

半水中型クローラダンプの開発（全体構想と基礎実験）

片野浩司・藤野健一・橋本 毅

1. はじめに

無人化施工技術は、この20年間に開発が進められ、多くの災害時緊急工事に用いられている。無人化施工は、これまで主に雲仙普賢岳のような火山災害（土石流）やドライな状態の環境に対応してきたが、近年は集中豪雨による水災害（地滑り、土石流、出水）が頻発しており、適用範囲の拡大が求められている。

これまで出水環境下での無人化施工は、水中部用途に改造されたバックホウやブルドーザーなどの作業機械を用いて施工されてきた。

しかし、大規模な水災害、土石流災害では施工範囲が広くなり、これらの作業機械だけではなく、資材等の運搬機械も必要なことが明らかになってきた。

そこで、浅水域から陸上にわたって移動可能で、数百メートルを効率よく走破可能な半水中型クローラダンプ（以下「重運搬ロボット」という。）の開発を行い、これに水中バックホウや水中ブルドーザーなどの作業機械と組み合わせることで、半水中での無人化施工を実現することにした。

本研究開発は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「無人化施工の新展開～遠隔操作による半水中作業システムの実現～」(管理法人NEDO)によって実施されている。

実施にあたっては、民間セクター及び関係法人とで設立した「次世代無人化施工技術研究組合」(略称UC-Tec)により、実証評価、機体開発、計測技術、操作支援の各WGを組織し、研究開発を行っている。

本報では、研究開発の全体構想の概要を述べるとともに、基礎実験の結果について報告する。

2. プロジェクトの開発内容と実施項目

本研究開発では、大雨等による河川の出水時や

土石流発生時において、土石流による堤防のオーバーフローや堤防決壊を防ぐため、土のう等による堤防の補強、河川の流れを妨げる水中内障害物（土砂、岩塊、被災構造物等）の撤去等の作業を、作業員が水際に近づくことなく、遠隔操作により実施することを具体的な活用場面として想定した。開発イメージを図-1に示す。

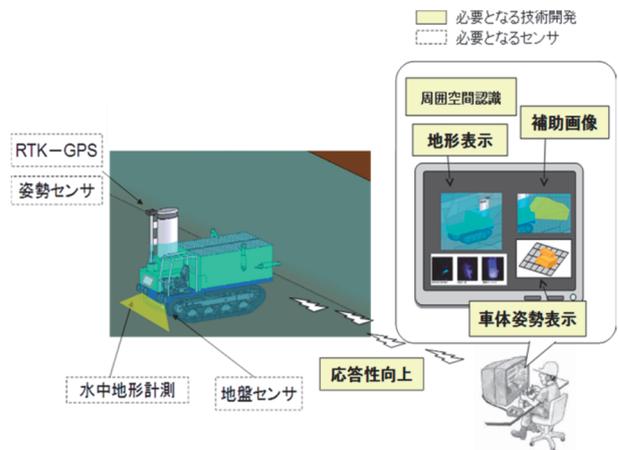


図-1 開発イメージ

また、開発項目として、次の5つの実施項目を設定した。

- ① 遠隔操作による半水中作業システムの構築と実証・評価
- ② 遠隔操作型重運搬ロボットの開発
 - ・耐水性
 - ・エンジン機構
 - ・走破性確保
 - ・ロボット本体の安定性
 - ・積荷の安定性
 - ・走行の安定性
- ③ 作業・走行支援センシング技術
 - ・走行地盤状況
 - ・空間把握技術
 - ・位置姿勢検知
- ④ 操作支援システム技術
 - ・ガイダンス及び表示機能
 - ・半自律走行機能
 - ・高精細画像伝送システムの開発
 - ・通信システムの高度化

- ⑤ 無人化施工・半水中作業のための基礎的ロボット技術の検討とシステム構築に向けたフィージビリティスタディ

3. 開発目標

実際の災害時では、水中バックホウや水中ブルドーザーなどの作業機械が先導して走行し、運搬機械は、それらの機械の走行によってできた経路に沿って、繰り返し往復走行することになる。

従って、重運搬ロボットは、この走行の操作・制御が可能なこと、及び決められた経路から外れた場合に水中の走行性能や走行環境を感知することが必要である。

そこで、重運搬ロボットに作業・走行支援のセンサを搭載するとともに、操作支援を行うためのシステムを構築する必要がある。操作は、遠隔操作による方式と半自律方式による方式の双方を開発対象とした。

