自動化施工システム A⁴CSEL®による施工効率向上および CO_2 排出量抑制効果

鹿島建設(株)　正会員　○出石　陽一　三浦　悟
浜本　研一　青木　恒
菅井　貴洋

１．はじめに

筆者らは「人手不足・熟練労働者不足への対応」,「建設生産性向上」,「労働災害撲滅」などの建設業界における重要な課題解決を目的として，建設機械の自動化技術を核とする建設生産システム A⁴CSEL®（クワッドアクセル）の開発を進めている．A⁴CSEL は，自動化された建設機械を用いた自律自動運転システムと，施工計画，施工管制，重機管理の機能を持つ施工マネジメントシステムで構成されており，これにより高い施工生産性を可能とし,「現場の工場化」を目標としている．本稿では，A⁴CSEL がこれまでに導入してきたダム，災害復旧現場等の実工事での施工効率向上および CO_2 排出量抑制効果について紹介する．

２．A⁴CSEL 概要

最適計画で多数の自動化機械を同時に自律運転させることをコンセプトとした A⁴CSEL は，最適化された施工計画・作業方法をデータ化し,それら作業データを基に最小の人員で複数の自動化機械を自律的に連携させることで極めて効率の高い施工を可能とする．A⁴CSEL は自動化された建設機械による自律自動運転システムと,それらを効率的に稼働させるために必要な施工計画，施工管制，重機管理のサブシステムを包含する施工マネジメントシステムで構成されている（図-1）．施工計画システムは，施工エリア情報や作業に必要な機械台数およびまき出し層厚などの作業条件を指定し，作業毎の詳細なタイムスケジュールを自動で作成する．施工管制システムは，施工計画システムで事前に計画した各作業を，作業順序や作業エリア等の制約条件に基づいて各重機の重機管理システムに作業データを指示する．また，全ての機械の作業状態を監視し，計画との差や異常を判定する．重機管理システムは，施工管制システムで作成した作業データを自動化機械に送信するとともに自動化機械から機体データを受信する．自動化重機は，送信された作業データを基に，作業エリアの不陸，材料の荷下ろし位置のズレなどによって生ずる施工誤差を自ら修正し，自律的に自動運転する．

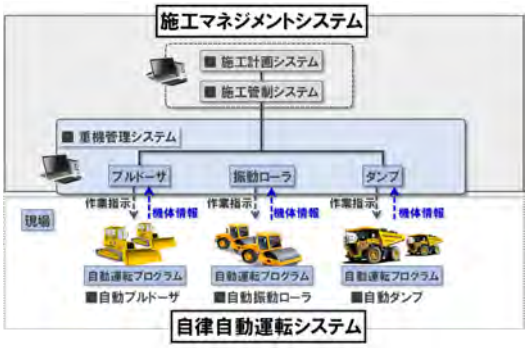


図-1　A⁴CSEL の構成

３．A⁴CSEL の現場適用

(1)成瀬ダム

a)工事概要

成瀬ダムは，雄物川水系成瀬川上流（秋田県雄勝郡東成瀬村椿川地内）に建設され，洪水調節，流水の正常な機能の維持，かんがい，水道用水，発電を目的とした多目的ダムで堤体積約 4,850,000 ㎥，堤高 114.5mの台形 CSG ダムである（図-2）．CSG とは，材料の合理化に着目し，ダムサイト近傍で得られる土石を原材料として分級や粒度調整・洗浄を行うことなくセメントおよび水を添加・混合したものである．同型式としては初の堤高 100m 超かつ国内最大規模となり，2018 年 10 月から本体工事に着手，2026 年度の完成を目指し現在施工中である．

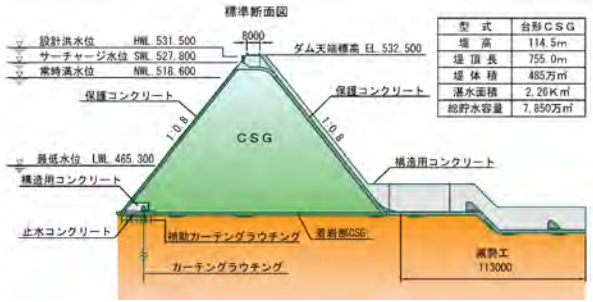


図-2 成瀬ダム標準断面図

キーワード　自動化施工,台形 CSG ダム,災害復旧,最適化,生産性向上,CO_2 排出量削減,
連絡先　〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8 鹿島建設(株)機械部 TEL03-5544-1111

