

ICT活用による堤防除草自動化技術の開発について

—堤防除草現場の省人化による生産性向上に関する取組—

事業振興部 機械課 ○東 陽一
小川 亮司
秋田 宜克

北海道は全国よりも人口減少が顕著であり、河川維持管理に従事する労働者不足が懸念されている。また、近年激甚化・多様化する災害に対し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ため、メンテナンスにかかる作業の省人化・効率化は喫緊の課題である。堤防除草自動化の取組「SMART-Grass」について、令和6年度までの検証結果を踏まえ今年度の検証・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

北海道は、全国よりも10年早く少子高齢化が進む中、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において、担い手不足が懸念されており、働き方改革と生産性向上は急務である。

また、近年の激甚化・頻発化する災害に対し、河川堤防（以下「堤防」という。）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。

堤防は、この機能を健全に維持するため定期的な除草が必要であるが、北海道開発局が管理する一級河川の管理延長は約1,850kmで除草面積は11,000haを超え、この除草作業には多くの労力と時間を要している。

北海道開発局では、これらの課題解決に向け、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) 堤防除草自動化の取り組み

現在の堤防除草は、現地の状況に応じて、トラクターモア、ハンドガイド式草刈機、大型遠隔操縦式草刈機（以下「草刈機」という。）、肩掛け式草刈機を用いて施工しており、各除草機械1台に1人以上の操作員が必要で

ある。堤防除草作業の生産性向上を目指すにあたり、現在の除草方法「レベル0」に対して、1人が複数台の除草機械を自動運転（以下「協調運転」という。）で運用する「レベル2」を本取組の目標として検討を進めた。図-1に本取組で設定した4段階の自動化目標レベルを示す。

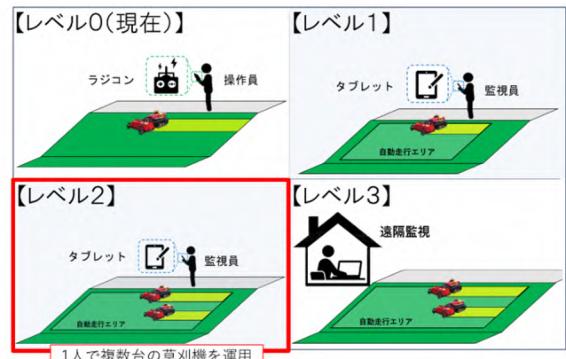


図-1 自動化目標レベル

(2) 除草機械の選定

本取組で使用する機械は、直轄河川の除草現場条件を基に、必要な登坂能力30度以上、除草幅1.5m以上とした。その他、除草能力、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を勘査した結果、草刈機が本取組に最も適した機械と判断した。草刈機の基本仕様を示す。〈表-1〉

(3) 除草機械自動化システムの概要

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、堤防における除草機械自動化システム（以下「自動化システム」という。）を作成した。

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

表-1 草刈機基本仕様

- 自動化システムは3つのプロセスで構成される。
- 【プロセス①】自動走行ルートや除草範囲を作成し、これらのデータを遠隔操作端末へ転送する。
- 【プロセス②】堤防除草の自動施工を実施すると共に、現地の監視員がリアルタイムで遠隔監視を行う。
- 【プロセス③】記録された施工履歴データを処理し、出来形管理帳票の自動生成・出力を行う。〈図-2〉

