ミリ波の吸収特性を利用した含水量および凍結状態のモニタリング

正員 水野 麻弥* 非会員 進藤 賢治*, **
 正員 小川 雄一*, *** 非会員 大谷 知行*
 正員 川瀬 晃道*, ***

Monitoring of Water Content And Frozen State by using Millimeter Wave Absorption Features.

Maya Mizuno*, Member, Kenji Shindo*, **, Non-member, Yuichi Ogawa***, *, Member,
 Chiko Otani*, Non-member, Kodo Kawase*, ***, Member

In this research, we built an experimental setup for measuring the water content in plants and food, and for determining the water/ice state of a sample. The setup consists of a 35 GHz Gunn oscillator producing about 10 mW of output power, two horn antennas and a power meter. We have checked that the absorption of a leaf is directly proportional to its water content, and we could show how changes of the water content depend on photosynthesis, by intermittent illumination with a white fluorescent lamp. In another direction of research, we verified that the difference in the absorption coefficients for water and ice is significant, and we could discriminate and monitor the frozen state of water and food material. All these experiments demonstrate the possibility of applying millimeter waves to fields such as botany, agriculture, and food industry.

キーワード：ミリ波，吸収，含水量，凍結状態，モニタリング

Keywords : Millimeter wave, absorption, water contents, frozen state, monitoring

1. まえがき

マイクロ波をはじめとする電波領域の電磁波は非金属材料に対して高い透過性を有するため、様々なセンシングへの応用⁽¹⁾⁻⁽³⁾が検討されている。中でもミリ波（周波数 30-300 GHz）は波長が短く、電波としては高い空間分解能が得られるため、小さな領域の情報を非破壊で計測する目的に適している。また、ミリ波コンポーネントは小型で取り扱い易いため、近年、車の衝突防止用レーダーや構内無線 LAN への実用化が進んでいる。我々は、これらの需要増

加に伴うコンポーネントの低価格化、小型化、ユーザーフレンドリー化を機に、農業、工業など様々な分野への応用の可能性を模索している。具体的には、水や氷の吸収特性⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾を利用した、植物工場や圃場における農作物の水分モニタリングや食品、繊維の水分含有量検査、冷凍食品の凍結解凍サイクル最適化などを目指したミリ波の応用研究を進めている。

現在、植物内の水分を非破壊かつ非接触で簡便に測定することは困難である。市場の高品質化への要望を満たすために一部の農家では厳密な水分管理を必要としているが、この現況では、農家の勘や経験に依存した場面が多く、定量的かつ簡便な水分モニタリング装置の開発が望まれている。一方、食品加工現場でも、非接触で微量の水分を測定する技術へのニーズがある。ゴマ油の生産工程におけるゴマの水分を全数検査したいという要望も、その 1 つである。また、冷凍食品や凍結保存サンプルの凍結解凍サイクルの最適化が可能となることは、食品業界のみならず、医療など幅広い分野において期待されている。ミリ波は、水と氷の吸収特性を利用することで、このような様々な要望に応

* 独立行政法人理化学研究所
 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1
 RIKEN

** 東京理科大学
 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3
 Tokyo University of Science
 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601

*** 東北大学
 〒981-8555 仙台市青葉区堤通雨宮町 1-1
 Tohoku University
 1-1 Tsutsumidori-Amamiyamachi, Aoba-ku, Sendai
 981-8555

じることができると考えられる。

そこで本研究では、「電波の窓（波長 1 mm から 30 m 付近）」と呼ばれ、大気中での減衰が比較的少ない周波数である 35 GHz を用いて、透過および反射測定により各種応用へ向け検討を行った。

2. ミリ波透過量測定装置

ガン発振器 (TERABEAM HGN35.021022, パワー: 10 mW, 35 GHz) を光源として使用した。矩形ホーンアンテナを用いてミリ波を空間伝搬させサンプルに入射し、透過量を同型のホーンアンテナおよびパワーメーター (ANRITSU ML2438A) により検出した。送信側と受信側のホーンアンテナの間隔は波長以下 (約 8 mm) とし、外部へのロスを少なくした。図 1 に本装置の概略図を示す。

3. 実験方法および結果

〈3・1〉 植物の葉の水分モニタリング 本実験ではまず、葉柄から切り取った葉が乾燥する過程を質量とミリ波

図 1 ミリ波透過量測定装置

Fig. 1. Schematic of the setup for measuring the sample transmission. T: transmitter, R: receiver.

図 2 ミリ波透過量の変化と葉の水分含有量変化の関係

Fig. 2. The relationship between the transmittance variation and the water content variation.

