

目 次

研究報告

- ・アノテーション範囲がエダマメ精選別用の物体検出 AI の精度に与える影響
 森 智洋・市浦 茂・片平光彦・・1
- ・水田作業における無段変速トラクタの負荷制御機能の効果
 進藤勇人・齋藤雅憲・高橋善則・関口一樹・佐々木景司・・5
- ・ブロッコリー選別自動収穫機の開発と課題
 星 太介・新妻俊栄・宮 和佳子・中田健信・・9
- ・花巻市圃場におけるドローンモニタリングを用いた水稻収益拡大化の取り組み
 梅木紳太郎・・13
- ・減圧マイクロ波によるトマトピューレの濃縮 —前加熱処理が食味と成分に与える影響—
 佐々木琴瑞・折笠貴寛・加藤一幾・松嶋卯月・小出章二・・19

トピックス

- [功績賞を受賞して] 25
- [奨励賞を受賞して] 26

支部会記事

- 庶務報告及び会計報告 27
- 令和 3 年度研究発表会発表課題 34
- 農業食料工学会東北支部役員及び役員体制 36
- 農業食料工学会東北支部規約・表彰規程と内規・役員選挙規程・投稿規程 37
- 東北地域農業食料工学関係の研究担当者名簿 44
- 団体賛助会員名簿・個人会員名簿 50

アノテーション範囲が エダマメ精選別用の物体検出 AI の精度に与える影響

森智洋*・市浦茂**・片平光彦**

Annotation Area Influence on Object Detection AI Accuracy for Green Soybean sorting

Tomohiro MORI*・Shigeru ICHIURA**・Mitsuhiko KATAHIRA **

Abstract

Object detection AI by deep learning is useful as a software of green soybean's appearance quality sorting. But it's not always possible to classify green soybean quality with high accuracy. We need to annotate correct information on the training data before developed object detection AI by deep learning, and its accuracy could change by setting of annotation area. In this study, we investigated the influence of annotation area on object detection AI's accuracy for sorting green soybean. Data sets were composed by A, limited annotation area on the pod that is important for the AI to classify the appearance quality of green soybean, and B, not limited annotation area on pod. The important area on the pod that AI classifies green soybean's appearance quality was determined using Score-CAM. Object detection AI have been made by Faster R-CNN. Results shows that dataset A had a significantly higher F-measure than the dataset B. Object detection AI's accuracy has changing by annotation area. So, it is important to limit annotation area to train object detection AI for green soybean sorting.

[Keywords] object detection, deep learning, annotation, sorting, Score-CAM, Faster R-CNN

1. 緒言

エダマメ栽培では収穫後の人手による外観選別の作業能率が12kg/hと低く、機械化が求められている。そのような外観選別機を開発するには、カメラで撮影した映像内からエダマメを検出して分類するソフトウェアが必要である。片平ら(2011) ¹⁾は、画像処理とファイバーセンサーを利用したエダマメ外観精選別機を開発した。開発された外観精選別機ではエダマメの傷害検出で照明の陰影による誤分類が発生した。このことから、エダマメの外観精選別用のソフトウェアには従来手法と異なる外観精選別技術を検討する必要がある。

近年、外観選別では、ディープラーニング(以下、DL)で作成されたCNN(Convolutional Neural Network)構造の画像認識AIや物体検出AIの利用が検討されている。画像認識AIは画像や動画に写っているものを分類し、物体検出AIは画像や動画に写っている対象物の範囲指定と分類する。森ら(2021) ^{2,3)}はエダマメの検出と外観品質を分類する物体検出AIを作成し、外観品質分類精度が人間と同等以上であることを確認した。そして、物体検出AIの各外観品質分類項目の検出・分類精度が高い項目と低い項目があることを確認した。

CNNを利用した物体検出AIには、Faster R-CNN⁴⁾やSSD⁵⁾、YOLO⁶⁾などがある。これらの物体検出AIでは、画像や動画が

入力されるとCNNが畳み込み処理によって画像内の特定の情報を保持した特徴マップ(feature map)を作成する。作成された特徴マップから、物体検出AIの領域探索アルゴリズムと分類アルゴリズムが対象物の位置推定と分類を行う(図1)。この領域探索アルゴリズムは、アノテーションの際に指定した範囲と同様に対象物を検出して範囲指定し、その情報を元に分類アルゴリズムで分類する。物体検出AIの作成では、使用する画像データに写っているエダマメに対し、範囲指定と分類項目のラベルを付与するアノテーションを行う必要がある。物体検出AIはアノテーションでエダマメの莢全体を範囲指定した場合、画像や動画に写っているエダマメを検出して莢全体をバウンダリボックスで囲い分類する。ただし、アノテーションで範囲指定した部分には、分類アルゴリズムが外観品質を分類する上で重要でない部分も混入するため、外観品質の分類精度を低下させる。レタスを検出する物体検出AIでは、アノテーション範囲の変化で検出・分類精度が変化することが確認されている(松浦ら,2018) ⁷⁾。物体検出AIの精度向上には、アノテーション指定範囲を限定することが有効と考えられ、CNN構造でのAIの分類根拠を特定する必要がある。

CNN構造の画像認識AIの分類根拠可視化技術としては、Score-CAM⁸⁾がある。Score-CAMは画像認識AIが分類を行った際に、画

* : 岩手大学大学院連合農学研究科

** : 山形大学農学部

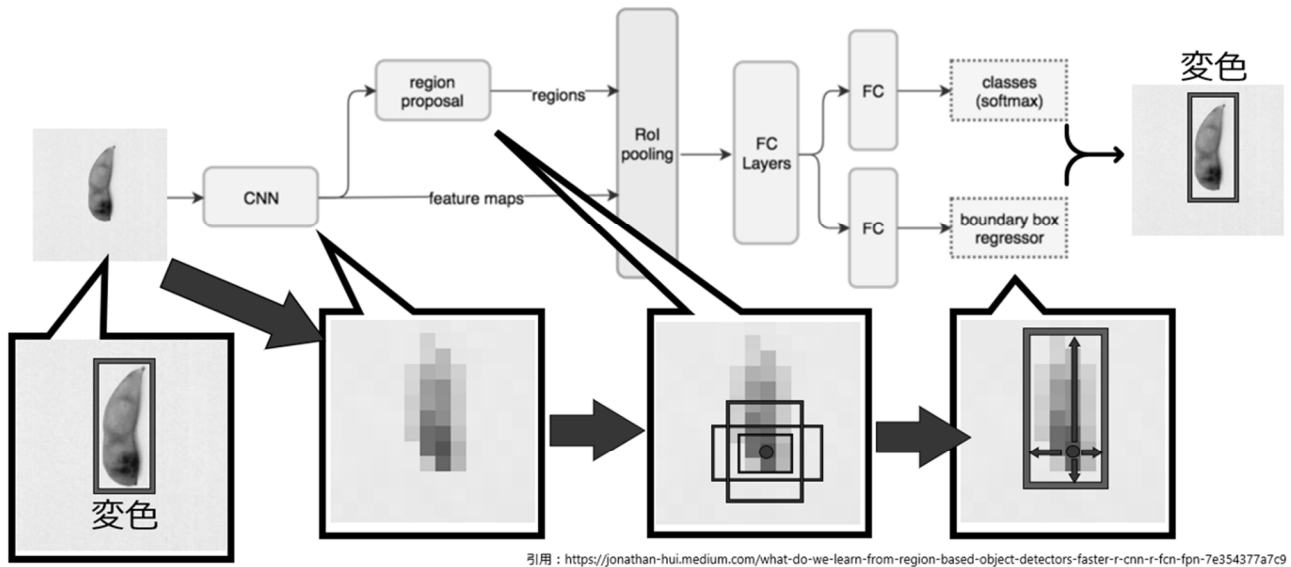


図1 物体検出AI (Faster R-CNN) でのCNN構造

像中のどの部分を分類上重要としたか可視化できる。

本報はCNNを利用したエダマメ外観精選別用物体検出AIの検出・分類精度向上を目標に、CNNの分類根拠可視化技術であるScore-CAMを応用し、物体検出AI作成時のアノテーション範囲の変化による精度の変化と精度向上方法を検討した。

2. 実験方法

AI作成と精度評価に必要な画像データ用のエダマメは、2020年に山形大学農学部附属フィールド科学センター高坂農場で栽培した「庄内三号」を用いた。物体検出AIに検出・分類させる外観品質分類項目は、良品1項目と不良品7項目の計8項目を設定し、外観品質分類項目ごとに画像データを収集した。画像データ1枚には4個のエダマメが様々な角度で写っており、解像度は1920×1080ピクセルである。各外観品質分類項目の画像データはAI作成用に200枚、精度評価用に50枚収集した。

アノテーションは、Microsoft社のフリーソフトウェア「VoTT-1.7.2」で行った。アノテーションの範囲指定は2とおりに設定し、AとBのデータセットを作成した(表1)。これら2つのデータセットでそれぞれDLを行い、ベースネットワークがResNet152のFaster R-CNNの物体検出AIを作成した。物体検出AI作成にはTensorflow2 Object Detection APIを使用し、DLの学習回数が30,000回、CNNの入力サイズを640×640に設定した。

物体検出AIの精度評価は物体検出AI作成用とは異なるテスト画像データを使用し、外観品質分類項目ごとに以下に示す適合率と再現率、F値をそれぞれ算出した。

$$\text{適合率} = \frac{\text{物体検出AIが対象の品質分類項目のエダマメを}\br/> \text{対象の品質分類項目へ正しく検出・分類した数}}{\text{物体検出AIが対象の品質分類項目へ検出・分}\br/> \text{類したエダマメの数}}$$

表1 データセットの構成

AIに分類させる 外観品質分類項目	細分類項目	データセット	
		A	B
良品	二粒	さや全体	さや全体
	三粒		
一粒	一粒	さや全体	さや全体
欠粒	片側欠け	さや全体	さや全体
	中央欠け		
奇形	四粒		
	合体さや		
	不等間隔さや	さや全体	さや全体
	くびれさや 湾曲さや		
未熟	一粒		
	二粒	さや全体	さや全体
	三粒		
さや割れ	ひげ	ひげとその直近 の谷間まで	
	亀裂さや 欠損さや 割れさや	亀裂とその周囲 さや全体	さや全体
しみ	莢の一部	変色部のみ	
	さや全体	花注以外	さや全体
黄化	黄化	さや全体	さや全体

$$\text{再現率} = \frac{\text{物体検出AIが対象の品質分類項目のエダマメを}\br/> \text{対象の品質分類項目へ正しく検出・分類した数}}{\text{テスト画像中の各品質分類項目のエダマメの}}$$

$$F \text{ 値} = 2 \times \text{適合率} \times \text{再現率} / (\text{適合率} + \text{再現率})$$

テスト画像データには外観品質分類項目ごとに画像内のエダマメ合計数が20個になるように調整して各物体検出AIに入力し、適合率と再現率、F値をそれぞれ10反復した。

データセットAのアノテーション範囲は、8項目の外観品質分

類を行う画像認識AIを作成し、細分類項目ごとにScore-CAMで分類根拠を特定した。細分類項目は、物体検出AIと画像認識AIに分類させる8項目の外観品質分類項目をさらに細分化した合計20項目である。Score-CAMで細分類項目ごとに分類根拠を特定する理由は、物体検出AIに分類させる外観品質分類項目が同一でも細分類項目ごとに分類根拠が異なる可能性を考慮したためである。

分類根拠特定用の画像認識AIは、外観品質分類項目ごとに500枚の画像データを使用し、TensorflowとKerasを使用したDLで作成した。これらの画像データは、物体検出AI作成用の画像からエダマメを切り出したもので、1枚につきエダマメが1つ写っている。作成した画像認識AIは、物体検出AIと同様のResNet152のモデルである。DLの設定に関し、学習回数は10回、CNNへの入力サイズを256×256に設定した。

Score-CAMに適用したテスト画像は、細分類項目ごとに30枚用意した。これらの画像データも、物体検出AIの精度評価用に用意した画像からエダマメを1つずつ切り出したものである。エダマメさや内の分類根拠は、PythonのライブラリOpenCV (Open Source Computer Vision Library)を利用してScore-CAMで得られた画像認識AIのエダマメ外観品質分類根拠部にヒートマップを表示させて確認した。なお、データセットAのアノテーション範囲は、画像認識AIがテスト画像のエダマメの外観品質分類項目を正しく分類できた際のヒートマップの出現パターンが最多の部分とした。エダマメ画像内の分類根拠部分をScore-CAMで特定した例を図2に示す。本研究でDLとScore-CAMに使用したコンピュータの構成を表2に示す。

本実験の統計処理はMicrosoft 365 Excel (Microsoft)でt検定を行い、各統計処理の有意水準は5%とした。

3. 結果と考察

データセットAとBで作成した物体検出AIの適合率と再現率、F値の結果を表3~5に示す。

データセットAでの物体検出AIの欠粒と8項目の平均の適合率と再現率、F値はデータセットBよりも5%水準で有意に高くなり、データセットAとBの物体検出AIのF値は欠粒でそれぞれ0.77と0.36、8項目の平均でそれぞれ0.94と0.89であった。データセットBの物体検出AIは、データセットAの物体検出AIよりも欠粒のエダマメを他の項目へ誤分類することや未検出が多発し、適合率と再現率、F値の欠粒の項目で有意差が出る要因となった。また、欠粒のエダマメのアノテーション範囲は、データセットAとBの両方でさや全体であるが、2つの物体検出AIの欠粒の検出・分類精度に差が出た。データセットAとBのアノテーション範囲は、さや割れの「ひげ」と「欠損」、そしてしみて異なっており、これらの項目のアノテーション範囲変更が別項目の欠粒の検出・分類精度を向上させた。アノテーション範囲の変更で検出・分類精度を向上するには、すべての分類項目のアノテーション範囲を再検討する必要がある。

データセットAとBの物体検出AIのさや割れの再現率は0.86と0.96となり、5%水準で有意差が生じた。再現率は物体検出AIに

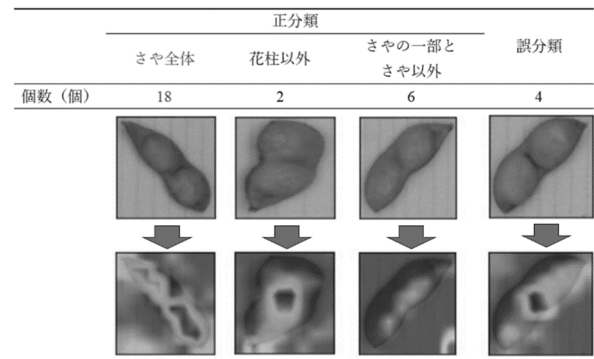


図2 Score-CAMによる良品・2粒での分類根拠の可視化

表2 コンピュータの構成

	物体検出AIの 作成環境	画像認識AIの作成環境と Score-CAMの実装環境
OS	Ubuntu20.04 LTS	
CPU	Intel Core i7 7700K	
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1080Ti	
CUDA	11.0	10.0
cuDNN	8.0.2	7.6.5
Python	3.8	3.6
Tensorflow	2.4.1	1.15
Keras		2.3.1

よる対象物の未検出の割合を示す指標であり、1に近いほど未検出が少ないことを示す。データセットAのさや割れに含まれる「ひげ」と「欠損」は、分類根拠の可視化結果からアノテーション範囲をさや全体よりも狭い範囲に限定した。そのため、アノテーション範囲をさやの一部に限定して物体検出する項目では、さや全体などの検出領域が広い項目と比べて検出精度が低下した。

以上から、物体検出AIはアノテーションの範囲指定の変化で検出・分類精度が変化し、CNNの分類根拠可視化技術であるScore-CAMで各分類項目の分類根拠部分を明確にしてアノテーション範囲をその部分に限定することで高精度な物体検出AIを作成できる。また、物体検出AIの精度向上は、DLに使用する画像データ数を増やすことが一般的であるが、アノテーション範囲を変更することで画像データ数の増加以外でも物体検出AI精度の向上に寄与できる。Score-CAMでの分類根拠部分特定は、データ数の増加でエダマメの外観精選別用の物体検出AIの精度が向上しない場合にアノテーションの前に実施することが有効である。

