

令和2年度
修士学位論文

輸送負荷に対する青果物の特徴的な近赤外波長帯の把握

令和3年2月

三重大学 大学院生物資源学研究科 共生環境学専攻

環境情報システム工学講座

応用環境情報学研究室

吉村 和己

目次

第 I 章 緒言	1
1.1 農産物をめぐる情勢.....	1
1.2 スマートフードチェーンについて.....	2
1.3 環境負荷が青果物に及ぼす影響	3
1.4 輸送青果物の損失	3
1.5 先行研究.....	3
1.6 研究目的.....	4
第 II 章 近赤外領域の活用	5
2.1 近赤外分光法.....	5
2.2 近赤外光とその利用法	5
2.3 近赤外光の吸収原理.....	5
2.4 スペクトルの前処理.....	7
2.5 ケモメトリックス	10
第 III 章 選択波長による品質推定	13
3.1 はじめに.....	13
3.2 フォトダイオードによる糖度推定実験	13
3.2.1 実験概要	13
3.2.2 近赤外分光測定装置 (flame-S)	13
3.2.3 自作センサユニット.....	15
3.2.4 前処理後, 波長選択およびモデル作成.....	17
3.2.5 実験結果および考察.....	19
3.3 実青果物を用いた自作デバイス試験	22
3.3.1 貯蔵試験用自作デバイス.....	22
3.3.2 温度補正実験.....	25
3.3.3 温度補正実験結果.....	25
3.3.4 実青果物適用実験.....	28
3.3.5 実青果物適用実験結果.....	28
第 IV 章 輸送負荷による近赤外特徴波長の特定	33
4.1 はじめに.....	33
4.2 実験試料.....	33
4.2.1 モモ	33
4.2.1 温州ミカン.....	34
4.3 実験機器および計測方法	34
4.3.1 モモ落下試験.....	34
4.3.2 ミカン振動試験.....	36

4.3.3 近赤外分光計測.....	39
4.3.4 ロジスティック回帰分析による近赤外波長特定.....	41
4.4 実験結果および考察.....	42
4.4.1 重量変化.....	42
4.4.2 近赤外スペクトル.....	43
4.4.3 モモの落下試験による特徴的近赤外波長.....	48
4.4.4 みかんの振動試験による特徴的近赤外波長.....	50
第V章. 結言.....	52
5.1 本研究の成果.....	52
5.2 課題と今後の展望.....	53
謝辞.....	54
参考文献.....	
付録.....	

第 I 章 緒言

1.1 農産物をめぐる情勢

我が国の人口は減少局面に入っており、生産年齢人口も 2007 年の 8716 万人をピークに減少しつづけ、2037 年には 7096 万人になると予想される¹⁾。特に農業分野では都市部への農業人口の流出や高齢化に伴う離農などにより、農業労働力の脆弱化の進行が懸念²⁾となる。そこで、農林水産省は農業・農村をめぐる基本計画を策定し、農業の成長産業化と農業・農村の有する多面的機能の維持・発揮を進める地域政策を進めてきた。その結果、農林水産物・食品輸出額は 2012 年から 2019 年の間におよそ倍の 9223 億円（図 1-1）となり、49 歳以下の新規就農者は約 2 万人のペースを維持し続けている。一方で、農地面積や農業就業者は減少し続けており、生産現場は依然として厳しい状況にある。

また、近年はライフスタイルの変化やデジタルトランスフォーメーション化などの新たな潮流も生じている。農業分野においても同様に、農作物の加工・選別などの人手に頼る作業やトラクタの操作、貯蔵を見越した収穫期の見極めなど、熟達者でなければ困難な作業を先端技術によって解決する農業が広がりを見せている。こうしたロボット・AI・IoT などの先端技術を活用して、現場の課題を解決する農業はスマート農業と呼称される³⁾。既に、ロボットトラクタやドローン・衛星を用いたセンシング、光選果など生産・加工において多くの技術が実用化されている。

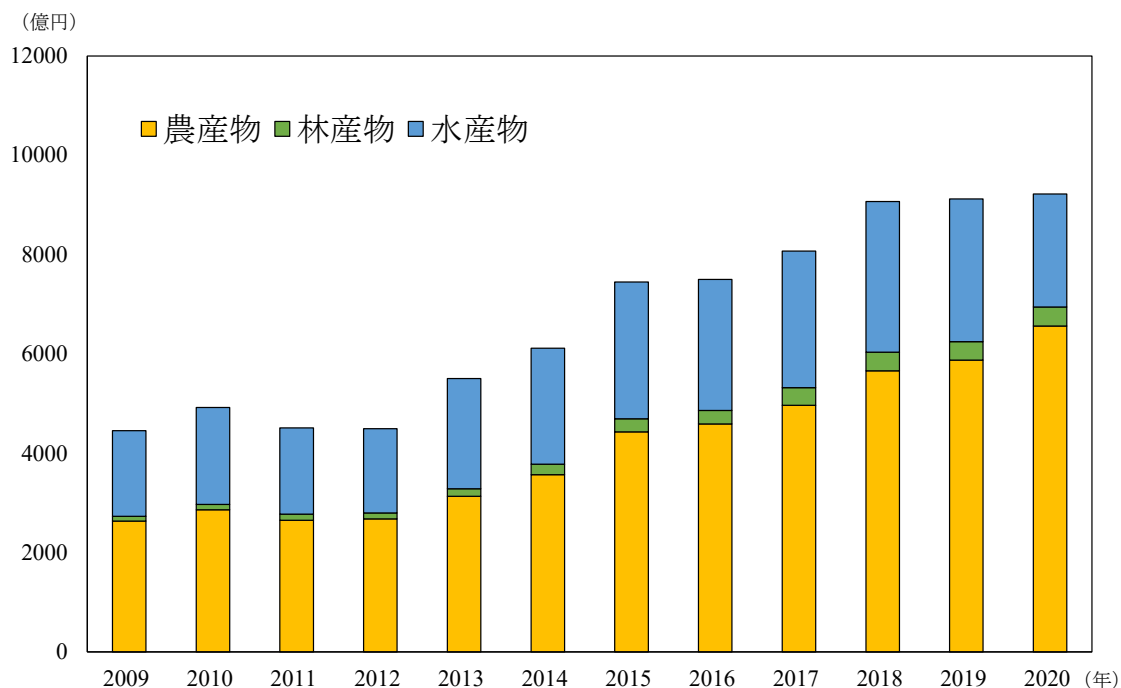


図 1-1 農林水産物・食品の輸出実績⁴⁾

1.2 スマートフードチェーンについて

農場から食品産業を経由して、消費者に食料として供給される構造はフードチェーンと呼称される。国民の生活形態が多様化している現代では、消費者のニーズや購買意識の複雑化、流通形態の効率化による食料・食品の品質概念の拡大が急速な進展を見せている。そのため、農業現場では新たな品質概念に応えるブランド化などの高付加価値化の取り組みやデジタルトランスフォーメーションによる生産性の向上を通じた国際競争力の強化が進んでいる。一方で、生産・流通・消費のフードチェーン各段階においては様々な ICT サービスが提供されているが、データやサービスが個々の段階で完結しており、相互間連携が行われていない。そのため、社会への浸透が遅れるなどの問題が生じている。

これらの問題に対し、国は 2022 年度までにスマートフードチェーンシステム⁵⁾の構築を掲げた。このシステムによりデータを集約し、国内外の多様化する需要などの情報をフードチェーン全体で共有することで、高付加価値化を目指した農業技術（育種・加工技術）の開発、フードロスを削減するための生産体制の構築や品質・鮮度保持技術につなげることが可能となる。そのため、フードチェーンの情報収集機構の構築が急務となっている。また、本システムの構築のため、農業はより消費者から得られるデータなどを活用して駆動することが求められたことから、農業経営は個人経営からビジネスへと転換し、参入企業の増加が進んだ。実際に農業経営における法人経営体は 2005 年から 2015 年までに 2.2 倍となり、農産物販売金額に占める法人経営体の販売金額シェアも 2015 年時点で 27%も占め、年々増加している⁶⁾ (図 1-2)。データを基にした多角的な農業経営のため、フードチェーン全体のデータ化とサービスの連携が進められ、データを基盤に農業経営する新たな運営スタイルによる農業の成長産業化が著しいものとなっている。

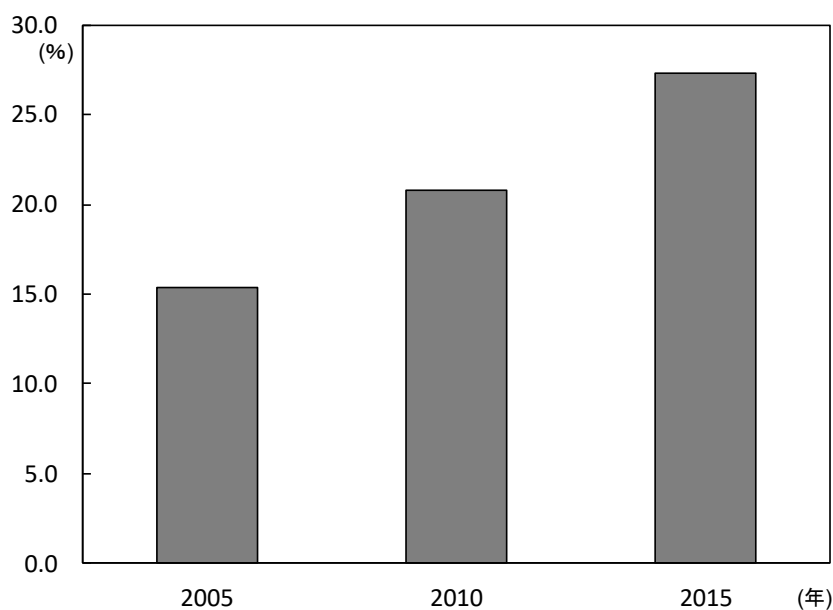


図 1-2 農産物販売金額全体に占める法人経営体の販売金額シェア

1.3 環境負荷が青果物に及ぼす影響

収穫後青果物は、消費者に商品を提供する輸送中において機械的損傷や物理的負荷により、鮮度劣化や品質低下を生じ、その価値を低下させている問題がある。機械的損傷では輸送中における振動が例として挙げられる。視認できる大きな振動では回転や衝撃により青果物に傷がつき、変形や破壊などの物理的劣化が生じる⁷⁾。また、視認できない程度の微細な振動でも、青果物は代謝異常を引き起こし、TCA サイクルや有機酸含量の低下などの生理的劣化を招く⁷⁾。物理的負荷としては温度やガスが例として挙げられ、温度変化では呼吸量の増加や青果物の軟弱化を誘発し、物理的劣化を誘引する原因⁷⁾となる。ガスとしては酸素濃度が挙げられる。酸素濃度は低いほど、呼吸量が減少することが報告されている⁸⁾。このように青果物は輸送中の環境負荷を受け、品質を低下させる。そのため、収穫後における青果物は輸送中に様々な影響を受け、品質低下を起こすため、現場における青果物品質をモニタリングし、それらのデータによる流通管理が求められている。

1.4 輸送青果物の損失

近年、日本では少子高齢化問題により国内食市場の縮小が見込まれているが、青果物のトラック輸送量は農産物輸送の根幹であり、日本生産物の高品質・ブランド化に伴う農産物輸出も増加している。また、新型コロナウイルスによる在宅需要などによる農産物における新たな流通の領域として EC 市場・宅配が急速に拡大しており、大規模輸送から小規模輸送に至るまで青果物輸送が増加傾向にある。さらに、国際農業機関（FAO）は農産物の収穫後から消費までのポストハーベストにおいて、14%のフードロスが発生していると報告している⁹⁾。この損失額はオーストラリアの GDP に匹敵し、国際的な課題である。また、フードロスは経済的損失だけでなく、環境にも負荷を与える。SDGs ではターゲット 12.3 のように、農産物の生産と消費の両面を持続可能なものにすることが求められている。

特に青果物は輸送時間や振動・衝撃、温度、ガス濃度などの周囲環境の影響を受けやすい性質をもつだけでなく、収穫後も生命活動を維持しており、自身の成分を消費することで呼吸を行う。そのため、青果物輸送においては輸送物自身はその価値を低下させる¹⁰⁾。そのため、青果物自身が受ける負荷特性や品質変化をオンサイトで継続して把握する必要がある。

1.5 先行研究

輸送中のロスを削減するために、青果物の外的要因を特定し、生理活性を抑えようという研究が行われている。国内においてはトラック内の気温計測や振動の計測に関する研究報告¹¹⁾¹²⁾があり、海外でも同様に青果物輸送における環境負荷を計測し輸送技術に役立てようとする研究が行われている¹³⁾¹⁴⁾。しかし、青果物の品質を計測し輸送技術に活用した報告はなく、輸送中の品質変化として輸送前と輸送後の青果物の糖度・酸度を計測し、比較した研究¹⁵⁾に留まるところである。外的要因だけでは実際の青果物品質の低下にいたるプロセスが不明であり、輸送中に青果物自身が受ける負荷特性や品質変化を把握することで、輸送

方法, 梱包材・梱包技術, 品質保持技術などのスマートフードチェーンの発展に寄与できる。

1.6 研究目的

上記の内容を踏まえ, 本研究では輸送青果物の負荷に対する品質低下のメカニズム解明のため, 輸送青果物の品質変遷をオンサイトで継続的に取得するシステムの開発を目的とする。輸送環境における商品の品質をオンサイトで計測するためには, 非破壊測定が必須であり, さらに非接触測定であることが望ましい。そこで, 青果物に対し優れた透過性をもつ近赤外領域の光計測に着目した。この領域での分光計測は多くの研究が進められており, 青果物の大規模選果場では導入が進んでいる。一方で, 輸送時の青果物品質計測の例はない。光測定として近赤外光の活用を目指す理由は, 近赤外光が青果物の食品成分の構造に由来する吸収特性を持つことである。そこで, 特定成分に対応する単一波長を選択した装置を作成することで, 青果物品質を推定できると考えた。

本研究では, 特定成分に対応する単一波長で青果物品質を推定する品質推定デバイスを試作し, その性能評価として青果物の糖度推定試験を実施した。さらに, 青果物が輸送中に受ける負荷に対する品質変遷を近赤外波長帯で評価するため, 落下・振動負荷試験を実施した。負荷の有無で分けた青果物を対象にした近赤外領域の分光計測結果から, 輸送負荷に対する特徴的な近赤外波長を統計的に評価・特定した。

第Ⅱ章 近赤外領域の活用

2.1 近赤外分光法

青果物を対象とした非破壊測定法は、色彩、内部損傷、見た目の損傷などの観点から光学的特性に基づいた測定法が研究されてきた。光学測定技術の発展とともに、食品成分の多くが赤外域において構造に由来する吸収特性を持つことが発見され、赤外域におけるスペクトル分析が広く研究されたが、 $2.5\mu\text{m}$ 以上の波長帯を用いた多水分試料の測定は水分の影響や吸収の複雑さにより測定することが装置的にも困難であった。そこで近年、紫外光や赤外光と比べ、エネルギー量が少なく、物質の吸光度が低い内部まで光が侵入しやすい近赤外域 ($0.7\sim 2.5\mu\text{m}$) において、試料に照射した光の反射、または透過光を計測し、吸光度の変化によって成分の特定や定量を行う近赤外分光法が農産物において発展した。特にオンラインにおける非破壊計測が可能であるという点から、食品成分の吸収帯を利用した研究が進み、水分、たんぱく質、炭水化物などの非破壊測定が可能となった。近赤外分光法は急速に発展し、イチゴ¹⁶⁾やミカン¹⁷⁾の brix 値や水分量などの測定例や実測装置が数多く報告され、近赤外スペクトル測定法は確立されたものとなっている。

2.2 近赤外光とその利用法

近赤外光は電磁波の一種であり、波の性質を有する。波の山と山の間隔を波長と呼び、近赤外光は波長 $800\sim 2500\text{nm}$ の領域の光を指す。この領域は可視域 ($380\sim 800\text{nm}$) と赤外 (中赤外) 域 ($2.5\sim 25\mu\text{m}$) の中間の領域にあたる。近赤外域の短波長端は人間の肉眼 (可視域) で捉えることが出来るか出来ないかの境目にあたるが、ある程度の強度があれば 785nm のレーザー光は人間の眼で赤色として認識することが出来るため、一般的に近赤外域としては 800nm を採用することが多い¹⁸⁾。そのため、近赤外光は一般的には人間の感覚で知覚することの出来ないものである。

近赤外域は大まかに領域Ⅰ ($800\sim 1200\text{nm}$)、領域Ⅱ ($1200\sim 1800\text{nm}$)、領域Ⅲ ($1800\sim 2500\text{nm}$) に分けることができる。しかし、これらの領域は厳密なものではない。特に領域Ⅰは電子遷移によるバンドと高次倍音、結合音によるバンドが観測されるが、どれも強度が非常に弱いため、この領域は非常に透過性に優れている。紫外～可視～赤外域の中で生体に対して優れた透過性をもつのはこの領域のみであるため、この領域は「生体の窓」とも呼ばれる¹⁹⁾。近年、この窓領域の光を発する素子の開発が進み、LED やフォトダイオード (PD) で製品化したことから、農産物の応用や生物学・医学への応用が活発に行われている。

2.3 近赤外光の吸収原理

近赤外分光法の吸収原理はランベルトーベールの法則に従っている。この法則は一樣な光吸収物質における入射光の強度と透過光の強度との間の関係を表す法則である。近赤外光は青果物などの対象物に照射するとこの法則に従い、特定の波長の光が吸収される。その光が吸収される強度 (吸光度) は光を吸収する物質の濃度に比例する。

まず、平行光束が図 2-1 に示すような暑さ d (単位 cm) の透明体に入射した場合を考える。

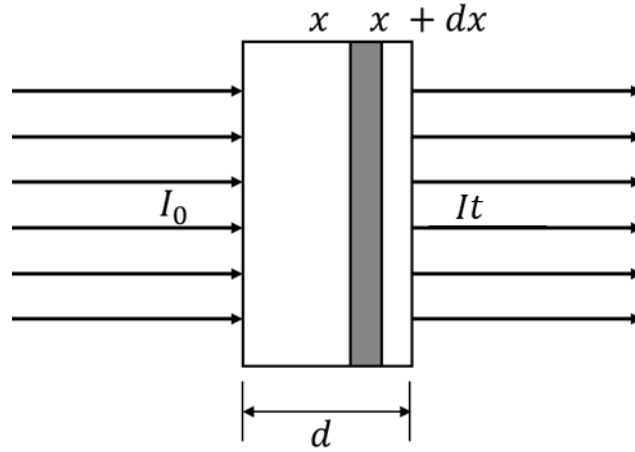


図 2-1

平行光束の入射位置における強度を I_0 、透明体を通過した後の強度を I_t とすると、透過率 T は

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad 2-1$$

となり、透過率 T は入射光の強度 I_0 に対する透過光 I_t の強度の比として定義することができる。

一方で吸収率 E は入射光の強度 I_0 に対する吸収された光の強度 I_a の比

$$E = \frac{I_a}{I_0} \quad 2-2$$

として定義される。透明体は光を散乱せず、非蛍光性であると仮定すると、

$$I_0 = I_a + I_t \quad 2-3$$

が成立するため、

$$E + T = 1 \quad 2-4$$

となる。

次に入射光が減衰する様子を数式で表す。図 2-1 の透明体中に暑さ dx の薄層を考え、入射光が x から $x + dx$ に進むことで、その入射断面積あたりの強度が i ($\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$) から $i + di$ に減衰したとする。入射した光の粒子(フォトン, 光子)が透明体試料の分子と衝突したとき、ある一定の確率で吸収されて消えるとすると、この時の減衰量 di は、入射光強度 i 、試料の濃度 c (mol dm^{-3})、距離 dx に比例する。

$$-di = \varepsilon^* ic dx \quad 2-5$$

位置 0 および d (厚さ) における光の強度をそれぞれ I_0 、 I_t として式 (2-5) を 0 から d の範囲

で定積分すると,

$$-\int_{I_0}^{I_t} \frac{di}{i} = \varepsilon^* c \int_0^d dx \quad 2-6$$

より

$$I_t = I_0 \exp(-cd\varepsilon^*) \quad 2-7$$

が得られる. 式 2-7 は, 光の強度が試料の厚みに応じて指数関数的に減衰することを示し, これをランベルト-ベールの法則という. また, この法則は 10 の累乗とした

$$I_t = I_0 \cdot 10^{-cd\varepsilon} \quad 2-8$$

を式変形して常用対数で表した

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right) = \log\left(\frac{1}{T}\right) = cd\varepsilon \quad 2-9$$

式 2-9 の形で用いられることが多い. ただし $\varepsilon = 0.434\varepsilon^*$ である. $A = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)$ を吸光度という. 一般的に, 吸収スペクトルの縦軸にはこの吸光度がとられ, 吸光度は物質の濃度 c と光路長 d に比例する. 比例定数 ε は特定の波長における吸収の強さを表す尺度で, モル吸光係数とも呼ばれる. 式 2-9 からわかるように A は単位をもたない無次元数であるため, ε の単位は $M^{-1}cm^{-1}$ となる (SI 単位では $mol^{-1}dm^3cm^{-1}$). ε は物質固有の値であることから, ε と d により, 濃度 c を求めることが出来る. 逆に既知の d と c から, ε を決定することも可能である. 一般的に式 2-9 の吸光度 A を縦軸にとり, 横軸に波長または波数変化を表したグラフを吸収スペクトルと呼ぶ. 近赤外分光法は特有の振動数を持つ原子団と共振する光を照射することで, そのエネルギーの一部が原子団に吸収され, その結果, 分子振動は激しくなり, 照射光は減衰する. その光の減衰は遭遇する原子団の数=濃度に比例する.

2.4 スペクトルの前処理

近赤外分光法で取得されるスペクトルは原理的には計測毎に違いは生じないが, 実際には装置の不安定性やノイズ, 屈折率の違いや不均一試料による散乱により, 見かけとは異なるスペクトルが取得されることが多い. このような分析の妨げとなるノイズやスペクトル変動を除去するために, 分析前に前処理を施すことが一般的である.

近赤外スペクトルにおいて最も問題となるのがノイズである. ノイズを除去するために最初にとるべき手段としては測定系を検証し, ノイズ発生要因を取り除くことである. しかしノイズを完全に除去することは難しい. そこでノイズを低減する方法として Savitzky-Golay 法 (SG 法) が使われる. 以下, 近赤外スペクトルの前処理法として代表的な SG 法について述べる.

