

ミリ波を用いた農産物の水分計測に関する基礎研究

Water content measurement in agricultural products by millimeter wave

Key words: water content, millimeter wave, free-space measurement

生物センシング工学分野 多田 佳也乃

1. 背景

水は植物細胞内の約 90%を占め、植物内の水分量の変化は植物の成長において光合成や栄養素の循環において重要である。農業分野においても、水ストレスを指標とした栽培管理が行われることがあり、ここでは精密な水分測定法が求められる。鮮度管理についても水分損失は、つやや萎れの原因となり経済的損失に繋がる¹⁾。このように植物体内における水分量の変化は重要な意味を持ち、そのため様々な水分量測定方法が提案されてきた。植物の水分量測定法として乾燥重量法や核磁気共鳴分光法、電気インピーダンス法が挙げられるが、破壊を伴う、接触を伴うといった問題点がある。そこで非破壊かつ非接触な計測が可能である近赤外分光法が提案されている。しかし近赤外領域は水の吸収ピーク付近に水以外の脂質やタンパク質といった生体高分子による吸収が存在すること、表面の凹凸による散乱の影響を受けやすいため複雑な解析が必要である。

ここでミリ波とは周波数 30 GHz から 300 GHz で定義される電磁波である。ミリ波は葉の構成成分である生体高分子への吸収が少なく高い透過性を持つ一方で、水に対しては大きな吸収を有し、少量の水の変化に対し敏感である特徴をもつ。また波長は 1 mm から 10 mm であり、農作物表面の凹凸による散乱の影響が少ないことに加え、高い透過性を有することから、細胞や小器官による吸収や散乱の影響を受けることなく農産物内部に届き、近赤外領域では得られないより深部の情報を得られる可能性がある。

本研究では、ミリ波を用いた水分計測の基礎研究として、35 GHz のミリ波を用いた透過測定系を構築して性能を評価するとともに、大葉をサンプルとして葉の水分量変化に応じた透過特性変化の計測を行った。

2. 実験系の構築

まずミリ波を用いた水分量測定用の系を構築した。発振器としてガンダイオード (TERA BEAMS 社製) を、検出器としてパワーセンサ、パワーメータ (Anritsu 社製) を用いた。本研究では周波数が 35 GHz の単一波長を用いた。図 1 に構築した透過測定系の略図を示す。発振器と検出器間に 2 枚のレンズを置き集光系の実験系とした。1 枚目のレンズで電磁波をほぼ平行状態にし、2 枚目のレンズに

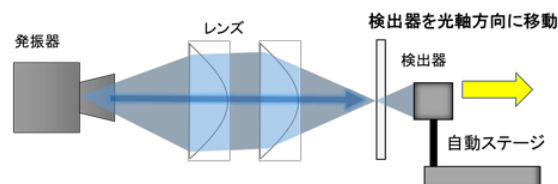


図 1 構築した実験系の略図

より電磁波がサンプルの表面に集光されるように調整した。検出器を光軸方向に動かすことにより透過波の信号強度と位相を同時に測定できるようにした。

3. 各実験方法と結果

3.1 ポリエチレンを用いた位相変化特性の評価

構築した実験系を用い、サンプルの厚み変化による光路長変化に応じて位相変化が生じることを確認するため、0.5~5 mm のポリエチレン (屈折率 $n=1.52$) 製の板を用いて透過測定を行った。リファレンスを空気とし、サンプルとリファレンスの強度波形から位相差を得た。図 2 にポリエチレンの厚みと位相変化の関係を示す。厚みの増加に伴い位相変化量も増加していくことが確認できた。

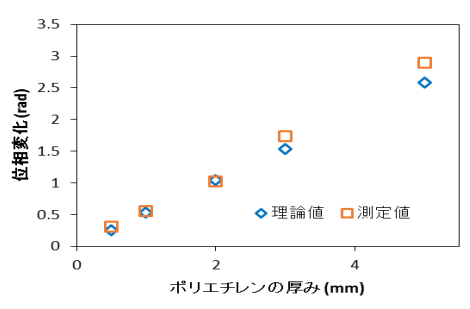


図 2 ポリエチレンの厚み変化に伴う位相変化

3.2 エタノールを用いた吸収係数測定

次に、電磁波の媒質への吸収が測定可能であることを確認するため、無水エタノールの吸収係数を算出し、理論値 (吸収係数 4.48 cm^{-1}) との比較を行った。吸収係数 α はランベルト・ベールの法則に従い以下の式により算出した。

$$\alpha = \log(I/I_0)/(-d) \quad (1)$$

この時 I : サンプルの信号強度, I_0 : リファレンスの信号強度, d : サンプルの厚みとした。

液体用セルにエタノールを充填したものをサンプルとし、リファレンスとして空の液体用セルを用いた。液体用セルの厚みは 2.32 ± 0.07 mm であった。この時液体用セルサンプルとリファレンスの信号強度の差より算出した吸収係数は 4.88 cm^{-1} となった。また、エタノールと空気の屈折率差により生じる表面反射による反射損失を考慮し算出した吸収係数は 4.44 cm^{-1} と理論値に近い値となり、媒質による電磁波の吸収が測定できていると考えられた。

