

# 博士論文要約 (Summary)

2019年 10月入学  
連合農学研究科 地域環境創生学 専攻  
氏名 高橋 史夫

タイトル	エダマメ選別機の開発に関する研究 Studies on Development of edamame sorting machine
緒論	
1. 枝豆の生産と現状	
<p>枝豆は 2020 年度の作付面積が 12,800ha, 収穫量が 66,300t, 出荷量が 51,200t で新潟県 (1,560ha), 山形県 (1,470ha), 秋田県 (1,340ha), 北海道 (1,300ha), 群馬県 (1,100ha), 千葉県 (756ha) が主要な産地である。枝豆はこれらの産地を含めて水田転換作物として注目されており, これまで生産を行っていなかった宮崎県でも 2020 年に作付面積が 235ha と 2007 年から約 1.7 倍に増加するなど生産拡大の傾向にある。平成 30 年度における米, 大豆, 枝豆の 60kg あたりの販売価格は米(12,853 円), 大豆(11,295 円), 枝豆 (47,700 円) であり, 枝豆の販売価格は米の約 4 倍, 大豆の約 4 倍になっている。このように, 米や大豆と比較して高値で取引される枝豆は農家の収益増加の観点から, 水田圃場での転換作物としても有効といえる。</p> <p>枝豆の需要は今後も増加が期待されており, 東京中央卸売市場での 2021 年枝豆の入荷量は 5458 トンであり, 前年比 108.7%と増加する傾向にあった。</p> <p>枝豆の生産現場では, 播種作業や防除作業を中心に大豆用機械の利用が進み, 作業能率の改善や湿害回避による収量の増加が顕著である。その一方で, 枝豆の作業体系では, 中耕作業や収穫調製作業での作業能率が低く, 栽培面積の拡大による収益増加が困難な現状にある。収穫作業では, 枝豆株の抜き取りを行う歩行収穫機や収穫脱莢を同時に行う枝豆ハーベスタの開発が進み, 中耕作業と同様に作業能率の改善が進んでいる。</p> <p>中耕と収穫作業の高能率化が進む一方で, 枝豆の調製作業は脱莢, 洗浄, 粗選別, 精選別, 袋詰め各作業を個別に行っている。枝豆は, 収穫直後から糖やグルタミン酸の低下が始まるため, これらの調製作業を迅速に行う必要がある。しかし, 精選別作業は人手で莢の傷害や子実の熟度を確認しながら良品と不良品に分類するため, 作業時間が 10a あたり 48 時間と調製作業の中で最も長く, 早期予冷による品質保持に大きな障害となっている。それに対し, 生産地では精選別作業を効率化するため, 家族労働に加えて雇用労働の導入が進んでいる。2006 年に行った秋田県仙北地域に対する調査 (調査数: 79 戸) では, 1ha 以上の生産農家の 85%, 調査した農家全体で 58%が雇用労働を導入している。その結果, 生産費に占める労働費の割合は, 機械関係費用の 11%に対して 46%, 労働費の中で収穫調製に要する費用が 69%といずれも大きくなり, 調製作業の効率化による経費の節減が必要な現状にある。また, 労働時間の長期化は作業員に対する負担を増加するため, 作業能率や選別精度の低下を誘引し, 出荷量や生産物の評価に悪影響を及ぼすことが考えられる。また, 生産地では包装出荷方式に対応するため, 脱莢, 粗選別, 洗浄, 精選別, 袋詰め各作業を行っている。この中で精選別作業は, 人手で莢の傷害や子実の熟度を確認しながら良品と不良品に分類するため, 作業時間が 10a あたり 48 時間と調製作業の中で最も長く, 早期予冷による品質保持に大きな障害となっている。</p> <p>上記したとおり, 生産現場では様々な手法で調製作業が行われており, 調製作業台の上</p>	

に枝豆を広げて選別を行う方法や、ベルトコンベア上での選別が主流である。近年では大規模生産集団を中心に枝豆精選別機を含むライン構成も見られており、更なる効率化が進められている。

