

## マイクロ波を用いた非破壊検査システムの開発\*

泉田 福典\*\*、大坊 真洋\*\*\*、川又 憲\*\*\*\*、田中 秀樹\*\*\*\*\*、田中 慎造\*\*

タイムドメイン法よりも簡単な計測システムとして、一定周波数のマイクロ波を用いる方法について検討し、タイムドメイン法よりは誤差が大きいが、玄米の水分とマイクロ波の反射波強度との間に理論的予測に近い結果を得ることができた。

また、水を多く含むフレッシュコンクリートについて透過によるタイムドメイン計測を行い、低い周波数のマイクロ波を用いることで相関が得られることが確認できた。

キーワード：マイクロ波、水分量、タイムドメイン計測、フレッシュコンクリート

## Development of Non-Destructive Measurement System Using Microwave\*

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

TANAKA Hideki\*\*\*\*\* and TANAKA Shinzo\*\*

We considered the method using the microwave of a fixed frequency as easier measurement system than the time-domain method, and although the measurement errors were larger than the time-domain method, the results near theoretical prediction were obtained to relationship between the water content of brown rice and the reflective intensity of microwave.

Moreover, according to the penetrative time-domain measurement about the fresh concrete containing many water, the correlation has been obtained using the low frequency microwave.

**key words** : microwave, water content, time-domain measurement, fresh concrete

### 1 緒 言

対象物を非破壊で検査する方法では、測定対象物に応じてX線、紫外線、可視光、赤外線、超音波、マイクロ波、ミリ波などが用いられる。紫外線、可視光、赤外線は光学的に不透明な対象物については表面情報しか得られない。一方、X線やマイクロ波、ミリ波、超音波では対象物の内部情報を得ることが可能である。このうちのマイクロ波は、周波数 3GHz~30GHz の電波であるが、広義には 1GHz~3000GHz 程度の電磁波を指し、UHF (極超短波) SHF(センチメートル波) EHF(ミリ波) サブミリ波などを総称することもある。波長が短く高い指向性を持つため、主に通信の分野での利用が進んでいる。一方、マイクロ波帯域では水の誘電緩和に伴う吸収が大きいため、対象物内部における水分の計測への利用にも適していると考えられる。

そこで、マイクロ波を用いて非破壊かつ非接触で検査

するシステムを開発することを目的に研究を実施し、昨年度はマイクロ波を用いたタイムドメイン計測によって玄米の水分量を高精度で同定できることを報告した<sup>1)</sup>。今年度は、より安価なシステムで計測するために単一周波数での測定方法について検討を行うとともに、水分を多く含む対象物でありその水分量が品質を大きく左右するフレッシュコンクリートの水分評価について実験を行った。

### 2 実験方法

#### 2-1 単一周波数での米の水分測定

タイムドメイン計測法では、約 1GHz~10GHz の帯域で周波数を掃引し、得られたスペクトルをネットワークアナライザのタイムドメイン機能によりガウシアンパルス波形に変換して測定を行う。この方法では、タイムドメイン機能を有したネットワークアナライザと広帯域ア

\* 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3報)

\*\* 電子機械部

\*\*\* 電子機械部 (現在 岩手大学工学部電気電子工学科)

\*\*\*\* 八戸工業大学電気電子工学科

\*\*\*\*\* 広島市工業技術センター

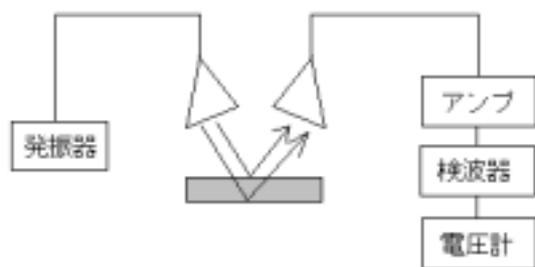


図1 単一周波数による測定方法

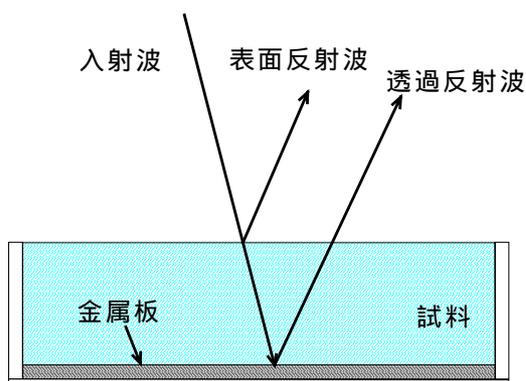


図2 試料からのマイクロ波の反射

ンテナを使用する必要があり、高価なシステムになる。そこで、ある単一の周波数のマイクロ波によって計測することでより安価なシステムで計測が可能であるかについて検討を行った。

