

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K15628

研究課題名（和文）サブテラヘルツ波を用いた食品中異物検査技術の創出

研究課題名（英文）Development of Inspection Technology for Foreign Materials in Food Using Sub-Terahertz Waves

研究代表者

鈴木 哲仁（Suzuki, Tetsuhito）

三重大学・生物資源学研究所・准教授

研究者番号：00723115

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）：サブテラヘルツ波（ミリ波）とそのデバイスの特徴を活かし、粉末食品のベルト搬送系および光源とラインセンサによる撮像系を組み合わせたライン検査システムを構築し、パセリ中の低密度異物における検出能の評価を行った。100 GHz（波長3 mm）の光源を用いた透過撮像系へベルト搬送と均し機構により均平に食品供給したことにより背景ノイズを抑えた撮像を実現し、異物部に円形の回折模様を認めることができた。異物部の画像変化の定量的評価により2mm以上のサイズの異物を有意に検出できることを示した他、ニューラルネットワーク解析を用いてロバストな異物判定モデルを構築し、正解率85%が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

特に農産物由来の食品に対し、虫、プラスチック片などの異物が混入したニュースは後を絶たず、企業の損失回避ならびに食の安心・安全の向上のため、新しい異物検出技術が求められている。本研究は、従来は検出が難しかった低密度の異物を対象にしてライン検査により自動で混入異物を判定できるシステム構築を目指したものであり、従来は人の目で多大な労力と時間をかけてきた検査作業を軽減することに貢献できるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：A line inspection system combining a belt conveying system for powdered food, a light source and an imaging system with a line sensor was constructed using sub-THz waves (millimeter-wave) and the features of the device, and the detection performance of low-density foreign material in parsley was evaluated. Foods were fed evenly to the transmission imaging system using a 100 GHz (3-mm wavelength) light source through a belt conveyor and leveling mechanism, which enabled imaging with minimal background noise and a circular diffraction pattern was observed on the foreign material. Quantitative evaluation of the image change of the foreign object showed that foreign objects larger than 2 mm could be detected significantly, and a robust foreign object judgement model was constructed using neural network analysis, which resulted in a correct judgement rate of 85%.

研究分野：農業情報工学

キーワード：異物検査 サブテラヘルツ波 ミリ波 透過強度分布 粉末食品 回折模様

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

食品に虫、プラスチック片、金属片、ビニール片など様々な異物が混入していたというニュースが昨今相次いでおり、食品の安全性に関する関心が一段と高まっている。食品の異物混入に関する相談は2009～2014年以降累積で16,094件にも上り、「異物によって歯が欠けた」などの危害情報は3,191件となっている。このように食品に混入した異物は、消費者に不快感のみならず危害を与えることもあり、生産者にとってもリコールで莫大な費用が生じるため重大な問題となっている。現在用いられる検査法にはX線透過画像法や金属探知機があり、金属や石などの異物を事前に検出するのに役立つられているものの、原理的にプラスチック片、虫、毛髪などの低密度の異物では食品とのコントラストがつかず検出が難しい。特にパセリなどのような農産物は天然物として外の異物が混入するリスクが高く需要が高いものの、製造現場では作業員が労力のかかる作業を長時間続けて異物検査を行っているのが現状である。他にも既往研究として、食品に対して比較的透過性が高いとされている近赤外光を用い、例えばチョコレート中の毛髪等の異物を検出する研究も行われている。しかし小麦粉やパセリのように粒子状・粉末状になっている食品の場合は、光は波長が短いほど散乱が生じやすく、かつ粒径と波長のスケールが近いほど散乱しやすいため、食品自体により光が散乱してしまい異物の像を得るのが難しくなる。このように食品の多くは光を入射しても散乱してしまう性質があるため、このような性状でも内部に混入した異物を検出できる技術が求められている。

そこで申請者らは、波長3mm、周波数100GHzのサブテラヘルツ波(ミリ波)を用い、パセリ等の食品中に含まれる異物検出を目指した研究を行ってきた。サブテラヘルツ波は近赤外等の光よりも波長が長く比較的散乱が生じにくいいため、食品自体による散乱の影響を小さく抑えることができる。ただし、一般的に電磁波は回折限界の原理により波長よりも小さい対象を画像化できないため、市場で求められている数mmオーダーまたはサブmmオーダーの異物に対して数mmの波長からなるサブテラヘルツ波(ミリ波)を用いる場合には、検出が難しく大きな課題であった。異物による電磁波の吸収は小さいものの、屈折率差によって異物周辺で回折が生じ、波長よりも小さな異物サイズであっても、電磁波の波面が歪んで透過強度分布が乱れる。そこで報告者らは図1のように、検出器を試料になるべく近づけ、異物周辺での回折により電場強度が乱れる現象を近くで直接画像化することで、波長よりも小さい異物を検出できることを示してきた。

