

平成29年度採択

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「マイクロ波による食品異物混入の検出装置及び異物除去
装置の研究開発」

研究開発成果等報告書

令和2年5月

担当局 北海道経済産業局

補助事業者 公益財団法人釧路根室圏産業技術振興センター

目次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 マイクロ波異物検出装置の開発
 - 2-1-1 高感度センサおよび位置分解能に優れたセンサの開発
 - 2-1-2 開発センサによる被検体に混入した異物検出のラボスケール実証
 - 2-1-3 試作機的设计・製作・実証
- 2-2 パラレルリンクロボットによる異物除去装置の開発
 - 2-2-1 食品形態および異物性状に対応したロボットハンド機構の設計・試作
 - 2-2-2 異物除去性能試験および評価
 - 2-2-3 統合型異物検出・除去システムの実証・評価

第3章 全体総括

- 3-1 研究開発成果総括と今後の課題
- 3-2 補助事業の成果に係わる事業化展開について

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1)研究開発の背景

近年、食品への異物混入事故が相次いで報道され、消費者の食品に対する安全・安心の意識が高まっている。2020年にはHACCPに沿った衛生管理が食品事業者に義務化されるなど、わが国の食の安心安全を取り巻く環境は大きな転換点にあると見てよい。しかし、もっとも衛生的でなければならないはずの食品にさまざまな「異物」が混入していたために、消費者からの苦情が増加している現状が報告されている。国民生活センターの調べによると、食品の異物混入に関する相談は、2009年度以降から2015年1月までの報告累積で約16,000件であった。生産者側にとって異物混入事故は商品回収による賠償金の負担だけでなく、商品価値の低下や企業イメージの失墜など、今後の企業活動の継続にも悪影響を及ぼしかねない。このような異物混入事故発生による経営リスクの増大を受けて、異物を確実に識別できる安価で操作性や保守管理性が容易な異物検査装置の開発が川下製造業者(食品事業者)に強く望まれている。現在、一部の企業において金属検出機やX線検査装置が導入されているが、検出できる異物の種類は限定的であり、非金属異物(軟骨・毛・虫・木片など)の検出は困難である。一方で、食品に混入した異物の内、非金属異物の混入割合が58%を占めている実態があり(図1-1)、検出困難な非金属異物の大半は生産工程や最終製品工程での確認で見逃されてしまうことが少なくないと推察される。各検査装置で検出しづらい非金属異物は、作業員が検視し、手作業で取り除かれるが、取りこぼしの問題と労働人口減少による作業員確保の問題から、手作業に替わって異物を自動除去する装置の開発に関する要望が本事業実施機関である(株)ニッコーに多く寄せられている。

(出典：国民生活センター資料より作成)

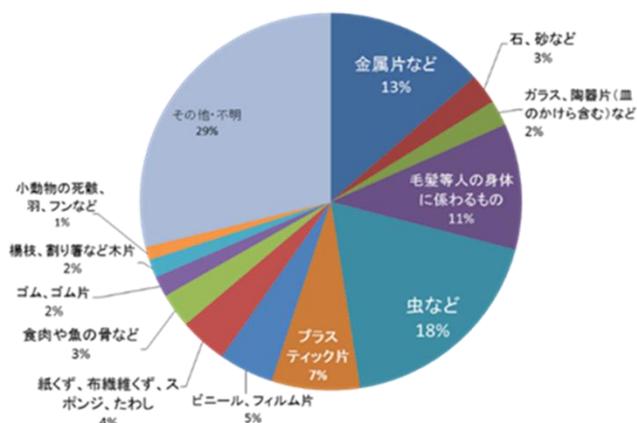


図1-1: 食品に混入する異物の種類と割合

(2)研究開発の目的及び目標

本事業では食品製造業者の食品づくりにおける徹底した衛生管理に対するニーズに応えるため、混入した異物が金属・非金属のいずれであっても検出できる、簡便操作性と導入容易性を兼

ね備えた新規装置をマイクロ波帯域の電磁波を応用した計測技術の高度化により開発する。また食品加工生産ライン上で検出した異物および異物混入食品をパラレルリンクロボットの制御技術によって排出する除去装置を開発する。

異物検査装置として主流である X 線検査装置であるが、軟骨や毛髪といった非金属の対応が不可となっており昨今の異物と認識される物質の多様化に対応しきれないのが現状である。また、非金属検出が可能なものとしてテラヘルツの波長を使用したものがあるが、装置価格が高価で汎用検査器としての導入が難しい。

マイクロ波を使用したシステムにおいては、使用帯域を限定することによりマイクロ波発生源機構ならびに検出センサ部の低価格化が可能であり、非金属対応の検査設備として生産者の負担の少ないシステムを提供することが可能と考える。図 1-2 に従来技術の課題と本事業で用いるマイクロ波センシング技術の特徴を示し、図 1-3 にマイクロ波を用いた新技術の要点を示した。

比較項目	X線	T線	マイクロ波
異物検出方式	画像認識	画像認識	位置座標認識
水分を含有する食品	○	×	○
異物が非金属	×	○	○
装置価格	△	×	○

課題	特徴
<ul style="list-style-type: none"> 高価なX線、T線発生源および透過光イメージング機器が必要 X線では、非金属異物の検出が困難 T線では、水分を含有する食品中の検出が困難 	<ul style="list-style-type: none"> マイクロ波送受信機が安価 伝送信号の位相変化から簡便に異物を識別 金属および非金属異物の検出が可能

図1-2:従来技術の課題とマイクロ波を用いた新技術の特徴

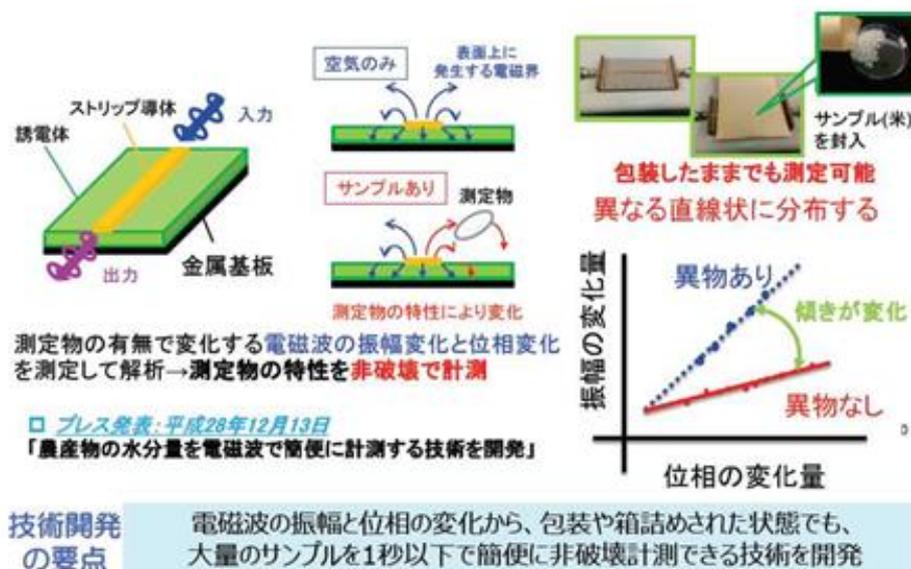


図1-3:マイクロ波を用いた新技術の要点

本計画の実施に供する加工食品として、首都圏で購入頻度の高い「おにぎり」の具材として生産されている水産加工品「鮭フレーク」と、ミンチ状に加工された半調理品の「ハンバーグ」の二種を選定した。また混入異物として、X線検査装置で検出不可な「骨片」と「毛髪」を想定し、それら異物が混入した被検体（鮭フレーク等）と電磁波伝搬の関係を実証的に明らかとする。

このような統合型異物検出・除去システムの実現のため、以下のサブテーマと達成目標を設定した。

【1. マイクロ波異物検出装置の開発】

【1-1】高感度センサおよび位置分解能に優れたセンサの開発

- ・食品に混入する異物の検出感度を向上するため、適用する発信周波数やセンサの基本構造となる伝送線路形状を最適化する。

- ・異物の位置分解能 10 cm × 10 cm 程度、大きさ 1 cm 程度の異物検出を達成する。

【1-2】開発センサによる被検体に混入した異物検出のラボスケール実証

- ・食品の搬送条件、センサユニットの組み込み条件、およびマイクロ波送受信機の検出条件を最適化する。

- ・開発した検出センサにより被検体に混入した異物を 98 %以上の精度で検出する。

【1-3】試作機の設計・製作・実証

- ・ラボスケール実証で得られた知見を基に送受信モジュール、センサユニットのカセット化および計測データの解析処理をカスタマイズ設計・製作する

- ・検出精度の信頼性を向上させ、試作機のコンパクト化、および低コストを図る。

【2. パラレルリンクロボットによる異物除去装置の開発】

【2-1】食品形態に対応したロボットハンド機構の設計・試作

- ・異物および異物が混入した食品を把持するロボットハンドの設計要素を被検体食品の性状に応じ最適化し、把持・除去特性を向上する。

【2-2】異物除去性能試験および評価

- ・試作したロボットハンドを搭載した異物除去装置の追従動作、位置決め精度、吸引・吸着把持特性および除去・排出特性を観測し、異物除去性能を改善・向上する。

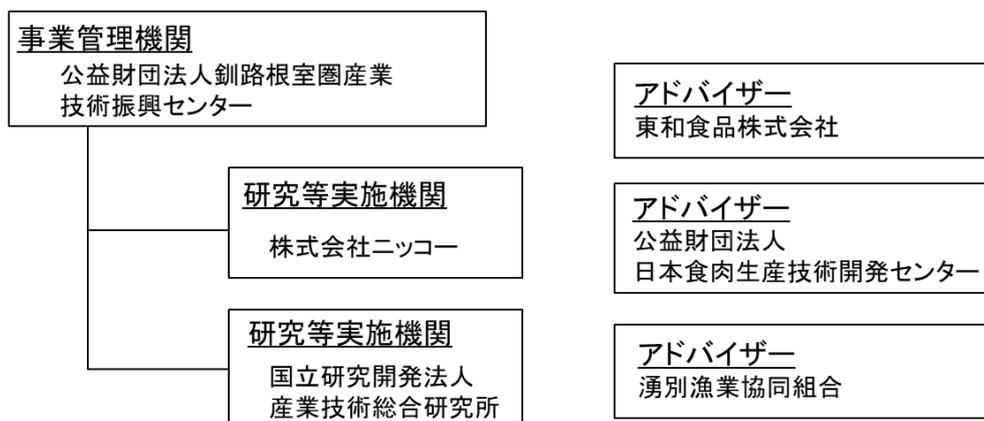
【3. 統合型異物検出・除去システムの実証・評価】

- ・実作業条件、環境における異物検出精度および除去精度に及ぼす不確かさ要因を解明し、さらには長時間操業下での動作安定性を実証することで、ロバスト性や信頼性を向上する。

