

マイクロ波を用いた米の水分量測定*

泉田 福典**、大坊 真洋**、川又 憲***

マイクロ波を利用した非破壊検査システムの開発を行っている。今回、タイムドメイン計測法により米の水分量とマイクロ波の吸収量との関係を調べた結果、高い相関関係を得ることができた。また、低い周波数を用いることで、より良い再現性が得られることが分かった。これらの結果から、マイクロ波を用いることで米などの水分量を非接触で測定できる可能性が示唆された。

キーワード：マイクロ波、水分量、タイムドメイン計測

Water Content Measurement of Rice Using Microwave

IZUMIDA Fukunori**, DAIBO Masahiro** and KAWAMATA Ken***

We are developing the non-destructive measuring system with microwave. We investigated the relation between water content and absorption amount of microwave of rice by time-domain method and found high correlation between them. In addition to that, we found that a better measurement reproducibility is obtained using a lower frequency. These results suggest to possibility to measure the water content without contact by using microwave.

key words : microwave, water content, time-domain measurement

1 緒 言

米など穀物の水分量は、試料を粉碎・加熱し水分の蒸発減量から算出する方法が一般に使われている。また、より簡便な方法としてすり潰した試料の電気抵抗や誘電率を測定する方法も実用化されている¹⁾。しかしこれらの方法では水分量の測定結果を得るまでに時間がかかることや測定精度にばらつきがあることなどから、短時間に精度良く測定する方法が求められている。また、木材やコンクリートなどでは水分量が加工精度や強度などを大きく左右するため、適当な水分量になるように乾燥等により水分調整を行っている。これらの水分調整では、対象物の水分をリアルタイムで測定することが困難であるため、あらかじめ適当な乾燥スケジュールを定めて水分量を調整したり、別途水分測定用サンプルを用意して水分量を推定する方法などが用いられる^{2,3)}。

一方、近年の電子デバイスや電子計測技術の発達により、高価であったマイクロ波帯域の測定機器が、比較的安価で高性能なものを入手できるようになってきた。これにより、マイクロ波帯域を利用した計測技術が様々な分野で応用できる可能性が高くなってきている。

そこで本研究では、マイクロ波による誘電率測定システム⁴⁾を用いて岩手県の主要農産物である米の水分量の測定をリアルタイムに行う方法について検討を行った。

2 実験方法

2 - 1 システム構成

図1にシステムの構成を示す。主に2台のダブルリジッド・ホーンアンテナ(EMCO 3115)とベクトルネットワークアナライザ(HP 8720D)、および制御用パソコンから構成されている。ホーンアンテナはそれぞれ同軸ケーブルでネットワークアナライザに接続されている。ネットワークアナライザはGP-IBによりパソコンで制御することが可能である。

2台のホーンアンテナを被測定試料上部約60cmの位置に設置し、一方のホーンアンテナからマイクロ波を照射して他方のホーンアンテナで試料からの反射波を受信する。ネットワークアナライザは1GHz~20GHzの周波数範囲で掃引させてマイクロ波を発生させることが可能である。ホーンアンテナで受信された反射波は、ネットワークアナライザによって処理され、測定結果はパソコンに転送される。

外界からの雑音や周囲からの反射波の影響を極力少なくするため、アンテナおよび測定試料はカーボン含浸ウレタン電波吸収体で覆われた電波無響箱の中に設置されている。また、ネットワークアナライザのタイムドメイン機能を利用することで、測定試料以外からの反射を区別することができる^{5,6)}。

* アクティブセンシングによる非破壊検査システムの開発(第2報)

