

電磁誘導法を用いた水分量測定装置の開発*

千田 麗誉**、箱崎 義英**、高橋 強**

岩手県特産の塩蔵わかめ製品の品質化・高収益化のために、水分・塩分量の全数検査が望まれている。全数検査を実現するためには非破壊、非接触、リアルタイムの測定技術を適用して不良品の出荷を防止する必要がある。測定技術としてマイクロ波法が知られているが、高周波を使用するため装置コストが高く普及性に問題があった。そこで本研究では、低コストで普及性の高い装置製作が可能な電磁誘導法による水分量測定装置の開発を行った。その結果、塩蔵わかめの水分量及び塩分量が±2.0%の精度で測定可能であることが分かった。また、渦巻き状のセンサを用いることにより、測定面と対象物の間にエアギャップを設けても測定できる可能性があることが分かった。

キーワード：水分量測定、電磁誘導法、非接触、非破壊、リアルタイム測定

Moisture content measurement using an electromagnetic induction method

Yoshitaka Chida, Yoshihide Hakozaki, Kyo Takahashi

The total moisture and salt contents of “salted wakame” that is locally produced in Iwate prefecture should be evaluated to improve its quality and profitability. Non-destructive, non-contact, and real-time inspection methods are therefore necessary to prevent the shipping of defective products. Methods based on microwaves can be used to measure the moisture content; however, they are difficult to implement on a wide scale due to the requirement of ultra-high frequency, which increases the equipment cost. Therefore, a novel electromagnetic induction method has been introduced for water content measurement. The moisture contents and salt contents of “salted wakame” can be estimated with an accuracy of ±2.0% using the proposed method. Furthermore, it has been found that the measurement can be performed using a spiral coil sensor despite the air gap set between the sample and sensor.

Keywords: moisture content measurement, electromagnetic induction, non-contact measurement, non-destruction measurement, real time measurement

1 緒言

岩手県を代表する海産物であるわかめは、長期保存を目的に水分量 50%~70%、塩分量 23%~26%の塩蔵品として市場を流通する。この塩蔵わかめの品質管理項目の一つである含有水分量は、乾燥重量法を用いた抜き取り検査により管理されている。しかし、自然物のわかめは、抜き取り検査では品質を保証することは困難であり、生産者は全数検査による高品質製品の出荷を望んでいる。全数検査を実現するためには非接触・非破壊・リアルタイムの測定技術が必要とされる。測定技術としてマイクロ波法¹⁾が知られているが、高周波を使用するため装置コストが高く普及性に問題があった。

本研究では、低コストによる普及性を考慮した非接

触・非破壊・リアルタイム測定技術として、電磁誘導を用いた水分量測定技術の開発を行った。

漁協等関係機関への聞き取り調査では、測定精度が±4%以内で、かつ出荷合否判定が可能な小型・操作性の良い装置が望まれていることが判明したため、本研究では±4%以内の測定精度を目標とする。

2 実験方法

写真1に水分量測定の実験で用いた測定システムを示す。水分センサは励起コイルと検出コイルまた結合調整コイルで構成されるユニットである。その水分センサ上に試料設置治具を用いて測定試料を設置する。次いで発振器から交流電圧を励起コイルに印加する。なお測定周波数は検出コイルもしくは結合調整コ

* 平成 27 年度 技術シーズ形成研究事業 発展ステージ

* 平成 28 年度 技術シーズ創生研究事業 発展ステージ

** 電子情報技術部

イルのLC共振周波数付近の周波数とする。検出コイルの両端には誘導起電力が発生するがこの値は水分量によって変化する。実験では誘導起電力の振幅(以下、受信電圧と呼ぶ)と位相を測定する。振幅と位相はオシロスコープで測定した。

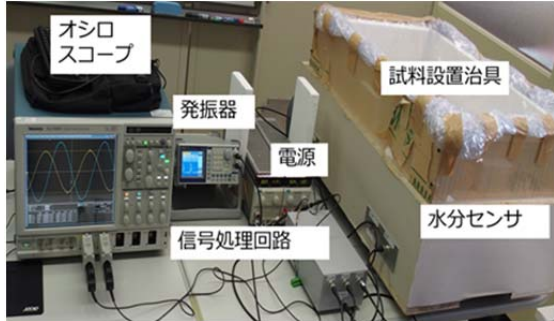


写真1 水分量測定システム

3 実験結果および考察

3-1 試作装置の構成と測定原理

3-1-1 装置構成

開発した水分センサを使用して2タイプの装置を試作した。図1に示すタイプ1は励起コイルと検出コイルを積層して配置する。また、図2に示すタイプ2は励起コイル、結合調整コイル、検出コイルの3枚のコイルを積層して配置する。両者とも、検出コイルの外側に測定対象物を近接させて測定する方式であり、試料サイズに依存せず測定が可能であることを特長としている。