1-2 研究体制

研究組織および管理体制

研究体制



1-3 成果概要

1. マイクロ波異物検出装置の開発

【1-1】高感度センサおよび位置分解能に優れたセンサの開発

(担当機関) 国立研究開発法人産業技術総合研究所

- ・対象食品の形状(厚み)に合わせて、センサの基本構造を改良した。
- ・鮭フレーク内部の骨片検出の実証実験を行い、厚さ 1 cm の鮭フレーク内部の 1 cm 程度の骨の検出が可能であり、位置分解能 10 cm × 10 cm を達成した。
- ・複数個のセンサをアレー状に配列するアンテナ型センサを開発し、横位置特定を理論上達成し、単一のアンテナ素子による実証試験により、2 cm 程度厚みのある鮭フレーク内の骨の検出が可能であることを実証した。

【1-2】開発センサによる被検体に混入した異物検出のラボスケール実証

(担当機関) 国立研究開発法人産業技術総合研究所、株式会社ニッコー

- ・厚み 1 cm 以内の鮭フレーク中の骨片、毛髪を 99.7 % 以上、厚み 4 cm 以内の鮭フレーク中の毛髪を 95.4 % 以上の確率で検出できることを実証した。厚み 1 cm 以内の鮭フレーク中の異物(骨片・毛髪)であれば、位置検出の場合も、99.4 % 以上の確率で異物を検出可能であることを解析的に明らかとした。
- ・センサ方式および検出方法、データ分析手法の大幅な改良に取り組み、被検体中に異物が無い場合とある場合の信号の変化を 98 % を超える確率で検出できる装置構成を実現した。

【1-3】試作機的设计・製作・実証

(担当機関) 国立研究開発法人産業技術総合研究所、株式会社ニッコー

- ・振動や温度変化による計測値のばらつきを低減する機構を導入した試作機を開発した。
- ・検出部で得られた計測データを異物位置座標に変換し、定量駆動するベルトコンベアの搬送に追従したロボットハンド動作により異物を除去するトラッキング制御プログラムを開発できた。
- ・周波数範囲を適当に絞ったマイクロ波送受信モジュールを計測部に採用し、制御プログラムもそれに合わせて修正することで、計測部の大幅なコストダウンを行った。

2. パラレルリンクロボットによる異物除去装置の開発

【2-1】食品形態に対応したロボットハンド機構の設計・試作

(担当機関)株式会社ニッコー

- ・組付、分解、洗浄が容易に行える機構のロボットハンド部を設計・試作し、食品の製品形態に合わせて、吸引式、チャック式、吸着式のハンドをそれぞれ試作した。
- ・鮭フレークのような不定物に対して吸引式ハンドを開発し、適切な吸引口径および形状を検討するため複数のノズル形態を設計・試作した。
- ・ハンバーグのような固形物に対しては、チャック式、吸着式の二種類のハンドをそれぞれ設計・試作し、水分や油分、製品の凹凸や大きさといった不定形な食品形態に対応するため、部品変更、設計、試作を実施した。

【2-2】異物除去性能試験および評価

(担当機関)株式会社ニッコー

- ・試作したロボットハンドを装着した異物除去装置の除去性能を評価し、ベルトコンベア上を所定の速度で搬送される異物混入試験食品に対し、吸引・吸着による把持状態、捕集器への移動動作、脱着排出の一連の動作処理と所要時間を確認できた。
- ・ロボットハンド構造を改良し、サニタリーレギュレーター配管の円筒ノズルであれば被検体食品の取り残しが少なくなることが確認できた。
- ・ロボットハンドがコンベアの搬送動作に追従して異物および異物混入食品を除去できることを確認し、ロボットの追従精度が ± 1 mm 以内で動作することから、実用に耐える装置であることを確認できた。

【3. 統合型異物検出・除去システムの実証・評価】

(担当機関)株式会社ニッコー、国立研究開発法人産業技術総合研究所

- ・実操業条件を想定した実証試験を複数回実施し、一連の異物判定と異物除去を確認した。しかし、実用化適用仕様まで設計を落とし込むまでに至らなかったため、今後は検査の高速化やロバスト性などの課題を解決することで、実操業条件においても開発したマイクロ波異物検出・除去装置がその性能を発揮できる見込みである。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

連絡担当者 所属： 公益財団法人釧路根室圏産業技術振興センター
氏名： 日戸 光輝
電話： 0154-55-5121
F A X： 0154-55-5161

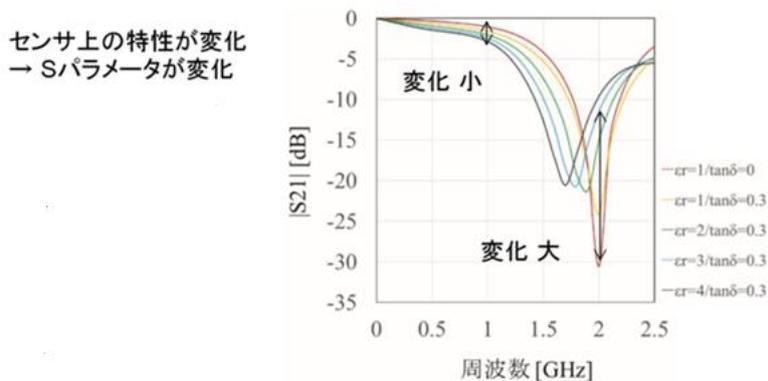
第2章 本論

【1. マイクロ波異物検出装置の開発】

【1-1】高感度センサおよび位置分解能に優れたセンサの開発

平成 29 年度より、加工食品の生産ラインにおいて使用されることを想定した異物の位置を特定できる伝送線路型センサの開発・改良に取り組んだ。図 2-1-1 にセンサの高感度化ルールを、図 2-1-2 にアンテナ型センサの設計ルールを示す。平成 30 年度からは、当初採用していた伝送線路方式のセンサを改良したアンテナ方式のセンサ設計により、センシング感度の向上を狙った。

センシング感度



Sパラメータの変化が急峻な点でセンシング感度が良

図2-1-1:センサの高感度化ルール

平面アンテナによる方法

- フレークの配置はランダム
(ランダムな多孔質媒質と考える)
→直線偏波より円偏波が有効
- 寸法変更により周波数が可変
→可能性のある周波数で複数作成
- Z方向の電界は波動方程式を解くことで、下記のように表現できる

$$E_z = E_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a} + \frac{m\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} + \frac{n\pi}{2}\right)$$

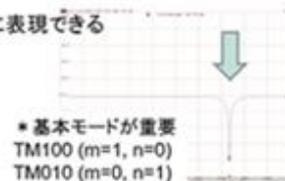


図2-1-2:狭帯域共振型アンテナの設計ルール

アンテナ型センサとして、狭帯域型(以下アンテナセンサ A と呼称)、広帯域型(以下アンテナセンサ B と呼称)の二種類を用意し、各試験に供することにした。「【1-1】高感度センサおよび位置分解能に優れたセンサの開発」では、センサ感度を向上するために、適切なセンサ構造を決定し、改良したアンテナ型のセンサを設計、開発することができた。

【1-2】開発センサによる被検体に混入した異物検出のラボスケール実証

伝送線路型センサを用いたラボスケール実証の概要と試験結果を示す。厚みを 1 cm, 4 cm, 6 cm と変えた鮭フレーク中に異物(骨および毛髪)を混入させて試験を行った。

鮭フレーク中の骨検出



図2-2-1: 伝送線路型センサによる鮭フレーク中の異物検出試験の様子

鮭フレーク中の骨の判定

フレーク高さ1cm→3 σ で検出可能(2.5 GHz & 3 GHz)

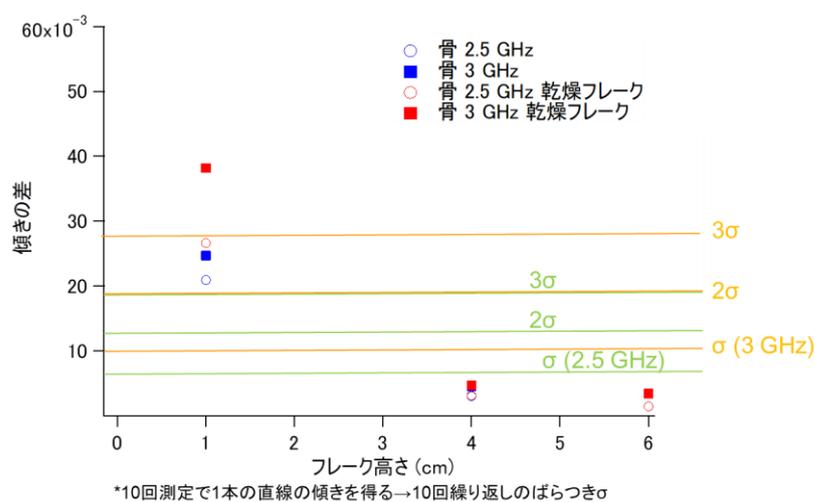


図2-2-2: 伝送線路型センサによるサケフレーク中の骨片判定結果

鮭フレーク中の毛髪判定

フレーク高さ1 cm→3σで検出可能(2.5 GHz & 3 GHz)
 フレーク高さ4 cm→2σで検出可能(2.5 GHz & 3 GHz)

