

河川砂防技術研究開発【開発成果概要】

	組 織 名 (ふりがな)	開発代表者名	役 職
①開発事業者	かわさきちしつ エフピーヴィ ロボティクス 川崎地質・FPV Robotics きょうどうぎぎょうたい 共同企業体	吉田 潔	保全部長
②開発経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。	令和4年度	令和5年度	総 合 計
	996 万円	998万円	1,994 万円
③共同開発者氏名			
氏 名	所属機関・役職 (※令和6年3月31日現在)		
今井 利宗	川崎地質 (株) 関東支社保全部 保全1G グループマネージャ		
駒形 政樹	FPV Robotics (株) 代表取締役		
山田 敬祐	FPV Robotics (株)		
④開発の目的・目標			
<u>＜開発の名称＞</u> 地中レーダ搭載型自動制御装置による空洞探査システムおよび異常信号の自動抽出 AI システム			
<u>＜開発の目的＞</u> 本開発は、護岸構造物背面の空洞化を自動検出する自動（自律）または遠隔式移動機器および点検技術の開発により、現地の探査および解析作業を効率化するために、自動制御による地中レーダ探査および AI システムによる探査データの自動解析をパッケージ化した新技術を開発することを目的とした。			
<u>＜開発の目標＞</u> 公募時の開発要求事項を満たすように、以下の開発目標を掲げた。			
目標内容			
1	自動制御装置のサイズ、重量の最適化により、総重量 35kg 以下を目指す。		
2	自動制御装置の操作は、無線通信距離 500m 以上 1km 以内を目指す。		
3	予め定めた経路に従って自動走行することを目指す。また、ドローンでは上空 1m 程度での安定したホバリングを目指す。		
4-1	ローバーおよびドローンに搭載し、空洞探査可能な地中レーダ探査システムを開発する。		
4-2	複数のアンテナを搭載することにより、1回で約 1m 幅の面的探査（人力に対して 2.5 倍の作業性向上）を目指す		
4-3	自動制御探査により 2 割勾配までの探査を目指す。なお、急勾配（0.5 割程度）に関しても探査可否を検証する		
5	多量な取得データを効率的に解析するために、護岸背面空洞の異常信号抽出 AI システムを開発する。		
6	探査コスト 400 円/m ² （税抜き）、従来の技術者解析に対して、解析時間 3 割短縮を目指す。		

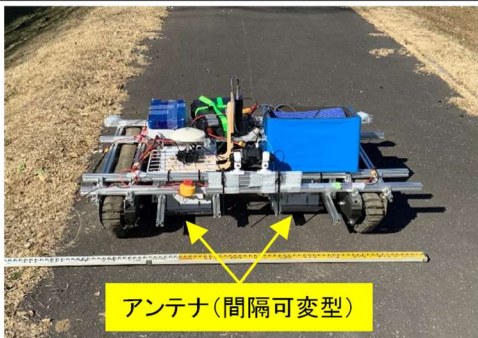
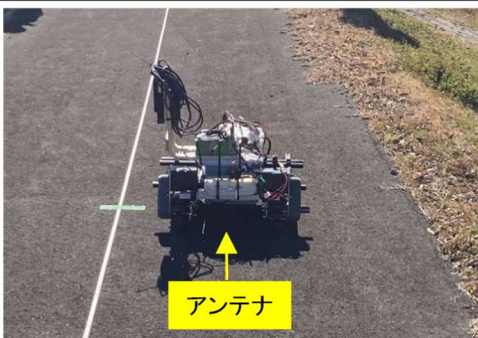
⑤開発成果

＜自律型空洞探査ロボットの開発＞

表 1 に、開発した自律型空洞探査ロボットの仕様を示す。自律型空洞探査ロボットは、ローバーと複数または単体の地中レーダアンテナを組合せた地中レーダ搭載ローバーである。自律型空洞探査ロボット（略称、ACR）は、地中レーダ探査装置が 1 台（ACR-S）または 2 台（ACR-M）の 2 種類を開発した。2 つの装置は大きさが異なるため、探査対象箇所の広さ等の現地条件に合わせた探査装置の選定が可能である。

