

## 第3章

### 食品の非破壊内部検査技術の開発

#### 3.1 はじめに

北海道の食品加工現場においては、原料の外観による不良品の判断に加え、傷みや腐れなど外観からは判断できない内部欠陥の判別・除去作業に多くの人手を費やしている。しかし、近年十分な作業人員を確保することが困難な状況となっていること、また、人手で判別作業を行っているため作業員により判別精度がバラつくことなどが課題となっている。

以上のことから、原料となる食品の内部欠陥を人手に頼らず自動で高速かつ精度良く検出する検査装置の早期開発が望まれている。

本研究では、既往の研究成果<sup>1)</sup>を基に食品検査の自動化に適した内部欠陥検査技術を開発する。具体的には、内部が木質化した人参(以下、抽苔)の判別作業を対象とし、これらを高速かつ高精度に非破壊で検出する技術を開発する。また、開発した非破壊内部検査技術を実用化するための他の食品へ適用可能かについて検討する。

#### 3.2 非破壊検査技術の開発

##### 背景

近赤外光や紫外光などによる光を用いた検査手法で抽苔人参を検出する試験を実施し、各々の検出精度や処理速度、導入コストを比較し、抽苔人参の判別に最適な手法を選定する。

##### 1) 紫外光を用いた手法による抽苔人参の判別試験(葉柄基部およびダイス状)

###### (1) 目的

紫外光を用いた手法による加工前および加工後(図1-1参照)の抽苔の判別手法について検討する。

###### (2) 試験方法

###### ア. 試験材料

###### ①加工前

- ・人参(スチームピーラーで外皮を除去(以下、スチームピーリング)): 正常20本、抽苔18本
- ・人参(生人参): 正常25本、抽苔15本

###### ②加工後

- ・人参(ダイス状に加工、4.8mm角): 正常42粒、抽苔12粒
- ・人参(ダイス状に加工、10mm角): 正常20粒、抽苔12粒
- ・人参(ダイス状に加工、15mm角): 正常24粒、

###### 抽苔17粒

※加工後の人参は、反射光を用いた撮像のみ実施  
イ. 主な構成部品

＜紫外光による試験環境(透過光撮像)＞

①カメラ: ARTCAM-407UV-WOM(検出波長帯200nm～900nm)((株)アートレイ製)

②レンズ: UV2528B(ユニバース光学工業(株)製)

③光源: IDBA-CH75L-UV-365(ピーク波長:365nm)、IDBA-CH150L-UV-375(ピーク波長:375nm)、IDBA-CH75L-UV-385(ピーク波長:385nm)、IDBA-CH225L-UV-395(ピーク波長:395nm)(株)レイマック製)

＜紫外光による試験環境(反射光撮像)＞

①カメラ: STC-MCS163U3V(検出波長帯400nm～1000nm)(オムロンセンテック(株)製)

②レンズ: VS-0818VM((株)ヴィ・エス・テクノロジー製)

③フィルター(ロングパスフィルター): #64-633(カットオン波長:475nm)(エドモンドオプティクス製)

④光源: IDBA-CH75L-UV-385(ピーク波長:385nm)((株)レイマック製)

⑤画像解析ソフトウェア: MATLAB 2021a

###### ウ. 試験方法

＜透過光(紫外光)を用いた判別試験＞

①図1-2に示す試験環境を構築し、人参を設置する。

②構築した試験環境で人参の撮像を行い、撮像した画像から抽苔判別の可否を確認する。

＜反射光(紫外光)を用いた判別試験＞

①図1-3に示す試験環境を構築し、人参を設置する。

②構築した試験環境で人参の撮像を行い、撮像した画像から抽苔判別の可否を確認する。

##### (3) 結果および考察

###### ア. 透過光を用いた判別試験

①撮像結果の一例を図1-4に示す。

②加工前と加工後のいずれの人参においても紫外光は透過せず(撮像画像は全面黒色)、抽苔判別は不可であることを確認した。

###### イ. 反射光を用いた判別試験

①取得した画像に色のしきい値を設け、抽苔部分を赤枠で囲う画像処理プログラムをMATLAB2021aで作成した。

②撮像結果の一例を図1-5に示す。

③紫外光を照射すると抽苔部分が蛍光することが判明した。本試験では蛍光箇所の有無で抽苔判

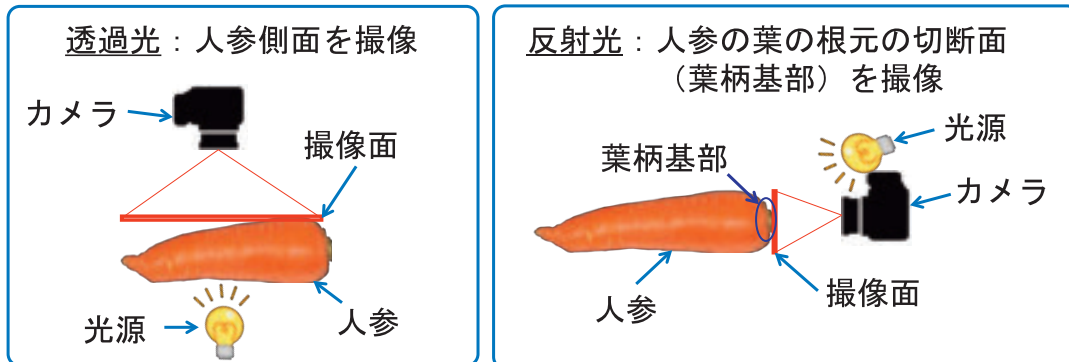
別を実施した。

- ④スチームピーリング後の人参(加工前)における抽苔有無の判別精度(正解率)は78.9%であった。試験本数の混合行列を表1-1に示す。本試験では、正常を抽苔と誤判別した割合が35.0%、抽苔を正常と誤判別した割合が5.6%であった。
- ⑤生人参(加工前)における抽苔有無の判別精度は72.5%であった。試験本数の混合行列を表1-2に

示す。本試験では、正常を抽苔と誤判別した割合は44.0%であったが、抽苔を正常として誤判別することはなかった。

- ⑥加工後の人参における抽苔有無の判別精度(全サイズの平均値)は、98.0%であった。試験本数の混合行列を表1-3に示す。本試験において、正常を抽苔と誤判別した割合は全サイズ平均で3.0%であったが、抽苔を正常と誤判別すること

#### 【加工前】スチームピーリング後および生人参を撮像



#### 【加工後】ダイス状に加工した人参を撮像

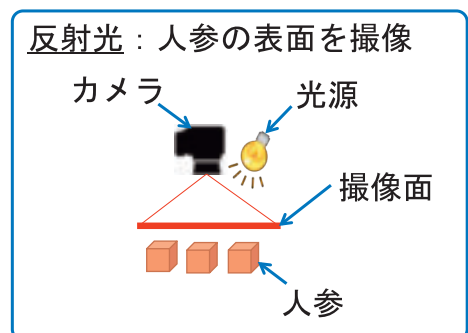


図1-1. 加工前と加工後の人参について

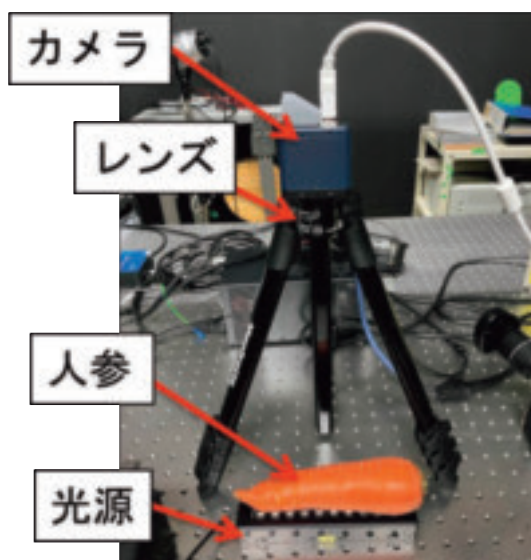


図1-2. 透過光(紫外光)撮像による抽苔人参の判別試験環境

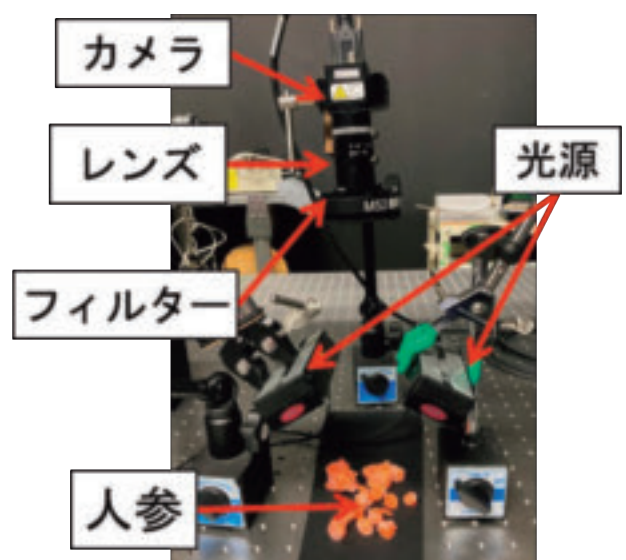


図1-3. 反射光(紫外光)撮像による抽苔人参の判別試験環境

はなかった。

⑦加工前の人参について、葉柄基部から露出した抽苔が蛍光するため抽苔を判別することができたが、判別精度は高くなかった。原因として、正常な人参の葉柄基部も蛍光する場合があること、また、抽苔人参の葉柄基部において露出した抽苔領域が小さいため認識できないことなどが考えられる。

