

骨材原石運搬作業への自動化技術の導入

T-iROBO® Rigid Dump 及び T-iDigital® Field を用いた建設現場のオートメーション化

遠藤 亮雄*¹・田村 道生*¹・片山 三郎*¹・青木 浩章*¹・石井 亘*¹・緒方 恒*²

Keywords : automatic operation, dump truck, unmanned construction, i-Construction 2.0

自動運転, ダンプトラック, 無人化施工, i-Construction 2.0

1. はじめに

生産労働人口が減少していく中、建設業界は 3K（きつい、汚い、危険）に代表される負のイメージにより、他産業と比べて高齢化が進んでいる。今後、高齢者の大量離職が見込まれることから、将来の担い手不足や、それに伴う技術やノウハウの喪失が懸念されている。一方で、高度経済成長期に建設された施設の老朽化が進行していることや、気候変動により頻発化している自然災害への対策・復興等で建設業に対する需要は高まっている。そのため、今後人手不足の加速により需要に対して供給が追いつかなくなることが予想され、負のイメージを刷新して魅力ある建設現場作りや作業員一人当たりの生産性を向上させる取り組みが求められている。

このような中、国土交通省は 2016 年に i-Construction¹⁾を提唱し、「ICT の全面的な活用(ICT 土工)」,「全体最適の導入(コンクリート工の規格の標準化等)」,「施工時期の平準化」の 3 つをトップランナー施策として、調査・測量,設計,施工,検査,維持管理・更新までのあらゆる建設生産プロセスにおける抜本的な生産性を向上させる取り組みを発表した。2020 年からは、「国土交通省インフラ分野の DX 推進本部」が設置され、インフラ分野においてデジタル技術を活用した業務の効率化や高度化,働き方改革を目的とした取り組みが進められてきた。このような取り組みによって、建設業界にデジタル化が浸透してきており、生産性向上においても ICT 施工による作業時間短縮効果が 2015 年度比で約 21 %になるなど²⁾,一定の効果が出ているが、i-Construction の取り組みをさらに加速し、

ICT 等の活用から自動化へと進めていくために、国土交通省は 2024 年に i-Construction 2.0 を発表した。これは、更なる建設現場の省人化対策として、これまで人が手作業で実施していた内容を自動化することで、建設現場のオートメーション化の実現を目指すものである。

このような社会的背景において、当社でも生産性の向上に寄与する様々な技術を開発してきた。中でも、省人化による生産性の向上と無人化による安全性の向上を目的として開発中の自動運転・遠隔操作が可能な建設機械 T-iROBO シリーズや、施工中に取得する膨大なデジタルデータを活用して施工管理業務を支援する基盤システム T-iDigital Field(以下、T-iDF)は、建設現場のオートメーション化に有効な技術となっている。

本稿では、T-iROBO シリーズの 1 つである自動運転ダンプトラック T-iROBO Rigid Dump(以下、T-iRD)と、T-iDF の 2 つの技術を組み合わせ、実際の建設現場の土砂運搬作業に適用することで、i-Construction 2.0 が提唱する 3 つのオートメーション化「施工のオートメーション化」「データ連携のオートメーション化」「施工管理のオートメーション化」を実施したので、その実施内容及び結果について報告する。

2. T-iROBO Rigid Dump の概要

2.1 使用建設機械及びシステム構成

T-iRD は運搬から排土作業に至る土砂運搬作業の一連動作を自動で実施可能な 55 t 積みのリジッドフレーム式ダンプトラックである。(株)小松製作所製の HD465 に対して電気信号で動作可能なように、電制化改造を施

* 1 技術センター 生産技術開発部 スマート技術開発室

* 2 東北支店 土木工事作業所

した機体である。図-1 に T-iRD の外観及び搭載機器を示す。自動運転を行うための制御用 PC、自己位置を認識するための RTK-GNSS 方位計、障害物を検知する LiDAR、外部との通信や非常停止を行うための無線機、及び車載カメラを搭載している。図-2 に T-iRD のシステム構成を示す。自動運転のプログラムがインストールされた制御 PC へは無線ネットワークを介して遠隔からのアクセスが可能で、走行経路や排土位置等の動作計画(以下、作業シナリオと称す)の設定や自動運転開始・停止の指令を出すことができる。自動運転が開始されると、制御 PC は設定された作業シナリオに従って制御信号を各種コントローラに伝達し、電磁制御弁を制御することで T-iRD が動作する。稼働時の車速や操



