

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19300246  
 研究課題名（和文） 水中衝撃波による細胞壁破壊を利用した植物性食品の軟化と  
 その加工技術への応用  
 研究課題名（英文） Softening of vegetable food and its application to the processing  
 technology by the cell wall destruction using underwater shock wave  
 研究代表者  
 伊東 繁（ITO SHIGERU）  
 熊本大学・衝撃・極限環境研究センター・教授  
 研究者番号：80069567

研究成果の概要：個人の咀嚼能力に対応できる新規の食品加工技術として、衝撃波による食品加工技術研究を実施した。水中衝撃波による細胞破壊のメカニズムを解明し、衝撃波負荷に対する食品の軟化評価、衝撃波パラメータの計測ならびに評価、衝撃波伝播解析のための数値計算用コード開発、顕微鏡観察による衝撃波痕跡の画像解析を行い、個々人の咀嚼能力に応じた固さを得る食品加工技術の実用化のためのメカニズムを解明した。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2008 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

## 研究分野：衝撃工学

科研費の分科・細目：生活科学・食生活学

キーワード：食品と咀嚼性、食品加工、衝撃波、食品軟化

## 1. 研究開始当初の背景

高齢化が進行する現代社会において、咀嚼能力が衰えた高齢者にも対応した食品の需要が高まり、個々人の咀嚼能力に応じた固さを得る食品加工技術が必要となっている。その一方で、1989年に食品への高圧利用が提案されて以来、食品の高圧加工への関心が高まった。しかし用いられる高圧は、長時間の静圧や急激な圧力からの解放が中心である。

研究代表者は、従来は金属加工等への利用が主流であった衝撃波利用技術を、生物系に応用する研究を行っていた。その中で、植物系食品に対し瞬間的超高压である衝撃波を

負荷することで、非加熱軟化の効果が得られることに着目した。非加熱軟化効果は抽出性の向上効果をも伴い、衝撃波処理により果実から得られた果汁の栄養成分が大幅に増加することが判明した。

衝撃波は音速を超える速度で MPa レベルの圧力が伝播する瞬間的超高压であり、その作用時間がきわめて短いために熱変性作用が皆無に近い。つまり食品に作用するのは圧力のみである。さらに密度の変化面で密度が低い方向へ反射波を生じ、引っ張り力による破壊作用を引き起こす。すなわち植物性食品の組織・細胞内部に含有される気体に反射波を

生じることで、細胞壁への破壊作用が生じ、軟化効果が得られると考えられる。衝撃波の強度によって軟化の程度は大幅に変化するので、本研究技術は個人の咀嚼能力に応じた植物性食品の加工を行うために最適な技術である。

## 2. 研究の目的

本研究は水中衝撃波による細胞壁破壊の詳細なメカニズムを解明し、個々人の咀嚼能力に応じた固さを得る食品加工技術の開発を目的として、下記の項目について実験研究を実施した。

(1) 食品の軟化と衝撃波パラメータとの対応の解明：食品の衝撃波負荷による加工効果は、含水率および含油率が大きく影響することが、過去の実験によって判明している。また本研究で利用する衝撃波は、数 10MPa～30GPa 程度の圧力レンジ、圧力ピーク幅は数 ms から 10ms 程度である。これらの値と軟化の度合いについて実験し、咀嚼能力に応じた最適な固さへの加工を行うためのデータ収集を行うことを目的とする。

(2) 画像解析による植物性食品の軟化メカニズム解明：衝撃波による細胞壁の破壊作用は理論によるものであり、その確実な証拠が依然として得られていない。したがって顕微鏡観察による画像解析によって細胞壁破壊の痕跡の探索を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 衝撃波負荷に対する植物性食品の軟化評価

衝撃波発生源には導爆線ならびに高圧電気パルスを用い、衛生面から試料となる植物性食品を保護包装した上で、衝撃波を負荷する。衝撃波圧力は試料と衝撃波発生源との距離によって調整する。デュロメータ( ASTM D 2240 準拠)を用いて硬度を測定し、衝撃波負荷前後を比較し軟化度を求めた。

