

交流インピーダンスを用いた凍結物の電気特性測定

林 達郎^{*1)}, 天野光明^{*2)}

Measurement of Electrical Property of Frozen Material.

HAYASHI Tatsuro^{*1)}, AMANO Mitsuki^{*2)}

食材向け凍結装置の開発において、凍結条件の違いが凍結物の物理特性に与える影響を調べ、その特徴を理解することは、技術向上への一助になると考えられる。

本研究では、凍結物の物理特性のひとつである電気特性に着目し、測定に用いる治具を試作するとともに、交流インピーダンスから凍結物の体積抵抗率や比誘電率を求める測定環境の構築を試みた。

また、その環境を用いて、空気や、凍結前後における水の電気特性を測定したほか、食材にみだた導電性のある液体を用いて、異なる凍結条件により得られる凍結物の特性を比較したところ、一部に相違が認められた。

1. 緒言

食材の凍結保存技術は1960年代から急速に普及し、今日では家庭から業務用途に至るまで、随所で利用されている。

風味を損なわずに食材を凍結することは、凍結装置に求められる最優先の課題であるが、そのための技術改良の過程において、異なる凍結条件によって得られる凍結物の物理特性を比較検討し、その特徴を理解することが、技術向上への一助になると考えられる。

そこで本研究では、凍結物の物理特性を示す指標のひとつとしてその電気特性に着目し、異なる凍結条件により得られる凍結物の電気特性を簡便に比較できるよう、測定環境の構築を試みた。

また、この環境を用いて、空気や、凍結前後における水の電気特性を測定したほか、食材にみだた導電性のある液体を用いて、凍結条件の違いが凍結物の電気特性に与える影響を検討したので、その一例を紹介する。

2. 凍結物の電気特性

食材の電気特性を大別すると、図1に示すように電解質による導電的な性質と、極性物質による誘電的な性質に区別される¹⁾。

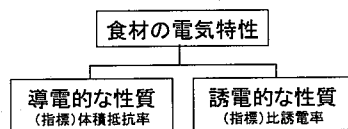


図1 食材の電気特性

多くの食材は、主要成分である水に、多様な物質を含む不均質多成分系として存在しており、常に導電的な性質と誘電的な性質の両方を併せ持つものと見なすことができる。一方、食材を凍結した場合は、主要成分である水の凍結により結晶が生成され、凍結前と異なる電気特性を示すことが予想される。

また、異なる凍結条件により得られる凍結物の間では、生成される結晶のサイズや形状、分布が異なる可能性があるため、凍結条件の違いが凍結物の導電的、あるいは誘電的な性質に与える影響についても、調査することが有効と考えられる。

3. 実験方法

3.1 測定法

物質の導電的あるいは誘電的な性質を測定する方法について、検討を行った。

一般に、物質の導電的な性質を示す指標としては、直流印加時における単位体積あたりの電気抵抗を示す体積抵抗率が用いられている。

しかし、本研究の測定対象となる物質は、多くの場合電解質を含むことが予想されるため、イオンの移動などに起因する測定値の時間的変動が生じやすい。

そこで、本研究では電子材料の特性測定などに用いられる交流インピーダンスを用いて、周波数ごとに得られるインピーダンスの値から、各周波数における体積抵抗率を求める方法をとった。

また、物質の誘電的な性質を示す指標として、比誘電率に着目し、周波数ごとに得られるインピーダンスの値から、測定系の等価回路を考慮して理論計算を行い、値を求めた。

*1) 機械・電子・情報技術チーム *2) (株)菱豊フリーズシステムズ

3.2 測定治具の構造

液体, ならびにその凍結物の電気特性を測定するためには, 測定対象となる物質の形状や性質を考慮したうえで, 安定した電圧印加が行えるよう測定治具を設計する必要がある。

本研究では, 図2に示すように2枚の平面金属を電極板として用い, これらを平行に配置することで隙間に測定対象物質が充填できる構造を採用した。

この方法は, マイクロ波帯域よりも低い周波数において, 誘電材料などの電気特性を測定する際に用いられる手法²⁾を応用したものであり, 系の自己共振などの誤差要因が発生しない範囲で比較的簡便な測定が行える。