4. 摘要

(1) Score-CAMはCNN構造の画像認識AIの各外観品質分類項目の分類根拠を可視化でき、ヒートマップの出現パターンからアノテーション範囲を設定した。

表3 各データセットで作成した物体検出AIでの適合率

データセット	良品	一粒	欠粒	奇形	未熟	さや割れ	しみ	黄化	平均
A	0.99	1.0	0.75	0.97	1.0	0.95	0.88	1.0	0.94
B	0.98	1.0	0.35	0.92	1.0	0.95	0.90	1.0	0.89
T-test	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*

n.s. : 有意差なし, * : $p < .05$

表4 各データセットで作成した物体検出AIの再現率

データセット	良品	一粒	欠粒	奇形	未熟	さや割れ	しみ	黄化	平均
A	0.99	1.0	0.80	0.97	1.0	0.86	0.88	1.0	0.94
B	0.99	1.0	0.38	0.96	1.0	0.96	0.91	1.0	0.90
T-test	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	*

n.s. : 有意差なし, * : $p < .05$

表5 各データセット作成した物体検出AIのF値

データセット	良品	一粒	欠粒	奇形	未熟	さや割れ	しみ	黄化	平均
A	0.99	1.0	0.77	0.97	1.0	0.90	0.88	1.0	0.94
B	0.98	1.0	0.36	0.94	1.0	0.95	0.90	1.0	0.89
T-test	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*

n.s. : 有意差なし, * : $p < .05$

- (2) さや割れとしみのアノテーション範囲をさやの一部に限定したデータセットAで作成した物体検出AIは、8項目の外観品質分類項目の平均の適合率と再現率、F値がそれぞれ0.94であった。
- (3) 全項目でさや全体をアノテーションしたデータセットBで作成した物体検出AIは、8項目の外観品質分類項目の平均の適合率と再現率、F値がそれぞれ0.89、0.90、0.89となり、データセットAの物体検出AIよりも5%水準で有意に低かった。
- (4) アノテーション範囲が異なるデータセットAとBで作成した物体検出AIの検出・分類精度に差が出たことから、アノテーション範囲の変化は物体検出AIの精度に影響する。

参考文献

- 1) 片平光彦, 張樹槐, 大泉隆弘, 後藤恒義, 鶴沼秀樹, 田村晃, 後藤克典, 2011. 画像処理によるエダマメの選別方法に関する研究(第2報) 試作エダマメ選別機の性能評価, 農業機械学会誌, 73(2), 127-134.
- 2) 森智洋, 市浦茂, 片平光彦, 2021. ディープラーニングを用いたエダマメの外観精選別用AIの作成と精度評価(第1報) 物体検出AIによるエダマメの外観精選別の有効性の検討. 農業食料工学会誌, 83(3), 163-171.
- 3) 森智洋, 市浦茂, 片平光彦, 2021. ディープラーニングを用いたエダマメの外観精選別用AIの作成と精度評価(第2報) データセットに含まれるエダマメ品種の違いが物体検出AIの外観選別精度に与える影響. 農業食料工学会誌, 83(3), 172-181.
- 4) Ren, S., He, K., Girshick, R., Sun, J., 2016. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. <https://arxiv.org/pdf/1506.01497v3.pdf>. Accessed October. 28, 2021.
- 5) Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C., Berg, C., A., 2016. SSD: Single Shot MultiBox Detector. <https://arxiv.org/pdf/1512.02325v5.pdf>. Accessed October. 28, 2021.
- 6) Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A., 2016. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. <https://arxiv.org/pdf/1506.02640v5.pdf>. Accessed October. 28, 2021.
- 7) 松浦良, 山崎公俊, 千田有一, 2018. YOLOv3を用いた圃場におけるレタスの位置検出と精度評価. 計測自動制御学会中部支部シンポジウム, http://ais.shinshu-u.ac.jp/~aislab/papers/201809_SICE_chubushibu_matsuura.pdf. Accessed October. 28, 2021.
- 8) Haofan, W., Mengnan, D., Fan, Y., Zijian, Z., 2019. Score-CAM: Improved Visual Explanations Via Score-Weighted Class Activation Mapping. <https://arxiv.org/pdf/1910.01279v1.pdf>. Accessed October. 28, 2021.

水田作業における無段変速トラクタの負荷制御機能の効果

進藤勇人¹⁾・齋藤雅憲¹⁾・高橋善則²⁾・関口一樹¹⁾・佐々木景司¹⁾

Effect of Load control Function of Tractors Equipped with Hydraulic Mechanical Transmission on Working Time and Fuel Consumption

Hayato SHINDO・Masanori SAITO・Yoshinori TAKAHASHI・Kazuki SEKIGICHI・Keiji SASAKI

[キーワード] 負荷制御機能, 無段変速トラクタ, 作業時間, 燃料消費量

1. 緒言

水稲作を主体とした生産者は、経営の安定化のため経営規模の拡大を進めている。作付面積の増加に伴い、これまで以上に計画通りに各種作業を進めることが重要になってきている。大区画ほ場整備の進展と農業機械の大型化により作業能率の向上が図られているが、作業時間を短縮できる技術の開発と普及が喫緊の課題である。また、燃料価格の高止まり傾向が続いており、コスト削減の観点から燃料消費量を削減できる技術開発の必要性も高まっている。著者らは、従来畑作用作業機として使用されてきたスタブルカルチと縦軸駆動ハローにより耕起、砕土・整地し、無代かき状態で播種する無代かき湛水直播を開発し、この方式では慣行の代かき体系に比べ、作業時間の短縮と燃料消費量の削減が図られることを示した¹⁾。また、農業機械の省エネ利用マニュアル平成27年度版¹⁾においても同様の効果が例示されている²⁾。しかし、この方式は新たな作業機の導入や農法の転換が伴うことから、幅広い生産者への普及は困難な側面もある。

他方、国内の農業機械メーカーはトラクタの操作性と作業効率の向上を目指して、従来のトラクタにも採用されていた HST と遊星歯車を組み合わせた HMT (hydro mechanical transmission, 油圧機械式変速装置)³⁾を開発し、これを搭載したトラクタを発売した。近年、水田作で主流になってきている中馬力帯のトラクタにも搭載されており、広く普及してきている。電子制御された HMT を搭載したトラクタは、足踏みクラッチ操作なしで、無段階での変速が可能であり⁴⁾、車速設定により一定速度を維持でき、エンジン負荷に応じて速度制御を行う負荷制御機能を有している。これにより燃料消費量の低減とオペレータの負担が軽減できるとされており、さらなる省エネ化が期待できる。

そこで本報は、負荷制御機能が搭載された無段変速セミクローラトラクタ 2 機種を用いて、無代かき体系と慣行の代かき体系の作業を実施し、負荷制御機能が作業時間と燃料消費量に及ぼす影響を検討したので、報告する。

2. 試験方法

(1) 試験場所・ほ場条件

試験は、ほ場Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの3ほ場で実施した。ほ場ⅠおよびⅡは秋田県農業試験場内水田ほ場で、ほ場Ⅲは秋田県代市現地水田ほ場で、ほ場Ⅲは、長辺148m、短辺68mの1haである。いずれのほ場も土壌は細粒強グライ土である。ほ場ⅠおよびⅡは2014～2016年の3カ年、ほ場Ⅲは2014、2015年の2カ年、試験を行った。

(2) 作業体系

耕うん、砕土・整地の作業は、無代かきおよび代かきの2体系で実施した。無代かき体系は進藤ら¹⁾の方式に従い、チゼルプラウ(スタブルカルチ)による耕起後に、縦軸駆動ハローによる砕土・整地とした。代かき体系は、慣行作業として実施される、ロータリによる耕うん後に、代かきハローによる荒代かき、植代かきとした。

無代かき体系はほ場ⅠおよびⅢで、代かき体系はほ場Ⅱで実施した。

(3) 供試機材

1) トラクタ: トラクタ A 47.8kW 無段変速セミクローラトラクタ (Y社 EG65QCW 型, HMT, 排気量 3.318L) およびトラクタ B 51.5kW 無段変速セミクローラトラクタ (Y社 YT470 型, HMT, 排気量 3.318L) の2機種を供試した。いずれも負荷制御機能が搭載された機種である。供試したトラクタのエンジン型式は同一であるが、トラクタ B は、特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律(2010年一部改正, 通称オフロード法)の国内特殊自動車4次排ガス規制をクリアした機種である。2014および2015年はトラクタ A を、2016年はトラクタ B を供試した。

2) 負荷制御機能: 供試したトラクタは、HMT を搭載しており、主変速レバーの操作のみで無段階に車速を変えることができる。作業時は、エンジン回転数と車速の上限を設定し、主変速レバーを全開にすることで、設定し

1) 秋田県農業試験場 秋田県秋田市雄和相川字源八沢 34-1

2) 元秋田県農業試験場

た車速の上限まで加速可能である。負荷制御機能は、作業時にエンジン負荷が大きくなると PTO 回転数(エンジン回転数)を維持したまま、主変速レバーの操作なしで自動的に減速し、さらに負荷が大きくなると自動的作業機を上昇するものである。また、負荷が小さくなると元の車速、作業機高さに自動で復帰する。従来の有段シフト変速と異なり、オペレータがほ場条件や作業の仕上がりにあわせて速度段を変更する必要がなくなるアシスト機能である。

3) 作業機: 2015 年の耕起作業を除く 2014~2016 年の無代かき体系では、耕起にチゼルプラウ (I 社製 FDSS71 型, 作業幅 2.2m) を、砕土・整地に縦軸駆動ハロー (I 社製, FECL-233PT 型(パッカローラ装備), 作業幅 2.3m) を使用した。2015 年の耕起作業は、チゼルプラウ (Su 社製 MSC6PYHLK 型, 作業幅 1.9m) を使用した。2014, 2015 年の代かき体系では、耕うんにロータリ (K 社製 KJF223 型, 作業幅 2.2m) を、代かきハロー (K 社製 TXM416 型, 作業幅 4.1m) 使用した。2016 年(トラクタ B) の代かき体系では、耕うんにロータリ (M 社製 SXL2411H 型, 作業幅 2.4m) を、代かきに代かきハロー (M 社製 HWS4100BR 型, 作業幅 4.1m) を使用した。いずれの年次も荒代かきと植代かきは同一の代かきハローを用いた。

4) トラクタの設定: トラクタ A (2014, 2015 年) での作業では、PTO を使用する作業機は PTO 速度段 1 (定格回転 540rpm) で作業し、エンジン回転数は 2300rpm であった。けん引作業のエンジン回転数は 2200rpm とした。トラクタ B (2016 年) での作業では、PTO を使用する作業機は PTO 速度段 1 (定格回転 540rpm) で作業し、エンジン回転数の 2500rpm であった。けん引作業のエンジン回転数は 2300rpm とした。

(4) 調査方法

調査はほ場を短辺で 2 分割して実施した。はじめに、負荷制御機能を使用せず約 50a を作業した(負荷制御無区)。その際にはほ場の仕上がりやエンジン負荷からオペレータの判断で作業速度を決定した。次に、同程度の速度で作業できるトラクタの速度の上限を設定し、同日に負荷制御機能を使用して作業を行った(負荷制御有区)。なお、その際の減速率は最大 15% に設定した。

(5) 調査項目

1) 作業速度および作業時間: 水田の長辺中央付近に 25m の区間を設置し、その区間の通過時間を計測して、作業速度を算出した。調査は全行程で行った。また、各試験区の作業開始から終了までの時間を計測した。

2) 燃料消費量: トラクタの燃料ホースに燃料消費計(流量計, BANZAI 社製 DE-FL 型)を取り付け、燃料の消費量を計測した。

3) 土壌砕土率: 負荷制御機能の有無による仕上がり状況を確認するため、作業後の土壌砕土率を測定した。作

業後に 1 試験区あたり 3 カ所から採土し、20mm 未満の土塊の重量を測定し、砕土率とした。あわせて乾熱法(105°C, 24 時間)により土壌含水比を測定した。採土した深さはチゼルプラウとロータリ耕が 11cm, 縦軸駆動ハローが 3cm である。

4) オペレータからの聞き取り: 実際に作業を実施した 3 人のオペレータから作業実施後に負荷制御機能使用時の操作性等を聞き取り調査した。各オペレータの試験実施前の当該型式トラクタの経験時間は、40 代男性が 40 時間以上、60 代男性が 5 時間未満、30 代男性が 1 時間未満であった。

(6) 統計処理

土壌含水率の調査データは、t-検定により処理(負荷制御の有無)区間の比較をした。ほ場 I および II におけるトラクタ A による作業速度、作業時間、燃料消費量の調査データは、処理(負荷制御)の有無と作業(機)を要因とした二元配置分散分析を行い、処理区間の比較をした。

3. 結果および考察

(1) 土壌砕土率

各作業後の土壌砕土率を表 1 および 2 に示した。トラクタ A 負荷制御有区のチゼルプラウおよびロータリによる採土率は、それぞれ 30.4~55.7%, 34.8~38.8% であり、トラクタ B 負荷制御有区の採土率は、それぞれ 31.1%, 54.8% であった。また、チゼルプラウ後の砕土・整地作業におけるトラクタ A 負荷制御有区の縦軸駆動ハローによる採土率は、61.9~78.3% であり、トラクタ B 負荷制御有区は、65.6% であった。いずれの作業においても負荷制御有区の前に実施した負荷制御無区の砕土率と同等であった。負荷制御有区の作業速度を負荷制御無区と同等になるように作業したことで、耕うんピッチが維持されたためと考えられた。いずれのほ場も砕土・整地および植代かき作業後に、湛水直播機で播種作業を行ったが、負荷制御の有無にかかわらず、十分な水稻の苗立ち率が得られた(データ省略)。これらのことから、負荷制御機能を利用しても、十分な作業精度が得られるといえる。

(2) 作業速度

負荷制御無区の作業速度を 100 とした時のトラクタ A 負荷制御有区の各作業速度は、ほ場 I および II (長辺 200m) で 96.7~108.0, ほ場 III (長辺 148m) で 98.7~108.7 であった(表 3, 4)。トラクタ B では 99.2~104.7 であった(表 5)。負荷制御機能を使用しても、負荷制御機能を使用しないと同等に、設定した速度を維持して作業できると判断された。

(3) 作業時間

ほ場 I, II におけるトラクタ A 負荷制御有区の作業時間は、チゼルプラウが 1.25~1.42h/ha, ロータリが 2.32~2.50h/ha であり、耕うん・耕起後の縦軸駆動ハローが 1.88

～2.30h/ha, 荒代かきが 1.35～1.73h/ha, 植代かきが 1.41～1.49h/ha であった。また、負荷制御無区を 100 としたときの負荷制御有区の各作業時間は 92.3～100.0 であり、全作業の平均では 3.2 ポイントの短縮であった(表 3)。

ほ場Ⅲにおけるトラクタ A 負荷制御有区の作業時間は、チゼルプラウが 1.19～1.53h/ha であり、耕起後の縦軸駆動ハローが 2.29～2.60h/ha であった。また、負荷制御無区を 100 としたときの負荷制御有区の各作業時間は 90.6～100.0 であり、全作業の平均では 3.8 ポイントの短縮であった(表 4)。ほ場Ⅲは、ほ場Ⅰ、Ⅱとほ場区画や条件が異なるが、負荷制御の効果については、ほぼ同様の結果であった。

負荷制御無区を 100 としたときのトラクタ B 負荷制御有区の作業時間は、89.3～104.6 であり、全作業の平均では 5.8 ポイントの短縮であった(表 5)。トラクタ B でも同様の結果が得られた。作業後に 3 人のオペレータから負荷制御機能使用時の操作性等の聞き取りをしたところ、主変速レバーとクラッチを使用しない操作に慣れることが必要であるが、最高速度設定と負荷制御機構を使用することで、加速時にエンジン負荷をあまり気にせずに加速できることや、その際に仕上がりや作業状態を確認できるとの感想を得た。このことから、作業時間の短縮は加速、減速時の操作性向上によると推察された。

