

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K05472

研究課題名(和文) 食材の調理状態を非破壊的かつ経時的に三次元分析し可視化するフードスキャナ

研究課題名(英文) Food scanner for non-destructive and temporal three-dimensional analysis and visualization of food preparation conditions

研究代表者

高橋 亮 (TAKAHASHI, Rheo)

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号：30375563

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、食品成分を非破壊的に三次元分析するフードスキャナの原理を構築することであった。既存の食品用非破壊分析法としてはX線～赤外線までのさまざまな波長の電磁波を用いる方法や電磁気を用いる方法、またX線コンピュータ断層撮影法や核磁気共鳴画像法などが知られていた。本研究ではこれらに替わる完全非破壊分析法として近赤外コンピュータ断層撮影法の原理の確立をめざし、実際に小麦乾麺などについて実際に分析を実施し、提案した分析法が有効であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

NIR光CTは食品に限らず生体全般に適用可能と考えられ、例えば標識物質を用いずに癌細胞を検出する技術などへの応用が可能で、学術的にも実用的にも極めて重要な基幹技術として期待できる。食品中の成分や状態の分布を非破壊計測することができれば、食の安全・安心を評価する分析機器として活用できるほか、食品の生産・流通・加工・保存・調理・摂食のあらゆるシーンで科学的な活用が可能となる。本研究が開発する食品分析装置は量産化されればX線CTやMRIと比べ1/10～1/100の製造コストで製作可能であり、食品加工業をはじめとして幅広い分野での利用が期待される。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is try to build a new nondestructive analyzer for food nutrition, that is, the 3D food scanner. Typical nondestructive testing method of food evaluation are using ultrasound, near infrared spectroscopy, mid-infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, hyperspectral imaging systems, magnetic resonance imaging, electronic nose, z-nose, biosensors, microwave absorption, and nanoparticles and colloids as sensors. On the other hand, our food scanner is a nondestructive analyzer based on the principle of optical computed tomography. In this study, we demonstrated the 3D distribution of moisture for a wheat rehydratable noodle (Udon).

研究分野：食品科学

キーワード：食品分析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

食品内部の成分または状態の分布を非破壊分析可能な手法には、X線~赤外線までのさまざまな波長の電磁波を用いる方法や電磁気を用いる方法などがあり、種々の農産物の品質検査に利用されている<sup>1)</sup>。なかでもX線コンピュータ断層撮影法(Computed Tomography; X線CT)と核磁気共鳴画像法(nuclear Magnetic Resonance Imaging; MRI)は、それぞれ農産物中の異物(X線CT)や水分分布(MRI)を完全に非破壊で検出および分析できる手法として大きく期待されている。

しかし、X線CTは食品成分分布の分析ができず、またMRIは空間分解能や測定成分項目を増やすと膨大な時間を要するという欠点がある。食品の非破壊分析で求められている、切断などの前処理が不要、多成分に対応、高分解能、および迅速分析の要求を満たすためには、既存の分析手法に替わる新たな分析技術の開発が必須である。

### 2. 研究の目的

本研究では、食品の非破壊分析技術として各国で盛んに研究されているX線CT法やMRI法ではなく、線源に近赤外(NIR)光を用いたコンピュータ断層撮影法(NIR光CT)を新たに開発することを目的とした。NIR光CTは、断層イメージ取得時間が短いというX線CTの長所と、食品成分の選択性と定量性に優れるNIR分光の長所を同時に備える分析方法で、近年著者が開発を進めている新しい分析法である。この分析法を開発するうえでの最大の障害は、NIR光線が食品中で屈折および散乱されるために大きな検体の分析が極めて困難なことである。しかし、NIR光CTは食品に限らず生体全般に適用可能と考えられ、例えば標識物質を用いずに癌細胞を検出する技術などへの応用が可能で、学術的にも実用的にも極めて重要な基幹技術となり得る。