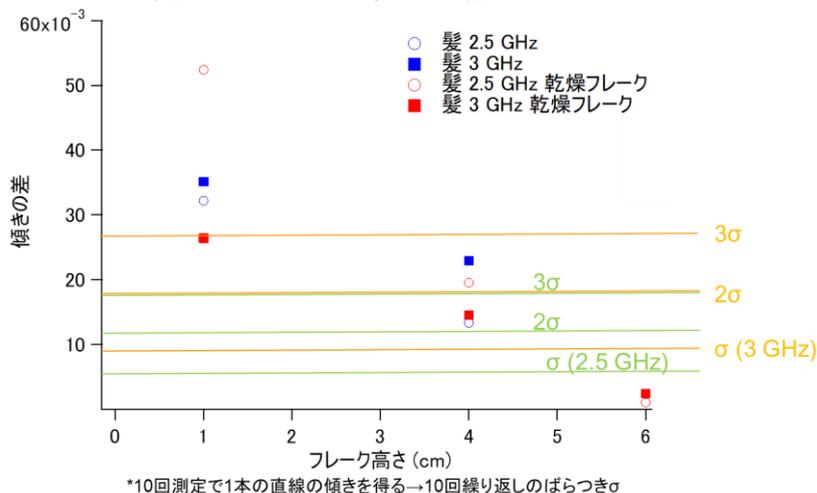
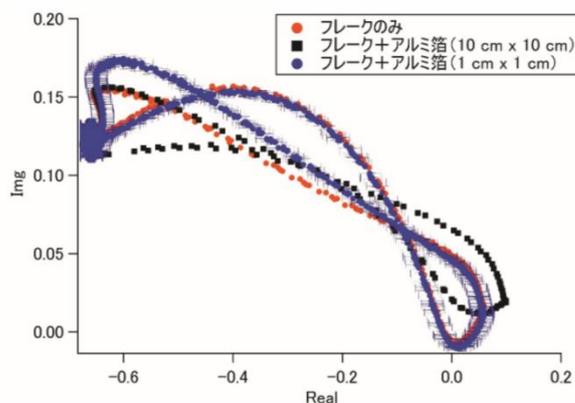


図2-2-3: 伝送線路型センサによる鮭フレーク中の毛髪判定結果

図 2-2-2、図 2-2-3 によれば厚み 1 cm 以内の鮭フレークであれば、内部に混入した骨片および毛髪ともに 98 %以上の精度で検出可能である。一方で厚みが 1 cm 以上、例えば鮭フレークの厚みが 4 cm 程度の時は、毛髪の検出確率は解析的に 95 %程度であり、本事業の目標値である 98 %の検出精度を達成できなかった。実作業下での鮭フレークの搬送状態を考慮すると、厚み 1 cm 以上の鮭フレークに混入した異物を 98 %以上の検出精度で検出可能なセンサ構造であることが望ましい。そこで理論上厚み 1 cm 以上の鮭フレーク中の異物を検出できると期待されるアンテナセンサ方式を使用し、2 cm 程度厚みのある鮭フレークに対する異物検出試験を行った。結果を図 2-2-4 に示す。

ばらつき(計測位置のずれ分も含む)を考慮



→1 cm x 1 cmの金属異物は十分検出できる

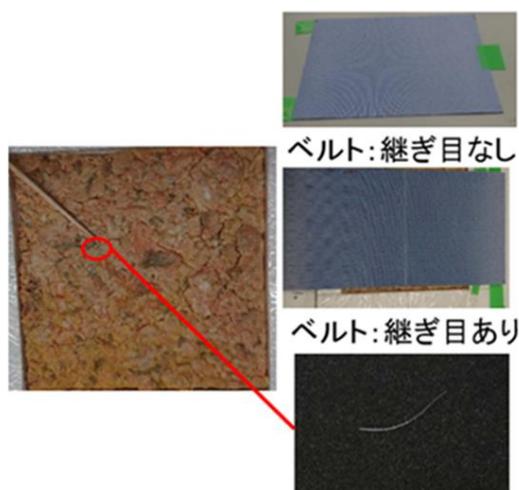
図2-2-4: アンテナセンサ A による異物検出試験結果

図 2-2-4 によれば、2 cm 以上厚みのある鮭フレーク底面の 1 cm × 1 cm 程度の金属異物が検出可能であった。本手法が有効であることが確認できたため、計測周波数帯域を更に広げ、S/N 比の向上と計測精度の向上に取り組んだ。

広帯域特性を有するアンテナセンサ B を対向させた透過型による骨片検出試験の実験概要とその結果を図 2-2-5 に示した。

実験概要

- ・透過型 (1 GHz - 6 GHz)、* 反射型は発砲スチロール部にアルミ板を入れて検証
- ・受信アンテナと対象の位置を固定して、送信アンテナ側を動かして距離 (高さ) 変更
- ・アンテナ開口面間の距離 88mm, 138mm, 188mm で測定
- ・コンベア上フレークの下に異物 (骨 1 本) がある状態を再現
- ・1 パック当たり 4 部位測定 (異物ありなし)
- ・ベルトをフレーク上に置いて測定 (ベルトなし、ベルト: 継ぎ目なし、ベルト: 継ぎ目あり)



結果

- ・透過型を実証。異物なし & 異物あり (骨 1 本) の傾きの周波数応答を比較することで、異物判定する手法を検証
- ・本方法では、値の飛び値 (共振のずれに起因) または非線形性を使うことで、少なくとも静止状態では、骨 1 本による変化を検出できる (フレークに起因する変化ではない)

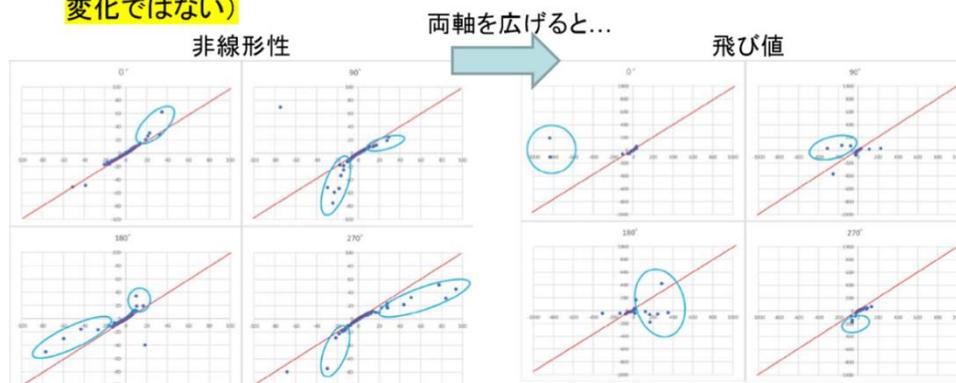


図 2-2-5: アンテナセンサ B による実証試験の概要と結果

図 2-2-5 によれば、値の飛び値(共振のずれに起因)または非線形性を使うことで少なくとも静止状態では、骨 1 本による変化が検出できる。

本試験では状態の異なる鮭フレーク 318 通りを試験に供し、内 314 通りについて検出可能であった。この実験における検出確率は 98.75 % (314/318) である。本試験においては、センサから被検体までの距離が 8.8 cm, 13.8 cm, 18.8 cm であり、本事業で設定した目標値 98 % 以上の検出精度を超える確率で検出できる装置構成を実現することができた。また未検出となった 4 例については、すべてアンテナ距離 18.8 cm 以上のものであり、実機ではアンテナ距離をこの距離以上に近づけることで対応することとした。

以上の試験結果を踏まえて、後述する試作機を用いた実証試験を実施し、実環境を想定した条件における異物判定状況を改めて評価することにした。

【1-3】試作機の設計・製作・実証

1. 試作機のハードウェア設計・製作

単体テスト、ロボット連動テストと様々な評価テストをするにあたり制御機器と検査部を集約したマイクロ波異物検出除去装置プロトタイプを設計・試作した。図 2-3-1 に試作機の外観を示す。

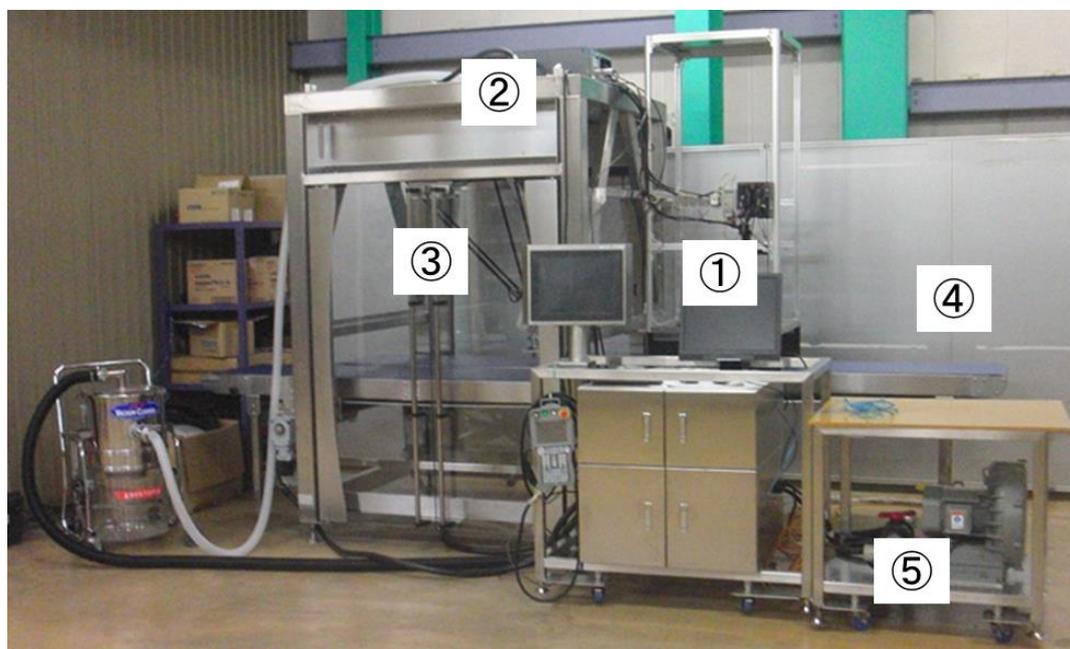


図2-3-1: 設計した試作機の外観

試作機の構成は、①マイクロ波異物検出装置、②パラレルリンクロボット、③異物除去ハンド、

④搬送制御コンベア、⑤異物吸着用ブローアである。(掲載写真ではマイクロ波異物検出装置が開発段階であったため、画像処理認識装置を代替として搭載)

