

【SMART-Grass】大型遠隔操縦式草刈機による 堤防除草の自動化に向けて —ICTを活用した堤防除草の生産性向上に関する取組—

事業振興部 機械課 ○齊藤 成邦
田中 克彦
佐藤 裕樹

令和2年度に河川堤防の維持管理における生産性向上のため、ICT（情報通信技術）を活用した堤防除草作業の自動化を進めるワーキンググループ「SMART-Grass」が発足した。本取組でこれまでに実施した、除草機械の自動運転、出来形の自動計測等の技術開発や実証実験状況を紹介するものである。

キーワード：SMART-Grass、除草機械、自動運転、ICT、インフラDX

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産業の担い手確保・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、雨水や洪水流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に及び、国が管理する全河川堤防の20%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。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、この除草にかかる費用は、河川事業における維持費の3割を占める。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

紹介する。



図-1 石狩川の丘陵堤の例（試験現場）

2. 堤防除草の自動化検討（SMART-Grass）

(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、肩掛け式草刈機を用いて施工しており、各除草機械1台につき1人の作業員が必要である。また、除草後の出来形計測作業である、刈高計測・横断測量・写真撮影は、3人程度で実施している。横断測量は200m毎の測量で10測点当たり3～4時間程度、出来形数量の算出は、横断測量結果と横断図を基に平均断面法により除草面積を算出しており、1～2時間程度の時間を要する。

河川堤防除草作業の生産性向上を目指すにあたり、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った。現在の除草方法を「レベル0」、1人が1台の除草機械を管理する自動運転を「レベル1」、1

人が複数台の除草機械を管理する自動運転を「レベル2」、現地を無人とする自動運転を「レベル3」と設定し、本取組における当面の目標を「レベル2」として、以後の検討を進めた。〈図-2、図-3〉



図-2 堤防除草の自動化イメージ

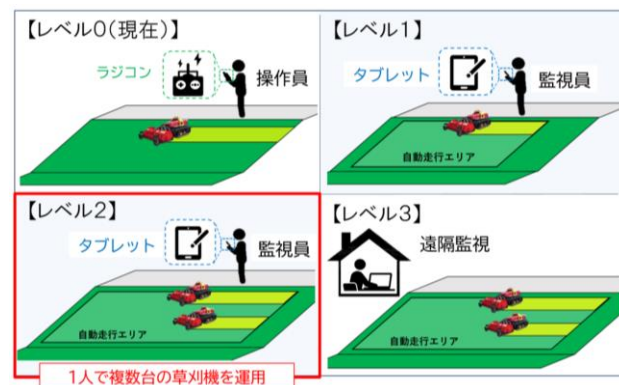


図-3 設定した自動化目標レベル

(2) ベースマシンの選定

本取組で使用する除草機械は、国土交通省が多数（約260台）保有し堤防除草で使用している大型遠隔操縦式草刈機 CG750（株）筑水キャニコム製）を基本にしながら、市場動向調査で把握した他機種と比較して自動化に適した機種の選定を行った。

従来の施工実態より、直轄河川における機械除草では、法面勾配が1：2以下、標準的に使用されている除草機械は除草幅1.5～1.85mであったため、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、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、保有形態等を比較検討した結果、大型遠隔操縦式草刈機 CG750（以下、「草刈機」と言う）が本取組に最も適したベースマシンと判断した。ベースマシンの基本仕様を〈表-1〉に示す。

表-1 CG750 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
最大自走法面勾配	40度

(3) 除草機械自動化システム

従来の除草作業の施工実態から、システム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。自動化システムは3つの項目で構成される。【①事前処理システム】を用いて自動運転走行ルートや除草範囲を作成し、それらのデータを草刈機に搭載した【②遠隔操作システム】へ送信・登録する。

【②遠隔操作システム】は堤防除草の自動施工を実施すると共に、リアルタイムで遠隔監視を行う。堤防除草作業の完了後は、【②遠隔操作システム】に記録された施工履歴データを【③後処理システム】でデータ処理し、出来形管理帳票等の自動生成・出力を可能とする。

