する元素であるため、栄養成長がひと段落した葉においては、それらの含量に相関があることは植物生理学的につじつまが合う。

色素に関しては、実験系の確立の際に確認された Anth-Chl 間の負の相関がすべての生育ステージを通じて確認された。また、Anth-Flav 間においても生育ステージを通じて 0.6 - 0.8 ほどの正の相関が見られた。フラボノールとアントシアニンは、どちらもフラボノイドのカテゴリーに属しており、どちらもクロロフィルとの拮抗作用を持つことがこの結果からも認められた。

色素・元素間の相関については、10 月に見られた K とクロロフィル間の 0.8 程度の正の相関のみであった。これは、10 月という生育期間の終了した時期を考慮すると、葉組織におけるクロロフィルの分解が進んだ組織では、葉の光合成に必要な K が少ないということからも理にかなっていると言える。

次に、樹勢強群における結果である。まず主要元素についての結果を見ていくと、6 月においては P と Mn, Fe, Ni とがそれぞれ 0.7 程度の負の相関を示した。これらの相関のうち、P と Mn については 7 月も継続して確認されたため、特にここについて考察していく。この 2 元素は、樹勢弱群においては無相関あるいはどちらかといえば正の相関を示していたが、このような樹勢間の差が生じた要因として、栄養成長中の樹勢強群では葉の数が多いことが予想されるため、Mn のような微量元素は異なる葉間での存在量の差が大きくなることが 1 つ、また、P は新しい葉へと移動しやすい元素であるのに対し、Mn は植物体内での移動が遅い元素であることも 1 つではないかと考えられる。また、7 月においては Si-K 間にも 0.7 程度の正の相関が見られた。

8 月については、主要元素間での高い相関は見られず、9、10 月には、9 月に P と Ca で 0.78 の正の相関が、10 月には Si と S で 0.84 の負の相関が見られた。これらを考察するために、生殖成長期の葉における Ca および P の役割について今一度考えていく。まず Ca であるが、これらは樹体の中でも葉に多く存在する元素とされているため、生殖成長期においても葉への蓄積を続けていく。それに対して、P は最も成長が必要な器官に局在することが知られていることから、生殖成長期には葉だけではなく、果実においてもその二次代謝等への寄与が考えられる。このことから、9 月においても P 含量が高い葉は、比較的新し

い葉であることが予想され、それは同時に Ca があまり蓄積されていない葉である可能性が示唆された。このような関係が、その他の生育ステージでは確認されないことから、生殖成長期における葉と果実の関係の変化が Ca と P の関係に反映されている可能性が示唆された。また、10月の Si と S の関係は、樹勢弱群と同様に正の相関があったことも興味深い。10月は収穫が終わり、次の生育ステージに向けての準備期間が始まる季節であるが、柑橘のような常緑樹では、冬季においても若干ながら光合成を行うことが知られている。しかしながら生育期間と比較すると栄養分の要求量は少なくなるのが一般的である。よって、ここでも必須栄養素ではないケイ素が、栄養欠乏ストレスへの対処のために多く存在し、その存在が硫黄の吸収を助けている可能性が示された。

次に色素についてである。ここで最も重要な樹勢の差による特徴は、樹勢弱個体で計測されたアントシアニン-クロロフィル間の負の相関や、クロロフィル-フラボノール間の負の相関は、生育期間を通じて見られなかったことである。この事実も、実験系の確立を目指した時のデータと一貫しているため、再現性がある事象ということが確認できた。

最後に色素と元素の相関について見ていくと、8月に P と NBI の間で 0.8 の負の相関があるほか、10月においては Si や S とフラボノールが正の相関を示した。まず 8月の負の相関について考える。この負の相関は、葉内のクロロフィル量が多いほど、葉内の P 含量は減少することを示しているが、樹勢弱においては全くこの傾向は観察されていない。このことから、樹勢強の個体群では、樹勢弱の個体と比較して生殖成長への切り替えが進んでいない可能性が示唆された。

### 3-3-2 ブドウ葉の計測結果

#### 3-3-2-1 蛍光分光分析器を用いた色素量

図 3.20 に、クロロフィル値 (Chl)、フラボノール値 (Flav)、窒素指標値 (NBI)、アントシアニン値 (Anth) の経時的な変化をプロットしたグラフをそれぞれ示す。

まずクロロフィルの変化から見ていく。展葉期 (5/25) には、蛍光分光器の指標値でいうと 20-27 の間に収まった (図 3.20 (A))。一つ一つの区画ごとに整理すると、最もクロロフィルの値が高かったのが樹勢が弱いとされるメルロ



一品種であり、樹勢が強いとされるメルロー品種、樹勢が普通とされるメルロー品種、健全なシラー品種、そして病気のシラー品種が最も低いという結果になった。その後、同品種の樹勢の違いや、病気の有無によるクロロフィル蛍光の差は見られなかったものの、7/12 の計測以外では、メルロー品種とシラー品種という 2 品種間での違いが見られた。経時的なクロロフィル量の変化に関しては、全体的な傾向として、栄養成長期間とされる 5/25 から 7/27 までは上下しつつもだいたい値は一定だったのに対して、生殖成長への切り替えの開始期とされる 8/8 から 9/14 まで値は上昇傾向に移るという挙動を見せた。本来であれば、落葉樹は栄養成長期間の前半にクロロフィルを合成し、葉の成熟から栄養成長の終わりまではクロロフィルは一定の値をとる (Louis et al., 2009) ことや、先行研究によるブドウの時期ごとのクロロフィル量からも (Cerovic et al., 2015) この傾向は見出されていない。この原因として考えられるのが、サンプリング方式の違いである。今回の実験において、サンプルは基部の葉から行っていたため、サンプリング間隔と葉の展開の間隔に大きな開きがあることや、基部の葉なので、どうしても影になりやすいコンディションということも関係している可能性が示唆された。

続いて、葉中のフラボノール含量について見ていく。すべての品種に関して、展葉期 (5/25) から栄養成長の終わりの時期 (7/27) までの期間は時間が経つにつれてフラボノール蛍光値は増加傾向にある (図 3.20 (B))。その一方で、生殖成長期間においてはフラボノール値は一定もしくはやや減少という結果となった。この結果は、Cerovic らによる結果と一致しており、本実験で採用した蛍光分光装置の有効性が示されたと言える (Cerovic et al., 2015)。その次に、樹勢の違い (強・中・弱)、前年度の樹体コンディションの違い (健全・病気)、品種間の違い (メルロー・シラー) のによる影響の評価を行ったところ、いずれの差もフラボノール蛍光からは読み取ることはできなかった。フラボノールは UV を始めとするストレスに応答して生成される防御関連物質であるため (Mierziak et al., 2014)、樹勢の影響によりその値に変化があるはずだが、今回その差が認められなかったということは、当初は観察されていた樹勢の差が、栽培過程を通じてキャンセルされた可能性が示唆された。

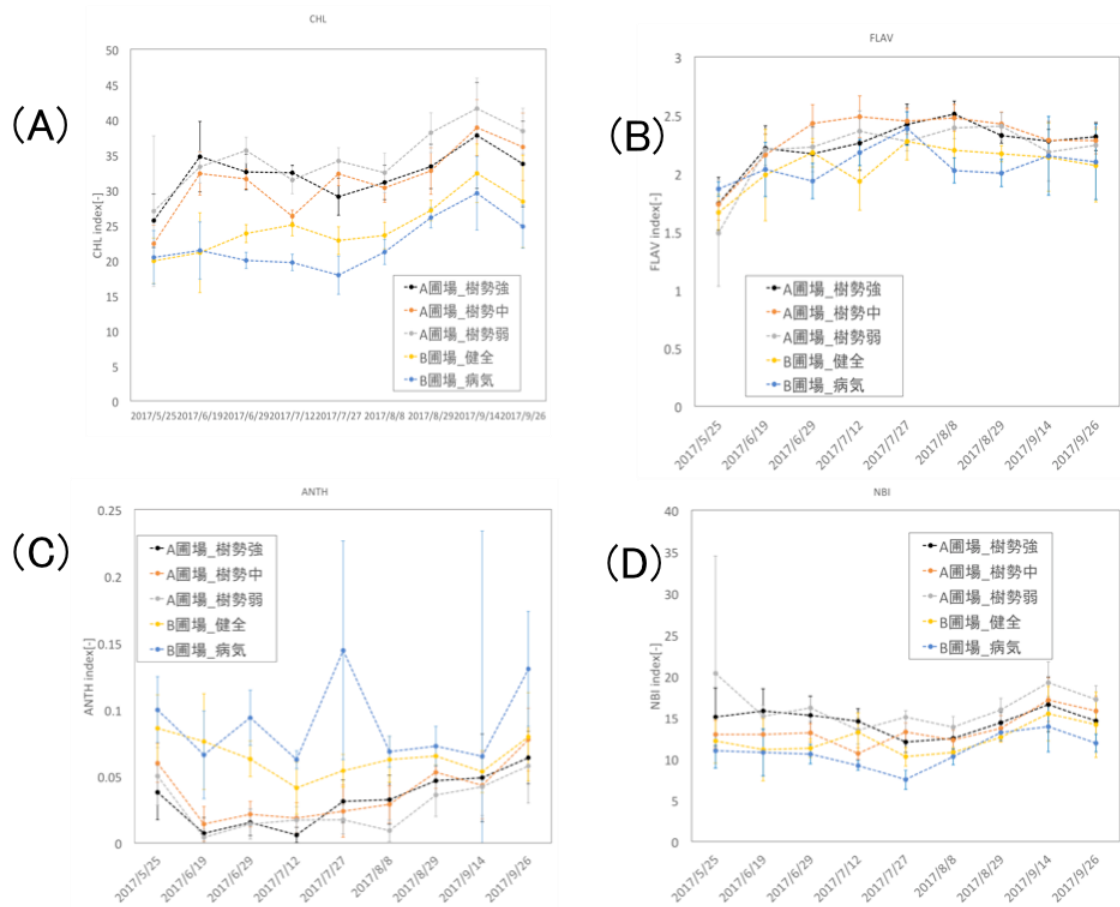


図 3.20 2017 年度におけるブドウ葉の色素分光データ。(A) クロロフィル値。(B) フラボノール値。(C) アントシアニン値。(D) NBI 値。

次がアントシアニン含量についてである。そもそもの量が小さいこともあり、値が持つ変化係数は非常に大きくなってしまい、有意差に関しては樹勢の違い・病気か健全か・メルロー品種かシラー品種かのいずれにおいても確認できなかったが、アントシアニン蛍光の大きい順で並べると、上位 2 つがシラー品種、下位 3 つがメルロー品種という順序性が 7 回の計測全てで見られたため、品種間における色素量の差は存在する可能性は残された (図 3.20 (C))。全体的な変動傾向について見ていくと、栄養成長期間中 (5/25~7/27) まではシラー品種の昨年度病気を発症していた個体群以外の 4 群において、アントシアニン量の減少傾向が読み取れた。その後、栄養成長に移るとともに、アントシアニン含量は増加していった。このことから、アントシアニンの量は、ブドウ樹体における生育ステージの切り替えを反映させている可能性が示唆された。

最後に NBI 値についてである。NBI 値は、全品種・条件のワイン用ブドウにおいて、展葉期(5/25)から始まって、果実肥大期 (7/27) までは若干減少傾向にあった (図 3.20 (D))。この値の変化に関しても、樹勢の違い・病気か健全か・メルロー品種かシラー品種かという違いによる有意差は確認できなかったものの、NBI 値を値の大きい順番に並べると、上位 3 つがメルロー品種、下位 2 つがシラー品種という順序性は 7 回の計測中に 5 回観察された。この値はクロロフィル値をフラボノール値で割ったものであるため、基本的にフラボノール量が一定だった結果を踏まえると、ほぼクロロフィルと同じ値を示すと考えられる。

### 3-3-2-2 可搬型蛍光 X 線分光器を用いた元素定量

図 3.21、図 3.22 に、Ca、K、S、P、Mn、Fe、Cu、Ni、Zn、Mo、Si の経時的变化を示したグラフをそれぞれ示す。この図 C には必須多量元素である K、Ca、P を、図 D にはその他の微量元素を示した。まず、葉中の Ca 含量は、最初の計測 (展葉期) ではシラー品種の健全区以外ではほぼ同様であったものの、2 回目 (6/19・開花期) の計測でメルロー品種の Ca 含量が飛躍的に上昇した一方で、シラー品種では若干の増加にとどまったため、この 2 品種間の差が大きく示された (図 3.21 (A))。その後 3 回の計測では、全ての試験区において適量基準 (静岡県土壤肥料ハンドブックを参考) を超えつつ、メルロー品種の樹勢強群、メルロー品種の樹勢弱群、メルロー品種の樹勢中群、シラー品種の健全群、シラー品種の病気群という順番だったが、8/8 (ヴェレゾン手前) のサンプルにおいて、メルロー品種の樹勢強群のみ Ca 含量の低下が見られた。カルシウ

ムは開花・結実期からヴェレゾン期までの間に最も吸収され、その大半は葉に蓄積されるという報告 (Conradie, 2017) から、今回の結果には信憑性があると言って良い。9/14 における、すべての圃場での Ca の急激な増加は、8/29 と 9/14 の間にボルドー液が散布されたことによる影響と考えられる。

また、一般的なカルシウムの植物生理学的な機能として、ヴェレゾン期における小花硬内のペクチンの再配向による水分抵抗の上昇 (Knipfer, 2015)、アブジン酸との協調による気孔開閉への関与 (Conn et al., 2011) 等が挙げられるが、これらの機構に十分なカルシウムイオン量を定量するには、葉のカルシウムイオンの定量が効果的である (Hocking, 2016) ことから、蛍光 X 線分光を用いた簡易な計測には重要な意義があることが示された。

次に K の変化を見ていく。Ca と同様に静岡県 of 土壌肥料ハンドブックの甲州ブドウの項目を参考に、適量基準を設定し計測を行ったところ、Ca で見られたような試験区間の差が小さいという結果だった (図 3.21 (B))。その中で、シラー品種における K 含量が常にメルロー品種より大きいという微弱な品種間の差異が見られた。また、どちらかという減少傾向にある上に、適量基準にも達していないという状況が続いていることから、カリウム吸収は不十分である可能性が示唆された。その一方で、カリウムは旧葉から新葉へと移動していく (Taiz and Zeiger, 2015) という報告があるため、旧葉から採取するという今回のサンプリング方法を考慮すれば、カリウムは新葉や果実へと輸送され、そこでの光合成やその他の栄養成長に関連する代謝を手助けしていることが考えられる。

先行研究によれば、カリウムはブドウの花芽分化や蕾の発生に寄与しているという報告 (Bhargava and sumner, 1987; Manivel, 1967; Srinivasan, 1968) や、主枝を始めとするシュート部分の成熟を促す (Winkler et al., 1974) ということが示されている。これらを踏まえて、ぶどう植物においては、葉のサンプル採取が可能となる時期よりも前の休眠期 (3 月下旬~4 月上旬) のカリウム吸収の方が顕著であることが考えられる。その後はヴェレゾン期までは、生育期間中の特定時期に葉中カリウムが急激に増加するといったことは見られないという今回の結果は、Conradie の先行研究における結果 (Conradie, 2017) と矛盾を生じない。

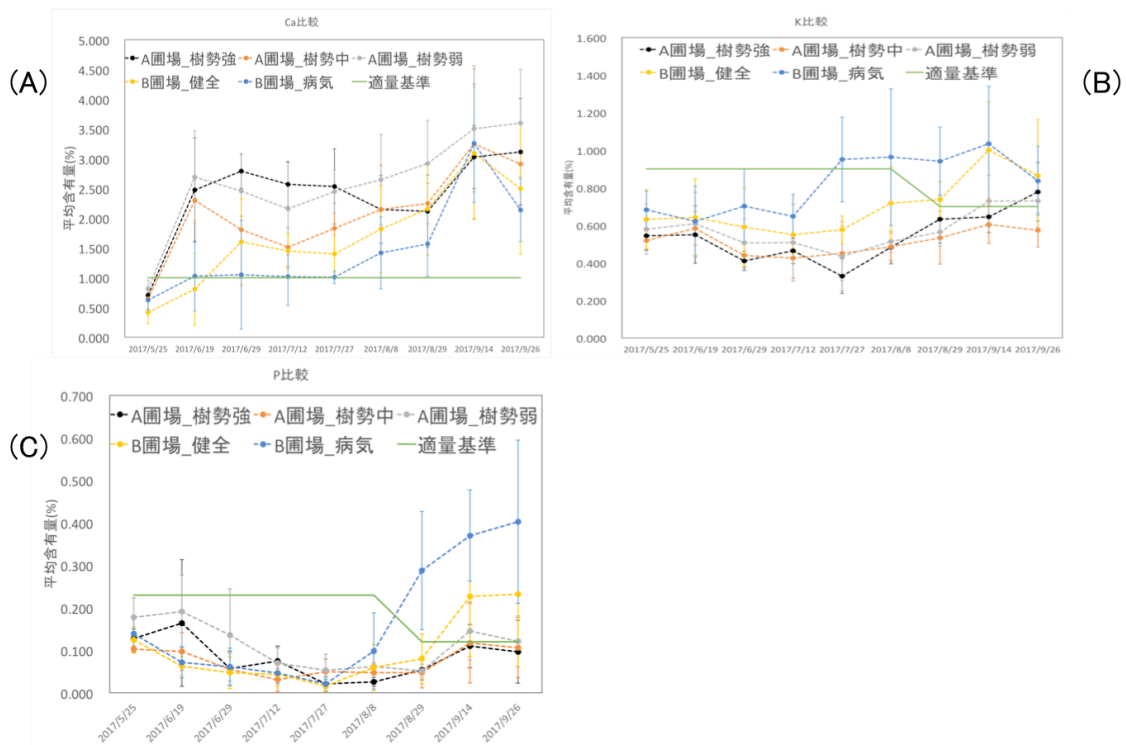


図 3.21 ワイン用ブドウの葉サンプルに存在する必須多量元素 (K, Ca, P) の経時変化グラフ。(A) カルシウム含量。(B) カリウム含量。(C) リン含量。

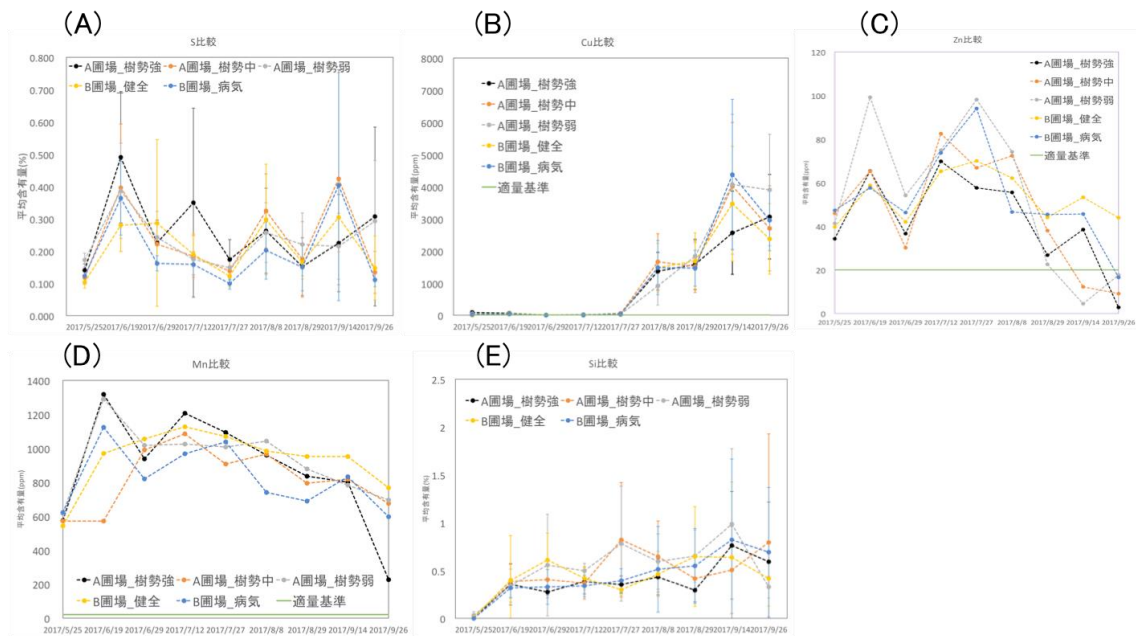


図 3.22 ワイン用ブドウの葉サンプルに存在する必須微量元素 (S, Cu, Zn, Mn, Si) の経時変化グラフ。(A) 硫黄含量。(B) 銅含量。(C) 亜鉛含量。(D) マンガン含量。(E) ケイ素含量。

また、カリウムの果実への寄与度の大きさを考慮すると、葉中のカリウム含量だけではカリウムの状態を断言できないことが示唆された。

S の経時的变化である。S についての全体的な傾向として、展葉して 2 週間後までは大きな上昇をみせたものの、そこから 7/27 の計測までは減少傾向となり、その後再び上昇するという経時変化を示した (図 3.22 (A))。次に樹勢の強弱および前年度の樹体状況という条件において、葉中 S 含量の差が見られるかどうかを見ていくと、毎回の計測で 5 群間での S 含量の順番は大きくばらついており、群による効果は見られなかった。次に、品種間における差の有無についてであるが、こちらも群による差と同様に認められなかった。

S に関する植物生理的な機能として、必須タンパク質であるシステインとしての働き、グルタチオンなどとしてのレドックス反応への寄与、光合成関連タンパク質としての働きなどが挙げられる (Davidian and Kopriva, 2010)。また、SO<sub>2</sub> には腐生菌や寄生菌を問わず高い抗カビ作用があることが知られている (Williams and Cooper, 2004)。その一方で、S の気孔による過剰摂取は葉内の硫酸濃度を高める結果となり、光合成阻害を起こすことも報告されている (Considine and Foyer, 2015)。ワイン用ブドウのみに言及するならば、チオールや SO<sub>2</sub> は多くのアロマやフレーバー関連物質の代謝に関与するという報告がある (Baumes, 2009) 一方で、高濃度の硫黄は、アルコール発酵過程で硫化水素の発生を伴うため、その結果ワインの品質を大きく低下させる結果となることが知られている (Kwasniewski et al., 2014)。

今回の結果から、生育期間において S は十分に存在していたため 7/27 まではやや減少傾向をたどり、その後、ボルドー液に含まれる S を気孔から取り入れて、減少していた分を補ったと考えられる。

P の経時変化は、次のように変化した。まず全体的な傾向として、最初の計測では基準値を若干下回る水準からスタートし、こちらも群ごとのブレこそあるものの、S と同様に 7/27 の計測までは減少し続けていた。その後、ヴェレゾンの開始期である 8/8 を境に、葉への P 含量は増加していった (図 3.21 (C))。先行研究において、開花期における P 含量が、収量や果樹の品質と大きく関わるとい報告 (Tecchio et al., 2007) があるため、開花期、つまり 6/19 のデータを見ると、適量基準には達していない。この結果を考察すると、1) 単純な栄養欠乏状態にある、2) 適量基準が海外のものであるため、圃場特性や品種の違いをカバーし切れていない、3) 葉の選定の関係上、古い葉から利用しているため、

P が新しい葉に送られている様子を反映、等の理由が考えられる。しかし、1) に関しては、8/8 から急に上昇していることを説明できないため棄却され、3) に関しても、7/27 における深刻な欠乏状態を説明できないので棄却される。これらをふまえると、2) を要因の一つと考えるのが最も妥当と言える。

続いて、樹勢の強弱並びに昨年度の樹体の健康状態による葉中 P 含量の差についてそれぞれ見ていくと、樹勢の違いによる P 含量の順序性は、計測ごとに一貫性がなかったことから、樹勢の強弱に起因する差は見られなかったと考えられる。また、前年度の健康状態をパラメータとして比較した群間では、昨年度病気だった樹体の葉において、ヴェレゾンの開始期である 8/8 からの P 含量の伸びが著しく、昨年度健全だった樹体の葉と大きな差がついた。品種の違いに起因する差についても、7/27 の計測まではほぼ同水準であったが、8/8 からの上昇具合に品種間の差が認められた。

その他の微量元素に関しては、やはりこちらでも Cu が上昇しているが (図 3.22 (B))、これはボルドー液に含まれる Cu 摂取なので、植物生理的なメカニズムによるものではない。それ以外では Zn が、5/25 の初回計測から 7/27 までの栄養成長期においては蓄積量を増加させていたのだが、その後は減少を続けている傾向が特徴的である。Zn は、基本的には導管を移動するイオンであるため (Welch, 1986)、8/8 以降も葉への蓄積が予想されたのだが、予想とは正反対の傾向を見せている (図 3.22 (C))。ここで興味深いことに、同じく導管を移動するグループに属している Mn においても Zn と同様の減少傾向を見せている (図 3.22 (D))。Zn の植物における機能は、主に酵素への活性を付与するリガンドの役割を、Mn は光化学系 II にて重要な役割をそれぞれになっているが (Grusak et al., 2016)、今回の結果を受けて、これら微量ミネラルは成熟から老化へと生育ステージが変わった葉では必要がない可能性が示唆された。

また、ブドウ葉においても、かなりの高い比率で Si が存在している (図 3.22 (E))。みかん葉の項目でも述べたように、Si の植物生理における役割として、P 欠乏時の吸収促進がある。今回の実験では、各圃場において P の欠乏が観察されたが、Si は計測開始から最終計測 (9/27) に至るまで常に上昇をし続けているため、この細胞壁に蓄えられた Si がある閾値に達して飽和し、遊離することで、根による P 吸収に何かしらの影響を及ぼしている可能性が示唆された。

### 3-3-2-3 すべてのデータにおける相関関係

ここからは、ブドウ葉において相関係数が高かった主要元素および色素蛍光

値について、生育ステージごとに考察していく。表 3-10, 3-11, 3-12, 3-13 に、それぞれの生育ステージで 0.7 以上の相関係数を示した組み合わせを示す。まず、栄養成長の初期である展葉期に関して見ていくと、まずメルロー品種においては、樹勢強群においては、P-S, P-Chl, Chl-Ca などに正の相関があり、K-Ca, Chl-Anth, S-Si などに負の相関が見られた。樹勢中群においては、Chl-Ca, Flav-Ca, Flav-S などに正の相関が、Chl-Anth などに負の相関が見られた。樹勢弱群では P-S に正の相関、K-Ca, Anth-Ca 等に負の相関が検出された。次にシラー品種の健全区について見ていくと、K-P, P-S に正の相関が、Anth-Chl, Flav-S に負の相関が見られた。病気群は、K-P, P-S に正の相関が、Anth-Chl, Flav-S に負の相関がそれぞれ検出された（表 3-10）。

次に、開花から果実肥大期までについての元素・色素間の相関について見ていく。樹勢強群においては、この期間中の 4 回の計測中、3 回で Anth-Chl に負の相関が見られたほか、2 回の計測において Ca-P, S-Ca で正の相関、P-K で負の相関が検出された。樹勢中群では、4 回の計測中 3 回で P-Chl の正の相関、2 回で Chl-Ca, Ca-P の正の相関を示した。その他に興味深かったのが、7/14 の光合成が最も活発だと考えられる時期には Ca-K 間に正の相関が検出された一方で、その 2 週間後の 7/28 には、この相関が強い負の相関に変化していたことである。樹勢弱群では、4 回の計測全てで Anth-Si に正の相関が検出されたのははじめとして、2 回で P-Ca, Chl-Si に正の相関が見られた。ここからはシラー品種の結果に移る。まず健全群では、4 回の計測中 3 回で Anth-Si の相関が検出されたものの、正と負が交互に逆転していた。その他に、Chl-Ca, S-Chl, NBI-S で 2 回の正の相関が、Anth-Ca, Chl-Anth で 2 回の負の相関が確認された。最後に病気群であるが、この群は一貫した相関傾向を示したものよりも、その計測時で相関の正負が変化するものが多数あった。Anth-P では開花初期とその 2 週間後は正の相関を示した一方で、最も光合成が盛んとされる時期には負の相関へと変化しており、それと全く逆の関係が Chl-P 間に検出されていた。



表 3-10 展葉期における高相関の組み合わせ

	5/25樹勢強	相関係数	5/25樹勢中	相関係数	5/25樹勢弱	相関係数	5/25健全	相関係数	5/25病気	相関係数
NBI-Chl	0.85214785	4Anth-Chl	-0.90040654	4Flav-Anth	-0.91631894	4Anth-Chl	-0.92546843	4Anth-Chl	-0.92546843	
P-Chl	0.76534887	5NBI-Chl	0.81910997	2Chl-NBI	0.73794422	1NBI-Anth	-0.93532375	2NBI-Anth	-0.93532375	
NBI-Flav	-0.74007092	7Anth-NBI	-0.82482999	8P-S	0.82050098	5K-P	0.81162204	Anth-NBI	-0.93532375	
Chl-Anth	-0.94369464	7NBI-P	0.78024613	Ca-K	-0.83884630	7Flav-S	-0.71402623	8K-P	0.81162204	
NBI-Anth	-0.91014330	4Flav-S	0.75235608	9Anth-Ca	-0.88757476	8P-S	0.80000221	4Flav-S	-0.71402623	
P-NBI	0.70827769	5Chl-Ca	0.82618502	9				P-S	0.80000221	
NBI-Si	-0.72367875	4Flav-Ca	0.79807912	9					4	
S-Si	-0.97318825	5S-Ca	0.70944023	9						
P-S	0.81009197	7								
Chl-K	-0.70144319	2								
Chl-Ca	0.90189816	1								
Anth-Ca	-0.79446213	9								
K-Ca	-0.87272987	7								

表 3-11 栄養成長期における高相関の組み合わせ

6/20樹勢強	相関係数	6/20樹勢中	相関係数	6/20樹勢弱	相関係数	6/20健全	相関係数	6/20病気	相関係数
Anth-Chl	-0.890317329	P-Chl	0.86657092	S-NBI	0.847442475	Chl-Anth	-0.814018261	P-Flav	0.733306572
Ca-P	0.865344966			Anth-Si	0.860265017	Chl-Ca	0.973752077	Ca-Flav	-0.934380767
S-Ca	0.95587123			P-Ca	0.826050842	Anth-Ca	-0.703935594	Si-Anth	-0.82327316
								Ca-Anth	-0.830262068
								Chl-Si	0.841829209
								Anth-P	0.854337664
								NBI-P	-0.906615952
								Si-K	-0.747390338
								Chl-Ca	0.760625877
								K-Ca	-0.787468978
6/30樹勢強	相関係数	6/30樹勢中	相関係数	6/30樹勢弱	相関係数	6/30健全	相関係数	6/30病気	相関係数
S-Flav	-0.758180027	P-Chl	0.915934753	Si-Chl	0.791766624	S-Chl	0.775137877	Anth-Chl	-0.982186121
Chl-Anth	-0.977544214	Chl-Ca	0.807960333	Anth-Si	0.867418619	Anth-Flav	-0.890518683	P-Chl	-0.913739168
Chl-Ca	-0.732257575	P-Ca	0.937078079	P-Ca	0.882118951	NBI-Flav	-0.827200383	Si-Anth	0.818410646
S-Ca	0.768922837					Anth-Si	-0.793195292	P-NBI	-0.806407413
								Chl-Si	-0.720265098
								Anth-P	0.952086783
								Si-Ca	0.852674202
								K-Ca	-0.881000865
7/14樹勢強	相関係数	7/14樹勢中	相関係数	7/14樹勢弱	相関係数	7/14健全	相関係数	7/14病気	相関係数
S-Flav	-0.800069516	Chl-P	0.961311374	Anth-Si	0.783510754	S-Chl	0.907678862	Anth-Chl	-0.982186121
Chl-Anth	-0.977544214	Ca-P	0.84749273			Anth-Flav	-0.890518683	P-Chl	0.764697151
P-K	-0.707349089	Ca-K	0.847495666			NBI-Flav	-0.827200383	Ca-Chl	0.789708365
Chl-Ca	0.939581326	Chl-Ca	0.8133294778			Anth-Si	0.714899125	Anth-P	-0.868731224
P-Ca	0.804077062					NBI-S	0.85723675	Anth-Ca	-0.733170371
7/28樹勢強	相関係数	7/28樹勢中	相関係数	7/28樹勢弱	相関係数	7/28健全	相関係数	7/28樹勢強	相関係数
P-K	-0.756514149	K-Ca	-0.908321048	Si-Chl	0.707900291	Anth-Chl	-0.849081277	Flav-P	0.7855266802
				Anth-Si	0.727469203	NBI-Flav	-0.705715069	Si-K	-0.965398503
						S-Flav	-0.981265644	Ca-K	-0.951331704
						Anth-Si	-0.89382064	Flav-Ca	0.767065961
						NBI-S	0.703196469	Si-Ca	0.964333673
						Chl-Ca	0.908938155		
						Anth-Ca	-0.712732215		

表 3-12 ヴェレゾン期における高相関の組み合わせ

8/28樹勢強	相関係数	8/28樹勢中	相関係数	8/28樹勢弱	相関係数	8/28健全	相関係数	8/28病気	相関係数
NBI-Chl	0.950213083	NBI-Chl	0.956863164	Ca-Flav	0.873660229	K-Chl	-0.9049348	K-Chl	-0.8102949
Si-P	-0.752059587	S-Chl	0.792816189	Flav-Anth	0.802355189	Ca-Chl	0.919014736	Chl-Flav	0.795034231
Chl-K	0.980718435	Anth-Flav	0.774290373	Chl-NBI	0.96668196	Ca-Anth	-0.80210368	P-Si	0.914661503
NBI-K	0.883291786	NBI-Flav	-0.782156754	Flav-NBI	-0.719286864	Anth-NBI	-0.93256112	S-Si	0.933308933
S-Ca	0.905646917	Ca-Flav	-0.719949412	Flav-S	0.766906422	Anth-Si	0.753909728	S-P	0.879899447
K-Ca	0.74966356	Chl-Anth	-0.816514323	NBI-S	-0.711673407	NBI-Si	-0.887323508	K-P	-0.717376421
		Anth-NBI	-0.90515362	Flav-K	-0.704905618	S-P	0.803992741	Si-K	-0.72998662
		Si-NBI	-0.807973762			NBI-Ca	0.769026504	S-K	-0.826641831
		K-NBI	0.78324134			K-Ca	-0.703242248	Chl-Ca	0.903146113
		Chl-Si	-0.741379986					Flav-Ca	0.719108786
		Anth-Si	0.952007271					K-Ca	-0.841813373
		Si-P	-0.702081845						
		Chl-K	0.874992459						

表 3-13 生殖成長期における高相関の組み合わせ

9/14樹勢強	相関係数	9/14樹勢中	相関係数	9/14樹勢弱	相関係数	9/14健全	相関係数	9/14病気	相関係数
Anth-Chl	-0.711348643	Ca-Chl	0.81755016	Si-Chl	0.77388569	Ca-Chl	0.825039934	Anth-Chl	-0.935103384
Chl-Anth	-0.711348643	NBI-Flav	-0.856005007	P-Chl	0.986901133	S-Flav	0.866641409	Ca-Chl	0.958123315
NBI-Anth	-0.713432104	Chl-NBI	0.96048623	Ca-Flav	0.875720174	S-Anth	0.708878473	Chl-Flav	0.89820968
K-Anth	-0.702015956	P-Si	0.904788584	Chl-Anth	-0.94625012	Flav-NBI	-0.880025793	Flav-Anth	-0.777798522
Flav-Si	0.828544241	S-Si	0.711907419	Anth-NBI	-0.77042392	Anth-NBI	-0.702670724	Ca-Anth	-0.946204959
K-Si	0.714375915	K-Si	-0.908326436	S-NBI	-0.863144875	NBI-P	0.840077051	NBI-P	-0.864851432
Chl-P	-0.764371975	Ca-P	0.926487646	Anth-P	-0.947988129	NBI-S	-0.746210518	K-P	0.977070978
NBI-P	-0.798722982	Chl-S	0.822046841	Si-P	0.736826169	K-S	-0.907217696	Flav-S	0.709758068
Anth-K	-0.702015956	NBI-S	0.752170413	S-P	-0.882970886	Flav-K	-0.97184237	NBI-K	-0.882653145
S-Ca	0.863294789	P-S	0.901416009	Chl-S	-0.92643776			S-K	0.760474067
		K-S	-0.904155918	Anth-S	0.956751719			Flav-Ca	0.925596902
		Si-Ca	0.791868532	NBI-K	0.755624829				
		S-Ca	0.97096995						
		K-Ca	-0.958235911						
9/30樹勢強	相関係数	9/30樹勢中	相関係数	9/30樹勢弱	相関係数	9/30健全	相関係数	9/30病気	相関係数
NBI-Chl	0.973288972	NBI-Chl	0.981161502	Flav-Chl	0.819115796	Anth-Chl	-0.850762796	Flav-Chl	0.925070808
S-K	-0.868789398	Ca-Chl	0.852912096	Ca-Chl	0.830518909	NBI-Chl	0.795146715	Anth-Chl	-0.829423656
K-Ca	-0.714810297	Chl-Flav	0.782084798	Flav-Anth	-0.834740649	Si-Chl	0.843377572	Anth-Flav	-0.845663725
		Ca-Flav	0.754542795	Flav-P	0.802605402	K-Chl	-0.785451168	Si-Flav	0.877104523
		Ca-NBI	0.810592197	NBI-P	-0.717163419		-0.77510621	K-Anth	-0.844749167
		Anth-S	0.756484743	Flav-K	-0.922167445	Anth-NBI	-0.751542532	S-NBI	0.819076801
		NBI-S	-0.768772553	P-K	-0.881807443	NBI-Si	0.852723269	K-NBI	-0.767171759
		NBI-K	0.722398624	Anth-Ca	-0.734881501	Ca-Si	0.88845055	Anth-Si	-0.715930882
		S-K	-0.724722404			NBI-P	0.727868045	NBI-Si	-0.827837643
						Si-S	0.784715263	Anth-P	-0.960182625
						K-S	-0.923934168	Flav-K	0.734140154
						Ca-S	0.971244632	Si-K	0.800507139
						Anth-K	0.79269951	P-K	0.796504064
						Chl-Ca	0.808207636	S-K	-0.743616711
						NBI-Ca	0.782925551	Ca-K	-0.82569678
						K-Ca	-0.897599763	S-Ca	0.935664803

その他にも、Anth-Si, Chl-Si において、生育期間中に正から負への変化が、Ca-Flav においては負から正への変化がそれぞれ見られた。常に一貫した変化を見せた組み合わせとしては、P-Flav, Ca-Chl, Si-Ca では正の相関が、P-NBI, Si-K, Ca-Anth, Anth-Chl, Ca-K では負の相関が検出された（表 3-11）。

続いて、ヴェレゾン期におけるメルロー品種での相関について見ていく。まず樹勢強群では、K-Chl, S-Ca, K-Ca 間で正の相関が、Si-P 間で負の相関が検出された。樹勢中群では、K-Chl, Anth-Si, S-Chl 等で正の相関が、Chl-Si, Anth-Chl, P-Si 等で負の相関が見られた。樹勢弱群では、Flav-S, Flav-Ca 等で正の相関が、Flav-K, NBI-S 等で負の相関が見られた。ここからシラー品種の結果に移る。健全群においては、Ca-Chl, Anth-Si, S-P 等で正の相関が見られた一方で、K-Chl, Ca-Anth, Ca-K で負の相関が見られた。病気群では、P,S,Si が高い正の相関を示したのに対して、K がそれらとは正反対の動きを示していたのが特徴的であった。これらに加えて K-Ca にも負の相関が見られた（表 3-12）。

最後に生殖成長、つまり果実の成熟段階における元素・色素間の相関を見ていく。まず、メルロー品種の樹勢強についてであるが、この時期の 2 回の計測で共通した相関の高い組み合わせは存在しなかった。樹勢中群では、Ca-Chl で 2 回の計測に共通して正の相関が、S-K で負の相関が認められたことに加え、NBI-S では 1 回目の計測では正の相関を示した一方で、2 回目の計測では負の相関という変化が認められた。樹勢弱群では、2 回の計測で共通した相関の高い組み合わせは存在しなかった。ここからシラー品種の結果に移る。まず健全区では、2 回の計測で共に高相関を示した組み合わせは、NBI-P が正の相関を、K-S が負の相関をそれぞれ示した。最後に病気群では、この時期の 2 回の計測で Flav-Chl は 2 回とも正の相関を示し、Anth-Chl, Flav-Anth, NBI-K は 2 回とも負の相関を示した。S-K については 1 回目は正の相関だったが、2 回目は負の相関に変化していた（表 3-13）。