食品中の成分や状態の分布を非破壊計測することができれば、食の安全・安心を評価する分析機器として活用できるほか、食品の生産・流通・加工・保存・調理・摂食のあらゆるシーンで科学的な活用が可能となる。本研究では、著者がこれまで開発してきた光計測技術および食品物性研究の成果を応用し、NIRヘテロダイン干渉法およびNIR光CTを融合することにより、既存の食品分析手法や食品分析装置では困難だった食品の成分を空間的に分析し断層マップとして取得する手法と装置を構築することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1)装置の試作

##### CT光学系の製作

CT装置の重要な基本原理は、検体のある断面において多方向から投影した電磁波の強度分布を用いて、内部のCT値を計測することである。その際の走査方法は、大別して平行ビーム走査とファインビーム走査の二種類がある。X線CTでは、基本的に忠実な投影データが得られるが走査に時間のかかる平行ビーム走査法ではなく、断層画像の再構成に困難が伴うものの走査時間が圧倒的に短いファインビーム走査法が主流である。しかし光CTで断層画像を再構築する際に、従来のX線CTアルゴリズムを利用するためには、検体を透過した光の直進(透過)成分のみを扱わなくてはならない。光の多くは検体中で屈折して曲げられるか散乱してしまうため直進成分はごくわずかであり、光CTでは平行ビーム走査法が圧倒的に有利である。本研究では、直進光の中の透過成分のみを検出する方法として光ヘテロダイン干渉法(後述)の採用を前提として光学系を構築した。製作には光学音響変調器(ISOMET OAM1977-T80-2)、ミラーホルダ(Photonprobe SK-LMMH-15B)および消耗品として調達した光学部品群を用いた。また光路の確認のためIRCMOSカメラ(Electro Optic Countour-IR Digital IR CMOS camera)を用いた。なお調達を予定していた光源(SLD)ではヘテロダイン検波が困難であることが知れたため、半導体レーザーに置き換えた。X線CTでは線源と受光部が検体のまわりを回転する方法がとられるが、本研究ではそれらを固定し、X-Y-Zの三軸ステージ上に置いた検体を移動させる方法をとった。こうすることにより装置全体を小型化することができ、またビームのずれを最小限に抑えることができるためである。

##### ヘテロダイン検波部の製作

後述する解析アルゴリズムでCT画像を得るためには、検体を透過した光の直進成分のみを扱う必要がある。可視~近赤外光はX線と異なり検体中で大きく屈折して曲げられるため、直進光はごくわずかである。また直進光には透過光のほかに散乱光も含まれるため、直進光の中から透過光のみを選択的に取り出す必要がある。本研究では透過光の選択的検出の方法として光ヘテロダイン検波法を採用した。ヘテロダイン検波部は株式会社フォトンプローブと共同で開発した。そのため利用を予定していた周波数シフタ(Photon Probe FS2)は部品単位で調達し、本研究での利用に適した特別仕様のもを製作した。このようにして試作された装置で正しくヘテロダイン検波を行うことができることを確認するため、光路上に置いた水浴に砂糖水を滴下し

たときの干渉光の強度変化を観察した(図1)。横軸は時間(フルスケールで32秒)、また縦軸は相対的な屈折率の変位の逆数を表している。砂糖水の滴下後に屈折率の変位の逆数が大きく減少、すなわち、水浴中の屈折率が増加し、後に水浴内の砂糖の濃度が均一になることにより再び屈折率が安定した。この結果から、検波部も含む、試作した光学系が正しく機能していることが確認され、また食品内の屈折率の分布を分析し得ることがわかった。



