

抽苔人参の非破壊判別技術の開発

川島 圭太、井川 久、宮島 沙織、吉田 道拓、中西 洋介、田中 彰*

Development of Non-Destructive Discrimination Technology for Bolting Carrots

Keita KAWASHIMA, Hisashi IGAWA, Saori MIYAJIMA, Michihiro YOSHIDA,
Yohsuke NAKANISHI, Akira TANAKA*

抄 録

人参の加工現場では、抽苔人参（内部の木質化）を全数人手で検査しており、人手不足の影響から高速・高精度に抽苔を検査する装置の早期開発が求められている。本研究では、抽苔の蛍光特性を応用して判別する手法の開発を行った。具体的には人参の葉柄基部を除去した切断面に青色光を照射して撮影した画像をAIモデルで解析し、抽苔の有無の判別を行う。人参サンプルを用いた実験の結果、抽苔有無の判別精度として97.9%が得られた。このとき、抽苔人参を正常人参と誤判別することはなかった。さらに、人参の切断面を連続して撮影可能なコンベア式撮影装置および抽苔判別後の人参を除去する機構の開発を行った。実用化に向けた動作検証を実施し、その有用性を確認した。

キーワード：非破壊検査、自家蛍光、AI、抽苔、人参

Abstract

At carrot processing sites, the of bolting carrots (lignification) is currently inspected manually for all products. However, due to labor shortages, there is an urgent need for the development of equipment capable of inspecting bolting both quickly and accurately. In response to this need, a technology was developed to enable rapid and precise detection of bolting. This was achieved by analyzing images captured after irradiating the cross-section of carrots with blue light, following the removal of the petiole base. An AI model was employed to determine the presence or absence of bolting. The resulting accuracy of bolting identification reached 97.4%. Furthermore, the method did not falsely identify bolted carrots as normal ones. To facilitate practical application, a conveyor-type imaging device was developed, capable of continuously acquiring images of the cut surfaces of carrots, along with a mechanism designed to remove bolted carrots.

KEY-WORDS : Non-destructive testing, Autofluorescence, AI, Bolting, Carrots

1. はじめに

北海道において、食料品製造業は製造品出荷額の38.2%を占める主要産業であるが¹⁾、業種別の労働生産性の観点では他の製造業より低い生産性となっている²⁾。さらに生産年齢人口の減少による深刻な人手不足の影響で十分な作業人員を確保できない状況が続いており、機械化などによる人手作業の省人化・省力化は重要な課題である。

また、食料品製造業では、原料の外観による不良品の判別に加え、外観ではわから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。特に北海道が国内生産量1位の人参³⁾の加工現場においては、図1に示すように抽苔人参を判別するために人手で人参を全数カットしながら、同時に硬さ検査を行っている。人参における抽苔とは花芽を形成する過程で根部の養分が消費され、維管束が硬化する現象である。加工した製品に抽苔部分が混入すると木材や石のような食感

* 道総研食品加工研究センター、* Hokkaido Research Organization Food Processing Research Center

事業名：戦略研究 ほか2件

課題名：食品の非破壊内部検査技術の開発 ほか2件

となり異物混入と間違えられる。抽苔人参の検査は加工する人参の全数に対して行っているが、作業者ごとに判別基準にばらつきがあることが、製品に混入してしまう原因の一つになっている。抽苔部分が混入しクレームとなった場合は、同一ロットは全数回収・廃棄となる。このようなことから抽苔人参を人手に頼らず、精度良く検出可能な装置の早期開発が望まれている。

本研究では、画像処理により高精度に非破壊で抽苔が判別可能な手法の開発、および当該手法の実用化に向けた、抽苔人参の有無を連続して判別可能とする装置や抽苔人参除去機構を開発した。

なお、当场では、これまでに振動や近赤外光、X線などを使用した抽苔判別手法について検討してきた。しかし、判別速度や精度、装置の製造コストなどに課題があった。本報では、紫外光および青色光を用いた判別手法について報告する。