## 2. 枝豆の毛が選別時の画像処理に及ぼす影響

農産物の選別では素材の色情報を基に選別する色彩選別機が開発されている。それに対し枝豆の選別では、色情報だけでなく形状も判断材料に加えた選別機が開発されている。両者の大きな違いは、アルゴリズム等を除き色彩選別機で採用されている上向き（又は斜め上向き）に設置された撮像カメラの有無である。このカメラ設置に関する構造の違いは、被選別物のごみやほこり、自然落下による泥や乾燥した土等が下方に堆積するため、それらに対して影響を及ぼすといったことである。

収穫前の枝豆には産毛状の毛が生えており、この毛は収穫の過程で洗浄を行ったりこすれたりすることで抜けおちるが、調製作業の現場ではそれが舞ったりしている状況が散見され、作業場に毛が埃のように積もっていることが多い。

枝豆の選別機は画像処理で選別を行うことから、毛が堆積することで処理に悪影響を及ぼすため、その適切な除去が課題になっている。

## 3. 枝豆の撮像方法と選別精度について

枝豆の生産は、前述したとおり地域の産業界だけでなく全国各社から様々な営農機械がリリースされており、近年ではコンバインも開発されている。出荷までの調製作業では、洗浄、一次選別、精選別などの機械が市販されているが、作業の中心は人手であり人的リソースを多く必要としている。大規模産地では精選別作業に対して大型の色彩選別機を導入しているが、著者らの調査では装置の後に数十名の人員を配置し、最終選別をしている事例も散見された。その一方で、中・小規模の農家は大型装置の導入が資金や機材設置の観点から困難であるため、小型の選別装置が導入されている。両者の違いは選別アルゴリズム等を除き、前者が色彩選別機で採用されている上向きと下向きに設置された撮像カメラで枝豆莢の両面を撮像する方式であり、後者がコンベア上の安定した状態で上から片面を撮像する方式である。このカメラ設置に関する構造の違いは、枝豆の両面を検査する必要性に起因するものである。

枝豆の選別では、良品出荷の必要性から莢の両面を検査することが一般的になっている。生産現場では、個々の枝豆の両側を確認するため搬送用のコンベアを2段に設置して一段目で表面、段差で反転させて二段目で裏面を検査するといった対応を行っている。しかし、この方法では段差での反転が不規則であるため、対策として不十分である。枝豆選別での両側検査の必要性は前記したとおり選別機も同様であり、その対応として複数台のカメラ設置や汚損への対応によるインシヤルコストの増加が課題となっている。また、枝豆精選別では、着色などの色彩系の傷害、1粒や割れなどの形状系の傷害があり、収穫時期の違いでその構成が変動し、かつ選別者の主観によって出荷率が変化する。出荷率の変化は、生産者の収入に影響を与えるため、選別機の開発にあたり選別精度を向上させると同時に傷害の構成を検証し、高位安定化させる必要がある。

## 4. 枝豆精選別機

枝豆以外にも使用される汎用的な選別機では、処理能力を提示している機種もある。汎用性のある多用途選別機では処理能力が0.1~6.0 t/hとなっており、広範なレンジになっている。これは選別対象が種子や食品、工業製品（リサイクルプラスチック）等になっており、密度がそれぞれ異なるためといえる。しかし、特定の原料に特化した装置では、処理能力等の装置の性能を示す値が重要となり、装置の必要性を示す数値となる。一例として

米専用の選別機では、その性能を狭いレンジで表現している。市販されている米用選別機では「不良品側歩留まり」という名称で、「不良品側に占める不良品の比率」という不良品側の選別率を明示している。

この様に選別する原材料が決まっている場合では、処理能力などの基本仕様を明示すべきであり、購入者が装置を導入するにあたって参考とする基本情報である。枝豆を選別する装置では、処理能力を全く明示していないメーカーや、処理能力と選別率の双方を明示しているメーカーは確認できていない。枝豆は季節性の野菜であり、収穫後の時間経過で表面水分量の変化にともない外観が変化する生鮮野菜の特徴が起因している。また、品種や作型が多様であり、データが収集しにくいこともあげられる。米では昭和 26 年に規定された穀物検査法によって検査規格が明確化されているが、枝豆は JA の集出荷所で取り扱いしない限り、出荷基準が生産者に委ねられているため、統一した基準での選別精度が測定できないことが原因といえる。