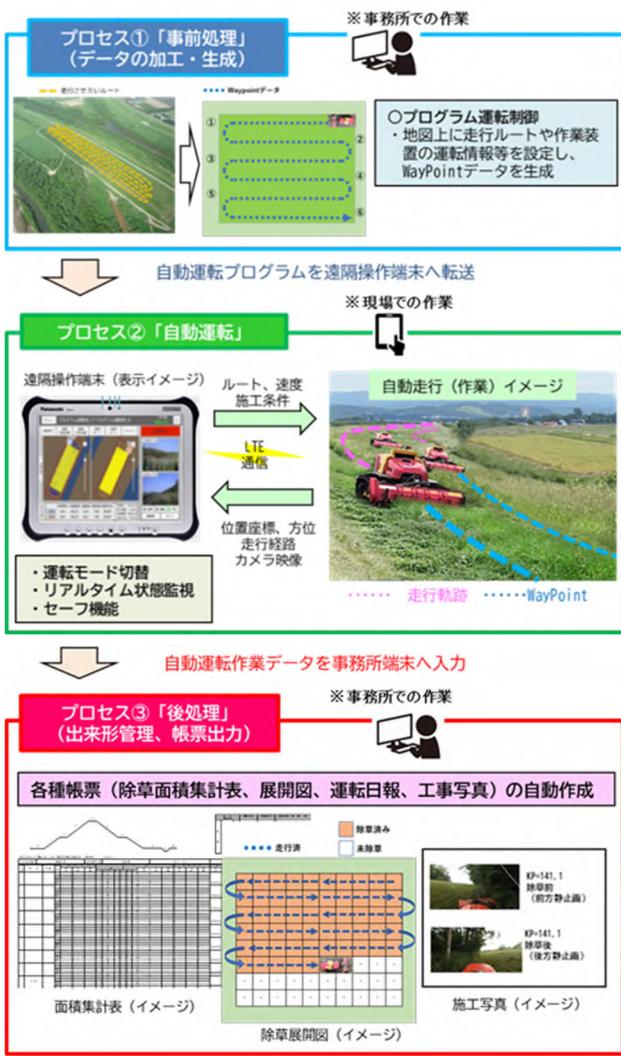


図-2 自動化システム概要

(4) 自動化システムの機器構成

自動化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」という。）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

いう。）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、電源装置で構成される。〈図-3,図-4〉



図-3 草刈機外観・機器構成

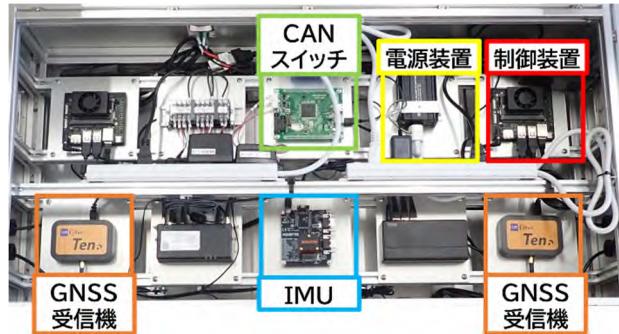


図-4 自動制御BOX内部

草刈機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（以下「CLAS」という。）に対応したGNSS受信機を使用した。自動運転中の進行方向は、IMUの方位検出データをBOXの左右に設置した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運転の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、走行経路等のステータス情報が0.1秒周期で送信される。

自動運転中の監視についてはBOXの前後に設置した監視カメラ映像をタブレットに表示することで、リアルタイムで進行方向の安全確認と後方の施工状況確認を可能とし、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を可能とした。

3. 過年度までの試験結果

令和3年度、平坦な試験場で機能確認、令和4年度、最大法勾配1:5の堤防で1台運転の試験を経て、令和5年度、同堤防で2台協調運転の試験を行った。

(1) 2台協調運転技術(走行精度)

1つの作業エリア内で同時に2台の草刈機の自動運転を行う「雁行運転」と2つの作業エリアでそれぞれ1台の草刈機の自動運転を行う「別エリア運転」の2パターンで、2台協調運転技術を試験した。〈図-5〉

雁行運転、別エリア運転ともに、自動走行ルートと実際の走行軌跡の平均誤差が許容値内の走行精度であることを確認した。

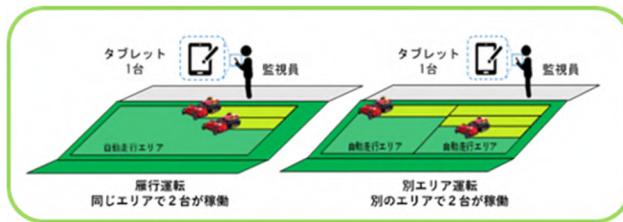


図-5 2台協調運転イメージ図

(3) 2台協調運転接触防止機能

協調運転時の草刈機同士の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し、2番車が減速、更に接近すると2番車を一度停止させ、1番車との距離が一定以上離れてから運転を再開させる機能を設けることにより、雁行運転では草刈機同士の接触を防止できることを確認した。一方、別エリア運転では2台の作業エリアが隣接している場合、2台の草刈機が向い合い、2台とも動作不能となるデッドロックという現象が発生することが判明した。〈図-6〉

