

# ICT活用による堤防除草現場省人化技術の開発に向けて

事業振興部 機械課 ○東 陽一  
三浦 豪  
石道 国弘

河川堤防は、堤防機能を健全に維持するために定期的な堤防除草が必要である。特に北海道は全国に比べ人口減少が顕著なため建設業の担い手不足が大きな懸念となっており、除草作業は多くの労力と時間を要するため省人化と効率化が求められている。堤防除草の自動化への取組【SMART-Grass】について、令和5年度までの検証結果を踏まえて、今年度に行っている検証・実証試験内容及び現場導入に向けた課題を報告する。

キーワード：SMART-Grass、除草機械、自動運転、ICT

## 1. はじめに

生産年齢人口が減少する中、社会インフラの整備・維持管理や災害対応に重要な役割を果たしている建設業の担い手確保・育成に向け、建設業の働き方改革と生産性向上は急務である。全産業平均に比べ建設業就業者の年齢構成比は高齢化が進行しており、特に北海道では全国に比べ高齢化が顕著である。

また、近年の激甚化・多様化する災害に対し、河川堤防などインフラの品質確保と適切な機能維持が重要である。

河川堤防は、雨水や洪水による侵食から保護するため植生による法面保護がなされており、堤防機能を健全に維持するには、定期的な堤防除草が必要となる。北海道開発局で管理する一級河川13水系における管理延長は約1,850kmにおよび、国が管理する全河川堤防の21%にあたる。また、石狩川や十勝川の下流域では、泥炭層が広く分布する軟弱な地盤地帯のため、法勾配1:5~1:10のゆるやかな傾斜の堤防（丘陵堤）**図-1**が整備されている。



図-1 石狩川の丘陵堤の例

そのため、全道で除草が必要な堤防の面積は10,000haを超える広さがあり、この除草作業には多くの労力と時間がかかっている。河川堤防除草の省人化・効率化・費用の削減に向け、これまでも様々な取組が行われてきたが、更なる生産性向上が必要である。

このことから、北海道開発局では、これらの課題を解決するため、河川堤防除草作業におけるICT（情報通信技術）を活用した自動化技術の開発と導入に向けた検討を「堤防除草の自動化検討ワーキンググループ【SMART-Grass】（Self-Moving And Remote-sensing Technique for Grass-cutting）」として進めている。本取組で検討した除草機械の自動化技術や試験状況について報告する。

## 2. 堤防除草の自動化検討【SMART-Grass】

### (1) 除草自動化の概要

河川堤防除草作業の省人化を目指し、除草機械の自動化レベル及び本取組で目標とするレベルの検討を行なった。除草機械の自動化にあたり、従来の除草作業の施工実態から自動化に必要な諸条件を整理し、3つのプロセス（事前処理・自動運転・後処理）で構成される除草機械自動化システム（以下、「システム」と言う）を構築した。**〈図-2〉**

また、現在の除草方法を「レベル0」と定義し、4段階の自動化目標レベルを設定した。本取組においてはその中の「レベル2」である1人で複数台の除草機械を管理する自動運転を目標に検討を進めた。**〈図-3〉**