試作機を構成する各装置の特徴を以下で説明する。

①マイクロ波異物検出装置

洗浄や評価時の段取り替えを考慮し、コンベア一体でなくセパレート式で設計した。センサユニットは搬送コンベアフレームの側面に挿入し、センサユニットの設置精度を保持するとともに洗浄の際の防水性、耐薬品性を考慮した構造とした。被検体食品の特性に合わせてセンサ構造を変更するため、複数のセンサが搭載可能なセンサ用カセットを都度作成し、簡易脱着可能な構造として、開発センサの性能評価試験に供することとする。マイクロ波送受信モジュールは、搬送コンベアの上部に組み込み制御盤と合わせて、防水、防滴が施されたフレーム内に格納している。

① マイクロ波異物検査装置

機械概要

・単体テスト、ロボット連動テストと様々な評価テストをするにあたり制御機器と検査部を集約した本体になります。

・コンベア一体での想定を考えていましたが、洗浄や評価の段取り替えなどを優先しセパレート式で設計

・コンベア部のセンサユニットの接続などは最終的にまとめ次第の取付をします

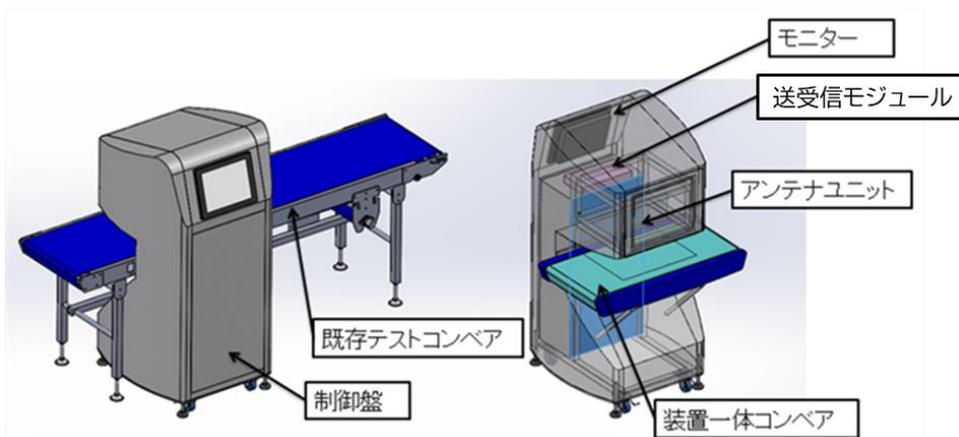


図2-3-2: マイクロ波異物検査装置の外観

②パラレルリンクロボット

コンベアやテーブルの取付部品を交換することにより高さ変更、配置変更など、さまざまな評価テストに対応可能とし、下側部分に空間を設けたことで洗浄を容易にした。異物除去ハンドに必要なエア機器や電気部品は上部、カバー内に収納し評価テスト時に目視確認ができるよう大型の

透明な扉及び窓を採用している。

② パラレルリンクロボット

機械概要

- ・評価テスト時に目視確認ができるよう大型の透明な扉及び窓を採用し安全面も考慮しています。
- ・コンベア等、配置した際の下側部分に空間を設け洗浄を容易にしています。
- ・コンベアやテーブルの取付部品を交換することにより高さ変更、配置変更など、様々な評価テストに対応可能としています。
- ・異物除去ハンドに必要なエア機器や電気部品は上部、カバー内に収納します。



図2-3-3:パラレルリンクロボットの外観

③異物除去ハンド

吸引式、チャック式のハンドをサニタリーヘルールにて容易に交換可能な設計とし、ハンド自体をロボットから外して丸洗い可能な構造としている。食品形態に適応したロボットハンドの設計は、【2-1】項で後述する。

③ 異物除去ハンド

機械概要

- ・吸引式、チャック式のハンドをサニタリーヘルールにて容易に交換できます。
- ・チャック式のハンドに関しましてはチャックの開閉ストロークの変更やチャックするヘラ部分の交換にて、様々な製品形態に対応できます。
- ・吸引式のハンドに関しましては、 $\square 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ と $\Phi 30$ のノズル形状を準備しますが、評価テストの内容に応じてノズルのみの交換で様々なテストに対応できます。
- ・ハンド自体をロボットから外した時点で丸洗い可能です。

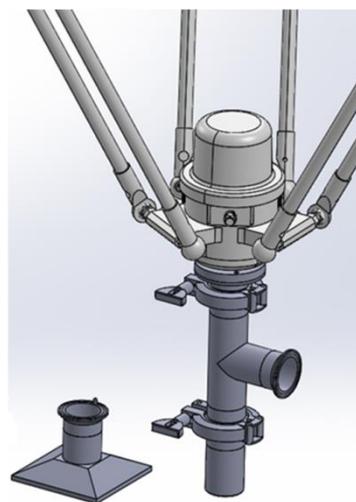


図2-3-4:異物除去ハンドの外観

④搬送制御コンベア

コンベア脚の交換、ブラケット変更にて単体テストやロボットに搭載など評価テストに応じた配置換えを可能な構造とし、センサユニットの搭載部は検出センサ構造の変更に対応できるようフレーム分割で設計している。入口部、出口部の部品変更にてナイフエッジコンベアに変更可能。

④ 搬送制御コンベア

機械概要

- ・コンベア脚の交換、ブラケット変更にて単体テストやロボットに搭載など評価テストに応じた配置換えを可能にしています。
- ・センサユニットの搭載部は現状フレーム分割で設計し、検出距離などカートリッジ式の配置詳細が定まった時点でフレーム中間部を交換にて対応可能としています。
- ・フレーム分割式及び入口部、出口部の部品変更にてナイフエッジコンベアに変更可能です。

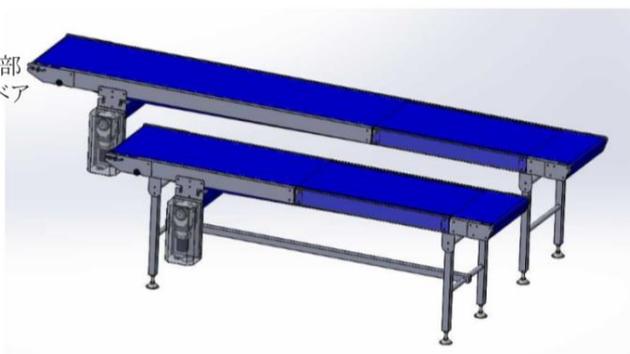


図2-3-5: 搬送制御コンベアの外観

⑤異物吸着用ブロア

本体の各壁に遮音および吸音材を施し防音対策をしており、ブロアの排気部にフィルターを設け衛生面に吸引側ホースの着脱はサニタリーヘルールにて取り外し可能とし洗浄に対応可能。

⑤ 異物吸着用ブロア

機械概要

- ・本体の各壁に遮音及び吸音材を施し防音対策しています。
- ・吸引側ホースの着脱はサニタリーヘルールにて取り外し可能とし洗浄対応できます。
- ・ブロアの排気部にフィルターを設け衛生面に対応可能にします。
- ・吸引のON/OFF用の切換弁を本体に搭載させ簡易脱着式で洗浄可能にしています。

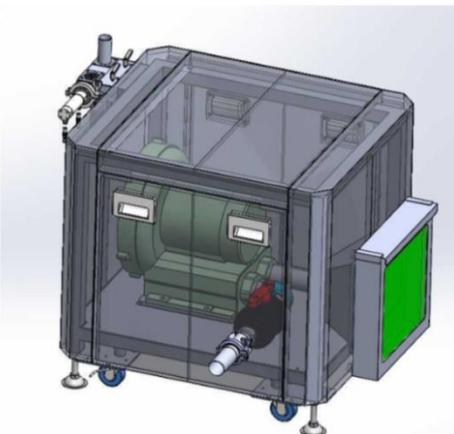


図2-3-6: 異物吸着用ブロアの外観

2. 試作機のソフトウェア設計・製作

統合システム構成における機器間接続図を図2-3-7に示す。

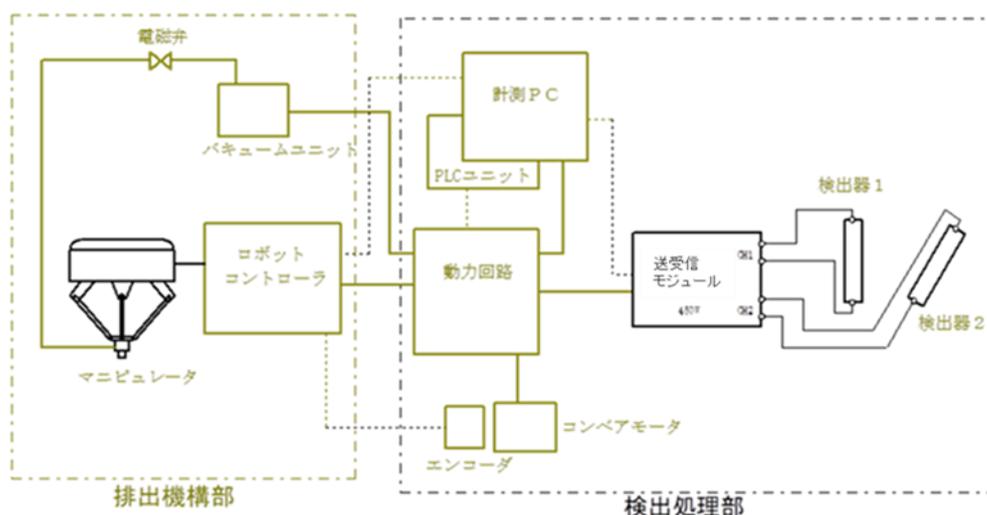


図2-3-7: 統合システム構成における機器間接続図

マイクロ波送受信モジュールからのデータは制御盤をモニターとする計測 PC に組み込まれたソフトウェアで解析処理され、位置座標に変換されたデータとしてパラレルリンクロボットの制御系に送信される。具体的には下記機能を有する。

①異物検出処理(PC アプリケーション)