図1にそのシステムの構成を示す。測定試料上部に2台のダブルリッジド・ガイド・ホーンアンテナ(EMCO 3115)を設置し、一方の送信アンテナはマイクロ波発振器に接続されている。試料からの反射波は他方のアンテナで受信され、増幅器を通して検波器に送られる。検波器は信号の大きさに応じた直流電圧を出力する。この検波出力を電圧計で測定することで反射波強度を測定することができる。

図2に試料からのマイクロ波の反射の様子を示す。タイムドメイン法による測定と同様に、試料は底にステンレス板を貼り付けた直径30cmのアクリル製容器に入れている。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)と試料内部を透過して容器底のステンレス板から反射する反射波(透過反射波)とがある。タイムドメイン計測の結果から、試料内の水分が多くなると試料の屈折率が増大し、試料内でのマイクロ波の伝搬速度が低下することが分かっている。すなわち、水分が変化することで、受信アンテナに到達した表面反射波と透過反射波との間で位相差が変化するとともに水分による吸収のため透過反射波の振幅も変化する。従って、表面反射波と透過反射波とが合成されると、アンテナで受信される反射波強度は試料の水分によって大きく変化

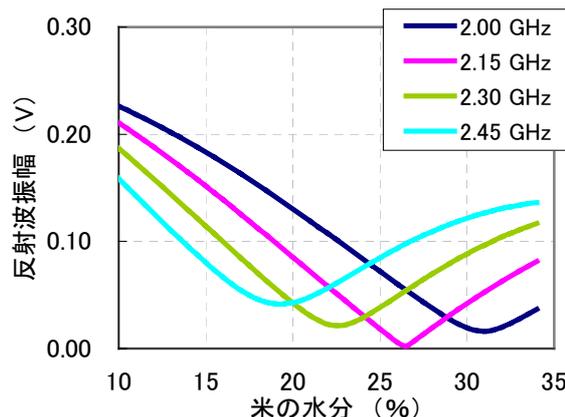


図3 米の水分と反射波振幅の関係の計算結果

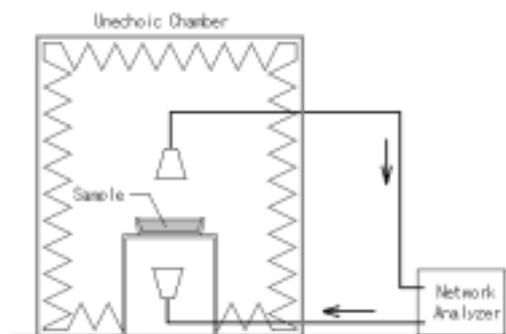


図4 コンクリートの水分測定

すると考えられる。

タイムドメイン計測により測定した結果から玄米の複素屈折率を求め、図2の反射波振幅の計算をした結果を図3に示す。いずれの周波数でも水分20%~30%に極小を持つV字形の特性を示す。これは、水分が増すにつれて透過反射波の位相が変化して、反射波振幅が互いに打ち消しあうことで減少し、互いの位相差が180°程度で振幅が最小になるためと考えられる。この計算から、2.15GHzの周波数では10%~25%程度で水分と反射波振幅とが直線的な関係になっていることが分かる。

## 2-2 フレッシュコンクリートの水分測定

フレッシュコンクリートにおける水分量が設計と異なると、コンクリート強度が不足したり、コンクリートを型枠に流し込む際にコンクリートが型枠や鉄筋へ十分に回り込まないなどの問題が生じる。コンクリートの軟度に関する試験としてスランプ試験が一般的であるが、打設現場で配合設計どおりのコンクリート水分量であるかどうかを定量的に評価できる方法はまだない。

マイクロ波は水により吸収される。また、中性子線も水の水素原子により減速・散乱を起こすことが知られている。そこで今回フレッシュコンクリート自体の水分量を定量的に評価する方法として、マイクロ波の吸収を測定する方法と、中性子線の後方散乱を測定する方法とを検討・比較することとした。なお、中性子線による方法は、共同研究機関の広島市工業技術センターで実施され、

岩手県ではマイクロ波を用いた方法について検討した。本稿では主にマイクロ波による方法について説明する。

### 2-2-1 測定システム

フレッシュコンクリートは水を多量に含みマイクロ波の吸収量が大きいいため、できるだけ低い周波数帯域を使い、なおかつ透過型の測定としてマイクロ波が試料内を通過する距離をできるだけ小さくした。

図4に本実験の構成図を示す。フレッシュコンクリートをポリプロピレン製容器(374×274×62mm)に入れて発泡スチロール製試料台の上に設置した。フレッシュコンクリートの上部と下部にそれぞれホーンアンテナを設置し、ネットワークアナライザによりマイクロ波の吸収量の測定を行った。