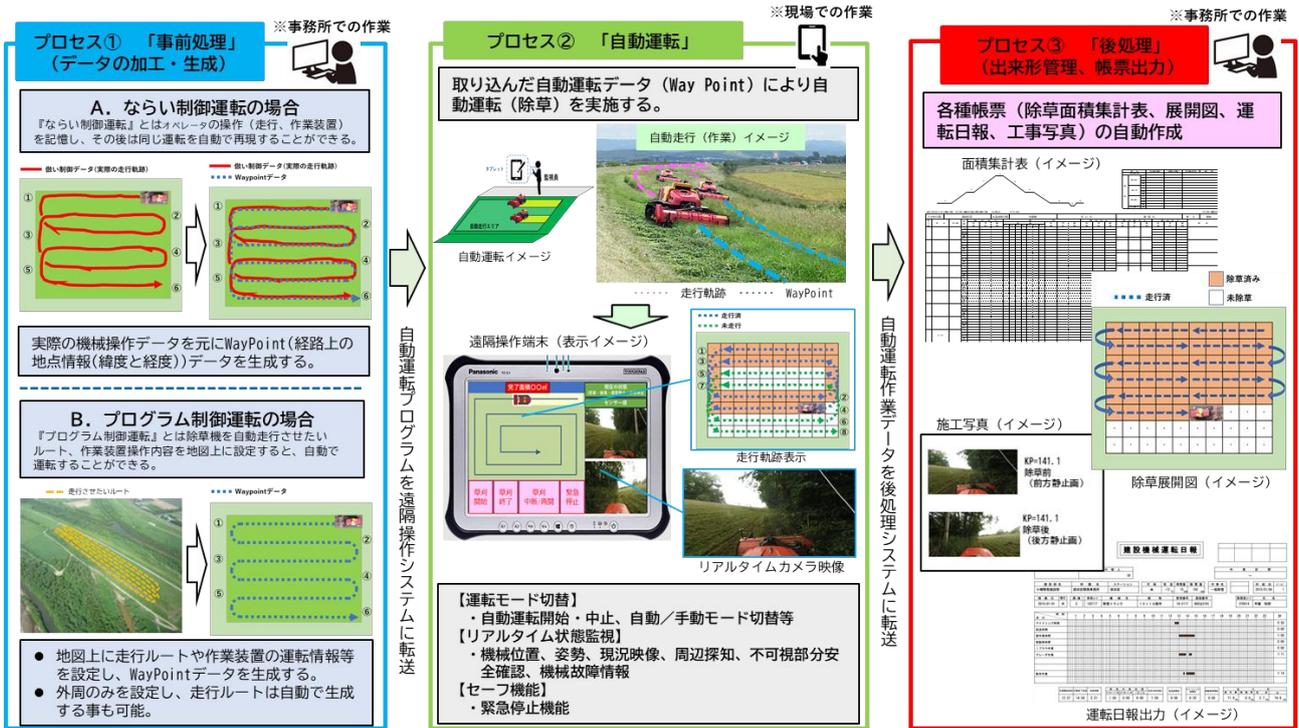


図-2 除草機械自動化システム概要

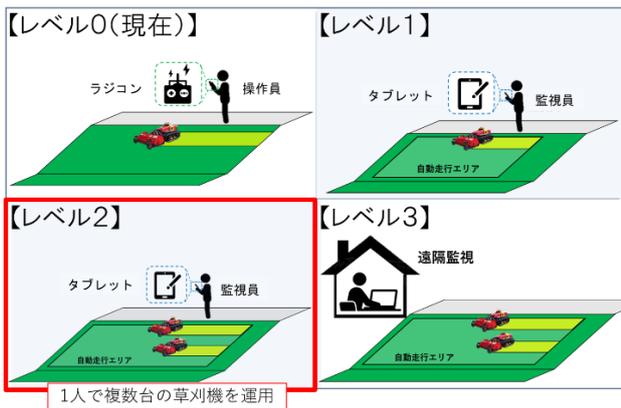


図-3 設定した自動化目標レベル

自動走行パターンについては、北海道開発局の河川維持工事で行われている、前後進の両方で除草する「スイッチバック」及び前進のみで除草し旋回は前後進して方向転換する「αターン」に加え、前進のみで走行、旋回する「スパイラル」の3種類を設定した。〈図-4〉

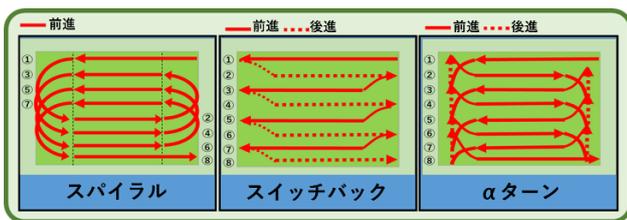


図-4 走行パターンイメージ図

## (2) 除草機械の選定

本取組で使用する除草機械は、直轄河川の現場条件を基に必要な登坂能力を30度以上、除草幅を1.5m以上とした。その他、除草能力や自動運転技術の実験状況及び改造への対応可否、国内でのメンテナンス性、国土交通省での保有状況等を比較検討した結果、大型遠隔操縦式草刈機（以下、「草刈機」と言う）が本取組に最も適したものと判断した。草刈機の基本仕様を表-1 に示す。

