

氏 名(本籍) お 小 ^{がわ}川 ^{ゆう}雄 ^{いち}一

学位の種類 博 士 (農 学)

学位記番号 農 第 6 9 9 号

学位授与年月日 平 成 17 年 9 月 8 日

学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当

学位論文題目 X線およびテラヘルツ電磁波を用いた農産物の品質評価
に関する基礎研究

論文審査委員 (主 査) 教 授 宮 澤 陽 夫
(副 査) 教 授 南 條 正 巳
教 授 桑 原 重 文
教 授 川 瀬 晃 道

論文内容要旨

1. はじめに

近年、農産物および食品の安全性や品質についての信頼性が揺らぐ問題が発生し、消費者からは安全性や品質の証明を求める動きが活発化している。そのため農産物の品質評価を通じて様々な情報を農産物に付加する技術は重要性を増している。また、生産者の立場からも、自らの生産物が良質農産物であることの判定と評価方法の確立は、急務な課題となっており、従来技術では判別が困難な内部障害の判別や鮮度評価に対しての要望が高まっている。そこで本研究では、未だ農産物の品質評価として実用化されていない X 線およびテラヘルツ電磁波（以後 THz 波と記す）を利用した、新しい農産物の品質評価法の技術開発を目指した。

X 線は透過性および直線性が高く、内部の構造や状態に関する情報を画像として得ることができるため、多くの産業分野で活躍している。一方 THz 波は、図 1-1 に示すように電波と光波の間に位置するため、被曝の影響が無く安全かつ簡便に取り扱うことができると共に、電波の透過性と物質に固有の吸収スペクトルを持つといった様々な特徴を兼ね備えた電磁周波数帯である。また、可視光や赤外光に比べて波長が長いため、生体内中の細胞レベルの微小な構造で散乱することなく透過することができると共に、水の吸収が大きいという特徴を持つため、農産物の品質を左右する水分に関する情報を詳細に知ることも可能と考えられる。

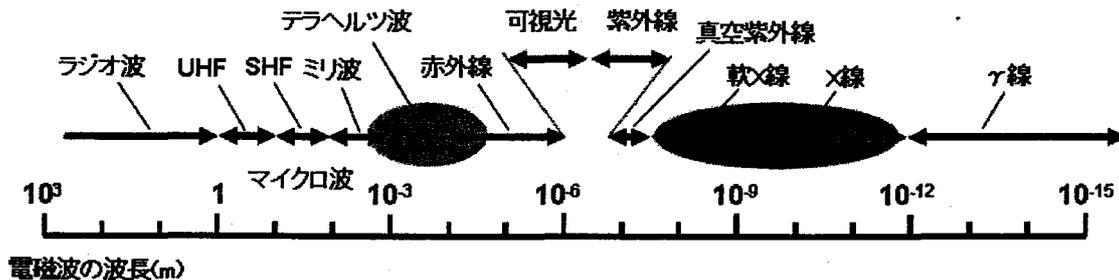


図 1-1 電磁波の波長と名称

本研究では、国内生産量の上位を占めており内部障害判別への要望の高いモモ、ナシ、リンゴに着目し、X 線による内部の可視画像から障害果の判別を試みた。さらに THz 波による水分状態のモニタリングおよびトマトの内部障害と鮮度の非破壊評価を試み、新たな付加価値を生み出す技術としての応用開拓を検討した。

2. X 線を用いた内部品質評価

2.1 目的および実験方法

本章では、流通過程での要望が高い農産物の内部の可視化による品質評価技術の開発を目指

し、実際に収穫された青果物の X 線による透過画像および X 線 CT 画像を撮像し、目視による検査結果を通じて内部障害判別の可能性について検討した。このとき、X 線については対象物が搬送される実時間での判別が可能なリアルタイム計測システムとして、“蛍光板と CCD カメラで構成した透過画像システム”を構築し実験を行った。一方、X 線 CT に関しては汎用型 X 線 CT スキャナを用いて内部障害と CT 値との関係を明らかにし、さらに、本手法を選果場へ導入する際の技術課題についての考察を行った。

実験で使用した品種と個数は、モモの「あかつき」50 個、ナシの「幸水」45 個、リンゴの「つがる」63 個である。それぞれのサンプルにおいて、採取後一週間以内に X 線にて透過画像を得た後、X 線 CT にて内部画像を取得し、それぞれの個体について断面の目視調査を実施した。

