

博士論文

音響振動による青果物の食感測定に関する研究

平成 24 年 3 月

広島大学大学院生物圏科学研究科

環境循環系制御学専攻

岩谷真一郎

## 目次

	ページ
第 1 章 序論	1
第 2 章 破壊音響振動法を用いたブドウ肉質の評価	19
2.1 概要	19
2.2 緒言	19
2.3 実験方法	21
2.4 結果	23
2.5 考察	25
2.6 引用文献	26
2.7 図表	29
第 3 章 音響法を用いたキャベツの食感解析方法の比較	35
3.1 概要	35
3.2 緒言	35
3.3 実験方法	37
3.4 結果	40
3.5 考察	41
3.6 引用文献	43
3.7 図表	46
第 4 章 圧電素子出力電圧の周波数特性評価	53
4.1 概要	53
4.2 緒言	53
4.3 実験方法	55
4.4 結果	56
4.5 考察	59
4.6 引用文献	61
4.7 図表	64
第 5 章 総合考察	72
謝辞	80

## 第1章

### 序論

#### 1. 青果物の品質とテクスチャー

近年、消費者は青果物に対してより高い品質を求める傾向にある。青果物の品質要素には、栄養などの機能性や農薬、微生物に対する安全性などがあるが、一般にスーパーなどで流通している商品については‘おいしさ’が最も重要視される要素と考えられる。食べ物のおいしさは甘・酸・塩・苦・うま味の基本味に渋味や辛味を含めた広義の味はもちろんのこと、香り、温度、テクスチャー（手触り、食感など）、色や形などの外観および音（固形食品ならば破壊音など）から複合的に判断される（川端，2003）。中でも消費者による食品の品質判断にはテクスチャーが重要性だと言われている（Szczesniak and Khan, 1971；Szczesniak and Kley, 1963；神山, 2003）。松本と松元(1977)は、日本人によく知られている料理16種について、味や香りで構成される化学的な味と、外観、テクスチャー、温度などが原因で生じる物理的な要素のおいしさ判断への影響を調査し、特に固形食品では、化学的な味よりもテクスチャーを主とした物理的な要素の方がおいしさへの貢献が強い食品が多いことを報告している。Bourne (2002)は、テクスチャーの重要度に応じて食品を3つのグループに分類している。1つはテクスチャーが決定的に重要な食品群（肉、ポテトチップス、コーンフレーク、セロリなど）。2つめに、テクスチャーが重要ではあるが支配的とまでは言えず、風味や外観と同程度に寄与する食品（ほとんどの果実、野菜、チーズ、パンなど）。3つめに、ほとんど影響しない食品（ほとんどの飲料、薄いスープなど）である。

この分類では青果物は1または2のグループに属し、青果物の品質においてもテクスチャーの影響が大きいと考えられる。

#### 2. 食感の定義

テクスチャーはBSO(British Standards Organization)では「口腔、触覚、視覚、聴覚を含む筋肉的、接触的感觉によって知覚する力学的性質のコンビネーションであり、その構造を構成する要素の大きさ、形状、数、性質、配列を

含む場合がある」と定義された (Bourne, 2002). ところが ISO (International Organization for Standardization) ではテクスチャーは「力学的, 触覚的および適切であれば視覚的, 聴覚的な方法で感知できる食べ物のレオロジー的構造的属性の総体」と定義されている (川端, 2003). このように, テクスチャーは明確な定義があるわけではないので, 食品自身の性質を「物性」(physical property), 食べる側の人間が知覚する感覚を「食感」(mouthfeel)として区別する場合もある (川端, 2003). どんなに物理的特性が優れていても実際に食べて「よい」と感じられなければ食品としては意味がなく (神山, 2005), テクスチャーは, 食品そのものに固有の客観的性質の中でヒトが感覚器で知覚できるものとも定義されている (西成, 2005). このように「物性」であってもヒトの感覚と相互作用するため, 食品テクスチャーは感覚的な特性であると考えられている (Szczeniak, 2002). Szczeniak (1963)は「物性」と「食感」を繋げるために, 英語でのテクスチャー表現に使用される用語を食品の力学的, 幾何学的などの特性によって体系化した. 日本語のテクスチャー用語の特徴は英語, ドイツ語, 中国語よりも数が多く (Nishinari et al., 2008), 擬音・擬態語が多い (早川ら, 2005). 早川ら (2011)は 271 個の日本語テクスチャー用語に対し想起される食物をアンケートによってリストにまとめた. 早川ら (2011)が調査したテクスチャー用語の中で, 強く青果物を連想させた用語を拾い上げてみると, ‘シャキシヤキ’, ‘シャクシャク’, ‘じゅくじゅく’, ‘歯切れが良い’, ‘水が多い’, ‘水っぽい’, ‘みずみずしい’ などがあり, 咀嚼音, 口腔内感覚に由来すると推測されるものと, 水分状態を表すものであり, 青果物の品質にはこのようなテクスチャー特性が特に重要だと考えられる. 本研究ではテクスチャー特性のうち青果物の品質に重要な ‘歯切れが良い’, ‘シャキシヤキ’, ‘シャクシャク’ とそれらに類似すると考えられる, ‘サクサク’, ‘ザクザク’ などの擬音語と, 英語でこれらの擬音語に相当すると考えられる (Drake, 1989)crispy, crunchy など表現される特性を「食感」として扱うこととする.

### 3. 食感特性の力学的測定

本来, 食感は官能評価で行うが, 品質評価の観点から機器測定が不可欠である. 官能による食感評価には外観, 咀嚼や嚥下時の口腔内での体性感覚と運

動感覚，固形食品ならば咀嚼音が影響する (Duizer, 2001 ; 西成, 2005). 視覚以外の感覚は食品の口腔内での破断と関係が深く，特に力学的要素が重要(西成, 2005)だと考えられ，様々な食品について，圧縮，引張，剪断など「歪計」を用いた力学的測定器による力学特性の評価が行われた (Blahovec et al., 1999, Rojo and Vincent, 2008 ; Sheman and Deghaidy, 1978 ; Valles Pamies et al., 2000 ; Vincent, 1998) . 力学的手法を用いた食感研究については Roudaut et al. (2002)によって総説としてまとめられている. 青果物の食感評価に力学的手法を用いたものでは，最も古典的な手法としてプローブを果肉に貫入させた時の最大破断力を記録する Magness-Taylor 型硬度計 (Magness and Taylor, 1925) がある. この装置は簡便ではあるが測定者によって貫入スピードなどの測定条件が異なるため，近年ではプローブ貫入をモーターなどで制御するユニバーサル型の穿刺試験を用いた食感評価が行われている. Mehinagic et al. (2004) はリンゴ (*Malus pumila*) 果肉に円柱形のプローブを貫入させ，得られた応力-変位曲線から破断荷重や，曲線の傾き，仕事量など7つのパラメーターを算出し，いずれのパラメーターもリンゴ果肉の食感特性である crunchiness の官能評価と高い相関が得られたと報告している. 同様に穿刺試験の応力-変位曲線から得られる最大破断荷重などのパラメーターは，リンゴ果肉の crispy, crunchy の評価 (Harker et al., 2002)，ブドウ (*Vitis*) 果粒の肉質の品種特性の評価 (薬師寺ら, 2007 ; Sato et al., 1997; Sato and Yamada, 2003)，ブドウ肉質のジベレリン処理の影響 (Sato et al., 2004)，キュウリ (*Cucumis sativus*) の歯切れのよい肉質評価 (石坂, 2000) に適用された.

圧縮試験は人間が歯で食品を押しつぶす咀嚼過程に近く，リンゴ，セロリ (*Apium graveolens* var. *dulce*)，キュウリ，ニンジン (*Daucus carota* L) など多様な青果物の食感評価に利用された (Harker, F. R. et al. 2006 ; Vincent, 2004). 圧縮試験は穿刺試験と同様に応力-変位曲線が得られ，長期冷蔵保存し食感が低下したリンゴは圧縮に対しての抵抗応力が低下し (Harker and Hallett, 1992), Vincent and Saunders (2002) はリンゴ果肉を圧縮し，ヒビ割れが起こるまでの抵抗力 ( $K_{IC}$ ) と弾性指標であるヤング率が，食感特性である crunchiness と高い相関が得られたと報告した. しかし，穿刺や圧縮で得られる力学パラメーターは，食感特性の1つである crispness の官能評価と相関が低いことが指

摘されており (Roudaut et al. 2002), これらの手法を用いた食感評価は難しいと考えられる.

レタス (*Lactuca sativa*) やキャベツ (*Brassica oleracea* var. *capitata*) などの葉物野菜には引張試験が行われることがある (Toole et al., 2002 ; Newman et al., 2005 ; Kohyama et al., 2008). 引張試験は長方形に切り出した試験片を両方向から引っ張り, 応力-変位曲線を得る手法であるが, ヒトの咀嚼においては圧縮が主であるため広くは利用されていない (Taniwaki and Sakurai, 2010a).

咀嚼中の食品は口腔内で空間的にも時間的にも一定でなく, 物理的性質はダイナミックに変化する (神山, 2000). このような考えのもと, 口内に入れたシート型の応力センサーでキュウリの咀嚼中の圧力が測定された (Dan et al., 2003, 2004). 食感は咀嚼中に知覚されるので, 咀嚼中の物性を調査することは重要であると考えられるが, 測定者によって咀嚼スピード, 顎, 口腔の大きさや形状, 唾液の量など個人差の問題が考えられる.

#### 4. 食感特性の音響的測定

##### 4-1. 食品破断音の発生メカニズムと知覚

Drake (1963, 1965) は, 食感特性の1つである *crispy* な食品の破壊音の調査から, より *crispness* な食品ほど大きな破壊音が発生することを報告し, 食感判断に対する咀嚼音の重要性を初めて指摘した. Vickers の研究グループは食感特性である *crispness* には音響的な感覚が重要であると仮説を立て (Vickers and Bourne, 1976 ; Vickers and Christensen, 1980), 食品の破断音と食感との関係を多数報告した (Vickers, 1981 ; Vickers, 1983 ; Vickers, 1984 ; Vickers and Wasserman, 1980). また湿って食感が低下したポテトチップスを食べているヒトに, 高周波領域を増幅した咀嚼音を聴かせると, 食感が向上するという研究報告もある (Zampini and Spence, 2004). 加えて, 日本語の食品テクスチャー用語には擬音・擬態語が多い (早川ら, 2005) が, これは咀嚼中に知覚する咀嚼音に由来すると推測される. このように食感の判断には咀嚼中に発生する食品の破断音が影響していると考えられる.

食品破断の瞬間に発生する音は, 食品の大きさや厚さなどの寸法および構

造的要素と、分子配列や化学結合、不純物、微小なヒビ割れなど微細構造的な要素に依存する (Al Chakra et al., 1996). 青果物のような植物性の食品では、破断音は特に細胞壁の破壊時に発生すると考えられている (Viccers and Bourne, 1976). 細胞壁には弾性があり、細胞内に水分が流入し膨張するのに対しそれに対抗する壁圧が働いている. この細胞壁が外力によって破壊されると、細胞の中身が流出し、音圧波が発生すると考えられている (Viccers and Bourne, 1976). つまり青果物の破断音は、細胞壁の強度、壁圧、水分含量、細胞間接着強度など細胞または細胞群の性質を反映すると考えられる (De Smedt et al., 1998; De Belie et al., 2002).

口内で食品を破断したときに発生する音圧波は、空気の振動として外耳から入り鼓膜に伝わる音と、歯や顎骨や舌や頬組織など、固体振動として直接鼓膜や聴覚神経に伝わる音 (骨伝導音) として知覚される (豊島, 2005). しかしながら、大きな音で聴覚刺激を遮った被験者でも crispness, crunchiness などの食感を判断できた (Christensen and Vickers, 1981) ことから、食感の知覚には聴覚情報と同程度に口腔内での振動知覚も重要だと考えられるようになった (Vickers, 1981).

## 4-2. 聴覚刺激に基づく食品破壊音の分析

### (1) 骨伝導音の取得

食品の破断音を利用した食感の評価には、聴覚刺激に基づくものと、口腔内での振動知覚に基づく手法に大別され、聴覚での知覚に基づくものについては、空気による破断音の伝播を利用したものと、骨伝導音を利用したものとに分けられる.

Kapur (1971) はレコード針を利用した骨伝導音を取得する装置を製作し、咀嚼中の被験者の下顎、額、乳突部から取得した咀嚼音の周波数特性を調査し、下顎の共振が 160Hz であると報告した. Dacremont et al. (1991) は、被験者の頬に取り付けた接触型のマイクと、外耳に置いたマイクロフォンで採取した咀嚼音を被験者に聴かせ、咀嚼中に感じた音と比較することによって、空気伝播音と骨伝導音の周波数的特徴を明らかにしようと試みた. このように骨伝導音の取得には、被験者の顔の一部に振動検出センサーを取り付け、固体振動で

伝わる咀嚼音の習得する方法が報告されている(豊島ら, 2004: Duizer, 1998). 骨伝導音は, 空気を介した咀嚼音とは違い, 被験者本人にしか知覚できないため, 食感判断に重要な情報が得られる可能性はあるが, 被験者によって歯または, 口腔と鼻腔の大きさや形が異なるなど個人差がある (Dacremont et al., 1991) ため, 再現性に問題があると考えられる.

## (2) マイクロフォンを用いた咀嚼音の取得

Drake(1963, 1965)が食感の客観的な評価における食品破断音の重要性を指摘してから, 食感特性の知覚について音響的な手法を用いた研究が多数報告されている(Duizer, 2001). 主要な手法として, 被験者が口腔内で測定試料を咀嚼した時の咀嚼音, または機器を用いて食品を破壊した際に発生する破断音をマイクロフォンで取得する方法である. (Al Chakra et al., 1996; Lee III et al, 1990; Edmister and Vickers, 1985; Seymour and Hamman, 1988; Vickers, 1987). マイクロフォンの出力信号は時間に対する音圧または電圧の変化で表わし, 取得信号の特徴を表すパラメーターとして, 最大振幅(Al Chakra, 1996; Drake, 1965), ピークまたはバースト音の数(Edmister and Vickers, 1985; Vickers, 1987; Vickers and Bourne, 1976), ピークの大きさの平均(Edmister and Vickers, 1985; Vickers, 1987), 信号の持続時間(Al Chakra, Edmister and Vickers, 1985; Vickers, 1987), バースト音の数とピークの平均的な大きさとの積(Edmister and Vickers, 1985)などが算出された. このような音圧や電圧の振幅-時間曲線で得られる破断音は, crisp な食品ほどその波形が密でギザギザと複雑な波形を示した(Vickers and Broune, 1976). そこで, 波形のギザギザの程度を幾何学的な手法であるフラクタルを用いた評価により定量化し, 食感パラメーターとした研究もある(Duizer, 1998; Tesch et al., 1995). 被験者の咀嚼音は空気伝導音であっても, 骨伝導音同様に個体差の問題を含んでいると考えられる. また, ヒトの器官を用いず機器によって試料を破壊しても, マイクロフォンを用いる限りは再現性に疑問が残る. なぜならマイクロフォンによる取得音は, マイクロフォンの性能(Vickers, 1991), マイクロフォンの設置位置や角度の影響を受ける(Chen et al., 2005; Vickers, 1991)からである. さらには, 食品破断音の分析には周波数特性も重要であると考えられる.



音の感覚は 3 要素からなると言われ、1. 物理的性質の音の強さに相当する音の大きさ (loudness), 2. 周波数に対応する音の高さ (pitch), 3. 明確な定義はないが 1, 2 以外の性質である音色, に分類される(境, 2002). 振幅-時間曲線から算出されるパラメーターは, 咀嚼音の大きさに関するものだと考えられる. Vickers (1984) は, 食感特性である crackliness は咀嚼音の大きさと高さに関係すると報告しており, 食品の破断音の評価には, 大きさだけでなく, 周波数特性の重要性も指摘している. 食品の咀嚼または破断音の周波数解析には, 複合音を純音に分解する方法として広く用いられている FFT(Fast Fourier Transform)が利用された(Dacremont, 1995; De Belie et al., 2002; Lee III et al., 1988). しかし, パルス状の衝撃音である食品の破断音の解析には向いていない(Luyten and Van Vliet, 2006). 豊島ら(2005)や Roudaut(1998)はヒトの耳の周波数分析機能に近い周波数を対数軸上で等間隔に分割する方法(オクターブバンド分析)を用いている. 近年では, 食品の穿刺試験時に発生する音をマイクロフォンで取得し, 穿刺試験の応力-変位曲線と音響信号を同時に取得する手法が試みられた(Arimi et al., 2010; Chen et al., 2005; Salvador et al., 2009; Varela et al., 2006). 応力-変位曲線, 音響測定それぞれ単独で行った場合と比較して, より多くの食感情報が得られると考えられる. しかし, いずれの手法であっても, マイクロフォンを使用した食品の破断音の取得には再現性の問題が残っている.

## 5. 口腔内の振動感覚に基づく破断音の分析

### (1) 食品破断音の直接的取得法

本章 3, 4 節では, 応力変化を測定する力学的またはマイクロフォンを用いた音響学的手法を用いた食感の定量的な評価方法について紹介してきた. それぞれの手法の特徴は次のようにまとめることができる. 力学的手法について, この手法のメリットは歴史が最も古く, 応力-変位曲線から得られるパラメーターは物理的で他の測定結果と比較が容易であることが挙げられる. 一方で, ヒトの食感知覚には聴覚または口腔内での振動知覚が重要である(Vickers, 1987). このために, 特に crispness の官能との対応が良くないと指摘されており(Roudaut et al. 2002), 食感の評価手法に用いることは難しいと考えられる.

一方、音響学的手法では、食感の知覚情報に基づく音響信号が得られ、官能よりも客観的な評価が可能である。しかし、骨伝導音の測定のように被験者が口腔内で食品を破断すると、被験者の口腔内の大きさや形状に個人差の影響を受け(Dacremont et al., 1991), 破断音の測定にマイクロフォンを用いた場合にはマイクロフォンの性能、マイクの位置や角度(Chen et al., 2005; Vickers, 1991; Vickers, 1991)により再現性に疑問が生じるため、音響信号の取得方法に課題がある。また取得音の解析では、FFT 適応が難しい信号が得られるため、オクターブバン分析を用いた周波数解析が有効であると考えられる。

食品破壊音の測定にマイクロフォンを利用した音響学的手法は聴覚に基づく情報であるが、食感判断には口腔内での振動知覚も重要である(Vickers, 1987)。口腔内で知覚する振動情報に基づく手法として、食品の破断音取得にマイクロフォンを使わず、貫入したプローブから直接振動を取得する手法が考えられる。Zdunek et al. (2010) は穿刺試験機のプランジヤーの根元に音響信号を検出するアコースティック・エミッションセンサー(AE)を取り付け、プランジヤーをリングに穿刺して得られるパルス状信号の合計数をリングの crispness 指標に用いた。この手法で得られた AE センサーの信号は音響信号のパルス数は、破断振動の大きさや周波数的な特徴など、どのような性質に対応しているのか解釈が難しく、食感の評価が困難であると考えられる。Makino et al. (2002) は 2 つの AE センサーを顎骨に見立てたアクリル棒に接着し、AE センサーの間に歯に相当するアクリル製のプランジヤーを取り付けた。プランジヤーでリングやポテトチップスなどを破断した時の破壊音を AE センサーで取得し、バンドパスフィルタを用いて抽出した 2kHz までの信号を用いてサクサク感を評価しようとした。クッキーやクラッカーのサクサクとした食感には 2kHz 以上の破断音が関与していると考えられており(Arimi et al., 2010; Zampini and Spence, 2004), この手法で採取された破断信号では、サクサクとした食感の評価は難しいと考えられる。

Sakurai et al. (2005 a, b) は金属性のプローブを接着した圧電素子をキュウリやカキ(*Diospyros kaki* Thunb.)の果肉にポンプと連結したピストンで貫入させ、プローブが受ける破断振動を圧電素子で検出した。これまでの力学測定に用いられた応力ひずみ計では、モーター駆動によりプローブを食品試料に接

触させ外力を加えたが、音響手法ではモーター駆動時の振動が大きなノイズ発生源となるため、駆動時のノイズが少ないポンプが採用された。取得した破断信号は FFT を用いて可聴領域(20kHz 以下)について周波数解析し、‘Shrpness’ 指標を用いて食感を定量化した。しかし、食品破断音への FFT 適応には問題があることが指摘された(Luyten and Van Vliet, 2006)。このため、Taniwaki et al. (2006b)によって、振動音の周波数解析にオクターブバンドを利用し、さらには、稼動時のノイズを低減、可聴領域で周波数特性が安定的な圧電素子の採用、プローブや圧電素子の共振を考慮した改良型装置が開発された。Taniwaki et al. (2006b) は取得した破断振動を、データ長  $T$ (s) , およびオクターブ幅のバンドパスフィルタで分割された周波数帯域の出力電圧  $V_i$  (V) を用いて、次式で定義された振幅密度指標で定量化した。

$$\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n |V_i|$$

または、圧電素子の出力電圧  $V_i$  (V) , バンドパスフィルタの各帯域の上限および下限遮断周波数  $f_u, f_l$  (Hz) , データ数  $n$  から次式で定義されたエネルギー密度指標 (Taniwaki and Sakurai, 2008) が食感指標値 (TI, Texture Index) として算出された。

$$(f_l f_u) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i)^2$$

以下、Taniwaki (2006 b) , Taniwaki and Sakurai (2008) によって提唱された、食品の破断音を直接的に取得し、オクターブ分析により周波数特性評価を行う手法を便宜上 AMC (Acoustic Measurement of Crispness) 法と呼び、このような信号取得、解析を行う装置を AMC 装置と呼ぶこととする。

AMC 装置によって取得された信号は、オクターブバンド分析によって可聴域をカバーする 25.6kHz まで周波数帯域をオクターブまたは 1/2 オクターブ幅の帯域に分割し、個々の周波数帯域を振幅密度またはエネルギー密度指標に当たる TI で定量化され、ネギの食感の品種特性 (Taniwaki et al., 2006a) , キャベツ葉の肉質の品種間差 (Taniwaki and Sakurai, 2008) , キャベツ葉の肉質特性の収穫時期についての影響 (Taniwaki et al., 2009c) , 貯蔵時間がカキ食感に与える影響 (Taniwaki et al., 2009a) , 西洋ナシの追熟過程における食感の変化

(Taniwaki et al., 2009b), 製造過程の異なるポテトチップスの食感評価 (Taniwaki and Sakurai, 2010b) に利用された. プローブを介して直接的に取得された破断信号は, 空気を介して聴覚で知覚される音と顎や頬などの固体伝導によって知覚される骨伝導音, さらに口腔などで知覚される触覚刺激の基になる振動情報だと考えられる. したがって, AMC 装置による取得信号は空気または骨伝導によって得られるそれぞれの破断音と比較して, より多くの情報が得られると推測され, 食感の定量評価に有効であると考えられる.

## (2) AMC 装置の課題

前節で述べたように, AMC 装置を用いて青果物の破断音響振動を分析することでネギ, カキ, キャベツ, 西洋ナシなど様々な青果物の食感特性が定量的に評価された (Taniwaki et al., 2006a; Taniwaki et al., 2009a; Taniwaki et al., 2009b; Taniwaki et al., 2009c; Taniwaki and Sakurai, 2008). 上記以外にも食感特性が重要視されている青果物は多数存在する. 例えばスイカのシャリシャリとした肉質特性やレタス葉のシャキシヤキとした食感などである. また, ブドウ果肉には品種特性があることが知られており, 破断応力の波形によって肉質特性を分類できる (薬師寺ら, 2007) が定量化には至っていない. 青果物は, 葉, 果実, 茎, 根などヒトが食する部位は様々であり, その形状や大きさ, 水分含量, 栄養素など物理化学的性質も多様である.