b) A⁴CSEL 適用状況

成瀬ダムの堤体打設工事に 2020 年度（令和 2 年度）から A⁴CSEL を導入し，現在も継続して稼働している．**図-3** に各年度における A⁴CSEL を導入する施工範囲を示す．初期の狭い作業エリアから徐々に定形的な作業を長時間繰り返し行う必要のある大きな施工エリアに広がり，自動化機械の能力を十分に発揮できる状況になっている．自動化されたダンプトラック，ブルドーザ，振動ローラの自動作業の管制と共に，日々の施工計画の作成などを行う管制室から昼夜勤体制で連続運転を実施している(**写真-1**)．2023 年の最盛期は，施工面積が 49,180m² におよぶ広大な範囲を，1 リフト 25cm×3 層で盛り立てる計画であり，総体積約 36,900 ㎥もの大容量打設となる．これを約 70 時間連続で完遂させる高速施工が要求されており，これに対し自動ブルドーザ，自動ダンプトラック，自動振動ローラなど合計 14 台の自動化機械を必要最小人員で全機種同時に稼働させる計画となっている（**図-4**）．

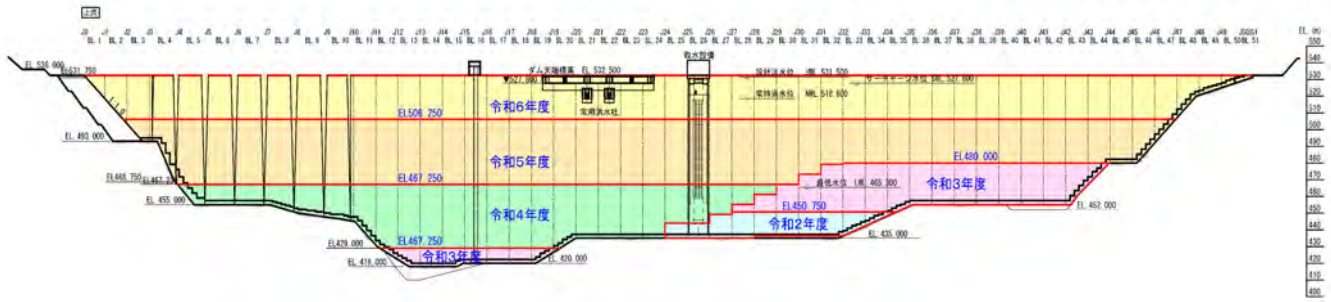


図-3 施工範囲図（縦断図）



写真-1 A⁴CSEL 稼働状況（成瀬ダム 2022 年度工事）



図-4 最盛期の A⁴CSEL 適用イメージ

(2)赤谷 3 号砂防堰堤

a)工事概要

赤谷 3 号砂防堰堤工事は，平成 23 年台風 12 号に伴う大雨の影響により奈良県五條市大塔町赤谷地区で発生した大規模土砂崩壊災害の復旧工事である．

崩壊斜面直下に位置する 3 号砂防堰堤工事は，斜面再崩壊に対する安全性確保のため立入規制区域内での施工となり，出水期（6 月～10 月）はオペレータが重機に搭乗して施工ができない．そのため，これまでは遠隔操作で行っていたが，遠隔作業はオペレータが搭乗して行う作業の 60～70%程度に効率が低下することが課題であった．このため，安全性と効率化を両立させる自動化施工を災害復旧工事としては国内で初めて導入した（**写真-2**）．



写真-2 赤谷３号砂防堰堤工事現場全景

b)A⁴CSEL 適用状況

3 号砂防堰堤工事におけるソイルセメント打設作業の効率向上を目指し，遠隔操作と A⁴CSEL による自動運転を連携させた施工を実施した．

A⁴CSEL の導入に先立ち，ソイルセメント打設に適した施工手順および施工計画を策定し，シミュレーションにて施工効率や選定機種の妥当性を確認した．施工は，立入禁止区域外に設置した遠隔操作室から遠隔操作のクローラダンプにてソイルセメントを運搬し，自動ブルドーザおよび自動振動ローラを管制してまき出しおよび転圧を実施した（**写真-3**）．使用機械，施工数量を**表-1** に示す．