表 1 負荷制御の有無が耕うん・耕起作業後の土壌碎土率に及ぼす影響 (2014～2016 年)

トラクタ	ほ場	体系	作業機	年次	作業日	負荷制御 有		負荷制御 無	
						碎土率(%)	含水比	碎土率(%)	含水比
A	I	無代かき	チゼルプラウ	2014	4/24	42.9(±5.0)	0.59	44.9(±5.9)	0.58
				2015	4/25	30.4(±4.7)	0.69	29.7(±5.9)	0.66
	II	代かき	ロータリ	2014	4/27	38.8(±2.2)	0.72	39.8(±1.6)	0.70
				2015	4/23	34.8(±2.4)	0.95	33.7(±2.1)	0.90
	III	無代かき	チゼルプラウ	2014	4/25	55.7(±5.6)	0.58	57.9(±4.7)	0.54
				2015	4/25	48.3(±3.6)	0.78	51.2(±3.6)	0.74
B	I	無代かき	チゼルプラウ	2016	4/24	31.1(±0.9)	0.69	31.0(±1.3)	0.65
				2016	4/25	54.8(±8.4)	0.78	53.0(±9.9)	0.77

注)いずれのトラクタ、ほ場、年次においても碎土率は、負荷制御の有無による差は認められなかった(5%水準、t検定、n=3)

表 2 負荷制御の有無が碎土・整地作業後の土壌碎土率に及ぼす影響 (2014～2016 年)

トラクタ	ほ場	体系	作業機	年次	作業日	負荷制御 有		負荷制御 無	
						碎土率(%)	含水比	碎土率(%)	含水比
A	I	無代かき	縦軸駆動ハロー	2014	4/28	61.9(±5.5)	0.42	61.4(±5.6)	0.38
				2015	5/2	63.1(±3.2)	0.30	61.0(±5.0)	0.29
	II	代かき	代かきハロー	2014		荒代かき・植代かき			
				2015		荒代かき・植代かき			
	III	無代かき	縦軸駆動ハロー	2014	4/29	76.2(±5.0)	0.32	77.2(±1.7)	0.28
				2015	5/1	78.3(±3.7)	0.40	75.6(±5.6)	0.38
B	I	無代かき	縦軸駆動ハロー	2016	4/24	65.6(±4.7)	0.49	64.3(±4.6)	0.46
				2016		荒代かき・植代かき			

注)いずれのトラクタ、ほ場、年次においても碎土率は、負荷制御の有無による差は認められなかった(5%水準、t検定、n=3)

表 3 長辺 200m ほ場 (ほ場Ⅰ、Ⅱ) におけるトラクタ A での負荷制御機構の有無が作業速度、作業時間、燃料消費量に及ぼす影響 (2014～2015 年)

ほ場	作業(機)	年次	作業速度(km/h)			作業時間(h/ha)			燃料消費量(L/ha)		
			負荷制御			負荷制御			負荷制御		
			有	無	左比	有	無	左比	有	無	左比
I	チゼルプラウ	2014	6.29	5.83	108.0	1.25	1.35	92.3	11.7	12.1	96.4
		2015	6.39	6.46	99.0	1.42	1.46	97.5	11.8	12.1	97.5
	縦軸駆動ハロー	2014	3.18	3.12	102.1	1.88	1.98	94.7	16.5	17.9	91.8
		2015	2.78	2.74	101.6	2.30	2.35	97.8	17.3	17.3	99.9
	ロータリ	2014	2.37	2.39	99.0	2.32	2.44	95.0	20.6	21.5	95.7
		2015	2.38	2.40	99.3	2.50	2.60	96.1	16.3	16.9	96.3
II	荒代かき	2014	2.55	2.63	96.7	1.35	1.37	98.5	10.0	10.4	95.9
		2015	2.07	2.12	97.5	1.73	1.73	100.0	11.3	11.3	99.8
	植代かき	2014	2.53	2.47	102.5	1.41	1.47	95.9	8.9	9.8	90.3
		2015	2.51	2.50	100.4	1.49	1.49	100.0	9.8	10.0	97.8
	平均					100.6			96.8		96.2
	分散分析			n.s.			**			**	

注)**は負荷制御の有無と作業を要因とした二元配置分散分析により、負荷制御の有無で1%水準で有意な差があることを示し、n.s.は5%水準で有意差がないことを示す。

表4 長辺148mほ場(ほ場Ⅲ)におけるトラクタAでの負荷制御機構の有無が作業時間、燃料消費量に及ぼす影響(2014~2015年)

ほ場	作業(機)	年次	作業速度(km/h)			作業時間(h/ha)			燃料消費量(L/ha)		
			負荷制御		左比	負荷制御		左比	負荷制御		左比
			有	無		有	無		有	無	
Ⅲ	チゼルプラウ	2014	7.87	7.97	98.7	1.19	1.25	95.2	10.2	10.2	100.2
		2015	7.52	6.92	108.7	1.53	1.69	90.6	11.9	12.3	96.9
	縦軸駆動ハロー	2014	3.10	3.13	99.0	2.29	2.31	99.1	17.9	18.0	99.1
		2015	3.34	3.26	102.5	2.60	2.60	100.0	18.2	18.7	97.1
平均			102.2			96.2			98.3		

表5 長辺200mほ場(ほ場Ⅰ,Ⅱ)におけるトラクタBでの負荷制御機構の有無が作業時間、燃料消費量に及ぼす影響(2016年)

ほ場	作業(機)	作業速度(km/h)			作業時間(h/ha)			燃料消費量(L/ha)		
		負荷制御		左比	負荷制御		左比	負荷制御		左比
		有	無		有	無		有	無	
Ⅰ	チゼルプラウ	6.91	6.61	104.5	1.33	1.46	91.0	14.4	14.4	99.5
	縦軸駆動ハロー	3.56	3.56	99.9	2.24	2.50	89.8	26.7	27.0	99.1
	ロータリ	2.91	2.92	99.7	2.62	2.72	96.3	22.5	22.8	98.9
Ⅱ	荒代かき	3.32	3.17	104.7	1.35	1.51	89.3	11.6	11.7	99.5
	植代かき	3.45	3.48	99.2	1.37	1.31	104.6	10.0	9.6	104.0
平均		101.6			94.2			100.2		

(4) 燃料消費量

ほ場Ⅰ,ⅡにおけるトラクタA負荷制御有区の燃料消費量は、チゼルプラウが11.7~11.8L/ha、ロータリが16.3~20.6L/haであり、耕うん・耕起後の縦軸駆動ハローが16.5~17.3L/ha、荒代かきが10.0~11.3L/ha、植代かきが8.9~9.8L/haであった。また、負荷制御無区を100としたときの負荷制御有区各作業の燃料消費量は90.3~99.9であり、全作業の平均では3.8ポイントの削減であった(表3)。

ほ場ⅢにおけるトラクタA負荷制御有区の燃料消費量は、チゼルプラウが10.2~11.9L/haであり、耕起後の縦軸駆動ハローが17.9~18.2L/haであった。また、負荷制御区を100としたときの負荷制御有区各作業の燃料消費量は96.9~100.2であり、全作業の平均では1.7%の削減であった(表4)。ほ場Ⅲは、ほ場Ⅰ,Ⅱとほ場区画や条件が異なるが、負荷制御の効果については、ほぼ同様の結果であった。燃料消費量の削減率は、作業時間の短縮率と同様の傾向を示しており、オペレータの聞き取りで、加速時の操作性の向上があげられていることから、負荷制御機能使用時の燃料消費量削減効果は、操作性向上による作業時間削減の影響が大きいと考えられた。

負荷制御無区を100としたときのトラクタB負荷制御有区の燃料消費量は、98.9~104.0であり、全作業の平均では0.2%の増加であった(表5)。トラクタBの燃料消費量の削減率は、作業時間の短縮率と比べ小さく、トラクタAと傾向が異なることから、今後詳細の検討が必要である。

農業機械の省エネ利用マニュアルー平成27年度版ーでは、30馬力級のトラクターで、最大出力の50%程度の負荷のロータリ耕を行う場合、走行速度段とPTO速度段を調節して走行速度とPTO回転速度を変えずに、エンジン回転を定格(2600rpm)から1800rpmに下げて作業すると20%燃料消費量を節減できることが例示されている²⁾。この方

法では、オペレータが作業時のエンジン負荷状況を判断して、エンジン回転数と走行およびPTO速度段を調整する必要がある。負荷制御機能はエンジン負荷状況にあわせて自動的に車速を制御するものであることから、例示された方法と負荷制御機能を組み合わせて作業することで、オペレータの負担を軽減し、さらなる燃料消費量の削減につながるものと考えられた。

4. 摘要

本報は、負荷制御機能が搭載された無段変速トラクタを用いて無代かき体系と慣行の代かき体系の作業し、負荷制御機能が作業時間と燃料消費量に及ぼす影響を検討した。5種の水田作業における負荷制御機能使用時の作業時間短縮率は-4.6~10.7%であり、燃料消費量削減率は-4.0~9.7%であった。

謝辞 本報の一部は、新稲作研究会の支援を受けて実施した試験結果である。関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) 進藤勇人・齋藤雅憲・佐々木景司・佐藤雄幸・片平光彦, 2017. スタブルカルチと縦軸駆動ハローを用いた播種床造成による水稲無代かき湛水直播栽培の特徴と水稲生育, 農作業研究, 52(3), 121-131
- 2) (一社)日本農業機械化協会, 2016. 農業機械の省エネ利用マニュアルー平成27年度版ー, (一社)日本農業機械化協会
- 3) (一社)農業食料工学会, 2020. 農業食料工学ハンドブック, (株)コロナ社, 361
- 4) 川尻伸也, 2010. ヤンマートラクターEG400シリーズにおける快適性・操作性, 農業機械学会誌, 72(1), 18-20

ブロッコリー選別自動収穫機の開発と課題

星太介*・新妻俊栄*・宮和佳子**・中田健信***

Development and Tasks of Broccoli Sorting Automatic Harvester

Daisuke HOSHI*・Toshiei NIITSUMA*・Wakako MIYA**・Takenobu NAKATA***

[キーワード] ブロッコリー, 選別, 収穫機, 作業性, 精度, 負担面積

1. 背景と目的

市場出荷向けブロッコリーは国内需要が伸びており、価格も比較的安定¹⁾している。また、高い生産性と高収益が期待出来る土地利用型野菜の一つとして注目されている。しかし、ブロッコリーは花蕾の大きさを揃えて収穫することが難しいことから、選別収穫は手作業で行われており、規模の大きい経営体は収穫作業に積極的に雇用を導入しているものの、労働力不足により雇用の確保が難しく、面積維持や拡大のための最大の制約条件になっていた。

福島県において、ブロッコリーは相双地方や県南地方の主要品目の一つであるが、東日本大震災に伴う原発事故により、相双地方の生産額は大幅に減少した。現在は、営農再開上の重要品目として位置付け²⁾られているものの、生産者や被雇用者の不足は、他の地域と比較して更に深刻な状況である。

そこで、本県では市場出荷向けブロッコリー栽培における収穫時の労働力不足を解消するため、ブロッコリーの花蕾の大きさを判別して収穫する選別自動収穫機の開発に取り組んできた。本稿においては、その概要を整理するとともに、本機の性能評価と実用化に向けた課題を考察する。

2. 選別自動収穫機の概要と試験方法

(1) 選別自動収穫機の概要

選別自動収穫機はマイコム株式会社の基本技術を基に福島県とマイコム株式会社が2018年から3ヶ年かけて開発(畝村, 2020)³⁾に取り組んだものである。

本機は2条型であり、図1の通りクローラ車体上に収穫部と搬送コンベアを積載している。収穫部は4つのユニットに分かれ、本機前方から順に、送風で花蕾を露出させる外葉除去ユニット、花蕾サイズを画像処理で判別するサイズ選別ユニット、収穫判断時に外葉をカットす

る外葉カットユニット、収穫判断時に花蕾茎をカットする収穫カットユニットからなる。また、動力部はインバータ発電機を使用している。

表1の通り、収穫搬送については、搬送コンベアを収穫部の2条の間に装備し、収穫されたブロッコリーを30cm/sの速度で後方部へ搬送する。クローラ車体については、前輪幅130mm、後輪幅180mmの4輪駆動クローラとなっている。クローラ車体の地際部から収穫部下部までの高さは最大92cmであり、昇降機構によってブロッコリーの生育に合わせた高さの調節が可能である。本機の目標値は、選別速度30株/min、収穫精度90%以上とした。また、本機は本体前方及びサイズ選別ユニットにLED照明を装備しているため、日中だけでなく夜間収穫も可能である。

本機の走行及び収穫操作は収穫部後方に設置されたタッチパネルで行う方式である。図2の通り、本機により収穫されたブロッコリーは外葉と花蕾茎がカットされ、調製された状態で搬送コンベアから搬出される。

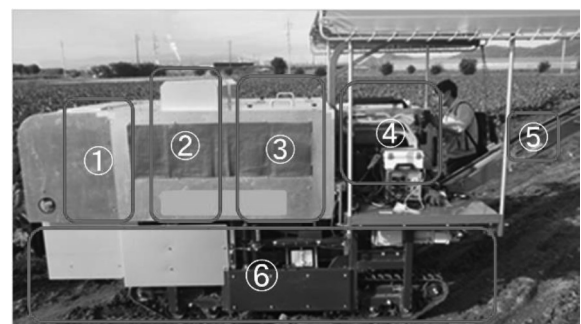


図1 選別自動収穫機の外観と各ユニット等の位置

注：①外葉除去ユニット，②サイズ選別ユニット，
外葉カットユニット，③収穫カットユニット，④動力部，
⑤搬送コンベア，⑥クローラ車体

* : 福島県農業総合センター

** : 福島県中農林事務所須賀川農業普及所

*** : マイコム株式会社

(2) 耕種概要

本機の性能評価は、福島県南相馬市I法人のプロッコリー栽培ほ場で行った。草丈が高すぎない品種を選定している。栽植密度は地域の慣行栽培と同様に、畝間 65cm, 株間 31cm とした。

なお、定植日は 2020 年 9 月 4 日、収穫日及び調査日は 2020 年 11 月 20 日であり、走行速度のみ 2021 年 6 月 17 日に調査した。

(3) 調査項目

現地ほ場において、プロッコリー収穫時の草丈、花蕾高、本機の収穫精度、選別速度(72m×2回)、走行速度(30m×2回)を調査し、現地手収穫の収穫時期、作業日数、収穫回数の聞き取りを加えて本機の負担面積を算出した。

3. 結果と考察

(1) 収穫時の生育

表 2 の通り、試験ほ場での実際の栽植密度は株間 32.2

表 1 選別自動収穫機の仕様等

項目	内容	
収穫条数	2条	
収穫部	外葉除去ユニット	電動送風機
	サイズ選別ユニット	画像処理装置+LED照明
	外葉カットユニット	ギア付きモータ回転+電動モータZ軸+電動モータX軸+電動モータY軸の4軸制御方式 3枚刃での回転による押し切り
	収穫カットユニット	電送シリンダ2軸
収穫搬送	搬送コンベア	専用扁平タイプ10cm高さ、30cm幅 搬送速度30cm/s 可変式
	モータ	ギア付きモータ 定格1500W×2
クローラ車体	走行方向	前進、後進、左、右、その場旋回
	クローラ(mm)	幅 前輪130/後輪180, 接地長500-500 (全長171)4輪駆動
	クローラトレッド(mm)	1320
	昇降機構	油圧電送式 ストローク200mm
	機体寸法(mm)	全長3850×全幅2000×全高1800
	動力部	インバータ発電機 AC200V 6.0Kw
目標値	選別速度	30株/min
	収穫精度	90%以上

注: 地際部から収穫部下部までの高さは最大92cm。夜間収穫も可能。



図 2 搬送コンベアから搬出されたプロッコリー

cm, 畝間 64.3cm であり、生育は草丈 55.3cm, 花蕾高 24.0cm であった。草丈に畝高さを加えても 65.1cm であり、選別自動収穫機の地際部から収穫部下部までの最大高 92cm よりも低いことから、本機がプロッコリー上部を通過するには問題の無い生育であったと考えられた。

