

## 研究論文

## 超音波による食品中の異物検出

市毛将司\*1、近藤温子\*1

## Detection of Foreign Bodies in Foods Using Ultrasound Imaging

Masashi ICHIGE\*1 and Atsuko KONDO\*1

Food Research Center\*1

超音波による液状食品中の異物検出について、医療用超音波診断装置を使用して基礎的なデータの取得を行った。均質な溶液中では食品と異物の組み合わせによって信号強度は変わるものの毛髪などの小さな異物を検出できた。一方、果肉など懸濁粒子の多いトマトジュースでは検出が困難であった。

## 1. はじめに

食品の異物混入対策は消費者の安全の確保の面からはもちろん、社会的な反響の大きさから食品製造企業の存続の上でも軽視できないものになっている。現在、異物混入の相談は食品に関する相談の 5.4%、食品に関する危害情報の 23%<sup>1)</sup>を占めている。食品製造業者は、金属検出器や X 線検査機などを導入し検査しているが、異物の材質によっては、検出が困難である。異物混入対策として、オンラインで迅速に把握できる、高精度・迅速・安価な検査手法が求められている。

液体系及びゲル状の食品中に固形の非金属異物(毛髪、昆虫及びプラスチック等)が混入している場合は、磁気や電磁波を使った検出が難しい。また、食品の多くが不透明であることから可視光による方法にも限界がある。超音波は空気中ではほとんど伝播せず、空間分解能も高くないが、食品中に比較的深く透過することから他の手法で検出困難な固形物の検出が期待される。そこで、本研究では、超音波による食品中の異物の画像取得及び検出について検討した。

## 2. 実験方法

## 2.1 反射式超音波イメージング装置の主要諸元

HS-2100(本多電子(株)製、画像処理機能付きのフルデジタル医療用超音波診断装置)を使用した。主要な諸元を以下に示す。

- (プローブ)128 素子アレイ型超音波振動子 40mm
- (周波数)6、8.5、11MHz
- (焦点距離)1~4 段多段フォーカス方式
- (深さ方向測定レンジ)2~16cm

## 2.2 音響インピーダンスが異なる溶液中での異物検出

音響インピーダンスが異なるように密度( $\rho$ )を変えた

シヨ糖水溶液( $\rho=1.00、1.05、1.10、1.15、1.20、1.25\text{g/mL}$ )を模擬食品として調製し、模擬異物としてナイロンテグス(0.285mm $\phi$ )、PE(ポリエチレン)製フィルム片(厚さ 50 $\mu\text{m}$ 、幅 2mm)、PP(ポリプロピレン)製フィルム片(厚さ 50 $\mu\text{m}$ 、幅 2mm)、天然ゴム(約 0.5mm $\phi$ )、毛髪及び銅線(0.5mm $\phi$ )の反射式超音波イメージング画像を取得した。模擬異物はプローブから 2cm の距離で、**図 1**のようにプローブのアレイ素子の配列方向と直交するように配置した。取得画像の異物を含む領域の濃度をデンストグラムの手法<sup>2)</sup>を用いて、異物の信号強度を求めた。解析ソフトとして、アメリカ国立衛生研究所から配布<sup>3)</sup>されている Image J を用いた。

## 2.3 移動状態での異物検出

水、牛乳、トマトジュースを満たしたアクリル水槽(100mm $\times$ 100mm $\times$ 500mm)に模擬異物として PE 球、PP 球、ステンレス球(いずれも 3.2mm $\phi$ )及び毛髪を設置した。その上部を超音波プローブで速さ 2cm/s で走査し、反射式超音波イメージング画像を取得した(**図 1**)。