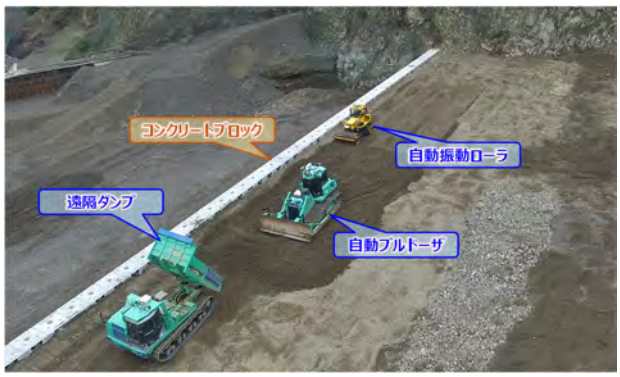


写真-3　A⁴CSEL によるソイルセメント打設

表-1 使用機械，施工数量

項目	種別	数量
使用機械（台数）	自動ブルドーザ	1
	自動振動ローラ	1
	遠隔キャリーダンプ	1
施工数量（m³）	ソイルセメント	6,561

４．A⁴CSEL の導入効果

A⁴CSEL は労働集約的，定性的に行われていた現場施工を，自動化機械によって①作業の標準化②運転方法の最適化③計画の最適化を実現することにより，最小人員数で高い生産効率で施工できる特長を持つ．ゆえに，A⁴CSEL を現場導入することにより最も期待されることは，施工生産性の向上，すなわち従業者 1 人，あるいは労働時間 1 時間あたりの生産量を従来よりも高めることである．そこで，生産性として労働生産性を指すものとし，『同じ生産量を従来よりも少ない人員で得る』『同じ人員数で従来よりも多くの生産量を得る』ことを評価の尺度と考え，次項から実現場での導入効果を考察する．

(1)省人化効果

A⁴CSEL を現場導入するメリットの一つとして一人で複数の自動化機械を稼働させることにより生産性を向上させることにある．従って，より少ない人数でより多くの自動化機械を稼働させることが重要課題である．

表-2 に成瀬ダムの各年度の管制員人数と使用機械の実績一覧表を示す．表中の黒字で示す機械は，自動化機械と有人運転を連携させるナビシステムを搭載した有人運転機械である．

2020 年度は 22 台，2021 年度は最大 26 台の建設機械を 4 名の管制員によって施工した．従来であれば，建設機械を稼働させるためには，1 台につきそれぞれ 1 人のオペレータが必要であるので 40～55%の省人化が図れている．

2022 年度は更なる省人化を図るため，管制システムのユーザーインターフェースの改良による運用時の操作性向上や，自動化施工周辺の有人作業との連携方法の合理化等により管制員を 4 名から 3 名（**写真-4**）に削減し，最大 27 台の機械を稼働させた．実際には，成瀬ダムでは昼夜施工体制をとっており，A⁴CSEL による省人化の効果は上記の 2 倍となっている．

表－2 自動化施工実績

項目		2020年度	2021年度	2022年度
管制人員(人)		4	4	3
使用機械（台数）	自動化機械	7	9	9
	有人運転機械※	15	17	18
	合計	22 (7+15)	26 (9+17)	27 (9+18)

