＜令和２年度助成＞

振動・音響試験技術に基づくソフトチーズの成熟度評価のためのソフトアクチュエータの創成

細矢　直基
（芝浦工業大学 工学部）

1．緒論

生乳は、長期の貯蔵ができない、季節により生産量が変化する（夏場は乳量が減る）、などの特徴がある。需給バランスが崩れた際には、長期貯蔵が可能な乳製品（チーズなど）の製造が鍵となる。チーズは、カルシウムやビタミンの摂取に役立つなど、健康食品として注目されている。日本におけるチーズの消費量は、2004 年に 26 万トンであったものが、2018 年には 1.3 倍の 35 万トンになっている。しかし、国産品の割合はおよそ 13％（ナチュラルチーズ）にとどまっている。チーズの成熟度は、人間の触診により評価しているため、人間の技量によるばらつき、評価基準の曖昧さが、生産効率、品質、価格において問題となっている。これらを解決でき、日本人の口に合う国産チーズが増えれば、チーズが日本人の食文化に、より強く根付くことになる。また、国産チーズのシェアや輸出量の拡大だけではなく、生乳の需給バランスの急変に対応できるようになり、我が国の酪農全体の強靱化への期待が高まる。

本論文では、振動試験技術に基づき、ソフトチーズの成熟度を定量的に評価するための、ソフトアクチュエータを創成する。機械構造物やインフラ構造物などの健全性を調べるために、打音検査や超音波検査などがある。打音検査では、対象をハンマーで叩いたときの応答を調べる。また、超音波検査では、硬い超音波プローブを対象に押しつけて超音波を伝播させ、その反射などを調べる。Tania Conde らは、マンチェゴチーズのようなハードチーズ表面にインパルスハンマーを用いてハードチーズ表面を加振し、マイクロホンでチーズから放射された音を計測する[1, 2]。そして、得られたスペクトルで確認できるピークの周波数が熟成日数の経過により高周波へシフトすることや、各ピークでのスペクトルのエネルギーが大きくなることを、熟成度と関連付けて評価している。しかし、ソフトチーズをハンマーで叩いたり、超音波プローブ[3]を押しつけたりすることは、商品価値を無くすことになるため、困難である。本論文の特徴は、ソフトチーズを無傷でしなやかに振動させるために、従来の硬いハンマーや超音波プローブを、誘電エラストマーアクチュエータ（Dielectric Elastomer Actuator：DEA）に置き換える点にある。DEA は、制御性に優れるソフトアクチュエータ（人工筋肉）として、ソフトロボット[4]、音響スピーカ[5, 6]などへの検討がなされている。ソフトチーズは、熟成するに従い、柔らかくなっていく。これを弾性波の伝播速度の変化として捉えることができれば、成熟度を定量的な評価につながる。本論文では、カマンベールチーズを供試体として用いる。そして、これに DEA を貼付し振動させ、チーズ表面に加速度計を貼付することで、その応答を計測する。得られた加速度応答より、DEA の加振性能を評価する。

2．DEA

図 1(a) に示すように、DEA とは、ゴム状の薄い高分子誘電膜を伸び縮み可能な柔軟電極で挟んだキャパシタ構造になっている。そして、**図 1(b)** に示すように、電極間に電位差を与えることで静電気力によって電極同士が互いに引き合い、高分子誘電膜が面外方向に圧縮され、面内方向に伸張する。これに

より、チーズを振動させる。図 1(c)、(d) に DEA の積層方法を示す。DEA が発生する力は、これを積層することにより増幅させることができる。図 1(c) のように単純に積層することもできるが、工数が増加することから好ましくない。そこで、図 1(d) のようにロールタイプ[7] にすることで、簡便に積層化する方法がある。本論文では、ロールタイプ DEA を製作し、これをチーズに貼付し、駆動することでソフトチーズを加振する。

