

超音波画像解析によるゆで卵の異物検出

渡邊弥生・塩野忠彦・橋本顕彦・青山康司

Ultrasonographic detection of foreign bodies in boiled eggs

Yayoi Watanabe, Tadahiko Shiono, Akihiko Hashimoto and Yasushi Aoyama

We examined how to detect eggshell fragments in boiled eggs, using a medical ultrasound diagnostic imaging system. The stronger ultrasound reflection from the eggshell fragment could be detect in the lower ultrasound frequency(6 to 9MHz), and the optimal distance of the ultrasound probe to the eggshell fragment was determined to be 1 to 3 cm. Therefore it was difficult to evaluate a whole egg with a single fixed probe, and it considered several probes were necessary for the detection. In this static condition, comparing the each mean concentration value, which was calculated from binarized and trimmed ultrasound image, was effective for the detection of foreign bodies in a boiled egg.

Since the reflection from the nearby egg white close to the probe and noise were observed in the dynamic condition, the concentration value was not enough to distinguish the eggshell fragment from the egg white reflection. Therefore the shape characteristics, defined as the ratio between the major axis and the minor axis of the ellipse equivalent, was considered to be useful for detecting the eggshell fragment from the boiled egg.

消費者の食品に対する安全・安心意識の高まりに伴い、食品製造企業に寄せられる異物混入クレーム件数が増加している¹⁾。食品製造現場では、異物が製品の中に混入している場合の異物検出装置として、金属探知機やX線異物検出機などが利用されているが、異物の種類や大きさ等が多様なため、完全に検出・除去できないのが現状である²⁾。特に、密度が低い異物などは、これらの装置では検出できないものも多く存在する。そのため、食品企業では、従来の装置では検出できない異物の新たな検出・除去技術が求められている。

超音波は非破壊で瞬時に素材内部の情報を得られるため、安全と品質を保ちながら、食品を検査できる有効な手段であると考えられる^{3)~6)}。しかし、超音波は空気中では減衰しほとんど情報を得ることができないため、水中での情報収集に利用されることが多い。著者らは、水中に浸漬可能な食品であるゆでた鶏卵の卵殻を取り除いた剥き身(以下ゆで卵とする)を検査対象とし、従来の方法では検出が難しいゆで卵に付着または突き刺さった卵殻を異物として、超音波照射で得られたエコー画像を利用して検出することを検討した。

実験方法

1. 超音波画像装置

超音波画像の取得には、「みるキューブ」(グローバルヘルス社製)および「sarano」⁷⁾(島津製作所製)を使用した。みるキューブのプローブはリニア型で、周波数

6MHz、振動子が64素子であり、取得される画像データの画素数は113×322であった。saranoのプローブ(L040-100U)はリニア型で、周波数6~12MHz、振動子が128素子であり、取得される画像データの画素数は645×517(最大時)であった。

2. 画像測定システム

(1) 静的画像測定システム

測定は、水槽に水を入れ、異物として卵殻片(以下、殻

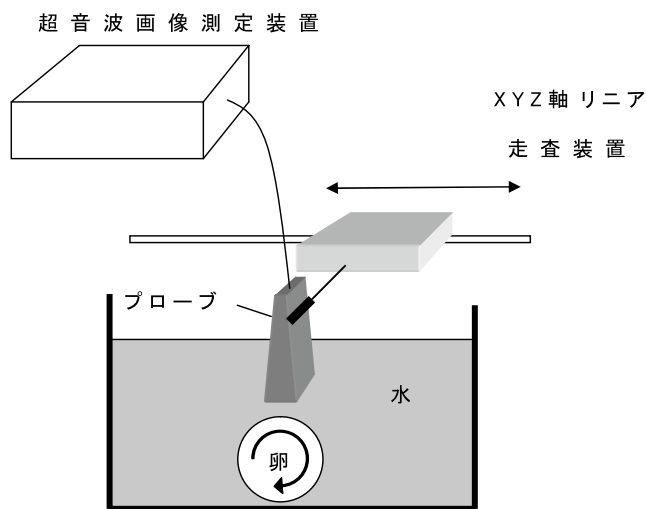


図1 画像測定システム

静的画像測定の場合は、卵を固定して、プローブを一定間隔移動させるごとに静止画を撮影した。動的画像測定の場合は、卵の回転やプローブ移動を行いながら、動画を撮影した。