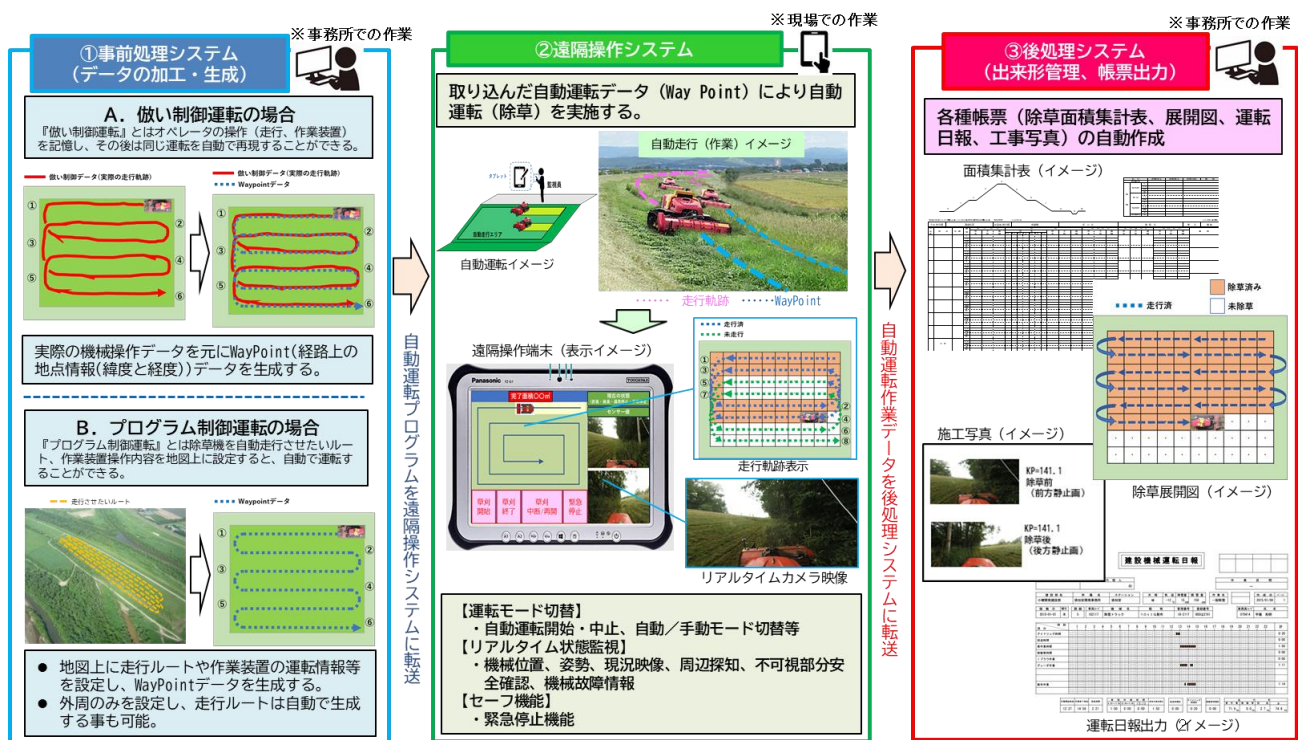


図-4 除草機械自動化システム概要

自動走行パターンは、北海道開発局の河川維持工事に実際に使用されている草刈機の旋回方法である、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、自動化実現に際し適していると、本検討で新たに考案した前進のみで走行する旋回方法「1本飛ばし」を選択出来るようにした。〈図-5〉

