

凝固度合いの異なる豆腐の光散乱測定

鈴木 優作

三重県立津高等学校

要旨

豆腐は製造過程で様々な化学変化や構造変化が生じており、非破壊的な豆腐の製造工程の制御や品質評価が求められている。そこで散乱光を検出角に応じて測定する実験系の構築、および散乱特性の変化から異なる豆乳凝固過程における豆腐の品質の違いを検知出来るか検証することを本研究の目的とする。

本実験では、光源に波長 1070 nm の LED を、検出器にフォトダイオードを用いた。検出角は回転ステージで調節した。測定試料は豆乳および豆腐とし、豆腐の凝固温度は 40℃、60℃、80℃、検出角は -90° から 90° の 10° おきとした。

全試料で検出角の増加とともに散乱光強度は増大し、豆腐では豆乳よりも光の検出強度が小さくなった。この原因は、豆腐の微細構造による散乱と考えられ、散乱から豆腐の凝固過程を評価できる可能性が示された。また、凝固温度と光の検出強度の関係は検出角によって異なる傾向を示した。これは試料設置時の誤差や、豆腐の構造の不均一性が原因と考えられる。

重要語句：豆腐、凝固過程、光散乱、検出角

序論

日本を代表する伝統的な食品である豆腐の製造過程では様々な化学変化や物理的变化が生じており、豆乳の品質や凝固の条件で豆腐の硬さや保水性などの品質は大きく変動する。例えば、凝固剤濃度を変えて豆腐の物性値、保水率を測定すると、物性値が定常状態になる変曲点が存在し、さらに凝固剤濃度が上がると豆腐の硬さは漸増するが保水率が低下することが明らかとなっている⁽¹⁾。このように、豆乳の凝固過程は豆腐の品質に直接影響するため正確な制御が必要であり、同時に製品の品質評価法も求められるが、そのために現場で求められる非破壊的な手法は確立されていない。

豆乳の凝固過程では、主に豆乳中のタンパク質粒子と油滴球が凝集することで、カードと呼ばれる微細構造が形成される⁽²⁾。カードは豆乳以外にも、牛乳の凝固でも同様に形成される。牛乳の凝固を非破壊的に検知するための先行研究では、カゼインミセルや脂肪球の凝集により平均粒径が増加し光の散乱特性が変化する（散乱係数と呼ばれる光学定数が変化する）ことから、光散乱法が有用であることが報告されている⁽³⁾。一方、豆乳の凝固に光散乱法を応用した先行研究は少なく、特定の検出角のみで凝固過程をモニタリングした事例が報告されているのみである⁽⁴⁾。

そこで本研究では、光散乱の現象を豆乳の凝固に対して適用し、光学系を構築し凝固条件の異なる豆腐を識別できるかを検証することを目的とする。豆乳が凝固する際、散乱の特性が変わることは報告されているが⁽⁴⁾、具体的に散乱光の角度の分布については明らかとなっていない。そこで本研究では、散乱光強度の検出角依存性に着目し、実験 1：豆乳の凝固前後における光散乱特性の評価、実験 2：凝固温度の異なる豆腐の光散乱特性の評価を行った。

試料と方法

豆乳（名古屋製酪株式会社）に凝固剤（ $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ）58.1 mM を加え、異なる凝固温度（40℃、60℃、80℃）で 20 分加熱し凝固させた後、冷蔵庫（4℃）で 2 時間以上冷やしたものを用いた。測定時の試料の温度は室温（20℃）とした。試料体積は 10 mL とし、内径 18 mm の試験管内で調製した。

本実験の測定系の概略図を図 1 に示す。光源には波長 1070 nm、視野全角 30° の LED（ソーラボジャパン株式会社）を用い、光の強度の検出には IGA-SERIES フォトダイオード（エドモンド・オプティクス株式会社）を用いた。光源の電圧は 1.00 V とし、LED から光を 3 枚の集光レンズ（焦点距離 100 mm、250 mm、75 mm）を用いて試料（半径 R=1.3 cm）に入射し、検出角 θ でフォトダイオードで検出する。検出された光信号はオシロスコープで観測される。

