

## 超音波パルスエコー法によるかまぼこ内部の 気泡の検査方法

高井陸雄\*・鈴木 徹\*・三堀友雄\*・陳 正宜\*  
発地由美子\*・小嶋秩夫\*

### Non-destructive Evaluation of Voids in Kamaboko by an Ultrasonic Pulse Echo Technique

Rikuo TAKAI\*, Tooru SUZUKI\*, Tomoo MIHORI\*, Seigi CHIN\*,  
Yumiko HOCCHI\* and Tuneo KOZIMA\*

\*Tokyo University of Fisheries, Department of Food Science and Technology  
4-5-7, Konan, Minato-ku, Tokyo 108

Kamaboko containing a lot of voids which arise from the air bubbles taken in the grinding process of fish meat during manufacturing is complained about its poor quality. An ultrasonic pulse echo technique was applied to evaluate the size and number of these voids in kamaboko by using a standard ultrasonic inspection apparatus (a single-type). The frequency used was 2.25 MHz. The number of voids larger than 1 mm diameter in kamaboko was determined by counting the number of ultrasonic echo pulses on the oscillograms. The number of echo pulses gradually increased as the increase of the number of voids while the voids' number was small. However, an abrupt saturation of detecting echo pulse took place. This may be caused by a rapid growth of the shaded space generated by void particles which reflected ultrasonic pulse wave. This phenomena was simulated by a simplified model calculation, which suggested a way of avoiding saturation. The non-destructive detection of voids in kamaboko using ultrasonic technique is concluded to be feasible.

(Received May. 9, 1994)

かまぼこには、製造時に魚肉のらいかい過程で巻き込んだ空気を核として多数の気泡が生成する。気泡径の大きなもの、小さな径の気泡でも個数が著しく多いものは製品クレームの対象となる。熟練した技術者は製造ラインでかまぼこをチェックしながら、大きな気泡を持つかまぼこを、欠陥品として選別することも可能であるようだが、このような技術を持つ人の数は限られており、この方法で品質の劣るかまぼこを取り除くことが出来る製造ラインは極めて少ない。そこで、かまぼこ製造工程で発生する気泡の有無、多少を非破壊的に検査する方法として超音波によるパルスエコー法の利用を検討した。

超音波探傷法の一つであるパルスエコー法は、金属の溶接の際に内部に残留する微細な気孔の有無を迅速に検

査する方法として確立されたものであり、取扱も簡単で習熟すれば確実に欠陥を探することができる。しかしながら、食品の非破壊的な品質評価への適用例は数が未だ少ない<sup>1)~4)</sup>。

音波は物質が均一な場合、その内部を物質の固有の音速で伝播するが、伝播の特性は音速 ( $c$ ) と物質の密度 ( $\rho$ ) との積である音響インピーダンス ( $z = \rho c$ ) によって特徴づけられる。音波が音響インピーダンス  $Z_1$  の物質から  $Z_2$  の物質に伝播するとき、界面での音波の反射率 ( $\alpha_r$ ) は  $\alpha_r = (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2$ 、であり、透過率 ( $\alpha_t$ ) は  $\alpha_t = 1 - \alpha_r$  である<sup>5)6)</sup>。かまぼこの主成分は水 (60~75%) であり、内部の気泡は空気であると考えられる。20°Cにおける音響インピーダンスは、水 ( $Z_w$ ) が  $1.48 \times$

\* 東京水産大学 (〒108 東京都港区港南 4-5-7)

$10^6 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 空気 ( $Z_a$ ) が  $4.00 \times 10^2 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であるから, 水から空気へ音波が伝播する場合の反射率は  $\alpha_r = 0.998$ , 透過率は  $\alpha_t = 0.002$  となり, 音波は, 水と空気の界面ではほぼ完全に反射する. したがって, かまぼこ内部に気泡があると, 音波は気泡の表面で強い反射を示し, この反射波 (エコー) を観測することによりかまぼこ中の気泡の存在を知ることができると考えられる.

本研究では汎用の金属用超音波探傷器を使用し, かまぼこに含まれる気泡数の計数, あるいは大きな気泡の検出を試みた.

