

# 超音波を利用した食品安全性のための製造技術\*

三浦 靖 (岩手大学農学部農業生命科学科)\*\*

43.35.-c

## 1. はじめに

現在の食に関する潮流は、消費者志向と循環型(持続可能型)社会志向とに大別できる [1]。前者は、①健康維持、②安全性確保、③簡便性、④アメニティとホスピタリティ、⑤食文化の多様性や食の匠の尊重などの5点に集約できる。一方、後者には3R [発生抑制 (Reduce), 再利用 (Reuse), 再資源化 (Recycle)], 5R [3R に分別・分解 (Refine), 廃棄物のエネルギー資源化 (Reconvert to energy) が加わる], 7R [5R に修理 (Repair), 無駄の排除 (Refuse) が加わる], ファクタ X [X は 4, 10, 16, 20 などであり, (製品性能/資源投入量) × (製品性能/環境負荷) = 資源効率 × 環境効率と定義される] などが挙げられる。

本稿では、食品の安全性確保の観点から食品製造・加工への強力超音波の利用例を紹介する。

## 2. 食品製造・加工への超音波利用

### 2.1 食品素材の調製

コメデンプンの分離・精製において、従来法であるアルカリ液浸漬のように化学物質を使う手法に替わる改良法として高出力超音波の利用が試みられている [2]。33%(w/w) 長粒米粉 (RL-100) スラリーに対し、0.1%(w/w) NaOH 水溶液を対照にして 0.1~0.5%(w/w) ドデシル硫酸ナトリウム (SDS), ステアロイル乳酸ナトリウム (SSL), ポリオキシエチレン [20] ソルビタンモノオレート (Tween 80) 水溶液と超音波処理 (超音波発信器の出力 187.5~750 W, 20 kHz, 40/50°C, 15~60 min) の併用効果が検討されている。デンプン

収量は処理温度の影響をほとんど受けず、超音波処理によりデンプン収率が 46.7~76.2%, タンパク質含量が 0.9~1.7%, 損傷デンプン含量が 3.1~3.5% の範囲で変化する。0.5%(w/w) SDS 水溶液と高出力超音波の併用処理により、残留タンパク質含量が低く、デンプンの熱特性やアミロース含量、並びにデンプン粒子の表面状態に影響を及ぼさずにデンプンを高収率 (84.9%(w/w)) で得ることができる。

### 2.2 原材料の検査

物質中を伝搬する波動には縦波と横波とがある [3]。横波は物質の各部分の密度が常に一定に保たれるような波動であり、物質の変位は波の進行方向に垂直である。従って、横波の速度や減衰率は、複素弾性率によって決定される。

振動子の共振周波数を用いる手法では、強制共鳴振動法において振動子を液体試料に浸さない場合と浸した場合の共振周波数の差及び電気インピーダンス又は共振幅の差、自由減衰ねじり振動法において振動子を液体試料に浸した場合と浸さない場合との共振周波数の差、及び1周期当たりの減衰率の差を測定する。また、非共振周波数を用いる手法では、超音波伝搬法 [ねじれ波伝搬法, せん断波法] や超音波反射法において、振動パルスが固体中を伝搬したり末端で反射したりする際に、表面に存在する粘弾性体により伝搬定数や位相・振幅が変化することを利用する。

一方、縦波は物質の各部分の密度が変化する波動であり、物質の変位は波の進行方向と一致する。従って、縦波の速度や減衰率は、複素弾性率によって決定される。測定には、パルス伝搬法、液浸法、シングアラウンド (sing-around) 法、共鳴残響法、ブラッグ (Bragg) 反射法、ブリュアン (Brillouin) 散乱法などがある。パルス法は液体や固体の音速や吸収を MHz 以上の周波数領域で測定し、超音波物性の標準的測定法である。固体を液体媒体の

\* Food processing technology for establishing the safety of foods: Applications of ultrasonic wave.