※有人運転機械は、自動化機械と連携運転させるナビシステムを搭載している

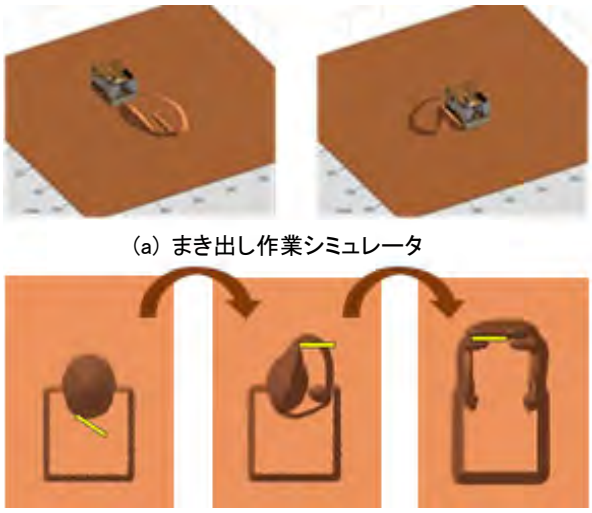


写真-4　施工管制状況（3 人管制）

(2) 自動運転による作業効率の向上

a) 自動運転によるまき出し作業の生産性向上

A⁴CSEL の自律自動運転システムにおける自動ブルドーザの運転制御は，熟練技能者の操作データを収集・分析して「熟練性」を定量化し，制御アルゴリズムに反映させることを基本としている．現場実験を実施し，熟練技能者の高い精度での作業をデータとして確認することから始め，その上で，開発したまき出し作業シミュレータ（図-5），AI 最適化手法などにより作業の最適化を図っている．まき出し作業時の労働生産性の高さとは，まき出し形状の精度を維持しつつ最少の押土回数で作業をすることである．自動化機械は常に最適化された動作通りに作業を行うため，自動運転の方がより少ない動作で行えることが大きな特長となっている．なぜ，熟練技能者よりも高い生産性で作業が行えるかについては，熟練技能者は均一ではない荷下ろされた材料の体積や位置に応じて，その度毎にまき出し形状を調整していくことに対し，A⁴CSEL の自動ブルドーザによる作業では，前工程である材料体積や荷下ろし位置の誤差を 10%程度（現状）に抑えることで，常に最適な動作を繰り返すことができるためである．逆に言えば，我々が目指している「現場の工場化」は製造工場と同様に扱う材料や部品の安定供給を前提とするが，それによって飛躍的な生産性の向上が図れる．成瀬ダムの 2022 年度工事での実績値として，CSG 打設でのブルドーザのまき出し作業の単位時間あたりの打設量について自動化施工と有人運転を比較してみると，自動化施工では 254.4 ㎥/時間で，128.6 ㎥/時間の有人運転の約 2 倍であった．



(a) まき出し作業シミュレータ

(b) 計算結果（作業前－作業中－作業後）

図-5 まき出し作業シミュレーション例

b) 自動ブルドーザの経路改良による作業時間の短縮

自動化施工の打設速度は自動ブルドーザのまき出し速度に依存するため，生産性向上の観点からまき出し速度向上が重要である．まき出し速度の向上は，作業時の移動速度の向上や移動距離の短縮により実現できる．成瀬ダムにおいて，自動ブルドーザの移動経路の数を低減させることによる移動距離の短縮に着目し，自動ブルドーザの経路生成システムを改良した．図-6 は自動ブルドーザのまき出し経路の一例を示したものである．まき出しは，荷下された材料をまず左右に撒き散らすようにまき出し，その後前方向に整地するようにまき出す手順で実施している．この左右に撒くばりするまき出し経路について，あるまき出し幅以下になると互いに近距離を辿る経路が存在することから，まき出し後の出来形を損なわないことを条件に近接経路を辿る経路を省略するように移動経路を改良した．これにより，表-3 に示すとおり改良効果として，まき出し時の経路で 19%，荷下ろし前移動時の経路で 40%の時間を短縮させることにより，自動化施工速度を向上させた．

表-3 まき出し経路改良による時間短縮効果

改良項目	改良前	改良後	改良効果	時間短縮率
まき出し経路	210秒	170秒	▲40秒	▲19%

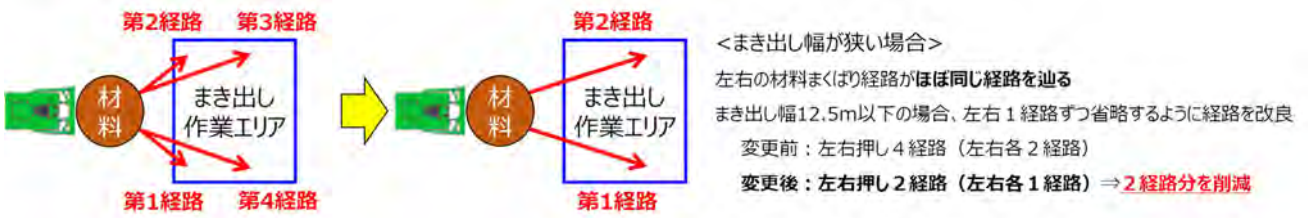


図-6 まき出し経路の改良例（左図：経路改良前　右図：経路改良後）

c)施工方法・手順の改良による打設速度向上

これまでの成瀬ダムにおける自動化施工では，有人ダンプによる荷下ろし作業と自動ブルドーザのまき出し作業との同時並行作業は実施していなかった（**図-7** 左図）．この手順では，ダンプ 1 台の荷下ろしとまき出しを交互に実施する作業手順であるため，ダンプによる荷下ろし作業中は自動ブルドーザが常に待機状態である．打設速度を向上させるためには，これらの同時並行作業の実現が課題であった．