測定によって得られた吸光度スペクトル ($y(i)$, i は整数) からノイズを低減する方法とし

て、加重移動平均による平滑化がある。 i 軸に沿った $(i - m)$ から $(i + m)$ まで大きさが $(2m + 1)$ ある領域（窓と呼称する）を考える（ m は自然数）。窓の中のデータ点数は窓幅と呼称され、加重移動平均では窓幅が $(2m + 1)$ の窓において重み関数 $w(j) (-m \leq j \leq m)$ を設ける。重み関数を用いて平滑値 $y_s(i)$ は以下のように計算される。

$$y_s(i) = \frac{1}{W} \sum_{j=-m}^m w(j) \cdot y(i + j) \quad 2-10$$

ただし、

$$W = \sum_{j=-m}^m w(j) \quad 2-11$$

は正規化のための定数である。

近赤外スペクトルの平滑化において最も使われている重み関数は Savitzky と Golay により提案された 2 次・3 次多項式によるものである²⁰⁾。平滑化点数が $2m + 1$ である 2 次・3 次多項式による重み係数 $w(j)/W$ は

$$w(j) = 3m(m + 1) - 1 - 5j^2 \quad 2-12$$

$$W = \frac{(4m^2 - 1)(2m + 3)}{3} \quad 2-13$$

から計算される。平滑化点数 $(2m + 1)$ が 5 から 15 における 2 次・3 次多項式による重み係数の値を表 2-1 に示した。重み係数は j に対する 2 次関数となっている。これは測定で得られた吸光度スペクトル $y(i)$ が $i - m \leq j \leq i + m$ の範囲で

$$y_s(i) = a(j - i)^2 + b(j - i) + c \quad 2-14$$

$$(j = i - m, \dots, i - 1, i, i + 1, \dots, i + m)$$

により近似できると仮定することで得られる。

SG 法によるスムージング処理は単純移動平均よりもスペクトルが保持され、かつノイズの除去が行える方法として近赤外分光法では広く用いられている。また、この手法は微分処理にも適用できる。微分処理によればベースラインシフト（加算的）は 1 次微分で除去でき、ベースラインの傾き（乗算的）は 2 次微分で除去できる。従って、微分処理では隠れたピークの顕在化とベースライン補正を行うことが可能である。また、微分法はピークの顕在化を行うため、ノイズの影響が非常に大きくなる恐れがある。そのため SG 法を適用して微分処理を行うことが望ましい。実際に (2-15) 式の 1 次微分は

$$y'(j) = 2a(j - i) + b \quad 2-15$$

となる。中心点が i で $y'(j) = b$ となり、この係数 b を求めることにより中心点 i の微分値 $y'(j)$ が得られる。このような微分スペクトルを計算する方法も平滑化と同様に SG 法という。この方法はデータの平滑化が原理的に行われる。表 2-2 に 2 次多項式適合によって微分スペクトルを求める際の窓関数の値を示す。この窓関数は 2 次多項式の微分波形であるため、1 次関数となる。

表 2-1 2次・3次多項式による重み係数

m	2	3	4	5
$2m + 1$	5	7	9	11
$w(j)$				
$j = -5$				-36
$j = -4$			-21	9
$j = -3$		-10	14	44
$j = -2$	-3	15	39	69
$j = -1$	12	30	54	84
$j = 0$	17	35	59	89
$j = 1$	12	30	54	84
$j = 2$	-3	15	39	69
$j = 3$		-10	14	44
$j = 4$			-21	9
$j = 5$				-36
W	35	105	231	429

表 2-1 2次多項式適合によって微分スペクトルを求める際の窓関数

m	2	3	4	5
$2m + 1$	5	7	9	11
$w(j)$				
$j = -5$				-5
$j = -4$			-4	-4
$j = -3$		-3	-3	-3
$j = -2$	-2	-2	-2	-2
$j = -1$	-1	-1	-1	-1
$j = 0$	0	0	0	0
$j = 1$	1	1	1	1
$j = 2$	2	2	2	2
$j = 3$		3	3	3
$j = 4$			4	4
$j = 5$				5
W	10	28	60	110

2.5 ケモメトリックス

近赤外域では物質による近赤外光の吸収がスペクトル上にブロードなバンドとなって現れ、さらに物質の分子振動の倍音や結合音などのバンドも数多く観測される。また、近赤外光は赤外や紫外光と比べ、非常に高い透過性を持つことから試料の厚みや密度と言った物理的な特性を反映しやすく、スペクトルのベースラインが変動しやすい。そのため、赤外スペクトルに比べると近赤外スペクトルの形状は非常に多くの情報量を含み、複雑になる。そこで、実験から得られた化学データの解析に数学・統計的な技法を適用し、膨大なデータから情報を引き出す手法として、ケモメトリックスが発案された。この手法における最大の特徴は、人間が直感的には解釈できない膨大なデータから意味のある情報を取り出すことができる点である。ここでは近赤外スペクトルの解析に用いられるケモメトリックスの手法について説明する。

近赤外スペクトルのようなデータは行列として扱うことが可能である。近赤外スペクトルは試料に対して様々な波長の光を照射したときに測定される、試料によってどの程度の光が吸収・反射されたのかを示す数値の集合である。例えば、単一の成分からのみ成り立つ資料が存在し、近赤外スペクトルを取得した場合、そのスペクトルは図 2-3 のような吸収ピークが単一のスペクトルが得られる。このスペクトルを行列表記に変換すると、

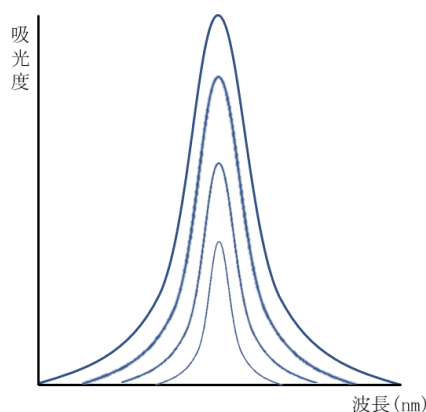


図 2-3 単一成分試料の場合の近赤外スペクトルとベクトル

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

2-16

式 2-16 のように表記することができる。このような単純なスペクトルの場合、ランベルトベールの法則に従って、試料の物性値 y （濃度，密度）と測定データ X との間で回帰分析を行う。回帰分析のための一般式は，

$$y = Xb = x_1b_1 + x_2b_2 + \cdots + x_nb_n \quad 2-17$$

と表される。この式では各波長における吸光度 $x_1x_2 \cdots x_n$ にそれぞれ回帰係数 $b_1b_2 \cdots b_n$ を乗じた総和が試料の物性値 y と一致するというを表している。回帰モデルを構築し，回帰係数 b を求められれば，実際の試料の物性値 y が未知であっても試料のスペクトル X から試料の物性値 y を見積もることができる。これにより，クロマトグラフなどの破壊的従来法を使わずにスペクトルの値から目的量を得ることができる。この回帰係数 b は y と X に相当するデータがあれば最小二乗法を用いて算出することができる。説明変数（波長） x が1つの場合，単回帰分析を行う。単回帰分析における数値を行列表記すると，

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ & \vdots \\ 1 & x_n \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad 2-18$$

となり，

$$\sum_{i=1}^n fi^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - yi^0)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_i)^2 \quad 2-19$$

と表される。この式を変換して，

$$f^T f = (y - Xb^T)(y - Xb) \quad 2-20$$

ここから，最小二乗法により，式 2-19 を最小にする b を探索する。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad 2-21$$

説明変数（波長） x が複数個存在するときには重回帰分析と呼ばれる。この時の数値を行列表記すると，

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1d} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2d} \\ & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nd} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad 2-22$$

$$\sum_{i=1}^n fi^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - yi^0)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_{i1} - \cdots - b_nx_{id})^2 \quad 2-23$$

単回帰分析と同様に，

$$f^T f = (y - Xb^T)(y - Xb) \quad 2-24$$

ここから，最小二乗法により，式 2-21 を最小にする b を探索する。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad 2-25$$

データから回帰モデルが得られた後，得られた回帰モデルの精度を評価する必要がある。モデルは相関係数や決定係数，RMSE などにより評価される²¹⁾。

図 2-4 にイチゴの brix 値を求める例を示す。Brix 値を求める回帰モデル式は

$$C_p = 9.9 - 89 \times \log\left(\frac{1}{R_{668}}\right) - 2064 \times \log\left(\frac{1}{R_{694}}\right) - 1711 \times \log\left(\frac{1}{R_{848}}\right) + 527 \times \log\left(\frac{1}{R_{890}}\right) \quad 2-26$$

となる。ここで $\log\left(\frac{1}{R_{668}}\right)$, $\log\left(\frac{1}{R_{694}}\right)$, $\log\left(\frac{1}{R_{848}}\right)$, $\log\left(\frac{1}{R_{890}}\right)$ はそれぞれ 668, 694, 848, 890nm における吸光度である。従前の研究により, 668, 694nm はクロロフィルの吸収ピーク, 890nm はスクロースに関する吸収ピーク, 848nm 吸収ピークは成分に依存しない中立の吸収ピークであることが知られている。イチゴの brix 値を求める検量線はクロロフィル, スクロースと中立波長の複数の情報から構成されていることが分かる。

図 2-4 の 668, 694, 848, 890nm における吸光度 $\log\left(\frac{1}{R}\right)$ を式 2-26 に代入することでイチゴの brix 値を求めることが可能である。近赤外分光法では, 近赤外スペクトルから統計解析により, 有用な情報 (波長) を抜き出し, 検量線 (回帰モデル) を作成することで非破壊分析法が行われている。

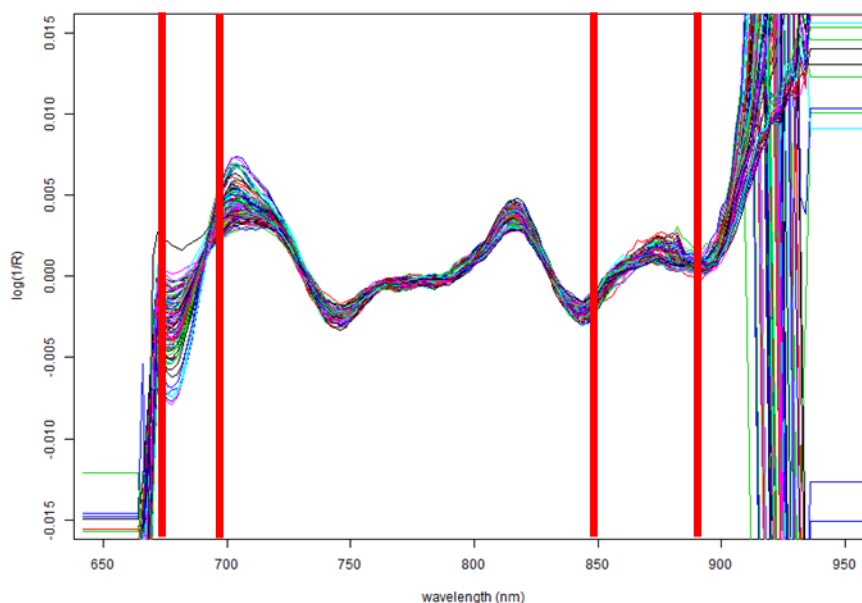


図 2-3 イチゴの前処理後スペクトルと brix 値検量線に採用された波長

第三章 選択波長による品質推定

3.1 はじめに

輸送中の青果物品質を計測するため、非破壊計測法として光を用いた近赤外分光法に着目した。しかし、実際のトラック輸送に適用するためには測定系が大型のシステムになることや、光源も含めた消費電力が大きいといった課題があった。そこで、近赤外分光法の定量分析において、品質項目の推定に用いられる波長は数個であることから、特定波長に対応するフォトダイオードと光源として LED を採用することにより、単一波長で青果物の品質推定デバイスの作成が行えるのではないかと考えた。

そこで、品質評価のための特徴的な波長を採用し、青果物の内部環境を計測する光学デバイスを開発する。まず、青果物の品質評価として最も一般的な糖度（スクロース溶液濃度）において、フォトダイオードと LED で糖度推定が可能であるか検証した。次に、外部環境を計測するシステムを付属したセンサユニットを作成し、実青果物（モモ）を用いて、1 週間の恒温貯蔵における品質データを取得した。

3.2 フォトダイオードによる糖度推定実験

3.2.1 実験概要

フォトダイオードと LED を用いて作成した自作センサユニットを開発し、スクロース溶液の brix 値推定を、近赤外分光法とフォトダイオードによるシステムで比較した。実験対象として、brix 値に差を設けたスクロース溶液 18 種を標準セル (G-10, ガラス製) に入れ、それぞれ 10 回計測し、189 サンプルを対象とした。どちらもリファレンスは標準セルに入れた精製水から取得した。

3.2.2 近赤外分光測定装置 (flame-S)

近赤外分光装置として flame-S (Ocean Insight, 図 3-2-1) を用い、光源としてタングステンハロゲンランプ HL-2000 (Ocean Insight, 図 3-2-2) を使用した。分光装置の仕様は表 3-1、光源の仕様は表 3-2 に示す。本分光装置は測定ソフト OPwave+ (Ocean Insight) により露光時間の調整、ダーク減算、リファレンス測定を行う。光の入出力は光ファイバを用いて行い、ファイバを交換することで透過測定とインタラクタンス測定が可能である。本実験において測定は透過法により、自作暗室内で行った。測定系は模式図 (図 3-2-3) に示す。



図 3-2-1 flame-S



図 3-2-2 ハロゲンランプ (HL-2000)

表 3-1 flame-S 仕様

Ocean Insight 近赤外分光測定装置 flame-S	
測定波長範囲	650~1100nm
波長分解能	2nm
S/N 比	250 : 1 (full signal 時)
A/D 分解能	16bit
ダークノイズ	50 RMS Count
熱安定性	0.06pixels/°C
積算時間	1msec.~65sec.
サイズ	89×63×34mm
重量	265g

表 3-2 ハロゲン光源仕様

Ocean Insight タングステンハロゲンランプ HL-2000	
波長範囲	360~2μm
安定性	2nm
ドリフト	<0.3% 毎時
ウォームアップ時間	~5 分
バルブ色温度	2960K
使用可能温度	5°C - 35°C
使用可能湿度	5 - 95% @40°C
サイズ	62×60×150mm
重量	500g

Transmission

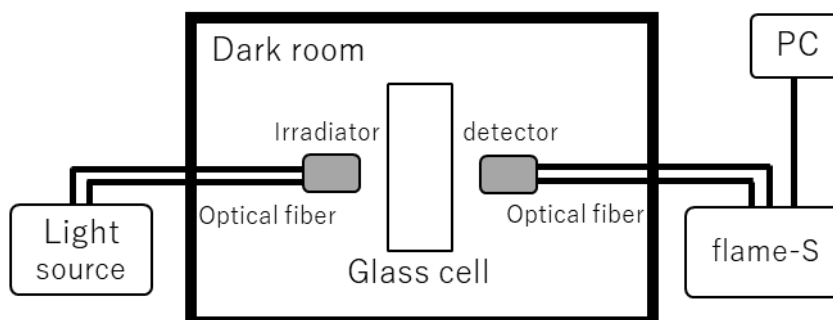


図 3-2-3 flame-S における実験系

3.2.3 自作センサユニット

フォトダイオードは QSD2030F（ピーク感度波長:880nm）、BPV10NF（ピーク感度波長:940nm）の2種類を採用した。これは 880nm が糖度推定のキイ波長²²⁾であり、940nm が水分の吸収波長²³⁾とされる研究を参考にした。フォトダイオードは図 3-2-4 に示す電流電圧増幅回路を構成した自作センサ基板に装着し、3D プリンタにより外装を作成して開発した（図 3-2-5）。表 3-3 に採用したフォトダイオードの仕様と自作センサユニットの仕様を示す。また、光源はフォトダイオードのピーク波長に対応する LED を採用した。採用した LED は表 3-4 に仕様を示す。測定は flame-S と同様に自作の暗室内において透過法により行った。（図 3-2-6）

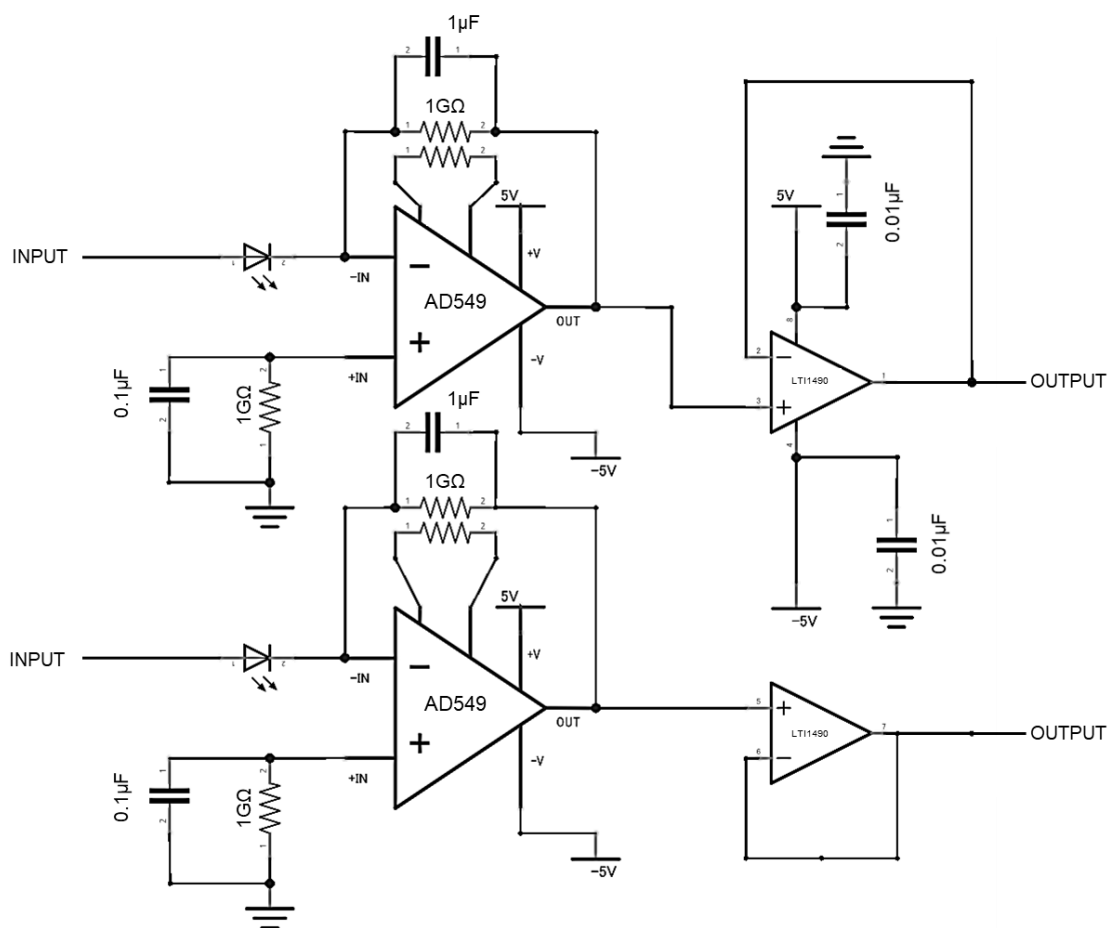


図 3-2-4 自作センサユニット回路図



図 3-2-5 開発した自作センサユニット

表 3-3 自作センサユニット仕様

フォトダイオード (PD) の仕様		
	QSD2030F	BPV10NF
ピーク波長	880nm	940nm
検出波長範囲	700~1100nm	790~1050nm
直流安定化電源装置		5V
サイズ		81×64×27mm

表 3-4 LED 光源仕様

	LSIR034	LIR034
ピーク波長	880nm	940nm
半値幅	70nm	50nm
電源		5V
LED 個数		それぞれ 5 個

Transmission

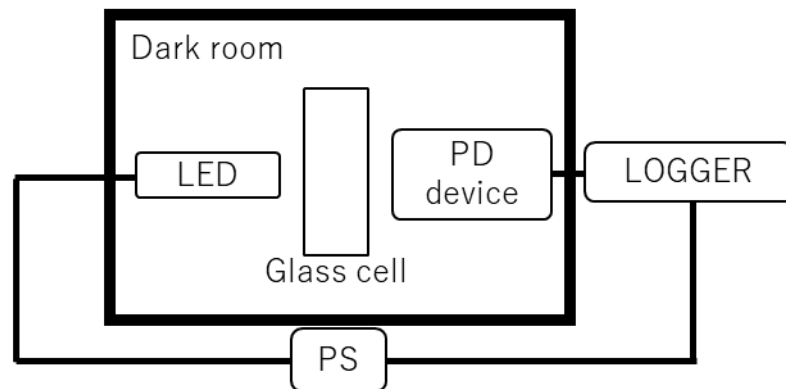


図 3-2-6 自作センサユニットにおける実験系

3.2.4 前処理後，波長選択およびモデル作成

flame-S を用いた近赤外分光測定では第 2 章で述べたように，計測した生スペクトル（図 3-2-7）にノイズが生じるため，ノイズを除去するために中心化・標準化・SG2 次微分（窓幅 = 27）の前処理を行った（図 3-2-8）．その後，データセットは試料を無作為に 3 分し，2/3 でキャリブレーションセットを作成し，残りの 1/3 でバリデーションを行う test-set 法により，統計解析ソフト SPSS（IBM ver.26）を用いてステップワイズ法による重回帰分析により回帰モデルを作成した．モデルの評価項目としては相関係数（1.0 に近くなるほど相関がある），実測値と予測値との 2 乗平均平方根誤差 RMSE（値は小さいほど実測値と予測値の差が小さい），農産物における分類精度を示す RPD 値²⁴⁾（1.41 < 粗い分類 1.71 < 適正な分類 2.43 < 高精度）を用いた．