## 実験方法

### 1. 試料

試料には, 市販の 5 種類のリテーナ型かまぼこを用いた. 比較のため, 冷凍すり身 (FA 級) と食塩とを 100 対 3 の割合で混合した原料を真空らいかい機 (STEPHAN-UM5 UNIVERSAL) で 10 分間らいかいし, ケーシング (塩化ビニリデン製, 折径 47 mm) に入れ,  $90^\circ\text{C}$ , 40 分間加熱してゲル化した「かまぼこ」も実験に供した.

### 2. 実験装置

測定には工業用超音波探傷器 (三菱電気製, FD-410) を使用した. 探触方法としては送信プローブと受信プローブとが兼用になっている 1 プローブ法を用いた. プローブ (探触子) には中心周波数 2.25 MHz をもつ, 直径 15 mm の広帯域型 (パナメトリック製, V106) セラミックス振動子を使用した. プローブからパルス幅  $1\mu\text{s}$  の超音波を照射し, その直後から反射波を受信した. 受信信号のオシログラムは, 縦軸が音圧信号強度, 横軸は超音波パルスの往復に要した時間を示す. 測定で得られるオシログラム像を写真撮影し解析に供した.

### 3. 実験手順

#### (1) かまぼこ内部の気泡の測定

Fig. 1 に示すようにプローブを支持架台に固定し, かまぼこの上部からプローブを圧着した. プローブとかまぼこの間に空気層を作らないようにするため, かまぼこの表面にグリセリンを塗布し, プローブと密着するようにした.

#### (2) かまぼこ内部の状態の測定

プローブをかまぼこの山の頂上部に密着させ, 長辺方向へ 2 cm づつ順次ずらしながら, オシログラムを写真撮影した. その後, プローブをかまぼこの上部中央に置いて, オシログラムの写真撮影を行うと同時に, その位置におけるプローブ真下のかまぼこの切断面の気泡の状態を記録した. すなわち, プローブ真下に超音波が

伝播する仮想的な円柱を考え, この円柱の中心軸に沿ってかまぼこを切断し, この仮想的な円柱の切断面にスタンプインクを塗り, 紙に押しつけその印影をとり, 切断面にある超音波の波長以上の直径 (0.7 mm 以上) を有する気泡の数 ( $v$ ) を数えた.

#### (3) かまぼこ中の音速の測定

かまぼこ中を伝播する超音波の波長と音響インピーダンスとを決めるためにかまぼこ中の音速を測定した. かまぼこから, 一様な厚さ, 2.0 cm 試料を切り出し, プローブ面に密着させ, 超音波が試料の厚み方向に伝播し, 戻ってくるまでの時間 ( $t$ ) をオシログラム上で決定した. 試料厚さの 2 倍の距離をこの時間で除してかまぼこ中の音速とした.

## 実験結果及び考察

### 1. かまぼこ中の音速

本実験に使用した 4 種類のかまぼこ中の音速と水分含有量とを Table 1 に示した.  $25^\circ\text{C}$  におけるかまぼこ中の音速は  $(1.49\text{--}1.59) \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  であり水の音速 ( $1.50 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) にほぼ等しい値であった. 水を含むゲル状食品の音速は水のそれにほぼ等しいと言われている<sup>8)</sup>

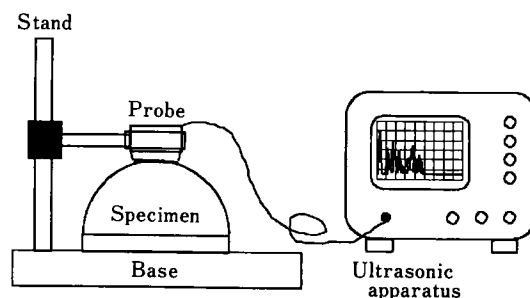


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Sound velocity and the water content of kamaboko

Kamaboko	Sound speed at $25^\circ\text{C}$ m/sec	Water content (%)(wet base)
A	1590	69
B	1490	73
C	1510	71
D	1492	71
E	—*	78