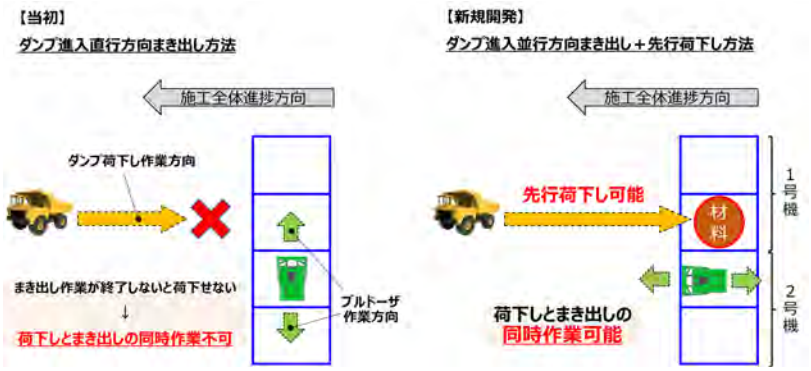


図-7 ダンプ進入並行方向まき出しおよび置き逃げパターン

今回，現状の作業手順から打設速度を向上できる要素を検討し，**図-7** 右図に示すように 1 台の自動ブルドーザに対して複数列のまき出しエリアを計画的に割り当てる作業区画割手法と，まき出しを実施していない列にダンプを進入させ，材料を先行的に荷下ろしできる材料置き逃げ手法（**写真-6**）をシステム化した．これによる効果として，自動ブルドーザの作業サイクルにおいて荷下ろしがまき出しと並行作業となり，連続したまき出しが可能となったことにより，**表-4** 示すとおり最大で荷下ろし作業時間 60 秒（23%）を短縮させることができた．また，ダンプの作業サイクルでは，実車走行時の停車時間を評価値として比較した場合，**図-8** のダンプの 1 回当りのサイクルタイムの実績（一例）に示すとおり，従来の方法に対して今回の方法により 1 分 56 秒（48%）短縮させた．これは，材料を先行的に荷下ろしできることによる実車走行時間を短縮できている材料置き逃げの効果である．



写真-6 材料置き逃げ施工状況

表-4　時間短縮効果（計画値）

置き逃げ	まき出し	荷下し前移動	荷下し	改良効果	時間短縮率
なし	170	30	60	260	-
あり	170	30	**0**	**200**	**▲ 23%**

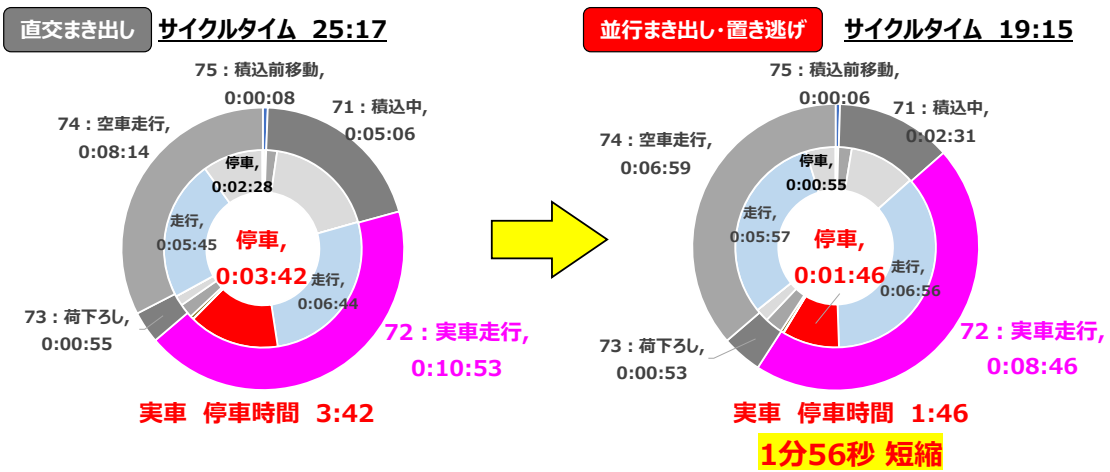


図-8　ダンプのサイクルタイムの一例（実測値）

(3)高い施工精度によって得られる作業効率の向上

A⁴CSEL では，前述した通り作業計画，施工計画の最適化により作業効率の向上を達成している．さらに自動化施工では予め計画した経路のとおり確実に自動化機械が作業を実施するため，有人施工と比較して無駄な作業がない．赤谷 3 号砂防堰堤工事における施工実績データ分析に基づく作業の効率化について以下に記す．