2.2 透過画像実験の結果

リアルタイム X 線透過画像取得実験系を構築し、X 線透過量の違いを利用した核割れ、芯に見られる異常や果裂果等の検出可能性を検討した。X 線透過画像中に図 2-1 に示すように ROI (Region of interest) を設定し、その中の画像階調の濃度分布について評価した。この図は蛍光板を利用して得た X 線透過画像で、透過強度の差が蛍光板の発光強度の差になって現れる。今回、濃度分布情報として得た値は、最小値・最大値・平均値・分散である。またこれらの結果を利用し、核割れ果および芯腐れなどの異常に対し、マハラノビスの距離により判別分析を行った。

図 2-2 にモモの実験結果の一例を示す。本サンプルは外観からは核割れが判別できないものであったが、果頂側からの X 線照射により核割れの様子が判別できた例である (矢印部)。

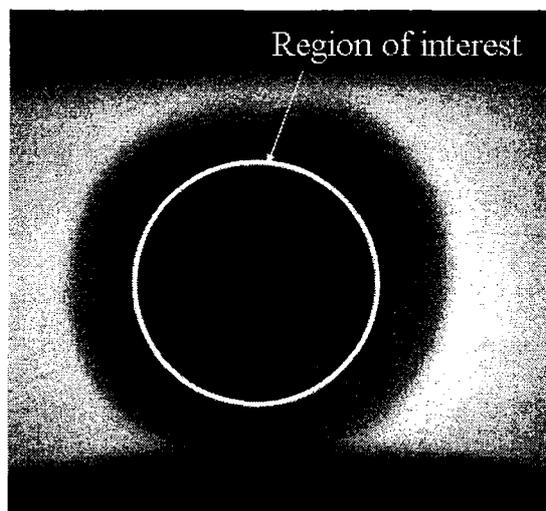


図 2-1 モモの側面からの X 線透過画像

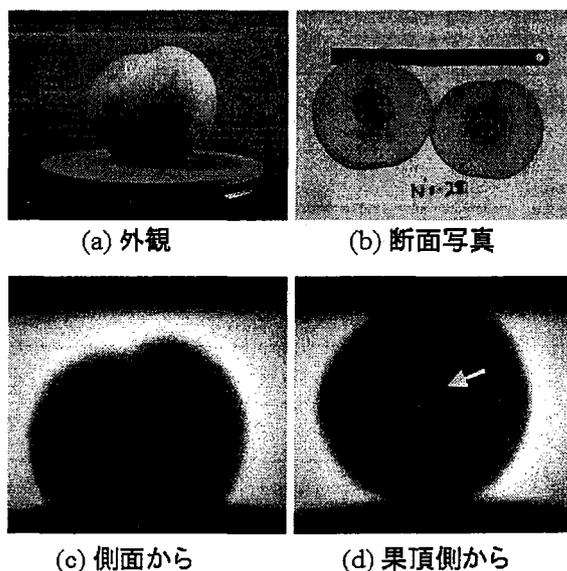


図 2-2 モモの可視画像および X 線透過画像

(X 線照射方向が異なる)

核割れの有無による ROI 内の濃度分布の違いを、表 2-1 に記す。この表に示すように、核割れのある果実の濃度値の分散値が、健全果より大きくなる傾向が見られた。さらに、果頂側から X 線を照射させた画像の方が分散の違いが顕著となり、2 倍以上となった。このとき、マハラノビスの距離を用いて判別分析を行った結果、判別率的中率は 86%であった。誤判別の原因として、核の先端がわずかに割れているといった軽微な核割れの認識ができなかったことや、カメラのランダムノイズが挙げられた。

表 2-1 核割れ果と健全果の濃度値比較

		最小値	最大値	平均値	分散
核割れ果	果頂側から照射	8.0	57.1	21.3	24.8
	側面から照射	6.4	49.1	19.1	13.4
健全果	果頂側から照射	7.0	37.5	19.2	10.3
	側面から照射	5.3	33.0	17.3	9.9

n=50

本方式は、CCD カメラで撮像することにより、リアルタイム、オンラインでの計測が可能である。また、本実験結果で示すように、核割れなどの判別には果頂側からの透過画像の方が判別しやすいため、1 方向からの照射のみで判別可能であることも考慮すると、十分に実用化が可能なシステムと考えられる。

