

32. CSG ダムにおける自動ダンプトラックを用いた材料運搬システム

鹿島建設株式会社 技術研究所
鹿島建設株式会社 機械部

○石川 貴大, 高木 優
服部 良彦, 福原 正晃, 矢富 孝治, 伊勢 卓矢

1. はじめに

建設業では近年、人手不足、高齢化に伴う熟練技能者不足や時間外労働規制による建設工事での生産性低下、及び安全性の低下が懸念されている。こうした課題に対し、生産性と安全性の向上手段として、自動化された建設機械等を用いて施工を行う自動化施工の適用が期待されており、国土交通省が建設現場のオートメーション化実現を目指す i-Construction 2.0 を策定する等、自動化施工の実現へ向けた様々な取り組みがなされている。

鹿島建設では、建設機械の自動化技術を核とする次世代建設生産システム A⁴CSEL[®]（クラウドアクセル）の研究開発を進めており、大分川ダムや小石原川ダム等での実証試験を経て、成瀬ダムの実施工へ本格適用してきた。A⁴CSEL は、現場条件に応じて立てた最適な作業計画を基に、定型作業を自動化建機で施工するシステムである。図-1 に示すように、施工領域外にいる管制員が 1 人で複数の自動化建機を稼働することができるため、生産性と安全性の向上が期待される。成瀬ダムでは、最大 98%の自動化施工率（打設リフトの施工面積に対し自動化施工を実施した面積の割合）を達成¹⁾し、ダム工事の月間打設量国内最高記録を樹立する等、生産性の向上を実現している。

2022 年度まで成瀬ダムでは、ブルドーザと振動ローラによる自動化施工の適用を推進してきた。今般、自動化率の向上による、さらなる生産性向上を目的とし、新たに開発した自動ダンプを用いた材料運搬システムを実施工へ導入した。しかし、本システムを実施工へ導入するためには、3 つの課題が存在した。1 つ目の課題は、最適なタイミングでの積込みの実現である。製造と施工の最大能力を發揮するためには、積込み待ち時間を最小とするようダンプを運用する必要がある。2 つ目は、複数台の自動ダンプを安全に運用する方法の確立である。施工領域長と運搬量から自動ダンプの稼働台数を 7 台としており、ダンプを衝突することなく運用しなければならない。3 つ目は、GNSS に依存しない自動走行機能の確立である。材料積込み設備付近において GNSS による姿勢の計測精度が低下することが確認されたため、



図-1 A⁴CSEL による施工イメージ

GNSS を用いない自動走行が求められる。

本論文では、実施工適用へ向けた各課題を解決するために実施した、材料搬送設備と自動ダンプの開発について述べる。材料搬送設備に関しては、1 つ目の課題を解決すべく、積込み状況等を A⁴CSEL と共有し、搬送設備の積載状況等から求めた積込み可能予測時間を用いることにより、待ち時間を最小とするようダンプを誘導するシステムを構成した。自動ダンプに関しては、2 つ目と 3 つ目の課題を解決するため、予測位置等を用いた衝突防止機能及び推定値を用いた自動走行機能の開発を実施した。そして、成瀬ダムの実施工へ適用し、有用性の実証を行った。

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では、材料搬送設備と自動ダンプの概要を述べ、自動ダンプによる材料運搬システムを説明する。第 3 章では、実適用へ向け改良した自動走行制御について、実験結果とともに述べる。第 4 章で実適用結果を紹介し、第 5 章で本論文をまとめる。

2. 自動化施工システム

本章では、成瀬ダムの工事概要、材料搬送設備及び自動ダンプの概要を紹介し、自動ダンプを用いた材料運搬システムについて述べる。

2.1 成瀬ダムの工事概要

成瀬ダムは、秋田県雄勝郡東成瀬村椿川地内に建設される、洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい、水道用水の貯水、発電を目的とした多目的ダムであり、堤体積約 4,850,000m³、堤頂長