とする)を上部表面に付着または突き刺した状態のゆで卵を、完全に水面下に浸漬して行った。プローブは、XYZ軸リニア走査装置(中央精機社製CPC-3D)にクランプを用いて固定し、プローブ先端が水中に漬かった状態で水平移動させて、水中に静置したゆで卵の超音波画像を取得した(図1)。プローブを一定距離移動するごとに超音波反射画像を取得した。

(2) 動的画像測定システム

ゆで卵を用いた食品製造現場でのゆで卵の連続的な動きを想定した動的画像取得のため、試料を回転させることと同時に、プローブをXYZ軸リニア走査装置により水平移動させることを組み合わせて、模擬的移動条件下において、試料の超音波画像を取得した(図1)。超音波装置としてはみるキューブを用いた。測定は、静的画像測定と同様に、殻を突き刺したゆで卵を試料として水面下に浸漬し、試料回転速度:60rpm、プローブ移動速度:1cm/sで行った。動画撮影はAmaRecCo(amamann, ver. 3.10a)により行い、フレームレートを50fpsとした。

3. 画像処理方法

(1) 静的画像測定

静的画像測定システムにより得られた画像は、PopImaging3.8(デジタル・ビーイング・キッズ社製)を用いて解析した。すなわち、画像の最大輝度値や平均濃度値などの特徴量を解析した。また、トリミング処理や2値化操作を行い、その後の画像の特徴量を解析した。

(2) 動的画像測定

動的画像測定システムにより撮影した動画からGOM Player(グレテック, ver. 2.1)により静止画抽出を行い、得られた静止画像をImage Factory(Imsoft, ver. 5.44)を用いて画像処理した。画像処理は、静止画を静的2値化(閾値100)し、形状特徴計測を行った。形状特徴計測は、抽出対象設定を幅、高さともに10ピクセル以上とし、小さいノイズを排除した反射像をカウントした。カウントした反射像の特徴量として等価楕円主副軸比⁸⁾を求めた。等価楕円主副軸比(A)は、面積一定で対象物を円形状に置き換えた際の等価楕円長径(a)と等価楕円短径(b)の百分率比であり、 $A=b/a \times 100$ で求められた。

4. 超音波周波数が異物検出に及ぼす影響

異物検出に適した超音波の周波数を調べるため、周波数設定が変更可能なsaranoを用いて撮影を行った。ゆで卵の上部に殻を突き刺し、超音波の周波数を5段階(6~9 MHz, 7.5~10.5 MHz, 9~12 MHz, 9~11MHz(H)*, 10~12 MHz(H)*)変化させて超音波を照射し、静的画像測定システムにより反射画像を取得した>(*H:ハーモニクイメーシング。超音波が媒質を伝搬中に発生する高調波の成分を映像化する手法)

5. 超音波画像装置の差異による異物の検出

超音波画像装置 sarano (6~9 MHz) およびみるキュー

ブ(6 MHz)を用いて、殻を付着または突き刺したゆで卵に超音波を照射し、静的画像測定システムにより反射画像を撮影した。

6. 超音波強度が画像に及ぼす影響

超音波は卵を通過する際に減衰するため、プローブと異物である殻との距離が長くなると殻の検出が難しくなると考えられる。したがって、みるキューブを用いて、水槽底やゆで卵底側からの反射像を得られるように超音波強度をvolume144とvolume255(最大値)に変化させて、静的画像測定システムにより撮影を行い、超音波強度が画像に及ぼす影響を調べた。