ナシについても同様に実験を行い、芯腐れの判別可能性について検討した。表 2-2 に果頂側から X 線を照射した透過画像の ROI から得た濃度値のデータを示す。芯腐れ果についてマハラノビスの距離を用いた判別分析を行った結果、6 個の芯腐れ果に対して全て判別可能であった。一方、生理障害によって生じたと思われる裂果の影響は平均値にわずかな違いが見られるが、芯腐れほどの大きな変化は見られなかった。

表 2-2 芯腐れ果、果裂果、健全果の濃度値比較

	最小値	最大値	平均値	分散
芯腐れ	9.5	44.5	22.5	26.3
果裂果	12	39.9	25.5	13.0
健全果	9.0	43.7	21.5	14.2

n=45

リンゴを対象に X 線の発生強度を変えて得た透過画像を評価したところ、果肉の褐変部やみつ症を判別することはできなかった。これは、X 線透過画像は投影画像であるため、形状の影響が大きく反映され、果肉の詳細な情報を得るには適さなかったためと考えられる。一方、ROI を設定する方式は、核割れや芯腐れのように構造に大きな変化が生じ、X 線透過量にバラツキが

ある場合に有効であった。

2.3 X線 CT による実験結果

図 2-3 に今回の実験で得たモモの CT 画像および目視調査時の写真の一例を示す。このサンプルは、果肉の障害が進み内部が水浸化したもので、目視にて断面を観察すると、上段左図に見られるように水浸化し変色している箇所が見られる。それに対し CT 画像では、写真ほど明瞭に判別することが困難であった。これは健全な部位と比較して水分含量に大きな差がなかったことや、使用した X 線に対する水の吸収係数が小さかったため、減衰量に違いが現れなかったためと考えられる。さらに本実験ではモモの核、種子、健全な果肉、果肉褐変症や腐敗により茶色く変色した果肉について、CT 値の比較を行った。図 2-4 にその結果を示す。以上の結果からも、健全な果肉と褐変症の果肉では CT 値に大きな違いとなって現れないことが確認された。

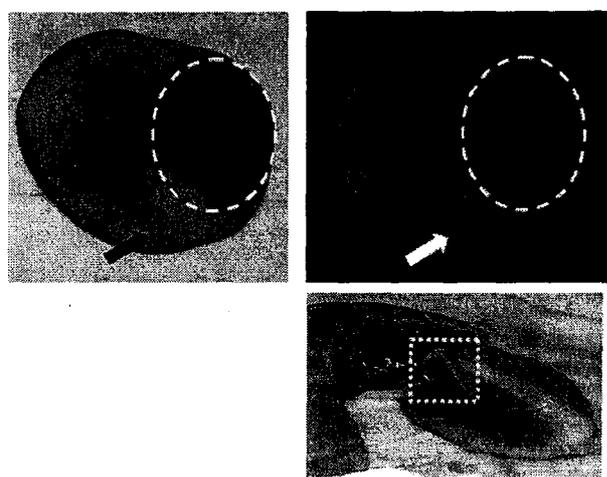


図 2-3 褐変部位（丸破線）と維管束（矢印、四角波線）

上段左：断面写真，上段右：CT 画像，下段：維管束部

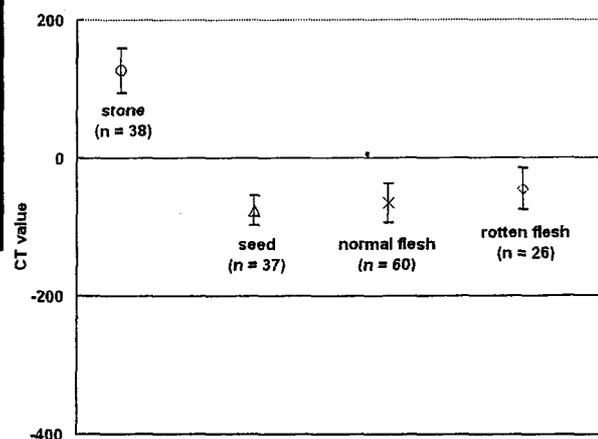


図 2-4 部位別の CT 値の違い（モモ）

図 2-5 にナシの断面の CT 画像と可視画像を示す。可視画像では CT 画像のように大きな果肉の変化を確認することができなかった。貫入式果実硬度計で果肉の硬度を測定したところ、CT 値の低い部位の硬度は 2 割程度低い値となった。また、この部分の果肉を採取し絞ると泡が多く、空気を多く含んでいる部位であった。さらに試食するとカスカスした食感で、みずみずしさが損なわれている部位であることが分かり、CT 画像を用いることで果肉の状態および食感に関する情報を得られる可能性があるとして示唆された。