\* no measurable with many air voids

が、水分が70%程度のかまぼこでも水と同じ音速をもつことがわかった。したがって、かまぼこ内部を伝播する2.25 MHzの超音波の波長はおおよそ0.67 mm程度であると推定できた。

かまぼこの密度は(1.03-1.05) kg・m<sup>-3</sup>であり、水とほぼ等しいので、かまぼこの音響インピーダンスは水とほとんど一致することがわかった。

## 2. かまぼこ内部の気泡の検査

かまぼこ内部からのエコーはおおむね Fig. 2 に示すような3種類の形に分けることができた。

### (1) 気泡の極めて少ないかまぼこの測定例

真空らいかいしたかまぼこ原料をケーシングに詰めて作ったかまぼこから切り出した厚さ2 cmの試料について求めたオシログラムを Fig. 2 A に示した。左端の脉冲は照射波に対応するもので、他の3つの脉冲はかまぼこの底面から反射してきたエコーの脉冲だと認められる。これらの脉冲の外には気泡から反射してきたと考えられる脉冲はほとんど見えない。これはかまぼこ内部に気泡が極めて少ないためと考えられる。

### (2) 市販のかまぼこの測定例

Fig. 2 B, 2 C は市販のかまぼこの測定例である。いづれのオシログラムにおいても、左端は照射波脉冲である。Fig. 2 B では底面からのエコー(矢印↑)が明瞭に認められるが、Fig. 2 C では底面からのエコーが認められない。Fig. 2 B には照射脉冲と底面からの脉冲の

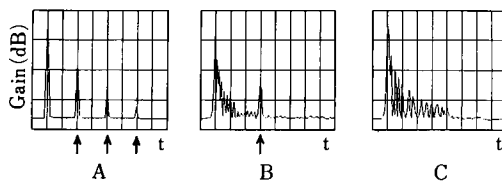


Fig. 2 Sample oscillograms of ultrasonic pulse echoes from kamaboko with wooden plate

- A: Kamaboko was prepared in the vacuumed vessel and it had no voids. Arrows mean the pulse echoes from the bottom of kamaboko.  
 B: Kamaboko was made by the standard process and had a lot of voids. The pulse echo from the bottom appeared. Kamaboko had a lot of voids and the  
 C: pulse echo from the bottom mixed up pulses from the voids.

間にいくつかの小さなパルスを見ることができ、これらは内部に存在していた気泡からのパルスエコーと思われる。他方、Fig. 2 C では多数の脉冲が観察できた。これらはかまぼこ内部に気泡が多数あったためと思われる。この場合、多数の気泡のため超音波が散乱・減衰し、底面からのエコーが観測できなかったものと思われる。

### (3) かまぼこ内部の気泡数の推定

超音波のオシログラム上で、照射波と底面エコーとの間に観察できるパルスは、照射波がかまぼこ内部の気泡で反射して戻ってきた信号と考えられる。プローブに到達する時間が近接している複数のパルスはそれぞれを独立したパルスとして認めることは困難であろうが、その合成されたパルスの信号強度を増加する効果をもたらすであろう。したがって、気泡からの反射に由来するエコーパルスの波形を解析すれば気泡に関する情報が得られるものと考えられるが、その解析は複雑なものになるであろう。本研究では取扱を簡単にするため、オシログラム上で識別可能な独立したパルスの数(P)を数え、それがかまぼこ内部の気泡数にどのように対応するかを検討した。

Fig. 3 はこのようにして数えたパルスの数(P)をプローブ面から底面までの距離(h)とプローブの直径の積で除した値を横軸に、プローブ真下の仮想的円柱の切

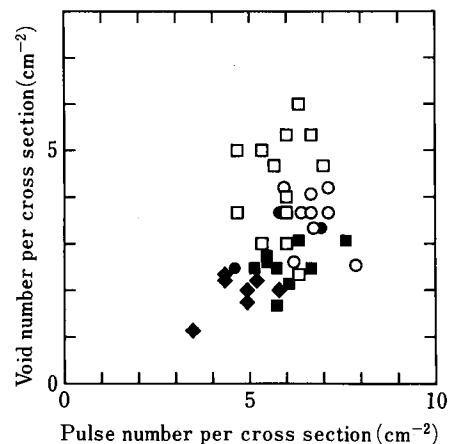


Fig. 3 Relationship between the number of pulse echoes on an oscillogram and the number of voids in the cross section of the kamaboko beneath the probe

Every symbol means the same brand from the different companies.