(2) 作業性

図 3 の通り、機械収穫作業は選別自動収穫機の操作に 1 人、収穫物のコンテナ詰めには 1 人で合計 2 人の組作業で行った。コンテナ詰め作業は、搬送コンベアから搬出される収穫物の傷の確認や取り残された外葉の除去を行う必要がある。プロッコリー収穫時の選別速度は表 3 の通り、29 株/min, 4.7m/min であった。選別速度の目標値は 30 株/min であるため、ほぼ同等の成果が得られた。選別速度を基に本機の作業能率を試算すると、10a 当たり 2.85h と試算された。また、本機移動時の走行速度は 14.3m/min であった。これは通常の歩行速度よりも大幅に遅いものであり、ほ場での作業性を高める際には走行速度の向上が必要と考えられた。

表 2 栽植密度及び生育

	(cm)
株間	32.2
畝間	64.3
畝高さ	9.8
草丈	55.3
花蕾高	24.0

表 3 作業能率

選別速度(収穫時)	29.0株/min
	4.7m/min
走行速度	14.3m/min
作業能率	2.85h/10a

注: 作業能率は選別速度を基に試算



図 3 選別自動収穫機による収穫

(3) 収穫精度

表4の通り、ブロッコリーの花蕾径が規格に達した収穫すべき株を100%とした場合、92.7%が収穫され、そのうち出荷可能な状態で収穫された株は84.4%であった。また、傷により出荷出来ない株が8.3%あったが、傷の状態を見ると、図4の通り外葉カット時の切り傷によるものであった。未収穫株は6.7%であったが、その原因は出荷規格より小さいと判断した見逃しによるものであった。

今後、収穫精度の目標値90%以上を達成するためには、収穫時の傷の低減が必要になると考えられた。

一方、収穫すべきでない株は全て未収穫であったことから、花蕾径10cm未満の誤収穫は無かったと考えられた。

(4) 負担面積

I法人において、ブロッコリーは春と秋の年2回作付けされており、表5の通り春作は5月下旬から6月にかけて、秋作は10月下旬から12月にかけて収穫される。また、一つのほ場での収穫回数は春作の場合は3回、秋作の場合は4回である。その場合、年間の収穫作業日数は111日であり、実作業日数に換算すると91.4日であった。これらの結果を基にして試算した負担面積は、春作2.72ha、秋作3.62haで合計6.34haであった。I法人の場合、2021年の作付面積が50haであることから、本機で収穫するには8台程度が必要になると試算された。

負担面積の試算にあたっては、1日当たりの作業時間は南相馬市における手収穫時間と同様としたが、本機は夜間

収穫も可能であるため、1日当たりの機械作業時間を増やすことで、負担面積を拡大出来る可能性がある。

(5) 実用化に向けた課題

本機は一定の生育条件下で8割以上の収穫精度と、6ha以上の負担面積が期待出来ることが明らかとなったが、実用化に向けた課題も明らかとなった。

一つ目は収穫精度の向上である。収穫精度の目標値90%以上に向けた精度向上を図るためには、切り傷の割合を減らしていくことが重要となる。収穫時に花蕾についた傷の多くは、ブロッコリーの外葉カット時に発生していたことが、画像解析によって明らかとなった。図5及び図6で示

表5 負担面積

作型	収穫時期	作業日数(d)	収穫回数(回)	作業能率(h/10a)	機械作業時間(h/d)	可能日数率(%)	実作業日数(d)	負担面積(ha)	小計(ha)
春	5月	10	3	2.85	8.0	77.1	7.7	0.72	2.72
	6月	30	3	2.85	8.0	71.4	21.4	2.00	
秋	10月	10	4	2.85	8.0	79.9	8.0	0.56	3.62
	11月	30	4	2.85	7.7	84.1	25.2	1.70	
	12月	31	4	2.85	5.3	93.7	29.0	1.36	
計		111	18				91.4	6.34	

注:収穫時期、作業日数、収穫回数は法人の聞き取りで、2021年の作付面積は50haであった。夜間収穫はせず、地域の作業可能時間を機械作業時間とした。

表4 収穫精度

	(%)
収穫すべき株(n=180)	100.0
うち 収穫(出荷可能)	84.4
収穫(出荷不可能, 傷)	8.3
未収穫(出荷可能, 見逃し)	6.7
未収穫(出荷不可能, 破損)	0.6
収穫すべきでない株(n=750)	100.0
うち 収穫	0.0
未収穫	100.0

注:花蕾径10cm以上を収穫すべき株とした。全調査株数は930株



図4 収穫時に傷付いたブロッコリー
注:外葉カット時の花蕾周りの切り傷



図5 横方向から見た外葉カットユニット
注:矢印部が外葉カットの刃

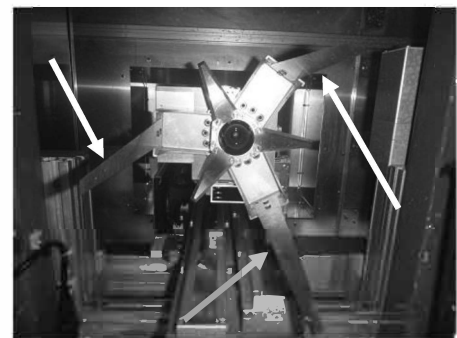


図6 下方向から見た外葉カットユニット
注:矢印部に真下に伸びる3枚の刃が見える

した、外葉カットユニットの刃がブロッコリーの周りを回転しながら上下するため、刃が外葉を押し切りした際に花蕾の位置がずれて、外葉カットの刃が花蕾に傷を付けたものであった。この問題を解決するには、本機改良の面では外葉カットの方法を修正することが考えられる。具体的には、刃の枚数を減らして押し切り回数を減らすことや、刃に角度をつけて引き切りに近い形にする対応が挙げられる。また、栽培技術の面では機械収穫適性の高い栽培方法とすることが考えられる。具体的には、深植え等の栽植様式を見直すことで、株のグラつきを抑え、花蕾のズレを軽減することや、外葉が開き花蕾が見えやすい品種を選定することが挙げられる。

二つ目は作業性の向上である。本機の選別速度は目標値に近い結果が得られ、2人組作業の場合の作業能率は10a当たり2.85hと試算された。一方で、現地における手収穫作業は3人の組作業で6条分を担当し、作業能率は10a当たり平均2.2hと試算された。本機の作業能率は、現地手収穫と比較するとやや劣り、延べ作業時間で見ても同程度と考えられ、移動時の走行速度が遅いことも作業性の低下要因になってくる。これらの点については、本機を実用化するために改善しなくてはならない重要な部分である。そのため、本機改良の面から、作業性の向上が不可避と考えられ、その点において選別速度の向上や本機の収穫作業を組作業から1人作業にすることで、投下労働時間の削減を考えていく必要がある。また、栽培技術の面からはブロッコリーの生育の斉一性を高め、収穫回数を減らすことも今後検討すべき技術になると考えられる。一方で、作業性については労働力不足や作業の習熟度等も影響すると思われるので、手収穫と機械収穫の作業能率が同程度であっても作業人数が減ることや習熟度が低くても機械の操作を行うことで選別収穫が出来る、という利点があることも考慮すべきである。

4. まとめ

本研究では、市場出荷向けブロッコリーの収穫作業における地域の労働力不足を解消するために選別自動収穫機の開発に取り組み、その性能評価と実用化に向けた課題について考察した。本機は2条型で操作1人、収穫物のコンテナ詰め1人の合計2人による組作業により収穫を可能とするものである。一定の生育条件下で8割以上の収穫精度、6ha以上の負担面積を期待出来ることが明らかとなった。

一方で、実用化に向け、収穫精度の向上と作業性の改善が挙げられた。今後は、農業者の要望も考慮しながら、本機を改良するとともに本機に適応した栽培技術の開発、品種の選定にも取り組んでいく予定である。

この研究は「福島県イノベーション・コースト構想に基づく先端農林業ロボット研究開発事業（農林水産省）」

(2018～2020)を活用し実施した。

参考文献

- 1) 独立行政法人農畜産業振興機構, 2020. 特定野菜の生産・流通・消費の動向, 11-14.
- 2) 福島県, 2017. 新たなふくしまの未来を開く園芸振興プロジェクト, 12-13.
- 3) 畝村暢一, 2020. 第6章ブロッコリー選別自動収穫機, 農業ロボットの最前線—生産性向上・人手不足解消による農業の持続的発展—, シーエムシー出版, 294-304.

花巻市圃場におけるドローンモニタリングを用いた 水稻収益拡大化の取り組み

梅木紳太郎*

Efforts to expand production using drone monitoring in Hanamaki city rice field

Shintaro UMEKI*

1. 緒言

農林水産省大臣官房政策課食料安全保障室が2019年に公表した「2050年における世界の食料需給見通し」によると、2050年の世界人口は2010年比の1.3倍に増加するため、食料生産全体を1.7倍に増やさなければならない見通しである。日本が高い食料自給率を誇っている水稻も同様で、同見通しでは穀類の生産量を1.7倍にしなければならない¹⁾。しかし生産現場の現状は、就農者の高齢化や新規就農者の減少により、農業従事者が減少し続けている。また、現在の農業は農家のノウハウによる暗黙知で行われることが多く、これが、新規就農者が増えない原因の一つと思われる。

本研究は、農家の持つノウハウの“見える化”を行うとともに、収穫量の最大化、収益拡大化、そして新規就農者の獲得を目的とする。そのツールとしてドローンを用いる。ドローンを用いる理由は、上空からの視点を活用することで圃場全体をモニタリングすることが可能になるからである。このドローンモニタリングは近年多くの企業で導入されつつあるが、このモニタリングを用いた検証実験はいまだに確立されているとはいえない。

本報告では週に1度、調査対象圃場のモニタリングを行い、生育状況の診断を行うだけでなく、追肥量比較実験などを行い、どの農作業条件が収益の最大化に繋がるか、モニタリング結果と実収量をもとに推定した。

2. 実験方法

(1) 空撮装置

本研究の空撮では、ドローン以外にもマルチスペクトルカメラを用いる。ドローンは飛行性能が高く自動空撮ツールが充実しているDJI社のMavic2proを使用した。マルチスペクトルカメラは各バンドの画像を取得することができ、将来の普及が比較的容易であるParrot社のSequoia+を使用した。このカメラの各バンドのスペクトル特性は、Green: 530~570 nm, Red: 640~680 nm, RedEdge: 730~740 nm, Near-infrared: 770~810 nmである。

(2) 空撮前準備

本研究では植生診断の際にベクタグリッドと呼ばれるメッシュを用いるため、観測圃場の四隅の緯度・経度・標高を空撮前に把握しておく必要がある。そのため、観測圃場の四隅に長さ20cmの塩ビパイプを打ち込んだ。この四隅のポイントを基準点と呼ぶ。

この塩ビパイプの地点である基準点の位置について、岩手大学理工学系技術部の協力で、緯度・経度・標高の測量を行った。測量は

主にGNSS測量を用いたが、一部圃場ではレベル測量も行った。

(3) 自動飛行条件

今回のモニタリング飛行ではDJI社が提供している「DJI GS Pro」アプリを使用した。飛行高度は30mもしくは50m、航路上のオーバーラップ率は80~90%、航路間のオーバーラップ率は60~80%で設定した。国土交通省が推奨する各オーバーラップ率はそれぞれ90%以上、60%以上であるが²⁾、その条件ではドローンのバッテリー容量が不足するため、上記の条件に設定した。またバッテリー容量の関係で圃場の面積に合わせて設定を変更した。つまり、面積が小さい圃場では解像度を上げるために飛行高度を低くし、オーバーラップ率を高く設定した。一方、面積の大きい圃場では飛行時間を短くするために飛行高度を高くし、オーバーラップ率を低く設定した。また、今回使用したマルチスペクトルカメラではフレアが発生する可能性が高いため、その発生範囲が極力小さくなるように、カメラ方向を「コースと垂直」、撮影モードを「等距離間隔で撮影」、コースアングルを太陽方向と垂直になるように設定した。

(4) 空撮

空撮は田植えから稲刈りまでの期間、週に1度実施した。空撮の直前に、黒と赤で色付けした目標盤を基準点に設置する。これを設置する理由は空撮画像上で基準点の目印にするためであり、色付けした理由はどのバンドの画像でも草木と判別できるようにするためである。また、調査地点の花巻市・五大堂地区の圃場を空撮する際には、いわて花巻空港が近くにあり、DJI社のコントローラではNo Fly Zoneに設定され離陸することができない。このNo Fly Zoneの解除にはDJI社が提供している「DJI GO 4」アプリを用いた。

本研究で用いる計算式は各バンドの反射率を用いる。そのため空撮時の日射量をもとに補正するためのCalibration画像が必要となる。この画像はSequoia+に付属されている標準反射板を用いて撮影した。

空撮手法について、ドローンの飛行は「DJI GS Pro」を用いた自動飛行で行い、マルチスペクトル撮影はSequoia+の等時間撮影で行った。撮影時刻は、モニタリング空撮に適している午前10時を中心とした午前9時半から11時の間に行った³⁾。また天候についても、撮影時に日射量が変わらないように快晴時または曇天時に行った。

(5) 空撮圃場

空撮は地域差や品種差を調査するため、表1の10圃場で行った。全圃場とも移植圃場である。

* 岩手大学生産技術研究センター花巻サテライト

表1 空撮圃場

圃場名	品種	管理者
五大堂A	ひとめぼれ	農家A
五大堂B	ひとめぼれ	農家B
五大堂B 2	ゆみあずさ	
湯口	ほむすめ舞	農家C
湯口2	ひとめぼれ	
湯口3	ゆみあずさ	
湯口4	ゆみあずさ	
湯口5	いわいだわら	
法船	つぶゆたか	農家D
坂杉	ひとめぼれ	農家E

(6) オルソモザイク画像の作製

オルソモザイク画像を作製するにあたって、Agisoft社のMetashapeソフトを使用した。このMetashapeソフトで、反射率キャリブレーション、写真のアラインメント(品質:中)、基準点マーカーを用いたGNSS補正、高密度クラウド構築(精度:中)、余分画像の無効化・フレア箇所のマスキング、メッシュ構築(品質:中)、オルソモザイク構築を施し、オルソモザイク画像をRed, RedEdge, NIRの3バンドで作製した。

各バンドのオルソモザイク画像のエキスポートは、GISソフトへのインポートを考慮して、岩手県における平面直角座標系であるJapan Plane Rectangular CS X(EPSC:2452)に変換して行った。

(7) メッシュマップの作製

生育分布はメッシュで見た方が農作業に反映しやすいという要望が、農家よりあったため、NDVI等の“見える化”にはメッシュ処理を行った。この処理にはQGIS(Version2.8.9)を用いた。今日ではさらにVersionの新しいQGISが提供されているが、2.10.1以降のVersionではメッシュ内の平均値を算出する「地域統計」機能がなくなってしまうため、当Versionを用いた。このソフトで各計算式を計算し、圃場内に設定したメッシュにおける平均値をもとに色付けを行い、農家に情報提供した。このメッシュは、圃場面積が広い五大堂B圃場や坂杉圃場は5m角、その他の圃場は3m角で設定した。

3. 実験結果

(1) NDVI

NDVI(Normalized Difference Vegetation Index: 正規化植生指標)は国土地理院でも採用される、植物の量や活力を示す最も一般的な指標である⁴⁾。農家に情報提供する際には、図1のように植生の良いところから悪くなるに順に、赤から青になるように色分けを行った。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

ただし、NIR:近赤外線光(790nm)の反射率、R:赤色光(660nm)の反射率

このNDVIの推移をまとめたのが図2である。凡例は主食用であるひとめぼれ、業務用米であるほむすめ舞、飼料米であるつぶゆたかである。基本的に収量が多い順に、飼料米、業務用米、主食