そういった状況の中、枝豆産地ではそれまで汎用的な原料用として使用されていた色彩選別機を枝豆に応用した機種への導入が進み、全国各地に枝豆の選果場が設けられている。しかし、それらの機種は、良品として排出される成果物に不良品が多く含まれているため、人手での再選別が必要になっている。機械を導入した集出荷所では、再選別での人数増や前処理にあたる粗選別時に人員を再配置して不良豆を除去するなどの対応をとっている。著者がヒアリング調査を行った所では、カタログ上の処理量をベースに導入したが、明示された処理能力量では誤判別が多くなり、再選別の必要性からカタログ値での稼働が不可能であるとの意見であった。その場合選別物は未選別の莢が大量に排出される（良品側に不良品が出る）ため、その処理に多くの人員が必要となり、人員削減に繋がらないことから「非常に困っている」との意見が多かった。そのような現状を解決するには、装置の設定を含めて機械の適正な運用が必要不可欠であるため、装置の選別能力を正しく測定する方法を確立し、性能を発揮できるセッティング方法を明らかにしていくことが重要である。それと共に、枝豆精選別機には機械として必要な因子を解明することが求められる。選別機に必要な因子としては、時間当たりの処理能力、良品不良品が適切に選別できているかを示す選別率、指定した色合いや形状を生産者が望む閾値で不良として判断させる事ができるかを示す不良品判定能力、装置全体での価格と運用上でのメンテナンス性、生産者の望んだ出荷率に調整できるかを示す歩留まりの調整能力、装置の立ち上げから設定操作などを含んだ操作性がある。

必要な因子の中で処理能力については、機械が壊れないだけの投入量を表すのではなく、一定の選別率を満たす投入量とする等、装置が適正に動作できるように設定した上で示す必要がある。また、選別率は総合の選別率として表現する事他に、良品選別率と不良品選別率のどちらが重要か明らかにされていないため、それらを個別に表現する手段もある。不良品判定は基本的性能としてどれだけの傷害莢に対応しているかを示しており、不良品レベルの調整に必要な要素である。操作性はタッチパネルの普及で簡単に行えるようになっているが、現状として ATM や自動券売機などのレベルまで至っていない。選別機は全自動で生産者の意思通りに選別設定できないため、タッチパネル等を利用した操作性の改善が利用にあたり重要である。選別設定が上手くできないことは、選別機の能力を十分に発揮できないことに繋がり、「役に立たない装置」と購入者から評価されるため、機械の普及にあたり操作性は極めて重要な因子である。そこで、枝豆精選別機を普及するには、これらの因子ごとに必要性を数値で確認し、装置の性能を的確に表現する必要がある。

#### 本研究の目的

前述の背景の中、枝豆調製作業では解決すべき課題があり、それらを解決して作業を効

率化することを目的に、下記の項目について検証を行った。

#### 1. 排出用電磁弁を用いた画像選別機内の清浄作用

枝豆生産現場では、調製作業効率化のため画像処理による選別機（以下選別機）が導入されている。本章では、画像処理システムにおけるノイズ要因となる空中浮遊物が、電磁弁を活用した自然換気方式で適切に排除されているかを検証するため、煙による画像処理解析を行い、圧力や流量の違いが室内空気の動作にどのような影響を与えるかを検証した。実験開始 40～80 秒で煙の濃度（V 値（画像明度））が 25.0～27.3 となり、時間経過で差が解消し、測定部位間の差がなかった。排出用電磁弁は噴射空気圧が、0.6 MPa（2～6 回／秒）で 10 秒、0.4 MPa（5 回／秒）が 20 秒で選別機内を清浄した。0.4Mpa（2 回／秒）では、煙の濃度低下が緩やかだが、約 120 秒で収束した。排出用電磁弁は、選別機内部の空中浮遊物対策に十分な機能を有している。

