

建設機械の自動化を核とした次世代施工システム 次世代建設生産システム A⁴CSEL[®] (クワッドアクセル)

三 浦 悟・黒 沼 出・浜 本 研 一

建設業界共通の喫緊の課題である「人手不足・熟練者不足」、「低い建設生産性」、「労働災害や事故の多さ」に対する解決法の一つとして自動化建設機械を用いた施工システムの開発を進めている。このシステムでは、作業指揮者がタブレット端末から作業指示を出すだけで複数の建設機械が同時に並行して自動運転を行うことが可能となっている。本報では、施工の安全性、生産性の大幅な向上を図ることを目的として開発した自律型自動建設機械を適用した、次世代施工システムのダム工事での実施状況について報告する。

キーワード：自動建設機械、建設ロボット、自律制御、振動ローラ、ブルドーザ

1. はじめに

熟練技能者不足と高齢化のみならず建設作業員全体の減少が続く、建設事業費の縮小傾向も予想されている状況下では、現場生産性の向上、すなわち少ない人員で品質を確保しつつ施工することが必須となる。また、長年にわたり建設業の重要課題となっている労働災害抑制の抜本的対策も強く望まれている。それらを実現する一つの方法として、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の研究開発を進めている。図-1に次世代建設生産システム A⁴CSEL[®] (クワッドアクセル: Automated/Autonomous/Advanced/Accelerated Construction system for Safety, Efficiency, and Liability) のコンセプトを示す。この施工システムの特徴は、いわゆる建設ロボットのような専用機械ではなく汎用機械をベースとした自動建設機械を開発するとともに、熟練者の運転操作をデータ化しそれを基に自動運転させること、及び状況に応じて決定しなければならない作業計画は人間が担当し、定型化された作業は自動建設機械が自動で行うことによって、少ない人員で多くの機械を動作させることで

安全で効率の良い施工が実現することにある。以下にその概要を記す。

2. 自律型自動建設機械の開発

近年、大規模土工事やダム工事を中心に ICT を活用した、いわゆる情報化施工システムの導入が積極的に進められている。建設機械に関連する代表的な例としては、GPS によって測定された建設機械の位置での設計データを照合して、例えば、ブルドーザであればブレードの高さを教示、あるいは自動制御することによって、熟練技能を持たないオペレータでも精度良く仕上げることを可能とする「3D-MG」や「3D-MC」と呼ばれる施工技術や、振動ローラの走行軌跡から転圧エリアと転圧回数をオペレータに提示して作業の品質を評価する「盛土締固め管理システム」といった管理技術などによる効率化、合理化が報告されている。

筆者らは、これらの技術をベースとして、就業人員・熟練作業員の減少、現場安全性の向上等に対してより一層貢献できる技術として、現状と同等以上の施工効率を極力少ない人数で達成することを目標に建設機械の自動化の研究開発を進めている。

今般、その第一段階として、汎用の振動ローラとブルドーザを対象に自動化装置や計測制御装置を後付けた、自動転圧システムと自動まき出しシステムを開発した。以下に、開発したシステムの概要と、本システムを RCD ダム現場他で試適用した結果を示す。



図-1 自動施工システム (A⁴CSEL[®]) のコンセプト

(1) 振動ローラ自動転圧システム¹⁾

(a) 開発の概要

転圧作業の自動化施工システムを実現するため、まず、振動ローラの自動化を行った。汎用の振動ローラにセンサや自動化装置を後付けするとともに制御用のPCを搭載し、計測データに基づいた自動制御信号を制御用PCから出力することで動作する自動振動ローラを実現した。

施工範囲や作業仕様などは作業指揮者が携帯するタブレットPC上で作成する。この作業指示を無線送信すると、自動振動ローラ上の計測制御PCによって走行経路を自動設定し、転圧作業を開始する。以降、安全確認を行いながら所定の指示内容を完了するまで自動で作業を行うことができるシステムとなっている。

本システムの現場導入にあたっては、特に、安全対策に十分留意した。遠隔操作型の建設機械も含め、これまで人が運転しない機械を一般の工事現場に導入した事例はなかった。このため、例えば、自動走行中は常時、前後の路盤形状を計測して、一定の値以上の凹凸形状に対しては障害物と認識して停止し、障害物を取り外されると運転再開するなど、人や他の建設機械が錯綜する施工実態に適した機能などを付加し、多重の安全確保を施した自動運転システムを実現した。

また、作業効率の向上を目的に一人の作業指揮者によって複数機械を同時並行作業させることができるよう、1台のタブレットPCから複数台の振動ローラに作業指令を出すことを可能としている。

