

# 食品の粘弾性特性の非破壊計測

Non-destructive measurement of food material viscoelasticity

松野 孝博, 王 忠奎, 岡田 育実, 沖野 友亮, 鐘江 峻, 栗山 佳之, 平井 慎一  
Takahiro Matsuno, Zhongkui Wang, Ikumi Okada, Yusuke Okino,  
Ryo Kanegae, Yoshiyuki Kuriyama, Shinichi Hirai

立命館大学ロボティクス学科ソフトロボティクス研究室  
Soft Robotics, Lab., Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

## 1. はじめに

食品の粘弾性係数は食感に大きく影響するパラメータであり[1][2], 適切な食感の実現には調理中または調理後の粘弾性係数の評価が必要である[3]. 現在, 食品の粘弾性を評価するためには, 人間が評価することが一般的である. しかし, 主観的な評価方法には個人差があるため, 定量的な計測方法が求められている[4]. 既存の弾性係数の計測方法として, クリープ試験による方法[3][4]や, ヘルツの接触理論を用いた方法がある[5][6].

これらの既存の計測方法に対し, 食品と接触せず粘弾性を推定する方法として, 人が食品を揺らしその様子から推定する方法が用いられている[7]. 本手法では計測の過程で食品の物性に影響を及ぼさないため, 繰り返し計測を行うことが可能である. しかし, 既存の方法では, 人間が揺れの応答を評価する必要があり, 揺れの評価基準も主観的であるため, 定量的な評価方法ではない[7].

そこで本研究では, 強制振動による定量的な食品の粘弾性計測方法を提案する. まず, 食品を簡易的な振動モデルで近似する. 次に, 強制振動時に観測される応答倍率と位相差から, モデル上のパラメータを求める. そして最後に, モデルパラメータを食品の縦弾性係数に変換する. 本稿では, 振動モデルとそのモデルパラメータ, そして粘弾性係数の導出理論について述べる. また, 試作した強制振動装置および応答倍率と位相差の観測装置について述べ, 提案した粘弾性計測方法の検証実験結果を示す. 本稿は, 強制振動による粘弾性計測の初期段階の研究である. 振動モデルに簡

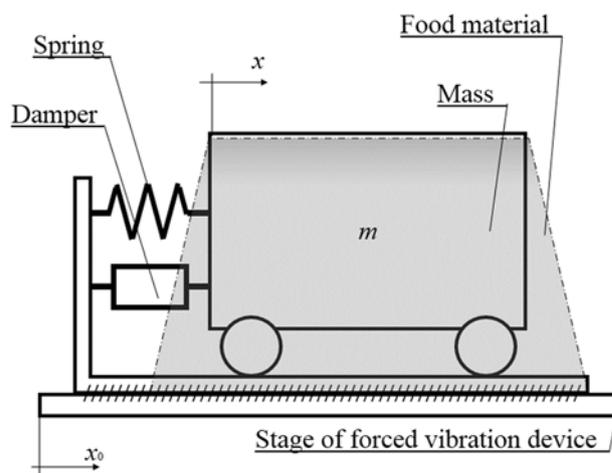


図1 食品の振動モデル

単なバネダンパモデルを用い, 食品の形状を円錐台に限定して解析および実験を行う.

## 2. 強制振動による食品の粘弾性計測

### 2. 1 食品の振動モデル

本節では, 食品の近似振動モデルにおける応答倍率と位相差の理論式と, モデルパラメータの導出方法について述べる. まず, 図1に示すとおり食品を一次のバネとダンパのモデルに近似する. ここで食品の振動モデルの等価質量を $m$ , 食品の水平方向の変位量を $x$ , 減衰係数を $c$ , バネ定数を $k$ , ステージの変位量を $x_0$ としたとき, 以下の運動方程式が得られる.

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{x}_0) + k(x - x_0) = 0 \quad (1)$$

食品には計測のため, 強制振動が加えられる.  $X_0$ をステージの振動の振幅,  $\omega$ を振動の各周波数,  $t$ を時間としたとき, ステージの変位量 $x_0$ を次式に

て定義する.

$$x_0 = X_0 \sin \omega t \quad (2)$$

ステージ上で揺れる食品を線形ばねとダンパで定義すると, 出力される位相差 $\theta$ は以下のとおりである.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{c\omega}{-m\omega^2 + k} \quad (3)$$

食品の振動の振幅を $X$ としたとき, 入力した強制振動に対する応答倍率 $T$ は次式より得る.

$$T = \frac{X}{X_0} = \frac{\sqrt{c^2\omega^2 + k^2}}{\sqrt{(-m\omega^2 + k)^2 + c^2\omega^2}} \quad (4)$$