** 電子機械部

*** 八戸工業大学電気電子工学科

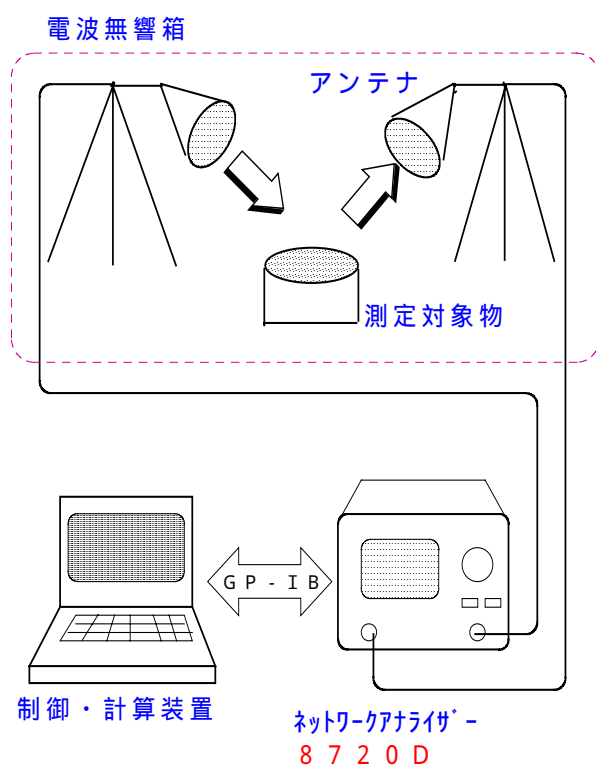


図1 システムの構成

2-2 測定原理

底にステンレス板を貼った直径 300mm、深さ 50mm のアクリル製容器に試料を入れ、高さ 500mm の発泡スチロール製の台に設置して、試料上部からマイクロ波を照射する。発泡スチロール製の台にはガイドを設け、常に容器が同じ位置に設置されるようにしてある。

照射されるマイクロ波の内、試料からの反射波には主に試料表面からの反射波（表面反射波）と試料内部を通過してステンレス板から反射する反射波（透過反射波）がある。受信アンテナで受信される反射波は、これら反射波の和として観測される。入射波および反射波が平面波でかつ試料が均質である場合、表面反射波のゲイン R_{dB} は、

$$R_{dB} = 20 \log |R_1| \quad (1)$$

透過反射波のゲイン G_{dB} は、

$$G_{dB} = -\frac{40\omega D \log e}{c} k + 20 \log |T_1 T_2| \quad (2)$$

と表せる。ここで、 R_1 は試料表面の反射係数、 T_1 と T_2 は試料と空気との間の透過係数、 k は減衰係数（複素屈折率の虚部）、 ω は周波数、 D は試料の厚さ、 c は

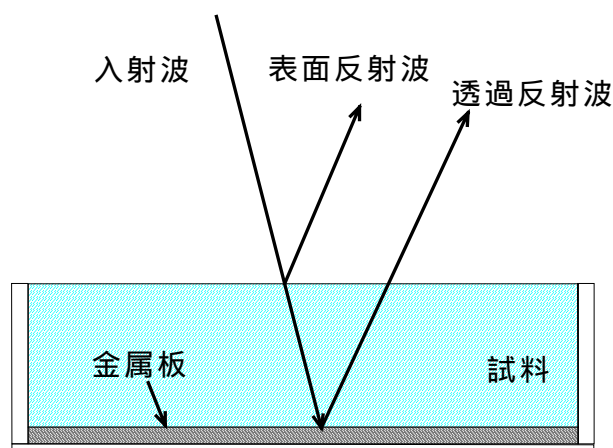


図2 試料への入射波と反射波

空気中の電磁波の伝搬速度である。(2) 式の右辺において、試料の水分量にかかわらず第2項がほぼ一定であれば、透過反射波のゲインは第1項に依存して変化する。水の減衰係数は大きいため、水分量と透過反射波のゲインの間には相関関係が有るものと考えられる。従って、透過反射波のゲインを測定することにより水分量を推定することが可能と考えられる。

なお、受信アンテナには、送信アンテナからの直達波や床からの反射波など、試料からの反射波以外のマイクロ波も受信される。試料からの反射波を測定するためには、不要な反射波を除去する必要がある。このために、タイムドメイン計測を用いて反射波を測定した。タイムドメイン計測では、ネットワークアナライザが反射スペクトルを時間領域のガウシアンインパルス応答波形（タイムドメイン波形）に逆フーリエ変換する。これにより、試料からの反射波のみを時間的に分離することができる。

2-3 水分量と反射ゲイン

マイクロ波の反射波と米の水分量との関係を調べるために、様々な水分量の米についてタイムドメイン波形を測定し、水分計を用いて測定した米の水分量との相関について調べた。

マイクロ波による測定の前に、ステンレス板を底に張ったアクリル製試料容器を試料台に置き、ネットワークアナライザのキャリブレーションを行った。これにより米がない状態での反射波を反射ゲイン 0dB として正規化することとした。次に、様々な水分量（約 10% ~ 15%）の米をそれぞれ試料容器一杯に入れた。表面を平らに均した後、キャリブレーションを実施した時と同じ位置に設置して、1GHz ~ 13GHz の周波数帯域で反射波のタイムドメイン波形を測定した。

