

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：13101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20600

研究課題名（和文）3波長同時入射型のレーザー散乱光計測による豆腐の微細構造の「緻密さ」の推定

研究課題名（英文）Estimation of "Denseness" of Tofu Microstructure by Simultaneous Triple-Wavelength Laser Light Scattering Measurement

研究代表者

斎藤 嘉人 (Saito, Yoshito)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：90964990

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、豆腐の凝固状態を非破壊的に評価するため、3波長同時入射によるレーザー散乱測定法の検証を行った。近赤外透過スペクトルの測定から、凝固が進むほど散乱が増加し、短波長ほど散乱が大きくなることが明らかになった。また、構築した光学系の線形性評価の結果、波長633 nmのHe-Neレーザーが最も適している結果となった。

波長633 nmにおける等価散乱係数と豆腐の粘度には有意な相関が見られ、可視領域のレーザー散乱光測定により豆腐の凝固状態を非破壊的に評価できる可能性が示唆された。今後は、高精度な光散乱計測システムの確立に向けて、ノイズ除去や近赤外レーザーの利用等を検討していく予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界的な非肉食圏の人口増加を背景として大豆製品の需要は増しており、それら加工品である豆腐の消費拡大も見込まれている。同時に、消費者の食のニーズも多様化が進む中、製造者には高品質な製品の安定生産が求められている。豆腐に見られる多孔質状の微細構造は豆乳に凝固剤が添加され「凝固」が起きる過程で形成されるが、凝固の制御は職人の「経験と勘」に依存しているケースが多く、多い場合には数百～数千kgの製造ロスに繋がる。

本研究は、豆腐以外の食品や、ひいては細胞培養培地の特性評価など、食品から生命科学に至る幅広い分野に応用可能であり、「微細構造の非破壊推定センサ」としての技術展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated a laser scattering measurement method using simultaneous irradiation of three wavelengths to non-destructively evaluate the coagulation state of tofu. Measurements of near-infrared transmission spectra revealed that scattering increases as coagulation progresses, and scattering becomes more significant at shorter wavelengths. Furthermore, the results of the linearity evaluation of the constructed optical system showed that the 633 nm He-Ne laser was the most suitable.

A significant correlation was found between the reduced scattering coefficient at 633 nm and the viscosity of tofu, suggesting the possibility of non-destructively evaluating the coagulation state of tofu by measuring laser scattering light in the visible region. In the future, we plan to investigate noise removal and the use of near-infrared lasers to establish a high-precision light scattering measurement system.

研究分野：応用光学

キーワード：豆腐 光多重散乱 凝固 等価散乱係数 微細構造

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界的な非肉食圏の人口増加を背景として大豆製品の需要は増しており、それら加工品である豆腐の消費拡大も見込まれている。同時に、消費者の食のニーズも多様化が進む中、製造者には高品質な製品の安定生産が求められている。豆腐に見られる多孔質状の微細構造は豆乳に凝固剤が添加され「凝固」が起きる過程で形成されるが、凝固の制御は職人の“経験と勘”に依存しているケースが多い。凝固の失敗は、多い場合には数百～数千 kg の製造ロスに繋がることから、凝固中のフィードバック制御の実現に向けた簡便な微細構造の計測技術が切望されている。

迅速で簡便な非破壊品質測定には光学的技術が広く用いられており、豆腐の微細構造の情報を得るためには光の散乱が有効であることが知られている。特に豆乳や豆腐のように光が複数回散乱する「多重散乱」が生じる場合、“単一波長”の計測ではばらつきが大きい上、豆腐のように散乱が強い試料の計測は困難であるとされてきた。

2. 研究の目的

本研究では、光の多重散乱の原理のうち“散乱が短波長側ほど指数関数的に大きくなる”点に着目し[1]、曲線近似に最低限必要な“3波長”での散乱光測定の可能性を検証することを目的とした。申請者がこれまで蓄積してきた光学系構築[2]や微細構造の解析技術[3]に加え、近年発達の著しいレーザやカメラの光学技術を応用し、“3波長同時入射によるレーザ散乱測定”による豆腐の微細構造における緻密さの推定を検証した。