図-1 T-iROBO Rigid Dump の外観及び搭載機器

Fig.1 Appearance and on-board device of T-iROBO Rigid Dump

舵角等の車両情報は各種センサにより常時測定され、目標値に対する誤差に対してフィードバック制御を行うことで自動運転が行われる。

2.2 作業シナリオとタスク

土砂の運搬作業は走行が主な動作となるが、それ以外に排土場でのダンプアップ・ダウン、積込み中の待機や積込み完了後の走行開始等の動作も必要となる。そこで本システムでは、それらの動作の一つ一つをタスクとして整理し、そのタスクを組み合わせることで作業シナリオを作成する仕組みとした。また、本システムでは主となる走行のタスクに関して「経路走行」と「接近走行」の 2 種類を用意している。図-3 にそれぞれの走行の概略図を示す。経路走行は基本的な走行タスクであり、予め指定した経路に沿って自動走行する。指定する経路情報は、有人操作で任意の経路を走行させて取得した座標値や速度情報により生成される。経路走行は、人間の操作を再現した走行であり、一度走行させなければならない手間が生じるが、すべてを机上で設定する手法に比べて、設定ミスや思わぬ動作が生じるリスクを低減できる。接近走行は、タスクの実行時に自己位置から目標位置へ向かう経路を自動で生成し、生成した経路に沿って自動走行する。主に積込み場や排土場で使用するタスクであり、作業の進捗によって積込み位置や排土位置が常に変化し、事前に経路を指定できない事象に対応するための走行である。