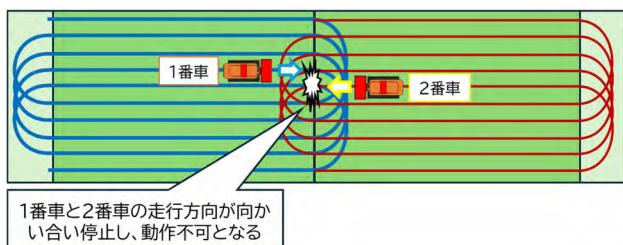


図-6 デッドロック現象

(4) 出来形自動計測及び工事用帳票出力機能

出来形を自動計測し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、工事用帳票に活用できる機能を設け、正常に動作することを確認した。出来形計測システムにて設定した20cmのメッシュサイズによる処理を行った面積と

実際の施工エリア面積を比較した結果、計測精度が99%以上であることを確認した。〈表-2〉

表-2 計測面積精度比較

計測パターン	計測面積精度比較		計測精度 (%)
	実際の設定施工エリア面積 (m ²)	システム計測面積 (m ²)	
1	860.2	859.8	99.95
2	860.2	859.6	99.93
3	716.6	716.3	99.96
4	716.6	716.2	99.82
5	860.2	859.8	99.95
6	860.2	859.6	99.93
計測面積精度平均値			99.92

(5) 安全対策機能

「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作動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、道内の堤防に多く過年度よりも急傾斜となる最大法勾配1:2の堤防において実施した。

(1) 方位検出技術の比較検証

現在使用の方位検出技術は、GNSS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2組と、高性能・高価格な高精度IMU1基の機器構成である。

GNSS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、高精度IMUよりも性能は劣るが小型軽量で安価な低価格IMU及びIMU内蔵型デュアルアンテナを用いて、現状の機器構成よりも簡素化かつ廉価化できる機器構成について、方位検出精度・価格・本体サイズを総合的に比較し検証を行った。〈図-7〉

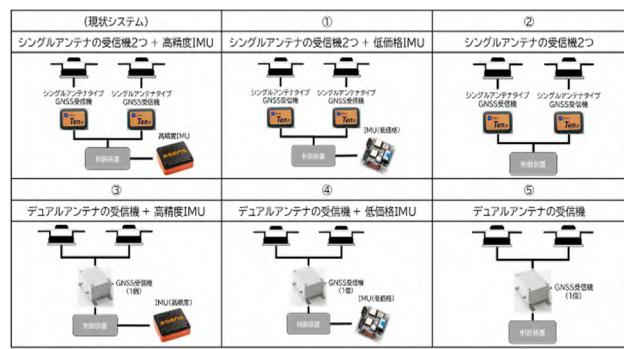


図-7 比較する機器構成のイメージ

現状の機器構成よりも簡素化及び廉価化を狙うことができる機器構成について、方位検出精度・価格・本体サイズを総合的に比較した結果、IMU内蔵型デュアルアンテナが走行精度を確保しつつ機器の個数削減及び合計金額の低減に有効であった。〈表-3〉

表-3 各機器構成の比較

	シングルアンテナ + 高精度IMU	シングルアンテナ + 低価格IMU	デュアルアンテナ + 低価格IMU	IMU内蔵 デュアルアンテナ
走行精度の平均誤差 (数値が低いほど高精度)	102mm	116mm	142mm	121mm
簡素化 (機器の個数削減)	5個 △	5個 △	4個 ○	3個 ◎
廉価化 (合計金額の低減)	現状 △	現状の約 $\frac{2}{3}$ ○	現状の約 $\frac{1}{3}$ ○	現状の約 $\frac{1}{5}$ ◎

(2) デッドロック防止機能

令和5年度の試験で判明したデッドロック現象に対応するため、プログラム製作を行った。

デッドロック防止機能は、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、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-8〉

縦断方向の作業エリア重複

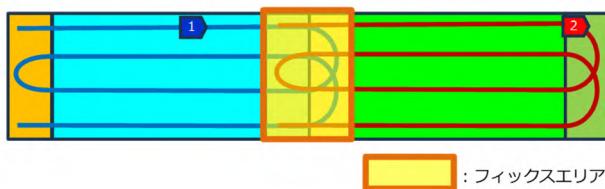


図-8 フィックスエリア

デッドロックが生じる現象を模擬的に再現し、試験を行った結果、本機能によりデッドロックを防止できることを確認した。

(3) 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、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地機械技術チームが開発した周辺探知技術システムを用いて、システム設計及びプログラム製作を行った。