以上のことから、機体性能の開発目標を以下のとおり設定した。

(1) 重運搬ロボット機体性能

- ・積載荷重：10t
- ・走行速度：3km/h
- ・登坂能力：10%
- ・左右傾斜：3度
- ・段差：20cm
- ・走行可能水深：2m
- ・走行可能流：4km/h（横方向）

(2) 重運搬ロボット走行センサ性能

- ・電磁波レーダ精度：±200mm
- ・位置センサ精度（RTK-GNSS）：XY-35mm、Z-50mm
- ・姿勢センサ精度（IMU）：左右傾斜0.005度、方向0.02度

(3) 操作支援システムでの制御可能スペック

- ・走行速度：3km/h
- ・作業時想定運搬距離：200m

4. 基礎実験と結果

2. の項目の内、基礎実験として実施した、

(1) 作業・走行支援センシング技術

(2) 操作支援システム技術

について報告する。

4.1 作業・走行支援センシング技術

重運搬ロボットが水中部の混濁区間でも走行できるよう、地盤形状や軟弱土の有無が精度よく探査できる水底地盤探査技術の開発を目指している。

基礎実験として、電磁波レーダ（SIR-30、GSSI社製、400MHz）の水中部における適応性を確認するため、土質の異なる水底地盤を判別できるか調査した。併せて、水中部での使用実績がある超音波探査機についても行った。

4.1.1 実験内容

容積20m³タンク（L5m×W2m×H2m）内部を4つのゾーンに仕切り、土質条件の異なる黒土（厚さ90cm）、シルト（厚さ30cm）、砂（厚さ35cm）、砂利（厚さ25cm）により模擬水底地盤を構成するように敷き詰めた（図-2）。水深は1.0～1.6mとなるように注水し、模擬水底地盤面の状況を確認した。

4.1.2 実験結果

図-3は電磁波レーダにより模擬水底地盤を測定した結果である。混濁した水中下でも各々異なる反射波が得られ、水底地盤を判別できることがわかった。超音波探査機では黒土以外は水底地盤の判別ができなかった。超音波探査機に比べ電磁波レーダの方が地層探査結果が鮮明であった。

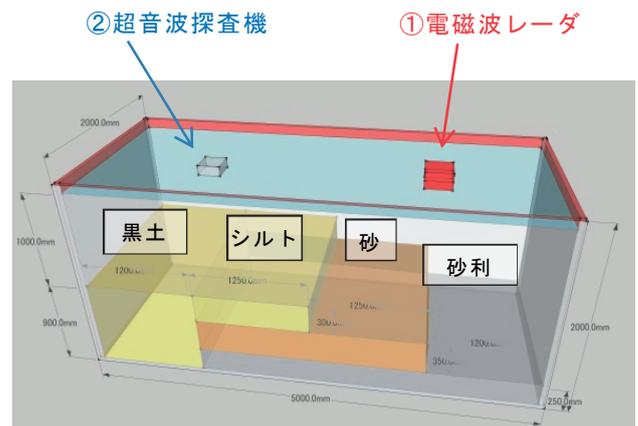


図-2 水中探査実験設備

4.2 操作支援システム技術

水中走行では、水中の透明度が低いことが通常なため、一般の無人化施工のようにカメラ映像だけの操作は不可能である。そのため、外部カメラ車の情報の他、操作ガイダンスとして、オペレータへ走行指標を提供することが必要である。