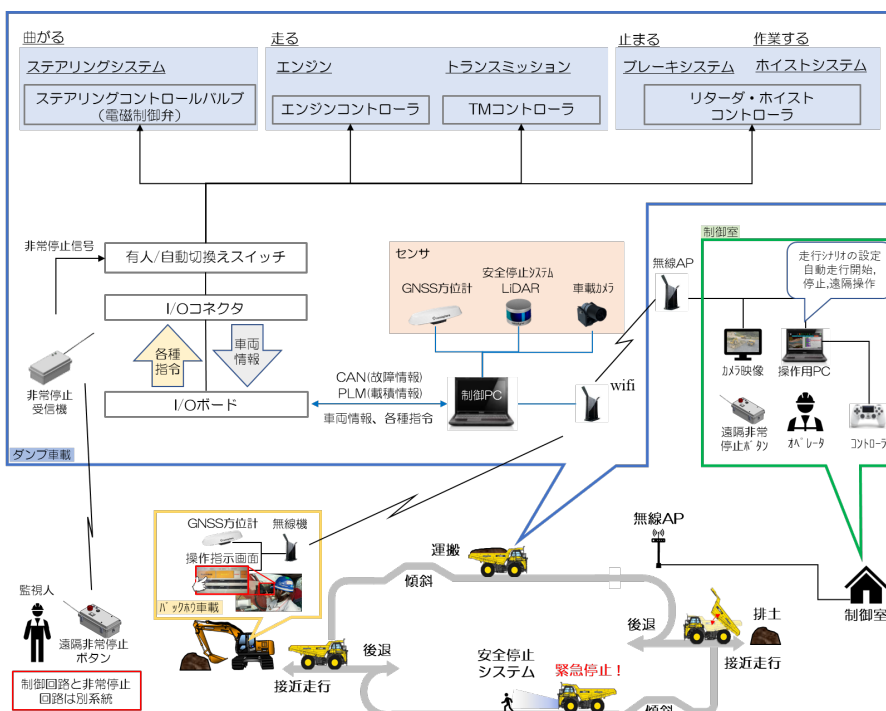


図-2 T-iROBO Rigid Dump のシステム構成

Fig.2 System configuration of T-iROBO Rigid Dump

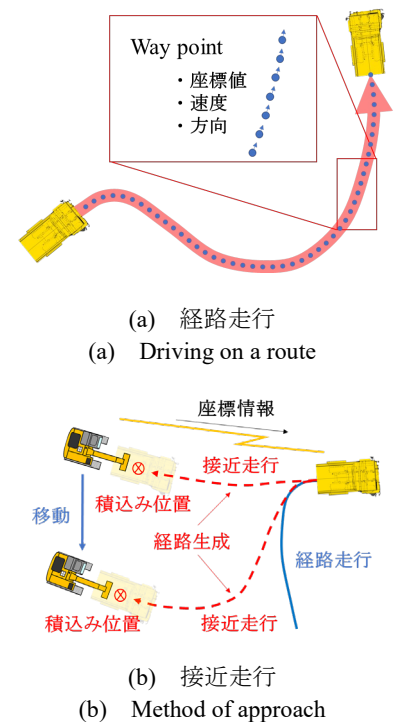


図-3 走行方式の概略

Fig.3 Overview of driving method

2.3 特長

2.3.1 積込み・敷均し機械との連携

従来の有人操作では、オペレータ同士がコミュニケーションを取りながら作業が実施されているため、積込み位置や排土位置が作業の進捗により移動しても問題なく作業を進めることができる。それに対して自動運転の場合は、一般的に、事前に設定した位置で積込みや排土を行うため、その位置が変更される度に再設定が必要となる。本システムでは、このような課題に対応するために、連携システムを構築した。このシステムは連携する建設機械に、GNSS 方位計・無線機・制御 PC・操作用モニターからなる装置を設置することで、T-iRD に対して、接近走行で用いる目標座標の送信や接近走行の開始、積込み完了後の走行開始指示が可能となる。図-4 に積込み機械との連携のイメージを示す。積込み機械の準備が整った段階で連携システムの「積込み位置確定」ボタンを押すことで、積込み機械

の現在位置座標を基に積込み位置が T-iRD に送信される。この積込み位置に対して経路が自動で生成され、T-iRD の接近走行が行われる。積込み完了後には、「積込み完了」ボタンを押すことで自動走行が再開される。敷均し機械との連携に対しても同様であり、敷均し機械の位置を基にした目標地点への走行・排土が可能である。



図-5 T-iROBO Rigid Dump の操作画面
Fig.5 Screen operation system of T-iROBO Rigid Dump

表-1 タスクブロックの種類及び役割
Table 1 Types and roles of task block

ブロック名	ブロック	動作内容
経路走行	経路走行 [waypoints]	記録した経路を追従走行
接近走行	接近走行 [座標] [経路] [経路生成後一時停止なし]	指定した座標へ経路を生成して走行
合図	合図 [音] [ホーン]	ホーンを鳴らす
排土動作	排土動作 [上げ下げ]	ダンプアップ・ダウンを行う
地点指定	地点指定 [座標] [X] [Y] [方位]	座標位置と方向を指定する
イベント待ち	イベント待ち	自動運転の処理を一時停止する
繰り返し	繰り返し [条件] [間]	間の動作を繰り返す

2.3.2 専門知識が無くても扱える UI

建設現場では積込み・排土場所といった目標地点、走行経路及び作業内容等が工事の進捗に伴い日々変化していく。そのため、事前に計画した作業シナリオをその都度更新する必要がある。本システムの UI では、できる限り簡易に自動運転の作業シナリオを作成するために、ビジュアルプログラミング形式を採用した。図-5 に本システムの操作画面を示す。T-iRD が実行する走行や排土動作等のそれぞれのタスクをブロックで表現し、そのブロックを積み重ねることにより、作業シナリオの作成を可能とした。ブロックの種類は表-1 に示す通りである。また、走行ブロックを選択すると、地図上に経路が表示される。これにより、直感的な操作が可能で、専門的な知識が無くても、現場の状況変化に伴う作業シナリオの変更を簡単に実施することが可能である。



図-4 T-iROBO Rigid Dump の外観及び搭載機器
Fig.4 Appearance and on-board device of T-iROBO Rigid Dump

2.3.3 複数の安全対策

本システムは複数の安全対策を実装している。

1つ目が各種センサ情報の常時監視機能である。センサから正常なデータが取得されない場合に自動運転を停止する。

2つ目が逸走防止機能である。設定した経路から逸脱した場合に自動運転を停止させる。

3つ目が自動運転中に懸念される人や障害物への接触防止機能である。これは、機体の前後に設置したLiDARにより周囲の状況を取得することで、走行経路上の障害物の有無を検出し、障害物が検出された場合に自動で減速・停止を行う機能である。自動走行停止後に障害物が移動または撤去され、エリア内に障害物が検出されなくなった場合は一定時間後に自動運転が再開される。