断面のスタンプインクによる印影から数えた気泡数 ( $v$ ) を切断面積 ( $S$ ) で除した値を縦軸にプロットしたものである。同図は一見して本測定がばらつきの大きいものであることを示している。これは、試料内の気泡の配置がランダムであることに起因すると思われる。したがって、バラツキの改善には測定回数を増し平均化した値を用いることが望ましい。また、Fig. 3 はかまぼこ中の気泡数が増加するとパルス数が飽和してしまう傾向を示している。

(4) かまぼこ板の上に生成する大きな気泡

かまぼこ板との面には大きな気泡が発達し空洞状態にまで至ることがある。この様に大きくなった気泡は前節で扱った小気泡に比べ、存在を確認することは比較的やすかった。プローブを同一試料のかまぼこの頂上部で、左から右へ移動してパルスエコーを採取した例を Fig. 4 に示した。Fig. 4 A には底面からのエコー (↑) が見られるが、Fig. 4 B にはこの底面位置に対応するエコーは見られず、それよりも短時間で戻って来る強いエコー (↑) のパルスをとらえることができた。これはかまぼこ板の面よりも浅い位置になんらかの広い境界面が有ることを示唆した。さらにプローブを左に移動させた

ところ、再び底面からのエコー (↑) を確認することができた (Fig. 4 C)。この検査の後、かまぼこ板を取り去り底面を観察したところ、底面付近には図に示すような、大きな気泡が確認できた。

3. 気泡数計測のシミュレーション

本節ではかまぼこ内部の気泡数を推定した本実験の結果 (Fig. 3) を、簡単な数学モデルによってシミュレーションし、更に、その結果に基づいて超音波パルスエコー法によるかまぼこ内部の気泡数の推定に有利な装置条件について論ずる。

(1) 切断面のスタンプ印影に現われる気泡数

体積  $W$  の媒体の中に直径  $d$  の球状の気泡が  $N$  個均等に分布する系を考える。この媒体を断面積  $S$  の平面で切断するとき、切断面に見いだされる気泡の数を  $n$  個とする。側面積が  $S$  で体積が  $W$  の立方体を Fig. 5 の一点鎖線で示す平面で切断する。切断面は側面に平行とすれば、断面の面積は  $S$  である。この断面によって切断される気泡は、断面から  $\pm d$  の距離の範囲に含まれているものに限られる。気泡が切断される領域の媒体体積は  $2dS$  である。したがって、切断される気泡数 ( $n$ ) は

$$n = 2dSN/W \tag{1}$$

となる。更に、この関係は媒体がどのような形状になっても変わらない。気泡の直径の 2 倍よりも試料が十分厚いものならば、体積が  $W$  の任意の形状の立体に対し、切断面の面積が  $S$  であればこの関係は適用できる。なお、切断面に色素を塗布してスタンプを作成し、その印影から  $n$  を計数する場合は、認識可能な最小の気泡の印影の寸法  $q$  (分解能の限界) が存在するであろう。その場合は上式の右辺の  $d$  を修正し、

$$n = (d + (d^2 - q^2)^{1/2}) SN/W \tag{2}$$

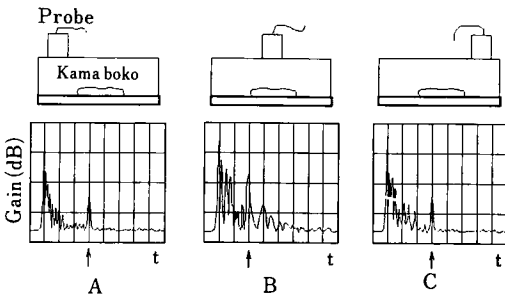


Fig. 4 Schematic diagram for detecting a large size void at the bottom of kamaboko

- A: The probe was put on the left top of kamaboko. The pulse echo from the bottom of the kamaboko appeared clearly (↑).
- B: The probe was placed above a huge void. The pulse echo from the bottom disappeared and another one from the huge void appeared at an early point on the time axis.
- C: The probe was put on the right top of kamaboko. The pulse echo from the bottom appeared in the oscillogram.