## 3-4 結論

### 3-4-1 本章のまとめ

本章の目的は、前章で行った圃場での生育環境計測・二次栽培指標と合わせて、実際の樹体情報を圃場でリアルタイムに定量する手法の有効性を評価することであった。

本実験においては、果樹の健康状態を診断するために、樹勢をその樹木の状態を反映する指標として設定し、その樹勢間差をマルチバンド光センシングによる色素・元素定量値で評価できるかを検討した。その結果、みかん樹体においては、樹勢をパラメータに置いた群間において、色素、元素ともに樹勢を反映していると思われる結果が認められた一方で、ワイン用ブドウ樹体では、樹勢の差に起因する色素および元素量の差は認められなかった。

この違いを考える時に、常緑樹と落葉樹の違いということが役に立つ。常緑樹では、果実の生育期間が終わった冬の間も、樹体は葉に残り光合成を続けているのに対して（農山漁村文化協会編，2000b）、落葉樹では、果実の収穫が終わった後、一月ほど光合成をした後に全て落葉して休眠期間に移る。本実験において、樹勢とは旺盛な栄養成長と定義できるので、樹勢が良い樹木において光合成が活発なのは言うまでもない。みかん樹体において、冬場の光合成が活発だった樹体は、生育期間に入る頃にはすでに栄養分を豊富に蓄えているために、その年は樹勢を緩めて果実生成が充実するという2年周期のサイクルで回っていることから（農山漁村文化協会編，2000b）、樹勢の差が如実に反映されると考えられる。

これに対して落葉樹では、冬場は休眠期間に入り、根による栄養吸収やエネルギーの生産はほとんどないと考えられるので、土壌や微気象、病原微生物のコンディション次第で樹勢はいかようにも変化する。よって、サンプリングの時期には樹勢が良いとされた個体も、その後の環境次第で樹勢は弱くなることもあり、逆の変化もまた然りである。

### 3-4-2 本章の課題

今後の展望として、まず1つ目に葉画像データの解析があげられる。色素や元素といった植物体内部の情報に外観情報を加えることで、隔年結果などを未然に防ぐ品質の安定した果実生産に寄与する定量指標の構築が期待される。そしてもう一つは機械学習である。今回の実験で得たような樹体関連のデータを大量に蓄積し、人間には判断できない情報を機械学習を用いて抽出し、実際の栽培に生かしていくことが次のステップだと考えられる。また、これらの項目を次年度の研究に生かしていくような実験区の設定ならびにサンプリング手法の確立も来年の課題となる。これらに加えて、樹勢の強弱と最終産物である果実の品質間の関係性についてもわかっていないことから、果実の品質計測にも

着手する必要がある。

このような課題を克服し、最も樹体の栄養状況および果実品質を反映している葉における健康指標を、現場で取得した元素および色素データから構築することで、2章で述べた圃場生育環境データから算出した二次栽培指標のパラメータチューニングに役立てることが可能となる。

さらに、本章で取り扱った葉データが、圃場生育環境データとは独立した果実品質・樹勢決定因子であった場合には、これらのデータを複合的に捉えたまったく新しい三次栽培指標の確立も求められる。このような指標は、二次栽培指標と比較して精度が上がるが見込まれる一方で、より複雑な関係性を表現する必要があるため、各圃場において1年に1回のデータ収集が非常に大きな意味を持つ。また蓄積したデータを機械学習によって解釈することも、このような複雑事象を理解する際には不可欠だと考えられる。

## 4 章 光分析手法を用いた

### レタス品質・鮮度指標の確立

#### 4-1 背景

##### 4-1-1 研究背景

2 章、3 章において、フードシステムの「栽培・生産」サブシステムにおける出力となる「品質」の最適化を目指す研究を、みかん、ワイン用ブドウをそれぞれ対象に行ってきた。そこでは、1) ビッグデータ化を促し、各栽培圃場の地域性を特徴量として抽出するためのフードシステム IoT クラウド、2) 生育環境情報を洗練させた二次栽培指標、3) 樹体情報の光センシングによる計測手法およびそのデータを用いた樹体健康指標、という 3 点のフードシステム最適化への有効性を検証するための基礎的研究をそれぞれ行った。

そこで本章では、「栽培・生産」から「消費」までの過程における「品質」を管理し、その最適化を目指す「保蔵」サブシステムに着目し、その最適化および改善の際に役立つ「品質指標」の有効性検証を目指して基礎的な研究を行った。研究対象には、1 章でその保蔵の重要性について説明したレタスを、計測手法には 3 章でその有効性を確認した光センシングをそれぞれ用いた。

##### 4-1-2 レタスの実用性

レタス、またそのカット野菜としての実用性について説明する。わが国の野菜の需要の現状について、家計消費における昭和 60 年と比較した平成 23 年の生鮮野菜購入金額は 17%減少しているが、サラダ購入金額は 91%の増加を示している(総務省統計局,家計調査, <<http://www.stat.go.jp/data/kakei/>>, 2018 年 2 月 12 日参照)(岐阜県農産物流通課(2011),平成 23 年度農産物購入に関するアンケート調査集計結果, <<https://www.pref.gifu.lg.jp/kensei/koho-kocho/iken-teian/11103/monitor-anketo.data/nousanbutsukounyuu-syuusei120201.pdf>>, 2018 年 2 月 12 日参照)。野菜需要においては加工・業務用需要の割合が増加しており、平成 23 年には約 56%近くを占めるに至っている。この加工・業



務用野菜の中でも、近年注目を集めているのがカット野菜である。元来、カット野菜は生鮮野菜の価格が高くなった時に需要が高まっていたが、昨今では、生鮮野菜の価格が安くなった時も恒常的に販売数量が伸びている。更には、外食産業にも人員削減やロスの削減のためにカット野菜の使用が増加している。そのような需要の高まりに対し、カット野菜の加工業者では原料野菜の調達先を複数にしていることが多く、原料の採用基準を生食用ほど厳しくしていない業者数は生食用と同じにしている業者数を上回っている（独立行政法人 農畜産業振興機構(2012),平成 24 年度カット野菜需要構造実態調査事業, <<http://www.alic.go.jp/content/000091984.pdf>>, 2018 年 2 月 12 日参照)。これらに加えて、年中栽培が可能であることから、1 年を通じて保蔵劣化実験を実施できるという点からも、本研究対象としてレタスを選抜した。

### 4-1-3 レタスの品質・鮮度とは

#### 4-1-3-1 付加価値品質としてのレタス鮮度について

野菜における付加価値品質として最も重視される項目として「鮮度」という概念が存在する。一般的にもよく使用される言葉であるが、現状では野菜の鮮度そのものの定義や評価法は定められていない。野菜は利用される植物器官や生育ステージが多様で、それぞれの野菜に含まれる成分も大きく異なる。そのため、野菜を一概に「鮮度」という言葉で定義することは難しく、全ての野菜に適用可能で、数値化が可能な評価基準は存在していないとされている（農研機構(2013), 野菜のおいしさの分析技術 研修テキスト(<[http://www.naro.affrc.go.jp/training/files/reformation\\_txt2011\\_c34.pdf](http://www.naro.affrc.go.jp/training/files/reformation_txt2011_c34.pdf)>, 2018 年 2 月 12 日参照))。

まずレタスにおいて特筆すべき点は、その水分含量の高さであり、重量パーセント濃度で 95%に上る。そのため、「鮮度」を規定する際に、レタス内の水分含量が非常に重要になると考えうる。ある先行研究では、単純なレタス重量に対する水分含量を計測するよりも、そのレタス細胞が含むことの可能な水分量に対してどれだけの水分量を含んでいるかを計測することが、レタスの重要な特徴であるクリस्पネス（シャキシャキ感）の官能検査の値とマッチするという報告もある（Agüero et al., 2008）。

次に、その他の物質について考えていく。葉野菜とは、その名の通り植物体

の葉を可食部とする野菜のことで、レタス以外にはキャベツ、白菜、ほうれん草などが葉野菜の代表とされる。植物生理学的に考えれば、葉は植物の代表的なソース器官であり、酵素、フェノール、クロロフィルやカロテノイドといった色素タンパク質、脂質、糖、酸、ビタミン、ミネラルなどの様々な物質を含んでいる。レタスも例外ではなく、これらの物質が豊富に含まれるほど、レタスは栄養成分が高いといえる。

#### 4-1-3-2 レタスの安全品質と微生物

人体の健康という観点に立つと、野菜に感染する病原体は、1) 野菜の組織を栄養源として繁殖し、野菜に腐敗を起こすタイプ（植物病原体）、2) 野菜に腐敗は起こさないまでも、野菜の代謝経路から栄養を得て増殖し、それを食べた人間に食中毒のような害を及ぼすタイプ（ヒト病原体）の2種類に分類できる。安全品質において懸念されるのは、後者の病原体による影響である。野菜全般にも言えることであるが、レタスにおいても、収穫後はこれらの微生物やウイルスに対するリスクにさらされることになる。まず「栽培・生産」サブプロセスにおいて、具体的にはレタスの収穫のタイミングで茎の切断面と土壌が近づいた際に、ヒト病原体の代表的な存在である病原性大腸菌 O-157 を始めとする植物媒介性のヒト病原体がレタス植物内に侵入するということがある（Taormina et al., 2009）。また、「保蔵」サブプロセスでも、保蔵中にレタス葉の気孔からやはりヒト病原体であるサルモネラ菌が侵入する可能性が報告されている（Kroupitski et al., 2009）。

これらのリスクに対応するために、「保蔵」サブプロセスにおいては、1) 予冷による微生物活性の低下、2) 表面の洗浄、3) 塩素やオゾンによる殺菌、などが行われている（Sinha et al., 2010, p.169）。また、「栽培・生産」サブプロセスにおいて、人間に無害な土壌微生物群がレタス組織に侵入することで、O-157 に対して拮抗作用を持つ酸や抗菌性ペプチドを生成し、レタスの抵抗性を高めているという先行研究も存在する（Johnston et al., 2009）。

このように、安全品質の定量は重要なながらも非常に複雑であるため、フードシステムを通じて共通の品質指標およびその定量手法が求められている。

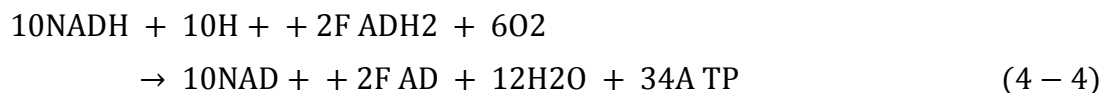
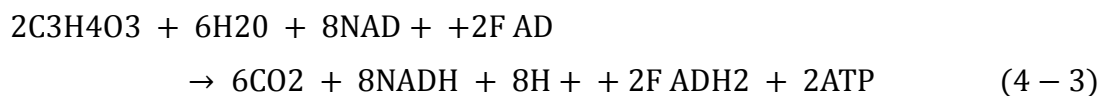
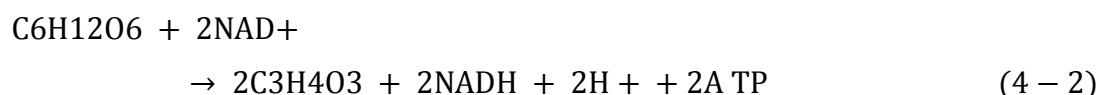
#### 4-1-3-3 レタスの品質低下について

一般的に野菜の品質低下は、1) 呼吸作用、2) 蒸散作用、3) 微生物作用の3つの要因によって進行する（大久保, 1982）。レタスもこの例に外れず、レタス

の保蔵研究では常にこれらを意識した取り組みが行われてきた。呼吸作用とは、基本的には糖や有機酸を基質としてそれを酸化させることで生成されるエネルギーを獲得する生理機能で、ミトコンドリアで行われることからミトコンドリア呼吸とも呼ばれることがある。以下の呼吸における化学反応式を示す(式 4-1)。



さらに、この呼吸過程も、1) 解糖系、2) クエン酸回路、3) 電子伝達系と酸化的リン酸化、という3つの過程に分けられ、それぞれ式 4-2、4-3、4-4 で表現される。



この反応は植物においても一般的に行われている。しかしながら、収穫後作物においては、炭素同化のための光合成能が著しく低下している上に、根系からの栄養供給もない状況に陥ることで、絶対的に糖および有機酸が欠乏してしまう。そこで、植物は体内に存在するたんぱく質、脂質、核酸、多糖類などの、生体構成分子を基質として分解することでエネルギーを得ようとするため、植物の組織は軟化していく。この時の反応は発熱反応であるため、植物内の呼吸活性はさらに上昇し、植物体の破壊は進んでいく(漆崎, 1988)。呼吸による基質の減少は、反応性の高い活性酸素やフリーラジカルなどの生成を促すことも問題となる。これらは、細胞膜を構成するホスファチジルコリンなどのリン脂質の分解を通じて細胞構造を破壊し、結果的に細胞死を引き起こす要因となる(Bartz et al., 2002, p.90) ことに加え、活性酸素除去酵素を生成する小胞体の

破壊を促し、それに伴い酸化酵素が多く生成されることが報告されている(Todd et al, 1990, 1992; Bartz et al., 2002, p.92)。

蒸散作用とは、植物が根系から栄養分を地上部へと輸送するために、水が蒸発する時のエネルギーを駆動力として用いる仕組みのことを指す。収穫後作物においては、根系から分離してしまっているため、新たな水分を得ることができない。それに加えて、呼吸に伴う発熱により、水分の蒸発も加速されてしまい、結果的に重量の減少や収縮・萎凋することで食味を大きく損なう (Bartz et al., 2002)。

特に葉野菜においては、一般的に収穫後の水分消失で最も大きい割合を占めるのが蒸散作用であると言われており (Ben-Yehoshua, 1983; Bartz et al., 2002)、蒸散作用はフィックの法則を用いて以下の式のように表現される。

$$J = (P_i - P_a)A_t / (RT)r \quad (4-5)$$

ここで、 $P_i$ (Pressures in the intercellular spaces)は植物体内における水蒸気圧、 $P_a$ (Pressures in the ambient atmosphere)は植物と接する大気における水蒸気圧、 $A_t$ は植物の表面積、 $R$ は気体定数、 $T$ が絶対温度、 $r$ が抵抗、そして $J$ が気体のフラックスを示している。この式から、蒸散フラックスは大気-植物体間の水蒸気圧勾配によって決定されることがわかる。また、植物の細胞における水蒸気圧は、ラウールの法則に従いその細胞質に溶けている溶質の量に比例することが知られている。理想溶液における式を以下に示す。

$$P_w = P_t * n_w / (n_w + n_o) \quad (4-6)$$

ここで、 $P_t$ (Pressures total)は理想溶液における全体の蒸気圧、 $n_w$ は水のモル濃度、 $n_o$ は溶液内の他物質のモル濃度を示しており、これは細胞質における濃度が上昇するほど水蒸気圧が低下することを示している。

外界との相対湿度差以上に蒸散速度を左右する要因が温度である。温度が水蒸気圧に及ぼす影響は非常に大きいことが知られており、具体的には、ある一定の温度上昇に対して水蒸気圧は指数関数的増加を示す (Nobel, 1974)。このことから、収穫後産物の貯蔵時には、室温などの保蔵環境と同時に収穫後産物自体の表面温度が重要だといえる。

微生物作用は、安全品質とも深く関わっているが、ここでは植物病原体が植物に感染・発病し、腐敗を引き起こす過程について説明していく。植物病理学において、微生物による感染とは「病原体が感受性植物に接触・侵入して、両者の間に栄養授受関係が成立すること」を指す一方で、発病は「感染が成立し、病徴があらわれること」を意味する（久能ら，1998）。この観点から、主に呼吸による植物体の基本構造の軟化により、病原体となる微生物は容易に感染できるようになり、やがて増殖することで発病するといえる。

これらの作用は安全品質と付加価値品質の両者に関わってくる事象であるため、その定量化は不可欠となる。

#### 4-1-3-4 従来の品質計測法について

鮮度に関する厳密な定義は存在していないが、古くから鮮度の指標として様々な計測方法が考えられてきた。一般的には(3)で述べた状態変化や品質低下に伴って生じる現象や物質を計測することで鮮度指標とされてきた。具体的には化学成分分析によるビタミンや色素成分、糖質、酸等の含有量の測定や、ガスクロマトグラフィー等を使用した呼吸量やエチレン生成量の測定、画像解析や色彩色差計等を用いた色や光沢の測定だけでなく、官能検査によっても様々な評価が行われてきた。種々の成分分析法や解析法の発達により、野菜に含まれる様々な成分の含量や生理状態を精密に評価することが可能になってきた。近年では青果物の貯蔵に伴って増加する脂質過酸化物の割合を利用して、鮮度を評価する方法が考案されており、注目を集めている（中野，2008）。しかし、それらを分析するためには破壊的を伴うサンプリングが必要になり、分析にも時間を要する。研究レベルでこのような評価の手段は重要であるが、一方で、非破壊的な分析によるリアルタイムの計測法の開発も重要視されている。表面の色や光沢、赤外線吸収、蛍光 X 線分光、共有振動性など様々な非破壊計測法が発明されてきている現状、それらの情報と野菜の成分や呼吸量との関連が明らかになれば、品質・鮮度の評価法として利用が可能になり、品質の保証に利用が期待できる（亀岡 and 橋本，2013）。

#### 4-1-3-5 レタスの品質と水分活性について

(3)でも触れたように、収穫後の作物の品質を決定するときに、決定的な役割を果たすのが生命活動維持のための「呼吸作用」である。そもそも、一般的な食品について言えば、1)生命活動を有しない加工食品、2)複雑で微妙な成分と機

能を保ちながら生命活動を続けている農産物、という 2 種類に分類される (亀岡, 1995)。この 2 つの后者では、収穫後必ず乾燥・貯蔵・冷凍などの操作が加わることになるが、生命活動の維持のためには単に農産物と水のミクロ構造だけでなく、収穫農産物の一次代謝、二次代謝の中での水を考えることが重要である。

先行研究では、食品中の水のミクロな構造性を反映したマクロ表現である化学ポテンシャル (吸着ポテンシャル) を指標にして、食品中の水の状態を連続的に捉えることができる収着等温式を導く方法が検討されるなど、葉菜類、特にレタスを例にとり、その水分活性および平衡含水率についての研究が行われてきており、化学ポテンシャルの値と実際の食品または農産物の状態とを 1 対 1 に対応させる努力がなされている。また、保蔵期間中のレタス葉における水分状態および含水率の変化をモニタリングし、その変化と官能評価の結果とを対比させる研究や (Agüero et al., 2008)、レタスの水分変化やビタミン C 変化をパラメータとして、官能評価と保存日数を予測するモデルの研究 (Ansorena et al., 2012) など存在する。

#### 4-1-4 既往の研究

これまでに、野菜の鮮度と野菜に含まれる脂質全体に占める過酸化脂質の割合とを関連付ける研究が行われている (中野, 2008; Isamah, 2003) ほか、鮮度をクロロフィルの分解と解釈し、温度・湿度・日照条件の変化に伴うクロロフィル変化を調べる研究 (Hörtensteiner, 2013; Almeida and Vasconcelos, 2003)、トマト植物における糖含量の収穫後の変化に関する研究 (Beckles, 2012)、ホウレンソウにおける収穫後のアスコルビン酸含量変化に関する研究 (Cocetta et al., 2014)、パパイアにおける収穫後のフェノールやカロテノイド含量変化に関する研究 (Rivera et al., 2010) 等が鮮度に関連する先行研究としてあげられる。

さらに、植物の収穫後劣化と一般的なストレス応答とを関連付けるために植物ホルモンに着目した研究 (Ludford, 1995) も存在しており、収穫後の品質及び鮮度変化の定量に向けた研究は多角的に行われている。

また、非破壊での品質分析に関しては、ハイパースペクトルイメージングを用いたブドウ品質の収穫時期による変化 (Piazzolla et al., 2013) が挙げられ、品質をいくつかのパラメータによって定義した論文 (Amodio et al., 2013) も鮮

度に関する先行文献として挙げられる。

## 4-1-5 研究目的

野菜の「品質」は購入される際に最も重視される項目である。加工された野菜製品の需要が高まり、持続可能かつ安全・安心なフードシステムへの強い要求に迫られる現状では、加工の現場においても原料として使用する野菜の「品質」は規格化、さらにはデジタル情報化される必要性が生じてきた。そして、そのような情報化された品質は、フードシステム全体を通じた共通概念として規定されなければならない。

そこで本研究では、野菜の「鮮度」・「品質」の計測の第一歩として、3章で取り扱った栽培・生産サブシステムと同様に光分析手法によって葉野菜の品質変化を取得できるかどうかの検証を目的とし、赤外光・X線・可視光といったマルチバンドの光を利用して、野菜でも特に短期間で品質変化の進行するレタスの品質変化における多角的な評価を試みた。赤外分光法では、レタスの葉から取得されたスペクトル情報をもとに品質変化の検討を行った。蛍光X線分析ではレタスの葉における元素量の変化から品質変化を検討した。可視光の情報を分析する、色彩画像解析ではデジタルカメラで取得したレタスの形状と色彩情報の経時変化から品質変化を検討した。

また、それぞれの手法における鮮度判定定量化の有効性を検討した後、マルチ分光手法を用いて取得した野菜の、収穫時から一定期間のマルチ分光情報をデータベースに蓄積し、この結果を総合的に分析・解析した上で、機械学習を用いて鮮度指標をモデル化し、正確な「鮮度」判定が行える仕組みを検討した。

## 4-2 実験試料、装置及び方法

### 4-2-1 実験試料

#### 4-2-1-1 野菜試料

野菜試料として、レタスの使用を検討した。本研究では、野菜の品質を計測するための項目を取り扱うため、短期間で劣化が進む物が対象として望ましい。表4-1にキャベツとレタスの平均的な貯蔵寿命を示す（農研機構，2013）。

表 4-1 キャベツとレタスの貯蔵に関する各項目

	貯蔵最適温度 [°C]	貯蔵最適湿度 [%]	貯蔵限界目安 [週]	エチレン 生成量	エチレン 感受性
キャベツ	0	98~100	20~24	極小	高
レタス	0	98~100	2~3	極小	高

表 4-2 各脂質の一般的な植物中における存在体

脂質	存在体
リン脂質	ホスファチジルコリン ホスファチジルグリセロール 等
糖脂質	3-sn-ジアシルグリセロール 等
過酸化脂質	マロンジアルデヒド



続いて、本研究の各実験にて使用したレタスについて説明する。まず、「光センシングの有効性実証のための7日間モニタリング実験」で使用するレタスは安定して箱単位で購入できる必要があったため、インターネット通販経由で、福岡県産の結球レタスを(有)おおつる青果(〒838-0215 福岡県朝倉群筑前町篠隈185-11)で購入した。「機械学習による判別モデル確立のための7日間モニタリング実験」では、キューピー様による多大なご協力により譲っていただいた、茨城県産レタス26個体を使用した。そして、「レタス表面および内部の品質変化計測のための7日間モニタリング実験」は2回行い、1回目は長野県産のレタスを24個体、2回目は香川県産のレタスを24個体それぞれを使用した。

#### 4-2-1-2 脂質関連物質

本研究の中赤外分光スペクトル計測における鮮度評価法のひとつとして、生体内脂質の存在比による評価法の考え方を使用する。既往の手法では化学分析ベースで過酸化脂質・リン脂質・糖脂質を分離し、その当量を回帰式に入れ込むことで鮮度値としている。そこで本研究ではそれぞれの脂質の吸光スペクトルを取得し、各脂質固有のピークを得ることで、実際の野菜計測データから、脂質各成分の相対的な変化量を取得することを目指した。植物中に含まれる過酸化脂質・リン脂質・糖脂質の存在体を表4-2に示す。

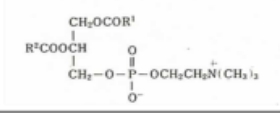
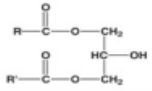
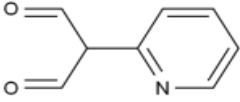
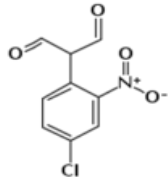
本研究では表4-2より、主成分が各脂質の全量であると仮定し、それぞれの試薬を赤外分光計測した。リン脂質としてホスファチジルコリン(ナカライテスク株式会社製)、糖脂質として主成分であるジアシルグリセロール(ヒドラス化学株式会社製)を用いた。但し過酸化脂質においては適切な試薬の販売が確認できなかったため2-2-ピリジルマロンジアルデヒド(関東化学株式会社製)、2-4-クロロ-2-ニトロフェニルマロンジアルデヒド(関東化学株式会社製)を計測し、官能基的に共通部分であるマロンジアルデヒド部と考えられる吸光データを使用した。以下の表4-3にそれぞれの試薬の状態と構造式を示す。

### 4-2-2 実験装置

#### 4-2-2-1 FT-IR

赤外分光スペクトルの取得にはフーリエ変換型赤外分光光度計(PerkinElmer社製 Spectrum two 以下FT-IR)を使用した。図4.4(A)にFT-IRシステムの外観を示す。またATRアクセサリにはSpectrum two専

表 4-3 使用した脂質酸化物質の試薬

試薬名	構造式
ホスファチジルコリン (粉体)	
ジアシルグリセロール (液体:揮発性)	
2-2-ピリジル マロンジアルデヒド (粉体)	
2-4-クロロ-2-ニトロフェニル マロンジアルデヒド (粉体)	

(A)

(B)

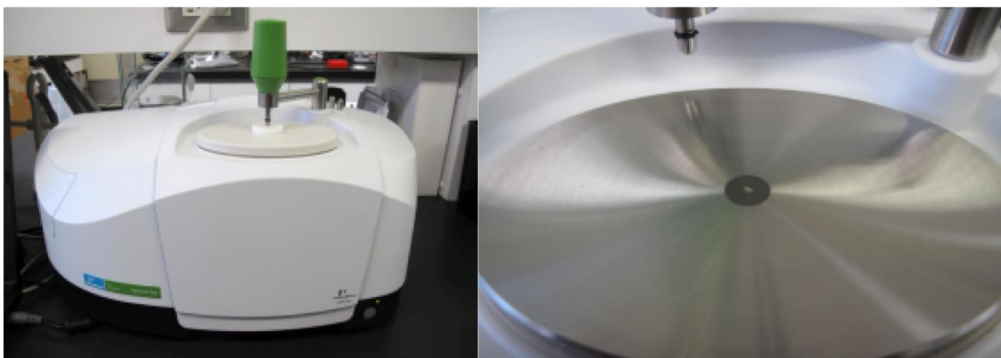


図 4.1 FTIR 機器。(A)FT-IR の外観。(B) ATR アクセサリの外観。

表 4-4 FT-IR 計測条件

光源	MIR
検出器	LiTaO3
ビームスプリッター	Opt KBr
計測範囲 [cm <sup>-1</sup> ]	4000～900
積算回数 [回]	8
分解能 [cm <sup>-1</sup> ]	2

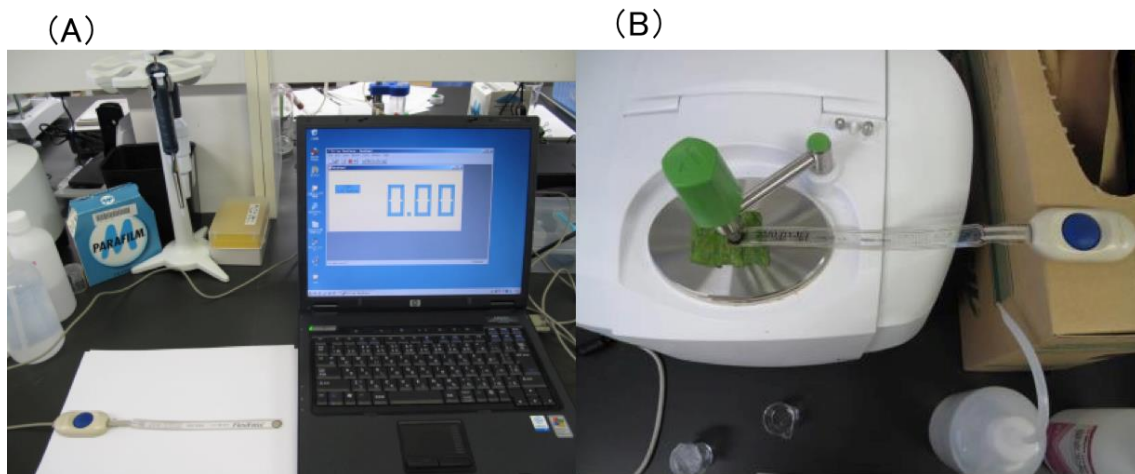


図 4.2 FT-IR システムの荷重ユニット。(A) 圧力センサ・システム外観。(B) FT-IR システムに設置した風景。

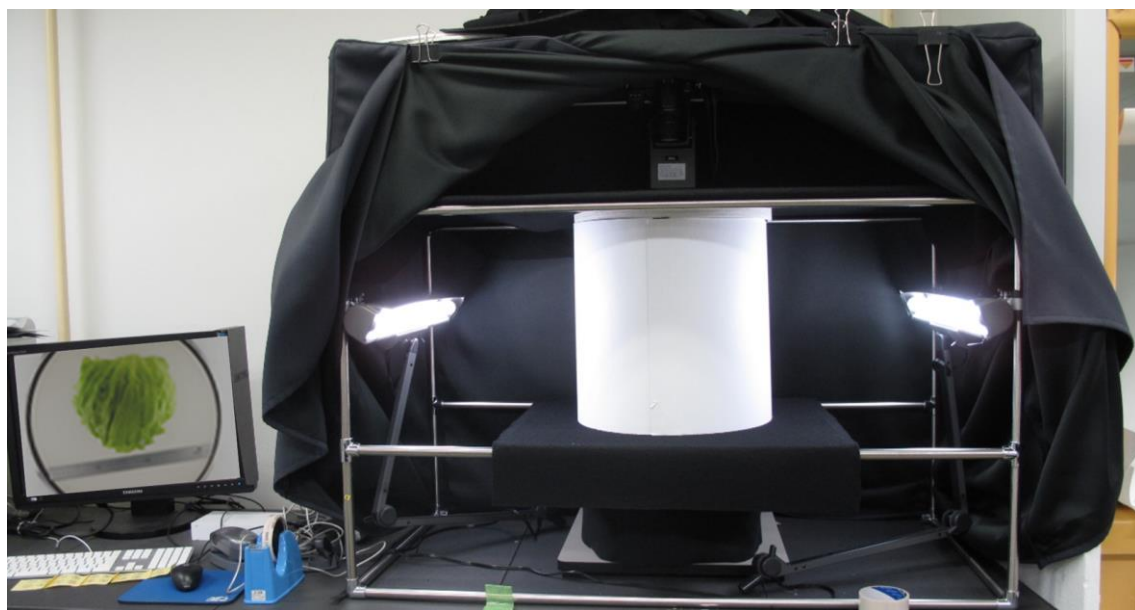


図 4.3 色彩画像解析システムの外観

用のユニバーサル ATR を用いた。図 4.1 (B) に ATR アクセサリの外観を示す。また、本実験での FT-IR の測定条件を表 4-4 に示す。

また、レタス葉計測の際、安定した計測を行うために FT-IR システムの荷重ユニットを使用し、一定の圧力をかけて計測を行った。レタス葉にかかる圧力を一定に保つため圧力センサ (Tekscan 社製 FlexiForce) をレタス葉と荷重トルクの間設置し、圧力のモニタリングを行いながら計測を行った。センサ部に均一に圧力がかかるように、センサ部直径と同サイズの円柱状の金属を用意し、FT-IR システムの荷重トルクとセンサの間に設置した。図 4.2 (A) に圧力センサとそのシステムの外観を示す。また、図 4.2 (B) に FT-IR システムに設置した様子を示す。

#### 4-2-2-2 経時的画像取得用撮像装置

本研究室に構築されている色彩画像解析システムの外観を図 4.3 に示す。

本装置はデジタル一眼レフカメラ (Nikon 社製 D300)、補助標準光 D55 に準拠し高い演色性を持つ電球型蛍光灯 (U.S.A LS 社製 VITSLITE)、外部の光を遮断するための暗室、拡散光源を作るための円筒形ケント紙 (特殊紙製 ルミネッセンス・ニュートラルホワイト)、画像モニタリングを行うために設置された色再現性の高いモニタ (Samsung 製 SyncMasterXL24) から構成される。本システムは光拡散体を中心にその左右にねじれ蛍光灯を配置、光拡散体の上部にデジタル一眼レフカメラを配置し、それらを暗幕で覆っている。

#### 4-2-3 実験方法

##### 4-2-3-1 光センシングの有効性実証実験

まず、実験手順を図 4.4 に示す。

本実験では光分析手法を用いた非破壊計測でのレタスの品質変化の定量を最終目的としているが、その基礎的研究として、異個体でも明確な品質差は検出できる必要が有ると考えた。そこで実験系を大きく 3 つに分けた。1 つ目は、同個体の結球サイズ・色彩の変化と任意のポイントの元素変化を取得することを目的とした、レタス 1 個体の連続計測である。2 つ目は、計測方法の確立と計測点の決定、また個体内の特性分布を取得することを目的とした、レタス 1 個体の分解実験である。最後は、経時的な品質の変化を化学的・元素的に取得することを目的とした、複数個体を用いた各日計測である。以下にそれぞれの実験

方法について記していく。

#### 4-2-3-1-1 結球状態のレタスを用いた連続計測

はじめに、レタスの品質変化として人間の視覚でも判断できる大きさの変化と色の変化に着目した。結球レタスの大きさと色の変化を経時的に取得するために本研究室の撮像システムを使用して経時的な計測を行った。また、色の変化に元素が関わっているかを確認するために、蛍光 X 線分析装置を用いて、結球レタスの任意の部位の元素量の経時変化を計測した。本実験は温度 22°C、相対湿度 65%の環境下で保存し、各日計測を行った。

##### (a) 撮像システムを用いた大きさと色彩計測

レタス 2 個体を用意し、撮像システムの拡散円筒内のステージに葉先を上に向けたものと、芯側を上に向けたものを隣り合わせで図 4.5 (A) のように設置した。

本システムでの実験に関しては各日で個体を変化させず、同個体を 1 日 1 回、計 7 日間計測した。撮影方法としては、デジタル一眼レフカメラ本体の絞り値を 35 に設定し、システムに接続されたコンピュータのカメラソフト (Nikon 社製 Camera Control Pro2) でフォーカスを行い、撮影した。データの取り出しには Photoshop (Adobe 製 CS4) を用いた。

##### (b) 蛍光 X 線分析を用いた元素計測

経時的なレタスの品質変化に、元素の変化が関わるかを確認するため、同一個体を結球状態のまま蛍光 X 線分析器を用いて計測した。葉先、葉の中央、根本の合計 3 点を任意に設定し、それぞれの経時的な変化を取得した。図 4.5 (B) に計測風景を示す。図 4.5 (C) に計測箇所のマーキング方法を示す。

#### 4-2-3-1-2 レタス 1 個体の特性分布計測

はじめに、レタス 1 個体内の品質特性を取得すること、計測方法の確立の 2 点を目的として、1 個体を分解して各種計測を行った。葉を外側から 1、2、3、・・・とナンバリングし、それぞれの葉の任意の部位を計測した。1 枚の葉が芯を軸として線対称であると仮定し、葉の中心で半分に切断し、芯に対して右側のサンプルを中赤外分光スペクトル計測に用いた。葉の右側、左側共に葉先、中央、芯付近の 3 部位に分け、葉先と中央はさらに 3 つの部位に切り分け、それぞれを 1~7 の番号で区別できるようにした。またおおよその重量が同じくらいになるようにした。切断方法の例として、外葉 1 枚目の右側葉の切断前と後の様子

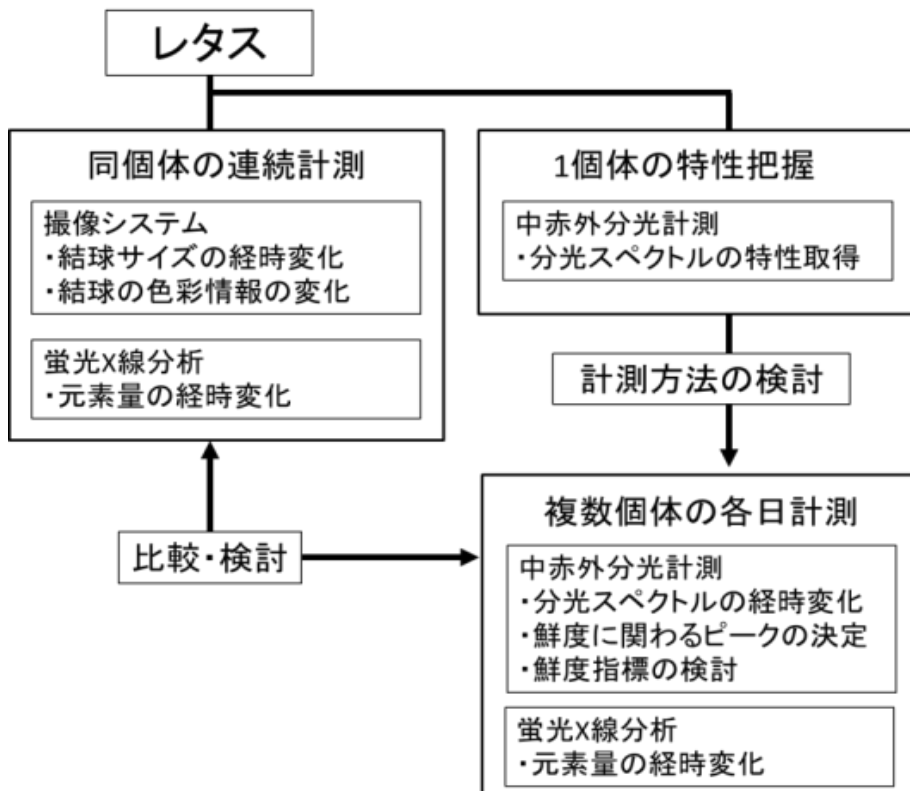


図 4.4 光センシングの有効性検証実験手順の概略図



図 4.5 実験風景 (A) 撮像システムへのレタス設置風景。(B) 蛍光 X 線分析装置による結球レタスの計測風景。(C) 計測箇所の様子。

を図 4.6 (A) と図 4.6 (B) に示す。

#### 4-2-3-1-3 レタス複数個体を用いた品質変化計測

レタス品質の経時劣化を元素的・化学的に計測するために 1 日 1 個体を計測し、それを 7 日間継続する実験を行った。保存条件は 22℃、相対湿度 65% の環境で行った。以下に各手法・計測対象ごとに示す。

##### (a) 中赤外分光法による評価

4-2-3-1-2 でレタス 1 個体内のスペクトル分布を取得したため、その計測結果からレタス各葉の代表スペクトルを取得できる計測部位を決定した。その部位に従ってレタス 7 個体を 7 日間毎日解体し計測を行った。本実験ではレタスサンプルの計測、粉末試料、液体試料の計測を行った。

##### (b) 蛍光 X 線分析を用いた元素分析

結球レタスの時と同様の計測部位のデータを同日時に取得した。計測部位のレタス葉を測定用のスタンドに設置し、葉が皺にならないように分析器で計測を行った。葉サンプルの設置風景を図 4.7 に示す。

#### 4-2-3-2 機械学習による判別モデル確立のための実験

前述した実験の結果を受けて、本実験ではマルチ分光手法を用いて取得した野菜収穫時から一定期間のマルチ分光情報を総合的に分析、解析したうえで機械学習へ導入することを目的とし、機械学習のデータセット作成のため同一個体での計測を重視した。本研究で用いるマルチ分光手法は 3 種類あり、蛍光 X 線分析、色素蛍光分析、可視光測定である。これらすべてを同一個体に対して行うものを 6 個体用意し、加えてそれぞれの手法ごとにその手法のみの計測を行う個体を、可視光測定に 2 個体、蛍光 X 線分析、色素蛍光分析に 1 個体ずつ用意し、計 10 個体の計測を行った。可視光測定に使用した 2 個体のうち、1 個体は光沢を含む画像取得のみを行い、1 個体はレタス結球状態の画像取得のみを行った。レタスの個体ナンバリング表は以下の表 4-5 の通りである。

本実験では 4-2-3-1 と同様の温度コントロールに加え、実験室への人の出入りなどで引き起こされる風の影響を押さえるため図 4.8 のようにレタスを衣装ケース内に保存し、またそのケース内に飽和塩を設置することで湿度コントロールを行った。本実験では、特に蛍光 X 線分析と可視光測定に焦点を当てて機械学習を行った。

