

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K02320

研究課題名（和文）誘電分光法を用いたパン生地の非破壊品質モニタリングシステムの開発

研究課題名（英文）Development of a non-destructive quality monitoring system for bread dough using dielectric spectroscopy

研究代表者

上野 茂昭（Ueno, Shigeaki）

埼玉大学・教育学部・准教授

研究者番号：80410223

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：パン生地に誘電特性測定および数値解析を適用した。水分子、デンプン分子および水分子-タンパク質分子間など分子間相互作用は特定周波数で緩和としてモニタリング可能であり、それは水和構造に起因する水分子の束縛状態を反映したものと推察された。また、誘電特性測定と力学特性測定で得られたパラメーター間において、いくつかの組み合わせにおいて高い相関が認められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

誘電特性測定によってパン生地の品質を評価することができる予想され、経験からくる主観的な評価方法に頼ることのない、誰でも扱える簡便なパン生地の品質評価方法の開発に繋がる基礎的な知見が得られた。本研究では高価なネットワークアナライザを用いた。周波数を限定するとともに、同軸ケーブルを含めた測定系を改良することにより、パン生地の製造現場で簡便かつ汎用的に使用可能となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Dielectric property measurements and numerical analysis were applied to bread dough. Intermolecular interactions such as those between water molecules and starch molecules and between water molecules and protein molecules could be monitored as relaxations at specific frequencies, reflecting the bound state of water molecules due to the hydration structure. In addition, high correlations were observed between the parameters obtained from dielectric and mechanical property measurements in several combinations.

研究分野：食品工学

キーワード：パン生地 誘電特性 力学特性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

小麦粉は 150 μm 以下の粒子であり、小麦デンプンの粒径分布は 2~40 μm で、15~40 μm の凸レンズ状の大粒子と、2~10 μm の球状の小粒子に分かれ、中間の大きさの粒子が存在しない。

小麦デンプンはアミロースとアミロペクチンからなり、両者の比率は 1:3 である。小麦のタンパク質は、水で捏ねた時、独特の粘弾性を示すグルテンを形成する。このグルテンの性質は、粉に水を加えて初めて出てくる。そのため、小麦では粒で食べるより、製粉したほうが小麦粉の特性を生かして、パン、麺、菓子などに加工することができる。

小麦タンパク質はグリアジンとグルテニンが主で、アルブミン、グロブリンは両方で 1% 程度と少ない。グリアジンとグルテニンは、ほぼ 1:1 の割合で存在し、水を加えて捏ねると特有な粘弾性を持つ複合体グルテンになる。グルテンは小麦粉に水を加えると、胚乳細胞中でタンパク質が水和、膨潤し、微細な繊維状となる。その時、構成成分の脂質が分散しタンパク質と複合体を形成する。それによりタンパク質の溶解性が低下し、繊維が合一して凝集体を作る傾向が促進される。この凝集体がグルテンで生地(ドウ)になる。グルテンにおいてグリアジンは柔らかく粘性、展延性を付与し、グルテニンは弾性に関与し、グルテンの機能特性はグルテニンによるところが大きい。

製パン工程は、ミキシング、発酵、仕上げ、最終発酵、焼成に大別され、各工程における品質は、小麦粉、酵母、食塩、水などの材料、ミキシング条件、温湿度等、多岐にわたる要素の影響を受ける。そのため、安定した生地に仕上げるためには、ミキシング工程におけるリアルタイム品質評価が必須である。しかし実際には材料の配合割合やミキシング条件をもとに製造し、熟練職人が手でパン生地を触り、軟らかさなどを感覚的に直接評価する方法、またはミキシング音で品質を判断するなど、熟練職人の経験に依存する部分が多い。

パン生地はデンプン、グルテンネットワークに水分子が水和し、酵母や塩が分散した構造が特徴的であり、また成分同士が相互作用をしている。そのため、パン生地の品質を評価するためには、X線回折法によるデンプンの結晶構造解析、核磁気共鳴画像法による水分子の分布解析、蛍光顕微鏡によるグルテンネットワークの観察など、高額装置の複数使用が不可欠であり、観察や解析に多くの時間を要する。