マイクロ波は試料下部のアンテナより送信され、試料上部のアンテナで受信される。測定では、ネットワークアナライザにより0.5GHz~3GHzの周波数帯域で周波数掃引して周波数スペクトルを測定し、これをタイムドメインパルス波形に変換した。このパルス強度によりコンクリートによる吸収量を評価した。

図4のような透過型での測定の際は、試料を回り込む信号も受信されるため、レスポンスのスルー校正及びアイソレーション校正の組み合わせでネットワークアナライザの校正を実施した。レスポンスのスルー校正は空の容器を設置して実施した。また、12%のフレッシュコンクリートを入れた容器を設置してアイソレーション校正を実施することで、アンテナ間のクロストークを補正した。

### 2-2-2 コンクリート試料の準備

コンクリートの材料は、水、普通ポルトランドセメント、細骨材(川砂)、粗骨材(砂利、25mm以下)のみで混和剤は使用しなかった。コンクリートの配合は、スランプの範囲12cm、空気量の範囲5%、細骨材30%を目標値とし、これから水と粗骨材を調整して水分量5%~12%になるよう表1により配合した。

表1 コンクリートの配合

水分量 (%)	水セメント比 (%)	配合量			
		水 (mL)	セメント (kg)	細骨材 (kg)	粗骨材 (kg)
5	35	545	1.56	2.83	5.96
6	40	623			5.37
7	45	701			4.92
8	50	778			4.56
9	55	856			4.27
10	60	934			4.02
11	65	1012			3.80
12	70	1090			3.60

## 3 実験結果および考察

### 3-1 単一周波数での米の水分測定

2.00GHz、2.15GHz、2.30GHz、2.45GHzで測定した結果を図5に示す。米の水分と検波器からの出力電圧と

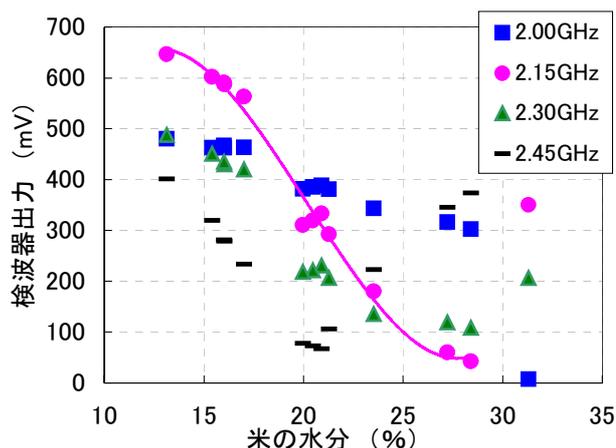


図5 単一周波数による反射波強度の測定結果

表2 単一周波数による米の水分推定

水分測定値 (%)	検波器電圧 (mV)	水分推定値 (%)	差異 (%)
27.23	60.47	26.43	-0.80
23.52	179.65	23.2	-0.32
21.28	292.65	21.19	-0.09
20.90	333.26	20.52	-0.38
20.48	319.59	20.75	0.27
19.96	310.94	20.89	0.93
17.00	562.79	16.44	-0.56
16.02	587.23	15.87	-0.15
16.00	590.98	15.78	-0.22
15.40	602.37	15.48	0.08

の関係は、ほぼ図3の計算と同様にV字形の振る舞いを示している。図中に、2.15GHzの測定データを3次多項式で近似した曲線を示す。2.15GHzの周波数では、ほぼ15%~25%の水分で直線的な関係になっていると考えられる。約15%~27%の米について、検波器出力電圧から近似曲線により推定した水分の推定値、及び実測した水分値との差異を表2に示す。実測値と推定値とは±1%以内で一致しており、標準偏差は0.48%である。このことから、タイムドメイン法に比較すると測定精度は劣るが、あまり精度を必要としない場合には比較的簡単に構成できる方法として有効であることが分かった。

しかし今回の測定では、測定データが不十分であるため、更に多くのデータを取得し校正曲線との関係及びばらつきを正確に求めることが必要である。また、温度など測定環境による測定への影響も考えられるため、正確な校正曲線及びその補正方法などについて検討するには更にデータを蓄積する必要がある。

### 3-2 フレッシュコンクリートの水分計測

図6に5%~12%のフレッシュコンクリートについて、マイクロ波の透過を測定したタイムドメイン波形を示す。水分が少なくなるにつれ、水分によるマイクロ波の吸収量が減少して透過量が多くなるために、タイムドメイン