ロボットは、人によるマニュアル走行と UAX-1（Unmanned Auto X）による自動走行を実装している。自動制御装置はドローンの飛行制御にて、機体とコントロール本部が約 1km の距離でも正常に動作した。

表 1 自律型空洞探査ロボットの仕様

項目	自律型空洞探査ロボット(ACR-M)	自律型空洞探査ロボット(ACR-S)
レーダアンテナ	GN-04(日本信号社製)	GN-04(日本信号社製)
送信周波数	100～1400MHz	100～1400MHz
データ送信	Wi-Fiによる送信(25m以内)	Wi-Fiによる送信(25m以内)
レーダ操作	専用アプリ(タブレット)	専用アプリ(タブレット)
有効探査深度	0.6m	0.6m
ローバー操作	無線コントローラー	無線コントローラー
寸 法	1050mm×1300mm×600mm	600mm×550mm×600mm
重 量	約65Kg(レーダアンテナ含む)	約35Kg(レーダアンテナ含む)
走 行 速 度	1.8km/h程度	1.8km/h程度
電 源	DC24V	DC24V
探査測線@回	2測線(アンテナ間隔0.4～0.5m程度変更可)	1測線
必要探査スペース	幅2m	幅1m
取得データ	探査データ、緯度経度、周囲映像	探査データ、緯度経度、周囲映像
装置外観		

自律型空洞探査ロボットは、写真 1 に示すような護岸形状（勾配 1：2.0）で問題なく探査できることを確認した。また、写真 2 に示すように、段差高さ 10cm 以下であれば走行可能である。さらに、護岸上でも自動走行による探査が可能であることを確認した。



写真 1 護岸探査状況

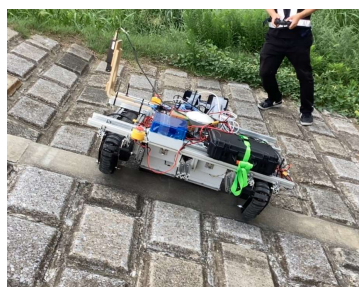


写真 2 段差乗り越え状況

地中レーダ探査性能の比較結果を図 1 に示す。自律型空洞探査ロボットに搭載した GN-04 は、空洞が検知できており、すでに空洞探査業務に活用されている KSD-22（光電製作所製）や高分解能な NJJ-200（日本無線製）と比べても同等の結果が得られた。