試験では、草刈機周囲10~50m内の人・車両の接近を検知し、タブレットへの通知による注意喚起ができるこことを確認した。

しかし、検知精度の向上、検知物までの距離の取得方法について、引き続き検討の必要があると考えられる。

(4) 自動走行による法面への影響

自動運転の走行パターンは、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」、前後進の両方で除草する「スイッチバック」、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-9〉

試験の結果、スパイラル・ α ターンで走行した場合は履帶の旋回により表面の草が一部剥がれて法面の土が抉れてしまうことがあったが、スイッチバックで走行した場合は法面を損傷させづらく、最も優れていることを確認した。

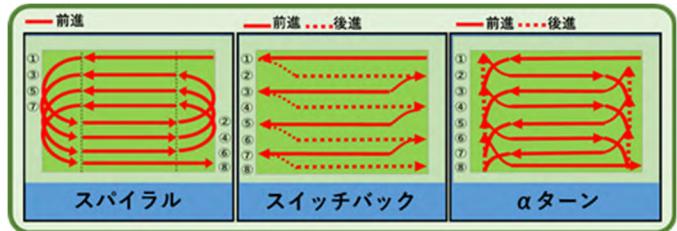


図-9 走行パターンイメージ図

(5) 堤防除草自動化の評価

堤防除草工事受注者の操作員を対象に、サイクルタイムの比較による堤防除草自動化の生産性の評価を行った。

草刈機を用いた施工における手動運転に対して、別エリア運転での2台協調運転のサイクルタイムを比較した結果、20歳代のサイクルタイム比率は約0.59、60歳代のサイクルタイム比率は約0.49となった。〈表-5〉

自動運転では1人で2台の運転が可能であるため、草刈作業中は操作員1名分の省人化が可能であること、出来形計測技術による除草後の出来形計測の自動化により、さらなる生産性の向上が期待出来る。

表-5 各機器構成の比較

操作員 年齢	手動運転	自動運転	比率 (手動/自動)
20歳代	16分05秒	9分33秒	0.59
60歳代	24分28秒	12分04秒	0.49

5. 今年度の取り組み

今年度は、試行工事として旭川開発建設部旭川河川事務所管内の堤防除草工事受注者による実作業現場における自動施工の実施及び令和6年度までの成果と課題を踏まえた現場実証試験を実施し、「除草自動化における自動運転開始条件の検討」「測位方式の自動切替の検討」「接触自動停止技術の検証」及び「周辺探知機能の検討」を行った。

(1) 除草自動化における自動運転開始条件の検討

草刈機が自動運転を開始するには、設定した作業エリアのスタート位置へ草刈機を手動で操縦する必要がある。

そこで、草刈機がスタート位置から離れた場所にあつた場合でも、本来のスタート位置まで自動走行し、自動運転を開始するシステムの検討を行った。〈図-10〉

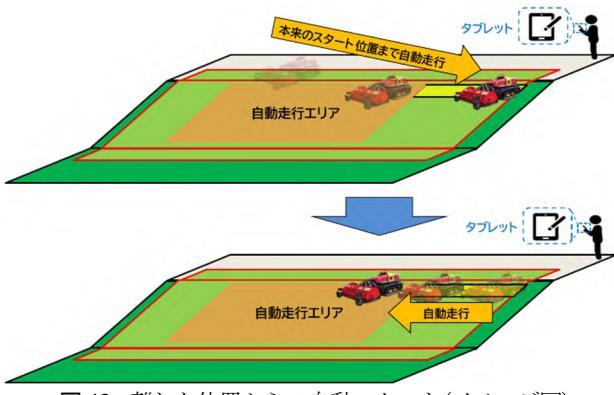


図-10 離れた位置からの自動スタート(イメージ図)

草刈機をスタート位置から離れた場所に配置し、スタート位置までの縦断方向の距離 (x) 、横断方向の距離 (y) 及び草刈機の角度 (θ) の三要素を変化させた11地点からスタート位置までの自動走行について動作確認を行った。〈図-11〉