写真-1 材料搬送設備配置：製造設備から右岸天端へ



写真-3 堤体全景と材料搬送設備

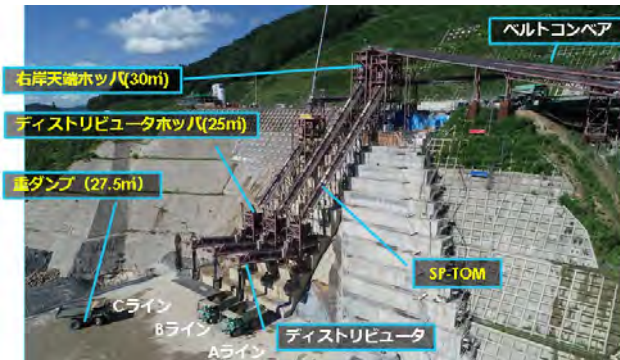


写真-2 材料搬送設備配置：右岸天端から堤体へ

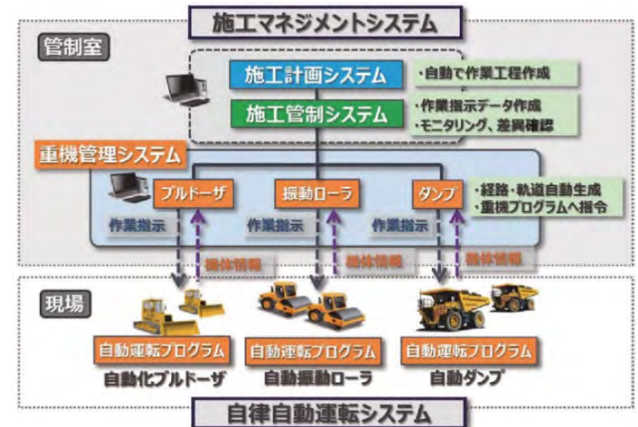


図-2 自動化施工マネジメントシステム

755.0m、堤高 114.5m の国内最大級の台形 CSG (Cemented Sand and Gravel) ダムである。2018 年から本体工事に着手しており、2026年度（執筆時点）の完成を目指し施工が進められている。成瀬ダムが位置する東成瀬村は豪雪地帯であり、冬季の堤体打設工事が困難である。そのため、大量高速施工を実現すべく A⁴CSEL が適用されている。2022 年度までは、堤体を左右岸で分断し施工していたことや材料搬送設備の設置工程等の理由から、ブルドーザと振動ローラによる自動化施工を実施し、ダンプトラックはオペレータが運転していた。

2.2 材料搬送設備

大量高速施工を実現するためには、最適なタイミングで材料をダンプへ積み込むことが必要となる。そこで、A⁴CSEL との連携を可能にすべく、製造設備と搬送設備の自動化を実施した。本節では、そのシステムについて述べる。

成瀬ダムにおける高速施工では、時間当たり約 900m³ の材料供給が必要となる。そのため、SP ミキサ²⁾ を主要製造設備とする CSG 製造プラント（1 系列あたり 300m³/h）を 3 系列構成する。

製造した CSG 材は、延長約 800m の長距離ベルトコンベア（写真-1）によって右岸天端まで搬送される。その後、写真-2 に示す SP-TOM (Special Pipe Transportation Method)³⁾ やホッパを介して右岸天端から堤体上へ搬送し、ディストリビュー

タによってダンプへの積み込みを行う。ダンプは、写真-3 に示すように、堤体上で積込んだ CSG 材をまき出し位置へ運搬する。

本システムは、ベルトコンベアの積載状況やホッパ内の残量を基に、CSG 材の積み込み可能時刻を秒単位で予測することが可能である。そのため、3 系列ある積み込み先のうち、最速で積み込み可能となる系列へダンプを誘導できる。また、自動化施工システムに対し、積み込み可能予測時刻やホッパで計測した積み込み量に基づいた積み込み完了信号を送信することにより、A⁴CSEL と連携し、最適なタイミングでの積み込みが実現可能となる。