(1)マイクロ波送受信モジュール計測値の解析により異物の有無を判断

(2)対象のワークと異物の組み合わせを品種登録

・・・可変設定値を登録し、解析処理を品種対応個別化

⇒産総研の既存技術+ α で実現（+ α 部ではワークと異物の組み合わせにより、データ採集・データベース化の必要あり）

②異物の X, Y 座標値生成処理(PC アプリケーション)

X 軸・・・コンベア進行方向 Y 軸・・・コンベア進行方向に直行する方向

⇒素子アンテナでの検出信号をもとに Y 軸上の座標値を算出する。

③リジェクト機構部への位置情報通知処理(PC アプリケーション)

リジェクト機構部コンベア同期処理に対して、

(i) 追従起点信号の印加(デジタル出力)

(ii) リジェクト動作時の異物の Y 軸値情報の通達(EtherNet 通信)

を有用なタイミングで行う。

⇒ロボットコントローラ通信仕様に準じた PC 側の通信処理プログラムを作成する

④駆動部制御処理(PLC プログラム)

(1)計測コンベア駆動制御処理

(2)現在位置情報採取処理

(3)異常監視処理

⇒上記を担う PLC プログラムを作成

⑤リジェクト制御処理(PLC プログラム)

(1)リジェクト動作用ロボットプログラムの作成

(2)リジェクト機構部駆動ユニット(コンベア・バキューム等)の制御プログラムの作成

①～⑤について作成し、動作評価済である。

実際に作成したプログラムの計測画面と位置座標モニタリングの結果を下図に示す。

図 2-3-8 は、センサ方式に伝送線路型を採用した位置座標特定プログラムの一例である。本プログラムでは、マイクロ波送受信モジュールにより得られた周波数領域での測定結果を時間領域でのデータに変換し、時間領域における反射信号の強度情報を色強度情報に変換するプログラムである。

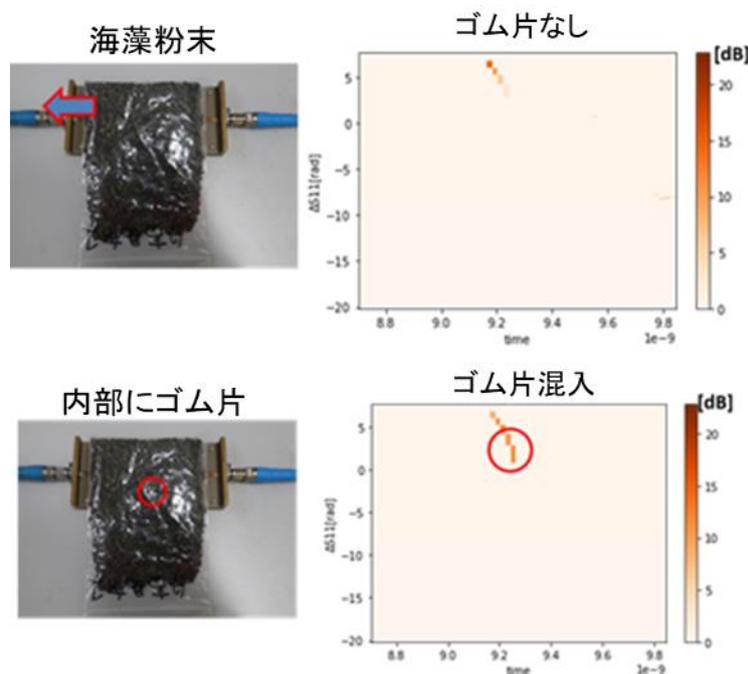


図2-3-8: 伝送線路センサによる異物位置座標特定
(海藻粉末中のゴム片検出)

繰り返し計測ユニットの製作

また、ラボスケール実証において鮭フレークに対する異物検出精度の評価として、同一対象物の再現性を確認するため繰り返し計測装置を製作した。製作した繰り返し計測装置の外観を以下に示す。

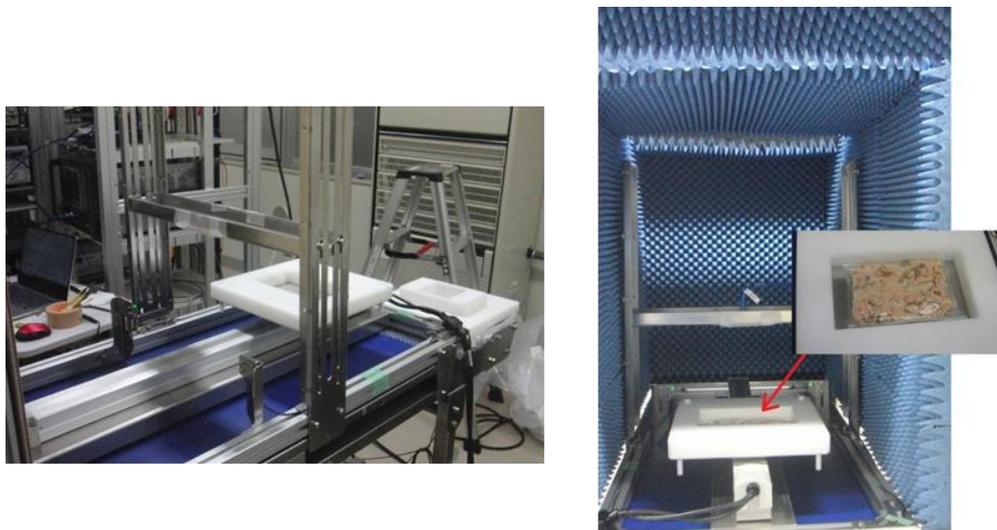
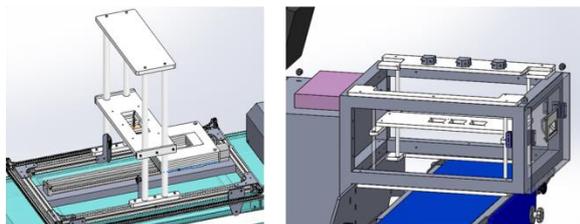


図2-3-10: 繰り返し計測ユニット外観(左)およびワーク実装状態(右)

本計測ユニットを使用した繰り返し計測を実施し、検出精度の評価ならびに、鮭フレーク製品の形状もしくは含有される調味液のどの成分が計測値に影響しているか検討を行った。結果、異物検出精度の検証や計測変動要因となる物質の特定までには至らなかったが、駆動装置による振動や、温度ドリフトが測定に影響することを示唆するデータが得られた。このため、本知見を試作機にフィードバックさせ、固定装置機構の見直しや、適切なケーブル選定により、これらの影響をなるべく低減させる機構を考案した。(図 2-3-11)

・樹脂製のアンテナ固定ジグ製作



・セミリジットケーブルによる固定

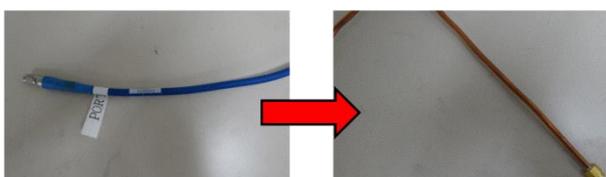


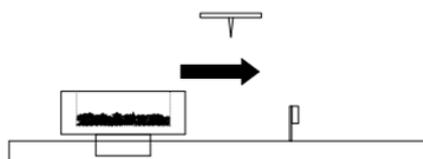
図2-3-11: 試作機の再設計・再製作

図 2-3-12 に、繰り返し計測ユニットによる計測概要を示す。

■試験方法

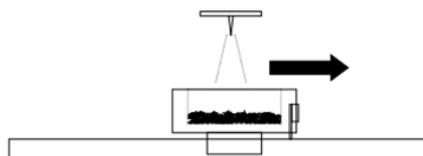
①前進開始

原点位置を起点に前進



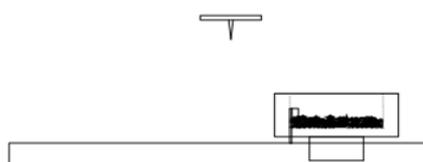
②計測実施(1回)

センサ検出にて計測トリガ印加
(デジタルIOにて計測PC側入力)
ワークポケット中央で中心周波数
になるように位置調整



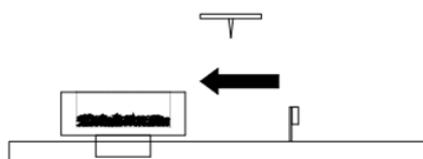
③停止

電磁波計測範囲を超え、センサが
OFFしない位置で停止
(設定により固定位置)



④原点復帰

原点に戻る



①～④をn回繰り返し計測データを採取する。
(n = 200回を想定)

図2-3-12: 繰り返し計測ユニットによる計測概要図

試作機の低コスト化

本事業で開発するマイクロ波異物検査装置は、従来の異物検査装置と比較して、マイクロ波帯域の送受信モジュールを使用することで、導入コストが安価となることに強みがある。平成30年度より試作機の低コスト化に継続して取り組み、使用する周波数帯域を適宜に選定し、より安価なマイクロ波送受信モジュールを、異物検査装置として使用することで、試作機の低コスト化を達成することができた。

【2. パラレルリンクロボットによる異物除去装置の開発】

【2-1】食品形態に対応したロボットハンド機構の設計・試作

異物が混入する食品を把持するためには、食品の重量以上の吸着力で食品を吸引し、吸着パッドと食品が密着して形成される間隙部の圧力が陰圧に到達することが必要条件となる。従って各種ハンドにおける吸着パッドの選択条件としては、食品（鮭フレーク、ハンバーグ等）の大きさに有効なパッド面積、およびそれら食品表面性状（粗さ、硬軟性、形状）に適合した密着性と移載後の脱着性を考慮して選定する必要がある。表 2-4-1 に各食品形態に応じた吸着パッド方式を示す。

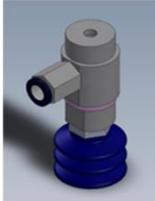
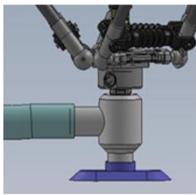
<p>ハンド方式</p>	 <p>(1) 吸引</p>	 <p>(2-1) 真空吸着</p>	 <p>(2-2) プロア吸着</p>
<p>食品の形態</p>	<p>フレーク状 粉粒体状 多孔質食品 (鮭フレーク)</p>	<p>多孔質食品 比較的小さな成形食品 (鮭フレーク、ミート ボール)</p>	<p>比較的大きな成形食品 (ハンバーグ)</p>