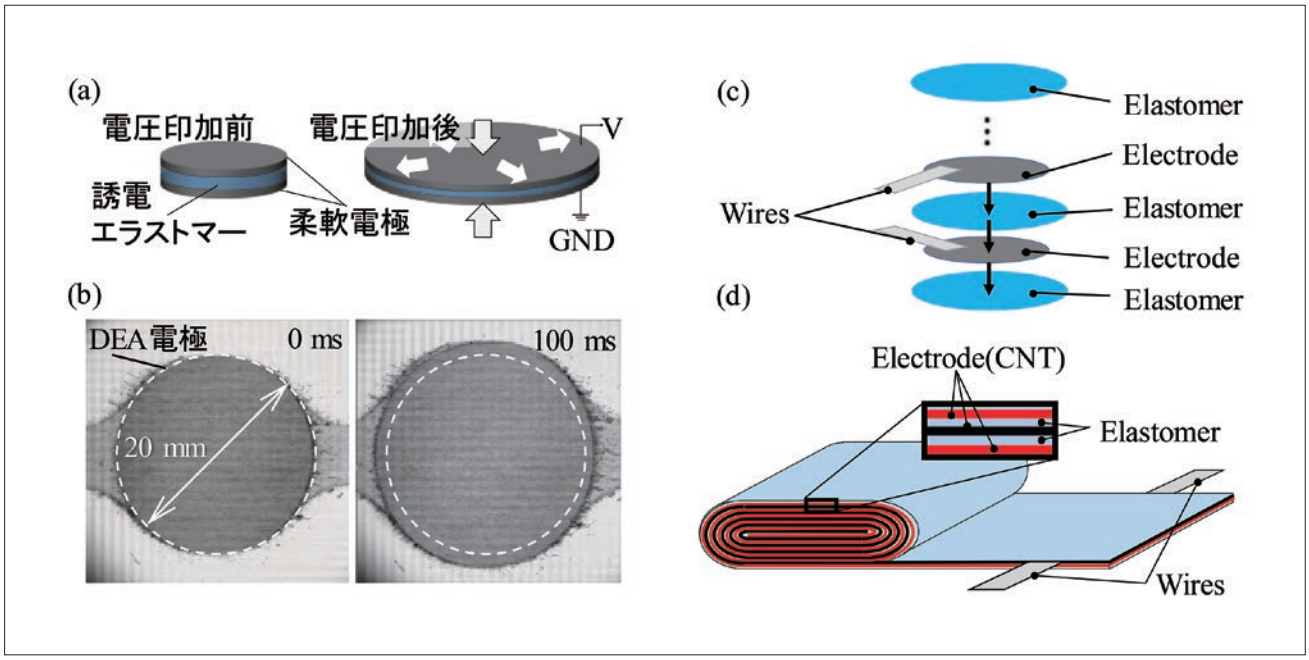

図 1　ソフトチーズを振動させるための DEA
(a) 構造と駆動原理、(b)DEA 駆動時の変化、(c) 単純積層、(d) ロールタイプ積層

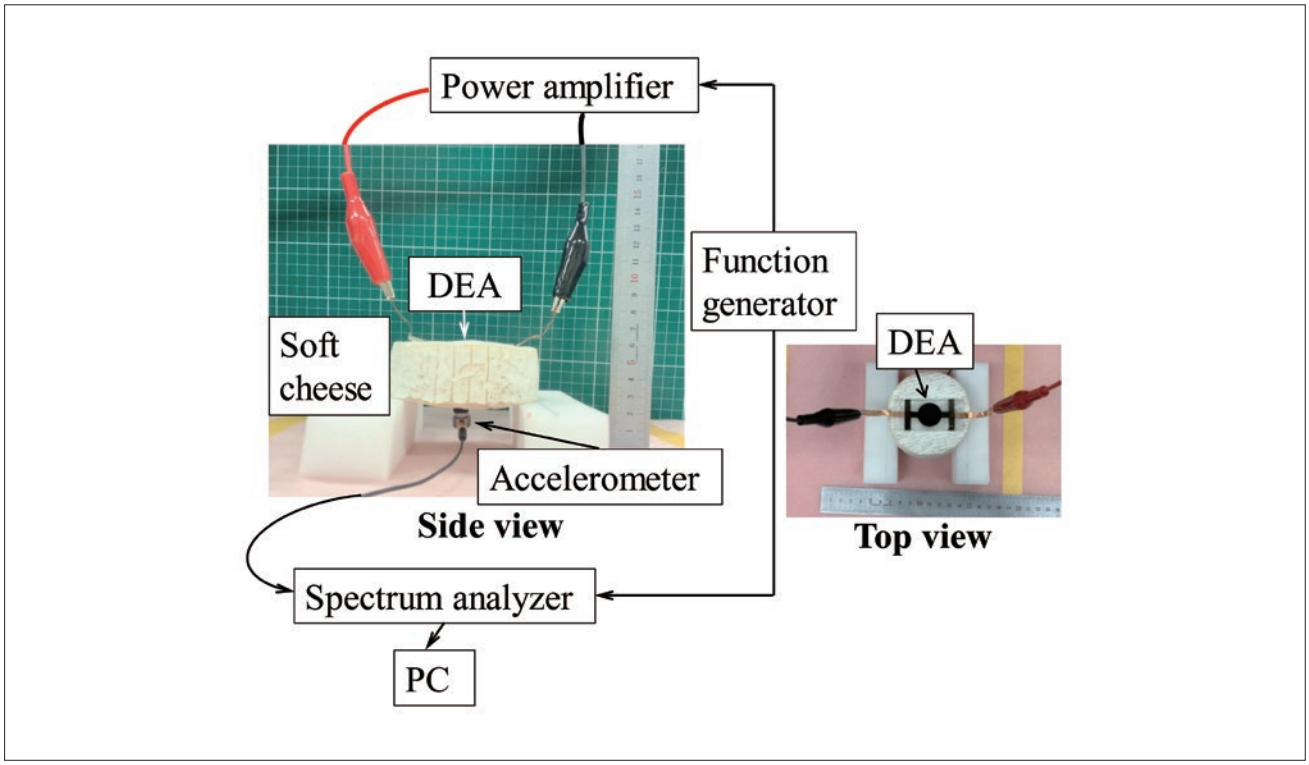

図 2　DEA によるソフトチーズの加振

3．ソフトチーズの振動応答計測

図 2 に、ソフトチーズを DEA により振動させ、その応答を計測するための実験システムを示す。ソフトチーズに DEA を接着剤で貼付し、それをスポンジの上に設置した。DEA を貼り付けた面の裏に、応答を計測するための加速度センサを取り付けた。信号発生器で生成された加振信号を高電圧アンプで増幅し、これを DEA に入力することで、DEA を駆動した。加振信号、加速度応答は、スペクトルアナライザで記録した。

