

非接触センサ式 EIS による食品加工のモニタリング

北 村 豊 (島根大学生物資源科学部助教)

はじめに

材料物性の非破壊計測技術の一つとして電気インピーダンス計測 (Electric Impedance Spectroscopy, EIS) が知られている。これは材料に接触あるいは挿入させた電極を用いて幅広い周波数帯の交流を材料に印加して、その応答特性すなわちインピーダンス特性を解析することにより材料物性を測定しようとする手法である。この特徴により、EIS は当初精密機械の部品や電気回路の物性解析に利用されてきた。しかし近年の研究から、EIS は人体や農水産物といった有機体を対象に、その脂肪含有率や熟度、鮮度といった物性の測定にも応用できることが示されている。さらに EIS は、材料物性に影響を与える水分移動や相変化、電解質増減等の生じる食品加工のモニタリングにも利用できると考えられ、乾燥や炊飯、発酵・凝固過程等への適用が試みられている。一方、多くの EIS では交流信号印加のために電極を材料に接触・挿入させる必要があるため、攪拌や輸送中の食品材料へ適用は難しいと推測される。また食品に対する電極の設置は、近年関心の高い食品衛生の観点からも、HACCP で定義される異物の混入等に繋がる可能性が懸念される。

そこで本研究では、食品に非接触の状態でのインピーダンス特性を計測するセンサならびにシステムを考案・試作した。これは電気的な現象と磁気的な現象が相互に影響を及ぼす事実に基づき、材料の電気的変化を磁気的変化としてとらえ、さらにそれを電気信号として検出しようとするもの

である。本法の原理は古くから知られており、これを利用した最近の研究例として糶の水分測定器の開発が挙げられる。しかしながら本法を食品加工における材料変化のモニタリングに適用しようとした研究事例は見あたらない。ここではモデル食品あるいは実際の食品を用いて、その濃度や硬さといった物性変化とインピーダンスパラメータの関係を実験的に明らかにすることにより、非接触センサ式 EIS の食品加工モニタリングへの適用性について検討したので報告する。

実験理論

例えば鉄やニッケルなどの物質は磁石によって強く磁化される、すなわち磁気的な性質を強く帯びる強磁性体である。磁性体への変化は、物質の構成を分子の磁石により考える分子磁石説によっても説明される。一方個々の分子磁石の特性は、分子同士のつながりや電子の数・運動等の変化すなわち物性の変化に影響されると考えられる。従ってソレノイド (以下コイル) 中に設置した材料に物性変化が生じれば、その物性変化はコイル内部空間の磁性を変化させ、それがコイルインピーダンスに変化を生じさせると思われる。材料とコイルとを直接接触させることなく、物性変化を電気変化として検出できるのが本法の特長である。

非接触式センサとしての有限長コイルのインダクタンス $L(H)$ は次式のとおり表される。

$$L = \frac{K\mu\pi r^2 n^2}{l}$$

ここで、 K は長岡係数、 μ はコイル内部空間

の透磁率 (H/m), r はコイル半径 (m), n はコイル巻数, l はコイル長さ (m) である。物性変化の生じる食品をコイル内部に配置した場合, 材料の変化に応じた μ の変化が生じ, コイルの L を変化させると考えられる。一方, コイルのインピーダンス $Z(\omega)$ は抵抗 $R(\omega)$ と誘導性リアクタンス $X(\omega)$ との直列回路として, 次式のように示される。

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

ここで ω は角周波数 (rad/s) である。コイルの R 成分は周波数変化と無関係に一定の値をとるので, 任意の周波数で測定された Z の変化は, L の変化すなわち材料の物性変化によるものと考えられる。

実験方法

1. 実験装置

ここで構築した非接触センサ式インピーダンス計測システムは, 恒温器, 試料容器, 3 種類のコイル (外径 50mm, 高さ約 88mm, 巻き数 70, 110, 150), インピーダンス計測器 (Z ハイテスタ, HIOKI), パソコン (PC98, NEC) から構成される。実験装置の概要図を図 1 に示す。またコイルは, 芯材に塩ビ管を使用し, $\phi 0.5\text{mm}$ のニクロム線を巻きつけて作成した。