2. 研究の目的

上記のように、検出器(カメラ)を対象に近接させて強度分布を得ることにより、波長以下のサイズの異物でも同心円状に生じる「回折模様」が見られることから、この特徴的な形状を検出することで食品製造のライン検査が可能なシステムの構築が期待できる。そこで本研究では製造ラインに導入できる検査システムへの応用を目指し、サブテラヘルツ波(ミリ波)の光源およびラインセンサ(カメラ)からなる撮像系の構成検討ならびにライン検査系の構築を行い、異物を混入させたパセリにより得られた透過画像から異物検査能の評価を目的とした。

3. 研究の方法

以下の2つの装置を構築し、(1)モデル実験系を用いた透過特性の検証、ならびに(2)ベルト搬送によるライン検査装置の構築および性能評価を行った。

(1) 試料往復搬送装置(図1)による透過特性検証

乾燥粉末パセリ厚み4, 8, 12mmの亚克力製のケースに充填し、それぞれに直径と高さが1, 2, 3, 4mmの円柱型から成るプラスチック(PTFE)ならびにゴム(EPM)を異物の標準サンプルとしてパセリの底に等間隔に配置して測定試料とした。

発振器には100GHz(波長3mm)の連続波を発振するIMPATTダイオード(TERA SENSE)を用い、その下110mmの高さで試料をリニアスライダにより175mmの幅を44mm/sで右方向(x)に搬送しながら、直下の検出器(ショットキーバリアダイオード, SAGA Millimeter)で1msごとに透過強度を測定した。試料を原点位置に戻す間に、検出器を自動ステージで奥行方向(y)に1mm移動し、同様に測定を行った。上記の実験手順を90回繰り返すことにより175mm×90mmの面測定を行った。また、検出器の高さ(z)を変化させ、伝搬特性の計測を行った。

(2) ベルト搬送系およびリニアカメラを用いたライン検査装置 (図2) の構築および評価

実際の食品検査の現場のようにベルト搬送された状態でパセリの撮像を可能にするため、ベルトコンベアによる搬送部、および食品供給を行うホッパーからなる検査システムの構築を行った。金属筐体中にベルトコンベア、発振器、リニアカメラ (TeraFAST-256-HS-100, TeraSense) を設置したシステムを構築した。また、発振器、食品試料、異物サンプルは先述のものと同様の装置および試料を用いた。プラスチックおよびゴムの計6個の異物を、ベルトコンベア表面へ固定し、その上から一様な厚みに調整した乾燥粉末パセリを供給しながら、一定の速さで水平右向きに移動させた。ベルト直下にラインセンサ、上方に発振器を配置し、ベルト越しに透過画像を取得した。また、食品試料にパセリ、異物資料にプラスチックおよびゴムを用い、取得した透過画像の評価および異物検出アルゴリズムの検証を行った。