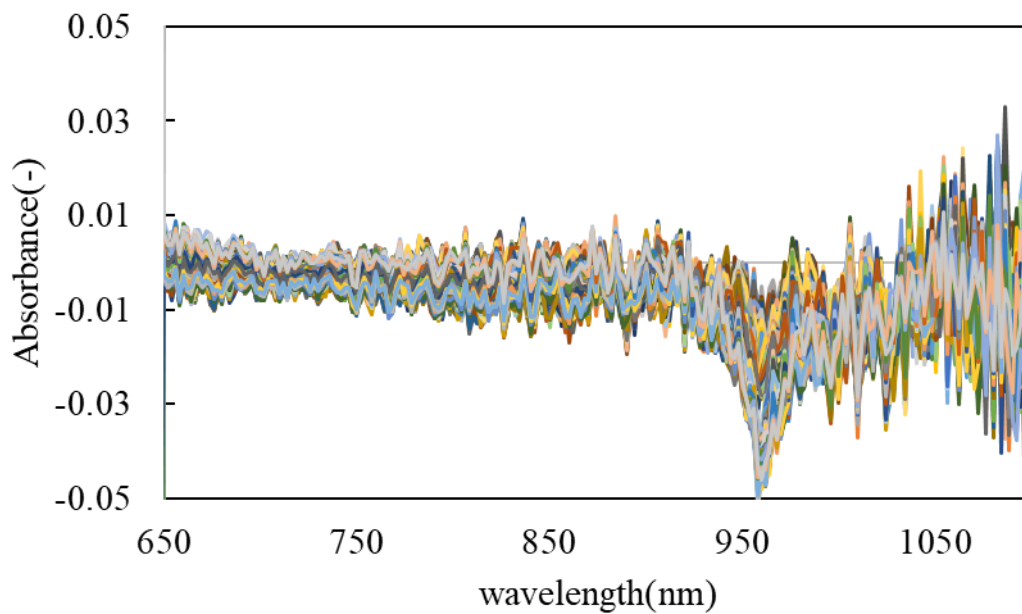


図 3-2-7 生スペクトル

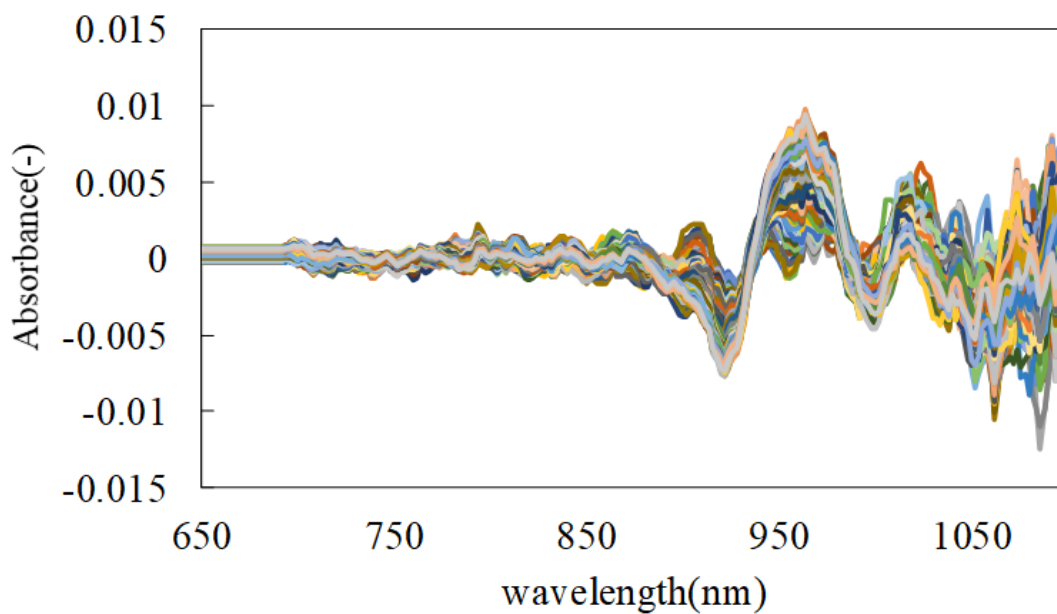


図 3-2-8 前処理後の近赤外スペクトル

自作センサユニットにおいては、リファレンスを標準セルに入れた精製水から取得し、差を吸光度とした（図 3-2-9）。データは `test-set` 法により、キャリブレーションセットとバリデーションセットに分け、強制投入法による重回帰分析により、回帰モデルを作成した。モデルの評価は `flame-S` と同様の項目で行った。

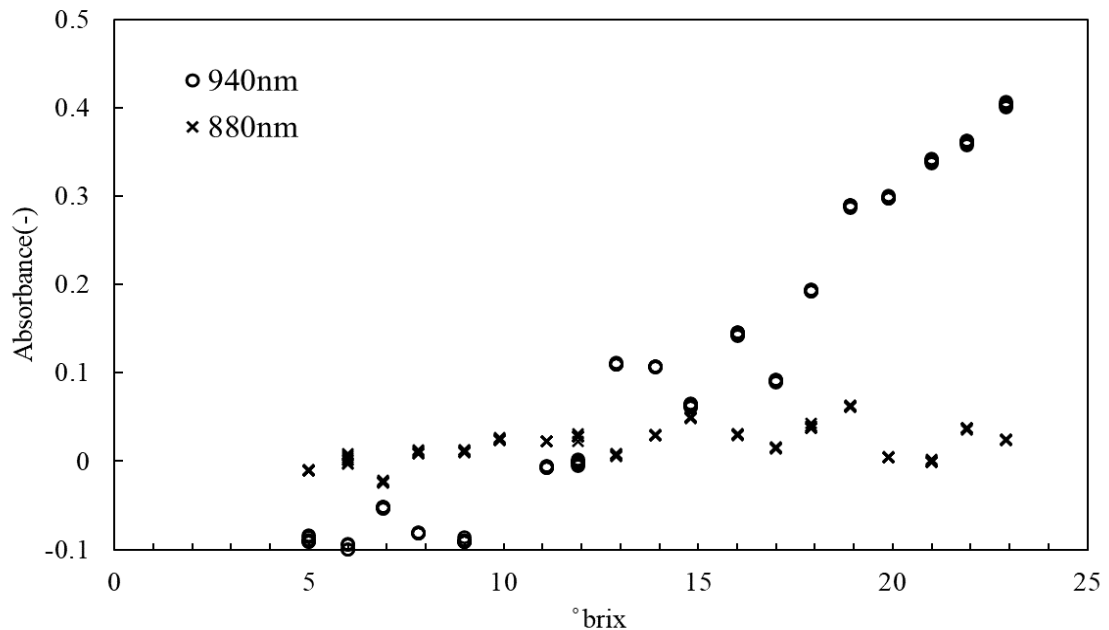


図 3-2-9 フォトダイオード (PD) で取得した吸光度

3.2.5 実験結果および考察

表 3-5 に近赤外分光法 (flame-S) における回帰モデル評価を示し、図 3-2-10 に作成したモデルにおける予測値と実測値との関係を示す。同様に、表 3-6 に自作センサユニットにおける回帰モデル評価を示し、図 3-2-11 に作成したモデルの予測値と実測値の関係を示す。

近赤外分光法において回帰モデルに採用された波長は、自作センサユニットにおいて採用した PD と近い波長域となり、デバイスで採用した波長の妥当性が示された。近赤外分光法における回帰モデルでは、どのモデルにおいても高い相関係数が得られ、RMSE は採用波長数、つまり推定における要因を増やすほど、実測値と予測値の誤差が小さくなる傾向となった。また、近赤外分光法の 2 波長モデルにおける RPD 値は 2.043 となり、実用に足るモデルが得られた。

自作センサユニットにおいて、相関係数は近赤外分光法と同程度の数値が得られたが、RMSEc 値は自作センサユニットの方が高くなった。また、RPD 値は 1.71 となり、実用に足るモデルであることが示された。この数値は近赤外分光法における 2 波長モデルと近い数値であったことから、フォトダイオードと LED を用いた糖度推定において近赤外分光法と同程度の推定が可能であることが示された。

表 3-5 近赤外分光法の回帰モデル評価

採用波長 $n\lambda$ (nm)	N_{cal}	N_{val}	R_{cal}	R_{val}	$RMSE_c$	$RMSE_v$	RPD
962			0.919	0.962	1.557	1.557	1.658
962,890	126	63	0.951	0.967	1.325	1.458	2.043
962,890,722			0.964	0.960	1.101	1.553	1.817
962,890,722,984			0.969	0.965	1.006	1.443	1.928

表 3-6 自作センサユニットの回帰モデル評価

採用波長 $n\lambda$ (nm)	N_{cal}	N_{val}	R_{cal}	R_{val}	$RMSE_c$	$RMSE_v$	RPD
880,940	126	63	0.919	0.962	1.557	1.557	1.658

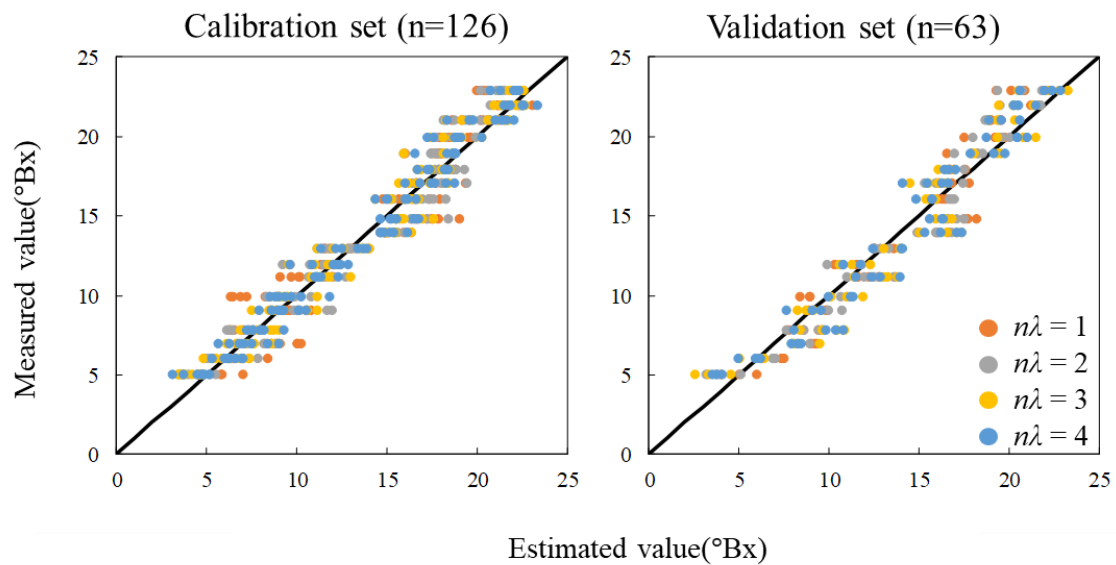


図 3-2-10 近赤外分光法における実測値と予測値との関係

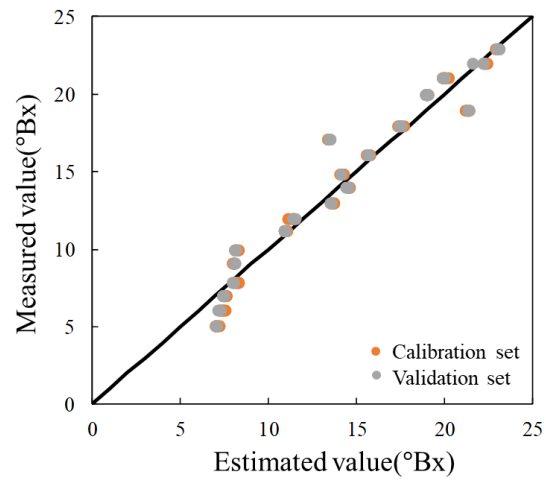


図 3-2-11 自作センサユニットにおける実測値と予測値との関係

3.3 実青果物を用いた自作デバイス試験

章 3-2 実験から自作光学系においてスクロース溶液の糖度推定が可能であった。そこで、対象を実青果物とし、青果物の近赤外領域における品質データと輸送環境を測定する自作センサユニットを開発した。本章では輸送環境の測定と品質評価が可能であるか、恒温機内における青果物の貯蔵実験を通して検証した。また、輸送環境における温度は一定ではない。さらにセンサは温度依存性を持つため、自作センサユニットにおけるフォトダイオードの温度補正を行った後、実青果物に適用してデータ取得を行った。

3.3.1 貯蔵試験用自作デバイス

作製した自作デバイスの仕様を表 3-1 に示し、概要図を図 3-3-1、センサ基板部回路図を図 3-3-2、センサ基板部図面を図 3-3-3 に示す。自作デバイスは青果物を静置する外装部とセンサ基板部（図 3-3-2）から構成される。本章ではモモを対象とするため、外装はモモ側面をカバーするよう CAD ソフトにて作成（図 3-3-3）し、3D プリンタで造形した。近赤外計測として用いるフォトダイオードは予備実験と論文を参考に、クロロフィルの吸収波長²⁵⁾である 650nm、糖度 (brix%) のキイ波長とされる 800nm・850nm、水分の吸収波長である 950nm を採用し、フレキシブル基板上に構築した。外装部における測定部位はモモと接触しない程度（3mm 程度）の間隔をあけるよう設計した。

センサ基板はメインボードとして Arduino Pro Mini を用い、RTC モジュール（DS3231AT24C32, HiLetgo Inc）、16bit ゲインアンプモジュール（ADS1115, TIJ Inc）、SD カードモジュール（SFE-BOB-00544, SparkFun Inc）、電源管理モジュール（TPL5110, TIJ Inc）、色情報モジュール（TSC34725, Adafruit Industries Inc）、温湿度・気圧センサモジュール（BME280, BOSCH Inc）、CO₂ 濃度センサモジュール（K30, Senseair Inc）、フレキシブル基板（ピーク波長 650nmPD（C30737LH-230-83A, Excelitas Technologies）、ピーク波長 800nmPD（C30737LH-230-80A, Excelitas Technologies）、ピーク波長 850nmPD（VEMD6160X01, Vishay）、ピーク波長 940nmPD（BPW 34 FS-Z, OSRAM Opto Semiconductors Inc）、株式会社 PROTEC）、表面実装 LED（650nm, 800nm, 850nm, 940nm）で構成した。電源には LiPo バッテリ（400mAh ~ 2500mAh）を用いた。センサ基板部のサイズは 71.1 × 63.5 (W_{cm} × D_{cm}) である。電源供給は RTC を搭載している TPL5110 により制御することができ、約 10 ~ 2h の間隔で制御することが可能である。また、待機時の消費電力は 20μAh と小さい。PD, LED は、LED が同時に点灯することで PD に与える干渉を防ぐため、単一の LED と対応する PD だけデータが取得できるよう制御した。そのため、近赤外光のデータ取得は 5 秒の間隔をあけ、合計 20 秒の時間を要した。また、微弱な PD 電圧の変化を取得するため、ADS1115 による 16bit の電圧データ取得を可能にした。その他各種センサは Arduino Pro Mini で制御し、センサから取得するデータは、microSD に保存するように接続した。開発したプログラムは付録①に記載する。

表 3-1 自作センサユニット仕様

項目	説明
サイズ	71.1×63.5 mm
電圧	3.3V
モジュール	Arduino pro mini 3.3V, DS3231AT24C32, ADS1115, sparkfunSD, TCS34725, BME280, LED・PD(650,810,850,950nm), K33LP, ADXL345, TPL5110
記録項目	温湿度, 気圧, 色温度, ルクス, RGB, Clear, (CO2 濃度), 3 軸加速度, PD 電圧 (650nm, 800nm, 850nm, 950nm)
データ取得間隔	10s ~ 2h で調整可能
計測時間	30s

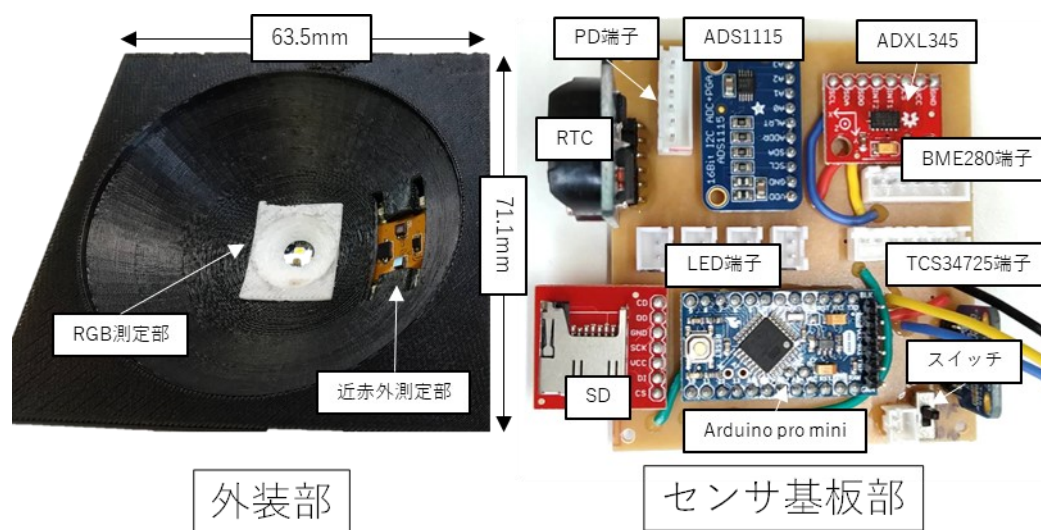


図 3-3-1 自作センサユニットの概要図

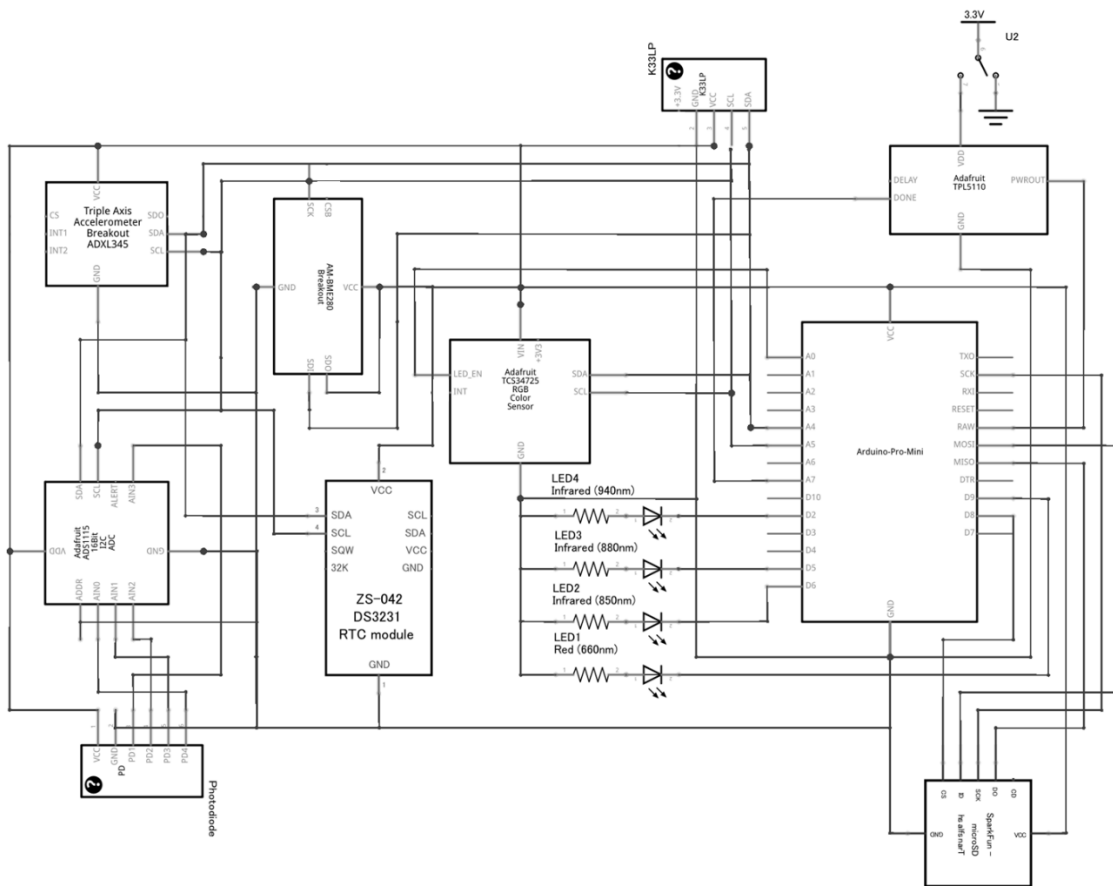


図 3-3-2 センサ基板部の回路図

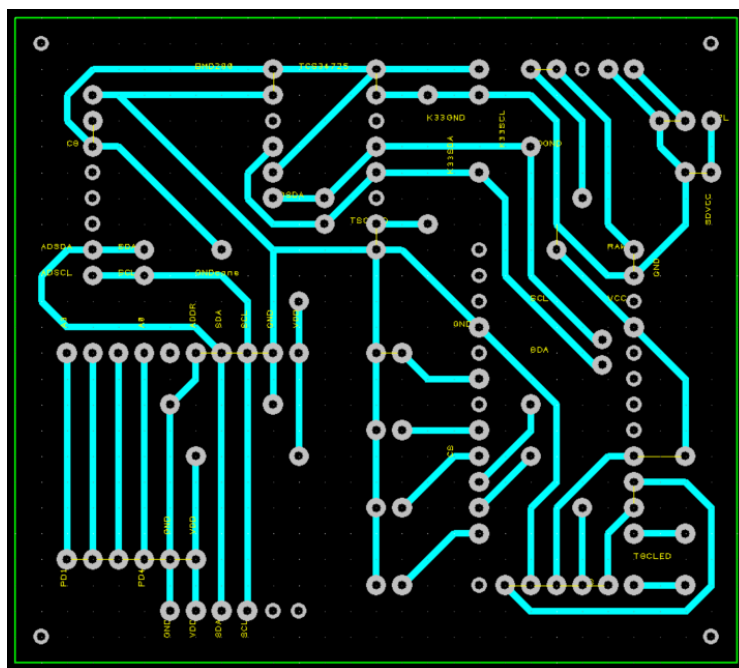


図 3-3-3 センサ基板部図面

3.3.2 温度補正実験

センサは一般的に温度依存性をもつ。そのため、本デバイスのような長時間の測定が行われる場合は温度を用いたセンサ値の補正が必要となる。そこで、恒温機（(株) ヤマト科学）を用いて、環境温度を変化させ、フォトダイオード（以下 PD）の温度補償を実施した。対象として白球（ソフトボール）を用い、自作デバイスの外装部に静置した。また、恒温機はプログラム制御が可能である。従前の試験から白球表面温度安定までに 6 時間要することを確認したため、白球温度安定のために 6 時間と計測時間として 2 時間を設定した、合計 8 時間を 1 タームの設定時間とした。そこで青果物が取り扱われる温度として一般的な常温条件（25℃）からトラック輸送における超低温条件（0℃）まで 5℃刻みで 6 ターム行った。

3.3.3 温度補正実験結果

図 3-3-4 に恒温機内の温度計測を示し、図 3-3-5, 3-3-6, 3-3-7, 3-3-8 に 650nmPD, 800nmPD, 850nmPD, 950nmPD の温度補正前計測値を示す。恒温機内の温度はプログラム通り推移し、計測時間とした 2 時間では安定していた。940nm 以外の PD において、温度が下がるほど、電圧値が上昇する関係が見られた。しかしながら、PD の電圧値では各種差が見られた。PD の特性によるところもあるが、今回の電源電圧が 3.3V であるため、PD の電圧値は少なくとも 1000mV 程度で検出できることが望ましい。そのため、600nm, 800nmPD においては得られる光量を増やすため、LED の増設や素子の再検討を行うことが必要であると考えられた。959nmPD では関係が見られなかった。

PD において温度依存が認められたため、キャリブレーション済 BME280 にて検出された温度を元に電圧値を補正する式を作成した。作成した補正式を温度補正前計測値に適用した図を、図 3-3-9, 3-3-10, 3-3-11, 3-3-12 に示す。それぞれ 650nmPD, 800nmPD, 850nmPD, 950nmPD となっている。950nmPD 以外では温度の影響を受けない補正式が得られたことが示された。しかし、650nm における補正式の対応幅は 1.5mV, 800nm での補正式の対応幅は 0.2mV, 850nm での補正式の対応幅は 40mV となり、650nm, 800nm では小幅な変化に対応したものとなった。そのため、白球よりも電圧変化が大きくなる高反射体を対象とする場合は温度補正を再構築する必要がある。

