

次世代建設生産システムの現場適用と生産性向上への展望

ロックフィルダムへの適用紹介とインフラ無線システム

田 中 秀 昭・太 田 裕 士

熟練作業員の高齢化による減少，低い生産性，高い労働災害発生率という建設業の重要問題を解決するため，省人化及び生産性と安全性の向上を同時に図ることを目的として，筆者らは建設機械の自動化技術を核とした次世代建設生産システム A⁴CSEL[®] (Automated/Autonomous/Advanced/Accelerated Construction system for Safety and Efficiency and Liability：クワッドアクセル) の開発を進めている。本稿ではその成果として振動ローラ，ブルドーザ，ダンプトラックの各自動化システムの概要を紹介する。また，各システムを連携動作させる通信バックボーンとしてインフラ無線システムを実用化，その要素技術について報告する。

キーワード：ダム工事，自動運転，ICT 施工，無人化，安全，無線 LAN，メッシュ無線 LAN

1. はじめに

建設施工における熟練作業員の高齢化と建設作業従事者全体の減少が予測される中，現場での生産性向上と省人化，そして作業安全性の確保による労働災害の抑制が強く求められている。筆者らは，その実現を目指す一つの方法として，次世代建設生産システムの開発を進めている（図—1）。その特徴は，いわゆる建設ロボットといった専用機ではなく，汎用の建設機械をベースに自動化を進め，熟練オペレータの運転技能をデータ化したものと組み合わせたものである。建設作業の中でも定型的な作業や繰り返し作業は自動化した建設機械で行い，機械の不得意な作業計画や手順の立案は人が安全な場所で行うことを基本としている。これまでに振動ローラとブルドーザの自動化技術を開発し，RCD ダムの施工現場においてコンクリートの自動転圧や自動まき出し・整形に関しての有用性を明

らかにしてきた。これら2機種はロックフィルダム施工において実運用を行った。今般，「土砂を運搬・荷下ろしして，まき出し後，転圧する」というダム盛立工事の一連作業を自動化するため，新たにダンプトラックの自動化を進めており，これらの連携動作を安定して運用するためのバックボーンとなる通信システムの構築も行った。以下，その概要を紹介する。

2. 各システムの概要

(1) 自動化振動ローラ

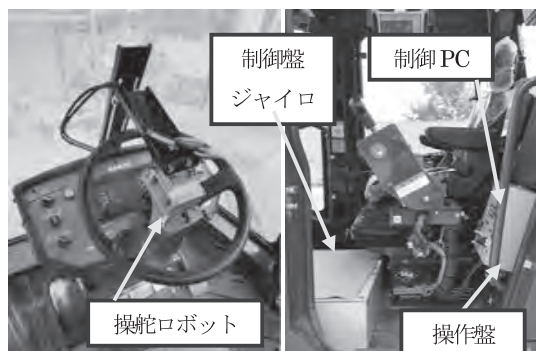
自動化振動ローラを写真—1に示す。汎用の振動ローラに計測機器・自動化装置を搭載して自動化を実現した。この後付け法の採用によってローラ本体に大掛かりな改造を必要とせず，低コストかつ短時間に多



図—1 次世代建設生産システムのコンセプト



写真—1 自動化振動ローラ



写真一2 自動化機器の配置（振動ローラ車内）



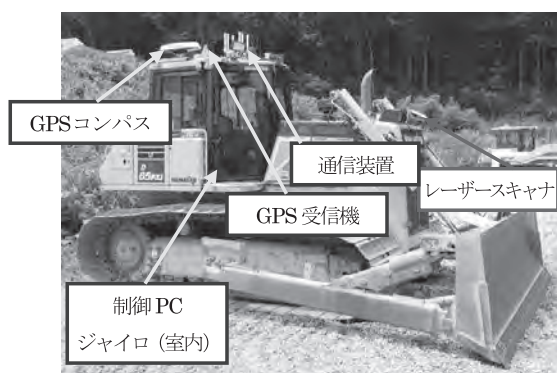
写真一3 2台の振動ローラによるコア材自動転圧

機種種の振動ローラの自動化を可能とした（写真一2）。

本機はRCDダムでの試行後、安全機能の強化、操作の簡略化、振動対策等を行い、ロックフィルダム施工におけるコア材、ロック材の転圧に適用した。ロックフィルダムの施工においては、1つの転圧エリアを2台の振動ローラによって分担施工することが多い。このため1台のタブレットによって複数の自動化振動ローラへの自動転圧指示を可能とした（写真一3）。

