

# マイクロ波共振器を利用した凍結食品の非破壊温度計測

河野晋治, 今村 光, 服部一裕

株式会社前川製作所 技術研究所

## 1. 緒 言

食品の凍結プロセスにおいて、食品内部の凍結状態および中心温度をオンラインかつ全数検査することは、品質管理および凍結装置の運転を制御する上で重要な項目となる。しかし、一般に広く使用されている温度計測機器では非破壊で中心温度を計測することができないため、実際の凍結プロセスでは、予備計測データおよび経験に基づいた凍結時間と庫内温度制御による間接的管理しか行っていない。このような管理では、食品の凍結状態を十分に把握できないため、適切なプロセス管理が行なわれているかどうかは不明である。そこで筆者らは、マイクロ波共振器を用い、迅速かつ簡易に食品の中心温度を予測する計測装置の開発を行なったので紹介する。

## 2. マイクロ波共振器について

金属の壁で囲まれた空洞はマイクロ波領域の共振器として利用可能であり、空洞共振器とよばれている。この空洞共振器内に物質を挿入すると共振周波数と透過波の共振ピーク電圧が摂動を受ける [1]。また、物質の質量と水分量の違いによって、共振周波数と共振ピーク電圧の変化量は変化する。同軸型空洞マイクロ波共振器は、開放型の場合、開口部がオープンサーキットとなるためマイクロ波の定在波の腹となり、さらに、マイクロ波の共振モードの腹が共振器の出口と一致せず、出口より外側となる [2]。本研究では、この現象を利用することにより、共振器に計測対象物を載せるだけで共振電圧および周波数の計測が可能となった。

## 3. 装置の構成

本計測装置は、マイクロ波送受信部と開放型同軸空洞マイクロ波共振器 (Fig. 1) を同軸ケーブルで接続し、

構成される。計測周波数は 3000 MHz までの範囲とし、マイクロ波発信強度を 100  $\mu$ W, 1 回の計測時間は 80 msec. に設定した。

## 4. 計測の原理

Table 1 で示されるように、水と氷では誘電損失係数が大きく異なる。すなわち、2450 MHz 付近のマイクロ波は、氷と比較し、水には非常によく吸収される性質を有する。本計測装置は、このマイクロ波の性質を利用して、凍結食品の内部に残存する微量な未凍結水分 [3] の含有比率を計測し、これらの結果をもとにして食品の中心温度を推定する。

Fig. 2 は同一質量および同一形状の容器に入れた際の水および氷のマイクロ波共振データを示している。氷

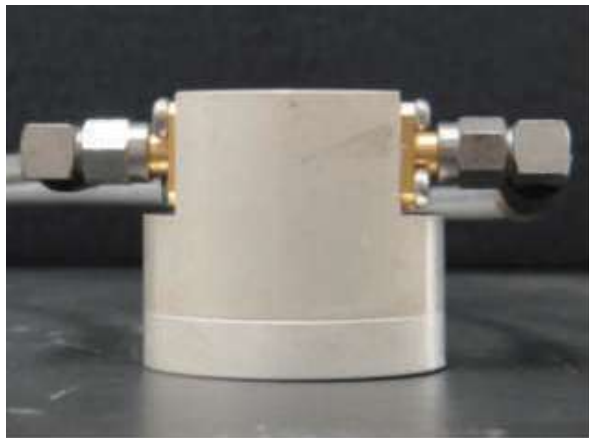


Fig. 1 開放型同軸空洞マイクロ波共振器

Table 1 2450 MHz における誘電損失係数

物質名	$\epsilon_r \tan \delta$
氷 (-13°C)	0.00028
水 (25°C)	12.3
牛肉 (4.5°C)	12.0
テフロン	0.0004
ガラス	0.05