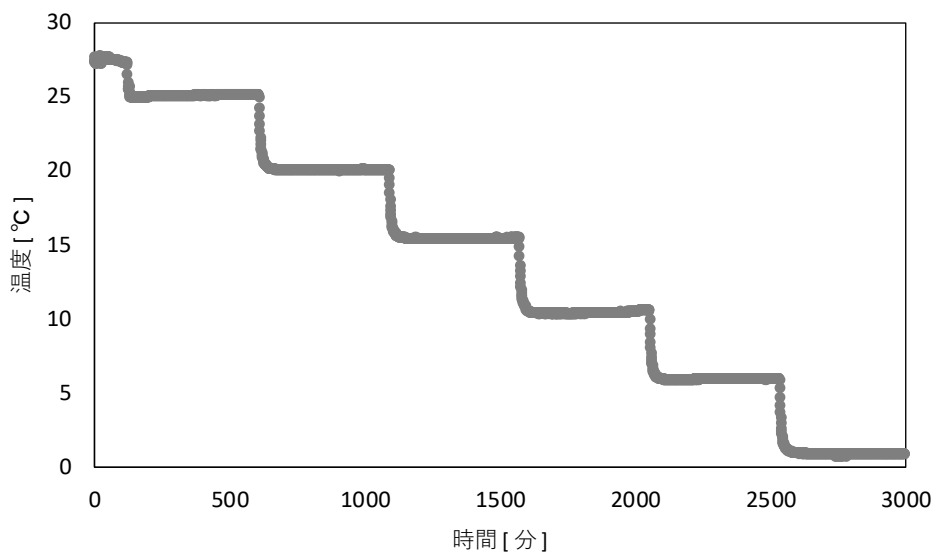


図 3-3-4 恒温機内温度 (BME280)

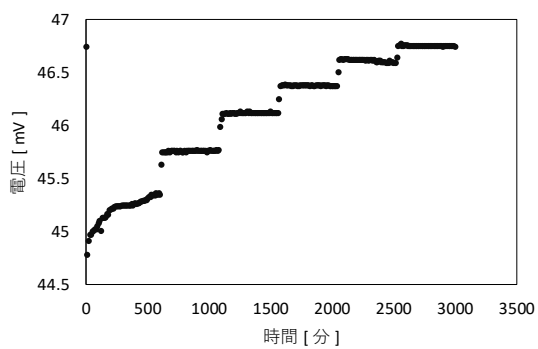


図 3-3-5 補正前 650nmPD

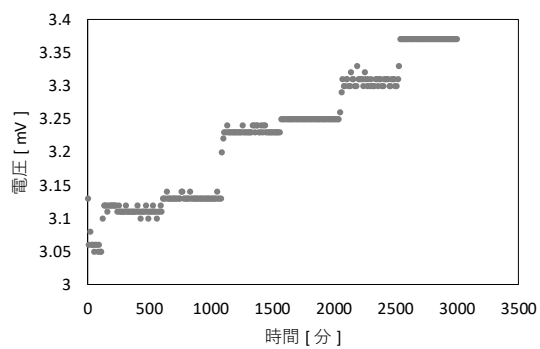


図 3-3-6 補正前 800nmPD

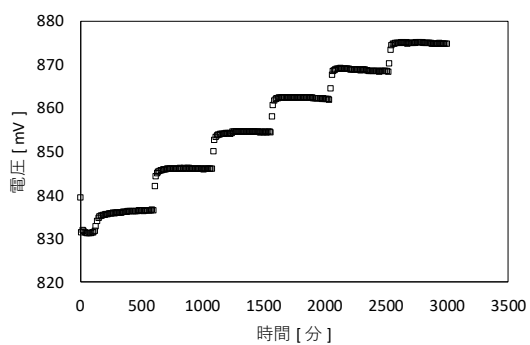


図 3-3-7 補正前 850nmPD

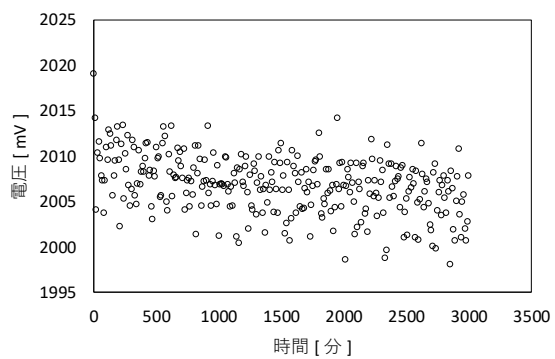


図 3-3-8 補正前 940nmPD

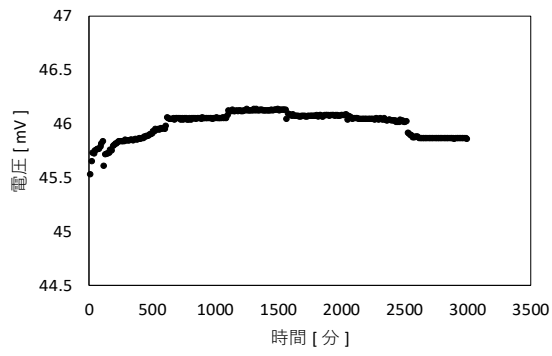


図 3-3-9 補正後 650nmPD

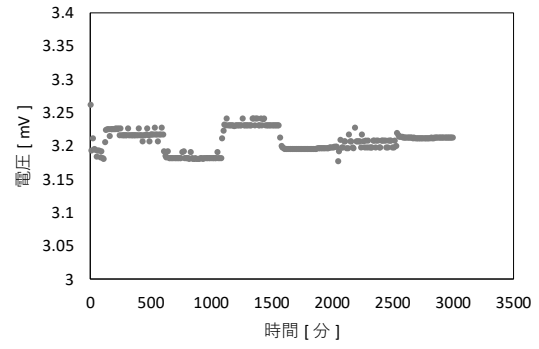


図 3-3-10 補正後 800nmPD

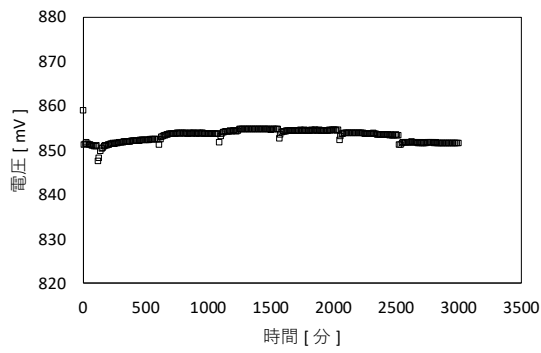


図 3-3-11 補正後 850nmPD

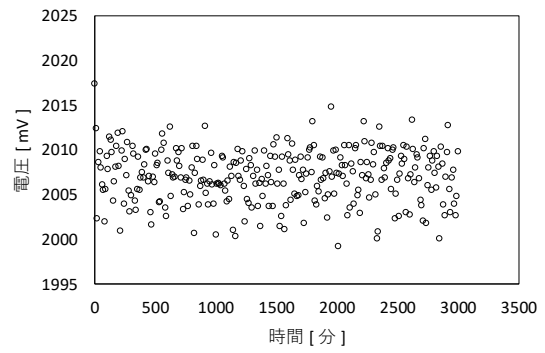


図 3-3-12 補正後 940nmPD

3.3.4 実青果物適用実験

開発した自作デバイスにおいて近赤外データ取得が可能であるか検証するため、常温貯蔵条件 (25°C) での周辺環境データと実青果物における近赤外データ取得実験を実施した。実験は温度環境の安定のため、恒温機 ((株) ヤマト科学) 内にて実施した。また、恒温機内は湿度が低いことから、果実の乾燥を抑えるためにモモ贈答用の箱を用意し、箱内で計測を行った。実験対象として軟弱果実であるモモを1個体用い、データ取得部はモモ赤道部とし、恒温機内に設置した箱にて実施した。実験期間はモモの鮮度が3~4日で低下する²⁶⁾ことを参考にし、従前の試験からもモモの見た目に明らかな変化が5日程度で見られたため、5日(120h)とした。また、自作デバイスにて計測した周辺環境が正確であるか比較するため、恒温機内におんどとり (TR-76Ui) を配置し、10分間隔でデータ取得した。気圧は後日、津気象台が公開しているデータを用いて比較した。

自作デバイスはLiPoバッテリー (3.7V 1800mAh) にて給電し、おんどとりは外部電源から給電した。どちらも恒温機内の箱に設置し、データ取得した (図 3-3-13)。

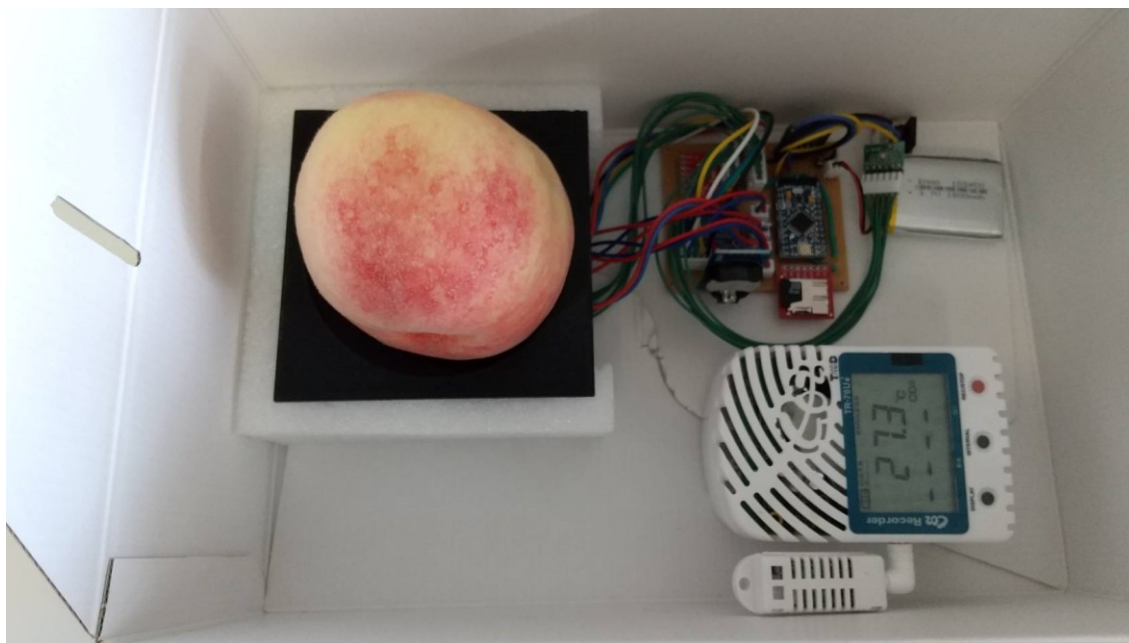


図 3-3-13 箱内デバイス配置

3.3.5 実青果物適用実験結果

図 3-3-14, 3-3-15, 3-3-16, 3-3-17 にそれぞれ 650nmPD, 800nmPD, 850nmPD, 950nmPD の電圧変化を示す。また、取得した気圧について津気象台と比べたものを図 3-3-18 に示し、温湿度とおんどとり (TR-76Ui) と比べたものを図 3-3-19, 3-3-20 に示す。

フォトダイオードにおいて、950nm 以外で計測開始後に電圧値が低下し、上昇した後に下がり続ける傾向が見られた。しかし、650nm における変化幅は 2mV, 800nm における変化

幅は 1.5mV, 850nm における変化幅は 20mV となり, 受光感度に差があり, 電圧変化幅がフォトダイオードにより異なる結果となった. そのため, 本光学機構による青果物品質データ取得にはレンジを調整し, 品質挙動の小さな変化も捉える機構の開発が必要である. また, 採用した波長がモモの貯蔵時における成分の減少に即したものであるか確認ができなかった. 飯村らによると, 貯蔵中の成分減少は全糖 (brix 値) ではなく, 糖組成に顕著であることが報告されている²⁷⁾. そのため, 波長選択を見直し, 輸送青果物の近赤外挙動に即した波長帯を探索する必要がある.

気圧におけるセンサ値 (BME280) は津気象台と同様の数値が得られ, センサ挙動は正常であることが確認された. 一方で, 温湿度においては差が見られた. これは BME280 におけるセンサ値の測定精度が温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 湿度 $\pm 3\%RH$ であるのに対し, TR-76UI では温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 湿度 $\pm 5\%RH$ であることから, センサ精度に起因する誤差であると思われる. しかし, 温度の変化は同様の傾向を示しているため, 環境温度の変化を捉えるには十分であることが確認された. 湿度では同様の値を示してはいたが, 2000 分において逆の傾向を示した. 温度とは異なる傾向のため, センサに起因するものではないと考えられる. 今回のセンサ配置では BME280 がモモに近く配置されていたため, 青果物の蒸散などの生理現象の可能性はある.