4つ目が万が一に暴走した場合の対策として非常停止装置である。遠隔から非常停止ボタンを押すことで強制的に走行を停止させることができる。この非常停止装置の無線信号は自動運転の指令を送る信号とは異なる周波数帯を使用しており、UI上から停止信号を送れない状況でも対応が可能である。さらに、非常停止装置の発信機と受信機は常に接続確認を行い、接続されていない場合は自動運転が停止する仕組みとすることで、T-iRDに停止信号が届かず非常停止装置が作動しないといった事態を防げるようになっている。

3. T-iDigital Field の概要

3.1 T-iDigital Field の概要

T-iDF はデータ利活用型の現場管理システムであり、Cyber-Physical System(CPS)の概念を用いて、建設現場内に点在するヒト・モノ・コトのあらゆるデジタル情報を取得して分析を行いデジタルツインを実現する。建設工事に伴う様々な諸問題を予見し、解決する支援策を施すことにより、現場のミス・ロスを防ぎ、生産性向上を図ることを目指している。

T-iDF はデータ層、基盤クラウド層、アプリケーション層の三層構造となっている(図-6)。まず、データ層は、現場の「ヒト」、「モノ」、「コト」の情報を様々なセンサやデバイスを用いて取得する層である。例えば、人や重機の位置情報・稼働状況について GNSS(Global Navigation Satellite System)端末やビーコンを用いて取得する。次に、基盤クラウド層では、データ層で取得したデータをネットワークを介してクラウド上で整理・集約する。アプリケーション層では、基盤クラウド層

で集約した様々なデータを抽出・加工・可視化し、アプリケーションとして提供する。建設現場関係者のニーズに合わせたアプリケーションを順次追加することができる。また、開発済みのアプリケーション間との連携も可能であり、2025 年 6 月現在では各工種に対応した 37 種類のアプリケーションが実装されている。インターネット接続端末を用いることで、Web ブラウザを通して、いつでもどこでも現場のデータをアプリケーション上で閲覧でき、建設現場関係者の QCDSE 管理(品質・コスト・工程・安全・環境)の支援が可能となっている。

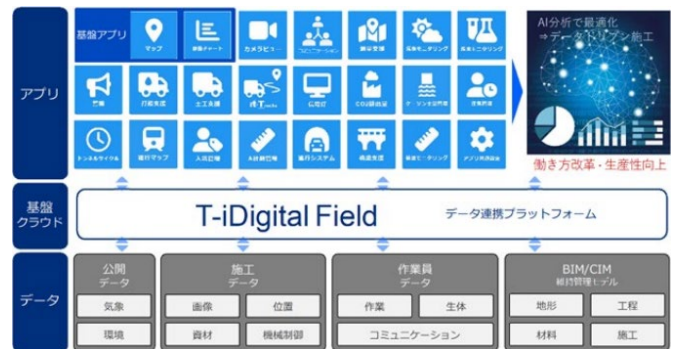


図-6 T-iDigital Field 全体概要図
Fig.6 Overview of T-iDigital Field

3.2 T-iDigital Field のアプリ

基盤クラウド層に集約されたデータを、建設現場のニーズに合わせて可視化するアプリを実装した。図-7に T-iDF 画面を示す。

建設機械と人の位置情報および稼働情報を集約する基盤アプリがマップアプリ及び稼働チャートアプリである。いつでもどこでも建設機械が稼働しているかを地図上のアイコンおよび時刻歴バーチャートで表示することができる。

土運搬車両および積込み機械の稼働情報と位置情報を加工・分析することで、土運搬の運搬経路や待機時間、運搬所要時間などの施工情報を可視化し、土工の進捗管理を支援できる。また、人と建設機械の位置情



図-7 T-iDigital Field のダッシュボード
Fig.7 Dashboard for T-iDigital Field

報を用いて所在エリアの判定や、建設機械との位置関係を判断し、作業員の無人化施工エリア侵入や重機への接近警報を発報し、メール通知を行える。さらに、車両や重機の走行軌跡を記録し、ルート走行のエビデンスや重機の最適な施工動線の分析への活用も可能である。

4. 現場導入

成瀬ダム原石山採取工事における骨材原石運搬作業に対して T-iRD 及び T-iDF を導入して「建設現場のオートメーション化」を実施した。その概要を以下に示す。