表-1 草刈機基本仕様

全長×全幅	4,540mm×2,040mm
刈幅	1,850mm
質量	3,000kg
走行速度	0~6km/h
最大自走法面勾配	40度

システムの主な機器構成は、草刈機本体上部に搭載した自動制御BOX（以下、「BOX」と言う）と草刈機の遠隔操作・監視が可能な端末（以下、「タブレット」と言う）である。

BOXは、GNSS受信機とIMUのセンサー類、各センサーが取得したデータを処理し自己位置推定を行う制御装置、草刈機へ走行指示信号等を通信するCANスイッチやログ用CPU電源装置で構成される。〈図-5、図-6〉

自車の位置情報取得には、高精度な自己位置推定を行うため、準天頂衛星「みちびき」のセンチメートル級測位補強サービス（CLAS）に対応したGNSS受信機を使用し、

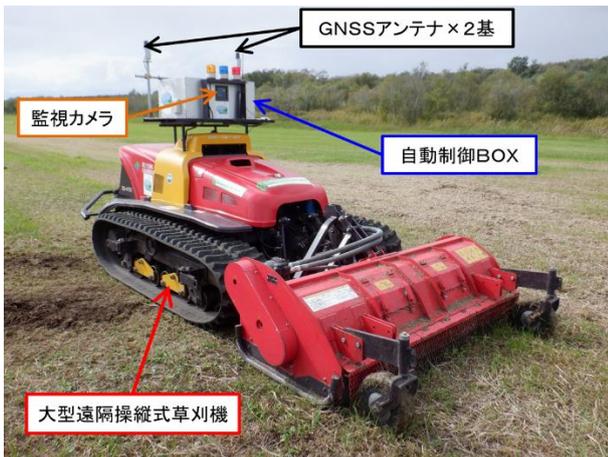


図-5 使用する草刈機

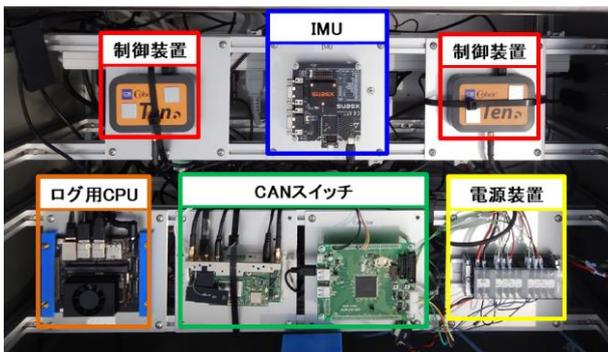


図-6 BOX内部

自動走行中の進行方向については、IMUの方位検出データを、BOX左右に設置したGNSSアンテナの相対位置から算出した方位で補正することで精度を高めている。

タブレットとBOXの通信はLTE回線を用いており、タブレットからBOXへは、施工範囲、走行ルート、走行速度等の施工条件を登録すると共に自動施工開始と停止及び、緊急停止の操作信号を送信する。

また、BOXからタブレットには、カメラ映像、自己位置座標、時刻、方位、走行経路等のベースマシンの稼働情報が0.1秒周期で送信される。

自動走行中の監視については、BOX前後の監視カメラ映像をタブレットに表示することでリアルタイムに進行方向の安全確認と後方の施工状況確認を監視することが可能である。また、2台の草刈機による協調運転作業の施工状況についてもタブレット上で確認が可能である。

### 3. 過年度までの試験結果

令和3年度から平坦なフィールドでの機能確認試験及び勾配がある現場において実証試験を開始した。

令和3年度は「プロセス1」についての検証、令和4年度はシステム全行程である「プロセス1~3」について検証及び実証試験を行った。

AZUMA Yoichi, MIURA Go, ISHIDO Kunihiro

令和5年度は自動化目標レベル「レベル2」に向け、改良したシステムを搭載した草刈機を用いて2台での協調運転技術の検証を行った。〈図-7〉



図-7 実証試験状況 (2台協調運転)

検証については、1つの作業エリア内で同時に2台の草刈機での自動運転を行う「雁行運転」と2つの作業エリアでそれぞれ1台の車両での自動運転を行う「別エリア運転」の2パターンを設定した。〈図-8〉