図 3 に、信号発生器で生成した入力信号（左列）

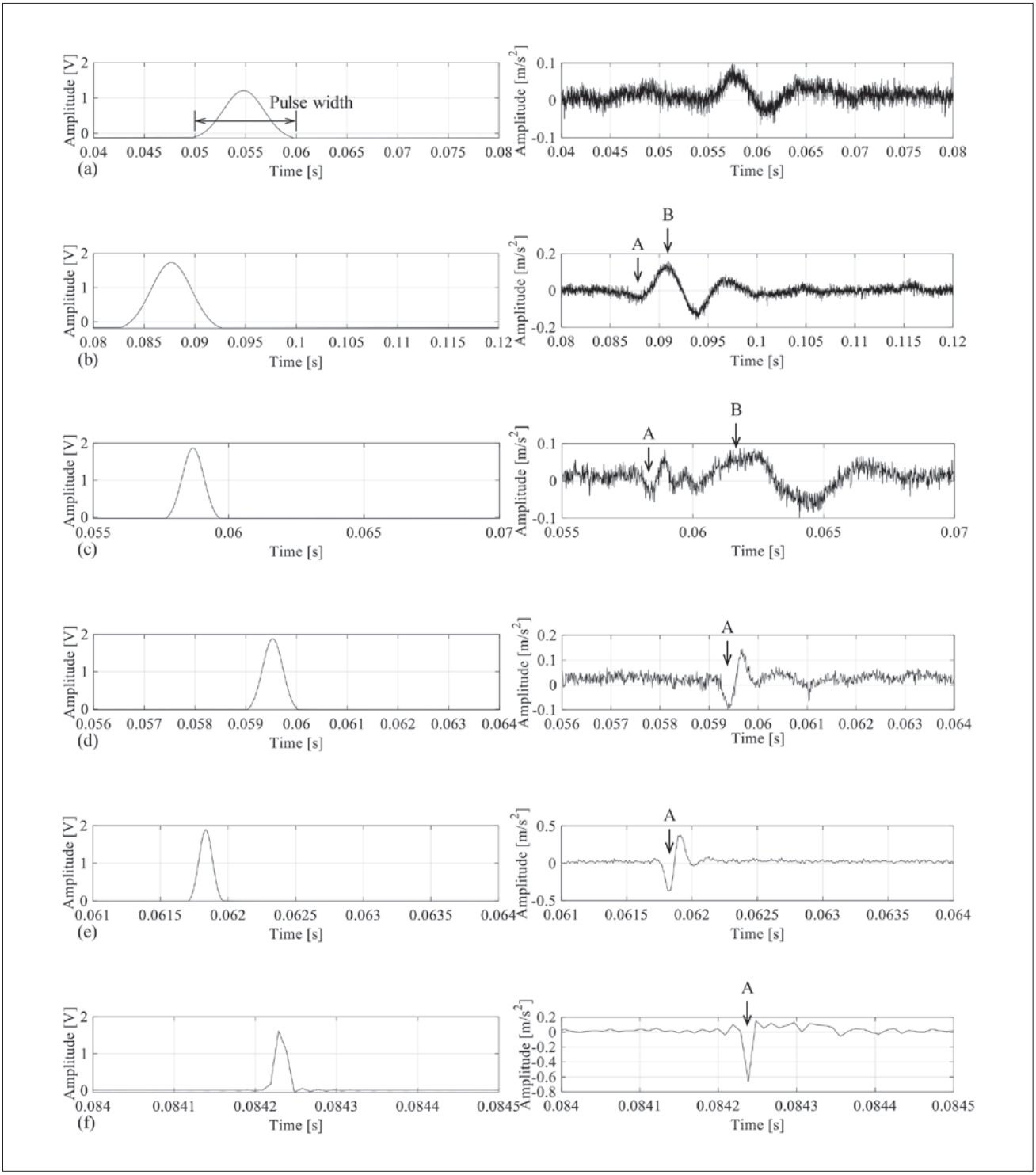

図 3　DEA に入力した信号発生器の信号（左列）と DEA 駆動によりソフトチーズ生成された弾性波（加速度応答）（右列）
(a) 入力信号：1.2 V、パルス幅：10 ms、(b) 入力信号：1.8 V、パルス幅：10 ms、(c) 入力信号：1.8 V、パルス幅：2 ms、
(d) 入力信号：1.8 V、パルス幅：1 ms、(e) 入力信号：1.8 V、パルス幅：250 μs、(f) 入力信号：1.8 V、パルス幅：31.3 μs

と、ソフトチーズに貼付した加速度計で計測された応答（右列）を示す。DEA には、入力信号の電圧の 500 倍が印可される。**(a)**、**(b)** に、入力信号の電圧をそれぞれ 1.2 V、1.8 V としたときの入力信号とその応答を示す。このとき、入力信号の幅は、10 ms とした。入力信号の電圧を 1.5 倍にすると、計測された応答もおよそ 1.5 倍となり、応答に含まれるノイズによる影響が相対的に小さくなっていることがわかる。また、**図 3(b)** の A、B で示したように、2 種類の弾性波が確認できる。弾性波 A は入力信号の最大値とほぼ同時刻に最大振幅となるものであり、弾性波 B は入力信号の最大値から、およそ 3 ms の遅れが確認できる。これにより、本論文で検討した DEA をソフトチーズに貼付し、それを駆動することでソフトチーズを振動させ、これに弾性波を生成することができることがわかる。以降の検討では、応答に含まれるノイズの影響を小さくするため、入力信号の電圧を 1.8 V とする。次に、**(c)** に、入力信号の幅を 2 ms としたときの入力信号と応答をそれぞれ示す。**(b)** と **(c)** を比べると、入力信号のパルス幅を小さくしても、弾性波 A、B の間隔はあまり変化しないことがわかる。**(d)** に、入力信号の幅を 1 ms としたときの入力信号と応答をそれぞれ示す。入力信号の幅が小さくなると、弾性波 A のみが生成されるようになることがわかる。**(e)**、**(f)** に、入力信号の幅を 250 μs、31.3 μs とした際の入力信号と応答をそれぞれ示す。入力信号の幅を数百 μs、数十 μs 程度に小さくしても、この DEA は高速で駆動し、ソフトチーズを振動させる能力を有することがわかった。