2枚の電極板は, 隙間の間隔が一定に保たれるよう, また隙間に液体を充填した際に漏れ出さないように樹脂製の保持材で固定した。

電極板の寸法は(幅)250×(高さ)125mmとし, 隙間は2mmとした。

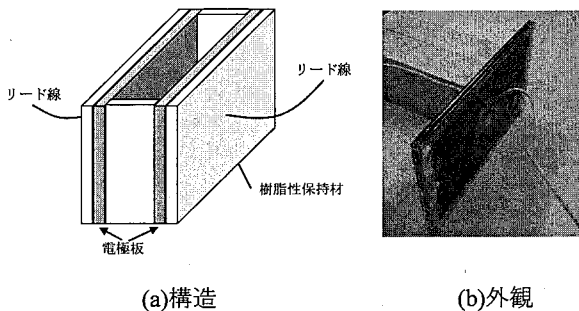


図2 測定治具

3.3 等価回路を用いた特性計算

測定対象物質を充填した治具に, 交流電圧を印加したときに測定される周波数ごとのインピーダンスの値から, 充填された物質の電気特性を求める方法について検討した。

2枚の電極板を平行に配置するとき, この治具はコンデンサの機能を果たし, 容量性の成分をもつと考えられる。

加えて, 本研究ではこの治具に導電性のある物質を充填することを考慮し, 治具全体の等価回路を図3のように容量性の成分 C と, 抵抗成分 R が並列接続されたものとして取り扱った。

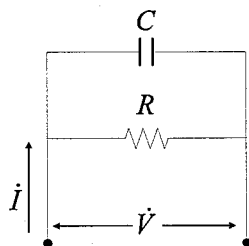


図3 測定治具の等価回路

等価回路に印加される交流電圧の角周波数を ω としたとき, C と R が並列に接続された回路では, アドミタンス \dot{Y} が次式で表され, アドミタンス \dot{Y} の実部 G から実際の抵抗成分 R が, また, アドミタンス \dot{Y} の虚部 B から容量性の成分 C が求められる³⁾。

$$\dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{V}} = G + jB = \frac{1}{R} + j\omega C$$

なお, 測定で得られるインピーダンス Z から, アドミタンス \dot{Y} を求めるために次式を利用した。

$$\dot{Y} = \frac{1}{Z}$$

また, 計算により求めた容量性の成分 C から, 充填された物質の比誘電率 ϵ_r を求めるために次式を用いた。

$$C = \epsilon_o \times \epsilon_r \times \frac{S}{d} \quad (F)$$

S : 電極板の面積 (m^2)

d : 電極板間の距離 (m)

ϵ_o : 真空の誘電率 8.854×10^{-12} (F/m)

3.4 測定機器ならびに測定環境

電気特性の測定は, 図4に示すようにインピーダンスアナライザを用いて測定治具に交流電圧を印加し, その際のインピーダンス値を読み取る方法で行った。

測定の対象とした周波数の帯域は 1kHz~1MHz である。

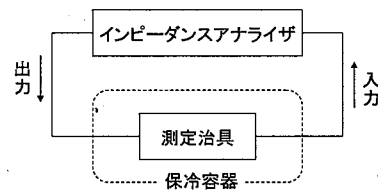


図4 測定環境

常温時の測定は, 測定対象物質を充填した治具を室温が概ね 22°C の環境に設置した状態で実施した。

また, 凍結時の測定は, 測定対象物質を充填した治具を -40°C の凍結装置から取り出した後, ドライアイスを満たした保冷容器に移した状態で実施した。

4. 結果及び考察

4.1 空気の電気特性

予備実験として, 治具に測定対象物質を充填しない状態, 即ち空気が充填された状態(湿度 40%)におけるインピーダンスを測定し, 比誘電率を求めた結果を図5に示す。

グラフより, 測定した周波数帯域 1kHz~1MHz のほぼ全域において, 比誘電率が 1.1~1.2 となっており, 正確な空気の比誘電率 1.0(20°Cの乾燥状態)より僅かに高い値を示