\*\* Makoto Miura (Laboratory of Food and Health Science, Department of Agro-Bioscience, Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka, 020-8550) e-mail: mako@iwate-u.ac.jp

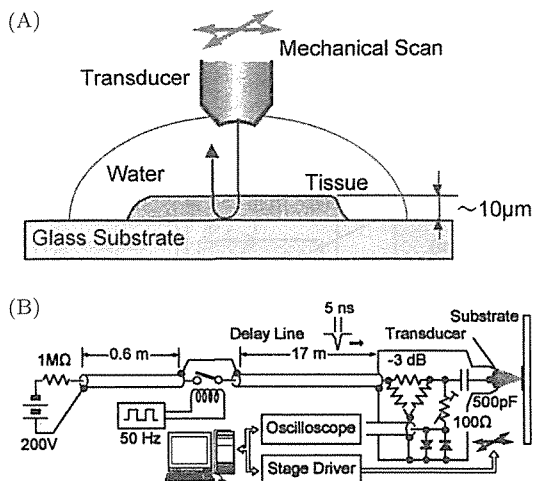


図-1 組織観察のための超音波顕微鏡の概念図 (A) 及び装置の概略図 (B)

中に浸して音速や吸収又は全反射の臨界角を測定する、又は粒状の試料を懸濁させて音速と吸収を測定する液浸法は、原理としては全くパルス法である。液体をパルス法で測定する場合には音速と吸収のいずれも測定できるが、吸収測定の方が有利である。音速測定ではパルスエコー法、パルス重量法、ミキサ法、シングアラウンド法、伝搬時間法などの方法をとる。

ナノ秒パルス (50 pulse·s<sup>-1</sup>) による超音波音速顕微鏡が提唱されている (図-1) [4]。振動子 (孔径 1.2 mm, 焦点距離 1.5 mm) の焦点直径は 80 MHz パルスの場合に 20 μm と推定されているので、測定点間距離を 20 μm に設定してある。本手法は走査点 1 個当たり 1 パルスなので、従来法である複数パルス法よりも格段に測定時間を短縮できる。実用化に向けては機械的走査速度並びにパルス繰り返し速度の向上が求められる。

### 2.3 洗 浄

食品工場における配管内の汚れの打音伝搬波と導波超音波を用いた検査は効果的かつ低経費である [5]。汚れは、汚れを起し易い食品、腐食、配管内や平板への食品の焦げ付きなどにより発生する。そして、汚れが存在すると送液装置の不必要な稼働を余儀なくさせ、汚れた配管内への熱流効率を低下させ、製品の品質や安全性を低下させる原因となる。汚れの早期発見や汚れ拡張の定量化は装置摩耗、配管の保守、製造停止に起因して発

生する経費を低減できる。導波法は平板や配管への粘稠性物質、半固体の付着によるエネルギー損失を計測する。打音 (衝撃応答) 法は汚れの存在による伝搬速度の変化や信号の減衰を計測する。

### 2.4 加工・調理

食品加工・調理への超音波照射の適用例として、超音波攪拌のマヨネーズ調製法への利用、各種野菜・果物の含銅農薬・塵埃の除去、鶏肝臓やコンニャク精粉・飛粉の脱臭、乾燥食品の復水、スープストック調製への利用などがある [6]。これらは超音波の攪拌効果、洗浄効果、物質移動の促進効果 (浸透、抽出) に基づいている。

超音波振動子 (38~42 kHz) を用い、酒類の熟成促進、溶液の分散や固-液抽出の向上、味質改善の効果をうたった超音波熟成装置が市販されている [7]。これは超音波の攪拌効果に基づいており、特にエタノール分子の水和促進と考えられる。

超音波乾燥は、強力超音波の機械的作用の一つとして、物質の置かれた雰囲気の状態、ほとんど温度上昇なしに短時間に物質から水分を除去できることを特長としており、熱的に制限を受ける保健機能食品などの製造技術として期待されている [8]。音波による乾燥速度の促進は、主に音波による物質表面の部分的な媒質振動に由来する。それは音波によって物体表面を部分的に攪乱し、その流れによって物体と空気との境界層を薄くすることである。乾燥における音波の効果が顕著に表れる音圧は通常 155 dB (微小粒子自身の振動速度である粒子速度が 3.27 m·s<sup>-1</sup> に相当) 以上と言われており、部分的交流的な速い流れの大容量音響出力を持つ音源が必要である。しかし、騒音低減を考慮して可聴周波数以上で大容量音響出力を持つ音源は実現されていない。そこで、短時間乾燥、低温乾燥、高い熱効率、省スペース、メンテナンスフリーを特徴にしたパルス衝撃波による固-液分離乾燥装置が開発されている (図-2)。パルスエンジン内の燃焼ガスは、1 秒間に百数十回~数千回の大きな振幅の圧力変化をしており、この圧力振動は尾管と呼ばれる燃焼ガスの通路内の燃焼ガスを数百 m·s<sup>-1</sup> の速度で振動させる。尾管出口では 155 dB 以上の強力超音波と 200~300°C の熱風の音場となっている。このパルス衝撃波中に分散状態又は溶液状態の原料を投入することで固-液分離乾燥をするものである。