(2) 自動化ブルドーザ

ブルドーザの自動化は建機メーカーとの共同研究開発により、同社製ICTブルドーザをベースに自動化を実現した（写真一4）。自動化ブルドーザは、荷下ろしされた材料を指定した厚み（高さ）とまき出し形状

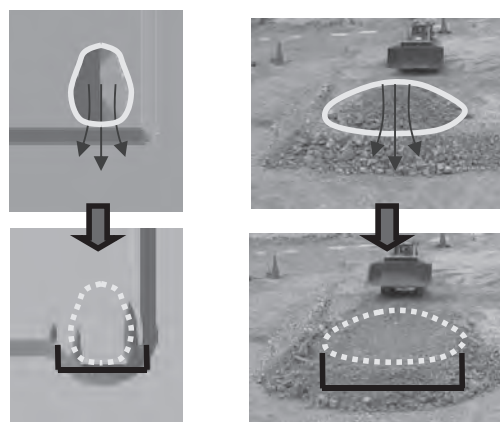


写真一4 自動化ブルドーザ 22tクラス

に応じて全自動でまき出しと整形を行う。ブルドーザの作業は荷下ろしされた材料の種類や位置、山の形状によってまき出し時の材料挙動は異なり、最適なまき出し経路は多様に変化する。熟練オペレータは目視と経験によってこれに対応するが、現場実験において全てを確認することは不可能である。このため筆者らは、ブルドーザのまき出しシミュレーションによるまき出し経路のモデル化を実施、併せて走行経路、ブレード高さなどの制御法を自動計画した。なお、今回ロックフィルダムでの試行にあたり、従来のRCDダムに用いた19tブルドーザに加えコア、フィルター用として22t、ロック用として41tの自動化ブルドーザを新たに開発、運用を開始した。

(a) まき出しシミュレーション

まき出しシミュレーションにおいては、ブルドーザの押土作業に伴う土砂の挙動とブレードの接触をシミュレートし、土砂の形状がどのように変化するかを予測する。一例として55tダンプ1台分のロック材（約25m³）をダンプアップし、これをブルドーザによってまき出すケースについてシミュレーション結果と実際のまき出した状況の比較を図一2に示す。



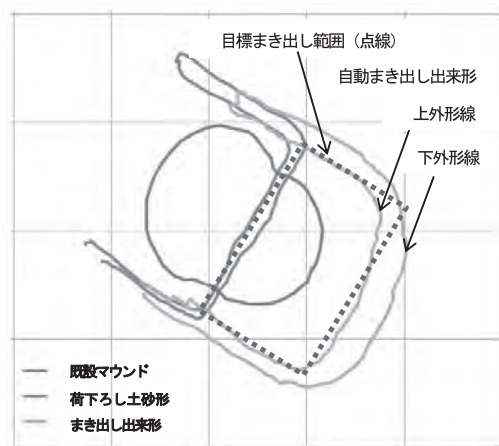
シミュレーション 実際のロック材挙動
図一2 作業シミュレーションと実際のまき出し

(b) 経路のモデル化と作業計画の自動策定

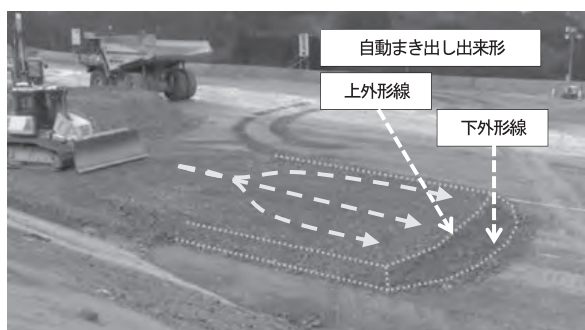
ロックフィルダムでは、コア、フィルター、ロックそれぞれに荷下ろしした材料とブルドーザの作業方向、材料の山形状やまき出し範囲、一層の厚みの仕様などは異なる。このため実作業における熟練オペレータの作業解析を行い、施工条件ごとに経路のモデル化を実施した。まず、まき出しシミュレーションの結果と作成した経路モデルからブルドーザの自動運転の基準となる作業（経路）計画を材料種類ごとに複数作成する。これを現場状況に応じて修正しながら自動化ブルドーザの作業計画を自動策定する。