すもの簡便な測定方法としては、概ね良好な測定が可能であることがわかる。

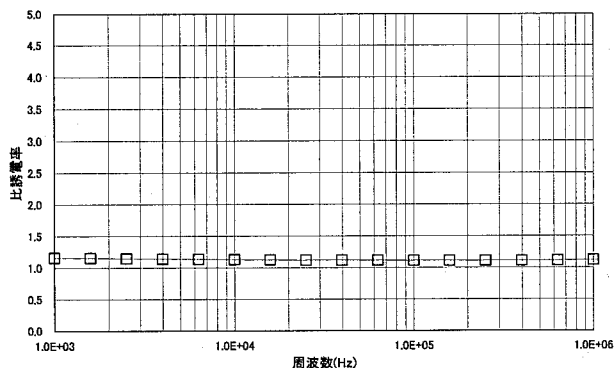
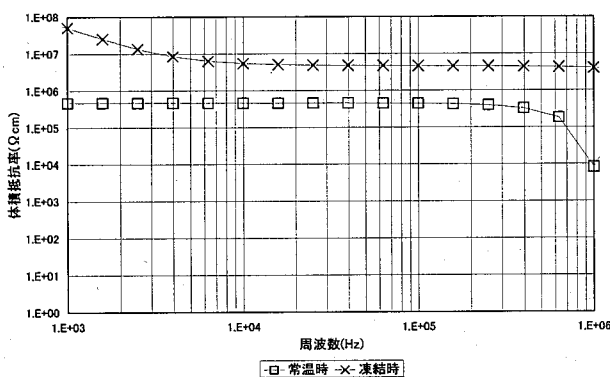


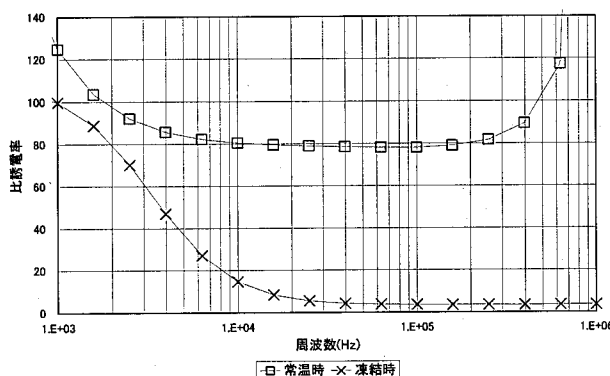
図5 測定した空気の比誘電率

4.2 水の凍結前後における電気特性

水(純水)を対象に、常温時ならびに凍結時のインピーダンスを測定し、体積抵抗率と比誘電率を求めた結果の一例を図6に示す。



(a)体積抵抗率



(b)比誘電率

図6 凍結前後における電気特性の変化

グラフより、体積抵抗率については、常温時に概ね 0.4 ~ 0.5MΩ・cm の値が観察される一方、凍結時には1kHz 付近から徐々に値が低下したのち、10kHz 付近から約 5.0MΩ・cm の値を示し、いずれの周波数においても常温時より

凍結時のほうが高い値を示すことが観察された。

また、比誘電率については、常温時に1kHz 付近と1MHz 付近で極めて高い値を示すほかは概ね 80 から 90 の値を示すのに対し、凍結時には1kHz から急激に値が低下したのち、30kHz~1MHz の帯域において概ね 3.5~4.5 の値を示すことから、常温時より凍結時のほうが極めて低い値を示す特徴が観察された。