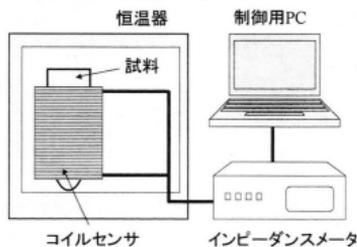


図 1 実験装置概略

2. 実験材料

モデル食品 (以下, 試料) には液体食品としてのグルコース溶液 (0~50%), スクロース溶液

(0~50%), 食塩水 (0~40%), 乳酸溶液 (0~40%) を, また 固体食品としての寒天ゲル (2~10%) をそれぞれ調整して供試した。また実際にヨーグルト (明治ブルガリア) とプリン (ハウスプリン) の加工を行い, その過程のモニタリングを行った。

3. 方法

ガラス遠沈管に種々の濃度の試料を入れ, それらを順番にコイル内部に入れながら, コイルインピーダンスを測定した。コイルへの印加電流は $1\text{V} \cdot 100\text{kHz} \sim 5\text{MHz}$ の交流電流とした。また温度変化がインピーダンス値に影響を与えないように, 測定は恒温器内で行われた。測定されたインピーダンス値を用いて, 抵抗とコイルの直列等価モデルに基づいたインダクタンスを算出した。寒天ゲルおよびヨーグルト, プリンについては, その表面破壊強度を強度あるいは硬度と定義して, レオメータを用いて測定した。

結果と考察

図 2 に試作した 3 種類のコイルインダクタンスの周波数特性を示した。いずれのコイルにおいても周波数の変化に対してインダクタンスはほぼ一定であり, 直列等価モデルの適用性が確かめられた。またコイル内部に何も無い状態 (空) と, 空のガラス管を配置した状態 (管) とでは, インダクタンスに差異は見られなかった。当然ながら巻き数が多くなるに従って, すべてのコイルのイン

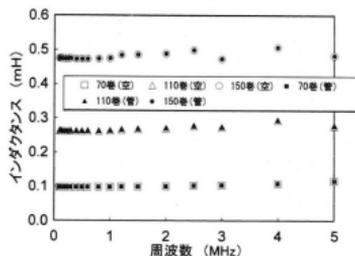


図 2 コイルインダクタンスの周波数特性

ダクタンスは増加した。

図3に3種類のコイル内に蒸留水を入れたガラス管を配置した状態で得られたインダクタンスの周波数特性を示す。70巻きと110巻きコイルについてインダクタンスの周波数に対する変化は4MHzまでの交流ではあまり大きくなかった。これに対して150巻きコイルにおけるインダクタンスの変化は、特に1~5MHzの周波数変化において大きかった。従ってそれ以降のインピーダンス計測ではインダクタンスの周波数特性が検出しやすい150巻きコイルを使用することとした。

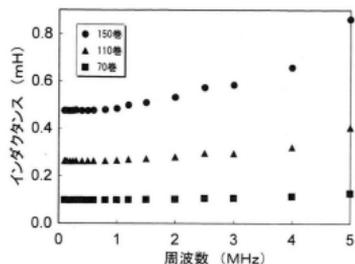


図3 水のインダクタンス周波数特性

図4に0~50%の間で数段階に濃度を調整したグルコース溶液におけるインダクタンス変化の周波数特性を示す。溶液の濃度変化がインダクタンスの変化に与える影響は、特に測定周波数が2MHzを越えるに従って次第に大きくなり、5MHzでは最大となった。図5は1~5MHzの各周波数で測定されたグルコース溶液の濃度とイ

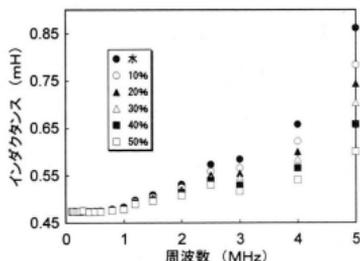


図4 グルコース溶液インダクタンスの周波数特性

ンダクタンスの関係を示した。濃度変化とインダクタンス変化が最も顕著に観察される5MHzの測定データにおいて、グルコース溶液の濃度とインダクタンスの間には相関の高い負の直線関係が認められた。