操作ガイダンスの構成は、走行計画路線と重運搬ロボット位置（移動点）からなり、走行計画路

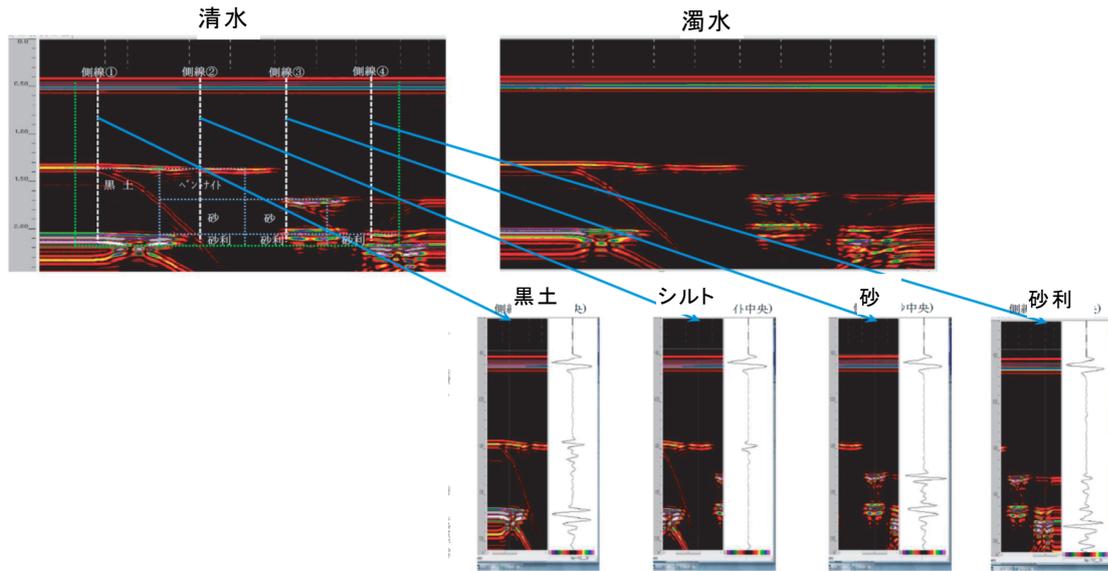


図-3 水中探査計測図面 (電磁波レーダ)

線に走行軌跡を近づける操作を行った。

遠隔操作式の陸上用クローラキャリア (積載荷重 11t) にネットワーク型RTK-GNSS受信機を取り付け、移動点位置をどこまでリアルタイムに取得できるか、IMUがない状態でどこまで向きがわかるか、及び計画路線からの走行軌跡のバラツキを計測する実験を行った。

4.2.1 実験内容

操作ガイダンスは、平面図に走行計画線とクローラとその向き、走行軌跡をモニタ表示するものである (図-4)。

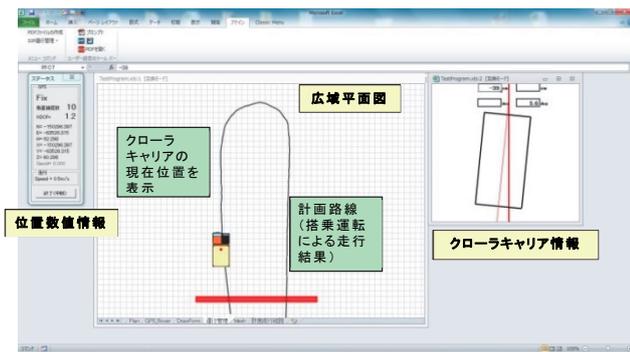


図-4 操作ガイダンス画面

走行計画路線は、先導するバックホウと同じ経路を走行するという考えで、計画路線を決定する走行を行い、その軌跡を利用した。

計画路線線形は、直線走行、曲線走行、U字走行の3ケースとした。

また、操作方法は、①搭乗運転、②外部カメラ車の画像による遠隔運転 (写真-1)、③操作ガイダンスによる遠隔運転 (写真-2) の3ケースとし

た。①と②の計画路線は、現場にコーンを置いて示した。



写真-1 カメラ映像による遠隔運転

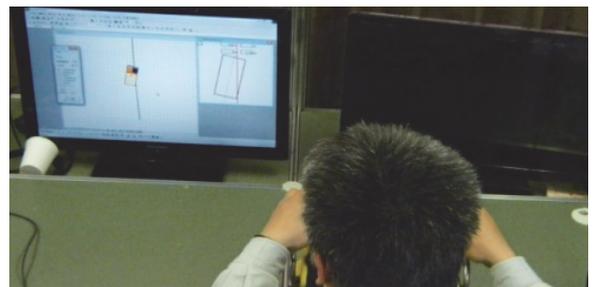


写真-2 操作ガイダンスによる遠隔運転

4.2.2 実験結果

直線走行では、搭乗運転による走行軌跡のバラツキは50cm以下であったのに対し、カメラ映像による遠隔運転及び操作ガイダンスによる遠隔運転は最大1.5mのバラツキが見られた (図-5)。