パン生地の状態の評価は焼成後のパンの品質に直結するため必要不可欠であるが、現在パン生地の品質評価は、生地表面の様子や生地をつまんだときの伸び具合、べたつきなど視覚的または触覚的感覚に基づいて判断している。これらの感覚的な評価法は、熟練の技術や長年の経験を要することから、職人と呼ばれる人材が必要になる。そこで、誰でも扱うことができ、パン生地に負荷をかけることなく評価する方法の開発が求められる。

2. 研究の目的

誘電緩和測定は高分子-水分子系および生体組織中の水分子の回転運動や水和量を知ることができる手法である。本研究では誘電緩和測定によって得られたパラメーターと力学特性測定によって得られたパラメーターを比較することで、パン生地の非破壊評価法の開発を目的とした。

具体的には、本研究ではパン生地における分子間相互作用を定量的に明らかにするためにベクトルネットワークアナライザを用いて、パン生地中の水分子の回転運動特性(誘電率、回転緩和時間、緩和強度)を測定する。ここでパン生地はデンプン、タンパク質および塩化ナトリウムを含む複合系であるため、それぞれの成分情報についても得る必要がある。さらに、パン生地内部構造の電子顕微鏡観察を行うことにより、内部構造変化を定量定性的に評価する手法を開発する。

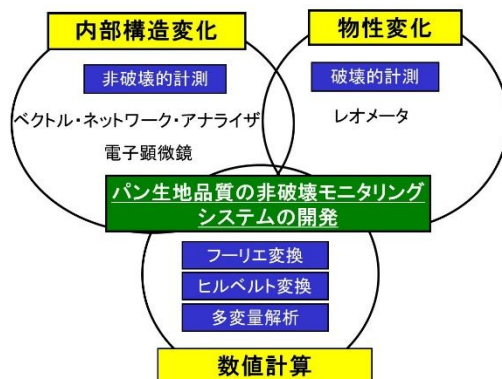


図1 研究概要

3. 研究の方法

試料調製

含水率を変化させたパン生地として、強力粉 250 g、塩 5 g に蒸留水を 140 g, 150 g, 160 g, 170 g (標準試料), 180 g の 5 条件の配合割合でミキサー (KENMIX Chef PRO KPL9000S, 株式会社 愛工舎製作所) を用いて 16.5 分間混捏して、パン生地試料を調製した。

他方、ミキシング時間を変化させたパン生地試料として、強力粉 250 g、塩 5 g、蒸留水 170 g をミキシング時間 2 分 (ピックアップ段階, P), 9 分 (クリーンアップ段階, C), 16.5 分 (ファイナル段階, F: 標準試料), 27 分 (オーバー段階, O) の 4 条件でミキシングを行い、パン生地試料を調製した (図 2)。

強力粉は日清製粉製、塩は日本塩事業センター製をそれぞれ用いた。パン生地は本来パン酵母 (ドライイースト) を含む。パン酵母は二酸化炭素を発生し、それがデンプンとグルテンタンパク質が作る基構造に拘束され、焼成時に膨張・脱離することにより、パン特有のやわらかさ、多孔質構造を形成する。本来であればパン調製に不可欠な原料であるものの、本研究ではパン生地中におけるデンプン分子、タンパク質分子および水分子間における分子間相互作用の解明を主としたため、パン酵母は添加しなかった。