抽苔人参検査の様子



抽苔人参

図1 人参加工工場における抽苔人参検査の様子と抽苔人参

2. 抽苔人参判別手法の開発

2.1 紫外光を用いた判別手法の開発⁴⁾

正常人参と抽苔人参の判別は、外観上からは困難である。また、葉柄基部の切断面による判別においても、正常人参と抽苔人参で切断面の色調が類似する場合が多く、可視光下における目視では判別が困難である。これまでに様々な波長の光を用いて抽苔部分の可視化を試みた結果、紫外光により抽苔部分が蛍光することを確認している。そこで、図2に示す試験環境下で撮影した人参の画像を解析し、抽苔人参が判別可能か確認した。試験に使用した機器の構成については、表

1に示すとおりである。使用した紫外光照明のピーク波長は385nmである。また、蛍光した抽苔部分の視認性向上のため、カメラのレンズには撮影画像の紫色成分を抑制するフィルター（カットオン波長475nm、エドモンド・オプティクス製）を装着した。

試験には、加工現場で使用されているスチームピーラーで皮を剥いた状態の人参を使用した。葉柄基部を除去した人参の切断面（図3）に紫外光を照射して画像を撮影し、画像処理で蛍光箇所を検出することにより抽苔を判別した。試験に供した人参の本数は正常人参20本、抽苔人参18本である。

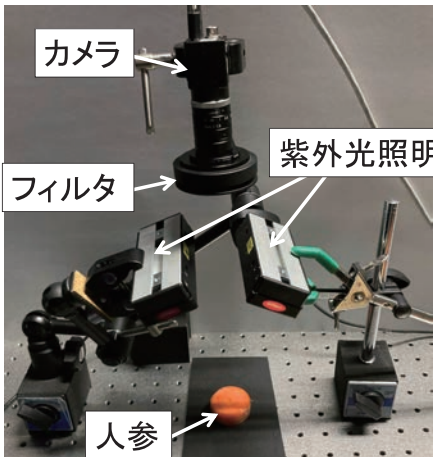


図2 紫外光を活用した試験環境

表1 紫外光を活用した試験環境の主な構成部品

機器	型式	メーカー
カメラ	STC-MCS163U3V	オムロンセンテック（株）
フィルター	#64-633	Edmund Optics
紫外光照明	IDBA-CH75L-UV-385	（株）レイマック

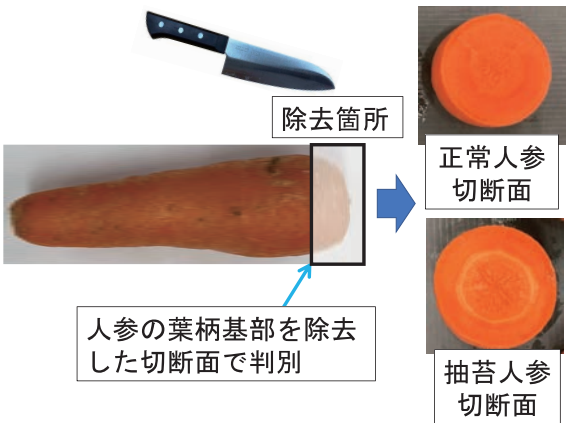


図3 葉柄基部を切断した人参の切断面

撮影した画像の一例を図4に示す。葉柄基部の切断面に紫外光を照射することで抽苔部分が環状に蛍光していることがわかる。このRGB画像の各チャンネルにおいて実験的に決

定した閾値で画像処理を実施した結果、抽苔人参の有無の判別精度は84.2%であった(表2)。判別精度の計算式は式(1)に示すとおりである。算出時に使用した本数は正常人参も抽苔人参もすべて合算した数である。

$$\text{判別精度}[\%] = \frac{\text{判別結果が正しかった本数}}{\text{試験した人参の総数}} \times 100$$

式(1)