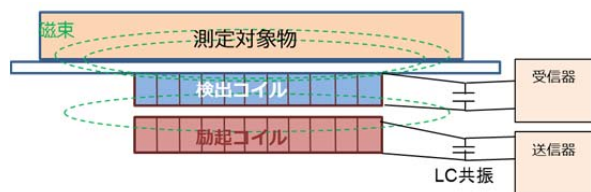


図1 タイプ1の構成

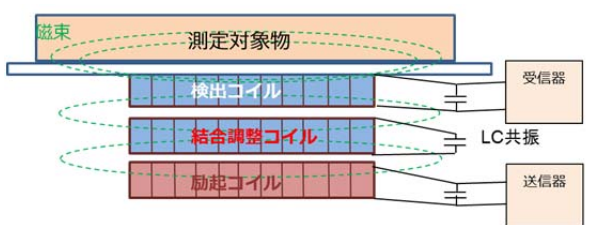
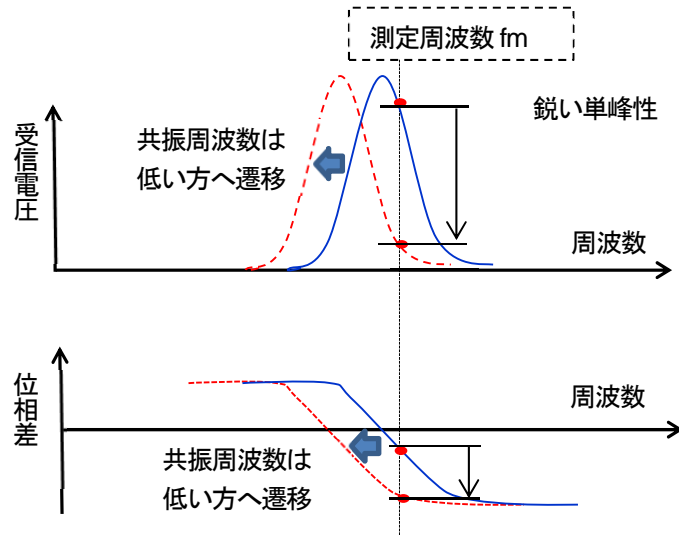


図2 タイプ2の構成

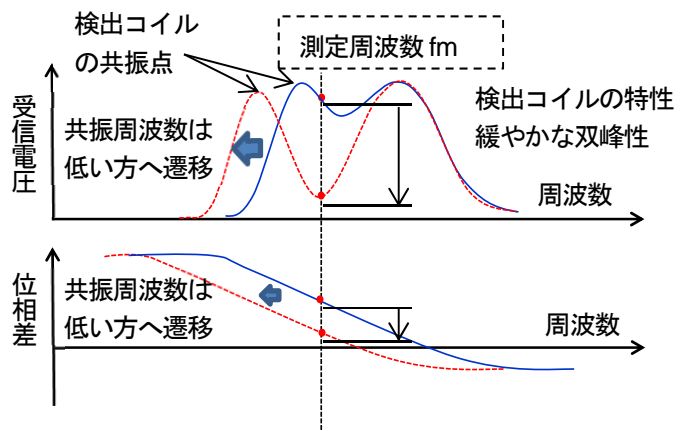
3-1-2 測定原理

励起コイルは、送信器から供給された周波数3.4[MHz]の交流電力により周囲に電磁場を発生する。この電磁場中に配置された検出コイルには、測定試料の水分量に依存する電圧が発生する。これは、検出コイルの共振周波数が変化するためである。水分量の算出は、検出コイルの電圧の振幅と位相を測定し、既知の検量線を用いて行う。また、励起コイル、検出コイルに加えて結合調整コイルを配置することにより、水分量の検出感度を変化させることも可能である。