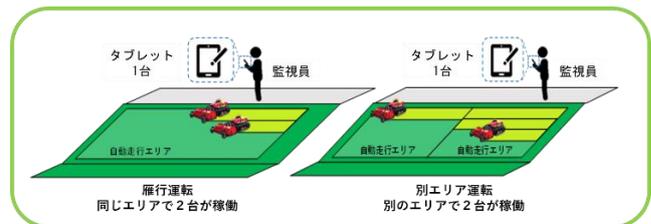


図-8 2台協調運転のイメージ

また、設定ルートに対する自動走行軌跡誤差の目標値を $\pm 250\text{mm}$ とし、2台協調運転では先行する草刈機を1番車、次に走行する草刈機を2番車と設定した。

検証内容としては「2台協調運転技術の検証 (走行精度・安定性) の確認」「自動走行安全機能 (エンジンストール防止機能、協調運転接触防止機能) の確認」「出来形自動計測技術及び工事用帳票出力機能の確認」「安全対策機能の確認」を行った。

試験の結果、2台協調運転技術の走行精度については、雁行運転、別エリア運転ともに、システムで設定したルートと実際の自動走行軌跡の平均誤差は目標値の範囲内であることを確認した。

また、走行安定性については、自動走行時に多少の蛇行が発生した場合でも目標値を超えないことを確認した。〈図-9〉

自動走行安全機能のエンジンストール防止機能については、自動運転において草が繁茂している場所等の高負荷がかかる除草作業でエンジンストールが発生したため、エンジン回転数(1,900rpm)以下を検知した場合に草刈機の走行を停止し、除草作業による負荷を一時的に軽減させることでエンジン回転数が回復する機能である。

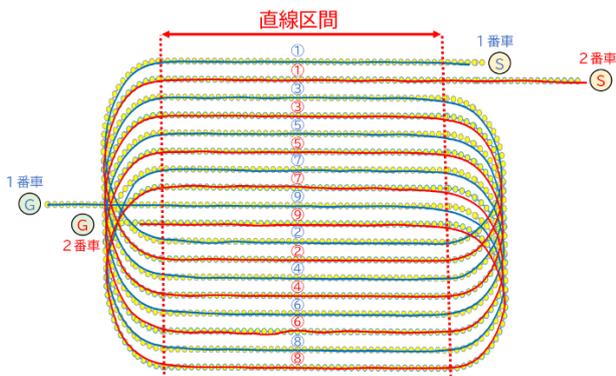


図-9 2台協調運転の自動走行ルート精度

この機能によりエンジンストールを回避し、除草作業の継続が可能となり、高負荷時でもエンジンストールせずに自動運転できることを確認した。

協調運転接触防止機能については、草刈機同士が近づいた場合に接触を回避するため、2台が一定の距離より接近すると警告を発出すると同時に減速し、更に接近を検出すると、先行している1番車は運転を継続した状態で2番車をその場で一度停止させ、1番車との距離が一定以上離れてから徐々に速度を上げ、運転を再開させる機能である。この機能により2台協調運転での草刈機同士の接触を防止することを確認した。<図-10>

また、2台協調運転(別エリア運転)において2台それぞれの作業エリアが隣接している場合、2台の草刈機が相互の位置及び走行方向が影響して両者ともに動作不能となるデッドロックという現象が起きる可能性が予測された。<図-11>

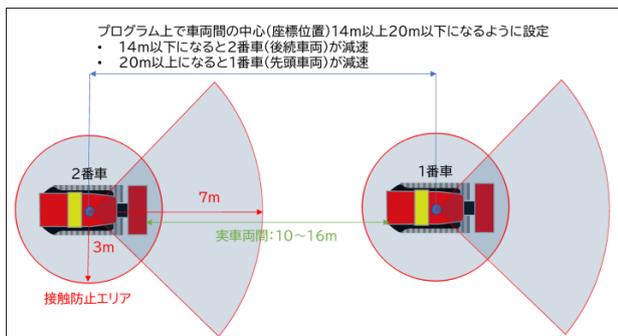


図-10 協調運転接触防止機能

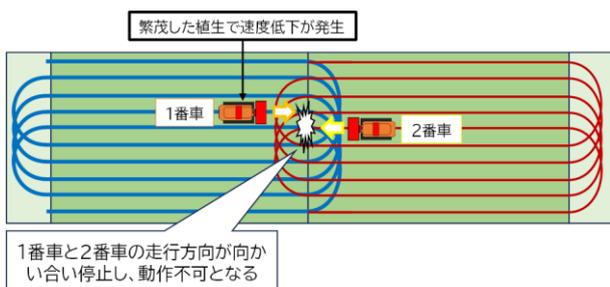


図-11 デッドロック現象

出来形自動計測技術及び工事用帳票出力機能については、記録された施工記録データを「集計表」「施工エリア」「数量調書」「写真」としてエクセルシートに出力し、工事用帳票に活用できる電子データが作成できることを確認した。