3. 研究の方法

(1) 3波長同時入射型の散乱光学系の構築

試料の光散乱の強さを表す等価散乱係数を3波長で同時に計測できる光学系の構築を行った。使用した波長は、405 nm、520 nm、635 nm の3波長であり、これら波長の可視光レーザを光源に用い、斜め入射式の散乱光測定系を構築した。検出には可視領域に感度を持つカラーカメラを用い、RGB の各チャンネルで観測される輝度値で各波長の散乱光の空間分布を検出できる光学系とした。光学系の妥当性評価には光散乱測定における標準品であるイントラリピッドを用い、線形性に基き評価した。

(2) 凝固状態の異なる豆腐の基礎的な光学特性の検証

本研究の最終的な到達目標である、3波長の光学特性に基づく凝固状態の異なる豆腐の品質評価の実現可能性を探るため、吸収と散乱の2つの特性で代表される光学特性の変化をスペクトルとして計測し検証した。可視領域に比べ比較的透過率の高い近赤外分光法を用い、凝固度合いの異なる豆腐を対象に透過測定を用いた光学特性の評価を行った。

(3) 凝固状態の異なる豆腐の光学特性と微細構造の関連性評価

(1)で構築した光学系を用い、異なる凝固条件で調製した豆腐の散乱光測定を行った。従来の計画では3波長の散乱光に拡散理論式を適用し、光学係数である等価散乱係数の波長応答を算出する予定であったが、光源に採用した波長が633 nmとなったことから、波長633 nmにおける等価散乱係数と豆腐の物性との関連性評価に取り組んだ。また、豆腐試料の顕微鏡観察と画像解析により、微細構造の緻密さの定量的指標である空隙率、孔のサイズ、孔の数を実測した。

4. 研究成果

(1) 3波長同時入射型の散乱光学系の構築

光散乱測定における標準品であるイントラリピッドを用い、構築した光学系の線形性評価を行った結果、短波長側の405 nmと520 nmの2波長のレーザでは散乱の影響が大きく空間分解測定が難しいことが判明した。また、赤色の波長は高出力のHe-Neレーザ(633 nm)を組み込むことができたため、以後の測定では等価散乱係数を正確に測定できた633 nmの測定結果に絞って解析を進めることとした。

(2) 凝固状態の異なる豆腐の基礎的な光学特性の検証

凝固度合いの異なる豆腐の近赤外透過スペクトルの測定を行った結果、凝固温度や凝固時間が増加するほど豆腐の透過率は減少する結果が得られた。また、得られた吸光度から吸収と散乱の成分に切り分けるところ、散乱の増加が支配的であり、短波長ほど指数関数的に散乱が大きくなることが明らかとなった。

(3) 凝固状態の異なる豆腐の光学特性と微細構造の関連性評価

検証の結果、豆腐の凝固温度が増加するほど波長 633 nm における豆腐の等価散乱係数は増加する結果が得られた。図 1(左)に示すように凝固温度の増加に伴い微細構造中の平均空隙サイズは小さくなり、微細構造は緻密になる傾向が得られた。また、その時豆腐の粘度は単調増加していたことから、

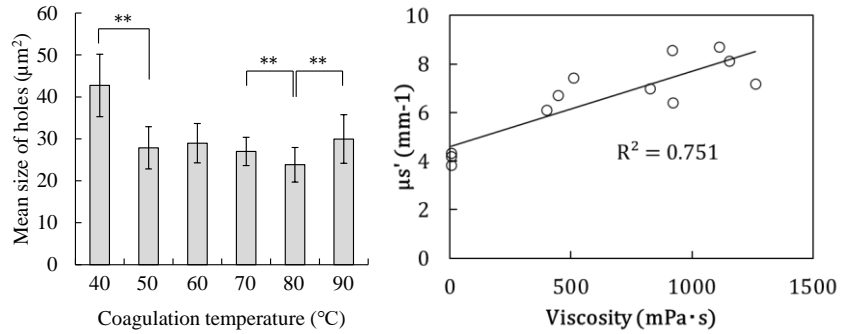


図 1 (左)凝固温度の異なる豆腐における微細構造中の平均空隙サイズ、(右)波長 633 nm の等価散乱係数と豆腐の粘度との相関

豆腐の粘度と波長 633 nm における相関プロットを作成した。その結果を図 1(右)に示す。図 1(右)に示したように、波長 633 nm における等価散乱係数と豆腐の粘度は有意な相関を示し、可視領域のレーザ散乱光測定により豆腐の凝固状態を非破壊的に測定できる可能性が示唆された。