図 2-6 にナシの部位別の CT 値を示す。本グラフに示した部位は、健全な果肉、水浸した果肉、打痕などにより生じた果肉の割れ、先ほどの水分を失った部位である。この結果、水分を失った部分は CT 値に反映され、本手法による健全部位との判別は比較的容易であることが確認できた。また、ナシの腐敗が進んだ水浸部位では健全な部分よりも CT 値が高くなる傾向が見られた。

今回、リンゴについては果実吸蛾類の害虫に果汁を吸われた果実や、内部から生じたため外観計測では判別困難な芯腐れ果についても判別可能性を検討した。現在このような障害果の判別は農家の感や経験に頼るしかなく、現在の選果機では判別が不可能である。さらに、CT画像からリンゴのみつ症についても判別が可能であることが明らかとなった。本実験の結果、従来技術では困難な高付加価値を生み出す技術としてCT画像が極めて有効であることが示された。

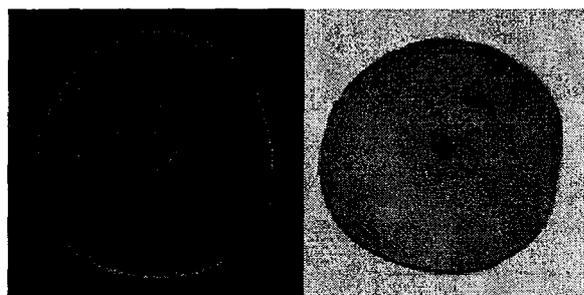


図 2-5 ナシの CT 画像 (左) と断面写真 (右)

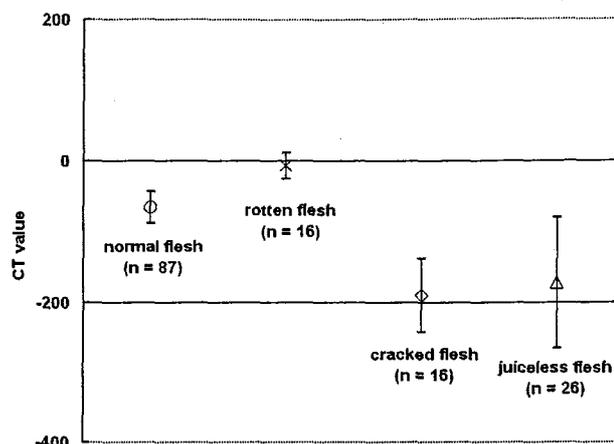


図 2-6 部位別の CT 値の違い (ナシ)

3. THz 波による農産物内の非接触水分計測に関する基礎研究

3.1 目的および実験方法

THz 波は水に対する感度が高いと共に、生体組織による散乱などの影響を受けることなく農産物の水分状態を知ることができるかと期待できる。そこで本研究では、THz 波の発生光源として TPO (テラヘルツ波パラメトリック発振器) を使って透過実験系を構築し、葉の水分状態のモニタリングを通じて農産物評価に関する知見を得ることを目指した。

本実験では、小売店で入手したシソの鉢植えの葉を対象とし、①1点照射による水分変化のモニタリング、②水ストレス環境によるモニタリング、③水分変化のイメージングの 3 つの実験を行った。

3.2 実験結果

【 ① 1点照射による水分モニタリング 】

図 3-1 に同一株の葉 2 枚を別々に測定した結果を示す。図中(a), (b)は 2 枚別々の葉の同一箇所における測定結果を示している。実験開始直後、今回使用した葉の透過率はそれぞれ約 5%、

6%であり、切断後約 50~60 分間透過率の変化が確認されなかった。この結果、切断面に近い部分から徐々に水分の流出が生じ、それに応じてある時間遅れを持って計測部位の水分移動が生じていると考えられた。

