

サトウキビ収穫機のスマート農機化に向けたアシスト技術に関する調査研究

琉球大学農学部 教授 鹿内 健志
琉球大学農学研究科 修士課程 中川 晃太郎
宇都宮大学農学部 助教 青柳 悠也

【要約】

南西諸島の小型サトウキビ収穫機への低コストで導入可能な操作アシスト技術の開発に向け、以下の三つの事項について基礎的知見を収集した。

- (1) 植え付け以外の管理作業時に取得した作業軌跡データから、収穫経路となる畝^{うね}位置を推定する新たな手法について
- (2) 収穫機の旋回や作業効率に大きく影響する枕地幅の実態を調査し、枕地幅と圃^ほ場^{じょう}条件との関係性について
- (3) サトウキビの倒伏状態など収穫作業に影響を及ぼす作業条件とオペレータの操作特性との関係性について

これらの結果から得た基礎データを基に、今後は小型収穫機の現況に即したアシスト機能のさらなる開発・研究を推進する。

はじめに

サトウキビは、沖縄県および鹿児島県の南西諸島の基幹作物である。同地域では、毎年のように台風が通過し、沖縄県における令和5（2023）年産のサトウキビは、台風に伴う倒伏などの被害もあり、10アール当たりの単収は5046 キログラムと、前年産の5391キログラムから約6.4%減少した¹⁾。一方で、こうした被害がある中でも収穫作業などにおける機械化が進み、省力化の推進、さらにはスマート農業技術の導入などが進められている。

サトウキビの収穫作業において、収穫機の導入は進められているものの、狭小な圃^ほ場^{じょう}が多いことから、普及しているのは主に小型収穫機であり、その刈り取り操縦には熟練した技術が必要とされている。担い手不足や熟練者の高齢化に加え、操縦技術の習得に時間を要することなどから、収穫機のオペレータ不足の発生が懸念されており、こうした問題

を解決するため、南西諸島の小型サトウキビ収穫機の使用に当たり、低コストで対応可能な操作アシスト技術の開発が求められている。

具体的には、収穫機の走行部と刈り取り部の操作のアシスト技術を開発することで、困難な作業が容易となり、未熟練者の操作が可能になる。走行操作については、GNSS（Global Navigation Satellite System：全地球航法衛星システム）を活用して畝筋を明らかにし、履帯式の走行装置でも畝筋に沿った走行ができるよう、操作をアシストする技術が求められる。また、刈り取り操作については、画像センサーなどから株の状況を判断し、株を刈り取る際のベースカッターの刈り高さ、進行速度などを最適化できるように操作をアシストする技術が必要とされる。

これらの技術は、前述の通り、現在南西諸島で普及している小型収穫機に適用可能なことが求められる。そのため、大型収穫機で求められる高度な口ボ

ットなどの自動運転を目指すものではなく、小規模圃場を経営する生産農家にとって実用性が高く、低コストかつ自助努力で対応できるアシスト技術である必要がある。

本調査研究は、南西諸島の小型サトウキビ収穫機について、低コストで対応可能な操作アシスト技術を開発することで、機械操作を容易化・高度化し、未熟練者でも操作が可能となることを目指した。そして、このアシスト技術によってオペレータ不足などの問題を解決することを目的とし、小型サトウキビ収穫機の走行性と刈り取り操作性について検証を行った。

1 管理作業軌跡データを用いた畝位置の推定

一般に、小型の農業機械は、大型機械と比較して作業能率が低く、費用対効果の観点から装備が簡素化されるため、自動運転などの先端技術の導入が難しい。そこで、経路ガイダンスなどの安価なオペレータ支援技術が有効であるが、南西諸島においてGNSSを用いた作業分析²⁾は見られるものの、GNSSを用いたオペレータ支援の導入事例はあまり見られない。先行研究では、大型機械向けのGNSS自動操舵システム³⁾が提案されているが、数年に一度の新植データ取得が前提となっており、即時普及には至っていない。

ここでは、沖縄本島中南部のサトウキビ圃場において、植え付け以外の管理作業軌跡データから、収穫経路となる畝位置の推定のための新たな手法を検討した。これにより、オペレータの負担を軽減させ、収穫口スを極力抑えた刈り取り作業を実現できる可能性がある。