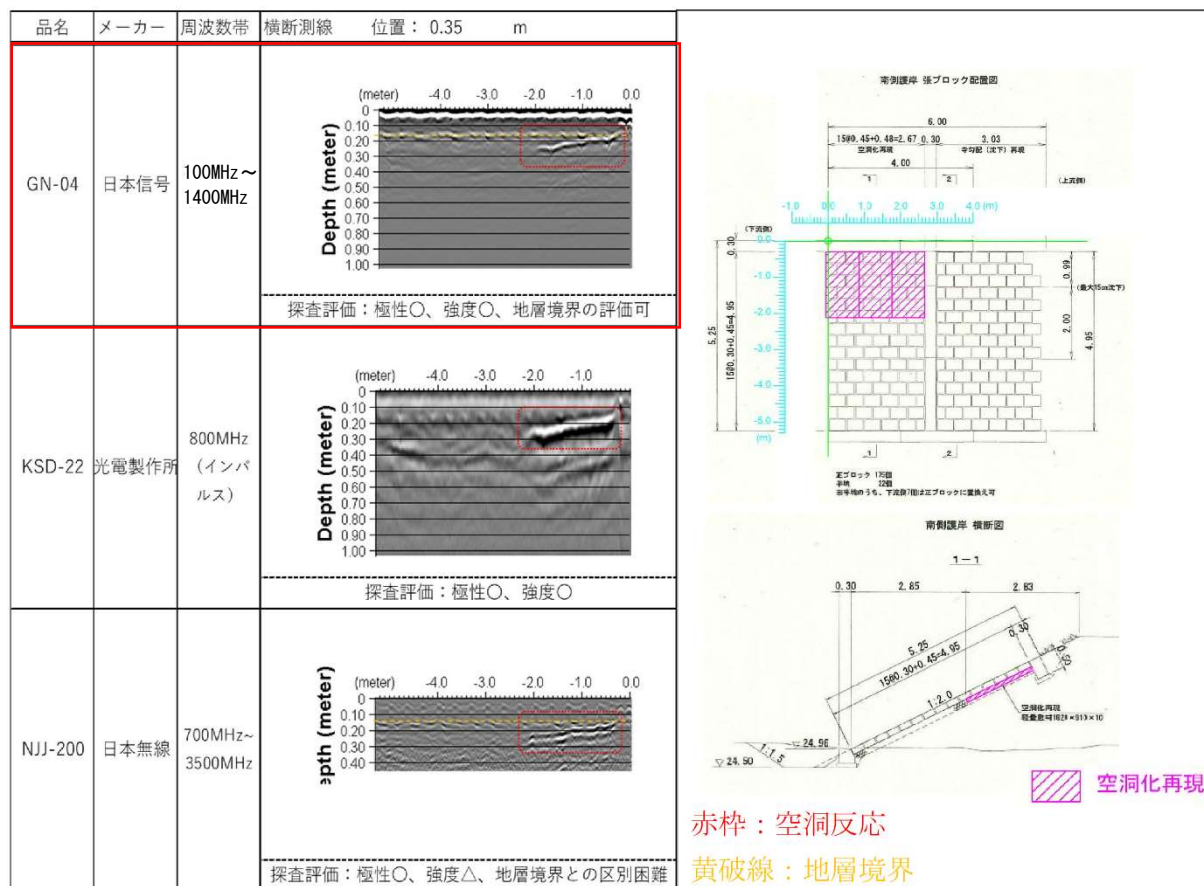


図 1 地中レーダ探査装置の性能比較結果

なお、本開発では地中レーダ搭載型ドローンも試作した。地中レーダを搭載し、上空 1m での安定したホバリングには成功した。一方で、ドローンの安全飛行を考慮すると、地中レーダと護岸までに 1m 程度の離隔が必要であるが、この離隔が影響し、現状では空洞検出は困難であることが分かった。

＜AI 解析システムの開発＞

図 1 に、AI 解析システムの概要を示す。AI システムは、川崎地質（株）と富士通（株）が開発した路面下空洞検出用の学習モデルに、護岸背面空洞の教師データを再学習させたシステムである。

開発した AI の精度は、再現率（AI 正解空洞数／総空洞数）と誤検出率（誤検出空洞数／（総空洞数+誤検出空洞数））で評価した。学習の結果として、再現率を上げるほど誤検出率も高くなることが分かった。実現場の探査データでテストしたところ、再現率 86%で誤検出率 82%となった。このように、再現率は高いが、多くの間違いが含まれる結果となった。

一方で、解析時間は技術者のみと比較して、4 割程度縮減した。このように、検出数は多いものの解析時間の削減になること、技術者は AI の結果と比較しながら解析できることから、解析時間の縮減と見逃し防止対策になることがメリットとして挙げられる。