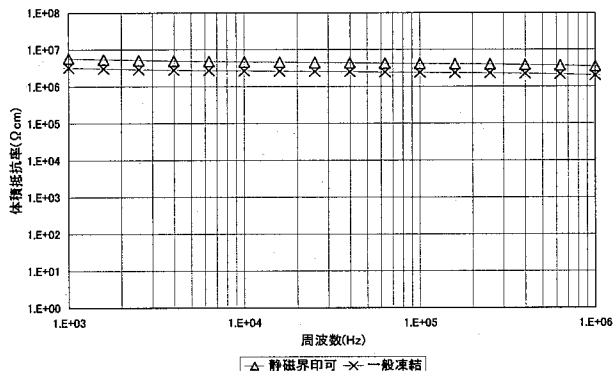
4.3 異なる凍結条件による凍結物間の電気特性比較

食材にみだた導電性のある液体を用いて、異なる凍結条件により得られる凍結物の間で、電気特性に相違がみられるか検証を行った。

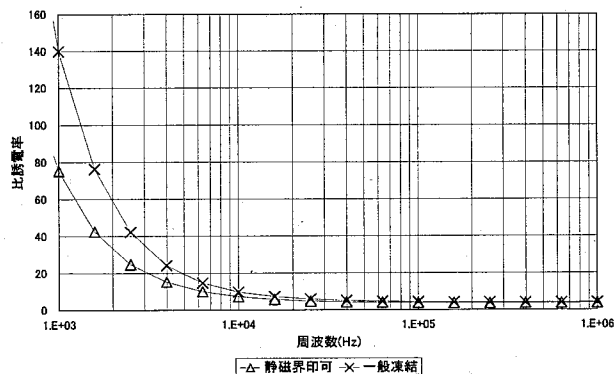
凍結条件の違いとして、凍結時に外部から静磁界を印加した場合と、そうでない一般凍結によるものを比較した。

比較に用いたのは、予め、常温時における体積抵抗率が 12.7kΩ・cm に調製された液体である。

比較を行った結果の一例を図7に示す。



(a) 体積抵抗率



(b)比誘電率

図7 異なる凍結条件で得られる凍結物の特性比較

図7より、体積抵抗率では対象となる周波数の全域において、静磁界印加による凍結物の値が約 5.0MΩ・cm であるのに対し、一般凍結による凍結物の値は約 2.5MΩ・cm であり、その特性に僅かな相違が認められる。

また、比誘電率では1kHz~10kHz の帯域において、一般凍結による凍結物の値のほうが、静磁界印加による凍結物

より高い値を示す特徴が観察されるが、それ以上の周波数帯域ではほぼ近似の値を示すことがわかった。

5. 結言

2枚の平面金属による電極板で構成する測定治具を試作し、空気や、液体ならびにその凍結物の電気特性を測定した。

測定により得られる交流インピーダンスの値から、体積抵抗率や比誘電率を求めた結果は、空気や水を対象にした場合、一般に知られる物性値と近似しており、簡便な測定系としての実用性があることを確認できた。

異なる凍結条件による凍結物の比較では、体積抵抗率については、ほぼ測定した周波数の全域で僅かな相違が認められ、比誘電率については、1kHz から 10kHz の周波数帯域で相違がみられることから、凍結条件の違いが凍結物の電気特性に何らかの影響を与えることが認められる。

このことは、異なる凍結条件による凍結物の間に、生成される結晶のサイズや形状、分布の相違が存在し、そのことが電気特性の差として観察されたものと推察されるが、さらに詳細な分析のためには氷結晶構造の観察などの手法を併用することが望ましい。

また、測定系全体においては、測定で用いたリード線に含まれる容量性の成分などを考慮することで誤差補正が可能であり、さらに精度の向上を行いたい。

今後は、測定で得られる凍結物の電気特性と、風味を損なわない凍結技術の相関関係を詳細に検証し、より優れた凍結技術の開発に利用すべく研究を進める必要がある。

謝辞

本研究の実施にあたり、的確な助言を頂きました成田絢一氏（奈良工業高等専門学校名誉教授、(株)菱豊フリーズシステムズ顧問）に感謝いたします。

ここに紹介した内容は、平成20年度に奈良県工業技術センターと、(株)菱豊フリーズシステムズが実施した共同研究で得られた成果の一部である。

参考文献

- 1) 豊田浄彦: 食品の電気物性とその応用, 美味技術研究会誌, No.11, 57-60, 2008
- 2) 橋本修: 高周波領域における材料定数測定法, 森北出版, 2-3, 2003
- 3) 川上正光: 改訂基礎電気回路I線形定常編(1) 電子通信大学講座 第13-1巻, コロナ社, 53-56, 1960