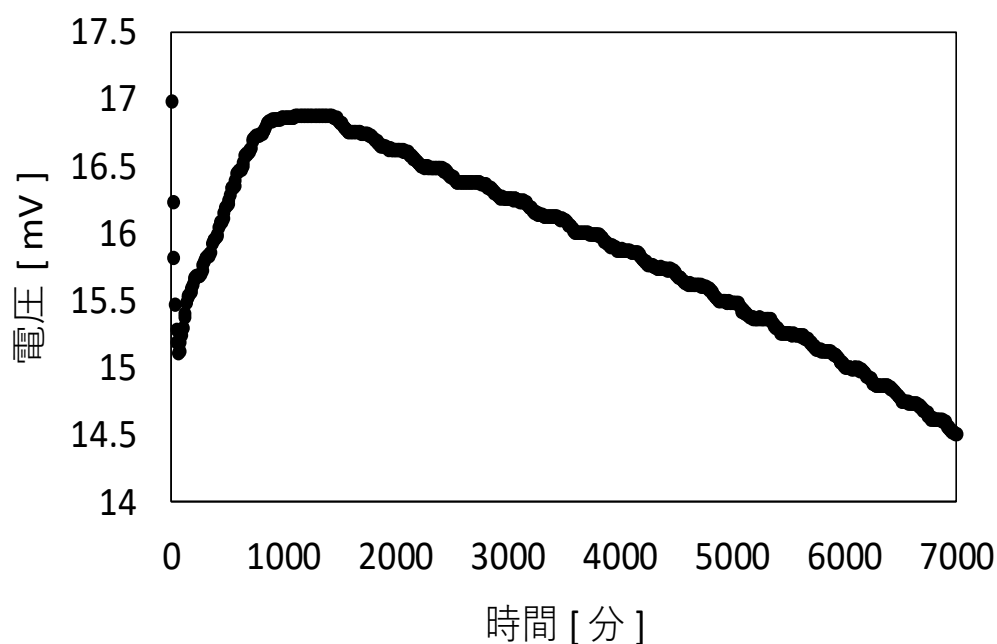


図 3-3-14 650nmPD 計測値

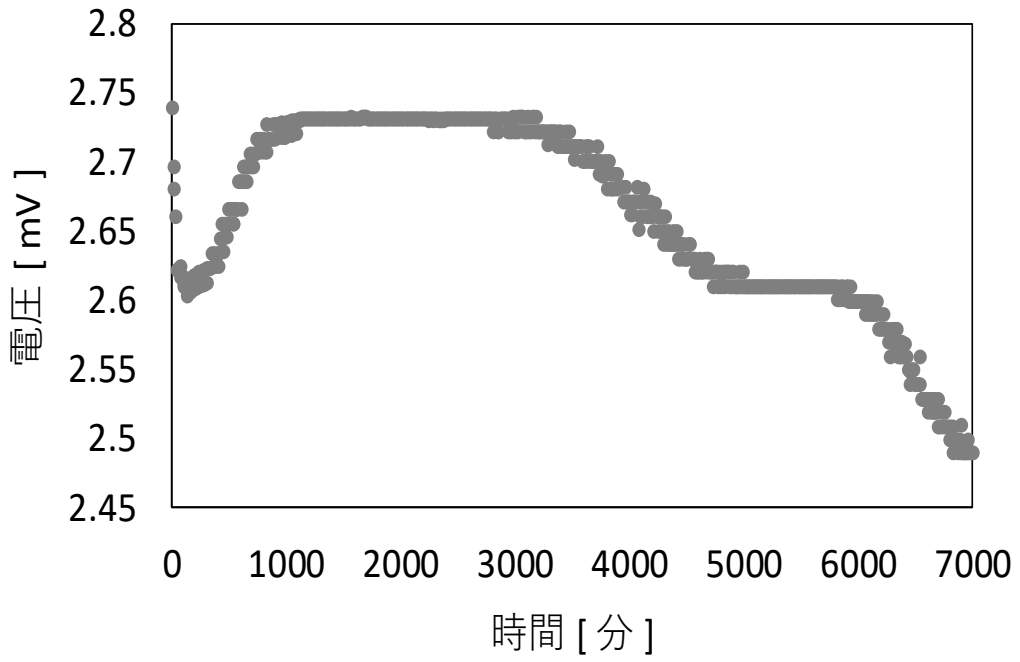


図 3-3-15 800nmPD 計測値

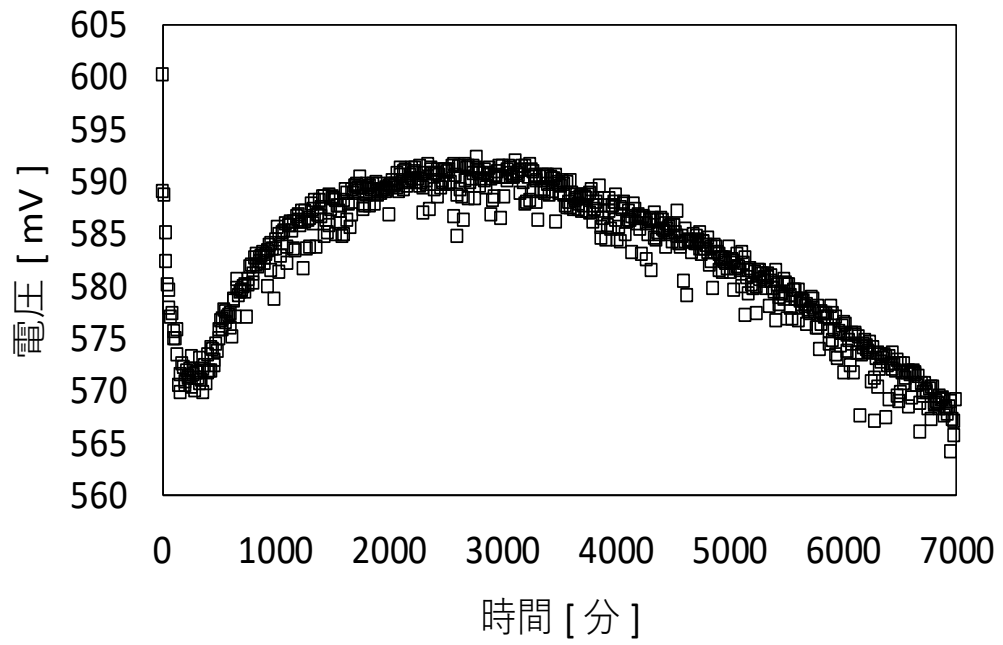


図 3-3-16 850nmPD 計測値

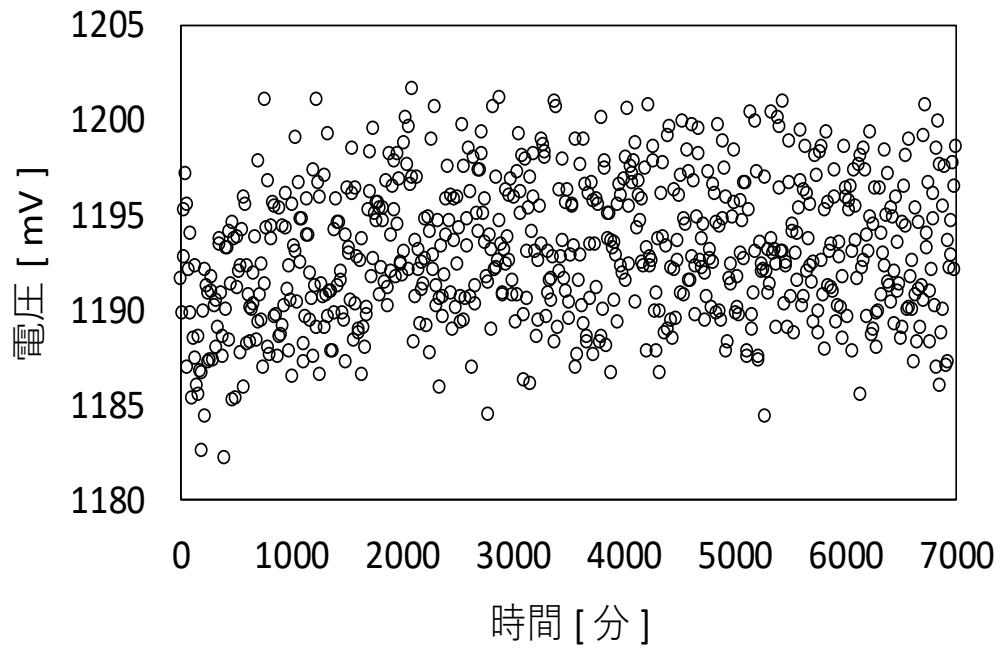


図 3-3-17 940nmPD 計測値

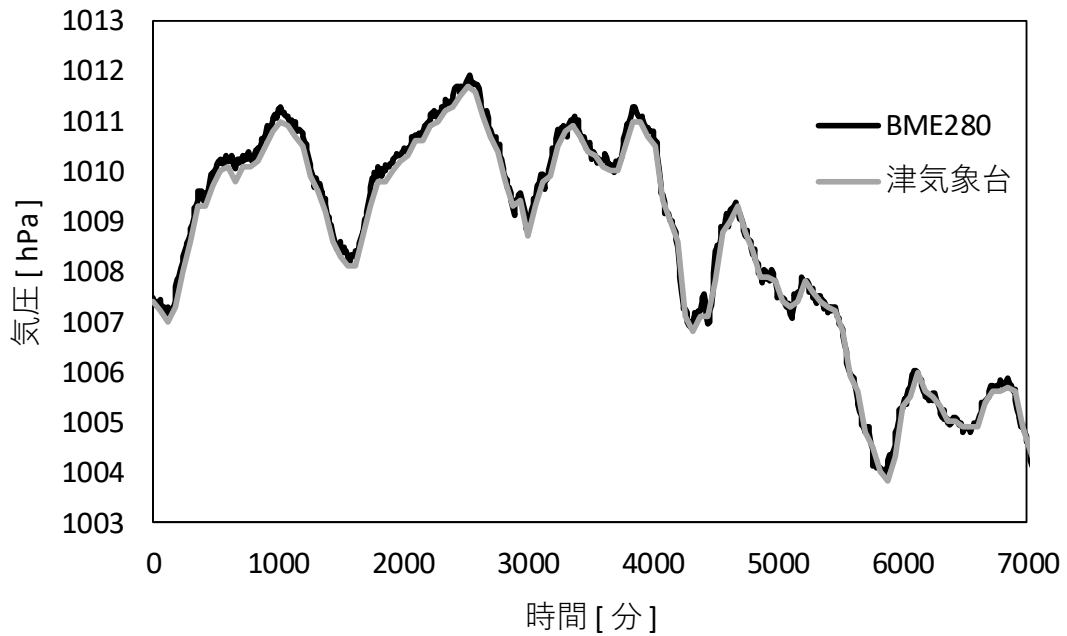


図 3-3-18 計測した気圧値と津気象台の気圧値

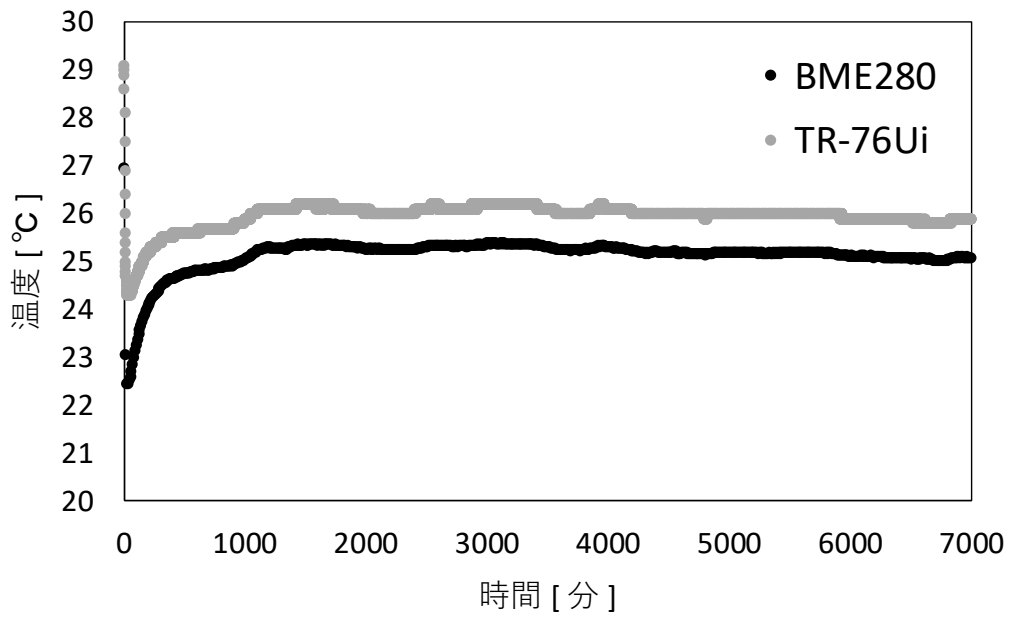


図 3-3-19 箱内温度

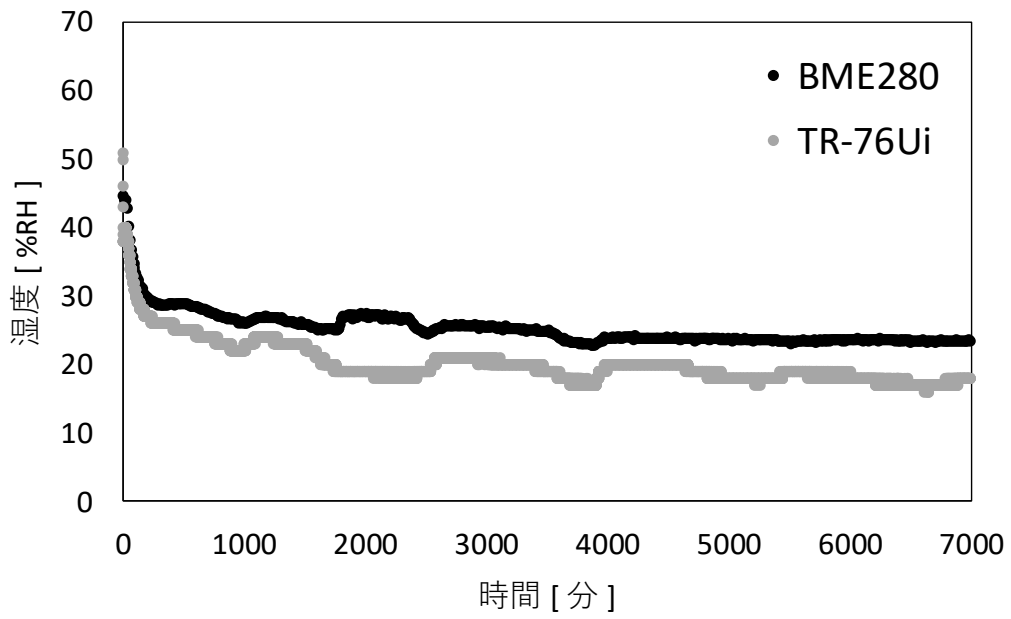


図 3-3-20 箱内湿度

第IV章. 輸送負荷による近赤外特徴波長の特定

4.1 はじめに

3章において単一波長で青果物品質推定できるか検証した。結果、実青果物のモニタリングには課題があったが、単一波長で糖度推定が行えることが示された。輸送時の青果物の品質低下は、複合的な要因が組み合わされている²⁸⁾。そのため、近赤外波長で輸送中の青果物モニタリングを行うためには、糖や水分などの単一指標ではなく、衝撃や振動に代表される輸送負荷に特徴的な反応を示す波長を特定することが必要である。

そこで、本章では輸送青果物の品質モニタリングのために、輸送中の負荷として代表的な振動・落下衝撃を青果物に印加し、負荷を受けた青果物において変化が顕著な近赤外波長帯を調査した。

4.2 実験試料

本研究では軟弱果実として代表的なモモと日本で最も生産されているミカン²⁹⁾を実験に使用した。実験試料はどちらも旬とされる時期に用意し、供試した。与える負荷として、モモは小さな落下衝撃でも損傷を受ける軟弱果実³⁰⁾であるため、落下試験を行った。ミカンにおいては落下による耐荷重が大きく、落下試験の場合 30cm の落下高さにおいて 15 回以上で損失が発生する報告³¹⁾があり、落下試験機を用いた実験とすれば時間を要し、果実温度が統一できないと考え、振動試験を行った。

4.2.1 モモ

川中島白桃（長野県産）15 個体を用い、旬とされる 9 月初旬に実験に供試した。実験期間は軟弱果実であることを考慮し、1 週間とした。近赤外測定時以外においては 15°C に設定された定温恒温機（ヤマト科学）の段ボールにおいて包装をつけた状態で貯蔵した（図 4-1）。また、実験時における温度の影響を除くため、モモは実験前に 15°C に設定した定温恒温機に 24 時間静置し、果実温度を調整した。



図 4-1 モモサンプル

4.2.1 温州ミカン

温州ミカン（三重県御浜町産）Mサイズを12月初旬の直売所にて、1箱約3.0kg詰めを4箱入手した。4箱のうち、3箱は振動試験用とし、1箱は対照区とした。振動を与えるミカン箱は直売所で入手の3.0kg用段ボール箱を用い、条件を揃えるため、購入した箱を開封し、ミカンと箱を含めた重量がおよそ3kgとなるようにミカンの個数を調整した。調整の結果、箱内ミカン個数は18～19個となり、余ったミカンは対照区とした。そのため、振動試験用ミカンは57個、対照区用ミカンは28個となった。調整後のミカン箱を図4-2に示す。また、ミカンにおいてもモモを用いた実験と同様に、果実温度を揃えるため、15℃に設定した定温恒温機に箱ごと24時間静置したのち、実験に供試した。実験期間として、ミカンは長期保存が可能であることから12日間行った。



図 4-2 温州みかんサンプル

4.3 実験機器および計測方法

4.3.1 モモ落下試験

モモに落下衝撃を印加する装置として、包装貨物落下試験機（神栄テクノロジー（株）DTS-50）を用いた。試験機外観を図4-3、仕様を表4-1に示す。本試験装置ではエア駆動シリンダとバネによる落下機構を採用しており、全ての動作が自動制御にて行われ、実験対象を任意の高さから垂直に自由落下させることが可能である。そのため、実験において、対象

物の落下姿勢を揃えることができる。

本試験におけるモモの落下高さとして、青果物の輸送中に想定される最大落下高は200mm程度であった³²⁾³³⁾³⁴⁾ことから、落下高さは20cmとした。また、落下衝撃を印加するモモは図4-4のように箱内で動くことがないように梱包し供試した。梱包の際、モモの果実赤道部の縫合線を挟んだ対角面の1ヵ所に落下衝撃が印加されるようにした。落下後、衝撃部を油性マジックにてマーキングし、落下衝撃印加部とした。同様に、落下衝撃を与えていない面を対照部とし、油性マジックにて区別できるようマークをつけた。その後、フルーツキャップを付け段ボール内にて保存し、15℃に設定した定温恒温機(ヤマト科学)にて貯蔵した。



図 4-3 落下試験機

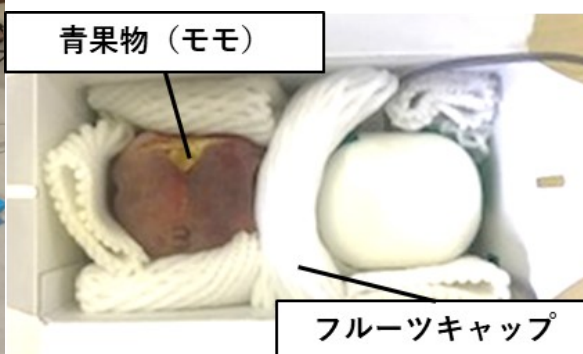


図 4-4 梱包方法

表 4-1 落下試験機仕様

神栄テクノロジー株式会社 包装貨物落下試験機 DTS-50	
本体重量	300kg
本体寸法	幅 920×奥行 1480×高さ 1975 (mm)
電源	AC200V 3相 5A
供試品最大質量	50kg
供試品最大寸法	幅 900×奥行 510×高さ 900 (mm)
設定落下高さ範囲	200～1200mm
落下動作	高速垂直・回転運動
供給空気圧	0.6MPa 以上
適合規格	JIS Z 0202, JIS C 60068-2-31

4.3.2 ミカン振動試験

ミカンに振動印加する装置として、輸送包装試験機（アイデックス(株)BF-50UT）を用いた。振動試験機の外観を図 4-6、仕様を表 4-2 に示す。本試験装置は輸送環境と同じ X・Y・Z 軸の 3 軸同時振動を与えることができる。与える振動条件として、パワースペクトル密度を基にした JIS 規格（JIS Z 0200:2013）や ISO 規格（ISO 13355:2016）のものが存在するが、青果物の振動損傷特性に応じた条件³⁵⁾は研究が進んでいるが、定まったものはない。一方で、ミカンにおいては 1.5G、30 分の振動条件では内部組織（砂じょう細胞）に物理的損傷を与えず、呼吸の上昇や TCA サイクルの停滞により、生理的影響を及ぼす³⁶⁾³⁷⁾ことが明らかにされている。また、イチゴにおいて 20Hz 以上の振動で見た目に明らかな損傷が生じた³⁸⁾ことから、ミカン箱には 2G を超えない範囲において 20Hz までのスイープ振動を与えることとした。事前に本実験と同様のミカンを詰めた 3kg の箱を用意し、箱上部にセンサを設置して 20Hz のスイープ振動を与えたところ、2G 以上観測されなかったため、本試験においてミカン箱には 20Hz、5 分間隔のスイープ振動を 30 分付与した（図 4-5）。

振動試験後のミカンは箱から取り出し、対照区との数を合わせるため、各箱無作為に 10 個ずつ選出した。その際、割れや明らかな傷みが生じたものはなかった。振動印加区で 30 個、対照区で 28 個の計 58 個を計測対象とした。箱から取り出したミカンは 15℃に設定した定温恒温機（ヤマト科学）に並べて貯蔵した。

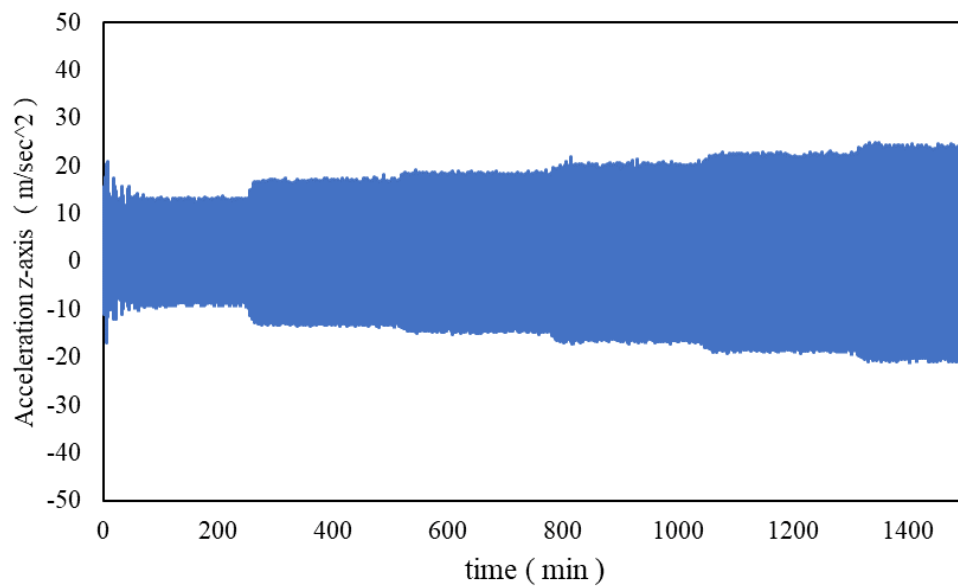


図 4-5 スイープ振動 (z 軸 15 分)



図 4-6 振動試験機

表 4-1 振動試験機仕様

アイデックス株式会社 輸送包装試験機 BF-50UT	
重量	約 80kg
外形寸法	幅 500×奥行 600×高さ 650 (mm)
電源	AC200～240V 3相 50/60 Hz 2A 以下
振動方向	上下・左右・前後 (3軸同時振動)
振幅設定範囲	0.2～2.6mP-P
加振テーブル	500×600mm L型治具付
周波数設定範囲	10～67Hz (10G)
許容加速度	98m/s ² (10G)
動作モード	マニュアル・ランダム・スイープ
使用周囲温度	10～35°C

4.3.3 近赤外分光計測

本研究における近赤外分光測定装置としてフルーツセレクタ（株式会社クボタ社製 K-SS300）を用いた。その外観を図 4-7、仕様を表 4-2 に示す。

本装置における測定部の模式図を図 4-8 に示す。測定法はインタラクタンス方式を採用しており、中心部に受光ファイバを設置し、周りを発光リングで囲うことにより、サンプルに照射した光を果実内部で拡散させ、中心部の受光ファイバで拡散した光を得ることで近赤外スペクトルを得る構造となっている。また、本装置は内部でダーク・リファレンス計測を行うことができる。計測時の設定として、測定波長域 500~1000nm、波長分解能 2nm、平均回数は 6 回、電荷を除去するためのダミー回数は 3 回とした。近赤外スペクトル計測と同時に、フルーツセレクタではロードセルによる重量計測も行うことができる。取得した近赤外スペクトルは csv 形式で保存され、Excel にてまとめた後、R で開発した自作プログラム（付録②）により中心化・標準化・SG2 次微分（窓幅=15）の前処理を施した。

青果物は種類により、内容成分の分布に偏りがある。そのため、同一サンプルでも測定部の置き方によっては、サンプルの個体中の成分のばらつきの影響により、近赤外スペクトルは異なる場合がある。本章においては近赤外スペクトル測定においてばらつきが生じないように、測定部位は落下衝撃・振動試験後に油性マジックにてマーキングを行った。

モモにおいては果実内の糖度分布は果頂部が最も高く、果梗部が最も低い傾向がある。また、縫合線の部分は糖度が低い³⁹⁾。そのため、近赤外スペクトル計測では縫合線を避けた落下衝撃印加部の反対側となる赤道部分を対照部とし、測定した。

温州ミカンではモモと異なり、赤道部が最も糖度分布が高く、果梗部・果頂部に向かうにつれ、糖度が低くなる傾向がある。さらに、内部構造のじょうのうにより、糖度分布は最大で 1%以上の差がある。そこで、測定はあらかじめマーキングされた赤道部を測定した。



図 4-7 測定装置外観

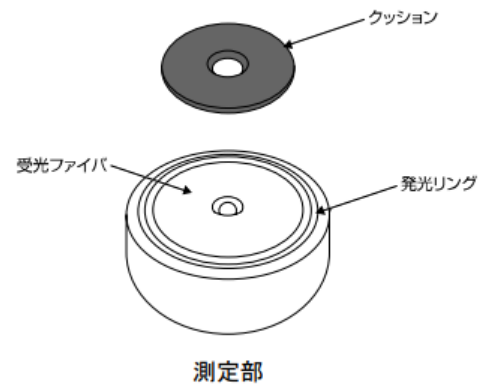


図 4-8 測定部模式図

表 4-2 近赤外分光測定装置仕様

株式会社クボタ フルーツセレクト K-SS300	
製品質量	約 9.5kg
外形寸法	幅 370×奥行 430×高さ 170 (mm)
使用電源	AC100V±10% (50/60Hz) 6A
計測対象物	青果物
測定項目	近赤外分光計測, 重量
近赤外測定方法	インタラクタンス方式
近赤外測定波長	500 ~ 1000nm
使用周囲温度	10~35°C
使用相対湿度	25~80%

4.3.4 ロジスティック回帰分析による近赤外波長特定

近赤外スペクトルにおける定量分析の方法として一般的に用いられる手法は線形モデルである。この手法については2章において説明の通りである。しかし、本実験においては目的量となる物理量がなく、さらに近赤外スペクトルから推定式を作成することが目的ではない。本実験では落下衝撃・振動負荷を与えたものと与えていないものを比べ、統計解析により波長を特定することが目的である。そのため、目的変数は落下衝撃・振動負荷の「あり」「なし」の2値であるため、一般化線形モデルにおける2項分布を目的量とする。従って、負荷ありなしを従属変数とし、近赤外スペクトルを独立変数とする2項ロジスティック回帰により、特徴的な近赤外波長を特定することとした。

分析はIBM SPSS Statistics (バージョン27)を用いて、従属変数として負荷を与えているか、与えていないかを1と0で表現したものを用意し、前処理後の近赤外スペクトルを独立変数(共変量)として解析した。変数の選択方法としては、変数増加法ステップワイズ(尤度比)を選択した。

分析された結果において、モデルの妥当性の検証を行った⁴⁰⁾。作成したモデルの意味についてはカイ2乗検定により、回帰式の有意確率を見たのち、各変数の有意を確認した。その後、回帰式の判別適合度をHosmer-Lemeshowの検定にて有意確率を確認し、表4-3の判別的中率を確認した。多重共線性の確認としては、モデルに採用された各共変量間の相関を確認し、相関係数が0.8または0.9を超えるか確認を行った。

また、波長が判別に影響する度合いを寄与度とし、表4-3の判別分割表にあるように変数増加法による変数選択で最初に選択された波長から、ステップを増加(波長を増やす)していくにつれて2値の正解の割合が増えていくことから、最初に選択された波長から寄与率が高いものとした。

表 4-3 判別分割表

			目的量		正解の割合
			.00	1.00	
ステップ 1 880nm	衝撃	.00	9	5	64.3
		1.00	4	10	71.4
	全体のパーセント				67.9
ステップ 2 880nm 660nm	衝撃	.00	12	2	85.7
		1.00	2	12	85.7
	全体のパーセント				85.7
ステップ 3 880nm 660nm 940nm	衝撃	.00	14	0	100.0
		1.00	0	14	100.0
	全体のパーセント				100.0

4.4 実験結果および考察

4.4.1 重量変化

図 4-9 にモモの経日重量変化，図 4-10 にミカンの経日重量変化を示す．どちらも負荷試験後を 100 として重量比 (%) を算出し，全個体の重量変化平均値を計算し，グラフ化した．ミカンにおいては対照区と振動負荷区で比べたものである．計測時に見た目において，明らかな傷みやカビの発生が生じた場合はサンプルから除いた．

どちらも初日から 10% 程度重量が減少していることが分かる．これは収穫後青果物が行う呼吸や蒸散による消費であり，糖・有機酸・水分が減少することによるものである⁴¹⁾．また，葉物野菜においては 5% 以上の水分が失われると商品価値の低下が起こる⁴²⁾という報告もある．ミカンの振動区において，経日重量が 95% 以下となるのが 1 日早くなった．これは振動負荷を与えたことでミカンの呼吸や蒸散の程度が上昇により，水分の消費が激しくなったと考えられ，輸送負荷により生理的活性が増加することが示された．

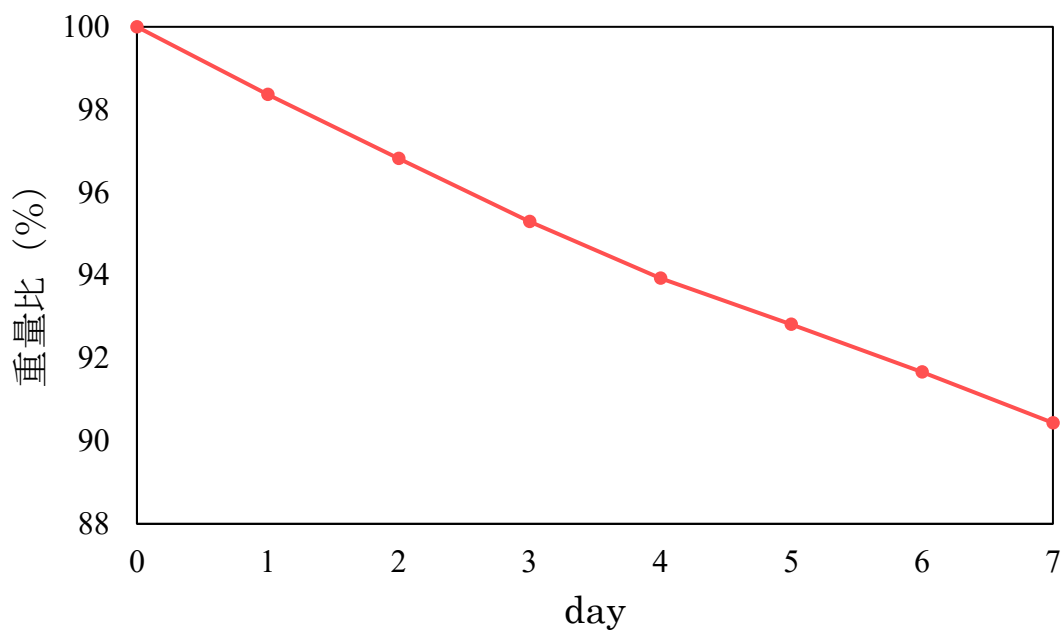


図 4-9 モモの経日重量変化

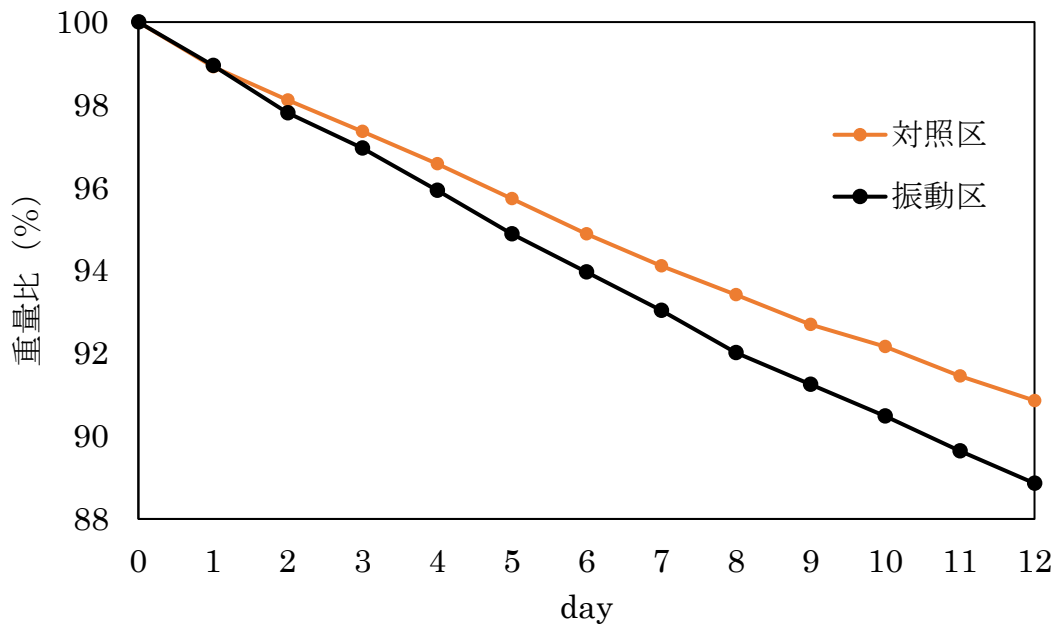


図 4-10 ミカンの経日重量変化

4.4.2 近赤外スペクトル

モモを用いた落下実験において、図 4-11 に対照区の吸光度スペクトル、図 4-12 に落下負荷区吸光度スペクトルを示す。この吸光度をもとに、中心化・標準化・SG2 次微分（窓幅＝15）の前処理を施したスペクトルについて、図 4-13 に対照区のスペクトル、図 4-14 に落下負荷区のスペクトルを示す。また、500～580 nm における近赤外スペクトルでは前処理では取り除くことのできないノイズが生じていた。これはフルーツセレクタの CCD 素子のディテクタ感度が 500～580 nm において感度が低いことに起因すると考えられる。本来であれば機器に採用している素子のグレーティングやブレード波長から考察を行うべきであるが、企業機密に関わる部分であるため、詳細な素子情報までは不明である。しかし、取得したスペクトルからは一部可視領域を含む、近赤外領域において明確なスペクトルが得られた。そのため、ノイズの生じた可視領域 500～580 nm は除いて 580～1000 nm における波長域を採用して特徴的波長を探索した。