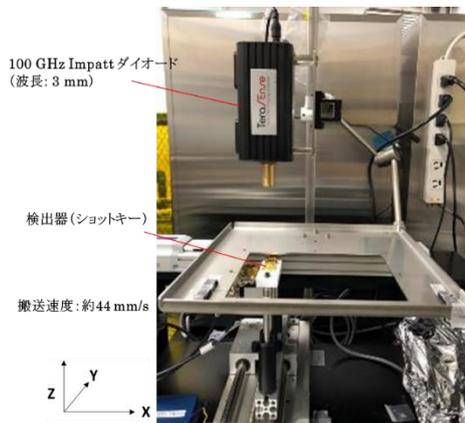


図1 モデル実験用往復試料搬送系

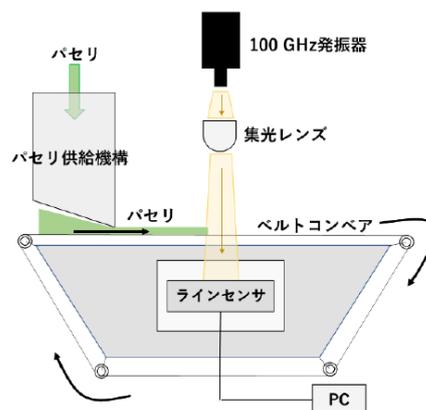


図2 ライン検査装置の概要

4. 研究成果

(1) 透過画像の取得および透過特性検証

プラスチック (PTFE) の異物における撮像結果を図3に示す。異物のサイズにかかわらず同心円状の様相が現われ (図中赤矢印)、パセリ充填前 (a) の結果から異物のサイズが大きいほどコントラストが強くなることを確認できる。これは異物直下での回折による模様と考えられ、パセリ充填下の図3(b)でも透過強度の減少は見られるものの、異物周囲の円形模様は残存し、パセリ中の異物を認識できた。ゴムからなる異物モデルの場合においても同様の傾向が確認できた。

同心円の中心から外側にかけて透過率の大きな変動が認められることから、異物を中心に 20 mm 四方の領域を抽出して透過率の最大値と最小値の差を算出し、異物の無い領域と比較した (この透過率の最大値と最小値の差を以下、透過率差と呼ぶ)。撮像を3回繰り返して検証した結果、材質がゴムの場合には 1 mm 以上、プラスチックの場合には 2 mm 以上の異物で有意差が認められ、検出可能であることが確認できた。また検出器の高さを調整し試料からの距離に応じた透過率変動を比較したところ、検出器を試料から離すほど、異物周囲に生じる同心円状模様の径は大きくなり、異物による透過率の変動は小さくなる傾向が見られた (図4)。検出器を異物から離すほど透過率差が小さくなり異物検出に不利になることが確かめられ、以後は検出器と試料間をなるべく近づけることとした。

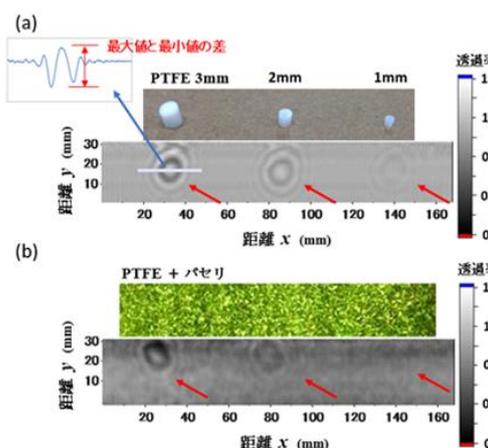


図3 異物配置図および透過画像: パセリ無し(a), 有り(b)

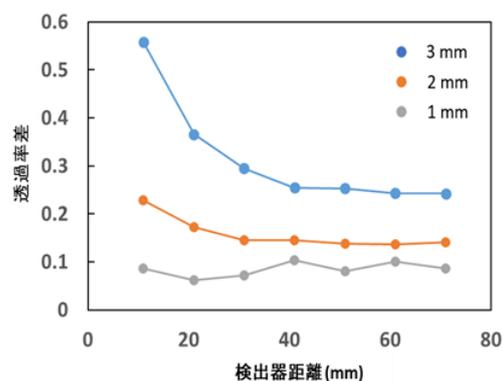


図4 検出器距離と透過率差の関係

(2) パセリの充填影響および異物検出能の評価

サイズ1～3mmのプラスチック（PTFE）に対しパセリの充填厚みを変えて撮像した結果を図5に示す。パセリの厚みを増すほど、背景部のノイズが大きくなり、相対的に異物による円形の回折模様の判別も難しくなっていることがわかる。パセリに対するサブテラヘルツ波の透過性は高いものの、充填密度のムラが背景ノイズとして現れることが確認できた。異物周辺部とパセリのみの部分の画像の違いを定量的に評価するため、パセリ厚み4mmの画像において、異物を中心に異物周辺部20mm四方、パセリのみ部分20mm四方を抽出し、評価画像と基準画像の差を数値的に求める評価法として知られるNMSE（Normalized Mean Square Error）を下式の通り算出した。

$$NMSE = \frac{\sum(F(x, y) - P(x, y))^2}{\sum(P(x, y))^2}$$

ここで $F(x, y)$ は異物周辺部画像の各ピクセル値、 $P(x, y)$ はパセリのみ部分の画像の各ピクセル値である。NMSEの値が大きいほど、比較している画像間の違いが大きいことを意味する。図6に示すように、プラスチック、ゴムともにすべての異物サイズで有意な差が認められ、検出限界は1mmとなった。いずれの異物サイズにおいてもプラスチックよりもゴムの方が大きなNMSEが得られたのは、同帯域における吸収および屈折率の違いの影響によるものと考えられる。パセリ厚が4, 8, 12mmの場合の検出限界はそれぞれ異物1mm, 1mm, 2mmとなった。