幅広い性質をもつ青果物に対して AMC 法を適用するためには個々の青果物の特徴に適した測定法を検討する必要があると考えられる. 例えば, 相良 (2009) は食パンの圧縮破壊試験において, 変形速度を遅くすると圧縮力が大きくなり, 食パンを圧縮するプランジャーサイズが小さければ硬さが増し, プランジャーの形状が円柱形と直方形では, 食パンに接触する面積が同じであっても円柱形の破壊エネルギーが大きくなると報告してした. このような測定条件による力学特性の変化は, 音響信号についても起こりうることを示唆しており, 測定条件の取得信号に与える影響を調査する必要があると考えられる. また, 低水分食品の中には口腔内で噛み始めて 0.2–0.3 秒で物理的特色が失われるものがある (Kohyama and Nishi, 1997). つまり咀嚼中の食品の物性特性はダイナミックに変化していると考えられ, 音響信号の性質も時間的に変化している可能性が

ある。これまで AMC 装置によって破壊音響振動を取得された青果物では、プローブ貫入中の破断過程が一定だとみなし、プローブが測定試料に触れてから止まるまでの数百ミリ秒間の信号を用いており (Taniwaki et al. 2009a)。得られる周波数特性はその間に発生する振動を時間的に平均化したものであると考えられる。つまり、破断過程が複雑になれば、取得される音響振動の性質も異なることが予想されるため、取得信号の時間変化を調査するような解析手法の検討が必要だと考えられる。

Taniwaki and Sakurai (2008)は、静的条件下における圧電素子の出力電圧は応力に比例することを確認し、圧電素子の出力電圧を応力値としてエネルギー密度に相当する TI を定義した。しかし圧電素子に加わる応力の速度変化に対する出力応答は確認していない。AMC 装置の振動検出に用いられた圧電素子はチタン酸・ジルコン酸鉛 ( $\text{Pb}(\text{Ti} \cdot \text{Zr})\text{O}_3$ , 以下 PZT) を材料とするセラミックス製である。セラミックス素材は一般的に数 kHz から数 MHz の周波数領域で使用される。20kHz 以下の音響領域での使用は稀であるため出力特性を確認する必要がある (新宅ら, 1998)。つまり、TI を物理的な量であるエネルギー密度指標として定義するためには、食感測定に用いる周波数領域において、圧電素子の印加信号に対する周波数応答を知る必要がある。

そこで、本研究の目的は AMC 法における、プローブ形状、信号解析方法、振動検出センサー出力特性が取得信号に与える影響について実験的に明らかにし、幅広い青果物の食感評価に適用可能な AMC 装置の性能について検討する。

## 6. 引用文献

- 石坂晃, 山本幸彦, 月時和隆, 満田幸恵, 2000. 歯切れ感が優れた大果どりに適したキュウリ品種. 福岡農総試報, 19. 41-43.
- 神山かおる. 2000. 食品咀嚼と口腔感覚テクスチャ. 日本食品科学会誌. 47. 341-346.
- 神山かおる. 2003. 食品・栄養学における咀嚼研究. 日本咀嚼学会誌. 2003. 13. 49-57.
- 神山かおる. テクスチャー特性. 食感創造ハンドブック (西成勝好, 大越ひろ, 神山かおる, 山本隆編). サイエンスフォーラム. 初版. 2005. 185-191.
- 川端晶子. 食品のテクスチャーとは何か. 食品とテクスチャー(川端晶子編). 光琳. 初版. 2003. 1-22.
- 境久雄. 音と聴こえ. 聴覚と音響心理学(境久雄編著). コロナ社. 第二版. 2002. 65-78.
- 相良泰行. 2009. 食品の力学物性とテクスチャーの感性計測法. 日本食品科学工学会誌. 56. 501-512.
- 新宅英司, 藤本由紀夫, 濱田邦裕, 武内哲也. 1998. 圧電素子による構造物の簡易応力履歴計測に関する研究. 日本造船学会論文集. 184. 339-346.
- 豊島尊. おいしさと音: 音響解析による食感評価. 食感創造ハンドブック (西成勝好, 大越ひろ, 神山かおる, 山本隆編). サイエンスフォーラム. 初版. 2005. 237-243.
- 豊島尊, 土屋欣也, 佐藤史明, 橘秀樹. 2004. 音響解析および咀嚼圧力解析によるフライ調理食品のテクスチャー評価. 日本食品科学工学会誌. 51. 388-394.
- 早川文代, 井奥加奈, 阿久澤さゆり, 齋藤昌義, 西成勝好, 山野善正, 神山かおる. 2005. 日本語テクスチャー用語の収集. 日本食品化学工学会誌. 52. 337-346.
- 早川文代, 風見由香利, 井奥加奈, 阿久澤ゆかり, 西成勝好, 神山かおる. 2011. 日本語テクスチャー用語の対象植物名の収集と解析. 日本食品科学工学会誌. 58. 359-374.
- 松本伸子, 松元文子. 1977. 食べ物の味—その評価に関わる要因—. 調理科学. 10. 97-101.

- 薬師寺博, 上野俊人, 東暁史, 児下佳子, 櫻井直樹. 2007. テクスチヨロメーターによるブドウ果粒肉質の評価法について. 園芸学研究. 6 (別2) . 463.
- Arimi, J. M., Duggan, M., O'Sullivan, M., Lyng, J. G., O'Riordan, E. D. 2010. Development of an Acoustic Measurement System for Analyzing Crispness During Mechanical and Sensory Testing. *J. Texture Stud.* 41. 320-340.
- Blahovec, J., Vacek, J., Patočka, K. 1999. Texture of fried potato tissue as affected by pre-blanching in some salt Solutions. *J. Texture Stud.* 30. 493-507.
- Bourne, M. C. 2002. Texture, Viscosity, and Food, In *Food Texture and Viscosity, Concept and Measurement*. Academic Press. 2nd Edition. 1-32.
- Chen, J., Karlsson, C., Povey, M. 2005. Acoustic envelope detector for crispness. *J. Texture Stud.* 36. 139–156.
- Christensen, C.M., Vickers, Z.M. 1981. Relationships of chewing sounds to judgments of food. *J. Food Sci.* 46. 574–578.
- Dacremont, C., Colas, B., Sauvageot, F. 1991. Contribution of air-and bone-conduction to the creation of sounds perceived during sensory evaluation of foods. *J. Texture Stud.* 18. 109-119.
- Dacremont, C. 1995. Spectral composition of eating sounds generated by crispy, crunchy and crackly foods. *J. Texture Stud.* 26. 27-43.
- Dan, H., Okuhara, K., Kohyama, K. 2003. Discrimination of cucumber cultivars using a multiple-point sheet sensor to measure biting force. *J. Sci. Food Agric.* 83. 1320-1326.
- Dan, H., Okuhara, K., Kohyama, K. 2004. Visualization of planar stress distributions in cucumber cultivars using a multiple-point sheet sensor. *J. Sci. Food Agric.* 84. 1091-1096.
- De Belie, N., Harker, F.R., De Baerdemaeker, J. 2002. Crispness judgement of Royal Gala apples based on chewing sounds. *Biosyst. Eng.* 81. 297–303.
- De Smedt, V., Pauwels, E., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B. 1998. Microscopic observation of mealiness in apples: a quantitative approach. *Postharvest Biol. Technol.* 14, 151–158.
- Drake, B.K. 1963. Food crushing sounds. An introductory study. *J. Food Sci.* 28.

233–241.

Drake, B.K. 1965. Food crushing sounds: comparisons of objective and subjective data.

J. Food Sci. 30. 556–559.

Drake, B. K. 1989. Sensory textural/reological properties- a polyglot list. J. Texture

Stud. 20. 1-27.

Duizer, L. 2001. A review of acoustic research for studying the sensory perception of

crisp, crunchy and crackly textures. Trends in Food Sci. Technol. 12. 17-24.

Duizer, L. M., Campanella, O. H. 1998. Sensory, Instrumental and Acoustic

Characteristics of Extruded Snack Food Products, J. Texture Stud. 29. 397-411.

Kapur, K. K. 1971. Frequency spectrographic analysis of bone conducted chewing

sounds in persons with natural and artificial dentitions. J. Texture Stud. 2. 50-61.

Kohyama, K., Nishi, M. 1997. Direct measurement of biting pressures for crackers

using a multiple-point sheet sensor. J. Texture Stud. 28. 605-617.

Kohyama, K., Takada, A., Sakurai, N., Hayakawa, F. Yoshiaki, H. 2008. Tensile test of

cabbage leaves for quality evaluation of shredded cabbage. Food Sci. Technol. Res.

14. 337–344.

Lee III, W.E., Deibel, A.E., Glembin, C.T., Munday, E.G. 1988. Analysis of food

crushing sounds during mastication: frequency-time studies. J. Texture Stud. 19.

27–38.

Lee III, W.E., Schweitzer, M. A., Morgan, G. M., Shepherd, D. C. 1990. Analysis of

food crushing sounds during mastication: total sound level studies. J. Texture Stud.

21. 165-178.

Luyten, H., Van Vliet, T. 2006. Acoustic emission, fracture behavior and morphology of

dry crispy foods: a discussion article. J. Texture Stud. 37. 221-240.

Harker, F. R. Hallett, I. C., 1992. Physiological changes associated with development of

mealiness of apple fruit during cool storage. Hort Sci. 27. 1291-1294.

Harker, F. R., Maindonald, J., Murray, S.H., Gunson, F. A., Hallett, I. C., Walker, S. B.

Sensory interpretation of instrumental measurements 1: texture of apple fruit. 2002.

Postharvest Biol. Technol. 24. 225-239.

Harker, F. R., White, A., Gunson, F. A., Hallett, I. C., De Silva, H. N. 2006.



- Instrumental measurement of apple testure: a comparison of the single-edge notched bend test and the penetrometer. *Postharvest Biol. Technol.* 39. 185-192.
- Magness, J.R., Taylor, G.F. 1925. An improved type of pressure tester for the determination of fruit maturity. *US Dept. Agric. Circ.* 350. 8
- Makino, Y., Ono, N., Ando, S., Sano, F., Toba, S. 2002. Bone conduction-like acoustic sensor system for evaluating crispness. *SICE 2002 Aug. Osaka.* 5-7.
- Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., Bertrand, D., Jourjon, F. 2004. Prediction of the sensory quality of apples by physical measurements. *Postharvest Biol. Technol.* 34. 257-269.
- Rojo, F. J., Vincent, J. F. V., 2008. Fracture properties of potato crisps. *International J. Food Sci. Technol.* 43. 752-760.
- Roudaut, G., Dacremont, C., Le Meste, M., 1998. Influence of water on the crispness of cereal-based foods: Acoustic, mechanical, and sensory studies. *J. Texture Stud.* 29. 199-213.
- Roudaut, G., Dacremont, C., Valles Pamies, B., Colas, B., Le Meste, M. 2002. Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. *Trends in Food Sci. Technol.* 13. 217-227.
- Sakurai, N., Iwatani, S., Terasaki, S., Yamamoto, R. 2005a. Texture evaluation of cucumber by a new acoustic vibration method. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 74. 31–35.
- Sakurai, N., Iwatani, S., Terasaki, S., Yamamoto, R. 2005b. Evaluation of 'Fuyu' persimmon texture by a new parameter, “Sharpness index.” *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 74. 150–158.
- Salvador, A., Varela, P., Sanz, T., Fiszman, S. M. 2009. Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis. *Food Sci. Technol.* 42. 763-767.
- Sato, A., Yamane, H., Hirakawa, N., Otobe, K., Yamada, M. 1997. Varietal differences in the texture of grape berries measured by penetration tests. *Vitis.* 36. 7–10.
- Sato, A, Yamada, M. 2003. Berry texture of table, wine, and dual-purpose grape cultivars quantified. *Hort Sci.* 38. 578-581.
- Sato, A., Yamada, M., Iwanami, H., Mitani, N. 2004. Quantitative measurements of

- grape flesh texture as affected by gibberellic acid application. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 73. 7–11.
- Seymour, S.K., Hamann, D.D. 1988. Crispness and crunchiness of selected low moisture foods. *J. Texture Stud.* 19. 79–95.
- Sherman, P., Deghaidy, F. S. 1978. Force-deformation conditions associated with the evaluation of brittleness and crispness in selected foods. *J. Texture Stud.* 9. 437-459.
- Szczesniak, A. S. 1963. Classification of textural characteristics. *J. Food Sci.* 28. 385-389.
- Szczesniak, A. S. 2002. Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference.* 13. 215-225.
- Szczesniak, A. S., Kahn, E. L. 1971. Consumer awareness of and attitudes to food texture, I: Adults. *J. Texture Stud.*, 2, 280-295.
- Szczesniak, A. S., Kleyn, D. H., 1963. Consumer awareness of texture and other food attributes. *Food Technol.*, 17. 74-77.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N. 2006a. Development of method for quantifying food texture using blanched bunching onions. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 75. 410–414.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N. 2006b. Device for acoustic measurement of food texture using a piezoelectric sensor. *Food Res. Int.* 39. 1099–1105.
- Taniwaki, M., Sakurai, N. 2008. Texture measurement of cabbages using an acoustical vibration method. *Postharvest Biol. Technol.* 50. 176–181.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N. 2009a. Postharvest quality evaluation of “Fuyu” and “Taishuu” persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique. *Postharvest Biol. Technol.* 51. 80–85.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Tohro, M., Sakurai, N. 2009b. Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques. *Postharvest Biol. Technol.* 51. 305–310.
- Taniwaki, M., Takahashi, M., Sakurai, N., Takada, A., Nagata, M. 2009c. Effects of harvest time and low temperature storage on the texture of cabbage leaves.

- Postharvest Biol. Technol. 54. 106-110.
- Taniwaki, M., Sakurai, N. 2010a. Evaluation of the internal quality of agricultural products using acoustic vibration techniques. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 79. 113–128.
- Taniwaki, M., Sakurai, N., 2010b. Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements. *Food Res. Int.* 43, 814-818.
- Tesch, R., Normand, M. D., Peleg, M. 1995. On the apparent fractal dimension of sound bursts in acoustic signatures of two crunchy food. *J. Texture Stud.* 26. 685-694.
- Valles Pamies, B., Roudaut, G., Dacremont, C., Le Meste, M., Mitchell, JR. 2000. Understanding the texture of low moisture cereal products: mechanical and sensory measurements of crispness. *J. Sci. Food Agric.* 80. 1679-1685.
- Varela, P., Chen, J., Fiszman, S., Povey, M. J. 2006. Crispness assessment of roasted almonds by an integrated approach to texture description: texture, acoustics, sensory and structure. *J. Chemometrics.* 20. 311-320.
- Vickers, Z. M. 1981. Relationships of chewing sounds to judgments of crispness, crunchiness and hardness. *J. Food Sci.* 47. 121-124.
- Vickers, Z. M. 1983. Pleasantness of Food Sounds. *J. Food Sci.* 48. 783-786.
- Vickers, Z. M. 1984. Crackliness: Relationships of auditory judgments to tactile judgments and instrumental acoustical measurements. *J. Texture Stud.* 15. 49-58.
- Vickers, Z. M. 1987. Sensory, acoustical, and force-deformation measurements of potato chip crispness. *J. Food Sci.* 1987. 52. 138-140.
- Vickers, Z.M., Bourne, M.C. 1976. A psychoacoustical theory of crispness. *J. Food Sci.* 41. 1158–1164.
- Vickers, Z.M., 1991. Sound perception and food quality. *J. Food Quality.* 14. 87-96.
- Vickers, Z. M., Christensen, C. M. 1980. Relationships between sensory crispness and other sensory and instrumental parameters. *J. Texture Stud.* 11. 291-307.
- Vickers, Z. M., Wasserman, S. S. 1980. Sensory qualities of food sounds based on individual perceptions. *J. Texture Stud.* 10. 319-332.
- Vincent, J. F. V. 1998. The Quantification of crispness. *J. Sci. Food Agric.*, 78. 162-168.
- Vincent, J. F. V. 2004. Application of fracture mechanics to the texture of food.

Engineering Failure Analysis. 11. 695-704.

Vincent, J. F. V., Saunders, D. E. J. 2002. The use of critical stress intensity factor to quantify “hardness” and “crunchiness” objectively. *J. Texture Stud.*, 2002. 33. 149-159.

Zampini, M., Spence, C. 2004. The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips. *J. Sensory Stud.* 19. 347-363.

Zdunek, A., Cybulska, J., Konopacka, D., Rutkowski, K. 2010. New contact acoustic emission detector for texture evaluation of apples. *J. Food Eng.* 99. 83–91.

## 第2章

### 破壊音響振動法を用いたブドウ肉質の評価

#### 1. 概要

ブドウ果粒の肉質の品種特性を定量評価するため、破断応力試験器と破壊音響振動装置 (AMC 装置) を用いて 9 品種のブドウの破断振動を取得した。AMC 装置は振動検出用の圧電素子をプローブに付け、プローブをブドウ果肉に貫入させて破断振動を電圧信号として出力した。取得信号はバンドパスフィルターを用いて可聴域をカバーする 25.6kHz までを 1/2 オクターブ幅の 19 の周波数帯域に分割し、各帯域のエネルギー密度に比例する Texture Index (TI) を算出した。破断応力試験器で計測した最大破断荷重では官能で評価された崩壊性、塊状、中間の 3 つのブドウ肉質特性を評価できなかった。一方、AMC 法においては、先端が楔状のプローブで取得した 10-3.2kHz の周波数帯域の TI は肉質特性を反映していた。特に 140-200Hz でその特徴が最も顕著であった。また円錐状プローブで取得した TI は楔状とは異なり、肉質特性を反映しなかった。また破断応力測定器で計測した最大破断荷重と、楔状プローブの 0-50Hz の TI には有意な相関 ( $p < 0.05$ ) があった。これらのことから、音響振動の検出にはプローブ形状が影響することがわかった。楔形プローブの場合、破断応力試験器では評価できなかった崩壊性、塊状、中間のブドウ肉質特性を 140-200Hz 周波数帯域の TI で定量評価できた。加えて、低周波の音響振動 (0-50Hz) を用いると AMC 法で果実硬度を評価できる可能性が示唆され、AMC 法は 1 度の測定でブドウの音響的・物性的特性が同時に計測可能な有望な手法だと考えられる。

#### 2. 緒言

英語では *crispness* と表記される、青果物の‘サクサク’とした肉質特性は細胞壁の強度、膨圧、水分含量、細胞間接着強度など植物組織の性質によって決まる (De Smedt et al., 1998; De Belie et al., 2002)。また、この組織を外部からの力によって破壊すると、これらの組織特性に応じた破壊音が発生すると考えられている (De Belie et al., 2002)。すなわち、青果物の破壊音を調査

することは、肉質特性評価にとって重要である。

被験者による官能評価では、ヒトは咀嚼中に crispness を判断する (Vickers and Bourne, 1976)。この考えに基づき、ヒトの肉質評価食品の破断音から推測する方法が多数報告されている。Drake (1963, 1965) は被験者に食品を食べさせ、その咀嚼音を録音しテクスチャーの評価に利用した。この他にも、食品破断に圧縮試験器を用いたものがある (Lee et al., 1988; Seymour and Hamann, 1988; Chen et al., 2005)。これらの手法はいずれも破断音をマイクロフォンで記録したという点で共通している。これは、ヒトの crispness 判断は聴覚情報に基づくとの仮定に起因すると考えられる。しかし、Christensen and Vickers (1981) および Vickers (1981) は、ヒトは聴覚だけでなく口内で知覚する振動も肉質判断に利用していると指摘している。それゆえに、耳に到達する破断振動を音波として取得するだけでは不十分で、歯が受ける振動を直接的に測定する方法がすぐれていると考えられる。最近の研究では、リンゴの crispness 評価に、圧縮試験器のサンプルに近い場所にアコースティックエミッションセンサー (AE) を取り付けて、リンゴ破壊時に発生するパルス信号の数が計測された (Zdunek et al., 2010)。これは食品の破断信号を直接的に取得する 1 つの方法であるが、パルス信号数では破断音の大きさや音色といった特徴の理解が困難でると考えられる。Zampini and Spence (2004) はポテトチップスの crispness 判断には 2kHz-20kHz の破断音が重要だと報告しており、青果物の肉質を評価する場合でも破断音の周波数特性を評価する必要があると考えられる。Sakurai et al. (2005a, 2005b) は、振動検出用の圧電素子を取り付けたプローブを青果物の肉質に挿入し破断振動を取得した。振動解析には高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) を利用した。FFT は振動を周波数成分に分解するため、取得振動の特性の詳細な評価が可能だが、食品の破断時に発生するパルス状で発生時間の短い信号の解析には向いていない。後に Taniwaki et al. (2006b) はヒトの咀嚼過程を模した食感の音響振動測定法 (AMC 法) を開発した。この装置では信号解析にバンドパスフィルタを用いており、19 の 1/2 オクターブ幅の周波数帯域をエネルギー密度で定量化し、多くの青果物の肉質評価に用いられた (Taniwaki et al., 2006a, 2009; Taniwaki and Sakurai, 2008)。

本章では、ブドウ (*Vitis vinifera* and *labrusca*) 果粒の肉質評価について取

り扱う。ヨーロッパではブドウといえばワインの原料というのが一般的であるが、日本では、果粒を生で食べる機会が多く、肉質がブドウの品質に占める割合が大きい。最近の日本では例えば‘シャインマスカット’のような‘サクサク’とした歯切れのよい食感のブドウの人気が高まってきている。ブドウの肉質には品種特性があり、官能評価で3つグループに分けられている(薬師寺ら, 2007)。それは歯切れが良く‘サクサク’とした「崩壊性種」、噛み切りにくい「塊状種」、それらの中間種である。日本では先に述べたように崩壊性種の需要が高まっている。Sato et al. (1997, 2004) は破断試験でブドウ果肉特性の定量評価を試み、応力-ひずみ曲線から算出される2つのパラメーター(最大破断荷重と1つ目の破断ピークの変形量)を用いて肉質特性を‘サクサク’(crispy)と軟らかい(tender)の2種類に分類した。先に述べたように、日本のブドウ肉質は官能によって3種類(崩壊性, 塊状, 中間)に評価されるため、より詳細に分類可能な手法が必要である。薬師寺ら(2007)はブドウ果肉破断時の応力-ひずみ曲線のギザギザとした形状が3つの肉質グループでは異なることを報告しているが定量化までには至っていない。そこで本章では, Taniwaki et al. (2006b) の開発した AMC 装置でブドウ果肉の破断信号を取得し、従来の応力-ひずみ曲線では分類できなかった、崩壊性, 塊状, 中間で評価される肉質の品種特性を定量的に評価することを目的とした。

### 3. 実験方法

#### (1) 材料

9品種のブドウを供試した。肉質の品種特性は官能評価によって‘オリエンタルスター’, ‘シャインマスカット’の2種が崩壊性, ‘デラウェア’, ‘ノースレッド’, ‘キャンベルアーリー’3種が塊状, ‘ハニービーナス’, ‘ピオーネ’, ‘巨峰’, ‘藤稔’4種が中間品種に分類されている(薬師寺ら, 2007)。表2-1に本章で供試したブドウ品種の形態的な特徴をまとめた。崩壊性種と中間種は塊状種と比較して果粒が大きく, 形状は崩壊性種が楕円, 塊状種が球状に近いものであった。果皮色には肉質特性との関係がなかった。

ブドウ果粒は農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所ブドウ・カキ研究

拠点（広島県東広島市）の圃場で栽培した。‘キャンベルアーリー’、‘デラウェア’、‘ノースレッド’、‘ピオーネ’の4品種は2009年8月21日に、‘オリエンタルスター’、‘シャインマスカット’、‘ハニービーナス’、‘巨峰’、‘藤稔’の5品種は2009年9月3日に収穫した。各品種の収穫日は収穫最適期にあたる。‘ハニービーナス’、‘キャンベルアーリー’、‘ノースレッド’を除く6品種は無核化のために開花後ジベレリン処理を行った。収穫後のブドウは直ちに広島大学に移送し、各測定に使用した。

## (2) 音響振動測定

本章では Taniwaki et al, (2006b)の報告した音響振動測定装置(AMC, (有)生物振動研究所, 東広島市)を用いてブドウ果肉の破断振動を取得した。図 2-1には装置の概略図を示す。振動検出には圧電素子(厚さ 2 mm、径 10 mm, (株)富士セラミックス, 富士宮市)を用いた。ステンレス製のプローブを円盤状の圧電センサの片面に接着し、もう一方の面をアルミニウム製のピストンに接着剤で固定した。ピストンは真鍮製のシリンダ内に収められており、送液ポンプ(D-120 平沼産業(株), 水戸市)でシリコンオイルを供給することにより駆動した。ピストンのスピードは 22mm 毎秒で、この速度でプローブを試料に貫入させた。プローブが試料破断時に受ける振動を圧電素子で電圧信号として検出した。プローブは径 5 mm, 長さ 20mm の円柱で、測定試料に接触する先端部の形状が異なる 2 種類を準備した。1 つは先端の 10 mm が円錐状(先端角 30 度)に尖ったもの(以下円錐プローブ)で、ヒトの犬歯を想定した形状である。もう一方は、先端角 30 度, 5mm 幅のマイナスドライバー型あるいは楔状(以下楔状プローブ)で、門歯を模した型にした。

圧電素子で検出した電圧信号はローノイズアンプ(SR-560, Stanford Research Systems, Inc., CA)を通じて A/D コンバーターシステム(NI PCI-6251, BNC-2110, National Instruments Co. Ltd., TX, USA)に入力し、サンプリング周波数 80k Hz でコンピュータに取り込み、LabVIEW (Ver. 7.1, National Instruments Co. Ltd., TX, USA) で作製した カスタムメイド振動解析プログラムで記録した。取得した電圧信号は可聴域をカバーする 25.6 kHz までをバンドパスフィルタを用いて、1/2 オクターブ幅の 19 の周波数帯域に分割した。各



帯域について、Taniwaki and Sakurai (2008) によって定義された、エネルギー密度に比例する Texture Index (以下 TI) を算出した。定義式は以下の通りである。

$$TI = (f_l f_u) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i)^2 \quad (2-1)$$

$V_i$  はバンドパスフィルターを通過した電圧信号(mV)、 $n$  はデータ数、 $f_l$  および  $f_u$  はそれぞれ各帯域の下限および上限遮断周波数(Hz)である。