4.1 工事概要及び適用範囲

成瀬ダム原石山採取工事は、秋田県内を流れる雄物川水系成瀬川に建設される多目的ダムである成瀬ダムの堤体材料となる CSG 材及びコンクリート骨材の採取・製造・貯蔵および、それに伴う廃棄岩処理等を行う工事である。成瀬ダム及び現場内の位置関係を図-8 に示す。原石山から採取してストックヤードに仮置きされた骨材原石をプラントの投入口であるホッパーま

で運搬する作業に T-iRD 及び T-iDF を導入し、i-Construction 2.0 が提唱する 3 つのオートメーション化を実施した。実施期間は 2024 年 5 月から 6 月までのおよそ 2 か月間とした。

4.2 使用機器及び設備

図-9 に骨材原石運搬作業における使用機器及び設備の概要を示す。今回の実施では 2 台の T-iRD と遠隔操作バックホウ(CAT352)1 台の計 3 台の建設機械を用いて骨材原石運搬作業を実施した。ここで、3 台の建設機械にはそれぞれ T-iDF 用 RTK-GNSS ロガーを設置した。RTK-GNSS ロガーはリアルタイムの稼働情報と cm 級の高精度な位置情報を取得することができる。これは GNSS モジュール（国土地理院登録 1 級 GNSS 測量機と同等）、docomo4G 通信回線、Ntrip 方式^{注1)}による位置補正情報配信、重機の稼働と連動した給電装置、およびこれらの情報を統合処理し専用クラウドに送信するエッジ IoT デバイスにより構成される。また、作業員には、リアルタイムの位置情報をスマートフォンと同等の精度で取得することが可能な T-iDF 用 GNSS ロガーを持たせた。これは、モバイルバッテリーにて給電することで、8 時間以上の連続稼働が可能となっている。また、300 g 未満で小型軽量であり、持ち運びの負担が少ない。

上流展望台には制御室や建設機械との通信を行うための無線基地局、T-iRD や遠隔操作バックホウの状況を確認するための俯瞰カメラを設置した。制御室内には、T-iRD の操作画面、俯瞰カメラ映像、及び T-iDF の Web アプリケーション画面を常時表示するためのディスプレイやバックホウを遠隔操作するための操作卓(CAT Command Station)を配置した。