### (2) 衝撃波パラメータの計測ならびに評価

シャドウグラフ法による撮影：高速ビデオカメラ(撮影速度 1,000,000fps～30fps)を用い、密度差を陰影として記録するシャドウグラフ法によるリンゴへの水中衝撃波負荷の瞬間を撮影した。

ストリーク写真：シャドウグラフ法と同様にリンゴを試料とし、スリットから撮影し圧力伝播の時間的変化を連続的に記録するストリーク写真を撮影した。

### (3) 衝撃波伝播解析のための数値計算用コード開発

計測や撮影が困難な衝撃波負荷による破壊現象の解明のために、非線形動的構造計算ソフトウェア LS-DYNA を用いて数値計算を行

った。さらに得られた式を用いた数値解析結果と、実験による圧力値との比較を行い、その結果による加工装置の試作を行った。

### (4) 顕微鏡観察による画像解析

衝撃波負荷後の植物性食品の組織細胞に残された衝撃波痕跡の探索を目的として、走査型電子顕微鏡を用いた形態観察によって、衝撃波による破壊の痕跡探索を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 衝撃波負荷に対する植物性食品の軟化評価

衝撃波発生源には導爆線ならびに高圧電気パルスを用い、衛生面から試料となる植物性食品を保護包装した上で、衝撃波を負荷する。衝撃波圧力は試料と衝撃波発生源との距離によって調整する。デュロメータ( ASTM D 2240 準拠)を用いて硬度を測定し、衝撃波負荷前後を比較し軟化度を求めた。

リンゴを試料とした圧力と軟化度との相関関係を図 1 に、ダイコンを試料とし加熱した場合の軟化度との比較を図 2 に示す。

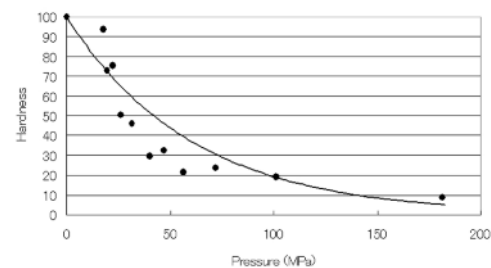


図 1. 衝撃波圧力とリンゴの軟化度との相関関係

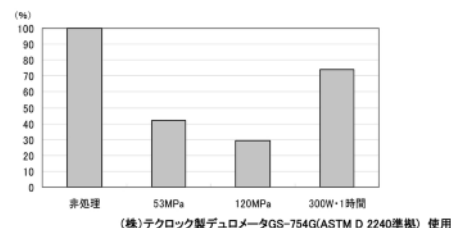


図 2. ダイコンに対する衝撃波圧力ならびに加熱による軟化度の比較

### (2) 衝撃波パラメータの計測ならびに評価

シャドウグラフ法による撮影：図 3 に撮影画像を示す。画面上方で生じた衝撃波がリンゴに到達し、その表面で反射波が生じていることが分かる。また 50MPa 程の衝撃波を負荷しているが、リンゴ全体の形状に変化は見られない。

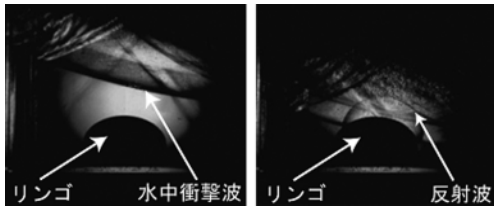


図3．高速度ビデオカメラで撮影した衝撃波伝播の画像（シャドウグラフ法）

ストリーク写真：図4に撮影画像を示す。横軸が時間、縦軸が距離となっており、この写真を画像処理することで、衝撃波速度を計測できる。一方でリンゴを透過する衝撃波については影により可視化不可能であるため、写真から平均速度を算出したものを透過衝撃波速度として取扱い、約3.1km/sの入射衝撃波速度が得られた。