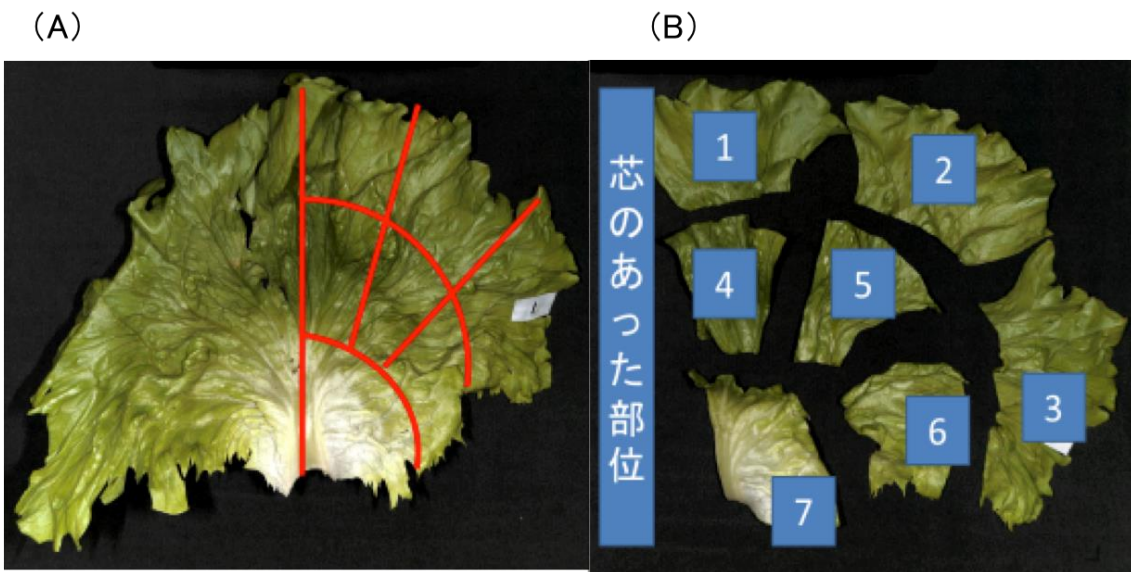


図 4.6 外葉の切片化。(A) 切断前の外葉 1 枚目。(B) 切断後の外葉 1 枚目。



図 4.7 蛍光 X 線計測スタンドに葉サンプルを設置した様子



#### 4-2-3-3 レタス内部の経時変化モニタリング

一定温湿度条件下でのレタス内部の経時変化をモニタリングするため、インキュベータ内にダンボールを用意し、そこにレタスおよび飽和塩溶液を静置させた状態で密閉した。実験の様子を図 4.9 に示す。

1 週間分の経時変化をモニタリングするため、この実験ではレタスを 7 個体使用した。本実験で用いたレタス計 9 個はそれぞれ、「レタス 1」「レタス 2」・・・「レタス 9」と命名した。レタス 1~9 はインキュベータで制御された温度 25 度、NaCl 飽和塩水溶液で湿度 Rh75%に制御したダンボール箱 9 箱に 1 個体ずつ入れ、毎日 1 個体ずつ取り出し、外葉から剥き、以下の実験を行った。

- ①保蔵段ボールから取り出し結球レタスの重量を計測する。
- ②レタス葉を 1 枚ごとに、蛍光 X 線計測（外葉から 7 枚目まで）FT-IR 計測
- ③各葉（外葉から 7 枚目まで）の重量計測
- ④各葉（外葉から 7 枚目まで）の炉乾燥をし、含水率算出

蛍光 X 線分析は各葉において 3 点ずつ計測し、その平均値を葉の代表値とした。FT-IR については予備実験にて 1 点による計測でも誤差は少ないことが確認されているため、1 点計測を行った。



図 4.8 サンプル保存ケース外観

表 4-5 レタスの個体ナンバリング

レタスナンバリング	可視光測定	蛍光x線測定	紫外蛍光測定	飽和塩
1	○	○	○	NaCl
2	○	○	○	NaCl
3	○	○	○	NaCl
4	○	○	○	NaCl
5	○	○	○	NaCl
6	○	○	○	KCl
7	○	×	×	NaCl
8	○	×	×	無し
9	×	○	×	NaCl
10	×	×	○	NaCl

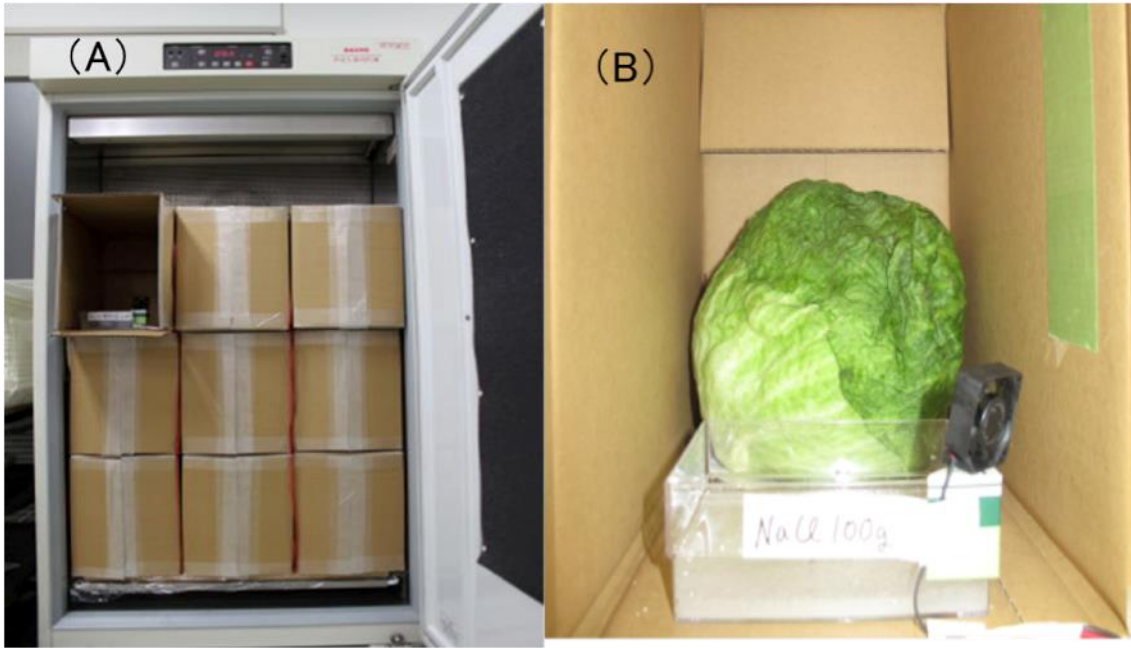


図 4.9 一定温湿度条件下での保蔵実験

## 4-3 実験結果および考察

### 4-3-1 FTIR を用いた脂質酸化指標計測・定量

#### 4-3-1-1 最適荷重の検討

最適荷重検討のためにレタス葉の同じ部位に上から荷重トルクで圧力をかけ、圧力センサの示す値が 0 から 5000hPa まで変化させた。図 4.10 (A) に荷重を変化させた場合のレタス葉のスペクトルを示す。

最適荷重を決定するために主要成分によるピークと考えられる  $1104\text{cm}^{-1}$ 、 $2850\text{cm}^{-1}$  と水による影響が現れていると考えられる  $3330\text{cm}^{-1}$  に着目した。図 4.10 (B) に  $1104\text{cm}^{-1}$  と  $2850\text{cm}^{-1}$  における吸光度の変化を示す。また、図 4.10 (C) に  $3330\text{cm}^{-1}$  における吸光度の変化を示す。

$1104\text{cm}^{-1}$ 、 $2850\text{cm}^{-1}$  のピークは水による影響が小さく、主要成分の影響が大きいピークであると考えられる。 $1104\text{cm}^{-1}$ 、 $2850\text{cm}^{-1}$  の両ピークは荷重が大きくなるに従い吸光度が大きくなった。この ATR 法ではサンプルの内側約数  $\mu\text{m}$  の情報を取得している。このことから荷重が大きくなるに伴い、IRE に葉がより密着し、内側約数  $\mu\text{m}$  の密度が増大していったと考えられる。次に  $3330\text{cm}^{-1}$  におけるピークの変化は OH 基の吸収帯、つまり水による影響が非常に大きい波数帯である。こちらも荷重が大きくなるに従い吸光度が大きくなる結果が観察されたが、4000 - 5000hPa の間で僅かに吸光度が低下する結果となった。この結果は荷重が大きくなるに従い、4000hPa まではサンプルと IRE がより密着していき、それ以上の大きな圧力下では葉から水が押し出される様子をとらえている。また、1500 - 4000hPa までは吸光度の変化が非常に小さかった。そこで最適荷重を決定するため各荷重における 3 回計測結果の標準偏差を比較した。図 4.10 (D) に各荷重における 3 回計測の標準偏差を示す。

標準偏差は 0.005 以下であれば非常に小さいとし、3 回計測によるバラつきが無いとして扱った。1500hPa ではレタス葉の吸収スペクトルの形状が標準偏差に現れてしまい、3 回計測それぞれのベースラインがずれていることが示唆された。2000 から 4000hPa では標準偏差が非常に小さな値となり 3 回計測が正しく行える条件であることが考えられた。以上のことから、その中でも葉が IRE により密着し、葉の構造が破壊されず、3 回計測が正確に行える 4000hPa の圧

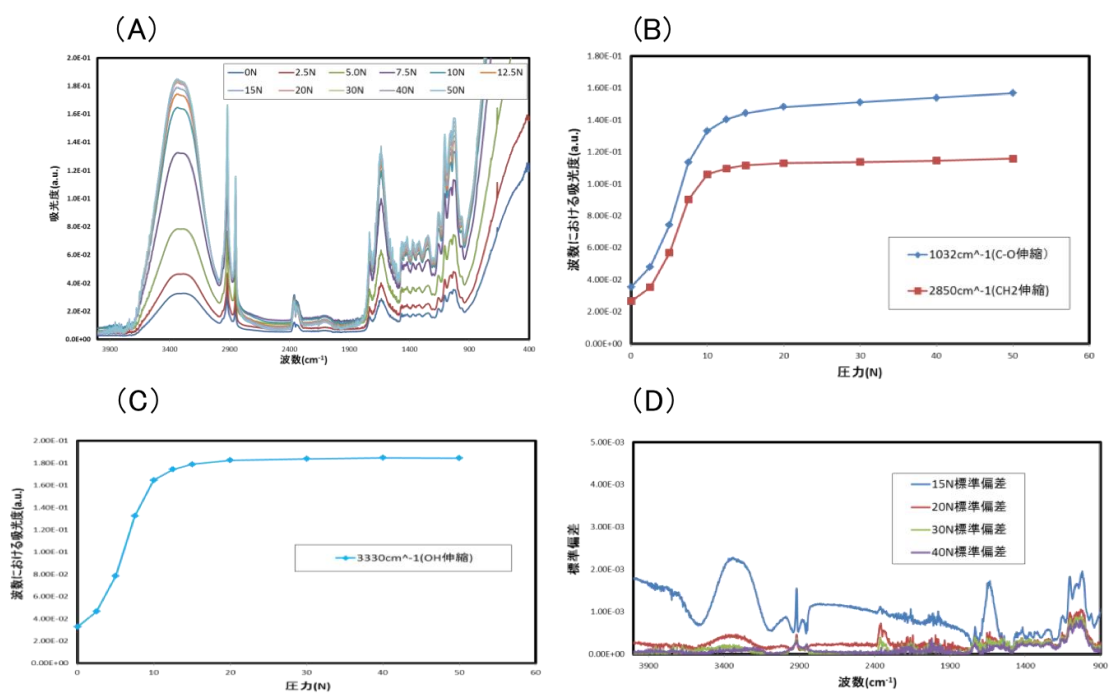


図 4.10 最適荷重の検討 (A) 荷重の変化によるスペクトルの変化。(B) 荷重変化による主要成分ピークの吸光度変化。(C) 荷重変化による水ピークの吸光度変化。(D) 各荷重における 3 回計測の標準偏差。

力が最適であると考察した。以下のレタス葉計測結果では、特に断らない限り 4000hPa の圧力を付加して計測を行った。また、計測にかかる時間もスペクトルに影響が出る可能性があったため、4000hPa の圧力条件下では 3 回計測の標準偏差の値が非常に小さくなることを前提とし、1 回計測の値を用いた。

#### 4-3-1-2 レタスの分光スペクトル特性と帰属

本実験はレタス葉を中赤外分光計測した際、その吸収スペクトルが示す特性の確認に加え、葉による差や傾向を確認することを目的とした。4.2.3 に従い、レタス 1 個体を分解し、葉の分光スペクトルを取得した。1 枚の葉が芯を軸として線対称であると仮定し、葉の中心で半分に切断し右側のサンプルを用いた。半分にした葉を更に葉先 3 点、葉の中央 3 点、葉の根元 1 点に分け、分光スペクトルを取得した。以下に葉ごとのそれらの平均スペクトルを取得することで葉全体の特性を取得できると考えた。1 個体を外葉側から 1、2、5、8、11、14、17、20 枚目のデータを取得した。図 4.11 (A) にそれぞれの葉の取得した 7 点の平均スペクトルを示す。特徴的な吸収の見られる 2 つの領域をそれぞれ拡大し、 $3000\text{cm}^{-1}\sim 2800\text{cm}^{-1}$  の波長領域の拡大図を図 4.11 (B)、 $1800\text{cm}^{-1}\sim 900\text{cm}^{-1}$  の波長領域の拡大図を図 4.11 (C) とする。また、各ピークの帰属調査を行うために、複合的なピークが多数見られる  $1800\text{cm}^{-1}\sim 900\text{cm}^{-1}$  の指紋領域のピーク分離が必要である。そこで吸収スペクトルに 2 次微分 9 点処理を行い、ベースラインのずれやノイズの影響を除き、ピーク分離を試みた。図 4.11 (D) に全体の二次微分 9 点のスペクトル、図 4.11 (E) に  $3000\text{cm}^{-1}\sim 2800\text{cm}^{-1}$  における二次微分 9 点のスペクトル、そして図 4.11 (F) に  $1800\text{cm}^{-1}\sim 900\text{cm}^{-1}$  における二次微分 9 点スペクトルをそれぞれ示す。この取得したスペクトルをもとにして、各ピークの帰属の調査を行った。その結果を表 4-6 に示す。

$3330\text{cm}^{-1}$  付近と  $1640\text{cm}^{-1}$  付近の OH 基による吸収に着目すると、葉が内側になるにつれて吸収が大きくなっていることが読み取れる。これは外葉に比べて内側の葉の方が水分含量が多いことを示している。その一方、OH 基由来のピーク以外では、その殆どで葉が内側になるにつれて吸収が大きくなる傾向が見られた。この原因として、水分が多く失われた葉では、ATR クリスタルに接する計測部位の収縮により、より多くの葉の構成成分のデータが取得されることが考えられる。よって微細なピークは水分含量の影響が大きく反映されているとして扱った。どの枚数のデータにも  $2920\text{cm}^{-1}$  と  $2850\text{cm}^{-1}$  に非常に大きな吸光度とクロロフィル量は高い相関関係を示すことがわかる。従ってこの 2 つの

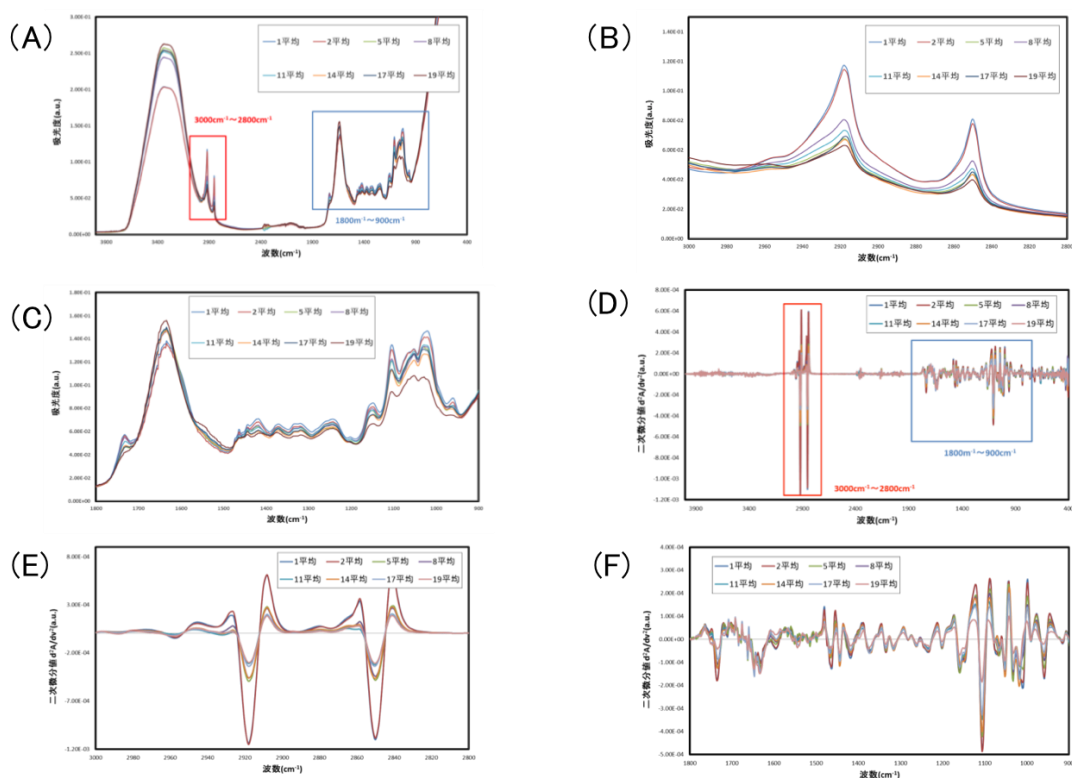


図 4.11 レタスの分光スペクトル。(A) 各葉における 7 点平均スペクトル。(B) 各葉における 7 点平均スペクトル(3000 $\text{cm}^{-1}$ ~2800 $\text{cm}^{-1}$ )。 (C) 各葉における 7 点平均スペクトル(1800 $\text{cm}^{-1}$ ~900 $\text{cm}^{-1}$ )。 (D) 各葉における二次微分 9 点スペクトル。(E) 各葉における二次微分 9 点スペクトル(3000 $\text{cm}^{-1}$ ~2800 $\text{cm}^{-1}$ )。 (F) 各葉における二次微分 9 点スペクトル(1800 $\text{cm}^{-1}$ ~900 $\text{cm}^{-1}$ )。

表 4-6 レタス葉スペクトルにおける各ピークの帰属

波数[ $\text{cm}^{-1}$ ]	帰属
2920	$\text{CH}_2$ 伸縮
2850	$\text{CH}_2$ 伸縮
1736	$\text{C}=\text{O}$ 伸縮
1632	$\text{C}=\text{O}$ 伸縮
1466	$\text{CH}_2$ , $\text{CH}_3$ 変角
1376	$\text{CH}_3$ 変角
1334	$\text{CH}_3$ 変角
1316	$\text{CH}$ 変角
1236	$\text{CH}$ 伸縮, $\text{PO}_2$ 伸縮
1200	$\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 伸縮
1160	$\text{C}-\text{O}$ 伸縮, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 伸縮
1148	$\text{PO}$ 伸縮
1106	$\text{C}-\text{O}$ , $\text{C}=\text{O}$ 伸縮
1060	$\text{PO}$ 伸縮
1052	$\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 伸縮
1032	$\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 伸縮
1016	$\text{C}-\text{C}$ , $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 伸縮
958	$\text{C}-\text{OH}$ , $\text{PO}$ 伸縮

特徴的なピークは、水分の影響よりも葉緑体色素の影響を大きく受けているピークであることが示された。

これは中赤外分光法によるレタス葉のクロロフィル量計測が可能であることを示唆しており、品質計測において有効に用いることが期待できる (図 4.12)。

#### 4-3-1-3 計測手法の確立

1枚の葉を7点計測するのは、後述する複数個体の計測を行う際に、非常に時間がかかり効率が悪いいため、計測点を減らすための検討を行った。葉先3点と葉の中央3点からそれぞれ1点を選定し、それを代表スペクトルとするため比較を行った。外葉として1枚目、結球葉として5枚目、内側の葉として11枚目で検討する。図 4.13 (C) に従い、それぞれの葉で葉先の芯に近い方から1、2、3部位とし3点の平均と部位のスペクトルを比較した。また、計測点の検討のために、レタス葉で特徴的な吸収を示す CH<sub>2</sub> 基由来である 2850cm<sup>-1</sup> と 2918cm<sup>-1</sup> のピークを用いた。それぞれの結果を図 4.13 に示す。

その結果、外葉・結球葉・内葉の全てにおいて、2部位が最も平均スペクトルに近付くことが確認できた。また水の吸収が表れる 3250cm<sup>-1</sup>~3360cm<sup>-1</sup>においても同様の傾向が見られた。これは、2部位の分光スペクトルを取得することで、葉先3部位のおおよその平均スペクトルが得られると考えることができる。以下では葉の中央においても同様であるとして、2部位、5部位、7部位を計測することで、各葉の分光スペクトル情報が得られるとする。

#### 4-3-1-4 葉ごとの分光スペクトル計測

4.2.3 に従い、複数個体を用いてレタス葉の分光スペクトルの経時変化を7日間取得した。3.2.1-(3)で検討した計測方法を用いて外側から1枚目、2枚目、5枚目、6枚目、10枚目、15枚目、20枚目で各3点の分光スペクトルを取得し、その平均スペクトルを各葉のデータとして用いた。外葉・結球葉・内葉を代表し1枚目、5枚目、10枚目の結果を図 4.14 に示す。

特徴的な経時変化として内側の葉ほどベースラインの差が小さく、外側ほどベースラインの差が大きいことが分かる。これは外側の葉では内側の葉に比べて水分を失う量が多く、葉の厚さや体積に影響が出たと考えられる。特に外葉1枚目では1日目~7日目で 3330cm<sup>-1</sup> 付近の OH 変角振動による吸収が次第に小さくなることが確認できた。これらの取得したデータから品質評価を行うために脂質成分に着目し、次の実験を行った。



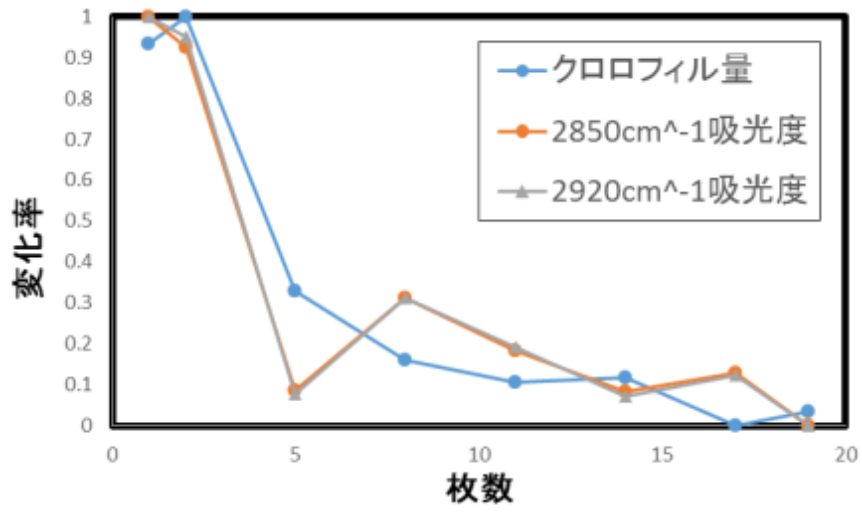


図 4.12 2920cm<sup>-1</sup>と 2850cm<sup>-1</sup>における吸光度とクロロフィル量の変化率。

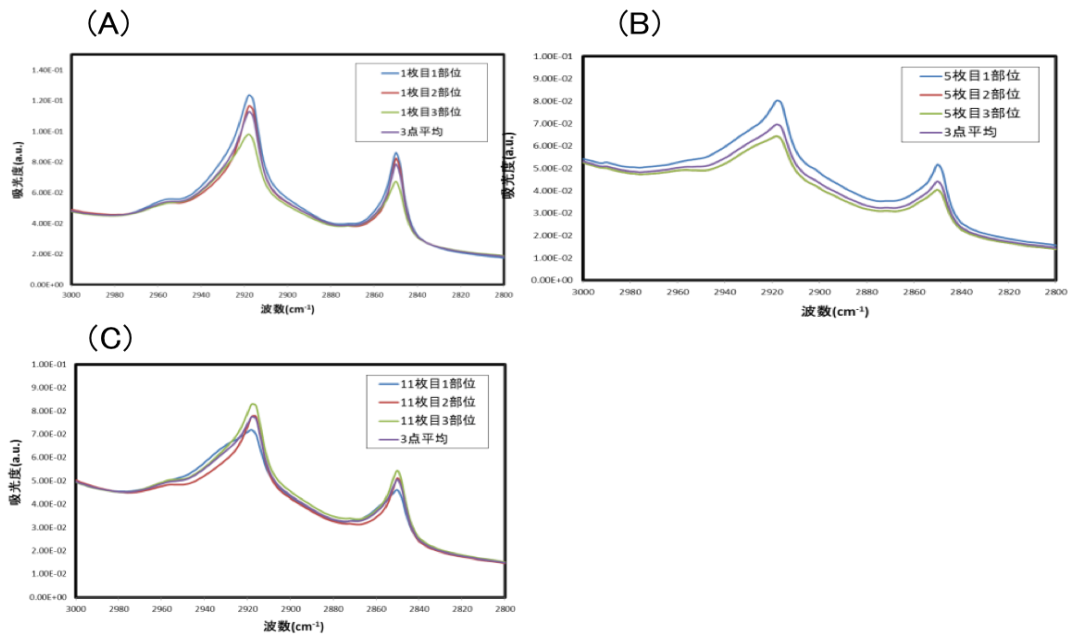


図 4.13 レタスの各葉におけるスペクトル (A) 1 枚目の葉先 3 点のスペクトルと平均スペクトル。(B) 5 枚目の葉先 3 点のスペクトルと平均スペクトル。(C) 11 枚目の葉先 3 点のスペクトルと平均スペクトル。

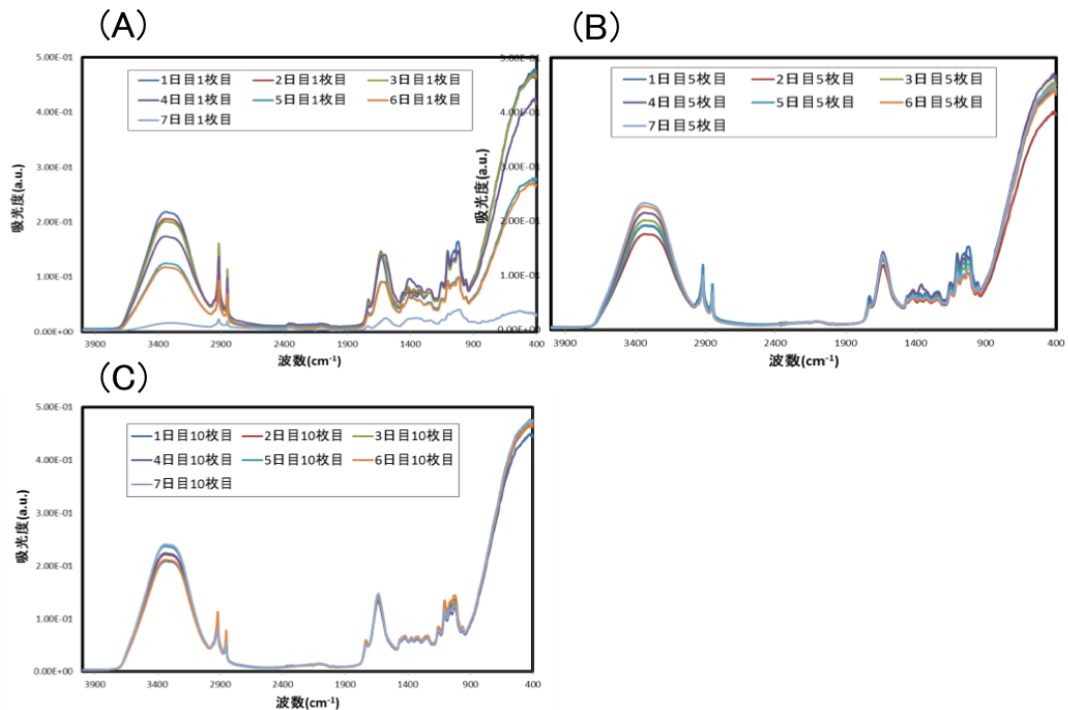


図 4.14 レタスの各葉のスペクトル。(A) 1 枚目スペクトルの経時変化。(B) 5 枚目スペクトルの経時変化。(C) 10 枚目スペクトルの経時変化。

#### 4-3-1-5 脂質酸化指標を用いた各葉の評価

取得した脂質関連物質のピークから、脂質の酸化指標を得る。各試葉ピークからレタス葉の分光スペクトル上で特徴的に経時変化しているものの検討を行った。微細なピークの検討も行うために、レタス葉の分光スペクトルに対し二次微分 9 点を行った。今回は大きく外れた計測がなく、経時変化がわかりやすく取得できていた 6 枚目のデータを示す。二次微分 9 点スペクトルを図 4.15 (A) に、その中でも脂質関連物質のピークが集中する  $1300\text{cm}^{-1}\sim 900\text{cm}^{-1}$  間のスペクトルデータを図 4.15 (B) にそれぞれ示す。

各脂質のピーク値と対応させると過酸化脂質が  $1008\text{cm}^{-1}$ 、リン脂質が  $1052\text{cm}^{-1}$ 、糖脂質が  $1160\text{cm}^{-1}$  でそれぞれ経時変化が見られる。本実験ではこの 3 点が、それぞれの脂質の特徴的な吸収であるとして扱う。脂質の酸化指標は過酸化脂質当量を全脂質当量で割った比率である。そこで各脂質のピークから、各脂質の当量を擬似的に求め、脂質の酸化指標を算出した。ベースラインとノイズの影響を小さくするために、吸光度スペクトルに対し 2 次微分 9 点処理を行い、対応する波数の 2 次微分値データを用いて算出を行った。以下に脂質酸化指標値を導いた式を示す。

その相対的な変化を鮮度値の移り変わりと考え、各葉における酸化指標値の経時変化を比較した。計測した各葉における結果を図 4.15 (C) に示す。

縦軸に算出した脂質酸化指標、横軸に日数をとり枚数ごとに経時変化を表した。外葉として 1 枚目・3 枚目を評価すると大きく変化が見られ、どちらも経時的に大きくなっていくことが分かる。これは外葉では内側の葉に比べ経時的な過酸化脂質の生成量が多いことが示唆される。また、外葉のデータでは 1 枚目の 7 日目や 3 枚目の 5 日目のように大きく外れている結果が見られる。これは (1)でも述べた劣化の激しかった部位や激しく乾燥しており正確に計測が行えなかった部位の影響であると考えられる。5 枚目からの結球葉を評価すると、どれも同じような緩やかな増加傾向を示し、変化量が外葉に比べると小さいことが分かる。しかし、5 枚目から 15 枚目でも内側の葉ほど変化の傾きが小さいことが分かる。これは結球葉では外葉に比べ品質の変化が少なく、結球葉でもより内側の葉ほど品質の変化が少ないと言える。20 枚目の内側の葉を評価すると日によって大きな差が見られる。これは個体差と経時的な品質の変化が小さいことが原因と考えられる。直線近似を行うと傾きが 0 に非常に近いため、個体差の影響で脂質酸化指標値は上下するが、7 日間では脂質の変化は非常に小さ

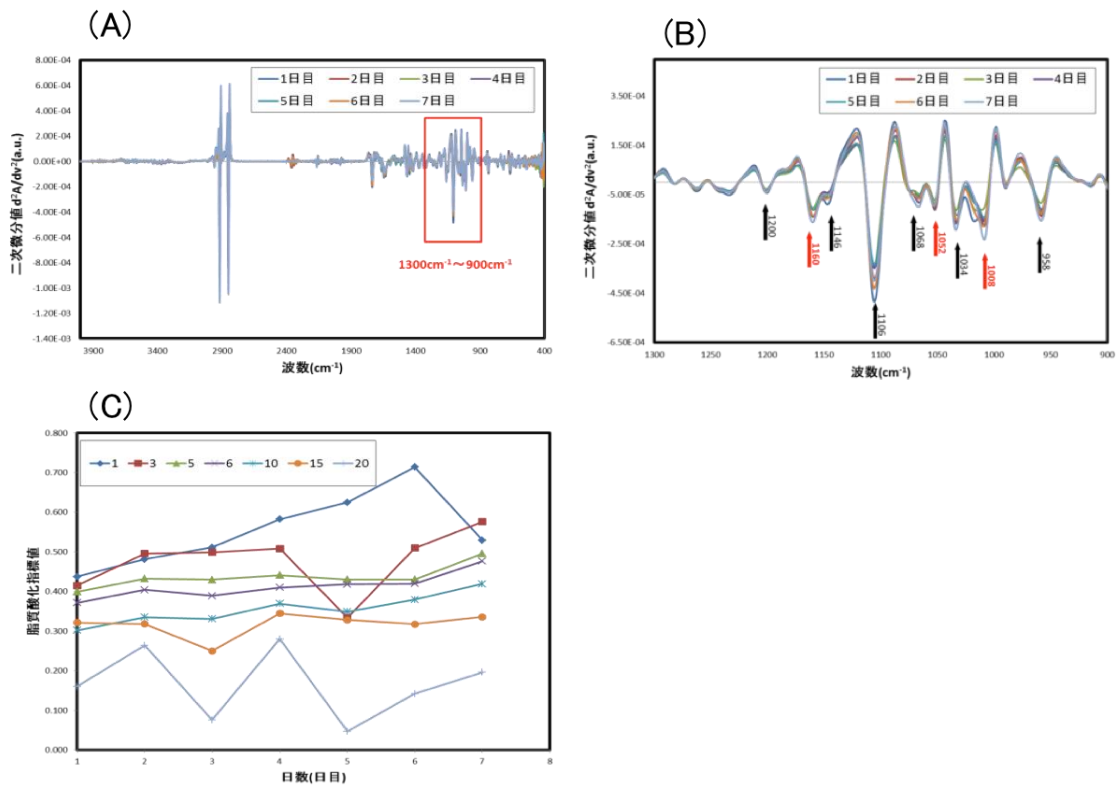


図 4.15 脂質酸化指標による各葉の評価。(A) 6 枚目の二次微分スペクトル経時変化。(B) 6 枚目の二次微分スペクトル経時変化(1300cm<sup>-1</sup>~900cm<sup>-1</sup>)。 (C) 各葉における脂質酸化指標値の経時変化。

いと考えられる。全体の評価を行うと外れ値や一部の値を除き殆どが、どの日数においても外葉から内側の葉になるにつれて脂質酸化指標値は小さくなる結果となった。

## 4-3-2 蛍光 X 線分光分析を用いた元素分析

### 4-3-2-1 結球レタスにおける K, Ca の経時的変化

経時的なレタスの品質変化に、元素の変化が関わるかを確認するために同一個体を結球状態のまま蛍光 X 線分析器を用いて計測した。葉先、葉の中央、根本の合計 3 点を任意に設定し、それぞれの経時的な変化を取得した。3 点の平均スペクトルを結球状態の外葉スペクトルとして扱った。取得した元素スペクトルは全体にノイズの影響が見られたため、Savitzky-Golay 法に基づき 5 点でスムージングを行った。図 4.16 (A) にスムージング後の元素スペクトルの経時変化を、図 4.16 (B) に 2.0keV~8.0keV 領域を拡大したスペクトルをそれぞれ示す。

放出エネルギーに元素を対応させたところ、Rh、K、Ca、Ti で大きなエネルギー放出が見られた。Rh は装置の X 線発生機構に由来するものであり、Ti は前述したように計測用スタンドの埋め込み金属である。よって本実験では大きく特徴的なピークが表れた K、と Ca に着目した。日数による K、Ca のカウント数の変化を図 4.17 に示す。

K・Ca の元素カウント数は 7 日目が外れているものの、経時的に増加していく傾向にある。但し、野菜の劣化による元素量の減少は確認されておらず、成分や物質移動による影響ではないと考えられた。そこで 4.5keV にエネルギー放出の表れる Ti 元素に注目した。Ti は計測用のスタンドに埋め込まれている金属であり、Ti エネルギー放出の強度は計測ビーム照射点との距離と計測物のエネルギー吸収度によって大きく影響を受ける。元素スペクトルより経時的に Ti のエネルギー放出が増加していることが分かる。これは計測スタンドの Ti 金属に届いている計測ビームが増加していることを表す。つまり、計測対象であるレタス葉が収縮していき、計測ごとに厚さ・体積が小さくなっていることが考えられる。それに従うと、K・Ca の放出エネルギー計数において経時的に増加するのは、葉の収縮により計測直径内に含まれる各種元素が相対的に増加して観察されたことが推測できる。

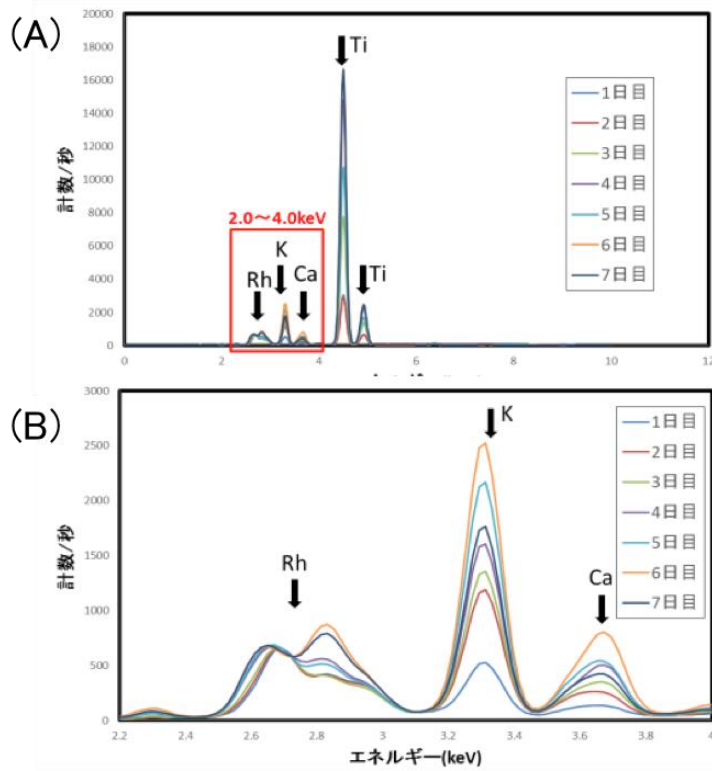


図 4.16 蛍光 X 線スペクトルデータ。(A) スムージングを行った元素スペクトル。(B) 2.0keV~8.0keV の拡大図。

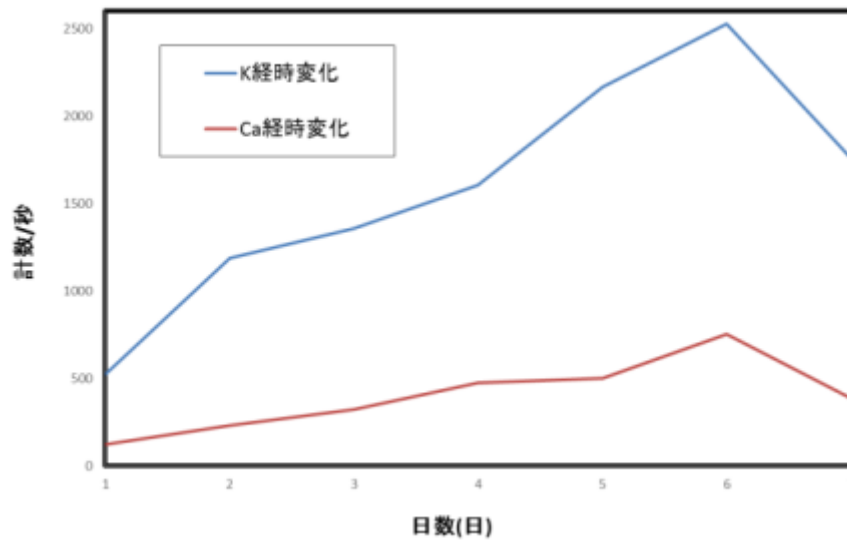


図 4.17 K・Ca カウント数の経時変化。

#### 4-3-2-2 1 個体のレタスにおける K, Ca の経時的変化

FT-IR による分光スペクトル計測を行った部位と同じ部位を蛍光 X 線分析機により元素分析を行った。以下に経過日数ごとの各枚数における K と Ca 元素に対応するエネルギーのカウント数を示す。