2.3 自動化施工システムと自動ダンプ

自動化施工マネジメントシステムを図-2 に示す。本節では、このシステムのうち自動ダンプに関する内容を説明する。その他自動化建機における各システムの機能や詳細については、文献^{4,5)}を参照されたい。施工計画システムは、施工するエリア情報や作業に必要な台数等の機械情報を基に、施工計画を作成するシステムである。施工管制システムは、積み込み可能予測時刻や積み込み進捗に基づき、積み込み先及び施工計画システムで事前計画したまき出し位置へ材料を運搬する自動ダンプの割り当てを行う。また、割り当て状態や自動ブルドーザの作業進捗に応じて自動ダンプに作業指示

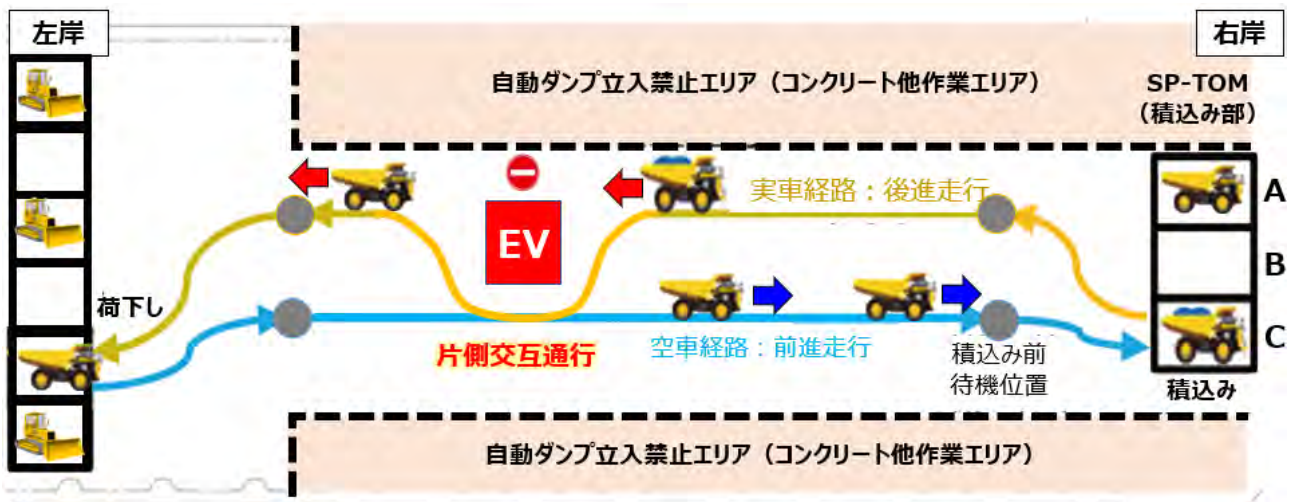


図-3 自動ダンプ走行模式図

を出す。管理システムは、目標地点まで走行する経路の生成や自動ダンプ同士の衝突防止を行いつつ、施工管制システムからの作業指示に基づき、各ダンプに対し走行や荷下ろしの指示を出す。自動運転プログラムは、ダンプに搭載した PC (インターフェース社 ECC-E211C(s)) 上で動作しており、センサ値の計測及び管理システムからの作業指示に基づく電磁制御弁の操作を行う。

自動ダンプ (写真-4) は、小松製作所製の HD465 (車長約 9.4m, 車幅約 4.6m, 車重 44.6t) をベースに、ステアリングやベッセル等の油圧回路を自動操作するための電磁制御弁を設置し、自動制御が可能となるよう改造されている。GNSS アンテナ, GNSS 受信機を搭載した方位計, ジャイロセンサ等の計測用センサ及び安全装置を取り付け、姿勢の計測や緊急時の停止を実施している。ここで、位置計測には、RTK-GNSS (Real-Time Kinematic-GNSS) を用いており、方位及び測位状況が Fix 解における位置計測精度はそれぞれ、0.3°と 2cm 以内である。また、ジャイロセンサによる角速度の計測精度は、 $\pm 0.5^\circ/s \pm 1\%$ である。

