

13. 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

北海道開発局事業振興部機械課○ 小川 亮司
秋田 宜克
東 陽一

1. はじめに

北海道は全国よりも人口減少や高齢化が進行しており、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り、インフラ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。

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いる。堤防機能を健全に維持するには目視点検を実施するため定期的な堤防除草が必要となる。北海道開発局が管理する一級河川13水系における管理延長は約1,850kmと、国が管理する全河川堤防の約21%にあたる。また、泥炭層が広く分布する軟弱地盤地帯には、法勾配1:5~1:10の堤防（丘陵堤）が整備されている。図-1

全道で除草が必要な堤防の面積は10,000haを超え、除草作業には多くの労力と時間を要しており、河川堤防除草の省人化・効率化に向け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。

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実証試験について紹介する。



図-1 石狩川の丘陵堤の例

2. 堤防除草の自動化検討（SMART-Grass）

2.1 自動化目標レベル

現在、河川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等を用いて施工しており、この操作は1台につき1人作業員が必要である。河川堤防除草作業の生産性向上を目指すにあたり、現在の除草方法を「レベル0」とし、1人が複数台の除草機械を運用する自動運転「レベル2」を本取組の目標として検討を進めた。図-2

2.2 自動化除草機械の選定

直轄河川の除草現場条件を基に、必要な除草法面勾配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案した結果、大型遠隔操縦式草刈機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示す。表-1

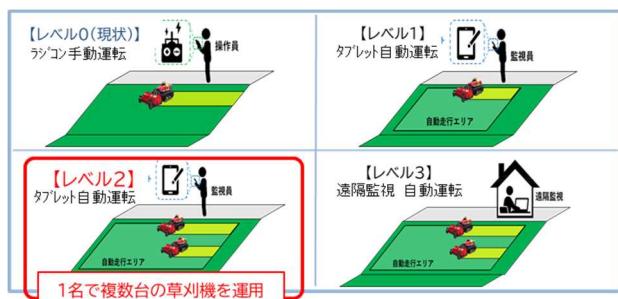


図-2 自動化目標レベル

表-1 草刈機基本仕様

全長×全幅	4,450mm×2,040mm
刈幅	1,850mm
質量	3,000kg
走行速度	0~6km/h
最大除草法面勾配	40度

2.3 除草機械自動化システム概要

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、河川堤防における除草機械自動化システム概要を作成した。図-3

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。

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ハンドガイド式草刈機及び大型遠隔操縦式草刈機にて実施する施工実態を調査し、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」、前進のみで走行、旋回を行う「スパイラル」を選択出来るようにした。図-4