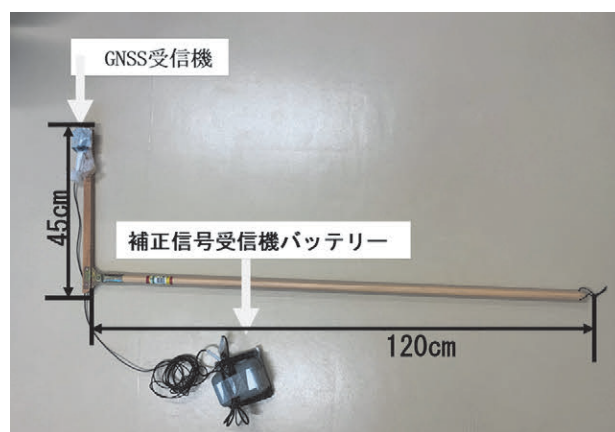
(1) 実験方法

実験は二つの試験圃場において行った。管理作業

の軌跡データを記録し、その作業軌跡を用いて推定畝位置を算出し、実際の畝位置との差を比較した。

初めに、琉球大学亜熱帯フィールドセンター内のサトウキビ圃場（土壌：島尻マージ。以下「琉大圃場」という）でデータ取得した。畝の位置情報は自作の測定具（図1）に取り付けたGNSS受信機（Softbank LC01）が畝（サトウキビ株）の直上を通過するようにして取得した。GNSS受信機はネットワーク型RTK-GNSS（観測点の測定値と、データ通信を利用し受信した仮想基準点のデータを用いて観測点の位置を決定する方式。RTKはReal Time Kinematicの略）でサンプリング周波数は1ヘルツとし、7畝分のデータを取得した。

図1 畝位置測定具



資料：筆者作成

次に、沖縄県中頭郡読谷村楚辺にある圃場（土壌：島尻マージ。以下「読谷圃場」という）でデータを取得した。トラクタ（YANMAR YT463）の中央付近にGNSS受信機を設置し、ビレットプランターでの新植作業時の作業軌跡を記録し（図2）、27畝分の植え付けデータを取得した。加えて、54畝分のデータを自作の測定具によって取得し、合計81畝分の植え付けデータを得た。これらにより得られたデータを実際の畝位置とした。

このように、実際の畝位置データを得た二つの圃

場において、管理作業（高培土^{たかばいど}（注1））の軌跡データを取得した。琉大圃場においてはミニ耕うん機（YANMAR YK650MR）の中央に、また、読谷圃場については、トラクタ（YANMAR YT18）の中央にそれぞれGNSS受信機を設置して軌跡データを記録した（図3）。

図2 GNSS受信機を装着したトラクタとビレットプランター



資料：筆者作成

図3 GNSS受信機を装着した耕うん機（左）およびトラクタ（右）



資料：筆者作成

（注1）根元に土を厚くかぶせることを培土といい、倒伏や雑草を抑制する効果がある。1回目の培土を平均培土、2回目の培土を高培土という。

（2）畝位置推定手法

計測した作業軌跡と実際の畝位置のデータを比較すると、作業軌跡は畝位置に平行に記録されることが分かる。これは、記録した作業が高培土であるため、耕うん機やトラクタが畝間を走行するためである。従って、作業軌跡から実際の畝位置を推定する方法として、作業軌跡のデータから線形回帰により作業軌跡を直線に近似し、その後、その直線を平行移動することで畝位置を直線で推定することとした。作業の種類、畝幅などに応じ、平行移動する距離となるパラメータを決定すれば、畝位置の推定が可能となる。

（3）結果

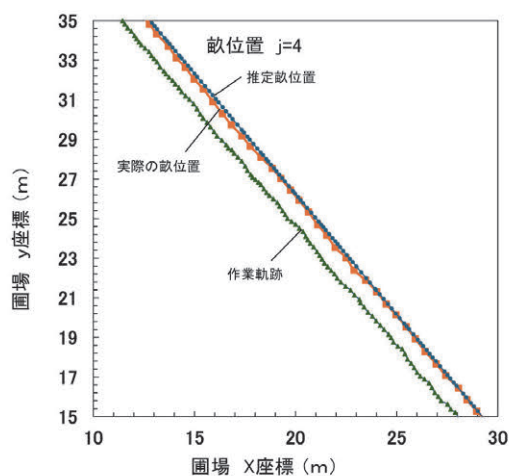
前述の手法で取得した作業軌跡データを用いて畝位置を推定し、実際の畝位置との差を算出した。琉大圃場においては、5畝分のデータを対象として解析を行った。その結果、畝位置推定誤差の平均値が最も大きかったのは5畝目で0.58メートル、最も小さかったのは4畝目で0.11メートルであった（表1）。図4には、琉大圃場における推定畝位置の代表例として、誤差の小さい畝（j=4）および誤差の大きい畝（j=5）を示す。