2.4 自動ダンプを用いた材料運搬

自動ダンプの走行模式図を図-3 に示す。実車は材料を積載した状態を、空車は積載していない状態を示す。実車経路は材料を積載した状態で荷下ろし位置へ走行する経路、空車経路は荷下ろし終了後に積み込み位置へ走行する経路を示しており、両経路間は、積み込み位置や荷下ろし位置付近で経路が交差する箇所を除き、すれ違い可能である。実車経路と空車経路の直線部分は、同一直線上の経路を走行する。堤体上には、管理・点検用エレベータを設置するための空間となるエレベータシャフト (EV) 等の構造物が存在しており、ダンプは構造物を迂回し、迂回箇所片側交互通行を実施する。外部コンクリート等の作業を実施して



写真-4 自動ダンプ外観

いるエリアに対しては、ダンプが進入しないよう走行領域を設定し、安全を確保する。材料の運搬及び荷下ろし手順を以下に示す。

- (手順1) ベルトコンベアと SP-TOM を用い、プラントで製造した CSG 材を堤体上へ搬送する。
- (手順2) 3 系列の積み込み先のうち、最短で積み込み可能となる系列のディストリビュータ下へダンプが前進で自動走行する。
- (手順3) 一定量の CSG 材をダンプへ積み込む。このとき、ホップにて積み込み量の計測を行う。
- (手順4) 積み込み完了信号を受けた自動ダンプは、荷下ろし位置へ後進で走行し、材料の運搬及び自動ブルドーザと連携した荷下ろしを行う。

自動ダンプの走行方式における特徴は、前進での走行を基本とするオペレータの運転と異なり、積み込み位置から荷下ろし位置までの最長 600m の経路を後進で走行する点である。これにより、経路途中での切り返し動作を無くすことができ、走行時間と距離の短縮が可能となる¹⁾。

管理システムは、構造物を迂回し、積み込み位置と荷下ろし位置を結ぶ経路を動的かつリアルタイムに生成する。これにより、積み込み先と荷下ろし先を動的に割り当てることができ、時々刻々と変

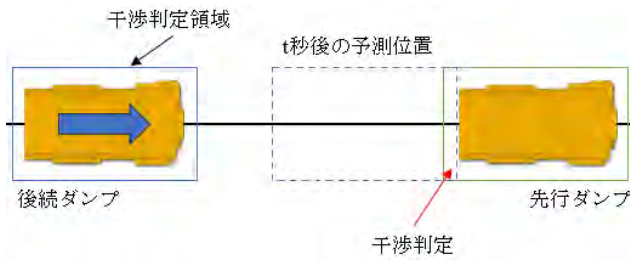


図-4 干渉回避の模式図

わりゆく施工状況への柔軟な対応が可能となる。

3. 現場適用へ向けた自動走行制御機能

現場への適用では、材料運搬を実現する機能に加え、次に示す課題を解決することが求められる。

(課題1) 最大 7 台の自動ダンプを衝突することなく、安全に運用する必要がある。

(課題2) 積込み設備付近において GNSS による姿勢の精度が低下するため、GNSS に依存しない自動走行が必要となる。

本章では、各課題を解決するために改良した自動走行制御機能について述べる。

3.1 複数台ダンプの衝突防止

成瀬ダムの自動化施工では、最大 7 台の自動ダンプが連携して走行する計画である。このとき、図-3 に示すように、実車経路と空車経路の直線部で同一経路を走行するため、先行するダンプへの衝突が懸念される。また、荷下ろし位置付近等、経路が交差し、すれ違いができない箇所での衝突を防止することも必要となる。そこで、自動ダンプ同士を衝突させず安全に運用するため、以下に説明する衝突防止機能を管理システムに実装する。