図3に、検出コイルの受信電圧と位相差の周波数特性を示す。なお、位相差は空気の値を基準にした。図3(a)はタイプ1の検出コイルの周波数特性で鋭い単峰性の共振特性を示す。周波数の遷移量は水分量に依存しており、試料中の水分量が増加すると共振周波数は低周波側に遷移する。これにより測定周波数 f_m における受信電圧と位相差が変化し、これを用いて水分量を算出することができる。



(a) タイプ1の規格化受信電圧・位相差



(b) タイプ2の規格化受信電圧・位相差

図3 検出コイルの周波数特性

図3 (b) はタイプ2の周波数特性である。検出コイルが結合調整コイルと結合し、それぞれの共振点を持つ緩やかな双峰性を示す。また、位相差も緩やかに変化する。タイプ1と比較して測定周波数 f_m での受信電圧の変化量は小さく、測定感度は低下するが、一方で、水分量の僅かな増加でも受信電圧が変化するため広範囲の測定が可能となる。

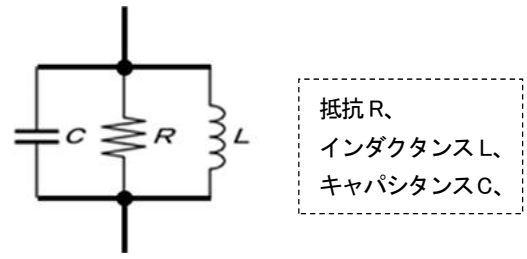


図5 RLC 並列等価回路

3-2 水分センサの共振特性

3-2-1 水分センサ

写真2に製作した水分センサを示す。本センサは板状のコイルであり、サイズは500mm×300mm×1.6mmである。測定では検出コイルもしくはそれに加えて結合調整コイルを式(1)の共振周波数 f_c で電氣的に共振させて使用する。

$$f_c = 1 / (2\pi \cdot \text{sqrt}(LC)) \quad [\text{MHz}] \quad (1)$$

ここで、L はコイルのインダクタンス、C はコイルの寄生キャパシタンスであり、sqrt() は平方根を表す。

Agilent 4294A

プレジジョン インピーダンスアナライザ

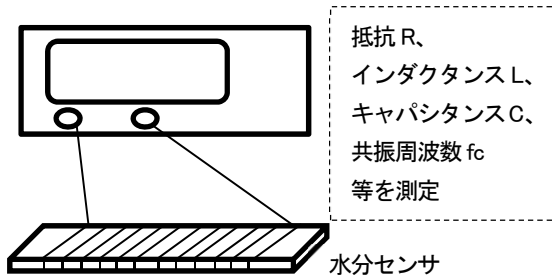


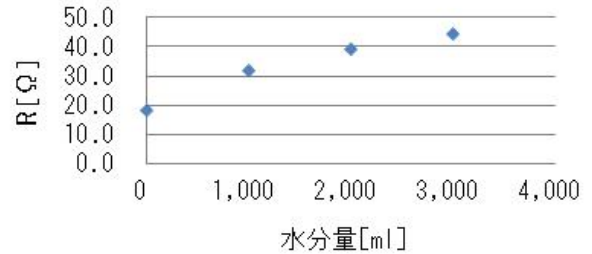
図4 LC 共振特性の測定構成



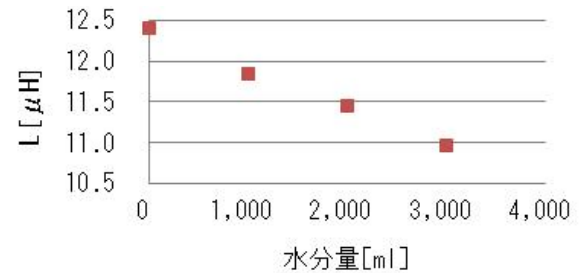
写真2 製作した水分センサ

3-2-2 水分量に対する共振周波数の遷移

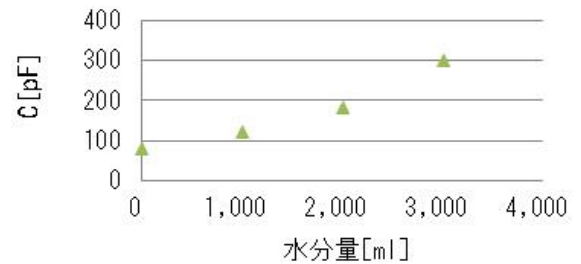
水分量に対する受信電圧の変化は検出コイルの周波数特性に依存するため、検出コイルの周波数特性を測定して、本測定法の動作原理を述べる。図4はそのための測定系である。本測定ではAgilent 4294A プレ