パン生地の調製は、温度制御可能なチャンパー内で行い、また蒸留水も予め低温で保存し、ミキシング段階においてパン生地の温度の上昇を最小限となるようにした。

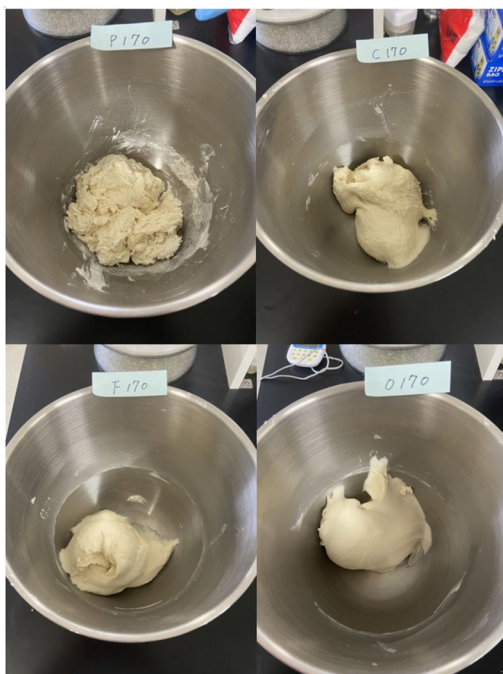


図 2 異なるミキシング時間で調製したパン生地

誘電特性計測

誘電特性は温度に敏感である。そのため試料調製後のパン生地は直ちに誘電特性計測に用いた。

誘電特性計測にはプローブ (図 3)、同軸ケーブル (0 シリーズマイクロ波・ミリ波同軸ケーブル精密計測用位相タイプ, 潤工社) およびネットワークアナライザ (ベクトルネットワークアナライザ P9374A, キーサイト社) で構成される実験系の温度制御が可能なチャンパー内に構築した。

ネットワークアナライザは、空気、水、エチレングリコールを用い、Debye 型または Cole-Cole 型で誘電特性を計算して校正を行った。続いて周波数 100 MHz ~ 20 GHz におけるパン生地試料の誘電率を測定した。測定点数は 400 点、各測定点における測定回数は 16 回とした。データ取得には、Keysight Materials Measurement Suite 2018 を用いた。その後、得られた測定値の周波数依存性に対してフーリエ変換、ヒルベルト変換などを適用することにより緩和時間、緩和強度を求めた。

なお測定中は熱電対およびデータロガ (GRAPHTEC, midi LOGGER GL240) を用いて試料温度を測定するとともに、試料温度にあわせて都度校正をやり直した。



図 3 誘電特性計測プローブ

力学特性

パン生地の力学特性を定量的に明らかにするために、パン生地試料の引張り試験を行い、最大応力、総エネルギーなどの10項目を測定した。

具体的には、クリープ粘弾性測定装置(RHEONER CREEP METER RE2-3305B, YAMADEN)を用いて、パン生地を均等に広げた引張試験用の治具を装着し、ロードセル20N、測定速度60mm/minおよび測定点数3000点にて、粘弾性測定を行った(クリープ粘弾性解析 Windows, YAMADEN)。

得られた粘弾性測定値から、パン生地の引張試験における緩和時間、緩和強度などを算出した。粘弾性測定は時間を要するものの、1時間程度では力学特性が変化しないことを予め確認した。また試料は測定に供するまでは密封袋内に保存し、含水率が変化しないようにした。誘電特性を測定後、同一試料について力学特性計測を行った。



図4 パン生地の引張試験

4. 研究成果

実験系の確度を確認するために純水の誘電スペクトルを得たところ、周波数 10^{10} Hz 以上で緩和現象が確認できた(図5)。

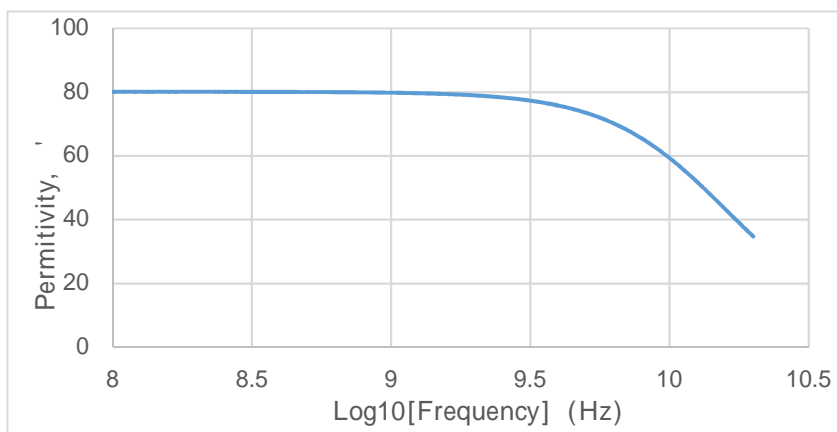


図5 純水の実部の誘電スペクトル

続いてパン生地の誘電スペクトルの解析結果から、いずれの含水量のパン生地試料でも本研究で用いた高周波領域において、異なる2つの周波数帯で緩和がみられた(図6)。これらの2つの緩和のうち高周波側の緩和を ϵ_1 、低周波数側の緩和を ϵ_2 とする。