図 4.18 よりどちらの元素も枚数が内側になるに従ってカウント数が減ることが分かる。経時変化に着目すると (1) でも扱った外葉 1 枚目のように、各元素は日が経つごとにカウント数が増加する傾向が見られた。内側の葉ほど日毎の増加率は小さくなり結球葉にあたる 6 枚目から内側はほとんどカウント数に変化がなくおよそ一定になることがわかった。日が経つごとに外側の葉と内側の葉で元素カウント数から見た品質は大きな差が生じてくることが言える。これは、外側の葉と内側の葉で蒸散や呼吸により水が失われ、収縮する速度が違うことが主な要因として考えられる。(1) と本項目の結果を踏まえると、葉のある範囲で K・Ca のような生体構成元素の消失や生成が起こりえないと仮定すると、その一定範囲の元素数を計測することで葉の収縮や水分変化と関連付けができることが示唆される。

#### 4-3-3 撮像システムを用いたレタス分析

##### 4-3-3-1 結球レタスの連続計測 (収縮実験)

7 日間取得した画像を、条件を一定にして結球の大きさの変化を検討するために、写真内の定規で同じ縮尺にした。図 4.19 (A) に 1 日目、(B) に 2 日目、(C) に 3 日目、(D) に 4 日目、(E) に 5 日目、(F) に 6 日目、(G) に 7 日目のそれぞれの状態を示す。写真の上部には日付と保蔵日数を記した付箋を配置した。結球サイズを比較するために、それぞれの画像データから輪郭を切り出して下端の座標を Photoshop ベースで揃えて横に並べた。便宜的に初日の上端と下端に白線を設置し、保蔵 7 日目の上端に赤線を設置した。作成した図を図 4.20 (A) に示す。

図 4.20 (A) より、結球が葉側を上にした状態、芯を上にした状態どちらも経時的に収縮が生じていることが分かる。レタスは水分を非常に多く含む野菜であり、収穫後の代謝反応により水分が失われる。水分の損失は結球サイズに大きな影響を及ぼすと考えられる。特に水分を多く含む芯や葉脈から遠い葉先では、水分の損失による劣化が速く、目視で劣化が確認できる部位もあった。

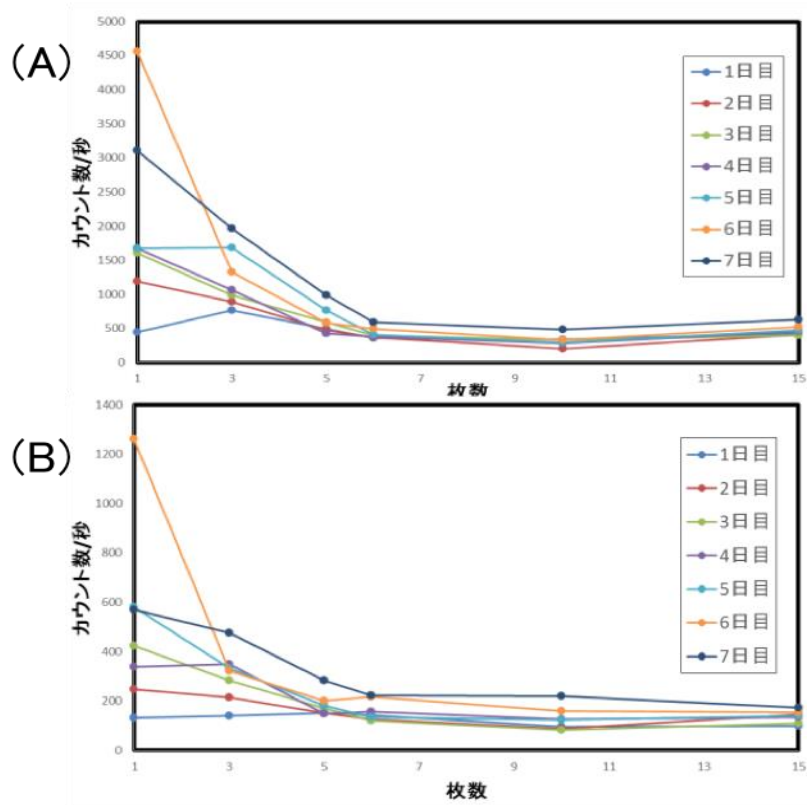


図 4.18 レタスにおけるミネラルの経時変化。(A) 経過日数ごとの各枚数における K 元素カウント数。(B) 経過日数ごとの各枚数における Ca 元素カウント数。

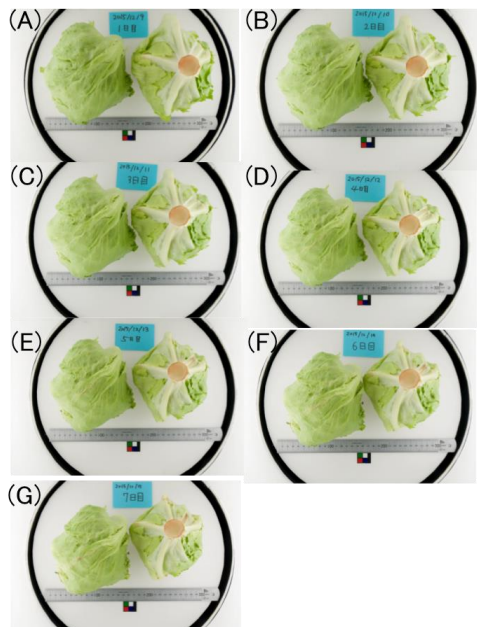


図 4.19 結球レタス画像。(A) 1日目。(B) 2日目。(C) 3日目。(D) 4日目。(E) 5日目。(F) 6日目。(G) 7日目。



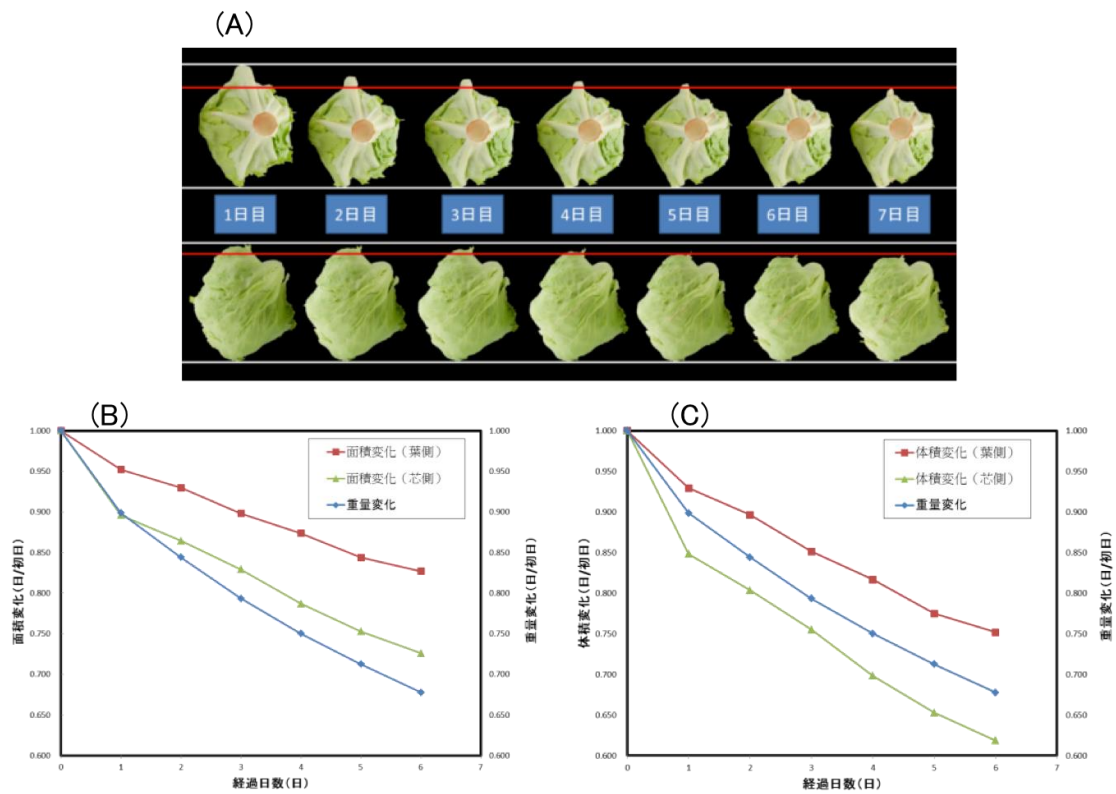


図 4.20 結球レタスの経時変化。(A) 1日目から7日目までのレタス結球のサイズ比較。  
 (B) 画像から切り抜いた面積変化と重量変化の比較。(C) 面積変化の  $3/2$  乗値と重量変化の比較。

そのため芯を上にした状態では、葉先が丁度輪郭あたるため、収縮が顕著に見られたと考えられる。代謝反応速度は環境温度と環境湿度に高い相関を示すことが明らかにされており、温湿度が一定の環境では直線的に水分が失われていくと推測される。失われていく水分量と結球サイズの収縮を関連付けるために、各日の画像からレタス結球を抜き出し、ピクセル数を表面積として計算に用いた。その際、画像内の定規と画質情報からピクセルをメートルの単位に変換した値をデータとして使用した。初日の切り抜いた面積を 1.00 とした時の、各日の切り抜いた面積との比と重量の変化率を共に図 4.20 (B) に示す。

図 4.20 (B) より、面積変化は葉側、芯側共に 1 日目から 2 日目の変化は大きくそれ以降は 7 日目まである程度一定に収縮していくことがわかる。重量変化に関しても 1 日目から 2 日目に大きく減少しそれ以降は一定の速度で減少していく傾向が見られた。同様の傾向を示すことが確認されたが、切り抜き画像の変化量は平面的なデータであり、重量変化は空間的なデータである。そこで、より正確に比較を行い相関を取得するために、データの次元を揃えて比較する方法を検討した。本実験では結球高さのデータを取得していないため、面積データを正確な体積データに変換することが出来なかった。面積は長さの 2 乗で表される単位であり、体積は長さの 3 乗で表される単位である。これに従い、切り抜いた面積のデータを  $3/2$  乗しデータの次元を揃えることで、便宜的に体積のデータとして扱った。各面積変化を  $3/2$  乗したデータと重量変化のデータを図 4.20 (C) に示す。

その結果、変化傾向が一致したことから、画像データの経時的な減少変化はレタス生体内からの水分減少を反映している可能性が認められた。

#### 4-3-3-2 色彩情報の経時変化

取得した各日の画像データから色彩情報の比較を行った。各日の色彩情報の経時変化を確認するために減算画像を取得した。Photoshop ソフトにおいて RGB 表色系ベースで表示される画像データに、HSV 表色系に変換するフィルタをかけ HSV それぞれの情報で減算画像を作成した。図 4.21 に 1 日毎の減算画像を示す。

大きな変化として 1 日目-2 日目間の芯側がずれていることが分かる。これは大きな体積変化があり、設置した台から傾きが生じたと考えられる。図 4.21 の全体を通して、色相では非常に小さな変化が毎日起こっていることしか確認できない。彩度では減算画像でレタス形状が把握できるほどの大きな変化が毎日

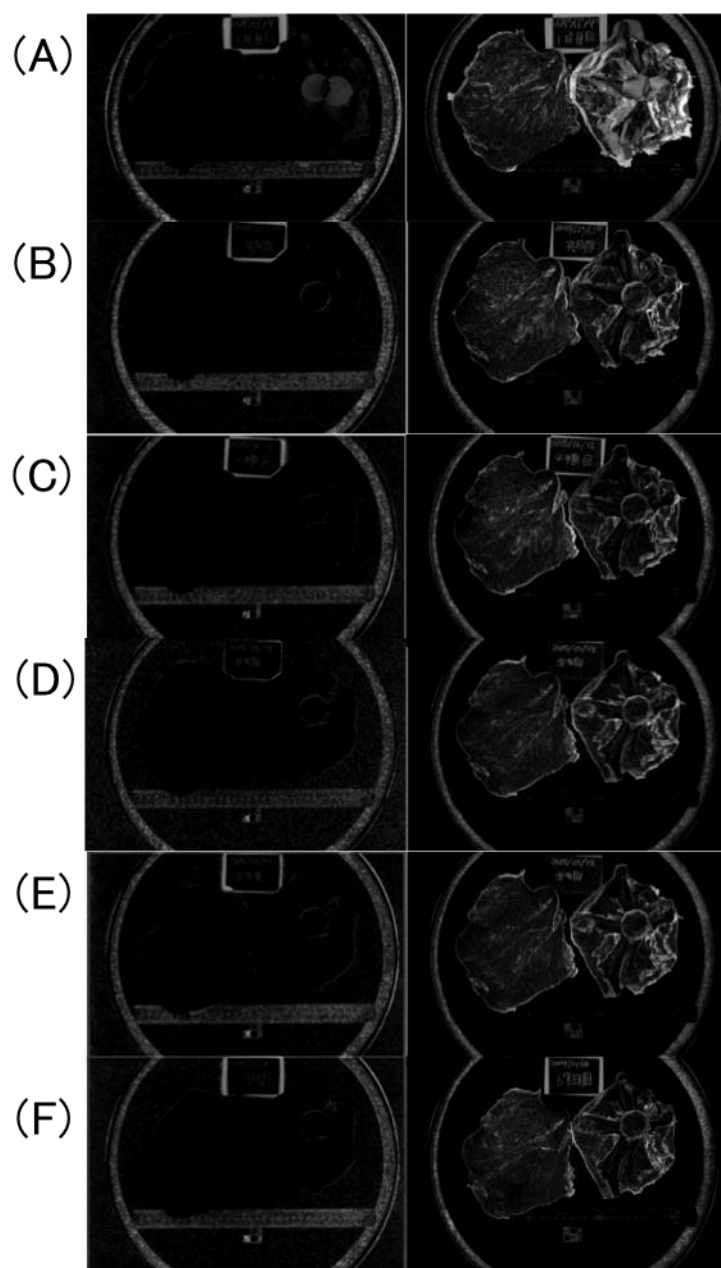


図 4.21 レタスの色相 (左)・彩度 (右) 減算画像。(A) 1日目-2日目。(B) 2日目-3日目。(C) 3日目-4日目。(D) 4日目-5日目。(E) 5日目-6日目。(F) 6日目-7日目。

起きていることが確認できる。特に芯側では芯を除いた葉の部分が大きく変化していることが読み取れる。また葉側では外周が綺麗に白く表れている。これらは 4.3.2 で述べた収縮の影響によるものであると考えられ、彩度の変化を減算画像から評価できないことが分かる。

そこで、レタス全体の色相と彩度の変化を比較するために葉側、芯側の切り抜き画像を作成して、HSV それぞれのヒストグラムを取得した。可食部である、葉の色彩変化が品質に大きく関わるとして、はじめに葉側の色相と彩度におけるヒストグラムの変化を示す。図 4.22 (A) に色相全体のヒストグラムを示し、図 4.22 (B) にピークの見られた色相値 60~80 の拡大図を示す。また、以下に示すヒストグラムのデータは各 HSV パラメータとピクセル数から表わされるため、収縮による影響が生じる。その影響をピクセル数で補正し、ヒストグラム全体の和を等しくすることで比較の行えるデータとした。また、ヒストグラムデータは RGB のデータから直接変換したものであり、HSV すべての横軸が 256 段階になっていた。そのため、色相は円環状の座標系なので 256 段階を 360 段階に変換し、一般的な色相の表現方法と比較が行えるようにした。

図 4.22 (B) より日が経つごとに色相ヒストグラムの形状は鋭いピークから緩やかなピークになり、次第に色相値が小さくなっていくことが読み取れる。色相環において、色相値 70 はおおよそ黄色であり 80 は黄緑色となる。従って、葉の色は時間が経つにつれて緑色から黄色に近づくことが、色彩データにより示される。おおよそ黄色を示す色相値 69~71 と、黄緑色を示す色相値 72~74 の総ピクセル数の変化を図 4.22 (C) に示す。この図からも経時的に橙色を示すピクセル数が増加し、黄緑色を示すピクセル数が減少していくことが分かる。4 日目から 5 日目の間で逆転が起きていることも確認できる。また、ヒストグラムからは色相値の分布が次第に広がっていくことも特徴として確認できる。

葉側の彩度のヒストグラムを作成したところ、ノイズの影響が非常に大きく、視覚的にヒストグラムを評価できない結果となった。そのため、連続確率分布の一種であるガンマ分布によりフィッティングを行い、ノイズを除去して評価を試みた。図 4.23 (A) にフィッティング後の彩度ヒストグラムの経時変化を示す。またフィッティングを行った際の、近似ガンマ分布曲線との残差平方和を図 4.23 (B) に示す。

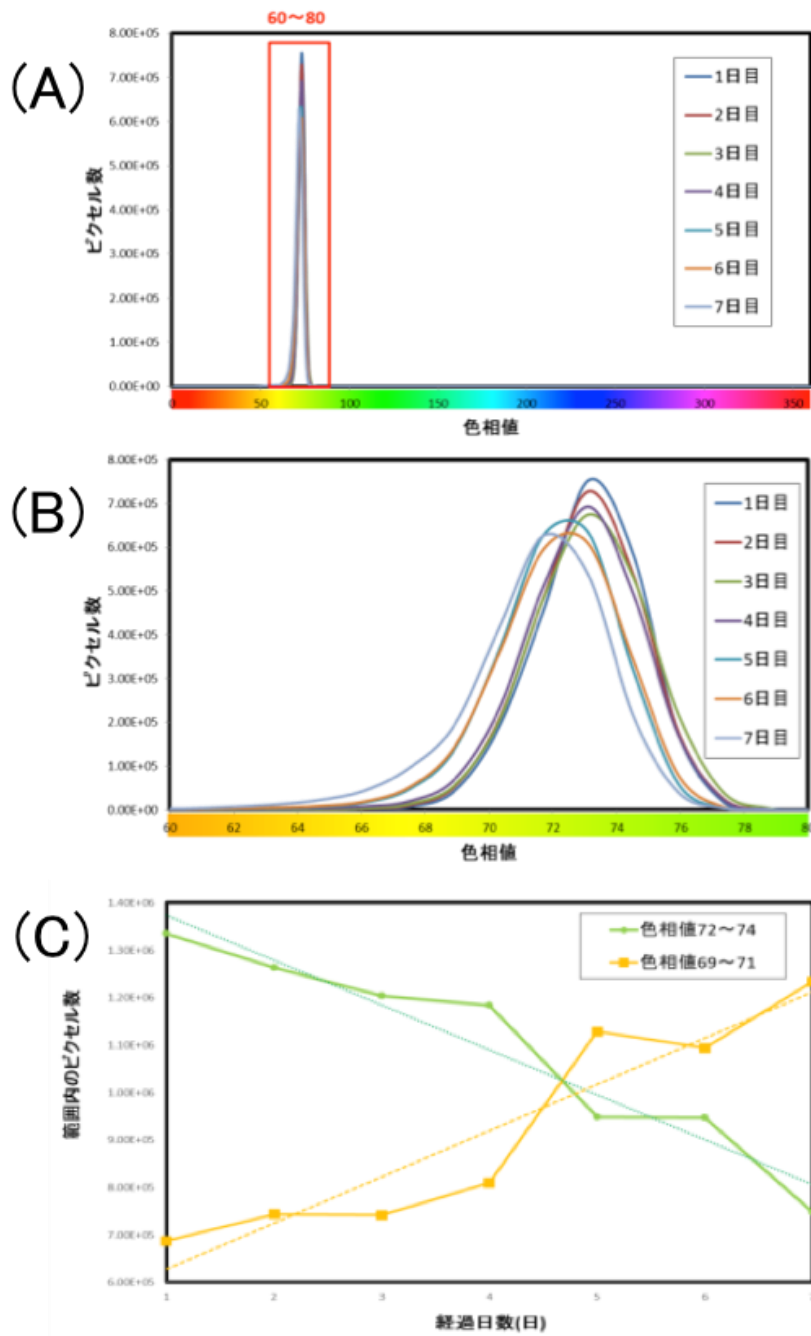


図 4.22 レタス色相ピクセルのヒストグラム。(A) ピクセル数補正を行った葉側の色相ヒストグラム。(B) 色相値 60~80 のヒストグラム拡大図。(C) 橙色と黄緑色を示す色相値帯の範囲内ピクセル数変化。

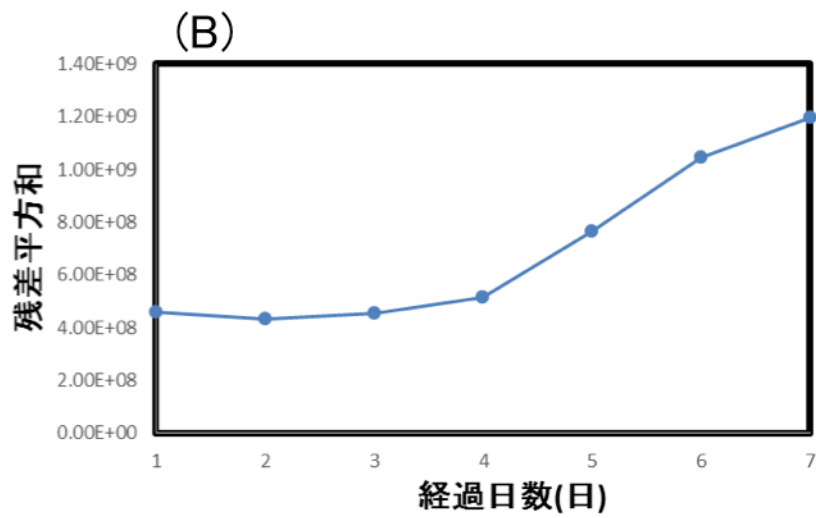
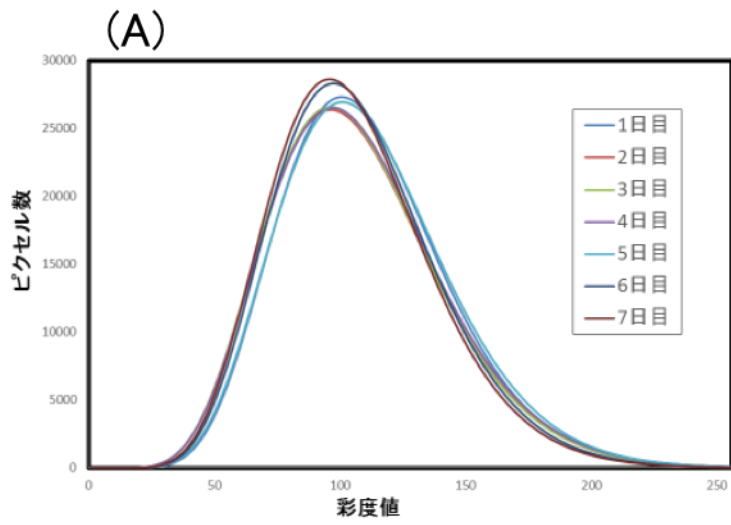


図 4.23 レタス彩度ピクセルのヒストグラム。(A) ピクセル数とガンマ分布による補正を行った葉側の彩度ヒストグラム。(B) フィッティング時のガンマ分布と彩度ヒストグラムの残差平方和。

図 4.23 (A) より、彩度のヒストグラムは経時的に彩度値が小さくなっていくことが分かる。また、ピークにおけるピクセル数は経時的に大きくなっていき、色相とは違い分布が狭くなっていく傾向が見られた。図 4.23 (B) よりフィッティングを行った際の残差平方和をそれぞれで比較すると、次第に大きくなっていくことがわかる。これは、ガンマ分布に近いヒストグラムであったレタス葉の彩度が、劣化が進むとガンマ分布から離れていくことが示唆される。彩度値ヒストグラムの経時変化を見ると、次第に偏りのない正規分布に近づくことも確認できる。

芯側においては、一般に芯の切断面が赤褐色に変化していく現象が知られている。これはレタスに存在するポリフェノール類が、切断により分泌されたポリフェノールオキシダーゼなどの酸化酵素によって褐色色素を持つ物質に変化するためだとされている。そこで、芯の切断面の色彩情報の変化によって鮮度の評価を行うための検討を行った。レタスの芯は直径 3.2cm であったため切断面の端による影響を無くすために 3cm で切り抜きを行い、ヒストグラムを作成した。図 4.24 (A) に 3cm で切り抜いた色相のヒストグラムを、図 4.24 (B) に彩度のヒストグラムを示す。

色相ヒストグラムは 1 日目から 5 日目にかけて大きくなり、5 日目から 7 日目にかけて小さくなる傾向にあった。1 日目から 5 日目にかけて 2 つのピークのバランスが左寄りから右寄りに移っていく傾向があり、また 5 日目から 7 日目にかけて 2 つのピークが 1 つに統合され、そのピークは次第に彩度が小さくなる方向に向かっていくことがわかる。つまり、レタス芯の切り口は保存開始から次第に橙色と黄色の比率において、黄色側が増加していき、最終的に中間色が一番多くの割合を占める。彩度に関しては、葉側のヒストグラム同様に経時的に彩度値が小さくシフトしていくことが分かる。

これらの結果から、画像情報が時間経過に伴うレタス組織の劣化を抽出している可能性が示唆された。

#### 4-3-4 機械学習のためのデータ取得

本研究で用いるマルチ分光手法は 3 種類あり、蛍光 X 線分析、色素蛍光分析、可視光測定である。これらすべてを同一個体に対して行うものを 6 個体用意し、加えてそれぞれの手法ごとにその手法のみの計測を行う個体を、可視光測定に 2

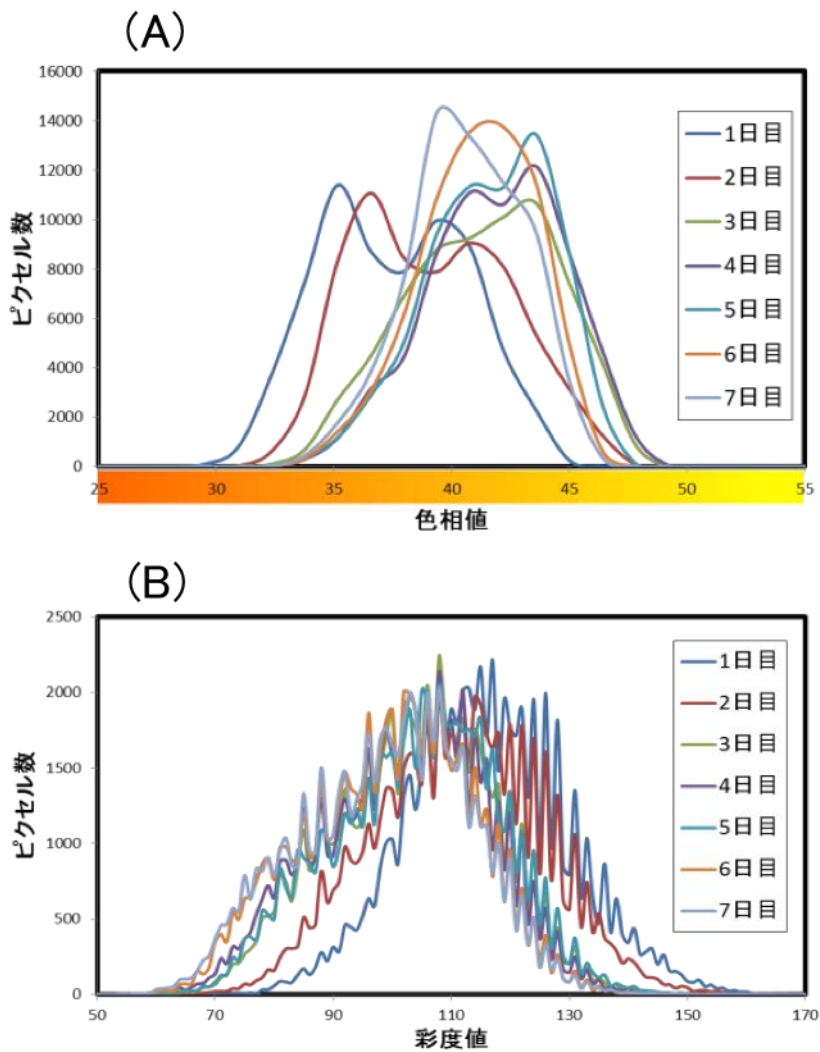


図 4.24 レタス芯側画像情報。(A) 芯を 3cm で切り抜いた際の色相ヒストグラム。(B) 芯を 3cm で切り抜いた際の彩度ヒストグラム。



個体、蛍光 X 線分析、色素蛍光分析に 1 個体ずつ用意し、計 10 個体の計測を行った。可視光測定に使用した 2 個体のうち、1 個体は光沢を含む画像取得のみを行い、1 個体はレタス結球状態の画像取得のみを行った。

基礎実験では、色相 H において芯切断より 24 時間後程度まで平均値が直線的に減少し、その後緩やかに増加、減少を行う特徴的な経時変化が見られ、彩度では芯切断より 24 時間程度まで平均値が直線的に増加し、その後増加傾向が緩やかになる傾向が見られた(図 4.25)。基礎実験で見られた特徴的な色相 H・彩度 S 平均値の経時変化がレタス芯において個体によらず普遍的に存在するのであれば鮮度指標としての利用が可能であると考え、本実験では基礎実験での経時変化の再現性の検討を行った。。

基礎実験、本実験のレタス試料は産地・収穫時期など大きく条件が異なっているにも関わらず、色相 H・彩度 S 平均値経時変化の特徴的な傾向はほぼ一致し再現性が見られた。色相・彩度共に各時間の基礎実験と本実験の結果の値は誤差率 10%以内に収まり、数値的にも再現性が確認された。以上の結果より、芯の色相 H・彩度 S 平均値を鮮度指標として用いる有効性が示唆された。しかし、基礎実験において芯を再切断し色相 H・彩度 S 平均値を追ったところ、再切断した地点から変化傾向・数値がリセットされてしまうことが確認された(図 4.26)。よって、実際の現場において、褐変した芯は除去されるため、芯の色彩情報を用いて正確な「鮮度」を評価することは困難だと考えられる。

#### 4-3-4-1 結球状態のレタスを用いた連続計測

##### 4-3-4-1-1 画像から見るレタス鮮度低下過程における変化

###### (a) HSV ヒストグラム平均値の変化

取得した各日の画像データから色彩情報の比較を行った。レタス結球(葉側)における HSV 平均値経時変化(sample1-6,7)は以下の図 4.27 の通りである。

図の通り、色相・彩度・明度はそれぞれ特徴的な経時変化を行ることが分かった。Sample1-6 について、色相は経時的に増加、その後直線的に減少を行う経時変化が主に見られたが、個体によって全く違う変化傾向を示すものも存在した。彩度は収穫後から増加傾向を示し、収穫後経過時間 91~115 時間の間で傾向が変化するという共通の経時変化が Sample1-6 全ての個体において見られた。が、その後の傾向は個体ごとに異なった。明度は収穫後から減少傾向を示し、彩度と同様に収穫後経過時間 91~115 時間の間で傾向が変化し、その後の傾向

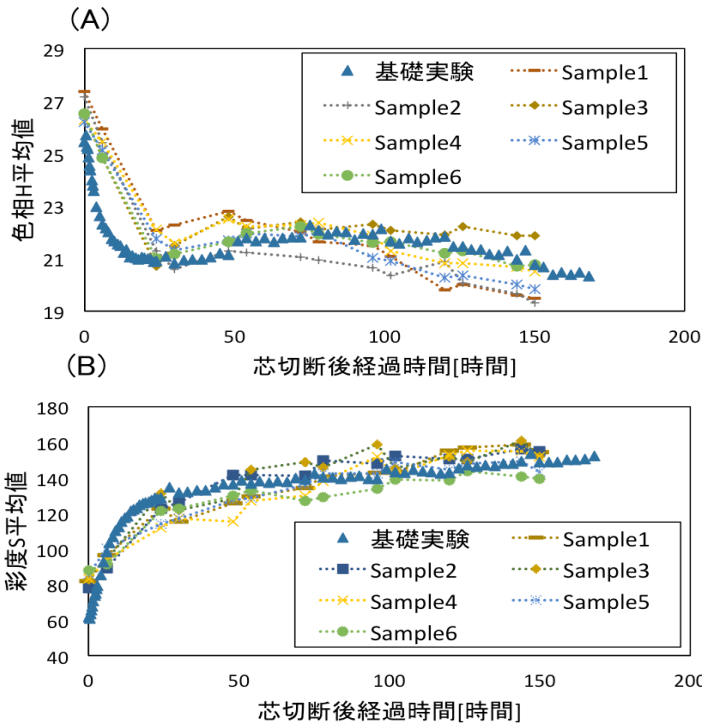


図 4.25 色相および彩度の経時変化。(A) レタス芯部分の色相 H 平均値経時変化。(B) レタス芯部分の彩度 S 平均値経時変化。

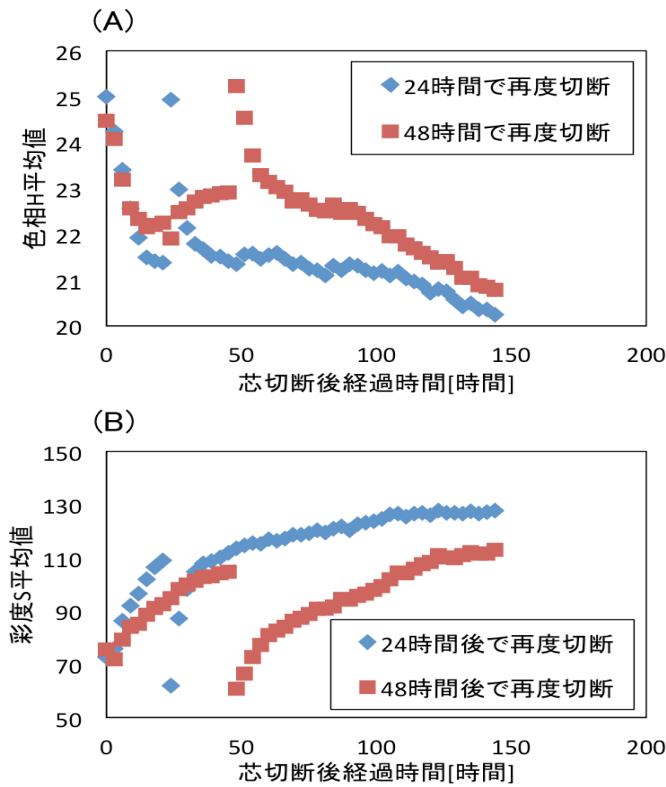


図 4.26 レタスの再切断による画像情報への影響。(A) レタス芯部分の色相 H 平均値経時変化。(B) レタス芯部分の彩度 S 平均値経時変化。

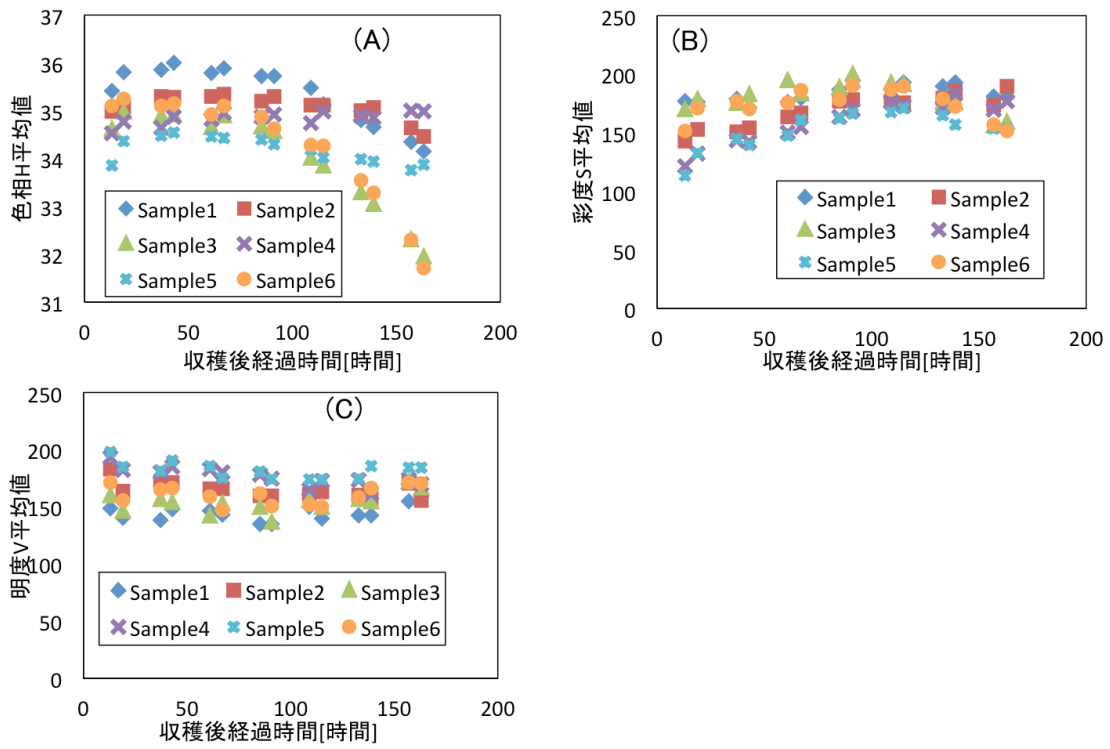


図 4.27 色彩情報の比較。(A) レタス結球の色相 H 平均値経時変化。(B) レタス結球の彩度 S 平均値経時変化。(C) レタス結球の明度 V 平均値経時変化。

は個体ごとに異なった。

これらのことから、レタス結球状態に着目した色相  $H$ ・彩度  $S$ ・明度  $V$  平均値経時変化における変化曲線の傾向が変化する部分は、鮮度が良いものと良くないものを分ける重要部分であると考えた。ここで、鮮度の良いもの、良くないものを区別するため簡易的に行った官能検査について述べる。官能検査は、環境条件は **Sample1-6** と同様に行い、図 4.28 (A) に従い 5 段階の視覚的な判断での検査を 3 人のモニタで行った。

図 4.29 (B) は簡易的官能検査の平均結果である。図 4.29 (B) の通り、収穫後経過時間 85~109 時間の間に、鮮度の良いものから鮮度が良いとは言えない 3 段階に変化している。官能検査に用いた 3 個体は **Sample1-6** と同じ環境条件での保存を行っており、それらにおける変化曲線の傾向の変わる傾向変化点とほぼ一致した。

以上より、色相  $H$ ・彩度  $S$ ・明度  $V$  平均値の傾向変化点は鮮度評価において重要な部分であると考察された。**Sample6** については **Sample1-5** に比べ湿度コントロールを高く設定しており、鮮度がより保持されるという観点から色相  $H$ ・彩度  $S$ ・明度  $V$  平均値の傾向変化点にも差が生じると考えられたが、本実験での計測間隔の大きさのためその差の確認は行えなかった。

#### (b) 表面積の変化

レタス結球状態に着目した撮像での処理におけるレタス輪郭から、表面積情報を Pixel 単位で取得しその経時変化を追った。図 4.30 (A)、(B) より、表面積変化は **Sample5** の 1 個体を除き決定係数 0.90 以上の精度の良い直線的な経時的減少を示すことが分かった。レタスは表 4.4 の通り、水分を非常に多く含む野菜であり、収穫後の代謝反応により水分が失われるため、水分の損失は結球サイズに大きな影響を与えると考えられる。**Sample1-6** における含水率の経時変化を図 4.30 (C) に示す。含水率はどの個体においても決定係数 0.99 以上のとても精度の高い直線的な経時的減少を行うことが分かる。図 4.31 に表面積(標準化処理)と含水率における相関図を示した。図 4.31 より、直線的な経時的減少を行わなかった 1 個体を除いて、決定係数が 0.90 以上の正の相関が見られたため、表面積と含水率の経時変化には強い相関があることが示された。