曲線走行では、操作ガイダンスによる遠隔運転において、曲線出入部で最大2m程度のバラツキが見られた (図-6)。

また、U字走行では、操作ガイダンスによる遠隔運転で最大2m程度、走行計画路線に対し逸脱走行した部分が発生した (図-7)。

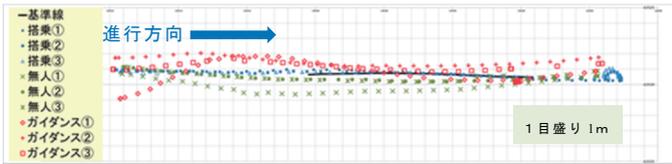


図-5 直線走行の軌跡図

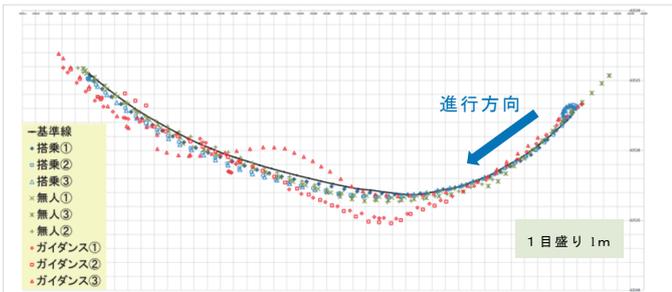


図-6 曲線走行の軌跡図

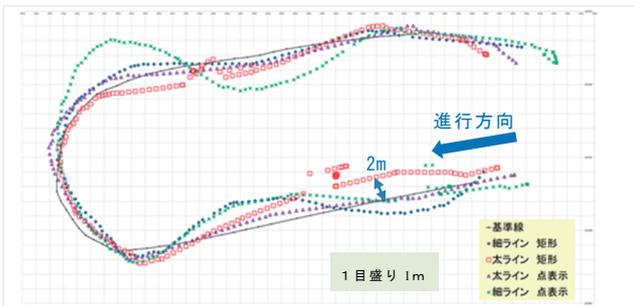


図-7 U字走行の軌跡図

各計画路線線形、操作方法における走行速度は、表-1のとおりである。

表-1 走行速度

(単位：km/h)

| | 搭乗運転 | カメラ画像 | 操作ガイダンス |
|----|------|-------|---------|
| 直線 | 2.72 | 3.54 | 3.44 |
| 曲線 | 2.80 | 3.47 | 2.41 |
| U字 | — | — | 2.67 |

4.3 まとめ

作業・走行支援センシング技術では、電磁波レーダが混濁した水中下でも水底地盤の判別が可能であった。今後、重運搬ロボットの半水中での作業・走行に利用できるよう諸条件を整理し、実験の追加やセンサの仕様検討を行う。

また、操作支援システム技術では、操作ガイダンスを用いた遠隔操作運転を行った結果、少ない操作ガイダンス情報だったにも関わらず開発目標である3km/h程度の速度で走行できた。しかし、曲線部の走行で曲線出入部での操作遅れが見られたことから、曲線位置に対する誘導・視覚的な情報提供方法等の検討が必要である。また、直線走行でも1.5m程度のバラツキを生じたことから、操作ガイダンスの改善が必要である。

5. おわりに

本報では、研究開発の概要を紹介するほか、走行を支援するための水底地盤の探査技術や操作支援に関わる技術の実現性を確認した。

無人化施工は、バックホウやブルドーザーなどの作業機械では水中部での施工に多くの実績があるが、運搬機械では施工実績はない。そのため、作業・走行支援センシング技術と操作支援システム技術は今後の展開にとって極めて重要である。

無人化施工が必要な現場のニーズに応えるため、今後、現場で必要とされる性能と実現できる技術のバランスを考慮しつつ、研究開発を進めたい。

謝 辞

本研究開発の実施にあたり、ご指導・ご助言を賜っておりますSIP、NEDOをはじめ関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 渡辺将旭、渋谷文哉、前田宗彦、村上弘記、早瀬幸知：「無人化施工の新展開～遠隔操作による半水中作業システムの実現～クローラキャリアの不正地走行の基礎解析～」、建設ロボット研究連絡協議会、第15回建設ロボットシンポジウム、2015
- 2) 藤野健一、油田信一、船迫敏雄：「無人化施工の新展開～遠隔操作による半水中作業システムの実現～」ロボット、No.228、pp.22～29、2016.1

片野浩司



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 主任研究員
Koji KATANO

藤野健一



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 主席研究員
Kenichi FUJINO

橋本 毅



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 主任研究員、工博
Dr. Takeshi HASHIMOTO