表2-4-1: 食品の形態に応じた適切なハンド方式

以上のロボットハンドの最適設計条件を見出すため、各食品形態に対応したハンド方式を設計、試作した。

鮭フレーク中の異物除去を目的としたロボットハンドの設計・試作

不定形な鮭フレークが数センチの層を成し、その中にピンボーンという小骨や毛髪が混在している場合には、層高さ方向の位置を特定できないため、検出精度に応じた有効断面積を設定して、円管ノズルを介して吸引搬送、除去する方法を選択した。

吸引式ハンドの設計にあたり、ノズルは簡易着脱構造にすることで様々な形状、範囲を部品交換でテスト対応できるように試作した。

また吸引後の配管経路は凹凸のないサニタリー配管を選定し、食品に適したホースを選定するとともにハンド材質もステンレス製にすることで丸洗い洗浄、耐薬品製に適した設計をした。吸引時にノズルに付着した製品、汚れが不衛生になるため、アルコールや洗浄水を吸引できる構造にして配管経路を洗浄できるようにした。

固形物(ハンバーグ等)除去を目的としたロボットハンドの設計・試作

固形物の除去を目的としたロボットハンドとしては、チャック式のハンド(図2-4-1)を設計・試作し、製品形態に応じた適切なサイズや材質を検討した。

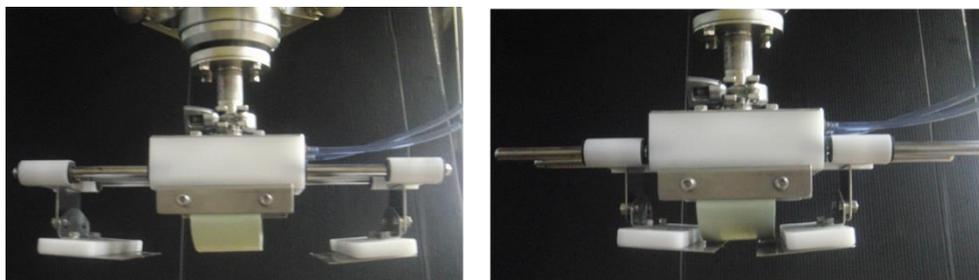


図2-4-1:ハンバーグ向けチャック式ハンド

【2-2】異物除去性能試験および評価

検出部を電磁波代用の画像装置とし、置き換え排出動作の評価を行った。異物は $\phi 10$ 前後の白紙を切り出したものを異物に設定し画像処理装置にて認識し、追従動作により 1 秒追従(吸引時間)し異物をサイクロンタンクに排除する一連の動作を検証した(図 2-5-1)。この際、ロボットの追従精度が $\pm 1\text{mm}$ 以内で動作することから、実用上使えるレベルであると判断した。

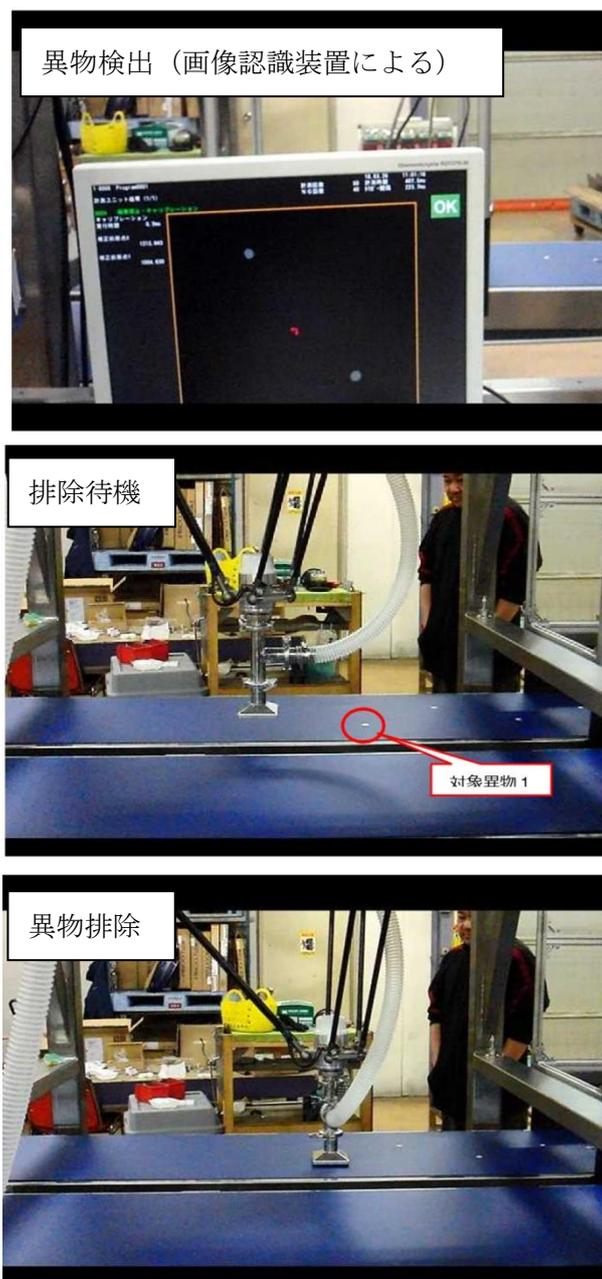


図2-5-1: 疑似異物除去性能試験様子

鮭フレークを使用した異物除去試験

検証に実ワークである鮭フレークを用いて、電磁波代用の画像装置により置き換え排出動作の評価を行った。異物は $\phi 10$ 前後の白紙を切り出したものを異物に設定し画像処理装置にて認識し、追従動作により 1 秒追従(吸引時間)し異物及び異物周辺の鮭フレークをサイクロンタンクに排除する一連の動作を検証した。

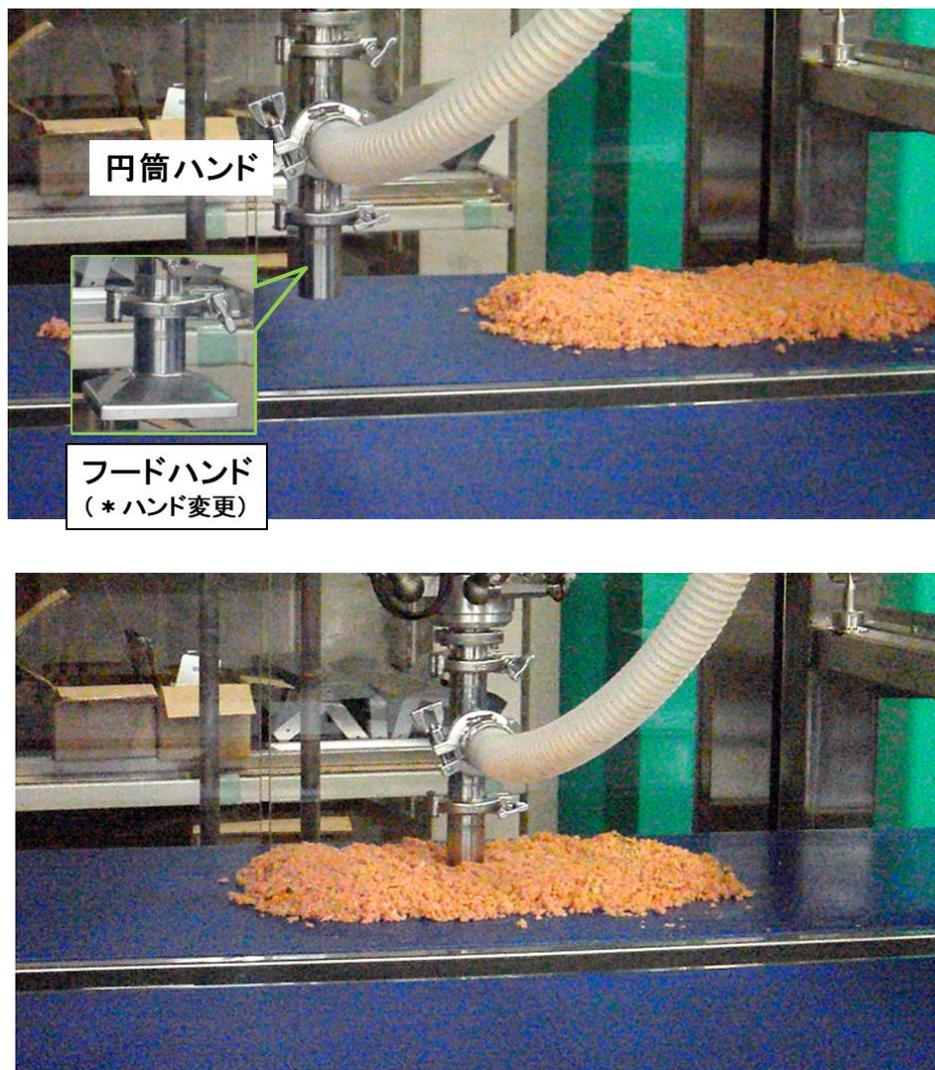


図2-5-2: 疑似異物を用いた鮭フレーク吸引性能試験様子

ノズル形状にフードハンドと円筒ハンドを使用して吸引試験に供したところ、広い面積を吸引する場合はフードハンドが適しており、厚みのあるフレークを吸引する場合、円筒ハンドが適していた。フレークを 30 mm 程度に厚盛りした場合、フードハンド形式ではフレークの取り残しが発生し、ノズル形式を筒状に変更したところ取り残しが減少することを確認した。吸引試験結果を表 2-5-1 に示す。

・□10cm範囲の吸引除去を目的としたハンドノズル部の吸引試験結果

	結果	原因
フードハンド薄盛り	取り残しが発生	ベルトとノズルテーパー面でワークを押し抵抗によって吸引が安定できない
フードハンド厚盛り	取り残しが発生	吸引範囲(空間)に余裕があってもテーパー面が予想以上に抵抗となり、吸引に影響した
円筒厚盛り	取り残し無	適正に吸引できており、筒状ハンドが望ましい