事例としてフィルター材の自動まき出し結果を図—3および写真—5に示す。図—3に点線で示す長方形の目標まき出し範囲に対し、自動まき出し出来形がほぼ同じ形状であることから自動化ブルドーザの良好な性能を確認することができる。

これまでにコア、フィルター、ロックそれぞれについて作業計画を作成、ダンプトラックと連携した自動まき出しを連続して行えることをロックフィルダムでの試行において確認した。



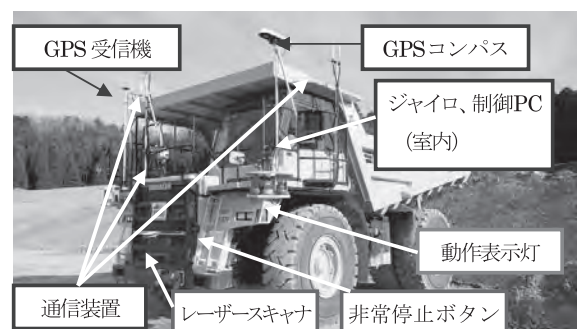
図—3 フィルター材自動まき出し結果（幅 10 m）



写真—5 フィルター材自動まき出し結果（幅 10 m）

(3) 自動化ダンプトラック

ダンプトラックの自動化はブルドーザ同様、建機メーカーとの共同研究開発により同社製 55 t ダンプトラックをベースに実現した（写真—6）。ダンプトラックの走行速度、操舵角などの情報は車体搭載のセンサを用いて計測している。ダンプトラックへの各種制御指令値はスロットル（アクセル）量、リターダ（ブレーキ）量、操舵角度、ベッセル昇降速度等である。これらは制御 PC によって演算し PLC を介して各装置へ指令される。



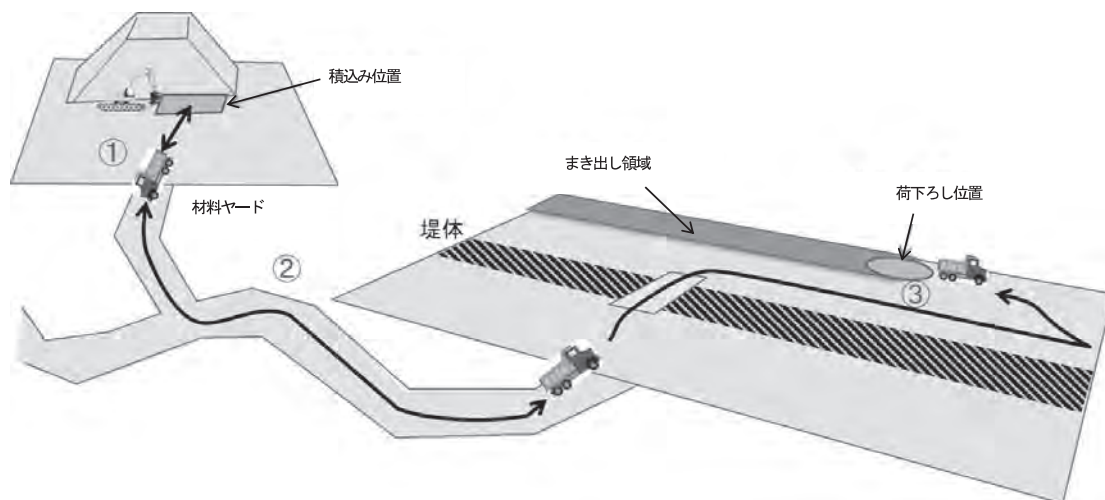
写真—6 自動化ダンプトラック 55 t 積み

(a) ダンプトラックの自動化に必要な機能

ロックフィルダム工事におけるダンプトラックの基本作業として次の①～③が挙げられる（図—4）。

- ①材料ヤードの材料を積み込み
- ②ダム堤体まで材料を運搬
- ③堤体のまき出し領域に材料を荷下ろし

この3つの作業を自動化するためにダンプトラックの基本機能として「走行」、「停止」、「操舵」、「作業（ベッセル昇降）」の自動化を実現した。さらにロックフィルダム工事においてダンプトラックの自動化に求められる機能は次の2点である。