a)振動ローラの転圧作業の効率化

自動振動ローラと有人振動ローラの走行経路の比較を図-9 に示す．有人運転では通常±20～50cm の精度である．これにより，有人運転では，踏み残しによる追加転圧の発生や踏み残しを回避するため各経路間のラップ幅が必要以上に広くなり経路数の増加が発生する．これに対し，自動振動ローラは，計画した経路のとおりに転圧可能であり，計画経路に対して±10cm の精度で走行できるため，最小の距離で転圧を完了させることができる．自動振動ローラは有人運転と比べて走行距離を 19.9%削減できることを確認した．

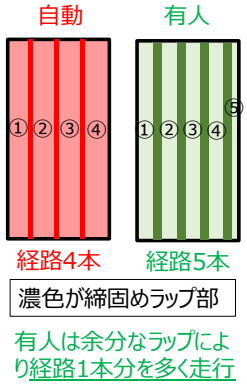


図-9 振動ローラ走行経路

b)ブルドーザのまき出し作業の効率化

自動ブルドーザと有人ブルドーザの走行経路の比較を図-10 に示す．最適化された同じ計画で運転する場合でも，有人運転では荷下ろしされた材料をオペレータが目視確認しながらまき出しを行うため，目視確認に必要な距離を余分に走行しなければならないが，自動ブルドーザの場合にはセンサによるため目視確認する必要がなく，最小限の走行経路，時間での作業が可能となる．自動ブルドーザは有人運転と比べて走行距離を 74.3%削減できることを確認した．

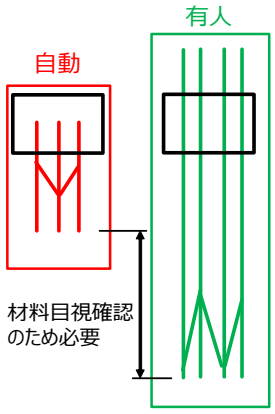


図-10 ブルドーザ走行経路

(4)自動化施工による CO_2 排出量の抑制

上述した通り，A⁴CSEL の導入により，単位時間あたりの施工量の増大，建設機械の走行距離の短縮が実現する．これにより単位生産量に対する燃料使用量が減り，CO_2 の排出量の抑制につながる．さらに，自動化施工ではアイドリングストップの制御が可能となり，さらなる燃料消費の削減が期待できる．以下にその効果について記す．

a)アイドリングストップの増加による燃料消費削減

自動施工中の自動化機械に対して，一定の作業の待ち時間が生じた際に自動的にエンジンを停止させ，アイドリングストップするように開発した．今回は，実施工で取得した自動ブルドーザの施工データから実際にアイドリングストップした場合の燃料削減率を算出した．表-5 に，まき出し施工数量約 8,500m³ の 1 施工分の燃料削減率を示す．アイドリングストップの実施回数は 122 回であり，アイドリングストップを実施することで 6.78%の燃料を削減した．

表-5 燃料削減率（1 施工分）

項目		数量
施工数量（m³）		8,580
施工時間（h）		23
燃料消費量（L）	アイドリングストップ無	667.2
	アイドリングストップ有	622.0
燃料消費量削減率（%）		6.78

b)走行距離減少による燃料消費量削減

成瀬ダムの 2022 年度の実施工から得たブルドーザの燃料消費データを解析し，材料まき出し時の自動ブルドーザと有人運転との燃料消費量比較を行った．データは，図-11 示す上流と下流の 2 台の自動ブルドーザでレーンごとに収集した 1 施工分の自動化施工と，有人運転のデータを解析し比較したものである．