本試験では、抽苔人参を正常人参と誤判別することはなかったが、正常人参が蛍光して抽苔人参と誤判別することがあり、これにより全体の判別精度が低下した。

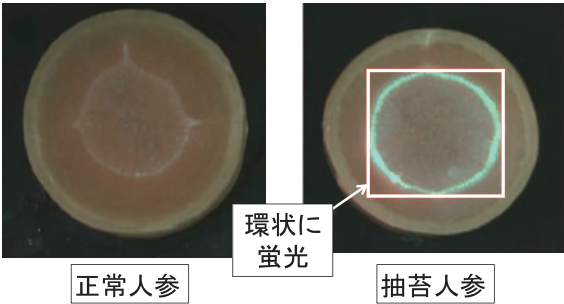


図4 紫外光による撮影結果の一例

表2 紫外光を用いた手法による抽苔の有無の判別結果

		人が人参切断時の 硬さで判別した結果	
		正常人参	抽苔人参
画像処理の 判別結果	正常人参	14	0
	抽苔人参	6	18

判別精度：84.2 %
※抽苔人参を正常人参と誤判別はしていない

2.2 紫外光による抽苔の蛍光について

抽苔部分が、紫外光によって蛍光する要因について詳しく検討した。文献調査から抽苔部分には、樹木に多く含まれ、紫外光で蛍光する特性のあるリグニンが含まれていると推測した⁵⁾。そこで、抽苔部分におけるリグニン含有の有無を確認するため定性試験を実施した。リグニン含有の有無は、人参の正常部分と抽苔部分の切片それぞれに、リグニンと反応して着色するフロログルシン-塩酸試薬を数滴滴下し、室温で15分静置した際の着色の有無で確認した。定性試験の結果は図5に示すとおりである。正常部分には色の変化が見られず、抽苔部分のみ赤紫色に着色し、抽苔部分にリグニンが含まれていることが確認された。

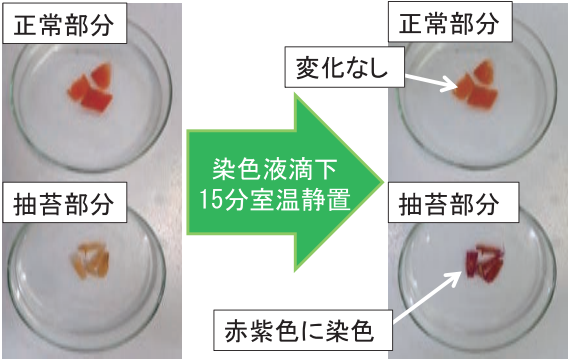


図5 人参におけるリグニンの定性試験の結果

2.3 青色光とAIを組み合わせた抽苔判別手法の開発⁶⁾

前節までに紫外光を用いた抽苔人参判別手法を開発したが、食品ロス低減のために食品加工業者からさらなる高精度化に対する要望が寄せられた。紫外光を用いた判別手法では、判別率の向上を図ることが困難であった。そこで、さらなる高精度化を目指し、正常人参が紫外光で蛍光する原因について調査を行ったところ、正常部分には、リグニン同様、紫外光に反応して蛍光するスベリンが含まれていることがわかった⁷⁾。スベリンは紫外光には反応して蛍光するが、青色光には反応しない性質を持つ⁸⁾。一方で、抽苔部分に含まれるリグニンは、紫外光にも青色光にも反応して蛍光反応を示す。そこで、正常部分と抽苔部分に含まれる成分による蛍光特性の違いを利用し、青色光を用いた抽苔人参判別手法の開発に取り組んだ。本手法では、光の輝度以外に蛍光箇所の分布状態も判別に使用するために、AIモデルによる画像認識を組み込むこととした。

第3章に示すコンベア式撮影装置で撮影した人参の蛍光画像をAIモデルで解析し、抽苔人参が判別可能か確認した。撮影装置の詳細については、第3章に記載のとおりである。青色光照明は、ピーク波長が420nmである。紫外光の手法同様に蛍光した抽苔部分の視認性向上のため、カメラのレンズにはフィルター（カットオン波長475nm、エドモンド・オブティクス製）を装着した。試験には、加工現場で使用されているスチームピーラーで皮を剥いた状態の人参を使用した。葉柄基部を除去した人参の切断面に青色光を照射して画像を撮影し、その画像を開発したAIモデルで解析して抽苔人参を判別した。本研究におけるAIモデルのデータセットのアノテーションは、画像内の人参の切断面を矩形で囲み、正常（OK）・抽苔（NG）のラベル付けすることにより行った。作成したデータセットを用いて、物体検出モデル「Ultralytics YOLOv11m」で学習を行った。データセット作成や判別精度検証のためのテストデータなど、本研究で使った人参画像枚数を表3に示す。また、AIモデルが人参断面だと判断した箇所に棒とAIモデルがOKもしくはNGと判断した結果、信頼度の数値が表示される。この信頼度は