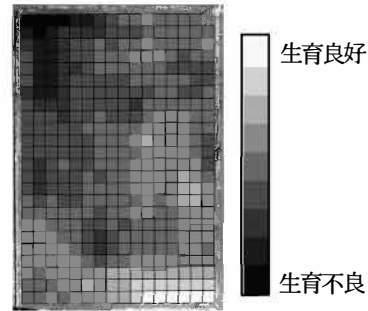


図1 NDVIマップ(五大堂B 2020.06.01)

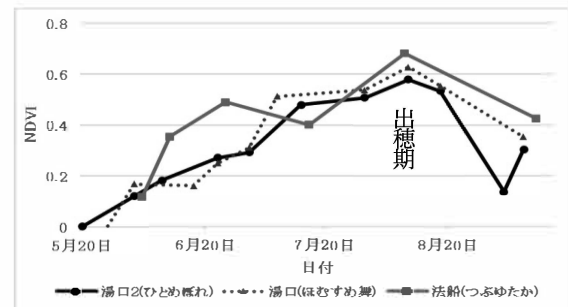


図2 品種ごとのNDVIの推移

用米となる。田中氏(2016)によると出穂期のNDVIの値が収量との相関が高いが⁴⁾、出穂期のNDVIに着目すると、飼料米、業務用米、主食用米の順となり、収量の傾向がNDVIのグラフに表れていることがわかる。

また、比較的倒伏しやすいひとめぼれを植生している湯口2圃場のNDVIマップにおいて、7月下旬より、南北に生育の悪いエリアの線aが現れるようになった(図3)。これに着目しながら収穫期を迎えたところ、圃場全体が倒伏しているのに対し、線a付近だけ倒伏していないことがわかった。この線aのエリアを調べたところ、このエリアは溝切を施した箇所であることも後にわかった。この線が、溝切を行った7月中旬以降に現れるようになったのも説明がつく。この結果をもとに今後、溝切とNDVI、倒伏、収量の関係を調査することにする。

(2) NDRE

NDRE(Normalized Difference RedEdge: 正規化レッドエッジ指数)はストレス、特に水関連のストレス診断に適した指標である⁵⁾。NDVI同様、植生段階でNDREの値も変化する(ブルースフト、レッドシフトと呼ばれる)が、圃場内の稲を全て同じ植生段階であると仮定すれば、NDREの値が低いほどストレスを抱えていると診断することができる。農家に情報提供する際には、天気予報の注意・警戒レベルの表示を参考にし、圃場におけるNDREの平均値と標準偏差を算出し、 $-\sigma \sim -2\sigma$ のメッシュを黄色、 $-2\sigma \sim -3\sigma$ のメッシュを赤色、 -3σ 以下のメッシュを濃い赤色に色分けを行った(図4)。注意を示す黄色のエリアを「様子見」、警戒を示す赤色のエリアを「要現地確認」、特別警戒を示す濃い赤色のエリアを「早急な対応が必要」と農家に提案した。

$$NDRE = (NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge)$$

ただし、NIR:近赤外線光(790nm)の反射率、RedEdge:RedEdge

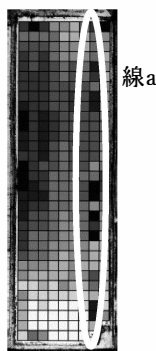


図3 2020.07.30 湯口2 NDVI マップ

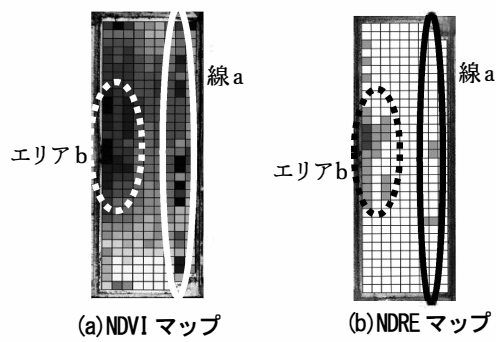
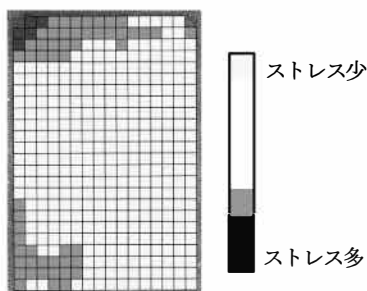
図5 NDVI マップと NDRE マップの比較
(湯口2 2020.07.30)

図4 NDRE マップ(五大堂B 2020.06.01)

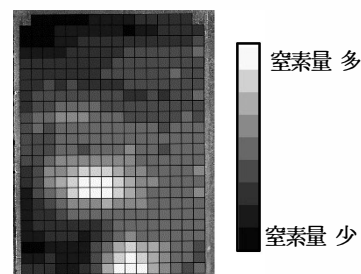


図6 CCCI マップ(五大堂B 2020.06.01)

光(735 nm)の反射率

NDVI マップと NDRE マップを比較することで判断できる項目もある。2020年7月30日の湯口2圃場に着目すると、NDVI マップ(図5a)において植生が比較的悪い箇所は線 a(実線囲い)とエリア b(点線囲い)の2箇所あることがわかる。しかし同日の NDRE マップ(図5b)に着目すると、エリア bはストレスを抱えているが、線 aはほとんど抱えていないことがわかる。つまり植生不良の原因について、エリア bはストレスによるものだが、線 aは溝切などストレス以外のものが起因していると判断できる。実際にエリア bの現地確認を行ったところ、ストレスの原因は西隣の圃場から畦畔の穴を通して流入した水によるものであると確認できた。このように NDVI マップと NDRE マップを比較することで、植生不良の原因がストレスか、それ以外に起因するものなのかを判断することができる。

(3) CCCI

CCCI(Canopy Chlorophyll Content Index)は葉に含まれるクロロフィルの量を表す指数である。日本語の論文でこの指数の記載を見つけてことができなかつたため、「葉蓋クロロフィル含有指数」と訳すこととする。また、この指数は葉中の窒素含有量を表す CNI に正の相関があるため、CCCI が高ければ相対的ではあるが葉中窒素含有量が多いと判断することができる⁹⁾。同時に、施肥量変更実験における CCCI の値を調査することで、適正施肥量や適正追肥量を推定することが可能である。なお、CCCI の計算式には相対値式と絶対値式が存在するが、CNI と相関がある Cammarano(2011)の相対値の計算式を採用した。農家に情報提供をする際には、NDVI 同様、クロロフィルや窒素量が多いところから少なくなる順に、赤から青になるように色分けを行った(図6)。つまり農家は CCCI マップの青い箇所に重点的に追肥を行えばよいと判断することができ

る。

$$CCCI = (NDRE - NDRE_{min}) / (NDRE_{max} - NDRE_{min})$$

(4) 追肥量比較実験

農家の収益最大化に最も関与する項目は、植生品種や施肥量であると考えられる。気候や土質も大きく収量に影響を与えるが、これらを容易かつ短時間で改善することは難しい。一方で、施肥量は容易に変更することが可能だが、ほとんどの農家が施肥量を毎年同じにし、品種ごとの変更も行っていない。また、その施肥量が収益最大化に適した量なのかを判断できる農家も少ない。

そこで、並んだ3筆において追肥量比較実験を行い、その収量を比較した。同時に CCCI を用いて葉中窒素含有量を調査することで、その根拠を示すことにした。

実験はほむすめ舞を植生している湯口圃場(図7a)と、ゆみあずさを植生している湯口3圃場(図7b)で行った。ほむすめ舞とゆみあずさは、ともに業務用米である。管理者も同じであり、秋肥にみりのパートナーを 100 kg/10a、基肥にタキコート を 50 kg/10a 施肥している。もともと追肥にオール 14 を 20 kg/10a 施肥していたが、当実験では、西圃場に 20 kg/10a、中圃場に 25 kg/10a、東圃場に 30 kg/10a、施肥を行った。施肥日は 7/10~13。施肥は真柴商会の協力を得て、施肥用ドローンで行った。

1) 追肥量比較実験結果(ほむすめ舞)

ほむすめ舞の NDVI の推移は図8のようになった。収量と正の相関がある出穂期の NDVI の値は、高い方から順に中圃場(25 kg/10a 施肥)、西圃場(20 kg/10a 施肥)、大きく下がって東圃場(30 kg/10a 施肥)となった。この結果から、ほむすめ舞について、30 kg/10a の追肥は過剰施肥であることが判断できる。

CCCI マップは図9のようになった。穂揃期以降は栄養である窒

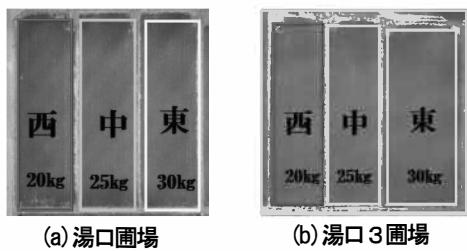


図7 追肥量比較調査調査圃場

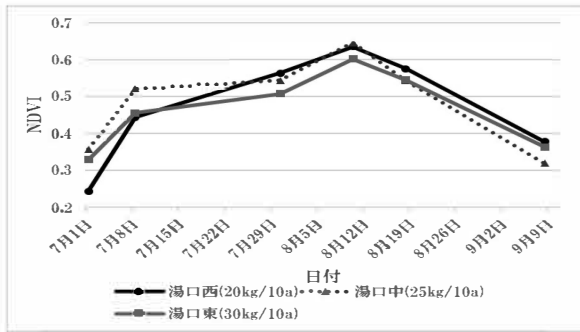


図8 ほむすめ舞における追肥量ごとのNDVIの推移

素を穂に送らなければならないが、西圃場(20 kg/10a 施肥)に比べて、東圃場(30 kg/10a 施肥)の方がCCCIは高くなっている。つまり、施肥の過剰分は葉中に余ってしまうことがうかがえる。

次に追肥量増加に伴う収益・費用・利益の変化を図10にまとめた。棒グラフは左から収益、追加費用、利益である。費用の棒グラフについて、農家がもともと20 kg/10a 施肥していたため、それに対する追加費用をグラフに示している。収量については、ほむすめ舞の収量予測式に基づいている。しかし、ほむすめ舞については、倒伏が見られ、出穂期NDVIの値が収量に与える影響は小さかった。なお収益については2020年度のほむすめ舞精玄米販売額である12,400円/俵をもとに算出した。

収益の棒グラフに着目すると、追肥量を増やしても収益が増えないことがわかった。そのため、追加の費用の分だけ利益が低下した。以上、NDVIの推移、CCCIマップ、利益棒グラフから判断すると、ほむすめ舞の適正追肥量は20 kg/10aであると推定される。

2) 追肥量比較実験結果(ゆみあずさ)

ゆみあずさのNDVIの推移は図11のようになった。出穂期のNDVIの値は、高い方から順に東圃場(30 kg/10a 施肥)、中圃場(25 kg/10a 施肥)、西圃場(20 kg/10a 施肥)となった。また、それぞれの値の差も大きく表れた。この結果から、ゆみあずさはほむすめ舞と異なり、30 kg/10aの追肥でも過剰とならないことが判断できた。

CCCIマップは図12のようになった。こちらもほむすめ舞と異なり、穂揃期以降のCCCIは西圃場から東圃場までバランスの取れた値となった。つまり、追加で施肥した肥料成分も葉中に余ることなく、穂に行き届いていることがうかがえる。

収益・費用・利益の変化は図13のようになった。収益はゆみあずさの収量予測式に基づく。ゆみあずさは倒伏が見られなかったためか、収量予測式について、田中(2016)⁴⁾のように正の相関がきちんと取れた。収益については2020年度のゆみあずさ精玄米販売額

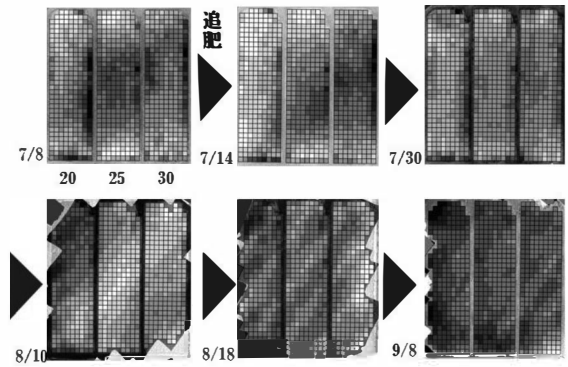


図9 ほむすめ舞における追肥量ごとのCCCIの推移

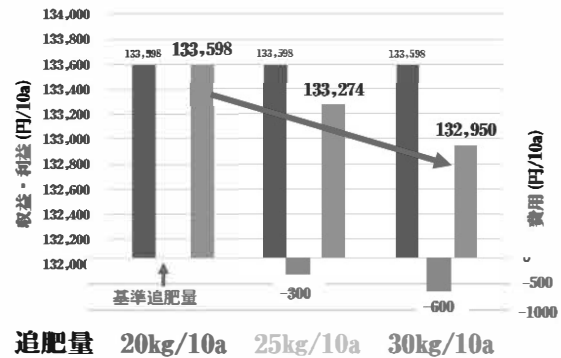


図10 ほむすめ舞における追肥量増加に伴う収益等の変化

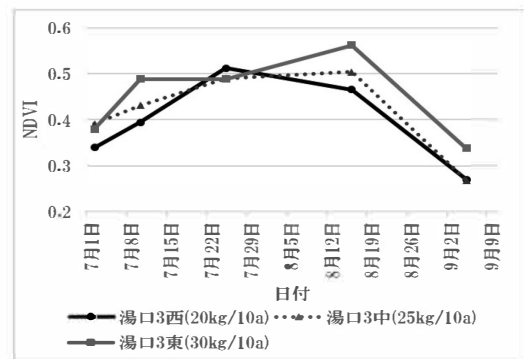


図11 ゆみあずさにおける追肥量ごとのNDVIの推移

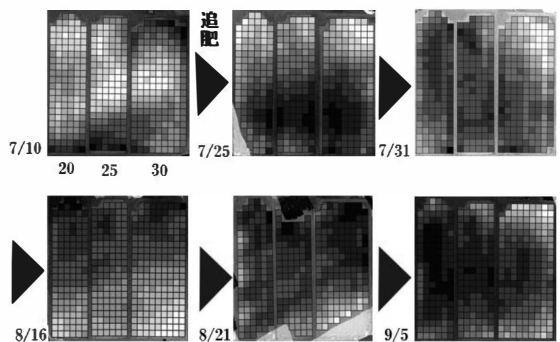


図12 ゆみあずさにおける追肥量ごとのCCCIの推移

である12,400円/俵をもとに算出した。

収益の棒グラフに着目すると、追加した肥料の窒素成分も穂に行

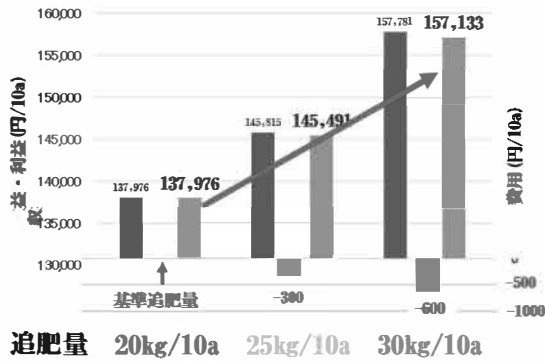


図13 ゆみあずさにおける追肥量増加に伴う収益等の変化

き届いたためか、施肥量を多くした分だけ収益が増えた。この増加した収益は、追加で発生した肥料の費用も上回ったため、20 kg/10a の追肥よりも 30 kg/10a に増やした方が利益の最大化に繋がることがわかった。以上、NDVI の推移、CCCI マップ、利益棒グラフから判断すると、ゆみあずさの適正施肥量は 30 kg/10a であると推定される。ちなみに、当結果を管理農家に報告したところ、調査翌年からゆみあずさの追肥量を 30 kg/10a に変更した。

今回の追肥量比較実験で、同じ業務用米においても適正追肥量に差があることがわかった。そのため、同じ農業法人内においても、品種ごとに適した農作業条件を設定することが利益の最大化に繋がると考えられる。そしてこの適正条件の判断に、ドローンというツールを用いながら、より寄与していきたいと考える。