⑧加工後の人参は、ダイス状に加工された際に抽苔部分が露出するため、判別精度が高くなったと考えられる。

⑨本手法を用いることで加工後の人参における抽苔判別は、高い判別精度であることを確認した。



波長:365nmの撮像画像  
(スチームピーリング)

図 1-4. 透過光（紫外光）撮像結果の一例

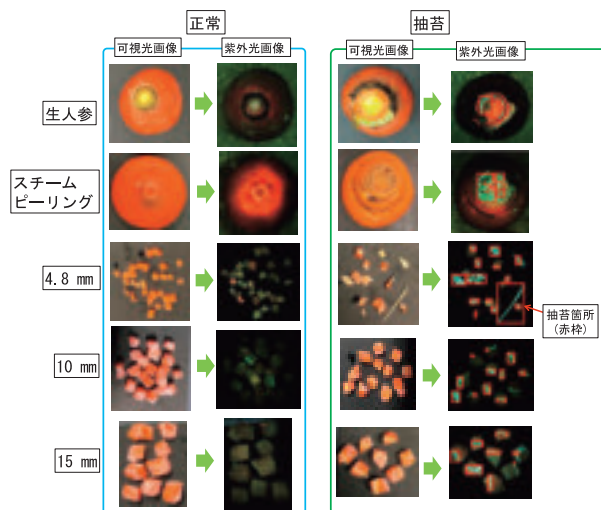


図 1-5. 反射光（紫外光）撮像結果の一例

表 1-1 スチームピーリング後の人参における試験本数の混合行列(反射光（紫外光）)

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 13 | 1  |
|              | 抽苔 | 7  | 17 |

表 1-2 生人参における試験本数の混合行列(反射光（紫外光）)

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 14 | 0  |
|              | 抽苔 | 11 | 15 |

表 1-3 加工後の人参における試験粒数の混合行列(反射光（紫外光）)

| 4.8mm        |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 40 | 0  |
|              | 抽苔 | 2  | 12 |

| 10mm         |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 20 | 0  |
|              | 抽苔 | 0  | 12 |

| 15mm         |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 23 | 0  |
|              | 抽苔 | 1  | 17 |

2) 近赤外ハイパースペクトルカメラを用いた手法による抽苔人参の判別試験(葉柄基部およびダイス状)

(1) 目的

既往の研究成果<sup>1)</sup>より、近赤外ハイパースペクトルカメラを用いた手法は、抽苔人参を高い精度で判別可能であることが明らかとなっている。そこで、近赤外ハイパースペクトルカメラを用いた手法を活用し、加工前および加工後の抽苔人参(図 1-1 参照)の判別手法について精度検証する。

(2) 試験方法

ア. 試験材料

①加工前

- ・人参（スチームピーリング後）：正常 20 本、抽苔 18 本
- ・人参（生人参）：正常 25 本、抽苔 15 本

②加工後

- ・人参（ダイス状に加工、4.8mm 角）：正常 31 粒、抽苔 27 粒
- ・人参（ダイス状に加工、10mm 角）：正常 28 粒、

抽苔 17 粒

- ・人参（ダイス状に加工、15mm 角）：正常 15 粒、  
抽苔 12 粒

イ. 主な構成部品（近赤外ハイパースペクトルカメラによる試験環境（反射光撮像）

①カメラ：FX17-F0V38（検出波長帯 900nm～1700nm）  
（Specim 社製）

②光源：LDL-222X42CIR-LACL（シーシーエス（株）製）

③画像解析ソフトウェア：Perception STUDIO\_OFF  
（Perception Park 社製）

ウ. 試験方法

<反射光（近赤外ハイパースペクトル）を用いた判別試験>

①図 1-6 に示す試験環境を構築し、コンベア上に人参を設置する。

②人参の撮像を行い、取得した画像を近赤外ハイパースペクトルカメラ専用の画像解析ソフトウェアを用いて解析することで抽苔を判別する。  
具体的には、撮像データから得られた特徴的な複数の波長を選択し、抽苔を青色、それ以外の部分を青色とする画像処理を行い、青色箇所の有無で抽苔判別の精度検証を行う。

### （3）結果および考察

ア. 近赤外ハイパースペクトルカメラで取得した画像を解析する画像処理プログラムを、画像解析ソフトウェア Perception STUDIO\_OFF で作成した。

イ. 取得した画像に色のしきい値を設け、抽苔部分を赤枠で囲う画像処理プログラムを MATLAB2021a で作成した。

ウ. 画像解析後の画像の一例を図 1-7 に示す。

エ. スチームピーリング後（加工前）の人参における抽苔有無の判別精度は 97.4%であった。試験本数の混合行列を表 1-4 に示す。本手法では、正常を抽苔と誤判別した割合が 5.0%あったが、抽苔人参を正常人参として誤判別することはなかった。

オ. 生人参（加工前）における抽苔有無の判別精度は 87.5%であった。試験本数の混合行列を表 1-5 に示す。本手法では、正常を抽苔と誤判別した割合が 20.0%あったが、抽苔を正常として誤判別することはなかった。

カ. スチームピーリング後の人参と比べて生人参の判別精度が下がった原因として、葉柄基部の周辺の水分含有量の低い箇所（図 1-8）を抽苔と誤認識していることが考えられる。

キ. 加工後の人参における抽苔有無の判別精度（全

サイズの平均値）は 100%であった。試験粒数の混合行列を表 1-6 に示す。

ク. スチームピーリング後（加工前）の人参と加工後の人参に対しては、本手法を用いることで高い判別精度で抽苔選別が可能であることを確認した。

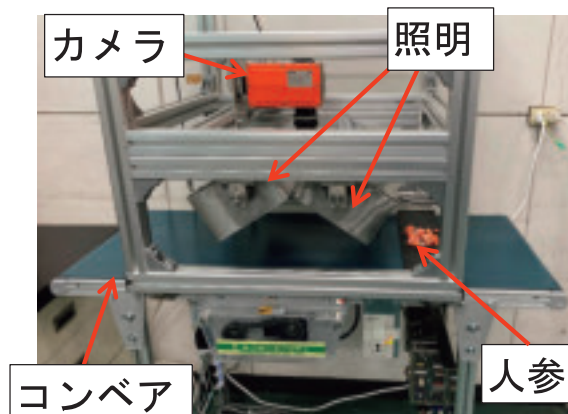


図 1-6. 近赤外ハイパースペクトルカメラを用いた抽苔人参の判別試験環境

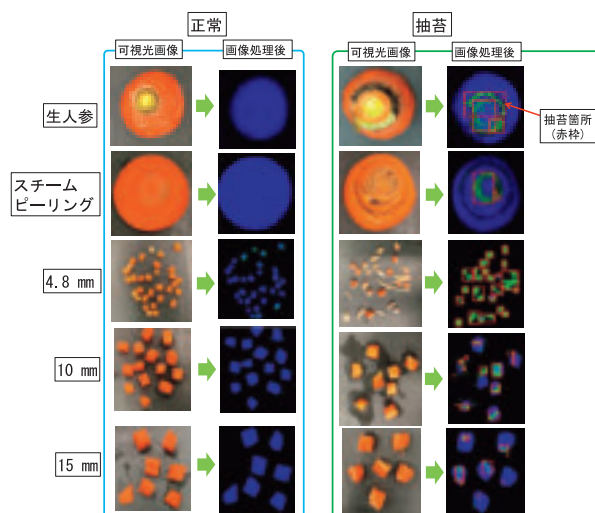


図 1-7. 画像処理後の解析結果の一例

表 1-4 スチームピーリング後の人参における試験本数の混合行列（反射光（近赤外ハイパースペクトルカメラ））

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>（予測） | 正常 | 19 | 0  |
|              | 抽苔 | 1  | 18 |

表 1-5 生人参における試験本数の混合行列(反射光(近赤外ハイパースペクトルカメラ))

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 20 | 0  |
|              | 抽苔 | 5  | 15 |

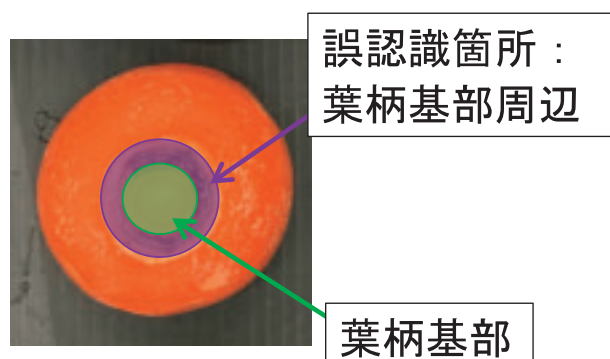


図 1-8. 抽苔と誤認識した箇所

表 1-6 加工後の人参における試験粒数の混合行列(反射光(近赤外ハイパースペクトルカメラ))

| 4.8mm        |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 31 | 0  |
|              | 抽苔 | 0  | 27 |

| 10mm         |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 28 | 0  |
|              | 抽苔 | 0  | 17 |

| 15mm         |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 15 | 0  |
|              | 抽苔 | 0  | 12 |