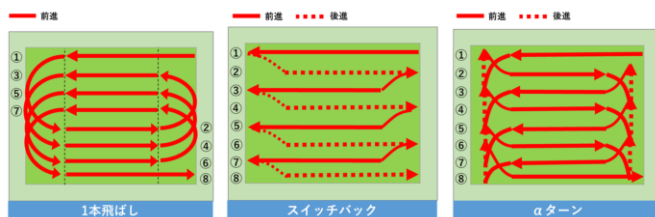


図-5 走行パターンイメージ図

(4) 実証試験に使用した試験機

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、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。制御BOXは、GNSS受信機やIMU(加速度・角速度計)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、ベースマシンへ走行指示信号等を通信するCANスイッチ等で構成される。〈図-6、図-7〉

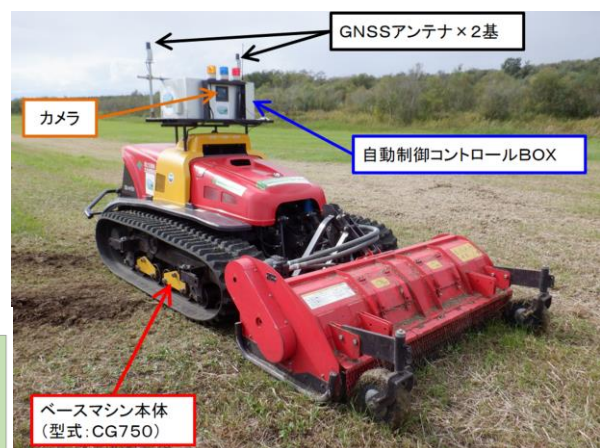


図-6 試験機

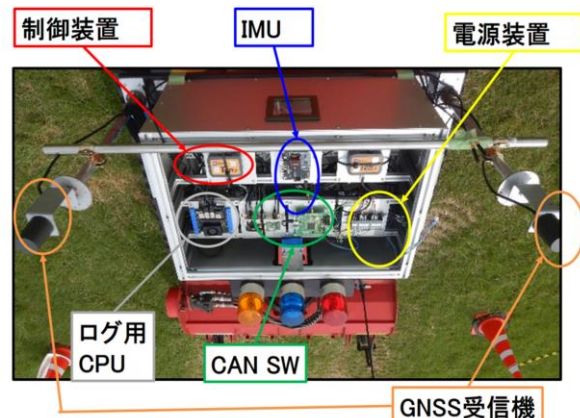


図-7 自動制御BOX

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サービス（CLAS）に対応したGNSS受信機を採用した。さらに、GNSSアンテナを2個搭載し、アンテナの相対位置を同時刻に測位することで、機械の走行方向把握精度を高めた。

自動走行中の進行方向については、GNSSとIMUから得られるデータを処理して方位を検出している。これによりGNSSの測位精度が低下した場合に方位が大きくずれることを軽減することが出来る。

また、自動走行中の監視については、制御BOXの前後に監視カメラを搭載しており、タブレットで進行方向の安全確認と後方の施工状況確認をリアルタイムで監視することが可能である。

(5) 試験機の通信方法

タブレットと制御BOXの通信はLTE回線を用いており、タブレットから制御BOXへの送信は、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/停止の操作信号である。また、制御BOXからタブレットには、自己位置座標、時刻、方位、走行経路等のベースマシンのステータス情報が100ミリ秒周期で送信される。

(6) 安全対策機能

緊急停止機能として「タブレット操作による停止機能」及び事前に設定する「施工エリア逸脱時の自動停止機能」を搭載した。これに加え、元々ベースマシンにある、本体のスイッチや操作プロポによる緊急停止も可能である。

(7) 出来形計測の自動化

出来形計測の自動化は、草刈機の除草幅と自動化システムから得られる走行軌跡データを用いて出来形展開図を作成し、除草面積を自動算出する。また、除草後の状況は、記録された監視カメラの映像より確認することが出来る。