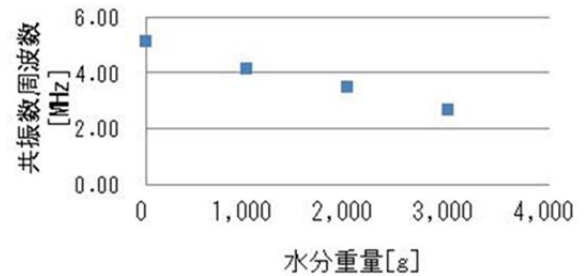
(a) 水分量の変化に伴う抵抗変化



(b) 水分量の変化に伴うインダクタンス



(c) 水分量の変化に伴う静電容量の変化



(d) 水分量の変化に伴う共振周波数の変化

図6 製作した水分センサの基礎特性

シジョン インピーダンスアナライザを用い、水分センサの共振周波数における等価回路解析を行った。等価回路には、図5に示すRLC並列回路を選択し、ここでの抵抗R、インダクタンスL、キャパシタンスC、共振周波数 f_c を求めた²⁾。試料は工業用紙ウエス400gに水を0から3,000ccまで1,000ccステップずつ加えて水分量を調整した。

図6(a)～(d)は水分量に対する検出コイルの電気的パラメータの変化を示している。(a)は抵抗R、(b)はインダクタンス、(c)はキャパシタンス、(d)は回路の共振周波数である。同図より、水分量の増加に対して抵抗Rは $18\Omega \sim 44\Omega$ 、キャパシタンスCは $78\text{pF} \sim 300\text{pF}$ までそれぞれ増加し、インダクタンスLは $12\mu\text{H} \sim 11\mu\text{H}$ に減少している、共振周波数は、式(1)に示す通りLとCの積により決まるため、水分量に対する共振周波数の変化はキャパシタンスが大きく寄与し、水分量の増加に対して共振周波数は低下することが分かる。

以上より、水分量に依存した受信電圧の振幅と位相を測定することにより、水分量の推定が可能になる。

3-3 塩蔵わかめの測定

3-3-1 水分量に対する基礎特性

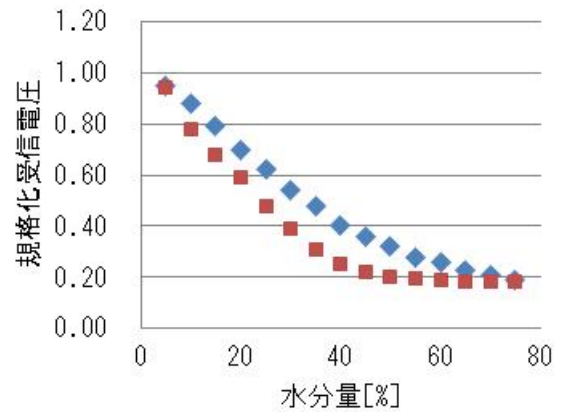
対水食塩濃度が25%の塩蔵わかめについて、タイプ1とタイプ2のそれぞれの装置での基礎特性を調査した。なお、空気の影響を最小限に抑えるため、試料を水分センサ面に極力近接させて測定を行った。図7(a)に水分量変化に対する規格化受信電圧、(b)に位相差の変化を示す。ここで、規格化は受信電圧の最大振幅で行った。また、グラフ内の赤のデータプロットはタイプ1、青のデータプロットはタイプ2の測定結果を示している。同図より、タイプ1は規格化受信電圧、位相差ともに領域0%～40%においては水分量の測定が可能であるが、40%を超える水分領域では規格化受信電圧も位相差も変化せず水分量の測定が困難である。これに対して、タイプ2は規格化受信電圧、位相差とも水分量全域に対して変化している。これは、水分量が50%～70%の塩蔵わかめを測定する場合、タイプ2が有効であることを意味している。