表2-5-1:各ハンドノズルによる鮭フレーク吸引性能試験結果



図2-5-3:鮭フレーク吸引性能試験結果

吸引で異物を分離除去するにあたり、製品を搬送させているベルト面も同時に吸い上げてしまう現象が確認された。そこで吸引部のノズル形状が密閉しない工夫とロボットの動作を吸引中は搬送ベルトにハンドを追従させ吸引を停止してから上空にハンドを上げる事で緩和できた。表2-5-2に各ノズル形状によるワークの吸引結果を示す。円筒Φ30の吸引ノズルの場合、ホース径とほぼ同一で取り残しがなく吸引可能であることを確認できた。四角□100の範囲を吸引するため、四角錐やΦ100程度の円筒状のノズルで吸引すると抵抗や中心部が真空状態となり、フレークの取り残しが発生する。そこで配管抵抗を減少させるため、サニタリー配管のレデューサーを使用したノズルでのワーク吸引を実施したところ、フレークの粗さや湿り具合で綺麗な円状にはならないが、フレークの取り残しが減少することを確認した。Φ30程度の吸引であれば円筒状のノズルが、□80程度の吸引であればレデューサー式のノズルが望ましいと思われる。図2-5-4に各ノズルによる鮭フレーク吸引試験の様子を示す。

ノズル	口径(mm)	取り残し	吸引範囲(mm)
四角錐状	□100×100	有	—
円錐状	Φ100	有	—
	Φ50	有	—
	Φ30	無	Φ30
レデューサー式	Φ50	少	Φ60
	Φ75	少	Φ80

表2-5-2:ノズル形状によるワークの吸引結果

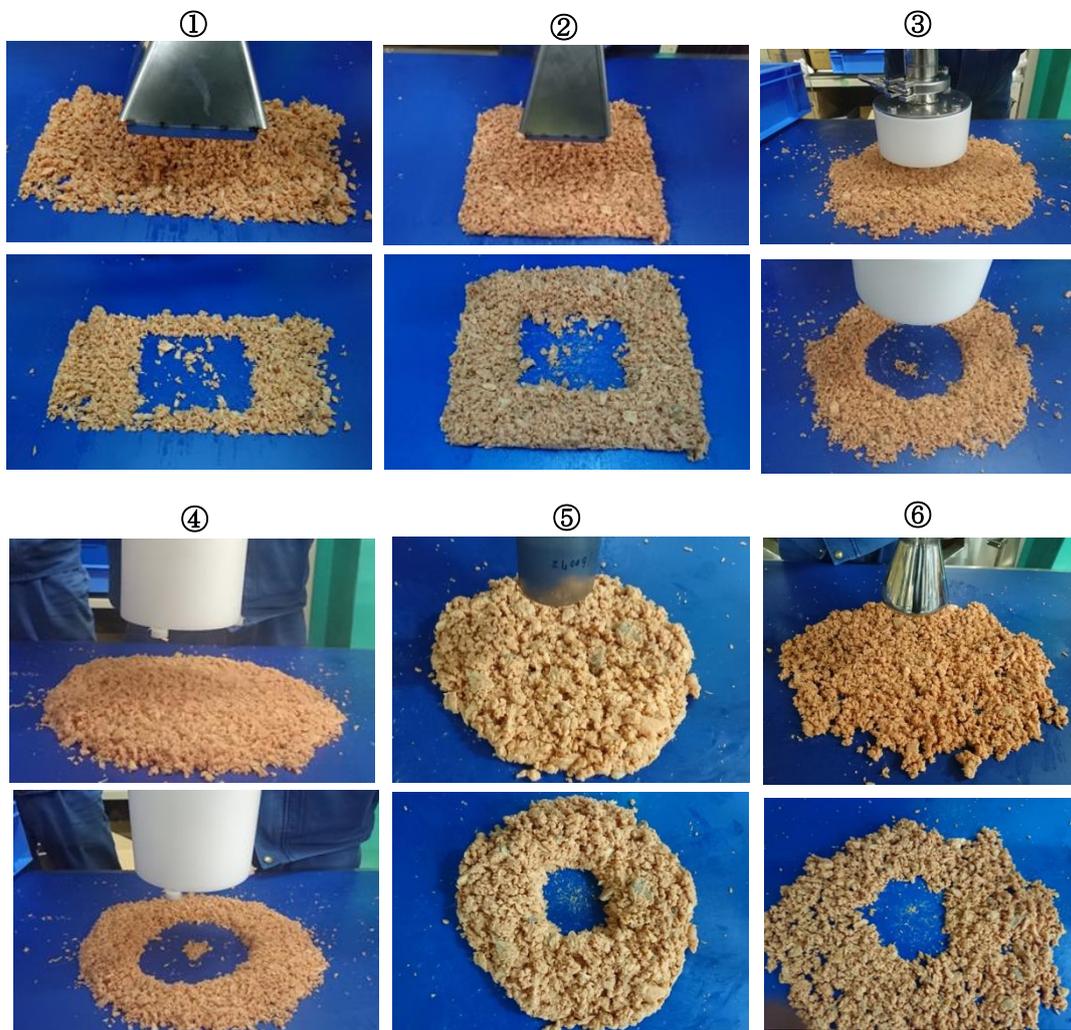


図2-5-4:各吸引ノズルによる鮭フレーク吸引性能試験結果様子

①四角錐 100mm 角 ②四角錐 75mm 角 ③円筒 Φ100mm

④円筒 Φ75mm ⑤レデューサー Φ50mm ⑥レデューサー Φ75mm

食肉ハンバーグ(固形物)を使用した異物除去試験

検証に疑似ワークと実ワークである食肉ハンバーグを用いて、電磁波代用の画像装置による置き換え排出動作の評価を行った。疑似ワークは厚みが1 mm以下の薄い紙にハンバーグを印刷したものを切り抜いてワークとして使用し、画像処理装置にて認識したワークを追従動作によりロボットハンドで移載する一連の動作を検証した。使用したワークの外観を図 2-5-5、チャック式のロボットハンドによる移載動作を図 2-5-6 に示した。

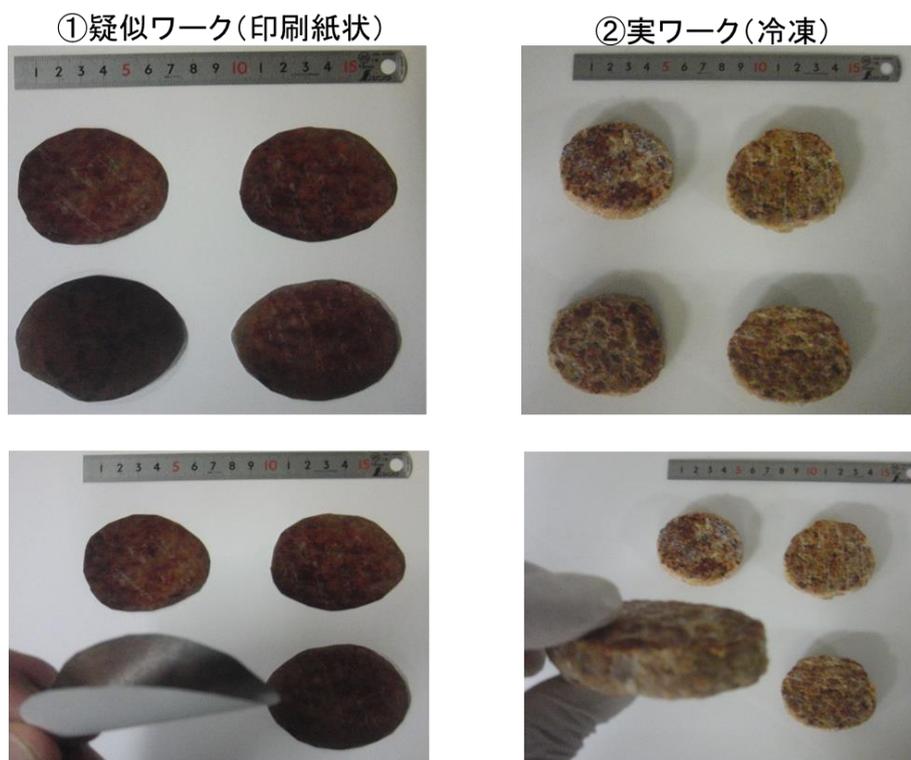


図2-5-5:食肉ハンバーグの疑似ワークと実ワーク



図2-5-6:開発したチャック式ハンドによる食肉ハンバーグの移載動作

この検証によって、チャック式のハンドにより食肉ハンバーグの移載が可能であることが確認できたが、チャック式のハンドはハンドサイズが大きいため製品の多列や密集に対応できない。そこで処理数向上のために、吸着式ハンドで食肉ハンバーグをピックアップする方式を検証することにした。

吸着式ハンドによる検証

吸引力・吸着力を得るための動力としては真空式あるいはブローア式を適宜選択することにより、処理効率およびエネルギー効率を高めることができる。下記に各吸着法と吸着パッドの組み合わせによる把持性能評価試験結果を示す。

・真空発生器＋吸着パッド

包装物、非包装物に対して把持性能試験を実施したところ、密閉が可能であれば、吸着に問題がないことが分かった。非包装の場合、密閉状態の確保が困難なため安定しなかった。

・ブロータイプ＋吸着パッド

包装物、非包装物に対して把持性能試験を実施したところ密閉状態にならなくても吸着可能であることが分かった。

開発した吸着パッドによる食品の把持性能について下表 2-5-3 にまとめた。

動力源	ハンド	包装	結果
真空式	吸着パッド	有	密閉が可能であれば吸着可能
真空式	吸着パッド	無	密閉状態の確保が困難なため安定せず
ブローア式	吸着パッド	有	密閉状態にならずとも吸着可能
ブローア式	吸着パッド	無	密閉状態にならずとも吸着可能

表2-5-3:各種吸着パッドの食品把持性能評価

【3. 統合型異物検出・除去システムの実証・評価】

1-1項で開発した異物検出用センサを各センサユニットに搭載し、実施機関である(株)ニッコーの本社内工場で実作業条件下を想定した実証試験を複数回実施した。各センサユニットの外観と実証試験の様子を下図に示す。