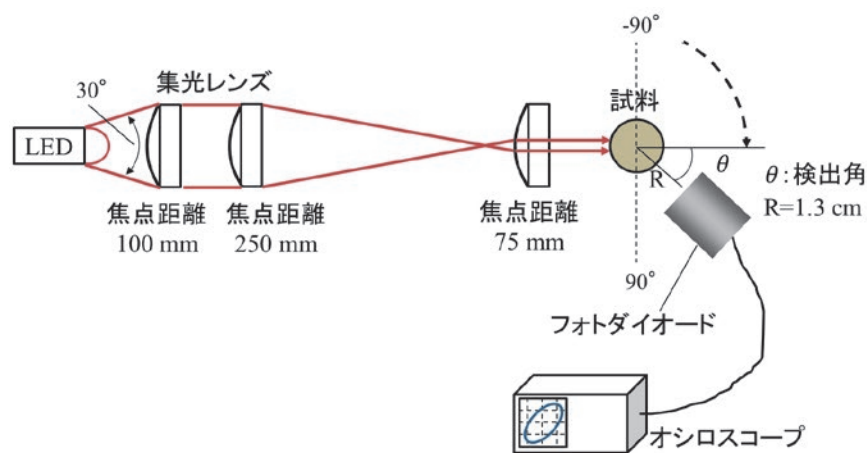


図 1. 実験系の模式図。

内容に関する連絡先：

近藤 直（京都大学大学院農学研究科）

kondonao@kais.kyoto-u.ac.jp

75 mm) で集光し、直径 6.6 mm の平行光にした。試料を回転ステージの中央に設置した後平行光を試料に入射させ、回転ステージに取り付けた検出器を、試料位置を中心として 10°ごとに -90°から 90°まで回転させ、各々の検出角についてフォトダイオードの電圧値から光の強度を測定した。データの取得にはオシロスコープを用いた。

なお、豆乳と豆腐（凝固温度 40℃）を比べたものを実験 1、豆腐（凝固温度 40℃、60℃、80℃）を比べたものを実験 2 とする。各実験では、豆乳の試料数は 1、豆腐試料数は 3 とした。

結果及び考察

実験 1：豆乳の凝固前後における光散乱特性の評価

実験結果を図 2 に示す。縦軸は検出角、横軸は電圧値を表し、光の強度が大きくなるにつれて電圧値は大きくなる。豆腐の測定結果のエラーバーは 3 つの測定値の標準偏差とした。図 2 より、検出角の絶対値が大きくなるにつれて電圧値は大きくなった。光の単散乱を観察する場合、0°の検出角において検出光強度が最大になるが、一方多重散乱の場合、検出角が小さいほど試料中を伝搬する光路長が長くなるため検出光強度が小さくなる⁽⁵⁾ため、本実験では光の多重散乱が観察されたと言える。また、すべての検出角において、豆腐のほうが豆乳よりも電圧値が小さくなった。光の減衰は吸収と散乱の足し合わせで表されるが、凝固の過程で化学成分自体は変化せず、吸収に劇的な変化はないと考えられるため、今回測定された光の減衰は主に凝固過程での散乱の増加に起因すると考えられる。凝固過程で散乱が増加することは、牛乳の凝固過程で光散乱測定をした先行研究でも報告されており⁽⁶⁾、牛乳の凝固により形成されるチーズのカードのサイズは豆腐のカードのサイズとほぼ同程度であることから⁽⁷⁾、豆乳の凝固においても構造のサイズの増加により散乱が増加したと考えられる。以上より、凝固前後では光の多重散乱という同一の現象が起こり、凝固することで散乱がより大きくなることが示唆された。

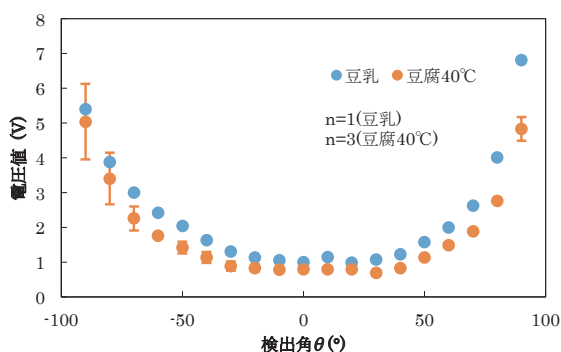


図 2. 豆乳と凝固温度 40℃の豆腐（豆腐 40℃）の散乱光の検出角特性。

実験 2：凝固温度の異なる豆腐の光散乱特性の評価

実験結果を図 3 に示す。図 3 では、検出角により凝固温度と電圧値の関係が異なる関係を示した。実験 1 では全ての検出角において凝固により電圧値は下がる傾向が示されたことから、凝固温度が上昇し、より強固なカード構造が作られると散乱が増加し電圧値が減少すると推測される。しかし今回の結果では、-90°～0°の検出角において、凝固温度が上昇し凝固程度が進むにつれて電圧値は増加した。一方、0°～90°の検出角では実験 1 から推測される傾向と同様の傾向が示され、-90°～0°とは真逆の結果を示した。これは、試料の固定法にばらつきがあっ