ブドウ果粒は 1 房につき枝に近い方から上部、中部、下部と 3 等分し、各部位から 8 粒 (24 粒/房) 採取した。1 品種につき 3 房を供試したので、1 品種につき 72 粒を AMC に使用した。ブドウの果粒は赤道面付近で 10 ミリ程度の厚さで切り出し、中心部の種子部と果皮の中間の内壁中央部にプローブを貫入させた。‘デラウェア’は果粒がプローブに対して小さかったため、試料調整時に切断面積を大きくするよう赤道面付近から少し上部を切除し、直径 10mm のアクリル製円筒形ホルダ上に置いて測定を行った。供試した果粒の半数 36 個体は円錐プローブ、もう半数は楔状プローブを使用して破断振動を取得した。プローブの貫入深度はプローブが果肉を完全に貫通する直前 (6-10mm) とした。

### (3) 破断荷重測定

果実肉質の特性評価に一般的に利用される物性測定装置 (TPU-2S, (株) 山電, 東京) でブドウ果粒の肉質評価を行った。測定用の試料調整は上述の AMC と同様にした。径 2 ミリの円柱形プランジャーを果肉に 8-10mm の深さで貫入させ、その時の最大荷重を記録した。1 品種につき 10 粒を 2-3 房からランダムに採取して、破断荷重計測に供試した。

## 4. 結果

図 2-2 には物性測定装置で計測した最大破断荷重を示す。値は 10 個体/品種の平均値である。崩壊性種に分類されている ‘シャインマスカット’ はすべての品種の中で最も破断荷重が高く、硬い肉質を有していた。次いで同じく崩壊性種の ‘オリエンタルスター’ の荷重が大きかったが、中間種の ‘ハニービー

ナス’、塊状種に分類されている‘キャンベルアーリー’、‘デラウェア’と有意な差 ( $p < 0.05$ ) は認められなかった。この結果からもわかるように、最大破断荷重だけでは、3種類のブドウ肉質特性を評価できないことが再確認された。

AMC 装置によって得られた代表的な電圧信号を図 2-3 に示す。上段(A)が崩壊性種、中段(B)が中間種、下段(C)が塊状種の結果であり、左列は楔状プローブ、右列が円錐プローブで取得した信号である。プローブの先端形状に関わらず、プローブがブドウ果肉に触れ始めると(図中の矢印)、圧電素子の出力電圧が上昇していき、プローブが試料に貫入中は複雑な信号が連続的に観察できる。プローブが止まると、出力電圧は 0 にまで低下した。楔状プローブで取得した信号は、円錐プローブで取得したものと比較し、果実の肉質特性によって特徴的なパターンがあった。崩壊性種では最大電圧が大きく、プローブが貫入中は振幅の大きな電圧信号が連続的に観測された。中間種では崩壊性種とよく似た波形を示したが、最大電圧が崩壊性種より小さい傾向にあった。一方、塊状種では波形がかなり滑らかで、単一のゆるやかなピークのようにあり、最大電圧も小さかった。円錐プローブを用いて取得した貫入中の電圧信号は、肉質特性による明らかな形状の違いは観測されず、いずれも滑らかなピーク状を示した。この電圧信号のうち、プローブが果肉に触れてから止まるまでの信号(約 400 ミリ秒間)を、バンドパスフィルターを通して食感指標(TI)を算出した。

図 2-4 には 0 から 25.6kHz までの 19 帯域の TI を示す。TI は対数値で縦軸に表示した。左図が楔状プローブを使用して取得した電圧信号から算出した結果、右図は円錐プローブである。楔状プローブで果肉破断した実験では、10Hz から 3.2 kHz の帯域で明らかに肉質特性を反映した 3 つのグループに分類された。この帯域では崩壊性 2 品種の TI が他の品種よりも有意に高く、次に中間 4 品種、塊状 3 品種が最も小さかった。一方、円錐プローブで取得した信号から算出された TI では、3 種類の肉質特性を明確に特徴付ける帯域はなかった。50-200Hz 帯域では、崩壊性種の TI が他の肉質特性のものより大きく、塊状種が小さい傾向にあったが、3 つの肉質特性のグループを明確に分けるほどではなかった。3.2kHz より高周波の TI では、品種やプローブ形状によって大きな差がなかったことから、この帯域の信号にはブドウ果肉の肉質情報が乏しいと推測さ

れる．図 2-5 には楔形プローブで計測した TI のなかで，最も TI が大きかった品種と最小であった品種の差が最も大きくなった 140-200Hz 帯域の TI を示したものである．本章で供試した 9 品種のブドウ果粒を肉質特性によって 3 つのグループを有意な差で区別することができた．

物性測定装置で計測した最大破断荷重と，楔状プローブで計測し，ブドウの肉質情報を含んでいると推測される 3.2kHz 以下の各周波数帯域の TI（品種平均）の相関を調査したところ，0-50Hz 帯域の TI にのみ有意な相関（相関係数 0.804,  $p < 0.05$ ）が得られた．

本章で音響振動に測定した装置は，プローブや圧電素子などハードウェアの共鳴振動数が 20kHz 以上であり，装置の共鳴信号が測定結果に影響を及ぼさないように設計されている（Taniwaki et al., 2006b）．しかし，ブドウ果粒の共鳴振動が測定信号に影響を与えている可能性は否定できない．例えば，表 1 に示したような果粒のサイズの違いが，特定の周波数帯域の TI に作用したことがある．そこでレーザードップラー振動計（Terasaki et al, 2001）を用いてブドウ果粒の  $s_2$  モードの共鳴振動を測定した．その結果，品種によってバラつきはあるものの最も低い個体で 600Hz，最も高い個体でも 2374Hz であった．仮にブドウ果粒の共鳴振動が測定結果に影響していたとしても，それは 600Hz より高周波域である．

## 5. 考察

リンゴ果肉について，細胞壁中のペクチン多糖類が分解されると crispness が低下することが確認されている（Reeve, 1970）．これは細胞間接着に寄与する多糖類であるペクチンが少なくなることで，外力に対しての細胞壁の破断よりも細胞間の剥離が優位になる（De Belie et al. 2002）ためと考えられる．つまり，サクサクした肉質には細胞壁の破壊が重要だと言える．ブドウの細胞壁多糖類では，崩壊性種の新鮮重量当たりのセルロースとヘミセルロース B 多糖類の量が塊状種と比較して少ない（薬師寺ら，2008）．ブドウではペクチンではなくセルロースとヘミセルロース B 多糖類が少ないことが細胞壁が壊れやすい原因と推察される．この結果，崩壊性種では細胞壁破断時に発生する振動が多

くなり、10-3.2kHz 周波数帯域の TI は崩壊性種が高く、塊状種が小さくなった (図 2-4) ののではないかと推測される。取得信号がプローブ形状の影響を受けたのも同様の理由が考えられる。楔状プローブは円錐プローブよりも果肉との接触面積が大きく、より多くの細胞壁を破壊したため TI が全体的に円錐プローブよりも高かったと考えられる。官能による肉質評価の場合、被験者は犬歯だけで果肉を咀嚼することはまずないが、犬歯だけで噛んだ場合、肉質の違いがわからない可能性がある。また逆に楔状プローブは門歯を模した形状をしており、破断条件は被験者による果肉破断の場合と近かったと思われる。このため、官能評価と楔形の結果が一致したと考えられる。すなわち、臼歯を使って咀嚼する食品に関しては、それに見合ったプローブ形状の検討を必要とすることが必要であろう。

物性測定装置から得られた最大破断荷重と楔状プローブで計測した 0-50Hz 帯域の TI とには有意な相関があった (図 2-6)。Taniwaki et al. (2006a) は、0-50Hz 帯域の出力電圧信号は、ネギの葉の組織にプローブが接触した時に大きくなり、その組織が破壊されると小さくなることを報告した。つまりこの帯域の TI は、測定試料のマイクロ組織の破壊に必要な力が大きいほど増加すると考えられる。このことから、0-50Hz 帯域の TI はサンプルの硬度の指標として有効であることが示唆された。

本章では 3 つのブドウ肉質特性を AMC 法で計測した TI をパラメータとして定量的に評価で、果実硬度も評価できる可能性が示唆された。1 回の計測で、音響振動、物性値の取得が可能より簡便な肉質評価法として期待できる。

## 6. 引用文献

- 薬師寺博, 上野俊人, 東暁史, 児下佳子, 櫻井直樹, 2007. テクスチャロメーターによるブドウ果粒肉質の評価法について. 園芸学研究, 6 (別 2), 463.
- 薬師寺博, 上野俊人, 東暁史, 児下佳子, 2008. ブドウ肉質の崩壊性と塊状における細胞壁多糖類の品種間差異. 園芸学研究, 7 (別 2). 452
- Chen, J., Karlsson, C., Povey, M., 2005. Acoustic envelope detector for crispness. J. Texture Stud. 36, 139-156.

- Christensen, C.M., Vickers, Z.M., 1981. Relationships of chewing sounds to judgments of food. *J. Food Sci.* 46, 574–578.
- De Belie, N., Harker, F.R., De Baerdemaeker, J., 2002. Crispness judgement of Royal Gala apples based on chewing sounds. *Biosyst. Eng.* 81, 297–303.
- De Smedt, V., Pauwels, E., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B., 1998. Microscopic observation of mealiness in apples: a quantitative approach. *Postharvest Biol. Technol.* 14, 151–158.
- Drake, B.K., 1963. Food crushing sounds. An introductory study. *J. Food Sci.* 28, 233–241.
- Drake, B.K., 1965. Food crushing sounds: comparisons of objective and subjective data. *J. Food Sci.* 30, 556–559.
- Lee III, W.E., Deibel, A.E., Glembin, C.T., Munday, E.G., 1988. Analysis of food crushing sounds during mastication: frequency-time studies. *J. Texture Stud.* 19, 27–38.
- Reeve, R. M., 1970. Relationships of histological structure to texture of fresh and processed fruits and vegetables. *J. Texture. Stud.* 1, 247-284.
- Sakurai, N., Iwatani, S., Terasaki, S., Yamamoto, R., 2005a. Texture evaluation of cucumber by a new acoustic vibration method. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 74, 31–35.
- Sakurai, N., Iwatani, S., Terasaki, S., Yamamoto, R., 2005b. Evaluation of 'Fuyu' persimmon texture by a new parameter, "Sharpness index." *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 74, 150–158.
- Sato, A., Yamane, H., Hirakawa, N., Otobe, K., Yamada, M., 1997. Varietal differences in the texture of grape berries measured by penetration tests. *Vitis* 36, 7–10.
- Sato, A., Yamada, M., Iwanami, H., Mitani, N., 2004. Quantitative measurements of grape flesh texture as affected by gibberellic acid application. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 73, 7–11.
- Seymour, S.K., Hamann, D.D., 1988. Crispness and crunchiness of selected low moisture foods. *J. Texture Stud.* 19, 79–95.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N., 2006a. Development of method for quantifying food texture using blanched bunching onions. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 75, 410–414.

- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N., 2006b. Device for acoustic measurement of food texture using a piezoelectric sensor. *Food Res. Int.* 39, 1099–1105.
- Taniwaki, M., Sakurai, N., 2008. Texture measurement of cabbages using an acoustical vibration method. *Postharvest Biol. Technol.* 50, 176–181.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N., 2009. Postharvest quality evaluation of “Fuyu” and “Taishuu” persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique. *Postharvest Biol. Technol.* 51, 80–85.
- Taniwaki, M., Sakurai, N., 2010. Evaluation of the internal quality of agricultural products using acoustic vibration techniques. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 79, 113–128.
- Terasaki, S., Sakurai, N., Wada, N., Yamanishi, R., Yamamoto, R., Nevins, D.J., 2001. Analysis of the vibration mode of apple tissue using electronic speckle pattern interferometry. *Trans. ASAE* 44, 1697–1705.
- Vickers, Z.M., 1982. Relationships of chewing sounds to judgments of crispness, crunchiness and hardness. *J. Food Sci.* 47, 121–124.
- Vickers, Z.M., Bourne, M.C., 1976. A psychoacoustical theory of crispness. *J. Food Sci.* 41, 1158–1164.
- Zampini, M., Spence, C., 2004. The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips. *J. Sensory Studies*, 19 (5), 347-363.
- Zdunek, A., Cybulska, J., Konopacka, D., Rutkowski, K., 2010. New contact acoustic emission detector for texture evaluation of apples. *J. Food Eng.* 99, 83–91.

表 2-1 ブドウ果粒の特徴

Cultivar	Classification of flesh texture	Diameter (mm)	Length (mm)	Color of skin
Oriental Star*	Crisp	24.96 ± 1.12	35.81 ± 2.58	Dark red violet
Shine Muscat*	Crisp	26.28 ± 1.33	33.21 ± 2.07	Yellow-green
Honey Venus	Intermediate	24.88 ± 1.16	28.36 ± 1.05	Yellow-green
Pione*	Intermediate	29.93 ± 1.37	33.78 ± 2.01	Blue black
Fujiminori*	Intermediate	30.49 ± 1.32	35.40 ± 2.28	Blue black
Kyoho*	Intermediate	27.83 ± 1.11	34.28 ± 2.15	Blue black
Campbell Early	Non-crisp	19.79 ± 1.35	21.31 ± 1.21	Blue black
Delaware*	Non-crisp	13.32 ± 0.78	13.83 ± 1.00	Red-brown
North Red	Non-crisp	19.04 ± 1.13	19.44 ± 1.14	Red-brown

\* ジベレリンによる無核化処理品種. 値は平均値 ± 標準偏差 (n= 10).

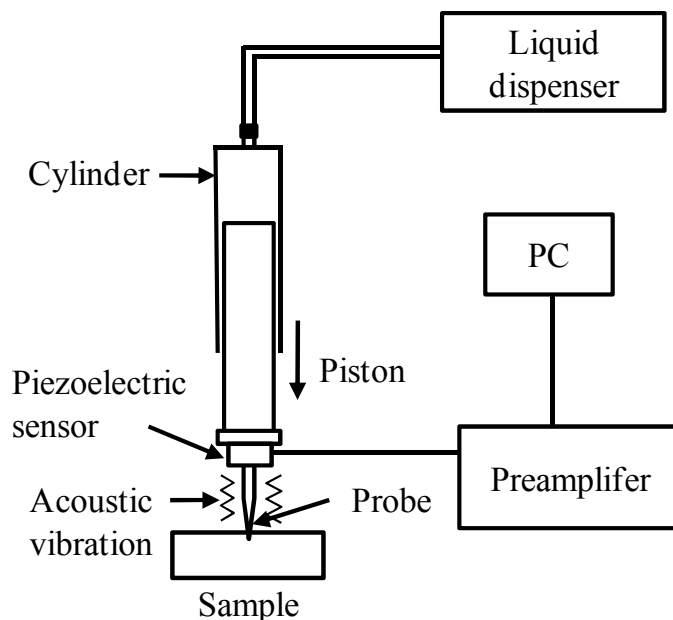


図 2-1 音響振動測定 (AMC) 装置の概略図

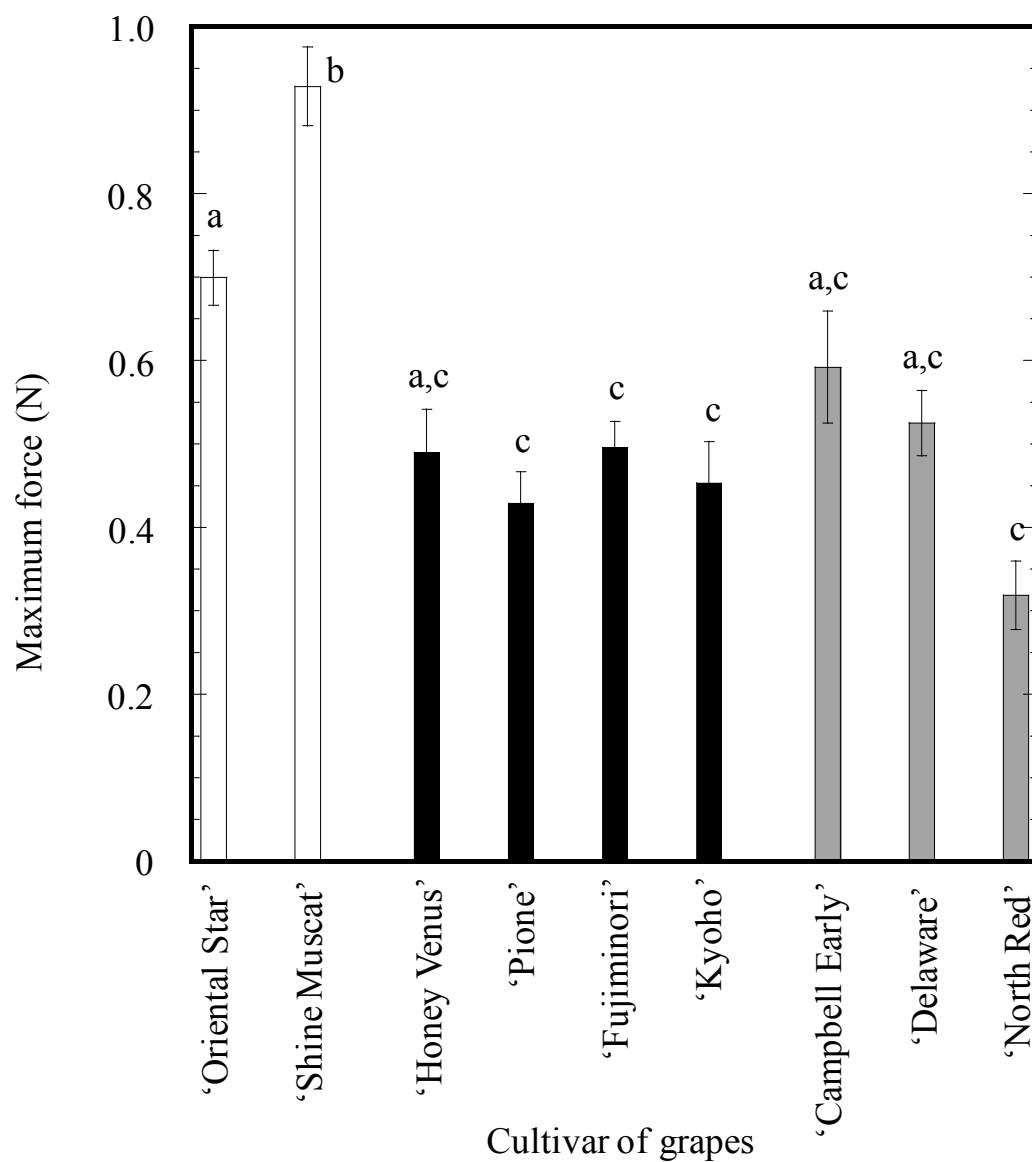


図 2-2 物性測定装置で得られた破断荷重。エラーバーは標準誤差 ( $n = 10$ )。図中のアルファベット記号は同一記号間に有意差なし (Games/Howell,  $p < 0.01$ )。□, 崩壊性種; ■, 中間種; ■, 塊状種。



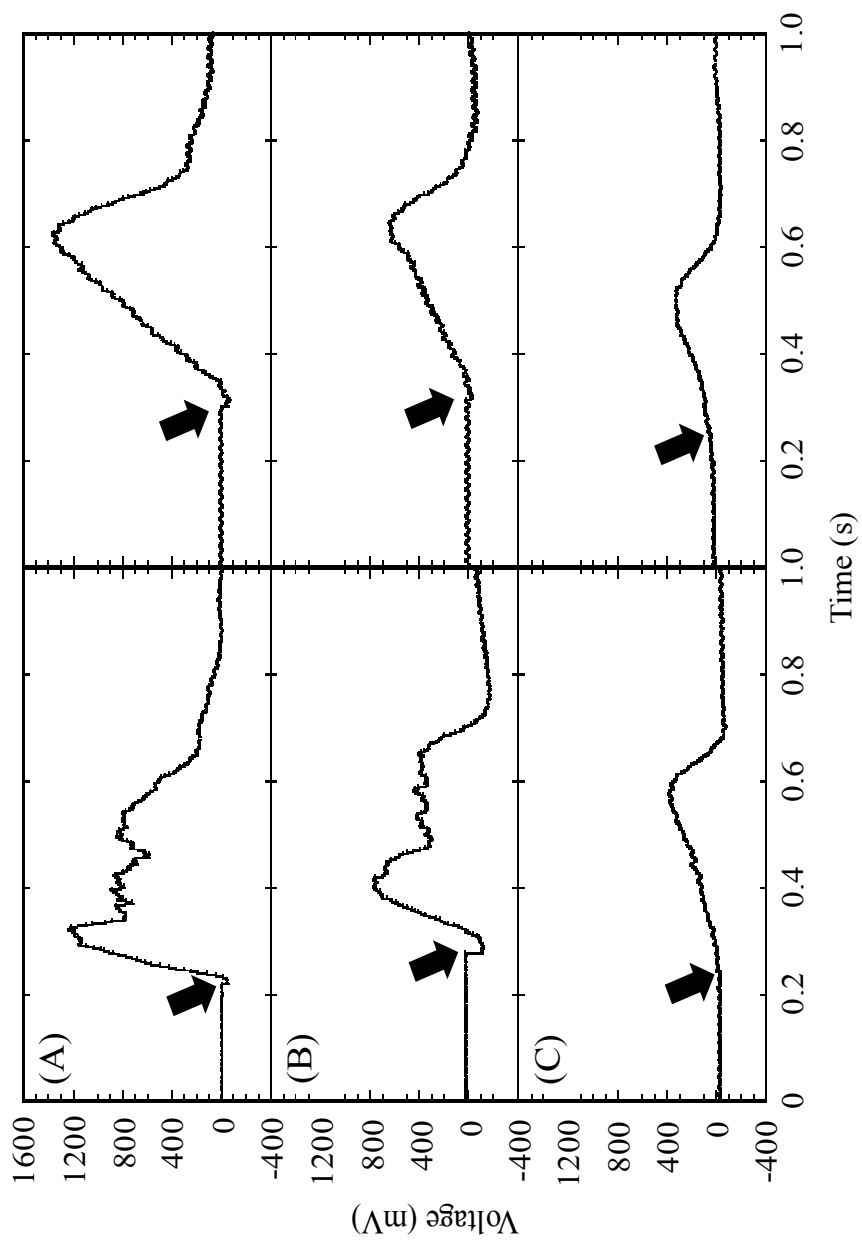


図2-3. 音響振動測定装置で得られる代表的な電圧信号. ‘シャインマスカット’ (崩壊性種), (B) ‘巨峰’ (中間種), (C) ‘デラウェア’ (塊状種).  
 図左; 楔状プローブを使用した信号. 右図; 円錐プローブ

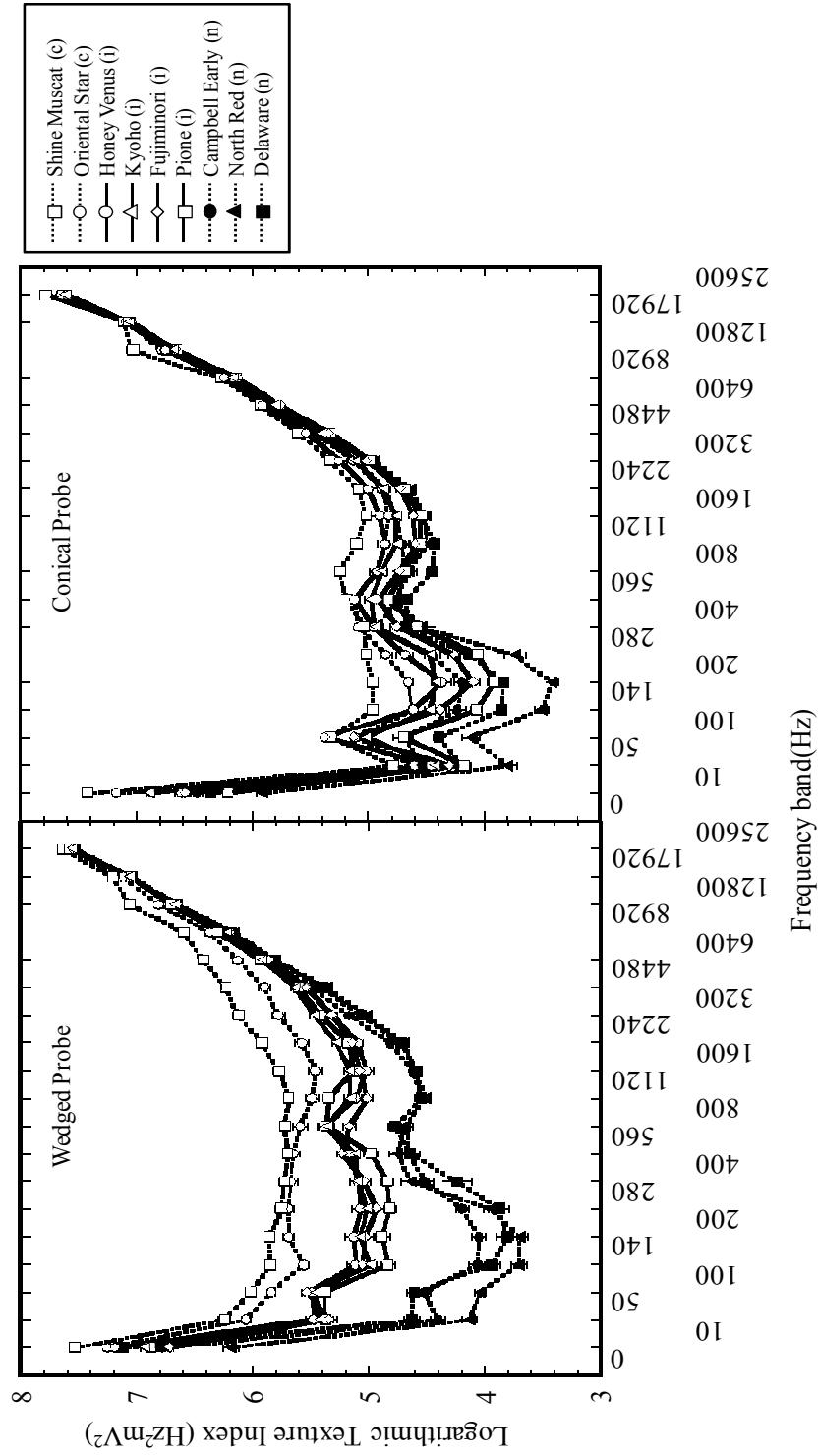


図2-4 品種別TIの周波数分布. 凡例内のアルファベット記号は肉質特性に対応: (c), (i), (n)はそれぞれ塊状種, 中間種, 塊状種. エラーバーは標準誤差 ( $n = 36$ ). 横軸の数字はそれぞれ帯域の遮断周波を意味する. 例えば左の帯域から順に 0-10 Hz, 10-50 Hz, 50-100Hzの周波数帯域である.