#### 2. 枝豆の傷病の状態とアルゴリズムについて

本章では枝豆調製作業での生産性を改善し、生産者の収益を向上するため、精選別機の開発に必要な機能の検証を行った。選別機に必要な機能の検証では、枝豆の良品・不良品の構成を調査して傷害を数値化し、それを用いた選別アルゴリズムが必要になる。農家が生産する枝豆莢は一欠けと 1 粒莢の発生頻度が高く、片面のみに発生する傷害の発生頻度は 11%に止まった。傷害の数値化は可食・形状・色彩別に分類・配点し、それに乗じた枝豆莢評価点、それに傷害の発生頻度を乗じて積算した枝豆選別指数で行った。枝豆選別機は枝豆莢評価点の低い 4 項目を中心に、枝豆選別指数で選別の信頼度を調節するアルゴリズムとすることで生産者に近似した選別が可能になる。

#### 3. 枝豆の外観特性が人の選別作業に与える影響

本章では枝豆の精選別作業を効率化するため、選別因子を限定した実際の枝豆に近似したモデル材料を人手で選別して有効性を確認するとともに、枝豆外観の違いが人間の作業性に与える影響を検証した。実験は枝豆選別の最適な選別方法を確認するため、実際の枝豆とシリコン製ダミー豆を使用して調査した。選別試験（時間制限なし）では、見落としが試料 100 個中で 1～4 回確認できた。選別率は平均で 0.994～0.997 といずれも 1 に近似した。ダミー豆と実豆の選別では、選別時間・選別率ともに相関があるため、同一条件下での選別能力試験の利用に有効である。良品と赤莢の選別では相関係数が 0.94 と高く、人と選別装置との能力値を比較する試験材料として適している。枝豆を効率の良く選別するには、不良品率が 10%変化するごとに 6.7 秒の差が生じるため、人の選別を行う前に選別装置を使い不良品を排出し、良品率を高い状態に維持する必要がある。

#### 4. 枝豆選別機の性能評価

本章では前章で得られた結果を基に、必要なアルゴリズムを導入した枝豆精選別機の性能調査を行った。選別機の能力を判断する測定方法検証試験では、実際の豆と選別精度が同等なシリコン製ダミー豆を使用した。その結果、枝豆選別機の装置検査方法としては、①不良品判定機能、②黒点最少確認機能、③総合選別指数の 3 つをレギュレーションとすることが有効であった。開発した枝豆精選別機の性能は、傷害莢を撮像した画像データとシリコン製ダミー豆と微小な黒点を印刷して調査し、色やシルエットで判定しにくい欠粒莢を除き、各傷病莢の全てが認識できた。なお、黒点の最少認識点は 0.3mm であった。選別時に発生する排出用エアに巻き込まれる莢の量は、莢の縦横範囲を乗算して算出する巻き込まれ指数で評価できる。装置の総合的な性能は、時間当たりの投入量と選別率（ニュー

トン効率)の近似直線で表され、その一次線形の傾きと切片で評価される。  
装置が本来 100%の性能を持つべき機能を検証するために、良品と不良品にそれぞれ正確に排出されるかを調査した排出確認試験では不良品側で 99.7%であり、装置の能力値として表現すべき数値である。精選別装置の運用は、人の選別能力試験の結果を加味して装置と人の効率良い配置が求められ、装置単体よりも並列処理が有効である。

「上記の構成は、一例ですので博士論文の構成スタイルに合わせて、必要に応じ変更して記載してください。」

その他の例：第1章、第2章、第3章などの各章ごとに短くまとめる。

序論、本論、結論などの各段落ごとに短くまとめる。

※注1 博士論文要約はインターネットの利用により公表されるので、記載内容については十分注意してください。

※注2 公表できない「やむを得ない事由」(特許、知的財産等に係る部分)は記載しないでください。

※注3 全体で4頁～5頁程度を目処にしてください。