7. 超音波画像解析による殻の検出

静的画像測定システムにより、ゆで卵を長軸方向に3mm間隔でスキャンして得た1枚1枚の画像について、プローブ付近の高輝度部分と水槽底部分の画像を除去するトリミング処理を行い、その後、画像の平均濃度値を求めた。また、画像に対して判別分析法⁹⁾による2値化処理をした後に、同様にトリミングを行い、画像平均濃度値を求めた。殻の配置については、殻を卵表面にのせるように配置した場合を横方向、卵の長軸と垂直に突き刺す方向に配置した場合を縦方向とした。なお、殻のある場合とない場合で画像平均濃度値に差があるか調べるために、殻ありの横方向と縦方向および殻なしの各区の卵5個について平均濃度値の最大値を抽出し、t-検定を行った。有意水準は0.05とした。

8. 動的条件における超音波画像解析による殻の検出

殻を突き刺したゆで卵を60rpmで回転させ、プローブを固定した場合と、卵を回転させながら1cm/sでプローブを移動した場合の動画を取得した。得られた画像に対し、既述の動的画像測定の方法で画像処理を行い、等価楕円主副軸比を求めた。また、ゆで卵を固定してプローブ移動のみ行う場合は、殻の位置をゆで卵の上端部にある場合を0°として、これに対して30°と90°(横側部)の3位置で撮影を行い、同様に等価楕円主副軸比を求めた。

実験結果および考察

1. 超音波周波数が異物検出に及ぼす影響

異なる周波数の超音波を照射して得られた反射画像の最大輝度値、平均濃度値、2値化後の殻部分の度数を図2に示した。ハーモニクイメーシングでは最大輝度値と平均濃度値が小さくなったが、それ以外の周波数では大きな影響はなかった。また、2値化後の殻の度数は、周波数が高くなるほど小さくなった。したがって、超音波画像ではハーモニクイメーシングを使わない方が明るい画像が得られ、また周波数が低いほど異物からの反射が大きく評価されることが分かった。