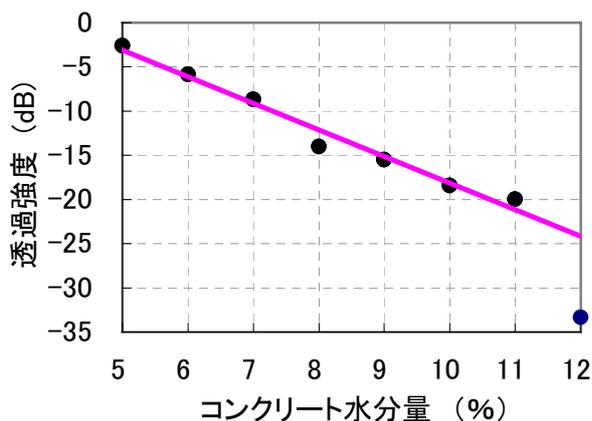


図6 コンクリートのタイムドメイン波形

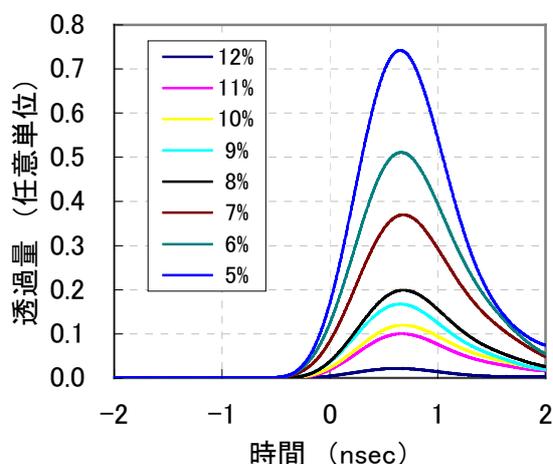


図7 コンクリート水分量と透過波強度

表2 マイクロ波による水分の推定

水分量 (%)	$\mu$ 強度 (dB)	水分推定値 (%)	差異 (%)
5	-2.589	4.8	0.2
6	-5.833	5.9	0.1
7	-8.651	6.8	0.2
8	-14.015	8.6	-0.6
9	-15.510	9.1	-0.1
10	-18.431	10.1	-0.1
11	-19.962	10.6	0.4
12	-33.326	15.0	-3.0

パルスの強度が増大する。

パルスの強度とコンクリート配合上の水分量との関係を図7に示す。5%~11%の水分量では、水分とパルス強度との関係はほぼ直線的である。5%~11%の実験結果から計算した回帰直線を用いてパルス強度からコンクリートの水分量を推定した結果、配合設計上の水分量との差異は、水分量12%のフレッシュコンクリート以外では1%以下であることが示された。このことから、水分の多いフレッシュコンクリートの場合でも、水分計測が可能であることが分かった。

広島市工業技術センターにおいて実施された、フレッ

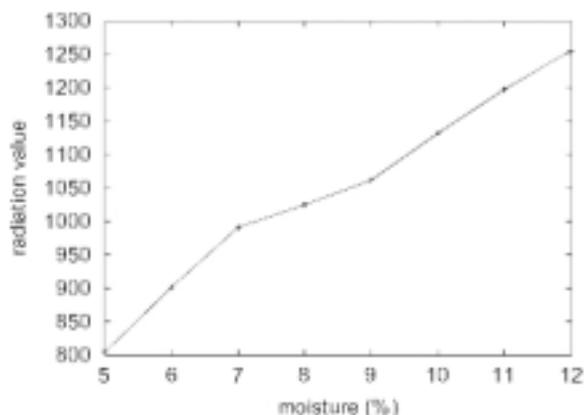


図8 フレッシュコンクリートの中性子線の後方散乱 (実施: 広島市工業技術センター)

表3 中性子線による水分の推定

水分量 (%)	散乱強度	水分推定値 (%)	差異 (%)
5	804.4	4.5	0.5
6	901.4	6.1	-0.1
7	991.2	7.6	-0.6
8	1025.0	8.1	-0.1
9	1062.2	8.8	0.2
10	1132.6	9.9	0.1
11	1198.0	11.0	0.0
12	1256.8	12.0	0.0

フレッシュコンクリートの水分による中性子の後方散乱を計測した結果を図8に示す。中性子の後方散乱は、ほぼ水分量に比例して増加する結果が得られた。また、この結果を回帰直線を求め水分を推定したところ、配合設計上の水分量との差異は1%以内で一致した(表3)。

マイクロ波による方法と中性子線による方法とは、ともに配合設計上の水分量と1%以内で計測できることが示された。特に、中性子線の方法は8%~12%の高い水分量で非常に良い直線性が得られており、水分の多い対象物での計測に向いていると考えられる。

#### 4 結 言

単一周波数を使った簡単な測定システムでも1%以内で米の水分を測定可能なことが分かった。しかしタイムドメイン計測に比べ精度は劣ると思われる。また、フレッシュコンクリートの水分計測では、マイクロ波による方法および中性子線による方法とも1%以内で推定可能であることが分かった。

本研究は平成13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。

#### 文 献

- 1) 泉田福典, 大坊真洋, 川又憲: 岩手県工業技術センター研究報告第8号, 89(2001)