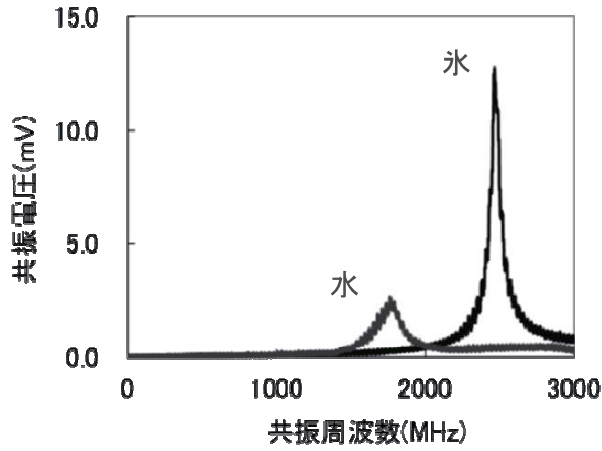


Fig 2. 水および氷のマイクロ波共振データ

はマイクロ波の透過性が大きいいため共振ピーク電圧が高く、さらに共振周波数も高い値となった。一方で、水はマイクロ波の吸収が大きく、透過性が小さくなるため、共振ピーク電圧および周波数はともに低い値となった。



Fig. 3 グラタン計測時の様子

### 5. マイクロ波共振器を用いた温度計測の実施例

まず、供試材料はグラタン、餡かけおよびうどんを用いた。-30~-45℃に設定したフリーザー内に供試材料をそれぞれ静置し、凍結過程において経時的に共振

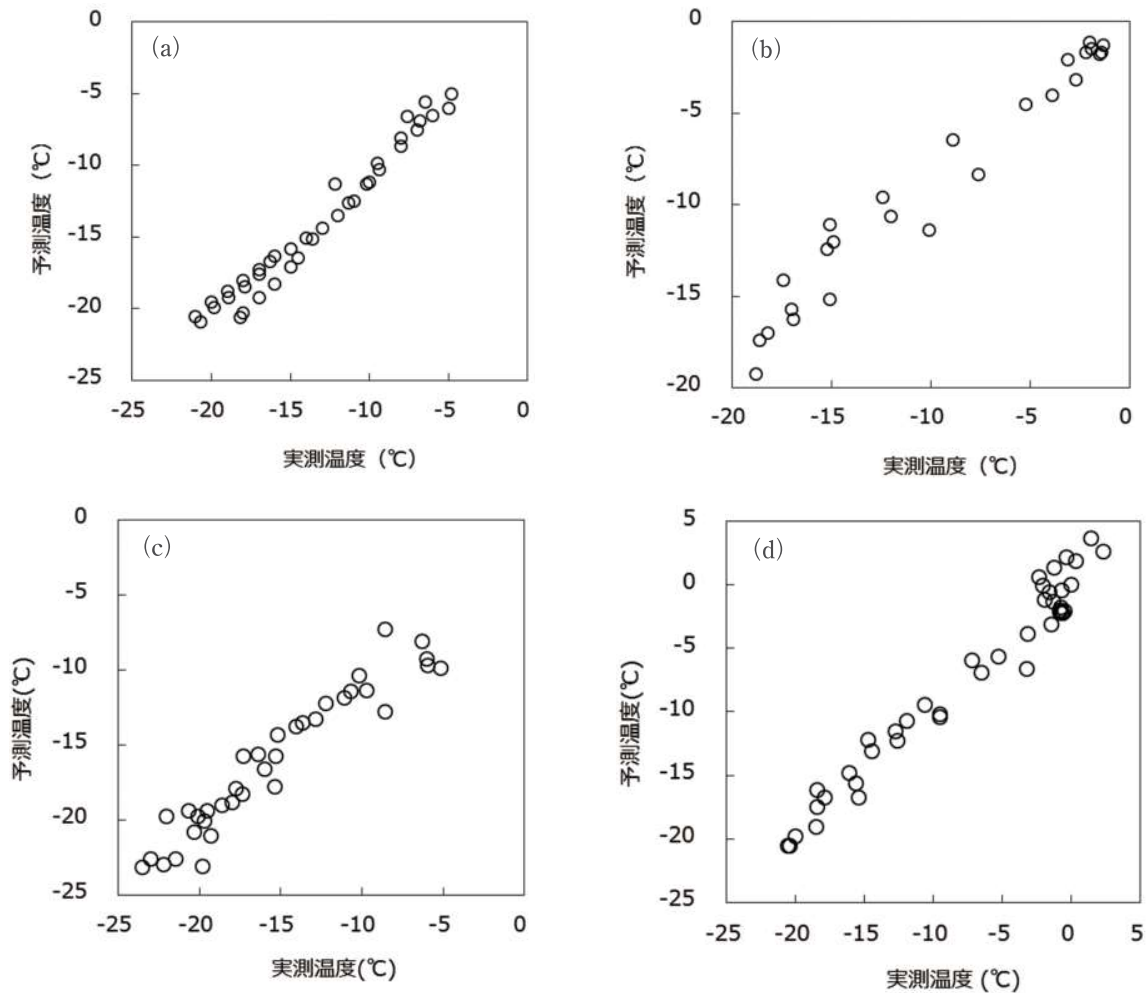


Fig. 4 供試材料の実測温度と予測温度の関係

(a) グラタン (トレイ凍結), (b) 餡かけ (バッグ凍結), (c) うどん (トレイ凍結), (d) グリーンピース (バラ凍結)

ピーク電圧、共振ピーク周波数および中心温度を測定した。共振データを取得する際には、グラタンおよびうどんはそれぞれ紙製トレイおよびプラスチック製トレイに入れ、これにマイクロ波共振器をトレイの底面から接触させ (Fig. 3)、また餡かけはポリエチレンバッグに入れて外側から接触させた。なお、測定周波数は 1000~3000 MHz の範囲とし、実測値としての中心温度計測には光ファイバー温度計 (T/Guard, Neoptix) を用いた。マイクロ波共振器にて計測した共振ピーク電圧および周波数を説明変数、また光ファイバー温度計にて計測した中心温度を目的変数として多変量解析を行い、検量モデルを作成した。次いで、別に用意した同一種類の供試材料を凍結し、マイクロ波共振器により共振データを計測し、先に作成した検量モデルを用いて中心温度予測を行なった。この予測温度と光ファイバー温度計にて同時に計測した実測温度との比較を Fig. 4 (a)~(c) に示す。これらの結果より、高い精度で中心温度を予測できることが明らかとなっただけでなく、さらに直接食品に触れることなくトレイなどの包装・容器外から計測できることが可能となった。