2. 超音波画像装置の差異による異物の検出

sarano およびみるキューブを用いて、殻を突き刺した

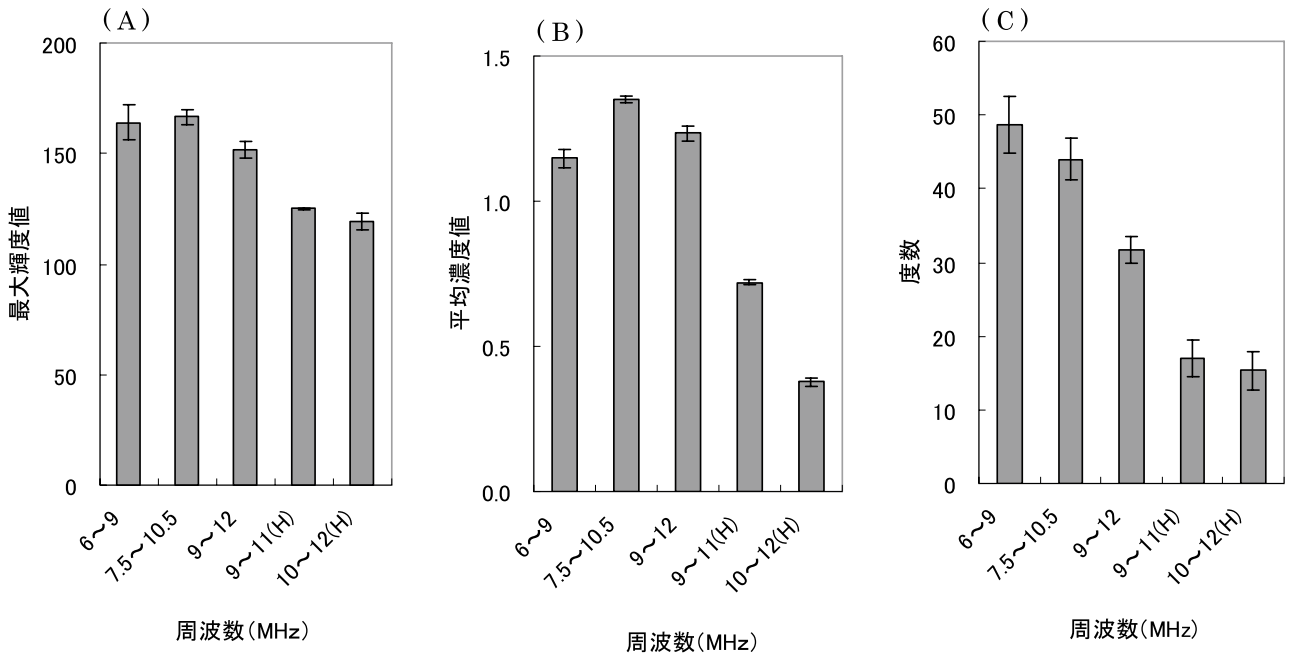


図2 周波数を変化させて撮影したゆで卵の画像解析
 (A) 最大輝度値, (B) 平均濃度値, (C) 2値化 (閾値80) 後の殻の度数
 平均値±標準誤差 (n=3), 殻: 3 mm 角上部突き刺し
 H: ハーモニックイメージング
 装置: sarano, 設定: focus 1, size 60, gain 10

ゆで卵を撮影して得られた画像を図3に示した。saranoを用いた撮影では、黄身やからぎ部分などの卵内部の様子が詳細に画像化された。一方、みるキューブではゆで卵自体の反射はほとんどなく、殻からのみ強い反射像が得られた。みるキューブに比べて、saranoはプローブの素子数や画像データの画素数が多いため、より詳細に画像化されたと考えられる。食品製造現場において、ゆで卵における異物としての殻は卵表面付近へ付着するか突き刺さっていると考えられるため、卵内部の詳細な情報は不必要である。したがって、saranoはゆで卵の異物検出には不向きであり、みるキューブを用いた方が有効であると考えられた。

3. 超音波強度が画像に及ぼす影響

図4に、みるキューブを用いて超音波プローブと卵の間の距離を変えて、撮影を行った場合の画像を示した。プローブと卵の距離が0.3 cmと非常に近い場合は、プローブ近傍の輝度の高い部分と殻の画像の判別が難しかった。一方、卵とプローブの距離が離れると、殻からの反射が小さくなっており、特に4 cm以上離れると、殻画像の輝度が非常に低くなっていた。したがって、対象とプローブとの距離は、1~3 cmが適していた。

しかし、鶏卵の直径は約5 cmあるため、プローブと反対側の面に殻がある場合には、検出が難しいと考えられた。そこで、水槽底やゆで卵の底側からの反射像を得られるように超音波強度について検討した。超音波の強度を変化させた場合の画像を図5に示した。超音波強度が小さ

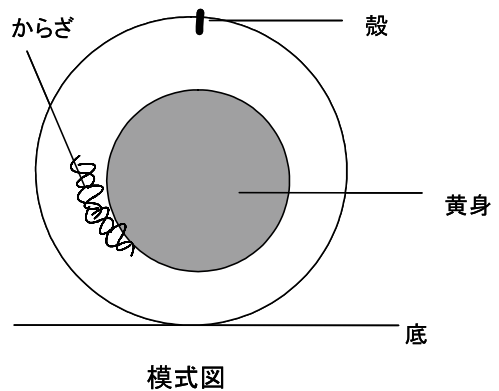
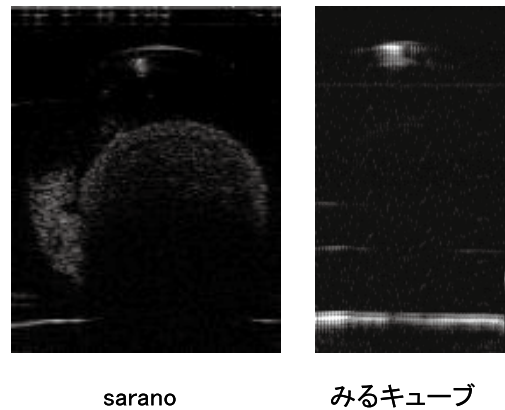