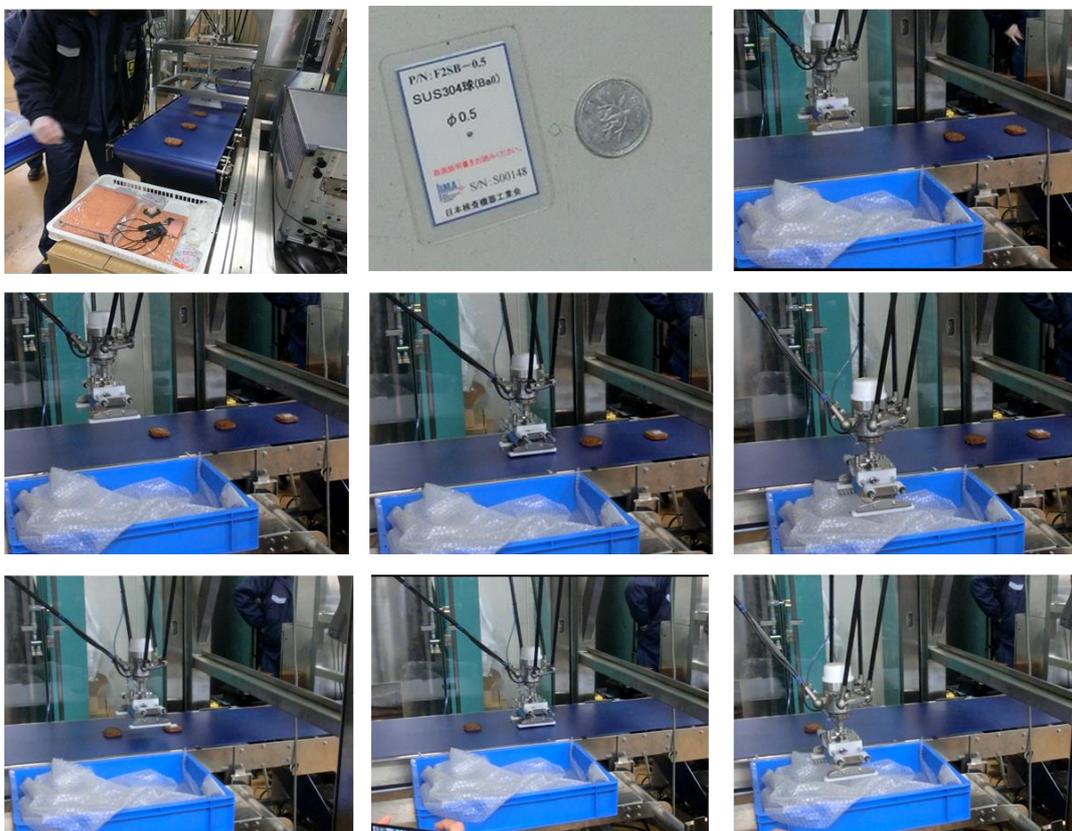


図2-6-1:ハンバーグ除去性能実証試験様子(アンテナセンサ B 使用)

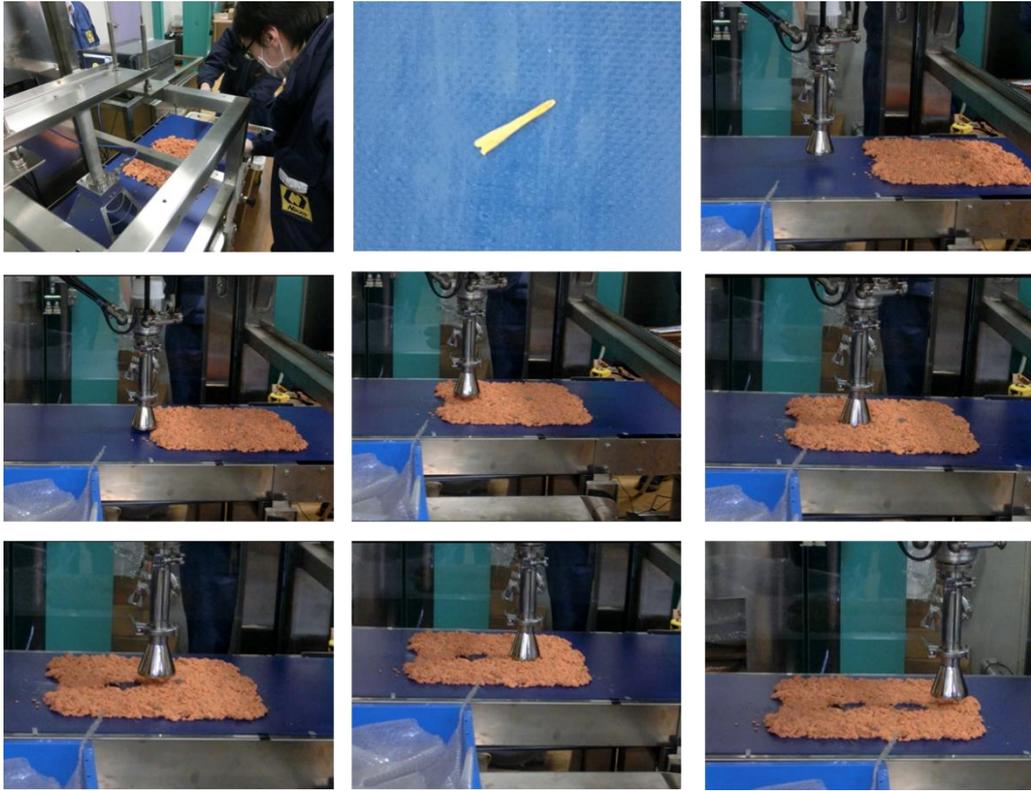


図2-6-2: 鮭フレーク除去性能実証試験様子(アンテナセンサ B 使用)

平成 31 年度は異物検査装置を実際の食品工場内に持ち込み、試験を実施する予定であったが、実用化適用仕様まで設計を落とし込むまでに至らなかったため、実環境を想定した性能試験を事業実施機関である(株)ニッコーの本社工場内で繰り返し行うことで、課題の抽出と計測精度の向上に取り組んだ。

上記試験では、一度基準となるワークをベルトコンベア上で搬送させ、送受信部からマイクロ波を照射させて基準値を事前に取得した後に異物判定に供して、一連の異物判定と異物除去を確認することができた。だが、この仕様は実用化適用仕様とは乖離がある。

課題としては、被検体食品の物性値の変動による電気的特性(複素誘電率)の変化が、異物混入による電気的特性(複素誘電率)の変化よりも大きい場合、原理的に検出が難しいことがあげられる。今後は被検体食品の水分量や塩分濃度、脂質含量といった食品物性値と計測値の相関関係に関する系統的なデータ蓄積を再現性(reproducibility)の取れる形で行い、品種ごとに適切なリファレンスデータ生成することによって、実操業条件におけるマイクロ波異物検出装置の計測精度の向上に取り組む。

第3章 全体統括

3-1. 研究開発成果総括と今後の課題

マイクロ波帯域を使用した本検出装置は、既存の装置(X線検査装置、テラヘルツイメージング装置等)と比較して、導入コストの低い検査装置であることに優位性があり、研究期間内に周波数を適当に選定することで検出部の低コスト化を図ることができた。

またシステムおよび良品が有するドリフトやばらつきに係る要素の検証を重点的に実施することで、本事業で開発したマイクロ波異物検査装置が実操業条件・環境下においてもその性能を発揮することが確認できた。

課題としては検出精度向上の課題が残っており、現在インラインにおけるワーク連続投入におけるリファレンスデータの適切な設定がなされておらず、実用機レベルにおける製品化にはこの課題を克服する必要がある。対象食品の条件(形状・厚みなど)やセンサからの距離を限定することで、金属および非金属異物の検出は可能だが、対象食品の条件が常に変動するような実環境を想定した条件下で異物を安定的に検出できるように検出精度の改善に取り組む。

現在この課題を解決するために、計測部およびデータ解析部分について複数の改良案を提案し、検証を進めている。

具体的には、以下の対応を予定している。

- ・計測パラメータ追加(逆方向計測結果の追加)による判定評価実施。
- ・広帯域計測値の結果(異物有/無それぞれの波形データ自体)をAI学習することにより異物有無判定可能か検証実施。
- ・タイムドメインによる実用計測手法の検証
- ・MT法などの導入による安定検出の実証(数学的手法による計測データ解析処理)

3-2. 補助事業の成果に係る事業化展開について

食品用マイクロ波異物検出装置は、マイクロ波を応用した水分を含有する食品中の異物を特定する画期的な非破壊検出装置で、金属はもとより様々な非金属異物の位置座標をモニタリングできるものである。その用途は、一次から三次の加工食品の異物混入検査で、異物の種類は、金属および動物性・植物性・鉱物性の非金属までカバーすることができる画期的な装置である。装置の特徴としては、異物の識別と特定が可能であるだけでなく、生産ラインでその異物の位置座標を連続的に検出できるようになる。競合する他社製品としては、テラヘルツ波を用いたイメージング検出装置があるが、検査対象は乾燥食品に限定され、今回の対象となっているサケフレークなどの水分を多く含有する加工品には適しておらず、マイクロ波型の開発する装置の優位性が高い。

対象食品の条件(形状・厚み)やセンサからの距離を限定することで、金属および非金属異物の検出が可能だが、現在インラインにおけるワーク連続投入におけるリファレンスデータの適切な設定がなされておらず、実用機レベルにおける製品化にはこの課題を克服する必要がある。透過型計測環境に移行したことにより、上→下、下→上各方向への計測が可能となっており双方向計測における新たなパラメータ設定、計測波形のAI解析などにより課題克服の具現化を図る必要がある。その他の非金属異物の検出に関しても、測定結果の信頼性向上とデータの蓄積によるセンサユニットおよび送受信モジュールの最適設計、および性能評価をとおして、複数の異物を同一装置で検出が可能となる。開発製品の製造は高精度の実装・組み込み技術を要するが、(株)ニッコーの設計・製造・ロボット技術力とノウハウを駆使することで実現できるものである。売先についても多数の販売チャネルや支援機関の活用により販路拡大が充分に見込め、開発製品の量産化を実現する生産管理体制を構築することにより事業化は可能である。