試験において、タブレットに表示される出来形展開図及びカメラ映像による除草後状況の確認を行い、正常に動作することが確認できた。〈図-8〉

現在は、【③後処理システム】を構築し、実証試験データから出来形管理帳票を出力するプログラムの作成中である。

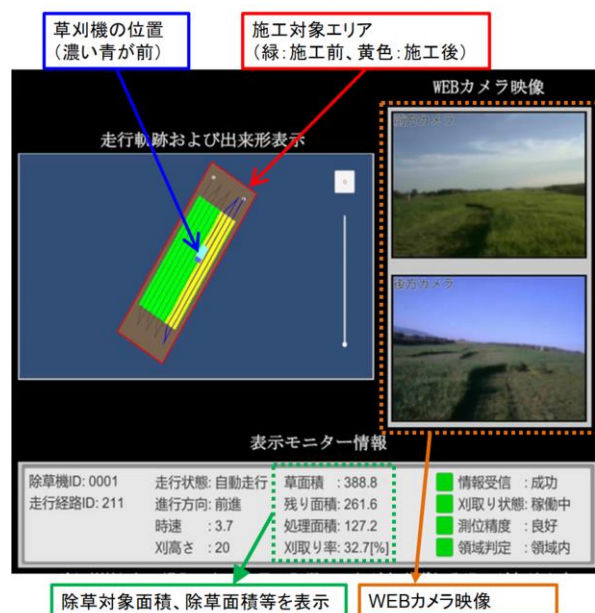


図-8 タブレットの画面表示

3. 令和3年度及び令和4年度の自動走行試験

令和3年度は、自動化システムの【②遠隔操作システム】を試作し、勾配の無い平坦な試験フィールドにおいて、試作機1台による自動走行及び安全対策の機能確認試験を実施した。走行パターンは「1本飛ばし」、走行速度は2km/h及び4km/hで試験を行った。

令和4年度は、前年度に引き続き勾配の無い平坦な試験フィールドにおける機能確認試験に加え、岩見沢河川事務所が管理する5割勾配及び10割勾配の河川堤防で現場実証試験を行った。走行パターンを「1本飛ばし」のほか、「スイッチバック」及び「αターン」を追加した3種類で実施、走行速度は、ベースマシンの最高速度である6km/hと4km/hの2種類として、各走行パターン及び速度において自動走行を行った。現場実証試験地における植生は、60cm程度のヒメシバが繁茂している区域と65～200cm程度のススキ等多種多様な雑草が繁茂する区域であった。

令和3年度から令和4年度の試験より、自動走行における走行ルート精度及び安全対策機能の確認や検証を行った。

(1) 傾斜の無い平坦な地における自動走行ルート精度の検証

令和3年度の自動走行プログラムは、施工エリアに配置された目標ポイントを通るようにルート計算を行っている。その為、草刈機が走行すべきルートから外れ、ルート修正する場合、次のポイントを目指した走行になり、実走行軌跡と設定された走行ルートに対する直角方向のズレ幅（以下、「誤差」と言う）が大きく、蛇行す

ることが多く見られた。これを踏まえ、令和4年度は、目標ポイントを目指す走行ではなく、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ルートとの誤差が最小となるように自動走行するプログラムへ改良した。〈図-9〉 その結果前年度に比べ、傾斜の無い平坦な場所における誤差は少なくなり、自動走行精度が向上する結果となった。

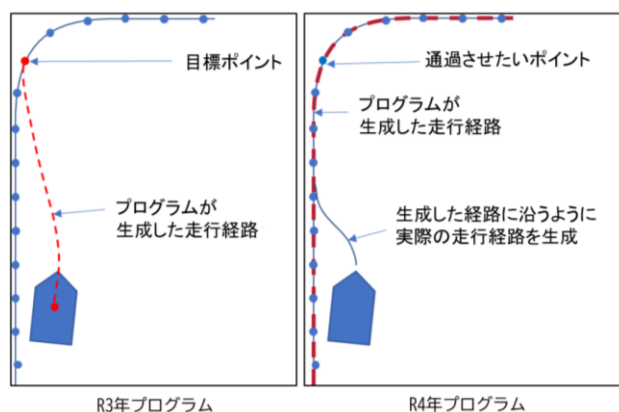


図-9 令和3年度、令和4年度の自動走行プログラム

令和3年度の平均誤差は目標値 $\pm 250\text{mm}$ に収まる値であったが、最大誤差は目標値を超える箇所が多数発生した。特に目標ポイントが少ない直線部で蛇行した走行が見られ誤差が多い結果であった。それに対して、令和4年度の試験は誤差が減少すると共に蛇行した走行は見られず、最大誤差も直線部は全て目標値 $\pm 250\text{mm}$ をクリアしており、カーブ区間も概ね目標値を満足することができた。〈図-10, 表-2〉