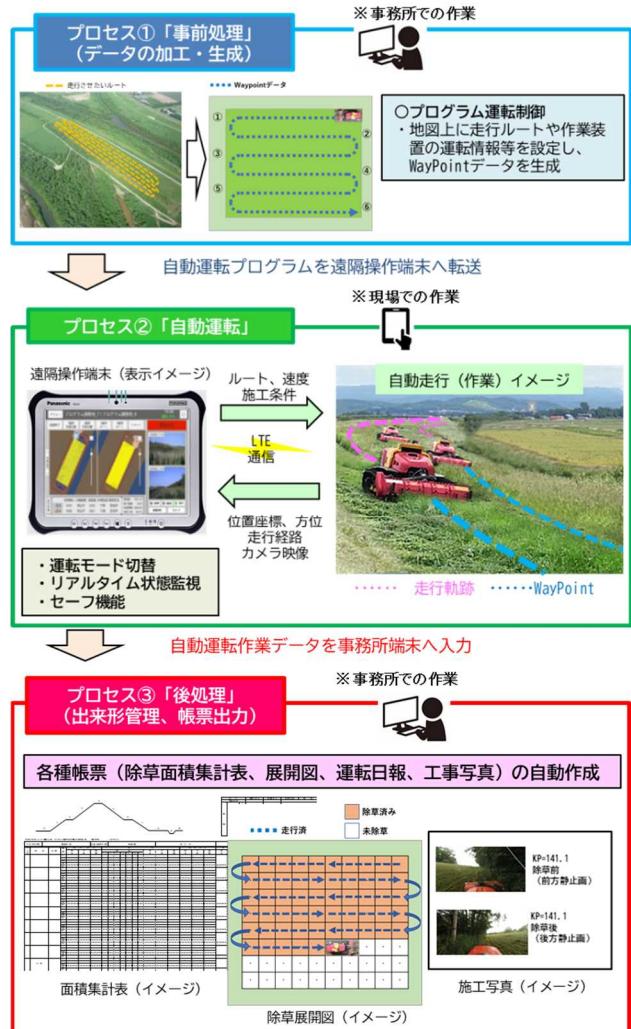


図-3 除草機械自動化システム概要

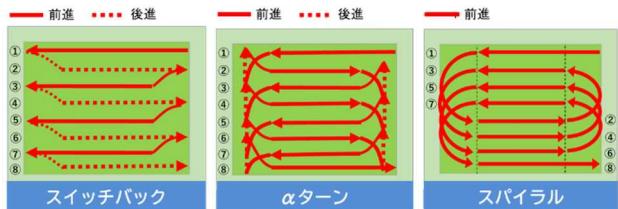


図-4 自動走行パターンイメージ

2.4 除草機械自動化システムの機器構成

除草機械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、電源装置で構成される。図-5、図-6

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」のセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)に対応したGNSS受信機を使用した。また、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。

自動走行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。



図-5 大型遠隔操縦式草刈機外観・機器構成

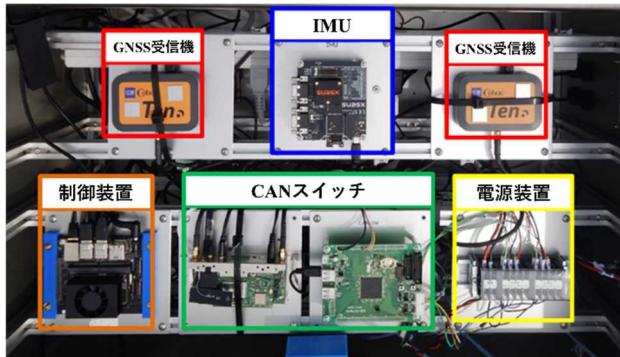


図-6 自動制御 BOX 内部

3. 除草機械 1 台による自動化システム走行試験

3.1 実験フィールドによる機能及び動作確認

令和 3 年度に自動化システムを試作し、平坦な実験フィールドにて草刈機 1 台による自動走行、セーフ機能及び出来形管理帳票生成のための出来形計測技術の確認実験を行った。

自動走行では「スパイラル」による直進性及び旋回性の確認を 2.0km/h, 4.0km/h の条件にて実施、刈り残し防止のためラップ幅を 500mm としていることから自動走行ルートと実走行軌跡に対する直角方向のズレ幅（以下、「誤差」という）の目標値をラップ幅の半分に相当する 250mm とした。

4.0km/h の条件下では直線区間で目標値を超える蛇行が発生、旋回部分では両速度とも大きく目標値を超える結果となった。自動走行プログラムは施工エリアに配置された経由地点を通過するようルート計算を行っており、設定した自動走行ルートから外れた場合は次の経由地点を目指した走行となるため、結果、自動走行ルートと実走行軌跡のズレ幅が大きくなつたと考えられる。図-7

セーフ機能は、タブレットによる緊急停止操作と自動走行中の施工エリア逸脱時の自動停止機能について、2.0km/h, 4.0km/h それぞれの条件下で約 1 秒以内に停止する結果を確認した。

出来形計測技術では、除草対象となる施工エリア面積をメッシュで区切り、草刈機がメッシュ中心位置を通過した部分を除草済範囲として、自動走行したルートを反映した除草出来形展開図が生成されていることを確認した。図-7

3.2 河川堤防による現場実証試験

令和 4 年度は自動走行時の走行精度及びセーフ機能の現場実証試験を、直轄管理する河川堤防（法勾配 1:5, 1:10）にて、「スパイラル」「スイッチバック」「α ターン」の自動走行パターンで実施した。試験場所における植生は 60～200cm 程度のヒメシバやススキ等多種多様な草が繁茂する区域であった。