図—4 ロックフィルダムにおけるダンプトラックの作業

①走行経路の自動生成機能

工事用道路など走行可能な領域、材料の積込み位置と荷下ろし位置、他の車両や重機との衝突回避など各種制約を満たす走行経路を自動的に生成する機能を有すること。

②指定経路への精度良い追従走行機能

自動生成した走行経路に対して、走行路面の勾配や不陸、降雨による路面状況の変化等があっても精度良く指定経路に追従できる走行機能を有すること。

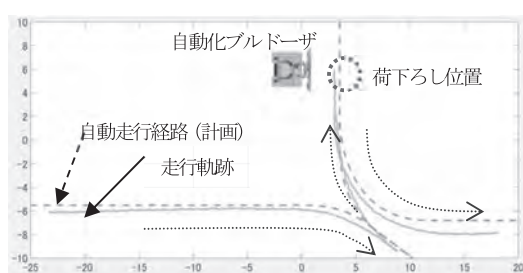
この2つの機能を堤体付近においてコア材の運搬および荷下ろし作業に対応できるように走行制御プログラムに実装し、実証を行った。

(b) ロックフィルダムでの実証試験

自動化ダンプトラックを自動化ブルドーザと連携させ、ダム堤体内のコア材運搬、コア盛立現場の荷下ろし、退避、次に自動化ブルドーザによるまき出し、整形まで一連の自動運転機能について検証を行った。走行経路は事前に図—5の破線のように定めておき、走路上は障害物などが無い状態で自動運転を行った。その際の走行軌跡は図—5の実線となり、荷下ろし位置での誤差は約50 cm以下であった。なお、自動化ブルドーザはダンプトラックの荷下ろし位置が1 m程度ずれても、まきだし経路の自動修正を行う機能を有しており、自動化ダンプトラックと連携した自動まき出しが行えることを確認した(写真—7)。

(4) インフラ無線システム

広範囲の施工現場において多数の自動化重機を運用



図—5 コア材運搬での自動走行経路と走行軌跡



写真—7 自動化ダンプトラックと自動化ブルドーザの連携作業

するためには、高速かつ高い信頼性を有する無線通信を必要とする。また、走行中のダンプトラックとの通信、ならびにタブレットからの接続機能も必要である。無線通信に求められる主な機能は次の3点である。

① Wi-Fi が利用できること

図—1に示したように、一人で複数の建設機械を同時に稼働させるためにタブレット等を利用する。このため Wi-Fi との接続機能は必須である。

② 伝送遅延が小さく、途切れないこと

複数の自動化重機間での共調連携や近接防止など通信の中断は許容できず、伝送遅延も小さいほど良い。

③ ダンプトラックの走行中に利用できること

30 km/h 程度以上で走行するダンプトラックに対しても安定した通信の確保を必要とする。

これらの機能を満たすため以下の評価を行った。

(a) 無線 LAN 装置の評価

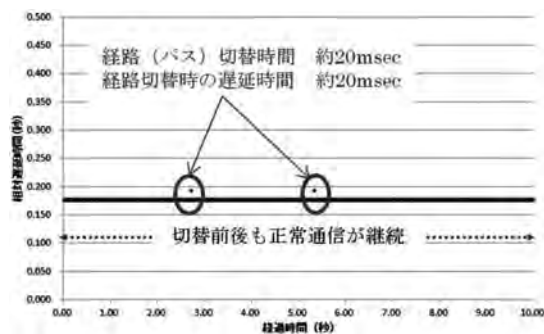
広範囲の施工現場において移動体との通信を確保するには、Wi-Fi 用の定置式アクセスポイント（以下 AP）を複数設置し、AP 間を有線で接続する方法が一般的である（図—6）。移動体はいずれかの Wi-Fi AP に無線接続し、移動によって通信状態が悪化すると他の AP に切替を行う（ローミング方式）。



図—6 一般的なアクセスポイントの配置

移動体の速度が概ね 10 km/h 以下である振動ローラおよびブルドーザにおいては、ローミング方式の利用に問題はない。しかし、より高速に移動するダンプトラックとの通信に際し、30～40 km/h での通信試験を行ったところローミング方式では AP の切り替えに失敗し、通信中断が発生した。このため、より高速に AP を切り替えられる通信方式としてメッシュ無線 LAN の評価を行った。なおメッシュ方式では AP の切替方法がローミング方式と異なり、移動体側の装置は常時複数の AP と無線接続（パス）を確保、常時最善の回線を選択して通信を行う（パスの切替）。