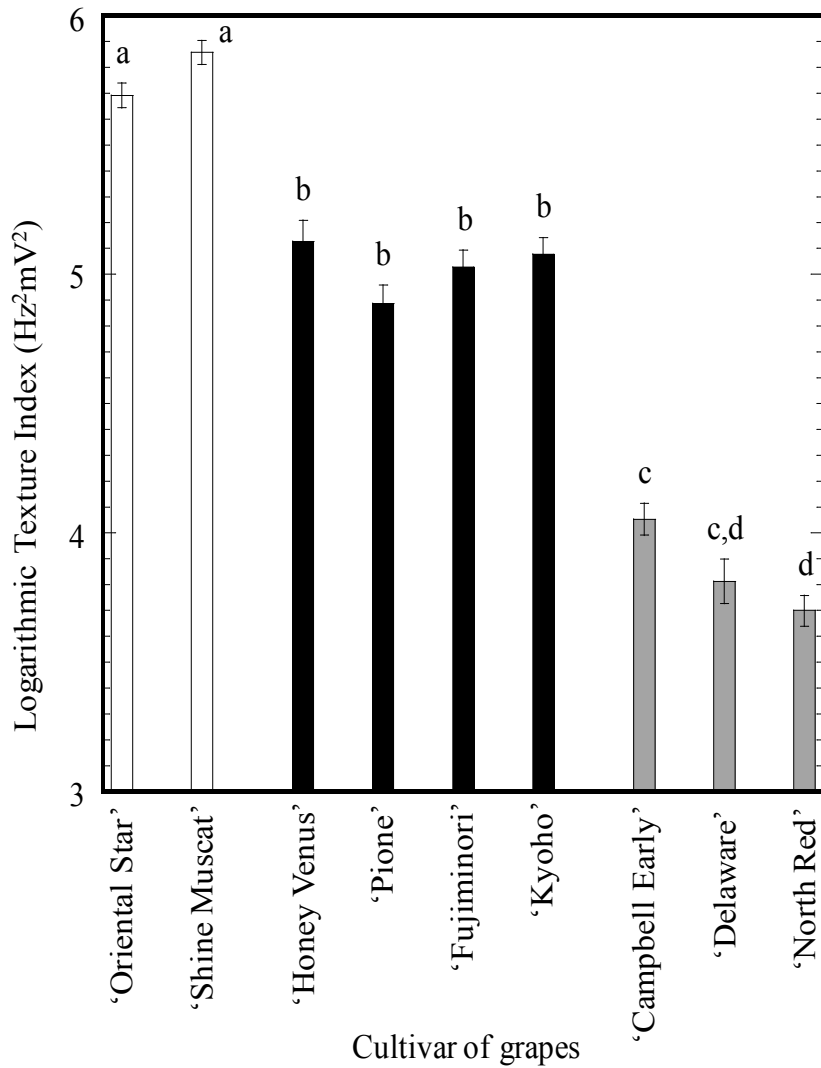


図 2-5 楔状プローブで計測した 140-200Hz 周波数帯域の TI. 図中のアルファベット記号は同一記号間に有意差なし (Games/Howell,  $p < 0.01$ ). □, 崩壊性種; ■, 中間種; ▒, 塊状種. エラーバーは標準誤差を意味する (n = 36)

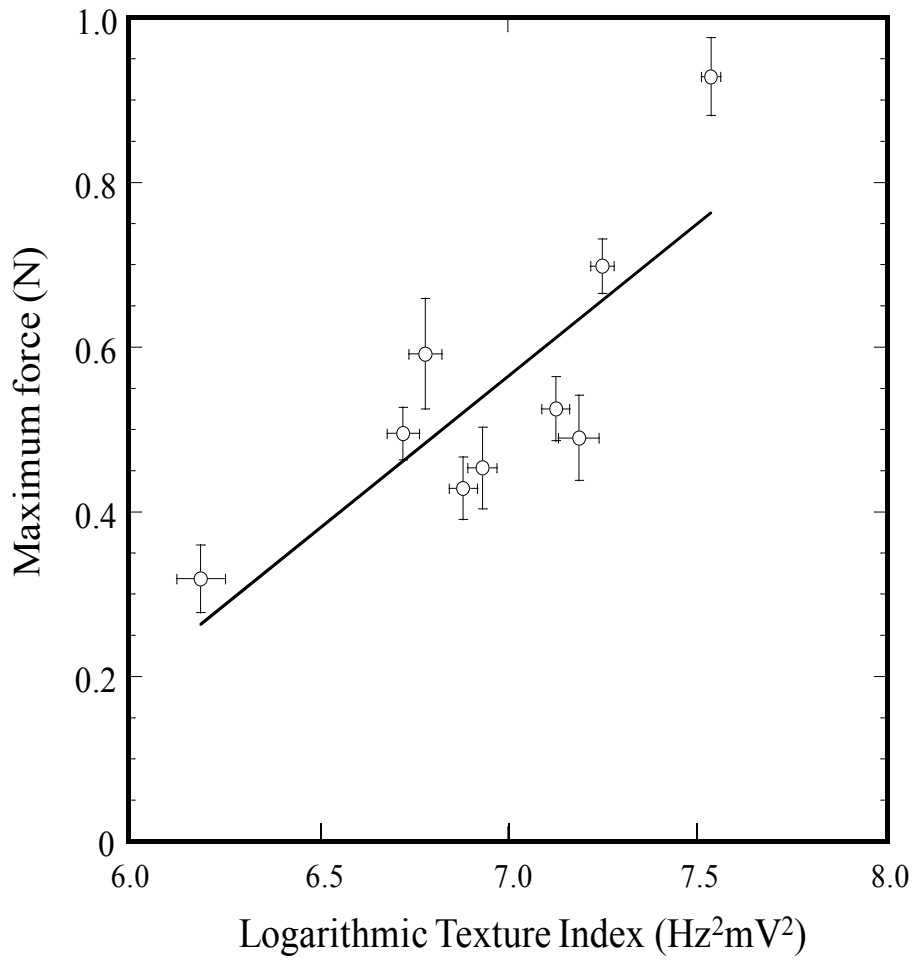


図 2-6 物性測定器による最大破断荷重と 0-50Hz 帯域の TI との相関. 相関係数  $r=0.804$ . エラーバーは標準誤差 ( $\bar{x}$ ;  $n = 36$ ,  $\bar{y}$ ;  $n = 10$ ).

## 第3章

### 音響法を用いたキャベツの食感解析方法の比較

#### 1. 概要

AMC法を用いてキャベツ葉の肉質特性の定量評価法について検討した。供試材料の4品種のキャベツは適期に収穫したものから収穫期を過ぎ品質劣化したものまでを収穫した。キャベツ1個体につき4枚の葉からそれぞれ5cm四方に切り出し重ねたものを1組のサンプルとし、ヒトの歯に見立てたプローブを突き刺し、プローブ根元の圧電素子で破断振動を電圧信号で取得した。1枚目の葉についてプローブが葉に触れてから完全に破断するまでの100から200ミリ秒間の信号を「前半」、葉が完全に破断する瞬間の40ミリ秒の信号を「破断」、1枚目の葉に接触した瞬間から4枚目の葉を完全に破断するまでの700ミリ秒間の信号を「総合」として、それぞれについて1/2オクターブ幅のフィルタで19の周波数帯域に分け、各帯域のエネルギー密度に比例するTexture Index(TI)を算出した。この時、フィルタには元信号に影響が少ない3次のバターワースフィルタを用いた。その結果「破断」信号のTIが他よりも高かった。キャベツの様な薄い試料では、破断の瞬間の信号が肉質判断に重要だと示唆された。また、収穫期を過ぎたキャベツ試料では800-4480Hzの帯域でTIの顕著な低下が見られたため、キャベツの肉質特性評価にはこの振動数の破断信号が重要だと考えられる。

#### 2. 緒言

日本で流通するキャベツ(*Brassica oleracea* var. *capitata*)は、約半数が業務用であり(太田, 2008)、工場で細かく裁断されカット野菜に加工されている。用途はコールスローなどのサラダ、トンカツの付け合わせの千切りキャベツ、餃子やお好み焼きの具材など多岐に渡り、日本人にとって最も馴染が深い野菜の1つである。日本で生産されるキャベツは肉質が軟らかい春系キャベツと玉の締りがよく、硬い肉質が特徴の寒玉系キャベツに大別され、カット野菜には寒玉系品種が適している(小林, 2006; 太田, 2008)。しかし、寒玉系キャベツは4月、5月は開花に伴う抽台のため品質が低下し(小林, 2006)生産が困難であ

る。この時期、春系キャベツは収穫適期であるが、葉が軟らかい上に歩留まりが悪く寒玉系の代替とはならない。そこで、4、5月でも収穫可能な寒玉系品種の選定が試みられた（太田ら，2007；高田ら，2007）。これらのキャベツ選抜評価にはこれまでの品種と比較するために正確な品質評価が重要である。この際、キャベツの葉の硬軟は重要な評価項目となる。第3章ではキャベツ葉の品質要素の1つである食感の定量評価法について検討した。

ヒトは咀嚼中に発生する音を基に食感を判断していると推察される（Vickers and Bourne, 1976）。日本語の食感表現には‘シャキシヤキ’，‘サクサク’など擬音語が多数あり，このことから食感の定量評価には音響学的アプローチが重要であると考えられる。Drake (1963, 1965)は咀嚼音が官能で‘うるさい音’と感じる食品では振幅の大きな音が発生することを発見し，食品の破断音と食感が関係することを初めて報告した。また多くの研究は，被験者が実際に食品を咀嚼した音を録音し食感評価に利用した（Lee et al, 1988; Seymour and Hamann, 1988; Dacremont et al, 1995）。この方法では唾液の量や，頭蓋骨の共鳴音など被験者の個人差に起因する問題がある。また頬の軟らかい組織が振動を吸収する（Vickers, 1991）ため，正確な咀嚼音の取得が難しい。また，これらの方法はヒトの聴覚に基づき，咀嚼音をマイクロフォンで収録しているが，食感判断には聴覚だけでなく口内での振動覚も重要な役割を担っていると考えられている（Christensen and Vickers, 1981 ; Vickers, 1981）。Taniwaki et al, (2006b)はヒトの歯の振動知覚構造に基づき，食品の破断振動を直接的に取得する AMC 装置を開発した。プローブを測定試料に挿入し，プローブが受ける振動を圧電素子で検出するものであり，カキ (*Diospyros kaki* Thunb)，セイヨウナシ (*Pyrus communis* L.) の食感測定を行った（Taniwaki et al, 2009ab）。

キャベツ食感の定量評価について，引っ張り試験による葉の力学特性評価（Kohyama et al., 2008）や千切りキャベツの破断荷重試験（高井，2009）など力学的手法を用いたものが報告されているが，音響手法についての報告は少ない。Taniwaki and Sakurai (2008) と Taniwaki et al. (2009c)はキャベツ葉の破断振動の周波数特性をエネルギー密度に相当する Texture Index (TI) で定量化し食感評価に用いた。このとき周波数解析には，長さ 20mm のプローブが4枚に重

ねた葉に接触を開始してから、最後の葉を完全に貫通するまでの信号全てを用いている。カキやセイヨウナシの測定サンプルは厚みが 20mm あり (Taniwaki et al., 2009ab) プローブが試料を貫通することはないが、キャベツの葉は薄く同等に扱うのは難しいと考えられる。キャベツと同じく薄い試料であるポテトチップスでは、最も大きく破断した瞬間の音響振動が食感判断に大きく寄与する (Taniwaki and Sakurai, 2010)。キャベツの場合でもポテトチップス同様、破断の瞬間の音響振動が食感評価には重要であると推測される。

第 3 章では、キャベツの葉の破断音響振動を Taniwaki and Sakurai (2008) の手法で取得し、キャベツの葉の食感特性が最も表現される解析方法について検討した。

### 3. 実験方法

#### (1) 材料

キャベツは ‘T-520’、‘冬のぼり’、‘さつき王’、‘金系 201 号’ の 4 品種を供試した。 ‘T-520’、‘冬のぼり’、‘さつき王’ は寒玉系、‘金系 201 号’ は春系品種である。供試キャベツは神奈川県農業技術センター三浦半島地区事務所 (神奈川県三浦市) で栽培し、2008 年の 2 月から 5 月まで 6 回に分けて収穫した。表 1 に各品種の播種日および収穫日を示す。各収穫日に 4 個体/品種の収穫を行った。 ‘T-520’、‘冬のぼり’ は夏播き春どりの寒玉系で神奈川県では一般に収穫適期が 4 月上旬までと言われている。 ‘さつき王’ は寒玉系ではあるが、秋まき初夏どり品種であり収穫適期は 6 月頃である。 ‘金系 201 号’ は典型的な春系品種で 4 月が収穫最盛期に当たる。

#### (2) 音響振動測定

食感測定には第 2 章と同様に音響振動測定装置 (AMC, (有)生物振動研究所, 東広島市) を使用した。この装置はヒトの口内での振動知覚構造をモデル化したもの (Taniwaki et al., 2006) で、プローブをサンプルに貫入させ、プローブの振動を根元の圧電素子で検出し、コンピュータに取り込んだ。プローブがヒトの歯、圧電素子が歯根膜神経、コンピュータが脳に相当する (図 3-1)。プローブは長さ 20mm、直径 5mm の先端が楔状 (先端角 30° ) のステンレス製のものを用

いた。圧電素子は厚み 1mm, 直径が 10mm (2Z10D-SYX, (株)富士セラミックス, 富士宮市) のものを使用した。プローブはヒトの平均的な咀嚼速度範囲内である 22mm/秒 (Roudaut et al., 2002) でキャベツ試料に貫入させた。

キャベツは、輸送時の保護のために残してあった最も外側の硬い葉 2, 3 枚を取り除き、そこから 4 枚の葉を測定に使用した。各葉から 5cm 角の試料を切り取り、4 枚重ねで 1 組のサンプルとし、5 組/個体のサンプルを採取した。各品種、収穫日当たり 4 個体を使用したので、1 品種につき合計 20 組のサンプルの計測を行った。測定サンプルはプローブ貫入用の直径 1cm の穴をあけたアクリル板 2 枚で挟み、プローブを貫入させた。セイヨウナシやカキなどの果実の AMC では、サンプルの厚みが 2cm 程度 (Taniwaki et al., 2009ab) であったが、キャベツの葉はそれらと比較して薄く (最も厚い葉で約 1mm) 軟らかい。そのため、プローブ貫入時にサンプルが変形し破断されるタイミングが定まらず、破断条件を一定に保つことが難しかった (図 3-2)。そこで、上述のように葉を 4 枚重ねると、波が変形することなく一定の破断信号が得られた。

プローブが受ける破断振動の特性を評価するため、コンピュータに取り込んだ信号は可聴域をカバーする 25.6 kHz までを 1/2 オクターブ幅のバンドパスフィルタを用いて 19 の周波数帯域に分割した (Taniwaki et al., 2006 ab)。各帯域は次の (3-1) 式で定義されるエネルギー密度に相当する Texture Index (TI) (Taniwaki 2006b, Taniwaki and Sakurai, 2008) で定量化した。

$$TI = (f_l f_u) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i)^2 \quad (3-1)$$

$f_l$  および  $f_u$  は 1/2 オクターブバンドパスフィルタの下限及び上限周波数 (Hz),  $V_i$  は圧電素子の電圧値,  $n$  はデータ数を表す。

### (3) 信号解析

キャベツ葉を破断した際には、図 3-3 のような電圧信号が取得できた。プローブが葉に接触してから電圧が高くなり、プローブが葉を貫通すると電圧は大きく低下した (図 3-3 中矢印)。また電圧低下後の約 40 ミリ秒間は小さな振幅の信号が多数観測された。その後、2 枚目の葉に当たるとまた電圧が高くなり始め、破断時に大きく低下した。同様に葉を 4 枚重ねているため、4 つの大きな電



圧の上下が観測された。寒玉系の3品種では最大電圧が1000mV以上と大きく、破断の様子も鮮明であったが、春系の金系201号は寒玉系と比較して出力される電圧が小さく、葉を突き破っても明確な電圧低下は見られない傾向にあった。

先行研究の果実のAMCでは(Taniwaki et al., 2009ab),測定試料の厚さが20mmあり、プローブ貫入中は数百mVの振幅で連続的な破断信号が得られた。そのため、プローブが測定試料に触れ始めてから止まるまでの信号(図3-3中(a)の信号に相当)を周波数解析に用いた。一方、キャベツの葉の信号では、プローブが葉に接触してから貫入する直前まで(図中(b)に相当)、貫入の瞬間から40ミリ秒間(図中(c))では全く性質の異なる信号であると考えられる。そこでプローブが1枚目の葉に触れ始めてから4枚目の葉を破断して止まるまでの700ミリ秒間の信号(a)を「総合」信号、葉に触れてから破断の直前の電圧が最も高くなるまでの100から200ミリ秒間の信号(b)を「前半」信号、葉が破断する直前から破断後40ミリ秒間(c)を「破断」信号として、それぞれについてバンドパスフィルタを用いた周波数解析を行った。

#### (4) フィルタの設定

圧電信号の周波数解析に用いた1/2オクターブフィルタには、次の(3-2)式で表される振幅特性を有する(六田, 2000)バターース型フィルタを用いた。

$$G^2(j\omega) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2N}} \quad (3-2)$$

G;利得, j;虚数単位,  $\omega$ ;角周波数,  $\omega_0$ ;遮断周波数, N;次数である。Taniwaki et al. (2006b)は次数10のバターースフィルタを用いており、本章でも同型のフィルタを採用した。バターースフィルタは(3-2)式からもわかるように次数Nを大きくすれば遮断周波数領域が急峻な出力応答を示す理想的なフィルタとなる。しかし、次数Nは振幅特性だけでなく、群遅延特性やインパルス特性といった他のフィルタ特性に影響し(六田, 2000)、元波形を大きく歪めてしまう場合がある。特に本章で扱うキャベツの信号は、「破断」信号で40ミリ秒と短く、フィルタ特性の影響を受けやすいと考えられる。そこで最適なバターースフィルタの次数について実験的に検討を行った。

関数発生器(Spectra Plus, Pioneer Hill Software LLC., WA)で 200 ミリ秒間のランダムノイズを発生させ, AMC 装置の A/D コンバータを介してコンピュータに取り込んだ. 取得した信号はキャベツの破断信号同様, バタワースフィルタを用いて 1/2 オクターブ幅の 19 の周波数帯域に分割し, 各周波数帯について(3-1)式から TI を算出した. バタワースフィルタの信号長に対する影響を調べるため, 取り込んだノイズ信号は入力開始から 20, 40, 60, 80, 100, 200 ミリ秒間の 6 つの信号長のものを周波数変換に用いた. このとき, バタワースフィルタの次数は Taniwaki et al, (2006b)に倣い 10 とした. その結果信号長が短くなるにつれ 1000Hz 以下の信号が小さくなることが分かった (図 3-4a). この結果, フィルタ次数 10 はデータ長が 80ms 以下の場合の信号解析には向かないことがわかった. 次にフィルタの次数について検討するため, ノイズ信号の冒頭からの 40 ミリ秒間を 3 から 20 の異なる次数のバタワースフィルタを用いて分割し, 同様に TI を算出した. その結果, 次数が大きいフィルタを使って算出した TI ほど, 1000Hz より低い周波数帯域で低下がみられた (図 3-4b). しかし, 次数 3 フィルタを使用したものは, 200 ミリ秒間 (次数 10) の信号とほとんど同等の結果であり, 周波数変換精度に問題はないと考えられる. この結果より, 本章では周波数解析に使用するバタワースフィルタの次数を 3 とした.

#### 4. 結果

破断時の取得電圧信号 をバンドパスフィルタで周波数領域に変換した. サンプルの破断状態によって分けた 3 つの領域(前半, 破断, 総合)の TI を図 3-5a に示す. 最も代表的なものとして 2 月 25 日収穫の 'T-520' の結果を示す. 「破断」信号は 1 枚目の葉の破断時のものである. 「破断」信号は全周波数帯域で最も TI が高く, 逆に「前半」信号は 0-50 Hz の帯域を除きもともと TI が小さくなった. 「総合」信号は 2 つの TI の中間であった.