表1 推定畝位置と実際の畝位置との差の平均値、最大値および標準偏差（琉大圃場）

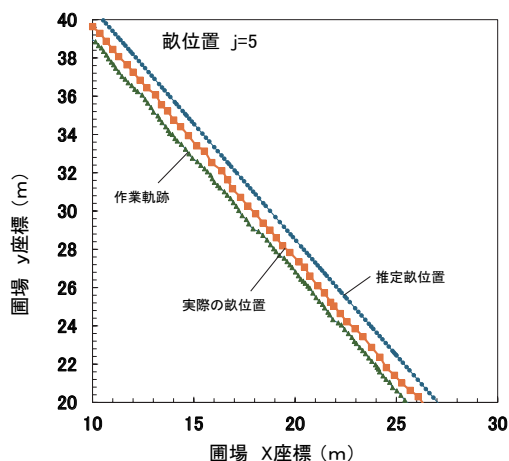
j	平均値（m）	最大値（m）	標準偏差（m）
4	0.11	0.28	0.07
5	0.58	0.86	0.13

資料：筆者作成

図4 推定畝位置（琉大圃場）



資料：筆者作成



資料：筆者作成

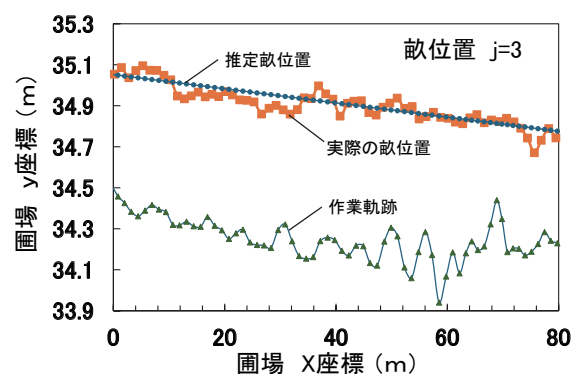
読谷圃場では、1回目が77畝、2回目が76畝の測定値を用いて解析を行った。その結果、平均誤差が最も大きかったのは、2回目サンプリング時の47畝目で0.44メートルであった(表2)。図5には、読谷圃場における推定畝位置の例として、誤差の比較的小さい畝(j=3)および誤差の大きい畝(j=47)を示す。

表2 推定畝位置と実際の畝位置との差の平均値、最大値および標準偏差（読谷圃場）

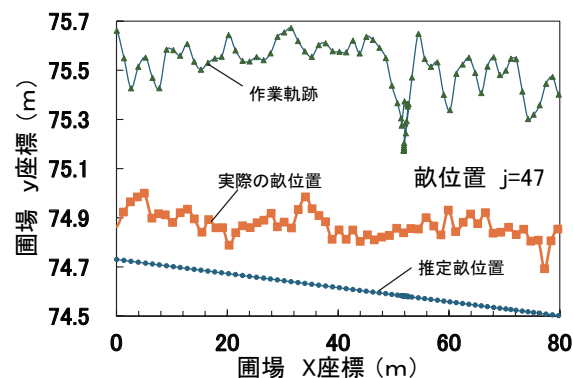
j	平均値 (m)	最大値 (m)	標準偏差 (m)
3	0.04	0.21	0.04
47	0.44	0.54	0.05

資料：筆者作成

図5 推定畝位置（読谷圃場）



資料：筆者作成



資料：筆者作成

各圃場における畝位置推定誤差の平均値、最大誤差および標準偏差を表3にまとめて示す。各圃場の結果を比較すると、畝位置推定精度は読谷圃場において高く、琉大圃場では推定精度が低いことが確認された。現地観察の結果、琉大圃場では畝の蛇行や間隔のばらつきなど、不規則な畝形状が広範に認められたのに対し、読谷圃場では畝の直線性および間隔が一定に保たれており、均一な畝形状が維持されていた。これらのことから、畝位置推定精度の差異は、圃場ごとの畝形状の規則性の違いに起因する可能性が高いと考えられる。すなわち、本手法は、畝形状が一定である条件下では有効に機能する一方で、畝形状が不規則な場合には、推定精度が低下する傾向を有することが示唆された。