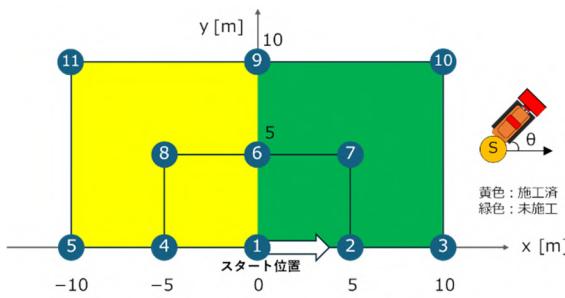


図-11 自動運転開始条件の検討方法

また、自動施工後のゴール地点から次の作業エリアのスタート位置まで自動走行し、スタート位置に到着と同時に自動運転が開始可能か検証した。

検証の結果、全ての地点からスタート位置へ自動走行可能であると確認できたが、草刈機がスタート位置に対して反対向きの場合、切り返す際にエリア逸脱によって自動走行が停止してしまうことが分かった。〈図-12〉

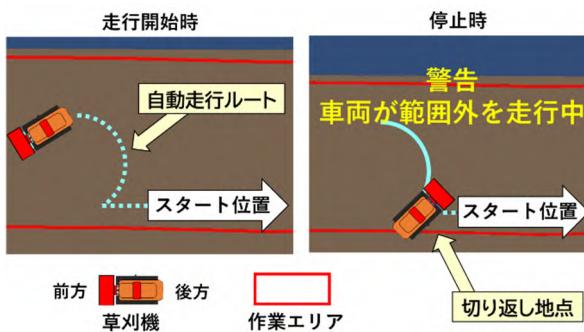


図-12 自動走行停止状況イメージ

(2) 測位方式の自動切替の検討

現状の自動化システムは、CLASからの補正情報が取得

不可になった際に自動運転が停止する。そのため、CLASが測位不良になった場合でもリアルタイムキネマティック（以下「RTK」という。）へ測位方式を自動切替することで、自動運転を停止させないようなシステムの検討を行った。〈図-13〉

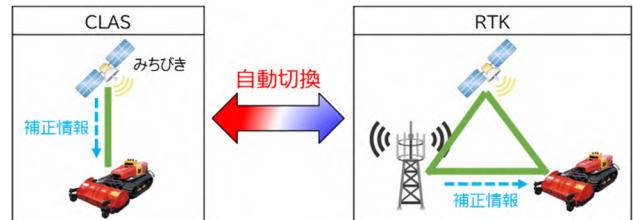


図-13 測位方式の自動切替(イメージ図)

CLASとRTKの自動切替に対応しているデュアルアンテナタイプのGNSS受信機を使用し、CLAS・RTK間の自動切替について自動運転にて動作確認を行った。CLASの測位状況が良好な場所に草刈機を配置、次にCLASが測位不良となる場所へ自動走行させ、再度、CLASが測位可能となる場所へ草刈機を自動走行させる。この一連の動作において、走行精度確認、CLASとRTKの自動切替が正常に動作するか検証した。〈図-14〉



図-14 CLAS測位不良想定場所

検証の結果、CLASとRTKの自動切替が正常に行われていることが確認できた。

(3) 接触自動停止技術の検討

自動運転中の草刈機が障害物と接触した際に、草刈機本体の故障防止を目的とした技術の検討を行った。

スプリング方式のバンパセンサを使用し、繁茂したイタドリ等では停止せず、地面に固定された杭や構造物などの障害物に接触した場合にのみ停止するバンパセンサの設計を行った。〈図-15〉

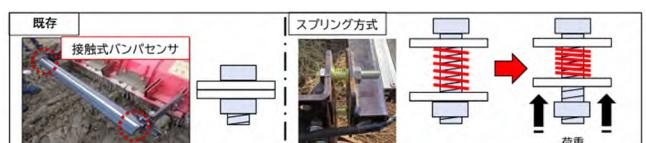


図-15 バンパセンサ (スプリング方式)

センサの動作確認のため、草刈機が静止時に人力でバンパセンサを押してセンサが反応するまでの「静的荷重」の測定、バンパセンサに使用するスプリングのばね定数を選定するため、草刈機を走行させてバンパセンサにイタドリ・杭が衝突した際の「動的荷重」について、ひずみゲージを用いた荷重測定を実施した。