いずれの信号も周波数が高くなるにつれ TI も大きくなる傾向にあったが, 「破断」信号では 140-1600Hz 帯域の TI が相対的に大きかった. 4 枚の葉の「破断」信号を比較すると 400Hz より低い周波数帯域では TI に差は見られなかったが, 400Hz, 特に 1600Hz 以上の帯域では, 1 枚目より 2 枚目, 2 枚目より 3 枚目と破断を重ねる毎に TI が大きくなる傾向にあった (図 3-5b). これは 1 枚目以降の

葉をプローブが破断する時、先に貫通したキャベツの葉がプローブ側面に触れているため、プローブに接触する葉の枚数が多くなるほど TI も大きくなっていると推察される。TI の周波数分布を見ても、葉の破断時にのみ表れるような特定のピークは観察されず、どの周波数帯域でも 4 枚の葉の信号に大きな差は見られなかった。そこで、1 枚目にはプローブが他の葉には接触していないため、第 3 章では 1 枚目の破断信号を試料の「破断」信号とし、収穫期及び品種の比較に用いた。図 3-6 には‘T-520’および‘冬のぼり’の「破断」信号から算出した TI を示す。‘T-520’は収穫日が遅くなるにつれ TI が下がる傾向にあった。特に 2 月から 3 月にかけて大きく低下し、周波数別では 800-4480Hz で有意な低下が見られた。‘冬のぼり’は 400-4480Hz の周波数帯域で TI の低下の有意な低下が認められたが、400Hz 以下および 4480Hz より高周波域では TI の変化はみられなかった。‘さつき王’は 5 月初旬から中旬にかけて 400Hz より高い周波数で TI の増加傾向が見られた。800Hz より高周波域で‘T-520’よりも TI が高い傾向にあった(図 3-7)。‘金系 201 号’は 3 月から 4 月にかけて有意差は認められなかった(図 3-7)。また‘金系 201 号’は他の寒玉系品種と比較して全帯域で TI が低かった。

## 5. 考察

キャベツのように薄い試料を AMC 法で扱う場合には、測定サンプルが主に破壊される 40 ミリ秒間の短い信号が重要であり、キャベツの葉の肉質特性は 800-4480Hz の周波数帯域で特徴的であるということが考えられる。

AMC 装置を用いてキャベツの破断振動を電圧信号で取得した(図 3-3)。この取得信号は、振動検出に用いた圧電素子の出力特性から破壊試験や圧縮試験の応力-ひずみ曲線に相当する(Taniwaki, 2006b)。高井(2009)は破壊試験で得た応力-ひずみ曲線から求めた切断荷重を用いて、キャベツの物性を評価した。しかし、応力-ひずみ曲線から算出されるキャベツの破断荷重、破断応力、弾性率などの力学特性単独での食感評価は難しいことが報告されている(Kohyama et al., 2008)。加えて、薬師寺ら(2007)はブドウ果粒の食感評価には応力-ひずみ曲線のギザギザとしたピーク形状が重要だと報告しているが定量評価できなかった。これらのことより、AMC 装置の電圧信号だけでは食感の評価は難し

く、周波数解析処理が重要であると考えられる。

キャベツ葉の破断エネルギーは、プローブが突き破る瞬間に最もよく発生している(図 3-5a)ことから、キャベツのような薄い試料では、ヒトの食感判断にもこの「破断」信号が最も寄与すると考えられる。Taniwaki et al. (2010) はキャベツ同様に比較的薄い試料であるポテトチップについて、ポテトチップスが完全に壊れる瞬間が最もヒトの食感判断に重要であると指摘しており、この結果と一致する。一方、「前半」信号は TI は低く、食感とはあまり関係がないと推測される。

寒玉系品種では収穫適期が過ぎ品質が低下すると TI の低下が見られ(図 3-6, 7), 特に 800-4480Hz の帯域でその特徴が顕著であった。Taniwaki et al. (2009c) は‘冬のぼり’の2月収穫から3月収穫にかけて、1120Hz より低周波数域で TI の著しい低下を指摘したが、その他の品種や収穫時期における TI の周波数特性を報告していない。Taniwaki et al. (2009c) は TI 算出に本研究の「総合」信号に相当する 700 ミリ秒間相当の全取得信号を用いており、この方法では「破断」信号の特徴的な周波数帯域が「前半」信号と平均化され、特徴が見えにくくなったものだと考えられる。本研究では周波数分解に用いたバタワースフィルタの次数条件を最適にすることによって、40 ミリ秒という短い「破断」信号を精度よく解析することが可能となった。その結果、初めてキャベツ葉の破断周波数特性が明らかになったと考えられる。

キャベツの破断音響振動で特徴的であった 800Hz から 4480Hz の周波数は、ブドウの肉質特徴であった数百 Hz(第 2 章 図. 2-4)と比較して高周波である。しかし多孔質食品ではあるがキャベツ同様に比較的薄い食品であるポテトチップスのクリスピー感(日本語ではサクサク感)には 2kHz-20kHz 帯域の音が重要であり(Zampini and Spence, 2004), クリスピーなクラッカービスケットは 4kHz-6kHz の破断振動が強い(Arimi et al., 2010)。これらの結果と比較しても 800-4kHz は決して高い周波数の振動ではなく、キャベツの肉質の特徴を反映していると推察される。

## 6. 引用文献

- 太田和宏, 2008. 4、5月どり寒玉系キャベツの品種選定について. 野菜情報, 48, 54-57.
- 太田和宏, 高田敦之, 北浦健生, 北宣裕, 2007. 寒玉系キャベツの4、5月どりを可能にする栽培技術体系:(第1報)4、5月どり寒玉系キャベツの品種選定およびトンネル被覆の検討, 園芸学研究, 6(別2), 234
- 神山かおる, 2009. 加工・業務用キャベツの客観的な食感評価方法の開発(その2) 二方向引っ張り試験によるカットキャベツの力学特性評価. 野菜情報, 68, 33-38.
- 小林茂典, 2006. 野菜の用途別需要の動向と国内産地の対応課題. 農林水産政策研究, 2006-11, 1-27.
- 高井雄一郎, 2009. 加工・業務用野菜の品種及び技術研究最前線(12)加工・業務用キャベツの客観的な食感評価法の開発. 野菜情報, 67, 18-23.
- 高田敦之, 太田和宏, 北浦健生, 北宣裕, 2007. 寒玉系キャベツの4、5月どりを可能にする栽培技術体系(第2報)三浦半島における4、5月どり寒玉系キャベツの生育特性および加工適正. 園芸学研究, 6(別2), 235.
- 六田嘉明, 2000. アナログフィルタの合成特性I. バタワースフィルタ. 奈良教育大学紀要(自然科学), 49(2), 65-73
- 薬師寺博, 上野俊人, 東暁史, 児下佳子, 櫻井直樹, 2007. テクスチャロメーターによるブドウ果粒肉質の評価法について. 園芸学研究, 6(別2), 463.
- Arimi, J. M., Duggan, M., O'Sullivan, M., Lyng, J. G., O'Riordan, E. D., 2010. Effect of water activity on the crispiness of a biscuit (Crackerbread): Mechanical and acoustic evaluation. *Food Res. Int.* 43, 1650-1655.
- Dacremont, C., Colas, B., Sauvageot, F., 1991. Contribution of air-and bone-conduction to the creation of sounds perceived during sensory evaluation of foods. *J. Texture Studies.* 18, 109-119
- Drake, B.K., 1963. Food crushing sounds. An introductory study. *J. Food Sci.* 28, 233-241.
- Drake, B.K., 1965. Food crushing sounds: comparisons of objective and subjective data. *J. Food Sci.* 30, 556-559.

- Duizer, L., 2001. A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures. *Trends Food Sci. Technol.* 12, 17-24
- Lee III, W.E., Deibel, A.E., Glembin, C.T., Munday, E.G., 1988. Analysis of food crushing sounds during mastication: frequency-time studies. *J. Texture Stud.* 9, 27–38.
- Kohyama, K., Takada, A., Sakurai, N., Hayakawa, F. and Yoshiaki, H., 2008. Tensile test of cabbage leaves for quality evaluation of shredded cabbage. *Food Sci. and Technol. Res.* 14(4), 337–344.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N., 2006a. Development of method for quantifying food texture using blanched bunching onions. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 75, 410–414.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N., 2006b. Device for acoustic measurement of food texture using a piezoelectric sensor. *Food Res. Int.* 39, 1099–1105.
- Taniwaki, M., Sakurai, N., 2008. Texture measurement of cabbages using an acoustical vibration method. *Postharvest Biol. Technol.* 50, 176–181.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N., 2009a. Postharvest quality evaluation of “Fuyu” and “Taishuu” persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique. *Postharvest Biol. Technol.* 51, 80–85.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Tohro, M., Sakurai, N., 2009b. Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques. *Postharvest Biol. Technol.* 51, 305–310.
- Taniwaki, M., Takahashi, M., Sakurai, N., Takada, A., Nagata, M., 2009c. Effects of harvest time and low temperature storage on the texture of cabbage leaves. *Postharvest Biol. Technol.* 54, 106-110.
- Taniwaki, M., Sakurai, N., 2010. Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements. *Food Res. Int.* 43, 814-818.
- Roudaut, G., Dacremont, C., Pamies, B. V., Colas, B., Le Meste, M., 2002. Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. *Trends Food Sci. Technol.* 13, 217-227

- Seymour, S.K., Hamann, D.D., 1988. Crispness and crunchiness of selected low moisture foods. *J. Texture Stud.* 19, 79–95.
- Vickers, Z.M., 1981. Relationships of chewing sounds to judgments of crispness, crunchiness and hardness. *J. Food Sci.* 47, 121–124.
- Vickers, Z.M., 1991. Sound perception and food quality. *J. Food Quality.* 14, 87-96
- Vickers, Z.M., Bourne, M.C., 1976. A psychoacoustical theory of crispness. *J. Food Sci.* 41, 1158–1164.
- Zampini, M., Spence, C., 2004. The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips. *J. Sensory Studies*, 19 (5), 347-363.

表 1 供試キャベツの概要

品種名	系統	播種 (2007年)	収穫(2008年)					
			2月25日	3月17日	4月9日	4月21日	5月7日	5月12日
‘T-520’	寒玉	8月22日	○	○	○	○		○
‘冬のぼり’	寒玉	8月22日	○	○	○	○		
‘さつき王’	寒玉	10月18日					○	○
‘金系201号’	春玉	10月10日		○	○			

\*表中の○印は4個体の収穫を行った日を意味する。

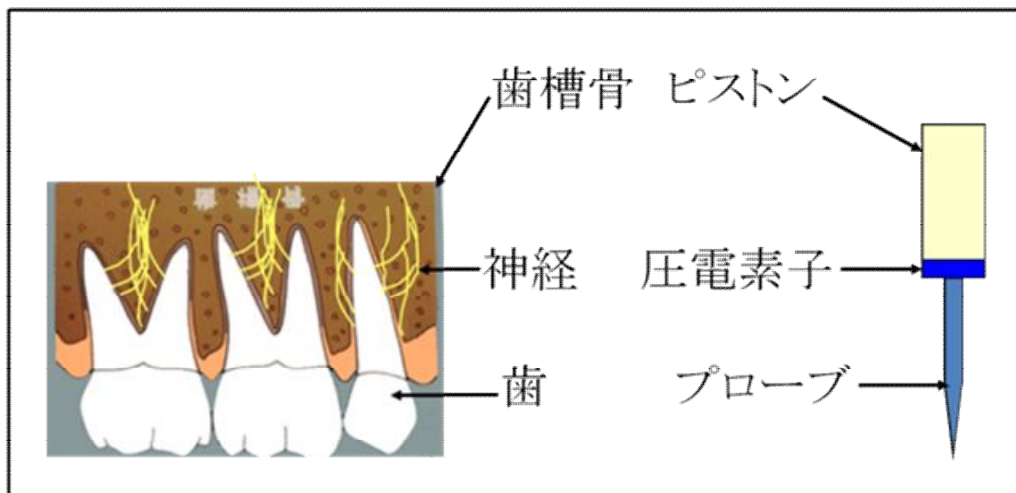


図 3-1 AMC 装置とヒトの歯の振動知覚との関係

装置のピストンがヒトの歯槽骨，圧電素子が歯槽骨内の神経，プローブが歯に相当する。



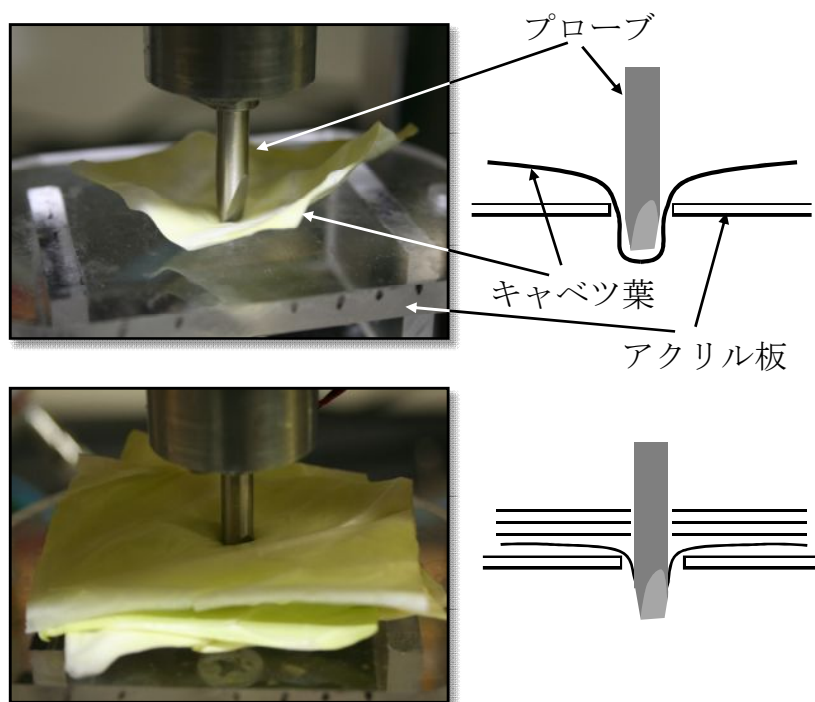


図 3-2 キャベツ試料のプローブ挿入時の模式図

プローブ貫入の様子を明らかにするため、押え用のアクリル板をはずしてある。

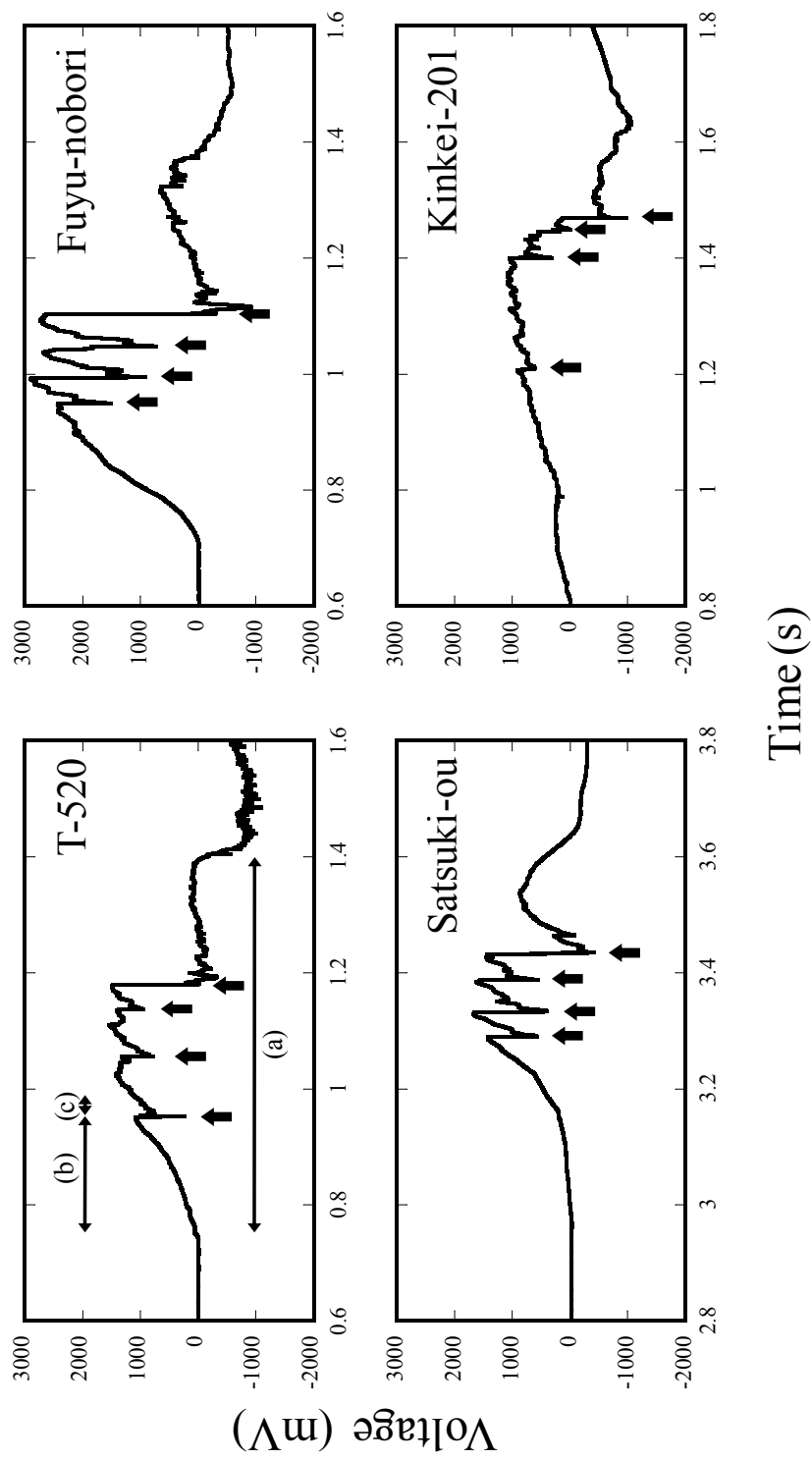


図3-3 代表的なキヤベツ破断信号. 矢印はプローブがキヤベツの葉を完全に破断した瞬間. (a), total signal. (b), anterior signal. (c), breaking signal.

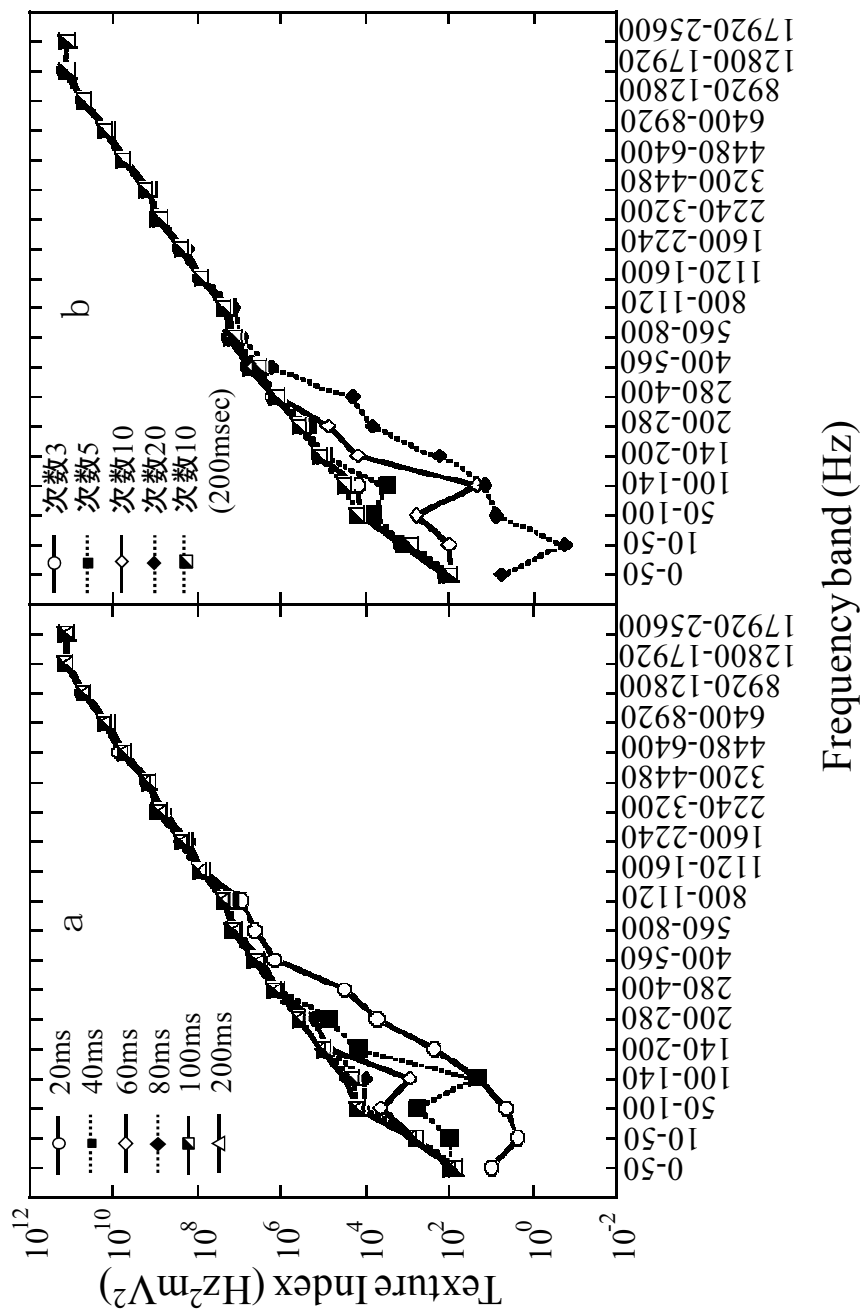


図3-4 a, バタワースフィルタ次数10と信号長の影響: b, 40ミリ秒間の信号長に対するフィルタ次数の影響. 比較として次数10, 信号長200ミリ秒のTIを合わせて表示した.

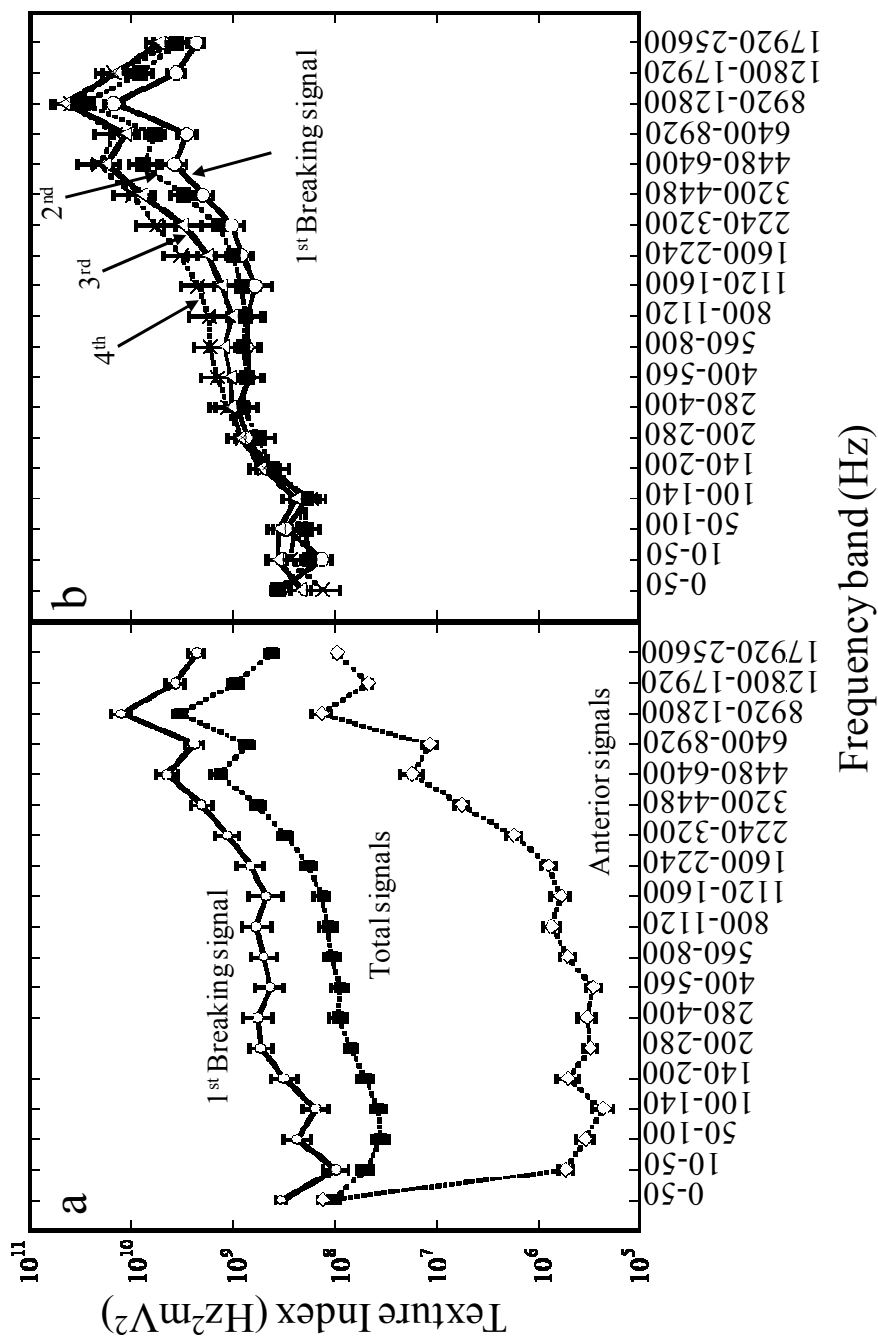


図3-5 キャベツ葉のTIの周波数分布. aは3つの破断状態の比較, bは4枚の葉の「破断」信号の比較. エラーバーは標準誤差(n=20).

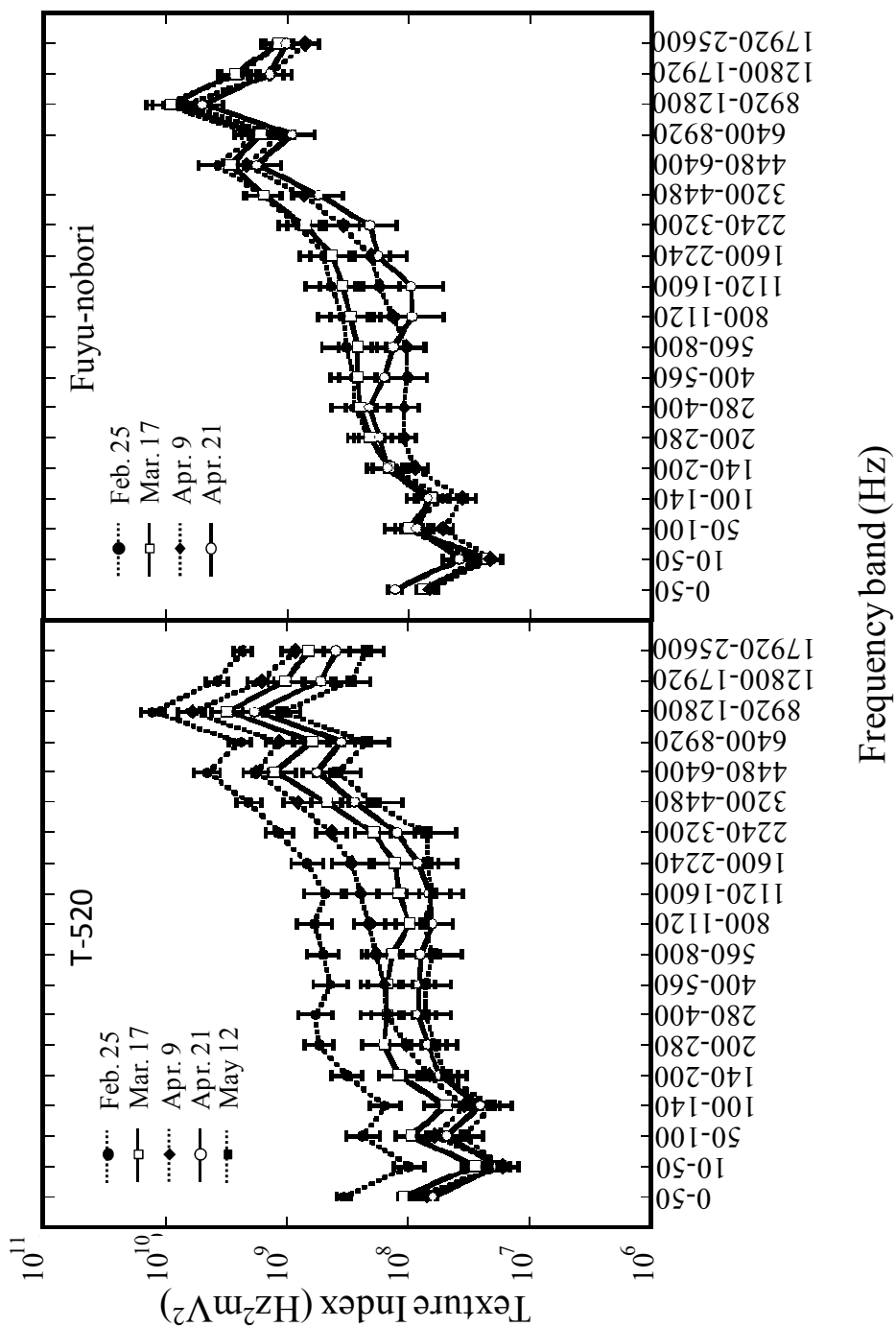


図3-6 ‘T-520’ および ‘冬のぼり’ の収穫日別TI. エラーバーは標準誤差 (n=20).