表3 推定畝位置と実際の畝位置との差の平均値、最大値および標準偏差

	平均値 (m)	最大値 (m)	標準偏差 (m)
琉大	0.34	0.56	0.12
読谷1	0.14	0.29	0.06
読谷2	0.14	0.29	0.06

資料：筆者作成

2 枕地幅の調査・解析

沖縄県においては、サトウキビ収穫作業の省力化を目的として収穫機（ハーベスタ）の導入・普及が進められており、その役割は今後さらに重要になってくると考えられる。しかしながら、収穫機の円滑な作業を前提とした圃場条件の整備だけでは必ずしも十分とは言えず、いくつかの課題が残されている。特に、収穫機の旋回や作業効率に大きく影響する枕地（農業機械が切り返しなどを行うため、圃場の端

に設けられた場所）幅については、適切な幅が確保されていない圃場が存在する可能性が指摘されている。一方で、実際の圃場における枕地幅の状況については、十分な実態把握がなされておらず、その現状は明らかではない。ここでは、沖縄県内のサトウキビ圃場を対象に、枕地幅の実態を調査し、枕地幅と圃場条件との関係性について考察することを目的とした。

（1）調査方法

本研究では、図6に示したようなサトウキビ収穫機（松元機工製 MCH-30WEC）を使用した。GNSSによる計測項目は、端末日時、緯度および経度とし、これらのデータを作業分析の対象とした。調査は沖縄県本島南部に位置する八重瀬町、南城市、糸満市の三つの市町で、一方向刈りを行っている20筆の圃場を対象として行った。

図6 GNSSを装着した収穫機



資料：筆者作成

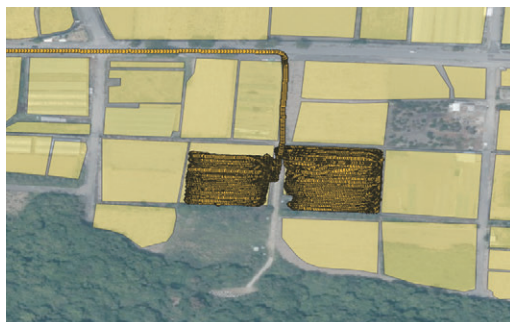
（2）枕地幅の算出

サトウキビ収穫作業における枕地の平均幅を求めるため、GNSSによって取得した収穫機の作業軌跡データをGIS（Geographic Information System：地理情報システム）上で解析し、QGIS（GISを使用するためのオープンソースソフトウェア）を用いて分析環境を構築し、農林水産省が公開している「農

地の区画情報（筆ポリゴン）」および国土地理院の衛星画像をベースマップとして重ね合わせ、圃場位置を明確化した。筆ポリゴンおよび衛星画像は、同一座標系上で表示した（図7）。次に、収穫機に搭載されたGNSS端末から取得した測位データをCSV形式でダウンロードし、QGIS上にポイントデータとして読み込むことで作業軌跡を可視化した。

測位データには経度・緯度および測定時刻が含まれており、座標系にはWGS84（EPSG:4326）を用いた。

図7 ベースマップの作成



資料：筆者作成

さらに、時間経過に応じた作業状況を把握するため、測位ポイントを時間順に表示させた。これにより、収穫作業の進行とともに枕地形成作業が行われる時間帯を視覚的に把握することが可能となった。枕地作業の抽出に当たっては、まず枕地形成の作業パターンを整理した。本調査では、畝を横断して枕地を空ける「横方向収穫」と、畝方向に沿って刈り進めながら枕地を形成する「縦方向収穫」の2種類の方法が確認された。可視化した作業軌跡を参照し、これらの枕地形成作業に該当する時間帯を特定した。その後、測位データに含まれる時刻情報を利用して、枕地形成時のデータのみを抽出し、他の収穫作業の軌跡を除去した。抽出した枕地作業の軌跡データから、枕地のポリゴンを作成した（図8）。しかし、枕地ポリゴンは不整形で幅が一定ではないため、その形状から直接幅を求めることは困難であった。そこで、枕地形状を長方形に近似する方法を採用した。各枕地ポリゴンを最小外接長方形で表現した。この長方形の属性情報として算出される長辺長（height）を枕地の代表的長さとし、先に求めた枕地ポリゴンの面積をその長さで除することで、枕地の平均幅を算出した。