一方、上述の測定に用いた試料1つについて任意の5カ所から米をサンプル抽出し、赤外線乾燥式電子水分計（YMC IB-30）により水分量の測定を行った。

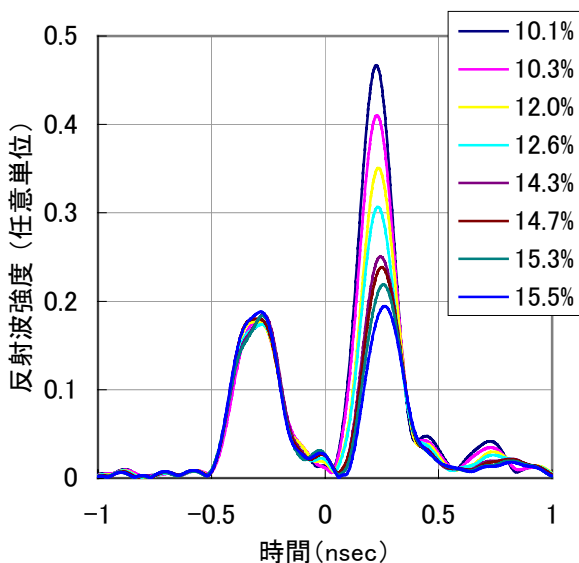


図3 タイムドメイン波形

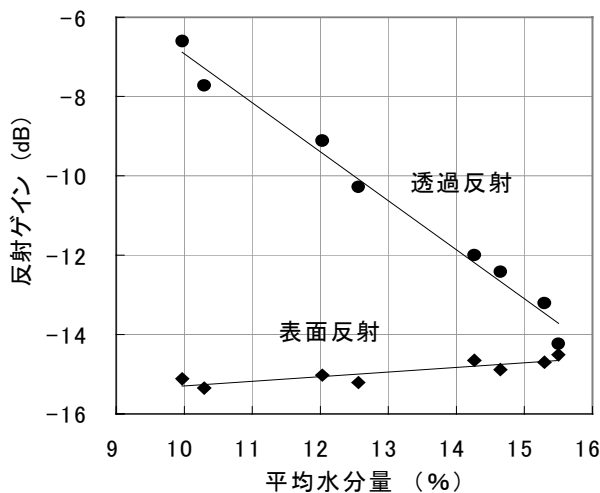


図4 反射ゲインと水分量の関係

2 - 4 測定周波数範囲と再現性

タイムドメイン計測では、測定周波数範囲が広いほど高い時間分解能で測定が可能である。しかし一方で周波数が高いほど波長は短いため、反射強度は容器の位置や表面の状態など水分量以外の要素に影響される可能性が考えられる。そこで、照射する周波数範囲を変えて測定再現性を調べた。

同じ水分量の5つの米それぞれについて、測定周波数範囲の開始周波数を1GHz、終了周波数を5GHzから20GHzの間で変えて、タイムドメイン波形の測定を行った。

表1 水分測定値との誤差

No	透過反射 (dB)	水分量		差異
		推定値(%)	測定値(%)	
1	-7.70	10.7	10.3	0.4
2	-13.20	15.1	15.3	-0.2
3	-12.44	14.5	14.7	-0.2
4	-12.02	14.1	14.3	-0.2
5	-14.23	15.9	15.5	0.4
6	-9.10	11.8	12.0	-0.2
7	-6.62	9.8	10.0	-0.2
8	-10.27	12.7	12.6	0.1