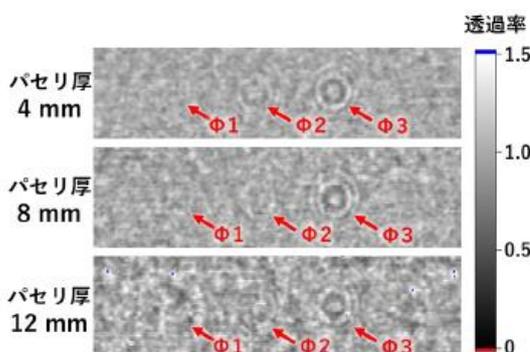


図5 パセリ厚を変えた PTFE 異物周囲の画像

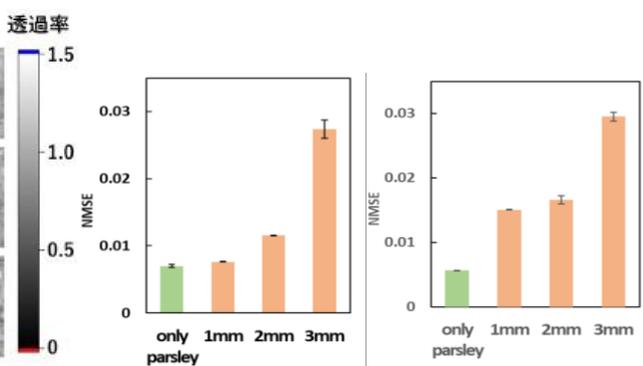


図6 NMSE算出結果：(左)PTFE, (右)EPM ゴム

(3) ライン検査システムによる透過画像の取得および異物検出

構築したライン検査システムを用い、ベルトコンベヤの速度を食品工場現場における実際のライン速度を考慮して55-145mm/sで駆動し、ホッパーからパセリを安定的に供給できることを確認できた。しかし、供給試料厚の不均一さが取得画像に背景ノイズとなって現れたため、ホッパー直後に均し板を設置して高さを調整できる機構を構築し、厚み4mmを下限として可変で均平な食品供給を実現させた。パセリをベルト搬送しながら取得した透過画像を図7に示す。図にはゴムおよびプラスチックの異物に加え、コガネムシ(5.0×2.5×2.5mm)を混入させた撮像部を含んでいる。前項までのモデル実験と同様に、異物がある位置にいずれも円形の回折模様が確認され、画像変化の程度を統計的に解析したところ、ゴムと樹脂のいずれも波長サイズ以下である2mm以上の異物を有意に検出することができ、最低限の企業ニーズは上回る成果を得ることができた。

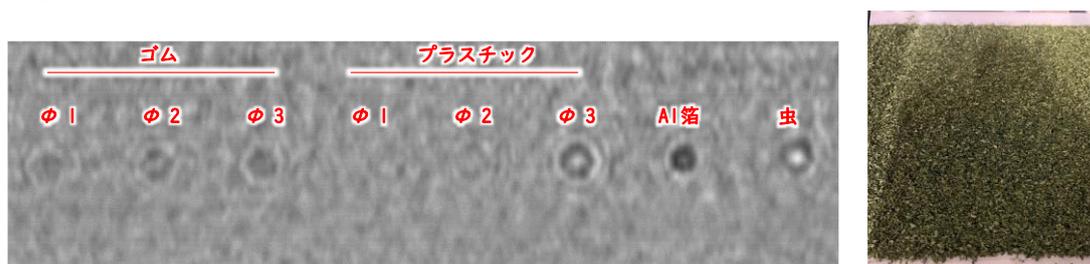


図7 ライン検査システムによる撮像結果：(左)透過画像、(右)撮像部の外観

また画像処理により特異的な円形模様の自動検出ができるよう、ハフ変換を用いた異物検出を試みた。その結果、模様が薄く不明瞭であったサイズ1mmのプラスチックを除き、すべての異物を検出することに成功した。しかし、検査システムの移設に伴い、画像撮像を再度取得しなおしたところ、おおむね同様の画像が得られるもののハフ変換による同心円模様の判定におい