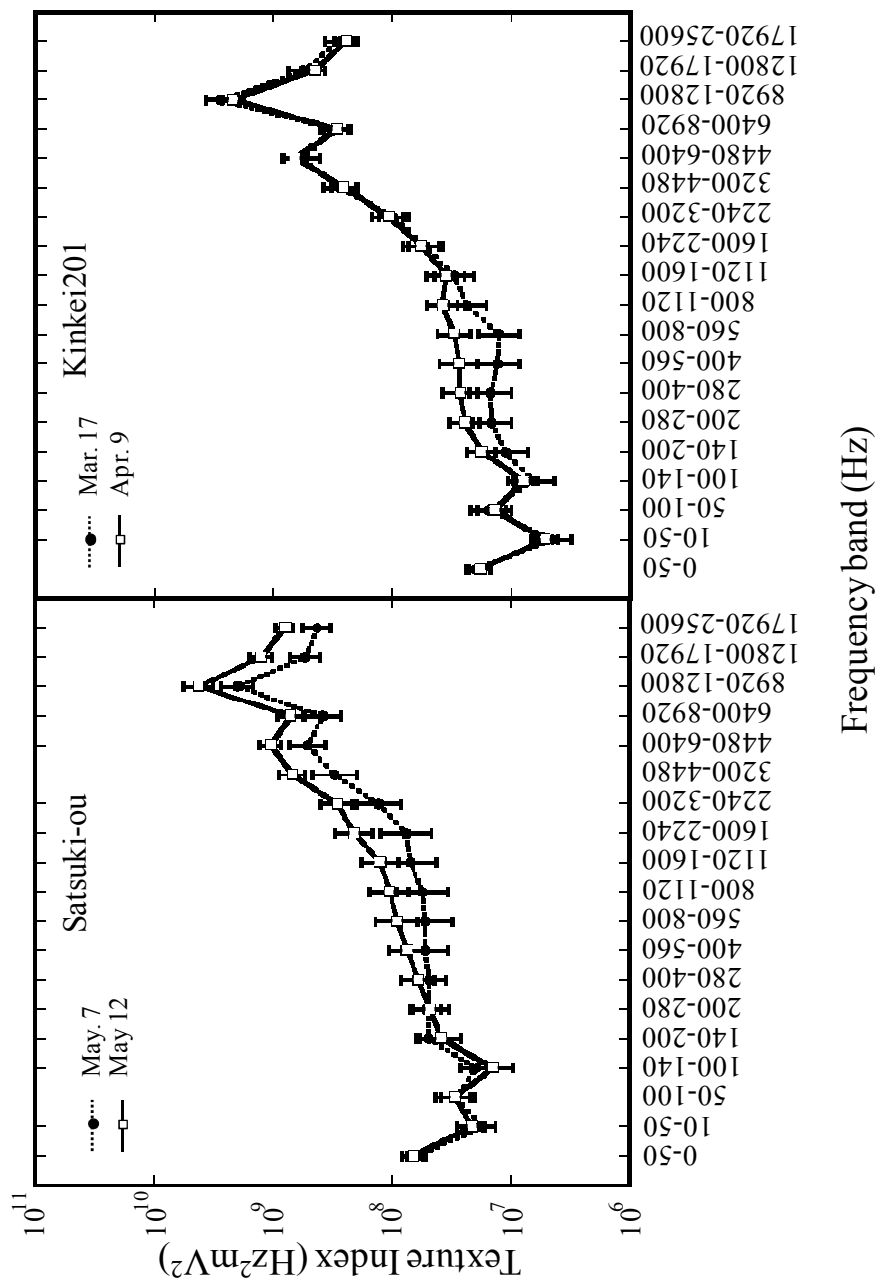


図3-7 ‘さつき王’および‘金系201号’の収穫日別TI. エラーバーは標準誤差 (n=20).

## 第4章 圧電素子出力電圧の周波数特性評価

### 1. 概要

音響振動測定 (AMC) 装置の振動検出に用いるセンサーの出力電圧の周波数特性を評価した。プローブ、圧電素子、アルミニウム製の台座からなる構造体を加振器に固定し、3Hz から 15kHz までの 23 種類の振動数の正弦波で振動を加え、圧電素子に接着したプローブの表面の振動をレーザードップラー振動計 (LDV) で計測した。圧電素子の出力電圧が計測する物理量を決定するため、加振速度に比例する LDV 出力電圧との位相差をオシロスコープで調べた。加振周波数 3Hz では、圧電素子の出力は LDV の出力から  $-\pi/2$  (rad) のずれがあり、圧電素子の出力は加わる信号の変位に相当していた。しかし、加振周波数が高くなるにつれ位相差も漸次的に変化し、10-75Hz ではその差は 0 (rad)、400Hz 以上では  $\pi/2$  (rad) であり、圧電素子の出力電圧はそれぞれ速度、加速度に相当していることがわかった。これは圧電素子を含む構造体の共鳴振動と、圧電素子の電気回路的特性によるものと推測された。周波数依存性のある圧電素子では食品の破断振動評価に用いるエネルギー密度指標の定義が難しいので、加速度ピックアップセンサーを振動検出に利用できないかを圧電素子同様の方法で検討した。加速度ピックアップセンサーはプローブと台座に接着した構造体であっても、その出力はどの周波数でも加速度に比例しており、AMC 装置の振動検出センサーに適していることがわかった。そこで、加速度を用いた破断振動エネルギー密度指標として、エネルギー食感指標 (Energy Texture Index, 以下 ETI) を新たに定義した。

### 2. 緒言

第2, 3章では AMC 装置による青果物の肉質評価について述べた。この装置はヒトの歯に見立てたプローブを食品に貫入させ、その際にプローブが受ける破壊振動をプローブ根元の圧電素子で検出するものであり (Taniwaki et al., 2006b), 取得振動はエネルギー密度指標の Texture Index (TI) で定量化を行う (Taniwaki and Sakurai, 2008) ものである。同様に食品の *crispy*, *crunchy* と

いったテクスチャー評価に食品の破断音を利用した先行研究が多数あり、Duizer (2001)や Taniwaki and Sakurai (2010a)による総説がある。食品破断音の取得にはマイクロフォンがよく利用された。マイクロフォンは音源との距離や角度の影響を受ける(Chen et al., 2005)ため、再現性のある信号取得のためには注意が必要ではあるが、音響分野で広く一般的に利用されている機器であり、音響信号取得に合わせた 20kHz 以下の周波数振動に対して有効な製品が利用されている (Arimi et al., 2010; Duizer and Campanella, 1998; Maruyama et al., 2008; Roudaut et al., 1998)。またマイクロフォンで得られる信号は音圧(豊島ら, 2004; Sanz et al., 2007), あるいは音圧から算出される音響レベル (Chen et al., 2005; Piazza et al., 2007)といった既知の物理的な量で表すことができる。音波以外の食品破断音取得法としては、咀嚼音の骨伝導を介した取得にはコンタクトマイクロフォンや加速度ピックアップセンサーが利用されており(豊島ら, 2004; Marzec et al., 2007; Van Der Bilt et al., 2010), センサーに加わる信号の加速度を評価していると考えられる。また近年ではアコースティックエミッションセンサーという音響領域のパルスを検出する機器も食品の破断音取得に利用されるようになった(Makino, et al., 2002; Zdunek et al., 2010)。

本研究の音響振動検出にはチタン酸・ジルコン酸鉛( $\text{Pb}(\text{Ti} \cdot \text{Zr})\text{O}_3$ , 以下 PZT)を材料とするセラミックス製の圧電素子を用いた。この圧電材料は数 kHz から数 MHz の周波数での信号発生及び検出に使用されるのが一般的で、20kHz 以下の音響信号のような比較的low周波帯域での使用は稀であるため、低周波帯域での出力特性を確認する必要がある(新宅ら, 1998)。Taniwaki and Sakurai (2008)は本研究で使用したものと同一の圧電素子の出力電圧は  $P(\text{Pa}) = -1.0 \times 10^6 + (1.1 \times 10^7) V(\text{V})$  の関係で応力に比例すると報告した。この関係から圧電素子の出力電圧を変位相当量としてエネルギー密度指標となる Texture Index (TI)を定義した。しかし、この出力電圧実験は静的条件下で行われたものであり印加応力の周波数特性についての調査は行われていない。新宅ら(1998)は PZT への荷重の繰り返し速度の出力電圧への影響を 5Hz 以下の周波数について報告している。この他にも圧電材料の音響領域での出力特性を調査したものでは、複数の PZT と薄板が一体となった構造体の 40kHz までの固有振動数の調査(中原ら,



2005)や、ポリフッ化ビニリデン(PolyVinyliden DiFluoride; PVDF)を用いた荷重検出回路の印加周波数 1kHz 以下での出力電圧と位相特性の報告(藤本と Setyanto, 2007)などがある。しかしながら、本研究で対象としている数 Hz から 20kHz までの可聴領域における PZT 単体の出力特性についての報告はまだない。また、本研究で使用した AMC 装置のプロープと圧電素子はそれぞれ単独では 20kHz 以下では共振しないことが確認されている(Taniwaki et al., 2006b)。しかし、圧電素子はプロープとピストンに固定するためのアルミニウム製の台座に接着されている。これらは圧電素子、プロープ、アルミ台座の 3 つから構成される 1 つの構造体とみなすことができ、この構造体の周波数特性調査は未だ実施されていない。そこで本章では、農産物の破壊音響振動検出に用いるプロープ-圧電素子構造体の可聴領域における出力電圧の周波数特性評価を試みた。

### 3. 実験方法

振動検出に用いた圧電素子の音響領域である 0~20kHz での周波数応答を調べた。図 4-1 は AMC 装置のプロープ周辺を拡大した模式図である。アルミニウム製プロープ台座(径 25mm, 厚み 15mm の円柱形)に直径 10mm, 厚み 1mm の圧電素子(2Z10D-SYX, (株)富士セラミックス, 富士宮市)を瞬間接着剤(アロンアルファ耐衝撃 EXTRA, 東亜合成(株), 東京都港区)で固定した。また圧電素子には測定サンプル破断用のステンレス製プロープ(径 5mm, 長さ 20mm, 先端形状楔型)を接着剤で密着固定した。図 4-2 に圧電素子の出力電圧特性調査の試験の概略図を示す。ピストンから取り外したプロープ台座は圧電素子の周波数特性に影響しないよう、可能な限り薄く敷いたワックスで加振器(513-B, エミック(株), 東京都品川区)に固定し正弦波で加振した。加振信号は、パーソナルコンピュータの関数発生プログラム(Spectra Plus, Pioneer Hill Software LLC., USA)で作成し、振動数は 3Hz から 15kHz までの 23 種類を用いた。表 4-1 に加振周波数を示す。第 2, 3 章では AMC 装置を用いて取得した信号は、1/2 オクターブ幅のバンドパスフィルタを利用した周波数特性評価を行った。そこで加振周波数はこれらの周波数帯域の中心周波数(特定のバンドの両端遮断周波数の相乗平均

周波数)に対応するよう選定した. 加振周波数 60Hz 以下については中心周波数に関係なくより多くの周波数について調査した. 信号はアンプ(371-A, エミック(株), 東京都品川区)を通じて加振器へ入力した. 圧電素子に加わる振動のモニタリングには, レーザードップラー振動計(以下 LDV, LV-1720, (株)小野測器, 横浜市)を利用した. 本章で使用した LDV 出力特性は  $v \text{ (m/s)} = 0.05 \times V \text{ (V)}$  であり, 出力電圧は振動速度に比例する. プローブの根元に 2mm 四方の反射用テープを張り付け, そこに LDV のレーザー光を照射し, プローブの速度を計測した. 圧電素子と LDV の出力電圧をそれぞれオシロスコープ(VC-6523, 日立電子社製)に入力し, 2つの電圧信号の位相差を調査した.

## 4. 結果

### (1) 圧電素子の出力電圧特性

圧電素子の出力電圧( $V_p$ )が「プローブと一体となった圧電素子の変位」に比例するならば, 速度振幅に比例する LDV 出力電圧( $V_l$ )に対する位相差は  $-\pi/2$  (rad) となる. 同様に  $V_p$  が速度に比例するならば位相差は 0,  $V_p$  が加速度ならば位相差が  $\pi/2$  (rad) となり,  $V_p$  の周波數位相特性を調べることで, 圧電素子が計測する物理量を特定できると考えた.

図 4-3 には加振周波数  $f$  が 3, 10, 500Hz の正弦波で加振した時の, 圧電素子, LDV それぞれの出力電圧をオシロスコープで計測した写真を示す. 圧電素子と LDV の出力電圧位相差  $\phi$  (rad) は角周波数の定義より  $\phi = 2\pi f \Delta t$  で求めた.  $f$  は加振周波数 (Hz),  $\Delta t$  は 2つの電圧波形のピーク間の差 (s) であり, オシロスコープから  $\Delta t$  を読み取り算出した. 加振周波数 3Hz では圧電素子の出力電圧は LDV の出力電圧に対して約  $-\pi/2$  (rad) の位相差が見られた. 10Hz では 2つの出力信号に位相差は観測されず, 500Hz では圧電素子は LDV の出力に対して約  $\pi/2$  (rad) 進んだ出力電圧を示した. 全部で 23 の加振周波数  $f$  に対して圧電素子・LDV 出力電圧の位相差の関係を図 4-4 に示す.  $f < 10$  Hz では, 圧電素子の出力電圧は  $f$  が低くなるにつれ LDV の出力に対して位相遅れが大きくなり, 3Hz 時に約  $-\pi/2$  (rad) に達した. この時, 圧電素子の出力は速度を時間について積分した量, つまり変位に相当する.  $10 \leq f \leq 75$  Hz では 2つの出力信号に位相差が無かったことから, 圧電素子の出力は速度に対応すると考えられる.  $75 < f$

＜ 400Hz では圧電素子出力は LDV に対して位相が進み始め、周波数が大きくなるにつれて位相差が大きくなった。400Hz  $\leq$  f では周波数に関係なく 2 つの出力電圧の差は約  $\pi/2$  (rad) 一定であり、圧電素子の出力はプローブの加速度を計測していた。圧電素子の出力電圧特性は加振周波数が増加するにつれて、変位、速度、加速度と変化することがわかった。Taniwaki et al. (2008) は  $V_p$  が変位に比例すると仮定し、エネルギー密度に相当する Texture Index (TI) を定義した。しかし、圧電素子の出力応答は周波数依存性があり、特に 3-10, 75-400Hz の帯域では特定の物理量ではないため、正確なエネルギー密度の算出が困難である。そこで、振動検出センサーとして加速度ピックアップセンサーを使用できないかを検討した。

## (2) 加速度ピックアップセンサーの出力電圧特性

加速度ピックアップセンサー出力電圧の周波数応答特性を圧電素子同様の方法で調査した。図 4-1 のプローブ台座の圧電素子の替りに加速度ピックアップセンサー (NP-2710, 小野測器, 横浜) を接着した。加速度ピックアップセンサーには取付用のオスネジ部 (径 3mm) があったため、プローブに同形状のタップを付けた。加速度センサー単体ではその名の通り加速度に応じた出力を反すと考えられるが、本研究で用いたように、加速度ピックアップセンサーをプローブとプローブ台座の間に接続したため、それらを含めた一つの構造体として評価する必要があると考えられる。そこでプローブ一体型の加速度ピックアップセンサーの出力電圧の周波数特性を圧電素子同様 (図 4-2) の手法で調べた。加速度ピックアップセンサーの出力はアンプ (PS-1300, 小野測器, 横浜) を介してオシロスコープに入力した。圧電素子と同様、様々な周波数 (3-10kHz) で加振し、プローブの付根部分に LDV のレーザー光を照射し、プローブの振動速度を計測した LDV の出力電圧との位相の同期を調査した。結果を図 4-5 に示す。加速度ピックアップセンサーの出力電圧は LDV の出力電圧に対して位相差が  $\pi/2$  (rad) であり、本研究で用いたサンドウィッチ型の構造体であっても周波数に関係なくプローブの加速度に応じた電圧が出力していることが確認できた。

次に、プローブ一体型の加速度センサーの出力電圧が周波数により変化しないかを調べた。40-2720Hz の周波数について、様々な振幅で加振を行い、加速度

ピックアップセンサーの出力電圧をオシロスコープで記録した。プローブの加速度は LDV の出力から得られた速度に角速度  $2\pi f$  をかけて求めた。その結果、加速度ピックアップセンサーの出力電圧は周波数に関係なく、加速度に比例しているのが確認できた(図 4-6)。

プローブの加速度に比例する加速度ピックアップセンサーの出力電圧から振動のエネルギー密度に比例する量として Energy Texture Index(以下, ETI)を次式で定義した。

$$ETI = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^n \left( \frac{V_i}{f_u f_l} \right)^2 \quad (4-1)$$

$f_l$  および  $f_u$  は 1/2 オクターブバンドパスフィルタの下限及び上限遮断周波数(Hz),  $V_i$  は加速度ピックアップセンサーの電圧値(V),  $t$  は時間(s)を表す。運動エネルギー(E)は速度を  $v$  ( $m \cdot s^{-1}$ )の二乗に比例する。加速度を  $\alpha$  ( $m \cdot s^{-2}$ ), 角周波数  $\omega$  (rad/s) とすると

$$v = \frac{\alpha}{\omega} \quad (4-2)$$

が成り立ち、また  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  は振動数 Hz) の関係から

$$E \propto \left( \frac{\alpha}{f} \right)^2 \quad (4-3)$$

と表すことができる。つまり(4-1)式で算出される ETI はプローブが受ける振動の特定の周波数帯域におけるエネルギー密度に相当する量と言える。

### (3) 加速度ピックアップセンサーを用いた AMC 測定装置

AMC 装置の振動検出に圧電素子と加速度ピックアップセンサーを用いた時の取得信号の比較を行った。測定サンプルには市販のポテトチップス(カルビー社製)を用いた。ポテトチップスは開封後、サイズが同程度の 20 個体を選定し、10 個体ずつをそれぞれ圧電素子、加速度ピックアップセンサーを用いた AMC 装置で破壊音響振動を取得した。すべての測定は開封後 15 分以内に行った。破壊音響振動の測定方法は、振動検出センサー以外は第 2 章と同様に行った。プローブは先端が楔状のものを使用した。代表的な取得電圧信号は図 4-7 に示す。振動検出に圧電素子を用いた際には、プローブが試料に接触すると電圧が上が

り始め(図中矢印), プローブが試料を破壊中に多数のパルス状の信号が観察され, プローブが試料を完全に破壊すると電圧は大きく負値をとり, 徐々に 0 へと戻った. 0.03 秒から 0.48 秒までを 1 周期とする約 2Hz の信号上にパルス状の信号が加わった波形のように見える. これは圧電素子の出力特性が 10Hz より低周波では変位に相当することに起因していると考えられる. 一方加速度ピックアップセンサーを用いた場合には, プローブが試料に接触後も大きな電圧変化は見られず(図中矢印), 破断中は 0 を中心とした振幅が観察された. 電圧信号はプローブが試料に触れてから完全に破壊されるまでの 400 ミリ秒間をフィルタを用いて 1/2 オクターブ幅の周波数帯に分割した. 各帯域について圧電素子の信号は第 2, 3 章の 2-1, 3-1 式に従い TI を算出した. 加速度ピックアップセンサーを用いた ETI は本章 4-1 式を用いた. 図 4-8 に振動検出センサー別の TI, ETI を周波数帯域について表示した. 圧電素子を用いた場合は周波数が高くなるにつれて TI が大きくなったが, 加速度ピックアップセンサーでは逆に周波数が高ければ ETI が小さくなる右肩下がりのグラフになった. これは圧電素子の TI は出力が変位振幅に比例していると仮定して定義されたためである. 10-400Hz の帯域では圧電素子の出力は速度に対応する. つまり, 最大速度は最大変位と角周波数  $\omega$  の積に相当するため, TI は実際のエネルギー密度指標に  $\omega^2$  を掛け合わせた量 (実際には計算では  $\omega$  を  $f(\text{Hz})$  に置き換えているので  $f^2$ ) だけ多く見積もっていたことになる. 400Hz より高周波では加速度相当量の出力なので(4-2)式からもわかるように  $f^4$  積だけ過剰な値と見積もっていたことになる. 8kHz 付近には両検出器に共通の鋭いピークが見られたが, その他ではどちらかのセンサーのみに特徴的な帯域は観察されなかった.

## 5. 考察

振動検出に加速度ピックアップセンサーを用いた AMC 測定では, 市販のポテトチップスを供試した. 圧電素子を用いた結果と比較するためには, 第 2, 3 章で供試したブドウやキャベツの使用が望ましい. しかし, 市販の青果物は栽培圃場や流通条件が不明確で品質のバラつきが懸念される. このため, 入手しやすく, 同一包装内での品質が比較的安定していると考えられるポテトチップス

を供試材料に選んだ。

圧電素子の出力電圧は、加振周波数 3~400Hz の範囲で速度に対し  $\pm \pi/2$  (rad) の位相のずれが見られた (図 4-4)。これは圧電素子の電気回路特性に起因するものと推測された。圧電素子の共振点付近の電氣的等価回路は、直列 RLC 回路に並列でコンデンサが接続した直列並列混在回路である (竹中, 1993)。直列 RLC 交流回路では、共振周波数に対して入力電流の周波数が十分に小さい場合、コンデンサ特性から出力電圧は入力電流に対して  $-\pi/2$  (rad) 位相の遅れを生ずる。共振周波数付近ではこの位相差はなくなり、入力周波数が十分大きい場合にはコイル特性から出力電圧は入力電流よりも  $\pi/2$  (rad) 進んだ波形を示す (藤島, 1993)。つまり、本研究で用いたプローブ一体型の圧電素子の電気回路的な共振点は 10-75Hz とすれば、電気回路特性からその周辺周波数で出力電圧の位相が  $\pm \pi/2$  (rad) ずれたと推測される。本研究で用いた圧電素子はそれ単体では厚み方向の共振周波数が 1MHz、直径方向の共振周波数が 200kHz であり、音響振動と比較しても十分に高い。しかし、プローブとプローブ台座で両面を固定したために、これらの共振周波数を抑制する方向に働いたと考えられる。または、プローブと圧電素子の接着面で新たに低周波の屈曲振動が発生したためだと推測される。

加振信号が 10-75Hz の周波数帯域では圧電素子の出力電圧は入力波形の速度に相当した (図 4-4)。PVDF の出力電圧は PVDF 表面に生じる電荷を  $Q$  として、電流  $i=dQ/dt$  に比例する (Liu et al., 2002)。つまり PVDF の出力を直接電圧計で測定すると荷重速度に比例した信号が得られる (藤本 and Setyanto, 2007)。チタン酸・ジルコン酸鉛を材料とする圧電セラミックスにおいても、応力振動数 1Hz 以下では素子の出力電圧は入力応力波形を微分した形であることが確認されており (新宅ら, 1998)、圧電素子が共振しない周波数帯域であれば圧電素子の出力は入力信号の速度に比例すると推察される。図 4-4 で見られた  $f < 10\text{Hz}$ ,  $75\text{Hz} < f$  での圧電素子の位相のずれが上述のように電気回路の共振特性によるものと仮定すると、これらの先行研究の結果と矛盾しない結果が得られたと考えられる。

圧電素子の 10Hz 以下の出力電圧信号は圧電素子の変位に対応することから、その電圧波形はフックの法則より応力-ひずみ曲線に相当すると考えられる。

このため、ネギでは 0-50Hz 帯域の出力電圧信号がその組織の破断過程と一致する波形を示し(Taniwaki et al., 2006a), 第 2 章ではブドウ果肉破断時の 0-50Hz の TI が最大破断荷重と有意な相関が得られたと考えられる.