また、傾斜の無い平坦な場所かつ「1本飛ばし」以外の走行パターンにおいても全ての試験条件で平均誤差は目標値をクリアしており最大誤差はカーブの一部以外で目標値を満たしていた。

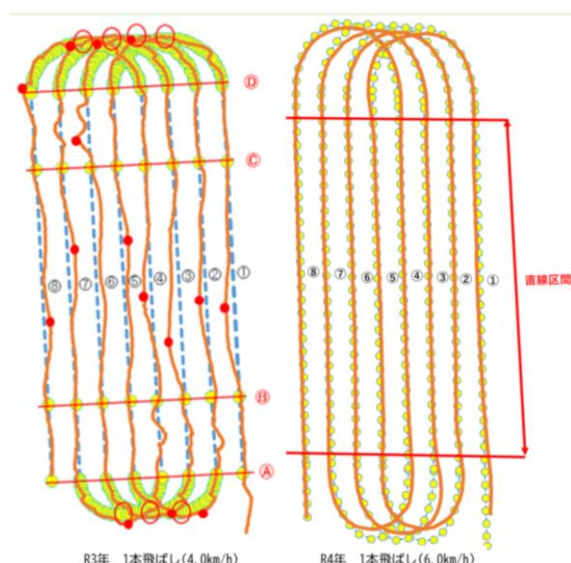


図-10 令和3年度、令和4年度の自動走行ルート精度比較

表-2 令和3年度、令和4年度の自動走行誤差比較

単位：mm

行程	測定点	R 3 年	R 4 年	R 3 年	R 4 年
		平均誤差		最大誤差	
①	直線区間	166	70	432	160
	カーブ	167	135	457	270
②	直線区間	149	90	369	130
	カーブ	150	162	446	230
③	直線区間	168	68	394	100
	カーブ	145	96	470	190
④	直線区間	196	53	527	70
	カーブ	122	220	356	330
⑤	直線区間	24	88	671	140
	カーブ	167	120	393	190
⑥	直線区間	145	68	417	110
	カーブ	208	200	443	260
⑦	直線区間	160	75	461	90
	カーブ	165	148	359	190
⑧	直線区間	178	88	387	120
全体平均	直線区間	176	75	457	115
	カーブ	161	154	418	237
R 4 年の誤差改善率	直線区間	57%		75%	
	カーブ	4%		43%	

注) は許容値（目標値）超過を示す。

(2) 傾斜のある河川堤防における自動走行ルート精度の検証

令和4年度は、勾配のある河川堤防における現場実証試験を実施した。〈図-11〉全ての試験条件において、蛇行した走行は見られず、直線部の平均誤差、最大誤差は全て許容値を満足した。但し「スイッチバック」「 α ターン」のカーブ区間は概ね目標値を満たしていたが、「1本飛ばし」のカーブ区間は許容値を超える誤差が生じた。〈図-12, 図-13, 図-14, 表-3〉

これらの原因は解析中であるが、旋回時の走行ルート計算プログラム設定値の調整不良と想定しており、設定値の修正で対応可能と考えている。今後は、詳細な解析を進め、誤差の発生原因を解消するためシステム修正等を行う予定である。