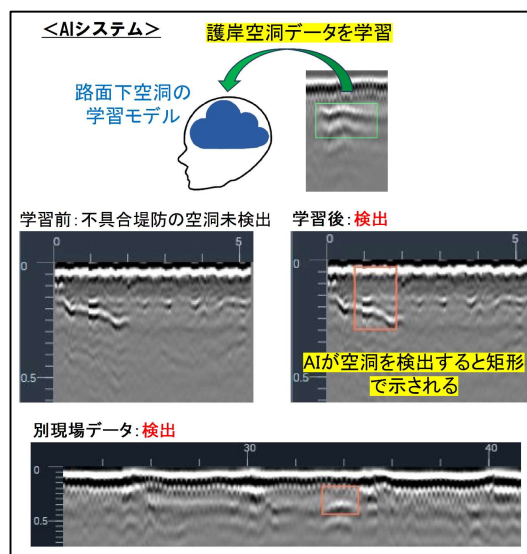


図 2 開発した AI 解析システムの概要

＜従来技術との比較＞

従来の空洞探査は、人手に頼って空洞探査を行ってきた。この方法を従来技術、開発した自律型空洞探査ロボットを新技術として作業性等の比較を行った。表2に、比較結果をまとめる。

表2 従来技術と新技術の比較結果

項目	従来技術（人力）	新技術（自律型空洞探査ロボット）
技術概要	アンテナを人力で走査し、空洞を探索。アンテナとPC・制御部はケーブル接続であるため、オペレータとアンテナ走査人員は近接しながら移動。また、突起部等へのケーブルの引っ掛かり防止のための補助が必要。アンテナは護岸に密着させながら探索。 	自走するロボットにより、空洞を探索。コントローラーによるマニュアル操作を基本とするが、自動走行も可能。データ通信は無線。現状では予期せぬ動作を停止するための探索補助が必要。アンテナは、データ品質が低下しない高さで3cmほど護岸から離して探索。 
現場人員	○（2～3人）	○（2～3人）
機器調整時間	◎（約5分程度）	△（約15分程度）
測線設定作業	△（1測線ずつ実施）	◎（2測線に1回実施：従来の半分に省略）
探索時間 （1kmあたり）	△（約70分：1回で1測線のみ探索）	◎（約25分：1回で2測線を同時に探索）
検出可能空洞 規模	○（長さ0.5m×幅0.5m×厚さ0.1m以上）	○（長さ0.5m×幅0.5m×厚さ0.1m以上）
探索可能深度	○（使用機器による0.4m程度～2m程度まで）	△（0.6m程度まで）
探索可能勾配	○（人が機器を持って走査できる勾配）	△（1：2.0以下）
対象部材	○（部材厚0.40mまで。鉄筋コンクリートの場合、鉄筋間隔0.2m以上で探索可。0.1mを超える段差部はデータ取得不可。覆土式等不可。）	○（部材厚0.25mまで。鉄筋コンクリートの場合、鉄筋間隔0.2m以上で探索可。0.1mを超える段差部はデータ取得不可。覆土式等不可。）
安全性	△（アンテナ走査人員が必ず護岸に降りる必要あり。）	○（探索時は技術員が護岸に降りる必要なし。無線範囲25m以内であれば、操作可能。）
取得データ	△（地中レーダ探索データ）	○（地中レーダ探索データ、GNSSデータ、ドラレコ映像）
探索データ 解析時間 （1kmあたり）	△（約180分、技術員のみで解析）	○（約100分、技術員+AIによる解析）
概算コスト （直接人件費）	【現場作業のみの場合】 △：約 470円/㎡ 【現場作業+データ解析】 △：約1,120円/㎡	【現場作業のみの場合】 ◎：約200円/㎡ 【現場作業+データ解析】 ○：約660円/㎡
総合評価 （新技術のメリット・デメリット）	空洞探査方法として確立されている技術。これまでの実績多数。	【メリット】 現場作業時間、データ解析の時間が大幅に短縮可能。コストも従来技術に比べて3割程度縮減。 【デメリット】 探索できる勾配に限りあり。自走式のためにセンサーを多数搭載しており、機器不具合が生じる可能性が従来よりも高い。