たため、あるいは凝固温度が上がった時の試料の構造が不均一になったためと考えられる。

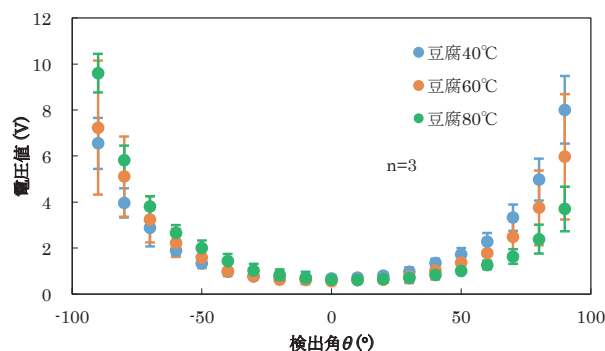


図 3. 凝固温度の異なる豆腐の測定結果。

結論

実験 1 では、豆乳と豆腐において散乱光の電圧値の検出角依存性を測定したところ、全ての検出角において豆腐の方が豆乳より散乱の影響が大きくなる結果が得られた。そのため、近赤外光の散乱現象から豆腐の凝固程度を評価できる可能性が示された。また実験 2 で、凝固温度の異なる豆腐と散乱の影響を検証したところ、検出角により散乱の現象は異なる傾向を示し、豆腐の品質の違いを検知する可能性は示されなかった。より精度の高い測定を実現するためには、試料の固定法のばらつきや試料の構造の不均一性を最小化する必要があると考えられる。

謝辞

受入研究室である京都大学大学院農学研究科生物センシング工学研究室の近藤直教授、小川雄一准教授、鈴木哲仁助教、また研究補助の担当をしてくださり、丁寧に優しく教えてくださった斎藤嘉人氏、高校生である自分とも話しをしてくださった研究室の皆様へ心から感謝申し上げます。

参考文献

- Onodera, Y., T. Ono, K. Nakasato & K. Toda. Homogeneity and microstructure of tofu depends on 11S/7S globulin ratio in soymilk and coagulant concentration. Food Science and Technology Research. 15: 265–274. (2009).
- Ono, T. The mechanism of curd formation from soybean milk to make a stable lipid food. Proc. of ISPUC-III, pp. 51–52. (2000).
- Castillo, M., F. A. Payne, C. L. Hicks, J. Laencina & M. B. Lopez. Effect of calcium and enzyme in cutting time prediction of coagulating goat's milk using a alight scattering sensor. International Dairy J. 12: 1019–1023. (2002).
- He, P., Z. Zhou & N. Wang. Development of A Novel Fiber Optic Sensor for On-line Monitoring of Soymilk Coagulation. Applied Mechanics and Materials. 52–54: 1703–1708. (2011).
- Nielsen, O. H. A., A. A. Subash, F. D. Nielsen, A. B. Dahl, J. L. Skytte, S. Anderssen-Engels & D. Khoptya. Spectral characterization of dairy products using photon time-of-flight spectroscopy. J. Near Infrared Spectroscopy. 21: 375–383. (2013).
- Glaser, J., P. A. Carrood & W. L. Dunkley. Electron Microscopic Studies of Casein Micelles and Curd Microstructure in Cottage

Cheese, J. Dairy Science. 63: 37–48. (1980).

7. 柴山充弘, 佐藤尚弘, 岩井俊昭, 木村康之. 光散乱法の基礎と応用. pp. 31, 110–118. 講談社, 東京. (2014).

Light Scattering Measurements of Tofu Made under Different Coagulation Conditions

YUSAKU SUZUKI

Mie Prefectural Tsu High School

Abstract

The tofu manufacturing process consists of various chemical and structural changes. However, there is currently no effective method for determining tofu quality in a non-destructive manner. The two objectives of this study were to develop a method to measure the angle and intensity of scattered light, and to test whether this system can distinguish tofu made under different coagulation conditions.

We used a light-emitting diode that emits 1070 nm wavelength light as the light source, and a photodiode was used as the detector in our measurement system. Soymilk and tofu made at different coagulation temperatures ranging from 40 to 80°C were measured at angles between -90° and 90° at 10° intervals. The intensity of light increased with increasing scattering angle for all samples. We also determined that tofu showed a lower light intensity than soymilk, which suggests that the microscopic structure of tofu increases light scattering. The relationship between scattering intensity and coagulation temperature was inconsistent, likely because of errors in inconsistent sample placement or structural non-uniformity in the samples.

Key words: Tofu, Coagulation process, Light scattering, Detection angle

Correspondence Researcher:

Kondo, N. (kondonao@kais.kyoto-u.ac.jp)

Graduate School of Agriculture, Kyoto University