ここで, 任意の強制振動に対して, 位相差 $\theta$ および応答倍率 $T$ が観測されたと仮定する. このとき, 観測された位相差 $\theta$ および応答倍率 $T$ を満たすばね定数 $k$ および減衰係数 $c$ は次式より得る.

$$k = \frac{\omega}{-1+T^2} \left( \frac{1}{2}m\omega(2T^2 - 1 + \cos 2\theta) - \right. \quad (5)$$

$$\left. \cos^2\theta \frac{1}{\tan\theta} \sqrt{m^2\omega^2 \left( \frac{T^2}{\sin^2\theta} - 1 \right) \tan^4\theta} \right)$$

$$c = \frac{\cos^2\theta}{-1+T^2} \left( m\omega \tan\theta - \right. \quad (6)$$

$$\left. \sqrt{m^2\omega^2 \tan^2\theta (T^2 - \tan^2\theta + T^2 \tan^2\theta)} \right)$$

ただし, 観測される位相差が 0 の場合, 以上で示した方法では結果が得られない. ここで, 減衰係数が 0 の場合, 位相差が 0 になることを用いて, 次式でばね定数を求める.

$$k = \frac{m\omega^2 T}{T - 1} \quad (7)$$

## 2. 2 粘弾性の導出

前節で得られたばね定数より, 食品の弾性係数を導出する. 食品を弾性体と仮定し, 負荷により食品に蓄えられる弾性エネルギー $U$ を求める. 食品に加わる負荷を $P$ , 食品の高さを $L$ , 任意の高さを $x_L$ , 食品の弾性係数を $E$ , 任意高さ $x_L$ におけるせん断方向の断面二次モーメントを $I$ としたとき, 弾性エネルギー $U$ は次式より得る.

$$U = \int_0^L \frac{(P(L - x_L))^2}{2EI} dx_L \quad (8)$$

本稿では, 食品の形状を円錐台に限定する. 食品

の上面の直径 $d_0$ と任意高さ $x_L$ の断面直径 $d$ の関係を, 直径の変化率 $a$ を用いて定義したとき, 任意高さ $x_L$ におけるせん断方向の断面二次モーメント $I$ は次式より得る.

$$d = ax_L + d_0 \quad (9)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (10)$$

なお, 上面の直径 $d_0$ は食品を直接計測して得る. また, 直径の変化率 $a$ は $x_L = L$ における直径の計測値より計算する. 以上より, 円錐台形状の食品の弾性エネルギーは次式より得る.

$$U = \int_0^L \frac{64(P(L - x_L))^2}{2\pi E(ax_L + d_0)^4} dx_L \quad (11)$$

$$= \frac{32L^3 P^2}{3\pi d_0^3 (d_0 + aL)E}$$

ここで, 弾性エネルギー $U$ を負荷 $P$ で偏微分することで食品のたわみ量 $\delta$ を得る. 食品のたわみ量 $\delta$ は次式のとおりである.

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{64L^3 P}{3d_0^3 (d_0 + aL)\pi E} \quad (12)$$

ばね定数を $k = P/\delta$ としたとき, 前節より得られたばね定数 $k$ から, 食品の弾性係数 $E$ を次式より導出する.

$$E = \frac{64L^3}{3\pi d_0^3 (d_0 + aL)} k \quad (13)$$

また, 円錐台における粘性係数と近似モデルの関係は次式より得る[8].

$$\mu = \frac{64L^3}{3\pi d_0^3 (d_0 + aL)} c \quad (14)$$

## 3. 粘弾性計測システム

### 3. 1 強制振動装置の開発

本研究で提案する強制振動装置を図 2 に示す. モータの原動軸に円形の偏心カムが取り付けられており, カムの直径と同じ幅のカムフォロアと組み合わせて用いる. 本機構の原動軸を等速で回転させた時, カムフォロアおよびそれに接続されたステージは, 式(2)に示す単弦振動を行う. ステージに加わる負荷が一定であると仮定したとき,

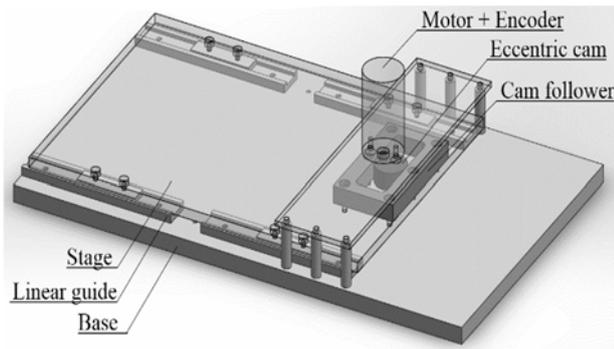


図2 強制振動装置の全体像

モータに定電圧を加えることで原動軸は等速で回転する。本研究では、ストローク 10 mm (振幅 5 mm) となるカムを設計した。

また、図 3 に単弦振動するステージの外観を示す。ステージ上にはゴムシートが敷かれており、ステージとステージ上の皿の滑りを防ぐ。モータは可変の電源装置に直接接続されており、振動の周波数が調節可能である。また、モータに取り付けられたエンコーダを用いて、ステージの周波数を表示している。