安全対策機能としては2つの緊急停止機能「タブレットによる停止操作機能」「施工エリア逸脱時の自動停止機能」を搭載し、2台協調運転において問題なく動作することを確認した。

#### 4. 令和6年度の現場実証試験

実証試験は2台協調運転において方位検出技術の比較検証、新たな要素技術としてデッドロック防止機能、自動走行中断後の復旧、周辺探知機能に関する機能、精度等の確認及び堤防除草の生産性向上の評価を行った。

現場実証試験場所については、昨年度までの試験現場よりも傾斜となる最大法勾配1:2(26.6度)において自動運転精度を検証するため旭川開発建設部旭川河川事務所管内の旭川市永山新川左岸・右岸を選定した。<図-12>



図-12 令和6年度 現場実証試験場所

##### (1) 方位検出技術の比較検証

現状で使用している方位検出技術は、受信機1台とアンテナ1基で1組となるシングルアンテナタイプのGNSS受信機を2組と、測定性能が高く高価格なIMU（以下、「高精度IMU」と言う）1基での機器構成（以下、「シングルアンテナシステム」と言う）である。

機器の簡素化や廉価化（ランクを下げた機器の採用等）について検討するために、受信機1台につきアンテナ2基で構成されるデュアルアンテナタイプのGNSS受信機（以下、「デュアルアンテナ」と言う）及び高精度IMUよりも測定感度誤差・精度が劣っているが小型軽量で安価なIMU（以下、「低価格IMU」と言う）を用いて、現状の機器構成よりも簡素かつ省スペース化を狙うことができる機器の方位検出精度・実用性について比較検証を行った。<図-13>

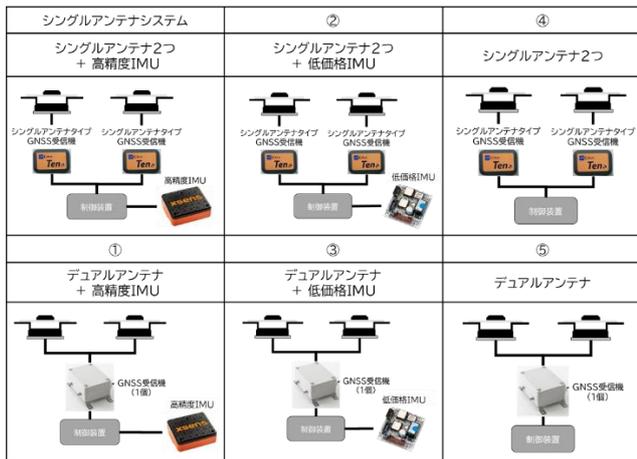


図-13 方位検出方法

「シングルアンテナシステム」では、本試験での刈取率は99%以上あり、方位検出の精度低下による刈残しは、ほぼ発生せず使用可能であると考えられる。

「①デュアルアンテナ+高精度IMU」では除草作業を行う直線部において蛇行が発生したが、刈取率は97%以上であり、方位検出の精度低下による刈残しが少ないため、本システムで使用可能であると考えられる。<図-14>

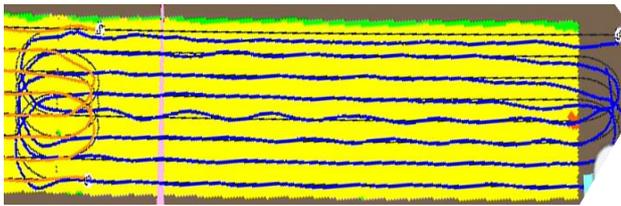


図-14 デュアルアンテナ+高精度IMUの走行軌跡

「②シングルアンテナ2つ+低価格IMU」では、1回目走行時は刈取率が99%以上であったが、2回目以降の走行から徐々に本来の自動走行ルートから逸脱することが確認され、5回目以降は直線部において何度もエリア逸脱を確認した。<図-15>