以上の手順により、GNSSによる作業軌跡データ

とGIS解析を組み合わせることで、実際の収穫作業に基づいた枕地の平均幅を定量的に求める方法を構築した。これにより、収穫機の旋回に必要な枕地幅の実態把握や作業計画の検討に活用できる基礎データを得ることが可能となった。

図8 枕地ポリゴンの作成

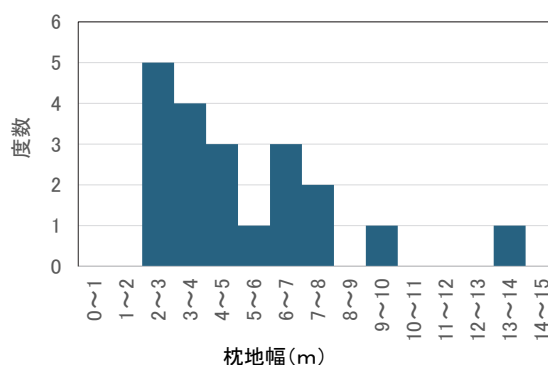


資料：筆者作成

（3）解析結果

各圃場における枕地幅の分布を図9に示す。作業分析の結果、調査対象圃場の枕地幅は一様ではなく、圃場間で大きなばらつきが認められた。枕地幅の最小値は2.185メートル、最大値は13.957メートルであり、広い範囲に分布していることが確認された。度数分布を見ると、枕地幅が2～3メートルの圃場が最も多く、全体としては5メートル以下の枕地幅を有する圃場が多数を占めていた。一方で、10メートル以上の比較的広い枕地幅を確保している圃場も一部に認められた。

図9 枕地幅の分布



資料：筆者作成

収穫機の全長は約7メートルであることから、これと比較すると、枕地幅が収穫機の全長を下回る圃場が多く存在していることが明らかとなった。写真に示したように、枕地幅が5メートル以下で収穫機の全長を下回る圃場を確認したところ、圃場と農道が隣接している、かつ、圃場と農道との間に段差やU字溝などの物理的障害が存在しない、といった条件を有する場合が多く認められた。このような圃場では、旋回や切り返し動作の一部を農道上（圃場外）で行うことが可能である。そのため、圃場内に確保する枕地幅を最小限に抑えることができ、その結果として枕地幅が小さくなっていると考えられる。一方、枕地幅が6～9メートルで収穫機の全長と同程度の圃場では、道路と隣接してはいるが、農道ではなく一般車道であるため、長時間の占有が困難であるもの、U字溝や給水栓などの障害物が存在するものが多く認められた。このような圃場では、車道へのはみ出しを抑制しつつ、圃場内での切り返しを可能とする必要があることから、一定程度の枕地幅が確保されていると考えられる。また、障害物の存在により枕地の確保に制約を受けた結果、枕地幅が6～9メートルの範囲に分布した可能性が示唆される。さらに、枕地幅が10メートル以上で収穫機の全長を上回る圃場では、圃場と農道との間に大きな段差が存在する場合や、出入口が限定されている場合が確認された。これらの圃場では、圃場外への出入りを最小限に抑え、圃場内で旋回および作業を完結させる必要があることから、広い枕地幅が確保されていると推測される。

以上のことから、枕地幅は収穫機の寸法のみならず、圃場の立地条件や周辺環境、物理的制約などの影響を受けて決定されていることが示唆された。従って、サトウキビ収穫における機械化体系の確立に向けては、機械寸法を踏まえるとともに、圃場条件に応じた枕地設計の検討が重要であると考えられる。



写真 枕地幅が10メートル以下の圃場

3 サトウキビの倒伏状況とオペレータの刈り取り操作に関する調査

前述の通り、沖縄県内においては小型サトウキビ収穫機が広く利用されている。しかし、収穫作業中の実際の作業状態や走行速度の変化については、オペレータの経験的な判断に依存する部分が多く、作業効率に影響する要因を把握した研究は十分ではない。特にサトウキビの倒伏状態などの作業条件は、機械の走行速度や作業効率に大きく影響すると考えられ、このときのオペレータの操作特性を把握することが操作アシスト技術を開発するために必要となる。ここでは、GNSSによる位置情報と、収穫機のキャビン内から撮影した360度映像を組み合わせ、小型サトウキビ収穫機の作業状況およびサトウキビの倒伏状態などを記録し、収穫作業中の作業条件と作業操作特性の関係について検討することを目的とした。