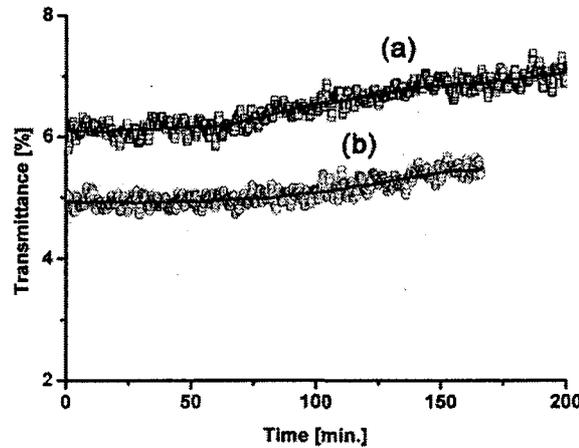


図 3-1 THz 波透過率の時間変化

【 ② 水ストレス時の水分変化モニタリング 】

図 3-2 に水ストレスによる透過率変化を測定した結果を示す。横軸は測定開始からの時間を示しており、図中(a)は測定結果の近似曲線を示す。実験開始から 15 分間ストレスを与え、50 分間注水、20 分間ストレス、33 分間注水を繰り返した結果である。葉の水分変化に応じて透過率が 0.5%程度変化している様子が確認された。透過率の変化には、乾燥、注水直後から約 5~10 分の時間遅れが見られた。また、図中の破線(b)で示すように、全体の透過率は時間と共に増加する傾向が見られた。これは水ストレスを与えた後、十分にストレス状態から回復させずに再び水ストレスを与えたため、結果的に植物体全体の水分量が減少していることを示唆している。

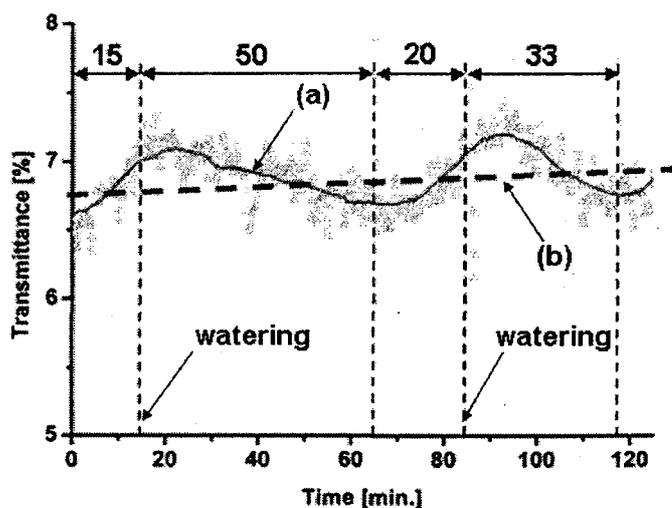


図 3-2 水ストレス時の透過率変化

【 ③ THz 波イメージングによる水分モニタリング 】

水分が変化する様子を THz 波の透過画像よりモニタリングした結果を図 3-3 に示す。図中上段の左は、葉柄を切断した直後の画像である。以後順に、1 時間後（上段中）、2 時間後（上段右）、2 日後（下段左）、4 日後（下段右）に測定した画像を示す。これらの画像は、各点における THz 波の透過率から吸収係数を計算したものである。

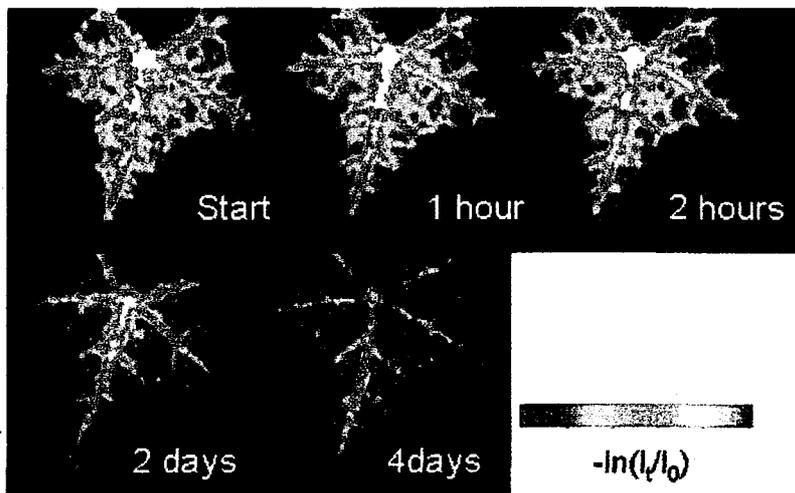


図 3-3 THz 波透過画像による水分分布（擬似カラー）

画像中で葉脈が際立って認識できるのは、他の部位よりも 2 倍程度厚みがあり、水分の違いだけでなく、厚みの違いを反映しているためである。しかし、厚みが均一な部分に着目すると、水分分布が変化している様子がはっきりと確認できた。なお、本実験から植物内の水の吸収係数を見積もったところ、純水よりも小さな値を取ることが分かった。このことは溶けている物質や内部の圧力による影響であることが考えられる。この結果、THz 波を用いた水の情報から植物内部の状態を読み取れる可能性が示唆された。