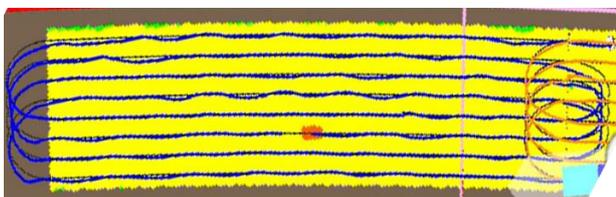


図-15 シングルアンテナ+低価格IMUの1回目走行軌跡

「③デュアルアンテナ+低価格IMU」では、刈取率は98%以上であったが、直線で蛇行の発生を確認した。

また、「②シングルアンテナ2つ+低価格IMU」同様に2回目以降の走行から自動走行ルート逸脱と直線部において何度もエリア逸脱を確認した。<図-16>

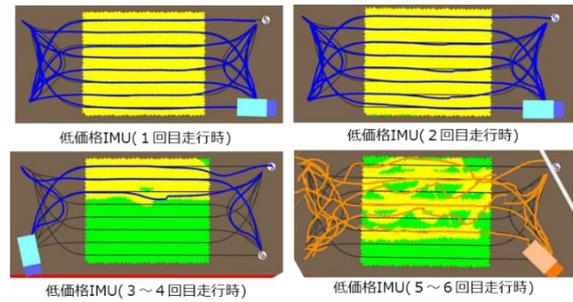


図-16 低価格IMUの走行回数による経路逸脱状況

自動走行ルートからの逸脱原因は使用した低価格IMUが高精度IMUと比較して、作動後の回転角が安定するまでに0.5秒程度の遅延があり、出力データについても、実際の動作に対して同様の遅延が発生しているためと想定される。そのため、IMU出力データの遅延に伴う測定誤差が蓄積され、正確な方位検出ができなくなったと考えられる。

「④シングルアンテナ2つ」では、刈取率は99%以上あり、方位検出の精度低下による刈残しはほぼ発生しなかったが、試行回数が少ないため引き続き検証が必要であると考えられる。

「⑤デュアルアンテナ」では、直線、旋回において大きく蛇行し、自動走行ルートから逸脱を確認した。原因としては検証で用いたデュアルアンテナが製品仕様上、Windows対応版測位ソフトウェアをインストールしたPCを介す必要があり、測位情報の伝送時にバッファ遅延が発生するものと考えられ、本システムで用いる場合は選定する機器仕様について検討が必要であることを確認した。<図-17>

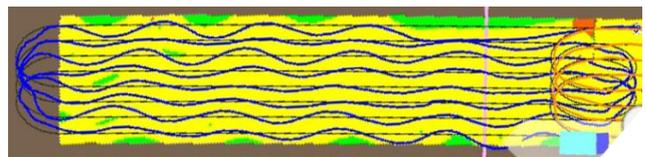


図-17 デュアルアンテナの走行軌跡

方位検出技術については、①～⑤の検討結果をふまえ、他の価格帯IMUやデュアルアンテナ（IMU内蔵型）等を含め、今後も検討していく。

## (2) デッドロック防止機能

令和5年度の試験で予測されたデッドロックに対応するため、2台の草刈機が隣接する作業エリアで旋回エリアや施工エリアが重複する区域を「フィックスエリア」と設定し、走行状態・走行場所・フィックスエリアへの侵入の可否について2台が相互に共有し、走行制御するもので、1台がフィックスエリアに侵入した場合に、もう1台の草刈機は、先に侵入した草刈機がフィックスエリアから離脱するまでフィックスエリア手前で停止することで、デッドロックを回避する機能である。<図-18>