図3 sarano およびみるキューブで撮影した殻混入ゆで卵の断面画像
 sarano 設定: frequency 6~9 MHz, gain 20
 みるキューブ設定: frequency 6 MHz, volume 144
 殻: 3 mm 角上部突き刺し

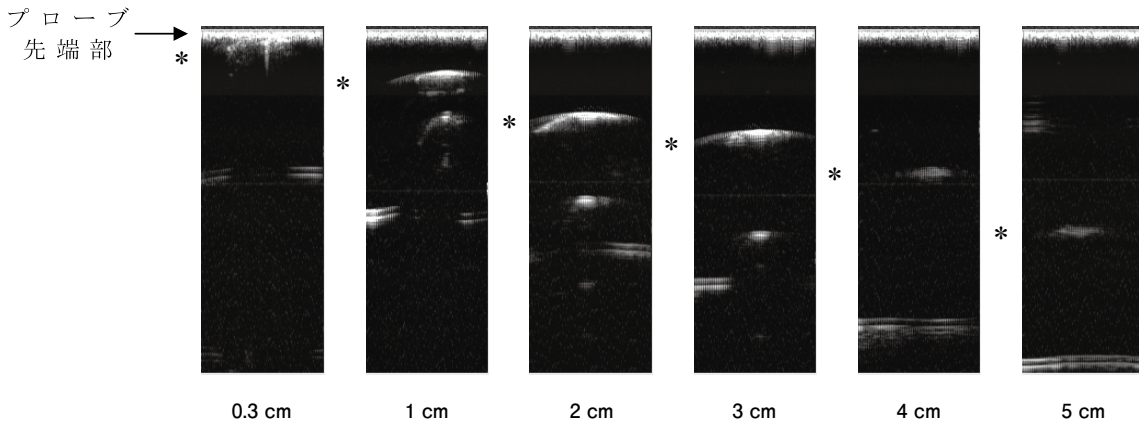


図4 卵上端部とプローブ間の距離の影響
 殻：卵の上部にのせた状態（2 cm 角），*：殻画像
 装置：みるキューブ，volume 設定：144

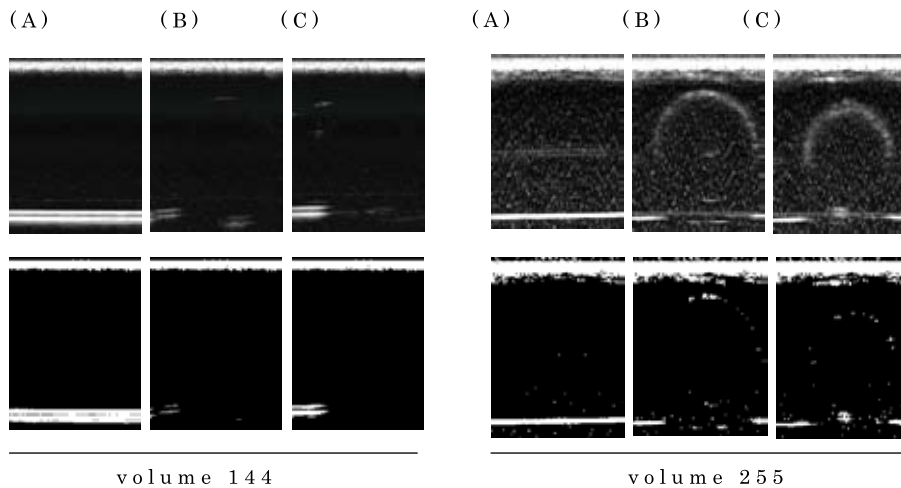


図5 超音波強度の影響
 上段：撮影画像，下段：2値化画像（判別分析法）
 (A) 卵なし，(B) 殻なし卵，(C) 殻あり卵
 殻：卵の下に置いた状態（3 mm 角），装置：みるキューブ