他のダンプとの干渉回避の模式図を図-4 に示す。各ダンプは、機体周囲に安全マージンを設定した干渉判定領域を有する。そして、点線で示す走行速度を用いて計算した t 秒後の予測位置と他ダンプの判定領域との重複を確認する。この領域の重複によって衝突を予測し、予測時間に応じて減速や停止指示を与えることで衝突を防止する。ここで、停止距離は、運用時の走行速度等の観点より 15m (約 1.5 車長) と設定した。この値は、現場や施工条件に応じて変化する値である。図-5 に示す荷下ろし位置付近では、実車ダンプは、実車の直線経路から荷下ろし位置へ、荷下ろしを終えた空車ダンプは、荷下ろし位置から空車の直線経路へ走行する。そのため、経路交差箇所でのすれ違いは困難である。そこで後着したダンプは停止して先着ダンプの通過を待ち、1 台ずつ順番に交差部を走行させる排他制御によって衝突を防止する。片側交互通行部や積込み位置付近も経路が交差するため、同様に排他制御を行い、衝突を防止する。

図-4 に示す干渉回避機能の実機検証結果を写真-5 に示す。写真より、約 1.5 車長の距離を保って

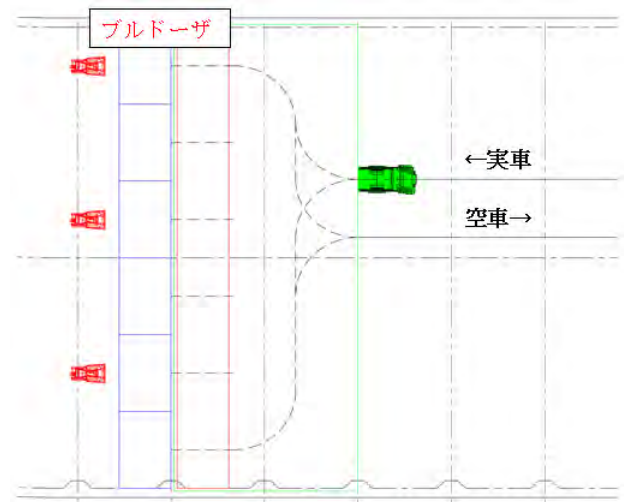


図-5 荷下ろし位置付近での経路交差箇所



写真-5 干渉回避機能での停止状況

停止していることが確認できる。経路交差箇所では、複数台が交差部に到着した状況においても 1 台ずつ順に進入していることを確認した。以上より、自動ダンプを安全に運用する機能を確立した。

3.2 推定値を用いた自動走行

成瀬ダムでの施工では、2.2 節にて述べたように、製造プラントから堤体上まで材料を搬送し、ダンプへの積込みを行う。積込み時は、写真-6 に示すように、車体前方に設置した GNSS アンテナと方位計の上空がディストリビュータによって遮蔽された状態で停止する。構造物に一部でも囲まれると GNSS 信号の遮蔽やマルチパスが発生し、位置と方位の計測精度が低下する⁶⁾ため、ここでも遮蔽による計測精度の低下が確認された。例えば、RTK-GNSS による位置計測では、通常 Fix 解 (2cm 以内) から Float 解 (30cm から 3m) まで低下し、方位計測では、5°程度のノイズや最大 30°程の値飛びが発生した。こうした状況下において連続的に自動走行を行うためには、GNSS に依存しない自動走行機能が必要となった。

この自動走行機能として、車速 v とジャイロセンサで計測されたヨー軸周りの角速度 ω から、位置 (x, y) と方位 θ を推定するオドメトリ⁷⁾を用い、非 GNSS 環境下での自動走行を実施する。ステップ t における推定値は、次式によって求められる。

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \\ \theta_{t-1} \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} \cos \theta_{t-1} & 0 \\ \sin \theta_{t-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{t-1} \\ \omega_{t-1} \end{bmatrix}$$