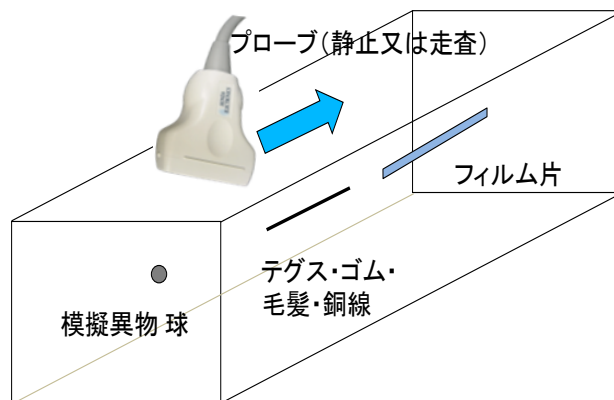


図 1 水槽中の模擬異物と走査方向

\*1 食品工業技術センター 保蔵包装技術室

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 音響インピーダンスが異なる溶液中での検出結果

反射式超音波イメージング装置は試験片にプローブを接触させプローブから超音波を発振し、プローブに返ってくる反射波の時間と強度から内部を可視化するものである。

異物検出の対象としては、水に近いものからジャムのように密度が高い食品を想定している。食品の密度が異なれば音響特性も異なるためである。

シヨ糖水溶液の音響インピーダンス(Z)はその定義( $Z = \rho \times c$ , c は媒体中の音速)から密度と別途求めた音速の積として表 1 のとおり求めた。

表 1 シヨ糖水溶液の音響インピーダンス

| 密度( $\rho$ )<br>(g/mL) | 音響インピーダンス(Z)<br>( $\times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) |
|------------------------|--|
| 1.00(水)                | 1.52   |
| 1.05                   | 1.63   |
| 1.10                   | 1.76   |
| 1.15                   | 1.90   |
| 1.20                   | 2.05   |
| 1.25                   | 2.22   |

代表的な音響材料では表 2 のとおり音響インピーダンスが測定されている<sup>4)</sup>。異なる媒質の境界に音波が入射した場合の音圧反射率( $R_p$ )は( $R_p = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2)$ :  $Z_1$  は入射側、 $Z_2$  は透過側の物質の音響インピーダンス)で与えられる。音圧反射率が負の場合は反射波の位相が反転する場合で、絶対値が反射の大きさである。これより、境界での音響インピーダンスの差が大きいほど音圧反射率の絶対値が大きくなるのがわかる。

表 2 模擬異物の音響インピーダンス

| 物質名  | 音響インピーダンス(Z)<br>( $\times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) |
|------|--|
| ナイロン | 2.97   |
| PP   | 2.23   |
| PE   | 1.71   |
| 天然ゴム | 1.55   |
| 銅    | 42.0   |
| 空気   | 0.0004   |

表 3 に音圧反射率の式に表 1 及び表 2 の値を  $Z_1$  及び  $Z_2$  として代入して求めた音圧反射率の絶対値を、水中での値( $\rho = 1.00$ )で除すことで規格化した値を示す。例えばナイロンの場合、表 3 の値からシヨ糖水溶液の密度が大きくなるにつれて、反射する超音波は単調に減少すると予想される。

表 3 音圧反射率( $R_p$ )の計算値(規格化後)

| シヨ糖水溶液密度( $\rho$ )<br>(g/mL) | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.15 | 1.20 | 1.25 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| ナイロン                         | 1.00 | 0.90 | 0.79 | 0.68 | 0.57 | 0.45 |
| PP                           | 1.00 | 0.81 | 0.62 | 0.42 | 0.22 | 0.01 |
| PE                           | 1.00 | 0.38 | 0.25 | 0.90 | 1.55 | 2.21 |
| 天然ゴム                         | 1.00 | 2.73 | 6.53 | 10.4 | 14.3 | 18.2 |
| 銅                            | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.97 |