Taniwaki and Sakurai (2008)は静的な実験から圧電素子の出力が圧電素子の変位に比例すると報告したが, 印加信号の繰り返し入力速度が早くなれば(周波数が高くなれば)その出力は圧電素子と一体となったプローブの速度または加速度に対応することがわかった(図 4-4).このような圧電素子の周波数特性から, エネルギー密度に比例する量として定義した TI は 10Hz より高周波域では実際のエネルギー密度指標より過剰に見積られていたと考えられる. そのため検出信号の周波数が高くなると, TI も高くなる傾向にあった(Taniwaki et al., 2008, 2009a, b, c, 2010b)と推察される. 振動検出に圧電素子を使用した場合には, 周波数帯域によって計測する物理量が異なり, 3-10Hz や 75-400Hz 帯域のように特定の物理量ではなく遷移的な領域も存在するため, エネルギー密度指標として統一的な TI の算出が難しいことが示唆された. 加速度ピックアップセンサー出力電圧の周波数応答は位相特性, 振幅特性ともに周波数に依存せず, 加速度振幅と常に線形関係にあり(図 4-5, 6), 出力電圧からエネルギー密度指標が(4-1)式を用いて導出できると考えられる. これらのことより, AMC 装置の振動検出には加速度ピックアップセンサーを用いた方が検出信号の周波数に依存しないより正確な振動評価が可能であると考えられる.

## 6. 引用文献

- 新宅英司, 藤本由紀夫, 濱田邦裕, 武内哲也. 1998. 圧電素子による構造物の簡易応力履歴計測に関する研究. 日本造船学会論文集. 184. 339-346.
- 竹中正. 圧電特性測定法. セラミックスの評価法(セラミックス編集委員会基礎工学講座小委員会編). 日本セラミックス協会. 初版. 1993. 257.
- 豊島尊, 土屋欣也, 佐藤史明, 橘秀樹. 2004. 音響解析および咀嚼圧力解析によるフライ調理食品のテクスチャー評価. 日本食品科学工学会誌. 51. 388-394.
- 中原健志, 大宅由佑, 大熊政明. 薄板形センサによるボルトゆるみモニタリン

- グ(発振回路を用いた固有振動数評価), 日本機械学会論文集(C編). 71. 137-142.
- 藤島啓. ピエゾセラミックス. 裳華房. 第2版. 1993. 41.
- 藤本由紀夫, Taufiq Arif SETYANTO. 2007. 圧電フィルムを用いたシート型衝撃力測定センサ. 日本機械学会論文集(C編). 73. 184-191.
- Arimi, J. M., Duggan, M., O'Sullivan, M., Lyng, J. G., O'Riordan, E. D., 2010. Development of an Acoustic Measurement System for Analyzing Crispness During Mechanical and Sensory Testing. *J. Texture Stud.* 41, 320-340.
- Chen, J., Karlsson, C., Povey, M., 2005. Acoustic envelope detector for crispness. *J. Texture Stud.* 36, 139-156.
- Duizer, L. M., Campanella, O. H., 1998, Sensory, Instrumental and Acoustic Characteristics of Extruded Snack Food Products, *J. Texture Studies.* 29, 397-411
- Duizer, L., 2001, A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures. *Trends in Food Sci. & Technol.* 12, 17-24.
- Liu, G., Fujimoto, Y., Shintaku, E., Wakabayashi, S., Masaguchi, T., Komatsubara, N., 2002, Application of PVDF film to stress measurement of structural member. *J. the Society of Naval Architects of Japan*, 192, 591-599.
- Makino, Y., Ono, N., Ando, S., Sano, F., Toba, S., 2002, Bone Conduction-like Acoustic Sensor System for Evaluating Crispness. *SICE 2002 Aug, Osaka*, 5-7.
- Marzec, A., Lewicki, P. P., Ranachowski, Z., 2007, Influence of water activity on acoustic emission of flat extruded bread. *J. Food Engineering*, 79, 410-422.
- Maruyama, T. H. Arce, A. I. C., Ribeiro, L. P., Costa, E. J. X., 2008, Time-frequency analysis of acoustic noise produced by breaking of crisp biscuits. *J. Food Engineering*, 86, 100-104.
- Piazza, L., Gigli, J., Ballabio, D., 2007. On the application of chemometrics for the study of acoustic-mechanical properties of crispy bakery products. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 86, 52-59.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N., 2006a. Development of method for quantifying food texture using blanched bunching onions. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 75, 410-414.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N., 2006b. Device for acoustic measurement of food



- texture using a piezoelectric sensor. *Food Res. Int.* 39, 1099–1105.
- Taniwaki, M., Sakurai, N., 2008. Texture measurement of cabbages using an acoustical vibration method. *Postharvest Biol. Technol.* 50, 176–181.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N., 2009a. Postharvest quality evaluation of “Fuyu” and “Taishuu” persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique. *Postharvest Biol. Technol.* 51, 80–85.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Tohro, M., Sakurai, N., 2009b. Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques. *Postharvest Biol. Technol.* 51, 305–310.
- Taniwaki, M., Takahashi, M., Sakurai, N., Takada, A., Nagata, M., 2009c. Effects of harvest time and low temperature storage on the texture of cabbage leaves. *Postharvest Biol. Technol.* 54, 106-110.
- Taniwaki, M., Sakurai, N., 2010a, Evaluation of the Internal Quality of Agricultural Products using Acoustic Vibration Techniques. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 79, 113–128.
- Taniwaki, M., Sakurai, N., 2010b. Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements. *Food Res. Int.* 43, 814-818.
- Roudaut, G., Dacremont, C., Le Meste, M., 1998. Influence of Water on the Crispness of Cereal-Based Foods: Acoustic, Mechanical, and Sensory Studies. *J. Texture Studies*, 29, 199-213.
- Sanz, T., Primo-Martin, C., van Vliet T., 2007. Characterization of crispness of French fries by fracture and acoustic measurements, effect of pre-frying and final frying times. *Food Res. Int.* 40, 63-70.
- Van Der Bilt, A., De Liz Pocztaruk, R., Abbink, J. H., 2010. Skull Vibration During Chewing of Crispy Food. *J. Texture Studies.* 41, 774-788.
- Zdunek, A., Cybulska, J., Konopacka, D., Rutkowski, K., 2010. New contact acoustic emission detector for texture evaluation of apples. *J. Food Eng.* 99, 83–91.

表 4-1 加振周波数と 1/2 オクターブフィルタを利用した周波数帯域との関係

遮断周波数 (Hz)	帯域中心周波数 (Hz)	加振周波数 (Hz)
-	-	3
-	-	5
-	-	7
0	-	10
10	-	40
50	-	60
100	71	70
140	118	80
200	167	120
280	237	170
400	335	240
560	473	360
800	669	450
1120	947	550
1600	1339	680
2240	1893	-
3200	2377	1300
4480	3786	1920
6400	5354	3000
8920	7556	4000
12800	10685	5000
17920	15145	7000
25600	21418	-
		15000

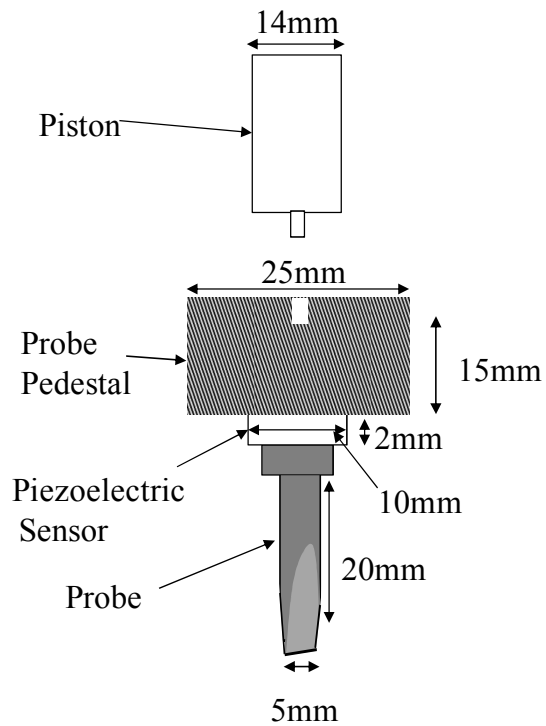


図 4-1 プローブ-圧電素子構造体の模式図

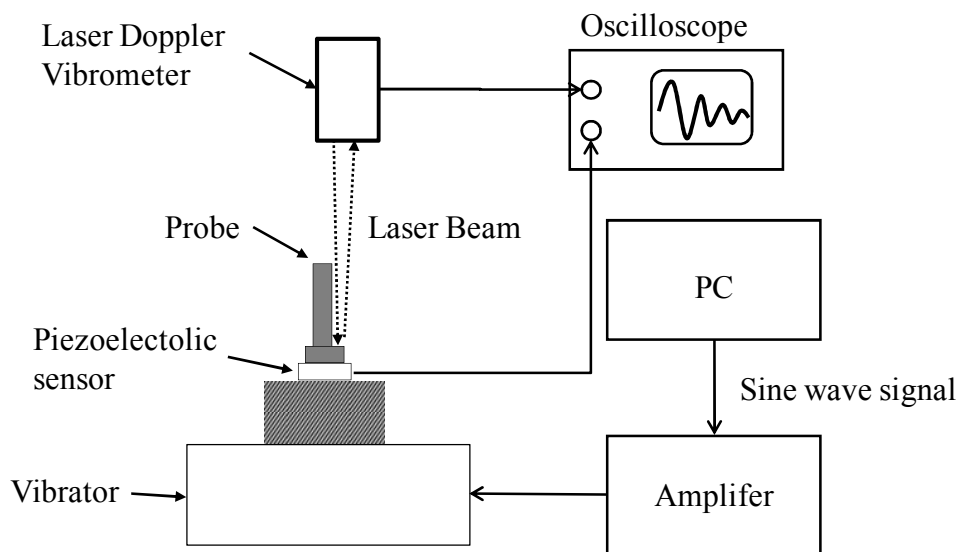
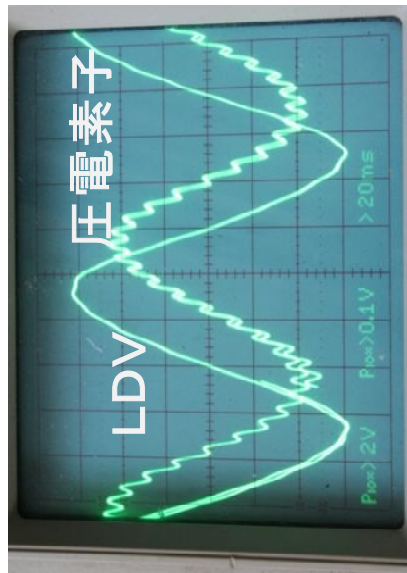
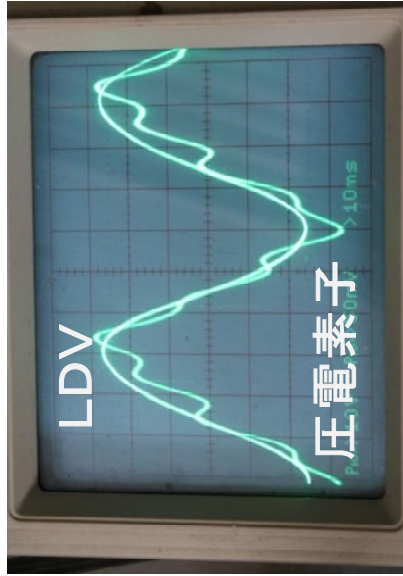