透過量により観測した。このときの質量変化は葉の蒸散による葉内部の含水量変化とみなすことが出来る。その結果、図 2 に示すように、植物の葉の含水量とミリ波透過量の変化に相関があることが確認された。図中の直線は純水を乾燥させた場合の理論値を示している。

次に、この関係を利用して、環境の変化による植物内の水分変化を非接触かつリアルタイムで測定することを試みた。ここでは、間欠光を用いて植物の光合成を促し、気孔の開閉による葉の水分変化を観測した。供試材料は 1 ヶ月にわたって 22 °C から 25 °C の室内で生育した鉢植えのポトス (学名: *Epipremnum aureum*) である。測定開始前に十分に給水させ、測定期間中は水を与えず乾燥ストレスを受けている状態とした。光環境は、葉の光の吸収帯 (400 ~ 700 nm) をカバーする 27 W の蛍光灯 (National FPL27EX-N) を周期 3 時間, duty 比 0.4 という条件でパルス制御することにより変化させた。測定葉面上の照度は約 3,500 lx である。

図 3 植物の葉の光合成による水分変化

Fig. 3. The variation of the water content depends on the photosynthesis process.

図 4 葉の透過量の長期測定

Fig. 4. Long-term transmittance recording of a leaf.

図 3 は間欠光照射時のミリ波透過量を測定した結果である。斜線部は蛍光灯が点灯していた時間帯を示す。葉が光を感知してから約 10 分後に透過量が増大することが確認された。また、蛍光灯を消灯するとその瞬間から、立ち上がりの変化に比べ時定数の大きい透過量の減少が確認された。消灯している間に透過量は 0.13 dB 減少し、点灯されると約 10 分後に再び透過量が増加するという繰り返し応答であった。測定中、葉は時間経過と共に乾燥し、全体として透過量が上昇する様子が見られた。

図 3 と同様の測定を長時間に亘って行った結果を図 4 に示す。ミリ波透過量は増減を繰り返しながら、時間の経過と共に増大した。測定開始から 20 時間が経過するとその傾きは増し、40 時間を過ぎると値が収束するような傾向が見られた。葉の水分が減少したとき、明暗による透過量の増減の幅が小さくなる様子も確認できた。93 時間を過ぎたところで給水を行うと、ミリ波透過量は減少し、再び透過量の増減の幅が拡大した。

一般に植物は、光を感知してから数十分後に気孔を開き、二酸化酸素を取り込んで光合成を始める。気孔が開くと葉の内部の水分が蒸散されるため、ミリ波透過量が増加すると思われる。図 3 および図 4 の測定結果はまさにこの一連の様子を非破壊かつリアルタイムで測定できたことを意味しており、植物の水分状態だけでなく気孔の開閉速度など生命活動も含めた様子をモニターするツールとしてミリ波計測が有効であることを示している。

〈3・2〉 ゴマの水分含有率測定 いりゴマ（白ゴマ）の水分変化をミリ波の透過量によって観測した。本実験では、水分 0 % と仮定したゴマに数十 wt% の水を加え、自然乾燥していく様子を透過量や反射量（後方散乱）によって観測した。

透過量測定では、図 1 のホーンアンテナを縦に設置し、PET 製（厚さ 1 mm）のケース上に隙間なく一層に並べたゴマの透過量を計測した。水分量の変化は、同時に測定し

ているゴマの質量変化から得た。水分含有率による透過量の変化を図 5 に示す。乾燥と共に透過量が増加する様子が確認された。水を加える前のゴマのミリ波吸収量は、サンプルへ入射されるパワーの揺らぎ (± 0.05 mW) 以下であり、水以外の物質による吸収の影響は殆どないと考えられる。このことから、ミリ波の透過量によってゴマの水分量の変化をモニタリングすることが可能であるとわかった。本実験系では、ゴマの水分含有量の変化による透過量の変化率は約 0.12 mW/wt% であった。

一方、ゴマがベルトコンベアなどで搬送されている現場を考えると、実用上、反射測定が望ましいと考えられる。そこで本実験ではさらに反射量測定装置を構築し、ゴマからの反射量の測定を試みた。反射量測定装置の構成を図 6 に示す。サーキュレーターを用いることでゴマからの反射成分を送信用と同一のホーンアンテナから受信し、パワーメーターで反射量を測定した。ゴマからの反射成分のみを効率よく検出するため、ゴマは電磁波吸収体 (ECCOSORB AN-73) の上に配置した。また、透過量測定と同様に、ロスを減らすためゴマとホーンアンテナの間隔は波長以下 (約 8 mm) とした。

図 6 反射測定構成

Fig. 6. Configuration of the reflection measurement setup.