図 2 にナイロンテグスを 8.5MHz の超音波で観察した像を示す。画面上部がプローブに接している面であり、画面下方向はプローブからの距離方向(深さ)、画面横方向はアレイ素子の配列方向である。プローブから発振した超音波は画面下方向に進み、異物で反射してプローブに戻り画像化されている。矢印で示す部分がナイロンテグスによる反射波が画像化されたものである。(a)、(b)ともに明瞭に識別が可能であったが、(a)と比較すると(b)の画像での強度はやや低下していた。

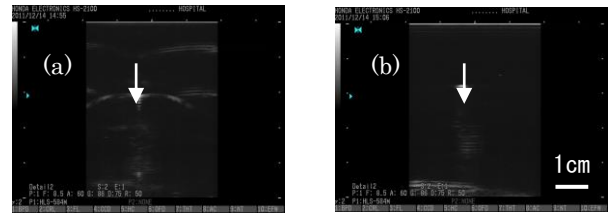


図 2 ナイロンテグスの観察像

(a)水( $\rho = 1.00$ )、(b)シヨ糖水溶液( $\rho = 1.25$ )

図 3 に異なる密度のシヨ糖水溶液毎にナイロンテグスを観察したときの信号強度を示す。信号強度は 3 種類の周波数のうち、測定値が最大だった 6MHz(水中、

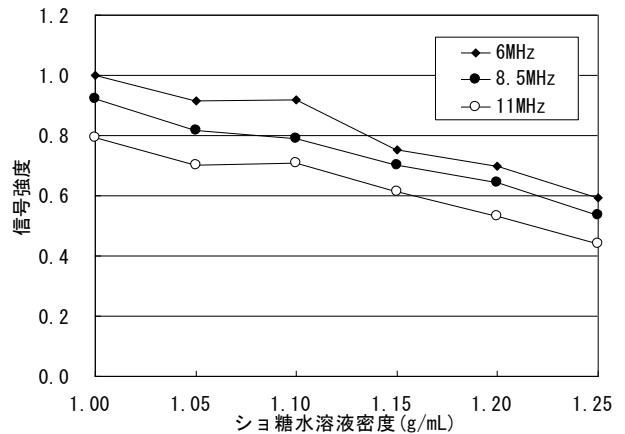


図 3 規格化したナイロンテグスの信号強度

$\rho=1.00$ )の値で除すことで規格化した。図3から、いずれの密度(音響インピーダンス)の溶液中でも、同一の溶液中での信号強度は6MHzで観察した場合が最も強かった。図には示さないが、いずれの模擬異物でも、ナイロンテグスと同様に同一の溶液中での信号強度は6MHzで観察した場合が最も強かった。これは、医療用超音波診断装置で使われる超音波の周波数では、周波数が高いほど媒質中を伝播する際の減衰が大きいためと考えられた。ナイロンでは、いずれの周波数でも音響インピーダンスが高い溶液中ほど信号強度が低下し、水と比較すると密度1.25g/mLのシヨ糖水溶液中では約60%まで低下した。これは、表3から予想される値よりも小さな低下だった。

図4に6MHzで各模擬異物をシヨ糖水溶液中で測定した信号強度を示す。信号強度は各密度の溶液での測定値を水での測定値で除すことで規格化した。

PPの音響インピーダンスは $2.23 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ であり、最も密度が高いシヨ糖水溶液では音響インピーダンスが近いので信号強度が小さくなると予想される。特にシヨ糖水溶液の密度が1.25g/mLの場合、表3から水中の場合の0.01倍と予想される。図4に示した結果からは、シヨ糖水溶液の密度が大きくなり、その音響インピーダンスがPPの音響インピーダンスに近づくにつれ信号強度は48%まで低下したものの、信号強度の極端な低下や異物画像の消失等は起こらなかった。測定に用いた医療用超音波診断装置では、反射波を画面上で輝度表示に変換する際、受信信号を対数圧縮し、音圧で1000倍異なる信号(60dBの幅)を同時に表示できる仕様である。このため、対数的に小さな信号であっても確認できたと考えられた。