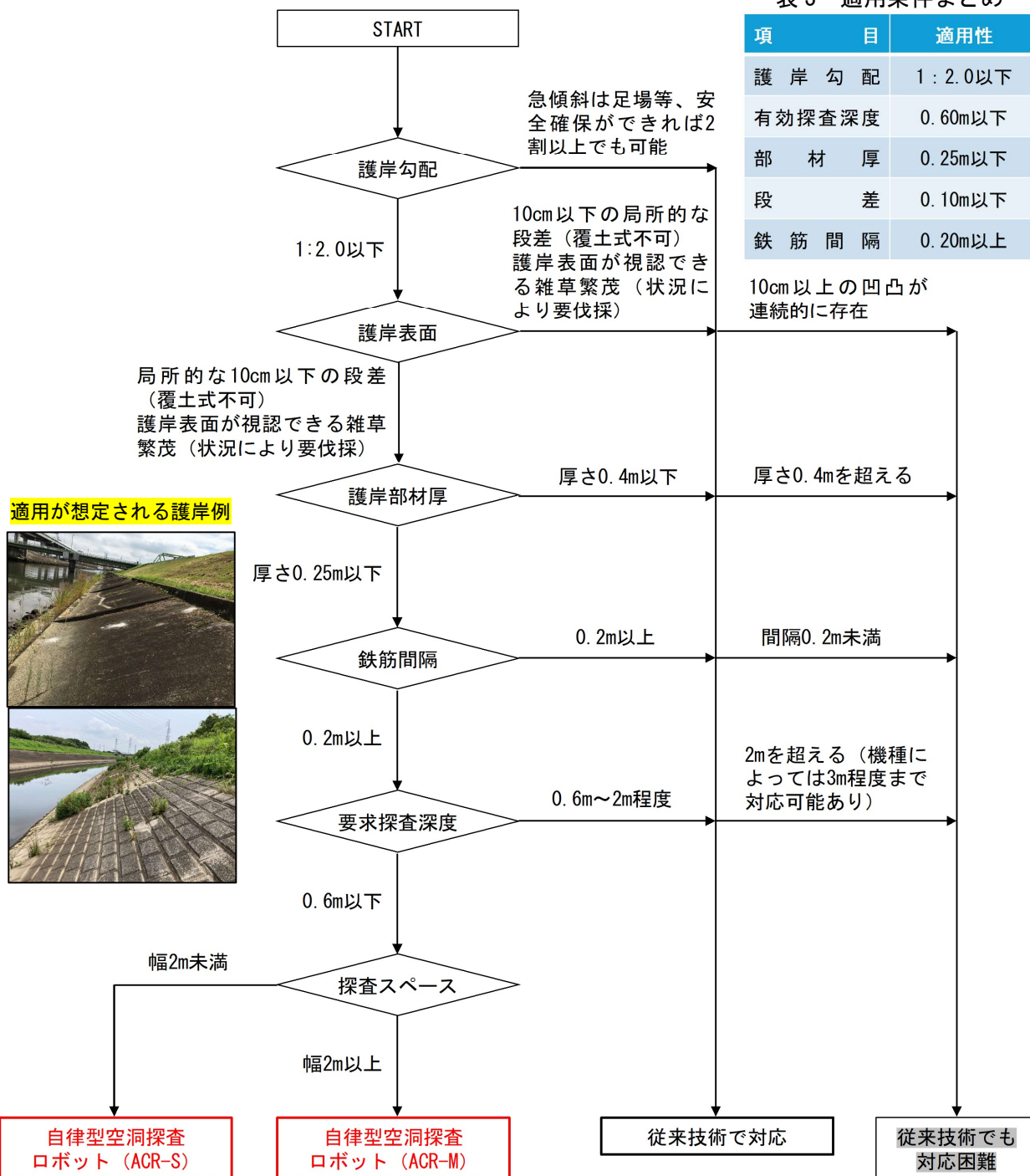
表記：◎比較して半分以上縮減 ○同等、△比較して劣る

<導入マニュアル>

表 3 に、自律型空洞探査ロボットの適用性を示す。図 3 には、適用性を考慮した現場への導入フローを記す。条件は、本業務の実証結果およびこれまでの護岸背面空洞探査の経験にもとづく知見からまとめた。この他、現場ごとの特殊条件を考慮しなければならない場合が考えられるが、その点については都度、現地踏査等を行い、判断することとする。なお、天端等の平坦地での探査も可能ではある。その場合、第三者への安全配慮を行った上で、要求探査深度内で調査を実施する。