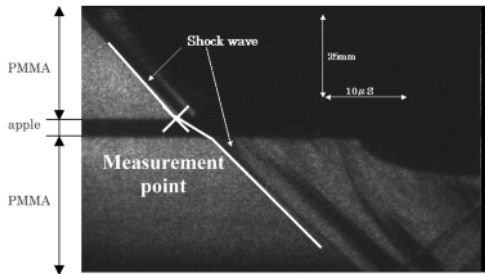


図4．リンゴを透過する衝撃波のストリーク写真

- (3) 衝撃波伝播解析のための数値計算用コード開発
- (2) で撮影したストリーク写真から、リンゴのユゴニオ状態方程式(式1)を算出した。

$$U_s = C_0 + s \cdot u_p \dots \text{式1}$$

$$C_0 = 1088 \text{ m/s}, s = 0.375$$

式1を用いた数値解析結果と実験による圧力値の比較結果を図5に示す。ユゴニオパラメータの誤差がピーク圧力値に表れているが、衝撃波電波時間では良好な一致が見られる。

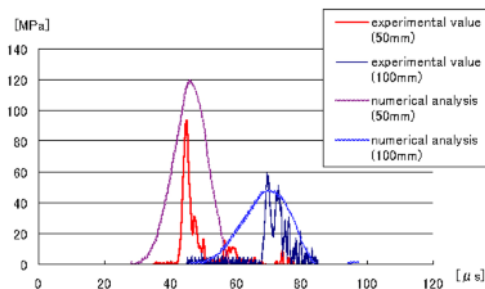


図5．リンゴのユゴニオ状態方程式による数値解析結果と計測実験による圧力値の比較

また高電圧放電実験用の衝撃波食品加工容器をモデルとして、衝撃波食品加工の数値解析モデルを作成した。その結果を図6に示す。容器における衝撃波の反射によって、点BDEFにおいて圧力波形の山が2つ生じていることが確認された。このように容器形状によって反射波の影響を考慮することで、より効率のよい加工が可能となる。さらにこれらの結果を参考に、爆薬による衝撃波と比べて取扱いが容易な放電による衝撃波を用いた食品軟化加工装置を試作した。(図7)。

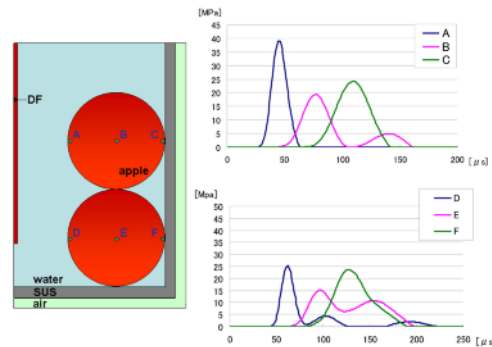


図6．衝撃波食品加工容器の数値解析モデル



図7．水中放電を利用した衝撃波処理装置

(4) 顕微鏡観察による画像解析

ダイコンを試料として用い非処理試料(図8)湯がきによる軟化試料(図9)圧力鍋を用いた湯がきによる軟化試料(図10)水中衝撃波(120MPa)処理試料(図11)それぞれの走査型電子顕微鏡写真を示す。

非処理ならびに湯がきによる軟化試料では、圧力鍋を用いた場合でも細胞壁の変化は見られないが、水中衝撃波処理による試料は、細胞壁各々に衝撃波により生じたクラックが確認される。