3-3-2 水分量と塩分量に対する基礎特性

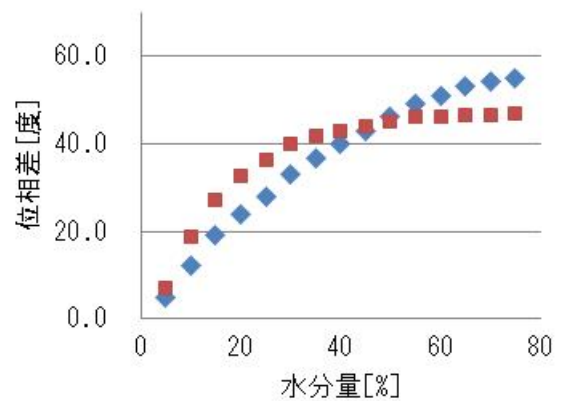
水分センサとしてタイプ2を用い、規格化受信電圧と位相差を測定し、水分量[kg]と塩分量[kg]との関係を求めた。塩蔵わかめは、乾燥わかめ1kgに対して、水分量は50%～80%の範囲で10%ステップで調製し、対水食塩濃度は20～26%の範囲で1.5%ステップで調製した。なお、水分量[%]および対水食塩濃度[%]をそれぞれ以下の式(2)および式(3)のように定義する。

図8に塩蔵わかめの水分量および塩分量を、規格化

受信電圧と位相差の測定から推定した結果を示す。また、これらより求めた検量線を式(4)～(7)に示す。こ



(a) 水分量に対する規格化受信電圧の変化



(b) 水分量に対する位相差の変化

図7 対水食塩濃度25%の塩蔵わかめの検出コイルの基礎特性

$$\text{水分量}[\%] = \frac{\text{水}(\text{kg})}{\text{わかめ}(\text{kg}) + \text{水}(\text{kg}) + \text{塩}(\text{kg})} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{対水食塩濃度}[\%] = \frac{\text{塩}(\text{kg})}{\text{水}(\text{kg}) + \text{塩}(\text{kg})} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{水分量}W_e[\text{kg}] = 303821e^6 - 546661e^5 + 401277e^4 - 153927e^3 + 32695e^2 - 3708.20e + 187.01 \quad (4)$$

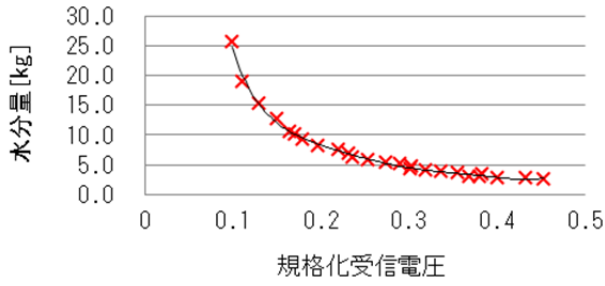
$$\text{塩分量}S_e[\text{kg}] = 144631e^6 - 263905e^5 + 196311e^4 - 76155e^3 + 16266e^2 - 1827.30e + 87.48 \quad (5)$$

$$\text{塩分量}S_c[\text{kg}] = 0.0000001c^5 - 0.0002c^4 + 0.0139c^3 - 0.46c^2 + 7.71c - 51.17 \quad (6)$$

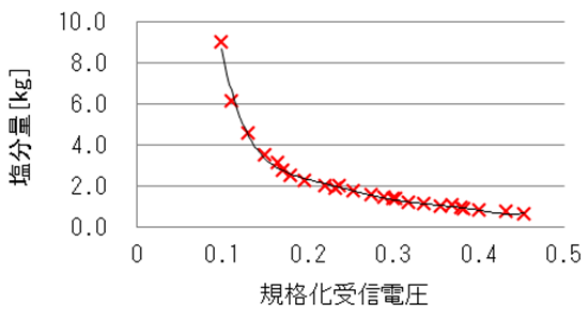
$$\text{水分量}W_c[\text{kg}] = 0.0000001c^5 - 0.0002c^4 + 0.0096c^3 - 0.27c^2 + 3.90c - 20.29 \quad (7)$$