図 4-11, 4-12 ではどちらも似た形状の近赤外スペクトルが得られ、500～600 nm と 1000 nm 付近において吸光度が高くなった。500～600 nm では前述の通り、感度が低かったことと、可視領域であることから近赤外領域と比べ、透過率が低かったためである。1000 nm 付近において、吸光度が高くなったことは青果物がおおよそ 90%以上水分から構成されている多水分構造体であることも一因であるが、近赤外領域におけるスペクトルは水の影響を大きく受ける。これは波長域が赤外側の長波長帯に行くに従い、影響が大きくなるためである。

図 4-13, 4-14 を比較すると、おおよそのスペクトル形状は近いものとなったことが示された。一方で、680 nm におけるピーク強度に差が生じていた。この波長域はクロロフィル

に特異な波長²⁴⁾であり、果実硬度に影響するものである。そのため、落下させたことでピークの顕在化が生じたと考えられる。

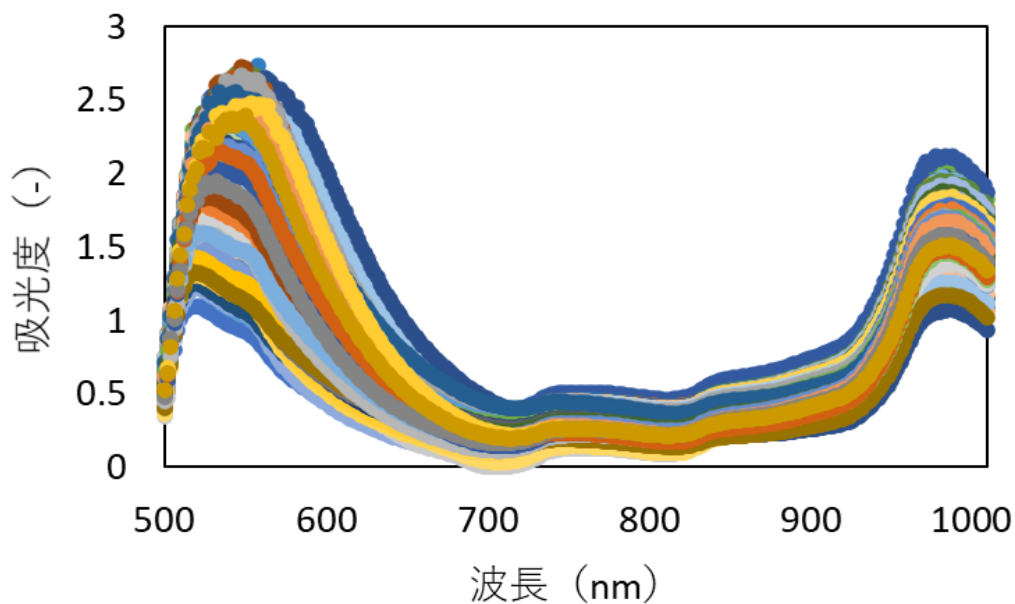


図 4-11 モモ対照区吸光度

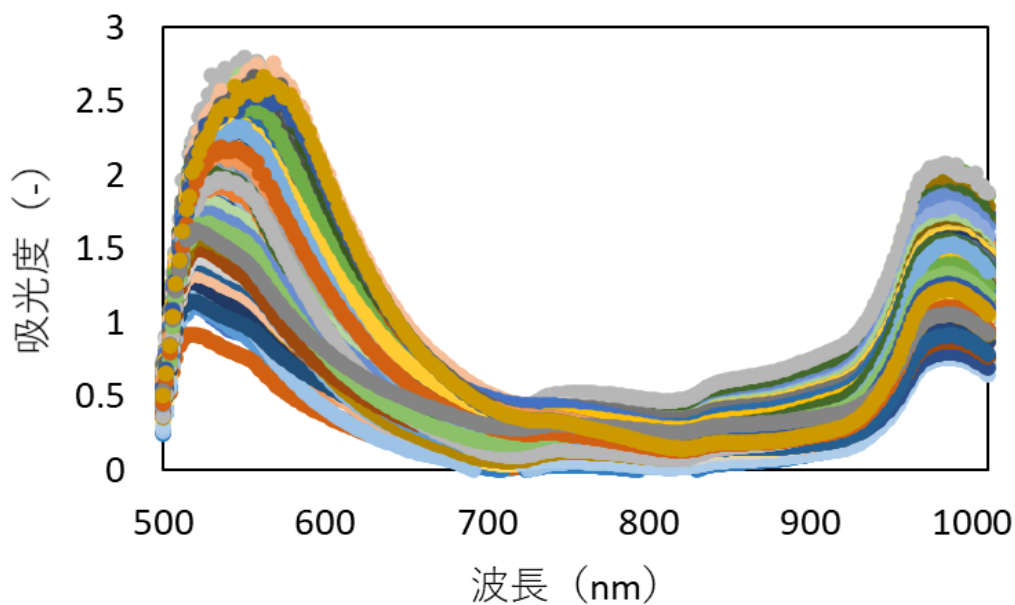


図 4-12 モモ落下負荷区吸光度

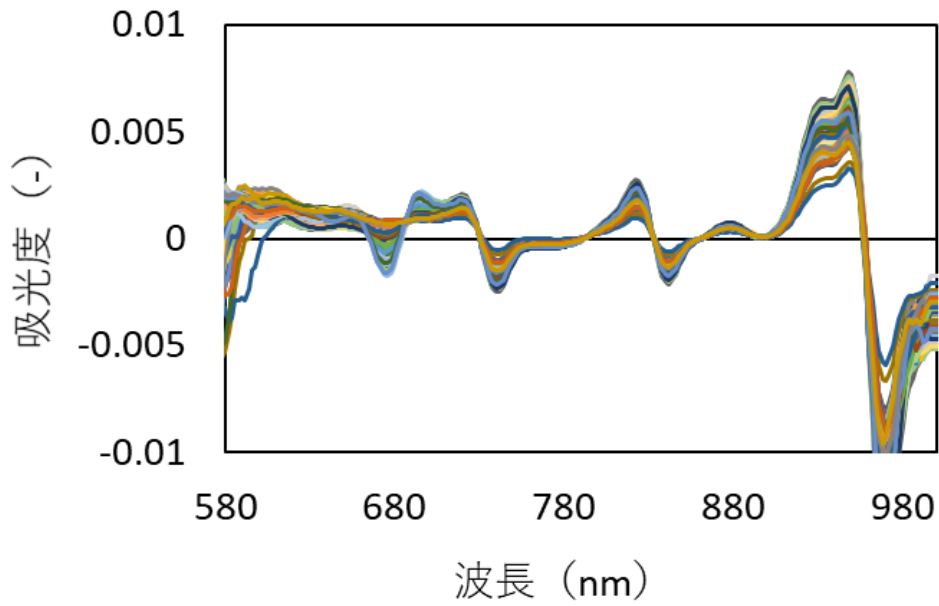


図 4-13 前処理後のモモ対照区近赤外スペクトル

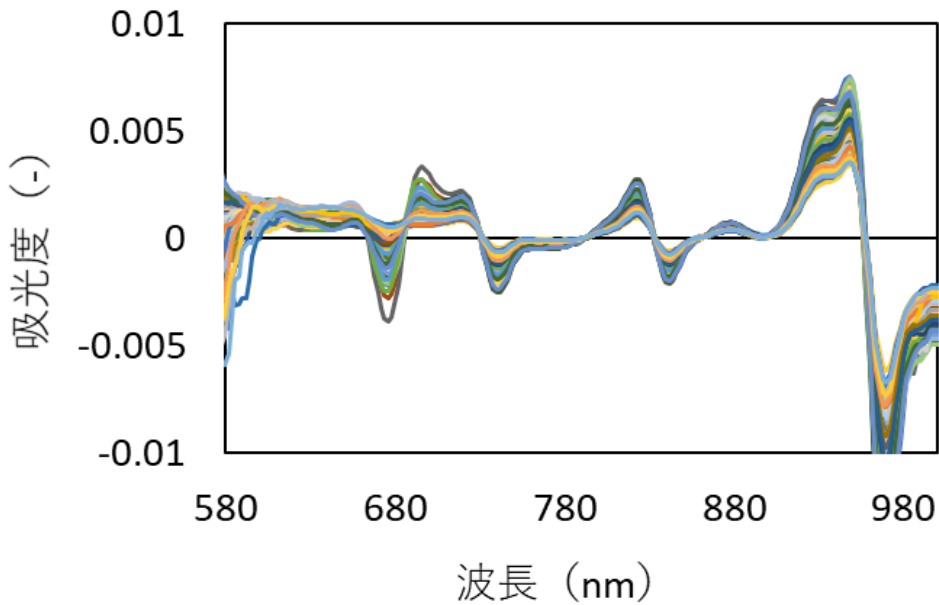


図 4-14 前処理後のモモ落下負荷区近赤外スペクトル

ミカンを用いた振動実験において、図 4-15 に対照区の吸光度スペクトル、図 4-16 に振動負荷区吸光度スペクトルを示す。この吸光度をもとに、中心化・標準化・SG2 次微分（窓幅=15）の前処理を施したスペクトルを図 4-17 に対照区のスペクトル、図 4-18 に振動負荷区のスペクトルを示す。ミカンの前処理後の波長域はモモと同様に 580~1000 nm

とした。ミカンにおける吸光度の近赤外スペクトルはモモと同様に 500~600 nm, 1000 nm にピークが生じていた。これはモモと同様にクロロフィルや水分の吸収が顕著であったためである。一方でモモと比べ、ベースラインがブロードなものではなかった。これはミカンにおいてはサンプル間サイズが近く、が理由として挙げられる。

前処理後の近赤外スペクトルでは対照区と振動負荷区において違いが見られなかった。これは落下負荷と比べ、振動負荷が果実硬度に与える影響が小さかったのではないかと考えられる。また、ミカンは耐荷重がモモと比べ高いことも一因である。最も顕著な 960 nm のピークは水の吸収ピークである。これは高水分の農産物において一般的に計測されるピークであり、顕著な水分減少が発生した場合、吸収ピークは小さくなっていくことが明らかになっている⁴³⁾。本実験でも吸収ピークの減少は見られたが顕著なものではなかったため、ミカンにおける極端な水分の減少は発生していないことが表れている。

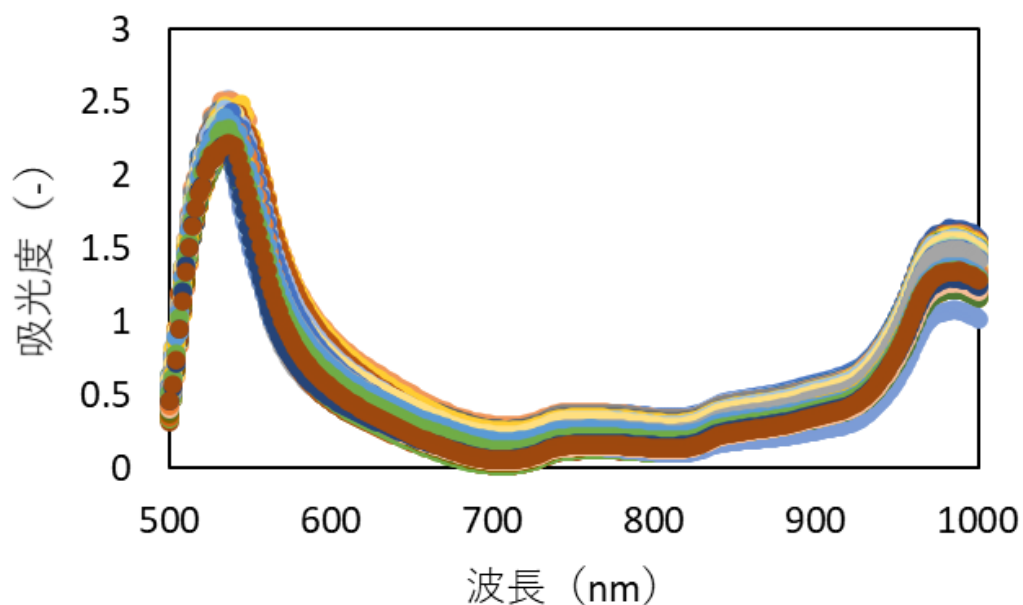


図 4-15 ミカン対照区吸光度

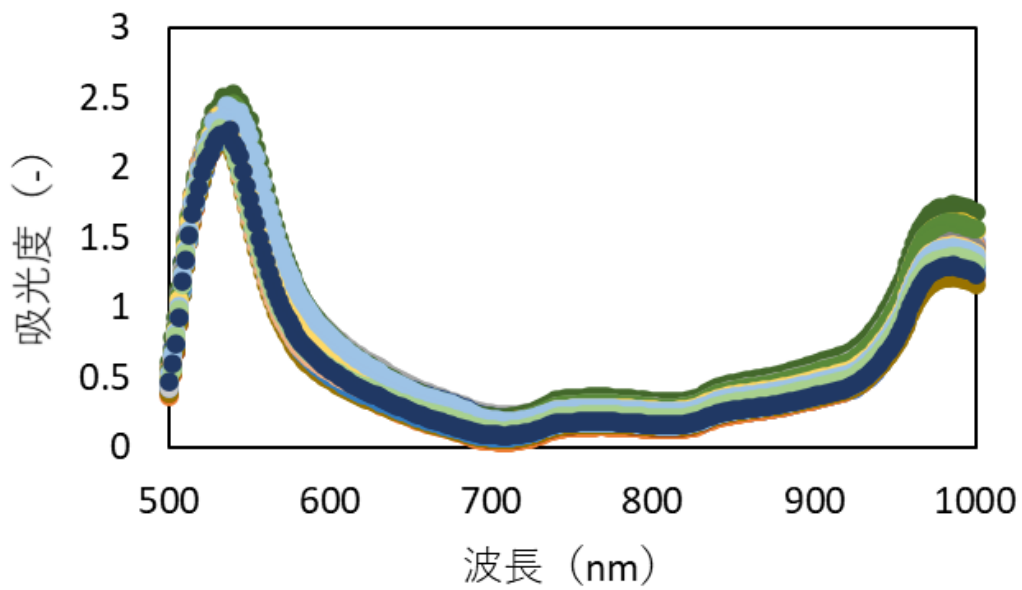


図 4-16 ミカン振動負荷区吸光度

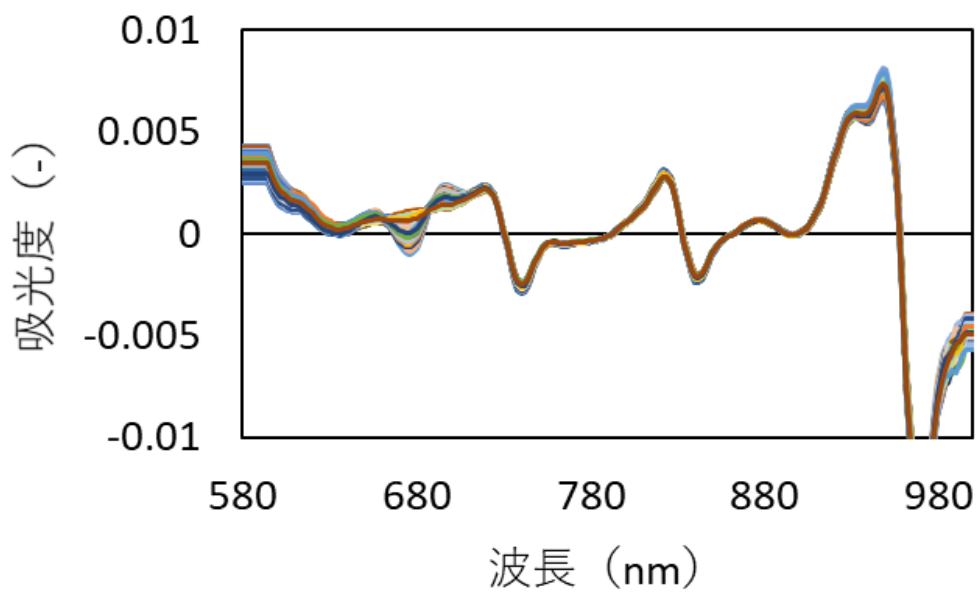


図 4-17 前処理後のミカン対照区近赤外スペクトル

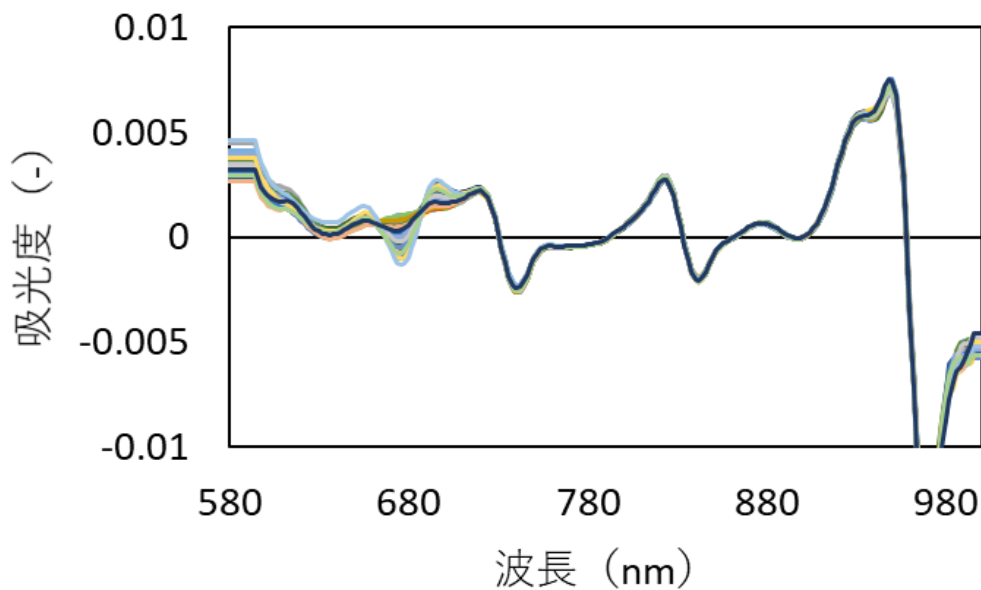


図 4-18 前処理後のミカン振動区近赤外スペクトル

4.4.3 モモの落下試験による特徴的近赤外波長

図 4-19 にロジスティック回帰分析により選択された波長を 4 波長抽出し、寄与度の高い順に色分けした図を示す。

落下負荷直後の選択波長域は 660 nm と 730 nm であったが、24 時間後からは 850 nm が最も寄与度が高く、次いで 660 nm が安定して選択された。660 nm はどの青果物においても吸収されるクロロフィルの波長域である。この波長域における変化が特に顕著となるのが果実の成熟期である。成熟期における果実の変化として表面果実硬度や着色度などが変化することが一般的であり、さらに可視光域を含むことから色と結び付けて多くの研究が 670 nm の波長において行われている⁴⁴⁾⁴⁵⁾。本実験では成熟したモモにおいて、落下試験したことにより、表面の組織が破壊され、光が透過しやすくなったことで果実硬度に影響する波長域として選択されたと考えられる。そのため、落下試験直後から常に選択され続けた。

850nm 帯はモモの内部損傷を検出可能である⁴⁶⁾と報告されている。本実験においても見た目の変化は生じなかったことから、落下により果実表面とは異なる内部での損傷が生じ、貯蔵を行うことで内部損傷がはっきりとしたものになったため、24 時間後から選択され続けたと考えられる。そのため、この波長域は落下によりモモ内部で生じた構造的損傷の発生を検出する可能性がある。