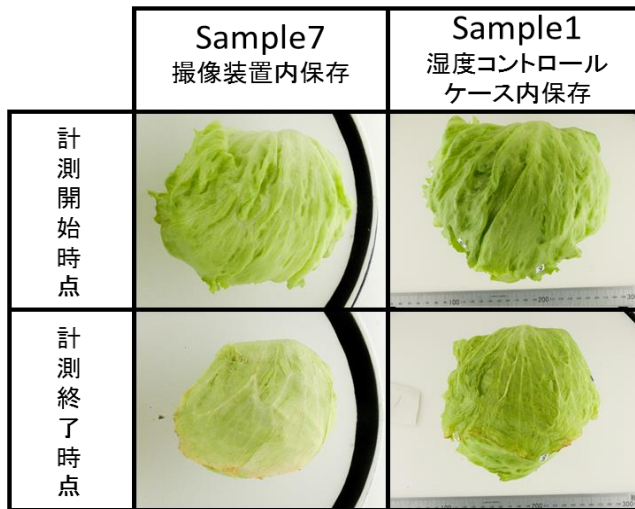


図 4.28 湿度コントロールの差の影響(画像サイズ固定)。

(A) 鮮度評価 (野菜試験場)

- 5 圃場での緑色・つやを保っている
- 4 光沢なくなり、緑色がややあせる
- 3 結球表面一部黄化、調製なしで販売可能
- 2 黄化2枚目に及ぶ、調製なしでは販売不可能
- 1 黄化さらにすすみ一部腐敗が認められる。2～3枚除けば食用可能
- 0 腐敗著しく食用不可能

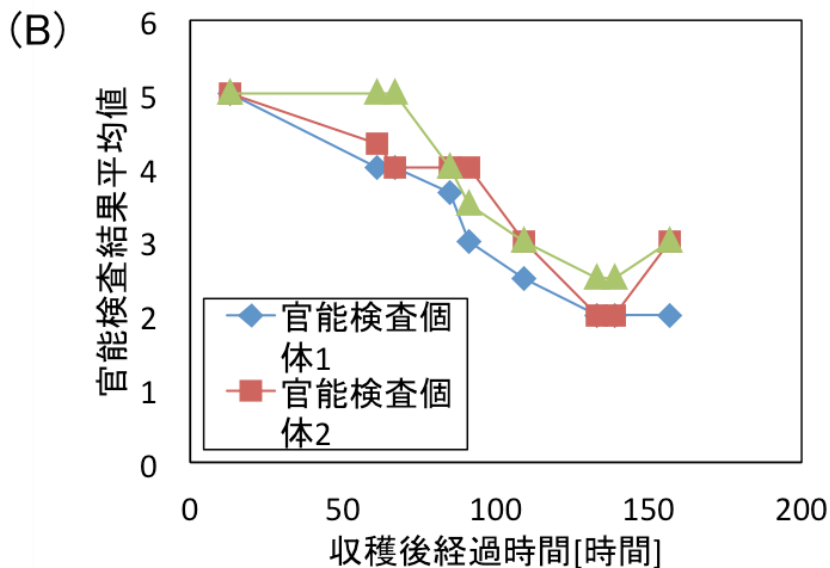


図 4.29 官能検査について。(A) 官能検査による鮮度評価 (農山漁村文化協会編, 2004)。

(B) 官能検査結果平均値の変化。

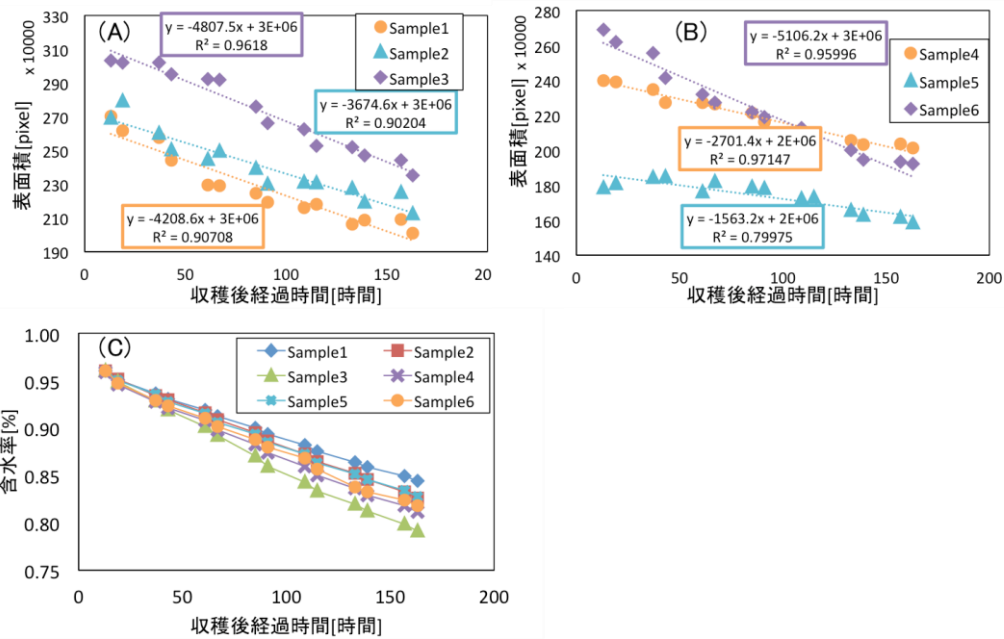


図 4.30 表面積および含水率変化。(A) レタス表面積経時変化(Sample1-3)。(B) レタス表面積経時変化(Sample4-6)。(C) 含水率経時変化。

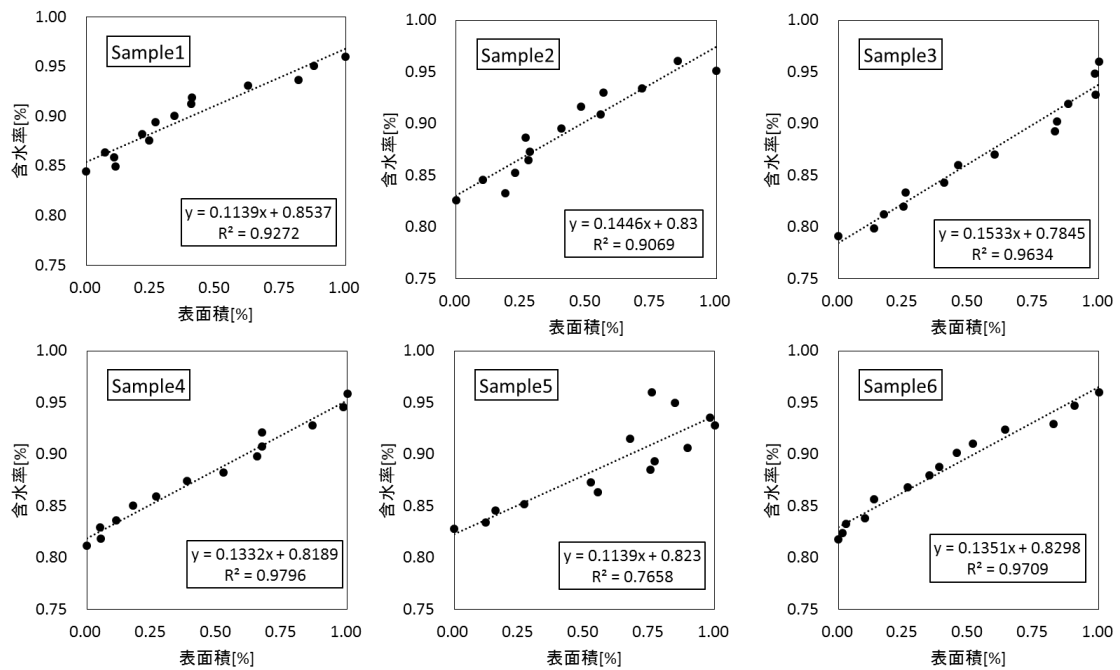


図 4.31 表面積と含水率における相関図

#### 4-3-4-1-2 蛍光 X 線分析による元素計測

レタス葉の計測において主に検出されてくる元素は、カリウム、カルシウム、リン、硫黄、ケイ素、アルミニウム、軽元素であった。本研究では先行研究の結果も踏まえ、レタス結球に多く含まれると考えられ、安定して検出されるカリウム (K)、カルシウム (Ca)、リン (P)、軽元素総量 (LE) の 4 項目に着目して、その検出値と経時変化について整理と考察を行う (図 4.32)。

Sample1-6 ではレタス結球に計測点を 3 点設定し、再現性の確認と元素データセットの取得を目的とした。検出項目ごとに計測結果を示す。カリウム、カルシウム、リン、軽元素の個体別の経時変化を図 4.32 に示す。また、それぞれの図には実線で Sample9 における計測点 5 か所の平均値も記している。

はじめに Sample1-5 について結果を整理する。カリウムの検出量はどの個体においてもおおよそ直線的な増加傾向を示した。また、値に関しても Sample9 の経時変化と大きく差のない結果となり、再現性が確認できた。カルシウムの検出量も同様に緩やかな増加傾向を示し、再現性がある結果となった。リンについては特に傾向を示さないという点では Sample9 と同様の結果であるが、値のバラつきが非常に大きく、再現性を議論できる結果とはならなかった。軽元素 LE に関してはどの個体においても減少傾向を示し、再現性が確認できた。

次に Sample6 について結果を整理する。Sample1-5 においてリンを除いた各検出値は、傾向や値についてもある程度の再現性を示す結果となった。Sample6 に関してもカリウムで増加傾向、カルシウムで増加傾向、リンで傾向無し、軽元素 LE で減少傾向を示し、経時変化の傾向に関しては再現性が確認できた。しかし、カリウム、カルシウム、軽元素 LE の検出値は収穫後 115 時間後まで、Sample1-5 とほとんど同様の傾向を示したが、その後はどれも大きく変化する結果となった。収縮による蛍光 X 線分析値の変化の観点から考察すると、Sample6 は収穫後 115 時間後から水分を多く失っていることが推測できる。

後述する機械学習の項目では、ここで取得した Sample1-6 の 6 個体のカリウム、カルシウム、リン、軽元素の 4 項目の検出値をデータセットに使用した。

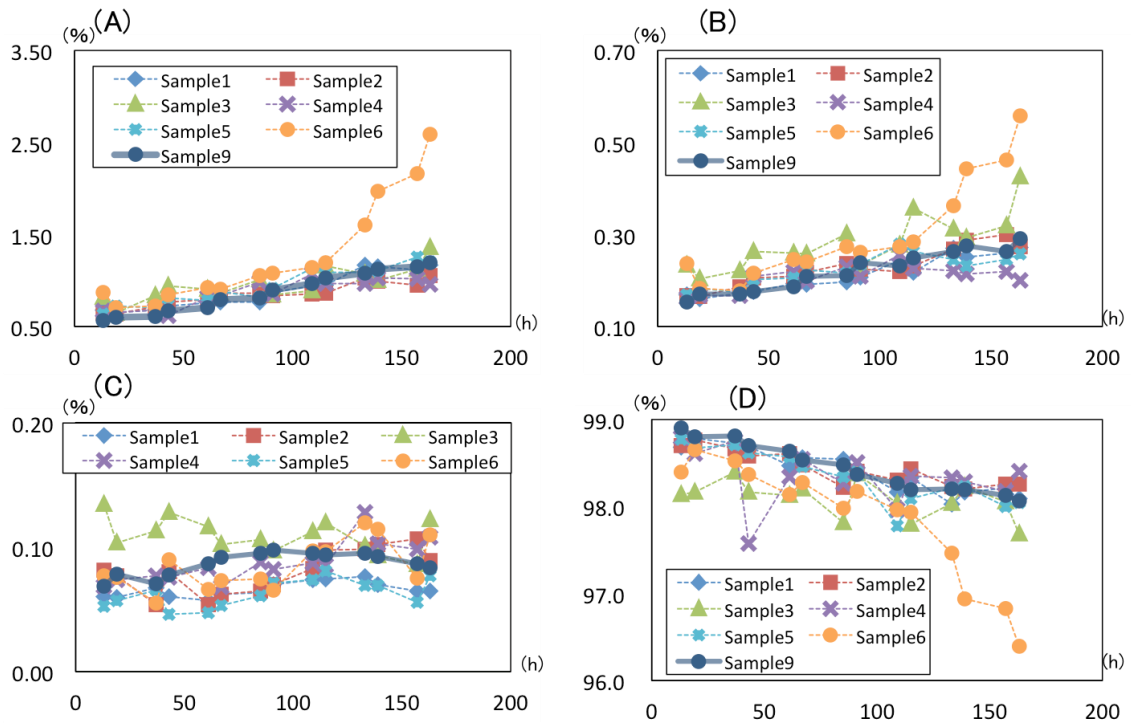


図 4.32 元素量の経時変化データ。(A) Sample1-6におけるK検出量の経時変化。(B) Sample1-6におけるCa検出量の経時変化。(C) Sample1-6におけるP検出量の経時変化。(D) Sample1-6におけるLE検出量の経時変化。



### 4-3-5 各種計測データを用いた鮮度判別モデル

本実験で取得した光計測による計測値から、レタスの鮮度判定を行うために機械学習を用いて評価を行った。その手順として、ここまで取得した各計測値からレタスの状態を示すと考えられるものをデータセットとして選択し、選択した多次元のデータに対し K 平均法 (k-means) を用いて近い属性によって分類を行った。その結果ある条件下において、収穫後経過時間によって大まかに分類が行えたため、この情報を学習・予測するためのサポートベクターマシン (SVM) と決定木の 2 種類の判別分析を行った。これらの結果からマルチ分光センシングにおける機械学習の有効性を検討した。行った操作を図 4.33 に示し、順に結果を述べていく。

#### 4-3-5-1 データの選択

はじめに本実験で取得した各計測項目から、レタスの状態を示していると考えられるものを機械学習のための「特徴」として選択した。以下に「特徴」として用いた 15 個のパラメータを表 4-7 に示す。

データセットとして扱う計測データは、結球状態のレタスを用いた連続計測で取得した Sample1-6 の 6 個体、7 日間の 14 回計測で  $6 \times 14 =$  計 84 セットとした。

機械学習のデータの選び方の問題点として、2 点考えられる。1 点目は特徴量の数が多くなりすぎると、未知のデータを予測する性能である汎化性能を向上させることが難しくなることである。2 点目は解析手法によっては特徴の項目数に対して十分な量のサンプル (特徴量の 10 倍以上が目安とされる) が解析の信頼性に繋がる点である。つまり、今回は 15 項目の検出値をすべてデータセットとして用いており、サンプルが 84 サンプルで解析を行っているが、データを選択部分では更なる検討を重ねることで、より精度の高い評価が行える可能性がある。但し本論文は、光計測データによるレタスの鮮度評価の有用性を議論することを主目的としており、精度の検討は今後の課題として扱うこととする。

#### 4-3-5-2 k 平均法 (k-means) によるクラスタリング

作成した各個体の計測時間ごとの 15 個のパラメータのデータセットから、パターンを見つけ出しグループ分けするために K 平均法によるクラスタリングを行った。本項では解析のために統計言語である R (Version3.3.1) の Cluster パッ

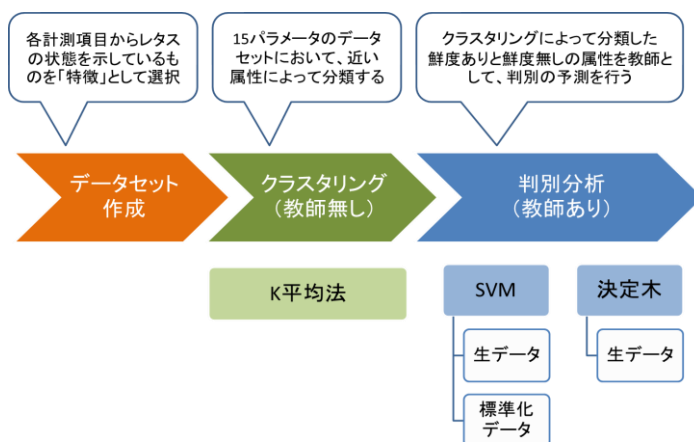


図 4.33 本実験における機械学習の手順

表 4-7 各機械学習法に使用したデータセットのパラメータ

計測手法	計測部位	特徴
画像	レタス結球	結球表面積
		色相H平均値
		彩度S平均値
		明度V平均値
	芯断面	色相H平均値
		彩度S平均値
蛍光X線	レタス結球	明度V平均値
		カリウムK
		カルシウムCa
		リンP
紫外蛍光	結球葉	軽元素LE
		クロロフィル値Chl
		フラボノール値Flav
		アントシアニン値Anth
		NBI値

ケージを用いた。K 平均法をはじめとする各クラスタリング手法において、データの 1 パラメータの値を 10 倍するだけで結果が大きく変わることがある。そこで 15 パラメータをそれぞれの個体ごとの計測結果において標準化を行った。

以上の処理を行ったデータセットに対し、それぞれのサンプル（ここでは 15 パラメータの値を持つ計測サンプルの計測時間ごとのセット）84 個に対し K 平均法によるクラスタリングを行う。結果を可視化するために、15 パラメータの第一主成分と第二主成分の得点でプロットした。その上に K 平均法によって分類した所属クラスで、色付けしたものを図 4.34 に示す。また、サンプルごとの分類結果を表 4-8 に示す。

その結果、今回使用した 15 パラメータでクラスタリングを行うと収穫後 85 時間から 109 時間にかけてサンプルの所属グループが変わることが分かった。また、結果を可視化するためにプロットした主成分得点からも同じ時間帯で大きく傾向が変わることが読み取れる。第二主成分までの累積寄与率を算出すると約 77%であった。第一主成分における得点はどのサンプルにおいてもほとんどが劣化に伴い小さくなった。しかし第二主成分の得点に着目すると収穫後 85 時間から 109 時間の間で増加から減少へと傾向が変化していることがわかる。K 平均法によるクラスタリング結果においてもこの点で分類が行われていることが読み取れる。従って、本実験で取得した光計測による計測値のデータセットを用いればレタスを、劣化におけるステージによって大別できることが示唆された。ここではこの分類結果の要因について議論することはせず、精度の向上やデータ検証については今後の課題として扱う。

#### 4-3-5-3 サポートベクターマシン (SVM) による分類

ここでは上述したように K 平均法による分類結果をそれぞれの従属変数としてサポートベクターマシンによって学習と分類を行い、その有用性を検討する。データセットについては、野菜の加工現場において計測を行うことが想定されるため、その場で迅速な判定を行うためには計測値に処理を行っていない生データについて検討を行った。それに加えて分類精度の比較を行うために標準化処理を施したデータについても、同様の学習と分類を試みた。本項では K 平均法と同様に、統計言語 R (Version3.3.1)の Kernlab パッケージを用い、以下の手順を踏み、一連の SVM による学習、評価を行った。

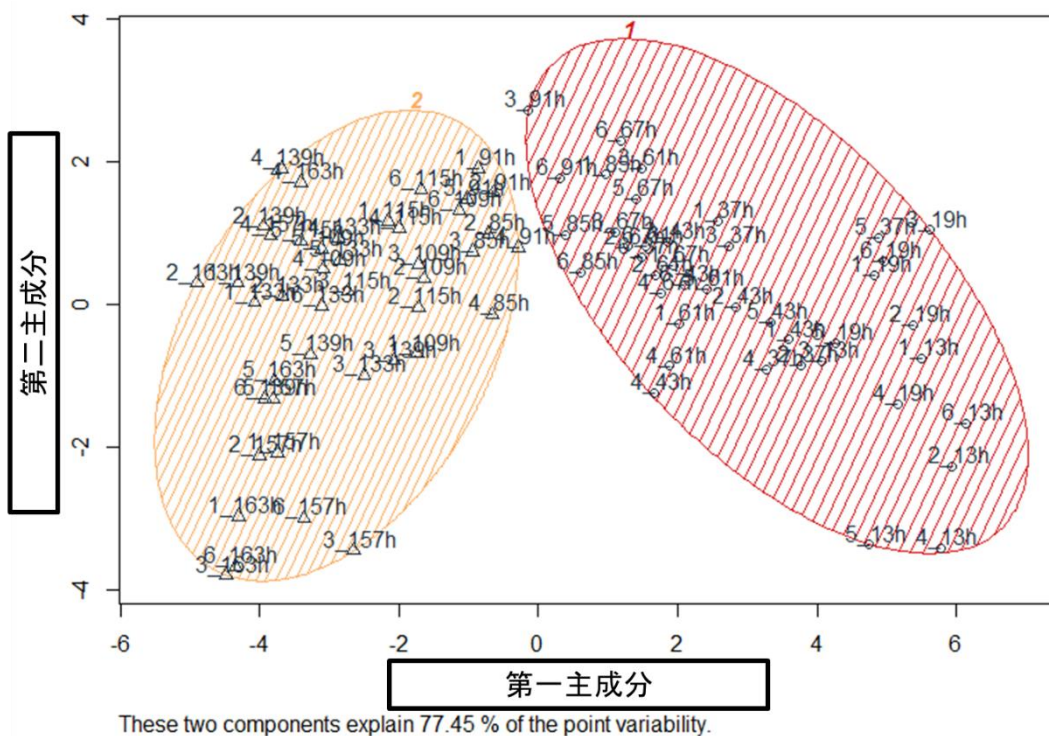


図 4.34 K 平均法による分類結果

表 4-8 K 平均法による分類結果の詳細

	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Sample5	Sample6
13h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
19h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
37h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
43h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
61h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
67h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
85h	Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Fresh	Fresh
91h	Non Fresh	Non Fresh	Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Fresh
109h	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh
115h	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh
133h	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh
139h	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh
157h	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh
163h	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh	Non Fresh

1. データセットを訓練データと評価データに分ける
2. 訓練データにおいてデータセットをカーネル法により特徴空間におけるパラメータに変換する
3. SVM によって非線形の分類面を作成する
4. 交差検証を行い、分類面モデルの精度を検討する
5. 評価データに分類面モデルを適用し、従属変数の予測を行う
6. 正解率を算出し、評価を行う

本項では SVM を用いた学習と評価において 1 例を示し、有用性を検証することを目的としているため、便宜的に訓練データを Sample1-3 のデータセット 42 サンプル、評価データを Sample4-6 のデータセット 42 サンプルとした。カーネル関数を動径基底関数カーネルである `rbfdot`、交差検証の分割数を一般的に用いられる 10 に指定した。はじめに計測値に処理を行っていない生データについて結果を示す。Sample4-6 における予測値と K 平均法によって分類した真値を以下の表 4-9 に示す。

その結果、訓練データの 10 分割交差検証における、10 回の正解率の平均値 (Total Accuracy) は 95.2% となり十分に高い値となった。この結果は、訓練データ内であれば、未知データに対する予測が高い精度で行える、つまり汎化性能が高く信用できる分類面モデルが作成されたと考えられ、評価データに適用した。分類面から従属変数である Sample4-6 の鮮度値の予測を行った結果、42 データ中 33 データに当たる 78.6% が正しく評価できた。その内訳を確認したところ、Sample4 ではすべての 14 データにおいて正しく予測が行えた結果となった。Sample5 では鮮度が良いとされる収穫後 67 時間、85 時間のデータにおいて鮮度が失われていると予測される結果となった。Sample6 でも同様に収穫後 61 時間から 91 時間までのデータにおいて、鮮度が失われていると予測された。「K 平均法によって分類した 2 つのグループ分けが劣化のステージにおいて正しく分類されている」という仮定のもとでは、これらの予測と真値のズレは、分類面が Sample5 と Sample6 の分類面付近のデータに対して正しく機能していないことを示す。また、Sample6 では確実に鮮度が失われていると考えられる収穫後 139 時間から 163 時間のデータにおいて鮮度が良いと予測される結果となった。この要因として Sample6 に関しては、Sample1-5 とは環境条件

が異なるデータであり、作成したモデルにおいて内挿問題の範囲に留まらないと考えられる。生データにおいては大きく外れた計測値が出てきたとき、全体の分布で特徴づけられておらず、このような誤判定が生じることが考えられた。

次に標準化処理を行ったデータセットにおける学習、分類結果を示す。生データと同様に Sample4-6 における予測値と K 平均法によって分類した真値を以下の表 4-10 に示す。

その結果、訓練データの 10 分割交差検証における、10 回の正解率の平均値 (Total Accuracy) は 97.6% となり、生データを学習させたときに比べて高い値となった。同様に信用ができる分類面モデルが作成されたと考え、評価データに適用した。分類面から従属変数である Sample4-6 の鮮度値の予測を行った結果、42 データ中 40 データに当たる 95.2% が正しく評価でき、生データに比べてその精度は大きく向上したといえる。内訳を確認したところ、Sample4 ではすべての 14 データにおいて正しく予測が行えた結果となった。Sample5 では鮮度が良いとされる収穫後 85 時間のデータにおいて鮮度が失われていると予測され、Sample6 でも同様に収穫後 91 時間のデータにおいて、鮮度が失われていると予測された。

以上の結果を整理すると、「K 平均法によって分類した 2 つのグループ分けが劣化のステージにおいて正しく分類されている」という仮定のもとで SVM によって学習を行うと生データ、標準化データどちらにおいても汎化性能の高い分類面モデルを作成でき、それぞれで未知のデータ評価を試みると、生データにおいてはある程度の精度で予測が行え、標準化データにおいては非常に高い精度で予測が行えた。これは簡易にデータ取得が行えるマルチ分光センシングの検出値からレタスの劣化ステージにおける状態を予測することが可能であることを示唆しており、SVM による学習が有用であることが明らかとなった。

#### 4-3-5-3-1 芯データを除いたデータによる SVM 分類

表 4-10 に示した 15 パラメータから芯断面の色彩情報 H,S,V を除き、12 パラメータで学習と評価を行った。標準化処理を行っていない計測生データと標準化を行ったデータの 2 パターンにおいて検討した。それぞれの結果を表 4-11 と表 4-12 に示す。

計測生データの場合、10 分割交差検証における、10 回の正解率の平均値は 92.9% となり高い値となった。この結果からは汎化性能が高いと判断できるが、評価データを予測した正解率は 42 サンプル中 27 サンプルにあたる 64.3% とな

表 4-9 SVM によって生データを学習させた際の予測値

	Sample4		Sample5		Sample6	
	予測値	真値	予測値	真値	予測値	真値
13h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
19h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
37h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
43h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
61h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Non fresh	Fresh
67h	Fresh	Fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh	Fresh
85h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh	Fresh
91h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh
109h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
115h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
133h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
139h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh
157h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh
163h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh

標準化処理なし(生データ) 交差検証:95.2% 予測正解率33/42サンプル:78.6%

表 4-10 SVM によって標準化データを学習させた際の予測値

	Sample4		Sample5		Sample6	
	予測値	真値	予測値	真値	予測値	真値
13h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
19h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
37h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
43h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
61h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
67h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
85h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh	Fresh	Fresh
91h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh
109h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
115h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
133h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
139h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
157h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
163h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh

標準化処理あり 交差検証:97.6% 予測正解率40/42サンプル:95.2%

表 4-11 SVMによって生データ（芯情報なし）を学習させた際の予測値

	Sample4		Sample5		Sample6	
	予測値	真値	予測値	真値	予測値	真値
13h	Fresh	Fresh	Non fresh	Fresh	Fresh	Fresh
19h	Fresh	Fresh	Non fresh	Fresh	Fresh	Fresh
37h	Fresh	Fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh	Fresh
43h	Non fresh	Fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh	Fresh
61h	Non fresh	Fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh	Fresh
67h	Fresh	Fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh	Fresh
85h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh	Non fresh	Fresh
91h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh
109h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
115h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
133h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
139h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
157h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
163h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh

芯なし 標準化なし 交差検証:92.9% 予測正解率27/42サンプル:64.3%

表 4-12 SVMによって標準化データ（芯情報なし）を学習させた際の予測値

	Sample4		Sample5		Sample6	
	予測値	真値	予測値	真値	予測値	真値
13h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
19h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
37h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
43h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
61h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
67h	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh	Fresh
85h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh	Fresh	Fresh
91h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Fresh
109h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
115h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
133h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
139h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
157h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh
163h	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh	Non fresh

芯なし 標準化あり 交差検証:97.6% 予測正解率40/42サンプル:95.2%

表 4-13 各計測手法の SVM による交差検証結果と予測正解率

	パラメータ数	交差検証	正解率
蛍光X線	4 (K,Ca,P,LE)	90.5%	76.2%
紫外蛍光	4 (Chl,Flav,Anth,NBI)	85.7%	71.4%
画像(芯データあり)	7 (表面積,H,S,V,芯H,芯S,芯V)	95.2%	78.6%
画像(芯データなし)	4 (表面積,H,S,V)	90.5%	69.0%



った。その内訳を確認すると Sample4-6 全体を通して Non-Fresh と予測されているサンプルが多く見られた。特に Sample5 では 14 計測データすべてにおいて Non-Fresh と予測される結果となったことから、計測生データにおいて SVM で学習と評価を行う時に芯断面データは大きな意味を持っていると考えられる。

一方、標準化処理を行ったデータの場合は 10 分割交差検証における、10 回の正解率の平均値は 97.6%となった。評価データを予測した正解率は 42 サンプル中 40 サンプルにあたる 95.2%となった。この結果は芯のデータを含めたときと同じ精度であり、予測がかなり正確に行われている。

#### 4-3-5-3-2 単一手法のみ結果を用いた SVM 分類

それぞれの計測手法（蛍光 X 線分析、色素蛍光分析、色彩画像処理）における計測値を特徴とした SVM における学習と評価を行い、単一の計測手法での鮮度判定の可能性について検討した。ここでは 15 パラメータを用いた時と同様に Sample1-3 の計測結果を訓練データとし、Sample4-6 の計測結果を評価データとした。表 4-13 に使用したデータセットごとの交差検証と予測の正解率の結果を示す。

まず蛍光 X 線分析におけるカリウム K、カルシウム Ca、リン P、軽元素 LE の 4 パラメータの検出値を特徴量とし、K 平均法で得られた分類結果である鮮度値 (Fresh-Non Fresh) を従属変数とした学習と評価を行った。その結果、交差検証における正解率は 90.5%、評価データを予測した正解率は 42 サンプル中 32 サンプルにあたる 76.2%となった。次に色素蛍光分析におけるクロロフィル値、フラボノール値、アントシアニン値、NBI 値の 4 パラメータを特徴量とし、同様の学習と評価を行った。その結果、交差検証における正解率は 85.7%、評価データを予測した正解率は 42 サンプル中 30 サンプルにあたる 71.4%となった。次に色彩画像処理における葉側・芯断面それぞれの色相 H、彩度 S、明度 V と結球の表面積の 7 パラメータを特徴量とし、同様の学習と評価を行った。その結果、交差検証における正解率は 95.2%、評価データを予測した正解率は 42 サンプル中 33 サンプルにあたる 78.6%となった。また、芯断面のデータを除き、レタス結球の色彩情報と表面積のみで学習と予測を行った。その結果、交差検証における正解率は 90.5%、評価データを予測した正解率は 42 サンプル中 29 サンプルにあたる 69.0%となった。

これらの結果から単一の計測手法による学習と予測は、マルチ分光センシングの全計測データを用いたモデルと比べると精度は落ちるが、比較的精度の高

いモデルが作成できることが確認された。特に色彩画像処理による 7 パラメータを用いた場合では、全計測データを使用した場合と非常に近い予測精度を示しており、今後検討を重ねることで単一手法のみで精度の高い判定が行えるようになる可能性がある。

#### 4-3-5-4 決定木モデリング

SVM での評価度同様、標準化処理前・後それぞれにおいて便宜的に訓練データを Sample1-3 のデータセット 42 サンプル、評価データを Sample4-6 のデータセット 42 サンプルとし、決定木モデルの有用性検討を行った。本項では、決定木分類モデルの構築を Python(Version2.7.10)と、オープンソースの機械学習ライブラリである scikit-learn(Version0.16.1)を用いて行う。グラフの可視化には GraphViz(Version2.38.0)を用いた。

決定木で使用される不純度の指標または分割条件は、ジニ不純度(Gini impurity)、エントロピー(entropy)、分類誤差(classification error)の 3 つである。本項では、相互情報量(2 つの確立の相互依存性)が最大化するように試みる条件であるエントロピーを用いてモデルを作成した。また決定木は木が深くなるほど決定境界が複雑になり過学習に陥りやすくなるため、作成したモデルにおいて深さ 1~4 のモデルを比較したところ深さ 3、4 においてほぼ同様の結果が出るということが確認されたため、本項での決定木深さは 3 を採択し行った。モデルの評価には k 分割交差検証を用い、分割数は一般的に用いられる 10 を指定した。

まず、マルチ分光センシングによって取得した 15 変数のデータセットを用いて決定木モデルを作成した。このとき、鮮度評価として高い精度での指標となると考えられるが、実現場での利用が困難であると考察されたレタス芯の色彩を除いたモデル作成も行い、精度の比較を行った。作成したモデルを可視化したものを図 4.35 に示す。可視化した図においての表記は、以下の表 4-14 の通りである。

マルチ分光センシングによって取得した 15 変数の生データ訓練データセットを用いてモデルを作成したところ、交差検証における正解率の平均値は 84.1% と十分に高い値となり汎化性能の高い信用できるモデルの作成ができたと考え、評価データに適用した。正解率は 95.2%となり、高い精度のモデルが作成されたと判断された。標準化処理を行わない生データを用いた場合について考えると SVM での結果よりも評価データセットに適応した際の正解率が高いことが

確認され、決定木モデルの有用性が示唆された。しかし交差検証における正解率の平均値は SVM を用いた際の方が高く、汎化誤差の小さいモデルとなっているため、どちらのモデルの方が優れているかという判断は難しい。レタス芯に着目した色彩を除いたデータセットでのモデル精度は、交差検証での正解率は少し下がったが、評価データセットを用いた正解率はレタス芯の色彩を含んだ際と同様であり、レタス芯の色彩を抜いたとしても十分に精度の高いモデルが作成できると確認された（表 4-15）。以上より、実現場での鮮度判定に適していると思われる標準化処理を行わない生データにおいての鮮度判定モデルは SVM、決定木どちらにおいても精度高く作成されることが分かり、マルチ分光センシングデータの機械学習への導入による鮮度判定モデリングの有用性が示された。またそれはレタス芯の色彩を除いた場合でも言えることが分かった。

#### 4-3-5-4-1 単一手法のみ結果を用いた決定木分類

各計測手法における複数の変数を特徴とした決定木モデルを構築し、マルチ分光センシングによって取得した 15 変数を用いたモデルとの精度比較を行い、少ない光計測手法での鮮度判定の可能性について検討した。

まず蛍光 X 線分析におけるカリウム K、カルシウム Ca、リン P、軽元素 LE の検出値を特徴量とし、K 平均法で得られた分類結果を従属変数とした決定木モデリングを行った。作成したモデルを可視化したものを図 4.36 に示す。

交差検証における正解率は 83.3%、評価データセットを用いた正解率は 80.9% となりマルチ分光センシングの全計測データを用いたモデルと比べると精度は落ちるが、比較的精度の高いモデルが作成できることが確認された。

次に色彩画像処理における葉側・芯の色相 H、彩度 S、明度 V を特徴量とし、同様の従属変数を設定し決定木モデリングを行った。このとき、実現場での評価が難しいと考察されたレタス芯における色彩を抜いたモデリングも行った。作成したモデルを可視化したものを図 4.37 に示す。

芯の色彩を含むモデルでの交差検証における正解率は 88.3%、評価データセットを用いた正解率は 95.2% となった。芯の色彩データを含まないモデルでの交差検証における正解率は 79.2%、評価データセットを用いた正解率は 57.1% となった。芯の色彩を含むモデルでは、マルチ分光センシングの全データを用いたモデル以上に交差検証における正解率が高くなり、評価データセットを用いた正解率と同様の値が得られた。しかし芯の色彩を除いたモデルでは、交差検証における正解率は同様に評価データセットを用いた正解率は低くなる結果

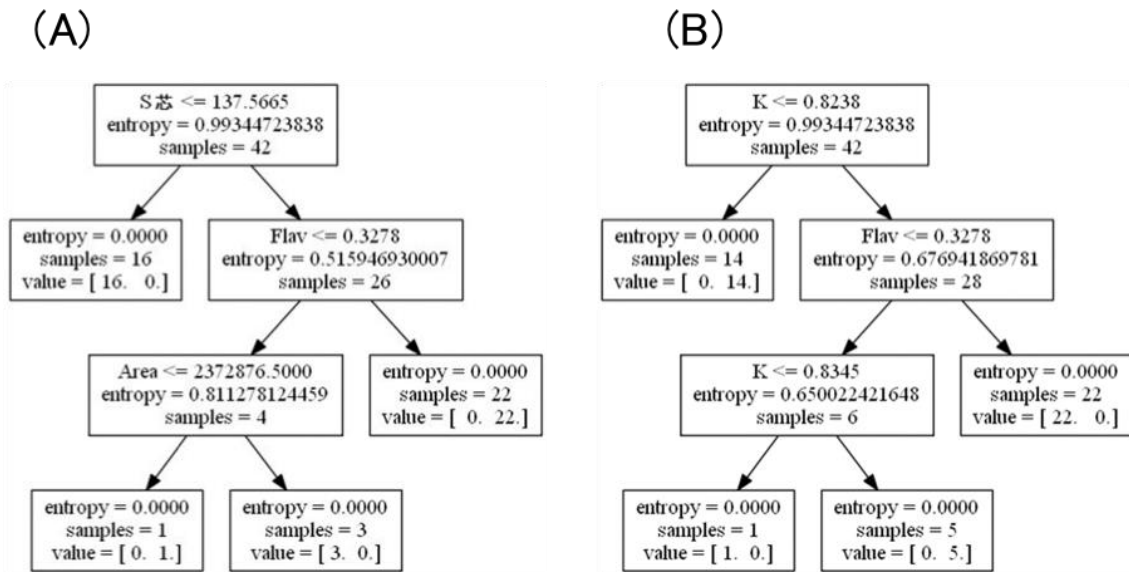


図 4.35 決定木モデル。(A) マルチ分光センシング全データにおける決定木モデル。(B) マルチ分光センシング全データ（芯色彩除く）決定木モデリング。

表 4-14 決定木可視化項目

Area	レタス表面積
H	レタス結球色相H平均値
S	レタス結球彩度S平均値
V	レタス結球明度V平均値
H芯	レタス芯色相H平均値
S芯	レタス芯彩度S平均値
V芯	レタス芯明度V平均値
K	カリウムK
Ca	カルシウムCa
P	リンP
LE	軽元素LE
Chl	クロロフィル値Chl
Flav	フラボノール値Flav
Anth	アントシアニン値Anth
NBI	NBI値

表 4-15 SVM、決定木モデル精度

	SVM		決定木	
	交差検証	正解率	交差検証	正解率
全データ	95.2%	78.6%	84.1%	95.2%
全データ(芯データなし)	92.9%	64.3%	89.0%	78.6%

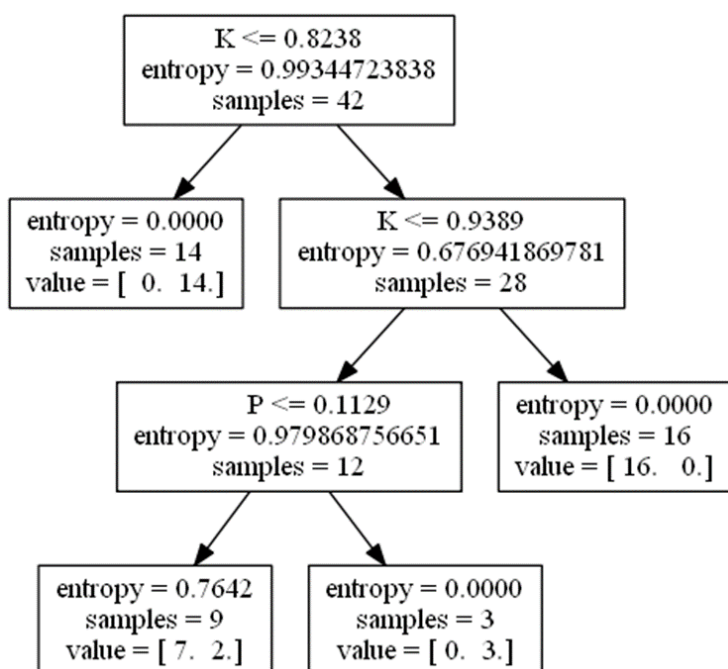


図 4.36 蛍光 X 線分析データのみを用いた決定木モデル

となった。この結果より、上述の考察の通り特に芯の色彩が鮮度評価に有効であること、各分光センシングデータでのモデル作成の有用性、マルチ分光システムの全データのある程度のデータクレンジングの必要性、芯を含まない色彩画像処理データのみでの機械学習モデリング鮮度判定は難しいということが確認された。表 4-16 に使用したデータセットごとの交差検証と予測の正解率の結果を示す。