令和 3 年度に確認した自動走行の誤差について、自動走行ルートの各経由地点に向けて走行し、経由地点が近づく度に目標の経由地点を更新してい

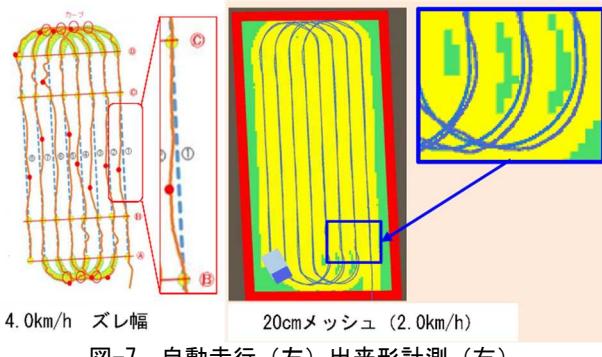


図-7 自動走行（左）出来形計測（右）

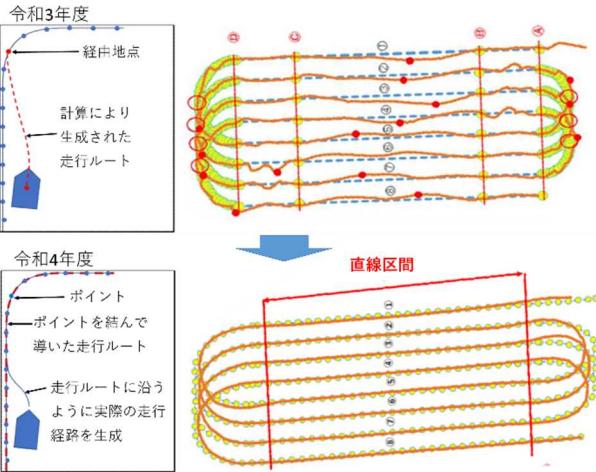


図-8 令和 4 年度 自動走行結果

く方式としていたものを、自動走行の開始地点から終了地点まで順にポイントを結んで導いた自動走行ルートとの誤差が最小となるよう改良したことにより自動走行精度が向上、4.0km/h, 6.0km/h で試験を行つた結果、目標値を下回ることを確認した。図-8

スパイラルのほか全ての走行パターンの直線区間にについても目標値内に収まることを確認した。

4. 自動化システム協調運転実証試験

令和 5 年度に自動化目標レベル「レベル.2」に向け自動化システムを改良し、直轄河川堤防で 2 台協調運転技術の検証を行つた。

協調運転については、1 つの作業エリア内で同時に 2 台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 台で自動運転を行う「別エリア運転」の 2 パターンを設定した。図-9

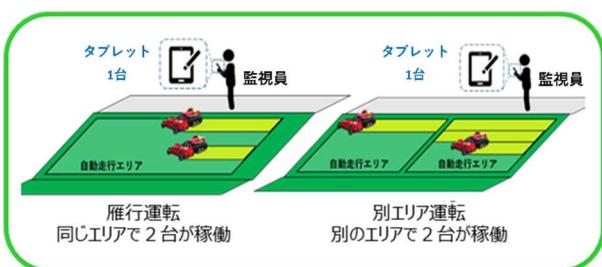


図-9 2 台協調運転パターンイメージ

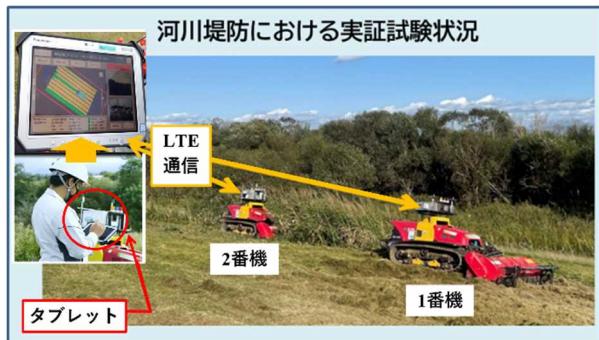


図-10 河川堤防における協調運転実証試験状況

試験内容として「協調運転技術(走行精度)確認」「自動運転追加機能(エンジンストール防止, 協調運転接触防止)確認」「出来形計測技術の確認」の項目を設定した。

試験条件は2パターン(法勾配1:5, 1:10)の堤防法面勾配に複数の施工エリアを設定、協調運転パターンを2種類(雁行運転, 別エリア運転), 自動走行パターンを3種類(スイッチバック, α ターン, スパイラル), 走行速度は4.0km/h, 6.0km/hで設定した。