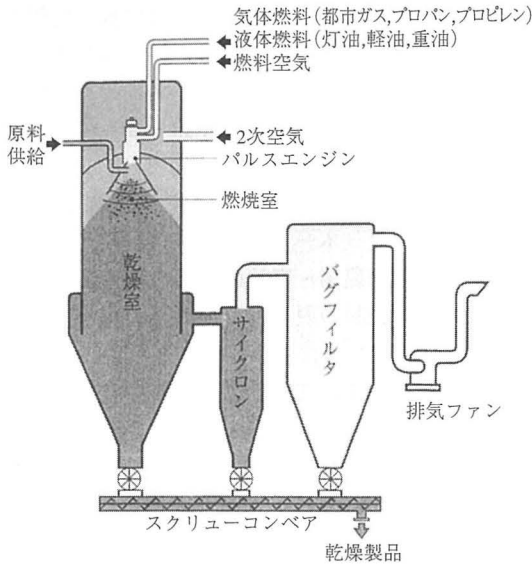


図-2 パルス衝撃波乾燥装置の概略図

凍結中の塊状食品 (2%(w/w)ゼラチン, 鶏肉, 牛肉) について, 凍結時間を予測するために熱流束方向への超音波パルス (2.25 MHz) の伝搬時間が計測されている [9]。食品表面及び食品中の凍結界面からの超音波エコーを記録しており (図-3), 超音波エコーの戻り時間が凍結により変化することを利用して, 音波パルスの伝搬時間が凍結相と非凍結相を伝搬する時間の合計であると仮定して凍結食品の凍結率の時間関数を求めている。温度変化よりも相転移の方が伝搬速度に影響を及ぼし, 水が凍結すると減衰が著しく大きくなるために, 超音波が十分な距離を伝搬しにくい。そこで, 低周波の利用が考えられるが, 空間分解能が低下してしまう問題が生じる。

ケーキ生地調製時における比重を測定する低価格な超音波測定装置が検討されている [10]。気泡量が最終製品の品質の主因子であるので, 生地の比重測定が品質及び混合状態の評価の一般的な手法である。超音波パルス反射法で測定する振動子 ( $\phi$  15 mm, 2.25 MHz) が考案され (図-4), 超音波強度と比重との線形関係が理論的に解析され, 実験的に検証されている。

低周波数超音波 (200 kHz) を使用して, 牛乳凝固過程における物理状態の変化を図-5 に示した装置で検討されている [11]。脱脂粉乳濃度, 凝固温度, 凝固 pH などの条件が, 超音波伝搬時間が有

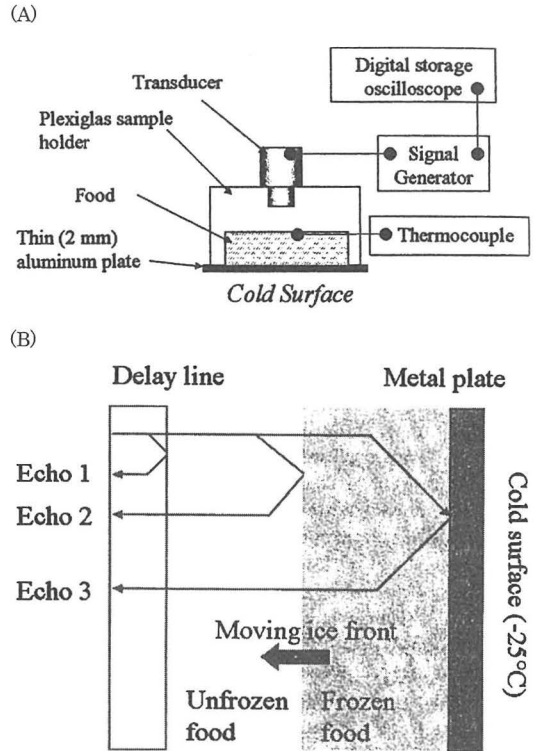


図-3 凍結装置及び超音波センサの概略図 (A), 並びに凍結過程にある食品の音波経路

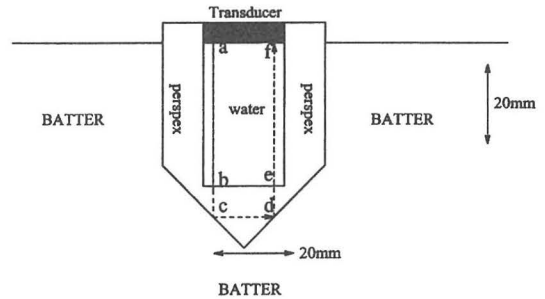


図-4 ケーキ生地比重測定のための超音波センサの概略図  
破線は音波の減衰経路を示す

意に変化し始める時間である遅延時間, 伝搬時間曲線の変曲点までの時間である凝固時間, 凝固時間での伝搬時間曲線の勾配である硬化速度, 力学的抵抗に相当し, 凝固反応による超音波伝搬速度の変化量であるゲル硬さに及ぼす影響が明らかにされている。