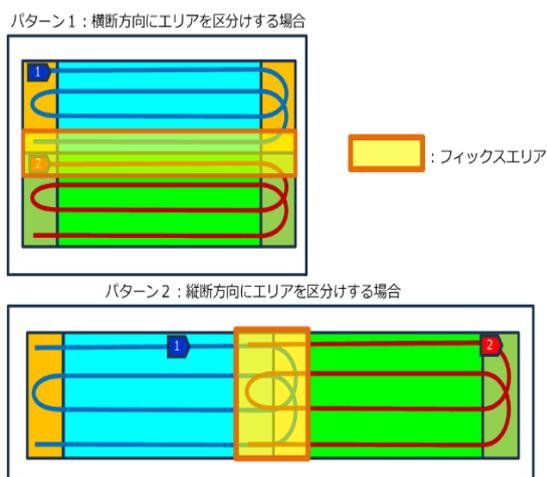


図-18 フィックスエリア

デッドロックが生じる現象を模擬的に再現し、本機能の動作確認を繰り返し行うとともにその他の安全機能等に悪影響を及ぼさないか検証を行った。

検証の結果、フィックスエリアでの草刈機の動作は設定どおりであり、本機能を用いることによりデッドロックを防止することを確認した。

### (3) 自動走行中断後の復旧

自動走行時に協調運転、接触防止機能動作時またはRCプロポの緊急停止ボタンを操作した場合、草刈機のエンジンが停止し、システムへの電源供給も停止する。

この場合、自動走行に復帰するためにはエンジンを起動し、システムへの電源供給を行ったうえで、走行経路を再度設定させる必要があり、停止位置から自動走行を再開するためにはエンジン停止時においてもシステムへの電源供給が必要であることがわかった。

電源供給のために、走行用バッテリーとは別に補助バッテリーを搭載することによりシステムへの電源確保ができ、自動運転時のメモリ・ログ等のデータを保持することが可能となり、エンジン停止状態からの自動走行を再開できることを確認した。

### (4) 周辺探知機能

人や車両をAI検知して衝突を防ぐ「周辺探知機能」の実装に向け、寒地土木研究所で開発された周辺探知技術システムを本システムに追加構築するため、システム設計及びプログラム製作を行った。

草刈機周囲20-50m内の人・車両等の接近を検知し、タブレットへの通知による注意喚起ができることを確認した。

しかし、草丈や繁茂状況によって人の身体の一部または大部分が隠れることで、検知精度が低くなることがわかった。

### (5) 除草自動化の生産性の評価

除草自動化による生産性向上を確認するため、工事施工業者のオペレータ2名を対象に除草面積(1,000m<sup>2</sup>)を施工する場合の自動運転と手動操作のサイクルタイムを比較した。

別エリア運転、スイッチバックの施工で20代男性作業員では、手動操作の施工時間が16分5秒、自動運転の施工時間は14分49秒となり、手動操作に対する自動運転のサイクルタイム比率は約0.92となった。60代男性作業員では、手動操作の施工時間が24分28秒、自動運転の施工時間は17分56秒となり、サイクルタイム比率は約0.73となった。

作業員の熟練度によって多少の差はあったが、自動運転時では手動運転よりも短い時間で作業を行えることが確認でき、本システムを使用することで生産性が向上していると考えられる。

## 5. まとめ

除草機械の自動化について、新たな要素技術として追加した、デッドロック防止機能、自動走行中断後の復旧及び周辺探知機能について、問題なく作動することを確認した。

今後の課題としては、方位検出技術の比較検証で使用したデュアルアンテナシステムについてバッファ遅延の影響を排除するために制御装置に直接測位情報を伝送できる測位演算ソフトを使用した上で評価を行う必要があると考えられる。また、周辺探知機能の検知精度の向上、検知物までの距離の取得について、ToFカメラやLiderを使用した検討の必要があると考えられる。

今後は今年度新たに追加した要素技術の検証をするとともに、方位検出技術の簡素化・廉価化を検証し実用化に向けてデュアルアンテナ(IMU内蔵型)等についても比較検討を行っていく。また、実働配備に向けた課題へ対応するため、方位検出技術の検討及び、導入に向けての運用上の課題の抽出や、操作指導・故障サポートなどの施工者の支援体制を構築していく予定である。

これら【SMART-Grass】の取組を引き続き進め、令和8年度の運用開始に向け、スマートで持続可能なインフラメンテナンスを目指していく。

謝辞：令和6年度の現場実証試験にあたり、北海道開発局旭川開発建設部旭川河川事務所よりフィールド提供及び試験実施に協力頂いた。ここに記して謝意を表する。