以上の結果より、マルチ分光センシングによって取得したデータにおける決定木モデルの有用性が示唆されたと同時に、各分光センシングデータのみでのモデリング有用可能性も示唆された。また、より汎化性能・精度の高いモデル構築のためのデータクレンジング方法の検討が今後必要となることが分かった。

### 4-3-6 レタス内部の情報を反映させた分解実験

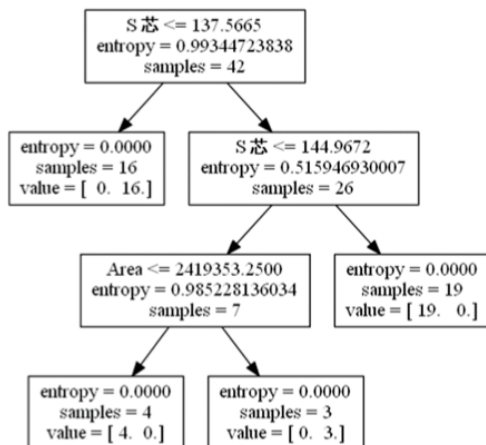
#### 4-3-6-1 蛍光 X 線による元素計測

##### 4-3-6-1-1 各葉の経時変化および各個体の分布

レタス内の蛍光 X 線分光分析による元素定量の結果を図 4.38 に示す。

まずは LE について見ていく (図 4.38(A))。1 枚目から 7 枚目の各葉において、LE は類似した減少傾向を示した。この変化が何を示しているのかを調べるため、各葉の湿量含水率を計測したところ、外側から 1 枚目と 2 枚目は LE と同様の減少傾向を示した一方で、3 枚目以降は LE において認められたような減少は見られなかった (図 4.38(E))。LE は、Na よりも原子量が小さい元素の事を指しており、基本的には蛍光 X 線装置が検知できなかった物質全体をまとめて軽元素 (LE) として算出している。このことから、レタス内部葉における LE の変化は、外葉で観察されていた水分の減少ではなく、蛍光 X 線分光装置の視野内に他の検知可能なミネラルが増加したことによるものである可能性が示唆された。これを踏まえて他の元素、主にカリウム、リン、カルシウムについての結果を見ていく (図 4.38(B, C, D))。まずカリウムは、外葉、内容を問わず経時的に増加している様子が認められ、これと同様の傾向がカルシウムにも認められた。その一方で、リンについてはすべての葉において LE と同様の経時的な減少傾向が認められた。

(A)



(B)

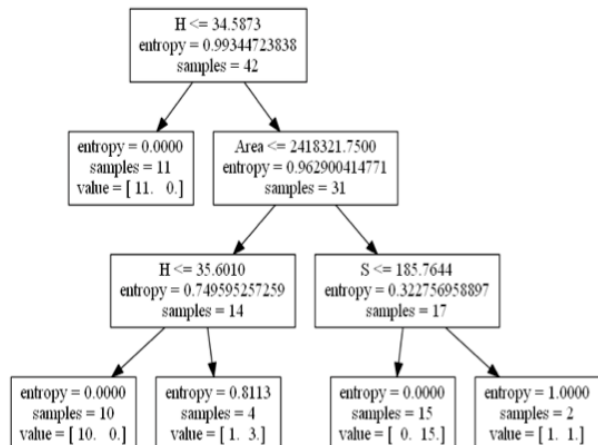


図 4.37 色差画像データを用いた決定木モデル。(A) 色彩画像処理データのみを用いた決定木モデル。(B) 色彩画像処理データ（芯色彩除く）のみ用いた決定木モデル。

表 4-16 各計測手法の決定木による交差検証結果と予測正解率

	パラメータ数	交差検証	正解率
蛍光X線	4 (K,Ca,P,LE)	83.30%	80.90%
紫外蛍光	4 (Chl,Flav,Anth,NBI)	67.50%	73.80%
画像(芯データあり)	7 (表面積,H,S,V,芯H,芯S,芯V)	88.30%	95.20%
画像(芯データなし)	4 (表面積,H,S,V)	79.20%	57.10%

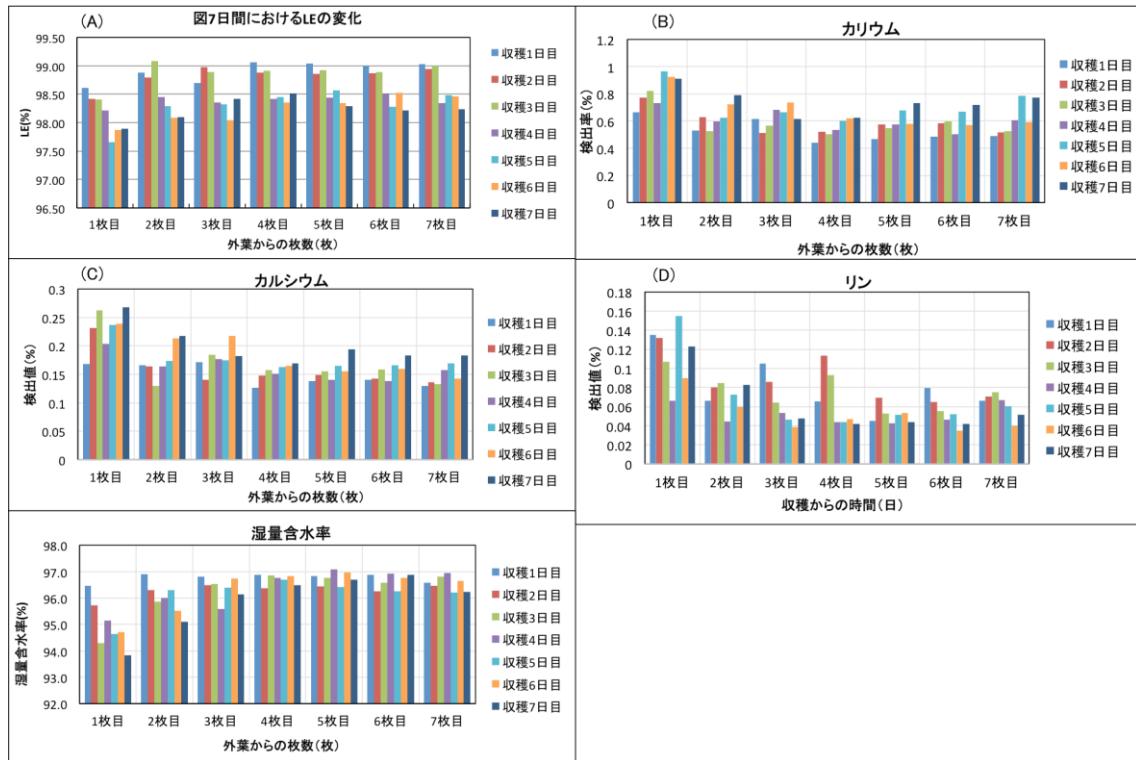


図 4.38 一回目の実験におけるレタス葉枚数ごとの蛍光 X 線の結果 (A) LE (B) カリウム (C) カルシウム (D) リン (E) 含水率



これらを考察するために、それぞれの元素が持つ植物体での働きについて考える。まず、カリウムは、基本的には細胞質もしくは液胞に存在し、pHの調整や様々な二次代謝経路でのカチオンとしての働き、さらには光合成関連の酵素活性などに寄与している (Wang et al., 2013)。また、植物は水ストレスを感知してアミノ酸の一種であるプロリンを蓄積することによって膨圧を保つ役割が知られているが、これにもカリウムが寄与しているという研究もある (Weimberg et al., 1982) 他、気孔開閉の調整もカリウムが持つ役割として広く認知されている。次に、カルシウムは、主に細胞壁や表皮細胞においてセルロースやペクチンの構造の強化をしており (Torre et al., 1992)、それ以外には気候の開閉や、活性酸素除去などに関連したセカンドメッセンジャーの役割なども果たしている (Lecourieux et al., 2006)。最後にリンは、核酸や細胞膜を形成するリン脂質、そしてエネルギー源である ATP 等にふくまれている。またレタスの内部葉は、外葉と比較して色素などの活性が少ないため、細胞における活動は少ないと考えられる。

これらの知見と、今回の結果を組み合わせると、外葉においては確かに水分が減少しており、その分の収縮が他の元素の増加を示していることは確からしいと言える。その一方で内部の葉においては、含水率の変化がないことから収縮による相対的な元素の増加ではなく、元素が葉の表面に局在を始めたことによる増加であると考えられる。その中でも、特に水分減少を防ぎ、カリウムおよびカルシウムの働きが大きく関与する動きは気孔の開閉である。カルシウムは気孔が閉じる時に孔辺細胞に含まれる元素であるため、それが原因で増加した可能性が示唆された。そしてカリウムは、表面の特に水ストレスがかかると思われる細胞内に局在することによって水分の消失を防ぐ役割をされると考えられる。最後にリンの減少は、膜として存在しているリンよりも表面にカリウムやカルシウムが存在したことによって、検知されなかったのではないかと考察される。

続いて、はじめに行った各葉の経時変化による解析から、各実験日ごとのレタスの元素分布の解析を行う。図に、各実験日ごとの各元素の存在比率を示す (図 4.39)。

まずは一回目の実験について、LE から見ていく (図 4.39(A))。LE は 1 日目から 7 日目まで非常に類似したパターンを示した。具体的には外葉で低く、レタス内部に向かうにつれて一定の値に収束するような分布を見せた。そして、カリウムとカルシウムはこの LE の動きと正反対の挙動を示した (図 4.39(B, C))。

このことから、各レタス個体内の元素分布は、実際に含水率が低下し収縮が起きているとされる外葉において相対的に大きくなる傾向が明確に認められた。さらに、レタス個体における元素分布パターンはすべての日で類似していることから、レタス個体内での葉から葉への移動といったダイナミックな元素な動きは起きていないことが示唆された。また、リンについても外葉で最も高く検出され、そのあとは幾分かのばらつきはあるものの3枚目より内部の葉では一定の値に収束するというパターンをすべてのレタス個体で示した(図 4.39(D))。このリンに特徴的な分布は、リンがカリウムやカルシウムと比較して個体間での差が大きいことに起因すると考えられる。植物において、リンは必須ではあるが、カリウムなどとは異なり過剰に存在すると毒性を発揮することが知られている(Bhatti and Loneragan, 1970)。そして、植物体内でリンが過剰となった場合には、リンは表皮細胞や柵状組織に局在することが報告されている(Shane et al., 2004)ため、個体としてリンを多く含んでいるものは表皮への蓄積が進み、多く検出されることが示唆された。

二回目の実験におけるレタス内の蛍光 X 線分光分析による元素定量の結果を図 4.40 に示す。

まず、LE について見ていくと、外葉 1 枚目では、その減少傾向が確認できる一方で、その他の葉ではほぼ経時的な変化は認められなかった。このような傾向は含水率においても認められたため、本実験においては、LE の変化量はそのまま含水率を反映していることが示唆された(図 4.40(A))。

その他の元素の変化について見ていく。まずカリウムは、外葉 1 枚目では LE の減少に伴って増加する傾向が見られた一方で、2 枚目以降は横ばい、もしくは若干の減少傾向を示した(図 4.40(B))。続いてカルシウムの経時変化は、外葉 4 枚目までは時間とともに含量が増加する傾向を示したが、5 枚目以降はほぼ経時変化は認められなかった(図 4.40 (C))。最後にリンは、非常にばらつきの大きい動きを示しており、その日ごとに大小を繰り返すというような変化を示した(図 4.40 (D))。このように、第一回目で認められた元素および LE の変化傾向が本実験では認められず、再現性は成立しなかった。

そこで、1 回目で認められた様々な変化が 2 回目のレタス群では再現されなかった要因を考察する。まず一つに、レタスが栽培された季節の違いである。レタスを始めとする葉野菜において最も重要な生育環境要因は日射量である。前者のレタスは 9 月中に生育したために、十分な日射量があったことに加えて、

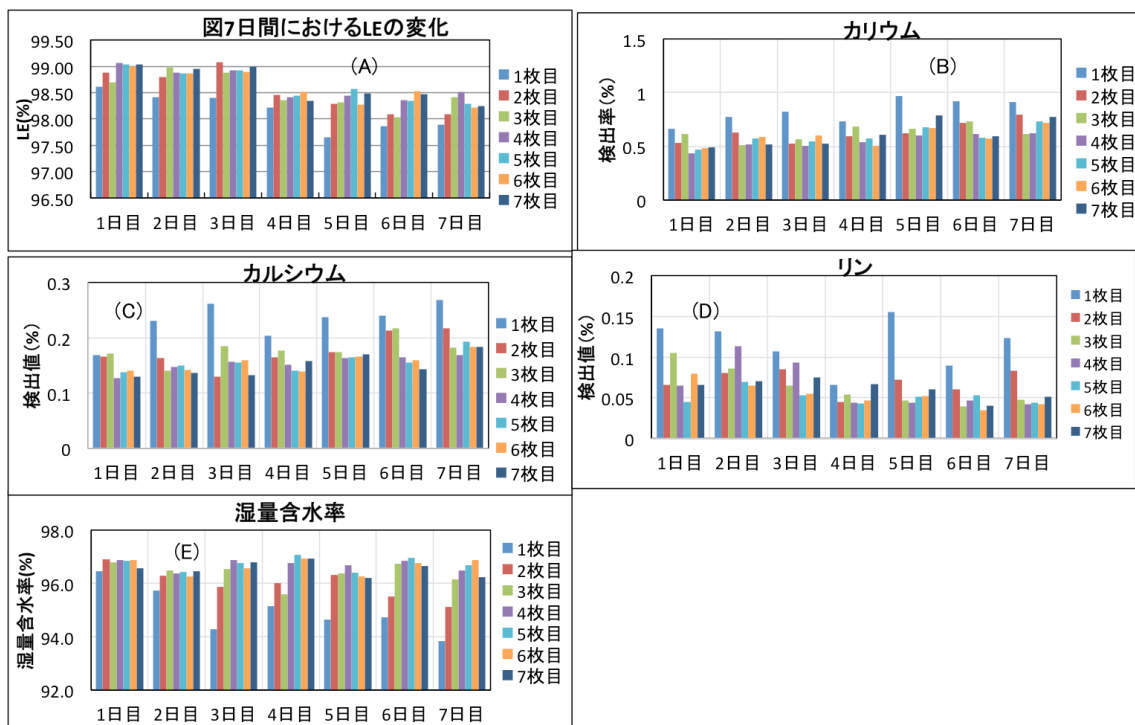


図 4.39 一回目の実験におけるレタス葉蛍光 X 線の経時変化の結果 (A) LE (B) カリウム (C) カルシウム (D) リン (E) 含水率

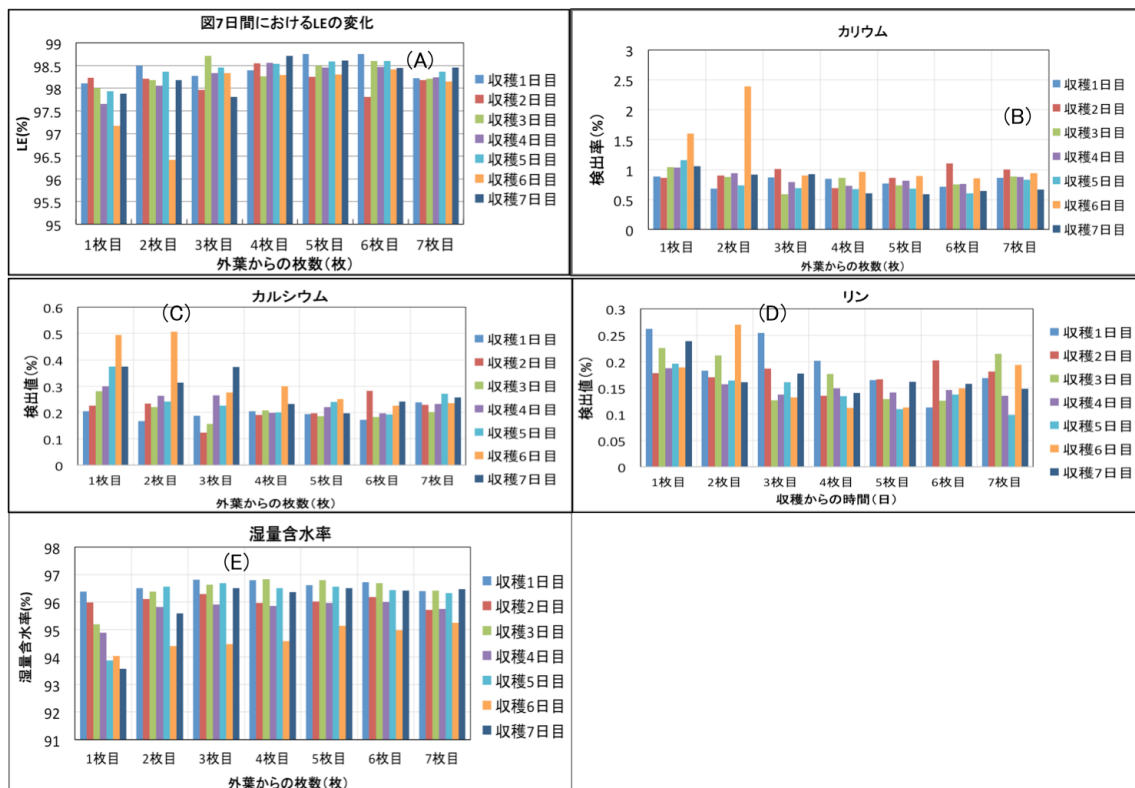


図 4.40 二回目の実験におけるレタス葉枚数ごとの蛍光 X 線の結果 (A) LE (B) カリウム (C) カルシウム (D) リン (E) 含水率

今年の 9 月の天候に恵まれたこともレタスの品質に寄与したと考えられる。一方で、今回の実験で用いたレタスは、10 月中に生育したレタスであるため、日射量が少なく、それに加えて 10 月における悪天候も加わり、同じレタスでも全く違うものと考えてもよいほどの差が生じた可能性がある。現に群における平均重量も一回目が 540g だったのに対し、二回目では 268g と比較して 1/2 ほど少なくなっており、相当小ぶりのレタスであった。

ここからは第二回目の計測結果を各実験日に使用したレタスごとにまとめたデータの解析を行う。それらを図 4.41 に示す。

まずは LE についてである (図 4.41(A))。実験日すべてにおいて外葉で LE が低くなる傾向は現れた一方で、最も内部である 7 枚目の葉においても LE が減少するという一貫したパターンを示した (図 4.41(A))。続いて他の元素における結果を見ていく。カリウムは、外葉で最も値が高い傾向はすべての実験日の個体で示したが、内部でもその値が上昇するという動きを示した (図 4.41(B))。カルシウムもカリウムと同様の動きを見せ、これらは LE と正反対のパターンを示していた (図 4.41(C))。

ここで、再度一回もの実験で用いたレタスと本実験で使用したレタスとの違いについて考える。まず、初期状態における 1-7 枚目の含水率については、どちらのレタスも 96-97%の間を推移していたが、8 枚目以降の葉に関する含水率が一回目の実験では 96%だったのに対し、二回目の実験では 94.7%という低い値を示していた。このことから、2 回目のレタスは収穫時点から輸送までの間で水分が内部から芯を通じて減少したことが予想される。そして、そのような水ストレスが早い段階で発生したことから、カリウムやカルシウムは初日の計測時点ですでに表面への局在を開始していたために、一回目の実験で見られた経時的な増加があまり見られず、水分が減少していきやすい 1 枚目や 7 枚目に多く分布したのではないかと予想される。これを確認するために、初期のレタスにおけるカリウムおよびカルシウム含量を比較すると、一回目の実験ではカリウムが 0.45-0.65%、カルシウムが 0.13-0.17%に推移していたのに対し、二回目の実験ではカルシウムが 0.68-0.89%、カリウムが 0.19-0.24%という値を推しており、いずれの元素においても 2 回目の実験で大きい値を示している。そして一回目の実験の最終日のカリウムおよびカルシウム含量は、それぞれ 0.62-0.91%と 0.19-0.27%で、これは二回目の実験における初期値と同じ水準であることがわかる。この事実からも、二回目の実験で使用したレタス群は、非

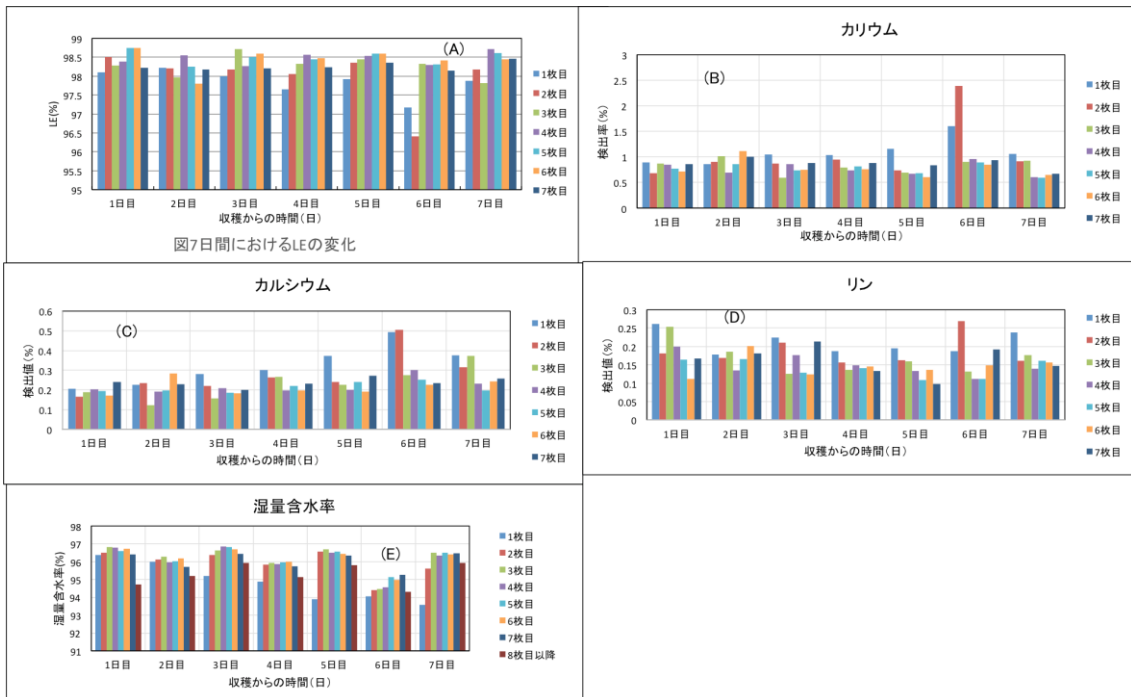


図 4.41 二回目の実験におけるレタス葉蛍光 X 線の経時変化の結果 (A) LE (B) カリウム (C) カルシウム (D) リン (E) 含水率

常に早い段階で水ストレスがかかったことが原因で、それ以降の経時変化を見ることができなかつたのではないかと推測された。

## 4-3-6-2 FT-IR による有機物計測

### 4-3-6-2-1 荷重検討

まず、1 回目の実験結果について見ていく。レタス葉において経時的に変化していくと考えられるものは、1) 糖 (特にグルコースとフルクトース、2) 有機酸、3) クロロフィル、4) 脂質、5) ペクチンやセルロースであると考えられる。しかしながら、有機酸は pH に依存してその波長が変化すること、糖や脂質はピーク波長が重複していることから非常に定量が困難である。よって、本実験ではクロロフィル、ペクチン、セルロースに着目して解析を行った。

その上で荷重について再度検討したところ、本実験では 4000hPa にて水分が染み出してくる様子が確認されたため、予備実験にて誤差が 5% 以内に収束する 1000hPa の圧力を採用した。。

### 4-3-6-2-2 各葉における経時変化および個体内の分布

第一回目の実験におけるクロロフィル、セルロース、ペクチンのピーク変化について図 4.42 に示す。

クロロフィル a は  $1448\text{cm}^{-1}$ 、クロロフィル b は  $1465\text{cm}^{-1}$  の波数域において吸収が見られることから、このピークの変化を定量したところ、クロロフィル a のピークが外葉と最も内部の葉である 7 枚目の葉において減少していく様子が確認された (図 4.42 (D))。その一方で 2-6 枚目では経時変化は見られなかった。クロロフィル b に関してはほとんど経時変化は認められなかった (図 4.42 (C))。続いて、セルロースのピークとされる  $1028\text{cm}^{-1}$  の変化傾向を調べたところ、4 日目の個体において外葉のピークが、6 日目の個体において 2 枚目と 7 枚目のピークが減少していた以外はさほど経時的な変化は認められなかった (図 4.42 (A))。最後にペクチンの変化であるが、ペクチンのメチル基におけるピークが  $1736\text{cm}^{-1}$  にて見ることもできるため (高峯ら, 2007)、そのピークに着目した。その結果、全ての葉において若干ながらペクチンのメチル基のピークが減少している様子が確認された。これはペクチンにメチルエステラーゼが寄与して脱メチル化が起きていること反映している可能性が示唆された (図 4.42 (B))。

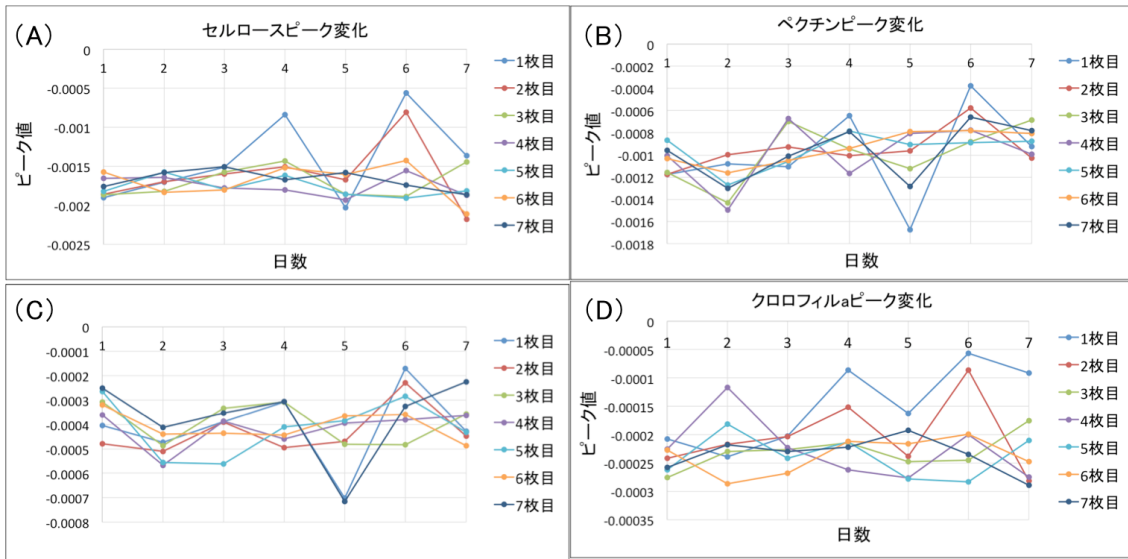


図 4.42 一回目実験の FTIR の経時的なピーク変化。(A) セルロース (B) ペクチン (C) クロロフィル b (D) クロロフィル a

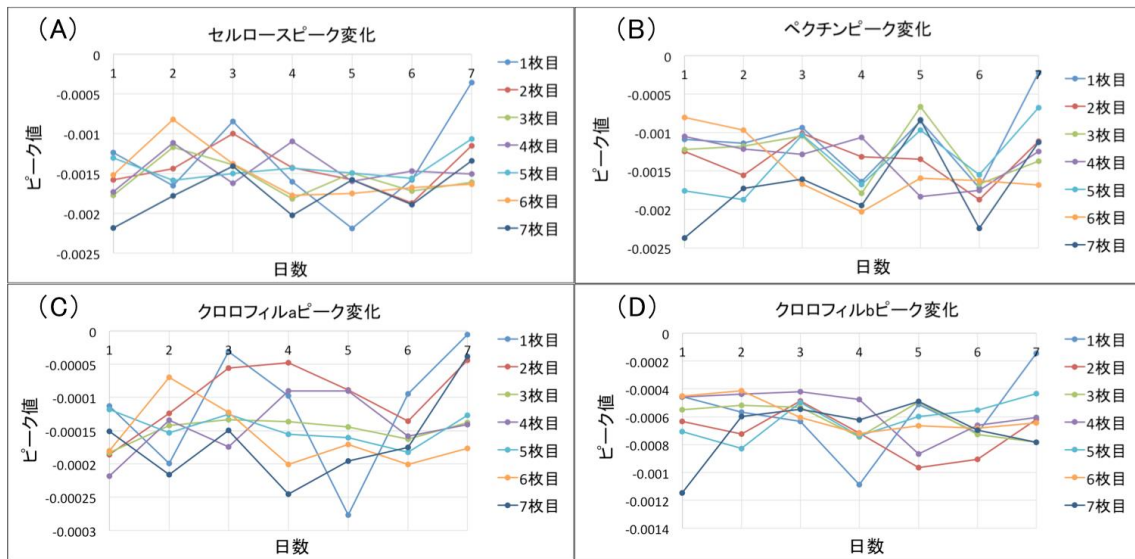


図 4.43 一回目実験の FTIR の経時的なピーク変化。(A) セルロース (B) ペクチン (C) クロロフィル a (D) クロロフィル b

ペクチンは、ホモガラクトuronanとラムノガラクトuronanから構成されており、この中でもホモガラクトuronanがゴルジ体にてメチル化されることで、細胞壁の様々な力学的特性を支えている。これらが脱メチル化されることで、細胞壁におけるカルシウムイオンと結合してゲル化を引き起こし、結果的に多糖構造の分解が起きやすくなるとされている (Francis et al., 2006; Pelloux., 2007)。そして、この脱メチル化に関わるペクチンメチルエステラーゼは、シロイヌナズナにおいてエチレンや傷害に反応して生成されるという報告がある (De Paepe et al., 2004)。よって、このペクチンにおける脱メチル化は、ペクチンがガラクトuron酸に分解される前段階で起こる反応であることから、収穫時の傷害に反応して生成されたペクチンメチルエステラーゼの酵素活性を反映している可能性が示唆された。

これを受けて二回目の実験結果に移る (図 4.43)。

まずはクロロフィル a のピークとされる  $1444\text{cm}^{-1}$  の経時変化を解析したところ、初日と最終日のみの比較においてはピークの減少傾向が確認できたが、その間の変化量も非常に大きいことから、誤差の範囲を超えない可能性が示唆された。次に、クロロフィル b においては、すべての葉で経時変化はほとんど検出されなかった。セルロースについても、ほとんどピークの変化は認められなかった。

ここからはペクチンの結果に移る。ペクチンのメチル基情報が反映されている  $1736\text{cm}^{-1}$  の情報を、一回目の実験と同様に経時的に分析したところ、初日および最終日のみに着目すれば、外葉や 5 枚目の葉において大きな変化が認められる一方で、2-6 日目の変化も考慮すると、全体的に変化の振れ幅が大きく、個体差か純粋な変化量かを判断するのが困難であった。そもそも一回目の実験のピーク変化も、ごくわずかなものだったことから、不安定な生育環境のもとで栽培された二回目の実験のレタス群では、その大きな群間誤差ゆえに、多くの有機物のピーク変化を定量することが困難だったと推測される。



## 4-4 結論

### 4-4-1 本章のまとめ

#### 4-4-1-1 色彩画像処理

レタス芯における色相 H・彩度 S・明度 V 平均値において特徴的な経時変化が基礎実験において確認されており、産地・収穫時期が異なるレタスにおいてもその特徴的な傾向は再現性を示したと共に、数値的にも誤差率 10%以内の再現性が確認された。しかし基礎実験において芯の色彩経時変化の途中で芯を再度切断すると変化傾向・数値がリセットされてしまうことが確認されているため、レタスを販売する際の見栄えや商品価値維持のための芯切断や、切り口に対する褐変防止剤使用を考慮すると実際の現場においては鮮度判定指標としての利用は困難であることが考えられるが、レタス鮮度を確認する部分としては最も精度が良いため、レタスの品質を研究するうえでの鮮度の 1 つの「正解」の指標として今後の鮮度研究への利用が期待される。

結球状態のレタス葉側の色相 H・彩度 S・明度 V 平均値の経時変化においては、収穫後経過時間 91~115 時間の間で傾向が変化するという共通の経時変化が同じ環境条件における全サンプルにおいて見られた。また、環境条件が異なり、品質低下が速くなると予測された 1 個体においては傾向が変化すると予測された部分よりも早い収穫後経過時間において傾向が変化したことから、レタス結球側の色相 H・彩度 S・明度 V 平均値の経時変化曲線の傾向が変化する部分は、品質が良いもの、良くないものを分ける境界であると考えられた。

表面積の変化について、画像データから得られる表面積データの変化傾向を追ったところ、1 個体を除いた全ての個体において決定係数 0.90 以上の精度の良い直線的な経時的減少を示した。また、レタスは水分を非常に多く含む野菜であり、水分の損失が結球サイズに大きな影響を与える可能性を考え、乾燥重量を用いた含水率と表面積データの相関を確認したところ、1 個体を除いて決定係数 0.90 以上の正の相関が見られたため、水分の損失は画像から得られる表面積での判断に有用であると示唆された。

#### 4-4-1-2 蛍光 X 線分析

X 線を照射した部位の元素組成を得られる蛍光 X 線分析では、蛍光 X 線分析

用に用意した個体において質感(Texture)に関する指標として考察したカルシウムとリンの含量に対するカリウムの含量( $K/(Ca+P)$ )における経時変化を追うと、収穫後 91 時間後から 109 時間後に大きく増加する傾向を示した。これは色彩情報の変化や簡易官能評価で大きな変化が現れた時間と同じであり、収縮の情報ではなく鮮度が良いものと良くないものを分けることができる指標に近い値になっていることが推測できた。

蛍光 X 線分析以外の計測も行い接触ストレスを与える結果となったサンプル群において、先行研究で確認されているカリウム K、カルシウム Ca、リン P、軽元素 LE の特徴的な変化について再現性が確認された。また、これらの検出値を用いることで、レタス結球の収縮や水分状態を把握することができた。

個体内における元素分布に関しては、同一の生育環境下で栽培されたレタス群については類似した結果が見出せた一方で、時期、栽培方法、個体の大きさ等様々なメタ要素が異なるレタスにおいては、その分布および経時変化はお菊異なる可能性が示された。その一方で、カルシウムとカリウムにおいては、水ストレスに応答してレタス組織表面に局在する様子を捉えている可能性が示唆された。

#### 4-4-1-3 FT-IR 分析

FT-IR 分析においては、まず 40N の圧力かにおいては、脂質が酸化していく様子が確認できた。その一方で、この圧力条件ではレタス組織が破壊されてしまい、細胞質の情報が漏出し、他のピークを検出できない可能性が示唆された。そのため組織の破壊を防ぎ、なおかつ計測誤差が少ない 10N の圧力を用いたところ、ペクチンのメチル基においてピークが経時的に減少していく様子を捉えることができた。しかしながら、レタス自体の個体差や生育環境の異なる群間差が、ピークと同レベルの影響を持つことから、今後定量実験のための工夫が求められることが示唆された。

#### (4) 機械学習

マルチ分光センシングから得られたデータセットを用いてレタス鮮度判定を行うべく機械学習への導入有用性を検討した。鮮度判定モデル作成のために与える正解(従属変数)を検討するため K 平均法を用いたクラスタリングを行ったところ、各計測項目の考察において鮮度が変化するとされた時間とほぼ合致する収穫後 85 時間から 109 時間においてサンプルの所属グループが変化することが分かった。加えて、鮮度低下が抑えられていると予測される個体において

はグループが変化する時間が他サンプルに比べて遅れていることなどから、マルチ分光センシングデータを用いた K 平均法クラスタリングによってレタス鮮度の大別ができたと考えられた。

鮮度判定モデルの作成はサポートベクターマシン(SVM)及び決定木の手法を用いた。SVM においては、マルチ分光センシングで取得した 15 変数における全生データ・標準化処理を行ったデータを訓練データ評価データに分けてモデリングを行ったところ、どちらにおいても交差検証の結果汎化性能の高い分類ができ、評価データに合致した精度の良いモデルとなったため、マルチ分光センシングの検出値を用いた SVM による学習が有用であることが明らかとなった。単一の手法でのモデル作成についても検討したところ、マルチ分光センシングで得られた全データを用いたモデルより精度は落ちる結果となったが、比較的精度の高いモデルが作成でき、今後の検討により単一手法におけるモデル構築の可能性が示唆された。

決定木には特徴量スケーリングを必須としないという長所があり、スケーリングを前提する SVM よりも実現場での利用が考えられる生データにおいて精度の高いモデル作成が可能ではないかという考察に基づき、マルチ分光センシング 15 変数における生データでのモデル精度検討を行った。その結果、汎化性能の高い、評価データに良く合致する精度の良いモデルとなり、鮮度判定における決定木モデルの有用性が示唆された。しかし、SVM でのモデルよりも汎化性能が落ち、SVM・決定木どちらのモデルが優れているかという判断は難しい。SVM でのモデル検討と同様に芯の色彩を除いた場合のモデル、単一手法におけるモデルの構築も検討した。芯の色彩を除いた場合のモデルでは、汎化性能は少し落ちるが、評価データを用いた正解率は変化せず、レタス芯の色彩を抜いたとしても十分に精度の高いモデルが作成できると確認された。単一手法におけるモデルにおいても、比較的高い精度のモデリングが可能となりその実現可能性を示唆した。

以上の結果より、フードシステムの IoT 化における品質指標としてのマルチバンド光センシングの可能性が示された。また、マルチバンド光センシングデータを機械学習することで、より精度が高い品質・鮮度定量指標の構築の可能性が示唆された。

## 4-4-2 本章の課題

本章においては、大きく分けて画像解析、蛍光 X 線分光分析、中赤外分光分析、そしてそれらのデータを複合的に処理する機械学習による判別分析を行った。まず画像解析において、経時的な収縮などのピクセル量を駆使した定量に関しては、本研究を通じて大いに有効であることが示された。その一方で、各ピクセルが持つ色彩情報については HSV 色空間を平均値処理して利用したのみにとどまっているため、今後さらなる「色」情報の解析が求められる。特に、各葉における部位ごとの色彩情報には、様々な植物体内の品質情報が含まれていると考えられ、それらの情報を抽出するための手法確立が今後の課題となる。

蛍光 X 線分析については、軽元素の存在比を示す LE 値とレタス外葉における含水率との間に高い相関が見られることを確認した。それに加え、外葉における LE 値とカルシウムおよびカリウム値も高い負の相関を示したことから、カルシウムとカリウムの値が、レタス植物における収縮を反映している可能性が示された。一方で、レタスの内部葉においてはこのような LE と含水率の相関が見られなくなり、カルシウムとカリウムの値も、含水率の変化が見られない葉での上昇が確認されたことから、含水率と葉の収縮の関係、および収穫後作物におけるカリウムやカルシウムの動きについて新たな知見を獲得するための基礎実験を行う必要がある。

FT-IR については、様々な有機物、特に脂質、糖、タンパク質に関する情報が取得できている可能性が示唆された。その中でも、ペクチンのメチル基が脱離していく情報を捕捉できている可能性が示唆された。その一方で、機器の仕様から結球状態での計測が困難であり、その結果破壊実験となってしまうために、同一個体を結球状態で継続的に計測することができない点が、軽時変化を分析する上で非常に大きな障害となっている。また、測定時に試料に対してかける圧力が、レタス組織と重りの接触具合等の要因によって一定ではないことも、計測ごとの誤差を大きくする要因だといえる。これらに対処するために、どのレタスに対してもピークが発生しない領域を探して、その領域の値を揃えることによってデータを標準化することが一つの解決策となりうる。さらに、有機酸などの品質と密接に関わる物質の定量を行うために、レタス細胞質における pH を計測することも今後の課題となりうる。

今後の展開として、光計測によるミクロな情報とメタボロミクスによる網羅

的な物質の存在情報とを複合的に考察することで、物質の植物体内における局在性およびその移動による変化をとらえ、収穫後作物の品質を定量するための指標構築に役立てていく必要がある。

次に機械学習についてである。本研究では、上に示したマルチバンド光を用いて、品質の中でも特に鮮度に重点を当てて分類を行い、その有効性を示した。今後は、機械学習を分類から回帰に展開させることで、マルチバンド光データによる品質関数の作成を目指していく必要がある。その時に重要なのがデータセットの作成である。本実験では、レタスの鮮度分類を可視画像情報と蛍光 X 線情報を用いて行ったが、最終的な社会への実装を考えた時に、データセットは少ない方が好ましい。よって、今後はこの点を重視しながらデータを取得していく姿勢が求められる。