ここで、検量線はマイクロソフトエクセルの関数近似機能により求めた。また、表1に水分量と塩分量の推定精度を示す。タイプ2の推定精度は、水分量[kg]と塩

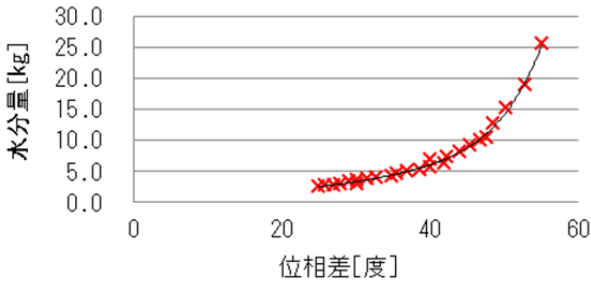
分量[kg]ともに±2.0以内であることが分かった。よって、本測定条件においては、塩蔵わかめの測定要求精度±4%以内を十分に満たしている。



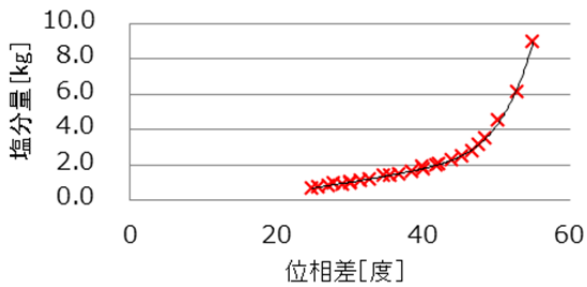
(a) 規格化受信電圧による水分量推定



(b) 規格化受信電圧による塩分量推定



(c) 位相差による水分量の推定



(d) 位相差による塩分量の推定

図8 塩蔵わかめの水分量と塩分量の推定

表1 塩蔵わかめの水分量・塩分量の推定精度

推定項目	平均推定精度 [%]
水分量 W_e [g]	0.45
塩分量 S_e [g]	-0.93
水分量 W_c [g]	-1.52
塩分量 S_c [g]	0.84

3-4 エアギャップの影響

3-4-1 タイプ2による測定

塩蔵わかめ製品は厚さ約 5 mmの段ボール箱に梱包されて出荷される。そのためここでは、段ボール箱入り塩蔵わかめの測定法を検討した。

タイプ2の装置について水分センサの測定面と試料間に 0~15 mmのエアギャップを挿入したときの規格化受信電圧の変化を調べた。試料は水 500 gをセンサ全面を覆う大きさの発砲スチロール容器に水 500 gを入れ、その深さは 2mmとした。

図9はエアギャップ長の変化に伴う規格化受信電圧の変化を示している。規格化受信電圧の値 1.0は空気の測定電圧である。同図より、ギャップ長が 3mmを超えると急激に受信電圧が減少することが判る。

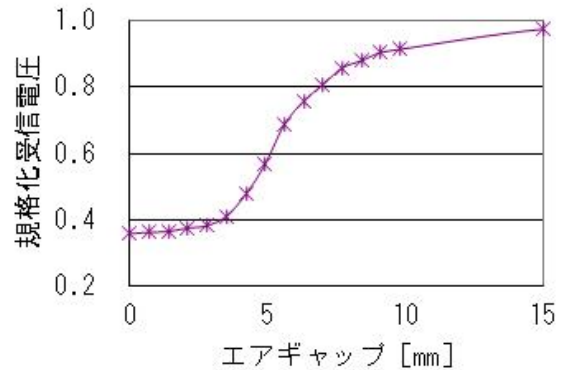


図9 エアギャップの変化に伴う規格化受信電圧の変化

タイプ2において測定の困難な理由は検出コイルと試料の電磁的な結合が弱いことである。そこで、更に電磁的な結合の大きい水分センサを製作し、水分測定可能性の調査を実施した。

3-4-2 渦巻き状水分センサによる測定

写真3、図10に新たに製作した渦巻き状の水分セ

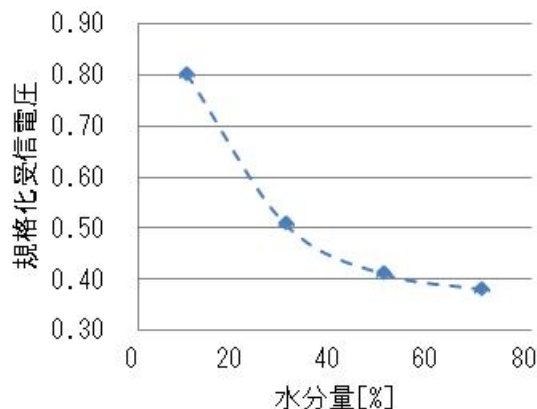
ンサと、それを用いた測定方法を示す。タイプ2は、水分センサの測定面と平行つまり試料の横方向から磁束が貫くのにに対し、渦巻き状水分センサは測定面全体から垂直に試料を磁束が貫く。これより、渦巻き状センサは試料を貫く磁束数が多くなるため試料との電磁的結合がより大きくなると考えられる。