### 3) 可視光を用いた手法による抽苔人参の判別試験(葉柄基部およびダイス状)

#### (1) 目的

可視光による加工前および加工後(図 1-1 参照)の抽苔人参の判別手法について検討する。

### (2) 試験方法

#### ア. 試験材料

##### ①加工前

- ・人参 (スチームピーリング後) : 正常 20 本、抽苔 18 本
- ・人参 (生人参) : 正常 10 本、抽苔 10 本

##### ②加工後

- ・人参 (ダイス状に加工、4.8mm 角) : 正常 46 粒、抽苔 12 粒

※加工後の人参は、反射光を用いた撮像のみ実施イ. 主な構成部品

<可視光による試験環境(透過光撮像)>

①カメラ : ARTCAM-407UV-WOM (検出波長帯 200nm~900nm) ((株) アートレイ製)

②レンズ : VS-0818VM ((株) ヴィ・エス・テクノロジー製)

③光源 : IDBB-LSRF100W ((株) レイマック製)

④フィルター (ロングパスフィルター) : #84-752(カットオン波長:625nm) (エドモンドオプティクス製)

⑤フィルター (ショートパスフィルター) : #84-727(カットオフ波長:700nm) (エドモンドオプティクス製)

⑥画像解析ソフトウェア : MATLAB 2021a (MathWorks 社製)

<可視光による試験環境(反射光撮像)>

①カメラ : ARTCAM-407UV-WOM (検出波長帯 200nm~900nm) ((株) アートレイ製)

②レンズ : VS-0818VM ((株) ヴィ・エス・テクノロジー製)

③光源 : MHAB-150W ((株) モリテックス製)

④フィルター (ロングパスフィルター) : #84-752(カットオン波長:625nm) (エドモンドオプティクス製)

⑤フィルター (ショートパスフィルター) : #84-727(カットオフ波長:700nm) (エドモンドオプティクス製)

⑥画像解析ソフトウェア : MATLAB 2021a (MathWorks 社製)

#### ウ. 試験方法

<透過光(可視光)を用いた判別試験>

①図 1-9 に示す試験環境を構築し、人参を設置する。

②構築した試験環境で人参の撮像を行い、撮像したグレースケール画像を疑似カラー画像に変換し、抽苔判別の可否を確認する。

<反射光(可視光)を用いた判別試験>

①図 1-10 に示す試験環境を構築し、人参を設置する。

②構築した試験環境で人参の撮像を行い、撮像したグレースケール画像を疑似カラー画像に変換し、抽苔判別の可否を確認する。

### (3) 結果および考察

ア. 透過光(可視光)を用いた判別試験

①カメラで取得したグレースケール画像を疑似カラー画像にする画像処理プログラムを MATLAB2021a で作成した。

②撮像結果の一例を図 1-11 に示す。

③スチームピーリング後の人参(加工前)を撮像した画像では正常と抽苔に大きな差が見られず、抽苔の判別は困難であった。試験本数の混合行列を表 1-7 に示す。

④生人参(加工前)を撮像した画像では正常と抽苔に大きな差が見られず、抽苔の判別は困難であった。試験本数の混合行列を表 1-8 に示す。

⑤人参の大きさや形状による光の透過度の違いを補正し、補正した画像を用いて抽苔判別を試みたが、正常と抽苔の画像に大きな差異は確認できなかった。人参内部で光が拡散し、形状による補正が効かなかったことが原因と考えられる。

イ. 反射光(可視光)を用いた判別試験

①カメラで取得したグレースケール画像を疑似カラー画像にする画像処理プログラムを MATLAB2021a で作成した。

②撮像結果の一例を図 1-12 に示す。

③スチームピーリング後の人参(加工前)における抽苔有無の判別精度は 55.3%であった。試験本数の混合行列を表 1-9 に示す。本手法では、抽苔を正常と誤判別することはなかったが、正常を抽苔と誤判別した割合が 85%であり、実使用は困難であると考ええる。

④生人参(加工前)の撮像結果では、正常と抽苔に大きな差が見られず、抽苔有無の判別は不可であった。試験本数の混合行列を表 1-10 に示す。

⑤加工後の人参の撮像結果では、正常と抽苔に大きな差が見られず、抽苔有無の判別は不可であった。試験本数の混合行列を表 1-11 に示す。

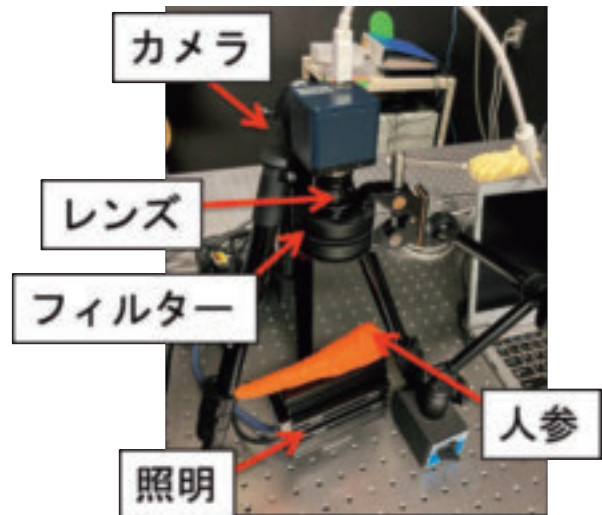


図 1-9. 透過光(可視光)撮像による抽苔人参の判別試験環境

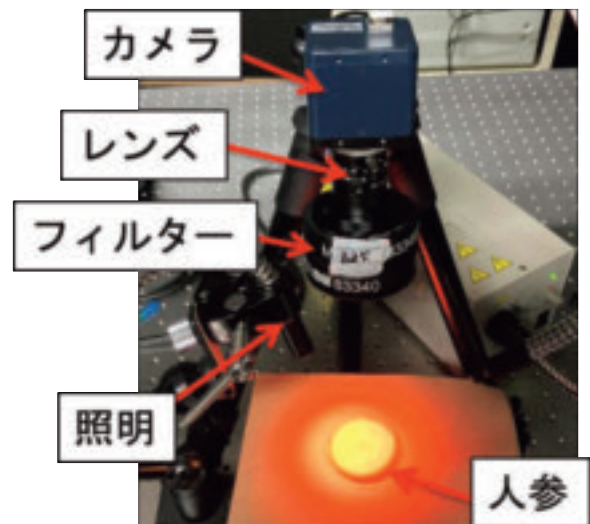


図 1-10 反射光(可視光)撮影による抽苔人参の判別試験環境

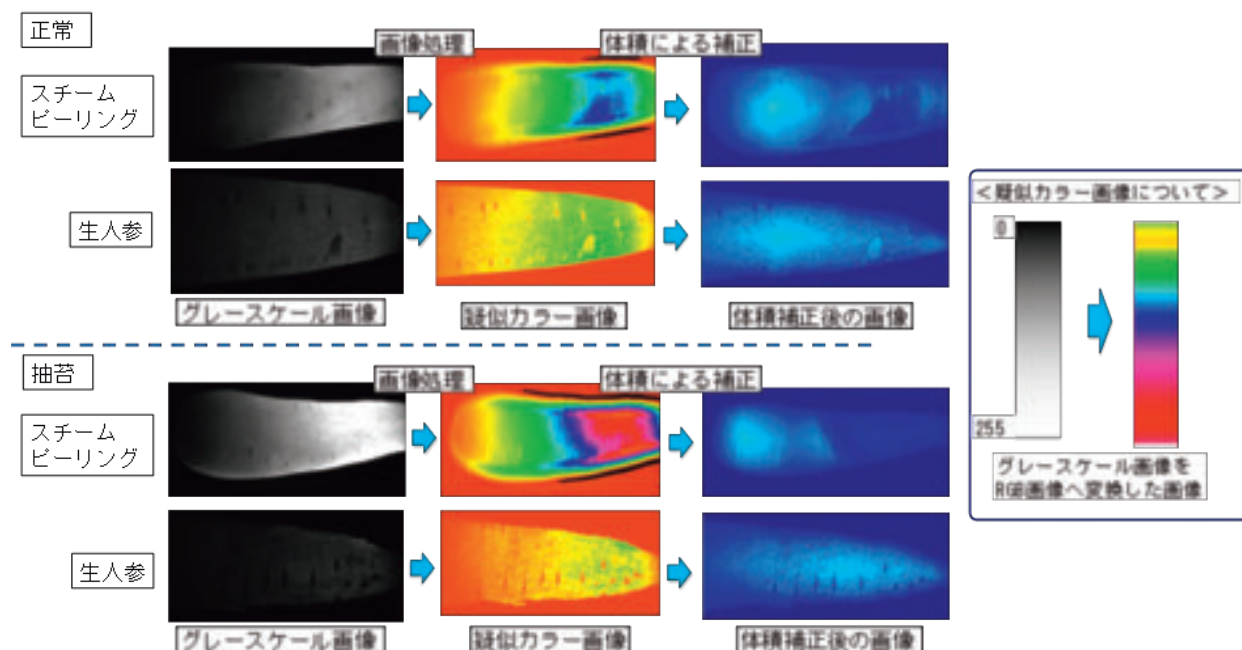


図 1-11. 透過光（可視光）撮像結果の一例

表 1-7 スチームピーリング後の人参の試験本数の混合行列(透過光（可視光）)