(5) 収量予測式

今年の農作業の評価をするうえで一番重要なのが収量である。しかし複数の圃場から収穫した米を一括して乾燥機にかける場合が多く、1筆ごとの評価は行っていないケースが多い。しかし農業法人に話を伺うと、各筆の作業者の評価指標を決める目的で、事前にある程度の収量を知りたいという意見があった。冬の賞与の金額を収穫後の実収量をもとに決めることはできないため、収量予測式が重要になってくる。今日では多くの研究者が収量予測に関する論文を発表しており、出穂期 NDVI を用いた田中氏(2016)⁴⁾、出穂期 NDVI とその後の全天日射量を用いた濱氏(2018)⁷⁾、幼穂形成期 NDVI を用いた原科氏(2019)⁹⁾などがある。しかし濱氏(2018)について、全天日射量の計測器は費用が膨大にかかるため、実用性が低く普及可能性が低いと考えられる。幼穂形成期 NDVI を用いた原科氏(2019)も複数品種を単一式に落とし込んでいるため、熟考が必要となる。そのため、田中氏(2016)を参考にして、花巻市における各品種の収量予測式を立式することとした。

1) 実験手順

出穂期における NDVI マップをもとに、畦畔から 3m 以上離れているメッシュにおいて、NDVI の値が異なる 5つのメッシュを選定した。そして、選定メッシュの中心エリアで収穫直前に各メッシュ 5株を坪刈りした。室内乾燥(晴天時は室外)を 2週間以上行った後に、脱穀、籾摺り、1.9 mm選別を岩手大学滝沢農場で行った。少量を選別できる色彩選別機はなかったため、色彩選別は行っていない。坪刈りを行った圃場は表 2 の通りである。

2) 実験結果

表 2 坪刈り実施圃場一覧

品種		圃場名	坪刈り箇所
主食用米	ひとめぼれ	湯口2	5箇所
		坂杉	5箇所
業務用米	ほむすめ舞	湯口東	5箇所
		湯口中	5箇所
		湯口西	5箇所
	ゆみあずさ	湯口3東	5箇所
		湯口3中	5箇所
		湯口3西	5箇所
		五大堂B2	5箇所
飼料米	いわいだわら	湯口5中	5箇所
	つぶゆたか	法船中	5箇所

出穂期 NDVI を x 軸に取り、坪あたりの精玄米量を y 軸に取ったところ、以下の結果となった。

主食用米

ひとめぼれ $y=2654.2x+575.5$ ($R^2=0.1987$)

業務用米

ほむすめ舞 $y=-341.56x+2332.1$ ($R^2=0.0148$)

ゆみあずさ $y=3300x+669.22$ ($R^2=0.7526$)

飼料米

いわいだわら $y=-3965.1x+5109.1$ ($R^2=0.2917$)

つぶゆたか $y=3615x-744.49$ ($R^2=0.9691$)

主食用米・業務用米において、倒伏が見られなかったゆみあずさは相関が高かったが、倒伏が見られたひとめぼれやほむすめ舞は相関が低くなり、ほむすめ舞については、出穂期 NDVI の値が収量に与える影響が小さかった。そのため、倒伏が見られた場合には田中氏(2016)モデルでの収量予測は難しいと考えられる。

飼料米において、飼料米は通常、選別を行わず、くず米は存在しない。そのため、粒が大きいつぶゆたかは相関が高く、粒が小さくくず米になる量が多かったいわいだわらは相関が低くなったのではないかと考えられる。このように業務用米においては、一部の品種は田中氏(2016)モデルでの収量予測が難しい可能性も踏まえながら継続的な研究が必要である。

また、すべての品種において継続的な研究が必要であり、一部の品種においてはよりプロット数を増やさなければならないなどの課題が生じた。

4. まとめ

今回は利益の最大化を目的に、ドローンというツールを用いて調査を行った。ドローンによるマルチスペクトル解析で NDVI、NDRE、CCCI の 3つの指数を算出することができた。さらにそれらの指数を活用することで、生育マップ、ストレスマップ、葉中窒素含有量マップ、生育不良の原因判断、適正施肥量、収量予測を得ることができた。しかし農業分野はいまだに調査途上であり、今回の調査も継続的な調査や改善が必要であることが見受けられた。また、追加の調査として、直播圃場の調査、溝切と収量等の関係調査、

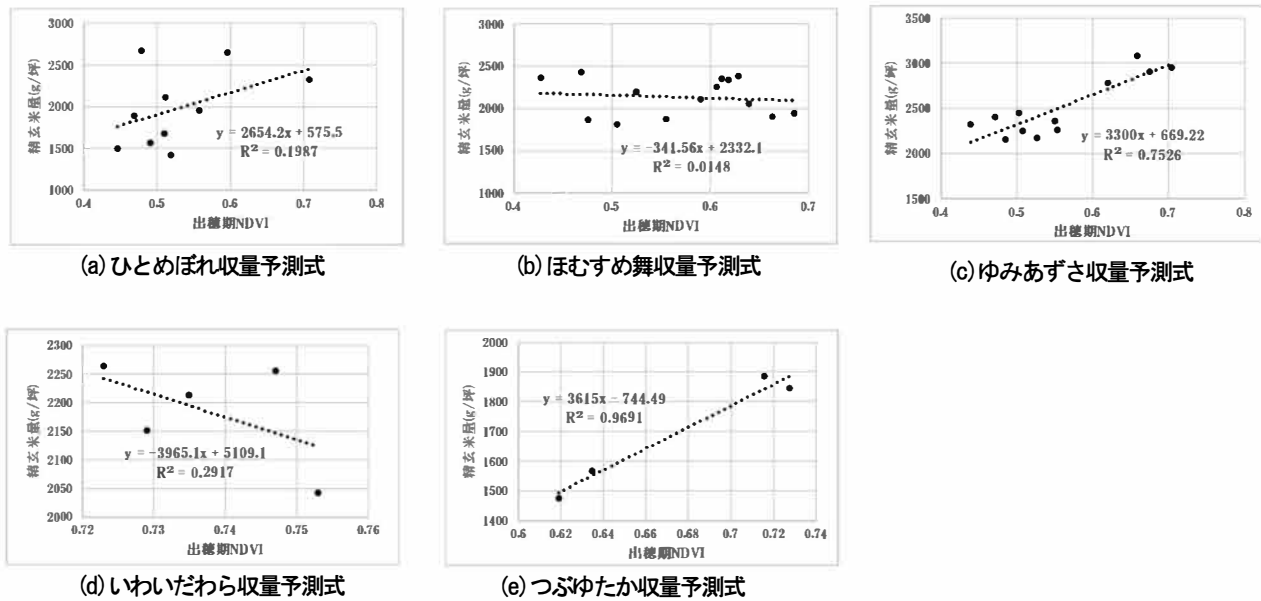


図 14 各品種における収量予測式

土壌水分量調査, 総肥料量調査, 追肥種比較調査などを行いたいと考えている。

謝辞

モデル作製を教えていただいた田中圭氏(日本大学), ドローン施肥をしていただいた真柴商会株式会社, 各種器具を製作いただいた株式会社アオバサイエンス, 測量をしていただいた岩手大学理工学系技術部, 脱穀・粃摺り・選別の機械をお貸しいただいた西政佳氏(岩手大学滝沢農場), そして圃場の調査許可をいただいた各農家様には多大なるご協力をいただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 農林水産省大臣官房政策課食料安全保障室, 2019. 2050年における世界の食料需給見通し 世界の超長期食料需給予測システムによる予測結果
- 2) 宮地邦英, 2016. 測量への無人航空機(UAV)の導入に向けた検討状況について.
- 3) 濱侃, 田中圭, 陳斌, 近藤昭彦, 2021. ドローンをを用いた作物モニタリングにおける日射条件の影響の軽減, 第2回スマート農業のためのリモートセンシング研究会.
- 4) 田中圭, 近藤昭彦, 2016. 小型マルチコプターを用いた近接リモートセンシングによる水稻生育マップの作成, 日本リモートセンシング学会誌 **36**(4), 373-387.
- 5) 原科幸爾, 山本清仁, 牧雅康, 武藤由子, 倉島栄一, 2019. ドローン搭載のマルチスペクトルセンサを用いた津波災害水田の直播栽培におけるイネの生育モニタリング, 農業農村工学会誌 **87**(2), 121-126.
- 6) Davide Cammarano, Glenn James Fitzgerald, Bruno Basso, Garry J O'Leary, Deli Chen, Peter Grace and Fiorentino Costanza, 2011. Use of the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) for Remote Estimation of Wheat Nitrogen Content in Rainfed Environments,

Agronomy Journal, **103**(6), 1597-1603

7) 濱侃, 田中圭, 望月篤, 新井弘幸, 平田俊之, 八幡竜也, 鶴岡康夫, 近藤昭彦, 2018. UAV リモートセンシングおよび日射量を用いた水稻の草丈と収量の推定, *水文・水資源学会誌* **31**(2), 68-82

減圧マイクロ波によるトマトピューレの濃縮

- 前加熱処理が食味と成分に与える影響 -

佐々木琴瑞*・折笠貴寛**・加藤一幾***・松嶋卯月**・小出章二**

Vacuum-microwave concentration for tomato puree

— Effect of preheating treatment on components and taste of tomato puree —

Kotomi SASAKI*・Takahiro ORIKASA**・Kazuhisa KATO***

Uzuki MATSUSHIMA**・Shoji KOIDE**

Abstract

Vacuum microwave (VMW) treatment can maintain some nutrition ingredients in tomato puree due to its low temperature and oxygen condition. The process has disadvantage that taste of puree have immaturity and bitter taste, and is not good. To solve the problem, we tried to apply preheating treatment to VMW concentration of tomato puree, and investigated the effect of the preheating treatment on nutrient components and taste of VMW tomato puree. Lycopene tended to be decreased with preheating time increasing due to isomerization from *trans*-isomers to *cis*-isomers. The taste was improved by preheating because glutamic acid and aspartic acid increased by denaturation and partial hydrolysis of protein.

[Keywords] preheating treatment, vacuum microwave, tomato puree, components evaluation, sensory evaluation

1. 緒言

加工用品種の赤系トマトであるクッキングトマトは、イタリア料理の普及に伴い、日本においてもその需要量が増加している。クッキングトマトは抗酸化能を有するリコペンが生食用トマトと比べて豊富に含まれているだけではなく、加熱後の赤みが鮮やかで水気が出にくく、煮崩れしにくいという特徴から、加工適性の高いトマトとして注目されている²⁾。また、生食用トマトの栽培には支柱が必要となるが、クッキングトマトにおいては支柱を必要とせず、地這い栽培などの粗放的栽培が可能である³⁾。加えて、ジョイントレス形質と呼ばれる特徴により、収穫時にヘタを切り取る必要がないため、省力的かつ低コストでの栽培が可能である³⁾。しかし、クッキングトマトは露地での収穫期間が8月から9月にかけての約一か月程度と極めて短く、生果での周年供給は困難である。さらに、クッキングトマトの流通を生果のみに限定してしまうと、販路が限定される問題を生じる。そのため、クッキングトマトの周年供給を可能とするための取組が必要である。その取組の一つとして、クッキングトマトの加工処理技術に関する研究が行われている⁴⁾。

代表的なトマト加工品として、トマトピューレが挙げられる。トマトピューレは、平成28年度における輸入量が11万tにも達し⁶⁾、わが国において需要の大きいトマト加工品の一つである。トマトピューレの製造工程の一つである濃縮工程において、一般的に用いられている濃縮法は常圧解放濃縮法(以下、通常濃縮法)である⁷⁾が、マイクロ波をトマトピューレの濃縮工程に適用した例もみられる⁸⁾。マイクロ波による加熱は内部加熱方式に分類され、試料に

マイクロ波を照射すると、試料内部に存在する水分子の電気双極子が電子分極を起こし、双極子がマイクロ波電界により激しい振動回転を行う。これに伴い分子摩擦が起こることで熱が発生する⁹⁾。この方法の特徴として、外部加熱方式である通常濃縮法に比べ素早く内部から加熱することができ、また被加熱体のみを選択的に加熱するため熱効率が低い¹⁰⁾。しかし、マイクロ波加熱は加熱中に試料内部温度が100°C近くまで達し、過熱による試料の褐変や熱耐性の低い栄養成分の損失などが問題となっている¹¹⁾。この問題を解決するために、減圧環境下でマイクロ波を照射する減圧マイクロ波(以下、VMW)の適用を試みた。試料を減圧環境下に置くことにより、試料中の水分の沸点を下げることができ、通常より低い温度で濃縮処理が可能となる。VMWによる濃縮により、試料の内部温度は60°C付近で留まり、リコペンおよびL-アスコルビン酸(以下、L-AsA)残存率が高い高品質なトマトピューレの製造が可能となったという報告もある⁸⁾。近年、高品質な食品に対する消費者のニーズは高まってきている¹²⁾ため、VMWをトマトピューレの濃縮に適用することは品質向上の観点から効果的であると考えられる。一方で、青臭さおよび苦みが強く、食味が良好とは言えないことが報告されている⁸⁾。これを解決する手段として濃縮前に加熱処理を施すことが考えられる。堀江¹³⁾によると、トマトを加熱することにより、グルタミン酸が増加し、グルタミン酸との相乗効果が起き、うま味が増加する。また、折笠⁸⁾は、加熱処理によりトマトピューレの食味が改善する可能性について言及している。このような加熱処理により、VMWを用いて製造したトマトピューレの食味の改善が期待され

* : 岩手大学大学院総合科学研究科

** : 岩手大学農学部

*** : 東北大学大学院農学研究科

一方で、熱による成分損失が危惧される。しかし加熱処理がVMWにより製造されたトマトピューレの食味・成分に与える影響について検討した例はほとんど見当たらない。そこで本研究では、濃縮工程前の加熱処理がVMWにより製造したトマトピューレの食味および成分に与える影響について検討した。

2. 材料および実験方法

(1) 供試材料

岩手県大槌町、岩手大学滝沢農場および東北大学圃場で生産されたクッキングトマト（品種名：すずこま）（初期含水率：13.58±0.24 d.b.decimal）を供試材料として用いた。なお、収穫後は、目視によりトマトの表面全体が赤く色づいたことを確認できた状態を追熟完了とし、追熟後-40℃の冷凍庫（MDF-235, 三洋電機（株））で冷凍保存した。トマトピューレ製造の際は、産地による偏りが無いよう、全ての産地のトマトをほぼ同じ割合になるよう混ぜて使用した。

(2) トマトピューレの製造

1) 濃縮前加熱処理

冷凍トマトを冷蔵庫（平均1.5℃）（SJ-55W, シャープ（株））に約12時間静置し、解凍した。解凍したトマトの皮をむき、裏ごし器（N3004BG, LaBonne Grain）で裏ごしした試料をジッパー付きの袋に200gずつ入れ、約5Lの沸騰水中に投入した。投入から取り出すまでの時間を加熱処理時間とし、加熱処理時間は30minおよび60minとした。加熱後は、氷水に10min浸し、粗熱を取り除いた。なお、未加熱試料は、裏ごししたものをそのまま濃縮処理に用いた。また、加熱中の試料温度測定のためジッパー付きの袋に、データロガ（GL220, グラフテック（株））に接続したT型熱電対を通し、1min間隔で温度を記録した。