### 3. 2 応答倍率および位相差の計測

本研究では振動する食品を高速カメラで撮影し、応答倍率と位相差を計測する。高速カメラ (EX-SC200BK, CASIO, Japan) で撮影した映像を、映像解析ソフト (Kinovea, Joan Charmant & Contrib, France) を用いて解析する。映像解析の一例を図 4 に示す。本研究では、食品の上面に存在する特徴

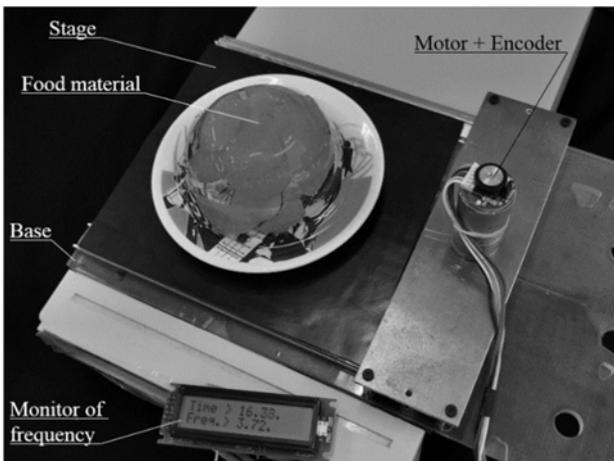


図3 強制振動装置試作機

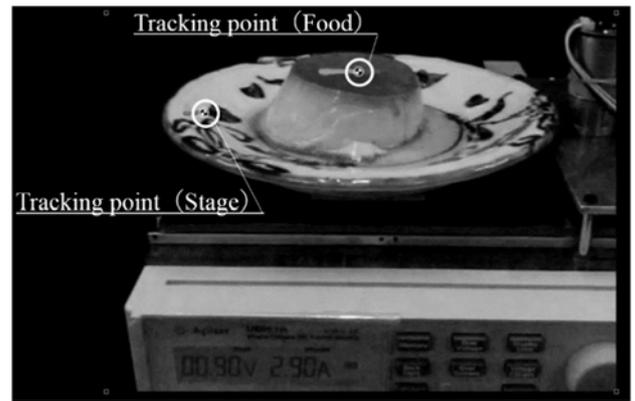


図4 映像解析を用いた応答倍率および位相差の計測

点を、食品の頂点と定義する。また、位相差の情報を得るために、ステージの振動についても映像解析で計測を行う。

ここで得られる軌道データは映像上の距離であるため、実際の変位にキャリブレーションを行う。食品に加える強制振動の周波数を低くした場合、応答倍率は 1 に近づく。そのため、ステージを低速で駆動した場合、ステージおよび食品の頂点部分の振幅は 5 mm となる。この値を用いて、画像上の距離と実際の距離の倍率を計算し、キャリブレーションを行う。

得られた軌道データの水平方向の変位を振動の変位とする。まず、計測した振動の変位の時間変化を Sin カーブに近似する。ステージの変位および振幅を  $x(t)$  および  $A$ 、食品の変位および振幅を  $x'(t)$  および  $A'$  としたとき、各計測データは次式に近似する。

$$x(t) = A \sin(\omega t - \varphi) \quad (15)$$

$$x'(t) = A' \sin(\omega t - \varphi) \quad (16)$$

ここで Sin カーブへの近似結果から応答倍率と位相差を取得する。応答倍率  $T$  と位相差  $\theta$  は次式より得る。

$$T = \frac{A'}{A} \quad (17)$$

$$\theta = \varphi' - \varphi \quad (18)$$

以上の計測で得られた応答倍率  $T$  と位相差  $\theta$  を、式 (5)-(6) および式 (13)-(14) に代入することで、食品の粘弾性係数を計測することができる。

## 4. 検証実験

### 4. 1 実験方法

本研究で提案した計測方法を用いて食品の粘弾性係数を求める。本計測に用いる食品は円錐台形状であるプリン(森永の焼プリン, 森永乳業株式会社)を用いる。食品の上面の直径は 60 mm であり, 下面は 70 mm である。本食品に 6.8–30.9 rad/s の強制振動を与え, 複数の応答倍率および位相差を計測する。各計測結果から粘弾性係数を計算する。