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 3  | 2  |
|              | 抽苔 | 7  | 8  |

表 1-8 生人参の試験本数の混合行列(透過光（可視光）)

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 10 | 7  |
|              | 抽苔 | 0  | 3  |

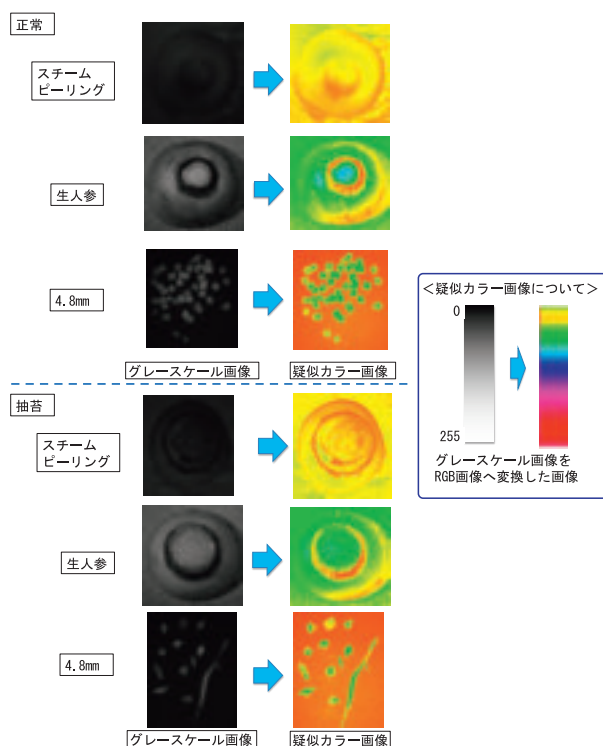


図 1-12. 反射光（可視光）撮像結果の一例

表 1-9 スチームピーリング後の人参の試験本数の混合行列(反射光(可視光))

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 3  | 0  |
|              | 抽苔 | 17 | 18 |

表 1-10 生人参の試験本数の混合行列(反射光(可視光))

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 0  | 0  |
|              | 抽苔 | 10 | 10 |

表 1-11 加工後の人参の試験粒数の混合行列(反射光(可視光))

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 0  | 0  |
|              | 抽苔 | 46 | 12 |

#### 4) 抽苔人参に紫外光を照射した際に蛍光する原因の調査

##### (1) 目的

1-1) において、抽苔に紫外光を照射すると抽苔部分が蛍光する原因について調査する。

##### (2) 試験方法

###### ア. 試験片

1辺15mmの立方体にカットされた正常な人参(以下、正常)と抽苔人参(以下、抽苔):各1個

(スチームピーラーで外皮除去後(以下、スチームピーリング後)にカット)

###### イ. 使用した試薬

①フロログルシノール二水和物:1g

②エタノール:50mL

③塩酸:25mL

###### ウ. 試験方法

①エタノール 50mL にフロログルシノール二水和物 1g を溶解し、塩酸 25mL を加えて混合する。

②正常を薄くスライスする。また、抽苔から固い抽苔部分のみを取り出す。

③スライスした正常と固い抽苔部分をそれぞれシャーレに載せ、各人参に上記で混合した試薬(フロログルシノール二水和物-塩酸試薬)を数滴滴下した後、室温で15分静置する。

④試薬を滴下してから15分後、各人参において赤紫色の着色の有無を確認する。

#### (3) 結果および考察

ア. 試験の結果を図1-13に示す。

イ. 正常に着色は確認できなかったが、固い抽苔部分は赤紫色に着色した。フロログルシノール二水和物-塩酸試薬は、リグニンに反応して着色反応を示す<sup>2)</sup>。このことから、固い抽苔部分にはリグニンが含まれていることが分かった。

ウ. リグニンは紫外光を照射すると蛍光する特性がある<sup>3)</sup>。以上のことから、抽苔が蛍光する現象は、抽苔部分に蛍光特性を持つリグニンが含まれていることが原因であると言える。

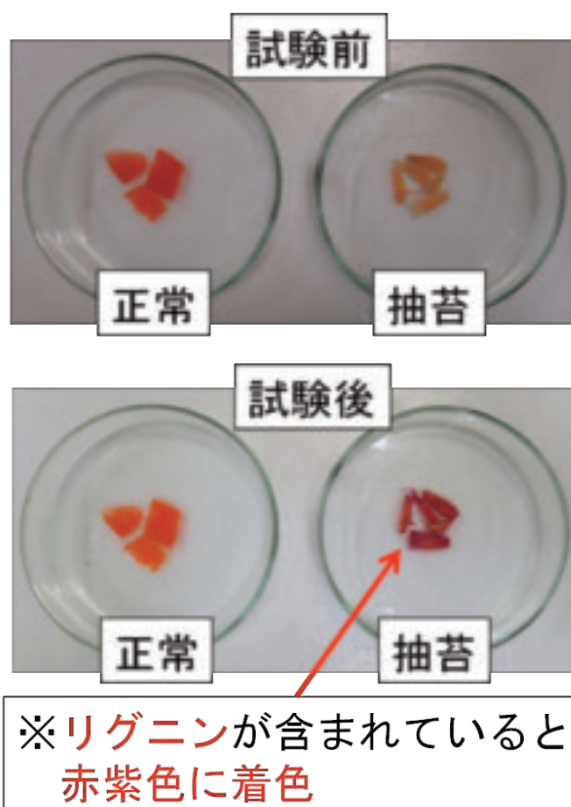


図 1-13 フロログルシノール二水和物-塩酸試薬 着色試験

#### 5) 切断面観察による抽苔人参判別試験

##### (1) 目的

人参の加工を行う道内企業(以下、ユーザー企業)から人参の葉柄基部を除去した切断面(図1-14)の観察による抽苔選別についてニーズがあった。1-1) ~1-3)の結果から、近赤外ハイパース

ペクトルカメラを用いた手法(以下、近赤外光)と紫外光を用いた手法(以下、紫外光)を用いて人参の切断面を観察した場合の抽苔判別精度について検証する。

## (2) 試験方法

### ア. 試験片

①人参 (スチームピーリング後) : 正常 20 本、抽苔 18 本

### イ. 主な構成部品

<近赤外光による試験環境>

①カメラ : FX17-F0V38 (検出波長帯 900nm~1700nm) (Specim 社製)

②光源 : LDL-222X42CIR-LACL (シーシーエス(株) 製)

③画像解析ソフトウェア : Perception STUDIO\_OFF (Perception Park 社製)

※図 1-6 と同様の試験環境

<紫外光による試験環境>

①カメラ : STC-MCS163U3V (検出波長帯 400nm~1000nm) (オムロンセンテック (株) 製)

②フィルター (ロングパスフィルター) : #64-633 (カットオン波長 : 475nm) (エドモンドオプティクス製)

③光源 : IDBA-CH75L-UV-385 (ピーク波長 : 385nm) ((株) レイマック製)

④画像解析ソフトウェア : MATLAB 2021a

### ウ. 判別方法

<近赤外光による抽苔の判別試験>

①図 1-6 に示す試験環境を構築し、コンベア上に試験片を設置する。

②試験片の撮像を行い、取得した画像を Perception STUDIO\_OFF を用いて解析することで抽苔を判別する。具体的には、撮像データから得られた特徴的な複数の波長を選択し、抽苔を緑色、それ以外の部分を青色とする画像処理を行い、緑色箇所の有無で抽苔判別の精度検証を行う。

<紫外光による抽苔の判別試験>

①図 1-15 に示す試験環境を構築し、試験片を設置する。

②試験片の撮像を行い、撮像した画像を MATLAB 2021a で作成した画像解析プログラムを用いて解析することで抽苔を判別する。具体的には、適切な色のしきい値を設定して蛍光箇所を検出する画像処理を行い (抽苔箇所は蛍光する)、蛍光箇所の有無で抽苔判別の精度検証を行う。

## (3) 結果および考察

ア. 近赤外光および紫外光による判別結果の一例

を図 1-16 に示す。

イ. 近赤外光による抽苔の有無の判別精度は 65.8%であった。試験本数の混合行列を表 1-12 に示す。近赤外光では、正常を抽苔と誤判別した割合が 20.0%、抽苔を正常と誤判別した割合が 50.0%であった。

ウ. 紫外光による抽苔の有無の判別精度は 84.2%であった。試験本数の混合行列を表 1-13 に示す。正常を抽苔と誤判別した割合は 30.0%であったが、抽苔を正常として誤判別することはなかった。