また、最後に保蔵サブシステムにおける食品安全の観点から今後の展開を考える。今回の実験では、葉野菜、その中でも特にレタスを対象に、品質の中でも鮮度に着目した研究を行ってきた。この「鮮度」はその食品において重要な要因であることには間違いないが、安全品質というよりはむしろ付加価値品質寄りの概念である。よって今後の研究では、今回のような付加価値品質に関する研究に加えて、食品の安全品質に着目した研究も求められる。具体的にはレタス植物における O157:H7 への感染性などの視点から、本研究で行ったマルチバンド光センシングデータを見直すことなども今後の課題となる。

## 5章 結言

本研究では、現実社会のフードシステム空間を IoT ベースのフードシステム空間に投影するため、フードシステム健全性のバロメータとして食品・農作物の「品質」に着目し、その定量指標の有効性検証に関する基礎研究を行ってきた。本章では、その中で得られた成果とその位置付け、克服していくべき課題や足りない要素、そして今後に向けた研究の方向性について考えていく。

### 5-1 本研究の成果

本研究では、フードシステムにおける「持続可能性」、「食料安全保障」および「食品安全」を向上させるため、IoT の 3 層構造に基づいた情報空間における仮想フードシステムの有用性検証を目的とし、フードシステムを「生産・栽培」、「保蔵」、「輸送」、「加工」、「流通」、「消費」、「再資源化」という 7 つのサブシステムで構成されているシステムとして定義した。その中で、最も本研究の趣旨に沿う形を模索した結果、「栽培・生産」と「保蔵」サブシステムに着目し、この 2 つのサブシステムが「食品安全」と「利益還元」を最適化するために具備すべき項目として「品質」を取り上げた。そしてその「品質」を定量する指標のフードシステム動的最適化への有効性検証を目指した。

まず、「栽培・生産」サブシステムに関して、果樹栽培現場のセンサーネットワークシステムを、従来の垂直統合型から、センシング層・基盤情報サービス層・ユーザサービス層からなる水平統合型のシステムに移行することで、今後のより複合的なサービスへの拡張性を付与した。特に、ユーザサービス層において、圃場生育環境情報から算出した複数の二次栽培指標サービス提供を実装し、今後の有用性検証に向けた基盤を構築した。また、実際に樹体の栄養診断を行うために、葉中の色素量と元素量を、それぞれ蛍光分光装置と蛍光 X 線装置を用いて簡便かつリアルタイムで定量する手法の有効性を評価した。さらに、「保蔵」サブシステムに対しては、レタスを対象作物として、蛍光 X 線、FT-IR、可視画像色彩分析をそれぞれ利用して、保蔵時の品質・鮮度変化をモニタリングした。また、この取得情報をより複合的に捉えるために、蛍光 X 線と色彩画像を用いて機械学習による鮮度判別モデルの有効性を検証した。

以下、得られた結果について各章ごとに詳述した。

## 5-1-1 農業 IoT による二次栽培指標 Web サービス

第2章では、フードシステム IoT 空間の基礎となるセンシング層・基盤情報サービス層・ユーザサービス層の3層構造からなるシステム構築を行った。具体的には、既存の圃場 WSN による圃場の生育環境モニタリングシステムから、フードシステム IoT に立脚したシステムへ転換することで、従来のスタンドアロンなシステムを脱却し、他のサブシステムとの連携を可能とする水平統合な情報インフラストラクチャーを構築した。

センシング層においては、ウェザーステーションを低価格かつオールインワンタイプのもにに変更した。このウェザーステーションの特徴として、雨量計にドップラーレーダー型を使用しているため、相当小さい雨滴にも対応でき、転倒ます型雨量計において問題となっている定期的なメンテナンスが必要なくなるというメリットもある。次に、通信に使用する無線の周波数を 2.4GHz 帯から 920MHz 帯に変更した。これにより、圃場の植物などによる電波減衰が頻発していた無線環境を改善することが可能となった。そして、データの収集に関しても、従来のシステムではデータベースのレプリケーション機能によるデータのバックアップが原因となり、半年に一度ゲートウェイの SD カードを交換しなければいけなかった状況を、インターネットの不具合時のみ送信予定のデータを一時ファイルにデータ待避しデータ欠損を防止するシステムを採用することによって克服した。

基盤情報サービス層においては、ビッグデータ化する生育環境情報と関連する周辺データの利活用を踏まえ、クラウドシステムを採用した。さらにそのクラウドの管理に関して、相互運用性を確保するために、国際標準化団体 OGC が提供している SOS というセンサデータの取り扱いを容易にする WebAPI を利用できる形を整えた。本クラウドシステムに格納された計測データは、観測項目の名称及びその単位系の標準化が行われ、これによりデータ・システム間の相互運用性を高めるとともに、センシング層におけるセンサ変更などに対しても柔軟に対応できるようになった。

ユーザサービス層においては、三重大学のサーバ内に基盤情報サービス層にて単位系と観測項目の名称が標準化された圃場生育環境データを格納するためのデータベースを設計した。同時に、基盤情報クラウドに具備された WebAPI を用いて観測項目名および単位系が標準化された圃場環境データを構築したデ

データベースに格納するプログラムの開発を行った。さらに、データベース内の圃場生育環境データを用いて、生データとしての一次栽培指標に加えて、植物のフェノロジー特性を留意した二次栽培指標を表示できる Web アプリケーションを構築した。特に二次栽培指標に関しては、データベースに格納されたデータを抽出して計算を施すためのプログラムを Java 言語で開発した。本研究における栽培支援 Web アプリケーションでは、ワイン用ブドウ栽培における品質最適化のための二次栽培指標として有効積算温度 (AGDD)、生育期間平均気温 (GST)、Coolnight Index (CI)、Heriothermal Index (HI)、Biologically Effective Degree Days (BEDD)、Dryness Index (DI)、日照時間の計 7 種類を具備し、それぞれについてプログラムを開発した。

新たに構築したセンサネットワークにより取得された圃場生育環境データは、気象庁の検定付きウェザーステーションのデータとの比較の結果、降雨量データを除いて差は見られなかった。降雨量については、比較的激しい雨を観測した日において、本ウェザーステーションは降雨量を過小評価してしまうことが示された一方で、長時間に及んで続いた弱雨などについては、本ウェザーステーションが過大評価しているが、これはむしろドップラーレーダー型雨量計の特性からしても、弱雨を正當に評価している可能性が示唆された。

また、Web アプリケーションに搭載した二次栽培指標値の正確性を検討したところ、DI、CI、HI については先行研究との比較によりその有用性が認められた。また、全天日射量から日照時間を算出するアルゴリズムに関しても、気象庁のデータと比較して、誤差率が 10% 範囲内に収まっていることが確認できた。

2 章をまとめると、栽培・生産過程における生育環境情報を IoT インフラに格納するシステムを導入し、その IoT インフラが具備する API を利用してデータを取得・加工を行うことで、より栽培過程を反映する二次栽培指標提供を可能とする Web アプリケーションを構築した。

## 5-1-2 マルチバンド光を用いた栽培指標

「栽培・生産」サブプロセスを「食品安全」および「生産者への利益還元」において最適化するためには、安全品質と付加価値品質の両者を最大化するような栽培支援が不可欠となる。これの実現のためには、2 章での「生育環境情報」から対象となる植物の生理状態を類推することに加え、実際にその生育環境下でどのような品質の収穫物が得られるかの定量が重要になる。また、栽培作物



および樹体の健康状態に関する情報の存在によって、それ以降の施肥や灌水等の栽培技術的な判断を下すことが可能となる。そこで第3章では、第2章で述べた圃場生育環境取得システムを補完する意味合いも含めて、果樹自体の樹勢および栄養状態を非破壊かつフィールド内でリアルタイムに診断する手法を光センシング技術を用いて確立することを目的とした。

対象作物は、常緑果樹の代表として温州みかん、落葉果樹の代表としてワイン用ブドウをそれぞれ選定し、生育期間（5-9月）を通じてそれぞれの樹体から採取した新葉の色素量および元素量を、それぞれ蛍光分光光度計、蛍光 X 線分光装置を用いて定量分析を行った。その際、みかんについては樹勢の強弱、ワイン用ブドウにおいては樹勢の強中弱、品種および前年度の病気の有無を変数に設定した。

その結果、みかん葉の蛍光 X 線分析では、樹勢の強いとされる樹体の葉において、Ca、P、Mn、Ni、Zn が常に多く検出され、それぞれ樹勢が強い樹体においてより摘採基準に近い値を示していた。その他の重要なミネラルとして K が存在するが、K に関しては8月までは樹勢の強い群で多く検出されていたが、9月の診断では樹勢の弱い群のほうが多く検出された。

次に、みかん葉の蛍光分光光度計による色素定量の結果、最も光合成に寄与しているとされるクロロフィル値に関して、常に樹勢の強い群で大きい値が計測された。その一方で、UV に反応して増加するとされているフラボノール値は樹勢の弱い群で多く計測されたため、葉における窒素バランス値（NBI）は樹勢の強い群で大きくなった。また、アントシアニン量については、樹勢の弱い群にて大きい値を示していたことから、樹勢の弱い樹体では窒素量と光合成のバランスがうまくいっておらず、余った炭素がアントシアニンになってしまったことが示唆された。

ブドウ葉の蛍光 X 線分析では、Ca、K、P といった多量必須元素において品種による濃度差が示された。その一方で、樹勢の強弱や、前年度の健康状態といったパラメータによる元素量の差異は認められなかった。これらより、ブドウ葉の蛍光 X 線診断によって品種ごとの最適元素量を導けることが示唆された。また、樹勢の強弱に関わりなく元素量の適量基準を満たしていたことから、栽培管理によって樹勢を改善したことが示唆された。

また、ブドウ葉の色素定量の結果、クロロフィル値、アントシアニン値において品種による色素量の差が示された。フラボノール値に関しても、品種によ

り異なる適量基準が存在する可能性が示唆された。樹勢の強弱および前年度の健康状態は、色素分析においても有意なパラメータとして機能していなかったことから、今年のワイン用ブドウ栽培における栽培管理が樹勢を改善した可能性が示された。

3章の総括として、マルチバンド光を用いた樹体センシングは、2章での「生育環境情報から算出する二次栽培指標」と同様に、栽培・生産過程の健全度に対する指標となりうる可能性が示唆された。

### 5-1-3 マルチバンド光を用いたレタスの鮮度指標

フードシステムにおける「安全品質」の最適化のためには、栽培作物の「保蔵」サブプロセスにおける品質定量指標が不可欠となる。他方、栽培作物の持つ鮮度および品質の定量化は、農産物の持つ付加価値を正當に評価するための指標ともなりうる。そこで、第4章では、第3章で行った栽培過程における植物のモニタリングを収穫後作物にまで展開し、その経時的な鮮度・品質変化を定量できる鮮度指標の構築を目的とした。

対象作物には、カット野菜としての需要が高まっているレタスを選定し、レタスの生体内の変化をモニタリングするための機器として、元素変化および水分変化を定量するために蛍光 X 線分光装置、野菜内部の有機物、特に脂質の酸化具合を定量するために FTIR を用いた。これらに加えて、レタスの可視画像を経時的に取得するために、一眼レフカメラを搭載した撮像装置およびそれによる撮影システムを構築し、これも実験機器として用いた。これらの機器を用いて、温度 22 度、相対湿度 65% 下でレタスを 1 週間保蔵し、その変化をモニタリングした。さらに、表面品質だけでなく、レタス内部の品質を経時的にモニタリングする実験も行った。

その結果、蛍光 X 線分析では、時間経過とともに Ca、K、P 等の元素量の増加が観察された一方で、LE（軽元素）の減少が認められた。これより、経時的にレタス内から蒸発した水分が LE 減少として反映され、同時に水分減少によるレタス組織の凝縮が元素量の増加という形で表れている可能性が示唆された。レタス葉の内部においては、含水率の変化と LE の変化が一致しておらず、K と Ca は増加している傾向が認められたため、収穫後のレタス内部特有の元素局在を捕捉している可能性が示唆された。

画像については、色相値と彩度値の 2 つで経時的な変化が認められた。色相

値に関しては、保蔵期間が長くなるにつれて、ピクセルの分布範囲が広がっていく傾向が示された。特に、保蔵後 4 日目と 5 日目の間でヒストグラムの形が変化して、より黄色に近い色を呈するようになることが示された。また、彩度値においては、色相値とは異なりピクセルの分布範囲が狭まる傾向を示し、ピーク値におけるピクセル数の増加が観察された。

FTIR では、中野による先行研究に従い、脂質酸化物のピークと脂質のピークを経時的にモニタリングし、その値を酸化指標値を算出する計算式に当てはめたところ、脂質酸化物において経時的なピーク増加が認められたことに加え、酸化指標値も経時的に増加を示したことから、脂質の酸化を通じた鮮度の劣化を FTIR によって計測できることが示された。またレタス内部においては、細胞壁構成多糖であるペクチンの脱メチル化を捉えている可能性が示唆された。

これらの機器から得られたデータをより複合的に解釈し、鮮度をさらに精度よく定量的に評価するために、蛍光 X 線分光データと色彩画像データを用いて機械学習を行い、鮮度による判別アルゴリズムを作成した。その結果、鮮度を初日からの経過時間として入力した場合、判別率が 90%前後という高い判別を可能とする機械学習モデルを確立した。この結果から、各計測データがレタスの鮮度・品質の変化を反映していること、さらにデータを増やすことでレタス品質変化の回帰モデルを構築できる可能性が示唆された。

このように 4 章では、食品・農作物の保蔵過程における「品質」変化に対するマルチバンド光センシングの有効性を確認したことに加え、これらのデータから構築した機械学習モデルが、単一のデータ群と比較して、より「品質」変化を明確化していることが示唆された。

## 5-2 今後の課題

本節では、本研究での課題を挙げ、それぞれに対する解決策を提示する。

まず第 2 章について考えていく。本研究で構築した水平統合型サービスでは、センシング層におけるセンサノードに拡張性をもたせたため、様々な環境モニタリングが可能となった。今回採用したセンサはウェザーステーションと土壤水分計の 2 種類だったが、今後はさらに発展した精密農業を目指し、樹液流センサをはじめとする新しいセンサの導入が必要となってくる。また、土壤水分に関するデータが、降雨量が多かった日を境にして 10 日間ほど計測が止まっていたことから、土壤水分センサの配置等に関しても今後検討を重ねていく必要

があることが示された。

ユーザサービス層では、より栽培と密接に関係する情報供給を目指し、様々な二次栽培指標をプログラミングにより算出・提供するサービスを開発したが、この二次栽培指標値が Web にグラフ表示されるのが非常に遅いという点が課題となる。これは、データベースに格納された 1 分間データを元に二次栽培指標値の計算アルゴリズムを動かしていることが原因であるため、新たに取得データを日単位の情報に変換し、それを格納するデータベースの構築が求められる。

他方、二次栽培指標の有効性に関しても検討していく必要がある。本アプリケーションで具備した二次栽培指標は、フランスのボルドーで使用されている指標をもとに作成しているため、必ずしも日本にそのまま適用できるかは定かではない。これについては、二次栽培指標と生産者からみた栽培ステージの関係を植物生理・群落生態学的に解析していくこと、またこれと並行して、生産者の経験および勘を生かせるような、その土地固有の二次栽培指標を確立することが求められる。特に、最もフェノロジー生育と関係が深いとされている BEDD 指標を、3 章でモニタリングしている葉の色素や元素の蓄積および変化と比較・検証することで、ヴェレゾンと関連深いとされるアブシジン酸をはじめとする植物ホルモンの動きを捉えることも、様々な気象条件下に対応する品質指標を構築する上での重要な研究テーマとなりうる。

次に、3 章について考える。この章では、樹体の栄養状態および樹勢をリアルタイムで取得する手法として光センシングを用いて葉の色素量と元素量を定量する診断法の確立ならびにその実用性の検討を行った。

第一の課題として、診断に用いる葉の選定がある。本実験では、その目的を「確立した葉診断手法の有用性確保」においたため、樹体の栄養状態・樹勢の代表値となる葉の選定基準の考慮にまで至らなかった。この点に関しては、今後の実験において、みかんとワイン用ブドウそれぞれで検討していく必要がある。みかん樹体については、形、色ともに誤差の少ない葉齢 5-8 ヶ月の葉を診断に用いる手法と、果実近傍の葉を診断に用いる手法とが存在する (Srivastava et al., 2004) が、このいずれの手法ともに経時的なモニタリングには向かない手法である。よって、これらの手法を取り入れながら、データを蓄積して各葉齢・各部位の葉における元素基準を作成していくことが求められる。

次に、1 回の計測におけるデータ量である。本研究では、品種間および樹勢間での差がある傾向こそ示されたものの、統計的に有意なほどの差ではなかった。

よって、1 回ごとのサンプルを増加させることで、データの値が外れ値の影響を受けにくくし、有意差が得られるようにしていく必要がある。そのために、先述した測定葉の選定と合わせてサンプル数も増やしていく必要がある。さらに、同様の属性を持つデータを蓄積していくことで、それらのデータ群を機械学習で複合的に考察することも可能となる。みかんおよびブドウの生育期間は 1 年に 1 回のみなので、その中で最も機械学習を含めたデータ解析に有効となりうるサンプリング手法とサンプリング数の検討が今後の課題となる。

3 つめの課題は、熊野における柑橘葉、塩尻におけるワイン用ブドウ葉それぞれに対して含まれるミネラル基準を作成することである。先行研究では、ワイン用ブドウ葉において、葉身診断時のミネラル基準値を決定する研究があるが、この研究では、葉の診断をする時に、たいていは葉身の診断が適しているものの、B と Fe についてのみ葉柄による診断がより適量値の精度をあげることができることが報告されており (Romero et al., 2014)、今後は葉柄の計測も視野に入れながら、より精密な診断法および適量基準を構築することが不可欠である。

4 つ目に、それぞれの光分析手法および分析機器がもつ特色を改めて学習しなおすことである。光分析による定量は、一般的にメタボロミクスというくくりで認識されているが、クロマトグラフィ等の化学分析やサンプルを破壊した状態での光分析とは異なり、非破壊の光分析においては、ヘテロな状態で存在する生体に対する「ある一部分」の光情報を抽出する手法であることを改めて確認する必要がある。これを踏まえた上で、組織内の網羅的な有機物解析を可能とするメタボロミクスと非破壊の光分析とを組み合わせ、新たな知見を獲得していく姿勢が不可欠である。

5 つ目は、最も重要な課題となる果実の栄養診断法の確立である。高精度な葉のミネラル適量基準を構築するためには、その教師データとしての果実品質情報が不可欠であるが、果実の光診断手法の確立によって、結実期以降は葉の診断と並行して果実の診断を行うことが可能となり、この両者の計測によって、各生育ステージにおける樹体中のミネラル分布が見えてくる。さらには、カルシウムに代表されるミネラル-植物ホルモン間の深い関わりからも、このようなミネラル情報から、植物ホルモンや糖の師管転流情報なども間接的に計測できる可能性も十分にある (Ferguson, 1984; Saure, 2005; Yu et al., 2006)。

最後に 4 章について考えていく。この章では、フードシステムにおける「安全品質」と「付加価値品質」の定量指標構築のために、光分析手法の品質分析

への有効性を評価することを目的とし、可視画像、FTIR、蛍光 X 線というマルチバンド光センシング手法を用いて収穫後レタスの品質変化をモニタリングした。さらに、その計測の結果から複合的な指標の構築を目指し、蛍光 X 線データと可視画像データを用いた機械学習による判別モデルを構築した。

この章における 1 つ目の課題として、パラメータの不足があげられる。本実験では、人手不足の関係もあり、温度は 25 度のみで、相対湿度は 75%と 84%という 2 つのみの実験となったため、温度変化に伴うレタスの光センシングデータの変化や、湿度条件が大きく異なる保蔵条件における光センシングデータなどが取得できなかった。それ以外のパラメータとして収穫した時期、収穫したレタスの成熟度、レタス品種間の物理構造および生理的特徴の違いに起因する品種といったパラメータが存在するが、これら要素をどのように組み込んでいくかが今後に向けた大きな課題となる。

2 つ目の課題として、FT-IR データにおける個体差を小さくする手法の再構築である。本研究の中で、クロロフィル、セルロース、ペクチン、脂質酸化物等の生体内有機物を FT-IR を用いて計測してきたが、いずれのピークも、その物質分解あるいは物質生成由来のピークなのかどうか断言できない。FT-IR 分析は、大きなくくりで言えば「非破壊」分析とはなるものの、レタスのような結球状態の作物においては、それを分解して葉の計測を行うことは組織の「破壊」となるため、予め個体間の誤差が少ないサンプルを用いなければ、経時変化を正當に評価することは困難であると言える。また、同一個体の計測については、本研究では常に同様の圧力をかけることでその計測誤差を緩和する手法をとった。しかしながら、これに関しても、重りとサンプル間の接触具合等により一定とはならない可能性がある。このような計測誤差ならびに個体間誤差少しでも緩和するために、レタス個体共通の「電磁波吸収」が存在しない波数域を探ることが今後の課題となる。

3 つ目は、「栽培・生産」サブシステムで構築された品質と、「保蔵」サブシステムでの品質保持とがどのように関係しているのかについての考察である。すべての作物において、その生育した圃場特性や気候特性、さらには栽培手法などが入力となり、作物の品質が出力される。この「品質」という「出力」から、実際の「栽培・生産」サブシステムでの「入力」をどのように評価できるのかということも重要な課題となる。これは、2 章と 3 章の立場からは、「栽培・生産」サブプロセスにおける入力によって、「保蔵」サブプロセスでの「安全品質」

および「付加価値品質」の維持をどのように最適化できるのか、というように言い換えられる。

そして 4 つ目に、機械学習による判別モデルではなく、パラメータに値を格納すればその対象作物の「安全品質」もしくは「付加価値品質」が返り値として得られるような回帰モデルの構築である。現在、食品の光センシングや画像解析において、機械学習による学問領域を超えたモデル構築が行われ始めており (Nychas et al., 2016)、レタスの品質変化を考えるのに適した機械学習手法を適切に選定して、モデリングを行っていく必要がある。また、機械学習の使い方として、答えを求めるのではなく、サンプル数が少ないときでもモデル化を行うことによって、新たな仮説を生み出すといういわゆる「仮説生成型」の学習方法を積極的に模索することも今後の重要な方向性となる。

最後に、4 章の結言とも重複するが、「安全品質」を目指す際に、最も重要な微生物およびウイルスなどの病原性物質に対する「品質指標」の確立が今後の課題となりうる。このために、今後はレタス植物における生菌数を定量し、それを教師として機械学習が行えるようなデータセットを検討していく姿勢が不可欠となる。

これらの課題をまとめると、本研究では「栽培・生産」と「保蔵」において対象作物の「品質」を反映する情報を 1) 生育環境データ、2) 植物体および対象作物へのマルチバンド光センシングデータの 2 つから抽出し、その有効性を確認するところまでを行ったので、今後はそのデータと植物生理の関係性を調べることで、品質とより密接に関わっているデータを取得すること、さらにはデータを増やすことでビッグデータ化し、それらを AI や機械学習することによって新たな「品質」モデルにすることが必要となる。

### 5-3 今後の展望

これらの研究内容が、今後構築されるであろう IoT ベースのフードシステムでどのような役割を担っているのかを図 5.1 に示す。

圃場の IoT においては、フードシステムに関する包括的な情報インフラとなる cloudSense への生育環境情報の格納システムを構築し、その格納したデータを再び利用することで、栽培のみにとどまらない拡張性を具備したアプリケーションを構築した。樹体診断においては、圃場における樹体の植物生理と関連する光情報を取得し、将来的には図のように指標化した値を格納していくシステ

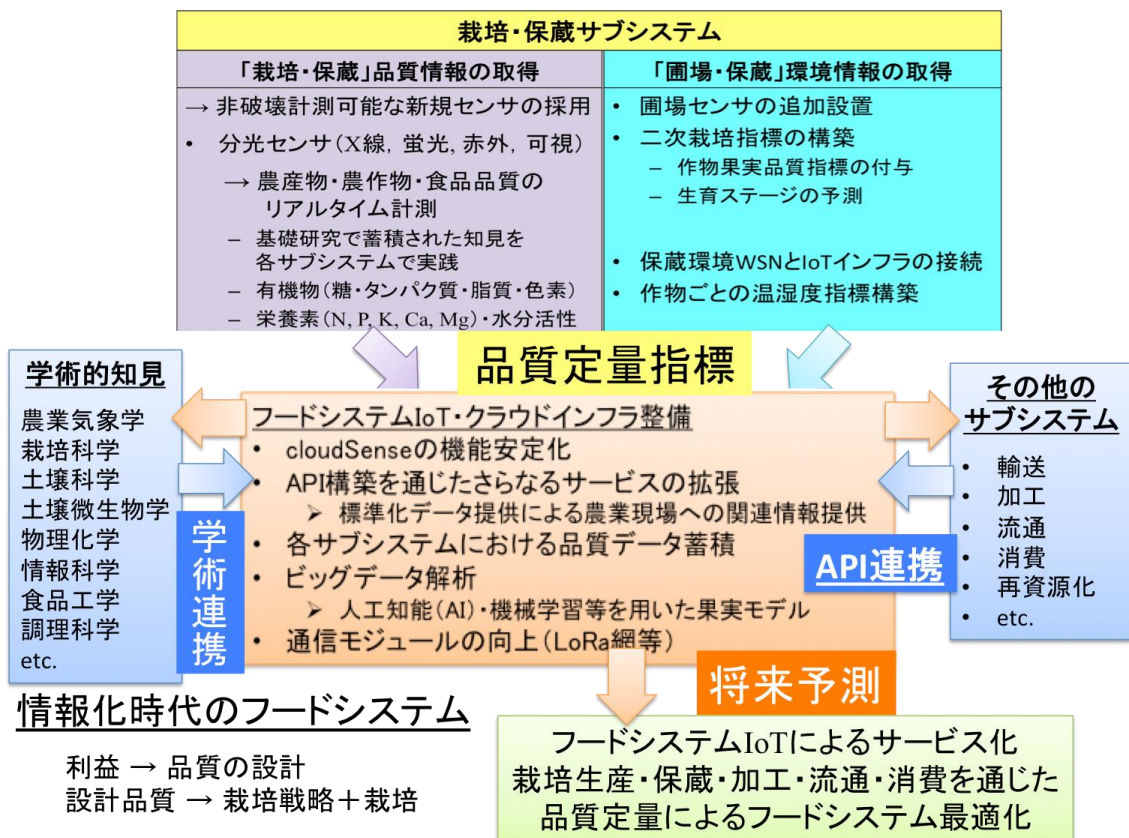


図 5.1 今後の展望



ムの構築につなげていく。保蔵サブシステムでは、加工段階より前の生鮮品に関する品質指標構築を目指し、これも将来的には情報インフラに格納することで、その生鮮品の安全情報をフードシステム全体で共有できるようにする。

そして、このような指標構築には、1) 栽培の対象となる植物の生理的特徴やそれに及ぼす周辺環境の影響を理解し、それらを正確に計測すること、2) 収穫後の植物の品質変化を植物生理のみならず、水分変化などに関わる物理的特性も考慮すること、3) 計測法が迅速かつ簡便であり、実用可能であること、4) 機械学習および深層学習などを利用し、人間には処理しきれない情報を処理させることで、新たな知見を得る姿勢をとること、という4つの条件が不可欠である。1つ目の条件を達成するためには、植物ホルモン、ポリフェノール、ビタミン、ミネラルといった微量物質のフェノロジー段階に対応した動きを計測することが重要である。現在、このような微量物質とミネラルとの関係が解明され始めており、特に果樹においては栄養生長から生殖生長への移行によって、果実と葉への水分やミネラルの分配が大きく変化する (Rogiers et al., 2006; Montanaro et al., 2014; Knipfer et al., 2015) ことから、蛍光 X 線分光分析のデータから、間接的に植物ホルモンなどの動きがモニタリングできる可能性がある。また、このような植物体内の代謝活動を補助する因子の変化と、実際に代謝が行われている場との関係性の理解も、定量指標構築には欠かせない。この中で重要なのが、クロロフィルの絶対量を光合成指標とするのではなく、フェノールやアントシアニンといった他の物質とのバランスでその葉における生理状態を類推するという考え方である (Louis et al., 2009)。このような植物自体への視点に加えて、土壌や気象条件の計測を行っていくことで、より栽培管理に資する定量指標の確立に近づいていくと考えられる。

2つ目の点に関して、収穫後の植物の特性を知る必要がある。4章の冒頭でも説明したが、栽培のモニタリングとは異なり、収穫物の品質を定量するにあたってはその劣化をモニタリングが不可欠となる。品質や鮮度の保蔵中における変化については、先行研究で生体内の構造水や自由水に加えて、ビタミン C の変化を読み取りながら、それぞれの変化に対する最適な重み付けを行い、数理的なモデルに落とし込むといった動き (Ansorena, 2012) もあるので、そのような試みからさらに派生して、データを大量に取得してから機械学習にまで落とし込んでいく研究が求められる。また、このようなポストハーベスト研究は、収穫物がどのような栽培管理を受けてきたかということに大きく依存すること

がわかってきている (Gil et al., 2012) ので、最終的には栽培管理と連結した総合的な定量指標の構築が求められる。

そして 3 つ目の条件である。このようなフードシステムの諸要素を定量する指標は、実際にシステムが動いている各現場の状況をリアルタイムで認識するためのものである。故にそのリアルタイム性が最も肝心な要素となる。従来の化学分析ではこの条件はクリアすることはできないため、非破壊かつ迅速な計測を可能とする光センシングに大きな期待が寄せられている (亀岡 and 橋本, 2016)。また、そのわかりやすさから、最終的には画像のみで栽培から流通までの品質管理が可能な機械学習モデルを構築することが理想である。

最後の条件として、機械学習を用いて大量の取得データを複合的に処理することで、思いもよらなかった関係性を導出するということが重要になってくる。このように、とりあえず原理はブラックボックス化して、まずは有効であるものを利用していくことが、様々な情報が横溢する現代において不可欠となる。

そして、この結果構築された指標を、他の情報 (気象予測、害虫予測、流通条件等) と結びつけるために、フードシステム IoT インフラにおいてはデータの標準化およびそのデータハンドリングのための API 開発が重要となる。

本研究では、この 4 つの条件を満たすための基礎的な計測手法の確立までを扱った。今後は上述した課題および展望に沿って、4 つの条件を意識しながら本研究を発展させていくことで、フードシステムの持続可能性に寄与する品質指標の確立が可能となり、異なる状況に対して動的最適解を導出できる IoT ベースのフードシステム構築のための礎となりうると考えている。

## 参考文献

Agati, G., Tuccio, L., Kusznierevicz, B., Chmiel, T., Bartoszek, A., Kowalski, A., Grzegorzewska, M., Kosson, R., & Kaniszewski, S. (2016). Nondestructive Optical Sensing of Flavonols and Chlorophyll in White Head Cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata subvar. alba) Grown under Different Nitrogen Regimens. *Journal of agricultural and food chemistry*, *64*(1), 85-94.

Agüero, M. V., Barg, M. V., Yommi, A., Camelo, A., & Roura, S. I. (2008). Postharvest changes in water status and chlorophyll content of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and their relationship with overall visual quality. *Journal of food science*, *73*(1).

Aiyappa, K. M., Rodrigues, J., Dalal, V. B., Subramanyam, H., & Srivastava, H. C. (1963). Effect of preharvest sprays of plant growth regulators on Coorg mandarins (*Citrus reticulata* Blanco) and their storage studies with and without wax coating. *Food Science*, *12*, 336-340.

Alaghabary, K., Zhu, Z., & Shi, Q. (2005). Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of plant nutrition*, *27*(12), 2101-2115.

Almeida, C. M. R., & Vasconcelos, M. T. S. (2003). Multielement composition of wines and their precursors including provenance soil and their potentialities as fingerprints of wine origin. *Journal of agricultural and food chemistry*, *51*(16), 4788-4798.

Alva, A. K., Mattos Jr, D., Paramasivam, S., Patil, B., Dou, H., & Sajwan, K. S. (2006). Potassium management for optimizing citrus production and quality. *International Journal of Fruit Science*, *6*(1), 3-43.

Amodio, M. L., Derossi, A., & Colelli, G. (2013). Modelling sensorial and nutritional changes to better define quality and shelf life of fresh-cut melons. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(1), 6.

Ansorena, M. R., Agüero, M. V., Goñi, M. G., Roura, S., Ponce, A., Moreira, M. D. R., & Di Scala, K. (2012). Assessment of lettuce quality during storage at low relative humidity using Global Stability Index methodology. *Food Science and Technology*, 32(2), 366-373.

Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant physiology*, 14(2), 371.

Bartholic, J. F., Namkem, L. N., & Wiegand, C. L. (1972). Aerial Thermal Scanner to Determine Temperatures of Soils and of Crop Canopies Differing in Water Stress 1. *Agronomy Journal*, 64(5), 603-608.

Bartholic, J. F., Namkem, L. N., & Wiegand, C. L. (1972). Aerial Thermal Scanner to Determine Temperatures of Soils and of Crop Canopies Differing in Water Stress 1. *Agronomy Journal*, 64(5), 603-608.

Baumes, R. (2009). Wine aroma precursors. In *Wine chemistry and biochemistry*. Springer, New York, 251-274.

Beckles, D. M. (2012). Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 129-140.

Behmann, J., Mahlein, A. K., Rumpf, T., Römer, C., & Plümer, L. (2015). A review of advanced machine learning methods for the detection of biotic stress in precision crop protection. *Precision Agriculture*, 16(3), 239-260.

Ben-Yehoshua, S., Shapiro, B., Chen, Z. E., & Lurie, S. (1983). Mode of action of plastic film in extending life of lemon and bell pepper fruits by alleviation of water stress. *Plant Physiology*, 73(1), 87-93.

Bhargava, B. S. (2001). Potassium nutrition of grapes. *International Potash Institute PRII K in Nutrient Management for Sustainable Crop Production in India, New Delhi, India*, 517-536.

Bhargava, B. S., & Sumner, M. E. (1987). Proposal for sampling grape (*Vitis vinifera* L.) petioles for nutritional diagnosis. *Communications in soil science and plant analysis*, 18(5), 581-591.

Bhatti, A. S., & Loneragan, J. F. (1970). Phosphorus Concentrations in Wheat Leaves in Relation to Phosphorus Toxicity 1. *Agronomy Journal*, 62(2), 288-290.

Bo, Y., & Ping, S. (2014). Intelligent monitoring system for aquiculture based on internet of things. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 45(1), 259-265.

Bordoni, A., Astolfi, A., Morandi, L., Pession, A., Danesi, F., Di Nunzio, M., ... & Pession, A. (2007). N-3 PUFAs modulate global gene expression profile in cultured rat cardiomyocytes. Implications in cardiac hypertrophy and heart failure. *FEBS letters*, 581(5), 923-929.

Bordoni, A., Picone, G., Babini, E., Vignali, M., Danesi, F., Valli, V., ... & Capozzi, F. (2011). NMR comparison of in vitro digestion of Parmigiano Reggiano cheese aged 15 and 30 months. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 49(S1).

Cantwell, M. A. R. I. T. A., & Suslow, T. R. E. V. O. R. (1999). Fresh-cut fruits and vegetables: aspects of physiology, preparation and handling that affect quality. In *Annual Workshop Fresh-Cut Products: Maintaining Quality And Safety*, 5, 1-22.

Capozzi, F., & Bordoni, A. (2013). Foodomics: a new comprehensive approach to food and nutrition. *Genes & nutrition*, 8(1), 1.

Carrasco-Benavides, M., Ortega-Farías, S., Lagos, L. O., Kleissl, J., Morales-Salinas, L., & Kilic, A. (2014). Parameterization of the Satellite-Based Model (METRIC) for the estimation of instantaneous surface energy balance components over a drip-irrigated vineyard. *Remote Sensing*, 6(11), 11342-11371.

Casa, R., Castaldi, F., Pascucci, S., & Pignatti, S. (2015). Chlorophyll estimation in field crops: an assessment of handheld leaf meters and spectral reflectance measurements. *The Journal of Agricultural Science*, 153(5), 876-890.

Cerovic, Z. G., Ghazlen, N. B., Milhade, C., Obert, M., Debuisson, S., & Moigne, M. L. (2015). Nondestructive diagnostic test for nitrogen nutrition of grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on dualex leaf-clip measurements in the field. *Journal of agricultural and food chemistry*, 63(14), 3669-3680.

Chahil, B. S., Dhath, A. S., Grewal, G. P. S., & Dhillon, D. S. (1991). Removal of NPK by Kinnow mandarin and urman ber. *Frontier in Tropical Fruit Research* 321, 541-544.

Chapman, H. (1949). Citrus leaf analysis: Nutrient deficiencies, excesses and fertilizer requirements of soil indicated by diagnostic aid. *California Agriculture*, 3(11), 10-14.

Chapman, H. D. (1960). Leaf and soil analysis in citrus orchards. *Univ. Calif. Div. agric. Sci. Manual*, 25.

Childers, & Norman F. (1966). Temperate to tropical fruit nutrition, Rutgers - The State University.

Clark, J. A. (1975). Heat and mass transfer from real and model leaves. *Heat and mass transfer in the biosphere*, 413-422.

Cocetta, G., Baldassarre, V., Spinardi, A., & Ferrante, A. (2014). Effect of cutting on ascorbic acid oxidation and recycling in fresh-cut baby spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves. *Postharvest Biology and Technology*, 88, 8-16.

Conn, S. J., Gilliam, M., Athman, A., Schreiber, A. W., Baumann, U., Moller, I., ... & Burton, R. (2011). Cell-specific vacuolar calcium storage mediated by CAX1 regulates apoplastic calcium concentration, gas exchange, and plant productivity in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 23(1), 240-257.

Conradie, W. J. (2017). Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc in sand culture: II. phosphorus, potassium, calcium and magnesium. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 2(1), 7-13.

Considine, M. J., & Foyer, C. H. (2015). Metabolic responses to sulfur dioxide in grapevine (*Vitis vinifera* L.): photosynthetic tissues and berries. *Frontiers in plant science*, 6, 60.

D'Alessandro, A., & Zolla, L. (2012). We are what we eat: food safety and proteomics. *Journal of proteome research*, 11(1), 26-36.

Davidian, J. C., & Kopriva, S. (2010). Regulation of sulfate uptake and assimilation—the same or not the same?. *Molecular plant*, 3(2), 314-325.

Demarée, G. R., & Chuine, I. (2006). A concise history of the phenological observations at the Royal Meteorological Institute of Belgium. In *Actes du ESF Exploratory Workshop, Phenology and Agroclimatology*, Volos, Greece, 21-23.

De Paepe, A., Vuylsteke, M., Van Hummelen, P., Zabeau, M., & Van Der Straeten, D. (2004). Transcriptional profiling by cDNA AFLP and microarray analysis reveals novel insights into the early response to ethylene in *Arabidopsis*. *The Plant Journal*, *39*(4), 537-559.

Ding, T., Ge, Z., Shi, J., Xu, Y. T., Jones, C. L., & Liu, D. H. (2015). Impact of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) and ultrasound on microbial loads and quality of fresh fruits. *LWT-food Science and Technology*, *60*(2), 1195-1199.

Dodd, A. N., Kudla, J., & Sanders, D. (2010). The language of calcium signaling. *Annual review of plant biology*, *61*, 593-620.

Donald, B. (2013). Food retail and access after the crash: Rethinking the food desert problem. *Journal of Economic Geography*, *13*(2), 231-237.

Embleton, T. W., Jones, W. W., Labanauskas, C. K., & Reuther, W. (1973). Leaf analysis as a diagnostic tool and guide to fertilization. *The citrus industry*, *3*(6), 183-210.

Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual review of plant biology*, *50*(1), 641-664.

Faisal, A. M. (2011). Plant phenology in a changing climate -A case of British Wild Plants. LAP LAMBERT Academic Publishing.

Ferguson, I. B. (1984). Calcium in plant senescence and fruit ripening. *Plant, Cell & Environment*, *7*(6), 477-489.



Fischer, W. W., Hemp, J., & Johnson, J. E. (2015). Manganese and the evolution of photosynthesis. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 45(3), 351-357.

Fraga, H., García de Cortázar Atauri, I., Malheiro, A. C., & Santos, J. A. (2016). Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Global change biology*, 22(11), 3774-3788.