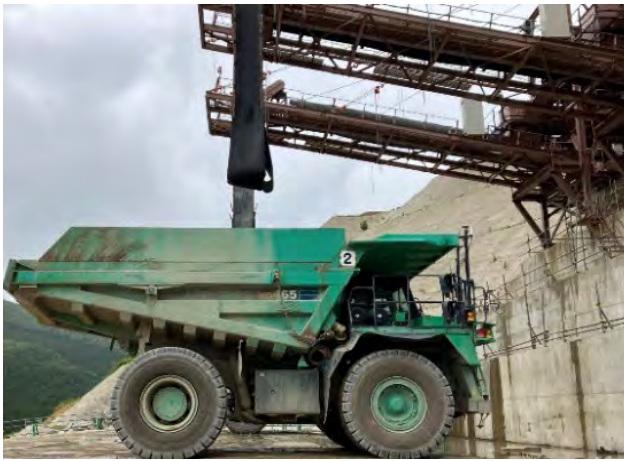


写真-6 ディストリビュータ下の停止状況

ここで、計算誤差等の観点から、オドメトリを用いた自動走行では、以下の条件を設定する。

- (条件1) 走行可能な経路は、ディストリビュータから一定距離以内の直線のみとする。
- (条件2) 切り替え直前の計測値を初期姿勢とする。
- (条件3) 対象とする動作は、ディストリビュータ下への前進進入、荷こぼれ防止を目的とし材料形状を2山にするための2m程の後進移動、及び積込み完了後の後進退出とする。
- (条件4) 方位は推定値を用いる。位置は、測位状況がFix解であればGNSSによる計測値を、それ以外であれば推定値を用いる。

目標位置に対する許容停止精度は、積込まれた材料形状の安息角より幾何的に、手前側に100cm以内、奥側に50cm以内と定めた。走行時の経路追従許容誤差は、ダンプ同士の衝突を防止するため、100cm以内とし、ディストリビュータ下での走行速度は10km/h以下とした。

実機検証結果を述べる。3系列あるディストリビュータのうち、センサ上空の遮蔽度合いが最も大きく、条件が最も厳しい中央のディストリビュータにて検証を実施した。対象とする動作のうち、GNSS測位状況がFix解からFloat解へ変化し、制御に用いる位置が計測値から推定値へ切り替わることが予想される、ディストリビュータ下への前進行における結果を示す。自動走行時のGNSS計測位置（十字）と推定位置（三角形）を図-6に示す。原点は、積込み時の目標停止位置であり、縦軸と横軸は、左右と前後方向の位置を示す。図より、走行中に測位結果がFloat解へ低下したため、GNSSによる計測位置において、進行方向に対して横方向に約40cm程度のずれが生じている。この結果より、GNSSのみを用いた自動走行では、経路へ追従できず衝突する恐れがあることが分かる。ディストリビュータ下での自動走行の制御で用いた位置と目標経路（直線）を図-7に示す。図