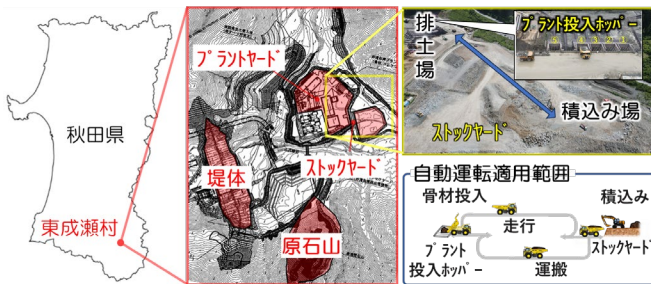


図-8 成瀬ダム及び現場内の位置関係
Fig.8 Location on site

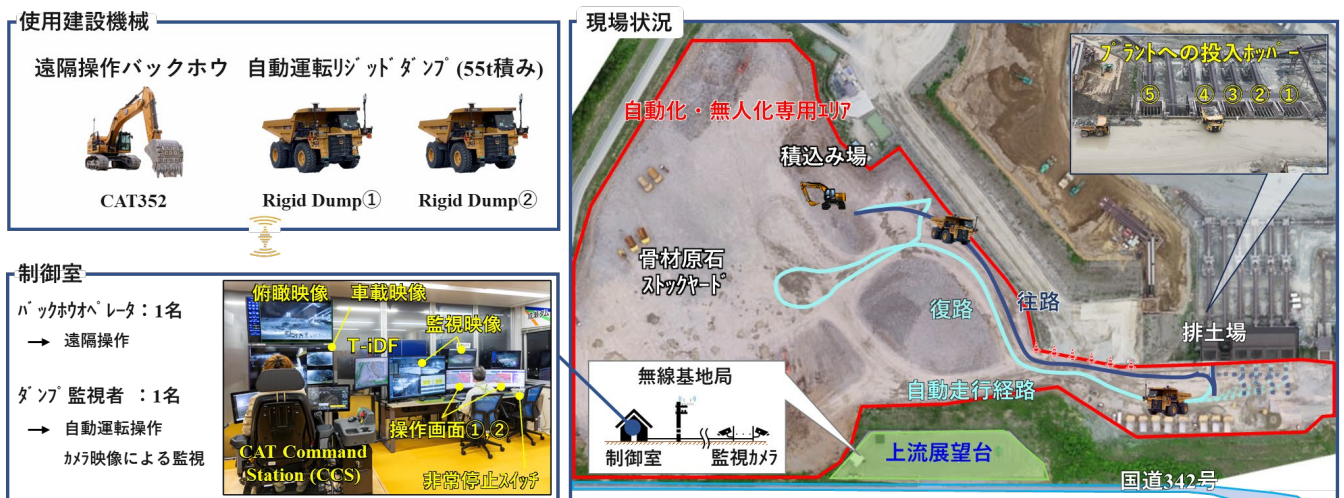


図-9 使用機器及び設備の概要
Fig.9 Overview of equipment and facilities

4.3 実施内容

3つのオートメーション化に対応した実施内容を以下に示す。

4.3.1 施工のオートメーション化

「自動施工における安全ルール Ver.1.0³⁾」を参考に、夜間作業時間帯を利用して自動化・無人化専用エリアを設定して骨材原石運搬作業を実施した。実施状況を写真-1に示す。運搬距離は片道約 250 m であり、積み込み場で積み込んだ骨材原石を青色で示す経路を自動走行してプラントまで運搬し、ホッパーへ投入した後、水色で示す経路で積み込み場まで戻るサイクルを繰り返して行った。道幅が狭い離合箇所・積み込み場・投入ホッパー手前の待機位置では自動運転を一時停止させ、進行に問題がないことを確認した後に運転再開させることで、2台の T-iRD が滞ることのないよう走行させた。上流展望台に設置した制御室では、表示されたカメラ映像や T-iDF の画面を確認しながら、バックホウの遠隔操作や T-iRD の設定・操作・監視を行った。現場施工は遠隔操作バックホウのオペレータ 1 名と T-iRD のオペレータ 1 名の計 2 名で実施した。

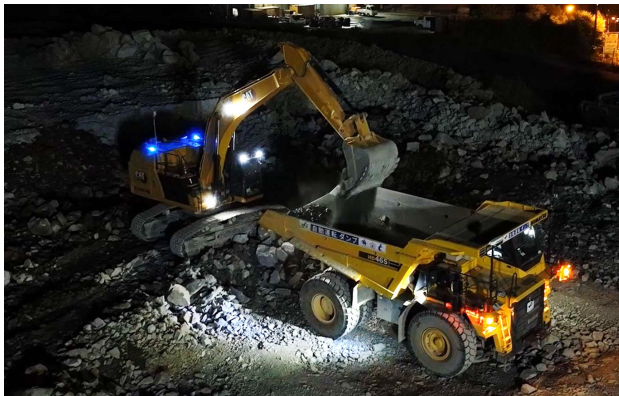


写真-1 骨材運搬作業の実施状況
Photo.1 Situation of transport operation

4.3.2 データ連携のオートメーション化（デジタル化・ペーパーレス化）

骨材原石の運搬量や運搬効率、及び自動運転ダンプトラックの実運搬距離等の施工データは T-iDF を利用してデジタル化し、リアルタイムにクラウド上へ収集した。図-10 に土工支援アプリ及びマップ軌跡アプリの画面を示す。骨材原石の積み込みはバックホウの稼働状況およびリジッドダンプの接近情報により自動判定した。荷下しは骨材投入口への移動と位置情報により判定した。これらの運搬履歴は Web 上で容易に表示・閲覧することができ、運土量をリアルタイムに確認する

ことができる。また、運搬中のリジッドダンプの位置情報を元に、荷下し前の待機時間を可視化した例を図-11 に示す。このように施工時の各種データを蓄積して客観的に検証・評価することで、作業のミス・ロスの可視化と作業見直しツールとしての活用を行った。