パン生地中の気泡分布を望ましい状態に維持するためには混捏条件が重要である。ミキサの頭部間隙圧を変化させた際のパン生地の力学特性変化を生地の空隙率<sup>注1</sup> (体積分率で 0.01~0.08) の関

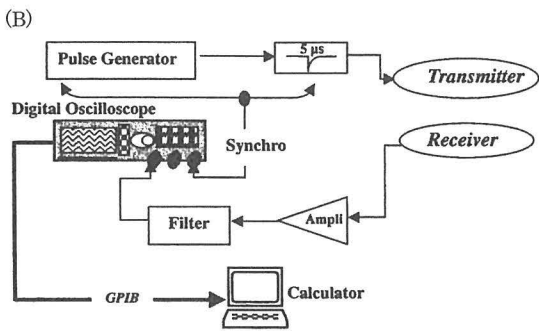
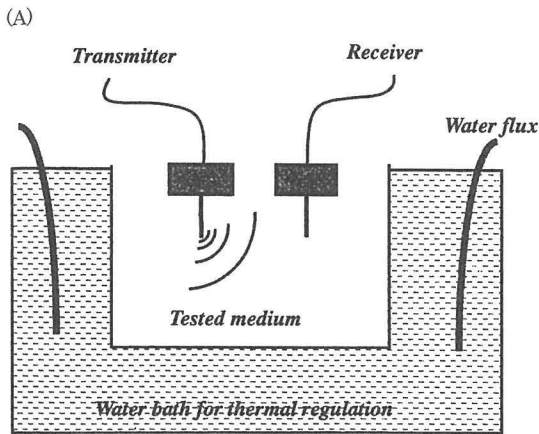


図-5 牛乳凝固過程での物理状態変化を検討するための超音波測定の原理 (A) 及び装置の概略図 (B)

数として低周波数超音波法 (50 kHz) により検討している (図-6) [12]。超音波縦波の減衰は、生地空隙率にしたがって直線的に増加する。もし、既報のように混捏での減圧は気泡数の密度<sup>注2</sup>を低下させるが気泡の大きさには影響を及ぼさないならば、超音波減衰の変化が気泡の数に比例する。しかし、空隙体積分率が 0.012~0.03 の範囲で増加するにつれて、超音波縦波の伝搬速度は水に近い値から空気中の値にまで著しく低下する。超音波法で求めた縦波弾性率は、パン生地の力学特性が気泡の存在に敏感であることを示している。低い空隙率では、パン生地の弾性挙動は生地の組織特性変化の影響を受ける。

### 2.5 保 蔵

超音波支援の浸漬凍結法により凍結したバレイシヨ組織の微細構造変化が検討されている [13]。高出力超音波は核生成速度と結晶成長速度を増加させるので結晶化工程の制御に有益である。超音波照射によりバレイシヨの凍結曲線から見た凍結

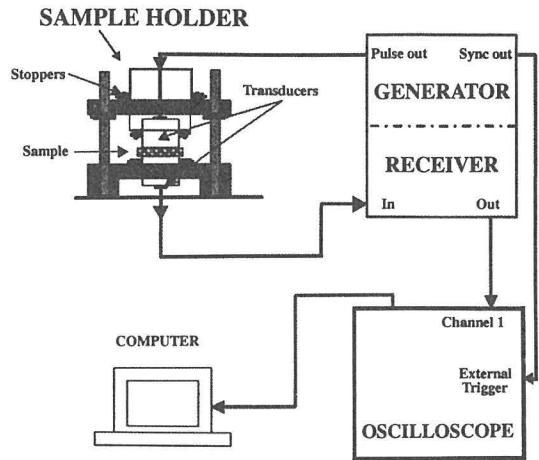


図-6 パン生地特性を評価する超音波測定装置の概略図

速度が増加し、出力が高く、照射時間が長いほど凍結速度の増大効果があるが、対象物が発熱するので限界がある。出力 15.85 W、照射 2 分間で凍結速度が最大となり、クライオ走査型電子顕微鏡観察によるバレイシヨ組織の微細構造変化が抑制される。