試験の結果、センサが反応する荷重が確認できた。また、ばね定数 6N/mm のスプリングを使用することで、イタドリで停止せず走行し、杭で停止することが分かった。

(4) 周辺探知機能の検証

昨年度の課題であった周辺探知機能の検知物までの距離の取得について、ステレオカメラ及びミリ波レーダを使用した検証を行った。

検証案①草刈機と検知物が停止状態の場合、検証案②草刈機が移動状態で検知物が停止状態の場合、検証案③草刈機と検知物の両方とも移動状態の場合について、草有無の条件下において、検知物（人、自転車、車両）までの距離取得精度を確認した。〈図-16〉

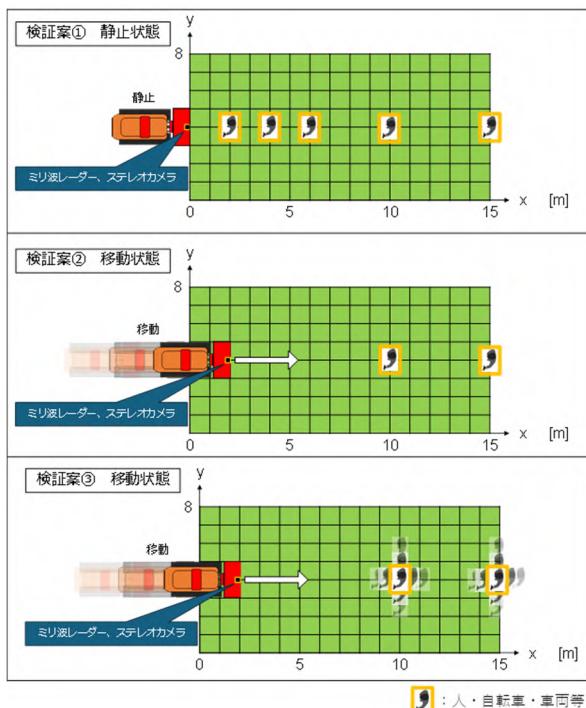


図-16 周辺探知機能の検証方法

検証の結果、ステレオカメラ・ミリ波レーダとともに検知物までの距離取得は可能であると確認できた。また、草の有無、検知物の種類、検知物までの距離によって距離の取得率が変動することも確認できた。

7. まとめ

堤防除草自動化技術の実用化に向けて、維持工事受注者による試行工事を実施するとともに、過年度に判明した課題に対して課題改善を図るため、現場実証試験を行った。

除草自動化における自動運転開始条件の検討では、スタート位置へ自動走行可能であることが確認できた。しかし、一部の自動走行開始角度によっては、自動走行の途中停止が確認されたため、安定性向上に向けて引き続き検討したい。

測位方式の自動切替の検討は、切替の正常動作確認が出来た。実工事で活用し、継続して状況確認を行いたい。

接触自動停止技術の検討は、イタドリでは停止せず、杭で停止する技術が確認できた。今後、イタドリを含む荷重が大きい現場植生に対して走行停止せず、杭等の固定物で停止するバンパセンサに適切なスプリングばね定数の検証を行いたい。

周辺探知機能の検討では、距離検出が可能な技術の確認が出来た。草あり条件下では接触自動停止技術との棲み分けを考えつつ、実現場で必要な距離における検知精度を有する最適な技術の確立に向け、引き続き検証を行いたい。また、距離検出による自動停止機能の検討も行いたい。

今年度の試行工事において、抽出した自動施工の課題及び現場実証試験の結果を踏まえ、令和8年度に向けて、自動化システムの現場適応性向上を目指して引き続き検討を行っていく。

これら堤防除草自動化の取組を引き続き進めていき、スマートで持続可能なインフラメンテナンスの早期実現を目指していくものとしたい。

謝辞：令和7年度の試行工事及び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。

参考文献

- 1) 令和7年度 建設施工と建設機械シンポジウム：ICT 活用による堤防除草自動化技術の開発について
- 2) 第68回（2024年度）北海道開発技術研究発表会論文：ICT 活用による堤防除草現場省人化技術の開発に向けて