2) VMW濃縮

VMW濃縮装置概略図を図1に示す。装置はデシケータ、マイクロ波加熱装置（μReactor, (株) 四国計測工業）、圧力調整ユニット（NVC-2100, 東京理化工業（株））および真空ポンプ（TSW-100, 佐藤真空（株））から構成した。マイクロ波装置内に設置したガラス製のデシケータ内に裏ごしした試料を約100g静置し、突沸による飛散を防ぐためケーキ型（シリコン製、直径115mm）の底にランダムに2.5cm間隔に穴を開けたものを被せ、マイクロ波出力1000W（63.7W/g-DW）で4min照射した。デシケータ内圧力は真空ポンプを用いて3kPaとなるよう制御した。なお、試料温度測定および記録のため光ファイバー温度計（FL-2000, 足立計器（株））およびノートパソコン（Compaq 6730b, (株) 日本HP）を設置した。光ファイバー温度センサおよび光ファイバー温度計で測定されたデータは、FL-2000専用のデータ収集ソフト（AMS-5002, 安立計器（株））がインストールされたノートパソコンに1s間隔で記録される。トマトピューレは農林水産省のトマト加工品の日本農林規格¹⁹⁾により、濃縮トマトのうち、無塩可溶性固形分が24%未満ものと定義されており、Brix糖度を無塩可溶性固形分とみなしてよいとされている。柴崎ら¹⁹⁾はこの基準に基づき、Brix糖度12%を目標としてトマトピューレを製造している。本研究においてもこの報告に従い、Brix糖度12%以上（平均15.0±2.0%）となる時間を予備実験

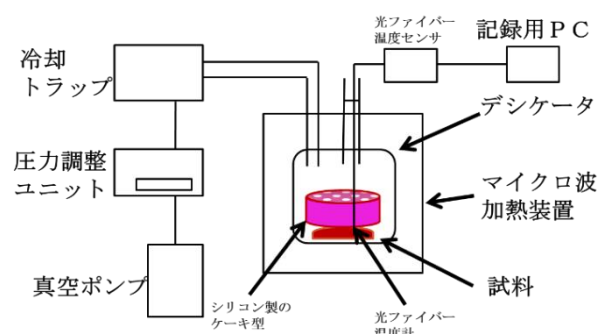


図1 減圧マイクロ波濃縮装置概略図

より求め、4minを濃縮処理時間とした。なお、濃縮時間が品質に与える影響を同一であると見なすため、濃縮時間は加熱処理の有無に関わらず、一定にした。

(3) 食味評価

1) 官能評価

官能評価は、2点比較法¹⁶⁾を用いて行った。事前に行った味覚感度試験により選抜された4名のパネリスト（男：女=1：3）（平均年齢22.8歳）に、未加熱試料と加熱試料（30minまたは60min）をスプーン1杯分（5.18±0.35g）（n=10）ずつ食してもらい、うま味、甘味、酸味、苦味、青臭さ、および美味しさを示す総合の6つの項目に対して、加熱試料が未加熱試料よりも強く感じたら1点、同じくらいだと感じたら0点、弱いと感じたら-1点を付けて評価させた。なお、それぞれのトマトピューレを食す際は、一度蒸留水で口を漱いだ。官能評価は、研究倫理審査委員会番号第201916号を得て実施した。

2) アミノ酸含有量

グルタミン酸とアスパラギン酸は、トマトの味に影響を及ぼすとされている¹⁷⁾¹⁸⁾ことから、グルタミン酸とアスパラギン酸を分析、定量した。グルタミン酸とアスパラギン酸の分析は、古館ら¹⁹⁾の方法に基づき行った。すなわちトマトピューレ3gに蒸留水100mlを加え、ホモジナイザ（CM-100, アズワン（株））を用いて5000rpmで10min、均一になるまで摩砕した後、遠心分離機（KUBOTA3700, 久保田商事（株））を用いて12000rpmで15min遠心分離させ、その上澄をろ過した。固形物を取り除いた試料溶液にn-ヘキサンを加え、脂溶性成分の分離を行った。この溶液にクエン酸リチウム緩衝液（pH2.2）を加え、希釈し、アミノ酸自動分析装置（JLC-500/V2, 日本電子（株））によりアミノ酸分析を行った。測定された値（nmol/ml）は乾物試料1gあたりの値（mg/g-FW）に換算して表した。

3) 糖酸比

糖酸比はトマト加工品の美味しさと正の相関がある¹⁹⁾ことから、糖および酸もまたトマト加工品の食味に関わる重要な指標のひとつである²⁰⁾。そのため糖度および酸度を測定し、得られた値から糖酸比を算出した。Brix糖度は、ポケット糖度計（PAL-J, (株) アタゴ）を用いて、酸度はポケット酸度計（PAL-AC1, (株) アタゴ）を用いてそれぞれ測定をした。糖度の値を酸度の値で除すことにより糖酸比¹⁹⁾を算出した。

4) グアニル酸

堀江らの報告を一部改変して、VMWトマトピューレに含まれるグアニル酸を高速液体クロマトグラフィー（HPLC）により分析した。

すなわち装置は、送液ユニット (LC-20AD, (株) 島津製作所), UV-VIS 検出器 (SPD-20A, (株) 島津製作所), カラムオープン (CTO-10A, (株) 島津製作所) よりなり、データの記録には C-R8A ((株) 島津製作所) を用いた。カラムは C30 を固定相とする Develosil RPAQUEOUS (粒子径 5 μm, 内径 4.6 mm×250 mm, 野村化学 (株)) にガードカラム (Mightysil RP-18, 5-4.6, 関東化学 (株)) を接続して使用した。移動相は 50 mM リン酸緩衝液 (pH2.8) を A 液とし、アセトニトリルと超純水を 9 : 1 (V : V) で混合した液を B 液とした。流速 1 ml/min とし、グラジエント条件は 0 min では B 液 0% とし、20 min に 5% になるようにした。なお、注入量は 10 μl とし、注入後 17 min 後のピーク面積を標品と比較して定量した。測定された値は、乾物試料 1 g あたりの値 (mg/g-DW) に換算して表した。

(4) 成分評価

1) リコペン含有量

リコペンはトマトの代表的な成分であり、抗酸化能を有している。近年、生活習慣病予防が期待されており²¹⁾、トマト加工品の機能性を判断するうえで重要となるため、測定項目とした。リコペン含有量の測定は、永田らの方法²²⁾を一部改変して行った。試料 2 g に対して、抽出溶媒としてアセトン-ヘキサン (4:6) を 100 ml 加え、ホモジナイザ (CM-100, アズワン (株)) で均一になるまで摩砕した。なお、ホモジナイザの回転数は 5000 rpm に設定し、作動時間は 10 min とした。その後、試料をろ過し、得られた溶液を試料溶液とした。

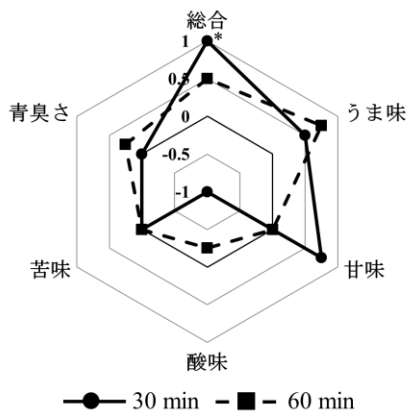


図2 食味試験の結果

各項目の0の値を未加熱試料の食味とした。それぞれの食味の項目について未加熱試料より強く感じたらプラス、弱く感じたらマイナスの値を示す。
 *は対照に対して Dunnett 法による有意差あり (P<0.01)

分光光度計 (V-630, 日本分光 (株)) を用いて、試料溶液の波長 750, 663, 645, 505 および 453 nm における吸光度を測定し、以下の式 (1) よりリコペン濃度を算出した。

$$CLYC = -0.0458A_{663} + 0.204A_{645} + 0.372A_{505} - 0.0806A_{453} \quad (1)$$

ここで、CLYC は試料溶液中のリコペン濃度 (mg/100 ml), A_{663} , A_{645} , A_{505} および A_{453} は波長 663, 645, 505 および 453 nm における吸光度から波長 750 nm における吸光度を引いた値をそれぞれ表す。算出された試料溶液 100 ml あたりのリコペン濃度を用い、乾物試料 1 g あたりに含まれるリコペン含有量 (μg/g-DW) に換算した。なお、リコペンは濃縮処理後、直ちに測定した。

2) DPPH ラジカル消去活性

DPPH ラジカル消去活性は、水溶性の抗酸化物質の抗酸化能を測定する。抗酸化物質はリコペンと同様に生活習慣病予防に効果があると期待されており²³⁾、食品の機能性を判断するうえで重要であるため、測定項目とした。DPPH ラジカル消去活性は、沖の方法²³⁾を一部改変して測定した。なお、本測定では、-40℃のフリーザーで冷凍保存してあった試料を冷蔵庫 (平均 2℃) (MR-C37W-P, 三菱電機 (株)) で 10 h 解凍し、測定試料とした。試料 2 g に 80% エタノールを加えてろ過を行った。ホモジナイザの回転数は 5000 rpm に設定し、作動時間は 10 min とした。ろ過で得られた残渣に 80% エタノールを加え、再度 5000 rpm で 10 min ホモジナイズし、その後ろ過を行った。これらホモジナイズとろ過の工程を 3 回繰り返す。全工程で得られたろ液に 80% エタノールを加え、100 ml に定容し、これを測定溶液とした。測定は 100 μM Trolox と測定溶液を用いた。それぞれの溶液に 50% エタノール, 200 mM MES および 400 μM DPPH を加え、20 min 経過後分光光度計を用いて、520 nm における吸光度を測定した。測定溶液の添加量を変化させて得られた吸光度の値から作製した回帰直線の傾きを、ラジカル消去物質として知られる Trolox の添加量を変化させて得られたそれと除し、原液 1 L あたりの DPPH ラジカル消去活性を求めた (μmol-Trolox 相当量/L)。ここで得られた値を乾物試料 1 g あたりの DPPH ラジカル消去活性 (μmol-Trolox 相当量/g-DW) に換算して表した。なお本測定では、-40℃のフリーザーで冷凍保存してあった試料を冷蔵庫で 10 h 解凍し、測定試料とした。

3) L-AsA 含有量

今回の供試材料であるトマトにおいて、L-AsA の DPPH ラジカ

表 1 各加熱処理時間における糖度、酸度、糖酸比、グルタミン酸、アスパラギン酸およびグアニル酸

	糖度 (%)	酸度 (%)	糖酸比	グルタミン酸 (mg/100g-FW)	アスパラギン酸 (mg/100g-FW)	グアニル酸 (mg/100g-FW)
0min	15.4±0.81a	1.5±0.13a	10.4±1.27a	508.9±126.4a	113.6±28.1a	4.32±1.09a
30min	15.8±1.70a	1.46±0.17a	10.9±1.44a	522.4±120.6a	118.9±23.3a	5.75±0.07a
60min	16.4±1.21a	1.64±2.7a	10.1±1.02a	586.6±63.3a	135.5±10.8a	4.88±1.28a

値は平均値±標準偏差 (n=3)。異なる英小文字間で Bonferroni 法による有意差あり (P<0.05)。

ル消去活性に対する寄与率は48%という報告がある²⁴⁾。またL-AsAは、食品の品質評価の指標としてよく用いられている²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾ため、本研究においてもL-AsA含有量を測定した。試料3gに5%(w/w)メタリン酸水溶液を加え、5倍希釈し、ホモジナイザ(CM-100, アズワン(株))にて試料を摩砕した。なお、ホモジナイザの回転数は5000rpm、作動時間は10minとした。その後、試料をろ過し、得られた溶液を試料溶液とした。得られた試料溶液のL-AsA含有量(mg/1000ml)を反射式光度計(RQ-flex Plus, メルク(株))を用いて測定した。得られた値に希釈倍率を乗じて乾物試料1gあたりのL-AsA含有量(mg/g-DW)に換算した。これを折笠ら⁸⁾のデータをもとに、生鮮試料に含まれるL-AsAを100としたときの残存率に換算した。なお、L-AsAは濃縮処理後、直ちに測定した。

3. 結果と考察

(1) 食味試験

官能評価の結果を図3に示す。0のラインは基準となる未加熱試料の食味を示している。図より、美味しさを示す総合において、30min加熱試料は未加熱試料と比べて有意に大きい値を示した。また有意差は見られなかったものの、60min加熱試料においても総合において大きい傾向が見られた。その他の項目については未加熱試料と比べて、有意差は見られなかった。

これらの結果の理由について考察するため、糖度、酸度、アミノ酸およびグアニル酸を測定し、糖酸比を求めた。これらの結果を表1に示す。糖度、酸度および糖酸比のいずれにおいても加熱による明確な差は認められなかった。佐藤ら¹⁾はトマト加工品の美味しさは糖酸比と正の相関があると報告している。しかし、加熱処理の有無による糖酸比の大小関係にほとんど差が出なかったため、加熱処理の有無が糖酸比による美味しさの違いに与える影響はほとんどなかったと考えられる。

一方、グルタミン酸およびアスパラギン酸は、加熱時間とともにその値は増加する傾向となった。Miladi et al.²⁸⁾は、トマトジュースを105℃で20min加熱した際、タンパク質の変性および加水分解によりグルタミン酸およびアスパラギン酸が増加したと報告して

いる。今回の実験では試料温度は加熱開始後20min後に100℃近くに達している(図4)ため、同様にタンパク質変性や加水分解が起こり、グルタミン酸およびアスパラギン酸が増加した可能性が考えられる。一方、加熱処理時間の違いによるグアニル酸含有量の値に明確な差は認められなかった。グルタミン酸は、トマトに含まれるグアニル酸との相乗効果によりうま味が増すとされる²⁹⁾。本研究では、30minおよび60minの加熱処理において、グアニル酸を含む状態でグルタミン酸が増加したことにより、グルタミン酸とグアニル酸の相乗効果が起こり、うま味が強く感じられる結果となった。その結果として、官能評価における総合の評価が良好となったと考えられる。以上より、濃縮前の加熱処理により、これまで課題であったVMW トマトピューレの食味を改善することが可能であると考えられた。

(2) 成分評価

1) リコペン含有量

各加熱処理時間におけるリコペン含有量を図4に示す。リコペン含有量は、加熱処理時間が長くなるほど有意に減少した。Shi et al.³⁰⁾は、加熱によりリコペンは異性化と酸化反応が起こるが、90℃から110℃で加熱すると、加熱開始から120min以内ではリコペンのトランス型からシス型への異性化の割合が大きく起こると報告している。また同時に、リコペンの酸化反応は100℃以上で2h以上の加熱が行われたときにはその割合が大きくなるとも報告している³⁰⁾。今回の実験における加熱処理中の試料の温度変化を図5に示す。加熱により試料の温度は20min付近で100℃近くに達し、60minまで約100℃で加熱されている。したがって、Shi et al.³⁰⁾が報告しているリコペンの異性化が起こりやすい条件下にあると言える。一方で、近ら²⁸⁾は、リコペンなどのカロテノイドは異性化により吸収スペクトルが変化することを報告している。そのため今回のリコペン含有量の測定方法では、シス型リコペンの含有量の測定が困難であった可能性がある。以上の理由から、今回の実験では100℃以下で60min以下の加熱によりリコペンのトランス型から