天然ゴムの音響インピーダンスは $1.55 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$

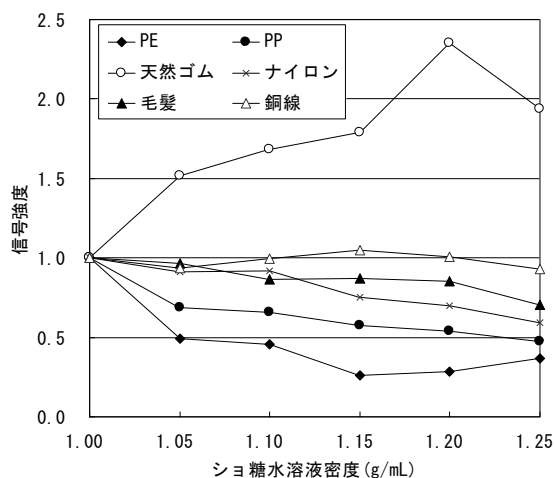


図4 規格化した各物質の信号強度(6MHz)

であり、水の音響インピーダンスに近い。図4に示した結果からは、シヨ糖水溶液の音響インピーダンスが天然ゴムの音響インピーダンスに近づくほど(シヨ糖の濃度が低いほど)信号強度が低下することが確認できたものの、信号強度の極端な低下や異物画像の消失等は起こらなかった。また、グラフの右端で信号強度が低くなっているのは、測定時のダイナミックレンジの設定をナイロンテグスやフィルム断面で最適化したため径の太い天然ゴムでは信号が一部飽和し、シヨ糖水溶液の粘性による減衰の影響が強めに現れたと考えられた。

PEの音響インピーダンスは $1.71 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ であり、今回用いた溶液の音響インピーダンスの範囲内である。このため、音響インピーダンスが同程度になる中間の密度では信号強度が小さく、音響インピーダンスの差が大きい水や密度が高いシヨ糖水溶液で測定した場合に信号強度が大きくなると想定される。図4に示した結果からは、シヨ糖水溶液( $\rho=1.15 \text{ g/mL}$ ,  $Z=1.90 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )で信号強度が最も小さくなり、音響インピーダンス値が異なるほど信号強度が大きくなることが確認できた。しかし、信号強度が最も小さくなったのは、シヨ糖水溶液の音響インピーダンスが文献値でのPEの音響インピーダンスに一致する濃度よりも高い密度の時であった。この原因としては、ポリエチレンの製造方法によって密度が0.91~0.96と幅がある<sup>5)</sup>ことから使用したフィルムと文献値の音響インピーダンスが異なったためと考えられる。また、PEの場合でも表3から予想される音圧反射率の低下と比較すると信号強度の低下は小さく、画像上での模擬異物の確認は容易だった。

銅の音響インピーダンスは $42.0 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ であり、水の音響インピーダンスと大きく異なる。このため、溶液の密度が異なっても信号強度は表3のとおりほぼ一定であると予想される。図4に示した結果からは、シヨ糖水溶液の音響インピーダンスが変化しても信号強度がほとんど変わらないことが確認できた。

毛髪は、ナイロンの場合と似た挙動を示したことから、その音響インピーダンスは近いものと考えられた。また、画像上での毛髪の存在はいずれの溶液中でも明瞭だった。

食品と異物の音響インピーダンスの違いに応じて音圧反射率は大きな変化が予想された。しかし、反射式超音波イメージング装置での観察画像からは、信号強度の増減の傾向についてはおおむね一致したものの、変化は緩やかでいずれの場合でも明確に確認することができた。このことから、静止した均質な食品中ではナイロンテグスのような細いもの、フィルムのように断面が薄いプラスチック類、異物としての混入頻度が高い毛髪であって

も検出の可能性があることが分かった。

### 3.2 移動状態での検出結果

液状食品中に PE 球、PP 球、ステンレス球及び毛髪を設置し、2cm/s でプローブを走査した。走査した連続画像のフレームレートは 46 フレーム/s であったので、フレームごとの移動は 0.44mm である。