図 5 ゴマの水分含有率による透過量変化

Fig. 5. The transmittance through sesame seeds depends on their water content.

図 7 ゴマの含水量と後方散乱強度の関係

Fig. 7. Relationship between the water content of sesame seeds and the back-scattering intensity.

水分含有量による反射量の変化を図 7 に示す。乾燥と共に反射量が減少する様子が確認された。反射強度は透過とは逆に、水分含有量の減少に伴い小さくなることがわかった。これは、ゴマ内部において大きな反射係数をもつ水の量が減少し、その結果ゴマ全体の反射係数が小さくなったためと考えられる。透過量に比べ反射量の変化は数 μ W と小さく測定分解能は低い、水分含有量による反射量の変化を観測することができた。

以上の結果から、ミリ波の透過または反射測定法を用いることでゴマの水分含有量を見積もることが可能であることがわかった。この方法は、ゴマ油の製造過程における数%と言われるゴマの水分量検査等においても使用できると考えられる。さらにミリ波は、マイクロ波に比べ水に対して感度がよく、また、回折や回りこみによる影響を受けにくいことから、精度よい検出が可能になることが考えられる。

〈3・3〉 水と氷の相転移モニタリング 液体サンプルが液体から固体へ転移する時のミリ波透過量の変化を温度と共に観測した。実験装置は、図 1 のホーンアンテナ部分を冷凍庫内に設置したものを使用した。液体サンプルはポリスチレンシート (100 μ m) 製のケースに入れ、凍結における体積膨張を防ぐため両側から PET 樹脂 (1 mm) で挟み込み、サンプル厚を 2 mm とした。本ケース内の水は、端から中心に向かって凍結するため、凍結過程における水や氷の温度は測定部の端と中央で約 3 $^{\circ}$ C の差がある。そこで本実験ではサンプル温度として、測定領域 (矩形 5.5 $\times$ 4.5 cm) の平均温度に近い値を取得するため、中心から約 1.2 cm 離れた位置の温度を熱伝対により測定した。予め本実験で使用する水の抵抗率を測定したところ、約 2 $M\Omega\cdot$ cm であった。

冷凍庫内にサンプルをセットし、冷凍庫内の温度を 20 $^{\circ}$ C から -17 $^{\circ}$ C まで下げ、水から氷になる凍結の様子を透過測定系にてモニタリングした。-17 $^{\circ}$ C まで冷却後、冷凍庫を開放し、氷の状態から水に相転移する様子も引続きモニタリングした。その測定結果を図 8 に示す。図より、液相から過冷却を経て固相へ至る相転移の様子がミリ波の吸収量の変化によって観測できることが明らかとなった。この結果を用いることで、ミリ波の吸収量からサンプルの凍結状態を推定することが可能であると考えられる。液相では温度に依存して吸収量は緩やかに変化し、融点で相転移により急激に値が変化した。固相では 0 $^{\circ}$ C から -13 $^{\circ}$ C 付近まで氷結晶の生成に関わる緩やかな変化を見せ、その後、一定となることがわかった。これらの結果から、ミリ波の吸収量は水分子の自由度に依存していると考えられる。解凍過程においても相転移の様子を観測することができた。解凍過程の場合、融点以下では殆ど吸収量は変化せず、0 $^{\circ}$ C になり結晶が融け始めると急激に増加した。0 $^{\circ}$ C 以上では、ケース表面の結露の影響により正確な測定は行えなかった。

本研究では、この実験結果を食品の凍結解凍の最適化に利用することを目指している。周知の通り、食品は数多くの物質で構成されており、これらを考慮する必要があると

考えられる。そこで今回、食品分野へ応用する前段階として、水に NaCl や食塩 (マグネシウムやカルシウム等を含む) をそれぞれ加えたサンプルを用いて、凍結過程における吸収量の変化を観測した (図 9)。NaCl 水溶液、食塩水の濃度は共に 0.8% である。図中の破線は水の融点 (0 $^{\circ}$ C) を示しており、NaCl 水溶液と食塩水の転移温度が水に比べ低くなっていることが確認できた。また、NaCl 水溶液と食塩水の転移開始温度はほぼ等しいが、その後の透過量の傾きが異なることがわかった。これは、水に含まれる Na, Cl イオン以外の物質 (マグネシウムやカルシウム) 量の違いによるものと考えられる。多数の物質を含む食品の測定を行った場合、物質の種類、割合などによって、この透過量の傾きが異なると予想される。

以上の実験から、各種液体サンプルの過冷却を含む相転移の様子をミリ波透過量によって観測することが可能であることがわかった。サンプルが異なると凍結過程におけるミリ波透過量の変化に違いが生ずるが、各サンプルの特性をデータベース化することで凍結状態を非接触で判断す

図 8 ミリ波を用いてモニタリングした水と氷の相転移
Fig. 8. The water-ice phase transition monitored with millimeter waves.