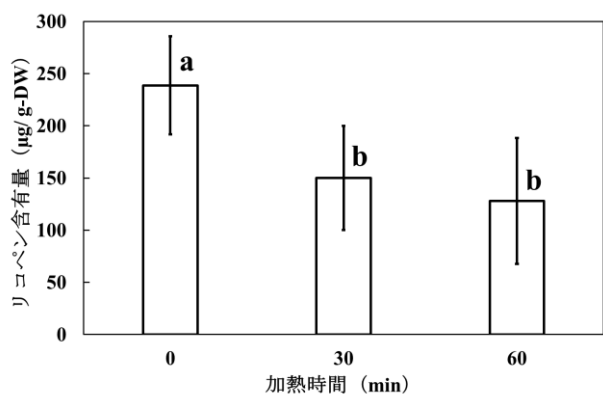


図3 各加熱処理時間におけるリコペン含有量

図中のバーは標準偏差を表す。

異なる英小文字間で Bonferroni 法による有意差あり (P<0.05)。

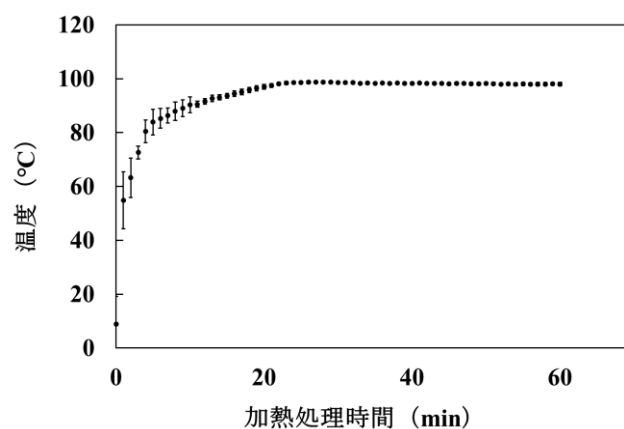


図4 加熱処理中の試料の温度変化。

図中のバーは標準偏差を表す (n=5)。

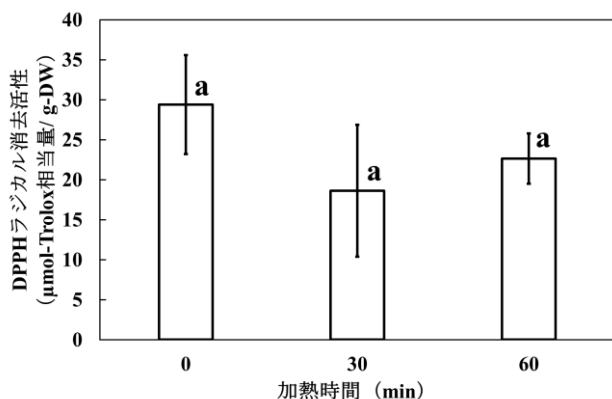


図5 各加熱処理時間における DPPH ラジカル消去活性

図中のバーは標準偏差を表す。

異なる英小文字間で Bonferroni 法による有意差あり (P<0.05)。

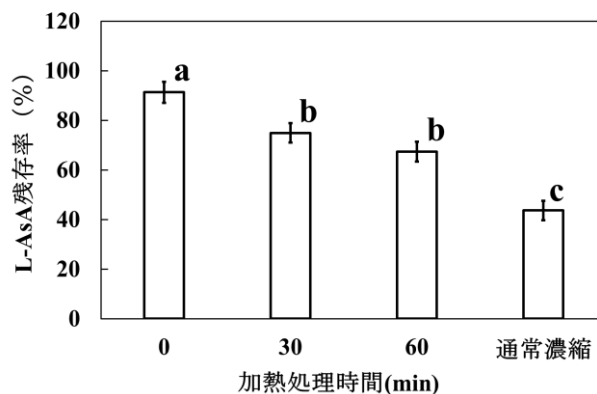


図6 各加熱処理時間における L-AsA 残存率

図中のバーは標準偏差を表す。

異なる英小文字間で Bonferroni 法による有意差あり (P<0.01)。

シス型への異性化が起こり、その結果として加熱処理試料のリコペン含有量が減少した可能性が考えられる。

また, Unln et al.²⁸⁾は、シス型リコペン 45%のトマトソースはシス型リコペン 5%のトマトソースよりも体内への吸収率が 1.55 倍向上したと述べており、リコペンの体内への吸収率はトランス型よりもシス型の方が高いことを報告している。以上より、加熱処理によりリコペンの異性化が進めば、体内への吸収率が良好なリコペンが増加するため、抗酸化能の高いトマトピューレの製造法の確立が期待できる。今後は Shi et al.³⁰⁾の報告に従い、シス型およびトランス型のリコペンの定量を行い、シス型リコペンを最大化する処理条件を検討する必要がある。

2) DPPH ラジカル消去活性と L-AsA 含有量

各加熱処理時間における DPPH ラジカル消去活性の結果を図 6 に示す。加熱処理の有無による DPPH ラジカル消去活性の値に有意な差は認められなかった。DPPH ラジカル消去活性の値の大小に関与する抗酸化物質は、主にポリフェノール類である³³⁾。ポリフェノールは熱に安定であり、100℃で 8 h 加熱してもその抗酸化能は 80%以上保持されたと報告がある²⁴⁾。一方、トマトにおいて、L-AsA は DPPH ラジカル消去活性に対する寄与率が 48%という報告²³⁾がある。図 7 は、折笠ら⁸⁾の結果をもとに作成した生鮮試料の L-AsA 含有量を 100 としたときの各加熱処理条件における L-AsA 残存率である。30 min および 60 min 加熱試料は加熱により、L-AsA 残存率は未加熱試料と比べ減少している。熱湯で 30 min, 60 min の加熱処理を行うと、L-AsA は熱や光により容易に酸化する²⁴⁾ため、加熱処理の条件下では、熱に対してポリフェノール自体は安定であるが、L-AsA が酸化し、生鮮試料と比較して抗酸化能が低下した可能性が考えられる。また、山口²⁴⁾は、抗酸化物質に影響を与える酵素、ポリフェノールオキシダーゼ (以下、PPO) およびアスコルビン酸オキシダーゼ (以下、AAO) が抗酸化物質に与える影響についても報告している。すなわち、これら 2 つの酵素は、ポリフェノールおよび L-AsA を酸化させ、その抗酸化能を低下させる。また、加熱によりこれらの酵素を抑制でき、抗酸化能の低下を抑制できたことも同時に報告している²⁴⁾。未加熱試料では、PPO および AAO

が抑制されておらず、PPO および AAO の働きによりポリフェノールおよび L-AsA が酸化することにより、生鮮試料と比較して、抗酸化能が低下した可能性が考えられる。したがって、加熱処理の有無に関わらず、抗酸化能の低下が見られたため、DPPH ラジカル消去活性の値に有意差は認められなかったと考えられる。

3) 加熱処理が L-AsA 残存率に及ぼす影響

折笠ら⁸⁾は、VMW を用いた濃縮法により製造されたトマトピューレは、通常濃縮法によるそれと比べて、酸素および熱による酸化反応が小さくなると報告している。図 7 より、本研究においては、VMW 濃縮の前に加熱処理を適用しても VMW により製造したトマトピューレの L-AsA 残存率は、通常濃縮法により製造したトマトピューレのそれよりも大きい値となった。濃縮前の加熱処理により、VMW の L-AsA 残存率の減少が危惧されたが、本研究の結果は、高い L-AsA 残存率を有する VMW の特徴を打ち消すことなく、かつ通常濃縮法と比べても L-AsA を十分保持することを示した。以上より、前加熱処理と VMW を組み合わせて製造したトマトピューレは、L-AsA の値が若干減少するものの、通常濃縮法により製造したトマトピューレよりも L-AsA を保持できると考えられる。

4. 摘要

本研究では、減圧マイクロ波を用いたトマトピューレの製造工程において、濃縮処理前に加熱処理を適用し、その成分および食味に与える影響について検討した。その結果、以下の知見を得た。

(1) 食味試験の結果から、加熱によりうま味や甘味が強く感じられるようになり、美味くなる傾向が見られた。これはグルタミン酸とアスパラギン酸が増加したことによるものと考えられる。特にグルタミン酸は、トマトに含まれるグアニル酸との相乗効果によりうま味を強く感じさせたと考えられる。

(2) リコペン含有量は、加熱により減少する傾向が確認されたが、トランス型からシス型へ異性化した可能性が考えられる。シス型リコペンの増加により、体内へのリコペンの吸収率が大きくなること

(3) L-AsA は、加熱により酸化反応が進み減少するが、その減少量は通常濃縮法と比べ小さい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP17K08015 (基礎研究 C) および旗影会研究助成により実施した。岩手大学農学部長澤孝志教授には、アミノ酸分析法について貴重なアドバイスをいただいた。岩手大学農学部寒冷フィールドサイエンス教育研究センター由比進教授には、実験試料を提供していただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 佐藤百合香, 小沢 聖, 石井孝典, 由比 進, 2004. 「クッキングトマト」としての利用に向けた加工用トマト品種の加熱調理適性の評価, 園芸学研究, 3(3), 307-312.
- 2) 佐藤百合香, 2010. 調理行動に着目した新タイプの野菜のニーズ創出における課題—加熱調理用トマトを事例として—, フードシステム研究, 16(4), 14-24.
- 3) 小沢 聖, 佐藤百合香, 2000. クッキングトマトの栽培と利用. 農山漁村文化協会, 東京, 20-64.
- 4) 中村俊輝, 田川彰男, 折笠貴寛, 飯本光雄, 2005. 調理用トマトの真空乾燥, 農業機械学会誌, 67(6), 105-112.
- 5) Orikasa, T., Koide, S., Sugawara, H., Yoshida, M., Kato, K., Matsushima, U., Okada, M., Watanabe, T., Ando, Y., Shiina, T., Tagawa, A., 2018. Applicability of vacuum-microwave drying for tomato fruit based on evaluations of energy cost, color functional components, and sensory qualities, Journal of Food Processing and Preservation, 42, e13625, doi:10.1111/jfpp.13625.
- 6) 農林水産省, 2017. 平成 28 年度食品産業動態調査. http://www.maff.go.jp/j/zyukyuu/jki/j_doutai/attach/pdf/doutai_top-58.pdf. Accessed Mar. 27, 2018.
- 7) 鈴木寔男, 1980. トマトの荷受けから加工まで, 農業機械学会誌, 671-678.
- 8) 折笠貴寛, 遠藤隆平, 加藤一幾, 藤尾拓也, 吉田 泰, 川村浩美, 小出章二, 2017. マイクロ波を用いた新しいトマトピューレ濃縮法の検討, 日本食品科学工学会誌, 64(9), 471-475.
- 9) 柴田長吉郎, 1994. 第 1 章 マイクロ波加熱の特性・原理・特徴, 越島哲夫, 柴田長吉郎, 戸石登志彦, 則元 京, 山田俊一, マイクロ波加熱技術集成. エヌ・ティ・エス, 東京, 4-14.
- 10) 肥後温子, 1988. 電子レンジの加熱特性, 日本調理科学会誌, 21(1), 35-42.
- 11) Soysal, Y., Ayhan, Z., Estürk, O., Arıkan, M.F., 2009. Intermittent microwave-convective drying of red pepper: Drying kinetics, physical (colour and texture) and sensory quality, Biosystems Engineering, 103, 455-463.
- 12) 藤井昭子, 新澤祥恵, 坂本 薫, 峰木真知子, 石井よう子, 川井考子, 金谷昭子, 2001. 食環境の市場変化と消費者行動の関わり—中食の流通と消費—, 日本調理科学会誌, 34(2), 165-180.
- 13) 堀江秀樹, 2012. 野菜の加熱こともなうグアニル酸の生成, 日本調理科学会誌, 45(5), 346-351.
- 14) 農林水産省, 2009. トマト加工品の日本農林規格. http://www.maff.go.jp/j/kokuji_tuti/kokuji/pdf/k0000993.pdf. Accessed Nov. 29, 2018.
- 15) 柴崎一雄, 高橋伸子, 薮 花雄, 小曾戸和夫, 数見秀次郎, 1963. トマトジュースおよびトマトピューレ製造試験, 日本食品工業学会誌, 10(2), 39-43.
- 16) 古川秀子, 1994. おいしさを測る 食品官能検査の実際. 幸書房, 東京, 19-61.

- 17) 奥村信二, 江口貞也, 小川若子, 1964. 味の素 (株). トマトの呈味を有する飲食品又は調味料の製造法. 特願昭 39-57828. 1964-10-12.
- 18) Oruna-Concha, M.-J., Methven, L., Blumenthal, H., Young, C., Mottram, D.S., 2007. Differences in glutamic acid and 5'-ribonucleotide contents between flesh and pulp of tomatoes and the relationship with umami taste, Food Chemistry, 55(14), 5776-5780.
- 19) 古館明洋, 目黒孝司, 2001. ジャガイモの遊離アミノ酸と煮汁への溶出について, 日本家政学会誌, 52(1), 71-74.
- 20) 山田耕二, 1959. 加工原料用トマトの化学, 農産加工技術研究会誌, 6(4), 42-58.
- 21) 稲熊隆博, 2003. 野菜摂取の意味—カロテノイドの効用を中心に—, The Vitamin Society of Japan, 77(10), 583-585.
- 22) 永田雅晴, 山下市二, 1992. トマト果実に含まれるクロロフィルおよびカロテノイドの同時, 簡便定量法, 日本食品工業学会誌, 39(10), 925-928.
- 23) 山口智子, 2012. 調理過程における野菜類の抗酸化性の評価に関する研究, 日本調理科学会誌, 45(2), 88-95.
- 24) Agüero, M.V., Ansorena, M.R., Roura, S.I., del Valle, C.E., 2008. Thermal inactivation of peroxidase during blanching of butternut squash, LWT, 41, 401-408.
- 25) Lin, T.M., Durance, T.D., Scaman, C.H., 1998. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices, Canadian Institute of Food Science and Technology, 31(2), 111-117.
- 26) Zheng, H., Lu, H., 2011. Effect of microwave pretreatment on the kinetics of ascorbic acid degradation and peroxidase inactivation in different parts of green asparagus, Journal of Food Chemistry, 128, 1087-1093.
- 27) 沖 智之, 2008. II. 機能性評価実験法, 1. 化学反応, 酵素反応を用いた機能性評価, 1) 抗酸化性評価法(1) DPPH ラジカル消去活性評価法, 平成 19 年度農林水産省補助事業 (食料産業クラスター展開事業) 食品機能性評価マニュアル集第 II 集, 71-78.
- 28) El-Miladi, S.S., Gould, W.A., Clements, R.L., 1969. Heat processing effect on starch, sugars, proteins, amino acids, and organic acids of tomato juice, Food Technology, 23, 691-693.
- 29) 堀江秀樹, 2010. トマトの味にグアニル酸が寄与する可能性, 日本味と匂学会誌, 17(3), 331-332.
- 30) Shi, J., Maguer, M.L., Bryan, M., Kakuda, Y., 2003. Kinetics of lycopene degradation in tomato puree by heat and light irradiation, Journal of Food Process Engineering, 25, 485-498.
- 31) 近 雅代, 廣田才之, 1994. 野菜・果実中のカロテノイド異性体, 栄養学雑誌, 52(6), 283-293.
- 32) Unlu, N.Z., Bohn, T., Francis, D.M., Nagaraja, H.N., Clinton, S.K., Schwartz, S.J., 2007. Lycopene from heat-induced *cis*-isomer-rich tomato sauce is more bioavailable than from all-*trans*-rich tomato sauce in human subjects, British Journal of Nutrition, 98, 140-146.
- 33) 藤江歩巳, 久保田真紀, 梅村芳樹, 大羽和子, 2001. 新鮮ハーブのビタミン C 量, DPPH ラジカル補足活性およびポリフェノール量, 日本調理科学会誌, 34(4), 34-43.
- 34) 島田和子, 2008. 第 8 章 ビタミン, 久保田紀久枝, 森光康次郎, スタンダード栄養・食物シリーズ 5 食品学—食品成分と機能性—第 2 版. (株)東京化学同人, 東京, 61-69.

TOHOKU BRANCH REPORT
OF
THE JAPANESE SOCIETY OF AGRICULTURAL MACHINERY AND FOOD ENGINEERS

CONTENTS

RESEARCH PAPERS

Tomohiro MORI · Shigeru ICHIURA · Mitsuhiko KATAHIRA
 Annotation Area Influence on Object Detection AI Accuracy for Green Soybean sorting 1

Hayato SHINDO · Masanori SAITO · Yoshinori TAKAHASHI · Kazuki SEKIGICHI · Keiji SASAKI
 Effect of Load control Function of Tractors Equipped with Hydraulic Mechanical Transmission
 on Working Time and Fuel Consumption 5

Daisuke HOSHI · Toshiei NIITSUMA · Wakako MIYA · Takenobu NAKATA
 Development and Tasks of Broccoli Sorting Automatic Harvester 9

Shintaro UMEKI
 Efforts to expand production using drone monitoring in Hanamaki city rice field 13

Kotomi SASAKI · Takahiro ORIKASA · Kazuhisa KATO · Uzuki MATSUSHIMA · Shoji KOIDE
 Vacuum-microwave concentration for tomato puree
 — Effect of preheating treatment on components and taste of tomato puree — 19

TOPICS 25

NOTES 27

ORGANIZATION DIRECTORY 44