1 周約 500 m の試験走行路にメッシュ AP を 4 か所



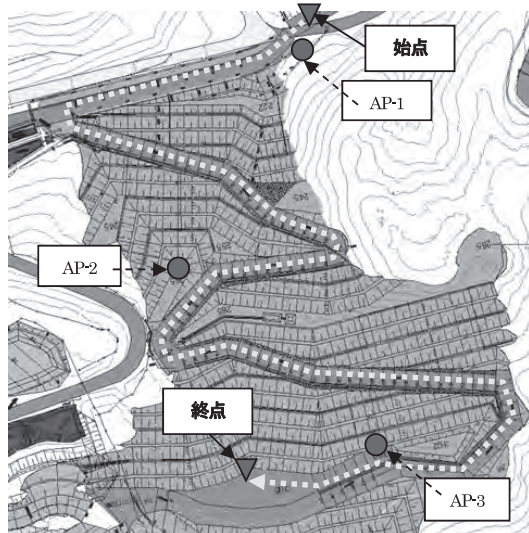
図一七 メッシュ無線 LAN による通信状態

設け、メッシュ無線 LAN 端末機を設置した車両を約 30 km/h で走行させた。通信状態の一部を図一七に示す。図中ではバスの切替が 2 回発生しているが、走行中の通信中断は発生せず、良好であった。また走行中のバスの切替は 20 回／分程度の頻度で発生していた。

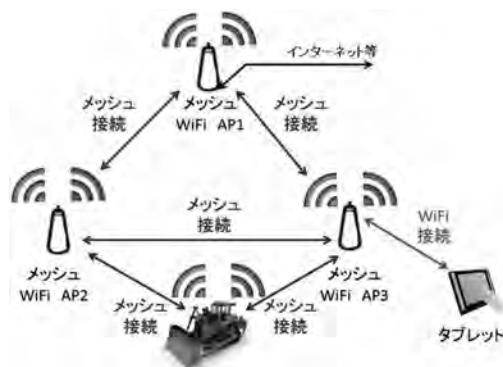
(b) 現場地形での評価

次にメッシュ無線 LAN をダム工事用道路に設置し実走試験を行った（図一八）。始点から終点までの走行距離約 1000 m、高低差 93 m 斜距離 320 m の登り走路にメッシュ AP を 3 台配置した。試験車両にはビデオカメラを搭載し、最大 40 km/h で走行中のビデオ画像（約 2 Mbps）についてデータ伝送を行った。その結果、走行中においてもビデオ画像に乱れはなく、低遅延であり通信中断の無い良好な結果を得られた。

ここまでの結果よりダンプトラックの移動中の通信手段としてメッシュ無線 LAN は有効であると判断した。しかし自動化重機への指示を行うタブレットにメッシュ機能はない。このため重機間の通信にはメッシュ機能、重機と指示者の通信には Wi-Fi を利用できるハイブリッド構成のインフラ無線システムを構築した（図一九）。これにより、自動化振動ローラ、ブルドー



図一八 現場材料運搬路での実走試験



図一九 インフラ無線システム（イメージ）

ザ、ダンプトラックおよびタブレット等の通信を一元化するとともに、現場内走行中のダンプトラックにおいても安定した画像と信号の伝送を実現した。

3. おわりに

本報文で紹介した各自動化システムは、単独の自動運転から複数台の同時運転、さらにブルドーザとダンプトラックの連携運転を実現するに至った。今後、さらに多台数・多機種の総合的な自動化を進めていく所存である。その中では既存の施工法の自動化ではなく「自動化を前提とした施工法」へ発展させるべきであろう。また、建設業における画期的な生産性向上を実現するためには発注者や建設業界に加え、コンサルタント、大学、メーカーや異業種など産官学一体となった幅広い研究開発活動を進めることが重要であると考えます。

謝 辞

最後になりますが、自動化ブルドーザ、ダンプトラックの開発、運用にあたり、D61PXi、D65PXi、D155AXi、HD465 についてコマツ殿と共同研究開発を行った際、コマツの方々には大変お世話になりました。ここに誌面を借りて心よりお礼を申し上げます。

J C M A

【筆者紹介】

田中 秀昭（たなか ひであき）
鹿島建設㈱
機械部 自動化施工推進室
担当部長



太田 裕士（おおた ひろし）
鹿島建設㈱
機械部 自動化施工推進室
担当部長