エ. 人参の切断面を観察する場合、紫外光を用いることで高い判別精度が得られることが分かった。

オ. 近赤外光では、紫外光と判別結果が異なることから、リグニンの有無で判別を行っていない可能性が高く、水分量の違いなどに着目して判別をしていたと考えられる。

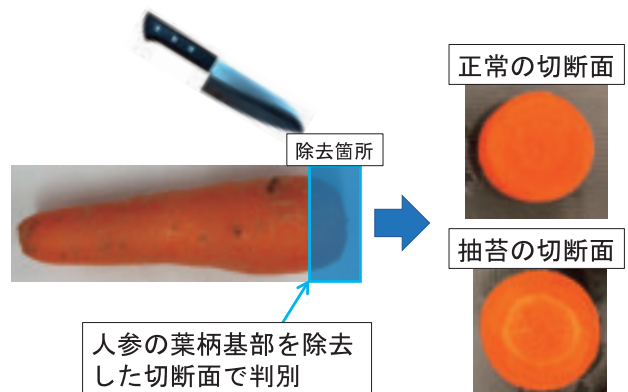


図 1-14. 人参の切断面の一例

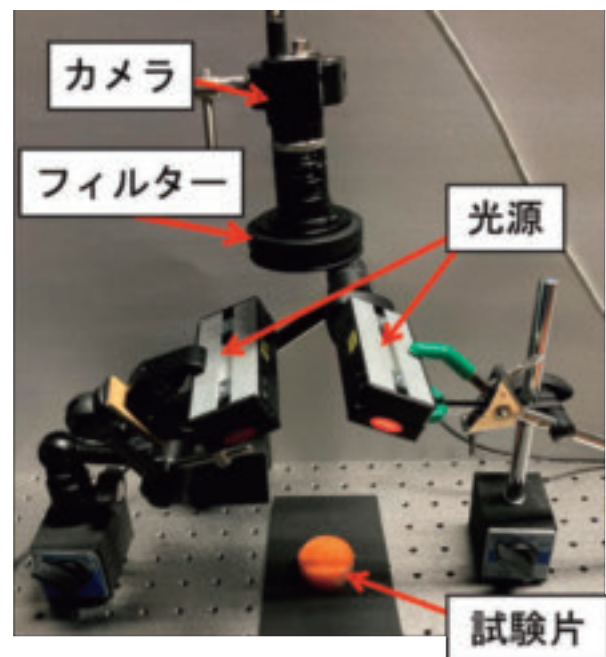


図 1-15. 紫外光による抽苔の判別試験環境

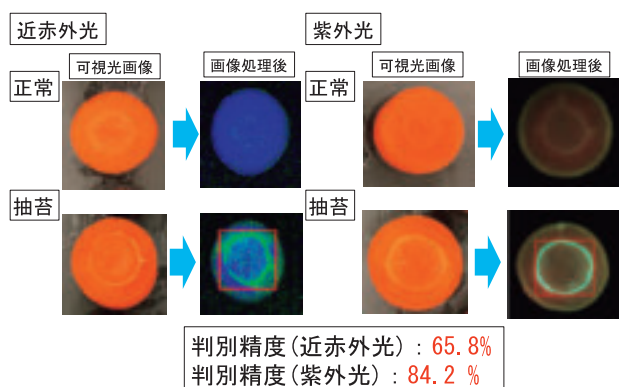


図 1-16. 近赤外光および紫外光による判別結果の一例

表 1-12 近赤外光ハイパースペクトルカメラにおける人参の試験本数の混合行列

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 16 | 9  |
|              | 抽苔 | 4  | 9  |

表 1-13 紫外光における人参の試験本数の混合行列

|              |    | 実際 |    |
|--------------|----|----|----|
|              |    | 正常 | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 14 | 0  |
|              | 抽苔 | 6  | 18 |

## 6) 人参加工工場における人参の切断面観察による正常人参の判別試験

### (1) 目的

1-5) の結果から人参の切断面観察では、紫外光を用いることで高い精度で抽苔の判別が可能であることが分かった。しかし、正常も抽苔と同様に蛍光する場合があり、正常を抽苔と誤判別した割合は 30.0% となった。人参加工工場において、加工する人参のほとんどが正常であるため、正常を抽苔と誤判別する割合を正確に把握し、その割合を低くすることが重要となってくる。そこで、人参加工工場の生産ラインで紫外光を用いて、人参の切断面観察による正常の判別について精度検証する。

### (2) 試験方法

#### ア. 試験片

①人参 (スチームピーリング後): 正常 745 本

イ. 主な構成部品 (紫外光による試験環境)

①光源: IDBA-CH75L-UV-385 (ピーク波長: 385nm)  
(株) レイマック製

#### ウ. 判別方法

①図 1-17 に試験環境を示す。葉柄基部除去後、作業者が目視で正常と判断した人参の切断面を観察する。

②人参の切断面に人手で紫外光を照射し、目視で蛍光の有無を確認し、正常か否かの判別を行う。

### (3) 結果および考察

ア. 紫外光による正常の蛍光の一例を図 1-18 に示す。

イ. 紫外光により正常を抽苔と誤判別した割合は 16.2% であった。試験本数の混合行列を表 1-14 に示す。

→試験本数を増やした結果、1-5) よりも高い判別精度が得られた。

ウ. 抽苔が蛍光する場合、円環状に発光する (図 1-17)。しかし、正常が蛍光する場合、部分的に光るなどの特徴がある。そのため、機械学習などを用いてさらに判別精度を向上させることが出来る可能性があると考ええる。

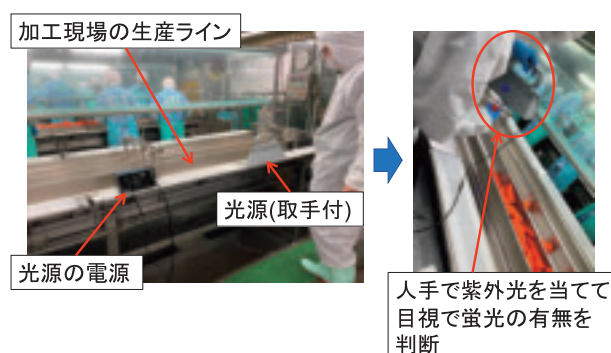


図 1-17. 加工現場における試験環境

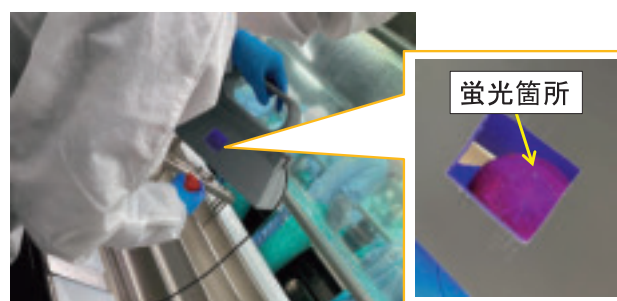


図 1-18. 加工現場における人参の蛍光の一例

表 1-14 加工現場における人参の試験本数の混合行列

|              |    | 実際  |    |
|--------------|----|-----|----|
|              |    | 正常  | 抽苔 |
| 判別結果<br>(予測) | 正常 | 624 | 0  |
|              | 抽苔 | 121 | 0  |

## 7) 小括

抽苔人参について判別手法を検討した結果、精度・コストの面から紫外光を用いた手法が最適だと判明した。今後、紫外光を用いた手法で実用化に向けた検討を進める。

## 3.3 内部欠陥検出機構の開発及び除去機構の検討背景

1 で選定した手法を用いて人参を検査対象とした検出機構の試作機を製作し、動作試験を行う。さらに、不良品の除去機構についての検討を行う。

### 1) 内部欠陥検出機構の試作機の製作

#### (1) 目的

抽苔人参の判別に最適である紫外光を活用して内部欠陥検出機構の試作機を製作する。

#### (2) 試験方法

卓上で判別試験を実施するための「卓上型」と、加工現場などに持ち運んで判別試験を実施するための「持ち運び型」の2種類の試作機を製作した。

##### ア. 主な構成部品

<卓上型 試作機>

①カメラ：acA1300-200uc (Basler 社製)

②フィルター (ロングパスフィルター)：#64-633 (カットオン波長：475nm) (エドモンドオプティクス製)

③光源：IDBB-CH225S-UV-385 (ピーク波長：385nm) ((株)レイマック製)

④画像解析ソフトウェア：MATLAB 2021a

<持ち運び型 試作機>

①カメラ：STC-MCS163U3V (オムロンセンテック (株) 製)

②光源：IDBB-CH225S-UV-385 (ピーク波長：385nm) ((株)レイマック製)

③画像解析ソフトウェア：MATLAB 2021a

#### (3) 結果および考察

ア. 卓上型(図 2-1)および持ち運び型(図 2-2)の2種類の内部欠陥検出機構の試作機を製作した。

イ. 卓上型は手洗い検査装置「てみえる」(図 2-3<sup>4)</sup>)