水中及び牛乳ではノイズが少なく、明瞭に観察することが出来たが、トマトジュース中では果肉が存在するためノイズが多くなると予想される。各模擬異物を設置し走査して得られた画像を図 5 に示す。画像中の微小な輝点は果肉や気泡に由来すると考えられる。

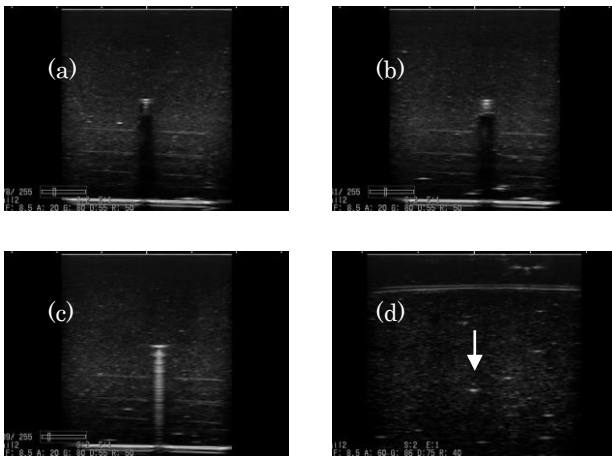


図 5 トマトジュース中の模擬異物 (a)PE 球、(b) PP 球、(c) ステンレス球、(d) 毛髪

3.2mm φ の球では走査した画像からは連続する約 10 フレームで異物を確認できた。プローブの走査速度は 0.44mm/フレームであるから、走査方向に約 4.4mm の長さで異物が観察されたことになる。これは試験片の 3.2mm φ より長いので、超音波のビームラインがある程度広がっていると考えられる。同一形状の球については、最も明瞭に観察できたのがステンレスで、次いで PP、PE であった。PE で反射が弱かったのは、トマトジュースの音響インピーダンス  $1.56 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (トマトジュースのブリックス(5.2)からショ糖水溶液として推測した比重をもとに表 1 の回帰式から推定した) と PE の音響インピーダンスが近いためと考えられた。毛髪は図 5 (d) の矢印に示した部分に確認できたが周辺には信

号強度が同程度の誤認しうる輝点が存在した。特に気泡によるノイズは、空気の音響インピーダンスが液状食品と大きく異なるため大きく現れると考えられる。

食品が動いている状況でも一定の検出力があるが、毛髪を検出する場合にはノイズとの分別が課題であることが分かった。異物と気泡や具材との判別には、画像処理によって形状などに基づく対応を行う必要があると考えられる。

## 4. 結び

反射式超音波イメージング装置を用いて異物検出試験を行った。均質な溶液中では、異物との音響インピーダンスの違いにより反射率が異なったが、毛髪など小さなものでも検出できた。果肉や気泡が混入し不均質な食品の例として試験したトマトジュースでは、ノイズと異物との識別が課題であることがわかった。

異物と気泡や具材との判別には、装置の測定信号による識別は難しく、異物や具材の形状などにに基づき画像処理による対応を行う必要があると考えている。今後、実食品で検出試験を進め、装置に適用可能な食品の範囲と異物の検出下限についてデータを取得していく予定である。

## 付記

本研究は、「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト「食の安心・安全技術開発プロジェクト」の研究成果の一部である。

## 文献

- 1) 国民生活センター：食品の異物混入に関する相談の概要，(2015)
- 2) 小島清嗣，岡本洋一：画像解析テキスト，(1997)，羊土社
- 3) National Institutes of Health : ImageJ, <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>, (2016.08.08 確認)
- 4) 超音波便覧編集委員会：超音波便覧，(1999)，丸善
- 5) 21 世紀包装研究協会：食品・医薬品包装ハンドブック，(2000)，幸書房