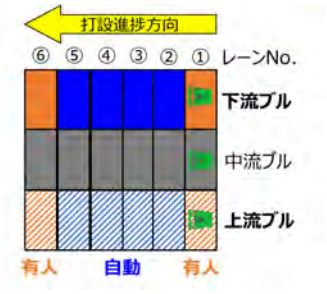


図-11 解析対象（模式図）

図-12 および**図-13** に燃料消費量および総移動量（走行距離）の比較図を示す．自動ブルドーザと有人運転との燃料消費量を平均値で比較した場合，上流側で 27%，下流側で 37%，自動ブルドーザの方が燃料消費量を削減できた．これは，**図-10** に示すように自動ブルドーザは有人運転に比べて総移動量が少ないためである．また，自動ブルドーザと有人運転のそれぞれで，上流と下流との総移動量を比較すると，自動ブルドーザの方がバラツキは少ない．これは，自動ブルドーザは決められた経路通りにまき出しを行うため，まき出し対象の条件が同じであれば定型作業をバラツキなく繰り返し実施できることを示している．

CO_2 排出量の抑制や燃料費上昇への対応が重要視される現状を鑑みると，上記は労働生産性の向上とともに A⁴CSEL 導入の大きな効果と言える．

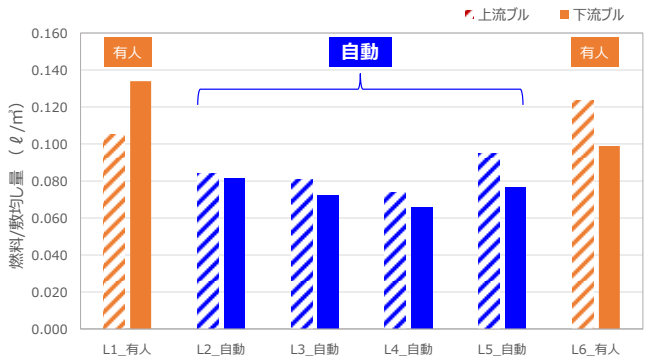


図-12 燃料消費量の比較

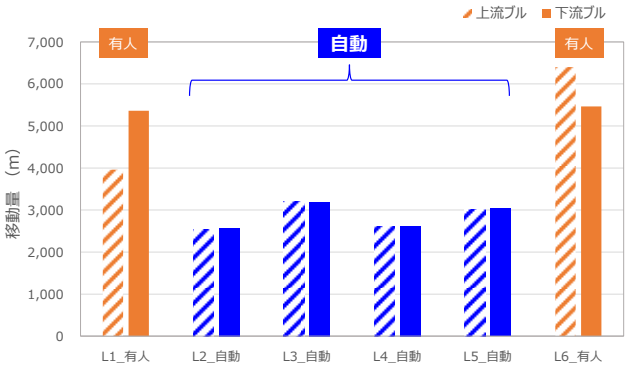


図-13 総移動量の比較

５．今後の展開

本稿では A⁴CSEL の開発および現場適用する上で重要な目的である生産性向上に対して，実現場での有人運転との比較例を示した．その結果，A⁴CSEL の適用範囲では極めて高い効率化が得られるとともに，大きな CO_2 排出量抑制効果も確認できた．

2023 年度の成瀬ダムでは材料製造プラントから堤体までのベルトコンベアによる自動搬送と連携し，堤体自動ダンプの本格運用を開始する予定である．これに加え，今後は造成工事をはじめとする他工種にも適用範囲を拡張する計画であり，これらの現場を遠隔地からの集中管制システムにより稼働させる予定である．

６．おわりに

A⁴CSEL は，単に汎用機械を自動化するだけではなく「自動化機械による作業方法や手順を決め，機械の組合せを最適化し，自動化機械に作業データを送ることで多機種・複数の機械を自律的に自動運転すること」をコンセプトとしており，施工計画・作業の最適化を追求し続けることを大きな意義としている．

今後も自動化施工による生産性向上のために，機能・性能向上，自動化機械の機種増強などを進めるとともに，自動化施工を様々な工種や規模の実工事に適用する．これらによって得られた具体的な課題や問題を解決する過程において A⁴CSEL を発展させ，建設現場の安全性向上，人手不足への対応および建設生産性の向上に貢献する所存である．

参考文献

１）三浦悟：次世代建設生産システムＡ⁴ＣＳＥＬ®の適用，土木施工, VOL62 No.1，2021 Jan.

２）菅井貴洋ほか：自動化施工システムの台形ＣＳＧダム工事への適用（その２），土木学会第 77 回年次講演会，Ⅵ-53，2022.