の筐体を活用して、製作した。

ウ. 持ち運び型は、当場所有の大型 3D プリンターを用いて ABS 樹脂で筐体を造形し、製作した。

エ. 開発した内部欠陥検出機構の2種類の試作機の動作確認を行った結果、抽苔検出が可能であることを確認した。

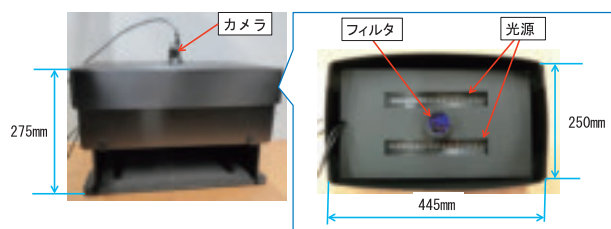


図 2-1. 卓上型の内部欠陥検出機構の試作機

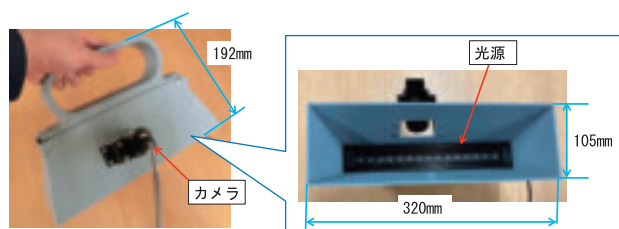


図 2-2. 持ち運び型の内部欠陥検出機構の試作機

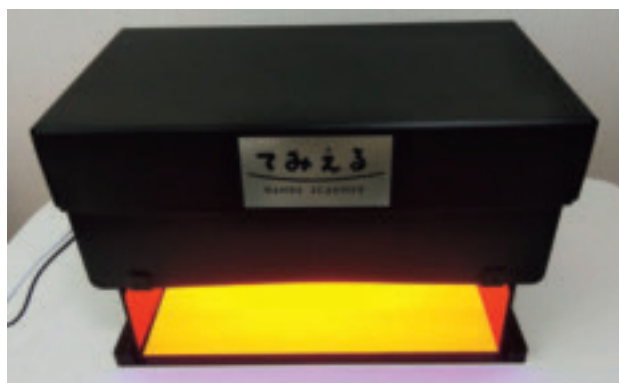


図 2-3. 手洗い検査装置「てみえる」の外観

## 2) 紫外光の撮影処理速度の検討

### (1) 目的

2-1) の成果の実用化に向けて紫外光で人参を撮影する際の処理速度について検討する。

### (2) 試験方法

ア. 主な構成部品

①カメラ：P4-CC-08K050 (DALSA 社製)

②光源：LNSP-500UV365-FN (ピーク波長：365nm) (CCS (株) 製)

③コンベア：特注品、搬送速度：最大 20m/min

### (3) 結果および考察

ア. 実験環境を図 2-4 に示す。

イ. 処理速度について検討した結果、ラインスキャンカメラを用いることで4本/秒(人参:直径40mmと仮定)の処理速度で撮影可能であることを確認した。撮影した画像を図2-5に示す。なお、この時のコンベア搬送速度は、10m/minであった。

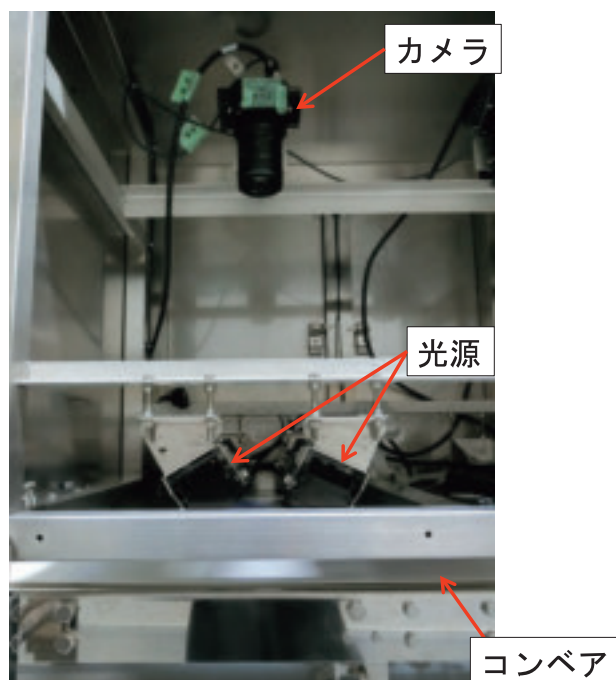


図2-4. 紫外光の処理速度検討の実験環境

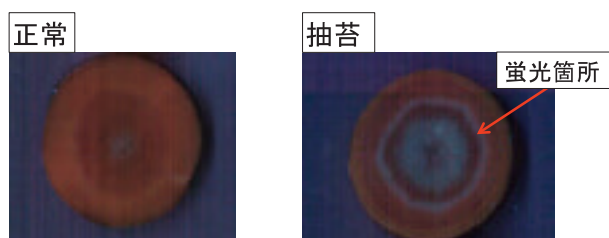


図2-5. ラインスキャンカメラで撮影した人参

### 3) ロボットによる不良品の除去機構の検討

#### (1) 目的

2-1)、2-2)により判別された抽苔人参をロボットで除去するシステムを開発する際のロボットハンドについて検討を行う。

#### (2) 試験方法

ア. 主な構成部品

<加工前の人参>

①吸着ハンド: VGS3010. AC. 00. BA (真空エジェクター)、BL40-2. 20. 04AD (吸着パッド) (piab 社製)

<加工後の人参>

①吸引ハンド: 780-25SUS (サンワ・エンタープライズ(株)製)

#### (3) 結果および考察

ア. 加工前と加工後のそれぞれの人参を除去することが可能なロボットハンドを選定し、人参の除去試験を実施した結果、人参の除去が可能であることを確認した。

イ. 選定したロボットハンドを図2-6に示す。

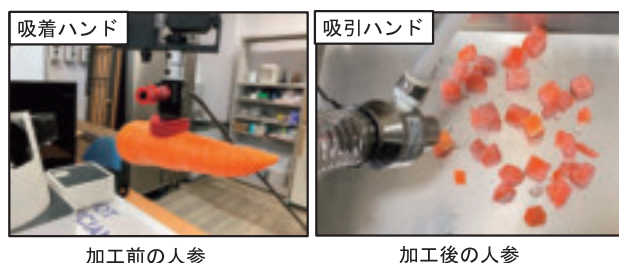


図2-6. 除去機構として選定したロボットハンド

#### 4) 小括

紫外光を用いた手法で内部欠陥検出機構の試作機を開発し、実用化に向けた検討を進めた。また、内部欠陥がある人参を除去する際にロボットを使用した除去方法について検討し、除去可能であることを確認した。今後は本知見を活用し、実用化に向けたコンベア式の撮影装置の開発を進める。

### 3.4 他の食品への適用の検討

#### 背景

1で開発した非破壊検査技術を抽苔人参の判別以外の他の食品における内部欠陥検出について適用可能か調査を行い、各食品に対して最適な手法を検討する。

#### 1) 西洋わさびの木質化検出の検討(切断面観察)

##### (1) 目的

西洋わさびの木質化(以下、木質化)について、切断面を観察して木質化を検出したいとのニーズがあった。そこで、これまでに開発した技術(紫外光、近赤外光、可視光による手法を使った判別技術)を活用し、最適な検出手法について検討する。

##### (2) 試験方法

ア. 試験片

①西洋わさび4本(木質化:3本、正常1本)(図3-1)

イ. 主な構成部品

<近赤外光>

①カメラ: FX17-F0V38 (検出波長帯 900nm~1700nm) (Specim 社製)

②光源: LDL-222X42CIR-LACL (シーシーエス(株)製)

- ③画像解析ソフトウェア：Perception STUDIO\_OFF  
(Perception Park 社製)

※図 1-6 と同様の実験環境

<紫外光>

- ①カメラ：STC-MCS163U3V（検出波長帯 400nm～1000nm）（オムロンセンテック（株）製）  
②フィルター（ロングパスフィルター）：#64-633（カットオン波長：475nm）（エドモンドオプティクス製）  
③光源：IDBA-CH75L-UV-385（ピーク波長：385nm）（株）レイマック製）  
④画像解析ソフトウェア：MATLAB 2021a

※図 2-1 と同様の実験環境

<可視光>

- ①カメラ：STC-MCS163U3V（検出波長帯 400nm～1000nm）（オムロンセンテック（株）製）  
②光源：FSAH42045F PJ9、FHF32EX-N-H：2 本（パナソニック（株）製）  
③画像解析ソフトウェア：MATLAB 2021a

ウ．試験方法

<近赤外光による木質化の検出試験>

- ①図 1-6 の試験環境を利用し、コンベア上に試験片を設置する。  
②試験片の撮像を行い、取得した画像を Perception STUDIO\_OFF を用いて解析することで木質化を検出する。具体的には、撮像データから得られた特徴的な複数の波長を選択し、木質化部分を緑色、それ以外の部分を青色とする画像処理を行い、緑色箇所の有無で木質化の検出を行う。

<紫外光による木質化の検出試験>

- ①図 2-1 の試験環境を利用し、試験片を設置する。  
②試験片の撮像を行い、撮像した画像を MATLAB 2021a で作成した画像解析プログラムを用いて解析することで木質化を検出する。具体的には、適切な色のしきい値を設定して木質化箇所を検出する画像処理を行う。

<可視光による木質化の検出試験>

- ①図 3-2 に示す試験環境を構築し、試験片を設置する。  
②試験片の撮像を行い、撮像した画像を MATLAB 2021a で作成した画像解析プログラムを用いて解析することで木質化を検出する。具体的には、適切な色のしきい値を設定して木質化箇所を検出する画像処理を行う。

### (3) 結果および考察

ア．各手法で撮影した結果を図 3-3、3-4、3-5 に示

す。

イ．近赤外光と可視光では木質化の検出が可能であることを確認した。ただし可視光の場合、小面積の誤検出箇所が多数確認された。

→小面積の誤検出箇所の多くは、木質化ではなく、茶色の表皮を検出していると考えられる。今後、画像処理時の西洋わさびにおける輪郭抽出の手法を変更するなどの対策により、小面積の誤検出は改善すると考えられる。