なお、自動化システム2台協調運転技術の制御を行う上で最初に走行する草刈機を1番機, 次に走行する草刈機を2番機と定義する。図-10

4.1 協調運転技術(走行精度)確認

試験の結果、走行精度については雁行運転、別エリア運転ともに各自動走行パターンにおいて、自動走行ルートと実際の自動走行軌跡の平均誤差は目標値 ± 250 mmの範囲内であることを確認した。

また、自動運転時に多少の蛇行が発生した場合でも、最大誤差は目標値 ± 250 mmを超えないことを確認した。図-11

4.2 自動運転追加機能(エンジンストール防止)

イタドリやススキなどの草が繁茂している場所の自動運転では草刈機に高い負荷がかかるため、エンジン回転数の低下によるエンジンストールの発生を確認した。この場合、すべての機能が停止するため復帰にはエンジンを手動で再スタートした上で、自動運転の再設定が必要である。これに対応するため、エンジン回転数の低下(1,900rpm以下)を検知した場合、走行を減速・停止し、草刈作業による負荷を一時的に軽減させることで、エンジン回転数の回復を図るエンジンストール防止機能を構築、この機能によ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。

4.3 自動運転追加機能(協調運転接触防止)

協調運転(雁行運転)による草刈作業では2台が同じエリアで草刈作業を行うため、草刈機同士が近づいた場合に接触を回避するための対策が必要である。

この対策として、2台が一定距離以内に近づいた場合、監視員に対しタブレットで警告を発する

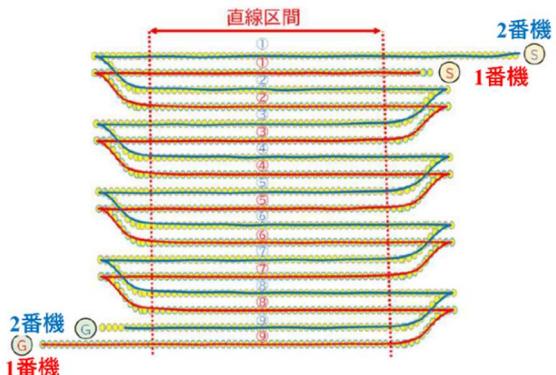


図-11 協調運転(スイッチバック)走行軌跡

プログラム上で車両間の中心(座標位置)14m以上20m以下になるように設定
 ・14m以下になると2番車(後続車両)が減速
 ・20m以上になると1番車(先頭車両)が減速

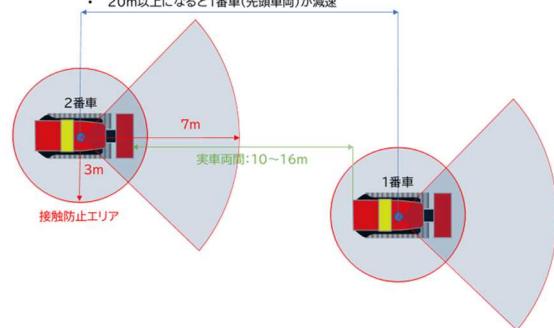


図-12 協調運接觸防止機能

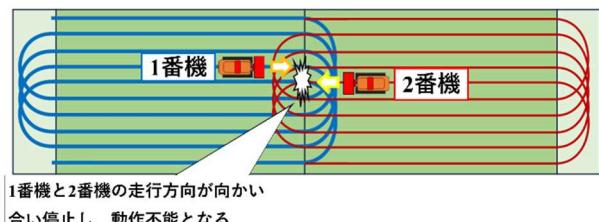


図-13 自動走行不能(デッドロック)状態

と同時に2番機が減速、更に接近を確認すると先行している1番機の運転を継続した状態で2番機をその場で一度停止、1番機との距離が一定以上離れてから2番機は徐々に速度を上げ、運転を再開させることで接触を防止できる協調運転接觸防止機能を構築、この機能により接觸を防止出来ることを確認した。図-12