Francis, K. E., Lam, S. Y., & Copenhaver, G. P. (2006). Separation of Arabidopsis pollen tetrads is regulated by QUARTET1, a pectin methylesterase gene. *Plant physiology*, 142(3), 1004-1013.

深津時広 (2014). 農業分野におけるセンサネットワーク技術の利用と課題. *電子情報通信学会誌*, 97, 688-694.

深津時広 & 平藤雅之 (2003). 圃場モニタリングのためのフィールドサーバの開発. *農業情報研究*, 12(1), 1-12.

Gaitis, F., & Ouzounidou, G. (2017). Food Safety: Strengthening the Present with an Eye to the Future. *Journal of Innovation Economics & Management*, 3, 177-189.

Gallardo, H., Queralt, I., Tapias, J., Guerra, M., Carvalho, M. L., & Marguí, E. (2016). Possibilities of low-power X-ray fluorescence spectrometry methods for rapid multielemental analysis and imaging of vegetal foodstuffs. *Journal of Food Composition and Analysis*, 50, 1-9.

Ganeshamurthy, A. N., Satisha, G. C., & Patil, P. (2011). Potassium nutrition on yield and quality of fruit crops with special emphasis on banana and grapes. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 24(1), 29-38.

García Cañas, V., Simó, C., León, C., Ibáñez, E., & Cifuentes, A. (2011). MS based analytical methodologies to characterize genetically modified crops. *Mass spectrometry reviews*, 30(3), 396-416.

Ghidelli, C., & Pérez-Gago, M. B. (2017). Recent advances in modified atmosphere packaging and edible coatings to maintain quality of fresh-cut fruits and vegetables. *Critical reviews in food science and nutrition*, 1-18.

DOI: 10.1080/10408398.2016.1211087.

Gil, M. I. (2015). Preharvest factors and fresh-cut quality of leafy vegetables. In *III International Conference on Fresh-Cut Produce: Maintaining Quality and Safety 1141*, 57-64.

Gil, S.C., Yubero, M. E., Cuesta, D. M., Millan, R., & Hernandez, L. E. (2012). Influence of nitrate fertilization on Hg uptake and oxidative stress parameters in alfalfa a plants cultivated in a Hg-polluted soil. *Environ. Exp. Botany*, 75, 16-24.

Gonzalez-Miranda, S., Alcarria, R., Robles, T., Morales, A., Gonzalez, I., & Montcada, E. (2013). Future supermarket: overcoming food awareness challenges. In *Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)*, 2013 Seventh International Conference on IEEE, 483-488.

Gross, J. (1987). *Pigments in fruits, food science and technology*, Academic Press, London and Orlando.

Grusak, M. A., Broadley, M. R., & White, P. J. (2016). *Plant Macro-and Micronutrient Minerals*. Wiley Online Library, DOI: 10.1002/9780470015902.a0001306.pub2.

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660.

Guerschman, Juan P., et al. (2015). Assessing the effects of site heterogeneity and soil properties when unmixing photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil fractions from Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 161, 12-26.

Guiboileau, A., Sormani, R., Meyer, C., & Masclaux-Daubresse, C. (2010). Senescence and death of plant organs: nutrient recycling and developmental regulation. *Comptes rendus biologies*, 333(4), 382-391.

Guild, G. E., & Stangoulis, J. C. (2016). Non-Matrix matched glass disk calibration standards improve XRF micronutrient analysis of wheat grain across five laboratories in India. *Frontiers in plant science*, 7, 784.

Guo, W., Fukatsu, T., & Ninomiya, S. (2015). Automated characterization of flowering dynamics in rice using field-acquired time-series RGB images. *Plant Methods*, 11(1), 7.

Hashem, I. A. T., Chang, V., Anuar, N. B., Adewole, K., Yaqoob, I., Gani, A. & Chiroma, H. (2016). The role of big data in smart city. *International Journal of Information Management*, 36(5), 748-758.

Hashimoto, A., Niwa, T., Yamamura, T., Rahman, M., Nakanishi, K., Kameoka, T. & Hosoi, K. (2005). X-ray fluorescent and mid-infrared spectroscopic measurement of leaf model. In *Proc. of EFITA/WCCA 2005 Joint Conference*, 252-259.

Hashimoto, A., Muramatsu, T., Suehara, K. I., Kameoka, S., & Kameoka, T. (2017). Color evaluation of images acquired using open platform camera and mini-spectrometer under natural lighting conditions. *Food Packaging and Shelf Life*, 14, 26-33.

Hayashi, N., Hashimoto, A., Suehara, K., Kanou, M., Kameoka, T., Kumon, T., & Hosoi, K. (2007). X-Ray Fluorescent and Mid-Infrared Spectroscopic Measurements of Vigor Information of Tomato Plant. In *Proceedings of the SICE Annual Conference 2007*, 220-223.

Heffernan, W. D., & Constance, D. H. (1994). Transnational corporations and the globalization of the food system. *From Columbus to ConAgra: The globalization of agriculture and food*, 29-51.

Heising, J. K., Dekker, M., Bartels, P. V., & Van Boekel, M. A. J. S. (2014). Monitoring the quality of perishable foods: opportunities for intelligent packaging. *Critical reviews in food science and nutrition*, 54(5), 645-654.

Hengl, T., de Jesus, J. M., Heuvelink, G. B., Gonzalez, M. R., Kilibarda, M., Blagotić, A., ... & Guevara, M. A. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one*, 12(2), e0169748.

Hepler, P. K., & Winship, L. J. (2010). Calcium at the Cell Wall Cytoplasm Interface. *Journal of integrative plant biology*, 52(2), 147-160.

Hertog, M. L., Rudell, D. R., Pedreschi, R., Schaffer, R. J., Geeraerd, A. H., Nicolai, B. M., & Ferguson, I. (2011). Where systems biology meets postharvest. *Postharvest biology and technology*, 62(3), 223-237.

Hocking, B., Tyerman, S. D., Burton, R. A., & Gilliam, M. (2016). Fruit calcium: transport and physiology. *Frontiers in plant science*, 7, 569.

Honda, K., Chinnachodteeranun, R., & Witayangkurn, A. (2016). Sensor Observation Service for Connecting Heterogeneous Field Sensor Platforms to Applications. In *Proceedings of the 2016 WCCA-AFITA, Suncheon, Korea*, 21-24.

Hong, Y. S. (2011). NMR based metabolomics in wine science. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 49(S1).

Hörtensteiner, S. (2013). Update on the biochemistry of chlorophyll breakdown. *Plant Molecular Biology*, 82(6), 505-517.

Iglesias, D. J., Cercós, M., Colmenero-Flores, J. M., Naranjo, M. A., Ríos, G., Carrera, E., ... & Talon, M. (2007). Physiology of citrus fruiting. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 333-362.

Isamah, G. K., Asagba, S. O., & Ekakitie, A. O. (2003). Lipid peroxidation, activities of superoxide dismutase and catalase during post-harvest deterioration of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) root tubers. *International biodeterioration & biodegradation*, 52(3), 129-133.

岩田智之 (2011). 植物工場で生産されたトマトの品質評価に関する基礎的研究, 卒業論文, 三重大学.

Johnsen, S. (2012). *The optics of life: a biologist's guide to light in nature*. Princeton University Press.

Johnston, M. A., Harrison, M. A., & Morrow, R. A. (2009). Microbial antagonists of *Escherichia coli* O157: H7 on fresh-cut lettuce and spinach. *Journal of food protection*, 72(7), 1569-1575.

Jones, C. G., & Hartley, S. E. (1999). A protein competition model of phenolic allocation. *Oikos*, 27-44.

Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005). Climate change and global wine quality. *Climatic change*, 73(3), 319-343.

Jorgensen K.R., Price G.H. (1978). The citrus leaf and soil analysis system in queens land. In *Proceeding of the international society of Citri-culture, Singapore*, 297.

Jurgilevich, A., Birge, T., Kentala-Lehtonen, J., Korhonen-Kurki, K., Pietikäinen, J., Saikku, L., & Schösler, H. (2016). Transition towards circular economy in the food system. *Sustainability*, 8(1), 69.

Kahn, J. M., Katz, R. H., & Pister, K. S. (1999, August). Next century challenges: mobile networking for “Smart Dust”. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, ACM, 271-278.

Kalcsits, L. A. (2016). Non-destructive measurement of calcium and potassium in apple and pear using handheld x-ray fluorescence. *Frontiers in plant science*, 7, 442.

Kameoka, T., & Hashimoto, A. (2015). Effective Application of ICT in Food and Agricultural Sector—Optical Sensing is Mainly Described—. *IEICE Transactions on Communications*, 98(9), 1741-1748.

亀岡孝治 (1995). 食品の水分収着と化学ポテンシャル, *日本食品科学工学会誌*, 42(2), 140-146.

亀岡孝治 & 橋本篤 (2013). 植物工場 生産システムと流通技術の最前線, *NTS*, 122-135.

亀岡孝治 & 橋本篤. (2016). 植物フェノタイピングのための光センシング技術, *農業食料工学会誌*, 78(4), 274-278.

Kameoka, T. & Hashimoto, A. (2013). A Sensing Approach to Fruit-Growing, In *Wireless Sensor Networks and Ecological Monitoring, Series: Smart Sensors, Measurement and Instrumentation 3*, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 217-246.

狩野幹人 (2003). 水溶液系における糖類の赤外分光解析, 博士論文, 三重大学.

Kashyap, H., Ahmed, H. A., Hoque, N., Roy, S., & Bhattacharyya, D. K. (2015). Big data analytics in bioinformatics: A machine learning perspective. *arXiv preprint arXiv:1506.05101*.

Kim, B. S., Kim, O. W., Chung, J. W., Kim, D. C., & Nahmgung, B. (1995). Influence of vacuum cooling on browning, PPO activity and free amino acid of Shiitake mushroom. *Applied Biological Chemistry*, 38(4), 345-352.

Kirubakaran, M. K., Ramalingam, S., Meerabai, S., & Preethi, V. (2014). Surveillance and steering of agricultural field using ZigBee. *International journal on recent and innovation trends in computing and communication*, 2, 668-672.

Kitano, H. (2001). Systems biology: toward system-level understanding of biological systems. *Foundations of systems biology*, 1-36.

Knipfer, T., Fei, J., Gregory, A. G., Andrew, J. M., Kenneth, A. S., & Mark, A. M. (2015). Water transport properties of the grape (*V. vinifera* L.) pedicel during fruit development: insights into xylem anatomy and function using microtomography. *Plant physiology*, pp-00031.

小林一樹 (2009). 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 回レーザセンシングシンポジウム予稿集, 148-149.

Koo, R. C. J., Anderson, C. A., Stewart, I., Tucker, D. P. H., Calvert, D. V., & Wutscher, H. K. (1984). Recommended fertilizers and nutritional sprays for citrus. *Fla. Agr. Expt. Sta. Bui. D*, 536, 30.

Koo, R. C. J., & Reese, R. L. (1977). Influence of nitrogen, potassium, and irrigation on citrus fruit quality. In *INTERNATIONAL CITRUS CONGRESS, Riverside*, 34-38.

Kroupitski, Y., Golberg, D., Belausov, E., Pinto, R., Swartzberg, D., Granot, D., & Sela, S. (2009). Internalization of *Salmonella enterica* in leaves is induced by light and involves chemotaxis and penetration through open stomata. *Applied and environmental microbiology*, 75(19), 6076-6086.

Kwasniewski, M. T., Sacks, G. L., & Wilcox, W. F. (2014). Persistence of elemental sulfur spray residue on grapes during ripening and vinification. *American Journal of Enology and Viticulture*, 65, 453-462.

Ladanyia, M., & Ladaniya, M. (2010). Citrus fruit: biology, technology and evaluation, Academic press.

Law, J. (2005). The backyard vintner: An enthusiast's guide to growing grapes and making wine at home. Rockport Publishers.

Lecourieux, D., Ranjeva, R., & Pugin, A. (2006). Calcium in plant defence signalling pathways. *New Phytologist*, 171(2), 249-269.

Li, Q., Wang, Z. Y., Li, W. H., Li, J., Wang, C., & Du, R. Y. (2013). Applications integration in a hybrid cloud computing environment: Modelling and platform. *Enterprise Information Systems*, 7(3), 237-271.



Lima, R., Severino, L. S., Cazetta, J. O., de Azevedo, C. A., Sofiatti, V., & Arriel, N. H. (2011). Redistribution of nutrients in jatropha leaves through phenological phases. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *15*(11), 1175-1179.

Linger, R., & Hevner, A. (2016). Flow Semantics for Intellectual Control in Smart City IoT Systems. In *Workshop on IoT and Smart City Challenges and Applications*, 1-9.

Lio, M., & Liu, M. C. (2006). ICT and agricultural productivity: evidence from cross country data. *Agricultural Economics*, *34*(3), 221-228.

Ljubešić, N. (1984). Structural and functional changes of plastids during yellowing and regreening of lemon fruits. *Acta Botanica Croatica*, *43*(1), 25-30.

Louis, J., Meyer, S., Maunoury-Danger, F., Fresneau, C., Meudec, E., & Cerovic, Z. G. (2009). Seasonal changes in optically assessed epidermal phenolic compounds and chlorophyll contents in leaves of sessile oak (*Quercus petraea*): towards signatures of phenological stage. *Functional Plant Biology*, *36*(8), 732-741.

Ludford PM. (2003). Hormonal changes during postharvest. In: Bartz JA, Brecht JK (editors), *Postharvest Physiology and Pathology of Vegetables*, 2nd Edition. New York: Marcel Dekker, Inc., pp. 31-77.

Lundquist, P. K., Poliakov, A., Bhuiyan, N. H., Zybaïlov, B., Sun, Q., & van Wijk, K. J. (2012). The functional network of the Arabidopsis plastoglobule proteome based on quantitative proteomics and genome-wide coexpression analysis. *Plant physiology*, *158*(3), 1172-1192.

Ma, J. F., Miyake, Y., & Takahashi, E. (2001). Silicon as a beneficial element for crop plants. *Studies in plant Science*, *8*, 17-39.

Ma, J. F. (2004). Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1), 11-18.

Manivel, L. (1967). Effect of Certain Fertilizer Treatments on the Fruitfulness of Grape Buds in Anab-e-Shani Variety, Doctoral dissertation, University of Madras, India.

Marchal, J., Cassin, J., Favreau, P., Lossois, P., & Martin-Prevel, P. (1978). Principal results of fertilizer studies on clementines in Corsica. *Fruits (Paris)*, 33, 822-827.

Markovic, M., & Edwards, P. (2016). Semantic Stream Processing for IoT Devices in the Food Safety Domain. In *SEMANTiCS (Posters, Demos, SuCCESS)*.

Matichenkov, V., Bocharnikova, E., & Calvert, D. (2001). Response of citrus to silicon soil amendments. In *Proc. Fla. State Hort. Soc* (Vol. 114, pp. 94-97).

Mierziak, J., Kostyn, K., & Kulma, A. (2014). Flavonoids as important molecules of plant interactions with the environment. *Molecules*, 19(10), 16240-16265.

Mistriotis, A., Briassoulis, D., Giannoulis, A., & D'Aquino, S. (2016). Design of biodegradable bio-based equilibrium modified atmosphere packaging (EMAP) for fresh fruits and vegetables by using micro-perforated poly-lactic acid (PLA) films. *Postharvest Biology and technology*, 111, 380-389.

三浦健志・奥野林太郎 (1992). ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細, *農土論集*, 164, 157-163.

Montanaro, G., Dichio, B., Lang, A., Mininni, A. N., Nuzzo, V., Clearwater, M. J., & Xiloyannis, C. (2014). Internal versus external control of calcium nutrition in kiwifruit. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(6), 819-830.

中野浩平 (2008). 青果物の鮮度評価方法, 特許公開 2010-25883.

Nakasone, E., Torero, M., & Minten, B. (2014). The power of information: The ICT revolution in agricultural development. *Annu. Rev. Resour. Econ.*, 6(1), 533-550.

Nelson, G. C., Valin, H., Sands, R. D., Havlík, P., Ahammad, H., Deryng, D. & Kyle, P. (2014). Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3274-3279.

Nychas, G.J.E., Panagou, E.Z., & Mohareb, F. (2016). Novel approaches for food safety management and communication. *Current Opinion in Food Science*, 12, 13-20.

Nobel, P. S. (1974). Introduction to biophysical plant physiology, A Series of books in biology, W. H. Freeman & Co Ltd.

O'Brien, J. M. (2012). The Vine Nerds-Meet the guys who are using data to push wine grapes to the limit. *Wired-New York*, 130.

大野宏之, 佐々木華織, 大原源二 & 中園江 (2016). 実測値と数値予報, 平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成, *生物と気象*, 16, 71-79.

Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66-84.

奥崎穰 (2017). 生態学者のための分光計測. *日本生態学会誌*, 67(1), 41-56.

Paltridge, N. G., Palmer, L. J., Milham, P. J., Guild, G. E., & Stangoulis, J. C. (2012). Energy-dispersive X-ray fluorescence analysis of zinc and iron concentration in rice and pearl millet grain. *Plant and soil*, 361(1-2), 251-260.

Pelloux, J., Rusterucci, C., & Mellerowicz, E. J. (2007). New insights into pectin methylesterase structure and function. *Trends in plant science*, 12(6), 267-277.

Petrolo, R., Loscri, V., & Mitton, N. (2014, August). Towards a smart city based on cloud of things. In *Proceedings of the 2014 ACM international workshop on Wireless and mobile technologies for smart cities*, ACM, 61-66.

Phillips, L. (2006). Food and globalization. *Annu. Rev. Anthropol.*, 35, 37-57.

Piazzolla, F., Amodio, M. L., & Colelli, G. (2013). The use of hyperspectral imaging in the visible and near infrared region to discriminate between table grapes harvested at different times. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(2), 7.

Piccin, R., Couto, R. D. R., Bellinaso, R. J. S., Gatiboni, L. C., Conti, L. D., Rodrigues, L. A. T., ... & Brunetto, G. (2017). Phosphorus forms in leaves and their relationships with must composition and yield in grapevines. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(5), 319-327.

Primo, E., Lafuente, B., & Pinaga, F. (1969). Powdered Cyperus ergeat. Effects of some variables on the freeze-drying process. In *Proceedings of the Intemat. Congress of Refrigeration vol.3*, 981-991.

- Puiggròs, F., Solà, R., Bladé, C., Salvadó, M. J., & Arola, L. (2011). Nutritional biomarkers and foodomic methodologies for qualitative and quantitative analysis of bioactive ingredients in dietary intervention studies. *Journal of Chromatography A*, *1218*(42), 7399-7414.
- Puppi, G. (2007). Origin and development of phenology as a science. *Ital J Agrometeorol*, *3*, 24-29.
- Quaggio, J. A., Cantarella, H., & Junior, D. M. (1996). Soil testing and leaf analysis in Brazil-recent developments. In *Proceedings of the International Society of Citriculture vol. 2*, 1269-1275.
- Ramundo, L., Taisch, M., & Terzi, S. (2016). State of the art of technology in the food sector value chain towards the IoT. In *Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, 2016 IEEE 2nd International Forum on IEEE, 1-6.
- Rao, J. S., & Syamala, M. (2017). Internet of Things (IoT) based Smart City Architecture and its Applications. *International Journal of Computer nad Mathematical Sciences*, *6*(10), 68-73.
- Rezzi, S., Ramadan, Z., Fay, L. B., & Kochhar, S. (2007). Nutritional metabonomics: applications and perspectives. *Journal of proteome research*, *6*(2), 513-525.
- Ritzer, G. (1983). The “McDonaldization” of society. *The journal of American culture*, *6*(1), 100-107.
- Rivera Pastrana, D. M., Yahia, E. M., & González Aguilar, G. A. (2010). Phenolic and carotenoid profiles of papaya fruit (*Carica papaya* L.) and their contents under low temperature storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *90*(14), 2358-2365.

Robinson, J. B., Treeby, M. T., & Stephenson, R. A. (1997). Fruits, vines and nuts, Plant analysis: an interpretation manual, CSIRO Publishing.

Robles, T., Alcarria, R., Martín, D., Morales, A., Navarro, M., Calero, R., ... & López, M. (2014, May). An internet of things-based model for smart water management. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, 2014 28th International Conference on IEEE, 821-826.

Rodrigues, F. A., Vale, F. X. R., Korndörfer, G. H., Prabhu, A. S., Datnoff, L. E., Oliveira, A. M. A., & Zambolim, L. (2003). Influence of silicon on sheath blight of rice in Brazil. *Crop Protection*, *22*(1), 23-29.

Rodriguez, O. and Gallo, J.R. (1961). Pe/a analise foliar, Bragantia, Campinas (SP) 20, 184-202.

Rogiers, S. Y., Greer, D. H., Hatfield, J. M., Orchard, B. A., & Keller, M. (2006). Mineral sinks within ripening grape berries (*Vitis vinifera* L.). *VITIS-GEILWEILERHOF*, *45*(3), 115.

Romero, I., Benito, A., Dominguez, N., Garcia-Escudero, E., & Martin, I. (2014). Leaf blade and petiole nutritional diagnosis for *Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo by deviation from optimum percentage method. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *12*(1), 206-214.

Rovira-Más, F., Chatterjee, I., & Sáiz-Rubio, V. (2015). The role of GNSS in the navigation strategies of cost-effective agricultural robots. *Computers and electronics in Agriculture*, *112*, 172-183.

Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., & Kämäräinen, M. (2016). Projections for the duration and degree days of the thermal growing season in Europe derived from CMIP5 model output. *International Journal of Climatology*, *36*(8), 3039-3055.

Saito, Y. (2007, March). Laser-induced fluorescence spectroscopy/technique as a tool for field monitoring of physiological status of living plants. In *14th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*, International Society for Optics and Photonics, Vol. 6604, 66041W.

Sams, C. E. (1999). Preharvest factors affecting postharvest texture. *Postharvest Biology and Technology*, *15*(3), 249-254.

Saure, M. C. (2005). Calcium translocation to freshy fruit: its mechanism and endogenous control. *Sci. Hortic.*, *105*, 65–89.

Schnabel, U., Niquet, R., Schlüter, O., Gniffke, H., & Ehlbeck, J. (2015). Decontamination and sensory properties of microbiologically contaminated fresh fruits and vegetables by microwave plasma processed air (PPA). *Journal of food processing and preservation*, *39*(6), 653-662.

Shane, M. W., McCully, M. E., & Lambers, H. (2004). Tissue and cellular phosphorus storage during development of phosphorus toxicity in *Hakea prostrata* (Proteaceae). *Journal of Experimental Botany*, *55*(399), 1033-1044.

Shukla, Y., & George, J. (2011). Combinatorial strategies employing nutraceuticals for cancer development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1229*(1), 162-175.

Singh, A., Ganapathysubramanian, B., Singh, A. K., & Sarkar, S. (2016). Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. *Trends in plant science*, *21*(2), 110-124.

Soni, K. A., Nannapaneni, R., & Tasara, T. (2011). The contribution of transcriptomic and proteomic analysis in elucidating stress adaptation responses of *Listeria monocytogenes*. *Foodborne pathogens and disease*, *8*(8), 843-852.

Srbinovska, M., Gavrovski, C., Dimcev, V., Krkoleva, A., & Borozan, V. (2015). Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Journal of cleaner production*, *88*, 297-307.

Srinivasan, C. (1968). Effect of certain fertilizer treatments with reference to the time of application in grape (*Vitis vinifera* L.) var Anabe-Shahi, M. Sc. Thesis, Madras University, India.

Srivastava, A. K., & Singh, S. (2004). Leaf and soil nutrient guide in citrus-A review. *Agricultural Reviews*, *25*(4), 235-251.

Stikans, M., Boman, J., & Lindgren, E. S. (1998). Improved technique for quantitative EDXRF analysis of powdered plant samples. *X-Ray Spectrometry*, *27*(6), 367-372.

高峯和則, 安部淳一, 下野かおり, 鮫島吉廣, 森村茂 & 木田建次. (2007). Physicochemical and gelling characterizations of pectin extracted from sweet potato pulp. *Journal of Applied Glycoscience*, *54*(4), 211-216.

田中慶. (2013). 農業シミュレーションモデルにおける分散協調システムのためのフレームワークに関する研究. *中央農業総合研究センター研究報告*, *20*, 1-115.

田中伸明 (1999). プレシジョンファーミング実現のための生体情報解析に関する基礎研究. 修士論文, 三重大学.

Taormina, P. J., Beuchat, L. R., Erickson, M. C., Ma, L. I., Zhang, G., & Doyle, M. P. (2009). Transfer of *Escherichia coli* O157: H7 to iceberg lettuce via simulated field coring. *Journal of food protection*, *72*(3), 465-472.

Tecchio, M. A., Pires, E. J. P., Terra, M. M., & Moura, M. F. (2007). Produtividade e teores de nutrientes da videira niagara rosada em vinhedos de louveira e Jundiaí. *Bioscience journal*, *23*(1).



Tezotto, T., Favarin, J. L., Paula Neto, A., Gratão, P. L., Azevedo, R. A., & Mazzafera, P. (2013). Simple procedure for nutrient analysis of coffee plant with energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry (EDXRF). *Scientia Agricola*, 70(4), 263-267.

Todd, J. F., Paliyath, G., & Thompson, J. E. (1990). Characteristics of a membrane-associated lipoxygenase in tomato fruit. *Plant Physiology*, 94(3), 1225-1232.

Todd, J.F., G. Paliyath, and J.E. Thompson. (1992). Effect of chilling on the activities of lipid degrading enzymes in tomato fruit microsomal membranes. *Plant Physiol. Biochem.* 30:517–522.

戸上崇, 伊藤良栄, 橋本篤, & 亀岡孝治. (2011). 高品質ミカン生産を目的とするセンサ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), 110-121.

Tonietto, J., & Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1-2), 81-97.

Torre, M., Rodriguez, A. R., & Saura-Calixto, F. (1992). Study of the interactions of calcium ions with lignin, cellulose, and pectin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(10), 1762-1766.

Trentmann, F. (2009). Crossing divides: Consumption and globalization in history. *Journal of Consumer Culture*, 9(2), 187-220.

Trewavas, A. (2001). Urban myths of organic farming. *Nature*, 410(6827), 409.

Verdouw, C. N., Beulens, A. J. M., & Van Der Vorst, J. G. A. J. (2013). Virtualisation of floricultural supply chains: A review from an Internet of Things perspective. *Computers and electronics in agriculture*, 99, 160-175.

- Verdouw, C. N., Sundmaeker, H., Meyer, F., Wolfert, J., & Verhoosel, J. (2013). Smart agri-food logistics: requirements for the future internet. In *Dynamics in logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 247-257.
- Verdouw, C. N., Robbemon, R. M., Verwaart, T., Wolfert, J., & Beulens, A. J. M. (2015). A reference architecture for IoT-based logistic information systems in agri-food supply chains. *Enterprise information systems*, 1-25.
- Vivar, M., Fuentes, M., Norton, M., Makrides, G., & De Bustamante, I. (2014). Estimation of sunshine duration from the global irradiance measured by a photovoltaic silicon solar cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 26-33.
- Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International journal of molecular sciences*, 14(4), 7370-7390.
- Wang, T. (1985). Application of fertilizers to satsuma based on leaf analysis. *Journal of Soil Science. (Turang Tongbo)*, 16, 275-277.
- Wawrzynska, A., Moniuszko, G., & Sirko, A. (2015). Links between ethylene and sulfur nutrition—a regulatory interplay or just metabolite association?. *Frontiers in plant science*, 6, 1053.
- Weimberg, R., Lerner, H. R., & Poljakoff Mayber, A. (1982). A relationship between potassium and proline accumulation in salt -stressed Sorghum bicolor. *Physiologia plantarum*, 55(1), 5-10.
- Welch, R. M. (1986). Effects of nutrient deficiencies on seed production and quality. *Adv. Plant Nutr.*, 2, 205-247.

Williams, J. S., & Cooper, R. M. (2004). The oldest fungicide and newest phytoalexin—a reappraisal of the fungitoxicity of elemental sulphur. *Plant Pathology*, *53*(3), 263-279.

Xiaorong, Z., Honghui, F., Hongjin, Z., & Hanyu, F. (2015). The design of the internet of things solution for food supply chain. In *5th International Conference on Education, Management, Information and Medicine*, Shenyang, China, 314-318.

山本恭輔, 木村佳嗣, 戸上崇, 吉岡洋輔, 橋本篤 & 亀岡孝治. (2011). CBIR 手法を用いた色彩画像解析システムの構築. *農業情報研究*, *20*(4), 139-147.

山本恭輔 (2011). 画像解析を用いた農産物の品質評価および品種識別に関する基礎的研究, 修士論文, 三重大学

Yamamoto, K., Guo, W., Yoshioka, Y., & Ninomiya, S. (2014). On plant detection of intact tomato fruits using image analysis and machine learning methods. *Sensors*, *14*(7), 12191-12206.

Yamamoto, K., Guo, W., & Ninomiya, S. (2016). Node detection and internode length estimation of tomato seedlings based on image analysis and machine learning. *Sensors*, *16*(7), 1044.

Yang, Y. M., & Fang-Tsou, C. T. (2014). Aquaculture cloud management system. *Journal of Information Technology and Applications*, *4*(2), 75-79.

Ye, J., Chen, B., Liu, Q., & Fang, Y. (2013, June). A precision agriculture management system based on Internet of Things and WebGIS. In *Geoinformatics, 2013 21st International Conference on IEEE*, 1-5.

Yu, H., Kaufman, Y. J., Chin, M., Feingold, G., Remer, L. A., Anderson, T. L., Balkanski, Y., Bellouin, N., Boucher, O., Christopher, S., DeCola, P., Kahn, R., Koch, D., Loeb, N., Reddy, M. S., Schulz, M., Takemura, T., & Zhou, M. (2006). A review of measurement-based assessment of aerosol direct radiative effect and forcing. *Atmos. Chem. Phys.*, *6*, 613-666.

Zambrosi, F. C. B., Mattos, D., Boaretto, R. M., Quaggio, J. A., Muraoka, T., & Syvertsen, J. P. (2012). Contribution of phosphorus (<sup>32</sup>P) absorption and remobilization for citrus growth. *Plant and soil*, *355*(1-2), 353-362.

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, *1*(1), 22-32.

Zapata, D., Salazar, M., Chaves, B., Keller, M., & Hoogenboom, G. (2015). Estimation of the base temperature and growth phase duration in terms of thermal time for four grapevine cultivars. *International journal of biometeorology*, *59*(12), 1771-1781.

Zhang, Z., Yu, X., Wu, P., & Han, W. (2015). Survey on water-saving agricultural internet of things based on wireless sensor network. *International Journal of Control and Automation*, *8*(4), 229-240.

Zhuang, Y., Lairong, L., You, J., Rengji, W., & Minghua, S. (1985). Preliminary Studies on the Nutrient Status of Productive Tree and Orchard Soil of POON-KAN (Citrus Reticulata Blanco) in Fujian. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, *1*, 003.

Zou, H., & Yang, S. (1990). Effect of organic-inorganic fertilization on citrus grown on the red soils. In *Proceedings of International Citrus Symposium*, Guangzhou, China, International Acac Publishers, China, 513-516.

参考図書

AJ Winkler. (1974). *General viticulture*. Univ of California Press.

Bartz, J. A., & Brecht, J. K. (Eds.). (2002). *Postharvest physiology and pathology of vegetables* (Vol. 123). CRC Press.

Gladstones, J. (2011). *Wine, terroir and climate change*. Wakefield Press.

Hui, Y. H., & Evranuz, E. Ö. (Eds.). (2015). *Handbook of vegetable preservation and processing*. CRC press.

猪瀬博 (1967) 岩波講座基礎工学 21. システム工学. 岩波書店

Jackson, R. S. (2008). *Wine science: principles and applications*. Academic press.

Johnsen, S. (2012). *The optics of life: a biologist's guide to light in nature*. Princeton University Press.

久能均, 高橋壮, 真山滋志, 白石友紀, 露無慎二 (1998). 新編 植物病理学概論, 養賢堂.

Ladanyia, M., & Ladaniya, M. (2010). *Citrus fruit: biology, technology and evaluation*. Academic press.

農林水産技術会議 (1996), 農林水産業の高度情報システム: 農林水産業における高度情報システム開発に関する調査委員会報告書, 農林水産技術情報協会.

農山漁村文化協会編 (2000a), 果樹園芸大百科 第 1 巻ブドウ, 農山漁村文化協会.

農山漁村文化協会編 (2000b), 果樹園芸大百科 第 2 巻カンキツ, 農山漁村文化協会.

農山漁村文化協会 編 (2004). 野菜園芸大百科 第 2 版, 農山漁村文化協会.

大久保増太郎 (1982). 野菜の鮮度保持, 株式会社養賢堂, 24-30, 204.

Schwartz, M. D. (Ed.). (2003). *Phenology: an integrative environmental science*. Springer.

Sebastian Raschka, (2016), *python 機械学習プログラミング*. 株式会社インプレス.

静岡県産業部農山村共生課 (2014). 静岡県土壌肥料ハンドブック. 静岡県,  
[http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen\\_type/h\\_sehi\\_kizyun/siz01.html](http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/siz01.html).

Sinha, N., Hui, Y. H., Evranuz, E. Ö., Siddiq, M., & Ahmed, J. (2010). *Handbook of vegetables and vegetable processing*. John Wiley & Sons.

塩井祐三, 井上弘, 近藤 矩朗. (2009), ベーシックマスター 植物生理学, オーム社, 244-262.

杉浦明 (2004), 果樹栽培の基礎, 農山漁村文化協会, 52-54

Taiz, L., & Zeiger, E. (2015). *Plant physiology*. 6th. *Sinauer Associate, Sunderland, Mass., EUA*.

田中信正著、浦上弘監修. (2008), HACCP 完全解説～国際的に通用する正しい HACCP とは～. 日本鶏卵肉情報センター

漆崎末夫, (1988), 農産物の鮮度保持-エチレン制御とその利用-, 筑波書房, 37-55.

渡辺和彦, (2009), ミネラルの働きと作物の健康, 農山漁村文化協会, 1-175.

Webber, H. J., & Batchelor, L. D. (1943). The citrus industry. Vol. I. History, botany and breeding. *The citrus industry. Vol. I. History, botany and breeding.*

参考 URL (記載順)

コトバンク・産業革命 <<https://kotobank.jp/word/産業革命-70520>>, 2017 年 12 月 11 日参照

Hau, L, Lee., Haim, Mendelson., Sonali, Rammohan., & Akhil, Srivastava. (2017). *Value Chain Innovation Initiative* <<https://www.gsb.stanford.edu/faculty-research/publications/technology-agribusiness-opportunities-drive-value>>

農林水産省・農業の多面的機能とは? <[http://www.maff.go.jp/j/nousin/tyusan/siharai\\_seido/s\\_about/cyusan/tamen/](http://www.maff.go.jp/j/nousin/tyusan/siharai_seido/s_about/cyusan/tamen/)>, 2017 年 12 月 11 日参照

FAO による農業関係統計 <<http://www.fao.org/faostat/en/#home>>, 2017 年 12 月 11 年参照

TECHNOLOGY IN AGRIBUSINESS OPPORTUNITIES TO DRIVE VALUE <<https://www.gsb.stanford.edu/faculty-research/publications/technology-agribusiness-opportunities-drive-value>>, 2017 年 12 月 25 日参照

東京大学大学院理学系研究科・オーミクス <<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/story/newsletter/keywords/29/06.html>>, 2017 年 12 月 25 日参照

農林水産省・面積調査 <<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/index.html>>, 2017 年 12 月 11 日参照

農林水産省・GDP に関する統計 <<http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/01.html>>, 2017 年 12 月 11 日参照

Agri journal・農産物の国際基準・グローバル GAP 認証取得とは? <<https://agrijournal.jp/aj-market/11712/>>, 2017 年 12 月 11 日参照



リモートセンシングの誕生と発展 <<http://mogist.kkc.co.jp/history/development/04/index.html>>, 2017年12月11日参照

e-kakashi <<https://www.e-kakashi.com/>>, 2017年12月11日参照

ICT活用農業 事業化・普及プロジェクト <<http://www.aip.nagoya-u.ac.jp/industry/ict/index.html>>, 2017年12月11日参照

OGC・Sensor Observation Service <<http://www.opengeospatial.org/standards/sos>>, 2017年12月11日参照

日本土壌学会・有機栽培技術の手引 <<http://www.japan-soil.net/report/h25.html>>, 2017年12月12日参照

総務省統計局・家計調査 <<http://www.stat.go.jp/data/kakei/>>, 2017年12月12日参照

岐阜県農産物流通課(2011)・平成23年度農産物購入に関するアンケート調査集計結果 <<https://www.pref.gifu.lg.jp/kensei/koho-kocho/iken-teian/11103/monitor-anketo.data/nousanbutsukounyuu-syuusei120201.pdf>>, 2017年12月12日参照

独立行政法人農畜産業振興機構(2012)・平成24年度カット野菜需要構造実態調査事業 <<http://www.alic.go.jp/content/000091984.pdf>>, 2017年12月12日参照

農研機構(2013)・野菜のおいしさの分析技術研修テキスト  
<[http://www.naro.affrc.go.jp/training/files/reformation\\_txt2011\\_c34.pdf](http://www.naro.affrc.go.jp/training/files/reformation_txt2011_c34.pdf)>, 2017年12月12日参照

定湿度の実現・飽和塩法 <<http://www.comb.kokushikan.ac.jp/lecture/envmeasure/node56.html>>, 2017年12月12日参照

JIS B 7920:2000・湿度計・試験方法 <<http://kikakurui.com/b7/B7920-2000-01.html>>, 2017年12月10日参照

Jason Roeder, Better and Faster: Reinventing Food Safety Management with the Internet of Things, (2016) <<https://powerhousedynamics.com/resources/white-papers/internet-things-reinvents-food-safety/>>, 2017年12月11日参照

Chris Wilder・What Does Food Packaging Have To Do With Big Data And The Internet Of Things? (2015) <<https://www.forbes.com/sites/moorinsights/2015/10/01/what-does-food-packaging-have-to-do-with-big-data-and-the-internet-of-things/#46ec7061c208>>, 2017年12月11日参照

## 謝辞

本研究は、三重大学生物資源科学科フードシステム学研究室の亀岡孝治教授と伊藤良栄助教によるご指導のもと行われたものである。両先生には本研究における構想、実験方法の提案及び様々な問題点の指摘とその解決策の提示等、様々な場面で貴重なご指導を賜り、学位論文の執筆に際しても、長時間にわたり研究の方向性に関する軌道修正や、新たな考察等のディスカッションを精力的に設けていただいた。伊藤助教には、数理的なデータハンドリングやプログラミングに関して非常に重要なご指導を賜った。亀岡教授からは、研究に対する姿勢、物事に対するシステム工学的アプローチの重要性、計測という分野の難しさと意義深さなど、今後の研究生活にとってかけがえのない貴重なご指導を賜った。研究の進捗が滞った際に、亀岡教授から厳しくも温かい指導をいただいたことは、筆者にとって非常に励みになった。

また、本研究全般にわたって、三重大学生物資源科学科生物情報工学研究室の橋本篤教授から、光分析やフードシステムに関する示唆に富んだご意見や、学会誌執筆の際に適切なご指導を賜った。三重大学生物資源科学科気象・気候ダイナミクス研究室の立花義裕教授には学位論文審査に当たって貴重なご意見をいただいた。礪田修平氏と岡野隆志氏と塚原茜氏にはデータ取得および Web アプリケーションの構築に関する多大なる協力をいただいた。サントリーワインインターナショナル株式会社の渡辺直樹様、和田弦己様には、気象観測データの取得および実際の圃場に関する様々なご助言をいただいた。社会福祉法人サンビジョン、サンサンワイナリーの戸川英夫様と田村彰吾様、紀州地域農業改良普及センターの鈴木賢様、山上尚史様にはそれぞれ試料となるワイン用ブドウ葉とみかん葉の採取に関して多くのご指導をいただいた。本研究の一部ともなった異分野融合プロジェクトにも多くの機会をいただいた。中部大学の本多潔教授には IoT インフラ構築に関して多大なるご助力を賜った。東京大学大学院農学生命科学研究科の二宮正士教授からは本研究の意義を再確認する貴重なご助言をいただいた。フードシステム学研究室の田口拓実氏、武田樹馬氏には、日頃より示唆に富んだ意見を多数いただいた。両親、兄弟、そして家族には常日頃より経済的・精神的なご支援をいただくだけでなく、暖かく見守った。

以上の方々および、ここには書ききれなかった多くの方々に、ここに記して、敬意を表し、深く感謝申し上げます。