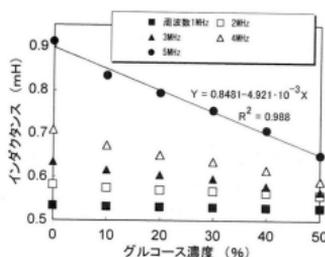


図5 グルコース濃度とインダクタンス

スクロース溶液についても、インダクタンスの周波数特性はほぼグルコース溶液と同様の傾向を示した。図6にスクロース溶液における濃度とインダクタンスの関係を示す。グルコース溶液と同様、5MHzにおける測定データに関してスクロース溶液の濃度とインダクタンスの間には高い相関の負の直線の相関が認められた。

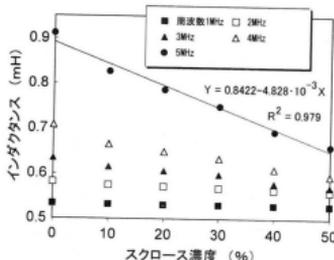


図6 スクロース濃度とインダクタンスの関係

一方、食塩水における濃度とインダクタンスの関係は図7に示すとおりグルコースやスクロースの溶液とは異なるものだった。すなわち食塩の添加直後に溶液のインダクタンスは急増し、それはその後高い相関を示しながら対数関数的に減少した。また食塩の飽和点にある溶液のインダクタン

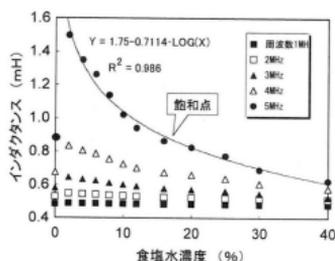


図7 食塩水濃度とインダクタンスの関係

スは蒸留水のインダクタンスとほぼ同じ値を示した。インダクタンス変化の濃度依存性が強く見られたのが5MHzの測定区であったことは、先のグルコース、スクロース溶液のものと一致した。

乳酸溶液については図8に示すとおり、他の溶液に見られたようなインダクタンス変化の濃度依存性を明確に見出すことは出来なかった。

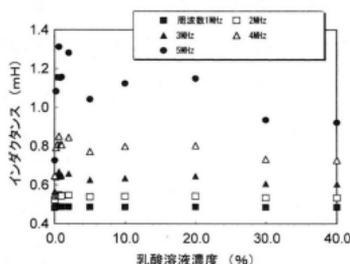


図8 乳酸溶液濃度とインダクタンスの関係

図9に5MHzで測定された固体モデル食品としての寒天ゲルのインダクタンスとその強度の関係を示す。グルコース、スクロースの溶液と同様にその関係は高い直線的相関を示した。しかしその傾きは正であった。

以上のモデル食品について得られた結果は、供試した溶液における溶質の溶解状態の相違すなわち水和による溶液か電離による溶液かの相違が大きく関係していると推察される。しかしその詳細については、ここでは明らかに出来なかったので、

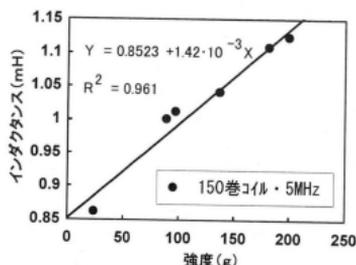


図9 寒天ゲルの強度とインダクタンス

今後の課題としたい。

モデル食品を対象とする実験に引き続き、実際の食品を対象としたインピーダンスの測定を行った。図10は、牛乳にヨーグルトを添加してから凝固するまでのヨーグルト加工プロセスにおいて、そのインダクタンスと硬度の経時変化を示した。なお本実験では長さを増したコイルを使用し、漏

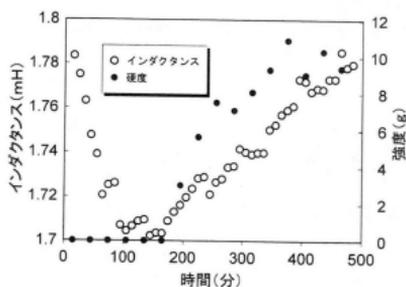


図10 ヨーグルト加工のモニタリング

れ磁束の低減による測定精度の向上を図った。図に示されるとおり、牛乳にヨーグルトを添加した直後からインダクタンスは減少し、その後の凝固が始まり硬度が増加を始めるにつれてインダクタンスは増加した。硬度の直線的増加に伴うインダクタンスの直線の変化は、モデル固体食品で得られた正の相関性と一致するものであった。一方、乳酸を主体とする電解質が増加していたと考えられる凝固開始までの期間に、インダクタンスの直線的变化が観察された理由は明らかに出来なかった。