既往の研究によるとタンパク質の分散は $10^5 \sim 10^7$ Hz で起こり、一方水和していない水(自由水)の分散は 10^{10} Hz 以上で起こると述べている。また、トレハロースと β -ポリリジンの混合溶液の誘電特性解析においては、防腐剤により近い水分子は相互作用が強くなり、緩和時間が長くなることが報告されている。

周波数が10GHz以上にある緩和は自由水の緩和、5GHz~7.5GHzにある緩和はタンパク質やデンプンなどの高分子物質と協働する結合水による緩和だと考えられた。本研究のパン生地試料について緩和時間の全ての項目において ϵ_1 に対して ϵ_2 の値のほうが大きくなっていることから、緩和強度 ϵ_1 は高分子に拘束されていない自由水量、緩和強度 ϵ_2 はデンプン分子やタンパク質分子に拘束されている結合水量を表していると考えられた。

全緩和時間における緩和強度の総和において、含水量 180 g のパン生地試料で最大値を、含水量 140 g のパン生地試料最小値を示した。このように含水量の変化に伴う誘電特性の変化では、含水量が増加するに伴いそれぞれの値も増加していくことが分かった。

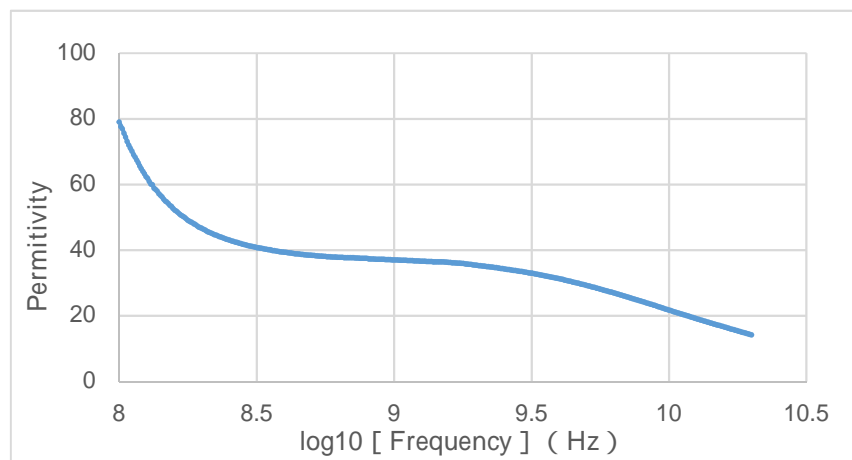


図 6 パン生地試料の実部の誘電スペクトル

力学的緩和について、緩和とは変化しているものが平衡状態に戻ることを指す。本研究におけるパン生地の引張試験において、引張りを開始してから 20 秒経過した引張り終了時点 を始点として応力が平衡状態 に戻るまでの時間を緩和時間、 時点の応力から 時点の応力を減算した値を緩和強度としている。緩和強度について、含水量を変化させたパン生地試料では、含水量が増加するのに伴い、緩和強度は減少していく傾向が見られた。また、ミキシング段階ファイナルでは含水率の増加に従って緩和強度は減少し、高含水率では緩和時間ごとの緩和強度の差はなくなっていった。同様の傾向がすべてのミキシング条件でみられた。

ミキシング時間を変化させたパン生地試料の力学特性は低含水率では変化は見られなかったが、高含水率ではミキシング時間が増加するのに伴い緩和強度が増加していく傾向が認められた。