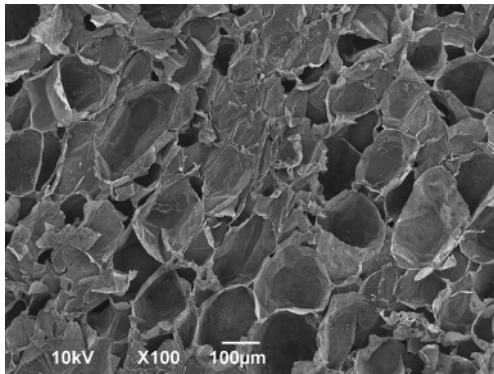


図 8 . 非処理ダイコンの電子顕微鏡画像

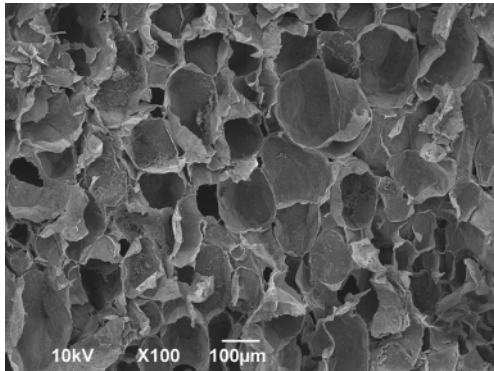


図 9 . 湯がきにより軟化したダイコンの電子顕微鏡画像

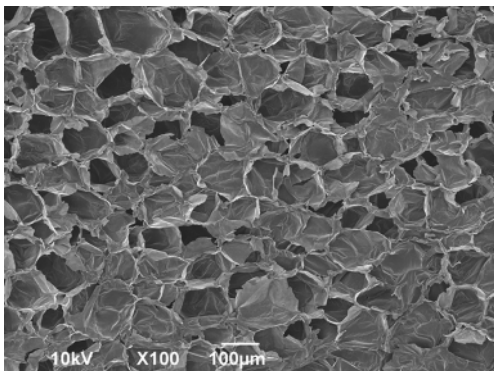


図 10 . 圧力鍋を用いた湯がきにより軟化したダイコンの電子顕微鏡画像

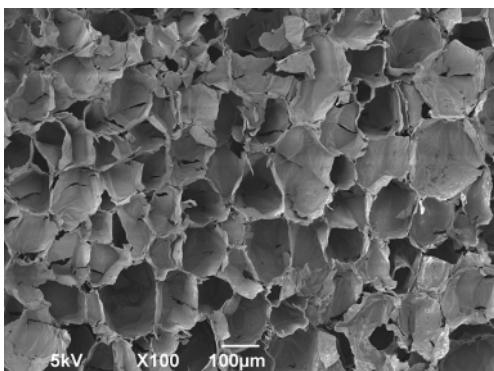


図 11 . 120MPa の水中衝撃波により軟化したダイコンの電子顕微鏡画像

さらに植物性食品の他、動物性食品に対しての軟化についても調査を行った。衝撃波非処理牛肉の走査型電子顕微鏡写真を図 1 2 に、120MPa の圧力で 3 回処理した牛肉の電子顕微鏡写真を図 1 3 に示す。衝撃波処理により筋膜が剥がれやすくなっている様子が分かる。このことは、口腔内での肉繊維のほぐれやすさによる食感の柔らかさを生み出す。

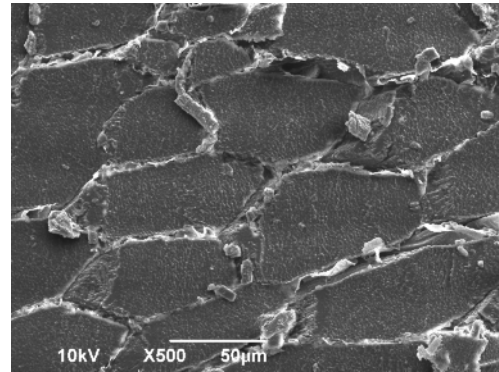


図 1 2 . 非処理牛肉の電子顕微鏡写真

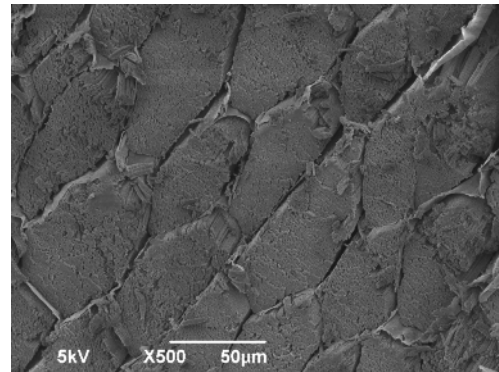


図 1 3 . 120MPa 3 回処理を行った牛肉の電子顕微鏡写真

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

1. A. Takemoto, H. Maehara, T. Watanabe and S. Itoh, "On Extraction from Coffee Beans using The Underwater Shock Wave" Transactions of the Materials Research Society of Japan, Vol.33, No.4, pp.1209-1212, 2008
2. Takemoto, A., Kuroda, K., Iyama, H. and Itoh, S. "On the destruction of the cell wall of plants and its mechanism by the shock wave" The International Journal of Multiphysics. Vol2, No.2, pp.165-170, 2008
3. A. Takemoto, H. Maehara, W. Toshiaki, S. Itoh "Extraction from coffee beans using the underwater shock wave" American Society of Mechanical Engineers,

Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP 4, pp. 131-135, 2008

4. A. Oda, M. Moatamedi, S. Itoh "Study and analysis of the fluid-structure interaction between apple and underwater shock wave " American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP 4, pp. 125-129, 2008

5. Itoh, S. "The industrial applications of underwater shock wave" Materials Science Forum Volume 566, 2008, Pages 361-372

6. Oda, A., Okamoto, N., Itoh, S. "Study on the relationship between some foods and underwater shock wave using the explosion of the detonating fuse" Materials Science Forum Volume 566, 2008, Pages 197-202

7. M.Otsuka, H.maehara, M.Souli and S.Itoh "Study on development of vessel for shock pressure treatment for food" The International Journal of Multiphysics, volume1, Number1, 2007 pp.69-84

〔学会発表〕(計 7 件)

1. 山下裕輔"衝撃波を用いた食品加工の数値解析" 第 23 回熊本県産学官技術交流会, 2009 年 2 月 5 日, 熊本県上益城郡

2. Y. Yamashita "The Numerical Analysis of Food Processing using Shock Wave", MULTIPHYSICS 2008, 10-12 December 2008, pp.71, Narvik, Norway

3. A. Takemoto "On study of the shock wave processing to plant cell and its application" The IUMRS International Conference in Asia 2008, H0-58, Nagoya, Japan, December 9-13, 2008

4. T. Watanabe "Pre-processing By Shock Loading For Freeze-drying" The IUMRS International Conference in Asia 2008, H0-60, Nagoya, Japan, December 9-13, 2008

5. 嶽本あゆみ" 衝撃波を利用した食品の軟化技術について " 日本調理科学会平成 20 年度大会研究発表要旨集, pp.25, August 29-30, 2008, 名古屋

6. A. Takemoto " On the destruction of the cell wall of plants and its mechanism by the shock wave " MULTIPHYSICS 2007, pp.35, 12-14 December 2007, Manchester, UK.

7. 嶽本あゆみ" 水中衝撃波を用いたコーヒー豆の抽出/On extraction from coffee beans using the underwater shock wave " The 18th Symposium of The Materials Research Society of Japan, pp.291, December 7-9,

2007, Tokyo

〔その他〕

報道による技術紹介

1. 2009.2.2 テレビタミン (KKT)
2. 2009.1.23 所さんの学校では教えてくれないそこんトコロ (テレビ東京)
3. 2008.12.13 九州満腹ツアー (FBS)
4. 2008.8.9 HI! HEY! SAY! (テレビ東京)
5. 2008.8.2 ナイトシャッフル (FBS)
6. 2008.6.8 近未来予測テレビ ジキル & ハイド (朝日放送)
7. 2008.4.28 ワールドビジネスサテライト (テレビ東京)

展示会出展

1. 伊東繁、渡邊俊晃、井山裕文 " 衝撃波を用いたフリーズドライの前処理技術について " FOOMA JAPAN 日本食品工業展 2008
2. 伊東繁 " 衝撃波による瞬間的超高压を利用した食品加工技術 " イノベーション・ジャパン 2007
3. 伊東繁、渡邊俊晃、井山裕文 " 衝撃波食品加工装置の開発 " FOOMA JAPAN 日本食品工業展 2007

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊東 繁 ( ITOH SHIGERU )  
熊本大学・衝撃・極限環境研究センター・教授  
研究者番号 : 80069567

(2) 研究分担者

( 該当無し )

(3) 連携研究者

( 該当無し )