図 11 には加熱した牛乳にプリン用ゲルを添加してからプリンが出来上がるまでのインダクタンスの経時変化を、プリンの温度と強度の経時変化と併せて示した。図から明らかなとおりプリン強度の増加に対するインダクタンスの直線的变化はここでは観察されなかった。これはプリンの加工では牛乳の温度変化が著しく、これがコイルセンサに伝わったことが原因として考えられた。従ってプリンのように温度変化の生じる食品加工のモニタリングに非接触式 EIS を適用するには、センサの断熱化が必要不可欠であることが示唆された。

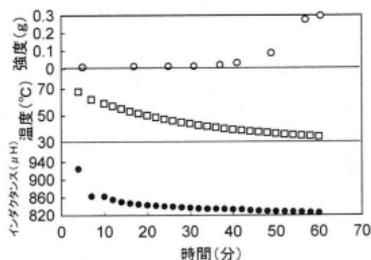


図 11 プリン加工のモニタリング

ま と め

非接触式 EIS を新たに試作し、モデル食品や実際の食品を対象として、インピーダンスパラメー

タと食品物性の関係を実験的に求め、食品加工への適用性を検討した。得られた結果は次のとおりである。

- (1) グルコース、スクロース溶液の濃度とインダクタンスは負の一次関数形で高い相関を示した。
- (2) 食塩水では食塩添加後からの濃度とインダクタンスの関係は対数関数形であり、高い相関を示した。
- (3) 乳酸溶液についての濃度とインダクタンスの関係は判然としなかった。
- (4) 寒天ゲルの強度とインダクタンスは負の一次関数形で高い相関を示した。
- (5) ヨーグルトの凝固過程を非接触式 EIS によりモニタリングできる可能性が示された。
- (6) 温度変化のある食品加工のモニタリングにはセンサの断熱が必要である。
- (7) 溶質の溶解状態と電氣的・磁氣的物性とを定量的に関係つけることが今後の研究課題である。

最後に本研究は浦上食品・食文化振興財団の多大なる助成によることを記して謝意を表する。

Food process monitoring by EIS with non-contact sensor

Yutaka Kitamura (Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University)

One of the nondestructive measuring methods for material properties, Electric Impedance Spectroscopy (EIS) system was constructed. Analyzing the electric response or impedance change to the AC current with a wide range of frequency, the system determines the material properties of the organic materials such as water content, phase change and ion concentration. In this study, the relationships between physical properties of the foods and their impedance parameters were determined experimentally by use of the EIS system with a non-contact sensor. The system is composed of the sensor, an impedance meter and a personal computer that controls the instrument and saves data. The sensor is a solenoid with 88 mm height and 50 mm outer diameter. The subjected food inside the sensor was expected to change the solenoid impedance when its magnetic property changed simultaneously with the change of material properties. The model foods as glucose solution (0 to 50%), sucrose solution (0 to 50%), sodium chloride or salt solution (0 to 40%), lactic acid solution (0 to 40%), agar gel (2 to 10%) and the actual foods as yogurt and pudding were put into the glass vessel and set in the sensor. Input AC current was 1 V and varied between 100k and 5MHz of frequency. 150 time winded solenoid with Nichrome wire (ϕ 0.5mm) was employed to detect the impedance changes. The glucose solution showed that the relationship between the concentration of glucose and the inductance obtained from the impedance value was a negative liner function. Also the relationship between the concentration of sucrose and the impedance for the sucrose solution was almost the same as the glucose solution. On the other hand, the relationship of the salt concentration and its inductance for the salt solution was a kind of logarithmic function with a Y-intercept. The lactic acid solution did reveal the dependence of the lactic acid concentration on the inductance clearly. Due to the solute type being hydrate or electrolyte, these differences of the relationships among the solutions seemed to occur. The relationship between the hardness determined by a compression test and the inductance for the agar gel was a positive linear function. Similarly in the yogurt processing, the inductance increased with the increase in the hardness because of its liner relationship. However the inductance did not increase with the increase in hardness in the pudding processing. The temperature change during the pudding coagulation seemed to effect on the impedance change, so that the design of the insulated non-contractive sensor was supposed for food process monitoring.