(b) 自動化装置システム

写真一1に自動化した振動ローラ（酒井重工製SD451, 運転質量：11t, 全長：4.1m, 全幅：2.3m, 高さ：3.0m）を示す。この振動ローラに設置した各種装置について以下に説明する。



写真一1 振動ローラ

①後付け自動化装置

汎用の振動ローラを自動化するために後付け自動化装置を設置した。既設のハンドルにモータ駆動の操舵用装置を設置し、これによって操舵を制御できるようにした。また、前・後進の切り替えや起振の入り切りは既設の電子回路にスイッチング回路を接続して制御する方法を採用した（図一2）。

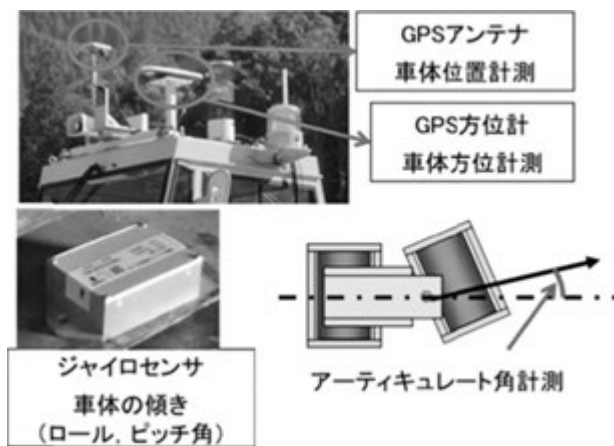


図一2 後付け自動制御装置

②計測センサ

振動ローラに各種センサを搭載した（図一3）。主なものを以下に記す。

- ・車体位置計測：RTK-GPS
- ・車体方位計測：GPS方位計
- ・車体の傾き（ロール、ピッチ角）計測：ジャイロ
- ・アーティキュレート角（前輪ローラとキャビンの相対角）



図一3 計測センサ類

③安全装置

前方監視センサとしてレーザスキャナを前後に設置し、障害物や法肩・法尻を検出し、その結果に基づき停止や走行方向を反転することができるようにした。また車体位置が万が一指示した設定範囲外に出た場合には停止する。さらに緊急時には非常停止ボタンを押すことで直ちにエンジンを停止できるようにして、多

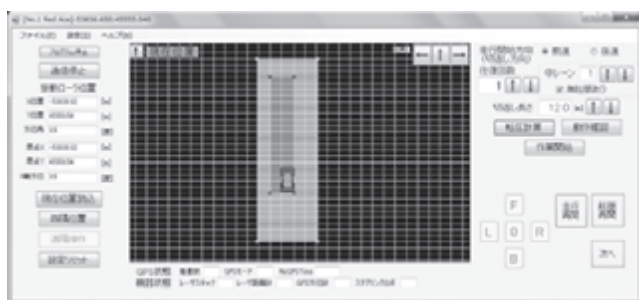


図—4 安全装置類

重の装備で安全性を確保している（図—4）。

④作業指示インターフェース

作業指示画面を図—5に示す。施工範囲や転圧回数、ラップ幅、切り返し長さなどの詳細な作業内容の指示をタブレットPCのタッチパネルで簡単に行うことができる。



図—5 作業指示画面の例

⑤走行制御アルゴリズム

走行制御アルゴリズムを検討するために、熟練オペレータの操作を計測し、そのデータに基づいて車体位置や姿勢と目標走行線の距離や角度に応じて補正されるよう制御アルゴリズムを構築し、ハンドル操作をフィードバック制御している。特に、隣接レーン移動時の走行については、直線走行とは異なり、目標走行線を状況に応じて設定しなければならないため、熟練オペレータへのヒアリングと操作データを参考に目標軌道を作成している。

(c) RCD ダム施工での実適用

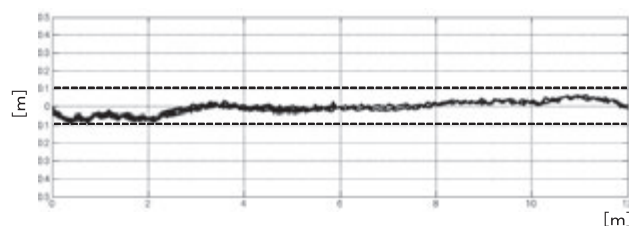
本システムを福岡県・五ヶ山ダム堤体工事のRCDコンクリート転圧作業に適用し、実用性を検証した。