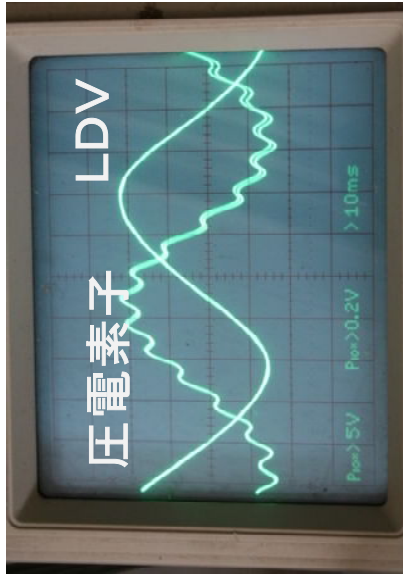
図 4-2 圧電素子の出力電圧特性評価方法



3 Hz [ $-\pi/2$ (rad)]



10 Hz [0(rad)]



500 Hz [ $\pi/2$ (rad)]

図4-3 圧電素子とLDVの出力電圧の位相差

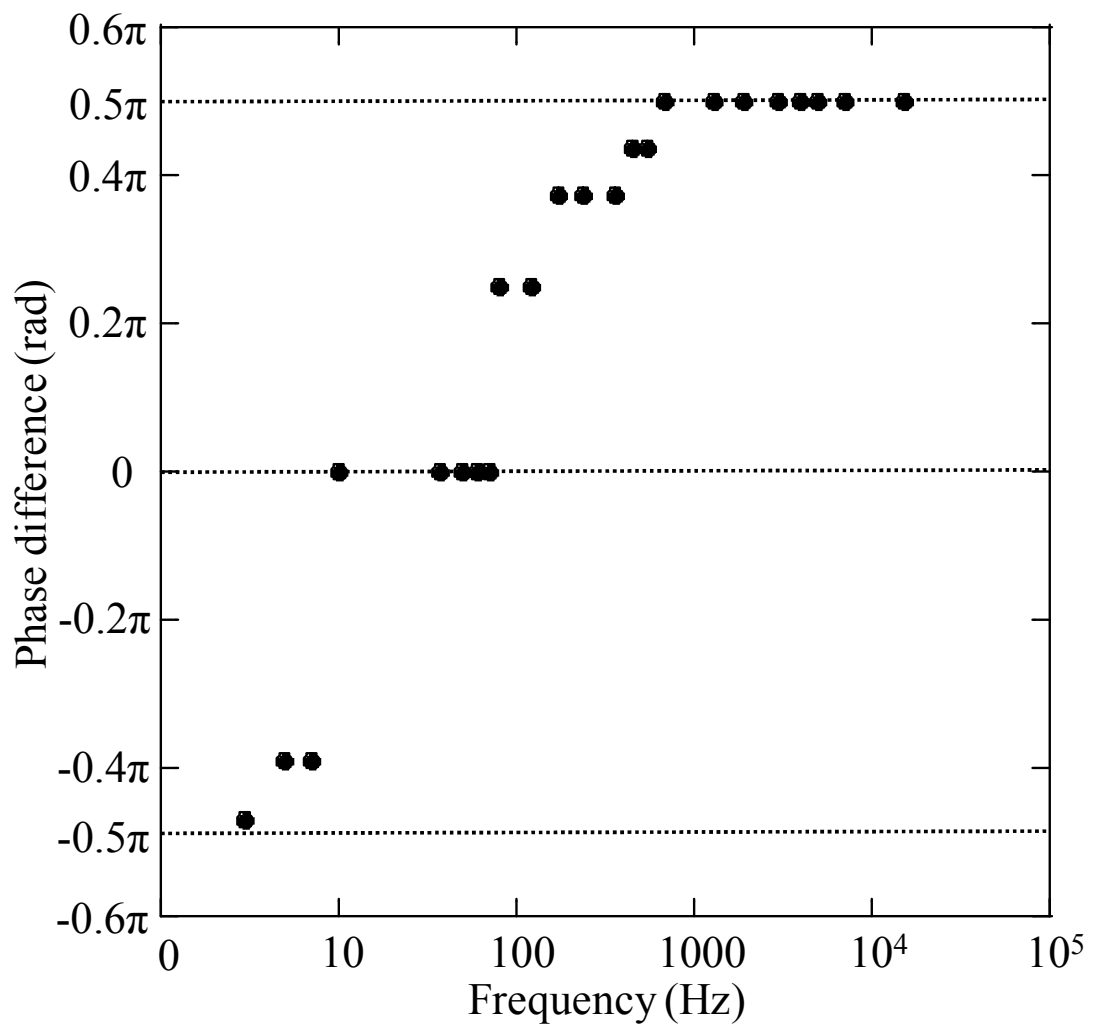


図 4-4 圧電素子出力の位相特性

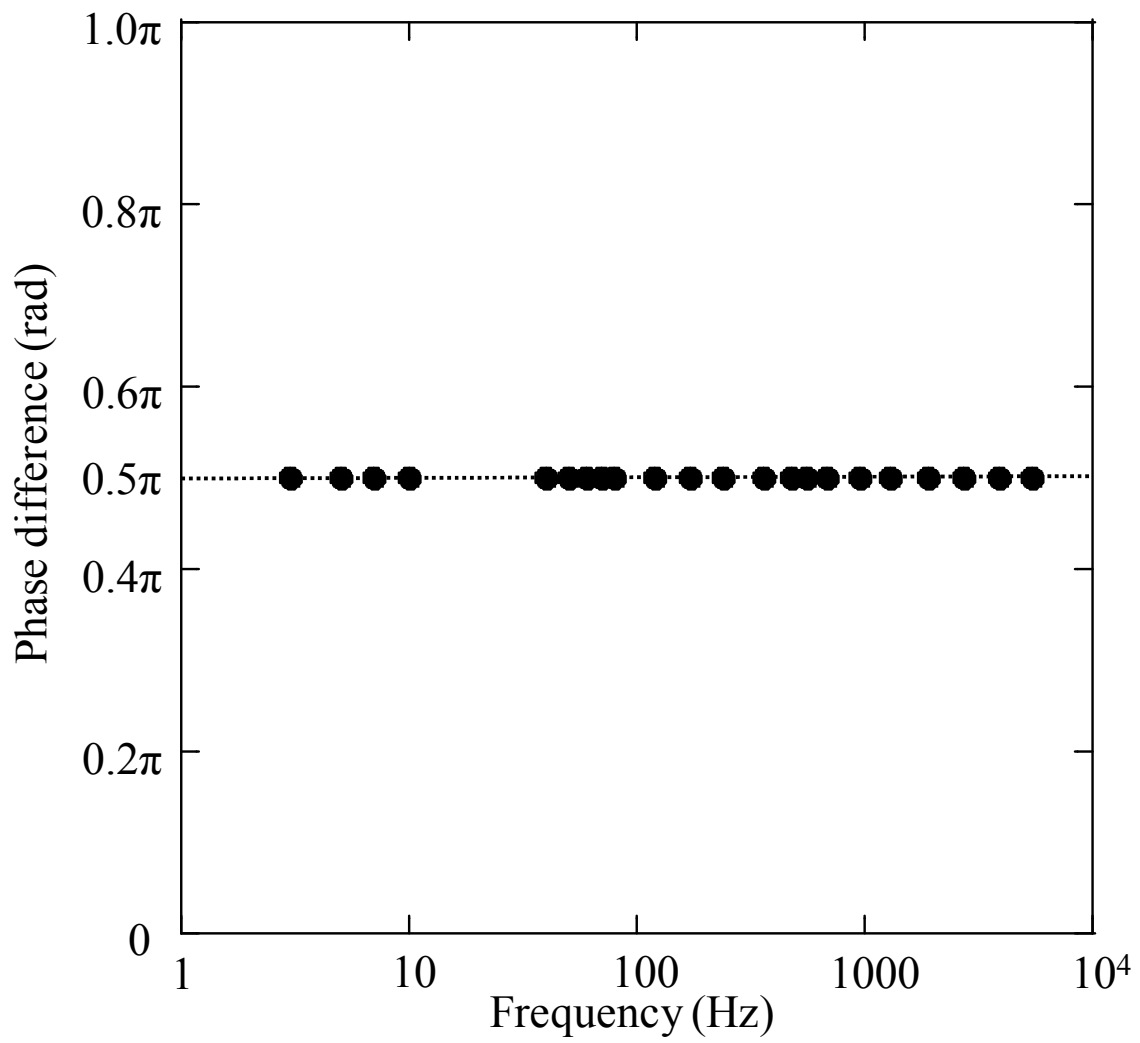


図 4-5 加速度ピックアップセンサーの出力位相特性

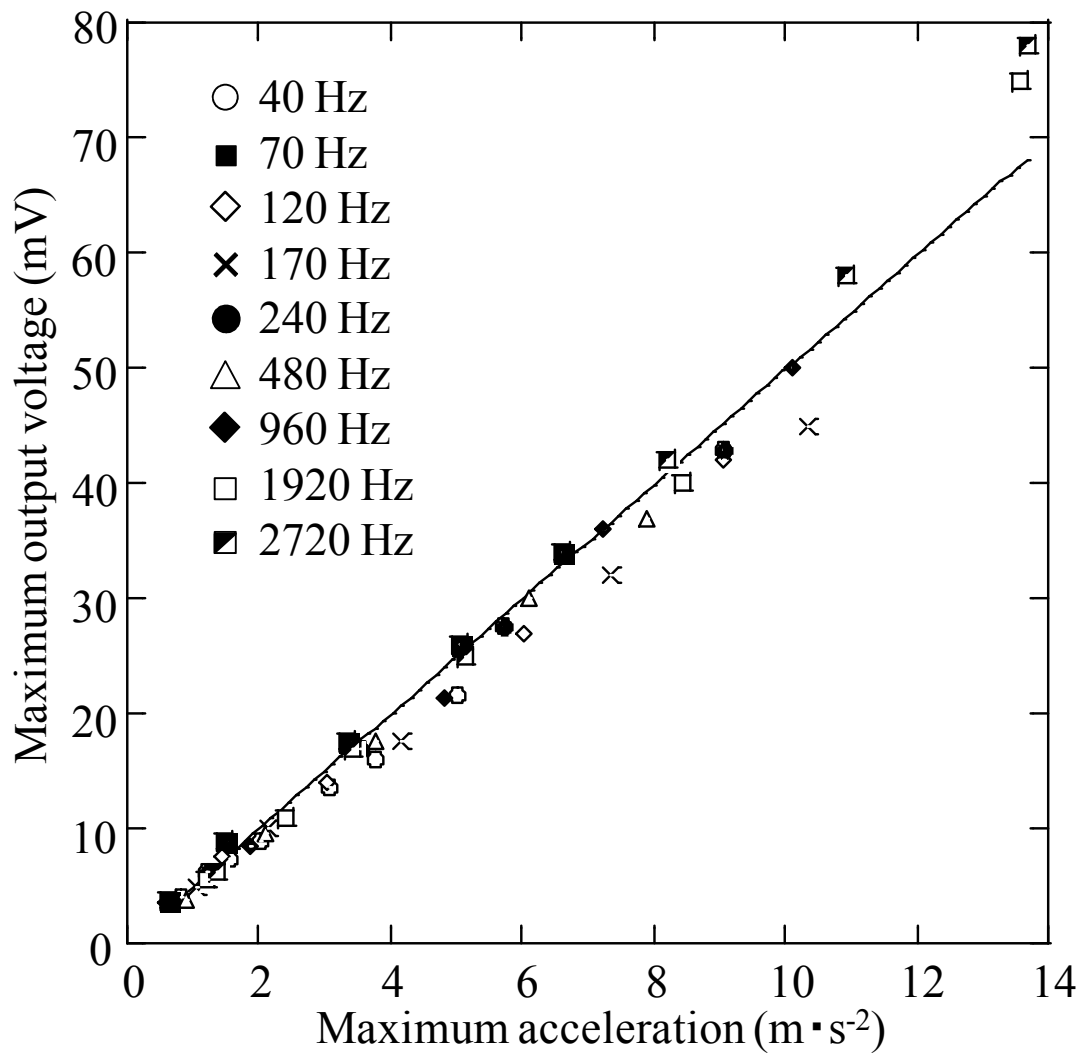


図 4-6 加速度ピックアップセンサーの出力振幅特性

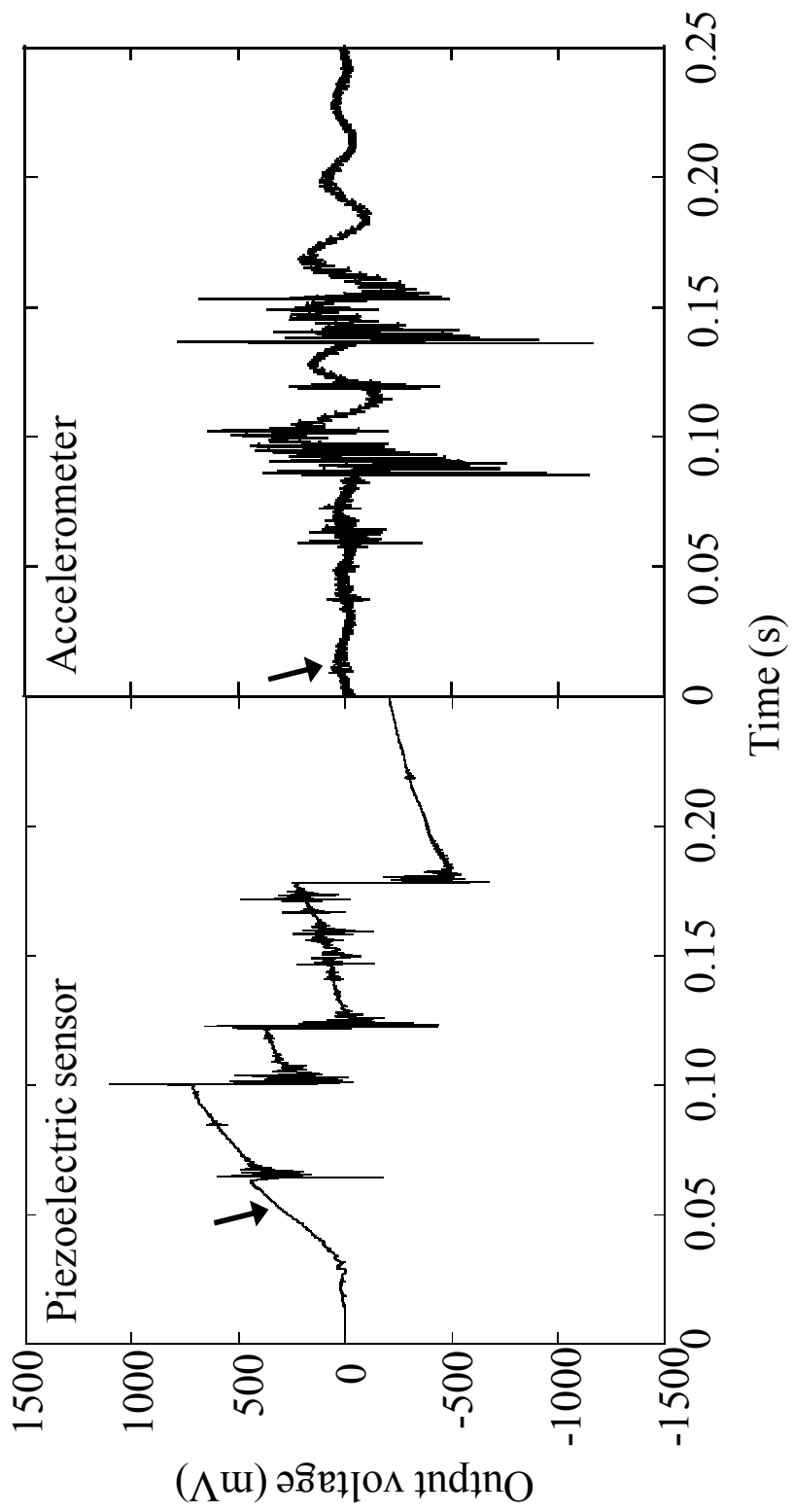


図4-7 圧電素子と加速度ピックアップセンサの出力電圧波形の比較



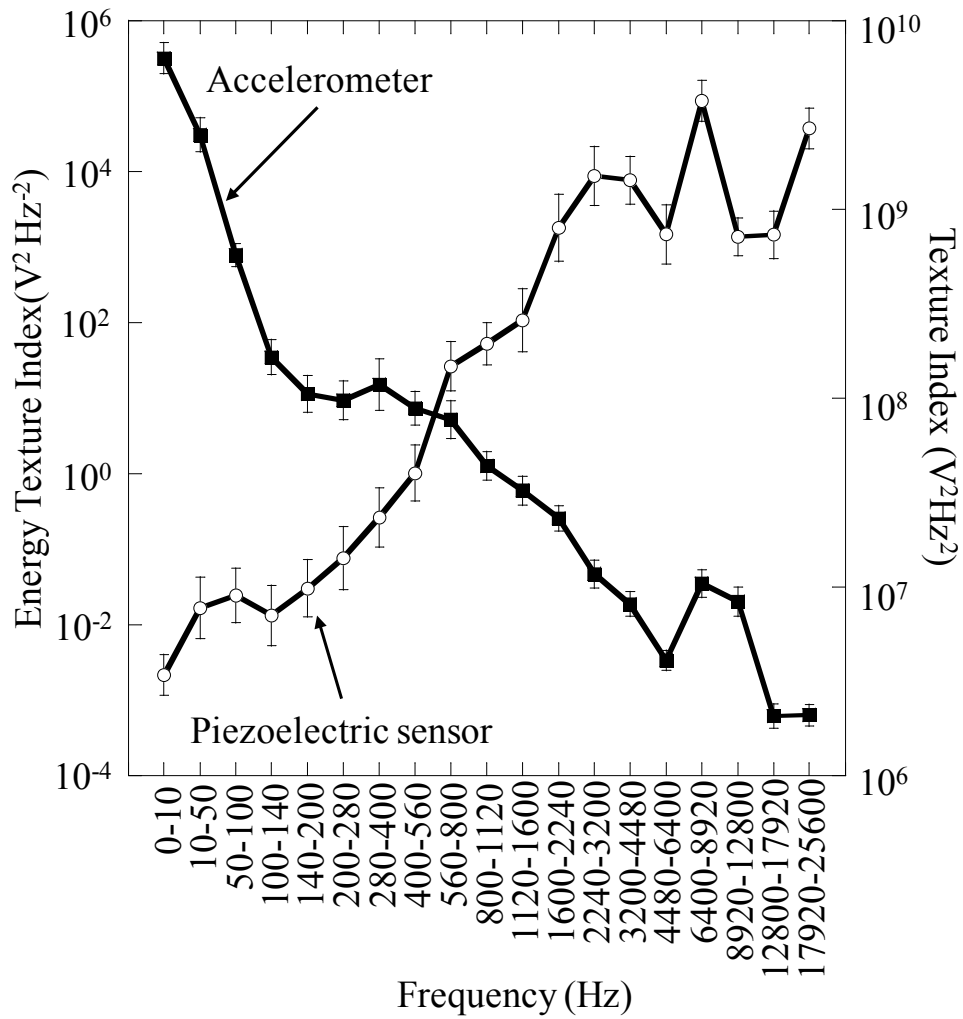


図 4-8 圧電素子と加速度ピックアップセンサーから算出した TI の比較

## 第5章

### 総合考察

青果物の食感は品質評価の上で重要な要素である。また食感は感覚特性であるため、官能による評価が行われるが、品質管理の観点から客観的評価法が必要である。本研究ではTaniwaki et al. (2006), Taniwaki and Sakurai (2008)の提唱した破断音響振動装置(AMC装置)により‘シャキシヤキ’, ‘シャクシャク’, ‘歯切れが良い’などの用語で表現される食感特性の定量化を試みた。AMC装置はプローブを食品に貫入させ、食品破断振動を直接的に検出するが、取得信号はプローブの大きさ、プローブの形状、食品の破断スピードなどの測定条件や振動検出センサーの周波数依存性に影響を受けると考えられる。食品の圧縮試験による力学特性評価においては、プローブの大きさ、プローブの形状、変形速度が結果に影響を与えることから(相良, 2009), これらの測定条件が破断振動にも影響すると示唆される。また、AMC装置の振動検出に用いた圧電素子の可聴域を含む低周波域における出力特性は明らかになっていない(新宅ら, 1998)。加えて、Taniwaki and Sakurai (2010)は、AMC法で得たポテトチップスの破断音の周波数特徴は、試料の破断プロセスによって異なると報告しており、青果物の破断音についても解析手法の検討が必要であると考えられた。本研究の目的は、測定条件、解析法、振動検出センサー特性が取得信号に与える影響を実験的に明確にし、ブドウ果粒やキャベツの葉の肉質など、物理的、化学的、構造的に多彩な青果物の食感評価にAMC法を適用することである。

第2章では、AMC法によって楔状プローブを使用して取得した140-200Hz帯域のTIを指標として、ブドウ果肉特性である‘崩壊性’, ‘塊状’, ‘中間’を定量評価できるとことが示された。ブドウ肉質の破断音響振動を取得には楔状と円錐状の二種類のプローブを用いたが、プローブによって電圧信号の振幅や複雑さに違いが観察され、算出されたTIは、楔状プローブでは3.2kHz以下の周波数帯域では肉質特性によって3グループに分類できたが、円錐状プローブではできなかった。この結果より、AMC法による破断音響振動はプローブの形状の影響を大きく受けることが確認された。ブドウ果肉のような植物体を破壊時に発生する振動は、細胞壁破壊時に発生すると考えられ(Vickers and Bourne, 1976), 肉質によって細胞壁を構成する多糖類が異なるため(薬師寺ら, 2007),

細胞壁の破壊特性に違いが生じ、得られる破壊音響振動に反映されたと考えられる。楔状プローブは人間の門歯を模した形状をしており、人間が知覚している破断振動に近いために、官能評価と一致する結果が得られたと推測される。

様々な形状のプローブが青果物の穿刺試験による力学評価に使用されている。例えば、リンゴは円柱形で先端が凸の半球面状のプローブが多く (De Belie et al., 2002; Harker et al., 2006; Harker and Hallett, 1992; Mehinagic et al., 2004; Zdunek et al., 2010)。ブドウやキュウリでは円柱形で先端が平らなものが使用された (石坂ら, 2000; Sato et al., 1997, 2004; Sato and Yamada, 2003)。また圧縮試験において、ラディッシュでは直径 150mm のプレート型 (Takahashi et al., 2009) や、ポテトチップスでは V 字型のプローブ (Rojo and Vincent, 2008) なども使用された。(大越ひろ, 1995) は青果物を含む 18 種類の食品に対し、歯形 (円柱形で接触面が凸凹状)、楔型、ディスク型 (円柱形) の 3 つのプランジャーで穿刺による破断応力を測定し、カマボコ、ダイコン、トウモロコシなどではプランジャー形状によって得られる応力波形が異なると報告し、穿刺試験における食品のテクスチャー評価にはプランジャー形状が重要だと指摘した。AMC 法による破断音響振動測定においても、個々の食品に適したプローブ形状の選定が必要だと考えられる。

第 3 章では AMC 法で得られたキャベツ葉の音響振動は、破壊過程によって変化することが明らかになり、プローブが葉を完全に突き破る瞬間の 40 ミリ秒間の振動がよりキャベツの肉質特性を反映していた。また収穫期を逸脱し、食感が低下したキャベツでの試料では、800-4480Hz 帯域の TI に顕著な低下が観察され、キャベツの食感特性を反映していると推測された。Taniwaki et al. (2009c) は ‘冬のぼり’ の 2 月収穫から 3 月収穫にかけて、1120Hz より低周波数帯域で TI の著しい低下を指摘したが、その他の品種や収穫時期については明確な周波数特性を報告していない。これは信号の解析にプローブがキャベツ試料に触れ始めてから、完全に停止するまでの 700 ミリ秒間を使用したからで、キャベツの破断がほとんど起きていない信号まで解析に用いたために、肉質由来信号が希薄化したと考えられる。Marzec et al. (2007) はデンプン押出成形食品の破断振動を加速度センサーで数秒間記録し、0.25 ミリ秒間毎に 15 kHz までの周波数成分に分解し、破断振動の周波数特性を経時的に観察した。1-3kHz の

信号は破断開始から 1.5 秒以内で発生することから、大きな組織の破断に由来し、7-15kHz の信号は、破断中に終始発生していたことから分子レベルの摩擦によるものだと考えられた (Marzec et al. 2007). キャベツの AMC 取得信号についても同様に、破断プロセスによって適当な信号長を用いて経時的な解析を行うことが、食感特性の理解にも繋がるのではないかと推測される. この時、1/2 オクターブバンド分析に用いたバターースフィルタの伝達関数の次数の検討が必要である. 信号長が 60 ミリ秒より短い場合では 1000Hz 以下の信号に影響を及ぼすため、第 3 章では次数を 3 として「破断」信号の解析に用いた. 次数を小さくすると元信号に対する影響は少ないが、遮断周波数付近の応答が緩やかになり、周波数分解能が低下する. 解析信号長を短くすることで時間に対する分解能を高めながら、周波数分解能も維持するために、周波数帯域によって次数を変化させる、つまり高周波では次数は高く、低周波では次数を下げるなどの対処が今後必要ではないかと考えられる.

第 4 章では、圧電素子の出力電圧とプローブ速度との位相差は、印加信号の周波数によって変化することが確認された. すなわち印加信号が 3Hz 以下では  $-\pi/2$  (rad), 10-75Hz では 0 (rad), 400Hz 以上では  $\pi/2$  であり、それぞれ変位、速度、加速度に対応することがわかった. このような周波数による位相の変化は、圧電素子をプローブとアルミニウム台座で挟んだために、新たな振動モードの共振が発生したためだと推測される. あるいは圧電素子の厚み方向または直径方向の共振が低周波側に抑制された可能性も考えられる. 振動検出に圧電素子を用いて算出した TI では周波数が高くなるにしたがって、TI も大きくなる傾向にあった (Taniwaki, et al., 2009a, 2009b). これは TI を、圧電素子の出力電圧が応力に比例すると仮定して、エネルギー密度として定義したためで、10Hz 以上の帯域では実際の振動エネルギー密度より  $f^2 \sim f^4$  倍過剰に見積もられていたからだと考えられる.

第 2 章では楔状プローブで取得された 0-50Hz の TI と破断応力試験器によって得られた破断荷重との間に有意な相関 ( $p < 0.05$ ) が得られた. これは上述した圧電素子の出力電圧が 3Hz 以下では変位に対応するためだと考えられた. 圧電素子構造体は 3-10Hz, 75-400Hz の帯域で、変位、速度、加速度、いずれの量とも完全には対応しなかったため、その出力電圧から振動のエネルギー密度の

算出はできないと判断された。そこで、プローブとアルミニウム台座で構造体を形成しても出力電圧が加速度に一定の加速度ピックアップセンサーを AMC 装置の振動検出に用いた。加速度ピックアップセンサーの出力電圧からエネルギー密度量としての ETI を定義した。

AMC法を用いた食感評価に関しての今後の展望は大きく分けて2つの方向性が考えられる。一つは AMC 法による破断音と食品の構造との関係であり、もう一つはヒトの食感知覚との関係についてである。食品の破断音は食品の構造と密接な関係があり、Duizer(2000)は破断音による食品テクスチャーの評価には、食品の構造と破断音との関係を理解することが重要だと指摘している。青果物の破断音は細胞壁の破壊によって発生すると考えられている(Vickers and Broune, 1976)が実証されていない。この関係を明らかにするためには、単一細胞のみを破壊するような極小プローブを用いた破断信号の取得が必要であると考えられる。また、キャベツのような葉物野菜では、プローブは表皮、下皮、柵状組織、海綿状組織と次々に破壊していると考えられる。種々の組織の破壊振動を時間軸で分割して解析することで、それぞれの特徴が明確になると考えられる。

次に、食品試料の破壊速度の影響を考慮する必要があると考えられる。食品をゆっくり破壊する場合と高速で破壊する場合では、構造の破壊過程が変化するはずである。圧縮試験で得られる最大応力やヤング率などの力学特性は、圧縮速度に応じて変化することが確認されており(Vickers and Cristensen, 1980)、音響信号の周波数特性も破断速度の影響を受けると推測される。例えば、1辺が  $100\ \mu\text{m}$  の正方形の植物細胞に  $1\text{mm/s}$  のスピードでプローブを貫入させると、0.1秒毎に細胞壁が破壊され、その際にパルス状の破断信号が取得できると仮定する。1秒当たりに発生するパルス信号の数を周波数とすると、 $10\text{Hz}$  の信号が得られる。一方、プローブの貫入速度を10倍の  $10\text{mm/s}$  にすると、破断信号は0.01秒毎に発生し、取得信号も10倍の  $100\text{Hz}$  となる。このように細胞構造が同じでも、破壊速度によって AMC で得られる信号の周波数特性が異なると考えられる。ヒトの咀嚼速度は20から  $50\text{mm/s}$  と言われているが(Roudaut et al., 2002)、多くの音響学的手法を用いた機器による食品破断試験では、破壊速度は  $1\text{mm/s}$  以下(Arimi et al., 2010; De Belie, 2002; Roudaut et al., 1998; Zdunek

et al., 2010)であり、ヒトの咀嚼速度の 20 分の 1 以下とかなり遅い。このため、得られる音響信号の周波数的特性は、ヒトが知覚している振動刺激と異なると考えられる。AMC 法はプローブ貫入速度が 22mm/s とゆっくりとした咀嚼速度に相当するが、早めの咀嚼に対応した破壊速度について、破断信号に及ぼす影響を確認する必要があると考えられる。

AMC 法で取得される破壊音響振動は、歯の直下の神経がとらえている振動情報を取得していると考えられる。したがって、聴覚刺激となる空気伝導音と骨伝導音と、口腔内で知覚する振動刺激の基となる信号だと考えられる。ただし、実際にヒトが耳で知覚する刺激は、骨伝導音は 160Hz である下顎骨の共振を含んでおり (Kapur, 1971), 3500Hz 以上の音は頬組織によって減衰される (Dacremont et al. 1991) など変化する。また、振動検出に圧電素子を用いた AMC 装置では、取得電圧の特性は周波数依存性が見られ、取得信号を物理的なエネルギー密度で表すために加速度ピックアップセンサーを用いた (第 4 章)。しかし、ヒトの食感知覚に関する振動情報は不明な点が多く、圧電素子の出力特性のように、周波数によって知覚する物理量が異なったり、知覚する器官が異なったりする可能性もある。AMC 法を用いれば、食感判断に重要な周波数帯域や知覚する器官が明確になると考えられる。例えば、キャベツの破断信号は 1/2 オクターブ幅の 19 の周波数帯域に分割される。この帯域から、1 つまたは複数の特定の周波数帯域の信号だけを、ヒトの聴覚や口腔内の振動刺激として与え、キャベツの食感として知覚させることができれば、その帯域がキャベツの食感判断に寄与すると判断できる。AMC 法によって得られる食品破断振動を介して、食品の構造的特性とヒトの知覚刺激とを繋げ、複雑な食感知覚メカニズムの完全な理解が期待できる。

## 引用文献

- 石坂晃, 山本幸彦, 月時和隆, 満田幸恵, 2000. 歯切れ感が優れた大果どりに適したキュウリ品種. 福岡農総試報, 19. 41-43.
- 大越ひろ. 食品テクスチャーの測定法. サイコロロジーと咀嚼 食べ物のおいしさ—その文化と科学 (川端晶子, 斎藤滋編). 建帛社. 初版. 1995. 170-193.
- 相良泰行. 2009. 食品の力学物性とテクスチャーの感性計測法. 日本食品科学工学会誌. 56. 501-512.
- 新宅英司, 藤本由紀夫, 濱田邦裕, 武内哲也. 1998. 圧電素子による構造物の簡易応力履歴計測に関する研究. 日本造船学会論文集. 184. 339-346.
- 薬師寺博, 上野俊人, 東暁史, 児下佳子, 2008. ブドウ肉質の崩壊性と塊状における細胞壁多糖類の品種間差異. 園芸学研究, 7(別2). 452
- Arimi, J. M., Duggan, M., O'Sullivan, M., Lyng, J. G., O'Riordan, E. D. 2010. Development of an Acoustic Measurement System for Analyzing Crispness During Mechanical and Sensory Testing. *J. Texture Stud.* 41. 320-340.
- Dacremont, C., Colas, B., Sauvageot, F. 1991. Contribution of air-and bone-conduction to the creation of sounds perceived during sensory evaluation of foods. *J. Texture Stud.* 18. 109-119.
- Dacremont, C. 1995. Spectral composition of eating sounds generated by crispy, crunchy and crackly foods. *J. Texture Stud.* 26. 27-43.
- De Belie, N., Harker, F.R., De Baerdemaeker, J. 2002. Crispness judgement of Royal Gala apples based on chewing sounds. *Biosyst. Eng.* 81. 297-303.
- Duizer, L. 2001. A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures. *Trends in Food Sci. Technol.* 12. 17-24.
- Harker, F. R. Hallett, I. C., 1992. Physiological changes associated with development of mealiness of apple fruit during cool storage. *Hort Sci.* 27. 1291-1294.
- Harker, F. R., White, A., Gunson, F. A., Hallett, I. C., De Silva, H. N. 2006. Instrumental measurement of apple texture: a comparison of the single-edge notched bend test and the penetrometer. *Postharvest Biol. Technol.* 39. 185-192.
- Kapur, K. K. 1971. Frequency spectrographic analysis of bone conducted chewing sounds in persons with natural and artificial dentitions. *J. Texture Stud.* 2. 50-61.

- Marzec, A., Lewicki, P. P., Ranachowski, Z. 2007. Influence of water activity on acoustic emission of flat extruded bread. *J. Food Engineering*. 79. 410-422.
- Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., Bertrand, D., Jourjon, F. 2004. Prediction of the sensory quality of apples by physical measurements. *Postharvest Biol. Technol.* 34. 257-269.
- Roudaut, G., Dacremont, C., Le Meste, M., 1998. Influence of water on the crispness of cereal-based foods: Acoustic, mechanical, and sensory studies. *J. Texture Stud.* 29. 199-213.
- Roudaut, G., Dacremont, C., Valles Pamies, B., Colas, B., Le Meste, M. 2002. Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. *Trends in Food Sci. Technol.* 13. 217-227.
- Rojo, F. J., Vincent, J. F. V., 2008. Fracture properties of potato crisps. *International J. Food Sci. Technol.* 43. 752-760.
- Sato, A., Yamane, H., Hirakawa, N., Otobe, K., Yamada, M. 1997. Varietal differences in the texture of grape berries measured by penetration tests. *Vitis*. 36. 7–10.
- Sato, A, Yamada, M. 2003. Berry texture of table, wine, and dual-purpose grape cultivars quantified. *Hort Sci.* 38. 578-581.
- Sato, A., Yamada, M., Iwanami, H., Mitani, N. 2004. Quantitative measurements of grape flesh texture as affected by gibberellic acid application. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 73. 7–11.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N. 2006. Device for acoustic measurement of food texture using a piezoelectric sensor. *Food Res. Int.* 39. 1099–1105.
- Taniwaki, M., Sakurai, N. 2008. Texture measurement of cabbages using an acoustical vibration method. *Postharvest Biol. Technol.* 50. 176–181.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N. 2009a. Postharvest quality evaluation of “Fuyu” and “Taishuu” persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique. *Postharvest Biol. Technol.* 51. 80–85.
- Taniwaki, M., Hanada, T., Tohro, M., Sakurai, N. 2009b. Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques. *Postharvest Biol. Technol.* 51.



305–310.

- Taniwaki, M., Takahashi, M., Sakurai, N., Takada, A., Nagata, M. 2009c. Effects of harvest time and low temperature storage on the texture of cabbage leaves. *Postharvest Biol. Technol.* 54. 106-110.
- Taniwaki, M., Sakurai, N., 2010. Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements. *Food Res. Int.* 43, 814-818.
- Vickers, Z.M., Bourne, M.C. 1976. A psychoacoustical theory of crispness. *J. Food Sci.* 41. 1158–1164.
- Vickers, Z. M., Christensen, C. M. 1980. Relationships between sensory crispness and other sensory and instrumental parameters. *J. Texture Stud.* 11. 291-307.
- Zdunek, A., Cybulska, J., Konopacka, D., Rutkowski, K. 2010. New contact acoustic emission detector for texture evaluation of apples. *J. Food Eng.* 99. 83–91.

## 謝辞

広島大学大学院生物圏科学研究科環境循環系制御学専攻教授櫻井直樹先生には指導教官として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導を戴いた。ここに深謝の意を表する。

同大学院生物機能開発学専攻教授上野聡先生、並びに、同専攻羽倉義雄先生には副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴いた。ここに深謝の意を表する。

本研究の第 2 章の実験では農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所ブドウ・カキ研究拠点主任研究員三谷宣仁博士、並びに、同拠点研究チーム長薬師寺博博士には試料および資料を提供して頂くとともに有益なご助言を戴いた。ここに深謝の意を表する。

本研究の第 3 章の実験では、広島大学産学連携センターVBL 研究員谷脇満博士には資料を提供して戴くとともに有益なご助言を戴いた。ここに同氏に対して深謝の意を表する。

本研究の第 4 章の実験では、広島大学産学連携センターVBL 研究員秋元秀美博士には実験の協力並びに資料を提供して戴くとともに有益なご助言を戴いた。ここに同氏に対して深謝の意を表する。

パナソニックヘルスケア株式会社知的財産権センター主任知財技術師寺崎章二博士には日頃より有益なご討論ご助言を戴いた。ここに感謝の意を表する。

本専攻植物環境評価論講座櫻井研究室の各位には研究遂行にあたり日頃より有益なご討論ご助言を戴いた。ここに感謝の意を表する。

本研究の第 2 章、第 3 章の一部は農林水産省委託プロジェクト研究「低コストで質の良い加工・業務用農産物の安定供給技術の開発」1 系によった。また本研究の第 4 章の一部は日本学術振興会科学研究費（特別研究員 課題番号 22・7447）によった。