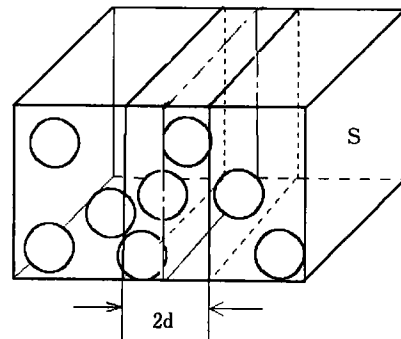


Fig. 5 Schematic void arrangement in a kamaboko model

とすればよい。

切断される気泡数  $n$  を切断面積  $S$  で除すと、試料中の気泡の濃度 ( $N/W$ ) を代表する値が得られる。

## (2) 超音波パルスの数

### i) 超音波の進行方向にたいする気泡の識別能

媒体中に気泡が2つあると、それらの深度  $L$  (センサーからの距離) に対応した時間軸上の位置 ( $t=2L/c$ ) にそれぞれのパルスが現われる。2つの気泡の深度が接近していると、それらのパルスは重複し、あたかも1つのパルスのように観測される。パルス幅  $\delta T$  の送信パルスを用いて観測する場合、この装置によって識別可能な分解能深度  $\epsilon$  は  $\delta T=2\epsilon/c$  によって決まる<sup>9)</sup>。この議論は3個以上の気泡からのパルスの重複についても適用できるだろう。Fig. 6 にその概念を示した。Fig. 6A の枠は7個の気泡を含む媒体を示している。この左側面より超音波を照射した時に得られるエコーは、Fig. 6B の様になると思われる。中央部の3個の気泡の深度の差は小さいのでそれらのエコーパルスは重複し、あたかも1つのパルスとして現われるであろう。同様に右端の2つの気泡のエコーも1つのパルスとして観測される。したがって、7個の気泡が存在するにもかかわらず、パルスは4個と観測される。

### ii) 超音波の陰に入った気泡の識別

超音波の進行方向に対し上流にある気泡は音波の進行方向、すなわち、下流に対し、陰を作る。この陰に入った気泡からエコーは返らないのでパルスは数える事がで

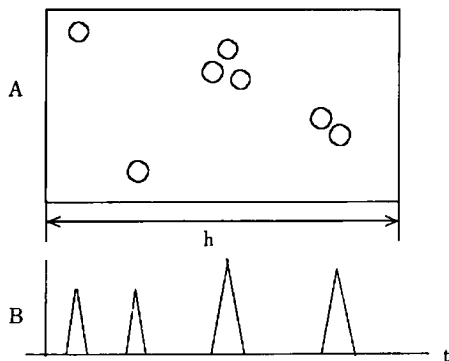


Fig. 6 Schematic model of the pulse echo from the isolated and the interacted voids each other

A : The position of voids in the kamaboko.

B : The pulse echoes from the voids.

きない。

### (3) 気泡数計測のシミュレーション

以上の様に考えると、超音波パルスエコー法による気泡の測定は、『プローブ面と試料の厚さで囲まれる3次元の領域内にランダムに  $N$  個の気泡が分散しているとき、超音波の進行方向に対し、気泡が作る超音波の陰に入らず、しかも超音波の進行方向に対し気泡の中心間の距離が  $\epsilon$  以内に集合した気泡クラスターの数を求める』問題に帰着する。そこで、この問題を簡単な数値実験に因って検討した。