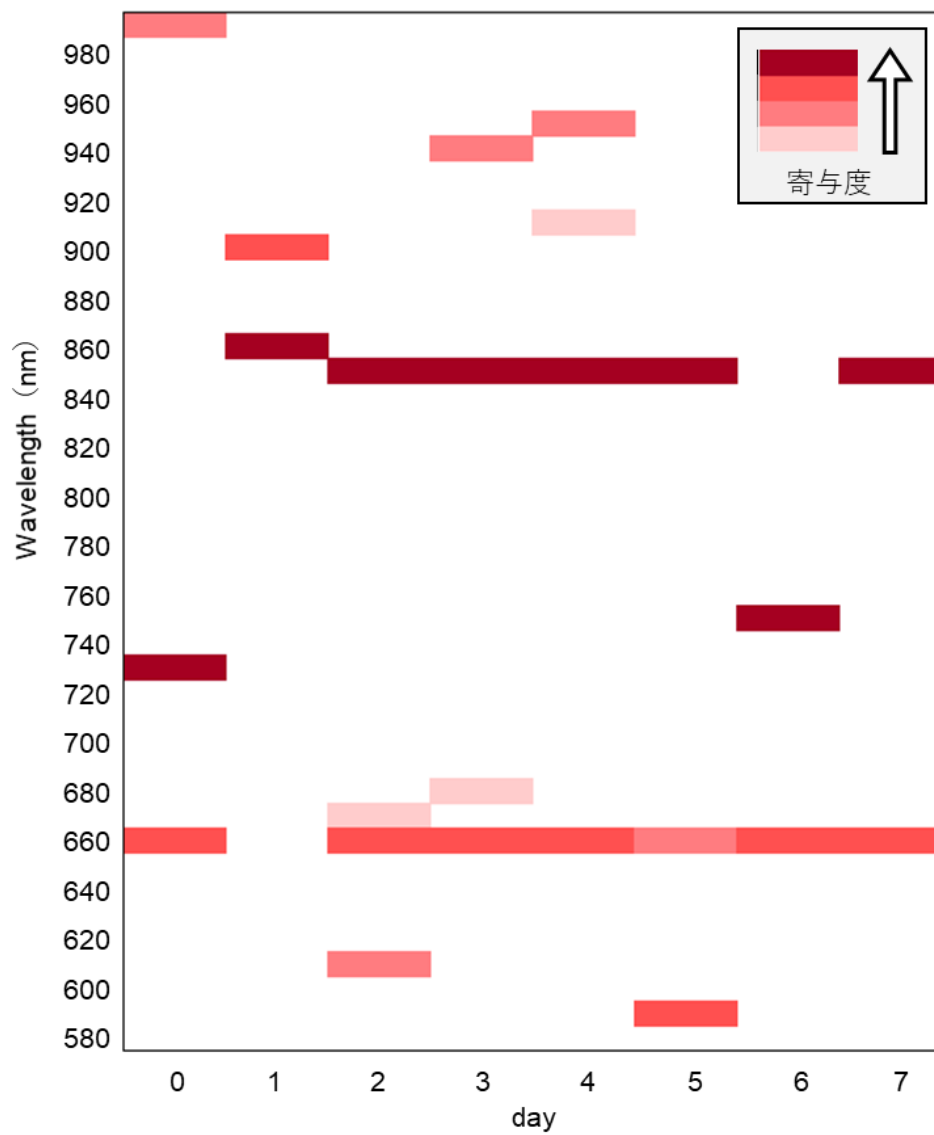


図 4-19 モモ落下試験において特定された近赤外波長

4.4.4 みかんの振動試験による特徴的近赤外波長

ミカンにおいてもモモと同様にロジスティック回帰分析により選択された波長を 4 波長抽出した。図 4-20 に 12 日間の波長抽出結果を示す。

ミカンにおいてもモモと同様に試験直後の波長選択と 24 時間後の選択結果が異なるものとなった。そのため、衝撃負荷直後の青果物品質挙動は青果物や衝撃の種類に関係なく、安定までに時間がかかることが示された。また、ミカンにおける初期の選択波長は 830nm, 690 nm, 660 nm (寄与度の高い順) となり、モモにおいて選択され続けた波長域と近い波長域が選ばれた。これは振動衝撃においても落下と同じような影響を受けたことが示唆されたものである。その後、24 時間後からは 890~910 nm 付近の波長域が選択され続けた。

章 4.4.1 にあるようにミカンの重量変化は振動区と対照区では 1 日当たり重量減少速度が振動区の方が早い結果が得られている。さらに振動負荷による青果物の影響を調べた研究では、振動負荷では物理的損傷よりも呼吸の上昇による糖・水分の消費⁴⁷⁾や TCA サイクルの停滞などにより、通常の生理活性とはことなる経路が活性化する⁴⁸⁾などの生理的な影響が報告されている。また、900 nm 付近の波長域はミカンにおける酸濃度⁴⁹⁾に関係するという報告があり、920 nm にはミカンの糖に関する吸収波長が存在する。さらにミカンは貯蔵することで酸が分解され、水分が揮発し相対的に糖度が高まる⁵⁰⁾⁵¹⁾。対照区は報告の通り、貯蔵により酸の分解と水分の揮発が生じた。振動区では振動により、呼吸や蒸散の上昇から水分消費が激しくなったため、振動試験後は対照区と比べ、酸の分解は抑制したと考えられる。そのため、数日間は酸のピークに近い 890 nm の波長帯が選択された。その後、生理活性が落ち着いた終盤では、どちらの区も酸の分解により、相対的な糖の高まりが生じるが、水分量の差から相対的に振動区の糖濃度が高く、920 nm の波長帯に選択のシフトが生じたと考えられる。

以上より、900 nm 帯はミカンに生じた異常生理活性の指標となる可能性がある。

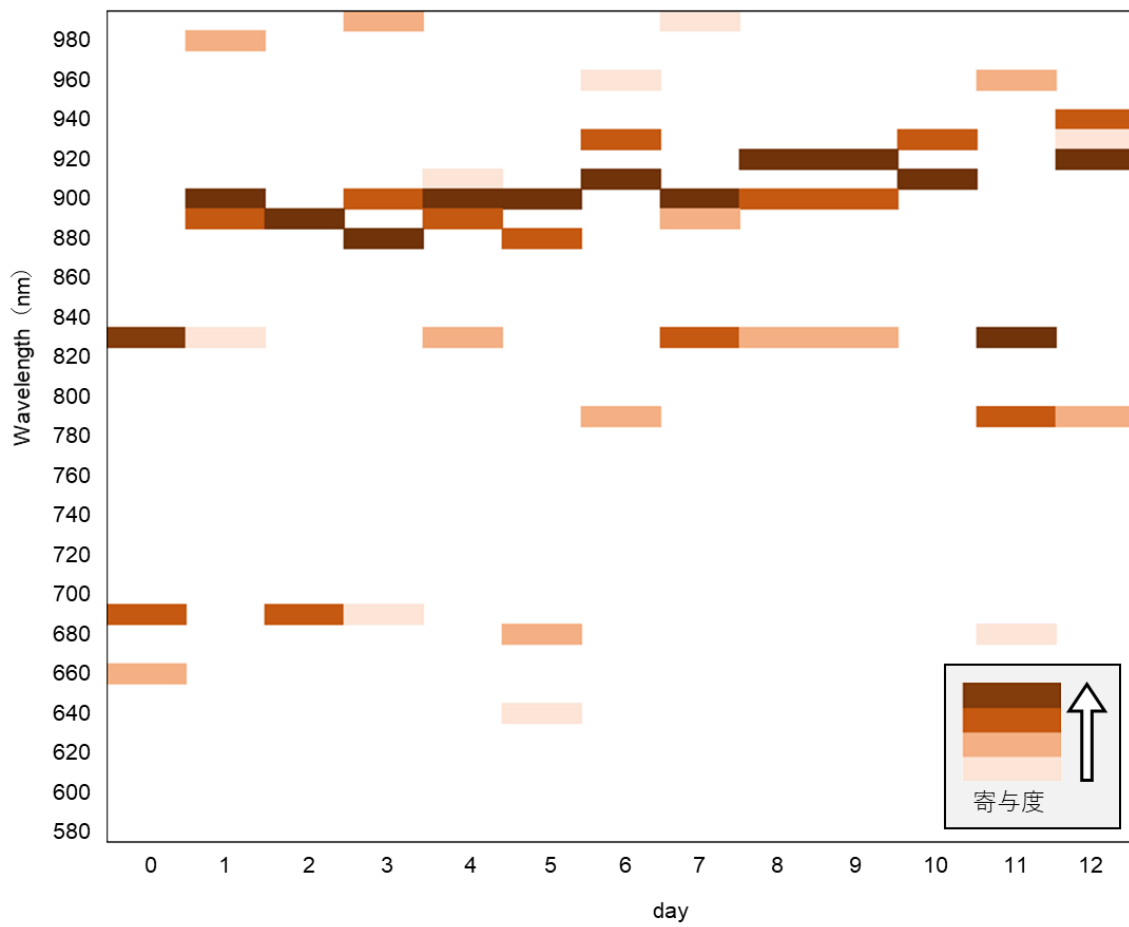


図 4-20 ミカン振動試験において特定された近赤外波長

第V章. 結言

5.1 本研究の成果

本研究では、輸送青果物の品質変遷をモニタリングするために、青果物の単一波長での品質推定と輸送負荷に対する変化を反映する特徴的近赤外波長を探索した。

まず、2章において近赤外領域の活用について述べた。特に基礎研究から応用研究まで多く利用されている近赤外分光法について紹介し、その吸収原理から統計的解析手法まで詳細に説明することで、LED・PDを用いた選択波長での品質推定の可能性を示した。

3章では選択波長による品質推定デバイスの作製について述べた。スクロース溶液を用いた brix 値を推定する単一波長フォトダイオードと LED を用いたセンサユニットにおいて、近赤外分光法による brix 値の予測モデルと比較した。その結果、スクロース溶液の brix 値推定において単一波長センサユニットで RPD 1.705、近赤外分光法で RPD 2.043 となり、同程度の推定が可能であることが確認された。そこで、実青果物に適用するために、フォトダイオードの数を増やし、周辺環境も取得するデバイスを作製した。ここでは周辺温度の変化に対するフォトダイオードの温度依存性を補正するため、恒温機の温度制御からフォトダイオードの温度補正式を作成した。補正式をデバイスのプログラムに反映し、モモを対象にデバイスを用いた糖度推定の計測を行った。デバイスにおいて周辺環境のデータ取得は変化を捉えるには十分であることが確認されたが、青果物の品質変遷を評価するのは困難であり、課題・改善点が多く得られた。

4章では、単一波長で青果物の品質変遷を把握するために、輸送時の負荷に対する変化を反映する波長域を特定した。対象として軟弱果実であるモモと、果物の中では日本で最も多く生産されているミカンを用いた。青果物に与える輸送負荷としては、代表的な輸送負荷である落下と振動を与えた。どちらの負荷条件においても見た目に明らかな変化が生じない程度に設定し、1週間程度貯蔵したときの経時的近赤外スペクトルを取得した。近赤外スペクトルは前処理を行い、ノイズやピークの顕在化を施したのちに、負荷のありなしの2項分布を従属変数とし、近赤外スペクトルを独立変数とする2項ロジスティック回帰分析により波長を推定した。落下負荷によるモモの特徴的近赤外波長は850nm域と660nm域であることが分かった。660nm域においてはクロロフィルの吸収波長域であるため、落下負荷が果実の硬度に影響を及ぼしたことが示唆された。また、850nm域はロジスティック回帰分析において常に寄与度が高く、落下により安定的に選択される波長であった。これは落下による衝撃がモモの成分に影響を及ぼすことではなく、内部での損傷を検出する特異な波長の可能性がある。振動負荷によるミカンの特徴的近赤外波長は890~910nm域であった。これは振動負荷がミカン内部の生理的活性に影響を及ぼしたことで、この波長域が選択されたことが示され、900nm帯においてミカンに生じた異常生理活性の検出可能性が得られた。

以上より、輸送青果物の品質変遷を単一波長でモニタリングするシステム開発の可能性と、輸送負荷に対する変化を反映する特徴的な波長を特定した。これらを組み合わせることで、輸送青果物の負荷に対する品質状態把握の可能性を示した。

5.2 課題と今後の展望

3章において、スクロース溶液における糖度推定から単一波長による輸送青果物品質の計測可能性を示し、加えて自作デバイスを試作し、データ取得を検証した。

1つ目の課題として、電流電圧増幅回路の小型化とPD感度の上昇である。スクロース溶液におけるセンサユニットの電流電圧増幅回路はプリント基板にスルーホール実装したものであり、加えてLED、PDは砲弾型であった。しかし、現在の基板実装の多くは小型化のため、表面実装のためのチップ部品を用いている。本論も自作デバイスにおける光計測部はフレキシブル基板にチップセンサを搭載することで計測したが、増幅回路の増幅率、またはセンサ素子に問題があり、十分な近赤外光データが得られなかった。輸送中における青果物品質評価のためのシステムでは小型化と限られた光量でのデータ取得が求められることを考慮すると、PDとLEDの感度に対応した表面実装の電流電圧増幅回路の検討が必要である。

2つ目の課題として、輸送時の単一波長を採用した近赤外データ取得部の構築である。今回、モモのデータ取得機構は貯蔵を想定した外装部として簡易的に作成したが、実際の輸送環境においては落下・振動などの衝撃を受け、データ取得部が安定しないことが考えられる。そのため、青果物全体を覆う外装を開発し、LED、PDの計測距離に応じた補正を行うなど、不安定な環境において安定したデータ取得機構の検討が必要である。

3つ目の課題は電源である。輸送時の青果物計測のためには電池駆動が望ましく、さらに長距離輸送であるならば1週間程度計測できる容量も必要である。今回試作したデバイスは電源を集約し、ナノパワータイマによりスイッチ制御するモジュールを採用したことで長期間のデータ取得を可能とした。今後、モニタリングのためデータ通信機構を付属し、LEDを増やすなど開発が進めば、より多くの電力消費が考えられる。そのため、計測目的に応じた電源の選定と、電源周りの回路設計が必要である。

4章では、単一波長で青果物の品質変遷を把握するために、輸送時の負荷として代表的な落下、振動負荷に対する変化を反映する波長域を特定した。落下負荷を与えたモモでは1個体に落下区と対照区を設けて、落下による衝撃の影響を明確化した。しかし、落下負荷が生理的活性に影響していたのであれば、落下区と対照区を分けて波長選択することが必要である。また、今回モモとミカンにそれぞれ異なる負荷を与えたが、より波長の考察を深めるためには同種類の負荷を与えるべきであった。加えて、波長選択の原理を解明するために負荷を与えた青果物の内容成分や細胞構造の変化を破壊的手法で検証することで、輸送時の青果物品質損傷に基づく、品質モニタリングが可能になると考えられる。

また、今回のデータはモモとミカンの落下・振動負荷における特徴的な近赤外波長であるため、青果物の種類や品種によらない普遍的な特徴波長であるか、他青果物で解析することで単一波長による輸送時の青果物品質変遷モニタリングへの寄与が考えられる。

謝辞

本研究を修士論文として形にすることができたのは、終始丁寧かつ熱心なご指導ご鞭撻を下さいました福島崇志准教授、滝沢憲治助教のおかげです。先生方には研究面で様々な配慮をして頂くと共に、数多くのご助言とお力添えを頂きました。また、応用環境情報学研究室の先輩、同輩、後輩の方々には実験の協力から研究室生活までたくさんのご助力を頂きました。

心から感謝の気持ちと御礼を申し上げ、謝辞とさせていただきます。

令和3年2月

三重大学 大学院生物資源学研究科 共生環境学専攻
環境情報システム工学講座
応用環境情報学研究室

吉村 和己

参考文献

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所 (2018) 日本の将来推計人口, [online]
http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp_zenkoku2017.asp, (参照 2020-05-17).
- 2) 澤田守, 農業労働力の変化と農業就業構造, 農業問題研究, VOL.49 No2, p27-39, 2018
- 3) 農林水産省 (2020) スマート農業の展開について,
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/index-134.pdf> (参照 2020-12-29).
- 4) 農林水産省 (2021) 農林水産物・食品の輸出に関する統計情報,
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/export/e_info/zisseki.html (参照 2020-02-03).
- 5) 農林水産戦略協議会 (2017) H28 年度中間報告,
<https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/11kai/siryo2-6.pdf> (参照 2020-11-27).
- 6) 農林水産省 (2018) 平成 28 年度 食料・農業・農村白書,
https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h28/h28_h/trend/part1/chap0/c0_2_01_1.html, (参照 2020-11-29).
- 7) 中村宣貴, 梅原仁美, 岡留博司, 中野浩平, 前澤重禮, 椎名武夫 (2007) 振動周波数及び振動方向がイチゴ果実の損傷に及ぼす影響, 農業施設, VOL. 38, No.2, p101-108.
- 8) 多々良泉, 辻聡宏, 御厨初子, 田中政信, 劉蚊艶, 小島孝之, 太田英明 (1999) 輸送過程で発生する振動がイチゴの呼吸速度及び品質に及ぼす影響, 日本食品保蔵科学会誌, VOL. 25, No.1, p15-20.
- 9) FAO (2019) The State of Food and Agriculture 2019, Rome, FAO.
- 10) 椎名武夫 (2016) 野菜の品質保持技術について,
<https://www.alic.go.jp/content/000128110.pdf>. (参照 2020-11-12).
- 11) 農研機構 (2012), 輸送性からみた夏秋イチゴの収穫時の品質と輸送温度管理,
<http://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouhou/H22/yasai/H22yasai007.html>., (参照 2020-12-28).
- 12) ファイトテクノロジー研究会 (2002) ファイテック How to みる・きく・はかる -植物県境計測-, 株式会社養賢堂, p.54.
- 13) M. Cecilia do Nascimento Nunes, Mike Nicometo, Jean Pierre Emond, Ricardo Badia Melis, Ismail Uysal (2004) Improvement in fresh fruit and vegetable logistics quality: berry logistics field studies, Philos Trans A Math Phys Eng Sci, VOL. 372, p0301-0307.
- 14) Behnam Soleimani, Ebrahim Ahmadi (2014) Measurement and analysis of truck vibration levels as a function of packages locations in truck bed and suspension, Computers and Electronics in Agriculture, VOL. 109, p141-147.
- 15) Giuseppe Aiello, Giada La Scalia, Rosa Micale (2012) Simulation analysis of cold chain performance based on time-temperature data, Production Planning and Control, VOL. 23, No.6, p468-476.
- 16) 西沢隆, 森祐子, 福島慎也, 夏賀元康, 丸山康広 (2009) 近赤外分光法によるイチゴ果

- 実糖組成の非破壊測定, 日本食品化学工学会誌, Vol. 56, NO.4, p.229-235.
- 17) 河野澄夫, 藤原孝之, 岩本睦夫, (1993) 近赤外透過法によるウンシュウミカン糖度の非破壊測定, 園芸学会雑誌, Vol. 62, NO.2, p.465-470.
- 18) 尾崎幸洋 (2015) 近赤外分光法, 講談社 分光法シリーズ 2, p45.
- 19) 河野澄夫 (2005) 近赤外分光法による果実糖度の測定, 食糧: その科学と技術 食品総合研究所, Vol. 43, p69-86.
- 20) Abraham. Savitzky and M. J. E. Golay (1964) Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures., Anal Chem, Vol. 36, No.8, p1627-1639.
- 21) 食品分析開発センターSUNATEC (2020) 近赤外分光法について, <http://www.mac.or.jp/mail/200901/03.shtml>, (参照 2020-12-29).
- 22) 伊藤秀和 (2007) 近赤外分光法によるメロン品質の非破壊計測法の開発, 野菜茶業研究所研究報告, Vol. 6, p83-115.
- 23) 西沢隆, 森佑子, 福島慎也, 夏賀元康, 丸山康広 (2009) 近赤外分光法によるイチゴ果実糖組成の非破壊測定, 日本食品科学工学会誌, Vol. 56, No.4, p229.
- 24) 森次真一, 鷺尾建紀, 高原知佳子, 大家理哉, 高野和夫 (2015) 近赤外分光法による土壌化学性診断の可能性, 岡山県農林水産総合センター農業研究所報告, Vol. 6, p41-48.
- 25) Yaowei Long, Hong Sun, Haojie Liu, Minzan Li, Mingqiang Han, Wei Yang (2014) Spectral Sensor Calibration for Maize Detection under Different Conditions, IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, Iss.17, p619-625.
- 26) 手塚誉裕, 加藤治 (2014) 氷温貯蔵によるモモ果実の品種別鮮度保持効果と出庫後の温度管理, 山梨県総合理工学研究機構, Vol. 9, p.21-25.
- 27) 飯村一成, 大橋隆, 小林康弘, 大橋幸雄, 重野貴, 中西達郎 (2017) 長期輸送に対応できるイチゴの鮮度および品質保持技術, 栃木農業試験場研究報告, Vol. 75, p45-53.
- 28) Marios C. Kyriacou, Youssef Rouphael (2018) Towards a new definition of quality for fresh fruits and vegetables, Science Direct, Vol. 234, No.14, p463-469.
- 29) 農林水産省 (2020) 作物統計調査 (果樹), <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500215&tstat=000001013427&cycle=7&year=20190&month=0&tclass1=000001032287&tclass2=000001032927&tclass3=000001148246> (参照 2021-1-6).
- 30) 今野勉, 小野寺玲子, 工藤信, 伊東良久, 石川豊, 中村ゆり, 羽山裕子 (2010) モモ輸出における荷傷み防止方法, 東北農業研究, Vol. 63, p107-108.
- 31) 岩元睦夫, 早川昭, 河野澄夫, 真子正史, 「選果工程中に受ける落下衝撃の温州ミカン品質に及ぼす影響, 農業機械学会誌, Vol. 38, No.4, p539-544, 1977
- 32) 北澤裕明, 石川豊, 路飛, 胡耀華, 中村宣貴, 椎名武夫 (2010) イチゴ輸送中の衝撃解析と損傷発生, 園学研, Vol. 9, p221-227.
- 33) Ishikawa Y., Kitazawa, H., Shiina, T. (2009) Vibration and shock analysis of fruit and vegetables transport-Cherry transport from Yamagata to Taipei, JARQ,43, p129-135.

- 34) 北澤裕明, 清水栄治, 長谷川奈緒子, 五十部誠一郎 (2014) モモ果実の繰り返し衝撃に対する易損性の部位別評価, 食品総合研究所, No.78, p31-36.
- 35) 中村宣貴 (2019) 総説: 青果物の輸送時の振動損傷に関する研究の現状」日本食品化学工学会誌, VOL. 66, No.11, p397-407.
- 36) 増田亮一, 早川昭, 河野澄夫, 岩本睦夫, (1988) 落下・振動衝撃がミカン果実の有機酸組成に及ぼす影響: 主成分分析による解析, 食品総合研究所, No.52, p36-46.
- 37) 中村礼之輔, 伊藤卓爾 (1976) 振動が果実の呼吸生理に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, Vol. 45, No.3, p313-319.
- 38) 中村宣貴, 梅原仁美, 岡留博司, 中野浩平, 前澤重禮, 椎名武夫 (2007) 振動周波数および振動方向がイチゴ果実の損傷に及ぼす影響, 農業施設, Vol. 38, No.2, p101-108.
- 39) 果物情報サイト果物ナビ, 果実図鑑 モモ,
<https://www.kudamononavi.com/zukan/peach.htm#miwake>, (参照 2021-1-10).
- 40) Annette J.Dobson, 田中豊, 森川俊彦, 山中竹春, 富田誠 (2008) 一般化線形モデル入門, 共立出版, p49.
- 41) 農研機構 食品研究部門 永田雅靖 (2018) 食糧-その科学と技術-No.56, 農研機構, p43-66.
- 42) 阿部一博 (2019) 青果物の鮮度評価・保持技術～収穫後の生理・化学的特性から輸出事例まで～, NTS, p15.
- 43) 須江芳恵, 夏賀元康, 江頭宏昌, 池田剛士, 千田智哉, 堀之内名那子, 赤澤経也 (2009) 近赤外分光法によるエダマメの品質測定, Vol. 71, No.6, p98-105.
- 44) V.Andrew, McGlone, Robert B, JordanPaul, J.Martinsen (2002) Vis/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for 'Royal Gala' apple, Postharvest Biology and Technology, Vol. 25, p135-144.
- 45) 青木宏道, 太田万理, 大塚周二, 鈴木鐵也 (2010) グローブ型装置による収穫前果実の可視近赤外分光計測, 農業機械学会誌, Vol. 72, No.4, p376-381.
- 46) 李曉明, 岩尾俊男, 藤浦建史, 洪沢栄, 毛利建太郎 (1993) 画像処理による青果物の損傷果検出システム, 農業機械学会誌, Vol. 55, No.4, p91-98.
- 47) 中村怜之助, 伊東卓爾 (1976) 振動が果実の呼吸生理に及ぼす影響, 園芸学会雑誌, Vol. 45, No.3, p313-319.
- 48) 増田亮一, 早川昭, 河野澄夫, 岩本睦夫 (1988) 落下・振動衝撃がミカン果実の有機酸組成に及ぼす影響: 主成分分析による解析, 食品総合研究所, No.52, p36-46.
- 49) Sumio Kawano, Takayuki Fujiwara, Mutsuo Iwamoto (1995) Nondestructive Determination of Sugar Content in Satsuma Mandarin using Near Infrared (NIR) Transmittance, Journal of Near Infrared Spectroscopy, Vol. 3, p227-237.
- 50) Naoya Kubo, Shiko Haginuma (1980) Effect of Storage Conditions on the Quality and Some Components of Satsuma Mandarin, Vol. 49, Iss.2, p260-268.