まず、実施工において一人の作業指揮者で2台の自動化振動ローラを稼働させることができ（写真—2）、少ない人員で多くの建設機械をコントロールできることを確認した。

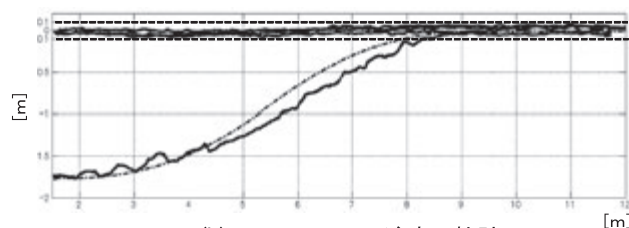
また、転圧時の機械の走行精度を尺度として、自動



写真—2 2台同時施工の状況



(a) 直進走行時の軌跡



(b) レーンチェンジ時の軌跡

図—6 自動転圧時の走行軌跡

施工の品質評価を行った。転圧走行時の軌跡を図—6に示す。直進走行では直線 $y = 0$ を目標として転圧し、レーンチェンジ走行では一点鎖線を目標軌道として走行後、直線 $y = 0$ を目標として転圧を開始する。太い点線は直線 $y = 0$ に対する ± 10 cm の誤差領域を示しており、どちらの図からも転圧時の誤差が ± 10 cm 内に収まっていることが分かる。

(2) ブルドーザ自動まき出しシステム²⁾

(a) 開発の概要

振動ローラと同様、自動化施工システムの前提となる自動ブルドーザの開発を進めた。写真—3に示すブルドーザ（コマツ製 D61-PXi, 機械質量：18.9 t, 全長：5.5 m, 全幅：3.9 m, 高さ：3.2 m）に各種センサや自動化装置を後付けし自動化した。なお、ブルドーザは振動ローラと異なり、掘削、押土、まき出し等、多くの作業に用いられるが、本開発では第一段階として、ダム工事、大規模土工事で作業量の多いまき出し作業を自動化の対象とした。



写真-3 ブルドーザ

なお、本システムは(株)小松製作所との共同研究開発で実施している。

(b) 自動化システム

①後付け自動化装置

後付け自動化装置としてブルドーザに搭載するのは、後述する計測センサ等からの信号を基に専用インターフェースを介してブルドーザ内部のコントローラと通信する計測制御用 PC で、これによって車体の走行や操舵、排土板操作を制御する。計測制御用 PC からブルドーザへ制御指令を送信すると同時に、ブルドーザの走行速度や各種レバー操作量、排土板操作量などの機体情報を取得することもできるようにして、本システムにおける制御則の基本形として活用している熟練オペレータの操縦データを記録することや、それらのデータを基に同じ動作を再現することなどにも使用している。

②計測センサ

ブルドーザに次の量を計測するため各種センサを搭載した。

- ・車体位置計測：RTK-GPS
- ・車体方位計測：GPS 方位計
- ・車体の傾き（ロール、ピッチ角）計測：ジャイロ

③走行制御アルゴリズム

作業内容に応じて事前に目標経路を設定し、自車位置と目標経路との誤差に応じてステアリング量を演算し、目標経路へ追従するよう走行させる。同時に、走行区間ごとに前後進速度や排土板操作量などをそれぞれ設定し、作業に合わせた複雑な動作を全自動で行うことができる。

実機を用いた目標経路への追従実験結果の一例を図-7に示す。オペレータが実際にまき出し作業を行った経路（点線）を目標として自動走行により追従させた（実線）。複雑な目標経路に対して追従可能であることが確認できた。

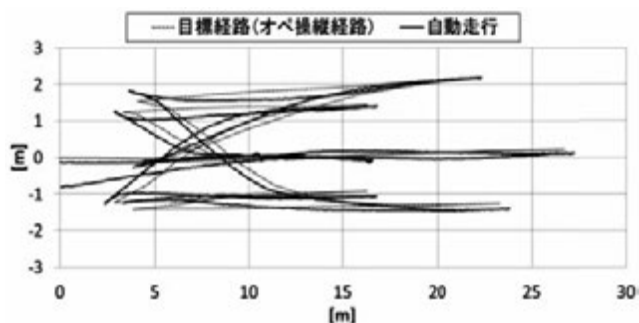


図-7 オベ軌跡への追従結果

(c) 造成工事での試験施工

本システムの性能確認のため、実際の造成工事において試験施工を行った。ダンプトラックにより荷下ろしされた約 20 m^3 （直径 5 m、高さ 3 m）の土砂を対象に、設定した作業経路、排土板動作でまき出しを行った。その結果、所定の仕様（幅 8 m、厚さ 30 cm）を確保しながら全自動でまき出し作業を行うことができた（図-8）。