プローブの接触面は一辺  $l$  の正方形とし、かまぼこ試料の厚さを  $h$  とする。 $N$  個の気泡をランダムに配置するため、気泡位置の座標 ( $X, Y, Z$ ) について、 $X, Y$  座標に対し  $0$  から  $l$  までの、また、 $Z$  座標に対しては  $0$  から  $h$  までの一様乱数を発生させる。ただし、 $Z$  軸方向をかまぼこの厚さの方向とし、この方向に音波が伝播する。まず、 $N$  個のすべての気泡について  $Z$  軸座標の大きい順に並び変える。次に超音波の進行方向に対し、陰に入る気泡を取り除く。そのために、順次気泡を  $XY$  平面に投影し、先に投影された気泡との距離が気泡の直径  $d$  よりも小さくなっている気泡を順次取り除く。この操作で残った気泡のうち超音波の進行方向に対し識別可能な距離だけ離れているものを求める。つまり、気泡の  $Z$  軸座標の差が  $\epsilon$  以内にある場合は1つのクラスターと見なし、計数可能なパルスの数には加算せず、求めた差が  $\epsilon$  以上の場合に計数可能なエコーパルスとして観測されるものとし、パルスの計数に  $1$  を加算する。

試料の単位体積中の気泡の数を  $1$  から  $N$  まで変化させ、この様な計算を行った例を Fig. 7A, 7B に示した。Fig. 7A はプローブの一辺の長さを  $1.5\text{ cm}$  とし、試料の厚さを変えた場合の、また、Fig. 7B は試料の厚さを  $2.0\text{ cm}$  とし、プローブの一辺の長さを変化させた場合の気泡の数とパルス数との関係を示したものである。同図より、計測されるパルス数は試料中の気泡数とともに増加するが、気泡数が一定数以上になるとクラスターが大きくなったり、上流の気泡の陰にはいる気泡の数が増えるために計測されるパルス数が飽和してしまったり、逆に減少していくことがわかる。

Fig. 3 に示した本研究の実験は、プローブの一辺が  $1.5\text{ cm}$  で試料厚さが  $2\text{ cm}$  であったから、Fig. 7A の  $\circ$  に対応する。同図は Fig. 3 のデータの挙動と良く一致しており、気泡数の増加とともにパルスの数が飽和してゆく状態を良く示している。本節で採用したモデルが、超音波エコーパルス数の計数に因ってかまぼこ内部の気泡

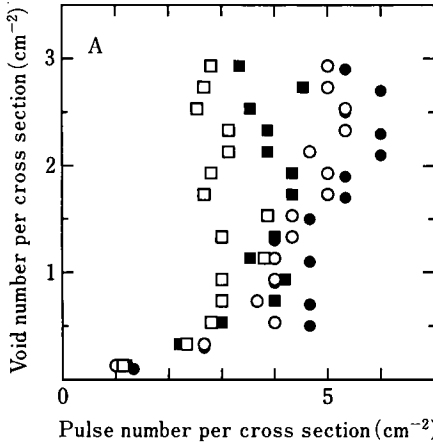


Fig. 7 Simulations of the relation between the number of echo pulse per unit cross section area of sample and that of voids in kamaboko

Fig. 7A Transmitter/receiver probe size was 1.5 cm × 1.5 cm.

Sample thickness :

●, 1 cm ; ○, 2 cm ; ■, 4 cm ; □, 6 cm.

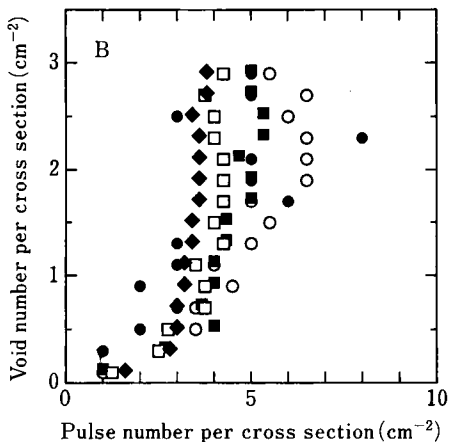


Fig. 7B Sample thickness : 2 cm. Transmitter/receiver size

●, 0.5 cm × 0.5 cm ; ○, 1.0 cm × 1.0 cm ; ■, 1.5 cm × 1.5 cm ; □, 2.0 cm × 2.0 cm ; ◆, 2.5 cm × 2.5 cm.