（1）調査方法

調査は2026年1月12日、15日、19日の3日間にわたり、沖縄県読谷村にあるサトウキビ圃場において実施した。対象機械は、小型サトウキビ収穫機（松元機工製 MCH-30WEC）を用いた。機械には、キャビン内の作業状況を記録するための全方位カメラ（Insta360 X5）、および車両位置を取得する

GNSS受信機を搭載した。映像は30フレームレート、GNSSは1ヘルツで記録し、車両の位置と映像による作業状況に対応付けることを可能とした。

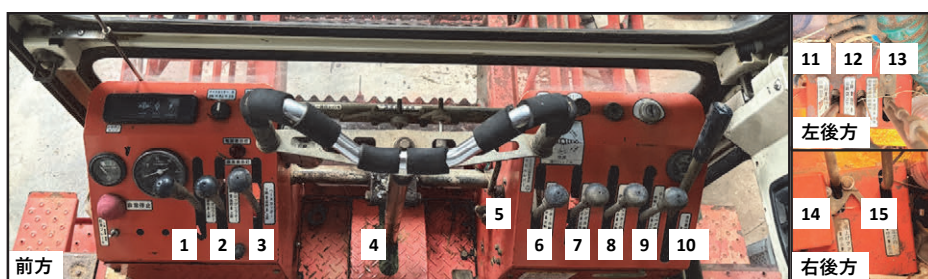
取得したキャビン内の映像を目視で確認し、収穫作業中の刈り取り区間を判定した。また、追い刈りの有無、サトウキビの倒伏状況、オペレータの操作状態などを確認した。得られた画像情報から、サトウキビの倒伏状況とオペレータの操作特性について

分析した。

(2) 操作レバーについて

図10に収穫機の操作レバーを示す。No.1～No.5は刈り取り部・走行・出力に関する連続調整系、No.6～No.10は作業部の駆動・停止を切り替えるON/OFF系、No.11～No.15は収納台・収穫袋・エクストラファンに関する補助操作系である。

図10 収穫機の操作レバー



資料：筆者作成

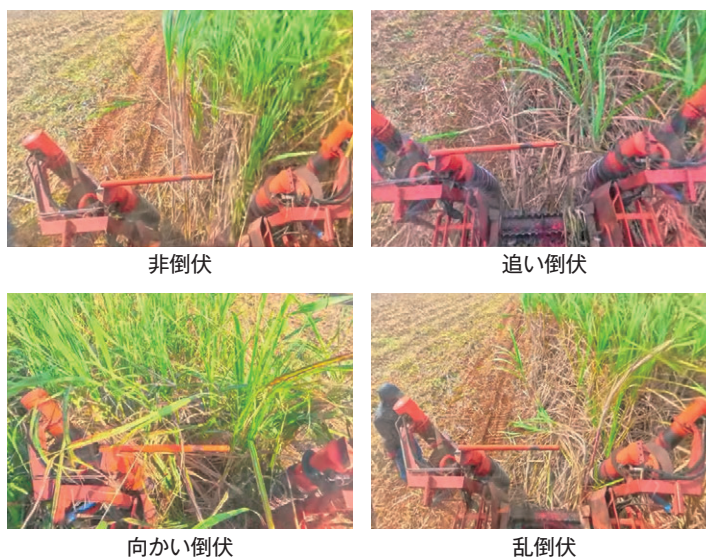
注：No.1 左ディバイダ 高さ、No.2 右ディバイダ 高さ、No.3ベースカッター 高さ、No.4 クローラ(走行・前後進)、No.5 エンジン回転数、No.6 ベースカッター 作動、No.7 チョッパー 作動、No.8 ディバイダ 作動、No.9 コンベア 作動、No.10 全作業 作動/停止、No.11 収納台 チルト、No.12 収穫袋 上下、No.13収穫袋 着脱、No.14ファン 上下、No.15 ファン 方向。

(3) 結果

キャビン内の映像を目視で判断し、サトウキビの状況を、1) 茎が真っ直ぐに立っている(非倒伏)、2) 茎が進行順方向に倒伏している(追い倒伏)、3)