図1 ヘテロダイン検波光学系で砂糖水の濃度の変化をさせた時の屈折率の変化

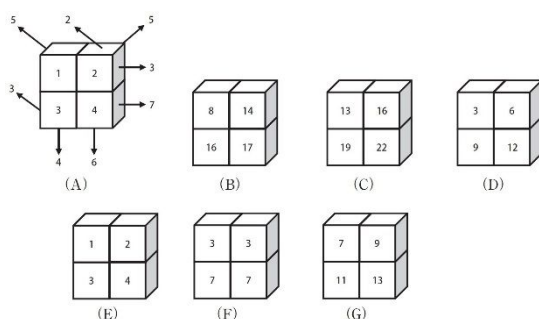


図2 単純逆投影法の原理

### 解析

CT 像の再構成を行う手法としては、単純逆投影法が最も容易である。単純逆投影法は、各方向から投影され得られる透過光強度を逆投影することにより原画像を再現する方法である。平行ビーム走査法において、入射光強度を  $I_0$ 、透過光強度を  $I$ 、ボクセルの一辺の長さを  $t$ 、また線減弱係数を  $m$  とすると、透過光強度は

$$I = I_0 \exp(-m_i \times t) \quad (1)$$

で表され、両辺の対数をとることにより

$$\log(I_0/I) = t \cdot m_i \quad (2)$$

が得られる。ここで図2(A)のように4つのボクセルがあるものとし、それぞれ1、2、3、および4のように分析対象物質の密度が異なるものと仮定する。このとき水平方向で得られた値3および7を逆投影すると(B)が得られ、さらに垂直方向の4および6を逆投影し(B)に重ねあわせると(C)が得られる。同様に左斜め方向(D)と右斜め方向(E)の結果も重ねあわせ、総画素数の10を差し引いた後に(F)、各ボクセルの最大公約数の3で除することにより原画像(G)が再現できる。ただし単純逆投影法で再構成した画像では周辺部にボケが発生することがあり、本研究では状況に応じフィルタ補正逆投影法<sup>2)</sup>を採用した。

### テレセントリック光学系

上述のヘテロダイン検波回路では、検体が大きく透過光強度が非常に微弱な場合の分析に非常に有効である。しかし、検体が小さいなど透過光強度が十分に高ければ、二次元カメラを用いた迅速分析が可能である。本研究では、照射ビームを平行ワイドビームとするテレセントリック光学系を試作した。テレセントリック光学系におけるテレセントリック配置とは、絞りの位置をレンズの焦点位置とするものであり、平行ビームのみを取り出すことができるため、光の散乱や