数を推定しようとする本研究の実験結果を予測する有用な手段であることを示唆している。

#### (4) 測定条件の検討

Fig. 3 の結果はばらつきが大きい上に飽和現象が現わ

れており、気泡数の推定という目的には不利である。ばらつきを押さえ、飽和現象を避ける方法を Fig. 7 から検討した。

Fig. 7A から明らかなように、プローブの大きさが一定の場合、試料の厚さが厚いものほど早くパルスが飽和する事がわかる。これは試料が厚くなると重なり合う気泡が増えてくることによるものと思われる。試料の厚みを薄くすると、気泡が重なりあう確率は減るものの、試料全体を代表するという条件に乏しくなる。Fig. 7B より、プローブの断面積を大きくすると飽和が始まるパルス数は大きくなるものの、気泡の数が少ない部分のパルス数に対する感度は悪くなる。したがって、本研究の方法で汎用的な“気泡数検査装置”を作ることは困難であるが、検査対象となる製品に含まれる気泡数密度に対応した最適なプローブ寸法や測定長さを、本シミュレーションによって決定し、単なる検査装置を作ることは可能なものと考えられる。なお、バラツキが大きいことは、測定を自動化し、多数回の測定の平均値を用いることにより克服できよう。市販のかまぼこに含まれる気泡の個数がスタンプの個数で 1~6 個/cm<sup>2</sup>であることを考え合わせると、本実験で採用した直径 1.5 cm のプローブでかまぼこの山の高さに当たる、厚さ 2~3 cm の試料を測定することにより内部に含まれる気泡の個数の状態をおおよそ把握できるものと思われる。

#### 要 約

かまぼこ内部に存在している気泡の状態を汎用の金属用の超音波探傷器を使用し、1プローブ法によって検査する方法を検討した。試料には市販のかまぼこを5種類使用した。以上の実験の結果、以下のことが明らかになった。

(1) かまぼこの音響インピーダンスは水とほぼ等しいため、かまぼこ内部の気泡の界面で音波はほぼ完全に反射する。このため、かまぼこ内部に存在する気泡の有無、大小を超音波パルスエコー法によって非破壊的に検査することが可能であった。

(2) 超音波オシログラム上から読み取れるパルスの個数とかまぼこ内部に存在している気泡数との間には複雑な関係があるものの、気泡数が少ない場合にはパルスの個数も少なく両者は比例関係を示した。しかし、気泡数の増加とともにパルス数は一定値に飽和し、気泡数の計測は困難となった。このような関係は簡単なモデルによる計算からも明らかになった。このような手法によって気泡の数を正確に求めることは困難ではあるものの、

プローブ径、試料の厚さを選択する事により気泡の多少を非破壊的に検査可能であることがわかった。

本研究において真空らいかいを施したかまぼこの調製をお願いした、(株)マルハ中央研究所星昌和博士に謝意を表します。

#### 文 献

- 1) 吉武 充：食品品質成分の非破壊分析測定法，食品研究刊行会，p.29 筑波 (1985).
- 2) POVEY, M.J.W and HARDEN, C.A. : *J. Food Technol.*, **16**, 167 (1981).
- 3) MILES, C.A., FURSEY, G.A.J. and JONES, R.C.D. : *J. Sci. Food Agric.*, **36**, 215 (1985).
- 4) HAFSTEINSSON, H., PARKER, K., CHIVERS, R. and RIZVI, S.S.H. : *J. Food Sci.*, **54**, 244 (1989).
- 5) 実吉純一・菊池喜亮・能本乙彦：超音波技術便覧 (日刊工業新聞社，東京)，p.720 (1987).
- 6) ENSMINGER, D. : *Ultrasonic*, (Marcel Dekker, Inc., New York), p.229 (1973).
- 7) KINSLER, L. and FREY, A.R. : *Fundamentals of acoustics* : (John Wiley & Sons, Inc. New York), p.128 (1950).
- 8) KRESS - ROGERS, E. : *Instrumentation and Sensors for the Food Industry*, ed by KRESS-ROGER, E (Butterworth - Heineman Ltd., Oxford). p.237 (1993).
- 9) 日本超音波医学会編，超音波医学 (第2版)，(医学書院，東京) p.108 (1980).

(平成6年5月9日受理)