次いで、凍結グリーンピースの温度予測試験を行った。グリーンピースは流動床式凍結装置にて凍結されることが多く、その装置の特性上、出庫時の中心温度を計測することは容易ではない。そこで、先の試験と同様に、事前に検量モデルを作成し、これを用いて中心温度予測を

行なった。実測温度と予測温度の関係を Fig.4 (d) に示す。この結果、バラ凍結食品においても高い精度で温度予測が可能であることが明らかとなった。

## 6. 結 論

開放型同軸空洞マイクロ波共振器を利用した本計測装置の開発により、迅速かつ簡易な凍結食品の中心温度計測を可能にした。これにより、食品凍結プロセスにおいて、非破壊にて食品の中心温度予測が可能となるばかりでなく、食品の凍結状態を正確に把握し、冷凍機器の運転制御などにフィードバックするプロセス管理用ツールの 1 つとしての利用が期待できる。

## 7. 引 用 文 献

- 1) S. Nakayama ; Simultaneous measurements of basis weight and moisture content of sheet materials by microwave cavity. *Jpn J. Appl. Phys.*, **26**, 1198 (1987)
- 2) S. Nakayama ; Development of microwave caliper for sheet materials. *Jpn J. Appl. Phys.*, **31**, 1519 (1992)
- 3) P. Nesvadba ; Thermal properties and ice crystal development in frozen foods, In "Frozen food science and Technology" J. A. Evans ed., Blackwell Publishing, 2008, pp.5-7.