写真3 渦巻き状の水分センサ

※ 磁束は裏面から表面へ貫く

め、今後の課題としたい。



(a) 水分量変化に伴う規格化受信電圧の変化

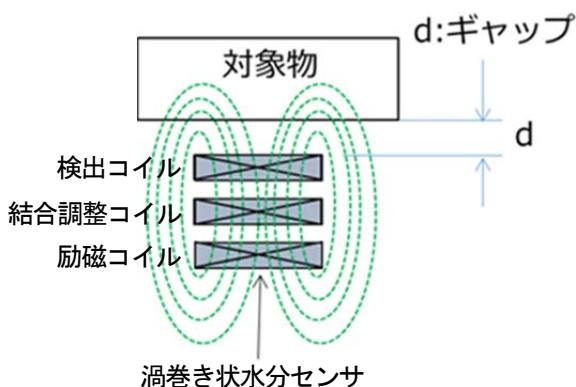


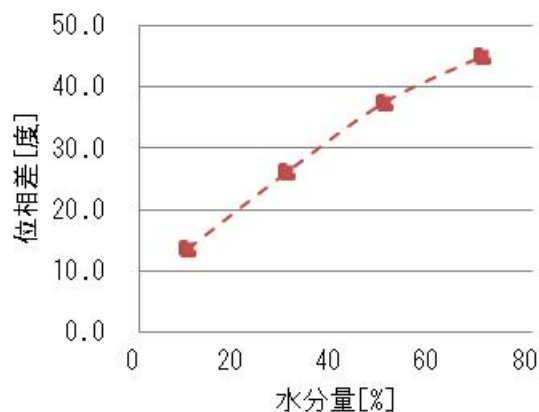
図10 測定方法

実験は、測定試料と水分センサの検出面のエアギャップ d を段ボール厚と同等の5mmに設定し、水量に対する検出コイル両端の電圧の振幅と位相の特性を調査した。なお、実験で使用した周波数は2.3MHzである。

図11は、工業用紙ウエスを水に含ませた試料の水分量を10%~70%に変化させたときの規格受信電圧および位相差の変化を示している。

図11(a)において水分量が40%を超えるとやや分解能は低下するものの、全域において測定は可能である。図11(b)において位相差と水分量の相関はほぼ線形であり、水分量の全域域において測定が可能である。

これらの結果から、測定面と対象物の間にエアギャップを設けても測定できる可能性のあることが分かった。しかし、推定精度の向上などの課題は残るた



(b) 水分量変化に伴う位相差の変化

図11 渦巻き状コイルの基礎特性

4 結言

本報告では電磁誘導法による水分量測定技術を開発したことについて述べた。水分センサは板状コイルを送信コイルと検出コイルとして使用するタイプ1、タイプ1の構成に結合コイルを付加したタイプ2、さらに渦巻き状コイルを用いたタイプ2について検討した。板状コイルのタイプ1は、水分量が40%未満において測定感度が良く、タイプ2は水分量0~70%に亘り感度を有することが分った。また、渦巻き状コイルの場合には、検出コイルと測定対象の間に5mmのエアギャップが存在する場合においても比較的良好的な感度を有することが確認できた。

また、推定精度は±2.0%であり、目標の±4.0%以下を達成した。本技術は、塩蔵わかめの他、広範囲の応用が考えられるため、新たなセンサ形状、専用の信号処理回路等の開発を進め実用化を目指したい。

電磁誘導法を用いた水分量測定装置の開発

最後に、本研究で開発したタイプ1、タイプ2による水分量測定技術は特許出願中である³⁾。

文 献

1) 山角達也：マイクロ波透過法による木材水分量の

測定、鹿児島県工業技術センター研究報告
No15(2001)

2) プレジジョン・インピーダンス・アナライザ Agilent 4294A
取扱説明書

3) 特願 2017 - 71222 号 「物体の成分量測定装置」