ウ．紫外光では、木質化部分が蛍光しなかったため、木質化の検出は困難であった。

→これは、西洋わさびの木質化部分にはリグニンが含まれていないためと考えられる。

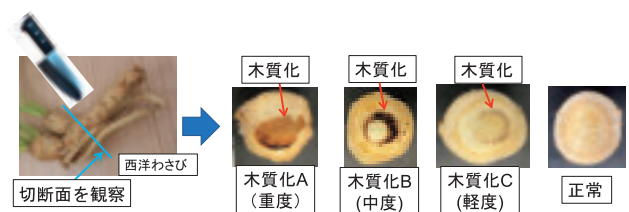


図 3-1. 西洋わさびの切断面

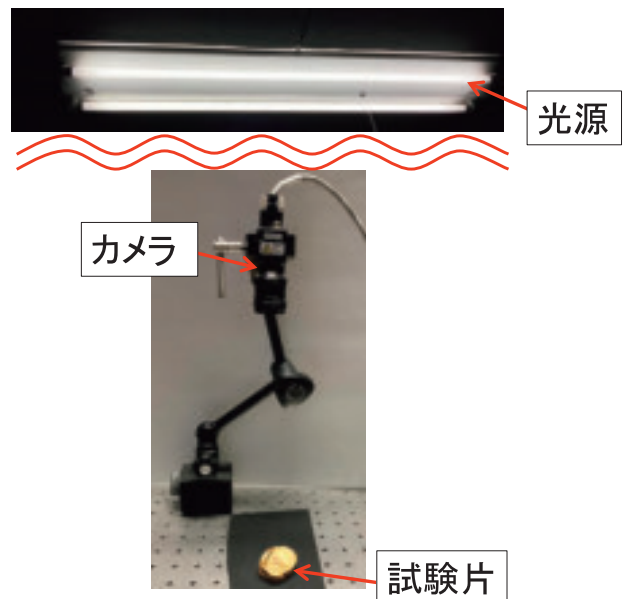


図 3-2. 可視光による試験環境

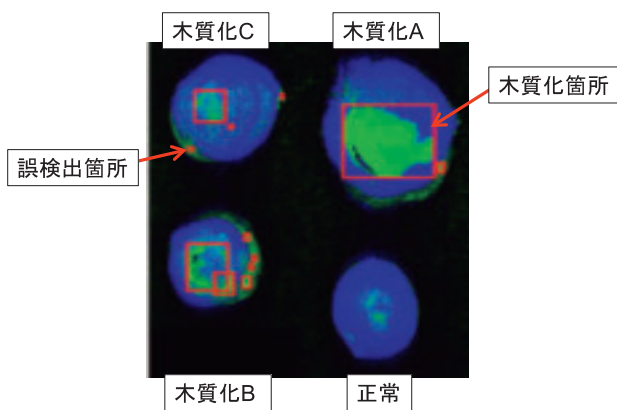


図 3-3. 近赤外による検出結果

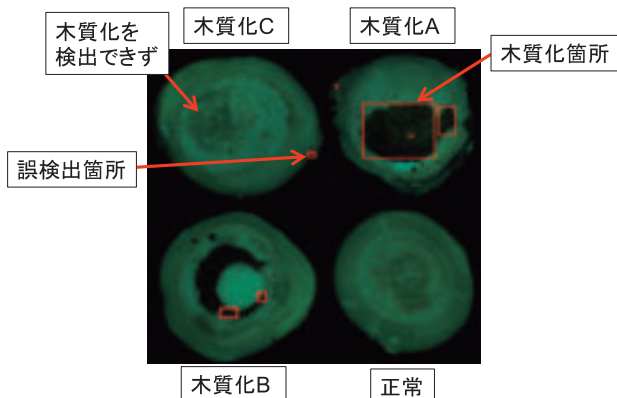
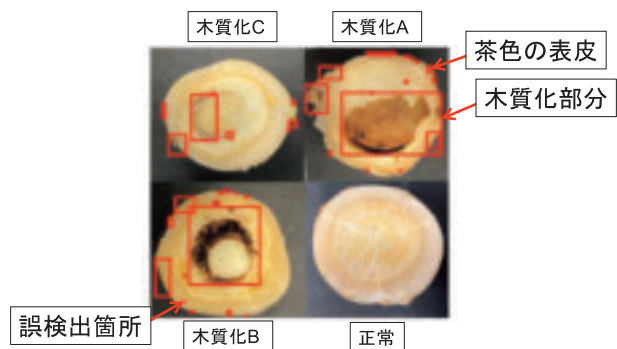


図 3-4. 紫外光による検出結果



※小さい赤枠の多くは茶色の表皮を検出

図 3-5. 可視光による検出結果

## 2) 西洋わさびの木質化検出の検討(立方体カットの観察)

### (1) 目的

3-1) において、切断面を撮像して近赤外光および可視光で木質化の検出が可能であることを確認した。次に、立方体にカットされた西洋わさびの木質化について、近赤外光および可視光を活用した検出手法を検討する。

### (2) 試験方法

#### ア. 試験片

①1 辺 15mm の立方体にカットされた西洋わさび(すべての面に木質化箇所を有する) : 8 粒

イ. 主な構成部品

<近赤外>

①カメラ : FX17-F0V38 (検出波長帯 900nm~1700nm) (Specim 社製)

②光源 : LDL-222X42CIR-LACL (シーシーエス(株)製)

③画像解析ソフトウェア : Perception STUDIO\_OFF (Perception Park 社製)

※図 1-6 と同様の実験環境

<可視光>

①カメラ : STC-MCS163U3V (検出波長帯 400nm~1000nm) (オムロンセンテック(株)製)

②光源 : FSAH42045F PJ9、FHF32EX-N-H : 2 本 (パナソニック(株)製)

③画像解析ソフトウェア : MATLAB 2021a

※図 3-2 と同様の実験環境

#### ウ. 試験方法

<近赤外光による木質化の検出試験>

①図 1-6 の試験環境を利用し、コンベア上に試験片を設置する。

②試験片の撮像を行い、取得した画像を Perception STUDIO\_OFF を用いて解析することで木質化を検出する。具体的には、撮像データから得られた特徴的な複数の波長を選択し、木質化部分を緑色、それ以外の部分を青色とする画像処理を行い、緑色箇所の有無で木質化の検出を行う。

<可視光による木質化の検出試験>

①図 3-2 の試験環境を利用し、試験片を設置する。

②試験片の撮像を行い、撮像した画像を MATLAB 2021a で作成した画像解析プログラムを用いて解析することで木質化を検出する。具体的には、適切な色のしきい値を設定して木質化箇所を検出する画像処理を行う。

### (3) 結果および考察

ア. 各手法で撮影した結果を図 3-6、3-7 に示す。

イ. 可視光では、木質化の検出が可能だった。

ウ. 近赤外光については、軽度の木質化の検出は困難であった。

→軽度の木質化は、正常な箇所と比較して含有成分に大きな差異がないため、近赤外による検出が困難であったと考える。

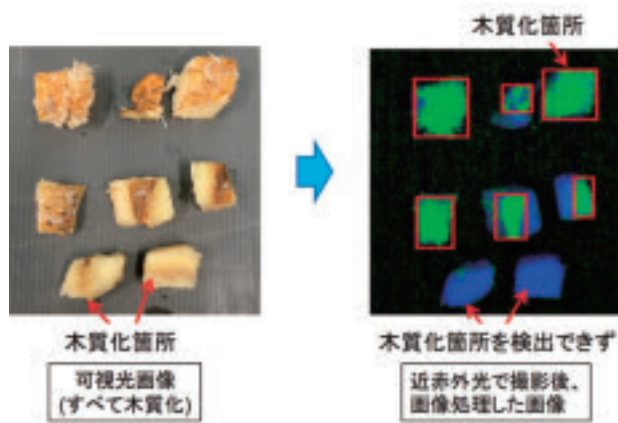


図 3-6. 近赤外による検出結果

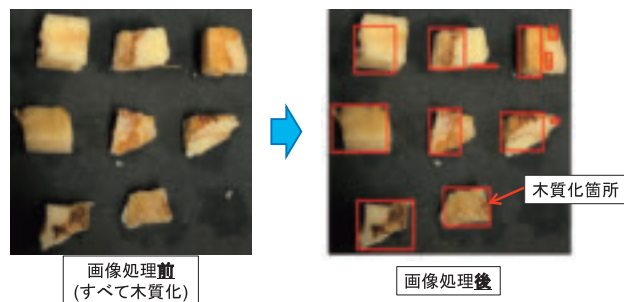


図 3-7. 可視光による検出結果

### 3) カボチャのクリスタル検出の検討

#### (1) 目的

カボチャのクリスタル<sup>※1</sup>の検出について企業からニーズが寄せられた。そこで、これまでに開発した技術(紫外光、近赤外光、可視光による手法を使った判別技術)を活用し、最適な検出手法について検討する。

※1: カボチャの実にデンプン質などが白く結晶化する現象。食べると硬く、苦みがあるため、異物混入のクレームに繋がる。(図 3-8 参照)

#### (2) 試験方法

ア. 主な構成部品

<近赤外>

- ① ハイパースペクトルカメラ: FX17-F0V38 (検出波長帯 900nm~1700nm) (Specim 社製)
- ② 光源: LDL-222X42CIR-LACL (シーシーエス (株) 製)
- ③ 画像解析ソフトウェア: Perception STUDIO\_OFF (Perception Park 社製)