⁵¹⁾ 大東宏, 佐藤義彦 (1985) ウンシュウミカン果実の成熟に伴う糖, 有機酸の変化」, 園芸学会雑誌, Vol. 52, No.2, p155-162.

付録

- ① 自作センサユニットにて開発した Arduino プログラム
本プログラムは Arduino (ver.1.8.13) を用いて開発した。

```
#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#include <DS3232RTC.h>
#include <time.h>
#include <TimeLib.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>

const int chipSelect = 8, LED1_PIN=3 , LED2_PIN=6 , LED3_PIN=5 ,
LED4_PIN=9 , LEDTCS_PIN=10;
const int donepin = 7; // TPL5110 の Done につなぐピン
#include "Adafruit_TCS34725.h"
#include "SparkFunBME280.h"
unsigned char BME280_address = 0x77;
unsigned char ID_register = 0xd0;
unsigned char TCS34725_address = 0x29;
unsigned char DS3231_address = 0x68;
unsigned char ADS1115_address = 0x48;
#define DEVICE_ADDR (0x53)
#define AVERAGENUM 100
#define CFACTOR 0.12500
unsigned long timeMS=0;
int K33 = 0x7F;
byte gammatable[256];
byte val=0;
char fileName[16];
byte axis_buff[6];
File dataFile;
int fileNum = 0;
Adafruit_TCS34725 tcs = Adafruit_TCS34725(TCS34725_INTEGRATIONTIME_700MS,
TCS34725_GAIN_1X);
BME280 sensor;
Adafruit_ADS1115 ads;
```

```

void setup() {
  Wire.begin();
  pinMode(13, OUTPUT);
  // DATA_FORMAT
  writeI2c(0x31, 0x0b);
  // POWER_TCL
  writeI2c(0x2d, 0x08);
  sensor.beginI2C();

  pinMode(chipSelect, OUTPUT);
  if (!SD.begin(chipSelect))
  {
  }else{
    File dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
    dataFile.close();
  }
  setSyncProvider(RTC.get); // ここで RTC の時刻をもとに Arduino の時刻を合わせ
る
  delay(1000);
  SdFile::dateTimeCallback( &dateTime );
  pinMode( LED1_PIN, OUTPUT );
  pinMode( LED2_PIN, OUTPUT );
  pinMode( LED3_PIN, OUTPUT );
  pinMode( LED4_PIN, OUTPUT );
  pinMode( LEDTCS_PIN,OUTPUT);
  pinMode( donepin, OUTPUT);
  digitalWrite(donepin, LOW);
  ads.setGain(GAIN_ONE);
  ads.begin();
}

void loop() {
  File dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
  //ADXL
  uint8_t length = 6;

```

```

readI2c(0x32, length, axis_buff); //レジスターアドレス 0x32 から 6 バイト読む
int x = (((int)axis_buff[1]) << 8) | axis_buff[0];
int y = (((int)axis_buff[3]) << 8) | axis_buff[2];
int z = (((int)axis_buff[5]) << 8) | axis_buff[4];
//BME280
timeMS=(millis()/1000);
double temp = sensor.readTempC();
double humi = sensor.readFloatHumidity();
double di = 0.81 * temp + 0.01 * humi * (0.99 * temp - 14.3) + 46.3;
initPoll();

//Colorsensor
wakeSensor();
analogWrite(LEDTCSPIN , 255);
delay(3000);
uint16_t clear, red, green, blue, colorTemp, lux;
tcs.getRawData(&red, &green, &blue, &clear);
tcs.setInterrupt(true);
delay(1000);
colorTemp = tcs.calculateColorTemperature_dn40(clear, red, green,
blue);
lux = tcs.calculateLux(red, green, blue);
delay(1000);
analogWrite(LEDTCSPIN , 0);
delay(100);

//PDLED
int cnt1,cnt2,cnt3,cnt4=0;
float read_from_ads1,read_from_ads2,read_from_ads3,read_from_ads4;
float averaged_input1,averaged_input2,averaged_input3,averaged_input4;

analogWrite( LED4_PIN, 255 );
delay(2000);
averaged_input4=0;
for(cnt4=0;cnt4<AVERAGENUM;cnt4++)
{

```



```

    read_from_ads4 = float(ads.readADC_SingleEnded(3));
    averaged_input4=averaged_input4+read_from_ads4/AVERAGENUM;
}
averaged_input4=averaged_input4*CFACTOR;
delay(1000);
analogWrite( LED4_PIN, 0);
delay(1000);

analogWrite( LED2_PIN, 255 );
delay(2000);
averaged_input3=0;
for(cnt3=0;cnt3<AVERAGENUM;cnt3++)
{
    read_from_ads3 = float(ads.readADC_SingleEnded(2));
    averaged_input3=averaged_input3+read_from_ads3/AVERAGENUM;
}
averaged_input3=averaged_input3*CFACTOR;
delay(1000);
analogWrite( LED2_PIN, 0);
delay(1000);

analogWrite( LED3_PIN, 255 );
delay(2000);
averaged_input2=0;
for(cnt2=0;cnt2<AVERAGENUM;cnt2++)
{
    read_from_ads2 = float(ads.readADC_SingleEnded(1));
    averaged_input2=averaged_input2+read_from_ads2/AVERAGENUM;
}
averaged_input2=averaged_input2*CFACTOR;
delay(1000);
analogWrite( LED3_PIN, 0);
delay(1000);

analogWrite( LED1_PIN, 200 );
delay(2000);

```

```

averaged_input1=0;
for(cnt1=0;cnt1<AVERAGENUM;cnt1++)
{
    read_from_ads1 = float(ads.readADC_SingleEnded(0));
    averaged_input1=averaged_input1+read_from_ads1/AVERAGENUM;
}
averaged_input1=averaged_input1*CFACTOR;
delay(1000);
analogWrite( LED1_PIN, 0);
delay(1000);

wakeSensor();
double RHValue = readRH();
delay(20);
wakeSensor();
double TempValue = readTemp();
delay(50);
wakeSensor();
double CO2Value = readCO2();
delay(1000);

if (dataFile) {

dataFile.print(month());dataFile.print("/");dataFile.print(day());dataFile.
print(" ");

dataFile.print(hour());dataFile.print(":");dataFile.print(minute());dataFil
e.print(":");dataFile.print(second());dataFile.print(" ");
    dataFile.print(',');
    dataFile.print(sensor.readTempC());
    dataFile.print(',');
    dataFile.print(sensor.readFloatHumidity());
    dataFile.print(',');
    dataFile.print(sensor.readFloatPressure());
    dataFile.print(',');
    dataFile.print(di);

```

```
dataFile.print(',');
dataFile.print(colorTemp);
dataFile.print(',');
dataFile.print(lux);
dataFile.print(',');
dataFile.print(red);
dataFile.print(',');
dataFile.print(green);
dataFile.print(',');
dataFile.print(blue);
dataFile.print(',');
dataFile.print(clear);
dataFile.print(',');
dataFile.print(RHValue);
dataFile.print(',');
dataFile.print(TempValue);
dataFile.print(',');
dataFile.print(CO2Value);
dataFile.print(',');
dataFile.print(averaged_input4);
dataFile.print(',');
dataFile.print(averaged_input3);
dataFile.print(',');
dataFile.print(averaged_input2);
dataFile.print(',');
dataFile.print(averaged_input1);
dataFile.print(',');
dataFile.print(x*0.0392266);
dataFile.print(',');
dataFile.print(y*0.0392266);
dataFile.print(',');
dataFile.print(z*0.0392266);
dataFile.println("");
dataFile.close();
}
delay(7930);
```

```
digitalWrite(donepin, HIGH); //ここで TPL5110 に信号 HIGH を送ると電源が切れる
delay(100);
digitalWrite(donepin, LOW); //切れなかったときに再試行するため LOW に戻しておく
delay(100);
}

void wakeSensor() {
    TWCR &= ~(1<<2);
    DDRC |= (1<<4);
    PORTC &= ~(1<<4);
    delay(1);
    PORTC |= (1<<4);
    TWCR |= (1<<2);
    delay(1);
}

void initPoll() {
    Wire.beginTransmission(K33);
    Wire.write(0x11);
    Wire.write(0x00);
    Wire.write(0x60);
    Wire.write(0x35);
    Wire.write(0xA6);
    Wire.endTransmission();
    delay(20);
    Wire.requestFrom(K33, 2);
    byte i = 0;
    byte buffer[2] = {0, 0};
    while(Wire.available()) {
        buffer[i] = Wire.read();
        i++;
    }
}

double readRH() {
    int RH_value = 0;
    digitalWrite(13, HIGH);
    Wire.beginTransmission(K33);
```

```

Wire.write(0x22);
Wire.write(0x00);
Wire.write(0x14);
Wire.write(0x36);
Wire.endTransmission();
delay(20);
Wire.requestFrom(K33, 4);
byte i = 0;
byte buffer[4] = {0, 0, 0, 0};
while(Wire.available()) {
    buffer[i] = Wire.read();
    i++;
}
RH_value = 0;
RH_value |= buffer[1] & 0xFF;
RH_value = RH_value << 8;
RH_value |= buffer[2] & 0xFF;
byte sum = 0;
sum = buffer[0] + buffer[1] + buffer[2];
if(sum == buffer[3]) {
    // Success!
    digitalWrite(13, LOW);
    delay(10);
    return ((double)RH_value / (double) 100);
} else {
    digitalWrite(13, LOW);
    delay(10);
    return ((double) -1);
}
}
double readTemp() {
    int Temp_value = 0;
    digitalWrite(13, HIGH);
    Wire.beginTransmission(K33);
    Wire.write(0x22);
    Wire.write(0x00);

```

```

Wire.write(0x12);
Wire.write(0x34);
Wire.endTransmission();
delay(20);
Wire.requestFrom(K33, 4);
byte i = 0;
byte buffer[4] = {0, 0, 0, 0};
while(Wire.available()) {
    buffer[i] = Wire.read();
    i++;
}
Temp_value = 0;
Temp_value |= buffer[1] & 0xFF;
Temp_value = Temp_value << 8;
Temp_value |= buffer[2] & 0xFF;
byte sum = 0;
sum = buffer[0] + buffer[1] + buffer[2];
if(sum == buffer[3]) {
    digitalWrite(13, LOW);
    delay(10);
    return ((double)Temp_value / (double) 100);
}
else {
    digitalWrite(13, LOW);
    delay(10);
    return ((double) -1);
}
}
double readCO2() {
    int CO2_value = 0;
    digitalWrite(13, HIGH);
    Wire.beginTransmission(K33);
    Wire.write(0x22);
    Wire.write(0x00);
    Wire.write(0x08);
    Wire.write(0x2A);

```

```

Wire.endTransmission();
delay(50);
Wire.requestFrom(K33, 4);
byte i = 0;
byte buffer[4] = {0, 0, 0, 0};
while(Wire.available()) {
    buffer[i] = Wire.read();
    i++; }
CO2_value = 0;
CO2_value |= buffer[1] & 0xFF;
CO2_value = CO2_value << 8;
CO2_value |= buffer[2] & 0xFF;
byte sum = 0;
sum = buffer[0] + buffer[1] + buffer[2];
if(sum == buffer[3]) {
    // Success!
    digitalWrite(13, LOW);
    delay(10);
    return ((double)CO2_value * (double) 1);
} else {
    digitalWrite(13, LOW);
    delay(10);
    return ((double) -1);
}
}

void writeI2c(byte register_addr, byte value) {
    Wire.beginTransmission(DEVICE_ADDR);
    Wire.write(register_addr);
    Wire.write(value);
    Wire.endTransmission();
}

void readI2c(byte register_addr, int num, byte buffer[]) {
    Wire.beginTransmission(DEVICE_ADDR);
    Wire.write(register_addr);
    Wire.endTransmission();
}

```

```
Wire.beginTransaction(DEVICE_ADDR);
Wire.requestFrom(DEVICE_ADDR, num);
int i = 0;
while(Wire.available())
{
    buffer[i] = Wire.read();
    i++;
}
Wire.endTransmission();
}
void dateTime(uint16_t* date, uint16_t* time){
    uint16_t year() ;
    uint8_t month() , day() , hour() , minute() , second() ;
    *date = FAT_DATE(year(), month(), day());
    *time = FAT_TIME(hour(), minute(), second());
}
```


② 近赤外スペクトルの前処理用 R プログラム

本プログラムは RGui (ver.3.5.1) を用いて開発し, R パッケージは `plsropt` を用いた. データは `csv` 形式により読み込むことができる. 波長範囲, SG 法の窓幅はサンプルにより変更している. 掲載のプログラムはミカンの振動実験において近赤外スペクトルの前処理に使用したものである.

```
library(plsropt)

#CSV 読み込み
datCSV <- read.csv(file = "R.csv", row.names = 1, check.names = F)

#列名の確認
rownames(datCSV)

# datCSV から X 変数を抽出
x <- extdat(datCSV, start = 580, end = 1010)

# Y 変数と抽出した X 変数を再度結合
momo <- data.frame( NIR = I(as.matrix(x)))

#波長範囲の選択
momo$NIR <- extdat(momo$NIR, start = 500, end = 1010)

# SNV
momo$NIR <- snv(momo$NIR)

# Savitzky-Golay2次微分
momo$NIR <- matsgolay(momo$NIR, p = 2, n = 15, m = 2)

# Auto-scaling(scale)は標準化する関数 momo$NIR <- scale(momo$NIR, center =
TRUE, scale = TRUE)

#グラフ保存・作成
matplot(colnames(momo$NIR), t(momo$NIR), type = "l", lty = 1,
        xlab = "wavelength (nm)", ylab = "log(1/R)",
```

```
xlim = c(580,1000),  
main = "NIR spectra of intact peach fruits")
```

```
#データ保存
```

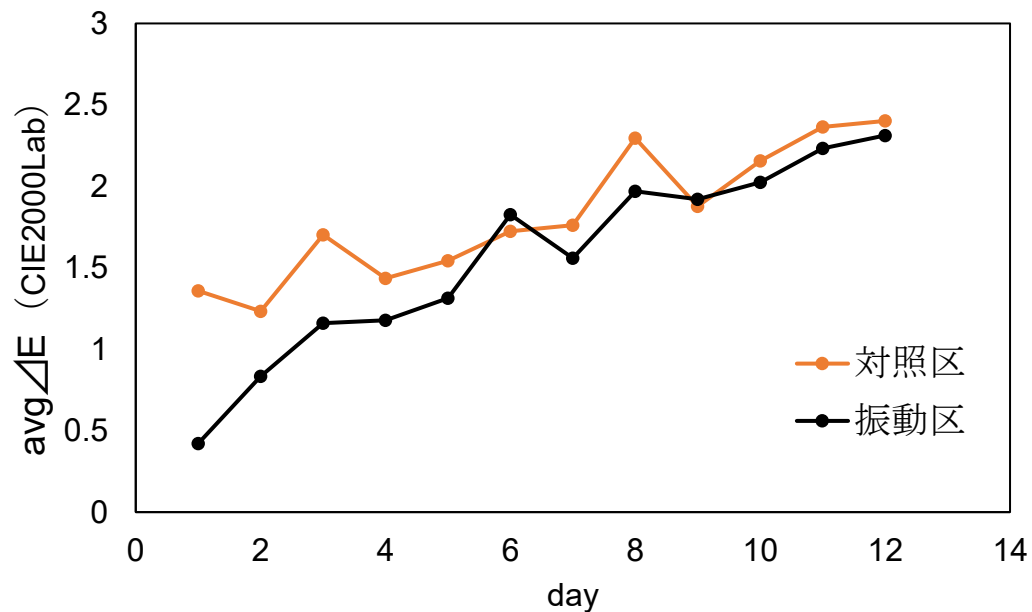
```
write.csv(momo$NIR, file = "flame15.csv")
```

③ 4章ミカンにおける色計測

ミカンにおいてはCS-10 Portable Color Meter (ZQ-141) を用いて、近赤外計測部の $L^*a^*b^*$ を計測し、見た目における色変化が生じたか確認した。計測した $L^*a^*b^*$ は (Colour Research and Application, 30(1),21 (2006)) を参考に CIE1976Lab, CMC (2:1), CIE2000Lab に変換し、振動負荷試験後の $L^*a^*b^*$ を基準色として色差 ΔE , 明度 L, 彩度 c, 色相 H を計算し、日別の平均値を計算して、グラフ化した。

CIE2000Lab は CIE (国際照明委員会) により開発された、現在 (2020) において最新の色差式である。この式では人間の目の特性を式に組み込んだものであり、実際に人間が感じる色に最も数値的に近い。CIEDE2000 3.5 以内が色差の許容値 (ISO12647), $\Delta E_{00} > 5$ で人間の目において明確な違いと判別できる (吉田ら 2007) と報告されている。

今回の計測においても CIE2000Lab 色差から、色変化が見た目では判断できない程度であったことが分かる。



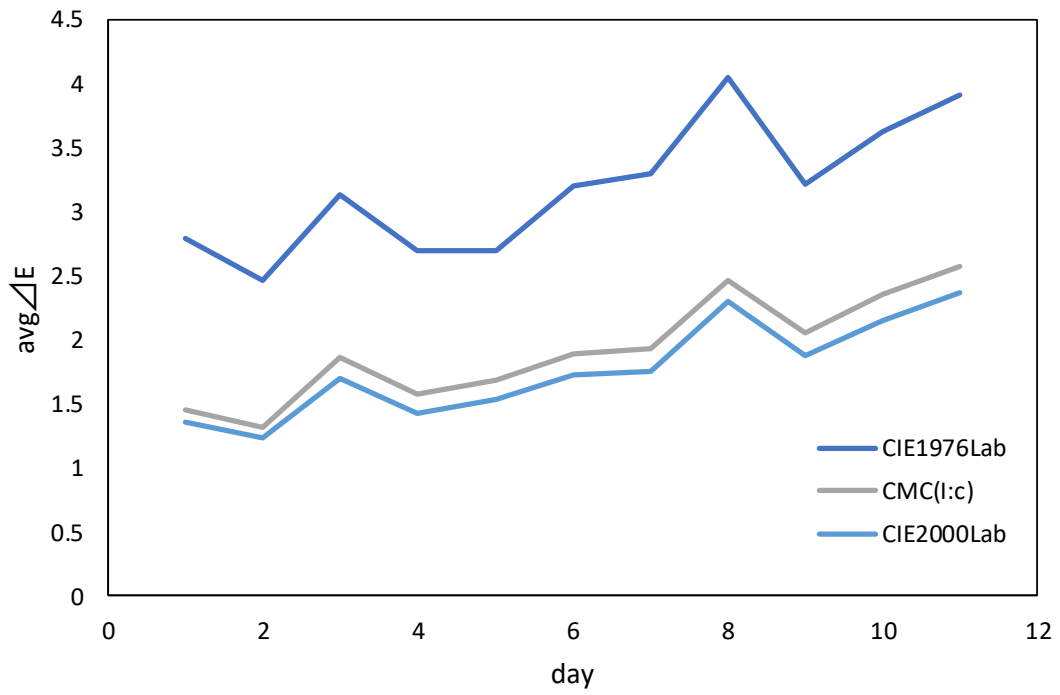


图 色差 (对照区)

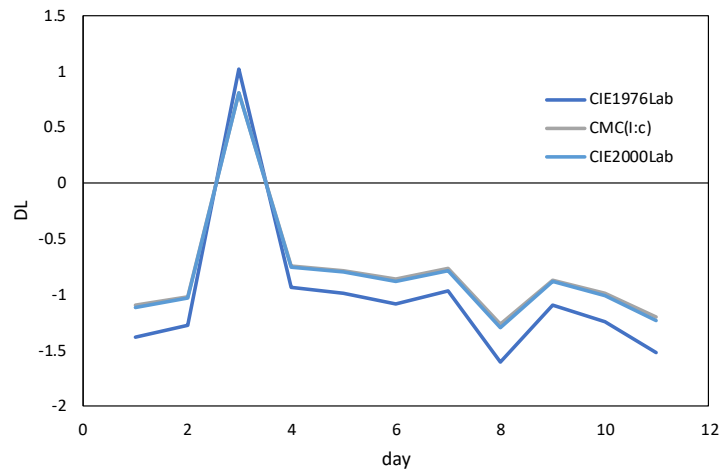


图 明度 (对照区)

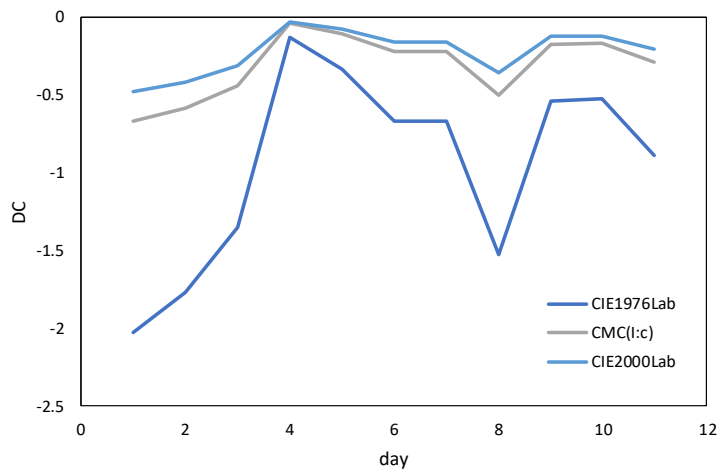


图 彩度 (对照区)

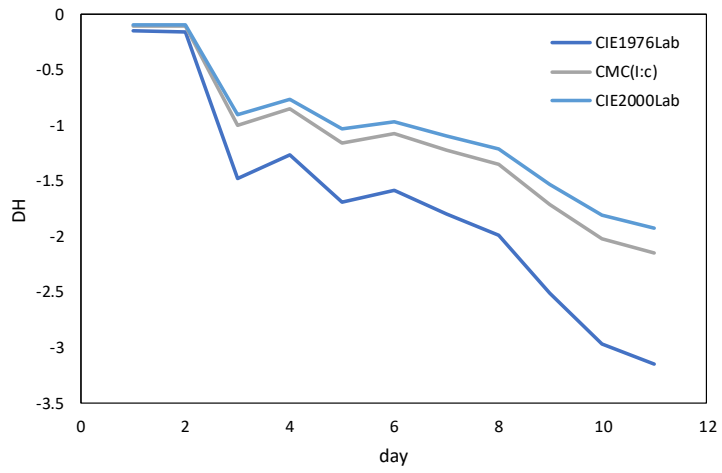


图 色相 (对照区)