4. THz 波によるトマトの非接触品質評価に関する検討

4.1 透過特性および品質評価実験方法

本実験では THz 波を用いてトマトの内部品質評価を試みた。まず、品種の異なる 2 種類のトマトの皮についてフーリエ変換式赤外分光光度計にて透過測定を行った。供試材料として一般に市販されている丸トマトおよびミニトマトを測定し、透過特性の比較を行った。

丸トマトの方がミニトマトよりも透過率が高い結果となったが、これはミニトマトの方が約 2 倍皮が厚いためであった。丸トマトおよびミニトマトの皮は 1 THz (33 cm^{-1}) にて約 50%, 30%

透過することが確認できた。以上の結果より、1 THz の電磁波をトマトに照射した際の反射光には、外皮の内側の水分情報を含んでいると考えられることが示唆された。

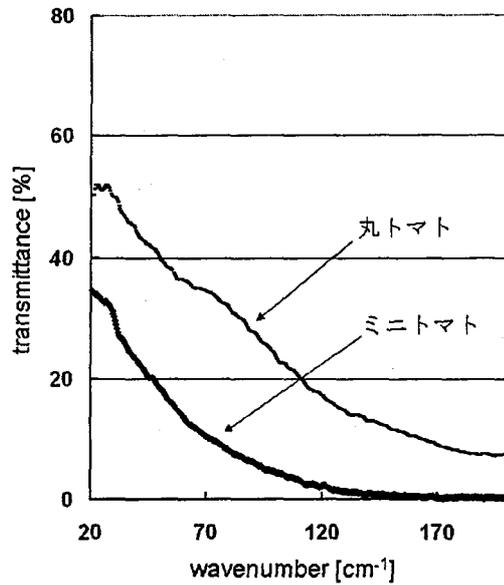


図 4-1 トマトの皮の透過特性

この結果をふまえ、THz 波光源として後進波管 (BWO: backward-wave oscillator) を用いた反射実験系を構築し、①内部障害を有するトマトの押し傷部と健全部の反射強度比較、②質量 (含水量) 変化と反射率変化の比較を行った。図 4-2 に本実験系を示す。なお、本実験では光源の電磁周波数を約 1 THz として実験を行った。

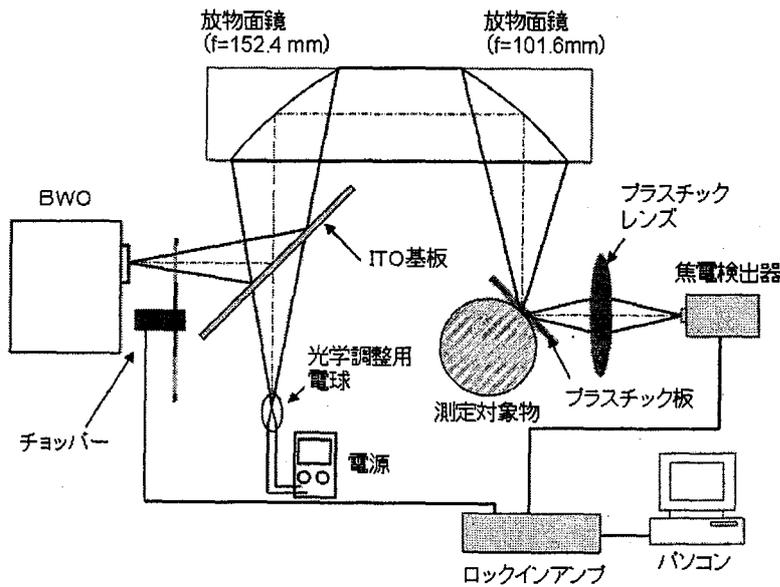


図 4-2 BWO による反射実験系

4.2 実験結果

【① トマトの内部障害部と健全部の反射強度比較】

本実験では、小売店で販売されていた内部障害を持つトマトをサンプルとして実験を行った。図4-3にその写真を示す。このサンプルは一目では判別が困難であるが、触ると明らかに軟らかい部位があり、注意深く見ると外皮の内側に障害を持っている様子が確認された（破線で囲んだ部分）。