4．結論

本論文では、ソフトチーズの成熟度を振動試験に基づき評価するための DEA を検討した。DEA をロールタイプ積層とすることで、製作の工数を低減し、発生する力を大きくすることに成功した。そして、これをソフトチーズに貼付し、その応答を加速度センサで計測したところ、ソフトチーズに弾性波を生成できることがわかった。

謝　辞

本論文は、公益財団法人 浦上食品・食文化振興財団の助成により遂行されました。当初 1 年間の予定でしたが、研究期間の延長をお認めいただき、3 年間実施することができました。感謝申し上げます。

参考文献

1) J. Benedito, T. Conde, G. Clemente, A. Mulet, Use of the acoustic impulse-response technique for the nondestructive assessment of Manchego cheese texture, J. Dairy Sci. 89 (2006) 4490–4502.
2) T. Conde, A. Mulet, G. Clemente, J. Benedito, Detection of internal cracks in manchego cheese using the acoustic impulse-response technique and ultrasounds, J. Dairy Sci. 91 (2008) 918–927.
3) G. Nassar, F. Lefbvre, A. Skaf, J. Carlier, B. Nongaillard, Y. Noêl, Ultrasonic and acoustic investigation of cheese matrix at the beginning and the end of ripening period, J. Food Eng. 96 (2010) 1–13.
4) J. Shintake, V. Cacucciolo, H. Shea, D. Floreano, Soft biomimetic fish robot made of dielectric elastomer actuators, Soft Rob. 5 (2018) 466–474.
5) N. Hosoya, S. Baba, S. Maeda, Hemispherical breathing mode speaker using a dielectric elastomer actuator, J. Acoust. Soc. Am. 138(4) (2015) EL424–EL428.
6) N. Hosoya, H. Masuda, S. Maeda, Balloon dielectric elastomer actuator speaker, Applied Acoustic 148 (2019) 238–245.
7) M. Randazzo, R. Buzio, G. Metta, G. Sandini, U. Valbusa, Architecture for the semi-automatic fabrication and assembly of thin-film based dielectric elastomer actuators, Proc. SPIE 6927, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008, 69272D.

Soft actuators for vibration testing to assess the maturity index of soft cheese

Naoki HOSOYA
Shibaura Institute of Technology

Abstract

Raw milk displays various characteristics, including the impossibility of long storage periods and variations in production volume (particularly as the production volume is lower in the summer). Accordingly, when raw milk is in surplus, producing dairy products (cheese or butter) that can be stored for long periods is crucial. Cheese is well-known as a healthy food, because it allows the ingestion of calcium and vitamins. In general, the maturity of cheeses displays some variation, as it is assessed by humans, which makes large-lot production challenging. Furthermore, consumers need to be able to make maturity assessments of cheeses to determine their edibility. While methods for assessing the maturity of hard cheeses using vibration testing techniques, such as hammering or ultrasonic tests have been studied, assessment methods for soft cheese have yet to be investigated because vibration techniques that might damage the cheese cannot be used. This paper presents soft actuators, such as artificial muscles that are used to vibrate soft cheeses. These soft actuators provide a pathway for conducting nondestructive testing of cheeses in the future. Dielectric elastomer actuators (DEAs) can be used to vibrate soft cheeses, as soft actuators. The DEAs are attached to the soft cheese surface to apply vibrations, and an accelerometer is used to measure the responses of the cheese. The vibrational performance of DEAs for soft cheeses was investigated by comparing the measured acceleration responses, and the results indicated that they are capable of vibrating soft cheeses at frequencies of up to several kHz.