迷光の影響を受けない利点がある。

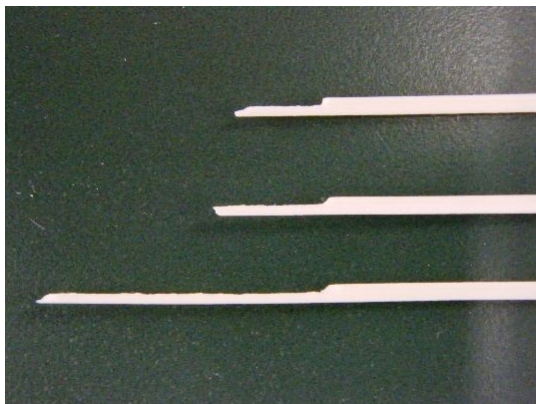


図3 クラック麺の写真

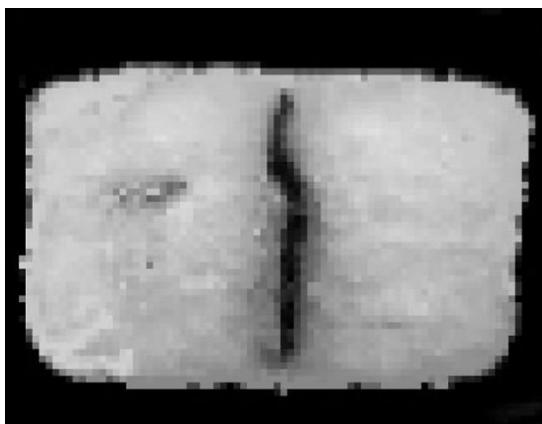


図4 クラック麺の麺割れ前のCT像

#### 4. 研究成果

試作したヘテロダイン検波 CT 光学系を用い、乾麺の水分分布を評価した。光源は半導体レーザーを用い、ボクセルサイズは  $20 \mu\text{m}$  とした。検体の乾麺は、星野物産株式会社より提供されたものを用いた。この検体はクラック麺と呼ばれる特殊な麺で、製造工程で不適切な条件で乾燥を行い製造され、麺割れを起こす特徴がある（図3）。麺割れの原因は麺の中心部の乾燥が不十分なためであることが既知である。このクラック麺の CT 像は中心部に水分の多い明瞭な領域が観察され、試作した光学系で水分分布の CT 像が得られることが確認された（図4）。同様にテレセントリック光学系においても CT 像が得られるかどうかは興味を持たれたが、データの取り込み回路と CT 像の再構成プロトコルとの連携がうまくいかず、これまでに成功していない。ただし、図5に示すように、直径約  $0.1\text{mm}$  の毛髪を包埋した幅約  $1\text{mm}$  の乾麺の二次元透過像には明瞭に毛髪の存在が確認され、ヘテロダイン光学系よりも高解像度の CT 像を得られる可能性があることが確認された。

本研究では、ヘテロダイン検波光 CT 光学系により、食品中の水分分布の非破壊 CT 像が取得可能なことが確認された。CT 像から水分値を算出する方法が未確立のため研究は未だ発展途上の段階にあることは否めないが、この難問は NIR 分光による食品の成分分析そのものがケモメトリクスの手法の上に成立しており、食品ごとに適切な解析条件を与えなくてはならないという問題と同質のものである。逆にこの問題を解決することにより、複数の食品成分の分布と成分値を瞬時に分析することが可能になると考えられる。また(1) で検証した相対的な屈折率の変化を分析できることを利用することにより、栄養成分以外の情報を取得できる可能性がある。これらの目的の達成のために研究を続けている。

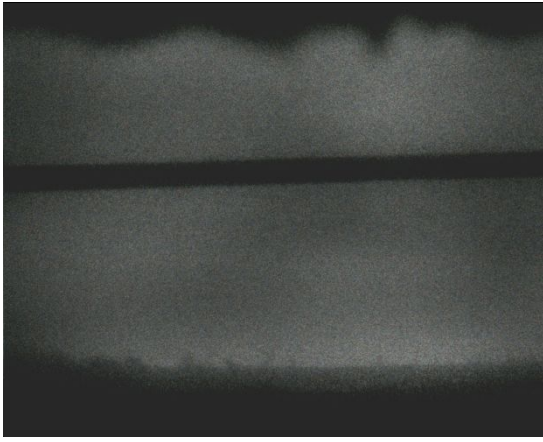


図5 テレセントリック光学系による毛髪を包埋した乾麺の透過光像

<引用文献>

「食品の非破壊計測ハンドブック」河野澄夫編、サイエンティックフォーラム、2003

「標準 X 線 CT 画像計測」日本放射線技術協会監修、オーム社、2009

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 平島円、高橋亮、西成勝好	4. 巻 52
2. 論文標題 コーンスターチゲルの力学特性に及ぼすショ糖添加の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本調理科学会誌	6. 最初と最後の頁 231 - 239
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 高橋亮	4. 巻 54
2. 論文標題 食品の栄養成分の3次元情報を非破壊計測するフードスキャナーの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 食品と開発	6. 最初と最後の頁 1-3
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2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋 亮
2. 発表標題 コンニャクの科学
3. 学会等名 高分子学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平島 円 / 山本 ちひろ / 高橋 亮 / 磯部 由香 / 西成 勝好
2. 発表標題 高pHでのジャガイモ澱粉の糊化と糊液の特性
3. 学会等名 日本調理科学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究で得られた重要な成果の論文または学会などでの発表は、特許権の取得後におこなう。

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
研究分担者	平島 円  (HIRASHIMA Madoka)  (80390003)	三重大学・教育学部・教授    (14101)	

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
---------	---------