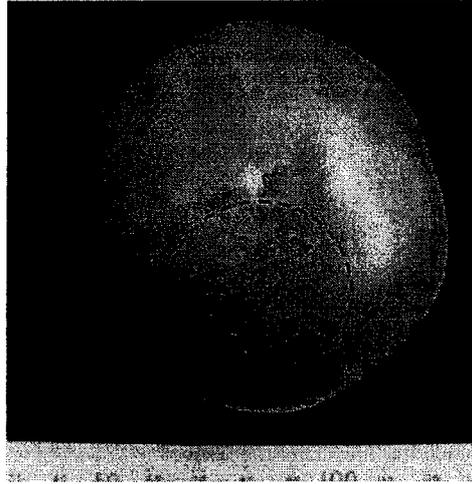


図4-3 内部障害を持つトマト

障害のある部位と健全な部位との反射強度比較を行った結果、障害部位の反射率は約13%、健全部位は約10%であった。この結果はシステムの揺らぎを考慮しても十分に有意な差であった。この結果より健全なトマト内部の屈折率は約3.2と見積もることができた。この値は純水の屈折率2よりも1.6倍大きな値であり、今後この値からトマト内部の糖度や病気の状態などの情報が得られると期待される。

【② 質量（含水量）変化と反射率変化の比較】

図4-4にトマト購入後室温に放置したトマトの反射率の変化を示した結果を記す。各サンプル①、②、③において、1日目、4日目、6日目とも同じ部位の反射率を測定した。（各サンプル番号の添え字は計測部位を示す）特にサンプル②-1、サンプル③-1、サンプル③-3の3つ（赤丸）は測定開始時から既に軟化が進んでいる部位であった。軟化が進んでいる部位は、健全部位と比較して反射率が高くなる傾向が見られた。

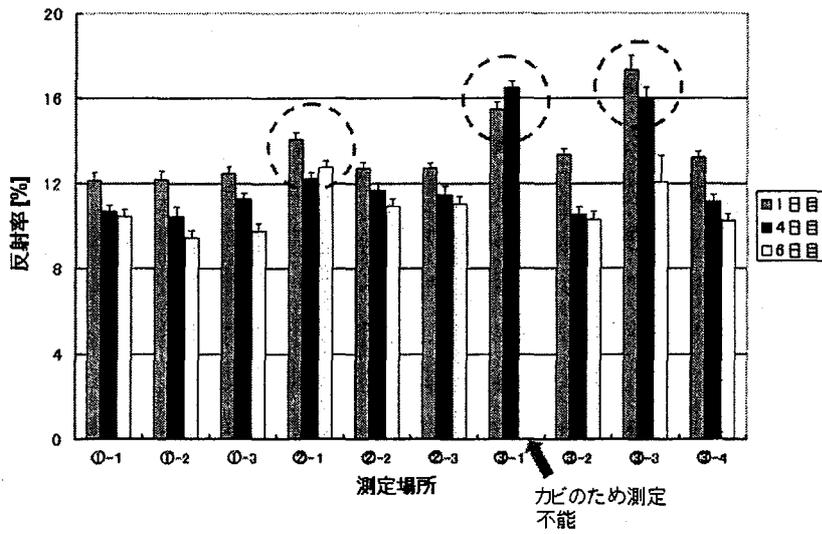


図 4-4 反射率変化

測定場所③-1は、6日目に表面からカビが発生しており、測定が困難な状態となった。また、健全な部位では日数が経つにつれて反射率が低下する傾向が確認された。このことは、対象サンプルの質量変化と反射率の関係を検査した結果、顕著に見られた。図 4-5 に一例としてサンプル番号①の質量変化と反射率変化の関係を示す。

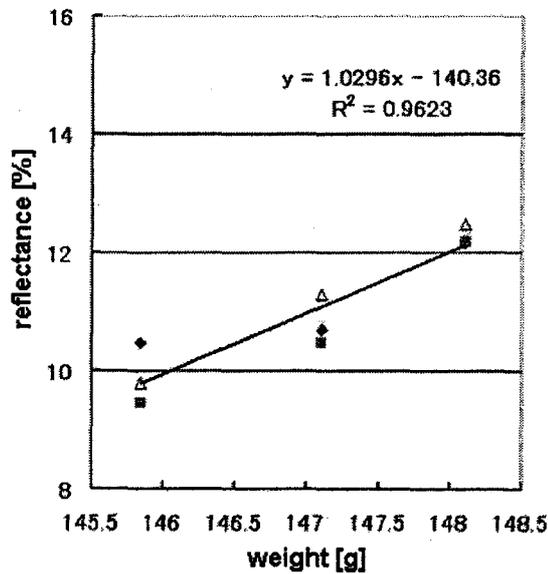


図 4-5 質量と反射率の関係 (同一サンプルの4箇所にてサンプリング)