### 4. 2 実験結果

各周波数で食品に強制振動を与えたときの応答倍率および位相差を図 5 に示す。また, 応答倍率および位相差から計算される粘弾性係数を図 6 に示す。まず, 弾性係数の計測結果について着目した場合, 約 15~30 rad/s の振動を与えたときに 2000Pa 前後の計測結果が示されることを確認できる。一方で, 粘性係数は入力した周波数全域でその値が異なり, 大きな周波数依存性が確認できる。今後, これらの計測結果の妥当性を検証する。

## 5. おわりに

本稿では, 強制振動を用いた食品の粘弾性計測方法を提案した。本手法では, 食品を一次のバネおよびダンパのモデルに近似し, 強制振動時に観測される応答倍率と位相差から, モデル上のばね定数および減衰係数を求める。次に, 食品の形状およびモデルのバネ・ダンパ係数を用いて, 食品の粘弾性係数を解析する。試作した強制振動装置および応答倍率と位相差の観測装置を用いて, 提案した強制振動による粘弾性計測方法を実験で確認した。今後は計測結果の精度検証, 振動モデル改善による精度向上, および計測システムとしての開発を継続する。

## 参考文献

[1] N. Nakahama, H. Ogoshi and H. Hatsue, The rheology and texture of foods, 1st ed. Tokyo, Japan: IK corporation, 2011, ch. 1, pp. 2-5.

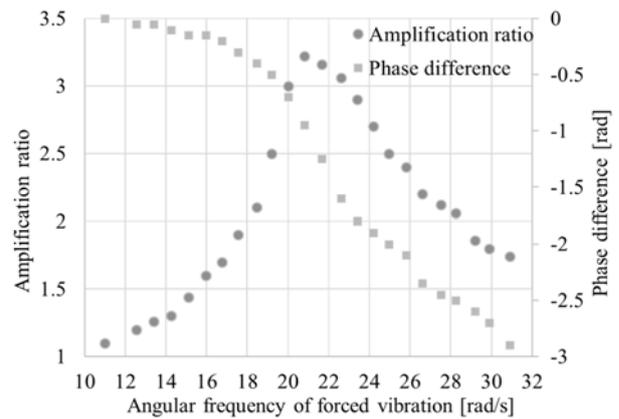


図 5 映像解析を用いた応答倍率および位相差の計測

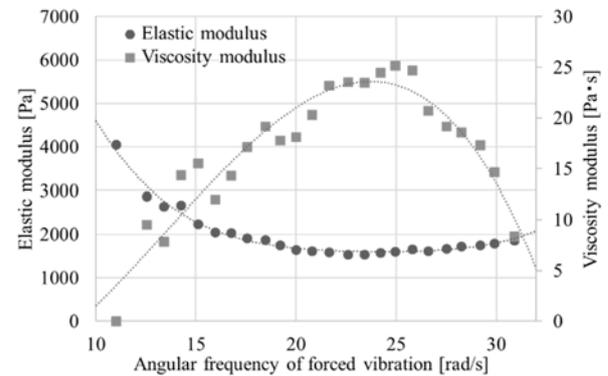


図 6 映像解析を用いた応答倍率および位相差の計測

- [2] T. Matoba, Shokumotsu Kagaku Gairon, 1st ed. Tokyo, Japan: Asakura Publishing, 2014, ch. 4, pp. 58-73.
- [3] S. Sato, Y. Tanaka and Y. Shimiyu, "Measurement of Viscoelasticity Distribution between the Surface and Center of Cooked Noodles Using the Modified Compression Creep Test," Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, vol. 61, No.3, pp. 108-116, 2014.
- [4] A. Morita, T. Araki, S. Ikegami, M. Okue, M. Sumi, R. Ueda and Y. Sagara, "Development of Texture Evaluation Model Based on Viscoelastic Testing Methods for Cheddar Cheese," Nippon Shokuhin Kagaku Kaishi, vol. 16, No.3, pp. 185-200, Sep. 2015.
- [5] K. Kadoma, Z. Wang and S. Hirai, "Elasticity measurement of Biological tissue using a Probe-Type Instrument," presented at the 12th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics, Ibaraki, Osaka, Nov. 11-14, 2016.
- [6] M. Tani and A. Sakuma, "Applicability Evaluation of Young's Modulus Measurement using Equivalent Indentation Strain in Spherical Indentation Testing for Soft Materials," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, vol. 76, No.761, pp. 102-108, 2010.
- [7] TSUJI Group., Pâtissier ni Osowaru Ninkino Okashi, 1st ed. Tokyo, Japan: Gakken publishing, 2014, ch. 1, pp. 30-31.
- [8] T. Matsuno and S. Hirai, "Grasping Force Measurable Soft Finger using Electro Conductive Material," IEEE/SICE SII 2019, pp.683-688, Paris, January 14-16, 2019.