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、重複区間で衝突を防止するため一時停止することがあるが、互いの進行方向が向かい合う時は自動走行不能(デッドロック)となる事が判明した。図-13

4.4 出来形計測技術の確認

出来形計測技術にて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、工事用帳票に活用できる電子データを作成する出来形計測システムを構築した。

表-2 計測面積精度比較

計測面積精度比較			
計測パターン	実際の設定施工エリア面積 (m ²)	システム計測面積 (m ²)	計測精度 (%)
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

また、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

5. 運用に向けた実証試験

令和 6 年度は平坦な実験フィールドでの「非矩形エリアでの走行検証」のほか、直轄河川堤防において機器構成の簡素化や廉価化に向けた「方位検出技術の比較検証」及び前年度判明した 2 台協調運転における「デッドロック防止機能」の試験を行った。

「方位検出技術の比較検証」及び「デッドロック防止機能」の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急な傾斜地において自動走行精度を検証するため、最大法勾配 1:2 (26.6 度) の直轄河川堤防を選定した。

5.1 非矩形エリアでの走行検証

直轄河川堤防の除草現場条件を模した矩形以外のエリアでの自動走行について、スイッチバック動作による単独運転及び雁行運転にて検証を実施、いずれも自動走行が可能であることを確認した。

単独運転での除草エリア面積に対する実除草面積の割合（以下、「刈取率」という）は 90%，雁行運転では 87.4% の刈取率であった。図-14

5.2 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（以下、「シングルアンテナ」と言う）と、測定性能が高く高価格な IMU（以下、「高精度 IMU」と言う）1 基の機器構成である。

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、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、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-15

現状システムのシングルアンテナ+高精度 IMU は過年度の試験結果より刈取率は 99% 以上であり

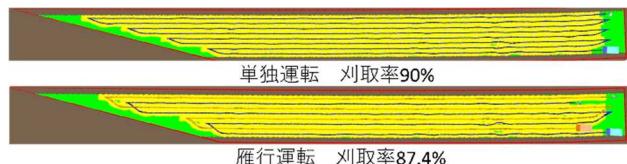


図-14 非矩形エリア刈取率

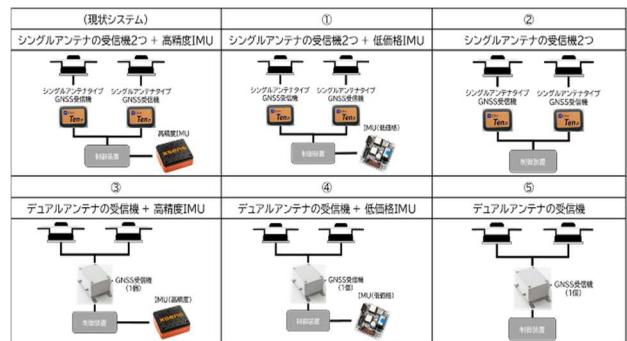


図-15 方位検出技術の比較

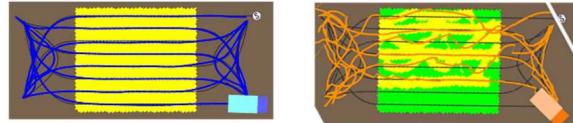


図-16 低価格 IMU 経路ズレ

使用可能と考えられる。

①、④の低価格 IMU を用いた場合、シングルアンテナ、デュアルアンテナ共に走行を重ねる毎に本来の自動走行ルートから逸脱することが確認された。図-16

②、⑤の IMU を用いない場合においてシングルアンテナは誤差の目標値内で刈取率 99% 以上となったが、デュアルアンテナでは刈取率 94% 以上で直線及び旋回において大きく蛇行することが確認された。