い場合（Volume 144）では超音波が卵を通過中に減衰し、水槽底からの反射像や底側にある殻の画像は得られなかった。一方、超音波強度を上げた場合（Volume 255）、底側にある殻からの反射像は得られたが、ノイズが大きいうえに、自身や黄身の表面からの反射像があるため、殻の検出は難しかった。すなわち1つのプローブで卵全体の殻を検出することは難しいと示唆された。したがって、少なくとも2方向からの超音波画像をもって、殻の検出をする必要があると考えられた。

4. 超音波画像解析による殻の検出

画像の平均濃度値を算出した結果を図6に示した。撮影した画像をトリミングしたのみでは、殻の存在する部位以外のスキャン位置でも平均濃度値が変動するため、殻の有無の判別が難しかった。しかし、2値化処理をした後トリミングを行うことで、殻の存在する部位以外のスキャン位

置での平均濃度値がほぼ一定になり、殻の存在する部位のみで値が大きくなった。

異物である殻がある場合とない場合のゆで卵を3 mm 間隔でスキャンして得た超音波画像それぞれについて、2値化後トリミング処理し、平均濃度値を算出し、各卵における最大値を抽出した結果を図7に示した。殻がある場合と殻がない場合の間には、画像平均濃度値の最大値に有意な差が認められた。このことから、異物検出のパラメータとして、画像平均濃度値が使用できると示唆された。例えば平均濃度値が2.5以上になった場合に殻があると判定すれば、殻の検出が可能になると考えられた。また、殻を横方向に配置した方が、縦方向にするよりも、平均濃度値が高くなっていた。卵の殻は厚みが約0.4 mmと薄いため、殻を横方向に配置すると、縦方向配置するのに比べて超音波が反射する面積が大きくなる。超音波は密度の異なる物質