AIモデルが検出の信頼性を評価した指標であり、0 から 1 で表記され、1 に近いほど検出の信頼性が高いことを示す。

表 3 AIモデル開発に使用した画像枚数内訳

	OK	NG
トレーニングデータ	247	71
バリデーションデータ	71	19
テストデータ	37	10

AIモデルによる判別結果の一例を図 6 に示す。AIモデルにおける抽苔の有無の判別精度は97.9%であった。判別精度の計算式は、式（2）に示すとおりである。算出時に使用した数は正常人参も抽苔人参もすべて合算した数である。

判別精度[%] = $\frac{\text{判別結果が正しかった本数}}{\text{AIが人参と認識した総数(枠が出た数)}} \times 100$ 式(2)

本試験時には、計算資源としてGPU（GeForce RTX3070Ti・NVIDIA製）を搭載したノートパソコン（CPU：12世代Core i9-12900H・Intel製）を使用し、画像一枚の判別に要した計算時間は平均で19.5ミリ秒であった。本試験の判別結果を表 4 に示す。この際、抽苔人参を正常人参と誤判別することはなかった。判別精度が100%にならなかった原因は、図 7 に示すように、本来は背景として認識され、枠が表示されないはずの領域において、曲がった人参の一部が正常な断面と誤検出されたためである。特に、本システムでは1つの人参につき1つの判定枠（OKまたはNG）の出力が原則であるが、この誤判別により、同一人参にOKとNGが混在する結果が生じた。このようなケースでは、局所的な正常領域が存在しても、抽苔判定が一部でも出た時点でその人参全体をNGとすべきであり、OKの判定枠が出力しないように修正する必要がある。

この問題への対応として、単純な追加学習だけでなく、ポストプロセスとして人参全体の領域統合処理や、NG優先のラベリングルールの導入、あるいはマスクベースの領域分割と判定結果の集約を行うことで、より安定した判別精度の向上が期待できる。

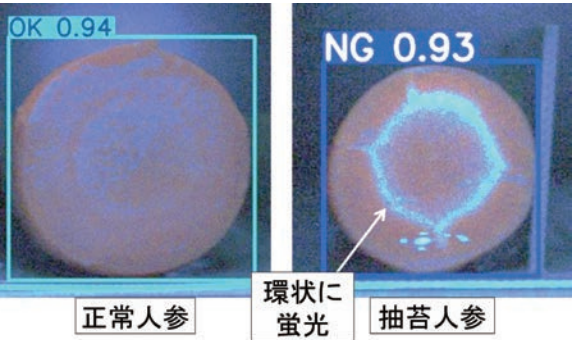


図 6 AIモデルによる判別結果の一例

表 4 青色光とAIを組み合わせた手法による抽苔の有無の判別結果

		人が人参切断時の硬さで判別した結果		
		正常人参	抽苔人参	背景
AIモデルの判別結果	正常人参	37	0	1
	抽苔人参	0	10	0
	背景	0	0	0

判別精度：97.9 %
※抽苔人参を正常人参と誤判別はしていない



図 7 背景を正常と誤検出した例

青色光を用いた抽苔人参判別手法は、紫外光を用いた判別手法と比較して正常人参の誤判別が大幅に減少し、結果として全体の判別精度が向上した。この誤判別の改善は、AIモデルの導入効果のみではなく、正常部分と抽苔部分の含有成分による蛍光特性の違いが主な要因と考えられる。

3. 実用化に向けた装置開発

3.1 コンベア式人参撮影装置の開発

前述した研究成果の実用化に向けて、人参切断面の画像を連続して撮影可能なコンベア式人参撮影装置を開発した。主要な構成部品を表 5、実際に開発した装置を図 8 に示す。

表 5 開発したコンベア式撮影装置の主要構成部品

機器	型式	メーカー
カメラ	a2a1920-51gcbas	Basler
レンズ	SV-1214HF	(株)ガイ・エス・テクノロジー
フィルター	#84-749	Edmund Optics
青色光照明	LED420-9VIS	オプトコード(株)
栈付コンベア	MB2S-VG-HS-106-300-100-L-IV40-O	マルヤス機械(株)