3.3 水分量変化における大葉の透過特性変化

農産物のモデルサンプルとして購入した大葉を用い、乾燥に伴う含水率変化によるミリ波の透過特性変化を測定した。この実験では葉を固定する基板として、ミリ波帯で吸収が小さいポリスチレン板を用いて測定を行ったため、リファレンスにはポリスチレン板のみを用いた。水分量変化を計測するために大葉を3時間自然乾燥させ、30分毎に信号強度と位相を測定した。葉の厚みと含水率は、測定開始時と測定後に計測し、乾燥時間に伴って葉の厚みと含水率が線形的に減少すると仮定して各測定時の厚みと含水率を見積もった。図3に乾燥時間と吸光度の関係を示す。図3より乾燥時間に伴い、吸光度が単調に低下していく様子が確認され、透過測定で水分量変化が観測できる可能性が示唆された。また測定間で乾燥に伴う含水率変化は平均して7.5%であった。この変化を詳細に解析するために、測定した厚さから吸収係数を算出し、含水率との関係を調べた。この時、反射によるロスは無いものとした。図4に含

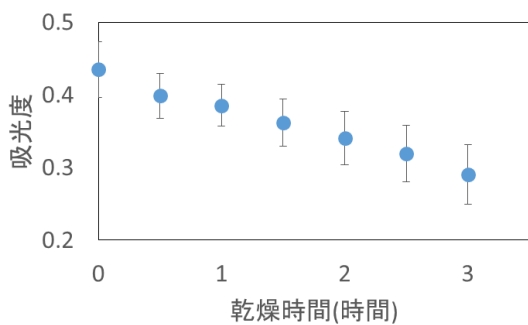


図3 乾燥時間と吸光度の関係

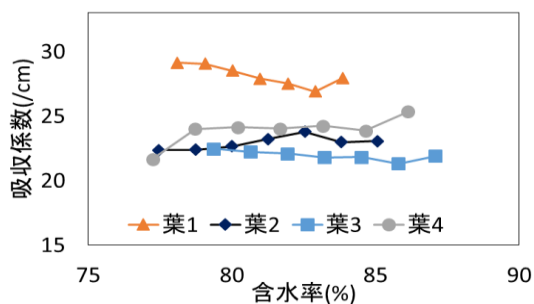


図4 含水率と吸収係数の関係

水率変化と吸収係数の関係を示す。ここで一般に、吸光度が減少する原因は、被測定物の吸収係数の減少による影響と、厚みが減少して位相が変化する影響が結果に示すとおり、含水率低下による吸収係数への影響確認されなかった小さかった。このことにより、本測定では、吸光度から時間大葉の厚み変化を計測することができた。

次に図5に含水率と位相変化の関係を示す。結果より含水率が低くなるにつれ、位相が単調に早くなる様子が確認された。これより含水率の低下と共に光路長が減少していると考えられた。この光路長が減少する原因は葉の厚みの減少によると考えられる。また水分量変化に対して、厚み変化と位相変化が同様の傾向を示すことが確認された。これは乾燥中に葉の厚みが変化することを位相差として計測できていることを示唆しており、水分量の変化と厚み変化の関係が明らかになることで、位相変化から水分量を推定できることが示された。

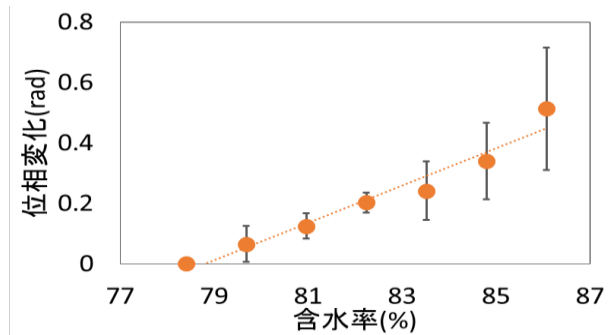


図5 位相変化と含水率の関係

4. まとめ

ミリ波と農作物の水分量変化に対する透過特性を明らかにすることを目的としミリ波の透過測定実験を行った。透過測定用の実験系を構築し、ポリエチレンと無水エタノールを用い、位相変化と吸収の情報が得られることを確認した。大葉を用いた実験では乾燥時間に伴う吸光度の低下が見られたが、吸収係数の変化は見られなかった。しかし含水率の低下により位相差が生じることが明らかになった。この結果は対象物の厚み変化から、ミリ波が水分量計測できることを示唆していると考えられる。

参考文献

- 1) 樽谷隆介：そ菜の貯蔵，日本食品工業学会誌，5，10，186-202，1963