③のデュアルアンテナ+高性能 IMU において刈取率 97% 以上となったが直線において蛇行することが確認された。

①、④における自動走行ルートからの逸脱原因是使用した低価格 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。このため繰り返し走行により地面が掘れ起伏振動が大きくなるにつれて測定誤差が蓄積され、正確な方位検出が出来なくなつたと考えられる。

③、⑤におけるデュアルアンテナによる蛇行の原因として、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る。自動化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。

表-3 IMU 内蔵デュアルアンテナ

パターン	スイッチバック		α ターン		スパイラル	
誤差 (mm)	平均	最大	平均	最大	平均	最大
	88	169	90	143	83	153
全平均	121					

表-4 機器構成比較表

	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)	5個 GNSSアンテナ×2 GNSS受信機×2 IMU×1	5個 GNSSアンテナ×2 GNSS受信機×2 IMU×1	4個 GNSSアンテナ×2 GNSS受信機×1 IMU×1	3個 GNSSアンテナ×2 GNSS受信機×1
廉価化	現状	現状の約 $\frac{2}{3}$	現状の約 $\frac{1}{3}$	現状の約 $\frac{1}{5}$

①～⑤とは別に、機器構成の簡素化及び廉価化として、平坦な実験フィールドにてIMU内蔵型デュアルアンテナの検証も行った。

走行速度は6km/hで設定、検証の結果、各自動走行パターンにおいて誤差の目標値±250mmを超えないことを確認した。表-3

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総合的に比較し、IMU内蔵型デュアルアンテナが走行精度を確保しつつ簡素化及び廉価化に有効であると考えられる。

表-4

5.3 デッドロック防止機能

2台の草刈機が隣接する作業エリアにおいて、縦断方向や横断方向で作業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有無について2台が相互に共有し走行制御することで、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機能を構築した。図-17

この機能により縦断方向及び横断方向共にデッドロックを回避出来ることを確認した。

6. 堤防除草自動化の評価

堤防除草自動化の評価として、サイクルタイムの比較による生産性の評価を行った。

サイクルタイムには堤防除草工事受注者の操作員を対象に、大型遠隔操縦式草刈機を用いた施工における手動運転と別エリア運転のスイッチバック動作での2台協調自動運転を比較した結果、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。

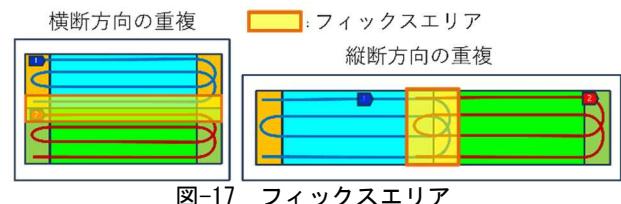


図-17 フィックスエリア

表-5 サイクルタイム(一人 1000m2 当たり施工)

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

7.まとめ

堤防除草の自動化について、2台協調運転による走行精度及び安定性、自動運転時のデッドロック防止機能、自動運転追加機能(エンジンストール防止、協調運転接触防止)及び出来形計測技術の実用性を確認することが出来た。

自動運転及び出来形計測技術により、作業中の操作員及び出来形計測に必要な人員の省人化へ繋がる事から、生産性向上のほか人件費のコストメリットが期待できる。

方位検出技術において自動走行の高精度化、機器構成の簡素化及び廉価化を目的としてIMU内蔵型デュアルアンテナの有効性を確認したが、平坦なフィールドでの検証であったため、河川堤防現場などにおいて傾斜による影響の確認が必要である。低価格IMUはデータ遅延による走行ルート逸脱が見られたが、廉価化を考慮し走行パラメータ(最大旋回加速度、最大旋回速度、目標地点への到達判断など)の設定値の調整による自動走行精度向上の検討が必要と考える。

今後は、試行工事として堤防除草工事受注者による堤防除草現場において自動運転の実施、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、令和8年度の運用開始を目指して新たな課題の抽出のほか、安全対策や操作マニュアル等の施工者の支援体制を構築していく予定である。

これら堤防除草自動化の取組を引き続き進め、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す。

参考文献

- 1) 東・三浦・石道:ICT活用による堤防除草現場省人化技術の開発に向けて、第68回(2024年度)北海道開発技術研究発表会論文