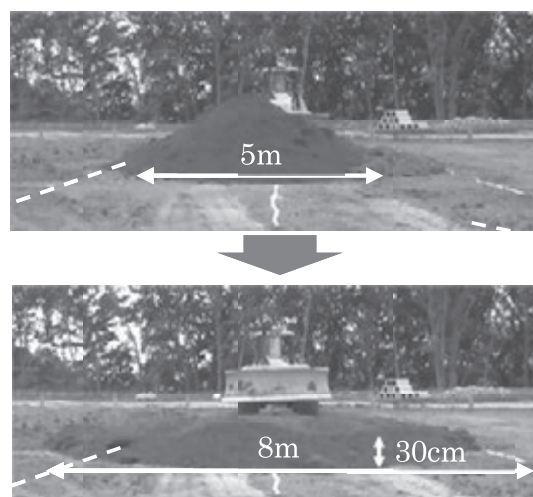


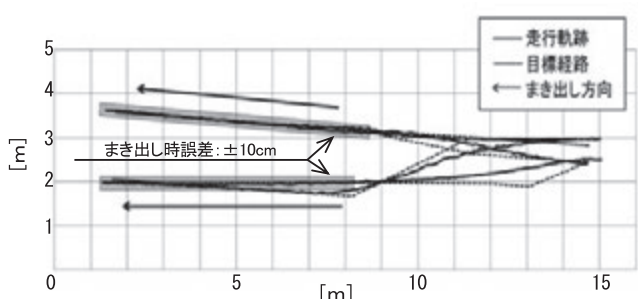
図-8 造成工事での自動まき出し結果の例

(d) RCD ダム堤体工事での試験適用

RCD ダム施工現場に本システムを試験導入し、実用性を検証した。福岡県・五ヶ山ダム堤体工事において写真-4に示すように、RCD コンクリートのまき出し及び整形作業の自動化性能を評価した。図-9は自動まき出し・整形作業時のブルドーザの目標経路に対する実走行経路の差の例を示している。図では目標経路は点線、走行軌跡は実線である。図中ハッチングの範囲はブルドーザが排土板に土砂を抱え、マウンド整形のために排土板の上下高さ、及び左右角度を制御しながら走行する範囲を示すと同時に、目標経路に対する $\pm 10 \text{ cm}$ の誤差範囲を示している。これを見ると、マウンド整形経路への移動範囲（図の右半分）で



写真—4 RCD ダム工事での自動運転状況



図—9 RCD コンクリートまき出し・整形作業時の経路追従性能結果例



写真—5 RCD コンクリート自動まき出し・整形状況

は、直線距離の短い折れ線状の目標経路に対して、実際の走行軌跡の円滑さを優先したために目標経路との差が大きくなっているが、整形作業時にはほぼ±10 cm 程度の誤差で目標経路に追従させることができていた。この結果、写真—5 に示すように矩形のマウンド整形が施工上十分な精度を持って実施することができた。

3. おわりに

汎用の振動ローラとブルドーザに自動化装置や安全

装置を後付けして建設機械の自動化を図り、また、熟練オペレータの運転データを基に構築した制御アルゴリズムを導入することによって自動転圧システムと自動まき出しシステムを開発し、実工事において試験施工を行いその性能、有効性を確認した。今後、性能向上やシステムの高度化を継続して進める予定である。

一方、本報で紹介した自動化システムを実現場に本格的に展開、普及させるためには、自動化機械に合わせた施工手順や方法の検討が不可欠となる。これに関しては、ゼネコンだけで進められることは限られているため、発注者やコンサルタント、協力会社とのコラボレーションが必要となると考えており、機器、システムの開発と並行して実施していきたいと考える。そして、このような施工の仕組み作りも含めた研究開発活動を進めることが、土木の生産活動の大きな部分を占める施工段階の次世代への変革、業界の問題解決につながるものと考えている。

謝 辞

本試験適用では福岡県五ヶ山ダム建設事務所より多大なご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

J C M A

《参考文献》

- 1) 浜本 研一ほか：振動ローラの自動転圧システムの開発（その2）、土木学会第70回年次学術講演会，VI -050，2015。
- 2) 黒沼 出ほか：ブルドーザの自動撒出しシステムの開発，土木学会第70回年次学術講演会，VI -051，2015。

〔筆者紹介〕



三浦 悟 (みうら さとる)
鹿島建設㈱
技術研究所
プリンシパル・リサーチャー



黒沼 出 (くろぬま いづる)
鹿島建設㈱
技術研究所 先端・メカトロニクスグループ
主任研究員



浜本 研一 (はまもと けんいち)
鹿島建設㈱
技術研究所 先端・メカトロニクスグループ
主任研究員