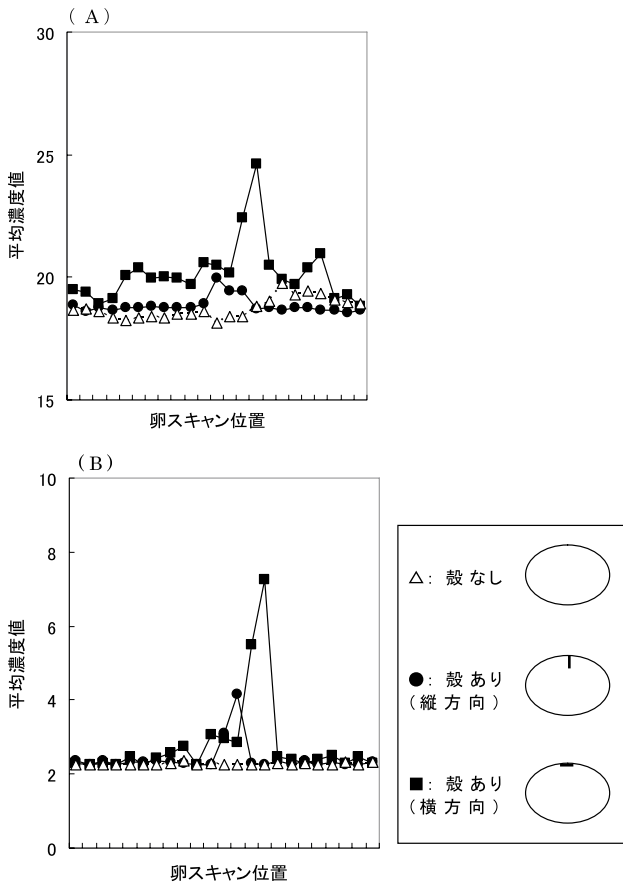


図6 ゆで卵の超音波スキャン画像の平均濃度値の推移
(A) トリミング処理のみ、
(B) 2値化 (判別分析法) 後トリミング処理
殻の大きさ: 3 mm角

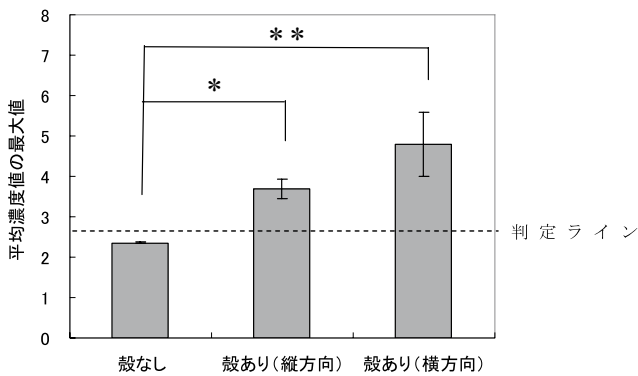


図7 ゆで卵の超音波スキャン画像の平均濃度値の最大値
ゆで卵の各スキャン画像を2値化後トリミング処理し、
平均濃度値を算出し、各卵の中で最大となった値を抽出した。
殻の大きさ: 3 mm角
平均値 ± 標準誤差 (n = 5), *: P<0.05, **: P<0.01

境界面で反射する特徴があり、検出には異物 (殻) の面積が重要であることが示唆された。現在主流の X 線異物検出装置では、X 線の透過量を元に異物を判別するため、異物の厚みが重要であり、表面積が大きくても厚みのない異物は X 線が透過して検出が難しい。一方、超音波では厚みよりも面積が重要と考えられた。したがって、卵の殻の

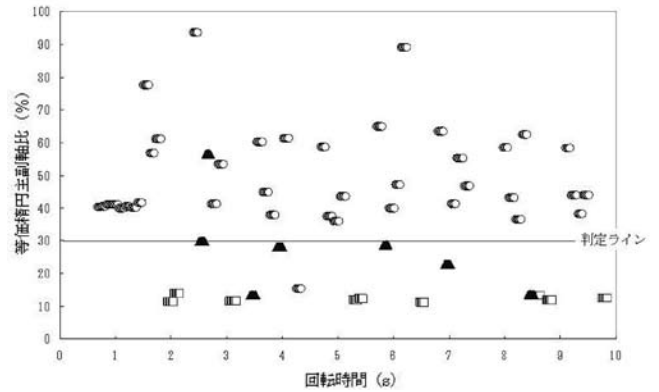
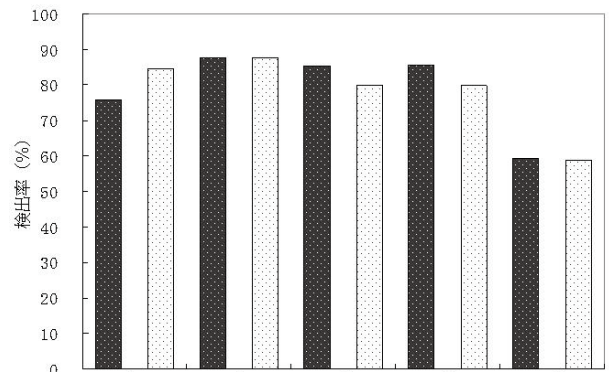


図8 ゆで卵の超音波画像の等価楕円主副軸比
ゆで卵に殻を挿入し回転させ得られた画像より等価楕円主副軸比を求めた。
殻: 1.5 mm 角, 装置: みるキューブ
○: 殻, ▲: エラー (ノイズ等), □: 白身反射



	A	B	C	D	E					
総静止画像数	2,946	3,113	5,177	4,804	4,362	4,532	4,783	4,893	4,451	4,673
位置	-	-	0°	30°	90°					
回転	あり	あり	なし	なし	なし					
プローブ移動	なし	あり	あり	あり	あり					

図9 動的条件下で画像解析を行った際の検出率
回転: 60 rpm, プローブ移動: 1 cm/s
■: 殻1.5 mm 角, □: 殻3.8 mm 角

ような薄い異物には超音波を用いた検出が有用と考えられる。

5. 動的条件下における超音波画像解析による殻の検出

ゆで卵に殻を突き刺し回転させた時の等価楕円主副軸比を図8に示した。動的条件下では、プローブに近い卵上端部の白身反射 (以下、白身反射とする) やノイズが一定でなく、画像の濃淡だけでは白身反射と殻の判別が困難であったため、形状的な特徴からの判別が必要であった。白身反射は細長い像として観察され、殻は相対的に円に近い像として観察されることから、等価楕円主副軸比を用いて殻の判別を行った。挿入した殻の等価楕円主副軸比は30%以上を示し、ノイズや白身反射がほぼ30%以下を示したことから、30%以上を殻として認識する判定ラインとした。