ではその精度が低下する結果となり、解析のロバスト性の課題が示された。照射光の 1kHz 変調およびロックインアンプを用いた検出など、様々な高感度化手法についても検証したものの、パセリ充填に起因する背景ノイズの影響が大きく異物検出能向上には至らなかった。そこでランダムな背景ノイズ中に混在する異物由来の回折模様を特異的かつインラインで即時的に検出できるロバストな判定モデルの構築を目指し、ニューラルネットワークによる機械学習を活用した判定を行った。1~3mm のプラスチックおよびゴムの異物を搬送方向へ 1 列に並べ、学習用に 50 画像、検証用に 20 画像を取得し、ラインセンサで取得できる画素データを基に異物と背景の判別精度を検証した結果、正解率が 85%、適合率（異物判定が正しかった割合）が 92%、再現率（検出された異物の割合）が 78% となり、効果的な結果が得られた。

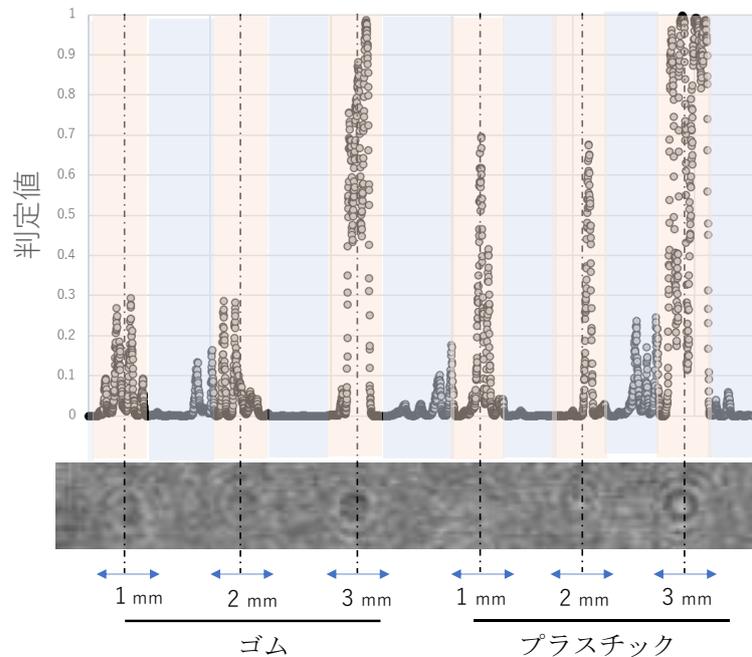


図8 判定値の推移の例。異物部で判定値が上昇し、閾値を上回った領域を異物と判定する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 中須賀健介, 小川雄一, 陳山鵬, 鈴木哲仁	4. 巻 136
2. 論文標題 ミリ波透過強度のニューラルネットワーク解析による粉末パセリ中の異物検出	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 関西農業食料工学会報	6. 最初と最後の頁
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 -

1. 著者名 中須賀健介, 小川雄一, 陳山鵬, 鈴木哲仁	4. 巻 -
2. 論文標題 異物を含む粉末パセリのミリ波透過画像におけるニューラルネットワーク解析の適用	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本設備管理学会東海支部令和5年度学生研究発表会要旨集	6. 最初と最後の頁 9-10
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 -

1. 著者名 鈴木哲仁	4. 巻 135
2. 論文標題 蛍光特性に基づく魚の鮮度評価および農畜産分野への展開	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 関西農業食料工学会報	6. 最初と最後の頁 9
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 -

1. 著者名 鈴木哲仁	4. 巻 86
2. 論文標題 鶏卵の光学計測による鶏ヒナの孵化前雌雄判定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 129-132
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 -

1. 著者名 杉原 鴻太, 鈴木 哲仁, 白神 慧一郎, 小川 雄一, 近藤 直, 野々原靖也, 廣瀬修, 小林直人, 樋口貴文	4. 巻 -
2. 論文標題 乾燥粉末パセリ内の異物によるミリ波の透過強度分布変化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第79回農業食料工学会年次大会講演要旨集	6. 最初と最後の頁 0-11
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 -