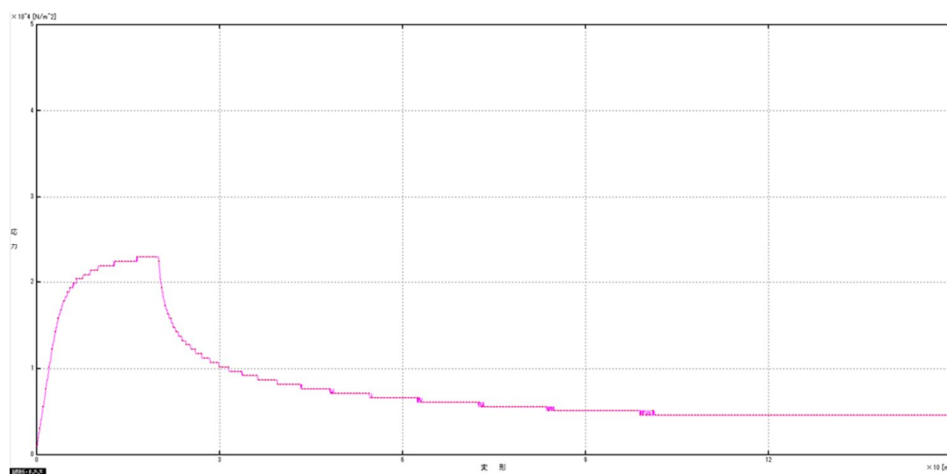


図 7 パン生地試料の粘弾性測定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Liu Hsiuming, Ueno Shigeaki, Araki Tetsuya	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of high-hydrostatic-pressure processing on catechin content in green tea leaves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08957959.2023.2195110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 上野茂昭, 長田仁花, 猪籠夏子, 島田玲子	4. 巻 1141
2. 論文標題 鶏胸肉の抗疲労成分に及ぼすの調理・加工の効果	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 冷凍	6. 最初と最後の頁 68-71
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakil Md. Arif, Mukae Kyosuke, Funada Ryo, Kotake Toshihisa, Ueno Shigeaki, Aktar Most Mohoshena, Roni Md. Shyduzzaman, Inoue-Aono Yuko, Moriyasu Yuji	4. 巻 11
2. 論文標題 Amino Acids Supplied through the Autophagy/Endocytosis Pathway Promote Starch Synthesis in Physcomitrella Protonemal Cells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plants	6. 最初と最後の頁 2157~2157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/plants11162157	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 該当する
1. 著者名 上野茂昭, 島田玲子	4. 巻 96
2. 論文標題 余剰・規格外農産物の再資源化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 冷凍	6. 最初と最後の頁 506-509
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 島田玲子・正岡亜紀・上野茂昭	4. 巻 1
2. 論文標題 米飯の力学物性測定手法の適用性 第2報	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 埼玉大学紀要教育学部	6. 最初と最後の頁 1-12
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 上野茂昭
2. 発表標題 健康で安全な食を目指した新規食品加工法・検査方法の開発
3. 学会等名 広域科学教育学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigeaki Ueno, Risa Kishino, Yuka Oshikiri, Yuki Kawaguchi, Hsiuming Liu, Reiko Shimada
2. 発表標題 Effects of high hydrostatic pressure on functional and taste compounds in soybean
3. 学会等名 High pressure bioscience and biotechnology 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigeaki Ueno
2. 発表標題 Effects of high hydrostatic pressure on the distribution of oligosaccharides, pinitol, and soysapapogenol A in soybean
3. 学会等名 University of Strasbourg, Faculty of Pharmacy, IPHC, CNRS, Analytical Chemistry of Bioactive Molecules and Pharmacognosy (CAMBAP) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigeaki Ueno
2. 発表標題 Improving food processing by high hydrostatic pressure on vegetables and beans
3. 学会等名 University of Strasbourg, Faculty of Pharmacy, IPHC, CNRS, Analytical Chemistry of Bioactive Molecules and Pharmacognosy (CAMBAP) seminar 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 上野茂昭 (山野 善正監修)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 408
3. 書名 おいしさの見える化マニュアル	

〔産業財産権〕

〔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			
フランス	ストラスブール大学			
その他の国・地域	台湾海洋大			