以上の結果、水分が減少すると反射率が減少する傾向が確認された。このことから反射率変化から鮮度や品質に関する情報を得ることができることが示唆された。

5. まとめ

本研究では、X線やTHz波を利用した農産物品質評価の可能性を検討した。その結果、X線では蛍光板とCCDカメラを組み合わせることで、簡便かつ迅速に核割れや芯腐れの判別が可能であることが示された。CT画像からはより詳細に構造欠陥が判別可能であることが示唆されたが、モモの水浸果の果肉の障害については判別できないことが明らかとなった。一方、ナシの食感を左右する果肉の水分ムラやリンゴのみつ症についてはCT画像から判別が容易で、新たな付加価値を生み出すことが示された。現在ほぼリアルタイムで断層像を得ることができるCTスキャナが開発されつつあり、今後農業分野への利用が期待できる。さらにTHz波を用いたトマトの内部品質評価を試み、表層水分の違いに依存する鮮度や外皮下の病気を判別できる可能性を示すことができた。

以上、本研究の成果により、X線やTHz波を用いることで従来の可視画像や近赤外分光法では判別できない内部障害や鮮度といった新たな価値や品質に関する情報を付加できる可能性が示唆された。特にTHz波については、まったく新しい電磁周波数帯の農業利用に関する世界的にも数少ない基礎研究であり、今後さらなる研究が必要であるが、様々な農業分野で活躍できる技術になると考えられる。また、生物の表層のみに特化できるTHz波の利用方法は従来無かったまったく新しい手法であり、農産物表層の水分状態といった新しい品質評価の指標になりうると期待された。

論文審査結果要旨

近年、農産物および食品の安全性や品質についての信頼性が揺らぐ問題が発生し、消費者からは安全性や品質の証明を求める動きが活発化している。そのため農産物の品質評価を通じて様々な情報を農産物に付加する技術は重要性を増している。また、生産者の立場からも、自らの生産物が良質農産物であることの判定と評価方法の確立は、急務な課題となっており、従来技術では判別が困難な内部障害の判別や鮮度評価に対しての要望が高まっている。そこで本研究では、未だ農産物の品質評価として実用化されていない X 線およびテラヘルツ電磁波（以後 THz 波と記す）を利用した、新しい農産物の品質評価法の技術開発を目指した。

本研究では、国内生産量の上位を占めており内部障害判別への要望の高いモモ、ナシ、リンゴに着目し、X 線による内部の可視画像から障害果の判別を試みた。その結果、X 線では蛍光板と CCD カメラを組み合わせることで、簡便かつ迅速に核割れや芯腐れの判別が可能であることが示された。CT 画像からはより詳細に構造欠陥が判別可能であることが示唆されたが、モモの水浸果の果肉の障害については判別できないことが明らかとなった。一方、ナシの食感を左右する果肉の水分ムラやリンゴのみつ症については CT 画像から判別が容易で、新たな付加価値を生み出すことが示され、今後農業分野への利用が期待された。

さらに THz 波による透過型水分モニタリングシステムを構築し、非破壊かつ非侵襲による植物内の水分計測を試みた。その結果、シソの葉の葉柄を切断したときの透過率変化をモニタリングし、水分の蒸散と共に透過率が上昇する様子を確認することに成功した。THz 波イメージングシステムにより水分分布の挙動を既存技術では煩雑で困難とされていた可視化に成功したと共に、500 μm という適度な空間分解能を有する本手法が植物生理学的新たな知見を得ることができる新しい手法としての可能性を示すことができた。

次に、THz 波を用いてトマトの品質評価を試みた。このとき、BWO を THz 波光源とした反射光学系を構築し、鮮度変化や内部障害と THz 波の反射率との関係を明らかにした。その結果、皮の屈折率と同等のサンプル位置決め用のプラスチック板を使用することにより、外皮からの反射強度の影響を受けることなく、内部からの反射を計測できる本方式が、農産物の反射測定に際して有効であった。軟化が進んだ部位は健全部よりも反射率が高くなる傾向が見られ、サンプルを回転させながら表面の反射率をモニタリングすることで、非接触で硬度異常を判別できることが明らかとなった。

このように、本研究においては THz 波の農学的応用に優れた成果が得られたため、審査員一同は博士（農学）の学位を授与するに値するものと判断した。