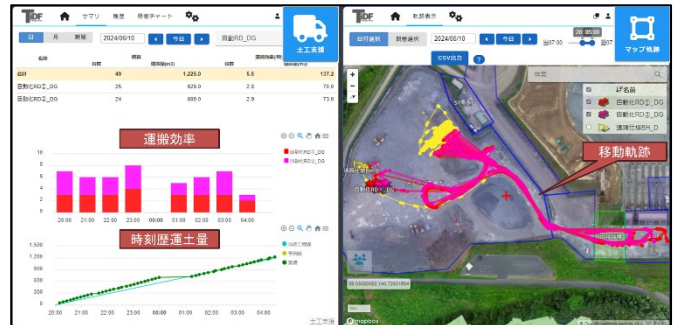


図-10 土工支援/マップ軌跡
Fig.10 Earthwork / Location path history

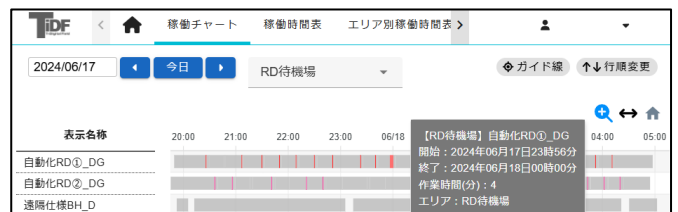


図-11 荷下し待機時間の可視化
Fig.11 Visualization of unloading waiting time

4.3.3 施工管理のオートメーション化（リモート化・オフサイト化）

T-iDF を利用した建設機械や作業員の位置や現場施工の進捗状況は、リモートから「いつでも」「どこからでも」アクセスが可能である。図-12 は Web 経由で作業員の現在位置リアルタイムで表示し、無人化専用エリアへ侵入しリジッドダンプ接近を検知している状況である。このように、建設機械のメンテナンスや故障等に、遠隔地からの状況確認が可能となり、Web 会議により復帰サポートをリモート化することが可能である。



図-12 作業員のエリア内作業警報
Fig.12 Alert for Worker

4.4 実施結果

今回、建設機械の自動運転と遠隔操作を併用し、作業区域を無人状態として、延べ 47,217.8 t の骨材原石の運搬作業(累計運搬回数 988 回)を行った。また、以下の 3 点について、オートメーション化の効果を確認できた。

(1) 生産性の向上

建設機械 3 台を 2 名で操作することでオペレータ 1 名の省人化が行えた。また、データを Ti-DF クラウド上に自動収集させることで、従来は施工担当者が作業報告のために繰り返していたデータ入力や、1 日の施工終了後に資料作成や取り纏め報告等に要していた作業時間を 20 分/day 程度削減することができた。

(2) 安全性の向上

施工エリアを無人にすることで安全性が向上し、始業時や不具合対応等で施工エリア内に立ち入る際も、Ti-DF を活用することで作業員の現在位置をリアルタイムで把握し、退去を確実に実施したうえでの建設機械の自動化・遠隔化施工を可能とした。

(3) 快適性の向上

従来の施工では、建設機械にオペレータが搭乗して作業していたため、振動や騒音、粉塵等といった過酷な労働環境で作業する必要があったが、今回の実施では、施工エリアを確認できる上流展望台に設置した制御室内から、自動化建設機械の制御や遠隔操作を行った。そのため、制御室内の快適な環境での作業が可能となった。

5. おわりに

T-iRD と T-iDF の 2 つの技術を実際の建設現場に適用し、i-Construction 2.0 が提唱する 3 つのオートメーション化を実施した。その結果、オートメーション化によ

る生産性・安全性・快適性の向上を確認することができた。しかし、今回の適用範囲は小規模な骨材原石の運搬作業であるため、今後はオートメーション化の適用範囲や対象を拡大させたいと考えている。具体的には、自動化建設機械の運用台数の増加や対象機種の拡張、それに伴う協調制御システムの整備である。それにより、更なる省人化や様々な工種への適用が可能となる。また、継続して建設現場の様々なデータを蓄積し、膨大な施工データ解析することで最適な施工計画の立案や、自動化へのアルゴリズム開発に反映する等の、さらなる生産性向上を目指した開発も進めていきたいと考えている。それにより、建設現場をオートメーション化し、安全で快適な生産性の高い建設現場の実現に貢献していきたい。

謝辞

本現場実証にあたり東北支店成瀬ダム原石山採取工事作業所と、水谷建設㈱の関係者に、多くのご協力とご意見を頂きました。ここに謝意を表します

注

注1) Ntrip(The Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)方式は、インターネット経由で GNSS の補正データを配信・受信するための通信方式。

参考文献

- 1) 国土交通省 i-Construction 委員会：“i-Construction ～建設現場の生産性革命～”，2016.
- 2) 国土交通省：“i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～”，2024.
- 3) 国土交通省 大臣官房参事官(イノベーション)グループ：“自動施工における安全ルール Ver.1.0”，2024.