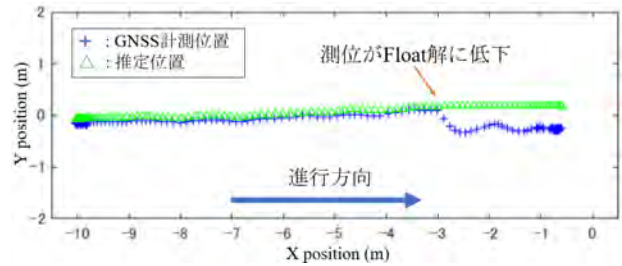


図-6 GNSS 計測位置と推定位置

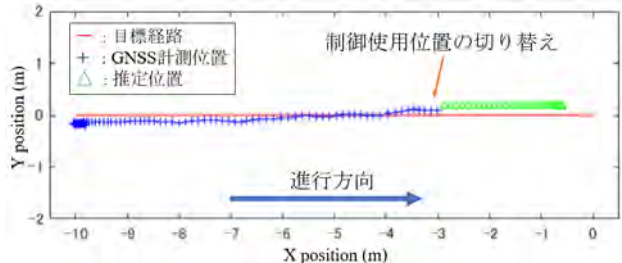


図-7 自動走行で用いた位置と目標経路

に示すように、走行中に測位結果がFloat解に低下した時、制御に使用する位置を、GNSSによる計測位置から推定位置へ切り替えていることが確認できる。推定値使用時の走行における、左右方向の経路追従誤差は約16cm、停止時の前後方向の距離は、約80cm手前側であり、要求仕様を満たしていた。また、(条件3)にて述べた、材料形状を2山にするための後進移動及び積込み完了後の退出動作も、オドメトリを用いて自動走行可能であることを検証した。以上より、位置と方位の計測精度が低下するディストリビュータ下において、GNSSに依存せず自動走行を継続する手法を開発した。これにより、荷下ろし位置から積込み位置まで、経路への追従精度を担保しつつ連続的に自動走行することが可能となった。

4. 現場適用

開発した機能を実装した自動ダンプを複数台走行させ、材料搬送設備や自動ブルドーザとの連携試験を実施した後、成瀬ダムの実施工へ適用した。

実車経路走行時における、自動ダンプの走行軌跡と目標経路への追従誤差を図-8及び図-9に、実車経路上の構造物付近での自動走行の状況を写真-7に示す。図-8と写真-7より、実車経路の直線上に存在する構造物を迂回し走行していることが確認できる。図-9に示す追従誤差の符号は、経路に対する位置関係を表しており、追従誤差は平均約6.6cm、最大約21.9cmであった。実適用時における自動ダンプの目標経路に対する平均追従誤差は約10cm、目標位置に対する荷下ろし精度は±50cm以内であり、次工程の自動ブルドーザによるまき出し作業への円滑な移行が可能な精度であった。