茎が進行逆方向に倒伏している(向かい倒伏)、そして4) 茎が複数方向に倒伏している(乱倒伏)の四つに分類した(図11)。

図11 サトウキビの倒伏状況



資料：筆者作成

刈り取り時、追い倒伏あるいは向かい倒伏、乱倒伏で畝筋から横に未刈側に倒伏している場合に対応する操作（図12）は、オペレータが前進操作しながら（レバー No.4）、未刈側のディバイダを上下操作し（レバー No.1、2）、倒伏茎を機体中央に誘導している。この場合は、作物の追い倒伏あるいは未刈側への倒伏の状況から、機体中央に引き込みにくい茎を判断し、エンジン回転数を上げ（レバー No.5）、左右のディバイダを上下操作させながら、倒伏茎を機体中央へ巻き込むように誘導し、刈り取りを進めている。

図12 刈り取り作業



資料：筆者作成

葉ガラが多い区間や乱倒伏している区間の刈り取り時には、搬送部の負荷の上昇によって、詰まりが発生する。この場合には、機体を一度退避させ、詰まりを解消するための操作が行われる（図13）。まず、ベースカッターを上昇し（レバー No.3）、クローラを操作して後進する（レバー No.4）。その後、エンジン回転数を下げて（レバー No.5）、全作業を停止する（レバー No.10）。次に、ベースカッターとコンベアを反転し（レバー No.6、9）詰まりを解消する。

今後、深度カメラやLiDAR^{（注2）}などの三次元センシング技術によりサトウキビの状況を詳細に把握し、刈り取り作業への影響とそれに伴うオペレータ

の操作の特性を明らかにし、精細な操作アシスト手法の開発を進めることとしている。

（注2）「Light Detection And Ranging」の略で、レーザー光を照射し、その反射光の情報を基に対象物までの距離や対象物の形などを計測する技術。

図13 詰まり除去



資料：筆者作成

おわりに

南西諸島の基幹的作物であるサトウキビの収穫作業において、収穫機の導入は図られているが、サトウキビの刈り取り作業には、収穫機の操縦に熟練した技術が必要とされている。本調査研究は、南西諸島の小型サトウキビ収穫機について低コストで対応可能な操作アシスト技術を開発することを目的に、収穫機の走行部と刈り取り部の作業支援に関する調査を行なった。

まず、走行部に関しては、走行位置を明確化する目的で、管理作業において畝の位置を正確に把握する手法を開発し衛星測位システム（GNSS）を用い、畝筋を数センチレベルの精度で確定する技術を開発した。また、旋回作業に重要な枕地幅の調査・解析を行い、必要な枕地幅について知見を得た。刈り取り部に関しては、圃場のサトウキビの状態とオペレータの作業状況を画像情報などで記録した。その結果、サトウキビが複雑に倒れる乱倒伏時には、オペ

レータによるクロープディバイダの高さ調整操作を行うことで刈り取りを行っていること、また、搬送部の詰まりを解消するための操作が行われていることについても確認された。これらよりオペレータのベースカッターやクロープディバイダの操作特性に関するある程度の知見が得られた。

完全自動化による収穫作業の実現には、高度な制御技術の導入や機体構造の大幅な改変が必要となり課題が多い。一方で、操作アシスト技術は、導入障壁が低く、既存機械への後付けが可能であることから、現場への普及性が高い技術として期待される。今後は、これらの結果から得られた基礎的知見を踏

まえ、小型収穫機の現況に適合した操作アシスト技術の開発をさらに推進し、地域農業における省力化技術の普及に貢献することを目指す。

謝辞

調査にご協力頂いた朝比奈大地氏(沖縄県読谷村)にお礼申し上げます。また、データ整理は、末吉わかかな氏(琉球大学農学部学生)に協力をいただきました。なお、本調査は独立行政法人農畜産業振興機構の令和7年度砂糖類及びでん粉関係学術研究委託調査により実施したものです。

【引用文献】

- 1) 沖縄県農林水産部糖業農産課(2024)「沖縄県における令和5年産さとうきびの生産状況について」『砂糖類・でん粉情報』2024年9月号、pp50-55、独立行政法人農畜産業振興機構
- 2) 鹿内健志、官森林(2020)「GNSS、ドライブレコーダを活用した農作業データの収集」『農作業研究』55巻3号、pp163-167、日本農作業学会
- 3) 上野正実、川満芳信、渡邊健太(2021)「ウフスマ・プロジェクトの終了とさとうきびスマート農業時代の幕開け」『砂糖類・でん粉情報』2021年7月号、pp46-56、独立行政法人農畜産業振興機構