表 3 適用条件まとめ

項 目	適用性
護 岸 勾 配	1 : 2.0以下
有効探査深度	0.60m以下
部 材 厚	0.25m以下
段 差	0.10m以下
鉄 筋 間 隔	0.20m以上



上記条件を満たす平ブロック張り、法枠を想定。

図 3 自律型空洞探査ロボットの現場への導入フロー

＜目標達成度＞

表 4 に公募時の開発要求性能に対する達成度を、表 5 に提案時の目標に対する達成度を示す。

表 4 公募時の開発要求性能に対する達成度

要求事項	達成状況
基盤盛土の沈下や流水の作用等で土砂が吸い出され、護岸背面に発生した空洞箇所を非破壊で点検する技術。	達成
空洞箇所の把握にあたっては、空洞化の範囲、深さを面的に把握できること。	達成
併せて、護岸構造形式毎の特性を踏まえた、ひび割れ、内部欠陥等を非破壊検査する技術を搭載できるか検討。	搭載可能だが、実装にはさらなる検討必要
一定の勾配を有する高水、低水護岸上を点検するための自動（自律）または遠隔式移動機器。なお、開発する機器は、積み（急勾配（0.5割程度））・張り（緩勾配（1.5～3割程度））の両方又はいずれかに対応できるものを想定。	達成 （緩勾配に対応）
護岸構造物の形式は、ブロック（石）積み（練積み）、平ブロック張り、法枠等を想定。	達成 （平ブロック張り、法枠）
開発技術による点検コストは、現状の非破壊点検費用程度以下を目安とする。（参考：人力によるレーダ探査、測線間隔0.4m、勾配2割～の点検費用（解析費用含まず）＝約500円/m ² （税抜き））	達成 （約200円/m ² ）

表 5 提案時の目標に対する達成度

	目標	達成状況
1	自動制御装置のサイズ、重量の最適化により、総重量35kg以下を目指す。	達成 （小型ローバーで達成）
2	自動制御装置の操作は、無線通信距離500m以上1km以内を目指す。	達成 （ドローンで確認）
3	予め定めた経路に従って自動走行することを目指す。また、ドローンでは上空1m程度での安定したホバリングを目指す。	達成
4-1	ローバーおよびドローンに搭載し、空洞探査可能な地中レーダ探査システムを開発する。	達成 （ローバーで達成）
4-2	複数のアンテナを搭載することにより、1回で約1m幅の面的探査（人力に対して2.5倍の作業性向上）を目指す。	達成
4-3	自動制御探査により2割勾配までの探査を目指す。なお、急勾配（0.5割程度）に関しても探査可否を検証する。	達成 （急勾配は探査不可）
5	多量な取得データを効率的に解析するために、護岸背面空洞の異常信号抽出AIシステムを開発する。	達成
6	探査コスト400円/m ² （税抜き）、従来の技術者解析に対して、解析時間3割短縮を目指す。	達成

＜技術の将来展望＞

- ・別のレーダアンテナでも試行し、様々な部材厚や要求探査深度の対応幅を拡大していく方針である。
- ・点群測量データを活用し、あらかじめ測線をプログラムすることによって、自動走行のための測線配置作業の省力化に繋がる可能性がある。
- ・すでに河川堤防にて実装されている、モグラ穴検知のための大型除草機との連携を図り、モグラ穴検知精度を向上させる。
- ・コンクリート背面に生じる空洞は護岸だけでなく、例えば、港湾エプロン背面にも生じる。このような場所は、自律型空洞探査ロボットの適用性が高いものと考えられる。このように、他分野への適用範囲（横展開）を広げていく方針である。
- ・地中レーダ搭載型ドローンによる空洞検出についても、継続して検討を進める。