図-11 令和4年度 現場実証試験状況

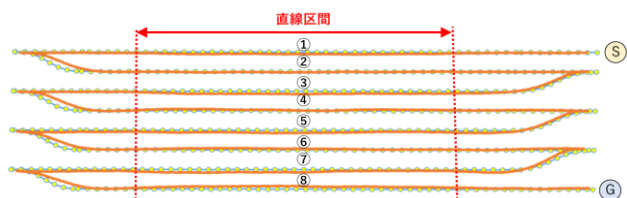


図-1 2 傾斜有、スイッチバック (6km/h) 自動走行精度

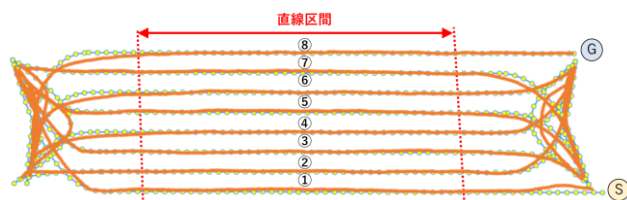


図-1 3 傾斜有、 α ターン (6km/h) 自動走行精度

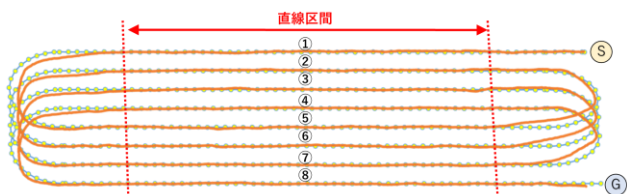


図-1 4 傾斜有、1本飛ばし (6km/h) 自動走行精度

表-3 傾斜有、自動走行誤差 スイッチバック・ α ターン・1本飛ばし

		単位: mm					
行程	測定点	スイッチバック		α ターン		1本飛ばし	
		平均誤差	最大誤差	平均誤差	最大誤差	平均誤差	最大誤差
①	直線区間	51	85	83	115	62	75
	カーブ	78	190	102	250	327	410
②	直線区間	100	135	54	75	56	70
	カーブ	67	115	123	250	580	685
③	直線区間	86	125	120	170	76	90
	カーブ	84	210	102	240	344	415
④	直線区間	98	135	79	110	63	80
	カーブ	64	100	108	240	478	555
⑤	直線区間	88	115	139	210	115	125
	カーブ	111	235	97	205	318	390
⑥	直線区間	103	145	121	160	84	95
	カーブ	95	150	100	245	324	390
⑦	直線区間	99	140	139	200	132	140
	カーブ	133	285	107	210	578	690
⑧	直線区間	86	130	96	125	76	85

注) 黄色は許容値 (目標値) 超過を示す。

(3) 安全対策機能の確認

搭載した2つの安全対策「タブレットによる停止操作機能」及び「施工エリア逸脱時の自動停止機能」について、試験速度2、4、6 km/hの前進/後進における停止時間、停止距離等の検証を行った。停止時間は、自動車の衝突被害軽減ブレーキシステム評価を参考に目標値を1秒以内と設定したが、全ての試験条件において目標値より短い時間で停止することができた。

今後は、障害物等への衝突時の「接触自動停止機能」や人や車両をAI検知して衝突を防ぐ「周辺探知機能」の実装に向け検討中である。なお、「周辺探知技術」は、寒地土木研究所の研究成果を取り込む予定である。

4. まとめ

大型遠隔操縦式草刈機による堤防除草の自動化について、傾斜の無い平坦地と傾斜の緩い丘陵堤で試験を行い、自動化目標「レベル1」の自動走行精度を高めてきた。平坦地は問題なく3種類の走行パターンで自動走行が可能であるが、傾斜地では、カーブ時の自動走行精度が不足しており、自動走行プログラムの改修が必要なのことがわかった。そのため、原因を究明しカーブ時の誤差を少なくすることが必要である。

また、今後は現場導入に向け、現在までの現場実証試験の実測データを元に、自動出来形帳票出力機能、及び1人で2台管理する協調自動運転についての試作・検証を行い、現場のニーズにあった自動化目標「レベル2」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、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。

謝辞: 令和4年度の現場実証試験に当たり、北海道開発局札幌開発建設部岩見沢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。