図8 開発したコンベア式人参撮影装置

開発したコンベア式撮影装置で撮影した画像を図9に示す。

開発した撮影装置のコンベアの処理能力は3本/秒であり、人参1本を150gと仮定すると1時間あたり1.6tの処理が可能である。

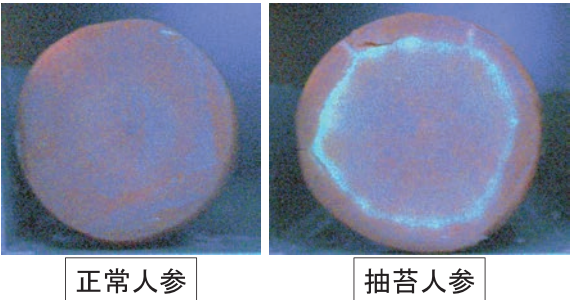


図9 コンベア式人参撮影装置で撮影した人参画像

3.2 抽苔人参除去機構の開発

次に、コンベア式撮影装置で抽苔人参を判別した後、抽苔人参を除去するための機構を開発した(図10)。コンベア式撮影装置からの信号をもとに、人参振り分け板で正常人参と抽苔人参を振り分ける。食品加工現場におけるメンテナンスなどを考慮して、人参振り分け板の駆動はエアシリンダで行うこととした。主要な構成部品については表6に示す。開発した除去機構の動作確認を行い、問題なく動作することを確認した。

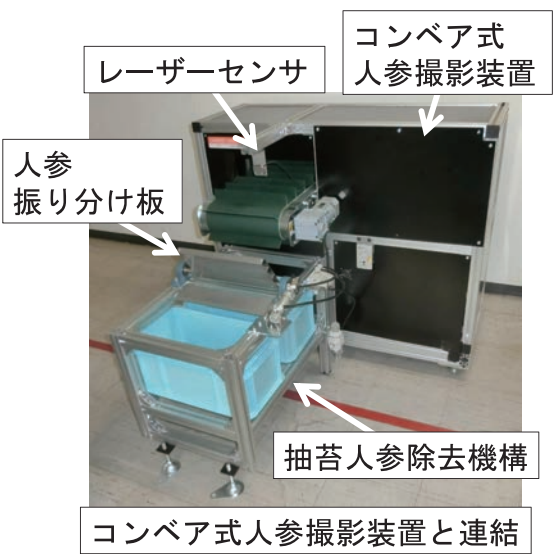


図10 開発した抽苔人参除去機構

表6 開発した抽苔人参除去機構の主要構成部品

機器	型式	メーカー
エアシリンダ	CDG1TA32-50Z-NV-M9BWL	SMC
ソレノイドバルブ	VQ2201-51-02	SMC
レーザーセンサ	LR-ZB100N	キーエンス

4. おわりに

本研究では、青色光とAIを組み合わせた高精度な抽苔人参判別手法を開発し、実用化に向けたコンベア式撮影装置および抽苔人参除去機構の試作を行った。

今後は、AIモデルによるリアルタイム判別機能の実装や、人参加工現場での現地実証試験を通じて完成度の向上を図る。これらの技術的課題の解決と並行して、食品機械メーカー等への技術移転も進め、次年度以降の早期実用化と省力化への貢献を目指す。

謝辞

本研究において、試験片である人参の提供や助言などで株式会社北海道フーズ、クレードル食品株式会社、ハウス食品グループ本社株式会社、京都大学にご協力いただきました。

また、コンベア式撮影装置や除去機構の設計・開発に際し、美和電気工業株式会社にご協力いただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 総務省・経済産業省：令和3年経済センサス-活動調査-
- 2) 経済産業省：2022年企業活動基本調査速報-2021年度実

續一

- 3) 農林水産省：令和 3 年作物統計調査
- 4) 川島圭太, 井川 久 他：園芸学研究 第23巻 別冊 1, pp. 402, (2024)
- 5) Lloyd Donaldson : *Molecules*, 25 (10), 2393, (2020)
- 6) 川島圭太, 宮島沙織 他：園芸学研究 第24巻 別冊 2, pp. 476, (2025)
- 7) P.E.KOLATTUKUDY, KAREN KRONMAN, et al: *Plant Physiol*, 55, pp. 567-573, (1975)
- 8) Lloyd Donaldson, Nari Williams : *Plants*, 7 (1), (2018)