1. 著者名 Ziwei Zheng, Tetsuhito Suzuki, Yuichi Ogawa, Naoshi Kondo	4. 巻 -
2. 論文標題 Wettability Detection by Using the Reflection Property of Metallic Mesh with Different Structural Parameters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本分析化学会第70年会講演要旨集	6. 最初と最後の頁 Y1123
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 -

1. 著者名 東 健喜, 鈴木 哲仁, 白神 慧一郎, 小川 雄一, 近藤 直	4. 巻 -
2. 論文標題 次亜塩素酸ナトリウムによる大腸菌 (Escherichia coli) の膜損傷および抗体反応性の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本分析化学会第70年会講演要旨集	6. 最初と最後の頁 Y3037
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 -

1. 著者名 杉原鴻太, 鈴木哲仁, 中島亜弓, 金子晴海, 野々原靖也, 廣瀬修, 白神慧一郎, 小川雄一, 近藤直	4. 巻 128
2. 論文標題 ミリ波の透過イメージングによる乾燥粉末パセリ内の異物検出	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 関西農業食料工学会会報	6. 最初と最後の頁 37
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 -

1. 著者名 鈴木哲仁	4. 巻 -
2. 論文標題 金属周期構造を用いたテラヘルツ帯センサの開発と食の安全に資する光分析分野への展開	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本分析化学会第69年会講演要旨集	6. 最初と最後の頁 44
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 -

1. 著者名 鈴木哲仁	4. 巻 82
2. 論文標題 光技術を用いた微生物検査の展望	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 317-322
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 中須賀健介, 小川雄一, 陳山鵬, 鈴木哲仁
2. 発表標題 ミリ波透過強度のニューラルネットワーク解析による粉末パセリ中の異物検出
3. 学会等名 関西農業食料工学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中須賀健介, 小川雄一, 陳山鵬, 鈴木哲仁
2. 発表標題 異物を含む粉末パセリのミリ波透過画像におけるニューラルネットワーク解析の適用
3. 学会等名 日本設備管理学会東海支部
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鈴木哲仁
2. 発表標題 蛍光特性に基づく魚の鮮度評価および農畜産分野への展開
3. 学会等名 関西農業食料工学会第150回例会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tetsuhito Suzuki
2. 発表標題 Light & sound-based sensing technologies for products of agriculture, livestock and aquaculture
3. 学会等名 International Webinar of "Technology Innovation toward a Smart and Sustainable Future", Universitas Brawijaya（招待講演） （国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tetsuhito Suzuki
2. 発表標題 Light & sound-based sensing technologies for products of agriculture, livestock and aquaculture
3. 学会等名 Special Lecture on Erasmus+ International Credit Mobility Project, Molise University（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tetsuhito Suzuki、Maho Chihara、Shin-ichi Nagaoka、Tomohiko Tasaka、Yuichi Ogawa、Naoshi Kondo
2. 発表標題 Gender Prediction of Hatching Chicken Eggs by Integrated Analysis of Visible Spectroscopy and Imaging
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 Takato Ikebe, Tetsuhito Suzuki, Yuichi Ogawa, Keiishiro Shiraga, Naoshi Kondo
2. 発表標題 Fluorescence Properties and Growth Conditions of Pseudomonas fluorescens in Chicken Egg
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 杉原 鴻太, 鈴木 哲仁, 白神 慧一郎, 小川 雄一, 近藤 直, 野々原靖也, 廣瀬修, 小林直人, 樋口貴文
2. 発表標題 乾燥粉末バセリ内の異物によるミリ波の透過強度分布変化
3. 学会等名 第79回農業食料工学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ziwei Zheng, Tetsuhito Suzuki, Yuichi Ogawa, Naoshi Kondo
2. 発表標題 Wettability Detection by Using the Reflection Property of Metallic Mesh with Different Structural Parameters
3. 学会等名 日本分析化学会第70年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東 健喜, 鈴木 哲仁, 白神 慧一郎, 小川 雄一, 近藤 直
2. 発表標題 次亜塩素酸ナトリウムによる大腸菌 (Escherichia coli) の膜損傷および抗体反応性の評価
3. 学会等名 日本分析化学会第70年会講演要旨集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木哲仁
2. 発表標題 金属周期構造を用いたテラヘルツ帯センサの開発と食の安全に資する光分析分野への展開
3. 学会等名 日本分析化学会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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