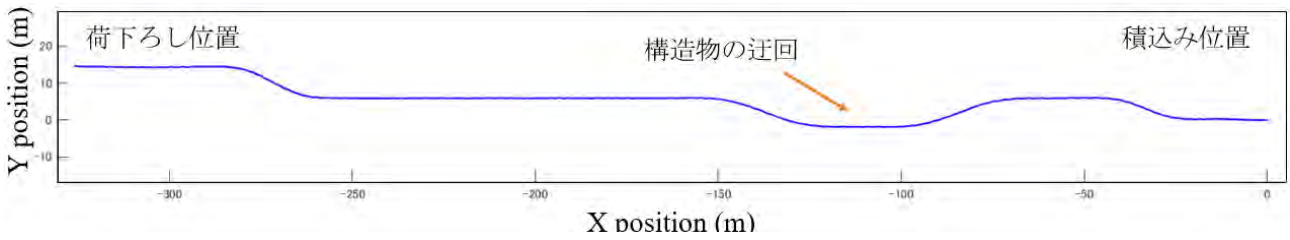


図-8 実車経路の自動走行時における走行軌跡

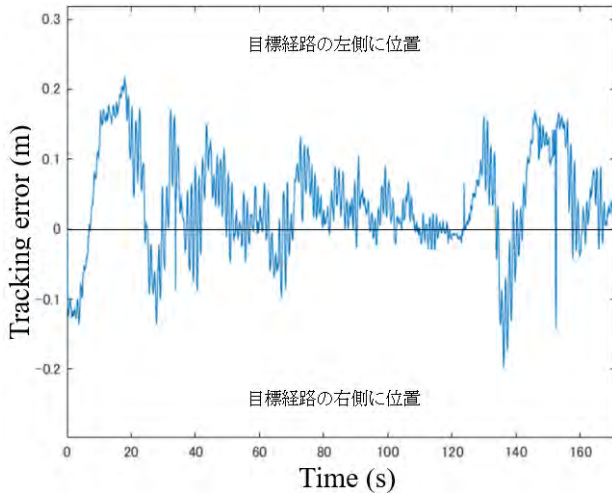


図-9 目標経路に対する追従誤差

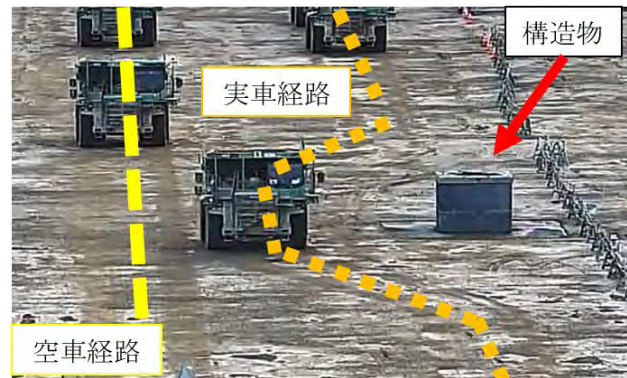


写真-7 構造物付近での自動走行

実施工での自動ダンプ運用期間は、延べ 3.5 か月間であり、1 日の最大運搬時間と運搬台数は、それぞれ約 4 時間と 47 台であった。この運用期間において、自動ダンプ同士の衝突が発生することなく、安全な運用を実施することができた。ディストリビュータ下での GNSS による姿勢の計測精度が低下した状況においても、推定した姿勢を用いることにより、経路追従精度を担保しつつ連続的な走行を実施した。さらに、A⁴CSEL と連携した最適なタイミングでの材料搬送と積込み、及び後進を基本とする自動ダンプの走行方式による走行時間と距離の短縮により、CSG 材の連続かつ最速運搬を実現した。加えて、1 人の管制員で最大 7 台の自動ダンプを稼働することにより、これまでの成瀬ダムでの自動化施工と比較し、最大 6 人の省人化を実現した。

以上より、成瀬ダムの実施工において、自動ダンプを用いた材料運搬システムの安全な運用を継続的に実施し、その有用性を実証した。

5. おわりに

本論文では、自動ダンプを用いた材料運搬システムの概要を示し、実適用へ向けて必要となった自動走行制御の改良について、実験結果を用いて紹介した。そして、本システムを導入した自動化施工システムの成瀬ダムへの実適用結果を基に、十分な成果が得られたことを確認した。

今後、他現場、他工種への展開を目指し、勾配路等の多様な走路環境に対応した自動制御システムの確立へ向けた開発に取り組む。造成等の現場では、これまで A⁴CSEL を適用してきたダム現場の堤体等における平坦な走路上での走行と異なり、勾配路での走行が必要となる。また、つづら折り箇所等での衝突防止や離合機能等も求められるであろう。今後、これまでに開発してきた制御システムや衝突防止機能等の管理システムの機能を発展させ、さらなる生産性向上の実現を目指す。

参考文献

- 1) 菅井ら：成瀬ダムにおける完全自動化システムの実現，第79回土木学会全国大会年次学術講演会，2024
- 2) 青野ら：連続・高速・大量 CSG 製造設備の開発と合理化システム 世界初となる台形CSGダム，建設の施工企画，753巻，pp. 89~94，2012
- 3) 松本ら：SP-TOM による搬送適用範囲拡大，第77回土木学会全国大会年次学術講演会，2022
- 4) 菅井ら：自動化施工システムの台形CSGダム工事への適用，第76回土木学会全国大会年次学術講演会，2021
- 5) 浜本：自動化による建設施工の革新とその展望 一大規模システムの制御系設計論の構築を目指して，計測と制御，60巻7号，pp.504~508，2021
- 6) 塙ら：衛星測位に用いる受信機の性能評価方法の提案，土木情報学シンポジウム講演集，39巻，pp.236~240，2014
- 7) 美多：非線形制御入門—劣駆動ロボットの技能制御論”，昭晃堂，2000