※図 1-6 と同様の試験環境

<紫外光>

- ① カメラ: STC-MCS163U3V (検出波長帯 400nm~1000nm) (オムロンセンテック (株) 製)
- ② フィルター (ロングパスフィルター): #64-633 (カットオン波長: 475nm) (エドモンドオプティクス製)

③ 光源: IDBA-CH75L-UV-385 (ピーク波長: 385nm) : 2 個 ((株) レイマック製)

④ 画像解析ソフトウェア: MATLAB 2022a

※図 2-1 と同様の試験環境

<可視光>

① カメラ: STC-MCS163U3V (検出波長帯 400nm~1000nm) (オムロンセンテック (株) 製)

② フィルター (ロングパスフィルター): #64-633 (カットオン波長: 475nm) (エドモンドオプティクス製)

③ 光源: :KD99 (色温度 9900K) 2 個 (YINGNUOST 製)

④ 画像解析ソフトウェア: MATLAB 2022a

※本環境は、図 2-1 の紫外光の試験環境を改造し、LED 照明を取り付け可能にした環境である。

イ. 試験方法

<近赤外光 (ハイパースペクトルカメラ) によるクリスタルの検出試験>

① 図 1-6 の試験環境を利用し、コンベア上に試験片を設置する。

② 試験片の撮像を行い、取得した画像を Perception STUDIO\_OFF を用いて解析することでクリスタルを検出する。具体的には、撮像データから得られた特徴的な複数の波長を選択し、クリスタルを緑色、それ以外の部分を青色とする画像処理を行い、緑色箇所の有無でクリスタルの検出を行う。

<紫外光によるクリスタルの検出試験>

① 図 2-1 の試験環境を利用し、試験片を設置する。

② 試験片の撮像を行い、撮像した画像を MATLAB 2022a で作成した画像解析プログラムを用いて解析することでクリスタルを検出する。具体的には、適切な色のしきい値を設定してクリスタルを検出する画像処理を行う。

<可視光によるクリスタルの検出試験>

① 図 3-9 の試験環境を利用し、試験片を設置する。

② 試験片の撮像を行い、撮像した画像を MATLAB 2022a で作成した画像解析プログラムを用いて解析することでクリスタルを検出する。具体的には、適切な色のしきい値を設定してクリスタルを検出する画像処理を行う。

#### (3) 結果および考察

ア. 各手法で撮影した結果を図 3-10、3-11、3-12 に示す。

イ. 紫外光による手法で、カボチャの実(内部)を撮影した画像においてクリスタルの検出が可能だった。10 個の試験片すべてにおいて、クリスタルを正しく検出できた。しかし、カボチャの外皮

(外部)から撮影した画像では、カボチャ内部のクリスタルの有無を検出することは不可能であった。これは、紫外光がカボチャの内部まで届かなかったためと考える。

ウ. 近赤外光 (ハイパースペクトルカメラ) による手法で、カボチャの実 (内部) を撮影したところ、5 個中 1 個は正しくクリスタルの検出が可能であった (図 3-10 左下) が、残り 4 個は検出されなかった。カボチャの外皮 (外部) からは、クリスタルの検出は困難であった。

→試験片が冷凍状態であり、表面の水分や氷の影響を受け、検出が困難であったと考える。



図 3-8. カボチャのクリスタルの試験片

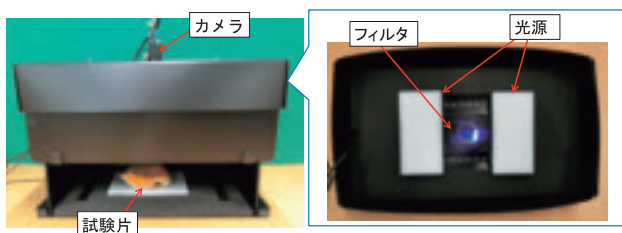


図 3-9. 可視光による試験環境

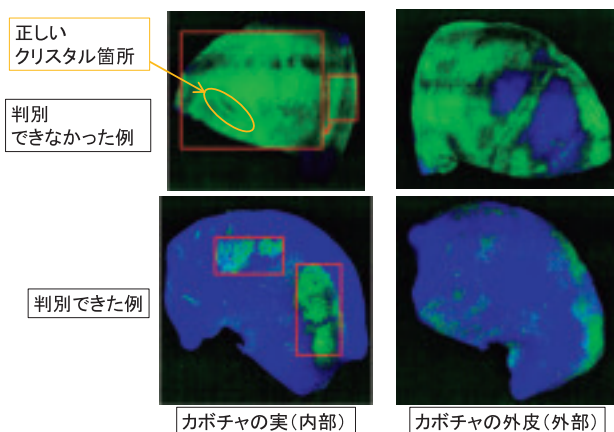


図 3-10. 近赤外光 (ハイパースペクトルカメラ) による検出結果

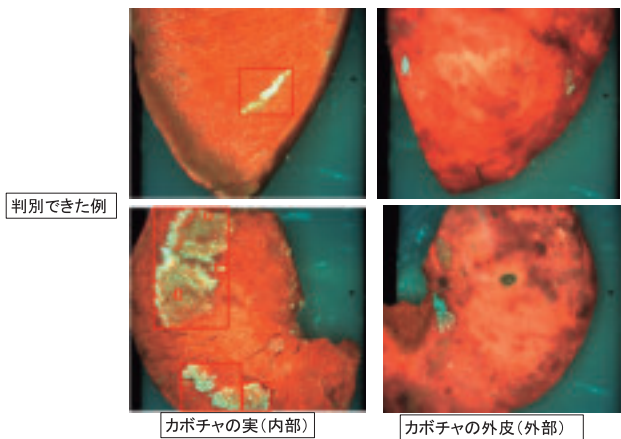


図 3-11. 紫外光による検出結果

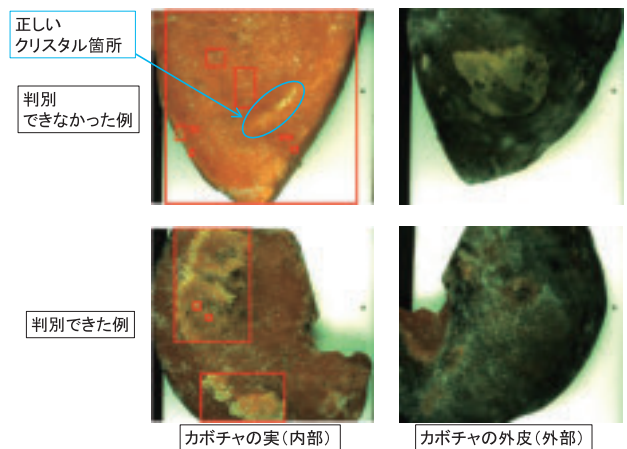


図 3-12. 可視光による検出結果

#### 4) 小括

1 において開発した非破壊検査技術の知見を活用し、人参以外の他の食品に対して内部欠陥検出試験を行った結果、西洋わさびについては可視光による手法、カボチャのクリスタルについては紫外光による手法が最適であると判断した。今後も非破壊検査技術の知見を活用し、食料品製造業における検査技術向上に向けた支援を行う。

#### 3.5 総括

本研究では、抽苔人参を高精度に非破壊で判別可能な技術を開発した。現在は、北海道大学と共同で外部資金を獲得し、研究を継続している。画像判別に AI を組込むことでこれまで以上に精度良く抽苔人参を判別可能な技術を開発し、さらに実用化に向けてコンベア式抽苔人参撮影装置を開発した。

本研究成果は R7 年度以降の実用化を目指している。道内企業に判別装置の製造・販売を打診中であり、装置の納入先として道内 2 社、道外 1 社を想定している。また、ダイスカットされた人参を対象とした判別装置について、現在道内 1 社に技術移転中である。

なお、本研究で開発した装置が人参加工現場で実用化されると、約90%の人員削減が期待できる。1日最大60人で検査している現場(作業期間：通年ではなく半年間)で考えると、経済的効果は以下のように試算できる。

○削減人数：60人×90%＝54人

○経済的効果：54人×193万円<sup>※2</sup>÷2＝5,211万円

※2：1人あたりの年間賃金は、令和2年賃金構造基本統計調査の概況(厚労省)を参照。

また、その他の食品に関してはニーズ元と継続して実用化などに向けた協議を進めている。さらに新たな食品の非破壊検査の相談も寄せられており、本研究における知見を活かして道内企業を支援する。

## 引用文献

- 1) 川島圭太 他：野菜の内部欠陥検査の自動化に関する研究 事業のあらまし 平成30年度事業報告、地方独立行政法人北海道立総合研究機構 工業試験場、p.57 (2019)
- 2) 堀田佳江 他：靱皮繊維の識別、関税中央分析所報、48、pp.73-75 (2008)
- 3) 高田昌嗣 他：リグニンの発光特性：樹種、抽出法、溶媒及びポリマーによる発光特性の制御、第30回日本エネルギー学会大会、2021年8月4-5日(5)、3-5-3、pp.72-73 (2021)
- 4) てみえる HANDS SCANNER、  
<https://temieru.jimdofree.com/> [accessed Mar. 15, 2023].