### 2.6 包 装

柔包装における微細漏れや融着部分汚染の信頼性検査は、製品の腐敗や安全上の問題点を抑制するために必要である。そこで、パルスエコー法による超音波映像化が試みられている [14]。後方散乱強度積分 (BAI, backscattered amplitude integral) 法の欠陥検出への適用が検討されている。樹脂包装とレトルトパウチ包装について、貫通溝欠陥 (直径 6~15 μm) や融着方向に直交する食品繊維 (直径 20~60 μm) を融着部分に巻き込ませて検討したところ、貫通溝欠陥 (9.5~15 μm) と繊維巻き込み欠陥が 17.3 MHz でのパルスエコー BAI 画像で検出できる。

### 2.7 品質評価

牛乳凝固系での超音波拡散係数を求める数値解法が提案されている [15]。再構成脱脂乳を異なる温度、レンネット<sup>注3</sup>の濃度や塩化カルシウム濃度で凝固させた。超音波パルス伝搬装置 (1 MHz) を使い、超音波拡散係数を伝搬速度と減衰特性の計測値から求めたところ、牛乳凝固の進行に伴って流動性が低下すると、拡散係数は増加する。そして、伝搬速度と拡散式に基づいて超音波拡散係数を予測する有限差分モデルが開発されている。

拡散係数の予測値は実測値によく対応したが、常に実験値よりも低かった。これは、振動子-牛乳ゲル界面でのエネルギー損失に起因すると考えられている。

ブタ肉発酵製品 (sobrassada) の成分組成を予測する分析手法への超音波利用が試みられている [16]。異なる配合の試料について、水分、脂肪及びタンパク質の含量と超音波伝搬速度 (1 MHz, 4~25°C) とを計測し、これら 3 成分の含量と伝搬速度を関連付ける半実験式が求められている。

スクロース (74~78%(w/w))-ゼンサンガム (0~0.5%(w/w)) 水溶液の 5~20°C における動的粘性率が、超音波せん断波反射率測定 (10 MHz) 並びに応力制御型レオメータを用いた動的粘性率測定で測定されている [17]。スクロース-ゼンサンガム水溶液では両測定法での測定値の相関が高いが ( $r^2 > 0.97$ )、絶対値はよく一致しない。一方、ゼンサンガム水溶液は超音波測定法では水と区別ができない。ゼンサンガムはスクロース分子の運動性を低下させ、マクスウェル緩和時間を 1 桁だけ増加させる。

固体脂の平均結晶径 30~36  $\mu\text{m}$  (試料 A) と平均結晶径  $< 1 \mu\text{m}$  (試料 B) の菓子用固体脂分散系 (被覆脂-トウモロコシ油 (2.5~12.5%(w/w))) について、固体脂の分散状態を固体脂含量 (SFC), X 線回折図, 密度, 動的粘性率, 粒子径分布, 分散系構造観察, パルスエコー法 (2.25 MHz) による伝搬速度と反射率, 減衰率により評価している [18]。超音波縦波特性は SFC と線形関係にあり, 減衰率のみが固体脂の微細構造の違いに敏感である。試料の SFC が類似していても, 超音波せん断反射率法と動的粘度測定法でも試料 B の方が試料 A よりも動的粘性率が高い。両測定法での測定値の相関は高いが ( $r^2 > 0.99$ )、絶対値は異なる。超音波縦波の反射率 (SFC, 分散系の密度の指標) と超音波せん断波の反射率 (レオロジー特性<sup>注 4</sup>の指標) のセンサは, 半結晶脂質 (チョコレート, ショートニング) のオンライン計測に適用できる。また, レオロジー特性のスケージング則は, 脂質分散系のフラクタル特性の指標になる。

### 3. おわりに

本稿では食品の安全性確保の観点から, 食品製造・加工分野での超音波利用技術を紹介した。今

後の超音波利用が期待される適用分野としては, 低出力の超音波照射によるバイオプロセス制御 (発酵や酵素反応の促進・遅延), 高出力の超音波照射による微生物制御 (除菌, 静菌, 殺菌), 結晶制御 (脂質結晶の多形, 糖質結晶のサイジング), 化学反応制御 (有機化合物の分解・生成による消臭, 加水分解, エステル交換, 風味改善) などが挙げられる。