図 9 NaCl 水溶液と食塩水の相転移のモニタリング
Fig. 9. Monitoring of the phase transition in water solutions of NaCl and cooking salt.

ることができるようになって考えられる。これは、ミリ波によるモニタリングを用いることで、冷凍食品などの凍結速度の最適化や冷凍保存中の品質管理が可能になることを示している。

4. むすび

本研究では、ミリ波水分モニタリングシステムの構築を行い、システムの検証をおこなった。また、ミリ波による植物や食品中の水分量検知、水・氷の判別技術を提案し、その応用への可能性を実験により検討した。その結果、ミリ波透過量の変化を計測することにより、検量線を用いて、葉や食品中の水分変化量を見積もることが可能、植物の生命活動における水分量の変化を非破壊・リアルタイムで計測することが可能、水・氷の相転移や状態をリアルタイムで測定することが可能であるということがわかった。今後は、これらのミリ波応用の実用化に向けて、測定装置の改良や定量性について検討を行う予定である。

(平成 16 年 8 月 30 日受付, 平成 16 年 11 月 17 日再受付)

文 献

- (1) R. M. Narayanan, C. C. Borel, and R. E. McIntosh: "Radar Backscatter Characteristics of Trees at 215GHz", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.26, pp.217-228 (1988)
- (2) R. M. Narayanan and R. E. McIntosh: "Millimeter-Wave Backscatter Characteristics of Multilayered Snow Surfaces", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol.38, pp.693-703 (1990)
- (3) S. Hadjiloucas, L.S. Karatzas, and J.W. Bowen: "Measurements of leaf water content using terahertz radiation", *IEEE Trans on Microwave Theory & Techniques*, Vol.47, pp.142-149 (1999)
- (4) C. Zhang et al.: "Optical constants of ice Ih crystal at terahertz frequencies", *Appl. Phys. Lett.* Vol.79, pp.491-493 (2001)
- (5) S. G. Warren: "Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave", *Appl. Opt.* Vol.23, pp.1206-1225 (1984)
- (6) Marvin R. Querry et al.: "Water (H₂O)", *Handbook of optical constants of solids II*, 1059-1077 (1991)

水 野 麻 弥

(正員) 1976 年生。2001 年 3 月東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年 4 月東北電力(株)入社。2002 年 2 月理化学研究所川瀬独立主幹研究ユニット研究員。2004 年 4 月東北大学大学院工学研究科博士後期課程。

進 藤 賢 治

(非正員) 1981 年生。2004 年 3 月東京理科大学工学部電気工学科卒。同年 4 月同大学院工学研究科電気工学専攻。

小 川 雄 一

(正員) 1971 年生。1997 年 3 月岡山大学大学院自然科学研究科修士課程修了。同年 4 月ヤママー農機入社。2001 年 7 月理化学研究所工学基盤研究部研究協力員。2003 年 7 月理化学研究所川瀬独立主幹研究ユニットユニット研究員。2004 年 4 月東北大学大学院農学研究科助手。現在、テラヘルツ波の農業応用に関する研究に従事。

大 谷 知 行

(非会員) 1965 年生。1995 年 3 月東京大学大学院理学系研究科博士課程修了(理学博士)。同年 4 月理化学研究所宇宙放射線研究室基礎科学特別研究員。1998 年 4 月理化学研究所研究基盤ツール開発推進グループ研究協力員。2001 年 11 月より理化学研究所川瀬独立主幹研究ユニットユニット研究員。

川 瀬 晃 道

(正員) 1966 年生。1996 年 3 月東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了(工学博士)。同年 4 月東北大学電気通信研究所 COE 研究員。1997 年 4 月東北学院大学工学部応用物理学科助手, 98 年 4 月講師。1999 年 4 月理化学研究所フォトダイナミクスセンターフロンティア研究員。2001 年 10 月より理化学研究所独立主幹研究員。同年 10 月より東北大学大学院理学研究科客員助教授。2004 年 4 月より東北大学大学院農学部客員教授。現在テラヘルツイメージングの研究に従事。1997 年応用物理学会講演奨励賞, 1998 年レーザー学会優秀論文発表賞, 2000 年レーザー学会業績賞・論文賞, 2002 年丸文研究奨励賞, 各受賞。