判定エラーは、等価楕円主副軸比が30%以上において白身反射あるいはノイズを選択している場合、又は殻の反射が30%以下である場合とし、正しく判別した静止画像数と

総静止画像数より求めた検出率を図9に示した。ゆで卵を回転させてプローブ移動がない場合 (A), 殻サイズ1.5 mm で75%, 3.8 mm で84%となり殻サイズが大きい方が検出率は高かったが, 回転かつプローブ移動させた場合 (B) では殻サイズに関係なく同じであった。ゆで卵を固定し, プローブを移動させた場合は, 0° (C), 30° (D) は両殻サイズとも79%以上を示したが, 90° (E) では両殻サイズとも59%と検出率が低下した。これは, 殻の角度変化による反射面積の減少により, 細長い画像が得られたためと考えられた。したがって, プローブと殻との位置関係による検出率低下を防ぐためには, 動的条件下でも複数のプローブが必要であると考えられた。

本報では, ゆで卵に付着または突き刺さった殻について, 超音波プローブを動かすこと, あるいはゆで卵を回転させる動的条件によって検出を行ったが, 生産現場の大量処理工程では, 複数の超音波プローブを固定し, 流水中を移動する卵を検査する必要があり, その場合のノイズや, 検査速度などについて, 今後検討する必要があると考えられる。また, 検出できる殻の大きさの下限や, 2つ以上のプローブを用いた場合の検出精度についても検討を要する。

要 約

超音波画像診断装置を用いて, 水中に浸漬したゆで卵の表面に付着又は突き刺さった殻の検出について検討した。超音波の周波数は低い (6~9 MHz) 方が殻からの反射が大きかった。また殻を検出するのに適した超音波プローブ

と対象間の距離は1~3 cmで, 1つのプローブで卵全体を検査することは難しかった。ゆで卵の超音波画像を2値化した後にトリミングを行い, 平均濃度値を比較することで, 殻の有無を判別できる可能性が示唆された。動的条件下では, 超音波画像を2値化および等価楕円主副軸比を求めることで殻の有無を判別できる可能性が示唆された。

文 献

- 1) 石向稔, 異物混入対策としてのAIBの導入支援, 食品と開発, 45 (5), 7-9 (2010).
- 2) 先光吉伸, 検出・除去装置の組合せ技術, 「食品異物除去ハンドブック」, 第1版 (サイエンスフォーラム, 東京), pp.151-154, (2008).
- 3) Cho, B.-K. and Irudayaraj, J.M.K., Foreign Object and Internal Disorder Detection in Food Materials Using Noncontact Ultrasound Imaging. *J. Food Sci.*, 68 (3), 967-974 (2003).
- 4) Hæggström, E. and Luukkala, M., Ultrasound detection and identification of foreign bodies in food products. *Food Control*, 12, 37-45 (2001).
- 5) Zhao, B., Jiang, Y., Basir, O.A. and Mittal, G.S., Foreign Body Detection in Foods using the Ultrasound Pulse/Echo Method. *J. Food Qual.*, 27, 274-288 (2004).
- 6) Chivers, R.C., Russell, H. and Anson, L.W., Ultrasonic studies of preserved peaches. *Ultrasonics*, 33, 75-77 (1995).
- 7) 小藪一弥, 柴田真明, 宮島武史, 常石召一, 岡崎秀樹, 辻井貫也, 俵秀行, 増田善紀, 八久保敬弘, 清水豊, 汎用超音波診断装置 sarano, 島津評論, 63, 189-194 (2007).
- 8) アイエムソフト, Image Factory for NT, 2000, XP User's Manual, 97 (2005).
- 9) 田村秀行, 2値画像処理, 「コンピュータ画像処理」, 第1版 (オーム社, 東京), p.140, (2002).