#### 注

- 注<sup>1</sup> パン生地 の体積に占める気泡の体積の割合のこと。  
 注<sup>2</sup> パン生地 の単位体積あたりに存在する気泡の数のこと。  
 注<sup>3</sup> 凝乳酵素とも呼ばれる酵素の一種であり, 牛などの乳をチーズにする過程で用いられる。  
 注<sup>4</sup> 物質の変形と流動を扱う学問がレオロジー (rheology) であり, 弾性, 粘性, 塑性などの力学的物性のことである。

#### 文 献

- [1] 三浦 靖, “食品の安全性のための製造技術—超音波の利用—,” *超音波 TECHNO*, 15(6), pp. 56-62 (2003).  
 [2] L. Wang and Y.-J. Wang, “Application of high-intensity ultrasound and surfactants in rice starch isolation,” *Cereal Chem.*, 81, 140-144 (2004).  
 [3] 三浦 靖, “最近の食品品質評価の技術と装置 4—力学および伝熱学的・熱力学的な非破壊試験 (その 1),” *化学装置*, 39(8), pp. 90-97 (1997).  
 [4] N. Hozumi, R. Yamashita, C.-K. Lee, M. Nagao, K. Kobayashi, Y. Saijo, M. Tanaka, N. Tanaka and S. Ohtsuki, “Ultrasonic sound speed microscope for biological tissue characterization driven by nanosecond pulse,” *Acoust. Sci. & Tech.*, 24, 386-390 (2004).  
 [5] K.R. Lohr and J.L. Rose, “Ultrasonic guide wave and acoustic impact methods for pipe fouling detection,” *J. Food Eng.*, 56, 315-324 (2003).  
 [6] 大村友子, “超音波の食品加工・調理への応用研究,” *調理学会誌*, 35, 114-123 (2002).  
 [7] 亀井信一, “超音波熱成器,” *超音波 TECHNO*, 15(2), pp. 101-102 (2003).  
 [8] 窪谷篤芳, “パルス (音波) による瞬間・低温乾燥システム,” *化学装置*, 46(6), pp. 45-49 (2004).  
 [9] H. Sigfusson, G.R. Ziegler and J.N. Coupland, “Ultrasonic monitoring of food freezing,” *J. Food Eng.*, 62, 263-269 (2004).  
 [10] P. Fox, P.P. Smith and S. Sahi, “Ultrasound measurements to monitor the specific gravity of food batters,” *J. Food Eng.*, 65, 317-324 (2004).  
 [11] G. Nassar, B. Nongailard and Y. Noel, “Study by ultrasound of the impact of technological parameters changes in the milk gelation process,” *J. Food Eng.*, 63, 229-236 (2004).  
 [12] H.M. Elmehdi, J.H. Page and M.G. Scanlon, “Ultrasonic investigation of the effect of mixing under reduced pressure on the mechanical properties of bread dough,” *Cereal Chem.*, 81, 504-510 (2004).  
 [13] D.-W. Sun and B. Li, “Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing,” *J. Food Eng.*, 57, 337-345 (2003).  
 [14] A. Ozguler, S.A. Morris and W.D. O’Brien, Jr., “Ultrasonic imaging of micro-leaks and seal contamination in flexible food packages by the pulse-echo technique,” *J. Food Sci.*, 63, 673-678 (1998).

- [15] C. Ay and S. Gunasekaran, "Numerical method for determining ultrasonic wave diffusivity through coagulating milk gel system," *J. Food Eng.*, **58**, 103–110 (2003).
- [16] S. Simal, J. Benedito, G. Clemente, A. Femenia and C. Rossello, "Ultrasonic determination of the composition of a meat-based product," *J. Food Eng.*, **58**, 253–257 (2003).
- [17] R. Saggin and J.N. Coupland, "Rheology of xanthan/sucrose mixtures at ultrasonic frequencies," *J. Food Eng.*, **65**, 49–53 (2004).
- [18] R. Saggin and J.N. Coupland, "Shear and longitudinal ultrasonic measurements of solid fat dispersions," *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **81**, 27–32 (2004).



三浦 靖

1958年4月17日生, 宮城県出身。1986年3月東北大学大学院農学研究科博士課程後期(食糧化学専攻)修了。農学博士。1986年4月~1994年3月三菱化成株式会社(現三菱化学株式会社)総合研究所研究員。1994年4月~岩手大学農学部助教。食品の新規な加工・保蔵法の開発, 食品の新規な品質評価法の開発, 食品新素材の開発, 地域産業支援を手掛けている。