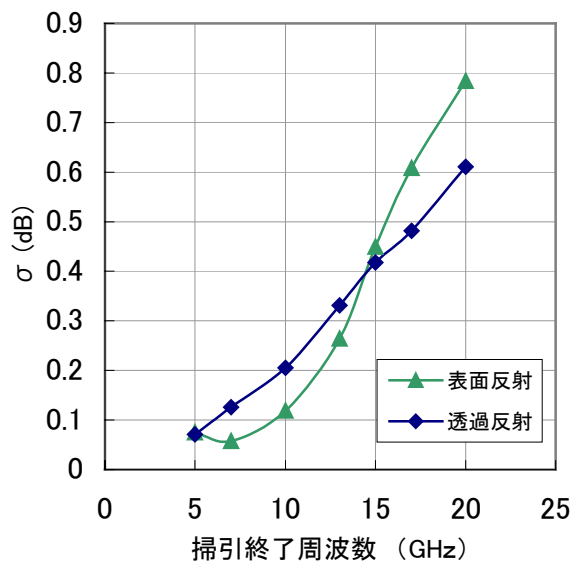


図5 測定周波数と再現性

3 実験結果および考察

3 - 1 水分量と反射ゲイン

各試料におけるタイムドメイン波形を図3に示す。図3において、-0.3nsec付近にピークを持つ反射波は表面反射波、0.25nsec付近にピークを持つ反射波は透過反射波である。表面反射波は米の水分量の変化に対してほぼ一定であるが、透過反射波の強度は水分量が増加するにつれて指数関数的に減少し、ピーク時間もわずかに遅れる。

水分計で測定した米ごとの水分量の平均値と反射ゲインの最大値との関係を図4に示す。表面反射波のゲインは水分の増加に伴ってわずかに増加する傾向が見られる。これは、水分量の増加により米の屈折率が大きくなるため、表面からの反射率が増加するものと考えられる。一方、透過反射波のゲインは米の水分量の増加に伴い直線的に減少する。これは、水分量の増加により米によるマイクロ波の吸収量が増加するためと考えられる。その相関係数は0.992であった。

透過反射波と平均水分量との結果から最小二乗法を用いて求めた回帰直線を図4中に示す。透過反射ゲインが

ら回帰直線により推定した水分量と水分計で測定した平均水分量、およびこれらの差異について表1に示す。透過反射波からの推定水分量と水分計の測定値との差異は $\pm 0.4\%$ 以内で、差異の標準偏差は $\pm 0.27\%$ であった。従って、マイクロ波の透過反射ゲインを測定することで、米の水分量を精密度 0.27%で推定できることが示された。

3-2 測定周波数範囲と再現性

5つの試料で得られた反射波ゲインの標準偏差と掃引終了周波数との関係を図5に示す。

表面反射波、透過反射波ともに掃引終了周波数が低い方が再現性が良く、周波数が高くなるにつれて再現性が悪くなる。図4の回帰直線を用いると、標準偏差 0.1dBは水分量にして0.08%に相当する。1GHz~13GHzでは標準偏差 0.331dBであるため、水分量に換算すると0.25%の誤差が生じることになる。この値は表1における差異の標準偏差とほぼ同じである。このことから、低い周波数を用いることで、測定精度の向上が期待できる。

ただし、周波数範囲を狭くすることで時間分解能は低下し、タイムドメイン波形において表面反射波と透過反射波とが時間的に重なる場合が考えられる。そのため、試料の厚さを調整するなどして各反射波が時間的に重ならないような工夫なども必要になると考えられる。

4 結 論

マイクロ波による誘電率測定システムを用いて、米の水分量とマイクロ波の反射量との関係について調べた。その結果、マイクロ波の反射ゲインと米の水分量との間に線形の関係が得られ、非接触で0.27%程度の精密度で

水分量を推定できることが分かり、水分をリアルタイムでモニタできる可能性を示すことができた。また、測定の再現性は使用する周波数によって変化し、低い周波数を用いる方が良い再現性が得られることも分かった。

今後は、より広い範囲の水分量について調べるとともに、測定精度の向上のための検討を行う予定である。また、今回得られた結果をもとに、他の対象物への応用についても検討して行きたいと考えている。

なお、本研究は平成12年度中小企業技術開発産学官連携促進事業により実施されたものである。

謝 辞

本研究を行うにあたり、米を提供していただいた上に、水分測定などでご協力をいただきました醸造技術部高橋亨専門研究員に感謝いたします。

文 献

- 1) 小原哲二郎, 鈴木隆雄, 岩尾裕之: 食品分析ハンドブック, 建帛社, (1973)
- 2) 中島厚: 木材工業, 52, 111(1997)
- 3) 久保島吉貴, 信田聡, 岡野健: 木材工業, 52, 389(1997)
- 4) 熊谷隆美, 大坊真洋: 岩手県工業技術センター研究報告第7号, 1(2000)
- 5) 橋本修: マイクロ波・ミリ波帯における測定技術, リアライズ社, (1998)
- 6) 電気学会編: 電磁波の散乱・吸収計測と建築電磁環境, コロナ社, (2000)