今後は、散乱光画像から等価散乱係数を算出する際のノイズ除去や、長波長側の近赤外レーザの利用等を検討することで、より高精度に豆腐の物性を推定する光散乱計測システムの確立に取り組む予定である。

以上の一連の結果は、2022 年 12 月に開催された国際学会である The XX CIGR World Congress 2022 にて報告し、Young Scientist Award を受賞した。また、第 39 回近赤外フォーラム (2023 年 11 月、東京) におけるポスター発表で Best Poster Award を受賞した。さらに、「光の多重散乱応答に基づく豆腐の微細構造評価手法の開発」という題目にて 2023 年度 農業食料工学会 第 22 回研究奨励賞の受賞に至った。本研究は豆腐に限らず光の多重散乱を起こす様々な農作物や食品へ応用可能であり、食品・農作物の品質評価センサとしての応用が期待される。

<引用文献>

- ① O.H. Abildgaard, F. Kamran, A.B. Dahl, J.L. Skytte, F.D. Nielsen, C.L. Thomsen, P.E. Andersen, R. Larsen, J.R. Frisvad, Non-invasive assessment of dairy products using spatially resolved diffuse reflectance spectroscopy, *Applied Spectroscopy* 69 (2015) 1096-1105.
- ② Y. Saito, K. Konagaya, T. Suzuki, N. Kondo, Determination of optical coefficients of tofu using spatially resolved diffuse reflectance at 633 nm, *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 11 (2018) 38-42.
- ③ Y. Saito, W.-H. Chiang, N. Kondo, T. Suzuki, Quantitative Analysis of Tofu Microstructure with Different Coagulant Concentrations Based on Geometric Parameters and Haralick Texture Features, *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers* 83 (2021) 95-104.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 斎藤 嘉人、宮川 璃空、村井 匠、小畑 悠、板倉 健太、佐藤 翼	4. 巻 4
2. 論文標題 カラーおよび紫外励起蛍光画像を入力とした深層学習による大豆の外部欠陥判別	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 215～222
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/jsceiii.4.3_215	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yoshito SAITO, Riku MIYAKAWA, Takumi MURAI, Kenta ITAKURA	4. 巻 5(1)
2. 論文標題 Classification of external defects on soybean seeds using multi-input convolutional neural networks with color and UV-induced fluorescence images input	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Intelligence, Informatics and Infrastructure	6. 最初と最後の頁 135-140
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yoshito Saito, Tetsuhito Suzuki, Naoshi Kondo
2. 発表標題 Evaluation of optical properties of tofu samples based on multiple scattering using near-infrared transmission spectroscopy
3. 学会等名 The XX CIGR World Congress 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤嘉人
2. 発表標題 可視から近赤外の光多重散乱応答に基づく豆腐の凝固特性評価
3. 学会等名 第39回近赤外フォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤嘉人
2. 発表標題 光の散乱および蛍光を活用した大豆から豆腐加工における光センシング
3. 学会等名 令和5年度 農業・工業原材料生産と光技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshito Saito
2. 発表標題 Non-destructive optical sensing techniques of agricultural products and foods for advanced precision agriculture
3. 学会等名 KAAB International Symposium 2024（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 齋藤嘉人, 大竹憲邦, 長谷川英夫
2. 発表標題 自家蛍光特性に基づく大豆の品種間差の評価
3. 学会等名 農業環境工学関連学会2023年合同大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 松川真吾	4. 発行年 2023年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 306
3. 書名 食品ハイドロコロイドの最新動向	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 豆含有イソフラボン量の推定方法、及び豆含有イソフラボン量推定装置	発明者 齋藤嘉人	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-140758	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------